

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14791

研究課題名(和文)乱流混合がUTLS付近の物質分布・熱収支に果たす役割について

研究課題名(英文)Role of the turbulent mixing on the vertical distribution of minor constituents and the thermal budget around the UTLS region

研究代表者

高麗 正史 (Kohma, Masashi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：80733550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：小スケールの乱流的な大気の運動は、大気中の微量成分の輸送・混合過程に寄与すると考えられている。本研究において、南極昭和基地にある大型大気レーダーによる観測から、小スケールの乱流を特徴づけるパラメータ(乱流エネルギー散逸率)を推定し、南極対流圏から中間圏までの大気現象、特に成層圏極渦や成層圏突然昇温に伴う乱流エネルギー散逸率の変動を明らかにした。また、対流圏-成層圏間の物質混合過程で重要と考えられている対流圏界面漏斗現象が、南極沿岸域で頻繁に発生していることを見出し、その力学機構を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大気境界層を除く対流圏から中間圏という広範な高度領域について南極上空の乱流の動態を明らかにした。天気予報・気候予測に用いられる数値シミュレーションにおいて、モデルで陽に取り扱えないほど小スケールの大気の運動の効果はパラメタリゼーションの手法で取り込まれている。しかしながら、それは大気境界層内の乱流に対して開発されたものであり、自由大気中での検証は、観測的知見の不足により十分に行われているとは言えない。本研究で明らかになった乱流強度の時空間変動は、乱流パラメタリゼーションとの比較を通じて、その検証が可能となることを意味する。

研究成果の概要(英文)：Small-scale turbulent atmospheric motion is considered to contribute to the transport and mixing processes of tracer in the atmosphere. In this study, we estimated parameters characterizing small-scale turbulence (turbulent energy dissipation rate) from observations by a large atmospheric radar at Syowa Station in the Antarctic region, and elucidated the variations in turbulent energy dissipation rate associated with atmospheric phenomena from the Antarctic troposphere to the mesosphere, particularly the stratospheric polar vortex and sudden stratospheric warming. Note also that we found that the tropopause folding event, which is thought to be important in the mass exchange between the troposphere and stratosphere, frequently occurs along the Antarctic coastline, and clarified its dynamic mechanism.

研究分野：大気科学

キーワード：乱流エネルギー散逸率 対流圏界面 対流圏界面漏斗現象 対流圏成層圏物質混合 中間圏 成層圏突然昇温

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

自由大気中の乱流パラメータ (乱流運動エネルギー散逸率、鉛直渦拡散係数) の推定は、1980 年台から大気レーダー観測に基づいて行われており、また、飛行機を用いたキャンペーン観測も行われている。ただし、それらが網羅する時空間領域には制限が大きく、乱流パラメータの全球的な分布や時間変動は明らかになっていない。一方で、乱流混合過程への知見の不足が、数値モデルにおける物質輸送の再現性向上の律速になっていると考えられており、モデル計算に対し束縛条件を与える観測的研究が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、南極昭和基地で 2012 年から観測を継続している南極昭和基地大型大気レーダー (PANSY レーダー)、ラジオゾンデ観測、水蒸気・オゾンゾンデ観測、及び再解析データを組み合わせた解析を行い、上部対流圏・下部成層圏での乱流パラメータの時空間変動要因の理解を目指した。研究を進める過程で、中間圏まで解析を拡張することで、南極域の中層大気全体の乱流強度の動態把握を目指した。

### 3. 研究の方法

次のような手順で乱流エネルギー散逸率の推定を行う。まず、PANSY レーダー観測により得られたドップラースペクトルのスペクトル幅から、乱流以外の効果によるスペクトルブロードニング成分を除去し、乱流に伴う速度分散を計算する。このとき、アンテナの分散配置を考慮したアルゴリズムを用いる (Nishimura et al., 2020)。次に、Kolmogorov の 3 次元等方スペクトルを用いて、速度分散からエネルギー散逸率を得る。以上の手順により、時間間隔約 200 秒、鉛直間隔約 150 m で乱流エネルギー散逸率が連続的に推定される (Kohma et al., 2019)。

大スケールの場の 3 次元構造は再解析データを用いて解析した。特に、極渦内外の乱流の特徴を調べるときには、渦位に基づく緯度座標 (等価緯度) を用いた。また、当初計画には含まれていなかったが、昭和基地上空で観測された重力波、及び、強い乱流の多層構造の成因について考察するために、米国の研究機関と共同してラージエディーションシミュレーション (LES) を用いた数値実験を実施し、その解析を実施した。

