

第3章 月からの宇宙観測

第3章 月からの宇宙観測

1. 月からの宇宙観測の意義と基本的方向

1.1. 月面における宇宙観測

月面からの宇宙の観測は、長期的に見るならば、極めて大きな可能性を秘めている。特に太陽や地球の熱放射の影響を避けることができる場所であれば、月面でのみ可能な長くかつ安定した基線は、将来可視光からサブミリ波までの広い波長域で1ミリ秒角から0.01ミリ秒角、すなわち現在の到達点の100～1000倍を越える革命的な高分解能をもたらす、宇宙像を一新するであろう。また長基線の重力波干渉計の展開や長波長電波による宇宙文明探査の試みなども、人類の宇宙理解野上で、月面に特有な新たな可能性を開くものである。

これまで日本では、月面における天文学はいわば遠い将来のことと受け取られ、現実性を伴う計画は提案されてこなかった。それには日本の宇宙科学推進体制の遅れなどいろいろの理由があるが、短・中期的に見たときに月面が必ずしも天文観測にとって理想郷ではないという点も、大きな問題であった。具体的には、太陽による熱の影響や月面からの熱輻射、ダストの存在、そしてラグランジュポイントなど宇宙観測に適した軌道へ投入した最適化された衛星からの観測に比べペイロードの不利が大きいこと、などがあげられる。

しかし冒頭に述べた長期的展望に加え、短・中期的段階においても、目的によっては月面からの宇宙観測には大きな魅力があり、十分な積分時間、低バックグラウンドでの観測など目的に応じた小型の実験的ミッションの検討を進めるべきである。とりわけ熱の問題が軽減される高緯度地方や理想に近い安定した環境が得られる極地域の永久影をもつクレーター内、地球の影響を受けない裏側などにおいては、月面の利点を生かすことができる。

さらに充分なペイロードや有人活動が期待できる将来には、冒頭に触れたように軌道上では困難な長基線を持つ各種の大型アレイの展開など、月面ならではの魅力が発揮され、天文学観測のさまざまな分野で大きな可能性が開けるであろう。短・中期的な天文観測ミッションは、そうした将来の大きな展望を開くためのステップとしても重要である。またわが国がこうした長期的展望に立つプロジェクトにおいて、科学の基本的可能性を開く先導的な寄与をなすことも、わが国の科学の将来にとって重要であろう。

1.2 当面する月探査での天文観測ミッションの基本的考え方

そうした観点から、今回の宇宙開発政策大綱で打ち出された日本の月探査計画にかけられる期待は大きい。大綱が述べているように、適切な理由により月面探査が実行されるな

ら、上記のような将来性を踏まえ、調査・開発を兼ねた短・中期の宇宙観測ミッションをその一環として実行することは、月面天文学への着実なステップとして大きな意義がある。また月面からの宇宙観測の評価・実験・技術開発などの点でも、日本が人類共通の財産となる先進的な寄与をなし得る可能性がある。もちろんそれには、有力な実行グループの存在、予算面での見通し、適切な研究推進体制の整備が前提になる。

本調査研究では、平成6年度の調査研究（未来工学研究所編「月探査に関する調査研究報告書」、平成7年3月、45p～124p 参照）を踏まえ、「月面からの観測」ワーキンググループを中心として、当面する第一期の月探査フェーズ（2010～2015年まで）での実験的な天文観測ミッションの検討を進めた。

既に述べたように、長期的には極めて魅力ある月面ではあるが、衛星軌道などに投入する最適化された観測衛星と比較したとき、短期的には不利な点も多い。一方、月面探査計画によるサポートや月面の安定性を考慮すれば、科学的に意義がありかつ、将来の月面天文学へのステップとなる優れた小型計画の実現は、十分に意義があるであろう。そのような計画を、ここでは「天文パイロット・ミッション」と呼ぶことにする。「天文パイロット・ミッション」の具体的提案例については、以下の報告で順次述べる。

当面する第一期の月探査においては、月面における天文学関連計画は準備段階にとらえており、宇宙科学研究所が中心になって検討中の「月の科学」が、月面活動に関連した技術開発ミッションと並んで、この時期の月探査計画における科学ミッションの主要部分になるであろう。天文関連分野では第一期探査の初めにはそうした計画と相乗りで実験的ミッションや調査を進める。同時に「天文パイロット・ミッション」の具体的検討により実施可能な計画にまで高め、第一期探査における適切な時期に実施することをめざすのがよいであろう。そうした段階を経て、つづいて第二期（2010～2015年以降と想定）の無人あるいは有人の探査が行われる場合には、より進んだ干渉計システムなどの計画に移行するのが適切である。

そこで以下では、○実験的ミッション、○パイロットミッション、○それに続く(第二期探査を想定した)提案、の3段階にわけて記述する。具体的な記述にはいる前に、月面からの宇宙観測で重要な設置場所（観測サイト）について、まず述べておこう。

1.3 観測好適地としての月面極地、および高緯度地域、裏面について

中・長期的観点に立ったとき、月面の南極・北極地域に存在すると思われる永久影に覆われた極地クレーター内は、極めて優れた観測地である。利点を具体的に上げれば、

- 常時70Kの極めて安定な低温（安定度・雑音面で極めて有利）
- 太陽と地球が見えない（低バックグラウンド）

- 安定した地盤
- 十分な積分時間がとれる（自転の遅さ、同じ天球が常時見える）
- 太陽エネルギー補給の利点（クレーターのリム上のピークから）
- 地球との通信の常時確保（同上）

など数多い。一方、極地クレーター内の不利な点としては、

- 到達・補給の困難
- 天球の半分だけしか見えない
- クレーターの壁からの太陽光反射があり得る（放射から完全には解放されない）

などがあげられる。だが総合的に見て極地クレーター内は、多くの観測装置、とりわけミリ波・サブミリ波、赤外線、可視光、紫外線、X線など各波長の大型観測装置やアレイ(重力波も含む)にとっては理想に近いサイトである。冒頭にも述べたが、そこでの長大な基線の展開は、人類の宇宙理解にめざましい発展の展望を開くと考えられる。従って将来の極地クレーターにおける月面天文台の建設の可能性については、今後腰を据えて追求する価値があるであろう。

極地の永久影地域における装置の持ち込みや設定は、探査の初期的段階では困難である。おそらくは第二期探査の課題になると考えるべきであろう。そこで第一期探査においては、そうした観測最適地の調査を他のミッションとの協力で進めつつ、温度や雑音の問題を除くことが比較的容易な高緯度地方（緯度80～85度前後）において天文パイロットミッションの観測を実行するのが適切である。

また月の裏面は、地球という太陽について強力な雑音源を見ないという点で、特に長波長電波の観測には有利である。宇宙文明探査や銀河系内の近傍空間の観測を目的とした長波長電波アレイは、月面裏側の赤道付近への設置が望ましい。ただしこれにはデータ転送や設置の問題を解決する必要がある、やはり第一期探査の段階では困難であろうが、将来構想として検討してゆく必要がある。

1.4 第一期探査の初期段階（第1回探査機）での実験的ミッション・調査

まず実験的ミッションおよび調査の段階としては、2003年の実施を目指す第1回月探査機（月周回衛星を主とする）において、以下の可能性が検討されている。

(ア) 月面電波源(RISE)

これは月の科学に属するものではあるが、従来天文・測地の分野で進めてきたVLBI野

観測手法による地球回転や変形の観測を、はじめて月に応用しようとするものであって、国立天文台が中心となって取り組むという点でも、月からの天文観測への第一歩と位置づけられる。複数の高精度電波源を月面ないし月周回軌道に設置し、国立天文台が開発した超高精度観測法である相対 VLBI によって、潮汐作用による月の変形を精密に観測し、月の内部構造を探る計画である。VLBI 観測には、国立天文台が銀河と地球の精密計測を目的に設置を計画している VERA (VLBI Exploration for Radio Astrometry; 日本国内に 20 m 級パラボラ 2 基からなる観測ステーションを 4 カ所に設置して、相対 VLBI により 10 マイクロ秒角の精密宇宙計測を実現する計画。国立天文台より概算要求中)を用いる。電波源については既に実験や試作が進み、実現に向けての詰めが行われている。RISE 計画は、月面に置く電波源の数を適切な配置のもとで順次増やしてゆくことにより、月の潮汐などによる変形をさらに効果的に測定できるようになる。従って、第 2 回以降の月探査においても機会あるごとに電波源をできるだけ多数月面に設置していくことが求められている。

またこの RISE は、月周回衛星の軌道の精密計測とレーザー高度計とを組み合わせることとで、月面の立体地形の精密計測や重力分布の測定にも用いられる。

(イ) 月面極地域観測条件調査

将来の極地クレーターにおける天文観測、およびその前段階としての高緯度地域での天文パイロットミッションの実施を念頭に置き、適切な極地クレーター及びその近辺を調査することは重要である。永久影のあるクレーターの探査とその詳しい地形、温度、環境、さらに地質等のデータに加え、発電と通信の基地となりうる隣接高地のサーベイ、パイロット・ミッションの候補地となる高緯度地方の地形と表面温度分布などのデータも必要である。当面、第 1 回の探査で検討されているレーザー高度計やレーダー、光学カメラなどリモート・センシング計画の協力を得ることが検討されている。

(ウ) その他

ダスト、宇宙線、温度の影響などが予想される月面における光・赤外線観測性能を、天文観測の視点から定量的に測る基本的実験も、第 2 回探査以後の初期段階での実験ミッションの一つとして検討された。具体的には、口径 20～40 cm の簡便な小型望遠鏡による可視・赤外線での試験的観測システムが考えられる。これは、口径 80 cm 級の小型赤外線望遠鏡に進む前段階として位置づけられるであろう。これについては、次項で述べる。

また地上からのモニタと連動した周回衛星からの月面上の異変モニタも、CCD カメラなどのデータと連動して行ってはどうかという提案がある。

1.5. 第一段階（第 2 回探査機以降）に向けた天文パイロット・ミッション

「天文パイロット・ミッション」は、想定される 2010～15 年頃までの第一段階無人月探査計画の一環として、月の科学探査や技術実験等と共同しての比較的身軽な実験的ミッションである。とはいえ、コストに見合っ科学に優れた成果をもたらすものでなければならぬのは言うまでもない。そのためにも、「天文パイロット・ミッション」の観測装置は、月面上の緯度 80～85 度の高緯度地方に設置し、有利な環境で優れたデータを得るために夜間観測が可能であることが条件となろう。今回の検討ではそうした点に重点を置いて、より具体的に技術的・科学的な検討を進めた。2010 年代中頃までの第一段階前・中期での実現を念頭におく天文パイロットミッションの具体的なテーマとして今回特に詳しく検討したのは、以下の 3 つである。

- **月面小型実験望遠鏡：** 口径 30 センチ前後の小型・軽量の光学・赤外線両用の望遠鏡を月面高緯度地方に設置し、可視光と近赤外線同時の高感度撮像のリモート観測を行なうことで、月面における宇宙観測の可能性を実証する。それとともに、長時間積分ができる月面の利点を生かし、銀河などのかつてない微光部分までの赤外線観測や、近接小天体の探査実験などを行い、また近接小天体のモニタ実験も行うなど、一定の科学的データをも獲得できる計画とするべく検討が進められている。早い時期の月面ランダーに、ペイロードの一部として載せる。
- **月面背景放射精密測定装置：** 極地に近い高緯度地方の温度の安定した場所にミリ波低雑音ラジオメータ（3 バンド）を備えた口径 2 m 前後の高感度パラボラを設置し、COBE より 10 倍以上の高精度で、かつ小さな構造（1 度以下）の検出を長期間のサーベイ観測で実現する。これによって、宇宙膨張初期における天体の形成過程や、ダークマターの効果などの認識を大きく進めることができる、科学的に価値の高い計画となりうる。ただし科学的意義からは、2000 年代の遅くない時期に実施することが重要である。
- **月面赤外線観測望遠鏡：** 上記の小形実験望遠鏡を受けて、本格的な赤外線観測を行う 80 cm クラスの望遠鏡を月面高緯度地方に設置する計画。

これらについては、次の項目（2. 第一段階に向けた天文パイロット・ミッションの提案）に詳述するが、いずれも高緯度地方への設置、さらに夜間観測が可能であれば、科学的に価値のある計画である。また技術的な開発要素も非常に大きくはなく、推進グループさえ整えば 2000 年代中期での実施は可能であろう。実施上の問題では、WG での検討によれば、高緯度地方への設置については特に大きな問題はない。一方夜間観測も、基礎的な

技術検討では可能性がありそうである。なおそうした第一段階での天文パイロット・ミッションに共通した技術課題の検討状況については、3. において個別にまとめている。従ってこれらの提案については、さらに具体的な技術検討に入るのが適当であろう。

1.6. 第一期以降に向けた提案

開発要素が多く相当の技術開発を必要とし、設置等がやや複雑になるためにパイロット・ミッションにつづいてやや先に想定されるテーマの検討も進めた。具体的には、第2期の探査（2010～2015年以降）を想定している。具体的に提案されている計画は、現在のところ以下のとおりであるが、さらに現実的な検討を重ねていくことが望まれる。

(ア) 赤外線干渉計： 口径 25cm の平面鏡 2 基を 500m 離し、中央に遅延線システムを置く。観測波長 2mm で 1 マイクロ秒角を分離。新しい世界が開けるが、感度では制限。平面鏡の位置安定度 5nm が厳しい。極地クレーター内の設置が必要。

(イ) 重力波望遠鏡： 極地クレーター内または高緯度地方で、直行する数 10km の基線にレーザー干渉計を構成する。中央の干渉システムは数百 m の見通し高さにおく必要がある。ミラーサイズは 50cm、シンプルなマイケルソン干渉計。

(ウ) 宇宙背景放射精密観測望遠鏡： パイロットミッションに続いて、より高感度・高分解能観測を目指すミリ波コンパクト・アレイである。

(エ) 低周波電波アレイ： 月の裏面での星間プラズマや SETI 観測などをを目指す 1 MHz 帯アレイの準備としての、月面低周波電波パイロットアレイである。

これらについては、4（第一段階以降の天文ミッションの構想）で具体的に述べられる。

1.7. 今後の課題

天文観測の計画にほぼ共通する技術的課題として、

1. 高緯度地方への設置
2. 熱・放射雑音源の排除
3. 一定の位置安定度と指向精度
4. 夜間観測の要求

などがある。さらに将来の段階では、干渉計などより複雑なシステムの設置技術、極地クレーター内あるいは裏面への設置、高精度の追尾駆動などが求められる。これらについての検討状況は3にまとめたが、さらに専門的見地からの技術的検討を進めていくことが重要である。

月探査や将来の月面天文台の構想には、宇宙開発において我が国独自の寄与をなすものとして、非常に高い期待が寄せられている（たとえば宇宙開発政策大綱案に関する公聴会での立花隆氏の意見など）。

重要なのは、月探査をしっかりした科学・工学の長期的統一計画として推進し、高い成果をもたらすことを保障する推進体制・研究体制の構築である。現在宇宙ステーション JEM の利用における研究促進の体制に関し、宇宙開発委員会の宇宙環境利用部会などを通じて積極的な検討が進められているが、月面探査に関してもそれに劣らないしっかりした体制の検討が急がなければならない。

これらについては、5の項で述べられる。

2. 第一段階に向けた天文パイロット・ミッションの提案

2.1 月面小型光学・赤外線望遠鏡

月面におけるパイロットミッションで早期に実現可能なミッションとして、月面からの赤外線及び可視光での試験観測を中心に一定の科学的価値を持つ天体観測実験などを目的とした、口径20～30 cmの月面小望遠鏡の計画が考えられる。これは、第二段階としての80 cm級赤外線望遠鏡の案(3を参照)や、月面からのモニタ観測などのための実証実験の性格をもつものであるが、同時に、月面からの初めての科学的価値を持つ宇宙観測実験ともなりうるものである。

(1) 目的

第一期探査の初期に、比較的簡便だが優れた検出器を備えた小望遠鏡をランダーに載せて持ち込むことにより、望遠鏡駆動系・検出器系の月面での運用運用実験、近赤外線波長帯における撮像及び低分解能の分光観測、および可視光域での近接小天体のモニタ観測実験など月面からの赤外線及び可視光での試験観測を行うことを目的とする。

(2) 科学的意義

(近赤外線による高感度観測)

近赤外線観測では、高感度の近赤外線検出アレイを備えることで、月面における低い背景放射と長時間露光を利して、近傍銀河など拡がった天体の高感度観測を目的とする。地球上から赤外線波長帯で観測を行うと、大気及び望遠鏡からの熱放射及び上層大気のOHラディカル分子などから生じる蛍光スペクトル線により非常に強い背景放射を受け、この背景放射により赤外線観測時の検出感度が大きな制約を受けている(図3.1参照)。

そこで高感度の赤外線観測を行うために、IRAS(米・蘭他1983)、IRTS(日本1995)、ISO(ESA1995)、IRIS(ISAS2002予定)等の赤外線天文観測衛星が打ち上げられつつある。

しかし衛星軌道にある望遠鏡は、冷却されている望遠鏡部分への熱入射を避けるため、軌道を回りつつ太陽光と地上光の熱放射を避けながら衛星運用を行う必要があり、一つの天域に望遠鏡を固定して行う観測(ポインティング観測)の継続時間(すなわち露光時間)に強い制限がある。例えば赤外線撮像を目的として計画が進んでいるIRIS衛星(太陽同期極軌道)では、この制限から1天域の観測時間は極付近を除いて半年間に数時間と限られており、連続した撮像時間としては10分程度が上限となっている。この制限を解消するためにラグランジェ点に宇宙望遠鏡を置く計画も検討されている(EDISON計画など)。

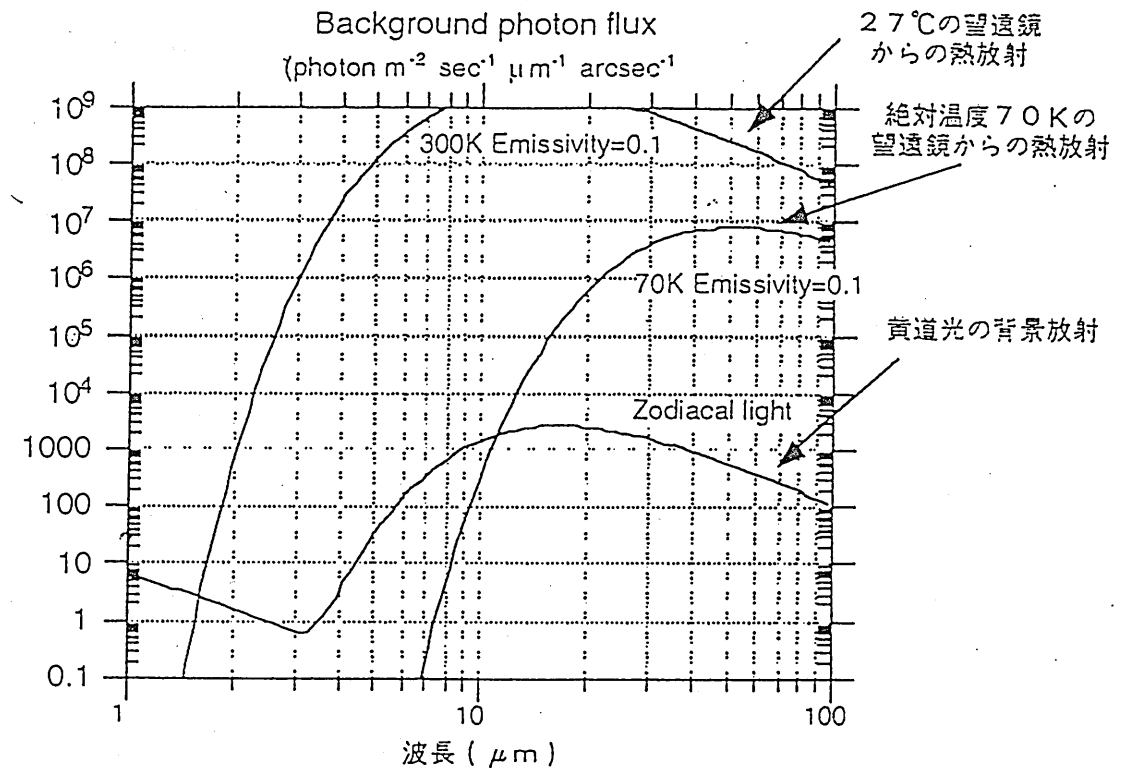


図3.1 赤外線における検出感度

一方月面に望遠鏡を置くと、固定した基盤と月の遅い自転速度のおかげで、1天域に対して十分に長い時間の蓄積観測が可能となり、軌道上からの観測の制限を逃れることができる。そのため、たとえ20～30 cmの小望遠鏡でも、最近発達を続けている優れた検出器を備えさえすれば、近傍銀河の外に拡がるかつてない微かな領域までとらえることが可能になるのである。

月面においてこのような高感度の小形赤外線望遠鏡を用いて近赤外線銀河の表面測光を行うことにより、以下の理由により、銀河の質量を他波長の観測と比較してより正確に見積ることができ、暗黒物質とも関連して大きな論議的となっている銀河の質量に重要な知見を加え、宇宙の理解の上で優れた成果をもたらすと考えられる。第一に、銀河の主たる質量は暗黒物質を除けば低質量星が担っているにもかかわらず、紫外線や可視光線で銀河の観測を行うと、その光度の主成分は大質量の若い星からの放射となってしまう。しかし近赤外線では晩期型星からの放射が光度に支配的な寄与を持ち、この結果若い大質量星からの寄与が大幅に抑えられ、その銀河における最近(大質量星及び星生成活動度のライフタイムのオーダー)の星生成活動度の差(質量)/(光度)関係にほとんど影響を与えなくなる。一方、逆に近赤外線よりも波長の長い中間赤外線領域で観測を行うと、星からの放射と並んで星生成領域にアソシエートした温かいダストからの放射が大きな寄与を持つこととなるため、IRASで検出されたスターバースト銀河のように現在の星生成の活動度が(質量)/(光度)関係に大きな影響を持ち始めてしまう。このような理由で近赤外線波長領域では銀河質量の根幹をなす低質量星を最も良くトレースすることができ、これにより他波長と比較して最も正確に銀河の質量を見積ることができる。

第二に、近赤外線のKバンド(2.2 μm)では星間吸収量が可視光のVバンドにおけ

る値と比較して等級にして10分の1（Hバンド：1.65 μm では約5～6分の1）になる効果も大きく、この結果銀河の自己吸収による影響も小さくなり、表面測光の値から質量を見積る際の不定性を小さくできる。また近年話題となっている低質量星が形成する銀河ハローの可能性も十分検出可能な範囲となり銀河のダークマターの検証に非常に重要な意味を持つ観測が可能となる。

（近接天体モニタ観測実験）

「月面からのモニタ観測」の項で述べられているように、地球に接近あるいは衝突する可能性のある小天体の検出とモニタは、そのような天体についての知識を増やすためにも、また将来の技術的な進歩による衝突回避の可能性を拓くためにも、着実に進めるべきである。月面はそのようなモニタ観測のためには有効な場所であるが、本格的な観測のためにはかなり大型の（1～2mクラス）光学望遠鏡が必要であり、将来のそうした計画に備える上では、まず実験的なフェーズが求められる。小型望遠鏡に近赤外と同時に可視光を観測できる検出器を搭載することは十分可能であり、可視光での実験的な宇宙観測と併せて小天体のモニタを実験的に行うことを提案する。とりわけ、地上では不可能な太陽近傍方向から多数やってくる小天体の観測を試みることができる。

（3）望遠鏡諸元

望遠鏡口径 : 20～30 cm ϕ
望遠鏡タイプ : 赤道儀式望遠鏡（フォーク型）
望遠鏡光学系 : カセグレン広視野リッチクレッチアン光学系
観測波長域 : 0.4～2.5 μm
観測装置 : 広視野赤外線カメラ
(広帯域干渉フィルターによる赤外線撮像観測及び透過型プリズムによる広視野対物分光観測)

広視野可視光カメラ

(近接小天体検出・モニタ実験、各種可視光観測実験)

検出器 : 512×512素子InGaAs赤外線検出器又は1024×1024素子HgCdTe赤外線検出器

(ともに感度範囲は1～2.5 μm)

2000×2000素子CCDカメラ(0.4～1 μm)

望遠鏡温度 : 160 K以下が必要(放射冷却により実現)

検出器温度 : 160 K以下(InGaAsの場合)

80 K以下(HgCdTeの場合) : 共に放射冷却

消費電力 : 10 W

装置重量

望遠鏡 : 5 Kg (Be一体成型の場合)

カメラ及び光学系 : 10 Kg

赤道儀本体 : 10 Kg (シールドを含む)

