

レーザーで照らし出す地球の大気環境

矢吹 正教^{1*}

Laser remote sensing for environmental monitoring

Masanori Yabuki^{1*}

概要

空を見上げると、青空や真っ赤な夕焼け、雨上がりに現れる虹、太陽の周りに現れる光の輪など、多くの大気光学現象と出会うことができる。これは、太陽光が大気に入射することで引き起こされた現象であり、大気を構成する様々な物質の光学特性を反映している。この特徴を利用し、“レーザー”を大気中に照射して人工的に光散乱を起こすと、直接的な計測が難しい上空などの大気環境をモニタリングすることができる。本稿では、地球大気環境を形成する大気成分の特徴と、それらを遠隔で計測できるライダー（レーザーレーダー）手法について紹介する。

1. はじめに

空に青い「何か」が浮いているわけでないのに、どうして日中の空は青く見えるのだろうか？それには、太陽の光と、地球を取り巻く大気関係している。プリズムに太陽光を通すと虹色に分光される。光の色は波長で特徴づけられ、虹の7色を波長の短い順に並べると、紫、藍、青、緑、黄、橙、赤となる。これらの波長の光が、同じ割合で目に入った場合は、人は白色や灰色として認識する。一

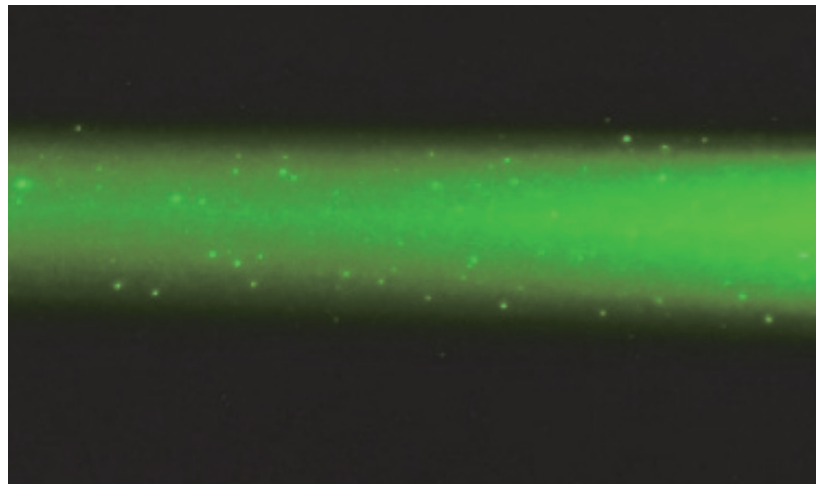


写真 1: レーザーを大気中に照射し、その光線を横から撮影した写真。微粒子の散乱によりビームの進行方向以外でも光の通り道を見ることができる（チンダル現象という）。

2018 年 5 月 25 日受理.

¹ 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所大気圏精測診断分野.

*E-mail: yabuki@rish.kyoto-u.ac.jp

方、いずれかの波長（色）の光が、強く散乱されたり、もしくは減衰したりすると、特定の色だけが強調して見えるようになる。つまり、青空は波長が短い青色の光が、夕焼けは長波長の赤色の光が、我々の目に多く届くような大気条件になっている。では、何が光散乱を起こしているのだろうか？暗闇でサーチライトやレーザーを使って光を照射すると、光の通り道が見える（写真1）。これは、大気中に浮遊する粒子に光が当たって様々な方向に散乱される様子を捉えたもので、チンダル現象と呼ばれる。可視化された光線を詳しく見ると、散乱の強さが異なる多くの粒子が混在していることに気が付く。このような特性の違いは、粒子の組成、サイズ、形状の違いなどを反映している。

地球の下層大気を構成する主な成分は、空気分子や微量気体などのガス状物質と、エアロゾルや雲粒などの粒子状物質である。これら大気物質による、太陽放射および地球からの赤外放射の散乱・吸収等を通じた地球のエネルギー収支への関与は、地球の気候形成に重要な役割を果たしている。また、大気を介した熱輸送や水循環が、豊かな生命を育む安定した地球環境の維持に寄与している。一方で、地球温暖化や極端気象の発生頻度の増加、大気汚染に伴う健康被害など、人類の持続的な発展や健康的な生活を脅かす大気現象も少なくない。そのような大気環境の変動要因を理解し、将来の変動予測を正確に行うためには、大気物質や気象要素を精密計測する技術の高度化が必須となる。ここでは、下層の地球大気を構成する各成分の役割と光学特性、またその散乱・吸収特性を用いた大気計測法であるライダーについて概説する。

