

スカイラジオメーターとライダーを用いた 岡山上空のエアロゾル観測

Aerosol observation at Okayama with Skyradiometer and LIDAR

永 松 慎 平 (Sinpei NAGAMATSU)*
江 川 大 貴 (Daiki EGAWA) *
塚 本 修 (Osamu TSUKAMOTO)**

Abstract

Aerosol is one of the controlling parameter for the global climate and also effects on local health hazards. The measurement of the aerosol was originally carried out as in-situ sampling and mass weight measurement including chemical analysis. Recently, remote sensing method is applied as satellite remote sensing and surface based remote sensing. Skyradiometer and LIDAR are surface based remote sensing system. Skyradiometer measures solar radiation as direct and scattered solar radiation affected by aerosols. LIDAR emit laser beam upward and it is backscattered by overlying aerosols. The backscattered light is received by a telescope and vertical distributions of the aerosols are obtained. These measurements require atmospheric radiation physics.

A Skyradiometer and a LIDAR were operated continuously at Okayama University campus and aerosol parameters were obtained from both of the system. Seasonal variations of the AOT (Aerosol Optical Thickness) and Angstrom parameter (α) are evaluated. During some dust events (e.g. yellow sand and PM2.5), time variations of these parameters were identified from both of the measurement system.

Keywords: Aerosol, Skyradiometer, LIDAR, Aerosol Optical Thickness (AOT)

I. はじめに

大気中には様々な微粒子 (エアロゾル) が浮遊している。このエアロゾルは健康被害だけでなく、気候変動などの地球環境にも影響を及ぼすことが知られている。粒子そのものが引き起こす散乱や吸収による直接的な効果、および雲核形成による間接的な効果があるためである。したがって、精度の高い環境影響予測のためには、エアロゾルが大気に及ぼす影響を精度よく把握することが重要となる。現在、エアロゾルの観測は地上でのエアサンプラーを用いたフィルター捕集法によりエアロゾルの構成成分や粒径分布、質量を測定するのが一般的である。それに加え、近年ではリモートセンシングにより衛星を使った観測や地上からの観測も行われている。本研究では、地上において太陽光を分光測定することにより、エアロゾルの各波長ごとの放射に与える散乱・吸収の影響を調べ、そこから、大気中を浮遊する物質の光学的特性を求めることを試みた。

本研究で使用している観測機器は、「スカイラジオ

メーター」と「ミー散乱ライダー」である。スカイラジオメーターは太陽光 (直達光および散乱光) を 11 波長で分光測定し、その放射データから、エアロゾルの光学的厚さ (AOT)、オンゲストローム指数 (α) などのエアロゾルの光学的特性を得るものである。一方、ライダーは「レーザーライダー」とも呼ばれ、上空に射出したレーザー光線が上空のエアロゾルで後方散乱された信号を受信して、エアロゾルの鉛直分布を見るものである。本研究では 2011 年からこの 2 つの装置を用いて、岡山上空におけるエアロゾルの挙動を観測し、黄砂や PM2.5 のダスト飛来イベントとエアロゾルの季節特性について調査した。

II. スカイラジオメーター観測

本研究で用いているのはブリード社製のスカイラジオメーター (POM-02) であり、岡山大学一般教育棟屋上で 2011 年から稼働している。(図 1) この装置は太陽の直達光と散乱光を全 11 波長 (340, 380, 400, 500, 675, 870, 940, 1020, 1225, 1627, 2200nm) で分光測

* 岡山大学大学院自然科学研究科, 〒700-8530 岡山市北区津島中三丁目 1-1
* Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama, 700-8530, Japan
* 現在所属: 日本気象協会 (Japan Weather Association)
** 岡山大学大学院自然科学研究科, 〒700-8530 岡山市北区津島中三丁目 1-1
** Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Okayama, 700-8530, Japan

定をしている。太陽光スペクトルの中でのこの 11 の波長帯を図 2 に示す。この各波長帯の放射データから、エアロゾルの光学的厚さ (AOT), オングストローム指数 (α), 一次散乱アルベド (SSA), 体積粒径分布, 複素屈折率といったエアロゾルの光学的特性を得るものである。この計算は Nakajima et al. (1996) で開発された SKYRAD.pack という Fortran プログラムを用いる。本研究では ver. 4.2 を使用した (永松ほか 2012, 2013)。



図 1 岡山大学一般教育棟屋上に設置されているスカイラジオメーター

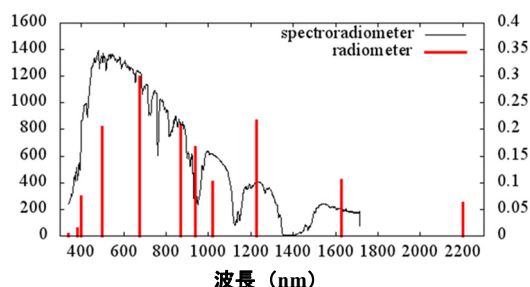


図 2 スカイラジオメーターで観測される 11 の波長帯 (赤) と太陽光スペクトルの関係

現在, このスカイラジオメーターを用いた観測ネットワークとして, 東京大や千葉大, 富山大を中心に SKYNET (<http://atmos.cr.chiba-u.ac.jp/>) が設立されている。東アジアを中心に 30 以上の地上観測サイト及び 4 隻の船による観測を行っている。これらの観測結果から地球放射収支や地球温暖化の寄与因子であるエアロゾルの広域分布の解明が試みられている。国際的には類似のネットワークとして NASA の運営する Aeronet (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) があり, 両者が連携して研究が行われている。