### 4. 研究成果

研究成果は、以下の 4 つに大別される。

#### a) 南半球極渦の乱流による特徴づけ

冬季南極成層圏に存在する極渦は、80 m/s を超えるような風速を持ち、水平方向 (等温位面に沿う方向) の混合を阻害する障壁として作用する。この輸送障壁により、極渦の縁辺部で大気微量成分の水平勾配が大きくなる。水平方向の混合過程については主にロスビー波が担うと考えられており、数値的・観測的研究がこれまで多くなされている。一方で、鉛直方向 (等温位面を横切る方向) の物質混合については、重力波など小さな鉛直スケールの現象が担うと予想され、ほとんど調べられていない。研究代表者らのこれまでの研究で、極渦の季節変化が、成層圏内の乱流の動態に関係することを示唆する結果が得られていた。そこで、渦位に基づく緯度 (等価緯度) を用いて、渦位-温位面に射影したエネルギー散逸率を解析した。極渦縁辺部は、極渦の十分内側に比べて、乱流エネルギー散逸率は大きくなることが分かった (図 1)。この結果は、極渦縁辺領域において、極渦の内側に比べて、乱流による混合過程・物質輸送が活発であることを意味し、水平方向の輸送過程とは対照的な振る舞いをすることを示唆している。

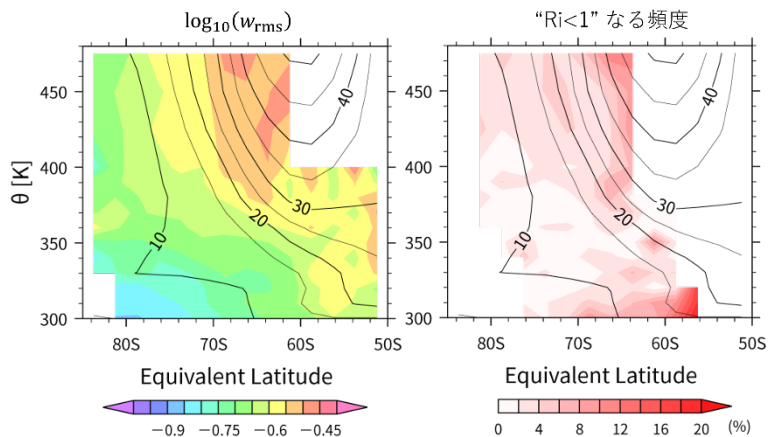


図 1 : 等価緯度-温位断面における (左) 乱流に伴う風速の RMS の常用対数と (右) Richardson 数が 1 未満となる頻度。

b) 中間圏の乱流エネルギー散逸率の季節変化と年々変動

中間圏（高度 50~80 km）の冬季に出現する極域中間圏冬季エコー（PMWE）に基づき、中間圏のエネルギー散逸率を推定した。エネルギー散逸率は冬季に極大となり、秋季・春季には小さくなる傾向が見られた。この季節変化は重力波活動の季節変化と概ね対応しており、重力波が中間圏における乱流生成の主要因であることを示唆している（Kohma et al., 2020）。

