

IMAP 観測と中間圏・熱圏・電離圏モデリング研究

藤原 均 (東北大理)、三好 勉信 (九大理)、陣 英克 (NICT)、品川 裕之 (NICT、齊藤 昭則 (京大理)、大塚 雄一 (名大STEL)、石井 守 (NICT)

はじめに

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(ISS-IMAP: Ionosphere, Mesosphere, upper Atmosphere, and Plasmasphere mapping)が進行している。同計画では、中間圏界面(～87km)、電離圏 E 領域(～95km)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(250km)における電子密度空間分布、電離圏・プラズマ圏(～20,000km)における O^+ イオン、 He^+ イオンの空間分布を最新の撮像技術を用いて導出することを主目的としている。このような大気撮像観測と連携して、大気圏・電離圏モデリング研究を進めることにより、観測データに基づく様々な現象の理解が可能になるものと考えられる。現在、我々は、中間圏・熱圏・電離圏変動の物理機構を理解することを目的に、これまでに個々の研究グループで開発が進められてきた大気圏モデル、電離圏モデル、ダイナモモデルを結合させた統合モデルの開発を進めている。ここでは、この大気圏・電離圏統合モデルの概要を紹介するとともに、観測とモデリング研究との連携の有効性について述べる。

1. 過去の熱圏大気衛星観測の例

米国のグループを中心として、人工衛星による熱圏大気観測が実施され、様々な大気変動が発見されてきたほか、グローバルな温度、風速分布が明らかとなった。例えば、1950 年代後半、人類初の人工衛星であるスプートニクや、その後に打ち上げられたエクスプローラ衛星等の軌道変化から、上部熱圏大気の質量密度の推定が試みられた[例えば、図 1: King-Hele, 1959]。1970 年代後半から 80 年代にかけて、Atmospheric Explorer や Dynamics Explorer 1・2 により、磁気嵐時の熱圏組成変化や極域でのオーロラ現象に対応した大規模な熱圏風分布が示された(例えば、図 2: Killeen and Roble, 1988; Prölss et al., 1995)。1990 年代に入って、Upper Atmosphere Research Satellite (UARS)は、中間圏・下部熱圏(Mesosphere Lower Thermosphere: MLT)領域での光化学過程を調べる目的で多くの微量成分の観測に成功したほか、2000 年以降、Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere Energetics and Dynamics(TIMED)衛星による温度・風速観測、SNOE 衛星による一酸化窒素観測(例えば、Barth and Bailey, 2004)などユニークな衛星観測が実施されてきた。また、近年、加速度計を搭載した測地衛星 CHAMP による観測によって、熱圏大気質量密度の詳細な変動・分布が明らかとなったほか(例えば、Liu et al., 2005)、IMAGE 衛星による大気光撮像から、下層・上層の大気結合が観測的に示された(Sagawa et al., 2005; Immel et al., 2006)。

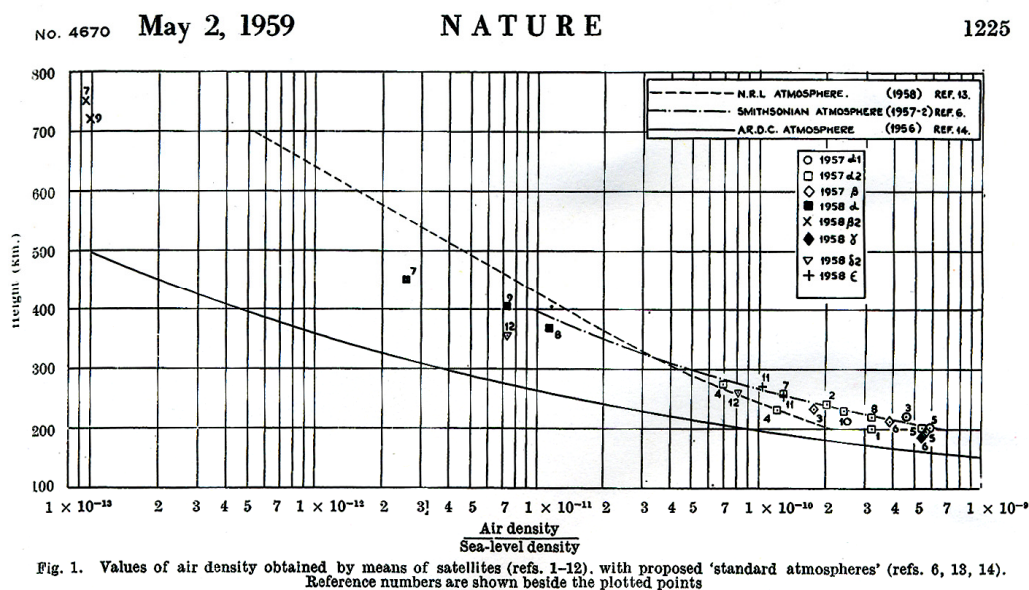


図 1. Sputnik 等の人工衛星の軌道から導出した大気密度。(King-Hele, 1959)

