

2-3-6 電離圏シミュレーション

2-3-6 Ionosphere Simulation

品川裕之

SHINAGAWA Hiroyuki

要旨

宇宙天気予報は、予報官が観測データと経験に基づいて予測を行う従来の方法に加え、数値シミュレーションを用いた数値予報を本格的に取り入れる段階を迎えようとしている。現在、NICTにおいては、宇宙環境計測グループが中心となって開発したリアルタイム宇宙天気統合シミュレータが稼働している。このシステムは、太陽・太陽風、磁気圏、電離圏の3つのリアルタイムシミュレータからなっており、常時データを公開している。本稿では、このシステムで用いられている電離圏モデルの概要について説明し、リアルタイム電離圏シミュレーションの結果の一例を紹介する。

In space weather forecast, we are at the stage of introducing numerical forecasts using numerical simulation in addition to previous methods in which forecasters make predictions based on observation data and their experiences. The real-time integrated space weather simulator, which has been developed by the space environment group, is now in operation at NICT. This system consists of a sun-solar wind model, a magnetospheric model, an ionospheric model. The real-time simulation data are now open to public. In this paper, the ionosphere simulation method in the simulator system is briefly described, and some results obtained by the NICT real-time ionosphere simulator are presented.

[キーワード]

宇宙天気, 電離圏, 数値予報, シミュレーション, 磁気嵐, リアルタイム

Space weather, Ionosphere, Numerical forecast, Simulation, Magnetic storm, Real time

1 まえがき

高度 80 km 以上の大気領域は超高層大気と呼ばれ、電荷を持たない中性気体と、イオンと電子からなる電離気体(プラズマ)が混ざった領域である。熱圏は密度が地表面の大気の 10 万分の 1 以下という極めて稀薄な大気領域で、電離圏はさらにそれより何桁も密度が小さく、ほとんど真空と言えるほど希薄であるが、人間の活動にとって重要な領域である。例えば、短波を使った通信やラジオの放送は、電離圏での反射を利用して行われているが、太陽フレアに伴う X 線や、磁気嵐による高エネルギー粒子の降下によって電離圏が異常に電離されると、通信や放送に障害を起し、私たちの生活に影響を与えることがある。また、激しい磁気嵐の時には、極域に降り注ぐオーロラ

によって電離圏領域にエネルギーが流入する結果、熱圏大気の加熱・膨張が起こり、大気密度が大きく増加する。このような時、高度 400 km 程度以下を飛ぶ低高度の地球周回衛星は、大気の摩擦力を強く受けて軌道の制御が困難になり、最悪の場合には落ちてしまうことがある。超高層大気の現況を把握し、さらに今後の状態を予測できれば、適切な手段を講じて、被害を未然に防いだり、軽減したりできる可能性がある。現在、世界の研究機関では、さまざまな電離圏じょう乱の数値予測モデルの開発が進められている。

2 電離圏シミュレーション

2.1 電離圏モデル開発の背景

電離圏の理論研究は、1960 年代から盛んになり、

コンピュータの発展に伴い、1970年頃から現実的なシミュレーションモデルが構築されるようになった。初期の鉛直1次元拡散モデルは、米国ユタ大学の Schunk らのグループによって開発され、中緯度電離圏の基本的な構造と日変動の再現に初めて成功した[1]。その後、1980年代に入り、米国のいくつかのグループで全球3次元モデルが開発された[2]。これにより、磁気嵐に伴う極域じょう乱がグローバルな電離圏環境にどのような影響を与えるかをモデル上で調べることができるようになった[3]–[5]。

電離圏の特徴として、磁気圏からの電場、降り込み粒子(オーロラ粒子)や下層大気圏からの波動などの影響を強く受けるという点がある。初期のモデルでは、熱圏や磁気圏の影響を観測データに基づく経験モデルなどから与えていたが、1990年代には磁気圏モデルや熱圏大気モデルも発展し、2000年頃には、初期の磁気圏-電離圏-熱圏結合モデルが開発された[6]。今世紀に入って、各領域のモデルがさらに精密化されるとともに、米国を中心に太陽面-太陽風のモデルや、下層大気圏から熱圏大気までを含む「太陽地球環境統合モデル」の開発が行われるようになった[7]。

