

宇宙天気予報計画

菊池 崇*

SPACE WEATHER FORECAST PROGRAM

By

Takashi KIKUCHI

This paper describes the Space Weather Forecast Program managed by the Communications Research Laboratory, which will be needed for aiding human activities in space laboratories, factories, and colonier in the 21st century.

The space weather forecast is primarily based on prediction of solar flares and geomagnetic storms, since they are two major critical phenomena causing radiation hazards to human space activities. This program is a 15 year project consisting of three phases. In the first phase, ground facilities for continuous observation of the solar magnetic field and solar plasma motion will be constructed. A computer communication network will be completed to provide quick exchange of the solar and space environmental data. In the second phase, prediction algorithms will be established based on the integrated scientific results. Efforts will also be made for development of standardized space environment monitors. The third phase is an experimental phase for operation of the space weather forecast. Finally, emphasis will be placed upon the necessity for international cooperation in the scientific and operational communities.

1. 緒言

21世紀の有人宇宙時代には、人類の宇宙活動と宇宙における衛星機器の安全のために宇宙環境予報（宇宙天気予報）が必要となり、それが現在の天気予報と同様な意味を持つと考えられる。このような事態に備えるために通信総合研究所は1988年度から宇宙天気予報システムの研究開発を開始した⁽¹⁾。宇宙における人体及び衛星機器に最も重大な障害を起こすのは太陽フレア放射線と地磁気嵐に伴う磁気圏内高エネルギー粒子及び放射線帯粒子である。したがって、宇宙天気予報の中心課題は太陽フレアと地磁気嵐の予報になる。

本稿ではまず、電波伝搬擾乱予報を中心とした通信総合研究所の活動、及びこれに関連する国際的な活動を振り返ることによって、宇宙環境予報が必要となった経緯を明らかにする。次に何を予報するかについて、太陽フレアと地磁気嵐に焦点を当てて記述し、現在進めている宇宙天気予報計画の内容について記述する。計画は3期15年からなり、第1期の目標を太陽フレア予知技術の確

立に置く。この目標を実現するために太陽磁場・プラズマ動態観測装置を整備し、太陽・惑星間空間のデータをリアルタイムあるいはそれに近い形で入手するためのネットワークを構築する。第2期では、これまでの研究成果を活用して予報アルゴリズムの確立を目指すほか、標準化された衛星搭載用宇宙環境モニターを開発する。第3期は宇宙天気予報の運用を行いつつ、システムの総合的な発展を目指す。また、21世紀に完成を目指している宇宙天気予報センターは予報業務及びこれを支える宇宙空間物理学の研究に加えて、総合的な太陽地球間情報センターとしての役割も果たすことを指摘し、これらの観測、データ交換には、国際協力が不可欠であることを強調する。さらに、計画は、過去、現在、そして未来の研究を総合する方向で進められるために、科学研究のコミュニティとの密接な関係を保つこと、そして衛星を運用している機関と緊密な協力関係を維持することの必要性を強調する。

2. 宇宙環境予報の歴史

現在の国際間の通信は通信衛星や海底ケーブルを用い

* 関東支所 平磯宇宙環境センター

るようになっているが、かつては短波通信がそれを担っていた時代があった。通信総合研究所は短波通信を始めとして、超長波から極超短波にわたる電波利用の安定した運用を確保するために、1949年から40年間にわたり、宇宙空間の擾乱や電波伝搬擾乱を予報する業務を実施してきた。この目的のために、各種電波の伝搬実験や伝搬に大きな影響を与える電離層の定常観測を行ってきた。また、電離層擾乱の最大の原因である太陽活動をモニターするために太陽電波の観測を行い、電波伝搬、電離層物理、そしてこれに密接に関係する太陽を含めた宇宙空間物理の研究を行ってきた。

