

デリー首都圏の深刻な大気汚染、インド北西部の稲わら焼きの寄与は従来の推定より小さい

～30 地点での独自観測データの詳細な分析から判明～

総合地球環境学研究所(地球研)の Aakash プロジェクト*の研究者による国際共同研究で、インド北西部のパンジャブ州とハリヤーナー州の農村部や郊外における農業残渣焼却（稲わら焼き）がその地域の大気汚染へ大きな影響を与える一方で、デリー首都圏への寄与はこれまでに考えられていたほど大きくないことを明らかにしました。Aakash プロジェクトでは、PM_{2.5}**センサーおよび複数のガスセンサーからなる小型大気計測器 (CUPI-G; Compact and Useful PM_{2.5} Instrument with Gas sensors)を約 30 台設置し、2022～23 年に大気汚染を継続的に観測しました。農業残渣焼却による大気汚染物質の放出と輸送を評価・予測するための新しい分析方法を開発しました。

【研究の背景と目的】

デリー首都圏では、毎年 10 月から 11 月にかけてたびたび警戒レベルの大気汚染が起きており、大気汚染が人間の健康と社会経済環境に及ぼす悪影響は、何十年にもわたり大きな懸念事項となっています。デリー首都圏で PM_{2.5} の高濃度イベントが急速に形成されて持続する要因には多くの仮説があり、インド北西部のパンジャブ州とハリヤーナー州の農業残渣焼却が大きく寄与しているという説(図 1)もそのひとつです。デリー首都圏での大気汚染の形成メカニズムは、今日にいたるまでメディアの報道や研究出版物などで議論が続いているにも関わらず、政府レベルの政策立案者は、刈入れの際の農民の行動を変えることによって農業残渣焼却の根絶を目指すことに重点を置いてきました。デリーの大気汚染の要因にかかわる議論は、わら焼きが盛んな地域での体系的な観測体制が不十分であるために続いています。今回の研究では、(1)Aakash プロジェクトが構築した低コストな計測器 CUPI-G を約 30 台設置した大気汚染物質のネットワーク観測 (2)空気の流れる様子、火災数、風の解析、および (3)化学輸送シミュレーションを組み合わせることで、農村部、郊外、および大都市の PM_{2.5} に対する農業残渣焼却の影響を評価しました。