しかしながら、現在の流体方程式に基づく数値モデルでは、乱流のようなミクロスケール現象の効果や、オーロラ粒子の降り込みのような粒子的效果などは原理的に表せない。そのため、モデル中に経験的な入力データや経験式などを入れてその効果を取り入れるという手法が考えられた。このような手法はパラメタリゼーションと呼ばれ、多くのグローバルモデルで用いられている。数値モデルの精度を上げるためには、観測データとモデルの比較と、それに基づくパラメタリゼーション方法の改良が不可欠となってくる。

2.2 電離圏モデリング方法

これまで世界各地の研究機関で多くの電離圏モデルが開発されており、使われる方程式系やモデリング方法も簡単なものから、非常に厳密なものまでさまざまな種類がある。ここでは、最も一般的に使われている比較的簡便な方法を紹介する。NICTのモデルも以下の方法を採用している。

電離圏は、イオンと電子からなる流体方程式で表すことができる。多くの電離圏モデルで用いら

れる一般的な方程式系は、以下のものである。

連続の式

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = -\nabla \cdot (n_i \mathbf{v}_i) + P_i - L_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

イオンの運動量の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = & -(\mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i - \frac{1}{m_i n_i} \nabla p_i - \mathbf{v}_{in} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_n) \\ & + \mathbf{g} + \frac{e}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

電子の運動量の式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} = & -(\mathbf{v}_e \cdot \nabla) \mathbf{v}_e - \frac{1}{m_e n_e} \nabla p_e \\ & - \mathbf{v}_{en} (\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_n) \\ & + \mathbf{g} - \frac{e}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

イオンのエネルギーの式

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} n_i k \frac{\partial T_i}{\partial t} = & -\nabla \cdot \mathbf{q}_i - \sum_t \frac{n_t m_t v_{it}}{m_i + m_t} \left[3k(T_i - T_t) \right. \\ & \left. + m_t (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_t)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

電子のエネルギーの式

$$\frac{3}{2} n_e k \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q}_e + Q_e \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 n 密度、 \mathbf{v} 速度、 P 粒子生成率、 L 粒子消滅率、 m 質量、 v_{ab} a 粒子の b 粒子に対する運動量輸送衝突周波数、 p 圧力、 \mathbf{g} 重力加速度、 \mathbf{q} 熱流速、 Q 正味の加熱率。添字 i, n, e はそれぞれ i 種のイオン、 n 種の中性粒子、電子を表し、添字 t はすべての粒子を表す。

連続の式(1)においては、イオン生成は、太陽極端紫外線(EUV)が中性粒子を直接電離する光電離に加え、電離してできた電子(光電子: Photoelectron)がさらに周りに中性大気を電離する2次元電離の寄与も存在する。光電子による電離を厳密に計算するのは複雑であるので、通常簡単な近似式が用いられる。また、イオンと中性粒子の間には、多くの化学反応が存在するため、あるイオンから別の種類のイオンが作られており、これも生成に含まれる。イオンの消滅は、イオン化学反応を通じて起きるが、最終的には、解離性再結合に

よってイオンと電子が結びついて、中性粒子に戻って消滅する。高度 200 km 以下の領域では、光化学過程が支配的であるが、高度 200 km 以上の電離圏の F 層領域では、式 (1) の右辺第 1 項の輸送の項が重要となる。この領域では、イオンの拡散過程や電場による対流の影響が支配的になる。

イオンの運動方程式 (2) では、左辺第 1 項の時間変化や右辺第 1 項の慣性項は比較的小さいので無視することもあるが、電離圏上部では必ずしも小さくない。さらに厳密にはイオンの粘性項を付け加える場合もある。電子の運動方程式 (3) では、時間変化や慣性項は通常無視することができる。

