

吸収性エアロゾルが大気・雪氷面放射過程に与える影響のモニタリングに関する研究

(1) 東アジア域における大気中のエアロゾルの地上観測によるモニタリング

国土交通省 気象庁 気象研究所

気候研究部 第三研究室

内山明博・山崎明宏・上沢大作・工藤玲

平成21～25年度合計予算額 113,307千円 (全課題分)  
 (うち、平成25年度当初予算額 20,920千円 (全課題分))

### [要旨]

光を吸収する性質を持つ「吸収性エアロゾル」(鉱物ダストや黒色炭素)は温室効果ガスと同様に大気を加熱し、また、雪氷面に沈着してアルベド(反射率)を下げることによって地球温暖化を加速させる働きをするため、気候システムにとって重要な要素の一つとなっている。本サブ課題では地球上で最も吸収性エアロゾル発生量の多い東アジア域に地上観測点を配置し、吸収性エアロゾルの空間・時間変動をモニタリングする。

東アジア域の観測網を構築するため、観測点の放射計の再校正、重点観測点への光学特性測定装置の設置を行った。放射計のうち直達分光観測機器の校正はマウナ・ロア観測所(NOAA)で取得したデータを基に準器を校正し、観測点の放射計の定期的校正を行ったことにより、精度の良い校正ができた。加えて他のプロジェクトの放射計にも反映することによって、連携した研究推進にも寄与することができた。地上でエアロゾルの散乱係数、吸収係数及び粒径分布を測定するため、つくば、福岡及び北京を重点観測点として光学特性測定装置と光学式粒子計数装置を設置し、連続観測を行い、オングストローム指数、一次散乱アルベドの時系列を調べた。また、つくば、福岡、宮古島、北京及び青島に設置しているスカイラジオメータのデータを気象研究所で開発した解析ソフトウェア(MRI-MLM)で解析し、エアロゾルの光学的厚さ、オングストローム指数、一次散乱アルベドの時系列を調べた。

[キーワード] エアロゾル、光学特性、一次散乱アルベド、放射強制力、気候変動

### 1. はじめに

地球の気候は、太陽からの日射がどれだけ入射し、地球からの熱放射がどれだけ放出するかの釣り合いで決定される。この入射エネルギーと放射エネルギーの釣り合い(地球放射収支)に影響を与えるものの一つとして、エアロゾル(大気中に浮遊している微小な粒子)がある。エアロゾルが、日射エネルギーを多く反射する場合に地球は冷却され、逆に多く吸収する場合に地球は暖められる。この日射エネルギーを、どれくらい反射したり吸収したりするかは、エアロゾルの個々の性質によって変化する。

このようなことから、地球温暖化の予測精度向上を図る上で、エアロゾルの実態把握と、その役割を明らかにすることは重要な課題であり、これまで多くの研究がなされてきた。しかしながら、IPCC第四次評価報告書(IPCC 2007)<sup>1)</sup>の指摘どおり、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必ずしも高くない。

本サブ課題では、光を吸収する性質を持つ「吸収性エアロゾル」（鉱物ダストや黒色炭素）に着目して研究を行う。

## 2. 研究目的

本サブ課題では、中国、日本の特徴ある地点に放射計及び光学特性測定装置(重点地点のみ)を配置して連続観測を実施し、吸収性エアロゾルの空間・時間分布の実態を明らかにする。同時に下向き放射量を測定しエアロゾルの放射量への影響を監視する。

## 3. 研究方法

気象研究所で現在観測を実施している放射計観測網と GEOS-5 SKYNET(気象研も参加)の観測点の一部を利用する。観測地点は、鉱物ダスト(黄砂粒子)や黒色炭素の発生、輸送を考慮して、北京、青島、福岡、宮古島、つくば、南鳥島とする。これらのうち重点観測点には、地上にエアロゾル散乱・吸収係数、粒子個数を測る装置を同時に設置する(表1)。上記の観測点で連続観測を実施し、可能な限りデータを準リアルタイムで収集する。

表1 観測点毎の機器設置状況

観測点	つくば	福岡	宮古島	北京	青島
スカイラジオメータ PREDE Sky radiometer POM-02 (波長：340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1225, 1627, 2200nm)	✓	✓	✓	✓	✓
散乱係数測定装置 (ネフェロメーター) TSI 3563 (波長：450, 550, 750nm)	✓				
散乱係数測定装置 (ネフェロメーター) ECOTECH AURORA3000 (波長：450, 525, 635nm)	✓	✓		✓	
吸収係数測定装置 Radiance Research PSAP-3λ (波長：470, 522, 660nm)	✓				
ブラックカーボン測定器 (エサロメーター) Aethalometer (波長：370, 470, 520, 590, 660, 880, 950nm)	✓	✓		✓	

放射計から光学的厚さ、屈折率、粒径分布、一次散乱アルベド(SSA)、散乱の位相関数を推定する。地上観測から散乱・吸収係数、SSAを推定する。これらの値から黒色炭素量、ダスト量を推定する。

精度の高い放射観測を実施するため、基準となる太陽直達分光放射計、日射計の校正を年1回行い、2次標準に転写後、現地で比較し転写する。エアロゾル散乱係数観測については、多波長の積分型散乱係数測定装置(ネフェロメーター)を用いて測定を行う。また、吸収係数観測は、精度はやや劣るがルーチン観測で実績のあるブラックカーボン測定器(エサロメーター)を使用する。

データの解析精度を上げるため、散乱係数と吸収係数を解析するためのプログラムの改良を行う。また、観測データはエアロゾル輸送モデルの検証に使用するとともに、観測点毎にまとめた蓄積データをもとに、空間変動、時間変動を明らかにする。

最終年度の平成25年度は観測点で得られた連続観測データを整理しデータ解析を行い、一次散乱アルベドの特徴を調べた。

#### 4. 結果・考察

##### (1) スカイラジオメータの校正

本課題では、スカイラジオメータ、日射計等による放射計を用いた観測により大気中全層のエアロゾルの光学特性、地上でのエアロゾル散乱係数計、エアロゾル吸収計による光学特性の直接測定を行っている。放射計の観測から精度が高く、且つ、均質なデータを得るためには、放射計の検定を定期的に行う必要がある。このため、直達分光日射計のLangley検定用データの取得が比較的容易なハワイ島にあるマウナ・ロア観測所 (NOAA) においてデータの取得を行っている。尚、平成23年度から平成25年度の検定観測については、環境研究総合推進費「2A-1102 「いぶき」観測データ解析により得られた温室効果ガス濃度の高精度化に関する研究」の支援を一部受け実施した。マウナ・ロア観測所で実施した検定観測で得られた検定データ数を表2に示す。2011年と2013年は得られた検定データ数が若干少ないが、概ね良好に検定データを取得することができた。検定を行った機器は、干渉フィルター型の放射計POM-02 (スカイラジオメータ) と回折格子型のSVC GER2600, PREDE PGS-100である。図1に2013年11月にマウナ・ロア観測所で実施した検定機器の写真を示す。

準器の検定後、国内のスカイラジオメータは気象研究所放射観測棟において12月下旬から1月にかけて比較検定を実施した (図2)。北京と青島のスカイラジオメータの比較は、準器を観測サイトに送りオンサイトでの比較検定を行うことを基本とした。修理などで北京と青島のスカイラジオメータが日本に戻ってきているときは、国内のスカイラジオメータと同様の比較検定を実施した。

図3にマウナ・ロア観測所で検定を行った準器スカイラジオメータと比較検定を行ったつくばのスカイラジオメータの5年間の検定定数の経年変化を示す。準器の検定定数は2009年11月の検定定数と比較すると2012年11月の検定定数は340~400nmにおいて約19~41%、500~1020nmでは約0.6~5%程度と短波長側でより大きな経年変化があった。準器の各波長の検定定数は1%以内の誤差で決められており、検定定数に経年変化があるものの精度良く検定されていた。スカイラジオメータは色収差が小さいレンズを使用しているが、レンズの劣化により短波長 (紫外線域) の透過率が悪くなり、測定出力の低下が起こっていた。このため、2013年の準器スカイラジオメータの検定は、2013年7月から8月にかけてレンズ交換を行った後に実施した。2013年11月の準器スカイラジオメータの検定定数は前年と異なり値が大きくなっており (図3左)、新しいレンズによりレンズの透過率に改善があったことを確認することができた。準器スカイラジオメータとの比較観測で決定したつくばのスカイラジオメータの検定定数は、1%以内の精度で比較転写することができた。また、つくばのスカイラジオメータの340~1020nmの検定定数の経年変化は5年間で1~11%の差を確認した。波長340~400nmでは8~11%の大きな経年変化があり、これは準器と同様にレンズの劣化が原因であることが分かった。このため、つくばのスカイラジオメータは2013年12月の比

