

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24224011

研究課題名(和文)成層圏 対流圏結合系における極端気象変動の現在・過去・未来

研究課題名(英文)Extreme Weather Variations in the Stratosphere -Troposphere Coupled

研究代表者

余田 成男 (YODEN, SHIGEO)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：30167027

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 134,200,000円

研究成果の概要(和文)：成層圏-対流圏結合系の内部・外部各変動の力学的関連性について、データ解析および数値モデル実験によって総合的に研究を行った。対流圏の変動が成層圏の変動に影響を与えているだけでなく、成層圏での波の反射や成層圏での大気循環・オゾン量の変動が対流圏での寒波の発生や降水量・気温の変動にそれぞれ影響を及ぼしうることを明らかにした。これらは対流圏の気候変動の理解にもインパクトを与える結果である。

研究成果の概要(英文)：Dynamical linkage among internal and/or external variations in the stratosphere-troposphere coupled system was investigated comprehensively by the combination of data analyses and numerical model experiments. We showed not only that variations in the troposphere affect variations in the stratosphere, but also that the wave reflection in the stratosphere and variations of the circulation/ozone distribution can affect the occurrence of cold surge and variations of precipitation/temperature in the troposphere, respectively. These results can have an impact on understanding of climate variations and change in the troposphere.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：成層圏 対流圏結合 極端気象 成層圏突然昇温 成層圏準二年周期振動

1. 研究開始当初の背景

温室効果気体やオゾン破壊物質の増加に伴う気候変化、およびそれに伴う極端気象の激化と出現頻度の変化は、広く社会的な興味までを喚起しており、その理解と将来予測は21世紀の地球科学の重要な研究課題の一つである。成層圏-対流圏結合系に特有の自然内部変動のなかで、成層圏突然昇温現象(SSW; Stratospheric Sudden Warming)は、冬季周極渦の変形・崩壊にともなって極域の気温が数日のうちに50度前後も上昇する惑星規模の極端気象である。このような成層圏内部の極端気象のシグナルが、対流圏と成層圏をつなぐ大気波動を介して、あるいは大気波動の碎波などによって誘起される子午面循環の「ダウンワード・コントロール」によって、対流圏まで伝わっていることが明らかになり、成層圏変動が地上の天候状態にまで影響を及ぼしているという認識が定着してきた。しかし、SSWなどの極端気象は非線型性の強い力学現象なので、その出現予測と影響評価は難しい問題であった。

また、成層圏-対流圏結合系の変動には、太陽活動変動や火山噴火、あるいは地球の軌道要素の周期変動といった自然起源、および、温室効果気体やオゾン破壊物質の増加という人為起源の諸外部強制の変動・変化に対する応答成分があるが、成層圏内部の極端気象がこのような外部強制の変動・変化に対してどう応答し、出現頻度がどう変化するのか、未解明であった。

2. 研究の目的

本研究は、成層圏-対流圏結合系の内部・外部各変動の力学的関連性を総合的に理解することを目的とする。そして、極端気象変動の予測能力の向上に資する具体的成果を得ることを目指す。現在気候の観測および予報データの解析による結合系変動の現状把握と、過去の気候再現実験および感度解析によるモデル検証・改良を踏まえて、未来予測の不確実性を押さえて結合系変動に対する気候変化の影響評価を行う。

実際には、季節内変動から年々変動に至る自然起源の内部変動と外部強制応答変動は独立でなく、相互に影響しあって複雑に変動しているので、過去50年程度の観測データや10年程度の現業予報データの解析だけでは結論できることがごく限られる。本研究では、十分な量のデータが得られ実験条件を自由に設定できる数値実験を有機的かつ有効に組み合わせることにより、成層圏-対流圏結合系のこれら内部・外部各変動の力学的関連性を明らかにする。SSWをはじめとするこの結合系の極端気象の出現状況は、確率密度関数の先端部の特性に直接関連しているので、それが温室効果気体等の増加という人為

