

令和元年5月22日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287110

研究課題名(和文)地球温暖化による海洋変化が日本・東アジアにもたらす海面上昇：メカニズムと将来予測

研究課題名(英文) Sea level rise due to the global warming for Japan and East Asia: Mechanisms and future projection

研究代表者

見延 庄士郎 (Minobe, Shoshiro)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：70219707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：主な成果は以下の通りである。1) 日本東方沖に予測されている世界有数の海面上昇は亜熱帯モード水が担う海洋の局所的な温暖化による。2) その東方沖ほど日本沿岸の海面水位が上昇しない理由は、亜寒帯から沿岸沿いに南に伝播する波動がもたらす盾効果による。3) 力学的ダウンスケール結果と比較して、気候モデルの結果は日本の主要4島の沿岸海面上昇については、おおむね信頼できる。4) 主要4島および東アジア沿岸の海面上昇の不確実性上限は全海洋平均より大きく、小笠原諸島や南西諸島ではさらに大きな海面上昇が生じる可能性が高い。5) 日本沿岸での1950年頃の高海面水位は、自然変動にともなう風の変化によってもたらされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、海洋の力学がどのように働いて、過去そして将来の海面上昇もたらすか理解を大きく前身させた。社会的な意義としては、1) 我が国沿岸での海面上昇の不確実性が大きいこと、2) 主要4島以上に大きな海面上昇が成果で述べた「盾」効果が及ばない、小笠原諸島や琉球列島で生じるであろうこと、が特に重要である。RCP8.5シナリオにおける、全海洋平均の20世紀末から21世紀末にかけての海面上昇の95%上限は82cmであるのに対して、日本の主要4島では96-102 cm、小笠原諸島の父島では110 cm、沖縄本島では106 cmである。我が国の温暖化対策の前提として、これらの値を使う必要がある。

研究成果の概要(英文)：Important results are as follows. 1) The world-leading sea level rise predicted east off Japan is mainly caused by the local warming of the ocean carried by the water mass called subtropical mode water. 2) The reason why the sea level at the coast of Japan does not rise as much as sea level east off Japan is due to the shield effect caused by the coastal trapped wave propagating from the subarctic region to the south along the coast. 3) Compared with the dynamical downscale results, the climate model results are generally reliable for the coastal sea-level rise of the four main islands of Japan. 4) Uncertainty upper limits of sea-level rise of the four main islands of Japan and coast of East Asia are larger than those for the global ocean average. 5) The past high sea-level along the Japan around 1950 was caused by the change of wind accompanied by natural variation.

研究分野：海洋物理学，気象学，気候学

キーワード：海面上昇 地球温暖化 気候モデル 海洋モデル ダウンスケーリング

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

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化による海面上昇は、社会に甚大な影響を与える可能性が高い、重要な現象である。海面上昇は、主として陸氷の融解と海面の熱膨張によって生じ、また場所毎の海面上昇には海洋循環や水塊の変化といった海洋構造の変化もかかわる。近年の人工衛星による観測(1993 年以降)は、全地球での平均海面水位は1年当たり約 3.0 mm の上昇を示している。また、最も温暖化が進む RCP8.5 シナリオで、20 世紀末を基準とする 21 世紀末の全海洋平均の海面上昇は 63 cm、不確実性を含めた 95 % 推定値は 82 cm と、IPCC 第五次評価報告書で推定されている。しかし研究開始当初には、いくつもの重要な未解決課題が残されていた。すなわち、1) 世界でも有数の海面上昇が日本東方沖で予測されているが、その原因について研究者間で意見が異なっている。2) 海面上昇予測に用いられている気候モデルは低解像度であるため、海洋構造が十分に解像されておらず、その変化が海面上昇に与える影響が不明である。3) 日本沿岸での将来の海面上昇がどの程度の大きさになりまたどれだけの不確実性を持つかの評価が行われていない。4) 日本沿岸の 20 世紀を通じた海面上昇変動が温暖化では説明できない。特に 1950 年頃の日本の非常に高い沿岸水位の原因が不明である。

