

令和元年6月14日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00530

研究課題名(和文) 大気から南大洋域へ供給される生物に利用可能な鉄の変動要因の解明

研究課題名(英文) Investigation of variability in atmospheric bioavailable iron supplied to the Southern Ocean

研究代表者

伊藤 彰記 (ITO, Akinori)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・気候モデル高度化研究プロジェクトチーム・主任研究員

研究者番号：00419144

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複数の数値モデルによる予測結果と観測データを組み合わせて、統計的な解析を行い、海洋大気中で観測された高い鉄溶解率に関する謎の解明を試みた。その結果、エアロゾル中の高い酸性度による人為起源鉄の溶出速度増加を予測した数値モデルが、鉄溶解率の高さや変動を最もよく再現していることが明らかにされた。本結果から、大気汚染に由来するエアロゾルでは、高い酸性度の溶液中で光化学反応によって人為起源鉄が水に溶けやすい性質に変化していることを示した。また、従来考えられていた自然起源の酸化鉄とは異なる人為起源の酸化鉄が、陸から遠く離れた海洋生態系へ栄養塩をもたらす重要な役割を果たすことを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今後、人間活動による化石燃焼の燃焼が植物プランクトン(一次生産者)を起点とした食物連鎖(海洋生態系)へ与える影響を評価し、より有効な海洋環境保全策へ貢献することが期待される。さらに、本研究で得られた知見は、既存の大気・海洋生態系間の相互作用を考慮に入れた地球システムモデルの生物地球化学と気候の相互作用における改善を迫る重要な成果である。

研究成果の概要(英文)：We collected model results and data from the international community to statistically analyze prediction results from multiple global atmospheric chemical transport models and observation data from various regions of the world's ocean. The results of our analyses showed that anthropogenic iron changes its chemical properties as it is transported through the atmosphere to the sea. Moreover, this is a primary factor in a large amount of water-soluble iron being incorporated into microparticles (aerosols) over the open ocean.

研究分野：大気化学

キーワード：地球環境変化 大気化学輸送モデル 人為起源鉄 溶存鉄 鉄溶解率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海水中に溶存する鉄は、植物プランクトンの貴重な必須元素(栄養塩)であり、光合成に欠かせない。そして、鉄が植物プランクトンの生育にとって制限要因となっている場合、大気から必要な栄養塩を受け取ることで植物プランクトンの成長は促進される。すなわち、大気からの水溶性鉄供給は、海洋生態系へ影響を与える。特に、南大洋は溶存鉄が植物プランクトンの生育にとって制限要因となっており、その広大さから全球炭素循環を理解する上で極めて重要である。しかし、南大洋域は文明圏から遠くアクセスしにくい等の理由により観測データが希薄している。そのため、鉄の発生過程と大気中での変質過程についての知見が極めて不足している。そこで、国内の研究者も参画し、世界規模で進められている研究プロジェクト、SOLAS (Surface Ocean-Lower Atmosphere Study) では、南大洋域における水溶性鉄の変動要因の解明が、今後明らかにすべき重要課題の一つとして認識されている。

2. 研究の目的

大気から海洋へと供給される生物に利用可能な鉄は、海洋生態系へ影響を及ぼし、大気中の二酸化炭素濃度を変化させることにより気候変動へと影響を与える。しかし、これまでの数値予測では、南大洋域において観測された水溶性鉄の沈着速度を再現できていない。本研究では、全球エアロゾル化学輸送モデルを用いて、南大洋域に着目し、大気中における水溶性鉄の変動要因を解明することを目的とする。このような取り組みから、過去から将来にわたる自然および人為起源の水溶性鉄供給量変化が海洋生態系および気候変動へ与える影響評価の研究に貢献する。潜在的な発生源を示唆するなど、今後必要となる研究課題についても考察し、所属する海洋研究開発機構などにおいて観測立案へとつなげ、地球環境および気候研究の進展に資する。

