

黒い煙に隠された鉄ナノ粒子 大気汚染の実態を磁性から解明

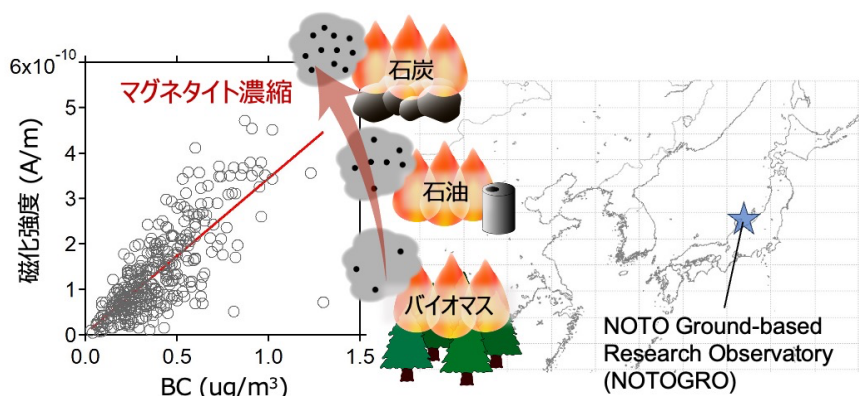
金沢大学環日本海域環境研究センターの松本篤准教授、京都大学大学院エネルギー科学研究科の土屋望助教、富山大学学術研究部都市デザイン学系の川崎一雄准教授らの共同研究グループは、**大気エアロゾル試料の磁性とブラックカーボン（BC）（※1）の観測という独自の組み合わせによって、新たな大気汚染の判別法を確立し、燃烧由来マグネタイトの動態を明らかにしました。**

PM_{2.5}（※2）中に含まれる酸化鉄、特にマグネタイト（※3）は燃烧排出に由来し、酸化ストレス増大による健康リスクや太陽光吸収・海洋プランクトンへの施肥効果を通じた気候変動への関与が指摘されています。しかし観測手法の制約から、その燃烧排出源や季節変動については、知見が不足していました。

本研究ではマグネタイトの磁性に着目し、能登半島に位置する観測サイト（※4）で採取した実大気フィルター試料の残留磁化（※5）を超伝導磁力計で非破壊的に検出することで、世界で初めて1日ごとという時間分解能でのマグネタイトの通年観測に成功しました。燃烧指標であるBCの観測データや詳細な化学分析結果との比較から、**マグネタイトが石炭燃烧と強く関連し、大陸からの越境汚染に伴って冬に濃縮する傾向があることが明らかになりました。**さらに、これまで光の吸収を利用して見積もられていたBCの総量に対して、燃烧由来マグネタイトが最大5%の寄与を持つと推定され、**無視できない温室効果を持つことも示されました。**

BCに対するマグネタイト含有量は、「石炭燃烧＞石油燃烧＞バイオマス燃烧」の関係を示し、この知見は気候影響のモデルシミュレーションや大気汚染の排出源判別に活用が期待されます。

本研究成果は、2025年5月22日に米国化学会が発行する学術誌『*Environmental Science & Technology*』のオンライン版に掲載されました。



【研究の背景】

PM_{2.5} などとして知られる大気エアロゾルは、多様な排出源を持ち、化学組成也多岐にわたります。そのため、それらの健康影響や気候変動への寄与を正しく理解・評価するためには、中身（成分）に着目したモニタリングが必要です。近年、注目を集めているエアロゾル成分の一つとして、マグネタイトに代表される酸化鉄が挙げられます。

マグネタイトは、同研究グループによる先行研究から、黄砂のような自然由来の鉱物エアロゾルにも多く含まれることが分かっていますが、人為活動を含む燃焼排出からも発生することが知られています。特に、燃料の燃焼に伴う排煙には PM_{2.5}（あるいは PM₁）のような微小粒子が多く含まれるため、呼吸器や嗅覚器を通して体内に侵入するリスクが高くなります。マグネタイトは、フェントン反応（※6）を通じて酸化ストレス増大に寄与すると考えられており、実際にヒトの脳内からも発見されていることから、アルツハイマー型認知症との関連も懸念されています。また、同じく燃焼排出に含まれる BC のように光吸収によって地球温暖化に寄与する一方で、特定の海域において鉄供給源（栄養源）となることでプランクトンの光合成を活性化し、温暖化抑制に寄与する可能性も指摘されています。

