

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 5-2103

体系的番号： （J P M E E R F 2 0 2 1 5 0 0 3）

研究課題： 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」

Research Title: Airborne Microplastics and Health Impact

研究代表者： 大河内 博

研究代表機関： 早稲田大学

研究分担機関： 徳島大学、東洋大学、大阪公立大学、気象庁気象研究所、広島大学

研究協力機関： 日本女子大学、石川県立大学、金沢大学、日本獣医生命科学大学、地方独立行政法人北海道立総合研究機構、名古屋市環境科学調査センター、国立研究開発法人国立環境研究所、一般財団法人日本環境衛生センター、PerkinElmer Japan、株式会社日本サーマル・コンサルティング、フロンティア・ラボ株式会社、日本分光株式会社、一般財団法人日本自動車研究所、慶應義塾大学

研究領域： 安全確保領域

キーワード： μ FTIR-ATRイメージング法、Py-GCMS法、空気動力学径分布、環境動態モデリング、呼吸器影響

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	7
2. 研究開発目的	8
3. 研究目標	8
4. 研究開発内容	9
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 研究目標の達成状況	9
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	11
6. 研究成果の発表状況の概要	13
6-1. 成果の件数	13
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	13
7. 国際共同研究等の状況	14
8. 研究者略歴	15
II. 成果の詳細	16
II-1 サブテーマ1「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明」	16
〔サブテーマ1要旨〕	16
1. サブテーマ1研究開発目的	16
2. サブテーマ1研究目標	16
3. サブテーマ1研究開発内容	16
4. サブテーマ1結果及び考察	19
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	27
II-2 サブテーマ2「大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング」	28
〔サブテーマ2要旨〕	28
1. サブテーマ2研究開発目的	28
2. サブテーマ2研究目標	28
3. サブテーマ2研究開発内容	28
4. サブテーマ2結果及び考察	31
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	42
II-3 サブテーマ3「大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明」	43
〔サブテーマ3要旨〕	43
1. サブテーマ3研究開発目的	43
2. サブテーマ3研究目標	43
3. サブテーマ3研究開発内容	43
4. サブテーマ3結果及び考察	44
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	53
III. 研究成果の発表状況の詳細	54
(1) 成果の件数	54
(2) 誌上発表	54
(3) 口頭発表	57
(4) 知的財産権	64
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	64
(6) マスメディア等への公表・報道等	65
(7) 研究成果による受賞	73

(8) その他の成果発表	74
--------------------	----

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要

<課題情報>

公 募 区 分 :	環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間 :	令和 3（2021）年度 ～ 令和 5（2023）年度
課 題 番 号 :	【5-2103】
研 究 課 題 :	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」
研 究 代 表 者 :	大河内 博（早稲田大学、教授）
重点課題（主）:	【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究
重点課題（副）:	なし
行政要請研究テーマ （行政ニーズ）:	（５－８）大気中に存在するマイクロプラスチックの呼吸器系への曝露による人健康影響に係る研究
研 究 領 域 :	安全確保領域

<キーワード>

μFTIR-ATRイメージング法
Py-GCMS法
空気動力学径分布
環境動態モデリング
呼吸器影響

<研究体制>

サブテーマ 1 「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明」

<サブテーマ 1 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
早稲田大学	理工学術院創造理工学部	教授	大河内 博	
早稲田大学	理工学術院国際理工センター	教授	速水 洋	
徳島大学	大学院医歯薬学研究部（薬学系）	准教授	竹内政樹	
東洋大学	理工学部	教授	反町篤行	
大阪公立大学	大学院現代システム科学研究科	准教授	藤井佑介	

＜サブテーマ 1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
大阪公立大学	大学院現代システム科学研究科	教授	竹中訓規（2021年4月～2023年3月）
日本女子大学	理学部	教授	宮崎あかね（2021年4月～2023年3月）
日本獣医生命科学大学	獣医学部	教授	羽山伸一（2021年4月～2022年3月）
石川県立大学	生物資源環境学部	准教授	勝見尚也（2021年4月～2023年3月）
金沢大学	環日本海域環境研究センター	教授	松木 篤（2021年12月～2023年3月）
北海道立総合研究機構	産業技術環境研究本部 エネルギー・環境・地質研究所	主査	山口高志（2021年4月～2023年3月）
名古屋市環境科学調査センター	環境科学室	研究員	池盛文数（2022年4月～2023年3月）
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	主幹研究員	鈴木剛（2022年6月～2023年3月）
国立研究開発法人 国立環境研究所	資源循環領域	研究員	田中厚資（2022年6月～2023年3月）
一般財団法人 日本環境衛生センター	東日本支局 環境事業本部 環境事業第二部	次長	高橋克行（2022年6月～2023年3月）
PerkinElmer Japan	アプリケーションリサーチラボ	シニアプロダクトスペシャリスト	新居田泰弘（2021年4月～2023年3月）
日本サーマル・コンサルティング		代表取締役	浦山憲雄（2021年4月～2022年3月）
日本サーマル・コンサルティング		アプリケーションケミスト	小林華栄（2021年4月～2022年3月）
フロンティア・ラボ		代表取締役	渡辺 壱（2022年4月～2023年3月）
日本分光	応用技術科	主任	赤尾賢一（2022年4月～2023年3月）

サブテーマ 2 「大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング」

＜サブテーマ 2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
気象庁気象研究所	全球大気海洋研究部	主任研究官	梶野瑞王	
気象庁気象研究所	全球大気海洋研究部	主任研究官	足立光司	

サブテーマ3「大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明」

＜サブテーマ3リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
広島大学	統合生命科学研究科	教授	石原康宏	
広島大学	統合生命科学研究科	准教授	岩本洋子	

＜サブテーマ3研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
早稲田大学	理工学術院創造理工学部	教授	所千晴（2021年4月～2024年3月）
日本自動車研究所	環境研究部	主席研究員	萩野浩之（2021年4月～2023年3月）
慶應義塾大学	理工学部	教授	奥田知明（2021年4月～2024年3月）

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	29,770千円	6,230千円	36,000千円
2022	29,770千円	6,230千円	36,000千円
2023	29,770千円	6,230千円	36,000千円
合計	89,310千円	18,690千円	108,000千円

1. はじめに（研究背景等）

プラスチック生産量は1950年以降に急増し、2050年には400億トンに達する（Zalasiewicz et al., 2016）。生産量の約10%が海洋に流入し（Thompson et al., 2004）、海洋生態系の破壊が懸念されている。このため、持続可能な開発目標（SDGs）で海洋プラスチックが取り上げられ、プラスチック使用量削減のために2020年に国内でレジ袋が有料化された。しかし、コロナ禍による在宅学習・勤務に伴って、プラスチック容器ゴミが急増した。さらに、プラスチック製不織布マスクの月間推定使用枚数が1290億枚にのぼり（Prata et al., 2020）、不適切管理により新たな汚染が広まっている。

しかし、大気中マイクロプラスチックの存在はこれまで見過ごされてきた。報告例の大部分は都市域の大気沈着であり（Dris et al., 2016; Cai et al., 2017; Klein et al., 2019; Allen et al., 2019）、大気中濃度は数例しかない（Dris et al., 2017; Liu et al., 2019, 2020）。海洋で微細化したプラスチックが大気へ放出され、陸域への輸送量は年間14万トンとの推計もあり（Allen et al., 2020）、大気を通じたマイクロプラスチックによる地球規模汚染の実態解明と健康影響評価は喫緊の課題である。現在、大気中マイクロプラスチックの採取法・同定法に統一規格はなく、健康影響評価に不可欠な空気動力学径分布の報告例は研究代表者のグループのみである。

参考文献

- Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G. et al. (2019) Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nat. Geosci.*, 12, 339–344, <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- Allen S., Allen D., Moss K., Le Roux G., et al. (2020) Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics. *PLOS ONE*, 15, e0232746, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>
- Cai L., Wang J., Peng J., Tan Z., et al. (2017) Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: Preliminary research and first evidence, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 24, 24928–24935, <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0116-x>
- Dris R., Gasperi J., Saad M., Mirande C. et al. (2016) Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Mar. Pollut. Bull.*, 104, 290–293, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.01.006>
- Dris R., Gasperi J., Mirande C., Mandin C., et al. (2017) A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments, *Environ. Pollut.* 221, 453–458, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.013>
- Klein M., Fischer E.K. (2019) Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany, *Sci. Total Environ.*, 685, 96–103, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.405>
- Liu K., Wang X., Fang T., Xua P. et al. (2019) Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai, *Sci. Total Environ.*, 675, 462–471, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.110>
- Liu K., Wang X., Song Z., Wei N., et al. (2020) Terrestrial plants as a potential temporary sink of atmospheric microplastics during transport, *Sci. Total Environ.*, 742, 140523, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140523>
- Prata, J.C, Silva, A.L.P., Walker, T.R., Duarte, A.C., et al., (2020) COVID-19 Pandemic Repercussions on the Use and Management of Plastics, *Environ. Sci. Technol.* 54, 13, 7760–7765, <http://orcid.org/0000-0001-7814-3659>
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A. et al. (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *SCIENCE*, 304, 838, <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Ivar do Sul, J., et al. (2016) The Geological Cycle of Plastics and Their Use as a Stratigraphic Indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13, 4–17, <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002>

2. 研究開発目的

本研究では、マイクロプラスチックの大気動態、発生源、健康影響の解明を目的に、産学官連携基盤を構築して観測・分析・モデリング・生体影響に関する総合研究を世界に先駆けて推進する。

大気中マイクロプラスチック（Airborne microplastics; AMPs）を空気動力学径100 μm以下と定義し、呼吸系への影響を考慮して4 μm以下のレスピラブル粒子およびPM_{2.5}に着目する。なお、PM_{0.1}に含まれる微細プラスチックを大気中ナノプラスチック（Airborne nanoplastics; ANPs）と定義する。

野外観測では、次のことを行う。①民間分析メーカーと連携して、μFTIRによるAMPs 定量法を確立する。②国内研究機関と連携し、同一手法でAMPsの個数濃度、空気動力学径分布、材質および沈着量を解明し、吸入量を推計する（サブ2、3と連携）。③自由対流圏、外洋、極域でAMPsの観測を行い、地球規模汚染の実態解明を行う（サブ2と連携）。④AMPsの吸着有機物・重金属を同定し、ANPs定量法に先鞭をつける（サブ2、3と連携）。

数値実験では、野外観測の成果をもとに研究を進める。初期段階では野外観測で成果が得られていないので、都市域におけるAMPsの発生源と推定されている自動車タイヤ摩耗粉塵と繊維状マイクロプラスチックの領域収支（発生、輸送、沈着量）を、気象庁領域気象化学モデルNHM-Chemにより概算を行う。野外観測結果が得られてきたら、陸域における各種AMPsのインベントリ作成に着手する。またAMPsの形状・材質が大気動態や雲生成・豪雨形成に及ぼす影響評価を行い、領域収支のさらなる高精度化を図る。サブ1、3と連携してAMPs肺沈着モデルを改良する。

健康影響評価では、モデルプラスチック粒子と採取した実粒子を動物に曝露し、肺障害と炎症を調べるとともに卵白アルブミン（OVA）を投与して喘息モデルを作成し、微粒子の喘息病態への影響を明らかにする。また、肺上皮細胞、マクロファージを用いて、微粒子の肺物理バリア、免疫バリアへの影響を精査する。

3. 研究目標

全体目標	産学連携でAMPs分析法を確立し、国内外における大気圏動態を野外観測と数値計算の両面から明らかにし、起源推定を行う。さらに、AMPsの健康影響リスクとして呼吸器系に焦点を当て、炎症惹起作用および気管支喘息に対する影響を毒性学的見地から評価する。3年間で国内学会50回、国際学会20回、査読付き論文10報をアウトプットし、ホームページで情報公開する。
サブテーマ1	大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明
サブテーマ1 実施機関	早稲田大学、徳島大学、東洋大学、大阪公立大学
サブテーマ1 目標	1試料あたり2日以内のAMPs迅速前処理法、μFTIRによる24時間以内の全面積AMPs自動計測法を確立する。国内12箇所（都市：札幌、新宿、名古屋、大阪、広島、徳島、北九州、森林：福島、生田、富士山麓、遠隔：利尻、能登）で大気濃度と大気沈着の観測ネットワークを構築する。富士山頂、太平洋上、北極、南極、東南アジアのAMPsを分析して地球規模汚染の実態を解明する。AMPs添加物・吸着物の同定を行う。
サブテーマ2	大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング
サブテーマ2 実施機関	気象研究所
サブテーマ2 目標	まず発生源が明らかになっている自動車タイヤ摩耗粉塵と繊維状マイクロプラスチックの領域収支を評価する。そして、サブテーマ1の観測成果に基づいて、各種AMPsの素過程モデルをNHM-Chemに実装し、大気濃度観測を用いてそれらの発生インベントリを構築する。NHM-Chemにより各種

	AMPsの領域収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにする。さらにAMPsの形状・材質が大気動態や雲・降水変化に及ぼす影響評価を行い、領域収支のさらなる高精度化を図る。
--	--

サブテーマ3	大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明
サブテーマ3 実施機関	広島大学
サブテーマ3 目標	モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子を肺上皮細胞、マクロファージに曝露し、マイクロプラスチックの上皮バリア、免疫に及ぼす影響を明らかにする。モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子をマウスに曝露し、呼吸器影響を調べる。呼吸器に炎症が生じ、或いは気道抵抗が上昇した場合、微粒子の用量依存性を調べて無毒性量を決定する。

4. 研究開発内容

本研究では、大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明（サブテーマ1）、大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング（サブテーマ2）、大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明（サブテーマ3）から構成されている。

サブテーマ1では、実態調査のための採取装置開発と国内外における観測網構築、大気中マイクロプラスチックの迅速分析法の確立を行った。サブテーマ3に提供するため、PM_{2.5}中AMPs乾式分級装置開発も目的の一つとしていたが、技術的困難さに見合う予算不足から断念し、マイクロおよびナノプラスチックの合成実験に変更した。

サブテーマ2では、自動車由来粒子（タイヤ摩耗塵、ブレーキ粉塵）のモデル化、サブテーマ1で得られた観測結果に基づきNHM-ChemによるAMPs個数濃度および大気沈着量予測に取り組んだ。

サブテーマ3では、モデル大気中マイクロプラスチックとしてPET、PS、PPを使用し、人工太陽光を照射してこれらを劣化させ、光劣化MPsと非劣化MPsの呼吸器影響を比較検討した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本研究では、大気中マイクロプラスチックの実態解明のために分析法を確立するとともに国内外で統一手法に基づく観測網を構築し、得られた実測データに基づいた環境動態モデルを開発し、太陽光で劣化したAMPsが気道抵抗性を増大させることを解明した。

サブテーマ3では、太陽光を照射していない繊維状PETと比較して、太陽光で劣化させた繊維状PETを吸入すると、肺の炎症と気道抵抗性の増大が生じることを明らかにした。太陽光照射によりPETから流出するテレフタル酸（TPA）が、光劣化PETの呼吸器影響の一因となることが示唆された。光劣化PSからは安息香酸が流出し、PSはエピジェネティックな影響を示し、光劣化PPはマクロファージ活性化能を示した。MPsのリスク評価には光劣化を考慮する必要があるが、光劣化によるMPsの物性の変化だけでなく、溶出する化学物質の生体作用に着目すべきである。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」

全体目標	全体の達成状況
産学連携でAMPs分析法を確立し、国内外における大気圏動態を野外観測と数値計算の両面から明ら	複数の分析機器企業と連携し、μFTIR-ATRイメージング法とPy-GCMS法によるAMPs分析を開発した。開

かにし、起源推定を行う。さらに、AMPsの健康影響リスクとして呼吸器系に焦点を当て、炎症惹起作用および気管支喘息に対する影響を毒性学的見地から評価する。3年間で国内学会50回、国際学会20回、査読付き論文10報をアウトプットし、ホームページで情報公開する。	発した手法に基づき、国内外でAMPsの濃度、形状、空気動力学径および実粒径分布を明らかにし、形状と組成から起源推定を行った。さらに、観測結果に基づく数値計算を行い、太陽光で劣化したAMPsは気道抵抗性を増大させることを解明した。 研究成果として、国内学会90回、国際学会21回行い、査読付き論文として26報を報告した。また、研究成果による受賞9件、国民への科学・技術対話17件、マスメディアによる報道が193件にも上り、社会的関心も高く、全体として目標を大きく上回る成果を挙げた。
--	---

＜【サブテーマ1】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
1試料あたり2日以内のAMPs迅速前処理法、 μ FTIRによる24時間以内の全面積AMPs自動計測法を確立する。国内12箇所（都市：札幌、新宿、名古屋、大阪、広島、徳島、北九州、森林：福島、生田、富士山麓、遠隔：利尻、能登）で大気濃度と大気沈着の観測ネットワークを構築する。富士山頂、太平洋上、北極、南極、東南アジアのAMPsを分析して地球規模汚染の実態を解明する。AMPs添加物・吸着物の同定を行う。	一試料あたり2日以内の前処理を可能とし（成果番号1、3、5、6）、低濃度試料の場合にはる過面積を1 mmとすることにより全面積測定を可能とした（成果番号45）。計測自動化には現行装置の性能の問題であり達成できていない。国内14箇所でエアロゾルおよび大気沈着の観測網を構築した。富士山頂でPM _{2.5} （成果番号36、45）、雲水（成果番号3）、積雪、北極圏でエアロゾル（成果番号45）および雪氷、南極で雪氷、カンボジア（成果番号44）、インドネシア（成果番号5）、ベトナムでエアロゾル観測を行い、地球規模汚染の実態を明らかにした。さらに、太平洋上で表層海水中100 μ m以下のMPs計測を行った（成果番号52）。AMPs添加物・吸着物の同定をPy-GCMS法で検討しているが、定量までには至っていない。

＜【サブテーマ2】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
まず発生源が明らかになっている自動車タイヤ摩耗粉塵と繊維状マイクロプラスチックの領域収支を評価する。そして、サブテーマ1の観測成果に基づいて、各種AMPsの素過程モデルをNHM-Chemに実装し、大気濃度観測を用いてそれらの発生インベントリを構築する。NHM-Chemにより各種AMPsの領域収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにする。さらにAMPsの形状・材質が大気動態や雲・降水変化に及ぼす影響評価を行い、領域収支のさらなる高精度化を図る。	自動車タイヤ摩耗塵の排出インベントリを構築し、領域収支を明らかにした。さらに、サブテーマ3と連携し、タイヤ摩耗塵だけでなく他の自動車由来排気・非排気由来を考慮したIL-8ベースの炎症誘導能の相対強度を評価した（成果番号20）。繊維状マイクロプラスチックだけでなく全マイクロプラスチックについて、観測結果と各種AMPsの素過程モデルを実装したNHM-Chemから排出インベントリを推定する技術を構築し、東アジア領域についてその収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにした。形状・材質による動態の違いについては世界的にも知見が不足しているため優先度を下げ、空気動力学径の感度実験によりそれに対処した。雲・降水変化に及ぼす影響についてはそれを評価することができるモデルを構築した。さらに、数値モデルが予測する雲・降水過程による除去過程を観測デー

	タから評価できる仕組みを構築し、NHM-Chemの評価に適用した（成果番号11）。
--	---

<【サブテーマ3】達成状況>・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子を肺上皮細胞、マクロファージに曝露し、マイクロプラスチックの上皮バリア、免疫に及ぼす影響を明らかにする。モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子をマウスに曝露し、呼吸器影響を調べる。呼吸器に炎症が生じ、或いは気道抵抗が上昇した場合、微粒子の用量依存性を調べて無毒性量を決定する。	人工太陽光で繊維状PET、PSおよびPP粒子を光劣化させ、光劣化MPsの物性を評価した。光劣化PETについて、詳細な解析を実施し、劣化していないPETと比較して、光劣化PETは呼吸器に対して炎症を引き起こし、気道抵抗性を増悪させることを明らかにした。さらに、一度光劣化したテレフタル酸は、暗所においてもテレフタル酸を持続的に生成し、テレフタル酸が呼吸器の炎症を引き起こすこと、気道抵抗性を増大させることを明らかにして、太陽光劣化PETの呼吸器影響メカニズムを示した。光劣化PSは、ヒストン修飾を介してエピジェネティックな作用を示す可能性があること、光劣化PPは強いマクロファージ活性化能を示すことも明らかにし、太陽光で劣化したMPsは、その材質特異的な作用を介して生体に影響することを明らかにした。

5－3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

サブテーマ1では、大気中マイクロプラスチックの個数濃度、形状、実粒径および空気動力学径分布を日本国内ではじめて明らかにした研究であり、革新性、先導性がある。さらに、開発した手法をエアロゾルや大気沈着のみならず、雲水、積雪、鳥肺、海水に幅広く展開し、サブテーマ1で開発した分析手法は発展性が高いことを示した。特に、自由対流圏および大気境界層における雲水中AMPsの実証は世界初であり、The New York Timesから「20 Things that Happened for the First Time in 2023」の15番目に選出されており、きわめて革新性が高い。

サブテーマ2では、従来区別なく扱われてきた大気中マイクロプラスチックの中から最も寄与率の大きい自動車非排気粒子の排出インベントリを個別集計し、そのIL-8ベースの炎症誘導ポテンシャルを明らかにしたことが世界的にも新しい。また、自動車非排気粒子以外の発生源が明らかでない大気中マイクロプラスチックの対しても、日本国内の多地点観測とタグ付き数値モデルを用いた排出量最適化手法を用いて、東アジア領域と北半球領域についてその領域収支（発生量、輸送量、光劣化による変質量、沈着量）を定量的に明らかにした。特に、海洋由来のマイクロプラスチックの大気への排出機構が間接生成過程より直接生成過程の方が現実をよく再現するなどの知見も得られている。

サブテーマ3では、太陽光を照射していない繊維状PETと比較して、太陽光で劣化させた繊維状PETを吸入すると、肺の炎症と気道抵抗性の増大が生じることを初めて明らかにしており、独創性、先導性が高い。太陽光を照射すると、PETからTPAの持続的な流出が認められ、TPAが炎症を誘発することが示された。着目すべきは、「一度光劣化したPETが暗所でもTPAを放出し続ける」という現象である。すなわち、肺に取り込まれたTPAは、肺内でTPAを持続的に放出することになり、肺という排出機能が乏しい組織の毒性を考えるうえで、非常に重要な知見である。

<行政等に既に貢献した成果>

令和5年度環境中流出プラスチック研究戦略検討会、マイクロプラスチック・スマート懇話会道路交通WGにおいて、本研究課題で得られた知見、データ類を提供している。

＜行政等に貢献することが見込まれる成果＞

サブテーマ1では統一手法を用いて観測を行い、これまで報告例のない質量濃度、添加剤および吸着剤分析も行っており、大気中マイクロプラスチックの環境基準の必要性など環境行政で判断が求められる際の基礎情報を提供する。また、標準分析法の構築を行っていることから、今後、地方自治体で大気中マイクロプラスチック分析を行っていく際の指針となり、さらには世界の標準的な分析法にもなりうる。

また、日本の主要な落葉広葉樹であるコナラ葉がクチクラとトライコームにより、大気中マイクロプラスチックを強固に捕捉することが明らかになった。本研究結果で得られた概算ではあるが、国内コナラ林は年間22兆個ものマイクロプラスチックを大気中から捕捉し、森林土壌に蓄積させていることになる。一般に、この効果は森林フィルター効果と呼ばれる森林生態系サービスの機能の一つであるが、街路樹、公園林、工場周辺林に大気中マイクロプラスチック捕捉能が高い樹種を植えることにより、ヒトが呼吸により大気中マイクロプラスチックを吸うリスクを低減させることができる。また、大気中マイクロプラスチックを捕捉した落葉を回収してバイオマスとして燃焼させ、サーマルリサイクルとして熱エネルギーに転化し、放出される二酸化炭素を回収利用することにより、大気中に飛散して紫外線によりメタンや二酸化炭素が大気中に放出されるリスクを低減することが可能となる。

現在、研究代表者はクールアースと早成桐に関する共同研究を開始している。早成桐はわずか5年ほどで20メートル程度の成木になる樹種であり、二酸化炭素吸収量はスギの3倍と推計されており、葉面積も大きいことから大気中マイクロプラスチック捕捉能が大きいことも期待されることから、鉢植えの苗木を道路沿道に設置したり、植林した早成桐について成長過程での大気中マイクロプラスチック捕捉能の評価を行う。

数値モデルにおいても、大気中マイクロプラスチックの収支（発生、輸送、沈着）を評価したものととしてはBrahney et al. (2021)があるが、大気降下量の観測値のみから全球収支を解像している。モデルのエアロゾル沈着スキームは顕著に不確実性が高く、少なくとも1桁から2桁程度の誤差を持つため、彼らの発生源情報もその誤差を内包している可能性がある。本研究では北半球～アジア領域の収支ではあるものの、大気降下量だけでなく大気濃度と、さらに空気動力学径分布の観測値を活用することで、より信頼性の高い収支を見積もることができる。信頼度の低い発生源情報は、発生源対策の効果を見誤る。本研究でより信頼性の高い発生源情報を提供することで環境行政に貢献する。

太陽光で劣化したPET、PS、PPの作用を調べたところ、光劣化PETは非劣化のPETと比較して、強い呼吸器系障害作用を示し、光劣化PSはエピジェネティックな作用を示し、光劣化PPはマクロファージ活性化作用を示した。また、太陽光照射によりPETから流出するTPAが、光劣化PETの呼吸器影響の一因となること、光劣化PSから流出した安息香酸がエピジェネティックな作用を示すことが示唆された。従って、PETやPSをはじめとしたMPsのリスク評価には光劣化を考慮する必要があり、光劣化によるMPsの物性の変化だけでなく、溶出する化学物質の生体作用に着目すべきである。また、本研究で明らかとなった「光劣化したPETが暗所でもTPAを放出し続ける」という現象は、肺という排出機能が乏しい組織の毒性を考えるうえで、非常に重要な知見である。MPsの体内動態だけでなく、放出される化学物質の局所濃度の推定など、光劣化MPsが化学物質を放出するとの立ち位置に則った体内動態測定が必要となる。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	26
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	9
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	21
口頭発表（学会等・査読なし）：	90
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	193
研究成果による受賞：	9
その他の成果発表：	13

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Tokunaga, Y., Okochi, H., Tani, Y., Niida, Y. et al. (2023) Airborne microplastics detected in the lungs of wild birds in Japan, <i>Chemosphere</i> , 321 , 138032, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138032 .
2	Mizuguchi, H., Takeda, H., Kinoshita, K., Takeuchi, M. et al. (2023) Direct analysis of airborne microplastics collected on quartz filters by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry, <i>Journal of Analytical and Applied Pyrolysis</i> , 171 , 105946, https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105946
3	Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y., Hayami, H. et al. (2023) Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation, <i>Environmental Chemistry Letters</i> , https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x ,
5	Hidayat, N.A.A., Kitano, K., Tani, Y., Lestari, P. et al. (2024) Airborne microplastics in Bandung and Osaka: Concentration and characteristics, <i>E3S Web of Conferences</i> 485(30), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448506004
6	Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y., Miyazaki, A. (2024) Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage, <i>Environmental Chemistry Letters</i> , https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3
12	<u>Kajino, M.</u> , Watanabe, A., Ishizuka, M., Kita, K. et al. (2022) Reassessment of the radiocesium resuspension flux from contaminated ground surfaces in eastern Japan, <i>Atmos. Chem. Phys.</i> , 22 , 783-803, https://doi.org/10.5194/acp-22-783-2022 , 2022.

17	Kayaba, S., <u>Kajino</u> , M. (2023) Potential impacts of energy and vehicle transformation through 2050 on oxidative stress-inducing PM _{2.5} metals concentration in Japan, <i>GeoHealth</i> , 7, e2023GH000789, 29 pp., https://doi.org/10.1029/2023GH000789 .
21	<u>Kajino</u> , M., Kayaba, S., Ishihara, Y., Iwamoto, Y. (2024) Numerical simulation of IL-8-based relative inflammation potentials of aerosol particles from vehicle exhaust and non-exhaust emission sources, <i>Atmos. Environ.: X</i> , 21 , 100237, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100237
22	Ishihara N, Okuda T, Hagino H, Oguro A, et al. (2022) Involvement of polycyclic aromatic hydrocarbons and endotoxin in macrophage expression of interleukin-33 induced by exposure to particulate matter., <i>J Toxicol Sci</i> , 47(5):201-210, https://doi.org/10.2131/jts.47.201

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

【サブテーマ1】

- カンボジア APSARA 機構と早稲田大学で 2017 年に MOU を結び、大気汚染全般について共同研究を実施してきた。本プロジェクトにおいて大気中マイクロプラスチックの共同研究を実施している。
- 本プロジェクトにおいて、インドネシア・バンドン工科大学の Puji Lestari 教授／インドネシア・ディボネゴロ大学の Haryono Setiyo Huboyo 博士／ベトナム・ベトナム国家大学ホーチミン市校の To Thi Hien 准教授と共同研究 (AMPs 観測) を実施している。

【サブテーマ2】

排出インベントリの専門家である香港大学Nicky Lam准教授、鳥取大学乾燥地研究センターCHING Ping Pui特命助教（令和3年3月31日まで気象研究所に滞在）らと協力し、AMPsのボトムアップ排出インベントリ構築を行っている。

【サブテーマ3】

米国カリフォルニア大学デービス校Christoph F.A. Vogel博士、米国カリフォルニア州環境保護庁Norman Kado博士、ドイツライプニッツ研究所Thomas Haarmann-Stemmann博士との共同研究を実施している。特に、ベクター効果に着目しており、MPsが吸着する多環芳香族炭化水素の免疫影響を調べている。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
アプサラ機構	カンボジア王国
バンドン工科大学	インドネシア共和国
ディボネゴロ大学	インドネシア共和国
ベトナム国家大学ホーチミン市校	ベトナム社会主義共和国
香港大学	中華人民共和国香港特別行政区
カリフォルニア大学デービス校	アメリカ合衆国

カリフォルニア州環境保護庁	アメリカ合衆国
ライプニッツ研究所	ドイツ連邦共和国

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
大河内博	東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了 東京大学論文博士 博士（工学） 早稲田大学創造理工学部准教授を経て、 現在、早稲田大学創造理工学部教授 マイクロプラスチック・スマート懇話会道路交通WG委員、マイクロプラスチック に関する動向調査等業務におけるワーキンググループ委員 専門は環境化学、研究テーマは環境動態解析、環境影響評価

<研究分担者（サブテーマリーダー）略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
梶野瑞王	京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 東京大学先端科学技術研究センター（学振特別研究員・特命 助教）、 気象庁気象研究所（研究官）を経て、現在、同主任研究官 また、筑波大学生命環境系教授（連携大学院） 専門は気象学・大気化学の数値シミュレーション	
石原康宏	大阪大学大学院理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 徳島文理大学助教、広島大学助教、カリフォルニア大学博士 研究員、広島大学准教授を経て、 現在、広島大学大学院統合生命科学研究科教授 専門は薬理学・毒性学であり、微粒子の生体影響を研究	

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、大気中マイクロプラスチック（Airborne microplastics、AMPs）の採取法、前処理法、同定および定量法を確立し、国内外に大気エアロゾルおよび大気沈着の観測網を構築した（国内13箇所、離島一箇所、東南アジア三カ国、北極圏）。統一手法を用いた観測網としては世界最大であり、季節変化、地域特性の解明を行った。開発した分析手法を雲水、積雪、鳥肺など様々な試料に適用し、数多くの世界はじめての成果を挙げた。

1. サブテーマ1 研究開発目的

AMPs迅速定量法の開発を目的としている（図1-1）。AMPsの最小計測径は実粒径（Feret径）で10 μm 以上が多く（Luo et al., 2022）、肺胞に到達する空気動力学径2.5 μm 以下（PM_{2.5}）、肺胞内で細胞膜を透過する実粒径5 μm 以下の報告は限られている。一般に、 μFTIR -反射法ポイント法では10 μm 、 μFTIR -ATRポイント法では5 μm 、 μFTIR -ATR（Attenuated Total Reflection）イメージング法では3 μm 程度が最小計測径とされているが、 μFTIR を用いた既往研究の最小径は5 μm である（Brahney et al, 2020）。

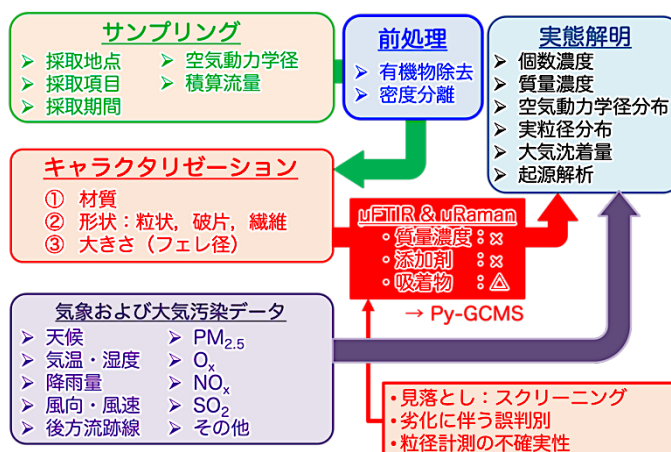


図1-1 大気中マイクロプラスチックの研究概要と課題

以上のような背景を踏まえて、サブテーマ1では、実粒径（Feret径）で5 μm 以下の同定を行える μFTIR -ATRイメージング法を開発し、AMPsの空気動力学径分布の解明を行う。さらに、 μFTIR -ATRイメージング法では検出困難な実粒径1 μm 未満のナノプラスチック、空気動力学径で0.1 μm 未満（PM_{0.1}）の大気中ナノプラスチック（ANPs）の質量濃度、添加剤および吸着物の解明を目的としてPy-GCMS法を確立する。

既往研究では採取法、前処理法、解析法が異なり、単純に大気中濃度や大気沈着量を比較できないという課題があることから、同一手法で大気エアロゾルおよび大気沈着を採取し、同一の前処理法、同定および計量手法を用いてAMPsの計測を行い、国内外におけるAMPsの実態解明を行う。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と実態解明」
サブテーマ1 実施機関	早稲田大学、徳島大学、東洋大学、大阪公立大学
サブテーマ1 目標	1試料あたり2日以内のAMPs迅速前処理法、 μFTIR による24時間以内の全面積AMPs自動計測法を確立する。国内12箇所（都市：札幌、新宿、名古屋、大阪、広島、徳島、北九州、森林：福島、生田、富士山麓、遠隔：利尻、能登）で大気濃度と大気沈着の観測ネットワークを構築する。富士山頂、太平洋上、北極、南極、東南アジアのAMPsを分析して地球規模汚染の実態を解明する。AMPs添加物・吸着物の同定を行う。

3. サブテーマ1 研究開発内容

(1) 大気中マイクロプラスチックの迅速分析法の確立

μFTIR や μRamann など分光学的手法で MPs を同定する場合、MPs を鉱物粒子などの共存物質から分離し、MPs に付着した汚染物質を除去し、MPs を濃縮し、MPs の誤判別を防ぐために前処理が必要となる。水圏 MPs ではふるい分け（ニューストンネットなど）、ろ過、分解（有機物除去）、密度分離を前処

理として行うが、AMPsの既往研究では前処理を行わずに計測している例が多く（Luo et al., 2022）、誤判別を引き起こす要因となっている。有機物除去を行っている数少ないAMPsの先行研究（Allen et al., 2019; Akhbarizadeh, 2021）では海洋MPsと同様に一週間から二週間を要しており、大量の試料分析に適していない。このような状況を踏まえて、本研究では大気エアロゾル、大気沈着に関する採取法の確立を目指した。

a. ブランク低減

試薬類、フィルター、ガラス器具、室内空気、作業による汚染の低減を検討した。

b. 有機物除去

H₂O₂（常温）処理時間、H₂O₂（加温）の温度依存性、フェントン試薬の利用を検討した。

c. 密度分離

密度分離に国内外で様々な重液が利用されているが、使用する重液密度によってMPs組成は異なる。本研究では、海洋MPsはAMPsの重要な起源となりうることから、国内で海洋MPs分析に使用されているヨウ化ナトリウム（NaI、密度1.5 g/cm³）を用いて前処理を行った。研究代表者は、本プロジェクト開始前にAMPsの密度分離条件を検討しており、海洋MPsで用いている“振とう静置法”ではAMPsと鉱物粒子との分離が十分に行えないことを経験していることから“振とう遠心分離法”の抽出効率について検討した。

d. キャラクターゼーション

μFTIR-ATRイメージング法によるAMPs同定および計数精度（ポリマー組成、形状、フェレ径）の向上のため、吸引ろ過面積の縮小、スクリーニングおよび解析手法（ノイズ削減、スムージング）、AMPs専用データベース構築を行った。

サブミクロンサイズのMPs同定を目的として、当初は計画していなかったが、2021年度からO-PTIR（光熱変換赤外分光法）を日本サーマル・コンサルティング、顕微ラマン法を日本分光と共同研究を行った。