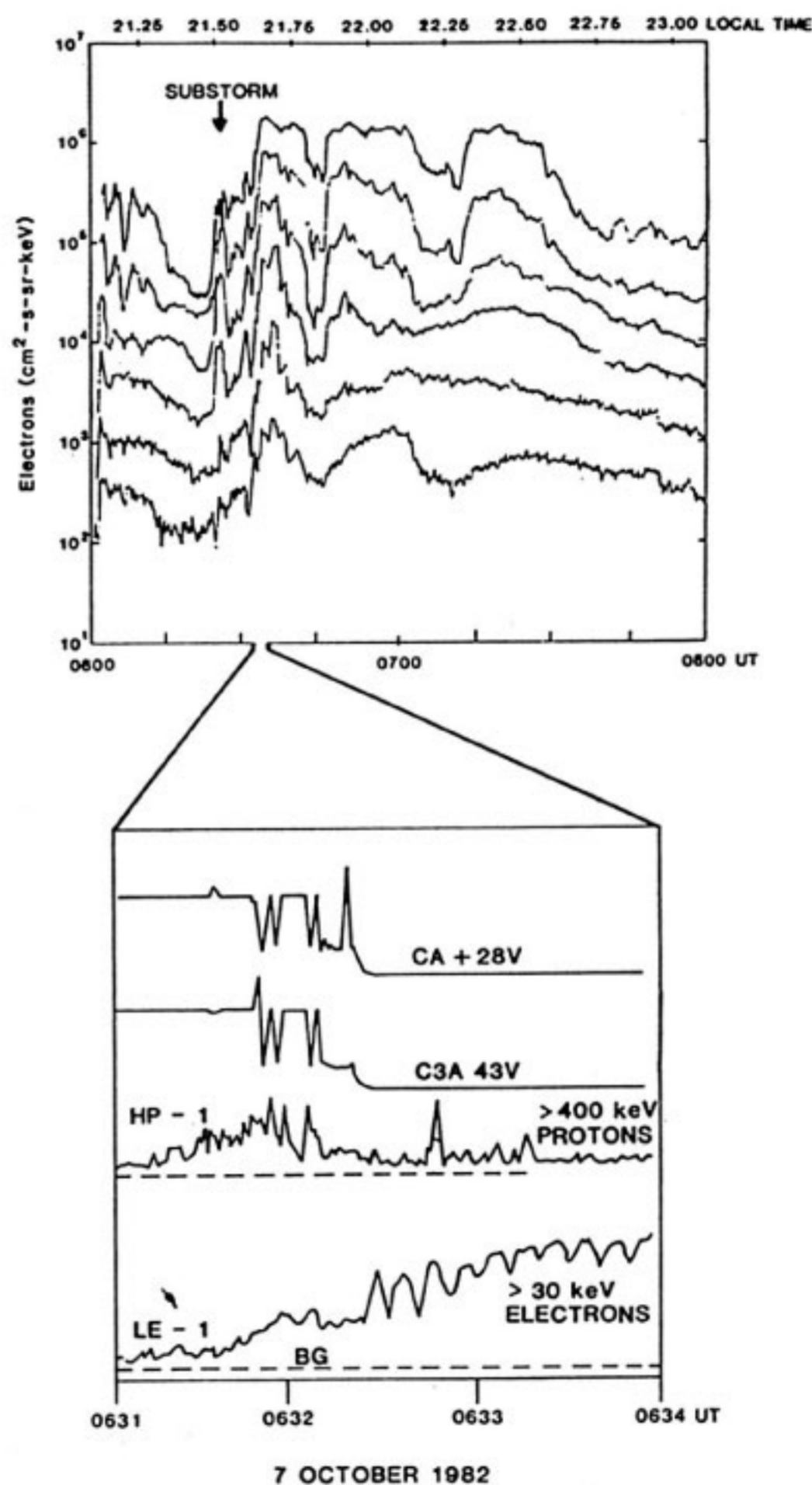
このような活動は日本のみならず、米国その他の国でも行われてきたが、宇宙空間及び電波伝搬擾乱予報のためには世界的な観測網と迅速なデータ交換ネットワークが必要である。この結果、国際的な宇宙環境情報サービスを行うために国際ウルシグラム世界日サービス機関 (IUWDS: International Ursigram and World Days Service) が結成された。IUWDS は国際電波科学連合 URSI (International Union of Radio Science) の公式機関であり、IAU (International Astronomical Union) と IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) と協同で運営している。IUWDS の宇宙環境データであるウルシグラム (Ursigram) は世界6箇所の地域警報センター (第1表参照) といくつかの準警報センターの間で交換され、各警報センターでは太陽フレアと地磁気嵐の予報が行われている。

IUWDS が1979年に米国のボルダーで開催した第1回の太陽地球環境予報 (Solar-Terrestrial Prediction) ワークショップでは、将来予報が必要とされる分野として、電力施設や石油パイプラインなどの地上施設が挙げられ、これらに対する地磁気嵐の影響が強調された⁽²⁾。そして、更に衛星の運用に対する予報の重要性が指摘された⁽³⁾。衛星が放射線 (高エネルギー粒子) に曝されると機器の絶縁体の中で電荷が蓄積され、放電が電子部品に障害や時には破壊をもたらす。また、熱プラズマ中の衛星機器は電子とイオンの移動度の差によって負に帯電し、衛星のある部分から他の部分への放電が起こり、機器の異常が発生する。第1図に、衛星帯電による静止衛星の障害の例を示す⁽⁴⁾。この図上部は 30 keV 以上の電子束を示し、図下部に、磁気圏サブストーム時の電源電圧変動と電子束、陽子束との関係を示している。