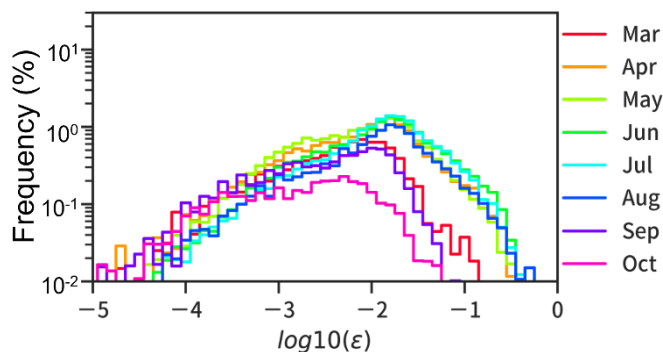


図 2：高度 70~75 km、太陽天頂角 90~95 度での乱流エネルギー散逸率の月ごとの頻度分布。

さらに、中間圏の乱流強度の年々変動に着目した研究も実施した。今回、2019 年 9 月に南半球で発生した成層圏突然昇温に伴う、中間圏のエネルギー散逸率、及び、極域中間圏冬季エコーの変動を調査した。昇温発生後に冬季エコーの出現頻度は著しく低下し、また、昇温発生後のエネルギー散逸率は、昇温発生前及び、昇温が発生していない年と比べて、有意に小さいことが判明した。冬季エコーの出現には強い乱流エネルギー散逸率が必要であることが知られており、突然昇温に伴う乱流エネルギー散逸率の低下により、冬季エコーの出現頻度が低下したと考えられる。次に、乱流エネルギー散逸率が低下した要因を考察した。中間圏の乱流生成の主要因は大气重力波の碎波であり、成層圏の昇温に伴い、重力波の鉛直伝播特性が変調されたことが、乱流エネルギー散逸率の低下を説明する可能性を考えた。それを検証するために、重力波の碎波条件を表す「臨界円」に基づく重力波伝播特性の診断手法を考案し、今回の事例に適用した。その結果、突然昇温の発生に伴い、重力波が伝播しにくい背景風速場となっていることが、明瞭に示された（Kohma et al., 2021）。

c) 南極沿岸域における対流圏界面漏斗現象の力学

対流圏界面は対流圏と成層圏の境界面である。対流圏と成層圏では、大气組成が異なっており、対流圏界面を通じた空気塊の交換・混合過程は、成層圏-対流圏物質交換（STE）過程として、長年研究が行われてきた。対流圏界面漏斗現象（Tropopause Folding; TF）は、上部対流圏 jet-front システムの発達に伴い対流圏界面が下降する現象であり、TF に伴う空気塊の交換・混合過程は、STE を担う主要過程の 1 つであると考えられている。本研究では、TF の南半球中高緯度域の気候学的特徴を、大气再解析データを用いて調べた。その結果、先行研究で知られている亜熱帯ジェット領域のみならず、南極沿岸域においても、TF の発生頻度の極大が存在することが明らかとなった。南極沿岸域は、気候学的なジェットやストームトラックは存在せず、今回見出された TF の発生頻度の極大は、南極固有の力学が働いていることを示唆する。さらに、南極沿岸域の TF の鉛直構造を調べると、大陸沿岸の斜面の向きと対流圏界面の折れ込み構造に関係があることが明らかとなった。これは南極大陸の存在が、TF の発生に影響を与えていることを示唆する。

この物理機構を調べるために合成図解析を実施した。TF の発生時には、総観規模の低気圧擾乱が南極沿岸域に接近し、擾乱の水平構造が南北方向に縮小することが判明した。さらに、WKB 近似の下で南極沿岸に接近する擾乱の時間発展を考察することで、南極沿岸域に気候学的に存在する東風、及び、強い渦位勾配により、擾乱の南北スケールの縮小が説明できることを示した。この東風と渦位勾配は、南極大陸沿岸の急峻な地形、及び、地表面での強い放射冷却により維持される。すなわち、南極大陸の存在により、南極大陸沿岸域において TF が発生しやすい場が形成されていることが明らかとなった（Kohma et al., 2022）。

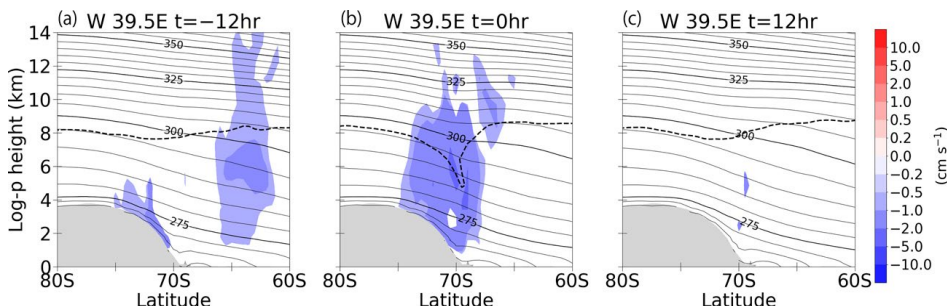


図 3：昭和基地上空での（色）鉛直風偏差、（等値線）温位、（破線）力学的対流圏界面高度の合成図。(a)TF 発生前の 12 時間前、(b) TF 発生時、(c) TF 発生後の 12 時間後。

