

<プロジェクト 3: 衛星データと地上観測ネットワークによる放射収支の評価と大気パラメータの長期変動>

研究課題 多波長ラマンライダーとスカイラジオメーター観測に基づくエアロゾルによる放射強制力の見積もり

研究者 村山利幸 (東京海洋大学海洋工学)
中島映至 (東京大学気候システムセンタ)
関口美保 (東京海洋大学海洋工学部)

担当教官 久世宏明

概要:

東アジア域においては大陸からの多種多様な人為起源及び自然起源のエアロゾルが排出され、地球放射収支に無視できない影響を与えていると考えられる。本研究は、東京海洋大学で定常的にこなっている多波長ラマンライダー観測とスカイラジオメーター観測から得られるエアロゾルの消散係数、微物理量の鉛直分布を用いて放射伝達計算を行い、瞬時及び日平均の放射強制力を推定することを目的として行なった。最初の事例研究として、多波長ラマンライダーからのエアロゾルの光学データセット (355, 532nm での消散係数, 355, 532, 1064nm での後方散乱係数) から既に正則化法を用いたインバージョン解析を用いて微物理量 (有効平均半径, 単散乱アルベドなど: 図 1) が得られている 2003 年 5 月 21 日のシベリア森林火災の事例について放射伝達計算を行なった¹。この事例では図 1 に示されているように有効平均半径は約 $0.22 \mu\text{m}$, 532nm での単散乱アルベドは約 0.95 と蓄積モードが卓越していることと吸収が少ないことが特徴である。図 2 からライダーのインバージョンから得られた体積粒径分布はスカイラジオメーターから得られた気柱積算のそれと良く一致していることがわかる。スカイラジオメーターの解析から得られた 500nm での単散乱アルベドは約 0.95 でありライダーからの結果と良く一致した。

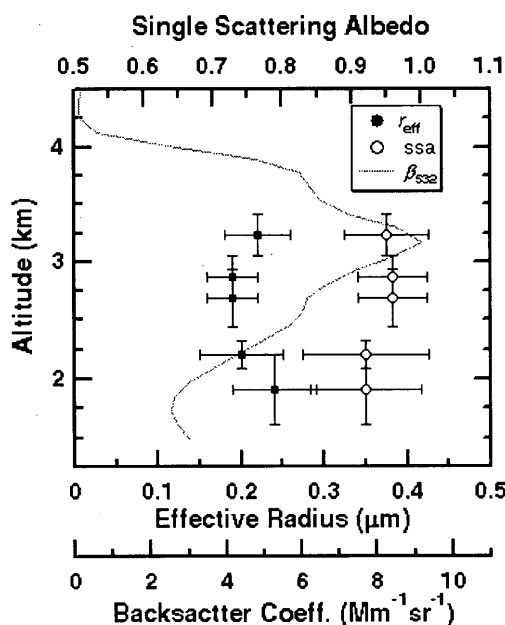


図 1. 2003/5/21 に得られたシベリア森林火災起源エアロゾルの微物理特性

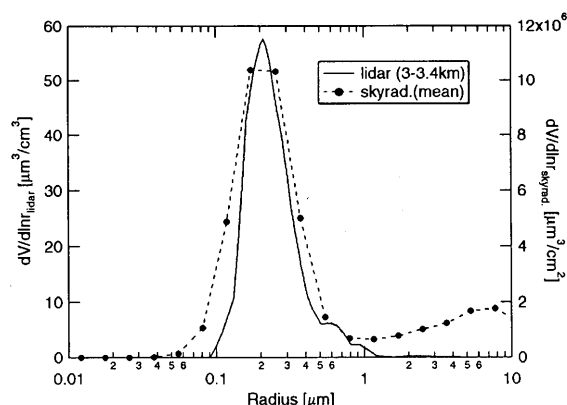


図 2. ラマンライダー及びスカイラジオメーターの各インバージョン解析によって得られた体積粒径分布

放射伝達計算には CCSR で開発された FSTAR5C を用い、大気密度・湿度の鉛直分布は館野におけるゾンデデータ(21JST)を用いた。また、エアロゾルの光学的厚さ及び消散係数の鉛直分布はライダーから得られた値(532nm, 図 4)を共通に用いたが、複素屈折率と粒径分布については次の 2 通りを考慮した。即ち、ライダーのインバージョンから得られた複素屈折率・粒径分布を用い高度依存性を与えるが(図 1), 複素屈折率の波長依存性はないとした場合(以下 lidar と呼ぶ)と、粒径分布と複素屈折率はスカイラジオメーターから得られた日平均値を用い、高度依存性はないが複素屈折率の波長依存性を持つとした場合(skyrad と呼ぶ)である。ここでは、これらの時間依存性を考慮せずに計算を行なった。図 3 は大気上端と地表面での短波領域 ($0.2\sim4.0\ \mu\text{m}$) における放射強制力の時間変化である。光路長が長く入射光が強く朝と夕方にピークを持つ。lidar と skyrad において、大気上端、地表面において $1\sim2\text{W/m}^2$ 程度の差が見られた。一日平均の放射強制力は大気上端(TOA)で lidar, skyrad のそれぞれで、 -39.0 , -41.2W/m^2 , 地表面では -51.1 , -50.2W/m^2 となった。532nm での光学的厚さが約 1.05 であるので強制力効率因子は約 50 となり、吸収が少ないことを反映して比較的小さい値となっている。図 4 は一日平均のエアロゾルによる加熱率の高度分布を示す。エアロゾルの消散係数の鉛直分布と比較すると、消散係数の大きい 3.2km 付近の直上に加熱率の差のピークが存在し、多重散乱・吸収によってその付近の大気層を暖めていることがわかる。また、複素屈折率の与え方の違いをみると、高度依存性を与えた lidar の方が加熱率の差の変化が大きく、大気各層に与える影響を詳細に示していると考えられる。

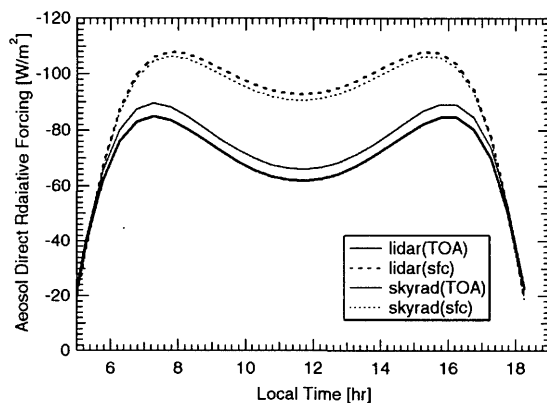


図 3. エアロゾルによる放射強制力の時間変化

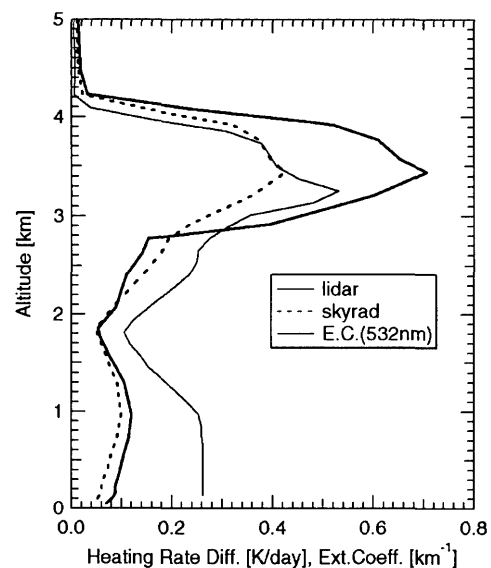


図 4. エアロゾルによる大気加熱率の日平均鉛直分布

1. T. Murayama, D. Müller, K. Wada, A. Shimizu, M. Sekiguchi, and T. Tsukamoto, Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23103, doi:10.1029/2004GL021105, 2004.

