

A-0803 革新的手法によるエアロゾル物理化学特性の解明と気候変動予測の高精度化に  
関する研究

(3) 放射観測に関する研究

国立大学法人 千葉大学

環境リモートセンシング研究センター 基盤研究領域

高村民雄

<研究協力者>

国立大学法人 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター Pradeep Khatri

平成20～22年度累計予算額 13,390千円（うち、平成22年度予算額 4,095千円）

上記の予算額には、間接経費を含む

[要旨] SKYNET辺戸岬（沖縄）及び福江島（長崎）観測サイトにおいて、スカイラジオメータ、日射計等を用いてエアロゾルの光学特性（光学的厚さ（AOT）、単一散乱アルベド（SSA）等）とその放射効果を明らかにした。2008年～2010年の観測に関する解析の結果、光学的厚さは0.2～0.4(500nm)で推移し、両サイトの変動傾向は類似している。しかし、吸収特性に違いが見られ、福江島サイトのエアロゾルの方がより吸収性が高いことが分かった。集中観測期間中の2009年～2010年3月～5月の平均で大気吸収が9-11 W/m<sup>2</sup>で、その差は2W/m<sup>2</sup>程度と小さかった。本研究では、新たに全天分光日射計が導入されAOTやSSAのスペクトルを得る手法が開発された。これによる評価では、吸収が更に強い可能性が示され、差が拡がると予想された。

[キーワード] エアロゾルの吸収特性、単一散乱アルベド、エアロゾル放射効果、直接効果、分光日射量

## 1. はじめに

エアロゾルが気候に与える影響が広く指摘され、多くの研究がなされてきている<sup>1),2)</sup>。アジアに拡がる吸収性の強いエアロゾルの影響<sup>3)</sup>について注目されており、国連の枠組みのもとでの研究も進みつつある。

エアロゾルの放射影響は、第4次IPCC報告書にも記載されているように、日射の散乱・吸収に寄与（直接効果）するだけでなく、凝結核となり雲生成に関与することで、さらに複雑に気候へ影響を与えると予想されている（間接効果）。この中には様々な形態があり、水循環への影響や局地循環への影響を含んでおり、熱構造の変容をもたらす可能性が指摘されている。

アジアに於ける急速な経済発展がもたらす大気環境の変化によって、こうした過程を通じて地球全体に影響が及ぶ可能性が危惧され、広域の観測とともにその物理過程解明にも力が注がれている。

SKYNET<sup>4)</sup>は、こうしたことを背景にして東アジアを中心にエアロゾル・雲に関する光学特性把握のために設置された観測ネットワークである。SKYNETでは、こうしたエアロゾルの光学的特性を様々な観測機材によって得ており、中でも中心器材は大気カラムの平均的な特性を計測するスカイラジオメータ(sky radiometer)である。同時に放射影響を評価する為に全天日射計、直達日射

計などが併設されている。

エアロゾルの放射影響を精度良く評価する為には、詳細な分光情報が必要である。スカイラジオオメータはこれに忠えてくれるが十分ではない。更に詳細に調べるために、今回新たに全天分光日射計が導入された。この器材には、自動太陽遮蔽装置が付加されており、全天日射量、散乱日射量をそれぞれ分光して得ることができる<sup>5)</sup>。こうした研究はこれまで殆ど無いことから、これによって、スカイラジオオメータによる結果との比較、分光的な特徴を明らかにすることを目的としている。

## 2. 研究の目的

本サブテーマは、日本南西海域に於けるエアロゾルの光学的性質とその放射影響を明らかにすることを主たる目的としている。南西海域は大陸に近く、また島嶼部の観測で比較的ローカルな汚染の影響を受けにくいことから、この地域の広い範囲の大気を代表していると考えられる。地理的位置から風系によって大陸の影響を受ける可能性も高い。こうした条件下でのエアロゾルの観測は、東アジアの大陸から太平洋に至る地域の、エアロゾル特性の一端を明らかにすることになる。

本研究では吸収性エアロゾルの挙動に焦点があり、本サブテーマではカラム平均のエアロゾルの吸収特性を含む光学的特性の把握と、その放射（日射）影響を観測から求める。エアロゾル自体の光学特性と、その日射への影響（放射強制量）の季節的な特徴を見ることとする。中でも吸収性エアロゾルで最も重要なカーボンに関わる知見が他グループから得られることから、これらとの整合性を検討する資料を提供することも目的の一つである。

SKYNETによる連続地上観測の結果をもとに議論する。

## 3. 研究手法

### (1) スカイラジオオメータによるエアロゾルの解析手法

スカイラジオオメータは、太陽直達光とその周辺光をほぼ同時に計測し、その天空輝度分布から大気浮遊微粒子の光学的性質を逆問題として推定しようとする観測機材である。推定の原理は、太陽直達光の減衰がエアロゾルの光学的厚さに対応しており、天空輝度分布がその吸収・散乱特性（複素屈折率）に強く依存することによる<sup>6)</sup>。解析の核となるアルゴリズムは、Tanaka et al. (1986)<sup>7)</sup>、Nakajima et al. (1996)<sup>8)</sup>に基づいており、その解析コードはオープンソース (SKYRAD.PACK ; <http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/~clastr/>) として公開されている。今回の解析で用いられたバージョンはSKYRAD.pack v4.2である。水平均質の大気を仮定した解析であり、不均質なエアロゾルの成層状態や積雲系の離散的な雲がある場合には、適切な解析が困難である。現在の雲検出アルゴリズムは、CSSR v1.0<sup>9)</sup>を用いている。

本課題で中心となるエアロゾルの吸収特性を評価しようとする場合には、精度のよい光学的厚さの推定が必要であり、この機材は二つの方法で検定されている。第一は、Improved Langley法 (I-L 法) であり、天空輝度計測を行うスカイラジオオメータ独自の検定手法である。濃度変動があっても一定の質であれば検定常数を推定できることから通常の観測を行いながら、同時に検定値の推定を可能にするものである。特に、分光に干渉フィルターを用いることから、その経年的な劣化が常に懸念され、I-L法による頻繁なチェックは機材の安定運用に欠かせないものである。同

時に、これを補強する点から、毎年1回程度、一次基準器と比較検定を行い確認する。この基準器は、気象研究所が管理するもので、Mauna Loa Observatory (ML0) でLangley法により検定したものである。

## (2) 分光日射計 (MS-700) によるエアロゾルの解析手法

スカイラジオメータが天空輝度分布を観測してエアロゾルパラメータを求めるのに対して、全天分光日射計は、地表面における波長別の日射の放射束密度 (spectral irradiance) を計測することによって求めようとするものである。吸収の性質を知るには、(吸収効果を含む) 散乱光の強度を分離して計測する必要があることから、この分光日射計には直達光を遮蔽し、散乱光のみ計測するシャドーバンド装置が付加されている。これにより、1台の計測器でほぼ同時に全天日射と散乱日射を計測し、これから直達日射を推定し、散乱日射と併せてエアロゾルパラメータを推定する。使用した分光日射計は、350nm~1000nmまでを分解能10nm程度で分光計測する。

スカイラジオメータとの違いは、放射輝度 (radiance) の計測か放射束密度 (irradiance) の計測の違いであり、理想的な大気状態での観測から求められる結果は等しくなるものである。分光日射計は、全天および散乱日射を波長別に絶対値で計測するので、波長別の日射量が必要な場合に有効な観測機材である。一方、絶対値を得ることが必要なことから、正しい検定値をつけることが必須となる。全波長域で計測する通常の広帯域全天日射計や直達日射計と異なり、分光日射計の検定に関する基準を気象庁は規定していない。そのため、検定方法を含めて、どのように決定されているかを述べておくことが解析結果の検討を行う場合に参考となる。

