

蛍光ライダー観測と拡散数値シミュレーションによる ヒノキ花粉飛散解析

熊田 喬一, 柴田 泰邦

東京都立大学 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Analysis of cypress pollen dispersion using fluorescent lidar observations and numerical diffusion simulations

Kyoichi KUMADA, Yasukuni SHIBATA

¹Tokyo Metropolitan University, 6-6, Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065

Abstract: Hay fever sufferers have been suffering from pollen for a long time, and it has become a social issue. The main method of measuring pollen at present is fixed-point observation, which has the problem that there are places where pollen cannot be measured accurately. The realization of pollen scattering distribution observations by the fluorescence lidar will contribute to these solutions. We conducted pollen observation using a fluorescence lidar with a laser wavelength of 266 nm. Additionally, we developed a pollen backward trajectory algorithm to trace pollen sources and improve future pollen forecasts. Our research highlights the potential of combining fluorescence lidar with numerical simulations to improve the accuracy of pollen dispersion mapping and source identification.

Key Words: fluorescence lidar , pollen , diffusion simulation

1. はじめに

国内の花粉症患者の約 7 割はスギ花粉（飛散時期：2～4 月）が原因で、国内ではこれまでに約 60 種類もの花粉についてアレルギーが報告され¹⁾、ヒノキ（3～5 月）、ブタクサ（8～10 月）、イネ科（4～11 月）など、ほぼ年間通して何らかの花粉が日本中で飛散している。

現在の花粉計測は、地上での定点観測によるものが主となっている。公的機関による観測は、10 km²に 1,2 点程度となっている。直線距離で約 17 km 離れている、多摩小平保健所と新宿区役所の過去の花粉飛散データ²⁾を例に挙げると、2021 年 2 月 22 日の 23:00 の多摩小平保健所では 676 個/m³、新宿区役所では 254 個/m³であり、2021 年 3 月 6 日の 16:00 ではそれぞれ 106 個/m³と 438 個/m³となっていて、観測値に 2～4 倍前後の差が生まれていることが分かる。山地に広範囲に植林されたスギやヒノキとは異なり、田圃や野原、河川敷など人の生活地域に密接している場所に自生しているブタクサやイネ科などの草花は、スギやヒノキと違い背が低いので、花粉が遠くに飛ぶことはない、花粉分布は正確に測れていない問題がある。

本研究は、大気中にレーザーを照射し、大気中に浮遊している物質が発する蛍光を集めることにより、物質の特定とその濃度分布を測定することができる蛍光ライダーを利用して、花粉の水平分布や鉛直分布を測定することとともに、時間を遡って花粉の後方軌跡を求めるために開発した拡散数値シミュレーションにより花粉発生源の推定することを最終目的としている。本講演ではスギ・ヒノキ花粉の飛散が最盛期を迎えた 2024 年 3 月下旬から 4 月上旬に蛍光ライダー実験を行った結果と拡散数値シミュレーションの解析結果について報告する。

2. 蛍光ライダー

多くの物質は、光照射をするとその光より長い波長の自発蛍光を発し、そのスペクトルは物質ごとに異なる。蛍光ライダーとは、レーザー光を大気中に照射し、大気中の対象物質が発した自発蛍光を望遠鏡で集め、分光検出器でスペクトルを検出することで物質を特定するとともに、その濃度分布を計測する装置である。Fig.1 に我々が使用している蛍光ライダーの概略図を示す。光源は出力 8.8 mJ、繰返し 10 Hz の Nd:YAG レーザ第 4 高調波(266 nm)を用い、口径 75 mm の望遠鏡で受光した大気散乱光および蛍光はダイクロイックミラーで 266 nm とその他波長に分離され、それぞれ光電子増倍管 (PMT) で受光される。その他波長から蛍光信号を抽出するため、中心波長 390 nm、帯域 10 nm の干渉フィルターを用いた。PMT は TTL 出力タイプで、帯域 200 MHz、サンプリングレート 125 MS/s の AD 変換器によってフォトンパルスを計数した。

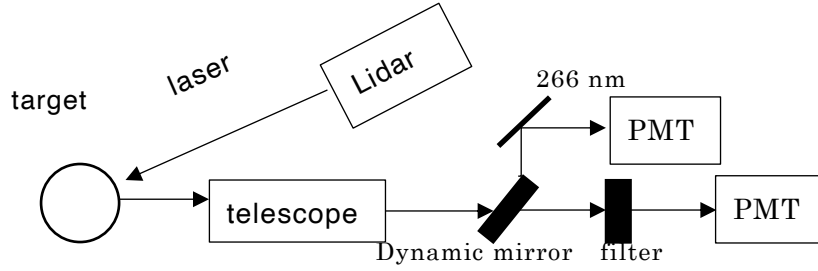


Fig.1 : Block diagram of the Fluorescence LIDAR.