高エネルギー粒子は衛星機器の障害を引き起こすだけでなく、人体へ重大な影響を与える。地上の生物が放射線の影響を受けないのは、等価的に90センチメートルの厚みの鉛に相当する厚い大気の層に保護されているからである。これに対して、宇宙船は鉛の厚みにして1セン

第1表 IUWDS の世界警報本部及び地域警報センター

センター名	サービス地域
世界警報本部 (米国ボルダー)	全地域
ボルダー地域警報センター (米)	西半球
パリ 地域警報センター (仏)	西ヨーロッパ
カムシュケト地域警報センター (独)	西ヨーロッパ
モスクワ地域警報センター (ソ)	アジア・ヨーロッパ
シドニー地域警報センター (豪)	オーストラリア・南極
東京 地域警報センター (日)	西太平洋



第1図 静止軌道上の衛星異常の例。プロトン、電子束の増加に対応して電源電圧変動が発生した (Baker, 1987 より)。

チメートル程度であり、宇宙服にいたってはせいぜい0.01センチメートルにすぎない。宇宙空間での人間活動にとって、宇宙線の危険性が地上では想像できない程大きいことが理解できよう。この問題は、人間の宇宙活動が飛躍的に増加する21世紀に深刻な問題となることが予想され、放射線発生の原因である太陽フレアと地磁気嵐の予報が宇宙活動支援業務の重要な部分になることは疑いない。このような衛星及び人体への放射線の影響の深刻さとその予報の必要性は、今後のSTPワークショップでも繰り返し強調されるであろう。

衛星及び人体への放射線の影響は、衛星機器や有人宇宙船そのものを改善することによりある程度は避けることが出来る。しかし、上に述べたように、飛行体を取り巻く宇宙環境の正確な情報を提供することと、更に一歩進んで環境予報すなわち宇宙天気予報を行うことが、21世紀の宇宙活動を支える上で非常に重要になる。将来、宇宙実験室での実験が計画され⁽⁵⁾、月に居住する可能性まで指摘されている⁽⁶⁾。このような近代的な宇宙システムは複雑さを増し、高度の機能を持つために、宇宙天気予報はますます必要性を増すと予想される。

3. 何を予報するか

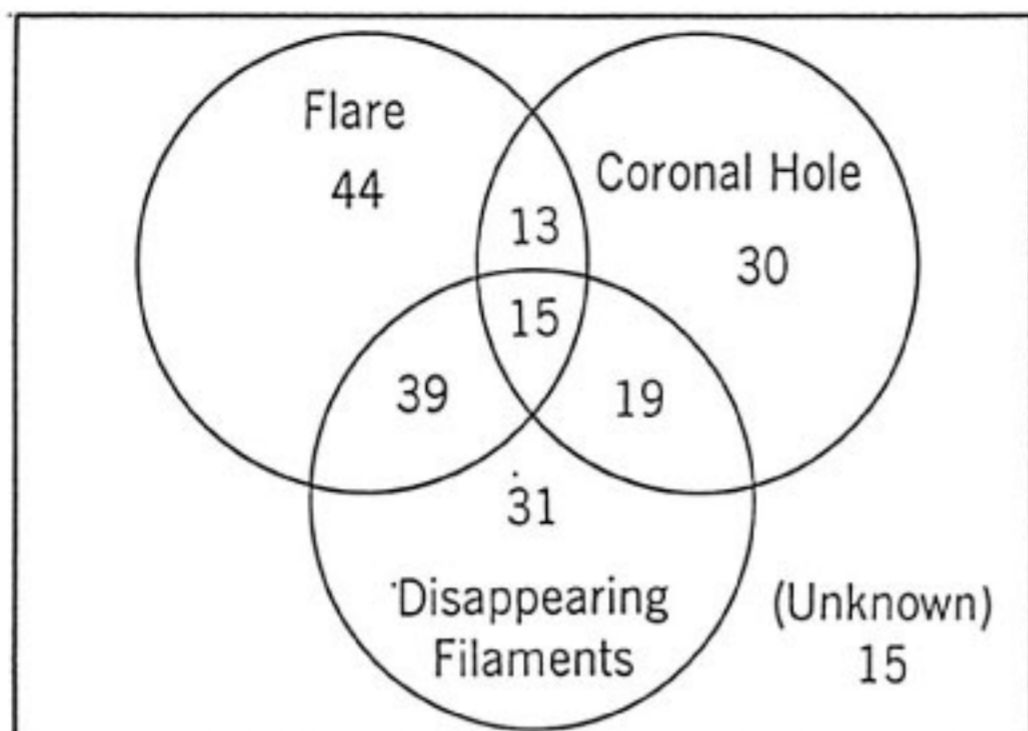
この節では、宇宙天気予報において何を予報するかを具体的に示す。衛星と有人宇宙船にとってもっとも大きな障害は太陽フレアが放出する放射線（高エネルギー粒子、X線、ガンマ線）と磁気圏内に起源を持つ放射線及び熱プラズマである。これらの中で最も重要なのは高エネルギー粒子であり、(1)太陽放射線（プロトン、アルファ粒子）、(2)磁気圏内放射線帯（バンアレン帯）粒子、そして(3)外部磁気圏の準捕捉帯粒子に分類される⁽⁴⁾。これらを予報するために最低限必要なことは太陽フレア発生の予報と地磁気嵐の予報である。予報の対象と予報に必要なデータを第2表にまとめたが、以下に少し解説を加える。

