

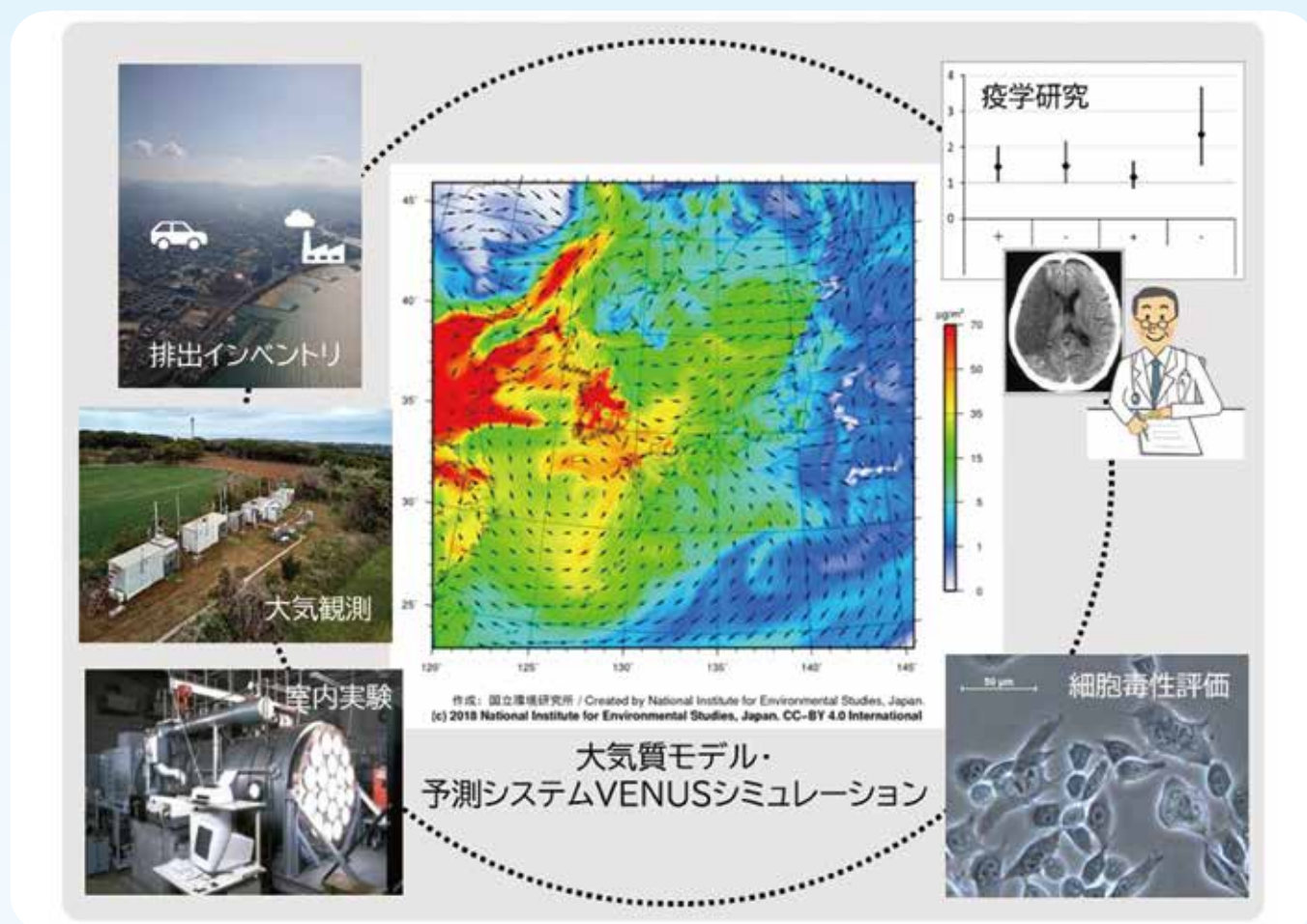
国立環境研究所 ニュース

Vol.38

No.6

令和2年(2020)2月

National Institute for Environmental Studies



安全確保研究プログラム・プロジェクト6の研究構成概念図

特集 | PM_{2.5} など大気汚染の現状と毒性・健康影響

PM_{2.5}は今どうなっている? | 2PM_{2.5}の現状と健康影響 | 3

有機エアロゾルの発生源解明に向けて | 6

有機化合物の揮発性と粒子化のメカニズム | 9

国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第25回締約国会議(COP25)参加報告 | 12

令和2年度政府予算案における国立環境研究所関係予算の概要 | 18

PM_{2.5} は今どうなっている？

高見 昭 憲

日本においては2009年9月にPM_{2.5}の環境基準が告示され、環境省のホームページに示されている通り年間の平均値は15 µg/m³、一日の平均値は35 µg/m³と定められました。PM_{2.5}とは、大気中に浮かぶ粒子状物質(PM)のうち、粒径が2.5 µmより小さい粒子を指します(正確な定義は環境省のホームページを参照してください)。同年から標準測定法とPM_{2.5}自動測定機の等価性評価が実施され、承認を受けた自動測定機による観測が2010年から始まりました。標準測定法とは環境大気常時監視マニュアルで規定されているように、濾過(フィルター)法を用いて24時間PM_{2.5}を捕集し、特定条件下で秤量して、PM_{2.5}の質量濃度を測定する方法です。2010年ごろは都市部を中心に測定が行われていましたが、徐々に測定局も増加し、「平成29年度・大気汚染の状況」の報告では1,000箇所以上で観測が行われています(一般局 814局、自排局 224局)。

2013年(平成25年)1月末に中国で起きた微小粒子状物質(PM_{2.5})の高濃度現象がマスメディアで多く報道されました。当時、北京では時間値の最大が993 µg/m³を記録し、同時期の日本でも日平均最大値が50 µg/m³を超過する地点があったとされています。あれから数年が経過し、国内のPM_{2.5}濃度は減少傾向にあり、2017年度(平成29年度)には80%以上の観測地点で環境基準が達成されました。環境基準達成の要因として、鶴野らは中国での排出量・濃度の減少を挙げています(大気環境学会誌 52号(2017)177-184)。中国での排出量減少が続くとPM_{2.5}濃度に対する越境大気汚染の寄与はかなり少なくなり、大気環境はかなり改善されると思われます。

このようにPM_{2.5}の環境基準は多くの測定局で達成されていますが、東京、大阪など大都市部、瀬戸内海沿岸地域、九州地区ではまだ達成されていないところもあります。越境大気汚染の寄与があまり考

えられない関東でも高濃度のPM_{2.5}を観測する場合があります。国内の排出源からの寄与を検討する必要があります。また、環境基準設定時にはPM_{2.5}の健康影響についての国内での知見が少なく、毒性や健康影響を解明する必要もありました。

このような状況のもとで、我々は国立環境研究所の安全確保研究プログラムの中の第6番目のプロジェクトとして「PM_{2.5}など大気汚染の実態解明と毒性・健康影響に関する研究プロジェクト(PJ6)」を開始しました。大気質モデルの精度向上と疫学的知見の収集を中心として研究を進め、

- 大気汚染物質の発生源や原因物質の排出削減対策の方向性の提示
- 注意喚起情報の発信
- 健康影響の解明(毒性評価・疫学による健康影響評価)