3. 研究の方法

南大洋域に焦点を当て、陸域における鉄の発生過程と大気中での変質過程に着目し、大気から海洋へ供給される水溶性鉄の変動要因の解明を目的とする。最新のダスト発生スキームを全球エアロゾル化学輸送モデルへ適用し、必要な改良をする。その際、屋外観測データを用いて、植生燃焼のような他の発生源による鉄濃度への影響を含めて調査する。独自に開発してきた全球大気化学輸送モデルを中心とした4種類の数値モデル結果と複数の観測データを統計的に解析し、モデル再現性の比較等を行うことで、発生源付近と海洋上における観測データのより良い再現性を可能にする。なぜ、発生源付近では数%の鉄溶解率が南大洋域で数十%まで桁違いに高い鉄溶解率で観測されるのか主な要因を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 大気中に浮遊する鉱物起源のダスト粒子は、ある風速を超えたときに発生し、その発生量は土壌水分量、地表面土壌粒径分布、植生被覆率などによって大きく左右される。そして、ダストにより供給される鉄は、食物連鎖を通して海洋生態系へ影響を与える。特に、南大洋域は溶存鉄が植物プランクトンの生育にとって制限要因となっており、その広大さから全球炭素循環を理解する上で極めて重要である。しかし、南半球におけるダスト発生量の推定値には多大な不確実性がある。本研究では、全球大気化学輸送モデルにおいて、ダスト発生量の季節変化の再現性を向上させるために、ダストの発生スキームを高度化した。その結果、南大洋域では、南米のパタゴニア地域のように、まばらに低木に覆われた地域から巻き上げられたダストが植物プランクトンにとって利用されやすい性質となる鉄の供給源として重要であることが示唆された。そのような地域は気候変動や土地利用変化の影響を受けやすい。そのため、将来、水溶性鉄供給量が変化し、それにより海洋生態系および気候へ影響を及ぼすことが懸念される。この研究成果は、国際的に先端的な研究が掲載される学術誌で主著の論文として掲載された。

(2) 近年、製鉄工程などから排出される燃焼起源の黒色酸化鉄が気候に影響を与えうるほどの大気加熱効果を持つことが報告された。しかし、どの国のどのような発生源がどれだけの大気加熱効果をもたらすのかは分かっていなかった。本研究では、全球大気化学輸送モデルを用いることにより、燃焼起源の酸化鉄粒子濃度の再現に成功した。さらに、大気中でのエネルギー収支を計算する放射伝達モデルを用いることにより、燃焼起源の酸化鉄粒子による大気加熱効果の指標となる放射強制力を、排出インベントリをもとに算出した。この結果、この酸化鉄粒子は黒色炭素性粒子に比べて、東アジアなど鉄鋼業が急速に発展してきている地域で特に大きい大気加熱効果をもつことを示した。その結果から、人為起源の黒色酸化鉄粒子は、新興国での急速な経済成長による重工業でのエネルギー消費に伴い、温暖化や水循環変化の一因として重要になる可能性が示唆された。今後、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)評価報告書で考慮される大気加熱・冷却物質の更新など、気候変動の数値予測に伴う不確実性を低減し、より有効な温暖化緩和策へ貢献することが期待される。この研究成果は、国際的に先端的な研究が掲載される学術誌で主著の論文として掲載された。

(3) 国際共同研究を取りまとめ、複数の全球大気化学輸送モデルを用いた予測結果と様々な海域における観測データを統計的に解析した。その結果、人為起源鉄は、大気を通して海に運ばれる間にその化学的性質を変えて、微細粒子(エアロゾル)中で水に溶けやすい鉄が多く含ま