III. ライダー観測

ライダー (LIDAR: Light Detection And Ranging) は「レーザーライダー」と呼ばれることもあり, 電波を使って探査するレーダーとは異なって, 電波の代わりにレーザー光を用いるものである。その観測原理はライダーの送信部からレーザーを鉛直上方に照射し, 上空に存在する土壌粒子や海塩粒子, 黄砂粒子, 花粉と

いったエアロゾルの微粒子により後方散乱 (反射) されるレーザー光をライダーの受信部 (望遠鏡) で受信し, エアロゾル濃度の高度分布を得ることができる。このことを利用して大気中にこれら微粒子がどれだけ存在するのか (光学的厚さ) を知ることができる。

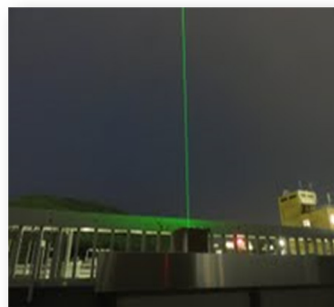


図 3 岡山大学工学部棟に設置されているミー散乱ライダーから射出されるレーザー光

使用しているミー散乱ライダーは, 岡山大学工学部棟 2 号館の天窓の付いた部屋に設置されていて, 鉛直上方に $0.532\mu\text{m}$ の波長のレーザーを射出している (図 3)。観測時間は 15 分間を一つの単位としており, 24 時間連続観測ができる。観測高度は地上から 15km 程度までで, 高度分解能は 45m である。 $0.532\mu\text{m}$ の波長を持つレーザー光のミー散乱の対象となるエアロゾルや雲粒をとらえることができ, ターゲットからの受信信号強度, および偏光解消度の鉛直分布を得ることができる (江川ほか, 2013)。「偏光解消度」とは出射信号と平行な成分と垂直な成分に偏光分離し, その値からエアロゾルの球形・非球形特性を見るものである。また後に詳しく述べるように, 受信信号強度からエアロゾルによる消散係数を計算することができる。

本研究では, ライダーで得られる消散係数の鉛直分布からエアロゾルの光学的厚さを求め, スカイラジオメーターから得られる光学的厚さと対比した。また, 各地に設置されている国立環境研究所のライダー網のデータ (<http://www-lidar.nies.go.jp/>) とも比較した。

IV. エアロゾルの光学的特性

【エアロゾルの光学的厚さ】

エアロゾルの光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness; AOT) は, ある波長 (λ) の光に対するエアロゾルによる減衰の程度を表す。Lambert-Beer の法則からある光路長 (z) を通って減衰された光の強度 (I_λ) は入射光強度 (I_{λ_0}) と消散係数 (k) を用いて以下のように書くことができる。

$$I_\lambda = I_{\lambda_0} \exp(-kz)$$

このとき, $\tau = kz$ を「エアロゾルの光学的厚さ (AOT)」

と呼ぶ。これは波長の関数であるが代表的なものとして太陽光のうちで代表的な 500nm の AOT を $\tau(500)$ として表す (永松, 2014)。

スカイラジオメーターでは SKYRAD.pack (ver.4.2) という Fortran プログラム (Nakajima et al., 1996) で AOT を計算することができる。一方、ライダーを用いると受信強度から Fernald 法 (Fernald, 1984) を用いて消散係数の高度分布を得ることができて (図 4 参照), これを高度積分することで AOT を求めることができる。(江川, 2015)

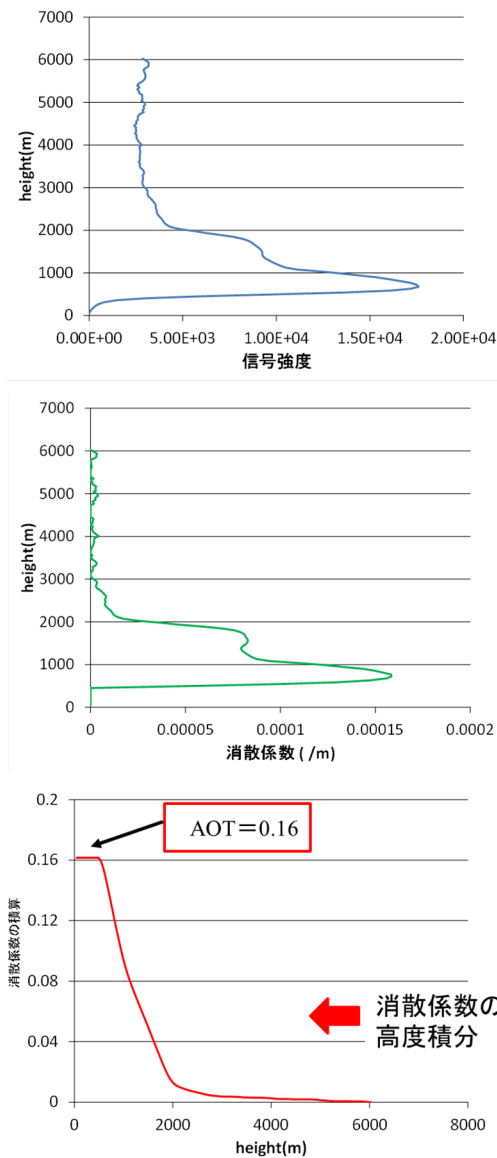


図 4 ライダーから得られる受信強度 (上段) と計算された消散係数 (中段) の鉛直分布, および消散係数を鉛直積分して得られる AOT の例 (下段)。

[オングストローム指数]

