

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):

研究代表者

田中 高史 (九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門 教授)

主たる共同研究者

品川 裕之 ((独)情報通信研究機構電磁波計測研究センター 主任研究員)

藤田 茂 (気象大学校 准教授)

寺田 直樹 (東北大学大学院理学研究科 准教授)

3. 研究実施概要

宇宙天気とは、太陽—太陽風(惑星間空間に飛び出したコロナプラズマ)—磁気圏(地球磁場の勢力圏)—電離圏(電離した超高層大気)—大気圏系におけるプラズマ(電離気体)環境のことを言う。これらは古くから太陽物理学、磁気圏物理学、電離圏物理学などとして個別に研究されてきたが、宇宙利用の拡大と共にプラズマ環境の人類活動への影響が顕著になったため、全体を統合して宇宙天気と呼ぶようになった。本研究課題では主に電磁流体(MHD)モデルによって、領域間の相互作用を考慮した宇宙天気の数値モデルを構築し、太陽から地球にいたる領域のプラズマ環境の研究や予報に役立てることをめざしている。

本研究課題では、宇宙天気の再現をめざして太陽から大気圏に亘る全領域でのシミュレーションモデルの構築を進め、また領域間の相互作用を調べるための結合システムを開発した。宇宙では超音速流、ショック、不連続などが発生するので、このような条件下で数値計算の安定性を確保するため、MHD 計算には有限体積 TVD スキームを用いている。また球面を正確に表現し、かつ大きさや特性が大きく異なる領域を一緒に計算するため、格子系として正12面体分割による特異点除去格子を開発した。

これらの開発から、太陽風変動に対する磁気圏—電離圏系の応答の再現、オーロラと磁場の変動が突然発生する現象であるサブストームの再現、磁気圏変動に対する粒子効果の再現、磁気圏変動と大気圏変動に対する電離圏応答の再現、電離圏電子密度が赤道でなく磁気緯度±15度で最大となる現象である赤道異常の再現、コロナ構造と地球軌道での太陽風の同時再現などを得て宇宙天気現象の理解を進めた。また数値モデルの応用として、金星や木星など惑星プラズマ環境の再現、ボエジャー宇宙船で観測した太陽風の果ての構造(太陽圏)の再現を行った。

実際の太陽風を与えた場合の磁気圏変動は、これまでに考えられていたよりずっと複雑で、いままでの単純化された描像での理解には限界があることが分かった。しかしモデル太陽風では太陽風動圧や磁場がそれぞれ単独で変動した場合の理想的な応答を調べることができるので、これらによってまず磁気圏の基本特性を明らかにした。磁気圏物理学の難問といわれているのがサブストームと呼ばれる現象であり、これはオーロラの突然の活発化とそれに伴って磁気圏—電離圏のプラズマと電流の分布が激しく変動を開始する現象である。ここでは開発された磁気圏—電離圏系のモデルを応用しサブストームの問題にも挑戦した。サブストームのような結合系としての磁気圏—電離圏応答では、基本特性の重ね合わせだけでは理解できず、複合系としてのシミュレーション結果の解析が必要であることを示し新たなモデルを得た。

電離圏は上方の磁気圏、下方の大気圏の双方の影響を受けるので、これらを統合する計算をめざし、モデルの開発を進めた。別々に開発された複数のモデルを結合して、同時に計算を進めるシステムを構築した結果、磁場擾乱の影響と赤道異常の再現に成功した。電離圏赤道異常は、第2次世界大戦のさなか日本で発見された現象で、その物理的な原因は電場によるプラズマ輸送であると言われてきた。今回の研究では、電場を励起するもとの大気運動、下部電離での電場生成過程、電場の影響を含めた電離圏のダイナミクスを同時に計算し、全てを基本方程式系から再現できた。現実の大気運動をもとに計算された赤道異常は複雑な変動を示し、磁気

緯度、経度、海陸分布に依存した変動、数日周期の変動などが複合した変化を示すことが分かった。

太陽コロナと地球軌道までの太陽風を同時に計算するためには、両者の大きさが極端に異なることに対応した格子を用いること、MHD 計算に加え重力、回転を考慮すること、コロナの加熱、熱伝導などの熱力学過程を加えることが必要である。さらに、異なった時定数を持った領域を広くカバーする計算を行うため、並列化による計算時間の確保が必要である。これらによって、太陽面から地球までの全領域を同時に計算するモデルを構築した。

研究成果のいくつかは、実際に情報通信研究機構(NICT)での予報に応用されHPで公開されている。また観測による宇宙研究は全体が見えにくく、グローバル構造が分からないという弱点があるが、これを克服するためにシミュレーションが非常に有効であることを示した。これはシミュレーションでは全体の自己無撞着性が保証され、かつ可視化が十分に有効であれば全ての要素の3次元構造と、要素間の相互作用が明らかになるため、このような研究を複合系の物理と呼んでいる。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

