

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月5日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03733

研究課題名(和文) 高分解能版大気圏・電離圏モデルによる熱圏重力波の研究

研究課題名(英文) A study on thermospheric gravity wave using a high resolution atmosphere-ionosphere model

研究代表者

三好 勉信 (Miyoshi, Yasunobu)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：20243884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：対流圏から熱圏・電離圏までの全大気を含む大気圏電離圏結合モデルを用いて、下層大気起源の大気重力波が熱圏・電離圏変動におよぼす影響を調べた。熱圏での重力波抗力や重力波活動度は、冬季の方が夏季よりも大きく、また、冬季における強さは、成層圏・中間圏における極夜ジェットの高さと良い相関がみられることが分かった。さらに、下層大気起源の大気重力波により励起される伝播性電離圏擾乱について調べた。伝播性電離圏擾乱の空間分布は大気重力波の活動度と良い相関があることが分かった。このように、下層大気起源の大気重力波の熱圏への鉛直伝播および電離大気変動への影響について、数値モデルを用いて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

下層大気起源の大気重力波が熱圏の大気大循環に及ぼす影響を、数値モデルにより明らかにした。熱圏大気大循環は、下層大気起源の大気重力波による重力波抗力の影響を強く受けること、熱圏大気重力波の活動度は、下層大気変動の影響を強く受けることが示された。これらの結果は、大気重力波による大気上下結合研究に新たな知見を与えたといえる。さらに、熱圏大気重力波(中性大気変動)が電離大気変動に及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。数値モデルによる熱圏・電離圏変動の再現は、将来における数値宇宙天気予報の基礎となることが期待でき、科学的意義・社会的意義は大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：Using a whole atmosphere-ionosphere coupled model, effect of upward propagating gravity wave from the lower atmosphere on the variability in the thermosphere and ionosphere has been investigated. Our results indicate that the gravity wave activity and gravity wave drag in the thermosphere are stronger in winter than in summer, and that the global distribution of the polar night jet plays a key role in determining the gravity wave activity in the thermosphere. Furthermore, we investigate traveling ionosphere disturbances generated by upward propagating gravity waves. Our results show that the global distribution of traveling ionosphere disturbances is closely related to the distribution of the gravity wave activity in the thermosphere. Using a numerical model, upward propagation of gravity wave from the lower atmosphere to the thermosphere and its impact on the ionosphere variability are quantitatively studied.

研究分野：大気物理学

キーワード：超高層大気環境 大気上下結合 数値シミュレーション 大気重力波

1. 研究開始当初の背景

大気重力波が大規模伝播性電離圏擾乱を引き起こす可能性という説が提案され、熱圏での大気重力波の研究は急速に発展し、1980年代以降には、3次元モデルによる熱圏・電離圏擾乱の伝播に関するシミュレーション研究がおこなわれてきた。しかしながら、過去の研究では、励起源はジュール加熱やローレンツ力、熱圏極域で励起された大気重力波が中・低緯度へ伝播する描像が中心であった。最近になって、対流圏熱帯域の積雲対流活動により励起された大気重力波が、熱圏まで鉛直伝播可能であるという理論的研究がなされ、下層大気起源の大気重力波の熱圏大循環における役割が注目されるようになった。さらに、中緯度における中規模電離圏擾乱や低緯度におけるプラズマバブルなどの励起源として、下層大気起源の重力波の重要性が指摘されている。しかしながら、熱圏の中性風のグローバル観測は難しいことから、熱圏重力波の振る舞いについてはよく解っていない。特に、熱圏重力波について、重力波活動度の3次元分布や下層からの鉛直伝播の様子に関しては不明な点が多いままである。熱圏重力波の活動度分布は、対流圏の積雲対流活動と関連があるのか、山岳起源の重力波と関連があるのか、成層圏・中間圏における重力波の活動度分布と関連があるのか、といった問いに対しての明確な答えは得られていない状況であった。

