



Title	SKYNET における雲・エアロゾルの観測と課題
Author(s)	高村, 民雄
Description	III. 雲・エアロゾルの光学的特性とその応用
Citation	低温科学, 72, 133-144
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55025
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_015.pdf



SKYNET における雲・エアロゾルの観測と課題

高村 民雄

エアロゾルや雲の放射影響評価を地上観測によって明らかにする目的で、SKYNET が構築された。SKYNET は、観測ネットワークをベースとした、観測データ及び解析結果の共有、観測・解析手法の開発などを行うオープン研究コミュニティである。基幹機材であるスカイラジオメータ (POM-01, POM-02) の観測・解析を中心に、SKYNET ではデータ品質の統一と向上を図るための努力が、観測・解析の両面で行われている。

SKYNET で観測されるエアロゾルは、それぞれの地域の特徴としてまとめられると同時に、衛星によるエアロゾルプロダクトの検証にも利用され、その一例を示した。こうした研究では、衛星データ解析による幾つかの仮定の妥当性が検証され、アルゴリズムの改善に役立てられる。SKYNET の重要拠点では、ライダーを利用した鉛直分布計測や散乱計、吸収計を利用した直接サンプリングも並行して行われている。こうした多様なデータは、複合的な解析を通してより精確な描像を得るのに有用である。

SKYNET による地上からの雲計測は、スカイラジオメータ (POM-02) を主として、その他に雲カメラ、マイクロ波放射計などが重要拠点で実施されている。雲計測のポイントは雲の非均質性であり、新しい観測・解析手法を含めて、放射影響評価のための努力がなされている。

Some topics and issues of aerosol and cloud observations in SKYNET

Tamio Takamura

The SKYNET is an open research network for observation to estimate the radiative effects of aerosol and cloud in the atmosphere. The research community can share the observed data and the analyzed results in the SKYNET as well as these methods, and has been making efforts to improve the data quality in terms of observation and analysis.

Aerosol parameters derived in the SKYNET activities are compiled as optical features in each region, and also utilized for the validation of satellite products. An example is shown in the satellite validation to improve the retrieval algorithm. In-situ sampling instruments such as a nephelometer, absorption meter, etc are operated as well as a lidar to get an aerosol vertical profile in several super sites of the SKYNET. Through the comprehensive analysis of these data, the understanding of the optical characteristics of aerosols makes progress.

Cloud observation in the SKYNET is also performed using a sky radiometer (POM-02) mainly, and in addition, a sky-viewing camera, a microwave radiometer and related instruments working in some super sites. The most sensitive issues on cloud observation are inhomogeneity in time and space. The SKYNET community has been making efforts to make it clear in viewpoint of radiative effects of clouds including developments of observation and analysis methods.

1. SKYNET の目的

大気中に浮遊する微粒子 (エアロゾル) の研究は古くからあり、JUNGE 分布 (Junge 1955) に代表されるように、典型的な粒径分布にその名前をとどめている。一方、電子計算機の発展とともに気候影響に関する研究も進み、60 年代から 70 年代にかけて既に影響評価の研究がある (例えば、Yamamoto and Tanaka 1972)。しかし、気体と異なり大気中での寿命が短いことや、汚染が

連絡先

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

Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University Chiba, Japan

e-mail : takamura@faculty.chiba-u.jp

局地的なものと考えられる傾向にあり、一部の研究者を除いて、全球的な影響評価研究についてそれほど深刻に考えられてこなかった。

ところが1983年に、米ソ両大国による全面核戦争は、放射能汚染だけでなく、深刻な気候影響を及ぼすことを数値的に評価する研究が発表され、全世界に大きな反響を巻き起こした（例えばターコ他 1984；Levi and Rothman 1985）。これは微粒子が引き起こす人為的な気候影響としては極めて極端な例であるが、必ずしも非現実的なものではないことを示しており、政策担当者の判断にも相当の影響を与えたものと思われる。Budyko (1969) は、わずかな日射の減少が急速な全球の不可逆的な寒冷化につながることを単純化したモデルで示し、気候に対する太陽エネルギー変化の敏感さを主張している。そうした研究と相まって大規模な核の使用は「パンドーラの箱」のようなものとなった。

人為起源の二酸化炭素の増加が温室効果をもたらし、温暖化傾向が促進される可能性が次第に高まり、気候モデルの進化もあって、そのメカニズムの詳細を組み込むことが必要となってきた。そのなかで冷却に関与すると予想される雲やエアロゾルの挙動は、IPCC (2013) の最新の報告書でも指摘されているように、不明の点が多々ある。将来予測の精度をあげようとするれば、このエアロゾルと雲が、温暖化に伴ってどのように振る舞うかが重要な課題であり、いわゆるエアロゾルの間接効果の仕組みと影響を知ることが必要となってきた。

SKYNET は、雲とエアロゾルの放射影響評価に関する地上観測地点である。雲は地球全体の放射収支に大きな影響を与えているにも関わらず気象官署での計測は不十分で、目視による雲量・雲種などが、限られた観測所でなされているにすぎない。またエアロゾルの直接観測は、WMO (GAW) の要請による綾里、南鳥島、与那国島でのサンフォトメータによるもののみである。これらの観測サイトは、バックグラウンド汚染を測ることに主眼があり、国際協力の一環として、特定波長の光学的厚さを現在も継続的に観測している (<http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/infohp/monitoring.html>)。

様々な人間活動が多様な分野で拡大し、その影響も広範囲に及んでいる。大気環境への影響も自然起源による変動を越えて広く地球全体に及び、自然の持つ復元力をも越えていることが懸念されている。こうした地球環境の状況を計算機内部で再現し、高精度の影響評価と将来予測に関する研究が進んでいる。そこでは、大気・海洋・陸域での気候に影響を与える因子の全球の実態把握が必要不可欠である。陸域に偏る地上観測はこうした要請に対して不十分であり、雲やエアロゾルのようにもともと十分な観測がなされていないものも多い。衛星計測は、広範囲に均質データが得られる点でおおきな優位性を持っている。しかし、衛星計測で全てが分かるわけ

はなく、計測できないものもあり、また推定される物理量の質や精度には検証も必要である。

SKYNET は、こうしたことを背景に、これまでの観測では得られない雲・エアロゾルの放射影響に関する情報を地上観測から得ようとするものであり、関連する研究者の自主的な観測をネットワークとして組織化したものである。

2. SKYNET のフレームと体制

SKYNET は雲・エアロゾル観測を中心とした観測ネットワークである。このネットワークは、個々の研究者が自主的に参加するもので、観測されたデータはSKYNET データポリシーのもとで参加者に共有されている (<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>)。これによって、少ない資金で多くのデータを得ることができ、効率的なデータ利用が行われる。また、特定予算に基づく研究観測はその目的が終了するとともに観測自体も終了するが、雲・エアロゾルに関する研究課題は幅広く、使用機材が機能する限り継続して観測することによって、長期データの収集と解析を可能にすることが出来る。雲やエアロゾルの定量的で継続的な地上観測データは少なく、貴重なデータとなる。