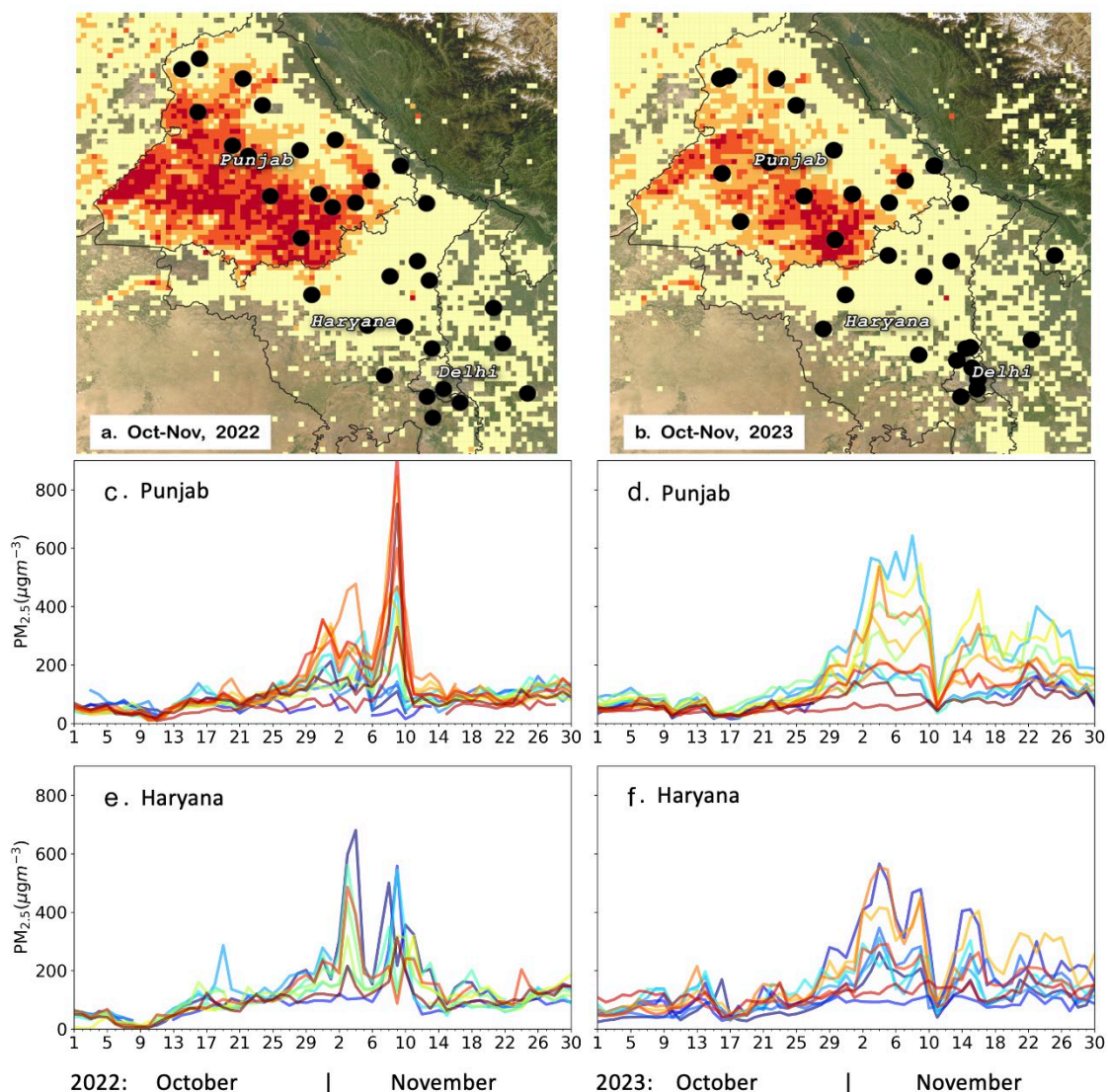


図 1. 上段の図は、NASA の人工衛星 SNPP および NOAA20 衛星に搭載された可視近赤外放射計群 (VIIRS)による緯度経度 0.05×0.05 度 (約 5 km) の解像度の火災検知数分布を示し、背景に地表面の可視画像を示しています。図 a, b の黒い丸の地点には約 30 台の計測器 CUPI-G を設置しています。コメなど夏作物が収穫された直後の 10 月下旬から 11 月にかけて、インド北西部で衛星から多数の農地火災が検出されました(a:2022 年, b:2023 年)。下段の図は、パンジャブ州(c, d)、ハリヤーナー州(e, f)に設置したすべての CUPI-G から得られた $PM_{2.5}$ 濃度の時間変化です。観測結果から、パンジャブ州(c, d)とハリヤーナー州(e, f)の農村部の $PM_{2.5}$ による大気汚染は、2022 年(左列)と 2023 年(右列)のどちらも、10 月から 11 月にかけての農業残渣焼却によって悪化することがわかりました。

【主な研究成果】

1. 火災検知数の減少と $PM_{2.5}$ 濃度の変動

観測結果から、2015 年から 2023 年の間にパンジャブ州とハリヤーナー州で衛星による火災検知数が大幅に減少したにもかかわらず(本論文 Figure 1 参照)、デリーの $\text{PM}_{2.5}$ 濃度は高いままであることが明らかになりました。 $\text{PM}_{2.5}$ の濃度は、2022 年と 2023 年のどちらも、地点ごと日ごとに大きな変動を示しました(図 1)。両年ともパンジャブ州南西部で非常に多くの火災が検知されており、デリーでも日平均 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度が $300\mu\text{g m}^{-3}$ を超えましたが、2022 年と 2023 年の農業残渣焼却のピーク期間(11 月 1–12 日)では気象条件が著しく異なっていました。

2. 気象条件の影響

2022 年 11 月には強い北西の風が吹き、パンジャブ州とハリヤーナー州からデリー首都圏への汚染された空気塊の移動が 2 度起きました。しかし、2023 年 11 月には南西の弱い風($<1\text{ m s}^{-1}$)のもとで空気の動きが限定的になり、デリー首都圏で生じた汚染物質が滞留しました(図 2)。

