

数値シミュレーションによる地球・宇宙環境変動予測

藤原 均^{*1}, 三好 勉信^{*2}, 陣 英克^{*3}, 品川 裕之^{*3}

Predictions of the Earth's and Space Environments by numerical simulations

Hitoshi FUJIWARA ^{*1}, Yasunobu MIYOSHI ^{*2}, Jin HIDEKATSU ^{*3}, Hiroyuki SHINAGAWA ^{*3}

ABSTRACT : In order to understand complete pictures of the energy, momentum, and molecular transfer in the atmospheric regions, dynamical features of the whole atmosphere, and near space environment, we have developed a new general circulation model (GCM) which covers all the atmospheric regions. Numerical simulations with this GCM have shown new aspects of the upper atmosphere: e.g., wavy structures and day-to-day variations of the thermosphere, generation and propagation of disturbances in the polar thermosphere due to the auroral activity. We report on some simulation results, possibility of space weather prediction, and some ongoing projects for studying the Earth's and space environments.

Keywords : thermosphere, auroral activity, space weather

(Received September 21, 2011)

1. はじめに

地球（惑星）大気は、重力の影響下で成層構造をなすことにより、高度ごとに特徴的な温度、密度、組成の分布を持つ。特に温度（気温）の高度分布に着目して、大気領域は下層（地面に近いところ）から「対流圏」「成層圏」「中間圏」「熱圏」といった領域に区分されている。対流圏から中間圏あたり（高度 0~80 km）までは主に気象学の対象として研究が進められてきた一方で、中間圏から熱圏までの領域（およそ 60~500-800 km）は超高層物理学の対象として別々に研究が進められてきた。超高層大気という呼び名は、時代や人によって違ったニュアンスを持つようであるが、概ね、中間圏の一部（60-80 km くらい）から熱圏の上端（500-800 km くらい）か更にその上空を指す。気温分布ではなく、他のパラメータに着目した領域の区分も存在し、例えば、大気分子の電離によって生じる電子密度の高度分布に着目して「電離圏」と呼ばれる領域が定義されている（空間的には、中間圏・熱圏と電離圏とはオーバーラップしている）。超高層物理

学は、電離圏までを含めた超高層大気の領域を研究する地球物理学の 1 分野であり、この領域を多くの飛翔体（人工衛星やロケット）が飛翔し、また電波通信の際の電波伝搬経路でもあることから、航空宇宙、通信分野とも密接に関わる研究分野である。

近年、対流圏の現象に起源を持つと考えられる変動が高度 300-400 km 付近で多く観測されるようになった¹⁾²⁾。また、巨大地震の際に地表面で発生する音波が上方に伝搬することによって上層の電子密度に揺らぎが生じることも明らかになった³⁾⁴⁾。対流圏での二酸化炭素の増大によって、熱圏では温暖化ではなく大気の寒冷化が進んでいるとの指摘もある⁵⁾⁶⁾。これらの例からわかるように、大気領域間では様々なエネルギー・運動量・物質輸送に関する結合過程が存在し、下層大気の影響が上層にまで及んでいる。従来のように、大気領域ごとに別々に研究を進めるだけでなく、大気全体を 1 つのシステムと捉えて、その変動の全体像を理解することが必要である。

この 20 年ほどの間に米国を中心として「宇宙天気」研究が盛んに実施されるようになった。人工衛星の安全な運用のために、機器の破損につながる高エネルギー粒子の到来予測や、衛星に働く大気摩擦の推定（すなわち衛星寿命・衛星の姿勢変化の推定）が重要な研究課題となっている。さらに、航空機や船舶の GPS 測位の障害とな

*1 : 理工学部 共通基礎 教授 (h_fujiwara@st.seikei.ac.jp)

*2 : 九州大学 大学院理学研究院

*3 : 情報通信研究機構

る電離圏変動の予測も宇宙天気研究にとって必要不可欠のものである。我が国でも宇宙環境予測の需要は徐々に拡大しており、情報通信研究機構によって宇宙天気サービスが提供されている。

本稿では、上記の大気領域間結合や宇宙環境変動の理解のために我々の研究グループで取り組んでいる数値モデル開発・シミュレーション研究について概要を報告する。また、我が国で推進している（我々が参画している）いくつかの研究プロジェクトについて紹介する。

