

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04407

研究課題名（和文）機械学習アルゴリズムを用いた微粒子越境輸送イベントの判定および予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of determination and prediction method of long-range transport event of atmospheric aerosol particles using machine learning algorithm

研究代表者

小林 拓 (Kobayashi, Hiroshi)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号：20313786

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により、越境輸送微粒子のイベントを判定および予測するために偏光OPCによるネットワークに新たな山岳域の観測地点を加え観測を継続した。組成別濃度推定手法の改良を行い、鉱物粒子と人為起源の二次生成粒子に多く含まれる潮解性粒子の粒径および質量濃度の推定精度が大幅に向上した。ディープラーニングを活用し、越境輸送イベントを判定できるモデルを構築した。予測に関しては、現状では十分に成果が得ることが出来ていないため、今後引き続きモデルの検討を実施する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境基準に微小粒子状物質が加えられたことや報道により北京での高濃度の様子が伝えられることにより、広く社会に微粒子の健康影響が意識されるようになってきている。このような状況で微粒子に関する観測ネットワークを維持し、そのデータを公開するだけでなく濃度予測にも活用を試みたことが社会的な意義が高い。また、特許を取得しているオリジナルの測定器による観測ネットワークは世界で唯一であり、学術的にも貴重なデータである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we continued to add new observation site at the foot of Mt. Fuji to the polarization OPC observation network to determine and predict events of long-range transported particles. We have improved the method for estimating the concentration by composition, and the accuracy of the estimation of the particle size and mass concentration of mineral particles and deliquescent particles, which are often included in anthropogenic secondary particles, has been greatly improved. A model that can determine long-range transport events has been developed using deep learning. As for the prediction, we have not been able to obtain sufficient results at present, so we will continue to improve the model in the future.

研究分野：大気科学

キーワード：越境輸送微粒子 偏光光散乱式粒子計測器 ディープラーニング 鉱物粒子 大気汚染粒子 観測ネットワーク 畳み込みニューラルネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

日本は偏西風帯に位置し、人間活動に伴って排出された人為起源の微粒子や砂漠で舞い上げられた黄砂粒子などの微粒子が、大陸から飛来している。微粒子は、太陽放射を散乱・吸収し地球の放射収支に影響を与え、気候変動を引き起こす (IPCC レポートなど)。また、微粒子のうち粒径が $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子は $\text{PM}_{2.5}$ と呼ばれ、人体や植物に影響を与えると指摘されており、平成 21 年に環境基準が設けられた。自由対流圏とよばれる高度 1km 以上の上空に巻き上げられた微粒子は、日本、北太平洋、さらに北米大陸にまで越境輸送され、半球規模で環境に影響を与える可能性が指摘されており (Uno et al., 2009)、その量や組成に関する動態の解明が求められている。

微粒子の観測体制として、各自治体に $\text{PM}_{2.5}$ や SPM の測定器が設置され、全国的な観測網が構築されている。環境基準を達成するため、発生源対策が必要となるが、日本国内で排出された微粒子だけではなく、国外から越境輸送されてくる微粒子の負荷量を把握しなければ、適切な対策を講じることができない。越境輸送される微粒子の量を推定する手法として、気象モデルに微粒子の発生、輸送、除去過程を組み込んだ物質輸送モデルが広く使用されている。しかし、天気予報の精度に限界があるように気象モデルそのものに不確かさが存在し、さらには、微粒子の素過程をモデル上で表現することにも不確かさが残り、物質輸送モデルの精度向上自体が研究の目的となっている現状である。一方で、多地点に展開された測定器によって構成された観測ネットワークが存在する。これは先程の物質輸送モデルの検証・改良に使用される。微粒子関連では、環境省のライダーネットワークが広く活用されている。このネットワークの web では東アジア各地に設置されたライダーの観測結果をリアルタイムにみることができる。これら多地点で観測結果の時系列変化を眺めるだけで、気象の知識がなくとも、空間的に広範囲に広がる微粒子の輸送イベントを感覚的に捉えることができる。図 1 のように北京、ソウル、甲府の 3 地点で微粒子濃度の時系列データが得られたとする。甲府では濃度のピークが 2 箇所現れているが、2 番目のピークは北京、ソウルから輸送されてきた微粒子による濃度上昇ということを直感的に予測できる。このように我々は、ピークの形状やその位置、互いの時間的なずれなどから無意識に解析を行っている。近年、このような人間の脳の仕組みをコンピュータ上で再現し、学習させる機械学習アルゴリズムの発展が著しい。また、機械学習アルゴリズムを大気環境の分野に応用する試みも始まっている。