3. 花粉拡散数値シミュレーション

3.1 花粉拡散方程式

スギやヒノキから放出された花粉は、その時の風向・風速といった気象場の作用を受けながら大気中を輸送され、その自重により落下する。花粉の発生源の特定のために、火山灰の拡散飛跡解析アルゴリズムを参考に、花粉の拡散数値シミュレーションを開発した³⁾。

時刻 t における花粉の位置を $(x(t), y(t), z(t))$ と表すと、この位置における平均風速 $(u(t), v(t), w(t))$ と風速の揺らぎ $(u'(t), v'(t), w'(t))$ により、時刻 Δt だけ前の位置は以下の式で求めることができる。

$$x(t - \Delta t) = x(t) - u(t - \Delta t)\Delta t - u'(t - \Delta t)\Delta t \quad (1)$$

$$y(t - \Delta t) = y(t) - v(t - \Delta t)\Delta t - v'(t - \Delta t)\Delta t \quad (2)$$

$$z(t - \Delta t) = z(t) - w(t - \Delta t)\Delta t - w'(t - \Delta t)\Delta t + w_g\Delta t \quad (3)$$

ここで、 u は東西風、 v は南北風、 w は鉛直風、 w_g は花粉の自重による降下速度 (3 cm/s) である。 u' (v' も同様) は、以下の式で与えられる。

$$u'(t - \Delta t) = R_h(\Delta t)u'(t) + \sqrt{1 - R_h(\Delta t)^2} \sqrt{\frac{K_h}{t_{LH}}} \Gamma \quad (4)$$

$$R_h(\Delta t) = \exp\left(\frac{-\Delta t}{t_{LH}}\right) \quad (5)$$

ここで、 $R_h(\Delta t)$ は u' の自己相関係数、 t_{LH} は水平拡散が減衰する緩和時間、 K_h は水平拡散係数、 Γ は正規乱数で、 u' の初期値 $u'(0) = 0$ m/s とする。風の揺らぎ u' , v' , w' で正規乱数が入っているのが、花粉ごとの軌跡が異なる。また、鉛直拡散 $w'(t)$ は鉛直拡散係数 K_v を用いて以下の式で与えられる。

$$w'(t) = \sqrt{\frac{2K_v}{\Delta t}} \cdot \Gamma \quad (6)$$

3.2 風データ

風データには、気象庁メソ解析モデル (MSM) の地表面の風向・風速データ⁴⁾を用いた。MSM は日本周辺域において 5.5 km × 5.7 km の格子点の 3 時間毎の風ベクトル情報を提供している。花粉の拡散数値シミュレーションを行うにあたり、格子点分解能、時間分解能が粗いため、MSM データを補間して、5 分毎、1 km × 1 km の風データベースを作成した。

4. 蛍光ライダー観測と拡散シミュレーションの解析結果

4.1 蛍光ライダー観測

蛍光ライダー観測は、スギ・ヒノキ花粉の飛散が最盛期を迎えた 2024 年 3 月下旬から 4 月上旬にかけて東京都立大学日野キャンパスにおいて複数回行った。レーザ光は仰角 2 度で照射した。また、昼間の太陽光による背景雑音を考慮し、日没後の 18:00 から 1 時間ほど観測を行った。

2024 年 4 月 1 日と 2024 年 4 月 4 日の結果を例として考察する。Fig.2 に 4 月 1 日における蛍光チャンネルの距離に対する受信光子数を、Fig.3 に 4 月 4 日における蛍光チャンネルの距離に対する受信光子数をそれぞれ示す。