2. 全大気領域を含む大気大循環モデル

これまでに、主に中層大気力学の研究を実施するために九州大学で開発されてきた大気大循環モデル (atmospheric general circulation model: GCM) の上端高度を熱圏上端にまで拡張し、世界初となる地表面から大気上端までを含んだGCMの開発に成功した⁷⁾。通常、大気モデルでは、地球回転系における流体の方程式を数値的に時間発展させて解く。また、加熱(太陽放射等)・冷却過程(赤外放射等)をモデル化して大気のエネギー収支の方程式を同時に解く。本モデルと気象学分野での大気モデルとの主な違いは、本モデルでは熱圏領域の大気について物理・化学過程を含んでいる点である。熱圏では大気が希薄になるために分子過程(分子拡散)が卓越するほか、短波長の太陽紫外線の吸収や、オーロラ活動に起因する大気加熱(ジュール加熱や降下粒子加熱)、重力分離による大気組成の変化などがこの領域での特徴的な物理過程である。

このGCMは下層から上層大気にいたる大気変動を記述可能であり、先に述べた対流圏起源の電離圏変動にかかわる中性大気擾乱について、数値シミュレーションによって新たな描像が明らかになりつつある^{8),9),10)}。GCMを用いた最近の数値シミュレーションによれば、極域へのエネルギー流入量を同様にした場合、極冠域での熱圏温度日変化は、太陽活動極小期では夏季に比べ冬季に顕著となることが予測されている。また、オーロラ現象に起因したエネルギー流入に加えて、下層大気に起源を持つと考えられる大気擾乱が極冠域での温度変化をより複雑なものとしている可能性が示された¹¹⁾。

本モデル(GCM)による計算結果の例を図1, 2に示す。これらは、温度・風速の全球分布で、11月5日01:00世界時(Universal Time: UT)における結果である。図1は、高度約12 km (対流圏界面付近、およそ航空機の飛行高度) の等圧面上での値である。日本上空で強い中緯度ジェットが見られている。ここでの最大風速は84 m/sであ

った。図2も図1と同様であるが、高度約300 km (スペースシャトルの飛行高度くらい) の等圧面上での値である。地磁気活動(オーロラ活動) 静穏時、太陽活動極小期における分布を表している。高度300 kmでは、昼から夜に向かう高速風が顕著に見られており、その最大風速は358 m/sとなっている。また、下層大気に比べて昼夜の温度差が極めて大きく、250 K以上にもなっていることがわかる。

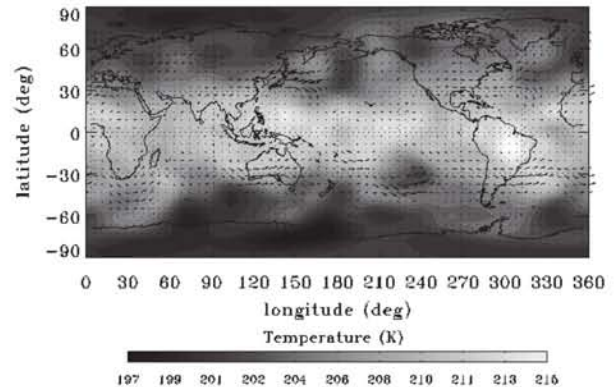


図1 大気大循環モデルによって計算された温度・風速の全球分布。11月5日01:00 UT、高度約12 km (対流圏界面付近、およそ航空機の飛行高度) の等圧面上での値。最大風速は84 m/s。

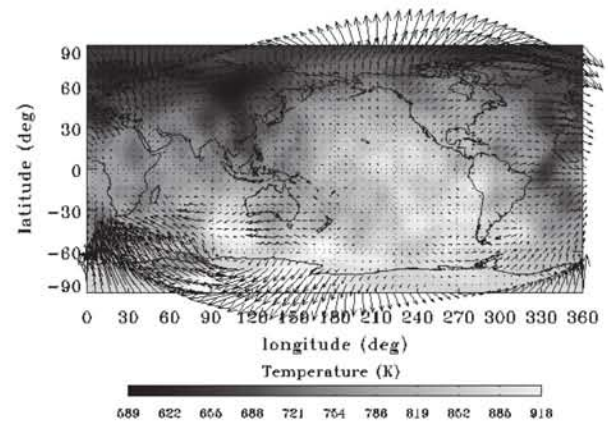


図2 図1と同様。ただし、高度約300 km (およそスペースシャトルの飛行高度) の等圧面上での値。地磁気静穏時、太陽活動極小期の分布を表している。最大風速は358 m/s。

