

## 2-3-4 磁気圏 MHD シミュレーションとその宇宙天気業務応用の展望

### 2-3-4 *The Global MHD Magnetosphere Simulation and Prospect for the Space Weather Prediction*

藤田 茂

FUJITA Shigeru

#### 要旨

本稿ではまず、電離圏を境界として取り入れた自己無撞着な磁気圏 MHD シミュレーションが磁気圏物理学に与えた磁気圏電離圏複合系という概念によって、磁気圏で生起する代表的な現象(磁気急始現象、 $\theta$  オーロラ、サブストーム等)は太陽風変化に伴う磁気圏電離圏複合系の状態遷移で整理されることを論じた。次に、将来の宇宙天気業務を考える上で有効と考えられる、気象(天気予報)で用いられている技法を宇宙天気に応用することを試みた。最初に、データ同化によって電離圏電気伝導度の最適値を推定する試みを紹介した。ただし、数値モデル自体の現象再現精度がまだ不十分であることから、現状では磁気圏シミュレーションを用いたデータ同化は宇宙天気の精度を向上させる有効な方法であるとは言い難い。次に、天気予報で利用されている「ガイダンス」を宇宙天気を導入することについて論じた。すなわち、時々刻々生産され蓄積されているデータは、気象学でいう客観解析データである。この蓄積された宇宙天気客観解析データから相関解析等によって必要な物理量を予報するための関係を求めることによって、天気予報で活用されているガイダンスと同じものを導入できる可能性があることを指摘した。

The realistic, global MHD simulations of the magnetosphere-ionosphere system invoke the new paradigm of "the magnetosphere-ionosphere compound system" in the magnetospheric science. The magnetospheric structure is comprehended within this context. In addition, typical magnetospheric disturbances such as sudden commencements, theta-auroras and substorms are interpreted as phenomena associated with state transition of the compound system. Next, we introduce the way of getting a suitable set of the ionospheric conductivity as a very primitive attempt of the data assimilation based on the global MHD simulation. In the final topic of this paper, it is indicated that the real time MHD simulation of the magnetosphere-ionosphere system carried out by NICT is producing continuously 3D MHD data that satisfy the MHD relation. These data are corresponding to the objective analysis data in the meteorology. Thus, bearing in mind utilization of the objective data in meteorology, it is proposed that the guidance method can be applicable in the space weather.

#### 【キーワード】

磁気圏電離圏複合系, 電磁流体, データ同化, ガイダンス, 数値予報

Magnetosphere-ionosphere compound system, MHD, Data assimilation, Guidance, Numerical weather prediction

## 1 はじめに

磁気圏全体を MHD シミュレーションで再現させようという試みは、1980 年代から開始され

た[1][2]。そして、1990 年代には、計算機の高性能化によって磁気圏現象を再現させるのに最低限必要な間隔のメッシュを与えた計算ができるようになったことや、電離圏磁気圏結合の導入等がな

されたことにより、現実的な磁気圏電離圏 MHD シミュレーションモデルが出来上がってきた<sup>[3][4]</sup>。さらに、2000年代になると太陽風を初期値として取りこみ、時々刻々の磁気圏の様子を計算機で再現させるリアルタイム MHD シミュレーションに発展した<sup>[5]</sup>。現在情報通信研究機構で稼働しているリアルタイム MHD シミュレーションの概要は文献<sup>[5]</sup>に詳細に説明しているので、本論文では、MHD シミュレーションが磁気圏物理学に与えたインパクトを簡単に紹介する。実用的な宇宙天気の数値予報を実現させるには、現在より高精度で安定した計算ができるコードの開発が重要であるが、一方宇宙天気と同じように十分とはいえない計算機資源を最大限利用して行っている気象の数値予報の場で採用されている先進的な技法を紹介することも重要であろう。そこで、本論文ではデータ同化の例とガイダンス導入について論じる。

## 2 磁気圏モデルが磁気圏物理学に与えたインパクト

磁気圏電離圏系という空間で生起している大規模な現象を理解するために、科学者は地上観測や衛星観測を用い、観測データが存在しないところは、MHD や適切な物理法則を用いて推定し、全体像を把握しようとしてきた。しかしながら、太陽風との相互作用によって磁気圏は複雑な形状を取ることから、地上観測や衛星観測と人間の想像を組み合わせただけでは、確定的な結論を見出すことが困難であった。たとえば Region 1 沿磁力線の存在は 1970 年代に知られてはいた<sup>[6]</sup>が、それらが磁気圏のどの領域でどのように発生し、どのような経路を辿って電離圏にまで到達するかという問題には、結論が得られていなかった。これに対し、磁気圏電離圏系における大規模な現象を現実的に再現しうる磁気圏数値シミュレーションの出現によって、このような磁気圏現象の発生メカニズムが明確に分かってきた。Region 1 電流系に関しては、文献<sup>[4]</sup>はシミュレーション結果を解析することによって、プラズマ圧の高まりを持つ cusp 領域と、太陽風と繋がって夜側に流れていく対流との相互作用によって、cusp の夜側に電流生成域が生じ、ここで発生した電流が磁気圏を

