

ヨウ素ブロッキングフィルターの蛍光を利用した 532nm高スペクトル分解ライダーの検討

杉本 伸夫, 神 慶孝, 西澤 智明

国立研究開発法人国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

High-Spectral-Resolution Lidar Using Fluorescence from an Iodine Blocking Filter for Detecting Mie-Scattering Signals at 532 nm

Nobuo SUGIMOTO, Yoshitaka JIN, and Tomoaki NISHIZAWA

National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onigawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

Abstract: The use of fluorescence from the iodine blocking filter in a 532-nm HSRL was studied to detect the Mie-scattering component of the lidar return signals. In our previous paper, we experimentally demonstrated that the measurement of the Mie-scattering component of lidar return signals was possible using the iodine fluorescence detector. The fluorescence quantum efficiency was ~ 0.08 . However, the efficiency of collecting fluorescence was very low (~ 0.008) in the experimental system. In this paper, we studied a method using detector arrays surrounding the iodine cell to improve the efficiency.

Key Words: High-spectral resolution lidar, iodine blocking filter, fluorescence of iodine

1. はじめに

532nmの高スペクトル分解ライダー(HSRL)において、レイリー散乱受信チャンネルにミー散乱成分のブロッキングフィルターとしてヨウ素(I_2)セルが用いられることが多い。ヨウ素セルでブロックされたミー散乱光(およびレイリー散乱光のスペクトルの中央部分)はヨウ素で吸収されてしまうので通常は利用されないが、吸収された光の一部は蛍光として放出される。これを利用できればミー散乱成分の検知ができる可能性がある。例えば、対流圏上部から成層圏のエアロゾルと大気密度の測定などでは、受信光子のできるだけ多くをレイリー散乱受信チャンネルに入力したいので、ヨウ素セルの蛍光がミー散乱成分の検知に利用できるならばHSRLの性能改善につながる。

筆者らは、これまでに、HSRLで用いるヨウ素セルの側面に蛍光を受光するPMTを設置し、ヨウ素セルの蛍光を検出器として利用する可能性を実験的に検討した。単一縦モードのパルスNd:YAGレーザーの第二高調波の波長を掃引して、透過スペクトル、励起スペクトル、蛍光寿命を同時に測定し、蛍光の量子効率を評価した。また、蛍光を利用して大気測定を行い、ヨウ素セルの蛍光を利用してミー散乱成分の測定が可能であることを示した¹⁾。ヨウ素セルの温度が 22°C (気圧31.8Pa)で、レーザー波長をヨウ素の吸収線1111に同調したときの蛍光寿命は $0.18\mu\text{s}$ であった。この時の励起状態は $B(^3\Pi_{0u})v'=32$ で、放射寿命は文献より約 $2.3\mu\text{s}$ と推定されるので、蛍光の量子収率は約0.08と見積もられた¹⁾。量子収率はヨウ素セルの気圧を下げれば改善され、0気圧に外挿した蛍光寿命は $1.1\mu\text{s}$ (文献値)であるので量子収率は0.48に達するが、気圧を下げると分子密度も低下するので実用上の量子収率は0.2くらいが上限となる。なお、蛍光寿命は検出器としての時間応答を決めるので距離分解能を制限することになる。検出器としての効率は、蛍光の量子収率と蛍光を集光する光学的効率の積で表される。HSRLのヨウ素セルを用いた既存の実験系では、蛍光を集光する光学的効率が非常に低く、これが測定感度を制限する要因となっている¹⁾。しかし、この光学的効率は積分球の利用やヨウ素セルの回りに検出器アレイを配置する方法で大幅に改善できると考えられる。

本発表では、ヨウ素セルの蛍光を利用したHSRLの特性および検出器アレイを用いた感度改善手法について報告する。

2. ヨウ素セルの蛍光を利用したHSRL

Fig. 1にヨウ素セルの蛍光をミー散乱の検知に利用したHSRLの実験システムの構成と、大気散乱光のスペクトルおよび、それぞれの受信チャンネルで検知されるスペクトルを概念的に示した。実験システム¹⁾では従来と同様のHSRLのヨウ素セルの側面に蛍光を検出する光電子増倍管(PMT)を設置し、セルの入射窓から10-30mmの蛍光を測定した。セル内のビーム径は約12mm、PMTの前のレンズの口径は25mmで、ビームの中心から約36mmの位置に設置した。この光学系ではビームの限られた部分からの球面状に拡がる蛍光の一部分のみを受光するので光学的効率は非常に低い(約0.008)が、それでもこのシステムを用いて大気の後方散乱信号の測定を行うことができた¹⁾。ヨウ素セルの蛍光で検知されるのは、ヨウ素セルで吸収された部分(Fig. 1左図の赤丸で囲んだ部分)で、後方散乱光のミー散乱成分とレイリー散乱成分の中央部分である。正確に言うとセル内のビームの一部分からの蛍光を測定しているので、励起スペクトルは蛍光測定系の位置(セルの入射窓からの距離)に依存する。実験システムでは入射窓付近の蛍光を受光しているので励起スペクトルの

