

## 人間活動によって放出される大気微粒子が 南大洋域への主要な鉄供給源となることを解明 ～地球温暖化予測の高度化に期待～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科の松井 仁志 准教授、リウ ミンシュ 研究員らの研究グループは、アメリカコーネル大学、アメリカ海洋大気庁などとの共同研究で、南大洋域における人為起源鉄（化石燃料の燃焼等の人間活動によって放出される微粒子に含まれる鉄）の大気濃度が、従来研究の推定と比べて約 10 倍多いことを新たに発見しました。

南大洋などの外洋域の海洋表層では、海洋生態系が光合成等のために利用する鉄が不足しており、大気から海洋への鉄供給が、大気中の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の海洋への吸収を決める重要な役割を果たしていると考えられています。しかし、この海域において、広域的な人為起源鉄の観測例はこれまでなく、その大気濃度や海洋への供給量はよく分かっていませんでした。

本研究では、人為起源鉄に関する新たな広域航空機観測と、全球気候シミュレーションによって、南大洋域において人為起源鉄が大気から海洋への鉄供給の主要な寄与を占め得ることを明らかにしました。そして、この海域において、現在から将来にかけて、大気から海洋への鉄供給量が大幅に減少する予測を初めて示しました。この結果は、将来的にこの海域において、大気 CO<sub>2</sub> の海洋への吸収が抑制され、地球温暖化の加速に寄与する可能性を示唆しており、今後の地球温暖化・気候変動予測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。

本研究成果は、2022 年 4 月 13 日午後 6 時（日本時間）付で気候科学分野の国際学術誌「npj Climate and Atmospheric Science」に掲載されました。

本研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費、文部科学省・北極域研究加速プロジェクト、公益財団法人木下記念事業団・木下基礎科学研究基金助成金などの支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

- ・新たな広域航空機観測と数値シミュレーションによって、南大洋域における人間活動由来の微粒子に含まれる鉄（人為起源鉄）の大気濃度が、従来研究の推定と比べて約 10 倍多いことを初めて実証した。
- ・人為起源鉄が、南大洋域における大気から海洋への鉄供給の主要な寄与を占め得ることを明らかにした（従来は自然起源の鉄粒子が主要な起源と考えられてきた）。
- ・この海域において、将来的に大気から海洋への鉄供給量が、大幅に減少する予測を初めて示した。鉄供給量が減少すると、海洋表層の一次生産や二酸化炭素の大気から海洋への吸収が抑制され、地球温暖化の加速に寄与するなど、将来の気候予測にも大きな影響を及ぼす可能性がある。

## 【研究背景と内容】

地球の表面積の 7 割を占める海洋は、現在の地球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機能を果たしています。大気中の微粒子（エアロゾル）に含まれる鉄は、大気から海洋に沈着すると、海洋表層の一次生産を変化させ、地球の炭素循環や長期的な（数十～数百年スケールの）気候変化に影響を及ぼすと考えられています。特に、南大洋などの外洋域では、海洋の一次生産において可溶性鉄<sup>注1)</sup>が不足しており、大気から海洋への鉄供給が重要な役割を果たす海域だと認識されています。

従来の研究では、大気から海洋に沈着する可溶性鉄の起源として、自然起源の鉄粒子<sup>注2)</sup>が主要な起源であると考えられてきました。一方、近年の研究では、北太平洋や北大西洋において、化石燃料の燃焼等によって放出する人為起源の微粒子に含まれる鉄（人為起源鉄）も、可溶性鉄の重要な起源となることが示唆されてきています。しかし、これまで南大洋域において広域的な人為起源鉄の観測例はなく、この海域において人為起源鉄の大気濃度や大気から海洋への沈着量<sup>注3)</sup>、可溶性鉄の全沈着量（自然起源鉄＋人為起源鉄）に占める人為起源鉄の寄与などはよく分かっていませんでした。

本研究では、これらの点を明らかにするために、南大洋域を含む広域的な航空機観測によって大気中の人為起源鉄を測定した新たな観測結果<sup>注4)</sup>（図 1）と、全球気候モデル<sup>注5)</sup>による数値シミュレーションとの詳細な比較を行いました。そして、従来の研究に基づく推定では、南大洋域（本研究では南緯 30 度以南の海域と定義）における人為起源鉄の大気質量濃度を 1 桁程度過小推定していることを新たに発見しました（図 1）。この結果は、南半球における人為起源鉄の大気への放出量が、これまで考えられてきた放出量よりも大幅に多いことを示唆しており、南大洋域における人為起源鉄の存在量を制約するための極めて重要な知見となります。