SKYNET では、その中核機材であるスカイラジオメータの観測データ解析に、共通の解析ソフトを提供している。またSKYNET コミュニティの研究者が開発したソフトウェアは、SKYNET 全体で共有することでデータ品質を一定に保つ努力を行っている。これは、ネットワークによるデータの共有化・共通化のためには必須の要件である。それぞれの研究者が計測したデータは、それぞれの研究者が利用・解析すると同時に、生データをSKYNET データセンターに集約し、一括して解析・公開する体制となっている。データセンターは、現在千葉大学環境リモートセンシング研究センター内に置かれており、データマネジメントは千葉大学が中心となって管理・運営する体制である。

ネットワークによって、各サイトから定期的に送られてくる生データは、一時処理として、暫定検定値を用いた物理量変換等が行われホームページ上で公開される。また、検定値などの変更や処理手法の改善があった場合には、その都度新しい解析値に更新される。

図1に、SKYNET コミュニティとしてスカイラジオメータを設置している地点を示している。個人の立場だけでなく、組織として加わっているサイトもある。ヨーロッパ地域では独自にネットワークを構成して活動 (<http://www.euroskyrad.net/index.html>) を行っており、相互にソフトウェアのチェックやデータ交換を行っている。インドも同様である。ネットワークの拡大につれて、こうした各地域を単位としたサブネットワーク化

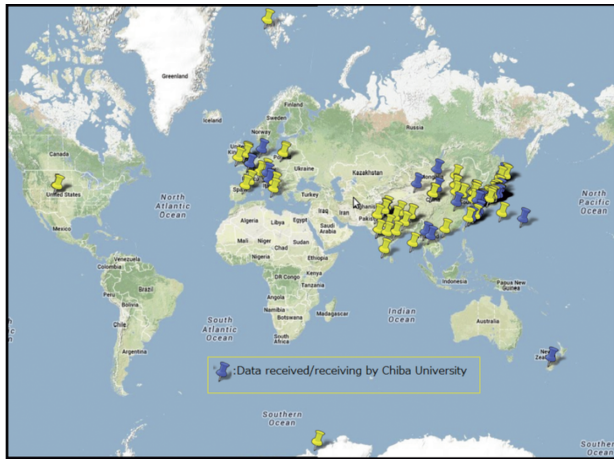


図1：スカイラジオメータ設置地点。

が進みつつある。

3. SKYNET 機材と維持管理

SKYNET 観測機材は、エアロゾル、雲及び放射を観測する機材からなっている。各サイトは、設置した研究者の目的によって様々な機材がある。共通しているのは、最低限エアロゾル観測機材であるスカイラジオメータが設置してあることである。表1に代表的な設置機材の一覧を示す。

エアロゾル計測には、衛星計測同様リモートセンシ

ング手法によって推定するものと、in-situ でエアロゾルを直接計測するものとに分かれる。リモートセンシング手法を用いるものには、エアロゾルのカラム積算値やカラム平均の物理量を求めるスカイラジオメータや、鉛直分布を直接計測するライダー（レーザレダ）などがある。一方、後者の代表的なものには、エアロゾル吸収計、散乱計、粒径計測器などがあり、直接計測する強みはあるが鉛直分布やカラム積算値を知ることは出来ない。それぞれに特徴をもっており、その目的に応じて利用することとなる。

一方雲計測では、直接計測をすることはできず全てリモートセンシング手法に依る。スカイラジオメータによって、鉛直直上の透過輝度観測により雲の光学的厚さを推定する。マイクロ波放射計では、雲水及び水蒸気から射出されるマイクロ波領域の電磁波を計測し、得られた輝度温度から雲水量と水蒸気量を推定する。また、雲カメラでは全天の雲の状況を定期的にモニターしている。最新の機材として、94 GHz を利用した雲レーダを独自に開発しており、雲の内部構造の解明やマクロ的特徴との関連研究に威力を発揮する。

また正確な放射影響評価のために、各サイトに全天日射計が設置されているところが多い。さらに赤外放射計、散乱日射計、直達日射計等を設置しているサイトもある。

こうした機材によるデータを利用する際に重要なこと

表1：SKYNET に展開されている機材のまとめ。全てが設置されているわけではなく、サイトによって、それぞれ異なる。“Tr” は、Traceability のある機材を示している。（*PWC：可降水量）

	Model	Tr.	Manufacturer	Aerosol	Cloud	Radiation	Others
sky radiometer	POM-01		PREDE	○			
	POM-02		PREDE	○	○		○(*PWC)
sun photometer	PGS-100		PREDE	○			
pyrheliometer	CH-1/CHP-1	○	Kipp & Zonen			○	
pyranometer	CM21/CMP21	○	Kipp & Zonen			○	
pyrgeometer	CG4	○	Kipp & Zonen			○	
	PIR	○	Eppley Lab.			○	
UV radiometer	UV-S-AB-T		Kipp & Zonen			○	
Spectral radiometer	MS-700		EKO	○		○	
microwave radiometer	WVR-1100		Radiometrics		○		○(*PWC)
	MP-1500		Radiometrics		○		○(*PWC)
	HATPRO		RPG		○		
cloud camera	PSV-100		PREDE		○		
cloud radar	FALCON-I		Chiba University		○		
lidar	—		NIES	○	○		
optical particle counter	KC-01D		RION	○			
	Model 237		MetOne	○			
aerosol scattering meter	Nephelometer M903		Radiance Research	○			
	Nephelometer 3563		TSI	○			
aerosol absorption meter	Aethalometer		Magee Scientific	○			
	SP-Y02		Hokkaido University	○			

は、データの信頼性である。日射計・放射計のように世界標準のある機材と、そうでない機材が混在しており、表に見られるように、可能なものについては、気象庁気象研究所と協力して機材校正の体制を確立している。スカイラジオメータの検定については次節で紹介する。

4. SKYNET によるエアロゾル観測

4.1 Sky radiometer の検定, CIMEL CE 318 との違い

スカイラジオメータは、天空輝度分布を計測し、その輝度分布の形状からエアロゾルの光学特性（光学的厚さ、単一散乱アルベド、等価粒径分布、平均複素屈折率等）を知ろうとする機材である。従って、センサーは単に太陽追尾するだけでなく、任意の方向の輝度を分光計測することができる。エアロゾルの光学的厚さは直達光の分光計測で得ることができるが、エアロゾル自体の平均的な複素屈折率を知るには、散乱光のパターンを知る必要があるためである。米国 NASA が展開する AERONET (Aerosol Robotic Network) では、フランス CIMEL 社製のサンフォトメータ (CE 318) を使用して、類似の観測を行っている。

解析の原理は、散乱光の角度特性がエアロゾルの粒径分布と複素屈折率に依存することを利用する。また複数波長の利用は、粒子の光学特性の波長依存性を知ると同時に、散乱に対する相対効果を変えることから、より幅広い粒径分布の推定に効果的である。