駆動電気系 : 10 Kg

計 35 kg

通信及び電源部

通信部重量 : 15 Kg

通信部電力 : 20 W

電源部重量 : 100 Kg (太陽電池パネルを含む)

設置場所 : 高緯度地域が好ましい(図3.2参照)

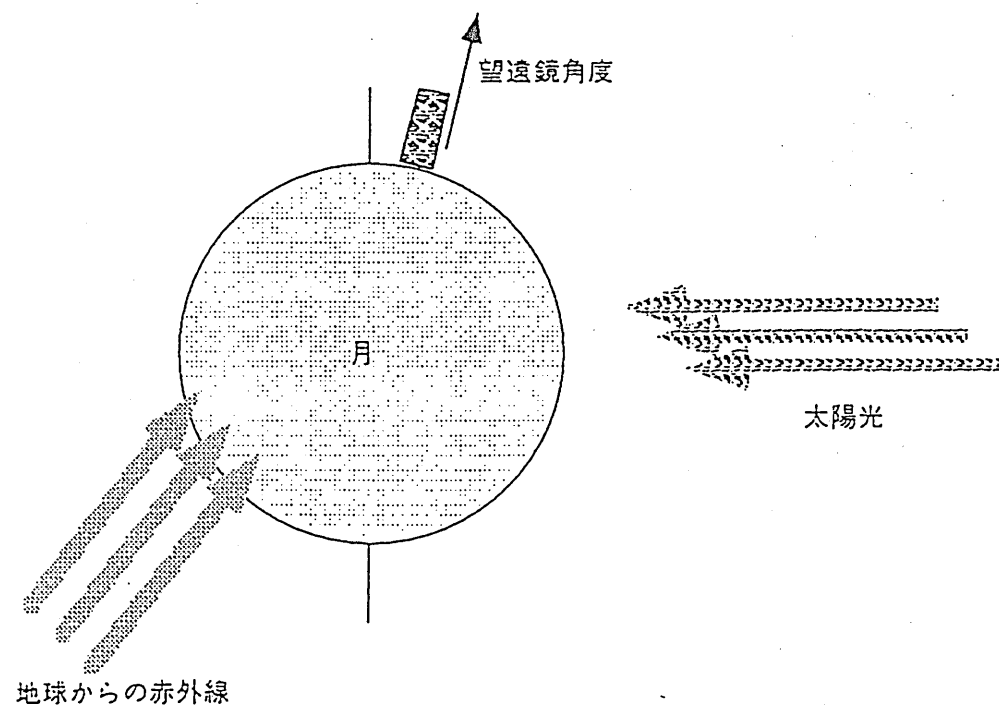


図 3.2 : 設置場所

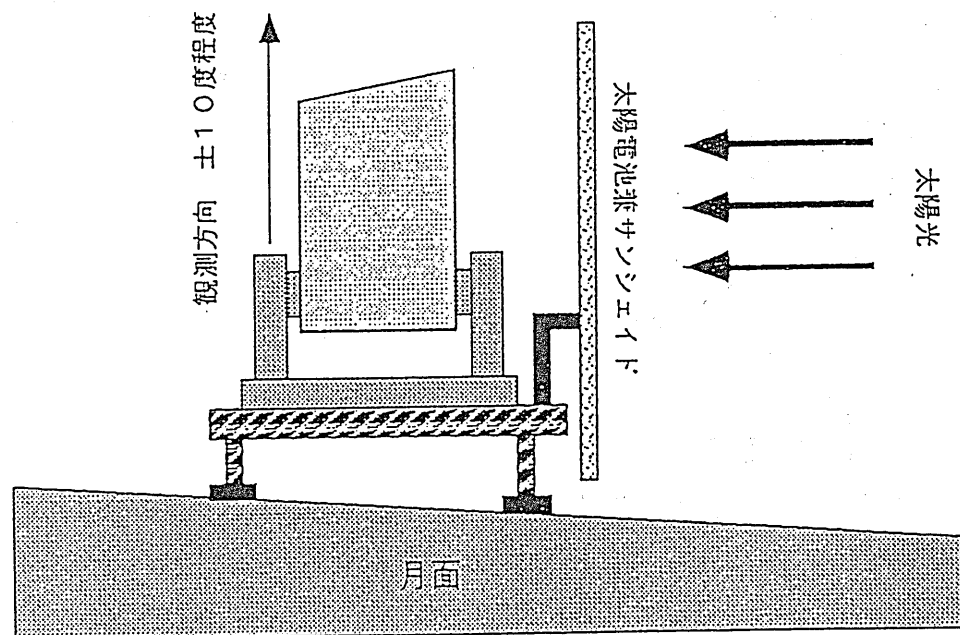


図 3.3 : 設置予想図

2. 2 宇宙背景放射観測用月面電波望遠鏡

(1) 月面からの宇宙背景放射観測

1) 宇宙背景放射の角度異方性

ビッグバン宇宙論によるとわれわれの宇宙は約 150 億年前に起った大爆発で開闢し、現在も膨張し続けている。1965 年に米国ベル電話研究所のペンジラスとウィルソンにより宇宙のあらゆる方向から同じ強さの電波がきていることが発見されたことから、このシナリオは基本的に正しいことが証明された。彼らの発見した電波は現在では“宇宙背景放射”とよばれ、2.74K の温度の黒体放射スペクトルをしていることが観測されている。ビッグバンとともに宇宙が生まれ、高温の状態であった時、光子はプラズマに阻まれ放射されなかったが、宇宙が膨張とともに冷えて電氣的に中性化すると始めて放射される。

このときの黒体放射が宇宙膨張によって赤方偏位して電波でみえていと考えられている。このように宇宙背景放射は電磁波をとおして得られる最も遠方の情報である。このため、宇宙背景放射の温度のゆらぎ ($\Delta T/T$)、すなわち、その角度異方性には現在の宇宙で観測されている銀河、銀河団の起源をとときあかすのに必要な情報がふくまれている。

しかし、長い間、宇宙を飛続けた放射であるので、途中の情報もいろいろ含むことになっている。宇宙背景放射の角度異方性は以下に示すように、角度スケールによってどの情報を主に含むかがことになっている。図 3.4 はその観測の現状をまとめたものである。

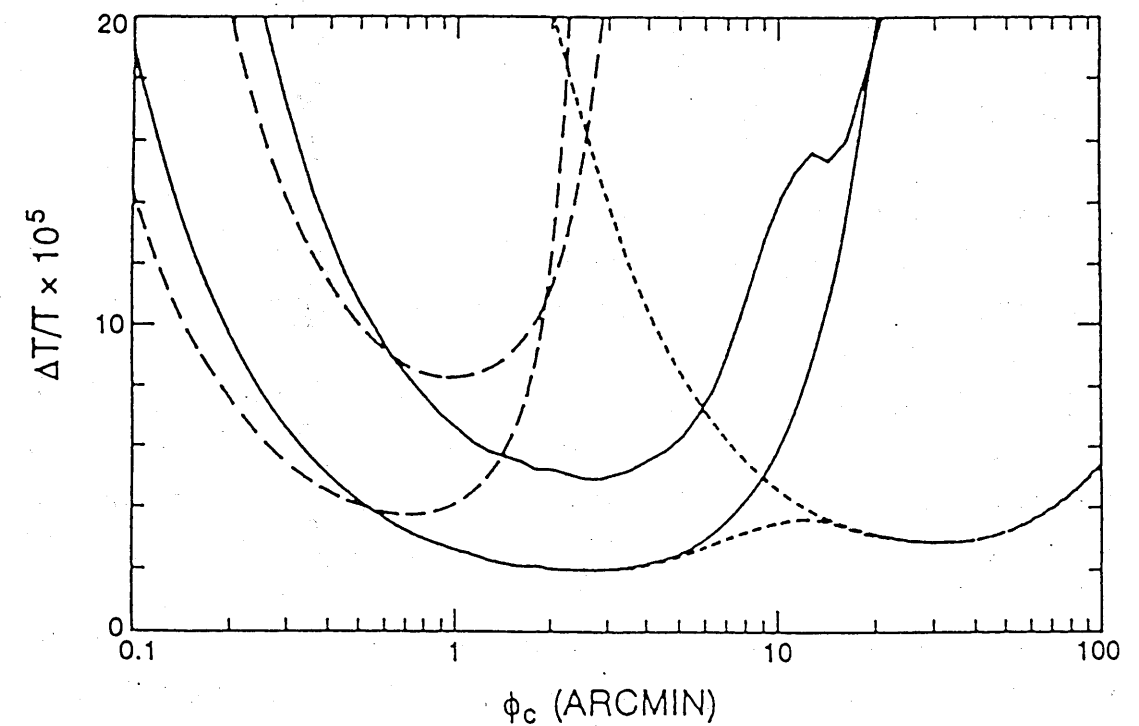


図 3.4 宇宙背景放射の観測の現状

180度スケールの異方性：

これは80年代より気球観測などにより検出されている(Lubin et al. 1985, Fixen et al. 1983)。宇宙背景放射は赤経11時、赤緯-6度の方向が3 mK (すなわち、 $\Delta T/T = 10^{-3}$ 程度) 高く、逆方向がひくい。これは太陽系が宇宙背景放射に対して直線運動していることによっておこるドップラー効果である。これらの観測によって銀河系を含む局所銀河団がヒドラ・センタウルス超銀河団に600 km/sの速度で引きよせられていることがわかった。

180度未満、5度以上スケールの異方性：

1992年に米国COBE衛星により発見された(Smoot et al. 1992、図3.5参照)。これは宇宙初期の空間の曲率のゆらぎ(Sachs-Walfe 効果)やエントロピーのゆらぎ(等曲率ゆらぎ)によるものである。発見されたゆらぎは10度スケールで $\Delta T/T = 10^{-5}$ 程度であった。まだ、現在も観測を続けているが、検出器の限界に近い観測であり、その絶対値は大きな不定性をふくんでいる。したがって、別のグループによる再観測は必要であり、地上観測、気球観測が続けられている。このゆらぎの角度スケールは宇宙中性化時に焼直すと宇宙の地平線よりも大きい。理論的なゆらぎのスペクトルの仮定をおき、観測されたゆらぎから推定することなしには現在の宇宙で観測されている構造とはむすびつかない。

5度未満、1度以上スケールの異方性：

このスケールのゆらぎは宇宙背景放射の最終散乱面のドップラー効果にもとづく、まだ検出されていない。

1度未満、5'以上スケールの異方性：

このスケールのゆらぎは宇宙背景放射の最終散乱面の光学的厚さにもとずき、宇宙中性化時の物質の密度ゆらぎを直接しめしている。宇宙中性化時に焼直すと30'ゆらぎは数10 kpcに相当する($q=0.5$)。これは銀河のスケールであり、このゆらぎから天体が直接進化したと考えられる。したがって、このゆらぎの角度スペクトルは大変重要な観測量になる。銀河の“卵”となったゆらぎを見つけようとする小角度スケールのゆらぎの観測は比較的高分解能が要求されるので観測装置が大きく、従来は、地上からの観測がおもに行なわれきた。しかし、大気電波透過率はたえず変化するため、地上電波観測では極めて薄い成分を検出することは非常にむずかしい。また大気電波の付加雑音も大きい。これらのため、残念ながら確実には検出されていない(Readhead et al. 1989)。この観測は非常に長い積分時間が要求され、システムの安定度や地上からのもれこみのため信頼性の高いデータは地上電波観測では得にくいのはあきらかで、現在、世界の観測グループが地上観測、気球観測に精をだしながらも、人工衛星をあげる準備をしている。

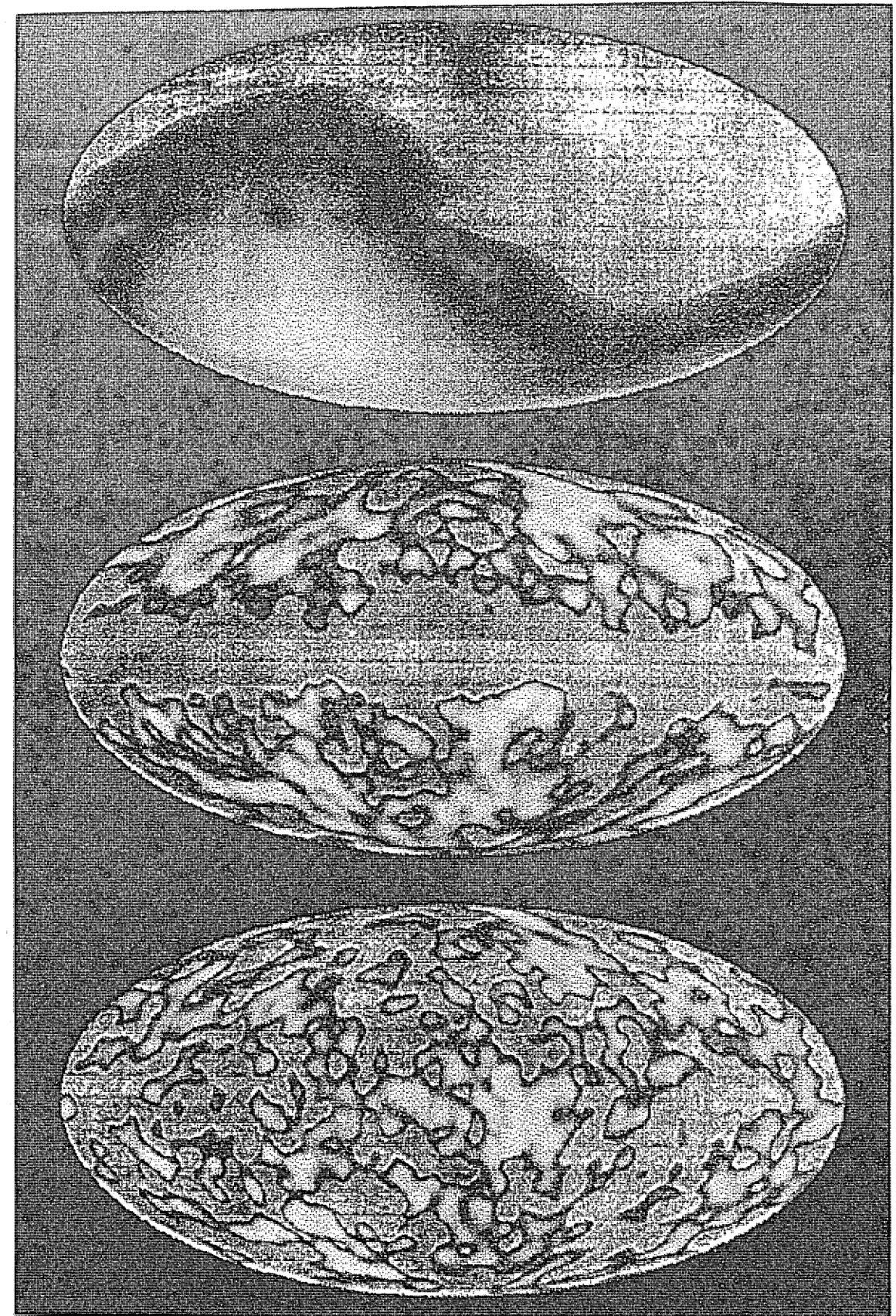


図3.5 COBE衛星により発見された180度未満、5度以上スケールの異方性(Smoot et al. 1992)

上図：銀河系の運動による双極子成分、中図：観測データから双極子成分を差し引いたもの、

下図：銀河系成分を差し引いた揺らぎ成分

5 ‘未満スケールの異方性：

高い分解能を必要とするため地上の大望遠鏡で観測されている。スニヤエフ・ゼルドビッチ効果による。この効果は銀河団に存在する10⁸ Kの高温プラズマに入射した宇宙背景放射の光子が逆コンプトン散乱され、ピークより短波長側（サブミリ波）では明るく、長波長側（長ミリ波）では暗くなる現象である。この効果の観測とX線観測をおこなえば、光学観測とはまったく独立に、宇宙の大きさ、年齢を決定するハッブル定数が決定できる。QSOの分光観測から銀河間物質の大部分が電離していることが知られている。すなわち銀河に含まれなかった物質はなんらかのメカニズムで再び電離されたことになる。電離ガスは宇宙背景放射を散乱するので、10⁻⁶程度以下の小角度異方性は打消されている可能性がある。したがって、どの程度まで構造が残っているかは再電離のメカニズムを知る上で重要である。

2) 月面からの宇宙背景放射観測の得失

<利点>

- 1) 大気がない。
- 2) 夜間、かつ極地方からの観測では測定器の周りの環境が冷たくゆるやかに変化し、太陽の影響もない。
- 3) 硬い月面がある。

宇宙には大気がないため、ここから発生する雑音、誤差に悩まされることはない。しかし、これだけでは人工衛星でも同じである。月面は2) 3) により、天空の同じ場所の長時間積分観測には有利であろうと考えられる。この種の観測を低い地球周回軌道の衛星でおこなうにはたえず姿勢制御が必要である。また、宇宙背景放射の精密測定を実現させるには外部からの擾乱をできるだけ少なくさせる方が有利である。地球周回軌道では大きな雑音源である太陽、地球が望遠鏡に対して、たえずちがう方向で見えていることになり、よい環境でない。月面のような環境を実現するには月面以外ではラグランジュ点L₂まで打ちあげることが必要である。

<欠点>

- 1) 観測器がかなり小さくなる。
- 2) 時間がかかる。

月面だけでしかできないというテーマは、宇宙の観測の場合には存在しない。月面の観測の有利性は相対的なものである。したがって、テーマの選びかたによっては、いくら月面がよい環境といえども、地上大望遠鏡や大型人工衛星を長時間駆使する競争相手にまける可能性がある。テーマの選択には定量的なアセスメントが不可欠である。下記の提案でも定量的なアセスメントが必要であることはいうまでもない。

3) 小角度ゆらぎスペクトルの観測の重要性

原始宇宙ではビッグバンとともに物質が生まれ、混沌の状態であった。ところが、現在の宇宙はふつうバリオンでできた物質は秩序を持った銀河の形で存在する。したがって、この宇宙が混沌から銀河へ進化したシナリオをあきらかにする必要がある。「われらの世界はどのように生まれたか？」を追究することは知的生命としてある意味で必然的なことである。

ゆらぎがあるといえても、そのサイズが大きければ、そのゆらぎが直接の銀河へ成長したのではない。もっと小さな角度スケールをもった、直接の銀河の“卵”となるゆらぎを発見しなければ、銀河形成シナリオは結局あきらかにならない。この小角度ゆらぎは $\Delta T/T = 10^{-6}$ 程度と予想されるので装置に要求される性能は大変きびしい。しかし、宇宙背景放射の小角度ゆらぎスペクトルの観測こそ、COBEの次の一手となり、宇宙の進化への理解を大きく進ませるものであると信じる。

(2) 月面宇宙背景放射観測システムの提案

1) 観測計画とシステム

われわれは小角度ゆらぎスペクトルをもとめることを目的とした月面から宇宙背景放射の小角度ゆらぎをCOBE衛星の10倍の角度分解能と10倍の検出感度の観測を提案する。図3.6はわれわれの提案するシステムの概略図である。このシステムはランダーによって月面高緯度に設置され展開される。観測は月の自転を利用したドリフトスキャン方式月の極の周りの小円上でおこなう。したがって望遠鏡の制御は1軸であり、月の自転1回ごとにアンテナの仰角を変えることによって行い（数箇月ごと）、天体の追尾は不要である（図3.7参照）。受信方式は基本的にはアンテナの焦点面におく1組のホーンアンテナの入力を切替えて行う。“銀河の卵”となった小角度“宇宙のゆらぎ”を観測するためには30⁻⁶程度の角度分解能を実現する必要があるが、この1組のアンテナは自転方向に数10⁻⁶程度はなれた2つの空を指向し、そこからの信号の差分を検出する差分放射計になっている。このため、アンテナ自体も30⁻⁶程度の角度分解能を実現する必要がある。これをミリ波帯（30—100 GHz）で実現するには有効アンテナ直径で1—2mのパラボラアンテナの使用が不可欠と考えられる。観測周波数は銀河系の背景放射から宇宙背景放射を分離するため3周波数以上必要である。宇宙背景放射のゆらぎの成分は周波数依存性はなく、宇宙背景放射が観測できればどの周波数でもよい。しかし、銀河系自体も背景放射成分をもっている。

この銀河背景放射は大きな観測誤差をうむ。これはシンクロトロン放射、熱的制動放射、ダスト放射の3成分よりなる。40—90 GHzがこれらの放射のもっともよいところである。しかし、0になるわけではないので、多波長の観測からこれらを推定し差引くことが必要である。COBEと連続性などを考え、30、50、90 GHzを観測周波数としたい。この周波数帯で有効アンテナ直径で1.5mとした場合、そのままでは分解能は30

GHzで28'、50GHzで17'、90GHzで9'であるが、ホーンの照射分布をかえて28'にそろえる。また、指向性は1'程度は必要であろう。以下、個々の装置を説明する。

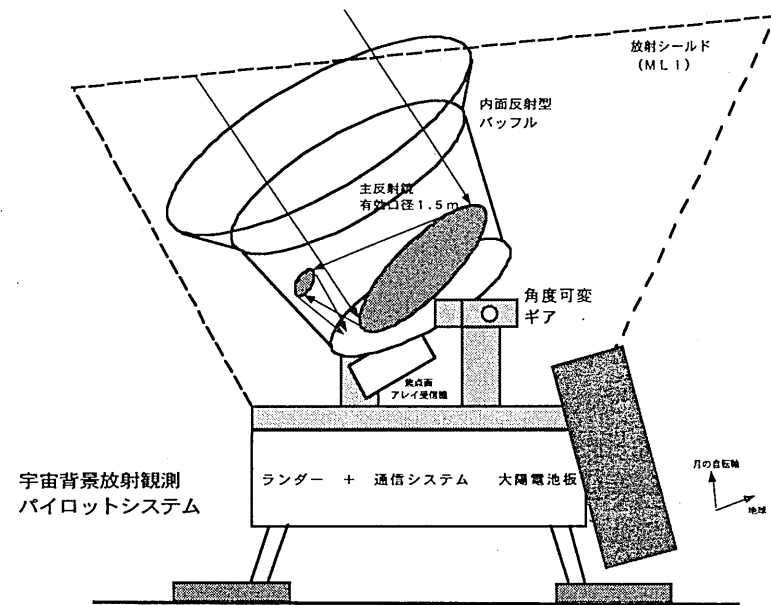


図 3.6 月面宇宙背景放射観測システムの概念図

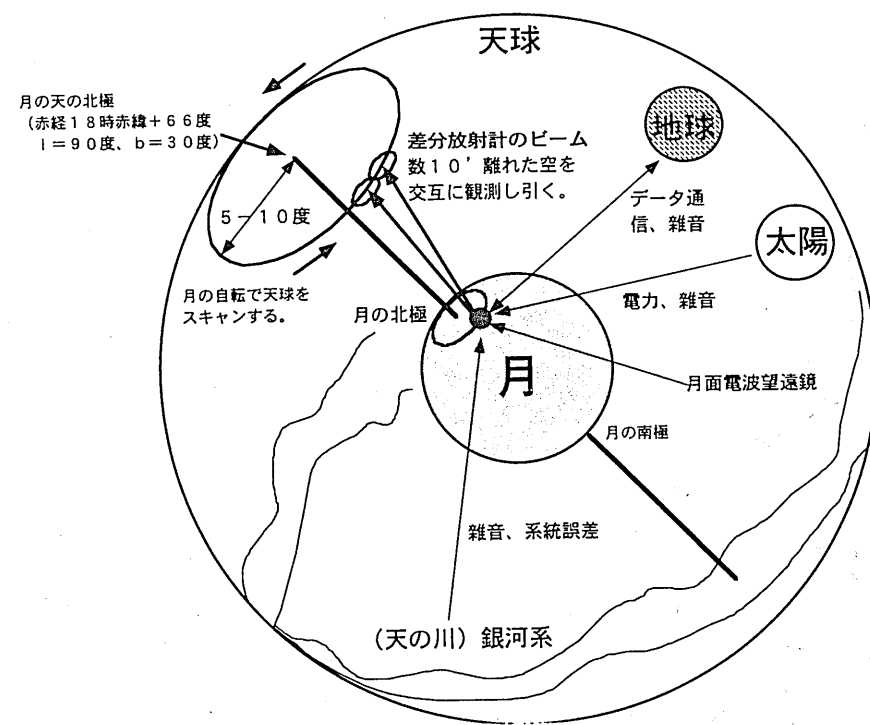


図 3.7 観測方法の概念図

2) アンテナとシールド

宇宙背景放射のゆらぎの大きさは 10^{-6} K以下と推定するので系統的な誤差がアンテナ等で起ると観測の大きな妨げになる。したがって、アンテナに要求される条件はきびしく、できるだけ低雑音・低スピルオーバーのアンテナが必要である。太陽は 10000 Kもあり、単純に言えば、観測すべき対象よりも 100 dB (100 億倍) 強い雑音源である。また、地球は温度でこそ 300 Kしかないが視直径は太陽の 16 倍もあり、太陽の半分程度の影響は考えられる。また、月面は夜は 150 Kと低温でも、全立体角の半分をしめている。たとえ考え得る最高の低雑音・低スピルオーバーのアンテナをもってきても、これらの放射にアンテナが直接さらされれば宇宙背景放射の精密測定などできないであろう。