経由し、最後に沿磁力線電流として電離圏につながることを示したのである。

磁気圏電離圏 MHD シミュレーションが磁気圏物理学に与えたインパクトは、単に観測された現象の説明をすることだけにとどまらない。磁気圏電離圏 MHD シミュレーションは、数値的な問題から由来する人工的な効果をできるだけ排除したうえで、MHD 方程式を電離圏境界条件のもとで適切に解く。すなわち得られた結果は物理的に自己無撞着なものである。同時に、この数値モデルは、駆動するために必要なパラメータは太陽風のプラズマデータのみである。すなわち余計な観測情報の援用なしで動くことができる自律的なものである。このことから、得られた空間 3 次元時系列データは、気象学という客観解析データであり、これを解析することによって磁気圏で進行する物理過程を MHD の範囲内で定量的に明らかにすることができる(客観解析データの利用に関しては、後で再び触れる)。

さらに、磁気圏電離圏 MHD シミュレーションのインパクトは、磁気圏電離圏現象の研究に複合系という新しい概念<sup>[7]</sup>(詳しくは<sup>[8]</sup>)をもたらしたことである。すなわち、MHD シミュレーションの結果は、複数の物理過程(電流・プラズマ分布・磁場形状・磁気圏対流・電離圏対流)がお互いに自己無撞着である状態を我々に与えてくれる。このように考えると、複合系としての磁気圏電離圏系に起きている現象を理解するという事は、従来の「なぜそうなるのか」という理解をすることではなく、「なぜそうならなければならないのか」の理解レベルへの移行であるといえる。要するに、前者は物理素過程を重視し、原因と結果というプロセスの理解が中心になり、磁気圏電離圏系全体でつじつまが合っているかどうかは無視する。一方、後者では、磁気圏電離圏系は全体として全ての物理機構が自己無撞着なシステムを構成しなければならないから、その状態しか存在してはいけないということを我々に示していることになる。

こうした複合系の捉え方は、太陽風の状態が変化したときの磁気圏電離圏系の変動を理解するうえで重要である。たとえば、太陽風動圧変動によって起きる磁気急始現象(Sudden Commencement, 以下 SC)を考えると、SC とは太陽風動圧が異なる二つの太陽風条件に適合した二つの複合系状態

間の遷移であると捉えられる。その枠組みでは、初相期(Preliminary Impulse, 以下PI)は磁気圏系に衝撃が加わったために生じた波動が主体の変動であり、磁気圏対流と電離圏対流の結合(磁気圏の電場と電離圏の電場が磁力線を通じて対応している状態)が失われる期間である。それに対して主相期(Main Impulse、以下MI)は、失われた磁気圏対流と電離圏対流の結合を回復し、新しい状態に遷移する期間であるという理解ができる[9]。さらに、状態遷移期には、沿磁力線電流の増大と磁気圏内の過渡的な対流渦ができることが、数値シミュレーションの結果として示されている。これは、状態遷移に伴って余分なエネルギーが磁気圏に発生し、それが電離圏にて消費されることを示している。沿磁力線電流の増大は地上磁場観測でも得られている(たとえば[10])。太陽風動圧変動以外にも太陽風磁場(IMF)の変化による状態遷移も考えられる。たとえば、IMFが北向きの時に東西成分が変化するときも、連続的な状態遷移が起き、現象としては $\theta$ オーロラが発生する[11]。沿磁力線電流等他の事柄もSCと同様である。また、多次元自由度を持つ磁気圏電離圏系の状態遷移は、物理過程間の結合がMHDの無撞着性を保つことができず、catastrophicな変動を示すことがありうる。IMFが北向きから南向きに変化するとき発生するsubstormのonsetでは、MHDの破綻が磁力線再結合として現れ、不連続な状態遷移となる[12]。再結合に伴い、高速のプラズマ流が発生する。この高速流は、SCのPI期と同じように、磁気圏内に慣性電流が卓越する領域に現れる。従って、磁気圏対流と電離圏対流の結合はこの時失われる。onsetの後のexpansion相において、SCのMI期と同様に磁気圏対流と電離圏対流の結合が回復していく[13]。

上記で説明した磁気圏電離圏系の「状態」は、この系が複合系をなしているということから、お互いに自己無撞着である物理要素のどれか一つ(たとえば、電流系・プラズマ分布・対流・磁場配置等)を取り出して議論することができる。この中で、磁力線の動きやプラズマ圧生成と直接関連する磁気圏対流に注目して、状態を捉えると磁気圏全体を理解しやすい。すなわち「状態遷移」は「対流遷移」としてとらえることができる。SC、 $\theta$ オーロラ、substormは遷移前後の定常対流系と

