

分光日射観測とデータ同化によるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響監視に関する研究

国土交通省 気象庁

気象研究所 気候研究部 第三研究室 山崎明宏・大河原望・工藤玲・長澤亮二・
内山明博* (*:客員研究員)

環境・応用気象研究部 第一研究室 眞木 貴史・関山 剛

第四研究室 梶野 瑞王

高層気象台 観測第二課

居島修・高野松美

2014-18年度合計予算額 98,524千円

(うち、2018年度当初予算額 18,295千円)

[要旨]

本研究では、直達日射と散乱日射の測定が可能な分光型日射計の開発を行う。また、開発された分光型日射計及び既存の測器による連続観測を行うことで、エアロゾル及び雲の地上放射への影響の評価と監視技術の高度化を行う。更に、既存の観測データと有機的に活用し、モデルの改良や同化技術の開発を行うことで、エアロゾル・雲が地表面放射収支に与える影響を、東アジアスケールで定量化する技術を確立する。これらの研究を2つのサブ課題において実施した。

サブ課題1では、波長域350～2550nm、波長分解能2.5～10nmの太陽直達光と散乱光の測定が可能な精密分光型日射計の開発を行う。分光型日射計の開発にあたっては、温度特性及び入射角度特性の改良を行う。校正法は、Langley法と光源を用いた方法を併用し、安定で継続性のある方法の確立を目指す。併せて、既存の観測点で使用しているスカイラジオメータの校正法を改良し、検定定数の転写を容易にする方法を開発する。エアロゾル・雲の地上放射への影響を監視し、地点毎の地域・時間変動特性を解明するため、既存の測器と共に開発した精密分光日射観測装置による連続観測を実施する。

2018年度は、波長350～2550nmの分光型全天日射計(MS-711、MS-712、MS-713)の開発を引き続き行い、分光型全天日射計の検定、温度と入射角特性検査を実施した。分光型直達日射計、基準器のスカイラジオメータ及び開発を進めている分光型全天日射計は、マウナ・ロア観測所(NOAA:米国海洋大気庁)で検定を行った。分光型全天日射計の検定結果は、気体吸収が弱い波長域においては、ほとんどの波長域で1%以下のバラツキで検定定数が決定することができた。間欠機能を持った太陽追尾装置を開発し、この装置に分光型全天日射計を搭載する精密分光日射観測装置を開発した。また、防塩機能を持った精密分光日射観測装置も開発した。つくばと南鳥島で精密分光日射観測装置による連続観測を開始した。

スカイラジオメータは引き続き精度の良い検定ができ、各観測点及び他のプロジェクトが展開している放射計にも校正結果を反映できた。また、他のプロジェクトの研究推進、気象庁のスカイラジオメータ現業観測における機器検定及びGCOM-C地上検証データの提供と地上検証器材であ

るスカイラジオメータの検定に貢献した。

これまでに気象研究所で開発してきたアンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) は、データ同化時に数十個の予測モデルによるアンサンブル計算を行う必要があるため、日々の予測実験や長期再解析を実施するには計算機負荷が大きくなる。このため、サブ課題2において高速に実行できるデータ同化システム (2D-Var) を開発し、世界で初めてひまわり8号から得られるエアロゾル光学的厚さのデータを同化できるシステムを構築した。このシステムを用いて、分光日射計観測データを用いる検証等のために改良した全球エアロゾル輸送モデル (MASINGAR mk-2; 水平解像度110km) に米国航空宇宙局 (NASA) の衛星センサ (MODIS) から得られたエアロゾル光学的厚さをデータ同化し、2011~2015年までの均質な品質のエアロゾル再解析 (JRAero) を作成し、研究者へのデータ公開を開始した。JRAeroはデータ同化を行わなかった実験と比較してエアロゾルの再現精度が大きく向上していることを確認した。

また、東アジアにおけるエアロゾル等の再現性を向上させるためにエアロゾルの詳細な内部混合過程をシミュレートできる領域化学輸送モデルを開発してそのパフォーマンスを確認した。特に、領域化学輸送モデルの輸送過程を詳細に評価するため、福島原子力発電所からの放射性エアロゾルの輸送過程に関して鉛直積算質量フラックスを用いた詳細な解析を実施した。

[キーワード] 分光型日射計、エアロゾル、雲、放射強制力、気候変動、全球エアロゾル輸送モデル、領域エアロゾル輸送モデル、データ同化

1. はじめに

気候モデルにおける温暖化予測を不確実にしている最大の要因の一つは、放射収支が正確に再現できていないことによる。IPCC第5次評価報告書 (IPCC, 2013)¹⁾は、エアロゾルが関わって地球放射収支をどれくらい変化させるか (放射強制力: エアロゾルがある場合と無い場合の差) の見積もりの信頼度は大きな不確実性をもたらしているとして報告している。このため、放射収支に影響を与えるエアロゾルが日射を直接反射・吸収する効果 (直接効果) 及び雲・氷晶核として働き雲の特性を変え間接的に放射収支に影響を与える効果 (間接効果) の実態を監視し、正確に評価できるようにすることが切望されている。気候変動メカニズム解明のためには、放射過程、雲物理・降水過程の解明が必要であり、衛星等の観測に加えて精密な地上観測の実施が必須である。

地上における日射観測では地表面放射収支の変化を監視することができるが、気候変動をひき起こす変化は10年間で1~2W/m²程度と非常に小さく、全日射量の監視だけでは大気要素により変動する地表面日射量の変化を捉えることは難しい。一方、大気要素毎の影響は異なる波長分布として現れるため、放射収支変化のメカニズム解明のためには、波長別に精度の良い日射観測 (分光日射観測) を実施して、大気要素ごとの影響を監視する必要がある。

さらに観測データを用いて全球・領域エアロゾル輸送モデルを検証することでモデルの改良を行う。また、モデルと同化技術を用いて広域のエアロゾル分布を再現し、エアロゾル間接効果過程を含んだエアロゾル輸送モデルを用いて雲分布の再現性向上を目指す。

これにより、気候変動予測における最大の不確定要素であるエアロゾル・雲の地表面放射収支に与える影響を、東アジアスケールで定量化する技術を確立する。また、これらの技術を通じ

て、地球温暖化予測の不確実性の低減に寄与することで、地球温暖化を見据えた緩和策や適応策的的確な政策決定や、持続可能な社会実現へ貢献する。

2. 研究目的

気候モデルにおける温暖化予測を不確実にしている最大の要因の一つは、放射収支が正確に再現できていないことによる。このため、放射収支に影響を与えるエアロゾルが日射を直接反射・吸収する効果（直接効果）及び雲・氷晶核として働き雲の特性を変え間接的に放射収支に影響を与える効果（間接効果）の実態を監視し、正確に評価できるようにすることが切望されている。このことは、「地球観測の推進戦略」（平成16年12月27日、総合科学技術会議）において、推進すべき項目として地球温暖化分野の中のアジア・オセアニア域の包括的な観測で雲・エアロゾルに係わる観測を実施することでも述べられている。また、「今後10年の我が国の地球観測の実施方針」（平成27年8月25日、文部科学省）においても、気候変動メカニズム解明のために放射過程、雲物理・降水過程の解明の必要性が述べられており、衛星等の観測に加えて精密な地上観測の実施が必須である。

本研究では、直達日射と散乱日射の測定が可能な分光型日射計の開発を行う。また、開発された分光型日射計及び既存の測器による連続観測を行うことで、エアロゾル及び雲の地上放射への影響の評価と監視技術の高度化を行う。更に、既存の観測データと有機的に活用し、モデルの改良や同化技術の開発を行うことで、エアロゾル・雲が地表面放射収支に与える影響を、東アジアスケールで定量化する技術を確立する。

リモートセンシングによるエアロゾル観測においては、そのリトリーバル処理（＝太陽スペクトル等の『観測された値』からエアロゾル濃度あるいは光学的厚さのような『知りたい値』に変換するための数学的な最尤推定処理）が必須であり、その処理においては『観測エラーの原因である様々な大気微量成分』の鉛直濃度分布情報が必要となる。それらは通常『気候値（＝長期間の観測等で得られた平均値）』が用いられるが、理想的にはモデルシミュレーションの計算結果を使う方が高精度なリトリーバル処理が可能となるはずである。しかし今日においても、化学輸送モデルの計算結果が「どの程度の精度で大気微量成分濃度を再現しているのか」「計算精度の時間変動や地域変動はどの程度なのか」について、特に対流圏においては未知の部分が多い。そこで今年度はリトリーバル処理の将来的な精度向上を目指して対流圏化学輸送モデルの計算結果について（特に東アジアにおけるオゾンの濃度変動について）詳細な精度検証を実施することにした。

3. 研究方法

気候の監視にとって必須項目である地表面日射量の分光測定を精度保持しつつ連続的に観測することを可能にする。さらに、観測データ、エアロゾル輸送モデルと同化技術を用いて広域のエアロゾル分布の解明及び雲分布の再現性を向上させ、エアロゾル・雲の地表面放射収支への影響を監視する技術を確立するために、2つのサブ課題に分けて実施する。

（1）地上分光日射観測によるエアロゾル・雲の地表面放射収支への影響監視

波長域 350~2550nm で直達日射と散乱日射の測定が可能な精密分光型日射計の開発を行う。その開発にあたっては、温度特性と入射角特性の改良を行う。精度の良い測定を継続して行えるようにするための校正法を開発する。校正法は、Langley 法と光源（ランプまたは積分球）を用いた方法を併用し、安定で継続性のある方法の確立を目指す。Langley 法のデータを取得するため、1 年に 1 回条件が良いデータが取れかつ補助データの揃っているマウナ・ロア観測所でデータの取得を行う。

2018年度は、精密分光日射観測装置の開発を引き続き行った。分光型全天日射計とスカイラジオオメータの検定は、マウナ・ロア観測所で実施した。分光型全天日射計の検定観測は、露光時間を変えた測定を行うことで露光時間毎に検定定数を決定し、そのデータから露光時間と検出器出力間の線形性の調査を行った。また、2017年度の検定結果と比較し、検定定数の経年変化を調べた。検定を行った基準器スカイラジオオメータは、気象研究所の地上放射観測点、また、他のプロジェクトが展開しているスカイラジオオメータとの比較観測を行い、検定定数の転写を行った。2017年度に開発を進めた防塩機能付き精密分光日射観測装置を南鳥島に設置・改良し、連続観測を開始した。

（2） 全球・領域エアロゾル輸送モデルを用いたエアロゾル分布の解明と雲分布再現性の向上

本研究課題では、放射過程および雲・降水過程を通じて放射収支に影響を与えるエアロゾル分布を精緻化するため、観測データをモデルに取り込むためのデータ同化システムの開発を行うと共に領域エアロゾル輸送モデルの開発とその輸送過程の評価を実施した。

1) エアロゾルデータ同化システムの開発

気候モデルにおける温暖化予測を不確実にしている最大の要因の一つは、放射収支が正確に再現できていないことである。エアロゾルは放射収支に影響を与える物質であり、日射を直接反射／吸収する効果（直接効果）及び雲・氷晶核として働き雲の特性を変え間接的に放射収支に影響を与える効果（間接効果）を気候モデルで正確に再現する必要があり、そのためにはまずエアロゾルの濃度分布の正確な再現が必要である。そこで衛星観測（ひまわり8号、MODIS等）より得られたエアロゾル鉛直積算量観測値をデータ同化によってシミュレーションモデルに取り込み、より現実に近いエアロゾル3次元濃度分布データセットの作成を目指した。データ同化とは、シミュレーションモデルの計算結果と観測値を組み合わせる統計学的に最も尤もらしい大気の状態を推定する技術である。もともとは天気予報の初期値を作成するための技術であったが、最近ではエアロゾルの分布推定にも使われている。本研究で用いたエアロゾルデータ同化システムは気象庁／気象研究所の全球エアロゾルモデルMASINGAR mk2に2次元変分法（2D-Var）データ同化モジュールを組み込むことで開発を進めた（Yumimoto et al. 2017²⁾）。この同化予測システムは、1サイクルが1日分の同化計算とその結果を初期値にした1回の5日間予測計算から成る。この同化計算の時刻（＝解析値の時刻）は全て00時UTCである。前節で述べた高速なデータ同化手法（2D-Var）の開発により、長期間にわたるエアロゾルのデータ同化計算が可能となった。そこで、本年は2011~2015年に及ぶ5年分のエアロゾル再解析データセット（JRAero）を作成した

（Yumimoto et al., 2017²⁾）。エアロゾル再解析データセットの公開は日本では初めて、世界でも欧米に次ぎ4番目の成果である。JRAero計算の概念図を図1に示す。用いた数値モデルはこれ

まで本課題等で改良を進めてきた全球エアロゾル輸送モデル (MASINGAR mk-2) であり、水平解像度はTL159 (約110km)、鉛直は48層 (地上~0.4hPa) がある。MASINGAR mk-2を駆動する気象データとしては6時間毎の気象庁全球客観解析を用いてナッジングを行い、モデルの気象場が客観解析値から大きくずれないようにした。今回の解析期間はひまわり8号のデータが十分に得られない期間であるため、衛星観測データとして米国航空宇宙局 (NASA) のMODISセンサを米国海軍研究所 (NRL) によってリトリブされたエアロゾル光学的厚さを用いた。データ同化は毎日6時間毎 (世界標準時で00、06、12、18時) に行い、モデルの誤差を示す背景誤差はMASINGAR mk-2の過去の実験結果と衛星観測データとの比較により算出した。

