

新年の御挨拶

皆さん、あけましておめでとうございます。

ロケット観測30年を祝った昨年は、「さきがけ」と「すいせい」、ソ連の2機のヴェガ、ヨーロッパのジオット、NASAのアイスによって編成されたハレー連合艦隊が、長旅のはて、3月にハレー彗星に群がりました。人工衛星を打ち上げるという大きなステップを踏んでから16年、ハレー計画は何といってもISASの歴史の中で一つの大きなやま場であり、営々として培われた皆さんの総力が見事に発揮されたプロジェクトでした。

さて息つく間もなく目の前にASTRO-C, さらにその先にEXOS-D, MUSES-Aがあります。そしてまだ「ひのとり」の活躍の記憶も生々しいいま、その成果を踏まえて、もう次の太陽活動期に向けてSOLAR-Aの用意が始まっています。米欧との総合的な計画ISTPの重要な一員としてのGEOTAILの準備も進んでいます。

これまで私たちは、将来の方針・戦略を、実績を重ねる毎に改訂しながら進んで来ました。そして頻度と、学問と人との連続性を重視して中小型ミッションを計画的に配列するという方針が育って、おそらく誰が予想したよりもっと急速に世界の宇宙科学の第一線に出

宇宙科学研究所長 小田 稔

ました。

巨大化を志向してきた米の全体計画が動脈硬化を起こしがちなのに比べて、自分で立てられる計画の強みを存分に発揮して来たと言えましょう。"クイック イズ ビューティフル"が、日本を例にひいて色々な場面で言われるようになってきています。また、X線天文、太陽観測、ハレー探査等の例に見られる、独自の計画を持った上での国際協力というやり方が高く評価されています。

さてこれからどうするか。昭和58年、基本的な考え方と分野毎の将来像について所内の討論会を開いたことがあります。以来折にふれ繰り返し議論が重ねられ、最近、宇宙観測の21世紀への展望がまとめられました。本号にその中身が紹介されますが、その基調は、10年に1回程度の大型計画もまじえながら、この20年程はこれまで進めてきた機動的な"自家製"計画を更に伸ばしていくことを骨幹とするということです。

一方21世紀の宇宙計画の主流が太陽系科学にも向いていくことが予想され、その準備を進めて行くことも、この展望の重要な骨組みの一つになっています。

新しい年はこうした計画に向けて頭脳も体も大いに 使う1年になりそうです。頑張りましょう。

地球型惑星の起源と進化を探る

科学者はまず量(はか)り、しかる後に組み立てる。抽象し組み立てるまえには、観るのである。 ボール・ヴァレリー「レオナルド・ダ・ヴィンチの方法」より

1. 月ペネトレータ

199X年,私は宇宙科学研究所の深宇宙管制センターのモニター・テレビの画面に釘付けになっている。先月日本の宇宙科学者の総力を挙げて打ち上げた月探査衛星から送られて来るデータが、モニター・テレビに次から次へと写し出されている。昨日衛星が月の北極を通った時にガンマ線スペクトロメータが検出した水素原子のピークを確かめるために、いま可視・赤外線スペクトロメータが精査モードに切りかわり、極地域の高分解能スペクトル・データを送ってきている。

あっ、ここにも波長3ミクロンの吸収ピークが あるではないか。

「これで極地域に氷があることが確かになったぞ」という歓声があがる。横においてあるモニター・テレビにはペネトレータ地震計からのデータが入り始めた。確かにこれは深発月震A1からの地震波だ。ああ、これでアポロ以来、科学者の悩み続けた問題が全て解決される。肩からすっと力が抜けていくような安堵感と幸福感に包まれる・・・・という所で私は夢からさめた。1987年の初夢としては幸先の良い夢であるが、世界中には同じような夢をみた人もいるだろう。なぜなら、世界中の科学者は、月の本格的科学探査を実施しない限り、

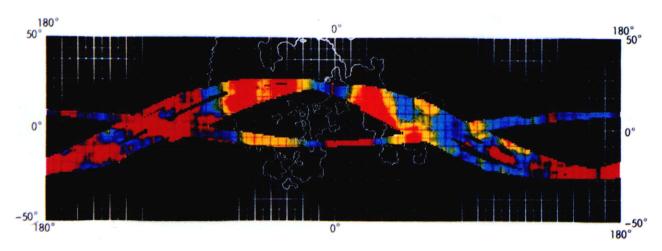
月の起源と進化の謎を解き明かす事は難しいだろ うと、今認識しつつあるからである。

アポロ計画やルナ計画で得られた月の岩石は、 月全面の地殼岩石を代表しているとはとても思えないし、月探査船からのリモート・センシング・ データも月の極地方や高地については殆ど何も語らないからである。従って月の極地方と高地の構造・組成を明らかにすれば、月の科学に革命をもたらす事が出来ると私たちは信じている。このため月の全表面の地質や化学組成を調べるべく、私たちは今、ガンマ線スペクトロメータをはじめとする各種のリモート・センシング機器の開発と月面に地震計を設置するために、ペネトレータの開発を進めている。

このペネトレータは昨年のISASニュース9月号にも紹介されているように、月を周回する衛星から月へ地震計や熱流量計などの科学計測器を投げ下ろして月面下数メートルの深さに潜り込ませ、無人で効率のよい科学ステーションを設置するための装置である。このような装置は月ばかりでなく、他の惑星の内部構造の探査にも有力である事は明らかなので、その開発は諸外国からも注目されている。1990年代初頭までにはこれらの装置と機器を完成し、私たちの夢を是非実現したいものである。



月面に向かうペネトレータ。槍型のケースの中に種々の 科学機器が入っており、月面上の科学ステーションをつく る。



アポロ計画のガンマ線スペクトロスコピーによる地殼岩石中の鉄・チタンの存在度 (赤・黄は鉄・チタンの多い地域、青・紫は少ない地域)。データは低緯度に限られている。

2. 火星探查

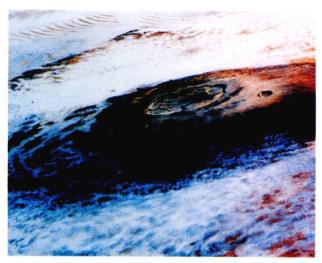
月の探査の次に待ち受けているのは火星探査である。米国のバイキング計画によって火星地形の素晴らしい写真が撮られた。これによると火星には巨大な楯状火山やグランドキャニオンの何百倍もあるような溪谷があることなどが分かってきた。確かに火星は月に比べればずっと地質活動が活発だが、地球のように現在も活動し続けてはいないようである。

