

第 2 回 CEReS
環境リモートセンシングシンポジウム
論文集

Proceedings of the 2nd CEReS Symposium on
Environmental Remote Sensing

1999 年 12 月 17 日 (金)
於 千葉大学自然科学大会議室

千葉大学環境リモートセンシング研究センター
Center for Environmental Remote Sensing (CEReS)

第 2 回 CEReS
環境リモートセンシングシンポジウム
論文集

Proceedings of the 2nd CEReS Symposium on
Environmental Remote Sensing

1999 年 12 月 17 日 (金)
於 千葉大学自然科学大会議室

千葉大学環境リモートセンシング研究センター
Center for Environmental Remote Sensing (CEReS)

はじめに

環境リモートセンシング研究センター長 安田嘉純

環境リモートセンシング研究センターは「リモートセンシング技術の確立と環境への応用」に関する研究を進めることを目的とし、平成7年4月に全国共同利用施設として設置されたものです。設置以来、毎年、公募による共同研究を実施するとともに、研究成果報告会を開催してきました。この報告書は平成11年12月17日に開催された5年目の共同利用研究会発表論文集です。本論文集にはリモートセンシングによる地球環境変動のモニタリング技術に関連して、大気、海洋、水、植生の科学、およびそれらの基板技術となる解析手法に関する研究報告が27件収録されています。

本センターは共同利用研究成果報告会のほかに、「衛星データの大气補正の現状と問題点」、「水分過程のリモートセンシング」などテーマを絞った研究会を随時開催しています。また、全国共同利用の中核施設として、NOAA-AVHRR、およびGMS-SVISSRデータの受信設備、およびデータアーカイブ装置などが導入され、平成9年度から定常運用を行っています。データ利用に関しては、センター・ホームページ (<http://ceres.cr.chiba-u.ac.jp:8080/>) を訪ねていただくか、衛星データ検索・ダウンロードシステム利用説明書をご参照くださるようお願いいたします。本センターは衛星データのほかに、4波長レーザ・レーダ、マイクロ波放射計、赤外イメージャー、可視・短波長赤外分光放射計などを整備し、共同利用に利用できるようにしています。

この第2回 CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム論文集が環境リモートセンシング研究に役立つことを希望するものです。また、共同研究の実施にあたりご指導いただいた関係各位に感謝するとともに、今後ともご理解と支援をお願いするものです。

第 2 回 CEReS 環境リモートセンシングシンポジウム

プログラム

日時:平成 11 年(1999 年) 12 月 17 日(金) 10:00 ~ 17:00

場所:千葉大学自然科学研究科 大会議室

挨拶

安田嘉純 (センター長)

[水]

1. "GPS データを用いた局地環境に伴う可降水量変動の研究"
○岩崎博之, 木村富士男*, 中川清隆**
(群馬大教育, *筑波大地球科学, **上越教育大自然科学)
2. "Water resource in China"
Feng Qj (Meteorological Research Institute)
3. "スプリットウインドウデータを用いた大陸規模での可降水量の推定"
○久慈誠, 岡田格*, 内山明博**, 高村民雄***
(奈良女子大, *CREST, **気象研, ***千葉大 CEReS)
4. "西部熱帯大太平洋海域における太陽放射エネルギーとエアロゾル観測"
香西克俊, 石田邦光, ○草刈成直, 佐々木政幸* (神戸商船大, *気象研)

[海洋]

5. "海面高度計データを同化した黒潮変動予測実験"
○淡路敏之, 石川洋一, 子守信正 (京都大院理学系)
6. "海洋地球研究船「みらい」による Sky Radiometer の観測結果"
○遠藤辰雄, 中島映至*, 太田幸雄, 上田厚志**, 高村民雄***
(北大低温研, *東大 CCSR, **北大工, ***千葉大 CEReS)
7. "鹿児島湾横断フェリーによる水温・塩分連続測定"
櫻井仁人(鹿児島大学・工学部)

[大気]

8. "Lidar と Sky radiometer による巻雲とエアロゾルの観測"
○青木一真, 西川寛子, 藤吉康志, 杉本 伸夫*, 松井一郎*, 橋口浩之**
(北大低温研, *国立環境研, **京大超高層)
9. "衛星データにおける大気補正および大気・エアロゾル観測の現状"
○朝隈康司, 美濃村満生, 大提新吾, 汝 剣飛, 久世宏明, 竹内延夫(千葉大学 CEReS)
10. "雲の放射強制力の推定に関わる地上観測"
○竹村英幸, 高村民雄, 岡田 格, 高藪 緑*(千葉大学 CEReS, *国立環境研)
11. "チベット高原東方の上層雲の短周期変化と中間規模東進波"
○児玉安正, 高橋美奈子*, 江川晋子*, 中井専人** (弘前大理工, *弘前大理, **防災科研)
12. "Relationship Between Turbulence by Water Vapor and Spatial Coherence of Light"
○Ning Yu, Shinya Takasumi and Hiroshi Okayama (Chiba University, CEReS)

[解析]

13. "遺伝的アルゴリズムに基づく教師つきテキスト分類用トレーニングエリアの自動選定"
○奥村浩, 内山克史, 梶原康司*, 張 熙, 吉川敏則 (長岡技科大, *千葉大学CEReS)
14. "衛星リモートセンシングによる雲仙普賢岳火砕流体堆積地の観察"
西田顕郎 (筑波大学農林工学系)
15. "ランドサット 5 号 TM データによるマングローブ林抽出のための閾値自動決定法の検等"
佐藤一紘 (琉球大学農学部)
16. "地球地図整備の現状について"
宇根 寛, 福島芳和 (国土地理院地理調査部)

[植生]

17. "LIF 法による植物からの生体情報の抽出"
○高橋邦夫, 峰内健一, 安田嘉純*, 立本英機* (木更津工専, *千葉大学工)
18. "新型衛星センサー (MODIS, GLI 等) による植生のリモートセンシングの検証実験計画"
西田顕郎 (筑波大学農林工学系)
19. "草地における分光反射輝度と蒸発散量の関係"
○近藤昭彦, 桶口篤志 (千葉大学 CEReS)
20. "ゴニオスペクトルラジオメータの試作と樹木葉の反射スペクトル"
○三輪卓司, 池田 卓 (千葉大学 CEReS)
21. "種々の施肥量で育成後, 水ストレスを与えたトウモロコシ, ダイズ葉の透過率, 反射率と生理物理量の関係"
○三輪卓司, 于 貴端* (千葉大学 CEReS, *千葉大学園芸学部)
22. "様々な手法による草地のフェノロジーモニタリング: (PGLIERC の成果から)"
桶口篤志, 西田顕郎*, 飯田真一*, 近藤昭彦 (千葉大 CEReS, *筑波大学)

ポスター

[水]

1. "A water balance model of the lake Bosten in the over all drainage area, Yanji Basin, Xinjiang, China",
○ Z. Jingfeng, H. Nagashima and T. Ishiyama* (Tokyo Univ. of Fisheries, *CEReS, Chiba Univ.)

[大気]

2. "ADEOS / POLDER 多視野角観測データを用いた大気エアロゾルの推定"
○見富 恭, 樋口理子, *福島 甫, **高村民雄
(RESTEC, *東海大開発工, 千葉大 CEReS)
3. "多波長ライダーおよびサンホトメータを用いたライダー定数の導出"
○金城秀樹, 久世宏明, 高村民雄, 竹内延夫 (千葉大 CEReS)

[解析]

4. "衛星画像高速検索システム"
斎藤元也, 児玉正文, ○宋 献方 (農林水産研究計算センター)

[植生]

5. "異なる環境条件下におけるワタとダイズの葉温と蒸散の反応"
○磯田昭弘, 安田嘉純* (千葉大園芸, *千葉大 CEReS)

目 次

はじめに	i
プログラム	ii
1. GPS データを用いた局地循環に伴う水蒸気変動の研究	1
岩崎博之(群馬大), 木村富士男(筑波大)、中川清隆(上越教育大)	
2. Water Resources in China	5
Feng Qi (Meteorol. Res. Inst.), Akihiko Kondoh (CEReS, Chiba U.)	
3. スプリットウィンドウデータによる大陸規模での可降水量の推定	13
久慈 誠(奈良女子大)、岡田 格(CREST)、内山 明博(気象研)、高村民雄(千葉大 CEReS)	
4. 西部熱帯大平洋海域における太陽放射エネルギーとエアロゾル観測	17
香西克俊(神戸商船大)、石田邦光(鳥羽商船高)、草刈成直(神戸商船大)、佐々木政幸(気象研)	
5. 海面高度計データを同化した黒潮変動予測実験	23
淡路敏之(京大院), 子守信正(京大院)、石川洋一(京大院)	
6. 海洋地球研究船「みらい」による Sky Radiometer の観測結果	29
遠藤辰雄・青木一真(北大低温研)、中島映至(東大 CCSR)、 太田幸雄・上田厚志(北大工)、高村民雄(千葉大 CEReS)	
7. 鹿児島湾横断フェリーによる水温・塩分の連続測定	33
櫻井仁人(鹿児島大工)	
8. Lidar と Sky radiometer による巻雲とエアロゾルの観測	39
青木一真・西川寛子・藤吉康志(北大低温研) 杉本 伸夫・松井一郎(国立環境研)、橋口浩之(京大)	
9. 衛星データにおける大気補正および大気・エアロゾル観測の現状	43
朝隈康司・美濃村満生・大提新吾・汝 剣飛・久世宏明・竹内延夫(千葉大 CEReS)	
10. 雲の放射強制力の推定に関わる地上観測	49
竹村英幸・高村民雄・岡田 格・金田真一(千葉大 CEReS)、高藪 緑(国立環境研)、 井上豊志郎(気象研)、河本和明・中島映至(東大 CCSR)	
11. チベット高原東方の上層雲の短周期変化と中間規模東進波	57
児玉安正(弘前大理工)、高橋美奈子・江川晋子(弘前大理)、中井専人(防災科研)	
12. Relationship Between Turbulence by Water Vapor and Spatial Coherence of Light	65
Ning Yu, Shinya Takasumi and Hiroshi Okayama (CEReS, Chiba U.)	
13. 遺伝的アルゴリズムに基づく教師つきテキスト分類用 トレーニングエリアの自動選定	69
奥村 浩・内山克史(長岡技科大)、梶原康司(千葉大 CEReS)、 張 熙・吉川敏則(長岡技科大)	

14.	衛星リモートセンシングによる雲仙普賢岳火砕流堆積地の観察	77
	西田顕郎・照沼利浩 (筑波大)	
15.	ランドサット 5 号 TM データによるマングローブ林抽出のための 閾値自動決定法の検討	79
	佐藤一紘 (琉球大)	
16.	地球地図整備の現状について	85
	宇根 寛・福島芳和 (国土地理院)	
17.	LIF 法による植物の生体情報の抽出	89
	高橋邦夫・峰内健一 (木更津工専)、安田嘉純・立本英機 (千葉大工)	
18.	新型衛星センサー(MODIS・GLI 等)による植生のリモートセンシングの検証実験計画	97
	西田顕郎 (筑波大)	
19.	草地における分光反射輝度と蒸発散量の関係	99
	近藤昭彦・樋口篤志 (千葉大 CEReS)	
20.	ゴニオスペクトロラジオメータの試作と樹木葉の反射スペクトル	105
	三輪卓司・池田 卓 (千葉大 CEReS)	
21.	種々の施肥量で育成後、水ストレスを与えたトウモロコシ、ダイズ葉の 透過率、反射率と生体物理量の関係	113
	三輪卓司 (千葉大 CEReS)、于 貴端 (千葉大園芸)	
22.	様々な手法による草地のフェノロジーモニタリング:(PGLIERC の成果から)	119
	樋口篤志 (千葉大 CEReS)、西田顕郎・飯田真一 (筑波大)、近藤昭彦 (千葉大 CEReS)	
23.	A Water Balance Model of the Lake Bosten in the Overall Drainage Area, Yanji Basin, Xinjiang, China	129
	Zhao Jingfeng・H.Nagashima(Tokyo Univ.of Fisheries) T. Ishiyama(Chiba U.)	
24.	OCTS/ POLDER 複合データによるエアロゾル情報の推定に関する研究	135
	見富 恭・樋口理子 (RESTEC)、福島 甫 (東海大)、高村民雄 (千葉大 CEReS)	
25.	多波長ライダーおよびサンフォトメーターを組み合わせたライダー定数の導出	139
	金城秀樹・久世宏明・高村民雄・竹内延夫 (千葉大 CEReS)	
26.	衛星画像高速検索システム	143
	斎藤元也 (農環研)、児玉正文 (農林水産研究計算センター)、宋 献方 (CREST)	
27.	異なる環境条件下でのワタとダイズの葉温と蒸散の反応	149
	磯田昭弘 (千葉大園芸)、安田嘉純 (千葉大 CEReS)	
28.	PGLIERC(Preliminary Global Imager experiment at Environmental Research Center):その概要	153
	樋口篤志 (千葉大 CEReS)、西田顕郎・飯田真一・新村典子 (筑波大)、 近藤昭彦 (千葉大 CEReS)	

GPSデータを用いた局地循環に伴う水蒸気変動の研究

Study on the diurnal variation of water vapor associated with local circulation using GPS data

○岩崎博之(群馬大学)・木村富士男(筑波大)・中川清隆(上越教育大)

連絡先：iwasaki@edu.gunma-u.ac.jp

1. はじめに

水蒸気量の情報は気象学、水文学やリモートセンシングの大気補正の研究に欠くことができない物理量である。近年、GPS (Global Positioning System) データから、約2mmの精度 (rms) で、30分毎の可降水量 (鉛直積分した水蒸気量) を推定する技術が開発されている。一方、国土地理院による約20km毎にGPS受信機が整備され、日本国内の水蒸気量の時空間変動を精度良く知ることができるようになった。ここではGPSデータの気象学の応用として、夏期の北関東に見られる可降水量の日変化の研究について紹介する。

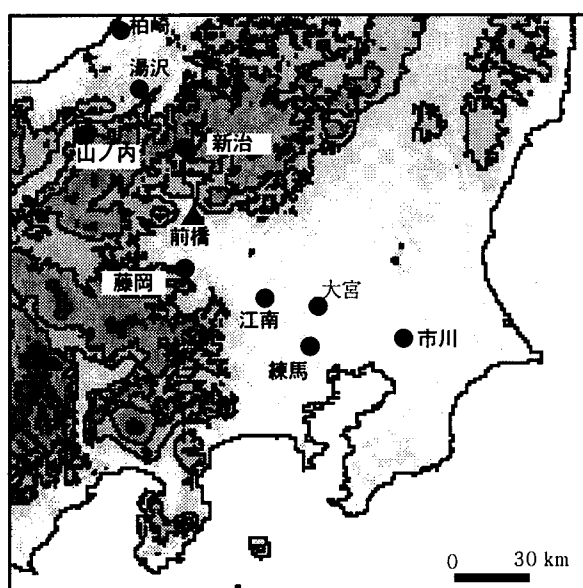


Figure 1: Location of GPS receivers and radiosonde observation sites.

半盆地に位置する前橋 (Fig.1) では、夏期の晴天日に可降水量が08-12 JSTに極少になり、20JST頃に極大になる日変動が卓越する。水蒸気の日変化は、熱的局地循環と関連していると考えられるが、水蒸気変動の水平分布・鉛直分布などの基本的な特徴さえも解明されておらず、メカニズムを考察するに至っていない。この水蒸気量の日変化の実態を把握することを目的に、1999年7月20日-8月30日の期間、北関東を中心に気象ゾンデとGPS受信機を用いた集中観測が行われた。ここでは、前橋で日変動が顕著であった7月30日-8月3日に注目し、水平・鉛直方向の水蒸気変動の特徴について記述する。

この期間の解析領域は、太平洋高気圧の勢力範囲にあり、晴天が続いた。そのため、関東地方は熱的局地循環 (大規模な海陸風) が発達して、南東風が卓越していた。

2. GPS可降水量の時空間変化

可降水量の日変化の空間的な広がりを見るために、気象ゾンデサイトの前橋 (独自に設置) に設置したGPSデータを基準として、Fig.1の9地点の国土地理院GPS観測網から得られた可降水量の時間変化を調べる。Fig.1の範囲に国土地理院GPSは約200点設置されているが、紙面の都合上、北関東山岳域を横切るような9地点のみを表示した。

Fig.2aは、前橋と山岳近傍の新治・藤岡、関東平野に位置する江南の30分毎に推定したGPS可降水量の時間変化である。4地点の可降水量は標高に起因する絶対値の差が見られるが、08時~10時 (JST) に極少、18時~20時に極大に達し、変動の位相は良く一致して

いる。北関東山岳域よりも日本海側に位置する湯沢・山ノ内・柏崎のGPS可降水量は、絶対値と振幅に違いはあるが、前橋とほとんど同じ位相で時間変動している（図略）。

それに対して、江南よりも南（太平洋側）に位置する大宮・練馬・市川においては、可降水量に日変化成分が見られるが、前橋の日変化と位相が大きく異なっている。前橋は12時は可降水量が少ない時間帯であるが、大宮・練馬・市川では可降水量が極大に達する場合がある（7/30-8/1）。

つまり、日本海側～北関東山岳域～北部関東平野にわたる広い領域で、水蒸気は気象ゾンデサイトのある前橋と同位相で変動していることが分かる。

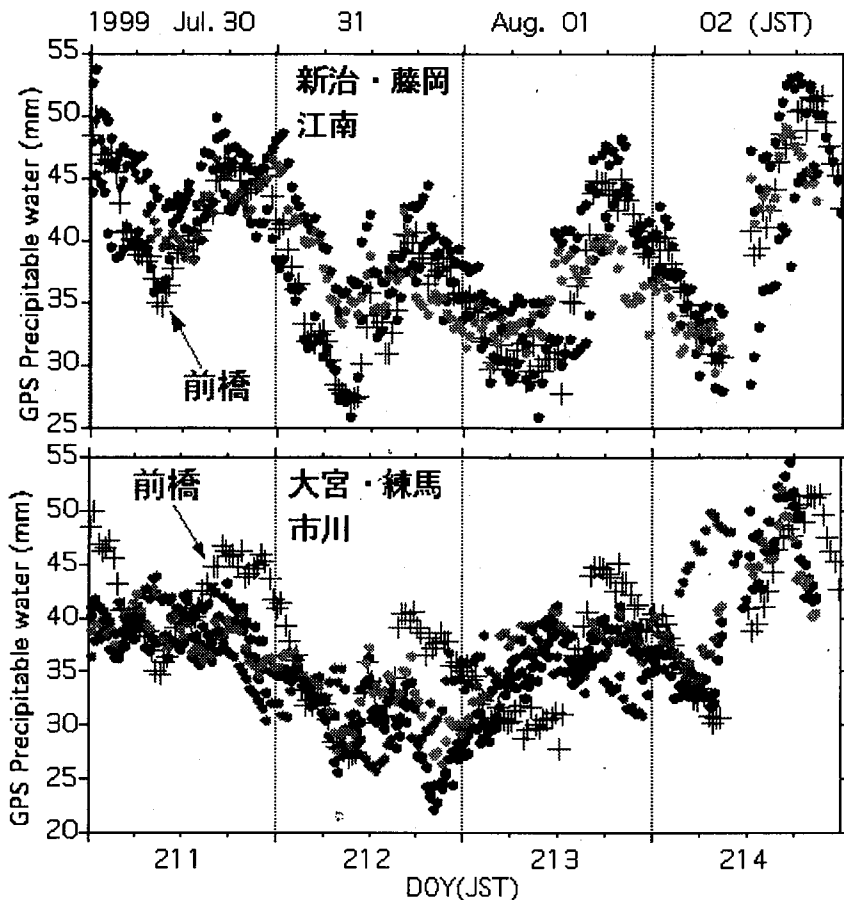


Figure 2a (upper panel)
Time change of GPS precipitable water at Maebashi (+), Niiharu, Fujioka and Konan. These GPS site shows similar variation of precipitable water.

Figure 2b (lower panel)
Time change of GPS precipitable water at Oomiya, Nerima and Ichikawa. The Phase of the variation at these GPS sites are different from Maebashi (+).

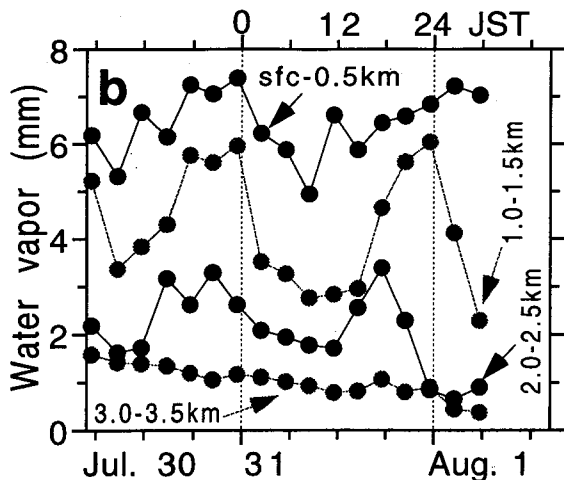
3. 水蒸気の鉛直分布

どの高度で起きている水蒸気変動が、可降水量の日変化に寄与するのかを確かめるために、前橋で観測されたゾンデデータを使って地上から0.5km毎の気層に含まれる水蒸気量を求め、その時間変化をFig.3に示す。

地上-0.5kmの層では、7月31日のように可降水量と同じ位相で日変化する場合もあるが、その振幅は小さく、8月1日のように可降水量が減少している時間帯に、水蒸気が増加する場合もある。また、地上の水蒸気分圧も可降水量と同位相で変動するとは限らない（図略）。

それに対して、高度1.0kmから2.5kmの層で、可降水量と同じ位相で水蒸気量が日変化している。日変化の振幅に注目すると、混合層の上部にあたる1.0-1.5kmの変動の振幅が最も大きく、位相も一致しているため、この気層の水蒸気量と可降水量の変動の相関が最も高い ($R=0.86$)。高度2.0-2.5kmに見られる日変化の振幅は小さいが、日変化が明瞭に見られる。温位の鉛直分布から定義される混合層の上端は約1.5kmであるため、この可降

水量の日変化は混合層内の水蒸気変動だけに原因する現象ではないことを意味している。



つまり、この期間の可降水量の日変化には地上付近の水蒸気量の変動よりも、1.0-2.5kmの水蒸気変動が大きく寄与していたことを示している。これらの特徴は、他の期間でも認められる特徴である。

Figure 3 : Time change of water vapor amount in the layers divided by 0.5 km from surface.

4. 考察

解析期間に可降水量の日変化が卓越した領域は、山岳域とその山岳域の南東側にあたる半盆地域であった。そして、その半盆地に位置する前橋では、地上付近よりも高度1.0-2.5km付近で水蒸気量の日変化が大きかった。この水蒸気の日変化のメカニズムについて、水蒸気が増加する期間と減少する期間に分けて考察を行う。

1) 昼から夕方に可降水量が増加するメカニズムについての考察

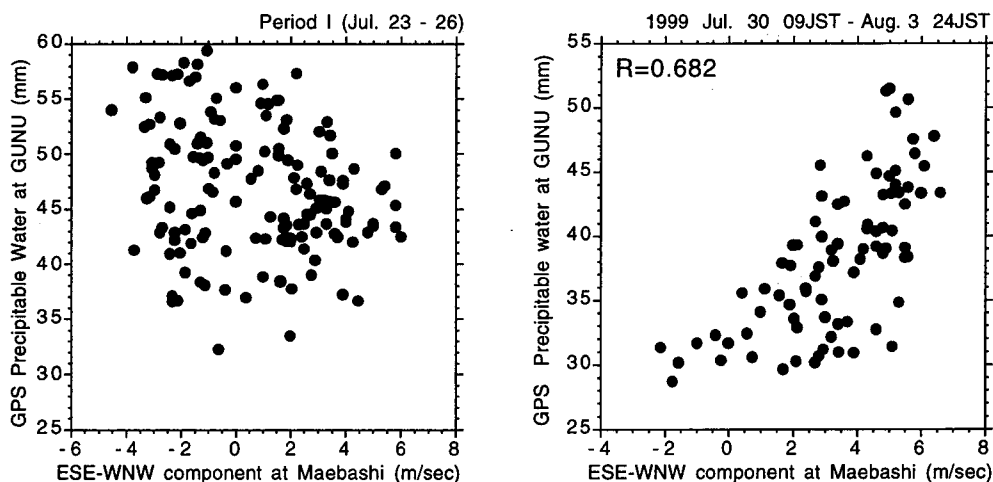


Figure 4: Relationship between ESE-ly component of surface wind and GPS precipitable water at Maebashi. Right panel shows the relationship from July 23 to 26 when local circulation didnot develop. Left panel shows from the relationship from July 30 to August 3 when local circulation developed.

図4は、前橋において可降水量の日変化が見られなかった期間（左：7/23-26）と日変化が卓越した期間（右：7/30-8/3）の地上風の東南東成分とGPS可降水量の関係を示したものである。地上風の東南東成分に注目した理由は、局地循環が発達する日には、関東地方で東南東～南東風が卓越するためである（日本海側では、逆に、北西成分が強まる傾向にある）。

可降水量が日変化しない期間では、東南東成分と可降水量には相関が見られない。しかし、可降水量の日変化が卓越する期間には、両者に強い正の相関が見られる。8月1日-2日

の48時間では相関係数は0.82を越え、局地循環が発達して東南東成分が強まると可降水量が広範囲で増加することを意味している。Fig.1の地形から、関東地方で南東風が卓越し、日本海側で北西風が強まれば北関東の山岳域とその近傍で地形による収束が起きると期待され、その収束はアメダス地上風分布からも裏付けられる。Fig.3で示されたように地上付近で水蒸気量が増加しなくても、局地循環に伴う南東風の北関東スケールの地形収束が起きることによって、水蒸気が効率よく境界層上端に輸送され、可降水量が増加する可能性が考えられる。

2) 夜間～早朝に可降水量が減少する過程についての考察

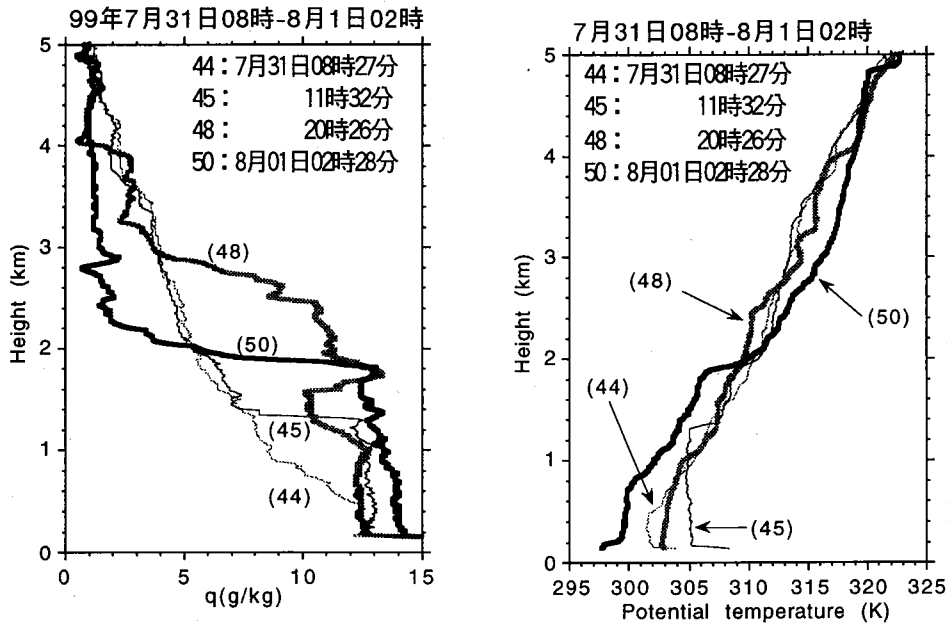


Figure 5
Time change of profile of mixing ratio (right) and potential temperature (left) at Maebashi..

可降水量の増加が局地循環に伴う南東風の地形収束が原因であったとしても、南東風が弱まる夜間から早朝に高度1.0-2.5km付近の水蒸気が除去される必要がある。このメカニズムを考えるために、可降水量の日変化が卓越した期間に、前橋で観測された比湿と温位の鉛直分布の時間変化を調べてみる (Fig.5)。

7月31日20時から8月1日02時の間に、高度4kmから2kmの水蒸気が急激に減少し、地上付近では水蒸気量の大きな変化は認められない。これは、Fig.3でも示したことである。ここで注目すべき事は、水蒸気が急激に減少した高度で、温位が2-4K増加していることである。水蒸気が減少した高度で、温位が上昇することは、可降水量の日変化が顕著であった他の日でも認められ、更に、前橋から北東に50km離れた丸沼高原 (標高1200m) の気象ゾンデデータでも認められる。つまり、数10kmの空間スケールを持つと考えられる。

この水蒸気増加と温位上昇を引き起こす原因の一つとして、太平洋高気圧に伴う大規模な下降流が考えられる。しかし、水蒸気が減少する時間帯が、20時～08時に限られていることが、高気圧に伴う大規模な下降流で説明可能か否かは分からない。つまり、可降水量が増加するメカニズムが働かない時間帯に、高気圧に伴う大規模な下降流が結果的に顕在化するのか、高気圧に伴う大規模な下降流自体が日変化しているのかを判断する十分な根拠は得られていない。

謝辞 国土地理院からGPS観測網データの提供を受けた。関係者の方々に感謝致します。

Water Resources in China

Feng Qi

Department of Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research,
Meteorological Research Institute

Akihiko Kondoh

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University

Serious Shortage of water Resources

The total volume of the water resources in China is approximately $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$, ranking it 6th in the world (1). However, the per capita share of the water is only 2400 m^3 , i.e. 25% of the world mean value, ranking China 109th in the world. Thus, China is among the 13 water-deficient countries in the world (2). Water shortages restrict China's agricultural, industrial and city developments (3). Over 300 of China's 600 cities are already experiencing a water shortage and 108 cities have a serious lack of water (4). In the 1990s, the drought-prone land areas covered almost $267\,000 \text{ km}^2$, and China's grain output had stagnated at the same level for the 4th consecutive year, and had decreased by 3500 million kg compared to previous years. Although the potential irrigated area that could be developed totals $640\,000 \text{ km}^2$, the area irrigated is only $500\,000 \text{ km}^2$, and that properly irrigated is only $400\,000 \text{ km}^2$. In the late 1980s and 1990s, many electric-power plants and factories in the large and medium size cities in northern China had to suspend production due to water shortages, and some cities in southern China were also affected (5). Excessive pumping of water leads to a drop in the ground water level and to and to the destruction of the water bearing aquifers. The lowering of the water table in coastal cities is causing seawater encroachment, resulting in salinized groundwater, and conflicting water supply and demand.

Deterioration of the water Environment

The total area subject to soil erosion in China has reached $3\,670\,000 \text{ km}^2$, i.e. 38% of China's total land area. Annual soil erosion amounts to more than 500 mill. tonnes, which is equal to 8.3% of the total soil erosion in the world. In the Loess plateau, alone, the losses of nitrogenous, phosphate, potash are 40 mill. tonnes and equivalent to the

total annual output of chemical fertilizers in China, resulting in an economic loss of USA 30 million.

Water pollution is a very serious problem in China. In the 1970s, polluted water discharge was 30~40 million tonnes, and increased to 10 mill. tonnes in the 1980s (6). Almost 85% of the waste were discharged to water sources without prior treatment; polluting rivers, lakes and, to some extent, agricultural land. It was found that more than 400 of the 500 rivers were contaminated to various degrees, and the water supplies of most of the cities, which lie near large rivers, were seriously polluted.

Desertified land areas in China cover 1 490 000 km²; i.e. over 15.5% of the total land area. From the end of the 1950s to the middle of the 1970s, land desertification in northern China expanded at a rate of over 1 570 km² per yr⁻¹. By the end of the 1980s (7) the area had reached 1 970 000 km² in northern China, mainly due to the misuse of the water resources.

Frequent Flood and waterlogging damages

Although many water conservation facilities have been constructed during the past 40 years, flood prevention has not been adequately developed due to the lower status of water conservation projects. In addition, there is poor control of soil erosion, the silting up of rivers, and the problem of manmade dikes in some river courses. Of the 370 large reservoirs over 100 have problems, as do 670 of the 2500 medium-size reservoirs. Similar problems have been noted in 40% of the 80 000 small reservoirs. In 1994, the flood-hit areas covered 193 000 km², affecting 223 mill. people at a direct economic loss of USD 2100 million.

Acute conflict between water demand and supply

Poor regulation of water is attribution to the unequal distribution of land, mineral and water resources, as well as to the poorly balanced distribution of the water resources in both time and space.

The conflicts among the water users in the upper, middle and lower sections of the rivers have become more apparent in recent years, due to poor water-management laws, uncoordinated water distribution, and uncontrolled development and wastage of

water resources in the upper, middle and lower sections of rivers. This can cause land desertification and environmental degradation in lower sections of rivers.

In China, high irrigation quotas, excessive water diversion, wide flooding and tandem irrigation methods are still used. For example, the irrigation norm in northern China is $1.5 \times 10^6 \sim 2.25 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$, and some farmland has a norm of $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$ (8). Lower water prices have led to water-resource wastage. The mean utilization coefficient of the channel systems is 0.3-0.45 and much of water is wasted.

Per capita water consumption is between 0.10-1.0 m^3 , and the industrial 10 000 yuan product output to water index demand is between 79-2000 tonnes (in Qingdao it is 79 tonnes). Thus, water consumption in Chinese industries and cities is high and extremely variable, and the reuse ratio is as low as 2-12%.

Unequal distribution of water resources

The distribution of water resources in northern and southern China is unbalanced. The total runoff from the Changjian River and its southern tributaries accounts for 80% of China's total runoff, but the farmland area fed by the Changjian is only 36% of China's total. The per capita water use in northern China is only 25% that in the south, however, the water resources in the north are 10% of those in the south.

The future expectations for water resources

The total water utilization quota for industry, agriculture and individual use is currently $5.828 \times 10^{11} \text{ m}^3$ while water shortage is $0.828 \times 10^{11} \text{ m}^3$, including a $0.77 \times 10^{11} \text{ m}^3$ shortage for agriculture (9). By the year 2 000, the water used for grain production is expected to increased by $0.5 \times 10^{11} \text{ kg}$ (10), and the water resource shortage will reach $0.6-0.9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ according to present water-requirement levels. Water shortages in urban areas, i. e. for household, commercial, industrial and other uses are expected to increase to $0.254 \times 10^{11} \text{ m}^3$.

Countermeasures

The Chinese Government has adopted many measures to alleviate and solve water problems: e. g. construction of large-scale water conservation projects. The water-

supply capacity of all the water conservation projects has reached $5.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$, i.e. 18% of China total water resources. Water diversion projects have resulted in economic benefits and other, e.g. the transfer of Luan River water to Tianjin City improved drinking water for the population. Water was diverted from the Hanghe River to Qingdao and helped settle the some of the conflicts between water supply and demand. Extensive water diversion from Dongjiang in Guangdong to Shenzhen has provided increased water for Hong Kong. The biggest water power project, the Sanxia Big Dam construction began in 1996 and the Yangtze River was cut-off in 1997 for the project.

Water-resources management has been strengthened by a series of administrative laws and by providing the public with information. In 1988, the first water law for the People's Republic of China was published. In 1993, the system of water division licenses was published, and in 1994, the rules for water pollution control of the Huihe River were established. Thus, development, utilization, protection, and improvement of water resources in China have been brought under the control of laws and regulations. Newspapers and television have been used to improve awareness, and citizens' concern about the use of water resources, their value and the need for restrictions and protection.

At the beginning of the 80s, China carried out a large-scale investigation and evaluation of its water resources, the supply-demand distribution and the need for protection. In the 9th five-year Plan period, China will continue to stress water-resources management, economy, and legislation. for water pollution-control, and will provide a plan for the comprehensive utilization of water resources and for water-resource taxation.

Efforts to develop water-saving in cities, industries, and agriculture are growing. Sprinkling and drip irrigation in China is used in only 1.5% of the total cultivated area. If the water utilization rate of the channel systems can be raised by increasing the expenditures on the channel systems, it could save 10-15% of the total water used in field irrigation. Field water conservancy projects could save 10-20% and up to 50%, of the water used in arid regions, and over 30% of the water used in humid regions. If industrial water-use ratios were at Qingdao levels, $1.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ water could be saved annually. Wastewater reuse and rational use of water could save 25-35% of the water

currently used in cities.

Tapping new sources of water is important countermeasures for China's economic development, and water distribution patterns. Precipitation is essential for development in subhumid, semiarid and arid regions. Precipitation provides drinking water in mountainous regions, and improves water conditions in forestland. Surface runoff can be exploited, and more efficiently used by the construction of terraces. Seawater can be used for industrial cooling water in coastal areas, and can also be desalted to provide the freshwater, solving water-shortage problem in some specific regions in the future.

Overall water-use problems in farming, forestry, animal husbandry, and environmental protection, need to be considered, and water-conservation works need to be regulated. Floodwater should be used to supply rivers and groundwater in a planned way, and interbasin transfer of water enhanced to solve the water-shortage problems.

China must abandon the existing management system of separating surface-water management from groundwater management, and separating water-conservation projects from water-supply institution, and establish a new authoritative management system of unified control. Coordination of the utilization of water and requiring users to observe the water laws, and unified allocation of water resources within each river basin, should be completed as soon as possible. Only by doing so can the problems of water resources development be solved (11).

China need to carry out the plan "to use science and technology in the utilization of water resources" and in the meantime train qualified water-conservation personnel, in addition to encouraging to scientific education. Administrative cadres should understand the economical basis for utilization of the water resources, in order to improve development, utilization, and protection. In order to strengthen the protection of its water resources, every city should adopt reasonable and feasible management plans and supervision measures, including supervision and management of the points of polluted water discharge. Polluted rivers need to be cleaned up, and polluted waters prevented from entering the rivers, lakes, and shallow groundwater aquifers. Adequate and good-quality water supplies to urban and commercial user are necessary. China must limit the exploitation of water resources to levels with the limitations the regional water resources discharges, which represent the total local precipitation available for

utilization. An assessment of the amount, variation tendencies, and methods of development is needed to predict social and economic development strategies. Setting up a model of water resources utilization that will satisfy the needs of development and sustainable utilization will be necessary to determine the effects of the water-resource use on the economy, while recognizing the important relationship between man and water (12).

Acknowledgements: The research was supported by grants from the joint research program of Center for Environment Remote Sensing, Chiba University in 1998 (No. C36)

Reference

1. Cheng, J.Q. 1992. Study of the feasibility of sustained utilization of Water resources. *ACTA National Resources* 10(3), 252-255. (In Chinese)
2. Niu, M. 1996. The problem of China water resources. *Guang Min Diary* 3.23. (In Chinese).
3. Cheng, Y. X. and Kang, S.Z. 1995. Water deficit-regulation irrigation principle. Published House of Water Conservancy and Hydroelectricity, Beijing, 145, 34-45. (In Chinese).
4. Geographic Agency of Chinese Academy of Sciences. 1998. The methods solving China' s water problem. *Advance in Earth Sciences* 13 (1), 1-5. (In Chinese).
5. Geographic Agency of Chinese Academy of Sciences. 1996. Report on sources of arid northwestern China. *Advance in Earth Sciences* 11(4), 1-3. (In Chinese).
6. Qiu, Y. G. and Ma, S. M. 1995. The stage and potentiality of water resource development and utilization in arid northwest China. *Journal of Natural Resource* 10 (1), 28-32. (In Chinese).
7. Zhu, Z. D. and Cheng, G. T. 1995. Sandy desertification in China. Sciences Press, Beijing, 53-66 pp. (In Chinese).
8. Gao, Q and Du, H. L.1996. Water resources and it' s sustainable utilization in arid northwest China. In: *Study on Water Problems in China*. Liu, C. (ed.). China Meteorological Press, Beijing, 93 pp. (In Chinese).
9. Ren, H. 1996. Analysis on the problems of water storage in China. In: *Study on Water Problems in China*. Liu, C. (ed.). China Meteorological Press, Beijing, 13 p.
10. Liang, Z. S., Kang, S. Z. and Hu, Y. 1997. The water economical efficacy with the technique of alternate irrigation in controlled root zones. *ACTA Agriculture and Engineer* 17(4), 24-29. (In Chinese).
11. Liu, C. 1996. Countermeasures for the solution of water shortage in China. In: *Study on Water Problems in China*. Liu, C. (ed.). China Meteorological Press, Beijing, 9 pp. (In Chinese).
12. Mou, H.1996. Approach in the models of connotation and evaluation of water resources. *Study on Water Problems in China*. . In: Liu, C. (ed.). China Meteorological Press, Beijing, 45 pp. (In Chinese).

スプリットウィンドウ データによる大陸規模での可降水量の推定

*久慈 誠 (奈良女子大)、岡田 格 (科学技術振興事業団)、内山 明博 (気象研究所)、高村 民雄 (千葉大 CEReS)

Retrieval of precipitable water in a continental scale using split window data

Makoto Kuji (Nara Women's University), Itaru Okada (Japan Science and Technology Corporation), Akihiro Uchiyama (Meteorological Research Institute), and Tamio Takamura (CEReS, Chiba University)

The algorithm has been preliminarily developed to retrieve precipitable water in a continental scale using split window data. The retrieval algorithm was applied to the GMS-5 / VISSR data. The retrieved results were rather inconsistent with the precipitable water estimated from radiosonde observation around Japan. The inconsistency seems to be attributed to the less exactness of regressive curve, rather than the influence of the atmospheric temperature at this stage. The method may, however, be applicable to NOAA / AVHRR data which has also split window channels so as to compare the results from both satellite / sensor data. It is planned to compare the retrieved results to the Objective Analysis Data in a continental scale. With the atmospheric temperature correction, the surface temperature index is estimated as a by-product, which should be also validated in comparison to the in-situ observation in a future work.

1. はじめに

大陸規模での水・熱エネルギーフローを理解するために、可降水量の分布・その変動などといった水蒸気の動態を把握することは、基本的であると同時に極めて重要である。従来、広域での可降水量の導出は人工衛星搭載型のマイクロ波放射計による観測が中心となっていたが、射出率の多様な陸域での信頼性があまり高くないとされている。

ところで、NOAA 衛星に搭載されている AVHRR には、いわゆるスプリットウィンドウという、赤外の窓領域を細かく分離した2波長のセンサーが搭載されている。この観測データから、統計的手法により、海面温度の推定がなされていることは有名である。この方法の骨子は、熱赤外波長帯で観測される輝度温度の情報に、スプリットウィンドウ(すなわち熱赤外2波長の差)の情報を加味することで、大気中の水蒸気の影響を補正し、海面温度を精度よく推定しようというものである。このことは逆に、スプリットウィンドウの情報から、大気中の水蒸気量(可降水量)が推定できるという可能性を示唆する。

そこで、本共同研究では AVHRR と同様にスプリットウィンドウの情報を有する GMS-5 搭載の VISSR のデータから、特に大陸規模での可降水量を推定するアルゴリズムを開発している。

2. 解析に用いたデータ

人工衛星データを用いて、大陸規模の可降水量を導出するために、VISSR / GMS-5 のデータを収集し

た。また、解析結果の妥当性を評価するための検証・参照データとして、ラジオゾンデデータと日本の AMeDAS データを収集した。

まず、収集した VISSR データは 70°N から 20°S、70°E から 160°E の領域について、緯度経度共に 0.05° 間隔のものであり、全体として 1800 × 1800 画素となる。更に、今回解析を行った VISSR データは、1997年の1、4、7、及び10月の、00 UTC と 12 UTC の両方の合計 228 シーンである。

一方、参照・検証データについては、気象庁高層気象データ(ラジオゾンデ)を 1988 年から 1997 年まで日本全部のものを準備し、可降水量を算出するプログラムを整備した。それに加えて、熱赤外のスプリットウィンドウ(観測波長 11 mm と 12 mm)では、地表面付近の温度にも感度を持つので、それに対する参照データとして、アルゴリズム開発領域・期間を含む日本の近畿地方一円の AMeDAS データを用意し、他と同様に処理プログラムの整備を行った。

また、VISSR / GMS-5 にはいわゆる水蒸気チャンネル(観測波長 6.7 mm)が搭載されている。このチャンネルはおおよそ 200 から 500 hPa (対流圏界面付近から対流圏中層)の水蒸気量の情報を含んでいる(Soden and Bretherton 1993)。一般的に水蒸気は境界層(対流圏下層)に多く存在するので、可降水量に対する寄与が大きいのもその層の水蒸気量である。そのため、スプリットウィンドウから導出される可降水量と比較する事により、水蒸気プロファイルに関する情報が抽出できる可能性がある。また、大陸規

模の可降水量分布のパターンを比較検証するには、同じプラットフォームに搭載されている、同じ時間・空間解像度を持ったセンサからの情報は、有益であると考えられる。

3. 解析方法と結果

解析アルゴリズムは Iwasaki (1994) を参考に、統計的手法とそれに対する大気補正の二段階に分けて、開発を進めている。

a. 統計式による推定 (第一段階)

まず第一段階では、いわゆる Split Window Variance Ratio (SWVR)法を用いた。具体的には、VISSR データ 228 シーンのうち、潮岬を含む 32×32 画素のユニットの中で、雲による汚染が少ないと考えられる有効解析画素を抽出し、可降水量の指標となる統計値 SWVR を計算した。これと潮岬 (33.45°N , 135.77°E) のラジオゾンデデータから見積もられる可降水量 (00 UTC と 12 UTC) との関係を図 1 に示す。

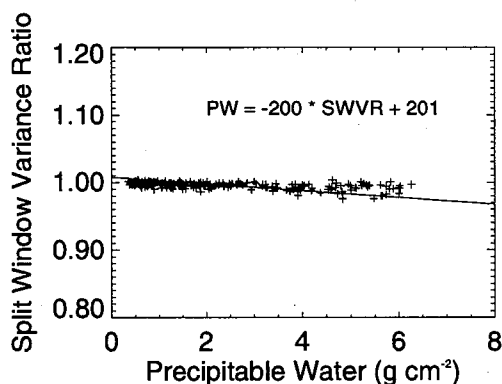


図 1 VISSR データの SWVR とラジオゾンデデータ (潮岬) から見積もられた可降水量 (PW) の関係。

図 1 より、SWVR と可降水量には、ほぼ直線状の相関関係のあることが分かる。そこで、この図から回帰直線を求め、それを用いて、各シーンの全てのユニットについて、計算された SWVR から可降水量の導出を試みる。

上記の回帰直線を用いて、スプリットウィンドウデータから、可降水量の分布を導出した。1997 年 10 月 19 日 9 時 (日本標準時) の日本付近における解析結果の一例を図 2 に示す。

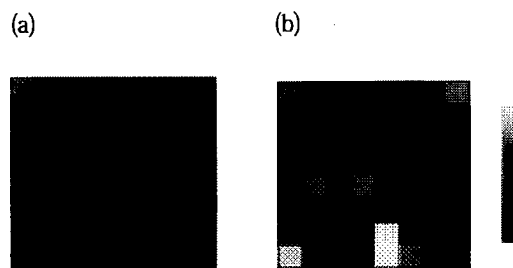


図 2 (a) VISSR/GMS-5 の水蒸気チャンネル画像と (b) 可降水量 (解析結果) の図。1997 年 10 月 19 日 9 時 (JST)。領域は、左上 (42.8°N , 129.2°E) から右下 (30.0°N , 142.0°E) 迄の等緯度経度座標である。日本付近の 256×256 画素が表示されている。グレースケールは、それぞれのパネル (a・b) の最大値 (黒・白) と最小値 (白・黒) で規格化してある。

可降水量分布は 32×32 画素の 1 ユニットについて、一つの (代表) 値が算出される。そのため図 2 においては、導出された可降水量の分布 (図 2b) の方が、水蒸気チャンネル (図 2a) よりも荒い分布となっている。この両者を比べると、全体的な傾向はそれほど変わらないことが分かる。しかしながら、地形の影響が大きい山岳部を含むユニットでは、導出された水蒸気量は、その周囲に比べて相対的に小さいことが分かる。この図では示されていないが、これと同じ傾向は、絹雲を含むユニットについても見られた。

この推定値を検証するために、図 2 と同じ日時について、日本の高層気象観測 (ラジオゾンデ) データから見積もられた可降水量と、それに対応するユニットの可降水量の推定値の関係について調べてみた。その結果を図 3 に示す。

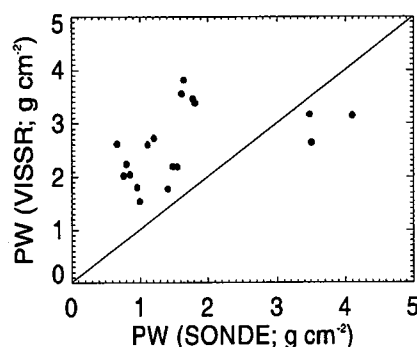


図 3 可降水量 (PW) の比較。図 2 と同じ 1997 年 10 月 19 日 9 時 (JST) の場合である。横軸はラジオゾンデデータから見積もられた可降水量であり、縦軸は VISSR のスプリットウィンドウデータから推定された可降水量である。図中には、補助的に 1 対 1 の直線が引いてある。

この図より、稚内から南鳥島までの 18 観測地点

について比較を行ったところ、人工衛星データから推定される値は、可降水量の小さいところでは最大で 2 g cm^{-2} 程度過大評価しており、その一方で、可降水量の大きいところでは最大で 1 g cm^{-2} 程度過小評価している事が分かる。

この比較検証を踏まえて、この解析手法を大陸規模のデータ範囲に適用した結果を図4に示す。

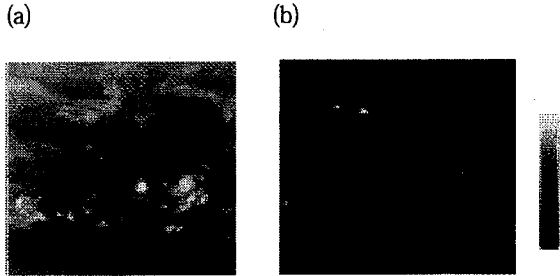


図4 (a) VISSR/GMS-5の水蒸気チャンネル画像と(b)可降水量(解析結果)の図。図2と同じ1997年10月19日9時(JST)。領域は、左上(70°N,70°E)から右下(20°S,160°E)迄の等緯度経度座標である。グレースケールは、それぞれのパネル(a・b)の最大値(黒・白)と最小値(白・黒)で規格化してある。

表示領域の表現は次のようになっている。水蒸気チャンネル(図4a)については、縦横 8×8 画素の平均値を改めて1画素とした、 224×224 画素である。可降水量(図4b)については、全体として 56×56 ユニットが算出されるが、水蒸気チャンネルとの比較のため、サイズを揃え、1ユニットを縦横 4×4 画素に拡大表示して、 224×224 画素としている。水蒸気チャンネル画像(図4a)と可降水量分布(図4b)を比較すると、その大陸規模でのパターンは大まかに見て矛盾していない事が分かる。しかしながら、地形の影響の大きいヒマラヤやチベット高原付近、あるいは台風や背の高い対流活動に伴って高高度に雲が存在すると考えられる熱帯地方では、所々両者のパターンが相違を示している領域も見られる。

b. 大気温度の補正 (第二段階)

第二段階では、まずモデル大気を仮定し、SWVRの計算を行い、可降水量に対する感度を調べた。尚、計算の際、水蒸気の連続吸収のみならず、水蒸気の線吸収、その他の気体の寄与も考慮に入れた。また、VISSRのスプリットウィンドウのresponse functionの重み付けを行ってある。

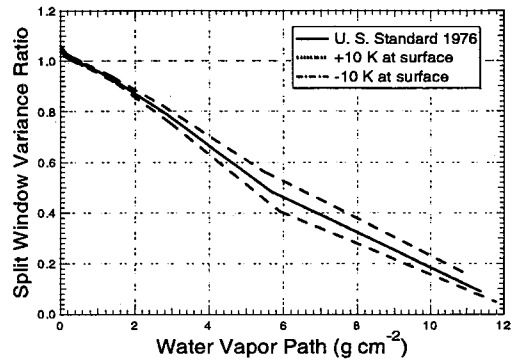


図5 SWVR(縦軸)と可降水量(横軸)の関係。大気モデルは、LOWTRAN 7に組み込まれているU. S. Standard 1976(以下、USS76)を仮定した。地表面温度は、温度範囲が285Kから295K迄の1様分布を仮定した。実線はUSS76の場合であり、また、破線(一点鎖線)はUSS76の表面気温を+10K(-10K)だけ増加させた時の割合を、プロファイル全体に乗じた場合である。

図5より、衛星データからの推定量であるSWVRは可降水量に対して、確かに感度をもつことが分かる。また、積算水蒸気量が 2 g cm^{-2} よりも大きくなると、気温に対する依存性が顕著になってくる事が見てとれる。

そこで、この気温の影響を考慮に入れて、可降水量推定の精度を向上する工夫を行った。基本的には、Iwasaki (1994)に準拠するが、主たる条件は次の通りである: 水蒸気の体積混合比は一定とし、気温を変化させることで、水蒸気量を変化させる。尚、気温プロファイルは、表面気温の変化の因子を全高度に乗じることで、現実の気温に近づける様にした。

結果として、大気プロファイルの影響を考慮に入れたにもかかわらず、推定精度はほとんど向上せず、その推定誤差は 2 g cm^{-2} 程度であることが分かった。

このことから、VISSRのスプリットウィンドウデータ場合、気温の影響を考慮に入れるよりは、SWVR法における回帰曲線をより精密に求めた方が、可降水量の推定精度の向上にとって、より現実的であるということが示唆された。

また、アルゴリズムを詳細に検討した結果、この第二段階から、可降水量に加えて、地表面付近温度の指標が得られることが分かった。そこで、副産物として推定された潮岬における地表面付近温度を、AMeDASの気温と単純に比較してみたところ、推定値の方が2K程小さめとなった。

ところで、実測データから求めた回帰直線(図1)とモデル計算から求めた回帰直線(図5)を比較すると、回帰直線の傾きが大きく異なっていることが分かる。これは、現段階では、晴天画素の抽出の不確定性に原因があるのではないかと考えている。

そのため、この部分のアルゴリズムについて、再検討が必要である。具体的には、例えば、第二段階のシミュレーション結果を参考に、回帰直線を回帰曲線(高次多項式等)にする、あるいは、解析ユニットサイズを現在の 32×32 画素から変化させて、第一段階における晴天画素抽出の感度を調べてみること、等を検討している。

4. まとめと今後の課題

本共同研究においては、大陸規模での可降水量の推定についてデータの収集並びに、アルゴリズム開発を行っている。具体的には、VISSR/GMS-5 のスプリットウィンドウを用いて、毎時データに対して解析アルゴリズムを適用し、大陸規模での可降水量の時・空間変動を調べる事を見据えて、アルゴリズム開発とその妥当性の評価を行う。

今年度はまず、VISSR/GMS-5 のデータを用いて、SWVR法により可降水量を導出した。更に導出された結果を、日本付近のラジオゾンデ観測から見積もられた可降水量の値と比較したところ、 $1\text{-}2\text{ g cm}^2$ 程度の誤差を持つことが分かった。

この比較検証の結果を踏まえた上で、スプリットウィンドウデータから推定された大陸規模で可降水量分布を算出した。この結果については、残念ながら、定量的な比較検証の可能なデータを準備できなかった。しかしながら、VISSR/GMS-5 に搭載されている水蒸気チャンネルの画像とスプリットウィンドウから推定された可降水量分布を比べると、全体的な変動の傾向はそれほど違わないことが分かった。但し、ヒマラヤやチベット高原付近の地形の影響が大きい(背景の不均質な)領域、あるいは対流活動に伴って高高度に雲が存在する領域では、水蒸気チャンネル画像と推定された可降水量の分布は傾向を異にすることが分かった。

一方、今回回帰直線を作成した日本付近について、推定された可降水量分布と水蒸気チャンネル画像の空間変動のパターンを比較してみると、やはり地形の影響が大きい山岳部や絹雲を含む場所では、導出された水蒸気量の変動が水蒸気チャンネル画像の変動と必ずしも一致していない事が分かった。

これらの不一致については、水蒸気チャンネルが感度のある対流圏中層から対流圏界面に水蒸気が多い事もその原因として考えられるが、推定アルゴリズム自身の限界であるとも考えられる。すなわち、本アルゴリズムは、対象ユニット内で地表面射出率が一様で、表面温度にばらつきのある場合に、一つの可降水量の代表値が導出されるというものである。しかし、今回のように、絹雲の存在により、射出率

が非一様になっていると考えられる領域や、地形の影響が大きい領域では、そのままではアルゴリズムの適用が難しいと考えられる。これについては今後、検討しなければいけない課題の一つである。

また、アルゴリズムの第二段階として、大気プロファイルの影響を考慮に入れ、可降水量のみならず、地表面温度の指標についての導出も行ってみたい。

その結果、アルゴリズムの第一段階における晴天画素の抽出の方法に改善の余地のあることが分かった。そのため、SWVR法における回帰曲線をより現実的なものにすることが、今後の課題である。更に、やはりアルゴリズムの第二段階から、地表面付近温度の指標が得られることが分かったので、これを現場観測値と比較し、実際に地表面温度の指標として有効なのかどうかについての検証を積み重ねて行きたい。

また、大陸規模での検証として、やはりスプリットウィンドウを有する NOAA/AVHRR や客観解析データ等とも、相互比較を行う予定である。

以上のように、アルゴリズム開発としては、まだまだ検討の余地がある。そうではあるものの、今回明らかになった問題点を改善し、マイクロ波放射計による推定精度が低いとされる、特に内陸部における可降水量、並びに地表面温度(指標)分布の導出を目指してゆきたい。

謝辞 解析に用いた VISSR/GMS-5 データは、高知大学理学部菊地時夫教授の御厚意により利用させて頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- Iwasaki, H., 1994: Estimation of Precipitable Water over Land Using the Split-Window Data from the NOAA Satellite, *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 223-233.
- Soden, B. J., and F. P. Bretherton, 1993: Upper Troposphere Relative Humidity From the GOES 6.7 mm Channel: Method and Climatology for July 1987. *J. Geophys. Res.*, **98**, 16,669-16,688.

西部熱帯太平洋海域における太陽放射エネルギーとエアロゾル観測

Characteristics of solar radiation and satellite-derived ocean color over the equatorial western Pacific

香西克俊	神戸商船大学
石田邦光	鳥羽商船高等専門学校
草刈成直	神戸商船大学
佐々木政幸	気象研究所

Abstract

Optical variabilities of the western Pacific Ocean are closely connected with the signal to ENSO and the global climate change. Therefore characterizing solar radiation and ocean color at the equatorial Pacific Ocean are important indices for occurrence of ENSO phenomena. Coordinated shipborne observations with SeaWiFS overpasses are carried out to estimate atmospheric effects on the satellite sensor performance by using sunphotometers and spectral radiometers on board R/V Mirai. Aerosol optical thickness is observed by using the sunphotometer and spectral radiance of the sea surface is observed by the spectral radiometer. Aerosol occupies greater portion of optical thickness than the Rayleigh and ozone optical thickness and the proportion of aerosol is larger in the longer wavelength. Aerosol occupies greater portion of radiance at each band as is the same as optical thickness. The proportion of aerosol is larger in the longer wavelength.

1.はじめに

地球の大気中には気体成分だけではなく、液体状、固体状の微粒子も多く浮遊している。液体固体の浮遊粒子は、種類、大きさなど様々だが、これらを総称してエアロゾルと呼ぶ。エアロゾルは大気に入射した太陽光を吸収散乱して、エネルギーを減衰させる光学的特性を持っている。エアロゾルは太陽からの放射収支に影響を与えているが、その寄与は決して小さいものではない。このため、可視波長域において衛星で観測される放射エネルギーは、大気中の吸収散乱の影響を大きく受けており、衛星からの可視域リモートセンシング観測を用いて海面現象を詳細に理解するには、エアロゾルの影響を補正することが必要不可欠である。

一般に、衛星可視画像の大気補正モデルは大きく分けて（１）現場衛星データと放射伝達モデルを組み合わせる方法、（２）現場観測に依存せず衛星データのみで大

気補正を行う方法、の2つがある。(1)は高い補正精度を維持することができるが衛星の通過時の現場観測が必要であるため、時系列画像への適用はあまり実用的ではない。また(2)は(1)と比較すると精度は劣るが、現場観測を必要としないため、時系列画像への適用面で実用的である。Rayleigh 散乱の強度は波長の4乗に逆比例し短波長域で可視光の伝達に大きな影響を及ぼすという特性がある。この散乱を考慮した Chavez (1996) の大気補正モデルにより可視衛星画像の大気補正が可能である。しかし現在エアロゾルに関する地域差、季節差などを考慮した観測データは十分に蓄積されておらず、特に海洋大気におけるそれらの理解は十分ではなく、毛利 (1998)、吉田 (1998) などにより海洋上のエアロゾルの観測が行われているにすぎない。以上から、エアロゾルが衛星画像に与える大気効果を明らかにすることは、これからの可視域リモートセンシングによる海色観測の発展に重要な役割を担っている。本研究は西部熱帯太平洋海域において海色観測衛星 SeaWiFS と同期した船舶上での分光放射計及びサンフォトメータによる観測を行い、SeaWiFS 衛星データにより得られる海色に及ぼすエアロゾルの影響を明らかにすることを目的とする。

2. 船舶及び衛星データ

本研究は、西部熱帯太平洋海域における大気-海洋相互作用の研究を主目的とした集中観測 Nauru99 の期間中 (1999年6月17日~7月4日) JAMSTEC 研究船「みらい」において、SeaWiFS の上空通過時と同期した現場観測を行った。Fig1 に観測海域を示す。

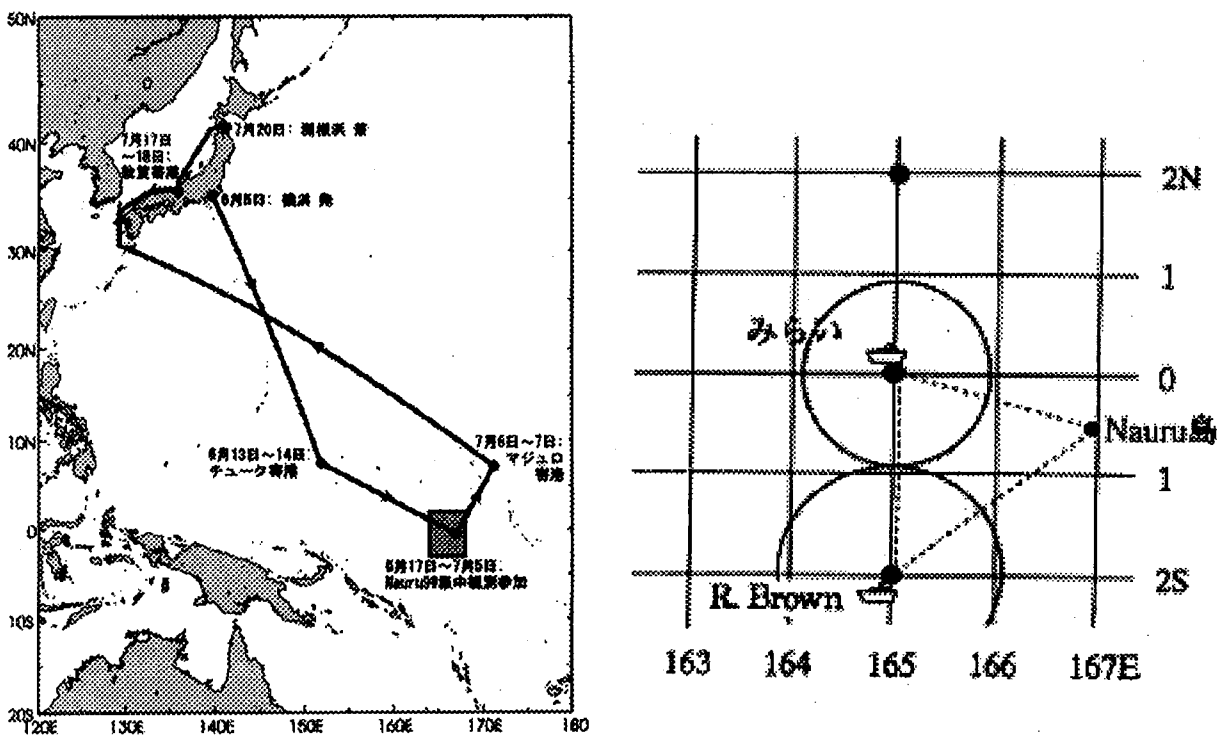


Fig.1 Study area.

分光放射計(MSR7000)は海面からの反射光を 400nm~1000nm の範囲で 1nm おきに測定し、あらかじめ与えられた計数により放射輝度に変換する。また、太陽直達光の減衰の測定はサンフォトメータを用いて計測した。サンフォトメータは太陽直達光を波長別(368,500,675,778nm)に観測することにより、その波長における減衰の割合をカウント値として表示する。これを用いて大気の光学的厚さ及び透過率を算出する。SeaWiFS は 1998 年打ち上げられた海色観測衛星 SeaStar 搭載のセンサーである。以下の Table 1 に示すように可視、近赤外域に 8 つのバンドを持ち、サングリッターを防ぐため軌道に沿ったチルト機構を有している。本研究では 1999 年 6 月 22 日東経 165 度、赤道上を通過の LAC(Local Area Coverage)画像を用いた。

Table1 Specification of SeaWiFS

	wavelength (nm)
1	402~442
2	433~453
3	480~500
4	500~520
5	545~565
6	660~680
7	745~785
8	845~885

Equatorial crossing time 12 : 00 (local)
 Altitude 705km
 Spatial resolution 1.13kmLAC ; 4.5kmGAC
 Scanning swath 2801kmLAC ; 1502kmGAC
 (from Barnes et al.1994)

3.解析方法

サンフォトメータで観測したデータのうち、可視近赤外域である波長 500,675, 778nm を対象とするため、SeaWiFS および MSR7000 の放射輝度データはそれぞれ上記の波長と同じ値を代表値として用いた。SeaWiFS の放射輝度値 $L(\lambda)$ は Rayleigh 散乱によりセンサーに入射した放射輝度値 $L_r(\lambda)$ 、エアロゾルの散乱により入射した放射輝度 $L_m(\lambda)$ 、海面からの上向きの放射輝度 $L_s(\lambda)$ が大気の透過率 τ を受けてセンサーに入射した $\tau L_s(\lambda)$ の 3 種類からなると仮定した。(式 (1) 参照) つまり $L(\lambda)$ から $L_r(\lambda)$ と $\tau L_s(\lambda)$ を取り除くことにより SeaWiFS に及ぼすエアロゾルの放射輝度を求めることができる。

$$L(\lambda) = L_r(\lambda) + L_m(\lambda) + \tau L_s(\lambda) \quad (1)$$

但し、 τ は大気の透過率である。

4.観測結果

Fig2 は MSR7000 と SeaWiFS によって観測された海面の分光放射輝度曲線である。MSR7000 の放射輝度値と比べると SeaWiFS の放射輝度値が非常に大きいのが見て取れる。その差は波長が短くなるにつれて大きくなっており、この放射輝度の差は大気の影響によるものと思われる。また水が電磁波をすべて吸収する近赤外域におい

でも SeaWiFS の放射輝度値はゼロではない。これに着目し、SeaWiFS と海面の放射輝度の差を Rayleigh 散乱によるものと仮定し、前述した Rayleigh 散乱の特性である波長の4乗に逆比例することから可視域の各波長の $L_r(\lambda)$ を求めた。一方 MSR7000 で観測した海面の放射輝度は大気を透過し減衰しながら SeaWiFS センサーに入射する。そこでサンフォトメータで測定した直達光強度のデータを用いる。サンフォトメータで観測したカウント値を各波長ごとの大気の光学的厚さに変換した。それに大気路程（エアマス）を乗じることにより大気の透過率を算出した。MSR7000 で観測した海面放射輝度に透過率をかけて海面からの上向きの放射輝度 $\tau L_s(\lambda)$ を求めた。最後に、SeaWiFS の放射輝度値 $L_r(\lambda)$ から Rayleigh 散乱により入射した放射輝度値 $L_r(\lambda)$ 、海面からの放射輝度値 $\tau L_s(\lambda)$ を取り除きエアロゾルによる影響分 $L_m(\lambda)$ を見積もった。

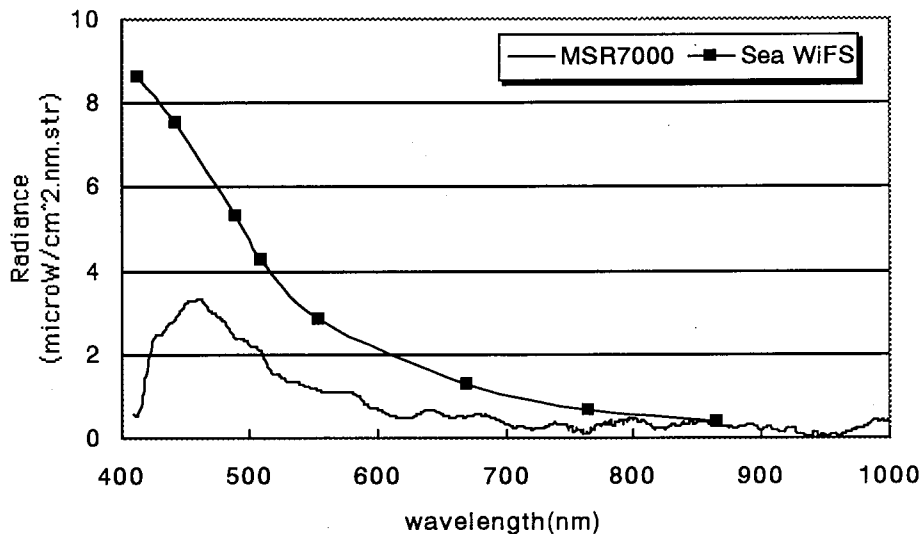


Fig.2 SeaWiFS & MSR7000 Spectral radiance curve.

Fig3 にサンフォトメータの直達光強度の測定をもとに算出した各波長の光学的厚さを示す。光学的厚さは大気中で太陽光の強度が弱められる割合を示している。Fig.3 は波長別に示しており波長が短いほど減衰されていることがわかる。また、エアロゾルは波長が短くなるにつれて増大し 500nm では 63% を占めていることがわかる。

次に SeaWiFS のセンサーに入射した放射輝度について、解析より得られた各種大気効果の割合を Fig.4 に示す。エアロゾルの効果は波長 510nm では 60% を占めており、このように衛星からの海色情報を精度よく抽出するためには Rayleigh 散乱だけではなく、エアロゾルによる散乱も考慮する必要があることを示している。

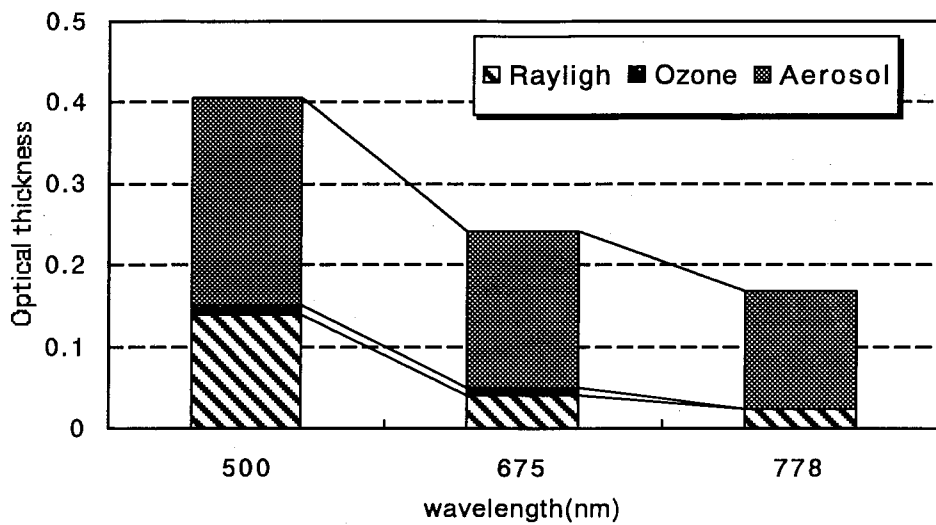


Fig.3 Optical thickness from sunphotometer.

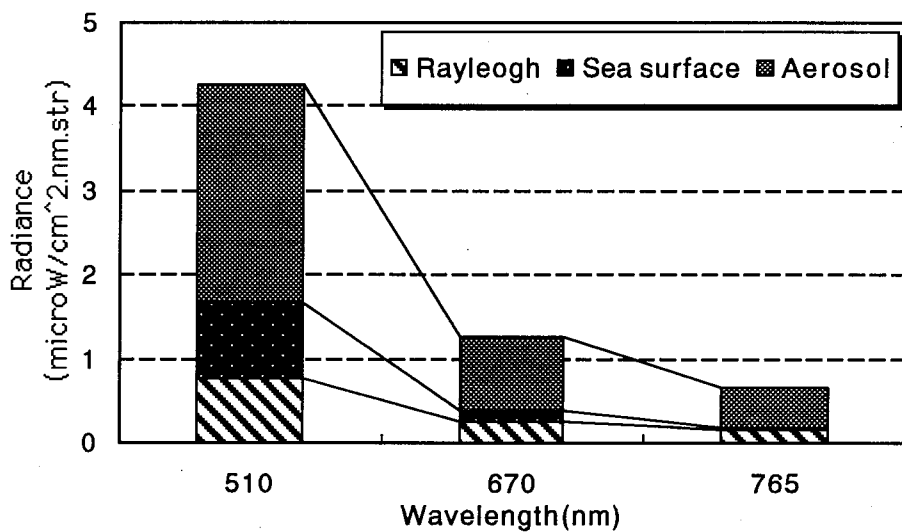


Fig.4 Contribution of various atmospheric effects on spectral radiance measured by SeaWiFS.

5.まとめ

本研究は、海洋上でエアロゾルが衛星海色データに及ぼす影響を明らかにするため、SeaWiFS 上空通過と同期した船舶観測を西部熱帯太平洋域において行った。その結果 SeaWiFS の放射輝度に占めるエアロゾルの影響の割合は、510nm において 60% を占めており、従来の Rayleigh 散乱のみを考慮した大気補正だけでは海色情報を抽出するのに不十分であることがわかった。また、海面から上向きの放射エネルギー

が大気を透過する際に受けるエアロゾルによる減衰は、光学的厚さの大きな 500nm においては 63%を占めており、海色情報自体がエアロゾルによって大きく減衰され SeaWiFS のセンサーに入射していることがわかった。

西部熱帯太平洋に存在するナウル島は warm pool の東の端に位置しているため、warm pool 変動が顕著に見られる海域でもある。よって同海域における大気の大気対流活動と海洋との相互作用解明のためエネルギー収支の基本となる太陽放射の精度の高い測定を実施し、観測精度を向上させる必要がある。また大気の散乱特性からエアロゾルの特性を分析し、どれくらい衛星海色画像に影響を及ぼしているか明らかにすること、そのための観測データの蓄積が今後の課題である。

謝辞

使用した船舶観測データは、すべて海洋科学技術センター所属研究船みらい MR99-K03 次研究航海 Nauru99 より取得した。SeaWiFS データの提供して下さった浅沼様、またみらい船長および乗組員の皆様に深謝いたします。本研究に対して助言をいただきました神戸商船大学海洋気象学研究室石田廣史教授に深謝いたします。

参考文献

Chavez,P.S. (1996) : Image-Based Atmospheric Corrections-Revisited and Improved, PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING,32,9,1025-1036

Gregg,W.W., Chen,F.C., Mezaache,A.L., Chen,J.D.and Whiting,J.A. (1993) : The Simulated SeaWiFS Data Set, SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum,104566,9,1.

Hooker,S.B., Esaias,W.E., Feldman,G.C., Gregg,W.W.andMcClain,C.R. (1992) : An OverView of SeaWiFS and Ocean Color, SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum,104566,1.

毛利 兼人 (1998) : 簡易型偏向放射計による海洋上エアロゾルの太陽放射散乱特性に関する研究 (神戸商船大学大学院 商船学研究科 商船システム学専攻 修士論文)

吉田 佳弘 (1998) : 直達太陽放射測定による海洋上エアロゾルの特性に関する研究 (神戸商船大学大学院 商船学研究科 商船システム学専攻 修士論文)

海面高度計データを同化した黒潮変動予測実験

淡路敏之、小守信正、石川洋一

(京都大学大学院理学研究科地球物理学教室)

Assimilation Experiments of the Kuroshio Variabilities using TOPEX/Poseidon Altimetric Data

TOSHIYUKI AWAJI, NOBUMASA KOMORI, AND YOICHI ISHIKAWA

Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., Kyoto 606-8502

Abstract: As a first step towards constructing a regional ocean state estimation for the Kuroshio around Japan, we have studied the capability of short-range forecasting of the Kuroshio variability by assimilating TOPEX/Poseidon altimetric data into a regional 1 1/2-layer primitive equation model with a variational initialization scheme. Using the sea surface dynamic height data derived from TOPEX/Poseidon altimetry, we carried out prediction experiments of Kuroshio path variations from 1993 to 1994. Although we used a mean data from a 3-year simulation as the background field for initialization in our experiments, the Kuroshio path variation was nevertheless successfully reproduced for up to two months after the initialization. In particular, the eastward progression speed and the amplitude of the Kuroshio meander were quite similar to those observed. These results show a dramatic improvement in accuracy in both initialized velocity and vorticity fields and hence confirm the efficiency of our variational assimilation method for the initialization of short-range numerical forecasting of the Kuroshio path variations.

