

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01976

研究課題名（和文）極東域森林火災によるPM2.5時空間変動解明と予測手法開発及び人間圏への影響評価

研究課題名（英文）Elucidation and prediction of spatiotemporal variations of PM2.5 due to wildfires over the Far Eastern region, and the assessment of PM2.5 impact on human activities

研究代表者

安成 哲平（Yasunari, Teppei）

北海道大学・北極域研究センター・准教授

研究者番号：70506782

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：シベリア森林火災による大気汚染の複合的な知見を得るため、我々の研究グループで開発したPM2.5測定装置で大気質観測を行い、全球データ解析（NASAのMERRA-2再解析データの分析やデータ利用による機械学習予測、日本の気候モデルの数値実験結果のデータ分析）から、森林火災の予測可能性、モデルの観測データ再現性・改善可能性、大気汚染の健康・気候・経済までの包括的影響の議論を行った。ロシアでの観測・地域調査を予定したが、新型コロナ及びウクライナ侵攻で、ロシア国内の観測・地域調査は完全に不可能となったものの、グリーンランド北西部での代替観測が成功し、全球データ解析から上記の複合的な知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

温暖化が進行する中、近年森林火災の懸念が増える世の中で、シベリア森林火災の大気汚染による複合的な知見を観測から全球データ解析（モデリングを含む）を通じて得ることで、今後のシベリア森林火災による大気汚染の影響緩和やその対策について、検討を行うための基礎データを本研究課題の成果は提供することができる。残念ながら、ロシア現地でのPM2.5の観測と地域調査は新型コロナ蔓延とロシアによるウクライナ侵攻で不可能となったが、グリーンランドでの代替PM2.5観測による野外廃棄物焼却の影響や、気候モデルを使ったシベリア森林火災による大気汚染の包括的影響の成果など十分上記目的に役立てる基礎データを取得できた。

研究成果の概要（英文）：To obtain complex knowledge of air pollution caused by Siberian wildfires, we conducted air quality observations using our developed PM2.5 measuring system and analyzed global gridded data (analyses of NASA's MERRA-2 reanalysis data, machine learning using the data, and analyses of global numerical sensitivity experiments by a Japanese climate model). We discussed the predictability of Siberian wildfires and the reproducibility and improvement potentials of the modeled data compared to observational data. Furthermore, we discussed the comprehensive impacts of air pollution on health, climate, and the economy due to the increasing Siberian wildfire intensities. PM2.5 measurements and a regional survey in Russia were also planned, but the COVID-19 pandemic and the Russian invasion of Ukraine made conducting them in Russia impossible. Fortunately, the above research targets were well investigated through alternative PM2.5 observations in Northwestern Greenland and global data analyses.

研究分野：環境科学、地球科学

キーワード：森林火災 大気汚染 PM2.5 シベリア グリーンランド 北極 地域研究 気候モデル

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

森林火災は世界中で毎年のように見られるが、大気汚染の観点からシベリア地域においては、現地観測による $PM_{2.5}$ (大気汚染) の研究がなかった。大気汚染の関連研究事例としては、例えば、研究代表者らの先行研究で、NASA の全球モデルと衛星データを合わせた MERRA-2 データ (データ同化) で、大規模森林火災時に北海道まで輸送された高濃度 $PM_{2.5}$ 濃度 (越境大気汚染) の時空間分布を見積もったものがあった (Yasunari et al., 2018)。このことは、森林火災時には、火災地域 (つまり、極東シベリア地域) やその風下地域では、「定期的に森林火災による高濃度大気汚染に暴露されているのではないかと」、と危機感を与えるものであった。しかし、上記の様な先行研究の解析ができて、残念ながら、「現地観測」の $PM_{2.5}$ がいないため、森林火災時の実際の現地 $PM_{2.5}$ 濃度の検証や、モデル予報・データ解析に「現地観測」データを考慮・反映が全くできていない状況であった。

2. 研究の目的

そこで本研究課題では、火災地域であるシベリア域の現地 $PM_{2.5}$ 測定やこの地域を対象としたデータ解析・モデリング研究を通じて、以下のことを明らかにすることを研究目的として設定した：(a) 森林火災発生域の人々が火災からの大気汚染 ($PM_{2.5}$) に、実際どれほどの濃度で、どの程度の頻度、どのくらいの期間暴露されているのか？；(b) 現地観測の考慮によって、既存の $PM_{2.5}$ 濃度解析データセットの値はどれほど改善可能なのか？；(c) 現在の数値モデルは、火災による現地観測の $PM_{2.5}$ 変動をどれくらい説明できるのか？；(d) 森林火災発生と現地観測 $PM_{2.5}$ の時空間変動は、各地域のどの気象・気候・環境要素の組み合わせで予測可能なのか？；(e) 現地住民は、森林火災と大気汚染について、どの程度知識があり、現在どの様な対策をしており、また科学的知見が増えればどういった対策改善ができるのか？

3. 研究の方法

本研究では、極寒の寒冷地でも通年で測定可能な寒冷地仕様の $PM_{2.5}$ 測定装置を開発し (内部を自動で温度を保持する自動温度調節断熱ボックスを作製し、 $PM_{2.5}$ センサー部分は、Nakayama et al. (2018) を元にしたものを別途用意して装着・採用)、この装置を使用する。ただし、この装置自体の検証なども行う必要があるため、それも同時に行いつつ、現地に設置をする。ロシア現地での $PM_{2.5}$ の観測には、寒冷地仕様 $PM_{2.5}$ 測定装置を複数台設置する (ヤクーツクに 6 台；ハバロフスクに 2 台)。全球グリッドデータ (NASA の再解析データ MERRA-2 や日本の気候モデルの全球数値シミュレーション結果等) を使って、 $PM_{2.5}$ の観測データとの比較や気候や大気質などへの影響を議論する。また、MERRA-2 や衛星データ等の各種変数を使用して機械学習による森林火災予測や、森林火災の $PM_{2.5}$ と気候の関係なども詳細に調べる。現地地域調査においては、現地住民との協働体制の構築、森林火災要因及びその大気汚染に関する社会的影響に関する調査手法の構築、地域調査 (アンケートやインタビュー等) を実施する。