を目的として研究開発を行い、大気環境管理を通じて安全確保社会の実現に貢献することを目指しています。

今回の特集では、大気・毒性・疫学の研究内容を紹介します。大気系の研究では大気モデルの性能向上を目指し、モデルの検証のための有機化合物や指標物質の観測や、大気チャンバーを用いた室内実験によるPM生成プロセスの理解、二酸化硫黄や窒素酸化物など大気汚染物質の排出源や排出量のデータベース(排出インベントリ)作成を行っています。改良した大気モデルの結果を用いて注意喚起情報を発信し、また、排出インベントリの排出量を変化させるモデル実験を通じて、どこでどのような物質の排出を抑制するのが効果的かを検討します。詳しくは「研究ノート」や「環境問題基礎知識」をご覧ください。また、健康影響の研究ではPM_{2.5}そのものや、PM_{2.5}に含まれる化学成分がどのように毒性を発現し、結果的に人の健康に影響を与えるのかを、

細胞を用いた実験や、大規模な大気汚染データや健康影響データを用いた疫学研究で明らかにしようとしています。健康影響の研究については「研究プログラム紹介」で解説します。本稿によって PM_{2.5} に対する理解を深めていただければと思います。

(たかみ あきのり、地域環境研究センター

センター長)

執筆者プロフィール：

沖縄、長崎、福岡、熊本などで長く越境大気汚染やローカルな汚染に含まれる PM の化学組成について観測を行ってきました。近年その組成が変化していることに興味を持っています。

【研究プログラムの紹介：「安全確保研究プログラム」から】

PM_{2.5} の現状と健康影響

高見昭憲、古山昭子、藤谷雄二、山崎 新、道川武紘

はじめに

粒子状物質 (PM) の健康影響の研究には大きく分けて、細胞や動物などを用いた毒性研究と人を対象とした疫学研究があります。毒性研究では PM_{2.5} や PM₁₀ の抽出物を細胞に曝露して解析することによってどのような物質がどのような毒性を発現するかといったプロセスやメカニズムの解明に役立ちます。しかし、細胞での研究がそのまま人の健康影響に当てはまるかという点、人体は様々な性質を持った細胞が臓器や組織を構築して、階層的に機能を制御することで正常な個体の機能を保っているため、培養した細胞への曝露では影響メカニズムのごく一部しかわかりません。一方で疫学研究は、例えば PM_{2.5} の濃度と人の死亡データなどを用いて両者に関連性があるかどうかを統計解析の手法を用いて明らかにします。疫学解析では関連性の有無は明らかになるものの、病気の発症や死亡に至るプロセスはわかりません。毒性研究と疫学研究はその研究手法の特性から相補的な関係があるため、両者を並行して進めていく必要があります。国立環境研究所には毒性研究グループと疫学研究グループがありますので、同じプロジェクトの中で連携しながら研究を進めています。

毒性研究—PM_{2.5} の成分と細胞の応答の関係

PM_{2.5} には発生源ごとに、異なる様々な種類の成分

が含まれ、成分によって影響が異なります。主な成分は硫酸イオン、硝酸イオン、アンモニウムイオン、有機物です。微量成分としては黒色炭素や金属成分があります。有機物は発生源から排出された後、大気中で光化学酸化反応を経て多種多様な有機物に変化します。このため地域や季節などによって PM_{2.5} の化学組成は異なります。毒性研究グループでは、PM_{2.5} の抽出物を細胞に曝露し、細胞の死、酸化ストレスの発現など細胞の反応を観察し、影響を評価します。このように生物の反応を利用した毒性評価をバイオアッセイと呼びます。このほかにも PM_{2.5} が持つ酸化能や酸化物の量を試薬の化学反応を利用して測る方法も併用して影響を検討します。

PM_{2.5} の毒性研究に関するいくつかの結果を紹介します。光化学チャンバーを用いて人為起源のキシレンから生成した PM_{2.5} は、自然起源のアルファピネンから生成した PM_{2.5} に比べ、酸化ストレスの指標である HO-1 という抗酸化タンパクの遺伝子発現が高くなりました。このことは、反応で生成する化学物質は、元の化学物質に依存し、その毒性も異なることを示しています(1)。

稲わらや麦わらなどを燃焼したときに発生する PM_{2.5} についても測定しました。その結果、稲わらより稲もみの酸化ストレス誘導能が高くなりました(2)。これは、何を燃やすかによって発生する PM_{2.5} に含まれる化学物質と組成が異なり、その毒性が異なる

特集 PM_{2.5} など大気汚染の現状と毒性・健康影響

ことを示しています。また、つくばで野焼きが盛んに見られる秋季に捕集した PM_{2.5} の結果では、有機溶媒で抽出した試料を曝露した場合、野焼きが多く観察された日や、植物の燃焼により大気中に放出されるレボグルコサン濃度が高い試料において酸化ストレス誘導能も高い傾向にありました。水で抽出した試料ではレボグルコサン濃度との相関は低かったため、これらの結果は野焼き由来の有機溶媒に溶ける有機化合物が高い酸化ストレス誘導能を示すことを示唆しています(2)。ただしこれは細胞での結果なので、人の健康影響については解釈に注意が必要です。

PM_{2.5} に曝露されると、その化学組成に応じて細胞は炎症や酸化ストレス応答などの生体影響の異なる細胞応答を示します。それに関与する遺伝子の発現を測定して毒性を調べる方法は高感度ですが大量の試料が必要な上に時間と労力がかかりました。そこで、細胞応答に応じて発光する酵素を細胞に導入することにより、細胞が受ける刺激の強さを発光量の変化で簡便に計測するアッセイ系を作製しました。酸化ストレス応答、炎症、薬物代謝酵素誘導などのそれぞれの応答に応じて発光する細胞を準備することで、捕集場所や季節の異なる PM_{2.5} 曝露による複数の細胞応答を同時に比較することが容易になりました。このアッセイ系を用いた解析では、9,10-Phenanthrenequinone、銅イオン、亜鉛イオンで細胞での酸化ストレス誘導が高く、PM_{2.5} 中の含有量が比較的高い銅や亜鉛の毒性寄与が大きいことが示唆されました。今後はこの新規開発したバイオアッセイ系を用いて、体系的な毒性評価を行います。

疫学研究-PM_{2.5} 濃度と死亡の関係

次に疫学研究の成果を紹介します。2010 年から開始された国内の常時監視局における PM_{2.5} 質量濃度データと、国内の 20 万人以上の都市の死亡データを用いて統計解析を行いました。その結果、PM_{2.5} と死亡との間には関連性があることがわかり、PM_{2.5} の質量濃度が 10 μg/m³ 上昇すると、死亡する人の割合が 1.3% 増加することがわかりました(図 1) (3)。これは気温などの気象要因や二酸化硫黄や窒素酸化物などほかの大気汚染物質の濃度を考慮しても PM_{2.5} 濃度と死亡との間に関連性が見られました。このことか

ら PM_{2.5} は人の死亡、とくに循環器疾患や呼吸器疾患が原因となった死亡、に影響があると考えられました。環境基準設定時には国内知見が少なかったのですが、今回の結果は国内の PM_{2.5} データと死亡とのデータを用いた解析なので、国内居住者に対する PM_{2.5} の健康影響に関する基本的な知見を提供しているといえます。

PM_{2.5} の成分と死亡の間に関連があるのかについても調査しています。硝酸イオン、黒色炭素と死亡との間に正の関連が見られていますが、統計的に有意な結果ではなく、今後のさらなる研究が必要です。疫学研究では十分なサンプルデータ数があるので、10 年程度の長期的なデータの蓄積が必要な研究分野です。

