

機関番号： 11301  
 研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2008 ～ 2010  
 課題番号： 20540435  
 研究課題名（和文） データ融合シミュレーションによる熱圏・電離圏変動の研究

研究課題名（英文） Simulation studies of thermospheric and ionospheric variations  
 in cooperation with radar observations

研究代表者

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)  
 東北大学・大学院理学研究科・准教授  
 研究者番号： 50298741

研究成果の概要（和文）：地表から大気上端（～700 km 高度）にいたる領域の気温、風速、組成変動を計算可能な数値モデルが研究代表者らのグループによって世界で初めて開発された。この数値モデルシミュレーションとレーダー観測データから、下層大気に起源を持つ高度 300 km 付近の超高層大気変動のいくつかを明らかにした。特に、極冠域では従来認識されていた以上の激しい大気変動を観測、シミュレーションの双方から明らかにすると共に、低緯度領域では、これまではシミュレーションでは再現不可能であった真夜中の温度極大の再現に成功した。

研究成果の概要（英文）： We have developed a general circulation model (GCM) which covers all the atmospheric regions: namely, from the ground to the top of the thermosphere (about 700 km altitude). Both from the numerical simulations and radar observations, we found significant variations of the polar cap thermosphere and ionosphere, which would be beyond our understandings. In addition, in the low-latitude thermosphere, we also successfully simulated the midnight temperature maximum (MTM) which cannot be reproduced from previous GCM simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 超高層大気物理学

科研費の分科・細目： 地球惑星科学・超高層物理学

キーワード： 極域電離圏、熱圏、大気大循環モデル、数値シミュレーション、レーダー観測、大気上下結合、大気波動

## 1. 研究開始当初の背景

超高層物理学関連の我が国の地上観測網の充実世界的にも卓越したものである。北海道レーダー、MUレーダー、赤道レーダー等のレーダー観測網に加え、GPS総電子数観測網、イオノゾンデ観測網は良質な電離圏データを提供している。また、国際共同で北欧

に設置/運営されている EISCAT レーダー観測に我が国が参加して10年以上が経過した。一方、応募者らは大気大循環モデル(GCM)という新たな研究ツールの開発に成功した。このような研究の進展を踏まえ、数値モデルによって個々に得られている良質な観測データを有機的に結合し、実際の現象を再現する方法論を確立したいと考え、本研究の着想に

至った。米国を中心とする世界の学界では、大規模な衛星プロジェクトが立案/実施され、太陽から熱圏・電離圏に至る大規模モデリングも開始されている。我が国でも、近年、遅ればせながら超高層大気撮像衛星(IMAP)計画や大気圏・電離圏結合モデル開発計画がスタートした。応募者は、大気圏・電離圏結合モデル開発グループ(情報通信研究機構・九州大学・東北大学・京都大学・名古屋大学)の中で熱圏・電離圏部分を担当し、数値シミュレーションに加えて、物理・化学素過程モデルの高精度化/精密化にも取り組んでいる。このような世界的な大きな研究の流れが向かう先の一つは電離圏変動予測・予報である。電離圏データ同化による電離圏変動予測の取り組みは、米国では80年代に開始されたものの、我が国ではいまだに着手されていない。応募者らは、GCMシミュレーションに加え、EISCAT観測データ解析から熱圏領域での電磁エネルギー、乱流エネルギー散逸率の同時推定にはじめて成功した[Fujiwara et al., 2004]。応募者らによるモデリング・シミュレーション、データ解析の経験を踏まえ、世界最先端にあるGCMと観測網データとを結びつけた熱圏・電離圏研究を開始したいと考えた。本研究は、これまでの熱圏・電離圏研究を更に発展させた、個々の観測事例の再現・及びそこの物理機構の解明・電離圏変動予測のためのモデル・データ融合の研究と位置づけられる。

## 2. 研究の目的

正相・負相を伴った電離圏嵐の複雑な振る舞いや、電離圏日々変動の原因を解明することは超高層物理学分野における最も重要な研究課題の一つである。近年、応募者らのグループによる世界初の対流圏を含む大気大循環モデル(GCM)開発の成功[Miyoshi and Fujiwara, 2003]により、電離圏日々変動に関係すると思われる下層大気と上層大気との結合過程の数値シミュレーションが可能となった[Miyoshi and Fujiwara, 2006, 2007]。また、極域でのオーロラ活動変化に伴って励起される伝搬性大気擾乱の数値シミュレーションから、擾乱の生成・伝搬に関する基本性質も明らかとなってきた[Fujiwara and Miyoshi, 2006]。次なる熱圏・電離圏モデリング・シミュレーションの目標は、モデル・観測データ融合による個々の観測事例の再現である。本研究では熱圏・電離圏領域へのエネルギー流入を観測データに基づいて決定し、数値シミュレーションを実施することにより観測事実を再現・説明することを目的とする。具体的には、欧州非干渉散乱(EISCAT)レーダー、または