イオンと電子のエネルギーの式 (4)、(5) では、左辺第 1 項の局所的な時間変化は小さく、近似的に無視しても良く、加熱、冷却項と熱伝導の項のバランスで表すことができる。不確定要素として、上部境界条件として与える熱流速がある。これを加えないと現実的なイオン温度、電子温度にならないことが知られており、観測にできるだけ合うように適当な値が与えられている。

電離圏シミュレーションでは、基本的にはこれらの式を解くのであるが、地球電離圏の場合、電離圏高度では固有磁場が十分強く、磁力線の形は変わらないとして良いので、運動方程式を解く際には、多くの場合、便宜上次の方法が取られている。

まず、運動方程式の時間変化の項を無視して、速度を磁力線に平行な成分 (添字 //) と垂直な成分 (添字 ⊥) に分ける。

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_{i//} + \mathbf{v}_{i\perp} \dots\dots\dots (6)$$

磁力線に垂直方向のイオンの運動は、以下で表される。

$$\mathbf{v}_{i\perp} = \mathbf{v}_n + \frac{e}{v_{in} m_i} (\mathbf{E}_{\perp} + \mathbf{v}_{i\perp} \times \mathbf{B}) \dots\dots\dots (7)$$

これを $\mathbf{v}_{i\perp}$ について解くことにより、速度を求めることができる。

一方、磁力線に平行方向の運動を電子とイオンについて書くと

$$0 = -\frac{1}{n_e m_e} \nabla p_{e//} - v_{en} (\mathbf{v}_{e//} - \mathbf{v}_{n//}) + \mathbf{g}_{//} - \frac{e}{m_e} \mathbf{E}_{//} \dots (8)$$

$$0 = -\frac{1}{m_i n_i} \nabla p_{i//} - v_{in} (\mathbf{v}_{i//} - \mathbf{v}_{n//}) + \mathbf{g}_{//} + \frac{e}{m_i} \mathbf{E}_{//} \dots (9)$$

となる。

これから、 $\mathbf{E}_{//}$ を消去すれば速度が求まる。今、簡単な場合を考えて、イオン i が主イオンであるとして、 $n_i = n_e$ 、 $v_{in} \gg v_{en}$ 、 $m_i \gg m_e$ の近似を使うと、以下のように書ける。

$$\mathbf{v}_{i//} = -\frac{e}{m_i n_i v_{in}} (\nabla p_i + \nabla p_e) + \frac{\mathbf{g}_{//}}{v_{in}} + \mathbf{v}_{n//} \dots\dots (10)$$

磁力線に平行な運動は、磁力管内の拡散方程式で表し、磁力線に垂直な方向は、電場を与えて、 $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ の運動で表す。この場合、 \mathbf{E} は高緯度では磁気圏の対流電場、中低緯度では、ダイナモ電場となる。

3 NICT リアルタイム電離圏シミュレーションモデル

3.1 NICT におけるリアルタイム電離圏シミュレーション

NICT では電離圏モデルを独自に開発し、現在、リアルタイムの電離圏シミュレーションを行っている。本モデルは、前述の電離圏の 3 次元基礎方程式をリアルタイムでグローバルに解くことにより、電離圏の物理量を求めるものである。電離圏への入力は、背景の中性大気モデルとして経験モデルに基づく熱圏モデルを用いている。この熱圏モデルは、変動成分も求めることが可能なものとなっており、熱圏の変動を与えることができる。また、磁気圏からの影響は、同時に稼働しているリアルタイム磁気圏モデルで得られる極域の電気伝導度と電位を用いて含めている。このリアルタイム磁気圏モデルは、太陽観測衛星 ACE で得られるリアルタイムの太陽風データを入力としている。

これにより、リアルタイムの太陽風データを入力として、現在の電離圏、熱圏の状態を再現することができるシステムとなっている。このシステムは、2008 年 7 月から本格的に運用を行っており、Web によって外部に公開されている。次にこの電離圏モデルの概要を説明する。