火星の進化の歴史は地球と月の中間的な様相を 呈している。従って月、火星、地球を比較するこ とは固体惑星の進化を明らかにする上で極めて重 要なことであろう。しかし残念ながら火星がどの ような物質で作られており、どのような構造にな っているか、殆ど分かっていない。1990年代初頭に計画されている米ソの火星探査はこの問題の解決を狙ったものである。これは20世紀から21世紀にかけて有人火星基地を作ろうとする両国の先陣争いの一つであり、火星の内部構造を調べるという純科学的な目的にとっては不十分なものである。

この点もし我が国がペネトレータという有力な 武器を持っていれば、これを使って火星の内部構 造の解明に大きな貢献をなす事が可能であろう。 火星の起源と進化の謎をさぐるという目的のため には、火星の地殼、マントル、中心核など構造を 明らかにすることは不可欠であるから、米ソ両国 によるリモート・センシングによる火星表面の探 査の他に、ペネトレータによる探査といった火星



月周回衛星から月の遠隔探査。極軌道を通せば月全面を 調査できる。



火星最大の火山、オリンポス山の周辺。山の高さは 約22,000m、火山の直径は少なくとも550kmある。



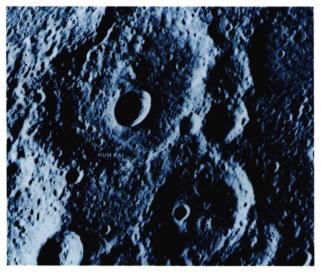
火星マリネリス峡谷の一部。マリネリス峡谷は最も深い所で約7kmもあり、幅は数100kmある。

内部の探査が重要な役割を果たすことになろう。

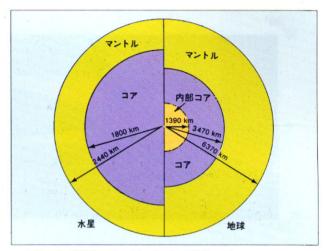
火星表面に多目的無人科学ステーションを展開し、そこで地震観測、熱流量測定、岩石の化学分析などができるようになれば、火星の科学は飛躍的に進歩することは疑いを入れない。我が国の惑星探査の進展に期待すること大なるものがある。

3. 水星の探査

火星と同様に水星も惑星科学にとって大変興味深い存在である。水星探査ミッションをやりたいという希望は日本の科学者の間に1980年代の初め頃から出されている。この惑星は太陽に最も近い領域に生まれた惑星として、他の地球型惑星に比べて極めて特異的であるからである。



水星の表面地形。130×190kmの範囲を示す。

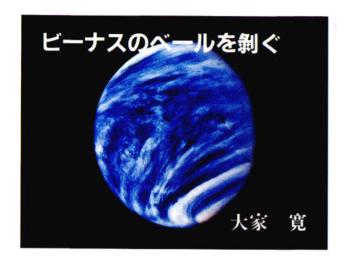


水星の内部構造の推定図。地球と比較してある。

水星の表面地形はクレーターで覆われ、月の高 地のそれとよく似ているが、水星を構成している 物質は他の地球型惑星とは大幅に異なっていると 信じられている。水星の金属コアは極めて大きく, 全質量の80%も占めていると思われる。これは水 星の材料物質が原始太陽系星雲の最も熱い所で, 初期にガスから凝縮した塵をもとにして作られた ものであろうという予測を裏付ける。水星の磁場 がそのゆっくりとした自転にも拘らず、地球の1/ 30程もあるという事も、水星のコアの大きさと関 連があるのかも知れない。この異常な性質の惑星 は一体どのような物質で作られた地殼とマントル を持ち、コアの大きさはどの位の大きさなのだろ うか。これらの疑問を明らかにする事が原始太陽 系内で起きたと信じられる塵と微惑星の形成過程 を明らかにする事に繋がるのは明白だろう。

このような重要な課題があるにも拘らず、諸外 国にはまだ水星探査ミッションの計画はない。日 本がこのミッションを遂行できれば、惑星科学の 一つの大きな金字塔を打ち立てる事になろう。

月、火星、水星のいずれも科学的に大変興味深い対象である。1960年代から80年代はこれらの惑星の探検時代であったが、1990年代から21世紀にかけて、惑星の真に科学的調査の時代が始まるだろう。宇宙研の全ての科学衛星ミッションがそうだったように、理工学の科学者の一致協力により惑星科学研究の新しい道を切り拓いて行きたい。



我が地球。その美しい姿を、我々はいま人工衛星の力をかりて見ることが可能になった。しかし、この地球だけを知っていればよいのではない。我々はいまや太陽系のすべてを知り、それを活用することを学ばなければならない時にさしかかった。地球上での生存そのものも、我々が意識を地球の中にのみ固着させている限り、いつ崩壊するか危ぶまれるような時代、21世紀を目前にしているのである。そしていま我々にできるのは、科学的な探査なのである。

1. 隣人のような天体 —— 金星 —

暁や宵の明星として知られる惑星,金星は,半径6052kmで,太陽からの距離0.72天文単位にある。地球には,その大きさ,太陽からの距離ともども最も類似した天体で,太陽系の中では,地球型惑星として位置づけられている。その名の通り地球に類似して,表面には固体部分がくっきりと境界を作り,同じく地球のように厚い大気層を持ち,上層部には雲が存在している。

しかし、その大気や雲の状態は、地球の場合とは余りにもかけ離れている。つまり大気圧は90気圧、そして温度は650K、その雲は濃密なCO₂が主成分で、太陽光は殆ど表面に達することもない。しかも雲の成分は濃硫酸で、雲の下には濃硫酸の雨が降っている。これはまさしく地獄絵図である。ならば我々はもうこの天体に用はないのだろうか。いや反対に、我々はこの天体の真の姿を知らねばならない。なぜ地球と類似する天体が、これほど

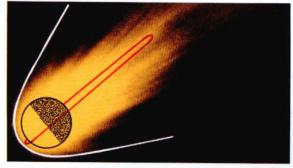
にも極端に異なった結末を迎えてしまったのか。

2. 金星探查計画

宇宙科学研究所では、いま大変に熱いワーキング・グループが誕生した。それは地球型惑星探査ワーキング・グループであるが、今その焦点を金星にしぼっている。従って金星という熱い天体を探査しようというから、というのではなく、宇宙研の20年にわたる技術と手法、そしてまたロケット実験開始以来30年以上にわたる努力の集積として、ぜひ惑星オービターを実現したいという思いが、ワーキング・グループを熱くしているのである。この金星探査計画は約250~300kgのオービターを金星の周囲に実現しようというのだ。