2. 大気の構成物質と光学特性

2.1 ガス状物質

我々は空気の重み（大気圧）の下で過ごしている。標準大気圧に近い標高の低い地表付近において、 1 cm^2 あたり約 1 kg 、 1 m^2 では 10 t に相当する空気の層が上空にはある。空気分子は、高い高度になるほど濃度は低くなるが、3成分で乾燥大気の99.9%以上を占める窒素（78.08%）、酸素（20.95%）、およびアルゴン（0.93%）は、高度80 km付近まではほぼ一定の比率で存在している。実大気においては、気象や地球の水循環を考えるうえで欠かせない水蒸気が1~4%程度存在している。空気分子1個の大きさは、 1 nm （ $=10^{-9}\text{ m}$ ）以下であり光の波長（380~780 nm）と比べると非常に小さい。このような粒子の光散乱は、イギリスの科学者 J.W.S.レイリーによって導かれたレイリー散乱理論で説明することができる。レイリー散乱の強さは、波長の4乗に反比例する。赤色と青色の波長の比は2:1であるため、散乱の強さに換算すると1（赤）:16（青）となり、青色のほうが赤色よりも散乱強度は16倍も大きくなる。日中の青空は、このレイリー散乱の特徴を反映している。一方、強く散乱されるということは、それだけ減衰しやすいことを意味する。そのため、太陽光が斜めから入射することで大気を通過する光路が長くなる夕方は、青色の成分が弱くなり、相対的に波長が長い赤色の成分が強くなる。これが夕焼けとなる。

総体積で見ると微量しか存在しないが、地球大気を考えるうえで欠かせない気体成分もある。例えば、成層圏のオゾン層では紫外光を吸収して熱を放出する反応が起こっている。興味深いことに、この波長帯は、遺伝子の構成物質であるDNAを破壊する吸収帯とも良く一致する。つまり、成層圏オゾンは生物にとって有害な紫外線を除去するフィルターの役割を果たしているともいえる。一方で、対流圏のオゾンは、人の健康や植物に悪影響をもたらす大気汚染物質として知られている。また、温室効果ガスで知られる二酸化炭素やメタンは、地表から放射された特定の赤外線を吸収して、地表付近の大気を一定の温度に保つ役割を担っている。この温室効果により、地表付近の大気は約33度も暖められており、地球が氷の惑星となるのを防いでくれている。これらの例からも分かるように、大気と太陽エネルギーに関連した放射により、快適な生存環境が作りだされているのである。但し、それらは、長い年月をかけて地球が獲得してきた、微妙なバランスの上に成り立っている環境であることを忘れてはならない。例えば、中低緯度からのフロン放出が、遠く離れた極域での成層圏オゾン層の破壊を引き起こすなど、予期せぬ形で環境に悪影響を与えてしまうことがある。そのため、継続的に

大気環境をモニタリングし、その環境変動の兆候を素早く察知して対策に活かすことは重要である。

2.2 粒子状物質（エアロゾル・雲）

『エアロゾル(aerosol)』は、「aero（空気の）」と「sol（媒質中に固体または液体が分散しているコロイド系）」を組み合わせた言葉である。すなわち、気体中に浮遊する固体もしくは液体の粒子がエアロゾルの定義となる。必ずしも親しみのある言葉とは言えないが、エアロゾルは私たちの身の回りにたくさん存在している。たとえば、代表格となるタバコの煙をはじめとして、海の波飛沫、土埃、火山の噴煙、車から排出される煤塵、花粉なども、すべてまとめてエアロゾルである¹⁾。大気中に浮遊するエアロゾル濃度は、場所によって大きく異なり、都市域では 1 cm^3 あたり数万個以上になるが、南極のように非常に清浄な地域では 100 個以下にまで減少する。エアロゾルは、工場や自動車などの人間活動がもとになって排出された『人為起源』のものと、森林や土壌、海水など自然界から放出された『自然起源』のものとに大別される（図 1 参照）。一般的に、燃焼など人工的に排出されたエアロゾルはサイズが小さく、自然起源のエアロゾルのサイズは大きい傾向がある。また、微小粒子ほど体の奥まで入りやすくなるため、健康影響の観点からも重要視されており、2009 年にはサイズが $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ($1\text{ }\mu\text{m}=10^{-6}\text{ m}$) 以下の粒子の重量濃度で定義される $\text{PM}_{2.5}$ について、環境基準が新たに設けられている。