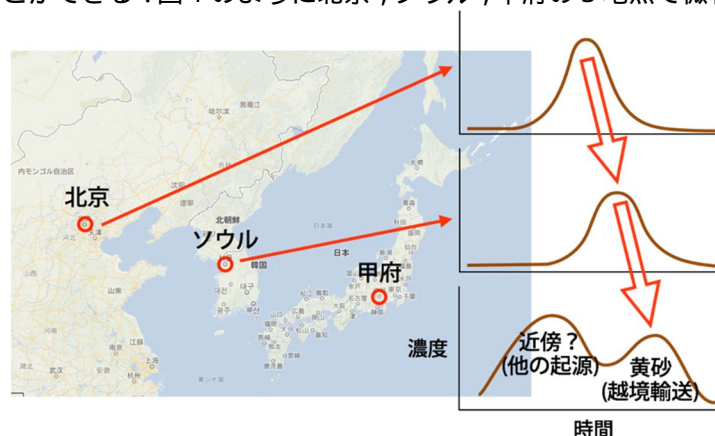


図 1 多地点観測データから時空間的に広範囲な輸送イベントを判定する概念図

2. 研究の目的

環境基準が質量濃度で定義されているため、多種多様な微粒子が存在し、微粒子による気候影響や環境影響は、その組成や粒径に強く依存するにも関わらず、各都道府県が展開する測定局は、それらを一括して質量濃度として測定している。そのため、微粒子の粒径別大気濃度を測定するとともに、微粒子の偏光特性の違いを利用して微粒子の組成に関する情報も同時に取得する偏光を利用した光散乱式粒子数計測器 (以下偏光 OPC と呼ぶ) の開発を進めてきた (Kobayashi et al., 2014) (特許第 5717136 号)。特に黄砂 (鉱物粒子) を他の微粒子と分離し、連続的にかつ定量的に測定できる装置は他になく、黄砂現象の理解に多大な貢献を果たすと期待される。

東アジア域における微粒子の動態を明らかにするために、偏光 OPC による観測ネットワーク POPCARN (POPC Aerosol monitoRing Network) を構築している。インターネットに常時接続可能な観測地点のデータは、即時に本学のサーバーに転送・処理され、web システムで公開している (<http://popcarn.yamanashi.ac.jp/>)。POPCARN の観測データは、微粒子の輸送モデルのデータ同化や検証に非常に有用である。さらに本研究では、この観測データに機械学習アルゴリズムを応用し、社会的に関心の高い微粒子の「天気予報」の予報精度の向上を試みるものである。微粒子天気予報は、研究者だけではなく、一般市民にも有用な情報源となりうると期待される。そこで本研究では、機械学習アルゴリズムを用いて、偏光 OPC のデータを対象とし微粒子の越境輸送イベントの判定・予測を行う。

3. 研究の方法

(1) 富士山麓における偏光 OPC による通年観測，偏光 OPC の維持管理

標高 1300m に位置する富士山御殿場登山口太郎坊において観測を実施した。自由対流圏に舞い上がった微粒子は、容易に長距離輸送されるため、越境輸送を把握する上で、測定が求められる。太郎坊は、富士山頂より標高が低く地上付近の気塊の影響を受けやすいが、夜間や冬季といった気象条件によっては、自由対流圏の大気を採取できる可能性がある。通年にわたり車両でのアクセスが可能であり、測定システムの保守点検が容易である。この拠点においても、偏光 OPC のデータ転送等は、携帯電話網を介したインターネットを経由して行った。多地点の観測データを使用するには、各地点に設置された偏光 OPC の器差を最小に抑える必要がある。厳しい環境で連続運用しているためにポンプなどの劣化が進むため、ポンプやレーザーの交換作業を実施した。