PLANET-A計画は、まず「さきがけ」によって始まった。彗星フライバイの技術的確認と、またPLANET-Aの主計画に盛り込めなかった重要な科学観測機器を同時に運び、見事にハレー彗星のフライバイ観測を成功させた。実は、金星探査計画はPLANET-Aの場合とかなり類似したストラテジーで実施しようとしている。まずテスト機を先行させるが、これはオービターに関する工学実験を主目的とするもので、金星に突入するプローブが大きな部分を占める。突入するプローブからはバルーンを浮遊させる。これに引き続いて、精巧な観測器を搭載した金星探査の主要機が軌道に投入される。

オービターに関する一つの案は,近金星点250~300km,遠金星点30,000kmで赤道軌道に入り(下図), 多項目にわたる観測を実施する。金星探査ワーキ



太陽風と相互作用する金星大気及びプラズマ中に投入予定の金星探査機の軌道。金星大気及びプラズマの広がりは1911年7月に出現したブルックス彗星をそのままかりて表わしている。

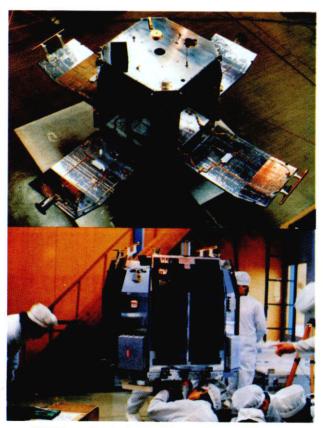
ング・グループで話題になっている観測器は、オービターについては、

- ・太陽風に関するエネルギー粒子計測器
- ・プラズマ密度, 温度計測器
- ・金星の電離層サウンダー (三次元観測)
- ・金星プラズマ中の電場計測器
- ・太陽風と金星プラズマの相互作用に係わる磁 場計測器
- · 重水素対水素比計測器
- · 中性大気運動計測器
- · 金星大気紫外線観測器

等である。一方、突入プローブの方では、大気温度、圧力、 CO_2 、NOx、SOx 観測器等をバルーンに搭載することになる。ところで1984年、EXOS-C 衛星(下図)が成功裏に打ち上げられたが、この観測計画は将来の金星探査ミッションの基礎になる点も既に配慮して実施してきたのである。

3. 金星探査計画の意義

現在の金星計画が目指している探査では, まず



惑星大気・プラズマ探査を将来に睨みつつ開発、実施されたEXOS-O衛星("おおぞら")。

金星大気が地球大気に比して大きく異なっている 様相の真因をつきとめることが第一目的となる。

真因の一つは、金星に水がないことであるが、水がないという問題の理解には一つの仮説がすでに1975年頃から提出されつつあった(かくいう著者であるが)。その後パイオニア・ビーナスの結果からオーストリアのS.J.バウアーが、そして惑星からオーストリアのS.J.バウアーが、そして惑星誕生過程の究明の立場から日本の松井&阿部が同じ仮説を出している。つまり、初期の頃金星大気中の水蒸気が、太陽風のため大量に失われたというものである。

金星には固有の磁場がない。従って太陽風が大 気に直接吹きつけて来る。大気が重力に逆らって 逃げるか、自然に拡散しているかの別を除けば、 金星大気と太陽風との相互作用は、そのまま太陽 風と彗星大気の相互作用と同じであろう。前ペー ジ下の図はこの点も同時に示唆している。

現在は、金星からは重い酸素が逃亡しているのみであるが、しかし、現在の酸素が逃亡する機構を分析することは、同時に水素の逃亡の事実があったか否かを知ることになる。しかも我々は今、PLANET-A観測の実施により、彗星の水素が太陽風によっていかに運ばれるかということも知るようになった。金星と彗星に共通した機構として正確に理解される時代に入ったのである。また金星探査計画で実施される重水素(D)対水素(H)の比が、厳正な判定役となってくれるであろう。

勿論プラズマ物理学,大気力学,化学に関する 多くの基礎研究の成果として,この問題は総合的 に解決して行く性格のものである。

4. 巨大惑星の謎

太陽系の構成に関しては、太陽を中心として、 木星に始まり海王星に至る巨大惑星群がその背骨 をなしている。中でも木星は巨大惑星の代表格で、 巨大惑星が木星型惑星の名で呼ばれることも多い。 この天体は、その表面に関する限り、地球型惑星 とは根本的に異なり、むしろ太陽の構造に近い。 太陽になりそこねた天体と呼ぶこともある。

この木星型惑星は、太陽系のみならず、宇宙の

天体現象を解明するための宝庫であることが、最近10年間の研究で明確になってきた。つまり太陽と並んで太陽系を構成していると共に、それ自体が多数の衛星群を従えたミニ太陽系となっている。

ところでこの巨大惑星群の現状をさぐることは、一機や二機の探査体ではとても十分とは言えない。 巨大さと奥行きの深い謎を秘めている。まず木星 の放射する電波は、宇宙の謎パルサーと原理的に は同じものなのである。回転する強く磁化した天 体からは、プラズマと磁場の相互作用からくる発 電エネルギーを使って、強い電波が放射されてく るのであるが、ここにはまた、激しい粒子の加速 も起こっている。

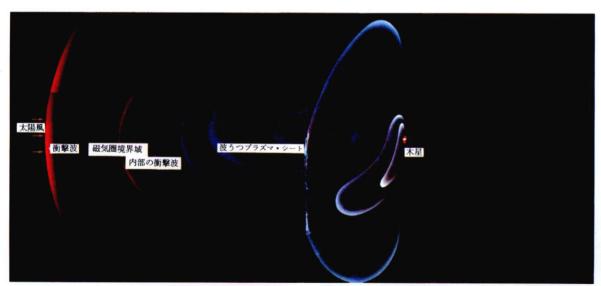
木星のプラズマ圏や磁気圏の物理は,一部では 地球にも類似している。確かに木星の磁気圏は巨 大である(下図)が,場合によって地球磁気圏の 研究で得られた知見を用いて解明できる部分もあ る。また地球とは異なる部分,つまり自転の効果 等は,木星のプラズマ圏や磁気圏を詳しく研究す ることによって,遠く銀河系に存在するブラック ホールの謎を明かすことに通ずる。