1 はじめに

十年ないし数十年スケールの気候変動を予測し、そのメカニズムを明らかにするためには、海洋における熱や物質の輸送混合過程を理解することが不可欠である。特に北太平洋においては、北大西洋とは大きく異なり、南北方向の熱輸送量の約半分にあたる0.4 PW (1 PW = 10^{15} W) を水深 800 m 以浅の表層循環が担っている (Bryden *et al.*, 1991) ことや、黒潮続流域での表層の熱バランスに移流の効果が重要であることから、北太平洋域の十年スケールの気候変動のメカニズムとして提唱されている沈み込み振動 Subduction Oscillation などの現象を考える場合、沈み込む水塊の特性に、日本周辺での一ヶ月から数ヶ月程度の黒潮変動が、特に晩秋から冬季の海面冷却効果と相まって影響を与えている可能性が推測される。従って、時空間的に十分な分解能で、黒潮の流速場と熱輸送量を定量的に把握し、大気・海洋間および亜熱帯循環・亜寒帯循環間の熱交換を考慮に入れた日本周辺の黒潮域における熱輸送バランスを明らかにすることは、気候変動の解明にとって極めて重要である。

日本周辺における黒潮変動の代表的な例としては、その流路の経年変動がよく知られている。これまでの観測結果から、それは比較的安定な三つの流路、すなわち非大蛇行接岸流路 (以下では直進路と

呼ぶ)・非大蛇行離岸流路 (C型流路)・大蛇行流路に分類され (Kawabe, 1985; Fig.1)、それらの形成機構に関しては、主に流速・流量の大小という観点から研究がなされてきた (Akitomo *et al.*, 1991) が、流路間の遷移機構や短周期変動過程についての理解は未だ不十分である。その原因の一つとして、力学的に解析が可能な客観解析データが存在しないことが挙げられる。流速の直接観測は ASUKA (Affiliated Surveys of the Kuroshio off Cape Ashizuri: 足摺岬沖黒潮協同観測) などの限られた測線でしか行われておらず、多くは水温と塩分の観測値から無流面を仮定して求めた地衡流速や、潮位差の変動から推定した相対的な流速変動である。最近では、流路の遷移に短期的な流量変動が重要であるとの指摘が観測・理論の両面からなされており、これらの研究を更に発展させる上でも、渦度場の時間発展が記述可能な分解能で流速場・温度場を再現することは有益であると考えられる。これは、Awaji *et al.* (1991) などの研究を踏まえると、日本周辺での黒潮流路の短周期変動 (約1ヶ月程度) の解析についても同様である。

そこで本研究では、現実的な海岸線を持つ高分解能の1.5層有効重力モデルに Ishikawa *et al.* (1999; 以下 IAK99 と略記) の同化スキームを適用し、海面高度計データの同化実験を行なう。黒潮の数日から数週間程度の時間スケールの現象を予測する場合、

傾圧不安定の効果は本質的に重要であり、また瞬時に isostasy が成り立つという 1.5 層モデルの仮定は厳密には適切でない。また、海底地形効果の重要性を指摘する研究結果 (Masuda *et al.*, 1999) もある。これらを考慮すると、より現実的な黒潮変動の再現を目指すには、少なくとも 2 層モデルの使用が望ましい。しかしながら、海面高度計や海面水温などの人工衛星リモートセンシングデータという海面付近の情報を用いて海洋の内部構造をいかに推定するかという問題に関しては、理論的に解決しなければならない課題も多く、今後の研究成果を待たねばならない。一方、1.5 層有効重力モデルは、境界面の変動が海面の変動と一対一に対応しており、このような問題を考慮する必要はない。また 1.5 層モデルであっても、傾圧不安定に伴う渦の発生そのものは再現できないものの、発生した傾圧渦のその後の時間発展及びそれも含めた表層流の非線形発展はかなり高い精度で追跡できるという指摘もある (Hurlburt, 1986)。従って、発生した傾圧渦をデータ同化によって取り込めれば、モデルの不十分性を緩和できる可能性がある。そこで、TOPEX/Poseidon 海面高度計の格子化データ (Kuragano and Shibata, 1997; 以下 KS97 と略記) を同化する初期値化実験を行い、この同化システムによる現実の黒潮短期変動予測の可能性について検討する。なお以下で示す notation は原則として Ide *et al.* (1997) に従う。

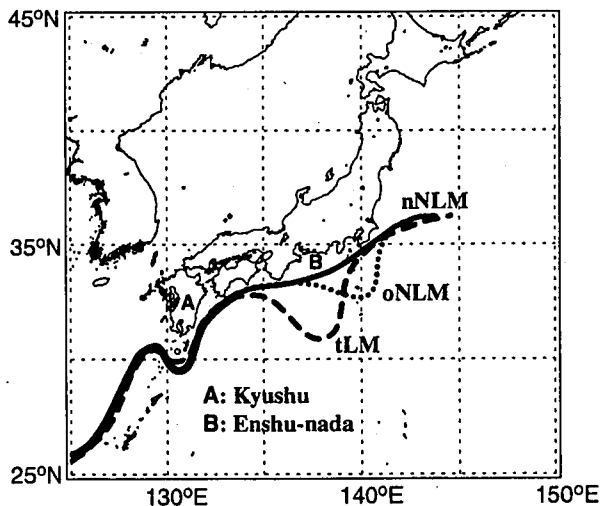


FIG. 1. Typical paths of the Kuroshio south of Japan. nNLM is the nearshore non-large-meander path; oNLM is the offshore non-large-meander path; tLM is the typical large-meander path.

2 同化モデル

2.1 観測データ

現場観測データと TOPEX/Poseidon 海面高度計データから最適内挿法を用いて時空間的に格子化された KS97 の絶対海面力学高度データを同化に用いた。空間分解能は緯度・経度ともに 1° であり、時間的には 1993 年 1 月 3 日を起点とする 5 日毎のデータとされている。本研究で用いた観測点 (854 点) の位置を Fig.2 に示す。実際の格子化データはさらに多く、モデル海洋では陸として扱っている領域にも存在するが、今回は陸岸に近い観測点は敢えて使用していない (理由は後述)。

2.2 数値モデル

より現実的に黒潮変動を再現するため、通常の 1.5 層予報方程式に境界面変位の水平拡散項 $K_H \nabla^2 h$ を加えた (式は省略)。これは連続成層モデルにおける密度の水平拡散項に対応するものである。これにより、 $L_v \sim (A_H/\beta)^{1/3}$ の Munk 層の他に $L_d \sim (K_H/\lambda_I^2)/\beta$ の拡散型西岸境界層のスケールが得られ、 $A_H \sim K_H$ ならば、内部変形半径 λ_I が Munk 層の幅より大きいときには粘性系の、小さいときは拡散系の西岸境界層となる。黒潮域では $L_v \sim 20$ [km], $\lambda_I \sim 35$ [km] である。外力としては、Hellerman and Rosenstein (1983) の月平均風応力場と、KS97 の 5 日毎の海面力学高度場から作成した開境界上での境界面変位を、それぞれ時間的に線形補間して用いた。予測実験は特徴的な黒潮変動が発生した 1993 年初頭から 1995 年末まで (後述) を対象とし、1993 年 1 月 3 日の格子化データから初期条件を作成して 1995 年 12 月 31 日まで積分を行った。その 3 年間の平均場を Fig.2 に示す。なお、黒潮の流動構造を十分に再現するために、モデルの格子間隔は $1/12^\circ$ と高分解能にした。

2.3 同化スキーム

IAK99 は、一連の双子実験によって、変動の激しい日本南岸における黒潮の初期値化問題に対する彼らの開発した Weak Constraint 法同化スキームの有効性を示した。しかしながら実際の観測データを用いて現実の海洋の変動予測を行う場合、誤差共分散行列などの同化パラメータの決定は、双子実験の場合と違って容易ではない。そのため、同化を行った場合でも潮位計との相関が負になるなど、未

だ成功を取めているとは言えない状況にある。そこで、同化実験に用いる KS97 データ及び上記のモデル実験結果から、観測及びモデル双方の誤差共分散行列を見積もり、それらを以下に示す同化スキームに使用した。

IAK99 の評価関数は次のような最適内挿法のパート J^S と力学的制約条件のパート J^D からなっている。

$$J[\mathbf{x}] = J^S[\mathbf{x}] + J^D[\mathbf{x}]. \quad (1)$$

モデルの平均場を \mathbf{x}^b 、観測値を \mathbf{y}^o とし、それらの誤差共分散行列をそれぞれ \mathbf{B} 及び \mathbf{R} とすると、 J^S は、

$$\begin{aligned} J^S[\mathbf{x}] &= \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^b\|_{\mathbf{B}^{-1}}^2 + \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}^o\|_{\mathbf{R}^{-1}}^2 \\ &= \frac{1}{2} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^{OI}\|_{\mathbf{B}^{-1} + \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}}^2 + \text{Constant}, \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{x}^{OI} \equiv \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}(\mathbf{y}^o - \mathbf{H}\mathbf{x}^b)$ 。

次に、 J^D に関しては以下の条件を課すことによって、モデルの力学による推定値の修正を行う。

$$J^D[\mathbf{x}] = \frac{1}{2} \|\partial\mathbf{x}/\partial t\|_{\mathbf{W}}^2. \quad (3)$$

これは場の定常性を制約条件に課すことに相当するが、 J^D は評価関数 J の一部であり、厳密には $J^D=0$ とはならず (すなわち、weak constraint である)、従って、時間変動の大きい高周波ノイズを選択的に除去する力学的ローパスフィルターとして作用する特性を有している。(J^D のゆらぎの大きさは重み \mathbf{W} によって決定されると。) この特性を利用すると、初期値化後の予報値の主たる汚染源である高周波ノイズ (ミスフィットによって発生する重力波) を効果的に除去できることが IAK99 によって確かめられている。

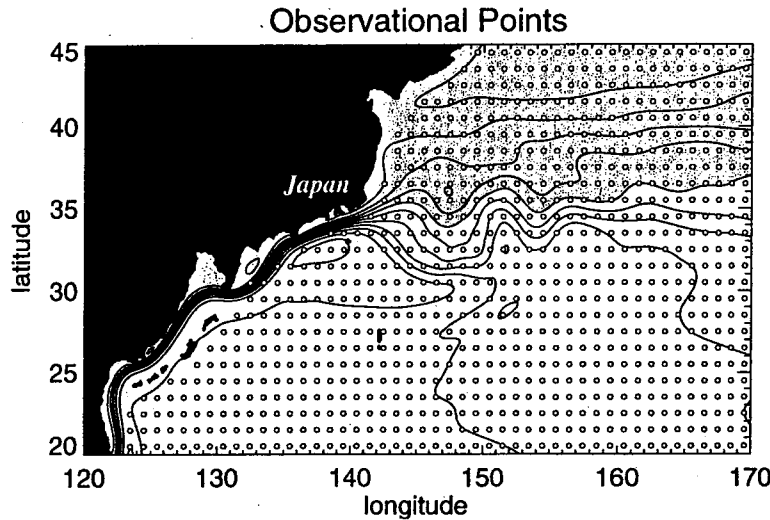


FIG. 2. Model geometry and observational points for the prediction experiments (white dots). Background contours represent the mean field of the three-year simulation (contour interval is 50 m and shaded region indicates upward displacement).

3 短期変動予測実験

海上保安庁発行の海洋速報によると、1993 年の 3 月中頃から発達しはじめた蛇行は、4 月の後半から数ヶ月間持続した後、振幅を変動させながら徐々に減衰した (Fig.3)。また翌年の 1994 年には、7 月頃に熊野灘から遠州灘にかけて小蛇行が存在していたが、すぐに減衰して直進路に戻った (Fig.5)。そこで、これらの各イベントに着目したデータ同化後の短期変動予測を行ったが、ここでは流路変動の代表例である下記のケースについて報告する。

Case 1: 小蛇行が大蛇行へ発達し始める直前の 1993

年 3 月 4 日 (Fig.3)。

Case 2: 小蛇行が発生し、その後減衰し始める 1993 年 7 月 2 日 (Fig.5)。

いずれのケースも、上述の 3 年間のシミュレーション結果から作成した平均場 $\bar{\mathbf{x}}$ を背景値 \mathbf{x}^b として初期値化を行い、その後 60 日間予報を行った。観測値の誤差共分散行列 \mathbf{R} については、平均場の誤差および格子化に伴う誤差を考慮し、海面変位の観測誤差の標準偏差は 7 cm として作成した。また、背景値の誤差共分散行列 \mathbf{B} に関してはモデルの 3 年間の変動の標準偏差で近似した。各ケースは全て

独立であり、初期値化の際に他のケースの予報結果は用いていない。また、初期値化後は一切データを同化していないこと強調しておく。

Case 1: 蛇行発達期間 (Fig.4) 初期にはほぼ直進路であったにもかかわらず、その後の蛇行の発達過程がよく再現されている。海洋速報による黒潮流路変動と比較すると、低気圧性循環の発達が少し弱いものの、蛇行のピークが二ヶ月間で約 400 km 東進し 31°N 付近まで達している点などは非常によく一致している。

Case 2: 蛇行減衰期間 (Fig.6) 7月に遠州灘沖で発生した小蛇行は、発生時期・振幅ともに海洋速報のそれと酷似している。しかしながらその後は減水せず、蛇行部が下流へと移動し、C型流路に遷移した。

以上の結果から、改良 1.5 層モデルと二次元変分法を用いることにより、一部問題が見られるものの、一ヶ月から二ヶ月程度の短期流路変動予測は十分に可能であることがわかる。特に Case 1 の直進路から蛇行路への遷移過程については、蛇行のピークの東進速度 (二ヶ月で約 400 km) や蛇行振幅は観測されたそれと非常によく一致した。流路の短期変動予測が成功した理由としては、いくつかの要因が推測される。まず、初期値化手法として用いた二次元変分法では、場を修正する際、波の伝播する方向や流れの向きに沿って非等方的に情報が伝達される (IAK99) ため、特に日本南岸の強流域で従来の手法に比べて非常に精度の高い初期値が得られているからである。また、蛇行の発達の初期段階で重要な傾圧不安定に伴う渦の生成は 1.5 層モデルでは予測できないが、観測データを同化することにより流軸の沖側にそのような渦が再現され、その後の蛇行の成長を予測できたことによる。事実、対照実験として、初期値化をせずに背景値から予報を行ったケースでは、蛇行は発生せず直進路が維持されるだけであった。一方 Case 2 においては、初期の蛇行の再現性は良いものの、蛇行が消滅して直進流路に復帰しない。Sekine(1990) や Masuda *et al.*(1999) は直進流路の維持に対する伊豆海嶺と陸棚スロープの重要性を指摘していることから、その主な原因は 1.5 層モデルでは再現できない海底地形効果のためだと考えられる。

4 まとめと議論

黒潮客観解析データの作成に向けた第一歩として、現実的な海岸線を持つ高分解能の 1.5 層有効重力 primitive 方程式モデルに海面高度計データを同化する初期値化実験を行い、黒潮短期変動予測の可能性について考察した。具体的には、Kuragano and Shibata (1997) により現場観測と TOPEX/Poseidon 海面高度計から最適内挿法を用いて格子化された絶対海面力学高度データを同化することにより、特に一ヶ月程度の流軸パターン変動の再現性に焦点を絞って、現実の黒潮短期変動予測の可能性を調べた。その結果、一ヶ月から二ヶ月程度の短期流路変動予測は概ね可能であることがわかった。特に直進路から蛇行路への遷移過程については、蛇行のピークの東進速度 (二ヶ月で約 400 km) や蛇行振幅は観測されたそれと非常によく一致し、また蛇行維持期においても、初期の蛇行の再現性は低かったにもかかわらず、その後の蛇行の予報結果は良好であった。

上述の初期値化を行った際に蛇行路の再現性が必ずしも良くない理由としては、次の三つが考えられる。まず第一に、絶対海面力学高度データのうち陸岸に近いものは使用していないため、蛇行が十分には分解できていないこと、第二に、初期値化を行う際の背景値 \bar{x}^b としてシミュレーション結果から作成した平均値 \bar{x} を用いていること、第三に、背景誤差共分散行列 \mathbf{B} の決定に変動自身の分散を利用していることである。

KS97 は海面力学高度の平均場を、TOPEX/Poseidon による観測と同時期の現場観測および気候値データから作成しているが、 $1^\circ \times 1^\circ$ の分解能では日本南岸の黒潮を再現するには不十分である。また変動成分に関しても、陸岸付近の浅い海域での海面高度計データは潮汐補正の影響などもあって精度は高くないことが知られている。事実、陸岸付近のデータも用いた予備実験では、使用したデータの量は多いにもかかわらず初期値化誤差は大きくなるという結果になった。もちろん、これには観測誤差の共分散行列 \mathbf{R} の与え方 (全観測点で誤差の標準偏差が同じ) の問題もあり、陸岸付近の観測データの精度を過大評価した結果、観測データに含まれる誤差が初期値化結果を悪化させたという側面も存在するが、蛇行発生に関する陸岸境界層の重要性 (Masuda *et al.*, 1999) を考えると、陸岸付近の浅海域での正確な海面高度計データの同化がこの問題の改善に極めて重要である。

第二・第三の理由は、本研究ではいわば表裏一体の関係にある。数値シミュレーションが現実の海洋変動を統計的には正確に再現している場合、背景値

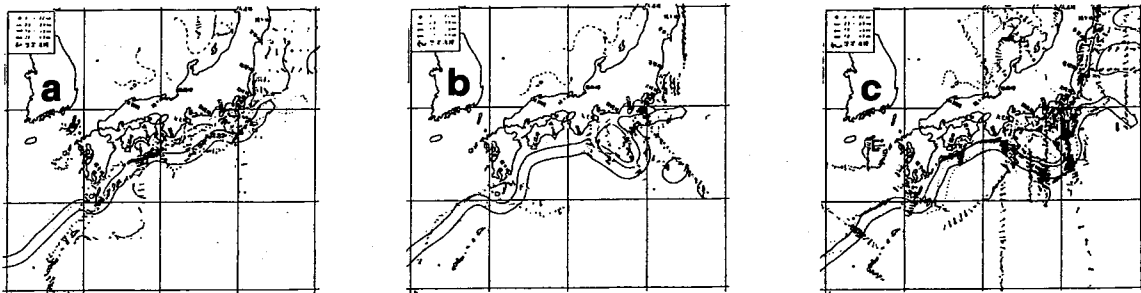


FIG. 3. Kuroshio path variation adopted from the Oceanographic Prompt Reports by the Japan Maritime Safety Agency. (a) March 3-17, 1993, (b) April 1-14, and (c) April 27-May 19.

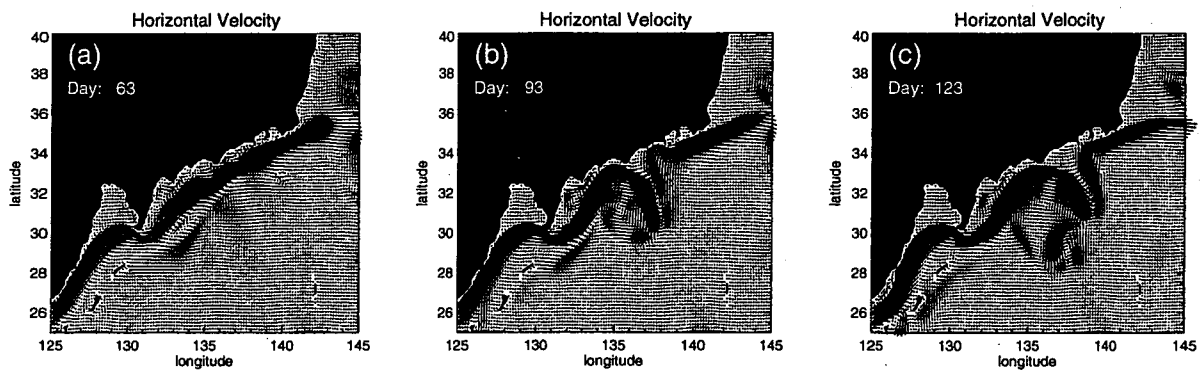


FIG. 4. Initialized and forecasted velocity fields of the case 1. (a) March 4, 1993, (b) April 3, and (c) May 3.

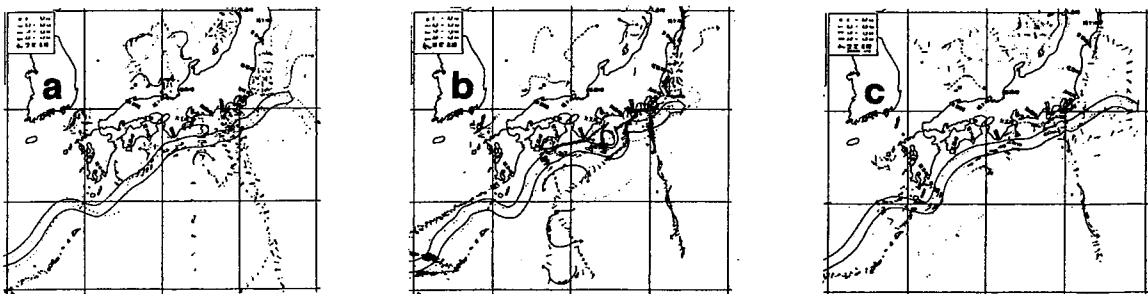


FIG. 5. As in Fig. 3 but for (a) June 1-14, 1994, (b) June 29-July 13, and (c) August 3-17.

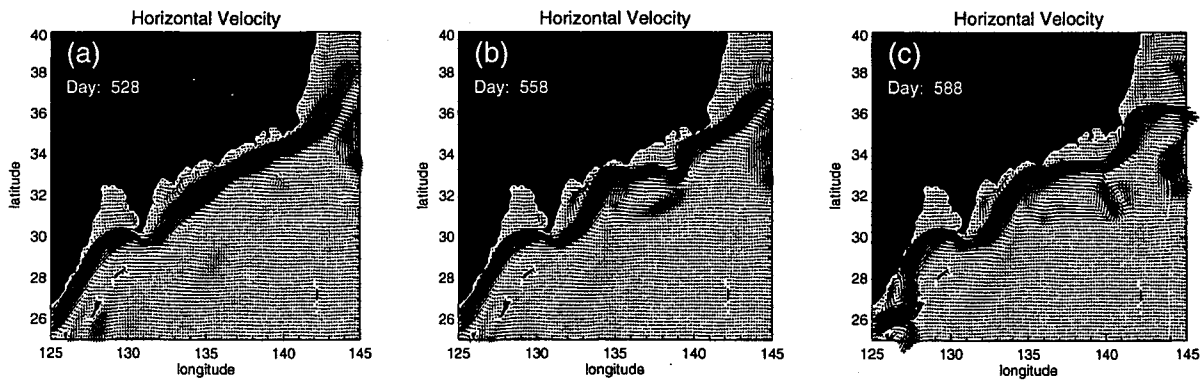


FIG. 6. As in Fig. 4 but for the case 2. (a) June 12, 1994, (b) July 12, and (c) August 11.

として平均値を用いると、背景誤差の共分散行列は変動の共分散行列に一致することになる。しかしながら今回用いたシステムでは、シミュレーション結果から計算される平均値は、観測データから推測される平均値とは大きく異なり、日本南岸では明瞭な直進路となってしまうため、変動の共分散を用いて誤差の共分散を近似することはあまり適切ではない。また、シミュレーション結果の変動の標準偏差を格子化データのそれと比較すると、続流域で2倍以上の変動を示す一方で、観測データでは八丈島の西方に見られる変動の極大が存在しない。この情報を基に誤差共分散行列を決定しているため、最適内挿法による解析値は、続流域では観測値に、蛇行域では背景値に過度に依存する。二次元変分法による初期値化結果は、評価関数の最適化を行う際の第一推定値（最適内挿法による解析値）に依存する（IAK99）ため、背景誤差共分散を変動の共分散で近似し、かつ直進路をとっている平均値を背景値として用いる限り、流軸が蛇行している場合の初期値化精度は向上しないと考えられる。このことは、背景値としてCase 1の40日予報値を用いた場合に、蛇行部の再現性がかなり向上したこと（図省略）と合致している。

最後に、「初期値化プラス十日予報」という設定で双子実験を行い、最適内挿法と二次元変分法による結果の比較・検討を行った結果について一言触れておく。本研究の二次元変分法を初期値化スキームに適用することによって、従来の最適内挿法を用いた場合に発生する重力波ノイズを効果的に抑制することが可能となり、日本南岸での h のrms誤差は最適内挿法による結果と比較して約10%減少した。さらに、直接には同化されていない流速 $u=(u, v)$ および高次の物理量である渦度 ζ に関しても、モデルの力学を媒介とすることにより、特に日本南岸の強流域において初期値化精度が大幅に向上し、rms誤

差はそれぞれ約35%、約50%減少した。この結果は、黒潮流路の変動予測に、高精度な渦度場の再現が本質的に重要である点を踏まえると、本研究の手法は、現実の黒潮変動の短期予報に対して極めて有益であることを示している。なお、本研究の数値実験は京都大学大型計算機センターのFACOM VP2600, VPP800にて行いました。記して感謝致します。

参考文献

- Akitomo, K., T. Awaji, and N. Imasato, 1991: Kuroshio path variation south of Japan 1. Barotropic inflow-outflow model. *J. Geophys. Res.*, **96**, 2549-2560.
- Awaji, T., K. Akitomo, and N. Imasato, 1991: Numerical study of shelf water motion driven by the Kuroshio: Barotropic model. *J. Phys. Oceanogr.*, **21**, 11-27.
- Bryden, H. L., D. H. Roemmich, and J. A. Church, 1991: Ocean heat transport across 24°N in the Pacific. *Deep-Sea Res.*, **38**, 297-324.
- Hellerman, S., and M. Rosenstein, 1983: Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1093-1104.
- Hurlburt, H. E., 1986: Dynamic transfer of simulated altimeter data into subsurface information by a numerical ocean model. *J. Geophys. Res.*, **91**, 2372-2400.
- Ide, K., P. Courtier, M. Ghil, and A. C. Lorenc, 1997: Unified notation for data assimilation: Operational, sequential and variational. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 181-189.
- Ishikawa, Y., T. Awaji, and N. Komori, 1999: Dynamical initialization for numerical forecasting of ocean surface circulations using a variational assimilation system. *J. Phys. Oceanogr.*, accepted.
- Kawabe, M., 1985: Sea level variations at the Izu Islands and typical stablepath of the Kuroshio. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **41**, 307-326.
- Kuragano, T., and A. Shibata, 1997: Sea surface dynamic height of the Pacific Ocean derived from TOPEX/POSEIDON altimeter data: Calculation method and accuracy. *J. Oceanogr.*, **53**, 585-599.
- Masuda, S., K. Akitomo, and T. Awaji, 1999: Effects of stratification and bottom topography on the Kuroshio path variation south of Japan. Part I: Dependence of the path selection on velocity. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 2419-2431.
- Sekine, Y., 1990: A numerical experiment on the path dynamics of the Kuroshio with reference to the formation of the large meander path south of Japan. *Deep-Sea Res.*, **37**, 359-380.

海洋地球研究船「みらい」による Sky Radiometer の観測結果

遠藤辰雄・青木一真（北大低温研）中島映至（東大CCSR）太田幸雄・上田厚志（北大工）

高村民雄（千葉大CEReS）

OBSERVATIONAL RESULTS BY SKY RADIOMETER ON OCEANOGRAPHIC RESEARCH VESSEL "MIRAI"

Tatsuo Endoh¹, Kazuma Aoki¹, Teruyuki Nakajima², Sachio Ohta³, Atsushi Ueda³ and Tamio Takamura⁴

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University¹, Center for Climate System Research, University of Tokyo², Graduate School of Engineering, Hokkaido University³ and Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University⁴

要旨: スカイラディオメータでは大気層全体を積分した大気エアロゾルの混濁度を測定する。この計測の試験観測を海洋地球研究船「みらい」にて行ない、この測器の船舶上での完全無人化に必要な問題の試験を行なった。平行して行なった観測項目と測器は以下の通りである。海上大気中の0.3ミクロン以上のエアロゾルを測定するパーティクルカウンター、大気エアロゾルによる散乱光の角度積分値を測定するINTEGRATING NEPHELOMETER、大気エアロゾルの可視光線の吸収係数をもとめるABSORPTION METER等である。この観測では、船舶観測用に設計したモジュールによる自動観測試験も行なった。得られた結果から見ると海上大気のエアロゾル濃度は全航海の初期の高緯度帯ではエアロゾル濃度が高く、後半の赤道付近ではこれが極めて低い濃度であり、海洋上で見られるエアロゾルのバックグラウンド値であった。前半の高濃度は大陸からの工業排気の影響と黄砂の飛来の可能性が考えられる。この初めの高濃度に対してスカイラディオメータによる光学的厚さ(混濁度)は後半の測定値と大きな違いは無く、大気全層と地表大気における構成が異なることを示しており、ライダー等のプロファイルとの比較が切望される。

Abstract: To improve and build up a sky radiometer for measuring optical characteristics of atmospheric aerosols into a completely automated instrument on board ship, some trial and test observations were carried out on RV "MIRAI" during 7 Feb to 10 March 1999 over the ocean area from Sekinehama harbor to the west tropical Pacific ocean. Simultaneously observed items and instruments were size distribution of giant and large particle aerosols, integrated scattering coefficients and absorption coefficients with Particle Counter, Integrating Nephelometer and Absorption Photometer. Over the middle latitude ocean area on the former way of the cruise (RM99-K01), the concentration of aerosols and other coefficients were observed relatively higher than those over the lower latitude ocean area of the latter way of the cruise, although such large discrepancies were not seen in optical thickness with sky radiometer. It may be considered that higher concentrations of aerosols observed were brought by air streams from east coast of Chinese continent with industrial pollutants and/or Asian dust-storm particles.

1. はじめに

地球温暖化に及ぼす大気エアロゾルの直接的効果としての放射強制力が正確に評価されなければならない。衛星観測によるリモートセンシングデータから大気エアロゾルによる混濁度に相当する光学的厚さを地球規模の水平分布図として作成しているが、現在のところ海洋上についてのみ、一応有意な解析が進められているところである。その理由は、陸上の表面は複雑で時空間変動が大きいのに対して、海洋表面ではアルベドも小さく、広域に亘って時間的にも一様性が期待されるなどの有利な条件があるからである。したがって、当面はリモートセンシングデータの検証更正に関する地上観測は大洋上でなされるべきである。孤島でさえ陸の地勢に相当する影響で危められることが分かっている。NASAを初めとして、地球上に60点ぐらいの観測点が展開されているが、それらはすべて陸上局か孤島の上である。大洋上の観測を獲得してその数を増やすのに苦慮しているところである。

孤島でもコンタミを受けるとなると、もはや航行中の船舶での観測以外には考えられないことになる。ところが太陽光を追跡する光学的な精密な観測を動揺する船舶の上で実行することには本質的に困難な問題が多くあり、これを将来は海洋上に早急に多数で展開するには、どうしても完全無人化する必要がある、その為にも、実績経験を増やしながらかこれらの問題を一つづつ解決して行く必要がある。

2. 観測方法

上記の目的の準備観測を展開するためには、初めは観測研究船で試行するのが便利であると考えられ、海洋科学技術センターの海洋地球研究船「みらい」において他の各種の観測とともに、それを実施した。観測はRM99-K1(1999年2月8日~3月10日)と RM99-K4(1999年7月23日~8月19日)

の二つの研究航海において行われたが、ここでは主にRM99-K11に関する観測結果を報告する。

使用した観測機はスカイラジオメータ、パーティクルカウンタ、Integrating Nephelometer、Absorption Photometerと、更にこれらを一体化して収納するために開発したモジュールも試験した。その中にはほとんど同種の測定機器を別一式入れて動作試験を試みてみた。

スカイラジオメータは太陽を自動追尾して、その直達光と周縁散乱光(青空光)を太陽からの角度毎に7枚のフィルターを通して7種類の波長毎に測定し、これらの1連のデータセットからコンピュータによる計算処理を経て、大気層全体のエアロゾル濃度による混濁度に相当する「光学的厚さ」と、それらの粒径分布による「波長依存性」等を求めることができるものである。これらの二つの光学的因子は大気的全層を積分した効果であるので、地球温暖化に対する放射強制力の計算評価をより正確にできる直接値でもある。さらに人工衛星からのリモートセンシングによる、この同じ光学的因子の測定データも、やはり大気的全層を積分した値であるので、それと比べて検証更正することから、エアロゾルによる地球温暖化に対する放射強制力の地球規模の正確な評価を進める目的で現在世界中で開発研究を進めている最中のものである。

このリモートセンシングのデータとの検証更正には、表面の性質が複雑な陸上でなく、アルベドの小さい上に広域に亘って時空間的に一様な海上における観測値に対して進めなければうまく行かないことがだんだん分かってきたところである。孤島ですら光学的には地勢の影響が入って来るので、これには広い大洋上の船舶による観測しか無いと考えられる。しかるに、船舶は動揺する事の方が多いので、このような精密な光学的観測を進めることは、ほとんど不可能に近いことである。さらに、これまでのこの種の観測機器を船舶上で完全無人で使用するには、種々の問題もある。その一つは、海上における自他船舶からの影響であり煙突からの排煙が装置の上に掛かること、また荒天時に発生する波飛沫による海塩粒子の影響などをモニターするために大粒子のエアロゾルの粒径分布を測定するために、パーティクル・カウンターをコンパステッキ前方に設置した。大粒子の導入管壁による損失を軽減する為に、取り入れ口と測定機を接近させて、コンパステッキに防風ケースを設け、その中に格納し、信号を30mの光ファイバーのRS232Cで調査指揮室内のパソコンに接続して記録した。

一方、これらの観測をまとめて行なうためのモジュールを設計試作したので、その動作特性や問題点も報告する。

3. 結果と議論

観測された航路は図1に示される通りである。それは緯度経度で示しているが、北から南へのコースで、まず母港の関根浜を出て、八戸から国外に出港しグアム経由でホニアラで下船するまでの観測である。図に黒丸で示すところが観測時間帯で、それぞれ日昼に相当しその長さは移動速度の速さを示している。実際の観測値は船の動揺をモニターしている内臓の水平センサーによる測定値の分散度等から判別して、観測値の品質が17段階で評価されている。この黒丸のなかには観測値から直接計算できるものと統計的補正式から計算で求める必要のあるものをまとめて表示してある。

図2では、SkyRadiometerの観測値から直接計算された、波長500nmの太陽光に対する大気全層のエアロゾルによる

光学的厚さ(AOT500)とその波長依存性(Alfa)が、それぞれ黒丸と白丸で示されている。縦軸は図1の縦軸と同様に緯度であり、観測された海上の位置を南北の経線に投影したものに相当する。一方、このコースに沿って観測された海面付近の下層大気中に含まれる大粒子エアロゾルの(積算)粒径ごとの濃度を緯度に沿って示したのが図3である。

図3に示す海上大気のエアロゾル濃度の粒径表示は 5, 2, 1, 0.5, 0.3 μm の5段階であるが、それはその粒径以上の粒子の数濃度を1リットル当たりの個数で示しており、その値は横軸に記す通りである。それによると、北緯32度から23度まで南下する海域で0.3 μm 以上で0.5 μm までのエアロゾル粒子の濃度に、顕著な高まりが認められている。しかし、それより南の海域(例えば北緯14度から5度まで)では、その高まりは見られず、むしろ0.5 μm 以上の巨大粒子に一樣に2-3倍の高まりが認められている。この2つの海域は前者が偏西風帯に、また後者は偏東風帯にそれぞれ属していて、前者では中国大陸からの工業排気や黄砂の流出に遭遇したものであると考えられ、後者は海洋上を長時間滞留して来たエアロゾルの成長したものか、或はそれと海塩粒子とのコンポジットなど、いわゆる海洋上のバックグラウンドのエアロゾル粒子であると考え、これらを説明することができる。

ところが、図2に示す、SkyRadiometerにより観測された大気エアロゾルの光学的特性を見ると、上述の前者の北緯32度から23度までの海域の光学的厚さ(AOT500)は後者の北緯14度から5度までの海域のそれより高くなって、むしろ後者の海域の方に高い光学的厚さの値が多く認められる。波長500ミクロンの光ではそれより小さい粒径のエアロゾルを光学的厚さに計算されないと推定されるので、これらはライダーなどの観測によってエアロゾルの鉛直プロファイルと比較して議論する必要がある。更に波長依存性(Alfa)を見ると、前者は小粒径が卓越し、後者では大粒子が卓越する傾向を示している。前者の高まりは、発生して間も無い若い人為起源の汚染粒子であって黄砂ではないと、また後者は海塩性の巨大粒子であることがそれぞれ示唆される。

4. 終わりに

これまで5年間に国内沿岸フェリー等を利用して、メーカーと共に試行錯誤の改良を繰り返してきた。その結果、今回の「みらい」における船上試験観測(1999年2月~3月と7月~8月までの合計2ヶ月間)により、船舶用のスカイラジオメータを完全無人化することに成功したと最終的に確信をもって言える段階に至った。それらは以下にまとめることができる。(1)水平から5度以内の動揺に対しても、レスポンスよく太陽を追跡することが出来るようになった。(2)雲や曇天による自動休止したり、再び晴れた時にも速やかに自動復帰することが、魚眼レンズ付CCDカメラを付加して太陽を検出することによって順調に行なえる様になった。(3)停電復帰時にも自動復帰し、直ちにGPSセンサーによって、正確な位置(経緯度)と時刻(世界時)と更に船首方向を計算し、観測を再開することが出来る。(4)停船中にも先のCCDカメラにより太陽をとらえて観測を継続することもできる。(5)この機械は156.8MHzのマリンバンド16チャンネルに干渉を与える電波を発生することが最近になってから見つか、船舶搭載が苦慮されていたが、今回の船上試験で、その発生源が特定され、その防除の対策がとれる見通しがついた。

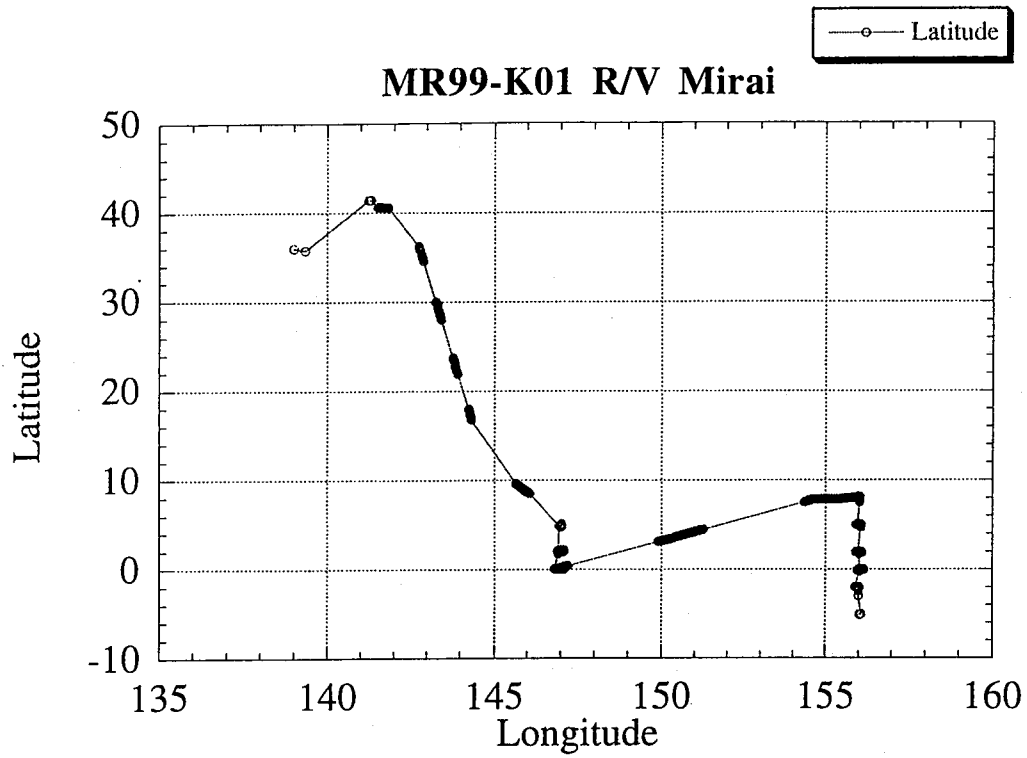


図1 RM99-K01の航路図とスカイラディオメータの観測領域

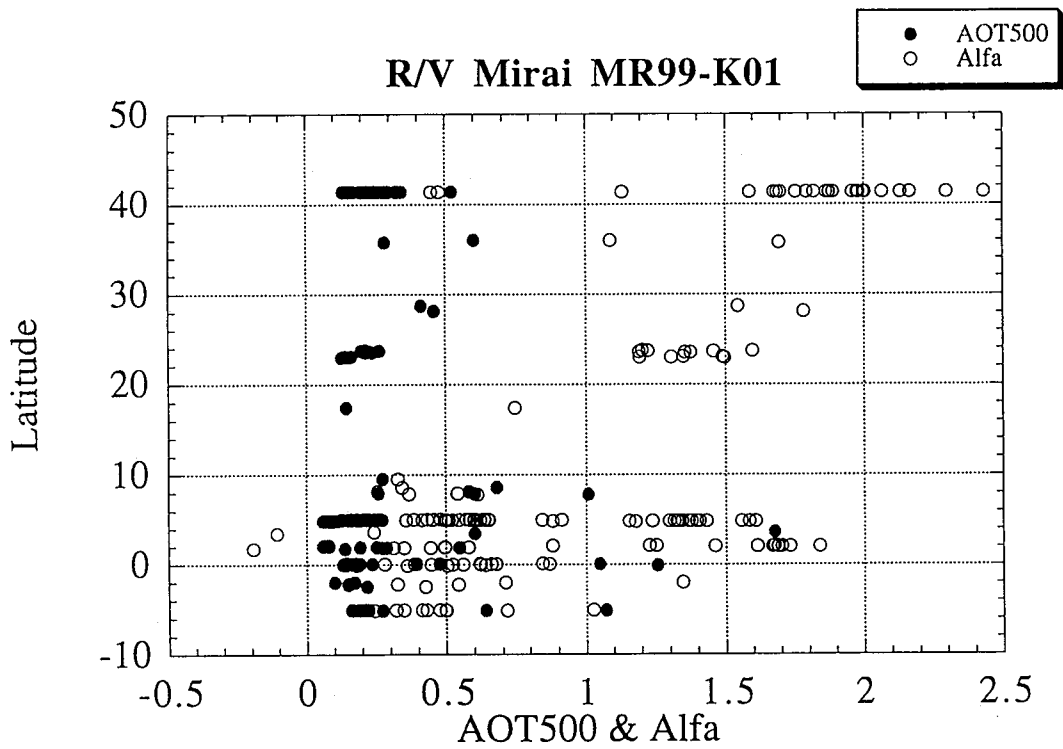


図2 スカイラディオメータにより観測された大気エアロゾルによる光学的特性

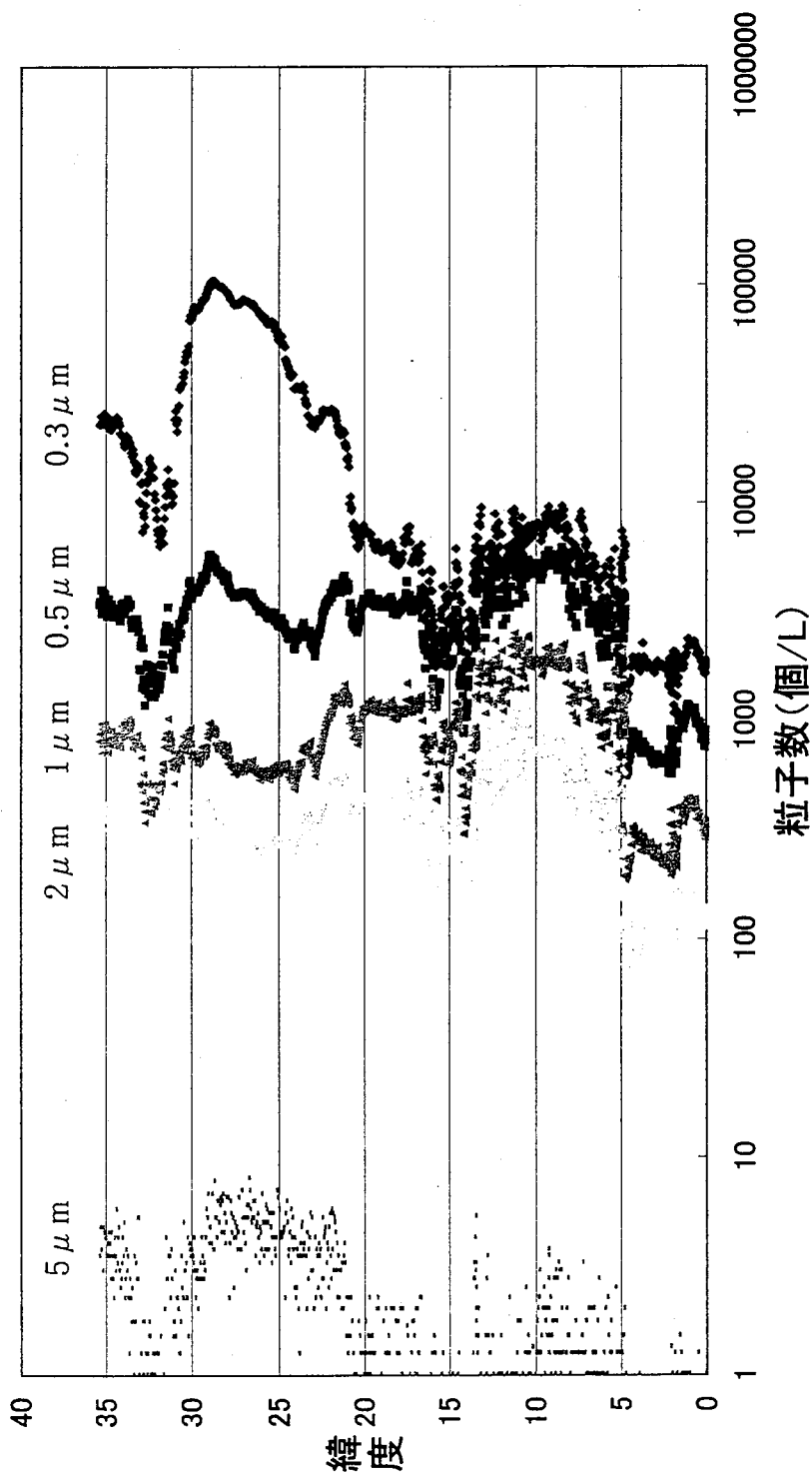


図3 パーティクル・カウンターにより測定された海上大気中の
大粒子エアロゾルの積算粒径別濃度の緯度分布

鹿児島湾横断フェリーによる水温・塩分の連続測定

(The Measurement of Sea Surface Temperature by Ferries which crosses in Kagoshima bay)

櫻井 仁人 (鹿児島大学 工学部)

sakurai@oce.kagoshima-u.ac.jp

Abstract

Kagoshima bay is about 75 km long in the north direction and 21 km wide in the east direction. The exchange of sea water between Kagoshima bay and the open sea occurs through such a small cross sectional area. Distribution of sea surface temperature (SST) across the Kagoshima bay has been measured by a thermometer installed on ferries.

When there is sudden rise in the SST along eastern part of Yamagawa - Nejime line, there is a delay of 1~3 days before the SST along the eastern part of Kamoike - Tarumizu line goes up. This expresses the inflow of warm water. Also, the SST change of the ferry and image of NOAA , too, correspond well.

The results show that continuation of measurement of SST distribution across the Kagoshima bay provides a good tool for monitoring.

1.はじめに

九州の南端に位置する鹿児島湾は南北に約 75 km、湾口幅 10 kmと細長い。また、湾内の海底地形は複雑で、2つの鞍部によって湾奥部、湾中央部、湾口部に分けられる。このような地形から鹿児島湾は海水交換がされにくい湾と考えられる。また、近年鹿児島市を中心とする人口増加により、生活排水やハマチなどの養殖による余剰餌の大量堆積が赤潮発生の原因ともされている。このような状況から鹿児島湾の海水交換のメカニズムを知ることは、研究上だけでなく社会的に非常に重要なことと考えられる。

湾内に流速計を多数設置すれば最良の方法かも知れないが輻輳する船舶や、漁船を避けての測定は多大な困難が伴

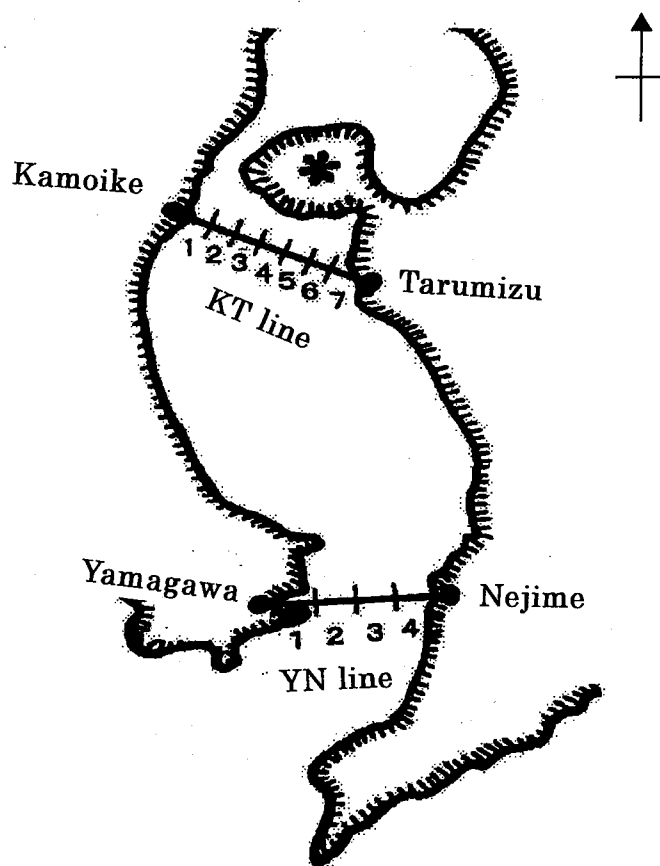


Fig.1. Observation lines.

いなかなか難しい。そこで、既存のデータを利用することが出来れば都合がよい。その一つとして、鹿児島県水産試験場がフェリーで測定している表面水温がある。ただ、これは湾を縦断しているので南北方向は分かるが、東西の違いについては分からない。そこで東西方向の変動についても知ることを目的としてFig.1のように湾内を横断している2つの航路のフェリーに水温・塩分計を取り付けさせてもらい、1997年10月から観測を開始した。これも一つのリモートセンシングと考え、その観測経過を報告したいと思う。現在もデータは取得中である。

2. 資料と解析方法

1997年10月から南海郵船(株)所属の山川～根占間を1日平均6往復航行するフェリー「第五おおすみ」と鴨池～垂水間を1日平均10往復航行するフェリー「第八おおすみ」に水温・塩分計を、エンジン冷却用送水管の中に設置し海水の温度と塩分濃度の記録を取得している。水温・塩分計で約3m深の海水を1分毎に記録し、データの記録可能な約20日おきに交換する。

フェリー「第五おおすみ」は山川～根占間、約12kmの距離を40分で航行するので、山川から3kmおきに1～4ブロックに分け10分間のデータを取り、フェリー「第八おおすみ」は鴨池～垂水間、14kmの距離を35分で航行するので、鴨池から2kmおきに1～7ブロックに分け5分間ずつのデータを取り、それぞれのブロック別の1日平均を計算した。また、鴨池～垂水間をKT線、山川～根占間をYN線とし、それぞれのブロックの数値をKT.1、YN.5等で表現する。

われわれが機器に馴れていないためか不良のためか欠測が多い。特に、塩分に欠測が多い上に信頼に足る精度に疑問が生じたので今回は水温を中心に報告する。また、フェリー運航上の都合によりデータを回収できないことがあった。

得られたデータの整理が複雑なため、今回は主に今年3月ころまでを中心に報告する。

3-1. 日平均水温の季節変化

ここでは1997年10月から1998年1月までの約1年4ヶ月について解析した。Fig.2に1998年の1年間の2測線における各観測点の水温記録を示す。

表面水温は最低水温を示す2月の15℃から最高水温を示す8月の31℃まで年較差16℃で変化している。また、水温の上昇期が変動が大きい。特に、6月から7月にかけては半月で6℃ほど急昇しているのに対し、夏から秋に向かう下降期はなだらかである。鴨池～垂水間(KT)、山川～根占間(YN)とも各測点で大きい違いはなく変動の傾向は似ている。ただ、水温値は年平均がYNで23.54℃、KTで23.46℃であり、ほぼ同じ水温値を示している。測点別ではKT.1が最低で23.11℃、最高がYN.3の23.72℃で差が0.6℃であった。

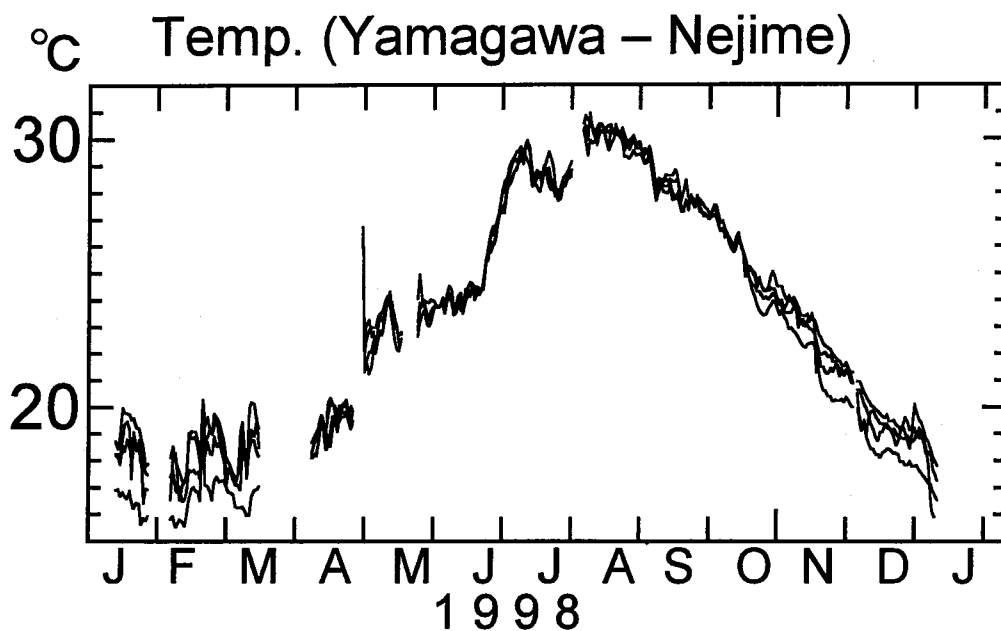
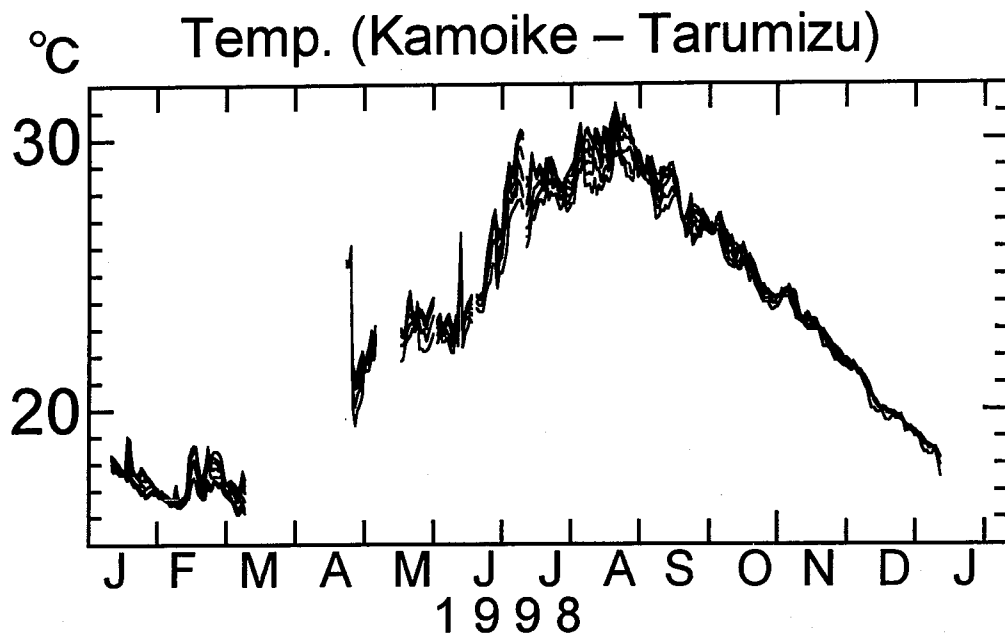


Fig.2. Temporal variations of SST at KT.1~7 and at YN.1~4.

3-2. 水温の短周期変動

Fig.2の日平均水温を見るとゆるやかな変動の上に短周期の変動が重なっている。特に冬季におけるYN線で変動が大きい。3月は欠測が多く判断できないが1月、2月にYN線、KT線とも短周期の水温の急昇がみられる。そこで、2月につき湾の東側のKT.6とYN.3をFig.3に示した。過去の研究で外洋暖水が急潮的に湾口東側から流入してくることが示唆されていたがこの図でも、YN.3で2月13日に1.8℃、19日に2.5℃の急昇が見られる。KT.6も大まかな変化は似ている。特に急昇のときにはYN線から1日から3日ほど遅れて昇温している場合が見られる。この場合には、外洋水が湾の奥まで流入していったと考えられ、YN線のみが昇温している場合は湾奥まで達していなかったと思われる。

単純計算してみるとYN線、KT線の距離が南北約26kmであるのでYNから1日後にKTへ達したとすると約30cm/sの速度となる。

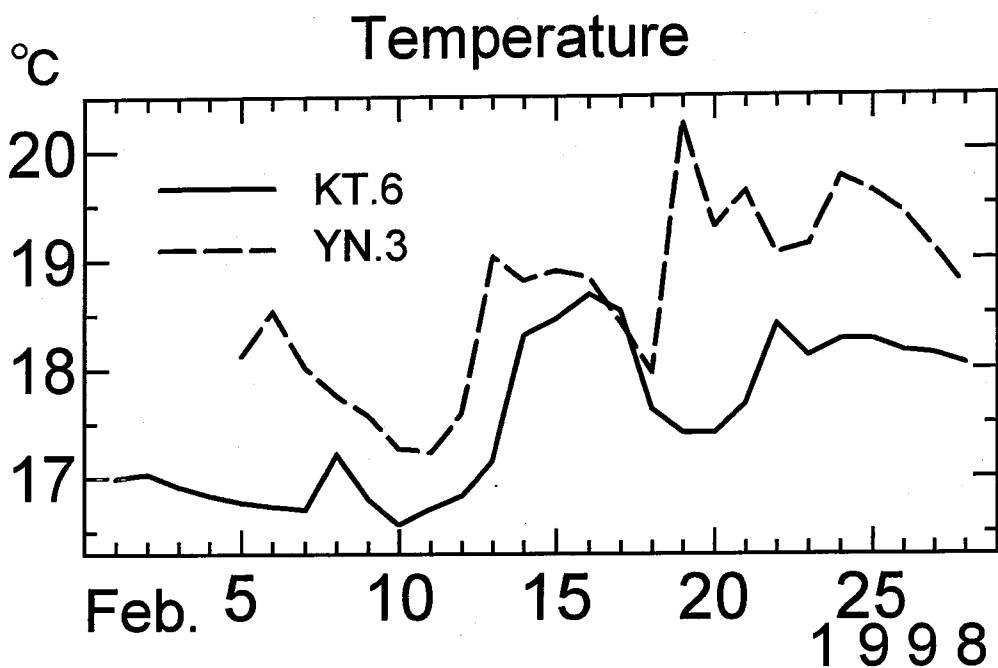


Fig. 3. Variation of daily mean SST at KT.6 and YN.3. Feb, 1998

3-3. NOAAの水温分布との比較

暖水の流入をみる手段として厳しい精度を要求しないならNOAAの表面水温 (SST) が使える。ただ、雲の存否で影響を受けるので実際は思ったほどは手に入らない。その中でフェリー水温とNOAAデータが同時期にあった1997年11月~12月について比較した。例をFig. 4に示す。NOAAのSST分布でみると11月23日ころ湾口付近に22°Cの暖水が流入している。これが27日になると湾奥まで暖水が東側を舌状に流入している。これをフェリーの測点YN.3とKT.6の差で見ると23日には4°Cあった差が27日には2.5°Cと差が小さくなっていった。次に12月25日のNOAA画像では20°Cを先端とする暖水が根占付近まで流入しているのが見られるが、3日後の28日になると20°Cが湾奥まで達している。この間のYN.3とKT.6の水温差を見ると11月ほどではないが25日1.5°Cあった差が28日には0.2°Cとなりほとんど差がなくなっていた。

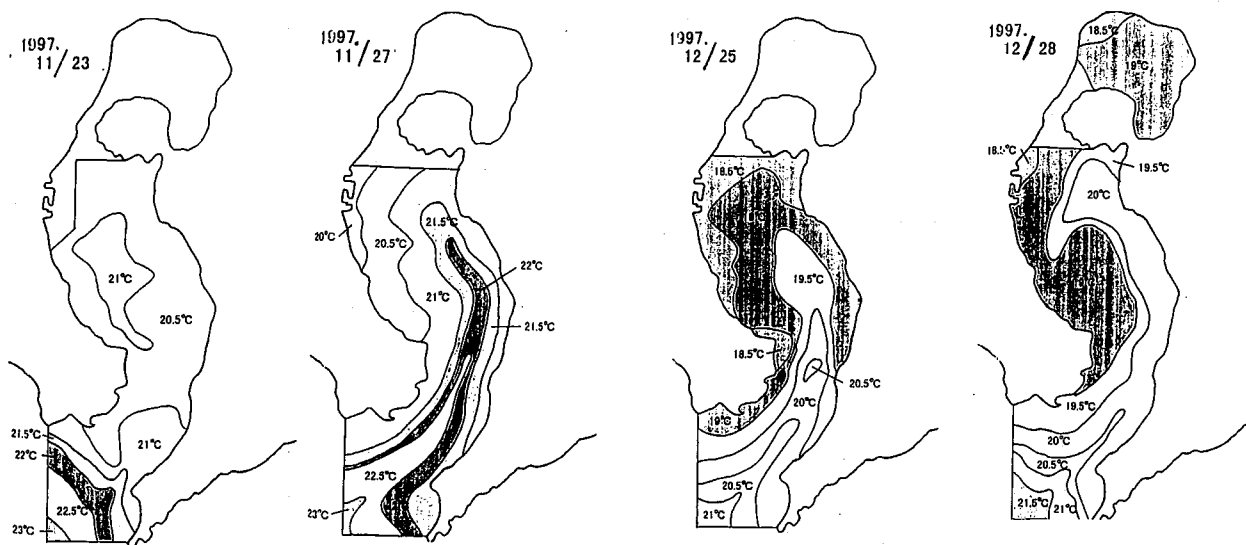


Fig. 4. Distributions of SST by artificial satellite NOAA.

対比させる資料が少ないので確定的には言えないが2測線の観測からある程度暖水流入がモニターできることが分かった。

3 - 4 湾の東西の水温差

フェリーは湾を東西に横断していることから両側線におけるそれぞれの東西差を求めた。また、塩分の絶対値には検討の余地があるが差を取った相対値は変動を表していると考えて図にした。Fig.5の図によるとKT線では水温・塩分とも夏季に変動が大きく冬季に小さい。逆にYN線では冬季に変動が大きく夏季に小さい。KT線では東側で水温が高いときには塩分も高いという同位相の傾向がみられる。また、夏季に東西差の水温ジャンプが顕著にみられる。4℃程の急下降があると数日継続しその後急上昇のジャンプが起こることが何回か繰り返されている。全期間では0.4℃東側が高温であった。

YN線はKT線ほどの大きい水温差はなく最大でも2℃でありそれも持続性がない。1月から7月中旬ころまでは東側が高水温・低塩分である。それ以後はあまり差はなくなるが傾向としてはやや東が低温・低塩分のようなのである。

これらの傾向が26km離れた測線でどうして異なるのか検討中である。

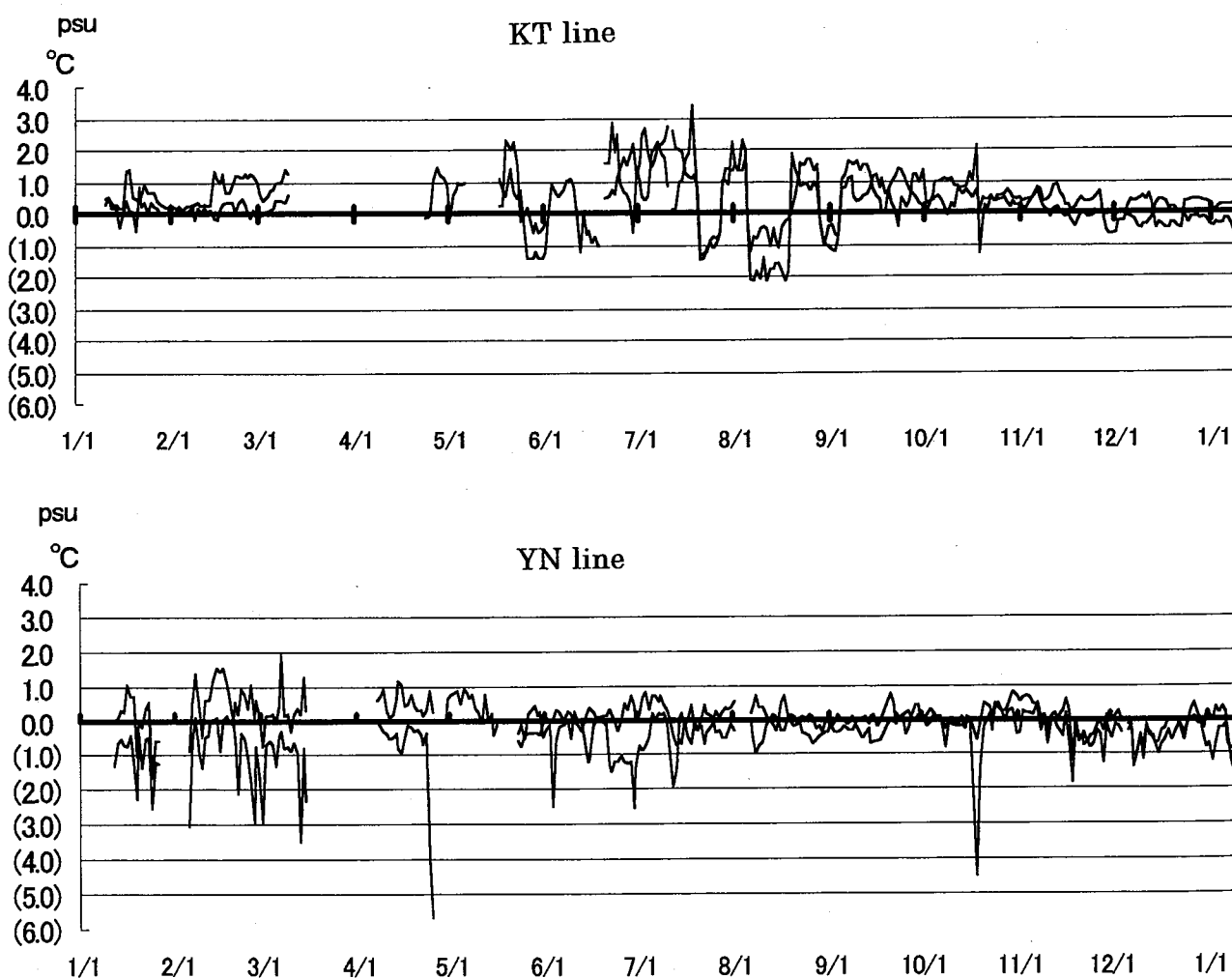


Fig.5. The sea-surface temperature difference and the salinity difference of the observing point on the east and west in the Kagoshima bay.

4. まとめ

最初に記述したように今回は観測開始から1年4ヶ月分について検討した。これから分かったことは①年変化はどの観測点も同じ傾向の変化をしている。②湾口の測線で水温の急昇のあと湾奥に到達する場合としない場合があり、到達する場合は1日～3日後である。③NOAA画像とフェリー水温の比較検討は事例が少ないがNOAAでみられる暖水流入がフェリー水温にも現れていた。④YN線では東西で水温の大きい差がないのに対してYN線では特に夏季に大きな差が現れた。これらを踏まえ、今後は湾を縦断しているフェリーの水温も合わせ、検討していくつもりである。

Lidar と Sky radiometer による巻雲とエアロゾルの観測

Lidar and Sky radiometer measurements of cirrus cloud and Aerosol

青木一真、西川寛子、藤吉康志(北大・低温研)、
杉本伸夫、松井一郎(国立環境研)、橋口浩之(京大・超高層)

kazuma@lowtem.hokudai.ac.jp

Kazuma Aoki, Hiroko Nishikawa, Yashushi Fujiyoshi,
(Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo)

Nobuo Sugimoto, Ichiro Matsui,

(National Institute for Environmental Studies, Tsukuba)

Hiroyuki Hashiguchi

(Radio Atmospheric Science Center, Kyoto University, Kyoto)

Abstract

We started the long-term monitoring of aerosols on July 1997, by using a sky radiometer set on the roof of our institute. Aerosol particles scatter light from the sun and cause enhanced bright regions surrounding the solar disk in cloudless conditions. This region is called as the aureole. The sky radiometer is a spectral scanning radiometer and measures both the direct-solar and circumsolar radiation. The sky radiometer permits continuous measurement of the volume size distribution, the aerosol optical thickness and the single scattering albedo of vertically integrated atmospheric aerosols. We started the monitoring of aerosols and cirrus clouds on February 1999, by using a Mie Lidar. Vertical profiles of aerosols and cirrus clouds are obtained by Lidar measurements. We briefly introduced the sky radiometer and some results obtained in this two year.

1. はじめに

大気エアロゾルによる気候影響は、エアロゾル粒子そのものが散乱や吸収を起こすことによる直接的効果と、エアロゾル粒子が雲核となって働く間接的効果がある。このようなエアロゾルや雲による変動や気候への評価は、最近のリモートセンシングの発達⁽¹⁾や気候への放射強制力^{(2), (3)}といった立場から報告されるようになり、その評価も徐々によくなってきている。しかし、時間・空間的変動が大きという特徴を持ったエアロゾルや雲の評価は、未だ不確定な量が多く、これからの研究課題が多いと考えられる。

そこで我々は、地上による観測から、エアロゾルや巻雲の時間・空間的変動について精度よく定量的に把握することを最初の目標として、研究を進めてきている。今回は、札幌におけるエアロゾルの季節変動と巻雲に関わる影響などを中心に報告する。

2. 観測と解析

1997年7月より現在まで、札幌(北海道大学・低温科学研究所、屋上)にて、太陽直達光と周辺光を7波長(エアロゾルチャンネル:400, 500, 675, 870, 1020 nm、水蒸気チャンネル:940 nm、オゾンチャンネル:315 nm)で測定できるSky radiometer(Prede Co., Ltd.: Fig. 1)により連続観測を行っている。また、Lidar(Mie lidar: 532 nm)は、1999年2月より観測開始し、札幌や京大MUレーダー観測所などにより観測を行っている。Sky radiometerは、晴天時の10分おきに1回、太陽直達光と周辺光を測定している。雨天時には、鏡筒に雨が入らないように雨センサーを取り付けて鏡筒が下を向くように設計されている。観測から得られた太陽直達光と角度別の周辺光の比を取り、Eq. (1)のように規格化した放射輝度を定義し

て、インバージョン法⁴⁾により、粒径分布や光学的厚さを計算した。

$$R(\Theta) \equiv \frac{E(\Theta)}{Fm\Delta\Omega} = \omega\tau P(\Theta) + r(\Theta) \equiv \beta(\Theta) + r(\Theta) \quad (1)$$

ここで、 $E(\Theta)$ は、太陽周辺光の放射輝度、 F は、太陽直達光の放射輝度、 m は、大気光路長、 $\Delta\Omega$ は、測器の立体視野角、 ω は、一次散乱アルベド、 τ は、光学的厚さ、 $P(\Theta)$ は、散乱位相関数、 $r(\Theta)$ は、多重散乱の寄与である。Table. 1 は、計算パラメータの詳細である。

Table. 1 Details of the calculation parameters

Aerosol complex refractive index	
$m = m - ki$	1.50 - 0.01i (rural)
	1.55 - 0.01i (dust)
Observation angle	
	0.0 - 160.0 degree
Used of the scattering angle	
	3.0 - 30.0 degree
	(3.0, 4.0, 5.0, 7.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0)
Volume size distribution of the aerosol particles in the radius interval	
	0.02 - 10.0 μm
Ground albedo	
	0.1 for each channel
	0.4 (winter season; Snow)

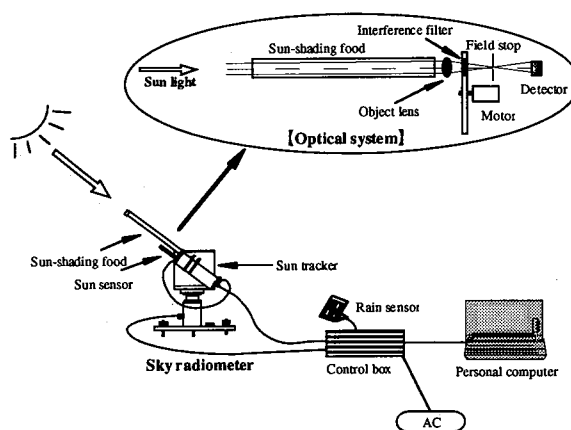


Fig. 1 Geometry of the sky radiometer system.

