

## 人間活動によって放出される鉄エアロゾルが 多面的に気候へ影響を及ぼすことを発見

名古屋大学大学院環境学研究科の 松井 仁志 助教、東京大学大学院理学系研究科の 茂木 信宏 助教、米コーネル大学の Natalie Mahowald 教授らの研究グループは、化石燃料の燃焼等の人間活動によって大気中に放出される鉄の微粒子（エアロゾル）が、海洋への沈着と太陽放射の吸収を通して、多面的に気候へ影響を及ぼし得ることを、観測および地球全体の大気を対象とした数値シミュレーションにより発見しました。今後の気候変動予測の高精度化に向けて、この研究成果が、その不確実性を減らす重要な知見となることが期待されます。

なお、この研究成果は、平成 30 年 4 月 23 日付（日本時間 18 時）英国オンライン科学雑誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

この研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業（26740014,17H04709,26241003,16H01770,15H05465）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1403,2-1703）、国立極地研究所 GRENE（グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス）北極気候変動研究事業・ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

- ・新しい測定法による黒色酸化鉄（マグネタイト）<sup>注1)</sup>の多地点観測と地球全体の大気を対象とした数値シミュレーションにより、人間活動によって放出される鉄（人為起源鉄）エアロゾルの大気中量が、従来の見積りよりも約8倍も多いことを発見した。
- ・人為起源鉄が、大気から海洋への主要な鉄供給源の1つである可能性を明らかにした。
- ・人為起源鉄が、地球システムの様々なプロセス（大気加熱・循環、海洋生態系、炭素・水循環、雪氷融解など）を通して、地球の気候に対して重要な役割を果たしていることが示唆される。

## 【研究背景と内容】

地球の表面積の7割を占める海洋は、現在の気候において人為的に放出される二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の大きな吸収源となっており、人間活動による大気環境の急激な変化を抑制する役割を果たしています。大気中の鉄を含む微粒子（エアロゾル）は、溶存鉄<sup>注2)</sup>の海洋への供給源となり、主に南大洋域などの外洋域における海洋の一次生産とCO<sub>2</sub>の吸収を変化させ、地球規模の炭素循環に影響を及ぼすと考えられています。化石燃料の燃焼等によってエアロゾルとして大気中に放出される鉄（人為起源鉄）は、海洋への溶存鉄の供給源の1つとして知られていましたが、その全球海洋表層への沈着量は、土壌起源の鉱物性ダスト<sup>注3)</sup>に含まれる鉄や森林火災由来の鉄（自然起源鉄）の沈着量に比べて少ないと考えられてきました。

今回、研究グループは、独自開発の新たな測定技術を用いた黒色酸化鉄の大気中濃度の多地点観測と、これまで開発してきた全球エアロゾルモデル<sup>注4)</sup>の数値シミュレーションにより、人為起源鉄の全球排出量と大気中濃度が、従来研究の見積りのそれぞれ約5倍、約8倍になることを発見しました（図1a）。この新しい全球排出量を用いた数値シミュレーションによって、世界各地（特に南半球）の地表付近の大気中鉄濃度や海洋への鉄沈着量の観測結果の再現性が大きく向上しました。また、この数値シミュレーションでは、海洋の一次生産が鉄律速であると考えられている南大洋域<sup>注5)</sup>において、1) 溶存鉄の全沈着量（全起源の総量）が、従来の見積りより約50%増大すること（図1b）、2) 溶存鉄の全沈着量に対する人為起源鉄の寄与が、鉱物性ダストに含まれる鉄や森林火災由来の鉄の寄与よりも大きくなり得ること（従来の見積りを用いた場合の9%から39%に増大）（図1b）、3) 産業革命前から現在までの溶存鉄の沈着量の増大に対する人為起源鉄の寄与が、南大洋の7割を超える海域で鉱物性ダスト起源鉄の寄与を上回ること（図2）が推定されました。これらの結果は、大気から海洋への鉄供給源として、自然起源鉄の寄与が支配的だと考えられてきた従来知見を刷新するものです。さらに、黒色酸化鉄の大気および雪氷面における加熱効果の全球評価を行い、他の光吸収性エアロゾル（ブラックカーボン、ブラウンカーボン<sup>注6)</sup>）に対して、無視できない加熱効果を持つことを明らかにしました。特にアジア域においては、ブラウンカーボンと同程度、もしくはそれ以上の大気・雪氷面加熱効果を持つと推定され、今後の温暖化や水循環・大気循環に関わる気候研究において、黒色酸化鉄を考慮する必要性を示しました。

