

地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来

地球電磁気・地球惑星圏学会

2013 年 1 月

目次

1	はじめに	5
1.1	地球電磁気学・地球惑星圏科学の特徴	5
1.2	本将来構想の策定における考え方	5
2	地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と科学課題	7
2.1	太陽活動により変動する太陽地球圏環境の解明	7
2.1.1	磁気圏・電離圏での時空間・エネルギー階層間結合	7
2.1.2	地球圏に影響を及ぼす太陽風・太陽放射	12
2.1.3	地球気候に対する太陽活動の影響	15
2.1.4	内部・外部太陽圏研究	17
2.1.5	太陽研究	19
2.2	宇宙につながる大気圏・電磁気圏環境の解明	21
2.2.1	下層大気から中層・超高層大気への影響と緯度間結合	22
2.2.2	中性大気・プラズマ相互作用	24
2.2.3	電離圏と磁気圏との間の領域間結合過程	24
2.2.4	地球温暖化や気候変動との関わり	27
2.3	多様な惑星圏環境の統一的理解	29
2.3.1	磁化天体における時空間・エネルギー階層間結合の統一的理解	29
2.3.2	大気流出過程および惑星大気進化の統一的理解	32
2.3.3	惑星大気の統一的理解	33
2.3.4	惑星ダイナモの統一的理解	35
2.3.5	惑星環境の安定性と進化と分化の理解	36
2.4	宇宙プラズマ・地球惑星大気における物理素過程の理解	38
2.4.1	宇宙プラズマ物理	38
2.4.2	弱電離プラズマ・中性大気の物理	46
2.5	地球および月・惑星の電磁場変動、古磁場環境の解明	50
2.5.1	地磁気変動—現在、過去、そして未来予測	50
2.5.2	月・惑星内部に関する電磁気学的研究	59
2.6	電磁場観測による地球内部の状態や変動現象の理解	62
2.6.1	地殻・マンツルの構造の解明	62
2.6.2	地殻活動およびそれに伴う現象のモニタリング	68
2.6.3	資源探査	74
2.6.4	リモートセンシングの新展開	75
2.7	岩石・堆積物が担う磁化の物理の解明とその応用	77
2.7.1	岩石磁気学—理論的・実験的研究	77

2.7.2	岩石磁気学の応用.....	79
2.8	太陽地球系と地球内部を結ぶ科学課題.....	83
2.8.1	地磁気急変現象に伴う日本での地中誘導電流の解明.....	84
2.8.2	地圏を含むグローバルサーキットモデルの再構築.....	85
2.8.3	人工衛星による高精度地磁気観測から解明できる現象.....	86
2.8.4	地震に伴う変動の理解.....	88
3	人類活動を支える知識基盤の構築.....	90
3.1	背景となるサイエンス.....	91
3.1.1	宇宙天気.....	91
3.1.2	宇宙工学.....	92
3.1.3	地球表層電磁気.....	93
3.2	人類社会基盤への影響.....	94
3.2.1	宇宙機・観測機器への影響.....	94
3.2.2	大気抵抗による衛星軌道の変動.....	94
3.2.3	空気シャワーがもたらす航空機乗員被爆.....	94
3.2.4	超高層大気変動が宇宙利用システムに与える影響.....	95
3.2.5	地上インフラに及ぼす影響.....	95
3.2.6	新しい宇宙探査・宇宙利用への影響.....	96
3.2.7	地震・津波・火山噴火による災害.....	96
3.3	知識基盤の構築に向けた研究課題.....	97
3.3.1	宇宙環境計測機器開発の充実.....	97
3.3.2	宇宙機運用データベースの整備.....	97
3.3.3	極端宇宙現象の把握と対策.....	97
3.3.4	大気海洋変動研究との連携.....	98
3.3.5	衛星工学分野との連携.....	98
3.3.6	予測研究の進展.....	98
3.3.7	予測研究実現のためのモデリングフレームワーク.....	98
3.3.8	予測研究実現のための観測.....	98
3.3.9	推進系.....	99
3.3.10	宇宙太陽発電所（SPS）建造における環境アセスメントへの貢献.....	100
3.3.11	地球表層電磁気現象.....	100
4	研究推進に必要な技術開発・環境整備.....	102
4.1	観測技術開発.....	102
4.1.1	太陽地球系科学分野の機器開発.....	102
4.1.2	固体地球研究分野の観測・分析機器開発.....	122
4.2	計算機シミュレーション・モデリング.....	125