較検定後に新しいレンズへ交換を行い、再度準器との比較検定を実施することで透過率の改善を確認した。

本課題において、スカイラジオメータの検定値の精度維持のための方法についてほぼ確立することができた。1年に1回程度の検定観測を行うことによって1%以内の精度で検定値を維持することができ、これによってエアロゾルの光学特性の地域による違い、長期の変動特性(トレンド)が監視できるようになった。

表2 マウナ・ロア観測所で得られた検定データ数

検定観測期間	2009年11月	2010年11月 12月	2011年11月	2012年10月 11月	2013年10月 11月
検定データ数	15	21	8	16	8



図1 2013年10月29日から11月25日の期間にマウナ・ロア観測所での検定。右はスカイラジオメータ POM-02、左の太陽追尾装置に載っているのは SVC GER2600 の太陽光導入部と PREDE PGS-100(2台)。



図2 2013年12月から2014年1月に気象研究所放射観測棟で実施したスカイラジオメータの比較検定観測。

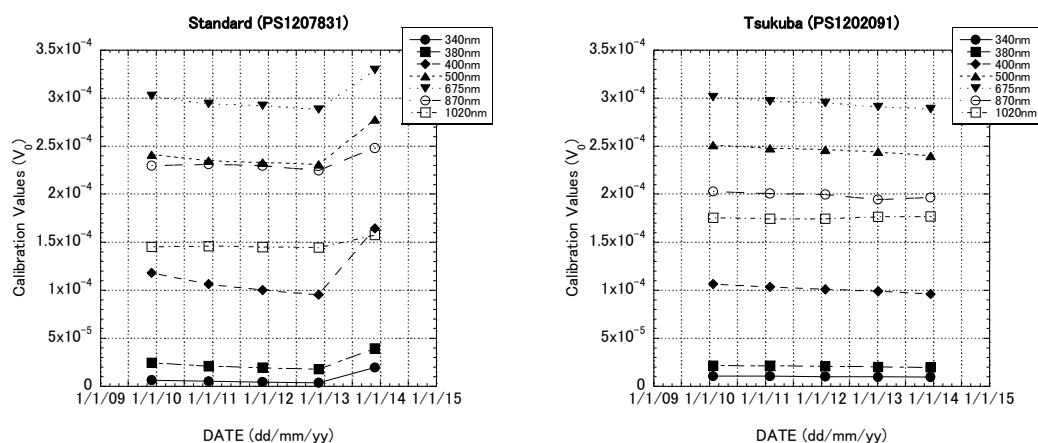


図 3 準器スカイラジオメータ（左）と比較検定を行ったつくばのスカイラジオメータ（右）の過去 5 年間の検定定数の変化。

## (2) スカイラジオメータのデータ解析結果

本サブ課題では、北京、青島、福岡、宮古島、つくばにスカイラジオメータを設置して連続観測を実施し、スカイラジオメータが測定した太陽直達光と散乱光の解析を行うことによって各地点でのエアロゾルの光学特性（光学的学的厚さ、一次散乱アルベドなど）の測定、推定を行う。

スカイラジオメータのデータは、天空散乱光インバージョンコード SkyRad. Pack ver. 4.2 を気象研究所で改良した解析ソフトウェア MRI-MLM (Kobayashi et al., 2006)<sup>2)</sup> を用いて光学的厚さの推定誤差を 0.01 以内として解析を行った。尚、比較検定で決定した検定定数は、解析時に年毎に内挿している。

図 4 から図 8 に 2008 年から 2013 年の北京、青島、宮古島、福岡とつくばの 500nm のエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500nm)、波長依存を示すパラメーター (オングストローム指数: Alpha) と一次散乱アルベド (SSA@500nm) の日平均値を示す。一次散乱アルベドは 1 に近いと吸収の割合が小さく、値が小さいと吸収の割合が大きい量である。また、オングストローム指数は、粒径分布に依存し、指数が小さいと粒径が大きな粒子、指数が大きいと粒径の小さな粒子が相対的に多いことを示している。

まず、本研究課題期間中の各観測点でのスカイラジオメータのデータ取得状況について説明する。北京はデータ収録器の異常と設置場所の改修工事や停電及びスカイラジオメータの故障による欠測が度々起こり、1 年を通じ連続観測データを取得できたのは 2012 年のみであった。青島は 2010 年 4 月から 2011 年 2 月と 2012 年 7 月から 2013 年 2 月までがスカイラジオメータの故障による欠測、2013 年 3 月以降は設置していた気象観測所の改修工事のため欠測となった。宮古島と福岡は毎年 12 月に気象研究所で実施している比較検定期間と故障による欠測を除きほぼ連続で観測が実施されていた。つくばのスカイラジオメータは、ごく短期間の故障期間を除き観測が実施されており、途切れの少ない連続観測データを得ることができた。

各観測点での光学的厚さ、オングストローム指数と一次散乱アルベドの傾向を表 3 に示す。北京については、1 年を通じ連続観測データが取得できた 2012 年に着目する。光学的厚さはバラツキが大きく、オングストローム指数は 1 前後の値を示し、明瞭な季節変化は見られない。一次散乱ア

ルベドは夏にやや大きくなる（吸収性エアロゾルの割合が低い）傾向、秋冬にやや小さくなる（吸収性エアロゾルの割合が高い）傾向がある。青島の光学的厚さは冬季にやや薄くなる傾向があるが、季節による違いが明瞭では無い。一次散乱アルベドは夏季にやや大きな値（吸収性エアロゾルの割合が低い）を示しているが、年間を通して値にバラツキがある。これは支配的な粒子が日毎に異なることにより、吸収性の強いエアロゾルから吸収性の弱いエアロゾルが存在している可能性を示唆している。宮古島では光学的厚さが夏季に薄く、春季に厚くなっており、オンゲストローム指数は夏季に小さくなる傾向がある。また、一次散乱アルベドについては夏季に小さくなる（吸収性エアロゾルの割合が高い）傾向がある。福岡では光学的厚さが冬季に薄く、夏季に厚くなっており、オンゲストローム指数は春季に小さく、夏季に大きくなっている。また、一次散乱アルベドの値は夏季に値が大きくなり冬に小さくなる傾向があり季節変化が見られる。つくばについては、季節変化がはっきりとしており、光学的厚さが冬に薄く、夏に厚い、また、一次散乱アルベドは冬に小さくなる傾向がある。つくばでは冬季に寒気に伴う北寄りの風が入ることで清浄な空気が流入し、光学的厚さが薄くなっていることが分かる。福岡とつくばのオンゲストローム指数は春季に0から0.5付近と小さな値（大粒子の寄与が大きい）を示していることがある。これは黄砂が飛来していたことに起因していると考えられる。

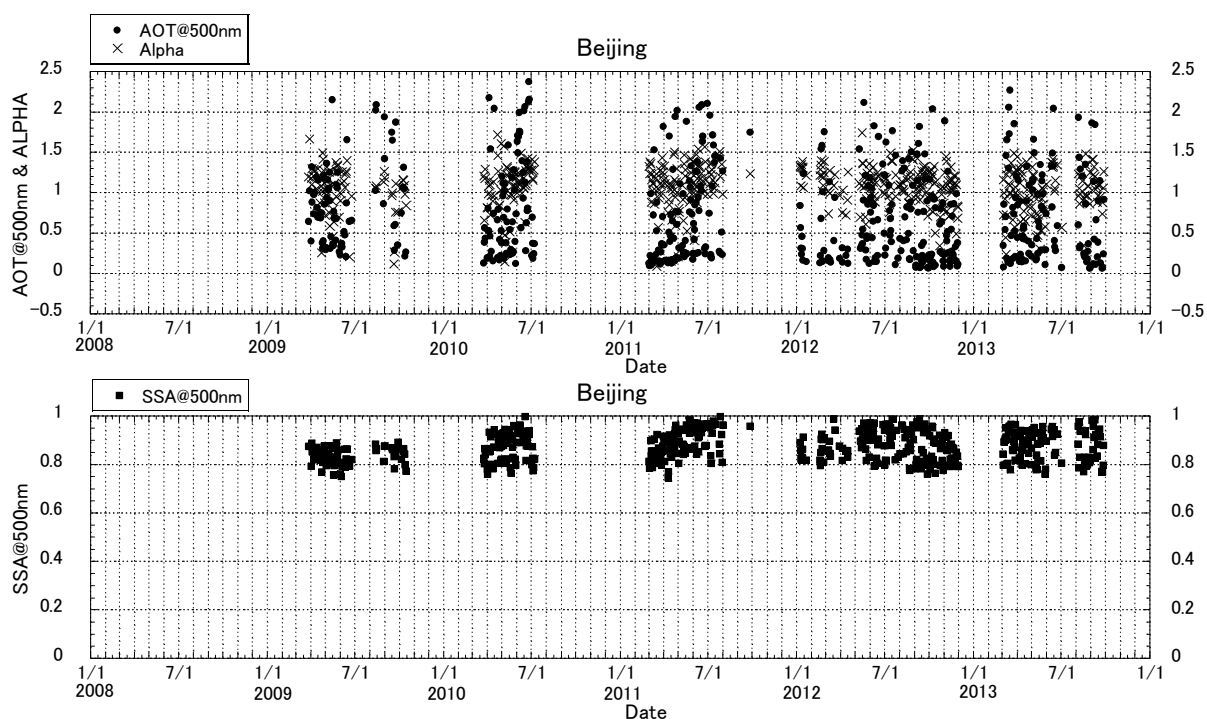


図4 北京の2009～2013年の500nmのエアロゾルの光学的厚さ（AOT@500nm）とオンゲストローム指数（Alpha）、一次散乱アルベド（SSA@500nm）