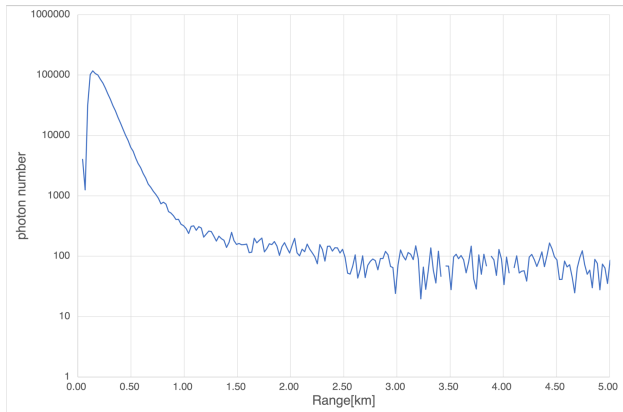


Fig.2 : Lidar observation results on April 1, 2024

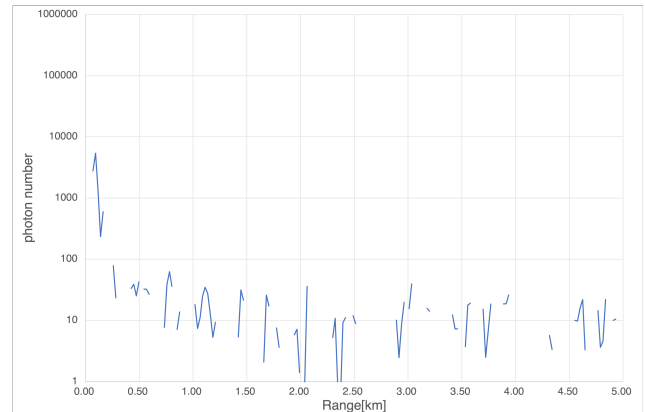


Fig.3 : Lidar observation results on April 4, 2024

Fig.2 において、ピークの受信光子数が多く、約 3.5 km 付近まで安定的に蛍光成分を含んだ信号を受信できていることが分かった。一方で、Fig.3 では、ピークの受信光子数も Fig.2 と比較しても約半数程度で、数百メートル以遠は、ノイズ成分が多く見られ、蛍光成分はほとんど見ることはできなかった。これらの結果から、4 月 1 日の方が大気中の花粉濃度が高いことが推測することができる。今回の実験は花粉の距離分布を得ることが目的ではなく、花粉由来の蛍光検出レベルの確認が目的の一つである。

Table2 に、各ライダー観測日の八王子市とさいたま市のスギ花粉とヒノキ花粉濃度の合計のデータ⁵⁾⁶⁾を示す。

Table2 : Total cedar and cypress pollen concentration in Hachioji City and Saitama City[particles/cm²]

	2024/4/1	2024/4/4
八王子市	202.5	15.4
さいたま市	172.5	21.9

このデータを見て分かるように、4 月 1 日の方が花粉飛散が多く、蛍光ライダーの受信光子数と相関があることが分かる。

4.2 拡散数値シミュレーションの解析結果

東京都立大学日野キャンパスを解析スタート地点とし、関東地域を含んだ 170 km×170 km の範囲で花粉数 1000 個を初期値とする拡散数値シミュレーションを行った。

2024 年 4 月 1 日と 4 月 4 日の 18:00 を起点とした拡散数値シミュレーションの結果を、Fig.4、Fig.5 にそれぞれ示す。図中の赤丸は日野キャンパスの位置を示す。他の○印は 60 分ごとに遡った時刻での花粉密度(個/km²)を丸の大きさに示している。

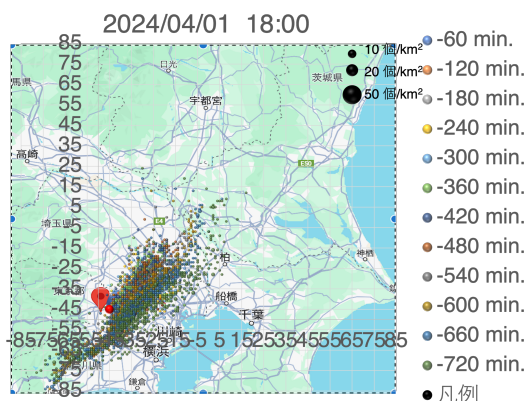


Fig.4 : Pollen diffusion simulation results starting from 18:00LT on April 1, 2024.