本報告では、JRAeroによって得られた全球的なエアロゾル分布の概要とその検証結果として地上観測データとの比較結果を示す。

2) 領域エアロゾル輸送モデル開発

Kajino et al. (2018)³⁾および Kajino et al. (2019)⁴⁾では、気象庁領域気象化学モデルNHM-Chemの開発を実施した。NHM-Chemには現在、5 カテゴリー非平衡、3 カテゴリー非平衡、およびバルク平衡の3つのエアロゾル表現法が実装されている。これら3つの方法は、それぞれ、領域気候、大気質、および現業予報を目的として開発した (図2)。

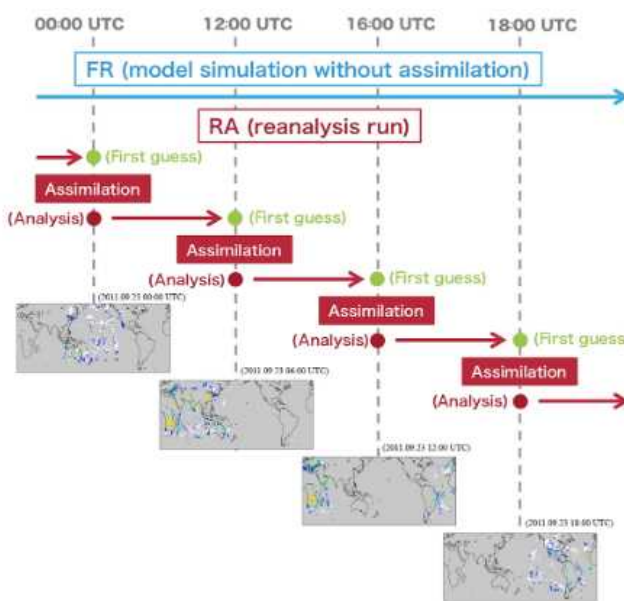


図1 エアロゾル再解析 (JRAero) の概念図。1日4回衛星観測データを同化している。

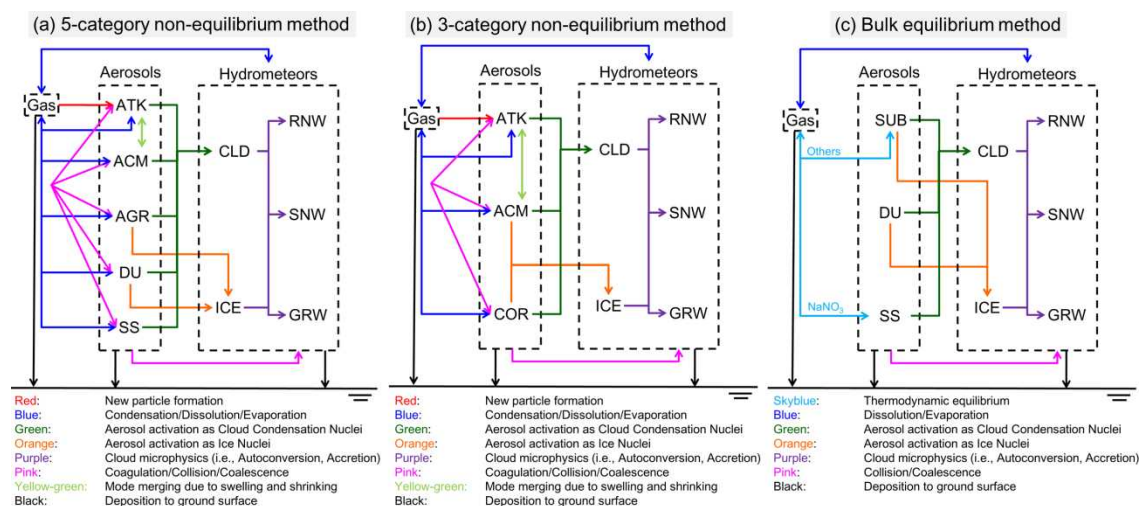


図2 NHM-Chemで考慮されるガス及びエアロゾルの物理・化学素過程。左から、5 カテゴリー非平衡法 (領域気候予測向け)、3 カテゴリー非平衡法 (大気質予測向け)、バルク平衡法 (現業予報向け) を表す。

3) 領域エアロゾル輸送モデルの輸送過程評価

エアロゾル輸送モデルの計算結果、特にその時空間変化を解析することは観測との比較や気候環境影響の評価を進めるための第一段階である。モデルで計算したエアロゾル分布の時空間変化は通常、どこか一地点の濃度変化を折れ線グラフに描いたり、瞬間値や平均値を2次元平面で描画したりして可視化することが多い。しかし、それでは2次元あるいは3次元のエアロゾル分布の時間変化を容易に目視で追うことができず（常に動画の作成と上映ができれば話は別である）不便であり、そのため貴重な情報を見逃す可能性がある。本研究課題で蓄積されたエアロゾル輸送モデルの計算結果の有効活用のためにも、目視が容易で定量的な情報を適切に抽出するモデル可視化手法の開発は大変有用である。その可視化手法として質量フラックス解析法をエアロゾル輸送モデル向けに開発した（Sekiyama and Iwasaki, 2018⁵⁾）。質量フラックス解析法は気象力学や海洋力学では時折使われる手法であるが、エアロゾルなどをターゲットとした環境学研究の分野ではほとんど使われることがなかった。その数学的概念を以下に示す。

質量フラックス \mathbf{j} を質量濃度 ρ と風速 $\mathbf{v} \equiv (u, v, w)$ の積として定義する。 \mathbf{j} は単位時間と単位面積当たりの質量 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) あるいは単位面積当たりの質量流量 ($[\text{kg s}^{-1}] \text{m}^{-2}$) と考えることができる。質量フラックスは濃度のようなスカラー量ではなくベクトル量で表されるので、質量フラックス分布を描画すればエアロゾルの流れていった総量だけでなく流れた方向も知ることができる。エアロゾルの質量濃度と質量フラックスは、以下に示すように質量保存の連続方程式で関連付けられる。

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} \\
 &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} \\
 &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \\
 &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v}_h + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \\
 &= \sigma,
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 t は時間、 $\mathbf{v}_h \equiv (u, v)$ は水平風を表し、 σ は単位体積と単位時間当たりのエアロゾル生成消滅量を表す。 $\sigma > 0$ の時は生成（あるいは放出）であり、 $\sigma < 0$ の時は消滅（あるいは沈着）となる。(1)式を地表面から大気上端まで積分すると

$$\begin{aligned}
 & \int_0^{\infty} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v}_h + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) dz \\
 &= \int_0^{\infty} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz + \int_0^{\infty} \nabla \cdot \rho \mathbf{v}_h dz + \int_0^{\infty} \frac{\partial \rho w}{\partial z} dz \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} \rho dz + \nabla \cdot \int_0^{\infty} \rho \mathbf{v}_h dz + [\rho w]_{z=0}^{z=\infty} \quad (x, y, z, t \text{はお互いに独立}) \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} \rho dz + \nabla \cdot \mathbf{j}_{\text{column}} \quad (\because \rho(\infty) = w(0) = 0)
 \end{aligned}$$

$$= \int_0^{\infty} \sigma dz = \sigma_s,$$

(2)

が得られる。 σ_s はエアロゾルが不活性かつ地表面でのみ放出沈着されると仮定した場合の生成消滅量である。ここで水平質量フラックスの鉛直積分 $\int_0^{\infty} \rho \mathbf{v}_h dz \equiv \mathbf{j}_{column}$ を定義する。これは地表面から大気上端までの総質量フラックスを表す。 \mathbf{j}_{column} を時間積分するとエアロゾルの流れを2次元的に描画できる。また(2)式でz方向の質量フラックスの鉛直積分 $\int_0^{\infty} \frac{\partial \rho w}{\partial z} dz = [\rho w]_{z=0}^{\infty} = 0$ は計算上無視できるので鉛直風のデータを入手する必要がないことは非常に便利である。次に(2)式をエアロゾルプルームに着目して時間積分することを考える。ある一地点に立って考えると、エアロゾルプルームは到着する前と去った後においてその場所での濃度がゼロである。この状況では、

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\infty} \rho dz dt = \left[\int_0^{\infty} \rho dz \right]_{t=0}^{t=\infty} = 0 \quad (\because \rho(t=0) \equiv \rho(t=\infty) \equiv 0);$$

であり、それゆえ(2)式の時間積分は

$$\int_0^{\infty} \nabla \cdot \mathbf{j}_{column} dt = \int_0^{\infty} \sigma_s dt,$$

(3)

となる。これは、水平質量フラックス鉛直積分量の収束発散の時間積分が、単位面積当たりの全放出または沈着に等しいことを示している(単位は kg m^{-2})。その例として、福島県大熊町から放出されたと仮定した硫酸粒子のシミュレーション結果を図3に示す。負の発散(=収束)の水平分布と沈着量分布がよく似ていることが分かる。ただしモデルシミュレーションには数値誤差や切り捨て誤差があるため、厳密には一致していない。

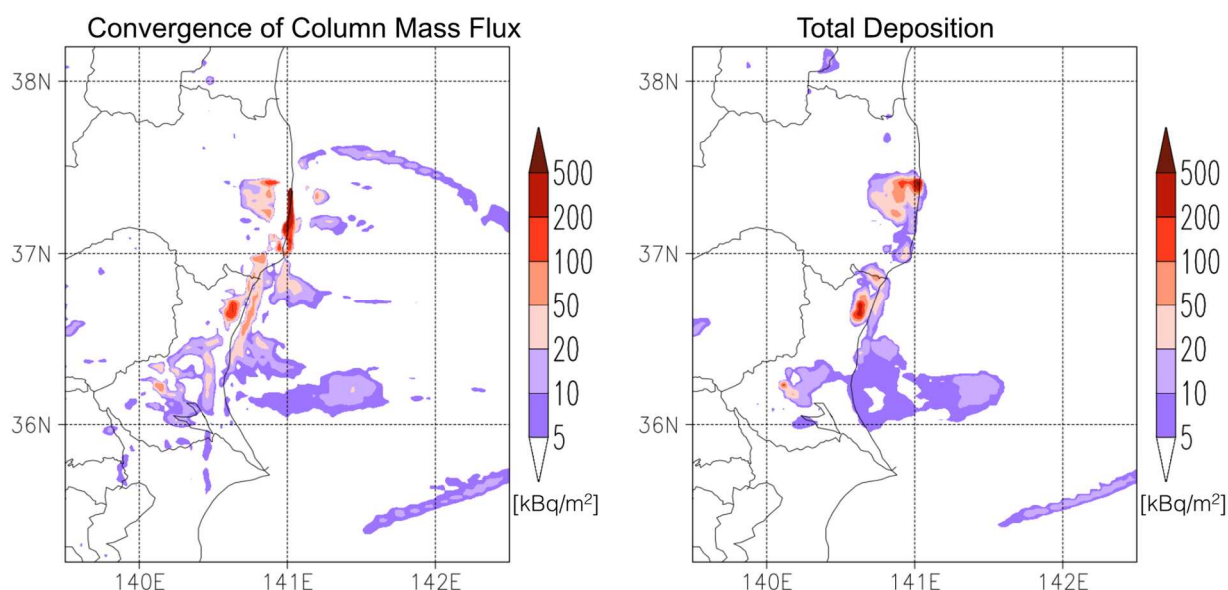


図3 (左) エアロゾル輸送モデルの計算結果から算出した水平質量フラックス鉛直積分量の収束を2011年3月20日21時から22日21時まで時間積分した結果。(右) 同じ時間帯にエアロゾル輸送モデルの中で計算された粒子の沈着総量。質量は1ナノグラム=3kBqで換算してある。

4. 結果・考察

(1) 地上分光日射観測によるエアロゾル・雲の地表面放射収支への影響監視

1) 精密分光日射観測装置の開発

本研究では波長域350～2550nmで直達日射と散乱日射の測定が可能な精密分光日射観測装置の開発を行う。開発中の分光型全天日射計 (MS-711、MS-712、MS-713、PGP200-NIR2) の仕様を表1に示す。分光型全天日射計の開発については、温度調整機能や光学部品取り付けの改良など、様々な改良を実施しながら、2014年度から2018年度にかけて順次整備した。分光型全天日射計を用いた連続観測については、2018年4月より、つくばと南鳥島において連続観測を開始した。

分光日射計による精密観測は、分光型全天日射計による分光全天日射測定に加え、分光散乱日射測定も実施する。このための精密分光日射観測装置の開発を進めた。精密分光日射観測装置は、分光型全天日射計による全天日射観測を行い、次に太陽光遮蔽を行うことで散乱光を観測する。この動作を繰り返す(間欠動作を行う)直達日射遮蔽装置付き太陽追尾装置を開発し(2015年度から2016年度)、この太陽追尾装置に分光型全天日射計を搭載することで観測を実施する装置を開発した。分光全天日射観測データ (E_{tot})、分光散乱日射観測データ (E_{diff})、分光直達日射観測データ (E_{dir}) と太陽天頂角 (Z) は次式の関係があり、分光全天日射観測データと分光散乱日射観測データから分光直達日射観測データを得ることができる。

$$E_{tot} = E_{diff} + \cos(Z) \times E_{dir}$$

南鳥島気象観測所は、海岸から50m程度しか離れておらず、海からの風により海塩粒子が観測機器に付着することで観測値に大きな影響を与える。観測値への影響を極力避けるためには、一