研究課題 GMS を用いた地表面エネルギーフラックス算出アルゴリズムの開発

研究者 石川裕彦（京都大学防災研究所）

奥勇一郎（京都大学大学院理学研究科博士後期課程 3 年次）

馬 耀明（中国科学院寒区旱区環境と工程研究所）

担当教官 竹内延夫・久世宏明

概要：

チベット高原はアジア地域の気候を支配するアジアモンスーンの形成に多大な影響を与えている。なかでも海拔高度が 4,000m を越える地表面の日射による加熱は対流圏中層の大気に直接熱的な影響を及ぼす。その高原全体からの寄与を考察するには、衛星データを用いて広い領域からの平均的な寄与を見積もる必要がある。Ma (2003) は NOAA/AVHRR を用いて領域地表面フラックスを算出したが、NOAA は極軌道衛星であるので観測時刻が限られ高原全体のその日変化をとらえることはできない。チベット高原では潜熱・顕熱フラックスの日変化の振幅が非常に大きい（Tanaka et al., 2001）、日変化が解像できる時間間隔で長期的に観測が可能な GMS-5（ひまわり）のような静止気象衛星のデータが必要不可欠である。

本研究では Su (2002) における NOAA/AVHRR を用いた地表面フラックス算出アルゴリズム Surface Energy Balance System (SEBS) を用いてチベット高原上のフラックスを算出する。SEBS に入力するデータは大きく分けて 2 つあり、地表面温度やアルベドなど地表面に関する情報と、大気のある高さにおける風速、気温など大気に関する情報である。本研究では、前者は衛星データ (GMS-5/VISSR, NOAA-14/AVHRR) を、後者は ECMWF 再解析データ ERA-40 を用いた。

チベット高原上の Amdo（東経 91.6 度、北緯 32.2 度、海拔高度 4,700m）において、観測されたフラックスの実測値と SEBS により算出されたその推定値との比較を行った。たとえば顕熱フラックスに関して、観測データでは 6 月の日中に 400 ないし 300 W/m^2 あった顕熱フラックスが、モンスーンの進行に伴い大気や地表面が湿潤になるにつれ減少し、7 月に入ると 200 ないし 100 W/m^2 に落ち込んでいるなどの特徴が観測値とよく一致した。この他の成分についても、SEBS を用いて GMS-5 から算出した地表面フラックスは、観測値と矛盾のない日変化および季節変化を再現できていることがわかった。

NOAA/AVHRR 画像データとゾンデ観測データとから地表面エネルギーフラックスの空間分布を推定するアルゴリズム SEBS を、GMS-5/VISSR 画像データに適用しゾンデ観測データの代わりに再解析データ ERA40 を用いてチベット高原スケールでのフラックスの空間分布の算出を行った。

まず、GMS 画像とゾンデ観測データを用いて算出したフラックスの推定値を観測値と比較し、フラックスの各成分における誤差の原因を検討した。観測値との差が大きくなる原因としては、衛星データと観測データとがとらえる空間スケールの差、SEBS で推定する値と観測データから求める値との計算方法の本質的な違い、中立に近い安定度を想定したモニン-オブコフの相似則の理論を夜間の放射冷却による強い安定層下で適用していること、などが考えられた。特に地中熱流量の推定では、土壌水分の変動による熱交換係数の変動を考慮していないため、この効果を地中熱流量の算出に反映させる必要がある。また、チベット高原の地表面は、日射による加熱と夜間の強い放射冷却のため、土壌水分の凍結・融解過程がしばしばみられる。しがたって土壌水分の変動に加えて、土壌における水の相変化を考慮した地中熱流量の算出法を新たに構築する必要もある。土壌水分量の空間分布はマイクロ波センサを搭載した衛星による研究が進められているが、これら凍結・融解水分量まで算出するとな

ると日変化を解像できる時間間隔での観測が必要になり、それは現時点では困難な状況である。また、顕熱フラックスを算出するのにモニン-オブコフの相似則を用いている点については、フラックスリチャードソン数などで安定度による閾値を決め、その値により算出される顕熱フラックスの信頼性の指標にすることなどを検討する必要があると思われる。同時に、安定層が発達する状況下における顕熱フラックスの算出法も構築するべきである。

次に、GMS 画像と再解析データ ERA40 を用いての算出および観測値との比較を行った。フラックス算出のために必要なブレンディングハイトにおける気温、風速のデータについて、ゾンデ観測データと再解析データとを比較したところ、ある程度の差が確認され、この差によるフラックス算出への影響は、正味放射量で最大 5W/m^2 、地中熱流量で最大 2W/m^2 、顕熱フラックスで最大 10 数 W/m^2 程度の影響を受けることがわかった。このような誤差があることをふまえた上で、観測値との比較を行った結果、ゾンデ観測データを用いたときと同程度の精度でフラックスが算出できることが確認された。またフラックスの季節変化の傾向を比較したところ、観測値と矛盾なく推定されていることもわかった。ここでは、フラックスの空間分布を算出する際に衛星データだけではなく、ブレンディングハイトにおける気温や風速の空間分布のデータとして再解析データを使用した。

本研究のようにチベット高原全体におけるフラックスの空間分布の算出となると、観測地点の少ないゾンデ観測データから気温や風速の水平一様を仮定するには無理がある。再解析データを用いた理由はそこにあるが、純粋な観測データではない以上、再解析データの気温や風速は気象モデルや陸面モデル、その解像度、乱流パラメタリゼーションなど物理過程の簡略化などに依存した値になる危険性がある。ゾンデ観測データとの比較により、再解析データの値が現実大気と矛盾しないこと、気温や風速の平均的な誤差が算出されるフラックスの値へ深刻な影響を与えないことが確認された。本研究における再解析データの使用は、実際のフラックスの変動と矛盾しないデータの算出のために必要最小限の入力データとして用いたという位置づけである。また、最近の衛星データを用いた研究では、気温プロファイルや水蒸気プロファイルの算出も行われている。これらのデータと組み合わせることで、より正確なフラックスの空間分布を算出できるようになると期待される。

本研究で構築した GMS-5 のデータを用いて地表面エネルギーフラックスの空間分布を算出する手法は過去に例がなく、この手法により算出されたデータセットを用いることにより、今後の、アジアモンスーン気候におけるチベット高原地表面の熱力学的影響の研究において、季節内変化、季節変化、年々変化に加え、日変化の時間スケールにおける解析が行えるようになる。具体的には、チベット高原上における対流圏の熱収支の指標として用いられている Heat Source Q1, Moisture Sink Q2 を再解析データから求め、これと本研究で算出した地表面エネルギーフラックスの分布と比較することで、地表面からの加熱が鉛直方向にどのように伝播しているのかを定量的にかつ面的に評価することができる。そして、モンスーンの動態の指標となるチベット高気圧の気圧場やこの対流活動度の分布と、Q1, Q2, 地表面エネルギーフラックスの空間分布を比較することにより、日変化を含む季節内変化、季節変化、年々変化と様々な時間スケールでのチベット高原の地表面が及ぼす大気加熱およびモンスーンの動態への影響が明らかにされるものと思われる。

GMS-5 の後継機 MTSAT や、中国の静止軌道衛星 FY2B の後継機 FY2C の観測体制が整えば、さらに長期間の地表面温度やフラックスのデータも取得できるようになる。また、現在の手法ではフラックスの算出の対象領域をチベット高原のみに限定しているが、衛星データに含まれる大気減衰の効果を水蒸気チャンネル以外のデータから定量化することができれば、他の地域においてもフラックスの空