われわれはシールドと着陸地点を高緯度にするにより、これらの雑音源をさけることを試みる。シールドは2つを組みあわせる。まず、アンテナを大きくつつむシールドで月面、太陽、地球からの陰をつくる。このシールドはMLIなどにより断熱する。内側は反射面で、さらに、端につけたラジエータで放射冷却する。これにより、このシールド方向をみた場合、宇宙背景放射以外はシールド端の回折光と内側の反射面からの熱放射しかみえなくなる。次にアンテナを反射型バッフルでおおう。これは第1のシールドの回折光と熱放射をさらにおとすものである。後述のようにこうすることによりアンテナの放射冷却が可能となる。第1のシールドは低緯度にいけばいくほど巨大なものになるし、アンテナの指向できる範囲がかぎられる。また、回折光のため有効に働かないであろう。設置場所は高緯度にいくしかないであろう。緯度として85度ほしい。このバッフル・シールドで雑音が 100 dB落ちていれば信号とほぼ同じおきさになる。この減衰率は実際にシステムを製作する場合は実現不可能なほどむずかしい。しかし、観測は実は空の2点の明るさの差分を測定するので、2つの空での雑音の影響が同じで差分に残らなければ、100 dBが達成されなくてもよい観測はできる。また、シールド・バッフルの性能にもよるが、すべてうまくいけば、夜でなくても観測できるだろう。ただし、シールド・バッフル付のオフセットカセグレンアンテナの定量的解析が不可欠である。前述のように有効アンテナ直径が 1.5 mであってもエッジレベルを下げてビームをよくし、雑音を減少させるためには 2 m程度のオーバーサイズのオフセットカセグレンアンテナが必要であろう。

さらに高い周波数では照射が真中にかぎられるので、エッジレベルを下げるができる。実際に南極での観測でも2-3倍の鏡をつかっている。また、オフセットカセグレンアンテナは前方に遮るもんがなく、低雑音、低いサイドローブ・レベルを実現できるからである。オーバーサイズの主鏡は端での電界強度をさげスピルオーバーを小さくする。副鏡からもれた部分は空ににげるので雑音を増加させない。アンテナの鏡面温度は雑音を小さくさせる点からできるだけ下げたい。上記の大きな主鏡を冷凍機などで冷却したりするのはとても無理であろうから、放射冷却で 100 K程度まで冷却することを考えたい。アンテナは反射面をもった断熱シールドに囲まれているので、放射冷却がつかえるはずである。この場合、アンテナ面をテンションサポート等の断熱しながらささえる機構で保持

しないと熱伝導で冷却されない。また、放射冷却を有効に使うためにはBeなど小さい比熱の材質でアンテナをつくる必要がある。また、この放射冷却のためのラジエータ方式をどう設計するかは問題である。温度がさがると放射効率が低下するので広いラジエータ面積がいるし、後述のように焦点面の1組のホーンアンテナの差分をとっているので、各ホーンのみるアンテナ面が微妙にことなり、誤差を防ぐため主鏡面の熱分布を一樣にすることが必要であるからである。電波は反射し、赤外は吸収するセカンドサーフェスマラー的なものが可能かどうか、実験が必要であろう。

3) 検出器と感度

大気圏外で観測するならば大気からの雑音がないので、太陽、月面などからの放射など回りこむものをぬかせば、望遠鏡（アンテナ）と受信機が主たる雑音源となる。したがって受信機も量子限界感度を実現できれば理想的である。これはミリ波帯でも超伝導検出器を使用してすでに実現されているが、この使用には4Kまで冷凍してやる必要がある点が宇宙では問題となるであろう。しかし、最近、半導体であるHEMTの技術の進歩は著しいので、数年後には、量子限界の数倍程度の低雑音が可能であろう。この冷却は4Kまでは必要なく、passive coolingで到達可能な70K程度で使用可能である。ただ発熱量が大きい場合やHEMTが冷やしないと低雑音にならない場合も考えるとこの方式だけでは難しいかもしれない。現時点では、放射冷却だけでなくスターリング冷凍機で50K程度にひやすことも考えたい。開発がうまくいけば、アンテナをふくんだシステム雑音は30GHzで30K以下、50GHzで50K以下、そして、90GHzで90K以下が実現できるであろう。またバンド巾も感度を左右するが、HEMTであればバンド巾10%は可能である。受信方式は差分放射計であるが観測の冗長性と一度に掃天できる範囲の広さから16ビーム（8対）x3波長を提案したい。到達感度は積分時間t、システム雑音T、観測バンド巾Bで到達感度DTは

$$DT = 2 \cdot T / (Bt)^{1/2}$$

できまる。たとえば月の極より10度はなれた小円上の観測の場合、1箇月の観測で独立観測点 $125 \times 8 = 1000$ 点の一点に対して

$$30\text{GHzでは } \Delta T / T = 5 \times 10^{-6}$$

$$50\text{GHzでは } \Delta T / T = 7 \times 10^{-6}$$

$$90\text{GHzでは } \Delta T / T = 9 \times 10^{-6}$$

となる。独立観測点が1000点もあり、また観測天域は黄道面からはなれているので小惑星が視野にはいる確率は小さい。この場合のデータを棄っても十分の観測点確保できるのであ

ろう。このため、1—2年の観測期間で目的とする感度に達するであろう。

4) データ取得と通信量

データをPSD処理をし、差分データにするのは原理的にはホーンの直後でアナログ的におこなうのが一番不定性ないはずであるが、ミリ波帯アナログスイッチの精度、雑音の問題があり、実験をしてみないと判断できない。ここではこのスイッチをつかわずデータがふえた場合で考える。PSD処理は後処理でおこなう。この条件でデータ発生量は1周波数あたり、16ビーム同時、A/D変換器の分解能16bitそして0.001秒ごとのサンプリングを考えると、

$$D = 16 \text{ ビーム} \times 16 \text{ bit} \times (1/0.001 \text{ sec sample}) = 768 \text{ kbps}$$

である。したがって、30日x24時間/125点=6時間積分したあとの分解能はシステム雑音を100Kにすると 10^9 になる。これは到達感度の3けた以上小さく、量子化されることなくデータ取得ができるであろう。このデータの宇宙線のヒット等によるスパイクを除去、冷凍器等の振動成分の除去、PSD等の処理をオンボードで実行し0.1秒程度に積分する。bit数はふやしないと量子化で情報がへるので100分の1の圧縮するためには $27=100$ なので7bitふやすと、 $D2 = 768 \text{ kbps} / 100 \times (23/16) = 11 \text{ kbps}$ になる。これを日本の不可視時間である12時間積分したとすると、メモリーは60MBになる。オンボード積分時間をのばせばデータ量はへる。通信量は原理的にはD2の2倍あれば最低よいが、50-100kbpsあれば余裕がある。

(5) システムの質量および必要電力

質量

(1) 輻射シールド: 50kg?

(2) アンテナ: 100Kg?

(3) 受信器: 50kg?

(4) 処理系: 20kg? 計220Kg??

電力

アンテナ: 5W? (たまにつかうだけ)

受信器: 45W? (1ビーム: $0.3 \text{ W} \times 50 = 15 \text{ W}$ + 発信器10W + 冷凍器20W)

処理系: 10W?

通信器: 10W?

したがって、合計70Wあればよい。

2. 3 赤外線観測望遠鏡ミッション

以下に述べるのは、2. 1の小形実験望遠鏡をふまえて第一期の内に天文パイロットミッションとして実施が可能と考えられる、本格的な赤外線観測用月面望遠鏡の案である。

(1) 目的

(月面からの赤外線試験観測の科学的意義)

前記の試験ミッションと比較して、スペースにおいては比較的大型の口径により、点源に対する高い検出限界を実現する。

点源に対して高い感度を持つことで、赤外線による原始銀河のサーベイ及び遠い銀河のカウント観測を行う。銀河の形成と進化に関しては、現在なお観測的に未開の領域であり、この点においても赤外線の観測は重要になりつつある。例えば原始銀河の探索に関しては赤外線のKバンドで非常にディープな観測が行われ、いくつかの候補サンプルが提示され、他波長によるフォローアップ観測が行われているが、未だにイニシャルスターバーストの検出には到達していない。また銀河の面密度 ($\log N/\log S$) から銀河の進化を調べる試みも、可視光波長帯ではベル研究所のTysonらにより非常にフェイントな観測が行われており、赤外線波長帯でもハワイ大学のCowieらを中心に非常にディープな観測が推進されている。

これらの観測的なアプローチは今世紀の後半に完成するすばる望遠鏡をはじめとする、いくつかの大望遠鏡により糸口がつかめる可能性があると共に、2002年頃に打ち上げが計画されている赤外線観測衛星(IRIS)により究極的な結果が得られるものと期待されている。しかし銀河の光度関数を考える際に問題となることとしてローカルキャリアレーションの問題がある。比較的遠方の銀河は見かけのサイズが小さいため、大望遠鏡やIRISのような計画で十分なサンプルを期待することができる。これに対して近傍銀河は見かけのサイズが大きくまばらに分布するため、このような大型の装置できちんと表面測光をする事は困難である。何故なら赤外線波長帯では背景放射が大きいため、この差し引きをきちんと行うことが銀河などの広がった天体の観測には重要になるが、小さな視野しか持たないこれらの装置では銀河全体に加えて、スカイと呼ばれる外側の領域を同時に観測することができないためである。本計画では近傍の比較的大きなサイズの銀河から遠方の銀河までを、同じ装置で一元的に観測できる。

(2) 望遠鏡の諸元

望遠鏡口径	: 80 cm ϕ
望遠鏡タイプ	: 赤道儀式望遠鏡(フォーク型)
望遠鏡光学系	: カセグレン広視野リッチクレッチアン光学系

観測波長域	: 1~5 μ m
観測装置	: 広視野赤外線カメラ 広帯域干渉フィルターによる赤外線撮像観測 及び透過型プリズムによる広視野対物分光観測
検出器	: 1024 $\times$ 1024素子InSb赤外線検出器 感度範囲は1~5 μ m
望遠鏡温度	: 100 K以下が必要(放射冷却により実現)
検出器温度	: 30 K以下: 冷凍機(スターリングサイクル)による冷却が必要
消費電力	: 50 W(冷凍機を含む)
装置重量	
望遠鏡	: 40 Kg (Be一体成型の場合)
赤外線カメラ及び光学系	: 10 Kg
赤道儀本体	: 50 Kg
駆動電気系	: 30 Kg (冷凍機を含む)
計	140 Kg
通信及び電源部	
通信部重量	: 15 Kg
通信部電力	: 20 W
電源部重量	: 200 Kg (太陽電池パネルを含む)

3. 天文パイロット・ミッションにおいて共通する技術課題

3. 1. 夜間のエネルギー

月面からの天文観測には、可視光・赤外線・電波などの波長域を問わず共通する課題がいくつかある。第一に、太陽とそこごく近傍を観測する場合を除いて、夜間の観測が昼間よりも条件が良いか、あるいは圧倒的に有利である。前項で提案されている「宇宙背景放射測定」および「小型赤外線望遠鏡」の2つのパイロット・ミッションに限って言えば、どちらも昼間の観測が可能なものの、月面そのものが発生源となる雑音がどの程度のものかが不確定な要素なので、超微弱な天体からの信号を捕らえようとする観測は夜間に期待せざるを得ない。従って、この夜間観測に必要なエネルギーの供給が大きな問題となる。本調査研究では、「月からの科学」WG と「月面インフラ」WG の関係者が、「月からの観測（天文学パイロット・ミッション）のエネルギー供給」と題する合同の会合を持ち、エネルギー供給方法の検討を行った。具体的には、提案されているどちらのパイロット・ミッションも夜間観測時の所要電力は 100W とし、夜間のエネルギー供給を二次電池（NiH₂、あるいはリチウムイオン）によるものと、再生型燃料電池によるものとの実現性のトレードオフを行った。

詳細は本報告の 3.1.4.2 に述べられているが、結論から言うと再生型燃料電池が重量的に有利であり、電池システムの総重量が 320kg となるが実現不可能ではないと言う結論であった。なお、アイソトープによる発電は実現性に問題があるため今回の検討からは外した。また、マイクロ波送電による供給方法もトレードオフには加えていない。

3. 2. 設置の安定性

天文観測では、目的とする天体の方向に望遠鏡を向ける、あるいは天体の日周（月周）運動を追尾する目的のために駆動装置があり、望遠鏡を振ることで月面を蹴るモーメントが発生することになる。このために、出来るだけ安定した方法で装置の足を月面に固定することが望まれる。しかし、今回提案されているパイロット・ミッションはどちらも望遠鏡に大きな加速度をかけて振り回すような観測モードを想定していない。加えて、月周運動は地球の 30 分の 1 の角速度なので極めてゆっくりした追尾となる。これらの条件から、月面の地盤的安定性や、観測機器の月面に対する安定度は、少なくとも第一段階でのパイロット・ミッションに関する限り大きな問題ではないと予想されるが、本調査研究では十分な時間をとって検討を深める機会がなかった。今後の議論の進展に期待する。

一方、関連する問題として、ランダー着陸時の姿勢に対する許容値が指摘された。すなわち、ランダーの着陸時に、その水平度と方位軸廻りの位置関係（ランダーのどの面が真南を向くか）がどの程度の精度で制御できるものか、あるいは着陸後にランダー自身がそ

れらを補正する機構を有しているかという問題である。「小型実験用望遠鏡」はともかく、「宇宙背景放射測定」の電波望遠鏡それ自体は 3 次元空間の中での自身の姿勢を簡単には確定できないし、「赤外線観測望遠鏡」においても問題となろう。設置姿勢制御（少なくともその初期設定）の機能を望遠鏡が持つか、あるいはランダーの受け持ちか、どのような機構が適切か、今後の検討課題として残されている。

3. 3. 熱制御

（月面望遠鏡の夜間の保温方法について）

月面天文台の実現可能性の検討に際しては、「夜間の保温」が最重要な問題の一つであると言われてきた。特に、天体観測にとって条件の良い夜間の観測は、この問題が解決されない限り不可能であるとされている。

しかし、軌道上の赤外線天文衛星などで既に採用されている断熱技術を用いることによって、夜間の保温の問題はほぼ解決できると思われるので、以下にそれについて詳述する。結論として、保温の問題は解決できるので、先に述べた夜間の電力の確保が夜間観測を可能とする上で残された重要課題である。まず、高断熱構造による保温方法を考える。最初に解決すべきは、夜間すなわち太陽が照射しない期間における電気回路類の保温である。この期間は約 14 日間継続する。この間、電気回路類を保温するためには、放射及び伝導という 2 つの熱伝達パスを高い断熱率で遮断し、電気回路類で必要な熱を発生させるかあるいは熱容量の大きいものを装備しておけばよいことになる。具体的には、クライオスタットのイメージすればよい。しかし、通常のデュワーびんは内部が低温であるが、この場合は内部が高温になる。詳細な最適化は今後の作業に譲るとしても、ここでは概略の計算でこのアイデアが成り立つかどうかを検討する。

モデルを図 3.8 に示す。内部は構造体容器である。これは、熱的には宇宙空間と放射結合し、かつ月面と伝導結合している。この外部容器の温度は熱収支で決めなければならないが、最悪ケースとして絶対 0 度を仮定する。内部には保温さるべき電気回路類が取り付けられる容器がある。この部分の温度は摂氏 0 度以上でなければならないと仮定する。次に外部と内部は機械的には FPR 製のテンションサポートで支持される。これは赤外線天文衛星で用いられているものと同様なものであり、熱伝導度が極めて低い。CFRP よりも GFRP や AFRP が適している。形状としては、赤外線衛星と同様なもの（S/L = 0.02cm のもの 12 本）を用いる。また、内部と外部との放射結合は MLI（多層断熱膜）で断熱されるものとする。

これらの条件のもので、熱的な計算をしてみよう。まず、伝導パスの熱伝達量は、

$$2 \text{ (W/cm)} \times 0.02 \text{ (cm)} \times 12 \text{ (本)} = 0.48 \text{ (W)}$$

次に放射による熱伝達量は

$$50 \text{ (W/cm}^2\text{)} \times 0.1 \times 6 \text{ (cm}^2\text{)} / 60 \text{ (層)} = 5 \text{ (W)}$$

となり、内部で 5W の発熱があれば外部が絶対 0 度でも内部は永久に常温に保たれることが計算される。また、放射熱結合の方が支配的になる。5W という発熱はちょっとした電気回路の発熱よりずっと小さいので、夜間観測を行って回路を作動させる限り、保温の問題は生じないことになる。仮に夜間は観測をせずに保温だけすればよいということであれば、5W の熱を発生できるだけのバッテリーがあればよい。これは 1.7Kwh 相当の放電電力量であるので十分可能な範囲である。

次に、内部に熱容量の大きいものがある、これによって温度の低下をくい止めることを考える。モデルとしては上記のものと同様のものを考えると外部と内部との熱伝達量は約 5W である。例えば 15 日間の温度低下を 20 度に抑えたいとすると、必要とされる内部の熱容量は

$$5 \text{ (W)} \times 15 \text{ (日)} \times 3600 \text{ (秒)} \times 24 \text{ (時)} / 20 \text{ (K)} = 324,000 \text{ (J/K)}$$

となる。これは水に換算して 77kg、金属だと 300kg 程度となる。従って、熱容量だけで保温するという方法はやや苦しい。

しかし結論としては、保温すべき電気回路およびバッテリーの発熱に見合うだけの熱伝達パスを持つような構造を作ることは十分可能である。

(日中の過熱防止)

派生する問題として、高断熱構造を採用した場合には外部が常温付近になる日中に内部が上がりすぎてしまう心配がある。例えば上記のモデルでは外部を 300K にすると内部は 400K 以上になってしまう。そこで、外部温度が高いときの処置が必要となる。

これには、要するに「高断熱構造」を少しだけ破る、すなわち放射あるいは伝導のパスを設けてやればよい。方法としては、

- 外部容器に蓋を付けて、日中は外部に開放する。
- 機械的な熱スイッチを外部—内部間につける。
- ON/OFF 制御可能な流体熱ループを装備する。

などいろいろ考えられるが、これらはどれも技術的に可能である。特に上の 2 つはきわめて簡単なもので十分である。

(まとめ)

赤外線天文衛星で確立している高断熱技術を採用すれば、夜間の保温および観測が以下の条件で可能になる。

- 夜間の保温のためには 2Kwh 以下のバッテリーで十分である。
- 夜間の観測のためには、観測に必要な電力があれば保温が問題になることはなく、むしろこの電力量を 15 日間供給する装備が持てるかどうか問題となる。
- ただし、いずれの場合も日中の過熱防止のメカニズムが必要となる。

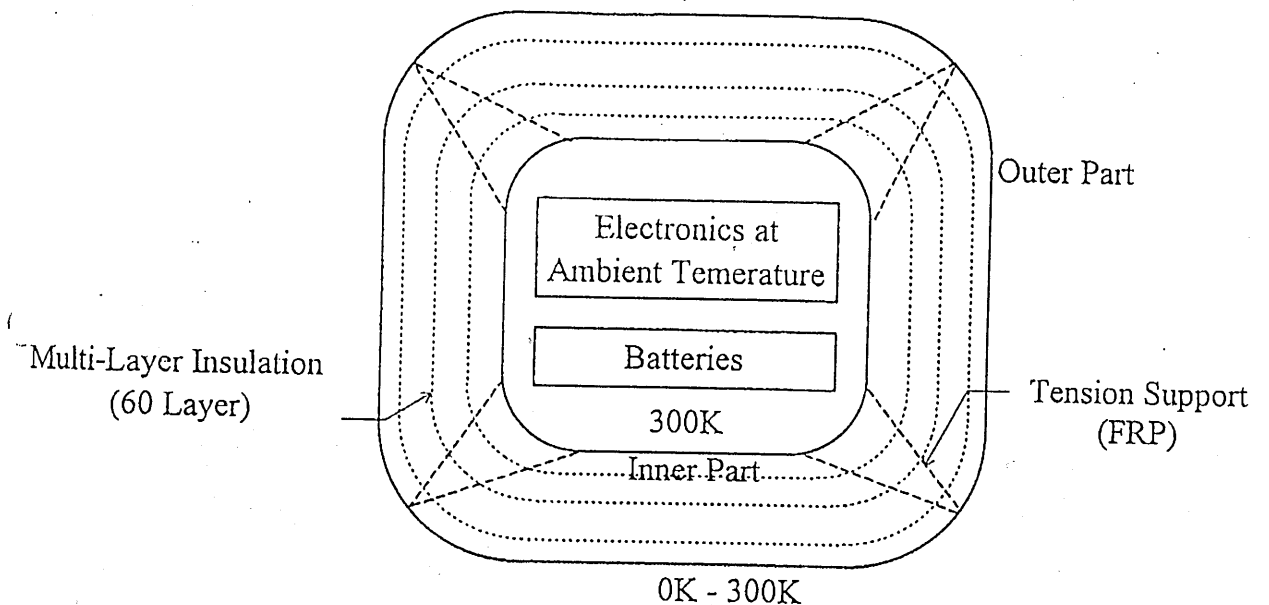


図 3.8 断熱構造のモデル

3. 4. 雑音

この問題は今回の調査研究では、宇宙背景放射での回折の検討を除いてはあまり時間をとって議論されず、特に赤外線環境に関しては大きな進展はなかった。本質的には、月面のごく希薄ではあるがゼロではない「大気」による電磁波の吸収、放射、散乱をどう評価するか、および極地付近（緯度—85 度程度）に望遠鏡を着陸させた場合の雑音環境、とりわけ月の表面温度とその局所的な分布や日照のフェーズによる変化がもたらす熱雑音がどの程度のものであるか、の 2 点が重要である。初期の月周回衛星計画がこれらの課題にどのような知見をもたらすかが大いに期待される。

4. 第一段階以降の天文ミッションについて

第一段階に想定する以上のような天文パイロット・ミッションに続き、2010～15年以降、有人または無人の第二段階の月探査が行われる場合には、月面からの宇宙観測はかなりの技術的発展を踏まえた、本格的な装置の展開を予想することになる。その多くは、極地クレーター内の永久影における、月面での理想的観測環境を目指すものとなるであろう。

そのような計画として、第一回の調査研究に置いては、以下のような案／項目が検討された（「月探査に関する調査研究報告書」P. 80～121、平成7年3月、未来工学研究所）。

宇宙背景放射精密測定
月面赤外線干渉計
月面重力波望遠鏡
月面低周波アレイ
月の裏側での SETI（地球外文明探査）
月面天文台への課題

今回の調査研究では、これらのうち月面赤外線干渉計と月面重力波望遠鏡についてより詳しい検討を進めたので、その検討結果を以下にまとめる。他の項目について関心を持たれる方は、前記報告書を参照されたい。もちろん今回の報告書に載せなかった項目に関しても、それぞれに極めて興味ある将来展望を拓くものであり、今後検討が進むものと期待している。

4. 1 月面赤外線干渉計

（1）概要

さまざまなパラメーターを考慮すると、将来の光赤外観測にとっての最善のサイト、特徴と、そこでの有効な手段は以下ようになる。

- 地上（U～K，大型，・・・） → 大口径（8 m 鏡）の > 1 km 基線アレイ
- 軌道（全波長，低温，広視野，・・・） → 中間・遠赤外の望遠鏡・干渉計，
位置天文干渉計，
HST タイプの中口径望遠鏡
- 月面（全波長，安定基線，・・・） → 長基線干渉計，位置天文干渉計

現在地上の光赤外干渉計は建設ラッシュで大規模なものも含まれており、波面補償光学

などの実現により地上干渉計でもかなりの性能が期待され、今あらためて地上干渉計の限界を正しく予測し認識することが必要である。必ずしも光学干渉計が月面に行かなければならないわけではない。また、太陽地球系の第2ラグランジュ点における軌道干渉計も大口径長基線化が可能であり、月面に建設するより得策であるとの報告も最近の研究会でなされている。