SuperDARNレーダー・観測データ等を用いて極域での電磁エネルギー、運動量流入をモデル化する。また、EISCATレーダー・データから極域E領域のイオン組成の推定を行う。上記データから得られた電磁エネルギー、運動量ソースをGCMへのインプットとして数値シミュレーションを実施し、我が国のレーダー観測網(北海道レーダー、MUレーダー、赤道レーダー等)やGPS、CHAMP衛星等による観測結果(中・大規模伝搬性電離圏擾乱など)との比較を試みる。本研究では、更にその先の目標である電離圏データ同化を意識し、観測データを用いた熱圏・電離圏モデリング・数値シミュレーションの基礎技術を確立する。

## 3. 研究の方法

極域レーダー(EISCAT・SuperDARN)観測によって得られたデータの解析から、大気大循環モデル(GCM)へのインプットとなるエネルギー・運動量流入を決定する。また、GCMシミュレーションにより、電離圏F領域域の中規模・大規模伝搬性大気擾乱、その他の大気擾乱について調べる。観測データを取り入れたモデリングの試みとしてEISCATレーダーで観測された電離圏パラメータを用いた極域E領域電離圏モデルを開発する。本研究では、大規模計算には情報通信研究機構、名古屋大学との共同研究により、両機関が所有するスーパーコンピュータを利用し、データ解析・データ管理のための環境を東北大学に新たに整備する。

## 4. 研究成果

(1) 大気大循環モデル(GCM)を用いた数値シミュレーション

### ① 極域上部熱圏での大気変動

EISCATレーダー観測サイト近傍での熱圏大気温度、熱圏風の短時間変動、日変化、日々変動について調べた。極冠域での熱圏大気に2~3時間程度の顕著な変動が見られ、夏季に振幅が大きく冬季に振幅が小さくなるという特徴が見出された。また、この変動は、極冠域で大きく、中低緯度では小振幅となる。本シミュレーション結果は、EISCATサイト近傍での基本的な大気変動と、様々な地磁気擾乱によって生じる変動要素とを分離する上で重要な結果を与えるものと考えられる。ここでの主な結果は、Fujiwara and Miyoshi (Ann. Geophys., 2010)などで公表された。

## ② 下層・上層大気結合

大気大循環モデル(GCM)を用いた数値シミュレーションにより、これまでの観測から知られていた上部熱圏での特徴的な温度構造である真夜中の温度極大(Midnight Temperature Maximum: MTM)が再現された。従来の数値モデルで計算される MTM は、振幅が極めて小さいものであったが、本研究では観測と整合的な 150K 程度の振幅が計算された。これは、下層大気の影響を十分に取り入れ、高次モードの大気潮汐の影響を考慮した結果と考えられる。さらに、MTM を生成する上で、高緯度側高温領域からの流れ(移流)による効果が潮汐起源の大気の収束流に加えて重要であること、MTM による気圧傾度力は南北風の向きの反転には影響しないであろうことが示された(図 1 参照)。また、MTM に伴う大気質量密度の変動の詳細を示すことが出来た。ここでの主な結果は、Fujiwara and Miyoshi (Ann. Geophys., 2010)、Fujiwara et al. (IAU, 2010)、Fujiwara et al. (IAGA book, in press)等によって公表された。

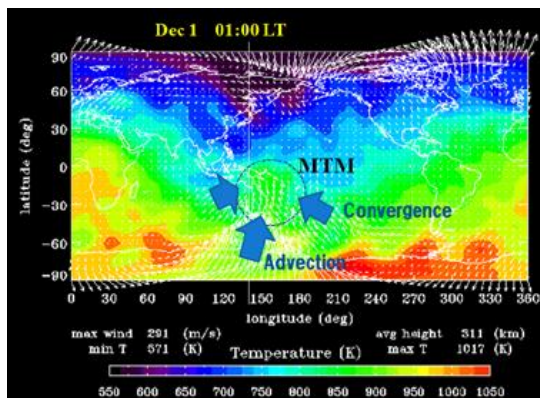


図 1. GCM シミュレーションによって再現された高度約 300 km での MTM とその近傍の風速場。太陽活動極小・地磁気静穏時の計算結果。(Fujiwara and Miyoshi, Ann. Geophys., 2010)

上記シミュレーションに加えて、連携研究者らとともに大気圏モデルと電離圏モデルとを結合した数値モデル開発を開始した。近年、下層大気の影響によって電離圏が激しく変動していることが観測的に知られるようになった。その変動の成因を理解する上で大気圏・電離圏モデルは不可欠である。このモデルを用いたシミュレーションの主な初期結果は、Jin et al. (J. Geophys. Res., 2008, 2011)、Miyoshi et al. (J. Geophys. Res., 2011, in press) 等によって公表された。