(1) 太陽フレア

太陽フレアは太陽面の黒点領域に磁場エネルギーの形で蓄積されたエネルギーが爆発的に解放される現象である。我々が予報すべきことは、フレアの開始時刻、継続時間、放射線強度及び太陽風衝撃波の発生などである。予報を可能にするために明らかにすべきことは、フレアのエネルギーがどのように蓄積され、どのように放出され、そして輸送されるかである。そして、これらを明ら

第2表 予報の対象と予報に必要なデータ

予報対象	予報項目	予報に必要なデータ及び観測
太陽フレア	開始時刻 継続時間 X線などの電磁放射 太陽宇宙線 太陽風衝撃波	黒点群の面積及び黒点数（白色光観測） フレア、プラージュ、フィラメントの発生と消滅（H α 光観測） 太陽磁場（リオフィルタ使用による光学観測） 太陽プラズマ速度（光ドップラー観測） 太陽電波スペクトル（70-500MHz 電波観測） 太陽面温度（32G, 49Gミリ波太陽像観測）
地磁気嵐	SSC (SI) サブストーム 放射線帯粒子 衛星帯電 地上誘導電流	太陽風衝撃波(Libration point観測) 太陽風速度・磁場(Libration point観測) 太陽電波スペクトル（70-500MHz 電波観測） 太陽放射線（静止衛星観測） 磁気圏高エネルギー粒子（静止、周回衛星観測） 極域磁場・粒子降下（磁力計、リオメータ） 地上磁場観測網（INTERMAGNET）



第2図 地磁気嵐の原因となる太陽フレア、コロナホール、フィラメント消失の発生割合。1976年6月1日から1983年12月31日までに発生した206個の地磁気嵐の原因と思われる現象の割合を個数で示している (Joselyn, 1986 より)。

かにするためには、太陽黒点群の面積及び黒点数、フレア、プラージュ、フィラメント像、太陽磁場とプラズマ速度場、太陽電波放射のスペクトル形、そして太陽面温度の連続観測を行うことが必要である。

(2) 地磁気嵐

地磁気嵐を発生させるエネルギーは太陽風によって供給されるが、磁気圏の中へのエネルギー流入は太陽風磁場の向きで決定される。すなわち、太陽風磁場が南を向く時に最も効果的であり⁽⁷⁾、流入するエネルギー量は太陽風磁場の南向き成分と太陽風速度に比例する。エネルギー流入が増加すると、磁気圏対流が強められ、尾部の形状が変化して、エネルギーが尾部磁場の中に蓄積される。蓄積されたエネルギーがあるレベルを超えるか、何らかのきっかけがあると、エネルギーの解放が起こり、粒子の加速を起す。この過程は磁気圏サブストームと呼ばれる⁽⁸⁾。サブストームが連続するとこの間に流入した粒子が地球の周囲を回ることによって環電流が発達する。この状態が地磁気嵐と呼ばれる。したがって、地磁気活動の指数、Dst, Kp, AE は磁気圏内の環電流や加速粒子の降下を知るための指標としての役割を果たす^{(9) (10)}。

地磁気嵐を予報する方法としては事前に太陽風磁場の向きを観測することが最も確実な方法である。太陽風磁場の方向を予測する努力はなされているが、現在のところ実用にはいたっていない。地磁気嵐の正確な予報には将来においても惑星間空間での観測が必要である。太陽と地球の間に位置する秤動点 (Libration point) において太陽風を観測すれば1時間前に磁気圏内の粒子の振る舞いを予測することが出来る。また、確率は落ちるが

太陽面現象から地磁気嵐の発生を予報することも可能である。この方法だと2~3日前に予測することが出来る。地磁気嵐の原因となる太陽面現象は、(1)太陽フレア、(2)コロナホール、(3)フィラメント消失が考えられる⁽¹¹⁾。これらの割合は、Joselyn (1986)⁽¹²⁾ が206個の地磁気嵐を調べたところ、第2図に示すようになった。