従って、月面では、安定で大きなプラットフォームを生かした干渉計で、地上や軌道では不可能で、月面でしかできない範囲を狙うのが有効である。現実問題としてとらえると、月面は天文台建設にとって理想的なことばかりでなく、地上干渉計や軌道干渉計などの実現性と性能を大きく上回るものは、月面では限られた用途にのみ存在する。現時点で候補は1つのみ考え得るが、1マイクロ秒角精度の位置計測を行う赤外位置天文干渉計である。

（2）月面赤外位置天文干渉計

月面でのみ可能になるものとして、1マイクロ秒角の位置天文観測がある。地上では大気揺らぎ、衛星では基線の長さや安定性の問題、によって、位置天文計測に限界があると考えられるからである。波長を長く赤外にする理由は、銀河系内での星間吸収を避けるためであり、位置決定精度を高くする観点からは波長が短い方がいいので、波長は $2\mu\text{m}$ に限定する。ここで述べる月面赤外位置天文干渉計は、有効口径 25cm の平面鏡による天体追尾部分を、基線 1km 離して設置し、遅延線 50cm と干渉光学系・検出器を含むセンターモジュールを中央に置く、無人設置が可能な程度のシステムとなっている。光赤外干渉計としては簡略なシステムにもかかわらず、目的を位置計測天文学に絞ることで、月面でのみ可能になる先端的な科学的成果を目指すものである。なお、 5nm の基線安定性の確保の方法については未解決である。干渉系の概略を図3.9に示す。

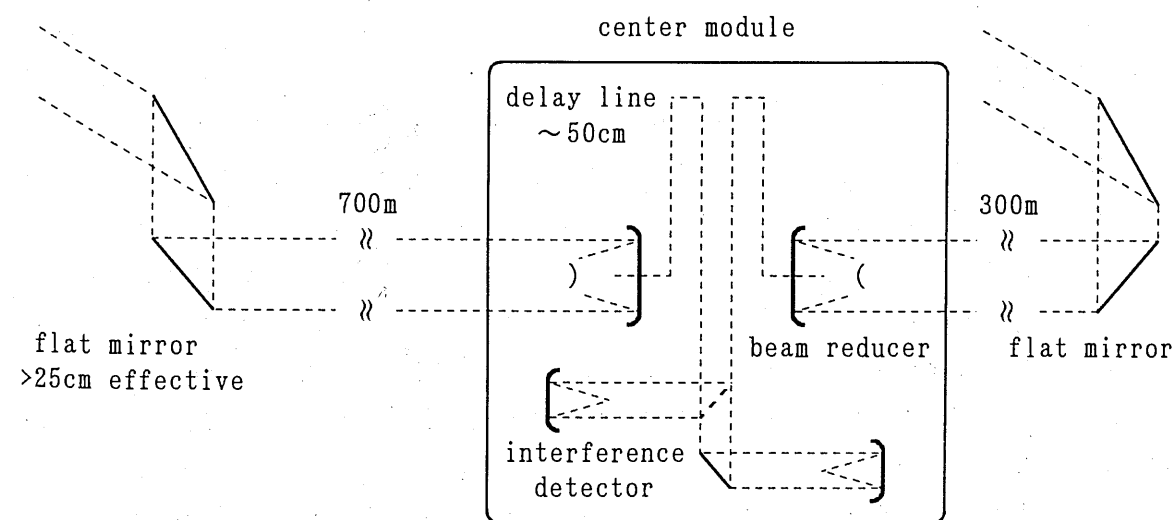


図 3.9 干渉系の概略

(3) 干渉計の仕様

波長	2 μ m
有効口径	25 cm (以上) ・ 平面鏡口径 38 cm
PSF 幅	2"
伝搬路長	2500 m 以内
基線長	1 km
波長/基線	0.4 mas
基線安定性・測定誤差	5 nm (と仮定する)
温度安定性	1/100 K
カセグレン光束縮小系	25 cm $\rightarrow$ 2 cm
光遅延線	50 cm $\times$ 2
追尾時間	400 s
追尾角度	200"
検出限界等級	70 μ J @ 400 s $\times$ 25 cm ϕ
位置精度	1 μ as = 5 nm/1 km
1 μ as の位置決定限界	300 m J
視差測定 GC : 10 kpc	1%
LMC : 50 kpc	5%
M31 : 700 kpc	70%
固有運動決定精度	5 km/s $\times$ year @ 1 Mpc
時計の必要精度	
1 μ as/月の自転速度 =	19 μ s

(4) 検討事項

月面干渉計では、5 nm の基線安定性と 10 km の基線で 0.1 μ as の位置計測の可能性が指摘されているが、ここでは、基線 1 km にしてある。基線 10 km にするには、2 μ m では 35 cm の伝搬光束径が必要である。S/N が同じであれば波長の短さに比例して位置精度が上がる。一方、波長が長いほど遅延線などの許容誤差が緩くなる。ホトンカウンティングができる検出器があるかどうかは S/N を大きく左右し位置精度に影響する。星間吸収の点からは 2 μ m 以上が好ましいと考えられる。銀極方向の光の観測を排除するものではないが、光では遅延線の仕様の厳しさがかなり違う。以上を総合すると、波長は 2 μ m に設定するのが妥当である。

5 nm の基線安定性を確保するために必要な 1/100 K の温度安定性を得るためには、極クレーター内に干渉計を設置しなければならないかもしれない。その場合の電力供給などについては別途解決しなければならない。また、月面への設置・固定方法も開発要素である。

子午線方向しか見れない場合、日周運動による超合成ができないので、数素子の干渉計はイメージングアレイとしてはあまりにもフーリエデータが少なく、貧弱と言わざるを得ない。イメージングはできないと言った方がいいかも知れない。位置天文に精を出すのが最良であろう。

子午線方向しか観測できないと、時角方向の位置精度はでるが、赤緯方向の精度は全くでない。これを解決する方法は、腕の長さの違う干渉計によって子午線大円からはずれた小円上を観測し赤緯の関数である通過時刻差を測るしかなさそう。通過時刻の平均値は子午線通過と同じ意味を持つので小円観測だけで両方向の位置観測が可能である。小円観測の場合天頂方向は観測できない。3 素子で 1 台腕の長さの違う干渉計とか、子午線用と小円用の 2 素子干渉計 2 セットを、設置することが考えられる。2 素子以上の干渉計は複雑になる。子午線や小円方向など決まった 1 円弧以外の広い範囲に干渉計を向けるためには、長い遅延線が必要である。いろいろな距離に固定鏡を配置することができたとすると、切り替え式の長い遅延線ができる。連続的に動かないので 5 nm の遅延変化の測定はできず位置天文観測には使えないと考えられるが、イメージングのための超合成は可能になる。しかし、自走車による固定鏡の配置などのめんどろな作業が増すことになる。もし、レールの上を 100 m ほど連続的に動く遅延線ができれば、広角度に渡って遅延量を 5 nm で測定することで位置天文干渉計に使えて望ましいのだが、月面での建設は容易ではないだろう。

イメージングアレイについては、30 年後には、地上に 1 km 以上の基線を持つ大口径のものが建設されていることだろう。光から近赤外ではこれを宇宙で上回るのは難しい。中間遠赤外では数十 m 規模の干渉計衛星が実現しているだろう。また、太陽地球系の第 2 ラグランジュ点における軌道干渉計も大口径長基線化が可能で、月面に建設するより得策であるとの報告が最近の研究会でなされている。月面でこれらを上回る干渉計を建設するのは、30 年後と言えども実現性が高いとは思えない。大規模なイメージングアレイの月面建設については、月面での活動が容易になるまで棚上げしておくことになりそうだ。

月の潮汐変形については、月は常にほぼ同じ面を地球に向けているので、地球月間距離の変化による重力変動が変形の要因になる。地球対月の質量比 (80) と半径比 (4)、月の軌道離心率 (5%) から、地上の変形量の $80 / (4 \times 4) \times (2 \times 2 \times 0.05)$ で約 1 倍の変形があることが予想される。地上の潮汐変形は $1 E - 7$ のオーダーで半日周期で起こり、海による影響や地殻活動による不規則変動を除いて個体地球の変形モデルとかなり合っていると考えられている。従って、月でも、1 km の基線があれば 100 μ m の変形が半月周期でおこり、かなりモデルフィットされるものになるであろう。しかし、変形モデルに 1% の精度があっても 1 μ m の予測しかできないので、5 nm の精度で基線を知ることは簡単ではない。変形速度は概算で 5 nm/分であり、5 nm の予測がはずれない 100 分程度間に相当数の天体を測ることによって基線を 5 nm で決定できる可能性は残されている。変形に 5 nm の再現性があれば、全観測データを使って解くことも可能性が残されている。非常に煩雑になるが、測量点において三角測量する方法も無いわけではない。

軌道干渉計において、3対の干渉計を基準星に向けながら1対の干渉計で測定する位置天文観測と比較して、この月面位置天文干渉計の実現性の優劣の判断は保留するが、1マイクロ秒角の位置天文はどちらかでやることになるだろう。

(5) むすび

光干渉計は難しいもので地上の環境ではなおさらと思われていたのかもしれないが、計測技術の発達と大気揺らぎの理解と克服が進むにつれて実現性の高いものになってきた。逆に、理想的な観測環境があるとされた月面での光干渉計は、地上と軌道での干渉計の実現性を知り、実際に月面に望遠鏡を置くことを考えると、必ずしもいいことばかりではない現実直面する。月面にもものを降ろすと衛星規模のものではたいがい損をする。H II ロケット1回で済まない大規模のものは困難が倍増し、地上干渉計規模のものを月面に建設するのはやはり困難である。また、光から近赤外域では地上干渉計がかなりのポテンシャルを発揮するので、それを大きく越えるものでなければ超大規模予算を投入するわけにはいかない。最近の報告によれば、ラグランジュ点での軌道干渉計が大口径長基線化の点で月面より優れているとされている。

月面では、このような強い制約・条件の中で月面の特徴を生かした先端的な成果を得うるものを考えていかなければならない。5 nmの変位安定性の確保の方法や、月の潮汐変形の測定など、未解決の問題もあるが、月面赤外位置天文干渉計はその解としてあげられる現時点で唯一の形態である。

4. 2 月面重力波望遠鏡

重力波の直接検出およびその後続く重力波天文学は、物理・天文分野の研究者の長年の夢である。現在既に重力波天文台を建設する米の LIGO 計画（基線長 4km のレーザー干渉計2基を東西両海岸に設置する）、伊仏共同の VIRGO 計画（基線長 3km のレーザー干渉計をピサに設置する）、日本の TAMA 計画（基線長 300m）、独英共同の GEO600 計画（基線長 600m）が開始されている。早ければ今世紀中にも重力波天文学の産声を聞けるかもしれないという状況である。ただし、これらの計画は重力波源として連星中性子星の合体や超新星爆発を想定しており、その他の重力波源に対する挑戦は本格的とは言えない。その理由は、一言で言うと地面振動である。地上の検出器では、低周波帯（10Hz 以下）に多く存在する重力波源を狙えないのである。もちろんドップラートラッキングやパルサータイミングによる重力波検出の試みはされているが、まだ十分な感度には達していない。

アポロの設置した月面地震計での観測により、月面は非常に静かであることがわかっていいる。さらに長基線干渉計を建設できるクレーターや、極地の安定した温度環境も魅力的である。こういった背景の中で、パルサーからの連続重力波や連星ブラックホールの合体

を検出するための月面重力波望遠鏡の構想を以下に示す。

(1) 月面重力波望遠鏡の意義

重力波観測の意義については上述のとおりであるが、地上では本格的な重力波天文台の建設が開始されており、また将来の計画としてスペース重力波天文台計画 LISA が非常に有望であるという状況下での月面重力波望遠鏡の意義をはっきりさせておかねばならない。ここで各種の重力波検出器を簡単に分類すると、次のようになる。

方式	基線長	帯域	重力波源
地上(LIGO、VIRGO)	4 or 3km	10 - 1kHz	連星中性子星合体、超新星爆発
月面	50km	1 - 100Hz	連星 BH 合体、パルサー連続波
宇宙(OMEGA)	100 万 km	10mHz-1Hz	巨大連星 BH 合体
宇宙(LISA)	500 万 km	1 - 30mHz	連星 BH 連続波、BH 形成
ドップラートラッキング		0.1-10mHz	連星中性子星連続波
パルサータイミング		0.01-1 μ Hz	宇宙紐、バックグラウンド

この表からわかるように、地上やスペース重力波天文台とは狙う重力波源が異なるのである。月面重力波望遠鏡の最大のメリットは、パルサーからの連続重力波を長時間積分により検出可能なことである。これはパルサーという既に発見されている重力波源から、理論的に予測される重力波を観測するということである。つまりイベントレートを仮定しない重力波観測をするという非常に重要な意義がある。確かに、LIGO 計画でも第2段階では Crab パルサーや Vela パルサーからの 60Hz および 22Hz の重力波を観測する計画であるが、パルサーは 1Hz 付近にもっとも多く存在し、その数 700 あまりにものぼっている。これらのパルサーからの重力波放出レートがわかれば、統計的な中性子星の研究に役立つであろう。また連星 BH（ブラックホール）の合体という現象も観測可能である。

(2) 月面重力波望遠鏡の概要

前掲の表に示された値は、

- ・月面での地面振動は、地球上の 1/100 以下である。
- ・基線長 50km（地上より1桁大きい）が可能な、平坦な場所が存在する。
- ・長時間積分が可能になるほど、環境が安定している。

等を前提にしている。設置場所は極地クレーターの中である。月面に重力波望遠鏡を設置する場合のメリットは、

- ・真空装置が不要である
- ・低温である（熱雑音が下がる）
- ・高出力レーザーへの電力供給等はスペース天文台よりはるかに自由度がある
- ・いったん作ってしまえば調整はスペース天文台より楽である

ということである。低温（70K 程度）は、熱雑音（ $\propto \sqrt{T/Q}$ ）を下げるのに有効である。温度(T)自体の寄与は小さいが、機械的Q値は常温より1桁以上良くなる可能性があるので、全体として熱雑音が1桁下がることが期待できる。

（3）月面重力波望遠鏡の具体案

完成予定	2020 年（無人）
設置場所	極地クレーター内
基線長	50km
方式	2 回折り返しマイケルソン干渉計
光源	出力 100W の LD 励起 Nd:YAG レーザー（波長 1.064 μ m）
鏡	直径 50cm、厚さ 20cm、重さ 100kg、共振周波数 5kHz、 $Q=10^7$
防振	周期 100 秒の 2 段振り子、 $Q=10^7$
感度	10^{-22} ($1/\sqrt{\text{Hz}}$)
観測帯域	1~100Hz
積分時間	3 年 (10^8 秒)

方式として 2 回折り返しのマイケルソン干渉計を採用した。これは地上のように曲芸的なアラインメント（0.1 μ rad）が不可能なのでファブリーペロー方式を使えないからである。このため 1Hz の重力波に対して最適化した場合（折り返し 3000 回）に比べ、感度で 3 桁以上悪くなる。しかし設置技術や動作安定性の点が優先されるべきなので、やむを得ないであろう。ここでは無人運転を仮定しているが、さらに将来の有人運転の場合にはファブリーペロー方式やデュアルリサイクリング方式（GEO600 方式）にして感度を上げることが可能である。ただし、後述のように数 Hz 以下の領域では期待薄である。2 回折り返し型の利点は、ディレイライン方式であるため両端の鏡のアラインメントは粗くてよく、最終調整は中央でできることである。このため、両端の鏡を搭載する自走車は簡単な構造となる。設置場所を極地クレーター内としているが、基線長 50km を見通すために中央部（光源、ビームスプリッター、検出器、データ収集系、データ送信系）は標高 700m 程度の山の上に設置する必要がある。設置の位置精度は、レーザー干渉計のコントラスト（ 10^{-4} ）を損なわないという条件を考えると、5m となる。中央装置の電力消費は、レーザー電源とデータ収録系及びデータ送信系（なるべくリアルタイムで地球に送信できるもの）が大部

分を占めるはずであり、供給電力として 1kW 程度が必要と思われる。。そのため、太陽の見える箇所に大面積の太陽電池を設置しなければならないかもしれず、今後の検討が必要である。重量としては中央装置と端部装置 2 台を合わせて 1ton 程度は必要であろう。

光源としては出力 100W の赤外レーザーを考える。このタイプのレーザーの利点は変換効率が低い（50%以上）ことで、電源供給の問題を楽にする。既にこの出力で低雑音のレーザーが開発されつつあることも強みである。寿命は LD で決まっており、連続使用で約 3 年であるが、これは交換用のレーザーを付けておくことで伸ばすことも可能である。積分時間はレーザーの寿命で決まっている。

以上の値を使ってノイズスペクトルを計算すると別紙のようになる。ショットノイズが大きい（基線長または折り返し数が小さい）ために熱雑音や地面振動がドミナントになるのは 1Hz 以下の領域である。しかし、熱雑音を下げるのは非常に困難であるので、ファブリーペロー方式にしてショットノイズを下げて 1Hz 付近の感度は改善されないことに注意すべきである。つまり 1Hz 付近は図 3.10 に示された感度が月面重力波望遠鏡の限界としてもよいであろう。むしろ折り返し数が小さいため 1kHz ぐらいまでは感度を持っていることを利用すべきかもしれない。

（4）重力波源と観測可能性

パルサーは回転する中性子星であり、その形が回転対称からわずかにずれているために連続重力波を放射する。歪みはパルサーのまわりの強力な磁場により発生すると予想されている。その重力波の振幅は、

$$h=10^{-30} (\epsilon/10^{-7}) P^{-2} r^{-1}$$

である。ここで ϵ は回転対称からのずれを表すパラメータ、 P は回転周期(sec)、 r は距離(kpc)である。また発生する重力波の周波数は回転周波数の 2 倍である。 ϵ を推定するのは難しいが、スピンドウンレート等から h を推定することはできる。例えば、

	周波数	最大値
Crab パルサー	60Hz	8×10^{-25}
Vela パルサー	22Hz	2×10^{-24}

となる。最大値はスピンドウンレートから計算されるエネルギー減少が全て重力波放出によると仮定した場合の数値であり、あまり現実的でない。最近、磁場による変形が数値計算されるようになり、最大値より 6 桁ほど小さい値が報告されている。実際には、両者の間に真の値があると思われる。上記の 2 つのパルサーは重力波源として最も有望なものであり、積分時間を 3 年としたときの月面重力波天文台の感度は 10^{-26} であるから、重力波

は観測できるかもしれない。一般のパルサーはこれより1桁以上振幅が小さいと推定されるが、特異的に ε が大きいものは観測可能である。地上の重力波天文台ではアンテナ指向性の日周変化により実効的な積分時間が小さくなるが、極地クレーターではその影響はかなり小さいことも利点となる。

連星BHの合体ではチャープと呼ばれる波形の重力波を放出する。太陽の1000倍の質量を持つブラックホール同士が合体する際に発生する重力波は、周波数が大体10Hzまでスweepし、

$$hc = 6 \times 10^{-21} (3 \text{ Gpc}/r) (10 \text{ Hz}/f_c)^{1/6}$$

となる。ここで r は距離、 f_c は周波数である。これに対する月面重力波望遠鏡の感度は 10^{-21} 以下であるから、数Gpcの距離まで充分観測可能であり、イベントレートも決して小さくはないと思われる。この現象を観測できる帯域をもつ重力波検出器が他に存在しないことは注目すべき点である。

地上の望遠鏡で観測可能な100Hz~1kHzはどうであろうか？実はこの観測帯域でも月面重力波望遠鏡はかなりの感度を有している。もちろん地上に比べれば2桁ほど感度は劣るが、LMC程度の距離であれば連星中性子星の合体時の重力波も充分観測可能である。もしこのような近距離で激しい天体現象（超新星爆発を含む）が起これば、地上の重力波天文台ネットワーク（LIGOの2台間距離は3000km）との連携で、重力波源の方向特定精度は2桁向上することになる。

(5) まとめ

1~100Hzという観測帯域を持つ月面重力波望遠鏡の狙うものとして、まずパルサーからの連続重力波観測を検討した。また、連星ブラックホールの合体時に発生する重力波に対しては充分な感度を持つことが確認できた。

連星中性子星の合体や超新星爆発時の観測に関しても、地上の重力波天文台ネットワークとの連携による重力波源の位置に対する角度分解能の2桁の向上は捨てがたい魅力がある。とにかく1Hz~10Hzの観測帯域は、地上でもスペースでも実現するのは不可能なので、この意味においては月面重力波望遠鏡の存在意義は充分にあると思われる。未だ想像もされない重力波源がないとも限らないので、チャンスがあれば実現できるように準備を進めなければならない。

Noise Spectrum

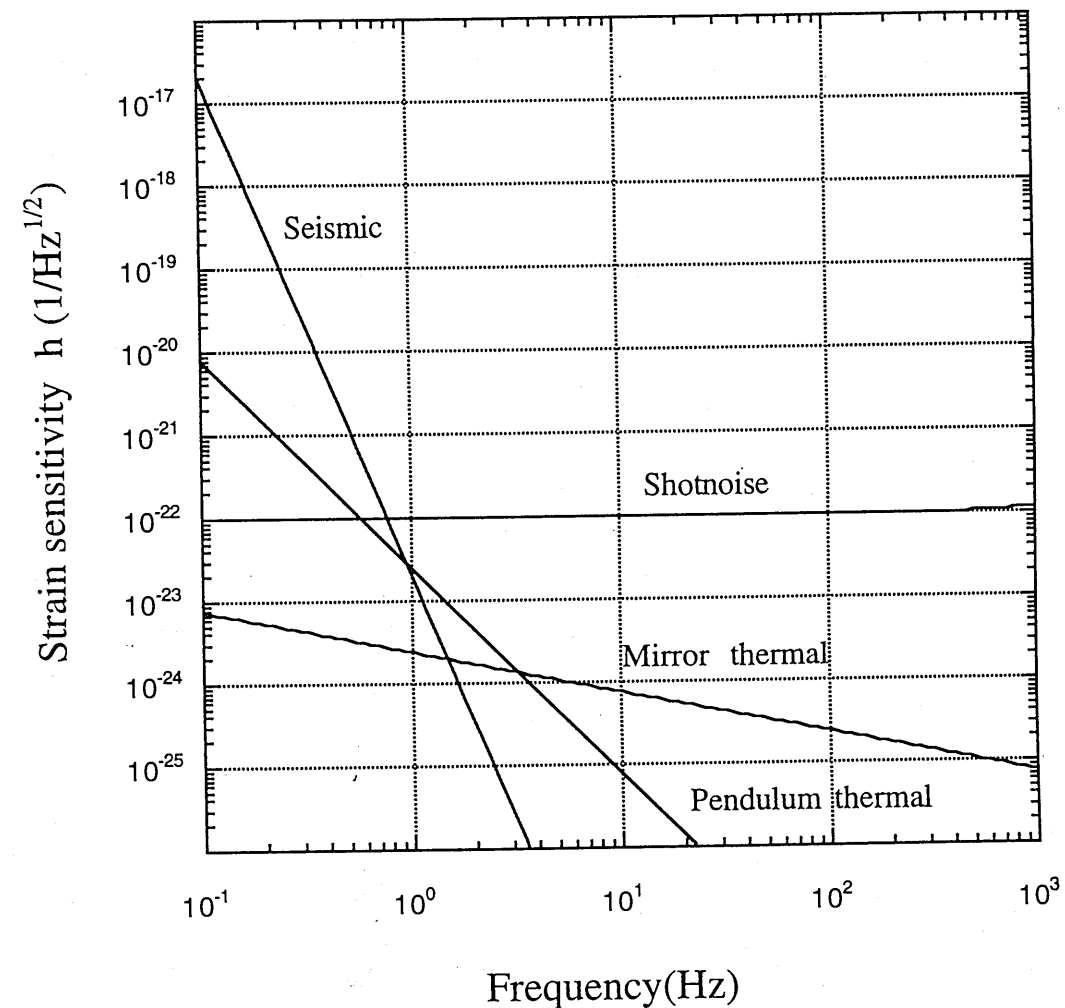


図 3.10 月面重力波望遠鏡のノイズスペクトル

参考文献

1. K. S. Thorne, 300 Years of Gravitation, (Cambridge Univ. Press, 1989)
2. D. R. Lammlein, Phys. Earth and Planetary Interiors 14, 224 (1977)
3. LIGO proposal, (1989)
4. GEO600 proposal, Max-Planck-Institute fur Quantenoptik Report
5. LISA proposal, Max-Planck-Institute fur Quantenoptik Report MPQ177
6. A. Abramovici et al., Science 256, 325 (1992)
7. R. T. Stebbins et al., AIP Conf. Proc. 202, 637 (1990)
8. 重力波アンテナ技術検討書、三尾・大橋編 (1992)