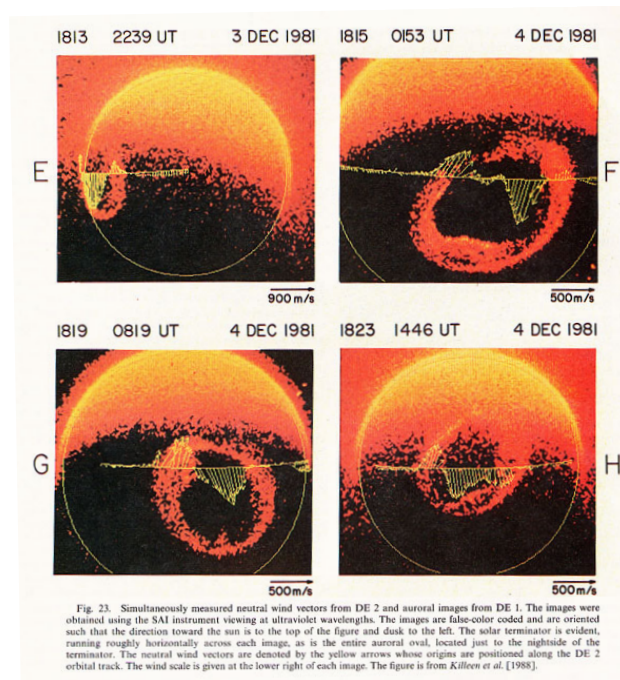


図2. DE1・2衛星観測によるオーロラと熱圏風分布。(Killeen and Robe, 1988)

2. 米国における(衛星)プロジェクトとモデル開発の関係

上述したような衛星プロジェクトと連携して、米国では大気大循環モデル(General Circulation Model: GCM)やそれへのエネルギー入力、初期値を与える経験モデルの開発が進められてきた。特に、National Center for Atmospheric Research (NCAR)が中心となって、TGCM、TIGCM、TIEGCM、TIME-GCMといった一連のGCMと、経験モデル MSIS、HWM、エネルギー入力のための観測に基づく Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics (AMIE)の手法が開発され、これらのプロジェクトを支えるコミュニティとして CDEAR, GEM 等が組織された。図3に米国における超高層物理学分野の(衛星)プロジェクト、GCM、経験モデル開発の過去の経緯を示す。図3左に、考慮されるモデルインプット、使用される経験モデル、開発年代が示されている。図中央に GCM のバージョン、図右に衛星プロジェクト(モデリングに使用する衛星データ)、プロジェクト推進のための中心機関/コミュニティが示されている。1995 年以降から、30-500 km の高度範囲であった超高層モデルと 0-40 km を考慮している気候モデルとを組み合わせる地表面から大気上端(0-500 km)までのシミュレーションを実施している。

LONG RANGE TGCM MODEL DEVELOPMENT

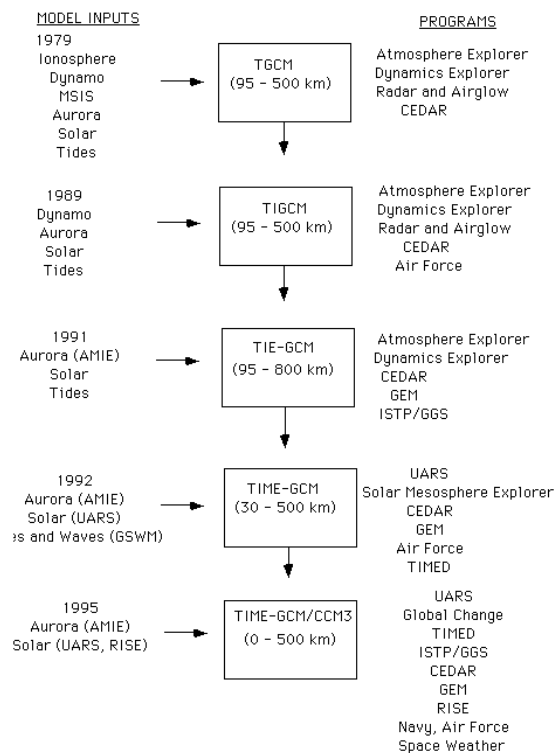


図3. 米国における(衛星)プロジェクトとモデル開発。
(www.ucar.edu)