4. 宇宙天気予報の計画と進捗状況

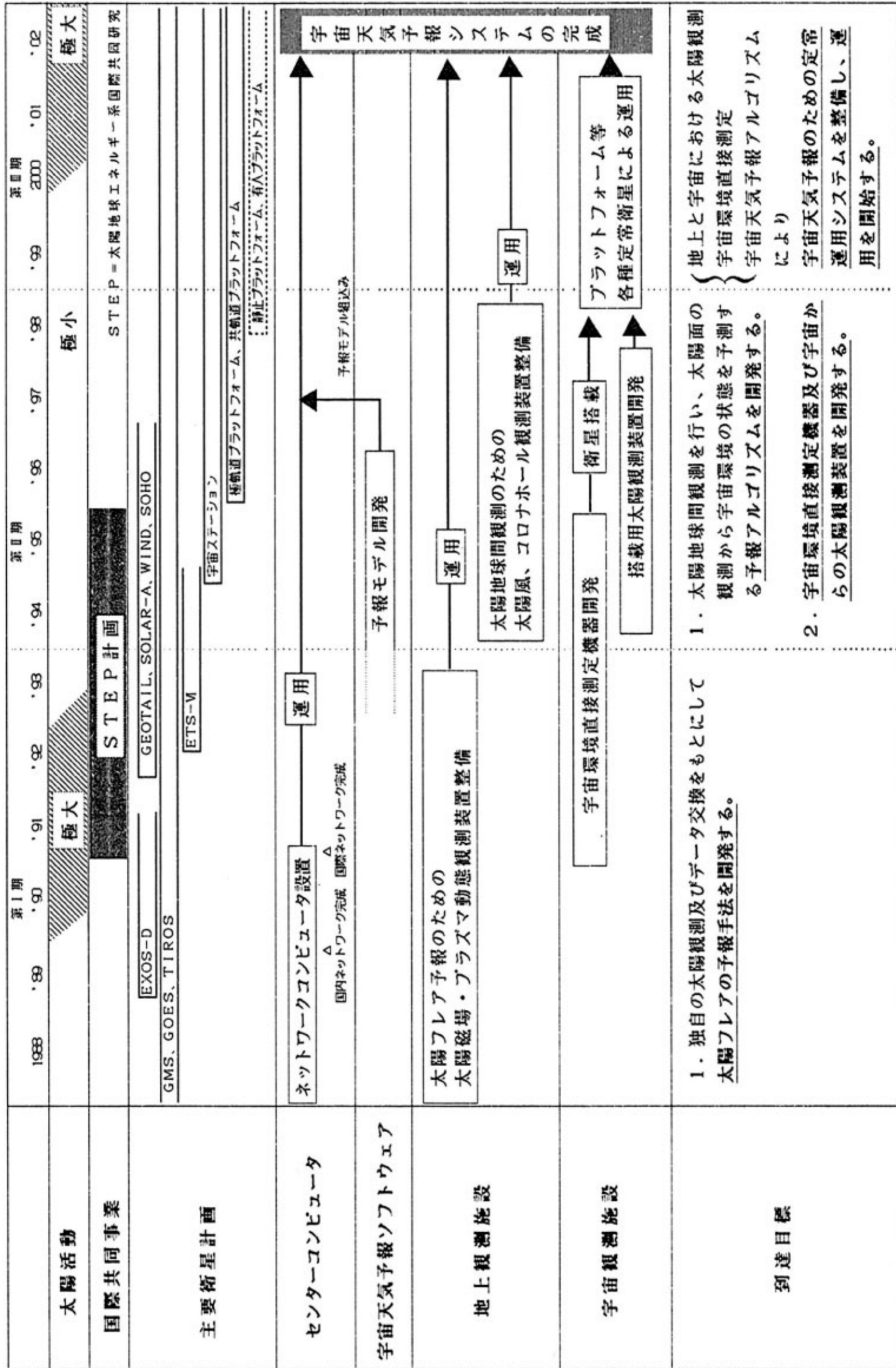
4.1 計画の概要

宇宙天気予報システム開発計画は、観測及びネットワークなどの施設の整備とフレア予知などの研究の推進からなっている。宇宙天気予報の全体計画は第3図に示すように3期15年からなっている。

第1期6ヵ年(1988—1993年)では、宇宙天気予報の最も大きいテーマである太陽フレア予知技術の確立を目的として、太陽磁場と太陽プラズマ動態を観測するための光学観測装置を平磯宇宙環境センターに設置する。1観測点での太陽観測は時間的に連続したデータを取得することが出来ない。この短所を補うために、国際的な協