PM_{2.5} とともに春になるとしばしば観測される黄砂について、心筋梗塞発症と関連しているか熊本大学などと共同で研究を行いました。その結果、黄砂が観測された日はされない日と比べて 1.4 倍心筋梗塞が発症しているという結果が得られました(図 2) (4)。また、75 歳以上の方、高血圧のある方、糖尿病のある方、腎臓病のある方では黄砂の影響で心筋梗塞を起こしやすくなっている可能性がありました。

まとめ

ここでは PM_{2.5} の毒性研究と疫学研究について紹介しました。PM_{2.5} が人の健康に影響があることは確かなようですが、PM_{2.5} 自体やどのような成分に毒性があり、死亡などの原因になっているのかはまだ未解明です。粒子自体もその成分も両方とも健康に影響があると想像できますが、どちらがどの程度影響があるのかは重要であり、それによって PM_{2.5} 自体を規制するのか、PM_{2.5} の前駆物質となる二酸化硫黄、窒素酸化物、揮発性有機化合物などを個別に規制するほうが良いのか、行政の対策の方針も変わってきます。我々のグループは大気汚染研究、毒性研究、疫学研究を連携して、国内はもとより海外も含めた大気質の改善に貢献し、SDGs (持続可能な開発目標) の「すべての人に健康と福祉を」という目標に貢献します。

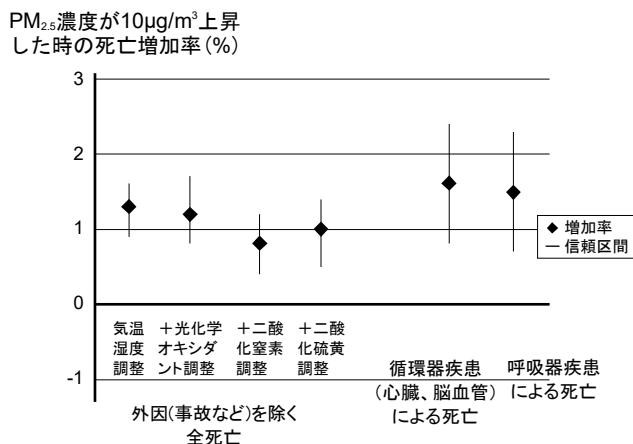


図1 死亡当日と前日の平均PM_{2.5}濃度と死亡との関連性

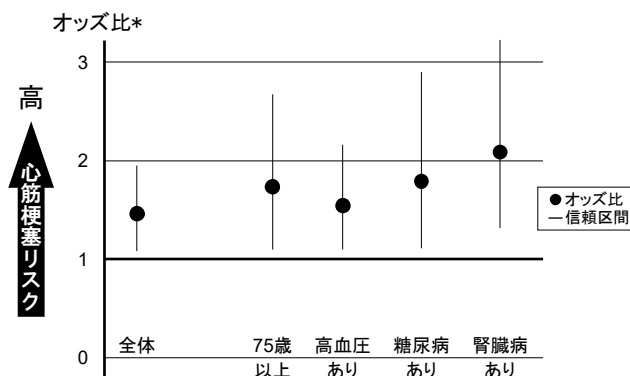


図2 心筋梗塞発症前日の黄砂と心筋梗塞との関連性
*心筋梗塞当日および2~5日前の黄砂、気温、湿度で調整

参考文献

- 1) 「都市大気における粒子状物質削減のための動態解明と化学組成分析に基づく毒性・健康影響の評価」(研究代表者 高見昭憲) 国立環境研究所研究プロジェクト報告 第109号
- 2) 「未規制燃焼由来粒子状物質の動態解明と毒性評価」(研究代表者 高見昭憲) 国立環境研究所研究プロジェクト報告 第133号
- 3) Michikawa, T., Ueda, K., Takami, A., Sugata, S., Yoshino, A., Nitta, H., Yamazaki, S. (2019) Japanese nationwide study on the association between short-term exposure to particulate matter and mortality. *Journal of Epidemiology*, 29, 471-477. doi: 10.2188/jea.JE20180122. <https://doi.org/10.2188/jea.JE20180122>.
- 4) Kojima, S., Michikawa, T., Ueda, K., Sakamoto, T., Matsui, K., Kojima, T., Tsujita, K., Ogawa, H., Nitta, H., Takami, A., (2017) Asian dust exposure triggers acute myocardial infarction, *European Heart Journal*,

38, 3202-3208, doi:10.1093/eurheartj/ehx509
(たかみ あきのり、地域環境研究センター
センター長
ふるやま あきこ、環境リスク・健康研究センター
室長
ふじたに ゆうじ、環境リスク・健康研究センター
主任研究員
やまざき しん、環境リスク・健康研究センター
エコチル調査コアセンター センター長
みちかわ たけひろ、環境リスク・健康研究センター
客員研究員)

執筆者プロフィール:

自身の美容と健康のためには PM_{2.5} 対策より生活習慣改善が喫緊の課題です。(AF) ダイエット目的の山登りが遠ざかっている今日この頃です。(YF) エコチル調査と大気汚染の疫学研究で忙しい日々を送っています。(SY) この夏は子どもとクワガタの飼育に熱が入りました。(TM)

特集 PM_{2.5} など大気汚染の現状と毒性・健康影響

【研究ノート】

有機エアロゾルの発生源解明に向けて

森野 悠

有機エアロゾルの発生源解明

環境汚染の原因解明や問題解決に向けては、当然ながらその発生源・発生機構の解明が不可欠です。大気中の微小粒子状物質（粒径 2.5 μm 以下の PM_{2.5} など）についてもこれまでに発生源推計が実施されてきました。1980 年代にはディーゼル自動車が 2～5 割を占める主要発生源であったのに対して、その後の自動車排ガス規制の効果により自動車の寄与割合が減少して、近年は PM_{2.5} の発生源が多様化していることが示唆されています。一例として、筆者らが 2012 年を対象に推計した PM_{2.5} の発生源寄与割合（図 1）を見ると、輸送部門・産業部門・発電部門・農業・植物・火山・バイオマス燃焼など、発生源が多岐にわたり、その対策が一筋縄ではいかないことが分かります。

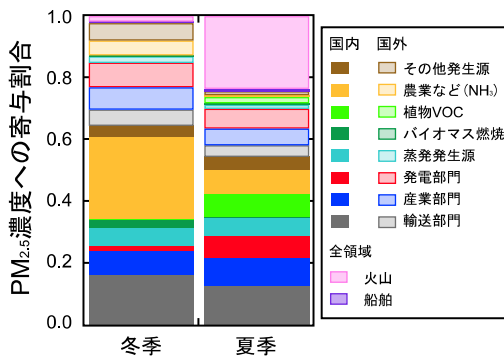


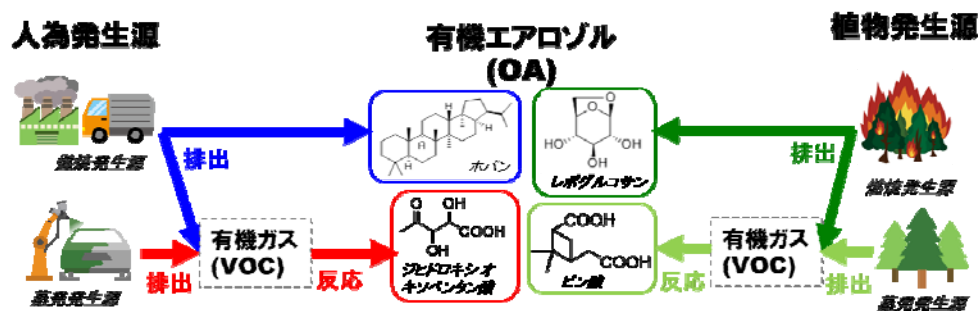
図 1 2012 年の関東地方における PM_{2.5} 濃度に対する発生源別寄与割合

