

# 磁気圏電離圏グローバル再解析データ作成のための基盤研究

藤田茂 モデリング研究系 特任教授

## 【概要】

現在、通信衛星・気象衛星・GPS衛星などを用いたサービスは、人間の生活に不可欠なものとなってきている。一方、大きな太陽風変動があると、人工衛星を取り囲む環境（**磁気圏と電離圏**）に荷電粒子の擾乱現象が発生し、衛星運用に障害を与えることがある。従って、天気のように、磁気圏や電離圏で起きている現象は、社会活動に影響を与えることから、**宇宙天気**と呼ばれており、天気予報と同様、**宇宙天気予報**は、円滑な社会活動を実現するために重要である。日本では、情報通信研究機構が、物理法則を元にした数値モデルを使って、宇宙天気数値予報業務を試みている。この業務は、太陽と地球を結ぶ線上で、磁気圏の外側の位置に打ち上げられた衛星のデータを活用する。この衛星で観測された太陽風をリアルタイムで受信し、これを入力データとして数値モデルを実行させ、磁気圏電離圏での荷電粒子の振る舞いを計算するものが宇宙天気数値予報である。衛星から地球まで太陽風擾乱が到達するのに約1時間掛かるので、宇宙天気数値予報は約1時間先の宇宙天気を予報できることになる。

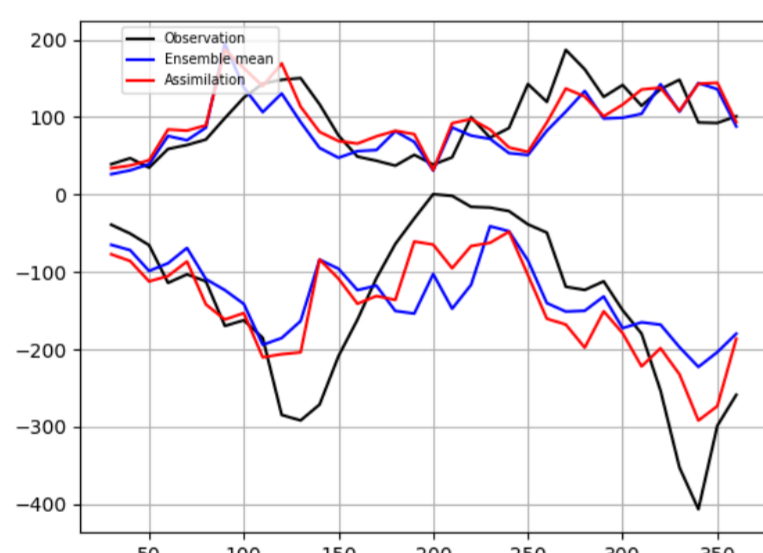
以上のように、宇宙天気数値予報は既に実施されている。しかし、宇宙天気現象（磁気圏・電離圏現象）は、まだ解明されていないことが多く、この現象自体を理解することは、大きな研究課題である。特に、**磁気圏および電離圏で起きている現象を観測で知ろうとすると、観測データの不均一分布が問題になる。すなわち、地球に近い電離圏においては、空間的に比較的密な観測がされている。一方、磁気圏域の衛星は数100機存在するが、ほとんどが静止衛星軌道に偏在しており、それ以外の磁気圏領域では極めて少ない。従って、磁気圏電離圏現象のグローバルな全体像は観測だけでは把握できない。電離圏の現象は、ほとんどが磁気圏に由来するものであるから、磁気圏の様子がよくわからないことは、磁気圏電離圏物理学にとって極めて重要な課題である。**一方、物理法則に基づいた数値モデルは磁気圏衛星 $10^7\sim 10^8$ 機に相当する格子点データ(Grid Point Value, GPV)を生成する。この密なデータが、衛星観測の絶対的不足という困難性をカバーし、磁気圏における物理現象の研究に寄与している。なお、情報通信研究機構による宇宙天気数値予報は速報性を重視するため、計算結果の信頼性に問題がある場合がある。そのため、そのまま研究に使うことは困難である場合が多い。さらに、宇宙天気用の数値モデルは近年開発されてきたものなので、気象の数値モデルと比較して、観測結果をどの程度再現させているかが十分確認されていないという問題もある。このように、信頼できる宇宙天気数値モデルを作り上げることは宇宙天気予報だけでなく研究にも必須である。気象業務では、最大限の観測データを同化させ最新のモデルを使った、長期に亘って安定した精度を持つ**再解析データ**が主要国の気象機関から公開されている。このやり方に倣い、我々は、**観測データと数値モデルをデータ同化手法を使って連結**させ、より良い数値モデルを開発・改良し、宇宙天気用の**磁気圏電離圏グローバル再解析データ**作成を目指して、2020年度から基盤的な技術開発を進めている。初年度は、モデルの改良とその評価を中心に研究を進めてきた。昨年度は、適当なイベントに対して、実際にデータ同化技法を応用し、最適な電離圏電気伝導度分布を求めることが可能であるかを研究した。