3. エアロゾルの時空間変動

Fig. 2 は、1997年7月から1999年10月までの札幌における500 nmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT500)の月平均値とその月の一番最小値を10倍にしたもの、オングストローム指数(ALFA)の月平均値、一次散乱アルベドの月平均値をプロットしたものである。500 nmのエアロゾルの光学的厚さは、春に高く、秋に低い傾向が示され、季節変動が見られた。また、月平均値と月最小値の変動は、必ずしも一致することにはなかったが、大体の傾向は似ているように思われる。オングストローム指数の変動は、はっきりした季節変動は、見られなかったが、春先の雪解け後によるローカルな砂塵の影響や長距離輸送による砂塵の影響で、値が低い傾向がみられた。一次散乱アルベドは、夏に最大のピークが見られ、冬にも小さいなピークが見られた。Fig. 3 は、1997年7月から1999年10月までの札幌における500 nmのエアロゾルの光学的厚さ(AOT500)とオングストローム指数(ALFA)の関係についてを季節ごとに分けて示したものである。冬と春は、負の相関が見られ、夏と秋には、正の相関と負の相関が組み合わさったものが見られた。どの季節も光学的厚さが高くなる時は、オングストローム指数が低くなる傾向が見られ、大気が混濁してくる原因として、大粒子の影響が大きいと示唆される。

4. エアロゾルと巻雲の効果

Fig. 4 は、1997年7月から1998年12月までの札幌における、Eq. (1)のように直達光と周辺光から求めた500 nmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係(黒色の点:真ん中)と、直達光のみでサンフォト法によって計算された500 nmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数の関係(薄い灰色点)をプロットしたものである。前者は、雲の影響も除去しており、例えば、直達光に雲がかかっている時はもちろん、直達光に雲がなくても周辺光に雲がかかっている場合は、計算をしていない。後者の場合は、測器がある数値より大きな放射輝度を測定するようになっており、測定された全データ

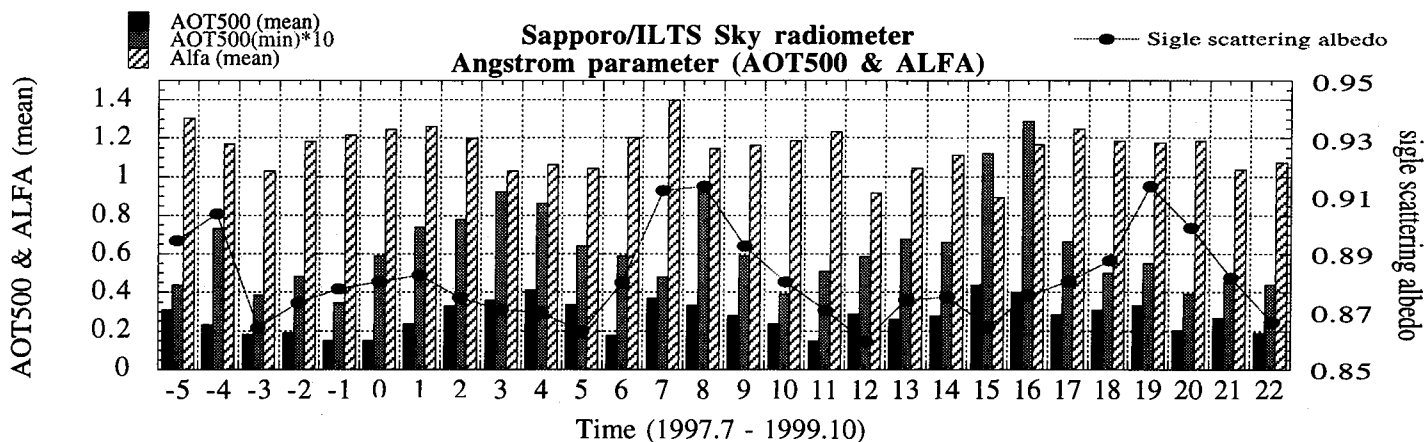


Fig. 2 The change with time of monthly averaged Aerosol optical thickness at 500nm (AOT500), Angstrom exponent (ALFA), Single scattering Albedo and monthly minimum Aerosol optical thickness at 500nm from July 1997 to October 1999 in Sapporo

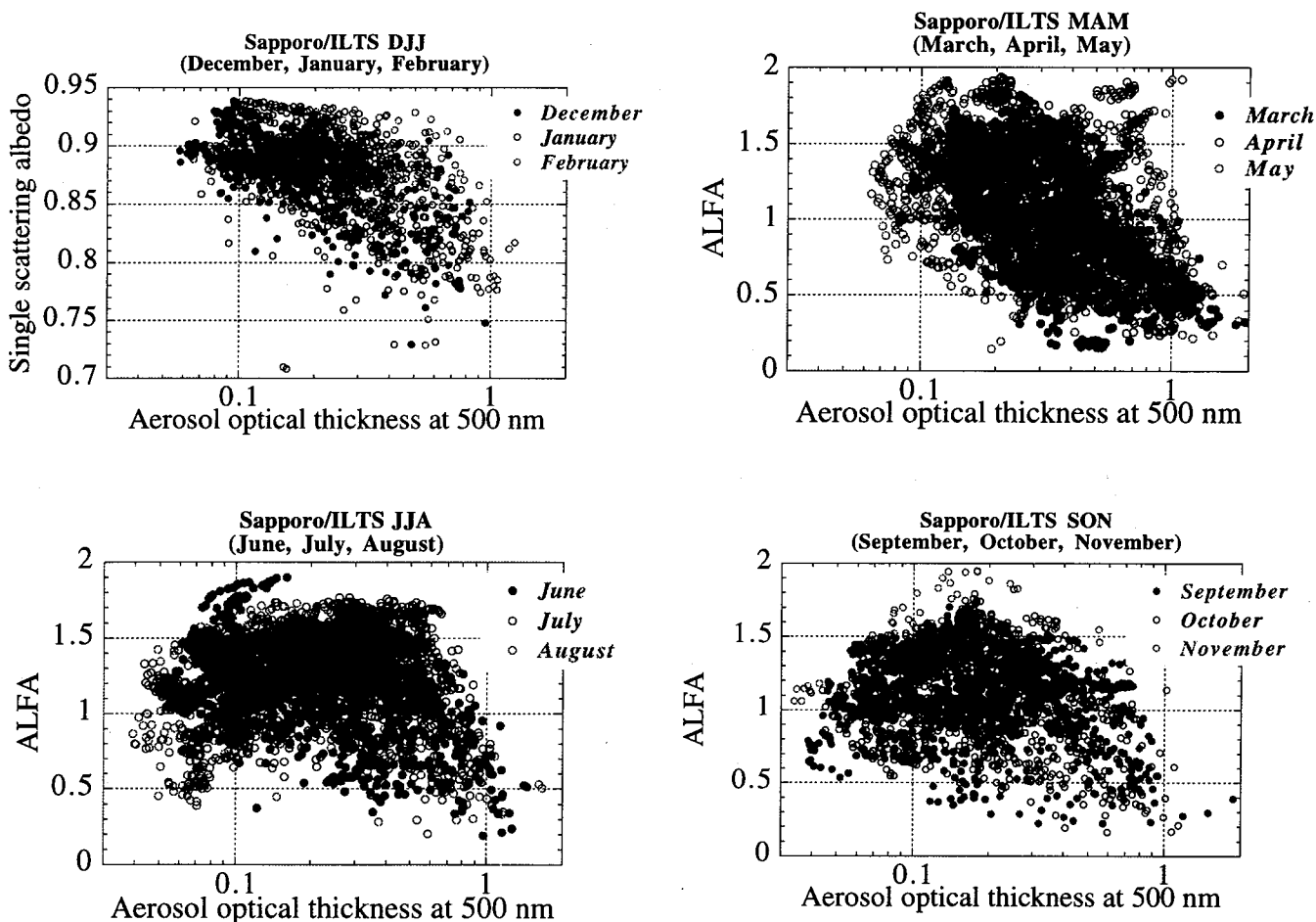


Fig. 3 Seasonal variations of Angstrom parameter from July 1997 to October 1999 in Sapporo

を解析したものである。前者は、全データを解析した後者のうち、札幌の2年間余りの観測結果では、約37%しかなかった。光学的厚さが高く、オングストローム指数が0以下のような小さいところでは、雲の影響が起因していると考えられるが、光学的厚さが小さいところでは、周辺光に雲があったなどの理由により、解析が行われたかった部分があったことが示された。

ここでは示しませんが、発表では、Lidar から得られたエアロゾルと巻雲の鉛直分布の結果も Sky radiometer の結果と比較しながら示す予定である

5. まとめと今後の課題

500nm のエアロゾルの光学的厚さ、オングストローム指数、一次散乱アルベドの時間変動は、光学的厚さが、春に高く、秋に低い値を示し、光学的厚さとオングストローム指数との関係からも季節変化の様子がみられた。また、春や冬には負の相関が、夏や秋には正と負の相関が合わさったものが確認された。一次散乱アルベドは、夏に最大、冬にもう一つ小さなピークが見られた。また、周辺光を使った計算が、全体の約37%しか計算することが出来ていないので、雲による影響については、これからの課題となろう。Sky radiometer から得られた情報は、大気一層として考えているため、鉛直分布の情報は得ることが出来ない。そのため、Lidar を組み合わせることにより、より詳細な時間・空間分布について議論する必要があると思われる。現在、Link-J グループ (<http://info.nies.go.jp:8094/kosapub/>) では、そのような組み合わせた観測について、まず、春先の黄砂現象に着目して研究を進めている。

Reference

- (1) Nakajima, T., A. Higurashi, K. Aoki, T. Endoh, H. Fukushima, Member, IEEE, M. Toratani, Y. Mitomi, G. B. Mitchell, and R. Furuin, 1999: Early phase analyses of OCTS radiance data for aerosol remote sensing. *37 IEEE Trans. Geosci. Remotesensing*, 1575-1585.
- (2) IPCC 95: Climate change 1996: *Univ Press*, pp.572.
- (3) Hansen, J. E., M. Sato, A. Lacis, R. Ruedy, I. Tegen, and E. Matthews, 1998: Climate forcing in the industrial era. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **95**, 12753-12758.
- (4) Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *App. Opt.*, **35**, 2672-2686.

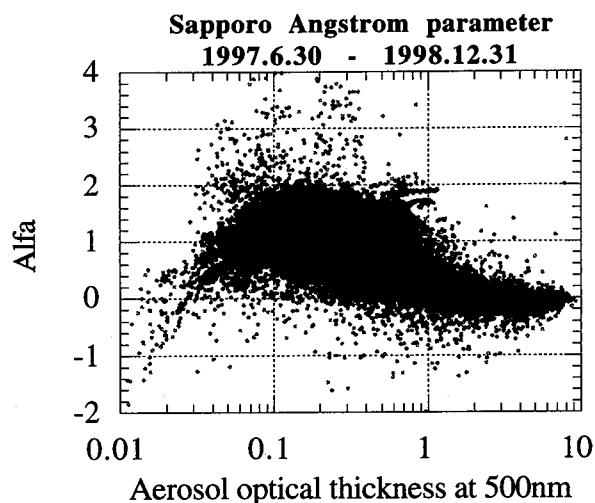


Fig. 4 Angstrom parameters (AOT500&ALFA) from Aureole and Sunphoto methods.

衛星データにおける大気補正および大気・エアロゾル観測の現状

○朝隈 康司, 美濃村 満生, 大堤 新吾, 汝 劍飛, 久世 宏明, 竹内 延夫

千葉大学 環境リモートセンシング研究センター センサ/大気放射部門 センサ研究分野

A situation of atmospheric correction and aerosol monitoring by satellite remote sensing

Koji ASAKUMA, Mitsuo MINOMURA, Shingo OTSUTSUMI, Jianfei RU,
Hiroaki KUZE, and Nobuo TAKEUCHI

Sensor Department, CEReS, Chiba University

Abstract: We present the situation of atmospheric correction and aerosol monitoring by satellite remote sensing with this symposium. We have ever performed atmospheric correction around Chiba by using the LIDAR system and MODTRAN, the radiative transfer code. And the sea surface albedo and aerosol optical thickness around Chiba are determined from an iteration process by 6S code and NOAA AVHRR visible data (channel 1). Also, we studied the optical properties of aerosol in Indonesian forest fire in 1997 by using two channel data of NOAA AVHRR, and investigate the smoke situation on the land area by textural analysis.

1 はじめに

人工衛星をもちいた地球観測をおこなう場合、各波長帯における地表面物質固有の反射率を正確に観測する必要がある。しかしながら、地球大気の影響により正確な地表面の反射率を求めることは難しい。大気の影響には光波の散乱と吸収があり、それぞれに対して大気分子と浮遊粒子状物質¹ (Aerosol:以下エアロゾルと呼ぶ)の影響が考えられる。この大気分子およびエアロゾルの影響を取り除き、正確な地表面反射率を求めることを大気補正という。大気補正をおこなうには、大気分子およびエアロゾルのプロファイルより得られる大気の光学的厚さが重要であるが、大気分子に関しては、ある程度狭い地域を限定すれば酸素はほぼ一定であり、オゾンの変化は予測が可能である。水蒸気に関しては、マイクロ波計測やGPS気象学で既に実績があり鉛直分布が求められている。

一方、エアロゾルに関してはその性質(粒径分布)や空間分布が時々刻々と変化するため、正確な大気補正をおこなうためには、その地域および時刻に合致するプロファイルを知らなければならない。我々はこのエアロゾルに対して、大気観測用多波長ライダーをもちいて千葉地域のエアロゾルプロファイルを観測し、このプロファイルと放射伝達コードMODTRANを用いて千葉周辺の大気補正をおこなっている。

¹ 正確には、浮遊粒子状物質(SPM)は $10\mu\text{m}$ 以下のものを示す。それより大きいものを含めるときには、全粒子状物質(TPM)という。

ところが、ライダーやサンフォトメーターなどの地上観測装置から離れた地域では、エアロゾルの光学的厚さを参照することができない。このため衛星画像のみからエアロゾルの光学的厚さを導出する手法を開発する必要がある。光学的厚さを求めるためには、大気補正とは逆に地上反射率を知らなければならない。地上反射率はその対象物や季節によって変動が大きい。海上の反射率はある程度変化が少なく一様に分布しており反射率を仮定することが容易である。とくに、赤外域では反射率が非常に低いため(2%以下)ある程度無視できる。我々は、千葉全域にわたるおおまかな光学的厚さを求めるために房総半島を取り囲む東京湾、太平洋などの反射率を仮定し、エアロゾルの光学的厚さを求めた。さらに、この千葉を取り囲む海の光学的厚さを空間的に内挿し内陸の光学的厚さを求め大気補正に利用することを予定している。

一方、大気補正に対して地上反射率がわかっていれば、大気の光学的厚さを求めることができることは先に述べた。またエアロゾルが非常に濃い場合、太陽光が透過せず大気による反射のみとなるため観測が可能である。これらのことを大気観測と呼び森林火災や都市公害など大量のエアロゾルを放出する災害などの影響を観測することができる。我々は、1997年に発生したインドネシア森林火災に関して衛星データを用いてカリマンタン～スマトラ島の海上で大気観測をおこないエアロゾルのプロファイルを求めた。

さらに、太陽光が透過せず大気による反射のみの場

合地表面反射率が全く反映されないことから、衛星画像のテクスチャ解析をおこない、エアロゾルで占有されている領域の抽出をおこなっている。エアロゾルに関するテクスチャ値が一様な場合、海上で求められたエアロゾルのプロファイルが内陸でも同様のエアロゾルで占有されていると考えられるため、森林火災によるエアロゾルの大域的な影響を観察していく予定である。

本シンポジウムで、以上の各具体的な手法を詳細に紹介していく。

2 衛星データからの光学的厚さ導出

2.1 光学的厚さ導出のケーススタディ

一般に衛星から観測される陸域の反射率は、都市域や森林など異なる成分が複雑に分布している。陸域に対して海上は一定の反射率を仮定できるため、比較的高精度の大気補正をおこないやすい。そこで、陸域と海域が混在するような衛星データから反射率を推定するには、まず海上の光学的厚さを決定し、それを利用して各画素の反射率を決定する方法が考えられる。本研究では、放射輝度の計算をおこなう上で放射伝達コードの1つである6S(Second Simulation Stellar Signal in the Solar Spectrum) [Vermote, Tanré, et al., 1997] と、NOAA AVHRR データをもちいて海面上のエアロゾルの光学的厚さと海面の反射率を導出するアルゴリズムについて述べる [大堤, 朝隈 他, 1999]。また、サンフォトメーターにより地上で観測された光学的厚さのデータと比較する。

2.2 衛星データから放射輝度成分への分解

人工衛星センサは、太陽光が地表面で反射されて大気中を通過した放射輝度を受光する。衛星が観測する放射輝度 L_{obs} は次式により計算される。

$$L_{obs} = (DN \cdot S + I) \frac{F}{100\pi W} \quad (1)$$

ここで、 DN は衛星画像の各画素の受光信号、 S と I は AVHRR の校正係数、 F は太陽光の分光放射照度、 W は AVHRR のスペクトル応答関数である。Fig.1 に放射伝達コード 6S で求められる以下の3つの放射輝度成分を示す。

1. L_{tar} - 目標物の反射による輝度。目標物の周辺面からの反射・散乱光が目標物で再び反射された成分も含めたもの。

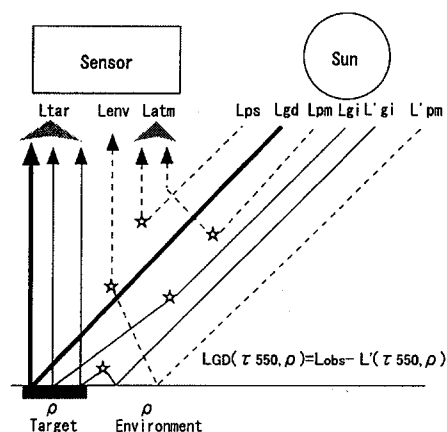


Fig. 1: Radiation components detected by a satellite sensor

2. L_{env} - 目標物周辺での反射光が散乱された単散乱成分。

3. L_{atm} - 大気でのみ散乱された成分。

また、大気の吸収・散乱の影響を受けない直達反射成分を L_{gd} とする。 L_{gd} に関しては6Sのソースコードを修正し算出できるようにした。6Sのパラメータとして与える波長 550nm での光学的厚さを τ_{550} とする。以上に示した4つの各放射輝度成分をもちいて、 τ_{550} の関数として衛星が受光する直達透過放射輝度 L_{GD} を求めることができる。これらは以下の式(2)-(4)にまとめられる。

$$L_{GD}(\tau_{550}) = L_{obs} - L'(\tau_{550}) \quad (2)$$

$$L'(\tau_{550}) = L_{total} - L_{gd} \quad (3)$$

$$L_{total} = L_{atm} + L_{env} + L_{tar} \quad (4)$$

ここで、 L_{obs} は実際に AVHRR が受光する各画素の放射輝度値、 L_{total} は大気上端での総放射輝度、 $L'(\tau_{550})$ は光路輝度である。これらの輝度値は衛星のバンドの中心波長に対して計算される。 $L'(\tau_{550})$ は、 $\rho=0$ として計算されるので τ_{550} のみの関数であり、センサが受ける全ての成分 L_{total} から L_{gd} を引いた拡散透過成分として与えられる。

2.3 光学的厚さの導出方法

目標物周辺で反射された太陽光が、大気中で散乱され再び光路に加わる隣接効果を見れば、 L_{GD} は式(2)で与えられる。一方、AVHRR チャンネル1の中心波長 (630nm) での光学的厚さを τ_{630}^{NOAA} とすると、Lambert-Beer の法則により、

$$\tau_{630}^{NOAA} = \frac{1}{1 + \sec \theta_S} \ln \left(\frac{\pi \cdot L_{GD}}{E_{ext} \cdot \rho \cdot \cos \theta_S} \right) \quad (5)$$

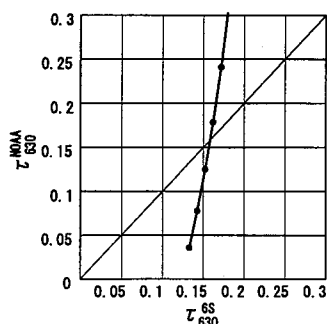


Fig. 2: Relation between the optical thickness τ_{630}^{NOAA} and τ_{630}^{6S} calculated by Eq.(5) (April 30, 1999)

となる。ここで、 E_{ext} は太陽放射照度である。6S によって $L_{\text{total}}(\rho_0, \tau_{550})$ を計算し、式 (2) と式 (5) から τ_{630}^{NOAA} を求める。また、別途 6S でエアロゾルの光学的厚さを τ_{630}^{6S} を計算し、 τ_{630}^{NOAA} と一致する値を反復計算より求める。6S では、中心波長 630nm におけるレイリー散乱成分による光学的厚さ τ_R およびエアロゾルのミー散乱による光学的厚さ τ_A が求められ、 τ_{630} はこれらの和となる。この τ_A が、最終的に求められるべきエアロゾルの光学的厚さである。

また、反射率 ρ は Richter の第一近似補正式をもちいて、

$$\rho = \rho_0 \frac{L_{\text{obs}} - L'(\tau_{550})}{L_{\text{total}}(\rho_0) - L'(\tau_{550})} \quad (6)$$

と書ける。ここで、 ρ_0 は目標となる画素からの反射率である [美濃村, 朝隈 他, 1999]。今後、この式をもちいて、得られた光学的厚さから大気補正を予定している。

2.4 光学的厚さの導出結果

2.3 の方法により NOAA AVHRR チャンネル 1 データを用いて海上の τ_A を求めた。Fig.2 に 1999 年 4 月 30 日でのチャンネル 1 の画素情報を含む海上の τ_{630}^{NOAA} と、6S で算出した τ_{630}^{6S} の関係を示す。このグラフから 2 つの光学的厚さが一致する点を求めると、 $\tau_{630} = 0.244$, $\tau_A = 0.181$ となった。

以上より決定した光学的厚さ τ_A の精度を検証するため、当センターに設置したサンフォトメーターで計測した千葉上空の光学的厚さと比較した。Fig.3 に光学的厚さの変動を示す。この時用いたデータは、1998 年 10 月から 1999 年 6 月の間で関東地方が快晴時のものである。これら 2 つの光学的厚さの相関係数は 0.82 であり、良い相関が見られた。

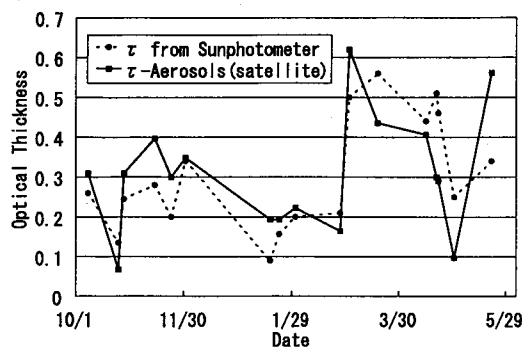


Fig. 3: Variation of optical thickness. The satellite value (around Chiba in April May, 1999) is compared with the sunphotometer value.

3 衛星データからのエアロゾルモデル解析

3.1 エアロゾルモデルについて

エアロゾルの光学特性は、発生源の強さ、大気特性およびその運搬によって決定される。対流圏エアロゾル粒子は時間や地域によって変化することから、明確なエアロゾルモデルを作ることは困難である。通常地上観測では、粒径分布、散乱位相関数、複素屈折率などが得られる。これらの特性は、(7) 式で示す対数正規分布 (log-normal distribution) として簡単にまとめて用いることが多い [Tanre, Kaufman, et.al., 1997]。

$$\frac{dN}{dr} = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma r \ln(10)}} \exp\left[-\frac{\log(r/r_g)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

ここで、 N_0 は濃度 [cm^{-3}]、 σ は粒子半径の対数をとった標準偏差、 r_g [μm] は粒子半径のモードである。

本研究では、アマゾンの森林火災で観測された二峰性 (bi-modal) 粒径分布を参照分布としてインドネシアの森林火災に適用した [Remer, Kaufman, et.al., 1998]。Table 1 に、この二峰性粒径分布を示す。小粒径モデルとして $S_a \sim S_e$ の 5 つのモデル、大粒径モデルとして $L_a \sim L_f$ の 6 つのモデルの計 11 個のモデルを示す。

3.2 衛星からのエアロゾルモデル導出

衛星が受光する輝度成分が地上反射と大気の反射成分に分解できるは既に述べた。本研究では、2 で述べたように 6S を用いて、海上の反射率を 0.02 に仮定し、Table 1 に示した各エアロゾルモデルに対して波長 550nm での光学的厚さ τ_{550} をパラメータとして大気上端での放射輝度成分 L_{TOA} を求めた [Ru, Kaneta, et.al., 1999]。この結果を Fig. 4 に示す。

Table 1: Bi-modal distribution for biomass burning

Aerosol Model	Radius Mode	Standard Deviation	Refractive Index
S _a	0.02	0.60	1.45 - i0.0035
S _b	0.04	0.60	1.45 - i0.0035
S _c	0.04	0.40	1.45 - i0.0035
S _d	0.08	0.60	1.40 - i0.0035
S _e	0.08	0.40	1.40 - i0.0035
L _a	0.40	0.60	1.40 - i0.0035
L _b	0.60	0.40	1.40 - i0.0035
L _c	0.60	0.60	1.45 - i0.0035
L _d	0.60	0.80	1.45 - i0.0035
L _e	1.00	0.60	1.50 - i0.0035
L _f	1.00	0.80	1.50 - i0.0035

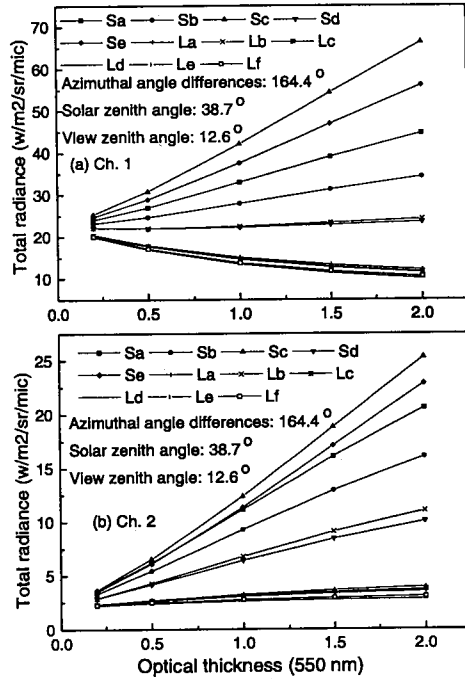


Fig. 4: Apparent radiance using 11 Aerosol models at sea between Karimantan and Sumatera at October 8, 1997. The top figure shows AVHRR Ch.1 and under figure shows AVHRR Ch.2.

一方エアロゾルそのものの反射は、以下の式により小粒径エアロゾルと大粒径エアロゾルの存在比 η で簡単に示することができる [Wang and Gordon, 1994].

$$L_c(\mu_s, \mu_v, \phi_v) = \eta L_s(\mu_s, \mu_v, \phi_v) + (1 - \eta) L_l(\mu_s, \mu_v, \phi_v) \quad (8)$$

ここで、 L_c はエアロゾルの散乱によって得られる大気上端の放射輝度、 L_s が小粒径エアロゾルの散乱による放射輝度、 L_l が大粒径エアロゾルの散乱による放射輝度である。

つぎに、衛星が観測する放射輝度 L_{TOA} と (8) 式で計算される放射輝度の誤差 $\varepsilon(\eta)$ を考えると、

$$\varepsilon(\eta) = \left[\frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \left(\frac{L_j^{TOA} - L_j^c}{L_j^{TOA}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

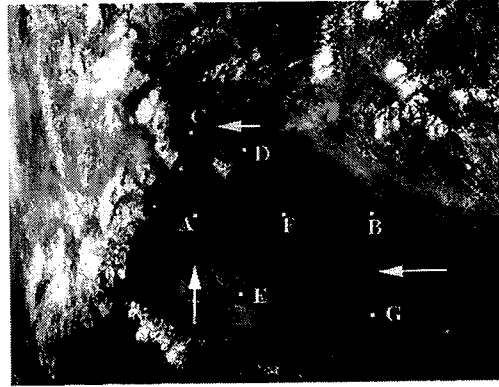


Fig. 5: Observation point at October 8, 1997

Table 2: Retrieved aerosol parameters on October 8, 1997

Point	η	τ_{550}	r_s	σ_s	r_l	σ_l	$\varepsilon(\eta)$
A	0.72	3.50	0.08	0.40	0.60	0.40	6.0
B	0.82	1.78	0.08	0.40	0.60	0.63	0.7
C	0.67	3.50	0.08	0.40	0.60	0.40	3.0
D	0.97	3.00	0.02	0.60	0.60	0.40	2.0
E	0.68	3.00	0.08	0.40	0.60	0.40	11.0
F	0.89	3.20	0.02	0.60	0.60	0.63	0.63
G	0.71	1.90	0.06	0.60	0.97	0.61	0.61

と書くことができる。ここで、 j は NOAA AVHRR のチャンネルである。この誤差を最小とする η によって小粒径、大粒径それぞれのエアロゾルモデルを決定する。

3.3 エアロゾルモデル導出結果

インドネシア森林火災のエアロゾルモデルを導出した。Fig.5 にインドネシア森林火災による排煙の調査のため、カリマンタン～スマトラ島の間の海上の6観測地点 A-G を示す。Fig. 中の矢印はこの日の風向を示す。また、3.2 の手順にしたがって導出した各観測地点でのエアロゾルモデルを Table 2 に示す。Table 中の各パラメータの値は各観測地点を中心に周囲5画素についてエアロゾルモデル導出した平均値である。各地点の光学的厚さ τ_{550} を比較すると、A,C,D,E,F 地点が厚くなっており、B,E 地点が薄くなっている。このことは、火災発生個所であるカリマンタン島南部からの風によって排煙が運搬されたことを示している。また、B,D,F 地点で小粒径エアロゾルの存在比が高くなっている。これは、カリマンタンで発生した火災排煙に起因すると考えられる。

4 テクスチャ解析によるエアロゾルの特定

4.1 衛星画像のテクスチャ解析について

3の方法は地表面反射率が解からない場合には適用が難しいため、海上でおこなった。しかし、1で簡単に触れたように、大気が高濃度のエアロゾルで占められているとき地表面の情報は衛星画像に反映されない場合がある。そこで、同じ特徴をもつ衛星画像中の画素を分類し抽出すれば、同じ特徴をもつ画素同士のエアロゾルプロファイルは、3の方法で得られるプロファイルと同質であるか、非常に類似性の高いものであると言える。このことから、反射率が一樣な近隣の暗い画素（海上、植生の天蓋など）からエアロゾルプロファイルがわかれば、ある程度詳細な陸域の大気観測が可能になると考えられる。

我々はこの考えにより、NOAA AVHRR のチャンネル1,2,4を用いてインドネシア森林火災排煙の分類、特徴抽出をおこなっている。テクスチャとは、画像中のある面積が示す明るさのパターンである。テクスチャを構成する各画素をテクセル (texel) と呼ぶ。テクスチャ解析のメリットはテクスチャを構成するテクセルの配置が異なってもテクスチャの性質は変わらないという点である。このことから、テクスチャ解析は画像の分類に適している。テクスチャ解析の方法として、一般的にはあるテクセルからテクスチャ中の別のテクセルへ角度 θ と距離 r の明度の組 (k, l) が発生する同時生起確率 $P_c(k, l)_{\theta r}$ を用いた同時生起行列 (co-occurrence matrix) を利用することが多く、雲の分類などで有名であるが [Kuo and Welch, 1988] テクスチャ量を求めるときに毎回行列計算が必要であり、計算量が膨大になる。そこで我々は、テクセルの組に対して明度の組ではなく、明度差 $m = |k - l|$ を用いてベクトル化する方法 (GLDV:gray level difference vector) $P_g(m)_{\theta r}$ を用いた [Christopher, Kliche, et al., 1996]。

4.2 森林火災画像へのテクスチャ解析の適用

テクスチャを用いて分類をおこなう場合、コントラスト Eq.(10) とテクスチャ平均の Eq.(11) の以下の2つのテクスチャ量を用いる場合が多い。

$$f_c(r, \theta) = \sum_{m=0}^{N_g-1} m^2 p_m(m)_{r\theta} \quad (10)$$

$$f_m(r, \theta) = \sum_{m=0}^{N_g-1} m p_m(m)_{r\theta} \quad (11)$$

コントラストはグレーレベルの濃淡の分離度合いを示ため、排煙とそれ以外の境界線を求めることができる。またテクスチャ平均はコントラストと比較して、低次のモーメントであるためよりなだらかな特徴量が求まる。本研究では排煙を含む画像の類似性を評価するために、この特徴量が重要となるためテクスチャ平均を用いる。

つぎにテクスチャ解析をおこなう基準について述べる。

$$d_{14} = (\rho_1^* - \rho_4^*) / (\rho_1^* + \rho_4^*) \quad (12)$$

$$f_m(r, \theta) = \sum_{m=0}^{N_g-1} m p_m(m)_{r\theta} < 0.3 \quad (13)$$

$$d_{12} = (\rho_1^* - \rho_2^*) / (\rho_1^* + \rho_2^*) > 1.0 \quad (14)$$

$$DN_4 < 140(280K) \quad (15)$$

(12)式はAVHRRチャンネル1と4が受光する大気上端での反射率の差を示す。AVHRRを用いてエアロゾルと水蒸気を分離するには、チャンネル1とチャンネル4の組み合わせが良いと言われている [Christopher, Kliche, et al., 1996]。この差画像に対して (13) 式でテクスチャ特徴量をもとめる。この特徴量が小さいほど、テクスチャ同士が類似していることを示す。本研究では0.3以下を類似基準とした。(14)式は陸域と海上を分離するための指標として用い、(15)式はAVHRRチャンネル4の輝度温度を用いて雲と排煙の分離に用いた。

4.3 テクスチャ解析の結果

4.2の基準にしたがって排煙を抽出した結果を Fig. 6の右側に示す。Fig.の左側は、テクスチャ解析との比較のため、火災発生場所周辺を手作業でサンプリングしたものを月別に集計したのち最短距離分類した結果である [朝隈, 汝 他, 1999]。左右の Fig. を比較すると、いずれも火災発生個所であるカリマントン島南部を中心に排煙が抽出されているが、手動分類の場合北東部まで排煙が抽出されている。どちらの分類が正確なのかは、現地でのエアロゾルサンプルが無いため決定することは出来ないが、この日の風向は北西を向いていたためテクスチャ特徴を用いて抽出された排煙のほうが、より妥当であると考えられる。なお手動分類の場合、数日分の統計量を用いるため、その平均や分散が重要であるが、サンプリングおこなう人間の主観が入ってくる可能性も高い。一方、テクスチャの場合1シーン中に含まれる (13) 式で示される特徴量が一致する画素を抽出するため、数値上の類似性を取り扱うのに適しているとも言える。

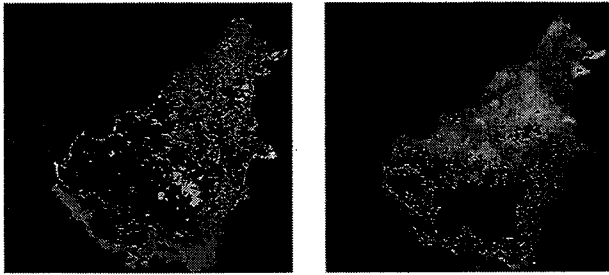


Fig. 6: Detected smoke in Karimantan at September 1, 1997. The left side shows detected by hand and right side shows detected by textural analysis.

5 今後の課題

以上各内容についてそれぞれ個別に研究をおこなってきたが、今後各内容について取り纏めて検討する。とくに、海上のエアロゾルプロファイルを陸域に適用するため、2で述べた光学的厚さを千葉周辺の海上全てに対しておこない空間内挿する方法の検討や、3のエアロゾルプロファイルと4のテクスチャ特徴を取り纏め陸域のエアロゾルプロファイルを求める方法を検討していく。

参考文献

- [1] S. A. Christopher, D. V. Kliche, Joyce C. and R. M. Welch: First estimates of the radiative forcing of aerosols generated from biomass burning using satellite data, *J. Geophys. Res.*, Vol.101, No.D16, pp. 21,265– 21,273(1996)
- [2] K. S. Kuo and R. M. Welch: Structural and Textural characteristics of Cirrus Clouds observed using high spatial resolution LANDSAT imagery, *J. Appl. Meteorol.*, Vol.27, pp. 1,242– 1,260(1988)
- [3] J. Ru, S. Kaneta, M. Minomura, H. Kuze and N. Takeuchi: Study on the biomass burning aerosol in Indonesian forest fire by using AVHRR two channel data, *日本リモートセンシング学会誌* (in press)
- [4] Remer, L. A., Y. J. Kaufman, B. N. Holben, A. M. Thompson and D. McNmara: Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties, *J. Geophys. Res.*, 103, pp. 31,379– 31,891(1998)
- [5] D. Tanré, Y. J. Kaufman, M. Herman and S. Mattoo: Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MOSIS/EOS spectral radiance, *J. Geophys. Res.*, 102, No.D14, pp. 16,971– 16,988(1997)
- [6] E. F. Vermote, D. Tanre, J. L. Deuze, M. Herman, J. J. Morcrette: Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S:An Overview, *IEEE trans. geosc. remote.*, Vol.35, No.3, pp. 675– 686(1997)
- [7] E. F. Vermote, D. Tanré, J. L. Deuze, M. Herman, J. J. Morcrette: 6S User Guide Version 2, Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, (1997)
- [8] M. Wang and H. R. Gprdon: Estimating aerosol optical properties over the oceans with the multiangle imaging spectro-radiometer: some preliminary studies, *Appl. Opt.*, 33, No.18, pp. 4,043– 4,057(1994)
- [9] 朝隈, 汝, 久世, 竹内: 衛星画像によるインドネシア森林火災が及ぼす影響への考察, 第26回(平成11年度春季) 学術講演論文集, (社) 日本リモートセンシング学会, pp. 156– 158(1999)
- [10] 大堤, 朝隈, 美濃村, 金田, 久世, 竹内: AVHRR画像を用いた関東域におけるエアロゾルの光学的厚さの導出, (社) 計測自動制御学会, 第25回リモートセンシングシンポジウム講演論文集, pp.41– 44,1999
- [11] 美濃村, 朝隈, 久世, 竹内: MODTRANを用いた人工衛星データの気象補正, 千葉大学環境科学研究報告 第24巻, pp.45–48(1999)

雲の放射強制力の推定に関わる地上観測
Validation of the insolation from GMS-5 for estimation of cloud forcing

○ 竹村英幸、高村民雄、岡田格、金田真一
(千葉大学環境リモートセンシング研究センター)
高藪縁(国立環境研究所) 井上豊志郎(気象研) 河本和明、中島映至(東大 CCSR)

Abstract

放射収支の推定において主要なパラメーターである地表面放射短波フラックスの雲による影響を衛星から正確に見積もることは大変重要なことである。GMS5 から推定された日射量の妥当性、問題点を明らかにした。GAME プロジェクトにおける観測値との詳細な比較を行った事によって、月平均日射量においては観測値と GMS での推定値は $\pm 3\text{MJ/m}^2$ 程度の正確さで一致している。日積算日射量で検証した結果、エアロソルの変動による日射量の変動が大きい為、固定したエアロソルの値では日々の日射量を正確に表せない事がわかった。正確な日毎の日射量を推定するには正確なエアロソルの量を知ることが重要である。GMS での地表面短波放射フラックス推定の際の雲による放射強制力の見積もりが過小評価であった。月平均での雲放射強制力は良い精度で求められている。

1. はじめに

地表面の熱的状态を決めるのは地表面熱収支であり、放射収支はその主要な要素である。その放射収支を見積もる為には地球に入ってくる下向きのエネルギーと地球から出て行く上向きのエネルギーを正確に知る事が必要である。放射収支の推定において主要なパラメーターである地表面放射短波フラックスの雲による影響を衛星から正確に見積もることは大変重要なことである。

地上放射収支における雲の効果については、現在 WCRP の ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project)等において、衛星の可視赤外画像から得られた雲情報を用いて全球的に求める試みがなされている。

ISCCP は 3 時間毎の衛星観測に基づき雲情報を作成している。(Rosow and Gordon,1993)一般的には C1 あるいは D1 と呼ばれる月平均の 2.5 度格子データがよく利用される。しかし、衛星データによって地表面短波放射量を計算する為には様々な仮定やモデルが使用される。この仮定やモデル値の精度の検証も重要である。

気象庁の静止気象衛星(GMS)のデータを直接利用する理由はそのデータが毎時得られ、同時に広い領域の状態を知ることが出来るからである。一方、欠点として、測定する波長帯の数が少ない、データの値の精度が粗い、現状では画像の地理的な位置合わせが最小画素の単位では不十分などの点が上げられる。しかしながら、日変化を詳しく知るには GMS が唯一の手段である。このこと

は、本研究の延長上にある放射収支見積のことを考慮すると、重要な相違点となる。なぜなら、特に短波放射入射量は時間毎の変動が大きく、時空間的にばらつきの大きい雲量との積による変動項を考慮すると 3 時間毎のデータの内挿では、毎時のデータとは必ずしも同じ値にならない可能性がある。従って、特に広域の平均ではなく、ある地点に対する日射量を考える場合は時間毎の見積もりが必要である。

本研究では GMS5 から推定した地表面短波放射フラックスを観測値と比較し、雲短波放射強制力の推定及び制度の検証を行った。

2. データと方法

GMS-5 の画像は東大・生産技術研究所で受信されたものを、高知大・菊池時夫教授が配布しているものを用いている。期間は 1996 年 1 月 1 日 00Z から 1998 年 12 月 31 日 23Z までである。0.5 度格子で推定した(雲情報(上層、中層、下層雲の雲量、光学的厚さ、雲頂高度、対流雲/層状雲インディックス)から高精度放射伝達モデル(RSTAR5 Nakajima and Tanaka 1983,1986,1988)とを用いて地表面短波放射フラックスを推定した。

検証の為の観測データは GAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment)プロジェクトと CREST PEPPERS(Core Research for Evolutional Science and Technology Project for Establishment of Plant Production Estimation

using Remote Sensing)における以下に示した観測地点での観測値を用いた。各観測地点には日射計(CM12F:Kipp&Zonen)と多波長で太陽周辺光及び直達分光強度を測定する事の出来るスカイラジオメーターが下記のように設置されている。

Si-Samrong (タイ)	17.17N, 99.87E
日射計 CM21F(diffuse,direct)	
スカイラジオメーター	
Shouxian (中国)	32.55N, 116.78E
日射計 CM21F(diffuse,direct)	
Yinchuan (中国)	38.48N, 106.22E
日射計 CM21F(direct)	
スカイラジオメーター	
Mandalgovi (モンゴル)	45.59N, 106.19E
日射計 CM21F(direct)	

本研究の雲情報の推定手法においては太陽天頂角が 70 度以上の雲の光学的厚さが得られない為、日積算日射量を算出する際、日の出から日没までの全日射量より少なくなっていることに留意しなければならない。よって、本研究で使用する全てのパラメータの日積算量は推定データの始まる時刻から終わる時刻までの積算を日積算量と定義する。地上観測値も推定値の時刻に合わせて同様に積算する。

3. 結果

3-1 月平均日積算日射量比較

Fig.1 に観測値と GMS5 において推定された日射量を月平均で比較したものを示す。、地域的には Yinchuan が一様に GMS5 が大きな値を示しているなど特性が見られるが、全体として GMS5 から推定した地表面短波放射フラックスは、月平均日積算日射量では約 $\pm 3\text{MJ/m}^2$ の範囲で比較的良い一致が見られる。この誤差が何に寄与しているかを、日射を減衰させる要因に分けて評価する。

3-2 日積算日射量比較

各観測地点での GMS5 での日積算日射量推定値と観測値の日積算日射量の比較を行った。Fig.2 は Si-samrong における比較を示す。

全体として比例関係にはあるが、個々のばらつきについてその原因を調べた。

3-3 エアロソルの評価

Fig.3(a)は 1998 年 1 月の全ての日において、観測値の日積算日射量と GMS5 推定日積算日射量の差 ($\Delta E(E_{\text{Obs}} - E_{\text{GMS}})$) つまり、観測値が推定をどれくらい上回るかと観測値の散乱日射量の日積算値 (ΣD_{Obs}) の相関を示す。また、この同日同場所で測定したスカイラジオメーターの観測値から算出したエアロソルだけの光学的厚さ τ_a を重ねた。これにより、日射の散乱とエアロソルの光学的厚さの関係を示す。Fig.3(b)は観測値の日変化から快晴(雲の影響がない)だと思われる日だ

けを取り出して同じように相関を取った。すると、GMS5 が過小評価である正の値だけが残る。この事から GMS5 による日射量推定の際エアロソルによる日射の減衰を多く見積もりすぎている可能性が考えられる。

同じ解析をスカイラジオメーターの観測値のある Yinchuan のにおいても行った。1998 年 1 月、2 月、3 月、4 月、5 月のデータを使用した。Fig.4(a)においては、Si-samrong と同様の傾向が見られる。次に Si-samrong と同様に雲の影響を除く為に、快晴日だけを取り出した図を Fig.4(b) に示す。これにおいても、Si-samrong と同様の光学的厚さが小さくなると GMS5 の過小評価の傾向が見られる。

冬季から春季にかけて GMS5 における日射量推定の際のエアロソルモデルが少なくとも 2 地点において過大評価になっている事を示している。しかし、館野での観測値との比較ではエアロソルの過小評価の結果が報告されている。

エアロソルの変動による日射量の変動が大きい事がわかる。Si-samrong では τ_a が約 0.2~0.7 で変動し、0~5MJ/m² の推定誤差がある。Yinchuan では τ_a が約 0.1~0.8 で変動し、0~3.5MJ/m² の推定誤差がある。固定したエアロソルの値では日々の日射量を正確に表せない事がわかる。

3-4 雲の評価

エアロソルが日射に大きな影響を与えているのは前節で述べた。次は日射において一番大きな影響を及ぼすであろう雲の推定の評価を行った。推定した雲の全光学的厚さと観測値の日積算日射量と GMS5 推定日積算日射量の差 ($\Delta E(E_{\text{Obs}} - E_{\text{GMS}})$) の相関を取った図を Fig.5 に示す。ここでの雲の全光学的厚さとは単純に高、中、低層雲の光学的厚さを足したものである。3 地点とも似たような傾向が見てとれる。光学的厚さ 0 というのは快晴日である。この場合、ほとんど全てが GMS5 の過小評価となっている。これは前節で述べたエアロソルの過大評価のみの推定誤差である。それ以外のプロットを見ると、光学的厚さが大きくなるにつれ、GMS5 の過小評価が目立つ。Si-samrong では τ_a が 0~20 の範囲で 0~+10 の推定誤差、Yinchuan では τ_a が 0~25 の範囲で 0~+10 の推定誤差、Shouxian では τ_a が 0~18 の範囲で 0~+13 の推定誤差がある。これは雲による日射の減衰量が実際よりも小さく見積もっている事を表している。

3-5 雲の地表面短波強制

前項で述べたような問題点はあるが、Fig.2 に見られるように月平均では良い一致を示している。本研究では Gupta(1996)のように雲の放射強制力 $CRF_{\text{sf}} = F_{\text{all}} - F_{\text{clr}}$ は all-sky での地表面短波放射フラックスから F_{clr} は clr-sky での地表面短波放射

射フラックスを引いたものと定義する。

$$CRF_{sfc} = F_{all} - F_{clr} \quad (\text{Gupta, 1996})$$

Fig.6 は 1998/1~5 月, 7 月, 8 月及び 10 月での CRF_{sfc} 月平均を示す。

赤道付近の地表面短波放射強制は年間を通して他の地域より大きいのが見てとれる。しかし、特に 1~4 月の冬季から春季にかけて約 $-40W/m^2 \sim -90W/m^2$ の放射強制を持つ雲が確認できる。5 月~8 月にかけての夏季では比較的、雲放射強制は弱くなっている。大陸では 1~2 月の冬季には雲放射強制は弱い。約 $0 W/m^2 \sim -20 W/m^2$ 。3 月~8 月の春季から夏季にかけて約 $-40W/m^2 \sim -80W/m^2$ の強い雲放射強制が見られる。太平洋の海域では年間通して約 $0 W/m^2 \sim -20 W/m^2$ の比較的弱い雲放射強制を示している。それでも 7 月 8 月の夏季には約 $-30W/m^2 \sim -40W/m^2$ の雲放射強制の範囲が広がっている。

4. まとめ

本研究において GMS5 から推定された日射量の妥当性、問題点を明らかにすることが出来た。GAME プロジェクトにおける観測値との詳細な比較を行った事によって、月平均日射量においては観測値と GMS での推定値は $\pm 3MJ/m^2$ 程度の正確さで一致している。しかし、日単位では推定誤差が大きい日がある。

快晴日において観測値のエアロソルの光学的厚さが大きくなるほど良く一致し、観測値のエアロソルの光学的厚さが小さくなるほど GMS 推定値が観測値より過大評価になる関係が明らかになった。これは、この観測地点においては GMS のエアロソルの仮定が過大評価であることを示している。Si-samrong では τ_a が約 0.2~0.7 で変動し、 $0 \sim 5MJ/m^2$ の推定誤差がある。Yinchuan では τ_a が約 0.1~0.8 で変動し、 $0 \sim 3.5MJ/m^2$ の推定誤差がある。以上より、エアロソルの変動による日射量の変動が大きい事がわかる。固定したエアロソルの値では日々の日射量を正確に表せない事がわかる。正確な日毎の日射量を推定するには正確なエアロソルの量を知ることが重要である。

また、雲の評価についても検討した。GMS での雲の光学的厚さが大きくなるほど GMS が観測値に比べ過小評価になる関係がある。Si-samrong では τ_a が $0 \sim 20$ の範囲で $0 \sim +10$ の推定誤差, Yinchuan では τ_a が $0 \sim 25$ の範囲で $0 \sim +10$ の推定誤差, Shouxian では τ_a が $0 \sim 18$ の範囲で $0 \sim +13$ の推定誤差がある。このことは、GMS での地表面短波放射フラックス推定の際の雲による放射強制力の見積もりが過小評価であることを示している。

この上記 2 つの傾向は検証した観測場所において同様な結果が得られた。よって、これは地域

的な特異な現象の為ではなく、GMS からの推定の際のエアロソルモデル値の与え方、雲の放射強制の見積もりにも問題があると言える。

これらの問題点を改善すればより正確な地表面放射フラックスや雲放射強制力が毎日毎時で衛星から求められることになる。

しかし、月平均では良い精度である為、GMS5 から月平均での雲放射強制力は正確に求められていると言える。

REFERENCES

- Rossow, W.B and L.C.Gardner, 1993: Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible for ISCCP. *J. Climate*, **6**, 2341-2369
- Hartmann, D.L., 1993: Radiative Effects of Clouds on Earth's Climate. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*, Academic Press, 151-173
- Nakajima, T., and M. Tanaka, 1986: Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere, *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, **35**, 13-21
- Nakajima, T., and M. Tanaka, 1988: Algorithms for radiative intensity calculation in moderately thick atmosphere here using a truncation approximation, *J. Quant. Spectrosc. Radiant. Transfer*, **40**, 51-69
- Nakajima, T., and M. Tanaka, and T. Yamauchi 1983: Retrieval of the optical properties of aerosols from aureoland extinction data, *Applied Optics*, **22**(19), 951-2959
- Gupta, K.S 1993: Seasonal Variation Surface and Atmospheric Cloud Radiative Forcing Over the Globe Derived From Satellite Data *J. Geophys. Res.*, **20**, 761-778
- 高藪 縁 1998: GMS 雲データを用いた地表面短波フラックスの推定, 「雲のリモートセンシングと気候影響に関するシンポジウム」 プロシーディング

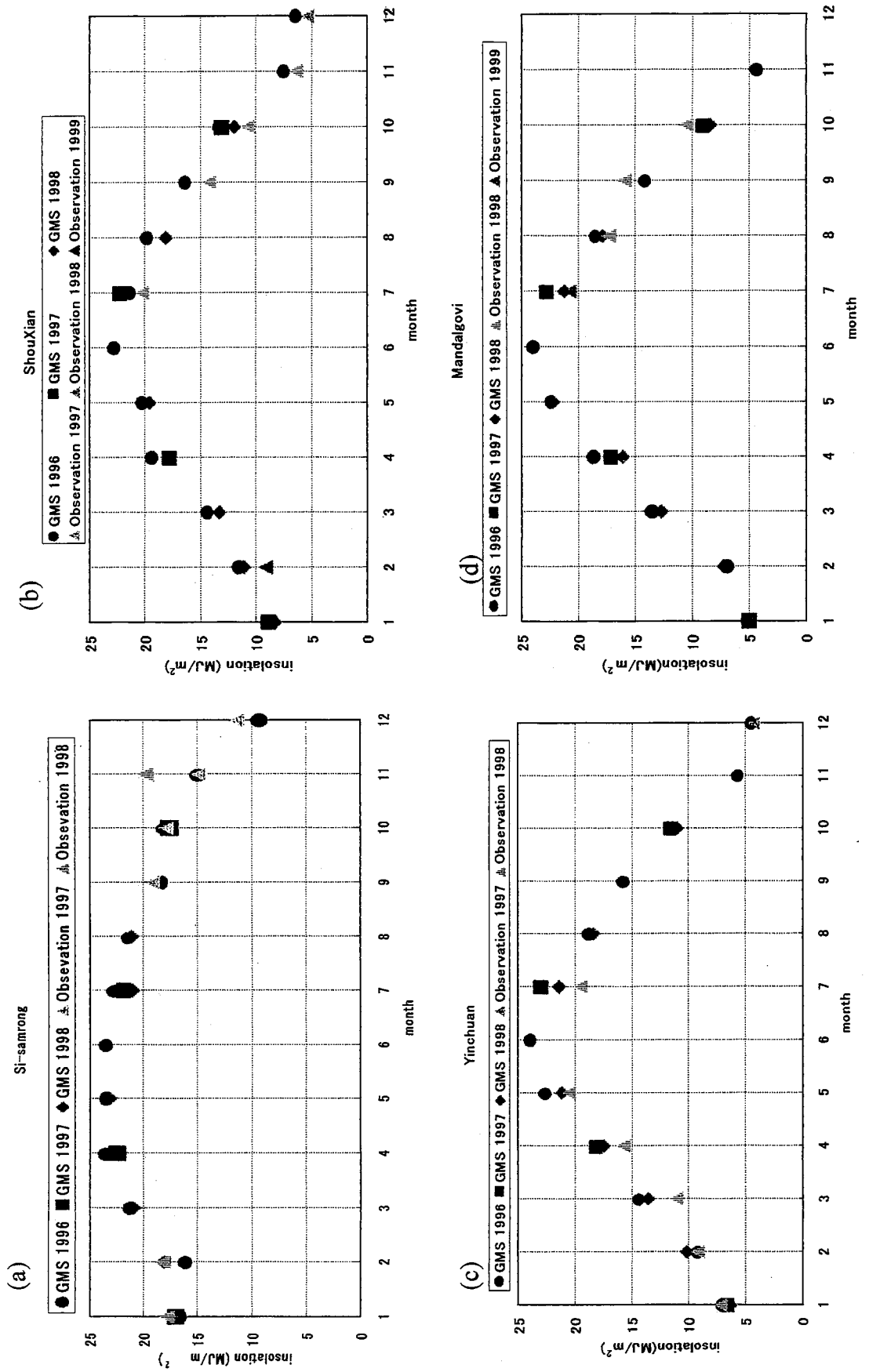


Fig.1 Insolation estimated from GMS5 and from observation : (a)Si-samrong (b)ShouXian (c)Yinchuan (d)Mandalgovi

1997/10,1998/01
Si-samrong

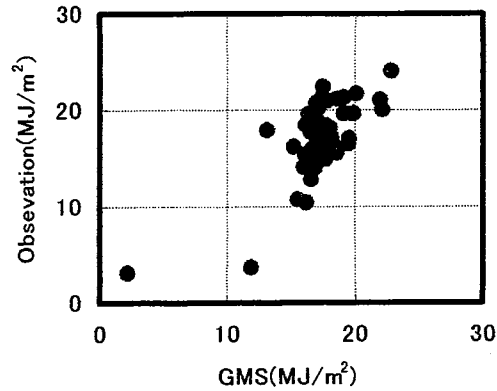
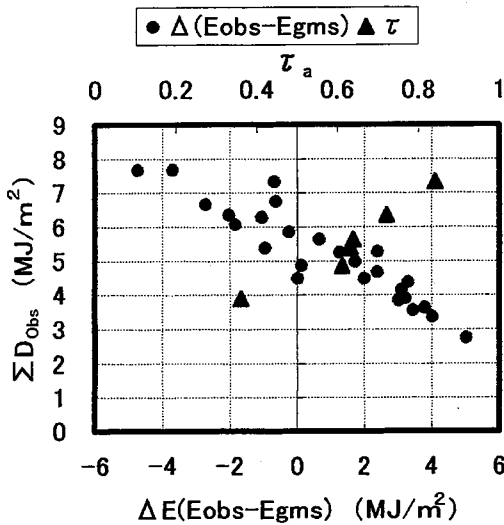


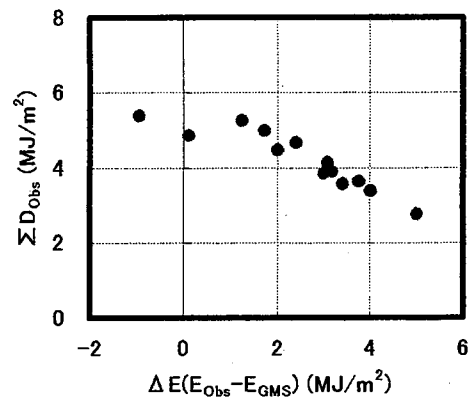
Fig.2 Comparison of the insolation mesered at Si-samrong with the insolation estimated from GMS5

1998/01 Si-samrong <All days>



(a)alldays

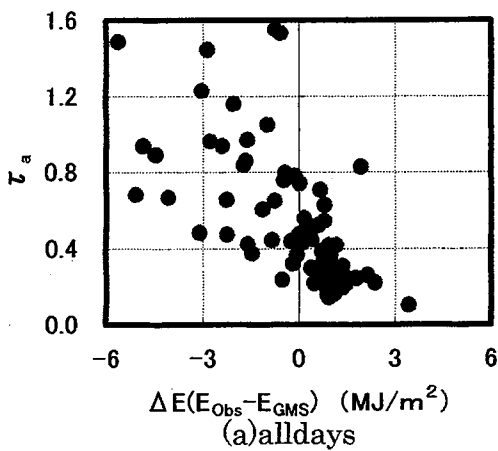
1998/01 Si-samrong <clr days>



(b)clrdays

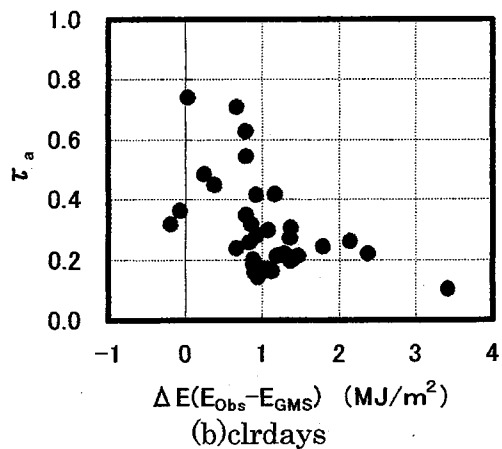
Fig.3 Comparison of the $\Delta E(E_{Obs}-E_{GMS})$ with the $\Sigma Diffuse_{Obs}$

1998/01,02,03,04,05 Yinchuan <All days>



(a)alldays

1998/01,02,03,04,05 Yinchuan <clr days>



(b)clrdays

Fig.4 Comparison of the $\Delta E(E_{Obs}-E_{GMS})$ with the τ_a from Observation

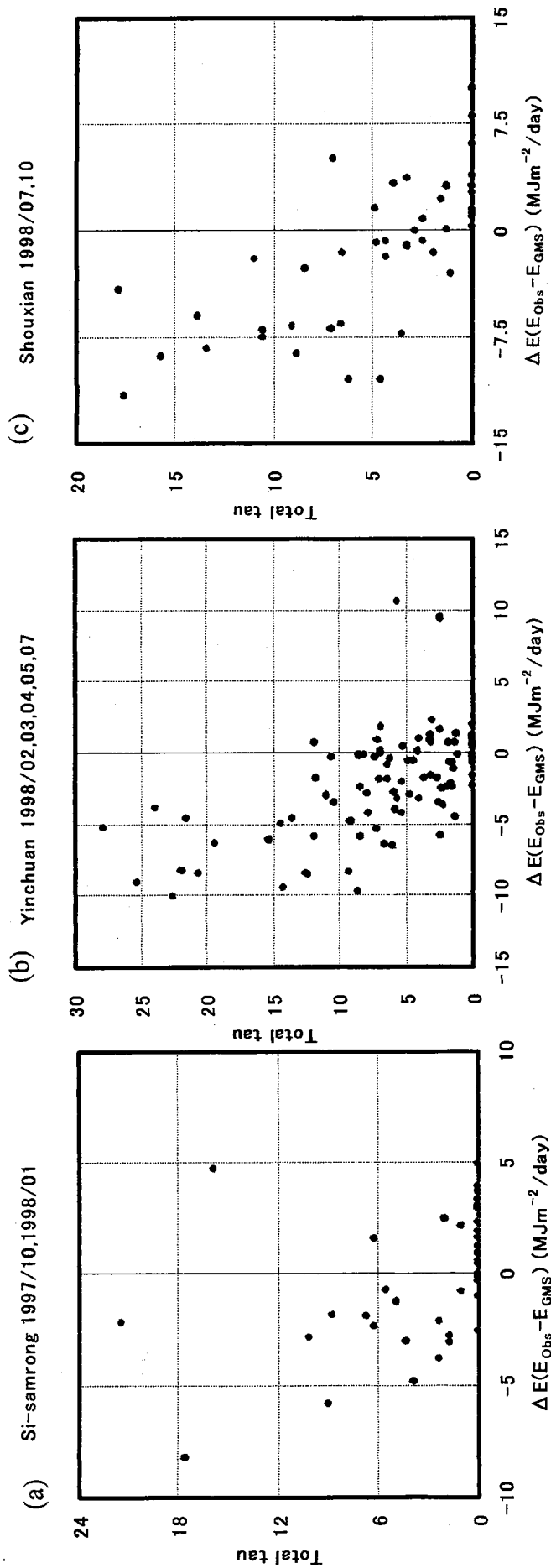


Fig.5 Comparison of the $\Delta E(E_{Obs} - E_{GMS})$ with the total tau estimated from GMS5

(a)Si-samrong (b)Yinchuan (c)Shouxian

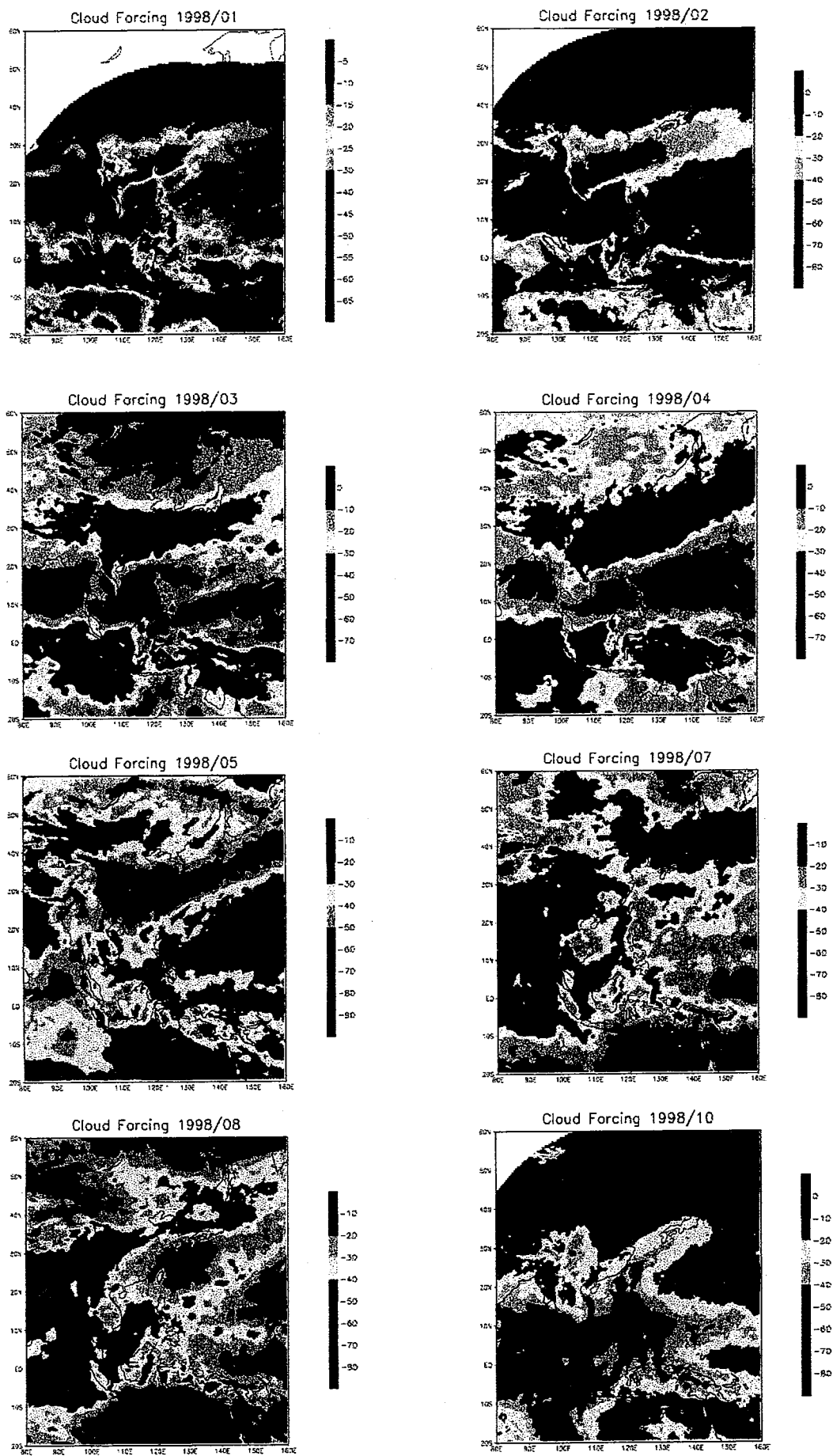


Fig.6 Cloud Forcing estimated from GMS5

20S-60N , 80E-160E

チベット高原東方の上層雲の短周期変化と中間規模東進波

Short-period variation of upper-level cloud to the east of Tibetan Plateau
and its relation to upper tropospheric medium-scale travelling waves

児玉安正（弘前大理工）・高橋美奈子・江川晋子（弘前大理）・

中井専人（防災科研）

Abstract

Short-period variations of upper level cloudiness over East Asia and the western North Pacific to the east of Tibetan Plateau were studied using 3-hourly GMS-IR observations during March of 1997. We found that upper-level cloud disturbances frequently travel eastward from the Tibetan Plateau to the western North Pacific with an interval of ~ 1 -day and a phase speed of ~ 25 m/s. These travelling cloud disturbances are accompanied with upper tropospheric medium-scale travelling waves.

1. はじめに

対流圏上部に現れる上層雲は氷晶からできており、温室効果があることが知られている。背の高い積雲対流に伴う上層雲はしばしば顕著な日変化を示すが、上層雲が放射過程に及ぼす影響は、日射と上層雲の日変化の位相関係によって大きく変化する。上層雲の日変化の情報は雲が気候に及ぼす影響を考える上で重要である。時間分解能の高い静止気象衛星のデータは雲の日変化の調査に有効で、多くの研究が行われているが、さらに発展させる必要がある。

Asai et al. (1998)は、3時間毎のGMS画像を用いて、暖候期（4月～10月）のチベット高原とその東方の上層雲の日変化について調査を行った。そして、チベット高原上では夕方（現地時刻18時頃）に上層雲量が最大になる顕著な日変化がみられること、高原東方の中国大陸の平野部ではチベット高原から離れるほど日変化の極大が現れる時刻が遅れること、ただし平野部でみられる位相の規則的な変化（位相の東進）は盛夏期（7月～8月）には不明瞭になること、を示している。我々は、この研究の続きとして、高原東方の平野部でみられる位相の東進について、GMS画像を用いた調査を行っている。

昨年度の共同研究では、この位相の東進が早春期（3月）にもみられることを示した。そして、早春期の位相の東進はチベット高原から ~ 4000 km離れた日本付近まで確認することができ、位相速度は ~ 25 m/sで傾圧不安定波にともなう移動性低気圧の移動速度よりも大きく、400hPa面の偏西風の風速にほぼ一致することを指摘した。そして、上層雲量にみられる位相の東進の原因として、チベット高原上の活発な対流活動によって対流圏上層に運び上げられた水蒸気（供給量が日変化する）が偏西風によって東方へ輸送されるためではないかという仮説を示した。しかし、昨年度の研究では、月平均場をみていたため、位相の東進のメカニズムを検討するには情報が不足していた。そこで本年度は、3時間毎のGMSデータと6時間毎の客観解析データを用いて、上層雲域の東進現象と対流圏界面付近の

大気場との関係を個々の事例に着目して調べた。

2. データ

解析に用いた資料は、防災科学技術研究所で受信された3時間毎のGMS赤外画像(11.5~12.5 μ m)、GMS赤外データから気象庁気象研究所気候研究部で作成された3時間毎のTBBデータ(1°x1°格子)、6時間毎のNCEP/NCAR再解析データ(2.5°x2.5°格子)である。解析した期間は1997年3月である。

3. 上層雲の変動

まず、上層雲域の東進が顕著であった事例をGMS赤外雲画像で示す(図1)。3月21日00Zに120°E、30°N付近にあった雲域Aは形を変えながら21日21Zには日本の南方135°E付近まで移動し、さらに22日09Zで160°E付近で速度の小さい総観規模の傾圧波動の雲域に追いつくまで追跡できた。また、21日15Zに110°E、30°N付近にあった雲域は発達しながら東進し、23日12Z頃に160°E付近で傾圧波動の雲域に追いつき、さらにそれを追い抜いて23日21Zには180°まで達した。これらの雲域の東進速度は~25m/sであり、総観規模の傾圧波動の一般的な東進速度である~10m/sに比べて明らかに大きい。

次に、上層雲域の東進現象の発生状況を把握するため、3時間毎のGMSのTBBグリッドデータを用い、中国大陸から中部太平洋における上層雲量(雲頂温度が-30°C以下の雲の雲量、緯度30°N~35°Nでの平均値)の時間経度断面図を作成した(図2)。100°E以西のチベット高原上では東西方向に同位相の日周変化が顕著であるが、110°E以东では、上層雲域が1日当たり経度~25°東進する(位相速度~25m/sに相当)現象がしばしば見られることがわかる。なお、3月2日~4日、27日~28日等にみられる東進速度の遅い雲域は通常の移動性低気圧に伴うものである。周期が数日~10日である移動性低気圧の影響を除くため、周期48時間以上の変動を除去するハイパスフィルターをかけた経度時間断面図を図3に示す。100°E以西では定在性の日周変化が顕著であるが、100°E以东では位相速度~25m/sの雲量アノマリの東進が多く、期間で顕著であり、変動の周期は~24時間である。また、東進する雲量アノマリのほとんどは、日変化するチベット高原の雲量アノマリと連続しており、東進する擾乱の起源がチベット高原にある可能性が示唆される。しかし、上層雲量日変化の振幅は110°E付近で弱まっており、この付近で位相に不連続がみられるケースもあるので、チベット高原の対流活動との関係についてはさらに検討する必要がある。

昨年度の共同研究で示した月平均場にみられる上層雲量日変化の位相の東進は、このような個々の上層雲域の東進が~1日周期で頻繁に起こったためであると考えられる。

4. 中間規模東進波との関係

高速で東進する上層雲域について、GMS画像の解析にもとづく萩原(1984)や坂田(1984)の報告がある。萩原(1984)は、1984年2月20日から25日にかけてほぼ24時間周期でチベット高原東部に濃密な上層雲域が形成され、それが48時間以上にわたって中国大陸上を東進したことを報告している。また、坂田(1984)は、上層雲域の移動速度は80km/hと大きく、対流圏上層の風の場に見られる波長~2000kmの東進する波動を伴うことを指摘している。

最近、京都大学のグループによって、対流圏界面付近のジェット気流のやや極側に振幅

の中心を持つ、周期1~2日、波長1000~3000km、東進速度~20m/sの大気波動が、季節を問わず両半球に存在することが見いだされ、中間規模東進波と名付けられた(廣田, 1999)。坂田(1984)が指摘した対流圏上層を高速で東進する波動も、中間規模東進波であった可能性がある。

そこで、NCEP/NCAR再解析データを用いて、1997年3月の日本付近の圏界面高度に近い300hPa面の高度データ(6時間毎、緯度30°N~35°Nで平均)に周期が48時間以上の変動を除去するハイパスフィルターをかけ、時間経度断面図を作成した(図4)。チベット高原付近の100°E以西では定在性の日周変化が顕著である。この領域では上層雲量の最大時(最小時)に高度が最大(最小)となっていた。上層雲が対流圏の上昇流に維持されており、上昇流は圏界面付近の発散を伴うので圏界面付近で高気圧性循環が発達すると考えれば、雲量と高度場の対応関係は説明できる。110°E以西では、位相の東進が見られるようになるが、雲量変動に比べると東進が卓越する期間や領域が限られており、東進が見られない場合も多い。しかし、上層雲量で位相速度の大きい東進が見られた14日~21日の110°E~140°E付近では、雲量の東進と平行して高度のアノマリも東進していた。この東進波動は、位相速度や波長が上述の中間規模東進波と良く似ている。この期間、圏界面付近のジェット気流の軸は35°N付近にあったので、調査した緯度帯は、中間規模東進波の振幅が最大になるとされるジェット気流の軸の~5°北側(廣田, 1999)からはやや離れている。しかし、中間規模東進波の南北方向の広がりには20°程度である(廣田, 1999)ので、この領域・期間で見られた高度アノマリの東進は中間規模東進波と考えても良さそうである。上層雲量と高度場の変動間には、チベット高原付近と同じく、雲量最大(最小)時に高度最大(最小)という関係がみられた。

5. 今後の課題

今年度の研究で見いだされた東進する上層雲域は、長いものでは3日間程度持続した。このような長時間の上層雲域の維持には、水蒸気と上昇流の存在が必要と思われる。中間規模東進波と上昇流の関係、及び、対流圏上部でのチベット高原からの水蒸気輸送、に着目して、上層雲域の速い東進現象についてさらに調査していきたい。

文献

- Asai, T., S. Ke, and Y.-M. Kodama, 1998: Diurnal variability of cloudiness over East Asia and the western Pacific ocean as revealed by GMS during the warm season. *J. Meteor. Soc. Japan*, 76, 675-684.
- 坂田敏夫, 1984: 宇宙から見た気象-No. 33 上層雲域と下層雲域の移動の違い. *天気*, 31, 583-585 (口絵写真付き).
- 萩原武士, 1984: 宇宙から見た気象-No. 30 チベット高原から東進する広大な上層雲域. *天気*, 31, 369-370 (口絵写真付き).
- 廣田勇, 1999: 気象解析学. 東京大学出版会, pp. 175.

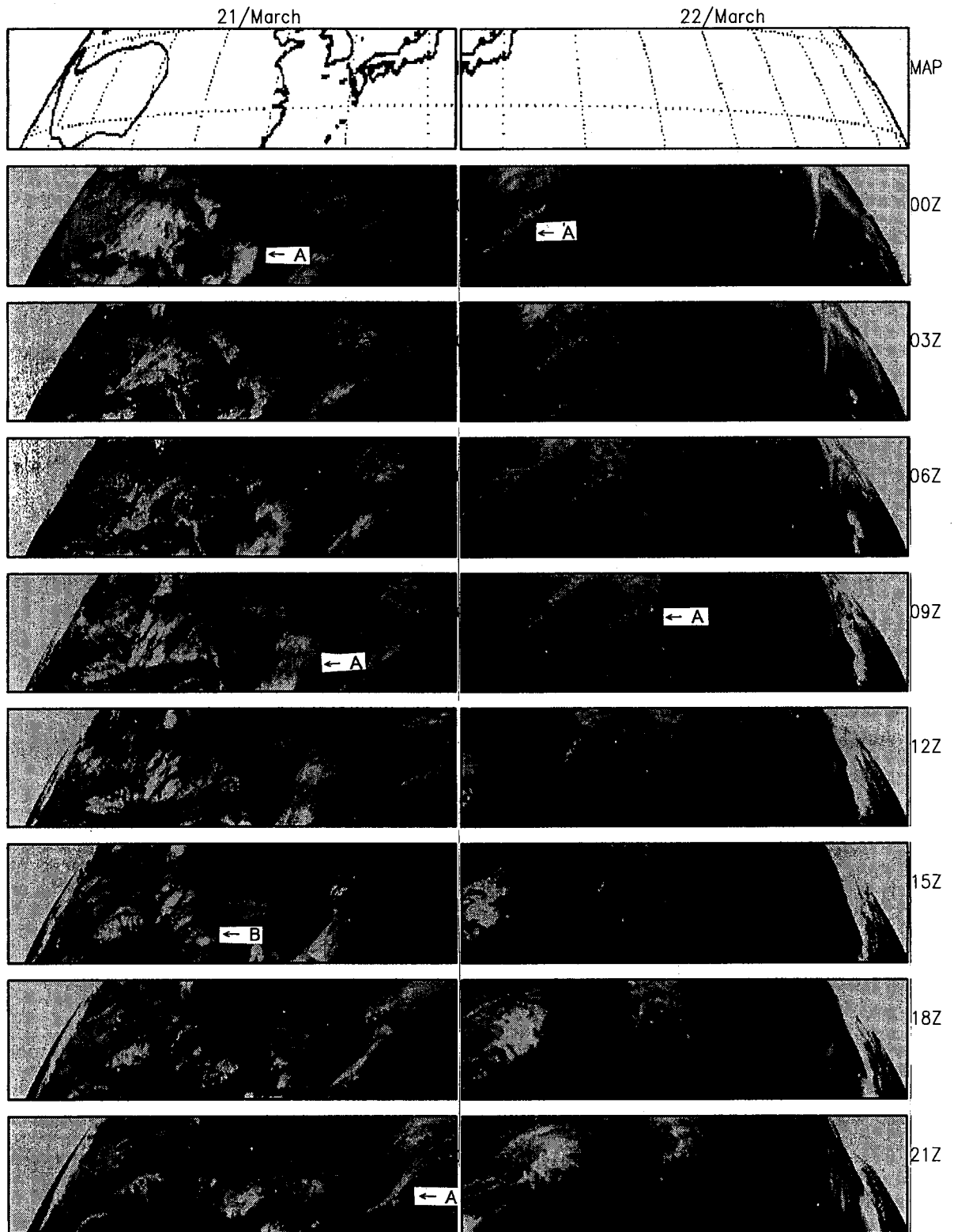


Fig. 1a. Right (left) column shows 3-hourly time sequence of GMS-IR images to the west (east) of Japan islands on March 21 (22), 1997. Maps are shown in the top panels as references of location.