PM_{2.5} が社会的関心を集めた 2013 年以降、日本における PM_{2.5} 濃度は減少していますが、依然として PM_{2.5} 環境基準の未達成の地域が残されています。現在でも PM_{2.5} の高濃度事例は頻発しており、その健康影響が懸念されるとともに、図 2 のような視程の悪化も起こっています (PM_{2.5} の健康影響についての詳細は本号・高見らの原稿をご参照ください)。そのため、引き続き PM_{2.5} の対策が必要とされていますが、特に有機化合物で構成される PM_{2.5} 成分（有機エアロゾル）は、発生源や生成機構に未解明の点が多く、世界的にも集中的に実測・実験的研究（本号、佐藤）やモデリング研究（森野、2015）が進められています。ただ、図 3 に示した通り、有機エアロゾルの発生源推計においては、まだ大きな問題が残されており、特に工場・発電所などの固定燃焼発生源や、塗装・印刷などの固定蒸発発生源からの寄与の推計に問題があります。

有機エアロゾルに対するこれら固定発生源の寄与を評価するためには、大気観測・室内実験に基づく実態把握と数値モデルに基づく寄与推計が必要です。そこで我々は、環境研究総合推進費の研究プロジェクトなどにより、特に人為起源の固定燃焼発生源と固定蒸発発生源が有機エアロゾルに与える寄与を正確に評価するための基礎研究を進めています。本稿では、研究の問題意識と現在までの成果を紹介いたします。



図 2 群馬県衛生環境研究所から撮影した赤城山（距離 19 km）。晴天日でも PM_{2.5} 濃度が高いと視程が遮られることが分かる（群馬県衛生環境研究所 熊谷貴美代博士 撮影）。



問題①:工場等からの半揮発性有機成分が数値モデルで未考慮
問題②:人為蒸発発生源起源の有機マーカ-の指標性評価が不十分

図3 有機エアロゾルの発生源・生成過程と有機マーカ-の例、および有機エアロゾルの発生源推計における問題点。

有機マーカ-の活用

有機エアロゾルは数万種以上の有機化合物の集合体であり、その発生源や生成過程は多様ですが、成分レベルで同定されている化合物は質量ベースで20~30%程度です。このように全量を同定できない有機エアロゾルの発生源寄与率を推計するためには、「有機マーカ-」を活用することが有効です。有機マーカ-とは、ある発生源から一次排出（粒子状で大気に排出）、或いは二次生成（ガス状で大気に排出されて、化学反応を経て粒子状に変化）された特有の有機指標成分のことを指します。有機マーカ-を各発生源の指標として用いるためには、排出割合や生成収率が安定していることや他の発生源の影響を受けにくいことなどの条件を満たす必要があります。これまで、有機エアロゾルの発生源寄与推計のために、下記の有機マーカ-が発見されて、広く使われています（図3）。

- 自動車起源（1次排出）：ホパン類や多環芳香族炭化水素（PAH）類
- バイオマス燃焼起源（1次排出）：レボグルコサンなどの無水糖類
- 調理起源（1次排出）：オレイン酸やコレステロール
- 植物起源（2次生成）：ピン酸やブタントリカルボン酸

ただ、人為・固定蒸発発生源の寄与推計には有効な有機マーカ-が少なく、これまでその発生源寄与

をきちんと推計できていませんでした。2004年より、エアロゾルや光化学オキシダントの濃度低減を目的として、工場・事業所など固定蒸発発生源から排出される揮発性有機化合物（VOC）の排出が規制されていますが、これまで上記の通り有機エアロゾルに対する固定蒸発発生源の寄与評価ができていないため、VOC排出規制のエアロゾル濃度低減への効果も評価できていませんでした。近年、ジヒドロキシオキソペンタン酸や芳香族ニトロ化合物など、人為蒸発起源の有機マーカ-の候補物質が報告されつつありますが、これらの候補物質の指標性評価が不十分であるという問題があります。そこで、本研究ではチャンバー実験や発生源調査（本号・佐藤と同様の実験）において、様々な条件における有機マーカ-濃度を測定してその指標性を評価するとともに、実大気中における有機マーカ-濃度を各季節・昼夜別に測定いたしました。その結果、ジヒドロキシオキソペンタン酸や一部の芳香族ニトロ化合物は人為蒸発起源の指標性を有すること、これらの成分は実大気中においても夏季・日中に濃度が増大し、二次生成物質に特徴的な経時変化を示すことが分かってきました。現在さらに、多地点・各季節の大気観測の結果を基に多変量データ解析を実施して、対策立案に必要な有機エアロゾルの発生源寄与評価を進めています。

固定燃焼発生源の寄与推計

燃焼発生源からは、揮発性の高いガス状成分から揮発性の低い粒子状成分まで、多岐にわたる有機化

特集 PM_{2.5} など大気汚染の現状と毒性・健康影響

化合物が排出されます（主に高揮発性のガス状成分が排出される蒸発発生源とは対照的です）。自動車など「移動燃焼発生源」の発生源調査では排ガスを希釈して温度を下げた後に粒子濃度を測定しているのに対して、工場や発電所など「固定燃焼発生源」の発生源調査では測定場所の制約などのために煙道中の粒子濃度を測定しています。ここで問題となるのが、高温の煙道内ではガス状で存在して、大気に放出されて気温が低下した後に粒子状となる半揮発性成分です（この半揮発性成分を「凝縮性粒子」と呼びます）。現在の固定燃焼発生源の発生源調査では、高温で揮発する凝縮性粒子を測定できていないため、凝縮性粒子は排出規制対象から漏れています。当然、凝縮性粒子は排出量データベースからも漏れており、大気中 PM_{2.5} に対する寄与も評価できていません。このため、現在は PM_{2.5} に対する固定燃焼発生源の寄与を過小評価している懸念があります。

そこで、本研究では固定燃焼発生源からの凝縮性粒子が大気中の有機エアロゾルに及ぼす寄与の評価を進めています。第一に、行政などで実施した凝縮性粒子を含む発生源調査のデータに基づいて凝縮性粒子の排出量を推計しました。対象発生源は限られているものの、凝縮性粒子を考慮することで日本における有機エアロゾルの排出量が7倍ほど増大すると推計されました。このことは、固定燃焼発生源から排出される有機エアロゾルは、半揮発性成分が主要であり、従来の発生源調査に基づく推計では有機エアロゾルの排出量を大きく過小評価していたことを示唆しています。また、凝縮性粒子を考慮することで、数値シミュレーションの精度も向上し、実測された有機エアロゾル濃度をより良好に再現可能となりました（図4）。

このように、固定燃焼発生源からの凝縮性粒子は大気中の有機エアロゾルに対して大きな寄与を持つことが示唆されましたが、その化学成分の多くは未解明で、寄与推計にも大きな不確実性が残されています。特に、発生源の状況（煙道温度や有機エアロゾル濃度）によって有機成分のガス・粒子分配は大きく変わるため、結果として凝縮性粒子の排出割合も大きく変わります。これらの効果を適切に計算するために、発生源における凝縮性粒子の揮発特性の実態調査（本号・佐藤）などのデータを活用した熱力学