## 【モデル】

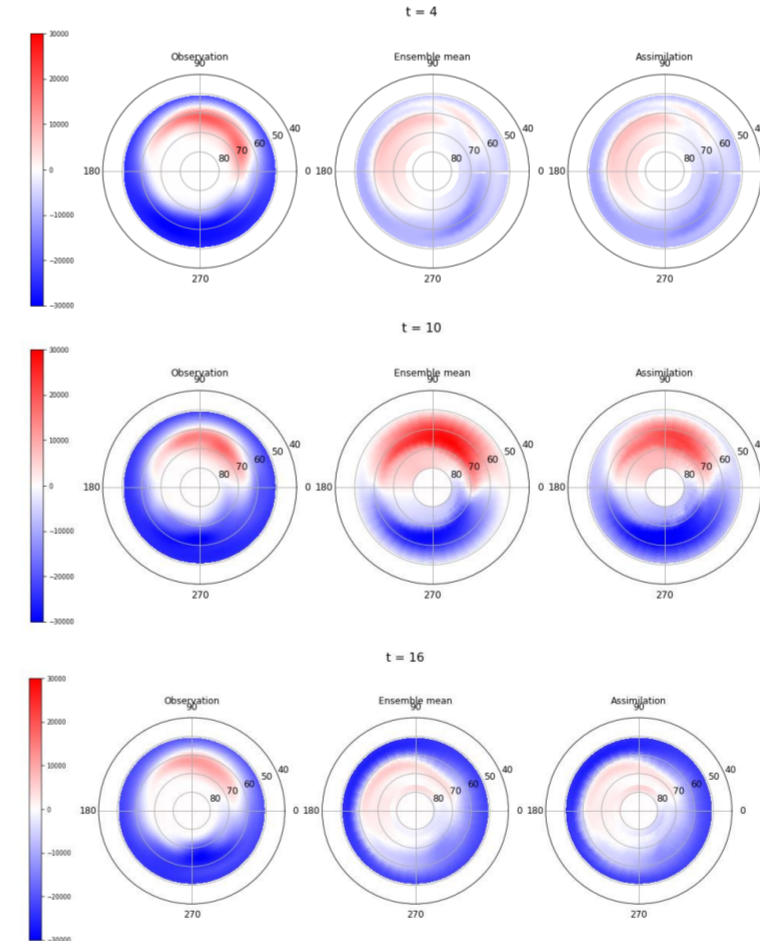
磁気圏は完全に電離した荷電粒子の大气からできている。この運動は電磁流体力学に従うから、電磁流体力学方程式を数値的に解けばよい。我々が用いている数値コードは、田中高史九州大学名誉教授が開発した**REPPUコード**を元にして、自転軸の黄道面からの傾きの効果と、磁軸が自転軸の回りを日周する効果を取り入れるように改良したものである。**改良されたREPPUコード**の入力データも、できるだけ正確な現実のデータが必要なので、我々はNASAが提供している品質管理された太陽風データを使う。一方、磁気圏の下部境界として電気伝導度を持つ電離圏が存在する。電離圏が電気を流す媒体であるため、磁気圏で発生した擾乱は、電離圏において、一部は反射され、同時にエネルギーが吸収される。従って、電離圏は磁気圏現象の振る舞いに大きな影響を与える。さらに、磁気圏擾乱に伴って電離圏に流れる電流は、地上の磁場変動を作り出すので、電離圏電流は、地上で観測される磁気圏変動にも、重要な働きをしている。電離圏電流を決める因子として重要なものは、電離圏電気伝導度である。REPPUコードで、観測された現象をできるだけ忠実に再現しようとするとき、電離圏電気伝導度を決定することが極めて重要である。電気伝導度は太陽のX線や磁気圏から電離圏に降りこんでくる荷電粒子によって変化するので、この効果を現実的に取り入れて電気伝導度分布を決めることが必要であるが、従来のREPPUコードでは、経験的に電離圏電気伝導度を決めている。

## 【データ同化による電離圏電気伝導度分布最適化】

昨年度の研究で、改良されたREPPUコードは、SuperDARNプロジェクトで得られた電離圏ポテンシャル分布と地上磁場変動を良く再現できることが確認できた。この時は、経験的に決めた電離圏電気伝導度分布を使っている。そこで、2015年9月6日のデータを使い、データ同化の手法を使って、電離圏電気伝導度の最適な分布を求めた。具体的には、電気伝導度分布を決める因子を設定し、4次元アンサンブル変分法を使って、その因子を決定した。その結果を下に示す。