4.2.1	技術開発要素.....	125
4.2.2	環境整備.....	134
4.3	データシステム.....	136
4.4	情報数理技術.....	140
4.4.1	データマイニング技術.....	140
4.4.2	データ同化技術.....	142
5	研究推進のために必要な施策・組織.....	143
5.1.	研究推進のために必要な施策.....	143
5.2.	共同利用拠点を含めた大型研究機関の重要性.....	246
6	学会と社会の関わり・研究者の働き方の多様性.....	269
6.1	はじめに.....	269
6.2	パブリック・アウトリーチ活動.....	270
6.2.1	アウトリーチイベント.....	270
6.2.2	秋学会の記者発表.....	273
6.2.3	衛星設計コンテスト.....	275
6.2.4	教育機関、公共団体等への講師派遣.....	276
6.2.5	若手アウトリーチ活動“STEPLE”.....	277
6.2.6	Webの充実.....	278
6.3	学校教育に対する働きかけ.....	279
6.3.1	SGEPSS分野の学校教育での扱われ方.....	280
6.3.2	「太陽地球系科学」の執筆と発刊.....	285
6.3.3	これからの学校教育へのはたらきかけについて.....	286
6.4	研究者の充実したライフスタイルの実現.....	288
6.4.1	現在の状況.....	288
6.4.2	これまでの取り組み.....	291
6.4.3	今後の方向性.....	292
資料	295

4.2.2 (3) 人材育成

計算機シミュレーション・モデリング分野において、プログラム開発が出来る若手研究者を育成することは急務である。しかし、プログラム開発技術の習得は機器開発度同様に難しく3年以上は要するため、単年度や短期間で雇用しているPDに、新たにプログラム開発を教えるのは困難な状況にある。また近年の計算手法や並列化手法の複雑さに加えて成果として要求されるサイエンスの高度化により、シミュレーション・モデリングコードの中身を知らずに道具としてのみ利用する、ユーザーとしての立場の研究者が増えてきた。さらには、プログラム開発ができる研究者のキャリアパスも大きな問題である。近年では、HPCIプログラムに関連して、核融合科学分野、天文学分野や計算科学分野へのキャリアパスが開かれてきたが、当学会関連機関においては狭き門であると言える。

シミュレーション・モデリング研究者の育成においては、国際的にはISSS (International School for Space Simulations) が数年おきに開かれており、間もなく11回目を迎える。また天文学分野においては宇宙磁気流体・プラズマシミュレーションサマースクールが開催されている。しかし、近年の先進的手法の発達に伴ってプログラムやシミュレーション手法が複雑化し、説明文とプログラムの対応関係がよく分かるような教科書が少なくなっている。また教科書やドキュメントの整備が新手法の開発スピードに追い付いていない。この結果、プログラム開発技術の基礎を学ぶ機会はむしろ減ってきているように思われる。今後は、Web などを利用したドキュメントの整備や初心者用のシミュレーションスクールの開催のみならず、上級者向けのプログラム講習会やコード開発ワークショップなども行っていく必要がある。しかしこれらには、学会のサポートが不可欠である。

4.3 データシステム

データシステム

本節では、科学研究を行う上で必要なデータの取得、処理、保存をする情報ネットワークや計算機、データの形式や扱い方などを考える情報科学や技術、構築されたデータベースやアーカイブ、さらに、それらを運用する組織を一体のもの、すなわち、データシステムとして捉える。そして、地球電磁気・地球惑星圏科学分野における情報科学や技術の利用・応用、そして、今後目指すべきデータシステムについて述べる。