(2) 複素屈折率を考慮した粒径推定

校正に使用した標準粒子と測定した粒子状物質の複素屈折率が異なる場合、粒径やこの値をもとに算出した質量の推定値に大きな誤差を生むことが指摘されている。偏光 OPC は、形状に関する情報も得られるため、簡易的に鉱物粒子と潮解性粒子とに分別することができる。そこで、各組成の複素屈折率を考慮し散乱理論により粒径推定に使用するデータベースを再構築し、粒径区分を細分化することで粒径分布の推定や質量濃度の推定精度も改良した。

(3) 自由対流圏中の鉱物粒子の動態解明

自由対流圏中の大気を直接採取可能な木曾駒ヶ岳千畳敷に設置した偏光 OPC のデータを用い、海洋生態系への微量金属の供給源として重要な鉱物粒子(Jickells et al., 2005)の動態について解析した。

(4) 機械学習アルゴリズムによる越境輸送イベント判定・予測システムの構築

機械学習アルゴリズム開発のために、教師データ、および検証データを作成した。入力データは、基本的には各地の偏光 OPC で測定された微粒子の各成分濃度の時系列データである。出力データは、濃度予測に関しては現在値となる。越境輸送イベントの判定では、その濃度の変動が越境輸送に起因するのかが判定し、スコアをつけてデータとした。判定作業は、偏光 OPC だけではなく、環境省のライダーやそらまめくん、各機関の黄砂・大気汚染物質濃度のエアロゾル輸送モデルによる予測などから総合的に判断した。

4. 研究成果

(1) 富士山麓における偏光 OPC による通年観測，偏光 OPC の維持管理

長野県駒ヶ根市の木曾駒ヶ岳千畳敷に設置された偏光 OPC の信号処理基板が故障したため、測定が停止していた。この地点は自由対流圏中の大気を通年観測でき、重要度・優先度が高いため、新規に導入した信号処理基盤と交換し、2019年2月から測定を再開した。故障していた信号処理基盤を修理し、新規に導入した偏光 OPC に組み込み富士山麓での観測を開始する予定であったが、2020年の年明けから新型コロナウイルス感染症が拡大し始め、太郎坊への偏光 OPC の設置が2020年の7月にずれ込んでしまった。韓国ソウル市のソウル国立大学に設置した偏光 OPC は、2020年の夏頃に観測小屋の雨漏れ、配管の抜けがあり内部の経路が汚染され、データが取得できなくなった。しかし、コロナ禍で出張できず、観測は停止したままである。福岡県福岡市の福岡大学に設置した偏光 OPC は順調に測定を続けている。福岡県春日市の九州大学応用力学研究所に設置した偏光 OPC に関しては、保守を依頼していた教員が2020年度で定年退職されるため、2020年8月に観測を終了した。大阪府東大阪市の近畿大学に設置した偏光 OPC は、2019年の夏頃に不調となり観測を停止した。その後、予定を調整しているうちにコロナ禍となり、機器の回収ができず観測は停止したままである。山梨県甲府市の山梨大学ではセンサに光電子増倍管を使用した高感度仕様の偏光 OPC により観測を実施してきた。2019年に通常の偏光 OPC と交換し、計測を継続している。

(2) 複素屈折率を考慮した粒径推定

偏光 OPC の取得した散乱光のパルス高から粒径を決定する際の粒径区分を従来の5区分から19区分に細分化するとともに、エアロゾルの組成毎に人為起源粒子（潮解性微小粒子）、鉱物粒子、そして海塩粒子（潮解性粗大粒子）の3つの成分の複素屈折率をもとに Mie 散乱理論から応答関数を求め、各粒径区分のしきい値を新たに設定した。2020年9月に各組成の質量濃度および粒径分布を導出するアルゴリズムを偏光 OPC 観測ネットワークのデータ処理システムに組み込んだ。それ以前のデータに対し、全パルスデータを記録したファイルから再処理できるプログラム群を作成した。しかし、パルスデータのファイルは容量が大きく、ネットワークでデータ

転送することは困難であるため、保守点検の際に持参したポータブルのハードディスクにコピーし、山梨大学へ持ち帰る必要がある。しかし、コロナ禍で出張できず、2019 以降のパルスデータの回収ができていないため再処理は進んでいない。