また、観測された人為起源鉄の濃度を再現できるように南半球の人為起源鉄の放出量を増大させた計算（「本研究」と、従来研究に基づく計算（「従来」と）の比較から、南大洋域における人為起源の可溶性鉄の沈着量が、従来研究の推定よりも 10 倍以上多い可能性があることを明らかにしました（図 2）。この増大に伴って、南大洋域における可溶性鉄の全沈着量に占める人為起源鉄の寄与は 11%から 61%に増大し、この海域に

において人為起源鉄の沈着量が自然起源鉄の沈着量よりも多い可能性があることを示しました（図2）。この結果は、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の知見を刷新するものです。

さらに、人為起源鉄について複数の将来放出量シナリオを作成し、南大洋域における可溶性鉄の全沈着量が、現在と比較して将来的に（2100年に）どのように変化するかを予測しました。人間活動に伴う微粒子の排出規制等によって、人為起源鉄は将来的に減少していくことが予想されるのに対し、自然起源鉄はそれと比較して将来の変化が小さいと考えられています。その結果、現在の気候において人為起源鉄の寄与が小さい「従来」の計算では、将来の可溶性鉄の全沈着量はほとんど（5～10%しか）減少しないのに対し、現在の気候において人為起源鉄の寄与が大きい「本研究」の計算では、将来の可溶性鉄の全沈着量が大幅に（21～55%）減少することが明らかになりました（図3）。これらの結果は、可溶性鉄の沈着量の将来変化において、人為起源鉄の変化が主要な役割を果たし得ることを示しています。また、将来の可溶性鉄の沈着量の変化を予測するためには、現在の可溶性鉄の沈着量の起源寄与を正確に理解することが不可欠であることを示しています。

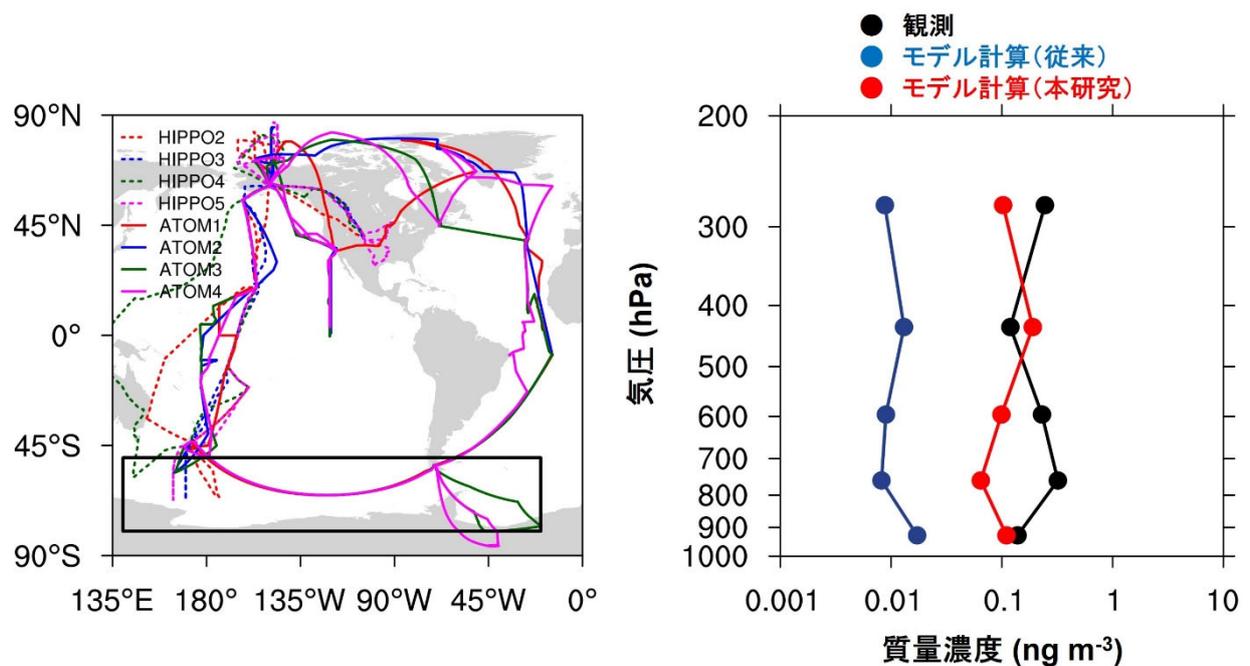


図1. (左) 人為起源鉄を測定した航空機観測の飛行経路。2009年から2018年にかけて8回の航空機観測キャンペーンが行われた。(右) 南半球の外洋域（左図のボックス内）における人為起源鉄の観測（黒色）と気候モデル計算（青色、赤色）の高度分布。航空機観測では、人為起源の黒色の酸化鉄粒子（マグネタイト）を測定しており（用語説明の注4を参照）、この鉱物の質量濃度について観測と気候モデル計算の比較を行った。8回の航空機観測キャンペーンの平均的な高度分布を示す。青色（従来）は従来研究で使用されてきた人為起源鉄の放出量データを用いたモデル計算結果、赤色（本研究）は南半球の人為起源鉄の放出量データを増大させたモデル計算結果を示す。