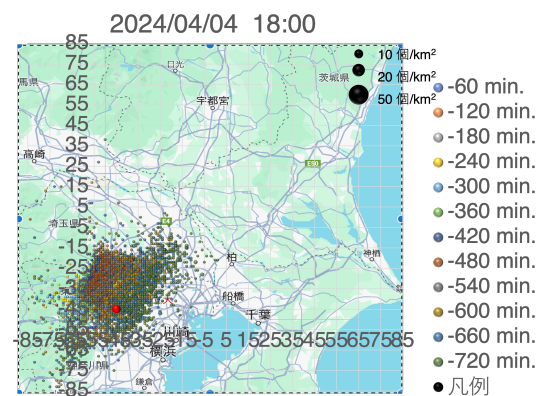


Fig.5 : Pollen diffusion simulation results starting from 18:00LT on April 4, 2024.

Fig.4 の 4 月 1 日の 18 時に東京都立大学付近に飛散している花粉は、埼玉、茨城南部方面からと、一部神奈川県丹沢方面から飛散してきていることが分かる。Table2 より、この日のさいたま市の花粉濃度は、他の日と比較して高い花粉濃度であることから、八王子付近の花粉濃度が他の日よりも比較的高く出ていることも相関をとることができた。

Fig.5 の 4 月 4 日の 18 時に東京都立大学付近に飛散している花粉は、四方様々な所から飛散して来ていることが分かる。この日は風が弱く、天候は曇りで湿度が高く、重くなった花粉が飛散しにくい条件がそろっていた。これらのことから関東近郊のスギ・ヒノキ林で発生した花粉の多くが途中で落下し、日野キャンパスまで飛散して来ていないことが推定できる。

5. まとめ

蛍光ライダーを用いた花粉由来の蛍光観測を行い、八王子市で 200 個/cm² と比較的花粉濃度が高い日（2024 年 4 月 1 日）は、約 3.5 km 遠方までの蛍光信号を捉えることができた。また、八王子市で 15 個/cm² と花粉濃度が低い日（2024 年 4 月 4 日）に関しては、蛍光信号は数百メートル遠方までしか得られず、至近距離における蛍光信号強度は花粉濃度の高い日の半分以下であった。

拡散数値シミュレーションの結果より、4 月 1 日は神奈川県の丹沢方向から飛来した花粉が蛍光ライダーによって検知されたと推測される。一方、4 月 4 日は過去 12 時間まで遡った拡散数値シミュレーションでは花粉発生源とみられる山地からの飛散は限定的であることが示された。また、湿度が高かったことから花粉が飛散しても長時間浮遊できなかったと推測されることから、蛍光ライダーでは蛍光信号が弱かったと推測される。以上から、波長 266 nm 光源による蛍光ライダーでスギ・ヒノキ花粉の検出が可能であることが示され、拡散数値シミュレーションにより花粉発生源推定の可能性があることが示唆された。

今後は、蛍光ライダー観測の効率を上げて、秋の観測に向けての準備を進めることを行う。拡散数値シミュレーションは、発生源をより正確に特定するために、確率的に拡散分布を計算する差分法を使ったシミュレーションを開発することを目指している。

参考文献

- 1) 環境省 “花粉症環境保健マニュアル-2014 年 1 月改訂版- II. 主な花粉と飛散時期” 環境省ホームページ. https://www.env.go.jp/chemi/anzen/kafun/manual/2_chpt2.pdf (参照 2019-01-07)
- 2) 環境省花粉観測システム過去データ一覧, 環境省 https://www.env.go.jp/page_00209.html
- 3) 新堀敏基 他、火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測- 2009 年浅間山噴火の事例-、気象研究所研究報告, 61, 13-29, 2010.
- 4) 数値予報解説資料集(令和 4 年度), 1.7 気象庁の現業数値予報システム, 気象庁情報基盤部, 2023.
- 5) 東京都アレルギー情報 navi., 東京都保健医療局, <https://www.hokeniryo.metro.tokyo.lg.jp/allergy/pollen/index.html>
- 6) 2024 年埼玉県さいたま市におけるスギ・ヒノキ花粉の飛散状況, サイエンスナビ, さいたま市健康科学研究センター, <https://www.city.saitama.lg.jp/sciencenavi/kurashi/003/p069268.html>