エアロゾルの放射影響評価では、その光学的厚さ (AOT) を知ることが最も重要であり、古くから計測が行われている。地上で計測される波長 λ の直達光の強度は、次式で表すことができる。ここで τ は大気全体の光学的厚さを示しており、気体の吸収のない波長域では空気分子の散乱とエアロゾルの消散 (AOT) の和となる。また E は地球太陽間距離 (天文単位) であり、 θ_0 は時刻 t での太陽天頂角を示している；

$$I_{\lambda}(t) = \frac{1}{E^2} I_{0\lambda} e^{-\tau(t)/\cos(\theta_0(t))}$$

AOT は、検定値 $I_{0\lambda}$ が分かれば I_{λ} を計測することで推定することが出来る。この $I_{0\lambda}$ の精度が AOT の精度になるため、その精度維持が重要である。SKYNET の国内主要サイトでは、気象庁気象研究所の国内基準器と比較することによって値付けする。この基準器は、毎年米国 NOAA のマウナロア観測所 (ハワイ州、標高 3400 m) において、Langley 法によって値付けしたものである。AERONET も同様の手法で検定をしており、両者の AOT の観測値はよく一致していることが分かっている。

一方、散乱光 (散乱角: Θ) の評価は、直達光との比 (R) で推定する；

$$R(\Theta) = \omega \tau P(\Theta) + q(\Theta)$$

ここで、 ω は単一散乱アルベド、 τ は光学的厚さである。右辺第一項は一回散乱、第二項は多重散乱項であり、光学的に薄い場合には散乱光は光学的厚さに比例することを示している。このとき、直達光の検定は、上記の通り大気が安定な高山などで直接太陽光を観測することによりなされるが、これはあくまで大気の上端での太陽エネルギーを基準としたときの相対検定であり絶対検定 (光量の絶対値計測) ではない。一方散乱光は、センサー開口 (受光立体角) の違いによって受光量が異なることから、センサーの立体角を厳密に計測しておく必要がある。あるいは、その立体角に入射する光量の絶対検定が出来れば、既知の光源を用いることによってこの問題を解決することも出来る。

AOT の推定にはセンサーの相対検定で十分であるが、エアロゾルの吸収性 (単一散乱アルベド, SSA) を評価しようとする精度のよい散乱光計測が欠かせない。即ち立体角を精度よく知るか、あるいは計測する散乱光量の絶対値を計測するか、いずれにしてもそれぞれ機材の検定が必要である。スカイラジオメータを使用する SKYNET では前者の手法を、サンフォトメータ CE 318 を用いる AERONET では積分球を用いた後者の手法を確立している。

スカイラジオメータなどのこの種の分光型フォトメータは、分光に 10 nm 程度の狭帯域干渉フィルターを採用している。このフィルターは比較的劣化が早く、特に使用開始直後から 1 - 2 年の間の透過率の減少の著しいものが散見される。もし検定値がずれると、AOT の推定値の誤差が拡大することは勿論、上式から分かるように、推定しようとする SSA にも影響を与えることになる。こうした計測器では、通常 1 年に一回程度の検定 (校正) を実施するが、必ずしもこうした状況に対応出来ない場合がある。SKYNET では、従来の Langley 法と並んでこうした劣化による検定値の変化を推定するために、Improved Langley 法が開発されている (Tanaka et al. 1986; Nakajima et al. 1996)。もしエアロゾルの質が一定の場合、直達光の減衰しか計測出来ない従来のサンフォトメータでは不可能であった検定値の推定を可能にしようとするものである。この原理は、一定の仮定の下に直達・散乱光比から暫定の大気的光学的厚さを推定し、これを利用して検定値を推定しようとするものであり、AERONET では採用されていないものである。図 2 に、SKYNET 辺戸岬、福江島、宮古島サイトで使用しているスカイラジオメータの検定値の経年変化の例を月平均の値として示している。Improved Langley 法で推定されたものであるが、併せて 2008 年 1 月及び 2009 年 1 月には Langley 法で求めたものが示しており、よく一致していることが分かる。頻繁に検定できないサイトにおいても、一定の品質で検定できるこ

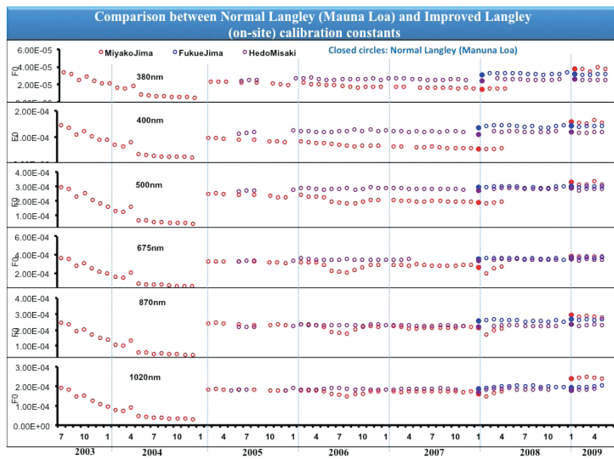


図2：Langley法とImproved Langley法によるスカイラジオメータの検定例。In-situで実施可能なImproved Langley法によって、細かな検定値の変動が確認できる。

とを示しており、アクセスの容易でないところや、厳しい環境下での使用にも対応出来ることを示している。この図を見ると、検定値が必ずしも経年的に安定ではない様子がよく分かる。

4.2 エアロゾルの解析例と衛星検証

地上で計測するエアロゾルは地理的に限られるが、それでもこれまで多くの観測がなされており、その成果が報告されている。またそれらをもとにエアロゾルのモデルもいくつか構築されてきた (Shettle and Fenn 1979; Deepak and Gerber 1991; Hess et al. 1998)。人為起源エアロゾルは殆ど陸域が発生源であり研究対象になりやすく、観測も比較的容易なことによる。一方、海洋上や海洋性のエアロゾルの観測は離島や船舶などを用いて観測されている (例えば, Yabuki et al. 2003)。

全球の状況を知るには、地域的なウェイトのかからない情報が必須である。地球観測衛星を用いたエアロゾル観測は、日射の十分でない極域を除き、こうした要請に対して好都合であり、粒径分布の形や屈折率を仮定すれば、1波長でも推定することが可能である。とりわけ地表条件の比較的分かりやすい海域 (水域) のエアロゾルは、アルゴリズム上は容易になる。一方、陸域では地表面の影響を適切に評価するのが難しく、その影響が相対的に小さくなるような条件の場合について推定が可能となる (例えば, Kaufmann and Sendra 1988)。

日本が打ち上げた本格的な地球観測衛星である ADEOS II は、可視・近赤外・赤外線センサー (GLI) を搭載して、大気・海洋・陸域の多様な情報を収集した。大気チャンネルを用いたエアロゾル推定も重要な生成プロダクトの一つである。この GLI 衛星データの、SKYNET データを用いた地上検証についての例を紹介する。図3は、Takamura et al. (2009) によって示された例で、図3(a)及び(c) (原図でも図3) は、初期アルゴリズム (ver.1) を用いたものである。明らかに地

