

令和元年6月25日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02137

研究課題名(和文) 南半球での超高層大気下部の大気重力波マッピング:ANGWIN網による空白域の調査

研究課題名(英文) Mapping of atmospheric gravity waves in the southern hemisphere at the bottom of the upper atmosphere --- Investigation of the blank area by ANGWIN network

研究代表者

中村 卓司 (Nakamura, Takuji)

国立極地研究所・研究教育系・教授

研究者番号：40217857

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,690,000円

研究成果の概要(和文)：地球大気の高さ100kmまでの全球的な循環(大循環)を駆動する「大気の波」である大気重力波について、もっとも活発な領域の一つでありながら、地理的制約からこれまで観測研究が遅れていた南半球高緯度すなわち南極域に焦点をあて、近年南極各地で観測が行われている大気光(超高層大気の発光現象)の高感度カメラ観測の画像を解析して、大気重力波の未知の特性を明らかにした。連続画像から波のエネルギーや伝搬特性を調べることができる解析法を開発し、南極のみならず世界各地の画像観測に適用できる汎用ソフトウェアを得た点も特筆できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、気候モデルや気象予報モデルの改良に重要なインプットとなるとともに、研究過程で開発した画像解析手法、すなわち2次元の連続画像から波状構造のエネルギーと伝搬特性を解析する手法は広く多種多様な科学的イメージングの解析に応用可能である。また、国際協力で実施されている南極観測においてその解析を日本がリードしたことは、地球惑星科学的成果のみならず、国境がなく科学的調査でのみ存在感を示すことのできる南極条約の協議国での地位向上にも貢献する。

研究成果の概要(英文)：Atmospheric gravity waves is the wave in the atmosphere, which drives general circulation of the earth's atmosphere with a top height of ~100 km. The Antarctic region, or the high latitude in the southern hemisphere, is one of the regions of the strongest gravity wave activity. However, lack of observations there limits our knowledge of such waves. This study used recent airglow imaging observations with high sensitive cameras at several Antarctic stations, and clarified unknown characteristics of the Antarctic gravity waves. Also achieved is the development of a general purpose software to analyze time series of image data obtained at various worldwide stations.

研究分野：超高層物理学、地球大気計測

キーワード：南極大陸 大気重力波 大気光イメージング 中間圏下部熱圏 ANGWIN アルゼンチン 伝搬方向

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

気候変動が身近な関心事となりその精密な予測が政策決定にも重要となってきた。気候変動の予測のモデル計算(気候モデル)で使われるグローバルな大気の大循環モデル(GCMモデル)の精度向上は、従って、いやおうなく関心事となってきている。近年の計算機能力の向上で可能になった高分解能GCMの結果からは、これまでの数値モデル、気候モデルでの大気重力波による運動量輸送の取扱いに大きな問題があることが指摘されてきた。モデルの検証と改善のためには大気大循環の上部である熱圏下部での大気重力波の観測データ、とくに重力波励起が盛んだがデータの少ない南半球の観測データを「観測モデル」として取りまとめることが急務となってきた。

一方で、近年、地表から熱圏・電離圏(高度数百~千km)までの大気を一体のシステムとして捉える「全大気モデル(Whole Atmosphere Model)」が発展してきている。熱圏下部での大気重力波による運動量の輸送をいかに再現するかが電離圏・熱圏のモデルの成否を分けることになる為、中間圏・下部熱圏の大気重力波、特に「アンデス・南極半島」を中心に活発に大気重力波が励起されることが成層圏の衛星観測などで明らかな南半球中高緯度域を押さえることが課題であった。

本研究の背景としてはこのように気候モデル改善と全球大気の理解再現の両方の意味で南半球の大気重力波の観測空白域を集中的に観測研究する重要性が高まっていた状況がある。