## (2) EISCAT レーダー観測による極域電離圏変動のモニタリングと GCM シミュレーション結果との比較

EISCAT Svalbard Radar (ESR)による 2007 年 3 月から 2008 年 2 月の 1 年間連続観測(International Polar Year: IPY)データは、太陽活動極小期の電離圏データセットとしてこれまでに例のない良質な連続データであり、極冠域の電離圏物理を理解する上で、また、上記 GCM シミュレーションとの比較において最適のものである。地磁気静穏時の ESR データでは、中性大気とのエネルギーのやりとり起因と思われる極冠域でのイオン温度の変動(数 10 分~数時間スケールの変動)が見られるほか、地磁気擾乱に伴う急激なイオン温度上昇も確認されている。

従来、中性大気や電離圏プラズマに対する強い加熱源の存在は、極冠域の熱圏・電離圏領域では広くは認識されていなかったが、ESR 観測による極冠域イオン温度は電離圏経験(統計)モデルである IRI2007 モデルに比 $\pm 120$  K 程度の大振幅の日変化を示すことがわかった。また、極冠域でのイオン温度観測結果と電離圏経験モデル(IRI2007)との比較、また中性大気温度の経験モデル(NRLMSISE-00)、GCM シミュレーション結果との比較から、極冠域での加熱源(電場強度)について議論した(極冠域に常に 30~数 10 mV/m の強度を持つ電場が存在しないと中性大気とイオン温度の 250 K 程度の差を説明できない)。ここでの主な初期結果は、Fujiwara et al. (Earth, Planets and Space, submitted) 等によって公表された。

これまでの解析結果を踏まえ、2011 年 1 月 10 日・11 日に EISCAT 特別実験を実施し、Svalbard(極冠域)、Tromsø(オーロラ帯)での冬季の良質な電離圏変動データの取得に成功した。中性大気、電離圏プラズマともに冬季極冠域での観測は容易ではないことから、ここでのデータは今後の極冠域熱圏・電離圏研究にとって極めて重要と考えられる。(極冠域とオーロラ帯での電離圏変動の比較が可能と考えられる)

## 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 23 件)

1. Fujiwara, H., Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, and K. Terada, Characteristics of temperature and density structures in the equatorial thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, *Aeronomy of the Earth's atmosphere and ionosphere*,

Di-vision II IAGA book edited by Abdu, Pancheva, and Bhattacharya, 2011. (印刷中, 査読有)

2. Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H. Shinagawa, H. Liu, and K. Terada (2011), Numerical Simulation of the Equatorial Mass Density Anomaly, *Journal of Geophysical Research*, 2011. (印刷中, 査読有)

3. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, K. Terada, N. Terada, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Vertical Connection from the Tropospheric Activities to the Ionospheric Longitudinal Structure Simulated by a New Earth's Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, *Journal of Geophysical Research*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925, 2011. (査読有)

4. Fujiwara, H., Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, Y. Otsuka, A. Saito, and M. Ishii, Thermospheric temperature and density variations, *Proceedings IAU Symposium No. 264, Solar and Stellar Variability Impact on Earth and Planets, International Astronomical Union 2010*, Cambridge University Press, doi:10.1017/S1743921309992857, 310-319, 2010. (査読無)

5. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, Morphological features and variations of temperature in the upper thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, *Ann. Geophys.*, 25, 427-437, 2010. (査読有)

6. Nozawa, S., Y. Ogawa, S. Oyama, H. Fujiwara, T. Tsuda, A. Brekke, C. M. Hall, Y. Murayama, S. Kawamura, H. Miyaoka, and R. Fujii, Tidal waves in the polar lower thermosphere observed using the EISCAT long run data set obtained in September 2005, *J. Geophys. Res.*, 115, A08312, doi:10.1029/2009JA015237, 2010. (査読有)

7. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, Global structure of large-scale disturbances in the thermosphere produced by effects from the upper and lower regions: simulations by a whole atmosphere GCM, *Earth Planets Space*, 61, 463-470, 2009. (査読有)

8. Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, Gravity waves in the equatorial thermosphere and their relation to the lower atmospheric

variability, *Earth Planets Space*, 61, 471-478, 2009. (査読有)

9. Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, J. M. Forbes, S. L. Bruinsma, The solar terminator wave and its relation to the atmospheric tide, *J. Geophys. Res.*, 114, A07303, doi:10.1029/2009JA014110, 2009. (査読有)

10. Maeda, S., Y. Ogawa, K. Hosokawa, S. Nozawa, S. Oyama, T. Tsuda, and A. Brekke, Ion heating in high-speed flow channel within the duskside cell of the polar-cap ion convection under large IMF-By condition, *J. Geophys. Res.*, 114, A11307, doi:10.1029/2009JA014300, 2009. (査読有)

11. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Electrodynamics of the formation of ionospheric wavenumber-four longitudinal structure, *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008. (査読有)

[学会発表] (計 31 件)

1. 藤原 均・野澤悟徳・小川泰信・三好勉信・陣英克・品川裕之・寺田香織 (2010), GCM シミュレーションと EISCAT 観測による熱圏・電離圏研究, 2010 年度 EISCAT 研究集会, 2010 年 12 月 8 日, 東京. (招待講演)

2. Fujiwara, H. (2010), Global circulation from high to low latitudes and from troposphere to thermosphere/ionosphere, *International Space Science Institute (ISSI) workshop on Coupling Between the Earth's Atmosphere and Its Plasma Environment*, 29 September, 2010, Bern, Switzerland. (招待講演)

3. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi (2010), Wavy structures of temperature and density in the polar thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 20 July, 2010, Bremen, Germany.

4. Shinagawa, H., H. Jin, Y. Miyoshi, H. Fujiwara, T. Tanaka, N. Terada, K. Terada (2010), Development of an ionosphere-atmosphere coupled model for space weather forecast, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 19 July 2010, Bremen, Germany.

5. Miyoshi, Y., H. Jin, H. Fujiwara, H. Shinagawa (2010), Effects of upward propagating atmospheric waves on day-to-day variations in the upper atmosphere by using an atmosphere-ionosphere coupled model, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 19 July 2010, Bremen, Germany.

6. Fujiwara, H., S. Nozawa, S. Maeda, Y. Ogawa, Y. Miyoshi, H. Jin, and H. Shinagawa (2009), Basic states of the polar cap thermosphere and ionosphere: GCM simulations and ESR observations, IRI2009 Workshop, 6 November, 2009, Kagoshima, Japan. (招待講演)

7. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, and K. Terada (2009), Characteristics of temperature and density distributions in the equatorial thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, IAGA 11th Scientific Assembly, 26 August, 2009, Sopron, Hungary. (招待講演)

8. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, S. Nozawa, and S. Maeda (2009), Thermospheric and ionospheric variations in the polar cap region: observations with the ESCAT Svalbard radar and GCM simulations, the Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, 13 August, 2009, Singapore. (招待講演)

9. Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, H. Jin, H. Shinagawa, Y. Otsuka, A. Saito, and M. Ishii (2009), Thermosphere temperature and density variations, International Astronomical Union General Assembly, 6 August, 2009, Rio de Janeiro, Brazil. (招待講演)

10. 藤原 均 (2008), 極域下部熱圏における大気加熱とダイナミクスの研究課題, 名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会「ナトリウム温度ライダーとレーダーを用いた中間圏・下部熱圏同時観測に関する研究集会」, 2008年11月28日, 東京. (招待講演)

11. 藤原 均・三好勉信・陣英克・品川裕之・石井守・大塚雄一・斉藤昭則 (2008), 領域間結合モデリングによる大気圏・熱圏・電離圏科学の新たな展開, 地球電磁気・地球惑星圏学会, 2008年10月12日, 仙台. (招待講演)

12. Miyoshi, Y., and H. Fujiwara (2008), Upward propagation of atmospheric waves from the troposphere to the thermosphere and its impact on the thermospheric circulation, 37th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly, 14 July, 2008, Montreal, Canada. (招待講演)

13. Forbes, J. M., S. Bruinsma, Y. Miyoshi, and H. Fujiwara (2008), Discovery of a Terminator Wave in Thermosphere Densities Measured by the CHAMP Satellite, 37th Committee on Space Research (COSPAR) Scientific Assembly, 14 July, 2008, Montreal, Canada. (招待講演)

14. Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito (2008), Nonmigrating Tidal Effects on Equatorial Ionization Anomaly Studied with a Whole Atmosphere-Ionosphere Coupling Model, the Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting (AOGS 2008), 17 June, 2008, Busan, Korea. (招待講演)

15. Fujiwara, H., Y. Miyoshi, S. Nozawa, and S. Maeda (2008), Modeling and GCM simulations of the polar thermosphere/ionosphere using EISCAT Svalbard radar data, the Asia Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting (AOGS 2008), 19 June, 2008, Busan, Korea. (招待講演)

〔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〕

特に無し

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号： 50298741

### (2) 研究分担者

野澤 悟徳 (NOZAWA SATONORI)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号： 60212130  
前田 佐和子 (MAEDA SAWAKO)  
京都女子大学・現代社会学部・教授

研究者番号： 00199613

(3)連携研究者

三好 勉信 (MIYOSHI YASUNOBU)

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号： 20243884

品川 裕之 (SHINAGAWA HIROYUKI)

独立行政法人 情報通信研究機構・

第3研究部門・主任研究員

研究者番号： 00262915