起源の気候変化に対してどう変化するかを求めて、極端気象の出現頻度や形態の変化を明らかにする。

3. 研究の方法

現在気候の再解析データおよび現業予報データの解析により結合系変動の実態把握を行い、理想化した大気メカニスティックモデル実験でその力学的特性を詳細に記述する。そして、最先端気候モデルを用いた地質学的時間スケールに及ぶ過去の気候再現実験と感度解析により、モデル性能を検証し改良を行うとともに、現在と異なる気候下での極端気象変動の有様を記述する。それを踏まえ将来予測の不確実性を押さえたうえで、結合系変動に対する未来の気候変化の影響評価を行う。

研究体制は、研究手法をもとに、データ解析班、メカニスティックモデル・統計理論班、大気大循環モデル・数値予報モデル班、気象研究所気候モデル班からなる4班体制とし、中層大気気候変動力学分野における我が国の第一線研究者および海外共同研究者で構成する。各班が、現在・過去・未来に関わる各研究目的を定め、多重の時間空間スケールで変動・変化する成層圏-対流圏結合系での極端気象について、現象の記述と力学過程の理解から最先端モデルによる予測まで総合的に研究を推進する。多重時間空間変動像と極端気象に関する新たな研究のアイデアを共有し、定期的な情報交換に基づいて全参加者が協調して研究を展開することにより、成層圏-対流圏結合系の気候形成過程とその気候変化における極端気象過程の有様を統一した視点で明らかにする。

4. 研究成果

研究手法をもとに構築された4班からなる研究体制のもとに、多重の時間空間スケールで変動・変化する成層圏-対流圏結合系での極端気象について、現象の記述と力学過程の理解から最先端モデルによる予測まで総合的に研究を推進した。各班の主要な研究成果は以下の通りである。

(1) データ解析班

様々な再解析データおよび結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Inter-comparison Project #5; CMIP5)データ等を整備して成層圏-対流圏結合系の大規模な変動形態とその力学過程を詳細に調べて、以下のような成果を得た。

エルニーニョ・南方振動(ENSO)および成層圏準二年周期振動(QBO)に関連した北半球冬季成層圏の年々変動を再解析データの力学・統計解析により調べて、冬季平均の極渦の形状および成層圏突然昇温の頻度が、ENSOとQBOに非線型に依存することをはじめて明

らかにした。

北半球冬季成層圏の東西平均場の ENSO/QBO に伴う年々変動は再解析データ間でよく一致するが、惑星規模波動によるフラックスの相違は比較的大きいことを示した。

気象庁長期再解析データおよび CMIP5 の多数モデルデータを用いて、SSW の発生頻度やその際の極渦形状を調べて、CMIP5 モデルデータでは SSW (特に極渦が伸長・分裂するもの) の頻度がより少ないことを示した。

JRA-55 再解析データにおいて、人工衛星データの同化が成層圏変動を表現するのに大きく寄与していることを示した。

CMIP5 の現在気候実験結果を比較し、SSW の発生頻度の相違の要因を調べた。極夜ジェット強度が弱く、その変動が大きいモデルでは SSW の頻度は高くなるが、極夜ジェット強度の変動は対流圏からの惑星波強制による成層圏極渦の減速応答で説明できることを示した。

以上の成果は、北半球冬季成層圏の年々変動を検討する際には、ENSO と QBO の両変動を考慮する重要性を示している。また、再解析データおよび CMIP5 データを相互比較する場合において成層圏-対流圏結合過程の認識の重要性を明らかにした点で、気候変動研究にインパクトを与えるものである。

(2)メカニスティックモデル・統計理論班
成層圏-対流圏結合系における変動について、その統計的性質を理論的に明らかにするためには、大量の数値実験を効率的に行う必要がある。そのため、数値計算が比較的短時間でできるメカニスティックモデルを用いた数値実験を行った。また、高速に動作する大気大循環力学モデルの構築を目指して、基盤となる数値ライブラリの開発も行い、以下の成果を得た。