定間隔で分光型全天日射計のガラスドームを清掃し、付着した海塩粒子などによる汚れを除去する必要がある。このため、ガラスドームの清掃を自動化し、海塩粒子のガラスドームへの付着を防ぐための防塩機能を付属した直達日射遮蔽装置付き太陽追尾装置の開発を行った（2016年度から2018年度）。防塩機能は、一定時間ごとに精製水などきれいな水をガラスドームに吹きかけ、その後ブローによりガラスドームに付着した水を取り除き清掃を行う方法を採用した。開発した防塩装置付属精密分光日射観測装置を図4に示す。また、待機状態の防塩装置と防塩装置が太陽追尾装置に搭載された分光型全天日射計のガラスドームを清掃している様子を図5と図6に示す。

分光型全天日射計の検定は、Langley法により検定する方法と標準光源を用いる方法を開発した。Langley法での検定は、分光型全天日射計にコリメーションチューブを取り付け、それを太陽追尾装置に載せ太陽に正対させることによって直達日射計と同様のデータを取得して検定に使用している。分光型全天日射計に取り付けるコリメーションチューブをJAXA所有の積分球により試験を行ったところ、コリメーションチューブ内部で反射光の影響を受けていることが分かった。このため、コリメーションチューブ内で光の反射を軽減する素材を使用し、コリメーションチューブの改造を行った。これにより改造したコリメーションチューブは内部での光の反射を約1.5%程度改善することができた（2017年度から2018年度）。

表1 分光型全天日射計（MS-711, MS-712, MS-713, PGP-200NIR2）の仕様

型式	MS-711	MS-712	MS-713	PGP-200NIR2
波長範囲	300～1100nm	900～1700nm	900～2550nm	900～2550nm
波長間隔	0.3～0.5nm	1.2～2.2nm	6.1～7.9nm	6.1～7.9nm
波長分解能	<7nm	<7nm	<20nm	<20nm
波長精度	±0.2nm	±0.2nm	±2nm	±2nm
露光時間	10～5000msec	10～5000msec	1～40msec	1～40msec
検出器	Si フォトダイオードアレイ (2048ch)	InGaAs リアイメージセンサー (512ch)	InGaAs リアイメージセンサー (256ch)	InGaAs リアイメージセンサー (256ch)
ドーム材質	合成石英	BK7	合成石英	BK7



図4 南鳥島に設置した防塩機能付き精密分光日射観測装置



図5 待機状態の防塩装置



図6 防塩装置がガラスドームを清掃している様

2) 放射計のLangley法による検定

① 分光型全天日射計の検定

分光日射計は、その出力を物理量（照度または輝度）に変換する定数か、または、大気圏外太陽直達光に対する出力を決めることによって使用可能となる。その作業を検定と呼んでいる。ここでは、後者の検定を行う。放射計（分光型全天日射計）の太陽地球間平均距離における大気圏外太陽直達光に対する出力を検定定数（または機械定数）とよぶ。縦軸に出力値の対数、横軸に大気路程（airmass）を取って測定値をプロットし airmass がゼロの値に対する出力値を推定することによって検定定数を決めることができる。この方法を Langley 法と呼ぶ。大気圏外太陽直達光の変動は小さいので、5～10nm 程度の波長分解能で地上に到達する直達日射量を測定することによって大気中のエアロゾルの光学的厚さを推定することができる⁶⁾。分光型日射計を標準ランプで検定して、地上に到達する直達日射量を測定し、観測で知られている大気圏外太陽直達日射量を与えることによって、同様に光学的厚さを推定できるが、標準ランプの精度、大気圏外太陽直達日射量の精度が十分でなく、エアロゾルの光学的厚さを高精度に推定することは難しい。

ここでは、Langley 法によって気体吸収のある波長域も含めて分光型全天日射計の検定を行った。検定した分光型全天日射計は EKO MS-711 を 2 台、EKO MS-712 及び EKO MS-713 である。Langley 法による検定を行うには、大気が安定で清澄な場所でデータを取る必要がある。Langley 法のためのデータは、マウナ・ロア観測所（標高約 3,400 m）で取得した。マウナ・ロア観測所は、広く海で囲まれたハワイ島にあり、大きな汚染源はなく、亜熱帯高気圧帯にあり大気が安定で、更に、観測所は大気境界層の上にあるため、Langley 法のためのデータを取得するのに最適な場所の一つである。また、マウナ・ロア観測所では、通常的气象観測、可降水量、オゾン全量などの気体吸収の見積りに必要なデータや、大気中のエアロゾルの変動を監視できるエアロゾル散乱係数・吸収係数、雲核粒子数の測定も行っている。2018 年度は、マウナ・ロア観測所での検定観測を、2018 年 10 月 12 日～11 月 20 日の期間に実施した。マウナ・ロア観測所では、分光型全天日射計にコリメーションチューブを取り付け、それを太陽追尾装置に載せ太陽に正対させることによって直達日射計と同様のデータを取得して検定に使用した（図 7）。

気体吸収を考慮した Langley 法では、気体ガスの鉛直分布が必要である。オゾンは、Brewer 分光光度計の測定から推定されたオゾン量を使用し、鉛直分布は、McClatchey et al (1972)⁷⁾ の大

気モデルの分布を用い総量を合わせた。水蒸気の分布は、Hilo のゾンデデータとマウナ・ロア観測所の湿度データを用いて鉛直分布を作り、総量は測定時刻の可降水量に合わせた。一昨年度より GPS からの可降水量のデータが得られなくなったため、2017 年度は NASA の AERONET のサンフォトメータから推定した可降水量を使用した。しかし、2018 年度は、AERONET のデータがまだ入手できていないため、検定用に持ち込んだ基準器スカイラジオメータの 940nm のデータから可降水量を推定した。大気中の吸収気体による線構造を持った吸収がある場合の Langley 法は、Uchiyama et al. (2014)⁸⁾ を拡張して行った。また、気体吸収の見積もりは相関 k -分布法を用いて行った。

図 8 に MS-711 (SN:S17024.06) (以後、MS-711N と略記)、MS-712 (SN:S14175) (以後、MS-712 と略記)、MS-713 (SN:ES16088.01) (以後、MS-713 と略記) の検定定数 (機械定数) (赤色、軸は左側) と検定に使ったデータの標準偏差/検定定数 (青、軸は右側) を示した。どのケースにおいても水蒸気の吸収帯で検定定数のバラツキが大きい。また、感度が低い波長域 (MS-711N では、350nm 以下や 1050nm 以上の波長域、MS-712 では、1650nm 以上の波長域、MS-713 では、2450nm 以上の波長域) でもバラツキが大きい。一方、気体吸収が弱い波長域では、ほとんどの波長域で 1% 以下のバラツキで検定定数が決定できている。2017 年度は、安定な日が多く水蒸気による吸収の補正が比較的うまくできていた日を選んだため、MS-711N の 940nm 帯においてもバラツキは小さく 0.5% 以下であったが、2018 年度は、2017 年度に比べ安定した日が少なく、バラツキは 2016 年度と同程度であった。2018 年は、2017 年の AERONET のデータと同様に、時間分解能の高いスカイラジオメータの可降水量を使うことで分光日射計の測定と可降水量の測定の同時性が高くなったことにより水蒸気による減衰の評価精度が上がったと思われるが、強い吸収帯では低い透過率のデータを透過率 1 に復元するには、透過率の計算精度が不十分と思われる。ガスによる吸収帯が有る波長域は、ランプによる測定を併用し、検出器の感度の波長連続性とランプのスペクトルの連続性を仮定して、ガスの吸収帯内の検定定数を内挿する方法の開発を検討する必要がある (照度の値を使わず、スペクトルの連続性のみを仮定する)。

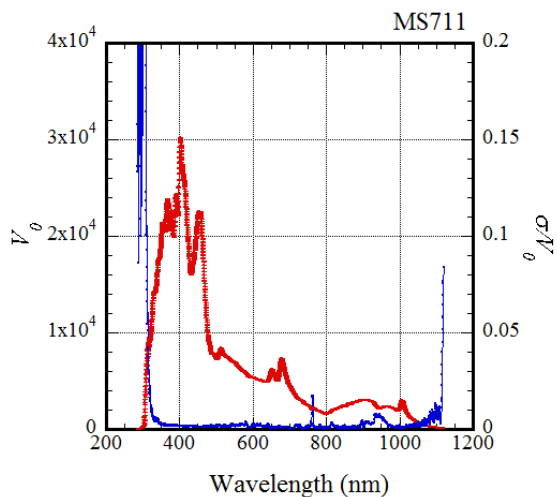
2018 年度も、露光時間を変えた測定を行い、計測に適した露光時間の選択と、露光時間と検出器出力の間の線形性について調べた。露光時間は、MS-711N においては、50, 100, 200msec、MS-712 においては、20, 50, 100msec、MS-713 においては、10, 20, 30msec と変えてデータを取得した。図 9 に基準とする露光時間に対する検定定数の比を示した。基準とする露光時間は、MS-711N では 100msec、MS-712 では 100msec、MS-713 では 30msec とした。図 9(a) において、MS-711N の 200msec の値が大きいくずれている波長域があるが、これは検出器の出力が飽和しているためである。MS-711N は、50msec と 100msec での検定定数の比は、平均値が 0.498 (標準偏差 0.052)、中央値が 0.498 であった (標準偏差の計算は、大きいくずれている 350nm 以下も含む)。従って、MS-711N では、測定時間と出力は、100msec くらいまでならば、0.5% 程度で線形性がある。200msec の測定値では、飽和している波長域があるので、中央値を見るとそれぞれの MS-711N で、1.994 であり、多くの波長域で測定時間と出力の間には線形な関係があると思われる。また、MS-711N は、今年度の結果が昨年と同様であることより、露光時間と検出器出力の間の線形性は 1 年程度では変化しないことが分かった。MS-712 においては、検定定数の比は、20msec と 100msec で平均値が 2.000 (標準偏差 0.002)、50msec と 100msec では平均値が 0.499 (標準偏差 0.001) であった。これらから、多くの波長域で 0.2% より良い精度で検出器出力と露光時間には線形な関係がある。MS-

713 においては、検定定数の比は、10msec と 30msec で、平均値が 0.374 (標準偏差 0.014)、30msec と 20msec では、平均値が 0.702 (標準偏差 0.017) であった。MS-713 の露光時間と検出器出力の線形性は、S/N が悪いいため明確な結論を得ることはできない。

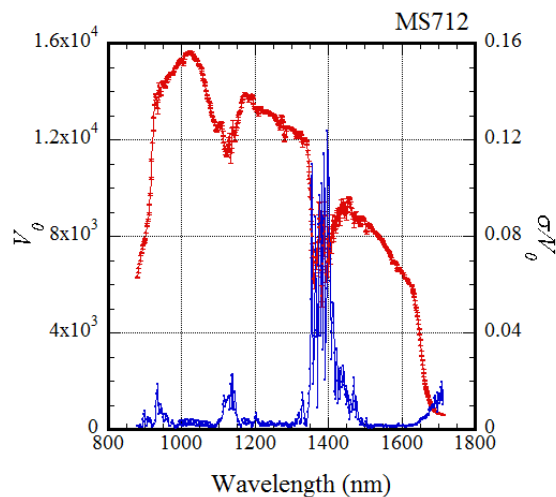
MS-711N、MS-712、MS-713 は、それぞれ 2017 年、2015 年、2016 年から複数年の検定観測を行っている。この結果から検定定数の経年変化を調べるため、それぞれ最初の観測年に対する検定定数の比を取った(図 10)。MS-711N においては、検定定数のバラツキが大きい 350nm 以下と 1050nm 以上を除いて、2018 年の値は 2017 年と比べて、700nm 以下で約 1%小さい。700nm 以上では、波長が長くなるにつれて差が大きくなり、1000nm で約 4%小さくなっている。2017 年は、MS-711N と同じ波長域の MS-711 (SN:S15038.04) (以下では MS-711 と略記) では、1 年で±1.5%以下の変化しかなかった。MS-712、MS-713 については後述するが、これらにおいても今年度の検定定数は、小さくなっている。検定観測で使用していたコリメーションチューブは、内部で光が反射して、その光が日射計に入る可能性が分かり 2018 年度にコリメーションチューブを改造している。2018 年の検定観測では、改造したコリメーションチューブを使用しており、これによる差と思われる。MS-712 においては、水蒸気の吸収帯を除いて、2015 年と比べて、2016 年、2017 年では、約 1%以内の過大な値であったが、2018 年の値は約 1.5%の過小な値である。2016 年と 2017 年の差がほとんどなかったことより、2015 年から 2017 年の値が、2018 年に比べて過小な値になったのもコリメーションチューブ内部の光の反射の影響が除かれたためと思われる。MS-713 においては、水蒸気の吸収帯や 2400nm 以上の検定定数のバラツキが大きな波長帯を除くと 2016 年と 2017 年の検定定数の差は、1%以下であった。2018 年の値は、約 3%小さくなっている。この傾向は、MS-712 と同様の傾向であり、コリメーションチューブ内部の光の反射の影響と思われる。



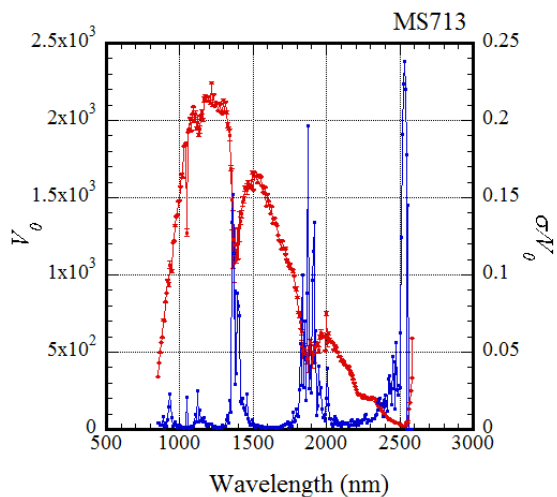
図7 マウナ・ロア観測所での校正観測の様子 (奥：分光型直達日射計、中央：スカイラジオメータ、手前：コリメーションチューブを取り付けた分光型全天日射計 (MS-711N, MS-712, MS-713))