5. 将来展望

月面における宇宙観測は、将来の人類の宇宙の理解に大きな飛躍をもたらすであろうが、そこに至る道はまだ決して見えているとは言えない。ここに呈示してきたのは、まだ麓の森の中ながら、たどれる道を探してステップを少しでも高めていこうと言う提案である。将来の月面天文台に至る道にまず見えている課題については、先の調査研究報告書（122～123ページ）にまとめてあるが、ここでは1～2の課題についてふれておくに留める。

5. 1 月面における宇宙観測推進のための体制上の課題

パルサーやX線天体の発見など、天文学上の重要な発見は、新しい検出装置が開発され、まったく新しい空が見えるようになった時になされる。つまり、世界に誇れる天文学上の成果をあげるには、オリジナリティの高い装置を開発して、今まで誰も見なかった空を見る必要がある。しかし、独自性が高い装置の研究・開発は予定通りには進まないのが通例である。したがって、開発過程における失敗や遅れをカバーし計画に破綻をきたさずに進行させていくためには、柔軟な開発体制が必要である。そのための重要な鍵となるのは

- 複数の開発チームによる競争
- 公平かつ適切な研究状況の把握と資源の配分
- 科学研究・技術開発に実績のある研究者による計画全体の統括
- 十分な予算
- 開発チームがそれぞれの予算の範囲内で自主的に活動できる体制

これらが実現されるために、開発テーマごとに装置の研究・開発の国際的な公募を行うこと、半年もしくは一年ごとに厳しいレビューを受ける代わりに、予算の執行などについて、研究者もしくはその所属機関に大幅に権限を認めること、さらに、単年度予算にあまりとらわれない執行ができることなどが肝要である。今後宇宙開発事業団が大きな役割を果たしていくであろう、月探査などの大型宇宙科学の計画において、そうしたフレキシブルで研究者のリーダーシップが発揮できるような体制をいかにして構築して行けるだろうか。スペースステーションでまず試されるであろうそのような研究推進の実現が、わが国の宇宙開発にとって今後大きなカギとなるに違いない。

月面における科学の推進の課題は、これもスペースステーションと並んで、日本の宇宙政策におけるいわゆる「開発」と「科学」という特殊な使い分けの壁をどう乗り越えて行くかという課題でもある。

5. 2 月面での天文学における有人と無人

1994年9月に開かれたシンポジウム「ふたたび月へ」で講演した立花隆氏は、有人宇宙活動の意義を大略以下のようにまとめた（詳細は同シンポジウム後刷集を参照のこと）。

1. 人類の活動圏を宇宙全体に広げるのは地球生物の進化という視点から画期的意義がある。
2. 人間はすべての動物と同様に、自分の種、同じ種のものに対して非常に強い関心を持つ。有人活動は宇宙開発への共感とコンセンサスに到る強力な driving force である。
3. 純無人の宇宙開発技術でも原理的には可能だが、経済的にも技術的にも人間の方がより効率的であり、有効であるという局面がいろいろ想定される。
4. 有人であることにより、失敗の許されない高い信頼性を持った技術の開発が必須となる。
5. 生命維持・閉鎖生態系、さらには地球の生態系維持の科学的知見の取得と技術の開発が有人宇宙活動をめざすことで本格的に展開される。

この論旨の3は、2010年—2020年を視野に入れた本格的な月面天文台である光赤外線干渉計や重力波望遠鏡を展望するときに、極めて重要な意味を持たざるを得ない。例えば、現在のところ人間が介在した曲芸的な光軸合わせ・調整を必要とするファブリーペロー共振器がたを採用すれば、すなわち月面に地上と同じタイプの重力波望遠鏡を設置できるとすれば、月面からの重力波観測は地上に比べ圧倒的に有利となる。この事情は光赤外干渉計においてもほぼ同じであろう。さらに、両者に共通することは、km かそれ以上の、見晴らしの保証されかつ暗黒の極地クレーター内に素子望遠鏡や共振器の端部装置を運搬して設置・固定し、さらに調整・測定・結果の評価という操作のサイクルを繰り返すことが必要なことである。この、手つかずの自然のままの広大な領域に精密機器を展開する、および人間の精密な観察に基づいた判断と手先の器用さが要求される調整作業、という2点においては、まさに立花氏の論旨3が鋭く指摘するところであり、有人月面活動、しかも天文台の設置調整作業に係わる短期滞在型ミッションを前提に構想を練り直すことは、計画に飛躍的な具体性と現実性を与えることになるかも知れない。本調査研究の前段階で平成6年度におこなわれた「月探査に関する調査研究」報告書でも、「... 無人でのこの種の設置システムがあまりに複雑で装置も重くなりすぎ、また、地上での準備・開発実験にも過度の時間と経費を要することになれば、無人設置から有人での設置の方向への転換が考慮される可能性は否定できない。そうした無人から有人への移行が、どのような場面で必要になるのかは、月面計画全体にかかわる大きなテーマとして、今後具体的に検討すべき重要な課題である。」と述べている。この前回の結論を、今報告でもくり返し強調したい。

第4章 月からのモニタリング

第4章 月面からのモニタリング

1. 月面からのモニタリングについて

地球は閉じた系ではないと言われる。地球の環境は地球自身の活動によって影響を受けるばかりでなく、太陽系空間さらには銀河系空間からも影響を受けている。各種の放射や粒子が地球外層大気に突入し地球周辺環境を変化させる。また、時には小惑星規模の固体が地表にまで突入してくる。これらが人類に直接的間接的な影響を及ぼすことが明らかになってきた。本章ではそれらの月面からのモニタリングがいかに必要で重要であるかを示し、それらのモニタリングのための具体的な提案を行う。

2. 地球衝突小惑星監視

2.1 地球衝突小惑星の地上観測と宇宙観測

2.1.1 なぜこのような観測を行うのか

小惑星が地球に衝突する、という現象は惑星の一生という時間スケールでみれば決して珍しいことではない。事実、月や惑星表面に見られる無数のクレーターは過去にいくつもの天体衝突が起きたかを明確に物語っている。しかし大きな衝突が何時起こったのか、今度起こるのは何時かといった時間間隔は、一般に人間の時間スケールでみれば途方もなく長いといえる。勿論数年以内に起こることが絶対にないわけではないが、何百万年、何千万年先になるかもしれないのである。現在地球上に生きる人類はその歴史に大きな変革をもたらすような天体衝突の経験をしたことはないし、それは5千年あるいは1万年過去までさかのぼったとしても同じである。したがってこのような問題を現実的な課題としてとらえること事態が誇大妄想的とでもいえるものであった。

それにもかかわらず今この問題が注目されるのはなぜであろうか。宇宙開発の大きな成果の一つは太陽系天体に関する科学の飛躍的進歩である。その中で、天体の衝突という現象は太陽系の歴史の中で常に起こっており、惑星の形成、進化の過程で、非常に大きな役割を果たしてきたことが明らかになってきたのである。さらに地質学的研究から、今から6千5百万年前、白亜紀末に起きた恐竜絶滅の過程で、とどめを刺したのは直径10 km程度の小惑星の衝突であったという説が広く受け入れられるようになってきた。またそれを裏付ける有力な証拠として、直径200 kmを超えるクレータの痕跡がユカタン半島で発見されたている。それとともに、もっと以前に何度か起こっている地上生物の大きな絶

滅の要因を、天体衝突に求める動きが大きくなっている。

また米国アリゾナに残る直径1 km を超える巨大な陥没は、約5万年前に起こった隕石落下によるクレーターと確認され、さらに今世紀に入ってから起こった、今でもシベリア、ツングースカにその跡をとどめる異常現象は、彗星のような小天体の衝突であったと推測されている。そして1994年の夏、我々は小天体の惑星への衝突という現象を目の当たりにした。シューメーカー・レビー9彗星は、多数に分裂しながら次々と木星に衝突したのである。そのいくつかは大きさが数 km を超えると推定され、もし同じことが地球に起こっていたら、その歴史を大きく変えていたと考えられるのである。

それでは近い将来、実際に小惑星が地球に衝突したとき、何がおきるのであろうか、その確かな予測をすることはきわめて困難である。それは様々な条件が絡み合って展開していくものであるし、実際、衝突後の全地球的な影響がどうなるかということに関する研究は、まだ始められたという段階である。ただいずれにしても次のようなことに対する明確な理解がまず必要になってくるであろう。

- ・天体の衝突によってどのような爆発エネルギーが発生するか
- ・その結果どのようなことが起こるか。すなわちクレーターが形成され、地表物質を空中に放出するまでの定量的プロセス。
- ・それに続いてどのような現象が起こるか。
- ・陸地ではなく海上に落下した場合にはどうなるか。

天体の衝突によって生じるエネルギーは、衝突してくる天体が鉄を多く含むのか、もろい石質なのかといった組成によっても、また衝突するときの相対速度によっても影響は大きく違って来るわけである。図4.1に紹介する推定値は次の仮定のもとで推算している。(参考文献1) まず天体の密度を3 g/cm³、衝突速度を20 km/s とする。これらは地上に落下している隕石のデータや、近地球天体の軌道データから推測される平均的な値と考えられる。

それによると衝突エネルギーをTNT火薬の爆発エネルギーに換算したとき、1メガトンに相当するのは直径約26 mの天体の衝突、同様に100メガトンが約110 m、10,000メガトンで約500 mの天体衝突ということになる。白亜紀末期に起こったと思われる10 km の天体衝突は1億メガトンにも相当する。これは広島型原爆(0.02メガトン)、地上の核兵器を総動員した全面核戦争(10,000メガトン)と比較しても、天体の衝突によってもたらされるエネルギーがいかに大きいかがわかる。

それではこのエネルギーによって何が起こるのか。陸地であればクレーターが形成され、大量の地表物質が空中に放出され、それらはまもなく地球全面を覆う。地球の環境条件は極端に変化し、動植物は致命的な被害を受けることが十分に想像できる。直径が1 km を

超えると、それは全世界的カストロフィになると考えられているわけである。

それでは海上に落ちたらどうなるであろうか。地球表面の2/3は海で占められているわけで、衝突が海上で起こる確率の方がずっと高いことになる。この場合も衝突する天体の組成、衝突した海の深さなどによっても違って来るわけであるが、たとえば太平洋のような所に落下したことを想定すると、図4.2(参考文献2)のようになる。落下点から1000 km 離れたところで、もし天体の直径が100 m程度とすると高さ5~10 m、直径が1 km とすると100 m前後の津波が襲うという推定もされている。これは陸上に落ちた場合に劣らない、あるいはもっと大きな影響が考えられる。しかも陸に衝突した場合の全地球的影響が、比較的時間をかけて現れるのに対して、津波の影響は一瞬のうちに現れる。

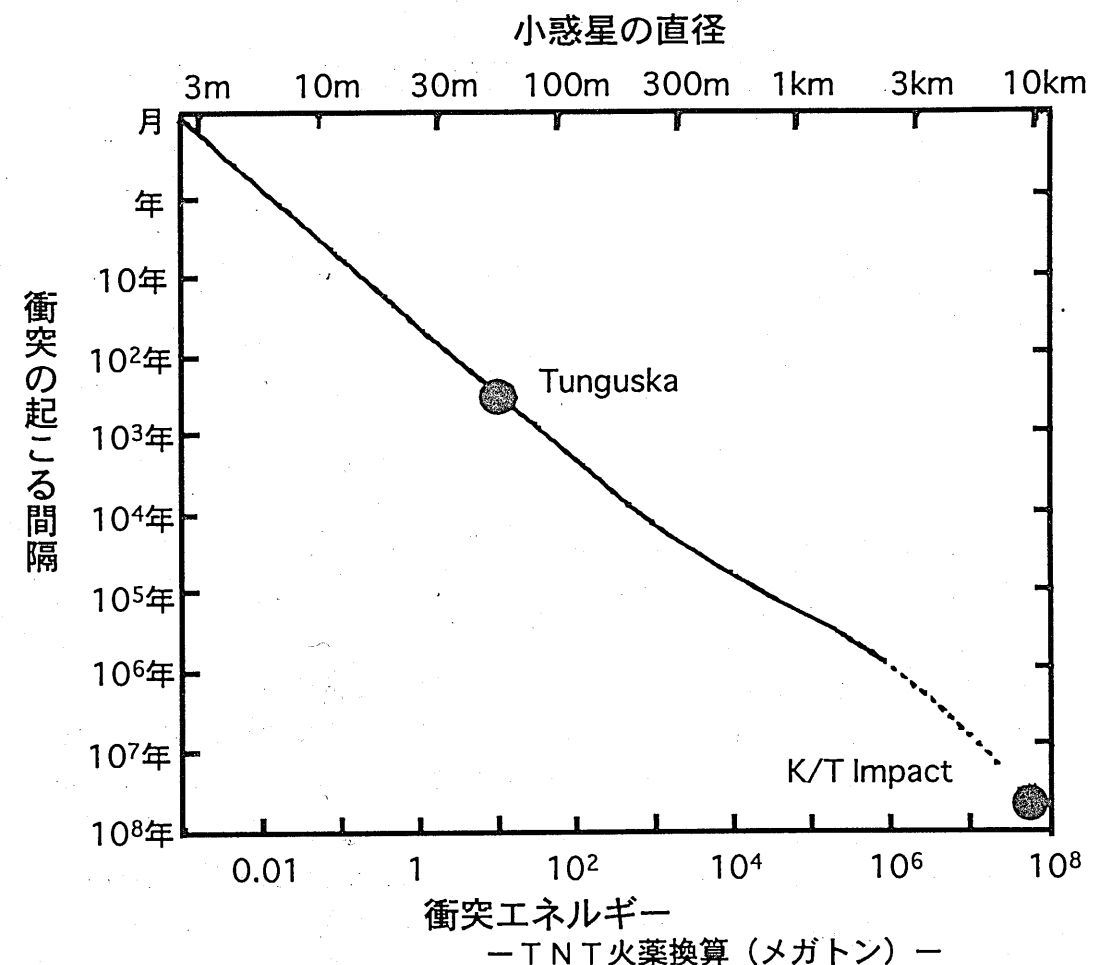


図4.1 小惑星が地球に衝突したときのエネルギー、起きる頻度、及び小惑星の直径
中心部の●はツングースカで起こった衝突、右下の●は白亜紀と第三期の境界で起きた衝突の推定値である。(参考文献1)

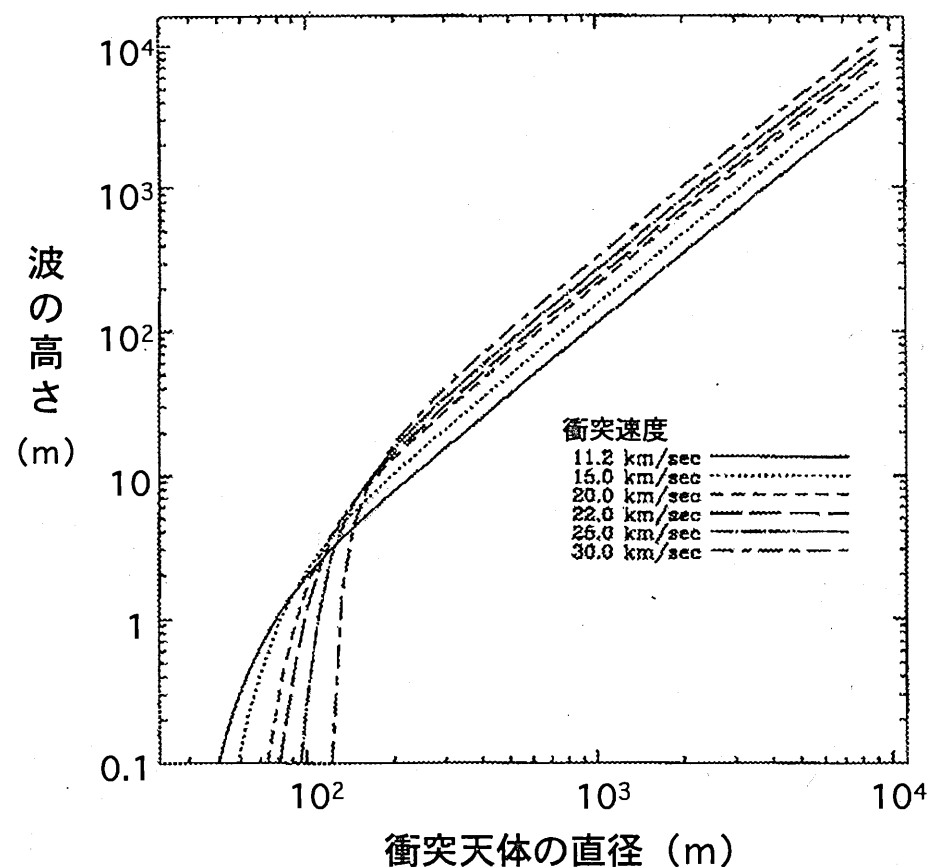


図 4.2 深海に石質の小惑星が衝突したときに、その直径と衝突地点から 1000 km のところで予想される波の高さの関係。衝突速度をパラメータとしている。(参考文献 2)

この問題についてのさらなる議論は今後の課題として残すことにして、衝突の危険性に関する問題に戻ることとする。前述したように、地上からの小天体観測が進むにつれて、小惑星の中でもその近日点が火星軌道あるいは地球軌道の内部に入りこむ、近地球小惑星 (NEO) と呼ばれる天体の発見数が飛躍的に増えている。それらは特異小惑星の中でも、アポロ/アモール/アテン群天体 (AAA 天体) と呼ばれるものであるが、軌道がわかっているものだけでも数百個に達している。特にキットピーク天文台を中心にした、スペースウォッチと呼ばれる、地球に接近する天体の集中的サーベイによって、地球の軌道付近には相当の数の小天体が存在していることもわかってきたのである。

したがって、今必要なことは我々の住む地球という惑星の周囲の状況がどうなっているかを、正確に把握することなのである。そのために米国を中心として幾つかの探索プロジェクトがスタートしたり、準備が進められている。

2.1.2 現在実施されている観測及び月面観測の意味

地球に近づく小惑星をサーベイするということは、実は次のようなことを明確にすることであると我々は考えている。

1. そのような小惑星はどれだけ存在するのか
2. それらの精密な軌道決定や軌道特性の解析、また将来の軌道予測
3. それらの大きさ、形状、質量
4. それらの組成、構造
5. それらの起源と進化

このうち 1 と 2 によって近い将来、地球への衝突があるかどうかを判断できるわけであり、3 と 4 は衝突したときの被害の推定や防御を考える上で必須である。また 5 はこのような天体はどこから、どれだけ、どのように補給されるのか、また小惑星同士の衝突、分裂によって新しい天体が誕生するプロセスはどうなっているかを明らかにすることである。これらの情報が蓄積されてはじめて、将来 NEO が我々とどのような関わりを持つことになるかを予測をすることが可能になるわけである。

ところで、特異な軌道を持つ小惑星の発見は 1898 年の 433 Eros に始まる。このような天体は一般に大変に暗く、また動きも早いために次々と見つかるものではない。現在までに軌道のわかっている 400 個ほどの AAA 天体の大半はここ 20 年ほどの間に発見されたものである。その中心となってきたのはパロマ天文台の 46 cm シュミットを用いた、E.H. Helin 及び Shoemaker 夫妻等による PCAS (Palomar Planet-Crossing Asteroid Survey) である。これは地球に接近する小惑星の数、及び地球に衝突する割合をシステムティックなサーベイによって決めることを目的としたもので、1973 年に開始された。写真観測によって彗星も含めた多くの AAA 天体を発見し、そのような天体への関心を高める上で大きな功績を残している。また 1983 年には同じ望遠鏡を用いた、PACS (Palomar Asteroid and Comet Survey) という計画もスタートしている。これは地球軌道及び他の惑星軌道を横切る小惑星及び彗星の数とフラックスを調べることを目的とした、長期的計画である。

しかし最近この分野の観測で注目を集めているのは、キットピーク天文台の T. Gehrels を中心として進められている Spacewatch 計画である。これは 92 cm の望遠鏡と CCD を組み合わせたもので、条件が良ければ平均して 1 ヶ月に 2000 個のメインベルト小惑星と 3 個の NEO (Near Earth Object) を発見できるといわれており、直径が 10 m 以下と推測される暗い天体も多く見つけている。現在までの観測データから、地球軌道の周辺

には直径数百m以下の天体で構成されるフラックスの存在も推測されている。

CCDの発達とともに観測はCCDによる検出と計算機処理を組み合わせたものに移り、上記以外にもNEO探索を目的として幾つかの計画が進められている。また米国ローウェル天文台や仏国ニース天文台をはじめとして、近い将来のスタートを目指した準備も進められている。

一方、小惑星の表面組成や形状、大きさ、スピンなど、小天体の物理的観測も最近活発になってきており、分光観測やレーダ観測のターゲットとしてNEOも注目されている。このような観測が進むと軌道などの力学的側面だけでなく、その構造、組成など物理的あるいは化学的側面からの理解も深まり、地球に接近してくる天体にどう対応していくかを考える上で、貴重な資料となるであろう。

しかし、対象とする天体は非常に小さく、かつ暗いために、その軌道を正確に決めたり、大きさや組成を判断したりすることは地上からの観測だけでは不可能である。特にその存在の全貌を把握し、また太陽に近い方向から接近するような、緊急を要する天体の発見、監視のためには、軌道上、そして月面上からの観測を合わせて行うことが不可欠となってくる。

特に月面からの観測は次のような利点が考えられる。まず地球に接近する小惑星の半分は太陽側から来るわけであるが、大気のある地上から昼間観測をすることは困難であり、日没直後の時間帯などで観測を工夫したとしても、それらの20～30%は検出できないと推定されている。月面では大気に邪魔されることはないので、その大半を検出できるであろう。また太陽方向から接近する天体の動きは小さいために発見したあとの軌道決定も地上からでは簡単ではないが、月面観測を同時に行うことで大きな視差がかせげるために、軌道精度を飛躍的に向上させることができる。

参考文献

1. D. Morrison et al., The Impact Hazard, Hazards due to Comets and Asteroids, 1995
2. J.G.Hills et al., Tsunami Generated by Small Asteroid Impacts, Hazards due to Comets and Asteroids, 1995
3. 磯部秀三、地上衝突小惑星の地上観測と月面上観測の必要性

2.2 地球衝突小惑星の月面観測へのストラテジー

小惑星の地球への衝突の可能性はあるが、それが近い将来であるかどうかは判らない。観測体制を整備しているうちに衝突という事もあり得る。10 mサイズのものでは全地球的には毎月1個程度落下していることがアメリカのミサイル防衛網の観測によって示されている。幸い地球には大気があり、30 mサイズ（鉄質か石質かによってサイズが異なる）程度以下のものは、大気中で減速を受け、運動エネルギーを徐々に解放して地表面に爆発的に衝突する事はない。1996年1月8日に千葉県上空で火球となり、爆発した後に多数の隕石を筑波周辺に降らせたのは直径3m程度の小惑星であった。一方、大きなサイズのものほど衝突確率は小さいので、ここ20年あまりには衝突が幸いにはないと信じて、その間の観測ストラテジーを考えておくべきである。

2.2.1 1998年-2008年の地上観測

地球近傍小惑星の検出のための地上観測体制は徐々に構築されつつある。アメリカ・アリゾナ大学のスペースウォッチ望遠鏡は毎年20個あまりを検出している。1991年に提案されたスペース・ガード計画を若干縮小して、既存の1m級望遠鏡に最適化したCCDを取り付けたシステムでの観測がアメリカ国内の3ヶ所で始めるための基礎準備を行なわれている。

ヨーロッパでもニース天文台を中心として検出システムの開発が行われている。日本ではまだテスト段階であるが、地球近傍小惑星の検出には欠かす事のできない受光器のscanning型CCDの開発を行っている。

地上におけるベスト・サイトで観測を行うと、21等級の地球近傍小惑星の検出が可能で、これは小惑星帯にある直径約1 kmの小惑星に相当する明るさである。地上での国際共同観測ネットワーク網が完成すると、10年間に90%を越える1 kmサイズ以上の地球近傍小惑星の検出が可能となる。20年では99%、30年ではほぼ100%となる。

地球近傍小惑星はその生成の過程から考えると、ほとんどのものが小惑星帯から来る。木星による摂動や小惑星同士の衝突などの生成原因が考えられている。地球に近づく時には、地上観測であってももっと半径の小さいものまで検出可能であるが、地球近傍小惑星を全検出するという立場に立つと、小惑星帯に滞在中の方が検出確率が高くなる。

いずれにしても、日本がこのような国際的観測ネットワークの構築に参加し、専用地上望遠鏡（口径1.0-1.5 m）の建設を始める事が必要である。

2.2.2 2000 年以降の月面観測

直径 1 km から数十 m の地球近傍小惑星の全検出には月面天文台における観測は不可欠である。先にも記したように地球に近づいた時には、直径 10 m クラスのものでも、地上からの観測でも検出可能である。しかし、そのような近距離における小惑星の天球上での動きが速いばかりでなく、滞在時間が短いので、単位時間当たりの検出確率はかなり低い。

