

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340134

研究課題名(和文) 気候システムにおける大気重力波の直接・間接効果の研究

研究課題名(英文) Direct and indirect effects of atmospheric gravity waves on the climate system

研究代表者

佐藤 薫 (Sato, Kaoru)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90251496

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：大気重力波の地球気候に及ぼす影響には、運動量の再配分による大循環の維持や駆動等の直接効果と、温度揺動により雲量を変調しオゾン等大気化学に影響する間接効果がある。本研究では、高解像大循環モデルや化学気候モデルデータを用いて、重力波の直接効果は平均風による移流や屈折により、発生源上空だけでなく広く及ぶこと、成層圏突然昇温の回復過程において重力波は本質的であること、夏半球成層圏循環は重力波強制が主要な駆動源であることを示した。衛星高解像データによりオゾン化学への重力波間接効果を定量化した。また今後の高解像データ解析に必須の3次元物質循環に関するロスビー波・重力波の統一理論の構築に成功した。

研究成果の概要(英文)：The effects of gravity waves (GW) in the earth climate are categorized into two: direct effects through their ability to deposit momentum to drive the general circulation, and indirect effects on the ozone chemistry through their temperature fluctuations to modulate polar stratospheric cloud amounts. Using data from a high-resolution general circulation model and a chemistry climate model, it was shown that GW forcing is distributed much wider than the source region by significant refraction and advection by the mean flow, that GW forcing is critical to the dissipation phase of the sudden stratospheric warming, and that the main forcing to drive the stratospheric circulation in the summer hemisphere is attributable to GW. By analyzing satellite data, GW indirect effect on the ozone chemistry is quantified. Moreover, we succeeded in formulation of a unified theory of the 3-d circulation driven by Rossby waves and GW that is inevitable for future studies using high-resolution data.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：中層大気 大気重力波 大気大循環 極成層圏雲 オゾンホール ロスビー波 コリオリカ

## 1. 研究開始当初の背景

重力波は、その鉛直運動量輸送能力により、中緯度対流圏界面付近に位置する西風ジェット構造の強さ、中間圏界面弱風層の維持、下部成層圏準2年周期振動(QB0)の駆動等に本質的な役割を担い(重力波の直接効果)重力波が駆動する物質循環の鉛直流による温度変化や、重力波に伴う温度揺らぎが極成層圏雲の雲量を変調し、オゾンの量や分布を変化させるなど(重力波の間接効果)地球気候に重要な役割を担うと考えられている。しかしながら時空間スケールが小さいため、気象・気候予測モデルで解像することができず、重力波はパラメタリゼーションの形でその作用のみが組み込まれている。これまで、様々な重力波パラメタリゼーションが提案されてきたが、重力波は、山岳波を除き発生機構もよくわかっておらず、波の性質を極度に単純化して表現しているのが現状である。また、重力波は3次元に伝播しうるのに鉛直伝播のみ考える、非地形性重力波の発生源は様々なものが考えられるのに全球一様とする、などの大胆な仮定がおかれていることが多い。

これに対し、2000年代になると、衛星観測技術の進歩により重力波の温度位相構造が宇宙から捉えられるようになり、重力波に伴う運動量フラックスの上限値やエネルギーの全球分布が徐々に明らかとなってきた。また、地球シミュレータ等計算機技術の進歩により重力波解像可能な大循環モデルが利用可能となった。さらに、観測データの同化手法も進歩し、モデル予測値と観測値との差から重力波作用を推定する試みも行われるようになった。そして、現在、重力波研究は再び国際的な盛り上がりを見せており、重力波パラメタリゼーションへの束縛条件を明確化しようという活動が始まっている。

## 2. 研究の目的

重力波の直接効果および間接効果が評価可能な様々なデータを用いて集中的に解析し、その特徴をより詳細に明らかにするとともに、気候予測モデルにおける重力波パラメタリゼーションに必要な束縛条件を具体的かつ定量的に明らかにする。またこれらのデータ解析に必要な理論構築も行う。具体的には以下の研究を行う。

(1) 重力波は鉛直のみにかつ瞬時に伝播するという仮定がパラメタリゼーションでは用いられることが多いが、実際は3次元に伝播しうる。3次元伝播が波強制の分布にどのように影響するかを明らかにする。