数 nm から約 $10\text{ }\mu\text{m}$ にわたる広い粒径範囲を取るエアロゾルの光学特性は、ミー散乱理論²⁾が適用できる。粒径 $10\sim 100\text{ nm}$ を最大とする一般的なエアロゾル粒子数濃度の分布（粒径分布）を考えた場合、光の波長領域におけるミー散乱の強度は波長におおよそ反比例する。レイリー散乱の強さが波長の 4 乗に反比例することを考えると、エアロゾル粒子の波長に対する強度差は、かなり小さい。そのため、太陽光に対するエアロゾルの散乱では、色ごとの明瞭な違いがあらわれにくくなる（白っぽ

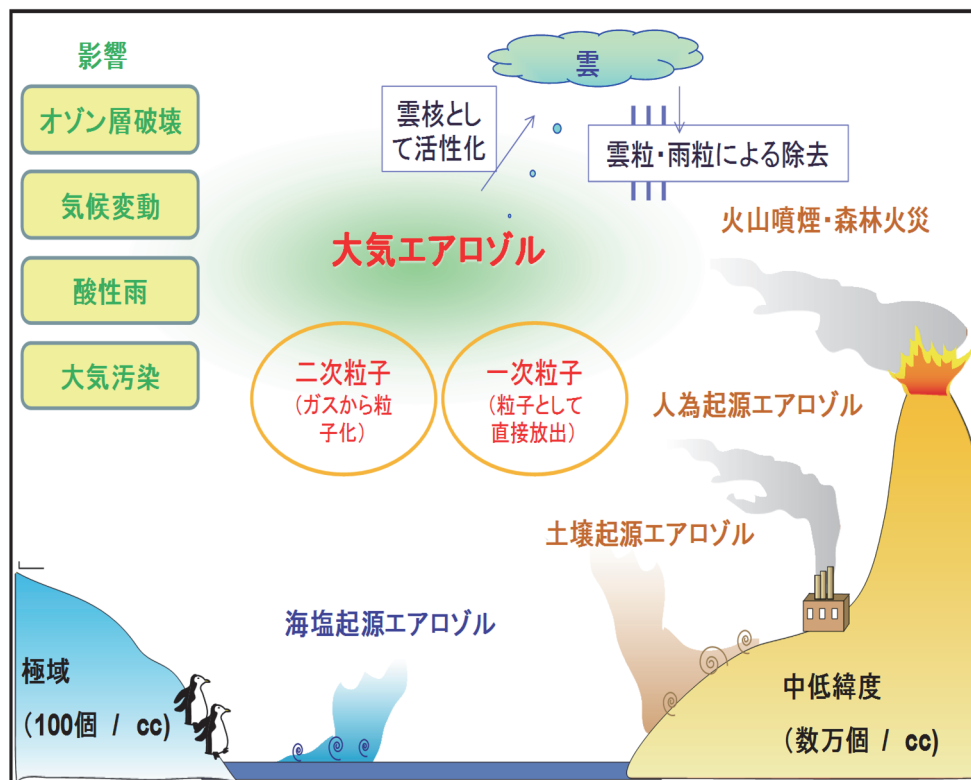


図 1: 大気エアロゾルと環境影響

く見える)。この特徴は、2000 m を超えるような標高の高い山で見る青空と、都会で見る青空の色の違いにも反映されている。高山では、透き通った深い青色、空気分子のレイリー散乱による「理想的な青空」となる。一方、大気汚染物質が多く浮遊する都市域で見る空は、空気分子によるレイリー散乱に、エアロゾルによるミー散乱の効果が加わった色となる。つまり、都市域では白みがかかった青色の空となることが多い。さらに、視程に影響を与えるくらいにエアロゾルが多くなると、条件により靄（もや）や霞（かすみ）と呼ばれるようになる。