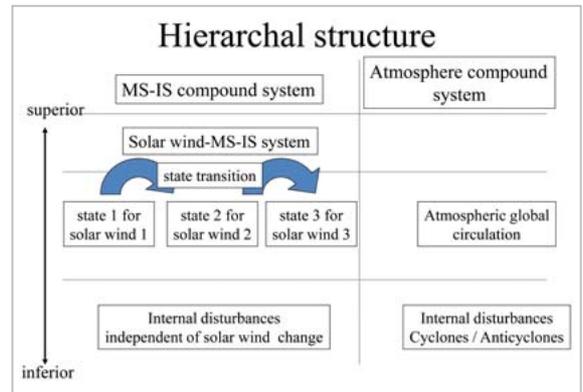


図1 磁気圏電離圏複合系(左)と気象複合系(右)の階層構造

気象複合系は状態が1つしかないが、磁気圏電離圏複合系では、太陽風状態に応じて多数の状態が存在し、状態間の遷移が起こる。

遷移期の過渡的な対流系を軸として、派生する他の物理要素を調べることで理解することが可能である。

磁気圏電離圏系を上記のように複合系と捉えた仕方を考えると、気象系も複合系をなしていることに気がつく。そこで、両複合系を比較することは興味深い。気象複合系の要素は、対流と圧力(温度)であり、極と赤道での温度差が対流を駆動している。地球の自転のため、極と赤道の温度差を、両者を直接結び対流で解消することができず、気象複合系の対流は極・中緯度・赤道域の3つのセル構造を持つ。気象複合系のこの基本構造は、磁気圏電離圏複合系での定常な太陽風に対する一つの状態に対応する。別の観点からみれば、磁気圏電離圏複合系は気象複合系と比べると、太陽風条件によって多数の状態を取りえることが特徴であるということが出来る。従って、上記で説明した太陽風変動に伴う状態遷移は気象複合系では存在しない。図1に示すように結局磁気圏電離圏複合系と気象複合系は、複合系の階層構造に違いがあるといえる。具体的に記述すると、気象複合系の階層は、3セル構造の大循環系を最上位構造とし、その下位構造は、高低気圧やジェット気流の蛇行を代表とする総観規模現象である。一方、磁気圏電離圏複合系では、総観現象に対する下位構造はULF波動や定常磁気圏対流系に内在する構造である。その上位構造として、太陽風条件に応じた複数の複合系の状態が存在し、さらにそれらは太陽風条件の変化によって遷移しあう。

### 3 リアルタイムシミュレーションの持つ可能性と問題点

2003年12月22日から情報通信研究機構で開始されたリアルタイムMHDシミュレーションは、ACEのデータを時々刻々MHDシミュレーションの初期値として取り入れ、約1時間のリードタイムを持って、磁気圏電離圏の様子を予報することができるという世界で初めての画期的な試みである[5]。この試みは、単にMHDシミュレーションが宇宙天気の予報をおこなうための道具として実用的になったという意味があるだけではない。気象の天気予報でも、毎日数値モデルを動かしているが、そこから生産されるデータは、3次元空間の格子点における気象要素の時系列データである。このデータは大気物理学の方程式群を自己無撞着に解いたものであり、単なる観測では得られない、物理法則に矛盾しない大気状態を我々に示してくれる情報の宝である。

気象の分野では、このような数値モデルの結果を客観解析データと称し、研究者の便のため、気象庁から公開されている(過去のデータに関しては、最新の数値モデルを使用して、再解析データと称する更新された客観解析データを公表している)。宇宙天気を目的として作成されたリアルタイムシミュレーション結果は、まさに磁気圏の客観解析データに相当するものである。この中に埋もれた情報を掘り出し、磨きをかけて新しいことを見出すこと(データマイニング)は、極めて重要なことである。客観解析データの調査としては、AE指数に関する実測値と計算値の比較[14]や、極域電場ポテンシャル分布に関する観測経験モデルと計算値の比較[15]、さらに静止軌道衛星軌道での電子温度の推定[16](この研究は後述するガイダンスの手法も取り入れている)などの研究があげられる。新しい磁気圏電離圏現象の発見と数値モデルの改良のため、このような解析調査を今後さらに発展させる必要がある。

研究面のみならず、宇宙天気予報という実用的な面から考えても、実際に観測された量と磁気圏客観解析データとしてのMHDシミュレーションの結果の相関解析等の比較を行って、両者の関連を調べることは重要である。いわば、数値モデルの癖を調べることである。これを行うことによ

て、後で述べるガイダンスへの実用化が可能になってくる。

なお、現在稼働しているリアルタイムシミュレーションは、現象を現実的に再現するうえで、以下に示すような注意しなければならない問題を抱えている。

- 安定したシミュレーションが行えるために、太陽風のパラメータに対する上限値と下限値を設け、極端な太陽風条件を計算から外すようにしている。このために、観測データと計算結果を比較する際にこの制限内に太陽風パラメータが入っていることを確認しておかねばならない[5]。興味ある現象は極端な太陽風条件のもとで起こりやすいことを考えると、現在より安定して動くことができる新しいリアルタイムシミュレーションコードの開発が必要である。
- 磁軸の傾きを考慮していない。磁軸が黄道面や子午面から傾く効果を取り入れるようにコードを改良する必要がある。なお、子午面内での磁軸の傾きに関しては、コードは対応できるが、実際の計算には活用されていない。現在開発中の熱圏電離圏モデルと磁気圏モデルの結合をするためには、前者が日変化や季節変化を重要視するため、この改良は重要である。
- 電離圏に入射した沿磁力線電流の反射が正しく表現されていないため、電離圏電場の値がやや大きくなる傾向がある[Nakata and Yoshikawa, 2009, private communication]。
- アルベン波の磁力線沿い伝播が正確には再現できない。このことは、特に磁力管の断面積が増加する電離圏から磁気圏方向に伝播するアルベン波の空間的散逸をもたらす。波動が重要な働きをするような現象に関してはシミュレーションとの比較は注意すべきである。

磁気圏客観解析データをより現実的なものにするには、このような問題点を克服していく必要がある。なお、MHDシミュレーションであることから、直接比較する現象はMHDで記述できるものに限られる。このことは、衛星で観測された物理量とMHDシミュレーションの結果を比較する時に留意しなければならない点である。