添加物および吸着物計測、質量濃度計測のため、エアロゾル直接導入Py-GCMS法をフロンティア・ラボとの共同研究で2022年度から開始した。

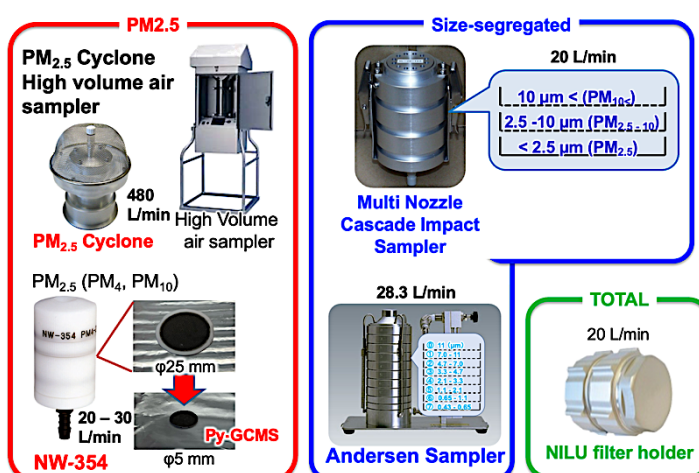


図1-2 AMΦプロジェクトで用いた大気エアロゾル採取装置

(2) 実態調査のための採取装置開発と国内外における観測網構築

Luo et al. (2022) はAMsに関する先行研究を整理して、エアロゾル、大気沈着（フォールアウト）、粉塵、積雪に分類し、エアロゾル採取をアクティブ、大気沈着、粉塵、降雪採取をパッシブとしているが、大気化学に基づく分類ではない。

また、エアロゾルはTSP（Total suspended particulate）を対象としており、空気動力学径を考慮していない。このような状況を踏まえて、本研究では大気エアロゾル、大気沈着に関する採取法の確立を行った。

a. 大気エアロゾル

地上観測

地上大気エアロゾルでは、Multi-nozzle Cascade Impactor（MCI）サンプラー（東京ダイレック）で空気動力学径別採取（吸引流量20 L/min、PM_{2.5}：2.5 μm以下、PM_{2.5-10}：2.5-10 μm、PM_{10<}：10 μm以上）を季節毎に行った（図1-2、図1-3）。各季節に一週間採取を四週、または、二週間採取を二週とした。捕集材として、μFTIR-ATRイメージング計測用にフッ素樹脂バインダーガラス繊維フィルター（Pallflex™, TX40HI20WW、捕集効率：0.3 μmを99.95 %）、Py-GCMS計測用に石英繊維フィルター（Pall Tissuquartz™ filters, 2500 QAT-UP、捕集効率：0.3 μmを99.90 %）を用いた。

都市一般大気および道路沿道大気中AMPsの空気動力学径分布を詳細に調べるために、アンダーセンサンプラー（図1-2）で捕集を行った。アンダーセンサンプラーでは捕集材としてステンレス板に直接捕集した。また、計画段階では想定していなかったが、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を用いたAMPsの鉛直観測、AMPsの個人暴露評価のために、NW-354（柴田科学、慣性衝突式分粒装置付ホルダ、図1-2）を用いたPM₄およびPM_{2.5}の採取法について検討した。

自由対流圏

自由対流圏に位置する富士山頂では、AMPs採取用にアルミニウム製PM_{2.5}サイクロン分級装置を新規開発し（図1-2、図1-5）、ハイボリウムエアサンプラーによりフッ素樹脂バインダーガラス繊維フィルター（TX40HI20WW）上に採取した（吸引流量480 L/min）。サイクロン分級装置を用いたのは、富士山頂では雲が頻繁に発生するため、インパクターによる分級では雲粒がはじけて雲水を吸引して故障したという経験に基づく。なお、自由対流圏におけるAMPs濃度を明らかにするため、タイマーにより夜間のみ（18:00-4:00）の採取とした。

北極圏

北極・ニーオルスンにおける大気エアロゾルの採取には、マイクロプラスチックサンプリング用として唯一市販されているフィルターホルダー（図1-2、NILU製NL-O-01A、以降、NILUホルダー）により捕集した。NILUホルダーはポリカーボネートからアルミに変更することでプラスチック混入を低減した製品である。ただし、NILUホルダーには分級機構がないため、全浮遊粒子状物質（TSP）の採取となる。吸引流量10 L/minでPTFEメンブレンフィルター（ADVANTEC製、孔径：0.2 μm）に捕集した。

b. 大気沈着

大気沈着量計測用にバルクサンプラーを自作した（図1-4）。ステンレス漏斗（採取面積0.045 m²）内部に5 mm目の金網をステンレスマグネットで固定した。ロッカー内部のガラス製ろ過ホルダーに孔径1.0 μm PTFE親水性メンブレンフィルターを装着し、雨水中マイクロプラスチックを捕集した。PTFE親水性フィルターをステンレスピンセットで採取面を内側に二つ折りにして50 mLガラス製遠沈管に入れて回収した。PTFE親水性フィルターでは降雨量が多い地域ではろ過速度が遅く、溢れてしまうという状況が頻発したため、より親水性が高い混合セルロースメンブレンフィルター（孔径1.2 μm）に変更した。

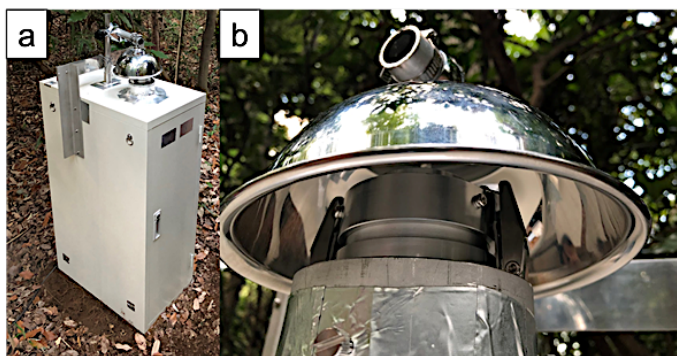


図1-3 大気エアロゾル採取装置（a:全景，b：雨よけ）

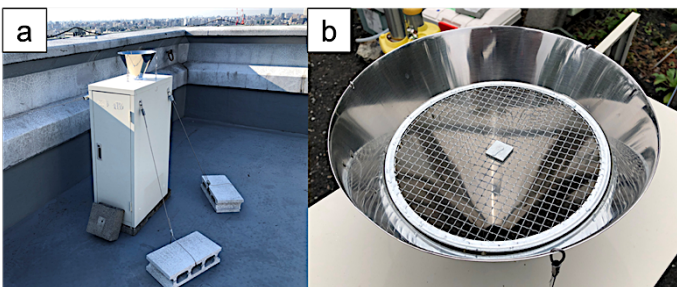


図1-4 大気沈着採取装置（a：全景，b：漏斗部）

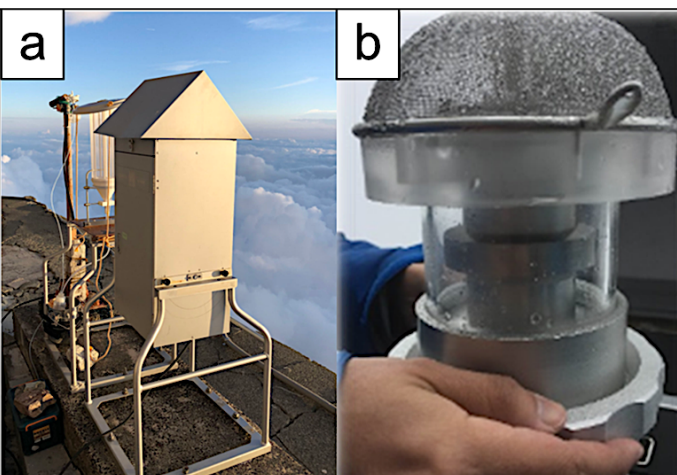


図1-5 富士山頂におけるPM_{2.5} AMPs採取装置の設置状況（a：全景，b：PM_{2.5}サイクロン式分級装置）

c. 観測網の構築

国内13箇所（都市7地点、郊外4地点、遠隔地2地点）に採取装置を設置し、全国一斉調査を2021年7月から順次開始した（図1-6）。当初、離島として利用を計画していたが、電源確保の問題があること、また、海洋大気中マイクロプラスチックの実態解明には日本列島からより離れた離島が望ましいことから、東京から約1000 km離れた父島での観測を2023年9月から開始した（2023年9月から14箇所）。なお、本研究では交渉が難航し、九州での観測を行うことができなかった。



図1-6 大気中マイクロプラスチック国内観測網

計画段階では想定していなかったが、富士山頂、新潟松代、富山県立山では積雪採取、富士山頂、富士山麓、丹沢大山では雲水採取を行った。海外観測では、2022年度に太平洋上、北極圏でエアロゾル観測、南極で雪氷採取を行った。また、東南アジア（インドネシア、カンボジア、ベトナム）での観測は2022年度夏季から開始した。

得られたデータは、サブテーマ2の環境動態モデリング、サブテーマ3の呼吸系影響評価のための基礎データとして共有する。

(3) 呼吸器影響評価のための試料調製

サブテーマ3の呼吸器影響評価に用いる実大気中AMPs粒子を得るために、2021年度にPM_{2.5}中AMPs乾式分級装置開発を目的として、柴田科学が開発した大容量微分型静電気分粒器（DMA）（小山ら、2007）の改良を想定して打ち合わせを行った。しかしながら、柴田科学ではすでに装置の製造販売を終了しており、入手不可能であった。東京ダイレック、リサイクル民間企業とも打ち合わせを行ったが、十分な装置開発費用がないことから、PM_{2.5}中AMPs乾式分級装置開発は断念せざるを得なかった。

代替策として、国立環境研究所・資源循環領域の田中厚資博士が開発された汎用プラスチックのナノおよびマイクロプラスチックビーズ合成法（Tanaka et al., 2021）に着目し、サブテーマ3に合成した汎用プラスチックのナノおよびマイクロプラスチックを提供して細胞および動物試験を行うこととした。

4. サブテーマ1 結果及び考察

(1) 大気中マイクロプラスチックの迅速分析法の確立

a. ブランク低減

AMΦ プロジェクトでは、すべての試薬、超純水、フィルター、ガラス器具からの汚染がないことを確認し、ブランクが確認された試薬類はすべてろ過し、室内環境汚染を防ぐために前処理はすべてクリーンブース内で行い、実験者は綿製の白衣、手袋、マスクを着用している。計測時には試料が室内環境に曝されることから、μFTIR 装置本体をチャンバー内に入れて室内環境汚染を防ぎながら計測を行った。さらに、前処理室および計測室は毎朝掃除を行い、ブランクはほぼゼロに抑えられた（成果番号 1、3、5、6）。

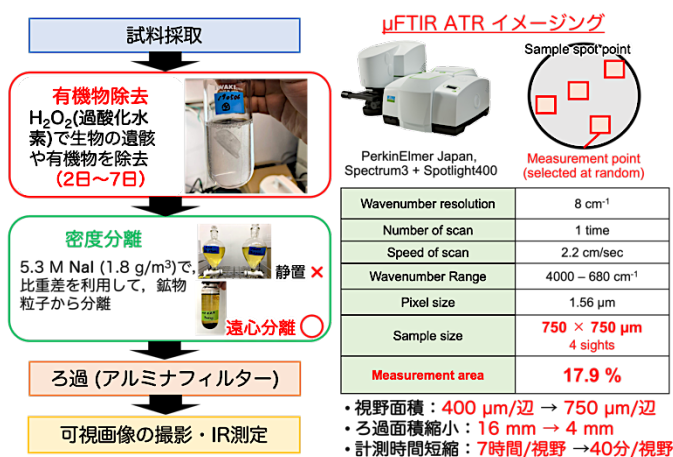


図1-7 μFTIR-ATRイメージング法による大気中マイクロプラスチック迅速分析法の検討

b. 有機物除去

過酸化水素 (H_2O_2) による有機物処理が一般的であり、30 % H_2O_2 で一週間程度、常温静置する例が多いが (Prata et al., 2021)、70 °C未満で加温すれば1日未満に短縮できる (Allen et al., 2019)。70 °Cを超えるとMPs表面が損傷する (Munno et al., 2018)。本研究では合成したマイクロビーズを用いて過酸化水素 (H_2O_2) の温度依存性を検討したところ、60 °C以上では表面損傷が観察されたことから、60 °C未満とする必要があることを明らかにした (成果番号 109)。

フェントン試薬 (30 % H_2O_2 30 mL+ FeSO_4 0.08 g) は反応が激しく、林内雨のように有機物量が多い試料でも一日で分解できた (成果番号 75)。ただし、フェントン試薬では赤褐色沈殿が生じ、 μFTIR ATRイメージング法でGeクリスタルを傷つけてしまった。密度分離を2回行うことにより赤褐色沈殿は完全に除去できるが、フェントン試薬では急速に反応が進み、温度制御も難しいことから、AMPsのように粒径が小さい場合には影響を受けやすく、AMPsの前処理には不向きである。

本研究では、より緩やかな有機物分解法として30 % H_2O_2 を数回に分けて添加した。エアロゾルでは2日間の常温静置により、糖類やタンパク質などの天然有機物の残存が確認されたが、誤判別することなく同定可能であった (成果番号109)。

c. 密度分離

密度分離に5.3 M NaI (密度: 1.5 g/cm³) を用いたが、振とう後静置では鉱物粒子の分離が不十分であったことから、遠心分離 (1500 rpmで1時間) を行うことにより鉱物粒子の分離を短時間で行うことが可能となった。ただし、Py-GCMSを用いて回収率を求めたところ、PVCでは回収率が低い可能性があり、一回の密度分離では回収率が20 %、三回でも60 %程度の回収率であった (成果番号109)。ポリマーによっては回収率が低い可能性がある。ただし、 μFTIR -ATRイメージング法の最小径は本研究では2.6 μm であるのに対して、Py-GCMS法ではフィルター孔径である0.3 μm までが計測可能であることから、Py-GCMSで回収率を求めた場合、 μFTIR -ATRイメージング法の回収率を過小評価している可能性がある。

なお、市販NaIには不純物として多数のPETが検出され、NaI溶液を使用前に吸引ろ過することによりブランクを大幅に低減させた (成果番号1、3、5、6)。

d. キャラクタリゼーション

ATRクリスタルを400 μm /辺から750 μm /辺に変更し、より広い範囲を迅速に計測できるように改良した。定量精度向上には全面積測定が望ましいが、ろ過面積が大きい場合には膨大な時間を要するとともに、現行装置のシステム上の問題で全面積測定的はできない。そこで、アルミナフィルターの最終ろ過面積を $\Phi 16\text{ mm}$ から $\Phi 4\text{ mm}$ に変更し、17.9 %計測 (視野面積750 $\mu\text{m} \times 750\text{ }\mu\text{m}$, 4箇所) を標準とした。また、低濃度試料では最終ろ過面積を $\Phi 1\text{ mm}$ に絞り、視野面積1箇所の計測で70 %以上の計測を可能とした。なお、北極圏エアロゾルのようなきわめて低濃度の試料では全面積測定を行った (図 1-7)。

μFTIR -ATR イメージング法による測定精度向上に取り組み、ブランク値の5 σ として最小実粒径で2.6 μm 程度までの計測を可能とした。また、劣化度を考慮したAMPs専用データベースを構築した。

スクリーニングはポリマー共通の振動バンドである3000 – 2700 cm⁻¹で行ってきたが、新たに1750 – 1710 cm⁻¹ (C=O 伸縮振動の吸収ピーク) で行うことによりPETの検出率を格段に向上させた (成果番号1、3、5、6)。

e. その他の同定法

O-PTIRを富士山麓で冬季に採取したPM_{2.5}に適用したところ、最小1 μm のAMPsの同定に成功した (成果番号37、64、68)。さらに、熱分解GCMSを徳島で採取したPM_{2.5}に適用したところ、前処理なしに大気中マイクロプラスチックの質量濃度計測に成功した (成果番号2)。熱分解GCMSでは μFTIR のようなMPs分離が不要であり、前処理5分、分析時間40分で大気中マイクロプラスチックの質量濃度を定量可能である。今後は分析条件の最適化を進め、添加剤、吸着剤、主要ポリマーの質量濃度の国内外で計測していく。

(2) 国内外における大気中マイクロプラスチックの実態説明

① ポリマー材質

本研究で同定したポリマーの種類は 32 種類であり、図 1-8 のように分類した。先行研究と本研究から AMPs の主成分はポリプロピレン (PP)、ポリエチレン (PE)、ポリエチレンテレフタレート (PET)、ポリスチレン (PS) などの汎用プラスチックであった。他に、ポリ塩化ビニル(PVC)、ポリカーボネート(PC)、ポリビニルアルコール (PVA)、ポリメタクリル酸メチル樹脂 (PMMA)、エチレンアクリル酸エチル共重合体 (EEA)、ポリアミド(PA)、ポリイミド (PI)、ポリ乳酸 (PLA)、ポリヒドロキシ酪酸 (PHB)、ポリアクリロニトリル (PAN)、ポリ(N-メチルアクリロアミド) (PAA)、レイヨン (RY)、エポキシ樹脂 (EP)、アルキド樹脂 (ALK)、エチレン酢酸ビニル (EVA)、シリコン樹脂 (SI)、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体 (ABS)、ポリウレタン (PUR)、スチレンブタジエンゴム (SBR) などが同定されている。ただし、樹脂かゴムか判別が難しい事例も多いが、エチレンプロピレン共重合体、ポリエチレンとポリプロピレンのポリマーアロイの判別は FTIR では困難であり PE/PP と分類した。

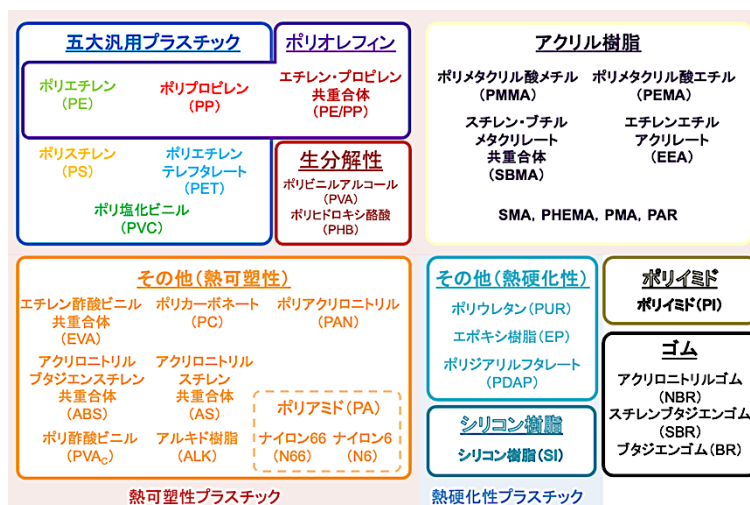


図1-8 大気中マイクロプラスチックの分類

② 個数濃度

a. 陸上大気エアロゾル中AMPsの国際比較

Revell et al. (2021) は全世界で報告されたエアロゾル中AMPs個数濃度を0.01 – 5650個/m³と報告している。中国・北京 (5650個/m³) と英国・ロンドン (2502個/m³) で極端に高く、計測手法の問題が考えられる。中国五都市で統一手法により観測が行われた研究では、北部 (北京, 天津) で358 個/m³、南部 (南京, 上海, 杭州) で230 個/m³ (五都市平均: 282個/m³)、中国東部沿岸都市の温州では224 個/m³である (Liao et al., 2021)。東南アジアでは、スラバヤ (インドネシア) で109個/m³ (Syafei et al., 2019)、シェムリアップ (カンボジア) における雨季の観測結果では2.44 – 48.8 個/m³ (n=5) (成果番号44)、バンドン (インドネシア) では6.63個/m³ (n=5) (成果番号5)。その他の地上観測では0.9 個/m³ (パリ, フランス) – 14個/m³ (サンパウロ, ブラジル) であった。

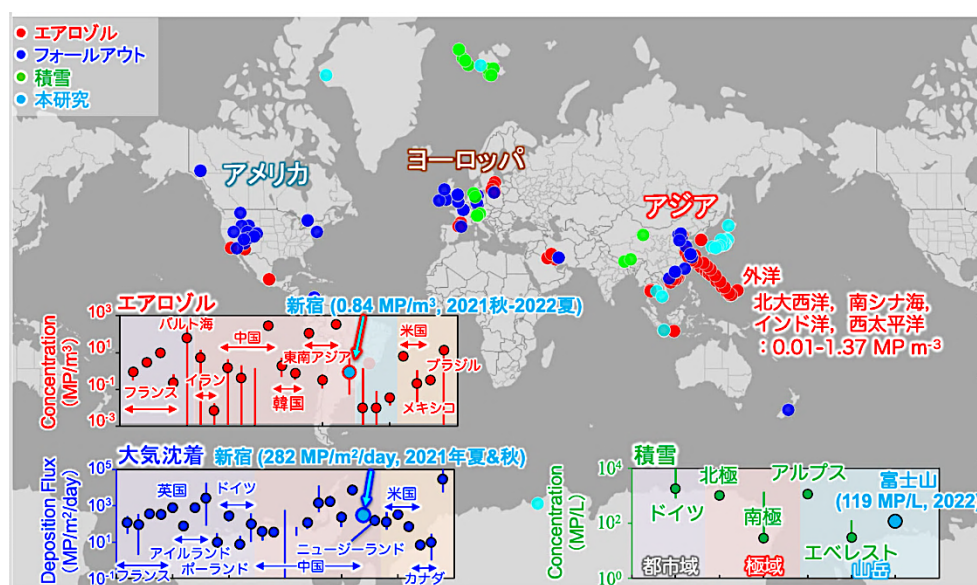


図1-9 エアロゾル、大気沈着、積雪中マイクロプラスチック個数濃度の比較

図1-9には、本研究により首都圏新宿で得られたエアロゾル中個数濃度、大気沈着量、富士山頂で得られた積雪中個数濃度を既往研究と比較して示している。新宿におけるエアロゾル中AMPs濃度は0.84個/m³（2021年秋季～2022年夏季の平均値）であり、既往研究と比べて低濃度側に分布していた。

以上より、世界的に観測事例は少ないが、中国と東南アジアではAMPs個数濃度が高い傾向にあり、プラスチックゴミの河川流出が中国と東南アジアで世界的に多いことと一致する（Jambeck et al., 2015）。

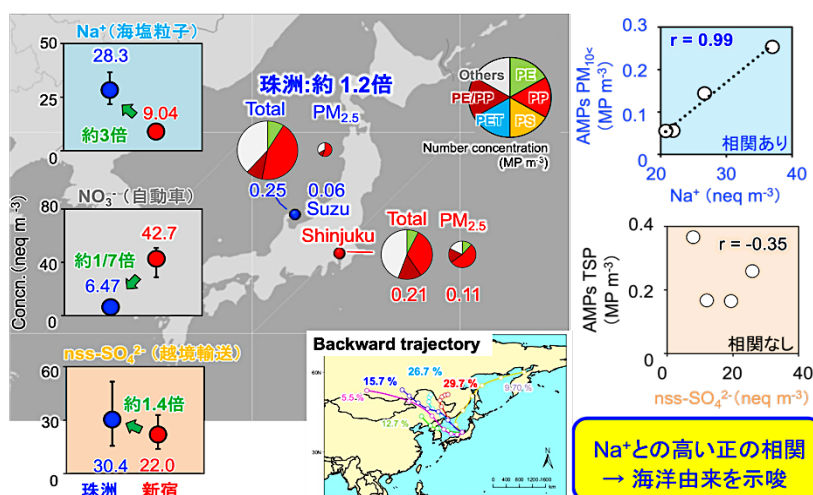


図1-10 大気中マイクロプラスチックの濃度分布の季節変化（2022年～2023年）

b. 大気エアロゾル中AMPsの国内比較：太平洋側都市大気 vs. 日本海側遠隔大気

図1-10には、2022年冬季（一月）における新宿と珠洲のTSPおよびPM_{2.5}中AMPs濃度とそのポリマー組成、Na⁺濃度、NO₃⁻濃度、nss SO₄²⁻濃度を比較している。2022年のTSP中AMPsのポリマー組成は類似しており、PP、PE、PE/PPが主成分であり、TSP中AMPs濃度は珠洲でやや高く、PM_{2.5}中AMPs濃度は新宿で高かった。また、珠洲では新宿に比べてNa⁺濃度、nss SO₄²⁻濃度が高かった。このことから、珠洲では冬季の北西季節風の影響を受けてTSP中AMPs濃度、Na⁺およびnss SO₄²⁻濃度が高濃度であったと言える。

大陸から越境輸送と日本海からの飛散が考えられるが、珠洲では粗大粒子を含むTSP中AMPs濃度が高く、海塩粒子由来であり粗大粒子領域に分布するNa⁺濃度比が、越境大気汚染由来であり微小粒子領域に分布するnss SO₄²⁻濃度比よりも高いことから、冬季に荒れた日本から放出される海塩粒子とともに、海洋MMPsが輸送された可能性が高い。そこで、Na⁺濃度と粗大粒子領域のAMPs濃度の相関分析を行ったところ、両者にはきわめて高い正の相関性（ $r=0.99$ ）があることから、冬季に珠洲で観測された粗大粒子領域のAMPsの起源は海洋MMPsであることを裏付けている。

そこで、能登半島の冬の風物詩である“波の花”に海洋MPsが濃縮され、強風によって大気中に飛散しているという仮説を立て、AMPs用に開発したμFTIR-ATRイメージング法を晴天時に採取した表層海水と“波の花”に適用して大気飛散の可能性がある100 μm以下の海洋MMPsの実態解明を行った（図1-11）。その結果、“波の花”では表層海水に比べて130倍～600倍も濃縮されていることが分かった。“波の花”では表層海水に比べてPEとPPが多く、冬季における大気エアロゾル中AMPs組成と類似していた（図1-10）。

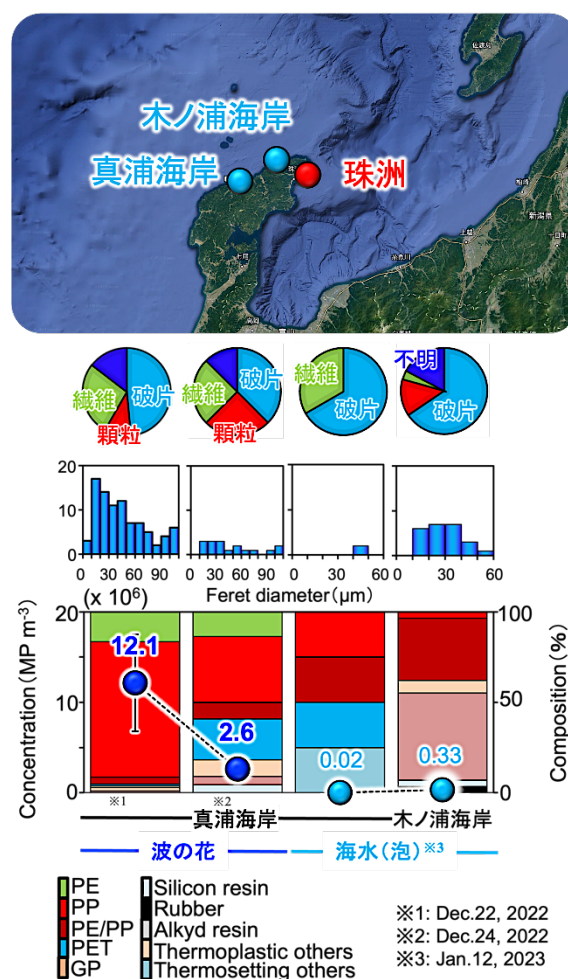


図1-11 “波の花”の個数濃度とポリマー組成

c. 都市大気エアロゾル中AMPsの季節変化

既往研究では、大気エアロゾル中AMPsの季節変化は明らかになっていない。図1-12に新宿における2022年冬季から2023年夏季までの大気エアロゾル中AMPs濃度の季節変化を示す。平均濃度はTSPで0.25-0.66個/m³、PM_{2.5}で0.07-0.24 個/m³であった。2022年春季にTSPおよびPM_{2.5}中AMPs濃度に明瞭な季節変化は見られなかったが、夏季にPM_{2.5}がTSPに占める割合が高い傾向にあった。TSP、PM_{2.5}ともに、PEとPPが主成分であった。

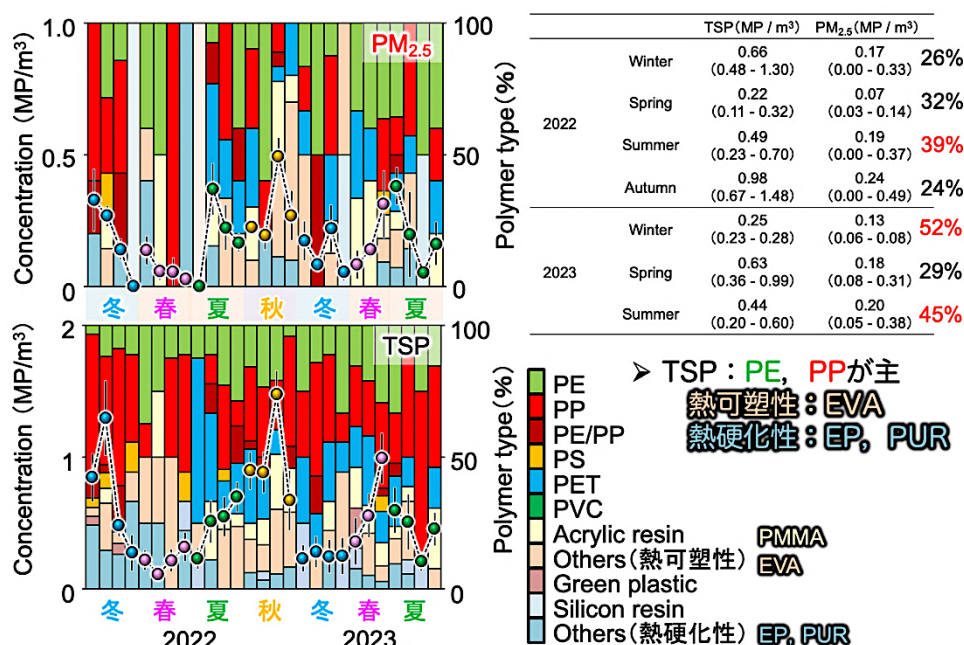


図1-12 新宿における大気マイクロプラスチック濃度の季節変化

d. 道路沿道大気エアロゾル中AMPs

図1-13には明治通り沿道大気エアロゾル中AMPs濃度とそのポリマー組成の空気動力学径分布を示す。PM_{2.5}、PM_{2.5-10}、PM_{10<}で個数濃度に明瞭な違いはなく、大気エアロゾル中AMPs (図1-12) に比べてエチレン酢酸ビニル (EVA) とポリウレタン (PUR) が高かった。このことから道路沿道由来と考えることができる。EVAは人工芝、改質アスファルト、靴底ソールなどに使用されており、PURも靴底ソールなどに使用されている。PM_{10<}からゴムが検出されたが、μFTIRでゴム同定は困難である。そこで、明治通り沿道大気エアロゾル中AMPsをPy-GCMS法で分析し、ポリマー別質量濃度の空気動力学径分布を調べた (図1-14)。自動車タイヤ磨耗塵由来と考えられるスチレンブタジエンゴム (SBR) はPM_{10<}でのみ検出された。このことから、図1-13のPM_{10<}で検出されたゴムはSBRであると考えられる。PM_{2.5}の主成分は個数濃度でPP、PS、PET、EVA、PURであり、質量濃度ベースでPEとPVCが主成分であった。両者の採取時期が異なることから季節変化差による違いも否定できないが、分析法によって組成が大きく異なる可能性を示している。既往研究との比較においても、分析法の違いを注意して比較する必要がある。なお、形状は破片状が半分以上を占めていた。

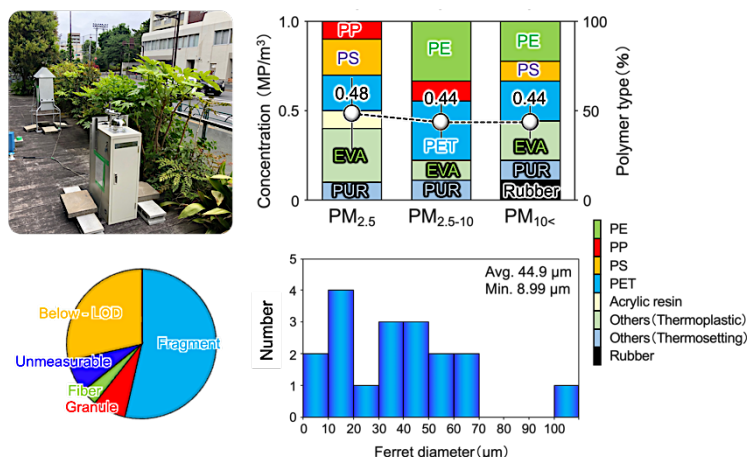


図1-13 新宿における明治通り沿道大気エアロゾル中AMPs個数濃度およびポリマー組成の空気動力学径分布、形状割合および実粒径 (Ferret径) 分布 (2022年5月9～13日)。Below-LODはSavitzky-Golay(SG)法で同定できたが、PCA法で計測不可であったもの

e. 用途別陸上大気エアロゾル中AMPsの地域比較

図1-15には、プラスチック用途別に大気エアロゾル中AMPs濃度を比較したものである。図1-13で示したように、EVAとPURは道路由来、繊維状（PET、PA、PAN、PP）を衣服由来、汎用プラスチック（PE、PP、PS、PET）に分類し、それらの地域毎に濃度比較を行った。TSP中AMPs個数濃度は徳島で低い以外に明瞭な地域は認められず、汎用プラスチックでも同様であった。一方、道路由来と衣服由来では明らかに新宿で高い傾向があり、交通量や人口密度の違いを反映している可能性が示された。

f. 自由対流圏大気中AMPs

地球規模汚染の実態解明のため、自由対流圏大気に位置する富士山頂（3776 m）で2021年から2023年までの夏季（夜間のみ）にPM_{2.5}の観測を行った（図1-16）。3年間の観測により自由対流圏PM_{2.5}中AMPs個数濃度は0.01～0.19 個/m³であることが分かった。2023年には空気塊依存性は明確ではなく、実粒径30-40 μmにピークがあり、PP、PE、PET、PE/PPから構成される単純なポリマー組成であった。

2021年の観測では明瞭な空気塊依存性がみられ、太平洋上空からの清浄な空気塊では0.06 個/m³であり、太平洋上の報告値と同レベルであった。しかし、大陸上空から流入すると0.10 MP/m³に増加し、東南アジアの地上部から空気塊が流入すると、さらに増加して0.19 MP/m³であった。清浄大気ではPETとPPからなる単純な組成であったが、東南アジアの地上大気が流入すると、PE/PP、ABS樹脂、ポリカーボネート（PC）などの種類が増加した。

一方、本研究開始前である2019年の観測ではPM_{2.5}中AMPs個数濃度は4.9 個/m³であり、このときには台風が富士山を直撃した。日本近海の表層海洋マイクロプラスチック濃度は高いことから、台風が自由対流圏高度まで海洋マイクロプラスチックを巻き上げている可能性が示唆された。サブテーマ2との連携で、海洋マイクロプラスチックが自由対流圏大気に及ぼす影響について数値シミュレーションを行っている。

図1-17には、富士山頂で採取したPM_{2.5}、積雪、雲水のAMPsの組成を示す。PM_{2.5}と積雪に含まれるAMPsの主成分はポリプロピレン（PP）、ポリエチレン（PE）、ポリエチレン・ポリプロピレン共重合体（PE/PP）など疎水性プラスチック