本研究では、気象研究所 (気候研究部第3研究室内山室長) の協力を得て、気象研究所構内において検定済み回折格子型サンフォ

トメータとの比較検定により値付けした。被検定機材を太陽追尾装置に載せ、常に太陽に正対させることで、検定機材との比較を行う。この時、被検定機材はコリメーションチューブを用いて散乱光を極力減少させる。検定済みサンフォトメータは、気象研究所により定期的に、前述のML0でLangley法によって相対検定された一次基準器である。絶対値に変換する際、大気上端での太陽放射スペクトルは、Wehrli (1985)<sup>10)</sup>を採用している。地上で観測されるスペクトル中には、水蒸気、オゾン、酸素等の気体吸収が含まれており、これらの波長域の検定では、両者のスペクトル分解能が異なり、単純比較はできない。ここでは得られたスペクトルから厳密な吸収気体量を推定し

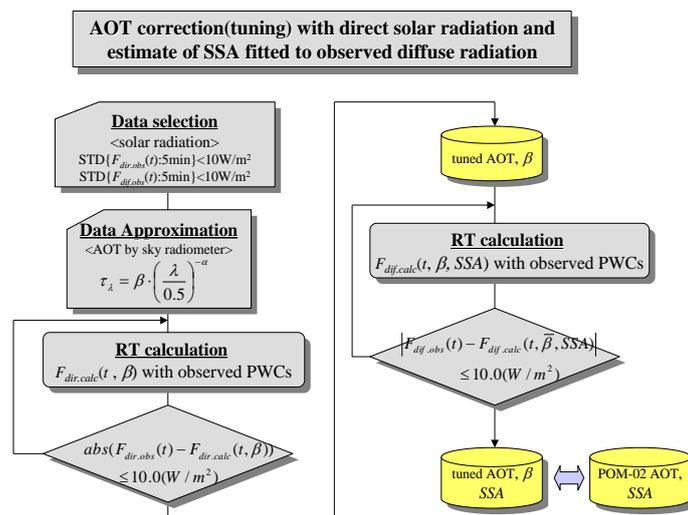


図30 シャドーバンド付き全天分光日射計からエアロゾルの光学的厚さ (AOT) 及び単一散乱アルベド (SSA) を求めるアルゴリズム

ないことから、最も近い波長の値で近似した。

全天分光日射計を用いた観測の場合、受光センサーの上面に取り付けてある拡散板の cosine 特性の精度が重要である。広帯域日射計の黒体センサーへの直接入力と異なり、拡散板を Lambert 面とすることは容易でなく、特に天頂角の増大につれて、一般に Lambert 面からのずれが大きくなる。従って、このずれを精度よく知ることがきわめて重要である。この特性は、単に天頂角方向だけでなく、方位角方向にも異なる可能性がある。さらに、拡散させるための拡散板内の散乱体の粒径分布や、拡散板自体の光学特性から、Lambert 面からのずれは波長特性を持つことが予想される。製品には、このずれを評価するための資料が添付されている。これは任意方向を北としたときの東西南北4方向の方位角に対して、天頂角を変えた場合の、天頂出力に対する任意天頂角での相対出力値として、いくつかの波長で計測、記載されたものである。解析では、このデータを元にして、天頂角、方位角方向にそれぞれ内挿して任意の方向の補正係数とする。

実際の観測で得られるデータはこうした誤差を含むものであり、検定値を用いて補正した値がそのまま水平面分光日射量 (spectral irradiance) に対応しない。得られるそれぞれの値は次式で示される。

$$\gamma_1 F_{dir} \cos(\theta_0) = \frac{I_{obs2} + I_{obs3}}{2} - I_{obs4}$$

$$\gamma_2 F_{dif} = I_{obs1} + I_{obs4} - \frac{I_{obs2} + I_{obs3}}{2}$$

$I_{obs1}$ ,  $I_{obs2}$ ,  $I_{obs3}$ ,  $I_{obs4}$  は、シャドーバンドがセンサー位置より低い最初の観測値、次にセンサーを隠す直前および直後、さらにセンサーの中心を遮蔽する位置にあった時の、それぞれ観測値である。 $F_{dir}$ ,  $F_{dif}$  は、理想的な場合の直達日射量と散乱日射量を示し、これに対してそれぞれ拡散板の誤差の補正係数を  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  として、それぞれ直達成分と散乱成分に対応するものである。

そのため、ここでは次のように計測データを処理する。

直達日射量の推定は、製品添付の資料に基づいて太陽位置に相当する天頂角データ（方位角方向の違いは小さいのでそれぞれの方向の平均を使用） $\gamma_1$  を用いることによって求めることができる。また、この補正された直達日射量から容易にその光学的厚さ (AOT) が求められる。

一方散乱日射量は、太陽位置を含む大気状態によって天空輝度分布が異なることから、Lambert 面からずれた場合の放射束密度を正しく補正することは容易でない。観測値から cosine 特性を補正した散乱光 ( $F_{dif}$ ) を求めるためには、直達光の場合と同様に、補正係数  $\gamma_2$  を知る必要がある。しかし補正係数  $\gamma_2$  は、放射束密度に対する補正係数であり、天空輝度分布によって変わるものである。従って厳密な補正は、太陽位置と大気の組成、とりわけ快晴時にはエアロゾルの光学特性に依存する。 $I(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0)$  を  $(\theta_0, \varphi_0)$  方向の散乱光とすると、観測される散乱光は次式となる：

$$\gamma_2(\theta_0, \varphi_0) F_{dif, \lambda}(\theta_0, \varphi_0) = \int_{\varphi} \int_{\theta} \gamma_1(\theta, \varphi) I_{\lambda}(\theta, \varphi; \theta_0, \varphi_0) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi,$$

そこで今回は上式を、エアロゾルパラメータ (SSA) を変えながらそのまま計算し、観測値と比較して最適の SSA を推定することとした。このアルゴリズムを図30に示す。

### (3) 全天日射計による放射影響評価

エアロゾルの放射効果は、水蒸気などの吸収性気体を含むエアロゾルのない大気と比較して、実際の大気の日射の散乱・減衰量として評価するものであり、ここではこれを放射強制量と定義する。放射効果は、地表面、大気自身、および大気上端での値として示されるが、観測によって直接得られるものは、地表面のもののみである。大気自身と大気上端での値は、放射計算を通じて推定する。地上での放射強制量は次式で定義する。

$$ARF_{SFC} = \frac{\int \int_{\lambda} [F_{obs}^{\downarrow}(\lambda, t) - F_{SFC.Ray}^{\downarrow}(\lambda, t)] [1 - R(\lambda)] d\lambda dt}{24 * 3600}$$

$$\cong \frac{(1 - \bar{R}) \int [F_{obs}^{\downarrow}(t) - F_{SFC.Ray}^{\downarrow}(t)] dt}{24 * 3600}$$

ここで、 $\bar{R}$ は太陽スペクトルで加重平均した地表面反射率であり、 $F_{SFC.Ray}(t)$ は時刻 $t$ におけるエアロゾルフリー大気の実測日射量を示している。一方、大気および大気上端での放射強制量は、次式によって求める。

$$ARF_{TOA} = \bar{F}_{TOA} - \bar{F}_{TOA.Ray},$$

$$ARF_{ATM} = ARF_{TOA} - ARF_{SFC}.$$

この放射計算では、スカイラジオメータによって得られる光学的厚さ、単一散乱アルベド、非対称因子などを用いる。また、吸収物質量は分光日射計データ処理に用いられたものと同様である。得られた地表面日射量が観測日射量と整合性がとれていることを確認し、大気上端および大気自体の放射強制量の妥当性をはかる。