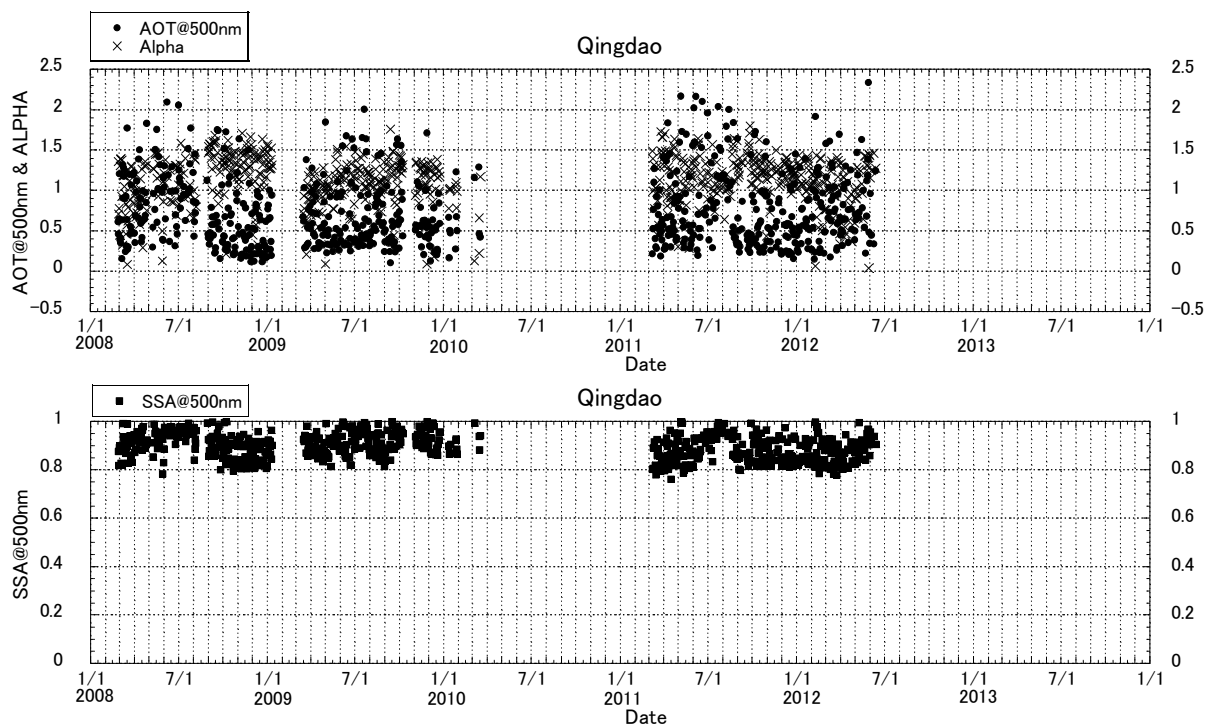


図 5 青島の 2008～2012 年の 500nm のエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500nm) とオングストローム指数 (Alpha)、一次散乱アルベド (SSA@500nm)

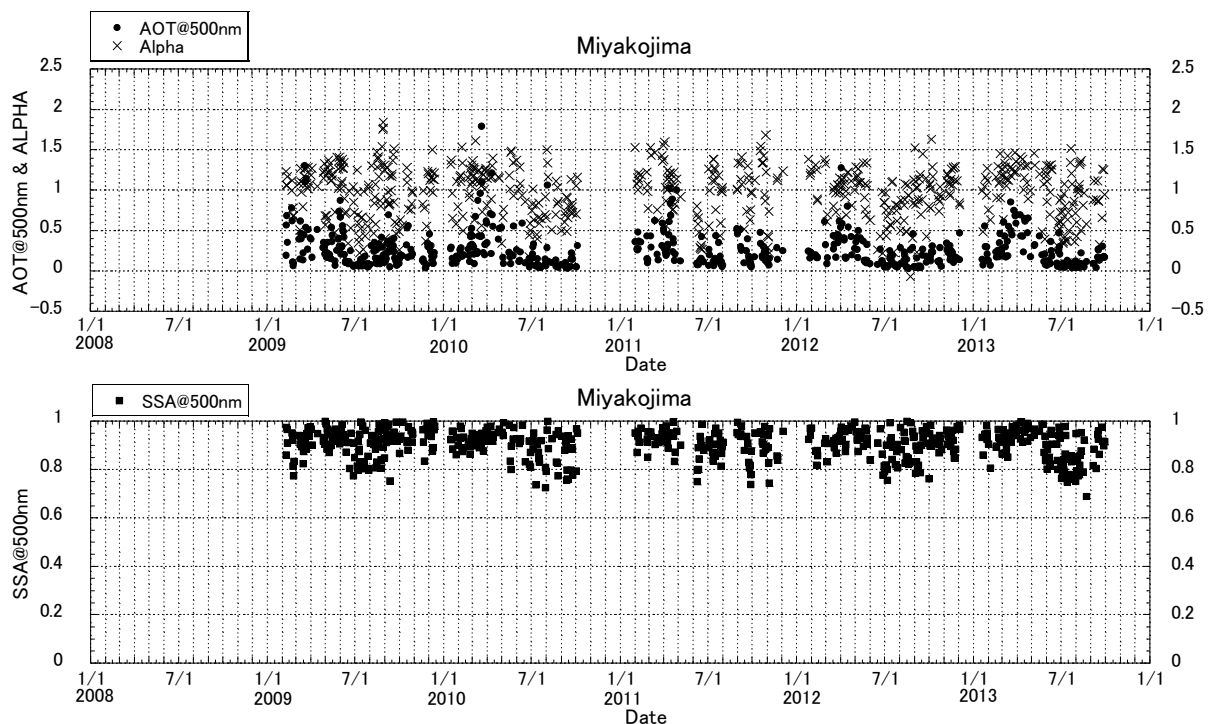


図 6 宮古島の 2009～2013 年の 500nm のエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500nm) とオングストローム指数 (Alpha)、一次散乱アルベド (SSA@500nm)

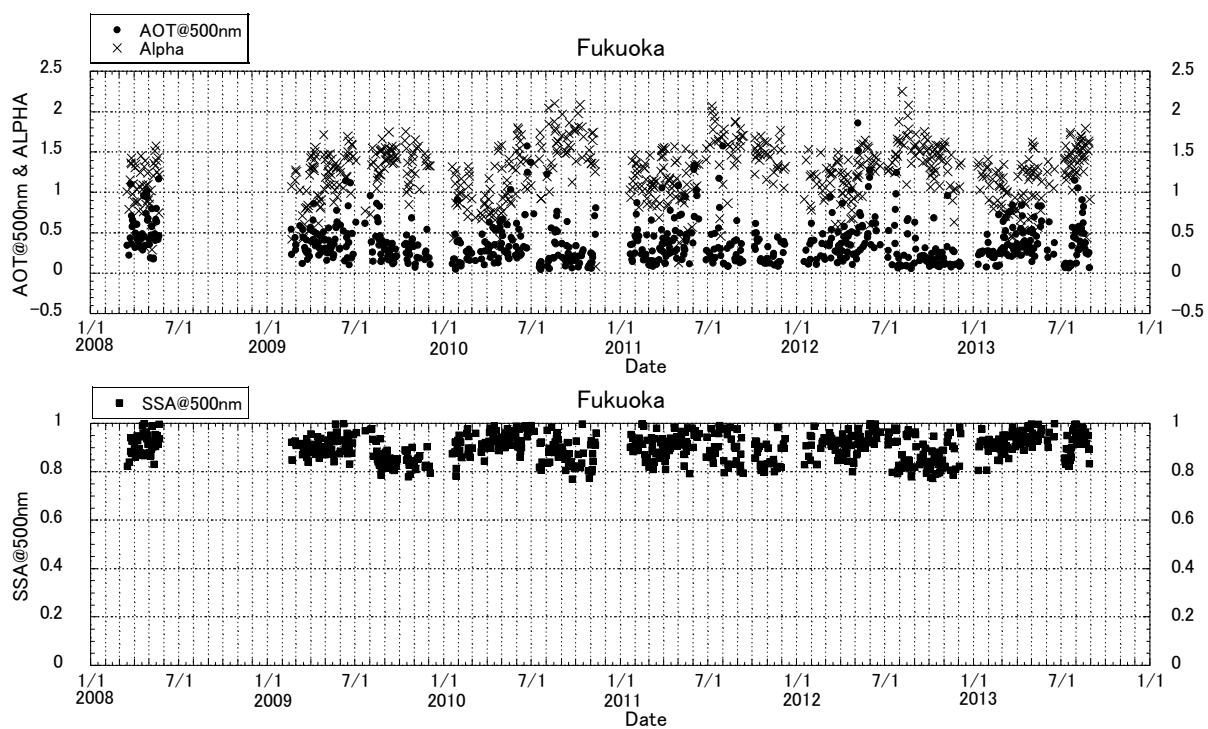


図7 福岡の2008～2013年の500nmのエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500nm) とオングストローム指数 (Alpha)、一次散乱アルベド (SSA@500nm)