次に雲を考える。雲は、10～100 μm 以上の水もしくは氷の粒で構成されている。光の波長に比べて、粒子サイズが十分に大きくなると、波長（色）ごとの散乱の強さの差はほとんど見られなくなる。このため、雲の色は白となる。水の粒が集まって数 mm の雨滴の大きさまで成長すると、太陽位置や大気条件によっては水滴の中で光が分光される虹が形成される。また、角柱粒子で構成される氷晶雲は、太陽や月の回りに光の輪を作るハローや、太陽が上下に伸びて柱状に見えるサンピラーなどの特異な大気光学現象を起こす。

ここまで、気体、エアロゾル、雲と別々に扱ってきたが、実大気ではこれらが相互に作用して複雑に繋がっている。例えば、二酸化硫黄、窒素酸化物等のガス状物質として放出された微量気体は、大気中での化学反応により二次的にエアロゾルを生成する。また、それらのエアロゾルは、雲過程を通じて地球の気候変動にも関与している。例えば、水蒸気のみで液滴の雲粒を作ろうとすると、相対湿度で 400% もの過飽和状態が必要となる。一方、硫酸塩などのエアロゾルがあると、100% を少し超え

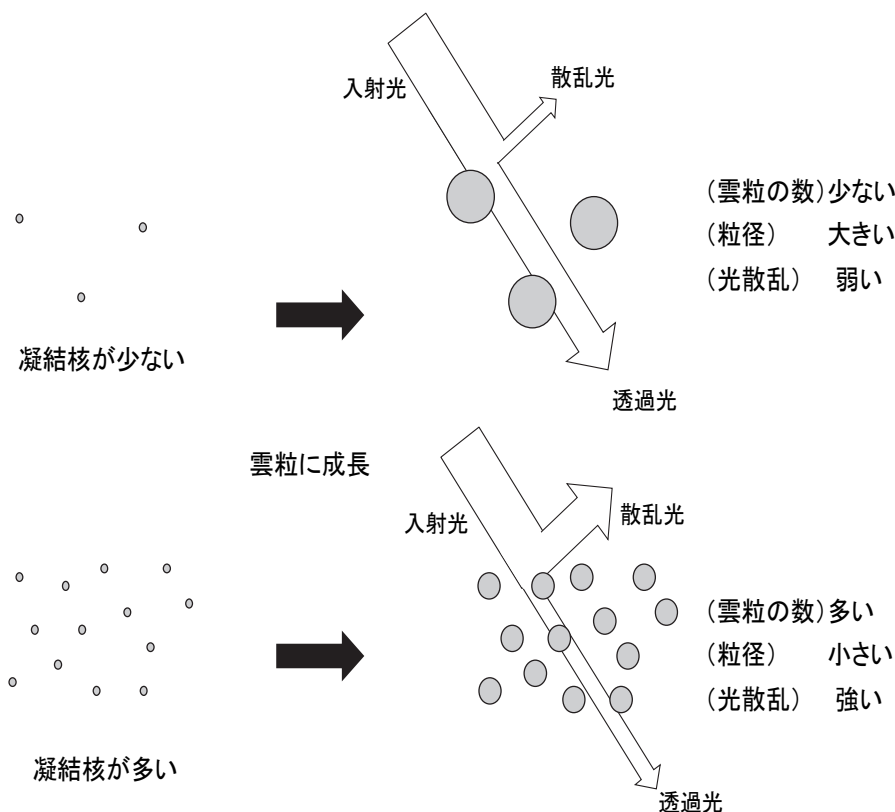


図 2：凝結核の数濃度と雲特性の関係³⁾⁴⁾

るくらいの現実的な過飽和状態で液滴が出来始める。これは、エアロゾルが雲凝結核として作用していることに因る。では、図2に示すように、水蒸気と同じ量しかない閉鎖空間に、個数濃度の異なる雲凝結核として働くエアロゾルを入れるとどうなるだろうか？水蒸気量が限られているため、核となるエアロゾル粒子の濃度が高い時ほど、1個あたりに振り分けられる水蒸気量は少なくなり、結果として生成される雲粒のサイズは小さくなることが想像できる。このように、雲粒径が異なると放射特性はどのように変わるのだろうか？雨と霧の条件下を想像してみる。雨が降っているときは、視程は若干悪くなるものの十分に辺りを見渡せるだけの視界は確保できるが、霧の中では、たちまち視界を奪われて身動きが取れなくなってしまう。この違いは、粒子の大きさと数密度が関係している。同じ雲水量を考えた場合、雲粒や雨粒の粒径範囲では、小さい粒子がたくさん存在するほど可視光に対する散乱が強くなる。そのため、雨粒より1~2桁以上、粒径が小さい霧粒のほうが、より多くの光散乱を起こす。地球の放射収支の観点からは、雲凝結核が増えて粒径の小さな雲粒が増加すると、雲の反射率が大きくなり地表に届く太陽放射が減少する（つまり冷却化に寄与する）。

