

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「シミュレーション技術の革新と
実用化基盤の構築」
研究課題「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの
研究」

研究終了報告書

研究期間 平成16年10月～平成22年3月

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)

§ 1 研究実施の概要

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来たが、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(4-1)、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(4-2)、磁気圏変動に対する粒子効果の再現(4-3)、磁気圏変動と大気圏変動に対する電離圏応答の再現(4-4)、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(4-4)、コロナ構造と地球軌道での太陽風の同時再現(4-5)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(4-6)、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(4-7)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出来るので、これらによってまず磁気圏の基本特性を明らかにした(4-1)。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。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(4-2)。

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(4-4)。

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(4-5)。

結果のうちのいくつかは、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、我々はこのような研究を複合系の物理と呼んでいる。

§2 研究構想

(1) 当初の研究構想

太陽から地球にいたる領域のプラズマ環境を数値的に再現し、この領域の理解を深めると共に、NICT(情報通信研究機構)で行われている宇宙環境予報に役立てるとというのが研究の出発点であった。目的として予報が出来れば理想的であるが、そうでなくとも目に見えないプラズマ環境を可視化し、多くの人が宇宙天気を理解する助けになれば、それでも大いに役立つことになると考えた。計画では各部分のシミュレーションモデルを順次開発し、NICTの予報に役立てるような運用を企画することを目標とした。各部分のシミュレーションモデル開発は、以下に述べるように、おおむね達成することができた。

リアルタイム磁気圏シミュレーション:太陽風の変動に対する磁気圏—電離圏結合系の応答をリアルタイムで計算・表示するシステムの開発をめざした。このため計算の高速化、リアルタイムグラフィックスを開発し、これらを NICT のスーパーコンピュータに乗せ、結果をホームページ公開するようにした。さらに、計算と観測との比較から結果の検証を行った。磁気圏と電離圏が結合したモデルでは地上磁場変動が再現できるので、これを比較対象として検証を行った。理想的太陽風変動に対する応答の解析を行い、磁気圏—電離圏系の基本特性の解明を進めた(4-1)。

流体—粒子連成モデル:磁気圏モデルの発展として、流体—粒子連成(粒子追跡)モデルとその磁気嵐への応用を試みた。磁気嵐時の電離圏粒子ダイナミクスを計算し、磁気嵐への寄与を明らかにした。モデルの応用として、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た。粒子モデルへの発展の道筋としての電磁場へのフィードバックを解析するまでには至らなかった。このモデルはまだまだ発展の余地がある(4-3)。

電離圏シミュレーション:上方の磁気圏と下方の大気圏からの影響を含めた電離圏モデルの開発をめざした。このため、各種のモデルを結合して同時に計算を進めるシステムを開発した。結果として、磁気嵐による電離圏変動の再現、大気圏との相互作用の結果発生する赤道異常の再現などを得た。特に全てを基礎方程式から計算し、赤道異常を再現したのは世界初である。赤道異常は緯度、経度、地磁気変動、気象変動にตอบสนองし、これまでに考えられていたよりはるかに複雑な変動を示すことが分かった(4-4)。

太陽—太陽風シミュレーション:太陽面磁場観測を与え、太陽から地球までを一体として計算する太陽—太陽風シミュレーションシステムの開発をめざした。観測データを正確に取り込むため、特異点除去格子を開発し、球面を正確に計算できるようにし、これに回転、重力、加熱、熱伝導を加えたモデルを作成した。これにより、コロナ構造の再現、地球軌道での高速、低速太陽風、セクター構造の再現を得た。観測データを用いた予測計算を NICT のホームページで公開したが、まだ精度に難点がある。計算モデルは、11年太陽周期における太陽圏構造の変動の解析、コロナ構造と太陽風の対応の解析にも応用された(4-5)。

(2) 新たに追加・修正など変更した研究構想

宇宙の問題の多くが、電磁流体力学によって記述できることから、研究計画に基づいて開発された格子生成法、計算スキーム、グラフィックスは各種の宇宙物理学の問題にも応用できると予想される。この観点からいくつかの問題を取り上げ、シミュレーションの活用を図った。シミュレーションでは全体の自己無撞着性が保証され、その条件下で全ての物理量の3次元分布が得られるので、それらを解析することにより、複合システムの問題があいまいさを残さず解明できることを示した。これにより、学術的な面でも貢献することができた。

サブストームの研究：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いる。これまではこの問題を爆発、不安定、リコネクション、非線形現象、階層間結合現象というような非 MHD 異常過程として捉え、核となる物理要素の解明からサブストームを理解しようとする研究が進められてきた。リアルタイム磁気圏シミュレーションの完成を受け、我々はこれをサブストームへ応用することを計画した。我々はサブストームを磁気圏—電離圏結合系における対流の発展と遷移と捉え、シミュレーションモデルによって複合システムの構造変動として研究した。これによって新たなサブストームモデルを得た（4-2）。

惑星シミュレーションへの応用；シミュレーションモデルを惑星のプラズマ環境に応用し、将来の惑星探査に備え、惑星プラズマ環境の解析を行った。木星は地球と同じような磁気圏があるが、回転効果が顕著になる。この場合の磁気圏電流系を明らかにし、木星オーロラとの関係を調べた。金星は磁場が無く、太陽風と電離圏が直接相互作用を行う。この系において、太陽風が電離圏に侵入する過程、太陽風が電離圏プラズマの運動を励起する過程、惑星プラズマが脱出する過程などを明らかにした（4-6）。

太陽圏シミュレーションへの応用：磁気圏シミュレーションの境界条件を、太陽風を銀河風、電離圏を太陽風に変更することによって、太陽圏の構造を計算した。ボエジャー1号が太陽風の果（終端ショック）を観測した状況をシミュレーションで再現した。これを基にボエジャー2号の太陽風の果への到着を予測したところ、予測どおりの観測結果となった。更に流体—粒子連成モデルを応用し、太陽圏における宇宙線の伝搬モデルを開発中である（4-7）。

精密グラフィックスの開発；サブストームや太陽風粒子の磁気圏への侵入を解析する過程で、磁気圏のトポロジー構造が少数の特異点で決定されていることが判明したので、この構造を精密に解析できるグラフィックスを開発した。これにより理論的に予測されているヌルーセパレータ構造（特異点とその周りの磁場構造）がシミュレーションでも再現できることが分かった。サブストームの発展や太陽風の磁気圏への侵入は、トポロジー構造とその変動から明快に理解できるようになることを見出した。このような精密グラフィックスによる描画は、以下の章にて多数示される。

§3 研究実施体制

(○：研究代表者または主たる共同研究者)

(1)「太陽・惑星」グループ

① 研究参加者

	氏名	所属	役職 (身分)	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
○	田中 高史	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	教授	16	10	22	3
	湯元 清文	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	教授	16	10	22	3
	吉川 顕正	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	助教	16	10	22	3
	深沢圭一郎	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	学振 PD	21	4	22	3
	青木将也	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M2	20	4	22	3
	川本浩臣	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M2	20	4	22	3
	山元 悠	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M1	21	4	22	3
	北村健太郎	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	非常勤職員	16	10	17	3
	鈴木 智美	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M 卒	16	10	17	3
	折口 太郎	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M 卒	17	4	18	3
	篠田 徹	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M 卒	18	4	19	3
	亀井 聡美	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M 卒	18	4	20	3
	森口 忠紀	九州大学理学府地球惑星科学専攻	M 卒	18	4	20	3
	中溝 葵	九州大学理学研究院地球惑星科学部門	博士研究員	16	10	21	3

② 研究項目：太陽全球シミュレーションの改良、惑星磁気圏への応用、サブストーム（オーロラ嵐）シミュレーション

(2)「粒子・リアルタイム公開」グループ
①研究参加者

	氏名	所属	役職 (身分)	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
○	島津 浩哲	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	主任研究員	16	10	22	3
	品川 裕之	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	主任研究員	18	4	22	3
	中溝 葵	九州大学理学研究院地球惑星 科学部門	特別研究員	21	4	22	3
	久保 勇樹	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	研究員	19	4	22	3
	坪内 健	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	専攻研究員	19	4	22	3
	陣 英克	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	専攻研究員	20	9	22	3
	中村 雅夫	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	専攻研究員	18	4	18	9
	田 光江	情報通信研究機構電磁波計測 部門	主任研究員	16	10	17	3
	島田 延江	情報通信研究機構電磁波計測 部門	特別研究員	16	10	17	3
	桑原 匠史	情報通信研究機構電磁波計測 部門	技術員	17	4	17	12
	小川 智也	情報通信研究機構電磁波計測 部門	専攻研究員	17	4	18	3
	深沢 圭一郎	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	専攻研究員	19	4	21	3
	小原 隆博	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	グループリ ーダー	16	10	21	3
	寺田 直樹	情報通信研究機構電磁波計測 研究センター	特別研究員	17	2	21	3

②研究項目：HPの改良、太陽シミュレーションの実装、MHD-粒子連成コードと地磁気嵐シミュレーターの開発、磁気圏-電離圏-熱圏-大気圏結合モデルの開発

(3)「電離圏・データ同化」グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職 (身分)	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
○	藤田 茂	気象大学校	准教授	16	10	22	3

②研究項目：磁気圏—電離圏—熱圏—大気圏結合モデルの開発、データ同化

(4)「非磁化惑星」グループ

①研究参加者

	氏名	所属	役職 (身分)	研究参加期間			
				開始		終了	
				年	月	年	月
○	寺田直樹	東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻	准教授	21	4	22	3
	埜 千尋	東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻	博士研究員	21	4	22	3

②研究項目：太陽風—非磁化惑星シミュレーション

§ 4 研究実施内容及び成果

4-1. 磁気圏応答

刻々と変動する太陽風に対する磁気圏の磁場・プラズマ分布の応答を理解することは、宇宙天気研究の基本となる。磁気圏という複雑なトポロジーを持つ系におけるこのような応答を理解するためには、時間空間的に限られたデータしか得られない観測だけでは不可能であり、数値モデルを駆使して研究することが必須である。同時に、その数値モデルが実際に観測事実を再現していることを確認しなくては、数値モデルから得られた知見が正しいかどうか判断できない。このため我々はまずモデル化された太陽風変動(動圧変動、磁場変動など個別の変動)による磁気圏応答を調べ、その結果が典型的な現象と一致することを確認すると同時に、数値モデルで得られた3次元時系列データを解析することによりその応答過程の原理の研究を行った。さらに実際の太陽風データを入力とした現実の磁気圏変動をリアルタイムで計算を行い、観測との比較から数値モデルの検証を行った。

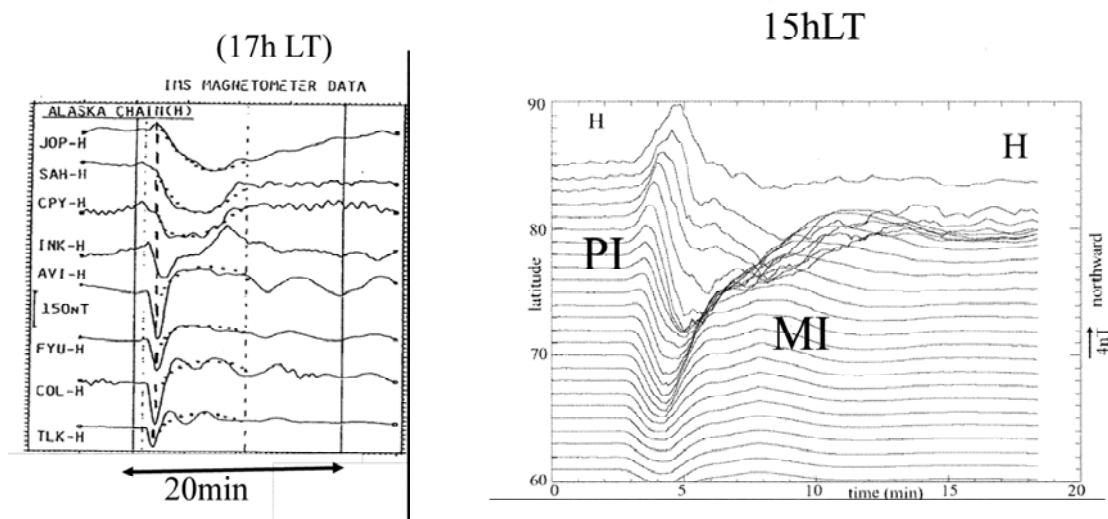
モデル化された太陽風変動として本研究で扱ったものは、太陽風動圧変動と磁場変動がある。この報告書では、太陽風変動に対する磁気圏応答の基本的な物理過程を示す太陽風動圧インパルス変動に対する磁気圏応答について説明する。太陽風動圧インパルスが磁気圏を変形(圧縮)させるとき、磁気圏内に電流が生じる。この電流は電離圏に流れ込み、地上磁場変動を引き起こす。こうして発生した地上磁場変動について、観測から得られた緯度分布(南北成分)と数値モデルで再現したものの比較を第1-1図に示す。この図から数値モデルが現実には起きている磁気圏電離圏変動を十分に再現していることが確認できたため、次の段階として数値モデルのデータを解析し、磁気圏の応答過程の原理を研究した。太陽風動圧インパルスに対して磁気圏は二段階の応答をすることが特徴である。最初の段階では、急激な磁気圏の圧縮に伴う圧縮性電磁流体波動が発生し、それが磁気圏内の磁場やプラズマの非一様分布のため、圧縮性波動に伴う慣性電流が沿磁力線電流(磁場と平行に流れる電流)に変わり、電離圏に到達することが数値モデルの解析により明らかになった(第2-2図)。次の段階は、強まった太陽風動圧に対応して、磁気圏全体が変形し新しい太陽風の状態に対して釣り合う定常状態に以降していく過程である。この時には、インパルスによって一端乱されたRegion1沿磁力線電流(磁気圏と電離圏を繋ぐ電流システムでオーロラ帯の高緯度側にある部分)がゆっくりと回復してくる(第2-3図)。このような二段階の磁気圏応答は太陽風動圧インパルスの特徴であり、太陽風磁場の変動では、インパルス応答の2番目の段階のみが現れる。ただし、太陽風磁場が北向きから南向きに変動した時に現れるsubstorm(サブストーム)は複雑な磁気圏応答をする。これに関しては4-2.でくわしく述べる。

モデル化された太陽風変動を与えた数値モデルの結果が観測された現象を十分再現することが確認されたため、次に実際の太陽風データを入力し、リアルタイムで磁気圏応答を計算した。この時、太陽と地球のラグランジュ点に設置してあるACE衛星で観測された太陽風データを用いた。ただし、ACE衛星は地球から太陽方向に地球半径で100倍以上の距離にあるが、その場所から地球近傍までほとんど変形なしに流れてくると考えられるので、リアルタイム計算では、計算時間を節約するため地球から太陽方向に地球半径で20倍のところまで観測しているものとした。このことは、現象が地球で起こる1時間前に予報できるというメリットがあることも意味する。さて、リアルタイム計算の結果から、実際の磁気圏変動はこれまでに考えられていたよりはるかに複雑であり、激しく変化していることが分かった(第1-4図)。数値モデルはモデル化された太陽風変動に対しては現実的な結果をもたらすことは確認されているが、実際の太陽風変動に対して本当に観測を再現することができるのかも調べる必要がある。この確認も、我々は地上磁場変動を用いることにした。磁気圏変動が作り出す地上磁場変動の全体はAEインデックス(オーロラ帯にある12の磁場観測所のデータから作られるインデックスで、地方時効果を消した地磁気擾乱を表す)として纏められている。観測によるAEインデックスは京都大学の世界地磁気資料センターがリアルタイムで算出しており、観測と計算のAEインデックスの比較は、磁気圏モデルの評価を行う上で有用である。第1-5図に観測されたAEインデックスと計算によ

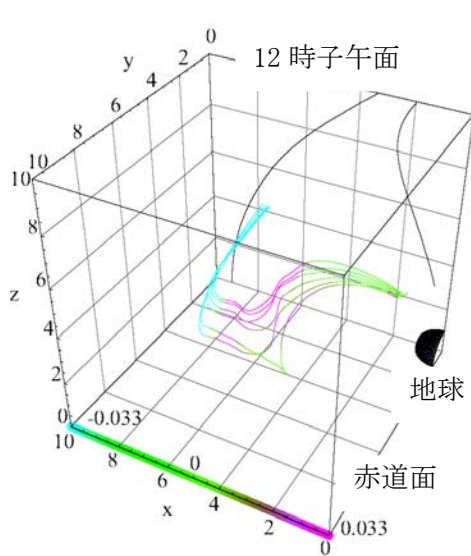
るそれを示した。この図から、モデルの精度が確かめられた。リアルタイム磁気圏シミュレーションの結果はデータとして蓄積されており、このデータベースからもモデル評価や、さまざまな現象のメカニズムの研究が進められた。これにより、必ずしも常に観測と計算がよく一致するわけではないことも、わかってきた。この両者の関係がどこまで一致し、どこに合わない点があるかは、現在も解析されつつある。

この一致、不一致の原因を更に解析するには、太陽風変動が磁気圏構造のどの部分を通じて電離圏に及ぶかを調べる必要がある。このためシミュレーション結果を解析し、磁気圏-電離圏結合系の物理過程を研究している。その結果、磁気圏全体の磁場構造は複雑ではあるが、全体のトポロジカルな構造は少数の特異点で決定されていることが分かってきた。しかしながら特異点の構造はきわめて狭い領域で決定されており、その詳細を描画するには特異点の極近傍の磁場を正確に描かなくてはならないことが判明した。そこで、グラフィックソフトウェアの開発を進め、磁場の書き出し点を精密に指定することによって、特異点近傍の磁場構造を正確に描くシステムを整備した。特異点の役割はサブストームを考えるとときに特に重要であるので、4-2. でさらに詳しく述べる。

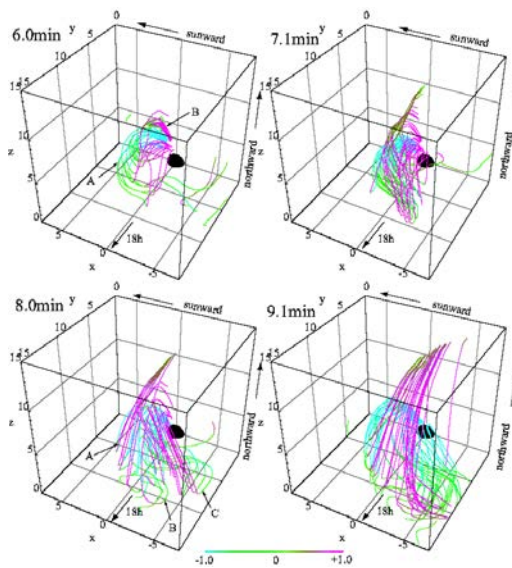
以上のように、リアルタイムシミュレーションは磁気圏電離圏の様子をかなりの程度正しく再現することが分かったため、NICT(情報通信研究機構)では、リアルタイム磁気圏シミュレーションの web 表示の改良を進め、太陽風構造、磁気圏構造などと共に、それから派生するさまざまなパラメータも同時に表示するシステムの開発を進めた。現在は、地上磁場変動を表す AE インデックス、衛星運用にとって重要な放射帯粒予測、電離圏の運動を表す電離圏ポテンシャルなどが表示されている。



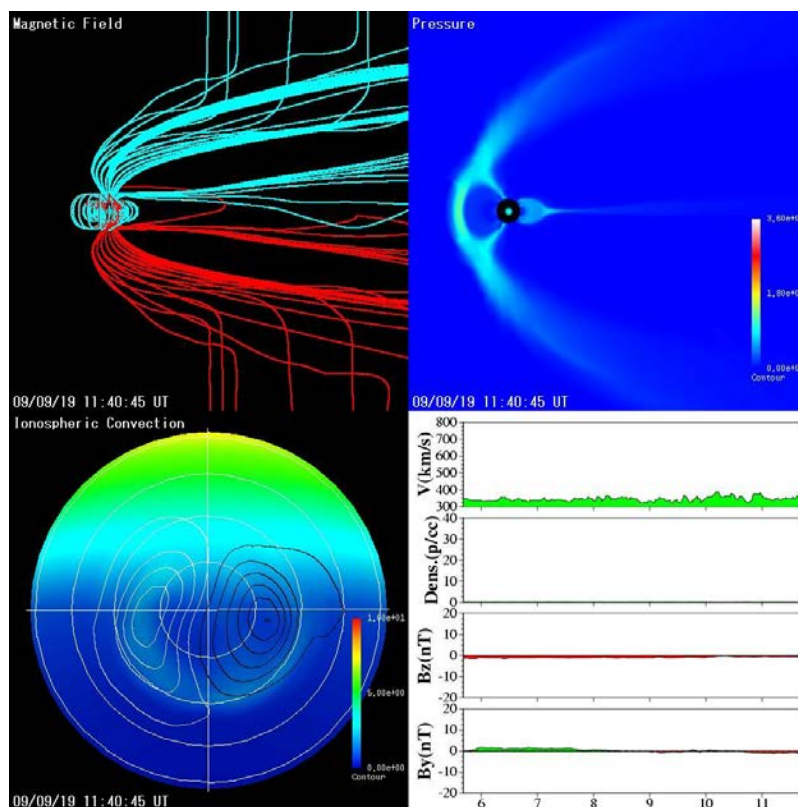
第 1-1 図 太陽風動圧インパルスによって生じる地上磁場変動(南北成分)の緯度分布(SC と呼ばれる変動)。(左)観測、(右)数値モデル。低緯度側では、始めに磁場が短期間減少する期間があり、これを PI(初期インパルス)という。次に比較的長い増加する期間があり、これを MI(主インパルス)という。SCの研究とは、換言すれば、これらの変動を発生させる磁気圏-電離圏電流系の全体を描くことといえる。観測で磁気圏-電離圏電流を辿ることは不可能であるので、観測から SCの原因を確定することは難しい。シミュレーションによれば、第 1-2 図、第 1-3 図に見られるように、PI と MI に対応する電流系をそれぞれ描くことができ、SCの原因を確定することが出来る。この電流系がどのくらい信憑性があるかということを決めるのが、本図の意味である。観測は現象の認識、シミュレーション結果の検証のために存在し、観測からの類推で原因を探っても不確定性が残る。その最大の原因は全体系(対流構造)の自己無撞着性の保証が無いことにある。



第 1-2 図 太陽風動圧インパルスに対する初期の磁気圏応答。カラーの曲線は電流を示す。電流の色は寒色系が電流の生成、暖色系は電流が仕事を行うことを示す。



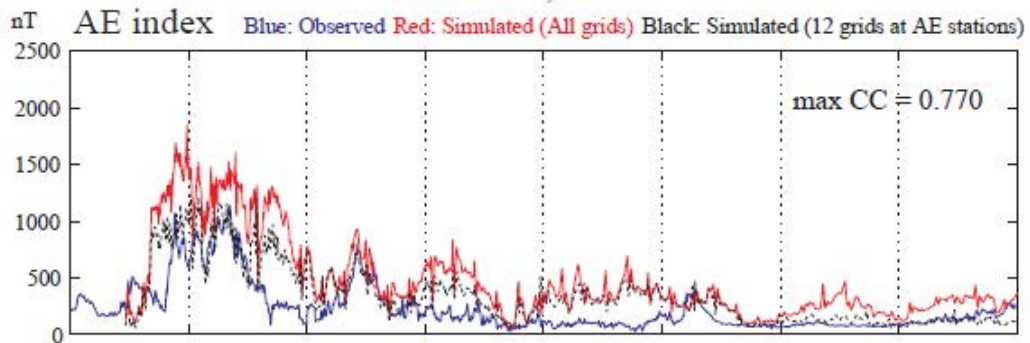
第 1-3 図 太陽風動圧インパルスに対する後期の磁気圏応答。時間とともに、cusp 域で生成される電流が Region1 沿磁力線電流系として電離圏と繋がるのが分かる。



第 1-4 図 リアルタイムシミュレーションの結果の例。(左上) 磁力線、(右上) プラズマ圧力、(左下) 電離圏での電場ポテンシャル (コンター) と電気伝導度 (カラー)、(右下) 太陽風データ。このデータはNICTからリアルタイムで公開されている。磁気圏シミュレーションを実時間で運用し、予報に利用したのは、世界初である。

Jul. 28, 2006

Time Delay = 71minutes



第 1-5 図 観測 (青) と計算 (赤) で得られた AE 指数の比較。計算された AE 指数は時間を 71 分遅らせている。この時の両者の相関件数は 0.77 である。

4-2. サブストーム

はじめに

磁気圏—電離圏結合系は、異なった太陽風の変動に対して様々な種類の応答を示すが、中でも特に重要なのが、太陽風磁場 (IMF) が北向きから南向きになる変動に対する応答で、これはサブストームと呼ばれる現象である。IMF が北向きから南向きになると、磁気圏対流や電離圏電流が緩やかに変動を開始し、この期間はサブストームの成長相と呼ばれ、成長相は 1 時間程度続く。その後突然明るいオーロラが発生して爆発的に広がり、これに伴って磁気圏磁場、磁気圏プラズマ分布、電離圏電流が激しく変動する。これはサブストームのオンセットと呼ばれるが、オンセットの様相は自然現象中の不連続性を連想させ、これを爆発現象、状態の遷移、階層間結合、不安定現象などと解釈したくなる。現実にもそのような発想に基づく多くの研究が行われており、プラズマ不安定、非線形現象、リコネクション物理などの理論を応用しようとする試みが広くなされている。しかしこれらのモデルを、実際のサブストーム発生に至る磁気圏—電離圏系の構造変動に対応させようとする、それは困難であることが知れる。磁気圏は広大な領域を占め、衛星観測から得られるのは断片に過ぎず、磁気圏—電離圏結合は相互作用を伴った複合系となる。断片を繋ぎ合わせて全体像を想像しようとする、磁場とプラズマの 3 次元構造や電流構造、結合系の自己無撞着性にあいまいさが残り、サブストームの研究はあやふやさを含んで行われることになる。さらに悪いことに、あやふやな裏返しとして、間違ったモデルでも信じ込んでしまえば否定もできないという状況になる。このため、サブストームの解明をめざし打ち上げられた衛星は 10 以上もあるにも関わらず、いまだそのメカニズムが明確とならない。このようにサブストームは磁気圏変動の最も特徴的変動であるにもかかわらず、信仰的格差が大きく、磁気圏物理学最大の未解決問題である。

サブストームのような複合系の問題こそがシミュレーションで研究されるべきで、シミュレーションによって第 1 原理からサブストームを再現できれば、磁場、プラズマ、電流の 3 次元構造、エネルギー流、それらの変動、相互作用の実態など我々が最も知りたいことが、衛星に頼らなくても全て分かるはずである。このような発想に基づき、本研究課題ではサブストームシミュレーションに挑戦してきた。シミュレーションモデルの基本方針は、磁気圏のような広域構造では、局所的な MHD の破れはあるが、大域的には MHD が成立するという考え方である。これを取り扱う磁気圏モデルは、MHD の破れを与えるプラズマの粒子効果を、磁場の特異点構造と連動させて、パラメタリゼーションにより組み込んだ流体モデルである。磁場構造に特異点 (ヌル) が現れると、そこで散逸が大きくなり、MHD が破れるという設定を行い、それ以外の場所では MHD が成立するとする。これに加え、磁気圏—電離圏結合、内部境界条件、磁場発散消去、可視化法などに関して、数値モデルの精密化を行った。これらによって、ようやくと見かけとして観測と同じようなサブストームが再現できるようになった。得られた結果は数値データとして、サブストームの過程を内包していると考えられるが、それを可視化して物理的構造を明らかにすることは、

容易でない。しかし計算結果のさまざまな解析から、磁気圏変動の3次元構造と共に、サブストームメカニズムについて観測では見えないような力学プロセスが明らかになってきた。

ヌルーセパレーター構造

サブストームを理解するには、まず出発点を明らかにしなくてはならない。北向き IMF の時には磁気圏は比較的静穏・定常であり、このときの磁気圏磁場を閉磁場(両端が地球上にある)、開磁場(一端が地球上にある)、分離磁場(IMF)の3種類に分けてそれらの分布を解析すると、以下のような構造が見える(第2-1図)。まず3種類の磁場にはそれぞれの境界面があるはずで、これはセパトリックスと呼ばれる。次に北半球と南半球にそれぞれ1つずつ磁場がゼロになる特異点(ヌル)ができ、ヌル同士を結ぶセパレーターラインは、昼側と夜側に2つ形成される。セパレーターラインはセパトリックス同士の交差線でもあり、その上では3種類の磁場が全て存在する。磁気圏構造はこのようなヌルとセパレーターラインによって特徴付けられ、これをヌルーセパレーター構造と呼ぶ。IMFが南向きになると、対流は活発になり、成長相が進行する。対流変動の第1の原因は昼側のセパレーターラインの構造が大きく変化するためである。これに対し、夜側のセパレーターラインは成長相の間は北向きの時のままである(第2-2図)。対流は磁気圏と電離圏の間で同時に進行する必要がある。成長相の対流は、ローブ(磁気圏尾部の赤道面の上下で磁場が強い領域)と極冠、内部磁気圏とオーロラ帯の間では比較的1対1に進行する。これに対してプラズマシート(尾部の赤道あたりでプラズマが濃い領域)の対流は、プラズマシートの形状のため電離圏との結合がゆるく、夜側セパレーターラインのせいで相対的に滞留しやすい。その結果生じるのは、ローブ磁場の増加(蓄積)と、プラズマシートの薄化(吸出し)である。総観的に見れば、この滞留を解消するのがオンセットである(第2-3図)。

プラズマシートの変動

オンセットにいたる磁気圏磁場構造の変化は、夜間セパレーターラインの消失で特徴づけられる。この消失は、プラズモイドの生成と夜側 X ラインの出現によって起こる。プラズモイドは磁場構造で見れば、フラックスローブと見える(第2-4図)。セパレーターライン消失に伴うプラズマシート対流の変動は、オンセットを生成する上で、最も重要なプロセスである。これはプラズマシートの力バランスを考察することによって理解できる(第2-5図)。オンセット前のプラズマシートは、静的釣り合いの状態である。この状態では、プラズマシートの圧力が磁場張力を伴うプラズマシートの磁場構造を支えるようになっている。オンセット後は、この構造が内側の静的釣り合い領域と外側の動的釣り合い領域とに分離する。この分離過程は急激であり、これは磁気圏プラズマ構造に対する一種の崩壊現象と解釈される。このようなプラズマシートのマクロ変動によって、急激なオンセットが実現され、これは今までもいくつか提唱されている状態遷移モデルの一例である。外側の領域はテンション(張力)過剰となり対流は加速を受ける。これは、プラズマシートで観測される、炸裂容積流(BBF)の発生と見ることができよう。これに対し内側の領域は、静的釣り合いの維持と高圧領域の発生で特徴付けられる。全体として、磁気圏—電離圏結合によって維持される対流と、プラズマシートのBBF対流が接続して、滞留を解消する。両対流の接続は、ブレーキ(減速)領域の発生で実現されるが、これは定常的構造にはならず、非定常性が不可欠である。これは電離圏でのオーロラ極方拡大に対応する。

沿磁力線電流の発生

次に考察しなければならないことは、高圧領域の発生に伴う電流系の構造である。高圧領域は静的釣り合いを維持するが、その圧力傾度に対応し、それに釣り合うアンペール力を作り出す電流が存在する。この電流は磁気圏内で閉じるとは限らず、沿磁力線電流、電離圏電流と結びつく(第2-6図)。この電流系の全体構造は、古くから知られている部分環電流である。この部分環電流を生成するエネルギー変換過程を考察するとサブストームの本質が良く理解できる。サブストームオンセットは総体的には、磁気圏に蓄えられた磁場エネルギーが変換されて沿磁力線電流として電離圏に供給され、対流が加速すると理解されるが、この沿磁力線電流にエネルギーが供給されるプロセスがポイントである。計算の結果では、磁場のエネルギーは直接沿