直径 100 m のものが小惑星帯にあれば、26 等級までの検出が必要である。地上からでも 26 等級の星の観測は可能である。しかし、雑音源としての夜空の背景光が 1 平方秒角当たり約 22 等級もあるので、通常 1 秒角の星像サイズの地上観測では口径 1 m 望遠鏡で約 10 時間の露出が必要である。小惑星の場合にはこの間に位置を変えてしまうので、検出できないことになる。大気圏外では望遠鏡の回折限界で星像のサイズが決まり、1 m 望遠鏡では 0.1 秒角に相当し、その部分に含まれる背景光の割合は $1/100$ に減少する。この事は 26 等級もの暗い天体に対して 100 倍効率の良い検出を示している。

地表まで落下し、大陸規模の災害を引き起こし得る直径数十 m より大きい地球近傍小惑星は 100 万個あるいはもっと多く 1000 万個と言われている。このような多数の地球近傍小惑星の検出のためには月面の 3 つの経度位置にそれぞれ 10 台あまりの望遠鏡を設置して連続観測をしなければならない。このような体制が確立し、直径 100 m 以上のすべての小惑星の軌道を決定するまでには少なくとも 50 年近い年数が必要であろう。

50 年間の間に小惑星が地球に衝突しなければ幸いである。一方、このような検出が完了するまでに 50 年もかかるという事は本格的な観測のスタートが数年程度遅れる事が統計的に許される範囲と考えられるかもしれない。

月面における本格的な光学観測がこれまでに行われたことがないという状況を考慮すると、月面に望遠鏡を 1 台ずつ順次設置する事が良いであろう。また、それまでのステップとして、人工衛星やスペースステーションへの望遠鏡設置も一つの方法であろうが、将来の本格観測を考慮すると、口径が小さくとも何らかの形で月面望遠鏡をまず設置すべきである。その場合には、開発の易しさ考慮すれば口径 20 cm 程度にするのが適当であろう。

100 m サイズのものでは、衝突確率は高くなる。また、磯部・吉川 (1995) によると、太陽から 30° 以内の方向から地球に接近する小惑星の割合が 40% に近い値になっている。これらは地上で検出されないまま地球に衝突する。

小惑星が地球に近づけば、直径 10 m 程度のものも地上からの観測で検出可能である。アリゾナ大学のスペース・ウォッチ望遠鏡がいくつもこのサイズの小惑星を検出している。しかし、これらの観測は夜側で行われているものであり、地上においては昼間は夜に比べて背景光はるかに明るく、直径 1 km の小惑星でも検出可能である。衝突警告時間を 1 週間以上得るためには背景光の暗い大気圏外からの観測のみによって検出が可能となるのである。

太陽方向から来る小惑星は天球上での動きが遅いので、なかなか軌道決定ができないという問題がある。そのために地球周辺と月周辺に設置された望遠鏡による視差観測は有効である。さらに、より軌道決定精度を良くするには、太陽-地球系のラグランジュ点に人工惑星を持っていき、観測すればより有効となる。

地球に大災害を引き起こし得る地球近傍小惑星の軌道を全て決めてしまえば、100 年後の衝突を予測でき、現在の宇宙技術で衝突を回避できる。これが、月面天文台建設の目的である。しかし、100% の捕捉ができるまでの 50 年程度の期間では、いつ衝突軌道の小惑星が突入してくるかは判らない。そのために太陽方向から来る小惑星を衝突の 1 週間以上前に検出する大気圏外からの観測も大災害を少しでも軽減するために不可欠である。さらに人類滅亡に導き得るような直径 1 km 以上のものの全検出は急がなければならない、そのための地上観測網の完成を早急に整備するべきである。

このような戦略によって、小惑星の地球衝突から人類を守る事が可能となる。

2.3 月面からの地球衝突小惑星の観測

2.3.1 月面における全検出望遠鏡システム

月面基地が完成する頃には、電力供給は十分あり、それにより、システム全体の熱対策は可能になるであろう。そして、月面の 3 経度位置に設置した 10 台近い望遠鏡で次々と検出される。一挙に複数台の望遠鏡を持つ観測基地を確立できるわけではない。月面基地の確立しない無人探査の時代から一步一步拡大すべきである。第一歩としては、省電力で自立したシステムを考えるべきである。夜側での観測はエネルギー源の観点からかなり難しいとされている。それでも最低限の観測を可能にする方法を考える必要がある。そのような方向での検討を次に示す。

a. Scanning CCD

月面観測での目標は小惑星帯にある 100 m サイズの 26 等級にもなる暗い小惑星の検出である。後に示すようにロケットの運搬可能性、月面の厳しい環境を考慮すると、口径 1.5 m 程度の望遠鏡の採用が適切であろう。その場合、26 等級の天体を検出するには 1 時間近い露出時間が必要である。

望遠鏡で、日周運動 (月の自転) によって天球上を動く星と小惑星を追尾して 1 時間露出の各画像を得る事は可能であるが、望遠鏡を駆動するために電力を消費する事になり不利である。CCD では、画像を読み出す場合各素子に受光して作られた信号電子を次々の素子に転送して読み出す方法が採られている。通常、画像読み出しの間シャッターを閉じ露出されない。

天体の移動に伴って、望遠鏡で追尾して、CCDの決まった素子に受光させる代わりに、天体の移動に合わせてCCDの素子間の信号転送速度を調節すると、天体がCCDを横切る間の全信号を蓄積しながら集め、最後に読み出す事が可能になる。その概念図が図 4.3 に示されている。

望遠鏡の回折限界に合わせてCCDの1素子が0.1秒角になるようにすると、現在一般に利用可能なCCDは2000×2000素子では200×200秒角四方の視野を見る事ができる。月の日周運動では1時間に180秒角移動するので、転送速度をこれに合わせれば1時間あまり露出をシステマティックに行う事が可能である。

この方法であれば、CCDの駆動のため電力が消費されるだけで、望遠鏡の駆動の必要はないので月面の夜側での観測を可能にするであろう。しかし、CCDでの1時間露出を可能にするには各素子からの熱雑音を下げるために-100°C位までの冷却をする必要がある。夜側では冷却に関しては問題ないが、昼側では冷却システムの開発が必要である。

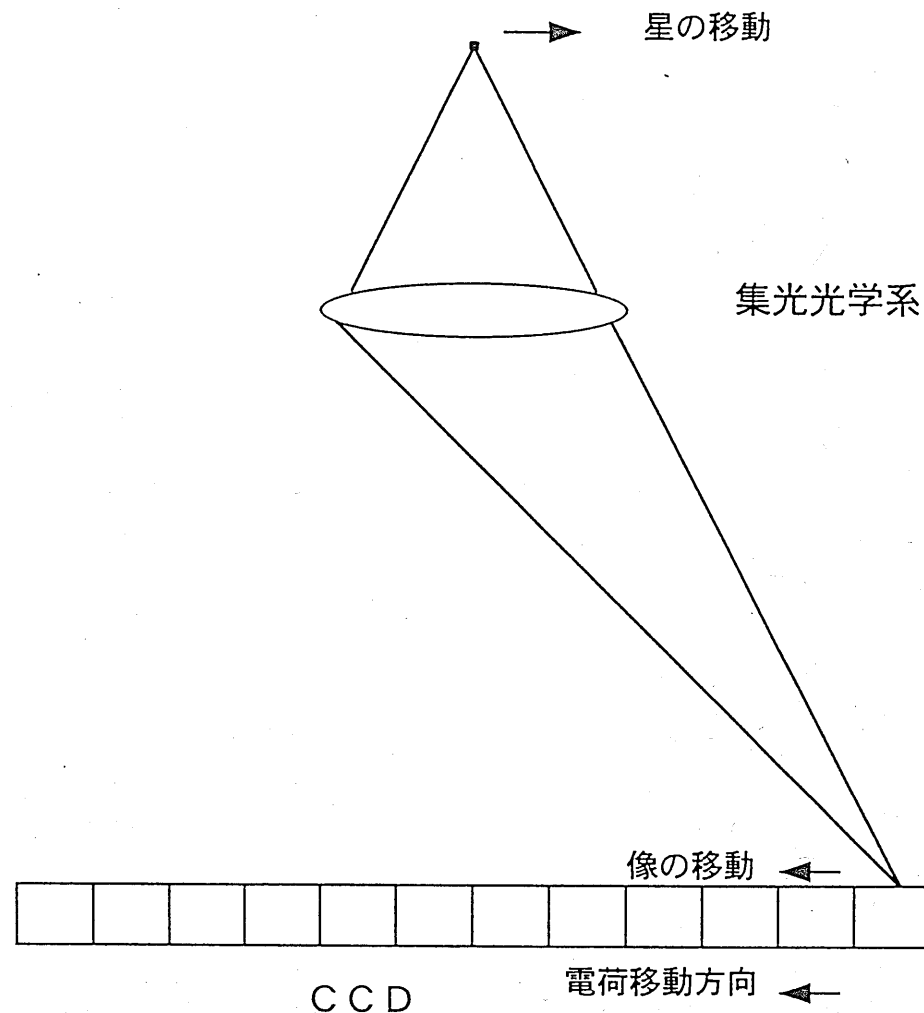


図 4.3 CCD受光面上で、日周運動によって星の像が移動するのと同じ速さで電荷転送を行う。

b. ツイン望遠鏡

月面望遠鏡はできる限り、駆動操作の少ないものが好ましい。1台の望遠鏡では天球のいろいろな方向に向けるために望遠鏡を次々と動かさなければならない。地球衝突小惑星の検出観測においては小惑星が背景の星々に対する移動によって行うので、一定時間以上間隔をおいた2回以上の観測が必要である。

受光器として Scanning CCDを使い、望遠鏡を固定して観測すると、天球上の長い帯状の部分の像が連続的に得られる。電力等の条件が許せば望遠鏡を動かす事なく天球を一周する帯状のデータを得る事も可能である。2台の望遠鏡が同じ赤緯（月の自転を基準にした座標系で：以下同じ）で、赤経が数時間離れた方向を向いていれば、数時間間隔の2枚の画像を次々と得る事ができる。

c. 望遠鏡

ツイン望遠鏡で地球衝突小惑星の検出だけを行い、その確認を他の望遠鏡（地上の大口徑望遠鏡を含めて）で行うのであれば、赤緯方向にのみ駆動可能な子午儀型の望遠鏡でよい。この場合可動軸が一つであるので、望遠鏡の安定性ははるかに良くなる。

実際には1朔望月の間の検出数は、10万個近くになるであろうから、次の朔望月の間に再観測し、次々により高い精度の軌道決定を行わなければならないので、赤経方向にも望遠鏡を駆動する必要性が出てくる。また、月面ランダーの着地の仕方や着地点の条件によって正確に望遠鏡の極軸を設置することは不可能に近いと考えられるので、架台は経緯儀式にせざるをえないであろう。

現在検討を進めている望遠鏡は図 4.4 のようなものである。望遠鏡の方位軸はランダーの上面に取り付けられる。一般には、ランダーの4本の足の着陸点が水平面から傾き、高度軸・方位軸は本来の方向から傾いているので、着陸後、明るい星を使つての傾き角の決定を行う必要がある。その補正項を実際の望遠鏡のポインティング時にソフトによって取り込めるようにする。高度軸は、口径1mの望遠鏡2本を串刺しにした形になる。2本の方円鏡は、月の自転による星像移動によって約4時間で次々に同じ星野を観測できるように2度程度離れた方向に向けておく。望遠鏡の焦点距離は、CCD 1ピクセル（10ミクロンとする）が、0.1秒角になるようにするために20mとする。このような焦点距離を直焦点では得られないので、焦点位置を主鏡の後にしたリッチクレチアン型にする。なるべく広い視野を一時に観測するために多数のCCDを並べるモザイク型にする必要があり、そのために広い視野のとれるリッチクレチアン型が適している。10個のCCDを並べると一辺が0.5度角の星野を掃くことができる。口径1m望遠鏡の主鏡の重さは通常のガラス材を使うと300kgにもなり、月面での望遠鏡としては当分の間実現不可能である。しかし、ハッブル宇宙望遠鏡のようにハニカム鏡にして軽量化が可能である。また、現在試作段階であるがSiCクリスタル鏡では30kg程度まで軽量化が可能であるようだ。架台まで含めた2台の望遠鏡では将来の開発要素も考慮して400kg程度にすることが可能であろう。

CCD等の受光機は500g程度である。10台では5kgになり、冷却器の重量がどの程度減らせるかが重要となる。十分な熱シールドがされていれば冷却に必要な重量をかなり減らせる可能性はある。それらが実現すれば、望遠鏡・検出側としての重量を500kg以下にしようであろう。ただし、この評価の中にはコンピュータや電源の重量は考慮されていない。

CCD1個からの出力データ数は夜の半月の間でもCCD1個当たり、1ギガバイト以下であるので、10個のCCDでの観測でも全てのデータを電力使用量の少ないメモリーに貯えることも可能であろう。もちろん、小惑星を検出しても軌道決定のためには数日以内の再観測が必要である。このような望遠鏡を動かさなければならないような電力使用量の大きい観測は初期の時代には不可能であろうが、将来電力事情が良くなれば問題はなくなる。

CCD本体1個の電力使用量は10W以下である。節電方式の開発を考慮すると、10個のCCDで100W程度にすることは可能であろう。

太陽方向周辺から来る地球衝突小惑星の観測のためにはハッブルを工夫することによって太陽から約8度以上離れたものを観測することが可能である。

以上を総合すると、今後の開発と研究がまだまだ必要なのは当然であるが、かなり早い段階で、月面で観測する地球衝突小惑星ミッションの製作は可能であると言える。

地球衝突小惑星全検出用月面望遠鏡（期待値）

口径	1 m
鏡筒数	2台
架台	経緯儀式
焦点	リッチクレチアン
焦点距離	20 m
指向精度	1 - 6 秒角
CCD 数	10 個以上
素子数	2000 x 2000
ピクセルサイズ	10 x 10 ミクロン
自転による通過時間（積分時間）	6 分
望遠鏡重量	400kg
駆動電力	200W
CCD・コントローラ重量	100kg
駆動電力	100W
その他	コンピュータ・電源・ランダー

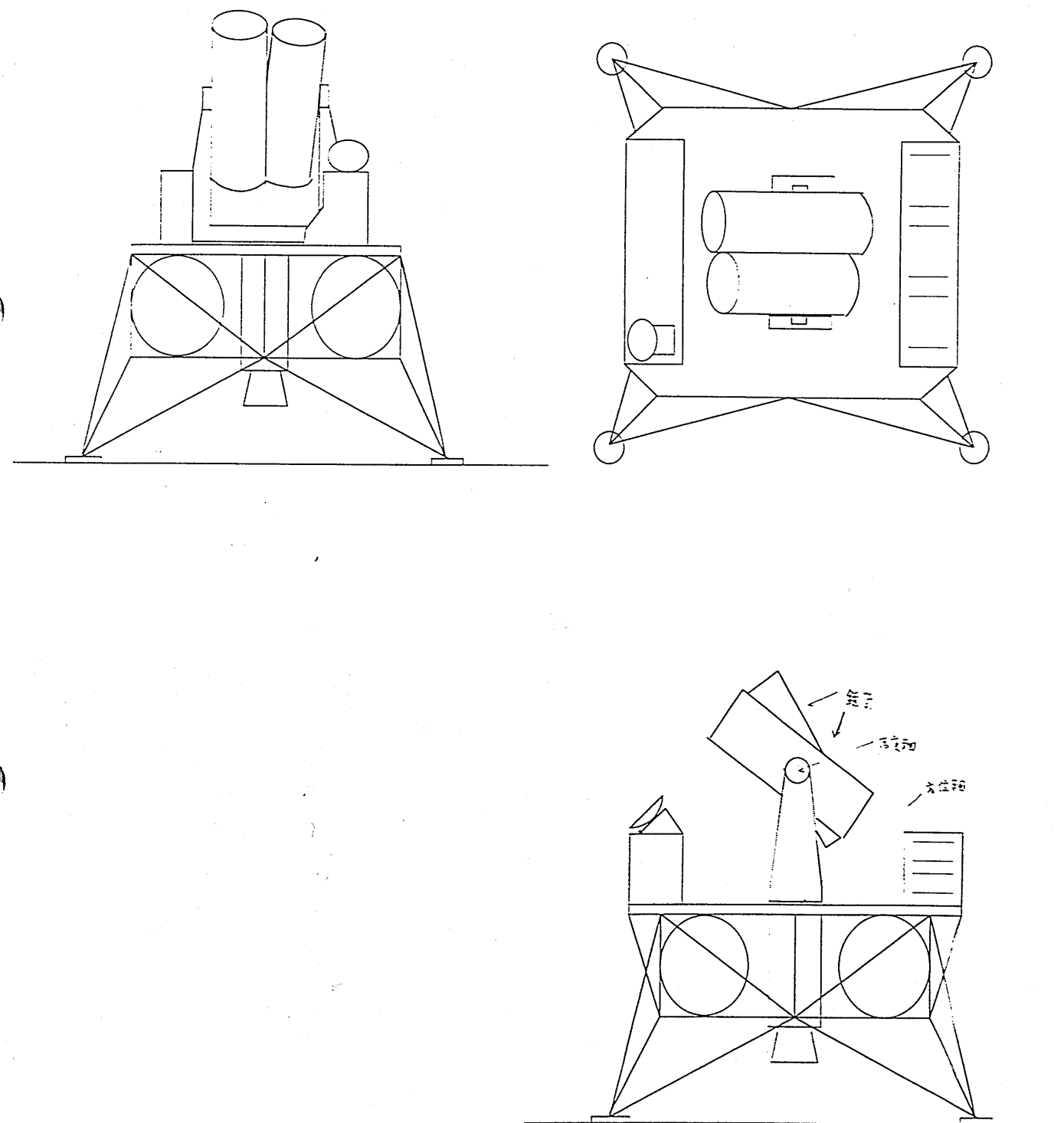


図 4.4 月面ランダー上に取り付けたツイン望遠鏡の概念図

2.3.2 フェーズⅠの月面望遠鏡

直径 100m 以上の小惑星を全検出するためには口径 1-1.5m 望遠鏡群が必要である。しかし、これまでのアポロ計画などにおいて月面にこのような望遠鏡を持ち込まれたことはない。又、地球周辺の人工衛星でもハッブル宇宙望遠鏡の口径 2.4m が打ち上げられているが、その他は何れも口径 30cm 程度未満である。月面からの小惑星探査を進める上では、より着実に実現性のあるステップが必要である。そのような技術的な観点から現在からの延長で可能な望遠鏡口径は 20cm 程度であろう。このような確実な望遠鏡を月面探査機の 2 号機又は 3 号機に搭載して、科学的・技術的両面において将来の本格的システムのための基礎を確立し、2.3.1 のフェーズⅡに相当する本格的なシステムを投入する前に以下に示すような中段階の月面望遠鏡で観測するべきである。

a. 科学的側面

月面に口径 35cm の望遠鏡が設置されたとして考察を進める。口径 1m に対して光量は約 1/10 になるが、地上の良い観測サイトのシーイング直径 1 秒角に対して回折像が 1/3 で、星像の受光面当たりの面積（角度）で 1/10 になり、21 等級より暗い天体では空の背景光との関係で能率は 10 倍以上良くなる。しかし、このような比較では月面 35cm 望遠鏡の方が地上 1m 望遠鏡に対して、絶対的に有利であるとは言えない。本質的に有利な点は、昼間側でも観測する事である。

2.2.2 で記したように、地球に大接近（将来は衝突）する小惑星の 40% 以上が太陽周辺方向から来る事は重要である。図の大接近の計算例で示すように大接近の 10 日以上前から太陽から 30 度以内の範囲に留まっている。もし、地上観測だけを行っていれば、衝突する瞬間までその存在に気づかないという事になる。このような小惑星を検出するには、月面望遠鏡からの観測は欠かせない。この場合全検出を目指す観測の場合と異なり、地球から小惑星までの距離が近いので、口径 35cm 望遠鏡でも、大接近（衝突）の 10 日以上前に直径 10m 以上のものでも検出可能になる。

残念ながら、1 台の望遠鏡では月面上で夜側にくると太陽周辺部の観測は出来なくなる。月面経度で 180 度離れた 2 ヶ所に設置するか、月の極地方に設置する必要がある。

地球に大接近する 10m 以上の太陽周辺 30 度以内から来る小惑星をほぼ全部検出する事は 2 つの側面で重要である。直径 100m の小惑星の地球衝突は数千年に 1 回、直径 1km では数百万年に 1 回程度の確立で起ると計算されている。しかし、この数字は 1 桁から 2 桁近い不確実性があると言わざるを得ない。それはこの範囲の地球近傍小惑星の検出が十分ではなく、直径 10km のものと火球などを起こす直径 10cm のもののデータから補間して求められている。近年、ミサイル防衛網で検出される 10m 程度の小惑星の衝突確率がかなりよく決まり、さらにスペースウォッチ望遠鏡で 300 個近い地球接近小惑星の検出が行われたので、確率の精度はかなりよくなったが、まだ、1 桁以上の誤差がある事は確かであ

る。第一段階の月面望遠鏡はこの確率の精度をはるかに良くして、将来の本格的な全検出望遠鏡群の建設をどれ位急がなければならないのかの重要な指標を与える。

2 番目には、実際に地球に衝突する軌道にある小惑星を検出することである。この事態があれば、人類にとって非常に大きな影響を与えるのは当然である。しかし、この問題は前記のより正確な衝突確率の確定まではより慎重に取り扱わなければならない。小惑星衝突によってパニックを引き起こす事も重要な点である。しかし、それ以上に重要なのは、衝突回避の手段である。100m 規模のものは大陸規模の災害を引き起こす。小惑星が地球に接近した段階でミサイルなどを打ち込んで大きく軌道を変えることが難しいとすると、アメリカ中部に衝突すると判った小惑星を日本に衝突させるくらいがやっとなんかということになる。ここに書いた事は、裏返せば小惑星の軌道を操って他国の攻撃の兵器となり得る事になる。この問題は一人科学者だけが議論するものではなく、高次の政治的又は人類的な問題を含むとだけここでは記しておくことにしたい。

b. 技術的側面

望遠鏡の全体システムとしては、口径 1m のものを小型にしたと考えてよいであろう。Scanning CCD の採用は、空を連続的に掃くためにも、露出時間を長くするためにも欠かせないものである。望遠鏡の焦点距離に対応して、CCD の素子間の信号転送速度を調節しなければならないことは当然である。

第一段階の地球衝突小惑星検出用月面望遠鏡

口径	35cm
鏡筒数	2 台
架台	経緯儀式
焦点	リッチクレチアン
焦点距離	7 m
指向精度	0.1 分角
CCD 数	4 個以上
素子数	2000 x 2000
ピクセルサイズ	10 x 10 ミクロン
自転による通過時間（積分時間）	18 分
望遠鏡重量	100kg
駆動電力	100W
CCD・コントローラ重量	40kg
駆動電力	40W
その他	コンピュータ・電源・ランダー