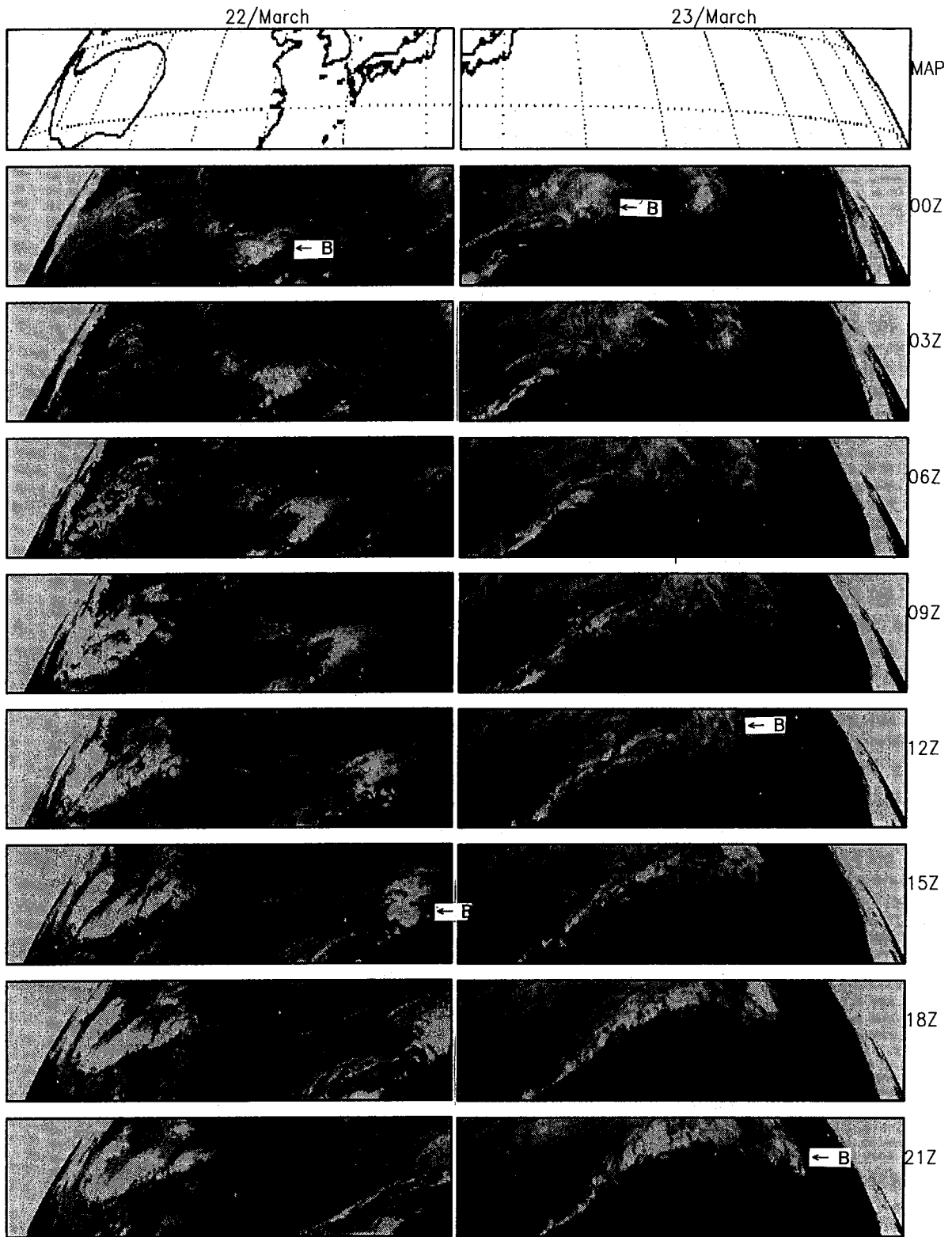


Fig. 1b. As in Fig. 1a except on March 22 (23), 1997.

Hovmoller diagram of upper cloudiness(%)
30N-35N

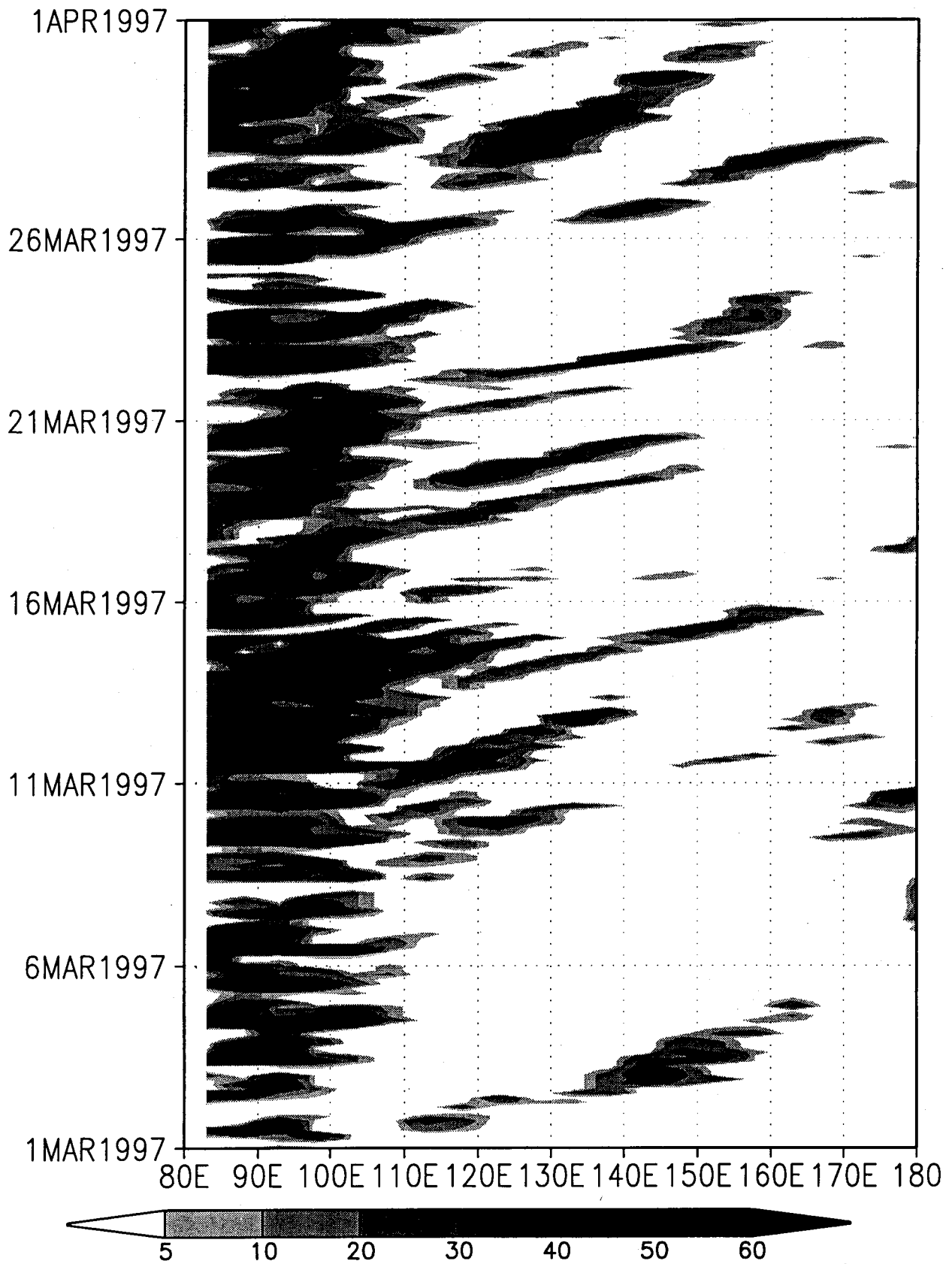


Fig. 2. Longitude-time cross section (Hovmoller diagram) of the amount of upper-level clouds whose top temperature is lower than 243K between March 1 and April 1, 1997.

Hovmoller diagram of 300hPa Height(m)
High pass filtered (<48hour) 30N-35N

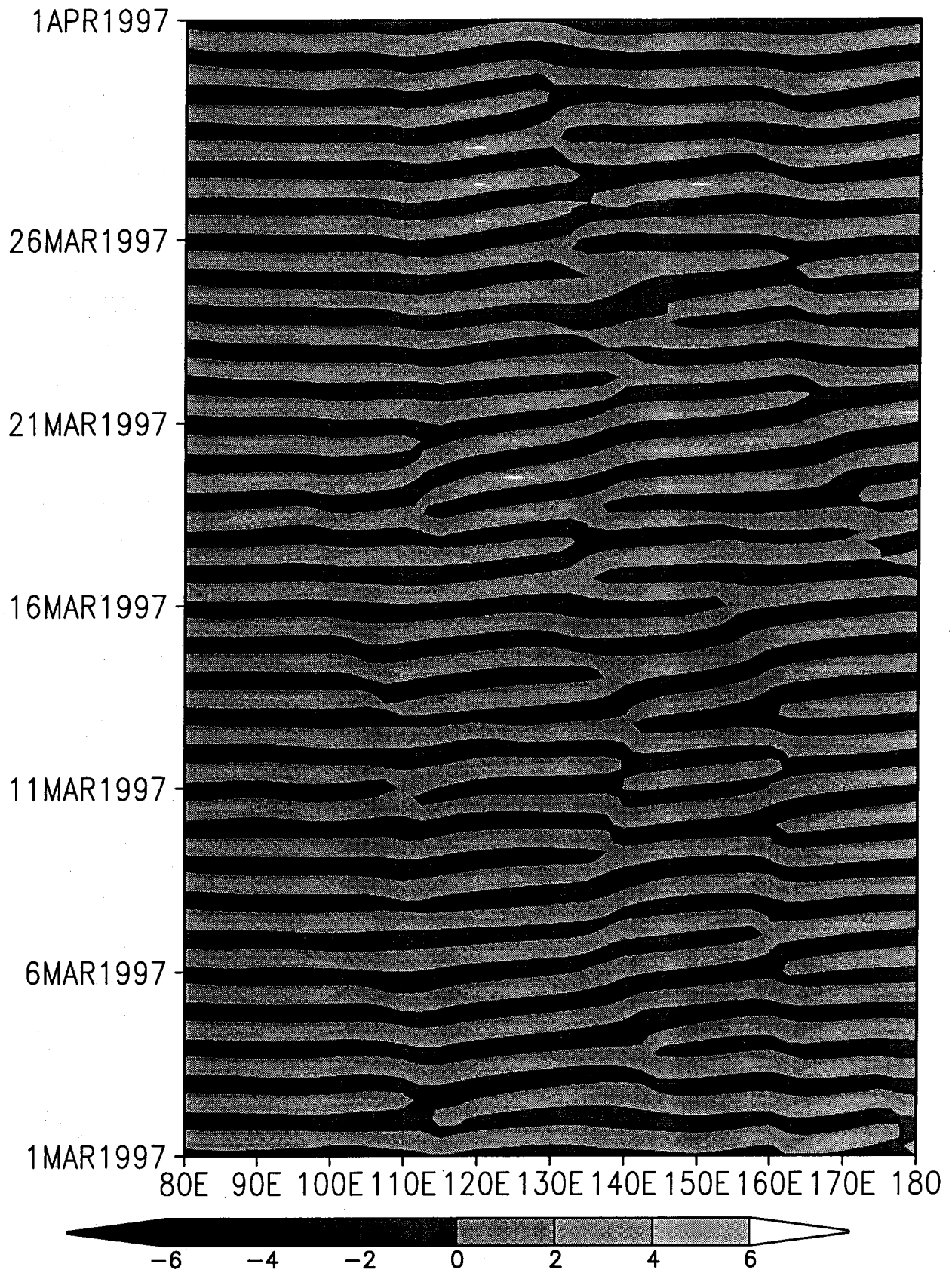


Fig. 4. As in Fig. 2 except for 300 hPa height.

Hovmoller diagram of upper cloudiness(%)
High pass filtered (<48hour) 30N-35N

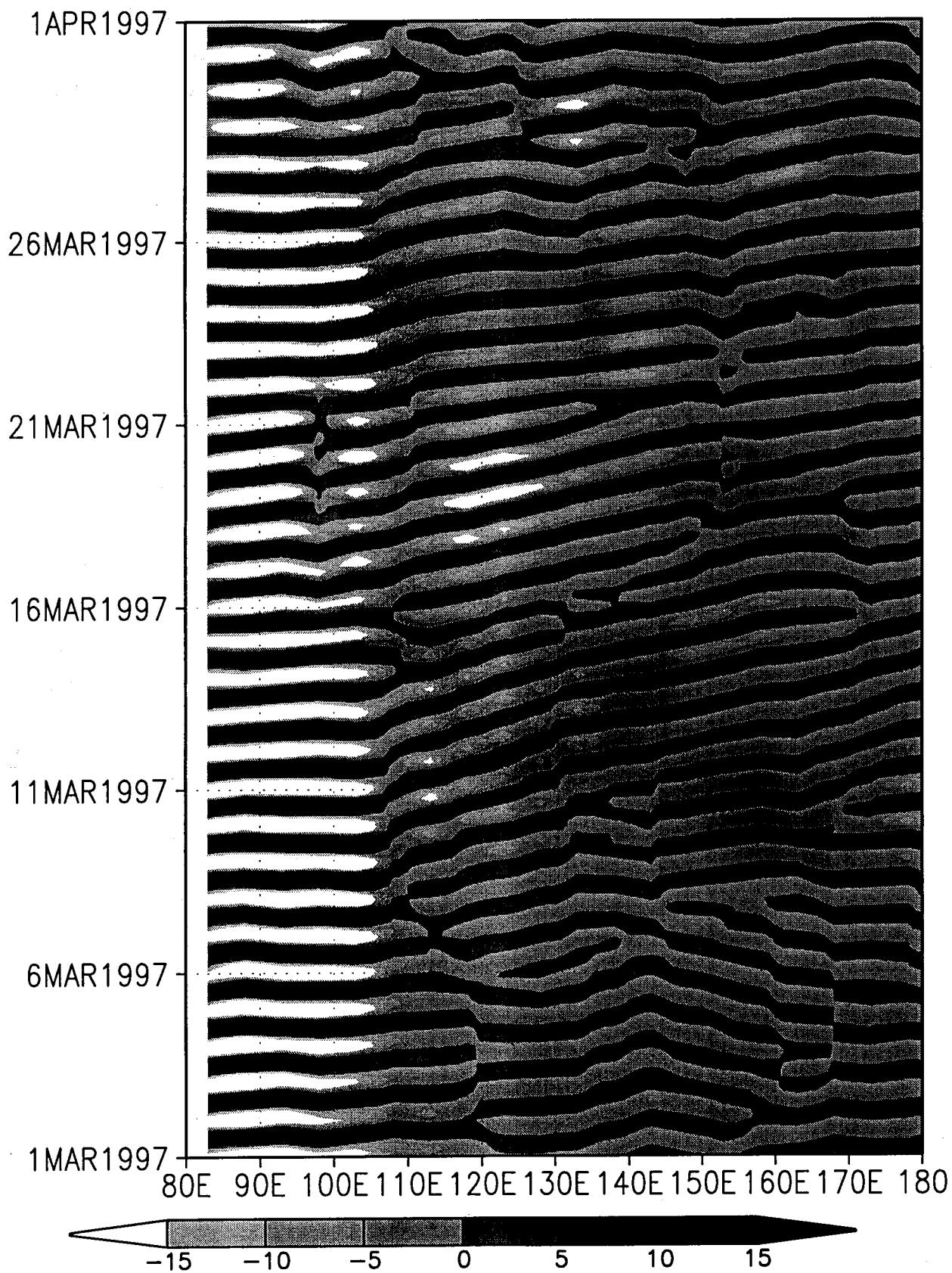


Fig. 3. As in Fig. 2 except for high-pass filtered one to remove longer period (more than 48 hours) variations.

Relationship Between Turbulence by Water Vapor and Spatial Coherence of Light

Ning Yu, Shinya Takasumi, Hiroshi Okayama

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba university
1-33 yayoi-cho, Inage-ku Chiba 263-8522 Japan
E-mail address : okayama@ceres.cr.chiba-u.ac.jp

In remote sensing, the correction of satellite data for atmospheric turbulence is an important problem. In this paper, the degrees of spatial coherence of the light that has passed in an atmospheric turbulence chamber are measured. Water vapor are selected as a factors of turbulence. Water vapor is adjusted by changing the humidity from 49 % to 95 %. The measurement results show that the degree of coherence degrades with the increase of turbulence. The results obtained by this experiment have verified theoretical ones.

1. Introduction

The quality of images obtained by an astronomical telescope set on the earth surface is damaged by atmospheric turbulence, although the image obtained by Hubble space telescope launched into the space is free from the effects of turbulence.

There are many papers ¹⁻⁵ on the study of turbulence. The experiment using an atmospheric turbulence chamber was described by Gamo ¹, the optical propagation in laboratory generated turbulence was experimented by Elliott ², and the modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations was discussed by Hill ³. We made measurements of spatial coherence of the light that has passed through turbulent air at different temperatures last time ⁴.

Correction of errors in satellite data

caused by the turbulence of atmosphere is a very important subject to solve in the remote sensing field. As factors of turbulence other than temperature we considered aerosol and water vapor in the present experiments.

A cloud consisting of cloud particles or ice crystals is formed when the air containing condensation nuclei or ice crystal nuclei is exposed to the state of supersaturation for water vapor ice. Water vapor changes its phase into condensation nuclei or ice crystal nuclei in the ascending current, which makes cloud particles or ice crystals.

It is most significant for correction of satellite data to know the degree of turbulence of aerosol and water vapor by studying the coherence degree of the light that has passed through the turbulent air.

We made a chamber 4 to simulate the turbulence in the atmosphere. Turbulence is generated by aerosol and water vapor, and the spatial coherence of the light affected by aerosol and water vapor is measured by use of Ar laser. The results obtained by this experiment have verified theoretical ones by Ho⁵ which are based on Kolmogorov's theory to describe the atmospheric turbulence.

2. Degree of Coherence

The degree of coherence γ is given by the following formula :

$$\gamma(x_1, x_2) = \frac{\Gamma(x_1, x_2)}{\sqrt{I(x_1) \cdot I(x_2)}} \quad (1)$$

where $\Gamma(X_1, X_2)$ is a mutual coherence function, and $I_1(X_1)$ and $I_2(X_2)$ are the intensities of the light. There are many papers related to coherence and turbulence published^{3, 6-8}. In our experiments, the interference fringes were photographed to obtain the degrees of coherence. The effective exposures of the image were obtained by use of a photographic characteristic curve and the visibility of the fringes was calculated.

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2(I_1 \cdot I_2)}{I_1 + I_2} |V_{12}| \quad (2)$$

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = |V_{12}| \quad (3)$$

where I_{\max} and I_{\min} are effective exposures. In our experiments as $I_1 = I_2$, the degree of coherence γ equals to the visibility V .

The theoretical analysis to obtain the degree of coherence by turbulence have been made by Ho⁵. His results show the degree of coherence degrades with the increase of turbulence as shown in Fig.1⁵.

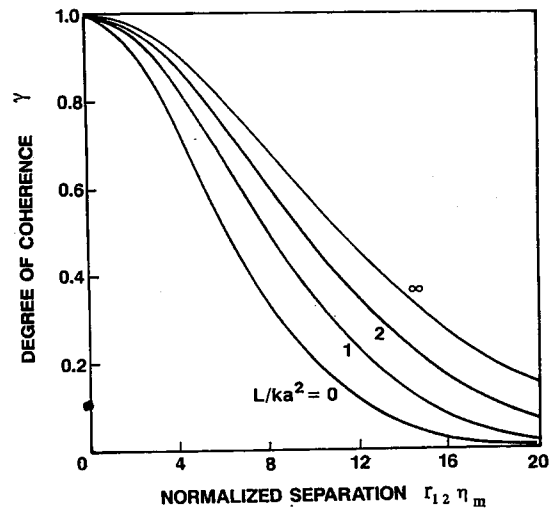


Fig. 1 Theoretical results of degradation of coherence.

3. Experimental Results

We used an atmospheric chamber in the experiments. The optical system of the chamber is shown in Fig. 2. The size of the chamber is 240 cm \times 75 cm \times 30 cm. The argon ion laser (Lexer Model 65) was used as the optical source.

The laser beam multiply reflects in the chamber, goes out and passes through the pinhole, 5 mm in diameter, and the double slits 25 μ m wide each and 50 μ m apart. The propagation length is about 40 m. When it reaches the screen interference fringes are formed by the

double slits. The projected interference fringes are photographed and developed, and the visibilities are measured by a microphoto-densitometer (Sakura PDM-5). In this experiment, the visibility equals to the coherence degree as is shown in Eq. (3).

If a random medium exists along any part of the propagation path between the transmitter and receiver, the optical field at distance $z = L$ from the transmitter under the Rytov approximation⁹ is

$$U(r, L) = U_0(r, L) \exp[\Psi_1(r, L) + \Psi_2(r, L) + \dots] \quad (4)$$

where $U_0(r, L)$ is the optical wave in the absence of turbulence and $\Psi_1(r, L)$ and $\Psi_2(r, L)$ are first-order and second-order complex phase perturbations caused by the random medium.

We have investigated the effects of water vapor. The quantity of the water vapor was controlled by a humidifier (Toshiba KA-500 D). The humidity changed from 49 % to 96 %. The room temperature was 22 ° C. The measurement results are shown in Fig. 6 where the curve "a" was obtained with a single phase screen and the curve "b" with two phase screens. It is found from Fig. 3 that the degrees of coherence are lower when two phase screens are used.

4. Conclusions

This study investigated the degradation of the spatial coherence of Ar laser passing through in the chamber with aerosol and water vapor as factors of turbulence. The results of measurements showed that the degree of coherence

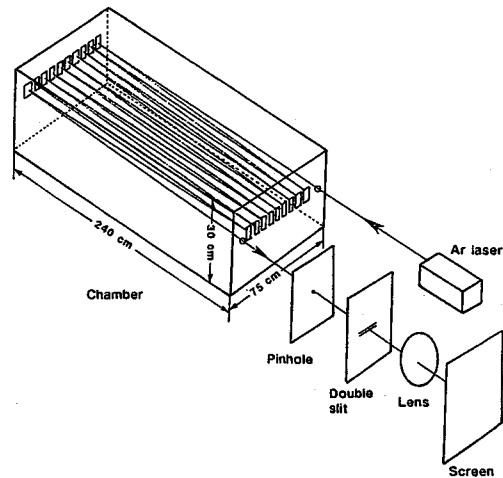


Fig. 2. Atmospheric turbulence chamber with optical system of multiple reflection.

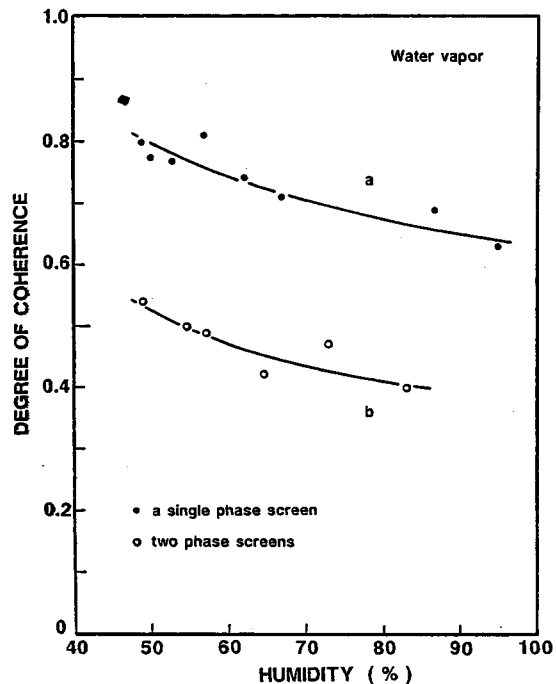


Fig. 3. Degree of coherence of the light influenced by turbulence of water vapor. "a" and "b" are the case of a single phase screen and two phase screens, respectively.

decreases when the turbulence of aerosol and water vapor increases. The decrease of degree of coherence in aerosol is about 0.007 / mg while it is about 0.015 / 1% as for water vapor. These degradations are not compared simply. Aerosol and water vapor exist in the atmosphere.

When the earth's surface from satellite is observed, the optical information by through atmosphere is transferred. The optical information needs the correction for influence of the turbulence to exist of aerosol, water vapor and etc, in atmosphere.

In the future it would be necessary to correct turbulence in atmosphere for satellite data.

References

1. Hideya Gamo and Arun K. Majumdar, "Atmospheric turbulence chamber for optical transmission experiment : characterization by thermal method", *Appl. Opt.*, **17**, 3755 - 3762 (1978).
2. R. J. Hill and S. F. Clifford, "Modified spectrum of atmospheric temperature fluctuations and its application to optical propagation", *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 892 - 899 (1978).
3. Richard A. Elliott, J. Richard Kerr and Philip A. Pincus, "Optical propagation in laboratory-generated turbulence", *Appl. Opt.*, **18**, 3315 - 3323 (1979).
4. Hiroshi Okayama and Li-Zhong Wang, "Measurement of the spatial coherence of light influenced by turbulence", *Appl. Opt.*, **38**, 2342 - 2345 (1999).
5. T. L. Ho, "Coherence Degradation of Gaussian Beams in a Turbulent Atmosphere", *J. Opt. Soc. Am.* **60**, 667 - 673 (1970).
6. L. C. Andrews, W. B. Miller and J. C. Ricklin, "Spatial coherence of Gaussian-beam wave in weak and strong optical turbulence", *J. Opt. Soc. Am. A*, **11**, 1653 - 1666 (1994).
7. Ronald L. Fante, "Mutual coherence function and frequency spectrum of a laser beam propagating through atmospheric turbulence", *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 592 - 598 (1974).
8. R. F. Lutomirski and H. T. Yura, "Wave Structure Function and Mutual Coherence Function of an Optical Wave in a Turbulent Atmosphere", *J. Opt. Soc. Am.*, **61**, 482 - 487 (1971).
9. V. I. Tatarski, *Wave propagation in a Turbulent Medium* (McGraw-Hill, New York, 1961).

遺伝的アルゴリズムに基づく教師つき テクスチャ分類用トレーニングエリアの自動選定

Automatic selection of reasonable training areas for supervised texture classification based on the genetic algorithm

○奥村 浩, 内山克史 (長岡技科大), 梶原康司 (千葉大 CEReS), 張 熙, 吉川敏則 (長岡技科大)
Hiroshi Okumura, Katsushi Uchiyama (Nagaoka Univ. Tech.), Koji Kajiwara (CEReS, Chiba Univ.),
Xi Zhang and Toshinori Yoshikawa (Nagaoka Univ. Tech.)

Abstract

An automatic selection method of reasonable training areas for supervised texture classification is proposed. This method is based on both the texture representation method using rotation invariant moments and the genetic algorithm (GA). In the proposed method, first, sets of candidates for each texture category are roughly given. The chromosomes for the GA are formed by the indexed candidates and their extent. The fitness function for the GA is obtained by the mixed texture model and quantified pure textures. In this paper, summary of the texture representation method and comparison of texture discrimination ability with the conventional Haralick's method are described. Furthermore, the details of the proposed automatic selection method are presented, and some simulation results are also shown.

Keywords

supervised texture classification, complex Zernike moment, training areas, genetic algorithm

1. はじめに

今秋打ち上げられ、その有用さが期待される IKONOS(米 Space Imaging Inc.) をはじめとした近年の衛星搭載センサの高解像度化により、地上の情報がより詳しく得られるようになった。しかしながら、従来のリモートセンシング画像分類手法では、主として分光(スペクトル)情報や空間(形状)情報が利用されているため、本来同一カテゴリに分類されるべき場所が、輝度のわずかな違いで別のカテゴリに分類されてしまうといった新たな問題が生じるようになった。本研究では、人間の感覚により近い画像分類を行う目的で、画像内のテクスチャ情報の新しい定量化手法を開発するとともに、その手法を教師つきテクスチャ分類に適用してきた。本稿では、まず、画像の空間パワースペクトル分布パターンを回転不変モーメントの一つである Zernike モーメント⁵⁾を用いたテクスチャ定量化手法の概要を示す。次に、従来のテクスチャ定量化手法とのテクスチャ識別能力の比較実験結果を示す。比較対象には、従来手法の一つである同時生起行列に基づく Haralick の特徴量ベクトル¹⁾を用いた。さらに、教師つきテクスチャ分類において重要な、適切なトレーニングエリアの選定作業を自動化するために、遺伝的アルゴリズム^{6),7)}に基づく新しいトレーニングエリア自動選定手法を提案し、実際の航空機 M S S 画像を用いたトレーニングエリア選定実験により、その有効性を検証する。また、本手法により選定されたトレーニングエリアを用いた教師つきテクスチャ分類の結果も併せて報告する。

2. Zernike モーメントに基づくテクスチャ定量化手法

画像のテクスチャは、通常ある程度の広さの領域を対象に定義される。ここでは、画像中のある大きさの正方形の視野内に入る部分のテクスチャについて定量化を行い、以後この視野を正方視野と呼ぶことにする。リモートセンシング画像のテクスチャ定量化で重要なことは、同じテクスチャであれば、正方視野内での位置や、テクスチャ回転角度の大きさに関わらず、同一のテクスチャとして扱われなければならない点である。そこで、本手法では、パターンの平行移動成分の影響を抑えるため、画像そのものではなく、2次元 DFT を用いて画像を空間振幅スペクトル分布に変換した上で、回転に対する影響を抑えるために、回転不変量として知られている Zernike モーメント⁵⁾を適用している。

本手法は、次の5つの手順からなっている。

- 1) 異常値の置換およびヒストグラムストレッチ：正方視野中にノイズが混入している可能性があるため、画素の輝度値分布ヒストグラムの両端5%を異常値と見なし、隣接8画素の輝度値の平均で置換した後、ヒストグラムをストレッチする。
- 2) 窓処理：2次元DFTを適用する際の境界効果を回避するために、窓処理を行う。ここでは、Hanning関数を採用した。
- 3) 空間スペクトルの振幅成分の算出と正規化：2次元DFTにより、正方視野内の画像の空間スペクトルの振幅成分を算出し、DC成分以外の値を正規化する。
- 4) Zernikeモーメントの算出：空間スペクトルの振幅成分の分布から複素Zernikeモーメントの絶対値

$$A_{nl} = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [V_{nl}(r, \theta)]^* \cdot f(r \cos \theta, r \sin \theta) r dr d\theta \quad (1)$$

を算出する。ここで、*は複素共役を意味し、 n 、 l はそれぞれ、次数、繰り返し数と呼ばれるパラメータである。次数 n は、正の整数であり、繰り返し数 l は、 $n - |l| = \text{even}$ ($|l| \leq n$)なる条件を満たす整数である。また、 $V_{nl}(r, \theta)$ は複素Zernike多項式²⁾⁻⁴⁾と呼ばれ、次式で定義される。

$$V_{nl}(r, \theta) = R_{nl}(r)e^{il\theta} \quad (2)$$

複素Zernike多項式系 $\{V_{nl}(r, \theta)\}$ は単位円内 $|r| \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi$ で完備な直交関数系を構成する³⁾。ここで、 $R_{nl}(r)$ は動径多項式と呼ばれ、

$$R_{nl}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|l|)/2} (-1)^s \cdot \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|l|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|l|}{2} - s\right)!} r^{n-2s} \quad (3)$$

で定義される。本手法では、次数 n は、計算量や各次数のモーメントが持つ情報量の大きさから考えて、 $0 \leq n \leq 20$ の範囲を用いることとし、さらに、空間スペクトルの対称性から偶数次のみを用いる。また、複素モーメントの絶対値を用いるため、繰り返し数 l は n 以下の正数のみを用いた。

5) Zernikeモーメントベクトルの正規化：算出した66種類のZernikeモーメントをまとめてひとつのベクトルと考へ、このベクトルの大きさが1になるように正規化を行う。これは、Zernikeモーメント算出の際に空間スペクトル分布を単位円へ写像するため、各Zernikeモーメントがほぼ一律に正方視野の大きさの影響を受けるためである。

以上の手順で得られた正規化Zernikeモーメントベクトルを定量化されたテクスチャと考へる。前述のように、このベクトルの各要素は互いに直交している。従って、画像のテクスチャは、用いたZernikeモーメントで張られる66次元直交空間の、原点から半径1の超球面上のある1点へのベクトルとして一意に表現できる。この定量化手法を教師つきテクスチャ分類に適用する際に重要な他のテクスチャとの相互識別には、各テクスチャから得られた正規化Zernikeモーメントベクトルで形成される偏角を利用し、最小角度を示す教師カテゴリに分類を行う。

3. 従来手法とのテクスチャ識別能力比較

提案したテクスチャ定量化手法の有効性を検証するために、自然界に実在するテクスチャの写真を用いて従来手法とのテクスチャ識別能力比較実験を行った。比較対象とした従来手法には、同時生起行列に基づくHaralickの特徴量¹⁾を用いた。従来手法1では、4種類の同時生起行列から得られた各々13種類、合計52種類の特徴量をそのままベクトルとして扱い、従来手法2では、上記13種類の特徴量の4種類の同時生起行列間での平均値と範囲をベクトルとして扱った。実験に用いた画像は、Brodatzの写真集⁸⁾から選んだ15種類の写真(Fig.1参照)を、フラットベッドスキャナ上で30度刻みで回転させながら取り込んだ画像である。画像の大きさ、正方視野の大きさは、ともに128×128で、これらの画像には、各々若干の平行移動も加わっている。これら180枚の画像総てを参照画像(教師画像)と考へ、180枚の画像がどの参照画像に分類されるかというクロスマッチ分類を試みたところ、Fig.2のようになった。各黒点は分類候補の上位12位以内を示している。これらの点が同じ種類の(回転していることを除けば同じ対象物を撮影した)参照画像に集結していれば、回転の影響による誤分類がないことを

示している。Fig.2 から明らかなように、従来手法は2種類とも誤分類を生じているのに対して、提案手法は正しく分類が行われている。処理に要する時間は、提案手法は正方視野の大きさに、従来手法は1画素あたりの階調数(同時生起行列の大きさ)にそれぞれ比例して増大するため単純には比較できないが、今回用いた128×128, 8bitを例にとると、提案手法は従来手法より約70倍高速であった。

4. 遺伝的アルゴリズムに基づくトレーニングエリア自動選定

提案したテクスチャ定量化手法を、教師つきテクスチャ分類に適用する際には、どのように適切なカテゴリを設定し、画像中のどこに各カテゴリのトレーニングエリアを設定し、正方視野の大きさをどのくらいにするかといった点が重要となる。従来は、実際に分類を試みた後に結果を評価して、必要に応じてこれらのパラメータを設定し直すという試行錯誤が主であった。しかしながら、提案したテクスチャ定量化手法は、性能はよいがある程度の処理時間が必要なため、こうした試行錯誤をできるだけ回避したい。そこで、探索空間の全域探索をせずに準最適解を得られる遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、適切なトレーニングエリアの場所と正方視野の大きさを決定する手法GATS(GA-based Training area Selection)法を開発した。GAは、環境に対する適応度の高い個体ほどその形質が後の世代に受け継がれるように、増殖と淘汰を繰り返して進化していく生物の進化過程を模倣した最適値探索アルゴリズムで、1960年代にHolland⁶⁾によって提唱され、後にGoldberg⁷⁾らによって様々な応用が模索された。

GATS法は、以下の手順からなっている。

- 1) カテゴリ数と種類を決定する。
- 2) 各カテゴリ毎にトレーニングエリア探索領域を指定する。
- 3) 初期染色体群を生成する。なお、これらの染色体の個々の遺伝子座には、トレーニングエリアの中心座標につけたインデックスとサイズが入る。
- 4) 適応度を算出する。なお、適応度には、次章で定義するトレーニングエリアの適切さの尺度を採用する。
- 5) 次世代に残す染色体を選択し、適応度の最も低い染色体を淘汰する(選択・淘汰)。ここでは染色体の選択にエリート保存戦略を採用した。
- 6) 染色体群から2つの染色体を選び、それらを親として次世代の子を生成する(交叉)。なお、親の選択にはルーレット(モンテカルロ)戦略を、また交叉方法として、一様多点交叉を採用した。
- 7) ある確率で1つの染色体の組成を変化させる(突然変異)。なお、ここでの突然変異率は0.1とした。
- 8) 4)から7)までの手順を、適応度が収束する(準最適な染色体で上位が独占される)まで繰り返す。

こうして得られた最終的な(進化を遂げた)染色体群のうち、最も適応度の高い染色体が、教師つきテクスチャ分類に適したトレーニングエリアの場所と正方視野の大きさを示している。

5. トレーニングエリアの適切さの尺度

GATS法で用いる適応度として、以下のように「トレーニングエリアの適切さの尺度」を定義する。教師つきテクスチャ分類に用いるトレーニングエリアに求められることは、正方視野内に複数カテゴリが混在した場合でもできるだけ誤分類を起こしにくい参照(教師)データを提供すること、すなわち、テクスチャ混在時の分類信頼性(Classification Reliability in Mixed Texture Cases: CRMTC)が高いことである。そこで、Fig.3(a)に示すような混在モデルを考える。正方視野内にはテクスチャAとテクスチャBの2種類しか存在しないと仮定する。Fig.3(a)に示すように、正方視野内にテクスチャAのみが含まれている状態(C1)から、2種類のテクスチャの混在状態(C2)を経て、テクスチャBのみが含まれている状態(C3)に至る場合を考える。状態C1, C3で得られる正規化Zernikeモーメントベクトルを、それぞれ a , b とすると、C1からC3への遷移中の状態C2で得られるNZMV c には、正方視野内におけるテクスチャAとテクスチャBの面積占有率に応じて、 a , b が寄与していると考えられる。そこで、テクスチャBの面積占有率を α とおくと、 c は次式のように定義できる。

$$c = \frac{W(1-\alpha)a + W(\alpha)b}{|W(1-\alpha)a + W(\alpha)b|} \quad (4)$$

ここで、 $\beta = W(\alpha)$ は、テクスチャ定量化の際に用いる窓関数によって決まる重み関数で、窓関数に Hanning 関数を用いた場合の $1 - \beta$ と β との比は、Fig.3(b) の左右の体積比となる。このモデルを用いて、CRMTC を次のような手順で算出する。

- 1) 最初に設定した m 種類の分類カテゴリのうち 2 種類を選択する。
- 2) この 2 種類の分類カテゴリに対応するトレーニングエリアから得られる正規化 Zernike モーメントベクトル a , b を算出し、式 (4) を用いて様々な面積占有率 α に対応する合成ベクトル c を求める。なお、面積占有率は、対象トレーニングエリアの大きさに対応して変化するものとする。
- 3) 合成ベクトル c と、各カテゴリに対応するトレーニングエリアから得られる正規化 Zernike モーメントベクトルとの偏角を求めると、【Case1】1) で着目した a か b かのどちらかが必ず最小偏角を呈する場合と【Case2】そうではない場合 (Fig.4) がある。Case1 では、最小偏角を呈する方のベクトルと、それ以外のベクトルとの偏角差の積分 ε_1 を、Case2 では、正常な分類が行われる混在比での最小偏角を呈する方のベクトルと、それ以外のベクトルとの偏角差の積分 ε_2 と、誤分類を起こす可能性のある混在比での本来は最小偏角を呈するべきベクトルと、実際に最小偏角を呈しているベクトルとの偏角差の積分 ε_3 を求め、次式によって CRMTC を定義する。

$$CRMTC = \frac{\sum_{i,j,k}^q \varepsilon_{1ijk} \cdot \sum_{i,j,k}^{p-q} \varepsilon_{2ijk}}{1 + \sum_{i,j,k}^{p-q} \varepsilon_{3ijk}} \quad (5)$$

ここで、 i, j は着目している 2 カテゴリ、 k はそれ以外のカテゴリを示す。 q は Case1 の数、 q は i, j, k の組み合わせの数 $((m-2)_m C_2)$ である。

また、正規化 Zernike モーメントベクトルには、正方視野の大きさが小さい場合、同じテクスチャ内であっても、得られるベクトルが不安定になるという性質がある。そこで、Fig.5 に示すように、現在着目している染色体が示す各カテゴリのトレーニングエリアから得られる正規化 Zernike モーメントベクトルを基準として、それより 1 まわり小さなトレーニングエリアから得られる正規化 Zernike モーメントベクトルとの偏角差 ($S1$) と 1 まわり大きなトレーニングエリアから得られる正規化 Zernike モーメントベクトルとの偏角差 ($S2$) を用いて、正方視野の大きさに関する正規化 Zernike モーメントベクトルの安定性 (Stability of NZMV in FOV Mask Size: SNFMS) を次式のように定義する。

$$SNFMS = \prod_i^m \{1 - (S1_i + S2_i)\} \quad (6)$$

以上のことから、トレーニングエリアの適切さの尺度、すなわち GATS 法における適応度値は、次式のように定義する。

$$fitness = CRMTC \times SNFMS \quad (7)$$

6. 数値実験

GATS 法の有効性を検証するために、テスト画像と実際の航空機搭載センサ画像を用いて、GATS 法によりトレーニングエリアの自動選定を行い、選定されたトレーニングエリアを用いて教師つきテクスチャ分類を試みた。実験に用いるテスト画像は、前述の Brodatz の写真集から選んだ「煉瓦の壁」、「爬虫類の皮膚」、「矢はず状の刺繡」の 3 つの写真と、「煉瓦の壁」を 30 度回転させた画像の合計 4 種類を組み合わせで作成した。Fig.6 に処理結果を示す。Fig.6(a) は、原画像と初期段階でのトレーニングエリアの例とを重ねたものを、(b) は、そのトレーニングエリアを用いた場合の教師つきテクスチャ分類結果を、(c) は、原画像と収束後のトレーニングエリアとを重ねたものを、(d) は、そのトレーニングエリアを用いた場合の教師つきテクスチャ分類結果をそれぞれ示している。これらの結果を見ると、GATS 法で選定されたトレーニングエリアを用いると、精度よくテクスチャ分類を行うことができることがわかる。なお、適応度値は、(a) では約 2.3、(c) では約 66 であった。

次に、実際の航空機搭載センサ画像を用いた結果を示す。用いた画像は、愛知県渥美郡渥美町福江地区のもので、飛行高度は1450フィート、観測波長帯は近赤外域、画像の大きさは256×256である。ここでは、分類カテゴリとして、水田、ビニールハウス、人工建造物の3種類を選択した。他に道路などがあるが、非常に細い対象物なので、独立テクスチャとしては不的確と判断した。Fig.7(a)に原画像を、(b)～(d)に設定したカテゴリ、及びそれらの探索領域をそれぞれ示す。また、Fig.8に処理結果を示す。Fig.8(a)～(d)の各図が示す意味は、Fig.6と同じである。これらの結果からも、GATS法で得られたトレーニングエリアが適切であることが明らかである。なお、適応度値は、(a)では約10.7、(c)では約101.8であった。

7. まとめ

本稿では、前回提案した画像のテクスチャを空間周波数の振幅成分分布から得られる正規化Zernikeモーメントベクトルを用いて定量化する手法と、従来手法のひとつであるHaralickの特徴量ベクトルに基づく手法とのテクスチャ識別能力比較実験の結果を示すとともに、教師つきテクスチャ分類を行う上で重要な、適切なトレーニングエリアの場所と大きさを決定するための遺伝的アルゴリズムに基づく新しい手法GATS法を提案し、数値実験により、その有効性を確認した。今後の課題は、より適切な適応度関数の検討と、教師なしテクスチャ分類への拡張である。

なお、本研究は千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究(11-49)により行われたものである。

参考文献

- 1) R.M.Haralick, K.Shanmugam and Its'hak Dinstein: "Textural Features for Image Classification", IEEE Trans. SMC, 3, No.6, pp.610-621, 1973
- 2) F.Zernike: "Beugungstheorie des Schneidenver-Fahrens und Seiner Verbesserten Form: Der Phasenkontrastmethode", Physica, 1, pp.689-704, 1934
- 3) A.B.Bhatia and E.Wolf: "On The Circle Polynomials of Zernike and Related Orthogonal Sets", Proc. Camb. Phil. Soc., 50, pp.40-48, 1954
- 4) M.Born and E.Wolf: "Principles of Optics 5th Ed., Chapter 9", Pergamon Press, 1975
- 5) C.H.Teh and R.T.Chin: "On Image Analysis by the Methods of Moments", IEEE Trans. PAMI, 10, 4, pp.496-513, 1988
- 6) J.H.Holland: "Adaptation in Natural and Artificial Systems", MIT Press, 1992 (First Ed.: Univ. Michigan, 1975)
- 7) D.E.Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, 1989
- 8) P.Brodatz: Textures : A Photographic Album for Artists and Designers, DoverPubl. Inc., 1966

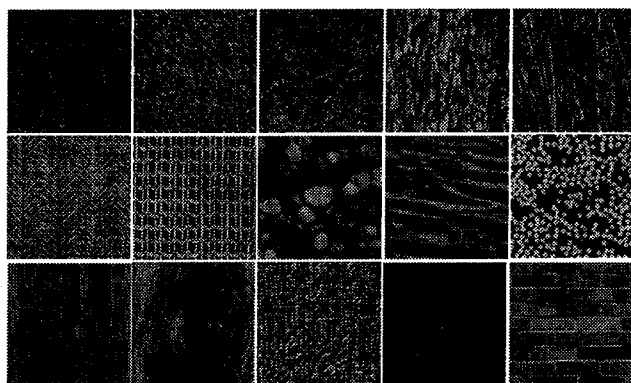


Fig.1 Sample images from Brodatz's album.

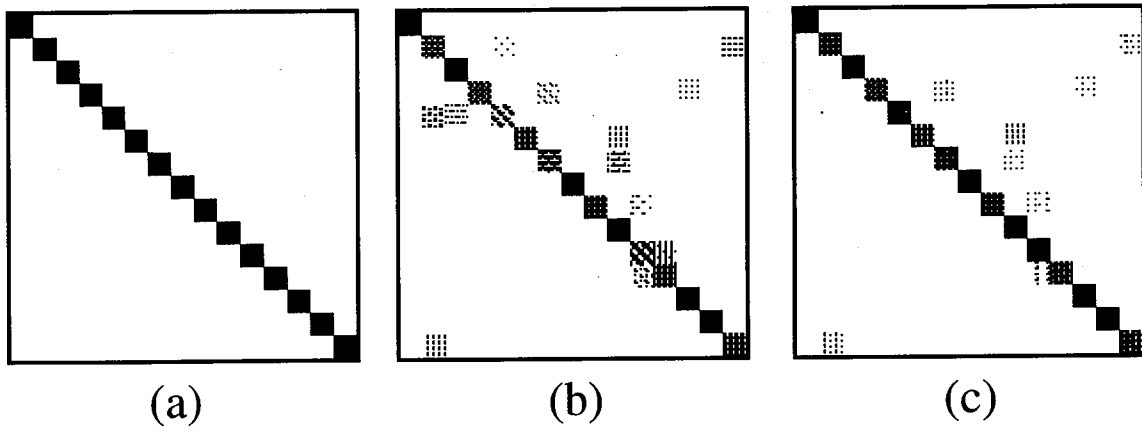


Fig.2 Evaluation result by the proposed method(a), the conventional method 1(b) and 2(c).

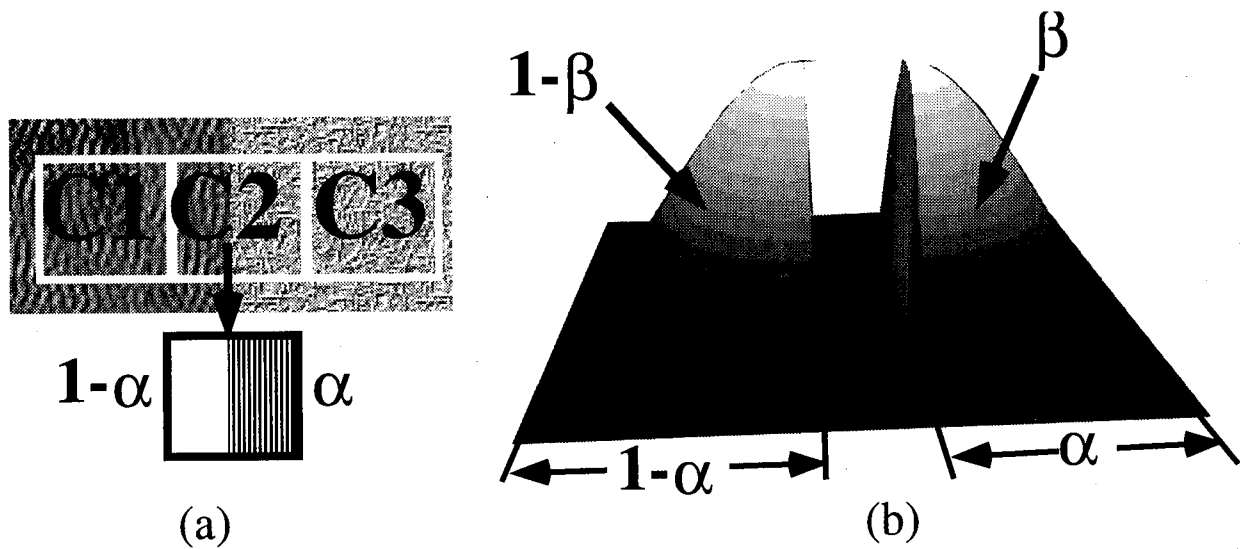


Fig.3 Mixed texture model(a) and the weighting function based on Hanning window function(b).

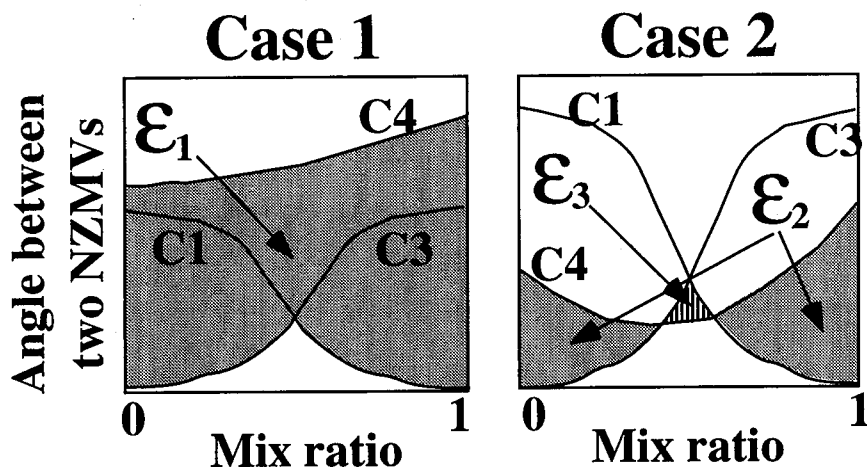


Fig.4 Typical mixed texture cases for calculation of the classification reliability.

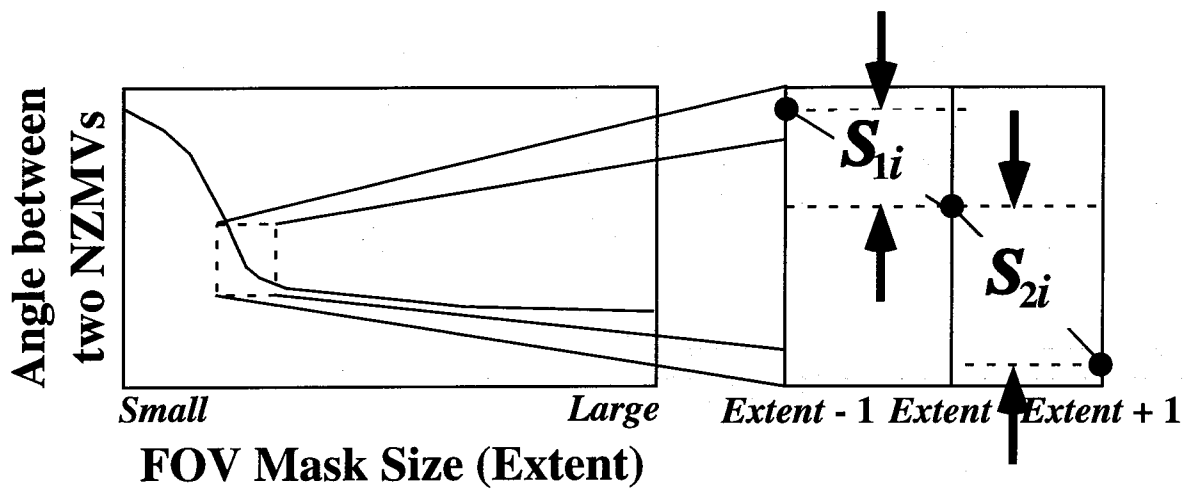


Fig.5 Schematic diagram for calculation of the stability of the normalized Zernike moment vector in field of view mask size.

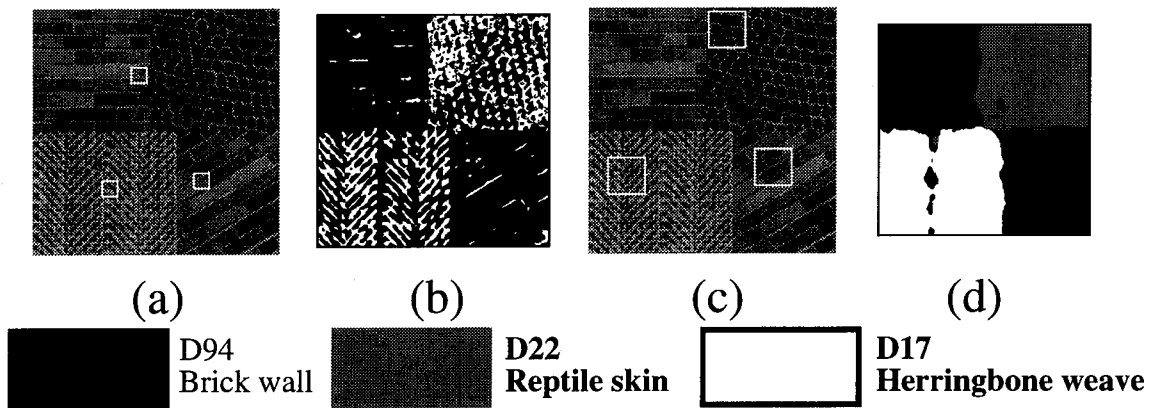


Fig.6 Processing results for test image, example of selected training areas before convergence(a), classification result with the training areas(b), selected training areas after convergence(c), and classification result with the training areas(d).

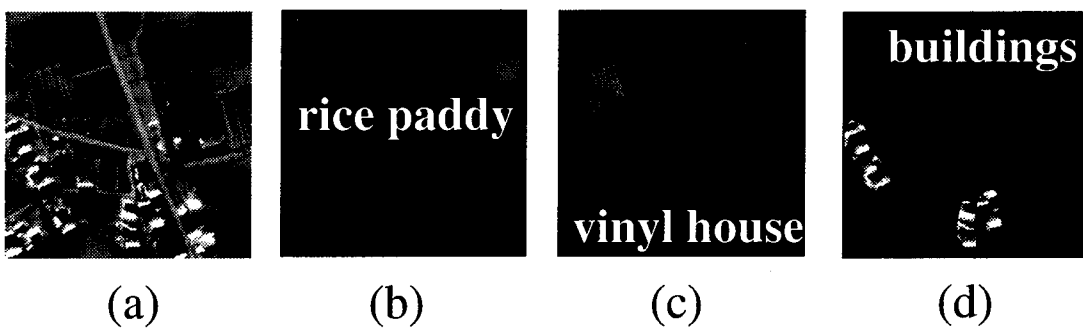


Fig.7 Actual airborne MSS image for processing(a), selected 3 classification categories, and the candidates of the center of training areas for each category.

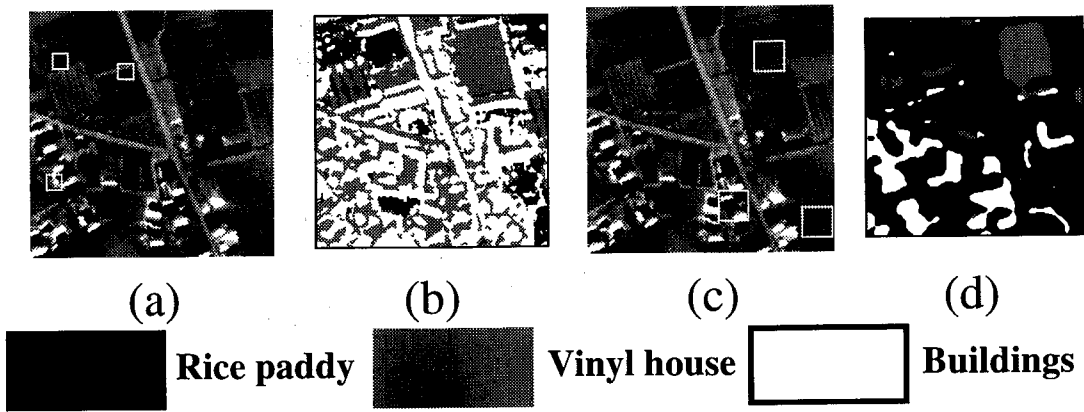


Fig.8 Processing results for actual airborne MSS image, example of selected training areas before convergence(a), classification result with the training areas(a)(b), selected training areas after convergence(c), and classification result with the training areas(c)(d).

衛星リモートセンシングによる雲仙普賢岳火砕流堆積地の観察 Observation of Pyroclastic Sediments on Mt. Unzen Volcano

西田顕郎 (筑波大学農林工学系)
照沼利浩 (筑波大学環境科学研究科)
〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1
nishida@bres.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

火砕流は火山噴火に伴って大量の噴出物が高温・高速の固気混相流となって流下する現象である。火砕流はそれ自身が破壊的な現象であるが、その堆積物が降雨によって侵食されて発生する火山泥流(土石流)もまた、大きな災害を起こす。火砕流は日本やフィリピン・インドネシアを含む、大陸縁辺の島弧に分布する火山に多く発生し、とりわけ、「メラピ型火砕流」と呼ばれる火砕流は、1990年代に限っても、雲仙普賢岳(日本)・メラピ火山・スメル火山(インドネシア)・マヨン山(フィリピン)・スプリエールヒルズ(カリブ海)等で発生し、大きな災害となった。この「メラピ型火砕流」は、堆積物の縁辺部や、新旧の堆積物どうしの境界部分が侵食されやすいことが報告されている(西田ら、1998)。従って、火砕流の堆積範囲が同定できれば、侵食によって発生する火山泥流の流下方向や範囲がおおまかに予測できると考えられる。しかしながら、前述のようなメラピ型噴火を起こす火山は、湿潤多雨な地帯に多く、噴煙の障害も考えると空中写真や光学センサーによるリモートセンシングでは迅速な観測が難しい場合が多いと考えられる。

そこで本研究では、雲や噴煙の影響を受けにくい、合成開口レーダーによるリモートセンシングで、火砕流堆積範囲を同定する手法の開発を目指した。

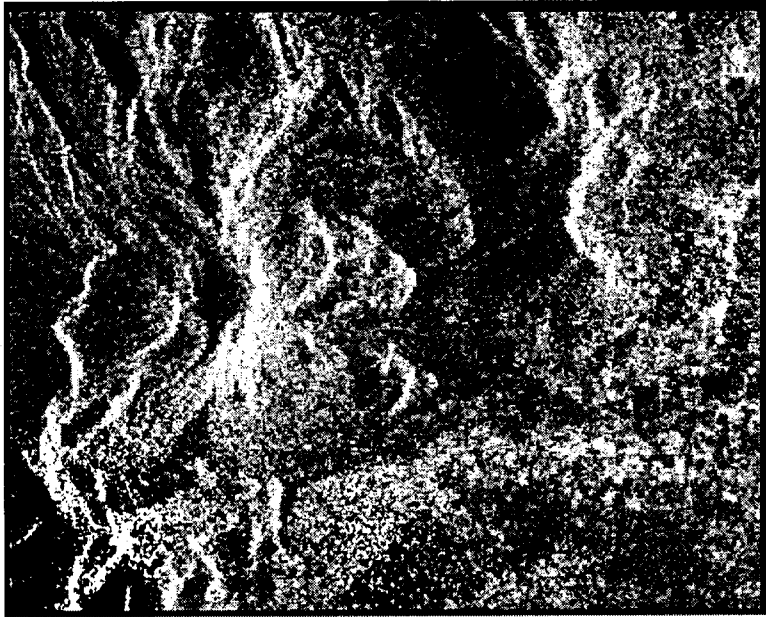
2. 手法と結果

テストサイトは雲仙普賢岳(1990~1995に噴火)とし、用いたデータは、JERS1/SARのレベル2.1画像である。JERS1は1992年から1998年にかけて運用され、ちょうど雲仙普賢岳の活動期と沈静化の時期を観測しており、約30シーンの良好な画像を取得できた。ここでは第一段階の試みとして、活動期のうちの2シーン(2時期;図-1上段・中段)に着目し、それぞれのSAR強度画像(後方散乱係数)の差分演算で火砕流の堆積範囲の抽出を試みた(図-1下段)。その結果、この期間に多くの火砕流流下が見られた箇所(東むきの谷および、北東側の谷)には目だったシグナルは認められなかった。

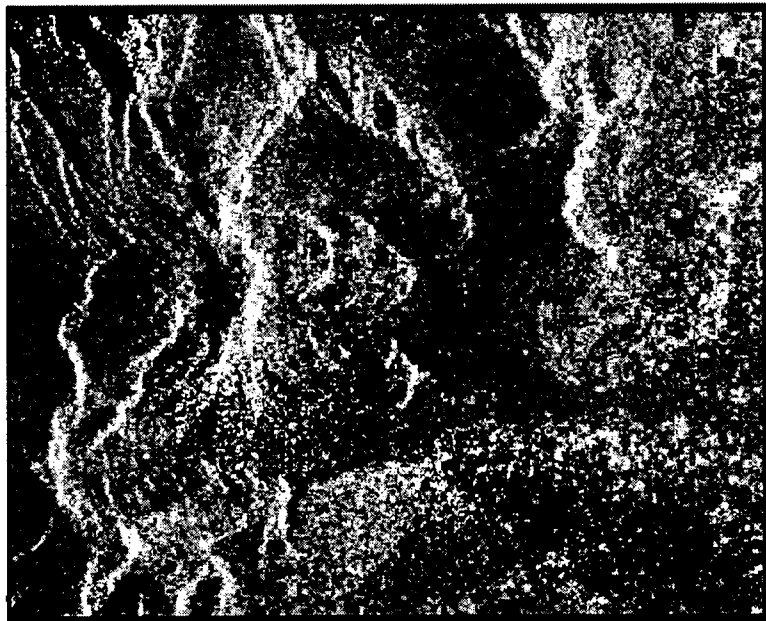
マイクロ波後方散乱係数は地表面の粗度や土壌水分に依存すると言われる。本研究の対象では、既にフレッシュな火砕流堆積物が被覆している箇所に新たな火砕流堆積物が乗った状況であり、このような場合には粗度や土壌水分条件に変化が起きなかったのかもしれない。あるいは、JERS1SARの波長(Lバンド)が不适当であったのかもしれない。実際、馬庭ら(1999)は、RADARSATのSAR画像(Cバンド)について、同様の処理によってメラピ火山の火砕流堆積箇所を良好に抽出している。

参考文献

- 西田顕郎・小橋澄治・水山高久(1998): 雲仙普賢岳における火砕流堆積とガリー侵食の相互作用による地形変化、地形 19(1), pp. 203-222.
馬庭慎吾ほか、1999、RADARSAT強度画像を用いたメラピ火山火砕流(1998年7月)の分布解析。日本写真測量学会・日本リモートセンシング学会合同学術講演会論文集、573-574。



930425



930722

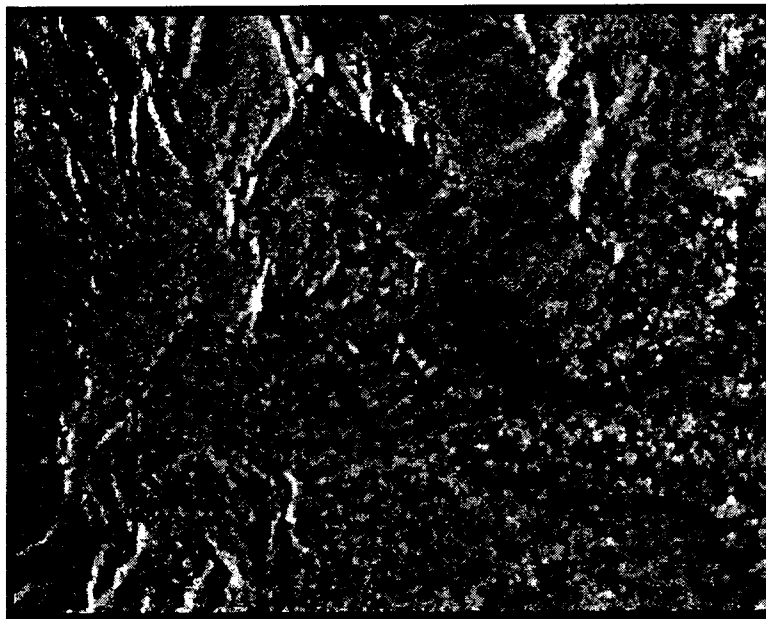


図-1 JERS1/SAR による雲仙普賢岳の画像およびその差分画像。上が北。

ランドサット5号TMデータによるマングローブ林抽出 のための閾値自動決定法の検討

An Examination on Automatic Determination of Threshold for Extraction of Mangrove Forest with TM Data of LANDSAT 5

佐藤 一紘*
Kazuhiro SATO

ABSTRACT : We had suggested a mask process that separates three categories of land area, mangrove forest and waters from a mangrove area composed with the categories. And the procedure and a practical way had been examined to decide thresholds in order to avoid the misclassification and to prepare data sets for quantitative estimation of stand parameters on mangrove forest with TM data of Landsat 5.

In this paper, an automatic determination method of the thresholds was examined to produce masks for extraction of individual categories. For the purpose, the Otsu's automatic threshold selection method was applied. For several ranges, searched threshold was compared. It was one or two of CCT count that the deference among searched thresholds in the ranges suitably set. Therefore, the application of Otsu's method was proper for the determination of threshold to extract mangrove forest.