2. 研究の目的

上記の未解決課題を解決することを念頭に、日本・東アジアで生じる地域的な海面上昇について、そのメカニズムを明らかにし予測の高精度化を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、本研究では異なる研究手段を用いる複数の個別研究を実施した。研究手法としては、多数気候モデルの解析(成果 1、4)、領域海洋モデルによる高解像度ダウンスケーリング(成果 2)、海洋モデル実験(成果 5)、気候モデル実験(成果 6)、理論構築(成果 3)である。これらの個別研究を有機的に組み合わせることで、全体として飛躍的に海面上昇の理解を向上させ、さらに日本および東アジア沿岸での海面上昇の将来推定を実現した。以下では、沖合から沿岸という流れで個別研究を説明する。

4. 研究成果

(1) 北太平洋における将来の海面上昇の要因解明

上述の通り、日本の東方では世界平均よりも大きな海面上昇が予想されている。その原因としては、黒潮続流の変化によるとする説と亜熱帯モード水と呼ばれる水塊の貯熱量増加によるとする説の、二つが出されていた。黒潮続流は、日本南岸を流れて来た黒潮が関東から離岸して東に進む海流である。一方亜熱帯モード水とは、黒潮・黒潮続流のすぐ南の海域で、暖かい海水が冬季に大陸から吹き出す寒気によって強力に冷却され鉛直に混合し、その結果、水深 100 ~ 400m において形成される鉛直方向によく混ざった水塊のことである。我々は、第五次気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)の多数(34)の気候モデル出力を用い、この日本東方沖において初めて海洋内部の水温・塩分そしてそれから計算できる密度・地衡流速を解析することで、大きい海面上昇の主たる原因は、亜熱帯モード水の熱吸収であることを示した。それに加えて黒潮続流の北上もある程度寄与しており、さらに黒潮続流の北上には風系の北上が影響することを明らかにした(図 1)(Terada and Minobe 2018, 論文 3)。なおこの研究によって、研究代

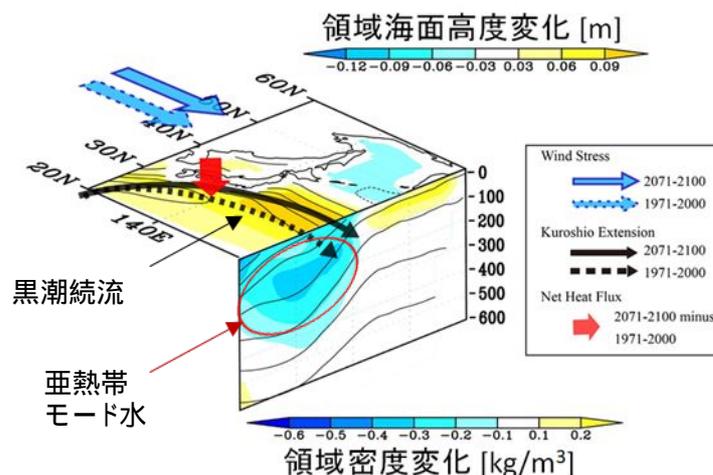


図 1. 日本東方沖での大きな海面上昇のメカニズムをまとめた模式図。海面高度はぜ全海洋平均からのズレである領域海面高度を、密度も各深度毎における全海洋平均からのズレである領域密についての 20 世紀末から 21 世紀末の変化を示している。

表 1. 研究の概要

表者の指導学生であった寺田は、2014年に日本海洋学会若手ベストポスター賞を、2016年には中国で行われた CLIVAR Open Science Conference において Early Career Scientist Excellent Poster Award (世界で10名)を受賞した。

(2) 北太平洋と日本沿岸における将来の海面上昇の力学的ダウンスケーリング

海面上昇の予測に用いられる気候モデルは海洋循環および水塊構造を十分に表現するには解像度が低すぎるため、これらの現象がどのように海面上昇に関係するのかが正しく評価できていないことが懸念される。そこで、我々は黒潮をある程度解像できる格子間隔が緯度経度0.25度の領域海洋モデル ROMS (Regional Ocean Modeling System)を用いて、海面上昇の力学的ダウンスケーリングを行った(Liu et al. 2016, 論文7)。この研究は我々の知る限り、沿岸海面上昇に着目して力学的ダウンスケーリングを行った世界初の研究である。力学的ダウンスケーリングは計算量が大い処理であるため、全ての気候モデルについて実施することはできない。そこで日本周辺の海面上昇ホットスポットである日本東方沖において、将来の海面上昇が大きな3つの気候モデルについてダウンスケーリングを行った。