エアロゾルの光学的特性を表すもう 1 つの指標として「オングストローム指数」 α がある。この値

は粒径の大小の指標となり、 α の値が高いほど相対的に微小粒子が多いことを、 α の値が低いほど相対的に粗大粒子が多いことを示す。この値は、AOT の波長依存性を示すものであり、Ångström の法則より、波長ごとの AOT ($\tau(\lambda)$) を用いて以下のように表される。

$$\tau(\lambda) = \tau(500) \left(\frac{\lambda}{500} \right)^{-\alpha}$$

したがってオングストローム指数 α は次のようになる。

$$\alpha = - \frac{\ln[\tau(\lambda)/\tau(500)]}{\ln[\lambda/500]}$$

以下に例を示す (図 5)。

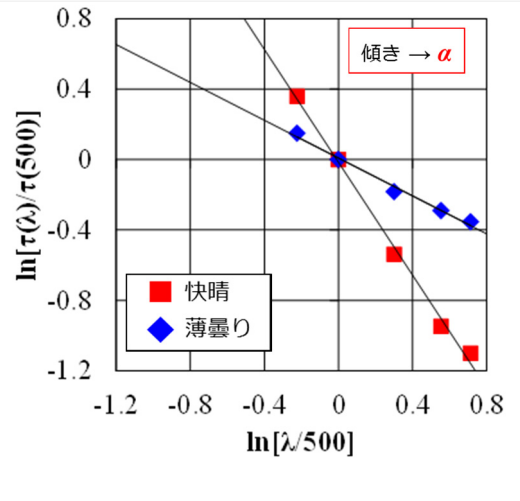


図 5 オングストローム指数 (α) を求めるためのプロット。2 つの事例について横軸に波長 (λ), 縦軸に波長ごとの光学的厚さ (τ) を、それぞれ 500nm の値で規格化し対数軸にしたもの。この直線の傾きがオングストローム指数 (α) になる。

[データの品質管理]

スカイラジオメーターでの観測において、太陽直達光だけでなく散乱光をも使用してエアロゾルの光学的特性を算出するのが特徴である。しかし、広範囲にわたって散乱光を観測し使用するために、雲の影響を受けやすくなっている。太陽を直接雲が覆う時だけでなく、散乱光観測域に雲が存在する場合や、観測域周辺に雲が存在することでも影響を受けてしまう。スカイラジオメーターでは、Sun センサーの出力が 1 分間の間 1000 を下回るような場合、散乱光観測は行われない。また SKYRAD.pack での計算時には、明らかな雲の影響がある場合は除外されるように設定されて

いる。しかし、これらの条件を設定していても、巻雲などの薄い雲の影響は判別が大変難しく計算結果に含まれてしまう。

そこで本研究では SKYNET で用いられている雲除去アルゴリズム (Khatri and Takamura, 2009) の一部を適用し、全天日射量を用いた品質管理を行った。全天日射量は岡山大学一般教育棟屋上で測定されており、1分平均値が記録されている。この1分毎の規格化データら、10分間の標準偏差を求める。そうすることで、雲の効果を受けて日射量の変動が大きい時間帯のものかどうかを判断することができる。ここでは、10分間の標準偏差が0.02以上のものを「雲ありデータ」と判別する。

図6は、2013年4月16日のAOTと α のそれぞれ雲除去前後の様子と全天日射の規格値の10分間の標準偏差である。この日、午前中は快晴だったものの、午後から巻雲がかかっていた。午前中は黄砂によると思われる、高いAOT (□) と低い α (□) を示しているが、午後からデータが途切れ、15時以降はAOTと α の値がばらついていて巻雲の影響と考えられる。しかし日射量のSDが0.02を超えた雲除去の品質管理により、15時以降のデータが落とされている。しかし、午前中の黄砂と思われるデータ (●と●) はそのまま残すことができ、効果的な雲判別を行えたことがわかる。

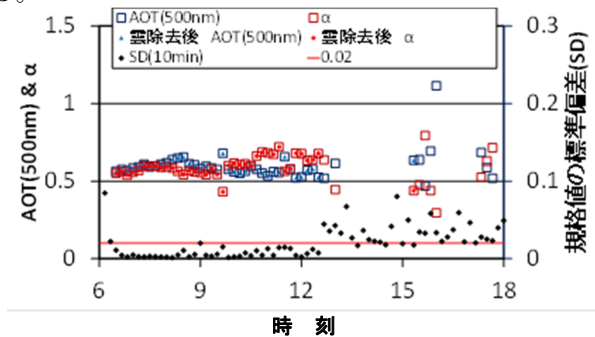


図6 スカイラジオメーターから得られたAOTと α の値に日射量変動を考慮して品質管理(雲除去)を行った前後の比較。右軸は日射量変動の標準偏差。

V. エアロゾルの季節変化

得られた光学的特性から、岡山上空でのエアロゾルの季節性に着目する。図7は、およそ3年間の観測から得られた α とAOT(500nm)の月平均値の変化を示した。品質管理前において、データ数が100個未満の月は除外した。それぞれの値について各年の線はおよそ重なっており、同様な季節変化を繰り返している。