3.2 電離圏モデル

座標系は、熱圏・電離圏とも球座標系(鉛直・緯度・経度)を用いている。鉛直方向の領域は、中性大気は、0 km(地表)から 600 km、格子点間隔は 10 km、電離圏は、0 km(地表)から 3000 km、格子点間隔は 高度 600 km までは 10 km、その上は徐々に間隔を広げ、上部境界付近では 100 km としている。緯度方向と経度方向の格子点は、それぞれ 1 度、5 度間隔としている。一般にグローバルモデルで球座標系を用いる場合には、極付近で格子点間隔が急激に狭まるという欠点があるが、超高層大気現象ではしばしば高緯度でオーロラなどの小スケール現象が発生するため必ずしも不都合ではない。しかし、極点の付近では、必要以上に格子点が狭まるので、極点から 3 度以内の領域は格子点を省き、補間を行って値を計算している。

電離大気は、5つのイオン種(N₂⁺、O₂⁺、NO⁺、O⁺、H⁺)を取り扱っている。運動方程式に関しては、上記で示した方法を用い、O⁺とH⁺の密度比を経験的に与えて一流体のイオンであるとして、2つの速度成分(磁力線方向に拡散、磁力線垂直方向にE×Bドリフト)に分けて、式(7)と(10)から速度を求めている。分子イオンについては、光化学平衡を仮定して密度を求めている。

エネルギーの式については、イオンは式(3)の左辺の時間変化の項はないとし、熱伝導は含まないとする。電子も式(5)の左辺の時間変化の項を無視し、下部電離圏(約150 km以下)では、衝突によるエネルギー交換と光電子による加熱、上部電離圏(約250 km以上)では、熱伝導のみが効くとして解析解で与え、上部と下部電離圏の解を滑らかにつなげている。磁場形状は傾いたダイポールで近似し、ダイナモモデルを別途構築して、中性風によるダイナモ電場を入れている[8]。

モデルのインプットは、太陽電波強度に基づくF10.7を指標とする太陽EUVスペクトルモデルEUVAC[9]を用いている。降下粒子による電離率、加熱率、極域ポテンシャルは、磁気圏モデルの出力データを入力とした経験モデルを使って与えている。

3.3 熱圏モデル

電離圏シミュレータでは、経験モデルを基本場

とした中性大気モデルを組み込んでいる。この部分は、他の熱圏大気モデルと置き換えることが可能である。このモデルの特長は、時間スケールや空間スケールの小さい現象を精度良く解くため、多くのグローバルモデルで用いられている静力学近似のモデルではなく、非静力学平衡の圧縮流体方程式系を用いている点である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_n) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_n}{\partial t} = -(\mathbf{v}_n \cdot \nabla) \mathbf{v}_n - \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} - 2\Omega \times \mathbf{v}_n - \nu_{ni}(\mathbf{v}_n - \mathbf{v}_i) + \frac{1}{\rho} \nabla (\mu \nabla \mathbf{v}_n) \quad \dots\dots (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -(\mathbf{v}_n \cdot \nabla) T - \frac{R}{C_v} T (\nabla \cdot \mathbf{v}_n) + \frac{1}{\rho C_v} \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{C_v} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$p = \rho RT \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに、 ρ 中性大気質量密度、 \mathbf{v}_n 中性大気の数、 p 圧力、 R 気体定数、 T 中性大気温度、 C_v 定積比熱、 μ 分子粘性、 κ 熱伝導係数、 Q 正味の加熱率、 Ω 自転角速度。

大気は1流体として、組成はO、N₂、O₂の3種からなるとしている。基本場は、大気密度と温度は経験モデルNRL-MSISE00によって与え[10]、組成の比は、基本場の組成比を基に計算している[11]。速度の基本場は、経験モデルHWM93で与えられるとする[12]。実際の計算では、この基本場は、平衡状態にあると仮定して、平衡状態からの変動量(例えば、 $\rho' = \rho - \rho_0$)を解いている。数値解法は、差分法を用い、移流項の計算にはCIP法を使って解いている。

