

機関番号：82636

研究種目：新学術領域研究（研究課題提案型）

研究期間：2008～2010

課題番号：20200047

研究課題名（和文） 大気圏－電離圏統合モデルによる超高層大気の変動機構の解明と数値予測システムの構築

研究課題名（英文） Development of a whole atmosphere-ionosphere coupled model for the upper atmospheric research and prediction

研究代表者 陣 英克（JIN HIDEKATSU）

独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ・専攻研究員

研究者番号：60466240

研究成果の概要（和文）：

本研究では、大気圏モデルと電離圏モデルを結合し、世界に先駆けて対流圏から電離圏までの全地球大気領域を扱う数値モデルの開発に成功した。この大気圏-電離圏統合モデルを用いて、近年注目されている気象の影響による超高層大気（熱圏・電離圏）の経度依存性や日々変動との関連を明らかにした。さらに、気象再解析データを取り込んだ現実に近い超高層大気モデリングを実現し、気象の影響を含む超高層大気の数値予測に向けて大きく進展した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a whole atmosphere-ionosphere coupled model, which can treat the Earth's entire atmospheric regions from the troposphere to the ionosphere. It has been found that the longitudinal dependences and day-to-day variations as recently observed in the upper atmosphere can be reproduced by the coupled model, and revealed that the effect of lower atmosphere is significant for the generation of the upper atmospheric variations. Further, we have incorporated meteorological reanalysis data into the coupled model, and the results suggested that the model and method can be useful for the future numerical prediction of the upper atmosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2009年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2010年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
年度			
年度			
総計	23,300,000	6,990,000	30,290,000

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

プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：気象、超高層大気、大気波動、領域結合、日々変動、シミュレーション、数値予報

1. 研究開始当初の背景

(1) 領域結合モデルの動向

米国を中心に領域ごとの数値モデルを結合させ、領域間の相互作用や複合過程を扱お

うとする動きが活発化していた。一方、国内においては超高層大気の数値モデル開発は米国に遅れをとっていた。しかし、近年九州大学と東北大学によって地表から熱圏まで

の中性大気領域を解く大気大循環モデルが世界で初めて開発され、また情報通信研究機構によって宇宙天気予報用の電離圏モデルが開発された。本研究では、これらを結合し、世界初の地表から電離大気領域までを含めた大気圏-電離圏統合モデルを構築する。

(2) 超高層大気研究の新展開

電離圏赤道異常などの日々変動や場所(緯度・経度)依存性は、数十年にわたってその要因が解明されておらず、超高層大気分野の最重要課題の一つである。これらは、太陽活動が穏やかな時にも観測されてきたことから、下層大気に起因するものと考えられている。しかし、下層大気から超高層大気に伝搬する様々なスケールの波動が存在し、電離圏変動に至る過程も複雑なことから、限られた超高層大気の観測では十分に調べることが出来ていない。さらに、最近の人工衛星による電離圏の全球観測からは、電離圏変動と気象現象との関連を示唆する例が幾つか報告されており、下層大気と電離圏のつながりがより一層重要視され始めた。我々は、本研究で開発する大気圏-電離圏統合モデルが大気上下結合の問題を扱うための有効な手段になると考えた。

(3) 超高層大気研究と社会との関わり

近年人間活動の宇宙への進出にとともに、超高層大気の数値予測の需要も増加している。例えば、電離圏電子密度の勾配や不均一構造は衛星測位利用に影響する。

さらに、長期の気候変動の重要性が認識されつつある。このため、人間活動によるCO₂濃度増加などが超高層大気システム全体にどのような影響を及ぼすのか、定量的に評価できる数値モデルが大変有用になると考えられる。我々は、大気圏-電離圏統合モデルが、下層大気の影響を含めた超高層大気数値予測モデルへ発展しうると考えた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、大気圏モデルと電離圏モデルを結合し、世界で初めての全地球大気の数値モデルを開発する。

(2) 大気圏-電離圏統合モデルを用いて、近年注目されている気象現象と電離圏変動との関連を含み、長年未解決であった電離圏日々変動のメカニズムの解明を目指す。

(3) 気象再解析データを入力した大気圏-電離圏統合シミュレーションを行い、現実の超高層大気変動がどの程度再現出来るか調べる。そして、超高層大気の数値予測モデルへとつなげる。

3. 研究の方法

(1) 大気圏-電離圏統合モデルの開発

本研究では、対流圏から熱圏までの地球中性大気領域を扱う大気大循環モデル、電離大気領域を扱う電離圏モデル、両領域の重要な橋渡しを担うダイナモモデル(電気力学モデル)を結合する。そして、中性大気と電離大気を含んだ地球大気全領域の大気圏-電離圏統合モデルを開発する。各モデル単体では既に完成しているが、別々の担当者によって独立に開発されてきた。したがって、システムティックな結合スキームを開発し、モデル間のデータ流れの制御、座標変換、共通設定・パラメーターの管理等を行うようにする。