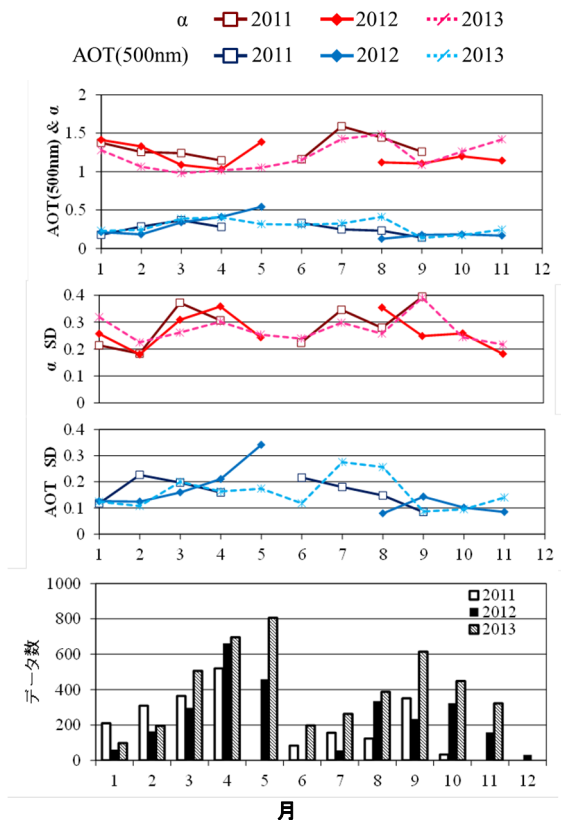


図7 2011年から2013年の3年間にわたるAOTと α の各月平均値(上段)、 α とAOTの月ごとのばらつきの標準偏差(2段目、3段目)、ひと月のデータ数(最下段)を示した。品質管理前のデータ数が100個未満の月は除く。

α は冬や夏で高い値をとり、春や秋では低下する。AOTは春の3月~5月の期間において最大となり、秋にかけて低下し、最小となる。また各月の標準偏差を比較してみると、 α に関しては春(3月、4月)と夏から秋(7月、9月)にかけて、データのばらつきが大きくなる傾向が表れている。この時期は天候も比較的穏やかで品質管理後も多くのデータ数が残っている。またデータ数の最も多い5月では標準偏差は小さくばらつきが少ないので信頼性は高い。このようなばらつきの違いは季節の特徴が表れていると考えられる。つまり、春は黄砂の飛来によって α の大きな変動があるため、ばらつきは大きくなる。一方で夏から秋、特に7月については、梅雨の時期にかかる事や夏特有の積雲が表れやすいことから多少雲の影響が残っている可能性が考えられる。また高い湿度の中で、吸湿性の高い硫酸系エアロゾルが周辺の水蒸気を吸収して粒径を増加させた可能性もある。9月に関しては、AOTが低くそもそものエアロゾル量が少ないため、粗大粒子や微小粒子のわずかな偏りが結果に影響することが予想される。つまり、少し微小なものが増え

れば α が上昇し、逆に少しでも粗大な粒子が増えれば、たちまち α が低下してしまうということである。このように、 α については標準偏差の季節性が見られるのだが、AOT の標準偏差では明確な季節性を読み取ることはできない。月平均値や月標準偏差の季節性は Aoki and Fujiyoshi (2003) における北海道での観測からも得られている。しかし、青木らの観測では α の季節性は弱いという結論であり北海道の結果とは多少異なっていた。

VI. ダストイベント

[黄砂]

ダストイベントの一つとして、まず黄砂に注目する。日本では、春になると周囲が霞みがかかり、窓や車には褐色がかかった汚れが付着することがある。これは、東アジアの砂漠域（タクラマカン砂漠、ゴビ砂漠など）や黄土高原から舞い上がった土壌粒子が飛来してくるために生じる。その粒径はおよそ $2\sim 5\mu\text{m}$ といわれている。黄砂は特に西日本で顕著で、岡山においても観測されることがある。前節で示したエアロゾルの季節変化で春にその影響（高い AOT, 低い α ）が現れていた。

図 8 に岡山で黄砂が観測された時のデータを示す。2012 年 4 月 8 日から 9 日にかけて、スカイラジオメーターから得られた光学的特性の時間変化と、ライダー観測から得られた信号強度と偏光解消度の時間高度分布図を示した。AOT と α の挙動に注目すると、8 日の朝では AOT は低く α も高く、黄砂粒子の流入はみられない。しかし、12 時に向かって AOT は急上昇し、 α も徐々に低下している。9 日になると、 α の値は高い値へ戻っているが、AOT は再び上昇しており、大気はかなり濁っている様子がわかる。黄砂が飛来すると、粗大粒子が大量に流入することから、 α は低下し、AOT は上昇する。したがって、この期間においては黄砂が飛来していると考えられ、実際に岡山地方気象台では黄砂が観測されている。