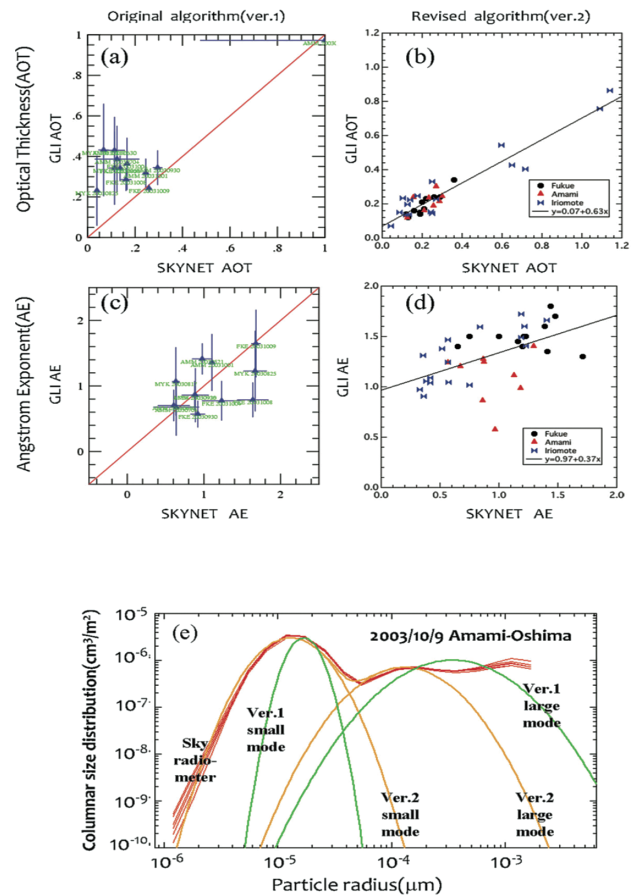


図3：スカイラジオメータによるエアロゾルの観測と衛星計測データの比較。(a)及び(b)は光学的厚さ、(c)及び(d)はオングストローム指数を示している。(a)及び(c)は、衛星推定アルゴリズムの初期版 (ver.1) を利用したものであり、図中の緑字はSKYNETの観測サイトを示している。(b)及び(d)は、地上検証によって、衛星データのエアロゾル推定アルゴリズムを改訂した結果 (ver.2) をそれぞれ示している。(e)に、推定アルゴリズムに使用した粒径分布の初期版と改訂版の違いが見える。

上の観測値と比較して、光学的厚さ (AOT) が過大評価傾向を示している。一方、オングストローム指数 (AE) の対応は比較的よい。AOTの不一致を是正するためにSKYNET奄美大島のデータを解析したところ、図3(e)に示されるように、GLIの解析で仮定されている粒径分布とはわずかに異なるものが得られている。こうした地上観測に基づいて粒径分布の仮定を変えて再解析 (ver.2) を行ったものが図3(b), (d)である。AOTの一致度はかなり改善されているが、AOTが大きくなると明らかにGLI AOTが過小評価になっていることがわかる。また、合うはずのAEは、むしろver.2の方が悪化しているように見える。これは、解析上の仮定がまだ不十分なことを示している。0.6~1以上の大きなAOTがIriomote (沖縄) で観測されているが、こうした大きなAOTは極めて薄い絹雲の影響を受けている可能性もある。検証では、こうした影響を避ける必要があり、信頼性の高いデータスクリーニングが欠かせない。こうした点を考慮すると、必ずしもGLIのアルゴリズム

ムのみに課題があるわけではなく、地上観測の精度及び信頼度の検証も並行して確認することを必要としている。

4.3 エアロゾル直接観測

エアロゾルの日射・放射への影響を知るには、エアロゾルの化学組成自体を知ることはそれほど重要ではない。その分布状態から推定される光学的厚さ、日射・放射に対する散乱・吸収の光学的な性質が分かればよい。エアロゾルをテーマとした研究者は多く、健康影響や汚染質の拡散、超微粒子生成などの多岐にわたる。とりわけ戦後高度成長期に深刻化した大気汚染では、喘息などの原因物質として広く調査・研究が進んだ経緯がある。各地の自治体に公害研究所や類似機能を持つ施設が設置され、こうした物質の観測体制が生まれた。健康影響の調査・研究では、重量濃度や化学分析を中心とする観測・解析が主であり、放射影響まで省みられることは殆どない。また、その手法から地上付近のサンプルに限られる。同時に、こうした汚染質がどのように拡散するか、発源地から拡がっていくのかも重要なテーマであり、混合層や境界層の研究も盛んとなったが、やはり放射影響の観点はなかった。

しかし、大循環モデルによる地球気候の再現が進み、人為起源エアロゾルの大規模な流れに伴う気候影響が重要な課題として俎上に上っている。そこではエアロゾルは重要なトレーサーとしての役割も果たしており、化学組成分析の重要性があらためて認識されている。

SKYNETでの地上観測によるエアロゾルの直接サンプリングでは、こうした化学組成分析は行われておらず、主として光学手法によるエアロゾルの散乱・吸収特性を直接計測することが行われている。これは、エアロゾル量を光学的効果の観点から手軽に計測出来る測定器として急速に普及している。(SKYNET 福江島、辺戸岬の両サイトでは、他グループによるエアロゾルの直接サンプリングによる化学組成分析が実施されている。)

こうした機材でエアロゾルのサンプリングをするには、注意が必要である。大気中に浮遊する状態と同じ状態で計測することはいずれの機材でも困難で、一旦パイプ等を利用してセンサー部分のある観測室に導入する。気体と異なり、この過程でエアロゾルの性質が変わる可能性がある。その第一は、吸引パイプの設計によっては粒子の大きさによってサンプリングされる粒子が選択的となり、本来のエアロゾル分布とは異なる分布サンプルを計測している可能性があることである。このため、導入路は慎重な設計が必要である。更に、導入路の中でも、室内に入れた時点で室内外の温度差による粒径変化の可能性もある (Hanel 1976)。

こうした点がきちんと評価されていないと、得られた結果に思わぬ誤差を生むことになる。

SKYNET サイトでエアロゾルの直接サンプリングを行っている地点では、こうした影響を最小にするために PM 10 相当のインパクターによる粒子カットと各計測器の吸引量に対応した等速吸引ノズルを採用している (兼保他 2009)。また、エアロゾルの湿度依存による変化を避けるために、室内引き込み時直後のパイプにヒーターを巻き、空気温度を 50°C に調整している。これによりエアロゾルを乾燥させたのちに、各計測器に導いている。従って、計測されたものは浮遊状態のものではなく、乾燥化させたものであることに注意する必要がある。

エアロゾルの散乱特性を計測するには、ネフェロメータを利用する。この機材は、外部から導いた微粒子を含む空気を光散乱室に導き、これにフラッシュランプ (ハロゲンランプや LED など) によって光を照射する。エアロゾルによって散乱された光は、分光フィルター付きの光検出器で連続的に検出する。巧みな光学系の配置によって、広範囲の散乱角方向から来る光をそのまま積分値として得ることが出来る構造となっており、原理的には全散乱断面積 (散乱係数) が推定可能なものである。

一方、エアロゾルの吸収の計測には幾つかの方法があるが、散乱量と比較すると吸収量は極めて小さいため、浮遊状態で計測するのはとても難しい。吸収量を増やす必要があり、簡便なのはフィルター上に捕集したのちに、サンプルに光を照射しその透過光量から推定するのである。ベースとなる清浄フィルターの透過率が既知であれば、Beer の法則でエアロゾル層での透過率が分かり、さらに照射光の断面積と通過する試料に対応する積算体積 (サンプル空気量) で吸収断面積を対応させることになる。