図2にダウンスケール結果の一例を示す。日本東方沖でダウンスケールモデルの方が気候モデルよりも、はるかに大きな海面上昇を示している。ダウンスケールモデルでは狭く強い黒潮続流が再現できているために、黒潮続流の北上が大きな海面上昇をもたらしている。一方沖合とは異なり、本州・四国・九州沿岸の水位上昇ではダウンスケールモデルと気候モデルとにそれほどの違いは見られず、差は10 cm以内である。気候モデルとダウンスケールモデルの間での海面上昇の違いが、沖合で大きく沿岸で小さいという特徴は、3つの気候モデルのダウンスケールに共通している。

沿岸で海面上昇の差が小さい理由は、沿岸捕捉波の効果によるものである。沿岸捕捉波は、大陸および日本の主要4島の太平洋沿岸に沿って北から南に伝播する。この沿岸捕捉波が、日本東方沖よりも海面上昇が小さい亜寒帯の海面上昇の影響を日本沿岸に伝え、それが日本東方沖の高い海面上昇の影響を西に運ぶロスビー波と呼ばれる波の効果を上回っている。日本の主要4島の沿岸は、あたかも、沿岸捕捉波が盾として働き、東方からの高い海面上昇を防いでいるのである。

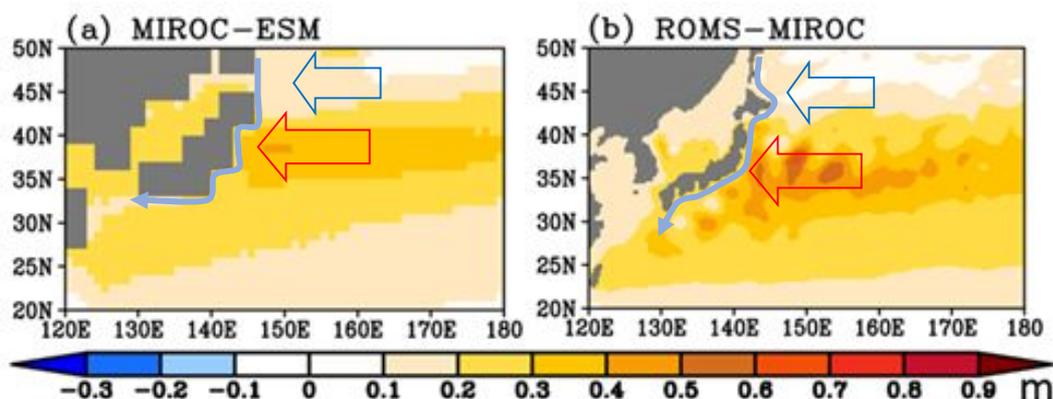


図2. (a)RCP8.5シナリオでの気候モデルMIROC-ESMと (b)そのダウンスケールモデルにおける、2081-2100年と1981-2000年との間の海面高度変化の全球平均からの差。図中の赤(青)枠矢印は非常に大きな(比較的小さい)海面上昇の情報を西に伝えるロスビー波であり、沿岸に沿う線の矢印は沿岸捕捉波を意味している。

(3) 沿岸海面水位の新理論

成果(2)の結果は、沿岸捕捉波の重要性を意味するものであったが、その効果を定量的に評価することは理論基盤の不足によって不可能であった。そこで基盤となる理論の構築に取り組み、日本の太平洋岸やアメリカの東海岸など(大洋を中心として見る西岸)での水位がどのように決定されるかの新しい理論解を導出することに成功した(Minobe et al. 2017, 論文6)。この理論は、日本が位置するような中緯度では、ある沿岸地点での水位はそれよりも北側での沿岸水位の沿岸捕捉波による影響を、ロスビー波で伝わってくる東側の水位よりも強く受けることを定量的に示すものであった。また、成果(2)の結果である、低解像度モデルでも高解像度モデルでも沿岸水位変化はそれほど変わらないことに理論的な基盤を与えた。この研究は、当初予定していなかった研究であるが、米国気象学会の全雑誌における論文から月に1・2編を選ぶ、会報のハイライトにも選出され、また同論文をきっかけとして2018年にスイスで行われた海面上昇の国際会議に、日