(想定外の事象発生による研究地域及び研究対象のやむを得ない変更)

2019 年度より現地ロシア (ハバロフスク及びヤクーツク) へ $PM_{2.5}$ 測定装置の設置を準備し、現地関係者とのやりとりと調整を行っていた矢先に、新型コロナウイルスの蔓延により現地の渡航制限が起こってしまった。このことにより、現地の $PM_{2.5}$ 測定や現地での地域調査などが延期される事となった。この間もオンラインでの現地とのやりとりや、データ解析やモデリング、センサー開発 (下記参照) と検証などで行える研究を継続した。その後、コロナ禍の様子を見て、現地ロシアへの測器の設置や調査などに向けて準備を継続し、もう少しで現地調査再開や $PM_{2.5}$ 測定装置が輸送できるという時に、2022 年 2 月にロシアによるウクライナ侵攻が開始され、現地ロシアでの $PM_{2.5}$ 観測及び現地調査は完全に不可能な状況となってしまった。そこで致し方なく、 $PM_{2.5}$ の現地観測をロシアではなく、別の森林火災 (カナダの森林火災) の越境大気汚染の評価ができるであろう場所を検討し、グリーンランド北西部カナックで $PM_{2.5}$ の測定を 2022 年の夏に行うことに急遽変更を行った。また、ロシア現地での $PM_{2.5}$ 測定が不可能となってしまったため、シベリア森林火災による越境大気汚染として影響が観測できるように、東北以北での $PM_{2.5}$ 測定装置を使った観測網を作り、越境大気汚染の議論ができるようにすることにした。さらに、その森林火災による越境大気汚染時の $PM_{2.5}$ だけでなく、大気化学ガスと合わせて議論が行えるよう、 $PM_{2.5}$ センサー (Nakayama et al., 2018) と他のガスセンサーを組み合わせた複合大気化学測定装置を作製して、研究代表者の所属する北海道大学の建物の屋上で観測を行い、近くの札幌国設局の観測データと比較検証を行うことで、研究を進めることとした。

4. 研究成果

(1) 寒冷地仕様 $PM_{2.5}$ 測定装置の検証と北陸以北への設置展開 (研究代表者：安成)

本研究課題で使用する寒冷地使用の $PM_{2.5}$ 測定装置の低温室での動作試験及び、国内 (札幌：図 1a) や国外 (アラスカ：図 1b) の現地観測 $PM_{2.5}$ データと検証を行った結果について、論文にまとめ、Yasunari et al. (2022) として、出版することができた。また、この論文に関して、北海道大学と名古屋大学から共同プレスリリースを行った。これにより、現地観測で使用する $PM_{2.5}$ 測定装置の測定精度についても科学的に検証した上で、現地観測を行う体制が整えることができた。尚、上記論文で作製したプロトタイプのと、いくつか部品などのアップデートをしたものが (アップデートについては、Yasunari et al., 2024a を参照)、(株) タナカより商用版として販売されており (自動温度制御断熱ボックスとして)、現在、誰でもこの $PM_{2.5}$ 測定装置を使用することができるようになっている (但し、 $PM_{2.5}$ センサー (Nakayama et al., 2018) については別途入手が必要)。

コロナ禍で現地ロシアへ $PM_{2.5}$ 測定装置の設置が滞ってしまったが、その間に、シベリア森林火災による越境大気汚染を評価するため北海道など東北以北 (例えば、Yasunari et al., 2018) に複数台同装置を設置展開し、いつでもシベリア森林火災による越境大気汚染を同時に評価できる観測網を整備した。装置が設置・稼働している場所は、新潟県長岡市の防災科研 (NIED) / 雪氷防災研究センター (SIRC)、青森県弘前市の弘前大学理工学部屋上、北海道は、函館市の国際水産・海洋総合研究センター、札幌市の北海道大学北極域研究センターの建物屋上、江別市の酪農学園大学中央館屋上である。これらの設置した装置から現地の PC 経由でインターネットを通じて、自動でデータをクラウドへ保存し、その後クラウド上でプログラムを走らせると、データ処理を各地点同時に行い、可視化までできるシステムを開発した。これにより、越境大気汚染による $PM_{2.5}$ の地域的な広がり度合い・到達タイミングなどが同じ装置で同時に評価できるようになった。例えば、2024 年 2 月 14 日の北日本への越境大気汚染の事例などでは、青森から北海道まで同じ越境大気汚染と見られる $PM_{2.5}$ 上昇が同時期に観測されたことが、このシステムを使ってデータ処理・図示化した

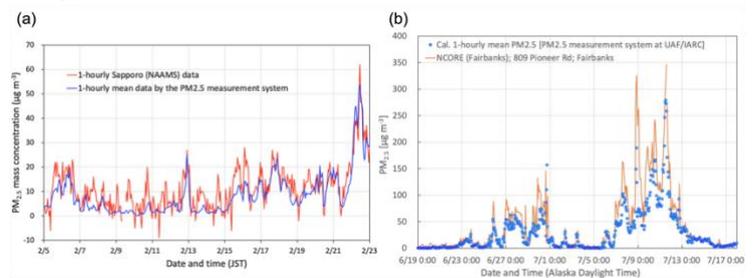


図 1. $PM_{2.5}$ 測定装置によって測定された $PM_{2.5}$ 濃度と現地観測ステーションの観測地との比較。(a) 札幌で冬季の検証。(b) 森林火災時の高濃度 $PM_{2.5}$ を米国アラスカ・フェアバンクスで検証。(図は、Yasunari et al. (2022) の Fig. 6 と Fig. 7 より)

ことで把握することができた。このシステムの開発により、今後、シベリアなどからの越境大気汚染があった際に、北陸以北で、我々のPM_{2.5}測定装置を使って、同型の測器で計測された観測データの分析と評価できる体制が整った。

(2) 複合大気化学センサーの開発と札幌での検証 (研究分担者：松見)