(a) MS-711N

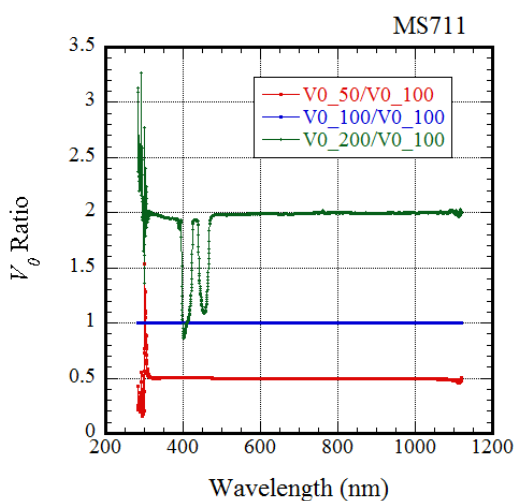


(b) MS-712

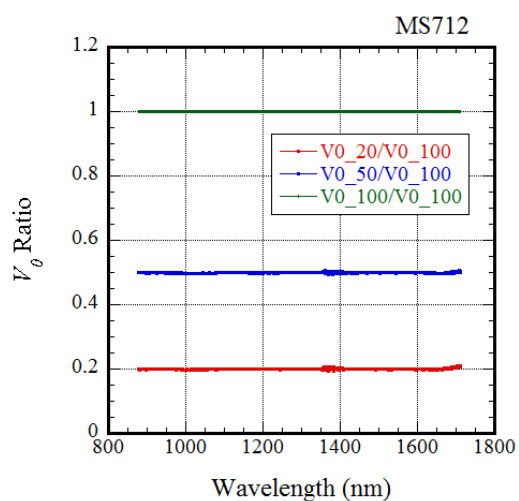


(c) MS-713

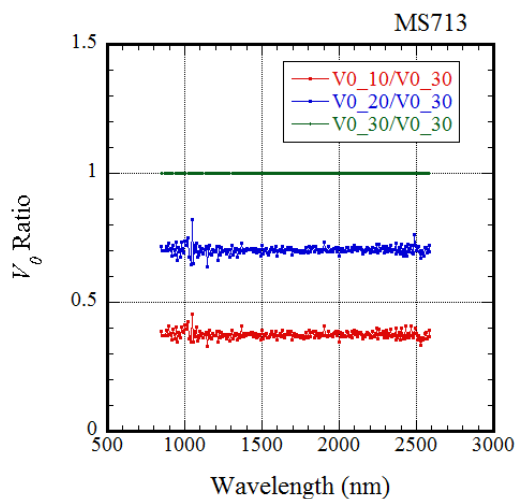
図8 分光日射計 MS-711 (SN:S17024.06)、MS-712 (SN:S14175) と MS-713 (SN:ES16088.01) の Langley法で決めた検定定数(赤色、軸は左側)と検定定数のバラツキ(標準偏差/検定定数)(青色、軸は右側)。露光時間はそれぞれ100、100、30 msec



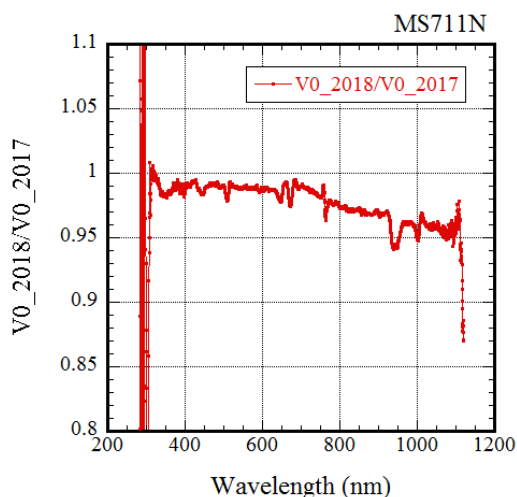
(a) MS-711N



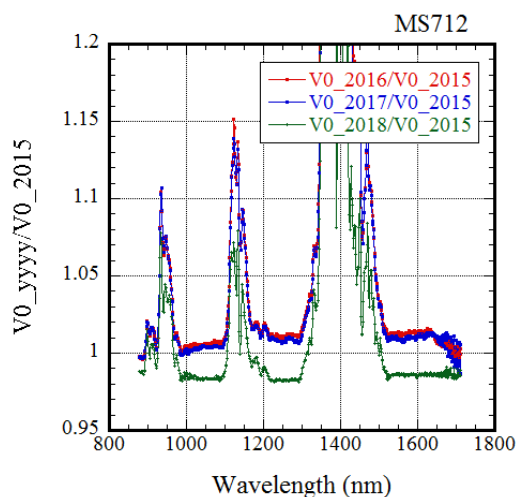
(b) MS-712



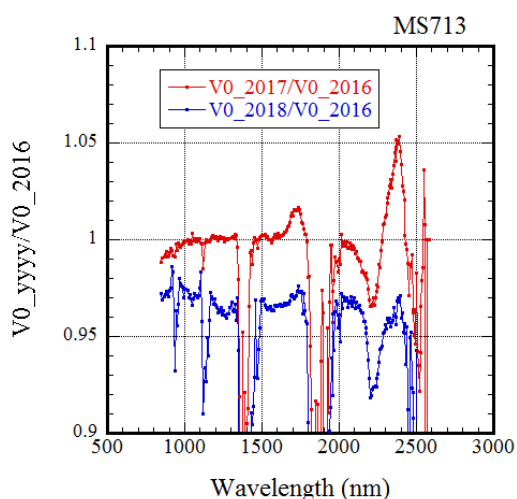
(c) MS-713



(a) MS-711N



(b) MS-712



(c) MS-713

図9 露光時間と検出器出力の間の線形性。(a) MS-711Nの100msecの検定定数に対する比。赤が、50msec、緑が200msecでの値。(b) MS-712の100msecの検定定数に対する比。赤が、20msec、青が50msecでの値。(c) MS-713の30msecの検定定数に対する比。赤が10msec、青が20msecでの値。

図10 (a) MS-711Nの2017年と2018年の検定定数の比較。露光時間は100msec。(b) MS-712の2015年～2018年の検定定数の比較。露光時間は100msec。2015年の値で割って比較した。(c) MS-713の2016年～2018年の検定定数の比較。露光時間は30msec。2016年の値で割って比較した。

② スカイラジオメータの検定

スカイラジオメータの検定は分光型全天日射計と同時にマウナ・ロア観測所で実施した (図

7)。図11に基準器スカイラジオメータの2014年から2018年の検定定数を示す。2018年度に決定した基準器のスカイラジオメータの検定定数のバラツキは、どの波長でも小さく0.7%以内であり、検定定数の経年変化は4年間で約0.1~2%と変動が非常に小さく安定していた。基準器スカイラジオメータのマウナ・ロア観測所での検定後、12月から1月にかけてつくば（気象研究所）で比較検定観測を実施した（図12）。比較検定には、他の研究機関、研究プロジェクトも参加しており、比較後に比較検定結果を提供した。表2に比較検定観測に参加したスカイラジオメータ（佐賀、富士北麓と富山：SKYNET）を含む比較検定結果を示す。つくばのスカイラジオメータは、1020nmを除き約0.4~9%の経年変化があった。1020nmは2016年12月に干渉フィルターの劣化を確認し、2017年1月に干渉フィルターを交換している。福岡と宮古島スカイラジオメータの経年変化は、約0.1~11%、約0.4~6%であった。個々のスカイラジオメータは、検定定数の経年変化が異なっており、干渉フィルターが劣化すると検定定数が11%も変わっていることがある。これは、精度の良い観測を継続するためには、定期的な検定観測が必要であることを示している。

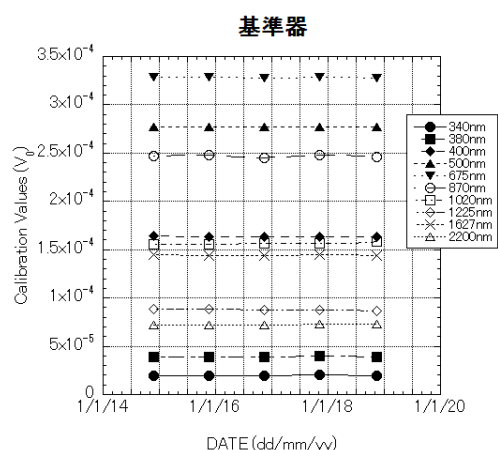


図11 基準器スカイラジオメータの検定定数



図12 比較検定観測の様子

表2 スカイラジオメータの検定定数の経年変化

Site	Period	Difference	notes:
基準器	FY2014-FY2018	0.2~2%	
つくば	FY2014-FY2018	0.4~9% *	* except at 1020nm: 1020nm filter was changed in Jan 2017
福岡	FY2014-FY2018	0.1~11%	** except at 380nm and 1020nm: 380nm and 1020nm filter was changed in Jan 2019 and Feb 2017, respectively.
宮古島 (SKYNET)	FY2014-FY2018	0.4~6%	
佐賀 (SKYNET)	FY2014-FY2018	0.2~4% **	
富士北麓 (SKYNET)	FY2014-FY2018	0.1~9%	*** except at 380, 870, and 1020nm: 3 filters were changed in Nov 2018
富山 (SKYNET)	FY2014-FY2018	0.2~2% ***	

3) 標準光源を用いた校正

標準光源を用いて分光型全天日射計を校正するための校正装置を開発した¹⁰⁾。この校正装置の標準光源は、NIST (National Institute of Standards and Technology: 米国国立標準技術研究所) でトレサビリティの取れたランプ (1000Wハロゲンランプ) を使用している。図13に標準光源を

用いた校正及び測器の設置状況を示す。標準光源の中心位置と測器の受光面までの距離は500mmであり、光源と測器の受光面の中心位置は、レーザー光を用いて正確に合わせている。NISTランプが反射する箇所には遮光シートを貼り付け、可能な限り迷光を低減し校正を行った。

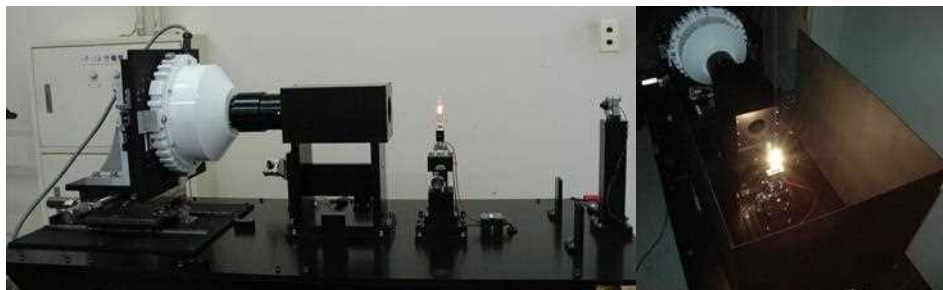


図 13 標準光源を用いた校正及び測器の設置状況 (MS-712 校正時)

4) 精密分光日射観測装置による連続観測

分光型全天日射計を使った精密分光日射観測は、つくば (N36.056, E140.125 : 気象研究所) と南鳥島 (N24.289, E153.983 : 南鳥島気象観測所) において連続観測を開始した。つくばと南鳥島での晴天日2018年4月29日と7月1日の分光全天日射 (TOT)、分光散乱日射 (DIFF)、分光直達日射 (DIR) の観測例を図14と図15に示す。図14はつくばでの南中時前後の時間帯の観測結果であり、図15は南鳥島での同日の同じ大気路程 (airmass) の時間帯の観測結果を示している。また、図16は、分光直達日射量に対する分光散乱日射量の比 (DIFF/DIR) を示している。尚、7月1日のつくばのデータではPGP-200NIR2の測定に問題があったため、PGP-200NIR2の測定波長域はプロットしていない。4月29日の観測値において、つくばでは可視近赤外域全域に渡り南鳥島に比べ散乱光が大きいことが分かる。7月1日の観測値では、1000nm以上の波長域においてつくばと南鳥島で散乱光に大きな差は無いが、1000nm以下で短い波長になるにつれて南鳥島よりつくばで観測した散乱光が大きくなっている。また、図16の7月1日の分光直達日射量に対する分光散乱日射量の比では、つくばの観測値で400nm付近において散乱光の割合が顕著に大きくなっている。このように波長ごとに直達光と散乱光を精密に観測することにより、ある特定の波長に対する感度が分かり、その解析を進めることでエアロゾル、雲の光学特性の地域特性や一次散乱アルベドなどその性質に係る情報を得ることができる¹¹⁾。今後は観測データを蓄積し、データ解析を進めていく方針である。

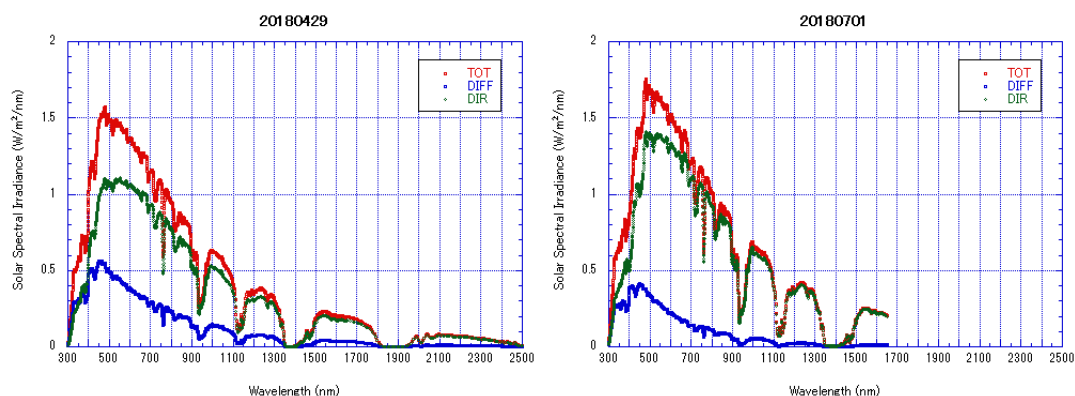


図 14 つくばでの観測例 (2018年4月29日 (左) と2018年7月1日 (右))