本研究では、二つの点に着目して解析を行う。最初に、SKYNET 辺戸岬および福江島サイトにおけるエアロゾルの放射特性の傾向を知るために、月平均の変化を調査する。この計算ではエアロゾル、水蒸気パラメータ等の月平均を求め、これをもとに放射計算を行い推定する。

次に、福江島上空で航空機観測が行われた2009年3月31日および4月5日の事例解析を、上記に従って行う。

## 4. 結果と考察

### (1) スカイラジオメータによる SKYNET 福江島、辺戸岬サイトの観測結果

研究期間(2008-2010)中のエアロゾルの光学的厚さ(AOT)の月平均の変化を、SKYNET 福江島(図 31a)及び辺戸岬サイト(図 31b)についてまとめた。

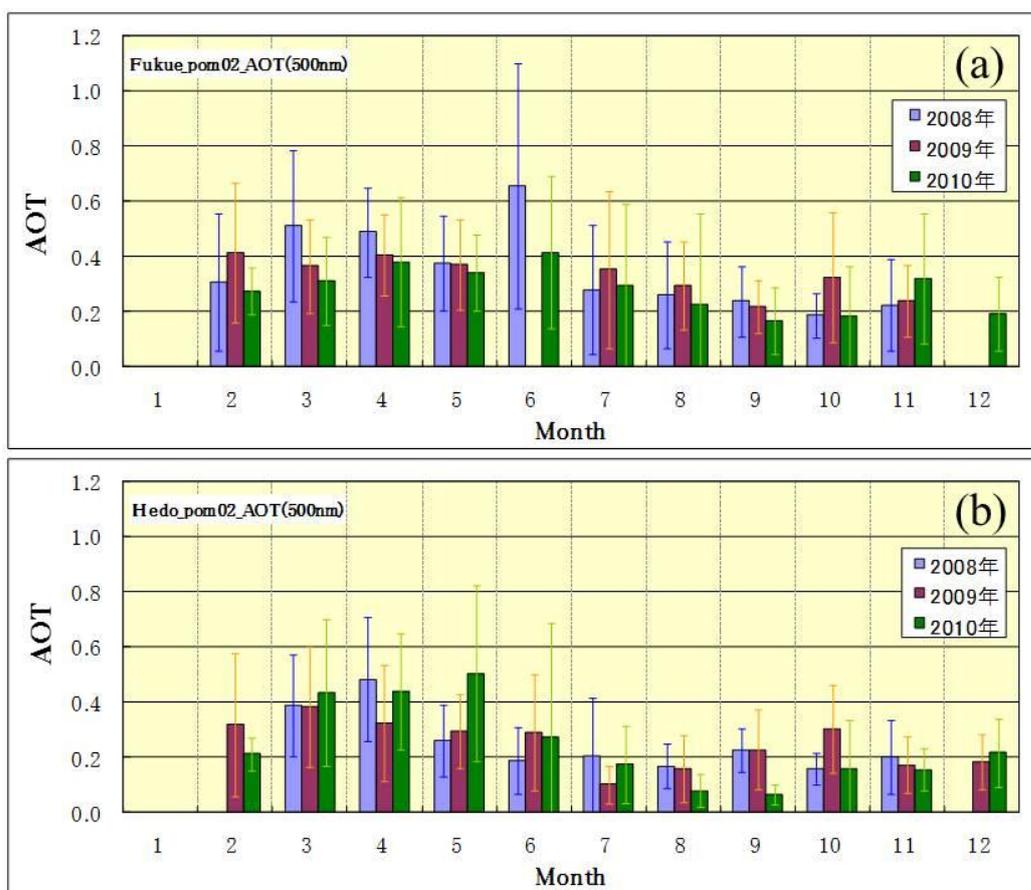


図31 SKYNET福江島(a)と辺戸岬(b)で観測されたエアロゾルの光学的厚さ(500nm)。2008年から2010年までの各月の平均を示す。バーは標準偏差を表す。

煩雑さを避ける為に、波長 500nm の結果のみ示したが、他の波長でも絶対値は異なるが概ね類似の傾向をもっている。図から分かるように、両サイトに共通する特徴は、春に高くなり夏から秋にかけて小さくなることである。また、絶対値で比較すると、3月・4月ほぼ同程度で、夏から秋に福江島のほうがやや高く出る傾向にある。その差は 500nm で、6月を除き最大 0.14(期間平均、9月)程度ある。

エアロゾルの光学特性との関係を見る為に示したものが図 32 である。これらの図は、3年間の月ごとの可能なデータの全ての平均である。図の左のカラムは福江島を示しており、右カラムが辺戸岬のデータである。また、上段からオングストロームの関係から得られる混濁係数 $\beta(1\mu\text{m})$ 及びオングストローム指数 $\alpha$  (中段)、下段が SSA (500nm) のそれぞれの全期間の月平均である。

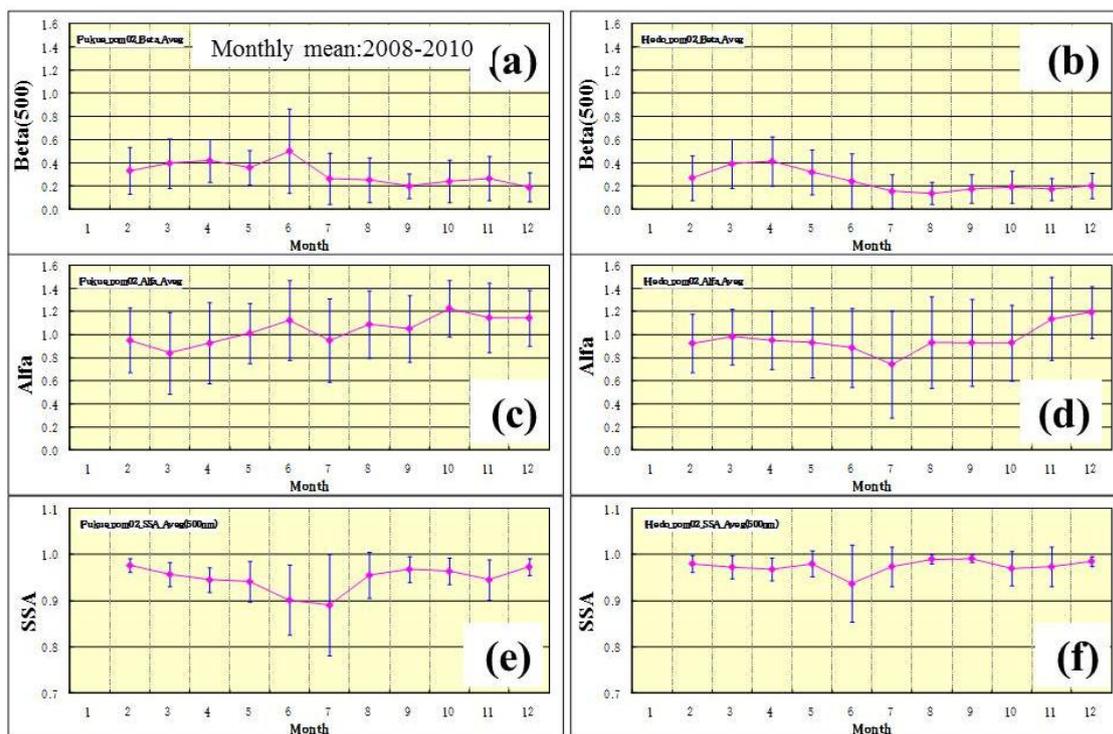


図32 SKYNET福江島(a:Beta, c:Alfa, d:SSA)及び辺戸岬(b:Beta, d: Alfa, f: SSA)で観測された月平均の $1 \cdot m$ の光学的厚さ(上段図: Beta), オングストローム指数(中段図: Alfa)及び単一散乱アルベド(最下段図: SSA)の変化。2008～2010年のSKYNETプロダクト レベル2の平均を示す。