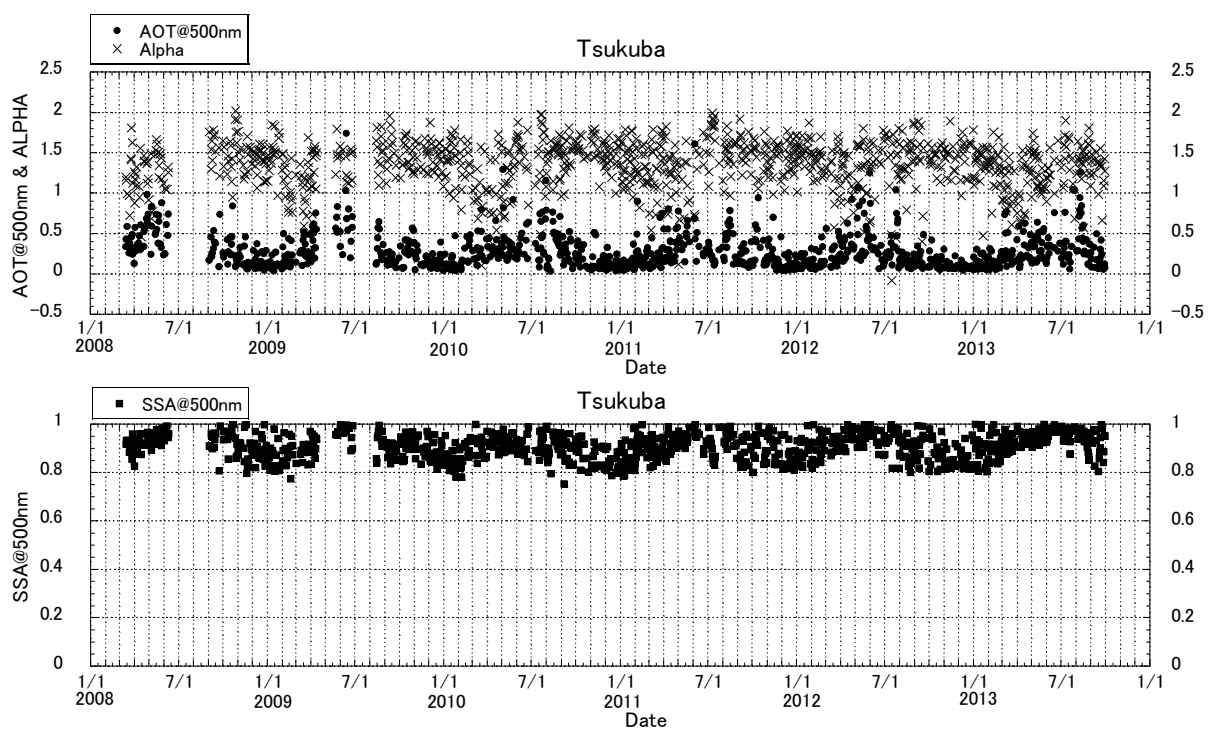


図8 つくばの2008～2013年の500nmのエアロゾルの光学的厚さ (AOT@500nm) とオングストローム指数 (Alpha)、一次散乱アルベド (SSA@500nm)



表3 各観測点の500nmのエアロゾルの光学的厚さとオングストローム指数、500nmの一次散乱アルベドの傾向

	光学的厚さ	オングストローム指数	一次散乱アルベド
北京	明瞭な季節変化 得られず	明瞭な季節変化 得られず	夏季に大きい
青島	明瞭な季節変化 得られず	明瞭な季節変化 得られず	夏季に大きい
宮古島	夏季に薄く、 春季に厚い	夏季に小さい	夏季に小さい
福岡	冬季に薄く、 夏季に厚い	春季に小さい	夏季に大きい
つくば	冬季に薄く、 夏季に厚い	春季に小さく、 夏季に大きい	冬季に小さく、 夏季に大きい

### (3) エアロゾル光学特性測定装置による地上での監視

2011年3月に北京、7月に福岡に機器を設置し、エアロゾル散乱係数と吸収係数の連続測定を行った。また、2012年12月には、南鳥島に機器を設置し、連続観測を始めた。気象研究所構内においては、本課題が始まる前の2002年からエアロゾル散乱係数と吸収係数の連続測定を行ってきた。ここでは、各観測点のエアロゾル光学特性（散乱係数、吸収係数、一次散乱アルベド（SSA）、散乱の非対称因子、消散係数および吸収係数のオングストローム指数）の変化を示す。吸収係数は、Bond et al. (1999)<sup>3)</sup>又はCoen et al. (2010)<sup>4)</sup>の方法、散乱係数は気象研で開発した方法（Uchiyama, 2014）<sup>5)</sup>で補正した。

長期期間のデータがある気象研究所構内での測定値について詳細にエアロゾルの光学特性の長期変動、気候値について調べた。その結果、多くのエアロゾル特性は、増加または減少のトレンドを示しており、それらは95%の信頼度で有意であった。

図9に、気象研構内で測定した散乱係数（波長550nm、□または■）と吸収係数（波長526nm、○または●）、SSA（波長550nm）、散乱の非対称因子（○または●）、消散係数および吸収係数のオングストローム指数の2002年～2013年の月平均値の変化を示す。2002～2013年の期間で消散係数のトレンドは、波長550nmで、 $-1.5 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1} \text{year}^{-1})$ であった。吸収係数のトレンドは、波長530nmで、 $-5.4 \times 10^{-7} (\text{m}^{-1} \text{year}^{-1})$ であった。散乱係数のトレンドは、 $-8.8 \times 10^{-7} (\text{m}^{-1} \text{year}^{-1})$ であったが、有意ではなかった。同期間のSSAのトレンドは、波長550nmで、 $7.4 \times 10^{-3} (\text{year}^{-1})$ であった。すなわち、わずかであるが吸収の割合が減少している。散乱の非対称因子のトレンドは、有意ではなかったが、2011年の2月まではやや減少傾向にあり、その後やや大きめの値が続いている。消散係数のオングストローム指数は、有意な増加トレンドであった。しかし、2012年以降小さな値がしばしば推定されている。吸収係数のオングストローム指数は、2006～2013年の期間で $2.1 \times 10^{-2} (\text{year}^{-1})$ と有意な増加傾向にあった。吸収係数のオングストローム指数は増加傾向にあることから、燃料の燃焼によって発生する時間経過していない黒色炭素が減少し、バイオマスの燃焼起源や発生から時間が経過した吸収物質が相対的に増加傾向にあることを示している。