3. 大気圏・電離圏モデル

これまで述べてきた地表から大気上端までの全大気領域モデルに加えて、電離圏変動の理解や宇宙天気研究の

ための電離圏モデル(電離大気モデル), 低緯度電離圏のダイナモ過程を記述するダイナモモデルが情報通信研究機構グループを中心に開発されてきた^{12),13)}。これらのモデルを結合し, 大気圏・電離圏統合モデル開発のプロジェクトがスタートした(図3)。ここでの統合モデル開発によって, 下層大気を起源とする電離圏擾乱の数値シミュレーションが可能となり, 様々な観測結果との比較が期待されている(電子密度などの電離圏パラメータは比較的観測が容易であるが, 熱圏での中性大気は観測が極めて困難である)。この統合モデルは, GAIA (Ground-to-topside model of Atmosphere and Ionosphere for Aeronomy) と命名され, 近年の衛星観測から明らかとなった熱圏・電離圏構造に関する初期結果が得られている^{14),15)}。

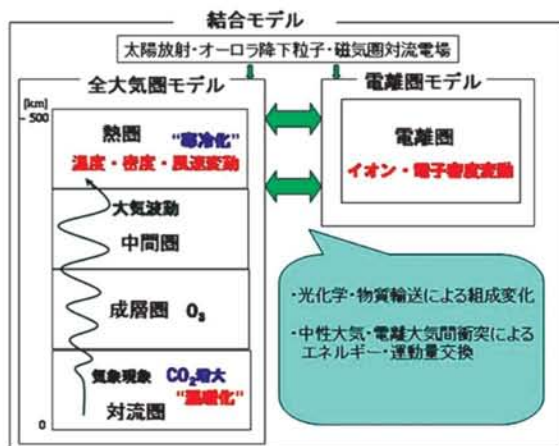


図3 大気圏モデル, 電離圏モデル, 電離圏ダイナモモデルからなる大気圏・電離圏統合モデル: GAIA

4. 欧州非干渉散乱レーダーとの共同

極域電離圏・熱圏には, オーロラ現象に伴う加熱現象が存在する。オーロラ発光を引き起こす磁気圏からの降下粒子によって, 発光だけでなく大気の加熱・電離も引き起こされる。また, 磁気圏で作られた電場が磁力線に沿って極域電離圏・熱圏に投影されることから, この領域特有の電離圏電流が駆動され, この電流の散逸に伴う加熱(ジュール加熱)が生じる。このような磁気圏からのエネルギー流入は定常ではなく, 太陽風の変動に伴って複雑に変化する。数値シミュレーションによって極域電離圏・熱圏変動を再現する際には, こういったエネルギー流入をモデルへのインプットとしなければならないため, 人工衛星やレーダー観測との共同は極めて重要である。

現在, 北欧に国際共同で設置・運営されている欧州非

干渉散乱レーダー (European Incoherent Scatter radar: EISCAT radar)¹⁶⁾ は, 世界有数の大型大気レーダーシステムである(1996年より日本も同レーダーの運営に参加している)。EISCAT レーダーシステムは, UHF (Ultra High Frequency) レーダー, VHF (Very High Frequency) レーダー, ESR (EISCAT Svalbard Rader) の独立した3つのレーダーシステムから構成されている。これらのシステムを構成するアンテナ群は, トロムソ(ノルウェー), キルナ(スウェーデン), サダンキュラ(フィンランド), ロングイヤビエン(ノルウェー)に設置されている。非干渉散乱レーダー(ISレーダー)観測では, 受信した散乱波スペクトルの解析により, イオン・電子の温度, イオンドリフト速度, 電子密度を推定することができ, これらから詳細な電離圏変動の様子を知ることができるほか, 大気加熱率を推定することができる。

本研究グループでは, 名古屋大学グループ, 国立極地研究所グループとの共同により, 2010年度よりEISCATレーダーによる特別観測を提案・実施している。様々なコンディション(オーロラ・太陽活動)において, 極域電離圏・熱圏に流入するエネルギー量を推定し, 熱圏・電離圏変動の理解に努めるとともに, 数値モデルへのインプットデータ作成を進めている。

5. 現在進行中の研究プロジェクト・将来観測

5.1 ISS-IMAP計画(国際宇宙ステーションからの大気光観測)

超高層大気中には, 大気光と呼ばれる大気発光現象が存在する。オーロラと同じ波長の大気光もあるが, オーロラとは違って磁気圏からの降下粒子によって励起状態が作り出されるのではなく, 化学反応によってのみ励起・発光する。したがって, 大気光は高緯度だけでなく中低緯度でも見られるグローバルな現象である(日本上空でも大気光は観測される)。