3. 汚染物質の主な発生源

今回の分析では、デリー首都圏と周辺地域の大気汚染対策を所管する大気質管理局(Commission of air quality management; CAQM)が発令する車両の走行規制や在宅勤務の移行などの段階的な各種規制「行動計画」(Graded Response Action Plan; GRAP)の適用開始(解除)と $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の上昇(減少)が対応することからも推測できるように(図 2)、デリー首都圏で蓄積し滞留する $\text{PM}_{2.5}$ は主にデリー地域内部の起源であることを示しました。

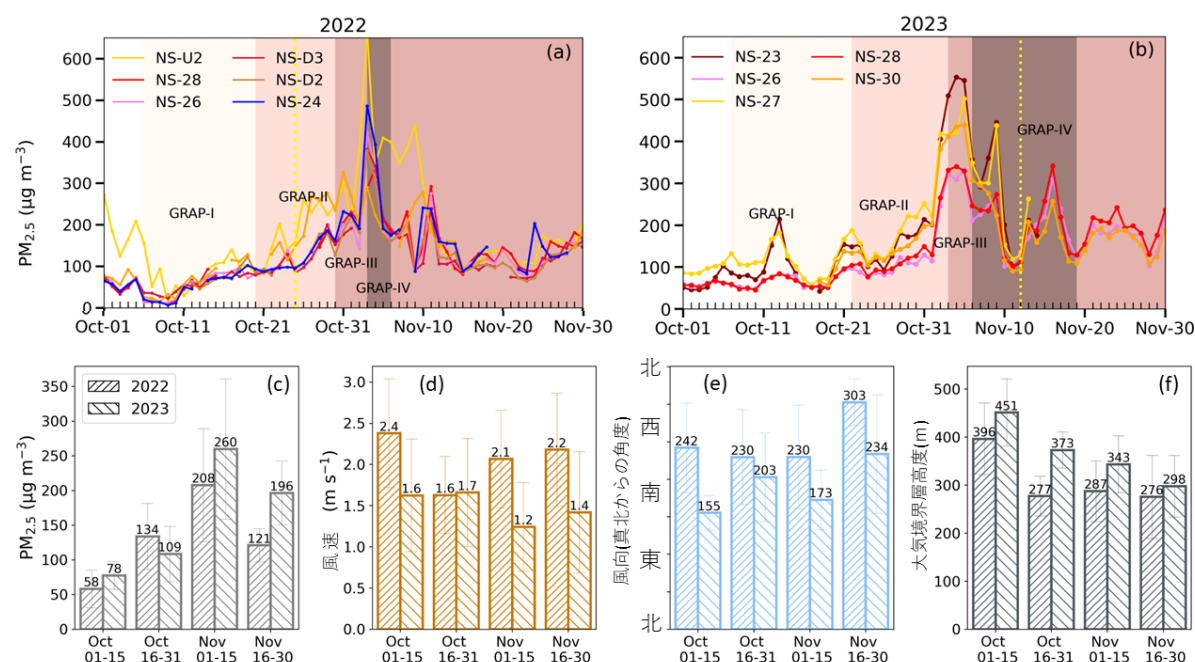


図 2. 大都市デリーとその周辺地域における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度は、主にデリー地域内での排出が支配的で、デリー首都圏の発生源に焦点を当てた GRAP 規制の実施によってコントロールされて

いることがわかりました(上段)。10～11月の15日平均のPM_{2.5}濃度(c)、風速(d)、風向(e)と境界層高度(f)による大気混合を見ると、広域の気象条件および年ごとの局地的な気象の影響も強く受けることがわかりました(下段)。

4. デリー首都圏の大気汚染への稲わら焼きの影響

この研究では、準リアルタイムでの観測データの処理とモデルを用いた解析も行いました。その結果、北へ向かう風はヒマラヤ山脈によって遮られるため(図 1a、c を参照)、新たに排出された、あるいは光化学的に生成された PM_{2.5} は、北以外の3方向に不規則に輸送され、大気境界層で鉛直方向に拡散することがわかりました(図 3)。このため、パンジャブ州とハリヤーナー州の農業残渣焼却は、コメ収穫のピーク期間(10月～11月)であっても、デリー首都圏の大気質を悪化させる決定的な原因になるとは限らないと結論づけられました。