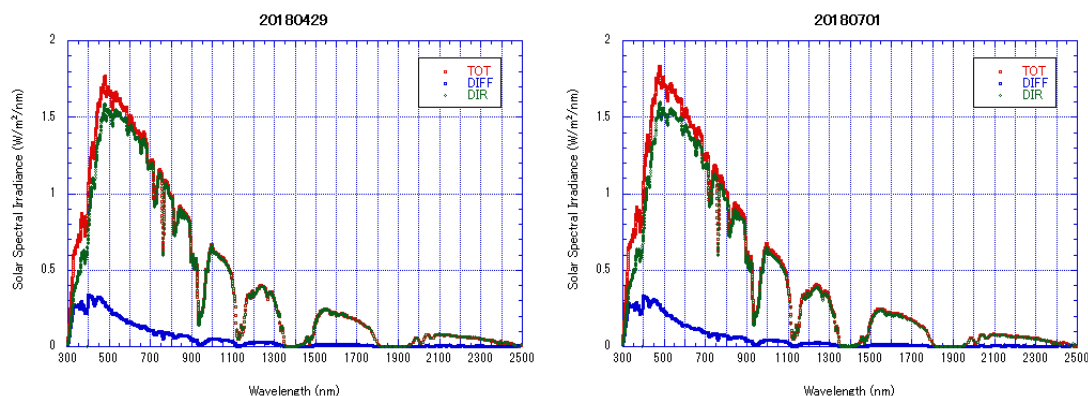


図 15 南鳥島での観測例 (2018年4月29日(左)と2018年7月1日(右))

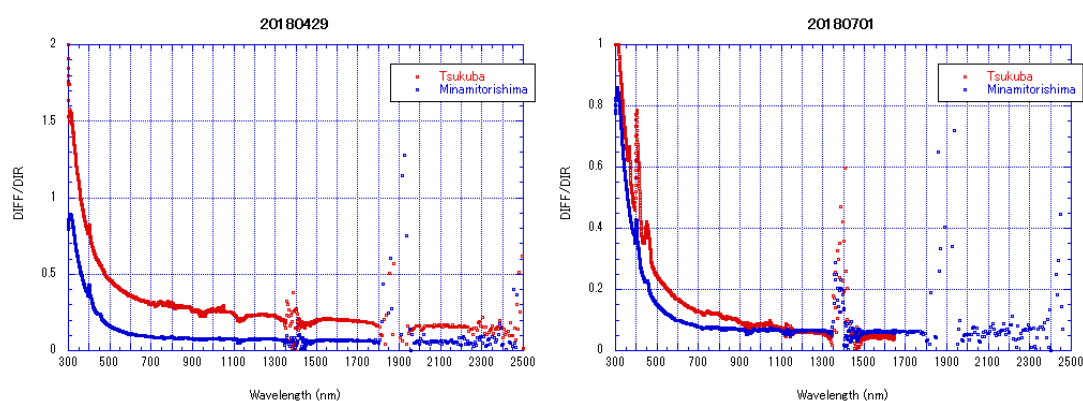


図 16 分光直達日射量に対する散乱分光日射量の比 (DIFF/DIR)
(2018年4月29日(左)と7月1日(右))

(2) 全球・領域エアロゾル輸送モデルを用いたエアロゾル分布の解明と雲分布再現性の向上

1) エアロゾルデータ同化システムの開発

作成したエアロゾル再解析における全球的なエアロゾル分布を図17に示す。RA (再解析) によるエアロゾル光学的厚さ (AOD) の空間分布は、衛星観測による分布と非常によく一致していた (図17aおよびb)。5年間の平均差の分布 (RA AOD-モデルフリーラン (FR) AOD) (図17c) は、一般的にデータ同化が中央太平洋のAODを増加させることを示しており、FRでは、MASINGAR mk-2のAODが過少であることを示している。海塩エアロゾルのカナダ、シベリア、およびインドネシアにおける大きなマイナスおよびプラスの違いは、森林火災からの有機エアロゾルシミュレーションの改善によるものである。サヘル (サハラ砂漠の南) とその風下の地域 (例えば、大西洋) で、データ同化によって鉍物ダスト粒子が増加した。対照的に、他の鉍物ダストの多い地域 (中国中央部、オーストラリア、ペルシャ湾、アルゼンチン) においては、AOD (主に鉍物ダスト粒子) は減少した。

地中海周辺の負のインクリメント (増分) は、モデルがサハラ砂漠から運ばれたダスト粒子を過大評価していることを示している。インドや中国の東海岸などの工業化地域では、データ同化によって人為起源の汚染物質 (硫酸塩と炭素質のエアロゾル) が増加し、観測されたAODとFR

AODの差が減少した。中央アフリカ共和国とギニア湾周辺の大きな正のインクリメントは、山火事による炭素質エアロゾルの増加を反映している。図17dは、データ同化による修正の5年平均から導出されるインクリメントの分布 (RA AOD-第一推定値 (FG) AOD) を示す。増分は、いくつかの領域 (特にエアロゾル源の風下の領域) においてより低い振幅および異なる分布を示す (図17c)。この理由は、その差が、同化後の修正の伝達および増分 (FG AOD) によって影響を受けるのは、それ以前のデータ同化による情報の蓄積を考慮に入れるためである。

次に、地上観測網 (AERONET) との比較検証結果を図18に示す。各AERONETサイトにおける

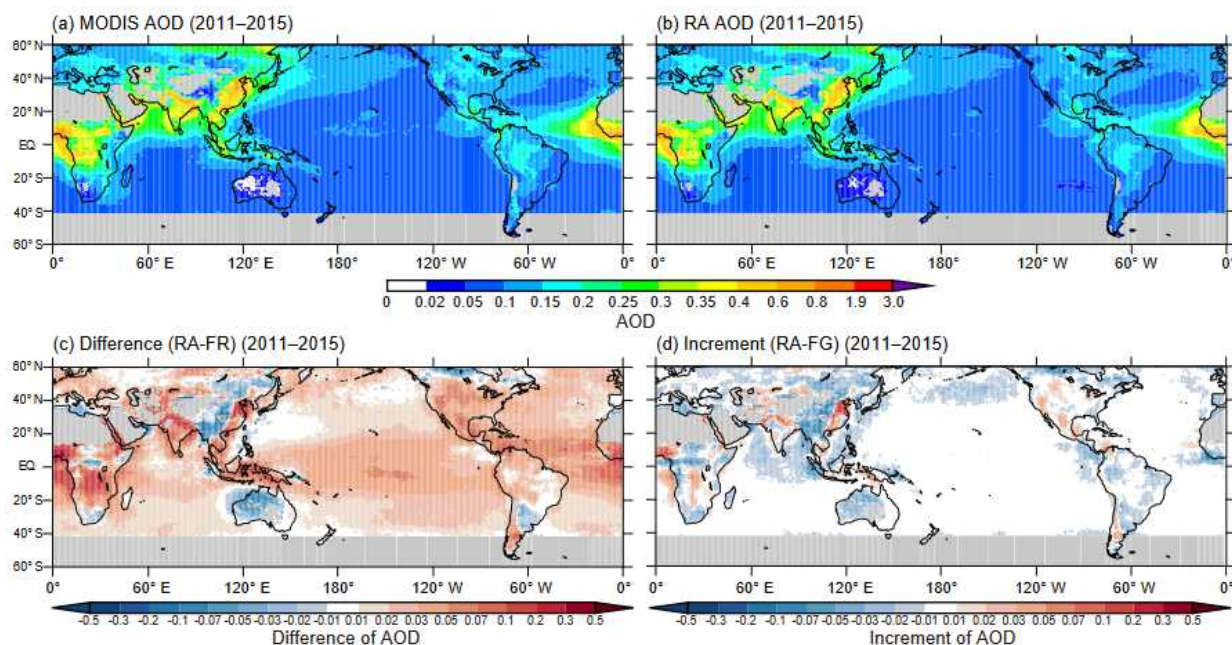


図 17 エアロゾル光学的厚さの全球平均 (2011~2015)。(a)は衛星観測を、(b)は再解析値を、(c)は再解析 (RA) とフリーラン (FR) の差を、(d)はデータ同化によるインクリメント (増分) を示す (RA-第一推定値 (FG))。

RAに関する統計的解析結果を図18に示し、FR AODに関しては図を省略する。この図では、36以上の月平均データを持つ181のAERONETサイトが描画されている。一般的に、RAはFRよりもAERONETのデータとはるかに良い一致を示している。RAでは、それぞれ181サイトの86.4% (154サイト)、40.7% (74サイト)、43.4% (79サイト) で根二乗平均誤差 (RMSE) < 0.01 、相関係数 (R) > 0.90 、一致度 (IOA) > 0.90 である。181地点 (91.2%)、81地点 (44.5%) の Mean Fractional Bias (MFB) の値は $\pm 15\%$ 以内である RMSEで見ると、中央アフリカ、インド、東南アジア、東海岸の各地域で比較的大きいが、比較的高いAOD値 (図17参照) に起因するも

のと考えられる。

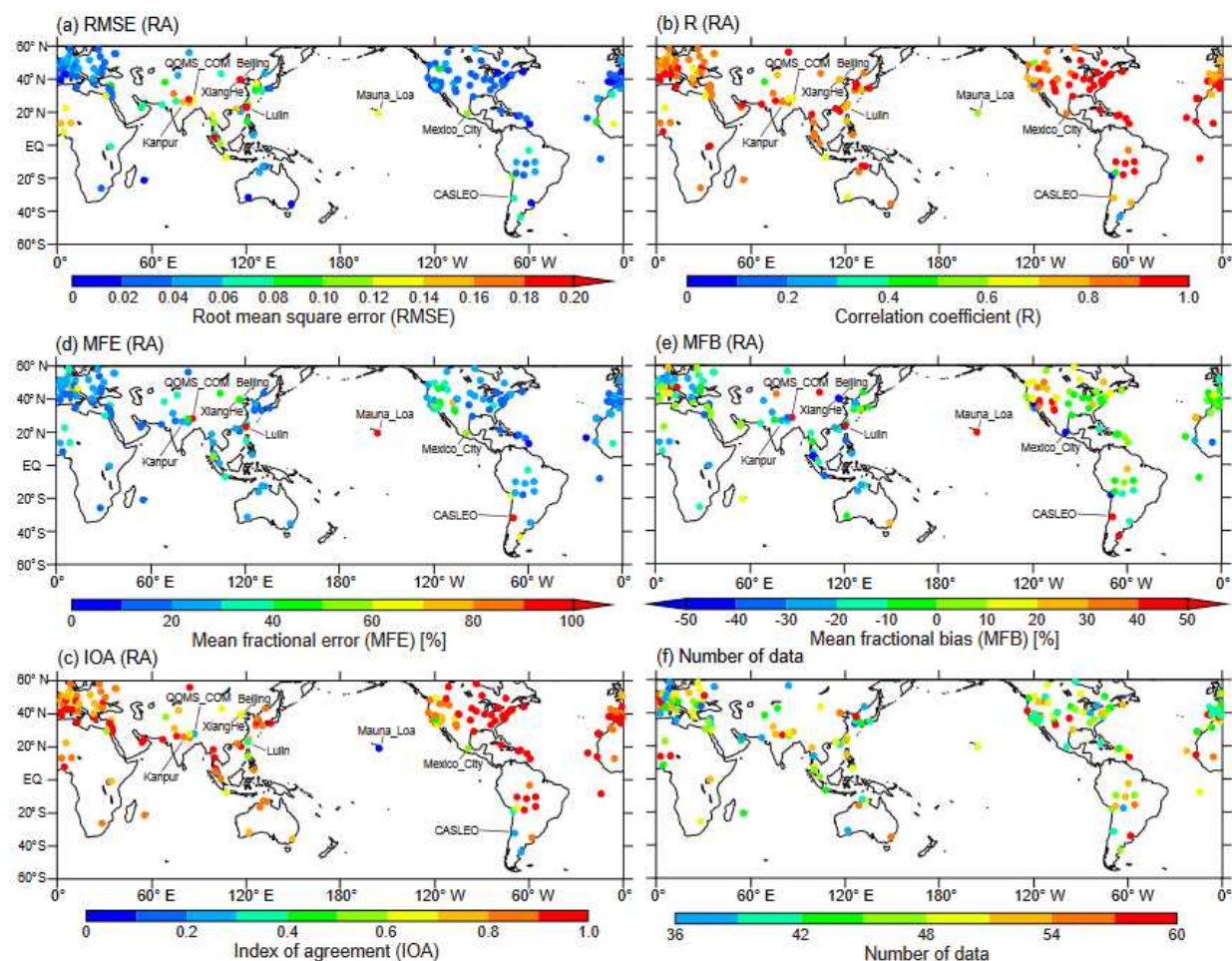


図 18 エアロゾル再解析値と地上観測（AERONET）の月平均光学的厚さの統計指標。左上より(a)は根二乗平均誤差 (RMSE)、(b)は相関係数 (R)、(d)は Mean Fractional Error (MFE)、(e)は Mean Fractional Bias (MFB)、(c)は一致度 (IOA)、(f)はデータ数を示す。