磁力線電流のエネルギーに変換されるのではなく、まずはプラズマの内部エネルギーに変換され、ついでプラズマの内部エネルギーが電磁氣的エネルギーに再度変換されるという、2段階のエネルギー変換が発生する。第1段階では、夜側 X ラインで開放された磁気張力が対流に作用して仕事をし、プラズマの内部エネルギーを増加させ、これが夜側の内部磁気圏に蓄えられる。この磁気張力の実態は、環電流である。対流が夜側の高圧域から昼側の低圧域に向かうときには、逆に圧力が仕事をし、ダイナモ作用を起こして沿磁力線電流を生成し、これは領域2沿磁力線電流となる。逆の見方をすれば、領域2沿磁力線電流が経度方向に高圧域を支えると見ることもできる。このように電流の全体は、環電流と領域2沿磁力線電流からなる、部分環電流となる。

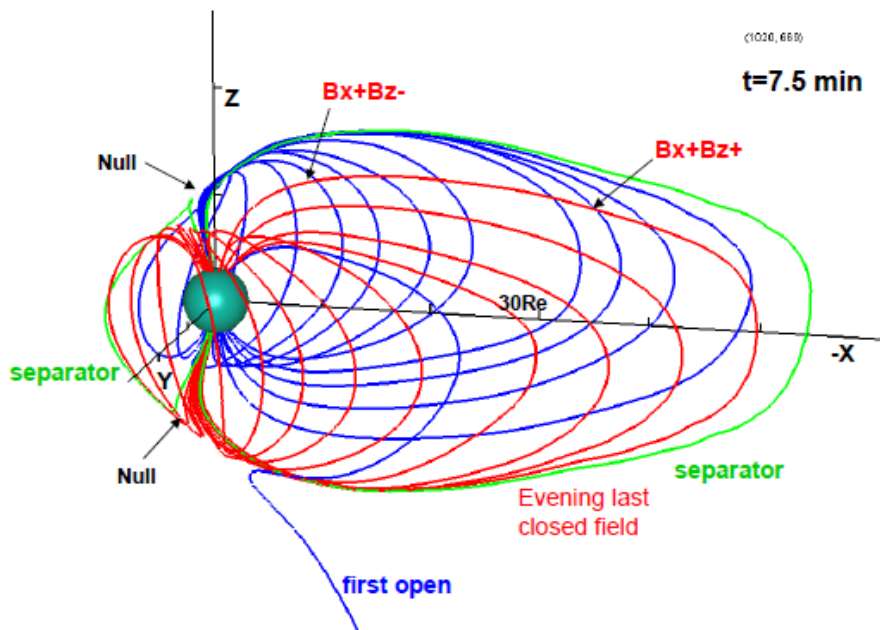
サブストーム電流系

このモデルでは、プラズマシートの擾乱は、領域2(低緯度側)沿磁力線電流によって電離圏に伝えられることになるが、これは今までの領域1沿磁力線電流がプラズマシートの擾乱を電離圏に伝えるというモデルと逆になる。しかしながら、オンセットには、領域1(高緯度側)沿磁力線電流の生成も必要であることは明らかである。領域2沿磁力線電流が発生するには電離圏でのクロージャーが不可欠であるが、これを東向き電離圏電流で実現することは出来ない。なぜならば、夜中の東向き電離圏電場は対流が逆流になってしまうからである。電離圏クロージャーは領域1沿磁力線電流と結合することによって達成される。領域1沿磁力線電流は領域2沿磁力線電流に呼応し、それを電離圏中の南北電流でショートするようにカスプ域から電離圏に流入する。その結果全体として実現される電流は、良く知られているポストローム電流系である(第2-7図)。このシステムでは、内部磁気圏のプラズマ圧力が決まるとそれにバランスする部分環電流の大きさも大体決まるので、領域2沿磁力線電流は定電流源とみなせる。これをショートする領域1沿磁力線電流も定電流となり、これらの大本はプラズマシートで開放されたエネルギーであるので、全体は溜め込み-解放型(ローディング-アンローディング)の特性を示す。この大きな閉回路対し、領域1沿磁力線電流は西向き電離圏電流で閉じることが出来るので、単独に流れることも出来る。その量は、領域1沿磁力線電流のダイナモが太陽風に接しているため、電離圏電気伝導度の増加に呼応していくらでも増加できるので、定電圧源としての特性が強くなる。この影響は地上では直接駆動型の磁場擾乱となる。

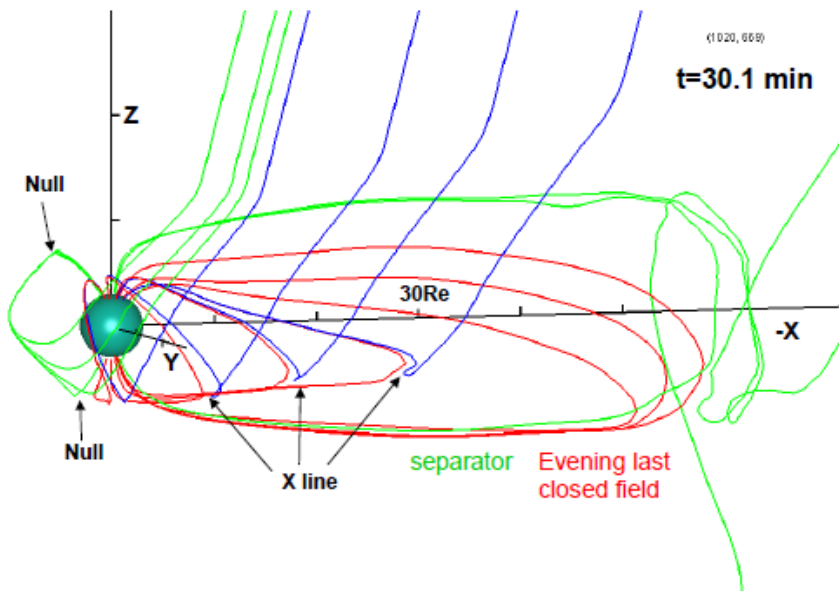
結論

我々の計算の特徴は磁気圏と電離圏の相互作用を正確に取り入れ、全ての要素を省略せず全体を複合系として扱ったとであるが、結果はむしろ単純で、古くから知られている(地球近くに押し寄せるプラズマの増加に見合って電流も増加する現象と理解できる)部分環電流がサブストームの主役という答えになった。これは観測結果から推定された、電流の流れ方が突然変わる current wedge と呼ばれる構造が主役になるとされる、これまでのメカニズムとは大きく異なるものとなった。これまでのモデルでは、領域1沿磁力線電流がオンセットの主役であったが、今回のモデルでは領域2沿磁力線電流が主役になる。この沿磁力線電流の生成の面からサブストームを見ると、これまでのモデルはサブストームの時は沿磁力線電流生成に特別な過程が発生すると考え、それはMHDを破るものであると主張するが、今回の結果では、沿磁力線電流の生成は、サブストームの時もサブストームでない時も基本的には同じであるという結論になる。それは磁気圏対流を電離圏に伝えようとする作用であり、MHDに基づくエネルギー変換によってなされる。今回のサブストームモデルの最大の利点は、サブストームに伴う磁気圏-電離圏系における対流・沿磁力線構造が、自己無撞着性を満たしているということにある。

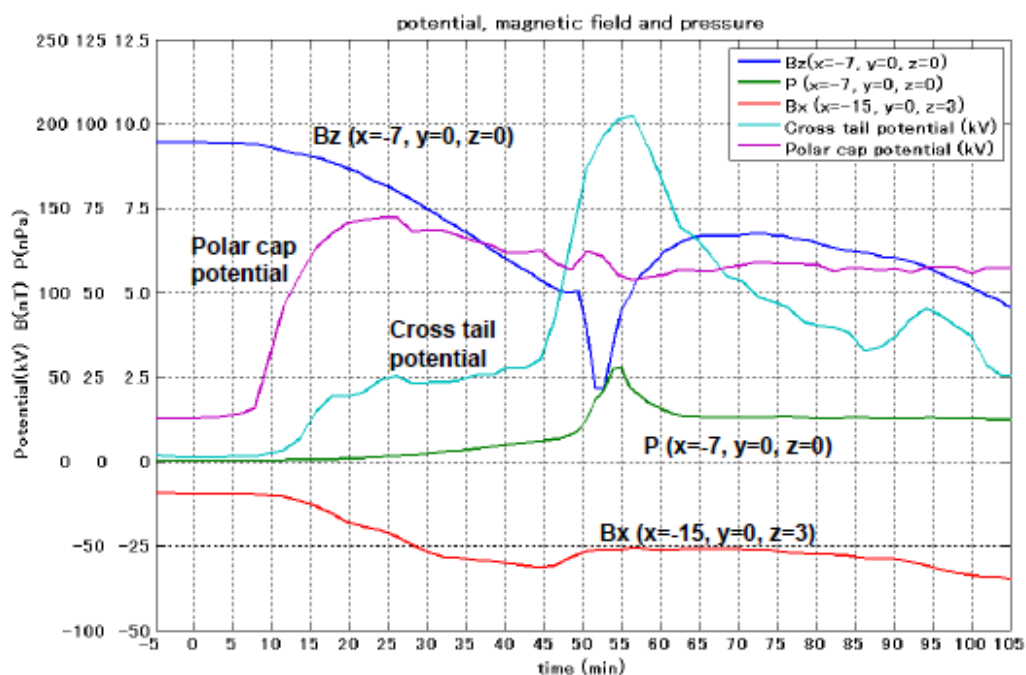
磁気圏と電離圏の対流が自己無撞着的に結合する構造が基本であり、宇宙はプラズマの実験室であるというような考えは誤りであり、宇宙では非MHD過程が主役になったりはしない。このような基本に忠実な研究方向が、複合系磁気圏物理学である。



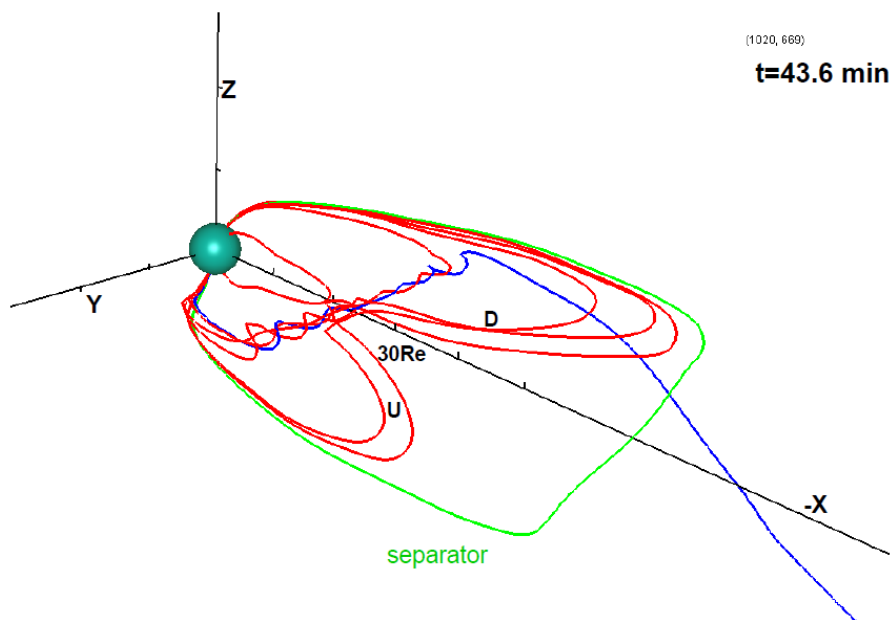
第 2-1 図、北向き IMF のときのヌルーセパレーター構造。青い線は朝方、赤い線は夕方側のセパレーター構造を表し、緑の線はセパレーターラインを表す。赤い線は北半球の電離圏では、極冠とオーロラオーバルの境界に繋がり、南半球ではカusp (双極子磁場の極に当たる領域) に収斂する。青い線は半球が逆で同じ構造となる。セパレーターライン上ではグローバル平行リコネクション (磁場再結合) が発生し、対流が励起される。



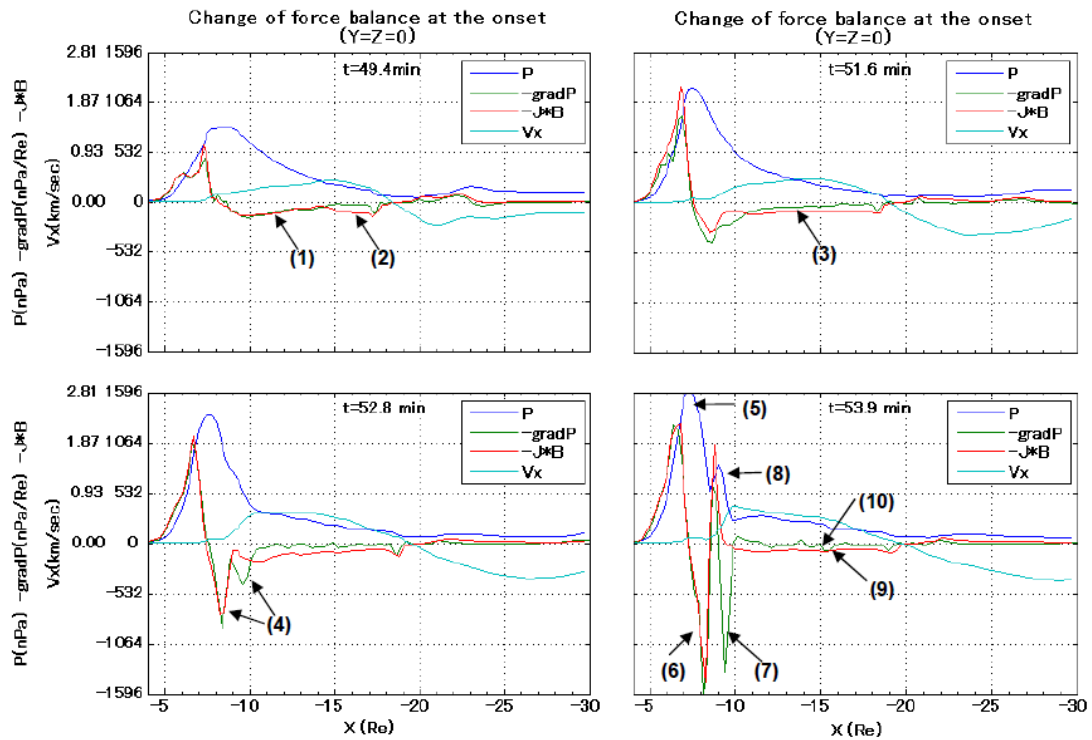
第 2-2 図、成長相におけるヌルーセパレーター構造。赤い線は最外側の閉磁場、青い線は最内側の開磁場を表す。昼側のセパレーターラインは大きく変化し、2 つのセパレーターラインが分離するようになり、その間に青い線が割り込むようになって、ヌルより夜側には X ラインが成長する。しかし夜側セパレーターラインは依然として北向きの構造が維持される。



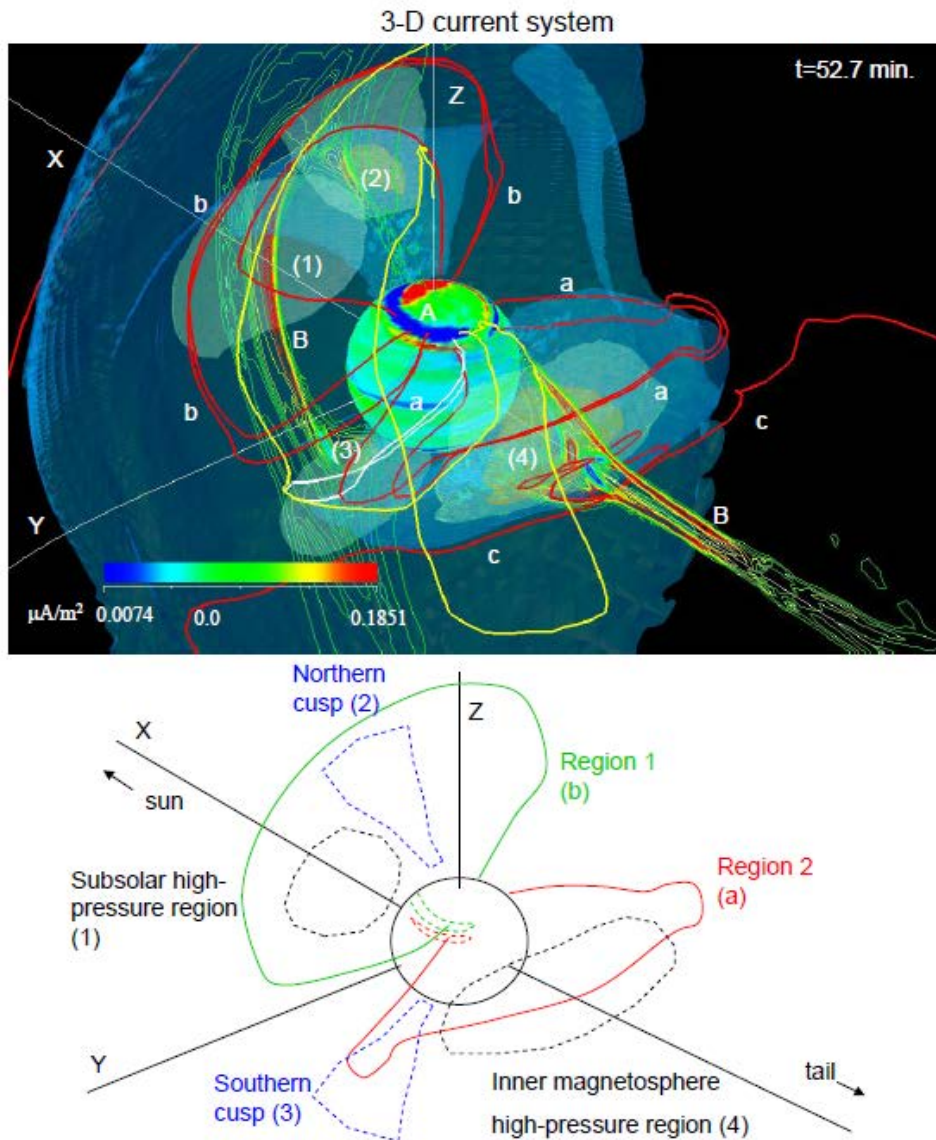
第2-3図、成長相、オンセットにおける対流の発達と磁場構造の変動。成長相(5から45分)では、極冠ポテンシャル(紫)が尾部横断ポテンシャル(水色)を上回り、フラックスは過剰に夜側に輸送される。その結果ローブの $|B_x|$ が増加し(赤)、夜側内部磁気圏で薄化が起こる(青)。オンセットでは、尾部横断ポテンシャルが急激に増加し、これに $|B_x|$ の減少、双極子化(青)、が伴う。内部磁気圏では、双極子化と共に圧力が増加するが(緑)、これに呼応し短期間の爆発的成長相が見られ、これは反磁性効果の現われと解釈される。



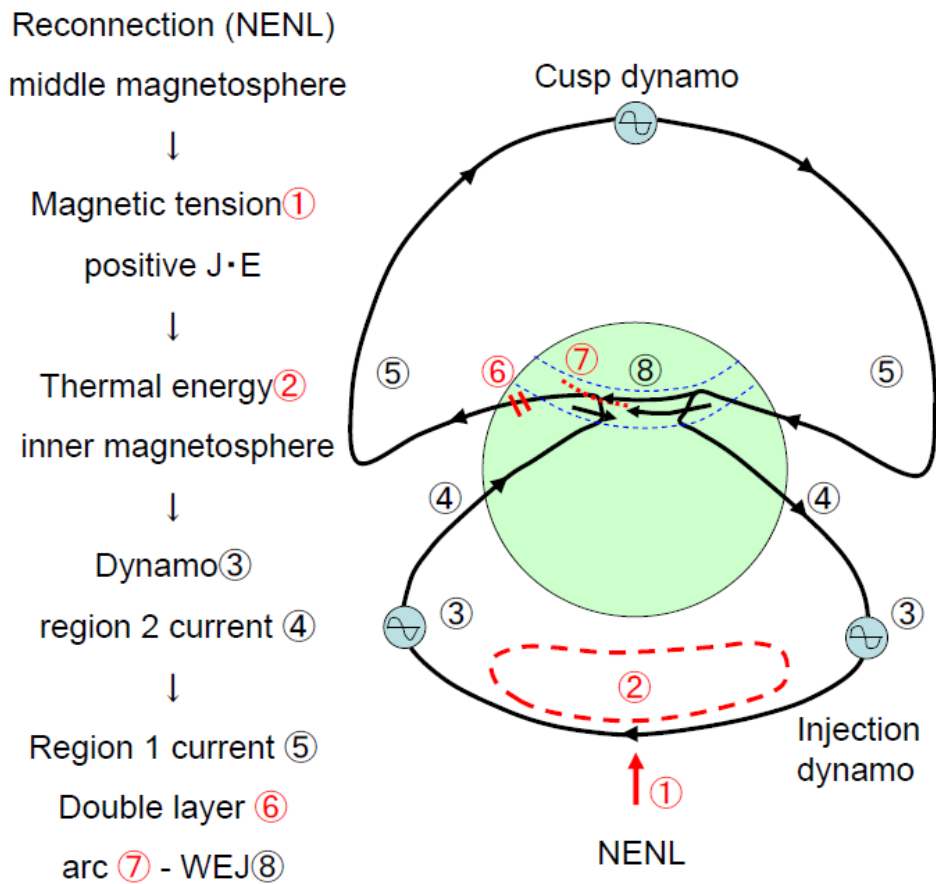
第2-4図、オンセットにおけるフラックスローブの生成。青線はローブの芯の構造、緑は夜側のセパレーターライン



第2-5図、オンセットに伴うプラズマシートの力学バランスの変動。左上はオンセット前で、地球向き磁場張力が、反地球向き圧力傾力と釣り合っている(1)(2)。オンセットに近づくとこのバランスが崩れ出し(右上)(3)、圧力傾力に2山が発生する(左下)(4)。この2山構造は急激に成長し、右下では内部に高圧が発生し(5)、外部には張力過剰域が発生する(9)(10)。しかし高圧域では依然として静的釣り合いが維持される(6)。圧力の分布を見ると、10Reより外側ではオンセットに伴って減少する。これは圧力傾力が小さくなり、圧力分布が平坦になるため、炸裂容積流(BBF)の発生によって、対流を維持しようとする機構が働いていると解釈される。プラズマシート流は、(7)点の慣性電流によって釣り合いを得て、減速する。しかしこの変動に対する圧力変化(8)は(5)より小さく、これは磁気圏では内部エネルギーが運動エネルギーに卓越することに対応する。結局この特性が沿磁力線電流を内部エネルギーによって生成するという磁気圏物理の本質を生み出し、領域1沿磁力線電流を主役とするようなこれまでのモデルが成立しなくなるという結果を招く。



第2-6図、3次元圧力分布と領域2沿磁力線電流に駆動されるサブストームの電流系。圧力はボリュームレンダリングで書いてある。赤は強度の強い主要な電流を表し、白と黄色は強度の弱い電流を表す。また3Reの球上にシェーディングで沿磁力線電流が、子午面に等高線で J_y 成分が書いてある。圧力の高いところは、太陽直下(1)、カusp(2)(3)、夜側インジェクション領域(4)で、(4)は第2-5図(5)に相当する。(4)は部分環電流aと対応しているのは良くわかり、これは磁化電流である。ブレーキングに対応する慣性電流cは電離圏には繋がらない。これは流れのシアを伴わないブレーキングは沿磁力線電流を生成しないという、当然の結果である。黄色い電流は伝統的な電流ウェッジに似ているが、これはマイナーな電流である。むしろ白色の電流の方が強く、これは領域1と領域2沿磁力線電流を局所的に繋ぐ成分もあることを示している。



第 2-7 図、サブストーム構造の模式図。NENL(近地球中性線)で開放された磁場張力は、内部磁気圏に高圧を発生させる。成長相でも高圧は徐々に発達するが、その時は静的バランスが成り立つ。NENL 発生後 5 分くらいの時、この静的バランスは急に破れ、テンション過剰の中尾部と、静的バランスを保ち続ける近尾部に分離する。この分離がオンセットの原因である。中尾部ではテンションによって BBF(突発容積流)が発生する。近尾部の高圧は部分環電流となり、サブストームを引き起こす。従って磁気圏尾部の擾乱は領域2沿磁力線電流を通じて電離圏に伝えられ、この領域2沿磁力線電流を南北にショートするように、領域1沿磁力線電流がカスプから発生する。カスプは太陽風に接しており、定電圧源的であり、電離圏の電気伝導度増加に対応して、領域1を発生させる。このとき夕方では領域2沿磁力線電流が一番近いアークを通じて領域1沿磁力線電流に繋がるのが自然である。このモデルではオンセットが赤道側のアークから始まる理由をよく説明できる。ショートに伴う電場は南北となり、これに対するホール電流が地上磁場の変動を作り出す。この電流系は古くから知られているボストローム電流系であり、最近では赤祖父によって再評価されているモデルである。

4—3. 流体—粒子連成

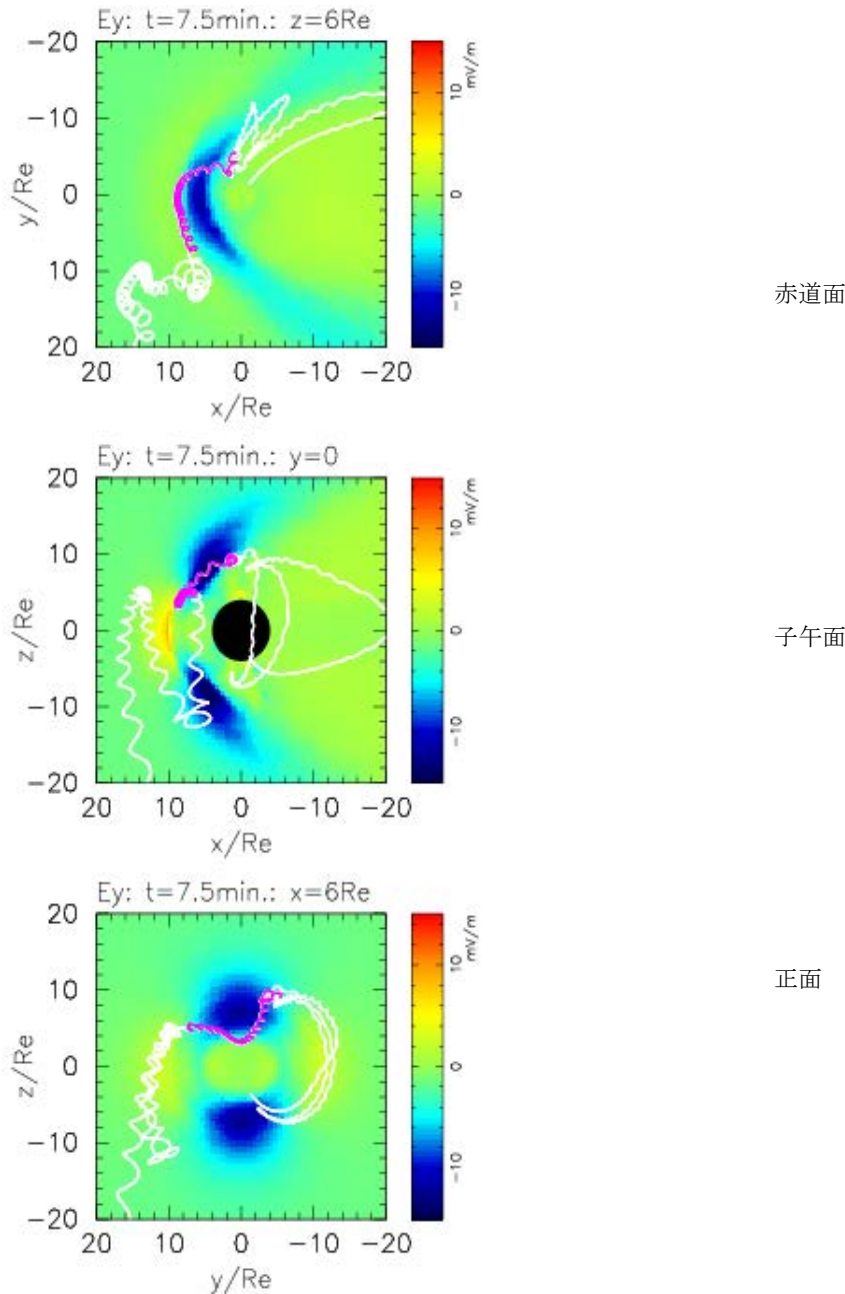
プラズマは近似的に磁気流体として扱えるが、正確には電荷を帯びた粒子（イオンと電子）の集団である。宇宙天気現象はマクロな現象であるので、全体的には磁気流体力学（MHD）近似が良く成立するが、それでも時としては粒子的な扱いも必要となる。このため我々は時間変動する MHD シミュレーションで得られた変動電磁場の中で、テスト粒子計算を行うモデルを開発した。

テスト粒子計算によって、太陽フレア（磁気爆発）に伴う太陽高エネルギー粒子が磁気圏内部に侵入する様子が計算された。第3—1図に、計算結果の一例として 100 keV の初期エネルギーを持つ太陽高エネルギープロトンの侵入経路を示す。MHD シミュレーションで得られた電磁場中で太陽プロトンの運動を追跡し、低高度に到達する位置の予測を行った結果、特に太陽風の動圧が増加する時に、地球磁気圏前面に形成されるバウショック領域でドリフト加速を経た後、カスプの上空から地球磁場に捕捉される粒子が増加することが分かった（第3—2図）。また、太陽高エネルギー粒子が地上に降ってくる緯度は、太陽風構造に依存し、太陽風磁場や太陽風速度が変動していると、より低緯度にまで降ってくるということが分かった。