間分布を求めることができるようになる。最近の衛星データのリトリバル研究では水蒸気プロファイルなどの算出も行われており、このようなデータを併用することによって、フラックス算出法の拡張を行うことができるものと思われる。この改良された算出手法により、地表面温度やフラックスの空間分布が他の地域でも1時間ごとに算出できるようになれば、4次元データ同化の資料として有用であり客観解析の精度向上に大きくつながるものと思われる。また、フラックスの空間分布のデータセットは、GISとしての広域の水・エネルギー循環や環境変動など様々な分野での需要が多く、気象学、気候学のみならず環境学、土木工学、農学はじめ多くの分野への貢献が期待される

研究課題 携帯型自動ライダーとサンプリングによる浮遊粒子状物質の光学的性質の研究

研究者 染谷篤夫・岡崎 淳・内藤季和（千葉県環境研究センター）

竹内延夫・久世宏明（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）

担当教官 竹内延夫

概要：

可搬型全自動ライダー（PAL）を千葉県環境研究センター（CERC）に浜松ホトニクス(株)の協力で設置し、大気混合層高度の連続観測に用いた。自動観測時のライダーのアライメントを自動調整するシステムとし、千葉大からでも遠隔的にモニター・制御できる機能を持たせた結果、安定したデータが得られるようになった。ライダーデータから推定された質量消散係数（MEE）は季節変化があり、湿度やエアロゾル粒径と関係するためか、冬期においては、地上観測の微小粒子濃度と良い相関を示すことが分かった。

研究課題 衛星観測におけるエアロゾル光学的厚さの不均一性に関する影響評価

研究者 朝隈康司（東京農業大学生物産業学部）

担当教官 竹内延夫・久世宏明

概要：

1. はじめに

衛星画像におけるエアロゾル光学特性に関する研究は、エアロゾル観測の予算・人的資源の難しさから、衛星画像1シーン中1つのエアロゾルモデルを仮定し、また光学的厚さ τ も一様と仮定することによりおこなわれてきた。しかし現実的には、エアロゾルの性質は時間的・空間的に変化が激しく、正確な衛星観測をおこなうには各シーン中各画素単位でエアロゾルの性質を知る事が重要であることがこれまでも繰り返し議論されてきた。CERESセンサ分野でも用いる放射伝達コードの特徴（計算のアルゴリズムや、採用されている近似方法）やそのときに仮定するエアロゾルモデルによって、大気補正結果に著しい違いが生じることを確認しており¹⁾、テクスチャによる解析などエアロゾルの不均一性に関する研究に重点をおいてきた²⁾。最近は、衛星画像を被覆分類し各土地被覆をATSERライブラリによる各物質の反射率と照らし合わせることによって、より正確な地表面アルベドマップ（ ρ -Map）の作成が可能となった³⁾。そして、この ρ -Mapの完成に伴い、エアロゾルモデルを1シーン中で同一であると仮定する必要があるものの、エアロゾル光学的厚さの分布図（ τ -Map）の作成も可能となった⁴⁾。しかし、その一方で衛星の解像度が高くなるにつれて、エアロゾルモデルが一様だと仮定した場合、本来、大気情報のみを示すはずの τ -Mapに海岸線が表れるなどの問題点が生じてきている。現状では、この海岸線が地表面の影

響が現れたものなのか海域と内陸部でエアロゾルの性質が異なる点が顕著に現れたのかの区別を実際に観測して検証するには、エアロゾルの鉛直構造を含む大気地表面間の相互作用や周縁効果が相俟ってイメージングライダーなど地上観測装置の運用を待たなければならない。その一方で、特殊な装置を使わない解決方法として衛星画像のみを用いてエアロゾル光学厚さと同時にエアロゾル光学特性を同時に導出する手法も必要である。本研究課題はこのような新たな問題をふまえ、千葉上空のエアロゾル光学の性質の解明を目的に、Landsat/TM画像からエアロゾル光学特性の1つである粒径分布の推定方法を検討したものである。

2. 粒径分布導出方法

2.1 エアロゾル粒径モデルと各光学パラメータの組合せ

放射伝達コード 6S は海洋性や大陸性など代表的なエアロゾルモデル以外に、任意のエアロゾルモデルとして多峰性の正規対数分布を指定できるが、そのパラメータは粒子半径 R_m 、粒子半径サンプルの分散 σ 、粒子数密度 N 、体積密度 V 、複素屈折率の実部 n_r および虚部 n_i の各々を指定でき、その組み合わせと地表面反射率 ρ と大気エアロゾルの光学厚さ τ の関係が各波長毎に存在し、その組み合わせは膨大な数となり実用時間で全ての関係を得ることは難しい。このため、地域を限定し実用的な範囲での組み合わせを求めることが重要である。本研究では WMO-WCP112 に示される代表的なコンポーネント (Table 1) を中心に粒子半径を変化させて複数波長で一致する粒子半径を求める。ここで、これまでに千葉大学で観測されたサンフォトメータによるエアロゾル光学厚さ τ と分光放射計 (USB-2000) で観測された地表面反射率 ρ の関係から、千葉地域は都市型 (Urban) エアロゾルモデルを指定した場合に解が無いという結果が報告されている。このことから、千葉地域では煤型 (Soot) 吸収性粒子の寄与がほとんど無いと考えられる。このため、都市型以外に千葉地域で想定される海洋性 (Maritime) 及び大陸性 (Continental) エアロゾルモデル共通の組成である水溶性 (Water Soluble) 粒子の半径を $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ から $1.0 \mu\text{m}$ まで変化させ、シミュレートされた τ' と $\rho^{(r)}$ が実測された τ と $\rho^{(c)}$ に一致し、かつ TM のチャンネル 1 (485nm) とチャンネル 2 (560nm) を同時に満足させる粒子半径を求めた。Figure 1 に上記手順をまとめたフローチャートを示す。

Table 1. Specifications of the four basic components in WMO-WCP112: R_m is the mean radius, s the standard deviation, V the volume concentration, N the particle number concentration, and n_r, n_i the refractive index.

	Dust Like	Water Soluble	Oceanic	Soot
$R_m [\mu\text{m}]$	0.500	0.005	0.300	1.180×10^{-2}
S	2.99	2.99	2.51	2.00
$V [\mu\text{m}^3/\text{cm}^3]$	1.140×10^2	1.140×10^{-4}	5.114	5.978×10^{-5}
$N [\text{cm}^{-3}]$	5.473	1.869×10^6	2.761×10^2	1.806×10^6
n_r at 488 nm	1.530	1.530	1.377	1.750
n_i at 488 nm	8.00×10^{-3}	5.00×10^{-3}	1.38×10^{-8}	4.50×10^{-1}