続いて、ライダーデータに注目する。ライダーから得られる情報のうち、信号強度は後方散乱の強さを示し、エアロゾルが多いほど強く信号が返ってくる。つまり、信号強度が強いほどエアロゾルが高密に存在することを示す。一方、偏光解消度の方はというと、粒子の球形か非球形かを示し、値が高いほど氷晶や黄砂のような土壌粒子の存在を表し、逆に低ければ、水滴や大気汚染物質の存在を表す。岡山大学のライダーでは、黄砂粒子は約 12% 以上の値を示すとされている（白川ほか, 2004）。上段に示したスカイラジオメーターの結果と比較してみると、AOT の上昇に対応するように、およそ上空 2km で信号強度が強くなっていく変化が見られる。夜間にやや弱まり、9 日の日中に再び信号強度が強くなっている。その信号強度の強

い一帯は、両日とも偏光解消度が高く緑色の 15% 前後を示している。したがって、ライダーによる観測結果からも、この高密なエアロゾル塊は黄砂粒子の可能性が高いと推察することができる。

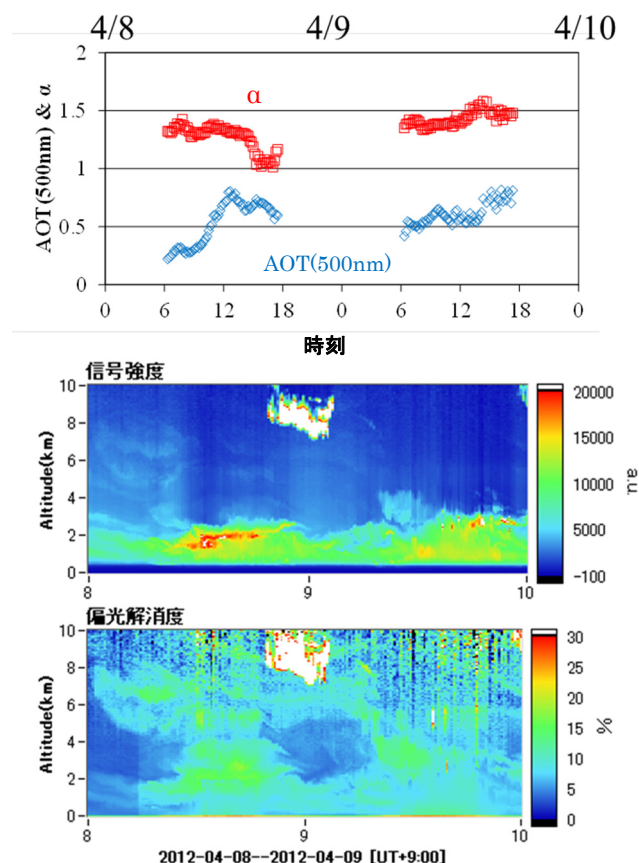


図 8 黄砂日の例（2012 年 4 月 8 日～9 日）における、AOT (500nm) と α , SSA (500nm) の時間変化（上）とライダーによる信号強度（中）と偏光解消度（下）の時間高度分布図

また、スカイラジオメーター観測から求められた体積粒径分布図を図 9 に示した。体積粒径分布図は、水平面に時間軸と粒径軸をとり、縦軸に粒子濃度（体積密度）を取ったものである。基本的に微小粒子（粒子半径 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ ）と粗大粒子（粒子半径 $1\sim 2\mu\text{m}$ ）の 2 つの山をもつバイモーダル（2 峰性）であり、今回の結果にもその様子が表れている。時間軸で見ると 8 日の朝は、粗大粒子も微小粒子もほとんど存在しないが、12 時頃に近くなるにしたがって急激に増加しており、黄砂粒子に相当する粗大粒子が上空に流入してくる様子が確認できる。15 時ごろから粗大粒子はさらに急激に増加しているが、全天カメラとライダーデータから 10km 以上の上空に巻雲が出現したことが要因と考えられる。一方で、微小粒子も粗大粒子と同様に増加を続けており、9 日になると粗大粒子よりも多

くの体積を有している。この結果として、9日に α の値が高くなってしまっている。黄砂飛来後の微小粒子の増加は Aoki らの北海道での観測からも報告されている。この微小粒子が流入時、ライダーの偏光解消度は水色の 10%程に下がっているのがわかる。したがって、黄砂粒子と共に飛来してきてはいるが、黄砂粒子とはまた別の存在の可能性が考えられる。

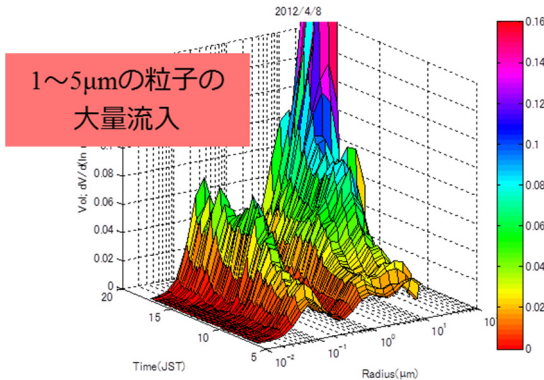


図9 スカイラジオメーターの観測結果から求められた、黄砂日(2012年4月8日)における体積粒径分布。高さやカラーバーは体積密度 [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$] を示す。

[PM2.5 微小粒子]