3.4 磁気圏との結合

磁気圏変動に対する電離圏の応答と電離圏変動の磁気圏へのフィードバック過程、すなわち磁気圏-電離圏相互作用過程は、未だに解明されていない大きな課題である。この問題に関しては、数値シミュレーション研究が非常に有効な手段である

が、モデルの結合においては、お互いの情報をどのように交換するかが問題となる。特に、磁気圏からのオーロラ粒子降下による電離に対応する極域電離圏電気伝導度をどのように与えるかが重要となる。我々の磁気圏モデルでは、球殻状の電離圏を仮定して、磁気圏内部境界 ($r=3.5 R_e$) のパラメータを電離圏上に投影している。電離圏の電気伝導度は高度積分値で与えられ、(1) 太陽極端紫外線 (EUV) による電気伝導度成分、(2) ディフューズオーロラ粒子による電離に相当する成分 (磁気圏モデル中のプラズマシートのプラズマの圧力と質量密度の関数とする)、(3) ディスクリートオーロラ粒子による電離に相当する成分 (磁気圏モデル中の極域の沿磁力線電流の関数とする) の3つの成分によって決まるとしている。この関数は、観測をできるだけ良く再現するように経験的に与えられている。

こうして与えられる高度積分された電気伝導度を計算した後、電離圏モデル中では、高度分布の形を仮定して電気伝導度の高度分布を求め、3次元データとする。そして、この電気伝導度を用いてイオン生成率、プラズマ加熱率や中性粒子加熱率を見積もるという方法を採用している。この一連の手続きは、いわゆるパラメタリゼーションと呼ばれるもので、グローバルモデルの中で、微視的な効果を取り入れるために必要な手法である。

極域の電位も電離圏にとって重要なパラメータであるが、磁気圏モデルから直接与えられるので、これを電離圏モデルの極域電場の入力として用いている。昼間側の EUV による電離成分については、電離圏モデル中で計算された値を用いている。この方法により、太陽風を入力とすることにより、電離圏、熱圏の状態をリアルタイムで再現できるモデルを実行することができる。

3.5 リアルタイムシミュレーション結果の例

次に、このリアルタイムモデルによって得られた計算例を紹介する。図1は、2008年7月23日にリアルタイムシミュレーションで実際に得られた結果である。電離圏の高度120 kmの電子密度とプラズマの速度を示している。太陽風磁場の南向き成分が増加したのに伴って磁気圏のじょう乱が発生し、電離圏のじょう乱も発生した。図の夜側(下側)で三日月形の電子密度の高い領域が見え

ているが、これはコンピュータ上で再現された「オーロラ」である。上側の明るい領域は、昼側の太陽紫外線による電離の効果によるものである。モデルの精度が十分でないため、オーロラの微細構造までは再現されていないが、大まかな構造は図2の代表的な観測結果と良くあっている。磁気圏の電場で励起される電離圏プラズマの対流速度は1 km/s を超え、高速の対流が起きていることがわかる。