球面調和関数変換を高速化するためのルジャンドル陪関数の新しい漸化式を提案し、独自開発している球面調和関数変換の数値ライブラリに実装し公開した。

数値モデルの精度検証のために、風下波の非線形定常解を高精度計算する手法を開発した。

赤道大気を理想化した鉛直二次元モデルにおいて、計算領域などによらず QBO 的振動がロバストに存在すること、および湿潤対流と重力波に伴う運動量輸送過程を明らかにした。

赤道大気を理想化した鉛直二次元モデルにおいて、QBO 位相と降水量変動との関連を明らかにした。

以上の成果のうち、で開発された球面調和関数変換数値ライブラリは世界最高速の性能を持つものであり、数値モデル開発の分野に大きく貢献するものである。また、の成果は、湿潤対流への QBO の位相の影響を

初めて指摘した論文であり、今後のさらなる研究展開が期待できる。

(3)大気大循環モデル・数値予報モデル班

長期再解析データ・アンサンブル予報データセット・衛星観測データを用いて、成層圏-対流圏結合系における変動、特に、成層圏で反射して下方伝播する惑星規模波が対流圏循環に及ぼす影響、成層圏周極渦の予測可能性、および SSW 生起前後の全球的な中層大気循環変動について調べ、以下の成果を得た。

SSW 後に生じる惑星波の下方伝播が、対流圏でブロッキングを誘起し、ユーラシアに寒波をもたらす事例を初めて見出した。また、2009年の極渦分裂型 SSW の生起時に上部成層圏循環が力学的に不安定となることを見出した。

成層圏の長期的変化は対流圏循環だけではなく海洋循環や海水分布も変化させるので、それらのフィードバックを考慮することが成層圏の気候への影響を考えるうえで重要であることを明らかにした。

北半球冬季における成層圏周極渦の予測可能性について、成層圏北極点温度の予測可能期間の上限は、初冬に最大 35 日に達した後、季節進行とともに徐々に減少し、晩冬には 20 日となること、および、晩冬における負の温度バイアスが、数値予報モデルにおける物理過程のパラメタリゼーションスキームの不完全性が原因である可能性が高いことを初めて示した。

SSW 生起前の中間圏域変動の特徴は事例毎に大きく異なるが、その違いには極夜ジェット構造の子午面内での曲率変化が引き起こす順圧/傾圧不安定によって生じる大規模波動が寄与していること、および、中間圏の大規模波動は成層圏界面以下の惑星規模波としばしば独立に存在し、両者の相互作用が生じたときに、エネルギーの間歇的な上方伝播が生じることを示した。

以上の成果のうち、は、成層圏で反射して下方伝播する惑星規模波が対流圏の気候に大きな影響を与えることを示す、気候研究にインパクトのある成果である。また、は、数値モデルによる成層圏循環の予測について、モデルの改良への示唆も与える重要な結果である。

(4)気象研究所気候モデル班

気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM) を用いて、成層圏-対流圏結合系を陽に含んだ系で古気候形成過程やその力学過程を解析し、以下の成果を得た。

西暦 850 年から 1850 年までの過去千年の気候に関する数値実験を行い、半球平均気温の比較ではプロキシデータと比べて特に 15 世紀以降で高い相関が見られること、および、気温の空間分布に関して、中世温暖期 (950-1250 年) と小氷期 (1400-1700 年) の

差でプロキシと同様のラニーニャ型の構造が見られることを示した。熱帯低気圧に関しては、1850年までは発生数の小さな減少トレンド、1850年以降では増加トレンドが現れ、プロキシでも同様の傾向が見られることを明らかにした。

産業革命前と完新世中期(6000年前)の気候再現実験においてオゾン化学輸送過程を含む/含まない実験を比較し、太陽軌道要素の違いによる上部成層圏オゾン分布の違いが、南極域地上付近の気温に最大1.7度程度の差を生じさせることを示した。