I. はじめに

マングローブは、熱帯・亜熱帯の潮間帯に広く分布する特異な群落である。その面積はここ数10年間減少の一途であったが、その生態系としての機能が認識され、減少に歯止めがかかり始めている。しかし各国ともに、この森林に関する統計数値は十分整備されてはいない。経済的価値が低いとされ、その他の森林として扱われてきたためである。さらに、その立地条件がきめ細かな林分調査を困難にしている事もその原因と考えられる。世界的に比較する場合も、調査の時期が10年も離れていたり、調査の方法や精度も精粗まちまちというのが実状であった。

しかし地球規模で環境の悪化が問題となり、マングローブの持続的利用と管理が重要な課題となっている。国際マングローブ生態系協会は、World Mangrove Atlas¹⁰を1997年に発刊した。これによると全世界のマングローブの面積は、181,077km²となっている。これは取得時期がそれほど隔たっていないデータを用いて、リモートセンシングによって実現した。センサにより解像度が異なる等の問題はあがあるが、同一の方法による結果であり、相互に比較できるものとして大きく評価できる。

筆者等は、今後マングローブに関するよりきめ細かな資料の必要性が増大すると考え、マングローブ林へのリモートセンシングの適用を検討してきた⁹⁾。それは一

* : 琉球大学農学部 〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地
Tel. 098-895-8792, Fax. 098-895-8734, E-mail: sato4408@agr.u-ryukyu.ac.jp
College of Agriculture, University of the Ryukyus,
Senbaru 1, Nishihara, Okinawa 903-0213, Japan
Tel. 81-98-895-8792, Fax. 81-98-895-8734, E-mail: sato4408@agr.u-ryukyu.ac.jp

体としてのマングローブ林林分解システム構築を目標としている。

このシステムは、マングローブを1つの範疇として他の地被・土地利用と区分し、図化と面積を求める従来の考え方に留まらず、その内部を樹種や林型、作業級等質的に分類し、さらに量的に樹高や太さ、蓄積量等の林分要素を求め¹²⁾、それを複合的に表現し³⁾、種々の集計を行うものである。その基本的な考え方⁷⁾は既にできているが、それをシステム化するための部分的な検討を進めている。そこで、リモートセンシング・データで林分要素を推定するためには、推定式に代入するマングローブ林のデータのみを確定しなければならない。また、陸域や水域にあるマングローブ林と類似の分光反射特性をもつ地被状態の干渉による誤分類を避けるためにも、マングローブ林を抽出する必要がある。

このマングローブ林を抽出するための閾値は、ランドサット5号 TM データの場合バンド4及び5が有効である。それを適宜設定して2値化した5つの結果を1画面に表示し、比較して決める方法⁹⁾を試みた。さらに、多くの方法が提案されている閾値の自動決定法^{4,11)}の中から、大津の方法⁹⁾を適用して自動的に決める方法⁹⁾を試みた。

ここではその自動決定の際の検索する範囲の与え方と閾値について、範囲の幅を変えて検討した結果を報告する。

II. 閾値の必要性

ここで、閾値を求める意味に触れておきたい。マングローブの周辺の地被状態は、一般に陸域、マングローブ林、水域に大別でき、それぞれはさらに細分できる。マングローブ林を1つの範疇として分類する場合はそれほど問題にはならないが、それぞれを細かに分類する場合、それぞれの中に含まれる類似の分光反射特性をもつ地被状態が誤分類の原因になり、陸域にマングローブの範疇が、マングローブの中に陸域の範疇が分類されたりする。陸域のため池や湿地、芋畑やマングローブの中の伐採跡地やアナジャコの塚で乾燥気味の部分である。全域を一体として分類する場合、かなり上手くトレーニング・データをとっても、この種の誤分類は避けられない。これを避けるためには、先ず陸域、マングローブ林、水域に大別し、それぞれを別々に分類し、その結果を重ねあわせる方法が考えられる。

また、マングローブ林の林分要素とTMデータとの関係から、林分要素を推定する場合は、推定式にマングローブ林以外のデータを代入しても意味はないので、マングローブ林のデータのみを用意する必要が生じる。このためにもマングローブ林とその他を大別する方法が必要になる。

上述の理由から、筆者等は陸域、マングローブ林、水域を分離するマスクを作り、それぞれのデータの組みを生成する方法を提案した^{6,7)}。その2値化画像としてのマスクを作る際の閾値を自動的に決定できれば、構築したい解析システムも操作が容易になる。

III. 大津の方法の適用

大津の方法を適用して閾値を自動的に決める方法は、既に報告⁹⁾した。それは、マングローブ林周辺の分光反射特性に着目し、バンド4及び5の CCT カウントの度数分布の谷の部分を検索範囲として与え、それに大津の方法を適用するものである。

Fig.1 にバンド4及び5の CCT カウントの度数分布図を示した。図中に矢印で示したものは、閾値が含まれているか、否かを検討した範囲である。その結果、バンド4の 86~95 の谷部は陸域とマングローブ林が大きく重なり、度数も 3,000 を越えている。同等に重なっているとしても、陸域、マングローブ林に 1,500 以上の画素が逆の区分として残る。この2つを区分する閾値を得るためには、バンド5の 55~62 の谷部の方が良好だと判断できる。よってバンド4の 86~95 の谷部を除く3つの範囲について、適宜幅を広げて大津の方法を適用した。

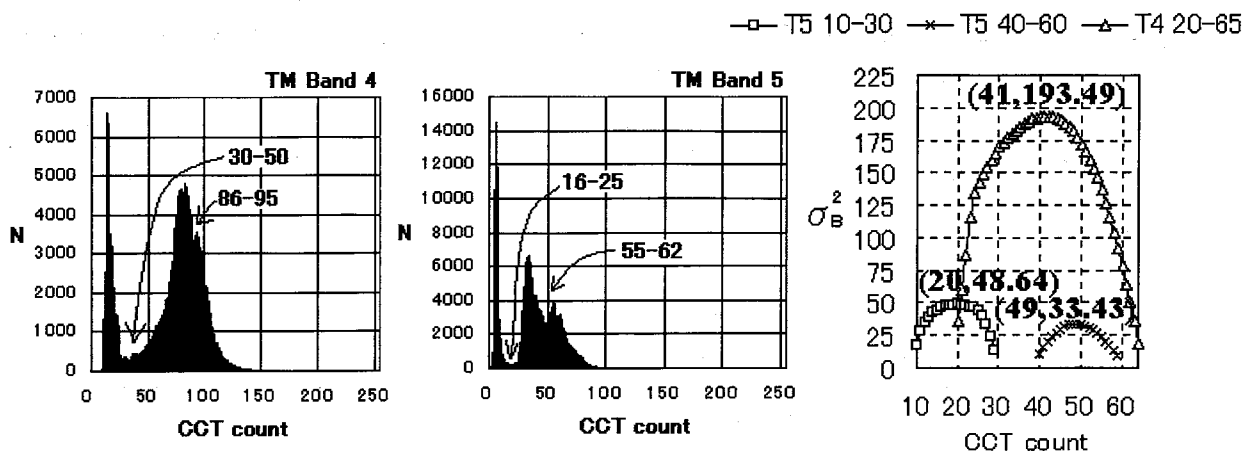


Fig. 1 Histograms for band 4 and 5 and provisional ranges to search threshold (left side), σ_B^2 of calculated results with Otsu's method and the maximum (right side)

大津の方法の考え方は、CCT カウントの度数分布図で閾値を検索する範囲を L 、そこに含まれる画素の総数を N 、 i 番目の CCT カウントを持つ画素の数を n_i とする時、次に示す式で k を 1 番目から $(L-1)$ 番目まで計算して、 σ_B^2 を最大とする k を閾値とするものである。

$$N = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_L \quad ,$$

$$p_i = n_i / N \quad ,$$

$$\omega_1 = \sum_{i=1}^k p_i \quad , \quad \omega_2 = \sum_{i=k+1}^L p_i \quad ,$$

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^k i \cdot p_i / \omega_1 \quad , \quad \mu_2 = \sum_{i=k+1}^L i \cdot p_i / \omega_2 \quad , \quad \mu_T = \sum_{i=1}^L i \cdot p_i \quad ,$$

$$\sigma_B^2(k) = \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2 (\mu_2 - \mu_T)^2$$

その計算結果として $\sigma_B^2(k)$ を、Fig.1 の右側に示した。 $\sigma_B^2(k)$ が最大となる k は、バンド 4 の左側の谷では 41、バンド 5 の左側の谷では 20、右側の谷では 49 であり、それぞれを閾値とした。

IV. 適用範囲の与え方と閾値

一体としての解析システムを考えると、バンド 4 及び 5 の度数分布図を見て、それから閾値を検索する範囲を決め、その範囲から自動的に閾値を求める形が考えられる。しかし、その範囲の決め方が難しいのでは容易なシステムにはならない。おおよその見当で与えても、妥当な閾値を自動的に求められるようにしたい。

よって、目で見て谷部の範囲を適当に与えた時、得られる閾値がどのようになるかを検討した。Table 1. に谷部の底の度数と、範囲を徐々に広げて得られた閾値を示した。現実の度数分布図の形は単純に増減するのではなく、細かに増減しながら全体として Fig. 1 に示すように 3 つの峰と 2 つの谷をもっている。よって、明確な度数の 1 つの極値を得るとは限らない場合が多いと思われる。

大津の方法を適用し、見当で検索範囲を与える事を想定し、Table 1 の下の欄に示す数通りの範囲について閾値を求めた。結果としては、隣接する 2 つまたは 3 つの閾値が得られている。それぞれの閾値の度数を比較すると、いずれの閾値によって

Table 1 Frequency(n) of each CCT count in the bottom of valley of histograms in Fig. 1 and thresholds with several searched ranges

Band 4 (14~66)		Band 5 (6~34)		Band 5 (35~61)	
CCT count	Frequency(n)	CCT count	Frequency(n)	CCT count	Frequency(n)
31	256	14	305	41	4136
32	303	15	287	42	3684
33	280	16	308	43	3359
34	220	17	239	44	3393
35	313	18	202	45	3288
36	427	19	222	46	2821
37	434	20	246	47	2455
38	449	21	238	48	2252
39	351	22	264	49	2459
40	436	23	270	50	2920
41	416	24	277	51	3257
42	425	25	431	52	3285
Searched range	Threshold	Searched Range	Threshold	Searched range	Threshold
20~60	39	10~30	20	40~60	49
19~61	38	9~31	20	39~61	49
18~62	38	8~32	20	38~61	48
17~63	37	7~33	19	37~61	48
16~64	37	6~34	19	36~61	47
15~65	37			35~61	47
14~66	37				

も、白または黒に振り分けられる画素数の少ない部分選ばれており、妥当な閾値が自動的に得られていると評価できる。

どのように閾値を決めても、それぞれの領域に白または黒で点在する画素が残る。それ等は、類似の分光反射特性を持つ画素と考えられる。それ等の点在する画素を、周囲の領域と同じに変更する。我々の都合に合わせて設定する範疇内で、範疇外のものと同様の画素も、内容としては範疇内で分類の方が妥当だと考えるのである。マスク作成の場合、その変更は塗りつぶしとして自動的にまたはペイント等のソフトで処理する。その処理の後に、適宜画像間の演算を行えばマスクができる。Fig. 1 で得た閾値を用い、2 値化処理した後それぞれの領域に残った点在する画素を塗りつぶしたものの例を、Fig. 2 に示した。2 つの画像の差を反転したものも、マングローブ林のマスクとして示している。

このマスクを各バンドのデータに重ねると、マングローブ林のみのデータが用意できる。それを用いてれば、マングローブ林のみを他からの影響を受けずに分類でき、そのデータを適当に組み合わせて推定式に代入すれば、林分要素が推定できる。ただし、実際は林分要素推定の前に、マングローブ林の内部を分類し、ニッパヤシと分類された部分を除外する処理が必要である。これまで得られた推定式は、ニッパヤシを対象としていないからである。ニッパヤシの林分要素とリモートセンシングデータとから推定式を求めた後に同様の処理を行えば、マングローブ林の量的推定と集計、図化が完成する。

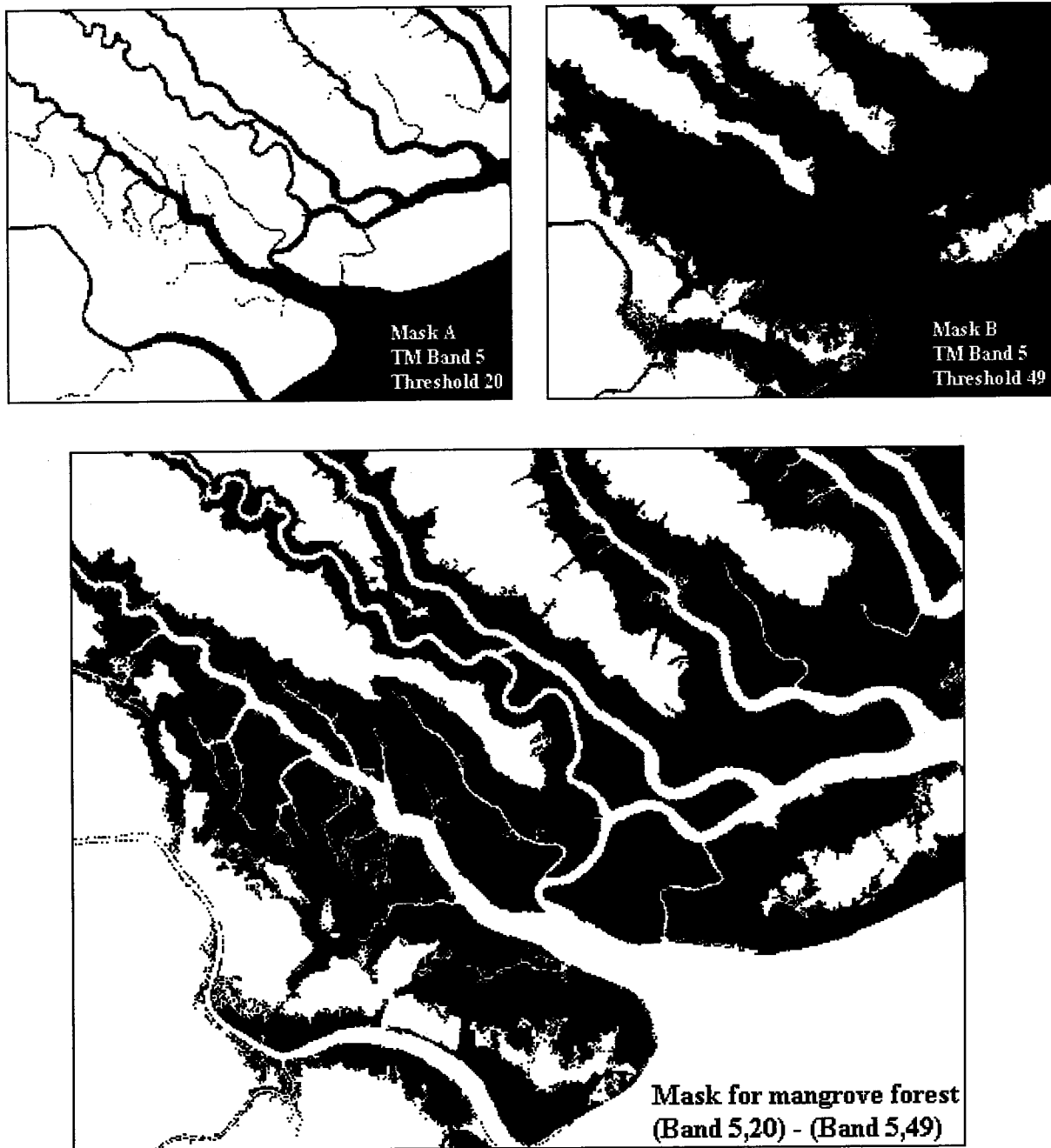


Fig. 2 Corrected mask A and B by the threshold determined automatically with application of Otsu's method and a mask for mangrove forest as reversed imagery of (A - B)

V. おわりに

ここではマングローブ林のみのデータを用意するために、大津の方法を適用して閾値を自動的に求める場合の閾値の妥当性を検討した。その結果、度数分布図で適当に見当をつけてその検索範囲を与えても、CCT カウントで1なし2程度の違いしかなく、それによって2値化してもそれぞれの領域に残った点在する画素の数に大きな違いはない事が確認できた。

今後は、この処理の後で両領域内に残り点在する画素を自動的に塗りつぶし、マスクを完成する部分までを一連の処理として行うように検討する。

REFERENCES

- 1) **Dwi, S., Sato, K., and Kohda, Y.**, 1997a. Relationships between TM Data of Landsat 5 and Stand Parameters on Mangrove Forest in Okinawa. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(2), pp. 4-12
- 2) **Dwi, S., Sato, K., and Kohda, Y.**, 1997b. Relationships between Calculated Indexes from TM Data of Landsat 5 and Stand Parameters on Mangrove Forest in Okinawa. *Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(3), pp.6-12
- 3) **Kanetomi, M., Sato, K. and Yamauchi, T.**, 1998. Expression of Qualitative and Quantitative Information on Mangrove Forest in Okinawa. *Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. Q-13-1-6
- 4) **Kittler, J. and Illingworth, J.**, 1986. Minimum Error Thresholding. *Pattern Recognition*, 19(1), pp. 41-47
- 5) **Otsu, N.**, 1980. An Automatic Threshold Selection Method Based on Discriminate and Least Squares Criteria. *The Transaction of the Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan*, J63-D(4), pp. 349-356
- 6) **Sato, k., Nakajima, M. and Hoshi, T.**, 1996. Mask Procedure for Effective Classification of Mangrove Area and a Method to Decide Threshold Values with TM Data of Landsat 5. *Proceedings of the 17th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. WS-1-1-6
- 7) **Sato, k., Nakajima, M. and Hoshi, T.**, 1997. Conception of Qualitative and Quantitative Classification of Mangrove Forest with TM Data of Landsat 5. *Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. G-6-1-6
- 8) **Sato, k., Nakajima, M. and Hoshi, T.**, 1998. Decision of Threshold Values for Extraction of Mangrove Area with TM Data of Landsat 5. *Proceedings of the 19th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. E-7-1-6
- 9) **Sato, k., Nakajima, M. and Hoshi, T.**, 1999. Threshold Operation for Extraction of Mangrove Area with TM Data of Landsat 5. *Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing*, pp. PS-307-1-6
- 10) **Spalding, M., Blasco, F. and Field, C.**, 1997. *World Mangrove Atlas*, The International Society for Mangrove Ecosystems, Okinawa
- 11) **Weszka, J. S., Nagel, R. N. and Rosenfeld, A.**, 1974. A Threshold Technique. *IEEE Transaction on Computers*, C-22, pp. 1322-1326

地球地図整備の現状について

Current Status of the Global Map Development

建設省国土地理院地理調査部 宇根 寛・福島芳和

Hiroshi UNE and Yoshikazu FUKUSHIMA: Geographical Survey Institute

〒305-0811 つくば市北郷1番

Kitasato 1, Tsukuba-shi, Japan 305-0811

e-mail:une@gsi-mc.go.jp

Abstract

The objective of Global Mapping Project is to help us understand the status of global environment and to facilitate the identification of future challenges. In November 1998, the United Nations recommended the heads of National Mapping Organizations to participate in Global Mapping Project. The number of countries and regions participating in the project is increasing. Following is a report on background of the Global Map and activities of ISCGM.

keywords : Global Map, Global Map Specifications, V P F, GLCC

1 はじめに

地球地図構想は、地球環境問題解明に必要とされる基本的な電子化地理情報を、縮尺 100 万分 1 相当の精度で、地球上の全陸域について統一規格で整備し一般に安価に提供しようというものである。本構想は、地球規模で拡大する環境問題を背景に日本の建設省が 1992 年に提唱した。続いて地球地図国際運営委員会(ISCGM, International Steering Committee for Global Mapping) が組織されて、本構想が推進されてきた。ISCGM から各国地図作成機関に宛てた本構想への参加要請状が、国連統計部長の推薦状を添えて国連より発送されて、参加募集がスタートしている(98 年 11 月)。99 年 11 月現在、参加国・地域数は 68、参加を検討している国・地域は 39 であり(Fig)、今後もその数は増加が予想される。

地球地図データ整備に必要となる地球地図仕様は、ISCGM 第 5 回会合(98 年 11 月)において内容が確定したが、本仕様に基づいて国土地理院は 98 年度、アジア地域の地球地図データ整備に着手した。本稿では、地球地図整備の現状を述べるとともに、地球地図作成の概要を、タイの地球地図作成にも触れつつ、述べる。

2 仕様の内容

地球地図仕様(Global Map Specifications Ver1.0) の主な内容(ISCGM, 1998)は、整備項目を海岸線・行政域、水文(河川・湖沼等)、交通網(道路、鉄道等)、人口集中地区(都市等)、標高、植生、土地利用、土地被覆とし、座標系には ITRF94 測地系を、楕円体には GRS80 楕円体を採用しており、さらに、整備フォーマットは、ベクター項目(海岸線・行政界、

交通網、水文、人口集中地区)を VPF(Vector Product Format:米国立画像地図庁 NIMA によるベクターフォーマット)、ラスター項目(標高、植生、土地利用、土地被覆)を B I L (ヘッダー無しバイナリデータ、1 画素/30 秒)とすることなどが決められている。

地球地図仕様は、大部分が ISO/TC211(International Organization for Standardization/Technical Committee211)の勧告に沿っており、例えばメタデータの内容は ISO メタデータ標準(ISO 15046-15)に従っている。

(1) 整備項目(ベクター)

ベクター項目の整備内容は Transportation, Boundaries, Drainage, Population Centers の 4 項目であり、各項目はそれぞれ細部項目をもつ。

1) Transportation (交通網)

道路 (Edge)

トレイル (Edge)

鉄道 (Edge)

鉄道敷地/操車場 (Point) - オプション

橋・フェリー航路・トンネル (Edge) - オプション

空港 (Point) - オプション

テキスト - オプション

2) Boundaries (境界)

行政域 (Area)

行政域 (Point)

行政界 (Edge)

海岸線 (Edge)

- 海洋域 (Area)
- テキストオプション
- 3) Drainage(水系)
- 内水面 (Area)
- 河川 (Edge)
- 運河・水路 (Edge) -オプション
- ダム・島・泉 (Point, Edge) -オプション
- テキストオプション

- 4) Population Centers(人口集中地区)
- 都市域 (Area) -オプション
- 都市 (Point) -オプション
- 居住地 (Point) -オプション
- テキストオプション
- なお、括弧内のArea、Edgeは、それぞれ後述するVFPフォーマットにより、構造化された面情報、及び構造化された線情報である。

Current Participation in Global Mapping Project

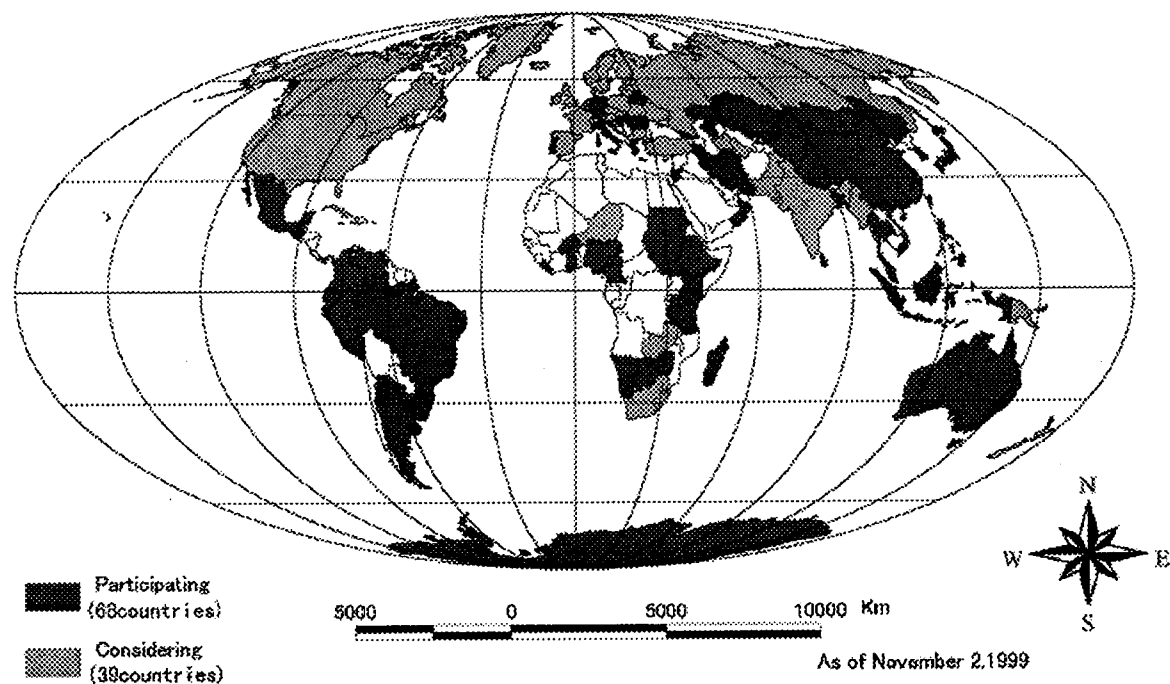


Fig. Current Participation in Global Mapping Project

(2) 整備項目 (ラスター)

ラスターとして整備する項目は、Elevation, Vegetation, Land Use, Land Cover の 4 項目である。このうち、Vegetationは、NOAA/AVHRRデータの月別正規化植生指標の季節変化及び気象データから分類することを想定して分類項目を設定した。基本的にはウォルターの植生分類に従っているが、都市、農地等の人工改変地にも対応するよう若干の修正を行った。土地利用は、LANDSATのTMデータ等の数10メートルクラスの地上解像度を有するデータから目視で分類することを想定して分類項目を設定した。Land Coverは、Global Land Cover Characterization(GLCC)として整備されたデータのうち、IGBP(The International Geosphere - Biosphere Programme, 地球圏-生物圏国際協同研究計画)とも関係し、最も信頼性の高いとされるIGBP分類の分類項目を採用した。なお、GLCCを地球地図仕様に変換する作業を、USGS/EROSデータセンターが行っている。

以下に各項目の内容を示す。

- 1) Elevation (標高) -メートル単位の標高値

- 2) Vegetation (植生) -熱帯多雨林、雨緑林、熱帯・亜熱帯の草原、熱帯・亜熱帯の半荒原、熱帯・亜熱帯の荒原、硬葉樹林、常緑広葉樹林、落葉広葉樹林、温帯の草原、温帯の半荒原、温帯の荒原、北方針葉樹林、ツンドラ、水面、雪氷面、湿地、混合林、混合地、非自然地、分類不能
- 3) Land Use (土地利用) -森林、混合地、草地、農地、湿地、裸地、市街地、河川、湖沼、海
- 4) Land Cover (土地被覆) -常緑針葉樹林、常緑広葉樹林、落葉針葉樹林、落葉広葉樹林、混合林、密集かん木林、かん木林、木の多いサバナ、サバナ、草地、湿地、畑、市街地、農地・自然地の混合、雪氷、裸地・砂地・岩地、水部

(3) 整備縮尺レベル

地球地図は一般にも安価で利用されるものであり、整備縮尺は、他国への情報提供に支障のない範囲で出来る限り大きな縮尺とすべきで、この観点から、ベクター項目を 100 万分 1 相当、ラスター項目を経度・緯度 30 秒毎に区切ることができる区

画を一画素とした。また、この縮尺レベルでは、位置精度、データ容量等の点で整備が比較的容易であり、VMAP0, GTOPO30 等利用可能な既存情報も多い。

(4) 基準測地系、楕円体

確定した仕様では、基準測地系を ITRF94 とし、基準楕円体を GRS80 とする等、いわゆる世界測地系に準拠している。これらは、一国による、あるいは軍事目的で構築されたものでなく公開性が高いことから地球地図の基準測地系として適している。

地球地図は、世界測地系に準拠することで GPS と連動したシステムやインターネット GIS 等で座標値の変換なしで、そのまま利用可能であり、世界測地系準拠の他の GIS データベースとの整合性が高くなるだけでなく、これら情報との複合利用の可能性も増加したといえる。

(5) タイリング

地球地図では、地球全域をある経度差、緯度差で区切られた区画に分割し、整備する各ファイルの容量が巨大にならないようにしている。この区画を“タイル”と呼び、分割の方法を“タイリング”と呼ぶ。地球地図仕様では、地球表面を経緯度によってタイル分割する際のタイルの大きさを規定しており (Table)、各タイルはアルファベット 4 文字で示される。命名法 GEOREF の詳細は、ISCGM(1998)を参照。

(6) ベクターフォーマット - VPF

ベクター項目のフォーマットは、NIMA の開発した VPF を採用している。VPF は、多様な地理データを記述する能力を有しており、トポロジー構造を保持する等本格的な GIS データフォーマットとなっている。また、前述の“タイリング”の概念を標準で取り入れた内容となっている。VPF は国家機関の作成した規格であり、仕様が完全に公開されている等国際的な利用の容易さからもこのフォーマットを地球地図仕様で採用することとした。詳細は高橋(1999)を参照。

Table Tile Size

Latitude	Tile Size (Degrees Latitude by Degrees Longitude)
0°- 40°	5° x 5°
40°- 50°	5° x 6°
50°- 60°	5° x 8°
60°- 65°	5° x 10°
65°- 70°	5° x 12°
70°- 75°	5° x 15°
75°- 80°	5° x 20°
80°- 90°	5° x 90°

(7) ラスターフォーマット - BIL

ラスター項目は全て、経度差及び緯度差 3 0 秒の領域を 1 画

素とするバイナリデータであるが、フォーマットには BIL (Band Interleaved by Line)を採用した。BIL は、衛星画像等のデータフォーマットとして既に一般的に使用されており、マルチバンドをサポートするフォーマットとなっているが、地球地図の各ラスター項目は、1バンドのみの使用となり、この場合にはヘッダー無しの単なるバイナリデータとも見なすことができるため、多くの汎用画像処理アプリケーションでの利用の可能性を開いている。

3 アジア地域のデータ作成

アジア地域のうち、自力ではデータ作成が困難な国々について国土地理院は相手国との協力により 1998 年度より地球地図データ作成を開始した。地球地図は、既存資料、既存情報等を有効に利用して整備している。

データ作成は、それぞれの国家地図作成機関による 25 万分 1~100 万分 1 の地形図を使用して、海岸線・行政界、道路、鉄道、河川・湖沼、都市等の情報をベクターデータとして取得する他、一部のデータ取得にあたっては、行政界図等他の地図も使用した。一方、土地被覆、土地利用の項目は Global Land Cover Characterization データベース [NASA 地球観測システム・パスファインダープログラム及び IGBP データ・情報システムフォーカス 1 アクティビティにより作成中のデータ] のうち IGBP 分類データ及び Olson 分類データを用いて作成した他、最新の情報とするため衛星画像データを用いて更新を行った部分もある。標高データについては、GTOPO30 を地球地図仕様に従い、切り分けて使用した。

例えば、タイの地球地図整備にあたっては、25 万分 1 地形図 50 面、GLCC、GTOPO30 を基礎資料とした。経年変化部分については、衛星画像データ (JERS-1/OPS ,LANDSAT/TM,) を、また、参考として VMAP 0 (CD-ROM) 等を使用している。

(1) Vegetation、Land Use、Land Cover ファイル作成

これらの各項目ファイルは、全て同じステップの前処理を経て作成している。すなわち、各画素の中心位置を経緯度で記述した中間ファイルを用意し、各画素毎にその位置に相当する GLCC 画像内の Row 方向、Line 方向の位置を求めその位置にある値を求める方法を用いた。経度、緯度から GLCC 画像内の位置を求めるプログラムソースは、既にこの GLCC の公開 HP で紹介されており、これを gih12ls.c として実行モジュールを作成して用いた。

(2) Elevation ファイル作成

標高ファイルは、既に GTOPO30 として公開されている経度、緯度 30 秒ごとの標高データを地球地図のタイルに切り分け直して整備した。

4 終わりに

アジア地域の国々については日本が中心となって地球地図データ整備を進めている。今後とも、ISCGM の枠組みの中で、同プロジェクト参加の国家地図作成機関を中心に、各国で地球

地図の整備が推進される予定である。

参考文献・資料

- 乙井康成 (1998) : 地球地図の展開—構想からデータ整備事業へ、国土地理院技術資料A・1-No.199 (第27回国土地理院技術研究発表会資料)、pp.12-19.
- 小井土今朝己 (1997) : 地球地図ワーキンググループの活動報告、地理調査部技術ノート第14号、pp.55-62.
- 坂部真一 (1997) : 「地球地図日本 (Edition 0)」の作成及び提供について、地図の友、Vol.41 No.1、p1、pp.4-7.
- 高橋広典(1999): 「地球地図」仕様とアジア地域のデータ作成について、地図、Vol.37 No.4 (印刷中).
- 丸山弘通 (1997) : GSDI (全地球空間データ基盤) 整備に向けた技術開発、第26回国土地理院技術研究発表会資料、pp.64-75.
- 丸山弘通 (1998) : 地球地図整備推進のための国際的合意形成、国土地理院時報 第89集、pp.59-75.
- 丸山弘通、高橋広典 (1999) : 地球地図整備の実施状況、国土地理院時報 第91集、pp.70-85.
- IGBP-DIS LCWG : http://plasma.phys.uidaho.edu/intergratedscience/_spring-97/s97-experiments/IGBP-classification.html
- ISCGM(1998) : Global Map Specifications Version 1.0, http://www.auslig.gov.au/mapping/global_m/specv1_0.htm
- NIMA : Vector Product Format Overview, <http://164.214.2.59/vpfproto/index.htm>
- USGS EROS Data Center: <http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/>

LIF法による植物の生体情報の抽出

Information from Plants Leaves by Laser Induced Fluorescence method

高橋邦夫¹⁾、峰内健一¹⁾、安田嘉純²⁾、立本英機²⁾

1) 木更津工業高等専門学校、〒292-0041 千葉県木更津市清見台東2-11-1

2) 千葉大学工学部、〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33

Kunio Takahashi¹⁾, Ken-ichi Mineuchi¹⁾, Yoshizumi Yasuda²⁾ and Hideki Tatsumoto²⁾

1) Kisarazu National College of Technology, 2-11-1 Kiyomidai-higashi Kisarazu Chiba, 292-0041

2) Chiba University, 1-33 Yayoichou Inageku Chiba-city Chiba, 263-8522

abstract

The LIF(laser-induced fluorescence) method is a potentially useful tool for remote sensing of plant vigor because LIF spectral profiles vary according to chlorophyll contents which indicates the activity of the plant .

In order to examine the relationships between the transverse distribution of fluorescence (blue:450nm, green:530nm, red:687nm and infrared:741nm) within cell tissue and LIF spectra of leaves of pothos with different chlorophyll contents, a LIF spectral system and a micro-fluorescence imaging (MFI) system using UV laser were developed.

The F450/F685 and the F450/F740 ratio of fluorescence intensity (F450:450nm, F685:685nm, F740:740nm) toward the different chlorophyll contents in pothos leaf were measured to examine the relationships between the blue-green and the red fluorescence. The F450/F687 and the F450/F741 ratio showed increase with the increase in the chlorophyll contents. It was found that the F450 fluorescence in intact leaves was reabsorbed by chlorophyll.

The blue-green fluorescence of green leaves was distributed only near the epidermis, but there was none within the leaf tissue. The chlorophyll fluorescence of the green leaves could be detected at mesophyll cells inside the epidermis but not at the epidermis on surface layer of the leaves. In contrast, the blue-green fluorescence of the white mottled leaf without chlorophyll appeared within the mesophyll cell.

It was clear from the results of this experiment that the changes of fluorescence distribution within the leaf tissue affected the fluorescence spectra emitted from leaves.

1. はじめに

1980年代に入って世界的に注目され始めた地球の温暖化、オゾン層の破壊といった地球規模の環境破壊は、このスケールが遥かに大きく、かつこの原因も産業活動に起因するのみならず、我々の日常生活様式の変化にも関係した複雑なメカニズムによるものであると考えられている¹⁾。

このような環境破壊の進展に伴って生態系のバランスの崩壊も深刻化してきており、これをどのように抑制し、いかにしてバランスの保全を図るかが急務となっている。

この様な背景の中で、植物の生育状態を非破壊、非接触で短時間にモニタリングするレーザー誘起蛍光(Laser-Induced Fluorescence : LIF)法の研究^{2) ~10)}が進められている。この方法は、レーザー光で葉内の光合成色素や葉内に蓄積された化合物を励起し、そこから放射される蛍光を利用して、植物の内部情報を抽出するため、リモートセンシングデータの解析に必要なグランドトゥルスデータ取得の測定方式としても有効なものとする。

本研究では、UVレーザー光を照射して誘起される蛍光の特徴を調べるための供試葉として、ポトスの生葉を使用することにした。ポトスの生葉は同一条件の下で育ててもクロロフィルを殆ど含まない白い斑入りのものからクロロフィル濃度の高い濃緑色のものまで存在し、植物情報の抽出用の研究に適しているものと考えて使用した。

さらに、ポトスから放射される青緑色とクロロフィルによる赤色から近赤外のLIFスペクトル変化及びそれに起因する蛍光の葉内分布ついて明らかにするとともに、それらの関連性について述べる。

2. 測定装置

本研究においては、葉外に放射されるLIFスペクトルを測定するLIF測定装置⁷⁾と葉内の照射光および蛍光分布を測定するMFI測定装置^{11) ~13)} (Micro-Fluorescence Imaging system) を用いて行った。以下に各装置の概要について述べる。

2.1 LIF測定装置

LIF測定装置を図1に示す。本装置は、光源部(A)、分光検出部(B)とデータ処理部(C)で構成されている。

光源部のレーザーは、紫外(351nm~364nm)で発振するcw Ar⁺レーザー(出力0~400mW、NEC)を用いた。

分光検出部は、光ファイバ付き分光器にII付ダイオードアレイ検出器(512素子)を取りつけ、MDS(Multipurpose Data Processing System)とコンピュータで構成されている。分光測光の波長範囲は、約330nmの波長領域を同時に測定できるようにした。サンプルホルダは、照射光の光軸に対して45°の方向からLIFスペクトルを検出できる構造とした。

データ処理部は、コンピュータ、プリンタ、プロッタで構成されている。LIFスペクトルのデータ処理は、MDSに記憶されている分光データをコンピュータで分光感度補正、積算、スムージング等を行い記録装置に保存される。

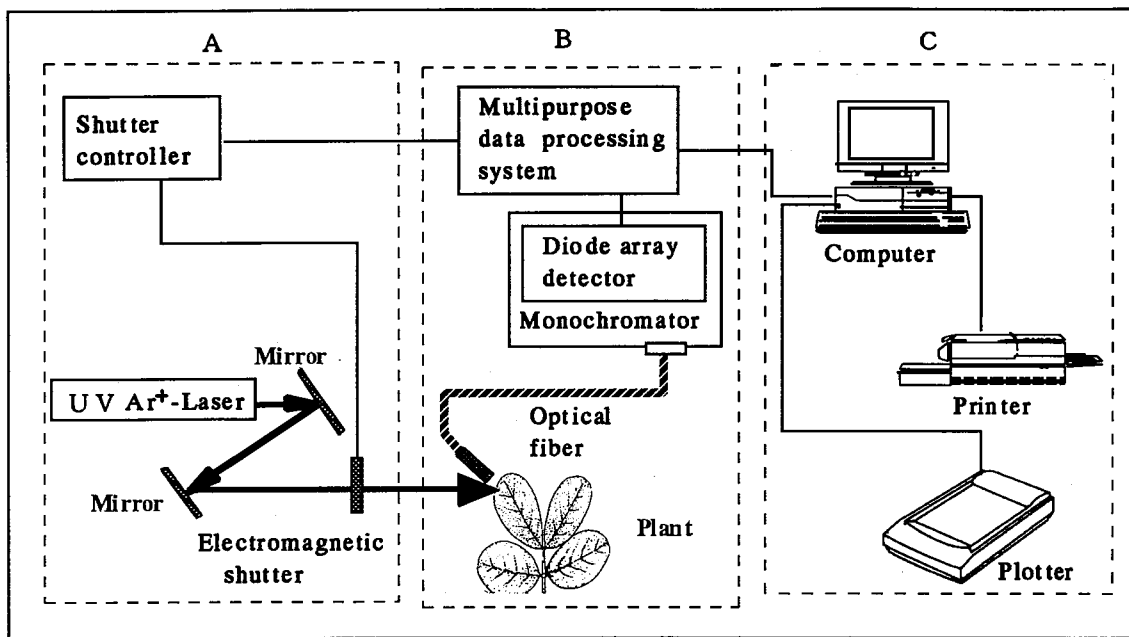


Fig.1 Blockdiagram of LIF system

2.2 MFI測定装置

MFI測定装置を図2に示す。本装置は、サンプルホルダ、レーザ光源、画像検出装置、データ収録・処理装置で構成されている。

サンプルホルダは、採取した葉の水分欠乏によるダメージを防ぐために水分を葉の下部から供給できるような構造とした。

レーザ光源は、前述した紫外で発振するcw Ar⁺レーザを使用し、サンプルホルダ面より上方に約50 μ m出た（細胞にして1ないし2個分に相当する）葉の横断面上に照射した。

画像検出装置は、金属顕微鏡とその上部に4枚の誘電体干渉フィルタ（透過ピーク波長：450nm、530nm、687nm、741nmで半値幅約5nm）を取りつけたI.I.付CCDカメラで構成されている。葉の切断面からの蛍光の葉内分布は、レーザ光の光軸に対し垂直方向に散乱した蛍光を誘電体干渉フィルタをとおして、各波長ごとにI.I.付CCDカメラで2次元画像として測定した。また、照射光の葉内分布も干渉フィルタの代わりに減光フィルタを使用し同様な方法を用いて測定できるようにした。

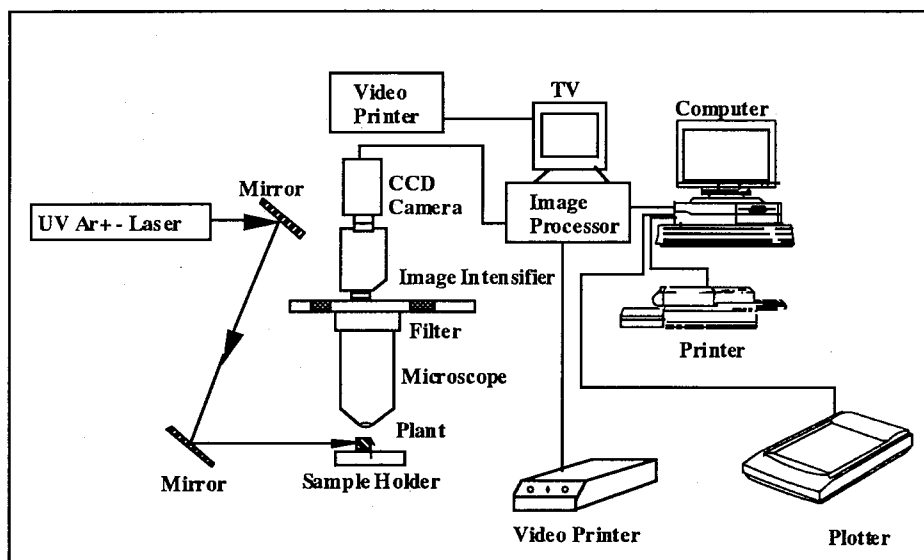


Fig.2 Blockdiagram of MFI system

データ収録・

処理装置は、画質改善のために積算平均化するためのイメージプロセッサ、イメージデジタイザボードを組み込んだコンピュータ、ビデオプリンタ、プロッタ、プリンタで構成されている。測定された画像は、市販のFRM-TOOL KIT（フォトロン製）と峰内等が開発したP-Graph画像処理ソフト¹⁴⁾を用いて任意に指定した位置のx軸上の強度プロファイル、バックグラウンド消去、線型濃度変換等の画像処理ができるようにした。

2.3 試料

供試葉には、クロロフィルの蛍光とクロロフィル以外の化合物による蛍光の関係を調べるために25℃の室内で生育させたポトスの生葉を用いた。クロロフィル濃度の異なった生葉を選ぶために、クロロフィル濃度と相関性が高く非破壊で測定できる葉緑素計（SPAD 501、ミノルタ）^{15)、16)}を使用した。その値からクロロフィルを殆ど含まない白い斑入りの葉（葉緑素計値GM=2）とクロロフィル濃度が徐々に高くなった緑色葉（葉緑素計値がGM=7、17、25、36）の4種類の葉を選び測定に使用した。

3. 測定結果

3.1 ポトス葉のLIFスペクトル

植物葉で吸収した紫外光や可視光の光エネルギーは、葉内に蓄積された有機化合物や集光性クロロフィルa、b及びカロチノイド等の光合成色素蛋白の色素間でエネルギー伝達され、最終的に反応中心クロロフィルaに到達し光合成反応に利用される。そのエネルギー伝達過程で、その一部が葉外に蛍光として放射される。特に、可視光励起では、クロロフィルによる650nmから800nmの波長域にかけた蛍光が主に放射される。また、紫外光励起では、クロロフィルによる蛍光に加えクロロフィル以外の葉内に蓄積された化合物による400nmから600nmの波長域の蛍光が観測される。このことは、植物葉を紫外光で励起した場合には、可視光励起によるクロロフィル蛍光測定の場合と比べ、蛍光放射の波長領域も広く多くの情報が含まれているため、植物の情報を得るのに有効なことと考える。しかし、400nm

から500nm付近までの波長帯は、クロロフィル等の光合成色素の光吸収帯にあたり、クロロフィルに再吸収・再利用されるため、クロロフィル蛍光に影響することが考えられる。

このため、一枚のポトス生葉で葉色が異なり葉緑素計のGM値が異なる5点（GM=2、7、17、25、36）を選び、その各部位とこの部位に対応し

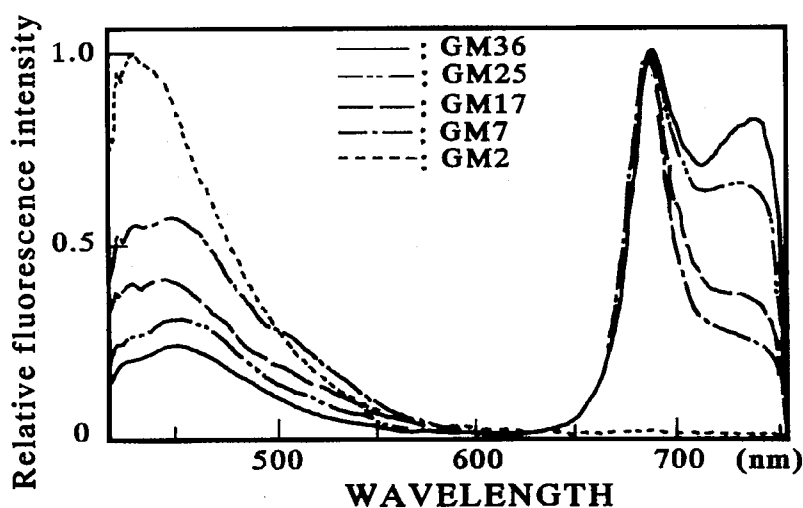


Fig. 3 Laser induced fluorescence spectra of pothos leaves with different chlorophyll contents

たLIFスペクトルを最大強度で規格したものを図3に示した。この結果、LIFスペクトルはGM値の増加に伴い青色の450nm (F450) 付近のピークが相対的に小さくなり、逆にクロロフィルによる赤色から近赤外の光化学反応系IIに関係した685nm (F685) と光化学反応系Iに関係した740nm (F740) 付近のピークが大きくなった。さらに、クロロフィルによる二つのピークの間では、488nmの励起光による水稻葉を用いたクロロフィル濃度とF740/F685比で得ら

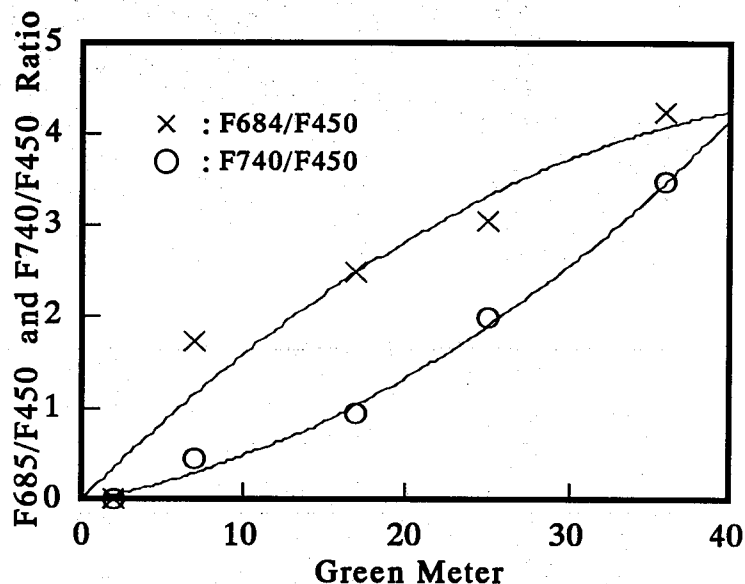


Fig. 4 Relationship between ratios of fluorescence peak intensity (F685/F450, F740/F450) and chlorophyll contents of pothos leaves

れたものと同様にGM値の増加とともに再吸収効果によって長波長側のF740が大きくなることを示した¹⁷⁾。各蛍光ピーク間の関係を調べるため、青色蛍光のピークとクロロフィル蛍光ピーク比 (F685/F450 比とF740/F450 比) とGM値との関係を求め図4に示した。この結果から、F685/F450比は、GM値の増加とともに傾きがゆるやかに増加した。しかし、F740/F450比は、逆に増加の傾きが大きくなった。このことは、前述の光化学反応系内の短波長側のF685をF740側が再吸収する要因が主に増した結果であると考えられる。

これらのことから、青色域とクロロフィルからのLIFスペクトルの形は、生葉内のクロロフィル濃度に深く依存していることが明らかになった。

3.2 ポトス葉内の照射光と誘起蛍光分布

可視光を照射したときの照射光の葉内分布は、著者等によって葉内のクロロフィル濃度に依存して変化すること示した¹²⁾。図3に示したようにUV光励起によるLIFスペクトルには450nm付近にピークと530nm (F530) 付近の肩をもつブロードな青緑色の蛍光とクロロフィル蛍光の二つのピーク687nm (F687)、741nm (F741) が存在し、これらの蛍光ピークの波長におけるの蛍光の葉内分布との関係を調べた。

LIFスペクトルの測定に用いた葉のクロロフィル濃度が、ほとんど含まれない葉 (GM値: 2) と中濃度 (GM値: 17) および高濃度 (GM値: 36) の3種類のポトス葉を同一ポット内から採取し、照射光と蛍光 (F450, F530, F687, F741) の葉内分布を測定した。その測定結果を、各濃度の葉の細胞構造とともに照射光と蛍光の葉内分布及びその各画像の同一場所に引いたライン上の強度プロファイルを規格化して図5に示した。これよりUV照射光の葉内分布は、クロロフィル濃度に関わらず葉の下面表皮まで到達していることが明らかになった。葉内の照射光は、クロロフィルを含まない白い斑入りの葉では上面表皮付近で強く分布するが、クロロフィルを含んだ葉では上面表皮細胞の内

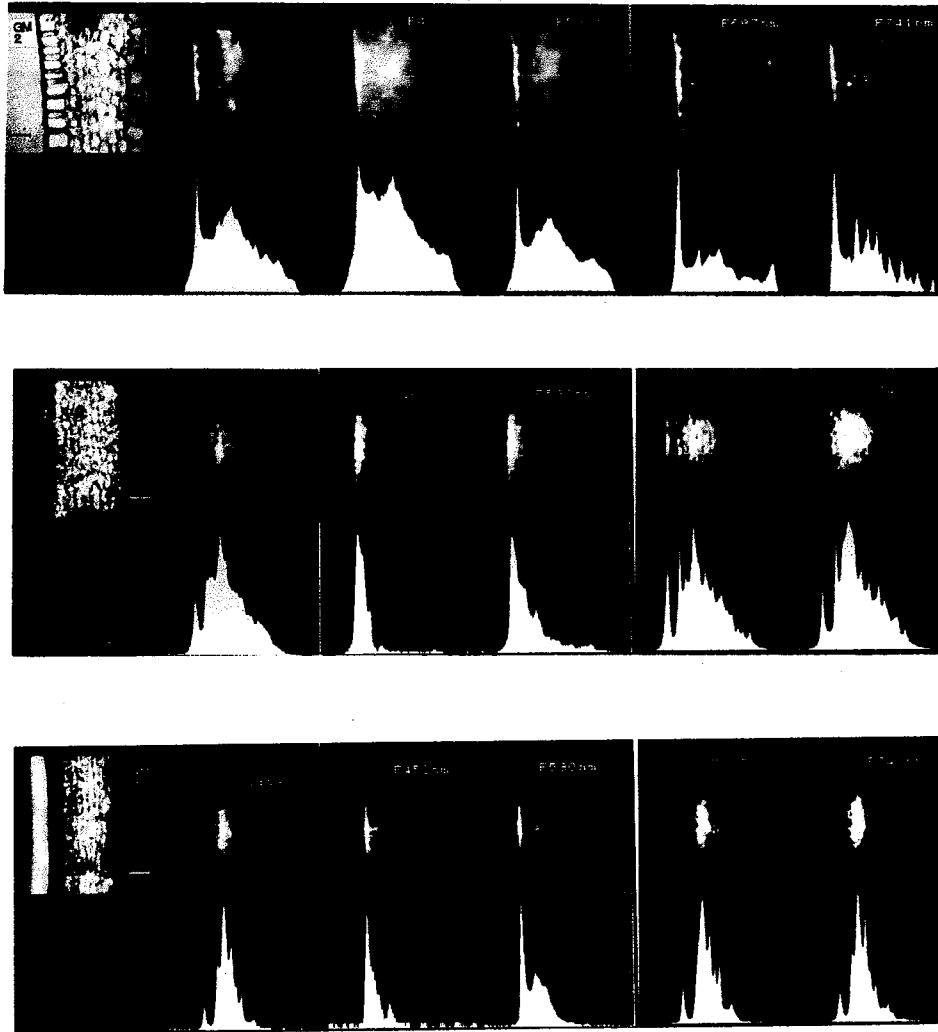


Fig. 5 Image of leaf cross sections ,scattered light ,blue-green (F450,F530) and chlorophyll fluorescence (F687,F741) in pothos leaves contained different chlorophyll contents (Upper : GM=2, middle: GM=17, bottom : GM=37). Profiles of scattered light, blue-green (F450,F530) and chlorophyll fluorescence (F687,F741) at the horizontal lines on the images. The scale bar is 200 μ m.

側にある葉肉細胞の先端よりさらに内部に入ったところで強くみられた。

青緑色のF450とF530の蛍光は、クロロフィル濃度の増加とともに葉の内部の葉肉細胞での分布強度が弱くなり、表皮細胞付近で強く見られた。特に、クロロフィルを含まない白い斑入りの葉では、葉の内部にまで比較的強く分布していることが明らかになった。このことより、青緑色の蛍光を発する物質は葉内全体に存在すると考えられる。しかし、クロロフィルの存在する緑色葉ではF450の青色蛍光は、先に述べたようにクロロフィルの再吸収により、葉肉細胞内でのクロロフィル濃度の増加にともない、急激に減衰して分布した。また、クロロフィルの最大吸収波長帯から外れるF530の緑色蛍光は、F450に比べクロロフィルの濃度が高い場合にも葉肉細胞の内部においても分布していた。

クロロフィルのF687とF741の蛍光は、クロロフィルが存在する葉においては、ともに葉肉細胞内で強く分布し葉肉細胞の先端部付近で最大値を示した。しかし、クロロフィルをほとんど含まないGM=2の葉では、表皮と細胞壁の一部にF687とF741の蛍光分布がみられ、クロロフィルを含む葉と異なった分布を示した。中濃度のGM=17ポトス

葉では、クロロフィルが葉肉細胞内に低濃度で広範囲に分布しているため、F687とF741の蛍光は、葉肉細胞内に広く分布した。高濃度のGM=36のポトス葉では、クロロフィルの分布密度が高い葉肉細胞の先端部付近で入射光をほとんど吸収するため、F687とF741の蛍光分布は葉肉細胞の先端部で強く、葉の深部では急激に減少した。また、GM値が高くなると、F687のピーク位置に比べF741のピーク位置は、低濃度葉に比べ蛍光の再吸収効果が強くなることから葉の深部に約 $5.1\mu\text{m}$ 程度シフトした。

これらの結果から、照射光や蛍光の葉内分布は、クロロフィル濃度に依存して変化し、これらが葉外に放射されるLIFスペクトルに密接に関係した結果として現れることが考えられる。

4. 結論

植物葉のLIFスペクトルは、UVのレーザー光で励起した場合には多くの植物葉において青色から緑色にかけて幅広い波長帯域の蛍光とクロロフィルの赤色から近赤外域にかけての波長帯域で放射される。緑色のポトス葉とクロロフィルを含まない白い斑入りのポトス葉を用いた蛍光分布の測定から、赤色から近赤外の蛍光は、柵状組織内に分布したクロロフィルによるものであるが、青色から緑色にかけての蛍光は、葉内のほとんどの細胞内に蓄積された化合物によるものであった。しかし、葉色の濃いポトス葉からの青色から緑色にかけての蛍光は、クロロフィルを含んだ柵状組織内では、クロロフィルにより再吸収され、クロロフィルを含まない表皮細胞付近からのものであった。

本研究からクロロフィル以外の葉内に蓄積された化合物による青緑色の蛍光とクロロフィルによる蛍光の葉内分布と、LIFスペクトルの中にみられた特徴的な蛍光ピークとの間には密接な関係があることが明らかになった。

参考文献

- 1) 農林水産省農業環境技術研究所編：「地球環境と農林業」養賢堂（1991）。
- 2) E. W. Chappelle, F. M. Wood, Jr., J.E. McMurtrey III, and W. W. Newcomb: Laser-induced fluorescence of green plants. 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation, *Appl. Opt.*, 23, 134~138 (1984)
- 3) K. Takahashi, Y. Emori, Y. Yasuda, A. Kimura: in-vivo Chlorophyll Determination of plants by Laser-induced Fluorometer, *Proceeding of 3rd International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing held at Les Arcs, France*, p.285-288 (1985)
- 4) H. K. Lichtenthaler, M. Lang and F. Stober: Laser-Induced Blue Fluorescence and Red Fluorescence Signatures of Differently Pigmented Leaves, *Proceeding of the 5th International Colloquium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d' Isere, France (ESA SP-319)*, 727-730 (1991)
- 5) 高橋邦夫、峰内健一、中村時久、松丸恒夫、高崎 強、遠藤宗男、小泉美香、狩野広美：レーザー励起による植物葉の蛍光スペクトル、*日本リモートセンシング学会第11回学術講演会論文集*、245-248 (1991)

- 6) H. Edner, J. Johansson, S. Svanberg, and E. Wallinder : Laser-induced fluorescence monitoring of vegetation in Tuscany, *EARSel Advances in Remote Sensing*, Vol.1, No.2-II, 119 -130 (1992)
- 7) K.Takahashi, K. Mineuchi, T. Nakamura, N. Sakurai, A. Komatsu, M. Koizumi and H. Kano: Laser Induced Fluorescence of Tree Leaves : Spectral Changes with Plant Species and Seasons, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS' 93)*, Tokyo, Japan (IEEE:93CH 3294-6) Vol. **IV**, 1985-1987 (1993)
- 8) K. Takahashi, K. Mineuchi, H. Kobayashi, N. Sakurai, A. Komatsu, M. Takahashi, T. Nakamura, M. Koizumi and H. Kano: Spectral changes of laser induced chlorophyll fluorescence in crop leaves by temperature, air-pollutants and genetic inheritances, In *Proceedings of the Sixth International Colloquium- Physical Measurements and Signatures in Remote sensing*, pp. 961-968 (1994)
- 9) Y. Saito, K. Takahashi, E. Nomura, K. Mineuchi, T. Kawahara, A. Nomura, S. Kobayashi and H. Ishii : Visualization of laser induced fluorescence of plants influenced by environmental stress with a micro fluorescence imaging system and a fluorescence imaging lidar system, in *Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Oceanographic Application*, R. M. Narayanan and J. E. Kalshoven, eds., *Proc. SPIE* **3059**, 190-198 (1997)
- 10) K. Mineuchi, K. Takahashi, A. Komatsu and H. Tatsumoto: Seasonal Variation of Laser Induced Fluorescence Spectra in Tree Leaves, *Environmental Technology*, Vol. **20**. pp.633-638, 1999
- 11) K. Takahashi, K. Mineuchi, T. Nakamura, M. Koizumi and H. Kano : A system for imaging transverse distribution of scattered light and chlorophyll fluorescence in intact rice leaves, *Plant, Cell and Environment*, **17**, pp.105~110 (1994)
- 12) 高橋邦夫、峰内健一、江森康文、小林智、石井弘允：MFI装置を用いたレーザー照射光とレーザー誘起蛍光の葉内分布の測定法に関する研究、*照明学会誌*、第80巻 11号 827-835 (1996)
- 13) 高橋邦夫、峰内健一、中村時久、江森康文：レーザー誘起蛍光法による葉からの蛍光生体情報の抽出に関する基礎的研究、*日本リモートセンシング学会誌*、Vol.16 No.1 pp2-13. (1996)
- 14) 峰内健一、高橋邦夫、小泉美香、狩野広美、峰内暁世：顕微鏡を用いた微弱蛍光画像解析装置の作成、*パソコンリテラシ*、第19巻、第12号、31-36 (1994)
- 15) ミノルタ葉緑素計事例データ集、*ミノルタカメラ販売株式会社産業特機部*76-87 (1986)
- 16) 稲田勝美：“緑”を測る [3] 一葉色の測定とその栄養・生育診断への利用一、*農業および園芸*、第68巻、第10号 p.1199-1205 (1993)
- 17) 高橋邦夫、峰内健一、江森康文、小林 智、石井弘允：レーザー誘起蛍光法による植物の生育状態のモニタリングに関する基礎的研究、*照明学会誌*、第79、第11号 86-92 (1995)

新型衛星センサー（MODIS・GLI等）による植生のリモートセンシングの検証実験計画
 A Plan of Experimental Study of Vegetated Lands Using the New Satellite Sensors,
 such as MODIS or GLI

西田 顕郎 （筑波大学農林工学系）

〒305-8572 つくば市天王台 1-1-1

nishida@bres.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

近年、全球規模での物質・エネルギー循環の研究が進展するにつれ、地上植生のバイオマスや地表面過程を広域的かつオペレーショナルに把握する必要性が認識され、衛星リモートセンシングへの期待が高まっている。そのような中で、今後数年間のうちに、Terra/MODIS・ASTER・MISR や、ADEOS II/GLI、ENVISAT/MERIS のように、高性能・多機能の光学センサーが実現されつつあり、中でも、MODIS や GLI のような中分解能・多バンドセンサーを用いた、植生のリモートセンシングのアルゴリズム開発が行われつつある（例えば、Running *et al.*, 1994）。そのような研究の多くは、放射伝達モデルや SVAT モデルに基づく理論的なアルゴリズム開発であるが（例えば、Knyazikhin *et al.*, 1998）、本研究は地上観測に基づいて、その有効性を検証することを目的とする。また、本研究は基本的にフラックス観測サイトで行う為、新型センサーの出力および、地上分光観測のデータをフラックスデータと突き合わせることによって、植生の地表面過程に関する新たな知見を得ることも目的とする。

表1 新型センサーの緒元

	チャンネル数	解像度	観測周期	備考
Terra-MODIS	36	250m~1km	毎日	1999/12/18打ち上げ成功
ADEOS2-GLI	34	250m~1km	4日	2001打ち上げ予定
ENVISAT/MERIS	15	300m~1.2km	2~3日	バンド位置・幅が可変
Terra-ASTER	14	15~90m	-	ポインティング機能
Terra-MISR	4	250m	毎日	9方向同時観測

2. 方法

東アジア各地の植生のフラックス観測サイトにおいて、下記の項目を観測する：

- 放射観測： S↓, S↑, PAR↓, PAR↑, PAR 林床 （定常）
 樹冠分光観測, 葉の分光特性（非定常）
- LAI 観測： 魚眼レンズカメラ, リタートラップ （非定常）
- フラックス観測： 蒸発散, コンダクタンス, CO2

この結果、以下のプロダクトを、衛星データと突き合わせる：

- NDVI = $(R_{nir} - R_{vis}) / (R_{nir} + R_{vis})$
 $R_{vis} = PAR \uparrow / PAR \downarrow$
 $R_{nir} = (S \uparrow - PAR \uparrow) / (S \downarrow - PAR \downarrow)$

(樋口ら、2000)

- $LAI = \ln (PAR \downarrow / PAR \text{ 林床}) / \kappa$
 κ は非定常の LAI 現地観測より

- $FAPAR = (PAR \downarrow - PAR \uparrow) / PAR \downarrow$

観測サイトは、現在のところ、表2の各地点に設定中である：

表2 観測サイト

Site	Vegetation Type	Location	Country	Observed by
Kog-Ma	Tropical seasonal forest	N18d48m45s, E98d54m07s	Thailand	Univ. of Tokyo
Pasoh	Tropical rain forest	N2d58m18s, E102d18m00s	Malaysia	NIES, FRIM, FFPRI, Kyoto Univ.
EGAT-Tower	Mixture of forest, paddy, and farm.	N16d56m24s, E99d25m49s	Thailand	Kyoto Univ.
Huaihe Basin	Corn and wheat		China	CEReS
Kiryu	Conifer forest	N34d57m49s, E135d59m40s	Japan	Kyoto Univ.

3. 見こまれる成果

このような検証実験の結果として見こまれる成果は、次のようなものである：

- MODIS+MISR プロダクトの信憑性がわかる。
- 各タワー周辺のフェノロジーを衛星データでマッピングすることが可能。
- フラックスとフェノロジー (LAI, FAPAR) の対応関係 (White *et al.*, 1997) が考察できる。
- ADEOS2/GLI へ向けてのアルゴリズム開発戦略の方向付けがなされる。

参考文献

- Knyazikhin, Y. V., Martonchik, J. V., Myneni, R. B., Diner, D. J., and Running, S. W., 1998, Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research*, 103(D24), 32,257-32,275.
- Running, S. W., Justice, C. O., Salomonson, V., Hall, D., Barker, J., Kaufmann, Y. J., Strahler, A. H., Huete, A. R., Muller, J. -P., Vanderbilt, V., Wan, Z. M., Teillet, P., and Carneggie, D., 1994, Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 15(17), 3587-3620.
- White, M. A., Thornton, P. E., and Running, S. W., 1997, A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), 217-234.
- 樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦, 2000: PGLIERC (Preliminary GLocal Imager experiment at Environmental Research Center);その概要について. 日本水文科学会誌、印刷中。

草地における分光反射輝度と蒸発散量の関係

RELATIONSHIP BETWEEN SPECTRAL REFLECTANCE AND EVAPORATION ON GRASSLAND

近藤昭彦・樋口篤志

Akihiko KONDOH and Atsushi HIGUCHI

* 千葉大学環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

本論では連続して撮影された可視・近赤外リモートセンシング画像から蒸発散量に関するシグナルの抽出を試みた。観測地は筑波大学水理実験センターの草地圃場である。1984年から1998年の間に撮影された80シーンのLandsat 5によるTM画像が収集され、分光反射輝度に対応するデジタル値(DN)を読みとった。渦相関・熱収支法によって求められた蒸発散量とNDVIを比較した結果、良好な相関が得られた。ただし、両者の関係は草の成長期と成熟期において異なっている。春から夏の成長期では近赤外のDNは増加するが、赤のDNは低下する。赤の波長域は作用スペクトルが大きい波長域であるので、赤の反射輝度の挙動に草の生理的活動に関するシグナルが含まれていると考えられる。夏以降の成熟期には赤のDNは一定になり、蒸発散量とNDVIの相関は主に近赤外域のDNの変化、すなわち日射量の変化によって説明することができる。したがって、NDVIと蒸発散量の関係は草の生育ステージによって異なり、相関のメカニズムも生育ステージによって異なる。

キーワード： リモートセンシング、Landsat TM、植生指標、蒸発散量、フェノロジー

1. はじめに

リモートセンシングは水文学研究の重要なツールであることは疑いがないであろう。近年では大量の衛星データが逐次撮影され、蓄積されている。しかし、これらの大量のデータから水文過程に関するシグナルは十分抽出されているだろうか。

時間変化を伴う水文現象の解析において植生のフェノロジー(生物季節)は重要な価値を持つ(例えば、Kondoh, 1995¹⁾;近藤, 1998²⁾)。フェノロジーに関わる植生のシグナルは可視・近赤外のリモートセンシングによって捉えることができる。フェノロジーと蒸散量の間には成長(LAIの増加)・光合成といった植物生理学的な過程を通じて相関があると考えら、連続して撮影された可視・近赤外リモートセンシング画像には蒸散量に関するシグナルが含まれているはずである。これが本研究において明らかにしようとしている仮定である。

この仮定を明らかにするためには、利用する衛星データの撮影頻度が高くなくてはならない。NOAA/AVHRRは1日に1回は地球上の同一地点を撮影することができるため、連続的な経時変化を明らかにするために広く利用されてきた。しかし、軌道直下における空間分解能が1.1 kmと粗いために、地上における同期観測、衛星データから得られたシグナルに内在するメカニ

ズムの検討は困難であった。

高空間分解能の衛星データが連続して得られれば、均質な地表面における観測結果との比較・検証も行いやすくなり、衛星で計測される分光反射輝度の変化に内在するフラックス情報を抽出することが可能になる。Landsat 5号のTM(空間分解能30 m)は1984年の運用開始以来データの蓄積を重ね、本研究の対象地域において約80シーンの雲のない画像が得られている。これらの画像から年度は異なるものの、季節変化に関する情報が抽出できた。

本論では地上において観測した蒸発散量と、衛星計測による分光反射輝度の間の関係について検討を行い、衛星計測による広域蒸発散量推定方法について考察を行った。

2. 実験地域

筑波大学水理実験センターの熱収支・水収支観測圃場(ERC)を観測のターゲットとした。半径80mの円形の圃場はランドサット衛星のTMデータでも容易に確認することができる。被覆としては当初ウィーピンググラブグラスを主体とする牧草が植栽され1993年までは均一な牧草が維持されていた。その後は二酸化炭素フラックス研究のために自然の草本群落になっている。現在の植生はC3植物(*Solidago altissima*, *Artemisia princeps*)とC4植物(*Andropogon virginicus*, *Imperata cylindrica*)が混在している。

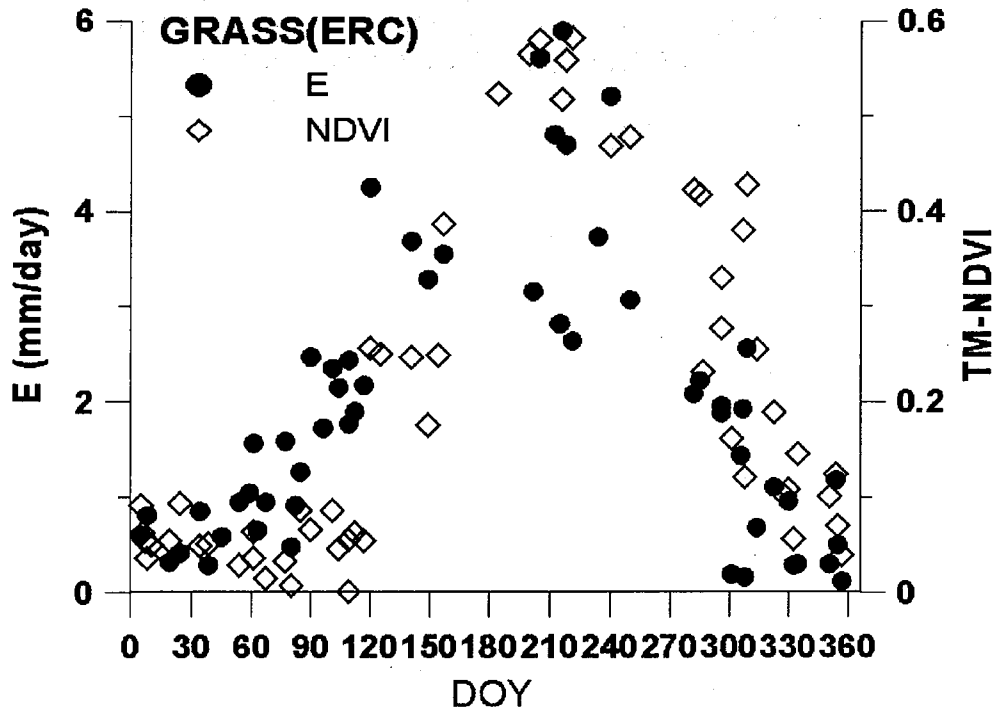


Fig.1 Seasonal changes in NDVI and daily evapotranspiration.

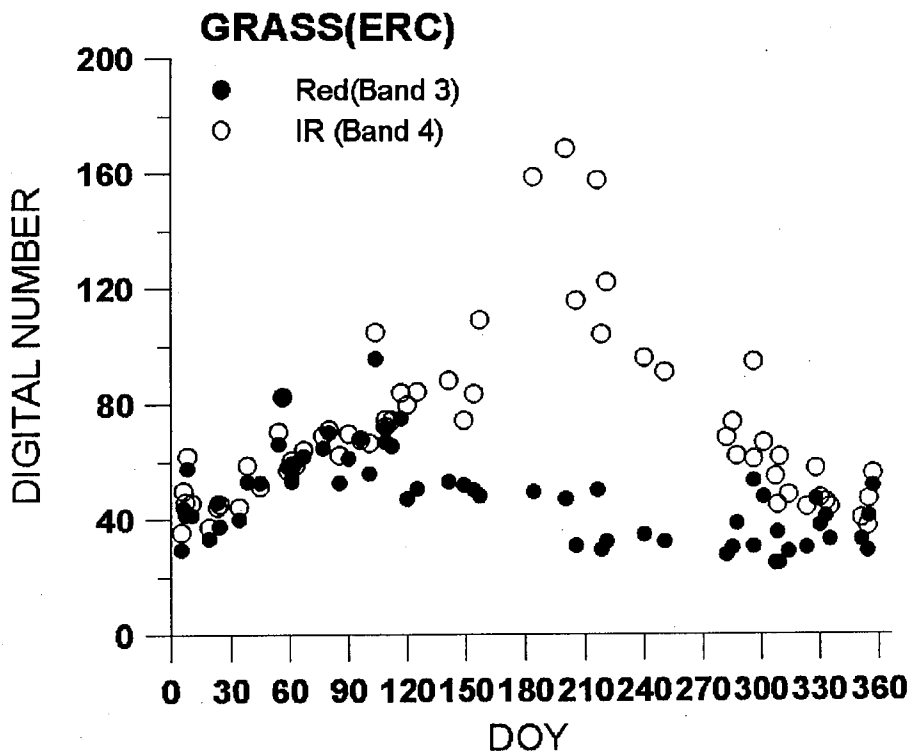


Fig.2 Seasonal changes in red (●) and near infrared (○) bands DN.

圃場の中心部に高さ30mの気象観測タワーが設置されており、気象・水文要素が定期的に計測されている。なお、ルーチン観測要素については <http://www.suiri.tsukuba.ac.jp/> で公開されている。

3. フラックス計測

フラックスの計算には熱収支式を用いた。熱収支式は次式で表される。

$$R_n = IE + H + G + dQ/dt + Ah + P \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 R_n は正味放射量(Wm^{-2})、 H は顕熱フラックス(Wm^{-2})、 IE は潜熱フラックス(Wm^{-2})、 G は地中熱流量(Wm^{-2})である。 dQ/dt はキャノピー内部の貯熱量変化、 Ah は移流項、 P は光合成によるエネルギー損失量であるが、草地ではこれらの項目は無視できると考え、 $R_n = IE + H + G$ とする。

顕熱フラックスは超音波風向風速温度計を用いた渦相関法で計算した。計算式は以下の通りである。

$$H = C_p w' T' \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 ρ は空気密度(kgm^{-3})、 C_p は空気の定圧比熱($Jkg^{-1}K^{-1}$)、 w は風速の鉛直成分(ms^{-1})、 T は温位(K)である。

R_n および G に実測値を用いると、潜熱フラックスは熱収支式の残差として次式で表すことができる。

$$IE = R_n - G - H \quad \dots\dots(3)$$

この計算から日積算蒸発散量を算出した。

4. 画像解析

本研究で使用した衛星データは Landsat TM で、可視～熱赤外に7バンドを持つ。空間分解能は30mで、バンド3が赤、バンド4が近赤外の波長域を観測する。そのデジタル値(以下DN)から以下の式でNDVIを計算した。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad \dots\dots(4)$$

ここで、NIRは近赤外のバンド4のDN、Rは赤のバンド3のDNである。使用した画像のパス・ローは107/35であり、1984年のランドサット5号の打ち上げ以降、1998年までにERCが撮影されているシーンが80シーン利用可能であった。画像を表示し、各バンドについて圃場の中心から3×3の範囲の平均値を読みとり、バンド3、4の値からNDVIを計算した。

5. 結果

(1) 画像解析

図-1に日蒸発散量とNDVIの相関を示す。1984年から1998年までのすべてのデータをプロットした。日蒸発散量とNDVIの相関は草の成長期にあたるDOY(Day Of Year)100~200においては良好であるが、DOY200以降は若干の違いが生じるように見える。

NDVIは赤と近赤外のDNのコンビネーションなので、図-2にそれぞれのDNの季節変化を示す。図-2によると近赤外のバンドのDNは概ね太陽高度に準じた季節変化をしている。赤のDNに着目すると、DOY100~200ではDN(デジタルナンバー)は低下し、DOY200以降は一定値を保つことがわかる。DOY100~200の期間が草の成長期、DOY200以降が成熟期と考えると、赤のDNの変化に草の成長・植物生理学的情報が含まれていると考えられる。

そこで、図-3に日蒸発散量とNDVIの関係を成長期(DOY100~200)、成熟期(DOY200~330)、冬期(DOY330~翌年DOY100)に分けてプロットした。草の成長期はNDVIと日蒸発散量が高い相関を持つことがわかる。成熟後は両者の関係は別の曲線に乗ってくるが、図-2から明らかのようにその相関は近赤外のDNと相関を持つようになり、結局、日射量 \propto 正味放射量の指標となっているものと考えられる。このように、時期により両者の相関に内在するメカニズムは変わってくるが、NDVIから日蒸発散量を求める経験的な手法については適用の可能性があると思われる。

(2) 地上計測

1999年から地上観測を強化し、様々な観測項目を追加した。この観測計画の詳細については樋口ほか(2000)³⁾を参照されたい。この計画の一環として光量子センサーにより上向きのPAR(Photosynthetically Active Radiation)を計測し、アルベドメーターによって計測された上向きの短波放射量成分との差をとることによって、総上向き短波放射量をPAR成分と赤外成分に分離した。これは衛星で計測している可視と近赤外の反射輝度とほぼ同じものと考えられる。光量子センサーの感度は0.4~0.7 mにある。アルベドメーターの感度は0.3~3.0 mなので、赤外成分は0.7~3.0 mの波長域を計測していることになる(詳細は樋口ほか、2000³⁾を参照のこと)。

図-4は草地の生育期間~成熟期間の上向きの総短波放射量、PAR成分および赤外成分である。観測開始時は草の芽生えの時期に相当し、その後草は活発に成長する。日本では6月から7月初頭は梅雨で、その後の8月以降草は成熟期に達する。図

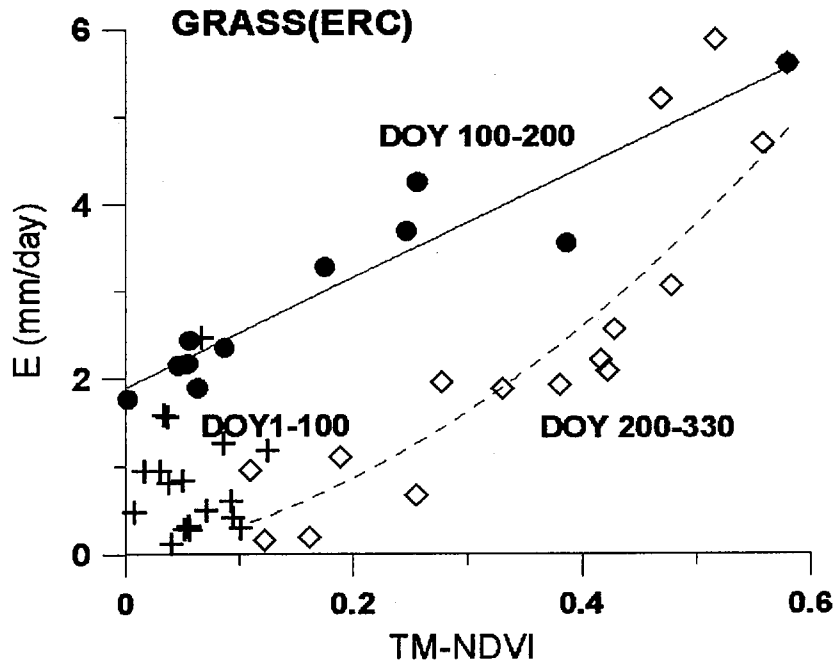


Fig. 3 Relationship between daily evapotranspiration and NDVI

DOY100-200 : growing season.

DOY200-330 : mature season.

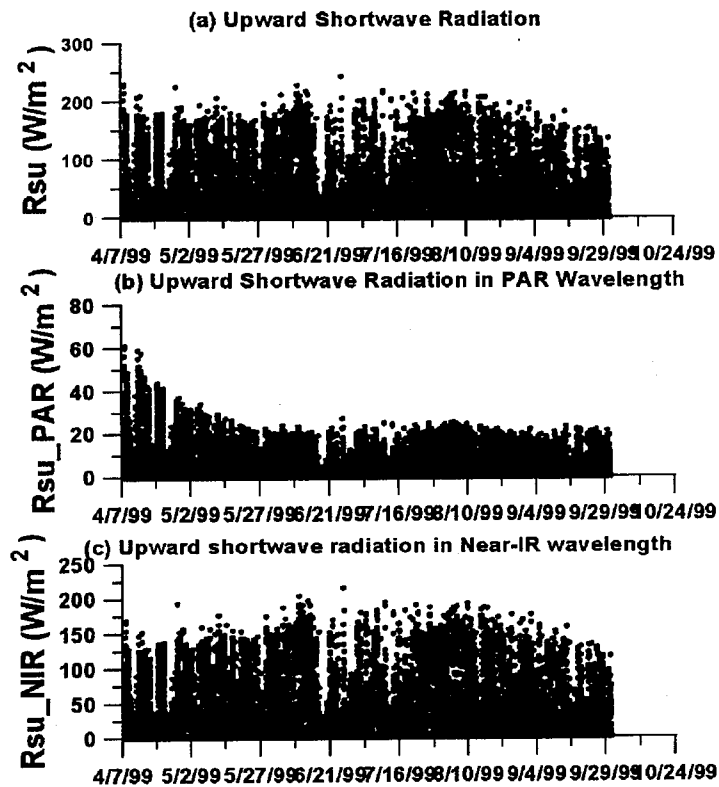


Fig.4 Upward total shortwave radiation(U_p) and its PAR component(Middle) and near infrared component(Low).

の上側の包絡線に注目するとPAR成分は4月から6月にかけて減少傾向にある。このとき、赤外成分は増加傾向にあり、結果として総成分は顕著な変動は示していない。その後、PAR成分はほぼ一定値を保つ。

6. 考察

これまでの研究によって光合成速度と蒸散量の間には一定の関係があることが明らかにされてきた(例えば、Choudhury, 1994⁴⁾).

$$\partial E / \partial A = \text{const.}, \partial^2 E / \partial^2 A > 0 \quad \dots (5)$$

ここで、Eは蒸散速度、Aは光合成速度である。光合成は植生が可視光を吸収して、炭水化物を作り出す作用である。5式を認めると蒸散量とAPAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation)の間の相関が導かれ、これが光学リモートセンシングで蒸散量を推定する根拠となる。

TMの赤バンドはクロロフィルの吸収帯の一つに対応する0.63~0.69 μm に感度があり、この部分は特に作用スペクトル(action spectrum)が大きい波長域である。そこで、図-5に赤のDNと蒸散量の関係を示した。

DOY100-200の生育期には両者の関係はきれいなマイナスの関係になる。すなわち、蒸散量が大きときは赤の反射輝度が小さい。このことは生育期においてはAPARの増加(赤の反射輝度の減少)は蒸散量の増加と対応していることを示す。したがって、図-3で明らかとなったNDVIと蒸散量の相関は、成長期においては植生の生理的活動を反映していることになる。

ここで明らかになった現象は図-4に示した草の成長期における赤(PAR)の反射輝度の減少と近赤外の反射輝度の増加に対応している。衛星計測で得られた草地の波長ごとの植物季節は明らかに現象を反映しているといえる。

一方、成熟期(DOY200-330)では赤のDNは一定値をとるようになる。図-1、3ではこの期間でも良好な相関があるように見えるが、その相関は近赤外のDNと蒸散量の相関に負うところが大きい。近赤外の反射輝度は日射の指標になり得るので、日射量と正味放射量との相関から比較的好い相関が得られていると思われる。ただし、内在するメカニズムは成長期と成熟期では異なっている。

7. 結論

21世紀の到来とともに世界は衛星による地球環境観測の最盛期に入り、高~中分解能の衛星データが高頻度で撮影されるようになる。これらのデータから水文過程に関する情報を抽出するためには、地上検証実験によって衛星で得られる分光学的な特性と、現象との間の関係、内在するメカニズムに関する検討を行っておく必要がある。

そこで、草地を対象として蒸発散量の地上観測と、大量の時系列衛星データの解析を行った。その結果、以下の観測事実が得られた。

- 植生指標は蒸発散量のよい指標になるが、その相関は生育期と成熟期で異なる。
- 生育期には赤の反射輝度の減少が衛星データと現地観測の双方において認められた。これは草の生理学的な活動を表していると考えられる。
- 成熟期には赤の反射輝度は一定値をとるようになり、植生指標と蒸発散量との相関は近赤外の反射輝度の変化による。この場合は両者の相関は近赤外の反射輝度が日射と相関が高いことによる。

以上の結果から衛星データによって得られた分光反射輝度、植生指標の時空間的な変化は蒸発散量の変化と関連づけられることが証明された。今後は、衛星情報と地上情報を組み合わせて流域スケールの広域水文情報を抽出することが課題である。

謝辞: TMデータの解析についてはADEOS/AVNIR検証実験(PI:近藤昭彦)の一環として宇宙開発事業団(NASDA)の支援を受けた。

REFERENCES

- 1) Kondoh, A., Relationship between the global vegetation index and the evapotranspirations derived from climatological estimation methods. *J. Japan Soc. of Photogram. and Remote Sens.*, 34, 2, 6-14, 1995.
- 2) 近藤昭彦, 草本群落の分光反射輝度と蒸発散量の関係. *水文・水資源学会誌*, 11, 599-602, 1998.
- 3) 樋口篤志・西田頭郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦, PGLIERC(Preliminary Global Imager Experiment at Environmental Research Center): その概要について. *日本水文科学会誌*(投稿中).
- 4) Choudhury, B.J., Synergism of Multispectral Satellite Observations for Estimating Regional Land Surface Evaporation. *Remote Sens. Environ.*, 49, 264-274, 1994.