これらの結果は、従来の気候変動研究では、それほど注目されてこなかった人為起源鉄が、短い時間スケール（数時間～数週間程度）での大気加熱効果と、より長い時間スケール（数ヵ月～数千年程度）での海洋生態系を介した大気冷却効果の両面で、地球の気候に対して重要な役割を果たしている可能性を示しています（図3）。

なお、この研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業（26740014, 17H04709, 26241003, 16H01770, 15H05465）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1403, 2-1703）、国立極地研究所 GRENE（グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス）北極気候変動研究事業・ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援のもとで行われました。また、第一著者は、日本学術振興会海外特別研究員制度の支援を受けました。

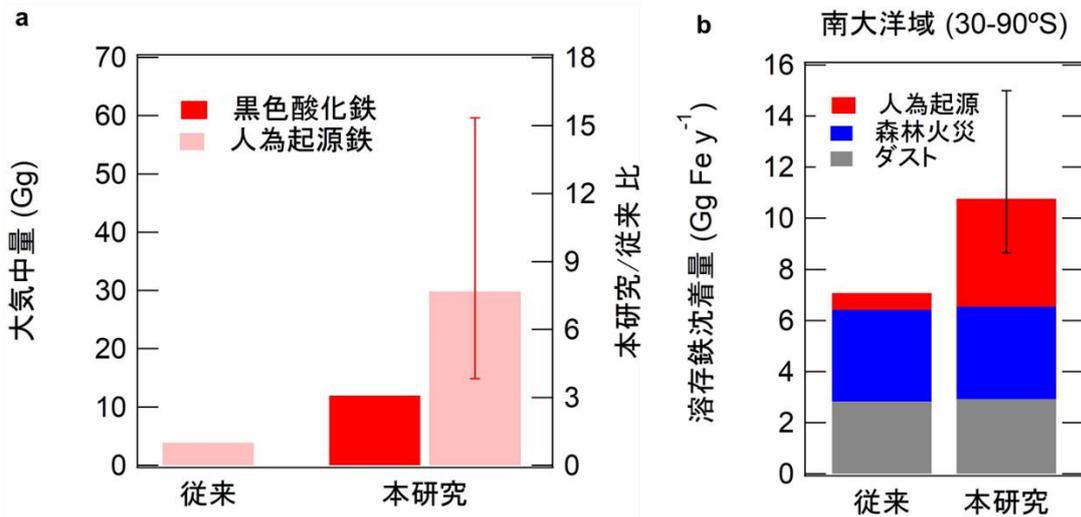


図 1. 人為起源鉄の大気中量と南大洋域への沈着量。パネル a は、黒色酸化鉄と人為起源鉄の大気中量について、従来の排出量データを使用した見積りと本研究での見積りを示している。パネル b は、溶存鉄の南大洋域への沈着量に対する各起源の寄与を示している。エラーバーは、黒色酸化鉄の大気中量から人為起源鉄の大気中量を推定する際の誤差幅を示している。