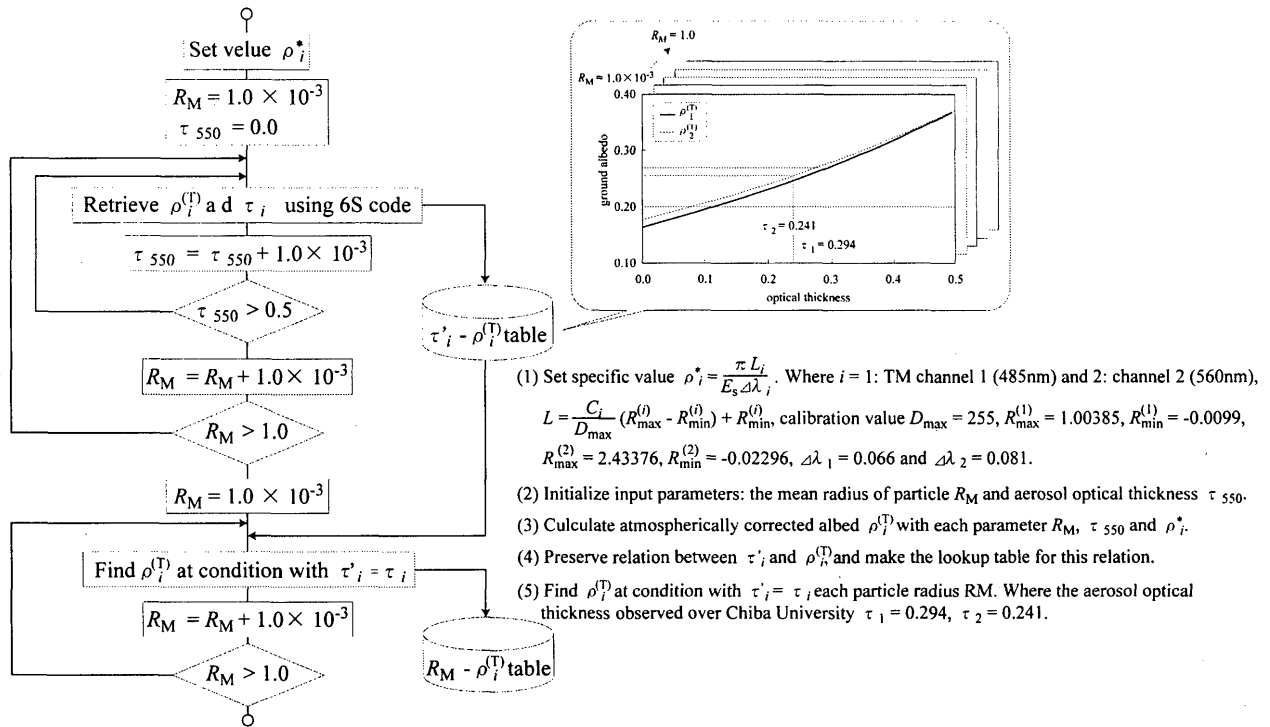


Figure 1: Flow diagram for retrieval of aerosol mean radius..

2.2 利用データ

2.1 のフローでエアロゾル粒径 R_M を求めるために必要なパラメータは、2 つ以上のチャンネル (i で示す) をもつ解析対象画像の観測値 DN_i (もしくは、 DN_i から計算されたアルベド ρ_i^*) と光学的厚さ τ_i と実観測されたもしくは参照用のアルベド $\rho_i^{(C)}$ と光学的厚さ τ_i の組である。解析対象画像としては、1998 年 12 月 13 日の Landsat/TM 画像のチャンネル 1 ($DN_1=75$) および 2 ($DN_2=31$) の画像を用いた。同日千葉大学で観測されたサンフォトメータの値は $\tau_1=0.294$, $\tau_2=0.241$ だった。また参照用アルベドは、よく晴れて大気の薄かった 1999 年 1 月 14 日の Landsat/TM 画像を美濃村らの方法で大気補正された ρ -Map の値を用いた ($\rho^{(C)}_1 = 0.14$, $\rho^{(C)}_2 = 0.16$)⁵⁾。

3. 粒径分布導出結果

Figure 2 に 1998 年 12 月 13 日の粒子半径 R_M とシミュレートされた地表面アルベド $\rho^{(T)}$ の関係を示す。Fig. を見ると $\rho^{(T)} = \rho^{(C)}$ を満たす粒径 R_M は、チャンネル 1 で $4.0 \times 10^{-3} \mu m$ と $4.7 \times 10^{-2} \mu m$ 、チャンネル 2 では、 $4.0 \times 10^{-3} \mu m$ と $6.5 \times 10^{-2} \mu m$ だった。従って、両チャンネルを同時に満たす粒径 R_M は、 $4.7 \times 10^{-2} \mu m$ であった。これは、代表的な大陸性エアロゾルモデルの主成分である水溶性粒子の $5.0 \times 10^{-3} \mu m$ と比べてやや小さな粒子である。

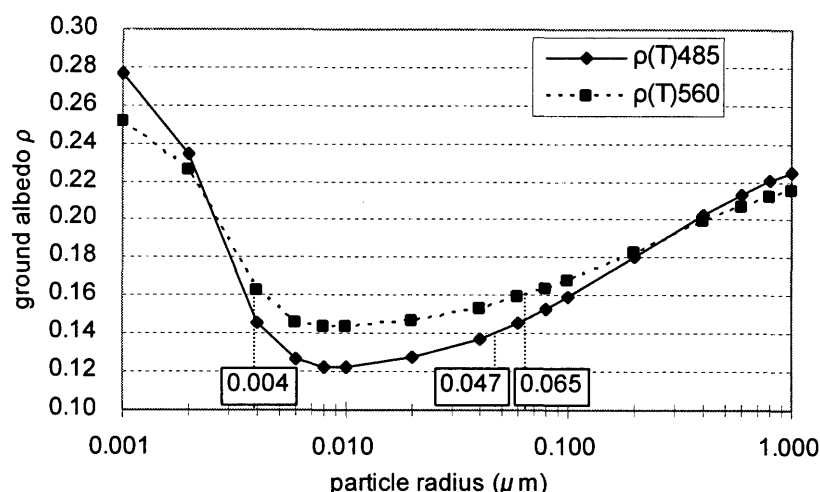


Figure 2: Relationship between the aerosol particle radius λ_m and atmospherically corrected ground albedo. The solid line shows the result at 485 nm (TM channel 1) and dotted line is at 560 nm (channel 2).

4. 今後の課題

今後、各パラメータと衛星観測値 (Digital Number:DN) の関係を示すテーブル (Look Up Table:LUT) の作成や近似方法を模索しアルゴリズムの高速化を検討する。また LUT を用いて広範囲の各季節毎の代表粒径分布地図 (Spatial Distribution for Aerosol Particle Mean Radius: R_M -Map) の作成、さらに複素屈折率も加味した R_M -Map も検討していきたい。

参考文献

- 1) 矢吹, 内藤, 美濃村, 久世, 竹内, 1999. 化学組成測定から導出される大気エアロゾルパラメータと 6S への応用, 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報告集第 4 号 "衛星データの 大気補正の現状と問題点", pp. 53-56.
- 2) Asakuma, K., M. Minomura, S. Otsutsumi, H. Kuze and N. Takeuchi, 2002. Estimation of aerosol optical thickness over land in Chiba area from AVHRR data, Advanced Space Research, Vol.29, No.11, pp.1747-1752.
- 3) 美濃村, 久世, 竹内, 2004. MODTRAN4 シミュレーション参照テーブルを用いた Landsat 7 ETM+ 画像データの 大気補正およびエアロゾル光学的厚さの導出方法, (社)日本リモートセンシング学会 第 36 回学術講演論文集, pp. 59-60.
- 4) 戸館, 美濃村, 久世, 竹内, 2005. LANDSAT-5/TM データを利用した関東地域の 大気補正とエアロゾル 分布抽出法, (社)計測自動制御学会 第 12 回リモートセンシングフォーラム, pp. 9-10.
- 5) Minomura M, Y. Todate, H. Kuze and N. Takeuchi, 2005. Retrieval of aerosol optical properties over Chiba land area from Landsat/TM imagery -Part I: Determination of spatial distribution of aerosol optical thickness, Proceedings of The CERES International Symposium on Radiation Budget and Atmospheric Parameters Studied by Satellite and Ground Observation Data - Toward the Understanding of Long Term Trend in Asia, pp. 58-64.