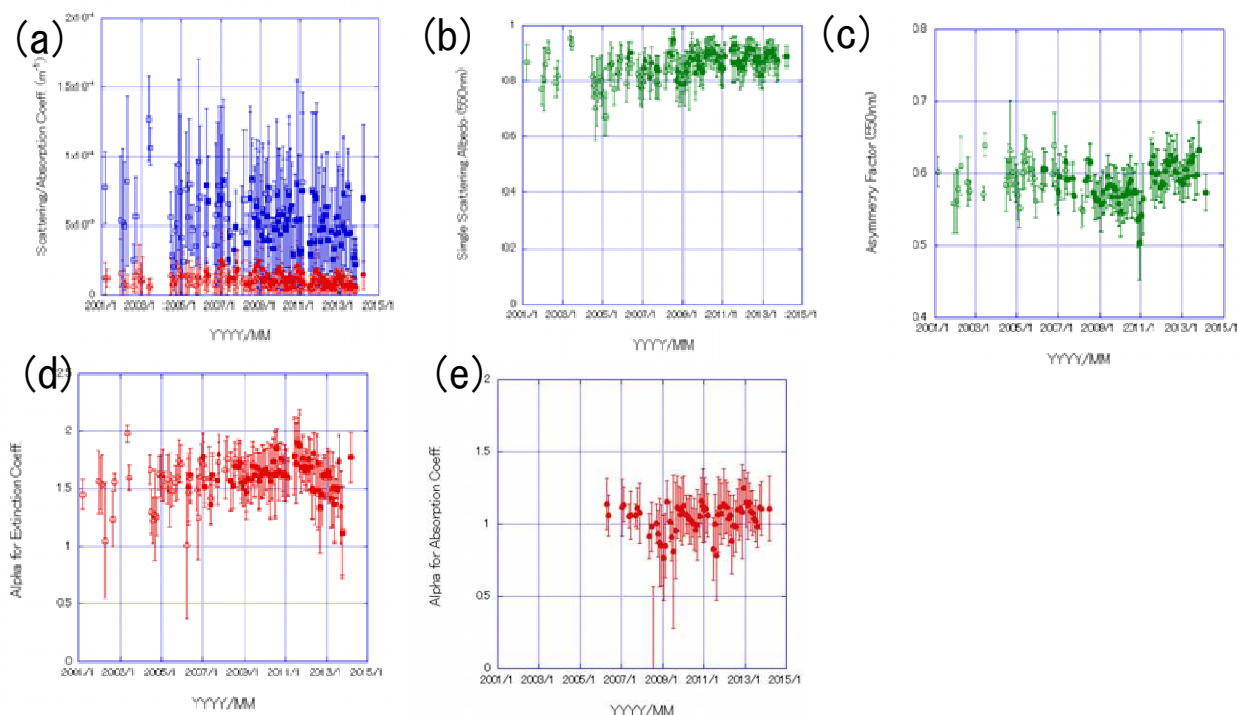


図9 (a)つくば(気象研構内)における、散乱係数(550nm)、吸収係数(526nm)の時間変化と、(b)SSA(550nm)の時間変化。(c)散乱の非対称因子(550nm)の時間変化、(d)消散係数のオングストローム指数の時間変化、(e)吸収係数のオングストローム指数の時間変化。

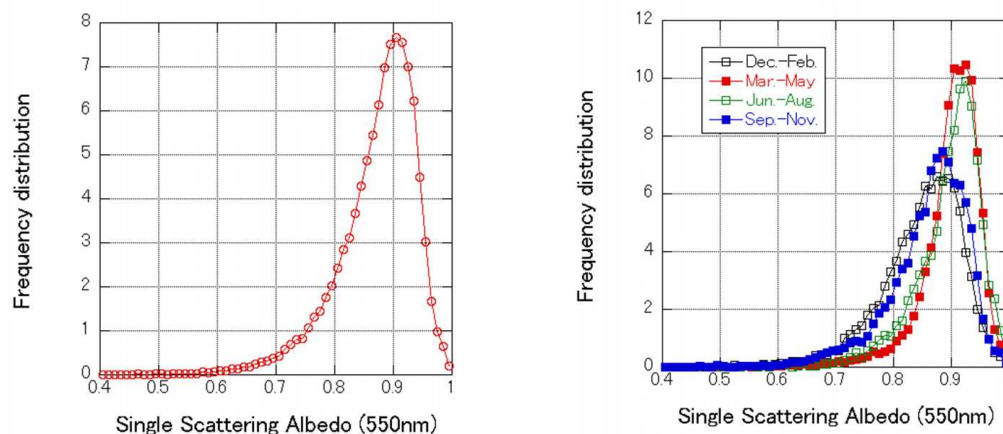


図10 一次散乱アルベド(550nm)の頻度分布、(a)全データ、(b)季節ごとの頻度分布。データは3波長PSAPのデータがある2006年以降のデータを使用。

図10に一次散乱アルベドの頻度分布を示した。全データの最頻値は0.905であり、春、夏、秋、冬の最頻値は0.925, 0.925, 0.885, 0.875であった。晩秋から初冬に一次散乱アルベドは小さくなるが、落ち葉や畑の作物の燃焼、燃料の消費の増加による吸収係数の増加によるものと推測される。

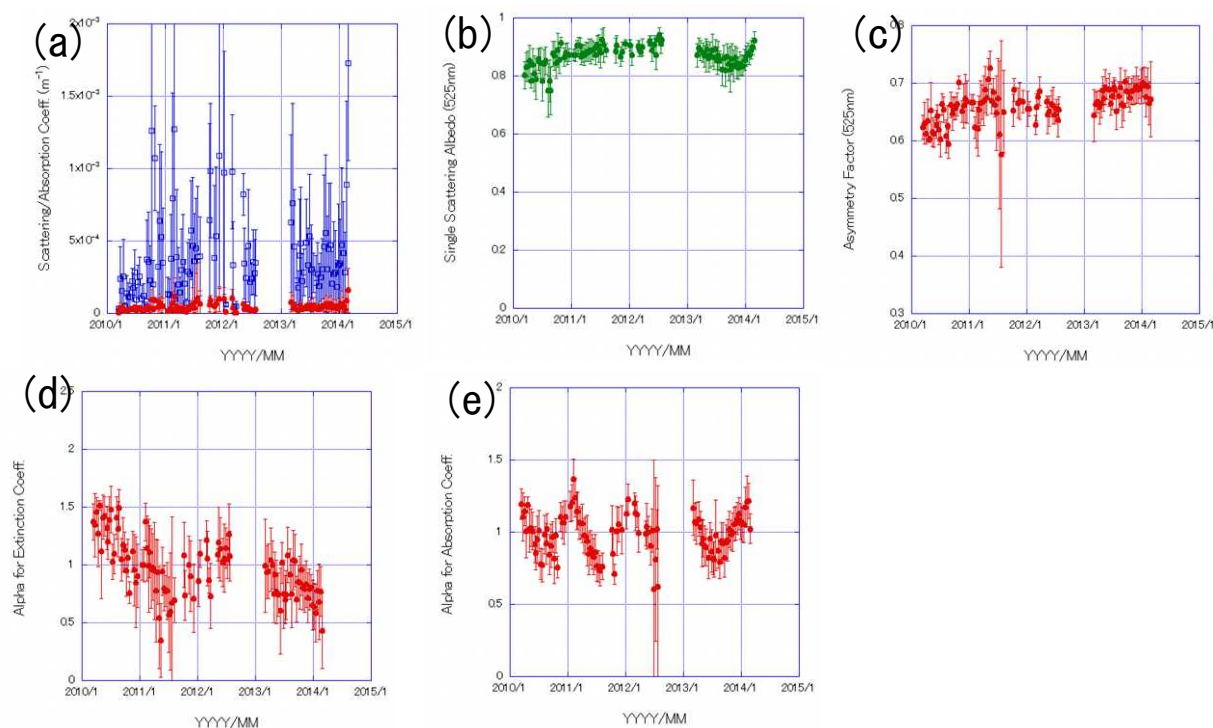


図 1 1 北京(中国科学院大気物理研究所)におけるエアロゾル光学特性の測定値 (散乱係数、吸収係数は、縦軸のスケールは、つくばの 10 倍。)

図 1 1 に北京におけるエアロゾルの光学特性の時間変化 (10日平均値) を示した。データ期間は2010年3月から2014年2月である。欠測が多く特徴が掴みにくいが、いくつかの特徴がある。散乱係数、吸収係数とも夏に小さく冬に大きな傾向がある。吸収係数の値は、 $150 \times 10^{-6}$  (1/m) 以下である。一次散乱アルベドは0.75~0.95の値である。2010年から2012年にかけては増加傾向があるように見えたが、その後はその傾向が見られない。また、つくばや福岡でみられるような季節変化をしていないことが特徴である。散乱の非対称因子は、0.6~0.7の値であり、つくばや福岡に比べて大きい、これは大きな粒子が相対的に多いことを意味しており、消散係数のオングストローム指数がつくばや福岡に比べて小さいこととも対応している。吸収係数のオングストローム指数は、夏に小さく、冬に大きいという明らかな季節変動をしている。夏期の吸収係数のオングストローム指数が他のサイトに比べて低い値である。

図 1 2 に福岡における光学特性の時間変化 (10日平均値) を示した。データ期間は2010年7月から2014年1月である。測定を行っている福岡大学では、観測期間中に建物の建築工事が行われていた期間があり、その影響を受けている可能性がある。北京と同様に、欠測期間があり、特徴が掴みにくいが、いくつかの特徴がある。散乱係数、吸収係数とも夏に小さく冬に大きな傾向がある。吸収係数の値は、 $15 \times 10^{-6}$  (1/m) 以下である。一次散乱アルベドは0.75~0.95の値である。一次散乱アルベドは、季節変化をしており、冬から春にかけて高い傾向にある。つくばの一次散乱アルベドも季節変化していたが、値が高い時期がずれている。散乱の非対称因子は、0.5~0.65の値であり、つくばと同程度であり、北京の値より小さい。消散係数のオングストローム指数がつくば