RELATIONSHIP BETWEEN SPECTRAL REFLECTANCE AND EVAPORATION FROM VEGETATED SURFACE

A. KONDOH AND A. HIGUCHI

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Chiba 263-8522, JAPAN

ABSTRACT

This paper attempts to extract the signal on evapotranspiration from continuous visible and near-infrared satellite images. The site is the experimental field covered with grass in Environmental Research Center, Tsukuba University. Eighty Landsat TM images from the launch in 1984 till 1998 are collected, and the digital numbers at the site are extracted. The spectrum brightness and NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) are compared with measured evapotranspiration by eddy correlation and heat budget methods. As a result, it is confirmed that vegetation index is a good index of transpiration, however, the relation is different between growing season and mature period. The reflected brightness in near infrared band is increased in the growing season from spring to summer, on the other side, the red brightness is decreased in the same period. As action spectrum is large in red wavelength, the data in red band contains the information on physiological activity of the grass. In the mature season after summer, red brightness become constant and evapotranspiration get the correlation between near infrared band which has a correlation with solar radiation. The relationship between NDVI and evapotranspiration should be considered separately between growing season and mature period. The inherent mechanism is different at the phenological stages.

KEY WORDS: remote sensing; Landsat TM; vegetation index; evapotranspiration; phenology

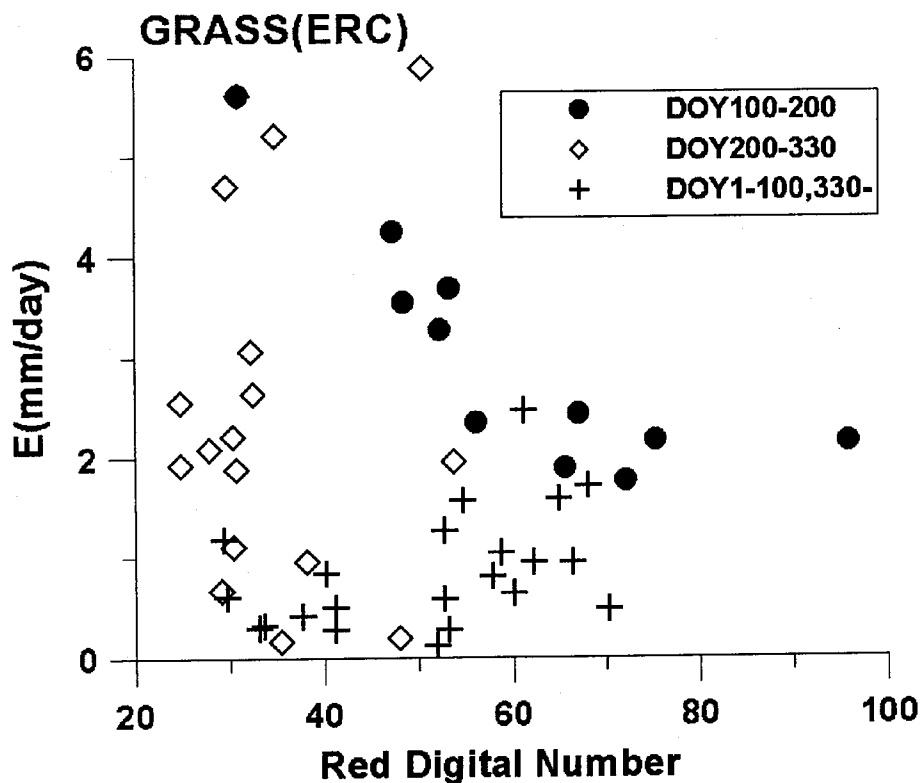


Fig.5 Relationship between DN in red band and daily evapotranspiration.

ゴニオスペクトロラジオメータの試作と樹木葉の反射スペクトル

Trial manufacture of goniospectroradiometer and reflection spectra of tree leaves.

○三輪卓司, 池田卓 (千葉大学環境リモートセンシング研究センター, 千葉市稲毛区弥生町 1-33, Phone:043-290-3840, FAX:043-290-3857)

Takuji MIWA and Takashi IKEDA (Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Phone:043-290-3840, FAX:043-290-3857)

1. はじめに

これまで樹木葉のスペクトルに対して, 1:葉のスペクトルの採取後の経時変化¹⁾, 2:葉の着枝位置, 枝の方向, 葉の成熟度²⁾, 3:測定法, 樹木葉の配置法による変化³⁾, 4:反射・透過率と含水率の関係⁴⁾, 5:反射・透過率と水以外の量の関係⁵⁾, 等の観点から実験的に検討した. 今年度は, ゴニオスペクトロラジオメータの試作, 動作テスト, 樹木葉の反射スペクトルの角度依存性の検討に着手した. これまでに, 常緑樹2種, 落葉樹3種のデータを取得したが, 未だ解析中の為, 今回は, 装置, 測定, 実験等を重点的に説明し, 反射スペクトルの角度依存性に付いては概要説明に止める. 今回の報告の主要部は, 日本リモートセンシング学会第27回学術講演会で発表した物である⁶⁾.

2. 実験

2-1. 試作器と SPC, LPC 配置

ゴニオスペクトロラジオメータの試作に際し, 1) 最少条件は, 任意に設定した角度で試料を照射可能な事である. 2) 次は適当な場所にセンシングプローブを配置する事である. 適当な配置として, 1:試料とプローブ間角度を固定, 2:照射光とプローブ間角度の固定の2種が考えられる. 何れの場合にも容易に対応可能な, 固定角 45° の装置とした.

試作装置では, 試料を固定し, これを中心として, 光源, レンズ等を設置したステージが回転する. 任意の角度には, パソコンで制御したパルスモータ動力の角度設定装置で実行する. 光源は, タングステンハロゲンランプ:規格12V, 50Wを電圧可変の直流安定化電源で11Vで点灯し, 熔融石英レンズ:焦点距離100mmで平行光とし, 開口を通して試料を照射した. 試料は, すべての角度で照射光の中心が同じになる位置に配置した. センシングプローブの瞬間視野角:FOVは 25° で, 2種の配置の何れの場合も, 試料中心から同一の25mmの距離に, 照射光中心と観測部中心が一致する様に配置した. 従って, 照射中心部の試料面上の直径約11mm部分を観測した. 照射部は, 開口で制限し, 観測範囲より長さで3倍程度とした. プローブの配置法と略称以下に記述する.

1:試料-プローブ間角度 45° 固定:この配置では, 試料固定台上にプローブを固定した. この配置を以後 SPC(constant angle between sample and sensing probe)略記する.

2:照射光-プローブ間角度 45° 固定:この配置では, プローブを光源, レンズ等を固定したステージに固定した. この配置を以後 LPC(constant angle between illumination beam and sensing probe)と略記する.

Fig. 1 に装置:SPC, LPC setting の概念図を示す. この研究中では, 照射光方向をZ軸, ゴニオメータの回転軸方向をX軸, 右手系でZ, X軸に垂直な方向をY軸と定義し, Fig. 2 の中央上部に示した. 左側に SPC 配置, 右側に LPC 配置の3種の角度の試料-照射光間角度による変化を示した. SPCではS-P線とS-L線の交点(45°), LPCではS-L線と逆S-P線(点線)の交点(22.5°)が正反射角になる様子が良く分かります.

分光反射スペクトルは分光放射計:Field Spec FR:Analytical Spectral Devices, Inc.製を使用した. 標準白板には Labsphere 社製 Spectralon 50x50mm:校正表付を使用した. 測定領域:350 - 2500nm でほぼ1の値を示すので, 測定データに校正表値による補正は行わなかった.

2-2. 測定

2種のプローブ配置(SPC, LPC setting)で, 2種の測定モード(DN, WR mode)で測定した. DNは, 光強度のデジタル変換値(digital number), WRは, 反射率(reflectance referred to standard white board)測定モードを表す.

DN 測定は、 $Z=0$, $X=0$ で標準白板をセットして最適化を行い、試料に交換して測定した。種々の角度における測定は、同一装置条件で角度のみを変えて実行した。

WR 測定は、各 Z , X 値に設定後、標準白板を試料として最適化、反射率標準 (100% line) 設定後試料をセット、測定した。つまり、各 Z , X 値で、標準白板の反射率を 100% とした試料の反射率を測定した。

3. 結果

SPC, LPC における DN, WR データの例を、Fig. 3 に示す。左列は SPC, 右列は LPC データ、上段は標準白板の DN データ、中段はソメイヨシノ葉表側の DN データ、下段はソメイヨシノ葉表側の WR データを示す。これより、試料-プローブ間角度が 45° に固定された SPC では角度による変動が、照射光-プローブ間角度を 45° に固定した LPC に比べて小さい。また、LPC では正反射角 (22.5°) に近い 20° で明瞭な極大を示す。この例からも LPC の方が SPC より反射率の角度依存性を調べやすいと思われるが、この他に衛星データ (太陽を光源とした場合、1 フレームのデータでは、照射光角度-プローブ間角度は一定) では、LPC 配置に対応すると考えられるので、以下には LPC 配置のデータのみを例示する事にする。

Fig. 4 には 5 種の樹木葉の $Z=0$, $X=0 - 70$, Fig. 5 には $Z=90$, $X=0 - 70$ の選択した 17 波長の反射率変化を示す。

4. まとめ と 結論

今回は、SPC 配置、LPC 配置に容易に対応可能な分光放射計 : Field Spec FR を使用したゴニオスペクトロラジオメータを試作し、色紙、樹木葉に対して $X=0 - 80^\circ$ で種々な測定を行い、正常な動作、データ取得を確認した。しかし、 80° は S/N が極端に悪く使用不可と判断した。 70° でも S/N はかなり悪いが、何とか実用になると推定した。DN モードでは、SPC で 45° 付近、LPC で 22.5° 付近、つまり、正反射角度で極大を示し、表面の正反射の寄与が大きいことを確認した。

WR モードにおいても、正反射角付近で極大を示す場合が多いが、これは、標準白板より樹木葉の方が正反射の寄与、つまり表面反射の寄与が大なる事を示す。標準白板は種々な測定、検討からかなり良好なランバート面と推定されたが、樹木葉面はランバート面から大きく外れた反射特性を示す事が確認された樹木葉の反射スペクトルは、樹種、表裏、主葉脈の配置方向、葉脈の構造等により種々な変動を示した。これらの変動は、主としてはの構造、つまり、葉の表面状況、例えば、蠟質の厚さ、凹凸、葉脈の形状、柔毛の状況等によると推察された。特に、葉の表側では葉脈はほぼ葉平面内にあるので、蠟質の厚さ、細かな凹凸、柔毛の状況等が主要因と推察された。しかし、葉の裏側では、多くの場合、葉脈は葉平面から飛び出ているので、飛び出し度合、葉脈の形状が主要因と推察された。しかし、反射率の変動の要因の解析は、現状では全く不十分であり、今後更に詳細な解析を実施し、反射率変動の要因を解明する予定である。

参考文献

- 1) 三輪外 : 日本リモートセンシング学会第 17 回学術講演会論文集 p45-p46 (1994.11), 18 回 p187-p187-p188 (1995.5), 19 回 p183-p184 (1995.11), 21 回 p177-p178 (1996.11), 22 回 p129-130 (1997.5)
- 2) 三輪外 : 日本リモートセンシング学会第 20 回学術講演会論文集 p29-p30 (1996.5)
- 3) 三輪外 : 日本リモートセンシング学会第 23 回学術講演会論文集 p47-p48 (1997.5), 24 回 p41-p42, p243-p244 (1998.5), 25 回 p45-p46, p47-p48 (1998.11), 26 回 p599-p600, p661-p662 (1999.5)
- 4) 三輪外 : 日本リモートセンシング学会第 27 回学術講演会論文集 p56-p57 (1999.11)

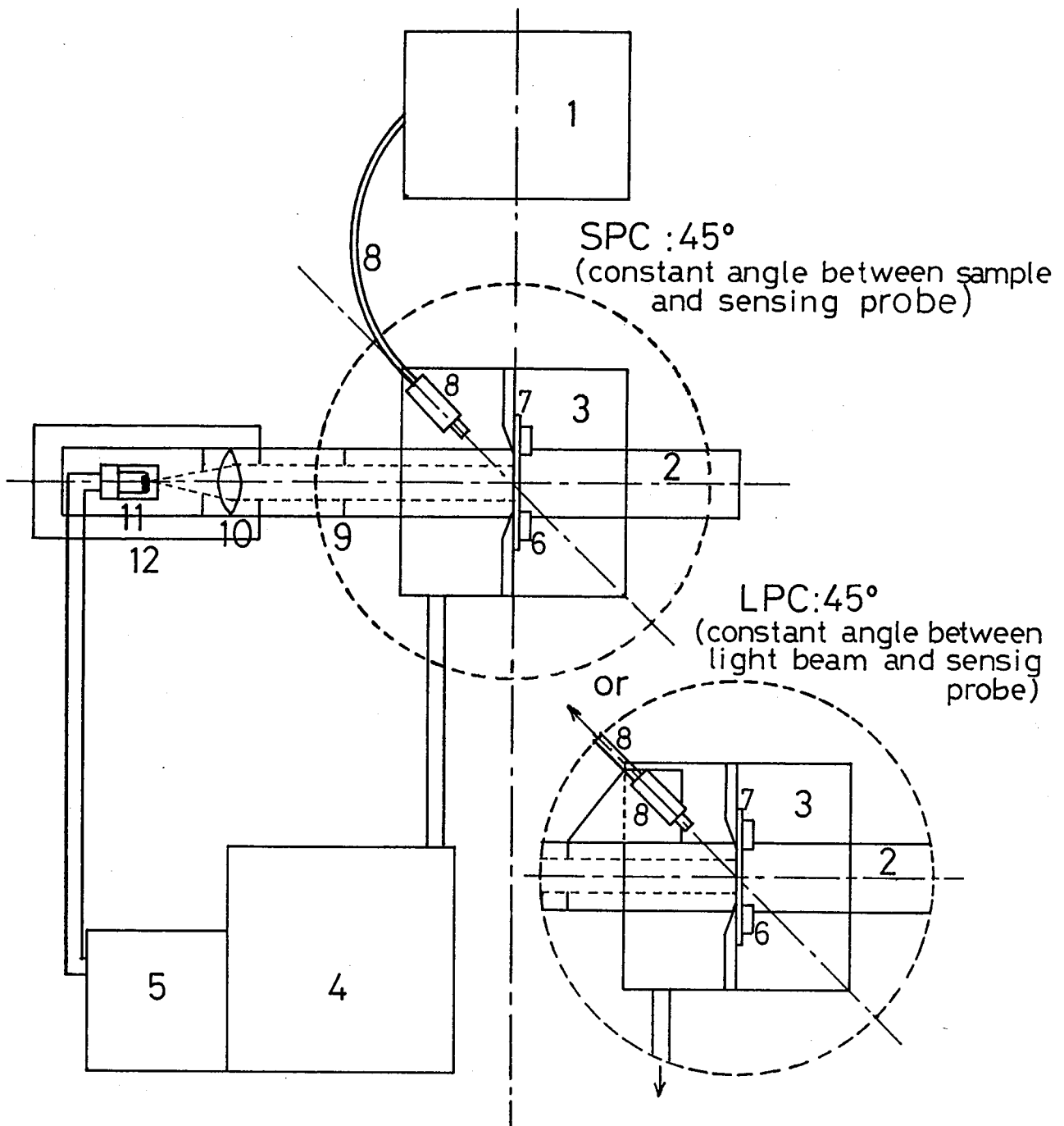


Fig. 1 Schematic diagram of goniospectroradiometer.

Direction of irradiation is defined as Z axis. Vertical direction to the paper plane is defined as X axis.

SPC:45° Constant angle between sample and sensing probe setting.
 LPC:45° Constant angle between illumination beam and sensing probe setting.

1:spectroradiometer:Field Spec FR, 2:goniometer stage, 3:angle setting unit (stepping motor, gear box, etc), 4:angle setting controller, 5:DC power supply, 6:sample holder, 7:sample, 8:optical fiber and sensing probe, 9:aperture, 10:fused quartz lens, 11:tungsten halogen lamp, 12:lamp house.

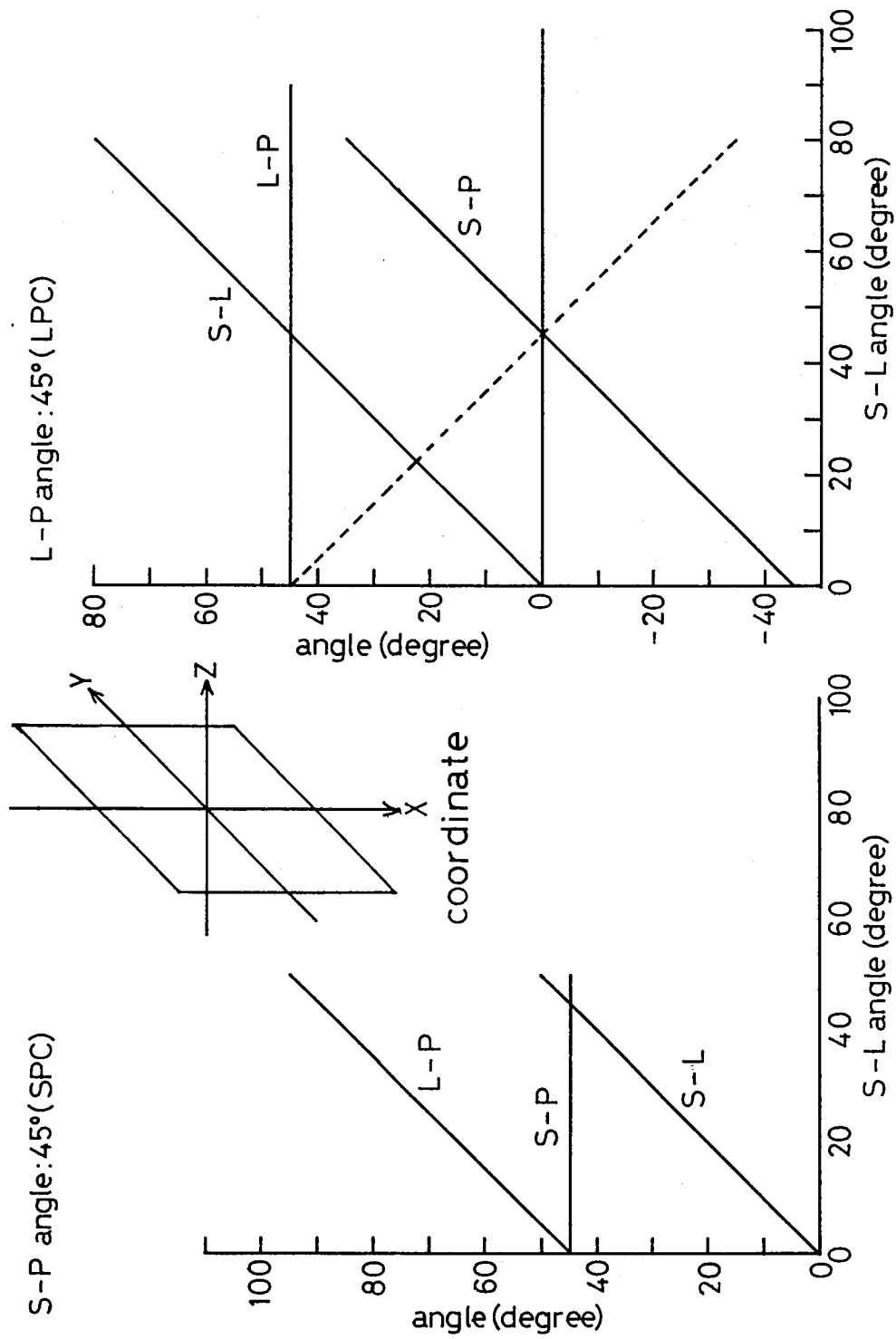
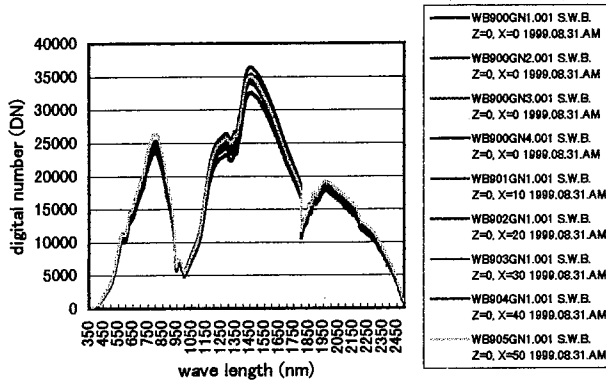


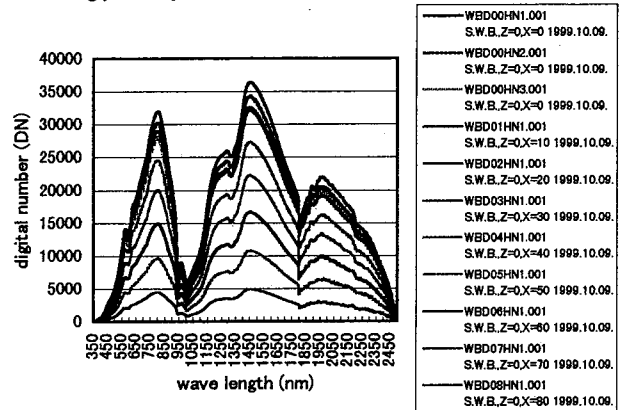
Fig. 2. Coordinate definition and various angle on SPC and LPC setting.
 MIDDLE: coordinate: definition of coordinate in this goniospectroradiometer.
 LEFT: SPC: 45°: constant angle (45°) between sample and sensing probe setting.
 RIGHT: LPC: 45°: constant angle (45°) between illumination beam and sensing probe setting.
 L: illumination beam, S: sample, P: sensing probe, S-L: angle between sample and illumination beam,
 S-P: angle between sample and sensing probe, L-P: angle between illumination beam and sensing probe.

Fig. 3 Examples of SPC and LPC setting performance at 0 - 50° or 80°.
 Left column: SPC setting, Right column: LPC setting
 Upper row: DN mode data of standard white board.
 Middle row: DN mode data of front side of Someiyoshino leaf.
 Under row: WR mode data of front side of Someiyoshino leaf.

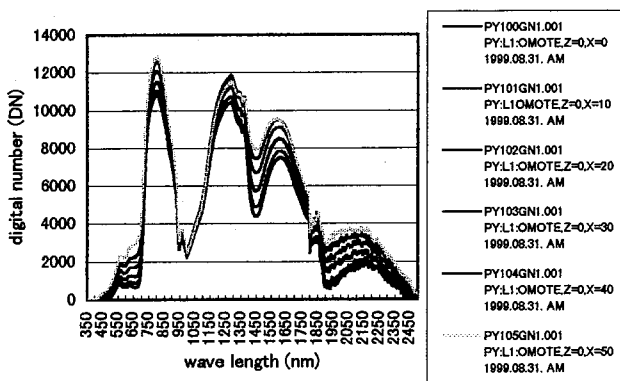
Reflection intensity of standard white board at Z=0 and X=0, 10, 20, 30, 40, 50° by FSFR DN mode standardized at Z=0 and X=0 at 1999.08.31. AM.



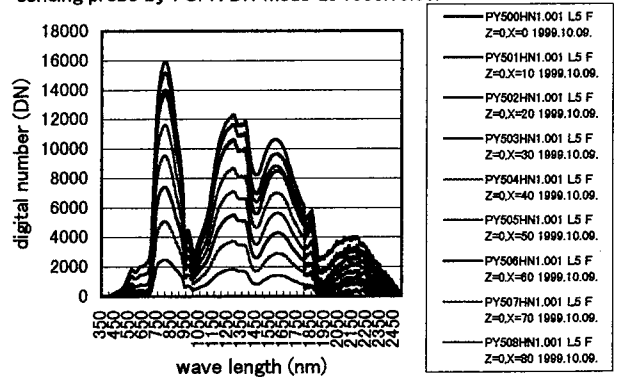
Reflection intensity of standard white board referred to standard white board standardized at Z=0 and X=0 on constant angle (45°) between illumination beam and sensing probe by FSFR DN mode at 1999.10.09.



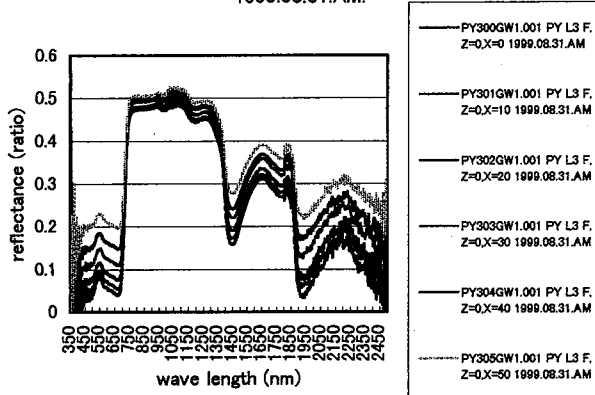
Reflection intensity of Someiyoshino:PY L1 leaf Omote at Z=0 and X=0,10, 20, 30, 40, 50° by FSFR DN mode standardized at S.W.B. Z=0 and X=0 at 1999.08.31. AM.



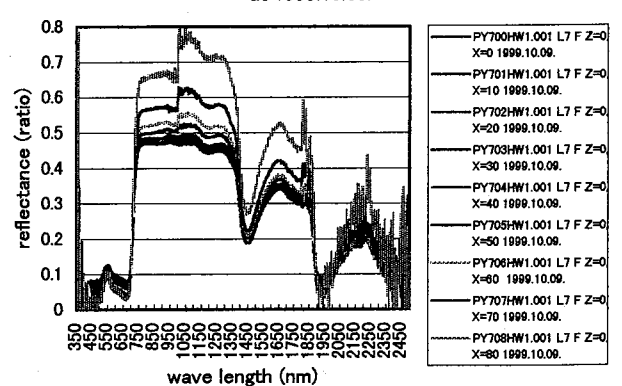
Reflection intensity of Someiyoshino:PY leaf L5 omote:F referred to standard white board standardized at Z=0 and X=0 On constant angle (45°) between illumination beam and sensing probe by FSFR DN mode at 1999.10.09.



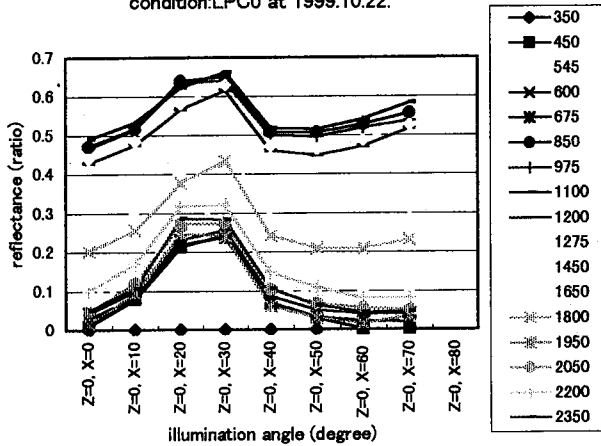
Reflection spectra of Someiyoshino:PY L3 omote referred to standard white board by FSFR WR mode standardized at Z=0 and each X condition at 1999.08.31. AM.



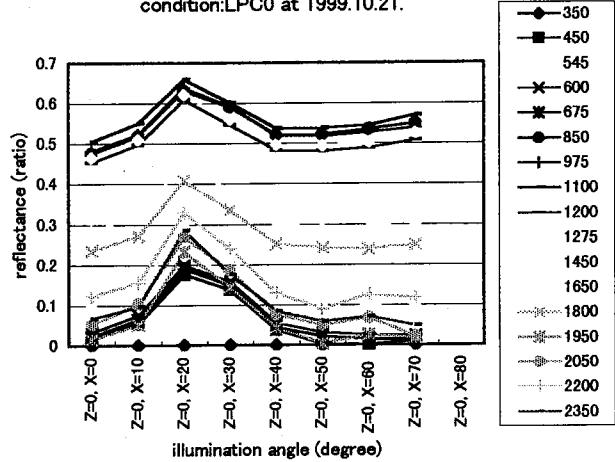
Reflection spectra of Someiyoshino L7 omote:F referred to standard white board by FSFR WR mode standardized at each Z and X condition at 1999.10.09.



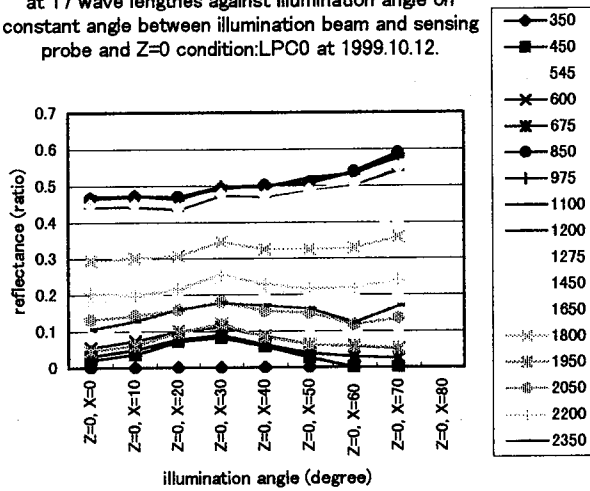
Plot of reflectance of Akagashi:AQ L7 leaf front side:F against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=0 condition:LPC0 at 1999.10.22.



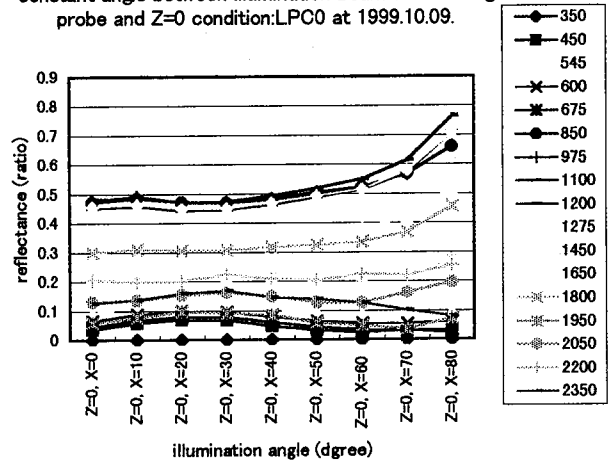
Reflection of Sudajii:CS L7 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=0 condition:LPC0 at 1999.10.21.



Plot of reflectance of Kumanomizuki:CB L7 front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=0 condition:LPC0 at 1999.10.12.



Plot of reflectance of Someiyoshino:PY L7 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=0 condition:LPC0 at 1999.10.09.



Plot of reflectance of Konara:QS L7 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=0 condition:LPC0 at 1999.10.11.

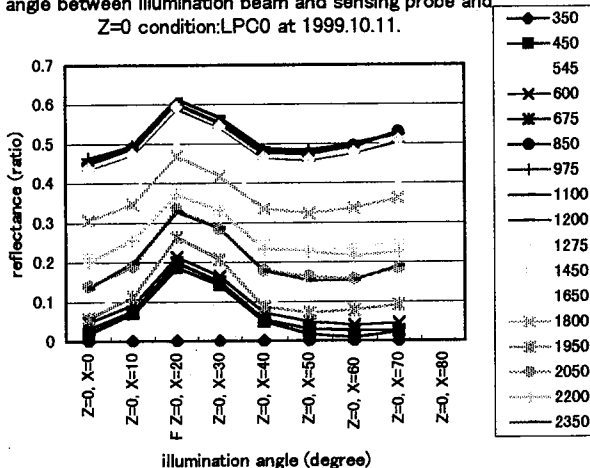
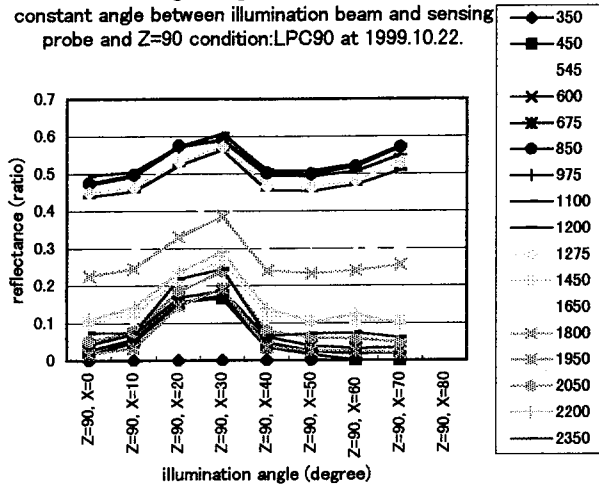
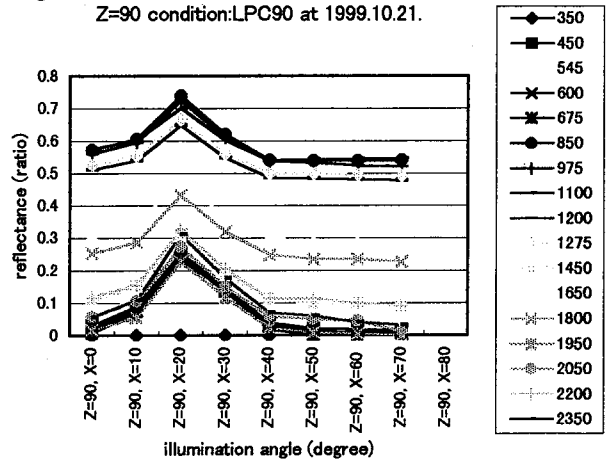


Fig. 4 Plots of reflectance at 17 wave lengths of 2 kind ever green and 3 kind deciduous leaves against illumination angle:X at Z=0 LPC setting.

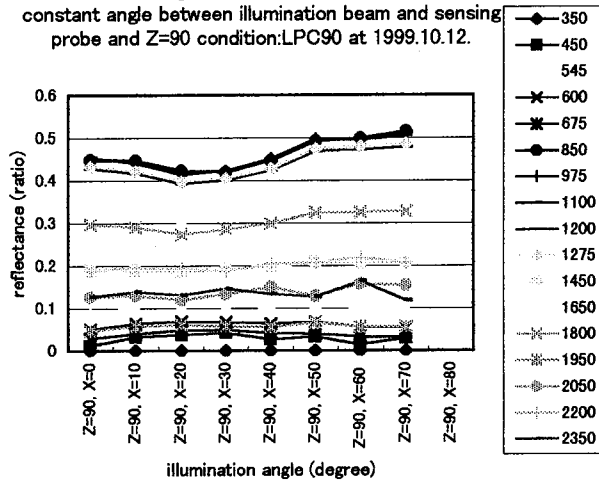
Plot of reflectance of Akagashi:AQ L8 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=90 condition:LPC90 at 1999.10.22.



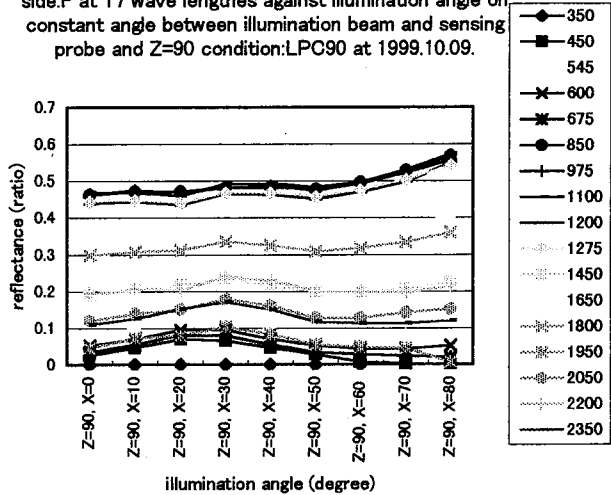
Plot of reflectance of Sudajji:CS L8 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=90 condition:LPC90 at 1999.10.21.



Plot of reflectance of Kumanomizuki:OB L8 front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=90 condition:LPC90 at 1999.10.12.



Plot of reflectance of Someiyoshino:PY L8 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=90 condition:LPC90 at 1999.10.09.



Plot of reflectance of Konara:QS L8 leaf front side:F at 17 wave lengths against illumination angle on constant angle between illumination beam and sensing probe and Z=90 condition:LPC90 at 1999.10.11.

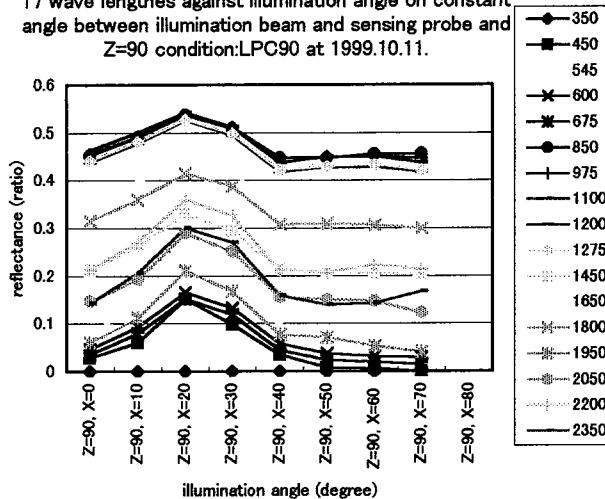


Fig. 5 Plots of reflectance at 17 wave lengths of 2 kind ever green and 3 kind deciduous leaves against illumination angle:X at Z=90 LPC setting.

種々の施肥量で育成後、水ストレスを与えたトウモロコシ、ダイズ葉の透過率、反射率と生理物理量の関係

Relation between transmittance or reflectance and physiological values of Zea Mays and Glycine Max rearing on various fertilizer levels and stressed on water to 6 degrees.

○三輪卓司*, 于 貴瑞**

(* : 千葉大学環境リモートセンシング研究センター : 千葉市稲毛区弥生町,

** : 千葉大学園芸学部 : 千葉県松戸市松戸 648)

○ Takuji MIWA * and Gui-Rui YU **

(* : Center for Environmental Remote Sensing:1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi,

** : Faculty of Horticulture, Chiba University:648, Mtsudo, Matsudo-shi, Chiba-ken.)

1. はじめに

これまでに、トウモロコシ:Zea Mays:ZM, ダイズ:Glycine Max:GM, サンゴジュ:ViburnumAwabuki:VA, ユリノキ:Liriodendron tulipifera:LTにつき以下の測定を実施した。1) 施肥量3段階, ポットで育成したZM, GM, ポット中で10年程度育成したVA, LTを試料とした。これらの採取葉に強制的に飽和まで吸水させた後、約1時間に1回、含水量と反射スペクトルを測定し、種々な含水量を表す量と種々な波長の反射率と反射率比の相関関係を詳細に解析し、含水量を表す量として単位面積当たりの含水比が最良で、樹種等に依存しない相関関係式を得た¹⁾。2) 1)のZM, GM, VA, LTに6段階の水ストレスを与えた試料に対して、着枝状態の葉の反射スペクトル、種々の生理物理量を並行して測定し、反射スペクトルと種々の生理物理量の相関関係を詳細に解析した。また、1)で得た相関関係式を2)のデータに適用し良好な結果を得た¹⁾。今回は、着枝状態の葉の拡散透過スペクトルを測定するユニットを試作し、試作ユニットの試験、透過・反射スペクトルと生理物理量の相関関係、透過スペクトルの特徴の検討に着手した結果を報告する。今年度の中間結果は日本リモートセンシング学会第27回学術講演会で発表した²⁾。今回の発表の大部分は、この発表の内容と重複し、装置、実験等について詳細に説明し、結果については概説的な説明に止める。現在、詳細な解析中であり、これらについては来年度に紹介する予定です。

2. 実験

2-1 : 装置 :

分光放射計 : Field Spec FR : FSFR (Analytical Spectral Devices, Inc.製) (測定波長域 : 350 - 2500nm) を使用した着枝 (茎) 状態の葉の反射は以前に作製し、これまでに種々のデータを取得して来た装置を整備した。拡散透過スペクトル測定用ユニットは、反射ユニットを主体としたもので、容易に透過ユニットに変換可能なユニットを目標として作製した。何れのユニットでも、スペクトル測定には、分光放射計 : FSFR を使用した。

Fig. 1-1 に着枝 (茎) 葉反射測定ユニットの概念図を、Fig. 1-2 に着枝葉拡散透過ユニット概念図を示す。

反射ユニット : Fig. 1-1 では、光源は規格 12V, 50W のタングステンハロゲンランプ 2 灯を、直流安定化電源を使用して、被測定葉を測定時の熱損傷から守る為に 7V で点灯した。その結果短波長ではセンサ : InGaAs の低感度に加えて低光放射の為に、450nm より短波長では N/S が悪く、実質上 450nm でのみ使用可能である。

透過ユニット : Fig. 1-2 では、光源には規格 12V, 50W タングステンハロゲンランプ 1 灯を定電圧電源で 11V で点灯した。受光部は、リモートコサインリセプタ : RCR 内にセンシングプローブをセットした。試料 (葉等) は、ホルダに挟んで、RCR の受光面の直前 (0.5mm 程度) に配置した。RCR は、Field Spec FR 用に A.S.D.社の純正品であるが、使用可

能域が、400-2200nm に制限されており、この全域でかなり良好なデータが取得される。

検証データを得るために、分光光度計：Lambda 19: Perkin Elmer 社製に積分球：Labsphere 社製を付けて、反射、透過スペクトル等を測定した。

2-2: 試料

装置の検証用の試料として、日本色彩研究所製の赤、緑、青の色紙を用いた。

トウモロコシ:Zea Mays:ZM, ダイズ:Glycine Max:GM の2種を対象植物とした。1/5000 アールポットで5段階の施肥量（日本エフシー KK 8:8:8 化成肥料, 1:0, 2:3, 3:6, 4:9, 5:12g/pot）で育成後、測定の約10日前から灌水量を調整して、6段階の水ストレスを与えた試料を調製した。水ストレスは、1, 2, 3, 4, 5, 6の順に強く掛けた試料を表す。ポット試料は、施肥量5種で育成したが、多くの場合に目視観察で4段と5段は差が認められなかったため、5段目試料の測定を省略し、4種（段階）測定を実施した。

2-3: 測定

測定は、FSFR のWRモードで実施した。つまり、標準白板：Spectralon 50x50mm：Labsphere 社製（校正表付）を使用して最適化、標準状態：100%ライン設定を実施後、標準白板に対する試料の反射率スペクトルを測定した。測定域全域で標準白板の反射率はほぼなので、測定値に対する校正表による補正は行わず、測定値を直接使用した。何れの場合にも、着枝葉の測定は、予め標準白板で最適化、標準状態の設定実施後、あまり無理の掛からない状態に測定葉をホルダに固定し、その状態でカーテンを下ろして外光が無視できる状態に設定後、反射スペクトルを測定した。

並行して測定した生理物理量は11種で、流量、気温、葉温、相対湿度、光量子密度、気孔コンダクタンス、蒸散速度はボロメータで、光合成量（SPND値）は専用メータで測定した。水ポテンシャルはスペクトル測定終了後葉を採取し圧力チャンバー法で、葉と土壌の水含量は、スペクトル測定終了後、葉と土壌を採取して、乾燥法（採取直後の重量と80°Cのオープン中で3日以上乾燥後の重量の差を水含量とする）で求めた。測定は、先ず拡散透過スペクトルと採取しなくても測定可能な生理物理量を並行して実施した。その後、可能な限り短時間内に、反射スペクトルと全項目の生理物理量測定を実施した。

3. 結果

3-1. 検証結果

検証は、積分球を付けた分光光度計の反射、拡散透過データと試作ユニットを用いた分光放射のデータを詳細に比較検討する事によって行った。先ず、検証用の色紙3種のデータについて詳細に比較検討して試作ユニットで正常なデータが取得される事を確認した。その後、試験的に採取した葉について正常なデータが得れる事を確認した。これによって試作ユニットで正常なデータが取得されると判断し、試料の着枝葉に対して測定を実施した。

3-2. 試料葉結果

この要旨では、トウモロコシのデータを例示する。Fig. 2にはトウモロコシの反射スペクトルを示す。左列の4つの図は、施肥量4段の試料に、何れにも水ストレスを6段掛けた場合のスペクトルを示し、上段から下段方向に、施肥量1, 2, 3, 4場合を示す。右列の4図は特定の水ストレス状態の施肥量によるスペクトル変動を示す。上段から下段方向に水ストレス1, 3, 5, 6段の場合を示す。Fig. 3にはトウモロコシの透過スペクトルを示す。左列の4つの図は、施肥量4段の試料に、何れにも水ストレスを6段掛けた場合のスペクトルを示し、上段から下段方向に、施肥量1, 2, 3, 4場合を示す。右列の4図は特定の水ストレス状態の施肥量によるスペクトル変動を示す。上段から下段方向に水ストレス1, 3, 5, 6段の場合を示す。以上2図には、各施肥量、各水ストレスポット試料に付いて2枚の葉に付いて測定したしたので、左列図には12本、右列図には8本のデータが表示されている。これらのトウモロコシデータの概要をFig. 4に示す。上段は透過スペクトル、下段は反射スペクトルを示す。左列は施肥量3段目試料に水ストレスを6段階掛けた場合のスペクトル変動を、右列は施肥量4段階で育成した試料に6段目の水ストレスを掛けた場合の変動を示す。

4. まとめと結論

今回は、実験について詳細に説明し、結果は概要のみを説明します。「1. はじめ」で述べた様に、これまでに3段階の施肥量で育成後、水ストレスを6段階かけたトウモロコシ、ダイズのポット試料と10年程度ポット中で育成したユリノキ、サンゴジュに6段階の水ストレスを与えた試料について、反射スペクトル測定と並行して種々の生理物理量を測定し、反射と生理物理量の相関関係を詳細に調べ、成分分析結果との相関関係検討を除きほぼまとまったデータが得られました。これまでに、分光光度計に積分球を付けて、樹木の採取葉に対して反射、透過スペクトルのみでなく、種々なスペクトルの検討を行って来ました。それによると、反射スペクトルと透過スペクトルでは、第0次的概要では、類似の変動を示しますが、第1次的にはかなり異なる挙動が確認されました。これまで、野外等の現場で分光放射計による拡散透過スペクトル測定を全く行いませんでしたが、私のみで無く現場での透過スペクトルに関する研究報告は非常に少ないと思われます。分光光度計による結果では、反射スペクトルとはかなり異なる変動を示すだけでなく、透過スペクトルの方が反射スペクトルより特徴をより良く表している事が確認されて来ました。従いまして、施肥量を変えて育成後水ストレスを与えた試料の場合でも、並行して測定した種々生理物理量との相関関係として、透過スペクトルでは反射より良好な関係が得られと推察されました。測定結果は、樹木の採取葉と同様に、反射と透過では、第0次的には類似な変動を示しますが、第1次的にはかなり挙動を示す事が確認されましたが、更に詳細な検討が必要と判断されました、従いまして、詳細な検討結果の報告は次年度の報告とする予定です。

参考文献

- 1) 三輪外：日本リモートセンシング学会第24回学術講演会論文集 p41-p42, p243-p244 (199.5), 25回 p45-p46, p47-p48 (1999.11), 26回 p599-p600, p661-p662 (1999.5)
- 2) 三輪外：日本リモートセンシング学会第27回学術講演会論文集 p55-p56 (1999.11)

Fig. 1 Block diagrams of the measuring units for reflection spectra (left:1-1) and transmission spectra (right:1-2) of a leaf on a twig.

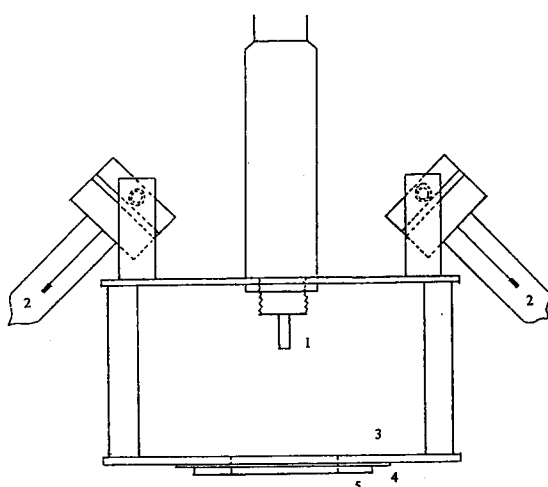


Fig. 1-1 Schematic diagram of trail unit for diffuse reflection spectra by spectroradiometer:Field Spec FR (FSFR)
1:optical fiber tip of FSFR, 2:tungsten-halogen lamps, 3:sample holder, 4:sample: leaf, etc., 5:metal fittings for holding sample (leaf, etc.)

Fig. 1-2 Schematic diagram of trail unit for diffuse transmission spectra by spectroradiometer:Field Spec FR (FSFR) with remote cosine receptor.

1:optical fiber tip of FSFR, 2:remote cosine receptor for FSFR, 3:sample holder, 4:sample, 5:tungsten halogen lamp

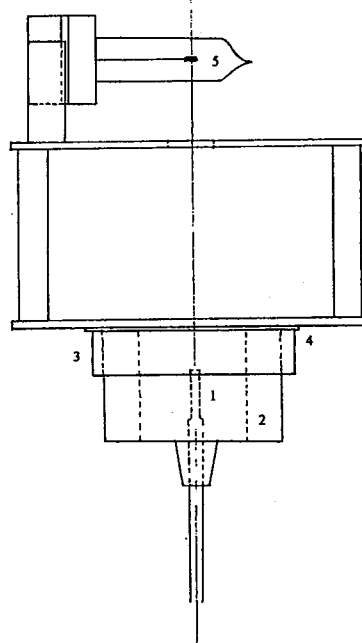


Fig. 2 Reflection spectra of Zea Mays levels reared at 4 fertilizer levels and of 6 degree water stresses.
 Left column: reared at the 0th, 1st, 2nd, 3rd fertilizer levels and stressed in water to 6 kind degrees.
 Right column: reared at the 5 or 4 kind fertilizer levels and stressed in water to the 1st, 3rd, 5th, 6th degrees.

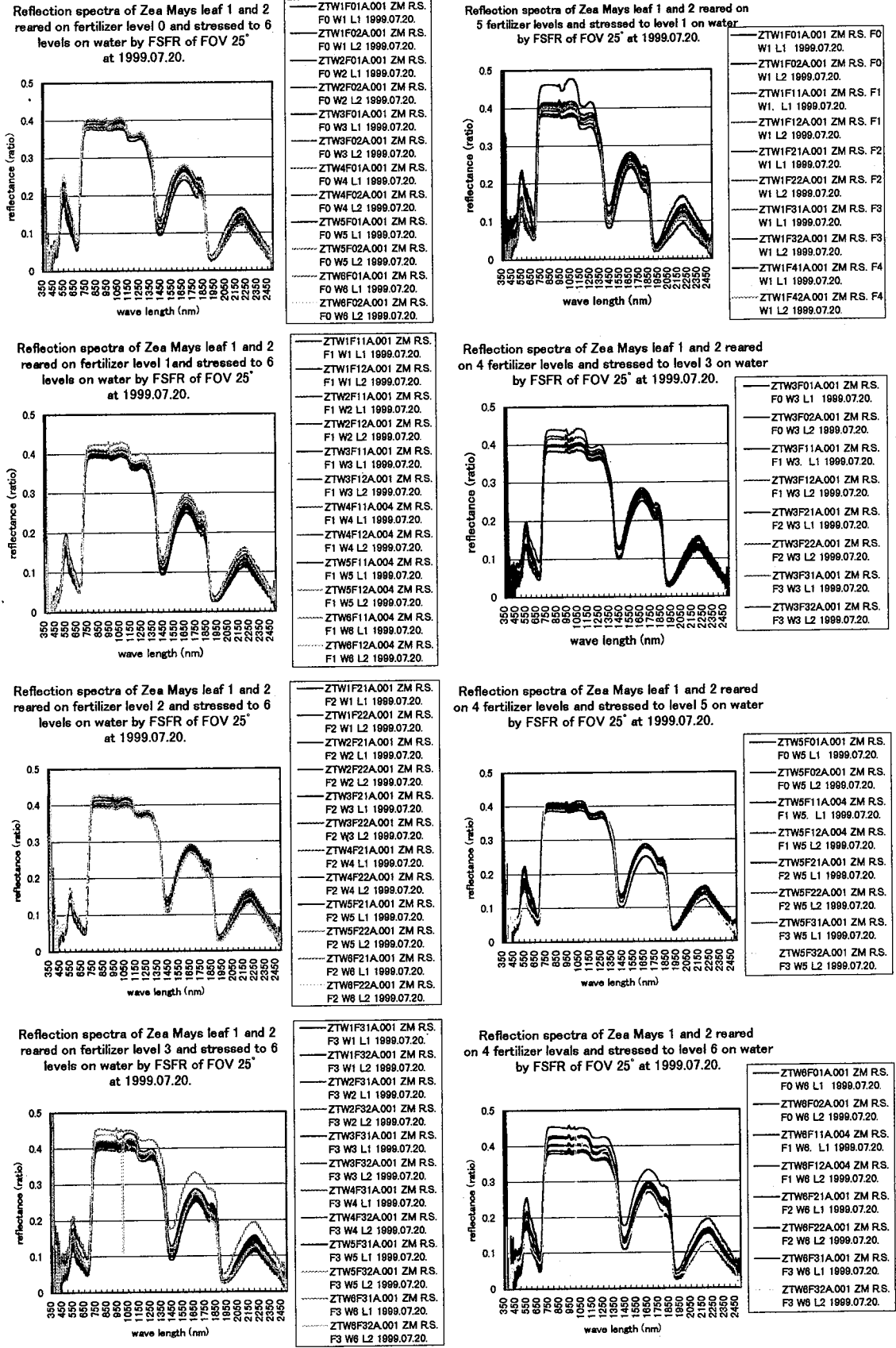


Fig. 3 Transmission spectra of Zea Mays reared at 4 fertilizer levels and of 6 degree water stresses.
 Left column: reared at the 0th, 1st, 2nd, 3rd fertilizer levels and stressed in water to 6 kind degrees.
 Right column: reared at the 5 or 4 kind fertilizer levels and stressed in water to the 1st, 3rd, 5th, 6th degrees.

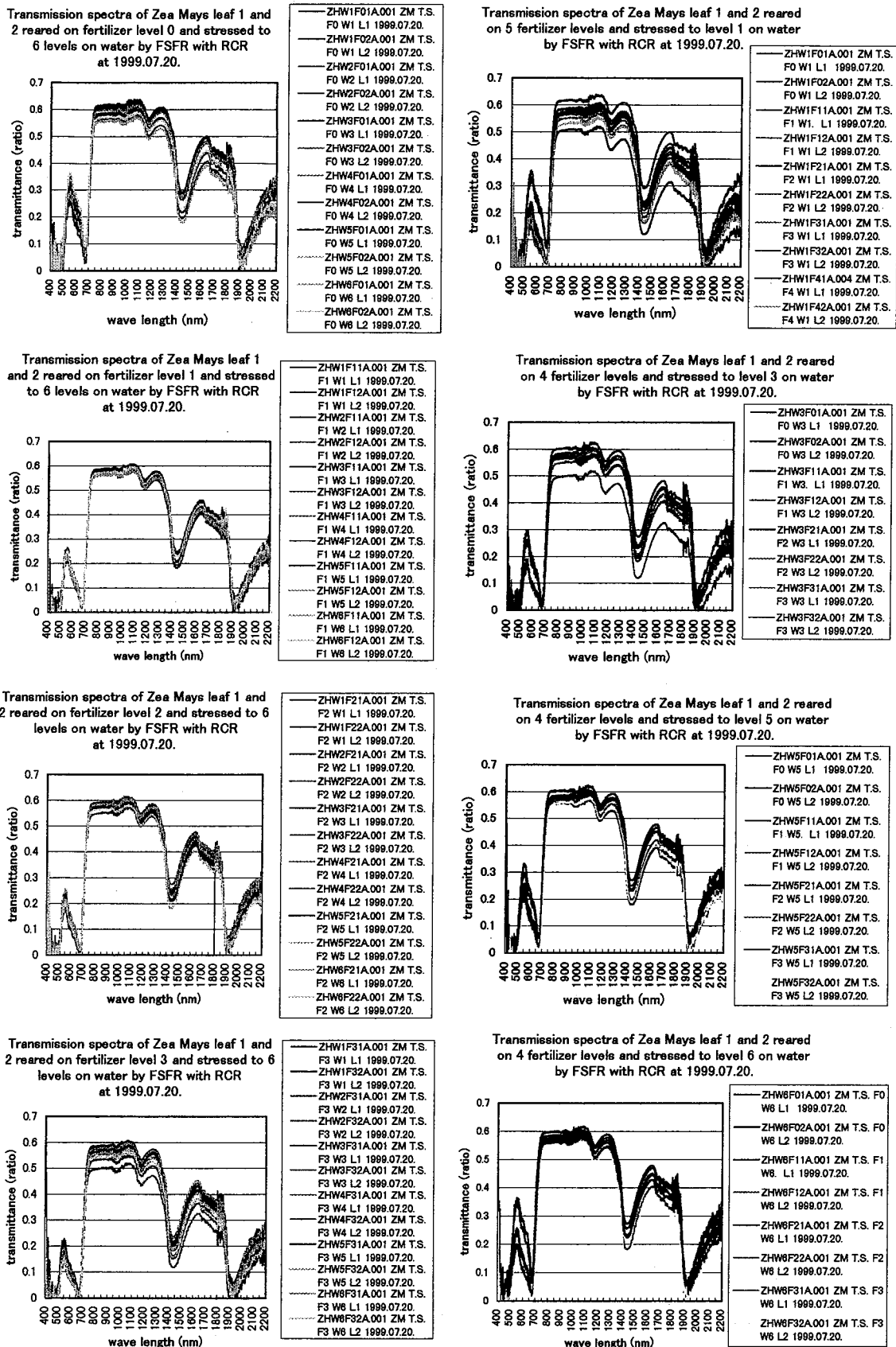
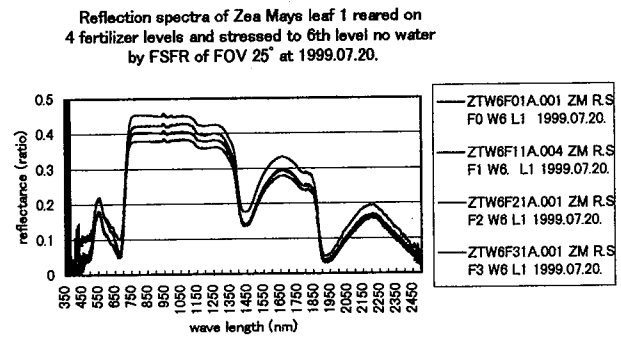
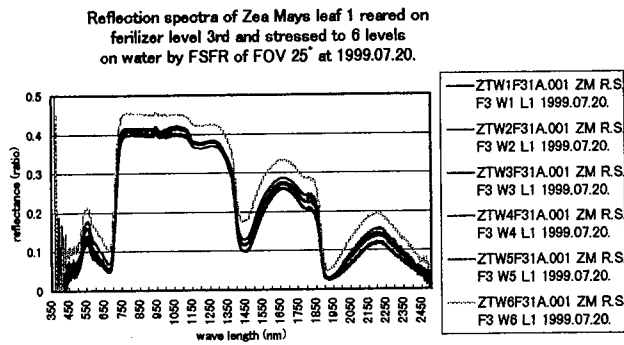
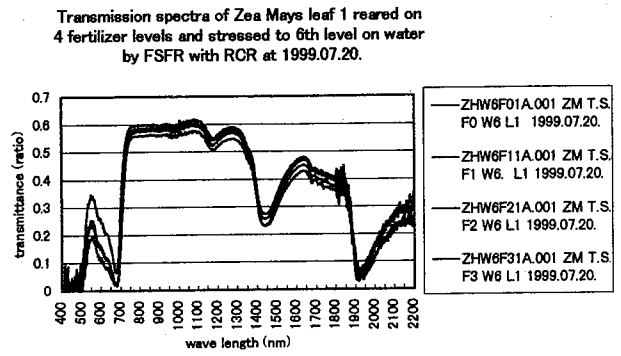
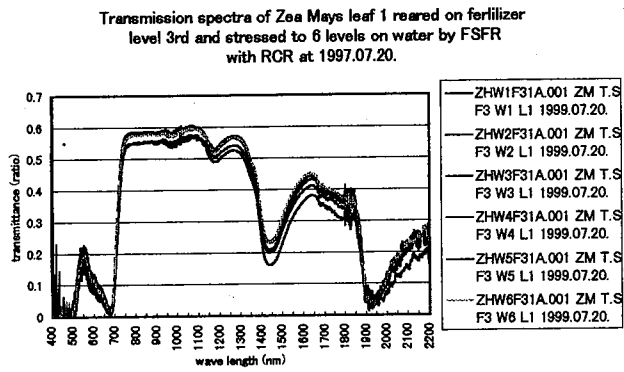


Fig. 4 Spectral change of Zea Mays leaves reared at 4 kind fertilizer levels and stressed in water to 6 kind degrees.

Upper raw: transmission spectra, Under raw: reflection spectra.

Left column: reared at the 3rd fertilizer level and stressed in water to 6 degrees. Right column: stressed in water to the 6th degree and reared at 4 kind fertilizer levels.



様々な手法による草地のフェノロジーモニタリング：(PGLIERCの成果から)

Phenology monitoring at grassland by several methods:
(from the results by PGLIERC)

樋口篤志¹・西田顕郎²・飯田真一³・近藤昭彦⁴
Atsushi HIGUCHI, Kenlo NISHIDA, Shin-ichi IIDA, and Akihiko KONDOH

¹理博 千葉大学特別研究員 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)

²農博 筑波大学講師 農林工学系 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

³筑波大学大学院 地球科学研究科地理学水文学専攻 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁴理博 千葉大学助教授 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)

フェノロジー (生物季節学, 植物季節学) は, 現在, リモートセンシングの応用を考える上で欠かせない概念である. PGLIERC (*Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center*) はフェノロジーモニタリングを考慮に入れた水文・リモートセンシング観測として計画された. PGLIERCではフェノロジーモニタリングでは3つの軸; 時間分解能 (定点・定常観測), 空間分解能 (可視・近赤外ビデオカメラ), および分光波長分解能 (スペクトロメーター) を持ち, それぞれがお互いを補完する. PGLIERC期間中では, 定点観測, スペクトロメーターでは草地のフェノロジーをよく表し, これまでの水文学的知見と矛盾しない結果が得られた. また, 過去10年のルーチン観測データから得られた蒸発比の季節変化の変遷から, "On Set"の概念を導入することで, 逆に草地のこれまでの変遷を確認することができた.

キーワード: フェノロジー, PGLIERC, 植生指標, 分光反射, 潜熱フラックス

1. はじめに

フェノロジー (生物季節学, 植物季節学) は, 現在, リモートセンシングの応用を考える上で欠かせない概念である. フェノロジーは植物生理学に代表される植物生態のみならず, 植物体の光合成に伴う蒸散量を通じ, 大気-陸面相互作用へも影響を与えると考えられる. さらに, 近年, PC・ワークステーションの高性能化 (及び低価格化) に伴い, 以前に比べ, 衛星の時系列データを大量に取り扱うことが容易になり, 上記の視点に基づいた研究例が見られ始めている (例えば, Nemani and Running, 1997⁸); White *et al.*, 1997¹¹); 近藤, 1998¹⁴); 樋口・近藤, 2000²³); Kondoh and Higuchi, 2000⁷). 特にWhite *et al.*, 1997¹¹)では, アメリカ全土, 複数年の NOAA/AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) で得られる NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*; 定義は後述) の時系列データより落葉広葉樹の *On Set* (出芽に対応) と *Off Set* (落葉に対応) を, BISE法 (*The Best Index Slope Extraction*; BISE法については Viovy and Arino, 1992¹⁰) を参照) を用いて求め, また微気象データよりも算出を試みた. また, 樋口・近藤 (2000)²³) では, 草地・水田・雑木林での衛星データ (NDVI) とフラックスの実測データの比較を行い, 植物の成長期の違いにより, 衛星によるフラックス推定手法を変えた方が精度が上がることを提案している.

PGLIERC (*Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center*) はフェノロジーモニタリングを考慮に入れた水文・リモートセンシング観測として計画された (PGLIERCの概要については樋口ほか, 2000a²¹) を参照していただきたい).

PGLIERCの目的は以下の4点に要約される;

- 1) GLI, MODISのような多バンド衛星で, どのような地上物理量を推定できるか検証する.
- 2) これまでの衛星データから得られた水文学的知見の妥当性を, 特にフェノロジーに着目し, 再検討する.
- 3) 植生指標と地表面温度の組み合わせが, 植物の成長, 土壌水分の変化に伴い, どのような変動を示し, 水文学, 特に大気-陸面相互作用にどう応用できるか検討する.
- 4) 植生の成長に伴う, BRDFモニタリングおよびそのモデリング.

本論文では, この中で特に2)に焦点を当てた解析結果を示す. なお, 3), 4)に関しては西田ほか (2000a)²⁰) を参照していただきたい.

PGLIERCの中で, 様々な手法でのフェノロジーモニタリングの概念をFig. 1に示す. PGLIERCでは大きく分けて3つの軸 (時間分解能, 空間分解能, 分光波長分解能) を持ち, それぞれの観測項目がお互いの欠点を補う形になっている.

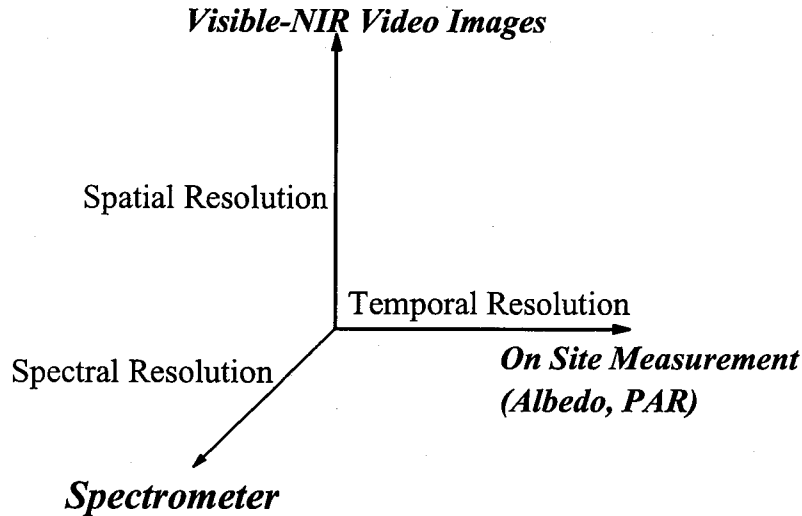


Fig. 1 Schematic diagram which represents a concept of phenology monitoring by several methods.

2. PGLIERC期間中での様々な手法によるフェノロジーモニタリング

2.1 定点・定常観測によるフェノロジーモニタリング

本節では、まずPGLIERCの定点・定常観測より、草地のフェノロジーを検証してみることにする。なお、定点・定常観測については樋口ほか(2000a)²¹⁾、水理実験センター特別観測用データ収録システムについては樋口・杉田(1998)¹⁹⁾、樋口ほか(1999)²⁰⁾をそれぞれ参照していただきたい。得られたデータは、サンプリング時間1秒、平均化時間15分であり、以下のURLで準リアルタイムに取得可能である；

<ftp://www2.suiri.tsukuba.ac.jp/Datalogger/>

定点観測より、PAR領域(0.4 ~ 0.7 μm)の分光反射率、および近赤外領域の分光反射率が計算できる：

$$\rho_{PAR} = PAR \uparrow / PAR \downarrow \quad (1)$$

$$NIR \downarrow \approx R_s \downarrow - PAR \downarrow \quad (2)$$

$$NIR \uparrow \approx R_s \uparrow - PAR \uparrow \quad (3)$$

$$\rho_{NIR} = NIR \uparrow / NIR \downarrow \quad (4)$$

ここで、 ρ_i は各波長域での分光反射率、 R_s は全短波放射量(W/m²、↓、↑はそれぞれ下向き、上向きを示す)、 PAR は可視光、 NIR は近赤外光を示す。

太陽からの放射(日射)はプランクの法則やウィーンの変位測に従い、放射強度の極大値は0.5 μmに見られ、この波長を境に徐々に減衰する(小倉, 1984¹²⁾)。厳密に考えると全短波放射量とPAR領域放射量の差分の全ては近赤外領域の放射量ではない。

しかし、紫外線は大気中のオゾンによってほとんど吸収され、波長が短いほど、レイリー散乱の影響を強く受け、大気中でその強度は減衰する。一方、近赤外より長い波長域(1 μm~)には水蒸気による複数の吸収帯が見られ(小倉, 1984¹²⁾)、地表面にはほとんど到達しない。よって、本観測では上記の差分を近赤外域の放射量として扱う。

Fig. 2にPGLIERC観測期間中の快晴日での下向き短波放射量とPAR領域の下向き放射量の日変化量の比較を示す。

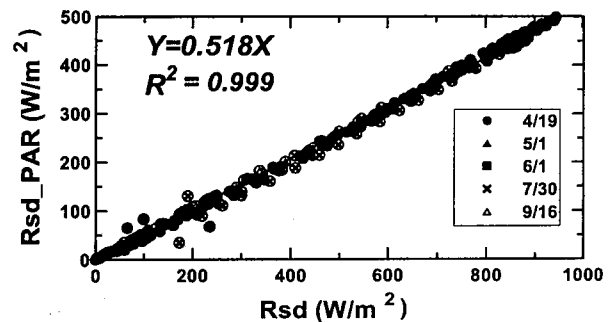


Fig. 2 Comparisons of downward shortwave radiation (Rsd) with that in PAR wavelength (Rsd_PAR) in completely clear days.

両者の関係から、非常に高い相関($R^2=0.99$)が認められる。回帰直線の傾きから、全短波放射の約半分が可視光で占められていることが分かり、これは従来の知見と大きく異なる。

Fig. 3にFig. 2と同一観測日での両者の上向き成分の比較を示す。

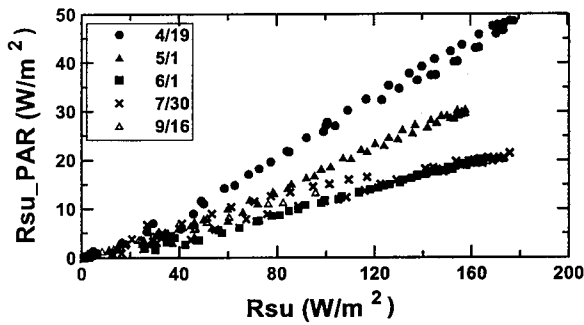


Fig. 3 Comparisons of upward shortwave radiation (Rsu) with that in PAR wavelength (Rsu_PAR) in completely clear days.

Fig. 2とは全く異なり, 季節による両者の違いが現れている。草の成長に伴い, PAR領域の上向き成分が小さくなり(植物によって吸収され), 6月以降には観測日による違いが現れていないことを示す。

Fig. 3の季節変化あるいは草地のフェノロジーをより明らかにするために, 定点観測データに対し, 日中平均(午前9時から午後3時までを平均)をかけたものをFig. 4に示す。

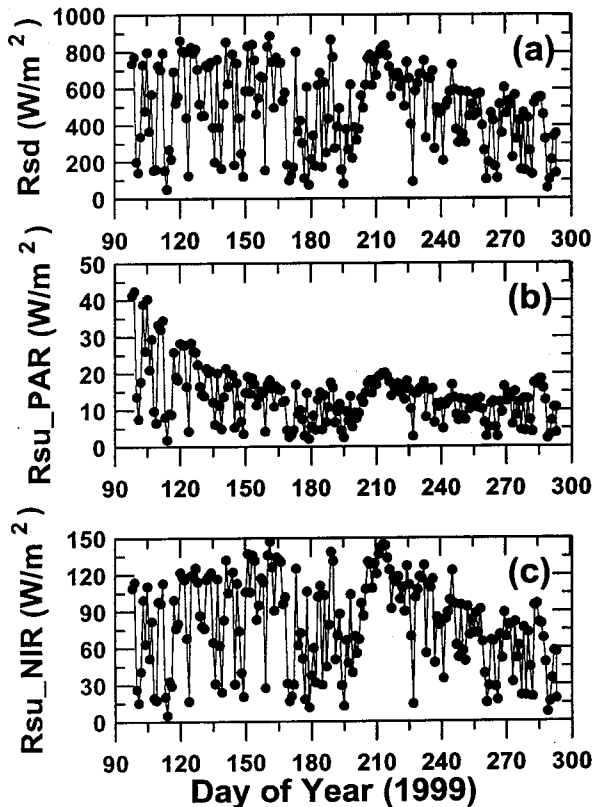


Fig. 4 Seasonal changes in downward radiation (a), upward radiation in PAR (b), and upward radiation in NIR (c).

Fig. 4より, 可視光・近赤外光の反射特性の違いが如実に認められる。可視光(PAR)の上向き放射量は150 DOY(5月末)まで明確な減少が認められた。これは, 草の成長初期から草によって可視光が積極的に吸収されていたことを示している。近赤外の上向き成分の季節変化は日射量の変動と連動しパラッキが多く見られる。近赤外光の季節変化傾向は, 分光反射率に換算したFig. 5で, より明確に見ることができる。

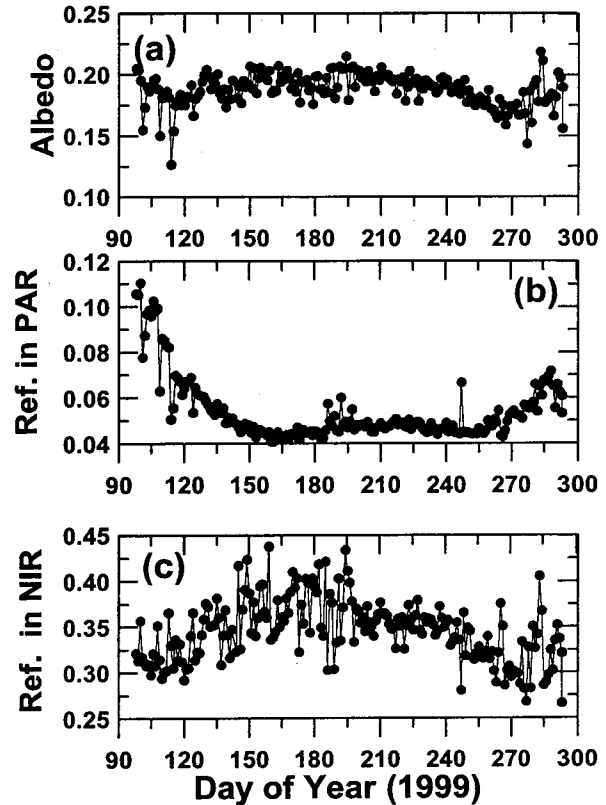


Fig. 5 Seasonal changes in the surface albedo (a), spectral reflectance in PAR wavelength (b), and spectral reflectance in NIR wavelength (c).