方が線幅が狭い．文献1)で大気散乱光の測定により示したように，蛍光チャンネルにはミー散乱成分に加えてレイリー散乱成分の約半分が含まれている．すなわちセルの透過光を用いるレイリー受信チャンネルではレイリー散乱成分の半分以上が失われていることになる．この結果は，Zhang et al.2)によるシミュレーション結果とも整合している．ヨウ素の吸収線の線幅はドップラー幅であるが，吸収線には超微細構造があるため単純に分子量と温度から計算したドップラー幅よりも広い．また，吸収線1111では2つの遷移が重なっていることもあって線幅がさらに広い．

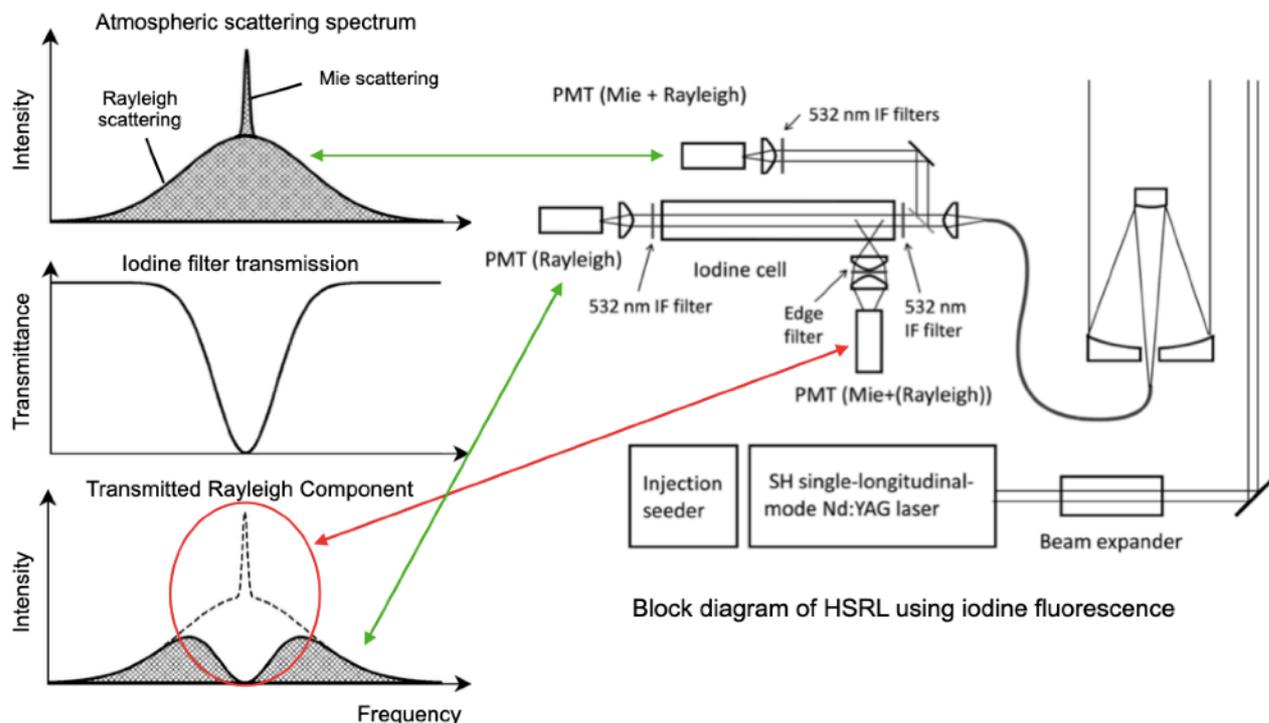


Fig. 1 Concept of the high-spectral-resolution lidar using fluorescence of an iodine blocking filter for detecting Mie-scattering signals.

ヨウ素セルの蛍光を利用するHSRLは，蛍光の受光効率の改善により十分な感度を得られるならば，以下のような利点がある．(1)受信光の全てをレイリーチャンネルに投入できるのでエアロゾル消散係数の測定精度が向上する．(2)蛍光チャンネルではミー散乱のレイリー散乱に対するコントラストが（ミー+レイリー受信チャンネルと比べて）高いので，散乱比の小さいエアロゾル層の検知に有利になる．(3)蛍光チャンネルはヨウ素の吸収線の波長のみ感度を持つので背景光雑音の低減が期待される．従って，この手法は自由対流圏から成層圏の薄いエアロゾルの観測などにおいて有用である可能性がある．

文献1)では蛍光の受光効率の改善のために積分球を用いる方法を提案したが，ここでは検出器アレイ(MPPCアレイなど)をヨウ素セルの周囲を取り囲むように設置する方法を考察する．この方法は積分球方式よりも直接的で高効率が期待される．また，セル内のビームの入射窓からの距離によって励起スペクトルが異なるので，距離の異なる複数のブロックに分けて蛍光を測定して解析すれば入射光のスペクトルの情報をある程度抽出することができる．すなわち，セルで吸収されるミー散乱光とレイリー散乱光の強度を分離して推定することが原理的には可能である．

参考文献

- 1) N. Sugimoto, Y. Jin, and T. Nishizawa: *Possible use of fluorescence from iodine blocking filter in high-spectral-resolution lidar to detect Mie scattering signals*, *Appl. Opt.* **60** (13) (2021) 3617-3622. <https://doi.org/10.1364/AO.421864>
- 2) Y. Zhang, D. Liu, X. Shen, J. Bai, Q. Liu, Z. Cheng, P. Tang, and L. Yang, *Design of iodine absorption cell for high-spectral-resolution lidar*, *Opt. Express* **25** (2017) 15913–15926.