現代の情報と科学

情報技術・通信技術 (IT あるいは ICT) の発達と普及には、インターネット通信技術を中心にめざましいものがある。しかしその結果、電子情報が急激に増加し、情報爆発、データの嵐、情報洪水、あるいはビッグデータなどとよばれる状況が出現した。膨大な情報量に適切なテクノロジーを用いて対処し、最大限の知識を獲得して社会の発展に役立てる必要がある。我が国では、技術的にはさまざまなチャレンジが行われ、例えば情報処理については「地球シミュレータ」「京 (けい)」といった世界トップランクのスーパーコンピ

ュータの開発、ネットワークでは超10ギガビット級のSINET4、JGN-Xなどの研究ネットワークの整備および実験に国家予算が支出されている。

地球電磁気・地球惑星圏科学においては、その時代ごとにロケット、人工衛星、レーダー、スーパーコンピュータなどの最新技術を利用して新たなブレークスルーをもたらしてきた。当分野において新たな飛躍をもとめるとすると、最新の情報通信技術を取り入れた新しいデータシステムの構築は一つの有力な手段であると考えられる。

地球電磁気・地球惑星圏科学とデータ

地球電磁気・地球惑星圏科学におけるデータは、気球・航空機・人工衛星などの飛翔体を用いた観測や、世界中に設置された地上観測装置により日々生産される。近年では、数値シミュレーション・モデリング技術の急速な発展により、大量のデータが計算機上で生み出され、観測データとの比較研究が行われている。

このうち、特に観測は、人類が制御できない、時々刻々と変動する自然を記録していくものであるがゆえに、全く同じ条件で生ずる現象の観測データは二度と取得することができない。このため、科学の基本的な手続きである「第三者の追試による再検証」を保証するためには、得られた観測データを余すところなく保存して失われないようにしておくことが本質的に重要となる。この点が、再検証に必要な情報として実験条件・方法、分析方法のみを記録しておけばよい物理・化学分野等の実験的研究と大きく異なる。また、地球電磁気・地球惑星圏科学データは地球環境データであり、数十年~数百年スケールの長期変動も重要な研究対象である。従って、観測データを長期に渡り蓄積・保存する必要がある。

データベース・データシステムの現状

国際学術連合（ICSU、現在の国際科学会議）が、1957-1958年に実施された国際地球観測年（IGY）で取得された大量の観測データを国際的に交換・保存する必要性を提示し、世界資料センター（WDC）組織が設立された。地球電磁気・地球惑星圏科学データは、歴史的にこの枠組を利用して世界中の研究者に提供されてきた。近年では、国際科学会議（ICSU）の太陽地球系物理学科学委員会（SCOSTEP）が主導した、太陽地球系エネルギー国際協同研究計画（STEP: 1990-1997）、STEP-Results、Applications and Modeling Phase（S-RAMP: 1998-2002）、Climate and Weather of the Sun-Earth System（CAWSES: 2004-2008）、およびCAWSES-II（2009-2013）などの国際研究計画を通して、各研究機関でのデータベース化が進められてきた。

ただし、データベース整備・開発の現状はそれぞれのデータによって大きく異なっている。例えば、人工衛星により取得されるデータは、我が国においても比較的データベース整備が進んでいるが、これはデータが地上局に転送された時点で既に計算機上に乗っていてデータベース化などの処理フローに乗せやすいためである。また、主なデータ生産者は宇宙航空開発機構に限定されるので一元管理ができ、かつデータセンターが業務として明

確に位置づけられているために、定常的にリソースを投入できる点が大きいの。

これからの科学データシステム、データベースのあり方

定常的・連続的観測で得られるデータについてはデータの品質管理、また保存されているデータの維持、管理が不可欠である。このためには、データの維持管理にも専門的な人材が必要であることは言うまでもない。現状、我が国で多く見られるような、分業体制の未確立によるデータ管理業務の特定の研究者への集中は解消されなければならない。