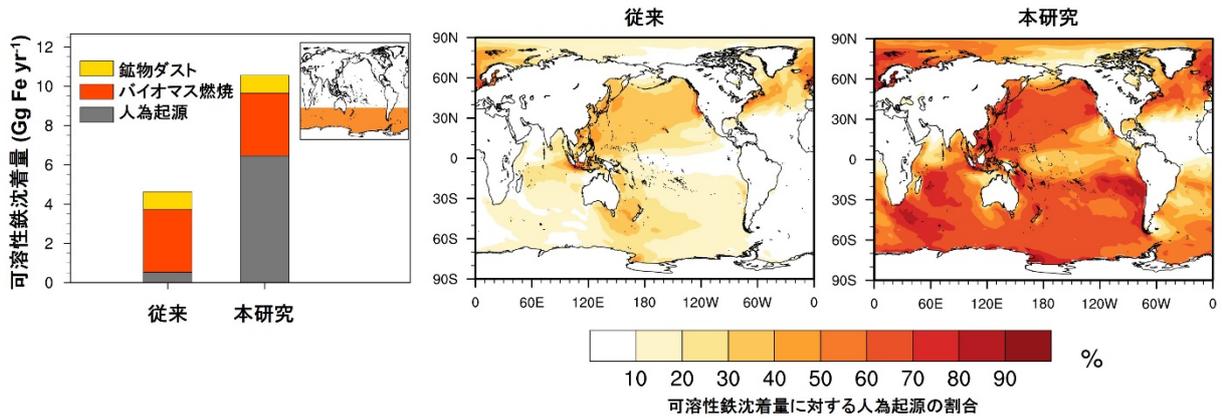


図 2. (左) 南大洋域 (南緯 30 度以南) における可溶性鉄の沈着量。「従来」と「本研究」の 2 つの計算結果について、人為起源 (灰色)、バイオマス燃焼起源 (赤色)、鉱物ダスト起源 (橙色) の可溶性鉄の沈着量を示す。(中・右) 全起源 (人為起源 + バイオマス燃焼起源 + 鉱物ダスト起源) の可溶性鉄の沈着量に対する人為起源鉄の割合の全球分布。「従来」と「本研究」の 2 つの計算結果を示す。

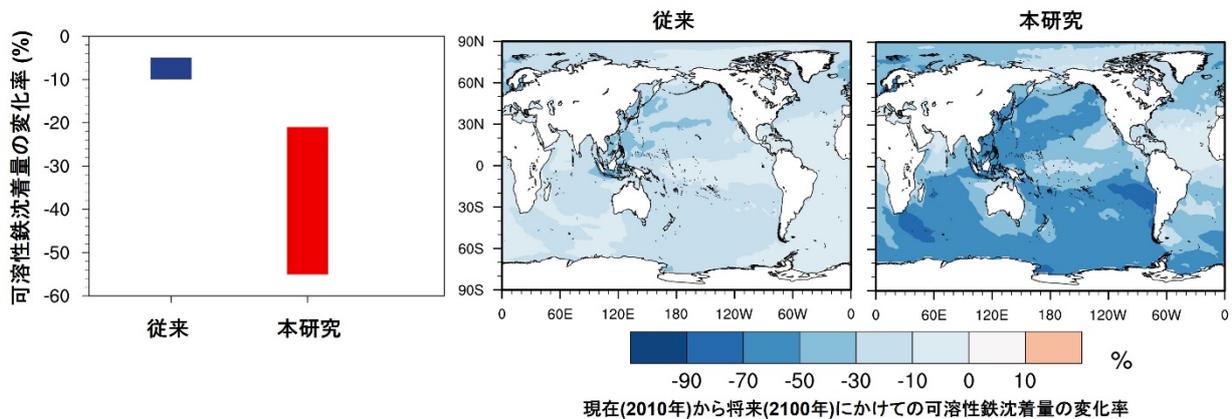


図 3. (左) 南大洋域 (南緯 30 度以南) における現在 (2010 年) から将来 (2100 年) にかけての可溶性鉄の沈着量の変化率。「従来」と「本研究」の 2 つの計算について、複数の人為起源鉄の将来放出量シナリオを用いた計算結果の推定幅を示す。(中・右) 現在 (2010 年) から将来 (2100 年) にかけての可溶性鉄の沈着量 (全起源の合計) の変化率の全球分布。「従来」と「本研究」の 2 つの計算について、現在からの変化率が最も大きな将来放出量シナリオを用いた計算結果を示す。