## 4 データ同化のあり方と現状

磁気圏モデルを始め、大気大循環モデル(気象)や海洋循環モデルなどの地球科学に用いられる数値モデルでは、境界条件と物理法則に含まれる因子(粘性係数や電離圏電気伝導度など)などのパラメータを与えて、初期条件を与えて物理法則を解く。特に、天気予報のための数値モデルのように、実用化を目指した数値モデルは、それが採用している物理法則が対象とする現象を再現するために正当であることに加え、上で述べた外部から与えるパラメータを適切に調整することが重要である。このために用いられる手段がデータ同化である。

本来、データ同化は現象を十分再現することが保証された数値モデルを用いて実行しなければ実用上意味がない。この点から考えると、磁気圏MHDモデルは、実測値と比較して、どのような現象をどの程度に再現しているかの調査がまだ不十分と言わざるを得ず、予報を目的として本格的なデータ同化を行うのは時期尚早である。このことから、天気予報で行われているような、初期値の不確定性を時々刻々観測値を同化させて予報誤差を最小限に抑えるようにするような進歩した四次元変分法<sup>[17][18]</sup>と呼ばれるデータ同化手法を磁気圏モデルに応用することは意味がない。技術的にみても、データ同化を行う場合は数値モデルを多数回反復して実行することが必要であり、我々の磁気圏MHDモデルで多数回反復計算を行うには現在の計算機能力がまだ十分でないことから、このような高度なデータ同化技法を応用しようとするは無理である。

しかし、パラメータの適切な値をデータ同化によって求め、観測値をよりよく再現する数値モデルを作りあげることが目的とすれば、データ同化を実行することは無意味ではなからう(ただし、その結果の妥当性は別に議論する必要がある)。なお、本稿でデータ同化を取り扱った目的は、磁気圏MHDモデルを用いてデータ同化を行うことが可能と考えられる物理量とその手法を紹介することであり、実用に至るには今後開発・改良すべき事柄がまだあることを最初に断っておく。

本論では、磁気圏モデルに対するデータ同化の応用例として、電離圏電気伝導度パラメータの最

適値推定を取り上げる。MHDモデルは電離圏電場を出力するが、これに電気伝導度を掛ければ、電離圏電流が計算でき、さらに地上磁場変動を求めることができる。多地点の地上磁場連続観測値は容易に入手できるため、観測と数値モデルで地上磁場変動の比較が容易にできる。なお、現在の数値モデルでは、地軸の傾きを考慮しておらず、観測所の位置とシミュレーションの場の中の位置は一致していないため、個々の地磁気観測所の位置における観測値と数値モデルの値を比較することは出来ない。一方、緯度60-70度における全経度方向の情報を包括して扱っているAE指数の方が、シミュレーションと同化するデータとして、利用可能なものと考えられる。

データ同化を実行する際、シミュレーションによるAE指数が観測されたAE指数をある程度正しく再現していることが必要であるため、両者を比較する。ただし、数値シミュレーションにおいては、太陽風データを数値モデルに組み込む位置を、実際のACE衛星の位置から地球近傍まで移動させているため、この距離にあたる時間差が存在することに注意が必要である。そこで、数値結果のAE指数を時間方向にずらし、観測されたAE指数と最も相関係数が大きくなる時間を見積もる。2006年7月14日09時-19時の10時間のデータに注目すると、観測されたAE指数とシミュレーションから得られたAE指数は後者を62分遅らせると相関係数が0.879という高い値を示すことが分かった。今回はこの期間を用いてデータ同化により電離圏電気伝導度を求めることとする。

次に、データ同化計算の具体的な仕方を説明する。磁気圏モデルにおいて、高さ方向に積分した電気伝導度テンソル( $\Sigma_{\theta\theta}$ ,  $\Sigma_{\phi\phi}$ ,  $\Sigma_{\theta\phi}$ )を以下の関係式で与えている。

$$\Sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0 \sigma_1}{\sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I} \quad (1)$$

$$\Sigma_{\theta\phi} = \Sigma_{\phi\theta} = \frac{\sigma_0 \sigma_2 \sin I}{\sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I} \quad (2)$$

$$\Sigma_{\phi\phi} = \frac{\sigma_0 \sigma_1 \sin^2 I + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \cos^2 I}{\sigma_1 \cos^2 I + \sigma_0 \sin^2 I} \quad (3)$$

この式で、 $I$  は伏角、 $\sigma_0$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  はそれぞれ沿磁力線、ペダーセン、ホール電導度である。 $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  は日射と磁気圏からのエネルギー入射に依存して変化する。その変化を文献[19]に従って

$$\sigma_1 = a_1(\rho, p, T, v_{\parallel}, \varphi)\sigma_{oval} + a_2(J, \varphi)\sigma_{curr} + f(\lambda)\sigma_{sun} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = a_{1H}(T)a_1(\rho, p, T, v_{\parallel}, \varphi)\sigma_{oval} + a_{2H}a_2(J, \varphi)\sigma_{curr} + f(\lambda)\sigma_{sun} \quad (5)$$