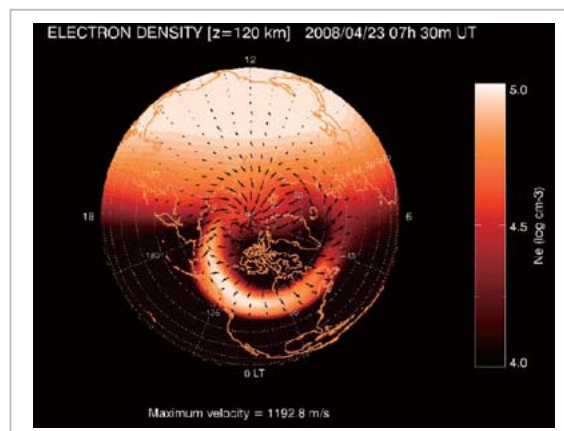


図1 リアルタイム電離圏シミュレーションで得られた高度120 kmの電子密度分布とプラズマ速度

夜側(下側)の三日月状の明るい領域がシミュレーションの中のオーロラを表している。

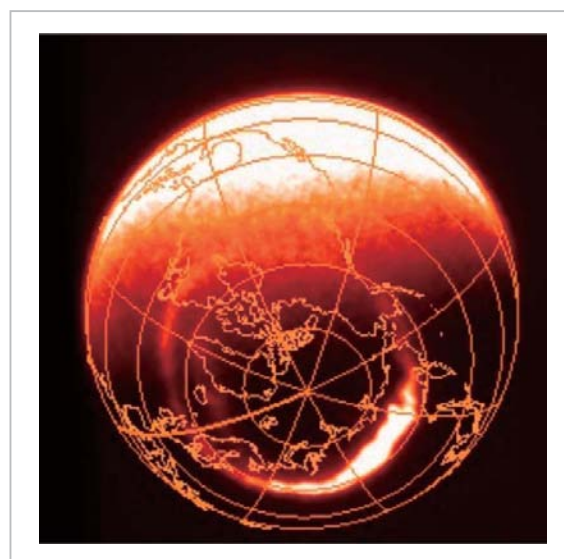


図2 人工衛星で宇宙から撮影したオーロラ画像 (Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley 提供)

図1と別の日の画像であるが、オーロラの特徴的な構造が現れている。

図3は、図1と同じ時刻での高度300kmの熱圏の温度上昇量と風速である。いずれも静穏時大気からの変動量を表している。磁気嵐が起きると、極域で太陽風のエネルギーが超高層大気に流入して、熱圏と電離圏の温度が大きく上昇する。この加熱により、極域の熱圏の圧力が増大し、極から赤道方向への強い風が励起される。この風は、電離圏を押し上げる効果があり、中緯度の電子密度の増大を引き起こす。これは電離圏正相嵐(ポジ

ティブストーム)と呼ばれるものである。

また、熱圏大気が加熱されると大気が膨張し、高度の高い領域の中性大気密度を上昇させる。非常に大きなじょう乱時には大気摩擦によって人工衛星の軌道を変えたり、最悪の場合には、衛星の落下を引き起こす。その他、最近問題となっているスペースデブリの分布を変えたりしてしまうこともあり、熱圏大気の膨張は、宇宙天气的にも極めて重要な現象である。

次に、リアルタイム電離圏シミュレーションで、電離圏の正相嵐が実際に再現された例を図4に示す。このじょう乱は、2008年6月15日に起こったものである。このイベントは、極域で加熱が起こり、赤道向きの熱圏風が発生し、それに伴って起きた電離圏全電子数(TEC)の上昇の例である。じょう乱の規模としては比較的小さいものであるが、GPS衛星で観測された国分寺でのTECの変動傾向と比較してみると、14日の終わり頃からTECが上昇し、15日は平均より高くなっている傾向が再現されており、シミュレーションと観測が良く一致していることがわかる。

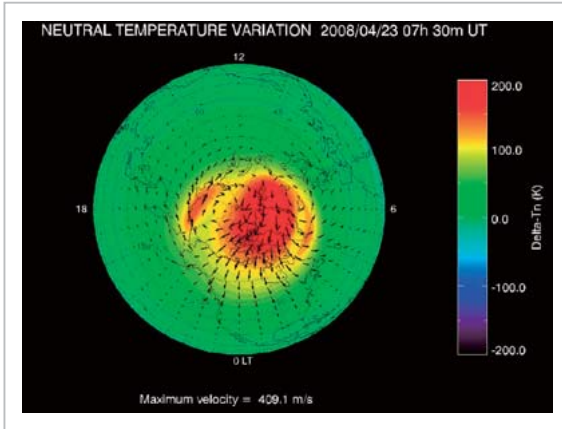


図3 北半球の高度300kmにおける熱圏の温度上昇量(カラーコンター)と風速(矢印)