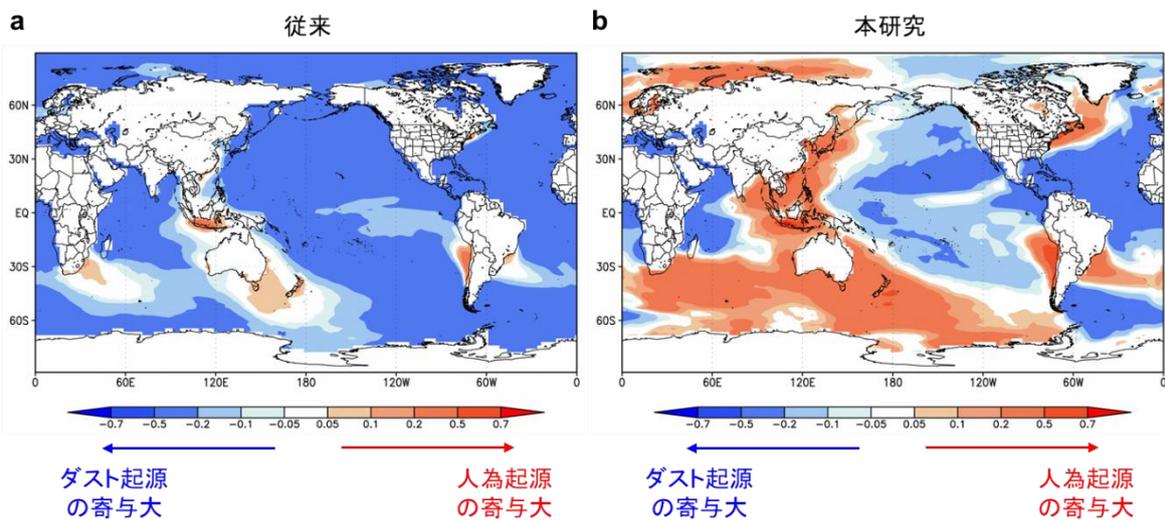


図 2. 産業革命前から現在に至る溶存鉄の沈着量の増大に対する人為起源鉄と鉱物性ダスト起源の鉄の重要性。赤色（パネル b の南大洋広域、アジア周辺域など）は人為起源鉄の方が鉱物性ダスト起源の鉄よりも寄与が大きい海域、青色（パネル b の大西洋、東太平洋域など）は鉱物性ダスト起源の鉄の方が人為起源鉄よりも寄与が大きい海域を示している。

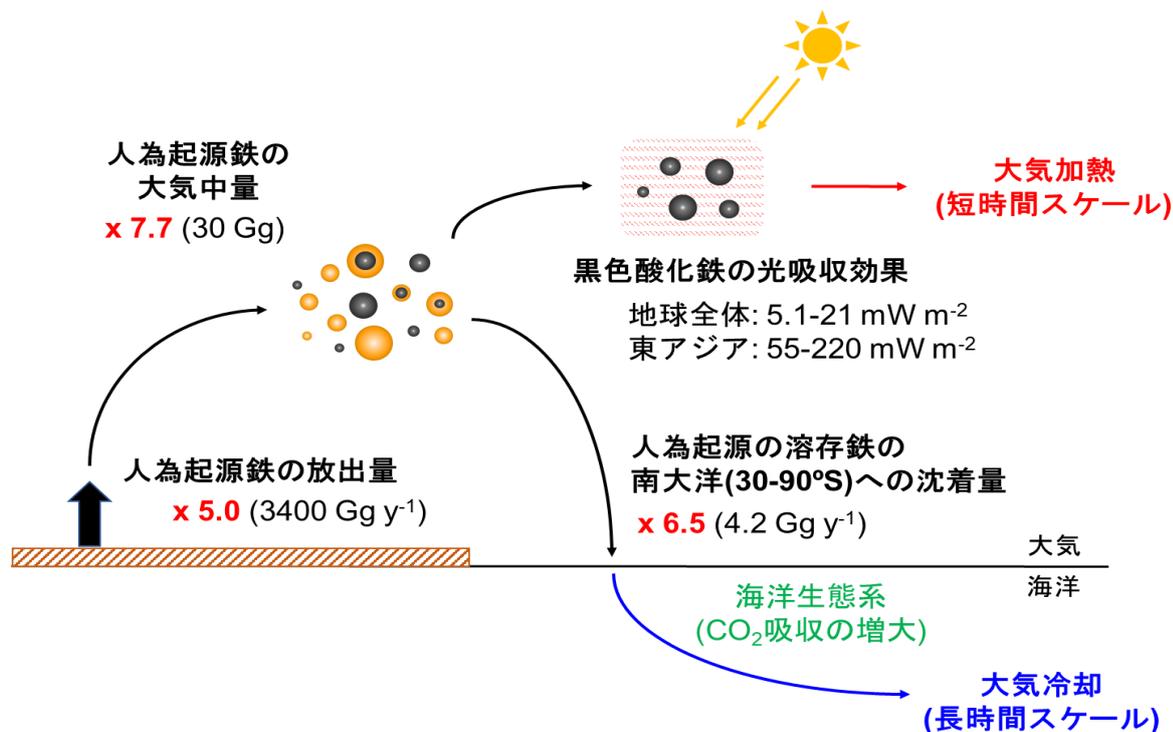


図 3. 研究成果の概略説明図。黒で示した値は、本研究で見積もられた鉄の排出量 ( $\text{Gg y}^{-1}$ )・大気中量 ( $\text{Gg}$ )、黒色酸化鉄の加熱効果 ( $\text{mW m}^{-2}$ )、南大洋への溶存鉄の沈着量 ( $\text{Gg y}^{-1}$ ) を示している。赤で示した値は、従来の排出量データを使用した見積りに対する本研究の見積りの増大比を示している。