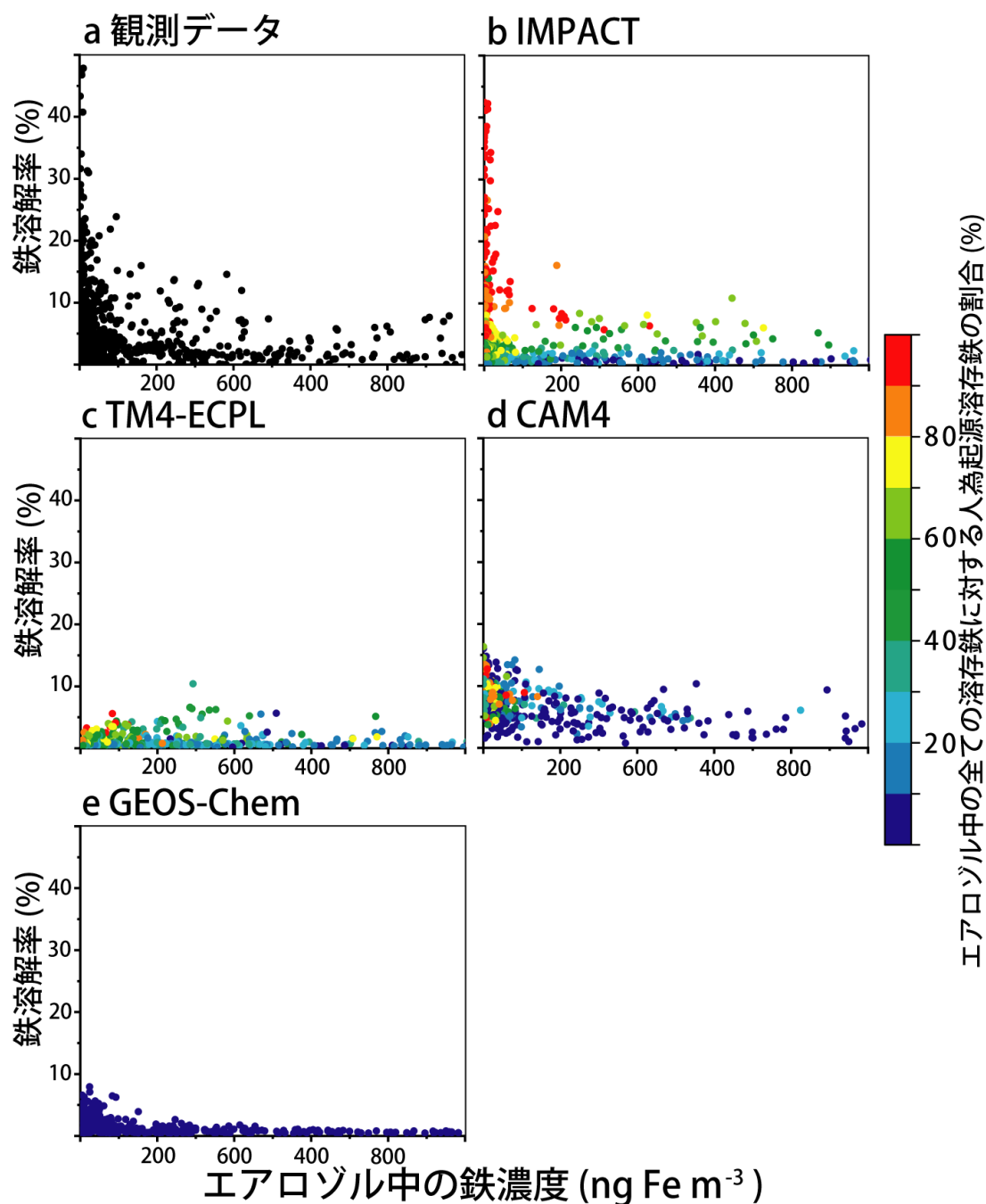


図 1. エアロゾル試料中の鉄濃度 (ng Fe m^{-3}) に対する鉄溶解率 (%) の関係。数値モデル結果の色は燃焼起源鉄の溶存鉄への寄与率を表す。

れる主要因となることを明らかにした (図 1)。鉄は、海洋の植物プランクトンにとって必要な栄養素である。鉄が不足する海域では、大気中のエアロゾルにより供給される溶存鉄が重要となる。海洋への鉄供給源としては、これまで低い鉄溶解率を示す自然起源の酸化鉄のみが考えられていた。それに対して近年、大気汚染の影響を受けたエアロゾルは高い鉄溶解率を示すことが観測により示唆されている。しかし、観測データのみからでは、なぜエアロゾルが高い鉄溶解率を示すのか明らかではない。また、数値モデルによる鉄溶解率の予測結果はばらつきが大きく、その手法によって何が原因で高い鉄溶解率をもたらすのか結論が異なっていた。そこで本研究では、複数の数値モデルによる予測結果と観測データを組み合わせて、統計的な解析を行い、海洋大気中で観測された高い鉄溶解率に関する謎の解明を試みた。その結果、エアロゾル中の高い酸性度による人為起源鉄の溶出速度増加を予測した数値モデルが、鉄溶解率の高さや変動を最もよく再現した (図 1)。本結果から、大気汚染に由来するエアロゾルでは、高い酸性度の溶液中で光化学反応によって人為起源鉄が水に溶けやすい性質に変化していることが示された (図 2)。また、従来考えられていた自然起源の酸化鉄とは異なる人為起源の酸化鉄が、陸から遠く離れた海洋生態系へ栄養塩をもたらす重要な役割を果たすことも示唆された。