これらの散乱及び吸収係数がわかれば、エアロゾルの単一散乱アルベド (SSA) を推定することが可能となる。こうした計測器から推定される SSA は、それぞれの計測器から得られる散乱係数、吸収係数にどのような誤差が含まれるかに注意する必要がある。例えば、散乱計によって求められる散乱係数は、前方や後方の散乱部分を十分に捉えておらず、例えば Radiance Research 社 (M 903) のものでは 10°~170° の散乱光を集光しているに過ぎない (TSI では 7°~171°)。この機材は、清浄な空気と二酸化炭素を用いて検定を行っているが、これらの散乱パターン (Rayleigh 散乱) と粒子の散乱パターン (Mie 散乱) は異なっており、特に前方散乱が大きく異なる。このため、計測データを正しく評価するためには補正が必要であるが、それには粒子の粒径分布の知識が必要となる。通常この補正を行わないと、散乱係数を過小評価することとなり、その結果、仮に吸収係数が正しいとしても SSA を小さく見積もる結果となる。例えば、前記の M 903 の計測では、最大 40% 程度の補正が必要となる場合もあることが示されている。

(Yabuki et al. 2003). 一方、光吸収計は、高濃度のエアロゾル集積の透過率を計測するため、試料内部やベースとなるフィルターとの多重散乱効果を評価する必要がある (Bond et al. 1999). しかし、多重散乱は粒子の成層状態によって異なるので定量的に評価するのは容易でない。また、散乱の様相も粒径によって異なる。これは精度のよい検定を行ったとしても、その計測上の特性に由来するものであり、避けることができないものである。どのような機材にも、計測結果にはそれぞれ計測手法に基づく固有の誤差を持つが、こうした場合にはその影響の程度を十分に把握することが必須である。

エアロゾルは、発生してそのまま大きく拡がることなく降下・沈着していくものと、黄砂やサハラダスト、大規模火山爆発の噴煙のように、長距離を移動し広範に影響を与えるものがある。自然現象だけでなく人為的な汚染も同様である。こうした長距離輸送の実態を知るには、衛星観測は勿論、輸送モデルによる研究が有効な手段として推進されている。こうしたものを検証するためにも、地上定点における種々の継続的な関連観測が必要である。エアロゾルのカラム情報は、前述のスカイラジオメータやサンフォトメータが、またエアロゾルの起源の推定には化学分析が極めて有効な手法である。3次元構造の解明には、ライダーによる鉛直分布の観測が極めて効果的であり、SKYNET でも福江島、辺戸岬、千葉大などのサイトは、国立環境研究所が中心となって実施している AD-Net (<http://www.lidar.nies.go.jp/AD-Net/>) の一部と重複したサイトとして運営されている。AD-Net で使用しているライダーは、後方散乱係数の鉛直分布の他に、偏光解消度の計測を行い、非球形粒子の検出も同時に行うことから、土壌粒子のような非球形性の強いエアロゾルを分離することが可能で、カラム情報しか得られないスカイラジオメータの解析にも、大きな力となる (例えば、Takamura et al. 2007)。

4.4 課題

直接サンプリングは、計測手法そのものは高い精度や信頼度が得られる反面、エアロゾル計測の場合には、こうした浮遊状態と必ずしも同一でない点で、放射影響評価を行う場合の課題となる。一方、放射環境の計測から推定されるエアロゾルパラメータは、カラム全体の平均的な量ではあるが、放射環境を再現できる点で有利である。

こうしたエアロゾルの直接・間接の複合的な観測が実施されているサイトでは、それぞれから得られるエアロゾルプロダクトが相互に整合性のとれたものとなっている必要がある。残念ながら現段階では、そのような検討は十分でなく、必ずしも合理的なプロダクトと言えない可能性もある。例えば、スカイラジオメータから得られる光学的厚さがライダーから推定されるものと一致して

いることや、そのプロダクトを用いて推定する日射量が観測値と整合することなどである。前述の吸収・散乱計を用いた地上観測値から推定される単一散乱アルベドやライダー解析時に使用される後方散乱係数比が、スカイラジオメータから推定されるものと大きくかけ離れず、かつ化学組成の観点からも合理的なものとなっている必要がある。

こうしたことを行う上で、大きな課題は浮遊状態のエアロゾルと計測時のものが、必ずしも同じでないことである。複合的な観測が行われているサイトでは、個々の観測値から得られる物理量の整合性を吟味することで、エアロゾルの混合状態や浮遊状態のパラメータに関する新しい知見を得る可能性も考えられる。

5. SKYNET による雲観測

雲の挙動は地球の放射収支に決定的な影響を与えるが、分からないことが多い。関心が高いことは、温暖化に雲がどのように反応するかと言う点である。気象庁では、地上気象観測指針 (1993) に基づいてルーチンの雲観測を実施しており、このなかでは雲量、雲形、雲高などを目視によって観測・記録している。観測の主目的は、大気運動に伴う雲の状態把握にあり、総観規模現象の解析を含めた気象擾乱の解明に役立つ雲観測としての立場である。従って、こうした気候目的のための雲観測の視点が小さく、また目視観測という点でも他の観測項目と異なる。観測に高度の練度が要求され、長期的な傾向把握や統計処理になじみにくい要素である。

出来るだけ観測結果に普遍性を持たせるには、曖昧さを出来るだけ排除する明確な定義や閾値の設定、手法依存性の少ない観測方法が必要であるが、こうした観点での定量的な地上からの雲観測は、現在気象官署では行われていない。

一方、衛星観測はマクロな雲の動態を知るには最適のものである。とりわけ静止衛星による観測は、高頻度で計測出来ることから比較的变化の激しい雲にも対応でき、長期・短期のいずれの時間スケールにも対応可能である。ISCCP (International Cloud Climatology Project: <http://isccp.giss.nasa.gov/index.html>) は、こうした雲の状態の長期変動を知るために、運用中の気象衛星や地球観測衛星のデータから、雲量、光学的厚さ、雲頂温度などを解析・蓄積している。気象庁も、このプロジェクトに対して「ひまわり」のデータ提供を継続している。

SKYNET による雲観測は、こうしたことを背景にして日本が主導する地球観測衛星 ADEOS II の実施に伴い、その主要センサーの一つである GLI から推定される雲パラメータの検証を目的に開始された。検証には幾つかの項目があるが、ここでは雲量、光学的厚さ、有効