混濁係数 $\beta$ は、図 31 と同様の傾向を示しており、6月を除き、両サイトでよく似た傾向を示す。一方、オングストローム指数 ( $\alpha$ ) の変動を見ると、全般に類似しているが、福江では 3 月を最小にゆっくりと上昇傾向を示すのに対して、辺戸岬では 7 月を除き殆ど変化せず、11 月、12 月にやや高い値を示している。福江島サイトの方が緯度が高く、春季の黄砂シーズンにはより影響を受けやすいと予想されるが、バラツキが大きく確定的ではない。また 10 月から 12 月にかけて大きくなる傾向は、大陸の汚染大気の影響の可能性を示唆しており、福江島サイトの方が早くから影響が出る可能性を示している。しかし、こうした傾向を単一散乱アルベド SSA(500nm)でみると、上記の予想を裏付けるものではない。特に福江島サイトでの年明けから一貫して 7 月まで低下する傾向の原因は、他の要因も併せて検討する必要がある。

本解析では SKYRAD.PACK v4.2 を使用しており、これまで AERONET の結果と比較されてきた。その結果、AOT は良く一致するものの、SSA が大きめにすることが指摘されてきた<sup>11)</sup>。最近この原因の一部が究明され、数ミクロン以上の巨大粒子や非球形粒子の取り扱い、雲影響データの除去の不徹底等が指摘されている。こうした新たな知見を考慮した解析プログラムの更新が進んでおり、今後の再解析に反映される予定である。

福江島の SSA の傾向は、こうした改良コードによる再解析の結果や、他の地上観測(吸収計等)やモデルの結果を併せて再度検討する必要がある。

## (2) 分光日射計 MS-700 を用いた観測結果

前節で述べたように、本研究ではエアロゾルの光学的厚さだけでなく、吸収特性を知ることにより大きな比重がある。放射効果を推定するために必要なエアロゾルのパラメータは単一散乱アルベド (SSA) であり、この波長特性を知る必要がある。スカイラジオメータは干渉フィルターを内蔵して分光を行い、波長特性を明らかにしようとするものであるが、より連続的に知るには分光器による観測が必要である。本研究では、直達光の遮蔽装置をつけた全天分光日射計を導入し、スカイラジオメータとは異なる手法で SSA の推定を行った。

解析手法は、前節で述べたので、その結果を以下にまとめる。解析は、SKYNET 福江島及び辺戸岬データで、研究対象期間の 2009 年及び 2010 年の 3~5 月である。本研究では、全天分光日射計を用いた解析に二つの目標があり、第一はこの手法と標準器材であるスカイラジオメータとの対応を検討することである。第二は、この器材の特徴である SSA のスペクトルを得ることである。

この節では、第一の目標について述べ、次節に航空機観測と同期した日のスペクトル解析の結果を述べる。

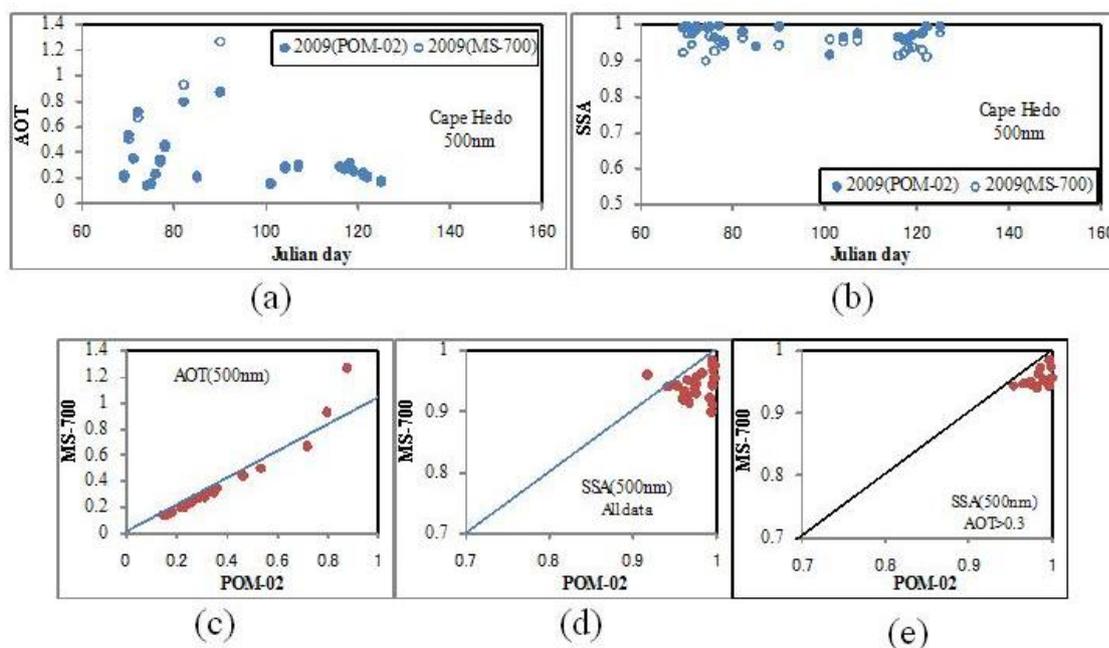


図33 SKYNET辺戸岬における全天分光日射計 (MS-700) 及びスカイラジオメータ (POM-02) によるエアロゾルの AOT ((a) 500nm)、SSA ((b) 500nm) の日平均の変動。両者の対応を AOT (c) 及び SSA (d) に示す。図 (e) は、AOT > 0.3 以上での SSA の対応を示す。

図 33 に、2009 年 3 月~5 月に観測された結果を示す。図 33 (a)、(b) は、それぞれ AOT、SSA の日平均の変動の様子を全天分光日射計及びスカイラジオメータについて示した。AOT の両者の違い (図 33 (c)) は、異常な 2 点を除くと平均 0.016 (500nm) 程度スカイラジオメータが一貫して大きく評価される。しかしこの差はスカイラジオメータの検定精度に近いものであり、全天分光日射計で AOT を充分精度良く推定できることを示している。

解析可能なデータによる SSA は、いずれも 0.9 (500nm) 以上の値を示しており、比較的散乱性の強いエアロゾルがこの時期の辺戸岬では多いことを示唆している。しかし、両者には、図 33 (c)

に見られるような一貫した差があり、AOT と異なりその差は比較的顕著である。また、スカイラジオメータの SSA が概ね大きめに出ていることが特徴である。AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/index.html>) では、SSA を AOT の一定値 (AOT(500nm) $>0.3$ ) 以上の場合に推定している。それに倣って抽出したものが図 33(e)である。本質的に図 33(d)と違いはなく、違いの平均は、0.026 程度である。この時、AOT の一致度の悪い 2 点を除いても違いは殆ど変わらなかった。