また、Aakash プロジェクトはこれらのデータと解析結果の図表を、2023 年以降、ウェブサイト(<https://aakash-rihn.org/en/campaign2023-week13/> など)から10月下旬から11月にかけてオンラインで公表し、毎日更新しました。

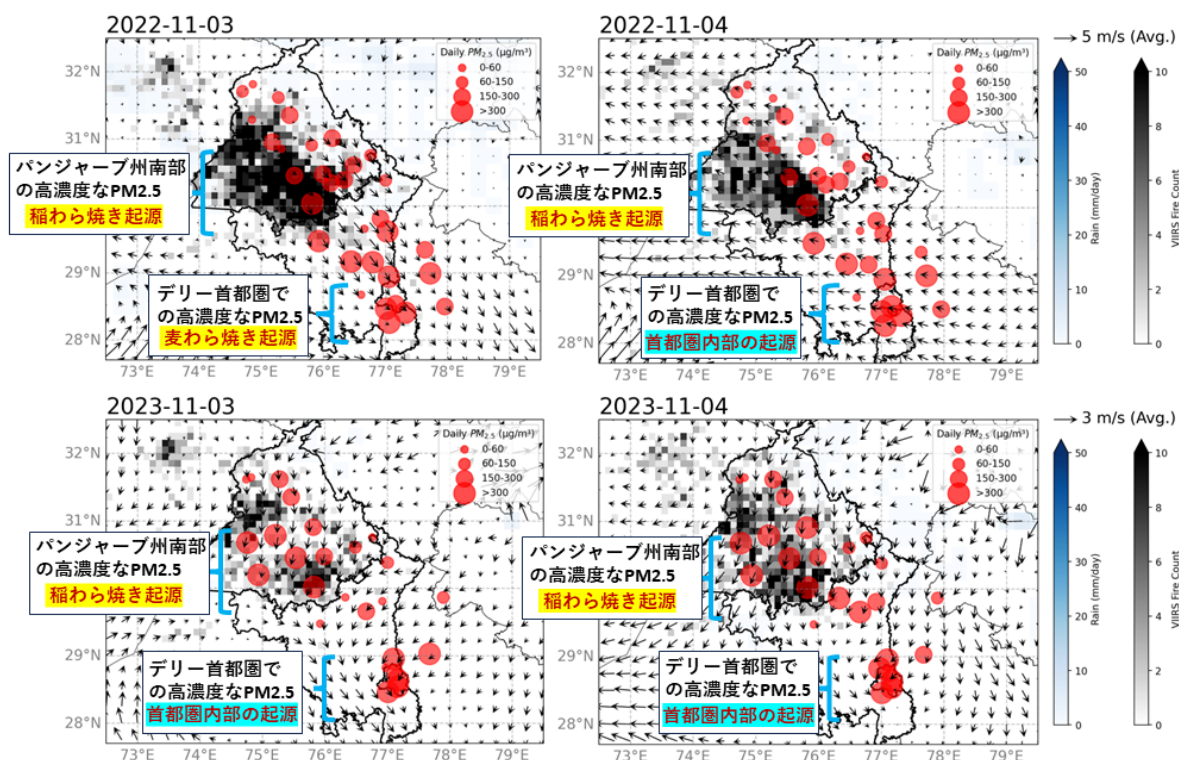


図 3. Aakash/CUPI-G の地上観測ネットワークにより、パンジャブ州からデリーまでの空気の動きを可視化した図です。デリー首都圏で高濃度の PM_{2.5} が観測された 4 日間(2022 年;上段、2023 年;下段)を示しています。農業残渣焼却によってパンジャブ州南部の日平均 PM_{2.5} 濃度(赤い丸)は常に上昇しますが、その直接的な影響がデリー首都圏に到達することはめっ

たにありません。地上観測装置である CUPI-G は、上空から観測する衛星が農地火災を検出できない煙霧や曇りの条件下でも、PM_{2.5}を継続的に観測できます。

【研究の意義】

Aakash プロジェクトのリーダーであるプラビル・パトラ教授（地球研/海洋研究開発機構 (JAMSTEC)）は「パンジャブ州、ハリヤーナー州、デリー首都圏をカバーする約 30 カ所での観測データを、広い範囲での PM_{2.5} 濃度分布や時間変化を高濃度イベントに着目して解析することで、デリーの PM_{2.5} 変動からインド北西部の稲わら焼きの寄与を、週～月平均レベルで分離することができました」と述べています。プロジェクトが収集した複数年(2022-2023 年、2024 年分も解析中)の大気汚染物質の観測データを利用して、観測結果の確認と仮説の検証ができるようになりました(図 3)。