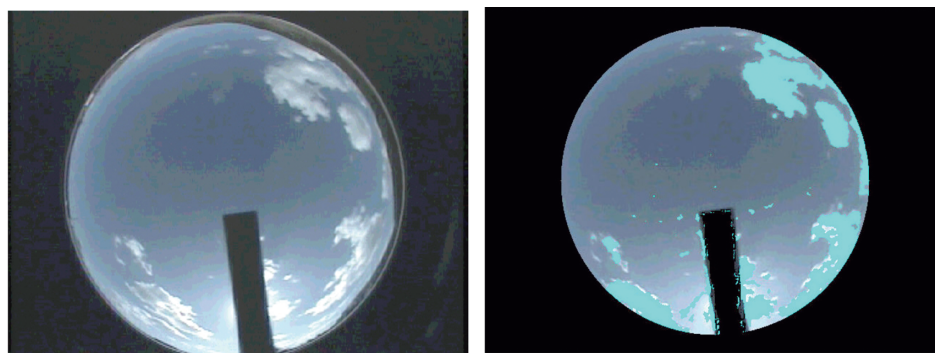


図4：雲カメラ SKYVIEW で撮影したイメージ（左）と、雲の検出結果の例．中央の黒い棒は、太陽直達光を遮蔽するためのもの．

粒径に関するものについて述べる．

5.1 雲カメラによる観測と雲量

雲カメラは、魚眼レンズを持つイメージセンサーで、指定の時間間隔で空の状況を撮影する．直達光によるセンサーの劣化を防ぐためにシャドーバンドが取り付けられている．空のモニターには極めて有効で、単に雲のあるなしだけでなく、アニメーションを作成することによって雲の移動方向や降水なども確認できる．

魚眼レンズのイメージから雲量を推定するには、レンズの投影法が重要である．幾つかの方法があるが、SKYNET で使用している魚眼レンズは、画像中心からの距離 r が天頂角 θ に比例するタイプ（等距離射影）と、像面積が立体角に比例するタイプ（等立体角射影）の2種類あり、現在は後者のものになっている．これによって画面上の面積で雲量を推定しようとする、観測者の中心から立体視野角に比例した雲量と同等となる．これは、必ずしも衛星からみた平面の雲量とは異なるが、地上で観測する場合の視覚的なものとはよく対応するはずである．

撮影イメージを用いて、雲量に変換するには雲の白さを利用する．撮影されたフォーマットは JPEG であり、これを RGB に変換したのち色度図に対応させることになる．これを用いて空の青さと雲の白さを判別するが、必ずしも撮影された色は絶対的なものではないので、経験的に閾値を事前に決めることが必要である．図4に例を示す．左の元のイメージに対して、ピクセル毎の雲判別とパターン認識による雲判別を組み合わせた結果が右図である．概ね認識しているが、所々目視と異なるところも散見され、改善の余地のあることを示している．

この雲判別では、エアロゾルによる太陽周辺光と雲の分別が問題となる．エアロゾルが増えるにつれて白く輝く太陽周辺光が増加し、一見雲と区別することが出来ないこととなる．やっかいなことは、この影響がエアロゾル濃度に依存することである．これを避ける方法はまだ開発されておらず、濃いエアロゾル状態での太陽周辺の雲判別は課題となっている．

衛星雲量は、一定の地理的面積に占める雲の割合である．これを地上観測値と対応させるには、雲の高度も考慮する必要がある．即ち、雨雲のような低層雲の場合と絹雲のような高層雲では、衛星から見た雲量は大きく異なるが、地上からのものは、相対的に雲を見込む立体角が異なることから大きく異なる可能性がある．衛星計測に対応する、地上からの雲量計測の自動化にはこうした点を考慮する必要がある．

5.2 Sky radiometer による雲パラメータの計測

雲の光学的な厚さ（COD）と有効粒径（ r_{eff} ）は、雲の発達・成長を考える上でも重要なパラメータである．SKYNET では、スカイラジオメータに 1.627、及び 2.2 ミクロンの雲チャンネルを追加（POM-02）して計測している．雲による吸収の少ない従来のチャンネル（1.02 ミクロン）と吸収のあるチャンネルを組み合わせることによって推定する原理である（Kikuchi et al. 2006）．図5に、地表面反射率がゼロで太陽天頂角が 30° の場合に、1.02 ミクロンと 2.2 ミクロンの鉛直方向

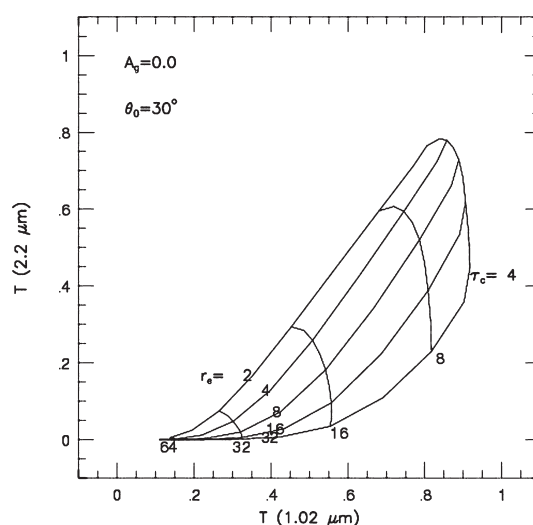


図5：太陽天頂角 30° で、地表面反射率 = 0 のときの、1.02 μm と 2.2 μm の層状雲の透過率．雲の光学的厚さ（ τ_c ）が 4～64 に対して、有効半径（ r_e ）が 2～32 μm をパラメータとして描いてある．

を見た時の雲の透過率を示している．太陽高度に依存するが，光学的に厚くなると，吸収のない1.02ミクロンでの透過率は計測できるものの，吸収のある2.2ミクロンでは透過光がほとんど地上に到達せず，光学的厚さは分かるが粒径推定が難しくなることを示している．2.2ミクロンより弱い吸収を示す1.627ミクロンを用いると，その点は改善されるが粒径推定精度は低くなる．

図6に，同一の雲を異なる手法で解析したときの有効粒径の違いの例を示す（Pandithurai et al. 2009）．2008年3～5月，SKYNET 沖縄辺戸岬での集中観測時のデータから推定されたもので，94 GHz 雲レーダのみ，雲レーダ+マイクロ波放射計，スカイラジオメータ（1.02+1.627 μm ，1.02+2.2 μm ）によるものの4種類の結果の経時変化と，同時に上空を通過したMODISのデータが，3日に分けて描かれている．スカイラジオメータの2チャンネルから推定される結果が必ずしも同じ値となっておらず，概して2.2 μm を用いた推定が有効粒径を大きめに評価する傾向が見える．しかし，その差は雲レーダによる推定値の違いに比べると遙かに小さく，雲レーダを用いた推定仮定にも課題のあることがわかる．雲レーダの時間断面図から，ターゲットの雲は全て水雲であり，比較的層状性の雲と考えられるが，こうした違いを生む理由は，観測上，解析上の双方に検討す