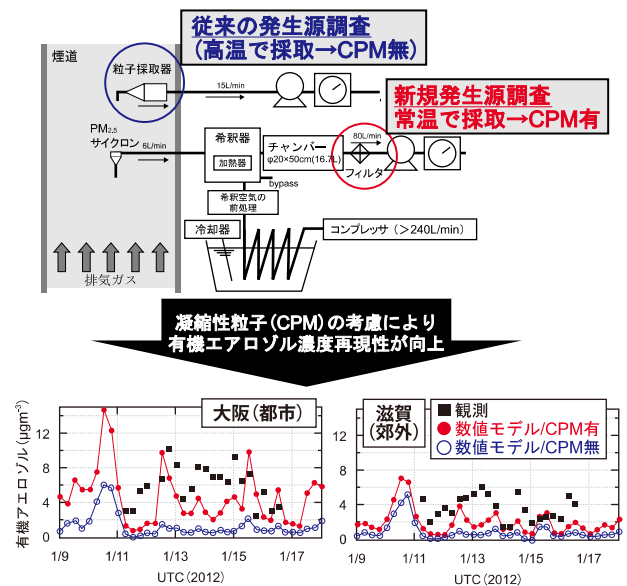


図4 凝縮性粒子（CPM）を考慮した場合（赤）としない場合（青）の有機エアロゾル濃度の数値シミュレーション結果。

モデルの構築と、そのモデルに基づく排出量推計などを進めています。

最後に

観測・実験研究者と数値モデル研究者との協働により、有機エアロゾルの発生源について新たに多くのことが分かりつつあります。今回お示しした固定燃焼発生源からの凝縮性粒子の問題は、日本のみならず、世界的にもデータ整備が不十分で、中国・韓国など東アジアの国々でも実測・数値モデル研究が進められ始めている、関心の高い研究分野です。我々も、これらの国々の研究者と密に情報交換しながら、大気環境改善に資するべく研究を進めてまいります。（もりの ゆう、地域環境研究センター

大気環境モデリング研究室 主任研究員）

執筆者プロフィール：

今回、大気観測を実施した前橋の方々には赤城山の眺めを汚染状況の目安にしていました。私自身、学生時代には海岸からの伊豆大島、現在は通勤電車からの筑波山の眺めを目安としております。そういった各地のランドマークが鮮明に見えた時の喜びは万国共通ではないでしょうか。



【環境問題基礎知識】

有機化合物の揮発性と粒子化のメカニズム

佐藤 圭

はじめに

当研究所では微小粒子状物質 (PM_{2.5}) の発生プロセスや物理化学性状に関する大気の基盤的実験研究を進めるとともに、PM_{2.5} が健康や気候変動等に及ぼす影響を解明するための研究プロジェクトにも取り組んでいます。本稿では、PM_{2.5} の主要成分のうち有機エアロゾル (OA) 粒子に着目し、粒子化のメカニズムを解説します。また、当研究所で行った OA 粒子の排出量調査や生成メカニズムに関する研究についてもご紹介します。

有機化合物の揮発性

大気中には多様な有機化合物が存在します。ある有機化合物の存在量が飽和濃度を超えると、その有機化合物はガスと粒子の混合状態になります。これは水蒸気存在量が飽和水蒸気量を超えると水蒸気と水の混合状態になるのと似ています。飽和濃度は有機化合物の種類によって異なります。有機化合物の種類と飽和濃度の関係を知るには、有機化合物中にある炭素数を横軸に、炭素の平均酸化数を縦軸にとった2次元マップ上で飽和濃度がどのように変化するか調べるのが便利です (図1)。

例えば、家庭で用いるプロパンは炭素3つを持つ (C₃) 炭化水素であり、常温常圧でガスとして存在します。炭素数が多い灯油 (C₉~C₁₅ 炭化水素) は液体、さらに多いワックス (C₂₀ かそれ以上の炭化水素) は固体となります。また、炭化水素の酸化によって得られる消毒用アルコールは液体、さらに高度に酸化されたクエン酸では固体になります。同様に、OA 粒子においても、炭素数や炭素の平均酸化数が大きいほど、液体や半固体、固体状の OA 粒子になりやすい傾向があります。

図1に色付の丸で示した化合物の飽和濃度を構造活性相関に基づいて予測し、予測結果を用いて対数飽和濃度 (log₁₀ [飽和濃度 (μg/m³)]) を表す等高線を描きました。平均的な都市大気条件では、対数飽和濃度が3よりも小さな有機化合物については少な

くともその一部が OA 粒子になります。すなわち、クエン酸やワックス等は OA 粒子化が可能な有機化合物です。

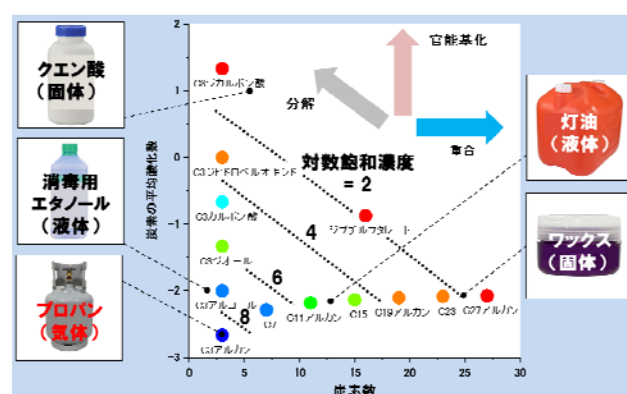


図1 有機化合物の炭素数、炭素の平均酸化数および対数飽和濃度の関係。対数飽和濃度は log₁₀ [飽和濃度 (μg/m³)] を表します。炭素の平均酸化数と炭素数を用いたプロットについては 2011 年に発表された Kroll らの Nat. Chem. 論文を参考にしたものです。

大気化学輸送モデルによる OA の取扱い

発生源から直接排出される OA を一次有機エアロゾル (POA) と呼びます。典型的な POA 粒子は、化石燃料やバイオマスの燃焼により排出される粒子です。燃焼由来の POA 粒子のうち、高温でガスとして排出された炭素数の多い有機化合物が後に冷えて粒子化したものを凝縮性粒子と呼びます。また、大気中に排出された揮発性有機化合物 (VOC) の光化学反応によって生じる酸化数の高い有機化合物が粒子化したものを、二次有機エアロゾル (SOA) と呼びます。

大気化学輸送モデルでは、飽和濃度に着目して、OA 粒子の濃度予測が行われています。発生源および化合物の違いによらず飽和濃度が近い有機化合物同士をひとまとめのグループとして扱うことにより計算を簡略化し、各グループの凝縮、揮発および反応などの挙動が計算されます。大気中での光化学反

特集 PM_{2.5} など大気汚染の現状と毒性・健康影響

応で OA の官能基化、分解および重合（図 1）がさらに進むことにより、有機化合物の飽和濃度分布は排出後も時間と共に変化していきます。標準的な大気モデルでは、官能基化、分解および重合のうち、官能基化による飽和濃度の低下のみを考慮して計算が行われています。

排出または生成時の OA は多様な有機化合物の混合物ですが、有機化合物の飽和濃度分布は発生源に固有なものと考えられます。大気モデルに利用するデータを取得するため、筆者らの研究グループは、POA および SOA の飽和濃度分布を測定しました。