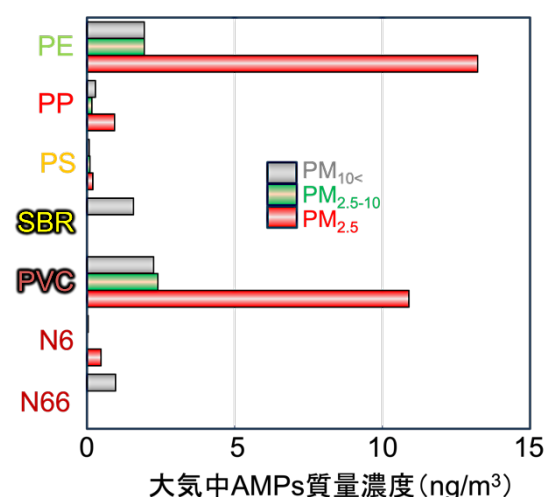


図1-14 新宿における明治通り沿道大気エアロゾル中AMPsのポリマー別質量濃度の空気動力学径分布

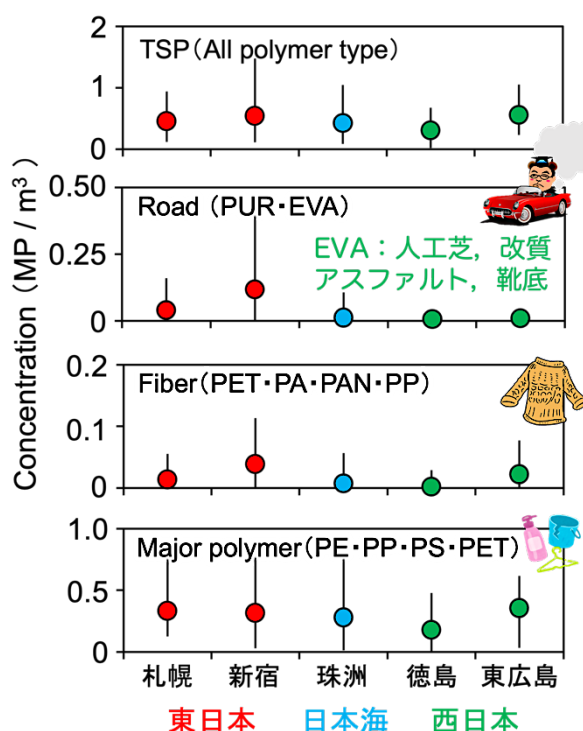


図1-15 大気エアロゾル中AMPsの用途別濃度比較

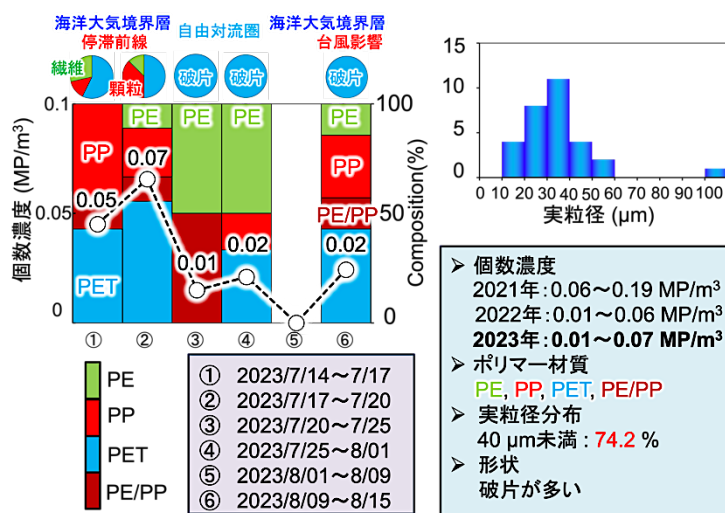


図1-16 2023年夏季に富士山頂で採取したPM_{2.5}中AMPs個数濃度、ポリマー組成および実粒径（Feret径）分布

クが50%以上を占めていた。一方、雲水では疎水性プラスチックの割合は低く、ポリエチレンテレフタレート（PET）、ポリカーボネート（PC）、ポリアミド（PA；ナイロン6、ナイロン66）、ポリウレタン（PU）などプラスチックの中では親水的なプラスチックの割合が多かった。ただし、積雪と雲水から検出されたポリプロピレン（PP）は、都市部の新宿で採取したPM_{2.5}に含まれるポリプロピレン（PP）よりも著しく劣化しており、親水的であった（成果番号3）。

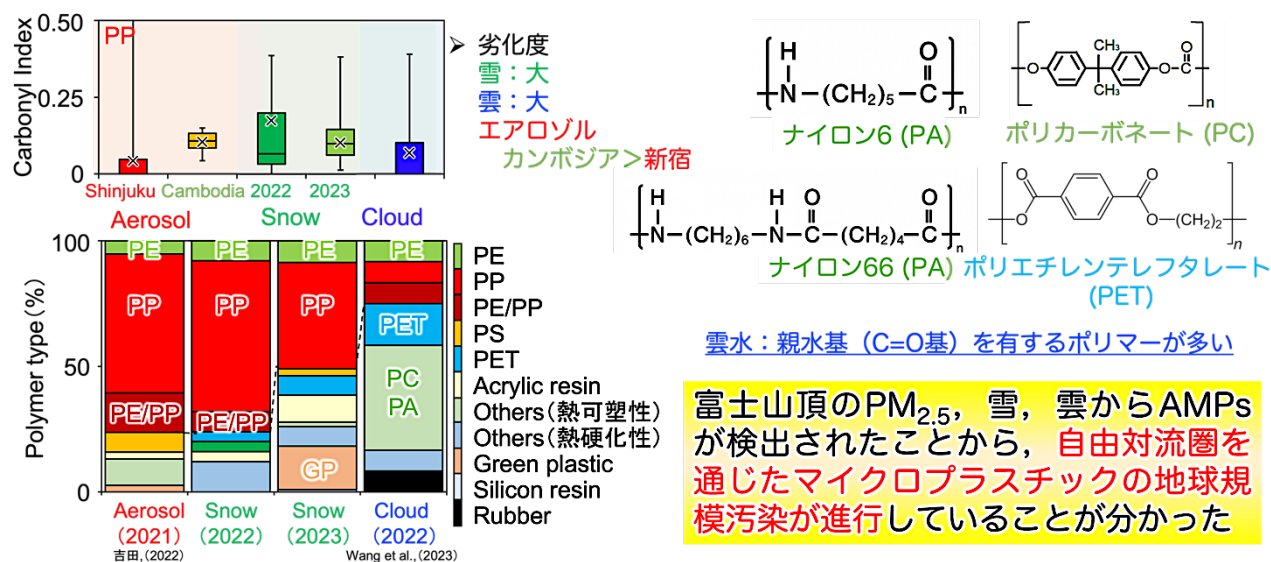


図1-17 富士山頂で採取したPM_{2.5}、積雪、雲水中AMPsのポリマー組成の比較

g. 大気沈着

大気沈着では前処理時に鉱物系粒子と思われる粒子の分離が不十分であり、μFTIR-ATRイメージング法で計測する際にクリスタルに傷をつけてしまうという問題が解決できていない。確立した前処理法で同定は可能であるが、夾雑物をさらに削減するために前処理法の改善を行っている。

2021年夏季から秋における大気沈着量を比較すると、堺（514 個/m²/day）>新宿（282 個/m²/day）>札幌（174 個/m²/day）>徳島（45 個/m²/day）であった。堺で大気沈着量が極端に高かったのは台風の影響による。東日本（札幌、新宿）と西日本（堺、徳島）では、それぞれ特徴的なポリマー組成を示しており、東日本ではPE、西日本ではPETの割合が高かった。形状としては破片状が多く、二次MPsが主成分と考えられた。

新宿における大気沈着量を海外と比較すると（図1-9）、米国と同程度であり、世界の中間的な大気沈着量である。日本では夏季から秋季にかけて台風の影響により降水量が多いことを反映したものと考えられる。

h. 森林樹冠による捕捉能

本研究では、首都圏小規模森林である生田（18 ha）で林外沈着量とコナラ林内沈着量の差から乾性沈着量を求める検討を行ったが、林内沈着量が林外沈着量と同程度であり、樹冠捕捉されたAMPsが降雨によって洗脱されないことが分かった。コナラ葉の超純水による葉面洗浄、超音波抽出（トライコームによる捕捉）、10 % KOH溶液への浸漬（エピックチクラ収着）による逐次抽出を行ったところ、90 %以上がトライコームおよびエピックチクラに捕捉されており、葉面捕捉量は0 - 0.21 個/cm²であった。観測結果に基づいて日本国内のコナラ林によるAMPs捕捉量を推計したところ年間で42兆個と推計された（成果番号6）。

i. 野鳥による吸引リスク

本研究で開発したμFTIR-ATRイメージング法を鳥肺中AMPsの検出に適用し、鳥肺から世界ではじめ

てAMPsの検出に成功した（成果番号1）。東京湾で棲息するカワラバトからはPPとPE、伊勢湾周辺で棲息するツバメからEVAが検出され、棲息環境の違いか、鳥類の種類による可能性が考えられた。

（3）呼吸器影響評価のための試料調製

実大気中マイクロプラスチックの代替策として、国立環境研究所で開発したナノおよびマイクロビーズの合成法を2022年度に取得し、2023年度に本格的に着手した。現在、五大汎用プラスチックのうちポリエチレンとポリプロピレンのナノプラスチック粒子合成に成功した（図1-18）。今後、人工的に紫外線劣化させ、国内都市部や東南アジアで野外暴露試験を行って大気汚染物質と接触させることにより、模擬大気中ナノおよびマイクロプラスチックを作成してサブテーマ3に提供する準備を進めている。本研究の継続課題（5-2404：大気中マイクロ/ナノプラスチックの海洋-陸域相互作用と劣化機構）で実験を行う予定である。

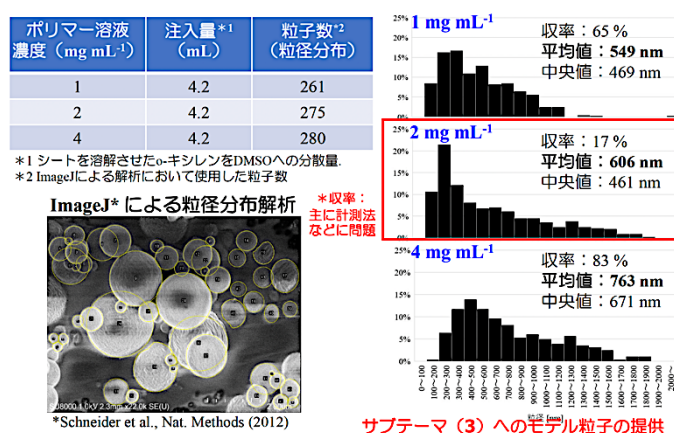


図1-18 PE製モデル粒子合成におけるポリマー濃度が粒径分布に及ぼす影響

参考文献

- Allen S., Allen D., Phoenix V.R., Le Roux G. (2019) Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12, 339–344, doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5
- Akhbarizadeh R, Dobaradaran S, Torkmahalleh MA, Saeedi R, Aibaghi R, Ghasemi FF (2021) Suspended fine particulate matter (PM2.5), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications, *Environmental Research*, 192, 110339, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110339>
- Brahney J., Hallerud M., Heim E., Hahnenberger M., et al. (2020) Plastic rain in protected areas of the United States, *Science*, 368, 1257–1260, doi.10.1126/science.aaz5819
- 小山 博已, 井川 誠司, 明星 敏彦, 奥山 喜久夫 (2007) 大容量微分型静電分級器 (DMA) の開発と分級性能、エアロゾル研究、22(1), 48-53, <https://doi.org/10.11203/jar.22.48>
- Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., et al. (2015) Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347, 768–771, <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Liao Z., Ji X., Ma Y., Lv B., et al. (2021) Airborne microplastics in indoor and outdoor environments of a coastal city in Eastern China, *J. Hazard. Mater.*, 417, 126007, doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126007
- Luo X., Wang Z., Yang L., Gaob T., et al. (2022) A review of analytical methods and models used in atmospheric microplastic research, *Science of the Total Environment*, 828, 154487, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154487
- Revell L.E., Kuma P., Le Ru E.C., Somerville W.R.C., et al. (2021) Direct radiative effects of airborne microplastics, *Nature* 598, 462-467, doi.org/10.1038/s41586-021-03864-x
- Syafei A.D, Nurassrin N.R, Assomadi A.F, Boedisantoso R. (2019) Microplastic Pollution in the Ambient Air of Surabaya, Indonesia. *Curr. World Environ.*, 14, doi.org/10.12944/CWE.14.2.13
- Tanaka, K.; Takahashi, Y.; Kuramochi, H.; Osako, M.; Tanaka, S.; Suzuki, G. (2021) Preparation of Nanoscale Particles of Five Major Polymers as Potential Standards for the Study of Nanoplastics, *Small*, 17, 2105781, <https://doi.org/10.1002/sml.202105781>

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
1試料あたり2日以内のAMPs迅速前処理法、μFTIRによる24時間以内の全面積AMPs自動計測法を確立する。国内12箇所（都市：札幌、新宿、名古屋、大阪、広島、徳島、北九州、森林：福島、生田、富士山麓、遠隔：利尻、能登）で大気濃度と大気沈着の観測ネットワークを構築する。富士山頂、太平洋上、北極、南極、東南アジアのAMPsを分析して地球規模汚染の実態を解明する。AMPs添加物・吸着物の同定を行う。	1試料あたり2日以内の前処理を可能とし（成果番号1、3、5、6）、低濃度試料の場合にはろ過面積を1 mmとすることにより全面積測定を可能とした（成果番号45）。現行装置の性能の問題で計測自動化は達成できていない。国内14箇所でエアロゾルおよび大気沈着の観測網を構築した。富士山頂でPM_{2.5}（成果番号36、45）、雲水（成果番号3）、積雪、北極圏でエアロゾル（成果番号45）および雪氷、南極で雪氷、カンボジア（成果番号44）、インドネシア（成果番号5）、ベトナムでエアロゾル観測を行い、地球規模汚染の実態を明らかにした。さらに、太平洋上で表層海水中100 μm以下のMPs計測を行った（成果番号52）。AMPs添加物・吸着物の同定をPy-GCMS法で検討した。今後、定量を行う。

II-2 サブテーマ2「大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング」

〔サブテーマ2 要旨〕

自動車タイヤ摩耗塵の排出インベントリを構築し、領域収支を明らかにした。繊維状マイクロプラスチックだけでなく全マイクロプラスチックについて、サブテーマ1の観測結果と各種AMPsの素過程モデルを実装したNHM-Chemから排出インベントリを推定する技術を構築し（NHM-Chem-AMPs）、東アジア領域についてその収支（発生、輸送、沈着量）と反応過程（光劣化）を明らかにした。自動車由来粒子については、タイヤ摩耗塵だけでなく他の自動車排気・非排気由来の粒子を考慮したIL-8ベースの炎症誘導能の相対強度についてサブテーマ3と連携して評価した。AMPsが雲・降水変化に及ぼす影響については、顕微鏡を用いた氷核生成実験結果を考慮することで、それを評価することができる数値モデル（Online NHM-Chem-AMPs）を構築した。さらに、数値モデルが予測する雲・降水過程による除去過程を観測データから評価できる仕組み（Climatological Deposition Velocity (CDV) analysis）を構築し、NHM-Chemの評価に適用した。富士山観測、国内多地点観測、北半球広域観測データを用いた様々な数値解析から、サブテーマ1の多地点観測の選定がAMPsの越境輸送と発生源解析に適した配置になっていること、また海洋由来のAMPsの発生機構が従来考えられていた間接生成過程より直接生成過程の方が現実をよく再現するなどの知見も得られた。

1. サブテーマ2 研究開発目的

大気中マイクロプラスチック粒子（AMPs）の環境動態は良く分かっていない。MPの製造量や使用量はよくわかっているものの、大気中に放出されるものがどの程度かは不明である。大気濃度や大気降下量の観測結果も全球的にみても限られており、測定手法によってもばらつきが大きい。米国西部の大気降下量のデータと全球モデルを用いて推定した研究結果によると（Brahney et al., 2021）、AMPsの発生源は自動車非排気由来が最も大きく、84%と推計されている（次いで海洋起源が11%、農地由来が5%）。空気動力学径として数10 μm を超える粒子の場合、重力落下が卓越するため、大気濃度・降下量比が発生源からの距離に応じて大きく変化する。一方で、数 μm より小さい場合は、長距離輸送されるため、大気濃度と降下量で発生源寄与率はあまり大きく変わらない。つまり、AMPsの環境動態を正確に知るためには、大気濃度、降下量、粒径分布の3つの要素を広域でおさえておく必要があるが、そのような研究は存在しない。現在、サブテーマ1では、日本多地点に海外も含めて大気濃度、降下量、粒径分布をおさえる観測を展開している。サブテーマ2ではそれに合わせて3次元の輸送モデルを構築し、アジア領域と我が国におけるAMPsの大気中の環境動態と発生源を解明することを目的としている。またサブテーマ3と連携して、AMPsの毒性について数値モデルにより広域評価を行う。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	大気中マイクロプラスチックの環境動態モデリング
サブテーマ2 実施機関	気象研究所
サブテーマ2 目標	まず発生源が明らかになっている自動車タイヤ摩耗粉塵と繊維状マイクロプラスチックの領域収支を評価する。そして、サブテーマ1の観測成果に基づいて、各種AMPsの素過程モデルをNHM-Chemに実装し、大気濃度観測を用いてそれらの発生インベントリを構築する。NHM-Chemにより各種AMPsの領域収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにする。さらにAMPsの形状・材質が大気動態や雲・降水変化に及ぼす影響評価を行い、領域収支のさらなる高精度化を図る。

3. サブテーマ2 研究開発内容

サブテーマ2では、自動車由来粒子（タイヤ摩耗塵、ブレーキ粉塵）のモデル化、サブテーマ1で得られた観測結果に基づきNHM-ChemによるAMPs個数濃度および大気沈着量予測に取り組んでいる。AMPs

モデルを搭載する3次元モデルNHM-Chem、領域収支評価のための基礎技術はすでに論文として発表した。また、サブテーマ3との連携として、毒性評価試験結果を用いた自動車排気および非排気由来の粒子毒性のモデル化にも取り組んだ。

図2-1にNHM-Chemの模式図とその特徴を示す。図2-1左は気象モデルと化学モデルの(a)オンライン結合、(b)オフライン結合の違いを示す。オンライン結合では、化学モデルが気象モデルのサブルーチンとして実装されているため、エアロゾルが大気放射や雲物理過程に影響することで気象場に変化をもたらすフィードバック効果を考慮することができる。一方、オフライン結合では、気象モデルの計算結果を化学モデルの入力データに変換してから化学モデルを単体で動かす方式であり、一度気象場を計算してしまえば、気象計算を繰り返す必要がないというメリットや、化学モデルの入力に変換するインターフェースさえ構築してしまえば複数の気象モデルの結果を用いて計算することができるメリットがある。現在、NHM-Chemでは、NHMのほか、WRF、asuca、SCALEなど他の気象モデルとのオフライン結合も可能となっている。図2-1右に、オンライン・オフライン結合NHM-Chem共通で実装されるエアロゾルモデルの模式図を示す。大きくわけて(a)5-カテゴリ法、(b)3-カテゴリ法、(c) バルク平衡法の3種類が用意されているが、ここでは(a)5-カテゴリ法のみを示す。5-カテゴリ法ではエアロゾルを粒径と物理特性ごとに次の5つのカテゴリに分類する：エイトケンモード（aitken mode: ATK）、光散乱性（太陽放射を吸収しない）微小粒子（accumulation mode (soot free): ACM）、光吸収性微小粒子（soot aggregate: AGR）、ダスト（mineral and anthropogenic dust: DU）、海塩（seasalt: SS）。

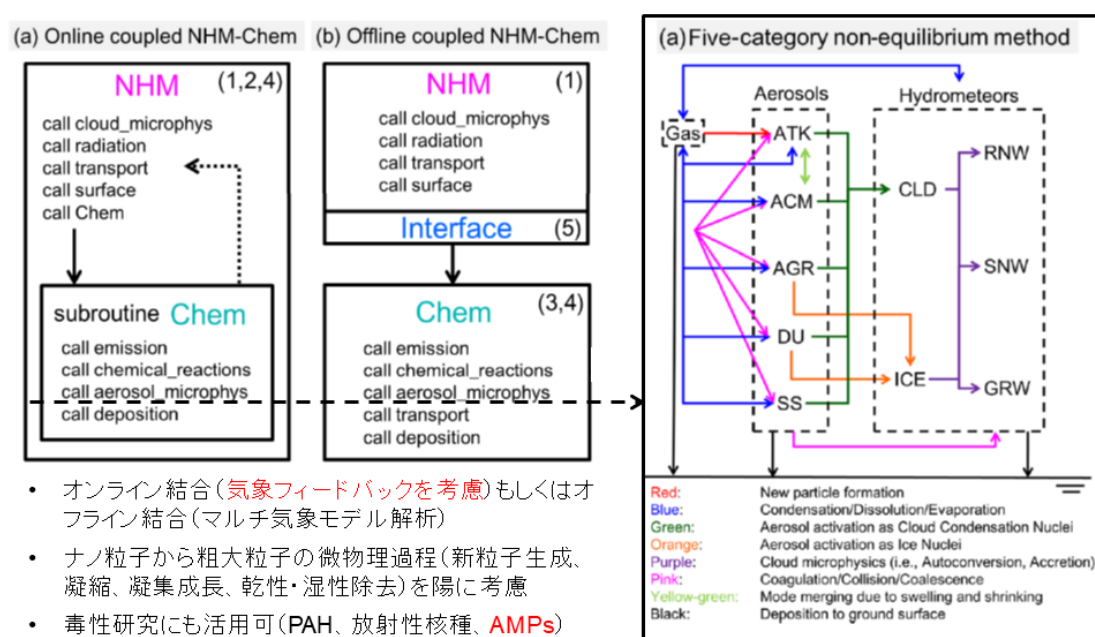


図2-1 NHM-Chemの模式図とその特徴（Kajino, Adachi et al., Geosci. Model. Dev., 2021）

考慮される素過程は、硫酸ガスによる均一核形成と新粒子生成、ガスの酸化反応に伴う蒸気圧低下と既存粒子への凝縮、粒子同士のブラウン凝集、雲凝結核活性、氷晶核活性、雲微物理過程に伴う湿性除去過程（in-cloud scavenging）、落下する降水粒子との衝突除去過程（below-cloud scavenging）、雲（霧）沈着、乾性沈着過程である。またNHM-Chemは通常的环境に存在するエアロゾルだけでなく毒性の高い特殊化学物質の輸送計算も可能である。たとえば、酸化ストレス原因物質とされる遷移金属、発がん性などを示す多環芳香族炭化水素（PAH）とそのニトロ誘導体、人工放射性核種、そして本研究で開発したAMPsである。表2-1にAMPsスキームの概要を示した。

表2-1 NHM-Chemに新規実装したAMPsスキームの概要

	Physical properties		Mass concentrations								
			Origins				Chemistry				
Submicron mode (~0.1 μm)	M ₀	M ₂	Fp	Ff	Fo	Aged Fp	PE	PP	PS	PET	← PM _{2.5} 相当
Supermicron mode (~1 μm)	M ₀	M ₂	Fp	Ff	Fo	Aged Fp	PE	PP	PS	PET	← PM _c 相当
Giant mode (~10 μm)	M ₀	M ₂	Fp	Ff	Fo	Aged Fp	PE	PP	PS	PET	← PM ₁₀ 相当

発生源モデル
(This Study)

光劣化
実装

組成モデル

AMPsスキームでは表2-1に示す通り、いわゆるナノプラスチックとされる微小粒子モード、粒径数 μm 程度の粗大粒子モード、粒径数 $10 \mu\text{m}$ 程度のジャイアントモードの3つのカテゴリを用意した。物理特性として0次モーメント (M₀: 数濃度に等しい)、2次モーメント (M₂: 表面積濃度に比例する) を輸送変数とし、化学特性として、起源別に3種類 (Fp: 人口由来、Ff: 農地由来、Fo: 海洋由来)、また組成別に4種類 (PE, PP, PS, PET) の質量濃度を輸送変数として用意した。対数正規分布を仮定すると、それぞれの物質ごとに仮定した密度から体積濃度が求まり、0次、2次、3次 (体積濃度に比例する) の3つのモーメントから、対数正規分布を決定する3つのパラメータ、数濃度、幾何中心径、幾何標準偏差が一意に求まる。起源別AMPs質量は先行研究と同様に、AMPsの観測値から発生量を逆推定するために用いるものであり、組成別AMPs質量は、AMPsの排出インベントリが与えられた場合に計算するためのものである。しかしまだAMPsの排出インベントリは世界的にも存在しない。本研究では、大気濃度、沈着量の観測値とNHM-Chem-AMPsの数値実験から排出インベントリを推定する技術確立した (第64回大気環境学会年会で発表)。

さらに本モデルでは、AMPsの光劣化を取り入れたことが新しい。サブテーマ3でPETの光劣化によるテレフタル酸の生成とそれによる毒性強化実験のサポートとして、世界で初めてAMPsの光劣化モデルを構築し、論文として投稿準備中である (第3回推進費アドバイザリ会合での発表のみ)。

またサブテーマ2では、温湿度を制御できる小型チャンバーを開発し、顕微鏡による個別粒子の氷晶核能を評価可能とした (図2-2) (成果番号15)。サブテーマ1で得られた新宿での試料、またサブテーマ2で取得した北極ニーオルスンの試料を分析によりAMPsの同定に成功した。現在、オンラインNHM-ChemではINAS (ice nucleation active sites) 密度を与えることでエアロゾルの氷晶核化を通したフィードバック過程を計算できるようになっている。AMPsのINASが実験的に与えられれば、AMPsによる降水過程の変化を評価できるモデル (online NHM-Chem-AMPs) を構築した。

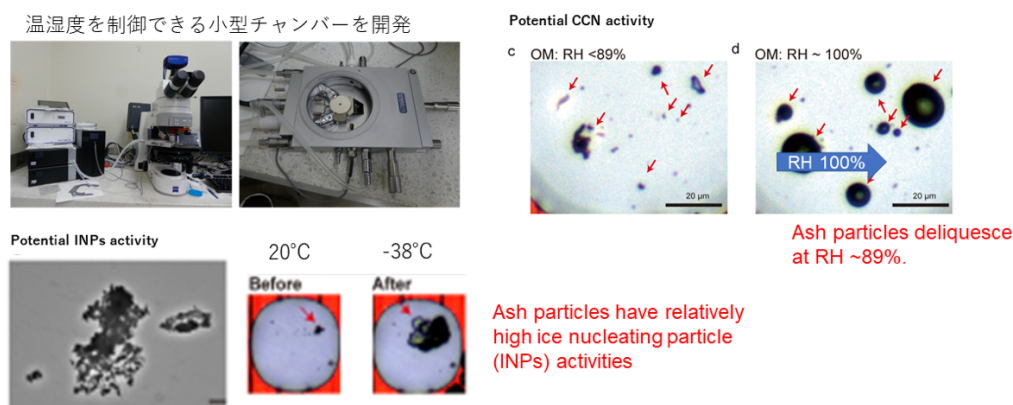


図2-2 顕微鏡による個別粒子の微物理特性 (雲凝結活性、氷晶核活性) 評価手法の開発

4. サブテーマ2 結果及び考察

(1) NHM-Chem-AMPsのシミュレーション

図2-3にNHM-Chem-AMPsの計算結果の一例を示す。上は夏季の計算例（2015年7月のある日のスナップショット）、下は冬季の計算例（2016年1月のスナップショット）、左から人口ベース（Fp）、農地由来（Ff）、海洋起源（Fo）、いずれも微小粒子モードの結果である。ここで発生時のAMPsの粒径分布は空気力学径で $0.1\ \mu\text{m}$ 、対数正規分布の幾何標準偏差は1.0の単分散を仮定している。

発生スキームはそれぞれ、下記のように定式化している：

$$F_p = C_{p,\text{const}} (\text{kg/person/s}) \times P (\text{person/m}^2) \quad (1)$$

$$F_f = C_{f,\text{const}} (\text{kg/soil}) \times F_M (\text{soil/m}^2/\text{s}) \propto u_*^3 \quad (2)$$

$$F_o = C_{o,\text{const}} (\text{kg/salt}) \times F_s (\text{salt/m}^2/\text{s}) \propto U_{10}^{3.41} \quad (3)$$

ここで、Cはモデル定数、Pは人口密度、FMは鉱物ダストの発生フラックス、FSは海塩粒子の発生フラックスを表す。

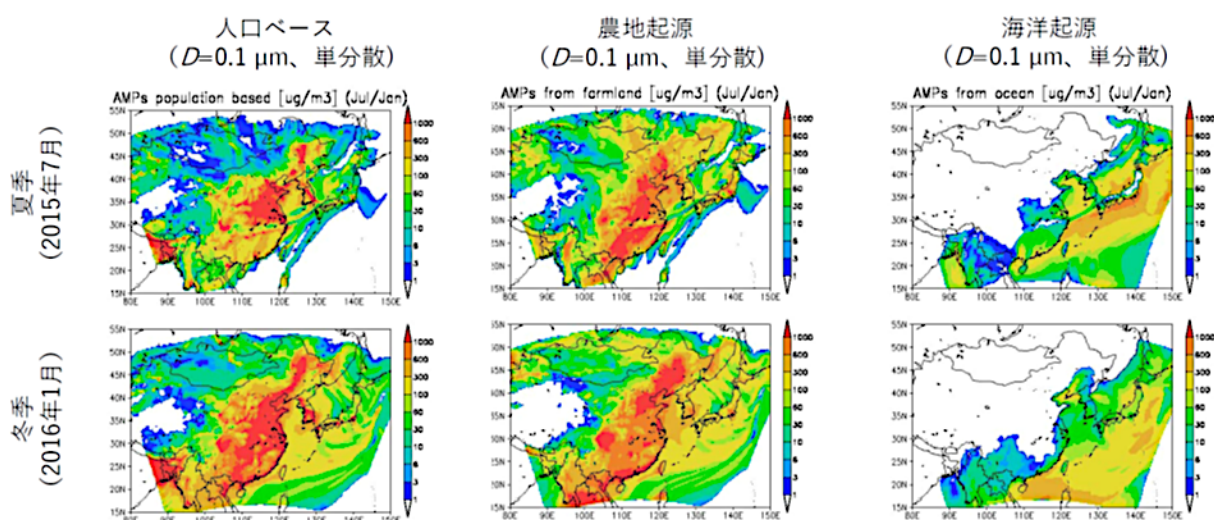


図2-3 NHM-Chem-AMPsによる計算例

人口ベースは、人口密度に一人あたり単位時間あたりのAMPs放出量を定数として掛けて算出、農地ベースは、農地の腐食したビニール片が舞い上がる過程をフリーダストの巻き上げ（土壌カテゴリと摩擦速度の関数）に類似させて単位土壌粒子質量あたりのAMPs存在量を定数として掛けて算出、海洋由来は、海塩粒子の放出過程（地上風速の3.41乗）に類似させて単位海塩粒子質量あたりのAMPs存在量を定数として掛けて算出している。図2-3では、定数をそれぞれのAMPsに対して最高濃度が $1000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ になるように調整して与えているため、異なる起源物質間の数値の比較は意味がない。

図2-4、図2-5に2019年夏の富士山観測に関する輸送解析の一例を示す。計算の水平分解能は $30\ \text{km}$ と粗いため、富士山は滑らかな丘陵（モデル標高は $668\ \text{m}$ ）として表現される。そのため、観測値と比較するためには、モデル上空の格子の値と比較する必要がある。まずは発生・輸送・生成・消滅過程が比較的明らかになっている CO と O_3 について、富士山頂の観測値とNHM-Chemの結果を比較した（図2-4）。その結果、およそモデル高さにして $2200 - 4200\ \text{m}$ 上空の結果が観測との一致度が高いことが明らかになった（モデル格子でいうと10層目から15層目に相当）。そこで、AMPsの発生量解析については、このモデル高さを不確実性として評価を行った。図2-5に、人口ベース（左上）、農地由来（右上）、海洋由来（間接生成プロセス）（左下）、海洋由来（直接生成プロセス）（右下）の計算結果を示した。（間接生成と直接生成については詳細は後述する）。絶対値に意味はないため、時系列の縦軸の値は無視して良い。観測期間中（図2-4に破線矢印で表示）、海洋起源AMPsには2回のピークがあった。一つは7/24 14:00-18:00

の熱帯低気圧によって引き寄せられた近海由来のAMPs（右上図）、またもう一つは8/5 11:00-15:00、8/6 10:00-14:00の台風によって運ばれたものであった。人口ベースについては8/3の15:00-19:00にピークがあった。首都圏から運ばれた国内由来AMPsとみられ、2つの高気圧間の低圧の循環による空気塊の上昇とみられる。一方で、観測は越境汚染の影響を見るために境界層の発達し、また登山客の多い日中を避け、

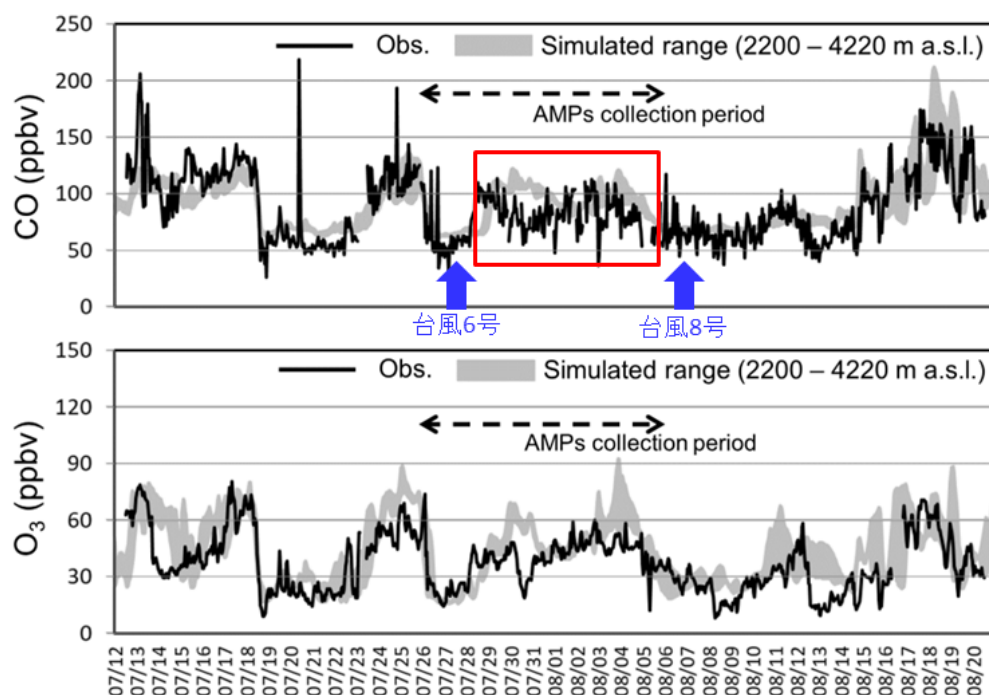


図2-4 2019年夏の富士山観測に関する輸送解析（COとO₃の観測とモデルの比較）

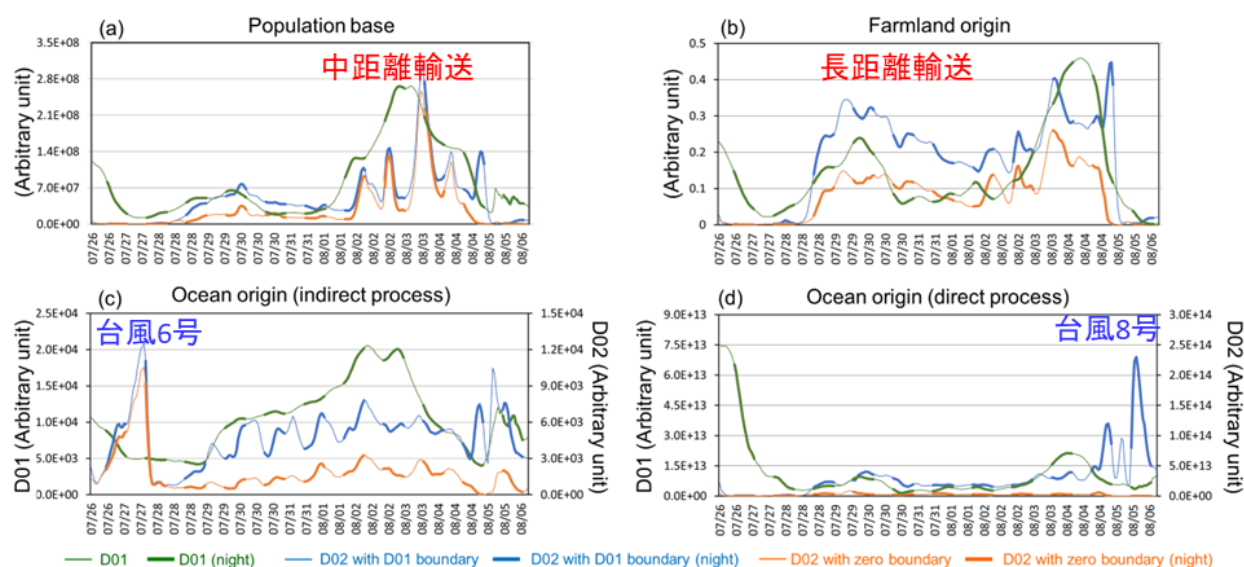


図2-5 2019年夏の富士山観測に関する輸送解析（NHM-Chem-AMPsモデルの結果）

夜間のみの捕集としているため、いずれのピークも外していた可能性がある。しかし、観測値と数値モデルの計算値から発生量の推定は可能であるため、それを実施した。

富士山観測値（4.91 #/m-air³）をすべて人口ベースで見積もると、SUB、COR、GNTそれぞれ28-160、25-120、34-450 #/100人/日の発生量が必要（0.1-10/人/日）と試算された。SUB（ $\sim 0.1 \mu\text{m}$ ）とCOR（ $\sim 1 \mu\text{m}$ ）の飛散距離はほぼ変わらず。GNT（ $\sim 10 \mu\text{m}$ ）の飛散距離は重力落下の影響が有意となり短くなるため、より多めの発生量が必要となる。次に、富士山観測値が土壌由来だとすると、土壌粒子（10,000 particles/kg-soil; 20-100 μm ; Katsumi, Okochi et al., 2022）と Ishizuka et al. (2017)のフリーダスト発生スキーマ