国際的な専門家をつくる気候変動に関する政府間パネル（IPCC）では、気候に影響を及ぼす因子（温室効果気体やエアロゾルなど）の量が変化した場合の、太陽放射および赤外放射の放射収支の変化の推定値を発表している。IPCCの最新の報告書である第5次評価報告書⁴⁾によると、産業革命から現在に至るまでのエアロゾルに起因した冷却効果は、未だ大きな不確実性があるものの、二酸化炭素による加熱効果の数割を相殺すると評価されている。

3. ライダーによる大気計測

ライダーとは、Light Detection And Rangingの略であり、指向性の良いレーザーを光源とするレーザー（Radio Detection and Ranging）手法である。そのため、レーザーレーザーともよばれる。離れたところから対象物の種類や性質を推定するリモートセンシング機器の一種でもある。大気計測を目的とする一般的なライダーは、光源としてのレーザー、散乱された光を集める望遠鏡、および集光された光の強度または光子数を計測する受光・分光装置で構成される。パルスレーザー光を射出して、その後方散乱光が戻ってくるまでの時間から距離を、散乱光強度や周波数変化から測定対象の分布や移動速度を計測する。測定対象は、エアロゾルや雲、オゾンや二酸化窒素などの微量気体成分、気温・水蒸気・風などの気象要素など多岐にわたる（図3）。時空間的な変動が大きい大気環境をモニタリングするうえで、ライダーは有効な計測手法の一つであるといえよう。

滋賀県にある京都大学生存圏研究所・信楽 MU 観測所には、レイリー・ミー散乱を計測する多波長偏光ライダーが設置されている。このライダーシステムにより、数メートルおきのエアロゾル後方散乱信号を、高度約1 km以下では数秒で、10 km以下では1分程度で取得することができる。何故、多波長なのかというと、2章で述べたように、粒子特性によって散乱される光の波長（色）ごとの強度が変化する特徴を計測に利用するためである。人工的に光の波長を制御したレーザー光を何種類か使用して、その波長ごとの散乱特性の違いを検出すると、粒子サイズなどの情報を抽出できるようになる。また、レーザーから出た光は電場（および磁場）の振動方向が一定の直線偏光をしている。球形の粒子に光が入射した場合は、その後方散乱光の偏光成分は変わらないが、非球形粒子では入射光と後方散乱光の偏光特性に違いが表れる。そのため、多波長計測と偏光計測を組み合わせたライダーは、エアロゾル成分や雲相（水雲・氷晶雲・混合相雲）の推定に繋がる情報の抽出に広く利用されている。また、レーザーの入射波長と散乱波長が異なる水蒸気分子や窒素分子のラマン散乱を検出すると、水蒸気濃度や気温の空間分布の計測が可能となる。これら物質の空間的な広がりを把握するために、ライダーの観測視野の方向を自動制御できる走査型ライダーも開発されている（図4）。