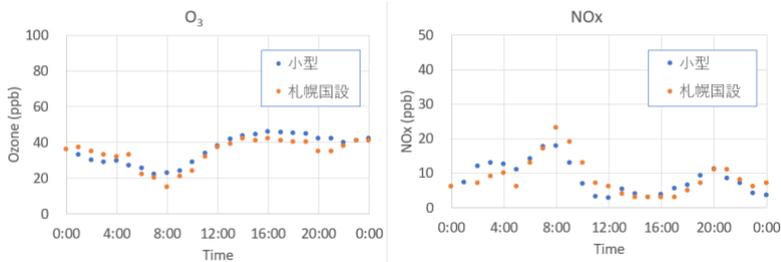


図2. 製作した小型大気計測器と「[そらまめ](#)」の札幌国設サイトの大型標準機の観測データの比較。

小型大気計測器はローコストなので大型標準測定器と比べると数多く設置することができ、得られる情報がより豊富である点に特徴がある。森林火災による大気環境や健康影響を研究する上で、PM_{2.5}だけでなく、PM_{2.5}の前駆物質や関連する大気汚染物質も同時に計測できるとPM_{2.5}の発生や移流などを含めて動態を詳しく調べられる。そこで、松見・中山とパナソニック(株)が開発したPM_{2.5}センサーだけでなく、[英国alphasense社](#)のNO、NO₂、CO、Ox(=O₃+NO₂)の安価な電気化学センサーを搭載した測定装置を製作した。そのテストを札幌で行った。屋外に設置できるように通気のあるプラスチックボックス内にセンサー等を収納した。小

型CPUでデータサンプリングし記録するとともに、インターネットにつながリアルタイムでデータが取得できるようにしている。大型の標準測定器は、通常の大気測定で使用する範囲では、メーカーが性能にある程度は責任を持ってくれる。上記の松見・中山とパナソニック(株)が開発した小型PM_{2.5}センサーも十分な精度で長期間安定して測定できることが確認できている(Nakayama et al., 2018)。しかし、電気化学センサーは標準機に比べて1/100程度の価格のローコストであるので、定量的な感度やオフセット、および干渉について使用者が自分自身で定量的に評価する必要がある。そのため、事前に使用環境に合わせて実際に自分で試験して校正しなければいけない。電気化学センサーの信号強度と実際の大気中の濃度の関係を明確にする校正を行った。札幌でのテストでは、大型標準機の測定データとして近くにある環境省の「[そらまめ](#)」の[札幌国設のサイト](#)の観測データを用いた。図2に示したのは、2022年4月15日の1日のオゾン(O₃)と窒素酸化物(NOx)の変動を見たものであるが、適切な感度とオフセット値を用いることにより、ローコストなセンサーを使用しても、これらの大気汚染物質の変動がうまく測定できることが分かった。

(3) 北極域の森林火災と西欧熱波を同時誘発させる気候(大気循環)パターンの特定 (Yasunari et al. (2021)の内容のまとめ：最初の段落) (研究代表者：安成)

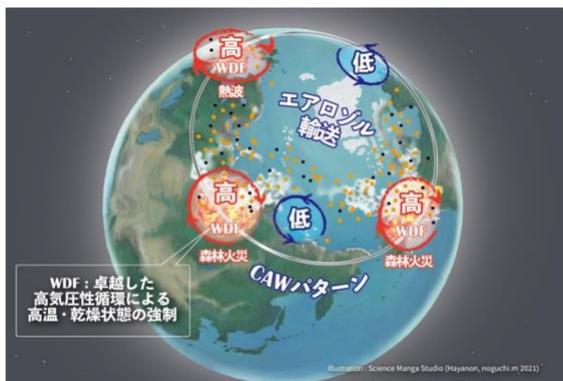


図3. Yasunari et al. (2021)によって、発見と命名がされたCircum-Arctic wave (CAW)パターン(はやのん理系漫画制作室に依頼作製：Yasunari et al., 2021のFig. 9の日本語版)。発達した高気圧性循環が北極を周極状に西欧、シベリア、亜寒帯北米(アラスカ・カナダ)に同時に位置することにより、これらの地域に高温・乾燥状態を強制し、その結果、西欧熱波、シベリアと亜寒帯北米に熱波による森林火災を同時に誘発し得ることを示唆。

シベリアを含む、北極域及びその周辺域において長期的なPM_{2.5}の変動傾向と、その森林火災との関係性などを大気循環など気候との関係から調査するため、NASAのMERRA-2の月平均データを使って2003年から2017年まで北極でPM_{2.5}が高濃度になる時の気象変数などの特徴を詳細に調べた。その結果、この15年間のうち高濃度のPM_{2.5}の20ヶ月のうち13ヶ月は夏の時期で(7, 8月)あった。これらの夏季のPM_{2.5}上昇は、MERRA-2や衛星データとの解析から、森林火災によることが示唆された。その夏季高濃度PM_{2.5}の時と、そうでない年の夏季の気象変数の平均的なパターンとの差分を見たところ、この13ヶ月では、西欧、シベリア、亜寒帯北米に同時に高気圧的な大気循環パターンが平均的な状態として卓越していた。一方、この解析とは独立した解析でユーラシアの気候変動の指標となるScandinavia Pattern Indexという指標を使って(このindexの7-8月の平均値で符号反転した年々変動の値を使用)、上記の解析に使った同様な気象変数と同帰分析を行ったところ、偶然にも上記平均値の差分と同様な高気圧パターンが見られた(西欧、シベリア、亜寒帯北米(アラスカ・カナダ))。これにより、北極域で森林火災によってPM_{2.5}が上昇した13ヶ月の平均的な大気循環の状態が、この気候indexに関連した夏季の変動で説明できることが示唆された。さらにこの回帰分析を1980年まで遡ったところ、2003年より前には、この西欧・シベリア、亜寒帯北米(アラスカ・カナダ)に同時に高