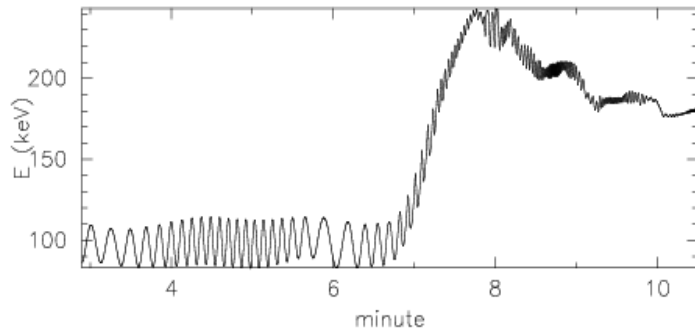
次に、将来の粒子グローバルシミュレーションに発展させることをめざし、正12面体分割による非構造格子を用いた MHD シミュレーション場中で、粒子の軌道追跡を実現する方法を開発した。非構造格子の格子点間の補間には area-weighting 法を用い、さらに背景双極子場から来る誤差を低減するために、双極子場からの寄与を分離して任意の粒子位置における場の量の精度の高い見積りを行った。粒子軌道追跡の高速化を図るため、MHD コードでは領域分割による並列化、粒子追跡ではグループ化による並列化を行い、両者を共存させるコードを開発し、太陽風—磁気圏結合系全体での粒子軌道追跡を実現した。本コードを用いて、電離圏起源の粒子に対してテスト粒子計算を行い、電離圏起源の粒子が磁気圏に対流していく様子が調べられた。第3—3図は、人工衛星観測に基づいた流出パラメータを用いて、polar wind, auroral wind, cleft ion fountain によって極域から流出する電離圏イオンを放出し、変動する MHD シミュレーション場において軌道追跡した結果である。電離圏起源の粒子は一度磁気圏尾部まで対流し、プラズマシートに到達すると、エネルギーを上げながら再び地球に向かって対流し、環電流にまで発達することが再現された。この過程も太陽風中の磁場（IMF）に依存し、太陽風磁場が北向きから南向きに変化すると、より強い環電流となることも分かった。このモデルでの問題点は、地球近傍の強磁場領域では高速に粒子が回転し、計算の時間ステップが極めて短くなることであるが、この点を克服するため、粒子軌道の積分法で Buneman-Boris 法と呼ばれる方法とジャイロ運動論を切り替える方法を開発し、有効性を実証した（第3—4図）。Buneman-Boris 法では粒子の旋回運動を十分に分解できる小さな時間刻み幅を用いるのに対して（典型的には1タイムステップあたりの刻み角度は $\Delta\theta \sim 3$ 度）、ジャイロ運動論ではハミルトン理論とリー摂動法に基づきブラソフ方程式を展開してオーダリングを行い、粒子運動の旋回位相を積分する。これにより、イオンの有限ジャイロ半径効果を保持しつつも、大きな時間刻み幅（すなわち大きな旋回位相角刻み幅 $\Delta\theta > \sim 360$ 度）を地球近傍領域の粒子計算に適用する事が可能となった。Buneman-Boris 法とジャイロ運動論を切り替える遷移層の位置は、 $\delta B/B_0 \sim \omega/\Omega_i = 0(\epsilon)$ となる領域に設定し、将来的な拡張として粒子からのフィードバック効果も含めて電磁場を自己無撞着に解く際に、プラズマ波動分散関係の連続性を保つ仕様設計を実現した。

テスト粒子計算を太陽風粒子に適用し、侵入の経路に対する太陽風中の磁場（IMF）の効果が調べられた。第3—5図に計算結果の一例を示す。MHD シミュレーション場において、太陽風中に蒔いた粒子の軌道を追跡し、それらの粒子のうち子午面近くに到達したものを描いている。粒子の一部が磁気圏内に侵入し、プラズマシートや環電流を形成しているのが見られる。数値解を解析した結果、太陽風中の磁場（IMF）が南を向い

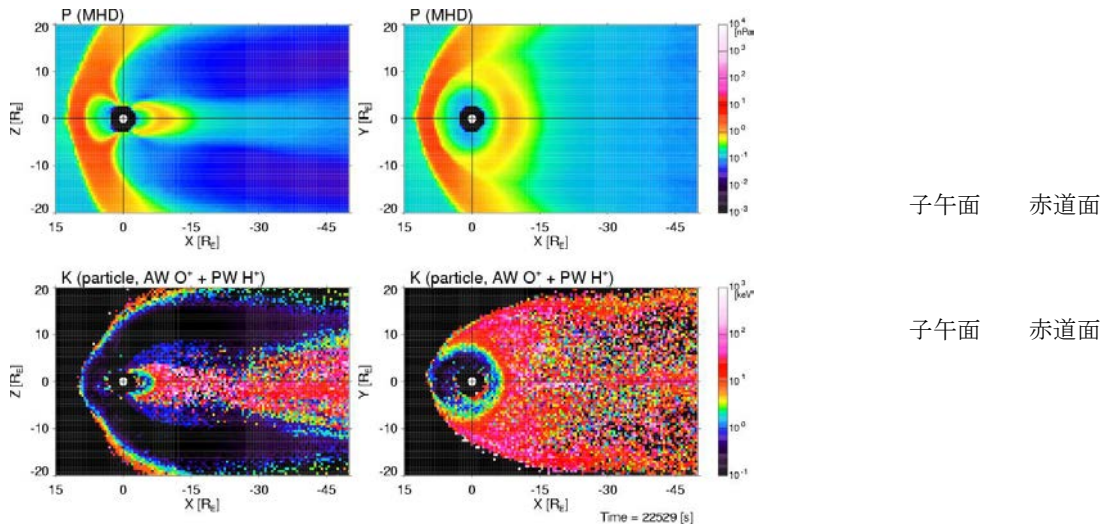
ている時は、主に磁気圏の南北（上下）から太陽風粒子が侵入するのに対して、北を向いている時は磁気圏の横側から侵入することが分かった。これらの計算結果の比較により、太陽風中の磁場（IMF）が北向きの時の方が多くの粒子が磁気圏に侵入してることが分かった。この事実は観測とも一致しているが、その原因はグローバルな磁場構造とリコネクション（磁場再結合）過程の（太陽風中の磁場（IMF）に対する依存性の）違いによる。これまでは磁気圏と太陽風の境界での MHD 不安定の起こり易さのような、ローカルな構造に原因を求めるのが一般的であったが、それが必ずしも正しくないことが示された。



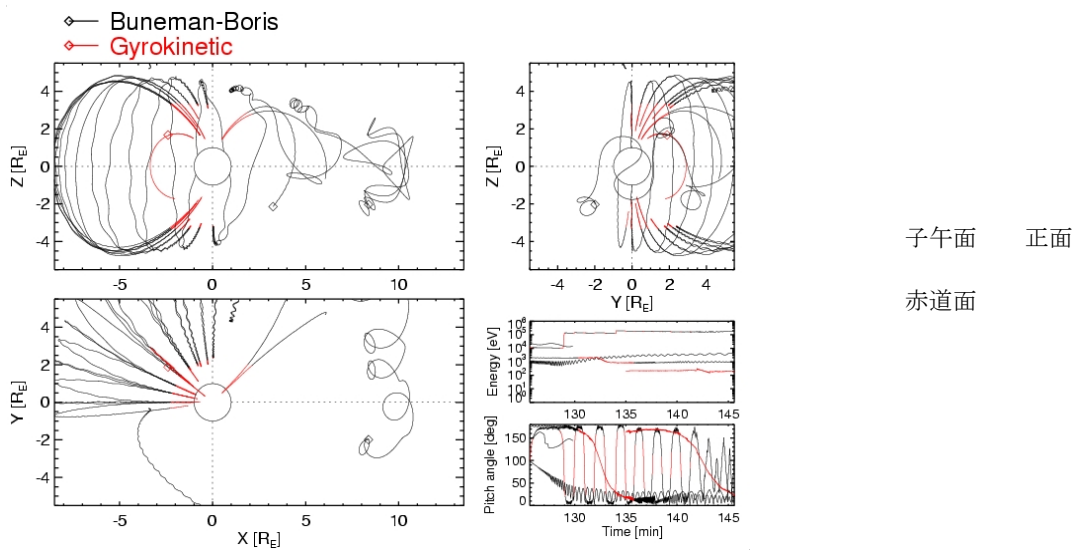
第 3-1 図、太陽高エネルギープロトンの侵入経路例。MHD 場中で太陽プロトンの運動を追跡し、低高度に到達する位置を予測。バウショック領域（磁気圏前面のショック面）で加速された後、カusp（南北の磁場が開いた領域）の上空から地球磁場に捕捉される。



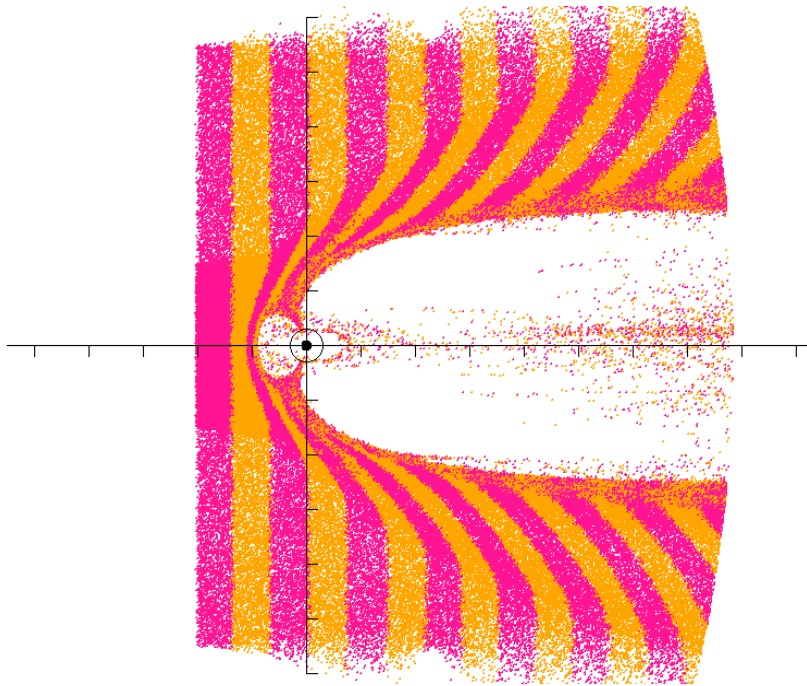
第 3-2 図、太陽高エネルギープロトンの加速例。地球磁気圏前面に形成されるバウショックでの圧縮に伴う電場により、太陽プロトンは強い加速を受ける。



第 3-3 図、電離圏起源イオンの軌道追跡計算結果。変動する MHD 場（上）において極域電離圏から放出した酸素イオンと水素イオンの粒子軌道を追跡し、磁気圏における粒子エネルギー分布を求めた（下）。電離圏起源のイオンは、磁気圏尾部のプラズマシート周辺で強い加速を受け、エネルギーを上げながら再び地球に向かって対流する。



第 3-4 図、電離圏起源イオンの軌道追跡例。地球近傍の磁場が強い領域では、計算誤差の蓄積を避けるために、粒子運動の旋回位相を積分するスキームに連続的に切り替える。



第3-5図、太陽風プロトンの軌道追跡計算結果（子午面）。太陽風中に蒔いた粒子の軌道を追跡し、それらの粒子のうち子午面近くに到達したものを描いている（目盛は10倍の地球半径で黒丸は地球）。色は粒子を投入した時間の違いを表す。粒子の一部が磁気圏内に侵入し、プラズマシート（x軸上）や環電流（地球近傍）を形成している。

4-4. 磁気圏—電離圏—大気圏結合

磁気圏、電離圏、大気圏の各領域は、強い相互作用のもとでお互いに密接に結合したシステムである。大気圏はさらに下から、対流圏、成層圏、中間圏、熱圏に分けられ、それぞれの間にも相互作用がある。観測データが蓄積してきた現在においても、システム全体としての振る舞いは依然未解明の部分が多い。このような複雑な複合系システムの中で生起される現象の本質的理解には、これらの領域を矛盾なく含む数値シミュレーションが極めて有効な手段である。しかしながら、このシステム全体を一つのモデルで完全にシームレスにモデル化するのは原理的には可能であるが、効率的な方法ではない。そのため近年では、領域毎にその特性に合った最適の数値モデルを構築し、それらの間で情報を交換することによって領域間の相互作用過程を含める手法が主流となっている。米国では既に、磁気圏から電離圏、熱圏領域までの結合モデルについて、試験的なものが構築されており、研究や宇宙天気予報にも利用され始めている。

我々は、「リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ」の開発の中で、磁気圏-電離圏-熱圏結合モデルを開発し、2008年からリアルタイム運用を開始し、結果をWebで公開するとともに、これを用いた研究も行っている。しかし、このモデルは下層大気から伝搬してくる波動を含むことはできないため、別途、電離圏-大気圏結合モデルを開発するとともに、これを磁気圏モデルに結合することによって、磁気圏から電離圏、さらに下層大気的气象現象までを含む世界初のモデルの開発を進めている。

電離圏-大気圏結合モデル

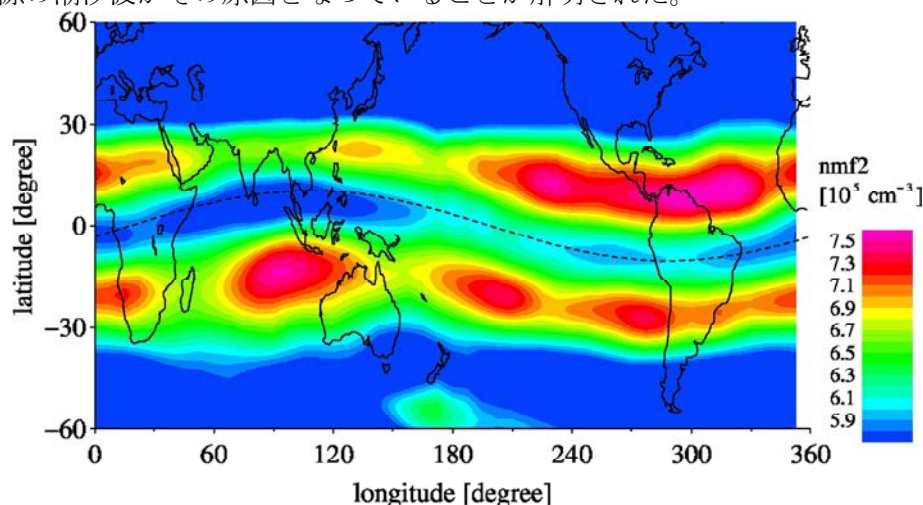
超高層大気は高度 80 km 以上の中性気体と電離気体が混在した領域である。そのため、この領域の数値シミュレーションを行うためには、中性大気（熱圏）と電離大気（電離圏）を両者の相互作用を含めて記述するモデルが必要である。さらに、太陽放射や磁気圏からのエネルギー流入など上方からの影響に加え、下層大気から超高層大気へ伝播する大気波動の影響も考慮に入れなければならない。

我が国では最近、九州大学と東北大学との共同研究によって、世界で初めて地上から熱圏上部までの全大気圏領域を含んだ拡張大気大循環モデルが開発された。本研究では、この拡張大気圏モデルをさらに改良し、NICT で開発された電離圏モデルとの結合を試みた。その結果、世界初となる地表から電離圏までを同時に含めた大気圏-電離圏統合モデルの初期版の開発に成功した。このモデルにより、電離圏の基本構造、下層大気の波動や磁気擾乱による電子密度変動などを再現することができるようになった。シミュレーション結果の解析により、これまで観測データから推測されてきたことが、実際に理論的に裏付けられるようになっただけでなく、これまでの解釈を変更する点があることなどもわかってきた。

この研究では、まず、電離圏の赤道異常と呼ばれる構造とその変動を調べた（第 4-1 図）。赤道異常とは、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、大気運動に起因する電場の効果で、プラズマが上下に輸送されることが原因とされてきた。しかし、この現象を大気圏との相互作用を厳密に含めて再現できるモデルはこれまで存在していなかった。今回我々は、対流圏から熱圏まで含めた大気の運動を再現し、その大気運動を起電力として電離圏電場を計算できるモデルを開発した。それに加えて、光電離によるプラズマ生成、極域の電離圏へのエネルギー注入などの影響を全て合わせてシミュレーションを行い、電離圏変動を求めた。このことは、赤道異常の発生過程に全く仮定を含まず、電離圏変動をモデルの中に自己無撞着に再現できるようになったことを意味している。

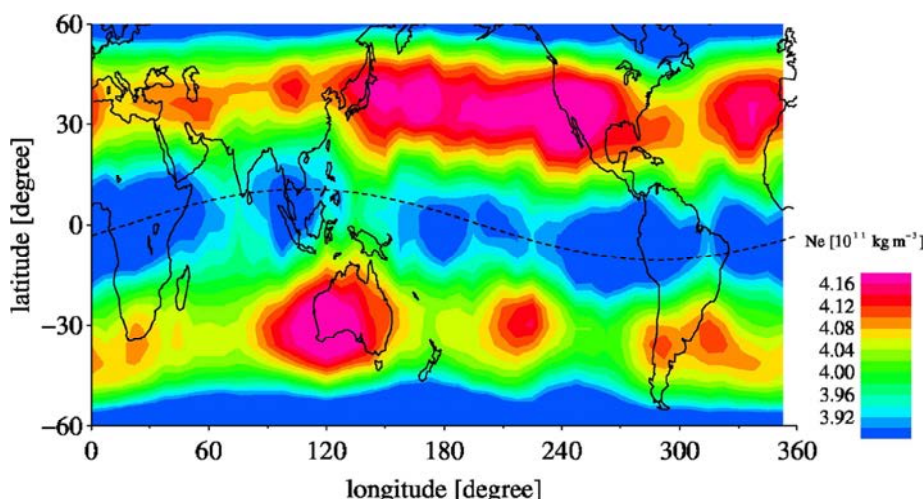
再現された赤道異常の時間的・空間的な変動は、日々変動や地形に対する依存性を含み、観測と見紛うほどリアルなものとなった。さらに、大気圏での地球規模波動の励起、上方伝搬、減衰などは地形の影響を受け、これが電場を通して電離圏でのプラズマ運動に影響を与えるため、電離圏にも地形の影響が現れることがわかった。特に、

経度方向に4つのピークが見られる現象は、近年、観測でも報告されており、そのメカニズムは十分に解明できていなかったが、今回、熱圏領域まで伝搬してくる下層大気起源の潮汐波がその原因となっていることが解明された。



第4-1図. 大気圏-電離圏結合シミュレーションで得られた電離圏電子密度ピーク (nmF2) の分布。6日間の平均をとったもの。磁気赤道 (点線) の両側にピークが現れる「赤道異常」が再現されているほか、経度方向に4つのピークを持つことが分かる。この構造は、人工衛星による観測で実際に確認されている。

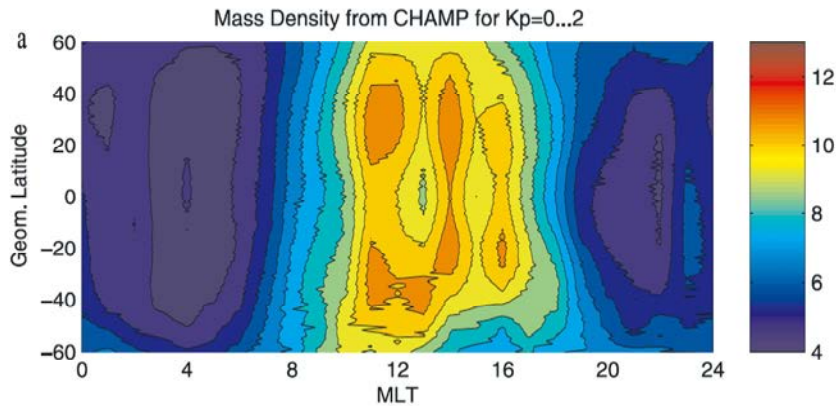
次に我々は、熱圏の中性大気密度の分布についても調べた。第4-2図は、中性大気密度の分布であるが、電離圏の赤道異常と同じような構造が見られる。この中性大気の赤道異常は、実際に CHAMP 衛星で観測されている (図3)。本来、電磁場を感じないはずの中性大気が、地理赤道ではなく、磁気赤道の両側に対称に分布するのは、非常に驚くべきことである。当初、この観測結果があまりにも常識とかけ離れていたため、測定上の問題ではないかという指摘もあったが、本研究のシミュレーションで、この中性大気の赤道異常が見事に再現され、その存在は疑いのないものとなった。



第4-2図. シミュレーションで再現された中性大気密度の「赤道異常」と経度方向の波数4のピークの構造。6日間の平均をとったもの。中性大気密度が磁気赤道の両側にピークを持っていることがわかる。

この中性大気の赤道異常の詳しい生成メカニズムについては、現在詳細な解析を行

っているが、これまでの解析では、大気圏自体が地理赤道の両側に密度のピークを持つ傾向があることに加え、イオンと中性大気の相互作用によって、磁気赤道の両側に動かされる効果が重なった複合的な要因によってこのような構造が形成されることが明らかになりつつある。第4-2図のシミュレーションの中性大気密度も電離圏電子密度と同様に、経度方向に波数4のピークが存在する。このピークは、地形に固定された構造であり、地形によって励起された潮汐波が上方に伝搬した結果形成された構造であることがわかった。



第4-3図. CHAMP衛星によって観測された中性大気の赤道異常。カラーコンターの単位は、 $10^{-12} \text{ kg m}^{-3}$ 。一年間の観測で磁氣的に静穏な場合の平均を表している [Liu et al., 2009]。縦軸に磁気緯度、横軸に地方時をとっているため、図2と直接の比較はできないが、磁気赤道の両側に中性大気密度のピークがあることが確認されている。

さらに次の段階として、我々は、長年未解決であり、近年注目されてきた気象活動と電離圏との関係や、電離圏日々変化のメカニズムの解明、長期の気候変動と超高層大気の関係の解明を目指している。下層大気の二酸化炭素の増加が熱圏や電離圏を変動させるという示唆もあるが、シミュレーションによってこれを調べることも可能である。さらに、将来的には、リアルタイムの気象データ（客観解析データ）を入力とし、データ同化の手法も取り入れ、超高層大気の数値予測システムの構築に挑戦する予定である。

リアルタイム磁気圏-電離圏-熱圏結合シミュレーション

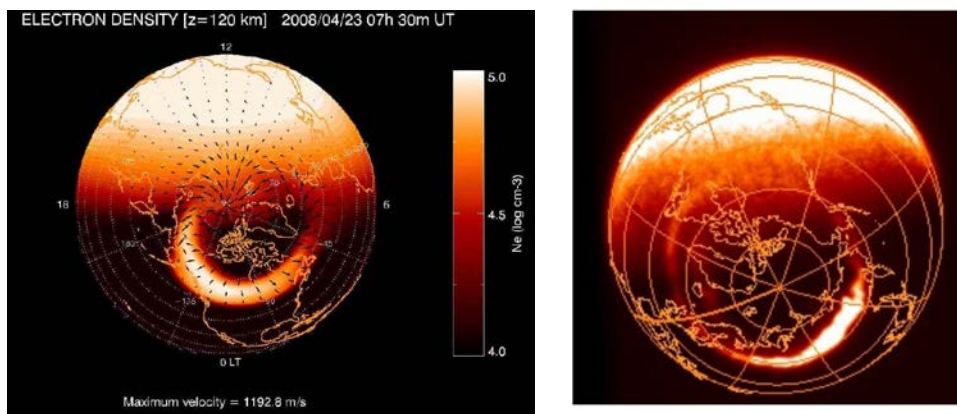
磁気圏変動に対する電離圏の応答と電離圏変動の磁気圏へのフィードバック過程、すなわち磁気圏-電離圏相互作用過程は、未だに解明されていない大きな課題である。この問題に関しては、数値シミュレーション研究が非常に有効な手段であるが、モデルの結合においては、お互いの情報をどのように交換するかが問題となる。特に、磁気圏からのオーロラ粒子降下による電離に対応する極域電離圏電気伝導度をどのように与えるかが重要となる。我々の磁気圏モデルでは、球殻状の電離圏を仮定して、磁気圏内部境界 ($r=3.5 \text{ Re}$) のパラメータを電離圏上に投影している。電離圏の電気伝導度は高度積分値で与えられ、(1) 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 P , ρ の関数とする)、(3) ディスクリッ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。

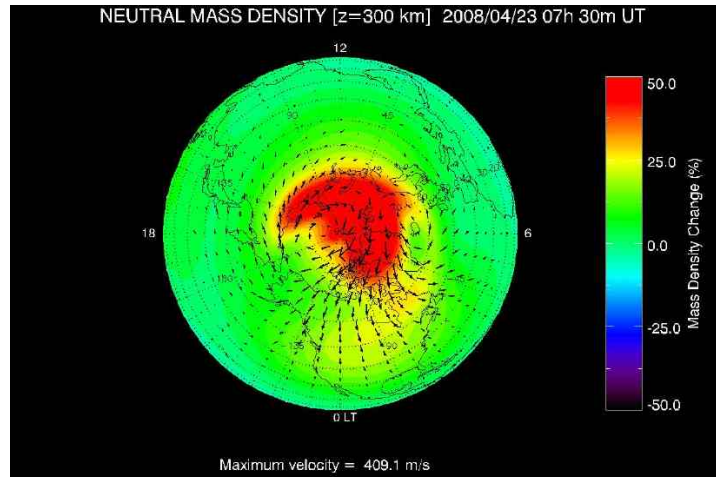
極域の電位も電離圏にとって重要なパラメータであるが、磁気圏モデルから直接与えられるので、これを電離圏モデルの極域電場の入力として用いている。昼間側の EUV による電離成分については、電離圏モデル中で計算された値を用いている。この方法により、太陽風を入力とすることにより、電離圏、熱圏の状態をリアルタイムで再現できるモデルを実行することができる。

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。第 4-4 図(左)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擾乱が発生し、電離圏の擾乱も発生した。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、大まかな構造は第 4-4 図(右)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。



第 4-4 図. (左) 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。(右) 人工衛星で宇宙から撮影したオーロラ画像。左図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。

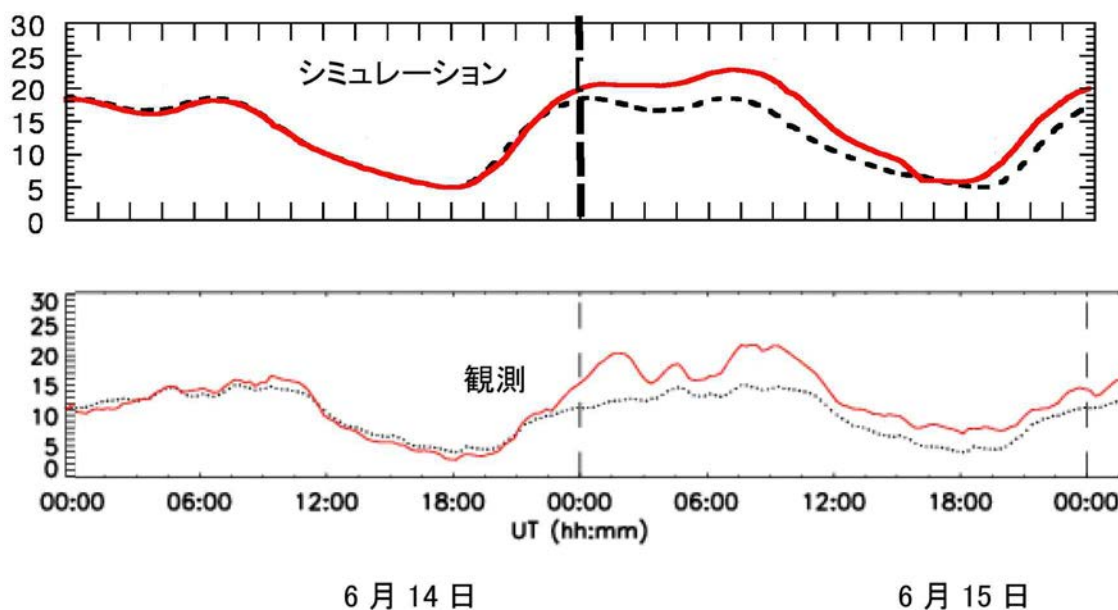
第 4-5 図は、第 4-4 図と同じ時刻での高度 300 km の熱圏の温度上昇量と風速である。いずれも静穏時大気からの変動量を表している。磁気嵐が起きると、極域で太陽風のエネルギーが超高層大気に流入して、熱圏と電離圏の温度が大きく上昇する。この加熱により、極域の熱圏の圧力が増大し、極から赤道方向への強い風が励起される。この風は、電離圏を押し上げる効果があり、中緯度の電子密度の増大を引き起こす。これは電離圏正相嵐(ポジティブストーム)と呼ばれるものである。



第 4-5 図. 北半球の高度 300 km 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。

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、宇宙天氣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第 4-6 図に示す。この擾乱は、2008 年 6 月 15 日に起こったものである。このイベントでは、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。擾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。



第4-6図. 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日終わりにから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。

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いつつ、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なっている。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擾乱に対して、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。

実際の宇宙天気予報では、半日から数日程度の予報が求められるが、それには太陽風の数値予報が不可欠となる。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の検証を行っている段階である。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可能と思われる。太陽活動はまだ極小期であるが、2013年頃に予想されている次期太陽活動極大期に向けて数値予報技術の研究開発を進め、「宇宙天気数値予報システム」につなげる予定である。

4-5. 太陽-太陽風シミュレーション

磁気圏-電離圏結合系は、太陽風の変動によってコントロールされるので、宇宙天気を予測するには太陽風の予測が不可欠である。太陽風は太陽コロナのプラズマが重力を振り切って、超音速流となって惑星間空間に流失したものである。太陽コロナの構造は太陽磁場に強く影響されるので、観測から得られた太陽表面の磁場を境界条件とし、太陽コロナを再現する。それから太陽風が発生する過程を計算し、太陽から地球軌道にいたる領域の太陽風を再現する。

太陽風シミュレーションの基礎方程式はMHD方程式であるが、重力、太陽回転、コロナ加熱、熱伝導を加える必要がある。これらを加えた方程式は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (5-1)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + P \mathbf{I} + \frac{B^2}{2\mu_0} \mathbf{I} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{\mu_0} \right) = \rho \mathbf{g} - 2\rho \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} - \rho \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}), \quad (5-2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0, \quad (5-3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\mathbf{v} \cdot \left(U + P + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) - \frac{\mathbf{B}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{B})}{\mu_0} \right] = -\nabla \cdot \mathbf{q} - \rho \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) + \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{g}, \quad (5-4)$$

$$U = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{P}{\gamma - 1} + \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (5-5)$$

となる。ここで \mathbf{g} は重力加速度、 $\boldsymbol{\Omega}$ は回転角速度、 \mathbf{q} は熱フラックス、 \mathbf{r} は位置ベクトルである。熱力学過程には、磁場形状に依存したコロナ加熱と磁場に沿った熱伝導を考慮する。それらは

$$\nabla \cdot \mathbf{q} = q_0 (r - 1R_s) e^{-r/L} + \nabla \cdot \left(\xi T^{2.5} \frac{\nabla T \cdot \mathbf{B}}{B^2} \right) \cdot \mathbf{B}, \quad (5-6)$$

$$f_{s'} \equiv \left(\frac{r_s}{r_{s'}} \right)^2 \frac{B_{rs}}{B_{rs'}}, \quad (5-7)$$

と表せる。ここで、 L は加熱率の半径分布を決める定数、 ξ は熱伝導を決める定数である。 s は太陽表面、 s' は磁場に沿った座標であり $f_{s'}$ は磁場拡大率となる。 q_0 は $f_{s'}$ に反比例するとして計算する。このモデルでは太陽面に一様な熱源の元があり、それが磁場に沿ってコロナに伝搬し、コロナ中で散逸して熱源となるという過程が想定されている。従って、太陽磁場の拡大率が大きいところでは、相対的に加熱率が小さくなる。

太陽コロナの構造は太陽磁場の影響を強く受けるので、観測された太陽面磁場分布を境界条件とし、コロナの構造を計算することが必要である。この手順は第5-1図に示されるように、観測ではゼーマン効果を観測して正面子午線の太陽面視線磁場を求め、これを一太陽回転分編集して視線磁場マップを作る。このマップが計算の内部境界条件となる。なお太陽は一回転ごとにCR数がつけられており、このCR数で期間を識別することが多い。CR数ごとに編集されたデータは公開されているので、計算にはこれを用いる。太陽面観測を正確に取り込むためには、球面を正確に表現する格子が必要であるので、正12面体分割による特異点除去格子を用いた。計算で用いられる全ての境界条件を纏めると表5-1のようになる。