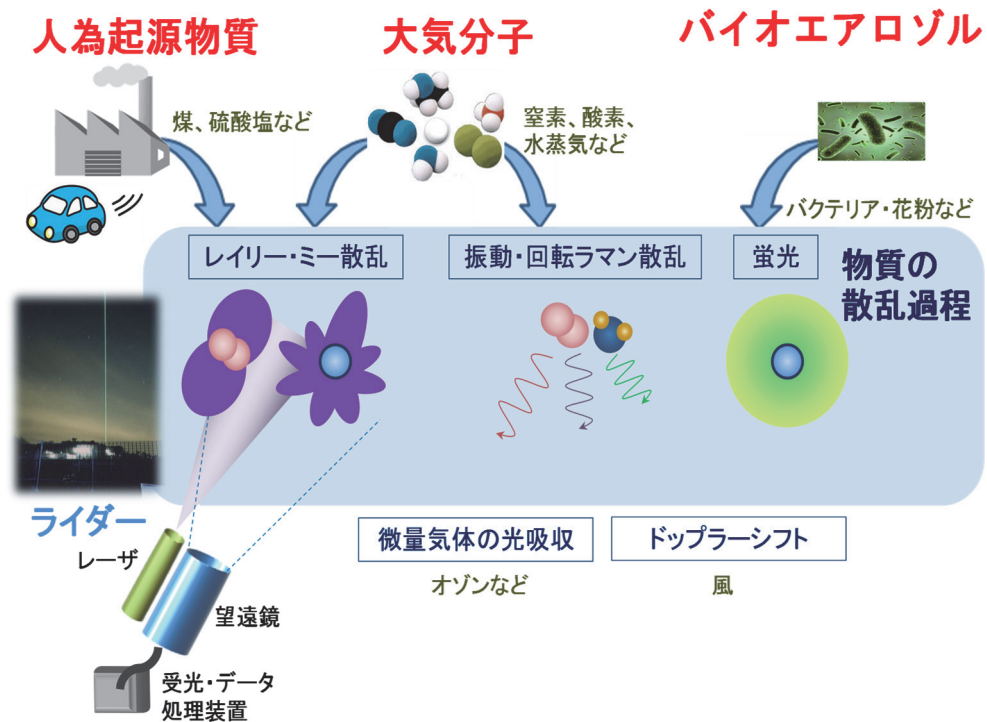


図3：ライダーの計測対象となる大気成分

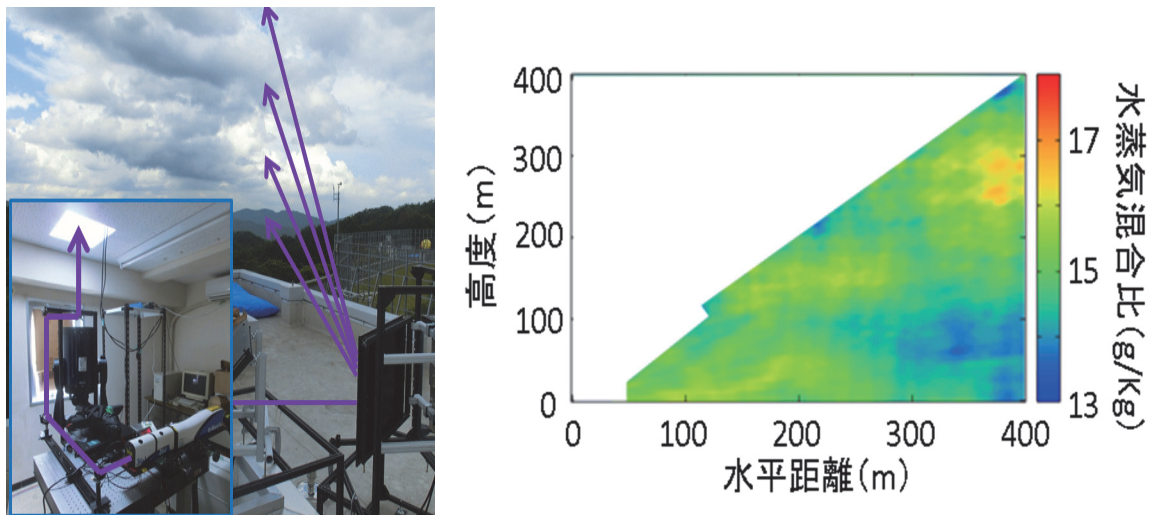


図4：（左）走査型水蒸気ラマンライダーシステムの外観⁵⁾、（右）ライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面構（信楽 MU 観測所、2012 年 8 月 28 日 22:17 JST）