2) 領域エアロゾル輸送モデル開発

2)-1 エアロゾル-放射-拡散フィードバックを通じた大気汚染と都市気象変化の相乗効果に関する研究 —2013年1月の北京煙霧事例の解析

Kajino et al. (2017)¹²⁾ では、2013年1月の北京煙霧発生時におけるエアロゾル-放射-成層-乱流-雲過程の相互作用を、領域気象化学モデル WRF-Chem を用いて検討した。晴天日は、霧が出現した日の出付近に 1.4K の減少し、日中に太陽放射量が約 15%減少し、地上気温が 0 から 0.5K までわずかに低下した。放射冷却は、上部逆転層の頂部付近の霧または霧状の液滴によって強化された。したがって北京では、昼と夜の両方で大気汚染物質によって表面気温が低下した。地上濃度に対する汚染物質排出制御の非線形効果（または正のフィードバック）を新たに評価した。大気汚染は、夜間に地上付近の成層を安定化し、混合層の発達を遅らせ、より深刻な大気汚染を引き起こす。この非線形効果は、現在の排出レベルではそれほど大きくなく、約 10%程度であった。

言い換えれば、エアロゾルの大気濃度は、自身の放射効果のために 10%高くなっていた (図 19)。

2)-2 NHM-Chem を用いたエアロゾルの化学、物理、光学特性の整合的予測に向けたモデル評価に関する研究

Kajino et al. (2019)⁴⁾では、領域気象化学モデル (NHM-Chem) について、エアロゾルの化学、物理、光学特性の整合的評価を実施した。これらの特性は、大気質と健康影響、陸域と海洋の生態系の汚染、そしてエアロゾル-雲-放射相互作用プロセスを介した領域規模の気候変化の正確な評価にとって本質的に重要なものである。本稿では、東アジアにおける様々な観測データを用いて、計算されたエアロゾルの化学、物理、光学特性の整合性を評価した (図 20)。質量、粒径、および SO_4^{2-} と NH_4^+ 濃度は、観測とよく一致したが、 NO_3^- 、海塩、およびダストの濃度はまだ改善の必要性が示唆された。計算された地上質量濃度 (PM_{10} と $\text{PM}_{2.5}$) と球形消散係数は観測とよく一致した。計算されたエアロゾル光学的厚さおよび非球形 (ダスト) 消散係数は著しく過小評価した。

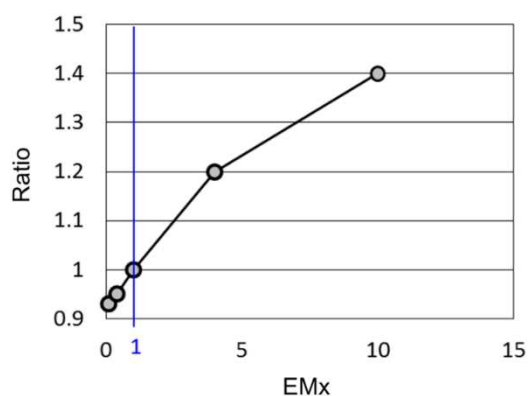


図 19 横軸は現在排出量を 1 としたときの、汚染物質の排出量比率、縦軸は非線形効果の比率を示す。

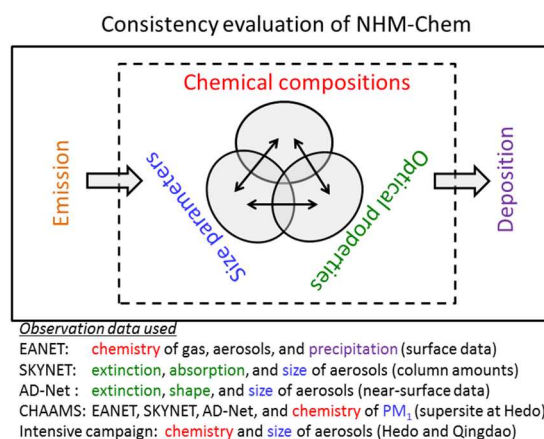


図 20 研究のコンセプト : Kajino et al. (2019)⁴⁾ の Graphical Abstract から引用

2)-3 大気質および気候関連変数に関する NHM-Chem に実装されたエアロゾル表現法間の比較実験

Kajino et al. (2018)³⁾では、NHM-Chem に実装した 3 つのエアロゾル表現法 (図 18) のパフォーマンスについて大気質関連要素および気候関連変数について、比較実験を行った。バルク平衡法に比べて 5-カテゴリ法と 3-カテゴリ法はそれぞれ 91%、41%ほど CPU 時間が多く必要であった。バルク平衡法は、大気質関連要素のうち現業予報に活用され得る変数、たとえば地上のオゾン、黄砂、PM_{2.5} 濃度については良いパフォーマンスを示した。3-カテゴリ法は、その他の大気質関連要素、すなわち上記以外の物質の大気質量濃度や、地表面への沈着量について、良いパフォーマンスを示した。5-カテゴリ法では、光吸収性エアロゾルとして重要な、ブラックカーボン (BC) と黄砂を別カテゴリとして取り扱うことにより、光吸収特性や氷晶核活性などの気候関

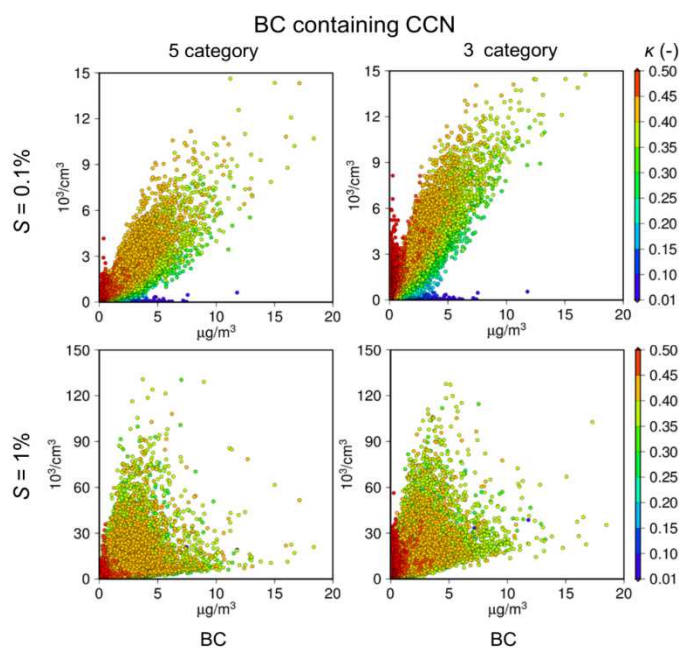


図 21 モデル領域 (東アジア) 全体のグリッドにおける高度 1km 以下の日平均値。横軸は BC 濃度、縦軸は BC を含む CCN 濃度。左が 5-カテゴリ法、右が 3-カテゴリ法。上が過飽和度 0.1%、下が過飽和度 1%。カラーシェードは吸湿性 κ を示す。

連変数を 3-カテゴリよりも正確に解くために開発された手法である。5-カテゴリ法と 3-カテゴリ法の比較においては、エアロゾル光学的厚さ (AOT) や凝結核活性 (CCN) など、エアロゾル全体の気候関連変数としてはほぼ違いは無かった。しかし、BC を含む CCN 数濃度、BC の沈着量、AOT の光吸収成分 (AAOT) については、違いが見られた。BC を含む CCN 数濃度については、3-カテゴリ法では全物質が BC と内部混合するため、吸湿特性を過大評価するため、低飽和度 (0.1%) では 50%程度過大評価した (図 21)。その結果、BC の沈着量も 10-20%程度、過大評価した。レンズ効果の増大による AAOT の過大評価は、BC の除去の過大評価と相殺され、あまり影響は大きくなかった (最大でも 5%程度)。

(3) 領域エアロゾル輸送モデルの輸送過程評価

前節で説明した水平質量フラックス鉛直積分量の時間積分量を計算した例を図22に示す。これも福島県大熊町から放出されたと仮定した硫酸粒子のシミュレーションである。図22のP1とP2はどちらのケースもエアロゾルブルームが南下して茨城県へ輸送されたことが観測研究から明らかにされている (Oura et al., 2015¹³⁾)。しかしながらこの二つのケースではエアロゾルが輸送された経路が全くことなることが図から容易に読み取れる。積分量が大きな領域 (図22で赤～オレンジ色) がエアロゾルの主な流れの位置であり、矢頭の向きが質量フラックスの方向であるか

らである。このように質量フラックスでモデル計算結果を可視化すると動画など使わなくても物質の移動した経路を定量的に把握でき、観測との比較や情報の効率的な抽出が可能となる。

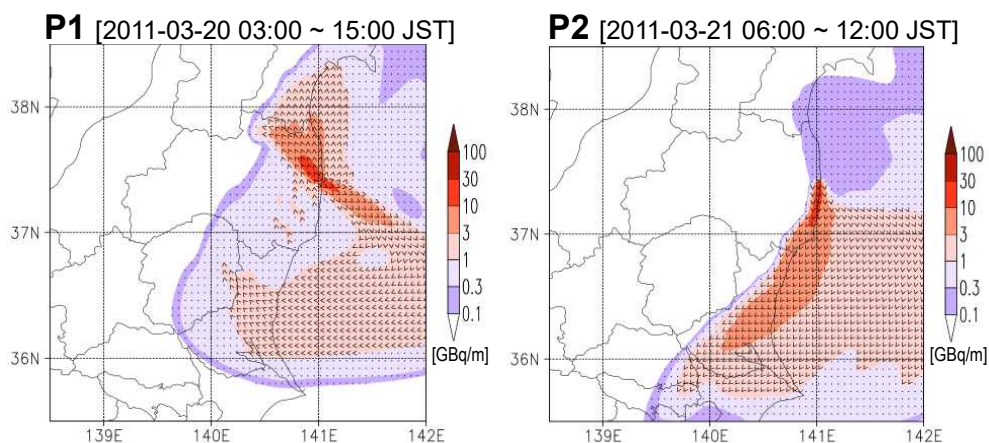


図 22 (左) エアロゾル輸送モデルの計算結果から算出した水平質量フラックス鉛直積分量を 2011 年 3 月 20 日 03 時から 15 時まで時間積分した結果。矢頭はフラックスの方向、コンターは積分量の大きさを表す。(右) 同様に 2011 年 3 月 21 日 06 時から 12 時まで時間積分した結果。黒矢印線はエアロゾルの輸送経路を大まかに示す。質量は 1 ナノグラム=3kBq で換算してある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 地上分光日射観測によるエアロゾル・雲の地表面放射収支への影響監視

本研究では、エアロゾル及び雲の地上放射への影響の評価と監視技術の高度化を行うため、波長域350~2550nmで測定が可能な精密分光日射観測装置の開発と分光型全天日射計 (MS-711, MS-712, MS-713, PGP-200NIR2) の検定システムの開発を行った。また、開発した精密分光日射観測装置による連続観測をつくばと南鳥島において開始した。

分光日射計による精密観測は、分光型全天日射計による全天日射観測を行い、次に太陽直達光遮蔽を行うことで散乱光を観測するという動作を繰り返す(間欠動作を行う)直達日射遮蔽装置付き太陽追尾装置を開発し、この太陽追尾装置に分光型全天日射計を搭載することで精密分光日射観測が可能な装置を開発した。南鳥島での観測実施のため、分光型全天日射計のガラスドームの清掃を自動化し、ガラスドームへの海塩粒子の付着を防ぐための防塩機能を付属した精密分光日射観測装置を開発した。防塩機能を付属した精密分光日射観測装置は、南鳥島設置後に清掃水吹き出し口暴風カバーとブロー設置位置改良などを施した後に、装置が順調に動作し連続観測が実施されている。

分光型全天日射計のLangley法を用いた検定は、感度が低い波長域と強い水蒸気の吸収帯を除いてバラツキ1%以下(多くの波長域で0.5%以下)で検定できることが示された。水蒸気のデータの精度を高めることで、弱い吸収帯であれば小さいバラツキで検定定数を決められる傾向にある

が、 $1.4\mu\text{m}$ 帯のように強い吸収帯では、依然精度が悪い。このため、ランプを併用した校正法を考える必要がある。露光時間を変えた測定では、MS-711、MS-711N、MS-712において、露光時間100msec以下であれば露光時間と検出器出力の線形性が2016、2017年度と同様に0.5%よりも良い精度で線形性があった。MS-713は、S/Nが悪く、線形性については確認できなかった。MS-711Nは2017年と2018年、MS712は2015年～2018年、MS-713は2016年～2018年の検定定数が得られている。この結果から水蒸気の吸収帯やS/Nが悪い吸収帯を除いて経年変化を見ると、2017年まではその変化は $\pm 1.5\%$ 以内であったものが、2018年に波長に依存して1.5～4%小さくなっている。従来の検定観測では日射計表面での反射光が、コリメーションチューブ内で反射して出力を大きくしていたものと思われる。2015年～2018年の変化を見ると2015年～2017年はコリメーションチューブ内で光が反射して検定定数が大きかったことを差し引けば、4年間での経年変化は小さいと思われるが、経年変化を正確に把握するには、今後も継続して検定定数を決める測定を行う必要がある。