第3表 収集データ及び協力機関

	協力機関	データ
国内	気象衛星センター	高エネルギー粒子 (気象衛星SEM)
	国立極地研究所	極域磁場、粒子降下 (リオメータ)
	名大空電研究所	太陽風速度 (惑星間シンチレーション)
	宇宙科学研究所	宇宙プラズマ、磁場 (科学衛星)
	国立天文台	太陽磁場、黒点 (光学観測)
	宇宙開発事業団	高エネルギー粒子、磁場 (静止技術衛星)
国外	米国宇宙環境センター	黒点、H α 、太陽X線、高エネルギー粒子、極域磁場 (SELDADS)
	オーストラリア	太陽電波スペクトル
	フランス	太陽黒点
	カナダ	極域磁場
	INTERMAGNET	凡世界磁場



第3図 宇宙天気予報システム研究開発の全体計画。計画は3期15年よりなり、それぞれの期で達成する目標を最下段に示す。

力のもとでのデータ交換が必要となる。太陽のデータを24時間取得するには、米国、フランスなどの国々との間で相互にデータを交換することが非常に重要であることが理解されよう。また、宇宙空間での放射線と熱プラズマの予測のためには、衛星観測が必要であり、世界的な規模での地磁気観測や極域での超高層観測も重要である。したがって、第1期計画では、太陽観測装置を整備するとともに、データを収集して交換するためのネットワークコンピューターを設置して国際的なデータネットワークの構築を行う。このシステムで収集するデータと協力機関の主なものを第3表に示す。

第2期5ヵ年(1994—1998年)では、第1期の成果と学会の最新の成果を取り入れて、太陽及び宇宙空間現象を予測する予報アルゴリズムを確立する。また、コロナホールの観測装置を設置する外、衛星、宇宙ステーションなどに搭載する標準的な宇宙環境測定装置を開発する。

第3期4ヵ年(1999年—2002年)で、これまでに構築した宇宙天気予報システムを実際に運用して、システムを総合的に発展させる。

4.2 観測及びネットワーク整備状況

(1) 太陽観測装置

太陽電波観測は、すでに長期にわたって100, 200, 500, 9500 MHzの4周波数での観測を継続してきた。また、1988年には、70 MHzから500 MHzの太陽電波スペクトルの観測を開始した。この結果、磁気嵐を起こしやすいII型、IV型電波バーストを検出できる体制が出来た。1980年には、32 GHzミリ波太陽像観測を開始したが、この観測は太陽面の輝度温度の情報を与えてくれる。

太陽光学観測では、1985年にH α 光観測を開始し、1988年には黒点観測をこれまでのシーロスタットを用いてスケッチする方式からCCDカメラ方式に変更し、テレビ画面上で黒点と太陽フレアを監視できる体制が出来た。宇宙天気予報プロジェクトの主要なテーマである太陽フレア予知研究のために、1989年から5ヵ年計画で太陽磁場観測装置及び太陽プラズマ動態観測装置の設置を開始した(詳細は本特集号3.⁽¹³⁾参照)。

(2) データネットワーク

1988年度にデータネットワーク用の処理装置 μ VAX 3500とハードディスクなどの周辺装置を設置し、平磯宇宙環境センター内にイーサネットを敷設した(詳細は本特集号17.⁽¹⁴⁾参照)。米国宇宙環境センター(NOAA/ESC)との間でデータ交換に関する話し合いを行い、1988年11月の日米常設幹部会議(SSLG)宇宙協力活動計画会議では宇宙環境監視における日米協力が討議され

た。その結果、通信総合研究所、NASA、NOAAが宇宙環境監視の分野で協力し、データ交換のために、NASAのネットワークであるSPAN(Space Physics Analysis Network)を使用することになった。また、日米協力の他に、日豪、日仏、日加協力の話し合いを進めている。

国内の機関との協力は国立極地研究所などとの間で進められている。1988年11月に出発した第30次南極観測隊は、準リアルタイムデータ伝送のための装置を昭和基地に設置し、インマルサット衛星を使ったデータ伝送実験を行った。この外、気象庁気象衛星センターのSEM(衛星環境モニター)、名古屋大学空電研究所のIPS(太陽風シンチレーション)のデジタルデータの伝送に関する話し合いが行われている。また、最終的には世界70か所での地磁気観測データをリアルタイムで収集するINTERMAGNET計画への参加を検討している。