(2) モデルの高精度化

大気圏モデルの水平および鉛直分解能(格子点間隔)の高分解能化を行い、現象をより高精度に再現出来ることを目指す。具体的には、後述の気象再解析データの入力を念頭に置き、気象数値予報などで使用されている大気大循環モデルと同程度(水平100km程度)を目指す。そして、高分解能モデルでの計算結果を分析し、下層大気から超高層大気へと伝播する大気波動の再現性をチェックする。ダイナモモデル、電離圏モデルの格子間隔も大気圏モデルに合わせて高分解能化を行う。

(3) 対流圏から電離圏までの上下結合過程の解析

大気圏-電離圏統合モデルによって観測と同様な電離圏の経度依存性や日々変動が再現できるか調べる。そして、シミュレーションの結果データを解析し、下層大気領域における大気波動の励起、上空への伝播過程、超高層領域における中性大気と電離大気の相互作用といった大気上下結合の素過程を明らかにする。

(4) 気象再解析データを入力したシミュレーションの実行および観測との比較

大気圏-電離圏統合モデルの下層大気部分(対流圏・成層圏)に気象再解析データを入力し、シミュレーションを行う。これにより、ある日付の電離圏観測と直接比較が可能となる。具体的には以下の方法で進める。

①気象再解析データの大气圏モデルへの入力手法の開発

②長期間のシミュレーションの実行

③シミュレーション結果と電離圏観測との比較

④観測される現実の電離圏変動が、どの程度下層大気に由来するか解析を行う

(5) リアルタイムの気象再解析データを入力した超高層大気の数値予測システムを試験的に構築する

4. 研究成果

(1) 世界初の大気圏-電離圏統合モデルの完成

大気圏モデル、電離圏モデル、ダイナモモデルをシステムティックに結合し、世界に先駆けて対流圏から電離圏までの全地球大気領域を扱う数値モデルの開発に成功した (GAIA: Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy と名づけた)。米国の幾つかの機関で同様なモデルを開発するプロジェクトが進行しているが、現時点 (2011年6月) で唯一のモデルである。

(2) 電離圏の経度依存性の再現および上下結合過程の解明

大気圏-電離圏統合シミュレーションを行い、電離圏の経度依存性を調べたところ、近年人工衛星で観測されたような波数4構造が再現されることが解った。さらに、対流圏との関連を調べたところ、様々な大気波動が混在する中で、波数4構造のもとになる大気潮汐が下層大気の大気活動によって励起し、熱圏まで伝播し、ダイナモ作用を介して電離圏に影響を与えることが解った (図1)。以前の研究例では個々の大気潮汐を抽出して電離圏への影響を評価していたが、本研究では潮汐の励起を含めて自然に近い状態で大気上下結合過程が明らかとなった。

また、磁気圏からの入力や太陽紫外光の強度を一定にした条件でシミュレーションを行っても、期間・場所ごとに様々な周期で変動する電離圏の様子が再現された。つまり、電離圏日々変動の一因として、下層大気における気象の影響を示唆する結果を得た ([Jin et al., 2011])。

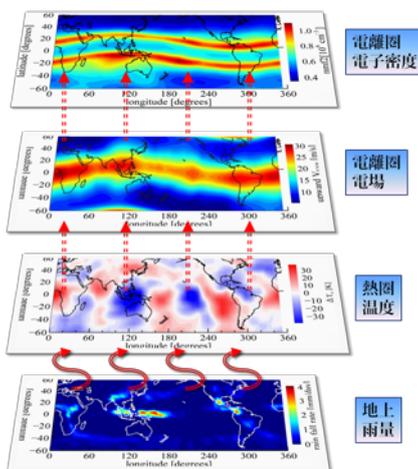


図1: 大気圏-電離圏統合モデル (GAIA) で再現された大気上下結合 [Jin et al., 2011]

(3) 熱圏分布における「赤道異常」の再現とその生成要因の解明

電離圏 F 領域における電子密度は、太陽光強度の最も大きい赤道でなく、磁気緯度 ±10-15 度付近にピークが現れる事 (赤道異常) が知られる。一方、最近の人工衛星による観測では、電離圏の背景にある熱圏の質量密度分布においても、「赤道異常」の構造が発見され、形成要因について議論が続いている。