ム（校庭で定式化）を利用すると、 10^{-7} から 10^{-8} #/m-air³となり、7-8桁過小評価する。ここから導かれる結論は下記の3通りである。(1) 土壌由来のAMPsは富士山頂にはほとんど寄与していなかった。(2) 土壌由来のAMPsの発生機構が、鉱物ダストの発生機構と大きく異なる。(3) 未計数の小さなMPsが存在する。(2)については今後、室内実験などから明らかになると期待されるが、(3)については下記の単純な分裂モデルからそれを推測した。

$$\frac{dn(D)}{dt} = \lambda(xn(x^{\frac{1}{3}}D) - n(D)) \quad (4)$$

ここで D は体積等価径として分割数 x で均等に割れるモデルを仮定すると、 $n(D)$ の形は対数正規分布に近くなり、初期条件に依存する形となる。初期条件を $D = 1$ mmの単分散として数基準中央径が $1 \mu\text{m}$ になるまで分割を行った。その結果、大気サンプルから得られるAMPsの粒径幅（ $0.1 - 10 \mu\text{m}$ ）の個数は、地表面（土壌や表面海水）から検出し得る粒径幅（ $10 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ ）の1桁から4桁程度大きい可能性があることが試算された。それを4桁と仮に過程したとしても、モデルの計算結果は観測値を3-4桁過小評価するため、(3) だけでは説明できないと結論できる。

最後に富士山観測値が海洋由来だとする。日本近海の表層水中濃度（ $1-100$ #/m-water³; $>300 \mu\text{m}$; 磯辺, 2020）とMonahan et al. (1986) の海塩粒子発生スキーム（間接生成プロセス）を利用すると、 10^{-8} から 10^{-9} #/m-air³となり、8-9桁過小評価する。実際、海水では 100 #/34 kg塩、大気は 5 #/0.5 μg 塩なので9桁程度の違いがある。そこで土壌粒子の場合と同様に、(1) 海洋由来のAMPsは富士山頂にはほとんど寄与しない。(2) 海洋由来のAMPsの発生機構が、海塩粒子の発生機構と大きく異なる。(3) 未計数の小さなMPsが存在する。の3通りの結論が導かれ、(3)については4桁多いとしても4-5桁足りないという結論になる。間接生成とは、海水中の気泡が表面に到達したときに弾ける際に発生する海塩粒子の生成メカニズムである。一方で、海塩粒子の生成には波の砕破に伴い発生する直接生成プロセスがある。直接生成は風速の弱いところではほとんど生じないとされるが、 10m 風速が 9 m/s より大きいところで顕著になり始め、 20 m/s になれば、間接生成に比べて9桁ほど大きな生成量となるとされる。一般に、海塩粒子の粒径は、初期海水粒径に依存すると考えられるため、直接生成で生成される海塩粒子（もしくは海水粒子）は粒径が大きすぎて、重力落下により速やかに海水に戻ると推測される。しかし、AMPsについては、粒径がそもそも決まっているため、大気中で長期間浮遊できるサイズであれば、生成メカニズムがどうであれ、長期間浮遊できると考えられる。従って、(2) 海洋由来にAMPsの発生機構が直接プロセスに従うと仮定した場合、計算結果は 10^{-61} #/m-air³となり、観測結果（ 4.91 #/m-air³）を定量的に説明できることになる。

(2) 発生源が不明瞭な物質の領域収支を抑えるためのCDV解析手法の確立

発生源が不明瞭な物質の領域収支を評価するための手法として、Climatological Deposition Velocity (CDV) 解析を提案し、発生源が明らかでない福島原発事故由来の放射性セシウム（Cs-137）の再浮遊過程に適用した（図2-6）。まず、地上濃度 C と降下量（沈着量） D の長期積分値に対して次の関係を仮定する。

$$D = aC^b, \log(D) = b \log(C) + \log(a) \quad (5)$$

ここで a は沈着率、 b は非線形性（時空間非一様性）とする。仮に b が1に近ければ、 a が沈着速度（m/month）の次元になり、つまり両対数グラフの縦軸の切片が沈着速度（ $\log(a)$ ）、つまり主たる担体エアロゾルの粒径分布を表すものになる。図2-5は、2013年の浪江町、福島市（福島大学）、つくば市（気象研）の3点における月平均の地上濃度と月積算の降下量を示す（全36プロット）。観測値（紫シンボル）の回帰直線（紫実線）の傾き b は 0.97 となり、赤矢印で示す二つの外れ値（詳述は避けるが、浪江町への原発敷地内からの瓦礫撤去作業に伴う再浮遊（2013年8月）と、福島大学の近傍からの巻き上げ（2013年1月）の2データ）を除けば傾き b は 0.98 となった。つまり、切片が沈着速度の次元となり、CDV解析がうまく成立した。オレンジは2016年当時の論文（Kajino et al., Atmos. Chem. Phys., 2016: K16）において微小粒子

を仮定した計算結果、緑色が本研究 (Kajino et al., Atmos. Chem. Phys., 2022) で粗大粒子を仮定した計算結果である。それぞれ、ダストに伴う再飛散と、森林由来の再飛散を仮定し、式1-式3のように定数を仮定して与えた。CDV解析のメリットは放出式の定数を変えても、この傾きが変わらない点にある。つまり、まずは輸送特性を決定する粒径分布（つまりは切片）を合わせこみ、その次に、絶対量を合わせこむ。K16では誤った粒径分布仮定を用いて大気濃度のみから領域収支を評価していたことから降下量を著しく過小評価した。それに対して本研究では、正しい粒径分布仮定によって領域収支を合わせこんだ結果、大気濃度、降下量、ともに整合的な領域収支を得ることができた。現在、サブテーマ1による地上濃度観測から東アジア領域の排出インベントリを推定したが、今後、降下量のデータも併用することにより、発生源が明確でないAMPsにおいても同様にCDV解析により領域収支の高精度化が達成されることが考えられる。

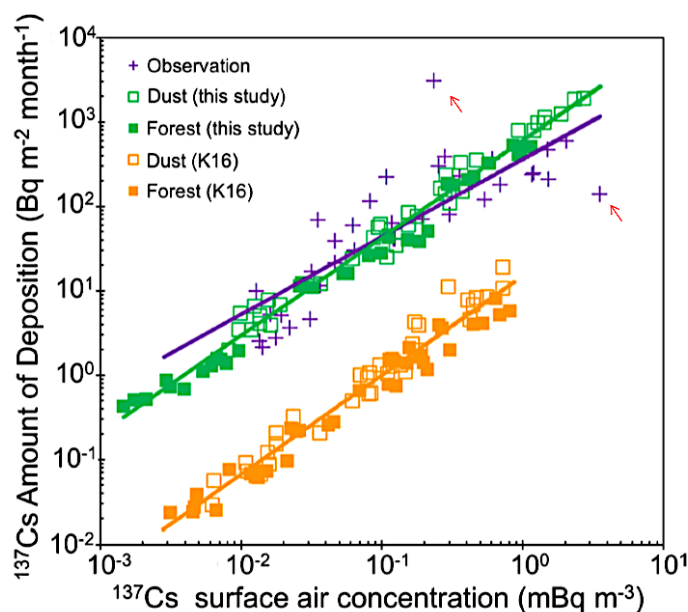


図2-6 福島原発事故由来の放射性セシウム (^{137}Cs) の再飛散期 (2013年) における月平均大気濃度と月平均降下量の関係。紫が観測結果、オレンジが微小粒子を仮定した計算値、緑が粗大粒子を仮定した計算結果

(3) タイヤ摩耗片のモデル予測とその健康影響評価

本研究 (Kajino, Ishihara, Okochi et al., 2024) では、ある程度排出インベントリが確立されているタイヤ摩耗片に焦点を当てた研究を行った。同じく非排気粒子であるブレーキ粉塵もまた広義のマイクロプラスチックに含まれる。タイヤ摩耗片、ブレーキ粉塵の排出インベントリは個別に整備されていないため (たとえば、タイヤとブレーキを合わせて推計していたり、ブレーキと道路粉塵を合わせて推計していたり)、既存のインベントリから様々な仮定をして導出した。本研究で用いたインベントリは環境省 $\text{PM}_{2.5}$ インベントリ ($\text{PM}_{2.5}\text{EI}$; Morikawa, 2017) である。 $\text{PM}_{2.5}\text{EI}$ の非排気粒子はタイヤとダストに分かれており、ロードダストはブレーキ粉塵と道路粉塵を含む。今回は全車種について、ブレーキ粉塵：道路粉塵を0.35:0.65で分配した。インベントリの空間解像度は $\Delta x=1\text{km}$ であり、それをモデルの空間解像度 ($\Delta x=6\text{km}$) に内挿して計算を行った。インベントリの基準年は2012年、計算・評価年は2015年である。図2-7にモデルで与えたタイヤ摩耗片とブレーキ粉塵の排出量の年間値を含むその他一次排出粒子のインベントリを示した。

近年、自動車排ガス由来の粒子発生量が低下しており、AMPsの一種である非排気粒子 (タイヤ摩耗片、ブレーキ粉塵) の重要性が高まりつつある。また近い将来、電気自動車が普及すると、回生協調ブレーキによるブレーキ粉塵の排出量減と、それに引き換え車重増によるタイヤ摩耗片の寄与が増える可能性がある。本研究では、(1)総 $\text{PM}_{2.5}$ 、(2)タイヤ摩耗片、(3)ブレーキ粉塵、(4) 総自動車起源粒子 (排気+非排気) のシミュレーションを行い、それにサブテーマ3による炎症誘導能 (IL-8) の毒性評価実験を掛け合わせることで、国内自動車由来の粒子毒性の重要性を相対化して評価することを目的とした。図2-8にIL-8生成能の測定データを示す。本研究ではその最大値、平均値、最小値を用いて、IL-8生成能の不確実性についても議論を行った。IL-8生成能については、ブランクに対する試料のシグナルの強さ (無次元：図2-8右の $X_{\text{IL-8}}$) で評価する。タイヤ摩耗片の質量濃度にタイヤ摩耗片のIL-8試験結果を掛け合わせたものをタイヤ摩耗片の炎症誘導能 (Inflammation potential of tire wear particles; IP(T))、ブレーキ粉塵の質量濃度にブレーキ粉塵のIL-8試験結果を掛け合わせたものをブレーキ粉塵の炎症誘導能 (Inflammation potential of brake wear particles; IP(B))、自動車排気粒子の質量濃度にディーゼル排気粒子 (DEP) のIL-

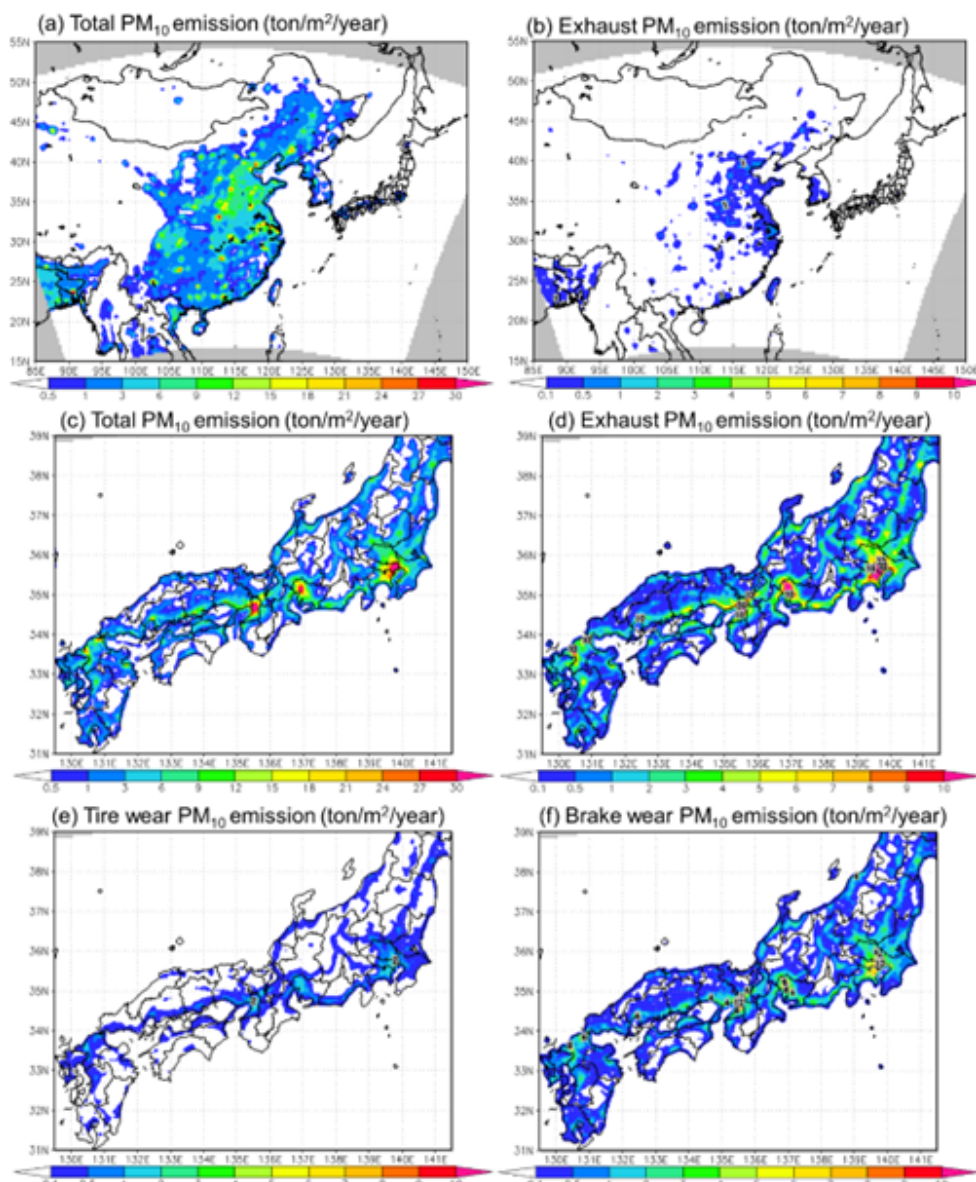


図2-7 自動車排気粒子、排気粒子、タイヤ摩耗片、ブレーキ粉塵粒子の東アジアおよび日本領域の排出インベントリ

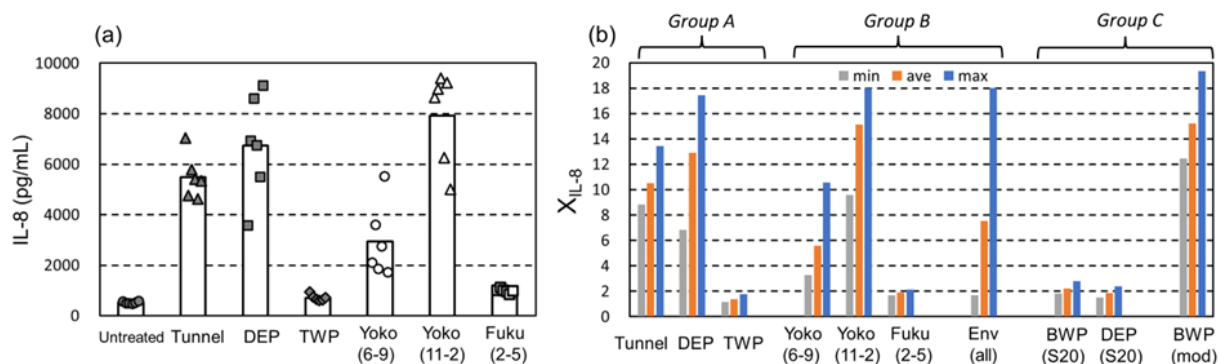


図2-8 本研究に用いた様々な粒子によるIL-8の生成能

8試験結果を掛け合わせたものを自動車排気粒子の炎症誘導能（Inflammation potential of vehicle exhaust particles; IP(E)）、自動車由来の総質量濃度にトンネル粉塵（自動車由来の粒子が大部分を占めると仮定

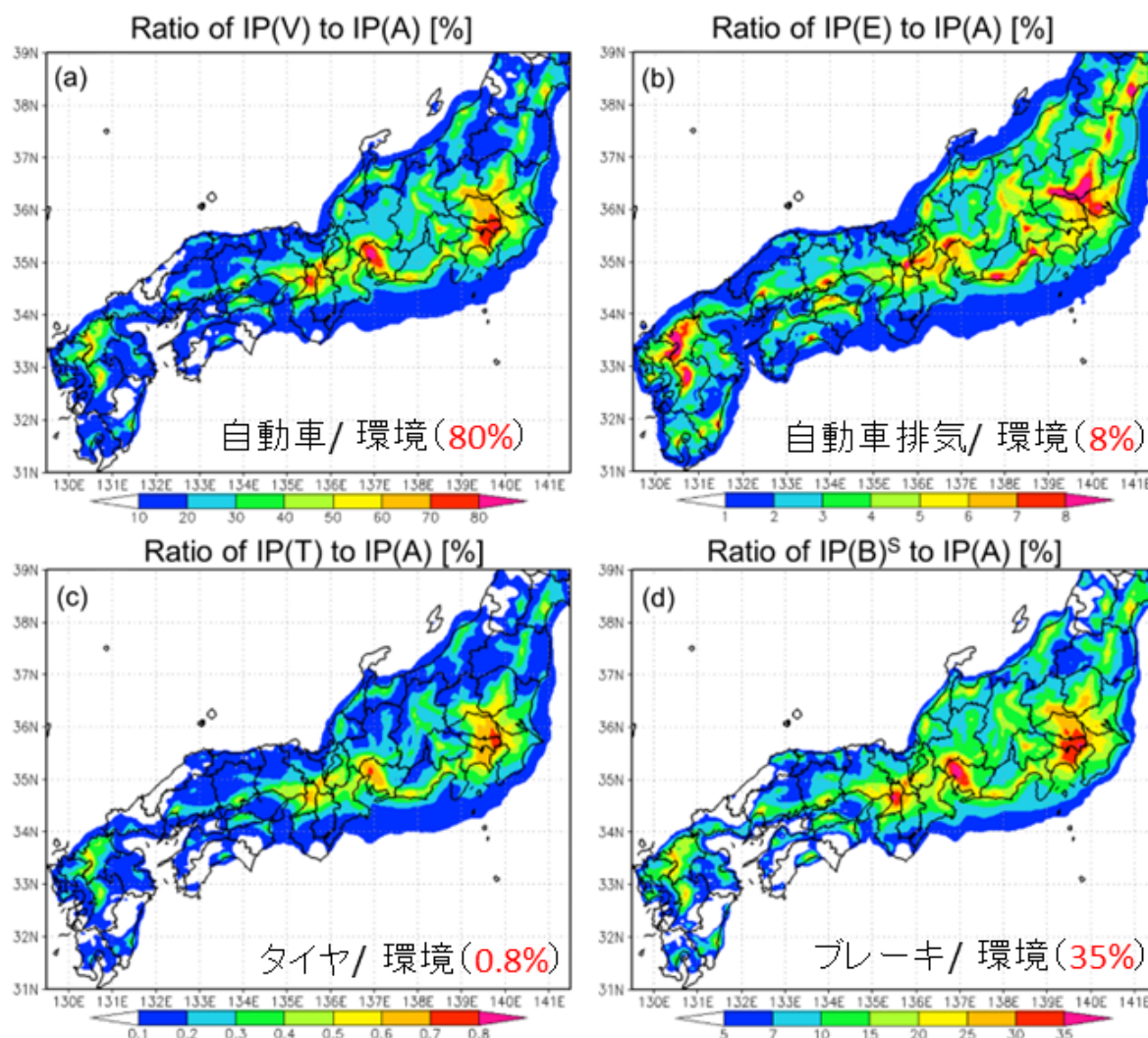


図2-9 一般大気環境における全PM_{2.5}のIL-8生成能（福岡と横浜の粒子サンプルを利用）に対する（a）全自動車由来粒子、（b）排気粒子、（c）タイヤ摩耗片、（d）ブレーキ粉塵のIL-8生成能の相対強度。ここでX_{IL-8}は平均値を使用。

できる）の試験結果を掛け合わせたものを自動車由来の総粒子による炎症誘導能（Inflammation potential of total vehicle particles; IP(V)）、PM_{2.5}の総質量濃度に、それぞれ代表するエアロゾルの発生源が異なると考えられる横浜と福岡の炎症誘導能を掛け合わせたものを一般大気環境のPM_{2.5}の炎症誘導能（Inflammation potential of all environmental particle; IP(A)）とした。

その結果を図2-9に示す。一般大気環境のPM_{2.5}が分母ではあるが、分子も分母もそれぞれ独立に算出されているため、最大値が100%とならないことに注意が必要である。しかし、図2-9(a)から(d)までの値自体は比較が可能である。すなわち、自動車由来の全粒子の炎症誘導能は、自動車排気ガス由来の炎症誘導能に比べて1桁程度高く、タイヤ摩耗片のそれよりも2桁程度高く、また、ブレーキ粉塵の炎症誘導能は自動車由来の全粒子の炎症誘導能よりは小さいが、それと同程度に高い、ということが示唆された。一方、でタイヤ摩耗片は、劣化により6PPDキノンという毒性物質を生成することで知られており、今回IL-8試験に用いたタイヤ摩耗片はfreshな粒子であったことから、今後はagedなタイヤ摩耗片によるIL-8試験と、タイヤ摩耗片の光劣化プロセスをNHM-Chem-AMPsに実装した研究が必要となる。

なお、自動車排気・非排気個別粒子の計算結果の妥当性を観測結果で評価するのは容易ではない。そこで本研究では環境省の4季節2週間のPM_{2.5}の成分分析の日別値を用い、間接的にそれらを比較することにした。結果を図2-10に示す。一般大気環境中の全PM_{2.5}粒子については、PM_{2.5}の総質量濃度で評価し（図2-10a）、排気由来の粒子についてはエレメンタルカーボン（EC）で評価した（図2-10b）。ブレ

ーキ粉塵についてはその主要成分の一つであるCu、タイヤ摩耗片についてはその主成分の一つであるZnを用いた。もちろん、CuやZnの発生源はタイヤ、ブレーキ以外に数多くある。従って、絶対値の比較のほかに、自排局と一般局とバックグラウンド局で、モデルと観測のパフォーマンスがそれほど大きく変わらないことが、様々な発生源からの物質を整合的に予測できていることの裏付けできると考えた。

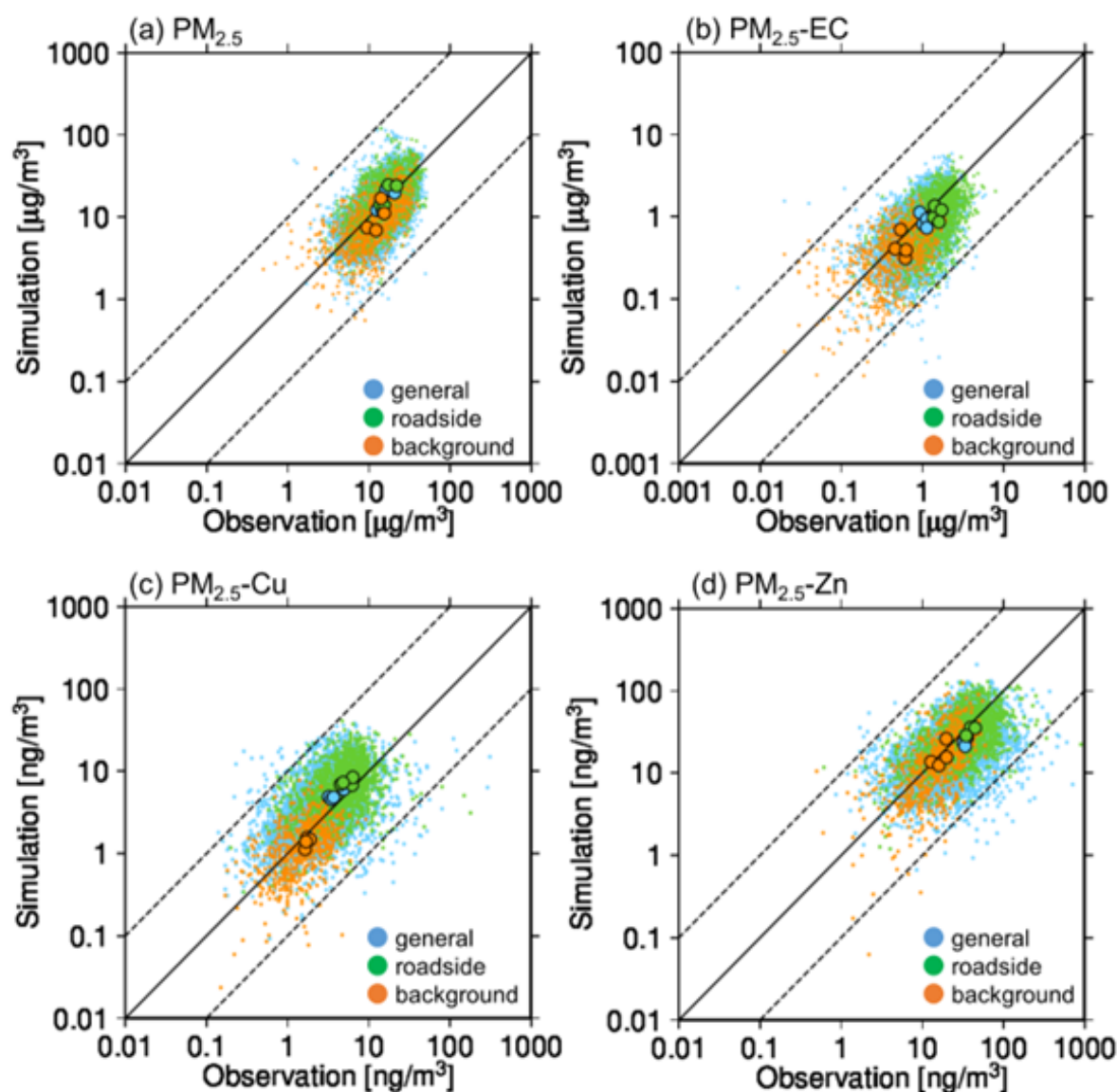


図2-10 環境省PM_{2.5}成分分析結果とNHM-Chemの比較

(4) AMPsの氷晶核活性を介した気象変化研究への道筋

オンラインNHM-Chemには、予測したエアロゾルが氷晶核として作用し、雲微物理過程に変調を及ぼすことにより降水の位置やその強度が変化する過程が考慮されている。現在は、鉱物ダスト、ブラックカーボン (BC)、バイオエアロゾルに加えてAMPsが考慮されており、鉱物ダストとBCとAMPsについては実際にモデルで予測した粒子表面積濃度が計算に用いられる (バイオエアロゾルについては時空間的に一様な濃度を与えている)。氷晶核粒子数濃度の予測には粒子表面積濃度とINAS密度が必要となるが、現在NHM-Chemでは、様々な実験から得られたINASの代表的な値 (図2-10に示す青丸) を気温の関数として与えている。鉱物ダスト、BC、バイオエアロゾルについてはINASの実験結果が豊富に存在する一方、AMPsについてはまだ分かっていない。本研究により顕微鏡によるAMPsの同定が可能になったため、その氷晶核能を関数化することで、AMPsによる降水過程の変化を直ちに計算することが可能となった。タイヤ摩耗片などの道路粉塵は都市大気に多く含まれるため、AMPsの持つ氷晶核能は都市の降水に多

少なりとも影響を与えているかもしれない、今後着目して評価していきたい。

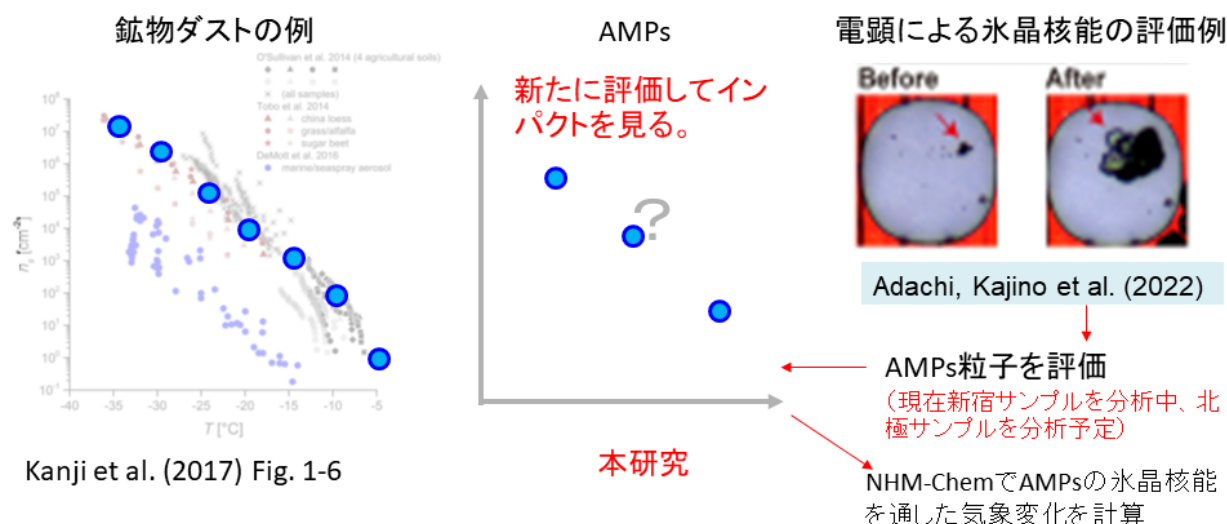


図2-11 AMPsの氷晶核活性を通した気象変化研究への道筋

(5) サブテーマ1の国内AMPs高精度観測とNHM-Chem-AMPsによる排出量推計手法の開発

サブテーマ1による新宿、太郎坊、堺、徳島、能登の2021年夏から2022年春までの4季節39データ（全粒径）とNHM-Chem-AMPsの人口ベース、農地由来、海洋由来のタグ実験（人口のみ、農地のみ、海のための計算を独立で実施する手法）から東アジア域の排出インベントリを推定した。排出インベントリの最適化のために、下記の目的関数 f を用いた。

$$f = \sum_N \frac{(O_N - (S_{0,N} + \sum_M x_M (S_{M,N} - S_{0,N})))^2}{\sigma_O^2} + \sum_M \frac{x_M^2}{(u_M - l_M)^2} \quad (6)$$

ここで O は観測値、 N は観測の数（今回は $N=39$ ）、 σ_O は観測の標準偏差、 S_0 は基準実験（今回はゼロ）、 S_M はタグ計算結果、 M はタグの数（今回は人口、農地、海の $M=3$ ）である。これを準ニュートン法の一つであるLimited-memory Bryoyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (L-BFGS)-B法 (L-BFGS-B; Byrd et al., 1995; Zhu et al., 1997)を用いて上限 u 、下限 l の間で係数 x を最適化する。今回はタグによらず $u=10$ 、 $l=0.1$ とした。図2-12の左図に観測結果と各タグ計算結果（人口ベース、農地由来、海洋由来）、右図に最適化された排出量を用いた計算結果を示している。人口ベースと良い相関がある太郎坊（ $R=0.92$ ）と海洋由来と良い相関がある能登（ $R=0.91$ ）により、最適化がうまく機能したと考えられる。すなわち、サブテーマ1による多地点観測は、領域スケールの輸送現象を把握するために適した配置であったと評価できる。

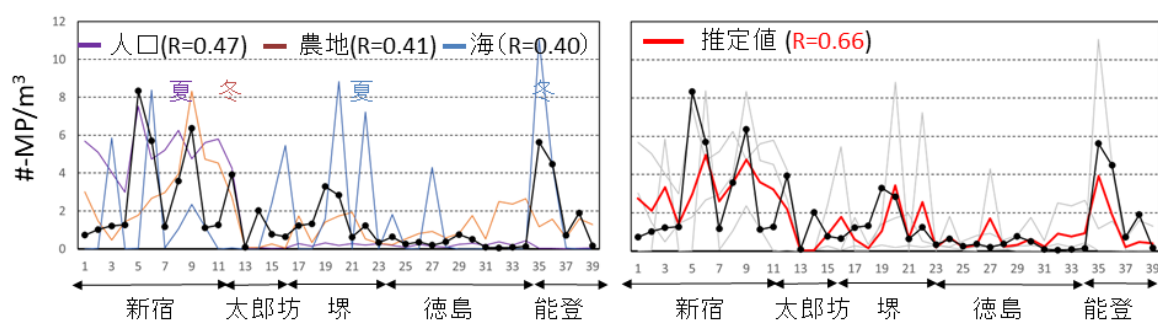


図2-12 （左）AMPsの観測値（黒）とタグ計算結果（カラー）、（右）観測値（黒）、タグ計算結果（グレイ）、最適化された排出量を用いた計算値（赤）。相関係数 R も図示している。

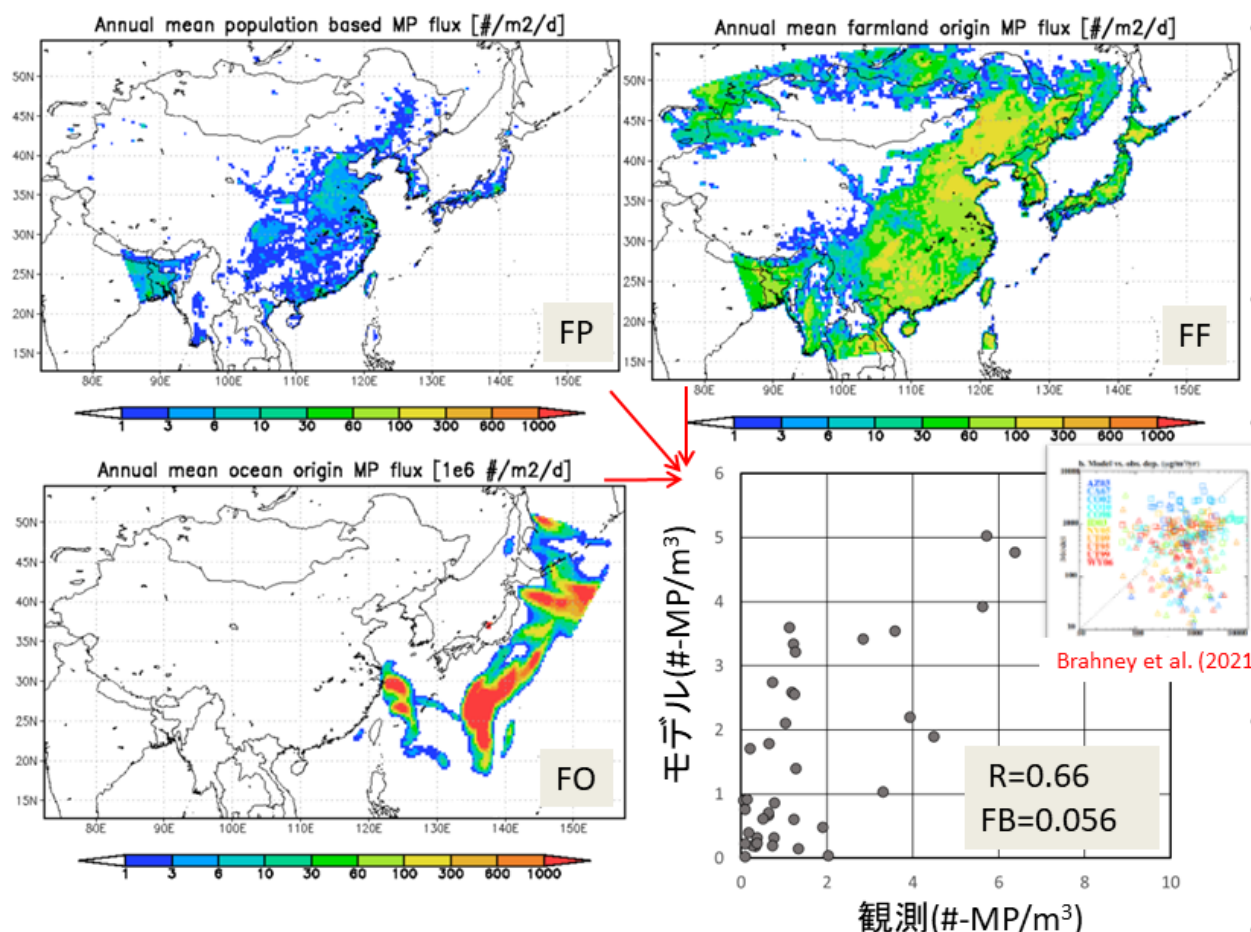


図2-13 (左上) 人口ベース、(右上) 農地由来、(左下) 海洋由来のAMPsの推定排出量。(右下) 観測とモデルの比較散布図。参考までに先行研究 (Brahney et al., 2021) の散布図も図示した。

図2-13に、(6)式による東アジアにおける推定排出量を図示した。また、領域や使用したデータは異なるものの、先行研究 (Brahney et al., 2021) が両対数の散布図でデータが散在しているのに対して、本研究では両線形の散布図で概ね正の相関関係が見られている。なお、海洋由来については、直接放出プロセスを用いた方が、推定値の精度が向上した。これは富士山で得られた知見と整合する。