このようなモデル化によって、太陽—太陽風シミュレーションは、十分な安定性を保って実行可能となり、太陽風発生の原因となる熱力学過程を含むモデルとして、コロナ構造、惑星間空間の太陽風と磁場の構造を再現することが出来た。第5-2図にCR2028の期間に対して計算されたコロナ構造を2つの角度から見たものと、同一期間、同一角度から見たX線画像を示す。この図では、シェーディングは下部コロナの温度、線は太陽磁場、線の色は温度を表す。磁場

TABLE 5-1. boundary condition of the MHD equation

distance form the Sun	1Rs	200Rs
Density	Fix	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$
velocity (parallel)	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	
velocity (perpendicular 1)	0	
velocity (perpendicular 2)	0	
B (radial)	Observation	
B (tangential 1)	$\frac{\partial}{\partial r} = 0$	
B (tangential 2)		
U	Fix	Fix(P→0)

構造を見ると、太陽から出た磁場が惑星間空間に向かって伸びている(開磁場)ところと、太陽から出た磁場が再び太陽に戻る(閉磁場)ところがあることが分かる。大きな構造の閉磁場が連続して並んでいる構造が見えるが、このような構造は双極子磁場であったら赤道に形成すると期待される。このような観点から図を見ると、磁場に関する赤道が、ちょうど野球のボールの縫い目のように並んでいるのが分かる。磁場に関する赤道面から遠いところでは、開磁場が卓越し、ここではプラズマが惑星間空間に逃げ出すことが出来、これが太陽風の出口となる。ここでは太陽風によって熱が運び出されるため、コロナは低温である。観測と比較すると、この低温の部分はコロナホール(X線像で暗く見えるところ)に対応していることが分かる。よってコロナホールが太陽風の出口となることになる。大きなコロナホール上空では、磁場の拡大率が小さく、従ってコロナ加熱が大きく、太陽風は高速になる。これに対し、閉磁場では惑星間空間に熱が逃げられないため、コロナが高温となる。この領域では、磁場に沿った熱伝導のため熱は下層に逃げ、加熱とのバランスで温度構造が決まる。

第5-3図に、惑星間空間の太陽風分布を示す。太陽から延びる磁場は、太陽から出てくるもの(away)と、太陽に向かうもの(toward)があるので、地球付近で観測される惑星間空間の磁場分布は、towardとawayの2種類で塗り分けられる。この塗りわけ構造はセクター構造と呼ばれる。セクターの切り替わりは閉じたコロナ磁場の(付近の)延長に位置するので、低速である。回転が無ければ、セクターの中央付近に高速流が位置するはずであるが、共回転相互作用のため高速流が低速流に追いつくような効果が生まれ、高速流はセクター境界通過の直ぐ直後に来るようになる。またセクター境界や磁場は回転のため湾曲し、これはパーカースパイラルと呼ばれる。

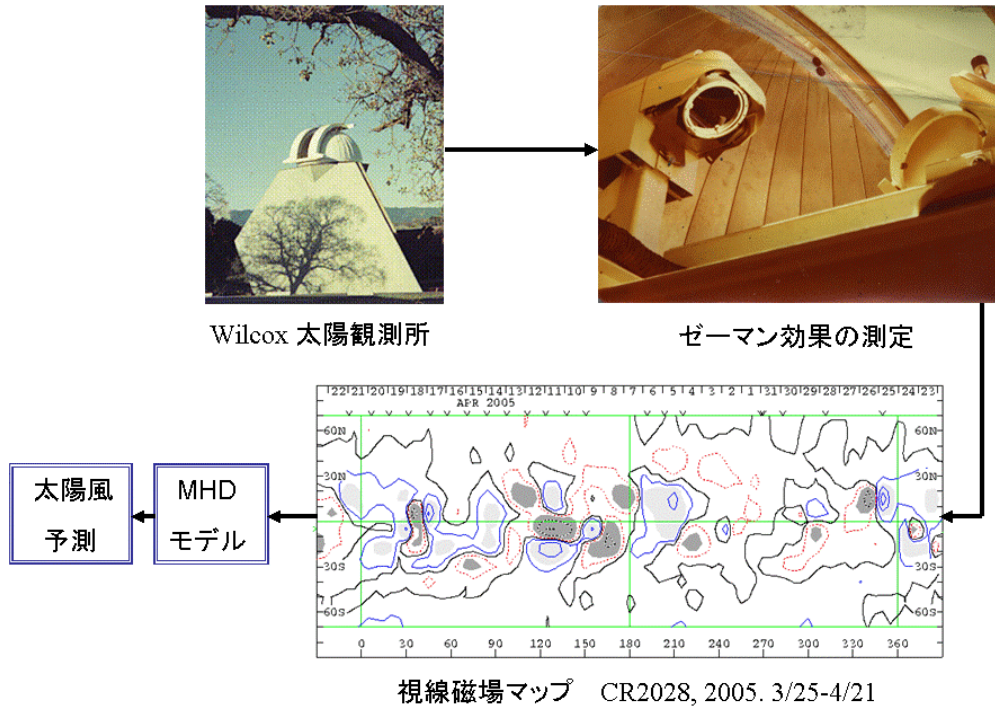
高速・低速太陽風が共に再現でき、地球軌道での太陽風変動の予測が出来るようになると、これを予報に応用することが出来る。第5-4図に、CR2028の期間について、ACE衛星による実際の観測と予測を比較した結果を示す。第5-4図では、速度、密度、温度、磁場強度、磁場セクターなどの比較がされているが、実測と予測で大体の傾向はあっているものの、細部を見ると食い違いも見えするという結果になっている。大きな傾向として、主要な高速風の期間が3つあり、高速風到来の前にセクターの切り替わりと密度上昇が見られ、これは共回転相互作用領域(CIR)と呼ばれるものである。この構造は定性的には再現されている。しかしながら、速度の絶対値は合っていないところも見られる。3番目にやってくる高速太陽風を伴わない小さなセクターは、正確に再現されている。

現在では子午線が地球正面に来る前の磁場観測も可能で、このような観測からは本格的な

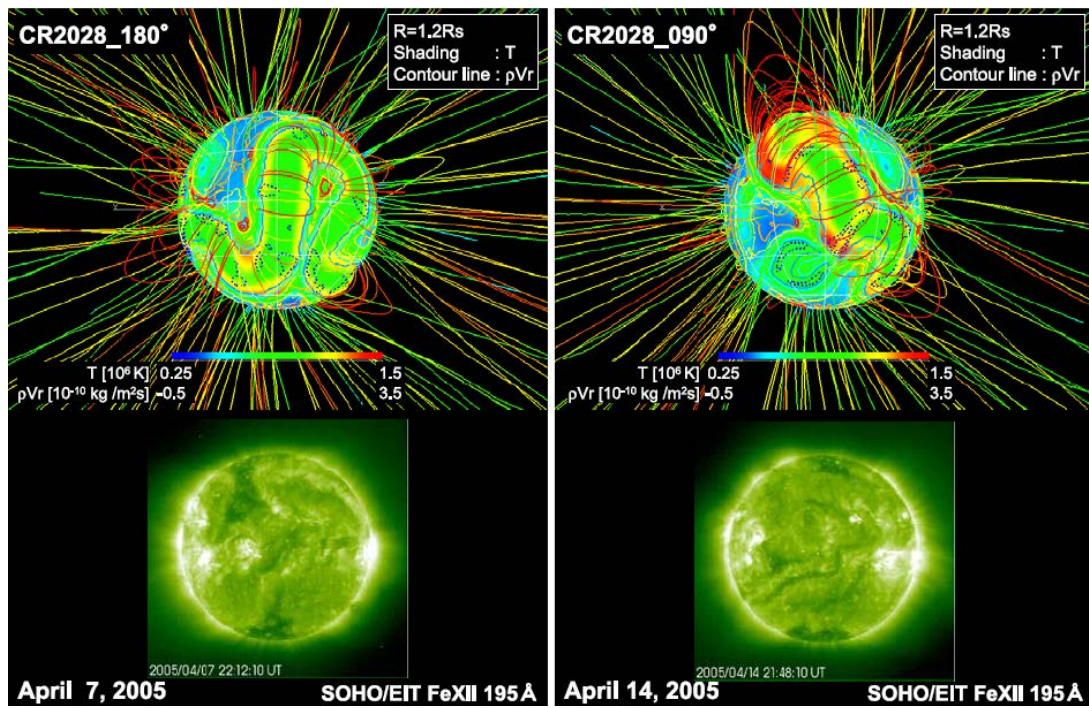
予測も出来る。これらを用いたシミュレーションによる予測値は、情報通信研究機構(NICT)でリアルタイム表示されている。しかしながら定常的に運用した結果では、時として予測結果が実測と大きく合わない場合もあり、このような時は磁場のセクター構造も合わないことが分かった。現在この点を検討中で、このため太陽活動周期(11年で太陽活動が活発になったり低調になったりする現象)の全てに亘って、条件が大きく異なるさまざまな場合を計算し、計算と観測が合う場合と合わない場合の違いを調べている。

以上の結果から、地球軌道で観測される太陽風と、太陽コロナ構造の間には密接な関係があり、この関係を十分な精度をもって再現することが、正確な予報の基礎になることが分かる。そこで太陽風とコロナの関係をさらに良く理解するため、以下にCR1913 期間を計算した結果を示す。CR1913 は太陽活動が極小であった期間に当たり、WSM(whole Sun Month)と名付けられている。この時はさまざまな共同観測が集中して行われ、極小期の太陽風と太陽コロナの関係が総合的に調べたことと知られている。第 5-5 図に CR1913 期間の X 線画像を示すが、象の鼻と呼ばれる特徴的なコロナホールが存在するのが見られる。この象の鼻がどのようにして出来たかを示したのが、第 5-6 図である。第 5-6 図に描かれているものは、座標軸(白線)、太陽面(緑の球)、地球軌道に到達する磁力線(赤い線)、下部コロナの温度(等高線)、磁場が太陽面に対して水平になる場所(等値面)、赤道での太陽風速度(シェーディング)である。等高線は太陽面よりやや上空で描かれており、等高線より低高度の領域も透けて見えるようになっている。また磁場が太陽面に水平ということは、磁場の半径成分がゼロであることを意味し、磁場の toward と away の境界面を示していることになる。この面を、磁気中性面と呼ぶ。磁気中性面は惑星間空間に張り出し、地球がこの面の上にくるか下にくるかでセクターが変わるので、この面が惑星間空間のセクター構造に対応する。磁気中性面の近くに磁場は閉じているから、磁気中性面近くからは太陽風は発生しないことになる。従って、赤い線(地球軌道から逆にたどった磁力線)を太陽面にたどって行くと、磁気中性面を避けるように太陽面に到達する。そして赤い線が到達する領域のコロナは低温(コロナホール)である。象の鼻が形成される領域を見ると、磁気中性面が赤道付近から高緯度に遠のいている。そのため、東(左)側に磁気中性面が連なる。また西(右)側にも磁気中性面があるが、この磁気中性面は惑星間空間には張り出さず、太陽面近傍で閉じているものである。しかしながらこのような磁気中性面もコロナホール形成に影響しており、太陽風の出口を制限しているのが分かる。象の鼻では赤道付近にコロナホールが出来ることになり、赤い線も赤道付近の太陽面に到着するが、これ以外の場所では、磁気中性面を避けるように高緯度の太陽面に到着する。このような状況においては、磁場の拡大率の効果で、高緯度の磁力線と共に低速太陽風、低緯度の磁力線と共に高速太陽風がやってくるので、コロナホールが正面に来ると、高速太陽風が出て、これが2、3日後の地球にやってくることになる。このようにシミュレーションによって、コロナ構造と地球での太陽風の関係が分かり易く可視化できることが分かる。

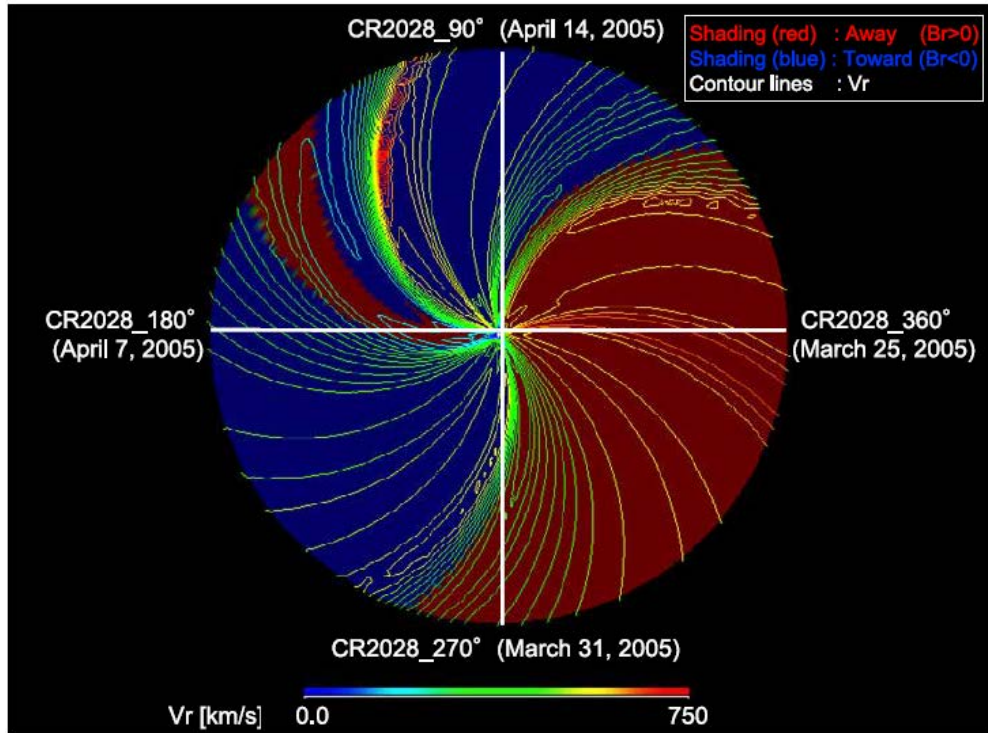
太陽-太陽風シミュレーション



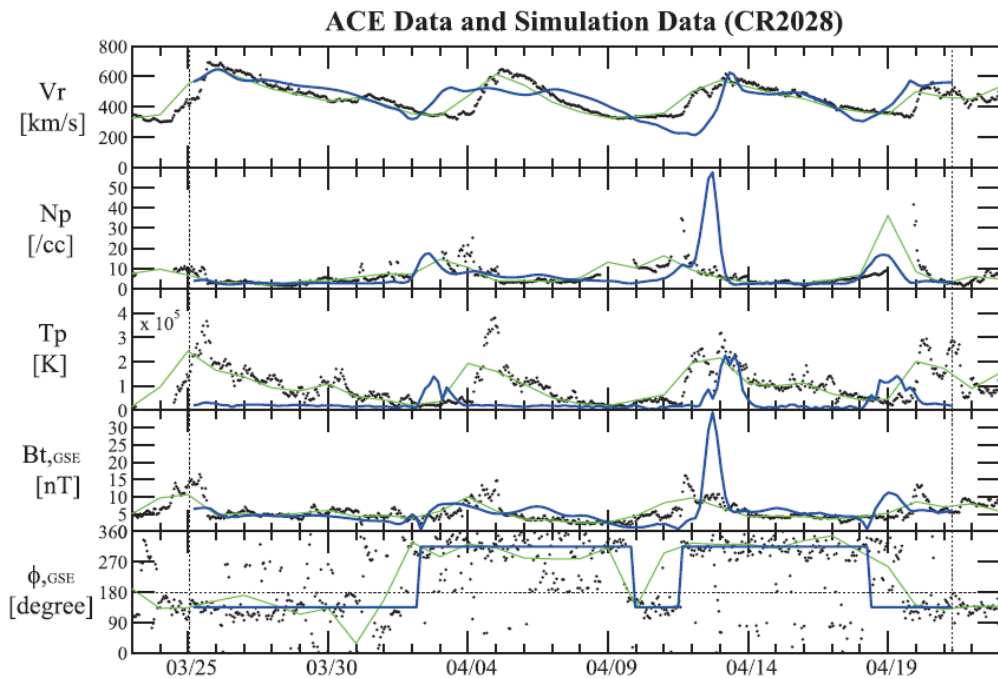
第 5-1 図、太陽シミュレーションの手順。磁場観測から視線磁場マップを作り、これを境界条件としてシミュレーションを行う。CR 数は太陽の回転ごとに付けられる数。



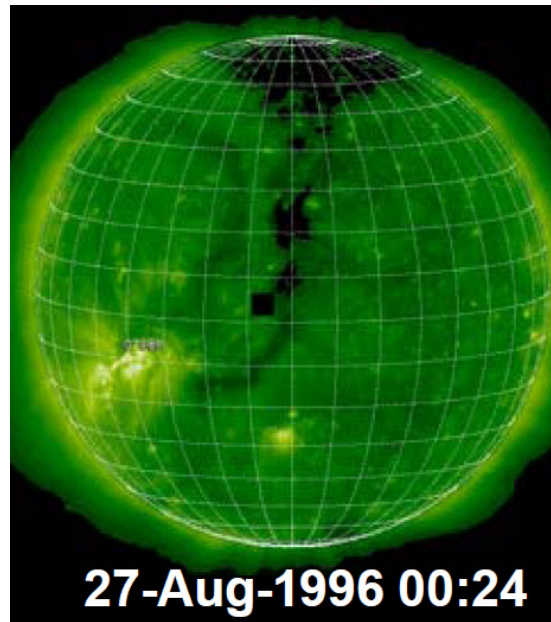
第 5-2 図、コロナ磁場、温度構造と、観測との比較。線は磁場、球面上と磁力線場上の色は温度を表す。観測(X線画像)で暗いところは、コロナホールと呼ばれ、太陽風の出口になる。



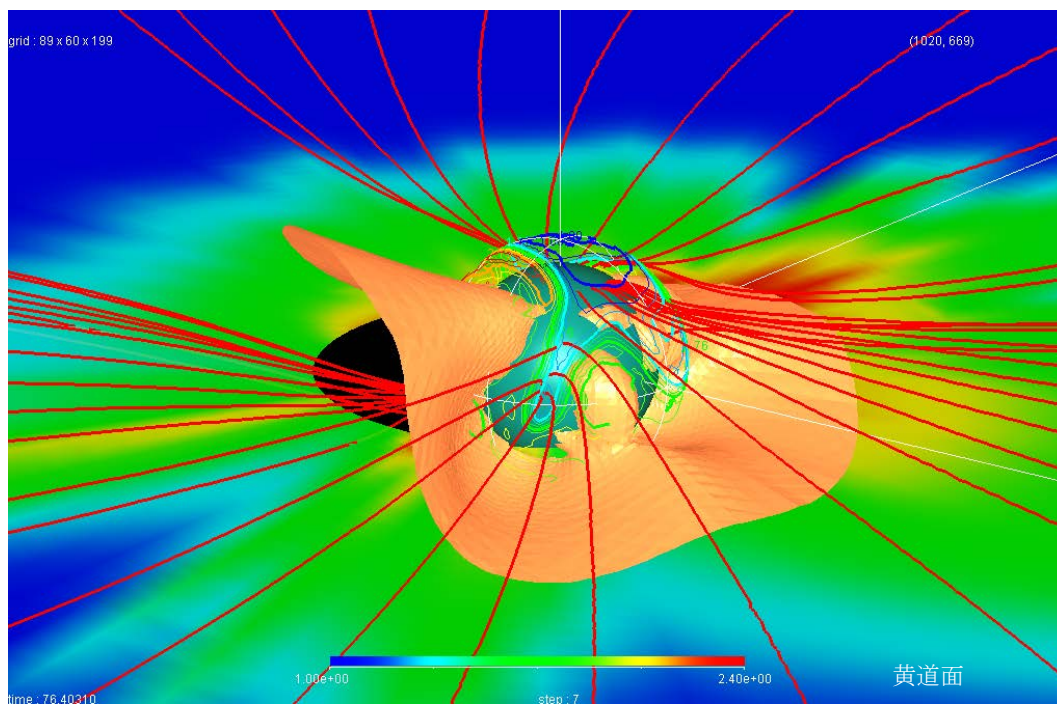
第 5-3 図、惑星間空間の構造(黄道面)。色はセクター、等高線は速度を示す。外周は地球軌道にあたる。セクター境界などの湾曲は、パーカースパイラルと呼ばれる、回転効果である。



第 5-4 図、計算と観測の、地球軌道での比較(時間変動)。上から、速度、密度、温度、磁場強度、セクター構造を示す。計算は青線、観測は点、観測の平均値は緑線で示す。高速風の前に高密度で磁場の強い領域があり、これを共回転相互作用領域(CIR)と呼ぶ。これは回転効果で、高速風が低速風に追いつくことによって出来る領域。



第 5-5 図、WSM 期間(1996年)における太陽 X 線像。象の鼻と呼ばれる特徴的なコロナホールが観測されている。象の鼻が正面より多少西に来た時に高速太陽風が地球にやってくる。



第 5-6 図、WSM 期間中の太陽コロナと太陽風の構造を可視化した図。白線は座標軸、青球は太陽面、橙の面は磁気中性面、赤線は地球軌道から辿った磁力線、等高線は下部コロナ温度、シェーディングは赤道面の速度を示す。等高線より下側が見えるので、象の鼻が出る原因が、磁場構造(磁気中性面分布)にあることが良く理解できる。

4-6. 惑星シミュレーション

これまでに地球磁気圏シミュレーションと太陽シミュレーションのために開発してきたコードを応用して、太陽風と惑星相互作用の研究を進めた。これらの研究は大きく分けて磁化惑星の場合と非磁化惑星の場合がある。

まず磁化惑星の場合では木星を取り上げ、惑星の回転（自転）効果が卓越する木星磁気圏—電離圏結合系において、系の構造およびダイナミクスがどうなるかを計算した。その結果、磁場が太陽風の動圧によって閉じ込められて磁気圏が出来るところは地球とさして変らないものの、磁気圏内のエネルギーの流れと、それを反映した電流構造は大きく異なることが分かった。第6-1図は、太陽風—木星相互作用によって形成される電流系を表す。電流の各要素（磁気圏の閉じ込め電流、双極子中の環電流、電離圏に繋がる沿磁力線電流、プラズマ中の磁化電流など）は地球と似ているものの、相互の接続が地球の場合と異なり、木星の回転を電離圏から磁気圏に伝えるような構造になっている。沿磁力線電流は低緯度側では上向き（電離圏から磁気圏に流れ出す向き）で高緯度側では下向き（磁気圏から電離圏に流れ込む向き）に流れる。木星のオーロラは電子の降り込みにより生じると考えられているので、上向き沿磁力線電流が電離圏から流れ出す位置が木星メインオーロラオーバル領域に対応する。シミュレーション結果から得られた木星オーロラの位置は観測結果と良く一致し、電流密度の計算値 $\sim 1 \mu\text{A}/\text{m}^2$ も先行研究の見積りと一致する結果が得られた。中低緯度の電離圏から流れ出す上向き沿磁力線電流は、木星を取り囲む構造を持つ。第6-1図に橙色で示した上向き沿磁力線電流は、20木星半径まで伸びたところで東向きに方向を変え、東向き環電流を形成する。電離圏から流れ出す沿磁力線電流のうちの幾つかは先ず真夜中の環電流と繋がり、その後朝側から夕方側に流れるChapman-Ferraro電流に接続する。このChapman-Ferraro電流は夕方側赤道面に到着した後二手に分岐する。一部は夕方側から朝側に流れるプラズマシート電流に接続し、他は昼側低緯度磁気圏界面の夕方側から朝側に流れるChapman-Ferraro電流に接続する。木星磁気圏におけるプラズマの圧力が高い領域は50木星半径まで及び、特に高圧で $-\nabla P + \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$ を満たす領域が25木星半径の真夜中付近に形成される。これは木星の環電流が空間非一様であることを示している。第6-2図は赤道面における共回転率、プラズマの圧力分布、木星から伸びる磁力線を示す。本シミュレーションにより、回転角運動量を磁気圏に伝える反作用として、プラズマの一部が木星回転より速く回るスーパーローテーションが発生することが分かった。木星磁気圏のプラズマは50木星半径まで共回転しており、35木星半径の真夜中から朝側にかけてスーパーローテーションが見られる。30木星半径の真夜中付近に圧力ピークが存在し、一般的な傾向としてスーパーローテーションは共回転の経路沿いに圧力が減少する領域に現れている。図中の磁力線の色は $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ の値を表し、赤色は $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ が正の値、青色は $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ が負の値を示す。 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ の値は、ダイナモ領域（ $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ が負）と電磁エネルギーが消費される領域（ $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ が正）の特定に用いることができる。木星磁気圏内においてダイナモ領域は30木星半径の朝側から昼側にかけて見られる。この領域ではプラズマ圧力が共回転に伴い仕事を行っている。35木星半径付近のスーパーローテーションの成因は、同径方向の対流も関係しているが、 $\mathbf{J} \cdot \mathbf{B}$ が負の領域もその一因を担っていると考えられる。プラズマの圧力分布は磁場と電流の構造とバランスするように決定されるので、木星磁気圏における沿磁力線電流、環電流、プラズマ圧力、速度場は、共回転過程を通じて自己無撞着に決定され、シミュレーションによる数理解析が非常に有効な手段となる。本シミュレーションでは他にも興味深い現象が多数確認されており、例えば磁気圏の夜側において夜中から朝側にかけて放出されるプラズモイド（磁場の塊）はその一例である（第6-3図）。

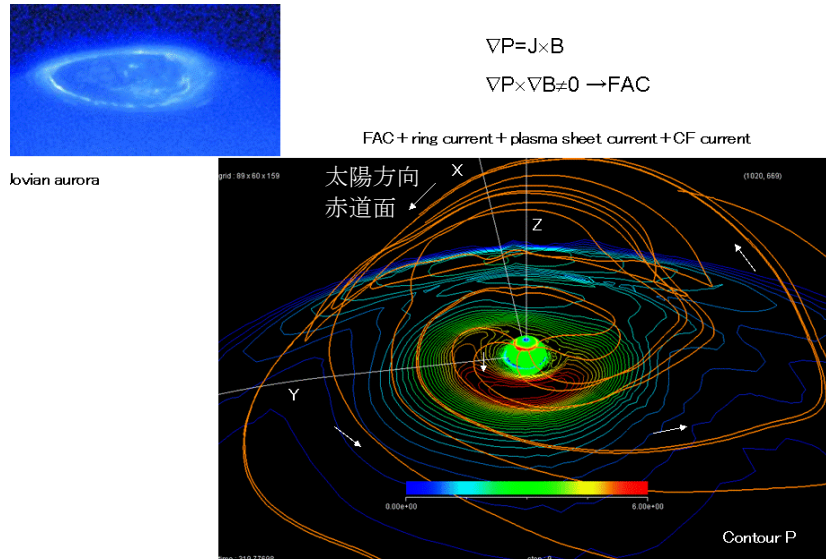
このように木星は高速で自転するため、木星大気・電離圏からの角運動量輸送が磁気圏ダイナミクスに大きな影響を及ぼす。一方で、熱圏や電離圏も逆に磁気圏からの影響

を強く受けており、木星熱圏—電離圏—磁気圏は複合系を形成する。そこで、磁気圏—電離圏結合に加えて、熱圏大気との相互作用も解くモデルを新たに開発し、木星熱圏—電離圏—磁気圏複合系における大気運動と電流分布の調査を行った。熱圏領域の主要な物理・化学過程を組み込んでプリミティブ方程式を解き、二次元の熱圏大気運動・温度分布を求めた。第6—4図に木星熱圏・電離圏—磁気圏結合シミュレーション結果を示す。熱圏大気は、高速自転に起因するコリオリ力等に拘束されつつも、沿磁力線電流分布と熱圏速度・温度分布の対応にみられるように、磁気圏—電離圏結合からの影響を強く受ける。一方で、磁気圏の対流を反映する電場強度は、熱圏大気との相互作用によって減少し(メインオーロラオーバル領域では22%の減少)、そのうちの約90%が高度550 km以下の大気運動に起因することが分かった。

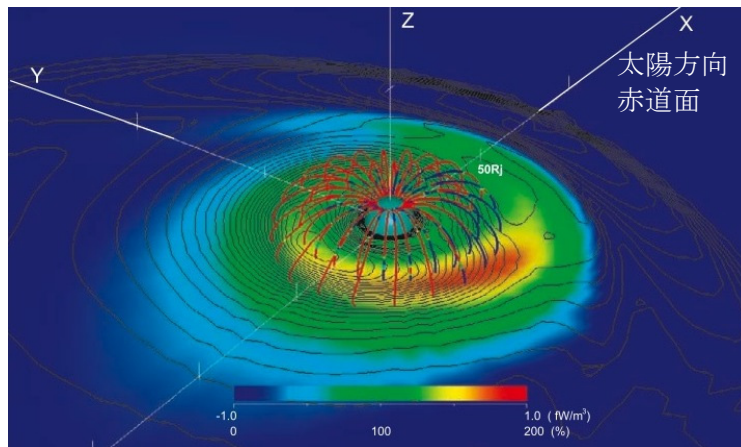
非磁化惑星の場合ではまず金星を取り上げ、太陽シミュレーションで用いた正12面体分割による特異点除去格子を適用して、これまでのモデルをはるかに凌ぐ高精度解を得た。惑星の電離圏領域も同時に高精度で解くために、全格子点の半数近くを電離圏領域に集中し、地球型惑星の超高層で重要となるイオン種と対応する光化学過程を組み込み、プラズマ粘性項・異常粘性項・熱伝導項を新たに導入した。数値単極子の除去には、非磁化電離圏領域における補正誤差の蓄積が少ない双曲型除去法を用いた。第6—5図に、太陽風—金星相互作用シミュレーションの結果を示す(可視化はバーチャルオーロラ三次元可視化ツールを用いて行った)。金星や火星などの非磁化惑星と太陽風の相互作用においては、太陽風中の磁場は惑星電離圏に侵入できず、惑星電離圏に絡みつくように分布する。惑星プラズマが宇宙空間に脱出し惑星大気が進化する過程は、この相互作用に大きく支配される。数値解を解析し、昼側での太陽風と金星電離圏の相互作用、昼側から夜側への電離圏プラズマの輸送、夜側でのプラズマの脱出などに関し、これまでの惑星探査機による観測結果を良く説明する、新たなメカニズムを考察することが出来た。第6—6図は、惑星プラズマの流線と太陽風中の磁場の絡み付きの関係を示す。太陽風中の磁場の絡み付きによって惑星電離圏プラズマが極域に集中するように加速され、一部は宇宙空間に脱出する。シミュレーションで得られた結果は、探査機の観測では捉える事が困難なプラズマの流れの三次元構造を、明瞭に説明することに成功した。また、プラズマ異常粘性の効果が、電離圏対流やプラズマの宇宙空間への脱出に及ぼす影響の定量評価を行った。その結果、粘性効果を含む計算は、含まない計算よりもより定量的に正しく惑星探査機による観測結果を説明することが分かった。太陽風が静穏な状況だけでなく、急変する状況のシミュレーションも行い、コードのロバスト性を示すだけでなく、太陽風の動圧が急変する時の金星電離圏の応答特性が、数十秒から数万秒の幅広い時間スケールを持つことを定量的に初めて示した。太陽風の動圧が増加する時は、数十から数百秒の時間スケールで初期的な圧縮を経た後、数千秒のゆっくりとした時間スケールをもつ大規模磁場の浸透が進み、電子密度の第二ピークが昼側下部電離圏に出現する。一方で、太陽風の動圧が減少する時は、千秒程度の時間スケールを持つ初期的な電子密度の回復に続き、さらに一桁長い時間をかけて浸透磁場が消失する。夜側電離圏は初期的な応答は早い、その後の緩やかな変化は数千秒から一万秒以上かけて行われることが分かった。