2. 研究の目的

下層大気起源の大気潮汐波やプラネタリー波などの惑星規模の大気波動が熱圏・電離圏変動に及ぼす影響については、観測的・理論的研究により次第に明らかになりつつある。一方で、大気重力波のような小スケールの大気波動が熱圏・電離圏に及ぼす影響はほとんど解明されていない。そこで本研究では、対流圏から熱圏・電離圏までの全大気領域を含むグローバルモデルを用いて、下層大気起源の大気重力波が熱圏・電離圏変動に及ぼす影響を定量的に解明する。さらに、下層大気起源の大気重力波と電離圏擾乱(中規模電離圏擾乱など)との関連性を調べ、重力波により引き起こされる熱圏・電離圏相互作用過程の解明を目指す。小スケールの大気波動の鉛直伝播による熱圏・電離圏への影響を加えた、新たな大気上下結合過程の描像を構築する。

3. 研究の方法

下層大気起源の大気重力波が熱圏・電離圏変動に及ぼす影響を調べるため、対流圏から熱圏・電離圏までの全大気領域を含む高分解能版大気圏・電離圏モデル(GAIA)を用いた数値シミュレーションを実行する。重力波に伴う下層大気から熱圏へのエネルギー流入量や重力波の砕波により発生する運動量(重力波抗力)の見積もりを行う。特に、季節ごとに重力波による下層大気から熱圏へのエネルギー流入量、重力波の砕波により発生する運動量(重力波抗力)の見積もりを行う。イオン抗力や気圧傾度力と比較することで、熱圏中性大気の運動量収支における重力波抗力の役割を明らかにする。これらの結果から、下層大気起源の重力波に起因する熱圏・電離圏変動の定量的見積もりを行う。重力波の伝搬経路を低高度方向に遡ることで、熱圏重力波にとって重要な励起源を特定し、相関解析を行うことで、下層大気変動と熱圏・電離圏変動の関連性を明らかにする。さらに、大気圏・電離圏モデルによる中規模電離圏擾乱の再現シミュレーションに挑戦し、熱圏・電離圏相互作用過程を解明すると同時に、電離圏変動と下層大気変動に関する描像を明らかにする。

4. 研究成果

下層大気起源の大気重力波が熱圏・電離圏変動におよぼす影響を調べるために、対流圏から熱圏・電離圏までを含む大気圏電離圏結合モデル(GAIA)の高分解能版を作成した。水平分解能が100kmのモデルと50kmのモデルの開発に成功した。高分解能版GAIAモデルを用いて、下層大気起源の大気重力波による熱圏での重力波抗力や重力波活動度を調べた。解析の結果、熱圏での重力波抗力は、冬季の方が夏季よりも大きくなることが分かった。また、冬季での重力波抗力や活動度は、成層圏・中間圏の極夜ジェットの強さと良い相関があることが分かった。特に、成層圏突然昇温時における極夜ジェットの変化と熱圏重力波の活動度について、詳しく解析した。図1に、モデルにより見積もられた成層圏突然昇温前と昇温時の重力波抗力の緯度高度分布を示す。昇温前の中・高緯度域では、高度110km付近で、最大で50m/s/day、高度200-250kmで100m/s/dayの重力波抗力があるのに対して、昇温時には、高度110kmおよび200-250kmでそれぞれ25m/s/dayおよび50m/s/dayになっている。また、高度200kmにおける重力波活動度(重力波に伴うエネルギー)を見てみると(図2)、北緯30°より北の領域で大きく減少していた。詳細な解析により、熱圏重力波は、主に、成層圏・中間圏の極夜ジェット付近での大気重力波の砕波により生成された二次的な重力波が、熱圏高度まで伝播していることも明らかになった。したがって、成層圏突然昇温に伴う極夜ジェットの急激な弱化により、2次的重力波の生成も弱まり、結果として熱圏まで伝播する重力波が少なくなることが明らかとなった。これらの成果は、主に、Miyoshi et al. (2015)に記載されている。