オゾンの化学輸送過程を含んだ最終氷期最盛期の気候再現アンサンブル実験とオゾンの化学輸送過程を含まない実験結果とを比較し、成層圏の子午面循環弱体化、熱帯下部成層圏のオゾン増加、そしてそれによるオゾン温室効果により、前者は後者よりも熱帯の寒冷化が20%程度抑制されることを示した。

以上の成果のうち、特に によって示された成層圏オゾンの変化と地表気温の関連は、近年観測されているオゾンホールが発達強化に伴う南極域地表寒冷化に逆符号で対応するものであり、完新世中期の古気候およびその再現シミュレーションに一石を投じる新たな知見である。この発見は、古気候モデル計算で高緯度域の気候復元精度を良くするためには当時の日射分布に整合的なオゾン分布を用いるべきことを示すものであり、今後の結合モデル相互比較プロジェクト・古気候再現プロジェクトの実験設定の協議・決定にインパクトを与えるものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計113件)

Taguchi, M., Seasonal winter forecasts of the northern stratosphere and troposphere: Results from JMA seasonal hindcast experiments, *J. Atmos. Sci.* 査読有, 75巻, 2018, pp.827-840, DOI:10.1175/JAS-D-17-0276.1

Ishioka, K., A new recurrence formula for efficient computation of spherical harmonic transform, *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 96巻, 2018, pp.241-249, DOI:10.2151/jmsj.2018-019

Kodera, K., and H. Mukougawa, Eurasian cold surges triggered by the nonlinear reflection of stratospheric planetary waves in December 2012, *SOLA*, 査読有, 13巻, 2017, pp.140-145, DOI:10.2151/sola.2017-026

Endo, H., A. Kitoh, R. Mizuta, and M. Ishii, Future changes in precipitation

extremes in East Asia and their uncertainty based on large ensemble simulations with a high-resolution AGCM, *SOLA*, 査読有, 13巻, 2017, pp.7-12, DOI:10.2151/sola.2017-002

Harada, Y., and T. Hirooka, Extraordinary features of the planetary wave propagation during the boreal winter 2013/2014 and the zonal wave number two predominance. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読有, 122巻, 2017, pp.11374-11387, DOI:10.1002/2017JD027053

Bui H.-H., E. Nishimoto, and S. Yoden, Downward influence of QBO-like oscillation on moist convection in a two-dimensional minimal model framework, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 74巻, 2017, pp.3635-3655, DOI:10.1175/JAS-D-17-0095.1

Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera, Dynamics and predictability of downward-propagating stratospheric planetary waves observed in March 2007, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 74巻, 2017, pp.3533-3550, DOI:10.1175/JAS-D-16-0330.1

Nishimoto, E., Yoden, S., Influence of the stratospheric quasi-biennial oscillation on the Madden-Julian oscillation during Austral summer, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 74巻, 2017, pp.1105-1125, DOI:10.1175/JAS-D-16-0205.1

Taguchi, M., A study of different frequencies of major stratospheric sudden warmings in CMIP5 historical simulations, *J. Geophys. Res. Atmos.* 査読有, 122巻, 2017, pp.5144-5156, DOI:10.1002/2016JD025826

Noda, S., K. Kodera, Y. Adachi, M. Deushi, A. Kitoh, R. Mizuta, S. Murakami, K. Yoshida, and S. Yoden, Impact of interactive chemistry of stratospheric ozone on Southern Hemisphere paleoclimate simulation, *J. Geophys. Res. Atmos.* 査読有, 122巻, 2017, pp.878-895, DOI:10.1002/2016JD025508

Kodera K., N. Eguchi, H. Mukougawa, T. Nasuno, and T. Hirooka, Stratospheric tropical warming event and its impact on the polar and tropical troposphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, 17巻, 2017, pp.615-625, DOI:10.5194/acp-17-615-2017

Naoe, H., M. Deushi, K. Yoshida, and K.