### 2. 研究の目的

中層大気および全大気圏において大気上下結合の主役である南半球の大気重力波を超高層大気(熱圏)下部のネットワーク観測の集中解析で明らかにする。すなわち、「大気上下結合」において理解が遅れている「南極域周辺」の力学的結合を取り上げ、アンデス山脈や南極半島で強く励起される大気重力波の、大気大循環の上端である高度100km付近での水平ベクトル的な伝搬エネルギー分布を定量的にマッピングし、大気大循環に影響し気候変動予測にも重要となる中層大気中の伝搬と熱圏を含む全大気システムで重要となる超高層大気下部の境界条件の双方を明らかにする。このため、「南半球、特に南極域の超高層大気下部(100km高度)大気重力波」に焦点をあて、強度マッピングを2次元水平位相速度分布として求め、地表付近から超高層大気に伝わる大気重力波の動きを季節変化、年々変動として捉える。併せて、2011年から南極域で国際的に展開が進められてきたANGWINネットワーク(網)を強化・活用し、わが国独自の解析手法も活用してその地位を確立する。

### 3. 研究の方法

本研究の2本の柱は、「観測の強化」と「新手法のデータ解析」であり、国際協力でこれを実施した。具体的には、下記の課題を設定して遂行した。

#### 課題1、イメージャネットワーク観測調査

南極域のANGWIN観測網、とくに南極半島から昭和基地(Syowa基地)の領域に新たに開発した装置を展開し、良質な大気光イメージングデータを取得する。

#### 課題2、大気重力波の統計解析調査

ネットワークの多点での大気光イメージング観測に汎用に適用できる新方式の3次元スペクトル解析法(M-変換)のソフトウェアパッケージを開発し、多点および多年度にわたる観測データを解析調査する。

#### 課題3、高エネルギー粒子降込みの影響の評価

高緯度帯特有の超高層大気からの高エネルギー粒子の降込み、オーロラ活動の影響について、測定上のコンタミネーションおよび加熱による上層からの大気重力波の割合について評価する。

#### 課題4、中低緯度との結合の調査

中低緯度の衛星観測および地上観測データを拡大調査することで、高分解能GCMで示唆されている中緯度から高緯度への重力波の伝搬等緯度間の結合・運動量輸送を調査する。

### 4. 研究成果

(1)南極域のANGWINネットワークのイメージャ観測点4点(Syowa基地(69S,40E)、Davis基地(69S,78E)、Halley基地(76S,27W)、McMurdo基地(78S,167E))の2014年4-5月の2ヶ月間の同時観測データを収集し、研究代表者らが開発したスペクトル解析手法(M-変換)を用いて重力波の活動(エネルギー)を2次元の水平位相速度スペクトルとして比較した。その結果、伝搬方向の大きな日々変化とサイト間の伝搬方向の違いが見いだされたが、平均スペクトルとしては、その強度すなわちエネルギーは高緯度ほど急激に減少する傾向が見られ、緯度9度で1/5程度に減少していた。また、伝搬方向は、Syowa, Halley, McMurdoの3地点において、冬季の中層大気ジェットの方法と逆

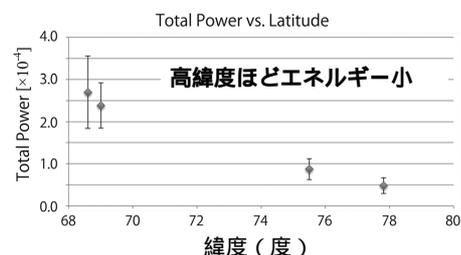


図1 大気光イメージングによる大気重力波のエネルギーの緯度分布。高度=90km。(Matsuda et al., 2017)

方向のほぼ西向きに伝搬をしていたのに対して、Davis 基地のみが明確な方向性を示さず、ほぼ全方向に向けた伝搬を示した。これらのことから、少なくとも Davis 基地上空においては、成層圏の東向きジェットより高度で大気重力波が励起されていることが示され、重力波の2次励起の可能性を強く示唆した。距離がわずか1500kmしか離れておらず同一緯度(69S)にあるSyowa基地とDavis基地の両者で大きく特性が異なることは一種の驚きの発見であった。