本から研究代表者がただ一人招待されるなど(学会発表 1)、国際的に高く評価された。

(4) 日本と東アジア沿岸における将来の海面上昇とその不確実性

成果(2)(3)は、我が国の主要 4 島および大陸沿岸における長期的な海面上昇について、気候モデルの結果をおおむね信頼してよいことを意味する。そこで多数の気候モデルの出力と、別に推定される陸氷融解の効果などを総合して、沿岸における海面上昇の平均推定値および不確実性を評価した。沿岸の形状がモデルごとに異なる問題は、沿岸点の検出方法を工夫することで解決した。

その結果、日本の主要四島の沿岸水位上昇は平均的には全海洋平均の海面上昇程度であるけれど、不確実性の幅は全海洋平均よりも大きいことが判明した(図 3)。たとえば、IPCC 第五次評価報告書において最も温暖化が進む RCP8.5 では、20 世紀末から 21 世紀末にかけての全海洋平均の海面上昇で平均と不確実性上限を加えて得られる 95%上限は 82cm である。しかし、我が国の主要 4 島沿岸における海面上昇の 95%上限は 96~102 cm と 2 割ほど大きくなる。不確実性幅が全海洋平均よりも個々の地点で大きくなる理由は、海洋の力学的変化が全海洋平均の海面上昇には全く寄与しないが、個々の地点の海面上昇には影響するためである。さらに、主要 4 島から離れた太平洋の島において、主要 4 島よりも大きな海面上昇が平均推定値および不確実性域前の両方に生じることが示された。これは上述の沿岸捕捉波の盾効果が、それらの島々には及ばないためである。沖縄本島(南西諸島を代表)と父島(伊豆・小笠原諸島を代表)では、平均推定値は 71.9 cm と 73.7 cm で全海洋平均値を 15 % 程度上回った。また 95 % 推定値は沖縄本島で 105.9 cm、父島では 109.8 cm と全海洋平均値を 30 % 程度上回る。父島での海面上昇は、東アジア沿岸で最大である。

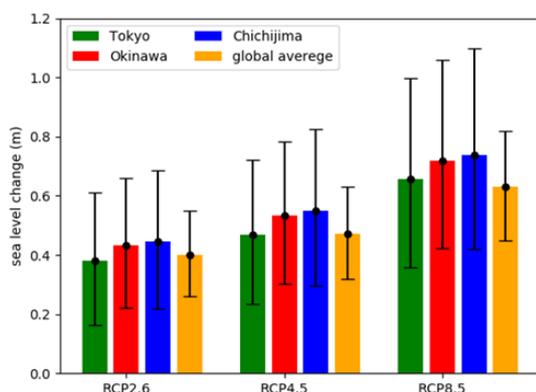


図 3 3つの RCP シナリオにおける東京、沖縄本島、父島、全海洋平均での 20 世紀末(1986-2005 年の 20 年間の平均値)に比べた 21 世紀末(2081-2100 年の 20 年間の平均値)における海面水位上昇とその不確実性の差。不確実性の上限と下限は 95% 推定値と 5% 推定値である。

(5) 日本沿岸における過去百年間の海面変動の要因解明

上述の未解明問題である 20 世紀の日本沿岸水位変動、特に 1950 年ごろの高い沿岸水位の原因を明らかにするために、海洋モデル ROMS を用いて、1871 年から 2010 年の北太平洋の海面水位変動の数値実験を行った。このような 140 年間にわたる長期の海洋数値モデルでの実験は、世界的にも珍しく日本では初めてである。海面水位変動の原因を調べるために、海洋モデル内の海面水位を変動させる外力について、風応力のみを経年変動させる実験と、海面からの熱と淡水の供給のみを経年変動させる実験を行い、さらに両者を経年変動させる実験(基本実験)を行った(Sasaki et al. 2017, 論文 5)。