研究課題 ヤマセ雲の衛星リモートセンシングおよび数値モデル化のための検証観測

研究者 浅野正二（東北大学大学院理学研究科）

高村民雄（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）

担当教官 高村民雄

概要：

夏季の三陸沖海上に頻発し、東北地方や北海道東部の天候に大きな影響を与えるヤマセ雲の雲物理学的構造と放射特性を、NOAA 衛星データ等を用いたリモートセンシングおよび数値モデルによるシミュレーションの手法により解析する。本研究の目的は、地表面（海面）からの検証観測を実施することにより、雲水量や有効半径などの雲パラメータの衛星リモートセンシングおよび数値モデルの雲パラメタリゼーションに含まれる不確実性を減らし、それらの改良に資することにある。船舶観測は、仙台管区気象台および函館海洋気象台とのヤマセ共同観測の一環として、函館海洋気象台の観測船高風丸にマイクロ波放射計や雲高計、分光日射計などを搭載して、三陸沖海上にて行われる。

本年度は 2003 年 6 月の船舶観測において遭遇したヤマセ現象を中心に、そのときの NOAA/AVHRR データを解析して、ヤマセ雲の光学特性および雲物理特性を抽出した。この船舶観測により、ヤマセ現象に伴う海洋大気境界層の時間変化の様相を初めて捉えることができた。また、衛星リモートセンシングにより、ヤマセ雲の分布や特性はその発達段階により変化するものの、平均的にはヤマセ雲は、光学的厚さが約 12、雲粒子の有効半径が約 $13\ \mu\text{m}$ 、積算雲水量が約 $110\ \text{gm}^{-2}$ の比較的均質で薄い層状雲であることが分かった。解析結果は、2005 年 2 月 17-18 日の CReS 国際シンポジウムにおいて報告した。

研究課題 広角高精度望遠鏡を利用した大気透過率計測手法の開発

研究者 佐々木真人・浅岡陽一（東京大学宇宙線研究所）

小川 了（東邦大学理学部）

眞子直弘・上橋雅志（東京大学理学系研究科博士後期課程 3 年）

会田勇一・奥村 暁（東京大学理学系研究科博士後期課程 1 年）

安田雅弘（東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程 1 年）

野田浩司（東京大学理学系研究科修士課程 2 年）

担当教官 久世宏明

概要：

申請グループは、現在、文部科学省の科学技術振興調整費「先導的研究等の推進」において、全天高解像度望遠鏡による超高エネルギー素粒子天文学の創成に関わる研究を推進している(研究期間は平成 15-17 年度)。この研究では宇宙線、素粒子、および環境計測の 3 分野での融合的研究をめざしており、本申請の共同研究は、CReS のプロジェクト研究に密接に関連する大気環境計測、とくに放射およびエアロゾル計測を中心として実施したものである。この計画の中心をなすのが、高精度広角望遠鏡を利用したイメージングライダーの開発であった。従来のライダー計測では、射出するレーザー光の光軸と望遠鏡光軸とを正確に一致させる後方散乱計測が行われてきたが、本計画で開発中の望遠鏡（Ashra 望遠鏡）を活用することにより、レーザー光の空間掃引のみでエアロゾルからの散乱を検出することが可能となる。波長域としては、高エネルギー宇宙線による大気発光の波長帯である 300-400nm 域を想定しており、レーザー射出時のアイセーフティを確保できる。背景光の低減のため、宇宙線観

測用に開発を進めているインテリジェントトリガー機構の採用を検討した。さらに、天空光分布を通じて、都市域における紫外放射環境の研究を行った。

研究課題 衛星画像データと天空観測データによる日本における反射率バンド比の推定

研究者 川田剛之・竹俣一也（金沢工業大学工学部）

担当教官 竹内延夫

概要：

はじめに

Kaufman et al. (1997) 1) は植生域や都市域の可視反射率と短波長赤外反射率との間に経験的ではあるが、一定の相関比が成立し、この反射率相関比を用いることにより、陸域のエアロゾルの光学的パラメータ推定可能となることを示した。本報告は日本における反射率バンド比とその季節変化などに関する研究結果について述べている。

2. 秋季の可視バンドと赤外バンドの反射率比

本研究では、日本を撮影した秋季の MODIS 画像データ(撮影日: 2003 年 10 月 9 日, 10 月 20 日, 10 月 25 日, 10 月 27 日, 11 月 1 日)に対して、スカイラジオメータ(Prede 製, POM-01)による衛星同期観測データに基づく大気エアロゾルの光学的厚さ μ とオングストローム指数 μ の値を用いて大気補正 2)を実施し、金沢地方の可視の 2 バンド、即ち、青色バンド 3 (中心波長: $0.47 \mu\text{m}$, バンド幅: $\pm 0.01 \mu\text{m}$)と赤色バンド 1 (中心波長: $0.65 \mu\text{m}$, バンド幅: $\pm 0.01 \mu\text{m}$)の反射率を計算した。次に、最尤法により画像を植生域、都市域、雲と雪、海域、その他の 5 つのカテゴリにクラス分類した。最後に、エアロゾルによる大気散乱効果が無視可能な短波長赤外域のバンド 7(中心波長: $2.13 \mu\text{m}$, バンド幅は $\pm 0.025 \mu\text{m}$)の反射率を計算し、陸域分類クラス毎に反射率バンド比 $R3/R7$ と $R1/R7$ の計算を実施した。ここで、 $R1$, $R3$, $R7$ はそれぞれバンド 1, 3, 7 の地表反射率である。本計算においてエアロゾルの複素屈折率 m は $m=1.50-i0.005$, サイズ分布モデルとしては海岸型の Haze M3)を仮定した。

Fig.1 と Fig.2 は秋季の MODIS 画像データから計算した植生クラスのバンド 3 とバンド 7 の反射率の散布図とバンド 1 とバンド 7 の散布図である。また、秋季の植生クラス、都市クラス、その他クラスの反射率比の結果を Table 1-(a)に示す。また、参考の為、MODIS 画像データから計算した春期の反射率比の結果 4)と Kaufman et al. 1)による米国の場合(夏期)の反射率比をそれぞれ Table 1-(b)と-(c)に示す。米国の植生クラスの $R3/R7$ の値は金沢市周辺の春季と秋季の値と比べて約二分の一と低い。これは季節変化というよりは地域による変化と思われる。我々が植生クラスとした領域には水田が多く含まれているが、米国では全く水田が含まれていない。ここでは示さないが、春季の植生クラスの散布図の分散が秋季に比べて大きく、春季は水田や畑、森林の緑の量的違いがそのまま反映されている。Fig.1-2 で分かる様に秋季の分散は小さく植生クラス内の緑の量が均一化される。季節変化が余りないと思われる都市域においても季節変化が見られる原因について今後良く検証する必要がある。

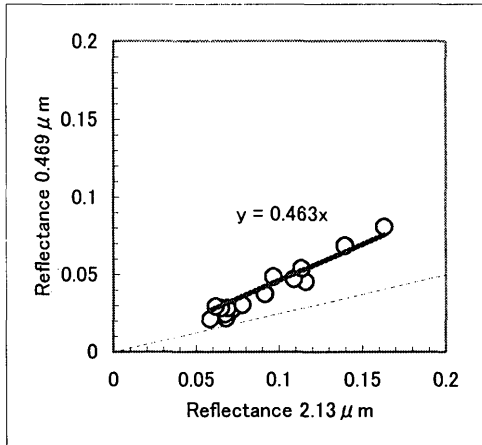


Fig.1. Scatter diagram for vegetation class. Band reflectance ratios is $R_3/R_7=0.463$. Broken line corresponds to $R_3/R_7=0.25$ (Kaufman et al.1))