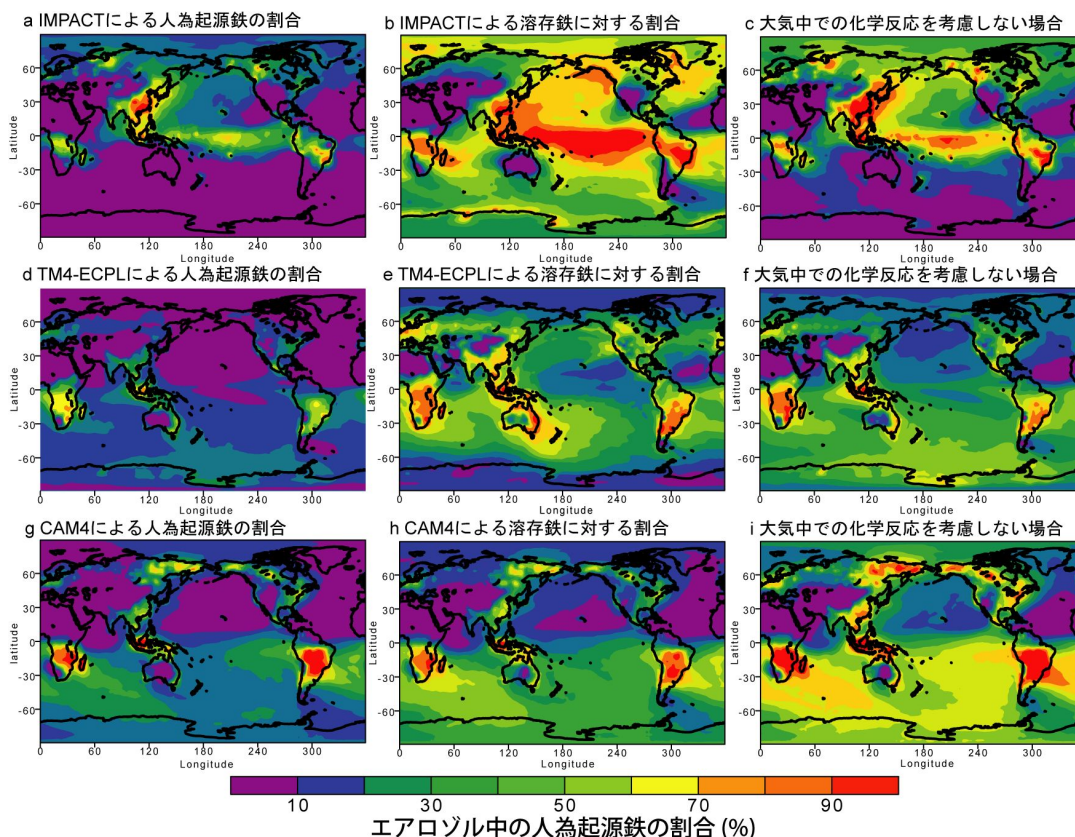


図2. 燃焼起源鉄のエアロゾル中铁(a, d, and g)、溶存鉄への寄与率(b, e, and h) (c, f, and i). 図2c, f, iでは、燃焼起源エアロゾル試料中の酸化鉄は鉱物起源と比べて、発生源付近では溶けやすい鉄を多く含むが、その後、大気中での溶出過程を無視した場合の結果を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Ito, A., S. Myriokefalitakis, M. Kanakidou, N. M. Mahowald, R. A. Scanza, D. S. Hamilton, A. R. Baker, T. Jickells, M. Sarin, S. Bikkina, Y. Gao, R. U. Shelley, C. S. Buck, W. M. Landing, A. R. Bowie, M. M. G. Perron, C. Guieu, N. Meskhidze, M. S. Johnson, Y. Feng, J. F. Kok, A. Nenes, R. A. Duce, Pyrogenic iron: The missing link to high iron solubility in aerosols, *Science Advances*, 査読有, Vol. 5, 2019, eaau7671 doi:10.1126/sciadv.aau7671

Zhang, C., Ito, A., Shi, Z., Aita, M. N., Yao, X., Chu, Q., Shi, J., Gong, X., and Gao, H., Fertilization of the Northwest Pacific Ocean by East Asia air pollutants. *Global Biogeochemical Cycles*, 査読有, Vol. 33, 2019 doi:10.1029/2018GB006146

Myriokefalitakis, S., A. Ito, M. Kanakidou, A. Nenes, M. C., Krol, N. M. Mahowald, R. A. Scanza, D. S. Hamilton, M. S. Johnson, N. Meskhidze, J. F. Kok, C. Guieu, A. R. Baker, T. D. Jickells, M. M. Sarin, S. Bikkina, R. Shelley, A. Bowie, M. M. G. Perron and R. A. Duce, The GESAMP atmospheric iron deposition model intercomparison study, *Biogeosciences*, 査読有, Vol. 15, 2018, 6659-6684 doi:10.5194/bg-15-6659-2018

Ito, A., G. Lin, and J. E. Penner, Radiative forcing by light-absorbing aerosols of pyrogenic iron oxides, *Scientific Reports*, 査読有, 8, 2018, 7347 doi:10.1038/s41598-018-25756-3