気圧性の大気循環が見られる気候パターンは見られないことがわかり、近年特有のものであることもわかった。北極を周るように位置する高気圧性循環のパターンであることから、Circum-Arctic wave (CAW)パターンと命名した(図3)。CAWパターン形成のメカニズムや持続時間、温暖化との関係などはわかっていないが、今後このCAWパターンの研究がさらに進めば、西欧熱波とシベリア・亜寒帯北米(アラスカ・カナダ)の森林火災が同時期に起こるタイミングの予測などが可能になることが期待される。尚、この段落の内容は、Yasunari et al. (2021)として出版され、[北海道大学・東京大学・三重大学から共同プレスリリース](#)を行った(英語版プレスリリースも行った)。

このCAWパターンについては、2024年にNHKの特別スペシャル「デジタル・アイ(消える大森林)」(英語版：[NHK Worldで配信](#)；日本語版：[NHK BSで放送](#))でも研究代表者のインタビューも交えて、紹介された。

(4) 機械学習による森林火災予測 (研究代表者：安成)

森林火災が夏季に活発になることで知られているサハ共和国の領域においてNASAのMODIS Fire Pixel Count ([FEER: Fire Energetics and Emission Research](#))の領域平均した火災カウントを、NASAの再解析データの森林火災と関連しそうな様々な変数及びMODIS Snow Cover Fraction (Hall et al., 2006)の変数を使って予測する試みを機械学習の方法を用いて行った。サハ共和国の

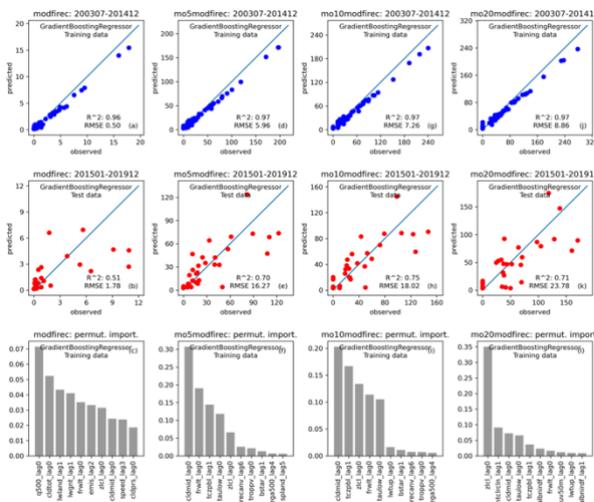


図4. 機械学習によって予測したロシア・サハ共和国で各閾値で領域平均した火災カウントデータと衛星観測による火災データの比較。(上段)学習データでの比較；(中段)テストデータでの比較；(下段)Permutation Importanceによる寄与上位の特徴量(変数)。

領域をグリッドデータから抽出するには、SPheroidal Coordinates Regridding Interpolation table Generator ([SPRING](#))を使用して作成されたマスクデータを使用した。尚、火災の予測の目的変数には、各グリッドの火災カウントをそのまま使って領域平均したものの (modfire), 5, 10, 20 カウントより少ないものを除外して領域平均した火災データ (mo5modfire, mo10modfire, mo20modfire) も使用した。説明変数は、170 個の変数に 0-6 ヶ月のラグを含めた変数の合計 1190 変数を使用した。データは、2003 年 7 月から 2014 年 12 月までのデータを学習データ、2015 年 1 月から 2019 年 12 月までのデータをテストデータとして使用した。機械学習としては、Python の [scikit-learn ライブラリ](#) を用いて行い、線形モデルは、Linear Regression, Lasso, Ridge を使い、非線形・アンサンブルモデルは、Extra Trees, Random Forest, Gradient Boosting モデルを用いた。

結果としては、線形モデルでは、Linear Regression や Ridge は全く再現がうまくいかず、Lasso はこれらよりはましなもの、良いとは言えない状況であった。一方、非線形・アンサンブルモデルは、かなり改善が見られ、決定係数 (R^2) で 0.7 を超える結果も、各グリッドの 5, 10, 20 カウント以上の火災カウントデータのみで領域平均した火災データの予測では見られた (図 4)。全ての火災カウントのデータを使った予測は、どのモデルでも、少ない火災カウント数データを除外したケースより予測精度が悪かった (少ない火災カウントは、使用した変数とは別要因で変動していることを示唆)。最も良い結果は、火災データ 10 カウント以上のみで領域平均した火災データ予測のケースで、Gradient Boosting モデルを使ったケースであった ($R^2 = 0.75$) (図 4)。Permutation Importance による、モデルの精度に寄与した度合いが高い特徴変数としては、火災変動とラグが少ない変数が多い傾向であったが、持ち上げ凝結高度 (zicl) など様々な変数と関連していた。この成果は、JpGU Meeting 2021 で研究発表を行った (安成ら, 2021)。この成果により、気象・気候・環境要素の組み合わせによるシベリア森林火災の予測可能性について、初期的な知見を得ることができた (本研究課題の研究目的(d)に関連)。

(5) 現地ロシアカウンターパートとの社会・環境調査 (研究分担者：内藤)

本研究課題では、ロシア極東部、ハバロフスク地方のアムール川流域において森林火災の社会生態的影響を明らかにするために、ロシア科学アカデミー水生生態問題研究所の研究者とともに、ア・ニュー国立公園周辺における森林火災の履歴についてのリモートセンシング、GIS による調査や森林火災の生態植生、水質への影響調査、国立公園周辺に暮らす先住民コミュニティを対象とした社会調査を実施してきた。しかしながら、上記のコロナ禍による渡航禁止、そして、ロシアによるウクライナ侵攻によって、本研究課題で計画していた PM_{2.5} 計の設置による大気汚染の調査、地域コミュニティへの影響調査などが多くのもので計画段階で頓挫し、継続が困難となってしまった。成果として出版した論文は、下記の査読付き論文 (Tashiro et al., 2023) は、水生生態問題研究所のカウンターパートとの共同研究の結果から、アムール川流域内の 24 河川から夏期に水質調査をおこなった結果、アムール川流域における湿地地域には、地層に大量の有機物を含む泥炭層が形成されており、湿地分布と河川の dFe 濃度と DOC の著しい相関がみられる結果が得られた。この論文では、分担者内藤は、執筆 (レビュー、編集) と資金を担った。自然科学系の観測やデータ解析は、代替の手法で成果を多く出せることとなったが、現地調査が必須である多くの社会調査は、現地調査ができないことは大きな打撃となり、志なかばで中断せざるおえない状況になってしまった (本研究課題の目的(e)に関連)。気候変動による森林火災は増えてきており、日本への影響も免れないだろう。一刻も早く現地調査を含む極東地域の森林火災に関する国際研究の再開が可能となることを願うばかりである。