d) 昭和基地上空で観測された重力波・強乱流層の数値実験

2021年5月18日に南極昭和基地のレーダーにより観測された大気重力波について、観測された水平風・温度の背景場の下で、高解像度モデルを用いたLES実験を実施した。この数値実験において、鉛直風擾乱の振幅や下部成層圏の北向き運動量の鉛直フラックスなど、観測された重力波の特徴がよく再現されていた。対流圏では、小さな海岸地形に沿ってShip-waveに似た特徴的な波状構造が現れていた。一方、成層圏では、背景風の鉛直変化に伴い、卓越する波の水平構造が大きく変化していた。臨界高度付近では、大きな渦度を持つ層が複数みられた。興味深いことに、レーダー観測においても、乱流エネルギー散逸率が大きな高度領域が複数層現れており、クリティカルレベル付近で、重力波の碎波が起きていることを示唆する。すなわち、本数値実験では、重力波の碎波、及び、それに伴う重力波の水平構造の高度変化を再現することができた。さらに、この計算の中には、地表付近で発生した跳流やその風下領域での重力波生成が現れており、これらと観測データを比較することで、南極上空の大気現象の階層構造・上下結合が明らかになると期待される。

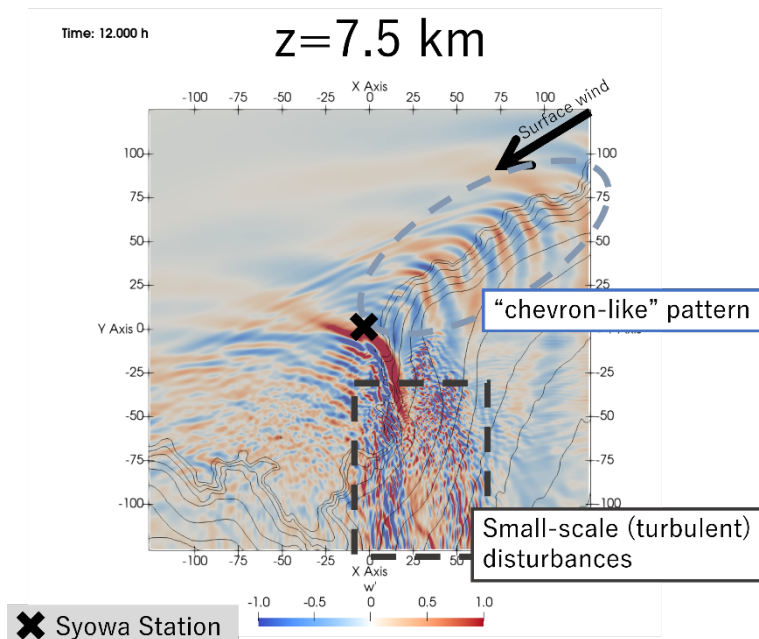


図 4: 南極昭和基地 (図の×印) を中心とする領域で実行した LES 計算で得られた、高度 7.5 km における鉛直風の水平図。パネル右上の矢印は地上風の向き (西南西向き) を示す。