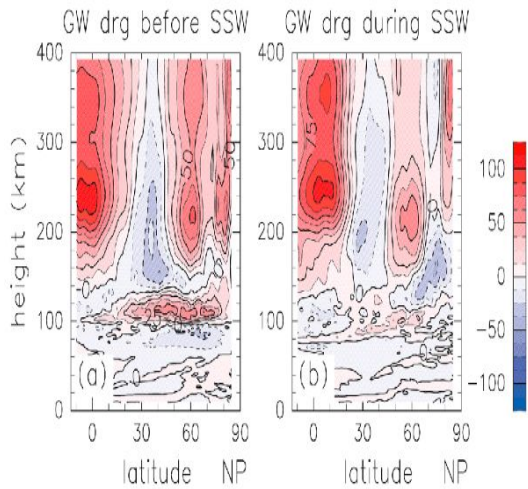


図 1: 成層圏突然昇温前(左図)と昇温時(右図)における重力波抗力分布。単位は m/s/day 。(Miyoshi et al. (2015)より)

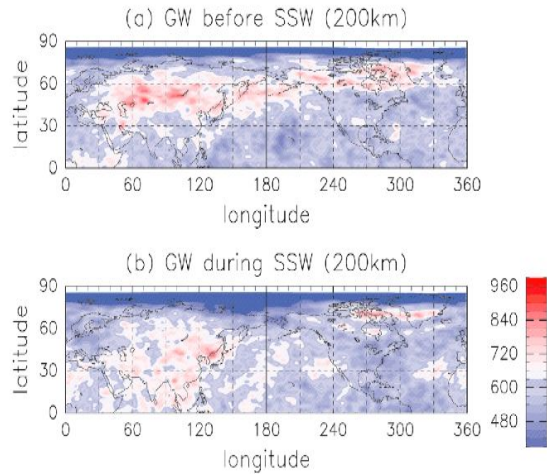


図 2: 成層圏突然昇温前(上図)と昇温時(下図)における重力波エネルギー分布 (10^{-9} J/m^2)。(Miyoshi et al. (2015)より)

次に、下層大気起源の大気重力波により励起される伝搬性電離圏擾乱 (TID) に注目して解析を行った。下層大気起源の重力波により、水平波長 400-2000km 程度の TID が励起され、昼間には高緯度から赤道に向かい伝播することを示した。さらに詳細な解析を行うことで、TID に伴う電子密度の空間分布や TID と中性大気変動との関連を明らかにした。図 3 に、熱圏における中性風変動と、電子密度変動の関係を示す。下層大気起源の大気重力波に伴う中性風変動により、プラズマが磁力線方向に強制的に運動させられることにより、中性風変動と同じ構造を持つ電子密度変動が生じることが明らかとなった。昼間における大気重力波は赤道方向に伝播する成分が卓越するため、昼間の TID も赤道方向に伝播する成分が卓越することも明らかとなった。さらに、TID の活動度は、熱圏重力波の活動度と良い相関があることが分かった。成層圏の極夜ジェットと電離圏 TEC 変動の関連について、図 4 に示す。図 4 から明らかなように、極夜ジェットが弱くなるに伴い、TEC 変動も弱くなっていることが分かる。これは、極夜ジェットの弱まりに伴い、熱圏重力波の活動が弱くなるため、励起される TID も少なくなることが原因であることが明らかとなった。また、重力波の活動度は冬季の方が夏季より強いいため、TID も冬季の方が夏季より強くなることも示された。このように、下層大気での重力波の励起・熱圏への鉛直伝播・電離大気への影響 (TID の励起) といった一連の現象を、一つのモデルにより世界で初めて再現に成功した。