続いては黄砂とは違い、より微小な粒子の例を示す。2013年1月末、中国からの越境汚染の話題が世間の注目を集めた。その際大きく取り上げられたのがPM2.5の大量流入である。PM2.5は、従来の環境基準の対象であったSPM (Suspended Particle Matter) とは異なる。SPMは「浮遊粒子状物質」とも呼ばれ粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子である。一方、PM2.5は「微小粒子状物質」とも呼ばれ、粒径が $2.5\mu\text{m}$ 以下のより小さな粒子を指す。粒径が $10\mu\text{m}$ 程度のものは人体に入り込んだ際、気道上部に沈着するが、より細かい粒子はさらに奥の肺にまで達してしまう割合が高く、微小な粒子の方がより人体への影響が大きいことがわかっている。そこで、現在では環境基準としてSPMにとって代わり、より微小な粒子を対象としたPM2.5が用いられている。このPM2.5の大部分は、化石燃料が燃焼して生じた粒子やガス状の大気汚染物質が大気中で粒子化したものであり、中国の工場や車の排出ガス、また暖房用の石炭燃焼による煙が国境を越えて日本まで到達する場合がある。その場合、日本でも視程が悪くなり気象台では「煙霧」として観測される。中国からの越境汚染の他に、シベリアの森林火災による煙霧も多く報告されており、研究対象となっている (Aoki and Fujiyoshi, 2003)。

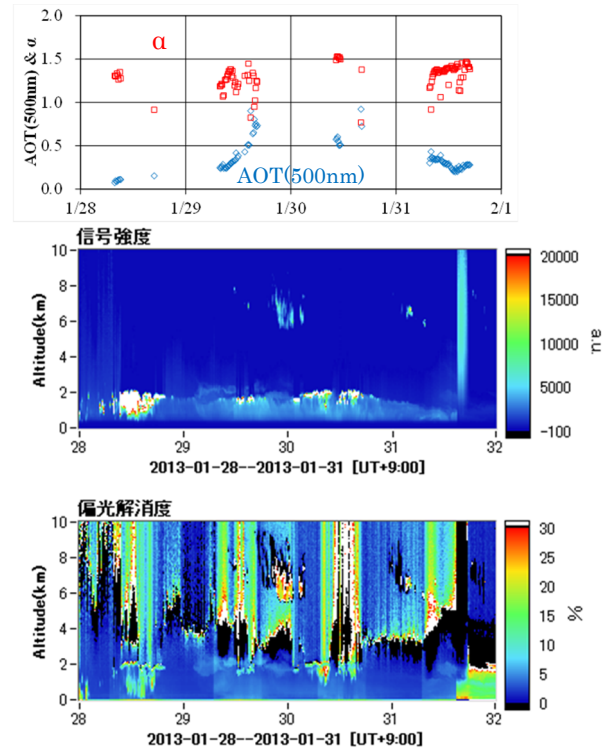


図10 PM2.5粒子流入の例(2013年1月28日~31日)における、AOT(500nm)と α の時間変化(上)とライダーによる信号強度(中)と偏光解消度(下)の時間高度分布図。

PM2.5粒子流入の例として、先に述べた2013年1月末のデータを図10に示す。1月28日の時点では、AOTは低い値、 α は高い値をとっているが、29日には、朝から夕方にかけてAOTは急上昇し、 α の値は1よりも高く、黄砂時のようなAOTが上昇するにつれて α が低下するという変動はみられない。その後、30日31日と高いAOT・低い α の状態が維持されつつ、31日夕方に向けてAOTが徐々に低下している。AOTが上昇しても α が高い値を維持しているということは、微小粒子の流入が考えられる。ライダーによる信号強度は、29日未明から徐々に強くなり始め、黄砂ほどではないにしろやや強い値が返ってきており、31日夜にむかって徐々に終息する様子がみえる。また偏光解消度は、青から水色の10%未満を示している。雲ほど信号強度が強くないことから、この低い偏光解消度は大気汚染物質でできた球形の二次粒子などが多いことを示している (Toriyama et al., 2005)。以上のことから、この期間のイベントは微小な大気汚染物質、PM2.5による煙霧であると判断できる。

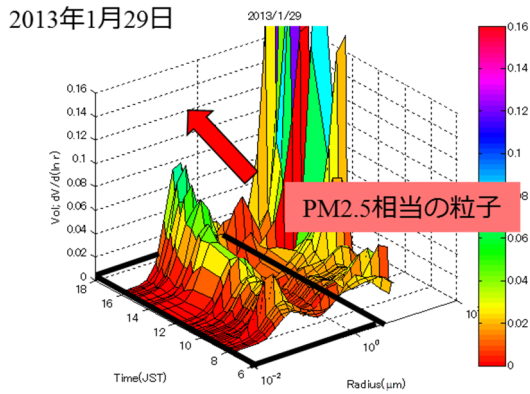


図 11 PM2.5 粒子流入の例 (2013 年 1 月 29 日) における、体積粒径分布。縦軸 (カラーバー) は体積密度を示す。

さらに、PM2.5 粒子が流入した 1 月 29 日の体積粒径分布を図 11 に示した。時間変化に注目してみると、29 日の朝方には少ないが、黒枠で囲った $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子が時間と共に急激に増加している様子がわかる。粗大粒子も値が大きくなっているが、これは午後から生じた雲の影響であると考えられる。