と表す。ただし  $a_1(\rho, p, T, v, \varphi)$ 、 $a_2(J, \varphi)$ 、 $a_{1H}(T)$ 、 $a_{2H}$  はそれぞれ、磁気圏内部境界における密度 ( $\rho$ )、圧力 ( $p$ )、温度 ( $T$ )、電流 ( $J$ )、速度 ( $v$ ) の関数であり、すべて正規化されている。 $f(\lambda)$  は太陽天頂角 ( $\varphi$ ) のコサイン ( $\lambda$ ) の関数である。

$$a_1(\rho, p, T, v_{\parallel}, \varphi) = \rho v_{\parallel} \frac{(\pi - \varphi)/2\pi + 0.1}{4} + \frac{T}{2(T+10)} \left( \frac{p^{3/2}((\pi - \varphi)/2\pi + 0.1)}{5T^{1/2}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$a_2(J, \varphi) = J_z \frac{\pi - \varphi}{2\pi} \quad (7)$$

$$a_{1H}(T) = 2 + \frac{T^{1/2}}{T^{1/2} + 2} \quad (8)$$

$$a_{2H} = 2.5 \quad (9)$$

なお、(7) 式の  $J_z$  は電流の鉛直成分である。以上の準備をした上で、データ同化技法を用いて ( $\sigma_0$ 、 $\sigma_{oval}$ 、 $\sigma_{curr}$ 、 $\sigma_{sun}$ ) の最適値を求めることとする。採用したデータ同化の手法はナッジング法である。これは適当な初期値から出発し、観測値 ( $AE_{obs}$ ) と計算値 ( $AE_{cal}$ ) の誤差

$$H(\sigma_0, \sigma_{oval}, \sigma_{curr}, \sigma_{sun}) = \frac{\sum_{i=1}^N (AE_{obs}(t_i) - AE_{cal}(t_i))^2}{N^2} \quad (10)$$

を最少にする ( $\sigma_0$ 、 $\sigma_{oval}$ 、 $\sigma_{curr}$ 、 $\sigma_{sun}$ ) の組み合わせを求める方法である。H を評価関数と呼ぶ。今回は

$$\Delta H(\sigma_0, \sigma_{oval}, \sigma_{curr}, \sigma_{sun}) = \frac{\partial H}{\partial \sigma_0} \delta \sigma_0 + \frac{\partial H}{\partial \sigma_{oval}} \delta \sigma_{oval} + \frac{\partial H}{\partial \sigma_{curr}} \delta \sigma_{curr} + \frac{\partial H}{\partial \sigma_{sun}} \delta \sigma_{sun} \quad (11)$$

を数値的に計算し、最少の評価関数 H が存在する方向を決め、その方向に ( $\sigma_0$ 、 $\sigma_{oval}$ 、 $\sigma_{curr}$ 、 $\sigma_{sun}$ ) を変化させながら、電気伝導度の最適値を求めている

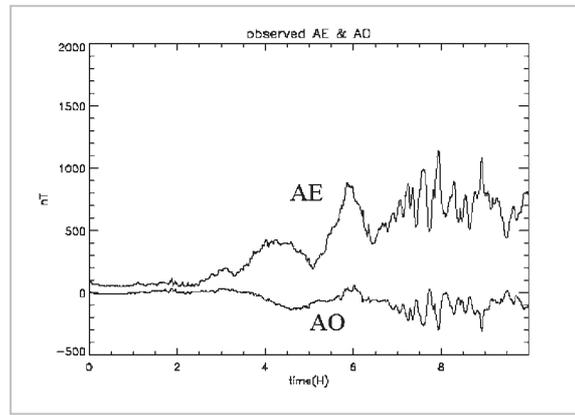


図2 2006年7月14日09時-19時のAE指数とAO指数(観測値)

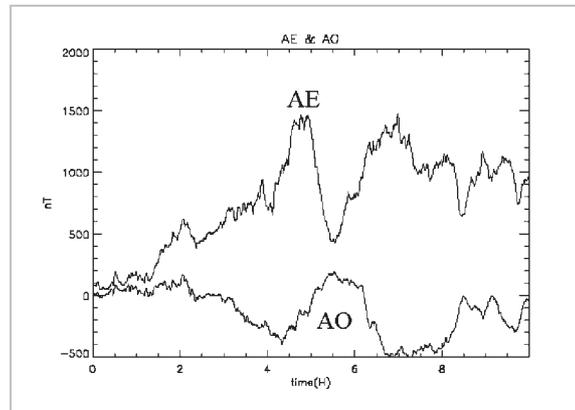


図3 データ同化前の電離圏電気伝導度を用いて計算したAE指数とAO指数

2006年7月14日09時00分-19時00分

く方法を採用した。AE 指数には AE、AO、AU、AL の 4 種類があるが、ここでは AE のみをデータ同化の対象として用いた。

結果を示す。図 2 に、2006 年 7 月 14 日 9 時-19 時の 10 時間分の AE 指数と AO 指数の観測値を示す。図 3 にはデータ同化を行う前のシミュレーションから得られた AE 指数と AO 指数を示す (AO 指数も図に入れてはあるが、これはデータ同化には用いていない)。図 3 の状態を出発として上で説明した方法で評価関数が減少する方向に ( $\sigma_0$ 、 $\sigma_{oval}$ 、 $\sigma_{curr}$ 、 $\sigma_{sun}$ ) を順次変化させていく。その過程を表 1 に示す。そして、5 回の反復のうちに得られた電離圏電気伝導度を用いて計算した AE 指数を図 4 に示す。図 3 と図 4 を比較すると AE 指数の絶対値が観測値 (図 2) に近づいたことが分かる。図 5 と図 6 には、同化前と後の  $\Sigma_{\theta\theta}$  の分布を示す。同化後の伝導度は昼間が大きくなり、オーロラ帯では小さくなっている。なお、こ