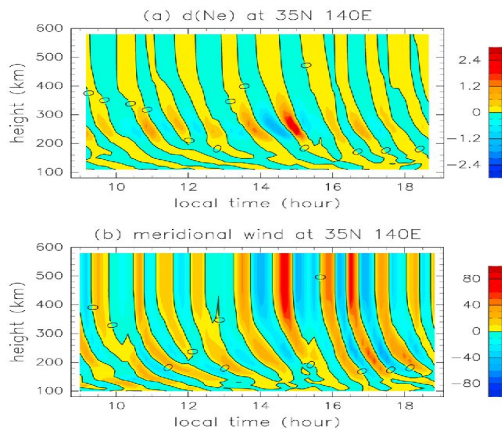


図 3: 35°N , 140°E における電子密度(上図)および中性南北風(下図)の時間変化の様子。(Miyoshi et al. (2018)より)

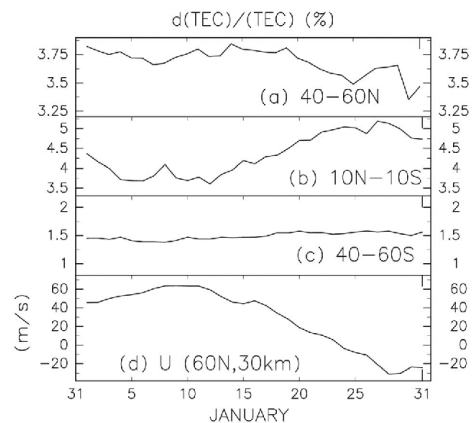


図 4: (a) $40^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$, (b) $10^{\circ}\text{N}-10^{\circ}\text{S}$, (c) $40^{\circ}-60^{\circ}\text{S}$ における全電子数 (TEC) 変動割合の日々変動の様子。(d) 60°N , 高度 30km での東西平均東西風の日々変動の様子。

本研究で得られた重力波抗力の知見を基に、重力波を解像が不十分な低分解能モデルにおける熱圏重力波抗力パラメタリゼーションの見直しを行った。この改良により、モデルにおける大気潮汐波のふるまいがより現実的になった。特に、DE3(東進・東西波数 3 の一日潮汐波)、SW1(西進・東西波数 1 の半日潮汐波)、SW3(西進・東西波数 3 の半日潮汐波)について、励起源に注目した解析を行った。これらの成果は、主に、Miyoshi et al. (2017)に記載されている。さらに、GAIA モデルを用いた大気潮汐波の長周期変動に注目した解析も行った。これらの成果

は、主に、Sun et al. (2019)やYamazaki et al (2017)に記載されている。

赤道F層で発生するプラズマバブルに関連して、GAIAで得られたプラズマバブルの発達率と観測されるプラズマバブルの発生頻度との比較・検証を行った。プラズマバブル発生の季節変化には、下層大気起源の様々な大気波動による中性大気状態の季節変化が重要であることが示された。また、スプラディックE層についても同様の解析を行い、スプラディックE層の八隻に寄与する大気潮汐波や大気重力波の役割について調べた。これらの成果は、主に、Shinagawa et al. (2018)やShinagawa et al. (2017)に記載されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

Sun, Y.-Y., H. Liu, Y. Miyoshi, L. Chang and L. Liu (2019), Nino-Southern Oscillation effect on ionospheric tidal/SPW amplitude in 2007-2015 FORMOSAT3/COSMIC observations, *Earth, Planets and Space*, 71:35,

<https://doi.org/10.1186/s40623-019-1009-7> (査読有)

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa (2018), Numerical study of traveling ionospheric disturbances generated by an upward propagating gravity wave. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.123, pp.2141-2155,

doi:10.1002/2017JA025110 (査読有)

Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Yokoyama and Y. Otsuka (2018), Daily and seasonal variations in the linear growth rate of the Rayleigh-Taylor instability in the ionosphere obtained with GAIA, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5:16, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0175-8> (査読有)

Miyoshi, Y., D. Pancheva, P. Mukhtarov, H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa (2017), Excitation mechanism of non-migrating tides, *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, Vol.156, pp.24-36, doi:10.1016/j.jastp.2017.02.012 (査読有)