と福岡で同程度であることと対応している。吸収係数のオングストローム指数は、つくばや北京と同様に夏に小さく、冬に大きいという明らかな季節変動をしている。

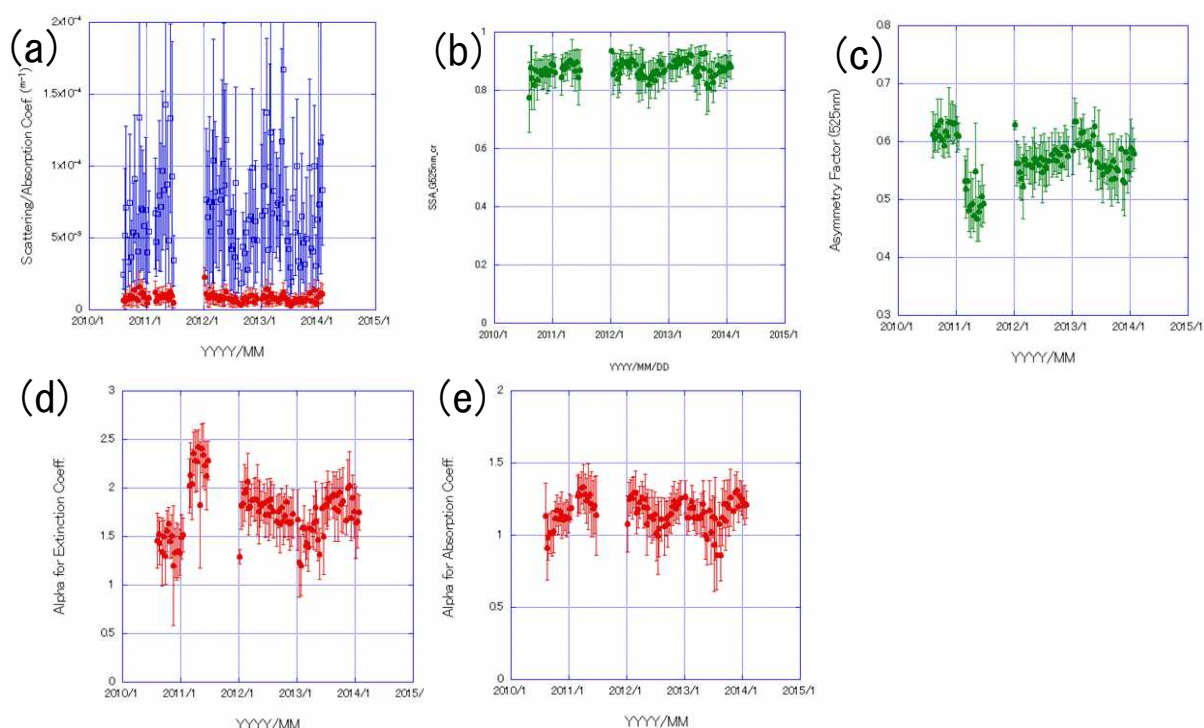


図 1 2 福岡(福岡大学)におけるエアロゾル光学特性の測定値

南鳥島では2012年12月から連続観測を始めた。吸収係数は $2.5 \times 10^{-6}$  (1/m)以下の小さな値である。サンプル空気を測器に導入するまでにロスが大きく正確に測定できていないことが分かったので、今後、空気の入力を変更して測定を行う予定である。

中国の大都市でPM<sub>2.5</sub>による大気質悪化が、2012年度以降、頻繁に指摘された。しかし、消散係数の値の変化傾向は小さい。大陸の空気の影響を受けやすい福岡においても、観測を始めて以降大きな変動はなく、測定値も北京の値に比べ一桁以上小さい。ただし、福岡の消散係数の値は大陸の汚染域からの空気が移流する春季に値がおおきくなることから大陸の影響を受けているものと思われる。

ここで示されたように地上での光学特性の測定によりエアロゾルの光学特性の長期変動特性、地域による違いを監視することが可能となった。

#### (4) 放射計から推定された光学特性と直接測定により得られた値の比較

放射計から推定された光学特性と直接測定により得られた値の長期変化傾向と気候値を比べた。

図 1 3 に2005年から2012年の光学的厚さ(500nm)と一次散乱アルベド(500nm)の10日平均の値を示した。光学的厚さは季節変化をしながら有意な減少をしており、直接測定の消散係数の減少傾向と対応している。一次散乱アルベドは、有意ではないがわずかに増加しており、地上測定による結果と整合している。

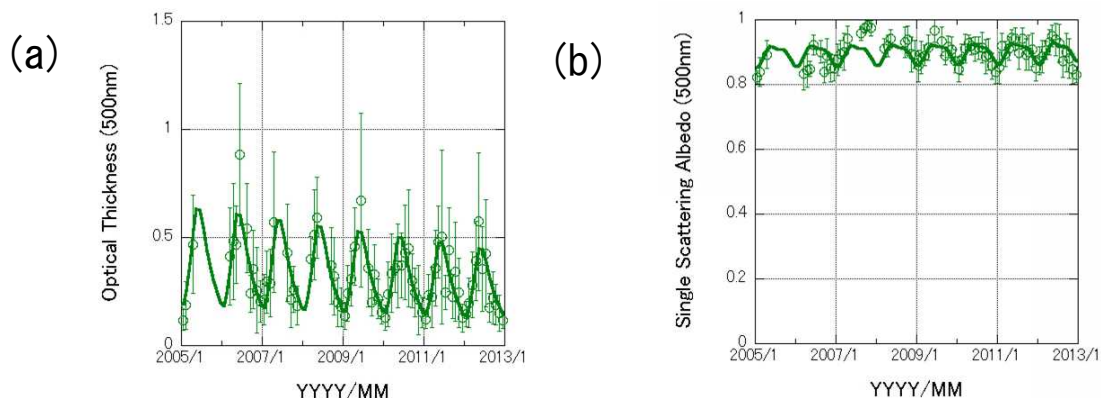


図 1 3 つくばのスカイラジオメータによる観測から得られた(a)光学的厚さと、(b)一次散乱アルベド(500nm) の長期変動

図 1 4 に、スカイラジオメータによる光学的厚さの各月の中央値と散乱係数・吸収係数測定装置から推定した消散係数の月平均値を示した。スカイラジオメータから推定した光学的厚さは5、6月に最大となるが地上で測定した消散係数は冬季に最大となる。これは、夜間地上付近に形成された逆転層内にエアロゾルがたまることによって大きな値が測定されるからである。

図 1 5 に、スカイラジオメータの測定値から推定した一次散乱アルベドと散乱係数・吸収係数測定装置から推定した一次散乱アルベドの月平均値を示した。最大値の月はずれているが、おおむね夏季に値が大きく冬に小さい季節変化をしている。日射フラックスのデータ解析からも一次散乱アルベドが得られているが、その値を比べると、スカイラジオメータから推定したSSAが他のものより大きな傾向があり、日射フラックスデータから推定したものは他のものより小さい傾向がある。

放射計から推定された光学特性と直接測定した光学特性には、違いが見られる点もあるが、おおむね傾向が一致していた。地上での直接測定によってもエアロゾル光学特性の監視が可能であり、放射収支の研究に役に立つと思われる。