公文書に国立公文書館があるように、データを公的に維持・管理する「国立科学データセンター（仮）」のような専門組織を設立すべき、とは、「地球電磁気学の発展的将来」（平成 3 年）においても提言されてきたところである。しかしながら、こうした公的機関の設立やその予算の確保は容易ではなく、いまだ実現には至っていない。一方、情報ネットワークで接続された機関同士でデータを流通しあうことで、バーチャルな分散データセンターを構想することは現代の技術で可能になっている。さらに、データサービスの一環として、データセンターが共通データ解析ツールの開発・供給することで、分散データセンターと研究者の研究活動を直接的に結びつける手段を提供することも求められつつある。これらの点については、過去のデータセンターや、最近では IUGONET プロジェクトでも試みられているところである。喫緊の課題として、分散データセンターを構成する各機関にデータ専門スタッフを配置してデータ維持・管理体制を強化することが急務である。また、それぞれの機関の独自観測データについては、メタデータやデータファイルのデータベース化と、関係組織との相互交換体制をつくることを条件づけて、そのための予算・人員を手当するなどの方策を通じて、オープンなデータ流通機構の普及を推進していくことが必要不可欠である。

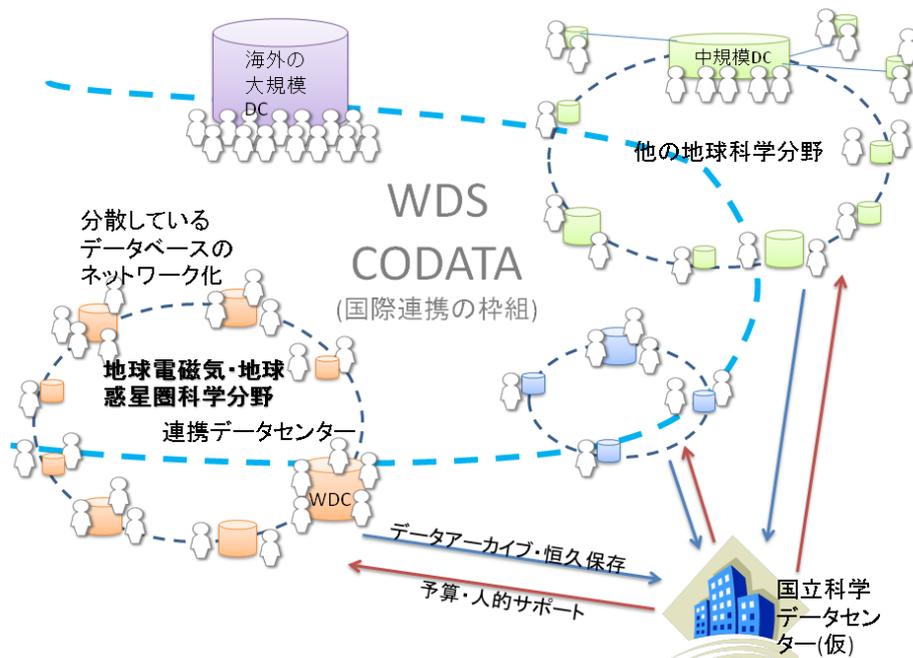


図4.3.1 連携データセンターと国立科学データセンターによる科学データサポート体制

こうした動向は、地球電磁気・地球惑星圏科学分野だけのものではない。データのオープン利用と流通が学術発展の根幹の一つであるという認識は、国際科学会議における World Data System (WDS) 事業や Committee on Data for Science and Technology (CODATA) 他関連委員会、国際連合下の学術やデータ、地球観測の関連組織群、また GEO (地球観測に関する政府間会合) において、データ体制の根本理念として共有されているところである。

また新たな動向として、データ公開体制を学術研究の制度として根付かせるために「データ・パブリケーション (data publication)」およびその一環として、データを論文のように参照してサイテーションインデックスのように被引用頻度を通じた業績評価を行う「データ・サイテーション (data citation)」などが国際的に議論されている。実際に一部の研究機関と商業出版社によるサービスが試験的に始まっているが、これは科学データの利用・評価体制全般の変革につながることであり、データシステムとしての対応を含めて、地球電磁気・地球惑星圏分野としても積極的に参加していくべきである。