VII. スカイラジオメーターとライダーによる AOT の対応 [ダストイベント]

エアロゾルの光学的厚さ (Aerosol Optical Thickness; AOT) は、これまでに述べたようにスカイラジオメーターから SKYRAD.pack を用いて計算することができる。また、ライダーの受信強度から Fernald 法を用いて消散係数を求め、これを鉛直積分して AOT を求めることができる。ここでは、2 つの方法で求めた AOT がどのように対応しているかについて検討した。

図 12 は岡山で黄砂が観測された 2012 年 4 月下旬の結果を示す。上段の図を見るとこの期間における岡山でのライダー (○) とスカイラジオメーター (○) の AOT は絶対値の違いはあるものの、4 月 23 日から 24 日にかけての黄砂の飛来に伴う概略の時間変化には対応が見られる。下段に示したライダー受信強度の変化もこれを裏付けている。参考のために国立環境研究所の松江ライダー (○) の結果と比べてもライダー同士での対応は良いことがわかる。4 月 22 日と 26 日の岡山ライダーによる大きな AOT は雲による影響と考えられ、品質管理が不十分なものを含んでいる。中段には国立環境研究所のライダーネットワークにある長崎 (○)、筑波 (○) の値とも対比した。4 月 22 日の長崎から始まり、23 日の松江と岡山、24 日の筑波と時間的な遅れを持って AOT の増加が見られる。

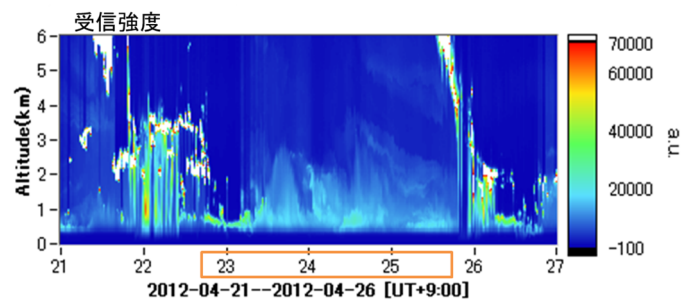
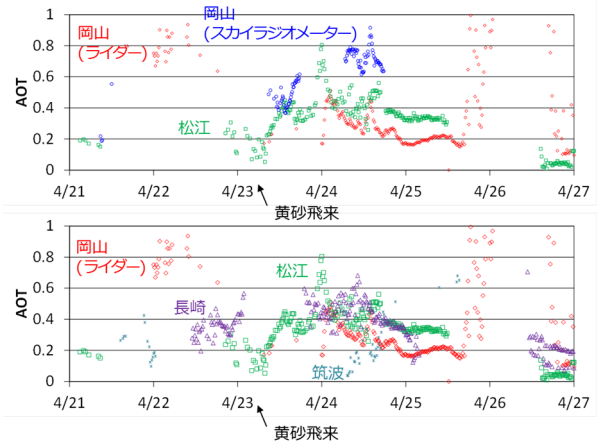


図 12 2012 年 4 月下旬の黄砂飛来時に複数の方法で得られた AOT の時間変化。上段：岡山スカイラジオメーター (○)、岡山ライダー (○)、松江ライダー (○)。中段：岡山 (○) と松江 (○)、長崎 (○) および筑波 (○) の各ライダー。下段：岡山ライダーの受信強度の鉛直時間断面。

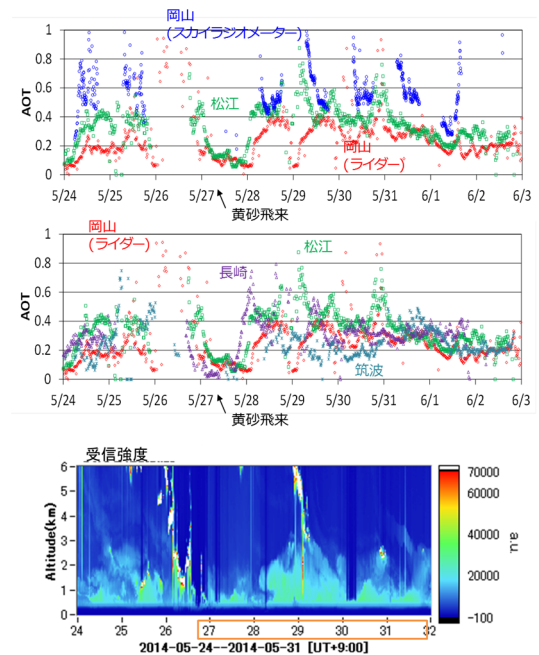


図 13 2014 年 5 月末から 6 月初めにかけての黄砂飛来時に複数の方法で得られた AOT の時間変化と岡山ライダー受信強度。記号、項目は図 12 と同じ。

図 13 にはもう 1 つの例として 2014 年 5 月末から 6 月初めにかけての結果を示す。5 月 27 日から長崎→松江→岡山→筑波の順番で AOT が次第に高くなっていく様子が見られ、黄砂が西から東に飛来していく様子がわかる。

[季節変化]