我々が開発した惑星シミュレーションコードは、木星や金星だけでなく、太古の時代の惑星や、太陽系外の惑星など、多様な天体に適用可能である。第6—7図は、約45億年前の火星に惑星シミュレーションコードを適用した結果を示す。過去の太陽は、紫外やX線領域の放射が非常に強かったことが様々な年代の主系列星の観測から推測されており、このような強い紫外・X線放射のもとで、火星の大気は現在よりも数倍膨張していたと考えられる。第6—7図の結果は、1000km高度まで電離圏が広がっていたことを示す。また、太陽風との相互作用によって、大規模な惑星プラズマの脱出が生じ、初期の1.5億年間で20—80mの水が火星から失われたという見積りが得られた。惑星シミュレーションコードは、水星のように弱い磁場を持つ惑星にも適用することができる

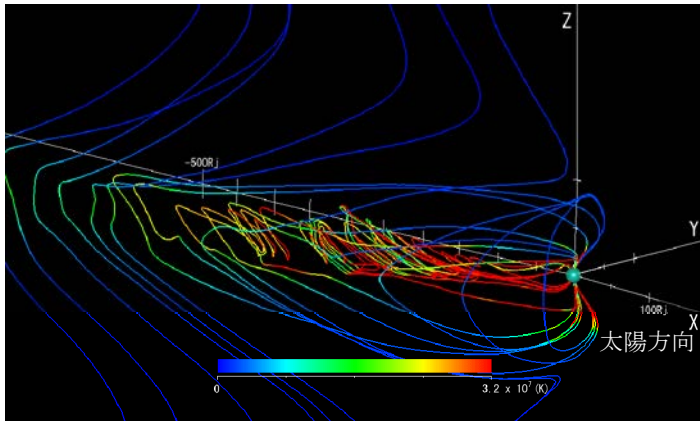
(第6—8図)。弱い磁場を持つ惑星の磁気圏は、その規模が小さく、惑星起源のイオンの生成が磁気圏の広い範囲で行われ、電離圏領域と磁気圏領域が広い範囲で重なる構造が得られた。惑星シミュレーションの結果は、今後進められる惑星探査の計画に生かされる。



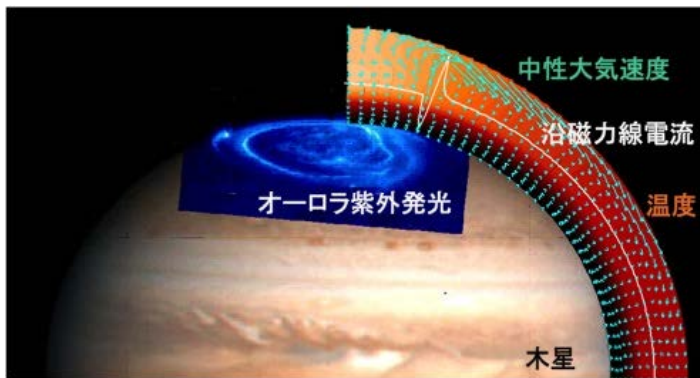
第 6-1 図、太陽風—木星相互作用。木星は高速で回転するため、地球とは異なった電流系を形成する。木星オーロラ（左上）の発生はこの電流系と密接に関連している。橙色の線は電流を、色つき等高線はプラズマの圧力分布を表す。



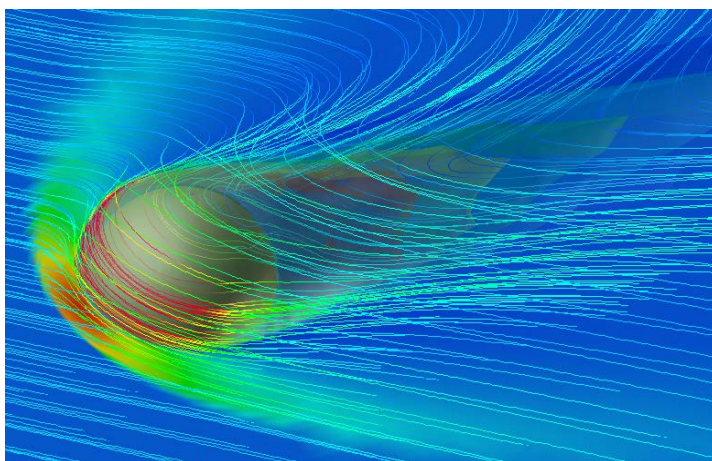
第 6-2 図、太陽風—木星相互作用。木星の自転よりもさらに高速に回転（スーパーローテーション）する領域が、内部磁気圏の朝側に形成される。赤道面の色は共回転率を、赤道面の等高線はプラズマの圧力分布を、木星から伸びる曲線は磁力線を表す。磁気圏尾部とプラズマシートが形成されると、プラズマシート内ではプラズマの圧力傾力と磁場テンションが釣り合う力学構造が成立し、近木星プラズマシートには高圧が発生する(第6-1図)。この高圧は同時に朝方、夕方に向かって圧力傾力を発生するので、これを支える構造が必要である。地球の場合は、領域2沿磁力線電流系がこの役割を果たす。木星の場合は第6-1図の電流系がこれに代わるが、この電流系による高圧の支えは、夕方にしか作用しないので、朝側では圧力傾力が電磁力とバランスせずプラズマを加速して、スーパーローテーションを生じる。



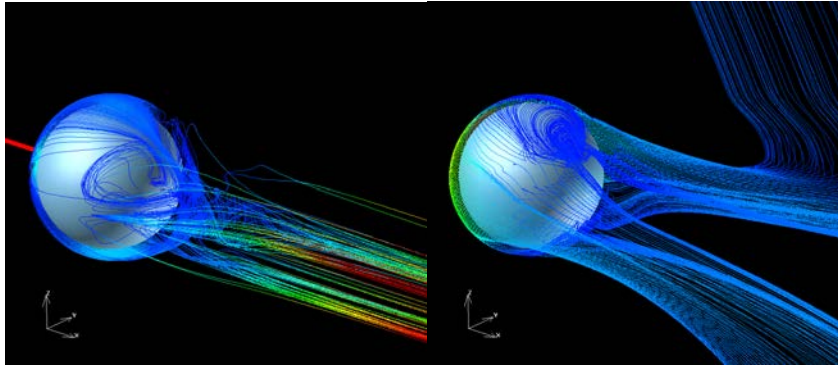
第 6-3 図、太陽風—木星相互作用。夜中から朝側にかけてプラズモイド（磁場の塊）の放出が確認される。色付きの線は磁力線を、色はプラズマの温度を表す。



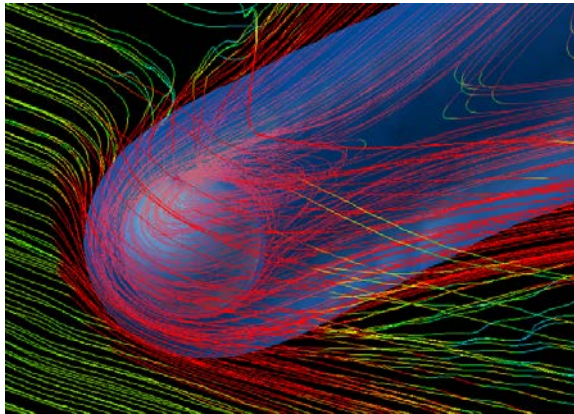
第 6-4 図、木星熱圏・電離圏—磁気圏結合。磁気圏—電離圏結合により生じる沿磁力線電流の分布と、熱圏大気温度と速度の分布の対応を示す。熱圏大気の構造およびダイナミクスは、磁気圏—電離圏結合からの影響を強く受ける。



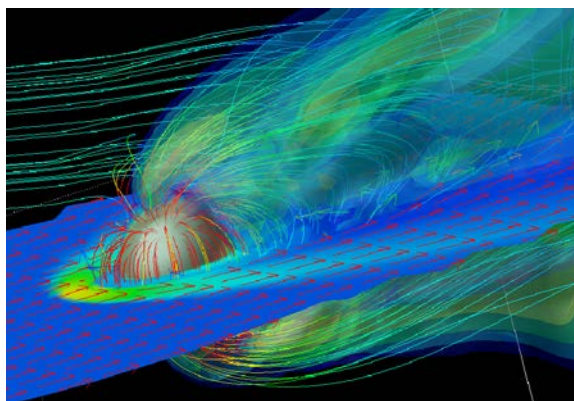
第 6-5 図、太陽風—金星相互作用。太陽風中の磁場は惑星電離圏に侵入できず、絡みつくように分布する。惑星プラズマが脱出し惑星大気が進化する過程は、この相互作用に大きく支配される。



第 6-6 図、太陽風—金星相互作用。惑星プラズマの流線（左）は、太陽風中の磁場（右）の絡み付きによって惑星プラズマが極域に集中するように加速され、一部は宇宙空間に脱出する様子を表す。



第 6-7 図 太陽風—初期火星相互作用。約 45 億年前の火星を数値シミュレーションで再現。太陽風との相互作用によって、大量の惑星プラズマが宇宙空間に脱出する。色付きの線は磁力線を、色付きの等数値面は惑星プラズマの数密度分布を表す。



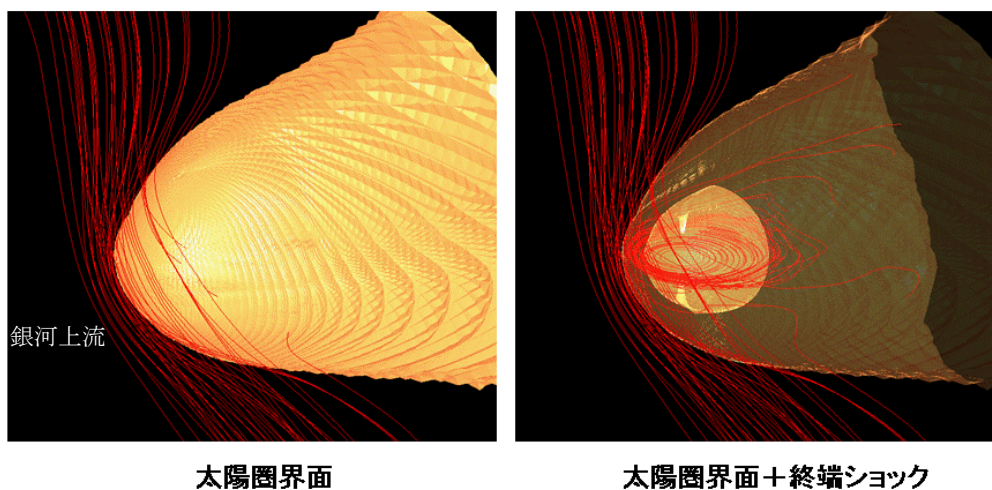
第 6-8 図、太陽風—水星相互作用。水星は磁気圏の規模が小さいため、電離圏領域と磁気圏領域が広い範囲で重なる。色付きの線は磁力線を、色付きの等数値面は惑星プラズマの数密度分布を表す。赤道面の色はプラズマの圧力分布を、矢印は流れの向きを表す。

4-7. 太陽圏シミュレーション

太陽風は地球に到達した後も超音速を保ち、木星や土星の磁気圏を形成し、更にその遠方まで達する。それはやがて銀河のプラズマと遭遇し、そこに太陽風の果てが形成されると予想されている。この太陽風が到達する果ての領域までを太陽圏と呼ぶ。40年前に打ち上げられた宇宙探査機ボエジャー1号、2号は、冥王星軌道を通してはるか彼方の太陽圏の果てをめざし飛行を続けていたが、2004年12月になって、ボエジャー1号は太陽風の限界（終端ショック）に到達した。これを受けて、太陽圏と銀河の相互作用をシミュレーションで研究しようとする機運が高まり、当研究課題で開発した磁気圏シミュレーションを太陽圏に応用することが進められた。磁気圏シミュレーションの境界条件を変更し、太陽風（外部境界）を銀河風、電離圏（内部境界）を太陽風に置きかえれば、太陽圏のシミュレーションが可能となる（第7-1図）。この研究では更に銀河中性水素の効果を含めるため、中性ガスダイナミクスもプラズマと同じようにモデル化し、プラズマ-中性ガス相互作用も考慮して計算した。

シミュレーションによる研究の結果では、終端ショック（太陽風が銀河物質に当たって出来るショック）は決して定常的な構造ではなく、太陽から放出されるCME（質量放出）によって常に変動しており、太陽圏の果ては膨張、収縮を繰り返している。ボエジャー1号が終端ショックに到達する1年から2年前には、相次いで大きなCMEが当たり、太陽圏は膨張中であつた。それが収縮に転じたときにボエジャー1号が終端ショックを観測しており、これはボエジャー1号が終端ショックを過ぎたというより、終端ショックがボエジャー1号に衝突してきたと見るべきであることが結論された。この結果をもってボエジャー2号の終端ショック到達が予想されたが、その後観測された結果は、予想に一致した。このように宇宙天気は太陽圏の果てまで及んでいることが実証された。

太陽圏モデル(N型)



第7-1図、シミュレーションによる太陽圏構造。太陽圏界面は銀河空間と惑星間空間の境界、終端ショックは超音速太陽風と亜音速プラズマの境界を表す。赤い線は銀河磁場と太陽風磁場を表す。銀河磁場は太陽圏界面に巻きつくように分布する。終端ショックは砲弾のような形で、これはマッハディスクと呼ばれる。

§ 5 成果発表等

(5-1)原著論文発表

- ①. 発表総数(発行済:国内(和文)14件、国際(欧文)79件):
- ②. 未発行論文数(”accepted”、”in press”等)(国内(和文)0件、国際(欧文)6件)
- ③. 論文詳細情報
<H16>
 - (1)Fok, M. C., T. E. Moore, M. R. Collier, and T. Tanaka, Neutral atom imaging of solar wind interaction with the earth and Venus, *Journal of Geophysical Research*, 109, A01206, doi:10.1029/2003JA010094, 2004.
 - (2)Fujita, S., T. Tanaka, T. Kikuchi and S. Tsunomura, A numerical simulation of a negative sudden impulse, *Earth Planets Space*, 56, 463, 2004.
 - (3)Kataoka, R., H. Fukunishi, S. Fujita, T. Tanaka, and M. Itonaga, Transient response of the earth's magnetosphere to a localized density pulse in the solar wind: Simulation of traveling convection vortices, *Journal of Geophysical Research*, 109, A03204, doi:10.1029/2003JA010287, 2004.
 - (4)Obara, T., T. Goka, and H. Matsumoto, Coupling of relativistic electrons in the inner magnetosphere to space weather phenomena, *Sun-Earth Connection*, ed by Y. Kamide and T. Lui, Klauwer Co Ltd, 135-144, 2004
 - (5)Shimada, N. and M. Hoshino, Electron heating and acceleration in the shock transition region: background plasma parameter dependence, *Physics of Plasmas*, 11, p1840-1849, 2004.
 - (6)Shimada, N. and M. Hoshino, Particle-field dynamics in the shock transition region, *COSPAR Colloquia on Frontier of Magnetospheric Physics*, p289-292, 2004.
 - (7)Shimada, N. and M. Hoshino, The effect of strong thermalization on shock dynamical behavior, *Journal of Geophysical Research*, vol. 110, No. A2, A02105, 10.1029/2004JA010596, 2005.
 - (8)Tanaka, T., T. Obara, and M. Kunitake, Formation mechanism of the theta aurora by a transient convection during northward IMF, *Journal of Geophysical Research*, 109, A09201, doi: 10.1029/2003JA010271, 2004.
 - (9)Tanaka YM., Yumoto K, Yoshikawa A, Shinohara M, Kawano H, Kitamura TI, Longitudinal structure of Pc 3 pulsations on the ground near the magnetic equator, *Journal of Geophysical Research*, 109, A03201, doi:10.1029/2003JA009903, 2004.
 - (10)Terada, N., H. Shinagawa, and S. Machida, Global hybrid model of the solar wind interaction with the Venus ionosphere: ion escape processes, *Advances in Space Research*, Vol. 33, pp. 161-166, 2004.
 - (11)Uozumi T., Yumoto K, Kawano H, Yoshikawa A, Ohtani S, Olson JV, Akasofu SI, Solov'yev SI, Vershinin EF, Liou K, Meng CI, Propagation characteristics of Pi2 magnetic pulsations observed at ground high latitudes, *Journal of Geophysical Research*, 109, A08203, doi:10.1029/2003JA009898, 2004.
 - (12)Washimi, H., and T. Tanaka, MHD effects in planetary nebulae and in the outer heliosphere, *Physics of outer heliosphere: Third international IGPP conference*, edited by V. Florinski, N. V. Pogorelov, and G. P. Zank, p. 87, American Institute of Physics, 2004.
 - (13)Watanabe, M., G. J. Sofko, D. A. Andre, T. Tanaka, and M. R. Hairson, Polar cap bifurcation during steady-state northward interplanetary magnetic field with $|By| \sim Bz$, *Journal of Geophysical Research*, 109, A01215, doi:10.1029/2003JA009944, 2004.
 - (14)Yamazaki, A., I. Yoshikawa, N. Terada, and M. Nakamura, EUV imaging of near-Venus space, *Advances in Space Research*, Vol. 33/11, pp. 1932-1937, 2004.
- <H17>
 - (15)Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, and Y. Hayashi, Real time earth magnetosphere simulation with 3-dimensional MHD code, *Space Weather*, 4, doi:

- 10.1029/2004SW000100, 2006.
- (16)Fujita, S., T. Tanaka, and T. Motoba, A numerical simulation of the geomagnetic sudden commencement: 3. A SC in the magnetosphere–ionosphere compound system, *Journal of Geophysical Research*, 110, A11203, doi: 10.1029/2005JA011055, 2005.
- (17)Kataoka, R., S. Watari, N. Shimada, H. Shimazu, and K. Marubashi, Downstream structures of interplanetary fast shocks associated with coronal mass ejections, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12103, doi:10.1029/2005GL022777, 2005.
- (18)Kitamura, K., H. Kawano, S.-I. Ohtani, A. Yoshikawa and K. Yumoto, Local-time distribution of low and middle latitude ground magnetic disturbances at sawtooth injections of April 18–19, 2002, *J. Geophys. Res.*, 110, A07208, doi:10.1029/2004JA011179, 2005.
- (19)Nakamizo, A., The wavelength of slow MHD waves observed in the night-side plasma sheet, in *Multiscale coupling of Sun–Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p421, Elsevier, 2005.
- (20)Obana, Y., A. Yoshikawa, J. V. Olson, R. J. Morris, B. J. Fraser, and K. Yumoto, North–South asymmetry of the amplitudes of high-latitude Pc 3–5 pulsations: Observations at conjugate stations, *J. Geophys. Res.*, 110, A10214, doi:10.1029/2003JA010242, 2005.
- (21)Obara, T., T. Goka, and H. Matsumoto, Coupling of relativistic electrons in the inner magnetosphere to space weather phenomena, in *Multiscale coupling of Sun–Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p135, Elsevier, 2005.
- (22)Obara, T., Y. Miyoshi, and T. G. Onsager, Generation and loss of new electron radiation belt in the slot region, *Space Radiation*, 4, 145–152, 2005.
- (23)Ogawa, T., and M. Den, High-resolution simulation of propagating of interplanetary shock wave caused by a coronal mass ejection observed on November 13, 2003, *Adv. Polar Upp. Atmos. Res.*, 19, 71, 2005.
- (24)Shimazu, H., and T. Tanaka, Simulation of entry of shock-drift-accelerated solar energetic protons into the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 110, A10105, doi:10.1029/2004JA010997, 2005.
- (25)Tanaka, T., Two state transition model of the magnetosphere, in *Non equilibrium Transitions in Plasmas, Astrophysics and space science library*, edited by A. S. Sharma and P. K. Kaw, p. 91, Springer, 2005.
- (26)Tanaka, T., Substorm onset caused by the two state transition of the magnetosphere, in *Multiscale coupling of Sun–Earth processes*, edited by A. T. Y. Lui, Y. Kamide and G. Consolini, p217, Elsevier, 2005.
- (27)Yumoto, K., Monitoring of geophysical electromagnetic environment for space weather study—a review, *Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci.*, XXXI, 81, 2005.
- (28)Yumoto, K., Magnetic environment in geospace, *IEEJ Trans. FM*, 125, 77, 2005.
- <H18>
- (29)Den, M., T. Kuwabara, T. Ogawa, T. Tanaka, I. Goncharenko, and H. Amo, A glassless stereoscopic visualization system for a 3D MHD real-time Earths magnetosphere simulator, *J. Plasma Phys.*, 72, 837, 2006.
- (30)Den, M., T. Tanaka, S. Fujita, T. Obara, H. Shimazu, H. Amo, Y. Hyashi, E. Nakano, Y. Seo, K. Suehiro, and Takei, and Y. Miyoshi, Real-time Earth magnetosphere simulator with three-dimensional magnetohydrodynamic code, *Space Weather*, Vol.4, S06004, 105–114doi:10.1029/2004SW000100, 2006.
- (31)Fujita, S. and T. Tanaka, Magnetospheric plasma processes during a sudden commencement revealed from a global MHD simulation, in *Magnetospheric ULF waves: Synthesis and New Directions*, Geophysical Monograph Series, Volume 169, pp. 31–50, ed. by K. Takahashi, P. Chi, R. Denton, and R. Lysak, American Geophysical Union, Washington, D. C., 2006
- (32)Kanao, M., N. Terada, A. Yamazaki, I. Yoshikawa, T. Abe, and M. Nakamura, The effect of the

- motional electric field on the Venus nightside ionopause, *J. Geophys. Res.*, Vol. 111, A03306, doi:10.1029/2005JA011293, 2006.
- (33)Kulikov, Y. N., H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, N. Terada, I. Ribas, H. K. Biernat, C. Kolb, E. F. Guinan, S. Barabash, and R. Lundin, Atmospheric and water loss from early Venus, *Planet. Space Sci.*, Vol. 54, 1425–1444, 2006.
- (34)Nishino, M., K. Makita, K. Yumoto, Y. Miyoshi, N.J. Schuch, M.A. Abdu, Energetic particle precipitation in the Brazilian geomagnetic anomaly during the “Bastille Day Storm” of July 2000, *Earth, Planets Space*, 58, 607–616, 2006.
- (35)Obara, T., Toward the radiation belt forecast in Japan, *Selected papers in ISTS 2006*, 1351–1355, 2006.
- (36)Obara, T., Magnetospheric plasma: Special issue on space weather, *J. Plasma Fusion*, Vol. 82, 756–761, 2006.
- (37)Obara, T., Space weather prediction: Applications and validation, Editor, *Adv. Space Res.*, Vol.37, No.6, 2006.
- (38)Shimazu, H., T. Tanaka, M. Den, and T. Obara, A. Geranios, E. Antonia, Dependence of the cutoff latitude of solar energetic protons on the southward component of the IMF, *Adv. Space Res.*, Vol. 38, 503–506, 2006.
- (39)Shinagawa, H., and S. Oyama, A two-dimensional simulation of thermospheric vertical winds in the vicinity of an auroral arc, *Earth, Planets Space*, Vol. 58, 1173–1181, 2006.
- (40)Shiokawa, K., K. Seki, Y. Miyoshi, A. Ieda, T. Ono, M. Iijima, T. Nagatsuma, T. Obara, K. Takashima, K. Asamura, Y. Kasaba, A. Matsuoka, Y. Saito, H. Saito, M. Hirahara, Y. Tonegawa, F. Tohyama, M. Tanaka, M. Nose, Y. Kasahara, K. Yumoto, H. kawano, A. Yoshikawa, Y. Ebihara, A. Yukimatsu, N. Sato, and S. Watanabe, ERG–A small-satellite mission to investigate the dynamics of the inner magnetosphere, *Adv. Space Res.*, Vol. 38, 1861–1869, 2006.
- (41)Takasaki, S., H. Kawano, Y. Tanaka, A. Yoshikawa, M. Seto, M. Iijima, Y. Obana, N. Sato and K. Yumoto, A significant mass density increase during a large magnetic storm in October 2003 obtained by ground-based ULF observations at $L \sim 1.4$, *Earth Planets Space*, Vol.58, 617–622, 2006.
- <H19>
- (42)Asai, K., T. Nagatsuma, H. Shimazu, T. Hori, K. Kitamura, and Y. Miyoshi, Cutoff L-values of solar protons, Cutoff L-values of solar protons in comparison with ring current protons during a storm: NOAA/POSES observations, *Advances in Geosciences*, Vol. 8 Solar Terrestrial, 2007.
- (43)Delcourt, D. C., F. Leblanc, K. Seki, N. Terada, T. E. Moore, and M.-C. Fok, Ion Energization During Substorms at Mercury, *Planet. Space Sci.*, 55, 1502–1508, 2007.
- (44)Fujimoto, M., W. Baumjohann, K. Kabin, R. Nakamura, J. A. Slavin, N. Terada, and L. Zelenyi, Hermean Magnetosphere–Solar Wind Interaction, *Space Sci. Rev.*, 132, 529–550, 2007.
- (45)Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker, Vortex-associated reconnection for northward IMF in the Kronian magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L23201, doi:10.1029/2007GL031784, 2007.
- (46)Kaneda, K., N. Terada, and S. Machida, Time variation of nonthermal escape of oxygen from Mars after solar wind dynamic pressure enhancement, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20201, doi:10.1029/2007GL030576, 2007.
- (47)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.*, 113, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.
- (48)Kubo, Y., Statistical Models for the Solar Flare Interval Distribution in Individual Active Regions, *Solar Physics*, Vol. 248, pp. 85–98, 2008.

- (49)Lammer, H., H. I. M. Lichtenegger, Y. Kulikov, J. M. Griessmeier, N. Terada, N. V. Erkaev, H. K. Biernat, M. L. Khodachenko, I. Ribas, T. Penz, and F. Selsis, CME activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets, Part II: CME induced ion pick up of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones, *Astrobiology*, Vol. 7, pp. 167–184, 2007.
- (50)Motoba, T., S. Fujita, T. Kikuchi, and T. Tanaka, Solar wind dynamic pressure forced oscillation of the magnetosphere-ionosphere coupling system: A numerical simulation of directly-pressure-forced geomagnetic pulsations, *J. Geophys. Res.*, 112, A11204, doi:10.1029/2006JA012193, 2007.
- (51)Shimoda, T., S. Machida, and N. Terada, Numerical Calculation on a Top-Hat Plasma Particle Analyzer Using a Boundary-Fitted Coordinate System, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 35, pp. 1178–1183, 2007.
- (52)Shimazu, H., K. Kitamura, T. Tanaka, S. Fujita, M. S. Nakamura, and T. Obara, Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, *Adv. Space Res.*, *Adv. Space Res.*, 41, doi:10.1016/j.asr.2007.07.014, 2008.
- (53)Shinagawa, H., T. Iyemori, S. Saito, and T. Maruyama, A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra Earthquake on December 26, 2004, *Earth Planets Space*, Vol. 59, pp. 1015–1026, 2007.
- (54)Tanaka, T., Magnetosphere-ionosphere convection as the compound system, *Space Sci. Rev.*, doi 10.1007/s11214-007-9168-4, 2007.
- (55)Tsubouchi, K., and Y. Omura, Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events, *Space Weather*, Vol. 5, doi:10.1029/2007SW000329, 2007.
- (56)Washimi, H., G. P. Zank, Q. Hu, T. Tanaka, and K. Munakata, A Forecast of the Heliospheric Termination-Shock Position by Three-Dimensional MHD Simulations, *Ap. J.*, 670, 2007.
- <H20>
- (57)Amm, O., A. Aruliah, S.C. Buchert, R. Fujii, J.M. Gjerloev, A. Ieda, T. Matsuo, C. Stolle, H. Vanhamaki, and A. Yoshikawa, Understanding the electrodynamics of the 3-dimensional high-latitude ionosphere: present and future, *Annales Geophysicae*, AG/2008057, **26**, 3912–3913, 2008.
- (58)Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, and H. Shinagawa, Electrodynamics of the formation of ionospheric wave number 4 longitudinal structure, *J. Geophys. Res.*, 113, A09307, doi:10.1029/2008JA013301, 2008.
- (59)Jin, H., and T. Maruyama, Temporary decrease in daytime F-region peak electron density due to eastward electric field penetration during magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 113, A05305, doi:10.1029/2006JA011928, 2008.
- (60)Jin, H., K. Maezawa, and T. Mukai, The critical solar wind pressure for IMF penetration into the Venus ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 113, A02309, doi:10.1029/2007JA012725, 2008.
- (61)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.*, **113**, A03S10, doi:10.1029/2007JA012514, 2008.
- (62)Lammer, H., Terada, N., Y. N. Kulikov, H. I. M. Lichtenegger, M. L. Khodachenko, and T. Penz, Atmospheric Erosion Caused by Stellar Coronal Plasma Flows on Terrestrial Exoplanets within Close-In Habitable Zones of Low Mass Stars, *Proceedings of 14th Cambridge Workshop on Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun ASP Conference Series*, Vol. 384, p.303, 2008.
- (63)Matsuoka, D., K. T. Murata, S. Fujita, T. Tanaka, K. Yamamoto, E. Kimura, Analyses of 3D Structure of Magnetic Flux Ropes via Global MHD Simulations, *Transactions of Visualization Society of Japan*, **28**, No. 6, pp.38–46, 2008.
- (64)Moriguti, T., A. Nakamizo, T. Tanaka, T. Obara, and H. Shimazu, Current systems in the

- Jovian magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, **113**, A05204, doi:10.1029/2007JA012751, 2008.
- (65)Oyama, S., B. J. Watkins, S. Maeda, H. Shinagawa, S. Nozawa, Y. Ogawa, A. Brekke, C. Lathuillere, and W. Kofman, Generation of the lower-thermospheric vertical wind estimated with the EISCAT KST radar at high latitudes during periods of moderate geomagnetic disturbance, *Ann. Geophys.*, **26**, 1491–1505, 2008.
- (66)Shimazu, H., K. Kitamura, T. Tanaka, S. Fujita, M. S. Nakamura, and T. Obara, Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, *Adv. Space Res.*, **41**, doi:10.1016/j.asr.2007.07.014, 2008.
- (67)Uozumi, T., K. Yumoto, K. Kitamura, S. Abe, Y. Kakinami, M. Shinohara, A. Yoshikawa, H. Kawano, et al., New index to monitor temporal and long-term variations of the Equatorial Electrojet by MAGDAS/CPMN real-time data: EE-Index, *EPS-letter, Earth Planets Space*, **60**, 785–790, 2008.
- (68)Terada, N., Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, T. Tanaka, H. Shinagawa, and T. Zhang, Atmosphere and water loss from early Mars under extreme solar wind and EUV conditions, *Astrobiology*, **9**, doi:10.1089/ast.2008.0250, 2009.
- (69)Tsubouchi, K., Alfvén wave evolution within corotating interaction regions associated with the formation of magnetic holes/decreases, *Journal of Geophysical Research*, A02101, doi:10.1029/2008JA013568, 2009.
- <H21>
- (70)Delcourt, D. C., Y. Saito, K. Seki, and N. Terada, Dynamics of magnetospheric ions at Mercury: Some open questions awaiting BepiColombo measurements, *AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations*, pp.102–108, 2009.
- (71)Hirahara, M., I. Shinohara, Y. Miyoshi, N. Terada, and T. Mukai, Editors of *AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations*, pp.1–239, 2009.
- (72)Kaneda, K., N. Terada, and S. Machida, Solar-wind control of the hot-oxygen corona around Mars, *Journal of Geophysical Research*, **114**, doi:10.1029/2008JE003234, 2009.
- (73)Liu, K., E. Kallio, R. Jarvinen, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, Yu. N. Kulikov, N. Terada, T. L. Zhang, and P. Janhunen, Hybrid simulations of the O⁺ ion escape from Venus: Influence of the solar wind density and the IMF x component, *Advances in Space Research*, **43**, pp.1436–1441, 2009.
- (74)Nakamizo, A., T. Tanaka, Y. Kubo, S. Kamei, H. Shimazu, and H. Shinagawa, Development of the 3-D MHD model of the solar corona-solar wind combining system, *Journal of Geophysical Research*, **114**, A07109, doi:10.1029/2008JA013844, 2009.
- (75)Shimazu, H. and M. Tanaka, Numerical simulation of small-scale low-beta magnetic flux ropes in the upper ionospheres of Venus and Mars, *Planet. Space Sci.*, Vol. **56**, pp. 1542–1551, 2008.
- (76)Shinagawa, H. and N. Terada, MHD and kinetic modeling of the ionospheres of Venus and Mars, *AIP conference proceedings 1144: Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations*, pp.63–69, 2009.
- (77)Tao, C., H. Fujiwara, and Y. Kasaba, Neutral wind control of the Jovian magnetosphere-ionosphere current system, *Journal of Geophysical Research*, **114**, A08307, doi:10.1029/2008JA013966, 2009.
- (78)Terada, N., Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. M. Lichtenegger, T. Tanaka, H. Shinagawa, and T. Zhang, Atmosphere and water loss from early Mars under extreme solar wind and EUV conditions, *Astrobiology*, Vol. **9**, doi:10.1089/ast.2008.0250, 2009.
- (79)Terada, N., H. Shinagawa, T. Tanaka, K. Murawski, and K. Terada, A three-dimensional, multi-species, comprehensive MHD model of the solar wind interaction with the planet Venus, *Journal of Geophysical Research*, **114**, A09208, doi:10.1029/2008JA013937, 2009.