3. 我が国におけるモデル開発の試み

従来、主に中層大気力学の研究に使われてきた九州大学 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 が開発された(Miyoshi and Fujiwara, 2003)。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、近年話題となっている対流圏起源の電離圏変動にかかわる中性大気擾乱の数値シミュレーションに成功している。図 4 に GCM での計算例を示す。

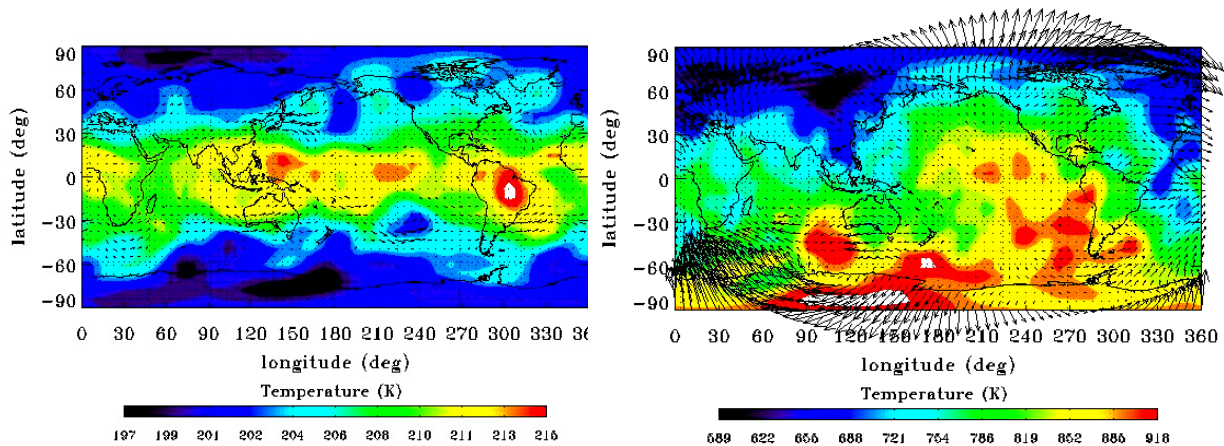


図 4. (左図) 大気大循環モデルによって計算された温度・風速の全球分布。11 月 5 日 UT=0100、高度約 12 km (対流圏界面付近、およそ航空機の飛行高度) の等圧面上での値。最大風速は 84 m/s。 (右図) 左図と同様。ただし、高度約 300 km (およそスペースシャトルの飛行高度) の等圧面上での値。地磁気静穏時、太陽活動極小期の分布を表している。最大風速は 358 m/s。

また、極域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が開発されてきたほか(Shinagawa and Oyama, 2006)、近年、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開発された(Jin et al., 2008)。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ている(図 5)。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、ISS-IMAP が目指している中間圏・熱圏・電離圏・プラズマ圏撮像研究による大気下層・上層結合について定量的な理解が進むものと期待される。