(6) 世界各地の観測データの文献収集による北半球のAMPs排出量推定

世界各地のAMPsの大気濃度および降下量の観測データを収集した(濃度129データ、降下量38データ)。その結果を図2-14に示す。観測データはまずは全AMPsを対象とし、粒径ごとに微小粒子と粗大粒子に分類した。図2-15にタグ計算結果と(6)式による推定値を示す。排出量最適化がよく機能した。まず、微小・粗大それぞれに分けて推定した方が、全粒径で推定するよりも精度が向上した。これは、領域収支評価における粒径分布(ここでは $0.1\text{-}1\text{ }\mu\text{m}$ と $1\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$ の違い)が重要であることを示している。また、本研究でも海洋由来については、直接放出プロセスを用いた方が、推定値の精度が向上した。これは富士山、サブテーマ1の国内多地点観測から得られた知見と整合する。

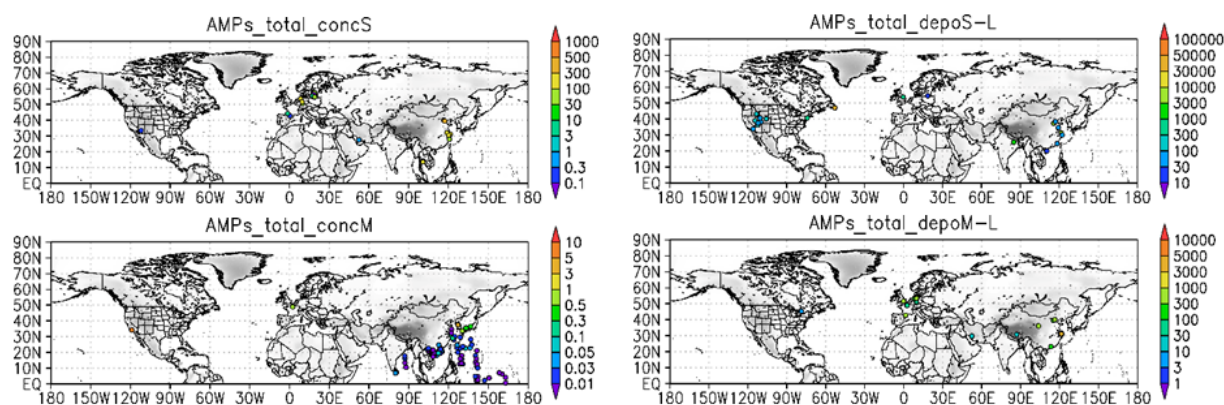


図2-14 文献による北半球のAMPs濃度（左）と降下量（右）の観測結果。（上）微小粒子（S）と（下）粗大粒子（M）に分類して図示。なお、降下量については、測定下限値から分類した。

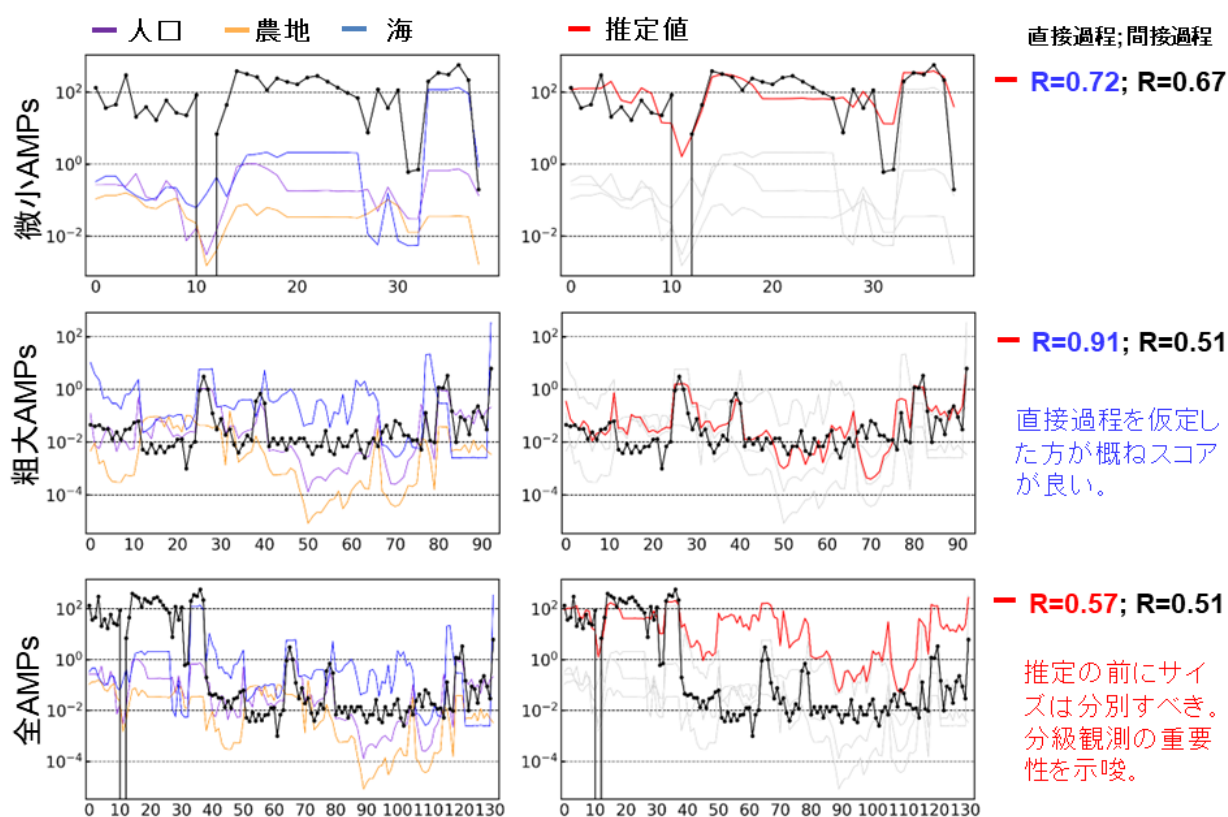


図2-15 図2-12と同じ、ただし図2-14の観測値と計算結果による。上から微小粒子の大気濃度による推定値、粗大粒子の大気濃度による推定値、微小・粗大合わせた全粒子による推定値。右に、相関係数Rについて海洋由来の発生メカニズムを直接過程と間接過程を仮定したもの両方を図示した。

(7) 北半球スケールのAMPsの光劣化輸送計算

当初想定していなかったが、サブテーマ3で得られた劣化PETによるテレフタル酸の生成と炎症誘導能・気道抵抗性増大の発見を受けて、AMPsの光劣化スキームを開発した。図2-16にその結果を図示する。未発表のため詳細は割愛するが、高緯度に位置するヨーロッパでは劣化度が低く、北米では日射量に差のある西海岸と東海岸で劣化度に有意な差が見られる可能性などを示した。本計算については、室内実験と数値実験の結果のみで、観測結果による裏付けが存在しない。今後、観測から得られたAMPsの劣化度に関する分析とモデル予測値の妥当性評価研究が必要である。

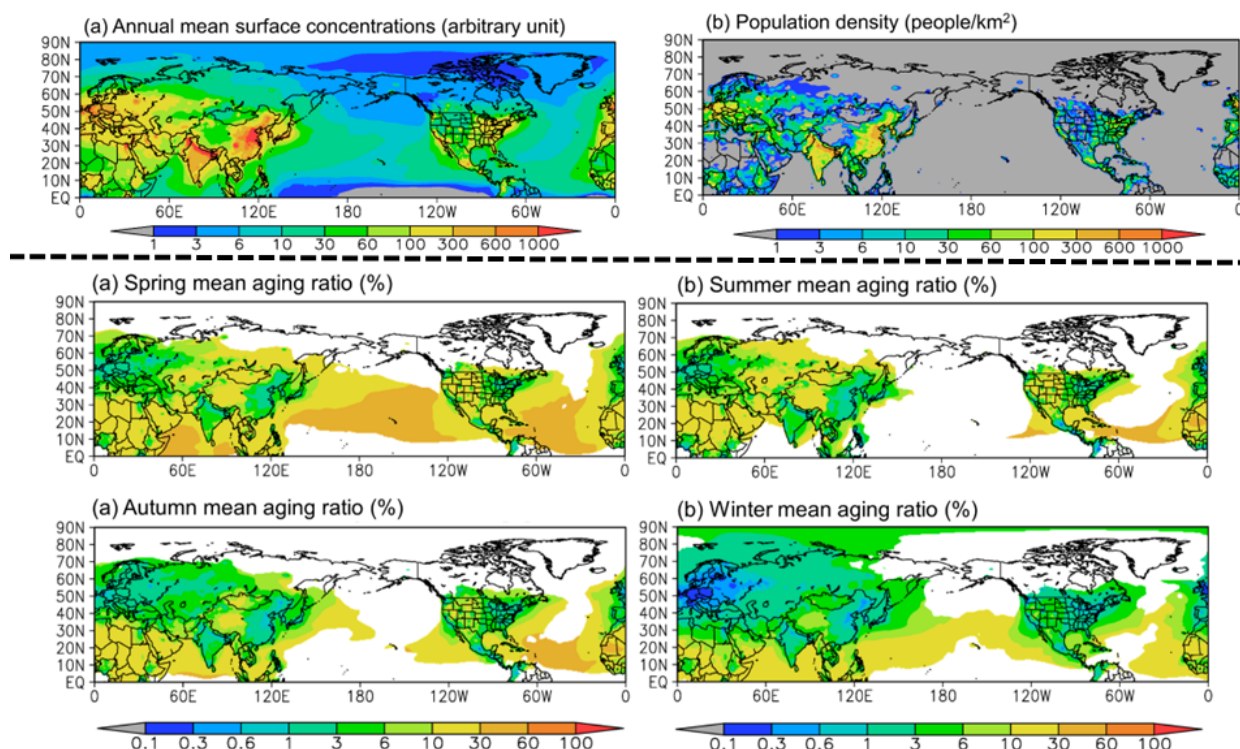


図2-16 上図(a)年平均AMPs地上濃度、上図(b)人口密度、下図(a)-(d)光劣化率の季節平均値

参考文献

- Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M., Cornwell, G., Klimont, Z., Matsui, H., Prather, K. M.: Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 118, e2020719118, 2021.
- Ishizuka, M., Mikami, M., Tanaka, T. Y., Igarashi, Y., Kita, K., Yamada, Y., Yoshida, N., Toyoda, S., Satou, Y., Kinase, T., Ninomiya, K., Shinohara, A.: Use of a size-resolved 1-D resuspension scheme to evaluate resuspended radioactive material associated with mineral dust particles from the ground surface, *J. Environ. Radioact.*, 116, 436-448, 2017.
- 磯辺篤彦：海洋プラスチックごみ問題の真実：マイクロプラスチックの実態とみらい予測, DOJIN選書, 192 pp., 2020.
- Kajino, M., M. Ishizuka, Y. Igarashi, K. Kita, C. Yoshikawa, M. Inatsu. Long-term assessment of airborne radiocesium after the Fukushima nuclear accident: Re-suspension from bare soil and forest ecosystems, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 13149-13172, 2016.
- Kajino, M., M. Deushi, T. T. Sekiyama, N. Oshima, K. Yumimoto, T. Y. Tanaka, J. Ching, A. Hashimoto, T. Yamamoto, M. Ikegami, A. Kamada, M. Miyashita, Y. Inomata, S. Shima, P. Khatri, A. Shimizu, H. Irie, K. Adachi, Y. Zaizen, Y. Igarashi, H. Ueda, T. Maki, M. Mikami, Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables, *Geosci. Model Dev.*, 14, 2235-2264, 2021.
- Kajino, M., A. Watanabe, M. Ishizuka, K. Kita, Y. Zaizen, T. Kinase, R. Hirai, K. Konnai, A. Saya, K. Iwaoka, Y. Shiroma, H. Hasegawa, N. Akata, M. Hosoda, S. Tokonami, and Y. Igarashi, Reassessment of the radiocesium resuspension flux from contaminated ground surfaces in eastern Japan, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 783-803, 2022.
- Kajino, M., Kayaba, S., Ishihara, Y., Iwamoto, Y., Okuda, T., and H. Okochi, Numerical simulation of IL-8-based relative inflammation potentials of aerosol particles from vehicle exhaust and non-exhaust emission sources, *Atmos. Environ.: X*, 21, 100237, 2024.
- Kanji, Z., L. A. Ladino, H. Wex, Y. Boose, M. Burkert-Kohn, D. J. Cziczo, M. Kramer. Chapter 1. Overview of

ice nucleating particles, Meteor. Monogr., 58, Amer. Meteor. Soc., 33 pp., 2017.

Katsumi, N., Nagao, S., Okochi, H.: Addition of polyvinyl pyrrolidone during density separation with sodium iodide solution improves recovery rate of small microplastics (20-150 μm) from soils and sediments, Chemosphere, 307, 135730, 2022.

Monahan, E. C., Spiel, D. E., Davidson, K. L.: A model of marine aerosol generation via whitecaps and wave disruption, in Oceanic Whitecaps, eds. Monahan, E. C., Mac Niocaill, G., 167-174, D. Reidel, Norwell, Mass., 1986.

Morikawa, T. Current status of Japanese emission inventory for PM2.5 and its problems. Journal of Japan Society for Atmospheric Environment, 52(3), A74–A78, 2017. (in Japanese)

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
まず発生源が明らかになっている自動車タイヤ摩耗粉塵と繊維状マイクロプラスチックの領域収支を評価する。そして、サブテーマ1の観測成果に基づいて、各種AMPsの素過程モデルをNHM-Chemに実装し、大気濃度観測を用いてそれらの発生インベントリを構築する。NHM-Chemにより各種AMPsの領域収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにする。さらにAMPsの形状・材質が大気動態や雲・降水変化に及ぼす影響評価を行い、領域収支のさらなる高精度化を図る。	自動車タイヤ摩耗塵の排出インベントリを構築し、領域収支を明らかにした。さらに、サブテーマ3と連携し、タイヤ摩耗塵だけでなく他の自動車由来排気・非排気由来を考慮したIL-8ベースの炎症誘導能の相対強度を評価した（成果番号20）。繊維状マイクロプラスチックだけでなく全マイクロプラスチックについて、サブテーマ1の観測結果と各種AMPsの素過程モデルを実装したNHM-Chemから排出インベントリを推定する技術を構築し、東アジア領域についてその収支（発生、輸送、沈着量）を明らかにした。形状・材質による動態の違いについては世界的にも知見が不足しているため優先度を下げ、空気動力学径の感度実験によりそれに対処した。雲・降水変化に及ぼす影響についてはそれを評価することができるモデルを構築した。さらに、数値モデルが予測する雲・降水過程による除去過程を観測データから評価できる仕組みを構築し、NHM-Chemの評価に適用した（成果番号11）。

Ⅱ－３ サブテーマ３「大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明」

〔サブテーマ３要旨〕

サブテーマ３では、人工太陽光で劣化させたMPsの物性と呼吸器影響を検討した。特に太陽光劣化PETの解析に注力した。太陽光を照射していない繊維状PETと比較して、太陽光で劣化させた繊維状PETを吸入すると、肺の炎症と気道抵抗性の増大が生じることを明らかにした。太陽光を照射すると、PETからテレフタル酸（TPA）の持続的な流出が認められた。TPAは弱いながらも炎症誘導能を示し、TPAの曝露は気道抵抗性の増大を示した。従って、太陽光照射によりPETから流出するTPAが、光劣化PETの呼吸器影響の一因となることが示唆された。光劣化PSからは安息香酸が流出し、PSはエピジェネティックな影響を示すことも示唆された。光劣化PPは強いマクロファージ活性化能を示した。PETやPS、PPをはじめとしたMPsのリスク評価には光劣化を考慮する必要がある、光劣化によるMPsの物性の変化だけでなく、溶出する化学物質の生体作用に着目すべきであろう。

１．サブテーマ３研究開発目的

直径 5 mm 以下のプラスチック片はマイクロプラスチック（microplastics: MPs）と呼ばれ、その多くは海洋に存在し、生物の誤食など生態影響が生じることが明らかになりつつある。日本政府も対策に乗り出しており、第 4 次循環型社会形成推進基本計画や海洋プラスチックごみ対策アクションプランにより、プラスチックゴミの削減、回収、代替素材開発を進める計画となっている。一方、MPs は大気中にも一定量浮遊しており、繊維状や球状、ポリプロピレン（PP）やポリエチレンテレフタレート（PET）など、様々な形状や材質の MPs が観察される。大気中 MPs の主な標的は、気管支や肺などの呼吸器系、さらに常に大気に露出している皮膚であると考えられる。MPs を含む微粒子が呼吸器系に取り込まれると、その排出経路の乏しさもあって肺に長期間留まることが予想され、実際、ヒト肺から数 μm の MPs が検出されている（1）。注目すべきは肺の下葉からも多くの MPs が検出されていることであり（2）、肺全体が大気中 MPs の標的となることが示唆される。

プラスチックをはじめとしたポリマーは熱や光により劣化する。劣化した MPs はその表面で活性酸素種（reactive oxygen species: ROS）を産生することが示唆されているため（3）、酸化ストレスに着目すると劣化 MPs の毒性は非劣化のそれと比較して大きくなると考えられる。しかし、Jeon らは光や熱で劣化させたポリスチレンやポリプロピレンのマクロファージへの毒性を調べ、劣化により毒性は大きくなる一方、劣化により ROS 産生能は低下することを報告した（4）。すなわち、ROS 以外の要因も毒性に寄与すると考えられる。劣化プラスチックの毒性メカニズムはその大半が未知であるが、大気中 MPs は常に太陽光による劣化を受けていることを鑑みると、太陽光劣化 MPs のリスク評価は喫緊の課題である。

以上の背景から、サブテーマ３では、ソーラーシミュレータを使用して繊維状 PET に人工太陽光を照射し、太陽光劣化 PET を作製した。この光劣化 PET の呼吸器影響について、細胞と動物（マウス）を用いて検討した。また、光劣化した PS および PP の作用についても解析した。

２．サブテーマ３研究目標

サブテーマ３	大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響の解明
サブテーマ３実施機関	広島大学
サブテーマ３目標	モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子を肺上皮細胞、マクロファージに曝露し、マイクロプラスチックの上皮バリア、免疫に及ぼす影響を明らかにする。モデルプラスチック微粒子と実プラスチック微粒子をマウスに曝露し、呼吸器影響を調べる。呼吸器に炎症が生じ、或いは気道抵抗が上昇した場合、微粒子の用量依存性を調べて無毒性量を決定する。

３．サブテーマ３研究開発内容

大気中 MPs を含む大気中微小粒子の健康影響評価において、呼吸により曝露する気管支および肺、直接大気と接する皮膚が重要な評価組織となる。サブテーマ３では、まず呼吸器に焦点をあて、大気中 MPs の呼吸器影響を調べた。肺胞では肺胞上皮細胞の上に肺胞マクロファージが存在し、外因性物質に

対する防御線としての役割を果たしている。そこで、ヒト肺胞上皮細胞である A549 細胞、ヒト単球 U937 をホルボール 12-ミリスタート 13-アセタートで処理してマクロファージに分化させた U937 マクロファージを使用した。また、マウスに対してマイクロプラスチックを経鼻曝露し、プレチスモグラフィーにより気道過敏性を評価した。

研究当初、東京都内トンネルに設置したフィルターより採取した道路粉塵をエルボージェット分級装置により $5\mu\text{m}$ 以下に分級し（サブテーマ 1 との連携）、ここに含まれるタイヤ破砕片に着目していたが、中間審査において汎用プラスチックを用いて研究を進めるようコメントがあり、衣服の製造に用いられるバインダー PET 原料、粒子状 PS、PP を使用した。PET は、凍結包埋後にクリオスタットで細断し、繊維状 PET として実験に使用した。また、比較検討のため、慶應義塾大学矢上キャンパス（横浜市）理工学部棟屋上にてインパクトター装備サイクロンで都市型 PM2.5 を採取し、実験に用いた。曝露実験で得られたデータは、粒子毒性のモデル化を見据えてサブグループ 2 に提供した（サブテーマ 2 との連携）。

実験方法の概要

バインダー PET 繊維（直径 $14\mu\text{m}$ ）を細断して繊維状 PET MPs を作製した。繊維状 PET に人工太陽光を照射して太陽光劣化繊維状 PET を作製した。劣化状態は、走査型電子顕微鏡観察および赤外吸収スペクトル測定により評価した。繊維状 PET をマウスに経鼻曝露し、Whole Body Phethysmography により PenH を測定して呼吸器機能の指標として用いた。また、肺における炎症性分子の発現を qPCR により調べ、マクロファージおよび好中球の免疫組織化学染色を行った。PET を肺胞上皮細胞 A549、単球をマクロファージ様に分化させた U937 マクロファージに曝露し、肺胞上皮への障害性、マクロファージ活性化能を調べた。HPLC を用いて劣化 PET から溶出する化学物質を同定した。

PS 微粒子に人工太陽光を照射して、太陽光劣化 PS を作製した。PS を A549 に曝露し、エピジェネティックな変化を、ヒストン抽出およびウエスタンブロットにより評価した。PP 微粒子を U937 マクロファージに曝露し、炎症反応を解析した。

4. サブテーマ 3 結果及び考察

4-1. 人工太陽光劣化 PET の作製

バインダー PET 繊維（直径 $14\mu\text{m}$ ）をクリオスタットで細断し、繊維状 PET を作製した。顕微鏡下で繊維状 PET を観察し、繊維長分布を求めた（図 3-1A）。平均繊維長は、 27.2 ± 20.8 (S.D.) μm であった。繊維状 PET に短波長 UV を 310nm カットフィルターで除いたキセノンランプ光（500W）を 96 時間照射し、光劣化繊維状 PET を作製した。赤外吸収スペクトルを測定したところ、太陽光照射によりエステルの C=O 伸縮および芳香族エステルの C-O 伸縮が増加した（図 3-1B）。走査電子顕微鏡観察より、光劣化 PET の構造を観察したところ、照射前後で明瞭な差は認められなかった（図 3-1C）。従って、人工太陽光照射により表面構造の差異は認められないものの、繊維状 PET の物性が変化していることが明らかとなった。

私たちが用いた人工太陽光照射システムの光強度は、2-ニトロベンズアルデヒドの光化学分解に基づく化学光量計を用いた検討によると、晴天の正午における自然太陽光と比較して 4.7 倍の光強度であった。1 日（24 時間）の平均放射強度（太陽放射強度の昼夜間の変動を考慮した光強度係数）は、0.32 と推定される（5）。従って、当該装置での 1 日の照射量（24 時間）は、昼夜の変化を考慮すると、自然太陽光の 14.9 日分照射に相当する。本研究では、人工太陽光を 96 時間照射して光劣化を誘導しているため、繊維状 PET は昼夜の変化を含めて、自然太陽光により 59.6 日の照射に相当する劣化を受けていると推定された。

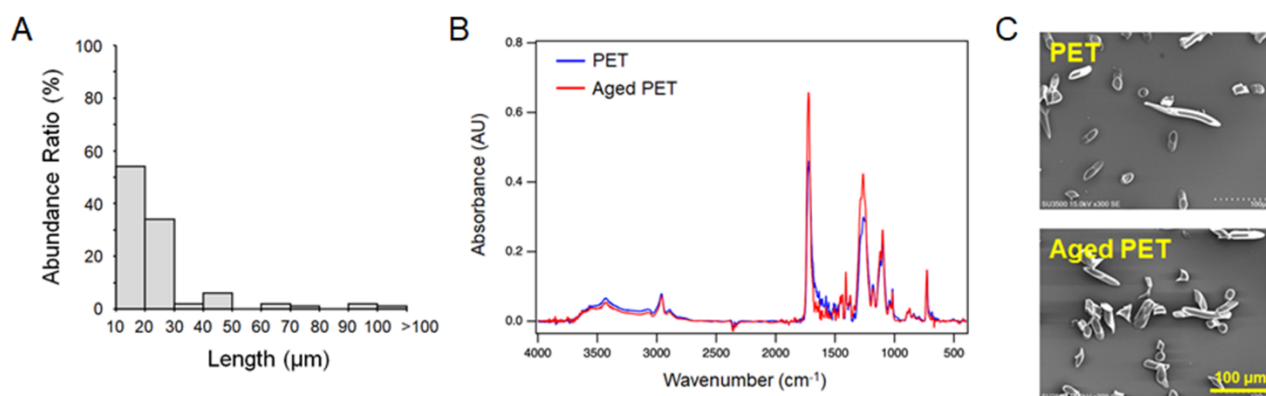


図 3-1 繊維状 PET の作製と光劣化

(A) 作製した繊維状 PET の繊維長分布、(B) 人工太陽光劣化繊維状 PET の赤外吸収スペクトルおよび (C) 走査型電子顕微鏡写真

4-2. 人工太陽光劣化 PET の in vivo 呼吸器影響評価

マウスに繊維状 PET または光劣化した繊維状 PET を 7 日間鼻内投与し (1 日あたり 100μg PET/マウス)、呼吸機能の指標として PenH を測定した。PenH 測定の概要を図 2 に、PET 曝露および測定プロトコルを (図 3-3A) に示す。また、曝露実験において、横浜で採取した PM2.5 をコントロールとして使用した。vehicle 処置群では、メタコリンの霧化量を増やすにつれて PenH の値が上昇しました (図 3-3B)。太陽光を照射していない繊維状 PET の曝露は PenH に影響を与えなかった一方、光劣化させた繊維状 PET の曝露は、vehicle 処置マウスと比較して PenH の値を有意に増加させた (図 3-3B)。PM2.5 を経鼻曝露したマウスの PenH 値は、vehicle 処置マウスよりも有意に高かった (図 3-3B)。次に、繊維状 PET または光劣化繊維状 PET を 7 日間曝露した後、肺を摘出し炎症分子の測定および病理学的解析を行った。太陽光を照射していない PET で処置した肺における IL-6 および IL-33 の mRNA 発現量は、vehicle 処置したマウス肺の発現と同程度だった (図 3C および D)。しかし、光劣化 PET を曝露すると、肺において IL-6 および IL-33 の mRNA 発現が有意に増加した。PM2.5 に曝露されたマウス肺でも同様に IL-6 および IL-33 の増加が観察された (図 3-3C および D)。PM2.5 は肺で COX-2 mRNA 発現も増加させたが、vehicle、繊維状 PET、および光劣化繊維状 PET 処置群間に差はなかった (図 3-3E)。肺へのマクロファージの浸潤を調べたところ、vehicle、PET、光劣化 PET の 3 群間に差は認められなかった (図 3-3F)。一方、光劣化 PET 処置群において、好中球の浸潤が観察された (図 3-2G)。これらの結果から、太陽光を照射していない PET と比較して、太陽光劣化 PET の吸入は肺における炎症と障害を引き起こし、呼吸機能の低下を誘導する可能性が示唆された。

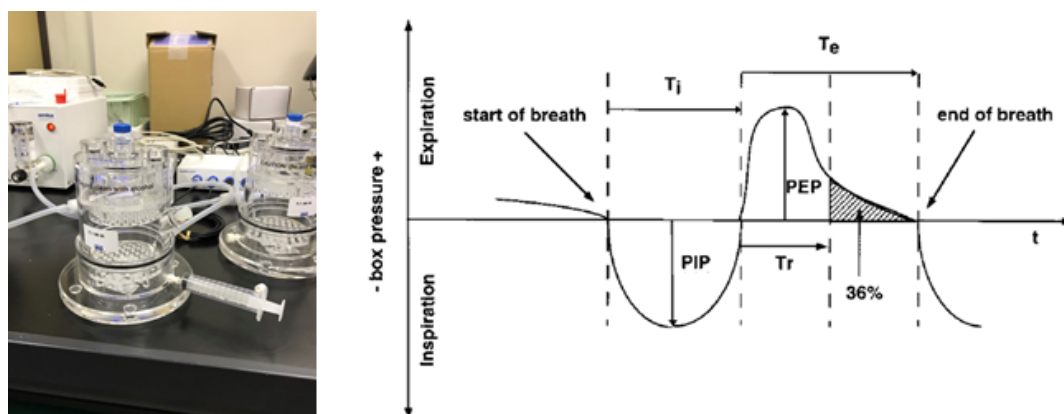


図 3-2 Whole Body Phethysmography による呼吸器機能測定の概要 (文献 6 より一部抜粋)

Whole Body Phethysmography を用い、マウスを入れたチャンバーの圧信号の変化から呼吸機能を推定した。Te (expiratory time/sec)、Tr (relaxation time/sec)、PEP (peak expiratory pressure mL/sec)、PIP (peak inspiratory pressure mL/sec) を測定し、測定気道収縮指標 (Enhanced pause : PenH) を以下の式により算出した。

$$\text{PenH} = (\text{Te} - \text{Tr}) / \text{Tr} \times (\text{PEP} / \text{PIP})$$

PenH が増加すると気道抵抗性が增大することを意味する。本研究では、気道収縮を引き起こすメタコリン（MCh）をネブライザーを用いて曝露し、MCh 曝露上昇に伴う気道抵抗性増大に対して PET 曝露がどのような影響を及ぼすか検討した。

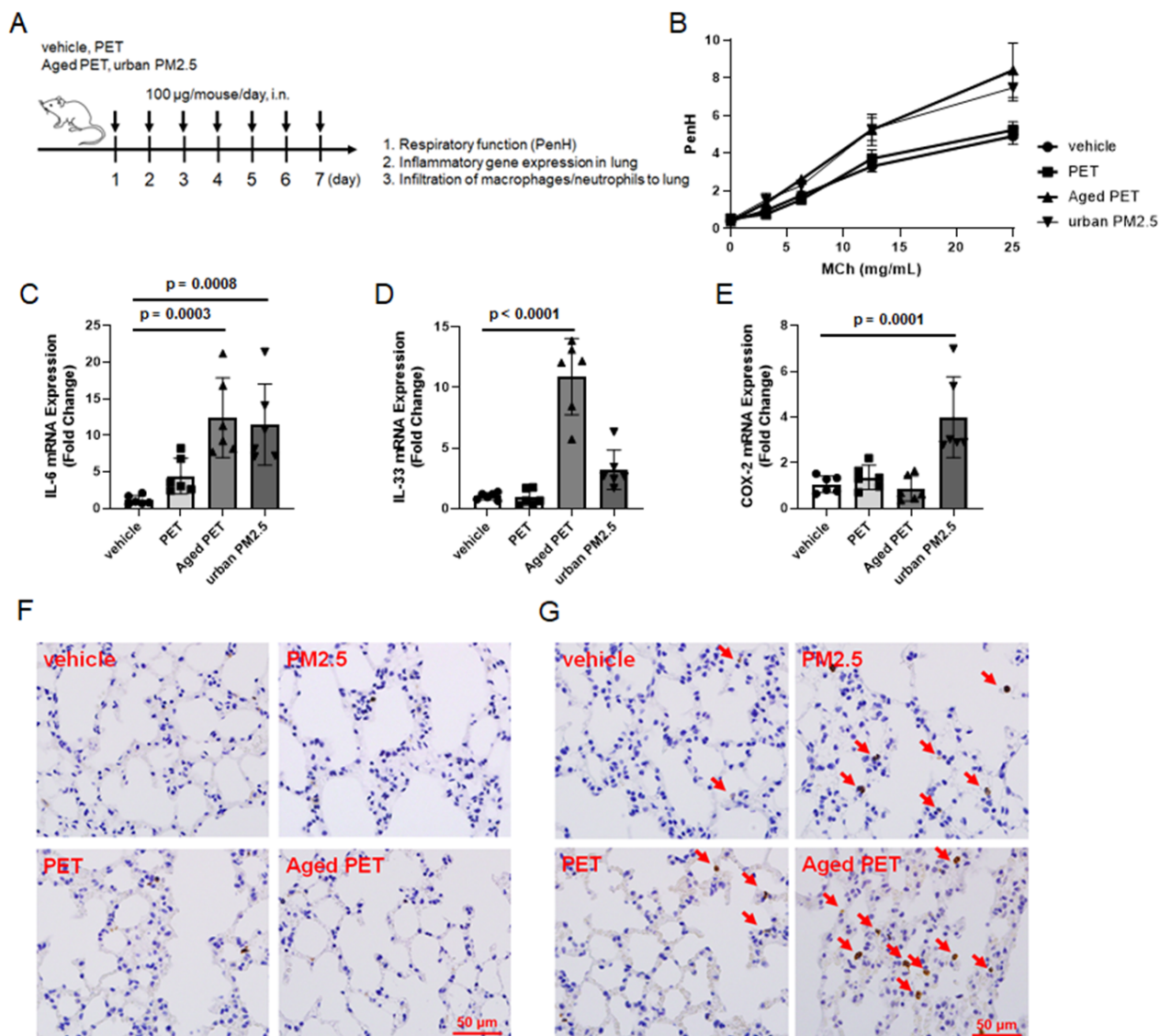


図 3-3 人工太陽光劣化 PET の呼吸器影響

(A) PET のマウス曝露および測定プロトコール、(B) メタコリン（MCh）を濃度を変えてネブライズした際の PenH の変化、(C-E) 肺における IL-6、IL-33 および COX-2 の mRNA 発現量、(F) F4/80（マクロファージのマーカー）および (G) ミエロペルオキシダーゼ（好中球のマーカー）の免疫染色像

4-3. 人工太陽光劣化 PET の in vitro 影響評価

ヒトの肺腺癌細胞株である A549 細胞に太陽光を照射していない繊維状 PET または太陽光照射繊維状 PET を処理し、細胞生存率を測定した（図 3-4）。未処理の繊維状 PET および人工太陽光処理した繊維状 PET とともに、A549 細胞の生存率に影響しなかった。従って、PET は重篤な肺損傷を引き起こさないと考えられる。一方、ヒト単芽球細胞 U937 をホルボール 12-ミリスタート 13-アセタートで処置してマクロファージ用に分化誘導し、太陽光劣化 PET を処置すると、太陽光を照射していない PET と比較して IL-6、IL-33、および COX-2 の発現が増加した（図 3-5）。したがって、PET の光劣化は、炎症反応を誘発する可能性がある。未処理 PET あるいは光劣化 PET を U937 マクロファージに処置した際の ROS 生成を測定したところ、ROS 生成は認められなかった（図 3-6）。マクロファージは外来性異物を食

食すると、NOX2 を活性化し、細胞外にスーパーオキシドを産生することが知られている (7)。しかし、本研究では PET 処置に際して ROS 産生の増大は認められず、このことは、本研究で用いた PET が径 14 μ m、長さ 27 μ m の大きさであり、マクロファージによる貪食を受けるには大きすぎる点からも支持される。従って、太陽光劣化 PET によるマクロファージ炎症反応の惹起は、PET の貪食とは独立した現象であると考えられる。そこで、光劣化による PET 物性の変化について、詳細に検討した。

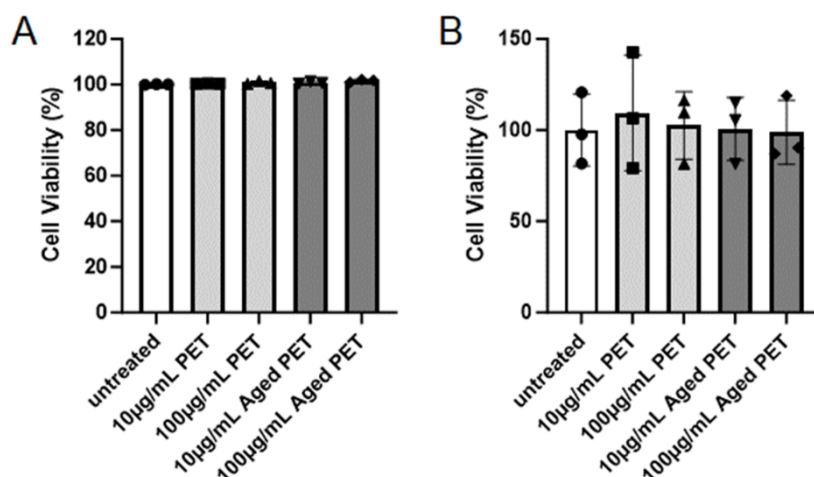


図 3-4 人工太陽光劣化 PET の A549 細胞への作用

(A) PET を 24 時間曝露した後に、Cell Counting Lit-8 を用いて細胞生存率を測定した。(B) 同様に、細胞外への LDH 放出を指標に細胞生存率を測定した。