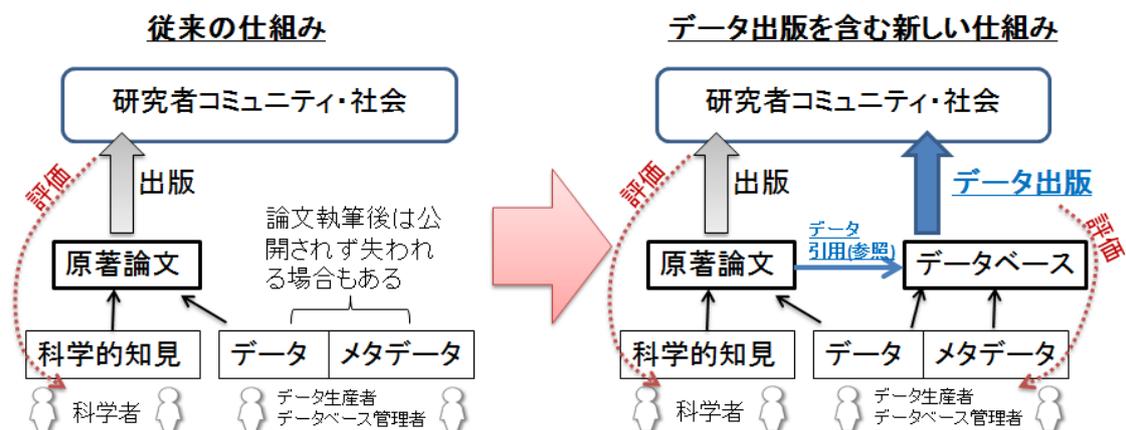


図4.3.2 科学的知見、科学データの出版

4.4 情報数理技術

地球電磁気・地球惑星圏科学に関わる様々なデータは、観測技術の進展に伴う観測機器の高精細化・高時間分解能化や観測点の多点化、また計算機シミュレーションを行うプラットフォームの性能拡大に伴い、飛躍的に増大することが予想される。これらの巨大データを有効に取り扱って科学の発展に役立てるには、科学的解釈を行うために用いる有用情報をデータ群から効率良く抽出する知的情報処理手法や、解釈を裏付けるデータをわかりやすく示す高度なコンピュータ活用法を積極的に導入する必要がある。さらには、観測とシミュレーションを連携し、両者を補完的に扱うことで、多数の要素が複雑に関与する物理現象をより現実的な形で計算機上に再現することも可能となりつつあり、物理現象の理論解釈や将来予測への活用が期待されている。このように、近年急速に発展してきた情報数理工学的な知見を、我々の学問分野に取り込んで応用することが、今後の地球電磁気・地球惑星圏科学の発展に必須である。

4.4.1 データマイニング技術

一般に自然科学分野では、獲得したデータからいかに興味ある事象を発見し、その原理をいかに理論的に説明するかが、最も基本的な研究アプローチである。しかし多くの場合、観測対象となるデータは、太陽活動度・地磁気活動・季節・緯度・ローカルタイムなど、多次元にわたるパラメータに依存し、種々の観測量の因果関係も、極めて複雑である。そのため、従来の研究アプローチは、「ある理論に基づき、その裏付けとなる観測結果を科学者が発見する」、「非常に特異な観測結果について理論説明を試みる」など、科学者が長年蓄積した経験と知見に基づいて行われてきた。しかしながら、観測データの高精度化・高分解能化にともなう爆発的な増加と、その理論解釈を助けるべき計算機シミュレーションの大規模化は、人間がその全貌を直感的に把握できるキャパシティを越えつつある。