一般に地表面日射量の測定は全波長の全天日射計が用いられている。全天日射量のみでの測定では、大気要素により変動する地表面日射量の監視を捉えることは難しいが、開発した精密分光日射観測システムにより波長別に精度の良い日射観測が可能となった。精密分光日射観測システムは、つくばと南鳥島において連続観測を始めている。これにより放射収支メカニズム解明のための大気要素（エアロゾル・雲など）ごとの影響監視が可能となった。

基準器のスカイラジオメータはマウナ・ロア観測所においてLangley法による検定観測を行い、精度よく検定することができた。検定された基準器スカイラジオメータは、気象研究所の観測点に設置しているスカイラジオメータと比較検定観測を行い、各観測点の観測精度を維持した。また、気象研究所で実施した比較検定観測には、SKYNET、国立環境研究所GOSAT検証グループや産業技術総合研究所、スカイラジオメータ観測を実施している大学などが参加しており、他の研究プロジェクトの研究推進に貢献することができた。衛星GCOM-C、GOSAT、GOSAT-2の地上検証では、気象研究所が比較検定したスカイラジオメータが使われており、衛星の地上検証においても大きな役割を果たした。

(2) 全球・領域エアロゾル輸送モデルを用いたエアロゾル分布の解明と雲分布再現性の向上

本研究課題によって高速なエアロゾルデータ同化システムを開発することができ、長期間のエアロゾル再解析データセットを作成することができた。この再解析データセットを用いることによって、エアロゾルの放射影響や雲、降水過程の理解を深めることができる。このデータセットは、その他にも産業、社会等の様々な分野に応用することが可能である。また、開発したシステムはその高速な計算性能により時間的に制約が大きい現業システムへの導入も容易であり、日々の予測計算にも利用可能である。本研究課題によって開発された領域エアロゾル輸送モデルは東アジアにおけるエアロゾル分布をより詳細に表現することができるため、東アジアにおける大気質の監視・予測のツールとして使用することによって、東アジアスケールで定量化することができた。本研究課題で蓄積されたエアロゾル輸送モデルの計算結果を質量フラックス法で解析することにより、効率的に分類することができるようになり、今後の環境監視予測に有効に活用できると考えられる。

6. 引用文献

- 1). IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA..
- 2). Yumimoto, K., T. Y. Tanaka, N. Oshima, , and T. Maki, 2017: JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0, Geosci. Model Dev., 10, 3225-3253, doi:10.5194/gmd-10-3225-2017.
- 3). Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, M. Mikami, 2018: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology - chemistry model (v1.0): model description and aerosol representations, Geosci. Model Dev. Discuss., in review, doi:10.5194/gmd-2018-128.
- 4). Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, A. Takami, A. Shimizu, S. Hatakeyama, Y. Sadanaga, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki and M. Mikami, 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology - chemistry model: model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols, J. Meteor. Soc. Japan, 97(2), doi: 10.2151/jmsj.2019-020.
- 5). Sekiyama, T. T. and T. Iwasaki, 2018: Mass flux analysis of 137Cs plumes emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tellus B, 70(1), 1-11, doi: 10.1080/16000889.2018.1507390.
- 6). 放射観測機器の較正に関するワーキンググループ編 (地球温暖化観測推進事務局/環境省・気象庁), 2015: 「放射観測機器の較正に関する技術報告書」、地球環境研究センター、国立研究開発法人国立環境研究所
- 7). McClatchey, R. A., R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garing, 1972: Optical Properties of the Atmosphere, (Third Edition). AFCRL 72-0497, AD0753075.
- 8). Uchiyama, A., A. Yamazaki, R. Kudo, 2014: Column Water Vapor Retrievals from Sky-radiometer (POM-02) 940nm Data. J. Meteorol. Soc. Japan, 92A, 195-203, DOI:10.2151/jmsj.2014-A13.
- 9). Uchiyama, A., T. Matsunaga, and A. Yamazaki, 2018: The instrument constant of sky radiometers (POM-02) - Part 1: Calibration constant, Atmos. Meas. Tech., 11, 5363-5388, doi.org/10.5194/amt-11-5363-2018.
- 10). 居島 修, 高野 松美, 山崎 明宏, 石田 春磨, 工藤 玲, 2018: 分光放射計用校正装置の開発及び分光放射計の校正精度, 高層気象台彙報, 75, pp.63-76.
- 11). Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami, and E. Kobayashi, 2010: From solar radiation measurements to optical properties: 1998-2008 trends in Japan,

- Geophys. Res. Lett. 37, L04805, doi:10.1092/2009GL041794.
- 12). Kajino, M., H. Ueda, Z. Han, Y. Inomata, H. Kaku, 2017: Synergy between air pollution and urban meteorological changes through aerosol-radiation-diffusion feedback - A case study of Beijing in January 2013, Atmos. Environ. 171, 98-110, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.018
 - 13). Oura, Y. et al., 2015: A Database of Hourly Atmospheric Concentrations of Radiocesium (¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs) in Suspended Particulate Matter Collected in March 2011 at 99 Air Pollution Monitoring Stations in Eastern Japan., J. Nucl. Radiochem. Sci. 15, 15-26.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- 1). Uchiyama, A., 2014: Method to retrieve single scattering properties of aerosols using multi-wavelength scattering and absorption coefficient data measured by integrating nephelometer and absorption photometer. J. Meteor. Soc. Japan, 92A, 71-91, doi:10.2151/jmsj.2014-A05.
- 2). Uchiyama, A., A. Yamazaki, R. Kudo, E. Kobayashi, H. Togawa, and D. Uesawa, 2014: Continuous ground-based observation of aerosol optical properties at Tsukuba, Japan: Trend and climatology. J. Meteor. Soc. Japan, 92A, 93-108, doi:10.2151/jmsj.2014-A06, doi:10.2151/jmsj.2014-A06.
- 3). Uchiyama, A., A. Yamazaki, and R. Kudo, 2014: Column water vapor retrievals from sky radiometer (POM-02) 940 nm data. J. Meteor. Soc. Japan, 92A, 195-203, doi:10.2151/jmsj.2014-A13.
- 4). Khatri, P., T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2014: Use of 315nm channel data of the sky radiometer to estimate the columnar ozone concentration: A preliminary study. J. Meteor. Soc. Japan, 92A, 185-194, doi:10.2151/jmsj.2014-A12.
- 5). Jin, Y., K. Kai, K. Kawai, T. Nagai, T. Sakai, A. Yamazaki, A. Uchiyama, D. Batdorj, N. Sugimoto, and T. Nishizawa, 2014: Ceilometer calibration for retrieval of aerosol optical properties,. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer,, 153(2015)49-56, doi:10.1016/j.jqsrt.2014.10.009.
- 6). Irie, H., T. Nakayama, A. Shimizu, A. Yamazaki, T. Nagai, A. Uchiyama, Y. Zaizen, S. Kagamitani, and Y. Matsumi, 2015: Evaluation of MAX-DOAS aerosol retrievals by coincident observations using CRDS, lidar, and sky radiometer in Tsukuba, Japan, Atmos. Meas. Tech., Vol. 8, pp.1013-1054, doi:10.5194/amtd-8-1013-2015.
- 7). Ohyama, H., S. Kawakami, T. Tanaka, I. Morino, O. Uchino, M. Inoue, T. Sakai, T. Nagai, A. Yamazaki, A. Uchiyama, T. Fukamachi, M. Sakashita, T. Kawasaki, T. Akaho, K. Arai, and H. Okumura, 2015: Observations of XCO₂ and XCH₄ with

- ground-based high-resolution FTS at Saga, Japan and comparisons with GOSAT products, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, 8, 8257–8294, 2015, doi:10.5194/amtd-8-8257-2015.
- 8). Sessions, W.R., J.S. Reid, A. Benedetti, P.R. Colarco, A. da Silva, S. Lu, T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, J.M. Baldasano, S. Basart, M.E. Brooks, T.F. Eck, M. Iredell, J.A. Hansen, O.C. Jorba, H.-M.H. Juang, P. Lynch, J.-J. Morcrette, S. Moorthi, J. Mulcahy, Y. Pradhan, M. Razinger, C.B. Sampson, J. Wang, D.L. Westphal, 2015: Development towards a global operational aerosol consensus: basic climatological characteristics of the International Cooperative for Aerosol Prediction Multi-Model Ensemble (ICAP-MME), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 335–362, doi:10.5194/acpd-14-14933-2014.
 - 9). Yumimoto K., H. Murakami, T.Y. Tanaka, T.T. Sekiyama, A. Ogi, and T. Maki, 2015: Forecasting of Asian dust storm that occurred on May 10–13, 2011, using an ensemble-based data assimilation system, *Particuology*, doi: 10.1016/j.partic.2015.09.001.
 - 10). Yumimoto K. and T. Takemura, 2015: Long-term Inverse Modeling of Asian Dust: Inter-annual Variations of Its Emission, Transport, Deposition and Radiative Forcing, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 2015, doi: 10.1002/2014JD022390.
 - 11). 鎌田茜, 直江寛明, 池上雅明, 出牛真, 梶野瑞王, 眞木貴史, 2016: 高濃度の光化学オキシダントが大気領域で観測された事例について, *大気環境学会誌*, 51(2), 144–152, 2016.
 - 12). Sekiyama, T. T., K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, T. Nagao, M. Kikuchi, and H. Murakami, 2016: Data Assimilation of Himawari-8 Aerosol Observations: Asian Dust Forecast in June 2015, *SOLA*, 12, 86–90, doi: 10.2151/sola.2016-020.
 - 13). Yumimoto, K., T. M. Nagao, M. Kikuchi, T. T. Sekiyama, H. Murakami, T. Y. Tanaka, A. Ogi, H. Irie, P. Khatri, H. Okumura, K. Arai, I. Morino, O. Uchino, T. Maki, 2016: Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5886–5894, doi: 10.1002/2016GL069298.
 - 14). Uchino, O., T. Sakai, T. Izumi, T. Nagai, I. Morino, A. Yamazaki, M. Deushi, K. Yumimoto, T. Maki, T. Y. Tanaka, T. Akaho, H. Okumura, K. Arai, T. Nakatsuru, T. Matsunaga, and T. Yokota, 2017: Lidar detection of high concentrations of ozone and aerosol transported from northeastern Asia over Saga, Japan. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 1865–1879.
 - 15). K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, N. Oshima, , and T. Maki, 2017: JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3225–3253, doi:10.5194/gmd-10-3225-2017.
 - 16). Ishii, S., P. Baron, M. Aoki, K. Mizutani, M. Yasui, S. Ochiai, A. Sato, Y.

- Satoh, T. Kubota, D. Sakaizawa, R. Oki, K. Okamoto, T. Ishibashi, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, T. Maki, K. Yamashita, T. Nishizawa, M. Satoh, and T. Iwasaki, 2017: Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar. Part 1: Instrumental overview for global wind profile observation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 95, 301–317, doi: 10.2151/jmsj.2017-017.
- 17). Kajino, M., H. Ueda, Z. Han, Y. Inomata, H. Kaku, 2017: Synergy between air pollution and urban meteorological changes through aerosol-radiation-diffusion feedback - A case study of Beijing in January 2013, *Atmos. Environ.* 171, 98–110, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.10.018.
 - 18). Uchiyama, A., B. Chen, A. Yamazaki, G. Shi, R. Kudo, C. Nishita-Hara, M. Hayashi, A. Habib, T. Matsunaga, 2018: Aerosol Optical Characteristics in Fukuoka and Beijing Measured by Integrating Nephelometer and Aethalometer: Comparison of Source and Downstream Regions. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96, 215–240.
 - 19). Jin Y., N. Sugimoto, A. Shimizu, T. Nishizawa, K. Kai, K. Kawai, A. Yamazaki, M. Sakurai, and H. Wille, 2018: Evaluation of ceilometer attenuated backscattering coefficients for aerosol profile measurement. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12.
 - 20). Uchiyama, A., T. Matsunaga, and A. Yamazaki, 2018: The instrument constant of sky radiometers (POM-02). Part 1: Calibration constant *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 5363.5388.
 - 21). Uchiyama, A., T. Matsunaga, and A. Yamazaki, 2018: The instrument constant of sky radiometers (POM-02). Part 2: Solid view angle. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11, 5389–5402.
 - 22). 居島 修, 高野 松美, 山崎 明宏, 石田 春磨, 工藤 玲, 2018: 分光放射計用校正装置の開発及び分光放射計の校正精度, *高層気象台彙報*, 75, pp.63–76.
 - 23). Sekiyama, T. T. and T. Iwasaki, 2018: Mass flux analysis of ¹³⁷Cs plumes emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *Tellus B*, 70(1), 1–11, doi: 10.1080/16000889.2018.1507390.
 - 24). Benedetti, A., J. S. Reid, A. Baklanov, S. Basart, O. Boucher, I. M. Brooks, M. Brooks, P. R. Colarco, E. Cuevas, A. da Silva, F. Di Giuseppe, J. Escribano, J. Flemming, N. Huneeus, O. Jorba, S. Kazadzis, S. Kinne, P. Knippertz, P. Laj, J. H. Marsham, L. Menut, L. Mona, T. Popp, P. K. Quinn, S. Rémy, T. T. Sekiyama, T. Tanaka, E. Terradellas, and A. Wiedensohler, 2018: Status and future of Numerical Atmospheric Aerosol Prediction with a focus on data requirements, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 10615–10643, doi: 10.5194/acp-18-10615-2018.
 - 25). Kajino, M., T. T. Sekiyama, A. Mathieu, I. Korsakissok, R. Pérrillat, D. Quélo, A. Quérel, O. Saunier, K. Adachi, S. Girard, T. Maki, K. Yumimoto, D. Didier, O. Masson, Y. Igarashi, 2018: Lessons learned from atmospheric modeling studies

after the Fukushima nuclear accident: Ensemble simulations, data assimilation, elemental process modeling, and inverse modeling, *Geochemical Journal* 52(2), 85-101, doi: 10.2343/geochemj.2.0503.