Shibata, Future changes in the ozone quasi-biennial oscillation with increasing GHGs and ozone recovery in CCMI simulations, *Journal of Climate*, 査読有, 30 巻, 2017, pp.6977-6997, DOI:10.1175/JCLI-D-16-0464.1

Taguchi, M., Comparison of large-scale dynamical variability in the extratropical stratosphere among the JRA-55 family data sets, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, 17 巻, 2017, pp.11193-11207, DOI:10.5194/acp-17-11193-2017

Kamae, Y., K. Yoshida, , and H. Ueda, Sensitivity of Pliocene climate simulations in MRI-CGCM2.3 to respective boundary conditions, *Climate of the Past*, 査読有, 12 巻, 2016, pp.619-1634, DOI:10.5194/cp-12-1619-2016

Ichimaru, T., S. Noguchi, T. Hirooka, and H. Mukougawa, Predictability changes of stratospheric circulations in northern hemisphere winter, *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 94 巻, 2016, pp.7-24, DOI:10.2151/jmsj.2016-001

Noguchi, S., H. Mukougawa, Y. Kuroda, R. Mizuta, S. Yabu, and H. Yoshimura, Predictability of the stratospheric polar vortex breakdown: An ensemble reforecast experiment for the splitting event in January 2009, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読有, 121 巻, 2016, pp.3388-3404, DOI:10.1002/2015JD024581

Kodera, K., H. Mukougawa, P. Maury, M. Ueda, and C. Claud, Absorbing and reflecting sudden stratospheric warming events and their relationship with tropospheric circulation, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読有, 121 巻, 2016, pp.80-94, DOI:10.1002/2015JD023359

Nishimoto, E., S. Yoden, H.-H. Bui, Vertical momentum transports associated with moist convection and gravity waves in a minimal model of QBO-like oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 73 巻, 2016, pp.2935-2957, DOI:10.1175/JAS-D-15-0265.1

Taguchi M., Predictability of major stratospheric sudden warmings: Analysis results from JMA operational 1-month ensemble predictions from 2001/02 to 2012/13, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 73 巻, 2016, pp.789-806, DOI:10.1175/JAS-D-15-0201.1

Taguchi, M., Features of vortex split

- MSSWs that are problematic to forecast, *Atmos. Sci. Let.*, 査読有, 17 巻, 2016, pp. 517-522, DOI:10.1002/asl.686
- ②① Taguchi, M., Connection of predictability of major stratospheric sudden warmings to polar vortex geometry, *Atmos. Sci. Let.*, 査読有, 17 巻, 2016, pp.33-38, DOI:10.1002/asl.595
- ②② Martineau, P., S. Son, and M. Taguchi, Dynamical consistency of reanalysis datasets in the extratropical stratosphere, *J. Climate*, 査読有, 29 巻, 2016, pp.3057-3074, DOI:10.1175/JCLI-D-15-0469.1
- ②③ Taguchi M., On the asymmetry of forecast errors in the northern winter stratosphere between vortex weakening and strengthening conditions *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 93 巻, 2015, pp.443-457, DOI:10.2151/jmsj.2015-029
- ②④ Taguchi, M., Changes in frequency of major stratospheric sudden warmings with ENSO and QBO, *J. Meteor. Soc. Japan*, 査読有, 93 巻, 2015, pp.99-115, DOI:10.2151/jmsj.2015-007
- ②⑤ Masuda, S. and K. Ishioka, A method to calculate steady Lee-wave solutions with high-accuracy, SOLA, 査読有, 11 巻, 2015, pp.85-89, DOI:10.2151/sola.2015-021
- ②⑥ Taguchi, M., Stratospheric predictability: Basic characteristics in JMA 1-month hindcast experiments for 1979-2009, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 71 巻, 2014, pp. 3521-3538, DOI:10.1175/JAS-D-13-0295.1
- ②⑦ Taguchi, M., Predictability of major stratospheric sudden warmings of the vortex split type: Case study of the 2002 southern event and the 2009 and 1989 northern events *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 71 巻, 2014, pp.2886-2904, DOI:10.1175/JAS-D-13-078.1
- ②⑧ Iida, C., T. Hirooka, and N. Eguchi, Circulation changes in the stratosphere and mesosphere during the stratospheric sudden warming event in January 2009, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 査読有, 119 巻, 2014, pp.7104-7115, DOI:10.1002/2013JD021252
- ②⑨ Yoden, S., H. Bui, and E. Nishimoto, A minimal model of QBO-like oscillation in a stratosphere-troposphere coupled system under a

radiative-moist convective quasi-equilibrium state, SOLA, 査読有, 10 巻, 2014, pp.112-116, DOI:10.2151/sola.2014-023