(6) グリーンランド北西部カナックにおける 2022 年夏 (Yasunari et al. (2024a)の内容のまとめ：最初の段落) 及び 2023 年夏の観測 (研究代表者：安成)

コロナ禍とウクライナ進出で、ロシアでの現地 PM_{2.5} 観測が行えなくなったことで、観測場所を変更し (3 章参照)、グリーンランド北西部のカナックに 2022 年の夏 (2022 年 7 月 20 日から 8 月 13 日) にカナダの森林火災からの越境大気汚染の影響把握などを念頭に、寒冷地仕様の PM_{2.5} 測定装置を短期設置し、観測を行った (同時に Kestrel などによる気象要素の観測も行った)。この期間、バイオマス燃焼によるカナックへの越境大気汚染による弱い PM_{2.5} 輸送の可能性は NASA MERRA-2 のデータから見られたものの、期間中、越境大気汚染は非常に貢献が少ないことがわかった。一方で、8 月 8 日から PM_{2.5} 濃度の大きな上昇が観測され、現地調査 (写真や動画)、NOAA HYSPLIT による後方粒跡線解析、MERRA-2 再解析データの複合的な分析から、カナックの野外廃棄物焼却によるものと特定できた (図 5)。MERRA-2 による PM_{2.5} 濃度変動は、特に 8 月 8 日以降において明らかに現地観測

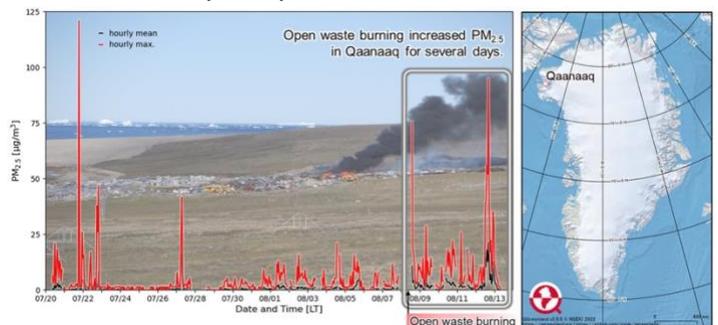


図 5. グリーンランド北西部カナックで 2022 年夏季に初めて明らかとなった PM_{2.5} の時間変動と野外廃棄物焼却 (8 月 8 日以降) による PM_{2.5} 濃度上昇 (グラフ黒線：1 時間平均値；赤線：1 時間内の最大値)。図は、Yasunari et al. (2024a) の Graphical Abstract より。

の PM_{2.5} 濃度より低く、観測期間においては、観測された PM_{2.5} 濃度変動を再現できていないことがわかった (本研究課題の目的(b)に関連)。Yasunari et al. (2024a) では、この期間中 MERRA-2 は、エアロゾル排出量計算において MODIS によるローカルな火災によるエアロゾルデータをデータ同化 (MERRA-2 は衛星データが利用できる場合には、光学的なエアロゾル観測データを同化している：Randles et al., 2017) に使えていない可能性を指摘している。また、さらに追加で NOAA HYSPLIT を使用して行った粒子拡散の計算から、この野外廃棄物焼却による大気汚染微粒子は、グリーンランド周辺の海域 (バフィン湾など) へも沈着し得ることが示唆された。この段落にまとめられた成果は、Yasunari et al. (2024a) に出版され、北海道大学・筑波大学・名古屋大学からプレスリリースを行った ([日本語版](#)；[英語版](#))。

Yasunari et al. (2024a) の成果を受けて、グリーンランド北西部カナックでは、PM_{2.5} 以外の大気質の要素の測定や、もっと長期的な大気質の変動を把握する必要性があると判断し、2023 年の夏にもカナックで観測を行った。その際に、同じ PM_{2.5} 測定装置による短期観測時に、大気中のブラックカーボンも MA350 (microAeth®) で測定を行った。また、カナック内を別の low-cost PM_{2.5} センサー (AirBeam3 : HabitatMap) で歩きながら PM_{2.5} の測定を行った。滞在期間中、PM_{2.5} 測定装置による PM_{2.5} は一時的なスパイク状の高濃度はあったものの、ほぼ低濃度で推移していた。また、カナック内も大気環境は PM_{2.5} の観点から清浄であった。MA350 による BC と PM_{2.5} の関係については、今後解析を進め、研究発表などを行う予定である。長期的なカナックの PM_{2.5} 濃度変動を把握するため、カナックの民家 (ゲストハウス) と学校に low-cost PM_{2.5} sensor として世界中で使用されている PurpleAir をそれぞれの場所に設置した。これにより、カナックの住民の方々のみならず、世界中の人が、本研究課題を通じて、[現在のカナックの大気質 \(PM_{2.5}\) の状況をリアルタイムで把握することが可能になった](#) (ゲストハウス設置のものは、一時的に WiFi の影響などでデータ送信が断続する状況が、その後起こっている)。

(7) 気候モデルを用いたシベリア森林火災増加の全球感度数値実験結果の分析と、その森林火災の大気汚染による大気質・気候・経済への包括的影響の分析 (Yasunari et al. (2024b)の内容のまとめ) (研究代表者：安成)