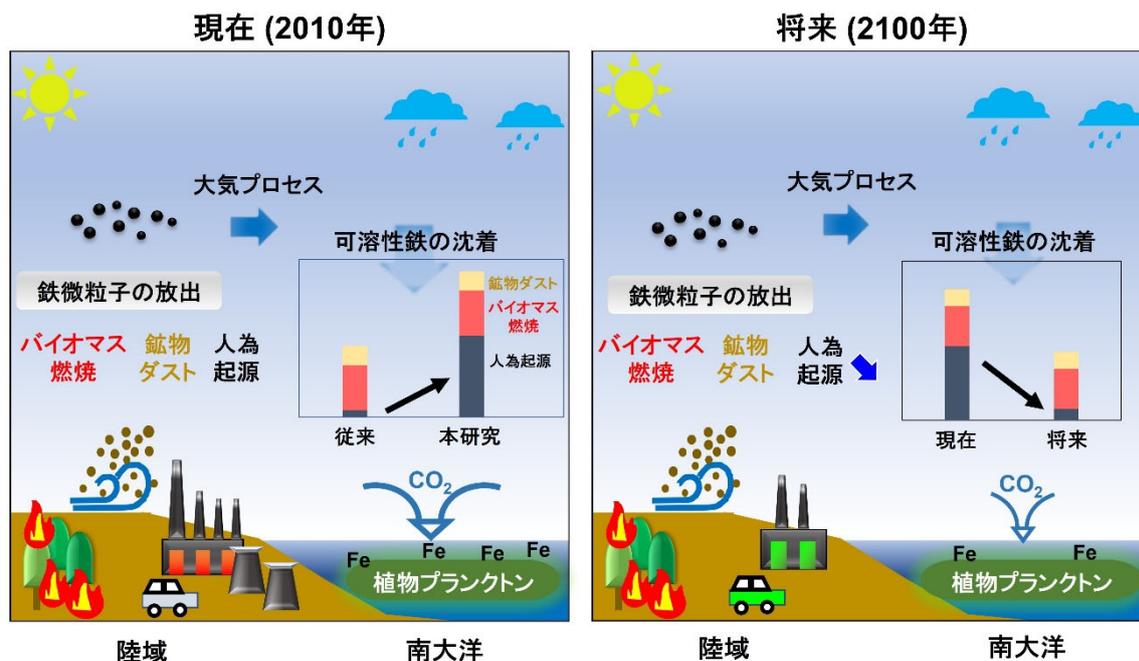


図 4. 研究成果の概要図。(左) 従来研究に基づく推定と比較して、本研究の推定の方が南大洋域における人為起源鉄の可溶性鉄の沈着量が大幅に多いことを示す。(右) 現在から将来にかけて人為起源鉄の放出・生成量が減少し、南大洋域における可溶性鉄の沈着量が大幅に減少することを示す。この鉄沈着量の減少によって、海洋の一次生産が減少し、大気 CO<sub>2</sub> の海洋への吸収が抑制される可能性が示唆される。

### 【成果の意義】

本研究では、南大洋域における人為起源鉄の大気濃度が、従来研究の推定と比べて約 10 倍多いことを初めて実証しました。また、この海域において、人為起源鉄が可溶性鉄の全沈着量に対して主要な寄与を占め得ることを明らかにしました。南大洋域において、可溶性鉄の全沈着量に対する人為起源鉄の寄与を解明することは、この海域における将来（50～100 年後）の可溶性鉄の沈着量の推定を大きく変え得る重要な知見となります。本研究で示したように、現在の気候において人為起源鉄の寄与が大きい場合は、現在から将来にかけて可溶性鉄の沈着量が大幅に減少することが予想され（図 3）、海洋表層の一次生産を減少させ、大気 CO<sub>2</sub> の海洋への吸収を抑制することで、将来の地球温暖化の加速に寄与する可能性があります（図 4）。このように、本研究の成果は、人間活動による海洋への鉄供給が海洋生態系や大気－海洋間の CO<sub>2</sub> の交換に与える影響を正しく理解する上で重要な知見となります。