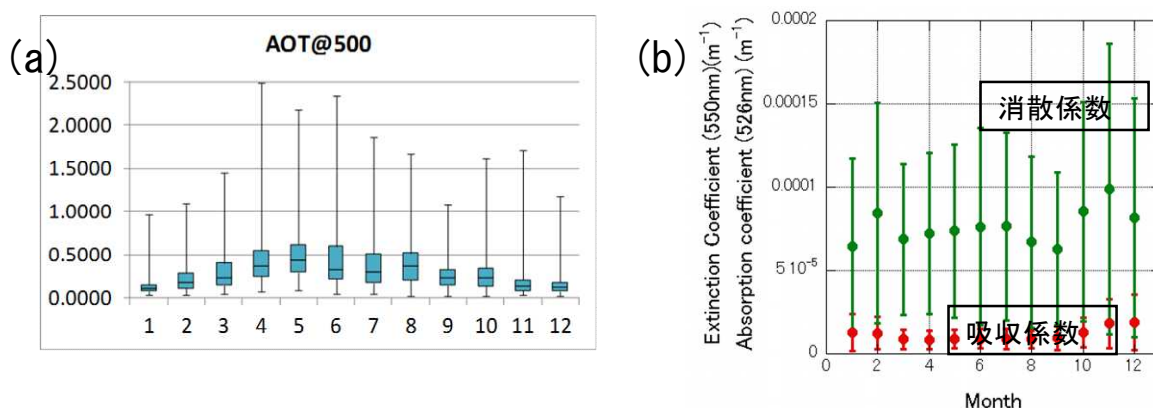


図 1 4 つくばのスカイラジオメータによる観測から得られた(a)光学的厚さと、(b)消散係数(550nm) の月平均値



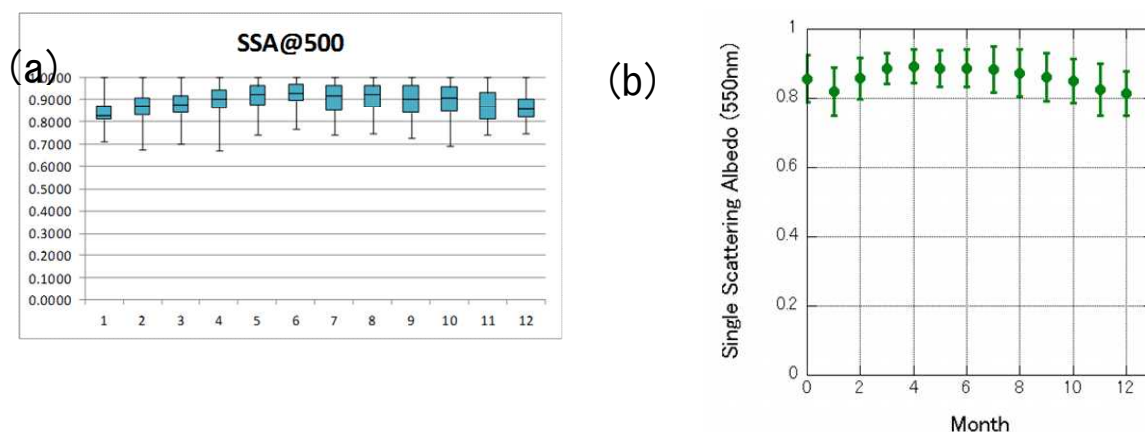


図 15 (a)つくばのスカイラジオメータによる観測から得られた SSA(500nm)と、(b) 散乱係数、吸収係数測定装置から得られた SSA(500nm) の月平均値

## 5. 本研究により得られた成果

本課題において、スカイラジオメータの検定値の精度維持のための方法についてほぼ確立することができた。マウナ・ロア観測所のような検定観測に適した地点でデータを取得して、1年に1回程度の検定観測を行うことによって、検定定数の経年変化を監視することができ、1%以内の精度で検定値を維持することができることが分かった。これによってエアロゾルの光学特性の推定精度が確保され、地域による違い、長期の変動特性(トレンド)が監視できるようになった。

北京、青島、福岡、宮古島、つくば、南鳥島に設置したスカイラジオメータのデータ解析および地上での散乱係数、吸収係数測定装置による測定データの解析から、各観測点のエアロゾル光学特性(光学的厚さ、一次散乱アルベド、散乱の非対称因子、オングストローム指数)には、観測点ごとに特徴があった。この特徴は、観測点近傍の影響を反映したものと、総観気象スケールの現象に伴うものがあり、解釈には注意を要するが、国内の観測点では大陸からの気団の移流に伴う光学特性の変化を捉えているし、また、吸収係数のオングストローム指数の季節変化が示すように観測点近傍の吸収性エアロゾルの放出の季節変化に伴う変動を捉えている。

長期観測データのあるつくばのデータの解析結果から消散係数(または光学的厚さ)、吸収係数が、ここ十年くらいでは有意な減少傾向にあること、また、一次散乱アルベドが僅かながら有意な増加傾向にあることが分かった。スカイラジオメータの観測期間はやや短い、同様の傾向にあった。この傾向は、つくばでの地上日射量の変化傾向と対応するものであり、正確な測定を継続することで捉えることができた。

## 6. 引用文献

- 1) IPCC 2007, Climate Change 2007: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
- 2) Kobayashi E, A. Uchiyama, A. Yamazaki and K. Matsuse, 2006: Application of the maximum likelihood method to the inversion algorithm for analyzing aerosol optical properties from sun and sky radiance measurements. J. Meteorol. Soc. Japan, 84: 1047-1062.
- 3) Bond, T. C., T. L. Anderson, and D. Campbell, 1999: Calibration and Intercomparison

of Filter-Based Measurements of Visible Light Absorption by Aerosols, *Aerosol Sci. Technol.* 30, 582–600.

- 4) Coen, M. C., E. Weingartner, A. Apituley, D. Ceburnis, R. Fierz-Schmidhauser, H. Flentje, J. S. Henzing, S. G. Jennings, M. Moerman, A. Petzold, O. Schmid, and U. Baltensperger, 2010: Minimizing light absorption measurement artifacts of the Aethalometer: evaluation of five correction algorithms, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 457–474.
- 5) Uchiyama, A., 2013: Method to retrieve single-scattering properties of aerosols using multi-wavelength scattering and absorption coefficient data measured by integrating nephelometer and absorption photometer *J. Meteorol. Soc. Japan*, (accepted)

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ① Kudo R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and E. Kobayashi, 2010: Seasonal characteristics of aerosol radiative effect estimated from ground-based solar radiation measurements in Tsukuba, Japan, *J. Geophys. Res.*, 115, D01204, doi:10.1029/2009JD012487
- ② Kudo R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami, and E. Kobayashi, 2010: From solar radiation measurements to optical properties: 1998–2008 trends in Japan, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2009GL041794
- ③ Kobayashi E, A. Uchiyama, A. Yamazaki, R. Kudo, 2010: Retrieval of Aerosol Optical Properties Based on the Spheroids Model. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 88, Doi:10.2151/jmsj.2010-505.
- ④ Ishimoto H., Y. Zaizen, A. Uchiyama, K. Masuda, Y. Mano, 2010: Shape modeling of mineral dust particles for light-scattering calculations using the spatial Poisson-Voronoi tessellation, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 111, 2434–2443.
- ⑤ Kudo R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, S. Sakami, and O. Ijima, 2011: Decadal changes in aerosol optical thickness and single scattering albedo estimated from ground-based broadband radiometers: a case study in Japan, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2010JD014911
- ⑥ Kudo, R., A. Uchiyama, O. Ijima, N. Ohkawara, and S. Ohta, 2012: Aerosol impact on the brightening in Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, D07208, doi:10.1029/2011JD017158
- ⑦ Khatri, P, T. Takamura, A. Yamazaki, and Y. Kondo, 2012: Retrieval of Key Aerosol Optical Parameters from Spectral Direct and Diffuse Irradiances Observed by a Radiometer with Nonideal Cosine Response Characteristic, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Volume 29, Issue 5, doi: 10.1175/JTECH-D-11-00111.1.
- ⑧ 工藤玲, 内山明博, 2012: 地上日射量の世界的減光・増光, *エアロゾル研究*, 27, 249–255.

- ⑨ Nakayama T., K. Sato, Y. Matsumi, T. Imamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama: 2013,, Wavelength and NO<sub>x</sub> dependent complex refractive index of SOAs generated from the photooxidation of toluene, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 531-545, doi:10.5194/acp-13-531-2013.
- ⑩ Nakayama T., K. Sato, Y. Matsumi, T. Imamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2012 : Wavelength Dependence of Refractive Index of Secondary Organic Aerosols Generated during the Ozonolysis and Photooxidation of  $\alpha$ -Pinene, *SOLA*, 8, 119.123, doi:10.2151/sola.2012-030.
- ⑪ Ishimoto H., Masuda K., Mano Y., Orikasa N., Uchiyama A. 2013: Optical modeling of irregularly shaped particles in convective cirrus. *Proceedings of the International Radiation Symposium (IRS2012)*, 1531, 184 (2013); doi: 10.1063/1.4804737.
- ⑫ Uchiyama, A., A. Yamazaki, R. Kudo, 2014: Column Water Vapor Retrievals From Sky-radiometer (POM-02) 940nm Data, *J. Meteorol. Soc. Japan*, (accepted)
- ⑬ 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. Meteorol. Soc. Japan*, (accepted)
- ⑭ 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. Meteorol. Soc. Japan*, (accepted)
- ⑮ Khatri, P., T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2014: Use of 315nm channel data of sky radiometer to estimate columnar ozone amount, *J. Meteorol. Soc. Japan*, (accepted)
- ⑯ Campanelli, M., T. Nakajima, P. Khatri, T. Takamura, A. Uchiyama, V. Estelles, G. L. Liberti, and V. Malvestuto, 2014: Retrieval of characteristic parameters for water vapour transmittance in the development of ground-based sun- sky radiometric measurements of columnar water vapour, *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 1075- 1087, www.atmos-meas-tech.net/7/1075/2014/doi:10.5194/amt-7-1075-2014

## (2) 口頭発表

- ① Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and E. Kobayashi: Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan (2009)  
“The recent decade tendencies of aerosol optical properties and surface radiative forcing at Tsukuba, Japan.”
- ② 工藤玲、内山明博、山崎明宏、古林絵里子：日本気象学会2009年度春季大会(2009)  
「つくばのエアロゾル光学特性と地上放射強制力の最近10年間の変化傾向」
- ③ 工藤玲、内山明博、山崎明宏、坂見智法：日本気象学会2009年度秋季大会 (2009)  
「直達・散乱日射の地上観測からのエアロゾル光学特性の推定」
- ④ 山崎明宏、内山明博、工藤玲、財前祐二、高橋宙、古林絵里子、林政彦、白石浩一、原圭一郎、丸山智生：日本気象学会2009年度秋季大会 (2009)  
「福岡での2009年春季エアロゾル光学特性集中観測期間中の炭素成分分析結果」
- ⑤ Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and T. Sakami, 2010: Influences of aerosol



optical thickness and single scattering albedo on global dimming and brightening, The 3rd Asia Pacific Radiation Symposium (APRS), 03\_8, Seoul, Korea.