大気光強度の空間分布(雲のように縞模様になることもある)から大気波動(大気重力波など)の波長や伝搬方向を推定することができる。また, 大気光のドップラーシフトから大気運動(風速)の推定が可能となるほか, 輝線幅から大気温度が推定できる。レーダー観測は, 電離大気(プラズマ)の情報を得る上で有効な観測手段であるが, 大気光観測からは電離していない中性大気の情報を得ることができる。

国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS)を利用した超高層大気撮像計画(Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping: ISS-IMAP)

¹⁷⁾が進行している。同計画では、ISS実験モジュールに最新の撮像機器を搭載し、大気光観測によって中間圏界面（～87 km）、電離圏E領域（～95 km）における大気重力波の水平方向への広がり、電離圏F領域（250 km）における電子密度空間分布、電離圏・プラズマ圏（～20,000 km）におけるO⁺イオン、He⁺イオンの空間分布を導出することを主目的としている。このような大気光撮像観測と連携して、大気圏・電離圏モデリング・シミュレーション研究を実施することにより、広範な観測データに基づく様々な現象（例えば大気重力波による対流圏・電離圏結合過程）の理解が進むものと考えられる。

5. 2 南極昭和基地大型大気レーダー

南極昭和基地大型大気レーダー計画 (Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar : PANSY 計画)¹⁸⁾ がスタートしている。南極は人間活動の影響が少なく、様々な人工ノイズが軽減されることから、地球環境モニタリングに際して有効な場所であると考えられてきた。さらに、南極上空では、カタバ風、オゾンホール、夜光雲、オーロラといった特有の現象があることから、ここに大型レーダーを設置して南極大気の下層から上層までを総合的に観測しようというのがPANSY計画である。

我が国が関係している大型レーダーには、すでに述べたEISCATレーダーシステムのほかに、京都大学が運営するMUR（信楽/日本）、京都大学・インドネシア航空宇宙庁の共同によるEAR（インドネシア）があり、南極昭和基地にPANSYレーダーが完成すると北極から南極に至る地球を横断する大型レーダー観測網が完成する。

PANSY 計画では、レーダー観測を軸として、既存の昭和基地での観測を組み合わせることにより多面的な極域大気観測の実現を目指している。さらに、国内研究グループによって開発されてきたいくつかの数値モデルとレーダー観測との連携により、定量的な、精密科学としての新たな極域大気科学の構築が期待されている。本研究グループでは、熱圏・電離圏研究のための数値シミュレーションを担当する。南極、北極との比較研究から、それぞれに特徴的な大気領域間結合過程（対流圏・熱圏/電離圏結合過程）について調べるとともに、PANSYレーダーで観測されるであろう中間圏界面付近の乱流構造と上層大気との関係を明らかにする予定である。研究課題の1例として、大気モデル (GCM) によって計算された風速の高度プロファイルを図4に示す。太陽活動極小期、地磁気活動（オーロラ活動）静穏時、12月1日 01:00 UT、緯度 76°、経度 17°での東西風 (zonal wind) と南北風 (meridional wind) である。高度約 50 km から 110 km 付

近の領域で風向・風速が大きく変化している様子が示されている。特に、高度 100 km 付近では大きな風速シアアが現れ、シアア不安定による乱流の維持・生成との関係が想像される。実際にはGCMで再現されている風速シアアと比べて更に大きなシアアが観測されており、その生成機構も十分には理解が進んでいない。

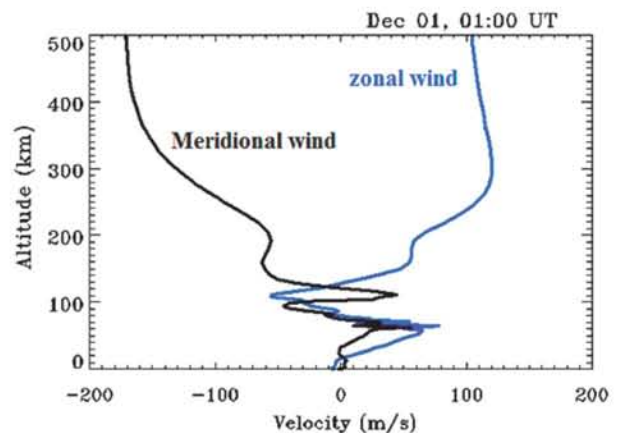


図4 GCMによって計算された緯度 76°、経度 17°での東西風 (zonal wind) と南北風 (meridional wind)。太陽活動極小期、地磁気活動（オーロラ活動）静穏時、12月1日 01:00 UTでの計算結果。