このような情報爆発問題に対し、巨大なデータ群の中に含まれる特定のパターンを機械

的に認識し抽出するパターン認識、既存の多量データに現れる法則性を学習させて将来予測に役立つ機械学習、複数の事象間の因果関係を見つけ出して定量化する相関ルール、類似するデータをいくつかのグループに分類するクラスタリングなど、巨大なデータ群から計算機力を借りて知識を発見するデータマイニングと呼ばれる技術が情報数学の分野で研究され、経済学（経済動向予測）、経営学（顧客の嗜好解析に基づくサービス提供・販売予測など）、生命科学（ゲノム情報解析）、医療（医療画像診断）など様々な分野で活用されている。我々の学会が取り扱う自然科学データは、「同じ事象は二度と発生しない」といってよいほど、個々の事象の特徴にバラエティがあり、それらを網羅的に説明できる理論の構築は極めて困難である。しかしながら、4.3節で述べたように、地球電磁気・地球惑星圏分野の各種データを広く、統合的にアーカイブし活用できる環境が今後急速に進むことが考えられ、これらの大容量データを、情報数学的な技術を積極的に取り込んで研究に活用することが学問の発展に寄与するであろう。このような研究アプローチはまだ端緒についたばかりであるが、長期にわたる巨大データセットから、磁気嵐急始部の自動検出や、特徴的なスペクトルを持つ波動現象の自動抽出（類似イベント抽出）システムなど、徐々に応用が始まりつつあり、今後の発展が期待される。

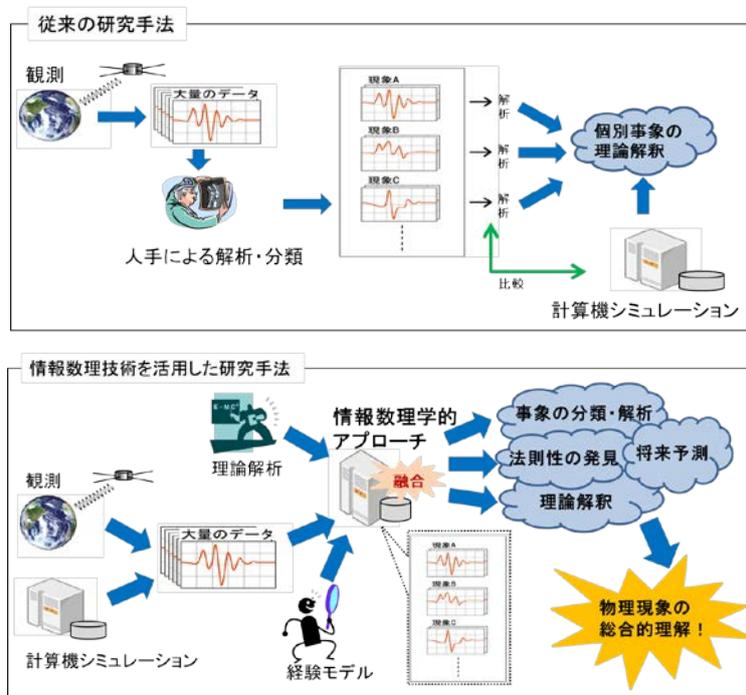


図 4.4.1 情報数理技術の活用

4.4.2 データ同化技術

近年、観測データとシミュレーションを融合させたデータ同化という技術が、地球電磁気・地球惑星圏科学においても用いられるようになってきている。一般的に地球科学の観測データはシミュレーショングリッド等に対して疎である。一方、シミュレーションで用いられているパラメータや境界条件等の不定性は大きく、現象の高精度な推定を行うためにはこれらのパラメータの精度向上が必須となる。データ同化の技術としては、気象業界を中心に用いられている 4 元データ同化法¹⁾の他、アンサンブルカルマンフィルターや粒子フィルターなどの逐次データ同化法と呼ばれる手法がある。

気象や海洋といった他の地球科学分野に比べて、地球電磁気・地球惑星圏科学においてにおけるデータ同化の適用例は、まだそれほど多くはない。電離圏、プラズマ圏、リングカレント、放射線帯といった領域についてのデータ同化研究が、米国、日本、欧州で進められており、モデルの改善や、現況、そして予測の高精度化に活用されつつある。一方、気象科学等の分野では、データ同化が天気予報にも活用されており、気象庁のような現業機関でも運用されている。地球電磁気・地球惑星圏科学においても、宇宙天気²⁾のオペレーションを行っている機関において、データ同化技術の積極的な導入と運用をはかっていくことが必要になると考えられる。