(3) 宇宙環境測定

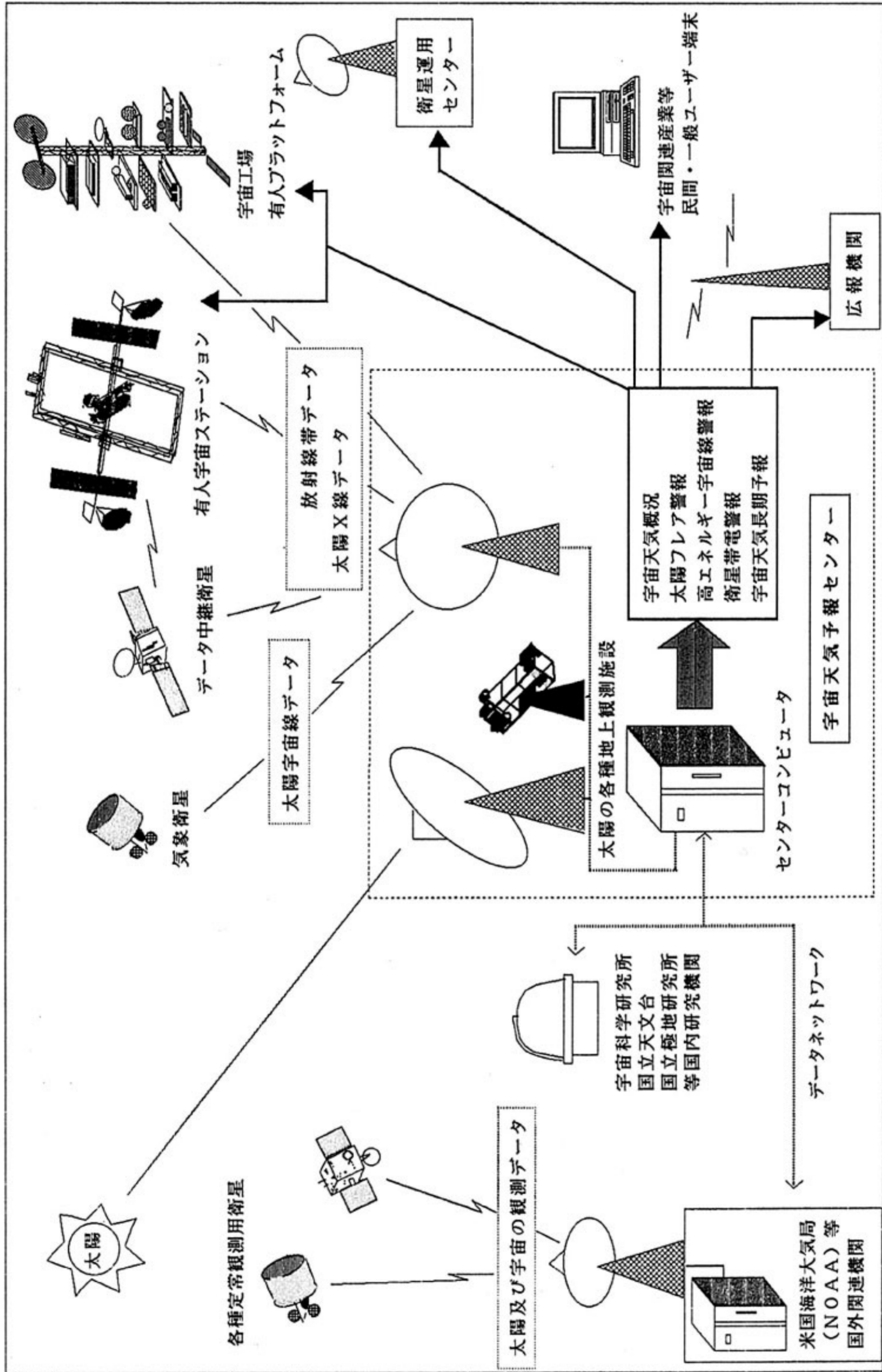
現在、日米の気象衛星GMS、GOESに搭載した衛星環境モニターで高エネルギー粒子の観測が行われている。GMSの高エネルギー粒子データのプロット結果はファックスによって毎日、平磯宇宙環境センターに伝送されている。近い将来、この方式をコンピューター通信によるデジタルデータの伝送に改めることを検討している。GOESのデータは必要に応じて国際電話回線によって収集しているが、データ伝送の品質の改善とコストの低減のためにSPANネットワークを使用することを検討している。

4.3 将来への動き

太陽観測装置のうち、太陽磁場、プラズマ動態観測装置整備は開始されている。将来、コロナホール観測装置を加えることで一応、太陽観測装置の整備は完成する予定である。

データネットワークに関してはデータの種類と協力機関の数が多いために、長期的に発展を遂げていくことになろう。データを持っている国内外の機関からのデータ収集については、既に述べたようにコンピューター通信などの方法を用いる。しかし、観測ステーションから直接、データを収集する方式の開発はこれからの課題である。例えば、INTERMAGNET、南極データなどは原則として人手を必要としないデータ収集システムが必要となる。

宇宙環境測定分野では、宇宙環境データを定常的に取得するために、実用衛星や宇宙ステーションに搭載する標準的な環境モニターを開発する必要がある。このための基礎実験を1991年に始めるが、この計画は同時に宇宙開発事業団、宇宙科学研究所などの衛星開発に従事し



第4図 宇宙天気予報センター運用の概念図.