一方、オゾンのような微量気体は、窒素分子や酸素分子に比べて非常に少ないため、その散乱の計測のみから濃度を求めることはできない。そこで、特定の光の波長のみを吸収する微量気体の特性を計測に利用する。例えば、オゾンは波長 250 nm を中心とする紫外域で強い吸収を示す。効率良く光を吸収する波長と、吸収しない波長の 2 波長の光源を用いて同時に信号を取得し、その差分を取ると、

オゾンによる光吸収の情報が抽出できる。分子1個あたりの光吸収（吸収断面積）は理論的に求まるため、それらの情報からオゾン濃度の分布を推定できるようになる。

ここまで読むとライダーは万能のように思えるが、実際には原理上の制限がある。まず、光を用いているため、大きく散乱するものがあるとその先が見えない。つまり、光学的に厚い雲があると、その先が計測できなくなる。さらに太陽光がノイズ源となるため、日中の観測精度が落ちるという課題もある。そのため、最近では、太陽光の影響が少ない紫外領域や近赤外域を光源とするライダーも多く開発されている。また、得られた信号からエアロゾルの情報のみを抽出しようとする、空気分子の散乱に埋もれない程度の粒子による散乱強度が必要となる。一般的に、ライダーで検出できる粒子サイズは、有意な光散乱を示すサブミクロン以上（0.1 μm 以上）と言われており、それ以下のナノ粒子サイズの定量的な計測は難しい。そこで、ライダーだけでなく、係留気球、観測タワー、孤立峰をプラットフォームとして利用した直接計測や、雲中まで計測できるレーダー・ソーダーなどの計測手法を組み合わせた複合観測から、大気微量物質の動態や気象要素の空間変動を統合的に把握するための取り組みが進められている。

4. おわりに

地球では、太陽光が大気に入射する際に引き起こされる、様々な大気光学現象が現れる。これらは、大気中に浮遊する微粒子の数・大きさ・形状・物質の種類や空間分布状態を反映している。古くは、身のまわりの空模様や自然の変化を観察して、天気や環境の変動を予想する観測法である観天望気に、この光学現象が用いられてきた。直接の計測が難しい高層の大気環境を間接的に知るその手法は、現在では、自然の光だけでなく人工的な光を用いた光学リモートセンシングへと発展している。これまでに培ってきた知見や新しい計測技術を活用して、地球大気環境の変化を精密かつ多角的・長期的に把握し診断していくことは、持続発展可能な社会の実現において重要である。

参考文献

- 1) 笠原三紀夫, 東野 達 監修, “大気と微粒子の話: エアロゾルと地球環境”, 京都大学学術出版会, 2008.
- 2) van de Hulst, H.C.: *Light scattering by small particles*, pp. 114-171, Dover, New York, 1981.
- 3) 日本エアロゾル学会 (畠山史郎・三浦和彦 編著), “みんなが知りたいPM_{2.5}の疑問25”, 成山堂書店, 2014.
- 4) IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- 5) Yabuki, M., M. Matsuda, T. Nakamura, T. Hayashi and T. Tsuda, A scanning Raman lidar for observing the spatio-temporal distribution of water vapor, *J. Atmos. and Solar-Terres. Phys.*, 150, 21-30, 2016.

著者プロフィール



矢吹 正教 (Masanori Yabuki)

<略歴> 2003 年 千葉大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了 (博士 (理))
 / 同年 国立極地研究所研究員 / 2005 年 日本学術振興会特別研究員 (第 47 次南極地域観測隊越冬隊) / 2008 年 千葉大学環境リモートセンシング研究センター協力研究員 / 2009 年 東京大学宇宙線研究所特任研究員 / 2010 年 京都大学生存圏研究所特定研究員 / 2011 年 京都大学生存圏研究所助教、現在に至る。
 <研究テーマ> 大気観測のための光学計測技術の開発、および大気エアロゾルに関する観測的研究。<趣味> 七味唐辛子の調合。