今後の研究では、南半球での人為起源鉄の観測事例を増やし、人為起源鉄の放出量の推定を改良していくことが必要です。また、人為起源鉄と自然起源鉄のそれぞれについて、可溶性鉄の放出・生成過程、空間分布、輸送・沈着過程等の理解を向上させていくことも重要です。そして、それらの知見を導入した気候モデルの計算によって、鉄粒子の海洋への沈着量と温暖化や炭素循環等の気候変化・気候変動への影響の予測を高度化していくことが求められます。

## 【用語説明】

### 注 1) 可溶性鉄 :

海洋表層の植物プランクトンの一次生産(光合成)で利用可能な、水に溶けやすい鉄。

### 注 2) 自然起源の鉄粒子 :

砂漠域などから風によって巻き上げられる粒子(鉱物ダスト)に含まれる鉄や、森林火災などのバイオマスの燃焼によって放出される粒子に含まれる鉄。

### 注 3) 大気から海洋への沈着量 :

大気中に浮遊する微粒子が、降水や重力沈降などによって海表面まで落下し、海洋中に取り込まれる(大気中から除去される)質量フラックス。本研究で着目する南大洋域の鉄を含む微粒子の多くは、陸上の放出源から大気中に放出され、大気中を長距離輸送されたのちに、南大洋域で大気中から除去される。

### 注 4) 大気中の人為起源鉄を測定した新たな観測結果 :

本研究では、米国海洋大気庁が中心となって実施した人為起源鉄の観測結果を用いた。この航空機観測では、単一粒子レーザー白熱法によって、大気中に浮遊する人為起源の黒色の酸化鉄粒子(マグネタイト:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )を選択的に測定した。人為起源のマグネタイトは、製鉄所、自動車の排気、自動車や電車のブレーキ摩耗、その他さまざまな工業活動など、多くの放出源から放出されると考えられているが、どの起源がどの程度重要かはまだよく分かっていない。本研究では、マグネタイトを人為起源鉄の指標として用い、マグネタイト以外の人為起源鉄がマグネタイトと同様に過小推定されていると仮定し、人為起源の可溶性鉄の沈着量を推定した。

### 注 5) 全球気候モデル :

地球全体の大気を緯度・経度・高度の 3 次元方向に細かい格子に分割し、それぞれの格子での気象要素(気温、風速など)や物質の濃度(水蒸気、微量気体成分、微粒子など)の時間変化を、流体力学、熱力学、化学などの法則に従って計算する数値モデル。本研究で用いた名古屋大学の全球気候モデル(CAM-ATRAS)は、微粒子の大気への放出、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、数ナノメートルから数十マイクロメートルの大きさを持つ大気微粒子の時空間分布を計算する。本研究では、人為起源、バイオマス燃焼起源、鉱物ダスト起源の微粒子に含まれる鉄の時空間分布や沈着量を計算した。

### 【論文情報】

雑誌名 : npj Climate and Atmospheric Science

論文タイトル : The underappreciated role of anthropogenic sources in atmospheric soluble iron flux to the Southern Ocean

著者 : \*Mingxu Liu<sup>1</sup>, \*Hitoshi Matsui<sup>1</sup>, Douglas S. Hamilton<sup>2</sup>, Kara D. Lamb<sup>3,4</sup>, Sagar D. Rathod<sup>5</sup>, Joshua P. Schwarz<sup>4</sup>, and Natalie Mahowald<sup>2</sup>

1 名古屋大学大学院環境学研究科

2 米国コーネル大学

3 米国コロラド大学

4 米国海洋大気庁地球システム研究所

5 米国コロラド州立大学

DOI : 10.1038/s41612-022-00250-w

URL : <https://www.nature.com/articles/s41612-022-00250-w>

### 【謝辞】

本研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業(17H04709、19H04253、19H05699、19KK0265、20H00196、20H00638)、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20202003)、文部科学省・北極域研究加速プロジェクト(ArCS II : JPMXD1420318865)、公益財団法人木下記念事業団・木下基礎科学研究基金助成金などの支援のもとで行われたものです。

### 【関連論文】

雑誌名 : npj Climate and Atmospheric Science (2021)

論文タイトル : Global-scale constraints on light-absorbing anthropogenic iron oxide aerosols

著者 : Kara D. Lamb, Hitoshi Matsui, Joseph M. Katich, Anne E. Perring, J. Ryan Spackman, Bernadett Weinzierl, Maximilian Dollner, and Joshua P. Schwarz

DOI : 10.1038/s41612-021-00171-0

URL : <https://www.nature.com/articles/s41612-021-00171-0>

雑誌名 : Nature Communications (2018)

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

URL : <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03997-0>