ている機関, そして搭載機器の開発に携わっている研究機関との協力が不可欠である。

太陽風の直接観測は地磁気嵐の予報に極めて重要であるが, 現在のところ, リアルタイムでデータを取得できる衛星はない。この問題を解決するには, 惑星間空間での定常的な観測衛星が必要になる。しかも, 太陽と地球の間の空間での定点観測が理想であり, これを実現するために, 将来, 秤動点 (Libration point) における観測が必要である。

5. 終わりに

宇宙環境の予報は宇宙科学研究の成果の上に成り立つ。したがって, 国際的な協力はもちろん, 国内の宇宙科学関係の学会や研究機関との協力が重要となる。また, 実際に宇宙開発に携わっている機関との連携は, 宇宙環境データの取得という面と, 宇宙環境予報を衛星運用に活用するという両面から重要となる。21世紀に完成が予定されている宇宙天気予報センターは太陽活動監視, 宇宙環境データの収集, 宇宙環境予報, そして, 太陽・宇宙環境の研究を中心とした活動を行う (第4図)。

宇宙天気予報センターはまた, 太陽・宇宙環境に関する大量のデータを蓄積していく。このデータは宇宙環境予報アルゴリズムの発展のために不可欠であるばかりでなく, 広く太陽及び宇宙空間物理学の研究のために貴重である。したがって, 予報センターは同時にデータセンターの役割を果たす。現在, 通信総合研究所は電離層世界データセンターC2を運営しているが, 将来はこれを包含した太陽地球環境データセンターへと発展していくことになる。

謝 辞

本計画は筆者が南極地域観測隊に参加していた1986年に立案され, その後, 多くの関係者の努力により, 1988年度から実行に移された。直接, 立案に携わった丸橋克英平磯宇宙環境センター長, 富田二三彦太陽電波研究室長ほかのスタッフ一同の努力に敬意と感謝の意を表します。また, 本計画を21世紀まで継続する構想として内外に認知されるよう尽力された畚野信義前企画調査部長 (現通信総合研究所長) に深謝します。

参 考 文 献

- (1) Marubashi, K., "The space weather forecast program", submitted to Space Sci. Rev., Vol. 51, (in press), 1989.
- (2) Campbell, W. H., Albertson, B. D., Boerner, W. M., Boteler, D. H., Goddard, W. R., Hruska, J., Irwin, S., and Kappenman, J. G., "A working group report II. Geomagnetic applications", Solar-Terrestrial Predictions Proceedings, Vol. 2, 133, 1979.
- (3) Vampolar, A. L., Altrock, R., Atwell, W., Backstrom, R. C., Garret, H. B., Hickman, D., Johnson, R. G., Pereyaslova, N. H., Robbins, D., Slowey, J., Sroga, I., Stassinopoulos, E., Teague, M., and Vaughan, W. W., "A working group report I. User requirements of solar-terrestrial predictions for spacecraft applications", Solar-Terrestrial Predictions Proceedings, Vol. 2, 1, 1979.
- (4) Baker, D. N., "Effects of the solar-terrestrial environment of satellite operations", Artificial Satellites, Space Phys., No. 6, Special Issue on STP Workshop June 1984, Meudon, France, 103, 1987.
- (5) Alexander, J. K. and McDonald, F. B., "Space science in the United States", Physics Today, 41(5), 57, 1988.
- (6) Donahue, T. M., "International space science", Physics Today, 41(5), 26, 1988.
- (7) Arnoldy, R. L., "Signature in the interplanetary medium for substorms", J. Geophys. Res. 76, 5189, 1971.
- (8) Kamide, Y. and Joselyn, J. A., "Toward the prediction of magnetospheric substorms from knowledge of the solar wind-geomagnetic activity relationship", Solar-Terrestrial Predictions, Proc. Workshop, Meudon, France, June 1984, 450, 1986.
- (9) Ejiri, M., Hoffman, R. A., and Smith, P. H., "Energetic particle penetration into the inner magnetosphere", J. Geophys. Res. 85, 653, 1980.
- (10) Nagai, T., "Space Weather forecast: Prediction of relativistic electron intensity at synchronous orbit", Geophys. Res. Lett. 15, 425, 1988.
- (11) Joselyn, J. A. and McIntosh, P. S., "Disappearing solar filaments: A useful predictor of geomagnetic activity", J. Geophys. Res. 86, 401, 1981.
- (12) Joselyn, J. A., "SESC methods for short-term geomagnetic predictions", Solar-Terrestrial Predictions, Proc. Workshop, Meudon, France, June 1984, 404, 1986.

(13) 富田二三彦, “宇宙天気予報のための太陽監視システムの概要”, 通総研季報, 本特集号.

(14) 徳丸宗利, “宇宙天気予報のための宇宙環境データネットワークの概要”, 通総研季報, 本特集号.