- 26). Kajino, M., T. T. Sekiyama, Y. Igarashi, G. Katata, M. Sawada, K. Adachi, Y. Zaizen, H. Tsuruta, T. Nakajima, 2019: Deposition and dispersion of radio-cesium released due to the Fukushima nuclear accident: Sensitivity to meteorological models and physical modules, *J. Geophys. Res.*, 124(3), 1823-1845, doi: 10.1029/2018JD028998.
- 27). Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, A. Takami, A. Shimizu, S. Hatakeyama, Y. Sadanaga, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki and M. Mikami, 2019: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology - chemistry model: model evaluations toward the consistent predictions of the chemical, physical, and optical properties of aerosols, *J. Meteor. Soc. Japan*, 97(2), doi: 10.2151/jmsj.2019-020.
- 28). Nishita - Hara, C., M. Hirabayashi, K. Hara, A. Yamazaki, and M. Hayashi, 2019: Dithiothreitol-measured oxidative potential of size-segregated particulate matter in Fukuoka, Japan: effects of Asian dust events. *GeoHealth*. (in press)

(2) 口頭発表

- 1). 山崎明宏, 内山明博, 福岡でのエアロゾル光学特性観測, 福岡大学「福岡から診る大気環境」研究所設立記念研究会, 2014年6月, 福岡県福岡市
- 2). 内山明博, 山崎明宏, 工藤玲, 石廣玉, 陳彬, 地上でのエアロゾル光学特性の連続観測 (福岡と北京の比較), 日本気象学会 2014年度秋季大会, 2014年10月, 福岡県福岡市
- 3). 山崎明宏, 内山明博, 堀雅裕, 村上浩, 積分球を使ったスカイラジオメータの検定, 日本気象学会 2014年度秋季大会, 2014年10月, 福岡県福岡市
- 4). 眞子直弘, 高村民雄, 久世宏明, プラディープカトリ, 山崎明宏, SKYNET/スカイラジオメータの立体視野角校正, 日本気象学会 2014年度秋季大会, 2014年10月, 福岡県福岡市
- 5). 眞木貴史, 関山剛, 弓本桂也, 大島長, 出牛真, 直江寛明, 梶野瑞王, 田中泰宙, 小木昭典, 全球エアロゾルモデル (MASINGAR) を用いた気候研究等への活用について, 統合的陸域研究連絡会, 2014年, 福岡
- 6). 弓本桂也, 村上浩, 田中泰宙, 小木昭典, 関山剛, 眞木貴史, 全球エアロゾルモデル MASINGAR を用いた黄砂同化予測システムの開発, 日本気象学会 2014年度秋季大会, 2014年10月, 福岡県福岡市
- 7). Maki, T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, K. Yumimoto and M. Mikami, Modeling

- Study in JMA/MRI, The 7th Meeting of Working Group (I) for Joint Research on Dust and Sandstorms among Mongolia, China, Korea, and Japan, 2014, 中国西安
- 8). 関山剛, エアロゾルの数値モデルシミュレーションについて, 鳥取大学研究集会「乾地研共同研究の黄砂関連研究の相互関係を確認する会」, 2014年, 鳥取
 - 9). 内山明博, 山崎明宏, 工藤玲, 石廣玉, 陳彬, 地上でのエアロゾル光学特性の連続観測 2 (福岡と北京の比較), 日本気象学会 2015 年度春季大会, 2015 年 5 月, 茨城県つくば市
 - 10). 泉敏治, 内野修, 酒井哲, 永井智広, 森野勇, 山崎明宏, 弓本桂也, 田中泰宙, 眞木貴史, 赤穂大河, 奥村浩, 新井康平, 松永恒雄, 横田達也, 佐賀の可搬型ライダーで高度 2 km 以下に観測された高濃度オゾンとエアロゾル(2)ミーライダーの解析と全球エアロゾルモデルとの比較, 第 33 回レーザセンシングシンポジウム, 2015 年 9 月, 東京都大田区
 - 11). 泉敏治, 内野修, 酒井哲, 永井智広, 森野勇, 山崎明宏, 弓本桂也, 田中泰宙, 眞木貴史, 赤穂大河, 奥村浩, 新井康平, 松永恒雄, 横田達也, 佐賀のライダーで高度 2 km 以下に観測された高濃度のオゾンとエアロゾル (2)ミーライダーの解析と全球エアロゾルモデルとの比較, 日本気象学会 2015 年度秋季大会, 2015 年 10 月, 京都府京都市
 - 12). Yumimoto, K., Development of a Forecasting and Data Assimilation System for Asian Dust in the Japan Meteorological Agency (JMA), AGU Fall Meeting, 2015, San Francisco, CA, USA
 - 13). Yumimoto, K., Aerosol Data Assimilation with the Next Generation Meteorological Satellite (Himawari-8), AGU Fall Meeting, 2015, San Francisco, CA, USA
 - 14). Yumimoto, K., Long-term Inverse Modeling of Asian Dust, Asian Aerosol Conference (AAC2015), 2015, Kanazawa, Japan
 - 15). 山崎明宏, 石田春磨, 工藤玲, 内山明博, 居島修, 高野松美, 分光型日射計による精密放射観測装置の開発, 日本気象学会2016年度春季大会, 2016年5月, 東京都渋谷区
 - 16). 山崎明宏, 分光型日射計による精密放射観測装置の開発について, 2016 年度福岡から診る大気環境研究所研究会, 2016 年 9 月, 福岡県福岡市
 - 17). 梶野瑞王ほか, 中国上空におけるオゾンの増加: モデルシミュレーションと衛星観測の比較, 第22回大気化学討論会, 2016年, 札幌
 - 18). 関山剛, エアロゾル数値モデルと観測データの比較による黄砂発生プロセス理解の深化, 2016年, 鳥取大学乾燥地研究センター平成28年度共同研究発表会
 - 19). Maki, T., K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, A. Ogi, T. Kitajima, T. Aoyagi and M. Deushi, Current Asian dust forecasting/monitoring activities of JMA/MRI, International Asian dust and Aerosol Workshop, 2016, Jeju, Korea
 - 20). 内山明博, 松永恒雄, 山崎明宏, スカイラジオメーター (POM02) の特性 (衛星推定エアロゾルプロダクト検証に向けて), 日本気象学会 2017 年度春季大会, 2017 年 5 月, 東京都

- 21). 山崎明宏, 福岡でのスカイラジオメータ観測, 2017年度 福岡から診る大気環境研究所研究会, 2017年7月, 福岡県福岡市
- 22). 神慶孝, 杉本伸夫, 清水厚, 西澤智明, 山崎明宏, 河合慶, 甲斐憲次, シーロメタ CHM15k の重なり関数補正と信号再校正, 日本気象学会 2017年度秋季大会, 2017年10月, 北海道札幌市
- 23). 高島久洋, 原圭一郎, 白石浩一, 西田千春, 林政彦, 藤吉康志, 吉野彩子, 高見昭憲, 山崎明宏, 局地的な前線にともなう大気組成の短時間変動, 第18回大気環境学会九州支部研究発表会, 2017年12月, 福岡県福岡市
- 24). Tanaka, T. Y., T. Maki and K. Yumimoto, Near Real Time aerosol forecast experiment with Himawari-8 aerosol product, JPGU and AGU joint meeting, 2017, Makuhari, Japan
- 25). Yumimoto, K., T. Y. Tanaka and T. Maki, JMA/MRI Aerosol reanalysis Product, JPGU and AGU joint meeting, 2017, Makuhari, Japan
- 26). 内山明博, 松永恒雄, 山崎明宏, スカイラジオメーター (POM02) の特性 (Part 2) (衛星推定エアロゾルプロダクト検証に向けて), 日本気象学会 2018年度春季大会, 2018年5月, 茨城県つくば市
- 27). 内山明博, 塩原匡貴, 小林拓, 菱田晃介, 山崎明宏, 江井和則, 河井和弘, 渡部義明, 松永恒雄, 改造スカイラジオメーターによる月を光源としたエアロゾル光学的厚さの推定 (2), 日本気象学会 2018年度春季大会, 2018年5月, 茨城県つくば市
- 28). 内山明博, 塩原匡貴, 小林拓, 菱田晃介, 山崎明宏, 神慶孝, 西澤智明, 江井和則, 河井和弘, 渡部義明, 松永恒雄, 改造スカイラジオメーターによる月を光源としたエアロゾル光学的厚さの推定 (3), 日本気象学会 2018年度秋季大会, 2018年10月, 宮城県仙台市
- 29). Takashima H., K. Hara, C. Nishita, K. Shiraishi, M. Hayashi, Y. Fujiyoshi, A. Yoshino, A. Takami, A. Yamazaki, Short-term variations in atmospheric constituents associated with local front passage over Fukuoka, an urban area in Japan, observed by a 3-D coherent Doppler lidar and in-situ tracer measurements., 2018 joint 14th iCACGP Quadrennial Symposium and 15th IGAC Science Conference, 2018年9月, 香川県高松市
- 30). Sekiyama, T. T. et al, The Impact of Wind and Concentration Data Assimilation on the Plume Dispersion Simulation in the Lower Troposphere, 15th AOGS annual meeting, 2018, Honolulu, USA
- 31). Sekiyama, T. T. et al., Operation-Oriented Asian Dust Data Assimilation Using Himawari-8 Aerosol Products, 15th AOGS annual meeting, 2018, Honolulu, USA
- 32). Sekiyama, T. T. et al., Ensemble dispersion simulation of tropospheric aerosol plumes using a perturbed meteorological reanalysis, 14th-iCACGP/15th-IGAC, 2018, Takamatsu, Japan.
- 33). Maki, T., T. Y. Tanaka, K. Yumimoto, A. Ogi, T. T. Sekiyama and M. Hosaka, Relationship between dust emission amount and soil moisture content, 9th

International Dust Workshop, 2018, Spain

- 34). Maki, T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, K. Kondo, A. Ogi, A. Saito, S. Yabu and K. Yumimoto, Verification and evaluation of DSS by numerical model and observations, DSS sub-forum for TEMM20, Jun 2018, Suzhou, P.R.C.
- 35). Sekiyama, T. T. et al., S Simultaneous Data Assimilation of Atmospheric Tracer Concentration and Meteorological Variables, AGU Fall Meeting 2018, 2018, Washington, D.C., USA
- 36). Yamazaki, A. and H. Ishimoto, Provision of validation data for GCOM-C atmosphere product validation from ground radiation measurement network, The Joint PI Meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2018, 2019年1月, 東京都
- 37). Khatri P., H. Iwabuchi, T. Hayasaka, H. Irie, T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Damiani, Cloud Retrieval from SKYNET Sky Radiometer, 5th INTERNATIONAL SKYNET WORKSHOP, 2019年2月, India, New Delhi
- 38). 関山剛, ライダー観測を利用したエアロゾルデータ同化、その将来性, レーザーセンシング学会第23回大気ライダー研究会, 首都大学東京秋葉原キャンパス, 2019, 東京都千代田区
- 39). 関山剛, 移流拡散シミュレーションにおける衛星観測とデータ同化の役割, 衛星搭載ドップラー風ライダー有識者会議, 2019, NICT大手町会議室, 東京都千代田区

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

大気環境学会進歩賞(2015)

(5) 一般への公表・報道等

平成30年10月：報道発表「ひまわり8号データを用いた黄砂やPM2.5飛来予測の精度向上について」

(6) 研究分野における成果の発展・牽引

気象研究所で実施したスカイラジオメータの比較検定観測には、SKYNET、国立環境研究所 GOSAT検証グループや産業技術総合研究所などが参加し、スカイラジオメータ観測の精度維持と他の研究プロジェクトの研究推進に貢献した。

(7) 政策への寄与・貢献

本研究では、サブ課題1で精密な分光日射計を用いた観測を実施すると共に、既存の観測データと有機的に活用し、サブ課題2でモデルの改良や同化技術の開発を行う。本研究は、エアロゾル分布の解明と雲分布再現性の向上を図り、気候変動予測の上で最大の不確定要因の一つである地表面放射収支の監視技術を確立し、地球温暖化予測の不確実性の低減に貢献するものである。

2018年度より、本研究で開発したスカイラジオメータを用いたエアロゾルの現業観測が気象庁で開始され、定常的な観測が可能となった。気象庁が実施したマウナ・ロア観測所での検定観測への協力、取得したデータを解析するためのプログラム提供、また、気象庁が観測点に設置したスカイラジオメータの比較検定観測データ解析プログラムの提供などを行い、気象庁スカイラジオメータ観測の現業化に貢献した。

比較検定された気象研究所のスカイラジオメータ（つくば、福岡、宮古島）から導出したエアロゾルの光学的厚さのデータは、2017年12月に打ち上げられた衛星GCOM-Cの地上検証で使用されている。また、気象研究所で実施した比較検定に参加したSKYNETや他研究機関のスカイラジオメータのデータは、GCOM-C、GOSAT、GOSAT-2の地上検証で使われている。

分光放射観測校正検討会に参加し、分光日射計の校正の国内基準の作成に関係している。

気象庁の黄砂情報提供業務において、本研究で開発した高解像度版全球エアロゾル輸送モデルが平成29年2月に業務化された。また、本研究で開発中のエアロゾルデータ同化システムは令和元年度中に気象庁の黄砂情報提供業務において業務化される見込みである。気象庁の大気汚染気象業務において、本研究で開発した領域化学輸送モデルが平成27年に業務化された。