(2)大気重力波観測に特化した高感度かつオーロラ光による不要干渉を極力防いだ大気光イメージャとして、InGaAs 素子による近赤外 OH 大気光全天イメージャを開発した。このイメージャを Syowa 基地の旧来のイメージャと取り替えることで画像取得間隔を従来の1 - 2分から5-10秒と大幅に改善し、また信号対雑音比も改善した。これまで日本の南極観測で使用していた大気光イメージャは、オーロラ帯に位置する Syowa 基地での強力なオーロラ発光による干渉を防ぐためにナトリウム大気光を観測するなどしていたが感度が十分に得られないことが問題であったがこの点が大幅に改善された。さらに同イメージャを南極半島により近いホットスポットの南米大陸最南端付近の Rio Gallegos に2017年に設置して定常観測を行い、ANGWIN 観測網を拡大しての観測ネットワーク構築を行った。これらの新たなイメージャ観測により、Davis 基地と Syowa 基地の間で高感度イメージャでの同時観測から2016年1年間の比較を詳細に行い、とくに大気重力波の励起領域が各夜では観測点からみて様々な方向に局在していることや、成層圏より上での2次波の発生が顕著であることが示されたほか、アンデス周辺での強い大気重力波の発生も捉えられるなど、興味ある観測結果が解析で得られており、今後の研究の発展に大きく資することが示された。

(3)Davis 基地上空と Syowa 基地上空で大きく大気重力波の伝搬方向特性が異なるという発見を受け、両基地で長期に観測を実施している中波(MF)レーダーおよびレイリーライダーに解析対象を広げ、比較研究を実施した。その結果、とくに Syowa 基地の2010年から2015年の5年間の観測データからは、季節変化、高度変化を詳細に解析し、高度20km付近に大気重力波(鉛直波長1.8-16km, 周期2時間以上)の局所的な極大が定常的に存在することを発見したほか、冬期から夏期への背景風速の移行が大気重力波のエネルギーの高度分布に大きく影響していることを示し、とくに東西風速が0m/sとなる高度の影響が顕著であることから観測された重力波は水平位相速度が小さい地形性励起のものが多いことが示唆されるなど、有用な知見が得られた。また、Davis 基地でのライダー観測との比較から Davis 基地では成層圏上部に Syowa 基地には見られないエネルギーの増大部があり、Davis 上空での2次波の発生の多さを示唆する結果を得た。さらに、2014年8月に Syowa 基地上空で高度50-60kmの大気重力波エネルギーが半月間ほど一桁以上増大するイベントを見だし、このときの増大原因を客観解析データ・MFレーダーデータ等による南半球の風速温度場データとレイトレーシングによって研究した。その結果、増大現象は極夜ジェットの緯度高度分布が特定の形状であるときに地表付近から上方に伝搬する大気重力波が屈性して収束することにより生じることを見だし、大気重力波の3次元伝搬過程を考慮する重要性を示唆した。

(4)南極域での地上からの観測に加えて衛星からの大気光等のイメージング観測を解析することも併用して、南極域・南半球高緯度と中緯度のカップリングやよりグローバルな大気重力波の動態を明らかにした。国際宇宙ステーションによるIMAP/VISIのO2大気光イメージャから同心状の大気重力波およびポア構造を解析し、低中緯度から高緯度にかかる緯度分布や特性変化を明らかにしたほか、NASAのAIM衛星CIPSイメージャ観測からは温度場の南極上空での顕著な経度依存性を明らかにし、大気潮汐波とプラネタリ波が大気重力波などの経度依存性をもたらすことを示唆した。また、地上からのイメージャ観測の解析範囲を中緯度から低緯度に広げることで、とくにインドネシア低緯度での強い重力波活動とその間欠性も定量的比較から初めて明らかにした。