(3) 自由対流圏中の鉱物粒子の動態解明

木曽駒ヶ岳千畳敷での観測では観測場が雲に覆われた際、雲粒を吸引してしまうため、エアロゾルの質量濃度を過大評価してしまう。そこで、雲粒測定データのスクリーニング方法を検討した。雲粒は一般にエアロゾルより粒径が大きいので、通常測定時よりも粒径分布モード径が粗大側にシフトする。最小粒径区分の個数濃度に対する各粒径区分の割合は、相対湿度が高いときに高い傾向を示した。よって個数濃度割合に閾値を設定し、それぞれの粒径区分に対して 1 つでも閾値を超えた場合に雲粒と判定した。設定した閾値は粒径区分 1~2 μm のとき 0.335, 2~5 μm のとき 0.422, 5~10 μm のとき 0.0168, 10~13 μm のとき 0.005, 13 μm ~のとき 0.00376 であった。実際に観測場が雲に覆われていたことを確認した 2019 年 2 月 6 日のデータを本条件により雲判定されていることを確認した。

自由対流圏の大気を採取できる木曽駒ヶ岳千畳敷での観測結果から、鉱物粒子が春期に高濃度になる傾向がみられた。一般的な黄砂飛来卓越期間と一致しており、千畳敷でも黄砂の影響を受けていることが確認された。千畳敷において冬期を除き、鉱物粒子は日中濃度が上昇する傾向が見られ、観測地点付近の局所的な土壌粒子の巻き上げによる濃度の上昇と考えられた。そのため、これらの影響を除くため積雪期以外は夜間 (21 時~8 時) データのみを使用し、期間全体の平均濃度を算出したところ $5.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ となった (図 2)。これはライダー観測より推定した濃度である $1.9\sim 25\mu\text{g}/\text{m}^3$ (平均: $18\mu\text{g}/\text{m}^3$) と同程度であった (Iwasaka et al., 1988)。

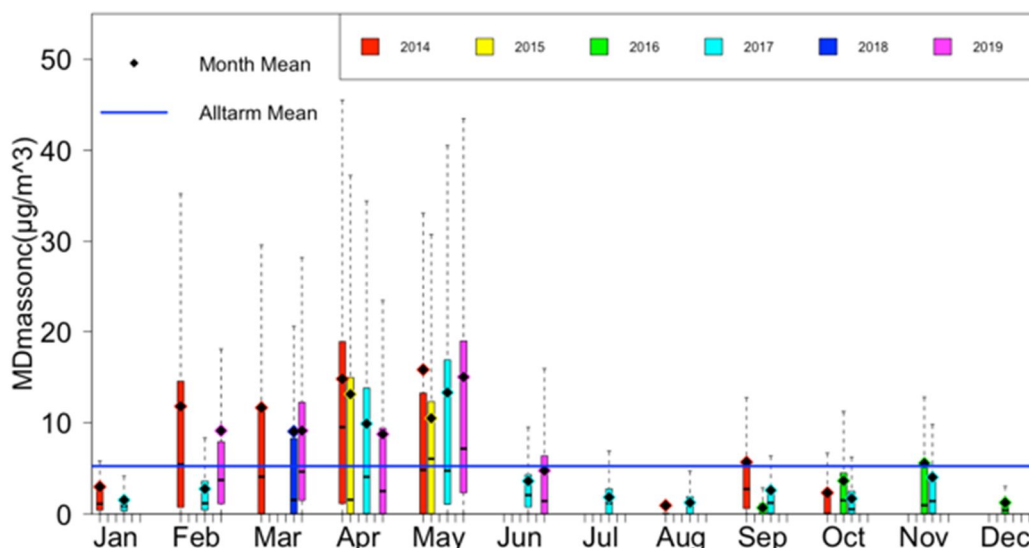


図 2 月別鉱物粒子質量濃度平均値と期間全体の平均 (夜間データのみ)