6. まとめ

大気下層から上層にいたる領域間結合過程の理解と宇宙環境変動予測（宇宙天気予測）のために、全大気領域を含む数値モデル (general circulation model: GCM) の開発を行ってきた。対流圏での大気現象が熱圏・電離圏変動に大きく影響することから、本モデルを用いた数値シミュレーションにより、従来は不可能であった種々の現象の再現に成功している。

欧州非干渉散乱 (EISCAT) レーダーシステムは国際共同で北極に設置・運営されている大型レーダーシステムである。1996年より日本もEISCATレーダー協会に加盟し観測時間の割り当てを得ることにより主体的に観測を実施することができる。EISCATレーダーシステムを用いた特別観測を提案・実施することにより、オーロラ活動に起因する熱圏・電離圏変動の理解やエネルギー流入量の推定を試みている。

EISCAT観測に加えて、本研究グループによる数値シミュレーション研究は、いくつかの観測プロジェクトとの連携が計画されている。例えば、国際宇宙ステーションからの大気光観測と連携し、中間圏界面（～87 km）、電離圏E領域（～95 km）における大気重力波の水平方向へ

の広がり、電離圏F領域 (250 km) における電子密度変動を引き起こす物理機構を調べる予定である。また、PANSY 計画では、下層から上層にいたる南極大気 of 総合観測と数値シミュレーションから、この地域・領域に特有の大気上下結合の研究を推進する予定である。広範かつ詳細な観測データを用いたモデリング・シミュレーションにより熱圏・電離圏、または地球周辺の宇宙環境予測に向けた研究が進展するものと期待される。

参考文献

- 1) Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, and S. B. Mende, Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV, *J. Geophys. Res.*, 110, A11302, doi:10.1029/2004JA010848, 2005.
- 2) Lin, C. H., W. Wang, M. E. Hagan, C. C. Hsiao, T. J. Immel, M. L. Hsu, J. Y. Liu, L. J. Paxton, T. W. Fang, and C. H. Liu, Plausible effect of atmospheric tides on the equatorial ionosphere observed by the FORMOSAT-3/COSMIC: Three-dimensional electron density structures, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11112, doi:10.1029/2007GL029265, 2007.
- 3) Otsuka, Y., N. Kotake, T. Tsugawa, K. Shiokawa, T. Ogawa, Effendy, S. Saito, M. Kawamura, T. Maruyama, N. Hemmakorn, and T. Komolmis, GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 159-165, 2006.
- 4) Tsugawa, T., A. Saito, Y. Otsuka, M. Nishioka, T. Maruyama, H. Kato, T. Nagatsuma, and K. T. Murata, Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 Tohoku Earthquake, *Earth, Planets Space*, 63, 875-879, 2011.
- 5) Roble, R. G., and R. E. Dickinson, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1441-1444, 1989.
- 6) Qian, L., R. G. Roble, S. C. Solomon, and T. J. Kane, Calculated and observed climate change in the thermosphere, and a prediction for solar cycle 24, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23705, doi:10.1029/2006GL027185, 2006.
- 7) Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695, 2003.
- 8) Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, Excitation mechanism of intraseasonal oscillation in the equatorial mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 111, D14108, doi:10.1029/2005JD006993, 2006.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Shinagawa, H., and S. Ohyama, A two-dimensional simulation of thermospheric vertical winds in the vicinity of an auroral arc, *Earth Planets Space*, 58, 1173, 2006.
- 13) Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure, *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.
- 14) 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.
- 15) Miyoshi, Y., H. Fujiwara, H. Jin, H. Shinagawa, H. Liu, and K. Terada, Model study on the formation of the equatorial mass density anomaly in the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A05322, doi:10.1029/2010JA016315, 2011.
- 16) EISCAT レーダーシステム
<http://polaris.nipr.ac.jp/~eiscat/>
- 17) 国際宇宙ステーション(ISS)-IMAP 計画
http://www.isas.ac.jp/j/researchers/symp/2010/image/0218_proc/4-1.pdf
- 18) 南極昭和基地大型レーダー(PANSY)計画
<http://pansy.nipr.ac.jp/>