スカイラジオメータの他の波長でも同様の比較を試みたが、その傾向は 400nm チャンネルを除いて変わらなかった。400nm チャンネルでは、分光日射計からの SSA 推定で、適切な解の無い場合が多く、その原因を究明中である。

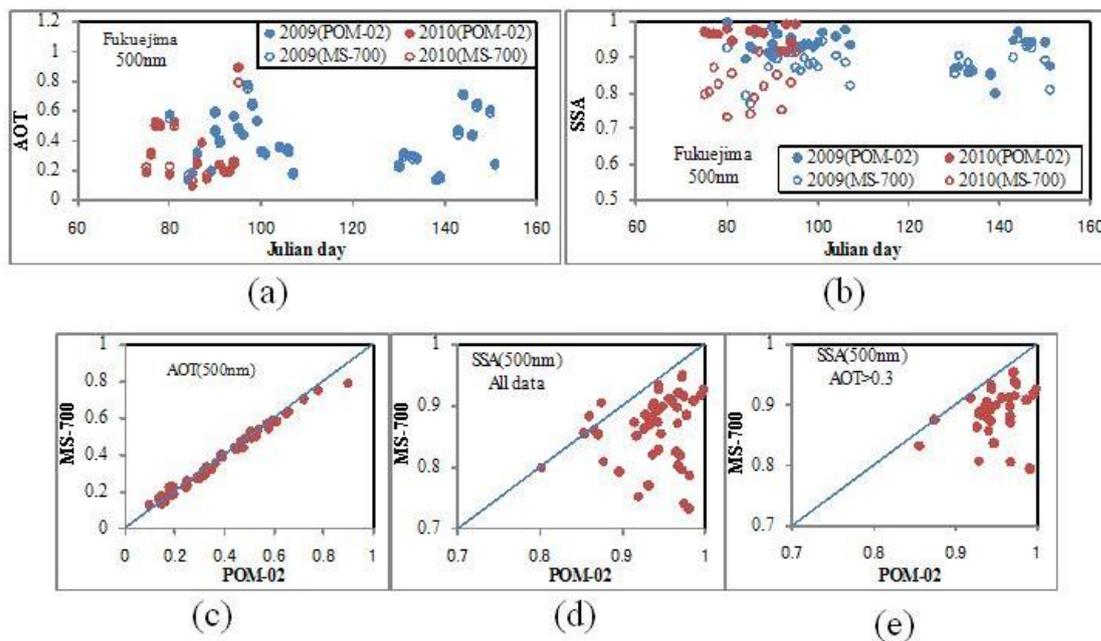


図34 図33と同様であるが、SKYNET福江島における例。福江島では、2009年及び2010年の例を示している。

図 34 は福江島のケースであり、2009 年及び 2010 年の 3 月～5 月の 2 年分のデータを対象としている。辺戸岬データと同様に解析を進めた結果、福江島の分光日射計から求められる AOT が、スカイラジオメータの同時観測データから得られるものと系統的に違い、その違いが太陽高度に強く依存していることが明らかとなった。これは、使用した分光日射計の cosine 特性に問題のあることを示している。このため、SSA を主とする今回の解析では、スカイラジオメータの解析を真値とし、これを再現するように新たに cosine 特性を推定し、この特性をもとに散乱光量を推定して最適の SSA を推定する手法とした(図 21)。従って、図 34(c)に示したスカイラジオメータと全天分光日射計の相関は 1 になるはずのものである。しかし、計算上の制約からこの新しい cosine 特性の導出には限られた日数のデータのみ使用して求め (2009/3/30 及び 4/5 の航空機観測時のもの)、これを他の日のデータにも適用した。その結果、図に見られるようなバラツキが発生している。しかし、このバラツキは 500nm の AOT で見ると、バイアス 0.004、標準偏差 0.024 程度と

なっている。これによって、より正しい cosine 特性が得られたので、このデータを散乱光の計算に用いて、最適の SSA を推定することとした。その結果が、図 34(b)である。

辺戸岬のものと同時期であるが、明らかに SSA の小さな値が多いことが分かる。スカイラジオメータとの比較を、全解析例に対して図 34(d)に、AOT(500nm)>0.3 の場合を図 34(e)に示す。この場合の差の平均は $-0.058 \pm 0.039$ であり、辺戸岬の違いよりかなり大きい。

福江島、辺戸岬のいずれの比較からも分光日射計からの SSA のほうが低く出る傾向があることがわかる。期間全部の解析可能なケースに対する両サイトの AOT と SSA の単純平均とその違いを表 2 に示す。

表2 SKYNETサイト福江島及び辺戸岬における、2009年及び2010年3月—5月の平均の光学的厚さ(AOT, 500nm)と単一散乱アルベド(SSA, 500nm)のまとめ。スカイラジオメータ及び分光日射計による結果を示す。

Mean values of AOT and SSA at 500nm for a period of Mar.-May, 2009-2010				
SKYNET site		Sky radiometer POM-02	Spectral pyranometer MS-700	Difference (MS700) – (POM02)
Fukuejima (福江島)	AOT	0.376±0.192	0.372±0.179	---(*)
	SSA	<b>0.940±0.043</b>	<b>0.864±0.056</b>	<b>-0.075</b>
Cape Hedo (辺戸岬)	AOT	0.298±0.139	0.282±0.131	-0.016
	SSA	<b>0.975±0.022</b>	<b>0.943±0.024</b>	<b>-0.032</b>

(\*) Fukuejima の MS-700 の AOT は、POM-02 の AOT で調整。詳細は本文参照。

表 2 に見られるように、両サイトの SSA を比較すると、この時期における福江島サイトのエアロゾルは辺戸岬に較べて明らかに吸収性の高いことを示している。図 32 に、スカイラジオメータで計測した 3 年間の平均の月平均の両サイトの違いで明らかにされているが、分光日射計でも同様の結果を示していることは、この傾向が確かなものであることを示している。一方、両器材による SSA の差は、福江島の結果ではかなり大きな違いがあり、違いの量的評価とその精度検証を行う必要がある。

### (3) 辺戸岬、福江島における放射影響評価

前項で得たエアロゾルの平均的な光学特性について、その放射効果を評価する。ここでは、この平均的なエアロゾルが存在する場合、太陽は各月の平均的な位置（各月の14日または15日）とし、水蒸気はマイクロ波放射計による現地観測の平均値、オゾン量はTOMSのものを利用する。従って、個々の解析の平均とはずれる可能性がある。しかし、放射強制量はその光学的厚さに強く依存することから、大きな違いはない。ただし、SSAによって変化することから、スカイラジオメータによって推定されるものに対して、さらにこれより0.05及び0.1各波長に対して一律に減少した場合の放射強制量の違いを併せて評価した。

図35は、SKYNET辺戸岬のエアロゾルによる放射強制量である。図の上段に、大気上端及び下端（地表面）でのものを、下段の図は上段と同じAOTであるが、SSAを実際の平均より0.05及び0.1小さく推定した時の強制量の差を示している。これは、前述のようにスカイラジオメータによるSSAの推定と全天分光日射計による推定に違いがあり、この影響を評価する為である。

季節や年によって大きく変動しているが、春の高濃度に対応して大きな強制量をもっていることがわかる。これは図31(b)に対応するものである。図中で大気上下端での強制量に大きな差がない月は、エアロゾルが非吸収性であることを示している。下段の図は、SSAが観測値よりそれぞれ0.05、0.1小さくなった場合（吸収性が強くなった場合）の、放射強制量の違いを示したものである。SSAが減少すると、図中の  $0W/m^2$  の線から離れ、地表ではより暗く、宇宙から見た地球も暗くなることになる。