Ito, A., and J. F. Kok, Do dust emissions from sparsely vegetated regions dominate atmospheric iron supply to the Southern Ocean?, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 査読有, Vol. 122, 2017, 3987-4002 doi:10.1002/2016JD025939

〔学会発表〕(計 18 件)

Ito, A., Akitomo Yamamoto, Michio Watanabe, Maki Noguchi Aita, Jan-Berend W. Stuut,

Atmospheric deposition of iron from mineral aerosols to the ocean, 2018 AGU Fall Meeting, December 2018, Washington DC, USA.

Ito, A., G. Lin, and J. E. Penner, Aerosol radiative forcing of pyrogenetic iron oxides, IGAC 15th International Conference, September 2018, Takamatsu, Japan.

Ito, A., Impacts of acidity on atmospheric Fe input to ocean biogeochemical cycles Goldschmidt 2018, August 2018, Boston, USA.

Ito, A., Atmospheric modeling studies of iron speciation: Problems and challenges in future studies, August 2018, Identifying and Characterizing the Processes Controlling Iron Speciation and Residence Time at the Atmosphere-Ocean Interface, Telluride, USA.

Ito, A., Jan-Berend W. Stuut, Akitomo Yamamoto, Michio Watanabe, Maki Noguchi Aita, Li Chuxian, Stephanie Arcusa, Navjit Sagoo, Zahra Hoseini, Charles Gonzales, Francois De Vleeschouwer, Atmospheric deposition of iron from mineral aerosols to ocean ecosystem model, June 2018, International conference on aeolian research 2018, Bordeaux, France.