### 【成果の意義】

本研究は、人為起源の鉄が地球システムの様々なプロセス（大気加熱・循環、海洋生態系、炭素・水循環、雪氷融解など）を通して、様々な時間スケールで過去から将来にかけての地球の気候に対して重要な役割を果たすことを示唆しています。また、今後の気候変動予測・政策において、人為起源の鉄の発生源や排出量、大気中の濃度の現状と将来変化を理解・考慮することも重要であることを示唆しています。将来的に人為起源の鉄が減少した場合<sup>注7)</sup>、大都市域周辺に注目する領域的な視点では、大気質の改善や大気の冷却（大気加熱効果の減少）に寄与すると考えられます。一方、地球全体を見る視点では、外洋域の海洋の一次生産とそれによるCO<sub>2</sub>の吸収を弱体化させ、大気CO<sub>2</sub>の増大と大気加熱に寄与することが考えられます。今後の研究では、世界中のより多くの地点での人為起源黒色酸化鉄の観測データを取得し、黒色酸化鉄の発生源、溶存鉄沈着量に占める人為起源の寄与、大気加熱効果に関するより精密な観測的理理解が求められるとともに、多くの数値モデルで人為起源鉄が関わる複雑なプロセスや放出量を考慮することで、気候変動の要因分析や予測に反映させていくことが求められます。

### 【用語説明】

1. 黒色酸化鉄（マグネタイト）：四酸化三鉄 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) の鉱物名。最近、東京大学が開発した単一粒子レーザー白熱法により、人為起源の粒子について選択的に質量濃度・粒径分布の観測が可能となった。

2. 溶存鉄：植物プランクトンの一次生産（光合成）で利用可能な水への溶解度が高い鉄。
3. 鉱物性ダスト：乾燥地域の砂漠や土壌などの地表面から風によって巻き上げられる粒子。
4. 全球エアロゾルモデル：地球全体の大気を対象とした数値モデル。大気中の数 nm から数十  $\mu\text{m}$  の大きさを持つエアロゾルの排出、大気中の輸送・変質、降水などによる除去といった過程を考慮して、エアロゾルの大気中の時空間分布を計算する。本研究で用いた全球エアロゾルモデルは名古屋大学が開発した。
5. 海洋の一次生産が鉄律速であると考えられている南大洋域：  
本研究では南緯 30~90 度の海域と定義。栄養塩（窒素など植物プランクトンに必要な栄養）の濃度が高いにも関わらず、植物プランクトン量が低い海域にあたる。このような海域では、微量栄養素である鉄が不足しており、鉄の不足が植物プランクトンの生産速度を決める要因となっていると考えられている。
6. ブラックカーボン、ブラウンカーボン：  
ディーゼルエンジンの排気ガス、石炭の燃焼、森林火災、バイオマス燃料の燃焼などによって発生する黒色・茶褐色の炭素を主成分とするエアロゾル。
7. 将来的に人為起源の鉄が減少した場合：  
黒色酸化鉄は、自動車のエンジンや製鉄工程など、高温プロセスを経ることで発生する可能性が指摘されている。しかし、どの過程からどの程度の黒色酸化鉄が発生するかはよくわかっておらず、比較的発生過程がわかっている炭素性エアロゾルとは異なる発生過程を持つ可能性がある。人為的に放出される炭素性エアロゾルは、将来的に減少していくと推定されているが、黒色酸化鉄が同じように減少するかどうかは、まだよくわかっていない。

#### 【論文情報】

雑誌名： *Nature Communications*

論文タイトル： Anthropogenic combustion iron as a complex climate forcer

著者： Hitoshi Matsui\*, Natalie M. Mahowald, Nobuhiro Moteki, Douglas S. Hamilton, Sho Ohata, Atsushi Yoshida, Makoto Koike, Rachel A. Scanza, and Mark G. Flanner

DOI： 10.1038/s41467-018-03997-0