(2) ダウンワードコントロール理論を駆使し、重力波の直接効果を診断的に定量化する。

(3) オゾン化学に重要な極成層圏雲の雲量に対する重力波の寄与を定量化する。また、最近注目されている極成層圏雲と上部対流圏の同時出現メカニズムも解明する。

(4) 重力波・ロスビー波の駆動する3次元ラグランジュ流の定式化を行う(重力波・ロスビー波統一理論)。

(5) 重力波はロスビー波に比べて強い鉛直風成分を伴うため、通常気象力学では無視される地球の自転の水平成分に起因するコリオリ力( $f_H$ 力)が無視できない可能性がある。 $f_H$ 力を残したときの重力波特性を理論的に明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 上記目的の(1)については、既存の重力波解像大気大循環モデルによるシミュレーションデータを重力波線形力学理論駆使して解析する。特に、観測データが不足している南半球の重力波特性や、最近注目されるようになった、成層圏突然昇温時の中間圏の構造や緩和過程における重力波の役割に着目する。

(2) 上記目的の(2)については、化学気候モデルによる21世紀予測データを用いて解析する。用いた化学気候モデルの妥当性については、期間の重なる長期気候モデルを用いた解析を行い、これと比較して確認する。

(3) 上記目的の(3)について、極成層圏雲、水蒸気、硝酸等の衛星観測データ、気候解析データを組み合わせた解析を行う。

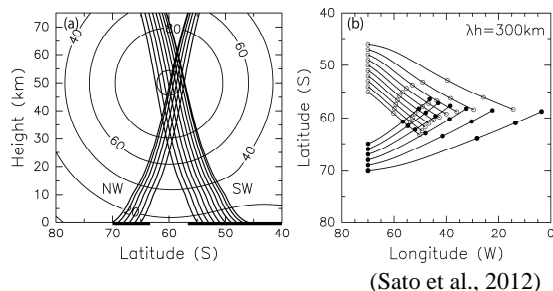
(4) 上記目的の(4)、(5)については紙と鉛筆で考察する。理論の妥当性の検証を行い有効性を示すため、必要に応じて、高解像モデルデータや観測データ等を解析する。

## 4. 研究成果

(1) 高解像度大気大循環モデルによるシミュレーションにおいて現れた成層圏突然昇温現象の詳しい解析を行い、その形成過程と消滅過程におけるプラネタリー波(ロスビー波)と重力波の役割を定量的に解明した。特に、消滅期(西風回復期)は2期に分けられ、初期においては中間圏における惑星規模不安定波の寄与が大きく、後期においては放射だけでなく重力波による加速が効いている可能性(重力波の直接効果)があることなど新しい事実が明らかとなった。

(2) 高解像度大気大循環モデルデータを用いた南半球重力波の季節変化や水平分布を

明らかにし、理論的な考察を行った。その結果、水平鉛直2次元理論においては、水平に伝播しないとされる地形性重力波が、3次元場においては、波数ベクトルに直交方向の平均流によって移流される効果が大いこと、冬季極域成層圏中部に存在する安定度の不連続性により内部反射が起きることなどが明らかとなった。これは重力波の直接効果が重力波の発生した地点の上空だけでなく、水平に広く及ぶことを示唆している。



(3) 衛星観測や重力波パラメタリゼーションを含む気候モデル、重力波解像大循環モデルによる重力波の全球分布の比較解析を行った。スイスの国際宇宙科学研究所の重力波チームにおける国際共同研究である。研究代表者の研究グループによる重力波解像大循環モデルでシミュレートされた重力波は衛星観測や重力波パラメタリゼーションを含む気候モデルと全球分布や振幅において特徴がよく一致することが確認できた。さらに、新たな知見として夏半球極域において、現在のパラメタリゼーションは重力波の振幅が強すぎるなどが明らかとなった。これは夏半球中層大気東風ジェットが低緯度よりになる気候モデルの系統誤差の原因である可能性がある。

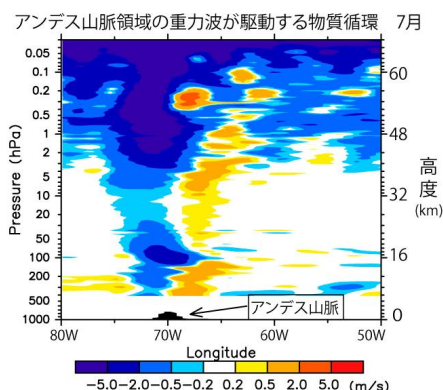
(4) 化学気候モデルによる21世紀予測実験データを用いて成層圏物質循環における重力波の直接効果の解析を行った。化学気候モデルにおいては、重力波はサブグリッドスケールであり、パラメタリゼーションとしてその作用が組み入れられている。この重力波ドラッグが物質循環の形や強さに与える影響を、変形オイラー平均方程式系の残差子午面循環や、ダウンワードコントロール理論を駆使して重力波と他の波を切り分けて解析した。その結果、特に冬循環の夏半球側上昇流に大きく寄与するという新しい知見が得られた。