以上、本研究課題はイメージングデータの解析手法M変換を汎用ソフトウェアパッケージとして完成させ、広く公開・普及する成果を得たとともに、高感度イメージャの開発でANGWIN観測網を拡大することに成功した。また、開発したM変換手法で南極域のみならず多くの地点

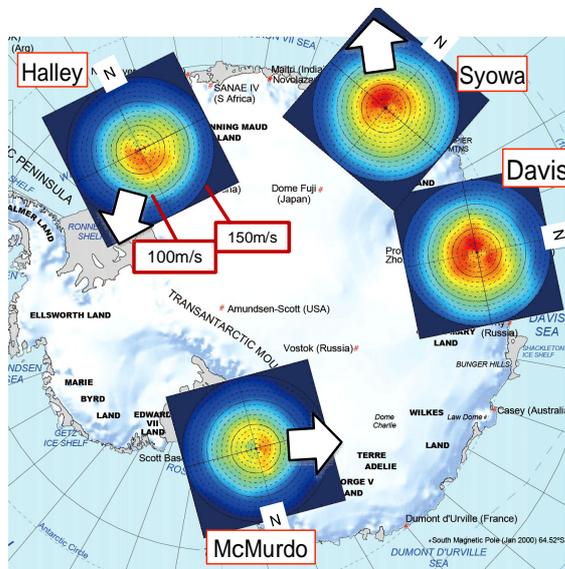


図1 大気重力波の水平伝搬方向を示す水平位相速度スペクトル(M変換による)。Matsuda et al., 2017より改変

のイメージ観測データを定量的に解析し、ライダー等他の地上観測データも組み合わせて南半球を中心とする大気重力波の特性を明らかにするとともに、衛星観測も組み合わせることにより広範な地域の大気重力波の特性を把握し、南半球の大気重力波に関する知見を大幅に刷新した。併せて、本研究課題は3名の大学院生の博士学位取得に大きく貢献したほか、ANGWIN観測網は国際学術会議(ISC)の南極研究観測委員会(SCAR)の物理科学部会でアクショングループとして正式に位置づけられ、我が国の存在感を高める結果ともなった。また、海外からも院生を招聘して我々の解析手法を指導し、業界での標準化を進めた。このような当初の想定を上回る成果を創出するにあたり、ぜひともこの資産を継続発展させる研究プロジェクトを今後立ち上げたいと強く感じる。

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計12件)

Hozumi, Y., Saito, A., Sakanoi, T., Yamazaki, A., Hosokawa, K., & Nakamura, T. (2019). Geographical and seasonal variability of mesospheric bores observed from the International Space Station. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 3775–3785.  
doi:10.1029/2019JA026635

Perwitasari, S., T. Nakamura, M.Kogure, Y. Tomikawa, M.K.Ejiri, and K. Shiokawa, Comparison of gravity wave propagation direction observed by mesospheric airglow imaging at three different latitudes by using M-transform, *Ann. Geophys.*, 36, 1597–1605, 2018,  
doi:10.5194/angeo-36-1597-2018

Kogure, M., Nakamura, T., Ejiri, M. K., Nishiyama, T., Tomikawa, Y., & Tsutsumi, M. (2018). Effects of horizontal wind structure on a gravity wave event in the middle atmosphere over Syowa (69°S, 40°E), the Antarctic. *Geophysical Research Letters*, 45, 5151–5157.  
doi:10.1029/2018GL078264

Matsuda, T. S., T. Nakamura, M. K. Ejiri, M. Tsutsumi, Y. Tomikawa, M. J. Taylor, Y. Zhao, P.-D. Pautet, D. J. Murphy, and T. Moffat-Griffin (2017), Characteristics of mesospheric gravity waves over Antarctica observed by Antarctic Gravity Wave Instrument Network imagers using 3-D spectral analyses, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 8969–8981,  
doi:10.1002/2016JD026217.