また、筆頭著者であるプーナム・マンガラージ博士は「有害で長く続く大気汚染と戦うために的を絞った緩和戦略を実施するためには、発生源(パンジャブ州)、流入域(デリー首都圏)、および中間地域(ハリヤーナー州)のすべてで大気汚染を継続的に監視することが重要であることを、私たちの研究は強く示唆しています」と強調しました。

名古屋大学宇宙地球環境研究所の松見豊名誉教授は「多数の小型で低コストの機器で形成した観測ネットワークにより、広範な領域の大気汚染物質の動向を測定しています。これらの観測結果は、種々のモデルシミュレーションによる分析に適しており、大気汚染の発生プロセスと削減対策を特定する重要な手段となり得ます。このプロジェクトの名古屋大学のメンバーとパナソニック株式会社と共同研究で高感度な小型 PM_{2.5} センサを開発し、使用しました。小型大気環境計測器の分野でも装置開発とその活用研究で日本が重要な役割を果たすことを目指しています。」と述べています。

共同研究の参考資料

名古屋大学とパナソニックの共同研究の論文：Nakayama, T., Matsumi, Y., Kawahito, K. & Watabe, Y. Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor. *Aerosol Sci. Technol.* 52, 2–12 (2018).

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2017.1375078>

【まとめ】

今回の成果は、デリー首都圏の大気汚染対策を科学的根拠に基づいて再評価する重要な知見を提供しました。また、農業残渣焼却がデリーの大気汚染に与える影響は限定的である可能性を示唆しており、適切な緩和策実施の必要性を提案しています。

この研究は、人間文化研究機構総合地球環境学研究所の Aakash プロジェクト（プロジェクト 14200133 号）の一環として実施されました。2022-23 年の集中的な広域観測キャンペーンは、インドの Centers for International Projects Trust (CIPT) の支援を受けて実施されました。

PM_{2.5} の観測データは、オープンデータ共有ポリシーに基づき、地球研・Aakash プロジェクトのホームページ(<https://aakash-rihn.org/en/data-set/>)から公開されています。

【注釈】

*Aakash プロジェクト『大気浄化、公衆衛生および持続可能な農業を目指す学際研究：北インドの藁焼きの事例』では、観測データとモデルシミュレーションを用いて、パンジャブ州のわら焼きとデリーの深刻な大気汚染との関連を科学的に検証します。その結果をもとに、文化的背景や、大気汚染が及ぼす健康への悪影響に対する住民意識も配慮しながら、大気浄化・公衆衛生の改善・持続可能な農業への転換に向けた人々の行動変容を推進していきます。

**PM_{2.5}: 直径 2.5μm 未満の粒子状物質(通称 PM_{2.5})。これらの微粒子は、呼吸によって人間の肺の深部に到達し、呼吸器に沈着するなどして健康被害を及ぼす可能性があります。物質の燃焼から発生する微粒子は、通常、鉱物ダストや海塩粒子などの自然起源エアロゾルよりも人体に与える悪影響が大きいことが指摘されています。

【論文情報】

タイトル: Weak coupling of observed surface PM_{2.5} in Delhi-NCR with rice crop residue burning in Punjab and Haryana

掲載誌: npj Climate and Atmospheric Science

著者: Poonam Mangaraj, Yutaka Matsumi, Tomoki Nakayama, Akash Biswal, Kazuyo Yamaji, Hikaru Araki, Natsuko Yasutomi, Masayuki Takigawa, Prabir K. Patra, Sachiko Hayashida, Akanksha Sharma, A. P. Dimri, Surendra K. Dhaka, Manpreet S. Bhatti, Mizuo Kajino, Sahil Mor, Ravindra Khaiwal, Sanjeev Bhardwaj, Vimal J. Vazhathara, Ravi K. Kunchala, Tuhin K. Mandal, Prakhar Misra, Tanbir Singh, Kamal Vatta, and Suman Mor

論文公開日: 2025 年 1 月 15 日

URL: <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00901-8>