

次世代磁気圏—電離圏結合シミュレーション

田中高史
九州大学・名誉教授

Next generation M-I coupling simulation

T. Tanaka
Professor emeritus, Kyushu University

Abstract: A new M-I coupling simulation model is developed aiming at the study of next generation magnetospheric compound system physics. The key point to realize the fine resolution in the M-I coupling calculation is how to construct the grid system. In the present model, 3D grid system for the magnetosphere adopts stacked spheres with triangular grids generated from a dodecahedron on each sphere. Grid system is constructed to a block structure in which 12 blocks are put on an altitude. Between neighboring blocks data exchange arrears are set for parallel computation. Simulation examples obtained hitherto are magnetospheric crossing, M-I coupling KH instability, and low latitude penetration of high latitude electric field. It is quite surprising that the finer resolution the simulation result realizes, the more it resembles the observation.

M-I 結合シミュレーションで再現する目標は、太陽風変動が磁気圏変動を引き起こし、さらに FAC 変動を通じて電離圏電流を励起し、最終的に地磁気変動を発生させる過程である。これまでにこのようなシミュレーションで、SC、 θ オーロラ、サブストーム、地磁気脈動、ダイナモ駆動機構、対流セルの IMF 依存性、AE の再現、などが研究されてきた。更なる高解像度を得るため、MHD シミュレーションと電離圏のポテンシャル計算の双方を改革し、次世代の M-I 結合シミュレーションを作成した。このような改革の中心課題は格子構造であるとの認識が、本研究の要点である。格子構造の概要は

- (1) 磁気圏は球の重ね合わせによる 3 次元格子 (2) 球面上では特異点や継ぎ目が無い 12 面体分割三角格子 (3) 中心付近で球座標、磁気圏尾部で円柱座標に漸近する (4) 電離圏の高緯度では 3 Re から 1 Re に投影した三角座標 (5) 電離圏の低緯度では構造格子で高緯度との間に継ぎ目が在る (6) 領域を球面で 12 分割し高度方向の分割と合わせブロック構造とする

となっている。計算法は特に変わっていない。これまでのような方法で

(1) 磁気圏—有限体積 TVD スキーム (2) 磁場発散消去—共役勾配法 (3) 電離圏—共役勾配法を用いている。またこれらに加えて数値的課題として

- (1) 磁気圏内部境界の数値的透明化 (2) 人工粘性の適切な分布による数値粘性効果の低減 (3) 低ベータ領域での数値誤差の低減と沿磁力線構造の保存

に注意を払った。以上のようなモデルの特徴は

- (1) 磁気圏は 1000CPU 程度の並列計算が可能 (2) 電離圏は 12 並列で計算できる (3) 磁気圏・電離圏双方で、無限の解像度 up が可能 (4) 極端太陽風条件でも安定に計算する (5) 電離圏構造 (FAC、ポテンシャル、オーバルなど) の詳細な計算が可能 (6) 赤道を含めた全球の電離圏電流が計算可能

となっている。計算例としては

- (1) 磁気圏境界面横断 (2) 磁気圏—電離圏結合 KH 不安定 (3) 電離圏・高緯度—低緯度結合

などが得られている。結果として、計算精度に最も影響するのは格子構造であることが再認識された。また格子構造は並列計算手順と結合し、計算の並列性を支配するので、高速化の要点でもある。改良された格子によって、磁気圏—電離圏間のプラズマ領域の接続が確保され、磁気圏観測だけでなく電離圏観測も詳細に再現することが可能になってきた。内部境界の数値的透明化は重要な要素で、これによって M-I 結合が適正に再現され、電離圏の反射も消失せず伝搬するのが分かる。驚愕することは、計算精度を上げれば上げるほど、結果が現実の観測にそっくりになってくることである。プログラムは分散メモリー上の並列化に対応しており、次世代の計算システムを駆使した次世代の複合系磁気圏物理学で、世界を圧倒できるでしょう。