したがって、大気中マグネタイトの動態を理解することは、大気エアロゾルの健康・気候影響評価や将来予測のために重要であるといえます。しかし、これまでは観測手法が一般化されていないため、限られた期間・時間分解能での調査報告しかなく、どのような燃焼排出源と強く関連し、どのような季節変動を示すのか、明らかになっていませんでした。

本研究グループは、マグネタイトの磁性に着目し、松本篤准教授らが運営する能登大気観測サイトにて、2014～2015 年にかけて連続的に採取した実大気試料を用いて、大気中マグネタイトの調査を実施しました。さらに、BC 観測や詳細な化学分析（炭素同位体分析や金属元素分析など）の結果と比較することで、マグネタイトと燃焼排出源の関係や季節変動への寄与を検証しました。

【研究成果の概要】

本研究では、試料中のマグネタイト含有量を反映する「残留磁化」を測定することで、世界で初めて日単位の分解能で、通年での大気中マグネタイト挙動の変動を明らかにしました（図 1）。その結果、BC 濃度との間には相関が見られ、マグネタイトの変動が燃焼排出と関連していることが示唆されました。しかし、ある程度のばらつきも確認されており、一部期間においては BC 濃度のみが顕著に増加する現象も見られました（2014 年 7 月末や 2014 年 10 月後半）。

炭素同位体やレボグルコサンおよびマンノサン（※7）の分析結果から、このような BC が卓越する期間では、大規模なバイオマス燃焼イベント（2014 年 7 月末：シベリア森林火災、2014 年 10 月後半：中国北東部での野焼き）の影響があったことが明らかになりました。また、化石燃料（石油・石炭）の燃焼に関連するバナジウム（V）および鉛（Pb）濃度の分析結果との比較から、BC 濃度に対する磁化強度が「バイオマス燃焼 < 石油燃焼 < 石炭燃焼」の順に増加する傾向があることが統計的に示されました。磁化強度/BC 比は、冬に増加（夏に減少）する傾向が見られましたが、上記の発見から、こ

の現象は大陸からの越境汚染に起因すると考えられます（日本では石油燃焼が優勢であるのに対し、中国では石炭燃焼が優勢）。

また、試料の磁化強度に基づきマグネタイトの質量濃度、さらに光吸収への寄与を算出したところ、BC の測定波長（670 nm）において、最大で BC の 5%程度となることが分かりました。この結果は、従来の光吸収に基づく BC 観測値が、マグネタイトによって過大評価されていたことを示唆しています。

【今後の展開】

本研究では、大気エアロゾルの磁性に着目し通年観測を行い、大気中マグネタイト粒子の動態について新たな知見が得られました。燃焼排出源（バイオマス・石油・石炭）ごとに推定されたマグネタイト/BC 濃度比は、気候影響のモデルシミュレーションにおける精度向上に貢献が期待できるほか、比較的容易に測定できる燃焼源識別の指標としてモニタリングへの応用も期待できます。今後は、自動車交通や製鉄所などからのマグネタイト排出にも焦点を当てた、より包括的な調査も必要であると考えられます。

本研究は、JST SPRING (JPMJSP2135)、JST CREST (JPMJCR18H4)、科学研究費補助金 (JP26701001)、および環日本海域環境研究センター共同研究課題 (No. 18007, 19015) の支援を受けて実施されました。