スカイラジオメーターから求めた AOT の季節変化については第 V 節で述べたが、ここではライダーから求めた AOT も含めた時間変化について比較検討した (図 14)。ダストイベントの場合と同様に、絶対値についてはスカイラジオメーターによる AOT の方が大きくなっている。これはライダーによる消散係数が図 4 に示したように地上から高度 6km までに限定しているのに対して、スカイラジオメーターでは大気全体の結果が反映されていることも 1 つの要因と考えられる。また、春にはダストイベントのために両者とも変化が大きく、時間変化の様子に対応が見られるのに対して、秋には値が比較的安定しているという点は共通している。

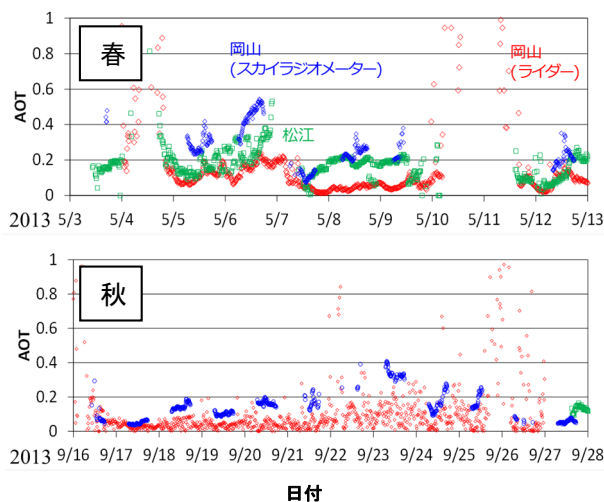


図 14 2013 年の春と秋の期間における複数の方法で得られた AOT の時間変化。岡山スカイラジオメーター(○), 岡山ライダー(○), 松江ライダー(○)。

VIII. まとめ

岡山上空におけるエアロゾルの挙動について、スカイラジオメーターとライダーを用いて、2011 年から 2014 年にかけて連続観測を行った。AOT で代表されるエアロゾルの光学的特性について明瞭な季節変化をとらえることができた。また、黄砂や PM2.5 粒子の飛来によるダストイベントについてもスカイラジオメーターとライダーの両方の機器で時間変化をとらえることができた。両者から求めた AOT の値を対比すると時間的な変化をよく対応している場合も見られるが、絶対値についてはライダーの方が小さく表

れる場合が多く見られた。観測高度範囲のちがいによるものと考えられる。

謝辞

本研究は岡山大学と(独)産業技術総合研究所との太陽光発電に関する共同研究の一部として行われたもので、スカイラジオメーターの設置、運用などで協力いただいた産業技術総合研究所の橋本潤博士、薛雁群博士に厚く感謝します。またデータ解析、Skynet との連携について富山大学の青木一真教授、千葉大学の高村民雄教授にお世話になりました。岡山大学大学院自然科学研究科の五百旗頭健吾先生にはライダーの運用、解析についてご協力いただきました。また、国立環境研究所の杉本伸夫博士にはライダーの同研究所のライダーネットワークのデータの提供とデータ解析についてお世話になりました。みなさまに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Aoki, K. and Y. Fujiyoshi, 2003: Sky Radiometer Measurement of Aerosol Optical Properties over Sapporo, Japan, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 81, No. 3, 493-513.
- 江川大貴, 永松慎平, 五百旗頭健吾, 塚本 修, 2013: 偏光ミー散乱ライダーを用いた大気中のエアロゾルと雲の観測, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集第 130 号.
- 江川大貴, 2015: ミー散乱ライダーを用いた大気中のエアロゾル観測, 岡山大学大学院自然科学研究科地球科学専攻平成 26 年度修士論文
- Fernald, G., 1984: Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, *Applied Optics*, Vol. 23, No. 5, 652-653.
- Khatri, P. and T. Takamura, 2009: An Algorithm to Screen Cloud-Affected Data for Sky Radiometer Data Analysis, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 87, No.1, 189-204.
- 永松慎平, 塚本 修, 橋本 潤, 薛 雁群, 2012: スカイラジオメーターを用いた岡山上空におけるエアロゾルの光学的特性の研究, 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, 第 127 号, 19-22.
- 永松慎平, 塚本 修, 橋本 潤, 薛 雁群, 2013: スカイラジオメーターを用いた岡山上空におけるエアロゾルの光学的特性の研究 (2), 日本気象学会関西支部例会講演要旨集 130 号, 9-12.
- 永松慎平, 2014: スカイラジオメーターを用いた岡山上空におけるエアロゾルの光学的特性の研究, 岡山大学大学院自然科学研究科地球科学専攻平成 25 年度修士論文
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman and B. Holben, 1996: Use of brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions, *Applied Optics*, Vol.35, No.15, 2672-2686.
- 白川紘之, 五百旗頭健吾, 小林 拓, 豊田啓孝, 和田修己, 古賀隆治, 2004: 偏光解消度の統計量から黄砂を判定する試み, レーザーセンシングシンポジウム予稿集, Vol. 23, 125-126.

鳥山成一, 山崎敬久, 近藤隆之, 水畑 剛, 奥村秀一, 水上昭弘, 神保高之, 木戸瑞佳, 日吉真一郎, 溝口俊明, 杉本伸夫, 松井一郎, 清水 厚, 2005: ライダーを使った立山山岳地域, 富山平野におけるオキシダントおよび黄砂の高濃度測定事例, 環境化学 (*Journal of Environmental Chemistry*), Vol. 15, No. 2, 269-285.