5. 21世紀の目標 ―― 木星オービター ―

我が国の惑星大気やプラズマの領域を研究する 分野では、この巨大惑星、木星のプラズマ圏や磁 気圏の探査は、常にめざしてやまない目標の一つ である。現在の情勢では、多分米国のガリレオ計 画の実施より10年は遅れることになるが、我が国 も宇宙研を中心にして、ぜひこの壮大なミッショ ンを実現したい。場合によると2001年に実現の運 びとなるかも知れない。「2001年宇宙の旅」では、 人間がコンピュータに苦しめられるが, 現在の進 行状況から、木星に向かう人間は登場しないとし ても,極めて優れたコンピュータを搭載し,オー ビターそのものが一体のロボットとして働き、多 岐にわたる観測を精密に実施してくれることにな ろう。オービターの重量としては約1ton程度が必 要になるが,これは木星軌道に投入された後は母 子衛星に分割され、出来るだけ広域的な観測を実 施することが望まれる。子衛星は、木星にぐんと 近づき, 母衛星は磁気圏 (下図) にとどまるが, 母衛星は、自らの観測とともに、子衛星の観測デ ータを地球局へ伝送するための基地としての任務 も持つことになろう。

高エネルギー粒子計測,プラズマ計測,磁場,電場,また大気観測のための紫外,赤外,X線の観測の他,TVカメラによる撮像も,ボイジャーの場合より更に高性能カメラを用いて実施されるだろう。

21世紀はもうすぐそこに来た。21世紀に活躍される人々が今から中心となり、木星オービターのスタディを始めても早過ぎはしない。



木星の磁気圏。太陽風と相互作用する木星磁気圏境界は700万kmにものびる。磁気圏の赤道域はプラズマが満ちていて、外側に向って惑星風を生んでいる。宇宙空間の電磁環境を究明するための宝庫となっている。



NASAはそのスペースサイエンスの究極の目標としてよく太陽系・生命・宇宙の起源を挙げる。最初の2つ(太陽系・生命)の化石としては、小惑星と彗星がターゲットとなろう。これらは質量が小さく、集積熱で分化が起こり証拠を消すことなどない原始的天体である。前者は岩と鉄、後者は更に氷を含み、有機物もある。

1.「もの」についての情報

小惑星に起因するらしい隕石の研究が進み,月 や火星から来たものと選り分けられ,小惑星のスペクトル観測で小惑星帯の外側の天体は炭素質とされた。またハレー彗星大探査網が敷かれ,「彗星のガスと塵は星間分子と星間塵」という話は一層固まった。しかし,小惑星スペクトルは詳細になるほど解析が進まなくなる。隕石の粉のスペクトルとすり合わせようにも,隕石が地球軌道とクロスするアポロ型小天体からのサンプルに限定される以上,全原始太陽系岩石をカバーしてはいないからである。

一方、ハレーの塵を完全に分析することもできない。70 km/sで叩きつけられた塵のプラズマ化のイオン化効率など誰も実験室で押さえていないのである。また、昔からどの彗星にも検出されている光るガス、 C_2 やCNの詳細な核付近の分布が観測され、塵分布に一致するスパイラル状とされると、星ガスを議論するにも、この塵の「CHON粒

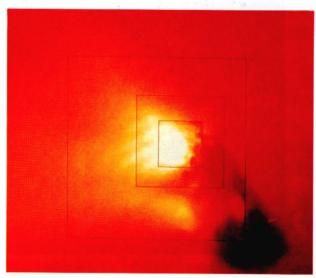
子」部分が分からないと靴上から搔くようなかゆ さが残る。

納得する,実証するには隕石の場合で分かるように,格段に精度の高い実験室でさばけるように, やはり標本回収が必要だろう。ただ口で言うのは 易しいが,ご承知のようにそれまでには相当技術 的ギャップを乗り越えなければならない。

小惑星や彗星からサンプルをとるにしても、まずどこにいるのかハッキリ知らなければならないが、ハレー彗星の時の「path finder」計画が示すように、この彗星のように富士山が30個くらい詰め込み得るほどの「大」天体でも地上観測から仲々位置を押さえ切れない。それに相手は無数にいて、落ち着かない隕石・隕氷等を狙うなら、どれを狙ったらよいか。

向こうへ着いても理学者はうるさいことばかり言う。表面を汚染しないようにそっと着陸するにはイオン推進でやれ、氷を削る時には熱を出して変成させないようにドリルをゆっくり回せ、生命物質の汚染を避けるため殺菌を徹底的にやらねばならぬ(もっとうるさくなると、地球に変なバクテリアを持ち帰らぬようにせよ)。

技術者が思い切ってジャンプしていただいても, 一方現在は世界的経済不振の真只中である。どこ から大金をせしめるか。と言ってもやることがで きれば,今迄大きな顔をしていた「不完全な隕石 学」を叩き破れるであろうし,ひょっとしたら,



ジオットの捉えたハレー彗星の活動



炭素質隕石。中央のすじは多分水の通った跡に硫酸塩が 沈着したものとされる。

宇宙のどこに生命が発生し得たかの手がかりも得られるかも知れない。

2. 「情報」についての情報

Maxim-Gilbert法などでDNA上の塩基の並び 方が容易に決められるようになり、遺伝子の内容 がどんどん読めるようになると、初めは、四文字 の並び方だけで原理性がない、せいぜいミニ革命 だなどと悪口を言われた段階を越えて、蛋白質だ けに限られていた筈の酵素が核酸でも見つかると か、発生分化の遺伝子初検出、癌遺伝子の解明な ど、20年ほど安定していた教科書書き替えの事態 になった。

ひとしきり前ゲージ理論万能で突走っていた素 粒子論を思い出す。こちらの方はproton decayで つまずき、統一理論もお化けばかり作り出しても たつくようになった。我々と同じ形の非バリオン 人間が、我々と同じ位置に重なり、相互作用なし にうごめいているなどという図は世紀末的である。 宇宙での発見が次のステップを誘うとでもなれば 大変結構なのだが・・・・・。

情報の大量蓄積につれて、生命の起源理論までたいへん賑やかになってきた。問題は「無生体」から「生命」へのジャンプである。生命分子レベルで考える正統派 (M.Eigen; Hypercycle) から、統計力学的ジャンプ (F. Dyson; 一次相転移, P. An

derson; スピンガラス相転移)を議論する人とさまざまで、W. Gilbert 自身も自分の出したデータを基に割り込んできた。

ほとんどがノーベル賞をとった現役の指導者であるし、鼻っ柱が強いから、決着など簡単につく 筈もないこの分野でも、アイデアが失敗して大騒 ぎになりそうである。ポイントはこんな段階になったほど分子生物学レベルでの情報が集められ、 それは宇宙の化石の中の情報と関連づけられ得る という点にある。宇宙物質の中でのアミノ酸や核 酸の並び方(いやアミノ酸分布でもよい)といった情報には殆ど手がついていない。