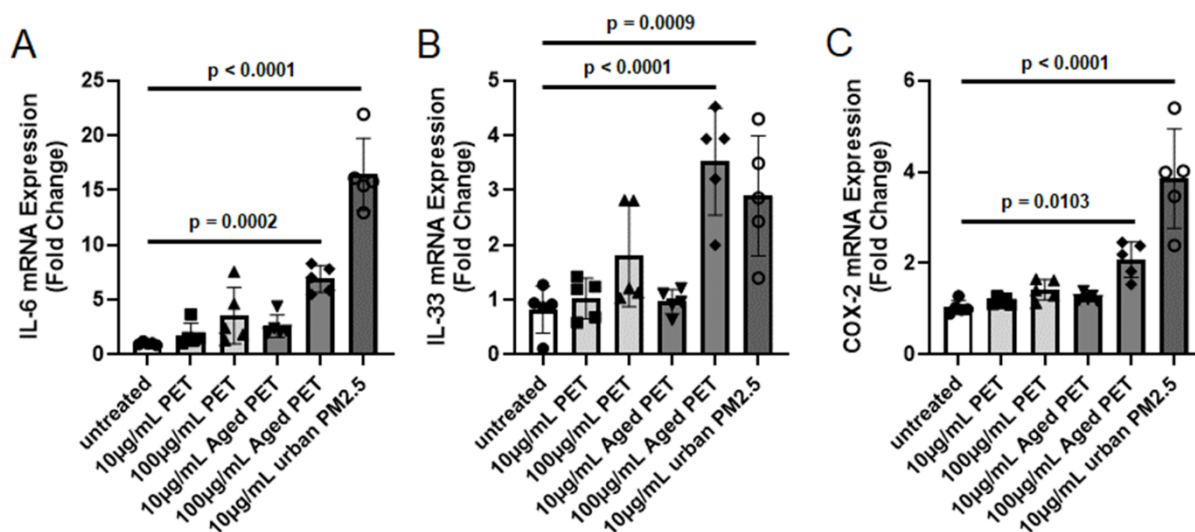


図 3-5 人工太陽光劣化 PET によるマクロファージ炎症反応の誘導

U937 マクロファージに PET を 6 時間曝露し、(A) IL-6、(B) IL-33 および (C) COX-2 mRNA を測定した。

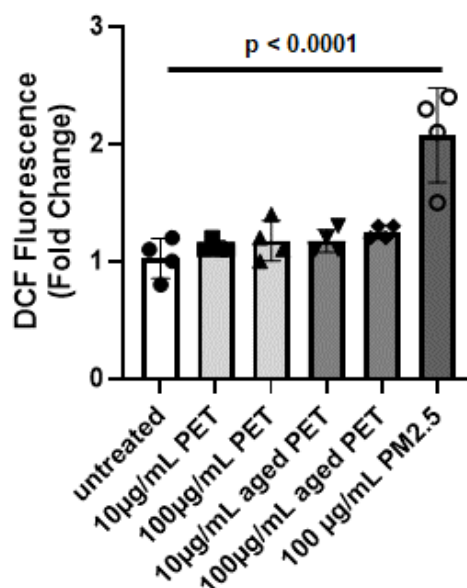


図 3-6. 人工太陽光劣化 PET によるマクロファージ炎症反応の誘導

U937 マクロファージに PET を 6 時間曝露した後、ROS 生成を測定した。

4-4. 人工太陽光照射によるテレフタル酸の溶出

PET を人工太陽光で劣化させた場合、炎症をはじめとした PET による呼吸器影響がより顕著になることが明らかになった。そのメカニズムを解明するために、光劣化した PET から放出される化学物質の同定を試みた。以前の研究より、水中で PET を人工太陽光により光分解すると、テレフタル酸 (TPA) や複数のフタル酸エステルが放出されることが報告されている (8)。そこで、テレフタル酸とフタル酸エステルを対象とした。

人工太陽光で劣化させた PET から放出される化学物質を蒸留水で抽出し、HPLC を用いて解析した。TPA、bis (2-ヒドロキシエチル) テレフタル酸 (BHET)、安息香酸 (BA)、モノメチルテレフタレート (mMe-TAP) を標準物質として分析したところ、HPLC スペクトルより、TPA が光劣化した PET から放出されていることが明らかとなった (図 3-7A)。一方、太陽光を照射していない PET からは TPA のピークは検出されなかった (図 3-7A)。また、フタル酸エステルや BA は、光老化した PET および未処理の PET からの抽出物にほとんど含まれていなかった (図 3A)。また、一度抽出操作を行った PET を 1 日間暗所で保存した後、抽出操作を行うという処理を 1 週間繰り返し、各抽出液に含まれる TPA を定量したところ (図 3-7B)、光劣化 PET は持続的に TPA を放出した。従って、一度 PET が人工太陽光に曝されると、それらは暗所においても持続的に TPA を放出し続けることが明らかとなった。これらの結果は、太陽光で劣化した PET が肺に取り込まれると、肺の中で持続的に TPA を放出し続けることを示唆している。肺に取り込まれた微粒子は、その排出経路の乏しさから、肺の中に長く滞留すること示唆され (9、10)、この事象は大気中 PET のリスクの把握において重要な意味を成すと考えられる。

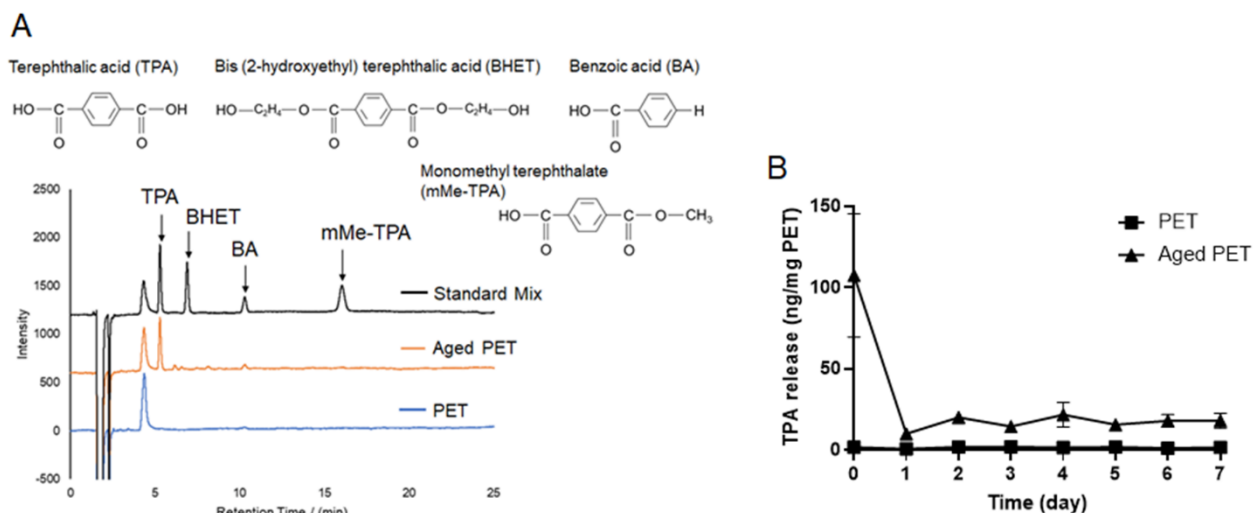


図 3-7 PET 太陽光劣化によるテレフタル酸の溶出

(A) 人工太陽光劣化 PET および非劣化 PET の LC クロマトグラムと (B) 暗所における繰り返し抽出操作により抽出されるテレフタル酸の定量。TAP: terephthalic acid, BHET: bis (2-hydroxyethyl) terephthalic acid, BA: benzoic acid, mMe-TAP: monomethyl terephthalate.

4-5. テレフタル酸の呼吸器影響

本研究で用いた人工太陽光照射条件により、PET から TPA が持続的に生じることが明らかとなった。そこで、テレフタル酸の呼吸器影響を調べた。テレフタル酸を $1\mu\text{g}/\text{mouse}/\text{day}$ の用量で 7 日間経鼻曝露し (図 3-8A)、測定項目については、図 3-3 および図 3-5 の測定に準じた。

TPA を曝露したマウスにおいて、vehicle 群と比較して PenH が増加し (図 3-8B)、マウス肺における IL-6、IL-33、COX-2 の発現が大きく増加した (図 3-8C-E)。このとき、マクロファージの肺への浸潤は認められなかった一方、好中球の浸潤が認められた (図 3-8F)。TPA を U937 マクロファージに曝露したところ、 $100\mu\text{M}$ TPA 処置により IL-6 mRNA が有意に増加し (図 3-8G-I)、TPA は弱いながらも TPA の炎症誘発能をもつことが明らかとなった。以上の結果より、人工太陽光劣化 PET 曝露により認められた呼吸器影響の少なくとも一部は、PET の光分解により生じた TPA の作用に因ることが示された。

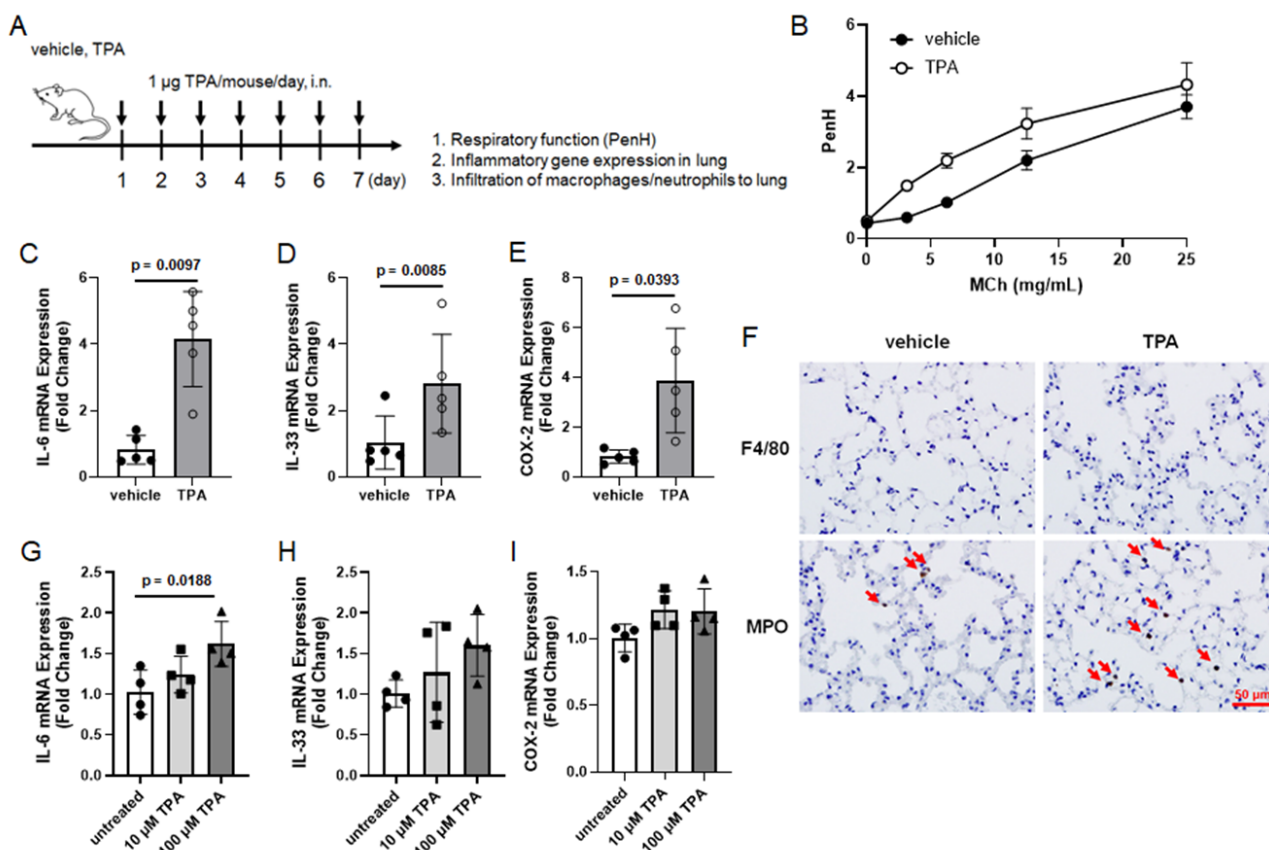


図 3-8 テレフタル酸の呼吸器影響評価

(A) テレフタル酸 (TPA) のマウス曝露および測定プロトコール、(B) メタコリン (MCh) を濃度を変えてネブライズした際の PenH の変化、(C-E) 肺における IL-6、IL-33 および COX-2 の mRNA 発現量、(F) F4/80 (マクロファージのマーカー) およびミエロペルオキシダーゼ (MPO、好中球のマーカー) の免疫染色像、(G-I) U937 マクロファージに曝露した際の IL-6、IL-33 および COX-2 の mRNA 発現量

4-6. PS および PP MPs の太陽光劣化と生物学的作用

5 µm 径の PS 微粒子に同条件で人工太陽光を照射し、まず、その物性を評価した。走査型電子顕微鏡で PS 微粒子を観察したところ、太陽光照射によりひびや割れが観察された (図 3-9)。また、太陽光照射による溶出物を検出したところ、安息香酸 (BA) の流出が明らかとなった。HPLC チャートによると、BA 以外にも複数のピークが観察されており、光劣化により BA 以外にも化学物質が溶出することが明らかとなった。

BA は食品の腐敗や変敗を防止する目的で食品添加物として使用されるなど、安全性については問題ないとされる。一方で、最近、BA がエピジェネティックな作用を有することが報告された (11)。すなわち、安息香酸を細胞に処置すると、ヒストンのリシン残基がベンゼン化される。そこで、A549 細胞を安息香酸および人工太陽光劣化 PS で処置した後にヒストンを抽出し、ベンゼン化の有無をウェスタンブロットにより評価した。BA 処置は A549 ヒストンにベンゼン化を誘導し、また、PS 微粒子もベンゼン化誘導の傾向が認められた (図 3-10)。しかし、太陽光で劣化していない PS にもベンゼン化が観察されたことから、この作用については、詳細な解析が必要である。Tan らは、ヒストンのリシンがベンゼン化されると、転写因子 BCLAF1 の発現が増大し、また、BCLAF-1 はがん細胞の増殖と薬剤耐性獲得に関与することを考察している (12)。ヒストンベンゼン化の生理学的、病態生理学的意義は不明であるが、太陽光劣化 PS の作用と含めて、この点も検討される必要があるだろう。

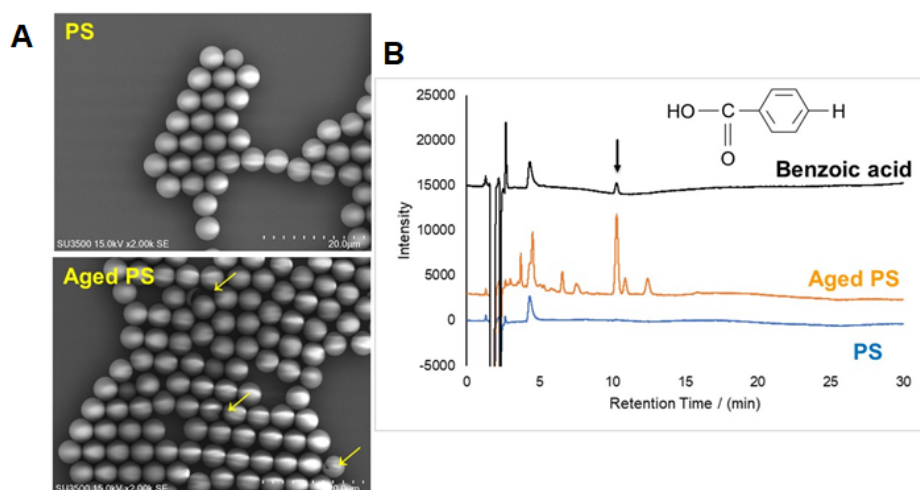


図 3-9 粒子状ポリスチレンの光劣化

(A) ポリスチレンおよび人工太陽光劣化ポリスチレン (PS) の走査型電子顕微鏡写真および (B) PS 流出物の HPLC スペクトル

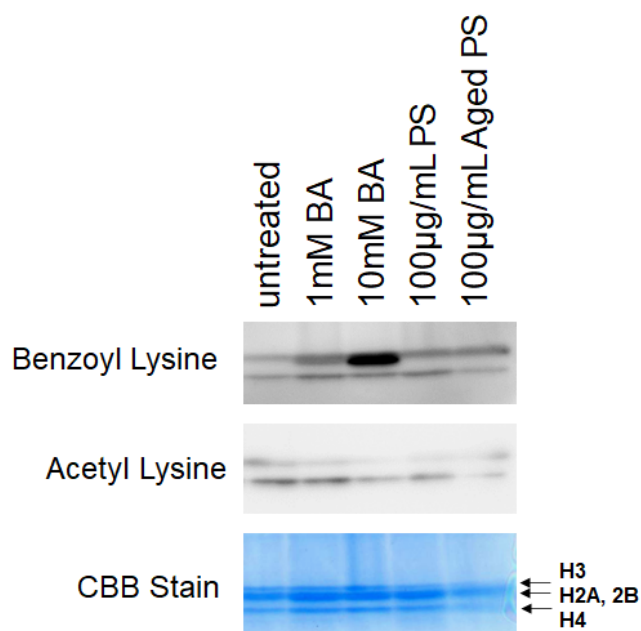


図 3-10 安息香酸および人工太陽光劣化 PS によるヒストンベンゼン化

A549 細胞を安息香酸 (BA) またはポリスチレン (PS) 微粒子で 24 時間処置し、ヒストンを抽出した。ヒストンリシン残基のベンゼン化およびアセチル化をウェスタンブロットにより評価した。

次に、5 μm PP 微粒子に人工太陽光を照射し、太陽光劣化 PP を作製した。PP および太陽光劣化 PP の表面形状を電子顕微鏡で観察したところ、差異は認められなかった (図 3-11A)。PP を終濃度 100 $\mu\text{g/mL}$ で U937 マクロファージに曝露したところ、光劣化 PP のみ、IL-6 および COX-2 の発現が大きく増加した (図 3-11B、C)。従って、PP は光劣化により炎症誘発能が大きく増大することが明らかとなった。光劣化による PP 分解生成物の同定を試みているが、現時点で光劣化 PP から流出する化学物質は同定できていない。流出化学物質の精査も含めて、光劣化 PP が炎症誘発能を増加させるメカニズムの解明は今後の課題である。

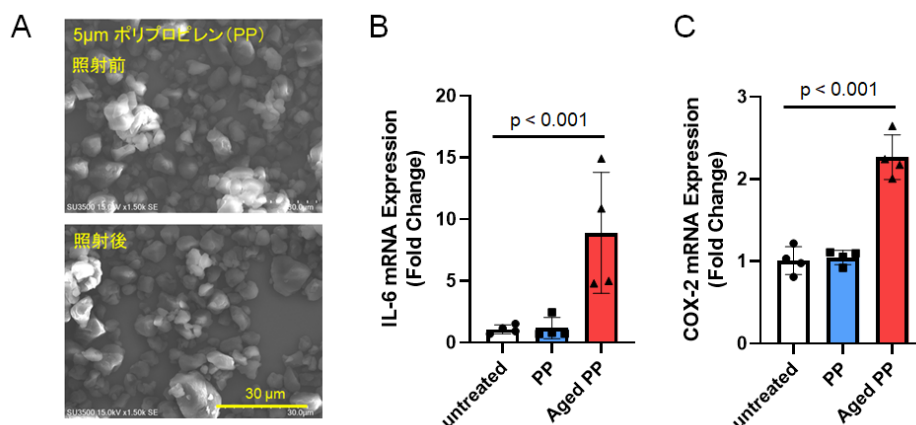


図 3-11 人工太陽光劣化 PP によるマクロファージ活性化

(A) PP および人工太陽光劣化 PP の走査型電子顕微鏡写真、U937 マクロファージに 100μg/mL PP または光劣化 PP を 6 時間曝露し、(B) IL-6 および (C) COX-2 mRNA を測定した。

4-7. 結論と今後の展望

本研究では、人工太陽光で劣化させたモデル MPs を用い、太陽光劣化による物性の変化を測定するとともに、細胞曝露試験、マウス曝露試験により、光劣化による生態影響の変化を調べた。今回用いた 3 種類のモデル MPs、PET、PS、PP のすべてにおいて、劣化により生体への作用が増強することが明らかとなった。光劣化 PET および光劣化 PS の作用は、劣化により生成する TPA、BA の作用に、少なくとも部分的には依存することを示した。光劣化 PP は、強いマクロファージ活性化作用を示したが、その原因は不明である。

人工太陽光を照射した PET および PS は、表面構造に変化がない一方、PET、PS からの TPA、BA の溶出が認められた。従って、劣化に伴う変化の中で、モノマーや添加剤の溶出は劣化早期に生じるイベントである可能性があり、MPs の健康影響を考える上で、劣化により生じる化学物質の作用に着目する必要がある。

また、本研究の重要な成果の 1 つは、一度光劣化した PET が暗所においても TPA を放出し続けることを発見した点である。すなわち、光劣化した PET を吸入すると、肺に到達した PET は肺の中で TPA を放出し続ける。このことは、光劣化した大気中 MPs を吸入すると、そのモノマーや添加剤の溶出により、肺における化学物質局所濃度が上昇することを示唆している。MPs のリスク管理においては、劣化した MPs 自身が化学物質排出源となることを考慮した取り組みが必要であろう。MPs の体内動態や排出機構、さらに MPs より生成する化学物質の体内濃度 (局所濃度) を明らかにすることにより、大気中 MPs の健康影響の全容が明らかになることが期待される。

本研究で得られた光劣化 PET に関する知見については、論文を作成して投稿している (Ishihara Y, Kajino M, Iwamoto Y, Nabetani Y, Okuda T, Kono M, Okochi H. Impact of Artificial Sunlight Aging on the Respiratory Effects of Polyethylene Terephthalate Microplastics through Degradation-Mediated Terephthalic Acid Release)。劣化 PS、劣化 PP における知見についてもデータを追加して、論文を急ぐ。

参考文献

1. Amato-Lourenço LF, Carvalho-Oliveira R, Júnior GR, Dos Santos Galvão L, Ando RA, Mauad T. Presence of airborne microplastics in human lung tissue. *J Hazard Mater.* 416:126124, 2021.
2. Jenner LC, Rotchell JM, Bennett RT, Cowen M, Tentzeris V, Sadofsky LR. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Sci Total Environ.* 831:154907, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907.
3. White JR, Turnbull A. Weathering of polymers: mechanisms of degradation and stabilization, testing strategies and modelling. *J Mater Sci.* 29:584–613, 1994.
4. Jeon S, Lee DK, Jeong J, Yang SI, Kim JS, Kim J, Cho WS. The reactive oxygen species as pathogenic factors of fragmented microplastics to macrophages. *Environ Pollut.* 281:117006, 2021.
5. Takeda K, Katoh S, Mitsui Y, Nakano S, Nakatani N, Sakugawa H. Spatial distributions of and diurnal variations in low molecular weight carbonyl compounds in coastal seawater, and the controlling factors. *Sci Total Environ.*

493:454-62, 2014.

6. Hamelmann E, Schwarze J, Takeda K, Oshiba A, Larsen GL, Irvin CG, Gelfand EW. Noninvasive measurement of airway responsiveness in allergic mice using barometric plethysmography. *Am J Respir Crit Care Med.* 156:766-75, 1997.
7. Forman HJ, Torres M. Reactive oxygen species and cell signaling: respiratory burst in macrophage signaling. *Am J Respir Crit Care Med.* 166(12 Pt 2):S4-8, 2002.
8. Takahashi N, Miyanishi Y, Kato R, Amimoto T, Iwamoto Y, Takeda K. Migration of terephthalate from scraps of poly(ethylene terephthalate) (PET) in water and artificial seawater. *Sci Total Environ.* 838(Pt 2):156053, 2022.
9. Eyles JE, Spiers ID, Williamson ED, Alpar HO. Tissue distribution of radioactivity following intranasal administration of radioactive microspheres. *J Pharm Pharmacol.* 53(5):601-7, 2001.
10. Klepczynska-Nystrom A, Sanchez-Crespo A, Andersson M, Falk R, Lundin A, Larsson BM, et al. The pulmonary deposition and retention of indium-111 labeled ultrafine carbon particles in healthy individuals. *Inhal Toxicol.* 24(10):645-51, 2012.
11. Huang H, Zhang D, Wang Y, Perez-Neut M, Han Z, Zheng YG, Hao Q, Zhao Y. Lysine benzoylation is a histone mark regulated by SIRT2. *Nat Commun.* 9(1):3374, 2018.
12. Tan D, Wei W, Han Z, Ren X, Yan C, Qi S, Song X, Zheng YG, Wong J, Huang H. HBO1 catalyzes lysine benzoylation in mammalian cells. *iScience.* 25(11):105443, 2022.

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

本研究では、人工太陽光で劣化させたMPsの細胞影響およびマウス呼吸器影響を調べ、光劣化によりPETから流出するTPAにより呼吸器系の炎症と気道抵抗性の増大が引き起こされることを示唆した。この成果は、「Impact of Artificial Sunlight Aging on the Respiratory Effects of Polyethylene Terephthalate Microplastics through Degradation-Mediated Terephthalic Acid Release」とのタイトルで原著論文を投稿中である。また、まだ学会発表レベルではあるが、光劣化PSおよびPPの作用も発表した。従って、目標に挙げた事項はほぼすべて達成した。唯一、無毒性量の推定については検討できていない。現在、MPsの濃度を変えてマウスに曝露し、PenHを測定することにより、無毒量の推定を進めているところである。

本研究より、一度光劣化したPETは、暗所ですら持続的にTPAを産生することが明らかとなった。環境中のPETをはじめとしたMPsは、その程度は異なるものの光劣化を受けている。従って、AMPsが肺に取り込まれると、肺から排泄されない限りは光分解物を肺の中で産生し続けることが予測される。従って、呼吸器に取り込まれたMPsの動態や排出にかかる時間、さらには排出経路も併せて毒性評価を行う必要があり、AMPsのリスク評価にはさらなる研究が必要である。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	26
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	9
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	21
口頭発表（学会等・査読なし）：	90
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	17
マスコミ等への公表・報道等：	193
研究成果による受賞：	9
その他の成果発表：	13

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Tokunaga, Y., Okochi, H., Tani, Y., Niida, Y. et al. (2023) Airborne microplastics detected in the lungs of wild birds in Japan, <i>Chemosphere</i> , 321 , 138032, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138032 .
2	Mizuguchi, H., Takeda, H., Kinoshita, K., Takeuchi, M. et al. (2023) Direct analysis of airborne microplastics collected on quartz filters by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry, <i>Journal of Analytical and Applied Pyrolysis</i> , 171 , 105946, https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105946
3	Wang, Y., Okochi, H., Tani, Y., Hayami, H. et al. (2023) Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation, <i>Environmental Chemistry Letters</i> , https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x ,
4	Tran, N., Fujii, Y., Khan, F.K., Hien, T.T. et al. (2024) Source apportionment of ambient PM _{2.5} in Ho Chi Minh City, Vietnam, <i>Asian Journal of Atmospheric Environment</i> , 18 (1), https://doi.org/10.1007/s44273-023-00024-7
5	Hidayat, N.A.A., Kitano, K., Tani, Y., Lestari, P. et al. (2024) Airborne microplastics in Bandung and Osaka: Concentration and characteristics, <i>E3S Web of Conferences</i> 485(30), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448506004
6	Sunaga, N., Okochi, H., Niida, Y., Miyazaki, A. (2024) Alkaline extraction yields a higher number of microplastics in forest canopy leaves: implication for microplastic storage, <i>Environmental Chemistry Letters</i> , https://doi.org/10.1007/s10311-024-01725-3

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
7	<u>Kajino, M., Tanji, N., Kuramochi, M. (2021) Better prediction of surface ozone by a superensemble method using emission sensitivity runs in Japan, <i>Atmos. Environ.: X</i>, 12, 100120, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100120.</u>
8	<u>Kajino, M., Deushi, M., Sekiyama, T.T. Oshima, N. et al. (2021) Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables, <i>Geosci. Model Dev.</i>, 14, 2235-2264, https://doi.org/10.5194/gmd-14-2235-2021.</u>
9	<u>Nakata M., <u>M. Kajino</u>, Y. Sato, Effects of mountains on aerosols determined by AERONET/DRAGON/J-ALPS measurements and regional model simulations, <i>Earth Space Sci.</i>, 8, e2021EA001972, https://doi.org/10.1029/2021EA001972, 2021.</u>
10	<u>Niwano, M., <u>Kajino</u>, M., Kajikawa, T., Aoki, T. (2021) Quantifying relative contributions of light-absorbing particles from domestic and foreign sources on snow melt at Sapporo, Japan, <i>Geophys. Res. Lett.</i>, 48, e2021GL093940, 10 pp., https://doi.org/10.1029/2021GL093940.</u>
11	<u><u>Kajino, M.</u>, Kamada, A., Tanji, N., Kuramochi, M. et al. (2022) Quantitative influences of interannual variations in meteorological factors on surface ozone concentration in the hot summer of 2018 in Japan, <i>Atmos. Environ.: X</i>, 16, 100191, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100191.</u>
12	<u><u>Kajino, M.</u>, Watanabe, A., Ishizuka, M., Kita, K. et al. (2022) Reassessment of the radiocesium resuspension flux from contaminated ground surfaces in eastern Japan, <i>Atmos. Chem. Phys.</i>, 22, 783-803, https://doi.org/10.5194/acp-22-783-2022, 2022.</u>
13	<u>Yamagami, A., <u>Kajino</u>, M., T. Maki, T. (2022) Statistical evaluation of the temperature forecast error in the lower-level troposphere on short-range timescales induced by aerosol variability, <i>J. Geophys. Res.</i>, 127, e2022JD036595, https://doi.org/10.1029/2022JD036595.</u>
14	<u>Maki, T., Tanaka, T.Y., Koshiro, T., Shimizu, A. et al. (2022) Changes in dust emissions in the Gobi Desert due to global warming using MRI-ESM2.0, <i>Sci. Online Lett. Atmos.</i>, 18, 190-193, https://doi.org/10.2151/sola.2022-035</u>
15	<u><u>Adachi, K.</u>, Dibb, J.E., Scheuer, E., Katich, J.M. et al. (2022) Fine ash-bearing particles as a major aerosol component in biomass burning smoke, <i>J. Geophys. Res.</i>, 127, e2021JD035657, https://doi.org/10.1029/2021JD035657</u>
16	<u>Yamagami, A., <u>Kajino</u>, M., Maki, T., Toyoda, T. (2023) Spatiotemporal variations in summertime Arctic aerosol optical depth caused by synoptic-scale atmospheric circulation in three reanalyses, <i>J. Geophys. Res.</i>, 128, e2022JD038007, 10 pp., https://doi.org/10.1029/2022JD038007</u>
17	<u>Kayaba, S., <u>Kajino</u>, M. (2023) Potential impacts of energy and vehicle transformation through 2050 on oxidative stress-inducing PM_{2.5} metals concentration in Japan, <i>GeoHealth</i>, 7, e2023GH000789, 29 pp., https://doi.org/10.1029/2023GH000789.</u>
18	<u>Kayaba, S., <u>Kajino</u>, M. (2023) Potential impact of battery electric vehicle penetration and changes in upstream process emissions assuming night-charging on summer O₃ concentrations in Japan, <i>J. Geophys. Res.</i>, 128, e2022JD037578, 21 pp., https://doi.org/10.1029/2022JD037578</u>
19	<u>Kuramochi, M., <u>Kajino</u>, M., and Ueda, H. (2023) Interannual variability of dust deposition in Japan during spring season and related atmospheric circulation fields, <i>J. Meteor. Soc. Japan</i>, 101(4), 255-270, https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-016,</u>
20	<u>Sekiyama, T., Y. Kurosaki, Y., <u>Kajino</u>, Ishizuka, M., et al. (2023) Improvement in dust storm simulation by considering stone coverage effects for stony deserts in East Asia, <i>J. Geophys. Res.</i>, 128, e2022JD037295, https://doi.org/10.1029/2022JD037295.</u>
21	<u><u>Kajino, M.</u>, Kayaba, S., Ishihara, Y., Iwamoto, Y. (2024) Numerical simulation of IL-8-based relative inflammation potentials of aerosol particles from vehicle exhaust and non-exhaust emission sources, <i>Atmos. Environ.: X</i>, 21, 100237, https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100237</u>

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
22	<u>Ishihara N, Okuda T, Hagino H, Oguro A, et al. (2022) Involvement of polycyclic aromatic hydrocarbons and endotoxin in macrophage expression of interleukin-33 induced by exposure to particulate matter., <i>J Toxicol Sci</i>, 47(5):201-210, https://doi.org/10.2131/jts.47.201</u>

23	Kono M, Okuda T, Takaishi M, Ikeda H, et al. (2022) Leaf extracts from the Camellia sinensis and the Argania spinosa suppressed oxidative stress and chemokine release in human 3-dimensional cultured epidermis exposed to PM _{2.5} collected with cyclonic separation. Fundam. Toxicol. Sci. 9:117-122, https://doi.org/10.2131/fts.9.117 .
24	Kono M, Okuda T, Ishihara N, Hagino H, et al. (2023) Chemokine expression in human 3-dimensional cultured epidermis exposed to PM _{2.5} collected by cyclonic separation. Toxicol Res. 39(1):1-13, https://doi.org/10.1007/s43188-022-00142-4
25	Tanaka M, Okuda T, Itoh K, Ishihara N, et al (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban particle matter exacerbate movement disorder after ischemic stroke via potentiation of neuroinflammation. Particle Fibre Toxicol. 20(6), https://doi.org/10.1186/s12989-023-00517-x .
26	Kono M, Takaishi M, Okuda T, Fujihara M, et al. (2024) A simple air-liquid interface exposure system for exposing cultured human 3D epidermis to PM _{2.5} collected through cyclonic separation. J Toxicol Sci., 49(2):61-68, https://doi.org/10.2131/jts.49.61 .

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ 1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ 1】のその他誌上発表（査読なし）
27	大河内 博（2021）話題の環境衛生「マイクロプラスチックによる大気環境汚染と健康および環境影響」，ビルと環境 174 号，2021 年 9 月 1 日
28	大河内 博，吉田 昇永，趙 鶴立，藤川 真智子ほか(2022) 大気中マイクロプラスチックの現状と課題，大気環境学会誌，57，A66-A72， https://doi.org/10.11298/taiki.57.A66 .
29	反町篤行（2023）大気中マイクロプラスチックに関する研究，工業技術，45，45-48，2023 年 2 月， http://doi.org/10.34428/00013933
30	大河内 博，谷 悠人，小野塚 洋介，王 一澤ほか（2023）プラスチック大気汚染の現状と課題，エアロゾル研究，38，145-159， https://doi.org/10.11203/jar.38.145

成果 番号	【サブテーマ 2】のその他誌上発表（査読なし）
31	梶野瑞王，足立光司，大河内博，石原康宏，茅場聡子，阪口悠宇，マイクロプラスチックの 3 次元モデル予測に向けて，大気環境学会誌，58(1)，A44-A48，2023.
32	梶川友貴，梶野瑞王，大気汚染物質が都市域豪雨の雲微物理過程と化学過程に及ぼす影響に関する数値実験とその検証，第 1 回都市極端気象シンポジウム（第 18 回台風研究会）報告書，57-67，2023.