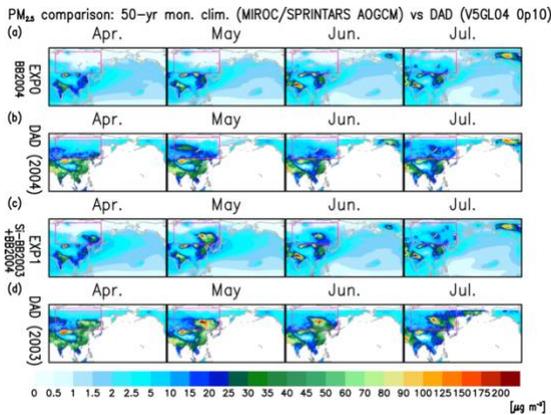


図 6. MIROC5/SPRINTARS による PM_{2.5} と、観測データが反映された PM_{2.5} のデータ (V5.GL04) の月毎の比較 (春から夏)。(a) 気候モデルの 2004 年の火災強度が弱いケースの PM_{2.5} の月毎の気候値。(b) V5.GL04 の 2004 年の PM_{2.5}。(c) シベリア領域 (ピンクの四角: 本文参照) を 2003 年の強い森林火災のエアロゾル等排出量に置き換えた実験 (それ以外の地域は、2004 年の排出量を使用) の PM_{2.5}。(d) V5.GL04 の 2003 年の PM_{2.5}。図は、Yasunari et al. (2024b) の Fig. S3 より。

使って、世界保健機関 (WHO) が定めた最新の PM_{2.5} の日平均 (24 時間) 環境基準値 (15 μg m⁻³; WHO, 2021) を超える頻度を分析したところ、環境基準達成率が発生域及び周辺域のロシア行政区や風下の日本など東アジアの国々で減少することがわかった。この環境基準達成率は、火災のシーズンである春から夏に注目すると更に減少した (本研究課題の研究目的(a)に関連)。経済影響の観点からは、現在気候下では、火災が「酷く強い」と「弱い」ケースとの比較によって、大気質悪化による健康被害の増加 (早期死亡者の増加) を見積もった場合には、例えば、中国と日本では、それぞれ年間で約 67,000 人と約 22,000 人の早期死亡者数が増加し得るという結果が得られた (図 7)。また、これらの早期死亡者数増加は、それぞれ約 510 億米ドルと約 840 億米ドルの経済的損失に相当することもわかった (図 7)。気候条件とシベリア森林火災増加の複合的な影響については、現在気候条件下では、火災による大気エアロゾル冷却効果が低緯度国 (例えば、中国、アメリカ、日本) には経済的利益をもたらすのに対し、高緯度国 (例えば、ロシアやカナダ) では経済的損失が生じる可能性が示唆された。近未来の温暖化時の複合影響では、上記の高低緯度の影響が逆の知見を経た。この研究成果により、シベリア森林火災増加時の気候・健康・経済への包括的な影響を初めて評価することができ、これらへの影響緩和やその対策 (政策立案) などについて今後議論するための重要な基礎的知見を得ることができた。この研究成果は、数値シミュレーション自体は、本研究課題の前の科研費研究課題の時から行っていたものであるが、その後、時間をかけて本研究課題の期間中にシミュレーション結果を詳細に分析し、議論を行うことで Yasunari et al. (2024b) としてまとめることができた (論文の出版自体は、本研究課題終了後の 2024 年 4 月)。

参考文献 (論文以外の Web サイトのリンクは、ハイパーリンクで出典を表示する)

Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (2006). MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m. Version 5. Boulder, Colorado USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <http://dx.doi.org/10.5067/ACITYZB9BEO5>

Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Nakayama, T., Matsumi, Y., Kawahito, K., & Watabe, Y. (2018). Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor. *Aerosol Science and Technology*, 52(1), 2–12. <https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1375078>

Randles, C. A., da Silva, A. M., Buchard, V., et al. (2017). The MERRA-2 aerosol re-analysis, 1980 onward. Part I: system description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, 30, 6823–6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>

Tashiro, Y., Yoh, M., Shesterkin, V. P., Shiraiwa, T., Onishi, T., & Naito, D. (2023). Permafrost wetlands are sources of dissolved iron and dissolved organic carbon to the Amur-Mid Rivers in summer. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128, e2023JG007481. <https://doi.org/10.1029/2023JG007481>

Watanabe, M., Suzuki, T., O'ishi, R., et al. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *Journal of Climate*, 23(23), 6312–6335. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

World Health Organization (WHO) (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. <https://www.who.int/publications/item/9789240034228>

Yasunari, T. J., Kim, K.-M., da Silva, A. M., et al. (2018). Extreme air pollution events in Hokkaido, Japan, traced back to early snowmelt and large-scale wildfires over East Eurasia: Case studies. *Scientific Reports*, 8, 6413. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24335-w>

Yasunari, T. J., Nakamura, H., Kim, K.-M., Choi, N., Lee, M.-I., Tachibana, Y., and da Silva, A. M. (2021). Relationship between circum-Arctic atmospheric wave patterns and large-scale wildfires in boreal summer. *Environmental Research Letters*, 16, 064009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf7ef>

安成哲平, 瀧川一学, Kyu-Myong Kim, & 竹島滉 (2021). Machine learning prediction of wildfire over the Republic of Sakha, Russia. JpGU Meeting 2021, ACG39-03. 日本地球惑星化学連合 2021 年大会予稿. <https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2021/ACG39-03/public/pdf?type=inv>

Yasunari, T. J., Wakabayashi, S., Matsumi, Y., & Matoba, S. (2022). Developing an insulation box with automatic temperature control for PM_{2.5} measurements in cold regions. *Journal of Environmental Management*, 311, 114784. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114784>

Yasunari, T. J., Kajikawa, T., Matsumi, Y., & Kim, K.-M. (2024a). Increased atmospheric PM_{2.5} events due to open waste burning in Qaanaaq, Greenland, summer of 2022. *Atmospheric Science Letters*, e1231. <https://doi.org/10.1002/asl.1231>

Yasunari, T. J., Narita, D., Takemura, T., Wakabayashi, S., & Takeshima, A. (2024b). Comprehensive impact of changing Siberian wildfire severities on air quality, climate, and economy: MIROC5 global climate model's sensitivity assessments. *Earth's Future*, 12, e2023EF004129. <https://doi.org/10.1029/2023EF004129>