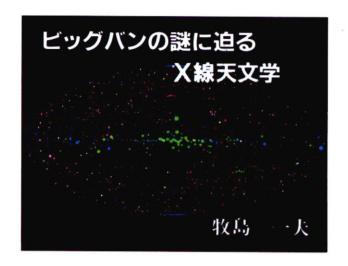
3. これからのミッション

もう一度初めの問題に戻ろう。太陽系でまだ誰も見ていない分野として、サンプルリターンはきわだっている。しかしそこまでのギャップは大きい。それを埋めるステップバイステップの動きはもうすぐ始まろう。1988年のソ連のフォボス50m接近、アメリカの彗星ランデブー計画である。ギャップのまだ相当こちらだが、次第に堀は埋まろう。サンプルリターンとなると国際協力は必至だろう。サンプルリターン時に、標本の分け前をむしりとるだけの腕をみがいておく必要がある。

(タイトルバックの写真は、ハイデルベルグ会議 に出展されたジオットの実物大モデルとハレー核 モデル。)



火星の衛星フォボス。炭素質隕石の塊である。



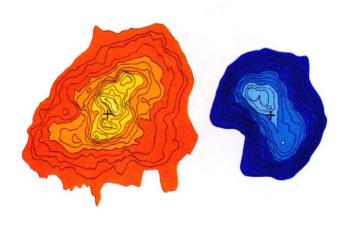
遠い星や銀河を眺める天文学は、浮き世と縁のない生活の代名詞みたいにみなされる。それが近頃では、高エネルギー天文学と称して、気球やロケット・人工衛星まで使って観測を行うようになってきた。

「一体そんなことをして何になるんですか」 という質問をもらうことがある。これを、日常生活にどう役立つか、と解釈すると残念ながら答え に窮するけれど、見方を変えて、なぜそうした研究手段が必要で、それはどんな成果をもたらし、 現代科学の根底にどんな本質的インパクトを与え 得るか、という設問として捉えることは可能であ る。巨大科学がその将来像を考える時、こうした 問いに答える努力なしには済まされないであろう。

1. 高エネルギー天文学が開いた世界

高エネルギー天文学は、光のかわりに天体からの紫外線、X線、ガンマ線などを手掛かりに宇宙を観測する。これらの放射は地上に届く前に大気に吸収されてしまうので、飛しょう体を用い大気圏外に出ることにより、初めてこの分野の研究が可能となった。以来、この分野は新しい発見と驚きの連続であった。例えば20年ほど前までは、中性子星という奇妙な天体はおよそ理論物理の空はX線バースト現象を利用して、3万光年のかなたの中性子星の大きさを殆ど直接に測ることができるようになった。これに関しては、諸外国の衛星に混じってわが国の"はくちょう"が重要な貢献を

行ったが、後続の"てんま"はその成果をさらに おし進め、中性子星の強烈な重力場によって X 線 が赤方偏移している証拠を初めて発見した。また 紫外線や軟 X線による観測から思いもかけず, 温 度100万度に達する熱いプラズマの泡が銀河系の あちこちに存在し、我々の太陽系をも包んでいる ことがわかってきた。"てんま"は銀河面に沿っ てさらに高温のプラズマが分布していることを発 見し、議論を呼んでいる。ところでこうした成果 は、断片的な新知識の寄せ集めにとどまらず、も う一段深い意味を持っている。現代のビッグバン 宇宙論によれば、宇宙は極めて高温で高密度な状 態として誕生し、次第に冷えかつ膨張して現在に 至ったという。宇宙が冷えるにつれ、あちこちで 銀河が形成され、星が輝きだし、そのあるものは 惑星系を従え、そこに生命を育んできた。星もま た生まれ、生き、最期に大爆発を起こして銀河の 熱いプラズマを生み, また星間ガスを圧縮して新 しい星の揺りかごを提供する。その際に残された 中性子星は、かに星雲(下図)の例のように、そ の回転エネルギーを用いて激しい活動を行う。高 エネルギー天文学が目の当たりに見たものは、ま さにこのように進化と転変を繰り返す, 活力と多 様性に溢れた宇宙だったのである。ビッグバンの 混沌の中から、どうしてこの美しい秩序だった字 宙が出来上がってきたのか。なぜ我々の宇宙はこ の道を選んだのか。これは現代物理学の根本命題 のひとつである。

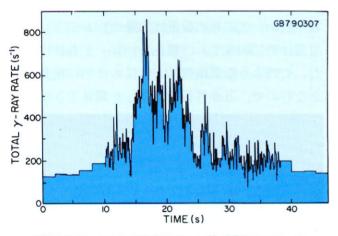


可視光(左), 硬X線(右) で見たかに星雲

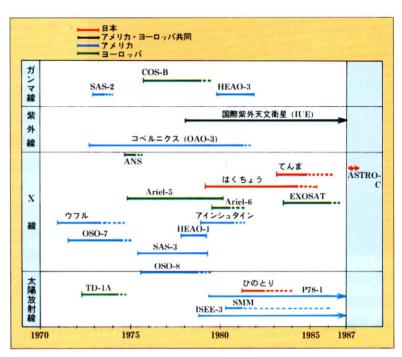
2. X線天文学の課題

ASTRO-C衛星により、X線天文学の 視野は宇宙の果てのクエーサーにまで及 ぼうとしている。それに続くミッション を企画する時、このような宇宙論的視点 がさらに重要になることは言うまでもい。特筆すべき例は、全天に充満しない るX線背景放射であろう。これはX線 文学の初期から知られており、全宇宙的 規模の現象であることは疑いない。未定 にその正体は謎のままであるといえで 進化の一つの鍵がここにあるといえる。 これを解明するには、大きな集光面積を もった軽量のX線反射鏡が不可欠とみられ、すでに基礎開発が始まっている。観

測プランはこの他にも枚挙にいとまがない。例えば、ブラックホールの存在を観測的に立証することも、この分野に課せられた大きな仕事であろう。このようにX線天文学は、まだ新しい発見の時代にある。地上の光や電波の望遠鏡と呼応し、激しく姿を変えるX線星を追い詰めるには、単発の巨大計画をもつより、中型の計画を継続させるほうがずっと有効である。そのとき後続の計画はその宿命として、つねに先行する計画より優れたものでなければならない。こうした進展を支えるものとして、新しい観測の着想、衛星工学の技術的進歩、新鋭の観測装置の開発に加え、打上げ能力