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
33	石原 康宏、河野 まおり、大河内 博、奥田 知明．道路粉塵の健康影響評価：都市型PM _{2.5} との比較．大気環境学会誌 58巻1号 A44 2023年．
34	和田 百合花、河野 まおり、鍋谷 悠、石原 康宏．大気中マイクロプラスチック毒性研究の現状と課題．エアロゾル研究 38巻3号 P. 181-186 2023年．
35	石原 康宏、岩本 洋子、奥田 知明、大河内 博、鍋谷 悠、河野 まおり．太陽光劣化繊維状ポリエチレンテレフタラートの呼吸器影響評価．大気環境学会誌 59巻1号 A44 2024年．

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
36	Norihisa Yoshida, <u>Hiroshi Okochi</u> , Somei Yanagitani, Hiroshi Hayami, Yasuhiro Niida, Naoki Umezawa, Eishi Iso, Tetsusaburo Miura, Erika Hiraya, Kenichi Akao, Mamoru Yamamoto, Yohei Itaya, Hiroko Ogata, Naoya Katsumi, Akane Miyazaki, Hideshige Takada, “Establishment of a standard protocol for airborne microplastics and its application to the particulate matters in urban and free tropospheric atmospheres”, Pacificchem 2021, December 16 - 21, 2021 (Virtual)
37	Heli Zhao, <u>Hiroshi Okochi</u> , Norihisa Yoshida, Hiroshi Hayami, Masaki Takeuchi, Atsuyuki Sorimachi, Yusuke Fujii, Norimichi Takenaka, Naoya Katsumi, Akane Miyazaki, Tomoyuki Hori, Hiroko Ogata, Youhei Itaya, Hanae Kobayashi, Norio Urayama Yasuhiro Niida, Hideshige Takada, “Atmosphere-forest interaction of airborne microplastics (AMPs) (1): Application of O-PTIR to the identification of AMPs in the forest area”, Pacificchem 2021, December 16 - 21, 2021 (Virtual)
38	Machiko Fujikawa, <u>Hiroshi Okochi</u> , Yasuhiro Niida, Junichi Saito, Takahiro Goto, Hideshige Takada, “Identification of Microcapsules in Personal care products and health / environmental impact assessment”, Pacificchem 2021, December 16 - 21, 2021 (Virtual)
39	Natsu Sunaga, Chiemi Osako, Norihisa Yoshida, Hiroshi Kobayashi, Yasuhiro Niida, <u>Hiroshi Okochi</u> , Akane Miyazaki, “Capturing of airborne microplastics (AMPs) by forest canopy in a small forest in the Tokyo Metropolitan area”, Pacificchem 2021, December 16 - 21, 2021 (Virtual)
40	Ngoc Tran, <u>Yusuke Fujii</u> , To Thi Hien, <u>Hiroshi Okochi</u> , Norimichi Takenaka, “Annual variation of PM _{2.5} in Ho Chi Minh City, Vietnam”, Asian Aerosol Conference 2022, June 12-16 (Virtual)
41	Yuto Tani, <u>Hiroshi Okochi</u> , Norihisa Yoshida, <u>Hiroshi Hayami</u> , Masaki Takeuchi, Atsuyuki Sorimachi, <u>Yusuke Fujii</u> , Norimichi Takenaka, Takashi Yamaguchi, Naoya Katsumi, Atsushi Matsuki, Mizuo Kajino, Kouji Adachi, Yasuhiro Ishihara, Yoko Iwamoto, Yasuhiro Niida, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (1): Distribution of concentration and deposition flux in Japan”, Asian Aerosol Conference 2022, June 12-16 (Virtual)
42	Ngoc Tran, <u>Yusuke Fujii</u> , Vinh Xuan Le, Nguyen Doan Thien Chi, <u>Hiroshi Okochi</u> , To Thi Hien, Norimichi Takenaka, “Seasonal variation in PM _{2.5} and influence of socioeconomic suppression in Ho Chi Minh City, Vietnam”, International Aerosol Conference 2022, September 4-9, 2022, Athens, Greece
43	Norihisa Yoshida, Hiroshi Okochi, Yuto Tani, Hiroshi Hayami, Masaki Takeuchi, Atsuyuki Sorimachi, Yusuke Fujii, Norimichi Takenaka, Takashi Yamaguchi, Naoya Katsumi, Atsushi Matsuki, Mizuo Kajino, Koji Adachi, Yasuhiro Ishihara, Yoko Iwamoto, And Yasuhiro Niida, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (2): Characteristics of AMPs at the summit of Mt. Fuji in the free troposphere”, International Aerosol Conference 2022, September 4-9, 2022, Athens, Greece
44	Yurika Tokunaga, Hiroshi Okochi, Yuto Tani, Yasuhiro Niida, Toshio Tachibana, Kazuo Saigawa, Kinya Katayama, Sachiko Moriguchi, Takuya Kato, Shin-ichi Hayama, “The possibility of presence of airborne microplastics in the lungs of wild birds”, ASCM 2022, October 25-28, 2022, Chiang Mai, Thailand
45	Onozuka Y, Okochi H, Tani Y, Yoshida N, Hayami H, Takeuchi M, Sorimachi A, Fujii Y, Takenaka N, Yamaguchi T, Katsumi N, Kajino M, Adachi K, Ishihara Y, Iwamoto Y, Niida Y, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (AMPs) (3)”, Acid Rain 2020, April 17-21, 2023, Niigata
46	Tani Y, Okochi H, Onozuka Y, Hayami H, Takeuchi M, Katsumi N, Kajino M, Adachi K, Kajikawa T, Niida Y, Kato S, Wada R, Kamogawa M, Iwasaki H, Yokoyama K, Nagato T, Narumi G, Miura K, Hirose K, Dokiya Y, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (AMPs): Characteristics of AMPs in high altitude and polar regions (4)”, Acid Rain 2020, April 17-21, 2023, Niigata

47	Atsushi Watanabe, Hitoshi Mizuguchi, Hiroto Takeda, Kyosuke Kinoshita, Masaki Takeuchi, Toshio Takayanagi, Hajime Ohtani, Norio Terame, William Pipkin, Kazuko Matsui, Chuichi Watanabe, “Analyzing microplastics in airborne particulate matter by Pyrolysis-GC/MS”, PYROASIA Symposium 2023, June 26, 27, 2023, Lumpur, Malaysia,
48	Ngoc Tran, <u>Yusuke Fujii</u> , Md Firoz Khan, To Thi Hien, Tran Hoang Minh, <u>Hiroshi Okochi</u> , “Source apportionment of one-year observation PM _{2.5} in Ho Chi Minh City, Vietnam”, 13th International Conference on Carbonaceous Particles in the Atmosphere, July 9-12, 2023, Berkeley, California, USA
49	Hiroshi Okochi, Yize Wang, Yuto Tani, Yosuke Onozuka, Hiroshi Hayami, Yasuhiro Niida, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (AMPs) (5): Characteristics of AMPs in cloud, snow, and aerosol at the summit of Mt. Fuji in the free troposphere”, 9th international conference on fog, fog collection, and dew, July 23-28, 2023, Fort Collins, Colorado, USA
50	Ngoc Tran, <u>Yusuke Fujii</u> , Tran Hoang Minh, To Thi Hien, Md Firoz Khan, <u>Hiroshi Okochi</u> , Norimichi Takenaka, “Source apportionment of ambient PM _{2.5} in Ho Chi Minh City, Vietnam”, European Aerosol Conference 2023, September 3-8, 2023, Malaga, Spain
51	Hiroto Takeda, Kyosuke Kinoshita, Masaki Takeuchi, Toshio Takayanagi, Hajime Ohtani, Norio Teramae, William Pipkin, Kazuko Matsui, Atsushi Watanabe, Chuichi Watanabe, Hitoshi Mizuguchi, “Highly sensitive analysis of airborne microplastics by splitless pyrolysis-GC/MS”, RSC Tokyo International Conference 2023, September 7, 8, 2023, Chiba, Japan
52	Nur Alina Aprilia Hidayat, Kotaro Kitano, Yuto Tani, Puji Lestari, Windy Iriana, <u>Yusuke Fujii</u> , Norimichi Takenaka, <u>Hiroshi Okochi</u> , “Airborne Microplastics in Bandung City: Concentration, Polymer Type, Diameter, and Shape”, 7th Environmental Technology and Management Conference, November 1-3, 2023, Bali, Indonesia
53	Moene Komatsu, Hiroshi Okochi, Yuto Tani, Yosuke Onozuka, Motohiro Oshimi, Hiroshi Hayami, Masaki Takeuchi, Atsuyuki Sorimachi, Yusuke Fujii, Norimichi Takenaka, Naoya Katsumi, Mizuo Kajino, Koji Adachi, Yasuhiro Ishihara, Yoko Iwamoto, Yasuhiro Niida, Ryota Nakajima, Akinori Yabuki, Distribution of Potentially Airborne Sub-100 μm Marine Microplastics in the Surface Ocean Near Japan, 2nd International Symposium on Plastic Pollution in Asian Waters - From land to the ocean, February 28-29, 2024, Tokyo

成果 番号	【サブテーマ 2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
54	<u>Adachi K.</u> Physical and chemical analyses of aerosol particles from biomass burning using transmission electron microscopy, 2021/12/22 Pacifichem2021 (Invited talk)

成果 番号	【サブテーマ 3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
55	Okuda T, Takano H, Ishihara Y. Cyclone Collected Particles for Exposure Experiments. 12th Asian Aerosol Conference June 12-16, 2022 (Taipei).
56	Kono M, Takaishi M, Kinoshita K, Ikeda H, Okuda T, Okano Y, Ishihara Y. Impact of particulate matter 2.5 on skin conditions- Using a novel air-liquid interface exposure system. IFSCC 2023 Congress. 4-7 Sept, 2023 (Barcelona, Spain).

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ 1】の口頭発表（学会等・査読なし）
57	大河内博, 吉田昇永, 趙鶴立, 藤川真智子, 谷悠人, 勝見尚也, 宮崎あかね, 高田秀重, 板谷庸平, 緒方裕子, 新居田恭弘, 梅澤直樹, 小林 華栄, 浦山憲雄, 「大気中マイクロプラスチックの現状と課題」, 令和 2 年度関東支部会講演会、2021 年 5 月 28 日（オンライン）
58	大河内博, 吉田昇永, 趙鶴立, 藤川真智子, 谷悠人, 勝見尚也, 宮崎あかね, 高田秀重, 板谷庸平, 緒方裕子, 新居田恭弘, 梅澤直樹, 小林 華栄, 浦山憲雄, 「大気中マイクロプラスチックの現状と課題」, 令和 2 年度関西支部会講演会、2021 年 7 月 30 日, 大阪
59	吉田昇永, 大河内博, 速水洋, 新居田恭弘, 小林華栄, 浦山憲雄, 緒方裕子, 勝見尚也, 皆巳幸也, 宮崎あかね, 竹内政樹, 戸田敬, 三浦和彦, 加藤俊吾, 小林拓, 和田龍一, 高田秀重, 「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と動態解明 (3) : 雲水および雨水を中心に」, 第 62 回大気環境学会年会、2021 年 9 月 15-17 日（オンライン開催）, 学生若手口頭発表賞

60	藤川真智子, <u>大河内博</u> , 齊藤純一, 後藤隆弘, 新居田恭弘, 高田秀重, 「パーソナルケア商品中のマイクロカプセルの同定と健康・環境影響評価 (2)」, 第 62 回大気環境学会年会, 2021 年 9 月 15-17 日 (オンライン開催)
61	趙鶴立, <u>大河内博</u> , 吉田昇永, 速水洋, 勝見尚也, 竹内政樹, 宮崎あかね, 緒方祐子, 板谷庸平, 小林華榮, 浦山憲雄, 新居田恭弘, 高田秀重, 「光熱変換赤外分光法 (0-PTIR) を用いた冬季富士山南東麓における大気中マイクロプラスチック観測の特徴」, 第 62 回大気環境学会年会, 2021 年 9 月 15-17 日 (オンライン開催)
62	藤井佑介, 崎谷亮太, 北野洸太郎, Vu Thi Dung, 松永優介, Tran Thi Minh Ngoc, 塚口海人, 竹中 規訓, <u>大河内博</u> , “大阪府堺市における PM _{2.5} 化学組成の季節変動”, 第 62 回大気環境学会年会, 2021 年 9 月 15-17 日 (オンライン開催)
63	Tran Thi Minh Ngoc, <u>Yusuke Fujii</u> , To Thi Hien, Yusuke Matsunaga, Norimichi Takenaka, Hiroshi Okochi, “Variation of PM _{2.5} chemical composition in Ho Chi Minh City, Vietnam including COVID-19 outbreak period”, 第 62 回大気環境学会年会, 2021 年 9 月 15-17 日 (オンライン開催)
64	<u>大河内博</u> , 吉田昇永, 藤川真智子, 趙鶴立, 谷悠人, 速水洋, 竹内政樹, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 勝見尚也, 宮崎あかね, 高田秀重, 緒方裕子, 板谷庸平, 新居田恭弘, 小林華榮, 浦山 憲雄, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響」, 第 38 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2021 年 8 月 26 日 (オンライン開催),
65	趙鶴立, <u>大河内博</u> , 吉田昇永, 速水洋, 勝見尚也, 竹内政樹, 宮崎あかね, 緒方祐子, 板谷庸平, 小林華榮, 浦山憲雄, 新居田恭弘, 高田秀重, 「光熱変換赤外分光法 (0-PTIR) を用いた冬季富士山南東麓における大気中マイクロプラスチック観測」, 第 29 回環境化学討論会, 2021 年 6 月 1 日 (オンライン開催)
66	藤川真智子, <u>大河内博</u> , 新居田恭弘, 齊藤純一, 後藤隆弘, 高田秀重, 「パーソナルケア商品中のマイクロカプセルの同定と健康・環境影響評価」, 第 29 回環境化学討論会, 2021 年 6 月 1 日 (オンライン開催)
67	Norihisa Yoshida, <u>Hiroshi Okochi</u> , Somei Yanagitani, Hiroshi Hayami, Takanori Nakano, Etsuo Uchida, Takeshi Nakagawa, Yasuhiro Niida, Yohei Itaya, Yuko Ogata, Naoya Katsumi, Hideshige Takada, Toshiya Matsui, Mitsumasa Ishizuka, Phul Phorsda, Poty Lay Peou Hang, “Aerodynamic diameter distribution of airborne microplastics in southeast Asia in rainy season”, 第 29 回環境化学討論会, 2021 年 6 月 1 日 (オンライン開催)
68	<u>Hiroshi Okochi</u> , Norihisa Yoshida, Etsuko Uchida, Takeshi Nakagawa, Toshiya Matsui, Mitsumasa Ishizuka, Phul Phorsda, Poly Lay, Peou Hang, Yasuhiro Niida, Naoki Umezawa, Yohei Itaya, Hiroko Ogata, Naoya Katsumi, Hideshige Takada, “Airborne Microplastics in Urban, Tropical and Free Tropospheric atmosphere”, Environmental Science Summit (Perkin Elmer 主催) 2021 年 6 月 5 日 (オンライン開催)
69	Heli Zhao, <u>Hiroshi Okochi</u> , Norihisa Yoshida, Hiroshi Hayami, Masaki Takeuchi Naoya Katsumi Akane Miyazaki, Tomoyuki Hori, Hiroko Ogata, Youhei Itaya, Hanae Kobayashi, Norio Urayama, Yasuhiro Niida, Hideshige Takada, “Atmosphere-Forest Interaction of Airborne Microplastics (AMPs): The Identification of AMPs in the Forest Area”, Environmental Science Summit (Perkin Elmer 主催) 2021年6月5日 (オンライン開催)
70	Machiko Fujikawa, <u>Hiroshi Okochi</u> , Junichi Saito, Takahiro Goto, Yasuhiro Niida, Hideshige Takada, “Identification of Microcapsules in Personal Care Products and Health /Environmental Impact”, Environmental Science Summit (Perkin Elmer 主催) 2021 年 6 月 5 日 (オンライン開催) .
71	<u>大河内博</u> , 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響」 (依頼講演), 日本公衆衛生学会・日本学術会議 市民公開シンポジウム, 第 80 回日本公衆衛生学会総会, 市民公開シンポジウム「プラスチックのガバナンス: 感染症制御のための衛生環境管理と資源循環」, 2021 年 12 月 23 日 (東京大学)
72	勝見尚也, 楠部孝誠, 長尾誠也, <u>大河内博</u> , 「石川県手取川七か用水における被覆肥料に由来するマイクロプラスチックの動態」, 環境化学物質 3 学会合同大会, 2022 年 6 月 14 日-16 日, 富山
73	<u>大河内博</u> , 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響」, 大気環境総合研究センター特別セミナー「大気中マイクロプラスチック問題の現状と課題」, 2022 年 1 月 14 日 (オンライン)
74	<u>大河内博</u> , 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響」 (依頼講演), 一般シンポジウム「古くて新しい環境中微粒子の健康影響—産業曝露からマイクロプラスチックまで—」, 日本薬学会第 142 年会, 2022 年 3 月 27 日

75	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響: 国内観測法の構築と観測結果」, 大気環境総合研究センター特別セミナー「大気中マイクロプラスチック問題の現状と課題 第2弾」, 2022年4月13日 (オンライン)
76	須永奈都, 大野桂史, 小林拓, 新居田恭弘, 大河内博, 宮崎あかね, 「森林樹冠による大気中マイクロプラスチック捕捉の検討」, 環境化学物質3学会合同大会, 2022年6月14日-16日, 富山
77	大河内博, 「富士山頂で地球大気環境を監視する〜温室効果ガスとマイクロプラスチックを中心に〜」, プラスチック成形加工学会 東海支部 2022年度 総会・特別講演会開催, 2022年5月23日, 名古屋, 愛知
78	谷悠人, 大河内博, 吉田昇永, 速水洋, 竹内政樹, 榎本真央, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 北野洸太郎, 山口高志, 勝見尚也, 松木篤, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響 (3): 日本全国に多ける AMPs 濃度および大気沈着量分布」, 環境化学物質3学会合同大会, 2022年6月14日-16日, 富山
79	小野塚洋介, 大河内博, 吉田昇永, 谷悠人, 速水洋, 竹内政樹, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 山口高志, 勝見尚也, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響 (4): 自由対流圏大気中マイクロプラスチックの特徴」, 環境化学物質3学会合同大会, 2022年6月14日-16日, 富山
80	水口仁志, 竹内政樹, 竹田大登, 木下京輔, 松枝真依, 寺前紀夫, 大谷肇, 渡辺忠一, 「熱分解-GC/MS による大気浮遊粒子状物質中のマイクロプラスチックの分析」, マテリアルライフ学会第33回研究発表会, 2022年7月21日, 22日, 江戸川
81	北野洸太郎, 藤井佑介, 竹中規訓, 稲次由香莉, 吉田昇永, 谷悠人, 大河内博, 新居田恭弘, 「大阪における大気中マイクロプラスチックの同定」, 第39回エアロゾル科学・技術討論会, 2022年8月3日-6日, 神奈川横浜
82	水口仁志, 竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺忠一, 「熱分解 GC/MS による分級捕集した大気浮遊マイクロプラスチックの分析」, 日本分析化学会第71年会, 2022年9月14日-16日, 岡山
83	榎本真央, 松田絵里奈, 木下京輔, 竹田大登, 水口仁志, 谷悠人, 大河内博, 田中秀治, 竹内政樹, 「大気中マイクロプラスチック分析における前処理の迅速化」, 第63回大気環境学会年会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
84	竹内政樹, 水口仁志, 竹田大登, 木下京輔, 田中秀治, 大河内博, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺忠一, 「熱分解 GC/MS の大気マイクロプラスチックへの適用」, 第63回大気環境学会年会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
85	藤川真智子, 大河内博, 石川翔, 駒場啓祐, 原圭一, 高木牧子, 宮川慎司, 新居田恭弘, 「パーソナルケア商品中のマイクロカプセルの同定と健康・環境影響評価 (3)」, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
86	谷悠人, 大河内博, 吉田昇永, 速水洋, 竹内政樹, 榎本真央, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 北野洸太郎, 山口高志, 勝見尚也, 松木篤, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響 (5): 雲水中マイクロプラスチック」, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
87	王一澤, 大河内博, 吉田昇永, 速水洋, 竹内政樹, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 山口高志, 勝見尚也, 松木篤, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響 (6): 雲水中マイクロプラスチック」, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
88	北野洸太郎, 稲次由香莉, 藤井佑介, 竹中規訓, 吉田昇永, 谷悠人, 大河内博, 新居田恭弘, 「大阪における全降下物に含まれるマイクロプラスチックの測定」, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
89	Ngoc Tran, Yusuke Fujii, To Thi Hien, Tran Hoang Minh, Norimichi Takenaka, “A comprehensive study on PM _{2.5} in Ho Chi Minh City, Vietnam”, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺
90	新居田恭弘, 吉田昇永, 谷悠人, 大河内博, 北野洸太郎, 藤井佑介, 竹中規訓, 「 μ FTIR イメージングによる AMPs 分析手法の開発」, 第63回大気環境学会, 2022年9月14日-16日, 大阪堺

91	大河内博, 谷悠人, 吉田昇永, 藤川真智子, 趙鶴立, 小野塚洋介, 速水洋, 竹内政樹, 檜本真央, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 北野洸太郎, 宮崎あかね, 須永奈都, 羽山伸一, 徳長ゆり香, 山口高志, 勝見尚也, 松木篤, 池盛文数, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 小林華栄, 浦山憲雄, 「環境研究総合推進費: 大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」, 第 63 回大気環境学会, 2022 年 9 月 14 日-16 日, 大阪堺
92	徳長ゆり香, 大河内博, 谷悠人, 趙鶴立, 小野塚洋介, 新居田恭弘, 橘敏雄, 西川和夫, 片山欣哉, 森口紗千子, 加藤卓也, 羽山伸一, 「野生鳥類の肺から検出された大気中マイクロプラスチック」, 日本鳥学会 2022 年度大会, 2022 年 11 月 3 日-6 日, 北海道 (ポスター賞)
93	水口仁志, 竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺壺, 渡辺忠一, 「石英繊維フィルターに捕集した大気マイクロプラスチックの熱分解 GC/MS による分析」, 第 27 回高分子分析討論会, 2022 年 10 月 27 日, 28 日, 名古屋
94	竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺壺, 渡辺忠一, 水口仁志, 「熱分解 GC/MS による大気粉塵中のプラスチック成分の分析」, 2022 年日本化学会中国四国支部大会, 2022 年 11 月 13 日, 広島
95	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明～プラスチック大気汚染～」, マテリアライズ学会 第 5 回マイクロプラスチック・シンポジウム, 2022 年 12 月 6 日 (オンライン)
96	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」, 環境省懇談会, 2022 年 12 月 23 日, 東京
97	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～プラスチック大気汚染～」, 39 回全国環境研協議会 東海・近畿・北陸支部 共同調査研究 (越境/広域大気汚染) 情報交換会, 2022 年 12 月 26 日 (オンライン)
98	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～交通由来物質を中心に～」, マイクロプラスチック・スマート懇話会 道路由来 WG, 2023 年 2 月 14 日, 東京
99	岸純哉, 増田裕介, 後藤充貴, 大河内博, 反町篤行, 室内マイクロプラスチックに関する予備的な調査, 2022 年度工業技術研究所「研究発表会」, 2023 年 2 月 24 日-3 月 6 日 (オンライン)
100	後藤充貴, 岸純哉, 増田裕介, 愛甲竜也, 渡邊大智, 田中厚資, 鈴木剛, 大河内博, 反町篤行, モデルプラスチック粒子の合成に関する取り組み, 2022 年度工業技術研究所「研究発表会」, 2023 年 2 月 24 日-3 月 6 日 (オンライン)
101	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」, マイクロプラスチック・スマート懇話会, 2023 年 3 月 8 日, 東京
102	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明」, 大気環境総合研究センター特別セミナー「大気中マイクロプラスチック問題の現状と課題 第 3 弾」, 2023 年 5 月 16 日 (オンライン)
103	竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺壺, 渡辺忠一, 水口仁志, 「スプリットレスモード熱分解 GC/MS による大気マイクロプラスチックの分析」, 第 83 回分析化学討論会, 2023 年 5 月 20 日, 21 日, 富山
104	大河内博, 「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～AMΦ プロジェクト～」, 大気環境学会 関東支部講演会, 2023 年 5 月 26 日, 東京
105	大島峻太郎, 大河内博, 藤川真智子, 石川翔, 速水洋, 新居田恭弘, 宮川慎司, 「パーソナルケア商品中のマイクロカプセルの同定と健康・環境影響評価 (4)」, 環境化学物質 3 学会合同大会, 2023 年 5 月 30 日-6 月 2 日, 徳島
106	小野塚洋介, 大河内博, 谷悠人, 速水洋, 竹内政樹, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 山口高志, 池盛文数, 勝見尚也, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 櫻井昌文, 齊藤純一, 小林紘子, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響 (6)」, 環境化学物質 3 学会合同大会, 2023 年 5 月 30 日-6 月 2 日, 徳島
107	Zetao Xiong, Hiroshi OKOCHI, Heri ZHAO, Yuto TANI, Hiroshi HAYAMI, Atsuyuki SORIMACHI, Masaki TAKEUCHI, Norimichi TAKENAKA, Takashi YAMAGUCHI, Fumikazu IKEMORI, Naoya KATSUMI, Yasuhiro ISHIHARA, Yoko IWAMOTO, and Yasuhiro NIIDA, “Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (7) : Behavior of AMPs in forests contaminated by radioactive materials”, Joint Conference on Environmental Chemicals, May 30-Jun2, 2023, Tokushima (ポスター賞)

108	小松萌音, 大河内博, 谷悠人, 小野塚洋介, 速水洋, 竹内政樹, 榎本真央, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 山口高志, 池盛文数, 勝見尚也, 松木篤, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響(8)」, 環境化学物質3学会合同大会, 2023年5月30日-6月2日, 徳島
109	竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺壺, 渡辺忠一, 水口仁志, 「大気マイクロプラスチック分析へのスプリットレス熱分解GC/MSの適用」, マテリアルライフ学会第34回研究発表会, 2023年7月6日, 7日, 豊中
110	松田絵里奈, 榎本真央, 木下京輔, 伊川凌太郎, 浅井悠希, 前川大河, 谷悠人, 大河内博, 後藤充貴, 反町篤行, 田中秀治, 竹内政樹, 「 μ FT-IRを用いた大気中マイクロプラスチック迅速分析法の検討」, 日本分析化学会第72年会, 2023年9月13日-15日, 熊本
111	北野洸太郎, 藤井佑介, 竹中規訓, 稲次由香莉, 柳瀬美汐, 谷悠人, 小野塚洋介, 吉田昇永, 大河内博, 新居田恭弘, 大阪府堺市で検出された大気中マイクロプラスチック粒子の性状特性, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
112	反町篤行, 愛甲竜也, 王森, 貞弘悠希, 増田裕介, 田中厚資, 鈴木剛, 大河内博, 石原康宏, 汎用プラスチックから合成したモデルプラスチック粒子, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
113	増田裕介, 大河内博, 反町篤行, 汎用プラスチックの劣化に関する大気暴露実験, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
114	王森, 愛甲竜也, 貞弘悠希, 増田裕介, 田中厚資, 鈴木剛, 大河内博, 反町篤行, 汎用プラスチックを用いたモデルプラスチック粒子の合成と応用, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
115	愛甲竜也, 王森, 増田裕介, 田中厚資, 鈴木剛, 大河内博, 反町篤行, 汎用プラスチックを用いたモデルプラスチック粒子の合成条件の検討, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
116	谷悠人, 大河内博, 吉田昇永, 速水洋, 竹内政樹, 榎本真央, 反町篤行, 藤井佑介, 竹中規訓, 北野洸太郎, 山口高志, 池盛文数, 勝見尚也, 松木篤, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響(9): 太平洋側都市大気と日本海側遠隔大気に及ぼす海洋マイクロプラスチックの影響」, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
117	小野塚洋介, 大河内博, 谷悠人, 速水洋, 竹内政樹, 反町篤行, 藤井祐介, 竹中規訓, 山口高志, 池盛文数, 勝見尚也, 梶野瑞王, 足立光司, 石原康宏, 岩本洋子, 新居田恭弘, 櫻井昌文, 齊藤純一, 小林紘子, Lay Poty, Phorsda, Hanpo, 石塚充雅, 中川武, 松井敏也, 「大気中マイクロプラスチックの起源・動態・健康影響(10): 首都圏および熱帯都市大気の特徴」, 第64回大気環境学会, 2023年9月13日-15日, 茨城つくば
118	Zetao Xiong, Hiroshi OKOCHI, Yuto TANI, Hiroshi HAYAMI, Atsuyuki SORIMACHI, Natsu SUNAGA, Akane MIYAZAKI, Masaki TAKEUCHI, Norimichi TAKENAKA, Naoya KATSUMI, Mizuo KAJINO, Kouji ADACHI, Yasuhiro ISHIHARA, Yoko IWAMOTO, and Yasuhiro NIIDA, "Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (11): Characterization of AMPs in a mountain and urban forest air", Japan Society for Atmospheric Environment, September 13-15, 2023, Ibaragi, Japan
119	竹田大登, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 大谷肇, 寺前紀夫, William Pipkin, 松井和子, 渡辺壺, 渡辺忠一, 水口仁志, 「スプリットレス熱分解GC/MSによる大気中の微量マイクロプラスチック分析における課題とその改善」, 第28回高分子分析討論会, 2023年11月9日, 10日, 茨城つくば
120	竹田大登, 苗村真依, 木下京輔, 竹内政樹, 高柳俊夫, 寺前紀夫, William Pipkin, 渡辺壺, 渡辺忠一, 水口仁志, 「スプリットレス熱分解GC/MSによる大気マイクロプラスチックの高感度分析法の開発」, 第59回フローインジェクション分析講演会, 2023年11月24日, 徳島
121	木下京輔, 竹田大登, 苗村真依, 水口仁志, 榎本真央, 松田絵里奈, 伊川凌太郎, 浅井悠希, 前川大河, 田中秀治, 竹内政樹, 「徳島市における大気マイクロプラスチックの動態」, 第59回フローインジェクション分析講演会, 2023年11月24日, 徳島 (優秀ポスター賞)
122	前川大河, 木下京輔, 竹田大登, 苗村真依, 榎本真央, 松田絵里奈, 伊川凌太郎, 浅井悠希, 水口仁志, 大河内博, 田中秀治, 竹内政樹, 「熱分解GC/MSを用いた大気マイクロプラスチックの分析-大気マイクロプラスチック捕集フィルターの検討-」, 第59回フローインジェクション分析講演会, 2023年11月24日, 徳島

123	藤井佑介, 「泥炭火災による越境ヘイズを中心とした東南アジアの大気質に関する観測研究」, 2023 年度大気環境学会近畿支部研究発表会 特別講演, 2023 年 12 月 26 日, 大阪
-----	--

成果 番号	【サブテーマ 2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
124	足立光司、深層学習を利用した画像認識技術による電子顕微鏡画像中の炭素質エアロゾル粒子の判定、第 38 回エアロゾル学会・技術研究討論会、2021 年 8 月 26-27 日 (招待講演)
125	梶川友貴、梶野瑞王、大河内博、須合俊貴、内山竜之介、荒井豊明、「都市域豪雨事例に注目した大気汚染物質が雲微物理過程および化学特性に及ぼす影響の推定」、第 26 回大気化学討論会、2021 年 11 月 9-11 日 (オンライン開催)、 学生優秀発表賞
126	茅場聡子、梶野瑞王、森川多津子、萩野浩之、「日本における電気自動車普及が複数大気汚染物質濃度に与える影響」、第 62 回大気環境学会年会、2021 年 9 月 15 日 (オンライン開催)
127	梶野瑞王、足立光司「マイクロプラスチックの 3 次元モデル予測に向けて」、第 63 回大気環境学会年会、2022 年 9 月 14 日
128	梶野瑞王、足立光司「マイクロプラスチックの 3 次元モデル予測」、第 64 回大気環境学会年会、2023 年 9 月 14 日

成果 番号	【サブテーマ 3】の口頭発表 (学会等・査読なし)
129	石原康宏, 日本毒性学会共催シンポジウム「微小粒子状物質による神経炎症の誘導と脳梗塞予後の増悪」, 第 95 回日本薬理学会年会, 2022 年 3 月 7-9 日
130	河野まおり、高石雅之、木下和彦、池田英史、奥田 知明、石原康宏. 大気中微小粒子 PM2.5 の三次元皮膚モデル気相曝露系の構築. 第 49 回日本毒性学会学術年会. 2022 年 6 月 30 日-7 月 2 日 (札幌コンベンションセンター) .
131	石原波、奥田知明、萩野浩之、大黒亜美、谷悠人、大河内博、所千晴、藤井-栗山義明、伊藤康一、Christoph F.A. Vogel、石原康宏. Involvement of polycyclic aromatic hydrocarbons and endotoxin in macrophage expression of interleukin-33 induced by exposure to particulate matter. 第 49 回日本毒性学会学術年会. 2022 年 6 月 30 日-7 月 2 日 (札幌コンベンションセンター) .
132	石原 康宏、大河内 博、奥田 知明. 道路粉塵の健康影響評価: 都市型 PM _{2.5} との比較. 第 63 回大気環境学会年会. 2022 年 9 月 14-16 日 (大阪公立大学中百舌鳥キャンパス)
133	石原 康宏. マイクロプラスチック曝露による呼吸器影響の解析. 大気環境学会近畿支部人体影響部会 2022 年度セミナー2023 年 3 月 7 日 (大阪市立長居ユースホステル)
134	石原 康宏. モデル大気中マイクロプラスチックの呼吸器影響. 大気環境総合センター定期セミナー2023 年 5 月 18 日 (オンライン) .
135	石見真優奈、岩本洋子、石原康宏、高橋伸弥、竹田一彦、大河内博. Evaluation of photodegradation of microplastics in the atmosphere by using model substances (モデル物質を用いた大気中マイクロプラスチックの光劣化評価). 日本地球惑星科学連合 2023 年大会. 5 月 23 日 (幕張メッセ)
136	根津直幸、田中美樹、奥田知明、石原康宏. Exacerbation of cerebral infarction prognosis due to endotoxin contained in PM _{2.5} . 第 51 回日本毒性学会学術年会、2023 年 6 月 19-21 日 (パシフィコ横浜) .
137	石原 康宏. 大気汚染物質PM2.5の化学組成、健康影響とそのリスク低減を目指した化粧品応用. 第74回中国四国産学連携化学フォーラム2023年6月26日 (オンライン)
138	石見真優奈、岩本洋子、石原康宏、高橋伸弥、竹田一彦、大河内博. 大気中マイクロプラスチックの光劣化: モデル物質を使った室内実験による評価. エアロゾル科学技術研究討論会. 2023年8月30日-9月1日 (桐生市市民文化会館) .
139	石原 波、奥田 知明、Christoph FA Vogel、石原 康宏. 粒子状物質への曝露によって誘導されるインターロイキン 33 発現における多環芳香族炭化水素とエンドトキシンの寄与. フォーラム 2023 衛生薬学・環境トキシコロジー 2023 年 9 月 12-13 日 (広島大学) .
140	石原 康宏、鍋谷 悠、谷 悠人、所 千晴、大河内 博. エルボージェットを用いた北京大気中微粒子の気相分級とその細胞応答の解析. フォーラム 2023 衛生薬学・環境トキシコロジー 2023 年 9 月 12-13 日 (広島大学) .

141	和田 百合花、岩本 洋子、鍋谷 悠、石原 康宏. 太陽光で劣化したマイクロプラスチックのマクロファージへの作用. フォーラム 2023 衛生薬学・環境トキシコロジー 2023 年 9 月 12-13 日 (広島大学).
142	根津 直幸、奥田 知明、石原 康宏. PM _{2.5} に含まれるエンドトキシンの脳梗塞予後に対する作用. フォーラム 2023 衛生薬学・環境トキシコロジー 2023 年 9 月 12-13 日 (広島大学).
143	石原康宏、河野まおり、奥田知明. サイクロンで採取した都市型 PM _{2.5} の三次元表皮曝露による好中球性炎症の誘発と障害を抑制する植物抽出液のスクリーニング. 日本動物実験代替法学会 第 36 回大会 2023 年 11 月 27-29 日 (千葉大学).
144	石原康宏. シンポジウムオーガナイザー「古くて新しい環境中微粒子の健康影響—産業曝露からマイクロプラスチックまで—」, 日本薬学会第142年会 (2022年3月25-28日)
145	石原 康宏、大河内 博、奥田 知明. 道路粉塵の健康影響評価: 都市型 PM _{2.5} との比較. 第63回大気環境学会年会. 2022年9月14-16日 (大阪公立大学中百舌鳥キャンパス).
146	石原 康宏、岩本 洋子、奥田 知明、大河内 博、鍋谷 悠、河野 まおり. 太陽光劣化繊維状ポリエチレンテレフタラートの呼吸器影響評価. 第64回大気環境学会年会. 2023年9月13-15 日 (つくば国際会議場).