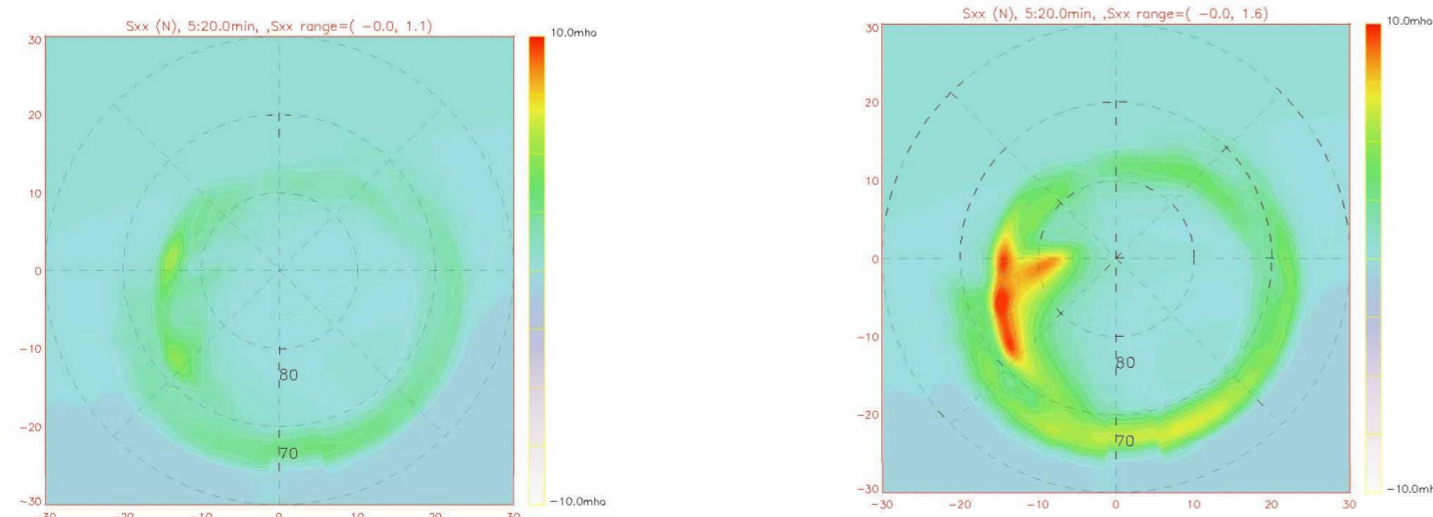


地上磁場変動の程度を表すAU指数とAL指数の観測値(黒)、計算結果平均(青)、4次元アンサンブル変分法による同化結果(赤)。2015年9月6日0時30分-6時10分。



電離圏ポテンシャル分布の観測値(左)、計算結果平均(中)、同化結果(右)。上から2015年9月6日0時30分-40分平均、1時30分-40分平均、2時30分-40分平均。

2015年9月6日0時30分-6時10分の、SuperDARN電場ポテンシャルと、AE指数の10分平均値を使い、**アンサンブル変分法**を使って、電離圏電気伝導度決定パラメータの最適値を求めた。アンサンブル数は20である。上右の図では、電離圏ポテンシャルの観測値、計算結果の平均、同化結果の3つを示す。この結果に対して、観測値と同化結果の二乗誤差は、観測値と計算結果平均の二乗誤差より小さくなっていることは、確認してある。



(左)データ同化前の電離圏電気伝導度分布、(右)データ同化後の電離圏電気伝導度分布。同化を行ったことで電導度は大きくなっている。

上の図は、データ同化の前後の電離圏電気伝導度分布を示している。データ同化によって電気伝導度が大きくなっていることが明瞭である。従来より、数値計算に使われている経験的に求めた電気伝導度分布の値は、現実の電離圏電気伝導度より小さい可能性があると言われていたが、今回の研究でそれを実証できた。この結果は、**電磁流体磁気圏電離圏シミュレーション**を使って、**電離圏電気伝導度の最適値をデータ同化によって決めた、世界最初の例である。**

## 【今後の研究予定】

4次元アンサンブル変分法を使ったデータ同化によって、電離圏電気伝導度分布の最適値を求めることが可能であることが実証された。今回は1つのイベントを取り上げて最適分布を求めたが、他のイベントでどうなるかを確かめる必要がある。別のイベントも取り入れて、電離圏電気伝導度を決定するパラメータを同化によって決定する。こうして得られたGPVを磁気圏電離圏グローバル再解析データの初期版として研究者に公開するための基盤的研究を実施していくことを計画している。

## 【謝辞】

本研究は2020年度から3か年計画で情報システム研究機構による未来投資プロジェクトの支援を受けて、実施している。