(印刷中)

- (80)Brain, D., S. Barabash, A. Boesswetter, S. Bougher, S. Brecht, G. Chanteur, D. Crider, E. Dubinin, X. Fang, M. Fraenz, J. Halekas, E. Harnett, M. Holmstrom, E. Kallio, H. Lammer, S. Ledvina, M. Liemohn, K. Liu, J. Luhmann, Y. Ma, R. Modolo, A. Nagy, U. Motschmann, H. Nilsson, H. Shinagawa, S. Simon, and N. Terada, A Comparison of Global Models for the Solar Wind Interaction with Mars, Icarus, in press, 2009.
- (81)Matsumura, M., T. Iyemori, M. Nose, M. Utsugi, Y. Odagi, Y. Tanaka, D. Han, N. Oshiman, H. Shinagawa, and Y. Tabata, The predominant periods of the atmospheric perturbations and geomagnetic oscillations, Adv. Geosci., in press, 2009.
- (82)Miyake, W., and H. Jin, Near-real time monitoring of TEC over Japan at NICT, Advances in Geosciences, in press, 2009.
- (83)Ogawa, T., M. Den, T. Tanaka, K. Yamashita, H. Amo, and T. Takei, Three-dimensional adaptive mesh refinement simulation of propagation of coronal mass ejection on October 28, 2003 connected with Earth's global magnetosphere simulation, Advances in Space Research, in press, 2009.
- (84)Shimazu, H., T. Tanaka, M. Den, and T. Obara, Simulation of the entry of solar energetic particles into the magnetosphere, Advances in Space Research, in press, 2009.

(査読中)

- (85)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, Journal of Geophysical Research, submitted, 2009.

国内

<H16>

- (86)小原隆博、中村雅夫、電子放射線帯変動における波動の役割、Space Radiation, Vol. 4, No. 2, p81-90, 2004.
- (87)中村、越石、松本、五家、小原、放射線帯外帯電子の消失機構、宇宙放射線、Vol. 4, No. 2, p91, 2004.
- (88)寺田直樹、品川裕之、阿部琢美、プラズマと大気の散逸、日本惑星科学会誌、Vol. 13, pp. 12-17, 2004.
- (89)町田忍、小野高幸、寺田直樹、金星のプラズマ粒子・波動環境、日本惑星科学会誌, Vol. 13, pp. 18-14, 2004.
- (90)杉山徹、寺田直樹、村田健史、大村善治、臼井英之、松本紘、LISTVEC 指示行を使った多粒子シミュレーションの大規模化(主メモリを節約し、かつ高速化を可能にする一つの方法)、情報処理学会論文誌, Vol. 45, pp. 171-175, 2004.
- (91)Yoshikawa A., H. Kawano, H. Kohta, S. Takasaki, T. Uozumi, K. Kitamura, and K. Yumoto, Modeling and Monitoring of Geospace Environments by using a Real-time Magnetometer Network (in Japanese), CHIKYU MONTHLY, VOL. 26, NO. 5, 307-314, 2004.

<H17>

- (92)小原隆博、宇宙に延びる地球磁場、日本応用磁気学会誌、29, 906, 2005.
- (93)武井 利文、田 光江、田中 高史、天羽 宏嘉、小原 隆博、島津 浩哲、SX を活用したリアルタイム数値宇宙天気予報システムの開発、NEC 技報、58, 53, 2005.
- (94)湯元清文、宇宙天気における宙空ダイナミクス、学術月報、58, 210, 2005.

<H19>

- (95)今村剛、佐藤毅彦、上野宗孝、寺田直樹、高橋幸弘、わが国の惑星大気探査の展望、日本惑星科学会誌、17, 54-57, 2008.
- (96)小原隆博、宇宙天気予報—宇宙の安全な利用のために—、「情報通信 BULLETIN」、No. 054、KDDI、2007.
- (97)小原隆博、宇宙天気予報、渋沢栄一記念財団雑誌「青淵」第 720 号、21-23, 2007.

(98)松岡大祐, 村田健史, 藤田茂, 田中高史, 山本和憲, 木村映善, Global MHD シミュレーションによる磁気フラックスロープの3次元構造解析, 可視化情報学会論文集, 2008.

<H21>

(99)寺田直樹, 松岡彩子, 関華奈子, 山崎敦, 二穴喜文, 横田勝一郎, 斎藤義文, 中川広務, 笠羽康正, 橋省吾, 尾川順子, 佐藤毅彦, MELOSワーキンググループ, MELOSが挑む「火星大気散逸・大気進化科学」, 日本惑星科学会誌, 18, pp.73-75, 2009.

(5-2)その他の著作物(総説、書籍など)

①. 詳細情報

総説・proceedings

<H16>

(1) Obara, T., M. Nakamura, K. Koga, T. Goka, and Y. Miyoshi, Reformation of outer belt electrons by magnetic storm, Proc. of 24-th ISTS, p930-935, 2004.

(2) Shimazu, H., T. Tanaka, M. Den, and T. Obara, Simulation of the solar wind interaction with the magnetosphere and its application to real-time calculation, 2004 Asia-Pacific Radio Science Conference Proceedings, Eds. by T. Keyun and L. Dayong, IEEE Press, pp. 597-599, 2004.

<H20>

(3) Ikeda, A., K. Yumoto, M. Shinohara, K. Nozaki, A. Yoshikawa and A. Shinbori, SC-associated Ionospheric Electric Fields at Low Latitude: FM-CW Radar Observation, Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth & Planet. Sci., Vol. XXXII, No. 1, pp. 1-6, February 1, 2008.

(4) Nakamizo, A., T. Tanaka, H. Shinagawa, and H. Shimazu, 3-D MHD model of the Sun-solar wind system: The first results, Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth and Planet. Sci., Vol. XXXIII, No. 2, pp. 69-86, March 2, 2009.

(5) Yoshikawa, A., H. Nakata, A. Nakamizo, T. Uozumi, M. Itonaga, and K. Yumoto, A new magnetosphere-ionosphere coupling scheme for temporal and global MHD simulation algorithm for temporal and global Magnetosphere-Ionosphere coupled system, Mem. Fac. Sci., Kyushu Univ., Ser. D, Earth and Planet. Sci., Vol. XXXIII, No. 2, pp. 87-94, March 2, 2009.

<H21>

(6) 島津浩哲, 宇宙・惑星における原子・分子過程とプラズマの構造, プラズマ・核融合学会誌, 第84巻第7号, pp. 417-421, 2008.

(7) 久保勇樹, 品川裕之, 島津浩哲, 田中高史, NICTリアルタイム宇宙天気統合シミュレータ: 現状と展望, 「第5回宇宙環境シンポジウム」講演論文集, pp133, 2009.

(8) Kubo, Y. and H. Shimazu, High-Rigidity Cosmic Ray Penetration Mechanism in Interplanetary Magnetic Flux Ropes, Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference, Vol. S.H.2.6, 223, 2009.

書籍

<H20>

(1) 品川裕之, 惑星超高層大気圏研究の将来, 月刊「地球」号外「IGY+50 一過去から未来へ」, No. 58, 2008.

(2) 梅田隆行, 杉山徹, 松本洋介, 篠原育, 寺田直樹, 「粒子シミュレーション」プラズマの計算科学-宇宙・核融合のマクロとミクロを解き明かす MHD と粒子シミュレーション-, 荻野瀧樹編, 共立出版, in press, 2009.

(3) 深沢 圭一郎, 荻野 瀧樹 第2章3節「磁気圏」プラズマの計算科学-宇宙・核融合のマクロとミクロを解き明かす MHD と粒子シミュレーション-, 荻野瀧樹編, 共立出版, in press, 2009.

(4) 三好 隆博, 松本 洋介, 深沢 圭一郎, 第2章1節「MHD モデルの基礎」プラズマの計算

科学—宇宙・核融合のマクロとミクロを解き明かす MHD と粒子シミュレーション—, 荻野瀧樹編, 共立出版, in press, 2009.

(5-3) 国際学会および主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内 18 件、国際 15 件)

国際

<H16>

- (1) Yoshikawa A., New Algorithm of Magnetosphere-Ionosphere Coupling for Global and Dynamic Closure of Field-Aligned Current to Ionospheric Current, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California.

<H17>

- (2) Tanaka, T., Energy transfer in the magnetospheric convection from global numerical simulation, Earth-sun energy exploration: Energy transfer, Jan 16, 2006, Kona Hawaii.
(3) 小原 隆博、中村 雅夫、島津 浩哲、Helium radiation belt dynamics inferred from Tsubasa (MDS-1) observations、IAGA 2005 Scientific Assembly, July 18, 2005, Toulouse, France.
(4) 小原 隆博、Radiation belt forecast in Japan、IAGA 2005 Scientific Assembly, July 18, 2005, Toulouse, France.

<H18>

- (5) Terada, N., A. Yamazaki, I. Yoshikawa, and Y. Takahashi, Global Modeling and Future Explorations of Atmospheric Escape Processes, Asia Oceania Geosciences Society 3rd Annual Meeting, Singapore, 2006 年 7 月 10 日-14 日.
(6) Obara, T., Long-term view of the radiation belts, 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, 2006 年 7 月 16 日-23 日.
(7) Shimazu, H., T. Tanaka, S. Fujita, M. S. Nakamura, and T. Obara, Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, 2006 年 7 月 16 日-23 日.

<H19>

- (8) Terada, N. and T. Tanaka, Numerical Simulations of Circulation and Escape of Ionospheric Plasmas: Comparative Study of Terrestrial Planets, Asia-Oceania Geosciences Society 4th Annual Meeting, Bangkok, Thailand, 2007 年 7 月 30 日-8 月 4 日.
(9) Terada, N, D. C. Delcourt, K. Seki, M. Fujimoto, T. Tanaka, Mercury's exosphere-magnetosphere interaction, Workshop BepiColombo France-Japan collaboration, Paris, France 2007 年 10 月 24 日-26 日.

<H20>

- (10) Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Nonmigrating tidal effects on equatorial ionization anomaly studied with a whole atmosphere-ionosphere coupling model, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008 年 6 月 16 日-20 日.
(11) Shinagawa, H., H. Shimazu, N. Terada, T. Obara, and H. Jin, S. Fujita, T. Tanaka, The NICT real-time thermosphere-ionosphere simulator: Initial results and future prospects, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008 年 6 月 16 日-20 日.
(12) Yoshikawa, A., Uozumi, T., and K. Yumoto, 3D-Cowling Channel Model in the Sq Current System, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008 年 6 月 16 日-20 日.
(13) Fujita, S, A numerical simulation of the Pi2 pulsations, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008 年 6 月 16 日-20 日.

<H21>

- (14) Terada, N., A. Matsuoka, S. Tachibana, K. Seki, A. Yamazaki, Y. Futaana, S. Yokota, Y. Saito, N. Ogawa, T. Okada, T. Sato, and Working Group for MELOS Mars Exploration Mission,

Atmospheric Escape Science by MELOS Mars Exploration Mission, Asia-Oceania Geosciences Society 6th Annual Meeting, Singapore, 2009年8月11-15日.

- (15) Fujita, S, T. Motoba, and T. Tanaka, ULF waves driven by solar wind disturbances, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA 2009, Sopron, Hungary, 2009年8月23-30日.

国内

<H17>

- (16) 寺田直樹、関華奈子、藤本正樹、荻野竜樹、松本洋介、田中高史、Possible impacts of magnetospheric ions on the development of magnetopause surface waves、Korea-Japan workshop on ULF waves and other geospace phenomena, Feb. 16, 2006, Fukuoka
- (17) 藤田茂、データ同化に関するチュートリアル講演、宇宙プラズマ/太陽系環境研究の将来構想座談会、2005年12月26日、愛知県伊良湖
- (18) 藤田茂、田中高史、菊池崇、Magnetospheric responses to periodic variations of the solar wind dynamic pressure、Korea-Japan workshop on ULF waves and other geospace phenomena, Feb. 16, 2006, Fukuoka

<H18>

- (19) Shinagawa, H., and N. Terada, Numerical modeling of the ionospheres of Venus and Mars, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, Rikkyo Univ., 2006年11月1日-2日.
- (20) Terada, N., A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Y. Futaana, S. Sasaki, and the Japan Martian aeronomy group, Japanese Mars mission in the future space program: post-NOZOMI exploration, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, Rikkyo Univ., 2006年11月1日-2日.
- (21) Obara, T., Recent topics of radiation belt science: new radiation belt and long-term variation, Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations, Rikkyo Univ., 2006年11月1日-2日.
- (22) 寺田直樹、火星電磁圏科学の可能性、第120回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006年11月4日-7日.

<H19>

- (23) 品川裕之、惑星大気圏研究の現状と将来展望、日本地球惑星科学連合 2007年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007年5月19日-24日.
- (24) 寺田直樹、金田香織、田中高史、品川裕之、宇宙・惑星におけるプラズマダイナミクスと原子・分子過程、日本物理学会第63回年次大会、近畿大学本部キャンパス、2008年3月22日-26日.

<H20>

- (25) 品川 裕之、島津 浩哲、寺田 直樹、陣 英克、久保 勇樹、深沢 圭一郎、坪内 健、國武学、小原 隆博、藤田 茂、田中 高史、NICTリアルタイム宇宙環境シミュレータ：現状と将来展望、日本地球惑星科学連合 2008年大会、幕張メッセ国際会議場、2008年5月25日-30日.
- (26) 品川 裕之、島津 浩哲、寺田 直樹、陣 英克、久保 勇樹、深沢 圭一郎、坪内 健、國武学、小原 隆博、藤田 茂、田中 高史、NICTリアルタイム宇宙環境シミュレータを用いた電離圏・熱圏研究、日本地球惑星科学連合 2008年大会、幕張メッセ国際会議場、2008年5月25日-30日.
- (27) 陣英克、丸山隆、電離圏嵐時に見られる TEC と NmF2 の異なる振る舞いについて、日本地球惑星科学連合 2008年大会、幕張メッセ国際会議場、2008年5月25日-30日.
- (28) Tanaka, T., Development of space weather simulation and prospect for the practical use, 日本地球惑星科学連合 2008年大会、幕張メッセ国際会議場、2008年5月25日-30日.
- (29) Fujita, S. and T. Tanaka, The magnetosphere-ionosphere compound system in the extremely

weak IMF condition, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日.

- (30) 田中高史, サブストームシミュレーションにおけるBPパラダイム, 第 124 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008 年 10 月 9 日-12 日.
- (31) 寺田直樹, 他共著者 26 名, モデル結合・融合方法の標準化, 第 124 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008 年 10 月 9 日-12 日.
- (32) 吉川顕正, 地上多点ネットワークデータの活用:MAGDAS/ CPMN データの料理の仕方, 第 107 回生存圏シンポジウム/SGEPSS 波動分科会「磁気圏および宇宙空間のプラズマ波動の観測と理論」, 日石仙台ビル, 2008 年 10 月 13 日.

<H21>

- (33) 寺田直樹, 陣英克, 松本洋介, 梅田隆行, 深沢圭一郎, 三好隆博, 加藤雄人, 鈴木朋憲, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 寺田香織, 村田健史, 吉川顕正, 三好由純, 中田裕之, 数値計算プロジェクトの将来像と惑星電磁圏の理解の今後, 第 126 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009 年 9 月 27 日-30 日.

② 口頭講演 (国内 215 件、国際 64 件)

国際

<H16>

- (1) Takasaki, S., H Kawano Yoshimasa Tanaka, Akimasa Yoshikawa, Yuki Obana, Masahiro Seto, Masahide Iizima, Kiyohumi Yumoto Plasmaspheric Mass Density Increase at low-Latitudes ($L \sim 1.3$) During Magnetic Storms, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (2) Obana, Y., A. Yoshikawa, R. J. Morris, B. J. Fraser, J. V. Olson, K. Yumoto, Relationship Between Toroidal and Poloidal Pc 3-5 Pulsations Observed at the Coordinated CPMN Stations{PRIVATE }, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (3) Obana, Y., K. Yumoto, D. G. Baishev, S. I. Solov'yev, A. Yoshikawa, H. Kawano and Circum-pacific Magnetometer Network Group, Global Pc 5 Pulsations During a Super Storm in Late October 2003{PRIVATE }, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (4) Daiki Orita, Yuki Obana, Akimasa Yoshikawa, Kiyohumi Yumoto, Analysis of CPMN ULF Data at the Magnetic Conjugate Points{PRIVATE }, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (5) Hiroko Kohta, Akimasa Yoshikawa, Kiyohumi Yumoto, Wave Characteristics of Pi2 pulsations observed at the CPMN stations-Results from the Independent Component Analysis{PRIVATE }, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (6) Shinbaru, T., K. Yumoto, A. Yoshikawa, T. Tanaka, M. Shinohara, K. Kitamura, K. Nozaki, Observations of Ionospheric Electric Fields Associated With SC and Pc5 Magnetic Pulsations by FM-CW Radar at low Latitude{PRIVATE }, Chapman Conference on Magnetospheric ULF Waves, 21-25 March 2005, San Diego, California
- (7) Tanaka, T., and T. Obara, Colliding convection model of the theta aurora. 2005 年 3 月 26 日、ISSS7、京都
- (8) Suzuki, T. and T. Tanaka, Three dimensional magnetohydrodynamic simulation of the sun-solar wind system on the dodecahedral gridpoint mode, 2005 年 3 月 26 日、ISSS7、京都
- (9) Den, M., T. Ogawa, T. Kuwabara, T. Tanaka, I. Goncharenko, H. Amo, Y. Kanou, and S. Nallani-Parayil, A Three dimensional visualization system for real-time earth's magnetosphere simulation. 2005 年 3 月 26 日、ISSS7、京都

- (10) 島津浩哲、田中高史、Simulation of the entry of solar energetic protons into the magnetosphere、The 7th International School/Symposium for Space Simulations、京都大学時計台ホール、2005年3月26日
- (11) Fujita, S., and T. Tanaka, A numerical simulation of geomagnetic sudden commencement、2005年3月26日、ISSS7、京都
- <H17>
- (12) 小川 智也、田 光江、田中 高史、山下 和之、天羽 宏嘉、武井 利文、Shock Passage Prediction Using Three-dimensional Simulation、AOGS 2nd Annual Meeting 2005、June 22, 2005, Singapore.
- (13) 小原 隆博、田中 高史、Conjugate appearance of theta aurora in both hemispheres during positive IMF Bz and varying IMF By conditions、IAGA 2005 Scientific Assembly, July 18, 2005, Toulouse, France.
- (14) 藤田茂、田中高史、A Numerical Simulation of a Geomagnetic Sudden Commencement, IAGA 2005 Scientific Assembly, July 21, 2005, Toulouse, France.
- <H18>
- (15) Blanch, E., I. Scholl, D. Altadill, J. Aboudarham, J.J Curto, M. Hernandez-Pajares, and H. Shimazu, Solar and Earth environment observations associated to active region #10759 and its effects on 15th May 2005, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 2006年4月2日-7日.
- (16) Fujita, S., T. Tanaka and T. Kikuchi, A Numerical Simulation of Electric-Field Overshielding Due to the R2 Current, 3rd annual meeting of Asia-Oscea Geophysics Society, Singapore, 10-14, July, 2006
- (17) Murata, K., D. Matsuoka, S. Fujita, and T. Tanaka, A study of IMF's penetration into the Earth's magnetotail and magnetic flux rope via global MHD simulation, 3rd annual meeting of Asia-Oscea Geophysics Society, Singapore, 10-14, July, 2006
- (18) Asai, K. T., T. Nagatsuma, H. Shimazu, and Y. Miyoshi, Cutoff latitudes of solar protons related with ring current proton precipitation during geomagnetic storms: NOAA/POES multi-observations, Asia Oceania Geosciences Society 3rd Annual Meeting, Singapore, 2006年7月10日-14日.
- (19) Asai, K. T., T. Nagatsuma, H. Shimazu, T. Hori, K. Kitamura, and Y. Miyoshi, Cutoff latitudes of solar protons during geomagnetic storms observed by NOAA/POES multi-satellites, 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, 2006年7月16日-23日.
- (20) Shinagawa, H., H. Shimazu, S. Fujita, T. Tanaka, N. Terada, M. S. Nakamura, and T. Obara, Development of a real-time geospace simulator for space weather forecast, 36th COSPAR Scientific Assembly, Beijing, China, 2006年7月16日-23日.
- (21) Washimi, H., G. P. Zank, Q. Hu and T. Tanaka, Three-Dimensional MHD Simulation of the Dynamic Heliosphere at the Time When Voyager 1 Crossed the Termination Shock, 6, November, 2006, Heliospheric Workshop, Oxnard City.
- (22) Shinagawa, H., H. Shimazu, N. Terada, M. S. Nakamura, S. Fujita, T. Tanaka, and T. Obara, Development of the NICT real-time thermosphere-ionosphere simulator, CAWSES International Workshop on Space Weather Modeling, Earth Simulator Center, Yokohama, 2006年11月14日-17日.
- (23) Shimazu, H., T. Tanaka, S. Fujita, M. S. Nakamura, H. Shinagawa, and T. Obara, Real-time global MHD simulation of the solar wind interaction with the earth's magnetosphere, CAWSES International Workshop on Space Weather Modeling, Earth Simulator Center, Yokohama, 2006年11月14日-17日.
- (24) Nakamura, M. S. , H. Shimazu, T. Obara, S. Fujita, and T. Tanaka, Study of plasma environment at geosynchronous orbit of the real time magnetosphere simulation for spacecraft charging forecast as space weather services, CAWSES International Workshop on Space Weather Modeling, Earth Simulator Center, Yokohama, 2006年11月14日-17日.

- (25) Fujimoto, K., and T. Obara, Magnetic reconnection in large and fully kinetic System, CAWSES International Workshop on Space Weather Modeling, Earth Simulator Center, Yokohama, 2006年11月14日-17日.
- (26) Washimi, H., G. P. Zank, and T. Tanaka, MHD Simulation of Dynamic Heliosphere Around the Time When Voyager 1 Crossed the Termination Shock, 11, December, 2006, the 2006 AGU Fall Meeting, San Francisco
- (27) Kamei, S., A. Nakamizo, and T. Tanaka, Development of global simulation model of the Heliosphere, Comparative study of solar flares and magnetospheric substorms, March 18, 2007, Alaska.
- (28) Shinagawa, H., T. Iyemori, S. Saito, and T. Maruyama, A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra Earthquake on December 26, 2004, International Symposium on Coupling Processes in the Equatorial Atmosphere, Kyoto University, 2007年3月23日.
- <H19>
- (29) Terada, N., Y. Kulikov, H. Lammer, M. L. Khodachenko, and H. I. M. Lichtenegger, Ion escape from the early Martian atmosphere, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 2007年4月15日-20日.
- (30) Fukazawa K., T. Ogino, and R. J. Walker, Formation of the Magnetic Island Wall at the Dayside Magnetopause in the Kronian Magnetosphere, Magnetospheres of the Outer Planets Meeting 2007, San Antonio Texas, USA, 2007年6月25日-29日.
- (31) Nakamizo, A. and T. Tanaka, Development of three-dimensional MHD model of the solar wind-interplanetary space combining system, IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics) XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2007年7月2日-13日.
- (32) Shinagawa, H., H. Shimazu, N. Terada, H. Jin, Y. Kubo, K. Fukazawa, K. Tsubouchi, T. Obara, H. Fujiwara, S. Fujita, Y. Miyoshi, A. Nakamizo, T. Tanaka, Development of the Solar-Terrestrial Environment Integrated Simulator, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, 2007年10月23日-27日.
- (33) Tsubouchi, K., The probability forecast of geomagnetic storm occurrences, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, 2007年10月23日-27日.
- (34) Fujita, S., and T. Tanaka, The magnetosphere-ionosphere compound systems for various solar wind conditions - A proposal to Space Meteorology -, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, 2007年10月23日-27日.
- (35) Murata, K. T., E. Kimura, Y. Kitamura, H. Shimazu, K. Fukazawa, T. Obara, H. Kumagai, J. Tanaka, T. Ikeda, H. Miyachi, Y. Matsumoto, M. Yoshikawa, D. Matsuoka, and K. Yamamoto, A Virtual Earth via Real-time Data Transfer from Super Computer, Bandwidth Challenge, SC07(SuperComputing), Reno-Sparks Convention Center, Reno, NV, USA, 2007年11月10日-16日.
- (36) Fujita, S., and T. Tanaka, Magnetospheric responses to periodic variations in the solar wind dynamic pressure, The Fall Meeting of the American, Geophysical Union, San Francisco, USA, Dec. 10-14, 2007.
- (37) Fukazawa K., T. Ogino, and R. J. Walker, Magnetotail dynamics in the rotating planets, AGU 2007 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2007年12月9日-14日.
- (38) Nagy, A. F., and H. Shinagawa, Modeling the interaction: Session summary, AGU Chapman Conference on the Solar Wind Interaction with Mars, San Diego, USA, 2008年1月22日-25日.
- (39) Terada, N., H. Shinagawa, K. Kaneda, and T. Tanaka, A Three-Dimensional MHD Model of the Solar Wind Interaction with the Ionosphere of Mars: Coupling with a Time-Dependent Exosphere Model, AGU Chapman conference on the solar wind interaction with Mars, San Diego, USA, 2008年1月22日-25日.

- (40) Tanaka, T., Space Weather as the Physics of Compound System, International Symposium on Hierarchy and Holism, Feb. 22, 2008, Okazaki.
 <H20>
- (41) Fujita, S., and T. Tanaka, The magnetosphere-ionosphere compound system in the extremely weak IMF condition, European Geosciences Union, General Assembly, Vienna, Austria, 2008年4月13日-18日.
- (42) Fujita, S., and T. Tanaka, The magnetosphere-ionosphere compound system in the extremely weak IMF condition, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (43) Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker, Magnetotail Dynamics in Jupiter: periodic plasma ejections, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (44) Fukazawa, K., Development of the Global Simulation Model of the Magnetosphere with 1Re Inner Boundary, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (45) Iyemori, T., M. Matsumura, M. Hashizume, M. Nose, Y. Tanaka, D.-S. Han, H. McCreddie, A. Saito, N. Choosakul, Y. Odagi, M. Utsugi, and H. Shinagawa, Temporal variation of acoustic resonance estimated from magnetic pulsations and barometric oscillations after earthquakes and a comparison with those excited by atmospheric turbulence, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (46) Matsumura, M., T. Iyemori, Y. Tanaka, M. Nose, M. Utsugi, N. Oshiman, H. Shinagawa, and Y. Odagi, The predominant periods of the atmospheric perturbations and geomagnetic oscillations, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (47) Tsubouchi, K, Verification of the forecast probability model for geomagnetic storm occurrences, Asia-Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16-20日.
- (48) Kubo, Y., Solar Flare Interval Distribution for Probabilistic Flare Forecasting Method, 37th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly, Montreal, Canada, 2008年7月13日-20日.
- (49) Nakamizo, A., T. Moriguchi, and T. Tanaka, Current systems in the Jovian, magnetosphere, 37th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly, Montreal, Canada, 2008年7月13日-20日.
- (50) Walker, R. J., K. Fukazawa, T. Ogino, and D. Morozoff, Simulations and observations of vortices near Saturn's dayside magnetopause, 37th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly, Montreal, Canada, 2008年7月13日-20日.
- (51) Shinagawa, H., NICT Real-time Space Weather Integrated Simulator: Current status and future prospects, The Korea-Japan Space Weather Modeling Workshop:2. Application of the Space Weather Model, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, Korea, 2008年9月26日.
- (52) Fujita, S., and T. Tanaka, A numerical simulation of a geomagnetic sudden commencement, Michigan-Japan Space Science Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008年11月4日-7日.
- (53) Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Development of the whole atmosphere and ionosphere coupling model, Michigan-Japan Space Science Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008年11月4日-7日.
- (54) Shinagawa, H., Space Weather Simulation at NICT, Michigan-Japan Space Science Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008年11月4日-7日.
- (55) Tanaka, T., Substorm mechanisms and solar wind models, Michigan-Japan Space Science

- Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008 年 11 月 4 日-7 日.
- (56) Terada, N., T. Tanaka, H. Shinagawa, and K. Murawski, Three-dimensional MHD simulations of the solar wind interaction with terrestrial planets, Michigan-Japan Space Science Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008 年 11 月 4 日-7 日.
- (57) Yoshikawa, A., A. Nakamizo, and T. Tanaka, Electromagnetic M-I-coupling algorithm through magnetic shear and compression flow for Global M-I coupled Simulation, Michigan-Japan Space Science Workshop, Michigan University, Michigan, USA, 2008 年 11 月 4 日-7 日.
- (58) Fukazawa, K., MHD simulation of the interaction between the Jovian and Kronian magnetospheres and solar wind, JSPS Sweden - Japan Joint Space Colloquium, Stockholm, Sweden, 2009 年 3 月 10 日-11 日.
- <H21>
- (59) Terada, N., T. Imamura, K. Seki, A. Yamazaki, T. Satoh, A. Matsuoka, T. Okada, and N. Ogawa, Synergetical Atmospheric Science by 2 Mars Orbiters, 27th International Symposium on Space Technology and Science, Ibaraki, 2009 年 7 月 5-12 日.
- (60) Tao, C., H. Fujiwara, and Y. Kasaba, Characteristics of coupling current and rotational dynamics in the Jovian magnetosphere-ionosphere-thermosphere model, The 2009 meeting of the Magnetospheres of the Outer Planets community, Cologne Germany, 2009 年 7 月 27-31 日.
- (61) Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, Initial Results from a Whole Atmosphere-Ionosphere Coupled Model: Day-to-day and Longitudinal Variations of Thermosphere and Ionosphere, 6th Annual Meeting, Singapore, 2009 年 8 月 10-15 日.
- (62) Fujita, S. and T. Tanaka, Dynamic behavior of the magnetosphere under the stationary IMF condition, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA 2009, Sopron, Hungary, 2009 年 8 月 23-30 日.
- (63) Tanaka, T., Substorm convection and current system deduced from the global simulation, IAGA 2009, Sopron, Hungary, 2009 年 8 月 23-30 日.
- (64) Tanaka, T., The role of region 2 FAC in the substorm current system at the onset, IAGA 2009, Sopron, Hungary, 2009 年 8 月 23-30 日.