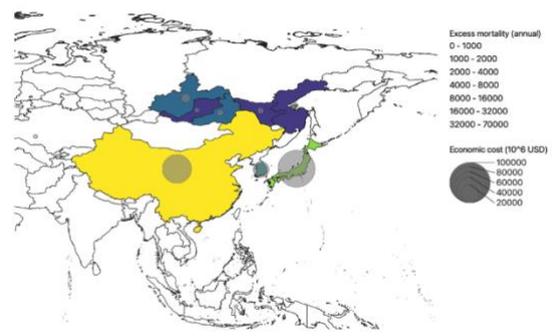


図 7. 現在気候下において、シベリア森林火災が「酷く強い」(2003 年の 2 倍強度) 場合と「弱い」(2004 年の強度) の比較によるいくつかの東アジアの国々及びロシアの行政区の大気汚染による早期死亡数の増加とそれに伴う経済的影響 (コスト)。図は、Yasunari et al. (2024b) の Fig. 3 より (データは Table S1 より)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Teppei J. Yasunari, Daiju Narita, Toshihiko Takemura, Shigeto Wakabayashi, and Akira Takeshima	4. 巻 12
2. 論文標題 Comprehensive Impact of Changing Siberian Wildfire Severities on Air Quality, Climate, and Economy: MIROC5 Global Climate Model's Sensitivity Assessments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Earth's Future	6. 最初と最後の頁 e2023EF004129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2023EF004129	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 -
1. 著者名 Teppei J. Yasunari, Tomoki Kajikawa, Yutaka Matsumi, and Kyu-Myong Kim	4. 巻 e1231
2. 論文標題 Increased atmospheric PM2.5 events due to open waste burning in Qaanaaq, Greenland, summer of 2022	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Atmospheric Science Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/asl.1231	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 Y. Tashiro, M. Yoh, V. P. Shesterkin, T. Shiraiwa, T. Onishi, and D. Naito	4. 巻 128
2. 論文標題 Permafrost Wetlands Are Sources of Dissolved Iron and Dissolved Organic Carbon to the Amur Mid Rivers in Summer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Biogeosciences	6. 最初と最後の頁 e2023JG007481
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2023JG007481	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 Teppei J. Yasunari, Shigeto Wakabayashi, Yutaka Matsumi, and Sumito Matoba	4. 巻 311
2. 論文標題 Developing an insulation box with automatic temperature control for PM2.5 measurements in cold regions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 114784
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jenvman.2022.114784	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 -