表1 ナッジング法で求めた電離圏電気伝導度最適値

Step	$\sigma_0$	$\sigma_{sun}$	$\sigma_{oval}$	$\sigma_{curr}$	H
0	27.0000	2.0250	0.1350	40.5000	208.03
1	26.9999	2.0257	0.1050	40.5000	150.36
2	25.8767	2.0258	0.1035	41.2488	136.46
3	25.8453	3.3744	0.0770	41.2022	122.19
4	25.8453	3.3741	0.0635	41.2023	104.59
5	25.8452	3.3740	0.0500	41.2023	88.05

単位は mho。各ステップの電離圏電気伝導度を求める因子と評価関数 (H) の変化。

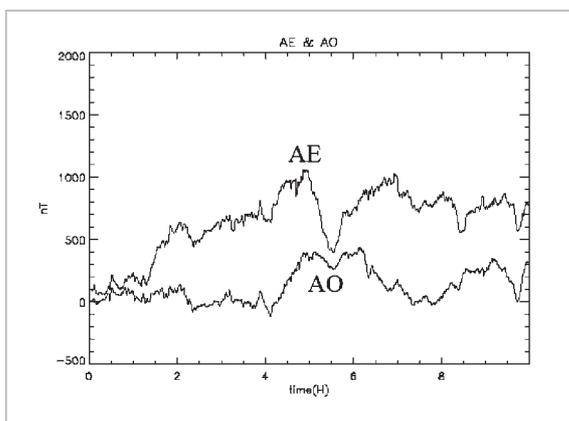


図4 データ同化後の電離圏電気伝導度を用いて計算した AE 指数と AO 指数

2006年7月14日09時00分-19時00分

ここで得られた電気伝導度の値は、採用したイベントに依存するであろう。そこで、さらに解析を進め、複数のイベントを用いてデータ同化により、AE 指数の変化を最適に再現する電離圏電気伝導度を求め、それらの平均を取る必要がある。その結果があまりにもばらつきが大きい場合は、今回紹介したデータ同化の結果を電離圏伝導度最適値として用いるよりは、数値モデルの改良を先行すべきであるという結論にもなる。本稿では、データ同化の試みの紹介のみにとどめ、さらなる解析は将来の問題とする。

ここで、データ同化で得られた電気伝導度最適値と実際の値は必ずしも一致しないということを説明しておく。その理由は、数値モデルが実際に働いている物理過程を全て取り込んでいるわけではないこと、数値モデルで用いているメッシュ間隔が現象を現実的に再現するには未だ不十分であるためである。後者のため、メッシュの細かさ

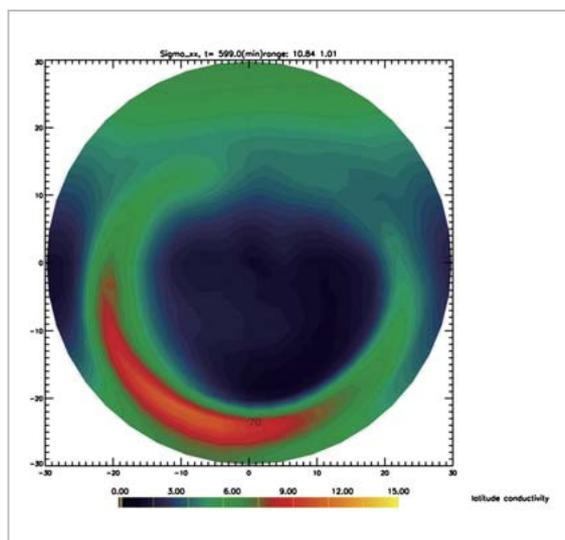


図5 データ同化前の電離圏電気伝導度 ( $\Sigma_{\theta\theta}$ ) 分布

単位は mho。2006年7月14日19時00分

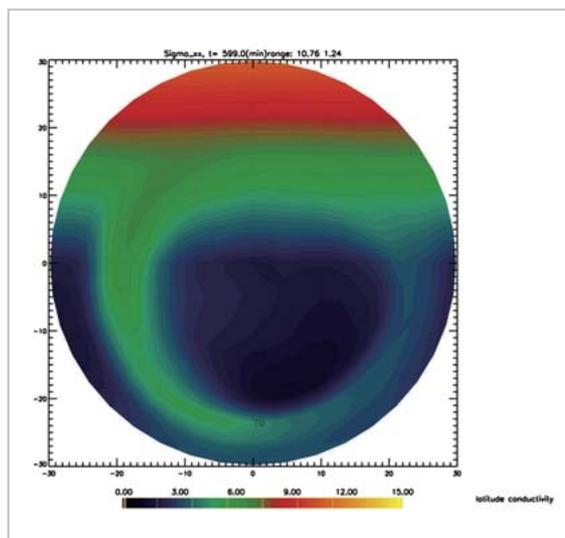


図6 データ同化後の電離圏電気伝導度 ( $\Sigma_{\theta\theta}$ ) 分布

単位は mho。2006年7月14日19時00分

を変えると、データ同化によって得られた最適値が変わることになる。これらのことから、データ同化で求められた電気伝導度は、AE 指数を数値モデルの中で最適に再現するための人工的な値であるといえる。言い換えると、観測された電離圏伝導度の値をそのまま現在の数値モデルに入れた場合、必ずしも AE 指数や地上磁場変化が正しく再現されるとは限らない。