宇宙からは、ときおり強烈なガンマ線が爆発的にやって来る。このガンマ線バーストも、まだ謎の現象である。



の増強が不可欠の要素となることは明白である。

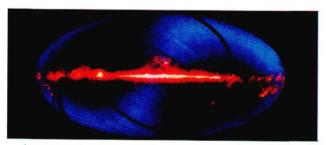
"はくちょう"からASTRO-Cへと、わが国で は適切な間隔で衛星計画が実現され、また先行す る衛星の成果と経験を後続の計画に十分に反映す ることができた。ところがこの間、欧米諸国は衛 星計画の深刻な停滞に直面し、特に米国ではこの 研究分野そのものが餓死寸前の危機に瀕している。 わが国が欧米諸国の二の舞を踏まずに切り抜けら れるか、そして日本的やり方が本当に正しいのか、 まさに真価を問われる時期にさしかかっている。 いま日本の宇宙科学研究のレベルを維持するには、 自前のロケットによる打上げ能力を着実に漸増さ せつつ、一貫性のある衛星計画を中断することな く続けることが何よりも大切であろう。5年に1 機程度のX線天文衛星を、11年毎の太陽活動極大 期には"ひのとり"やSOLAR-Aに続く太陽観測 衛星を, 今世紀中に1機の紫外線天文衛星を, そ してこれらの衛星にはルーチン的に小型ガンマ線 バースト検出器を、というのが地に足のついた将 来方針であろう。これは単に日本のこの分野の発 展にとどまらず、広く世界の天文学や宇宙物理学 を支えるという重責につながるものである。



1983年にアメリカ、オランダ、イギリスの3国 共同で打ち上げられた赤外線天文衛星IRASは、 9か月間の観測で約20万個もの赤外線源を検出し、 天文学の全ての分野に大きいインパクトを与えた (下図)。その後も、赤外線天体観測技術の進歩は 予想以上に急で、例えばIRASのものより何桁も 感度のよい検出器や、一次元、二次元の赤外線画 像検出器なども開発されている。これらを用いた 次期赤外線衛星計画が、ESAやNASAで積極的に 進められている。

一方わが国においては、宇宙研のIRTSワーキング・グループを中心とした長い間の準備がようやく実り、小型宇宙プラットフォーム (SFU)に搭載する赤外線望遠鏡計画が動き出した。この装置は、近赤外宇宙背景放射の観測と、炭素イオン(C+)の遠赤外スペクトル線による銀河系のマッピングを主目的としたもので、小型装置の特色を生かして、他に類を見ない独特の成果を出すものと、大きな期待が寄せられている。

SFU計画は将来の本格観測の準備研究であり、 その次の夢は、パロマー山200インチ望遠鏡、あ



a) 拡がった赤外線源、主として銀河系の中の低温ダストの 分布。

るいは野辺山45m電波望遠鏡に匹敵するような、スペース天文台と呼ぶべき本格的な宇宙赤外線望遠鏡の保有である。その場合、直径1mもしくはそれ以上の口径を持った極低温冷却望遠鏡であって、なるべく遠地点の遠い長円軌道が望ましい。観測対象としては宇宙のほとんどの現象が含まれるが、そのうちの代表的なものを二つ取り上げよう。

1. "星" になれなかった星たち —— 巨大惑星 —

夜空に輝く無数の星は、そのほとんどが、水素 を燃料とする核融合反応によってエネルギーを発 生し,数千度から数万度という高い温度で輝いて いる。これら普通の星の質量は、太陽の約1/10か ら数十倍の範囲に分布している。一方われわれの 知っている天体でもっと質量の小さいものには. 地球を初めとする太陽系内の惑星があるが,一番 大きい木星でさえ、太陽の約1/1000の質量しかな い。木星より重く太陽の1/10より小さい質量を持 つ星がもし存在するならば、星と惑星の中間に位 置づけられるであろう。しかし、質量が小さ過ぎ て水素燃焼が起こらず, そのかわり星の内部が少 しずつ収縮し、重力エネルギーを赤外線に変換し て放射しているといわれている。このような星は 目で見える波長帯の光(可視光)をほとんど出さ ないので、観測が困難であると思われていた。

ところが最近、VB8という名前のかなり暗い星のすぐそば(6.5天文単位)に、もっと暗い低温の星が存在することが、近赤外線の観測によって発見された。この星の質量は太陽の1/10以下、表面温度は約1300 Kで、「褐色わい星」と名付けられた。このような低温度の天体はもはや可視光を出さないので、近赤外線観測でしか発見できない。



b) 点状赤外線源、主として星と銀河の分布。銀河面を除くほとんどすべてが系外銀河である。

*IRASによって得られた全天赤外線マップ。銀河座標で表示されている。

さらにもっと低温、例えば500K以下の天体は、波長3μm以下の光をほとんど出さないと思われる。このような天体を検出するためには、もっと長い波長の赤外線で観測しなければならず、高い感度を得るためには望遠鏡自身を冷却する必要がある。したがって地上の大望遠鏡よりも、スペースの小型の冷却望遠鏡の方が、ずっと感度が良くなる(右図)。どんどん低温度の天体を見つけていけば、これまでぽっかりあいていた恒星と惑星の間のギャップが埋まり、「巨大惑星」とも呼ぶべき天体が発見されるかもしれない。またこの種の天体の研究は、太陽系や太陽系外惑星系の形成論へとつながっていくだろう。

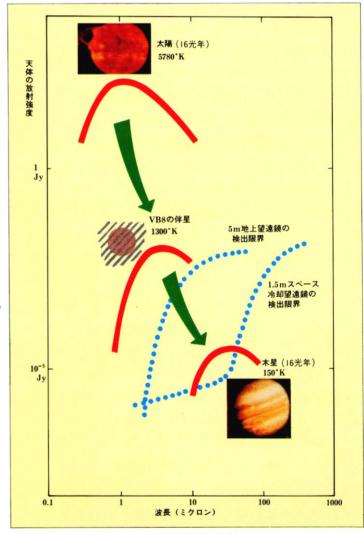
2. 銀河系のルーツを求めて ―― 原始銀河 -

光と電波の観測によってどんどん遠方の天体(したがって昔の天体)が発見されるようになってきた。現在知られている最も遠方の天体は、赤方偏移の程度 z が約3のクェーサー(QSO)である。ちなみにクェーサーは中心核が非常に活発な銀河で、大きいエネルギーを出しているものと考えられる。このように大きい放射エネルギーを持っているために遠方まで観測できるのである。