1. 著者名 Teppei J Yasunari, Hisashi Nakamura, Kyu-Myong Kim, Nakbin Choi, Myong-In Lee, Yoshihiro Tachibana, and Arlindo M da Silva	4. 巻 16
2. 論文標題 Relationship between circum-Arctic atmospheric wave patterns and large-scale wildfires in boreal summer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental Research Letters	6. 最初と最後の頁 64009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-9326/abf7ef	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 Hiroshi Hayasaka, Koji Yamazaki, and Daisuke Naito	4. 巻 22
2. 論文標題 Weather conditions and warm air masses during active fire-periods in boreal forests	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 100472
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2019.07.002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murnira Othman, Mohd Talib Latif, and Yutaka Matsumi	4. 巻 170
2. 論文標題 The exposure of children to PM2.5 and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur City Centre	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ecotoxicology and Environmental Safety	6. 最初と最後の頁 739 ~ 749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecoenv.2018.12.042	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Yasunari, T. J., D. Narita, T. Takemura, S. Wakabayashi, and A. Takeshima
2. 発表標題 How much does the increased Siberian wildfire impact air quality, human health, and the economy?
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安成哲平, 成田大樹, 竹村俊彦, 若林成人, 竹島滉
2. 発表標題 MIRCO5 sensitivity experiments on increasing Siberian wildfires. Part I: impacts on aerosols, air quality, and climate
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teppe J. Yasunari
2. 発表標題 Tackling measurements and assessments of the air quality affected by transboundary air pollution transport to Hokkaido
3. 学会等名 HAI-FES International Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Teppe J. Yasunari, Tomoki Kajikawa, and Yutaka Matsumi
2. 発表標題 Preliminary results of the atmospheric particulate matter variations in the summer of 2022 in Qaanaaq, Greenland
3. 学会等名 ISAR-7 (Seventh International Symposium on Arctic Research) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasunari, T. J., S. Wakabayashi, Y. Matsumi, S. Matoba, T. Watanabe, F. Takahashi, S.-I. Saitoh, S. Ishida, and S. Nakai
2. 発表標題 Development of the PM2.5 measurement system for cold regions for the Cryosphere and PM2.5 observations with the system in Alaska and Japan
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安成哲平, 渡邊達博, 松見豊, 高橋文宏, 齊藤誠一, 石田祐宣, 中井専人
2. 発表標題 寒冷地仕様PM2.5測定装置の国内展開と防水強化版の開発
3. 学会等名 日本気象学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teppe J. Yasunari, Shigeto Wakabayashi, Yutaka Matsumi, Sumito Matoba, Tatsuhiro Watanabe, Fumihiro Takahashi, Sei-Ichi Saitoh, Sachinobu Ishida, and Sento Nakai
2. 発表標題 Tackling air pollution (particulate matter) measurements in any frigid regions in the world
3. 学会等名 The 3rd Japanese-American-German Frontiers of Science (JAGFoS) Symposium (with only invited attendees) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安成哲平, 若林成人, 松見豊, 的場澄人, 高橋文宏, 齊藤誠一, 石田祐宣, 中井専人
2. 発表標題 Development of a portable PM2.5 measurement system for cold regions and its deployment from the Hokuriku region to Northern Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安成哲平
2. 発表標題 森林火災とその大気汚染及び気候変動との関係
3. 学会等名 日本太陽エネルギー学会 太陽光発電部会 第32回セミナー-気象・環境セミナー「気候変動」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teppei J. Yasunari, Hisashi Nakamura, Kyu-Myong Kim, Nakbin Choi, Myong-In Lee, Yoshihiro Tachibana, and Arlindo da Silva
2. 発表標題 The impacts of the newly found circum-Arctic wave (CAW) pattern on summer heatwaves and wildfires in recent years and the year 2021
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teppei J. Yasunari
2. 発表標題 Characteristics of Siberian wildfire in recent years, their impacts on air quality, and future plans of PM2.5 observations in Yakutia
3. 学会等名 The workshop, "The impact of climate change on natural ecosystems in the Arctic" (online & on-site) by IBPC SB RAS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安成哲平, 若林成人, 松見豊, 的場澄人
2. 発表標題 寒冷地対応型小型ポータブルPM2.5測定装置の開発 - 冬季札幌観測, 夏季アラスカ森林火災事例, 函館黄砂事例の紹介 -
3. 学会等名 雪氷研究大会 (2021・千葉 - オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安成哲平, 瀧川一学, Kyu-Myong Kim, 竹島滉
2. 発表標題 Machine learning prediction of wildfire over the Republic of Sakha, Russia
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安成哲平, 若林成人, 松見豊, 的場澄人
2. 発表標題 寒冷地対応型ポータブルPM2.5 測定システムの開発と性能評価及び利用希望者への情報提供
3. 学会等名 気象学会2020年度秋季大会 (オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teppe J. Yasunari, Kyu-Myong Kim, Hisashi Nakamura, Nakbin Choi, Myong-In Lee, Yoshihiro Tachibana, Yutaka Matsumi, Shigeto Wakabayashi, and Arlindo M da Silva
2. 発表標題 A recent summer wave pattern in the Arctic explains co-occurrences of European heat waves, and wildfires in Siberia, Alaska, and Canada
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Teppe J. Yasunari, Shigeto Wakabayashi, Toshihiko Takemura, and Daiju Narita
2. 発表標題 Impacts of increased Siberian wildfire on air quality, climate, and economy, assessed with MIROC/SPRINTARS sensitivity experiments
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasunari, T. J., Y. Matsumi, S. Wakabayashi, K.-M. Kim, B. N. Holben, A. Shimizu, A. M. da Silva, and S. Matoba
2. 発表標題 Wildfire smoke transport to Hokkaido, and our portable PM2.5 sensor system for cold regions
3. 学会等名 Chozen International Symposium on Transboundary Pollution at North-South Transect at Marginal Sea in western Pacific Ocean (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunari, T. J., and T. Takemura
2. 発表標題 Impacts of increased Siberian wildfire on air pollution, radiative forcing, and climate at present and in the future assessed with MIROC AOGCM
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunari, T. J., K.-M. Kim, Y. Matsumi, I. Takigawa, and A. M. da Silva
2. 発表標題 Wildfire and its air pollution: Importance of their assessment and better prediction
3. 学会等名 The 2nd Japan-American-German Frontiers of Science (JAGFoS) Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunari, T. J., T. Takemura, and K.-M. Kim
2. 発表標題 Siberian Wildfire Impacts on Air Pollution and Climate under the Present and Future Climate Conditions with MIROC/SPRINTARS AOGCM Experiments
3. 学会等名 The 27th IUGG General Assembly, Montreal (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安成哲平, 瀧川一学, Kim Kyu-Myong, da Silva Arlindo
2. 発表標題 東ユーラシアの5つの領域における機械学習を使った森林火災と大気汚染の予測 (Prediction of wildfire and air pollution with machine learning over the five domains of Eastern Eurasia)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 北極環境研究コンソーシアム長期構想編集委員会 編（第1章自然科学 1-1-3物質循環《トピック-2》執筆担当：安成哲平）	4. 発行年 2024年
2. 出版社 海文堂出版株式会社	5. 総ページ数 480
3. 書名 北極域の研究 その現状と将来構想	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>2024年3月プレスリリース（日本語版）：https://www.hokudai.ac.jp/news/2024/03/pm25-1.html 2024年3月プレスリリース（英語版）：https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/open-waste-burning-linked-to-air-pollution-in-northwestern-greenland/ 2022年3月プレスリリース（日本語版）：https://www.hokudai.ac.jp/news/2022/03/pm25pm25.html 2021年5月プレスリリース（日本語版）：https://www.hokudai.ac.jp/news/2021/05/post-843.html 2021年6月プレスリリース（英語版）： https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/newly-identified-atmospheric-circulation-enhances-heatwaves-and-wildfires-around-the-arctic/</p> <p>アウトリーチ関連： https://www.hokudai.ac.jp/pr/webpamphlet/litterae_vol.69/index.html#page=21 https://www.hokudai.ac.jp/bureau/populi/edition69/houmon.html https://www.hokudai.ac.jp/researchtimes/2023/01/academic-fantasisata-2022sshcosmos2022.html https://www.asiaresearchnews.com/content/atmospheric-link-between-northern-wildfires-and-heatwaves https://www.sekaiwokaeyo.com/wakate/w2069/ https://www.jpsps.go.jp/file/storage/grants/j-grantsinaid/37_topics/data/00042-10101-70506782.pdf</p>
--

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
研究分担者	松見 豊 (Matsumi Yutaka) (30209605)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・名誉教授 (13901)	
研究分担者	内藤 大輔 (Naito Daisuke) (30616016)	京都大学・農学研究科・助教 (14301)	

	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
研究協力者	鄭 峻介 (Tei Shunsuke) (40710661)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	早崎 将光 (Hayasaki Masamitsu)	日本自動車研究所	
研究協力者	ゲプタ パワン (Guputa Pawan)	アメリカ航空宇宙局	
研究協力者	齊藤 誠一 (Saitoh Sei-Ichi) (70250503)	北海道大学・北極域研究センター・研究員 (10101)	
研究協力者	佐藤 友徳 (Sato Tomonori) (10512270)	北海道大学・地球環境科学研究院・准教授 (10101)	
研究協力者	キム キュミョン (Kim Kyu-Myong)	アメリカ航空宇宙局	
研究協力者	瀧川 一学 (Takigawa Ichigaku) (10374597)	京都大学・国際高等教育院・特定教授 (14301)	

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	蔚山科学技術大学校 (UNIST)			
米国	アメリカ航空宇宙局 (NASA)			
ロシア連邦	ロシア科学アカデミー・ハバロフスク支部	北東連邦大学 (NEFU)	北方圏生物問題研究所 (IBPC)	