- ⑥ Ishimoto H., Y. Zaizen, A. Uchiyama, K. Masuda, Y. Mano, 2010: Voronoi aggregate for a shape model of mineral dust particles, 2010 Asia-Pacific Radiation Symposium (APRS), 05\_02, Seoul, Korea.
- ⑦ Uchiyama A., A. Yamazaki, R. Kudo and T. Sakami, 2010: Development of correction method for integrating nephelometer, The 3rd Asia Pacific Radiation Symposium (APRS), PF\_01, Seoul, Korea.
- ⑧ Sakami T., A. Uchiyama, A. Yamazaki, and R. Kudo, 2010: Retrieval methods of microphysical and optical properties of cloud vertical profiles from radiances measured by ground-based observations at a specific point, Proceedings of the 16th CERE International Symposium on Climate Change Studies through activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, Okinawa, Japan P11-12.
- ⑨ Yamazaki A., A. Uchiyama A., E. Kobayashi, R. Kudo and T. Sakami, 2010: The analysis of Skyradiometer observation data by using SKYRAD.PACK and MRI-MLM, Proceedings of the 16th CERE International Symposium on Climate Change Studies through Activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, Okinawa, Japan, P23-24.
- ⑩ Sheng L-F., A. Yamazaki, A. Uchiyama, and G-Y. Shi, 2010: Seasonal variation of aerosol optical properties in Qingdao, Proceedings of the 16th CERE International Symposium on Climate Change Studies through Activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, Okinawa, Japan, P25-26.
- ⑪ Kudo, R., A. Uchiyama, A. Yamazaki, T. Sakami and O. Ijima, 2010: Impacts of aerosol optical thickness and single scattering albedo on the dimming and brightening in Japan, The 16d CERE International Symposium on Climate Change Studies through activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, Okinawa, Japan, P101-104.
- ⑫ Uchiyama A., A. Yamazaki, R. Kudo and T. Sakami, 2010: Development of correction method for integrating nephelometer and recent trend of aerosol optical properties based on ground-based measurement at Tsukuba, Proceedings of the 16th CERE International Symposium on Climate Change Studies through Activities of SKYNET and Virtual Laboratory for Climate Diagnostics, Okinawa, Japan, P151-154.
- ⑬ 工藤玲、内山明博、山崎明宏、坂見智法、2010: つくばにおけるエアロゾル光学特性の長期変動と地上日射への影響、日本気象学会2010年度秋季大会予稿集D363.
- ⑭ 石元裕史、増田一彦、真野裕三、財前祐二、内山明博、村上正隆、折笠成宏、2010: Poisson-Voronoi構造と粒子画像情報を用いた鉱物・氷晶粒子形状のモデル化、日本気象学会2010年度秋季大会予稿集D362
- ⑮ プラデーブ・カトリ、高村民雄、内山明博、山崎明宏、2010: Retrieval of ozone concentration using 315nm channel data of sky radiometer of SKYNET network、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、鹿児島
- ⑯ 内山明博、2010：気象研究所における放射観測に関する取り組み、地球温暖化観測推進事務局、「放射観測機器の較正に関する専門家会合」、2010年12月、つくば
  - ⑰ 坂見智法、内山明博、山崎明宏、工藤玲、2011：定点放射輝度観測による鉛直雲特性量の推定、極域の雲の衛星観測に関する研究集会、国立極地研究所、2011年1月、東京
  - ⑱ Khatri P., T. Takamura, A. Yamazaki, Y. Kondo, A. Shimizu, and N. Sugimoto, 2011: Study of aerosol direct effect over the East China Sea region using the combination of ground based remote sensing data and aircraft observation data, International symposium on aerosol studies explored by electron microscopy, Tsukuba, Japan.
  - ⑲ 内山明博、山崎明宏、坂見智法、工藤玲、2011：つくばでの地上観測によるエアロゾル光学特性の変動、日本気象学会2011年度春季大会予稿集P329.
  - ⑳ 工藤玲、内山明博、山崎明宏、坂見智法、2011：日本のエアロゾル光学特性の長期変動と地上日射への影響、日本気象学会2011年度春季大会予稿集P334.
  - ㉑ 工藤玲、青柳暁典、西澤智明、2011：光吸収エアロゾルの大気境界層構造への影響、日本気象学会2011年度秋季大会予稿集P378.
  - ㉒ Kudo, R., and A. Uchiyama, 2011: Direct effect of aerosol optical properties on global dimming and brightening, American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco, USA, 5-9 December 2011.
  - ㉓ Kudo, R., A. Uchiyama, 2012: Aerosol impact on the brightening in Japan, International Radiation Symposium 2012, August 06-10, 2012, Berlin, Germany.
  - ㉔ 山崎明宏、内山明博、上澤大作、工藤玲、2012：比較検定と Improved Langley法で決められたスカイラジオメーターの検定定数について、日本気象学会2012年度秋季大会予稿集P344.
  - ㉕ 内山明博、山崎明宏、工藤玲、上沢大作、2012：スカイラジオメーターの940nmチャンネルによる水蒸気量の推定、日本気象学会2012年度秋季大会予稿集、C314.
  - ㉖ 工藤玲、青柳暁典、西澤智明、2012：ライダーとスカイラジオメータから推定したエアロゾル光学特性の鉛直分布、日本気象学会2012年秋季大会予稿集、P342.
  - ㉗ Rei Kudo, 2013: Development of an algorithm to estimate the aerosol vertical profile from Sky radiometer and Lidar measurements, International SKYNET Workshop 2013 and the 19th CEReS International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, July 04-05, 2013, Chiba, Japan.
  - ㉘ Uchiyama, A., A. Yamazaki, R. Kudo, and D. Uesawa, 2013 : Column water vapor retrieval from skyradiometer (POM-02) 940nm channel data, International SKYNET Workshop 2013 and the 19th CEReS International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, July 04-05, 2013, Chiba, Japan.
  - ㉙ Khatri, P., T. Takamura, A. Yamazaki, and A. Uchiyama, 2013 : Use of 315nm channel of sky radiometer to retrieve columnar ozone amount, International SKYNET Workshop 2013 and the 19th CEReS International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, July 04-05, 2013, Chiba, Japan.
  - ㉚ Campanelli, M., T. Nakajima, P. Khatri, T. Takamura, A. Uchiyama, V. Estelles, G.L. Liberti, and V. Malvestuto, Retrieval of calibration parameters for ground based sun-sky radiometric measurements of columnar water vapor using operational

surface meteorological measurements, International SKYNET Workshop 2013 and the 19th CReS International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, July 04-05, 2013, Chiba, Japan.

- ⑳ Uchiyama, A., A. Yamazaki, R. Kudo, and D. Uesawa, 2013 : Continuous ground-based observation of aerosol optical properties in Tsukuba, Japan, International SKYNET Workshop 2013 and the 19th CReS International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, July 04-05, 2013, Chiba, Japan.
- ㉑ 内山明博, 山崎明宏, 工藤玲, 上沢大作 2013 : 地上で測定したエアロゾル光学特性, 150万都市福岡と越境物質－福岡大学における観測から－8研究機関合同研究会, 平成25年6月22日, 福岡
- ㉒ 内山明博, 山崎明宏, 石廣玉, 陳彬, 工藤玲, 上沢大作 2013 : 地上でのエアロゾル光学特性の連続観測, 日本気象学会 2013 年度秋季大会予稿集, D371.
- ㉓ Katri, P., T. Takamura, A. Yamazaki, A. Uchiyama, B. Holben, I. Sano, 2013: Comparison of single scattering albedo of aerosols obtained from observation data PREDE sky radiometer and CIMEL sunphotometer, 日本気象学会 2013 年度秋季大会予稿集, D370.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

なし