POA の揮発特性の測定

ディーゼル車、一般廃棄物焼却炉および下水汚泥処理施設（A 重油燃焼）から排出された POA の飽和濃度分布を測定しました（図 2A～2C）。各発生源からの高温の排気を流通容器内で精製空気によって希釈し、常温になった状態で測定を行いました。

対数飽和濃度が -2～4 の領域については、希釈倍率に対する粒子濃度の応答を測定することにより飽和濃度分布が決定されました。温度一定の下で試料空気を希釈すると OA 粒子濃度が下がり、その結果として OA 粒子濃度よりも高い飽和濃度を持つようになった有機化合物が揮発します。希釈倍率の増加に対する粒子の濃度変化を詳細に解析することにより、飽和濃度分布を評価することができます。対数飽和濃度が 4～6 の領域については、ガス状有機化合物を陽子移動反応質量分析計で分析することにより評価しました。検出された有機化合物の飽和濃度を、あらかじめ計算して作成した飽和濃度のデータベースを利用して推定しました。

燃焼発生源において測定された POA の排出係数は、対数飽和濃度が 5 または 6 の場合に最も高く、対数飽和濃度の値が減るにつれて減少する傾向がみられ、主に 0 以上の対数飽和濃度を持つ成分の寄与が大きいことが明らかになりました（図 3A）。得られた飽和濃度分布の情報は大気モデル計算に活用され、PM_{2.5} の予測精度の向上に役立っています。



図 2 有機エアロゾルの揮発特性の測定風景
 A：低公害車実験施設（当研究所）
 B：一般廃棄物焼却炉
 C：下水汚泥処理施設
 D：大気光化学チャンバー（当研究所）

SOA の揮発特性の測定

大気光化学チャンバーを用いて、自動車や塗料から排出される 1,3,5-トリメチルベンゼンの光酸化実験を行い、生成する SOA の飽和濃度分布を測定しました（図 2D）。標準的な大気モデルで使われる SOA の飽和濃度分布は、SOA 粒子の生成収率（生成した SOA 粒子濃度を反応した 1,3,5-トリメチルベンゼンの濃度で規格化した値）の OA 濃度条件による変化を解析することによって決定されます（収率法）。従来の収率法で決定された飽和濃度分布を、以下に述べる化学分析法、加熱法および希釈法等の新たな測定手法を用いて検証しました。

化学分析法では、フィルターに採取した SOA 粒子を液体クロマトグラフ質量分析計によって分析しました。検出された有機化合物の飽和濃度は、あらかじめ計算した飽和濃度のデータベースを利用することにより推定されました。加熱法では、SOA を加熱したときに残留する粒子の濃度を温度の関数として測定しました。SOA に関する加熱法の測定結果は、標準粒子を用いた測定結果と比較することにより常温の飽和濃度分布に変換されました。希釈法では、POA の測定と同じ原理を利用しましたが、短時間で希釈が完了した POA の場合と対照的に、SOA を希釈してから粒子濃度が平衡に達するまで数時間を要することが明らかになりました。従って SOA の希釈

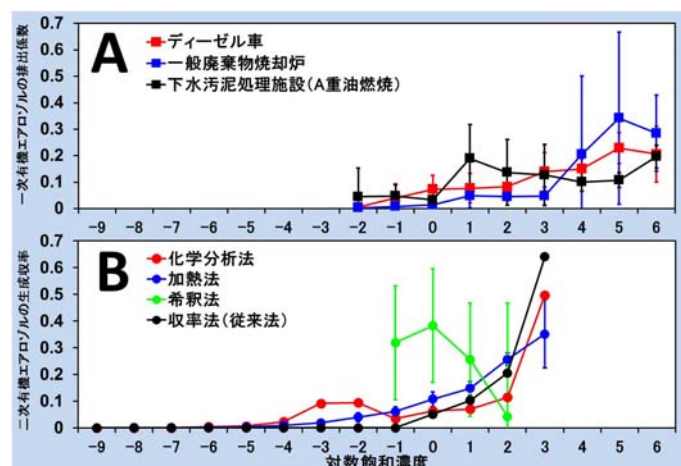


図3 有機エアロゾルの揮発特性の測定結果。都市大気条件において、対数飽和濃度 <0 はほぼ完全に粒子、 $0\sim3$ は一部が粒子、 >3 はほぼ完全にガスとなります。縦軸は -9 から 6 の各対数飽和濃度物質の排出係数または生成収率の合計が 1 となるように表しています。

A: 一次有機エアロゾル(凝縮性粒子)の結果。2018年に発表された環境リスク・健康研究センターの藤谷雄二らによる環境研究総合推進費終了研究成果報告書(5-1506 燃焼発生源における希釈法による凝縮性一次粒子揮発特性の評価法の確立、2015~2017年度)からデータを引用しています。

B: 二次有機エアロゾルの結果。2019年に発表された佐藤らのAtmos. Chem. Phys. 論文からデータを引用しています。

法の測定では、テフロンバッグ(図2D左手奥)の中でSOA試料を希釈し、その後数時間にわたり粒子濃度の変化を追跡することにしました。

図3Bに示すように、従来の収率法では 0 以上の対数飽和濃度を持つ成分しかないと考えられていましたが、化学分析法、加熱法および希釈法の測定結果から、 0 より小さな対数飽和濃度を持つ低揮発性成分があることが明らかになりました。希釈法では、測定上の制約のため、対数飽和濃度が -1 より小さな区間を評価できませんでした。しかし、平衡化にかかった時間と粒子のサイズを考慮したOAの蒸発に関するモデル計算の結果は、粒子中や粒子表面に分子の拡散を邪魔するような低揮発性有機化合物が存在していることを示唆していました。現在、低揮発性有機化合物の生成および揮発時間の遅れを大気モデルに取り込むことにより、 $PM_{2.5}$ の濃度予測に及ぼす影響を評価しているところです。

今後の展望

本稿でご紹介した研究によって、発生直後のPOAおよびSOAの飽和濃度分布が明らかになり大気モ

デルに反映されました。しかし、低揮発性物質の生成メカニズムや大気中でのその後の変質過程である、官能基化、分解および重合への分岐はまだよく分かっておらず、予測に関する不確実性の要因になっています。これらOAの生成・変質過程に関する未解明の課題は、今後、チャンバー等の大気実験によって解明が望めます。また、OA粒子の毒性や気候影響の研究にも大気実験が一定の役割を果たすことが期待されます。

(さとう けい、地域環境研究センター

広域大気環境研究室 室長)

執筆者プロフィール:

半年間のごみ当番のためカラスと知恵比べしています。いろいろ試したところ、収集用の金網カゴをなるべくカラスから隠すのが効果的でした。でもそれでは清掃車からも見えなくなり、ごみ收拾してもらえない事案が多発。今はぎりぎり見えるけど見えないポイントを模索中です。



【行事報告】

国連気候変動枠組条約（UNFCCC） 第 25 回締約国会議（COP25）参加報告

地球環境研究センター
気候変動適応センター

はじめに

2019 年 12 月 2～15 日、スペインのマドリードで、国連気候変動枠組条約（UNFCCC）第 25 回締約国会議（COP25）が開催されました。COP25 は当初チリで開催される予定でしたが、11 月に現地治安の問題により開催を断念したため、急遽スペイン政府が当初計画と同じ日程で首都マドリードでの開催を引き受けることになりました。議長国は当初予定どおり、チリが務めました。