太陽から地球の電離圏までのプラズマの動向間予測を衛星等の観測データから実時間で計算できる理論的およびコンピュータ技術的な基盤を構築し、情報通信研究機構(NICT)が提供する宇宙天気予報として公開実現した。望遠鏡の観測では得られない、すなわちシミュレーションでしか分からないプラズマ環境の可視化を実現した点を高く評価する。

本プロジェクトでは以下に示すように非常に多種・多様な要素やスケールが関わる課題において著しい研究の進展があった。リアルタイム磁気圏シミュレーションでは太陽風の変動に対して磁気圏—電離圏結合系の応答をリアルタイムで計算・表示するシステムであるが磁気圏—電離圏系の基本特性の解明を進めた。流体—粒子連成モデルでは磁気圏モデルの発展として磁気嵐への応用を試みている。その結果太陽風粒子や高エネルギー粒子の磁気圏への侵入過程を明らかにして磁気嵐への寄与を明らかにしたことは顕著な成果である。また電離圏シミュレーションでは電離圏を中心としてその上下の磁気圏と大気圏の結合を行い各領域からの影響を考慮したシステムを作り上げた。大気圏との相互作用の結果発生する赤道異常を再現したことは高く評価できる。さらに太陽—太陽風シミュレーションでは太陽面磁場観測をもとに太陽から地球までを一体として計算するシミュレーションシステムを作り上げている。

特に研究の自然な流れかとは思われるが、赤道異常のシミュレーションによる再現やサブストームに対する独自のモデルへの到達など必ずしも当初から計画されたことではないが大きな成果でありこのCRESTに相応しい業績である。また、当初研究計画では想定されていなかったが、磁気圏シミュレーションを惑星シミュレーションに応用し、木星、火星、金星、水星の周りの磁気環境の解析を行いインパクトのある研究成果をだした。太陽圏シミュレーションへの応用でも観測データをもとに観測衛星の到達予測を再現するなど興味深い結果を出した。

外部発表に関しては多くの成果をレベルの高い雑誌等に発表しており、シミュレーション技術によって新たな成果が得られたと判断できる。また研究テーマの性格から、知的財産権に関しては該当しないものといえる。

研究の進め方については、各研究グループを統合して効率よく成果にまとめたという点で十分なリーダーシップが発揮された。予算執行については人件費が主であり、CREST 研究員から大学に移り新たな研究チームを立ち上げる例もあった。以上のことから“個性を引き出す”ことが重要なこの業界では適切なチーム運用が行われたと判断できる。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

研究成果がNICTでの宇宙環境予報に応用されているが、この分野の研究を、観測だけに頼るのではなく、大規模なシミュレーションを用いる手法が非常に有効であることを示したことは極めて画期的であり国際的にも

レベルが高い。

本研究のシミュレーションは多自由度、多スケールを考慮し太陽から地球磁気圏までが計算対象になっており、計算科学としての興味深い成果が出ている。そして磁気圏—電離圏—大気圏を結合する試みにより宇宙天気は単なるアカデミックな問題ではなく、電離圏が大気大循環モデルに組み入れられていることから、地球上での長期の気象変動とも関連して考えることができる。特に磁気圏シミュレーションをリアルタイムで実行した研究成果は海外の研究チームより進んでいるとあってよい。

リアルタイム磁気圏シミュレーションを概ね完成することによって、いくつかの未解明現象の理解を促進した。サブストームは磁気圏物理学最大の未解決問題とされており本研究のシミュレーションにより新たなサブストームモデルを得たことは多大な研究成果である。また電離圏シミュレーションによって大気圏との相互作用の結果発生する赤道異常を世界で初めて再現したことも高く評価できる。

本研究課題では宇宙シミュレーションという大規模なシミュレーションにチャレンジし、研究の全体的な枠組みが形成された。本研究成果によりこのような宇宙スケールのシミュレーションが可能であるということを示しこの分野の研究開拓に大いに貢献した。今後、超並列化による巨大シミュレーションが可能になり、シミュレーションと観測データとの統合分析が進み、この分野の研究がさらに発展していくことは大いに期待できる。そして宇宙観測ではわかりづらいことも宇宙シミュレーションによって目で見て分かり易くなるので一般の人への理解が深まるという利点もある。また原子分子レベルの現象に基づく精密な電離層予測の統合シミュレーションを確立したという点で、当領域の戦略目標に対し大きく貢献した。NICTのホームページで、太陽風予測、地球磁場変動、磁気圏プラズマ分布、電離圏予測を公開し分かり易い宇宙天気に貢献しているが、今後さらに公開情報の充実を図り社会的なインパクトを与えるアピールを継続してほしい。

4-3. 総合的評価

地球を中心とした太陽系のプラズマ環境の数値シミュレーションを実現し、目には見えないプラズマ環境を可視化したことを高く評価する。またシミュレーション結果によりサブストームモデルを提案したこと、世界で初めて赤道異常を再現したことは顕著な成果である。

本研究で開発したシミュレーションシステムは太陽—地球間だけではなく、太陽—他の惑星間にも応用・研究しているが、今後はさらに広い太陽圏のシミュレーションも開発中であると報告を受けておりさらなる研究の発展が期待できる。