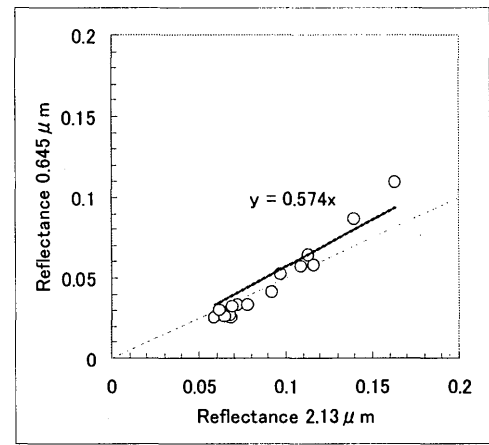


Fig.2. Scatter diagram for vegetation class. Band reflectance ratios is $R_1/R_7=0.574$. Broken line corresponds to $R_3/R_7=0.50$ (Kaufman et al.1))

Table 1. Reflectance band ratios for land classes computed from MODIS image data sets.

(a) in the fall season

	vegetation	urban	the others
R_3/R_7	0.463	0.513	0.471
R_1/R_7	0.574	0.660	0.601

(b) in the spring season4)

	vegetation	urban	the others
R_3/R_7	0.557	0.490	0.431
R_1/R_7	0.563	0.582	0.517

(c) in the summer season
based on Kaufman et al.1)

	vegetation	urban	the others
R_3/R_7	0.25	0.42	—
R_1/R_7	0.50	0.69	—

本研究の結果はエアロゾルの屈折率と Haze M モデルを仮定したものであり、今後の課題としてはこれ以外のエアロゾルモデルについても解析する必要がある。また、反射率バンド比の季節変化に関しては、分類における春季の植生クラスや都市クラスのトレーニングサンプルの取り方などについて検討する必要がある。

参考文献

1. Kaufman, Y., et al., The MODIS 2.1mm Channel-Correction with Visible Reflectance for Use in Remote

Sensing of Aerosol, IEEE Trans. GRS, vol.35, no.5, pp.1286-1298, 19972.

2. Kawata, Y., Mouri, K., and Izumiya, T., New estimation algorithm of aerosol optical thickness from space remote sensing data and its validation, Adv. Space Res., vol.25, no.5, pp.1007-1013, 2000.
3. Deirmendjian, Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions, American Elsevier, New York, 1969.
4. Kawata, Y., et al., Surface reflectance ratios between the visible and infrared bands of satellite images over land areas in Japan for retrieval of aerosol optical thickness, Submitted to Advances in Space Research, 2005.

研究課題 西部赤道太平洋域における現場海面分光反射及び二方向性反射計測

研究者 香西克俊・石田廣史（神戸大学海事科学部）

担当教官 竹内延夫・高村民雄・久世宏明・岡山 浩

概要：

研究課題 衛星および CCD カメラによる大気エアロゾルの解析

研究者 木下紀正（鹿児島大学教育学部）

菊川浩行（鹿児島大学水産学部）

飯野直子（鹿児島大学工学部）

担当教官 竹内延夫

概要：

1. はじめに

黄砂や火山噴煙などの大気エアロゾルの動態を把握するには、衛星画像解析とともに地上観測が重要である。ここでは、CCD 撮像素子を用いたデジタルカメラ・ビデオカメラ・パソコン接続の Web カメラなどによる地上映像観測の現状とその背景および衛星データとの関係を述べる。2004 年における鹿児島大学グループの黄砂と噴煙の地上映像観測点を図 1 と図 2 に示す。

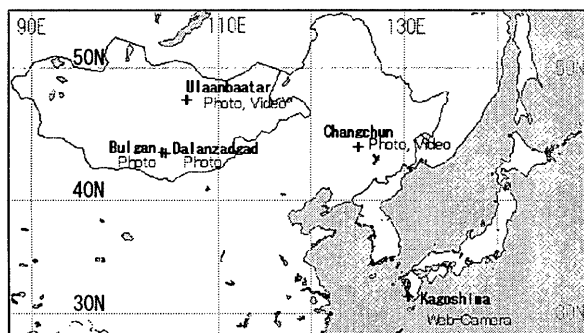


図 1. 黄砂の地上映像観測点。モンゴルの 3 点は気象水文研究所，中国の長春は東北師範大学との共同観測。

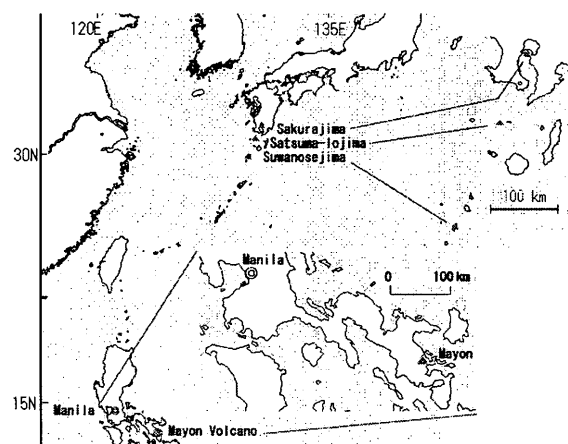


図 2. 火山噴煙の地上映像観測点。マヨン火山はフィリピン火山地震研究所との共同観測。

2. ビデオとデジタルカメラによる映像の

長期自動観測

アナログビデオの時代から、インターバル撮影による映像の長期自動観測が、火山研究などの目的で行われて来た。デジタル映像技術の発達とインターネット時代の到来によって、ビデオ映像のデジタル化や静止画の取得とデータベース化・ホームページ公開が出来るようになった。1997年に開設した Volc のページ <http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/volc/> は、1987 年以來の桜島噴煙映像の長期自動観測とフィルムカメラによる随時撮影の記録によってスタートした。

インターバル撮影できるデジタルカメラは、映像の長期自動観測と大量データのランダムアクセスに適している。1997 年発売のデジタルカメラ SHARP MD-PS 1 は 1 時間毎の撮影で 81 日間継続して 140MB の MD に記録できる。これを用いて、1998 年 7 月末から 2003 年 11 月まで、薩摩半島の南南西約 40km にある薩摩硫黄島の硫黄岳を 3km 離れた屋内から観測を行ない、Volc のページに公開している。

MD-PS1 は、1998 年 12 月-2003 年 1 月の間、桜島東南東約 11km の名大 ST 研垂水観測所からの噴煙観測に用いた。また、2003 年 6 月-8 月、フィリピンで現在最も活動的なマヨン火山の噴煙観測と、2004 年 3 月-6 月、モンゴルのゴビ砂漠南部にあるダランザドガドで砂嵐と黄砂の観測に用いた。この機種は独自の画像ファイル形式を Win95 のソフトで JPEG に変換し、撮影日時のリストを MS-DOS で得なければならなかった。