我々は、大気圏-電離圏統合シミュレーションを行ったところ、モデルにおいても電離圏だけでなく熱圏の赤道異常が再現されることが解った (図2)。そして、詳細な解析を行ったところ、超高層大気における中性大気と電離大気の相互作用の影響に加えて、下層大気から直接熱圏上部まで伝播する大気潮汐が熱圏赤道異常の形成に寄与するという新たな見解を得た。さらに、電離圏だけでなく熱圏上部においても波数4の経度構造が現れることが解り、超高層大気が下層大気の影響を深く受けているという新たな描像を得た [Miyoshi et al., 2011]。

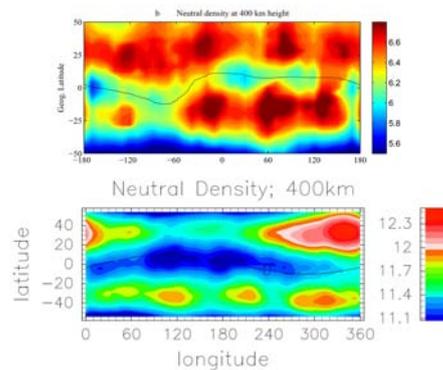


図2: 熱圏質量密度の赤道異常: 上が観測 [Liu et al., 2010]。下が大気圏-電離圏統合モデルの計算結果 [Miyoshi et al., 2011]。

(4) 高分解能シミュレーションによる種々の超高層大気現象の再現と理解の進展

大気圏モデルの高空間分解能化を行い、シミュレーションを行ったところ、下層大気の大気活動によって励起する水平波長数 100~数 1000km の重力波が熱圏まで伝播する様子が再現された。Miyoshi and Fujiwara [2009] では、モデルで再現された熱圏中の重力波の特徴を調べ、さらに経度に依存する下層大気の大気活動と熱圏の重力波との関連を明らかにした。さらに、陣ほか [2011] では高分解能化したダイナモモデルに高分解能大気圏モデルの結果を入力し、熱圏の重力波の影響が十分に電離圏電場分布に現れることを示した。今後、電離圏で観測される波動 (TID: traveling ionospheric disturbance) などの関連について研究の進展が期待される。

Shinagawa et al. [2009]は、電離圏モデルの高分解能化を行い、2009年7月22日に日本で起こった皆既日食の際の電離圏についてシミュレーションを行った。そして、日本上空の全電子数の観測とモデルの両面から日食の電離圏への影響（月の影の移動に伴う電子密度減少領域の移動など）を明らかにした。

(5) 気象再解析データを入力した大気圏-電離圏シミュレーションと観測との比較

GATAの対流圏・成層圏部分に気象再解析データをナッジングによって入力する方法を開発した。さらに、太陽放射強度についても実際に観測されたF10.7指数の変動をモデルに取り入れた。これらにより、実際の下層大気の影響を含んだ、現実に近い超高層大気モデリングが実現した（磁気圏擾乱の影響は除く）。

このモデルを用いて長期間のシミュレーション（現時点では数ヶ月間）を行い、全球全電子数の観測と比較を行った。陣ほか[2010, 2011]は初期結果を報告し、電離圏の赤道異常の位置や南北非対称を含めて良く再現出来ることを明らかにした。さらに、電離圏の日々変動に関して、2009年1-2月に起こった成層圏突然昇温の影響が顕著に現れる領域やそのタイミング、変動の度合いなども良く再現出来ることが解かった。これらは、将来的な超高層大気の数値予測モデルへの発展に向け、十分期待を持てる結果と言える。ただし、定量的に観測と合わない部分も残り、幾つか数値的扱いを改良する必要がある。また、長期シミュレーションを行うために、計算の高速化なども今後の課題である。

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20件)

- ① Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H. Shinagawa, H. Liu, and K. Terada, Numerical Simulation of the Equatorial Mass Density Anomaly, *Journal of Geophysical Research*, 116, A05322, doi:10.1029/2010JA016315, 2011, 査読有.
- ② 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*,

Division II IAGA book, edited by Abdu, Pancheva, and Bhattacharya, Volume 2, Part 4, pp. 329-337, doi:10.1007/978-94-007-0326-1_24, 2011, 査読有.

- ③ Venkateswara Rao, N., T. Tsuda, S. Gurubaran, Y. Miyoshi, and H. Fujiwara, On the occurrence and variability of the terdiurnal tide in the equatorial Mesosphere and Lower Thermosphere and its comparison with the Kyushu-GCM, *Journal of Geophysical Research*, 116, D02117, 2011, 査読有.
- ④ 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, *J. Geophys. Res.*, 116, A01316, doi:10.1029/2010JA015925, 2011, 査読有.
- ⑤ Fujiwara, H., and Y. Miyoshi, Morphological features and variations of temperature in the upper thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, *Annales Geophysicae*, 25, 427-437, 2010, 査読有.
- ⑥ 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.
- 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, J. M. Forbes, S. L. Bruinsma, The solar terminator wave and its relation to the atmospheric tide, *Journal of Geophysical Research*, 114, A07303, doi:10.1029/2009JA014110, 2009, 査読有.