基本実験は 1950 年頃の日本沿岸水位の高さをよく再現していた。さらに他の 2 実験の結果を用いて、風応力と熱塩フラックスの寄与を調べると、1950 年頃の日本沿岸の高水位は、風応力の変動により生じていることが明らかとなった。熱塩フラックスの経年変動はこの高水位にほとんど影響を与えない。一方、近年の水位上昇は熱塩フラックスの変動により生じている。この 1950 年頃の風応力の変動についてさらに詳しく調べると、冬季の北太平洋上に存在するアリューシャン低気圧の勢力が、この時期に弱体化していたことが明らかとなった。このアリューシャン低気圧の弱体化に伴う風の変化が、海洋循環を変化させ、日本の沿岸水位を上昇させた。このアリューシャン低気圧の弱体化は、太平洋十年規模変動(Pacific Decadal Oscillation)の変動および 1940 年代の気候レジームシフトと関係している。また、この 1950 年頃の高水位は、CMIP5 の 20 世紀再現実験の複数モデル平均では再現されておらず、このことはこの高水位が人為起源による変動ではなく、気候に内在する自然変動によって生じていることを示している。したがって、日本沿岸水位の将来予測のためには、地球温暖化に代表される人為起源の変動だけではなく、自然変動の理解も

重要である。この成果について、プレスリリースを行った(その他1)。

(6) 気候モデルによる要因解明および1.5度シナリオ評価

気候モデルを用いて海面上昇の要因の切り分け実験を行った。要因の切り分けに関しては、国際的な海面水位上昇分布変動に関する比較実験などの枠組みに従って行う。切り分ける要因は熱・淡水・風応力フラックスとし、それぞれの温暖化時の境界条件をモデルに与え、数値実験を行う。これにより、海面水位上昇メカニズムを理解する。さらに、温暖化時の長期の社会経済シナリオに従い、地球温暖化を1.5度以下に抑えた場合の海面水位変化を評価する。

日本周辺を含む海面水位上昇分布メカニズムを明らかにするための第六次気候モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)において FAFMIP (Flux Anomaly forced model inter-comparison project)が実行されている。FAFMIP 実験の骨子は気候モデルで得た熱・淡水・風応力の海面フラックス偏差を、気候モデルの海面に加えて駆動する海面フラックス偏差駆動実験である。本研究では別プロジェクトで計算された MIROC6 モデルのデータを用いるとともに追加実験を行った。その結果、北太平洋の海面水位上昇は海面熱フラックス偏差による黒潮再循環領域の水温上昇によって引き起こされていることが示された。この結果は、上記の成果(1)とも整合的である。

さらに、社会経済の発展に伴う温暖化による全球平均気温を 1.5 度未満に抑えた場合の海面水位変化を評価した(Frieler et al. 2017, 論文4)。MIROC5 モデルの結果によると、今世紀中の日本周辺海域の海面水位上昇は、全球気温上昇を 1.5 度に抑えても、ほとんど抑制できない。しかし、全球の海面水位のばらつきは今世紀末より減少に転じる可能性が示された。この 1.5 度に温暖化を抑えた場合の海面水位上昇研究は当初予定にはなく、2015 年 12 月のパリ合意を受けた社会的な要請の高まりに応えたものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