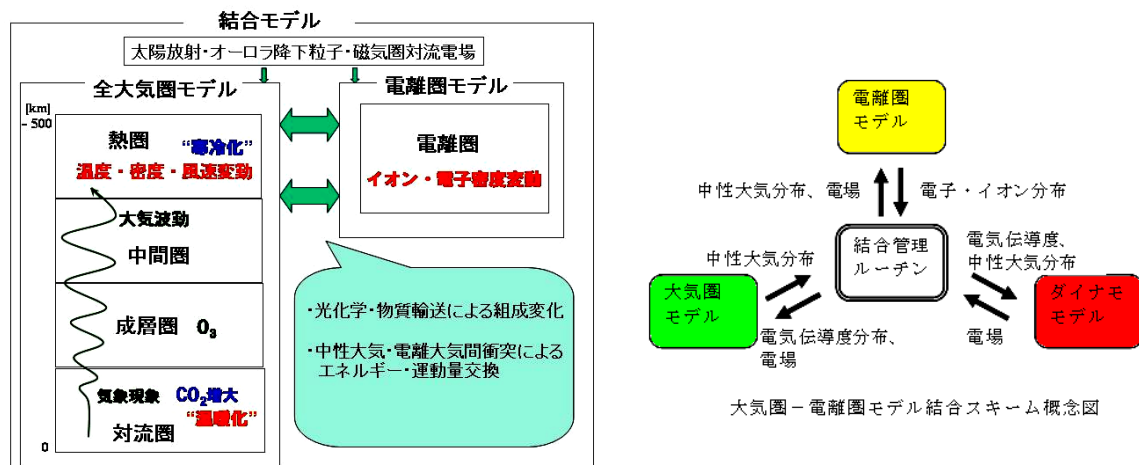


図 5. 大気圏、電離圏、ダイナモモデル領域と主な物理過程(左図)。右図はモデル間の結合スキームの概念図。

上記のような組織的な結合モデル開発の試みは我が国ではこれまでに例がなく、超高層物理学・電離圏物理学分野における新たな研究の方向性を示すものと思われる。米国の例を参考にしながら、ここでのモデリング研究と ISS-IMAP 計画とを結びつけ、観測とシミュレーションとの相補的關係を構築することが必要である。また、我が国の超高層大気・電離圏分野では、世界有数の地上観測網を有している。例えば、EISCAT レーダー、SuperDARN、MU レーダー、赤道大気レーダー(EAR)、イオノゾンデ観測網、大気光イメージャー、GPS 受信網による全電子数観測、磁力計ネットワークなどが挙げられる。こういった観測データと数値シミュレーションとの比較研究を行うとともに、近い将来、可能な限りのデータを用いた電離圏データ同化による電離圏変動予測の研究へと発展することが期待される。

まとめ

ISS-IMAP 計画と連携して(またはその一部として)、観測データとの比較・データの有効利用を念頭に置いたモデリング研究がスタートしている。このような組織的なモデリングの試みは、我が国の超高層物理学分野としては初のものであり、観測と相補的なモデリング(理論系)研究を発展させる上で重要な試みであると考えられる。

これまでに米国を中心とした衛星観測、数値シミュレーションから様々な熱圏・電離圏の姿が明らかとなってきた。近年の衛星観測から得られた新たな電離圏の描像は、下層大気からの影響を受け激しく変動するというものである。ISS-IMAP では、領域間の上下結合を探るための中間圏・熱圏・電離圏・プラズマ圏撮像を実施することから、大気圏・電離圏統合モデルは得られた観測結果を理解する上で必要不可欠の研究ツールである。

参考文献

- Barth, C. A., S. M. Bailey (2004), Comparison of a thermospheric photochemical model with Student Nitric Oxide Explorer (SNOE) observations of nitric oxide, *J. Geophys. Res.*, 109(A3), A03304, doi:10.1029/2003JA010227.
- Immel, T. J., E. Sagawa, S. L. England, S. B. Henderson, M. E. Hagan, S. B. Mende, H. U. Frey, C. M. Swenson, and L. J. Paxton (2006), The control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L15108, doi:10.1029/2006GL026161.
- Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa (2008), Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure, *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301.
- Killeen, T. L., and R. G. Roble (1988), Thermosphere dynamics: Contributions from the first 5 years of the Dynamics Explorer program, *Reviews of Geophysics*, 26, 329-367.
- King-Hele, D. G. (1959), Density of the atmosphere at heights between 200 km. and 400 km., from analysis of artificial satellite orbits, *Nature*, 183, 1224-1227.
- Liu, H., H. Lühr, V. Henize, W. Köhler (2005), Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP, *J. Geophys. Res.*, 110, A04301, doi:10.1029/2004JA010741, 2005.
- Miyoshi, Y. and H. Fujiwara(2003): Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, 1789, doi:10.1029/2003GL017695.
- Prölss, G. W. (1995), Ionospheric F-region storms, in *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* edited by Volland, H., Boca Raton, CRC Press, 2, 195-248.
- Sagawa, E., T. J. Immel, H. U. Frey, S. B. Mende (2005), Longitudinal Structure of the Equatorial Anomaly in the Nighttime Ionosphere Observed by IMAGE/FUV, *J. Geophys. Res.*, 110, A11302, doi:10.1029/2004JA010848.
- Shinagawa, H., and S. Oyama (2006): A two-dimensional simulation of thermospheric vertical winds in the vicinity of an auroral arc, *Earth Planets Space*, Vol. 58, 1173-1181.