## 5 数値モデルの限界とそれを踏まえたガイダンスの導入

数値モデルが不十分であることから、さらなる数値モデル開発を行う必要があることは言を待たない。一方で、現在持っている不十分な数値モデルを十二分に応用して、有益な情報を得る手法がある。天気予報に用いる数値モデルも特に地上気温や降水量など地上の気象に関しては必ずしも適切な予報値を出すとは限らないことが知られている。そこで、数値モデルで得られている他の物理量と実際の観測値の関係をしらべ、回帰的に予報値を与えるのがガイダンスである。宇宙天気において、リングカレントの強度、放射線帯粒子の総量は MHD モデルでは本来得られないが、MHD シミュレーションのデータが蓄積して、実測との比較ができるようになるなら、ある場所での MHD 量と、放射線帯粒子量等の相関を調べることによって予報が可能になるかもしれない。文献[16]はリアルタイム磁気圏 MHD シミュレーションで得られた圧力から静止衛星軌道での電子温度を推定している。MHD シミュレーションで得られる圧力は本来イオンのものであって、電子ではない。従って、この試みはガイダンスを応用したものであるといえることができる。

上記で説明した方法は、太陽風データと K 指数を用いて、ニューラルネットによって電離圏電子密度を求めようとする試み[20]と同様のことを、数値モデルの中のデータを用いて行おうとするものである。回帰分析を行う場合、単純な最少自乗法だけでなく、重回帰、カルマンフィルター等を利用することが可能である。具体的な手法の説明は「天気予報ガイダンスの解説」[21]を参照していただきたい。

なお、ガイダンスによって予報をすることは、

不完全な技術の下で、技術開発に時間と労力がかかるために、あくまでも実用上仕方なく行うことであり、研究面からみれば正しい道ではない。本来は、物理法則に則り数値モデルの現象再現性を高めることが、科学研究の正道である。

## 6 今後の課題

磁気圏数値モデルを改良していくことが重要であるが、そのためには、毎日生産されているリアルタイムシミュレーションの結果がどの程度観測とあっているのかを詳細に確認していく作業が必要であろう。実際、気象のモデルも、気象庁本庁・管区気象台・地方気象台の予報官らによって毎日実測と比較されて、その結果を数値モデル改良に戻してきた結果、現在の数値モデルが出来上がってきているのである。これまでも、AE 指数[14]、極域電離圏ポテンシャル[15]、静止衛星データ[16]との比較などの結果があるが、極域電離圏観測 (Super DARN 等) との定量的比較、substorm の発生時刻のモデル・観測の比較など、できることは多い。

一方、数値モデル自体の改良すべき点はかなり多い。磁軸の傾きの考慮については前に指摘したが、それ以外にも下記に記した点は重要であろう。

- 電離圏境界条件の改良が必要である。今のままでは、電離圏伝導度が高くなればなるほど電流が大きく流れることになってしまう。磁気圏のアルベンコンダクタンスが電離圏の伝導度より小さくなるような条件は、不適切な解を与えている。
- 磁気圏と熱圏電離圏との双方向接続も必要である。これは、磁気圏にとって、上の問題より軽微ではあるが、熱圏の効果が磁気圏に現れることが数値モデルで再現されることは地球物理的には意味がある。
- 太陽風入力データは、ACE 衛星観測値を用いているが、観測されたすべてのデータを用いているわけではなく、太陽風磁場の  $B_x$  成分 (太陽-地球方向) と太陽風速度の  $V_y$ 、 $V_z$  成分 (それぞれ東西・南北成分) を無視している。太陽風変動に対する磁気圏の変動を正確に再現させるには、これらも入力値として取り込むような改良が必要である。

- 磁気嵐の再現にはリングカレントを構成する高エネルギー粒子の振舞を数値モデルの中に取り入れることが重要である。従って、MHDモデルとリングカレントモデルの接続も必要である。すでにアメリカでは行われているが、我が国にも本格的な結合モデルが必要であろう。磁気嵐を計算対象とすることから、MHDモデルはrobustである必要がある。メッシュ形状を変えるか、時間ステップを必要なだけ小さくするなどの方法を取ることで、実現可能であろう。
- 気象の数値モデルは、降水過程というマイクロ過程を含む。この過程はミクロスコピックではあり、パラメータ化して数値モデルに取り込まれているが、雲の生成消滅を左右し、さらには大気大循環全体をも左右する重要な過程である。磁気圏モデルでもサブストームの中に取り込まれている磁気リコネクションに関して、現在より精密な取り扱いが必要になってきていると考える。特に、サブストームの発生時刻の予測精度を上げることを目指すには、リコネクションのパラメータ化の高度化、もしくは粒子シミュレーションとの連成シミュレーションが必要であろう。

## 7 まとめ

磁気圏電離圏結合MHDモデルについて、この数値モデルが磁気圏物理学に与えたインパクトを論じ、さらにリアルタイムシミュレーションという宇宙天気予報を目指した試みに対して今後どの

ような技術開発が必要かを考えた。主な結果は以下の通りである。

- 自己無撞着な取り扱いをした磁気圏電離圏全域のMHDシミュレーションによって、磁気圏電離圏複合系という新しい概念が提案された。太陽風変動に伴う磁気圏現象は複合系の状態遷移で理解できる。
- AE指数を用い、データ同化によって電離圏電気伝導度を推定する試みを紹介した。数値モデルの不完全性と同化計算にかかる膨大な計算時間のため、まだ実用とは言い難いが、将来宇宙天気予報には必要な技法である。
- MHDシミュレーションでは再現できない物理量に関して、ガイダンス的手法を用いて、推定する方法があることを紹介した。これを実現するには、リアルタイムシミュレーションの結果を詳細に解析し、計算値と予報値の関連を十分に調査する必要がある。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、大阪府立大の中村博士の助言をいただいたことをここに謝する。また、本研究では、情報通信研究機構計算機システムおよびOneSpaceNetの大規模ストレージを利用した。一部の計算は核融合科学研究所計算機システムも利用した。さらに、本研究は、名古屋大学太陽地球研究所計算機共同利用研究「磁気圏電離圏系のグローバルな振舞の研究」の一環としても行われたものである。