Kogure, M., T. Nakamura, M. K. Ejiri, T. Nishiyama, Y. Tomikawa, M. Tsutsumi, H. Suzuki, T. T. Tsuda, T. D. Kawahara, and M. Abo (2017), Rayleigh/Raman lidar observations of gravity wave activity from 15 to 70 km altitude over Syowa (69°S, 40°E), the Antarctic, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 7869–7880,  
doi:10.1002/2016JD026360.

Perwitasari, S., T. Sakanoi, T. Nakamura, M. K. Ejiri, M. Tsutsumi, Y. Tomikawa, Y. Otsuka, A. Yamazaki, and A. Saito (2016), Three years of concentric gravity wave variability in the mesopause as observed by IMAF/VISI, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 11,528–11,535,  
doi:10.1002/2016GL071511.

### 他計12件

#### [学会発表](計67件)

Nakamura, T.他、Mesosphere and lower thermosphere observations at Syowa Station, the Antarctic (69S, 40E), 12<sup>th</sup> International workshop on Layered Phenomena in the Mesopause Region, 2015 (国際学会、招待講演)

Nakamura T.他、Studies on Vertical Couplings by Gravity Waves over the Antarctic with the Ground-based Observations, Second VarSITY General Symposium, 2017 (国際学会、招待講演)

Tanaka, Y. 他、IUGONET TOOLS for Solar Terrestrial Physics Research, Second VarSITY General Symposium, 2017 (国際学会、招待講演)

Nakamura, T. 他、Spectral Analyses of Airglow Imaging, the 3<sup>rd</sup> COSPAR Symposium, 2017 (国際学会、招待講演)

他、招待講演7件、国際学会51件含む計67件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：齊藤 昭則

ローマ字氏名：(SAITO, akinori)

所属研究機関名：京都大学

部局名：理学研究科

職名：准教授

研究者番号(8桁)：10311739

研究分担者氏名：三好 勉信

ローマ字氏名：(MIYOSHI, yasanobu)

所属研究機関名：九州大学

部局名：理学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：20243884

研究分担者氏名：田中 良昌

ローマ字氏名：(TANAKA, yoshimasa)

所属研究機関名：国立極地研究所

部局名：研究教育系

職名：特任准教授

研究者番号(8桁)：50425766

研究分担者氏名：鈴木 臣

ローマ字氏名：(SUZUKI, shin)

所属研究機関名：愛知大学

部局名：地域政策学部

職名：准教授

研究者番号(8桁)：60397479

研究分担者氏名：堤 雅基

ローマ字氏名：(TSUTSUMI, masaki)

所属研究機関名：国立極地研究所

部局名：研究教育系

職名：教授

研究者番号(8桁)：80280535

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：江尻 省

ローマ字氏名：(EJIRI, Mitsumu)

研究協力者氏名：西山 尚典  
ローマ字氏名：(NISHIYAMA, takanori)

研究協力者氏名：坂野井 健  
ローマ字氏名：(SAKANOI, takeshi)

研究協力者氏名：松田 貴嗣  
ローマ字氏名：(MATSUDA, takashi)

研究協力者氏名：木暮 優  
ローマ字氏名：(KOGURE, masaru)

研究協力者氏名：ペルウィタサリ セプティ  
ローマ字氏名：(PERWITASARI, septi)

研究協力者氏名：テラー マイク  
ローマ字氏名：(TAYLOR, mike)

研究協力者氏名：マーフィー ダミアン  
ローマ字氏名：(MURPHY, damian)

研究協力者氏名：リウ アラン  
ローマ字氏名：(LIU, alan)

研究協力者氏名：ユエ ジア  
ローマ字氏名：(YUE, jia)

研究協力者氏名：バゲストン バレンチン  
ローマ字氏名：(BAGESTON, valentin)

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。