[学会発表] (計86件)

- ① Y. Miyoshi, Effects of the atmospheric waves on variations in the upper atmosphere using an atmosphere-ionosphere coupled model, the 4th IAGA/ICMA/CAWSES-II TG4

- workshop, 2011/2/17, Hotel Globus, Prague, Czech Republic
- ② H. Jin, Connection between Tropospheric Activities and Ionospheric behaviors Simulated by a Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model, 2010 AGU Fall Meeting, 2010/12/14, Moscone Convention Center, San Francisco, the U.S.A
- ③ H. Jin, Space weather simulation by a whole atmosphere-ionosphere coupled model, 20th International Toki Conference, 2010/12/9, Ceratopia Toki, Gifu, Japan
- ④ H. Fujiwara, 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, 2010/9/27-10/1, International Space Science Institute, Bern, Switzerland
- ⑤ H. Fujiwara, Wavy structures of temperature and density in the polar thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 2010/7/18-25, Bremen Exhibition and Conference Center, Bremen, Germany
- ⑥ H. Shinagawa, Development of an ionosphere-atmosphere coupled model for space weather forecast, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 2010/7/18-25, Bremen Exhibition and Conference Center, Bremen, Germany
- ⑦ Y. Miyoshi, 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, 2010/7/18-25, Bremen Exhibition and Conference Center, Bremen, Germany
- ⑧ H. Shinagawa, Study of ionospheric variation during the eclipse of July 22, 2009 using NICT Space Weather Simulator, 2009 AGU Fall Meeting, 2009/12/18, Moscone Convention Center, San Francisco, the U.S.A.
- ⑨ Y. Miyoshi, Effects of upward propagating tides on longitudinal and day-to-day variations in the thermosphere/ionosphere simulated by an atmosphere-ionosphere coupled model, 2009 AGU Fall Meeting, 2009/12/16, Moscone Convention Center, San Francisco, the U.S.A.
- ⑩ H. Fujiwara, Basic states of the polar cap thermosphere and ionosphere: GCM simulations and ESR observations, the 2009 URSI/COSPAR Workshop on the International Reference Ionosphere (IRI), 2009/11/6, 鹿児島大学, 鹿児島県
- ⑪ H. Jin, Lower atmospheric effects on the ionospheric longitudinal structure studied with an atmosphere-ionosphere coupled model, the 2009 URSI/COSPAR Workshop on the International Reference Ionosphere (IRI), 2009/11/6, 鹿児島大学, 鹿児島県
- ⑫ H. Fujiwara, Characteristics of temperature and density distributions in the equatorial thermosphere simulated by a whole atmosphere GCM, IAGA 11th Scientific Assembly, 2009/8/26, Sopron Downtown Conference Centre, Sopron, Hungary
- ⑬ H. Jin, Initial Results from a Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model: Day-to-day and Longitudinal Variations of Thermosphere and Ionosphere, the Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, 2009/8/15, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore
- ⑭ H. Fujiwara, Multiple TAD Propagation in the Upper Thermosphere Simulated by a Whole Atmosphere General Circulation Model, the Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, 2009/8/15, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore
- ⑮ Y. Miyoshi, The Solar Terminator Wave and Its Relation with Atmospheric Tide, the Asia Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, 2009/8/15, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre, Singapore
- ⑯ H. Fujiwara, 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, 2009/8/13, Suntec Singapore International Convention and

- Exhibition Centre, Singapore
- ⑰ H. Fujiwara, Thermosphere temperature and density variations, International Astronomical Union General Assembly, 2009/8/6, Convention Center SulAmérica, Rio de Janeiro, Brazil

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陣 英克 (JIN HIDEKATSU)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ・専攻研究員
研究者番号： 60466240

(2) 研究分担者

三好 勉信 (MIYOSHI YASUNOBU)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号： 20243884
藤原 均 (FUJIWARA HITOSHI)
東北大学・理学研究科・准教授
研究者番号： 50298741
品川 裕之 (SHINAGAWA HIROYUKI)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センター 宇宙環境計測グループ・主任研究員
研究者番号： 00262915

(3) 連携研究者

大塚 雄一 (OTSUKA YUICHI)
名古屋大学・太陽地球環境研究所・助教
研究者番号： 40314025
石井 守 (ISHII MAMORU)
独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センター・推進室長
研究者番号： 20359003
齊藤 昭則 (SAITO AKINORI)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号： 10311739