国内

<H16>

- (65) 田中高史、鈴木智美、非構造格子を用いた太陽-太陽風結合の全球シミュレーション 10 月 28 日、2004 年名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会:STE シミュレーション研究会、柏市
- (66) 小原隆博、田中高史、テーターオーロラ:MHD シミュレーションと観測の比較 10 月 28 日、2004 年名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会:STE シミュレーション研究会、柏市
- (67) 島津浩哲、田中高史、地球磁気圏への太陽プロトンの進入のシミュレーション、STE シミュレーション研究会、千葉県民プラザ、2004 年 10 月 28 日
- (68) 藤田 茂、田中高史、磁気圏電離圏シミュレーションの新しい展開、10 月 28 日、2004 年名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会:STE シミュレーション研究会、柏市
- (69) 寺田直樹、小嶋稔、品川裕之、関華奈子、月表層土中の窒素、軽希ガス同位体比は初期地球大気の流出で説明可能か? 2004 年度 STE シミュレーション研究会、千葉、2004 年 10 月 28-29 日
- (70) 田中高史、中溝 葵、磁気圏対流の励起とプラズマ領域性生徒の結びつき 12 月 27 日、第 3 回 NICT 計算科学シンポジウム、小金井市
- (71) 島津浩哲、田中高史、地球磁気圏への太陽プロトンの進入とショックドリフト加速との関連、第 3 回 NICT 計算科学シンポジウム、情報通信研究機構、2004 年 12 月 27 日
- (72) 寺田直樹、関華奈子、藤本正樹、品川裕之、萩野竜樹、Exoionosphere を含めた水星グローバル MHD シミュレーション、惑星電磁圏・大気圏研究会、仙台、2005 年 3 月 3-4 日

- (73) 寺田直樹、藤本正樹、品川裕之、荻野竜樹、惑星磁気圏グローバル構造とプラズマ輸送、日本物理学会第 60 回年次大会、千葉、2005 年 3 月 24-27 日
 <H17>
- (74) 田中高史、複合系の科学としての磁気圏物理学、地球惑星科学関連学会合同大会、2005 年 5 月 22 日、幕張
- (75) 湯元 清文、新原 俊樹、吉川 顕正、尾花 由紀、野崎 憲朗、菊池 崇、環太平洋地磁気観測グループ、FM-CW 短波レーダーによる 2003 年 10 月 31 日の Pc5 脈動の低緯度電離層電場観測、地球惑星科学関連学会合同大会、2005 年 5 月 22 日、幕張
- (76) 湯元 清文、吉川 顕正、篠原 学、河野 英昭、Baishev D. G.、Solovyev S. I.、環太平洋地磁気観測グループ、2003 年 10 月 31 日の北向き IMF・高速太陽風時における Global Pc 5 脈動について、地球惑星科学関連学会合同大会、2005 年 5 月 22 日、幕張
- (77) 小原 隆博、中村 雅夫、島津 浩哲、MDS-1(Tsubasa)により観測された α 粒子放射線帯の挙動、地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会、2005 年 5 月 22 日、幕張
- (78) 寺田直樹、関華奈子、藤本正樹、品川裕之、荻野竜樹、水星表面一外圏一磁気圏システムにおける領域間相互作用、地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会、2005 年 5 月 22 日、幕張
- (79) 田中高史、磁気圏一電離圏対流を駆動するカスプ、第 29 回極域宙空圏シンポジウム、2005 年 8 月 4 日、国立極地研究所
- (80) 田中高史、小原隆博、国武学、北向き IMF 期間の非定常対流によるテーターオーロラの形成、第 29 回極域宙空圏シンポジウム、2005 年 8 月 4 日、国立極地研究所
- (81) 中溝葵、田中高史、エネルギー変換過程としての磁気圏尾部対流、第 29 回極域宙空圏シンポジウム、2005 年 8 月 4 日、国立極地研究所
- (82) 藤田茂、田中高史、磁気圏電離圏複合系におけるグローバルな自己無撞着性の破壊と再生としての SC、第 29 回極域宙空圏シンポジウム、2005 年 8 月 4 日、国立極地研究所
- (83) 田中高史、島津浩哲、MHD 磁気圏場の中での粒子追跡、第 118 回地球電磁気・地球惑星圏学会、2005 年 9 月 28 日、京都大学
- (84) 湯元清文、篠原学、CPMN 観測グループ、宇宙災害につながった si 磁気圏擾乱、第 118 回地球電磁気・地球惑星圏学会、2005 年 9 月 28 日、京都大学
- (85) 小原 隆博、中村 雅夫、三好 由純、古賀 清一、内部磁気圏・放射線帯領域における磁気嵐主相時の磁気圏対流、第 118 回地球電磁気・地球惑星圏学会、2005 年 9 月 28 日、京都大学
- (86) 小川 智也、田 光江、田中 高史、山下 和之、CME 衝撃波同士の相互作用のシミュレーション、日本天文学会、2005 年 10 月 6 日、札幌
- (87) 田中 高史、島津 浩哲、篠田 徹、MHD で計算された磁気圏場中での粒子追跡、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (88) 折口 太郎、田中高史、2005 年 5 月中に起きた CME に伴う太陽圏構造の変化、NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (89) 島津浩哲、田中基彦、イオンスケール磁気フラックスロープのシミュレーション、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (90) 寺田直樹、関華奈子、藤本正樹、荻野竜樹、品川裕之、松元洋介、D.C.Delcourt、磁気圏対流によって駆動される磁気圏界面波動絶対不安定性、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (91) 小川 智也、CME 連発時の惑星間空間衝撃波、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (92) 藤田茂、田中 高史、田 光江、小原 隆博、島津 浩哲、天羽 宏嘉、Virtual AE indices、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、2005 年 10 月 13 日、愛媛大学総合情報メディアセンター
- (93) 藤田茂、田中高史、磁気圏電離圏対流遷移 = 電磁気圏現象の基本原則、磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、2005 年 11 月 14 日、倉敷市

- (94) 田中高史、複合系磁気圏物理学の進展磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、2005年11月15日、倉敷市
- (95) 森 隆志、田中高史、中溝 葵、IMF の方向と磁気圏尾部対流との関連磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、2005年11月15日、倉敷市
- (96) 湯元、河野、吉川、家森、山岸、門倉、佐藤、行松、西谷、菊池、塩川、大塚、小川、細川、田口、ERG プロジェクトにおける地上観測-汎地球的観測によるジオスペース-マクロ場分布の導出と多圏間相互作用、ISAS 磁気圏・電離圏シンポジウム、2005年11月24日-25日、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・相模原キャンパス
- (97) 湯元清文、ERG プロジェクトチーム、宇宙嵐の理解をめざして~ERG プロジェクト~、ISAS 磁気圏・電離圏シンポジウム、2005年11月24日-25日、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・相模原キャンパス
- <H18>
- (98) 田中高史、中溝 葵、折口太郎、亀井聡美、太陽-太陽風結合系グローバルシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (99) 中溝 葵、田中 高史、Three-dimensional MHD model of the solar wind-interplanetary space combining system、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (100) 藤田 茂、田中 高史、菊池 崇、周期的太陽風動圧変動に対する磁気圏応答、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (101) 藤田 茂、田中 高史、田 光江、小原 隆博、島津 浩哲、中村 雅夫、宇宙天気における格子点データ生成と評価、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (102) 浅井佳子、長妻努、島津浩哲、三好由純、低高度極軌道衛星観測による 16 - 500MeV 太陽プロトンのカットオフ緯度:磁気嵐に伴う変化と地方時依存性、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (103) 小原隆博、放射線帯予報の現状と今後について、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (104) 品川裕之、島津浩哲、小原隆博、寺田直樹、中村雅夫、小川智也、藤田茂、田中高史、リアルタイムジオスペース統合シミュレータの開発、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (105) 品川裕之、家森俊彦、地球惑星下層大気擾乱で発生する音波が電離圏に与える影響について、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (106) 品川裕之、火星下層大気擾乱が電離圏に与える影響、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (107) 島津浩哲、田中基彦、金星や火星で観測されたフラックスロープのシミュレーション、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (108) 寺田直樹、火星エアロミー勉強会グループ、火星大気散逸とその観測の可能性、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (109) 中村雅夫、小原隆博、越石英樹、松本晴久、五家建夫、Entry and loss of energetic electrons in the slot region in a sequence of magnetic storms、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (110) 村田健史、亘慎一、木村映善、北村泰一、島津浩哲、松岡大祐、山本和憲、五十嵐喜良、高速ネットワークを活用した数値宇宙天気シミュレーションの遠隔バーチャルリアリティシステム、日本地球惑星科学連合 2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日。
- (111) 松岡 大祐、山本 和憲、村田 健史、藤田 茂、田中 高史、Global MHD シミュレーションによる IMF の磁気圏へのしみこみと磁気フラックスロープ生成の研究、日本地球惑星科学連

- 合 2006 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006 年 5 月 14 日-18 日。
- (112) 松岡 大祐、村田 健史、藤田 茂、田中 高史、視覚型・触覚型バーチャルリアリティシステムの 3 次元宇宙プラズマシミュレーションデータ解析への応用、日本地球惑星科学連合 2006 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006 年 5 月 14 日-18 日。
- (113) 品川裕之、地球型惑星電離圏モデリングの発展と応用、シンポジウム「電離圏研究と利用の将来」、東京大学、2006 年 5 月 26 日。
- (114) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、中村雅夫、藤田茂、田中高史、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレーションモデルの開発、名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 STE シミュレーション研究会、九州大学西新プラザ、福岡、2006 年 6 月 7 日-8 日。
- (115) 島津浩哲、金星での衝撃波高度の非対称性のシミュレーション、名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 STE シミュレーション研究会、九州大学西新プラザ、福岡、2006 年 6 月 7 日-8 日。
- (116) 中村雅夫、島津浩哲、小原隆博、藤田茂、田中高史、リアルタイム磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道環境予測、名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 STE シミュレーション研究会、九州大学西新プラザ、福岡、2006 年 6 月 7 日-8 日。
- (117) 松岡大祐、村田健史、山本和憲、木村映善、島津浩哲、田中高史、藤田茂、亘慎一、宮地英生、久保卓也、石倉諭、数値宇宙天気シミュレーションのリアルタイム3次元可視化、名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 STE シミュレーション研究会、九州大学西新プラザ、福岡、2006 年 6 月 7 日-8 日。
- (118) 小原隆博、New Electron Radiation Belt Formation During Bastille Day Super Storm、学術創成「宇宙天気予報の基礎研究」、2006 年 8 月。
- (119) 寺田直樹、火星エアロノミー勉強会グループ、火星大気の散逸と表層環境への影響、第 39 回月・惑星シンポジウム、JAXA 宇宙科学研究本部、2006 年 8 月 8 日。
- (120) 品川裕之、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータの開発、宇宙天気ワークショップ、京都大学乗鞍天文台、2006 年 8 月 22 日。
- (121) Obara, T., Global mapping of geospace radio environment by means of low earth orbiting satellite and related studies of polar cap patches, e-POP Science Meeting, 2006 年 9 月。
- (122) 亀井聡美、最近の太陽圏構造の推移:太陽圏構造シミュレーションの結果、平成 18 年度第 1 回 STE 現象報告会、情報通信研究機構、2006 年 9 月 13 日。
- (123) 田中高史、九州大学における宇宙天気シミュレーション、平成 18 年度第 1 回 STE 現象報告会、情報通信研究機構、2006 年 9 月 13 日。
- (124) 田中高史、UCR 訪問と太陽圏研究、平成 18 年度第 1 回 STE 現象報告会、情報通信研究機構、2006 年 9 月 13 日。
- (125) 寺田直樹、田中高史、磁気圏 MHD/粒子モデルの開発状況、平成 18 年度第 1 回 STE 現象報告会、情報通信研究機構、2006 年 9 月 13 日。
- (126) 浅井佳子、島津浩哲、長妻努、堀智昭、北村健太郎、三好由純、太陽プロトンカットオフ緯度とリングカレント粒子との比較、第 2 回ジオスペース環境科学研究会、情報通信研究機構、2006 年 9 月 15 日。
- (127) 品川裕之、津波起源の電離圏変動の数値シミュレーション、中間圏・熱圏・電離圏研究会、豊川市民プラザ、2006 年 9 月 26 日。
- (128) 藤田 茂、菊池 崇、田中高史、磁気圏対流電場遮蔽の数値実験、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (129) 中溝 葵、田中高史、Variations of solar wind speed obtained by 3-D MHD model incorporating flux expansion rate、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (130) 中田裕之、吉川顕正、田中高史、改良された磁気圏電離圏結合アルゴリズムを用いたグローバル MHD シミュレーション、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。

- (131) 小原隆博、電子放射線帯の巨大磁気嵐における変動、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (132) 北村健太郎、亙慎一、国武学、小原隆博、静止軌道高エネルギー電子フラックスと Pc5 地磁気脈動との比較、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (133) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、藤田茂、田中高史、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータの開発、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (134) 島津 浩哲、田中基彦、イオンスケール磁気フラックスロープのシミュレーションとその金星昼間側電離層への適用、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (135) 関華奈子ほか 23 名、小原隆博、島津浩哲、品川裕之、ジオスペースにおける粒子加速・プラズマ輸送過程の解明に向けて: ERG 計画データ解析・モデリング、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (136) 寺田直樹、田中高史、惑星電磁圏統合モデルの開発、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (137) 寺田直樹、火星エアロノミー勉強会グループ、佐々木晶、上野宗孝、今村剛、日本の火星科学探査の展開、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (138) 藤本桂三、島津浩哲、小原隆博、磁気再結合現象の大規模シミュレーション: 電子磁気拡散領域と磁気再結合の時間変化、第 120 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、相模原市産業会館、相模原市けやき会館、2006 年 11 月 4 日-7 日。
- (139) 田中高史、トポロジーのある系における磁気リコネクション、磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、岡山、2006 年 11 月 20 日。
- (140) 藤田茂・菊池崇・田中高史、磁気圏対流電場遮蔽の数値実験、磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、岡山、2006 年 11 月 20 日。
- (141) 寺田直樹、田中高史、能勢正仁、磁気圏 MHD 場における電離圏起源イオンの軌道追跡、磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会、岡山、2006 年 11 月 20 日。
- (142) 田中高史、トポロジーの有る系でのリコネクションと対流、「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究」および「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会、名古屋、2006 年 11 月 22 日。
- (143) 寺田直樹、田中高史、惑星電磁圏統合モデルの開発、「重力多体系・プラズマ系における連結階層シミュレーション研究」および「自然界と実験室のプラズマ研究の交流」研究会、名古屋、2006 年 11 月 22 日。
- (144) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、小原隆博、藤田茂、田中高史、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータ: 試験運用結果報告、南極昭和基地大型大気レーダープロジェクト (PANSY) 研究集会、2006 年 12 月 22 日。
- (145) 田中高史、CREST 研究課題「リアルタイム宇宙天気シミュレーション」の進捗、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (146) 松岡大祐、村田健史、藤田茂、田中高史、磁気フラックスロープの生成・伝搬における磁力線トポロジーの変化、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (147) 田中高史、太陽圏グローバルシミュレーションスキームの開発、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (148) 中溝葵、田中高史、亀井聡美、3 次元太陽風モデルの開発: 1AU で垣間見えるグローバル構造の一端と太陽面起源の検証、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (149) 篠田徹、田中高史、Global test particle simulation による Solar wind の磁気圏への侵入経路

- と IMF 依存性、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (150) 北村健太郎、島津浩哲、藤田茂、亘慎一、国武学、田中高史、シミュレーションによる AE 指数と実測の AE 指数との比較、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (151) 久保勇樹、島津浩哲、磁気フラックスロープ中の銀河宇宙線、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (152) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、小原隆博、藤田茂、田中高史、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータの開発：初期結果報告、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (153) 島津浩哲、田中高史、藤田茂、品川裕之、中村雅夫、北村健太郎、小原隆博、NICT リアルタイム磁気圏シミュレーション、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (154) 寺田直樹、田中高史、磁気圏 MHD-粒子連成モデルの開発、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (155) 中村雅夫、島津浩哲、小原隆博、藤田茂、田中高史、磁気圏シミュレーションを用いた静止軌道プラズマ環境予報、JST/CREST-NICT 合同シミュレーション研究会、統計数理研究所、2006 年 12 月 25-26 日。
- (156) 小原隆博、放射線帯電子の変動機構と宇宙天気への応用、第 3 回宇宙環境シンポジウム、2006 年 12 月
- (157) 田中高史、リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究、2007 年 1 月 23 日、第 2 回 CREST さきがけ領域シンポジウム、大手町 JA ビル
- (158) 品川裕之、NICT リアルタイム熱圏・電離圏モデルを用いた電離圏擾乱研究、平成 18 年度中緯度短波レーダー研究会、名古屋大学、2007 年 2 月 19 日。
- (159) 品川裕之、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータ開発の現状と磁気嵐シミュレータへの応用、磁気嵐シミュレータ検討会、名古屋大学、2007 年 2 月 23 日。
- (160) 寺田直樹、田中高史、電離圏起源粒子のテスト粒子シミュレーション、磁気嵐シミュレータ検討会、名古屋大学、2007 年 2 月 23 日。
- (161) 寺田直樹、統合型シミュレータの概念設計・実装について、磁気嵐シミュレータ検討会、名古屋大学、2007 年 2 月 24 日。
- (162) 品川裕之、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータ：初期結果と今後の計画、CAWSES/IHY workshop、名古屋大学、2007 年 3 月 14 日。
- (163) 小原隆博、Relativistic electron variation in the radiation belt inferred from MDS-1 (Tsubasa) satellite, CAWSES/IHY workshop, 名古屋大学, 2007 年 3 月 15 日。
- <H19>
- (164) 中溝葵、田中高史、太陽圏グローバルモデルの開発、2007 年 5 月 16 日-17 日、「自然科学における階層と全体」第 4 回シンポジウム、岡崎市、自然科学研究機構 岡崎コンファレンスセンター。
- (165) 田中 高史、CREST 研究課題「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」の進捗、2007 年 5 月 19 日-24 日、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場
- (166) 田中 高史、トポロジーのある磁気圏系における対流の励起、2007 年 5 月 19 日-24 日、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場
- (167) 小原隆博、松本晴久、五家建夫、Relativistic Electron Variation in the Radiation Belt Inferred from MDS-1 (Tsubasa) Satellite、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (168) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、藤田茂、田中高史、小原隆博、NICT リアルタイム熱圏・電離圏シミュレータ：初期結果報告、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (169) 関華奈子、三好由純、海老原祐輔、中村雅夫、家田章正、松本洋介、能勢正仁、田中高史、

- 小原隆博、島津浩哲、品川裕之ほか、ERG 計画における理論・データ解析・モデリングの役割:総合型ジオスペース研究に向けて、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (170) 寺田直樹、田中高史、能勢正仁、Numerical modeling of the circulation of ionospheric particles in the Earth's magnetosphere、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (171) 寺田直樹、Y. Kulikov, H. Lammer, M. L. Khodachenko, an H. I. M. Lichtenegger, Atmospheric escape from the early Martian atmosphere、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (172) 寺田直樹、山崎敦、土屋史紀、三澤浩昭、二穴喜文、横田勝一郎、渡部重十、吉川一朗、TOPS サイエンス検討 WG、TOPS の科学目標:水星磁気圏と外圏/火星・金星外圏と流出大気、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (173) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、陣 英克、小原隆博、藤田 茂、田中高史、The NICT real-time thermosphere-ionosphere simulator: Initial results, SuperDARN Workshop 2007、網走湖荘、2007 年 6 月 4 日-8 日。
- (174) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、小原隆博、陣 英克、藤田 茂、田中高史、NICT リアルタイム電離圏・熱圏シミュレータ: 初期結果と今後の計画、第 31 回極域宙空圏シンポジウム、国立極地研究所、2007 年 7 月 23 日-24 日。
- (175) 田中高史、磁気圏磁場のトポロジー構造、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (176) 國武学、亘慎一、品川裕之、島津浩哲、田中高史、NICT 太陽風-磁気圏-電離圏 MHD シミュレーションと観測との比較・検証(極域電離圏ポテンシャルについて)、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (177) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、藤田茂、田中高史、深沢圭一郎、國武学、小原隆博、NICT リアルタイム電離圏・熱圏シミュレータ: 現状と今後の展、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (178) 島津浩哲、北村健太郎、國武学、藤田茂、田中高史、オーロラエレクトロジェット指数のシミュレーション比較、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (179) 坪内 健、CIR 形成過程における Alfvén 波の伝播特性、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (180) 寺田直樹、深沢圭一郎、金田香織、陣英克、田中高史、品川裕之、多圏間・階層間結合モデルカップラーの開発、STEL 研究集会「磁気嵐シミュレータ実現に向けた検討会」、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日。
- (181) 寺田直樹、金田香織、田中高史、品川裕之、Y. Kulikov, M. Kodachenko, H. Lammer、惑星大気散逸の動的モデル、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (182) 森口忠紀、中溝葵、田中高史、小原隆博、島津浩哲、MHD シミュレーションから推定される木星の電流系、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (183) 深沢 圭一郎、内側境界を 1Re にしたグローバル磁気圏モデルの開発、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、大阪府立大学、2007 年 9 月 11 日-12 日。
- (184) 藤田茂、田中高史(2007)、極端な太陽風条件における磁気圏、STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会、堺、2007 年 9 月 11 日-12 日
- (185) 久保勇樹、島津浩哲、惑星間磁気雲中の宇宙線、太陽地球環境(STE)現象報告会、情報通信研究機構小金井本部、2007 年 9 月 14 日。
- (186) 坪内 健、速度勾配のある太陽風中における Alfvén 波の発展、日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜大学、2007 年 9 月 26 日-28 日。

- (187) 森口忠紀、中溝葵、田中高史、MHD シミュレーションから推定される木星の電流系、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (188) 浅井佳子、島津浩哲、長妻努、三好由純、低軌道衛星観測による太陽プロトン侵入の地方時およびピッチ角依存性の磁気嵐変化、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (189) 久保卓也、木村映善、村田健史、篠原育、笠羽康正、亘慎一、松岡大祐、島津浩哲、山本和憲、長谷川洋、小原隆博、RSS1.0 とRDF を用いたSTP セマンティックWeb の構築とその応用、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (190) 久保勇樹、島津浩哲、磁気フラックスロープ内部の宇宙線密度と異方性、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (191) 國武学、亘慎一、品川裕之、島津浩哲、藤田茂、田中高史、極域電離圏対流の比較解析(シミュレーション、SuperDARN 観測、Boyle の経験モデルの相互比較)、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (192) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、陣英克、藤田茂、田中高史、深沢圭一郎、國武学、小原隆博、NICT リアルタイム磁気圏-電離圏-熱圏シミュレータ：電離圏嵐の再現と予測、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (193) 坪内 健、Evaluation of the probability forecast on geomagnetic storm occurrences、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (194) 寺田直樹、田中高史、品川裕之、Numerical methods useful for modeling the solar wind-magnetosphere-ionosphere interaction: Div B=0 constraint/gyrokinetic approach、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (195) 深沢圭一郎、荻野瀧樹、Raymond J. Walker、MHD Simulation of Kronian Magnetosphere with Titan Plasma Torus、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007年9月28日-10月1日。
- (196) 田中高史、リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究、第3回「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」領域シンポジウム、慶応義塾大(三田)北館ホール、2007年11月20日-21日。
- (197) 田中高史、森口忠紀、中溝 葵、木星磁気圏における沿磁力線電流系の構造、磁気圏電離圏複合系における対流に関する研究会、岡山、2007年11月26日-12日
- (198) 藤田 茂、変な太陽風条件での磁気圏電離圏複合系、磁気圏電離圏複合系における対流に関する研究会、岡山、2007年11月26日-12日
- (199) 田中高史、MHD シミュレーションの有効性とその限界、平成19年度名古屋大学太陽地球環境研究所研究集会 GEMSIS ワークショップ:実証型ジオスペースモデリングに向けて、2007年12月26日、犬山
- (200) 品川裕之、島津浩哲、寺田直樹、陣 英克、久保勇樹、深沢圭一郎、坪内 健、國武 学、小原隆博、藤原 均、藤田 茂、三好勉信、中溝 葵、田中高史、太陽地球系統合モデルの開発と観測との連携、国立極地研究所研究集会「電離圏・磁気圏のリモートセンシングデータとモデルの結合」、2008年1月18日。
- (201) 田中高史、太陽圏シミュレーションとボエジャー1号2号の終端ショック通過、H19年度太陽圏シンポジウム、研究集会「惑星間空間中の高エネルギー粒子成分の起源と粒子加速・伝播機構 IX」、研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、名古屋大学グリーンサロン東山会議室、2008年1月28日-30日。
- (202) 久保勇樹、島津浩哲、宇宙線強度に対する磁気雲の影響、H19年度太陽圏シンポジウム、

研究集会「惑星間空間中の高エネルギー粒子成分の起源と粒子加速・伝播機構 IX」、研究集会「太陽地球環境と宇宙線モジュレーション」、名古屋大学グリーンサロン東山会議室、2008年1月28日-30日。

- (203) 田中高史、サブストームの構造と原因:MHD シミュレーションによって解明された姿、第3回ジオスペース環境科学研究会、九州大学西新プラザ、2008年3月5日-6日。
- (204) 寺田直樹、田中高史、品川裕之、金田香織、惑星電磁圏多圏結合モデルの開発と将来展望、第3回ジオスペース環境科学研究会、九州大学西新プラザ、2008年3月5日-6日。
- (205) 藤田茂、品川裕之、田中高史、磁気圏モデル-電離圏モデル結合の試み、ジオスペース環境科学研究会、福岡、2008年3月5日-6日
- (206) 品川裕之、赤道異常を再現する大気圏-ダイナモ-電離圏結合モデル、STE 現象報告会、九州大学西新プラザ、2008年3月7日。
- (207) 久保勇樹、島津浩哲、田中高史、NICT リアルタイム太陽・太陽風シミュレーション、STE 現象報告会、九州大学西新プラザ、2008年3月7日。
- (208) 寺田直樹、惑星電磁圏モデルの現状と今後の展望、第95回生存圏シンポジウム「地球惑星流体の数値モデルの柔軟な開発の枠組に関する研究集会」、京都大学生存圏研究所、2008年3月10日。
- (209) 田中高史、森口忠紀、木星磁気圏対流の電磁力学、第9回惑星圏研究会、東北大学青葉記念会館、2008年3月17日-19日。
- (210) 寺田直樹、Y. N. Kulikov, H. Lammer, H. I. Lichteneger、田中高史、品川裕之、火星史における酸素散逸率の変遷、第9回惑星圏研究会、東北大学青葉記念会館、2008年3月17日-19日。
- (211) 深沢圭一郎、荻野瀧樹、Raymond J. Walker、木星磁気圏の太陽風に対する応答、第9回惑星圏研究会、東北大学青葉記念会館、2008年3月17日-19日。
- (212) 田中高史、サブストームの構造と原因:MHD シミュレーションによって解明された姿、海洋研究開発機構「階層構造の科学」研究会、2008年3月28日、湯河原。

<H20>

- (213) 家森 俊彦, 松村 充, 橋爪 道郎, 能勢 正仁, 田中 良和, 韓 徳勝, McCreddie Heather, 齊藤 昭則, Choosakul Nithiwatthn, 小田木 洋子, 宇津木 充, 品川 裕之, 地磁気脈動と微気圧振動から推定される地震に伴う音波共鳴モードの時間変化, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (214) 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 石井守, 大塚雄一, 齊藤昭則, 大気圏-電離圏結合モデル開発の現状と今後の展望, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (215) 寺田直樹, 他共著者 19 名, モデル結合・融合方法の標準化: 計算科学研究者間の連携と観測との連携, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (216) 寺田直樹, 山崎敦, 上野宗孝, 土屋史紀, 高橋幸弘, 吉川一朗, TOPS サイエンス検討 WG, 宇宙望遠鏡 TOPS による惑星大気散逸観測の科学目標, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (217) 寺田直樹, 火星エアロノミー勉強会グループ, 火星大気-太陽風相互作用研究の展望と将来探査における科学目標, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (218) 深沢圭一郎, 荻野瀧樹, Behavior of Saturn's magnetosphere on various solar wind condition, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (219) 吉川顕正, 魚住禎司, 糸長雅弘, 湯元清文, Cowling 効果同定の為の Hall 共役電流法の開発, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (220) Yoshikawa A., Formation of Cowling channel in the global ionosphere, 第 32 回極域宙空圏

- シンポジウム, 国立極地研究所, 2008年8月4日-5日.
- (221) 品川 裕之, 太陽地球系統合シミュレータの開発, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (222) 寺田直樹, 他共著者 26 名, モデル結合・融合に向けたプログラム自動生成ツールの開発, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (223) 中溝葵, 吉川顕正, MHD シミュレーションにおける固有モード分離法の提案, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (224) 深沢圭一郎, 重合格子による異なる特性長・特性時間の連結, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (225) 藤田茂, 品川裕之, 田中高史, 熱圏-電離圏-磁気圏結合数値シミュレーション, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (226) 吉川顕正, 内部境界条件に於ける誘導効果と Br の処理: 仮想モノポールの取り扱いについて, STE 研究集会「ペタスケールコンピューティング検討会」および STE 研究集会「太陽地球/惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」、海洋研究開発機構 横浜研究所 三好記念講堂、2008年8月6日-8日.
- (227) 吉川顕正, 磁気圏電離圏間の対流・電流・物質流結合, 第2回 GEMISIS ワークショップ, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 2008年8月21日-23日.
- (228) 久保勇樹, 島津浩哲, 田中高史, NICTリアルタイム宇宙環境シミュレータの開発: 太陽・太陽風モデル, 日本天文学会秋季年会, 岡山理科大学, 2008年9月11日.
- (229) 久保勇樹, 島津浩哲, 田中高史, NICT Real-time Space Environment Simulator: The Sun and Solar Wind Model, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (230) 品川 裕之, 島津 浩哲, 久保 勇樹, 陣 英克, 寺田 直樹, 深沢 圭一郎, 坪内 健, 國武 学, 亙 慎一, 小原 隆博, 藤田 茂, 中溝 葵, 田中 高史, 三好 勉信, 藤原 均, 石井 守, 大塚 雄一, 齋藤 昭則, 太陽地球系統合シミュレータの開発, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (231) 島津 浩哲, 品川 裕之, 久保 勇樹, 陣 英克, 寺田 直樹, 深沢 圭一郎, 坪内 健, 國武 学, 亙 慎一, 小原 隆博, 藤田 茂, 中溝 葵, 田中 高史, NICT リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ: 現状と今後の展望, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (232) 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 電離圏経度構造と下層大気とのつながりについて, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (233) 坪内 健, Kinetic manifestation of the current profile bounding the magnetic decrease (MD) structure, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (234) 中溝葵, 吉川顕正, The realization of substorm processes by the eigenmode decomposition method in global MHD simulations, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.