図36に、SKYNET福江島の結果を示す。AOTの違いから予想されるように、放射強制量にも違いが見られる。

Aerosol Radiative Effect at Cape Hedo

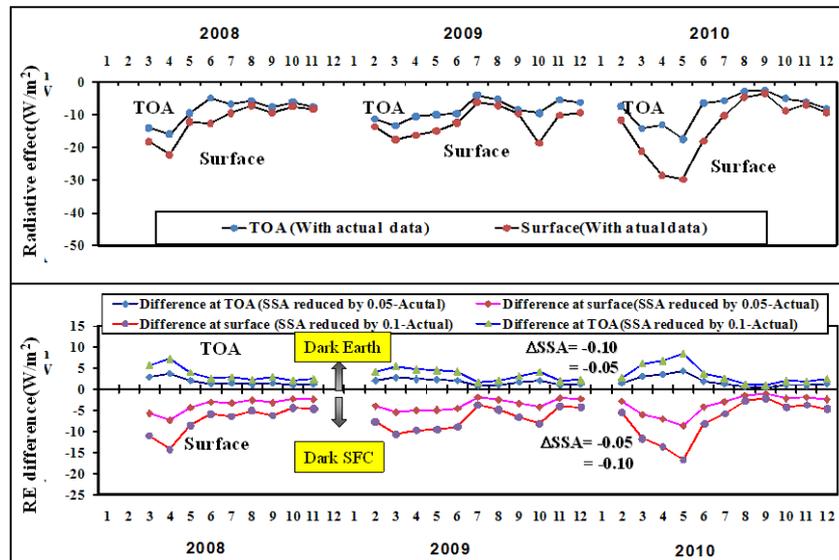


図35 SKYNET辺戸岬における月平均のエアロゾルパラメータから推定される大気上下端の放射強制量（上図）。下段の図は、同じAOTで、SSAが0.05及び0.1減少したときの強制力の差を示す。

Aerosol Radiative Effect at Fukuejima

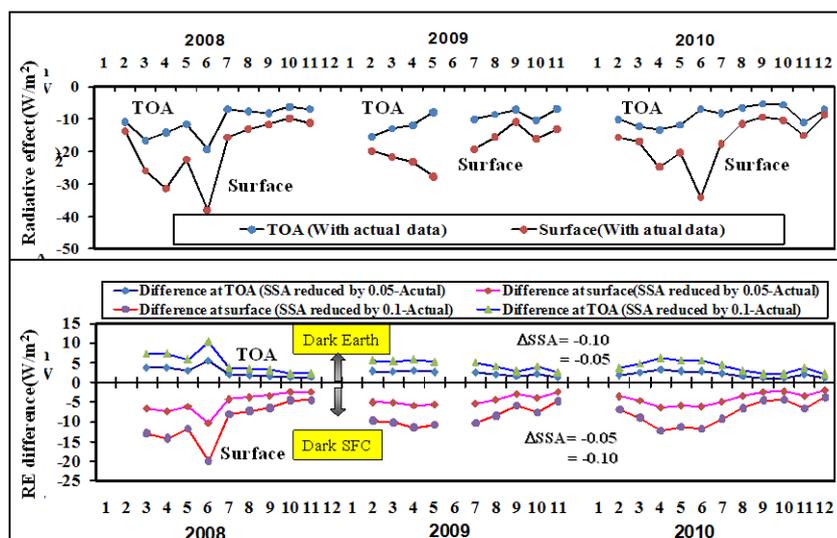


図36 SKYNET福江島における放射強制量。他は、図35に同じ。

表3 SKYNET福江島及び辺戸岬における2009-2010年3月-5月のエアロゾル放射強制量の平均。カラムSSAの” Present” に、観測された平均値を用いたものを、また、SSAが観測値より” 0.05” 及び” 0.10” 減少した場合の強制量の変化を示す。

Fukuejima (福江島)	SSA	TOA(W/m <sup>2</sup> )	Surf.(W/m <sup>2</sup> )	Atmos.(W/m <sup>2</sup> )
	Present		-11.6±1.9	22.4±3.7
AOT(500)=0.363±0.032	D: -0.05	2.8	-5.5	8.3
SSA(500)= 0.946±0.028	D: -0.10	5.4	-10.8	16.3
Cape Hedo (辺戸岬)	SSA	TOA(W/m <sup>2</sup> )	Surf.(W/m <sup>2</sup> )	Atmos.(W/m <sup>2</sup> )
	Present		-13.1±2.7	-21.4±6.4
AOT(500)=0.397±0.078	D: -0.05	3.1	-6.1	9.3
SSA(500)= 0.968±0.013	D: -0.10	6.0	-12.0	18.0

表3に、集中観測期間中の2009-2010年3~5月の放射強制量の平均についてまとめを示す。表中のAOT(500)及びSSA(500)の値が表2と異なるのは、表2の平均は対象となる全ケースの単純平均であるのに対して、表3はそれぞれの月平均値を平均したことによる。平均の放射強制量は、それぞれの月の値の平均を示している。この時期の放射強制量は、それぞれ11-13W/m<sup>2</sup>(上端)、21-22 W/m<sup>2</sup> (地表面)、及び9-11 W/m<sup>2</sup>を示している。AOTに顕著な違いがないため両サイトでの違いはそれほど大きくない。さらに、エアロゾルの吸収性が強くなり、SSAで0.05程度小さくなると大気上端でおよそ3 W/m<sup>2</sup>、地表面で6 W/m<sup>2</sup>、大気の吸収8 W/m<sup>2</sup>程度の強制量の強化となる。さらに0.1になるとおよそこの倍の強制量が見込まれる。

大気中での日射吸収の増加は、大気安定度を変えることから重要な量であり、図37にそれぞれのサイトについての変動の様子を示した。

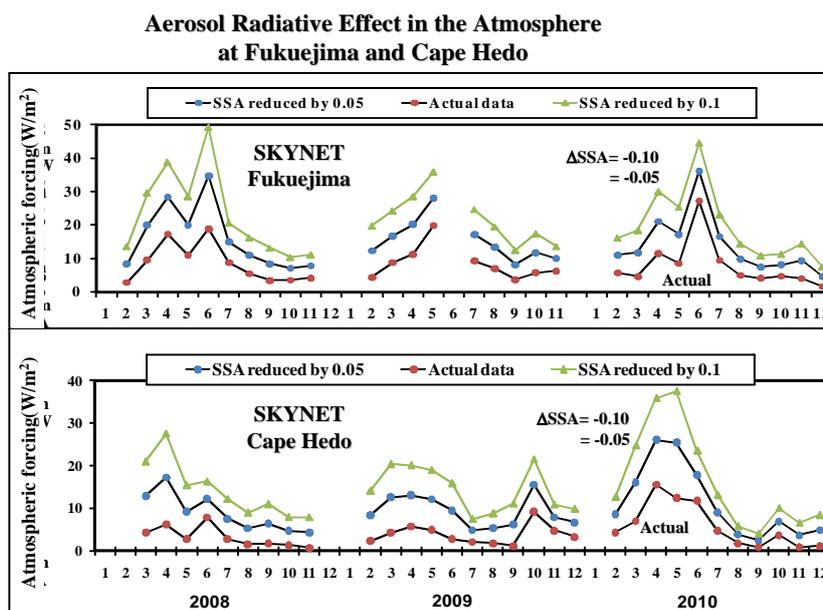


図37 SKYNET福江島（上図）及び辺戸岬（下図）での、日平均のエアロゾルによる日射吸収量。ΔSSAは、図35に同じ。

#### (4) 航空機観測時の地上観測のまとめ

航空機観測と同期した地上観測で、エアロゾルのカラム平均の光学特性について、全天分光日射計データの詳細解析をおこない、エアロゾルの分光特性のスペクトルを得ることを試みた。