(4) 機械学習アルゴリズムによる越境輸送イベント判定・予測システムの構築

機械学習アルゴリズムの開発用データとして、2016 年 3 月 7 日から 2017 年 5 月 31 日までの甲府における偏光 OPC 測定結果から、学習用データセット 88760 組、テスト用データセット 40000 組を用意し、回帰モデルとして Lasso を使用した。濃度予測に関しては、甲府における鉱物粒子の 6 時間後の予測で濃度の増減の傾向がよく一致するような結果を得た。しかし、突発的な濃度増加を予測しきれないことから、時間スケールが 5 分よりある程度長い現象でなければ、予測が困難であった。また、予測時間を 12 時間後にした場合には、予測精度が低下したため、現段階では 12 時間後の予測は難しいことがわかった。

越境イベントの抽出に関しては、畳み込みニューラルネットワークを用いて機械学習を行った。学習用データセットとして、福岡市、東大阪市、そして甲府市のデータを使用した。二日間の 3 地点の濃度変動を一つのデータセットとし、20 万組を用意した。評価用データセットは約 8 万組用意して学習結果を評価した。その結果、95%の精度で判定できることを確認した。

本研究により、越境輸送微粒子のイベントを判定および予測するために偏光 OPC によるネットワークに新たな観測地点を加え観測を継続した。組成別濃度推定手法の改良を行い、鉱物粒子と人為起源の二次生成粒子に多く含まれる潮解性粒子の粒径および質量濃度の推定精度が大幅に向上した。ディープラーニングを活用し、越境輸送イベントを判定できるモデルを構築した。予測に関しては、現状では十分に成果を得ることが出来ていないため、今後引き続きモデルの検

討を実施する予定である。

参考文献

- Iwasaka, Y., Yamato, M., Imasu, R., & Ono, A. (1988). Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus, Ser. B*, *40*, 494–503.
- Jickells, T. D., An, Z. S., Andersen, K. K., Baker, A. R., Bergametti, G., Brooks, N., et al. (2005). Global Iron Connections Between Desert Dust, Ocean Biogeochemistry, and Climate. *Science*, *308*(5718), 67–71. <https://doi.org/10.1126/science.1105959>
- Kobayashi, H., Hayashi, M., Shiraishi, K., Nakura, Y., Enomoto, T., Miura, K., et al. (2014). Development of a polarization optical particle counter capable of aerosol type classification. *Atmospheric Environment*, *97*, 486–492. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.006>
- Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Uematsu, M., et al. (2009). Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geosci*, *2*(8), 557–560. <https://doi.org/10.1038/ngeo583>
- Iwasaka, Y., Yamato, M., Imasu, R., & Ono, A. (1988). Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles. *Tellus, Ser. B*, *40*, 494–503.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Pan, X., Ge, B., Wang, Z., Tian, Y., Liu, H., Wei, L., Yue, S., Uno, I., Kobayashi, H., Nishizawa, T., Shimizu, A., Fu, P., Wang, Z.	4. 巻 19
2. 論文標題 Synergistic effect of water-soluble species and relative humidity on morphological changes of aerosol particles in Beijing mega-city during severe pollution episodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 219-232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-19-219-2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Yu Tian, Xiaole Pan, Tomoaki Nishizawa, Hiroshi Kobayashi, Itsushi Uno, Xiquan Wang, Atsushi Shimizu, and Zifa Wang	4. 巻 18
2. 論文標題 Variability of depolarization of aerosol particles in the megacity of Beijing: implications for the interaction between anthropogenic pollutants and mineral dust particles	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 18203-18217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/acp-18-18203-2018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林 拓
2. 発表標題 山岳域における偏光OPCによる大気エアロゾル観測
3. 学会等名 東京理科大学総合研究院大気科学研究部門第5回成果報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井雄太
2. 発表標題 衛星データと山岳観測拠点での連続測定を組み合わせた自由対流圏中黄砂の動態解析
3. 学会等名 第5回山岳科学学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖 由裕, 石井雄太, 小林 拓, 白石浩一, 林 政彦, 鷓野 伊津志, 西澤智明, 清水 厚, 杉本伸夫
2. 発表標題 偏光光散乱式粒子計測器を用いた組成別エアロゾル質量濃度推定法の改良
3. 学会等名 第35回エアロゾル科学・技術研究討論会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

POPCARN (POPC Aerosol monitorRing Network)
<http://popcarn.yamanashi.ac.jp/>

6. 研究組織			
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	ソウル国立大学			
中国	中国科学院大気物理研究所			