Shinagawa, H., Y. Miyoshi, H. Jin and H. Fujiwara (2017), Global distribution of neutral wind shear associated with sporadic E layers derived from GAIA, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.122, pp.4450-4465,

doi:10.1002/2016JA023778 (査読有)

Yamazaki, Y., H. Liu, Y.-Y. Sun, Y. Miyoshi, M. J. Kosch, and M. G. Mlynczak (2017), Quasi-biennial oscillation of the ionospheric wind dynamo, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.122, pp.3553-3569, doi:10.1002/2016JA023684 (査読有)

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin and H. Shinagawa (2015), Impacts of sudden stratospheric warming on general circulation of the thermosphere, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol.120, pp.10897-10912,

doi:10.1002/2015JA021894 (査読有)

[学会発表](計67件, 招待講演10件) 多数につき, 以下に招待講演のみ記載

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Wave coupling processes between the lower and upper atmospheres simulated by a whole atmosphere model, AGU fall meeting, 2018.

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Numerical Simulation of Traveling Ionospheric Disturbances generated by upward propagating gravity waves, AGU fall meeting, 2018.

Miyoshi, Y. and E. Yigit, Implementation of a Gravity Wave Parameterization into a Whole Atmosphere GCM and Simulation of thermospheric gravity Wave Effect, COSPAR 42nd assembly, 2018.

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Vertical coupling processes simulated by a whole atmosphere-ionosphere coupled model GAIA, Whole Atmosphere Modelling Workshop, 2018.

三好勉信, 全地球大気の数値シミュレーション, STEシミュレーション研究会, 2018年.

三好勉信, 大気波動を介した大気上下結合の数値シミュレーションによる研究, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2018年.

Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara and H. Shinagawa, Behavior of Gravity waves in the thermosphere simulated by high resolution GAIA, JpGU, 2016.

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, and H. Shinagawa, Vertical propagation of gravity waves in the thermosphere simulated by GAIA, International Symposium on the Whole Atmosphere, 2016.

Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, and H. Shinagawa, Impact of stratospheric sudden warming on the general circulation in the MLT region simulated by a whole atmosphere model, 26th IUGG General Assembly, 2015.

三好勉信, 藤原均, 陣英克, 品川裕之, 高分解能版 GAIA を用いた熱圏重力波の研究, 地球
電磁気・地球惑星圏学会, 2015 年.

〔その他〕

ホームページ等

<http://seg-web.nict.go.jp/GAIA/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：品川 裕之

ローマ字氏名：Shinagawa Hiroyuki

所属研究機関名：国立研究開発法人 情報通信研究機構

部局名：電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室(2015 年度)

電磁波研究所・宇宙環境研究室(2016 年度以降)

職名：短時間研究員

研究者番号(8桁): 00262915

研究分担者氏名：藤原 均

ローマ字氏名：Fujiwara Hitoshi

所属研究機関名：成蹊大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号(8桁): 50298741

研究分担者氏名：陣 英克

ローマ字氏名：Jin Hidekatsu

所属研究機関名：国立研究開発法人 情報通信研究機構

部局名：電磁波計測研究所・宇宙環境インフォマティクス研究室(2015 年度)

ソーシャルイノベーションユニット戦略プログラミングオフィス(2016 年度)

経営企画部企画戦略室(2017 年度)

電磁波研究所・宇宙環境研究室(2018 年度)

職名：主任研究員(2015 年度)

プランニングマネージャー(2016 年度～2017 年度)

主任研究員(2018 年度)

研究者番号(8桁): 60466240

研究分担者氏名：リュウ フィシン

ローマ字氏名：Liu Huixin

所属研究機関名：九州大学

部局名：国際宇宙天気科学・教育センター(2015 年度から 2017 年度)

理学研究院(2018 年度)

職名：准教授

研究者番号(8桁): 70589639