航空機観測のうち、SKYNETサイト上空を飛行し、快晴で地上観測が収集されたものは2009年3月30日、4月5日の2日であった。当日の日射データを図38に示す。

3月30日は15時前後から機材の不調により欠測となった。また両日も、昼前後に離散雲が見られる。放射強制に利用するデータは、3月30日は10時前後まで、4月5日は15時前後以降の雲の影響のない時のみである。スカイラジオメータの観測と日射観測の併用による推定結果については、2009年度報告書に載せたので割愛する。

同時に計測した全天分光日射計(MS-700)による観測結果の例を紹介する。3の(2)節で述べたように、MS-700は散乱光を計測するためにシャドウバンドを併設しており、一組の観測で全天分光日射量と直達光をカットした散乱光のみの観測をほぼ同時に、定期的に繰り返し観測する。全天分光日射量と散乱日射量の差が、直達日射量となり、これからAOTの波長分布を推定する。図39(a)及び(c)が3月30日のもの、(b)及び(d)が4月5日のものである。AOTスペクトルの図中、赤丸は同時計測したスカイラジオメータ(POM-02)から得られたものを示している。福江島設置のMS-700のcosine特性が十分な精度を持っていないことが判明しており、POM-02のAOTに合うようMS-700のcosine特性データを修正して他のチャンネルデータも補正している。従って、両者のAOTは一致している一方、図中の三角は広帯域全天直達日射計出力から推定されたものである。

AOTスペクトルに見られる760nm及び940nm前後の大きな値は、酸素と水蒸気の吸収である。しかし、それ以外の気体吸収が弱く比較的平坦が期待される可視中心部でもAOTに振動が見られる。この振動はエアロゾル負荷の小さい3月30日の方が顕著にみられ、MS-700の検定時に使用した太陽スペクトルと、推定時に用いたスペクトルの違いに起因すると考えられる。

SSAのスペクトルを図39(c)及び(d)に示す。図中の赤丸をもつ線で、20nm間隔で求められている。前年度の報告で、スカイラジオメータの解析結果でも、3月30日は薄い濃度で吸収性が強く、4月5日は濃度が濃く吸収性が弱いことが示されているが、同様の結果を得ている。SSAスペクトルが振動しているのは、AOTスペクトルと同様の理由によると思われる。図には、WCP-55<sup>12)</sup>に示されたSSAを併せて示した。これによると、3月30日のケースでは600-700nmを中心に吸収が強くなっており、“Continental model”と“Urban model”の間にあることが示されている。一方、4月5日のケースでは、可視中心部で“Continental model”に近い。しかし、両データとも近赤外域で吸収が弱くなる傾向がでており、この原因を検討中である。SSAを求める時の各波長での散乱光量の再現性は、いずれの波長でも図30に示した基準(差が10W/m<sup>2</sup>以下)より遙かに小さく、1-2W/m<sup>2</sup>程度に収まっている。

こうしたことから、SSAの分光特性の精度のよい観測・解析によって、エアロゾルの特徴をより

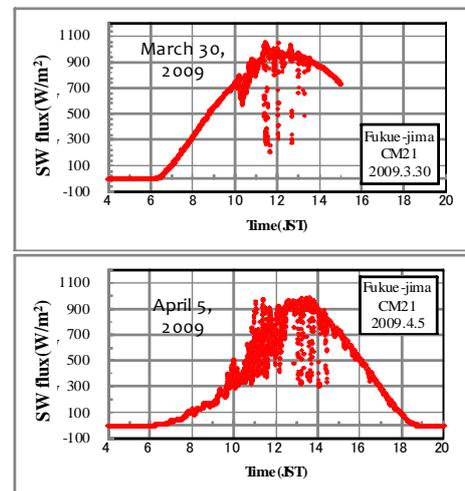


図38 航空機観測に同期した地上日射観測(2009/3/30,4/5)。

正確に記述することが可能であることが分かる。

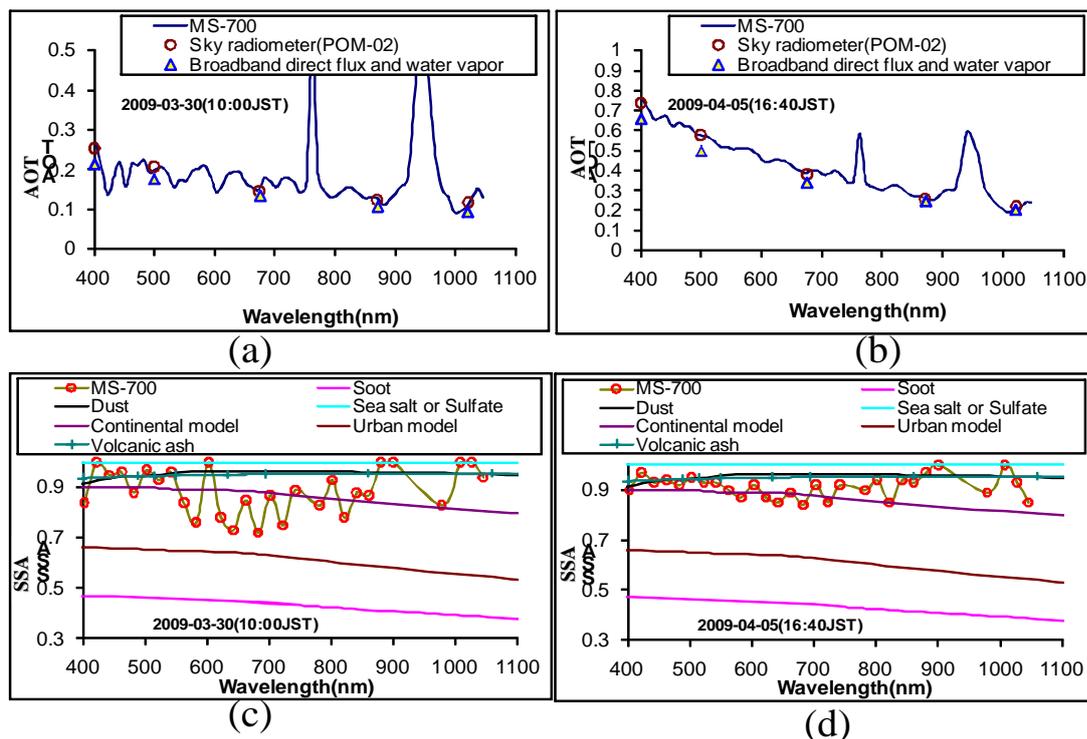


図39 全天分光日射計から推定されるAOTとSSAのスペクトル。図中のSSA（下段）には、比較のためにエアロゾルモデル（WCP-55）の値が同時に示されている。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

日本南西海域のSKYNET観測サイトである福江島（長崎県）及び辺戸岬（沖縄県）におけるエアロゾルの光学的特性を、スカイラジオメータ、全天分光日射計、及び広帯域直達・全天日射計等の地上放射観測データから求めた。航空機観測の行われた3～5月を中心にまとめた結果、いくつかの特徴が明らかとなった；