研究期間全体を通じて、PANSY レーダーによる観測をもとに、大気境界層を除く対流圏から中間圏という広範な高度領域について南極上空の乱流の動態を明らかにしてきた。具体的には、これまで中層大気において水平方向の混合過程の障壁として作用することが知られていた成層圏極渦を乱流で特徴づけ、鉛直方向の混合が起りやすいことを明らかにした。対流圏界面漏斗現象の南極沿岸域で特異性を明らかにすることができた。今後、対流圏界面漏斗現象を含む様々な気象システムを乱流によって特徴づけ、また、それに伴う混合過程を明らかにするための基礎を与える成果が得られたと言える。さらに、研究開始当初予定していなかった高解像度数値実験を実施することにより、大気重力波の碎波及びそれに伴う乱流発生過程をシミュレーションし、それをレーダー観測と比較する事例研究を行うことができた。このような研究を発展させ、PANSY レーダーによる長期観測によって捉えられた、重力波及び強い乱流発生事例についての事例研究を積み重ねることで、それらの一般性を検証する研究につながると考えられる。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kohma Masashi、Mizukoshi Masatoshi、Sato Kaoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamical analysis of tropopause folding events in the coastal region of Antarctica	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 1~31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-21-0858.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kohma M.、Sato K.、Nishimura K.、Tsutsumi M.	4. 巻 48
2. 論文標題 Weakening of Polar Mesosphere Winter Echo and Turbulent Energy Dissipation Rates After a Stratospheric Sudden Warming in the Southern Hemisphere in 2019	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021GL092705	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kohma M.、Sato K.、Nishimura K.、Tsutsumi M.、Sato T.	4. 巻 125
2. 論文標題 A Statistical Analysis of the Energy Dissipation Rate Estimated From the PMWE Spectral Width in the Antarctic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JD032745	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nishimura Koji、Kohma Masashi、Sato Kaoru、Sato Toru	4. 巻 58
2. 論文標題 Spectral Observation Theory and Beam Debroadening Algorithm for Atmospheric Radar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 6767~6775
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TGRS.2020.2970200	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsushita Yuki、Kado Daiki、Kohma Masashi、Sato Kaoru	4. 巻 38
2. 論文標題 Relation between the interannual variability in the stratospheric Rossby wave forcing and zonal mean fields suggesting an interhemispheric link in the stratosphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annales Geophysicae	6. 最初と最後の頁 319 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/angeo-38-319-2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kohma Masashi、Sato Kaoru	4. 巻 76
2. 論文標題 A Diagnostic Equation for Tendency of Lapse-Rate-Tropopause Heights and Its Application	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences	6. 最初と最後の頁 3337 ~ 3350
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JAS-D-19-0054.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 高麗 正史	4. 巻 66
2. 論文標題 極域対流圏界面雲の出現に関する力学的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 天気	6. 最初と最後の頁 411 ~ 419
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24761/tenki.66.6_411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kohma, M., Sato, K., Tsutsumi, M., and Nishimura, K.
2. 発表標題 Estimation of turbulent energy dissipation rates in the mesosphere by a VHF radar in the Antarctic
3. 学会等名 SPARC Gravity Wave Symposium 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohma, M., and K. Sato
2. 発表標題 Analyses of the Seasonal Variation of the Tropical Tropopause Height Using a Diagnostic Equation for the Lapse-rate-tropopause Heights
3. 学会等名 AOGS 18th Annual Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫、堤雅基、西村耕司
2. 発表標題 南極UTLS領域における乱流パラメータの極渦・総観規模擾乱への依存性
3. 学会等名 PANSY研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, K. Nishimura, and M. Tsutsumi
2. 発表標題 A statistical analysis of the turbulent parameters of the PMWE observed by the PANSY radar at Syowa Station (69S, 40E) in the Antarctic
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫
2. 発表標題 熱帯域のLapse-Rate Tropopause高度の季節サイクル
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, K. Nishimura, and M. Tsutsumi
2. 発表標題 Time variations of PMWE and turbulent energy dissipation rate after SSW in the Southern Hemisphere in 2019
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohma, M., and K. Sato
2. 発表標題 A Diagnostic Equation for Tendency of Lapse-Rate-Tropopause Heights and its Application
3. 学会等名 WCRP/SPARC SATIO-TCS joint workshop on Stratosphere-Troposphere Dynamical Coupling in the Tropics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohma, M., and K. Sato
2. 発表標題 A Diagnostic Equation for Tendency of Lapse-Rate-Tropopause Heights and its Application
3. 学会等名 100th AMS Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, K. Nishimura, M. Tsutsumi, T. Sato
2. 発表標題 A statistical analysis of the spectral width of the PMWE observed by the PANSY radar at Syowa Station (69° S, 40° E) in the Antarctic
3. 学会等名 The 10th Symposium on Polar Science, National Institute of Polar Research (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫
2. 発表標題 北極域のLapse-Rate Tropopause高度の季節サイクル
3. 学会等名 日本気象学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kohma, M., K. Sato, K. Nishimura, M. Tsutsumi, and T. Sato
2. 発表標題 A statistical analysis of the spectral width of the PMWE observed by the PANSY radar at Syowa Station (69° S, 40° E) in the Antarctic
3. 学会等名 Layered Phenomena in the Mesopause Region (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫、西村耕司、堤雅基、佐藤亨
2. 発表標題 南極大型大気レーダー (PANSY) で推定された南極上空の乱流エネルギー散逸率
3. 学会等名 MUレーダー・赤道大気レーダーシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高麗正史、佐藤薫、西村耕司、堤雅基、佐藤亨
2. 発表標題 南極UTLS領域における乱流パラメータの極渦・総観規模擾乱への依存性
3. 学会等名 地球惑星科学連合2019年大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者のホームページ  
<https://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kohmasa/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	GATS, Inc.			