樋口ほか(2000b)²²⁾では, 同観測地点での地表面アルベド(以下アルベド)と蒸発比(=IE/Qn; IEは潜熱フラックス, Qnは有効エネルギー, 共に単位はWm⁻²)の季節変化傾向に類似性があることを示している。また, その中で, アルベドの季節変化に, 4月初頭から中旬まで明確な減少, その後6月中旬まで単調な増加が見られたことを示している。樋口ほか(2000b)²²⁾はアルベドの上記の変化傾向の説明を以下の様に示している(以下引用, 一部省略)

”これらのアルベドの傾向の前者は草の出芽に伴う, 可視域の吸収量(Absorbed PAR: APAR)の増加, 後者は葉面積指数(Leaf Area Index: LAI)および植被率の増加に伴う近赤外波長域の反射率の増加にそれぞれ呼応していたものと考えられる。

可視域での反射率の変化はアルベドに大きな影響を与える。一方、植物体は光合成のため、可視域の短波放射をよく吸収する。従って、LAI値が小さくても草が出芽すれば、可視域の分光反射率は急激に減少し、アルベドの急激な減少をもたらすと考えられる。

一方、近赤外波長域は植物は葉温増加を防ぐためよく反射する。但し、反射率は植物体に依存するが約40%~60%であり、残りの大部分は透過して地面に吸収される。ところが植生がある程度成長し、葉が重なりキャノピー内での多重散乱がおこるようになると、地面に到達し、吸収される近赤外光は減り、その分、近赤外光の反射が多くなると考えられる。従って、近赤外域の分光反射率増加が可視域の分光反射率を凌駕するためには、地面が草でまんべんなく覆われ、(植被率がほぼ100%)キャノピー内での多重散乱が発生する必要がある。”

Fig. 5は上記の説明を実証する観測結果となりうると考えられる。可視光の反射率の急激な減少の後、近赤外の反射率は徐々に増加し、バラツキはあるものの180 DOY (6月末)には極大値に達していた。近赤外の反射率が極大値に達した時期は植被率が飽和した時期とほぼ同一であり (Fig. 6; 植被率の測定法は樋口ほか, 2000a²¹⁾を参照) この結果も上記の説明を補佐するものである。

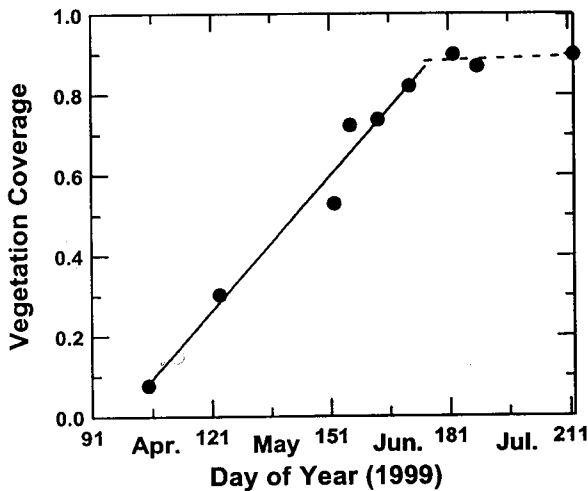


Fig. 6 Seasonal changes in ratio of vegetation cover (after Higuchi *et al.*, 2000a).

可視 (PAR), および近赤外の分光反射率より、植生指標 (Vegetation Indices) が算出可能である。様々な植生指標があるが (例えば Huete, 1988⁹⁾), 本研究ではNDVIとSR (Simple Ratio) を算出した。算出式は次式で表せる;

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{PAR}}{\rho_{NIR} + \rho_{PAR}} \quad (5)$$

$$SR = \rho_{NIR} / \rho_{PAR} \quad (6)$$

Fig. 7にSR, NDVIおよびIE/Qnの季節変化を示す。

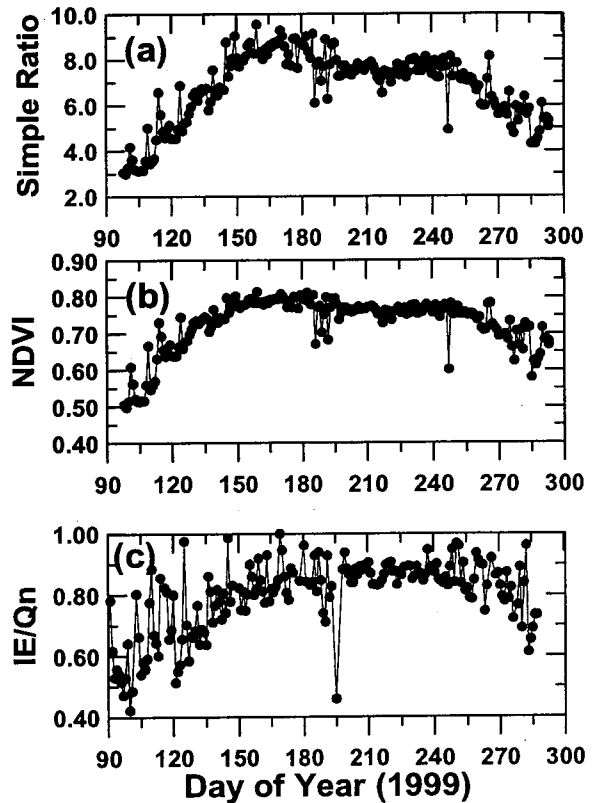


Fig. 7 Seasonal changes in Simple Ratio (SR) (a), NDVI (b), and evaporative fraction (IE/Qn) (c).

どちらの植生指標も草地のフェノロジーを反映していると言えるが、NDVIは150 DOY (5月末)で既に飽和している。これはNDVI自身が持つ問題 (詳しくは西田ほか, 2000b²⁷⁾を参照) であると考えられる。

NDVIと蒸発比の季節変化特性は非常に類似している。樋口・近藤 (2000)²²⁾では、SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre) /HRV (High Resolution Visible) から得られたNDVIと、同観測地点での蒸発比及び潜熱フラックスとの間に、成長期 (4月~7月) では非常に高い相関が見られたことを示した。

本観測結果は上記考察を追尾するものであるが、草の成長期に限ってその変動パターンを見比べると、蒸発比の変動パターンはNDVIよりはむしろSRに近い。ただし、全ての時期に対し、SRのみで蒸発比を見積もろうとすると、成長後は明らかに過小評価になるおそれがあり、成長後に関してはNDVIが向いていると言える。

蒸発比は草の成長に伴い0.4から0.8まで上昇し (90 DOY から 180 DOY), その後ほぼ横這いで、240 DOYから徐々に減少し始めている。蒸発比の増加および減少の時期は、植生指標のそれと同じである。

Fig. 7から、植物のフェノロジーが地表面での水熱交換過程を大きく制御していることが再認識される。今後は、同時に地上で計測された植生理量 (草丈, LAI (Leaf Area Index), バイオマス, クロロフィル量) との関係調べる必要がある。

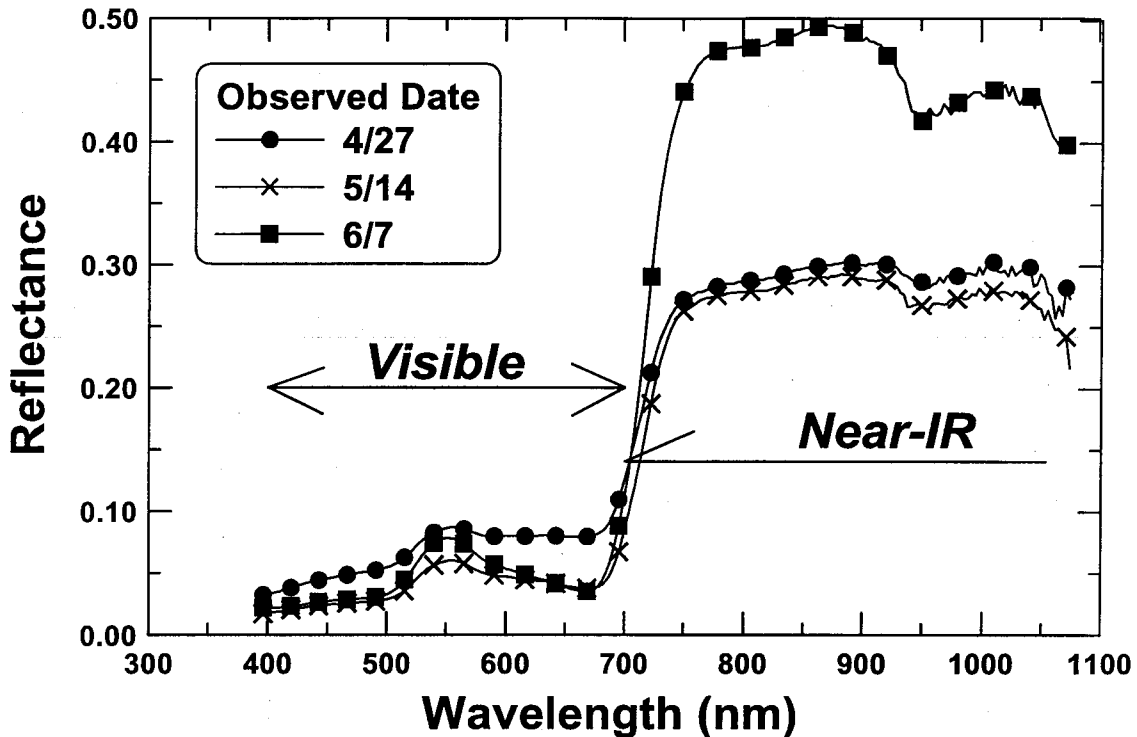


Fig. 8 Examples of the hyper-spectral reflectance derived from a spectrometer, observed on the top of 30 m meteorological tower (after Higuchi *et al.*, 2000a, but slightly modified).

2.2 スペクトロメーターによるフェノロジーモニタリング

熱収支・水収支実験圃場の中心部には30 mタワーがあり、定点観測で不足している情報、すなわち、空間分解能・波長分解能を補うために、PGLIERCでは、不定期にタワー頂上から分光反射計（スペクトロメーター）による観測を行なった。Fig. 8に草地の分光反射特性の例を示す。

4月27日は Fig. 5より PAR領域の反射率が減少していた時期で、スペクトロメーターでも、Fig. 5と矛盾しない結果が得られた。5月14日は、近赤外の反射率は4月27日と比べ、ほとんど変化していない。一方、PAR領域の反射率、特に赤（0.6~0.7 μm）に明確な減少が認められた。赤の波長、及び近赤外との境界 (Red Edge) は植生の状態をモニターする上で非常に重要である (例えば、Horler *et al.*, 1983⁹⁾)。6月7日には、近赤外の反射率増加が顕著に見られ、PAR領域の反射率では、ほとんど変わらなかった。

Fig. 9 にスペクトロメーターの分光反射率と定点観測のそれとの比較を示す。若干のバラツキが見られるが、これは波長情報の違いと言うよりは、時間分解能の違い（平均化時間内での天候の変化）によるものであり、良い一致を示しているといえる。

以上の結果より、タワー観測データは定点観測の結果によく対応している。これは、2つの手法が時間分解能と波長分解能を補いあう好例であろう。

今後はこれらのデータより、次世代衛星のバンド情報を抽出する必要がある。

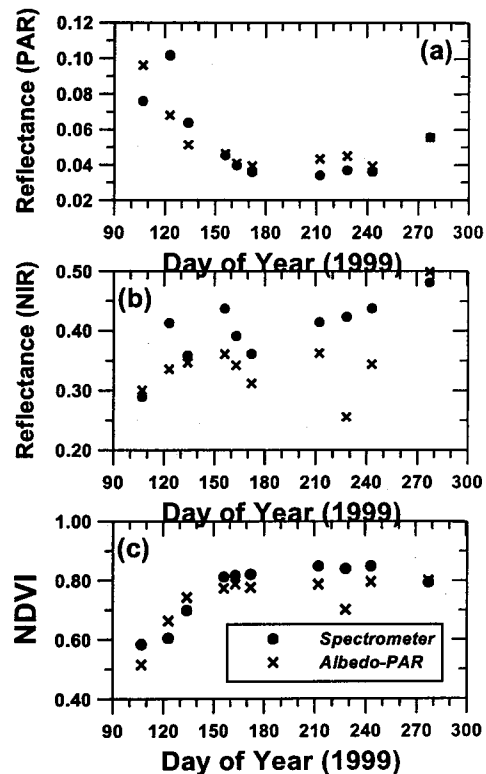


Fig. 9 Comparison of spectral reflectance in PAR (a), in NIR (b), and NDVI (c) with those derived from on site measurement.

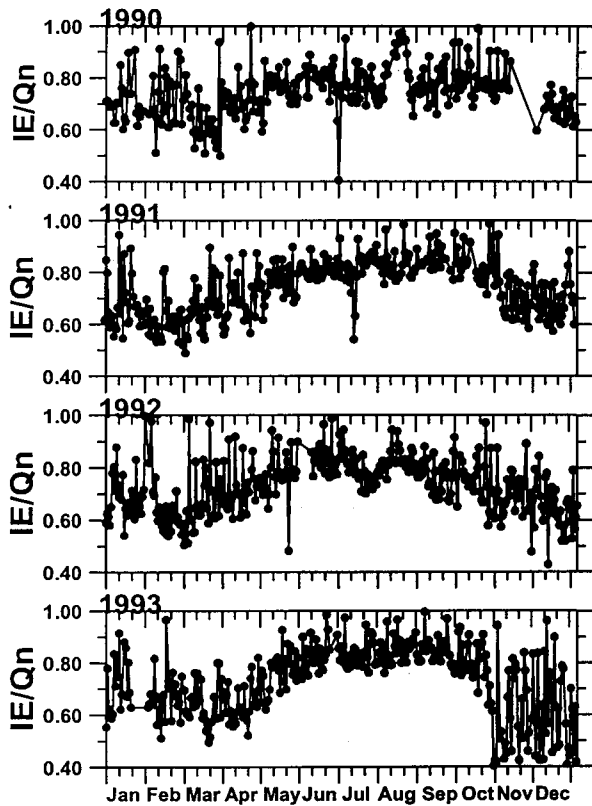


Fig. 10 Seasonal variations in evaporative fraction at grassland in ERC, 1990-1993.

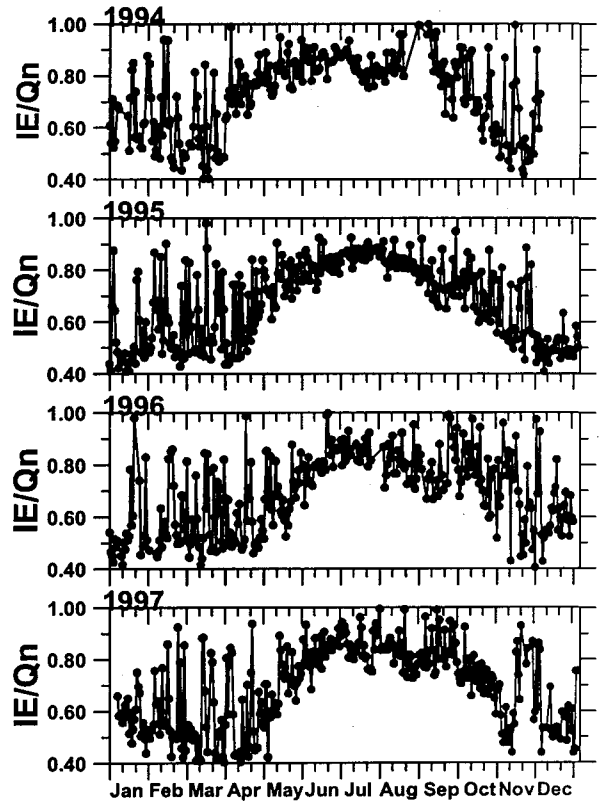


Fig. 11 Seasonal variations in evaporative fraction at grassland in ERC, 1994-1997.

3. 水理実験センタールーチン観測データから見た草地のフェノロジーの変遷

筑波大学水理実験センター、熱収支・水収支実験圃場（以下水理センター）では、1981年11月より今日まで、微気象・水文ルーチン観測が継続されてきている。水理センターの研究例は多く見られる（最近の例では、Saigusa *et al.*, 1998⁹⁾; 近藤, 1998¹⁵⁾; Higuichi *et al.*, 1999⁴⁾）。これら最近の研究例の多くは、草地のフラックスの季節変化とそれに関連した物理量（LAI, 群落抵抗等）との関連性についてである。

しかし、近年、年々変動についての研究に焦点が当てられるようになり、非常に少ないが研究例も見られる（例えば、White *et al.*, 1997¹¹⁾）。本節では植生指標（植生の状態）と蒸発比の季節変化パターンが非常に類似していたことから、蒸発比の年々変動の推移を、フェノロジーの観点から見てみることにする。

3.1 データ処理、フラックス算出法について

フラックス算出は、1981年（ルーチン観測開始）から1999年10月までの全ての時期に対して行った。なお、ルーチン観測項目に関しては、鳥谷ほか(1989)¹⁸⁾、新村・杉田(1998)²⁹⁾を参照していただきたい。

フラックス計算を行う前にデータのクオリティチ

ェックを行い、適切でない観測時期に関しては欠測扱いにした。また、地中熱流量に関しては、檜山ほか(1994)²⁴⁾での補正を施した。

顕熱フラックスは渦相関法より算出した；

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (7)$$

ここで H は顕熱フラックス(Wm^{-2})、 ρ は空気密度($kg m^{-3}$)、 C_p は大気定圧比熱($J kg^{-1} K^{-1}$)、 w は風速の鉛直成分、 T' は気温である。プライムとオーバーバーはそれぞれ偏差と平均を示す。熱収支式の差分より、潜熱フラックスを算出した；

$$IE = R_n - G - H \quad (8)$$

ここで、 IE は潜熱フラックス(8式の中のシンボルの単位は全て Wm^{-2})、 R_n は正味放射量、 G は地中熱流量を示す。 R_n と G に関しては実測値をそのまま使った。蒸発比は次式で定義される；

$$IE/Q_n \equiv IE/Q_n = IE/(R_n - G) \quad (9)$$

計算されたフラックス及び蒸発比は全て日中平均(9時から15時の平均)をかけた。

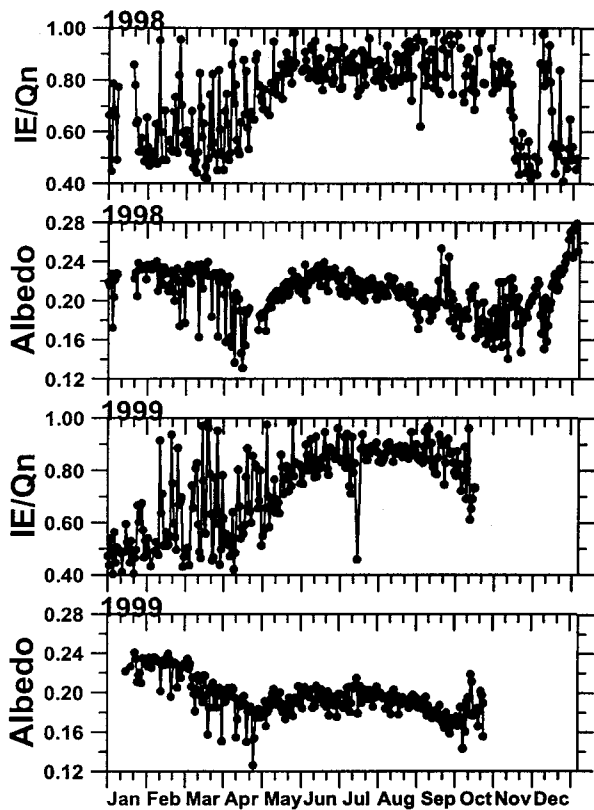


Fig. 12 Seasonal variations in evaporative fraction and surface albedo at grassland in ERC, 1998-1999.

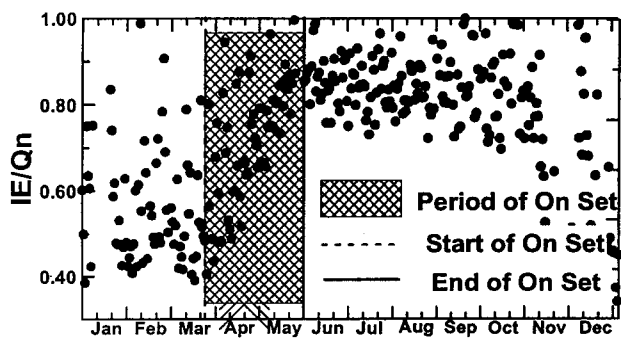


Fig. 13 Definition of "On Set" by an aspect of hydro-meteorological phenology.

3.2 草地での蒸発比の季節変化から見られる、フェノロジーの変遷

水理実験センターにおける、蒸発比の季節変化（1990-1999）を、Fig. 10 から Fig. 12 に示す。なお、アルベドが通年で連続観測され始めた1998年（観測自身は1997年から）以降に関してはアルベドの季節変化も共に記載している。

Fig. 10 から Fig. 12 までの季節変化パターンを比較すると以下の特徴が認められる；

1. 1993年までと、1994以降では明らかにその変化パターンは異なる。
2. さらに1994年以降では、3月～4月上旬の蒸発比の値が小さくなってきている。

また、Fig. 13 で定義した"On Set"の概念を用いて季節変化パターンを見比べると、以下の点を挙げるができる；

3. 1993年以前では"Start of On Set"を同定することは非常に難しい。
4. 1995年以降では比較的"Start of On Set"を同定することが容易であり、さらに現在に近づくにつれ、"Period of On Set"が短くなってきている。

水理実験センターの地表面状態は1993年を境にして大きく変化した。1993年以前はアルファルファ等の牧草地であったが、生態研究を行うため、1993年に刈り取りが行われ、その後、自然植生（草地）に変遷している（ただし、毎年11月から12月には刈り取られる）（筑波大学水理実験センター、1998¹⁷⁾。

先に挙げた年々変化の特徴は水理実験センターの地表面状態の変化による点が多いと考えられる。例えば、2. は刈り取り後の枯れ草の地表面温度が以前と比べ高くなったために、結果として顕熱フラックスが大きくなった、と考えることができる。

アルベドが計測されだした1998年、1999年（Fig. 12）のみを見比べても、明らかに変動パターンは異なっている。しかし、アルベドの減少・増加傾向がより明確に見られる1998年には、"Period of On Set"は1999年よりも短く、急激に蒸発比が増加している。

"On Set"の概念は本論文で初めて提示したものであり、定式化は未だ行われていないが、リモートセンシングデータの解析法を逆に使用することで、今後定式化を行っていく予定である。

このように、蒸発比の季節変化より、逆にフェノロジーの推測を行うことは可能である。Kondoh and Higuchi (2000)⁷⁾では、同観測地点での複数年にわたるTM・NDVIデータとフラックスデータとの比較を行い、成長期に関してはNDVIと日蒸発量との間に良い一致を見せたことを示している。この結果は、リモートセンシングデータ年々変動についてもモニターしていたことを示すことになり、リモートセンシングの応用の可能性を提示したことになる。

4. 終わりに

本研究ではPGLIERCの成果の一部として、"フェノロジー"をキーワードに様々な手法でのフェノロジーモニタリングを行った。

今後は、本論文では掲示しなかった、可視・近赤外ビデオカメラの解析を行い、Fig. 1に示したもう一つの軸である"空間分解能"についての考察を進めていく予定である。また、同時に計測された、草地に隣接したアカマツ林の観測データとも併せて、二つの土地被覆の比較研究（例えば、Baldocchi, 1994¹⁾; Higuchi et al., 1999⁴⁾）も併せて行う。

リモートセンシング技術の水文学への応用（水文リモートセンシング学）の今後進んでいく方向性として、2つ考えられる：

1つは、これまでと同様に衛星データから地表面、大気の物理量を推定する方向（Choudhury, 1991²⁾, 近藤, 1996³⁾で蒸発量、放射量に対しての詳細なレビューが見られる）。もう1つとして、衛星の持つもう1つの特徴であるデータの連続性を利用した、“変化”あるいは“状態”の違いをモニターする（この中にフェノロジーが含まれる）方向である。

前者では、例えば正味放射量を衛星データから推定する試みでは、杉田（1993）が指摘したように、最終的には日射量が推定誤差の最大の原因になる。もちろん、衛星データから絶対量を推定する試みは今後も継続する必要があるが、後者の視点に基づいた研究も今度増えてくると思われる、その際、キーワードは“フェノロジー”、“Synergism（複数の衛星データを統合的に使う；Choudhury, 1994³⁾”、“および”Operational”となると言えるだろう。

謝辞：本観測の主旨を理解し、協力して下さった筑波大学水理実験センターの皆様に対し、感謝の意を表します。水理実験センタールーチン観測データは筑波大学水理実験センター新村典子博士、植村奈緒美さんより提供していただいた。なお、本観測は千葉大学環境リモートセンシング研究センターの支援を受けた。

参考文献

- 1) Baldocchi, D.: A comparative study of mass and energy exchange over a closed C₃ (wheat) and an open C₄ (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. *Agric. For. Meteorol.*, **67**, 191-220, 1994.
- 2) Choudhury, B. J.: Multispectral satellite data in the context of land surface heat balance. *Rev. Geophys.*, **29**, 217-236, 1991.
- 3) Choudhury, B. J.: Synergism of multispectral satellite observation for estimating regional land surface evaporation. *Remote Sens. Environ.*, **49**, 264-274, 1994.
- 4) Higuchi, A. A. Kondoh, and S. Kishi: Relationship among the surface albedo, spectral reflectance of canopy, and evaporative fraction at grassland and paddy field. *Adv. Space Res.*, 1999. (in Press)
- 5) Horler, D. N. H., M. Dockeray, and J. Barber: The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, **4**, 278-288, 1983.
- 6) Huete, A. R.: A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, **25**, 295-309, 1988.
- 7) Kondoh, A., and A. Higuchi: Relationship between spectral reflectance and evaporation from vegetated surface. *Hydrol. Processes*, 2000 (Submitted).
- 8) Nemani, R. R. and Running, S.: Land cover characterization using multitemporal red, near-IR, and thermal-IR from NOAA/AVHRR. *Ecological Applications*, **7**, 79-90, 1997.
- 9) Saigusa, N., T. Oikawa, and S. Liu: Seasonal variations of CO₂ and H₂ between a grassland and the atmosphere: An experimental study. *Agric. For. Meteorol.*, **89**, 131-139, 1998.
- 10) Viovy, N., and O. Arino: The best index slope extraction (BI SE): A method for reducing noise in NDVI time-series. *Int. J. Remote Sens.*, **13**, 1585-1590, 1992.
- 11) White, M. A., P. E. Thornton, and S. W. Running: A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, **11**, 217-234, 1997.
- 12) 小倉義光: 一般気象学. 東京大学出版会, pp. 314, 1984.
- 13) 近藤昭彦: V. 広域蒸発散の推定法(2) —リモートセンシングによる広域蒸発散量の推定法—, 講座「蒸発散」. ハイドロロジー (日本水文学会誌), **26**, 267-280, 1996.
- 14) 近藤昭彦: 草本群落の分光反射輝度と蒸発散量の関係. *水文・水資源学会誌*, **11**, 599-602, 1998.
- 15) 近藤純正: 種々の植生地における蒸発散量の降水量および葉面積指数への依存性. *水文・水資源学会誌*, **11**, 679-693, 1998.
- 16) 杉田倫明: 衛星データからの時間スケールでの正味放射量推定の可能性. 筑波大学水理実験センター報告, 第17号, 103-108, 1993.
- 17) 筑波大学水理実験センター: 外部評価資料, pp. 25, 1998. (ftp://erc2.suiri.tsukuba.ac.jp/pub/ERC-DATA/gaibu_s.doc)
- 18) 鳥谷均・川村隆一・嶋田純・谷口真人・西本貴久: 気象日報作成装置新システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 13号, 147-158, 1989.
- 19) 樋口篤志・杉田倫明: 筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 91-94, 1998.
- 20) 樋口篤志・杉田倫明・飯田真一: 筑波大学水理実験センター水収支・熱収支観測圃場における、新・特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 24号, 135-141, 1999.
- 21) 樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦: PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center); その概要について. 日本水文学会誌, 2000a. (投稿中)
- 22) 樋口篤志・近藤昭彦・池田正一・黒子裕史: 草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係 I. 各土地被覆での地表面フラックスの季節変化. *水文・水資源学会誌*, 2000b. (投稿中)
- 23) 樋口篤志・近藤昭彦: 草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係, II. 衛星から得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性と地表面フラックスの関係. *水文・水資源学会誌*, 2000. (投稿中)
- 24) 檜山哲哉・生川智彦・田 少奮・杉田倫明: 水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における地中熱流量. 筑波大学水理実験センター報告, 第19号, 63-67, 1994.
- 25) 新村典子・杉田倫明: 熱収支・水収支観測資料, -1997年-. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 103-136, 1998.
- 26) 西田顕郎・樋口篤志・飯田真一・近藤昭彦: VI-Ts法とBRDFによる、地表面状態推定手法の検討 (PGLIERCの成果から). 第2回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ, 2000a. (印刷中)
- 27) 西田顕郎・樋口篤志・松田咲子・近藤昭彦: VI-Ts法: 分光植生指標と表面温度に基づく、地表面過程のリモートセンシング. *水文・水資源学会誌*, 2000b (投稿中).

(1999年11月26日 受理)

Phenology monitoring at grassland by several methods: (from the results by PGLIERC)

Atsushi HIGUCHI¹, Kenlo NISHIDA², Shin-ichi IIDA³, and Akihiko KONDOH¹

¹Dr. Ph., Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University
(Yayoi 1-33, Inage, Chiba 263-8522, Japan)

²Dr. Agri., Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba
(Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan)

³Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba (Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan)

1. INTRODUCTION

"Phenology" is essential and the concept, when we consider about the application of satellite remote sensing today. In the near future,

"PGLIERC (Preliminary Global Imager Experiment at Environmental Research Center)" had been planned which considered to monitor "phenology", and PGLIERC has four main objectives;

- 1) To validate of inferring the physical data on the ground using multi-spectral satellite data
- 2) To reconsider the knowledge about relationship between satellite data and ground-based data (especially the knowledge of hydrological aspects)

To monitor the temporal variations in the combinations of Vegetation Indices (VIs) and surface temperature (Ts) at "real scale"

- 4) Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) monitoring with the growth of grass, and its modeling

In this study, we focus on the second objective.

Fig. 1 shows the schematic diagram of the concept for monitoring phenology by the several methods. PGLIERC has three components; temporal resolution (on site measurement), spatial resolution (visible and near-IR video camera), and spectral resolution (spectrometer). These components compensate for weak points each other.

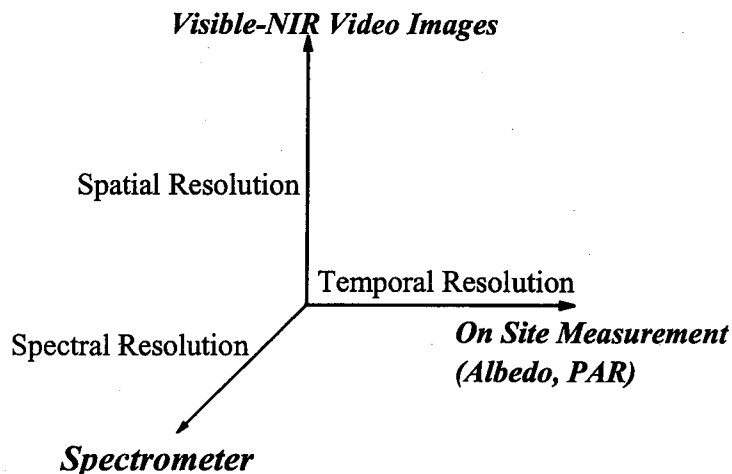


Fig. 1 Schematic diagram which represents a concept of phenology monitoring by several methods.

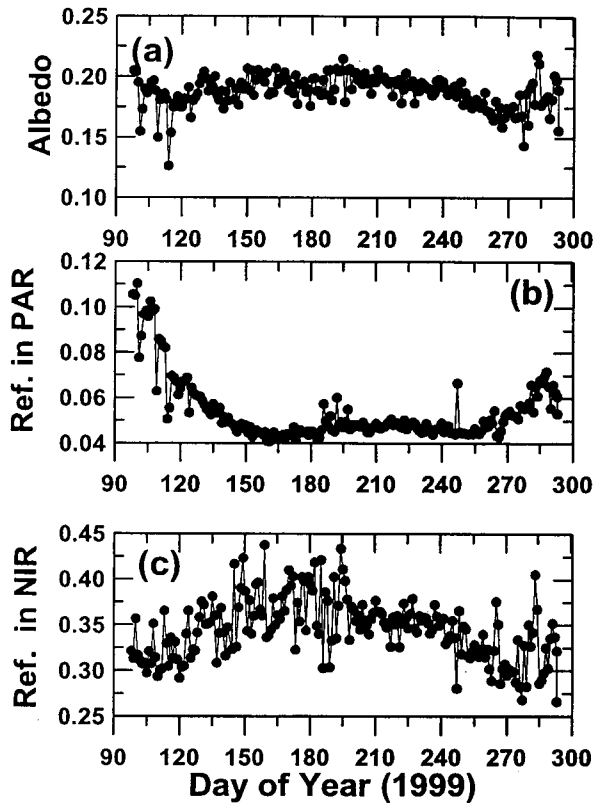


Fig. 2 Seasonal changes in the surface albedo (a), spectral reflectance in PAR wavelength (b), and spectral reflectance in NIR wavelength (c) (Same as Fig. 5 in Japanese page).

2. RESULTS

Results are summarized as follows:

- 1). From the on site measurement data, we could estimate downward and upward shortwave radiation in PAR (Photosynthesis Active Radiation; Visible) wavelength and in near-IR wavelength derived from differences between the whole of shortwave radiation and that in PAR (see Eq. 1-4 and Fig. 2 and Fig. 3 in Japanese pages)
- 2). Seasonal changes in upward radiation in PAR and in near-IR were quite different. In PAR, these were absorbed by the grass canopy during early growing, as the results, detected values were decreased from 90 DOY (Day of Year) to 150 DOY. (Fig. 4 in Japanese page).
- 3). Seasonal changes in the surface albedo, and spectral reflectances in PAR and in near-IR (Fig. 2, Fig. 5 in Japanese page) were good responses to express the phenology in grassland. The increments of the spectral reflectance in near-IR were delayed the responses of the decrease in PAR. Because much increase in near-IR spectral reflectance derived from the rise of vegetation

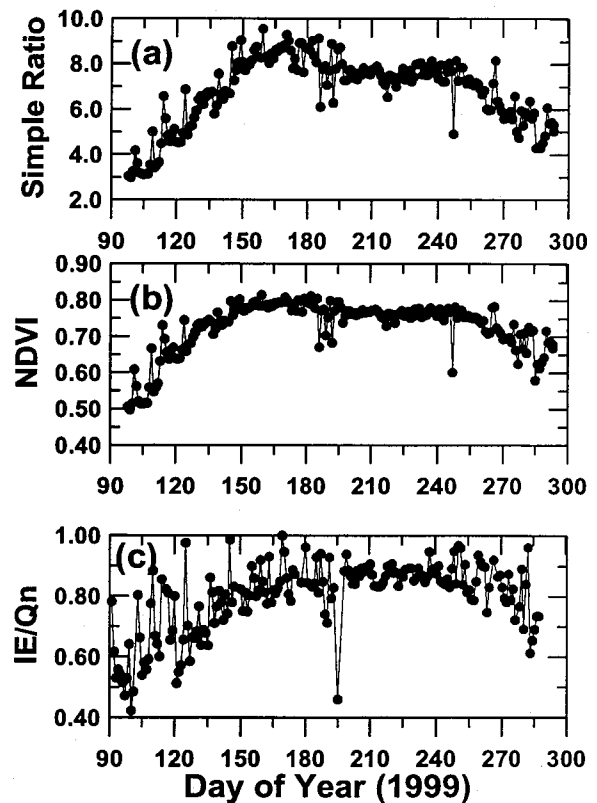


Fig. 3 Seasonal changes in Simple Ratio (SR) (a), NDVI (b), and evaporative fraction (IE/Qn) (c) (Same as Fig. 7 in Japanese page).

coverage in grassland. In this study, we showed the evidences from ground-based measurement of vegetation coverage (Fig. 6 in Japanese page).

- 4). Seasonal changes in Vegetation Indices (VIs) were also described the phenology in grassland. And good agreement in its variation in evaporative fraction at grassland (Fig. 3, Fig. 7 in Japanese page).
- 5). Spectral reflectance measurements by a spectrometer represent good examples of explanations in hyper-spectral reflectance in grass. And good agreement was found between two components (Fig. 8 and Fig. 9 in Japanese page).
- 6). From the inter-annual variations in evaporative fractions derived from the routine measurements at Environ. Res. Center, Univ. Tsukuba, we detected the differences of grass phenology at each year. Especially, we detected change of the status in land cover from 1993 and after 1994 from the changes in pattern of evaporative fraction. (Fig. 10 - 13 in Japanese pages).

Key Words; PGLIERC, Phenology, Vegetation Indices, Spectral Reflectance, Latent Heat Flux

(Accepted 26 November, 1999)

A Water Balance Model of the Lake Bosten in the Overall Drainage Area, Yanji Basin, Xinjiang, China

Zhao Jingfeng*, Hideki Nagashima*, Takashi Ishiyama**

*Tokyo University of Fisheries, **Chiba University, Center for Environmental Remote Sensing.

Abstract

The Lake Bosten in the Yanji Basin is the biggest lake in Xinjiang, China, and plays important roles on the agriculture, industries and environment in the local region. However, the water levels of the Lake Bosten demonstrate a decreasing trend in the past several ten years. The goal of the research is to clarify the mechanism of the water balance of the basin. Based on the available hydrological data from 1976 to 1989, we give the annual water balance model to evaluate the water budgets of the Yanji Basin. Details are given of the method to calculate the evapotranspiration from vegetation, the evaporation and the storage change of groundwater. With this model, we calculated the annual water budgets from 1976 to 1989, and evaluated the effects of the irrigation expansion to the lake that had made the Lake's water level dropped more than 0.8 meters down during the past 13 years from 1976 to 1989.

Key Words: Water Balance Model, Bosten Lake, Yanji Basin.

1. Introduction

The Yanji Basin almost is an enclosed Basin within the Range of Mountain Tianshan. The Lake of Bosten, which is located in the lowest place of the Yanji Basin, nowadays, becomes the biggest lake in Xinjiang after the Lop Nor and the Aibi lakes dried up, and also is the biggest freshwater lake inland of China. The lake's area is about 877.0-1002.4 km² with capacity of 52-88 km³ corresponding to the elevations of lake's water level of 1044.95-1048.75 meters (Li, Huang and Yi 1984). In the Basin, the three main inflow rivers, named Kaidu, Huangshui and Qingshui, derive from the northwestern and northern mountain areas. The unique outflow named as Kongque River originates from the Lake Bosten and stretches out of the Basin (Figure 1), and provides the water resource for the Kurla City. The Yanji oasis in the basin consists of irrigation areas, reed lands, lake Bosten and other areas etc, so, it is one of the most important bases of agriculture, reed and fisheries in the Xinjing Region.

However, in the past several ten years, the water levels of the Lake Bosten present a decreasing trend, and the water salinity also increases quickly, especially, during the 1980s, the lake's water levels reached the lowest value in the history of records. To avoid the same misfortune experienced in the famous Lake of Lop Nor in Central Asia, it needs to clarify the mechanism of water balance for the Basin. Since 1960s, several of general estimation methods for calculating the water budgets of the basin have been proposed for some specific years. However, fewer researchers have concerned about a systematic water balance model for the overall drainage area.

In this paper, an annual water balance model of the overall drainage area is given (Figure 2). Details are also described of the method to calculate the evapotranspiration from the main types of the

vegetation, the evaporation and the storage change of the groundwater in the basin. Accordingly, we give the calculations of the water budgets by using of this model for the 14 years of 1976~1989. Moreover, after examining the precision of this model within the period, we have evaluated the effects of the irrigation expansion to the lake's change. The agriculture increment is one of the reasons that caused the lake's water level decreasing; as an example, the calculation shows that the lake's level had been dropped more than 0.8 meters in the past 13 years of 1976-1989, which caused by the farmland increase only.

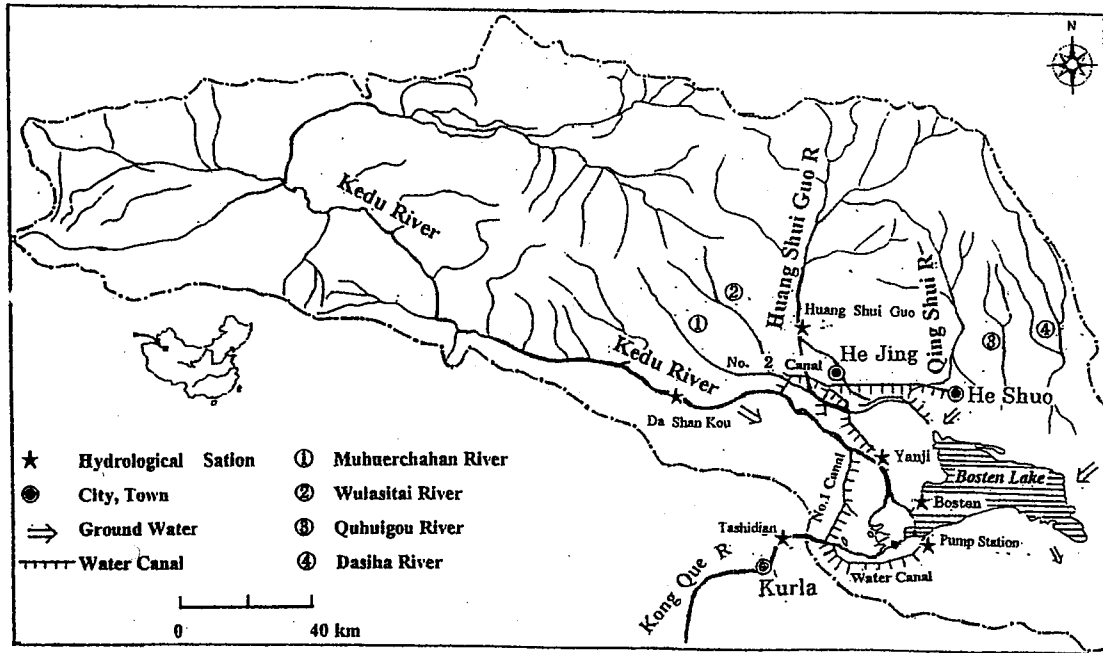


Figure 1. Map of the Yanji Basin with the Hydrological station

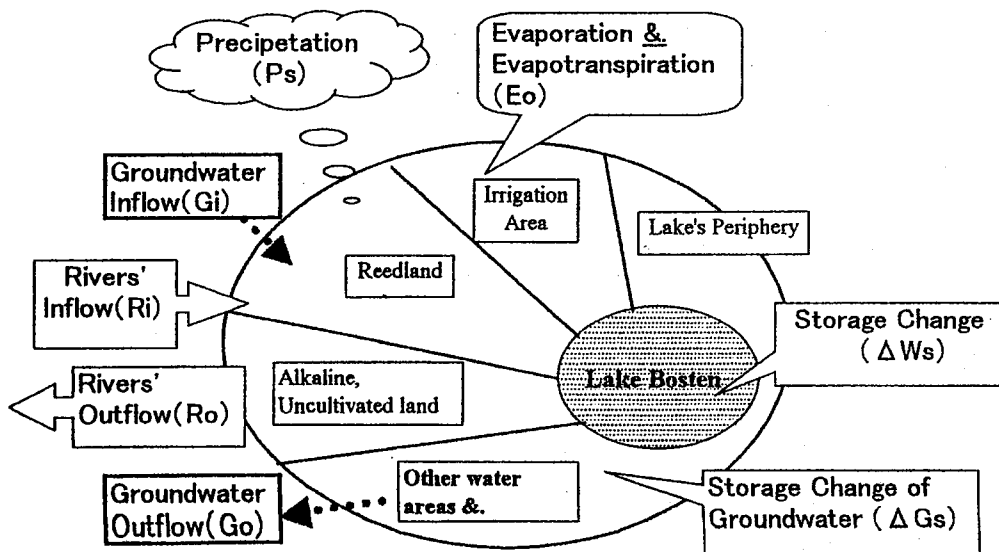


Figure 2. Sketch Map of the Water Budgets of the Yanji Basin

2. Available Data and Previous Researches

The available data during 1976-1989: i) The rivers discharges and the lake's water levels recorded at hydrological stations. ii) The data of precipitation, evaporation observed at hydrological and meteorological stations. iii) The areas of the oasis that including the irrigation lands, the reed lands, and the other water area etc.

Table 1. List of Hydrological and meteorological data available in this model

Station	Name of river	Catchment area (km ²)	Elevation (m)	Period (year)	Data
DSK St.	Kaidu	19,022	1338.9~1339.7	1976~1989	Q
HSG.St	Huangshuigou	5,000	1319.4~1323.3	1976~1989	Q
QSH.St	Qingshui	465	-----	1976~1989	Q
TSD.St.	Kongque	-----	1048.2~1052.3	1976~1989	Q, E20
BST.st.	Bosten Lake	-----	1047.7~1049.1	1976~1989	H, E20, P.
Heshuo	Town	-----		1976~1989	E20
Hejing	Town	-----		1976~1989	E20
Yanji	town	-----		1976~1989	E20

E20: Evaporation with 20 cm evaporation pan. H: lake's level is available during (1955-1993)

Q: Discharge P: precipitation. Tw: Water temperature

The Previous Study Results: i) The relationship between the water levels and the lake's area and the capacities ii) The empirical coefficients for calculating the lake's evaporation and vegetation evapotranspiration (Table 2).

Table 2. The empirical coefficients (K) for calculating the vegetation transpiration

Land Type	Farmland & Reed 1, 2 (K _{in})	Reed 3, 4 & Cattail (K _{R34})	Bare Land (K _o)	Herbage (K _H)
coefficient	1.3	1.0	0.90*	0.75*

* denotes that is referred by H.L. Penman for calculating the potential evaporation on bare land

3. Water Balance Model of the Yanji Oasis

As the Figure 2 shows, the basic equation of the annual water balance in the overall basin is given by,

$$\left. \begin{aligned} (R_i + P_s + G_i) - (R_o + E_o + G_o) &= \Delta W_s + \Delta G_s + \Delta Q_v \\ E_o &= E_L + E + E_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

where R_i is the discharge of the inflow rivers, P_s is the precipitation over all the oasis areas, G_i is the inflow of the groundwater, R_o is the discharge of the outflow river, the groundwater outflow presents $G_o \approx 0$ here, ΔW_s is the storage change of the lake, ΔG_s is the storage change of the groundwater in the basin and ΔQ_v is the water residuals of the equation. E_o consists of E_L , E and E_p , here E_L is the evaporation of the lake, E is sum of the evaporation and evapotranspiration of the oasis without the lake, and E_p is the evaporation of the groundwater in the lake's periphery area. The calculation of the three unknowns of G_i , E_o , ΔG_s in the equation is key point for this model.

3.1 Calculation of the discharges of groundwater inflow

The equations (2) gives an approximation method to calculating the annual ground water that percolated into the basin; δ is the ratio between the G_i and the R_i of some specific years.

$$G_i = \alpha \cdot Q_i, \quad \alpha = 0.0833 \quad (2)$$

3.2 Calculation of the evaporation and the evapotranspiration

With using of the data of E_{20} at four stations, we give a calibration parameter to revise the records, then to calculate the potential evaporation of the region with the empirical coefficient $\bar{\lambda}$. Thus, the evaporation and the evapotranspiration of the oasis can be calculated with the following equation,

$$\left. \begin{aligned} E_L &= E_{B20} \cdot \bar{\lambda} \cdot S_L \\ E_w &= K_w \cdot E_{m20} \cdot \bar{\lambda} \\ E &= K_{Irr} \cdot E_w \cdot S_{Irr} + E_w \sum_j (K_j \cdot S_j) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} (\bar{\lambda} &= 0.4045) \\ (j &= 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (3)$$

where, E_L is the lake's evaporation, E_{B20} is the data at the Bosten hydrological station; E_w is the potential evaporation, E_{20m} is the average value of E_{20} over the four station, K_w is the calibration parameter, K_{Irr} , K_j is the empirical coefficients, S_{Irr} , S_j is the areas of the land. In this model, we employ the K_w , K_{Irr} as parameters, which are changed in the reasonable range of 0.9-1.25 and 1.20-1.45, to calculate the evaporation and the evapotranspiration respectively.

3.3 Calculation of the groundwater evaporation in the lake's periphery areas

With the hypothesis of that, the change of groundwater storage is directly proportional to the water level's change Δh , i.e.

$$\Delta G_s \propto \Delta h \quad (4)$$

we can ignore the ΔG_s in the four years of 1976, 1979, 1981 and 1982 due to the little change for the Δh . Therefore, we can calculate the groundwater evaporation E_p of the area from the equation (1), moreover find out a series of the regression equations between E_p and the lake's water level h .

3.4 Calculation of the storage change of the groundwater in the basin

In combination with the water balance equation and the calculations above as G_i , E_o and E_p , We can calculate the annual storage change of the groundwater for 1976~1989. Moreover, we find out the regression equations between ΔG_s and Δh .

3.5 Establishment of the water balance model

Because, sum of the square of the water residuals should be close to the minimum, as

$$\sum_{i=1976}^{1989} (\Delta Q_{v,i})^2 \rightarrow \varepsilon \quad (5)$$

thus, we can obtain a series of the optimum combinations of K_w , K_{Irr} and the regression coefficients for calculating the E_p and the ΔG_s by means of the least square method. In this study, we employed the parameter of K_{Irr} varies from 1.20 to 1.45 with a step of 0.05, and obtained six patterns for the water balance model.

4. Results

The examination of the model's precision was carried by means of making the comparisons of the level water between the data and the calculation results (e.g. Figure 3). The level's deviations between the data and the calculation are less than 0.20 meter during the period of 1976-1989 with the maximum value in 1985 and 1986. Using of the model's six patterns, we calculated the water budgets of the basin respectively from 1976 to 1989 (e.g. Figure 4). Moreover, the results shows as the follows: i) The average of the vegetation evapotranspiration varies in the range of $18.88 \times 10^8 \text{m}^3$ per year, which is 46.3 ~ 49.1% of the total water resource in the basin; ii) The lake's evaporation is about $9.63 \times 10^8 \text{m}^3$ per year. iii) The groundwater evaporation in the lake periphery is directly proportional to the lake's water level, with the value of $6.94 \sim 7.68 \times 10^8 \text{m}^3$ in 1976. iv) The evaporation of the other land surface in is $1.45 \sim 1.65 \times 10^8 \text{m}^3$ per year, and 3.6~4.0% of the total. v) The total decrease of the groundwater storage is in the range of $7.46 \sim 15.71 \times 10^8 \text{m}^3$ from 1976 to 1989. Furthermore, we also calculated the effect of the human activities to the lake, and the result indicates that the irrigation expansion for agriculture in the basin had made the Lake's water level dropped 0.83 meters down during the past 13 years from 1976 to 1989 (Figure 5).

Thus, we can give the conclusions as the follows:

- 1) Most of the water resource has been consumed by the vegetation evapotranspiration, the lake's evaporation and the discharge of the River Kongque.
- 2) The groundwater evaporation in the lake's periphery region becomes stronger when the lake's water level is higher than 1046.7 meters.
- 3) The variations of the rivers inflows and evaporation strongly influenced the fluctuation of annual water levels of the lake.
- 4) The increase of the irrigation areas is one of the reason that caused the lake's water level low.

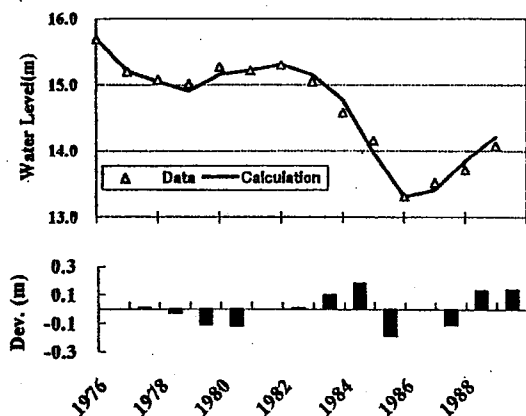


Figure 3. Contrast of Water Levels between Records and calculation (when $K_{irr}=1.30$)

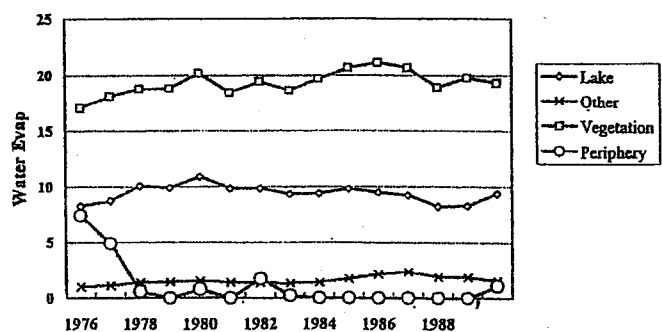


Figure 4. Water Budgets in the Basin Calculated by the Water Balance Model (when $K_{irr}=1.30$)

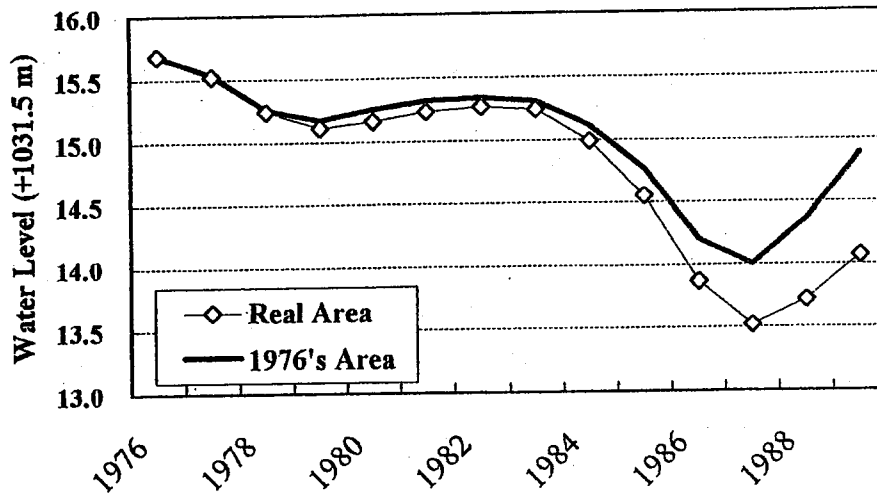


Figure 5. Evaluated the effect of the Irrigation expansion to the lake water level
(When $K_{irr}=1.30$)

References

- Cheng, C. Z. Cheng (1982), *View of the Water Balance in Lake Bosten*, Science and Technology in Bayinguole Region, Vol. 48, Xinjiang, China, 5-13 pp.
- Cheng, Q. C. (1995) *Study on the Lake Bosten*, Hehai University Press House.
- Hydrological Yearbook of the People's Republic of China (1983-1986), Vol. 10, No. 2.
- Ishigawa Masami (1985), *Basic of the Hydrology*, Koinn Press House, 94-106 pp., (in Japanese).
- Li, X.X (1981) *Caring and Improving the benefit of the Lake Bosten*, Science and Technology in Bayinguole Region, Vol. 48, Xinjiang, China.
- Liu, Y.X. & Y.G. Qu (1984): *Utilization and Improvement of the Lake Bosten*, Xinjiang Geography Vol. 7, No 4, 17-29 pp.
- Li Xin (1999), *The Effects of Human Activities to Water Ballance in the Arid Land of China and Experimental Research on it—A case study in Alar Irrigation area*, Xinjiang, China. Ph.D. thesis, January, CHIBA UNIVERSITY, JAPAN, 54 pp.
- Meteological Yearbook of Xinjiang (1951-1980), China.
- Mao, D.H. (1978), *The Possible Changes of the Environment in the Bosten Lake*, Xinjiang Geography, Vol. 1, 56-63 pp.
- Yi, L.Z., Huang, W., Ying Zhang, Y. & Liu, L.M. (1984), *Program of Care and Improvement of the Lake Bosten and Project of the Resources Development*, Development Project of the National Land in Bayinguole Mongolian Region, Xinjiang, China, the Group of Making Program for the Lake Bosten in Bayinguole Region, 1-68 pp.
- Zhong, X. C. (1988), *Primary Evaluation of Water Surface Evaporation in Bosten Lake*, Arid Land Geography, Vol. 11, No. 4, 39-44 pp.

OCTS/POLDER 複合データによるエアロソル情報の推定に関する研究

Estimation of aerosol from OCTS and POLDER data for ocean color remote sensing.

見富 恭*・樋口 理子*・福島 甫**・高村 民雄***

*財団法人リモート・センシング技術センター

**東海大学開発工学部

***千葉大学環境リモートセンシング研究センター

e-mail:mitomi@restec.or.jp

1. はじめに

人工衛星による海色リモートセンシングは、衛星高度での光学観測データから大気による散乱・吸収の光学的効果を取り除くことにより、海中から射出される光のスペクトル情報を抽出する技術であり、その中でも時空間的な変動の大きい大気エアロソルの影響を衛星データから如何に精度良く見積もるかが、海色情報抽出の精度を高めるための大きな課題の一つである。

海色観測用のセンサである OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) と共に ADEOS に搭載されていた POLDER (POLarization and Directionality of the Earth Reflectances) は、OCTS に比べて空間分解能は劣るものの、同一海表面に対する多視角および多偏光の観測情報を有しており¹⁾、これらのデータの複合的な利用により OCTS 単独では得られなかった高い精度のエアロソル情報を得られることが期待される。

そこで本研究では、POLDER データの持つ多視角の観測情報を用いた大気エアロソルパラメータの推定アルゴリズムを検討すると共に、OCTS-POLDER データの有効的な複合利用技術を確立することを目的とする。

なお、本研究は平成 11 年度より千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究として始められたものであり、本稿では、その中間結果について報告する。

2. 大気エアロソル推定アルゴリズム

海色のリモートセンシングにおいて、衛星高度で観測される光 (太陽光に対する反射率: ρ_T) は、一般に(1)式のようにモデル化される。

$$\rho_T(\lambda) = \rho_M(\lambda) + \rho_A(\lambda) + \rho_{MA}(\lambda) + t(\lambda)\rho_W(\lambda) \quad (1)$$

ρ_T : 衛星で観測される反射率

ρ_M : 大気分子の多重散乱による反射率

ρ_A : エアロソルの多重散乱による反射率

ρ_{MA} : 大気分子-エアロソルの相互散乱による反射率

t : 海面→大気上端の透過率

ρ_W : 海水射出輝度成分の反射率

λ : 波長

(1)式について、近赤外波長域においては $\rho_W \approx 0$ であり、また、 ρ_M は大気分子の組成が安定していることから理論的に計算することが可能である。従って、近赤外波長域におけるエアロソルの多重散乱に関わる項 $\rho_A + \rho_{MA}$ は(2)式で表される。

$$\rho_A(\lambda) + \rho_{MA}(\lambda) = \rho_T(\lambda) - \rho_M(\lambda) \quad (2)$$

一方、OCTS アルゴリズムに基づき²⁾³⁾、(3)~(7)式が成り立つと仮定し、(2)式に代入することにより、(2)式は(8)式で表される。

$$\rho_{RA}(\lambda, \Omega) = (1-r)\rho'_{RA}(M1, \lambda, \Omega) + r\rho'_{RA}(M2, \lambda, \Omega) \quad (3)$$

$$\rho_{RA}(\lambda, \Omega) \equiv \rho_A(\lambda, \Omega) + \rho_{MA}(\lambda, \Omega) \quad (4)$$

$$\rho'_{RA}(M, \lambda, \Omega) \equiv \rho'_{AS}(M, \lambda, \Omega) + \sum_{n=1}^3 a_n \tau_A(M, \lambda)^n \quad (5)$$

$$\tau_A(M, \lambda) = \frac{k(M, \lambda)}{k(M, 500nm)} \tau_A(500nm) \quad (6)$$

$$\rho'_{AS}(M, \lambda, \Omega) = \frac{\omega_A(M, \lambda) \tau_A(M, \lambda) P_A(M, \lambda, \Omega)}{4 \cos \theta \cos \theta_0} \quad (7)$$

M=M1, M2: 候補エアロソルモデル

Ω : 観測幾何学条件

$\rho'_{RA}(M, \lambda, \Omega)$: M, λ, Ω における $\rho_A + \rho_{MA}$

r: 候補エアロソルモデルに対する内分率

τ_A : エアロソルの光学的厚さ

k: 正規化消散係数

ρ'_{AS} : 単散乱近似によるエアロソルの反射率

ω_A : エアロソルの単散乱アルベド

P_A : エアロソルの散乱位相関数

$$\begin{aligned} 0 = & \tau_A^3(500nm) \left\{ (1-r) a_3 \frac{k(M1, \lambda)}{k(M1, 500nm)} + r a_3 \frac{k(M2, \lambda)}{k(M2, 500nm)} \right\} \\ & + \tau_A^2(500nm) \left\{ (1-r) a_2 \frac{k(M1, \lambda)}{k(M1, 500nm)} + r a_2 \frac{k(M2, \lambda)}{k(M2, 500nm)} \right\} \\ & + \tau_A(500nm) \left\{ (1-r) \frac{k(M1, \lambda)}{k(M1, 500nm)} \left[a_1 + \frac{\omega_A(M1, \lambda) P_A(M1, \lambda, \Omega)}{4 \cos \theta \cos \theta_0} \right] \right. \\ & \left. + r \frac{k(M2, \lambda)}{k(M2, 500nm)} \left[a_1 + \frac{\omega_A(M2, \lambda) P_A(M2, \lambda, \Omega)}{4 \cos \theta \cos \theta_0} \right] \right\} \\ & - \rho_{RA}(\lambda, \Omega) \end{aligned} \quad (8)$$

よって、実際のエアロソルの特性に近い2つのエアロソルモデルが与えられた時、(8)式に関する未知数は $\tau_A(500\text{nm})$ および2つの候補エアロソルモデルの内分率 r となる。ここで(8)式は観測視野角に関する項を含んでいることから、本研究では、幾つかの候補エアロソルモデル、内分率および光学的厚さの組に関して、複数の視野角からの観測情報を用いて(8)式を解き、各視野角情報から得られる $\tau_A(500\text{nm})$ 値の分散が最も小さい時の候補エアロソルモデル M1, M2、内分率 r 、そして $\tau_A(500\text{nm})$ を選択した。Fig. 1にPOLDERの多視角観測とOCTSの一方方向観測との違いを示す。

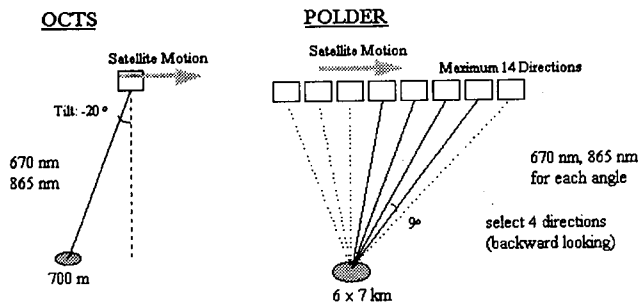


Fig. 1 Difference of observation system between POLDER and OCTS

3. シミュレーションデータによる評価

多視角観測データを用いたアルゴリズムの有効性を検討するために、以下の2つの条件における大気上端での反射率データを作成し、このシミュレーションデータを入力としたアルゴリズムの評価を行った。

シミュレーション条件:

- ・エアロソルモデル:
 - A)対流圏型-RH80%
&沿岸型-RH80% (50%50%)
 - B)海洋型-RH99%&黄砂型 (50%50%)
- ・500nmにおけるエアロソルの光学的厚さ: 0.01~1.0, 0.05 刻み

アルゴリズム条件:

- ・候補エアロソルモデル: 10モデル
 1. 対流圏型-RH50%
 2. 対流圏型-RH80%
 3. 対流圏型-RH90%
 4. 沿岸型-RH50%
 5. 沿岸型-RH80%
 6. 沿岸型-RH99%
 7. 海洋型-RH50%
 8. 海洋型-RH80%
 9. 海洋型-RH99%
 10. 黄砂型
- ※以上OCTSアルゴリズム用テーブルを使用
- ・500nmにおけるエアロソルの光学的厚さ: 0.01~1.0, 0.05 刻み

・使用視野角: 後方4方向

ここで、各シミュレーションデータによる $\tau_A(500\text{nm})$ の推定結果をFig. 2(A),(B)に、そして2つの選択モデルおよび内分率から得られるオングストローム指数 $\alpha(670/865)$ の推定結果をFig. 3(A),(B)に示す。横軸はシミュレーションデータ作成時の $\tau_A(500\text{nm})$ の設定値を示しており、縦軸は各々アルゴリズムで推定された $\tau_A(500\text{nm})$ および $\alpha(670/865)$ の値である。また、本アルゴリズムは単一の波長データにおける複数の視野角データからの推定が可能であることから、推定結果には670nmのデータと865nmのデータの適用結果を各々示している。この結果から、B)モデルについては $\tau_A(500\text{nm})$ 、 $\alpha(670/865)$ 共に、設定値にほぼ等しい値が推定されているものの、A)モデルについてはB)モデルの結果と比べて若干誤差が大きくなっていることがわかる。

4. POLDER データによる適用結果

Fig. 4およびFig. 5に実際のPOLDERのデータ(670nm)を本アルゴリズムに適用した結果を示す。ここで、Fig. 4は $\tau_A(500\text{nm})$ 、Fig. 5は $\alpha(670/865)$ の推定結果であり、各々(B)は3方向、(C)は4方向データからの推定結果を示している。また、(A)は従来の近赤外2波長(670/865)アルゴリズムからOCTSデータを用いて推定された各パラメータの値である。

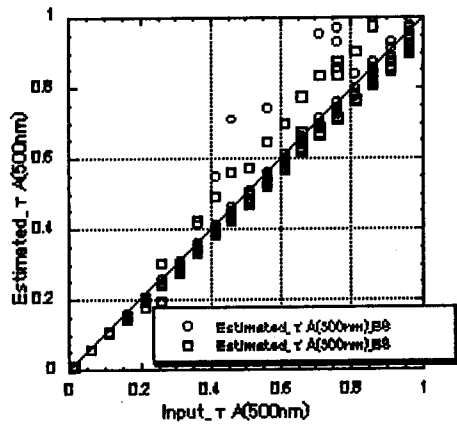
この結果、 $\tau_A(500\text{nm})$ についてはOCTSプロダクトと同様な分布パターンを示しているものの、全体的に低い推定結果を示していることがわかる。エアロソルのタイプを表す $\alpha(670/865)$ に関しても、OCTSよりもかなり低めの推定結果を示していることがわかる。

4. まとめ

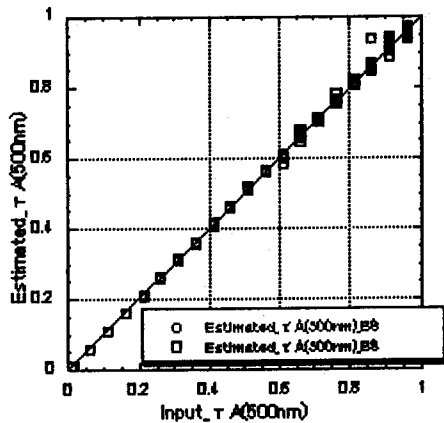
本研究では、OCTS-POLDERデータの有効的な複合利用技術を確立することを目的として、POLDERデータの持つ多視角の観測情報を用いた大気エアロソルパラメータの推定アルゴリズムの検討を行った。シミュレーションデータによる適用結果では、設定するエアロソルのタイプによって精度に大きな差が出るという結果であった。これらの結果は、今回の評価に使用した候補エアロソルモデルの設定に若干の偏りがあったことによるものであると考えられる。本解析結果は、提案アルゴリズムの中間的な評価結果であり、今後より適切なエアロソルモデルをアルゴリズムに組み込むことを検討すると共に、現状の単一波長情報から複数波長情報の利用も考慮して、更にアルゴリズムを検討していく予定である。

参考文献

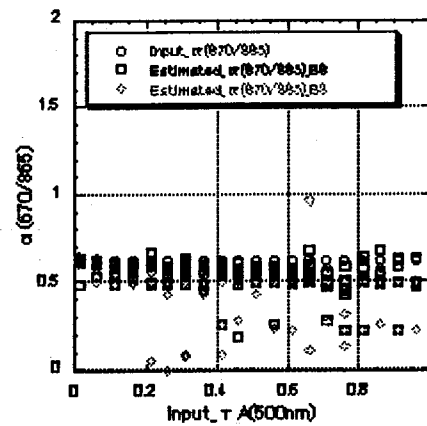
- 1) POLDER Level-1 Product Data Format and User Manual, CNES, PA.MA.19.1332.CEA, Ed.2-Rev. 0, Nov. 4th, 1997
- 2) Correction of Atmospheric Effect on ADEOS/OCTS Ocean Color Data: Algorithm Description and Evaluation of Its Performance, H. Fukushima et. al, Journal of Oceanography, Vol.54, pp.417 to 430. 1998
- 3) Early Phase Analysis of OCTS Radiance Data for Aerosol Remote Sensing, T. Nakajima et. al, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 3, May 1999



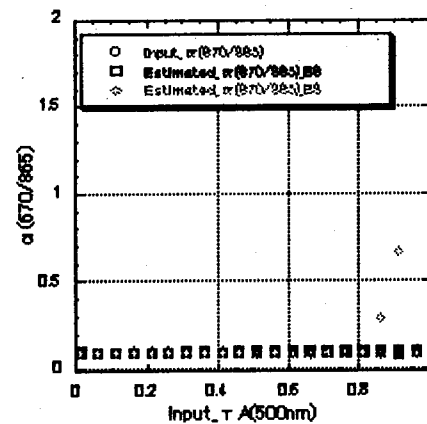
(A) Tropospheric type-RH80%&Coastal type-RH80% (50%50%)



(B) Oceanic type-RH99%&Yellow dust type (50%50%)
Fig. 2 Estimation results of aerosol optical thickness at 500nm using simulation data.



(A) Tropospheric type-RH80%&Coastal type-RH80% (50%50%)



(B) Oceanic type-RH99%&Yellow dust type (50%50%)
Fig. 3 Estimation results of Angstrom exponent(670/865) using simulation data.

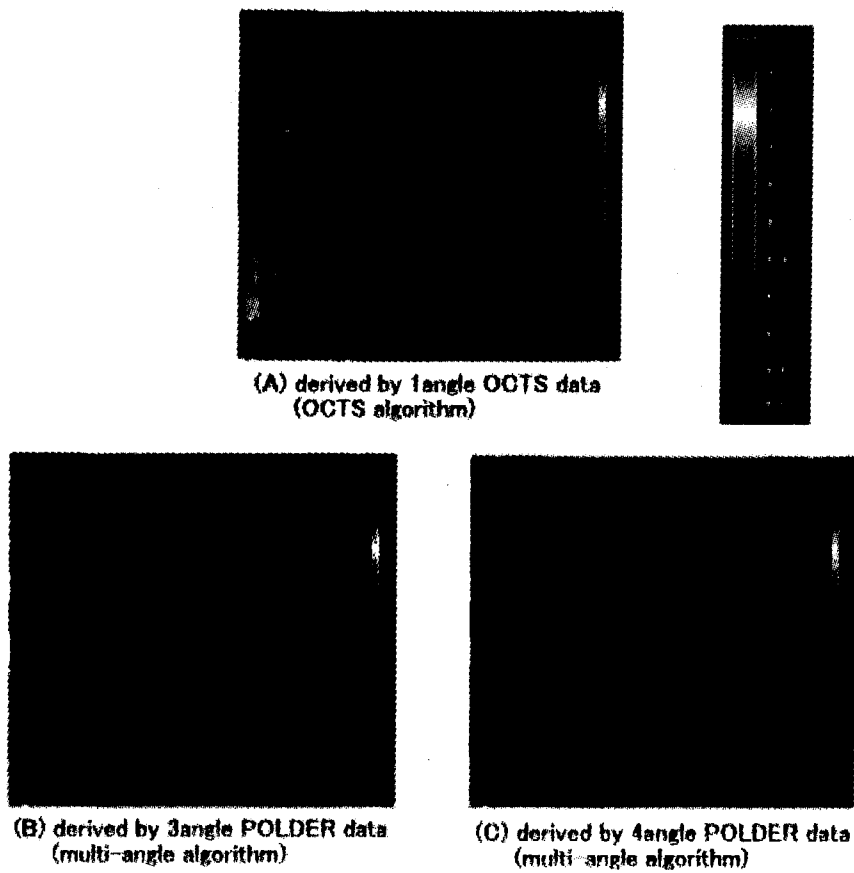


Fig. 4 Estimation results of aerosol optical thickness at 500nm

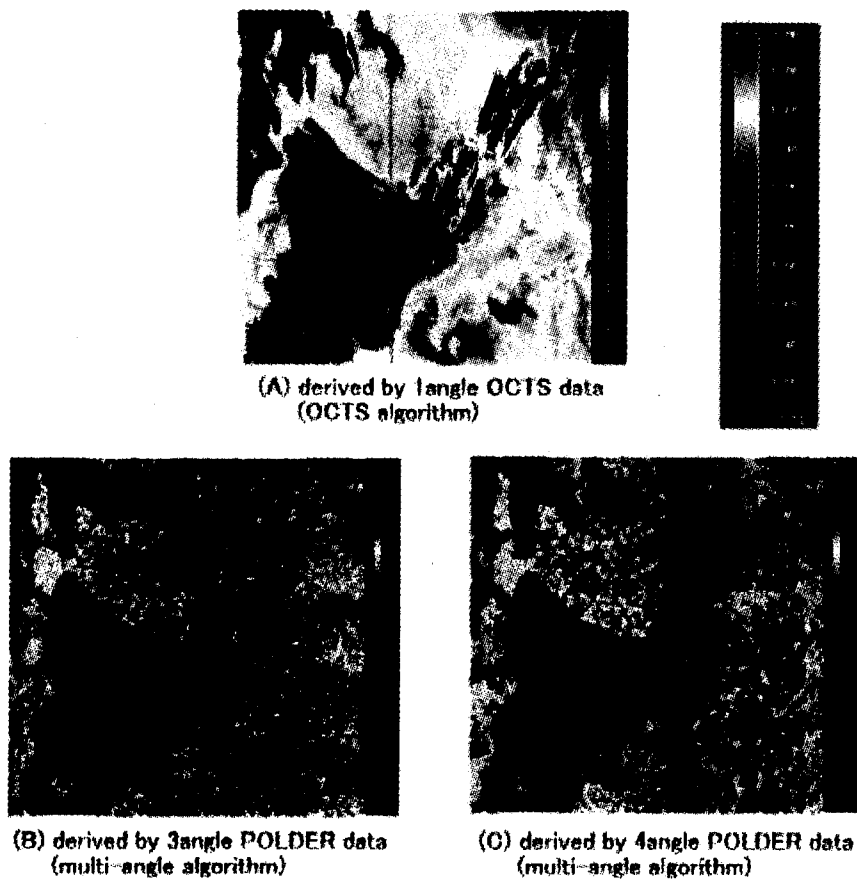


Fig. 5 Estimation results of Angstrom exponent (670/865)

多波長ライダーおよびサンフォトメーターを組み合わせたライダー定数の導出

金城秀樹, 久世宏明, 高村民雄, 竹内延夫
千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

Derivation of Aerosol Extinction-to-Backscattering Ratio
using a Multi-Wavelength Lidar and a Sun photometer
Hideki Kinjo, Hiroaki Kuze, Tamio Takamura, and Nobuo Takeuchi
Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

Representative sets of the extinction-to-backscattering ratio for several wavelengths from the actual measurements would contribute to extract more substantial information from remotely sensed aerosol data. Here we propose a method to determine the extinction-to-backscattering ratio using a multi-wavelength lidar (1064, 532, 756, and 355 nm) and a sun photometer data. In our approach, first, the ratio is obtained at 532 nm by comparing the optical thickness derived from the lidar data with optical thickness obtained with the sun photometer. At each altitude, it is assumed that the aerosol extinction coefficient at each lidar wavelength is proportional to the coefficient at 532 nm. The proportional factors are obtained from the sun photometer data. Then we determine the value of the ratio at 1064, 756, and 355nm using the profile as a reference profile.