(5) 衛星GPS掩蔽観測データ、衛星搭載のライダー観測データ、衛星による水蒸気・硝酸観測データ、再解析気候データを用いて、ロスビー波、総観規模波、重力波に伴う温度擾乱の極成層圏雲量への寄与を定量的に推定し、その力学メカニズムを調べた。これは重力波に伴う温度揺らぎが雲量を変調し、オゾン化学に影響するという、重力波の間接効果に関

する研究である。その結果によれば、両半球いずれについてもロスビー波の寄与が最大であった。しかしながら、南半球では、成層圏下端の低緯度側で総観規模波が、高緯度側で重力波が大きく寄与していることが明らかとなった。

また、極成層圏雲と対流圏上部の雲の同時出現について、その頻度や季節特性を解析し、同時出現のメカニズムを特定した。その結果、先行研究で推察されていたような低気圧に伴う水蒸気の鉛直輸送ではなく、背の高いブロッキング高気圧の存在が同時出現しやすい場をもたらしていることがわかった。

(6) 重力波を含むデータ解析に必要な理論の構築を行った。これまでの研究で提案されてきた、波の駆動する物質循環を3次元に記述する理論式は、ロスビー波と大気重力波のいずれかの内部波にしか適用できないものであった。そこで、両者の特性を含む統一分散関係式を導出し、全ての波に適用可能な3次元理論式を新たに導いた。また、重力波とロスビー波の伝播を空間3次元において記述する波活動度フラックスも新規に導出した。



(Kinoshita and Sato 2013)

(7) 通常考えられていない地球自転の水平成分に起因するコリオリ力( $f_H$ 力)による重力波特性の変化を理論的に調べた。波の特性を記述する偏波関係式・分散関係式を導出し、波数・周波数空間におけるそれぞれの領域においての、鉛直群速度の向きを力のバランスから説明できることを示した。また、 $f_H$ 力があると安定度の低い領域に捕捉波が存在することを理論的に見出し、現実大気のデータ解析を行って、その存在を確認した。

さらに $f_H$ 力を考慮した沿岸捕捉波の理論特性に関する研究も行った。特性を理論的に明らかにした。その結果、通常のケルビン波とは逆向きに伝播する捕捉波があること、地面付近に捕捉されるロスビー波があることなどがわかった。

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13件)

Kinoshita, T., and K. Sato, A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 70, 1603-1615, doi:10.1175/JAS-D-12-0138.1, 2013.

Kinoshita, T., and K. Sato, A formulation of three-dimensional residual mean flow applicable both to inertia-gravity waves and to Rossby waves, *J. Atmos. Sci.*, 査読有, 70, 1577-1602, doi:10.1175/JAS-D-12-0137.1, 2013.

Kohma, M., and K. Sato, Kelvin and Rossby waves trapped at boundaries under the full Coriolis force, *SOLA*, 査読有, 9, 9-14, doi:10.2151/sola.2013-003, 2013.

Yasuda, Y., and K. Sato, The effect of the horizontal component of the angular velocity of the Earth's rotation on inertia-gravity waves, *J. Met. Soc. Japan*, 査読有, 91, 23-41, DOI:10.2151/jmsj.2013-102, 2013.

Kohma, M. and K. Sato, Simultaneous occurrence of polar stratospheric clouds and upper-tropospheric clouds caused by blocking anticyclones in the Southern Hemisphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, 13, 3849-3864, doi:10.5194/acp-13-3849-2013, 2013.

Nishimura, K., T. Nakamura, T. Sato and K. Sato, Adaptive Beamforming Technique for Accurate Vertical Wind Measurements with Mult-channel MST Radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 査読有, 29, 1769-1775, doi:10.1175/JTECH-D-11-00211.1, 2012.

Tomikawa, Y., K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, and M. Takahashi, Growth of planetary waves and the formation of an elevated stratopause after a major stratospheric sudden warming in a T213L256 GCM, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 117, D16101, doi:10.1029/2011JD017243, 2012

Sato, K., S. Tateno S. Watanabe, and Y. Kawatani, Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model. *J. Atmos.*

*Sci.*, 査読有, 69, 1378-1396, doi:10.1175/JAS-D-11-0101.1, 2012.

Kohma, M. and K. Sato, The effects of atmospheric waves on the amounts of polar stratospheric clouds. *Atmos. Chem. Phys.*, 査読有, 11, 11535-11552, doi:10.5194/acp-11-11535-2011, 2011.

Tsuchiya, C., K. Sato, T. Nasuno, A. T. Noda, and M. Satoh, Universal Frequency Spectra of Surface Meteorological Fluctuations. *J. Climate*, 査読有, 24, 4718-4732, doi:10.1175/2011JCLI4196.1, 2011.