- 1) Hughes, C. W., I. Fukumori, S. M. Griffies, J. M. Huthnance, S. Minobe, P. Spence, K. R. Thompson and A. Wise, 2019: Sea level and the role of coastal trapped waves in mediating the influence of the open ocean on the coast. **Surveys in Geophysics**, in press, doi:10.1007/s10712-019-09535-x (査読あり)
- 2) Woodworth, P. L., A. Melet, M. Marcos, R. D. Ray, G. Woppelmann, Y. N. Sasaki, M. Cirano, A. Hibbert, J. M. Huthnance, S. Monserrat, and M. A. Merrifield, 2019: Forcing Factors Affecting Sea Level Changes at the Coast. **Surveys in Geophysics**, in press. doi:10.1007/s10712-019-09531-1. (査読あり)
- 3) Terada, M. and S. Minobe, 2018: Projected sea level rise, gyre circulation and water mass formation in the western North Pacific: CMIP5 inter-model analysis. **Climate Dynamics**, 50, 4767-4782, doi:10.1007/s00382-017-3902-8. (査読あり)
- 4) Frieler K., et al. (T. Suzuki, 47 名中 20 番目), 2017: Assessing the impacts of 1.5°C global warming - simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b), **Geoscientific Model Development**, 10, 4321-4345, doi: 10.5194/gmd-10-4321-2017. (査読あり)
- 5) Sasaki, Y. N., R. Washizu, T. Yasuda, and S. Minobe, 2017: Sea level variability around Japan during the 20th century simulated by a regional ocean model. **Journal of Climate**, 30, 5585-5595, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0497.1. (査読あり)
- 6) Minobe, S., M. Terada, B. Qiu, N. Schneider, 2017: Western Boundary Sea Level: A Theory, Rule of Thumb, and Application to Climate Models. **Journal of Physical Oceanography**, 47, 957-977, doi: 10.1175/JPO-D-16-0144.1 (査読あり)
- 7) Liu Z.-J., S. Minobe, Y. N. Sasaki, and M. Terada, 2016: Dynamical downscaling of future sea-level change in the western North Pacific using ROMS. **Journal of Oceanography**, 72, 905-922, doi: 10.1007/s10872-016-0390-0. (査読あり)
- 8) Sasaki, Y. N., and S. Minobe, 2015: Climatological mean features and interannual to decadal variability of ring formations in the Kuroshio Extension region. **Journal of Oceanography**, 71, 499-509, doi:10.1007/s10872-014-0270-4. (査読あり)

[学会発表](計 65 件)

- 1) Shoshiro Minobe, Open ocean vs. coastal sea level in regions of strong western boundary currents and eddy fields (including relative effects of interior vs. along boundary effects), International Space Science Institute Workshop "Understanding the Relationship between Coastal Sea Level and Large-Scale Ocean Circulation", 2018 (招待講演)
- 2) 見延 庄士郎, WCRP コアプロジェクトI: CLIVAR Climate and Ocean - Variability,

Predictability and Change 気候と海洋-変動・予測可能性・変化, 研究計画, 公開シンポジウム「Future Earth 時代の WCRP」, 2017(招待講演).

- 3) Mio Terada, Shoshiro Minobe, 2017: Projected sea level rise, gyre circulation and water mass formation in the North Pacific: CMIP5 inter-model analysis, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (招待講演)
- 4) 見延 庄士郎, 海洋物理学のフロンティアと未来への試み, 日本海洋学会 2014 年度秋季大会, 2014(招待講演)

[その他]

- 1) 一般向け解説記事, 見延 庄士郎, 2017: 21 世紀における日本沿岸の海面上昇: そのメカニズムと将来予測, Ocean Newsletter, 396 号, https://www.spf.org/opri/newsletter/396_2.html
- 2) プレスリリース, 佐々木 克徳, 20 世紀の日本沿岸水位の変動をシミュレーションで再現—なぜ 1950 年頃の日本沿岸水位は現在と同程度に高いのか?—, https://www.hokudai.ac.jp/news/170525_pr.pdf

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 佐々木 克徳

ローマ字氏名: (SASAKI Yoshinori)

所属研究機関名: 北海道大学

部局名: 理学研究院

職名: 准教授

研究者番号(8 桁): 50604815

研究分担者氏名: 鈴木 立郎

ローマ字氏名: (SUZUKI Tatsuo)

所属研究機関名: 国立研究開発法人海洋研究開発機構

部局名: 統合的気候変動予測研究分野

職名: 技術研究員

研究者番号(8 桁): 10415995

研究分担者氏名: 安田 珠幾

ローマ字氏名: (YASUDA Tamaki)

所属研究機関名: 気象庁気象研究所

部局名: 気候研究部

職名: 主任研究官

研究者番号(8 桁): 80354471

(2014 年度まで研究分担者であったが、2015 年度からは研究協力者となった)

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 黒木 聖夫

ローマ字氏名: (KUROGI, Masao)

研究協力者氏名: 寺田 美緒

ローマ字氏名: (TERADA, Mio)

研究協力者氏名: 劉 昭君

ローマ字氏名: (LIU, Zhao-Jun)

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。