いずれも静穏時大気からの変動量を表している。赤い領域が加熱が起きているところで、大気密度も上昇する領域である。この加熱領域から熱圏の風が赤道に向かって吹き出している。中心が北極点、上側が昼側を表している。

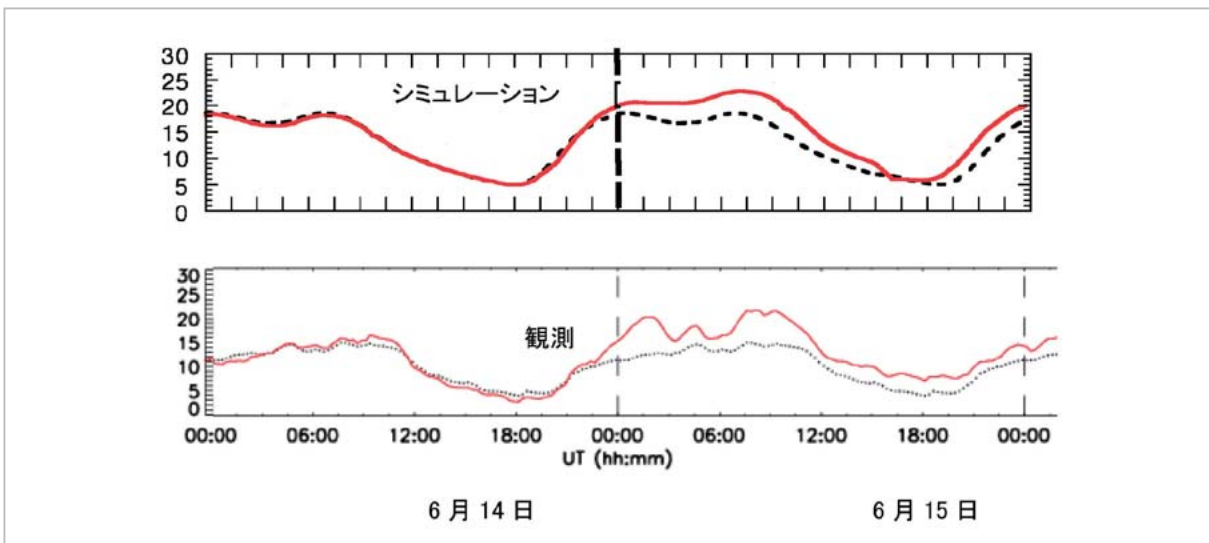


図4 東京付近における電離圏じょう乱日(2008年6月14日-15日)(赤線)の電離圏全電子数(単位は 10^{16} m^{-2})の変化

(上)リアルタイム宇宙天気シミュレータの計算結果。(下)観測から求められた電離圏全電子数。点線は電離圏静穏日の変動を表している。6月14日終わりから15日にかけて、静穏日に比べて明らかに電子密度が上昇しているのが再現されている。

4 むすび

本文では、電離圏モデルとその手法についてその概要を述べた。現在、NICTのリアルタイム宇宙天気統合シミュレータ上で定常的に運用を行っている、電離圏変動をさまざまな電離圏観測データと比較することにより、磁気圏-電離圏結合の妥当性についての検証を行っている。これまでのところ、定量的にはまだ十分とは言えないが、多くの磁気圏起源のじょう乱に対して、シミュレーションの電離圏変動は観測とかなり良く対応していることを確認している。このことから、数時間程度の電離圏数値予測モデルの開発は十分可能であると考えている。また、中低緯度では、下層大気起源の電離圏じょう乱も重要となるが、そのためには、気象現象も含む拡張大気圏モデルを用いる必

要があり、そのためのモデル開発^[13]と、観測データ^{[14][15]}との比較も進めている。

しかしながら、実用上は、宇宙環境じょう乱に十分に対応するためには半日から数日程度の予報が求められることが多い。それには磁気圏や電離圏だけではなく、さらに上流側の太陽風の数値予測が不可欠となる。我々は、2008年からリアルタイム太陽・太陽風シミュレータも運用しており、現在、地球付近でのACE衛星の太陽風データとの比較を行ってモデルを検証している段階である。太陽風が太陽面から地球軌道まで到達するのに数日かかることから、この太陽・太陽風シミュレータの精度を高め、磁気圏-電離圏-大気圏モデルと連動させることにより、数日先までの宇宙天気を実用的な精度で予測することは理論的に可能と思われる。