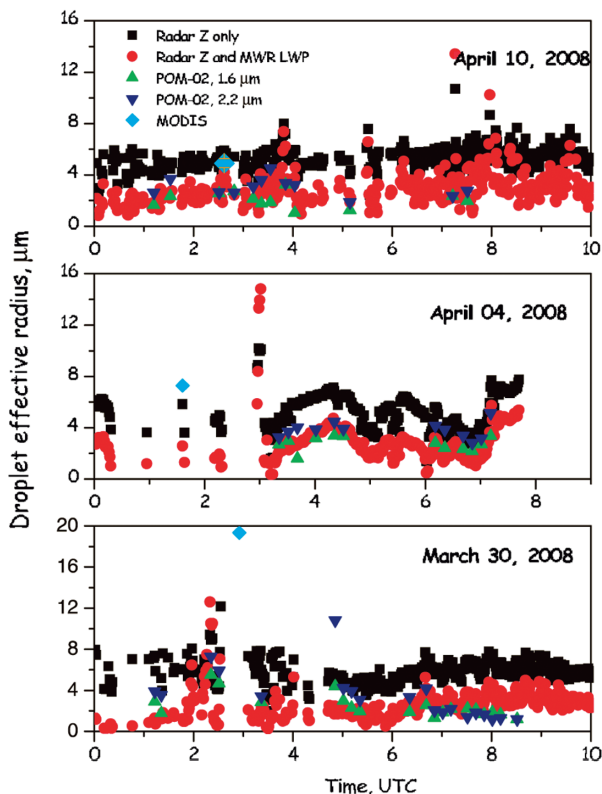


図6：幾つかの観測・解析手法から得られた雲の有効粒径の例．94 GHz 雲レーダのみ（黒），雲レーダとマイクロ波放射計の組み合わせ（赤），スカイラジオメータ（1.6 μm （緑）と2.2 μm （青））及びMODIS（空色）のそれぞれについて，時間変化で示されている．

べき課題が未だあることは明白である．観測上の問題では，観測された雲に大きな非均質性はなくとも，それぞれの機材の視野（角）が異なることによって結果に影響を与えることや検定値のずれなどが予想される．また，太陽光を用いるスカイラジオメータや衛星センサーでは，大気状態や地表面の仮定が結果に影響を及ぼす可能性がある．MODISの結果とも一致度がよくないのは，こうした幾つかの原因が積み重なったものであり，予想される原因を出来るだけ排除する努力が必要である．

スカイラジオメータによる雲パラメータ推定では，上記のようにそれぞれのチャンネルの透過率から求めることができるが，このためには各チャンネルで受ける散乱光の輝度を精度よく計測する必要がある．これはエアロゾルの散乱光計測と同様であることから，その検定にはMLOでのLangley法による検定と大気上端での該当波長での太陽エネルギー分布を仮定することによって達成することができる．しかし，この波長域では太陽エネルギー自体がかなり小さく，センサーを安定した状態で保つ工夫も同時に必要となる．

SKYNETサイトでは，雲の計測が出来るPOM-02と雲チャンネルのないPOM-01のいずれかのスカイラジオメータが設置されているが，現在ルーチ的な雲パラメータの解析は行っていない．集中観測などで必要な場合に依拠して個別解析を行っているが，今後ルーチ的に解析を行い，結果を公開する予定である．

5.3 マイクロ波放射計と日射計による雲パラメータ推定

雲水量は雲水量と並んで，雲がもつ水の総量（LWP）を示す指標として重要なパラメータである．ほぼ球の水粒子から構成される水雲では，雲の光学的厚さ（COD）とその有効粒径（ r_{eff} ）の間に次の関係がある；

$$LWP = \frac{2}{3} COD \cdot r_{\text{eff}}$$

この雲水量は，マイクロ波放射計で直接計測することが可能である．これは水（液体）自身が出すマイクロ波領域の僅かな放射を検出して推定するもので，通常市販の放射計では可降水量（PWC）も同時に推定する．マイクロ波領域の水蒸気吸収線の近傍である23 GHz前後と，水蒸気吸収の小さい30 GHz前後の2周波を用いたものが一般的に用いられており，得られる輝度温度（または対応する光学的厚さ）から推定されるものである．

一方，水平均質な雲がある場合，そのCODと r_{eff} が分かれば，放射伝達方程式を用いて地表面での日射量は推定可能である．これは，もしLWPが計測出来れば，同時に計測される日射量を用いることによってCODと r_{eff} が推定出来ることを示している．SKYNETでは日射計を併設しているところが多く，こうしたことが可能

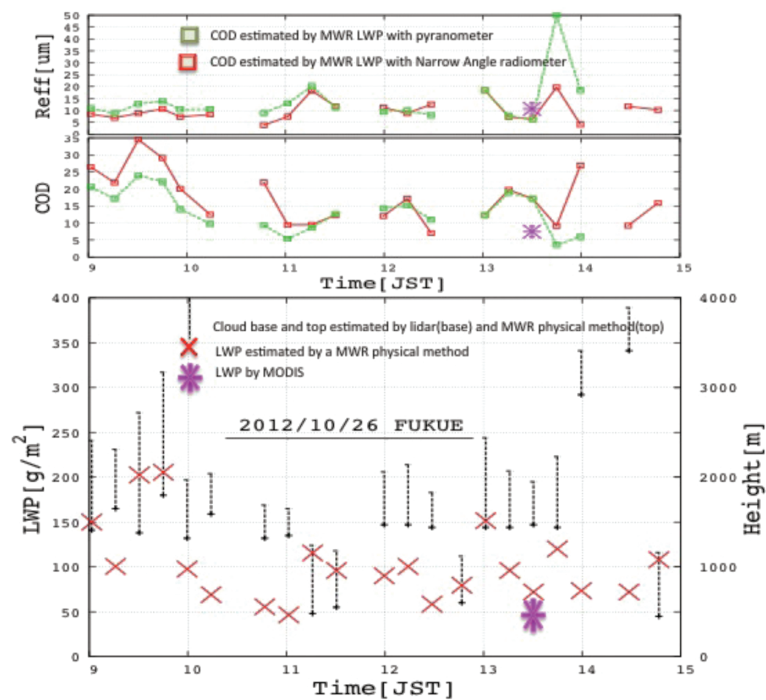


図7：マイクロ波放射計による LWP（下段）と、これと観測日射量を組み合わせで推定された COD（中段）と r_{eff} （上段）。全天日射量（黄緑）と狭視野日射計（赤）の違いによってそれぞれのパラメータの推定精度が異なるのは、雲の非均質性を表している。

となる。これは、衛星による雲パラメータ推定データの検証手法の一つとして利用することも出来る。

雲パラメータの定量的評価で最大の問題は、その非均質性にある。例えば、極めて小さな雲でも、その雲が太陽を遮蔽していれば地上で受ける全天日射量は小さく、同じ雲が太陽方向と大きく異なる場所にあれば、その雲の影響はほとんどない。雲の観測においては、水平非均質の影響を最小限にとどめる必要がある。

図7に、マイクロ波放射計による LWP と観測日射量を併用して推定した COD と r_{eff} のサンプル例を示す。観測値は、SKYNET 福江島サイトである。下段に、マイクロ波放射計による LWP (X 印) の変化を示しており、図中の短い垂直の破線は雲の存在範囲（雲底と雲頂）を示している。これは、マイクロ波放射計から得られる LWP の推定精度を向上させるためのアルゴリズムを利用する際に同時に求まるものである。この時、雲底は同時計測のライダーデータを利用している。この日は、おおむね 1500 m 前後に雲底をもつ雲であるが、時々 500 m 程度のものもあること観測されている。同時計測の日射量を利用して推定した COD を中段に、 r_{eff} を上段に示す。両図に黄緑と赤で示した点は、それぞれ全天日射計と視野角 11° の狭視野日射計を用いた場合の結果である。

完全な平行平板の雲であれば、いずれの日射計でも同じ結果を得られるはずであるが、非均質な雲や明らかな離散雲では、両者の結果は異なることになる。両者が大きく異なるところは、非均質性の高いところと考えられ