1. はじめに

反転解法¹⁾を用いた弾性散乱ライダーデータから消散係数への変換において、エアロゾル消散係数と後方散乱係数の比(ライダーレシオ)は重要な役割を果たす。また、ライダーレシオの波長依存性は、エアロゾルの光学的特性の同定に有効である。このライダーレシオは、対流圏に存在するエアロゾルの粒径分布および複素屈折率に対して 10~100 sr の値を示す²⁾。したがって、多波長においてライダーレシオの代表値を求めることは、ライダーデータの解釈において重要である。

弾性散乱ライダー単独ではライダーレシオの導出は不可能であるため、他の観測機器との同期観測が提案されてきた。金城ら³⁾は、エアロゾル散乱係数(波長 530 nm)を地上設置の積分型ネフェロメーター⁴⁾で観測し、ライダーデータ(532 nm)の校正を行った。サンフォトメーターは気柱内エアロゾルの

光学的厚さを計測することが可能であるため、ライダーレシオの決定と消散係数の校正に有効である^{5,6)}。高村ら⁵⁾はサンフォトメーターとライダーの同期観測を行い、532 nm におけるライダーレシオが 30~70 sr であることを示した。本研究では、多波長ライダー^{7,8)}とサンフォトメーターを用いたライダーレシオの導出法について述べる。

2. 理論

単散乱ライダー方程式は、

$$P(z) = K \frac{G(z)}{z^2} [\beta_1(z) + \beta_2(z)] \times \exp \left[-2 \int_0^z \alpha_1(z') dz' - 2 \int_0^z \alpha_2(z') dz' \right], \quad (1)$$

与えられる。ここで K は装置定数、 $G(z)$ は重なり関数、 z はライダーから対象物までの距離、 β_i および α_i ($i=1,2$) は消散係数と後方散乱係数である。

添字 1, 2 はそれぞれエアロゾル粒子、空気分子を示す。Fernald の解法¹⁾では、 β_i と α_i の間に線形関係 $\alpha_i = S_i \beta_i$ が仮定される。ここでエアロゾルのパラメーター S_1 はライダーレシオと呼ばれる。空気分子の係数 β_2 および α_2 は、標準大気モデル⁹⁾から推定できる。

ライダー信号を距離 2 乗補正した信号を

$$X(z) = P(z)z^2, \quad (2)$$

と定義すれば、エアロゾル消散係数は

$$\alpha_1(z) = -\frac{S_1(z)}{S_2} \alpha_2(z) + \frac{S_1(z)X(z) \exp [I(z)]}{\frac{X(z_c)}{\frac{\alpha_1(z_c)}{S_1(z_c)} + \frac{\alpha_2(z_c)}{S_2}} + J(z)}, \quad (3)$$

で求められる。ここで積分項 $I(z)$ 、 $J(z)$ は

$$I(z) = 2 \int_z^{z_c} \left[\frac{S_1(z')}{S_2} - 1 \right] \alpha_2(z') dz', \quad (4)$$

$$J(z) = 2 \int_z^{z_c} S_1(z') X(z') \exp [I(z')] dz', \quad (5)$$

で定義される。式(3)において、 z_c は参照高度を示す。

3. 観測

多波長ライダーの鉛直方向の観測は Nd:YAG レーザー(1064, 532, 355 nm)および Ti:Sapphire レーザー(756 nm)で行なわれた。繰り返し周波数は 10Hz である。サンフォトメーターによる光学的厚さの観測は 8 波長(368, 420, 500, 532, 675, 778, 880, 1033nm)で行なわれた。これらの測器は千葉大学環境リモートセンシング研究センター(海拔 30 m)に設置された。

対流圏エアロゾルの光学的厚さは気柱内の光学的厚さから成層圏エアロゾルの光学的厚さを差し引くことにより求まる。1991 年 6 月の Pinatubo 山の噴火により、成層圏エアロゾルの光学的厚さは噴火前

に比べると 20-50 倍になっている¹⁰⁾。しかしながら、1997 年には成層圏エアロゾルの光学的厚さが噴火前と同程度になっていることが報告されている¹⁰⁾。Kent ら¹⁰⁾が報告した後方散乱積分値および消散係数と後方散乱係数の比を用いて、本研究では 355 nm, 532 nm, 756 nm, 1064 nm に対して 0.0043, 0.0024, 0.0014, 0.00088 を仮定した。

ライダーおよびサンフォトメーターデータからの S_1 の導出にあたり、光路中の S_1 は一定であると仮定した。解析において、まず、光学的厚さの比較から波長 532 nm における S_1 を求めた。その際、参照高度から対流圏界面までの消散係数プロファイルは、笹野¹¹⁾が筑波において得た大気モデルを利用した。

各高度において、波長 λ_i ($i = 355, 756, 1064$ nm) の消散係数 $\alpha_1(\lambda_i, z)$ が、532 nm 波長の消散係数と線形関係にあると仮定すると、

$$\alpha_1(\lambda_i, z) = K_i \alpha_1(\lambda_{532}, z), \quad (6)$$

で表される。ここで、 $K_i = \tau(\lambda_i)/\tau(\lambda_{532})$ であり、 $\tau(\lambda_{532})$ と $\tau(\lambda_i)$ はサンフォトメーターで計測される波長 λ_{532} と λ_i における光学的厚さである。式(6)により導出された波長 λ_i における消散係数プロファイルは、参照プロファイル $\alpha_1^{(ref)} (= \alpha_1(\lambda_i, z))$ とすることができる。続いて λ_i におけるライダー信号は、Fernald¹⁾の反転解法を用いていくつかの可能な S_1 について消散係数に変換される。このプロファイルを $\alpha_1^{(obs)}$ と記述すると、 $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の RMS 誤差は

$$D = \left[\frac{\int_{z_0}^{z_c} [\alpha_1^{(obs)}(z') - \alpha_1^{(ref)}(z')]^2 dz'}{z_c - z_0} \right]^{1/2}, \quad (7)$$

で定義される。 z_0 はレーザービームと望遠鏡視野の重なり点、 z_c は参照高度を示す。 D を最小にすることにより、参照プロファイルを最も良く再現する S_1 を決定することができる。

4. 結果と議論

フィッティング区間 $z_0 \sim z_c$ が小さければ、求まる S_1 は局所的なエアロゾルの光学的特性の影響を

受け、逆に $z_0 \sim z_c$ が大きすぎれば $\alpha_1^{(obs)}$ はノイズの影響を受け、 D の最小値を適切に検出できない。これらを考慮し、 z_c は 3000 m に設定した。 z_0 は 750 m である¹²⁾。

Fig.1 に結果を示す。Fig. 1(a) に入力した S_1 に対する D の変化を示す。ここで D の値はその最小値で規格化されている。規格化された D がある閾値を与えた場合、求まる S_1 の範囲は、355 nm が最も大きいことがわかる。Fig. 1(b) には、1064 nm における $\alpha_1^{(ref)}$ と、 D を最小にする S_1 を用いて導出された $\alpha_1^{(obs)}$ が示されている。 $z_0 \sim z_c$ における $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の光学的厚さを $\tau^{(obs)}$ および $\tau^{(ref)}$ とし、 $\tau^{(ref)}$ に対する $\tau^{(obs)}$ の誤差 ε を $\varepsilon = (\tau^{(obs)} - \tau^{(ref)}) / \tau^{(ref)} \times 100$ とすれば、 D を最小にする S_1 により導出された $\tau^{(obs)}$ と $\tau^{(ref)}$ の誤差は 355 nm で -6% 程度、756 nm および 1064 nm では $\pm 1\%$ 以内であった。

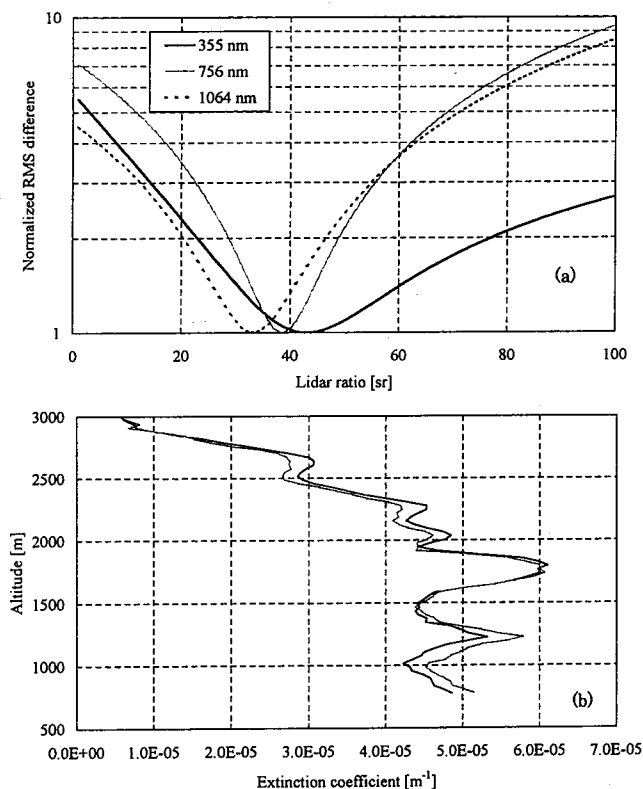


Fig.1 Results of applying the present method to the multi-wavelength lidar and the sun photometer data (Apr. 14, 1999). (a) Normalized RMS difference. (b) The reference profile (gray line) and the observed profile which minimizes the RMS difference (black line) at 1064 nm.

Fig.1 では式(7)を用いて D を評価したが、消散係数の波長依存性が高度に対して一定であるという仮定を厳密に解釈するならば、 $\alpha_1^{(obs)}$ と $\alpha_1^{(ref)}$ の対数をとった

$$D = \left[\frac{\int_{z_0}^{z_c} [\ln \alpha_1^{(obs)}(z') - \ln \alpha_1^{(ref)}(z')]^2 dz'}{z_c - z_0} \right]^{1/2}, \quad (8)$$

で評価するべきであろう。したがって、式(7)、(8)を用いて評価した結果の違いについて議論する必要がある。Fig.2 は 1999 年 5 月 21 日、1998 年 10 月 9 日にそれぞれ観測されたデータについて、式(7)、(8)の評価式を用いて求められた S_1 の相関をとった結果である。1999 年 5 月 21 日の大気は、大気混合層が高度 2600 m 付近まで発達し、 $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルの光学的特性が一定であると考えられる状態であった。それに対し 1998 年 10 月 9 日の大気は高度 1600 m まで大気混合層が発達し、 $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルが光学的特性の異なる 2 層構造をなしていた(Fig.2(a))。Fig.2(b)、(c)において、横軸は式(7)から導出された S_1 、縦軸は式(8)から導出された S_1 である。Fig. 2(b) のケースでは、どちらの評価式を用いても、ほぼ同じ S_1 が得られた。したがって $z_0 \sim z_c$ においてエアロゾルの光学的特性が一定であるならば、式(7)、(8)で得られる結果は一致するといえる。それに対し、Fig.2(c)のケースでは式(7)で評価した場合に比べ、式(8)で評価した結果が小さくなる傾向にあった。このようなケースでは、 $z_0 \sim z_c$ に均等に重みをかけた式(8)で評価された値は適切とはいえないため、式(7)で評価するのが適当であるといえる。

5. まとめ

本研究では、多波長ライダーとサンフォトメーターのデータからライダーレシオを導出する方法について述べた。提案された手法は、多波長ライダーの解析において、校正された 532 nm 波長の消散係数プロファイルから他のライダー波長の消散係数プロファイルを推定し、そのプロファイルを参照プロファイルとすることによりライダーレシオを求めると

いうものであった。

532 nm の消散係数の校正は、金城ら³⁾が提案したように地上設置の積分型ネフェロメーターにより可能である。Mie 散乱から算出される消散係数の波長依存性とライダーレシオのルックアップテーブルを用いれば、サンフォトメーターデータがない夜間でのライダーレシオの同定が可能になるだろう。

Reference

- 1) F. G. Fernald: *Appl. Opt.* **23** (1984) 652.
- 2) S. J. Doherty, T. L. Anderson, and R. J. Charlson: *Appl. Opt.* **38** (1999) 1823.
- 3) H. Kinjo, H. Kuze, Y. Sakurada, and N. Takeuchi: *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999) 293.
- 4) J. M. Rosen, R. G. Pinnick and D. M. Garvey: *Appl. Opt.* **36** (1997) 2642
- 5) T. Takamura, Y. Sasano, and T. Hayasaka: *Appl. Opt.* **33** (1994) 7132.
- 6) T. Hayasaka, Y. Meguro, Y. Sasano, and T. Takamura: *Appl. Opt.* **37** (1998) 961.
- 7) N. Takeuchi, H. Kuze, Y. Sakurada, T. Takamura, S. Murata, K. Abe and S. Moody: *Proc. 18th Int. Conf. Laser Radar, Berlin, 1996* (Springer-Verlag, Berlin, 1997) p. 71.
- 8) H. Kuze, M. Qiang, Y. Sakurada, T. Takamura, and N. Takeuchi: *Proc. 18th Int. Conf. Laser Radar, Berlin, 1996* (Springer-Verlag, Berlin, 1997) p. 75.
- 9) NASA: *1976 U. S. Standard Atmosphere Supplement* (U. S. GPO, Washington, D. C., 1976)
- 10) G. S. Kent and G. M. Hansen: *Appl. Opt.* **37** (1998) 3861.
- 11) Y. Sasano: *Appl. Opt.* **35** (1996) 4941.
- 12) H. Kuze, H. Kinjo, Y. Sakurada and N. Takeuchi: *Appl. Opt.* **37** (1998) 3128.

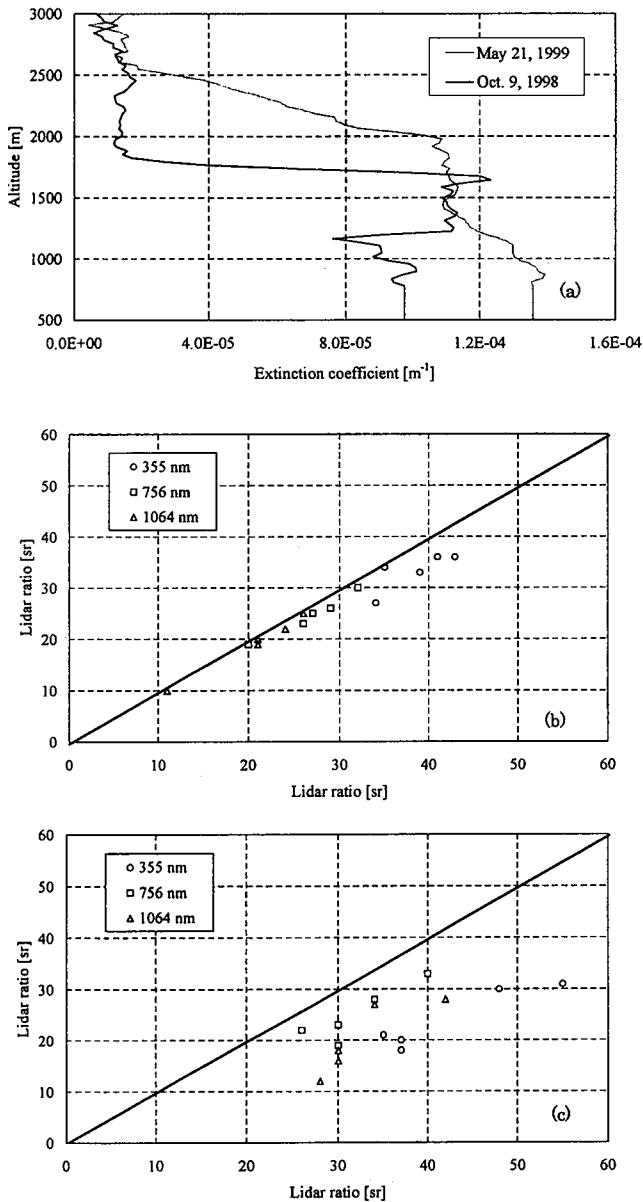


Fig.2 (a) Top panel shows aerosol extinction profiles at 532 nm measured at May 21, 1999 and Oct. 9, 1998. Middle and bottom panels show the comparison of the lidar ratio obtained with Eq.(7) and (8). (a) May 21, 1999. (b) Oct. 9, 1998.

衛星画像高速検索システム

Remote Sensing Data Search System

斎藤元也*、児玉正文**、○宋 献方***

*農業環境技術研究所 **農林水産研究計算センター *** 科学技術振興事業団

Abstract

The remote sensing technology has been used in many science fields. Since it isn't easy to search and get the satellite data, a new remote sensing data search system was made by Computer center for Agriculture Forest and Fisheries Research, Ministry of Agriculture Forest and Fisheries. The data of NOAA, DMSP, GMS and others can be search and download easily anytime and anywhere by signed users.

はじめに

現在、人類に直面した地球温暖化、異常気象、砂漠化などの地球環境変化は、人類生存の水資源や食糧・エネルギーに深刻な影響を与える重大問題である。地球規模の環境変化のメカニズムを解明するために、リモート・センシング技術の活用は不可欠である。一方、リモート・センシングの研究が進められ、及び応用技術を開発に伴うデータ入手が困難、機器や解析用ソフトウェアが高価格、利用方法が分からないなど、さまざまな問題が生じている。したがって、この技術が十分に利用されていることとはいえない。

以上の問題を解決するために、我々は、農林水産研究計算センタにおいて、当面、NOAA、DMSP、GMS等汎用性の高い地球観測衛星データを蓄積し、農林水産試験研究機関のユーザーに提供しようと、検討を進めてきた。その結果、1998年度補正予算で「衛星画像高速検索システム」を含む「農学情報資源システム」を整備することとなった。

このシステムでは、農林水産省試験研究機関で受信している地球観測衛星データをはじめ、米国や他の関係機関で受信・作成されたデータを、ユーザーに使いやすい形に処理し、ネットワークを介し、検索・提供する。提供範囲は、農林水産関係国公立試験研究機関のみならず、農林水産業従事者、行政・普及機関、環境・防災関係研究機関あるいは、アジアをはじめとする世界中を対象とする。

1、 衛星画像高速検索システム系統図

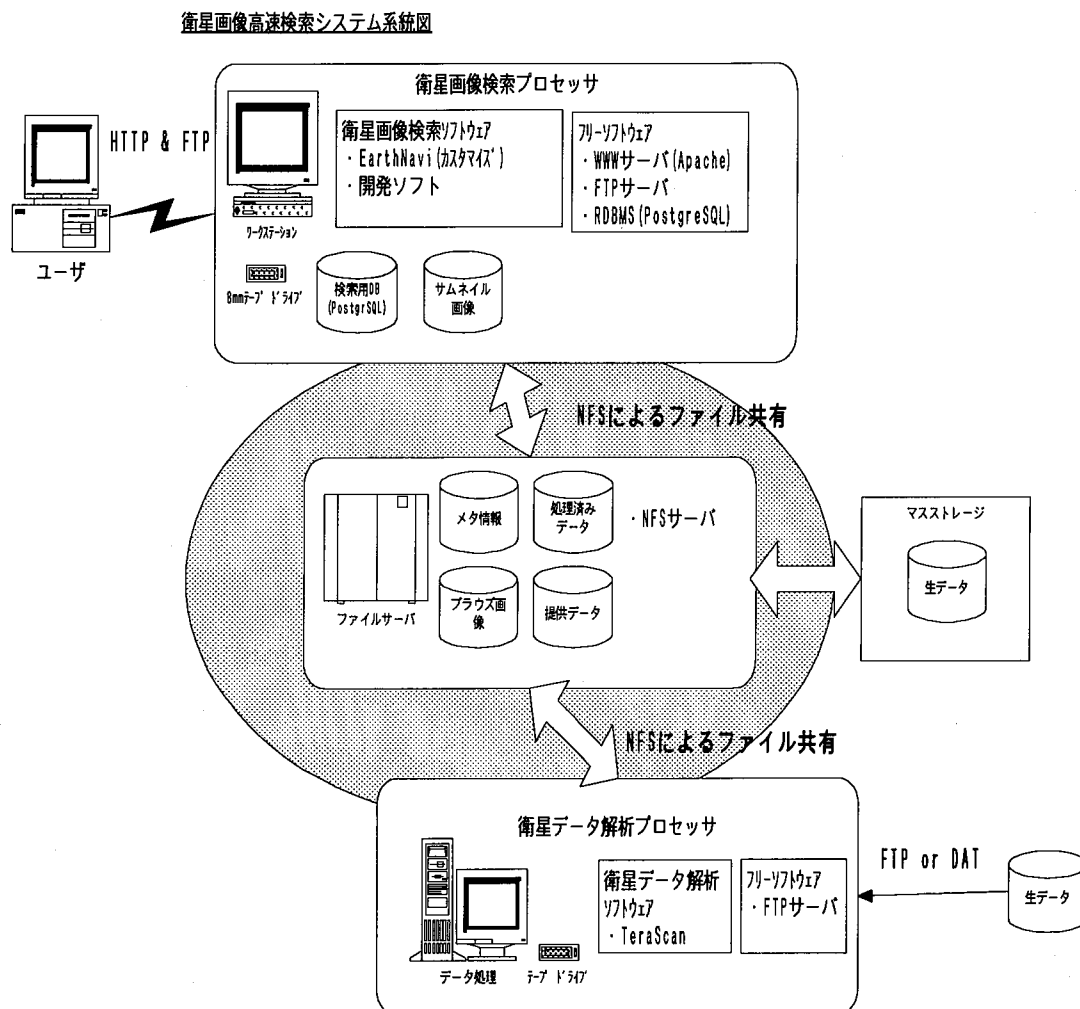


Fig. 1 The system map of remote sensing data search system

2、 提供する予定のデータの種類

当面提供する予定のデータは、以下の通りである。今後、ADEOS-II、ASTER など高分解能のデータも提供できるよう検討を進めている。

NOAA

NOAA データは、米国海洋大気庁が運用している気象衛星で、東北区水産研究所、中央水産研究所、西海区水産研究所石垣支所及び ACRORS, AIT(Asian Center Research on Remote Sensing, Asian Institute of Technology)において、受信しているものを農林水産研究計算センターで、処理しているものである。

提供する予定のデータセット

- a. 生データ
- b. AVHRR Level3
- c. MCSST、NDVI 日、旬、月データ
- d. TOVS、DCS メタデータ

GMS

GMS は、「ひまわり」の愛称で呼ばれている静止気象衛星で、国内の大学など他機関において、受信されたものを農林水産研究計算センターで、処理しているものである。

提供する予定のデータセット

- a. 生データ
- b. GL3 Level3

DMSP

DMSP は、米国空軍・海軍の軍事衛星で、72 時間後には一般の利用者にも配布されているものである、データは NOAA(米国海洋大気庁)の National Geophysical Data Center (NGDC) から入手し、農林水産研究計算センターで、処理しているものである。

提供する予定のデータセット

- a. OLS
- b. SSM/I

TRMM

TRMM は、熱帯地域の降雨強度とその分布を観測する衛星で、NASA からデータを入手し、ユーザーに提供予定。

3、検索方法

本システムへのユーザー登録者は、作成したデータ WWW 上で観測日時、観測範囲等、処理情報（処理レベル、データセット名、雲量等）を選択し、検索する事ができる。また、データ形式、データの切りだし範囲、投影法、海岸線の表示・非表示などを指定してオーダーすることができる。検索結果は、サムネイル画像、JPEG(600X800)画像で表示することができる。

4、データのオーダーと入手

登録ユーザーは、上記及び WWW 上で以下のようなオーダーができる。

- 1) オーダーによりデータセット作成、
- 2) データ登録場所を mail によりユーザーへ連絡
- 3) ユーザーのダウンロード順にデータを入手できる。

5、検索サンプル及びデータサンプル

図 2 と 3

おわりに

今回構築しているシステムが、広い分野の研究者に、広く使用されることを期待する。更に、今後、国内外で受信されているデータを相互利用できるシステムが確立されることも期待する。

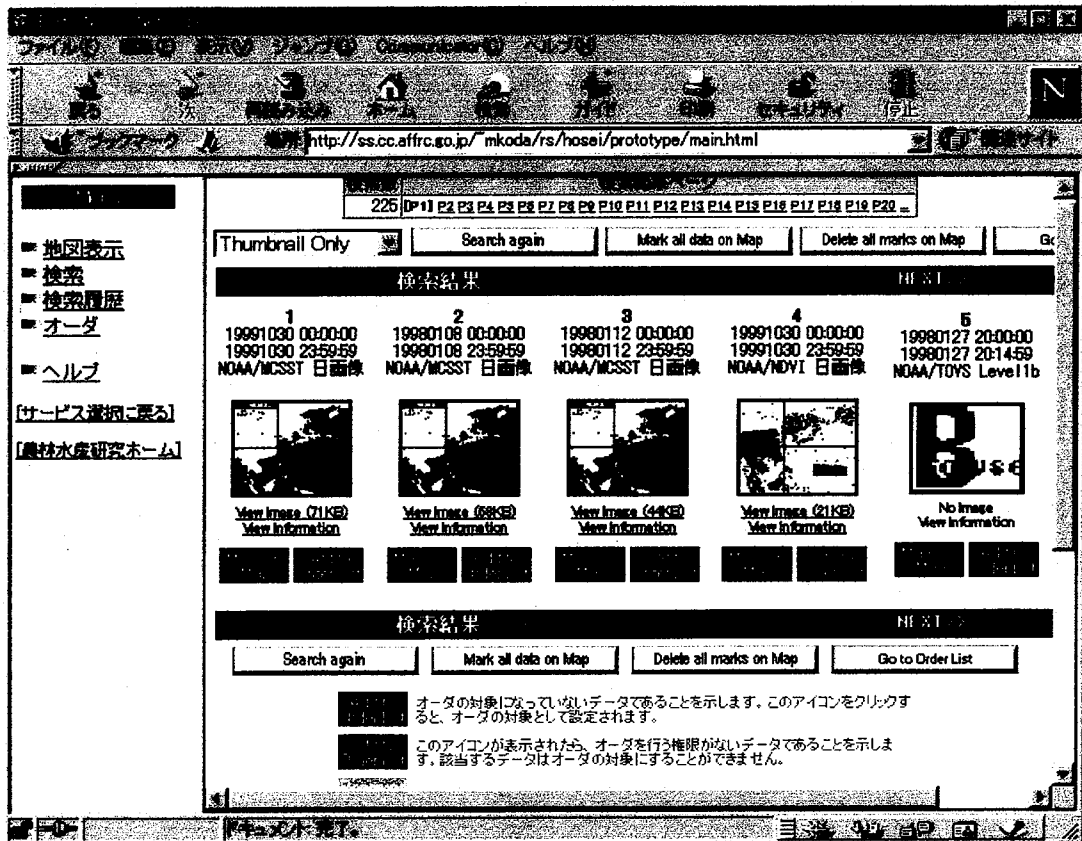
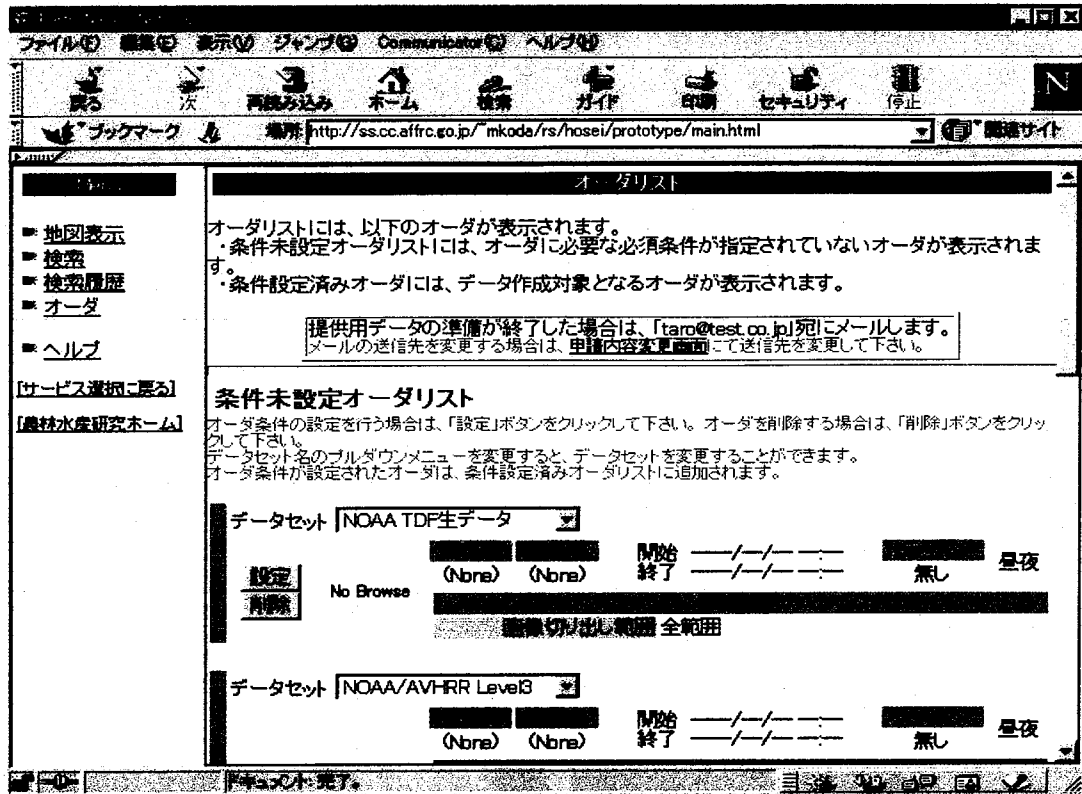


Fig. 2 A search sample using this system

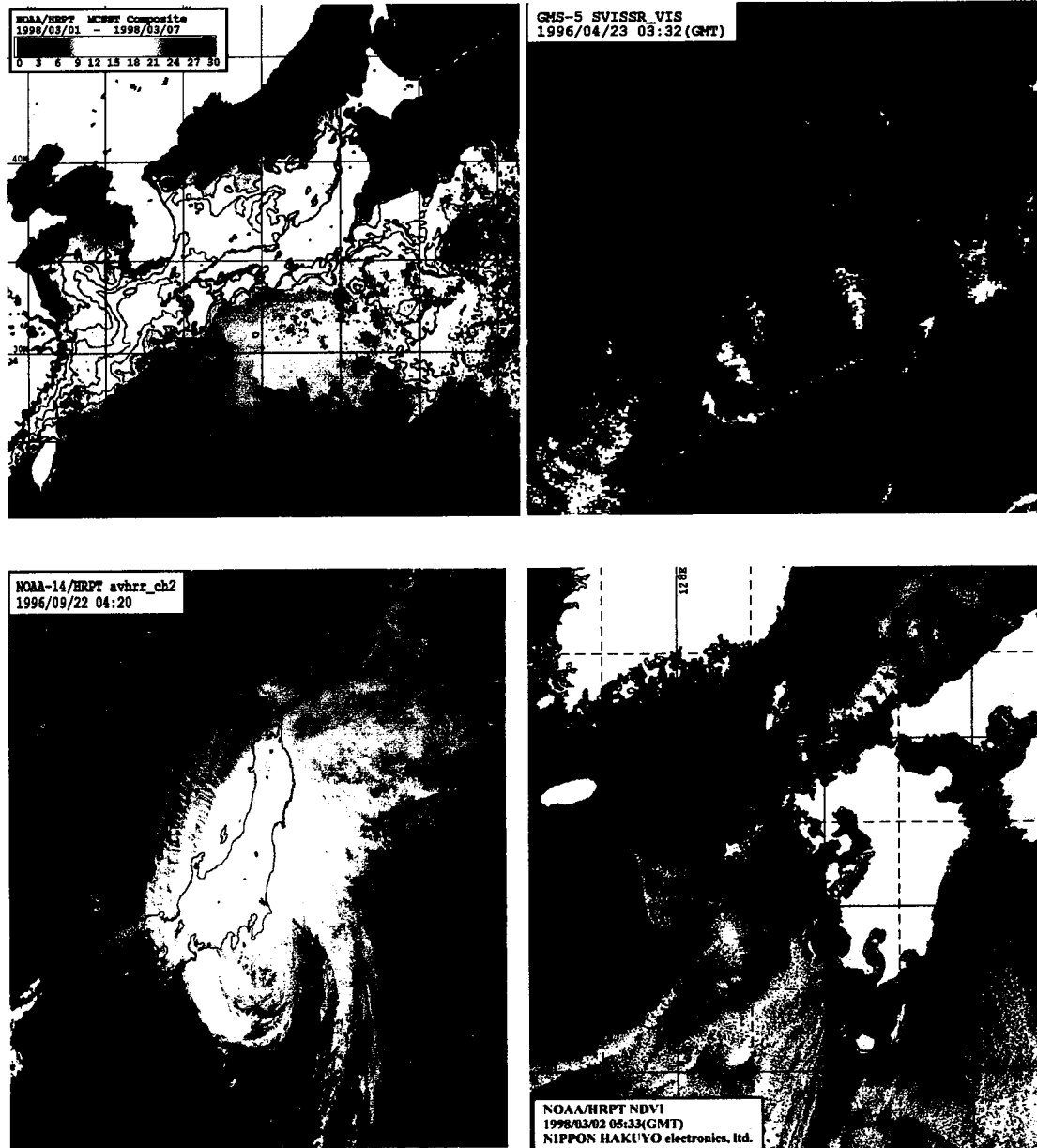


Fig. 3 Some data samples in this search system

異なる環境条件下でのワタとダイズの葉温と蒸散の反応

磯田昭弘 (千葉大学園芸学部)

安田嘉純 (千葉大学環境リモートセンシング研究センター)

Transpiration and Leaf Temperature of Cotton and Soybean under Different Climatic Conditions: Akihiro ISODA and Yoshizumi YASUDA* (*Faculty of Horticulture, Chiba University, *Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University*)

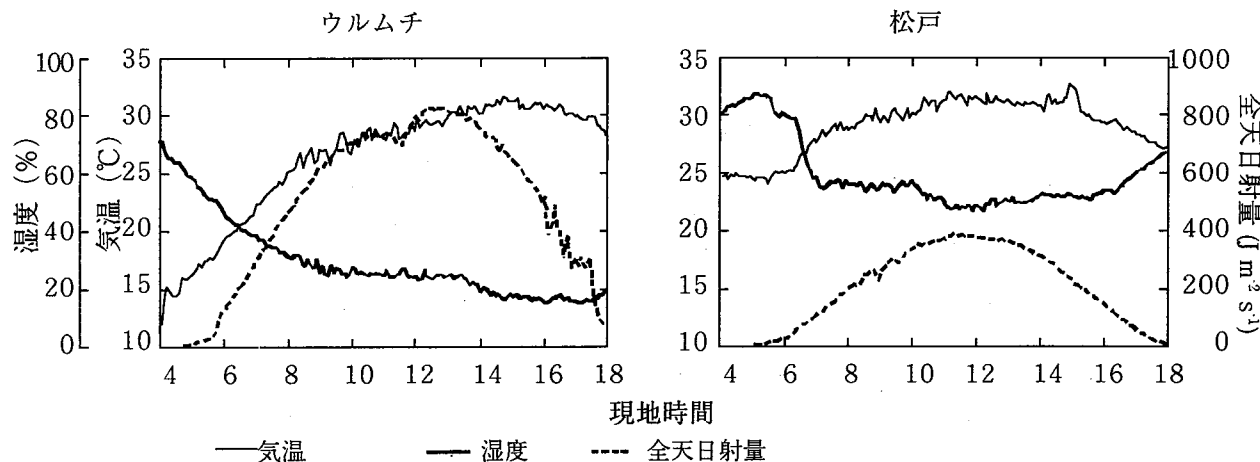
Abstract: Adaptability of cotton and soybean, which are known as leaf moving crops responding to the sun ray, for different climatic conditions were examined in terms of leaf temperature and transpiration. Cotton and soybean were grown in the arid (Urumqi, Xingjiang, China) and the wet (Matsudo, Chiba, Japan) conditions. In Urumqi, leaf temperature of the cotton cultivars was greater than that of the soybean cultivar and the air temperature during the morning. The cotton cultivars had greater transpiration rates as compared to the soybean cultivar, with responding to the value of vapor pressure deficit. In Matsudo, there was no large difference among the cotton, soybean cultivars and the air temperature. Transpiration rates of the soybean cultivars were greater than those of the cotton cultivars in the wet conditions. Leaves of cotton moved diaheliotropically to the sun ray during the daytime, although soybean moved leaves paraheliotropically during the mid-day. Cotton seemed to adapt for the arid conditions with high transpiration ability, as compared to soybean.

ワタとダイズは太陽光線に対して葉面角度を変化させる葉の調位運動を行うことが知られている。一般に植物は蒸散による気化熱により葉温の上昇を抑えているが、マメ科植物では日中、太陽光線を避ける葉の調位運動 (Paraheliotropic movement) によっても葉温の調節を行っていることが明らかになっている (Isoda et al. 1994, 1996)。一方、ワタでは同じ葉の調位運動でも一日中太陽光線に対して垂直になろうとする運動 (Diaheliotropic movement) を行っており (Lang 1973; Fukai and Loomis 1976)、むしろ逆に葉温の上昇を招きかねない。葉の調位運動は環境条件により大きな影響を受けており、特に

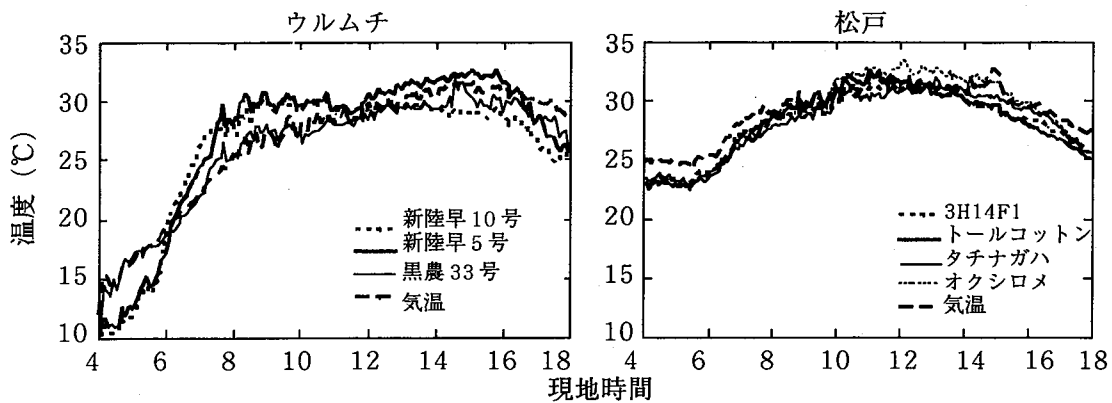
水分状態によって変化することが知られている (Oosterhuis et al., 1985; Prichard and Forseth, 1988; Forseth, 1990; 王ら, 1993)。そこで本研究では、ワタとダイズを乾燥地域と湿潤地域で栽培し、その葉温と蒸散速度をモニターし、環境条件との関係について調査することにより、環境条件に対する両作物の適応能力について検討した。

材料と方法

試験は、乾燥地として中国新疆ウイグル自治区ウルムチ市の新疆農業大学の試験圃場、および湿潤地として千葉県松戸市の千葉大学園芸学部の実験圃場



第1図. ウルムチ (7月24日) と松戸 (9月2日) の気象条件.



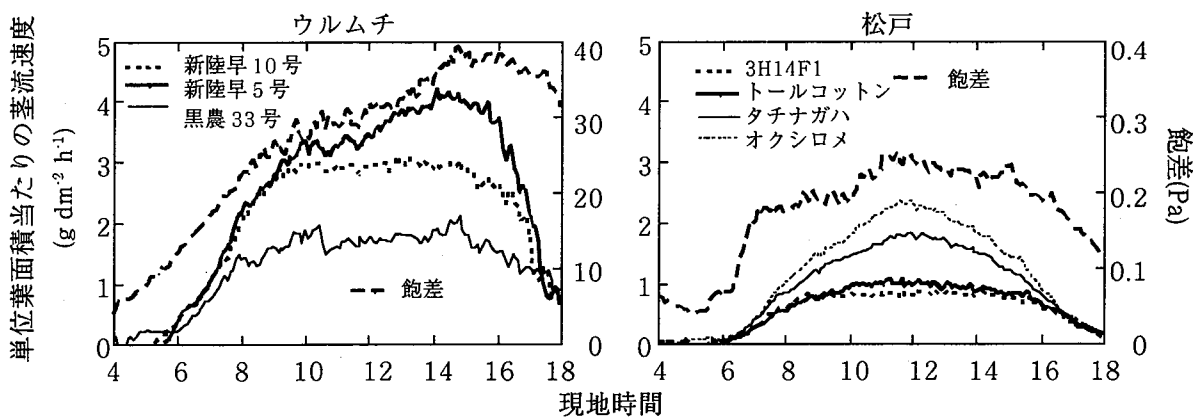
第2図. 葉温の推移.

で行った. 供試材料は、ウルムチではワタが新陸早5号、新陸早10号、ダイズが黒農33号で、畦間70cm、株間30cmに植え付けた. 松戸ではワタが3H14F1、トールコットン、ダイズがタチナガハ、オクシロメで、畦間60cm、株間30cmに植え付けた. 調査はウルムチでは7月25日に、松戸では9月2日に行った. 葉温は最上層の3枚の葉の裏側に熱電対を取り付け、蒸散速度は1品種1個体につき茎基部に茎流センサー (Dynamax社、ダイナゲージ) を取り付け、1分間隔でデータロガー (江藤電気、サーモダックE) で記録した. 同時に全天日射量、気温、湿度についても測定した. それぞれのデータは5分間の平均値で表し、葉温については3枚の葉温の平均値を表示した. ウルムチでは7月25日に、松戸では9月10日に、日没後それぞれの品種の群落最上層の50枚の葉表面に簡易積算日射計フィルムを貼り付け、翌日2日間の葉面受光量を測定した.

結果

大気中の湿度はウルムチが1日中低く推移し、日中は20%以下であった (第1図). 松戸では常に高く50%以上の値であった. 最高気温はそれほど大きな違いはなかったが、ウルムチでは夜温が低く、朝急速に上昇し、ピークは15時前後であったのに対し、松戸では変動が少なく日中は30℃前後で推移した. 全天日射量はウルムチが高く最大値は800Jm²s⁻¹で、松戸のおおよそ2倍であった.

ウルムチでは、ダイズの黒農33号の葉温は日中気温とはほぼ同様の推移をしたが、夕方になると気温より高くなった (第2図). ワタの葉温は午前中気温に比べ3~5℃高く推移し、常にダイズより高い値となった. 松戸ではワタの3H14F1が午前中高くなり、ダイズのオクシロメが10時から14時頃まで若干高く推移したが、ウルムチに比べ両作物とも気温との余り差が無く推移した.



第3図. 単位葉面積当たりの茎流速度の推移.

第1表. 簡易積算日射計による群落最上葉の平均受光量と最大値 (MJ m² d⁻¹).

ウルムチ	平均		最大		松戸	
	平均	最大	平均	最大	平均	最大
ワタ					ワタ	
新陸早 5 号	9.39a	10.85			3H14F1	8.45a 10.24
新陸早 10 号	10.25a	12.57			トールコットン	7.83b 10.33
ダイズ					ダイズ	
黒農 33 号	6.62b	10.51			タチナガハ	6.03c 8.27
					オクシロメ	6.44c 7.97
全天日射量	11.11				8.09	

平均値の後のアルファベットはダンカンのMRT (p=0.05) による有意差検定.

単位葉面積当たりの蒸散速度は、ウルムチではワタの2品種がダイズに比べ常に高い値で推移していた(第3図). ダイズの黒農33号とワタの新陸早10号では、日の出とともに上昇し、9~10時にほぼ一定となり、夕方減少した. 新陸早5号では10時以降も緩やかに14時頃まで増加し続け、その最大値はダイズの黒農33号の2倍以上となった. 蒸散速度は飽差の推移とよく似たパターンを示し、特に新陸早5号での夕方までの推移の仕方は同様であった. 松戸においてはウルムチとは逆にダイズ2品種がワタ2品種よりも高い値で推移し、いずれの品種も12時頃にピークに達した. 松戸でのダイズの値はウルムチでの値とほぼ同程度であったが、ワタでは約3分の1の値であった. ダイズのオクシロメが最も大きな値となり、ワタの2品種は0.1Pa以下の値で推移した. 飽差も12時頃にピークとなったが、特にダイズ、ワタの推移の仕方と同様ではなかった.

第1表に簡易積算日射計によって測定した群落最上層の葉面の受光量を示した. ウルムチでは、ダイズの葉面受光量は全天日射量の3分の2程度の6.62 MJ m⁻² d⁻¹であった. ワタでは10 MJ m⁻² d⁻¹前後で、ほぼ全天日射量と同程度、ダイズの1.5倍程度の値を示した. 松戸においてもワタが全天日射量とほぼ同程度となり、ダイズの値を上回った. ワタの最大値は全天日射量より大きくなり、Diaheliotropicな運動を行っていた.

気孔についてみると、ウルムチでは気温の最も高かった16時にはダイズの気孔は堅く閉じていたのに対し、ワタでは両品種とも完全に閉じていないものが多かった. 松戸においてはオクシロメで閉じ

ているものがあつたが、タチナガハおよびワタの2品種は完全に開いているのが観察できた.

論議

ダイズ群落上層の葉は、昼間太陽光線を避けるParaheliotropicな調位運動を行っていた. 特に乾燥地で太陽光線の強いウルムチにおいても葉温の上昇を防いでいた. 一方、ワタの上層の葉は一日中Diaheliotropicな調位運動を行っていたことが認められた. Diaheliotropicな調位運動は受光量を増大させる効果を持ち、乾物重の増大可能性を上げるが(Isoda et al., 1994)、葉温の上昇を招くことにもなる. ダイズのようにParaheliotropicな調位運動を行い葉温を下げているものもあるが、ワタではむしろDiaheliotropicな調位運動を行っていたことから、この調位運動を続けるためにはさらに高い蒸散能力による葉温の低下が必要となる. この点から考えて、乾燥条件下でワタは非常に高い蒸散能力を示し、葉温の上昇を防ぎ乾燥地域に適応していることがうかがえた. 耐乾性に関して、根の量より深さの方がより関係が深いことが示されている(Reicosky and Deaton, 1979). 本実験では根の形態について調査しなかったが、松戸に比べウルムチにおけるワタの根は大変発達していることが認められた. ワタの乾燥地域での高い蒸散能力はこの発達した根系によって支えられているものと考えられる.

ダイズにおいてはウルムチ、松戸ともそれほど大きな値の違いは見られなかったが、松戸におけるワタの蒸散速度は、ウルムチに比べ大変小さくなっていた. 気孔についてみるとワタは松戸においてはウ

ルムチに比べより大きく開いていた。一般的に蒸散速度の制御は2つの段階があることが知られている。気孔の開閉によるガス拡散の制御と気孔内孔と大気中のガス濃度勾配の差によるものである(Nanami et al., 1990)。ウルムチでは飽差に反応して蒸散速度が変化していた。また、松戸においては飽差が小さいため、気孔が開いていたのにも関わらず蒸散速度が小さくなっていた。このことから、ワタは主に飽差、すなわち気孔内孔と大気中のガス濃度勾配の差によって蒸散速度が制御されているものと考えられる。一方ダイズにおいては、飽差が大きくなると気孔が閉鎖するが、気孔は開いているにも関わらず飽差の小さい松戸でも蒸散速度はそれほど高くないことから、もともと蒸散能力はワタに比べ高くないものと思われる。このようにワタとダイズは環境条件に対する反応は全く異なり、特にワタは蒸散能力の点からみても乾燥条件によく適応していることが認められた。

引用文献

- Forseth, I. N. 1990. Function of leaf movements. In Satter, R. L. et al. eds., *The pulvinus: Motor organ for leaf movement*. Amer. Soc. Plant Physiol., Rockville, 238-261.
- Fukai, S. and Loomis, R. S. 1976. Leaf display and light environments in row-planted cotton communities. *Agric. Meteorol.* 17:353-379.
- Isoda, A., Yoshimura, T., Ishikawa, T., Nojima, H. and Takasaki, Y. 1996. Effects of leaf movement on radiation interception in field grown leguminous crops. III. Relation to leaf temperature and transpiration among soybean cultivars. *Jpn. J. Crop Sci.* 63: 657-663.
- Isoda, A., Aboagye, L. M., Nojima, H. and Takasaki, Y. 1996. Effects of leaf movement on radiation interception in field grown leguminous crops. IV. Relation to leaf temperature and transpiration among peanut cultivars. *Jpn. J. Crop Sci.* 65:700-706.
- Lang, A. R. G. 1973. Leaf orientation of a cotton plant. *Agric. Meteorol.* 11:37-51.
- Nonami, H., Schulze, E. D. and Ziegler, H. 1990. Mechanisms of stomatal movement in response to air humidity, irradiance and xylem water potential. *Planta* 183:57-64.
- Oosterhuis, D. M., Walker, S. and Eastham, J. 1985. Soybean leaflet movement as an indicator of crop water stress. *Crop Sci.* 25:1101-1106.
- Prichard, J. M. and Forseth, I. N. 1988. Rapid movement, microclimate, and water relations of two temperate legumes in three contrasting habitats. *Amer. J. Bot.* 75:1201-1211.
- Reicosky, D. C. and Heatherly, L. G. 1990. Soybean. In Stewart, B. A. et al. eds., *Irrigation of agricultural crops*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, 639-674.
- 王培武・磯田昭弘・魏国治 1993. 乾燥条件下におけるダイズの生育と適応 第1報 葉の調位運動の実態と葉温について. *日作紀* 62:401-407.

PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center): その概要*

Preliminary Global Imager Experiment at Environmental Research Center, University of Tsukuba (PGLIERC): Its Overview*

樋口篤志¹・西田顕郎²・飯田真一³・新村典子⁴・近藤昭彦⁵
Atsushi HIGUCHI, Kenlo NISHIDA, Shin-ichi IIDA, Noriko NIIMURA, and Akihiko KONDOH

¹理博 千葉大学特別研究員 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)

²農博 筑波大学講師 農林工学系 (〒305-8572 つくば市天王台1-1-1)

³筑波大学大学院 地球科学研究科地理学水文学専攻 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁴理博 筑波大学準研究員 水理実験センター (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

⁵理博 千葉大学助教授 環境リモートセンシング研究センター (〒263-8522 千葉県稲毛区弥生町 1-33)

リモートセンシング技術の水文学への応用はこれまで多く行われてきている。本研究では来年打ち上げ予定のADEOS-II/GLIに注目し、水文・リモートセンシング観測 (PGLIERC: Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center) を行った。PGLIERCの目的は以下の4点である; 1) GLI, MODISのような多バンド衛星で、どのような地上物理量を推定できるか検証する。2) これまでの衛星データから得られた水文学的知見の妥当性を再検討する。3) 植生指標と地表面温度の組み合わせが、植物の成長、土壌水分の変化に伴いどのような変動を示すか、“実スケール”で検証する。4) 植生の成長に伴う、BRDFモニタリングおよびそのモデリング。また、PGLIERCは以下の6つの観測からなる; 1) 気象・水文要素定常観測, 2) 定点観測, 3) 移動観測, 4) バイオマス計測, 5) タワー観測, 6) BRDF観測

キーワード: PGLIERC, リモートセンシング, GLI, 草地, 植生指標

1. はじめに

リモートセンシング技術の水文学への応用 (例えば, Sellers *et al.*, 1996¹⁾; Choudhury, 1991²⁾) は、これまで多く行われてきている。リモートセンシングデータの応用には、可能性と限界点があるが、ここ1年の間に日本からADEOS-II/GLI (略語は全て本稿末に記載されている補足を参照のこと)、アメリカではEOS-AM/MODISが打ち上げられ、現在運用されているNOAA/AVHRR, Landsat/TM, SPOT/HRV等と併せて、まさに現在は“地球観測時代”といえる。これらの衛星群から得られるデータを、水文学分野で有効活用するためには、アルゴリズム開発が急務である。

GLIやMODISに代表される、新規搭載センサーの特徴として、より多くのバンド (チャンネル) を持ちつつ、高い観測頻度を保つ点が挙げられる (Table 1)。これらのチャンネル情報をうまく組み合わせることで、新たな指標を導き出せる可能性がある (例えば, Hayashi *et al.*, 1998³⁾)。しかし、衛星データを水文情報として扱うためには地上検証 (Ground Truth) が必要不可欠である。

Table 1 A comparison of the specifications of GLI with those of MODIS

	GLI	MODIS
No. of Bands	36	36
Swath Width	1600 km	2300 km
Resolution	250m, 1km	250m to 1km
Altitude	803 km	705 km

これまでの地上観測では、数回の衛星通過時のみ地上観測を行い、衛星データとの比較を行う例が非常に多かったが、最近では、植物季節 (フェノロジー) あるいは季節変化に基づいた長期 (数ヶ月~数年) 観測が非常に有効かつ必要である (樋口・近藤, 2000^{1b)})。PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center) はそのような視点に基づき、GLI・MODISを意識した水文・リモートセンシング観測として計画された。

PGLIERCの目的は以下の4点に要約される:

* 本論文は日本水文学会誌に投稿中の原稿を再構成したものである。

- 1) GLI, MODISのような多バンド衛星で、どのような地上物理量を推定できるか検証する。
- 2) これまでの衛星データから得られた水文学的知見の妥当性を、特にフェノロジーに着目し、再検討する。
- 3) 植生指標と地表面温度の組み合わせ(西田ほか, 2000²⁰⁾) が、植物の成長, 土壌水分の変化に伴いどのような変動を示し, 水文学, 特に大気-陸面相互作用にどう応用できるか検討する。
- 4) 植生の成長に伴う, BRDFモニタリングおよびそのモデリング。

本稿では, PGLIERCの観測概要, 観測結果の一部, 及び今後本観測で得られる知見について速報的に報告する。

2. 観測概要

(1) 観測サイト

本観測サイトは筑波大学水理実験センター熱収支・水収支実験圃場である。ここは直径160mの円形の草地で (Fig. 1), C3植物(セイタカアワダチソウ, ヨモギ等), C4植物(メリケンカルカヤ, チガヤ等)が混在する(戸田, 1997¹¹⁾; 田中・及川, 1998¹⁰⁾)。土壌は天地返しの影響を受け, 表層では明褐色の粘質土壌であり, 間隙率は約70%である(濱田ほか, 1998¹³⁾)。

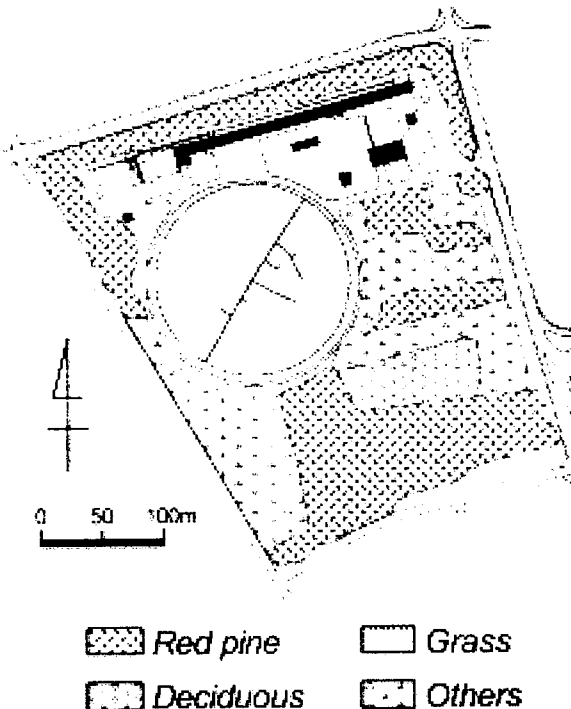


Fig. 1 Study site

圃場中央には30mの気象観測タワーが設置され, 気象・水文要素が定期的に計測されている(鳥谷ほか, 1989¹²⁾)。PGLIERCのような水文・リモートセンシング観測では, 定期的な熱収支・水収支観測と, タワー頂部からの衛星の代替センサー(リモートセンサー)による地表面情報取得が必要不可欠であり, このようなサイトは, 本観測では絶好のサイトである。

(2) PGLIERC

PGLIERCは, 大きく分けて以下の6つの観測要素からなる (Fig. 2)。

- 1) 気象・水文要素定常観測
- 2) 定点観測
- 3) 移動観測
- 4) バイオマス計測
- 5) タワー観測(リモートセンサーによる観測)
- 6) BRDF観測

それぞれの観測項目について, 以下に説明する。

(2.1) 気象・水文要素定常観測

筑波大学水理実験センター, 熱収支・水収支実験圃場では, 気象・水文要素が定期的に30項目計測されている。

これらの観測結果より, 蒸発散速度等, 必要なデータが算出可能である。なお, 定常観測システムの詳細については鳥谷ほか(1989)¹²⁾を, 観測項目については新村・杉田(1998)¹⁹⁾をそれぞれ参照されたい。

(2.2) 定点観測

定点観測は, 草地内の1地点において行われている (Fig. 3)。観測項目は以下の通りである(カッコ内は観測測器)：

- ・上向き, 下向き短波放射 (EKO, MK-22)
- ・上向き, 下向きPAR (PREDE, PAR-01)
- ・放射温度 (Everest, 4000A)
- ・体積含水率 (Campbell Sci., Inc., CS 615)

上記の観測項目が, 平均化時間15分でデータロガーに取得される。取得データは1997年より集中観測システム(樋口・杉田, 1998¹⁵⁾; 樋口ほか, 1999a¹⁶⁾)を用いて, 以下のURLに準リアルタイムで公開している(1999年10月現在)：

<ftp://www2.suiri.tsukuba.ac.jp/Datalogger/>

(2.3) 移動観測(グリッド観測)

実験圃場南東部に縦(中心から周縁)に8m間隔で6本(40m), 横方向に5m間隔で5本(20m), 計30のグリッドを設置した。各グリッド毎に50cm角で囲い(コドラート)を施し, 以下の項目を1~2週に1度計測した：

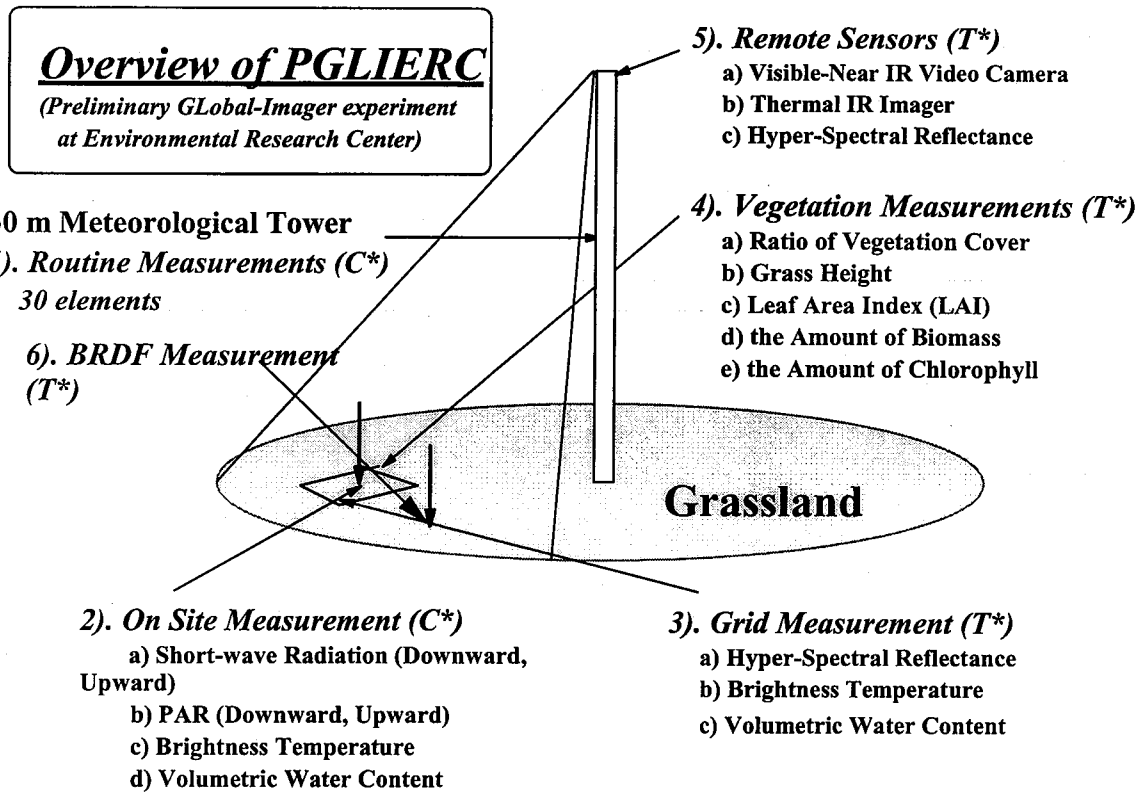


Fig. 2 Overview of PGLIERC. *C indicates the continuous experiment, T represents the temporal measurement.



Fig. 3 PAR Radiometer

- ・可視～近赤外分光反射スペクトル (Spectron Engineering, Inc., SE590 ; 測定波長 : 396～1073 nm, 測定間隔 : 約2nm)
- ・放射温度 (ミノルタ505 ; 測定波長 : 8～14 μm, 射出率 : 0.98で固定)
- ・体積含水率 (Campbell Sci., Inc., CS 615, および IMKO Inc., TRIME-FM)

(2.4) バイオマス計測

以下の物理量を1～2週に1度計測した。

- ・草丈 : 各コードラートに対し, 草種, 本数, 草丈を全て実測した。
- ・植被率 : 各コードラートに対し, 真上よりデジタルカメラで撮影し, 教師付き分類法で計算した。
- ・LAI : 各草種に対し, 刈り取りを毎回5本程度行い, それぞれの草丈と葉面積を測定し, 成長曲線 (草丈-葉面積の関係) を求めた。草丈データにこの成長曲線を当てはめ, LAIを推定した。
- ・バイオマス : LAIとバイオマスとの関係 (例えば, 田中・及川, 1998¹⁰⁾) より推定した。
- ・クロロフィル量 : SPADメーターを用いて, 各草種約5株, 各株約5葉について計測した。一方, 実験室でアセトンによる抽出を行い (Lichtenthaler, 1987⁹⁾), 実際のクロロフィル量を計測して較正曲線を作成し, SPAD値をクロロフィル量に換算した。

(2.5) タワー観測 (リモートセンサー)

圃場中央の30mタワー頂上より, 以下の4項目を測定した :

27 Apr., 1999

12 Jun., 1999

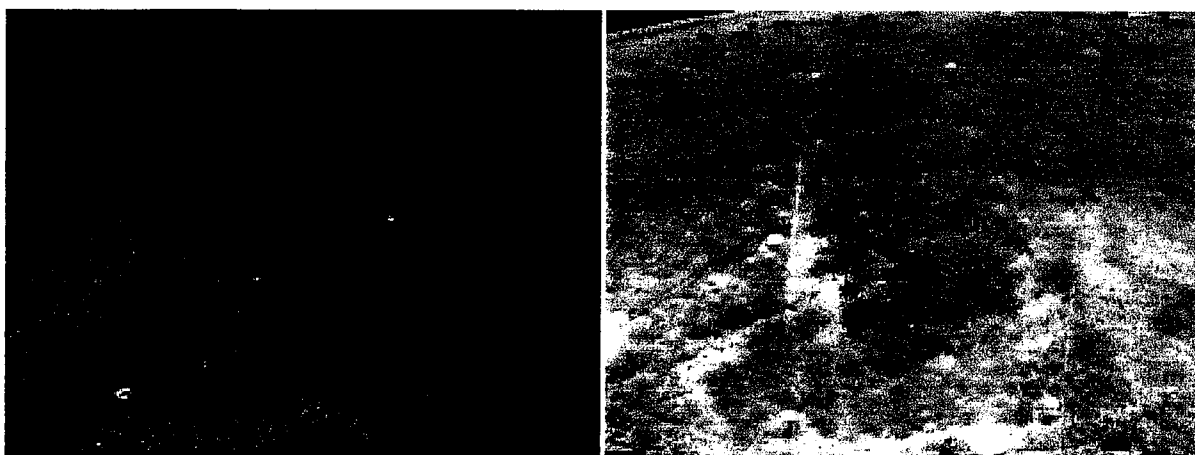


Fig. 4 Examples of the captured images derived from visible and NIR video camera (SILVACAM).

- ・可視・近赤外面像 (Fig. 4; SILVACAM : 樋口・近藤, 1998¹⁴⁾を参照)
- ・熱映像 (JEOL/日本電子, JTG-6300)
- ・可視～近赤外分光反射スペクトル
- ・可視画像 (Fuji Film Inc., FinePix 500)

全ての観測は定点観測地点を中心として行った。

(2.6) BRDF観測

地表面の反射特性は光源 (太陽) 方向と観測方向の両方に依存する (例えば, Asrar, 1989¹¹⁾)。BRDF (双方向反射分布関数) はその様子を表すものであり, BRDF観測から地表面の構造, 特にLAIや葉の角度分布などが推定できる可能性が指摘されている (例えば, Knyazikhin *et al.*, 1998⁴⁾)。

ここでは, 草の成長に伴うBRDFの変化を調べるために, 1m四方のコドラートを設け, 不定期に観測を行った。長さ3mの可動式アームの先端に分光放射計を取り付け, 太陽方位を含む鉛直面内

(*principal plane*) と, それに直交する鉛直面内のそれぞれで, 鉛直下向きを0度とし, ± 60 度の範囲を10度間隔で観測した (Fig. 5)。



Fig. 5 An example of the BRDF measurement by spectrometer

上記した予測知見は, 詳細な解析・考察の後, 随時発表予定である。

また, PGLIERCの観測結果は全て, インターネット及びCD-ROMでの公開を目指している。参加者以外の研究者がPGLIERCのデータセットを用いて, 新たな知見を導き出すことを期待する。

3. PGLIERCで予測される知見, 今後の展望

PGLIERCから以下の知見が予測される ;

- ・植生指標から群落抵抗の推定 (Verma *et al.*, 1993⁸⁾のさらなる検証)
- ・植生指標と地表面温度の組み合わせの地上検証, 及びその妥当性 (Nemani and Runnig, 1989⁶⁾)
- ・複数の測定手法によるフェノロジーモニタリング およびフェノロジーと蒸発散量との関連 (樋口・近藤, 2000¹⁸⁾のさらなる検証)
- ・GLIデータを用いた新しい指標, アルゴリズムの構築

4. 終わりに

現在, 研究分野の細分化への反省から研究領域の総合化が図られつつある。PGLIERCの出発点は, ベースを異にする著者らの (樋口: 理学, 西田: 農学) 率直な意見交換にある。今後このような観測をきっかけとし, 広い領域を網羅した共同研究, しかもそれぞれが対等な立場での研究が多く行われることを期待したい。

謝辞：本観測の主旨を理解し、協力して下さった筑波大学水理実験センターの皆様に対し、感謝の意を表します。また、Fig. 1は筑波大学地球科学系・濱田洋平博士より提供していただいた。なお、本観測は千葉大学環境リモートセンシング研究センターの支援を受け、概要は1999年水文・水資源学会研究発表会¹⁾にて発表した。

補足 (略語解説)

ADEOS: Advanced Earth Observation Satellite
AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer
BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function
EOS: Earth Observing System
GLI: GLobal Imager
HRV: High Resolution Visible
LAI: Leaf Area Index
MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NIR: Near-InfraRed
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA Satellites
PAR: Photosynthesis Active Radiation (Visible)
SPOT: Systeme Probatoire d'Observation de la Terre

参考文献

- 1) Asrar, G., Ed.: *Theory and application of optical remote sensing*. Wiley, New York, NY, 734 pp, 1989.
- 2) Choudhury, B. J.: Multispectral satellite data in the context of land surface heat balance. *Rev. Geophys.*, **29**, 217-236, 1991.
- 3) Hayashi, A., K. Muramatsu, S. Furumi, Y. Shiono, N. Fujiwara, and M. Daigo: An algorithm and a new vegetation index for ADEOS-II/GLI data analysis. *J. Remote Sens. Soc. Japan*, **18**, 28-50, 1998.
- 4) Knyazikhin, Y. V., J. V. Martonchik, R. B. Myneni, D. J. Diner, and S. W. Running: Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *J. Geophys. Res.*, **103** (D24), 257-275, 1998.
- 5) Lichtenthaler, H. K.: Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, **148**, 350-382, 1987.
- 6) Nemani, R. R., and S. Running: Estimation of surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *J. Appl. Meteorol.*, **28**, 276-284, 1989.
- 7) Sellers P. J., S. O. Los, C. J. Tucker, C. O. Justice, D. A. Dazlich, G. J. Collatz, and D. A. Randall: A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate*, **9**, 706-737, 1996.
- 8) Verma, S. B., P. J. Sellers, C. L. Waktall, J. F. G. Hall, J. Kim, and S. J. Goetz: Photosynthesis and stomatal conductance related to reflectance on the canopy scale. *Remote Sens. Environ*, **44**, 103-116, 1993.
- 9) 近藤昭彦: 草本群落の分光反射輝度と蒸発散量の関係. *水文・水資源学会誌*, **11**, 599-602, 1998.
- 10) 田中克季・及川武久: 水理実験センター内円形圃場草原におけるC3・C4植物のLAIの季節変化(1996, 1997). 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 87-90, 1998.
- 11) 戸田求: 草原群落・大気間のCO₂/H₂O交換過程の季節変化に関する実験的研究. 筑波大学大学院修士課程環境科学研究科修士論文, 89 pp, 1997.
- 12) 鳥谷均・川村隆一・嶋田純・谷口真人・西本貴久: 気象日報作成装置新システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 13号, 147-158, 1989.
- 13) 濱田洋平・A. R. インドラ F.・田中正: 筑波大学水理実験センター内アカマツ林および熱収支・水収支観測圃場における土壌の物理特性. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 1-10, 1998.
- 14) 樋口篤志・近藤昭彦: 可視-近赤外ビデオカメラによる琵琶湖プロジェクト'96での水田観測. *水文・水資源学会誌*, **11**, 382-386, 1998.
- 15) 樋口篤志・杉田倫明: 筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 91-94, 1998.
- 16) 樋口篤志・杉田倫明・飯田真一: 筑波大学水理実験センター水収支・熱収支観測圃場における、新・特別観測用データ収録システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 24号, 135-141, 1999a.
- 17) 樋口篤志・西田顕郎・宮本みちる・飯田真一・近藤昭彦: 筑波大学・水理実験センター熱収支・水収支観測圃場におけるリモートセンシング・水文観測について - 次世代地球観測衛星 ADEOS-II・GLI(Global Imager)を見据えて-. *水文・水資源学会1999年研究発表要旨集*, 162-163, 1999b.
- 18) 樋口篤志・近藤昭彦: 草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性および植生指標との関係, II. 衛星から得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性と地表面フラックスの関係. *水文・水資源学会誌*, 2000 (投稿中).
- 19) 新村典子・杉田倫明: 熱収支・水収支観測資料, 一1997年一. 筑波大学水理実験センター報告, 23号, 103-136, 1998.
- 20) 西田顕郎・樋口篤志・松田咲子・近藤昭彦: VI-Ts法: 分光植生指標と表面温度に基づく, 地表面過程のリモートセンシング. *水文・水資源学会誌*, 2000 (投稿中).

(1999年11月26日 受理)

Preliminary Global Imager Experiment at Environmental Research Center, University of Tsukuba (PGLIERC): Its Overview

Atsushi HIGUCHI¹, Kenlo NISHIDA², Shin-ichi IIDA³,
Noriko NIIMURA⁴, and Akihiko KONDOH¹

¹Dr. Ph., Center for Environmental Remote Sensing (CEReS), Chiba University
(Yayoi 1-33, Inage, Chiba 263-8522, Japan)

²Dr. Agri., Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba
(Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan)

³Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba (Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan)

⁴Dr. Ph., Environmental Research Center, University of Tsukuba
(Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan)

1. INTRODUCTION

Applications of the remote sensing technologies to hydrological processes have been an important subject in hydrological studies. However, it is difficult to determine that a great success in these applications has been achieved until now.

This study focused on GLI (Global Imager) boarded on ADEOS-II (Advanced Earth Observation Satellite-II) which would be launched in 2000, and carried out a preliminary ground-based experiment, so-called "PGLIERC (Preliminary GLObal Imager experiment at Environmental Research Center)". PGLIERC has four main objectives;

- 1) To validate of inferring the physical data on the ground using multi-spectral satellite data
- 2) To reconsider the knowledge about relationship between satellite data and ground-based data (especially the knowledge of hydrological aspects)
- 3) To monitor the temporal variations in the combinations of Vegetation Indices (VIs) and surface temperature (Ts) at "real scale"
- 4) Bi-directional Reflectance Distribution Function (BRDF) monitoring with the growth of grass, and its modeling

2. OBSERVATION METHODOLOGIES

2.1 Study site

Study site is the experimental field within Environmental Research Center, University of Tsukuba, which vegetation is grass. This field has a 30 m meteorological tower, such situation is very good for the hydrological and remote sensing experiment (Fig. 1).

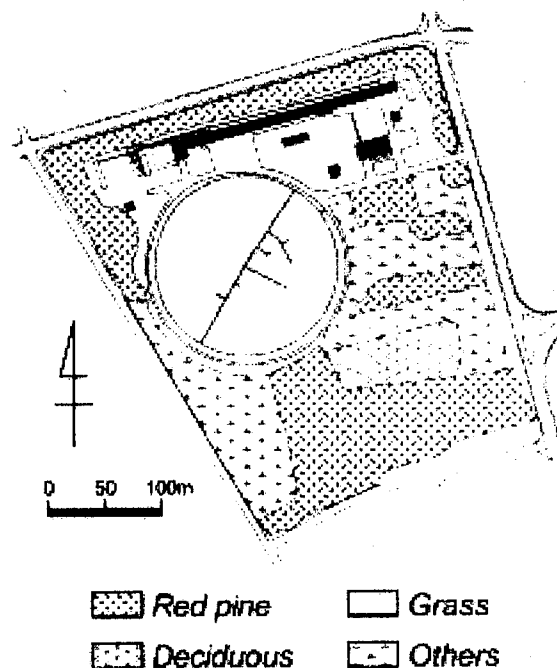


Fig. 1 Study area

2.2 Overview of PGLIERC

PGLIERC could be divided into six observation elements as follows (Fig. 2);

- 1) Routine meteorological / hydrological measurements.
- 2) On site measurements.
- 3) Moving measurements (grid measurements)
- 4) Biomass measurements.
- 5) Measurement from top of the tower.
- 6) BRDF measurement.

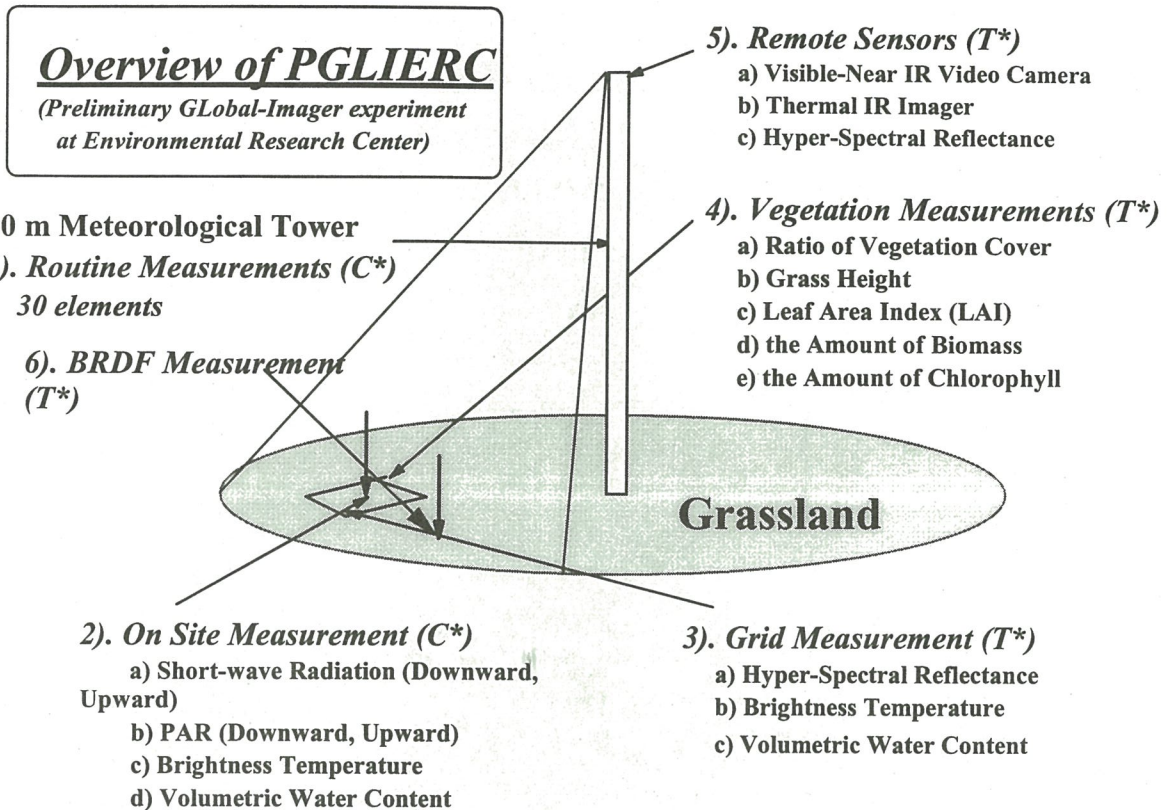


Fig. 2 Overview of PGLIERC . C indicates the continuous, T is temporal.

1). Routine measurements

In this experimental field, 30 elements included a turbulence measurement have been collected routinely.

2). On site measurements

These elements have been measured on site in this field, as follows;

- Downward and Upward Short-wave radiation.
- Downward and Upward PAR radiation.
- Brightness temperature.
- Soil moisture at 5 cm depth below the ground.

3). Moving measurements.

In this experiment, we make 30 grids, which intervals are 8 m (directions are from center to end of field), and 5 m (perpendicular directions), respectively, At each grid, we measured the elements as follows;

- Spectral reflectance from visible to near-IR.
- Brightness temperature
- Soil moisture

4). Biomass measurements

We measured biomass elements at each grid described above;

Grass height, fraction of vegetation cover, leaf area index (LAI), amount of biomass, amount of Chlorophyll.

5). Measurements from top of the tower.

We measured these elements as follows;

- Visible - near IR video images
- Thermal IR images.
- Spectral reflectance from visible to near-IR
- Digital images by digital camera (visible images)

6). BRDF measurements

We carried out BRDF measurements using instruments by hand made with spectrometer (see Fig. 5 in Japanese page).

Key words: PGLIERC, Remote sensing, GLI, Grassland, Vegetation indices

(Accepted 26 November, 1999)