カシオ QV-R4 は JPEG 形式で 512MB の SD メモリーに記録できるので、様々なサイズと画質で大量に記録できて、電源さえ安定ならば 1 時間間隔で半年以上でも自動観測できる。2003 年 3 月から中国東北部の長春で黄砂の観測に用いている。QV-R4 はインターバル撮影の電力消費が少なく、内蔵用のバッテリーで 20 日余り、外付けの簡便なバッテリーで数ヶ月継続使用できる。AC 電源のない屋外で防水ケースに入れて火山の野外観測のテストを重ねて来た。2004 年 3 月-4 月、ダランザドガドの北西 85km のブルガンでは、ゴビ砂漠の停電の恐れがある小さな観測所で、外付けバッテリーで 26 日間の撮影を行った。インターバル撮影できるデジタルカメラの機種は限られ、2003 年発売のリコー CaplioG4wide が現在殆ど唯一である。これは待機中も休眠しないのでバッテリー使用には適さないが、35mm カメラ換算 $f=28\text{mm}$ の広角撮影ができるので黄砂や噴煙観測に適している。これを 2004 年 3 月からウランバートルで、2005 年 3 月からダランザドガドで黄砂観測に用いている。薩摩硫黄島では 2003 年 12 月から 2004 年 8 月まで噴煙観測に用いた。

3. インターネット利用の映像観測と噴煙の近赤外撮影

噴煙活動の毎日あるいは実時間のインターネット配信を、Web カメラなどを用いコンピュータを介して行なうことが出来る。鹿大噴煙研究グループでは、2000 年 12 月から火口の西約 11km の教育学部屋上からの桜島の映像を 5 分おきの更新で配信している。カメラとサーバ機能を組み込んだネットワークカメラは、ブロードバンドの常時接続環境にあれば実時間監視が出来るので、桜島噴煙の多点観測のため、火口の北西約 10km の鹿大南西島弧地震火山観測施設と南南西約 10km の垂水市役所に設置して鹿大噴煙データメインサーバに接続している。薩摩硫黄島はモデム等によるダイヤルアップ環境のため、20 分おきの画像を 1 日 1 回まとめて大学に送信する方式で運用している。諏訪之瀬島御岳についてはネットワークカメラの停電後の自動回復機能を活かし、送信回数を絞って実時間の直接配信にしている。これらは鹿大サーバに画像データを蓄積していく自動更新データベース方式で運用し

ているので、過去画像の検索が可能である。

CCD の近赤外感度を活かし可視光をカットする IR フィルターなどの装着で地上近赤外撮影ができ、可視では見ることが難しい薄い噴煙のエアロゾルを検出できる。途中の大気の薄い汚れは良く透過するため遠望観測に適しており、最近では薩摩硫黄島と諏訪之瀬島については近赤外観測にしている。特に、25km 離れた中之島からの諏訪之瀬島噴煙観測では、海上のモヤで霞む日が多いが、近赤外光によって鮮明な映像を得る事が多い。マヨン火山では、11km 南の観測所に可視と近赤外 2 台のネットワークカメラを置きインターネットに接続しているが、気象条件が厳しく通信事情が悪いので観測所に Network Attached Storage を置いてデータを蓄積している。

4. 衛星画像データと地上観測映像の関係

土壌性エアロゾルに対する熱赤外 12 と 11 μ m バンドの差による Aerosol Vapour Index(AVI) 検出法によって、NOAA/AVHRR と GMS-5/VISSR のデータを解析して黄砂を検出して来た。1997-2004 年の結果は、黄砂の英文ページ <http://arist.edu.kagoshima-u.ac.jp/adust/kosa-e/kosa-e.htm> に公開している。2004 年春の黄砂については、テラ衛星 MODIS センサーのデータも解析した。

衛星画像はある時刻における広域の水平分布の情報を示すのに対し、地上観測映像は観測点から見た空の色やその仰角依存性・水平方向の視程などを定性的に示し、衛星画像に対する地上の状況の視覚的理解を与える。2002 年 11 月の黄砂については、長春における随時撮影の結果が季節外れの濃い黄砂現象を捉え、衛星画像とも良く対応した。1 時間毎の自動撮影では、2004 年 3 月 10 日の長春における黄砂の様に、1 日の経時変化が判る。さらに、デジタルカメラ映像を三色分解したデータの濃度値解析によって、晴天や曇天の場合と比較して黄砂による大気の混濁と視程の低下が定量的に検討できる。

長春とウランバートルではデジタルビデオカメラも設置し、10 分おき 0.5 秒の最長モードで撮影しているが、黄砂現象に対しては 1 時間おきで十分で、デジタルカメラのバックアップとなっている。噴煙の動態記録にはこのモードでは少し粗いが、LP2 時間テープで 90 日継続できるので、薩摩硫黄島やマヨン火山でも使用してきた。ビデオカメラ映像に日時を重ねるにはアナログ出力から MPEG 化するので、ここでは単にビデオカメラと呼び、デジタルスチルカメラをデジタルカメラと呼んでいる。

2004 年 6 月の第 2 回火山灰と航空安全国際会議で総括された様に、衛星による噴煙監視体制と経験は充実して来た。しかし地上映像観測は手薄であり、その重要性はようやく認識されつつある段階である。特に、マヨン火山のような熱帯性気候では衛星観測は雲に遮られる場合が多いが、地上映像観測では朝夕に晴れたシーンが得られるチャンスが大きいことが判った。

5. おわりに

デジタルカメラやビデオカメラによって離島や海外など遠隔地での長期自動観測が可能であり、それには良いサイトと協力者が必要である。AC 電源が安定し通信環境が良ければパソコンを用いた撮影システムが構築できる。これらは衛星やライダーなどによる観測と合わせて活用できると考えられる。長春・ウランバートル・マヨン火山のデジタルカメラ映像も、それぞれのホームページに時間を選んで公開している。地上映像データの定量的解析は始めたばかりであり、絶対較正は今後の課題である。

研究課題 偏光情報を利用した衛星／地上からの大気粒子解析

研究者 佐野 到・向井苑生（近畿大学理工学部）

担当教官 竹内延夫・高村民雄・久世宏明・岡山 浩

概要：

1. はじめに

温暖化問題において、衛星による地球規模のエアロゾル情報の把握が必要である。本研究では陸上域を含めた全球規模でのエアロゾル導出に関して実施を行った。また、同時に地上からのエアロゾル光学特性把握のため、東大阪市、五島市（長崎県福江島）、白浜町（和歌山県）にて地上放射計観測を実施する。

2. 衛星データ解析

本研究では、1996 年～1997 年に稼働した ADEOS-1/POLDER、及び 2003 年の ADEOS-2/POLDER-2 にて観測された偏光輝度データを用いる。海域上空のエアロゾル解析の場合、放射輝度(I), 偏光輝度(Q,U)を用いる。一方、陸上域上空においては、偏光輝度成分(Q,U)を用いる。導出するパラメータは、海上域においては光学的厚さ、オングストローム指数、組成（屈折率）、陸上域では光学的厚さ、オングストローム指数である。

衛星データに本手法を適用し、全球規模のエアロゾル特性を導出する。Fig.1 は ADEOS 運用期間のうち、1996 年 11 月、1997 年 1, 3, 5 月における光学的厚さを示している。値が高い程エアロゾルが多く浮遊していることを示す。特に中央アフリカ・ギニア湾の周辺国ではこの時期において大量のバイオマス燃焼由来エアロゾルの排出が活発であることが分かる。また、サヘル砂漠付近からの土壌粒子が貿易風により大西洋にかけて輸送される。アジアに注目すると、インド北部の工業地域より大量の人為起源粒子が排出されており、ベンガル湾付近まで達している。また中国上空において、一年を通して大量のエアロゾルが排出されている、同時に導出するオングストローム指数（粒径を表す）の情報より、大部分は人為起源排出物（硫酸エアロゾルなど）であることが示唆される。なお、1997 年春季において、黄砂現象が活発でなかったため、図中に顕著な結果は現れていない。