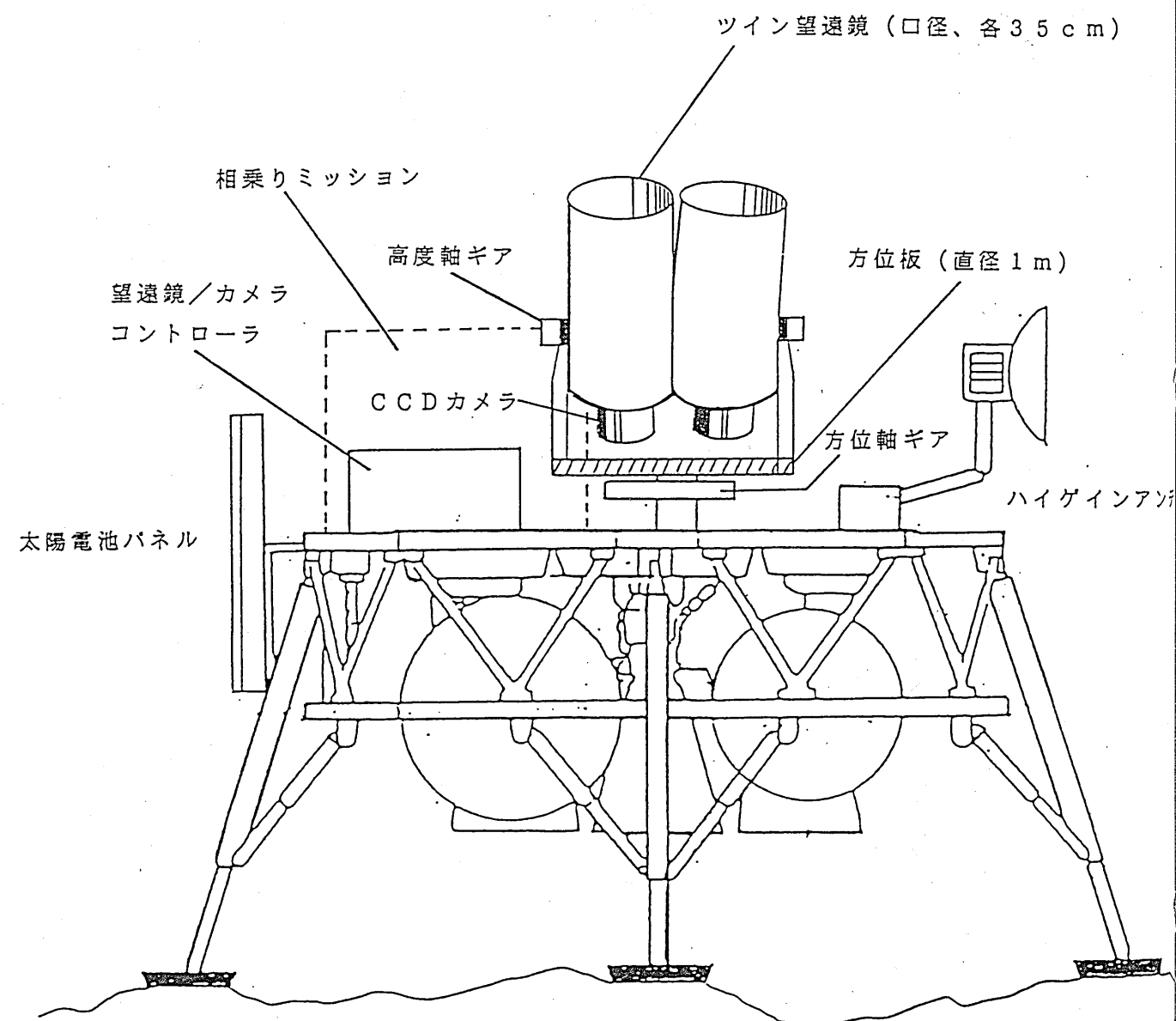


図 4.5 地球衝突小惑星監視装置の構想

望遠鏡は 2.3.1b. で示したように、検出効率を上げるためにツイン望遠鏡にするべきである。口径 35cm になると回折限界像のサイズが 0.3 秒角になるので、それに対応した光学系が必要となる。これらを考慮して上記のようなシステムであれば、現在の技術の中で十分製作できると考える。

c. 最初に送るべき月面望遠鏡

ここで特に注意しておかねばならないことは、これまでに一度もいわゆる望遠鏡が月面上に設置されていないということである。地球衝突小惑星観測のための望遠鏡ばかりでなく、天文観測用望遠鏡にとってもたとえ小さくとも一度月面上で望遠鏡を作動させておくことは将来の本格的な望遠鏡群にとっては欠かせないものである。

望遠鏡技術面からいえば、口径 20cm のものを製作し、月面で作動させるのにはあまり大きな開発要素はなく、既存の技術の精選によって可能である。一方、観測データの点においては、b. で示したツイン望遠鏡とは異なり、移動天体検出のための繰り返し観測が必要となり、月面の夜側では電力消費量の点において観測できない結果になる。また観測能率も 1/3 程度に落ち、口径が小さい分だけ小惑星が地球に余分に接近した段階でやっと検出できることになる。しかし、太陽の周辺部の観測という地上では行えない小惑星の検出が可能であるという大きな利点は残る。また、地球近傍小惑星のサイズ分布を一定程度求めることができ、地球への衝突確率の精度を上げられる。これらの事情を考慮して、提案し得るシステムを示す。

最初に送るべき月面望遠鏡

口径	20cm
鏡筒数	1 台
架台	経緯儀式
焦点	カセグレン式又はポール・ベーカー式
焦点距離	3 m
指向精度	0.1 分角
CCD 数	4 個 (又は 1 個)
素子数	2000 x 2000 (又は 4000 x 4000)
ピクセルサイズ	10 x 10 ミクロン
CCD scanning と望遠鏡駆動の組み合わせ	
望遠鏡重量	30kg (→20kg)
駆動電力	50W (昼間のみ)
CCD・コントローラ重量	20kg (→15kg)
駆動電力	40W (→20W)
その他	コンピュータ・電源・ランダー (→ 努力目標)

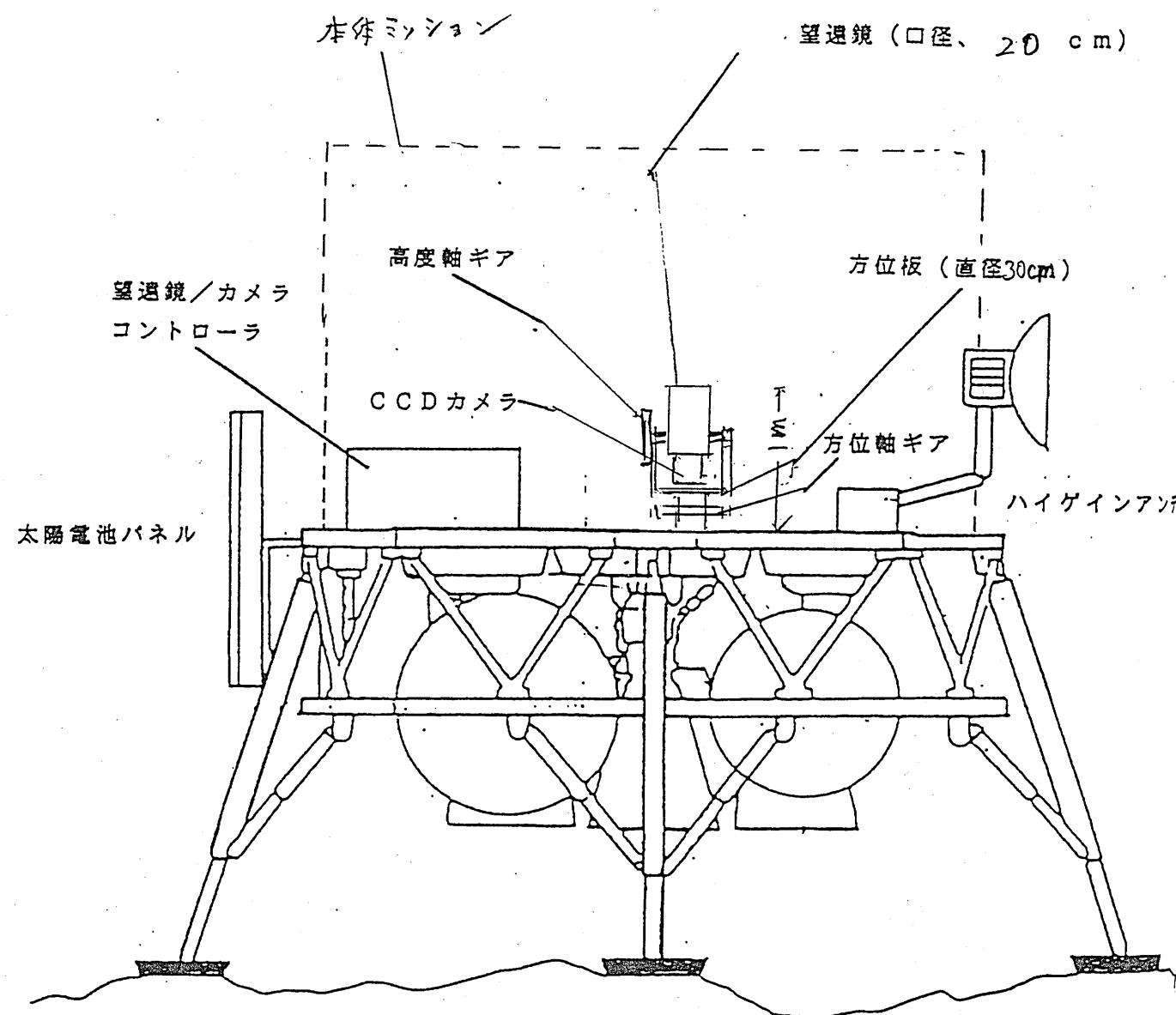


図 4.6 最初に送るべき月面望遠鏡

2.3.3 月面望遠鏡以前の望遠鏡

直径数十mから 100 m以上の地球近傍小惑星の全検出を目標とした月面望遠鏡での観測が達成されるまでには、人類の滅亡を引き起こし得る直径 1 km 以上のものの地上観測、それに太陽方向から近づく地上観測では警告時間がほとんどないものに対する大気圏外観測も行っておかねばならない。それらのための望遠鏡に必要な仕様は月面望遠鏡とは多少異なる。ここでは、それらについて記しておく。

a. 地上望遠鏡

地上観測のターゲットは、直径 1 km 以上のものである。この場合 21 等級より明るいので、口径 1 m以上の最適化された望遠鏡を使用すれば 5 分程度の露出時間で検出可能である。CCDの1素子を大気によるシーイングサイズの 1 秒角にすると、約 0.5° 四方の視野になり、日周運動による CCD面の天体の通過時間は約 2 分になる。CCDを 2000×2000 から拡大して 4000×4000 にすれば必要な露出時間と整合性がとれる。また、1 素子当たり 2 秒角にする事も選択枝の一つである。

Scanning CCDを scan する方向と直角に 5-10 個並べるモザイク型にする事により、掃天効率を良くする事ができる。そのためには収差補正をした視野角を $3^\circ - 5^\circ$ 得られる光学系を採用するべきである。このようなタイプの望遠鏡はコスト・ダウンの点に配慮しなければならないが現在ではすでに標準品として利用可能である。

月面望遠鏡の場合と同じようにツイン望遠鏡にする事により検出能率を上げるべきである。

b. スペース・ステーション望遠鏡

スペース・ステーションで口径 1 mの望遠鏡を駆動する事は、重量の点でも電力消費の点においても難しい事ではない。しかし、スペース・ステーションの軌道運動と姿勢によって、望遠鏡を任意に駆動し、CCDによる Scanning 観測を可能にするためには 3 軸駆動のシステムが必要となる。しかし、コストの問題は残るが技術的に本質的な開発要素はないと考えている。

c. 月周回望遠鏡等

月面望遠鏡での観測が一定の成果をあげるまでは警告時間の短い太陽周辺方向から来る地球衝突小惑星の検出を中心にする。その場合、距離は小惑星帯よりかはるかに近い（これが逆に警告時間を短くする結果になっている）ので、口径が若干小さくなくても光量的には 100 mサイズのものを検出可能である。しかし、望遠鏡の回折像の大きさが口径に逆比例するので、口径を 50cm 以下にすると検出能力が著しく悪くなる。

衛星は scanning CCDで観測する場合でも、3 軸制御が必要である。

月周回衛星からの観測・検出は、太陽周辺方向から来る地球衝突小惑星の場合、特に重要である。小惑星の天球上の位置がほとんど変わらないので軌道決定が難しいが地上の観測との協力により視差測定をする事により、軌道決定が可能になる。その場合、月周回衛星で検出された小惑星の位置データを使うので、21 等級より暗くても地上からの観測が可能となる。

視差観測をより有効に行うためには、太陽-地球系のラグランジュ点に望遠鏡を置いての観測も重要である。

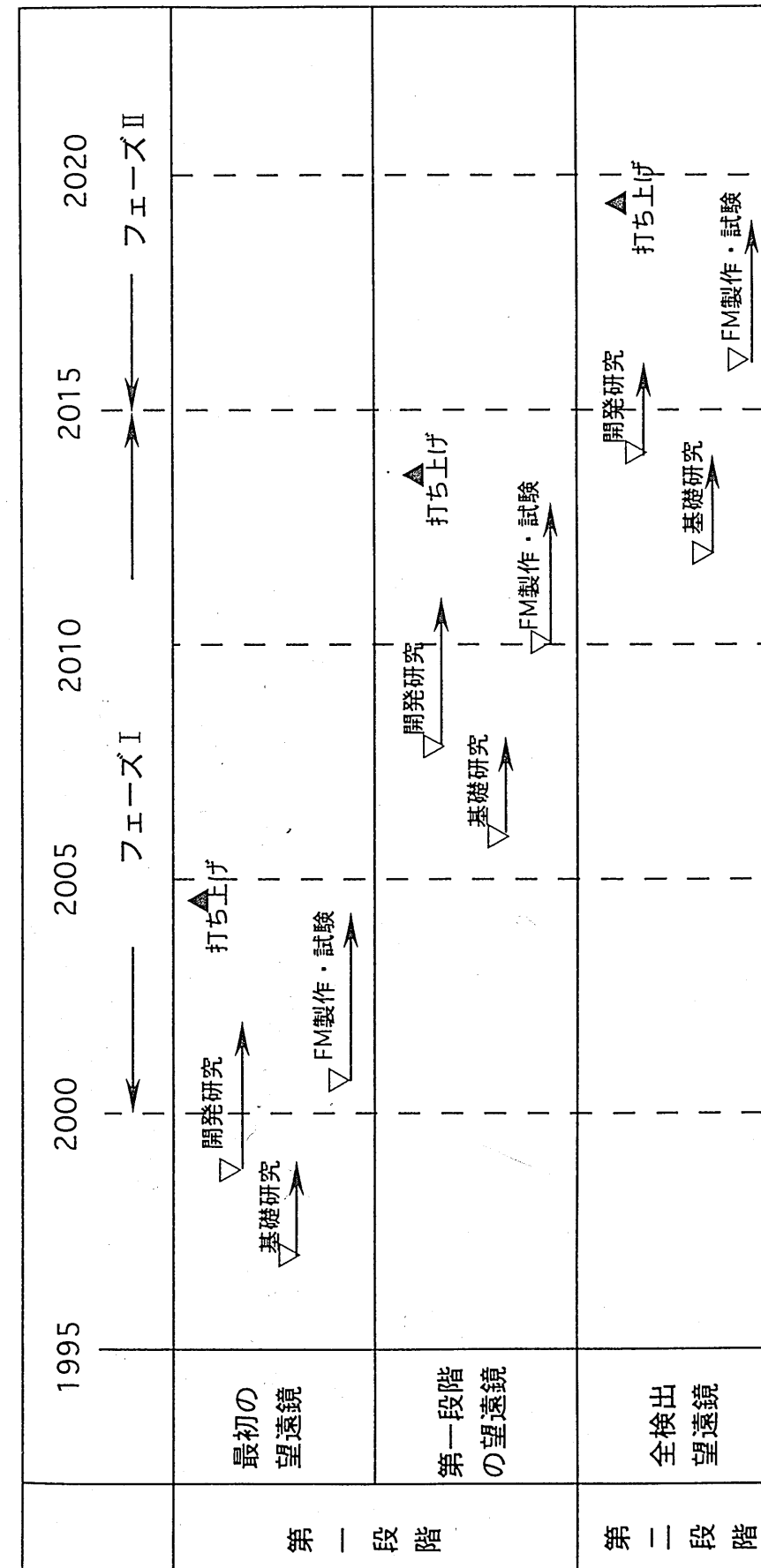
2.3.4 月面望遠鏡プランと体制

これまでの内容をまとめると表 4.1 のようなプランが考えられる。早い段階に小型望遠鏡を月面に送り、太陽方向から来る小惑星の検出を行うばかりでなく、月面上に置く初めての望遠鏡としてその技術的な試験を行う。次には、月の夜側における観測も可能にするツイン望遠鏡により、夜間観測システムの確立を行うとともに地球近傍小惑星のサイズ分布を求め衝突確率の精度の良い評価を行う。フェーズⅡでは、直径 100km 以上の小惑星の全検出を目指した本格的な観測を行う。

このようなシナリオにしたがって進める場合の体制は現在のところ不透明である。研究者個人の集まりである地球衝突研究会のメンバーは 20 人あまりいるが、実質的にこのプロジェクトにかなりの時間参加出来るのは数人である。しかし、最初の小型望遠鏡はかなり確立した技術を利用したプロジェクトであるので、今後参加が期待される若手研究者を含めて進めることは可能であろう。この計画が進む中で協力する研究者グループが形成されていけば、次々と打ち上げが可能になるであろう。まず、大切なことは第一歩を踏み出すことであるといえる。

表 4.1

地球衝突小惑星モニタリングプラン



2.4 地球衝突小惑星の軌道運動解析システム

2.4.1 検出小惑星の軌道運動解析システムの確立

(1) 小惑星の数と軌道データ

小惑星は、何回か観測されると軌道が求められるが、その軌道が十分な精度で決定されたと判断されれば、通し番号である「確定番号」がつけられる。この確定番号が付いた小惑星については、位置が予報されると必ずその予報位置付近に観測され、見失われることはほとんどない。1996年初めの時点では、この確定番号が付いたものが6807個ある。また、確定番号はまだ付いていないがかなり軌道が正確に分かっているものも4千個ほどあるから、現在(1996年2月末)ではほぼ1万個の小惑星の軌道がよく分かっていると考えてよい。

これらの小惑星について、ある時点での位置をプロットしてみると図4.7のようになる。また、特に地球軌道付近まで来るような小惑星の軌道を描いてみたものが図4.8である。これらの図を見ると、太陽系空間には非常に沢山の小惑星があることが分かるし、地球軌道付近といえども小惑星の軌道で混雑していることがわかる。(もちろん、これらの図では小惑星の大きさを非常に誇張して描いてあるので、実際の太陽系空間はこれらの図が示すようにぎっしりと小惑星が詰まっているわけではない。)

この1万個という小惑星も、軌道があまり正確には求められていないものや観測されただけのものを加えると、その数はさらに増える。また、今後、地上からの観測やさらには宇宙や月面基地からの観測が始まれば、その数は桁違いに増大することが予想される。従って、ここで考える「小惑星の軌道運動解析システム」としては、最低でも100万個ぐらゐの小惑星は扱えるようなものを念頭に置いておく必要があるし、より将来的には1千万個のオーダーの数の小惑星を扱えるようなシステム構成にする必要があるかもしれない。

さて、小惑星の軌道に関するデータとしては、

- ・軌道6要素(ある時刻での小惑星の軌道を指定するもの)
- ・観測データ(観測時刻における小惑星の位置。赤経・赤緯など)
- ・予測位置のデータ(各時刻における小惑星の位置の予報)

などがある。つまり、100万個の小惑星について、これらのデータが問題なく扱え、かつ各種の軌道解析が可能なような計算機のシステムが必要となる。現在の計算機の性能を見ると、それなりの費用はかかるにしても、ハードウェアについては技術的には問題はないと思われる。問題は、これらのデータを扱ったり解析をしたりするためのソフトウェアの開発である。

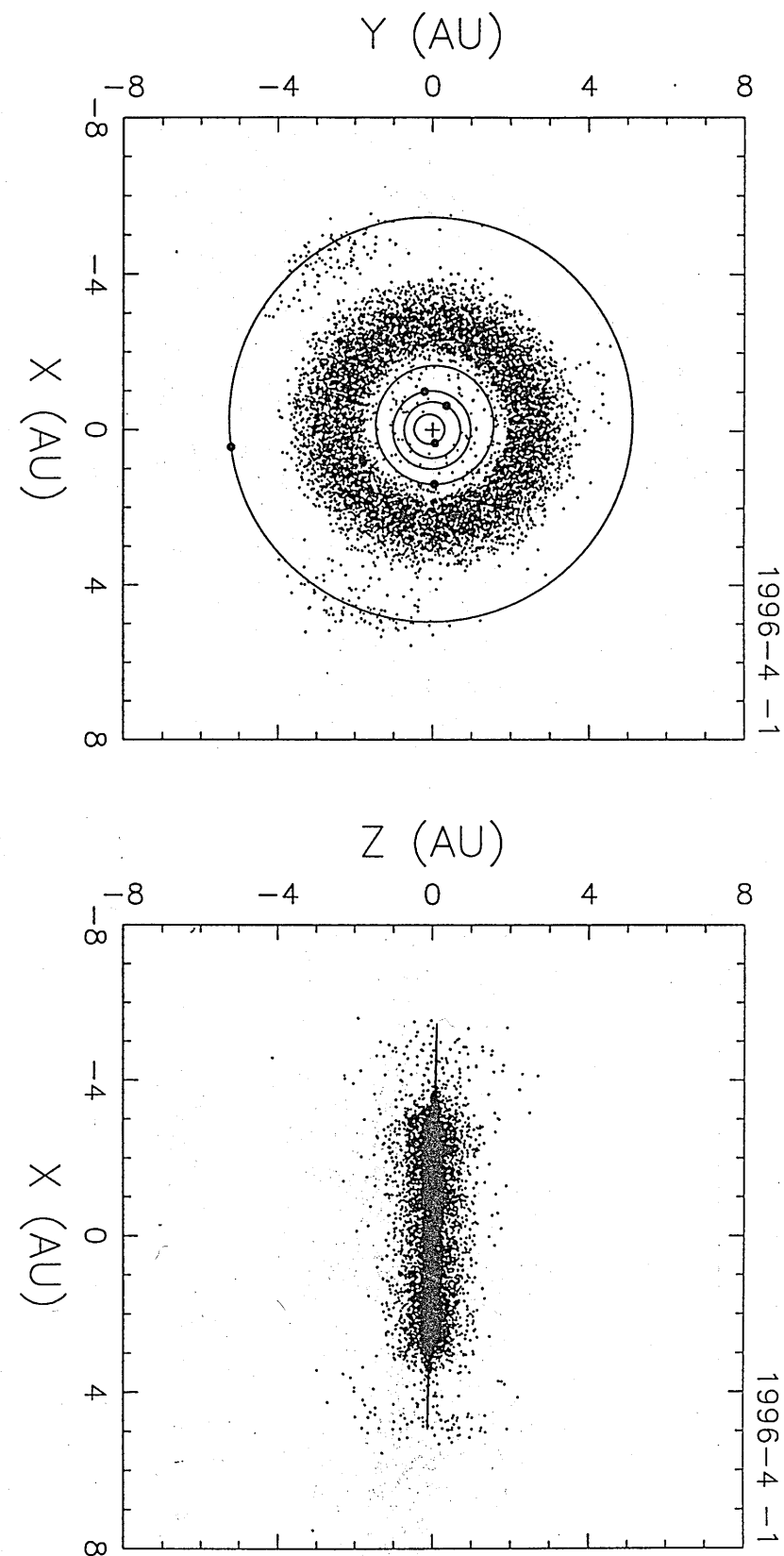


図4.7: 小惑星の分布図

軌道が精度高く決定されている約1万個の小惑星の1996年4月1日の位置。左が黄道面に投影したもの(太陽系を「上」から見た図)で、右がそれに垂直な面に投影したもの(太陽系を横から見た図)である。左の図で楕円は内側から水星、金星、地球、火星、木星の軌道を示す。