る。因みに利用したマイクロ波放射計はおよそ 5° 程度の視野角をもっており、狭視野日射計との対応は、全天日射計よりよい。因みに、同時刻に MODIS データから推定された LWP, COD, r_{eff} も記入されている。

非均質効果を含んだ雲のパラメータ推定は、非均質状態を正確に知ることが前提であり、それ自体容易でないケースも多い。また、それに対応した三次元の放射伝達を考慮することが必須であり、こうしたものに対応する汎用性のある解析システムの構築はまだこれからの段階と言える。

ただ、別の視点で考えると、得られる雲パラメータがどのような目的で使われるのかによって、必要とする推定精度も異なるのは当然である。SKYNET は、基本的に放射を中心とする収支に関する研究に資することを目的としている。その時間的なスケールも、短時間に急変する現象に必ずしも対応していない。例えば、発達する積雲は極めて短時間に、三次元的に変化しており、こうした雲を詳細に捉えることはケーススタディとしては行えるが、ルーチンとしては難しい。むしろこうした詳細な状態と、マクロスケールの状態の関係を明確にすることが重要である。収支で必要とされる空間分解能に対して、それぞれのパラメータで対応する時間分解能と精度が保たれることが重要であり、相互に整合性が取られていることが必要である。

6. おわりに

雲・エアロゾルが地球の放射収支に与える影響を評価するために、様々な衛星データを用いた解析や、大気海洋モデルを用いた研究が推進されている。地域によって異なる自然環境があり、それによって異なる人間活動がある。多様な大気環境の一部として雲・エアロゾルがどのような状況となっており、気候にどのような影響をもたらしているか、今後ともたらず可能性があるか等を知ることとはとても重要なことである。

SKYNET は、こうした研究に対して地上観測データをもとに寄与しようとするものである。衛星解析や気候モデルではハッキリしないパラメータやメカニズムの詳細を、地上計測によって明らかにすることも重要であり、またこれらによる生成物の精度検証も必要である。こうした活動のために、SKYNET は各国の興味ある研究者がスカイラジオメータによる地上観測とその解析をキーとして連携し、SKYNET コミュニティを形成して研究の促進を図っているものである。

雲・エアロゾルの気候影響に関する研究では、従来の気象官署の観測の枠組みでは出来ない要素を含んでいる。また、国を越えて広がりを持つ必要がある場合もある。気象官署によるルーチン観測では、精度の維持された安定な観測が期待される反面、意思決定に時間がかかり拡大・縮小などの戦略に対する即応性に乏しい。また、それぞれの国内にとどまるために、広範な領域への対応も困難である。研究者の自発的な連携による研究フレームは、観測上の課題はあるものの多くの利点もある。

こうした活動の中で、インド、中国、韓国、日本などでは、気象官署の観測に既に組み込まれたり、組み込もうとする動きもある。変化の著しいアジア域でこうした動きのあることは歓迎すべきことであり、関連研究がさらに発展することが期待される。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、北海道大学名誉教授太田幸雄博士、産業技術総合研究所兼保直樹博士、千葉大学環境リモートセンシング研究センター Pradeep KHATRI 博士から有益な情報を頂いた。また、マイクロ波放射計を利用した雲水計測では、研究室の大森亮太君に助けてもらった。これらの方々に感謝致します。

参考文献

兼保直樹, 山形定, 小林拓, 2009: GEOSS-SKYNET エアロゾル・インレットの設計と多分散フライアッシュ粒子による特性評価, エアロゾル研究, **24**(3), 201-208.

- ターコ, R. P., O. B. ツーン, T. P. アッカーマン, J. B. ボラック, C. セーガン, 1984: 核戦争は気候をどう変えるか, サイエンス, **14**(10), 12-25. (Scientific American の邦訳)
- 地上気象観測指針, 気象庁, 1993.
- Bond, T. C., T. L. Anderson, and D. Campbell, 1999: Calibration and inter-comparison of filter-based measurements of visible light absorption aerosols, *Aerosol Science and Technology*, **30**, 582-600.
- Budyko M. I., 1969: The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth, *Tellus*, **21**, 611-619.
- Deepak, A., and H. E. Gerber, 1991: Solar Spectral Irradiance under Clear and Cloudy Skies: Measurements and a Semiempirical Model. *Journal of Applied Meteorology*, **30**, 447-462.
- Hanel, G., 1976: The properties of atmospheric aerosol particles as functions of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the surrounding moist air, *Advances in Geophysics*, **19**, 73-188.
- Hess, M., P. Koepke, and I. Schult, 1998: Optical Properties of Aerosols and Clouds: The software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**(5), 831-844.
- IPCC Climate Change 2013, The Physical Science Basis, Summary for Policy makers, http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf.
- Junge, C., 1955: The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data of the atmosphere. *J. Meteor.*, **12**, 13-25.
- Kaufman, Y. J. and C. Sendra, 1988: Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int. J. Remote Sensing*, **9**, 1357-1381.
- Kikuchi, N., T. Nakajima, H. Kumagai, H. Kuroiwa, A. Kamei, R. Nakamura, and T. Y. Nakajima, 2006: Cloud optical thickness and effective particle radius derived from transmitted solar radiation measurements: Comparison with cloud radar observations, *J. Geophys. Res.*, **111**, D07205, doi:10.1029/2005JD006363.
- Levi, B. G., and T. Rothman, 1985: Nuclear winter: A matter of degrees, *Physics Today*, Sept. 1985, 58-65.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *App. Opt.*, **35**, 2672-2686.
- Pandithurai, G., T. Takamura, J. Yamaguchi, K. Miyagi, T. Takano, Y. Ishizaka, S. Dipu, and A. Shimizu, 2009: Aerosol effect on cloud droplet size as monitored from surface-based remote sensing over East China Sea region, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L13805, doi:10.1029/2009GL038451.
- Shettle, E. P. and R. W. Fenn, 1979: Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties. AFGL-TR-79-0214, AFGL-ERP-676, *Environmental research papers*.
- Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B. J. Sohn, and H.

- Takenaka, 2007: Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S36, doi:10.1029/2007JD008506.
- Takamura, T., H. Takenaka, Y. Cui, T. Y. Nakajima, A. Higurashi, S. Fukuda, N. Kikuchi, T. Nakajima, I. Sano and R. T. Pinker, 2009: Aerosol and Cloud Validation System Based on SKYNET Observations: Estimation of Shortwave Radiation Budget, *J. Remote Sens. Soc. Jpn*, **29(1)**, pp.40–53.
- Tanaka, M., T. Nakajima and M. Shiobara, 1986: Calibration of a sun photometer by simultaneous measurements of direct solar and circumsolar radiation, *Appl. Opt.*, **25**, 1170–1176.
- Yamamoto and Tanaka, 1972: Increase of global albedo due to air pollution, *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1405–1412.
- Yabuki, M., M. Shiobara, H. Kobayashi, M. Hayashi, K. Hara, K. Osada, H. Kuze, and N. Takeuchi, 2003: Optical properties of aerosols in the marine boundary layer during a cruise from Tokyo, Japan to Fremantle, Australia, *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 151–162.