伊藤 彰記, Stelios Myriokefalitakis, Maria Kanakidou, Natalie Mahowald, Rachel Scanza, Alex Baker, Tim Jickells, Manmohan Sarin, Srinivas Bikkina, Yuan Gao, Rachel Shelley, Clifton Buck, William Landing, Andrew Bowie, Morgane Perron, Nicholas Meskhidze, Matthew Johnson, Yan Feng, Robert Duce, エアロゾル中における鉄への燃焼起源の寄与、日本地球惑星科学連合 2018 年大会、2018 年 5 月、千葉。

Ito, A., S. Myriokefalitakis, M. Kanakidou, N. Mahowald, R. A. Scanza, A. Baker, T. Jickells, M. Sarin, S. Bikkina, Y. Gao, R. Shelley, C. Buck, W. Landing, A. Bowie, M. Perron, N. Meskhidze, M. Johnson, Y. Feng, R. Duce, The GESAMP global model intercomparison: Evaluation of labile iron in aerosols, April 2018, EGU2018, Vienna, Austria.

Ito, A., S. Myriokefalitakis, M. Kanakidou, N. Mahowald, R. A. Scanza, A. Baker, T. Jickells, M. Sarin, S. Bikkina, Y. Gao, R. Shelley, C. Buck, W. Landing, A. Bowie, M. Perron, N. Meskhidze, M. Johnson, Y. Feng, R. Duce, Evaluation of labile iron formation in the atmosphere, February 2018, 2018 Ocean Science Meeting, Portland, USA.

Ito, A., PAGES-DICE workshop, January 2018, Las Cruces, Chile.

Ito, A., G. Lin, and J. E. Penner, Radiative forcing of iron oxides from combustion sources, 2017 AGU Fall Meeting, December 2017, New Orleans, USA.

伊藤彰記, Lin Guangxing, Penner Joyce E., 燃焼発生源の酸化鉄による放射強制力、第 23 回大気化学討論会、2017 年 10 月、香川。

伊藤 彰記, Myriokefalitakis Stelios, Kanakidou Maria, Mahowald Natalie, Baker Alex, Jickells Tim, Sarin Manmohan, Bikkina Srinivas, Gao Yuan, Shelley Rachel, Buck Clifton, Landing William, Bowie Andrew, Perron Morgane, Meskhidze Nicholas, Johnson Matthew, Feng Yan, Duce Robert, GESAMP 全球モデル相互比較：大気中における不安定鉄生成過程の評価、2017 年度日本地球化学会年会、2017 年 9 月、東京。

Ito, A., S. Myriokefalitakis, M. Kanakidou, N. Mahowald, R. A. Scanza, A. Baker, T. Jickells, M. Sarin, S. Bikkina, Y. Gao, R. Shelley, C. Buck,

W. Landing, A. Bowie, M. Perron, N. Meskhidze, M. Johnson, Y. Feng, R. Duce, Evaluation of labile iron processing in atmospheric models, Goldschmidt 2017, August 2017, Paris, France.

Ito, A., J. F. Kok, Global modeling study of dust source and soluble Fe input to the Southern Ocean, 2016 AGU Fall Meeting, December 2016, California, USA.

伊藤彰記、Kok Jasper F.、南大洋域へ供給される鉱物エアロゾルに関する全球エアロゾル化学輸送モデル解析、日本気象学会 2016 年度秋季大会、2016 年 10 月、愛知。

Ito, A., J. F. Kok, Atmospheric delivery of bioavailable iron from sparsely vegetated areas to the Southern Ocean, IGAC 14th International Conference, September 2016, Colorado, USA.

Ito, A., J. F. Kok, Global modeling study of dust source and Fe input to the Southern Ocean, Goldschmidt 2016, June 2016, Yokohama, Japan.

伊藤彰記、Kok Jasper F.、南大洋域における海洋生態系へ供給される鉄起源としての鉱物エアロゾル、日本地球惑星科学連合 2016 年大会、2016 年 5 月、千葉。

〔その他〕

ホームページ

人間活動により放出された鉄粒子は大気汚染の影響で海水へ溶けやすくなる

https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20190502/

「排出インベントリ」で、見過ごされてきた大気汚染物質の大気加熱効果を推定

<https://www.jamstec.go.jp/iccp/j/topics/20180605/>

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。