一方、宇宙が生まれてから約10万年後、 Z ≒1000の現象をとらえたものとして、有名な 3K宇宙背景放射の観測がある。もともと波長 1μmにピークを持つ約3000 K の黒体放射だったものが、宇宙の膨張による赤方偏移の結果、波長 1 mmにピークをもつ約3 K の非常に等方的な電磁波として宇宙に満ちているものである。

このように、z=1000のところと、z=3 より新しいところについてはある程度情報が あるが、このあいだに起こった出来事につい てはほとんど何一つ分かっていないといって よいだろう。しかもこの間には、原始ガス雲 の分裂、収縮に始まり、いくつかの過程を経 て、現在見られるような銀河や球状星団など が形成されてきたはずである。あるいは、わ れわれが予想もつかないような現象が起こったかも知れない。この「宇宙の青年期」と呼ぶべき銀河誕生時代の謎を解明する重要な鍵が、赤外線の観測によって見出されるであろう。なぜなら、銀河や球状星団が誕生した時には、主に可視光の波長域に強い放射をするが、赤方偏移を被った結果、それが赤外線波長域に移っていると考えられるからである。したがって、生まれたての銀河が赤外線で見えてきて、銀河誕生の様子が解明されることになる可能性は大きい。

観測対象の天体が遠方にあるため、かなり弱い 赤外線を検出しなければならないこと、赤方偏移 の程度が分からないので、広い波長帯域をカバー する必要があることなどから、スペースの冷却赤 外線望遠鏡が最も適していると思われる。



褐色わい星のスペクトルと検出限界の比較。 太陽と木星は16光年の距離に置いた。



人類は長い間、宇宙の観察を肉眼に頼って来た。 人の目の瞳から採り入れる光の量は僅かである。 そのため、肉眼では遠方の暗い天体を見ることは 不可能である。また、瞳の直径は高々数ミリメー トル。これでは遠い天体をくっきりと高分解能で 見ることもできない。

宇宙観測における「ブレークスルー」は1609年に起こった。ガリレオが光学望遠鏡で宇宙を眺めた時である。ガリレオはこの時、木星をめぐる四大衛星を発見、そこにミニ太陽系のような世界を垣間見た。ガリレオの望遠鏡は直径が高々3cmほど。サイズは小さくてもその意義は大きかった。

この後も宇宙観測に向けてのステップは次々と踏み出された。そして電磁波の全域にわたる観測,

飛翔体を駆使した観測が宇宙に向けられ ている昨今である。

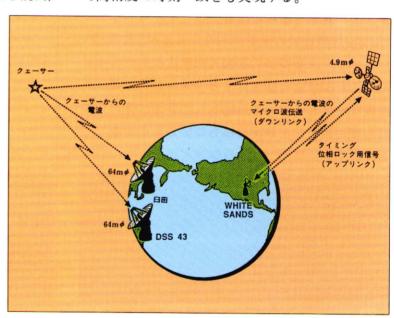
1. VLBIとは

1986年の夏、宇宙観測にとって歴史的なステップといえる実験が成功した。TDR S-OVLBI実験と呼ばれたスペースVLBI 実験である。それは電波領域で空前のサイズの望遠鏡を作ることが可能であることを実証した実験であった。スペースVL BIの実現のためには、宇宙に大口径の電波望遠鏡が必要で、そのためには強力な打上げロケットや地上の支援用管制局と観測局のネットワークが必要である。

スペースVLBIは、宇宙空間を巨大な電波望遠鏡

にして、遠い電波天体を超高空間分解能で観測しようというものである。既に地球上では、世界各国の電波天文台の大アンテナをリンクし、地球規模の口径に相当する大干渉計アレイが観測を行っている。そのベースになるのがVLBI (Very Long Baseline Interferometry) という観測技術である。

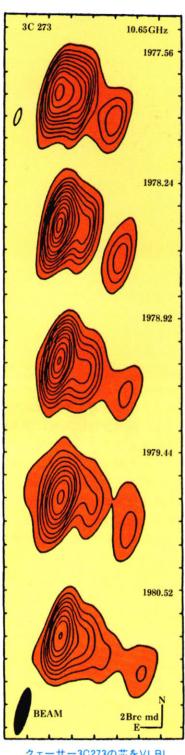
天体からやって来る電波を, 各地の電波望遠鏡 で、電波の波の性質が保存できるような形で、高 密度磁気テープに記録する。記録テープは一か所 に集められて同時に再生されて、 つきあわされ、 干渉させられる。こうして電波望遠鏡がつながっ たことになる。ありがたいことに星空に対して地 球が自転をしているので、各地の電波望遠鏡の相 対位置が、いながらにして変化する。いわば、地 球規模に拡がる鏡面の各部が次々と張られていく ようなものである。こうして雄大に拡がる大干渉 アレイが実現し、電波天体の微細構造の電波写真 が作り出される。この時、各アンテナで受信され た電波は可干渉性があって、電波の位相や時刻も きちんと合致しなければならない。このため、ミ クロな原子の基本的な振舞に発する振動をもとに した原子発振器に電波望遠鏡を位相ロックすると いう技術を使う。また原子発振器はいわゆる原子 時計として使われるものであるから、これによっ て高精度の時刻一致をも実現する。



TDRS-OVLBI実験では、受信局として静止衛星 | 局と地上 2 局が使われた。

クェーサーの謎を追って

このような地球規 模のVLBI観測での 空間分解能は,角度 の千分の1秒ほどで あり、これは月に立 つかぐや姫を地球か ら見込む角度である。 VLBIで観測される 天体は、小さくて輝 度の高い天体である。 電波で見るクェーサ ーはまさにこういっ た性質を持っている。 クェーサーの芯をV LBIで見ると, 一方 向にのびた電波ジェ ットが見える。その 付け根では光速の数 倍というみかけのス ピードで、放射領域 が年のスケールで次 々と飛び出している のが観測できる。実 際は光速の98%程度 のスピードでほぼ我 々の方向に飛び出す 相対論的なビームの せいであると考える ことができる。この ような高エネルギー ビームを放出する芯 は、1光年以下の大 きさであるが、数十 億光年の遠方にあって