- ① 2008～2010年の月平均の光学的厚さ（AOT(500nm)）で見ると、3～5月を中心に大気は混濁し、AOT(500)が0.4程度に達する。その後夏季後半から冬季にかけて小さくなり、およそ半分程度で推移する。この傾向は両サイトともよく一致している。sky radiometerによる単一散乱アルベド(SSA)の変化を見ると、全般に福江島のそれは辺戸岬より強い吸収性を示している。福江島では2月から7月にかけて減少していき、その後に回復する特異な形を示しているが、辺戸岬では、変動はあるものの、ほぼ一定の値を示している。
- ② 全天分光日射計による2009-2010年3-5月の解析結果では、両サイトともスカイラジオメータと同様の解析結果が得られたが、SSAの絶対値はスカイラジオメータよりさらに小さくなる傾向が見られた。
- ③ 同時期の放射強制量をみると、光学的厚さに顕著な違いがないために、平均で12-13W/m<sup>2</sup>(TOA), 21-22 W/m<sup>2</sup>(Surface), 9-11 W/m<sup>2</sup>(Atmosphere)程度と見積もられた。吸収性の弱い辺戸岬の方が大気中での強制量（吸収量）は2 W/m<sup>2</sup>程度小さくなった。

- ④ 分光日射計の観測から SSA のスペクトル分布が推定され、エアロゾルのより詳しい特性の推定が可能となった。

以上の成果は、今後モデル構築やその検証に必要な貴重なデータである。

## (2) 環境政策への貢献

日本南西海域におけるエアロゾルの光学特性とその放射影響の経年的な変動が明らかになってきた。これは、エアロゾルの起源と輸送を考察する上で重要な資料であり、モデル研究と併せることにより東アジア域のエアロゾル環境とその影響に関する政策を考える上で重要なものと考えている。

## 6. 引用文献

- 1) IPCC, Climate Change 2007, 2007:The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, IPCC WGI, Fourth Assessment Report, 18pp, UNEP/WMO.
- 2) Ramanathan, V., P.J. Crutzen, J. Lelieveld, A.P. Mitra, D. Althausen, J. Anderson, M.O. Andreae, W. Cantrell, G.R. Cass, C.E. Chung, A.D. Clarke, J.A. Coakley, W.D. Collins, W.C. Conant, F. Dulac, J. Heintzenberg, A. J. Heymsfield, B. Holben, S. Howell, J. Hudson, A. Jayaraman, J.T. Kiehl, T.N. Krishnamurti, D. Lubin, G. McFarquhar, T. Novakov, J.A. Ogren, I.A. Podgorny, K. Prather, K. Priestley, J.M. Prospero, P.K. Quinn, K. Rajeev, P. Rasch, S. Rupert, R. Sadourny, S.K. Satheesh, G.E. Shaw, P. Sheridan, And F.P. J. Valero, 2001: Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze, *J. Geophys. Res.*, 106(D22), 28371-28398.
- 3) Ramanathan, V., P.J. Crutzen, 2003: New Directions: Atmospheric Brown "Clouds", *Atmospheric Environment*, 37, 4033-4035.
- 4) Takamura, T., T. Nakajima and SKYNET community group, 2004: Overview of SKYNET and its Activities, *OPTICA PURA Y APLICADA*, 37(3), 3303- 3308.
- 5) Reynolds, R.M., Mark A. Miller, Mary J. Bartholomew, 2001: Design, operation, and calibration of a shipboard fast-rotating shadowband spectral radiometer, *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 18, 200-214.
- 6) van de Hulst, H.C., 1957: *Light Scattering by Small Particles*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- 7) Tanaka M., T. Nakajima, and M. Shiobara, 1986: Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations, *Appl. Opt.*, 25, 1170-1176.
- 8) 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, *Appl. Opt.*, 35, 2672-2686.
- 9) Khatri, P. and T. Takamura, 2009: An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis, *J. Meteorol Soc. Japan*, 87 (1), 189-204.

- 10) Wehrli, C., 1985: Extraterrestrial Solar Spectrum, Publication no. 615, Physikalisch-Meteorologisches Observatorium + World Radiation Center (PMO/WRC) Davos Dorf, Switzerland.
- 11) 橋本真喜子、2011: 天空木戸観測から導出されるエアロゾル光学特性に関する研究、2010年度東京大学理学系研究科修士学位論文。
- 12) Deepak, A., and H. E. Gerber (Eds.), 1983: WCP-55, "Report of the Experts Meetings on Aerosols and Their Climatic Effects", International Council of Scientific Unions, WMO.

## 7. 国際共同研究等の状況

東アジアを中心としたエアロゾル・雲の放射影響評価を行うための観測ネットワーク SKYNET 活動を通じて、関係国（モンゴル、中国、韓国、タイ、インド）と共同研究を実施している。本研究の枠組みと解析では、中国、韓国のデータを使用しておらず、共同研究も実施していない。

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 紙上発表

〈論文(査読あり)〉

1. Khatri, P. and T. Takamura, 2009: An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis, J. Meteorol. Soc. Japan, 87 (1), 189-204.
2. Khatri, P., T. Takamura, A. Shimizu, and N. Sugimoto, 2010: Spectral dependency of aerosol absorption over the East China Sea region, Sci. Online Lett. Atmos., 6, 1-4.

### (2) 口頭発表(学会)

1. Khatri, P. and T. Takamura, 2008: A method to screen cloud affected data for sky radiometer data analysis, 2008年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, B212, P158, 2008年11月19日～21日, 仙台国際センター。
2. Khatri, P. and T. Takamura, Cloud screening of sky radiometer data of SKYNET network, 2009:AERONET, Network Sun Photometry and MODIS RS Training Workshop, August 16-21, 2009, Zhejiang Forestry University, Hangzhou, China.
3. Takamura, T., and T. Nakajima, 2009:SKYNET Observation Network Activities for Climate change monitoring on aerosol and cloud, AERONET, Network Sun Photometry and MODIS RS Training Workshop, August 16-21, 2009, Zhejiang Forestry University, Hangzhou, China.
4. 高村民雄、P. KHATRI、近藤豊、2009: 2009年3月-4月の福江島におけるエアロゾルの放射効果、日本気象学会秋季大会、2009年度秋季大会講演予稿集、C209, P215, 2009年11月25日～27日、アクロス福岡。
5. Khatri, P. T. Takamura, and A. Shimizu, 2009: A study of spectral dependency of

aerosol light absorption over East China Sea region using sky radiometer data, 日本気象学会秋季大会、2009 年度秋季大会講演予稿集、C211, P217, 2009 年 11 月 25 日～27 日、アクロス福岡.

6. Khatri, P. T. Takamura, A. Yamazakai, Y. Kondo, 2010: Retrieval of aerosol optical parameters using spectral irradiances measured at surface, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会、AAS005-P01、幕張メッセ国際会議場、2010 年 5 月 27 日.
7. Khatri, P., T. Takamura, A. Yamazaki, and Y. Kondo, 2010: Aerosol optical parameters of SKYNET sites retrieved by using spectral irradiances measured at surface, 日本リモートセンシング学会第 49 回(平成 22 年度秋季)学術講演会論文集, 2010 年 11 月 9 日-10 日, 鹿児島市, pp79-80.
8. Takamura, T., P. Khatri, and Y. Kondoh, 2011: AOT and SSA derivation by a shadowband spectral pyranometer at SKYNET site, International Symposium on Radiative Effect of Atmospheric Brown Clouds, January 12-16, 2011, Jinghong Yunnan, China.

- (3) 出願特許  
該当なし
- (4) シンポジウム、セミナーの開催  
該当なし
- (5) マスコミ等への公表・報道等  
該当なし
- (6) その他  
該当なし