## 参考文献

- 1 Lyon, J., S. H. Brecht, J. A. Fedder and P. Palmadesso, "The effects on the earth's magnetotail from shocks in the solar wind", Geophys. Res. Lett., Vol.7, 721-724, 1980.
- 2 Ogino, T., "A three-dimensional MHD simulation of the interaction of the solar wind with the Earth's magnetosphere: The generation of field-aligned currents", J. Geophys. Res., Vol.91, 6791-6806, 1986.
- 3 Fedder, J. A. and J. G. Lyon, "The Earth's magnetosphere is 165Re long: Self-consistent currents, convection, magnetospheric structure, and process for northward interplanetary magnetic field", J. Geophys. Res., Vol.100, 3623-3635, 1995.

- 4 Tanaka, T., "Generation mechanisms for magnetosphere- ionosphere current systems deduced from a three-dimensional MHD simulation of the solar wind-magnetosphere-ionosphere coupling processes", *J. Geophys. Res.*, Vol.100, 12057-12074, 1995.
- 5 Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hayashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, H. Takahara, and T. Takei, "Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code", *Space Weather*, Vol.4, S06004, doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- 6 Iijima, K. and T. Potemra, "The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad", *J. Geophys. Res.*, Vol.81, 2165-2174, 1976.
- 7 Tanaka, T., "Formation of magnetospheric plasma population regimes coupled with the dynamo process in the convection system", *J. Geophys. Res.*, Vol.108 No.A8, 1315, doi:10.1029/2002JA009668, 2003.
- 8 Tanaka, T., "Magnetosphere-Ionosphere Convection as a Compound System", *Space Sci Rev*, DOI 10.1007/s11214-007-9168-4, 2007.
- 9 Fujita, S., T. Tanaka, and T. Motoba, "A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 3. A sudden commencement in the magnetosphere-ionosphere compound system", *J. Geophys. Res.*, Vol.110, A11203, doi:10.1029/2005JA011055, 2005.
- 10 Araki, T., "A physical model of the geomagnetic sudden commencement. in *Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves*", ed. by M. J. Engebretson, K. Takahashi, and M. Scholer, American Geophysical Union, Washington, D.C., 183-200, 1994.
- 11 Tanaka, T., T. Obara, and M. Kunitake, "Formation of the theta aurora by a transient convection during northward interplanetary magnetic field", *J. Geophys. Res.*, Vol.109, A09201, doi:10.1029/2003JA010271, 2004.
- 12 Tanaka, T., "The state transition model of the substorm onset", *J. Geophys. Res.*, Vol.105, 21081-21096, 2000.
- 13 Tanaka, T., A. Nakamizo, A. Yoshikawa, S. Fujita, H. Shinagawa, H. Shimazu, T. Kikuchi, and K. K. Hashimoto, "Substorm convection and current system deduced from the global simulation", *J. Geophys. Res.*, in press, 2009.
- 14 Kitamura, K., H. Shimazu, S. Fujita, S. Watari, M. Kunitake, H. Shinagawa, and T. Tanaka, "Properties of AE indices derived from real-time global simulation and their implications for solar wind-magnetosphere coupling", *J. Geophys. Res.*, Vol.113, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.
- 15 國武学, 亘慎一, 品川裕之, 島津浩哲, 長妻努, 堀智昭, 藤田茂, 田中高史, "磁気圏モデルの数値予報への応用に向けて—極冠電位差による検証—", *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 2-2-4, 2009.
- 16 中村雅夫, "磁気圏シミュレーションによる静止軌道プラズマ環境変動の予測", *情報通信研究機構季報*, 本特集号, 2-2-3, 2009.
- 17 Talagrand, O. and P. Courtier, "Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. I: Theory", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.113, 1311-1328, 1987.
- 18 Courtier, P., and O. Talagrand, "Variational assimilation of meteorological observations with the adjoint vorticity equation. II: Numerical result", *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol.113, 1329-1347, 1987.
- 19 Robinson, R. M., R. R. Vondrak, K. Miller, T. Dabbs, and D. Hardy, "On Calculating Ionospheric Conductances from the Flux and Energy of Precipitating Electrons", *J. Geophys. Res.*, Vol.92, No.A3, 2565-2569, 1987.

- 20 Nakamura, M., T. Maruyama, and Y. Shidama, "Using a neural network to make operational forecasts of ionospheric variations and storms at Kokubunji, Japan", Earth, Planets and Space, Vol.59, 1231-1239, 2007.
- 21 Forecast Division, "天気予報ガイダンスの解説 (Manual of the weather forecast guidance)", Bulletin of the forecast technique (予報技術資料), Vol.41, Japan Meteorological Agency, 1991.



藤田 茂  
 気象大学 校 准 教 授 理 学 博 士  
 磁気圏電離圏系物理学

太陽宇宙環境の計測・予測に関する研究開発／数値宇宙天気予報に向けた統合型宇宙天気シミュレーション／  
 磁気圏MHDシミュレーションとその宇宙天気業務応用の展望