クェーサー3C273の芯をVLBIで観測すると、時間と共に光速の6倍という見掛けのスピードで右下に何かが飛び出ているのが分かる。

強力な放射の源となる真の姿はいまだに分かっていない。大質量の回転するブラックホール説が盛んである。このような芯へのてがかりは、とにかくその像をズームアップして見ること、そのため

にはスペースVLBIでなければならないのである。

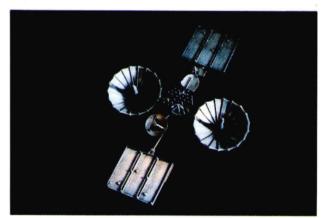
3. 宇宙局と地上局を結んで

スペースVLBI、それは宇宙に巨大アンテナを作り、これをVLBI観測の一局として地球上のアンテナ群と結ぶ宇宙空間VLBIである。宇宙のアンテナで受けた電波はマイクロ波で地上に伝送して磁気テープに記録すればよい。また宇宙の受信器は地上の原子時計に伝送で位相ロックすることができるはずだ。こうすると、原理的にはもはや電波望遠鏡の有効サイズを限定するものはなくなって、人類の観測手段は大幅に向上する。

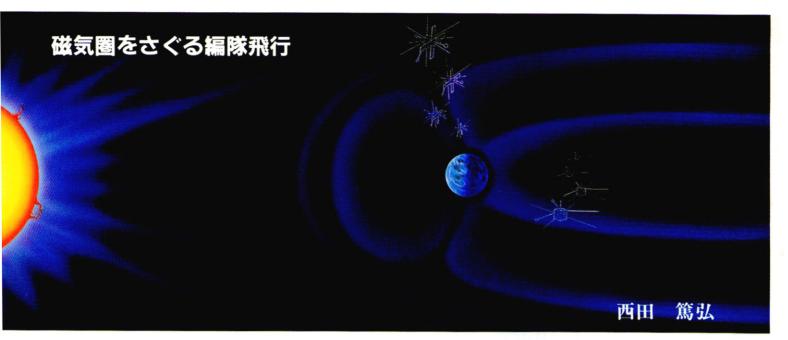
静止軌道上に浮かぶ現実のデータ伝送衛星(TDRS衛星)を使ってスペースVLBI実験をしたのが、TDRS-OVLBI実験であったのである。地上局としては、オーストラリアと臼田の64m鏡が使われた。そして現実のクェーサーを観測してその実験に成功したのである。この時、臼田-TDRS衛星間をクェーサーの方角から見た実効間隔は、17.800km、地球直径の1.4倍という記録つきである。

宇宙研では東京天文台、電波研究所と共同で日本のスペースVLBIを世界との協力のもとに実現する計画を練りつつある。

宇宙に巨大アンテナを作り、地上と結んで宇宙空間そのものを望遠鏡にするスペース VLBI。その行く手には強力な打上げロケットを初めとしてさまざまな工学的開発要素があるが、スペース VLBIは人類が作らなければならない目前の宇宙観測システムである。



世界初のスペースVLBI実験に使用されたTDRS衛星の卓上モデル。



『太陽地球系科学』は、太陽活動が地球周辺の空間の状態に及ぼす影響を研究する分野である。科学衛星という観測手段の実現は、この分野の研究の発展に決定的な影響を及ぼした。研究対象の真只中に測定器を送り込むin situ観測によって、地上からのリモートセンシングでは想像することしかできなかった構造や現象を直接見ることができるようになったからである。現在開発が進められているEXOS-D衛星とGEOTAIL衛星はこの系列に属する。これらの衛星は、極光帯上部と磁気圏尾部という重要なエネルギー変換領域を飛び、究極的にオーロラの発生につながる一連の機構の解明に寄与しようとしている。

この分野の自然な発展方向の一つは、対象を『太陽惑星系』へと拡大し惑星周辺の空間においてin situ観測を展開して、比較惑星磁気圏学的な見地から研究を進めていくことである。これについては大家寛教授執筆の項を見られたい。もう一つの方向は、地球周辺のプラズマ中においてより詳細な観測を実施し、エネルギーの輸送や変換、粒子の加速など基本的に重要なメカニズムに関する知見を一層深めて行くことである。

一機のみの衛星によるin situ観測の本質的な泣き所は、時間変化と空間変化を分離できないことである。この欠点を補うためには、数機の衛星に編隊飛行をさせ空間構造を把握することが望ましい。またactive実験の手法を併用し、一機の衛星から放射された粒子ビームや波動が他の衛星の位置でどのように観測されるかを見ることによって、周辺のプラズマ中に潜在する加速や波動励起のメカニズムの性格を明るみに出すこともできる。相対距離100kmから1000kmの衛星を数機飛ばし、active実験を含む編隊観測を磁気圏の主要領域において実施することが次の目標である。

例えば,図に示すように極軌道上に衛星を配置して, 極光帯上空における電子のエネルギースペクトルが高 度と共にどのように変化し、その変化が周辺のプラズ マの状態とどのように関連しているかを見る。またこ の一機から電子とイオンビームを放射し、そのスペク トルがどのように変化して行くかを見る。このような 観測により、粒子加速のメカニズムの解明を前進させ ることができる。また図に示すような尾部の衛星群に より,磁気中性線領域に流入するプラズマとそこから 流出するプラズマの状態を比較し、その間に働くメカ ニズムを調べる。ここでも人工的な電子やイオンがテ スト粒子として有用である。衛星群による観測は、磁 気圏境界層における運動量とエネルギーの輸送機構の 解明においても有効である。電離圏では, 数機の衛星 を最長100kmのひもで結び、極域電流の立体的把握など を目指すテザー衛星の構想がある。

個々の衛星は重量約200kgとするが、衛星群が分散してしまわないように軌道を制御する機能を持たせなければならない。最小限4機の衛星で構成するとしても重量の合計は約1tonとなる。

太陽地球系科学のもう一つの方向は、宇宙空間の環境科学としての役割である。宇宙基地が実現し、宇宙空間で生活する人間が常時存在するようになった暁には、放射線の強度など磁気圏や電離圏の状態の予報が要求され、また基地による宇宙空間の環境汚染の理解と防止も現実的な課題となろう。この側面は主として宇宙の実用との関連において発展するものであろうが、新たなアカデミックな課題も発生するであろう。



見わたせば 星も溶けゆく 初茜 (的川)

ISASニュース No.70 1987.1.

ISSN 0285-2861

発行:宇宙科学研究所(文部省) ●153 東京都目黒区駒場4-6-1 TEL 03-467-1111 The Institute of Space and Astronautical Science