COP25 ではパリ協定の各国削減目標や気候変動対策メカニズムの具体的なルール等について議論されました。国立環境研究所は締約国としての国際交渉を行う政府機関ではありませんが、国連の経済社会理事会に COP25 に NGO として参加できる資格を申請して受理されているために、主に会期の前半に行われたサイドイベント等に複数参加し、多くの研究成果を発信することができました。

以下、同会議における国立環境研究所の活動を紹介します。

1. 開催地マドリードの雰囲気

COP の直前の開催地変更は長い歴史の中でも初めてのことであり、急遽開催準備に追われたスペイン政府の努力は想像を絶するものがあります。しかし、開催地マドリード市街や地下鉄の駅および車内には、気候変動への理解と行動を呼びかける各種の広告や、「Act Now」という標語を印刷した数多くの旗などが設置されており、街を挙げて会議を支援しようとする雰囲気がありました。また、駅や会場入口では、連日プラカードやビラを持って緊急の行動を呼びかける多くの若者の姿もあり、日本との気候変動問題への関心の高さの違いを実感しました。



写真 1 COP25 会場のメインエントランス

2. 国立環境研究所の展示ブース

国立環境研究所とリモート・センシング技術センター（RESTEC）の合同展示ブースでは、衛星（GOSAT シリーズ）による温室効果ガスの観測を紹介しています。ディスプレイに投影されているのは 2009 年から 2017 年までに得られた GOSAT の観測データを利用して作られた全球地表面の CO₂濃度のシミュレーション動画です。

たくさんの参加者が衛星で温室効果ガスを観測することに関心を示してくれました。今回、現地の参加者のために GOSAT シリーズのリーフレットのスペイン語バージョンを用意しました。これはとても役に立ちました。

*GOSAT（Greenhouse gases Observing SATellite）は、環境省、国立環境研究所、宇宙航空研究開発機構（JAXA）が共同で開発した温室効果ガス観測技術衛星



写真 2 展示会場に据えられた COP25 のオブジェ

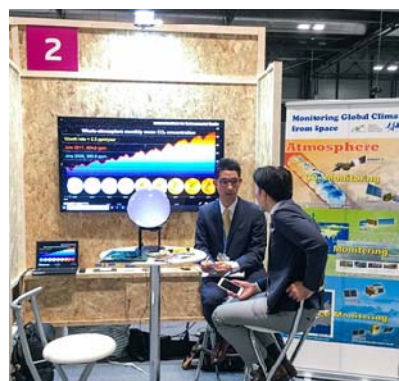


写真 3 国立環境研究所の展示ブース

3. サイドイベントへの参画

COP25 では、連日、数多くのサイドイベントや発表が行われました。12月4日に開催されたサイドイベントの様子をご紹介します。

Global Carbon Budget 2019 の Press Conference

国立環境研究所内にも国際オフィスがある Global Carbon Project の活動と、1850年以降の人為起源 CO₂ 排出量、海洋への吸収、陸域への吸収などの世界全体の炭素収支の経年変化が紹介されたあと、世界全体の人為起源排出量は 2019 年の終わりまでに前年比 0.6% 増加する見込みであることが報告されました。2018 年に比べて上昇率は下がっていますが、排出量が低下し始めるには至っていません。2019 年の大気中 CO₂ 濃度の平均値は約 410 ppm になると推定されています。

ICOS のサイドイベント“Standardized observations are the base of all climate science”



写真 4 ICOS のサイドイベント

Integrated Carbon Observation System (ICOS) は温室効果ガスと炭素循環の変化を観測に基づき把握することを目的とした欧州のプログラムです。サイドイベントでは、ICOS の趣旨説明に始まり、大気観測の標準化を担っている世界気象機関 (WMO) 全球大気監視 (GAW) の取組が紹介されました。国立環境研究所からも、気象庁や国立環境研究所の進める地上、船舶、航空機観測に加え、衛星観測などの各種観測の現状と、データ利活用の課題を紹介しました。

4. 日本パビリオンで開催されたセミナー

(1) Satellite Observation Contributing to Decision Making to Reduce GHG Emissions

(温室効果ガス排出量削減政策に貢献する衛星観測) : 12/5 開催

温室効果ガス排出削減のための意思決定に衛星観測がどのように貢献するかをテーマとしたセミナーが開催されました。日本と米国の宇宙機関の専門家、大気輸送モデルの研究者、衛星をはじめとする各種観測データやモデルの利活用を進める研究者などが登壇して現状の取組や課題を紹介しました。会場からは、温室効果ガス観測の意義や、各種観測インフラが災害防止などの目的にも使えるかといった質問があり、熱心に意見交換が行われました。



写真5 温室効果ガス排出量削減政策に貢献する衛星観測セミナー

(2) Youth for Climate Action: Stakeholder Engagement : 12/5 開催

Youth for Climate Action というパネルセッションが開催されました。シンガポール、韓国、マレーシア、台湾、日本などから若手がパネリストとして登壇し、気候問題に対してアジアの各国・地域で行っている活動、COP25 に対する印象などが熱心に語られました。パリ協定の交渉の行方に関心と期待をもち、世界各国の若手や専門家と直接対話するなど、COP25 参加の経験を最大限活かそうとする高い意欲が表れていました。



写真6 ユースクライメートアクション
(写真：衛星観測センター)

(3) Satellites in Support of National Greenhouse Gases Reporting and Global Stocktake : 12/6 開催

欧州宇宙機関 (ESA)、リモート・センシング技術センター (RESTEC)、森林全球観測と土地被覆ダイナミクス (GOF-C-GOLD)、国立環境研究所、JAXA、およびオランダのワグeningen大学による標記合同サイドイベントが開催されました。はじめにイベントの趣旨説明を兼ねて2019年温室効果ガスインベントリガイドラインの改訂の概要と、地球観測衛星委員会 (CEOS) からグローバルストックテイク*への貢献について解説されました。続いて、日本とモンゴルで実施されている、温室効果ガス観測とモデルを組み合わせた地域およびグローバルな温室効果ガス吸収・排出量推定の研究が紹介されました。その後、CO₂ 吸収源として重要な役割を果たす森林の炭素ストックを衛星観測から推定する ESA の取組、モザンビークにおける森林炭素の推定などの取組が紹介されました。最後に、会場からの質問を受けたのち、セッションの総括となるキーメッセージをとりまとめてサイドイベントを終了しました。

* パリ協定の目的および長期目標に向けた世界全体の温暖化対策の進捗状況を5年おきに確認し、取り組みを強化していく仕組み。



写真7 温室効果ガス観測とグローバルストックテイクに貢献する衛星観測（写真：衛星観測センター）

(4) Towards climate-resilient world: Challenges for Asia-Pacific Climate Change Adaptation Information Platform on disaster risk reduction : 12/11 開催

環境省、地球環境戦略研究機関（IGES）と国立環境研究所の共催で、気候変動により激甚化すると予測されている災害リスクに対するアジア太平洋気候変動適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）の取り組みについてのサイドイベントが開催されました。冒頭小泉進次郎環境大臣より2019年6月に立ち上げられたAP-PLATについて紹介があり、次いでAP-PLATに関わっている各機関の代表がそれぞれの取り組みについて講演しました。国立環境研究所からは、AP-PLATウェブサイトを通じた科学的知見の発信について、これまでの取り組みと今後の方向性を紹介しました。パネルディスカッションでは、アジア太平洋地域の各国からのAP-PLATに対する高い期待が示され、今後も関係機関のネットワークをさらに強めていくことで意見が一致しました。