Okamoto, K., K. Sato, and H. Akiyoshi, A study on the formation and trend of the Brewer-Dobson circulation. *J. Geophys. Res.*, 査読有, 116, D10117, doi:10.1029/2010JD014953, 2011.

Alexander, M. J., M. Geller, C. McLandress, S. Polavarapu, P. Preusse, F. Sassi, K. Sato, S. Eckermann, M. Ern, A. Hertzog, Y. Kawatani, M. Pulido, T. Shaw, M. Sigmond, R. Vincent, S. Watanabe, Recent developments in gravity wave effects in climate models, and the global distribution of gravity wave momentum flux from observations and models. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 査読有, 136, 1103-1124, DOI: 10.1002/qj.637, 2010.

Kinoshita, K., Y. Tomikawa and K. Sato, On the three-dimensional residual mean circulation and wave activity flux of the primitive equations. *J. Met. Soc. Japan*, 査読有, 88, 3, 373-394, DOI:10.2151/jmsj.2010-307, 2010.

[学会発表](計12件)

高麗正史, 佐藤薫, 自転角速度ベクトルの水平成分により境界に捕捉される Kelvin 波と Rossby 波, 日本気象学会 2013 年度春季大会(東京, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2013.5.15~18)

M. Kohma and K. Sato, Simultaneous occurrence of polar stratospheric clouds and upper-tropospheric clouds caused by blocking anticyclones. Third International Symposium on the Arctic Research (ISAR3), Tokyo, Japan, January 14-17, 2013.

K. Sato, T. Kinoshita, and K. Okamoto, The driving mechanism of the residual circulation from a gravity-wave resolving GCM. SPARC Brewer-Dobson Circulation Workshop, Grindelwald, Switzerland, June 24-29, 2012.

K. Sato, Re-examination of observed

gravity wave characteristics by using a high-resolution GCM. 13th International Workshop on Technical and Scientific Aspects of MST Radar, Kuehlungsborn, Germany, March 19-23, 2012.

Y. Tomikawa, K. Sato, S. Watanabe, Y. Kawatani, K. Miyazaki, and M. Takahashi, Recovery processes after a major stratospheric sudden warming with a reformation of elevated stratopause in a T213L256 GCM. Workshop on Stratospheric Sudden Warming and its Role in Weather and Climate Variations, Kyoto, Japan, February 22-24, 2012.

安田勇輝, 佐藤薫, 対流圏界面直下の弱い成層域に捕捉された重力波 地球角速度ベクトルの水平成分の影響, 日本気象学会 2011 年度秋季大会 (名古屋, 名古屋大学, 2011.11.16 ~ 18)

K. Sato, Y. Tomikawa, and S. Watanabe, A new estimation method of the total momentum fluxes associated with gravity waves. IUGG 2011 General Assembly, Melbourne, Australia, June 28-July 7, 2011.

木下武也, 佐藤薫, 慣性重力波とロスビー波に適用可能なストークスドリフトの定式化, 日本気象学会 2011 年度春季大会 (東京, 国立オリンピック記念青少年総合センター, 2011.5.18 ~ 21)

K. Okamoto, K. Sato, and H. Akiyoshi, On the mechanism of the formation of the Brewer-Dobson circulation and the change in the age of air. AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate, Honolulu, Hawaii, U.S.A., February 28-March 4, 2011.

C. Tsuchiya, K. Sato, T. Nasuno, A. T. Noda, and M. Satoh, Universal frequency spectra of the short period fluctuations. AGU Chapman Conference on Atmospheric Gravity Waves and Their Effects on General Circulation and Climate, Honolulu, Hawaii, U.S.A., February 28-March 4, 2011.

高麗正史, 佐藤薫, 衛星ライダー観測データを用いた極成層圏雲と大気擾乱の関係の解析, 日本気象学会 2010 年度秋季大会 (京都, 京都テルサ, 2010.10.27 ~ 29)

岡本功太, 佐藤薫, 秋吉英治, 21 世紀における Brewer-Dobson 循環の形成とトレンドに関する重力波ドラッグの役割, 日本地球惑星科学連合 2010 年大会 (千葉, 2010.5.23 ~ 28)

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kaoru>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 薫 (SATO, Kaoru)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90251496

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

秋吉 英治 (AKIYOSHI, Hideharu)

独立行政法人国立環境研究所・大気圏環境

研究領域・主任研究員

研究者番号：80211697

渡辺 真吾 (WATANABE, Shingo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境

変動研究領域・研究員

研究者番号：50371745