(4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき 事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
147	2021	新潟県立松代高等学校における特別授業「空飛ぶマイクロプラスチックをつかまえる！～地球表層を巡るプラスチック問題を考えよう～」(2021年6月12日, 聴講者約50名)
148	2021	東京都早稲田実業学校における特別授業「環境化学への誘い～ 空飛ぶマイクロプラスチック～」(2021年7月12日, 聴講者約100名)
149	2021	広島なぎさ中学校・高校における特別授業「ASEANエコスクール」(2021年11月8日, 聴講者約100名)
150	2021	富山県立魚津工業高等学校における基調講演「空飛ぶマイクロプラスチックをつかまえる！～地球表層を巡るプラスチック問題を考えよう～」(2021年11月13日, 聴講者約100名)
151	2021	早稲田大学エクステンションセンター「現代社会と科学」における講義「マイクロプラスチックによる地球規模汚染: 大気中マイクロプラスチックの健康・環境リスク」(2022年1月25日, 受講者数不明) 2022年度以降、オンデマンド配信
152	2021	「空飛ぶマイクロプラスチック～プラスチック大気汚染～」(主催: 生活クラブ生協静岡志太支部, オンライン, 2022年3月23日, 聴講者約100名) にて講演
153	2022	「空中を漂うマイクロプラスチック～プラスチック大気汚染～」(主催: さいたまSDGs応援団, 2022年11月12日, 大宮, 聴講者: 約50名)
154	2022	「環境や人体を汚染するマイクロプラスチック」(主催: 日本消費者連盟・洗浄部会 オンライン連続学習会, 2023年3月15日, 聴講者: 約100名) にて講演
155	2023	「大気中マイクロプラスチックの実態と健康影響評価～環境や人体を汚染するマイクロプラスチック～」(主催: 3R 全国ネット オンラインセミナー第15回, 2023年7月4日, 聴講者約50名) にて講演
156	2023	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～AMΦプロジェクト～」, (第4回 ERCA 環境研究シンポジウム, 2023年5月29日, 聴講者100名) にて講演
157	2023	早稲田大学・仙台オープンキャンパスにおける模擬講義「富士山頂で空飛ぶマイクロプラスチックをつかまえる～地球表層を巡るプラスチック問題を考えよう～」(2023年7月17日, 聴講者約50名)

158	2023	早稲田佐賀高校における模擬講義「環境化学への誘い～空飛ぶマイクロプラスチック～」(2023年9月11日, 聴講者数約100名)
159	2023	群馬県立太田女子高校における模擬講義「環境化学への誘い～地球表層を循環するマイクロプラスチック～」(2023年11月6日, 聴講者数約20名)
160	2024	新潟県立松代高等学校における特別授業と実験講座「環境化学への誘い～地球表層を循環するマイクロプラスチック～」(2024年1月10日, 聴講者数約40名)
161	2024	早稲田実業高校における模擬講義「環境化学への誘い～地球表層を循環するマイクロプラスチック問題を考えよう～」(2024年1月13日, 聴講者約100名)

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
162		広島大学高大連携講座における特別授業「環境中微粒子の実態と健康－今を理解して未来を考える－」(2022年8月4日, 聴講者約30名)
163		広島大学高大連携講座における特別授業「大気汚染の過去・現在・未来」(2023年8月8日, 聴講者約30名)

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
164	日本経済新聞(2021年5月20日、全国版、「大気に漂う微細プラ 健康影響 本格調査へ」)
165	東頸新聞(2021年6月15日、地方版、「「プラスチック問題」考える」)
166	新潟日報(2021年6月15日、地方版、「微小プラ 大気も汚染」)
167	Yahoo ニュース(2021年8月24日、オルタナ「新概念「プラスチックニュートラル」の光と影(下)／カーボンニュートラルに逆行も」)
168	Yahoo ニュース(2021年8月24日、オルタナ「廃プラから「水素＋カーボンナノチューブ」の新技术に期待と懸念」)
169	テレビ朝日(2021年9月23日「ウラ撮れちゃいました」)
170	十日町タイムス(2021年11月28日、「大気中マイクロプラスチック観測 松代高校生が早大大河内教授と連携」)
171	東頸新聞(2021年12月6日、「松代高校の屋上で10カ所目 マイクロプラ観測開始」)
172	毎日新聞(2021年12月6日、地方版、「大気中のマイクロプラスチック 松代高校生が観測」)
173	妻有新聞(2021年12月11日、「豪雪地帯で大気汚染調査 早大と松代高校が合同で」)
174	日本消費者連盟(取材日:2021年12月13日、「AMPsを研究する大河内博さんに聞く 気候や人体に与えるリスク顕在化する前に調べる必要が」)
175	新潟日報(2021年12月14日、松代高の屋上で微小プラ観測)
176	RKB 毎日放送(2021年12月27日、「魔法の素材が舞う～プラスチック大気汚染～」) 民放連賞・優秀賞(ラジオ報道番組) JNN九州沖縄ドキュメントムーブ・年間大賞(2020年)

177	TBS ドキュメンタリー「解放区」（2022 年 1 月 16 日、「魔法の素材が舞う～プラスチック大気汚染～」）ギャラクシー賞 2022 年 1 月度月間賞
178	Yahoo!ニュース（2022 年 1 月 21 日、「富士山頂で空飛ぶマイクロプラスチックに迫る」）
179	早稲田学報 4 月号（2022 年 3 月 17 日、「すごいゼミ」）
180	日経ヘルス春号（2022 年 3 月 17 日、「大気中にも検出 マイクロプラスチックの健康影響は」）
181	豪田ヨシオ部（2022 年 4 月 14 日、プラごみの行方を追う！「地球規模で広がる大気中のマイクロプラスチック 「海洋」と「大気」では一体どう違うのか！？」）
182	早稲田ウィークリー・キャンパスライフ（2022 年 5 月 5 日、「大気中マイクロプラスチックの実態を明らかにする 世界最先端の研究に挑む」）
183	Very6 月号（2022 年 5 月 7 日、「地球に広がるマイクロプラスチック」）
184	読売新聞（2022 年 5 月 11 日、「プラ粒子、大気中飛散か」、全国版、夕刊一面）
185	Yahoo!ニュース（2022 年 5 月 11 日、「プラ粒子、大気中飛散か」）
186	TBS news23（2022 年 6 月 15 日、「“プラごみ” 海や大気にも 最新調査で見えた汚染」）
187	TBS まるっと！サタデー（2022 年 5 月 27 日、「新宿の大気にプラ微粒子」）
188	TBS まるっと！サタデー（2022 年 8 月 13 日、「ヒトの血液からプラ微粒子 新宿の大気にも「年 3 万個吸引」」）
189	Yahoo!ニュース（2023 年 1 月 16 日、オルタナ「富士山頂の積雪からマイクロプラ見つかる、地球規模でプラスチック汚染が進行か」）
190	Yahoo!ニュース（2023 年 2 月 15 日、「オルタナ「日本の研究グループがハトやツバメの肺からマイクロプラ検出、野鳥の肺からは世界初」」
191	Globeride Features（2023 年 2 月 15 日、「私たちはすでに吸い込んでいる、大気中に広がるプラスチック汚染」）
192	静岡新聞 時論（2023 年 4 月 2 日、「地球へ 富士山頂から警鐘」）
193	主婦の友社 暮らしニスタ（2023 年 5 月 17 日、「環境化学者・大河内教授が考える「今の子どもたちに必要なこと」」）
194	主婦の友社 暮らしニスタ（2023 年 5 月 24 日、「多くの人がまだ知らない、本当の「プラスチック問題」」）
195	徳島テレビ（2023 年 5 月 29 日、「マイクロプラスチックについて考える」）
196	東京新聞（2023 年 7 月 23 日、「大気にも広がる微小プラ 海から空に拡散か」）
197	NHK ニュースかいドキ（2023 年 7 月 28 日、「富士山頂 かつての気象庁測候所 認定 NPO 法人が建物借りて観測や研究」）
198	Yahoo!ニュース（2023 年 8 月 10 日、「台風から日本を守った富士山測候所を守れ 「最高の場所での研究は“科学のロマン”」成果も着々」）
199	テレビ朝日 潜入仰天ツアーズ（2023 年 8 月 31 日、富士山頂での大気中マイクロ採取の様子を 5 分ほど放送）
200	早稲田大学 NEWS（2023 年 8 月 23 日、「雲水の野外観測で初めて AMPs を検出」）

201	国立環境研究所環境展望台（2023 年 8 月 23 日、世界初の高高度観測成果～大気中 MP 汚染の根深さあらわに））
202	河北新報オンライン（2023 年 8 月 23 日、「雲水の野外観測で初めてマイクロプラスチックの存在を実証」）
203	和歌山県南紀のニュース/AGARA 紀伊民報（2023 年 8 月 23 日、「雲水の野外観測で初めてマイクロプラスチックの存在を実証」）
204	沖縄タイムス+プラス（2023 年 8 月 23 日、「雲水の野外観測で初めてマイクロプラスチックの存在を実証」）
205	AFPBB News（2023 年 8 月 23 日、雲水の野外観測で初めてマイクロプラスチックの存在を実証）
206	ZDNET Japan（2023 年 8 月 23 日雲水の野外観測で初めてマイクロプラスチックの存在を実証））
207	四国新聞社（2023 年 8 月 23 日「雲水中のマイクロプラスチックが想定以上に環境および健康リスクを高めていることが明らかに」）
208	朝日新聞（2023 年 8 月 23 日；「雲水中のマイクロプラスチックが想定以上に環境および健康リスクを高めていることが明らかに」）
209	TECH+（2023 年 8 月 24 日「マイクロプラスチックの雨が肺や水源などを汚染する危険性を早大などが発表」）
210	大学ジャーナル（2023 年 8 月 26 日、「雲水中にマイクロプラスチックが存在、早稲田大学などが初めて実証」）
211	日本経済新聞（2023 年 8 月 30 日、「雲からマイクロプラスチック、早稲田大 気候に影響も」）
212	Yet Unique Discovery, NDTV（2023 年 9 月 2 日、「Microplastics In Clouds: Japanese Scientists Make Worrying」）
213	Nikkei Asia（2023 年 9 月 2 日、「Japan researchers find microplastics in clouds for first time」）
214	Waseda University News（September 27, 2023.,「Plastic Cloud: New Study Analyzes Airborne Microplastics in Clouds」）
215	環境ロドリゲス（2023 年 9 月 25 日、「環境志向の道を歩んで：環境資源工学科の教授が語るキャリアの選択と意義」）
216	Health news（2023 年 9 月 26 日。「Japanese Scientists Discover Microplastics in Clouds」）
217	Technology Network（2023 年 9 月 27 日、「How Do Microplastics in Cloud Water Impact Climate Change?」）
218	SciTechDaily（2023 年 9 月 27 日、「Plastic Rainfall: The Hidden Microplastics Clouding Our Skies」） Phys.org,（2023 年 9 月 27 日、「New study analyzes airborne microplastics in clouds」）
219	Research Suggests, Asharq Al-Awsat（2023 年 9 月 27 日、「Microplastics in Clouds May be Contributing to Climate Change」）
220	HEAD TOPICS（2023 年 9 月 27 日「Plastic Rainfall: The Hidden Microplastics Clouding Our Skies」）
221	Bioengineer.org（2023 年 9 月 27 日、「Plastic cloud: New study analyzes airborne microplastics in clouds」）
222	SCIENMAG（2023 年 9 月 27 日、「Plastic cloud: New study analyzes airborne microplastics in clouds」）
223	Mirage News（2023 年 9 月 27 日、「Research Probes Airborne Microplastics Presence in Clouds」）
224	EurekAlert! AAAS（2023 年 9 月 27 日、「Plastic cloud: New study analyzes airborne microplastics in clouds」）

225	Ka Verdad Noticias (2023 年 9 月 28 日、「Detectan científicos partículas de microplásticos en las nubes ¿Afectan el clima?」)
226	Sky new (2023 年 9 月 28 日、「Researchers have found tiny particles of plastic in clouds, where they may be contributing to climate change」)
227	NextShark (2023 年 9 月 28 日、「Japanese researchers discover microplastics in clouds, raising grave climate concerns」)
228	Scientists Discover, Newsweek (2023 年 9 月 28 日、「Microplastics Are 'Abundant' in Clouds」)
229	The Manila Times (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics in clouds」)
230	Terra Daily (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
231	Azocleantech.com (2023 年 9 月 28 日、「Study Examines “Plastic Clouds” in Air」)
232	Sverige Radio (2023 年 9 月 28 日、「Mikroplast kan påverka hur moln bildas」)
233	Groud news (2023 年 9 月 28 日、「Microplastics in clouds may be contributing to climate change, research suggests」)
234	Fanpage (2023 年 9 月 28 日、「Le microplastiche si trovano anche nelle nuvole e hanno impatto sul cambiamento climatico」)
235	The Hindu (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
236	Gulfnew. Com (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
237	Spam Chronicles (2023 年 9 月 28 日、「Scientists find microplastics in clouds – TVA Nouvelles」)
238	NewDeal (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
239	Ai Jazeera (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
240	The Daily Star (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
241	Metro Americas (2023 年 9 月 28 日、「The Importance of Microplastics in Cloud Formation and Global Warming」)
242	JANPAN TODAY (2023 年 9 月 28 日、Top news 「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
243	Science News (2023 年 9 月 28 日、Researchers Examine Presence of Microplastics in Cloud Water)
244	El Espectador, (2023 年 9 月 28 日、Encuentran microplásticos en las nubes)
245	TODAY(Singapore) (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
246	Phillipine Star (2023 年 9 月 28 日、Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
247	Yahoo! News (2023 年 9 月 28 日、「Japanese scientists find microplastics are present in clouds」)
248	Firstpost (2023 年 9 月 28 日 (YouTube)、「Researchers In Japan Find Microplastics In Clouds」)
249	National Post (2023 年 9 月 29 日、Microplastics found in clouds for the first time)

250	Study, Common Dreams (2023 年 9 月 29 日、Microplastics in Clouds Could Be 'Contaminating Nearly Everything We Eat and Drink')
251	The Independent (2023 年 9 月 29 日、 「Clouds now contain plastic, risking contamination of ‘everything we eat and drink’」)
252	Bgr (2023 年 9 月 29 日、 「Earth is such a mess right now that scientists found microplastics in clouds」)
253	New Kerala (2023 年 9 月 29 日、 「Researchers examine presence of microplastics in cloud water」)
254	Innovazione (2023 年 9 月 29 日、 「Le microplastiche nelle nuvole influenzano il cambiamento climatico」)
255	Yahoo! News (2023 年 9 月 29 日、) 「‘Plastic air pollution’: Microplastics in clouds could be exacerbating climate change, study says」 ,
256	Kathemerini (2023 年 9 月 29 日、 「Επιστήμονες εντόπισαν για πρώτη φορά μικροπλαστικά στα σύννεφα」)
257	Bluewin (2023 年 9 月 29 日、 Forscher entdecken Mikroplastik in Wolken)
258	Salon (2023 年 9 月 29 日、 「Japanese study detects microplastics in clouds, potentially altering the climate」)
259	The Citizen (2023 年 9 月 29 日、 「Japanese scientists find microplastics in clouds」)
260	Yahoo! News (2023 年 9 月 29 日、 「Japanese researchers discover microplastics in clouds, raising grave climate concerns」)
261	South China Morning (2023 年 9 月 29 日、 「Japanese scientists find microplastics in clouds above Mount Fuji」)
262	Yale Environment (2023 年 9 月 29 日 (Blog) 、 「Japanese Scientists Find Microplastics in the Clouds Above Mount Fuji」)
263	Paleofuture (2023 年 9 月 29 日 (Blog) 、 「The Microplastics Are in the Clouds Now」)
264	Meteored UK, (2023 年 9 月 30 日、 「Microplastics found in clouds could impact climate and food」)
265	Galileu (2023 年 9 月 30 日、 「Microplásticos são encontrados em nuvens — e podem agravar crise climática」)
266	Ukrainian Independent Information Agency (2023 年 9 月 30 日、 「Вчені знайшли мікропластик у хмарах: це може впливати на клімат і все, що люди їдять」)
267	Forbes India (2023 年 9 月 30 日、 Microplastics are also in the sky, according to Japanese scientists)
268	IndianWeb2.com (2023 年 9 月 30 日、 「For the 1st Time, Tiny Plastic Found in Clouds, Catalysing Global Warming Dangerously」)
269	National Post (2023 年 9 月 30 日、 「Microplastics found in clouds for the first time」)
270	DNYUZ (2023 年 9 月 30 日、 「Earth is such a mess right now that scientists found microplastics in clouds」)
271	My droll (2023 年 9 月 30 日、 「Earth is such a mess right now that scientists found microplastics in clouds」)
272	The Times of India, (2023 年 10 月 1 日、 「Researchers investigate occurrence of microplastics in cloud water」)
273	WION (2023 年 9 月 30 日 (YouTube) 、 「Study shed light on concerning reality of microplastics」)

274	Gizmodo (2023 年 9 月 30 日、「The Microplastics Are in the Clouds Now :」)
275	Tek Deep (2023 年 10 月 1 日、「It's raining plastic: scientists discover microplastics in clouds」)
276	New York Post (2023 年 10 月 1 日、「Microplastics are in the clouds: researchers sound alarm on plastic air pollution」)
277	Green Report (Italy) (2023 年 10 月 2 日、「Nuvole di microplastiche sul Monte Fuji」)
278	Chemical & Engineering News (2023 年 10 月 2 日、「Researchers find microplastics in clouds」)
279	Mail Online. co.uk (2023 年 10 月 2 日、「The new plague of plastic rain: Scientists discover microplastics in clouds - and say they could be contaminating nearly everything we eat and drink」)
280	Tempo.co English (2023 年 10 月 3 日、「Japanese Researchers Discover Microplastics in Clouds」)
281	Interesting Engineering (2023 年 10 月 2 日(Blog)、「Plastic rain: Scientists find microplastics in cloud water」)
282	Tech Times (2023 年 10 月 3 日、「Microplastics Found in Clouds Could Dangerously 'Modify' Earth's Climate, New Study Reveals」)
283	Focustech (2023 年 10 月 3 日、「Nuvole di plastica: le microplastiche sono anche nell'atmosfera」)
284	HVG.hu (2023 年 10 月 3 日、「Nagy a baj: mikroműanyagot találtak a felhőkben」)
285	Index Hungary (2023 年 10 月 3 日、「A mikroműanyagok már a felhőkben is ott Vannak」)
286	The Science Times, United States, (2023 年 10 月 4 日、「Microplastics Found in Clouds for the First Time: Experts Warn About Their Contribution to Climate Change」)
287	Tieteen Kuvalehti (2023 年 10 月 4 日、「Mariaanien haudasta Everestille: Nyt pieniä hiukkasia on löydetty pilvistäkin」)
288	Illustreret Videnskab (2023 年 10 月 4 日、「Fra Marianergraven til Everest: Nu er de små partikler også fundet i skyerne」)
289	Infobae (2023 年 10 月 3 日、「De los océanos y la tierra al cielo: detectan microplásticos en agua de nubes y niebla」)
290	EcoWatch (2023 年 10 月 3 日。「Microplastics in Clouds Could 'Modify the Climate,' Study Finds」)
291	Biglobe ニュース (2023 年 10 月 5 日、「富士山山頂の雲の中でマイクロプラスチックを発見. 雲水では初検出」)
292	カラパイア (2023 年 10 月 5 日、「富士山山頂の雲の中でマイクロプラスチックを発見」雲水では初検出」)
293	Mikroplastik in den Wolken: Japanische Studie offenbart neue Umweltrisiken, Basic Thinking, 2023 年 10 月 5 日
294	Mongabay (2023 年 10 月 5 日、「Up in the air: Study finds microplastics in high-altitude cloud water」)
295	Descopera (2023 年 10 月 9 日、「Cercetătorii au găsit microplastice în nori」)
296	Radio Renascença (2023 年 10 月 9 日、「Microplásticos detetados em nuvens sobre montanhas do Japão」)
297	Fox 26 Houston (2023 年 10 月 9 日、「Evidence of microplastics found in clouds above mountains in Japan, study says」)
298	One Green Plant(2023 年 10 月 9 日(Blog)、「Japanese Researchers Have Now Found Microplastics In Clouds」)

299	Slashdot (2023 年 10 月 9 日 (Blog)、「Microplastics Detected in Clouds Hanging Atop Two Japanese Mountains」)
300	Science Alert, (2023 年 10 月 8 日、「Tiny Biological Particles Are Influencing Cloud Formation Over The Arctic」)
301	South Africa Today, (2023 年 10 月 8 日。「Up in the air: Study finds microplastics in high-altitude cloud water」)
302	Breaking Latest News (2023 年 10 月 8 日、「Plastic also found in clouds and perhaps modifies their formation – Scientific news.it」)
303	Noise (2023 年 10 月 5 日 (YouTube)、「富士山山頂の雲の中でマイクロプラスチックを発見」)
304	Snob(2023 年 11 月 15 日、「Ученые обнаружили, что микропластик может влиять на погоду」)
305	Clouds: The latest unlikely place where microplastics can now be found, Borneo Bulletin, 2023 年 11 月 15 日
306	Plasztikzivatar? A mikroműanyagok az időjárást is befolyásolhatják, Blikk, 2023 年 11 月 15 日
307	Natural History Museum (2023 年 11 月 15 日。「News story from Natural History Museum」)
308	World Today News (2023 年 11 月 13 日、「Essential in Public Health: Latest Updates on COVID-19 and Emerging Infectious Diseases」)
309	Nouvelles du monde (2023 年 11 月 13 日。「Majeure en santé publique. Microplastique identifié dans les nuages au-dessus des montagnes du Japon」)
310	長野新聞 (2023 年 11 月 10 日。ゼミ・研究室探検 早稲田大学創造理工学部「甚大な環境汚染や破壊に至る前に対策を打つ研究」)
311	SFGate (2023. 年 11 月 3 日、「The latest unlikely place where you can now find microplastics」)
312	Washington Post (2023 年 11 月 2)日、「Microplastics are everywhere, even in clouds」)
313	CBC テレビ (2023 年 11 月 1 日。「化学物質過敏症」)
314	LIMEX LABO (2023 年 10 月 31 日、「プラスチックの雨！？ 富士山で発見されたプラスチックの雨雲が与える衝撃」)
315	Wheels 24 (2023 年 10 月 27 日、「Microplastics are a danger to our health. Here's how to reduce our exposure to them」)
316	The Standard (2023 年 10 月 23 日、「Plastic rain: How the tiny particles end up in clouds」)
317	Daily Maverick (2023 年 10 月 24 日、「Microplastics can poison our health and living environment — here's how to reduce our exposure to them」)
318	AllAfrica (2023 年 10 月 24 日、「News story from AllAfrica on Tuesday 24 October 2023」)
319	News24 (2023 年 10 月 24 日、「Microplastics are a Danger to Our Health. Here's How to Reduce Our Exposure to Them」)
320	ギズモード・ジャパン (2023 年 10 月 22 日。「富士山の雲からもマイクロプラスチック」)
321	Yahoo! News (2023 年 10 月 9 日、「Microplastics detected in clouds hanging atop two Japanese mountains」)
322	The Guardian (2023 年 10 月 9 日、News story from The Guardian on Monday 09 October 2023)
323	AOL(2023 年 10 月 9 日、「Microplastics detected in clouds hanging atop two Japanese mountains」)

324	Snob(2023 年 11 月 15 日、「Ученые обнаружили, что микропластик может влиять на погоду」)
325	Canal Extremadura (2023 年 12 月 28 日、「Un equipo de científicos japoneses descubre microplásticos en las nubes」)
326	TRTArabi.com (2023 年 12 月 28 日、「"هل بلغ التلوث عنان الغيوم؟".. الأمطار البلاستيكية」)
327	コンバーテック 12 月号 (2023 年 12 月 19 日、「最先端大気中マイクロプラスチック研究で地球・健康リスクを未然に防ぐ」)
328	東京都 Clear Sky オンラインセミナー (2023 年 12 月 10 日 (YouTube)、「大気環境を考えるセミナー 現役大学生×専門家×SDGs アイドル」)
329	DNYUZ (2023 年 12 月 5 日、「20 Things That Happened for the First Time in 2023,」)
330	The New York Times (2023 年 12 月 5 日、20 Things That Happened for the First Time in 2023)
331	North Carolina Health News (2023 年 12 月 4 日、「From creeks to clouds: The invisible invasion of microplastics」)
332	Asian Scientist Magazine (2023 年 12 月 1 日 (Blog)、「Microplastics In clouds: Scientists Warn Of “Plastic Rainfall”」)
333	Asian Scientist (2023 年 12 月 1 日、「Microplastics In clouds: Scientists Warn Of “Plastic Rainfall”」)
334	主婦の友社 暮らしニスタ (2023 年 11 月 30 日、「【バイオプラスチック】は環境にやさしい？環境化学者・大河内教授に聞きました」)
335	Limnnew(2023 年 11 月 30 日、「MICROPLÁSTICOS ENCONTRADOS EM ÁGUA DE NUVEM PODEM INFLUENCIAR O CLIMA LOCAL」)
336	NHK ニュースかいドキ (2023 年 11 月 30 日。「特集 “大気中マイクロプラ” 富士山頂で探る」)
337	GIZEMODO (2023 年 11 月 19 日、「雲の中にもマイクロプラスチックは存在する」)
338	International Business Times (UK) (2023 年 11 月 17 日、「News story from International Business Times (UK) on Friday 17 November 2023」)
339	Yahoo! News (2023 年 11 月 16 日、「Microplastics found in clouds could affect weather and global temperatures」)
340	Encuentran microplásticos en las nubes: ¿qué consecuencia puede tener para el clima? Muy Interesante, 2023 年 11 月 16 日
341	El Espectador (2023 年 11 月 16 日、「Los microplásticos encontrados en las nubes podrían afectar el clima」)
342	The Guardian (2023 年 11 月 16 日、「News story from The Guardian on Thursday 16 November 2023」)
343	Tempo.pt (2023 年 11 月 15 日、「Microplásticos detetados em nuvens suspensas no topo de duas montanhas japonesas」)
344	Canal Extremadura (2023 年 12 月 28 日、「Un equipo de científicos japoneses descubre microplásticos en las nubes」)
345	EurekAlert! (2024年3月24に日、「World's first demonstration that forests trap airborne microplastics」)
346	Bioengineer.org (2024 年 3 月 27 に 日、「World's first demonstration that forests trap airborne microplastics」)
347	ZDNet Japan (2024年3月27日、「森林が大気中マイクロプラスチックを捕捉することを世界で初めて実証--ヒトによるAMPs吸入リスク低減において森林が重要であることを明らかに—」)
348	JJJI.com (2024年3月27日、「森林が大気中マイクロプラスチックを捕捉することを世界で初めて実証」)
349	Mainichi (2024年3月27日、「森林が大気中マイクロプラスチックを捕捉することを世界で初めて実証--ヒトによるAMPs吸入リスク低減において森林が重要であることを明らかに」)

350	News.Toremaga.com (2024年3月27日、「森林が大気中マイクロプラスチックを捕捉することを世界で初めて実証--ヒトによるAMPs吸入リスク低減において森林が重要であることを明らかに」)
351	senteiyasora.com (2024年4月7日、「Forests Emerge as the New Protagonist in Tackling Microplastic Pollution」)
352	Re Soil Foundation (2024年4月8日、「Forests keep us from breathing in microplastics」)
353	Yahhoo! ニュース (2024年4月16日、「森林が大気中のマイクロプラを捕捉、国内の研究グループが世界で初めて実証」)
354	Asian Scientist Magazine (2024年5月8日、「Forests Can Trap Airborne Microplastics」)

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
355	まるっと！サタデー (TBS) (2022年8月13日、マイクロプラスチックが血液中から検出された論文を解説)
356	THE TIME (TBS) (2022年8月15日、マイクロプラスチックが血液中から検出された論文を解説)

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
357	吉田昇永, 大河内博, 速水洋, 新居田恭弘, 小林華栄, 浦山憲雄, 緒方裕子, 勝見尚也, 皆已幸也, 宮崎あかね, 竹内政樹, 戸田敬, 三浦和彦, 加藤俊吾, 小林拓, 和田龍一, 高田秀重, 「大気中マイクロプラスチックの分析法確立と動態解明 (3) : 雲水および雨水を中心に」, 第62回大気環境学会年会、2021年9月15-17日 (オンライン開催), 学生若手口頭発表賞
358	徳長ゆり香, 大河内博, 谷悠人, 趙鶴立, 小野塚洋介, 新居田恭弘, 橘敏雄, 西川和夫, 片山欣哉, 森口紗千子, 加藤卓也, 羽山伸一, 「野生鳥類の肺から検出された大気中マイクロプラスチック」, 日本鳥学会2022年度大会, 2022年11月3日-6日, 北海道 (ポスター賞)
359	Zetao Xiong, Hiroshi OKOCHI, Heri ZHAO, Yuto TANI, Hiroshi HAYAMI, Atsuyuki SORIMACHI, Masaki TAKEUCHI, Norimichi TAKENAKA, Takashi YAMAGUCHI, Fumikazu IKEMORI, Naoya KATSUMI, Yasuhiro ISHIHARA, Yoko IWAMOTO, and Yasuhiro NIIDA, "Occurrence, behavior, fate, and health impact of airborne microplastics (7) : Behavior of AMPs in forests contaminated by radioactive materials", Joint Conference on Environmental Chemicals, May 30-Jun2, 2023, Tokushima (ポスター賞)
360	藤井佑介「2023年度 大気環境学会 進歩賞 (泥炭火災による越境ヘイズを中心とした東南アジアの大気質に関する観測研究)」, 2023年9月14日, 茨城つくば
361	木下京輔, 竹田大登, 苗村真依, 水口仁志, 榎本真央, 松田絵里奈, 伊川凌太郎, 浅井悠希, 前川大河, 田中秀治, 竹内政樹, 「徳島市における大気マイクロプラスチックの動態」, 第59回フローインジェクション分析講演会, 2023年11月24日, 徳島 (優秀ポスター賞)
362	北野洸太郎「2023年度 研究業績優秀表彰 (大阪公立大学)」, 大阪公立大学, 2024年3月21日, 大阪堺
363	RKB 毎日放送 (2021年12月27日、「魔法の素材が舞う～プラスチック大気汚染～」) 民放連賞・優秀賞 (ラジオ報道番組) JNN九州沖縄ドキュメントムーブ・年間大賞 (2020年)
364	TBS ドキュメンタリー「解放区」 (2022年1月16日、「魔法の素材が舞う～プラスチック大気汚染～」) ギャラクシー賞 2022年1月度月間賞

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
365	梶川友貴、梶野瑞王、大河内博、須合俊貴、内山竜之介、荒井豊明、「都市域豪雨事例に注目した大気汚染物質が雲微物理過程および化学特性に及ぼす影響の推定」、第26回大気化学討論会、2021年11月9-11日（オンライン開催）、 学生優秀発表賞

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
366	石川県立大大学院における特別講義「世界遺産・富士山頂で地球大気環境を調べる～空飛ぶマイクロプラスチック～」(2021年10月29日、聴講者約50名)
367	金沢大学における特別授業「Airborne MicroPlastics & Health Impact (AMΦ Project)」(December 1, 2021, 聴講者約50名)
368	大河内 博(監修)、環境マンガ『地球からの挑戦状～ビイの大冒険』監修・出演、マガジンハウス、2022年3月17日発売
369	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価」(主催：列島縦断代理店共催パーキンソエルマー ウェビナー、オンライン、2022年8月30日、聴講者不明)にて講演
370	アースドクターによる環境診断「富士山頂における地球大気観測から何が分かるのか？～COVID-19、越境汚染、気候変動、マイクロプラスチック～」(主催：白元アース株式会社、大宮、2022年7月14日、受講者：約50名)にて講演
371	「大気中マイクロプラスチック～プラスチック大気汚染～」(主催：大阪ブルー・オーシャン・ビジョン推進議員連盟、衆議院第一議員会館、2022年11月14日、聴講者：約20名)にて講演
372	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～From Pollution to Solution～」(主催：富山県環境科学センター令和5年度環境セミナー、2023年10月3日、聴講者約40名)にて講演
373	明海大学における特別講義「プラスチック大気汚染～地球表層を循環するマイクロプラスチック～」(2023年11月7日、聴講者数約60名)
374	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～プラスチック大気汚染の現状～」(主催：JARI、2023年12月26日、東京、聴講者約50名)にて講演
375	「大気中マイクロプラスチックの実態解明と健康影響評価～AMΦプロジェクト～」(主催：アセス士会勉強会、2023年7月7日、東京、聴講者約30名)
376	「Airborne Microplastics and Health Impact～AMΦ project～」(主催：JASIS、2023年9月8日、幕張、聴講者約100名)にて講演

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
377	東京理科大学大学院薬学研究科における大学院講義「古くて新しいPM2.5の健康影響」(2021年10月9日、聴講者約20名)

378	産業医科大学大学院医学研究科医学専攻における大学院講義「PM _{2.5} の中樞影響。」（2022年9月6日，聴講者約10名）
-----	--

Abstract

[Research Title]

Airborne Microplastics and Health Impact

Project Period (FY):	2021-2023
Principal Investigator:	Okochi Hiroshi
(PI ORCID):	ORCID0000-0003-2735-7571
Principal Institution:	Waseda University 3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, JAPAN Tel: +813 5286 3327 Fax: +813 5286 3327 E-mail: hokohci@waseda.jp
Cooperated by:	Tokushima University, Toyo University, Osaka Metropolitan University, Meteorological Research Institute, Hiroshima University
Keywords:	μ FTIR-ATR imaging, Py-GCMS, Aerodynamic Diameter Distribution, Environmental Dynamic Modelling, Respiratory Effects

[Abstract]

Airborne Microplastics and Health Impact

This study was the first globally to establish a comprehensive research infrastructure for the observation, analysis, environmental modeling, and health impact assessment of airborne microplastics (AMPs) through an industry-academia-government collaboration.

In Subtheme 1, several activities were carried out. First, in collaboration with PerkinElmer Japan, we established a method for quantifying airborne microplastics using micro-Fourier Transform Infrared-Attenuated Total Reflectance (μ FTIR-ATR) imaging. Additionally, in partnership with domestic research institutions, we collected and identified AMPs using a unified method, elucidated their number concentration, aerodynamic and Feret diameter distribution, and deposition fluxes, and estimated inhalation amounts (in cooperation with Subsections 2 and 3). Observations of AMPs in the free troposphere, open ocean, and polar regions were conducted to assess the extent of global-scale pollution, in collaboration with Subtheme 2. Finally, we identified additives and adsorbed organic matter in AMPs and developed a quantification method for airborne nanoparticles (ANPs).

In Subtheme 2, Emission inventory of tire wear particles, one of the most abundant AMP in cities, is made. Emission, transport, photo-degradation, and deposition processes of AMPs are implemented into the Japan Meteorological Agency's regional meteorology-chemistry model NHM-Chem. An emission optimization technique is established to estimate emission inventory of AMPs from cities (population base), farmland, and ocean, by using observed concentration and deposition data in Japan and North Hemisphere obtained by Subtheme 1 and others and the NHM-Chem simulation data. By combined with IL-8 data obtained by Subtheme 3, the numerical simulation of inflammation potentials of tire wear particles and other particles originated from vehicles are estimated for the first time.

In Subtheme 3, we mainly investigated the respiratory effects of degraded PET by artificial sunlight and created transport and degraded model of PET for risk assessment. PET fibers were cut and then degraded by artificial sunlight irradiation. Exposure of mice to photo-aged PET resulted in exacerbated airway resistance. Inflammation occurred in the lungs with observed infiltration of neutrophils. Terephthalic acid

(TPA) was sustainedly released from PET aged by artificial sunlight. Exposure of mice to TPA resulted in lung inflammation and exacerbated increase in airway resistance. Collectively, these results suggest that inhalation of photo-aged PET can impact the respiratory system via TPA release.

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

氏名

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
中間評価コメント「地方環境研究所やその他の機関も協力できる測定方法の標準化に取り組み、国内での計測が広く行われるように調整していただきたい。」	すでにマニュアルも作成し、操作動画も作成しており、富山県、新潟県から研究者が訪問しています。レクチャーを研究代表者が行い、大学院生から前処理法および解析法に関する講習会を開催し、装置さえ入手できれば計測ができるようにしています。
中間評価コメント「PM2.5 の健康影響は確立されているので、サブテーマ3では課題の目的通り、困難性を回避しないで適切な手法でマイクロプラスチックの健康影響を調べてほしい。」	大気中マイクロプラスチックに関する先行研究がないことから、当初は道路粉塵を用いた呼吸器健康影響評価を行っていましたが、モデル大気中マイクロプラスチックとして繊維状PET、粒子状PS、粒子状PPを人工太陽光によって劣化させ、研究に使用しています。そのなかで、一度でも太陽光照射により光劣化したPEやPSは、肺胞などの暗所であっても有害化学物質を放出し続けることを明らかにし、この性質と呼吸器影響との関連を解明しました。
中間評価コメント「サブテーマ3の研究材料はサブテーマ1、2と連携して選んでほしい。」	上述しましたように、サブテーマ1、2と連携して繊維状PET、粒子状PS、粒子状PPを用いた研究を行っています。繊維状PETはその大きさだけではなく、アスベストのように繊維状という形状も重要である可能性があります。
中間評価コメント「サブテーマ3について、道路粉塵、PM2.5、繊維状PET（サイズ>10μm）で比較をしているが、この実験デザインでは、プラスチックの形状、サイズ、吸着成分の違いの検討ができない。重要な研究であり、MP/NPの毒性評価結果を引き出すことができるようなデザインに改良していただきたい。	サブテーマ1によりますと、大気中マイクロプラスチックの主な形状は破片状であり、主要ポリマーは五大汎用マイクロプラスチックです。そこで、PET、PS、PPを研究対象にしています。特に繊維状PETについては、ドラム式洗濯乾燥機を使用する欧州における洗濯観測により、年間一億本ものマイクロファイバーが放出されているという推計もあります。サブテーマ1では、PETはほぼ検出される重要なAMPsの一つであり、サブテーマ1とサブテーマ3の整合性はとれています。
中間評価コメント「大気中のマイクロプラスチックの濃度制御は困難であろうが、蓄積したデータを基にヒトへのばく露量を減らす手法提案が欲しい。」	サブテーマ1で、コナラ葉が大気中マイクロプラスチックを強固に捕捉し、国内全体にコナラ葉による大気中マイクロプラスチックの捕捉量を推計したところ年間42兆個（成果番号6）でした。今後は企業と連携して大気中マイクロプラスチックの削減に取り組む予定です。
中間評価コメント「表面に付着している（絡み合っている）POPsを含む他種の化学物質に係る情報が興味深い。成果を期待したい。」	現状では大気中マイクロプラスチックを他の粒子と乾式分級できる装置が存在しないことから困難です。今後の研究課題とさせていただきます。

中間評価コメント「サブテーマ1、2、3で主対象としている MP 種、観測場のスケールがサブテーマごとに異なっている。研究のしやすさもあると思うが、相互に密接に関連した成果を期待する。」	サブテーマ1によりますと、大気中マイクロプラスチックの主要ポリマーは五大汎用マイクロプラスチックです。サブテーマ2ではこれらポリマーのモデリングを行っており、サブテーマ3では同じく呼吸器影響を中心とした生体への作用を調べています。
---	--