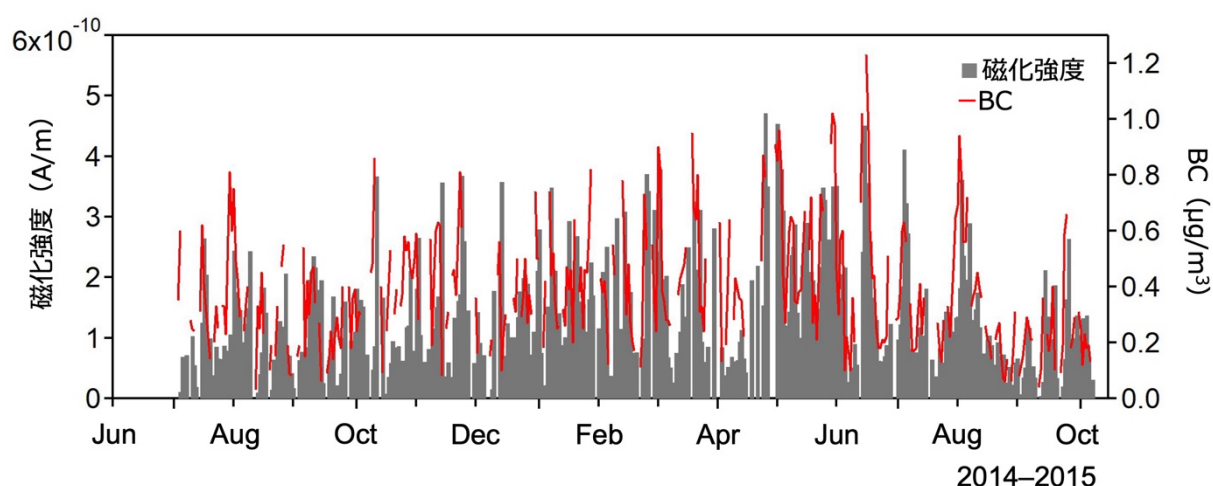


図 1. 能登大気観測サイトにて得られた実大気フィルター試料の残留磁化強度および BC 濃度の変動。

【掲載論文】

雑誌名 : *Environmental Science & Technology*

論文名 : Linking Combustion-Derived Magnetite and Black Carbon: Insights from Magnetic Characterization of PM_{2.5} in Downwind East Asia

(燃焼由来マグネタイトとブラックカーボンの関連 : 東アジア風下地域における PM_{2.5} の磁気調査に基づく発見)

著者名 : Nozomu Tsuchiya, Fumikazu Ikemori, Kazuo Kawasaki, Reina Yamada, Mitsuhiro Hata, Masami Furuuchi, Yoko Iwamoto, Naoki Kaneyasu, Yasuhiro Sadanaga, Takahiro Watanabe, Takayuki Kameda, Masayo Minami, Toshio Nakamura, and Atsushi Matsuki

(土屋望、池盛文数、川崎一雄、山田怜奈、畑光彦、古内正美、岩本洋子、兼保直樹、定永靖宗、渡邊隆広、亀田貴之、南雅代、中村俊夫、松本篤)

掲載日時 : 2025 年 5 月 22 日にオンライン版に掲載

DOI : 10.1021/acs.est.4c14187

URL : <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c14187>

【用語解説】

※1 ブラックカーボン

BC または黒色炭素粒子とも呼ばれる、不完全燃焼によって生じる成分。黒い排煙に多くみられ、PM_{2.5}の粒子の中でも黒い色を持つことから、太陽の光を吸収し大気を加熱する。CO₂などと並んで重要な温室効果物質の一つとされている。

※2 PM_{2.5}

PM は particulate matter (粒子状物質) の略。なかでも PM_{2.5} は、空気動力学径が 2.5 μm 以下の粒子状物質の総称で、一般的に人為排出の指標とみなされる。

※3 マグネタイト

Fe₃O₄ で表される酸化鉄の一種。黄砂などに含まれるものもあれば、化石燃料中に含まれる黄鉄鉱 (FeS₂) が高温条件下で酸化されて生成するものもある。

※4 能登大気観測サイト

Noto Ground-based Research Observatory (NOTOGRO)。石川県珠洲市 (37.45° N、137.36° E) に位置する金沢大学能登学舎の一角に観測拠点を構えている。

※5 残留磁化

室温条件下にて、パルス磁化器を用いて試料に一定強度の直流磁場を印加することで獲得させる。本研究では 1200 mT の磁場印加後、逆方向に 300 mT の磁場を印加することでマグネタイト由来の残留磁化を得た。

※6 フェントン反応

2 価の鉄イオンと過酸化水素 (H₂O₂) によって、強力な酸化剤であるヒドロキシルラジカルを生成する反応 (Fe²⁺ + H₂O₂ → Fe³⁺ + OH⁻ + OH[·])。

※7 レボグルコサン・マンノサン

多糖類の熱分解によって生成する単糖無水物であり、バイオマス燃焼の指標とされる。