写真8 サイドイベント冒頭の小泉環境大臣のあいさつ

5. 最後に

地球環境研究センターは、最近のCOPでは主としてGOSAT関連の取り組みを紹介してきました。今回、GOSATはもとより、国立環境研究所が関わる世界全体の炭素収支に関する研究や様々な手法による地球観測・研究について、各国の関係者と意見交換・情報交換を行うことができました。また、気候変動適応センターはアジア太平洋地域における気候変動適応に関する取り組みについて発信し、世界各国の関連機関と今後の方向性についての意見交換を行いました。次回のCOP26はイギリス（スコットランド）のグラスゴーで開催予定です。今後もCOP関係者に有益な情報提供を行うとともに、世界が必要としている研究を肌で感じるCOPという場に積極的に参加していきたいと思っております。

6. ウェブサイト

COP25の政府代表団からの報告は地球環境研究センターニュース2020年3月号 (<http://www.cger.nies.go.jp/cgernews/>) で取り上げられますので、ぜひこちらもご覧ください。

新刊紹介

国立環境研究所プロジェクト報告 第135号

「東南アジア熱帯林における高解像度3次元モニタリングによる生物多様性・機能的多様性の評価手法の開発
平成28～30年度」

本報告書は、垂直方向にも水平方向にも環境・生物の分布が不均一である熱帯林で、林床と林冠をつないだ観測を実現する観測方法の開発について取りまとめたものです。近年技術の発展が著しいドローンでの空撮や、環境中の水に含まれるDNAから種判別を行う環境DNA技術も取り入れています。本研究では、森林内の光環境に応じて植物の光合成活性などの機能が異なること、熱帯林の種多様性が林冠構造と関係があること、熱帯林内で採取した雨水等には主要な陸生哺乳類ばかりではなく樹上に分布する野生動物のDNAも含まれていることが明らかになりました。



○<http://www.nies.go.jp/kanko/tokubetu/setsume/sr-135-2019b.html>

表彰

「受賞のひとつこと」など、詳しくはホームページもご覧ください。 <http://www.nies.go.jp/index.html#tab5>

2018 Most Cited Paper Award for RCR

受賞者：吉田綾、寺園淳（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：E-waste recycling processes in Indonesia, the Philippines, and Vietnam: A case study of cathode ray tube TVs and monitors, Resources, Conservation & Recycling, 106, 48-58, 2016

一般社団法人廃棄物資源循環学会関東支部 優秀ポスター賞

受賞者：北村洋樹（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：一般廃棄物焼却灰の鉱物学的不溶化に関する基礎的検討，平成30年度 廃棄物資源循環学会関東支部 研究発表会，2019

Make Our Planet Great Again 活動業績に対する賞

受賞者：田中克政（地球環境研究センター）

受賞対象：地球温暖化に関するこれまでの研究活動と今後のフランスでの研究活動

日本藻類学会 第15回日本藻類学会研究奨励賞

受賞者：松崎令（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：氷雪性緑藻類の種分類学的研究

林業経済学会学生論文賞

受賞者：三ツ井聡美（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：奄美大島「金作原原生林」における利用ルールに関する訪問者の評価：ベスト・ワースト・スクエリングの適用, Journal of forest economics, 64 (3), 2018

公益財団法人海洋化学研究所 第3回海洋化学奨励賞（30歳未満）

受賞者：坂田昂平（地球環境研究センター）

受賞対象：エアロゾルのクリーン採取法の開発による微量金属の溶解性と大気化学反応の関連性の解明

日本都市計画学会 2018 年年間優秀論文賞

受賞者：松橋啓介、石河正寛（社会環境システム研究センター）

受賞対象：家庭と乗用車から生じる市区町村別 CO₂ 排出量に関する考察, Journal of the City Planning Institute of Japan, 53 (3), 913-918, 2018

環境科学会 論文賞

受賞者：田崎智宏（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：小売業者のリデュース取組はすすんだのか?, Environ. Sci., 29 (4), 191-200, 2016

WM 2019 Superior Paper Award

受賞者：山田一夫（福島支部）

受賞対象：New Project on the Analysis of Contamination Mechanisms of Concrete at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, WM2019 Conference, abstracts, 19511, 2019

廃棄物資源循環学会奨励賞

受賞者：石森洋行（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：遮水材の安全性向上と放射性 Cs の挙動解明

World Cultural Council Special Recognitions

受賞者：江波進一（環境計測研究センター）

受賞対象：大気環境科学への貢献

モンゴル環境・観光省 名誉賞

受賞者：王勤学（地域環境研究センター）

受賞対象：モンゴルの自然環境の保全や天然資源の有効利用への貢献

日本毒性学会奨励賞

受賞者：木村栄輝（環境リスク・健康研究センター）

受賞対象：分子－組織－行動レベルの統合的アプローチによる発達神経毒性研究

独立行政法人日本学術振興会

受賞者：南齋規介（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：特別研究員審査への貢献

一般社団法人環境放射能除染学会 学会賞

受賞者：大迫政浩（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：放射能汚染廃棄物等の適正処理に関する研究を通じた福島等の環境回復への貢献

※所属は受賞当時のものとなります。

令和2年度政府予算案における 国立環境研究所関係予算の概要

企画部企画室

令和2年度政府予算案においては、運営費交付金 163 億 1 千万円、施設整備費補助金 3 億 3 千万円が計上されました。令和2年度の運営費交付金は対前年度比 97.9%となっています。

研究所の運営費交付金の業務費は、第4期中長期計画期間（平成28年度～令和2年度）中に用いる算定ルールにより毎年度一定の割合で削減が求められていますが、気候変動適応、衛星観測（GOSAT-GW）等への対応として若干名の人員増が認められています。

衛星観測経費については、人員増の他、GOSAT-GWの地上データ処理システムの開発等が計上されました。

施設整備費補助金については、老朽化施設等更新工事の補助のための経費が引き続き計上されています。

なお、12月13日に閣議決定された令和元年度政府補正予算案においては、衛星観測経費及びエコチル調査経費が計上されています。

令和2年度は、第4期中長期計画の最終年度にあたります。環境政策への貢献を担う研究機関として、また、国内外の環境研究の中核的研究機関として、新たに国環研の業務に追加された気候変動適応業務の推進をはじめ、今期の目標達成はもとより、次期中長期計画に向けた検討も進めつつ、さらなる研究展開を図っていきます。

編 集 後 記

今回の特集の冊子を手にとりくださった皆様、web版を目にしてくださった皆様は、記事を読む前から、PM_{2.5}は大気中の粒子状物質のうち粒径が約2.5 μm以下のものである、と、ご存じだったでしょうか？2001年12月発行の国環研ニュースでは、PM_{2.5}について解説した執筆者が「ある人に“PM_{2.5}”と言った

ら、午後2時半のことですかと聞き返されたとか？何とか早くPM_{2.5}の問題を解決したいと思っている。」と書いていますが、その後約18年間で、PM_{2.5}の研究は大きく進みました。その成果を今回の特集から読み取っていただければと願っています。
(M.K.)

国立環境研究所ニュース Vol. 38 No. 6 (令和2年2月発行)

編 集 国立環境研究所 編集分科会
ニュース編集小委員会

発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

●バックナンバーは、ホームページからご覧になれます。
<http://www.nies.go.jp/kanko/news/>

無断転載を禁じます



この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。