- ③⑩ Kodera, K., H. Mukougawa, and A. Fujii, Influence of the vertical and zonal propagation of stratospheric planetary waves on tropospheric blockings, J. Geophys. Res. Atmos., 査読有, 118 巻, 2013, pp.8333-8345, DOI:10.1002/jgrd.50650

[学会発表](計 364 件)

Yoden, S., Stratosphere-troposphere two-way dynamical coupling in the tropics through organization of moist convective systems, Asian Conference on Meteorology (ACM) 2017, 2017 年 10 月 23 日, 釜山(韓国)

Yoden, S., H.-H. Bui, and E. Nishimoto, Stratosphere-troposphere two-way dynamical coupling in the tropics through organizations of moist convective systems, Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-6), 2017 年 11 月 15 日, シンガポール

Taguchi, M., A study of different frequencies of major stratospheric sudden warmings in CMIP5 historical simulations, AOGS 14th Annual Meeting, 2017 年 8 月 10 日, シンガポール

Taguchi, M., Seasonal winter forecasts of the Northern stratosphere and troposphere: Results from JMA seasonal hindcast experiments, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年 5 月 23 日, 千葉市

Hirooka, T., R. Kato, N. Eguchi, Dynamical and minor constituent changes related to the anomalous QBO appearance in 2016, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年 5 月 23 日, 千葉市

Mukougawa, H., S. Noguchi, Y. Kuroda, R. Mizuta, and K. Kodera, Dynamics and predictability of downward propagation of stratospheric planetary waves promoting blocking formation over the north Pacific: A case study for March 2007, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017 年 5 月 23 日, 千葉市

Hirooka, T., T. Ohata, and N. Eguchi, Modulation of the semiannual oscillation induced by sudden stratospheric warming events, F-02, International Symposium on the Whole

Atmosphere, 2016 年 9 月 14 日, 東京
Yoden, S., Stratosphere-troposphere dynamical coupling in the tropics, Workshop on the stratosphere-troposphere dynamical coupling in the tropics, 2015 年 10 月 22 日, 京都市

[図書](計 7 件)

廣岡俊彦, 成層圏突然昇温, 河村公隆他編「低温と環境の科学事典」, 朝倉書店, 14-15, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

余田 成男 (YODEN SHIGEO)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 30167027

(2) 研究分担者

石岡 圭一 (ISHIOKA KEIICHI)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 90292804
向川 均 (MUKOUGAWA HITOSHI)
京都大学・防災研究所・教授
研究者番号: 20261349
水田 亮 (MIZUTA RYO)
気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官

研究者番号: 80589862

田口 正和 (TAGUCHI MASAKAZU)

愛知教育大学・教育学部・准教授

研究者番号: 50397527

(3) 連携研究者

榎本 剛 (ENOMOTO TAKESHI)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号: 10358765

小寺 邦彦 (KODERA KUNIHICO)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・客員教授

研究者番号: 70343887

廣岡 俊彦 (HIROOKA TOSHIHICO)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号: 90253393

鬼頭 昭雄 (KITOH AKIO)

筑波大学・生命環境科学研究科・主幹研究員

研究者番号: 50354452

村上 茂教 (MURAKAMI SHIGENORI)

気象庁気象研究所・気候研究部・主任研究官

研究者番号: 80354455

吉田 康平 (YOSHIDA KOHEI)

気象庁気象研究所・気候研究部・研究官

研究者番号: 10636038

内藤 陽子 (NAITO YOKO)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 50324603