- (235) Fujita, S., and T. Tanaka, Magnetospheric responses to various solar wind impulses, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (236) 吉川顕正, 陣英克, 三好勉信, 魚住禎司, 藤井良一, 宮原三郎, 糸長雅弘, 湯元清文, Separation of Sq current system into Cowling-Electrojet current channel using Hall conjugate current analysis, 第124回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会, 仙台市戦災復興記念館, 2008年10月9日-12日.
- (237) Jin, H., Y. Miyoshi, H. Fujiwara, H. Shinagawa, M. Ishii, Y. Otsuka, and A. Saito, A new challenge of atmospheric model: the whole atmosphere-ionosphere coupled model, International Symposium: Fifty Years after IGY -Modern Information Technologies and Earth and Solar Sciences-, Tsukuba, 2008年11月10日-13日.
- (238) 田中高史, 領域2電流によって駆動されるサブストームモデル, 第4回磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会, 吉備国際大学岡山駅前キャンパス, 2008年11月17日-18日.
- (239) Fujita, S., and T. Tanaka, Pi2 pulsations in the MHD global simulation, 第4回磁気圏-電離圏複合系における対流に関する研究会, 吉備国際大学岡山駅前キャンパス, 2008年11月17日-18日.
- (240) 田中高史, 領域2電流に駆動されるサブストームモデル, STE研-NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (241) 久保勇樹, 島津浩哲, 田中高史, リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ:太陽風シミュレーション, STE研・NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (242) 品川裕之, 久保勇樹, 島津浩哲, 陣英克, 寺田直樹, 深沢圭一郎, 坪内健, 國武学, 亘慎一, 藤田茂, 中溝葵, 田中高史, 藤原均, 三好勉信, 宇宙天気統合シミュレータ:リアルタイムから予報への課題, STE研・NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (243) 坪内健, CIR中のmagnetic hole形成メカニズム, STE研・NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (244) 寺田直樹, 田中高史, 品川裕之, K. Murawski, 金星電離圏の対流構造:3次元グローバルシミュレーションと観測の比較考察, STE研・NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (245) 深沢圭一郎, 荻野瀧樹, R. J. Wakler, グローバルシミュレーションによる木星磁気圏尾部構造の研究, STE研・NICT合同シミュレーション研究会, 名古屋大学, 2009年1月29日-31日.
- (246) 田中高史, サブストームの対流と電流系, 電磁圏シンポジウム, 九州大学, 2009年3月5日
- (247) 田中高史, 磁気圏対流の発展による磁場トポロジーの変形とサブストームの発生, 宇宙プラズマ爆発現象研究会, 名古屋大学, 2009年3月13日
- (248) 深沢圭一郎, 荻野瀧樹, R. J. Wakler, 木星磁気圏大規模構造・ダイナミクス, 第10回惑星圏研究会, 東北大学, 2009年3月17日-19日.
- (249) 田中高史, サブストームはリコネクションか FAC か, 物理学会, 立教大学, 2009年3月27日.
- (250) Fujita, S. and T. Tanaka, 太陽風動圧変化と磁気圏電離圏複合系状態遷移, 日本物理学会, 東京, 2009年3月27日-30日.
- <H21>
- (251) 田中高史, 領域2電流駆動サブストームモデル, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009年5月16-21日.
- (252) 品川裕之, 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 熱圏のシミュレーション研究, 日本地球惑星科学連合 2009年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009年5月16-21日.
- (253) 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 石井守, 大塚雄一, 齊藤昭則, 大気圏-電離圏結合モデル開発の現状と今後の展望大気圏-電離圏統合モデルによる電離圏変動の研究,

- 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (254) 坪内 健, 島津浩哲, Properties of magnetic hole/decrease structures in the solar wind, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (255) 中溝葵, Excitation of substorm-FAC by slow mode disturbances in the near-earth plasma sheet, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (256) Fujita, S. and T. Tanaka, MHD シミュレーションから見た Pi2 脈動の発生機構, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (257) 寺田直樹, 松本洋介, 三好隆博, 深沢圭一郎, 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 田中高史, 高精度中心解法コードの開発とモデル融合への適用, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (258) 寺田直樹, 松岡彩子, 橋省吾, 関華奈子, 山崎敦, 二穴喜文, 横田勝一郎, 斎藤義文, 尾川順子, 岡田達明, 佐藤毅彦, MELOS ワーキンググループ, 火星複合探査 MELOS が挑む「火星大気散逸科学」, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (259) 埜 千尋, 藤原 均, 笠羽 康正, 木星磁気圏・電離圏・熱圏結合系における中性-電離大気相互作用の役割, 日本地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 千葉, 2009 年 5 月 16-21 日.
- (260) Tanaka, T., The region 2 current driven model of the substorm, Workshop on M-I system, Institute of Statistical Mathematics, Tokyo, Japan, 2009 年 7 月 14-15 日.
- (261) 品川裕之, 磁気圏-電離圏-大気圏結合過程のシミュレーション, 「NICT 計算機シミュレーション研究会」 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系科学シミュレーション技法勉強会」 合同研究集会, 九州大学西新プラザ, 2009 年 8 月 4-5 日.
- (262) 島津 浩哲, リアルタイム磁気圏シミュレーションから得られた AE 指数, 「NICT 計算機シミュレーション研究会」 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系科学シミュレーション技法勉強会」 合同研究集会, 九州大学西新プラザ, 2009 年 8 月 4-5 日.
- (263) 坪内 健, Magnetic hole 形成過程におけるプラズマダイナミクスと多次元特性, 「NICT 計算機シミュレーション研究会」 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系科学シミュレーション技法勉強会」 合同研究集会, 九州大学西新プラザ, 2009 年 8 月 4-5 日.
- (264) 田中高史, 磁気圏物理学において region1 沿磁力線電流発生メカニズム追求が如何に重要か, NICT 計算機シミュレーション研究会およびシミュレーション技法研究会, 九州大学西新プラザ, 福岡, 2009 年 8 月 4-5 日.
- (265) 寺田直樹, 松本洋介, 梅田隆行, 三好隆博, 深沢圭一郎, 田中高史, 高精度中心スキームを用いた磁気圏シミュレーション, 地球惑星系科学シミュレーション技法勉強会, 九州大学西新プラザ, 福岡, 2009 年 8 月 5-6 日.
- (266) 田中高史, 有限体積 TVD スキームを思いついた経緯, JST/CREST リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究チーム成果発表会および太陽地球惑星系統合型モデル・シミュレーター構築に向けた研究会, 九州大学山の家, 大分, 2009 年 8 月 5-6 日.
- (267) 久保勇樹, 中溝葵, 品川裕之, 島津浩哲, 田中高史, リアルタイム太陽風シミュレーションの開発とNICTでの運用, 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系統合型モデル・シミュレーター構築に向けた研究会」 「JST/CREST「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」チーム成果発表会」 合同研究集会, 九州大学山の家・九州地区国立大学九重共同研修所, 2009 年 8 月 6-7 日.
- (268) 品川裕之, リアルタイム電離圏-熱圏シミュレーションの現状と今後の展望, 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系統合型モデル・シミュレーター構築に向けた研究会」 「JST/CREST「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」チー

- ム成果発表会」合同研究集会, 九州大学山の家・九州地区国立大学九重共同研修所, 2009年8月6-7日.
- (269) 中溝 葵, 太陽風 MHD モデルの開発/磁気圏サブストーム解明を目指して, 「H21 年度名古屋大学太陽地球環境研究所 共同研究集会・太陽地球惑星系統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会」JST/CREST「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」チーム成果発表会」合同研究集会, 九州大学山の家・九州地区国立大学九重共同研修所, 2009年8月6-7日.
- (270) 寺田直樹, 田中高史, 品川裕之, K. Murawski, 太陽風-惑星相互作用シミュレーション, JST/CREST「リアルタイム宇宙天気シミュレーションの研究」チーム成果発表会, 九州大学山の家, 大分, 2009年8月6-7日.
- (271) 埜 千尋, 藤原 均, 笠羽 康正, 自転駆動の木星磁気圏-電離圏結合電流系の考察, 統合型モデル・シミュレータ構築に向けた研究集会, 九州大学山の家, 大分, 2009年8月6-7日.
- (272) 田中高史, サブストームは階層間結合の現われか?, 重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会, 国立天文台, 三鷹, 2009年9月10-12日.
- (273) 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 大気圏-電離圏結合モデルの概要と初期結果, 重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会, 国立天文台, 2009年9月10-12日.
- (274) 久保勇樹, 惑星間空間における太陽高エネルギー粒子の伝播, 日本天文学会秋季年会, 山口大学, 2009年9月14-16日.
- (275) 品川裕之, 陣 英克, 三好勉信, 藤原 均, 家森俊彦, 松村 充, 齊藤昭則, 五井 紫, 藤田茂, 津川卓也, 久保田 実, 加藤久雄, 石井 守, 村田健史, 寺田直樹, 寺田香織, 2009年7月22日の日食における電離圏変動のシミュレーション, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (276) 陣英克, 三好勉信, 藤原均, 品川裕之, 寺田香織, 大気圏-電離圏結合モデルによる電離圏日々変動の研究, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (277) 坪内 健, 島津浩哲, Non-stationarity of magnetic holes based on two-dimensional hybrid simulations, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (278) 藤田茂, 田中高史, 定常 IMF の下での磁気圏電離圏複合系の振舞, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (279) T. Tanaka, Region 2 current driven model of the substorm, 極地研究所シンポジウム, 国立極地研究所, 立川, 2009年11月12-13日.

③ ポスター発表 (国内41件、国際23件)

国際

<H17>

- (1) Terada, N., K. Seki, H. Shinagawa, and M. Ozima, Estimation of ion escape rates from non-magnetic earth: On possible contribution of terrestrial ion flows to non-solar components implanted in lunar soils, European Geosciences Union, General Assembly 2005, 29 April 2005, Vienna.
- (2) Shimazu, H, and T. Tanaka, Combined simulation of shock drift acceleration with proton entry into the magnetosphere, IAGA 2005 Scientific Assembly, July 18, 2005, Toulouse, France.
- (3) 藤田茂, 田光江, 小原隆博, 島津浩哲, 田中高史, 天羽 宏嘉, The virtual AE indices, IAGA 2005 Scientific Assembly, July 21, 2005, Toulouse, France.
- (4) 藤田茂, 田中高史, The Geomagnetic Sudden Commencement in the Magnetosphere-Ionosphere Compound System, Earth-sun energy exploration: Energy transfer, Jan 17, 2006, Kona Hawaii

<H18>

- (5) Nakamizo, A., and T. Tanaka, 3-D MHD Model of the Solar Wind-Interplanetary Space Combining System 1: Variation of Solar Wind Speed Associated with the Photospheric Magnetic Field, 11, December, 2006, the 2006 AGU Fall Meeting, San Francisco
- (6) Terada, N., Y. Kulikov, H. Lammer, M. L. Khodachenko, and H. I. M. Lichtenegger, Stellar radiation and particle induced ion-escape from CO₂-rich Earth-size and mass exoplanets within the habitable zones of dwarf stars, International TPF/Darwin workshop, Pasadena, USA, 2006年11月11日.

<H19>

- (7) Terada, N. and T. Tanaka, Numerical modeling of the circulation of ionospheric particles in the magnetosphere: Gyrokinetic approach, European Geosciences Union General Assembly 2007, Vienna, Austria, 2007年4月15日-20日.
- (8) Fukazawa K., T. Ogino, and R. J. Walker, The response of the Magnetosphere to a Northward IMF, IUGG2007, Perugia, Italy, 2007年7月2日-13日.
- (9) Tsubouchi, K., Nonlinear processes of Alfvén waves within the growing CIR, Asia-Oceania Geosciences Society 4th Annual Meeting, Bangkok, Thailand, 2007年7月30日-8月4日.
- (10) Fukazawa K., Y. Aoyama, and T. Ogino, Relation of the Cross Polar Cap Potential to the Interplanetary Electric Field, International CAWSES Symposium, Kyoto, Japan, 2007年10月23日-27日.
- (11) Tsubouchi, K., Alfvén wave evolution in an interaction system of the fast and slow solar wind, American Geophysical Union 2007 Fall meeting, San Francisco, USA, 2007年12月10日-14日.

<H20>

- (12) Miyake, W., and H. Jin, Near-real time monitoring of TEC over Japan at NICT (RWC Tokyo of ISES), Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (13) Ogino, T., K. Mase, T. Umeda, and K. Fukazawa, An MHD Simulation of the Magnetosphere of Hot-Jupiter, Asia Oceania Geoscience Society, 5th Annual Meeting, Busan, Korea, 2008年6月16日-20日.
- (14) Nakamizo, A., and T. Tanaka, Solar wind structure and sources: A comparison, of 3D MHD model with observations, 37th COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly, Montreal, Canada, 2008年7月13日-20日.
- (15) Jin, H., and T. Maruyama, Different behaviors of TEC and F₂ peak electron density at midlatitudes during geomagnetic storms, XXIX URSI General Assembly, Chicago, USA, 2008年8月11-16日.
- (16) Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker, The Dependence of Saturn's Magnetosphere and Polar Ionosphere on Solar Wind Dynamic Pressure and IMF Direction, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008年12月15日-19日.
- (17) Ogino, T., T. Aoyama, K. Fukazawa, and R. J. Walker, Dependency of the polar cap phenomena and magnetospheric dynamics on the intrinsic magnetic field, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008年12月15日-19日.
- (18) Walker, R. J., K. Fukazawa, T. Ogino, and D. Morozoff-Abezgauz, Simulations and Observations of Vortices Near Saturn's Dawn Magnetopause, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008年12月15日-19日.
- (19) Tsubouchi, K., Kinetic behavior in the formation process of magnetic decrease structures within the corotating interaction regions, American Geophysical Union 2008 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2008年12月15日-19日.

<H21>

- (20) Tsubouchi, K., H. Shimazu, Kinetic properties and multi-dimensionality associated with the

magnetic holes, The 9th International School of Space Simulations, Saint-Quentin en Yvelines, 2009年7月6-10日.

- (21) Kubo, Y. and H. Shimazu, High-Rigidity Cosmic Ray Penetration Mechanism in Interplanetary Magnetic Flux Ropes, 31st International Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, 2009年7月7-15日.
- (22) Tao, C., H. Fujiwara, and Y. Kasaba, Characteristics of Jovian magnetosphere-ionosphere current system induced by diurnal variation of ionospheric conductance, The 2009 meeting of the Magnetospheres of the Outer Planets community, Cologne Germany, 2009年7月27-31日.
- (23) Nakamizo, A., Generation of the substorm-FAC by slow mode disturbances in the near-rear plasma sheet, IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) 11th Scientific Assembly, 305-TUE-P1703-0602, Sopron, Hungary, 2009年8月23-30日.

国内

<H17>

- (24) 鈴木智美、田中高史、中溝葵、12面体分割三角格子による太陽-太陽風結合系の3次元シミュレーション、地球惑星科学関連学会合同大会、2005年5月22日、幕張
- (25) 島津浩哲、田中基彦、イオンスケール磁気フラックスロープの安定性、地球惑星科学関連学会2005年合同大会、2005年5月22日、幕張
- (26) 小川 智也、田 光江、田中 高史、山下 和之、3次元惑星間空間シミュレーションによるCME 衝撃波到来予報、地球惑星科学関連学会2005年合同大会、2005年5月22日、幕張.
- (27) 藤田茂、田中高史、磁気圏電離圏複合系の電離圏による影響、地球惑星科学関連合同大会、2005年5月22日、幕張
- (28) 島津 浩哲、田中 基彦、小規模磁気フラックスロープのシミュレーション、第118回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2005年9月29日、京都大学.
- (29) 小川 智也、田 光江、田中 高史、山下 和之、CME 衝撃波同士の合体のシミュレーション、第118回地球電磁気・地球惑星圏学会総会・講演会、2005年9月29日、京都大学
- (30) 田中高史、中溝 葵、小原隆博、島津浩哲、寺田直樹、藤田 茂、NICTで開始された宇宙天気シミュレーション予報、JSTシンポジウム「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」、2005年12月6日、東京大学

<H18>

- (31) 寺田直樹、田中高史、能勢正仁、電離圏起源イオンの磁気圏内での粒子軌道追跡、日本地球惑星科学連合2006年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2006年5月14日-18日.
- (32) Terada, N. and T. Tanaka, Numerical modeling of the circulation of ionospheric and solar wind particles in the magnetosphere, CAUSES International Workshop on Space Weather Modeling, Earth Simulator Center, Yokohama, 2006年11月14日-17日.
- (33) 中溝葵、田中高史、太陽シミュレーションモデルの開発、2007年1月23日、第2回CREST さきがけ領域シンポジウム、大手町 JAビル
- (34) 寺田直樹、田中高史、島津浩哲、藤田茂、地磁気嵐シミュレーションモデルの開発、2007年1月23日、第2回CREST さきがけ領域シンポジウム、大手町 JAビル
- (35) 寺田直樹、田中高史、地球型惑星電磁圏モデルの開発: Gyrokinetic approach、第8回惑星圏研究会、東北大学、2007年3月23日.

<H19>

- (36) 中溝 葵、田中 高史、3-D MHD model of the solar wind-interplanetary space combining system、2007年5月19日-24日、日本地球惑星科学連合2007年大会、幕張メッセ国際会議場
- (37) 浅井佳子、島津浩哲、長妻努、三好由純、太陽プロトンの侵入強度の地方時依存性: 低高度極軌道衛星観測、日本地球惑星科学連合2007年大会、日本地球惑星科学連合2007年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007年5月19日-24日.

- (38) 島津浩哲、田中基彦、小規模低ベータ値フラックスロープでの電子加熱、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (39) 久保勇樹、同一活動領域でのフレア発生時間間隔の分布について、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (40) 坪内健、The waiting-time distribution of the geomagnetic storm occurrences、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張メッセ国際会議場、千葉、2007 年 5 月 19 日-24 日。
- (41) 久保勇樹、島津浩哲、惑星間磁気雲中の宇宙線密度と異方性、日本天文学会 2007 年秋季年会、岐阜大学、2007 年 9 月 26 日-28 日。
- (42) 島津浩哲、北村健太郎、國武学、藤田茂、田中高史、オーロラエレクトロジェット指数のシミュレーション比較、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007 年 9 月 28 日-10 月 1 日。
- (43) 深沢 圭一郎、内側境界を 1Re にしたグローバル磁気圏モデルの開発、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007 年 9 月 28 日-10 月 1 日。
- (44) 松岡大祐、久保卓也、村田健史、木村映善、山本和憲、島津浩哲、小原隆博、亘慎一、藤田茂、田中高史、宮地英生、NICT リアルタイム磁気圏 MHD シミュレーションのリアルタイム 3 次元可視化とデータ公開、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007 年 9 月 28 日-10 月 1 日。
- (45) 村田健史、篠原育、宮下幸長、島津浩哲、木村映善、寺田直樹、ペタフロップススパコンによる宇宙プラズマシミュレーションへのロードマップ、地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、名古屋大学野依記念学術交流館、2007 年 9 月 28 日-10 月 1 日。
- (46) 藤田茂・田中高史、様々な太陽風条件における磁気圏－宇宙気象学序論－、地球電磁気・地球惑星圏学会、名古屋、2007 年 9 月 29 日-10 月 1 日
- (47) 田中高史、湯元清文、吉川顕正、中溝葵、亀井聡美、森口忠紀、島津浩哲、小原隆博、品川裕之、久保勇樹、坪内健、寺田直樹、深沢圭一郎、藤田茂、太陽風-惑星相互作用シミュレーション、第 3 回「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」領域シンポジウム、慶応義塾大(三田)北館ホール、2007 年 11 月 20 日-21 日。
- <H20>
- (48) 坪内 健、Probability forecast for geomagnetic storm occurrences and its verification, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張メッセ国際会議場、2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (49) 中溝葵、田中高史、Upgrading of the 3-D MHD solar wind model, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張メッセ国際会議場、2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (50) 中溝葵、田中高史、The realization of magnetospheric MHD processes: An idea based on the eigenmode decomposition in global MHD simulations, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張メッセ国際会議場、2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (51) 深沢圭一郎、Development of the Global Simulation Model of the Magnetosphere with the Nested Grids, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張メッセ国際会議場、2008 年 5 月 25 日-30 日。
- (52) 田中高史、宇宙天気シミュレーション、JST シンポジウム CREST12, 東京国際フォーラム、2008 年 5 月 27 日。
- (53) 坪内 健、Alfvén wave evolution in a corotating interaction region, International Congress on Plasma Physics 2008, 福岡国際会議センター、2008 年 9 月 8 日-12 日。
- (54) 吉川顕正、Formation of Cowling channel in the global ionosphere and their description method, 第 124 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、仙台市戦災復興記念館、2008 年 10 月 9 日-12 日。
- (55) 深沢圭一郎、荻野瀧樹、Turbulent convection in the magnetosphere related to the solar wind and planetary characters, 第 124 回地球電磁気・地球惑星圏学会総会及び講演会、仙台市戦災復興記念館、2008 年 10 月 9 日-12 日。
- (56) Fukazawa, K., Development of the Global Simulation Model With the Nested Grids, International Symposium: Fifty Years after IGY -Modern Information Technologies and Earth

and Solar Sciences-, Tsukuba, 2008年11月10日-13日.

- (57) 品川裕之, 大気圏/ダイナモ/電離圏結合シミュレーション, 第4回「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」領域シンポジウム, 慶応義塾大学, 2008年11月12日.
- (58) 田中高史, 磁気圏サブストームのMHDシミュレーション, 第4回「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」領域シンポジウム, 慶応義塾大学, 2008年11月12日.
- (59) 寺田直樹, 太陽風-惑星相互作用のシミュレーション, 第4回「シミュレーション技術の革新と実用化基盤の構築」領域シンポジウム, 慶応義塾大学, 2008年11月12日.
- (60) Fukazawa, K., T. Ogino, and R. J. Walker, Comparative magnetosphere from the global simulation, International Symposium for Magnetosphere and Ionosphere, Kanagawa, 2008年11月26日-28日.

<H21>

- (61) 久保勇樹, Effect of the heliospheric current sheet on the solar energetic particle transport, 日本地球惑星科学連合2009年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2009年5月16-21日.
- (62) 品川裕之, 陣 英克, 藤田 茂, 三好勉信, 田中高史, 藤原 均, 寺田直樹, 寺田香織, 島津浩哲, 村田健史, 磁気圏-電離圏-大気圏結合モデルを用いた中性大気変動の電離圏・磁気圏への影響の研究, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (63) 中溝葵, 坪内健, 島津浩哲, 久保勇樹, 品川裕之, 村田健史, MHD processes and FAC system during substorm deduced from data analysis and MHD simulation, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, B010-P011, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.
- (64) 埜 千尋, 藤原 均, 笠羽 康正, 磁軸の傾きに起因する木星磁気圏-電離圏-熱圏結合系の経度分布, 第126回地球電磁気・地球惑星圏学会総会および講演会, 金沢大学角間キャンパス, 2009年9月27日-30日.

(5-4) 特許出願

- ① CREST 研究期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

(5-5) 受賞等

- ① 受賞

<H18>

- (1) 平成18年5月16日、地球電磁気・地球惑星圏学会 田中館賞
藤田 茂、数値シミュレーションによる磁気圏電離圏系グローバル応答の研究

<H20>

- (2) Jin, H., Young Scientist Award, XXIX URSI General Assembly Chicago, 2008年8月.

② 新聞報道

<H20>

NICTで2008年7月から稼働を開始した「リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ」について、以下の新聞各紙に関連記事が掲載された。

- (1) 日経産業新聞, 「太陽風を即時に予想 通信障害・オーロラ予知 情通機構」, 2008年7月28日朝刊.
- (2) 電波タイムズ, 「NICT 世界初リアルタイム宇宙天気統合シミュレータ完成 『数値宇宙天気予報システム』を構築」, 2008年7月30日朝刊.
- (3) 岡山日日新聞, 「宇宙環境を実況で再現 オーロラ予測も!?', 2008年8月9日朝刊.
- (4) 東京新聞, 「宇宙天気予報 早く正確に 新システム開発 磁気嵐3日前にも」, H208月19日朝刊.
- (5) フジサンケイビジネスアイ, 「宇宙にも天気予報があるのは本当?」, 2008年8月19日朝刊.
- (6) 中日新聞, 「宇宙天気予報 早く正確に 新システム開発 磁気嵐3日前にも」, 2008年8月

19 日夕刊.

- (7) 日刊工業新聞, 「宇宙の天気 リアルタイムで再現 情通機構 シミュレーター開発」, 2008 年 8 月 25 日朝刊.

(5-6) 特記事項

<H17>

(1) リアルタイム宇宙天気シミュレーションの公開

17 年度よりリアルタイム宇宙天気シミュレーションをインターネットで公開している。現在全世界より一日 100 件程度のアクセスがあるが、地磁気嵐が発生すると、これが 1 日 500 件程度に増加するのが見られる。また 1 日単位のムービーも公開されており、太陽風—磁気圏—電離圏システムの理解を深めるのに有効であり、大学での教育に活用されている。

<H18>

- (2) NICT においては、ラグランジュポイントでの太陽風観測(ACE 衛星)を入力とし、リアルタイム磁気圏シミュレーションを行い、結果を常時ネットで公開している。同様のシステムは、最近 NASA でも運用されるようになり、我々のシステムが世界の先駆けとなる結果になった。

§ 6. 主催したワークショップ等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
17 年 8 月 3 日	STE 現象報告会	NICT	30 人	宇宙天気データの解析と解釈
17 年 10 月 13-14 日	STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会	愛媛大学	30 人	シミュレーション研究の成果発表
18 年 3 月 23 日	STE 現象報告会	NICT	30 人	宇宙天気データの解析と解釈
18 年 12 月 25-26 日	JST/CREST ・ NICT 合同シミュレーション研究会	統計数理研究所	40 人	宇宙関連のシミュレーション、および観測との比較について討議
19 年 9 月 11 日	STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会	大阪大学	30 人	名古屋大学 STE 研究所と共催で、宇宙天気シミュレーションの研究會を実施
20 年 3 月 7 日	STE 現象報告会 特集:宇宙天気シミュレーションの進捗と実用化への展望	九州大学	30 人	STE 現象報告会で、宇宙天気シミュレーションの報告を実施
20 年 11 月 4~6 日	日米宇宙天気シミュレーションシンポジウム	ミシガン大学	30 人	講演者 日本 6 人 米国 19 人
21 年 1 月 29~31 日	STE 研 NICT 合同シミュレーション研究会	名古屋大学	30 人	シミュレーション技術と宇宙天気への応用について討議された。

21年8月6～7日	JST/CREST チーム成果発表会	九州地区国立大学九重共同研修所	20人	宇宙天気シミュレーションの成果発表を行った。
-----------	--------------------	-----------------	-----	------------------------

海外から招聘した研究者等

氏名	所属・役職	滞在先	滞在期間	招聘の目的
Kris Murawski (ポーランド)	マリア・キュリー大学・教授	情報通信研究機構	20年9月1～30日	太陽風-非磁化惑星相互作用シミュレーションの研究
鷲見治一	アラバマ大学 研究員	九州大学	21年11月9日～ 12月8日	宇宙線シミュレーションの研究

§7 結び

本研究プロジェクトでめざしたMHDシミュレーションによる宇宙天気の可視化は、10年前であれば計算法やスキームが確立していなかったもので、かなり困難な問題であったが、現在では電磁力学や数値シミュレーションスキームを良く学べば、努力の積み重ねでなんとか出来るレベルの課題である。現在最も困難な問題は、実際の現象でまだ理解されていないものの説明に、シミュレーションを適用することであろう。宇宙天気に関わる観測は極度に専門化されており、シミュレーションに熟達し、かつ観測の意味をよく理解するという2面に精通することはなかなか難しい。しかしこのような2面に精通した人材を養成しないと、現在のこの分野では成果をあげられない。以上のような観点から見ると、本研究プロジェクトでは古くからの学問上の難問である次の2課題について、独自の答えを出したことが最も大きな成果といえる。この成果は実用上というより学問上の成果であるが、我々の研究はやはり最後は学問に向かう傾向があった。結論として、本研究プロジェクト最大の成果は、このような学問を推進する人材を養成したことと思われる。前述2課題に対する我々の意見は以下のものである。

サブストームモデル：本研究課題で樹立したサブストームモデルは、これまでの大勢と相反するものとなった。多くの学者はこのモデルに反対するでしょう。しかし大勢を確認する研究はつまらない。一見すると大勢に逆らう非常識なモデルに見えるが、対流のメカニズムに従って良く考えると、とても理にかなった自然なものである。

赤道異常：この結果はとても自然かつ華麗で、今までの疑問の大半を解決するもので、余り反対する学者はいないでしょう。直ぐに、同じような研究を行うグループが数多出現し、この分野は複合システム科学の時代となるでしょう。

用語解説

IMF: 惑星間空間磁場。コロナの磁場が引き出されたもの。

圧縮性波動：プラズマの中を伝播する波動のうち、縦波成分をいう。

AE インデックス：オーロラ帯にある12の磁場観測所のデータを重ね合わせ、その上下包絡線を取り、その幅を時間で並べたもの。

SC：磁気嵐急始。太陽風の動圧が高くなったことに対する磁気圏-電離圏系の応答。

ACE 衛星：地球前面の200地球半径の場所で、連続的に太陽風を観測している衛星。

沿磁力線電流：磁場に平行に流れ、磁気圏と電離圏を繋ぐ電流で、両者のエネルギーのやり取りを担う。

コロナ：太陽の電離大気（プラズマ）で、温度は100万度と光球の6千度より高い。
コロナホール：X線像で暗く見えるコロナ領域。ここから太陽風が発生する。
座標軸：座標軸の取り方はxを太陽方向、zを北、yを夕方方向に取る。
サブストーム：太陽風の磁場が北向きから南向きになったときの磁気圏—電離圏結合系の応答で、突然オーロラが明るくなり、激しい磁場変動が始まるオンセット、その前兆である成長相、オンセットの後の拡大相がある。
磁気嵐：IMFが大きく南を向くと、サブストームのような変動が激しく複数発生し、磁気嵐になる。
磁気圏：太陽風が地球磁場によってせき止められ出来る空洞で、地球磁場の勢力範囲。
磁気圏対流：磁気圏の磁場とプラズマが昼から夜へ、そしてまた昼へと循環する対流運動。
磁気張力：曲がった磁場がまっすぐになろうとする力。
赤道異常：電離圏電子密度は緯度15度付近で極大となり、この構造を赤道異常という。
太陽風：コロナのプラズマが太陽重力を振り切って惑星空間に超音速流として流出したもの。
ディスクリットオーロラ：サブストームのオンセットに現れるカーテン状のオーロラ。
ディフーズオーロラ：サブストームの拡大相に現れる雲のように広がったオーロラ。
電離圏：超高層大気が紫外線で電離し、大気とプラズマが混合して存在する領域。
電離圏ポテンシャル：磁気圏では運動は電場と等価であり、対流運動に対する電場が電離圏に投影されると電離圏ポテンシャルとなる。
プラズマシート：磁気圏尾部で赤道面付近はプラズマ圧力が高く、この領域をプラズマシートという。
ローブ：磁気圏尾部で赤道面から離れた領域はプラズマ圧力が低く、この領域をローブと呼ぶ。