参考文献

- 1 Schunk, R. W., and J. C. G. Walker, "Theoretical ion densities in the lower ionosphere", *Planet. Space Sci.*, Vol.21, pp.1875-1896, 1973.
- 2 Sojka, J. J., and R. W. Schunk, "A theoretical study of the global F-region for June solstice, solar maximum, and low magnetic activity", *J. Geophys. Res.*, Vol.90, pp.5285-5298, 1985.
- 3 Fuller-Rowell, T. J., et al., "Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionosphere-thermosphere model", *J. Geophys. Res.*, Vol.92, pp.7744-7748, 1987.
- 4 Roble., R. G., E. C. Ridley, A. D. Richmond, R. E. Dickinson, "A coupled thermosphere/ionosphere general circulation model", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.15, No.12, pp.325-328, 1988.
- 5 Roble., R. G., and E. C. Ridley, "A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (TIME-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30-500 km)", *Geophys. Res. Lett.*, Vol.21, No.6, pp.417-420, 1994.
- 6 Raeder, J., Y. L. Wang, and T. J. Fuller-Rowell, "Geomagnetic storm simulation with a coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere model", in *Space Weather: Progress and Challenges in Research and Applications*, pp.377-384, P. Song, H.J. Singer, and G. Siscoe, editors, *Geophysical Monograph*, No.125, AGU, Washington, D.C., 2001.
- 7 Tóth, G., D. L. De Zeeuw, T. I. Gombosi, W. B. Manchester, A. J. Ridley, Igor V. Sokolov, and I. I. Roussev, "Sun-to-thermosphere simulation of the 28-30 October 2003 storm with the Space Weather Modeling Framework", *Space Weather*, Vol.5, S06003, doi:10.1029/2006SW000272, 2007.
- 8 Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, "Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, No.A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.
- 9 Richards, P. G., J. A. Fennelly, and D. G. Torr, "EUVAC: A Solar EUV Flux Model for Aeronomic Calculations", *J. Geophys. Res.*, Vol.99, No.A5, pp.8981-8992, 1994.

- 10 Hedin, A. E., "Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere", J. Geophys. Res., Vol.96, pp.1159-1172, 1991.
- 11 Fuller-Rowell, T. J., and D. Rees, "Derivation of a conservation equation for mean molecular weight for a two constituent gas within a three-dimensional, time-dependent, model of the thermosphere", Planet. Space Sci., 31, 1209-1222, 1983.
- 12 Hedin, A. E., E. L. Fleming, A. H. Manson, F. J. Schmidlin, S. K. Avery, R. R. Clark, S. J. Franke, G. J. Fraser, T. Tsuda, F. Vial, and R. A. Vincent, "Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere", J. Atmos. Terr. Phys., Vol.58, pp.1421-1447, 1996.
- 13 Miyoshi, Y., and H. Fujiwara, "Day-to-day variations of migrating diurnal tide simulated by a GCM from the ground surface to the exobase", Geophys. Res. Lett., Vol.30, No.5, pp.1789-1792, doi:10.1029/2003GL017695, 2003.
- 14 Liu, H., H. Lühr, V. Henize, and W. Köhler, "Global distribution of the thermospheric total mass density derived from CHAMP", J. Geophys. Res., Vol.110, No.A04301, doi: 10.1029/2004JA010741, 2005.
- 15 Liu, H., S. Watanabe, and T. Kondo, "Fast thermospheric wind jet at the Earth's dip equator", Geophys. Res. Lett., Vol.36, No.L08103, doi:10.1029/2009GL037377, 2009.



品川裕之

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 Ph. D.
電離圏物理学