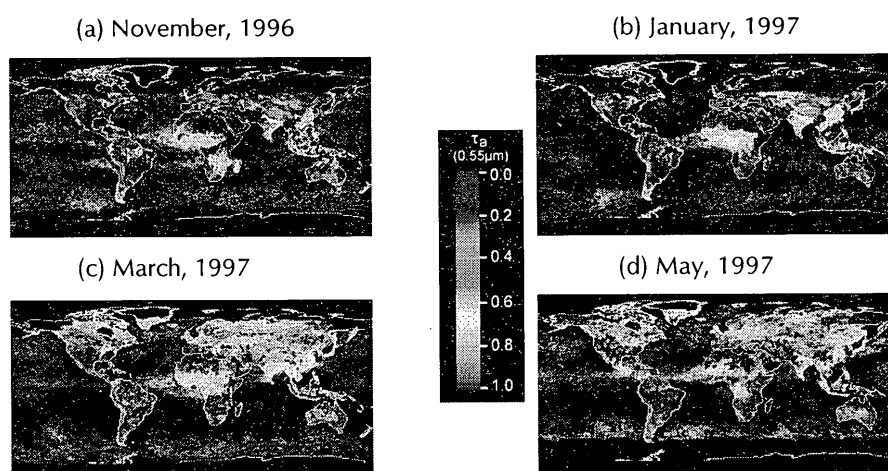


Fig.1 1 Monthly averaged aerosol optical thickness (AOT) at a wavelength of 0.55 μm derived from POLDER onboard ADEOS-1. Panels (a), (b), (c), and (d) correspond to the AOT image in November 1996, January, March, and May 1997.

Fig.2 は 2003 年 4 月 13 日に飛来した黄砂現象を捕らえた画像である。黄海から、日本海沿岸部分にかけて光学的厚さが高くなっており、黄砂が飛来しているが分かる。2001 年、2002 年の大規模な黄砂イベントにくらべ、2003 年は小規模なものであった。日本上空において黄砂の飛来が見られたのは Fig.1 に示す 4 月 13 日に限られる。一方、5 月にはシベリアからの森林火災由来の煙が大量に飛来した。Fig.2 は 5 月 21 日における煙の分布状況を光学的厚さで捉えた画像である。中央付近の非常に光学的に厚い領域は、波長 $0.55\ \mu\text{m}$ での値が 1.6 を超えるため、図では雲と同様に黒くなっている。特に西日本上空は非常に濃い煙に覆われ、光学的に厚い状況がよくわかる。

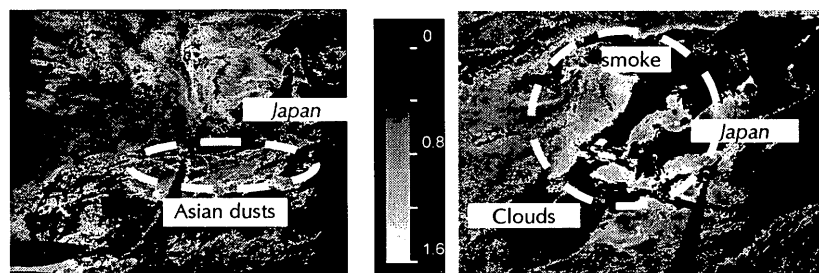


Fig. 2 Distribution of aerosol optical thickness over East Asia on 13 April 2003 (left) and on 21 May 2003 (right).

3. 地上観測値との比較

和歌山県白浜町に設置している AERONET 放射計により取得した 2003 年 4~5 月における光学的厚さとオングストローム指数の散布図を Fig.3 に示す。通常値と明らかに異なる 2 つのグループ（線で囲んだ A と B）が見られる。衛星データで示した特徴的 4 月 13 日、5 月 21 日はそれぞれ B グループと A グループに属している。B グループの 4 月 13 日は光学的に厚く粗大粒子であることから、黄砂の飛来を示している。一方、5 月 21 日は光学的にさらに厚くバイオマス燃焼特有の小粒子エアロゾルを表す。いずれのケースも衛星導出画像(Fig.2)と矛盾しない。

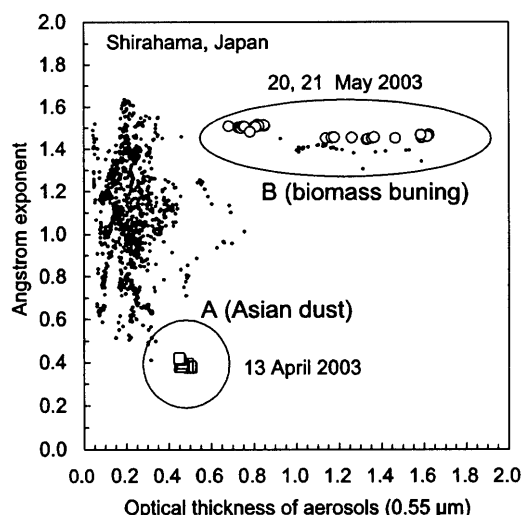


Fig. 3 Observed Aerosol optical thickness and Angstrom exponent by sun photometry on 13 April 2003 (open squares) and 21 May 2003 (open circles) at Shirahama.

4. 終わりに

衛星観測，並びに地上観測からエアロゾル特性導出を行った。衛星解析に関しては，まだ多くの誤差が含まれるため，今後さらにアルゴリズムの改良を必要とするだけでなく，雲領域の判定を厳密に行うため，GLI データなどとの複合利用も必要である。

研究課題 ミリ波レーダによる雲物理量導出と放射収支評価への応用

研究者 鷹野敏明（千葉大学大学院自然科学研究科）

高村民雄（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）

熊谷 博（独立行政法人情報通信研究機構電磁波計測部門）

河村洋平（千葉大学工学部）

担当教官 高村民雄

概要：

本年度は，我々が開発した 94GHz FM-CW レーダをさらに信頼性のある装置にすること，およびこれを用いて他の観測装置との同時観測をさらに進め，科学的データを出すことを目標にした。そのために，2004 年 9 月から 2005 年 2 月にかけて，海洋研究開発機構の海洋地球研究船「みらい」に我々の 94GHz FM-CW レーダを搭載し，北極海から西太平洋にかけての広い範囲の雲観測を行った。また，2005 年 3 月には，鹿児島県奄美大島の千葉大 SKYNET 観測サイトにミリ波 FM-CW レーダを搬入設置し，千葉大環境リモートセンシング研究センターのマイクロ波放射計，雲底温度赤外線測定装置，全天雲撮影装置，のデータ，および国立環境研究所のライダのデータ，等との比較を行った。これらの観測の結果，我々が開発した 94GHz FM-CW レーダは，雨を伴わないような薄い雲中の水氷粒子を充分観測可能である感度を保有していること，ライダで観測できない濃い雲の内部構造を観測可能であること，などが明らかになった。

今後はさらに，放射計やゾンデ，ライダ等のデータと比較することなどにより，雲レーダ強度の減衰効果を較正などの精度を上げることを行い，それらの結果を用いることで，雲の種類による水氷粒子の粒径分布解明，雲底雲頂に観測による物理パラメータ導出アルゴリズムの確定，マイクロ波放射計データとの比較により雲水量の分析手法の検討，などを行う。

<プロジェクト 4:地域社会に役立つリモートセンシングの実現ー多様な空間情報のシナジーによる社会基盤情報の発信ー>

研究課題 リモートセンシングおよび GIS を利用した田園生態系が有する環境保全機能の広域評価マップ作成に関する研究

研究者 美濃伸之・藤原道郎・内藤和明（兵庫県立大学自然・環境科学研究所）

本郷千春（千葉大学環境リモートセンシング研究センター）

担当教官 本郷千春

概要：

1. はじめに

中山間地域の小規模水田では近年，耕作放棄等の水田利用の変化が著しく，それに伴う多面的機能