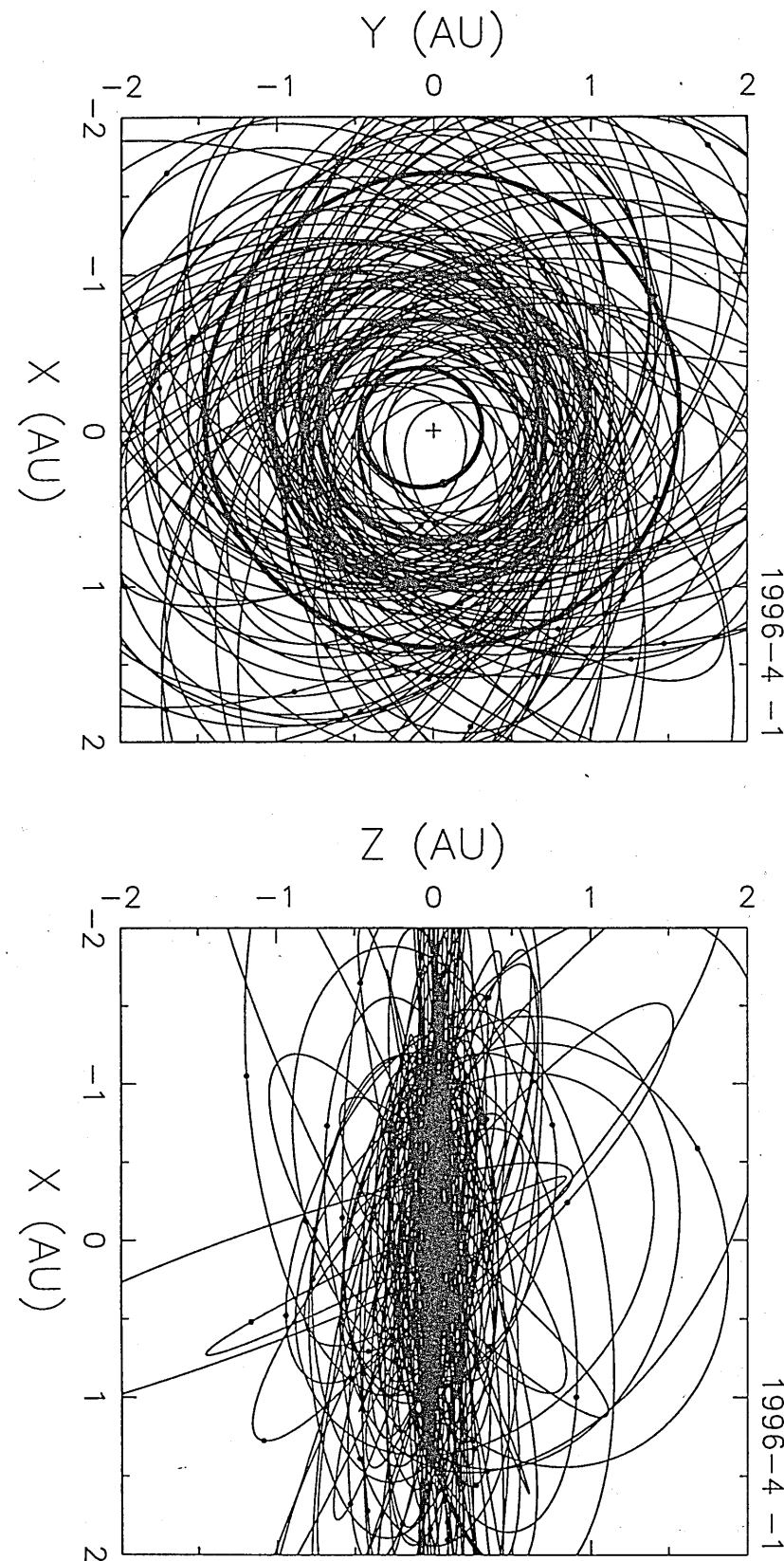


図 4.8 : 地球軌道付近の小惑星の軌道の図

地球の軌道の内側に入り込む小惑星の軌道。ここでは 115 個の小惑星の軌道が描かれている。左が黄道面に投影したもの（太陽系を「上」から見た図）で、右がそれに垂直な面に投影したもの（太陽系を横から見た図）である。左の図で太い楕円は内側から水星、金星、地球、火星の軌道を示す。

(2) 検出小惑星の軌道運動解析システムの概要

観測者や観測所さらには宇宙や月面望遠鏡から小惑星の新しい観測の報告があったときに、すぐにデータを処理して既存の小惑星なのか新しいものなのか、また、地球との衝突の可能性はあるのかないのかを調べる必要がある。また、その観測データをデータベースに収集し、より精度の高い軌道を決定していくという作業も重要である。

ここでは、これらの一連の作業を行うための「小惑星の軌道運動解析システム」というものを検討する。図 4.9 に、その模式図を示す。図 4.9 では、おおよそのデータの流れを中心に示してある。観測者から提供された新しい観測データは、まず既知の小惑星かどうかをチェックされ、もし既知のものであれば軌道の改良が、未知のものであれば軌道の推定が行われる。その結果はデータベースとして蓄えられるほか、地球との衝突の可能性も調べられ、衝突がありそうな場合については、追跡観測などの処置がとられることになる。また、これらの処理の大部分は自動化することを考える。

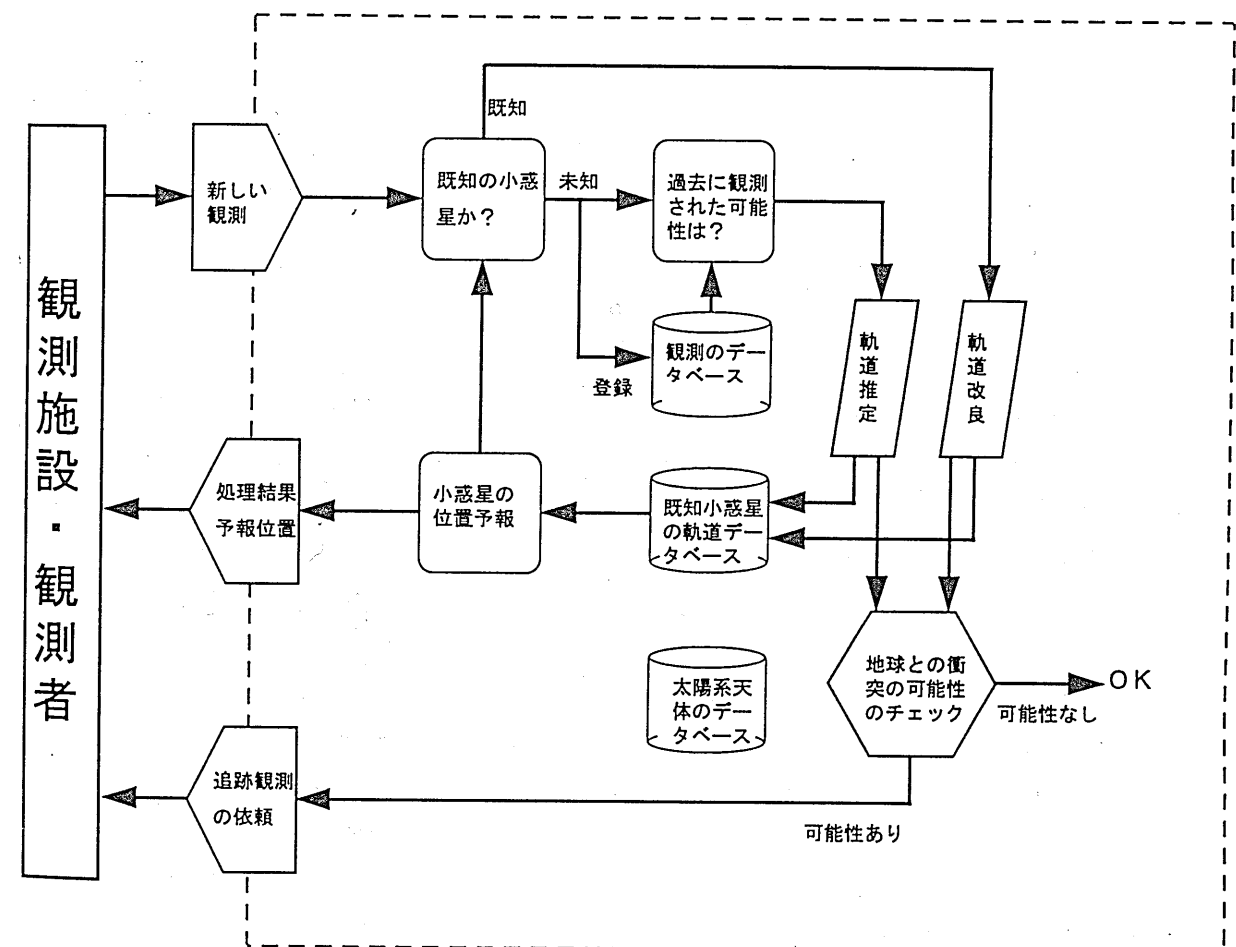


図 4.9 小惑星の軌道運動解析システムの模式図。

3. 検討課題

ここでは、図 4.9 に示した一連の流れの中にある各々の処理作業について、その現状とあわせて問題点や検討課題を簡単にまとめてみることにする。なお、下記のそれぞれの項目について、次のような判断基準でマークが記してある。

◎：現状の技術で問題はない

○：現状の技術が使えるが、少し検討が必要

□：現状の技術に加えて、かなり検討する必要がある

△：全く新しく検討をする必要がある

a) 小惑星の軌道運動の予測〔◎〕

小惑星の軌道要素データさえあれば、小惑星の軌道運動の予測は現在ある技術で問題はない。特にここで考えている予測の期間は、観測のためならばせいぜい数年間予測できればよいし、地球との衝突を考える場合でも数百年間程度計算できれば十分である。この程度の期間の計算ならば、現在ある計算機を使っても、100 万個程度の小惑星は問題なく扱える。特に軌道予測の場合には同時に 100 万個を計算する必要はないので、計算機のハードウェアの能力的には問題はない。ただし、100 万個も扱う場合にはその計算結果が大量となるので、大容量のデータが扱えるハードウェアが必要となる。

b) 小惑星の同定〔○〕

観測データが入ってきたときに、まず既知の小惑星かどうかをチェックする必要がある。これは、上記の a) で既知の小惑星についてはその存在位置が予測できるので、チェックは難しくはない。どの程度のずれまでを許容するかという点だけ検討すればいいと思われる。もし、既知の小惑星ではなかったらこの小惑星の軌道を推定する必要があるが、そのときには観測データベース中に同じ小惑星の観測データがあるかどうかを調べ、ある場合には過去のデータも使って軌道を推定するという作業を行う。ここでは、膨大な観測データベースの中から同じ小惑星のものと思われるデータを探し出す必要があるが、これについては、検討が必要である。

また、もしこの同定作業で観測された小惑星が新しいものであることが分かったら、即座に追跡観測の要求を出して、観測が可能ならうちに軌道をより正確に決定するためのデータを集める必要がある。この場合、下記の軌道推定などの処理をして軌道運動の予測を行い、その予測軌道情報を観測所に提供する。

c) 軌道推定・軌道改良〔□〕

新発見の太陽系天体の軌道をまず決めることを、天文学ではよく「軌道決定」というが、「軌道決定」というと軌道が確定してしまうような印象を与えるので、ここでは「軌道推定」と表現することにする。また、すでに推定された軌道要素があるときに、新たな観測

データを加えてより精度の高い軌道を求めることをここでは「軌道改良」と呼ぶ。これらの軌道推定や軌道改良については、天文学の歴史の中で、いろいろな手法が検討されている。しかし、かなり人の経験や「感」が必要な作業であることは否定できないので（特に軌道推定の場合）、できる限り自動化されるようなアルゴリズムや手法の検討が必要である。

d) データベースの構築〔□〕

図 4.7 には 3 つのデータベースがあげられているが、内容は次のようになる。

- ・観測データのデータベース：観測によって得られた小惑星の位置データ

- ・既知小惑星の軌道データベース：軌道が推定されている小惑星の軌道要素データ

- ・その他の太陽系天体のデータベース：惑星等小惑星の運動に関係深い天体のデータ

これらについては、一般のデータベースのようにその検索性を高めたものにする必要があるが、どのような方針でデータベースを作成しかつ活用するかは検討を要する。

e) 地球衝突の可能性の検定〔○〕

観測によって新たな小惑星の軌道が推定されたり、以前に発見されていた小惑星の軌道が改良されたりしたら、その小惑星が地球に衝突する可能性があるかどうかを調べる必要がある。この場合、原理的には a) の小惑星の軌道運動の予測ということを行えばいいのであるが、観測データの誤差を考慮した計算を行う必要がある。

f) 観測者・観測所との通信〔○、□、△〕

観測者や観測所からの観測データの転送であるが、現在使うことができる技術で最も好ましいのはネットワークを通してたとえば WWW などを利用する方法である。これは、観測者がネットワークを使える環境にあれば問題はない。もし、観測者が電話回線しか使えない場合には、モデムを通してデータのやり取りをする方法を検討する必要がある。さらに、モデムも使えない場合には、FAX や郵便などを使用することになるかもしれないが、これは手間がかかるので問題であろう。いずれにしても、現在において実際に行われている観測については、通信の問題はそれほど難しいものではない。

問題になるのは、宇宙や月面基地からのデータ転送である。これらの場合には、データの量もけた違いに大量になる可能性があるので、極力自動化をはかってオンラインで処理するようなシステムを開発する必要がある。さらに、データが観測された小惑星の位置データではなくて、小惑星を撮影した写真そのものであるような場合についても、その画像データの転送の方法や転送後の処理方法などを考える必要がある。

また、逆に、観測者や観測所への通信についても、ネットワーク化を含めてその方法を検討する必要がある。

2.4.2 データセンターの確立

(1) データセンターの概要

前節で述べたような「検出小惑星の軌道運動解析システム」を常時駆動させておく場として、小惑星などの太陽系天体について特に軌道データに関係した「データセンター」的な組織が是非必要となる。このセンターでは、軌道運動の解析をすることに加えて、小惑星などの太陽系内小天体についての様々なデータを提供したり、ユーザー側の様々な要求に応えられるようなものにすべきである。データセンターの一案としての概略を図4に示す。

図4.10に示してあるように、データセンターは「観測装置」、「データベース」、「解析システム」の3つを「核」として持つ。ここで、データセンターに敢えて観測装置を加えたのは、データセンターでも独自に確認観測などができる方が望ましいと考えたためである。ユーザーは、センターに來たりネットワークを使ったりしてセンターにアクセスでき、各種のデータを検索したり、または自分の必要とするデータを計算機に計算させたりすることができる。さらに、それらのデータを、単なる数字としてだけでなく映像などとしても得ることができるようにする。

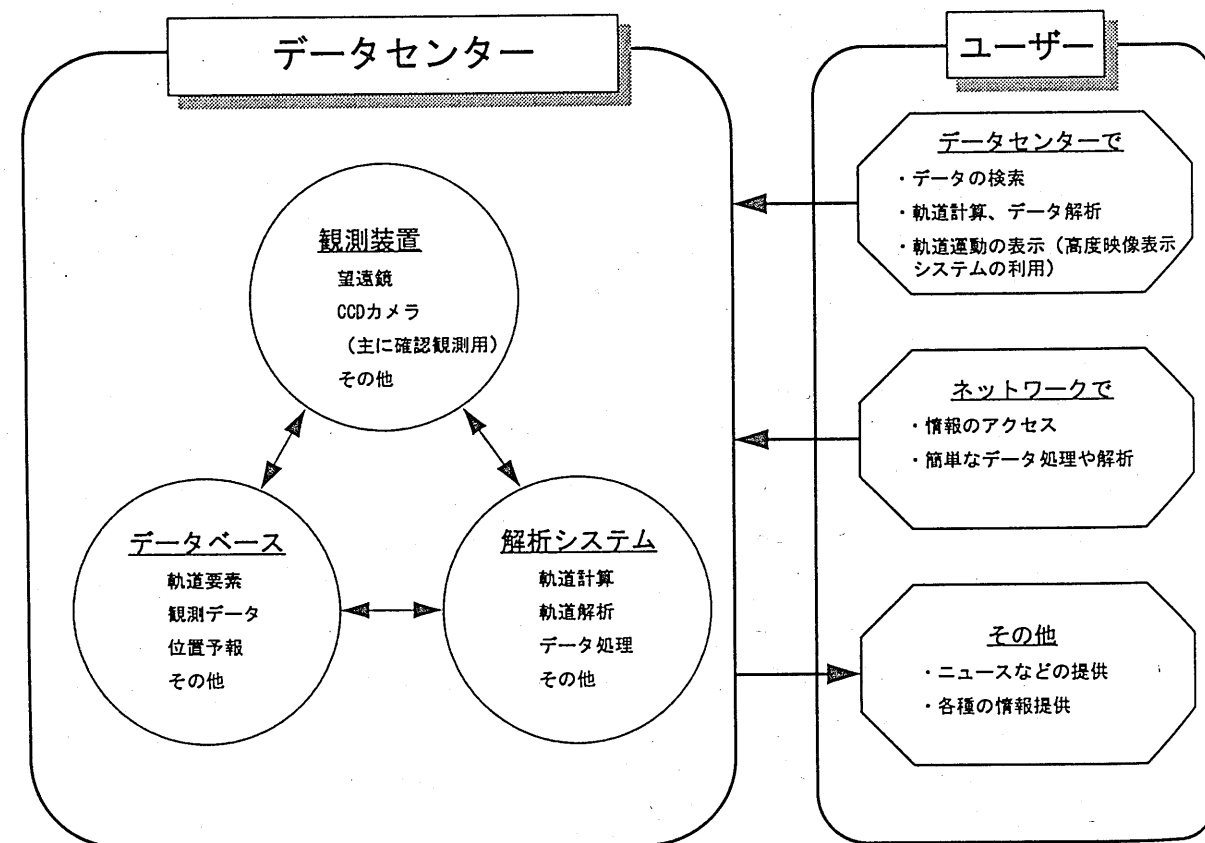


図4.10 データセンターの概念図。

(2) 国際協力

このような小惑星の軌道運動解析システムやそれを含むデータセンターを作るにあたっては、当然、外部との協力を念頭に置く必要がある。むしろ、外部との協力なしには、データセンターとしての機能を果たさない、と言っても過言ではない。この「外部との協力」には、日本国内のアマチュアとの協力と国際協力の2つが考えられる。

まず、日本国内のアマチュアとの協力であるが、日本では小惑星の発見やその軌道推定においてアマチュアの活動が著しい。従って、アマチュアとの連携をどのように取っていくことが小惑星の観測データを収集するのに効果的であるか、を検討する必要がある。

また、国際協力であるが、小惑星のデータの管理は、現在、Smithsonian astrophysical Observatory の Minor Planet Center で行われているので、同センターとの協力をどのようにするのがよいのか、協議する必要がある。さらには、1996年3月には、イタリアに「国際地球衝突小惑星財団」(International NEO foundation: NEO = Near Earth Object)が発足したが、この財団との協力関係も検討していく必要がある。

現在は、ネットワークが発達してきているから、お互いのセンター間でネットワークを通じた情報のやり取りは物理的には簡単にできる。従って、問題は、どのような内容の情報のやり取りをするのがよいとか、具体的な協力体制をどのようにするかということであろう。同様に、この他の機関とも必要があれば協力関係を結べるような体制に確立していく必要がある。

(3) 検討課題

図4.10に示した内容について、問題点と今後の課題についてまとめてみることにする。ただし、前節ですでに検討されていることと重なる点については省略する。また、前節と同じ記号を用いる。

a) データのアクセス方法 [□]

データのアクセス方法としては、直接センターに來て端末からアクセスする場合と、ネットワークを経由して利用する場合を考える。ネットワークとしては、WWWなどを使うのが現状では最も便利ではあるが、anonymous ftpのサービスや場合によってはtelnetでアクセスするような権限を与えることも考慮する。さらに、ネットワークがない場合に備えて、電話回線も利用できるようにする。

b) プレゼンテーションの方法 [○]

アクセスしたデータの表現方法であるが、軌道要素のように単に数値データである場合もあるが、場合によっては、軌道や運動の様子を図や動画として提供することも考える。このようなプレゼンテーションについては、現在すでに検討が開始されている。

c) マンパワーの問題〔△〕

ここで述べてきたような小惑星に関するデータセンターを構築し運用していくためには、今まで述べてきた計算機等のハードウェアやソフトウェア以上にマンパワーというものが重要になる。現状のように、地上の観測施設からのデータを処理する程度でよければ、数人程度で対応するのも不可能ではない。しかし、宇宙や月面望遠鏡から毎日多量のデータが入ってくることになれば、いくらオンラインで自動化を図ったとしても人が行う作業も膨大となる。このようなセンターが完全に機能するためには、最低でも数十人規模の人員が必要となると思われる。

2.5 地球衝突小惑星観測の人類的意义

2.5.1 地球衝突小惑星の人類的影响

地球に衝突する天体が見つかったらどうするか。運命とあきらめて、その被害が極力小さくて済むことを祈りながら、座して待つことにするか。人類はそれで滅びるかもしれない。しかし、地球という惑星の長い歴史の中では、人類という一つの生物種が生存したのも、一瞬の出来事に過ぎない。地球を包む薄い大気層、我々を宇宙の放射線から守ってくれる、それこそ限りなく薄いオゾン層、微妙な地表の気温のバランスといった、人類を生存させてくれた環境も、衝突によって大きく破壊されるかもしれない。しかし地球は我々人間が勝手に想像するように脆いものではない。数百万年という惑星の時間スケールでは、地球はまもなく同じ環境を再生するかもしれないし、あるいは違った環境に移っていくかもしれない。そのときにはその環境に適した生物が繁栄することになるだろう。

衝突回避

このような見方に対して、人類生存を積極的に守っていこうと考える人も多いわけである。人類はその発生が奇跡としか考えられない、貴重な生物種である。50億年ともいわれる地球の残りの寿命の中でも、このような生物は二度と現れることはないかもしれない。是が非でもその生存を守らなくてはならない。そのためには全力を尽くすべきである。地球に衝突する天体が見つかったら、その天体を破壊する、いやその軌道を少し修正して衝突を回避するだけでよい。近い将来、我々がそのような技術を持つことは十分に可能である。

この二つはあまりかみ合うことのない議論になりそうである。ただ、いずれの立場をとるにしても、まず必要なことは近い将来、衝突するような天体が現実存在するかどうかを調べることであろう。ここの主題である月面からのモニタリングも、そのために行うわけである。その結果地球を取りまく環境についての理解が深まれば、上記のような議論の内容も大分違ってくるのではないかと考えられる。

ところで、このようなNEOのサーベイを実施するとき、我々が暗黙のうちに期待する結果は、近い将来、地球に衝突する恐れのある天体は存在しない、というものであろう。実際、これまでに軌道のわかっている小惑星を対象とした研究でも示されているように、相当に高い確率でこのような結論を得ることが予想される。ただ、それがわかったからといって、このサーベイは目的を達したというわけでは決してないのである。

実は、地球に近づく小惑星というものに我々がどう対処していくかということを考えるとき、最も重要なことは、それらの天体の持っている、人類に対する「資源」としての価

値を冷静、かつ積極的に見極めることなのである。そうすれば地球衝突問題も、単なる脅威という認識を超えて、むしろ利用すべき資源の一部と考ええることもできるのである。したがって小惑星のサーベイはこの資源利用としての第一ステップということにもなる。

小惑星の資源としての価値

そこで地球に近づく小惑星の資源としての価値を考えてみる。資源というとどうしても材料とかエネルギーといったことを連想しがちである。しかしもう少し広い意味で資源というものを考えてみると、それは以下のように物質的資源と、知的資源とでも呼ぶべきものに分けることができる。

a) 物質的資源としての活用

地上、あるいは軌道上で必要とする鉱物、材料、水等の補給。地球上での鉱物資源や化石燃料、またハイテク産業に欠くことの出来ないレアメタルといったものは、近い将来枯渇することは確実であり、またそれに対処するための太陽発電衛星や宇宙都市のようなものは、地球外天体物質の有効活用なしには考えられない。現在の技術文明の延長線上に我々の将来を位置づけるかぎり、地球外天体資源の活用がその存続、発展の鍵を握っているといえる。

b) 知的資源としての活用

太陽系の起源、地球の起源、生命の起源などを考える上で小惑星は非常に重要であることが認識されてきた。すなわちこれらの天体は科学的な観点からも大きな資源なのである。それとは別に、これらの天体の中にはいつか地球と大きな衝突をするものがあるかもしれない、という「地球への脅威」は、単に人類に「恐怖」や「危機感」といったものをもたらすだけではない。例えば地球上の人類に連帯感を生み出すとか、人類の将来の進む方向を考える上で一つのガイドラインを提供するといった、大きな効果も考えられるわけで、これは人類に対する知的資源として積極的に受け入れるべきものである。

ここで物質的資源としての活用というのは、文字どおり、人類が地上、あるいは宇宙に進出する上で必要とする鉱物、材料、水あるいはエネルギー等を地球外天体から補給しようというものである。今までに行われたスペクトル観測によって、小惑星は鉄隕石のように金属鉄でできているものから、隕石に多く見られる岩石状のもの、炭素質コンドライトのように有機物質や含水鉱物を含むものまで、様々な組成のものが存在すると推測されている。

ところで、地球に接近するような天体が、我々の必要とする資源を持っているのか、ということはまだ推測の域をでていない。ただ、物質資源としての利用という観点に立った

とき、これらの天体は最初に取り上げて調査すべきものなのである。静止軌道上に建設する太陽発電衛星、それはエネルギー問題の切り札にもなりうるし、技術的には決して不可能ではないが、必要とする膨大な建設資材を地上から持ち上げることは、ほとんど不可能に近い。これらの天体がその材料を提供してくれたら、一気に実現の展望がひらけてくるのである。これらの天体は、向こうから我々に近づいてきてくれるというわけで、月とともに最もアクセスが容易な地球外天体なのである。

知的資源としての活用という表現が適切ではないかもしれないが、学問的、あるいは知的好奇心といった側面から、NEOはきわめて豊富な情報を提供してくれることが期待されている。メインベルト小惑星との関係、彗星あるいは地上にある隕石との関係、その表面と内部組成、有機物の存在など、その解明は惑星科学に大きな発展をもたらすであろう。

それとは別に、これらの天体の持つ、いつか地球と大きな衝突をするものがあるかもしれない、という「地球への脅威」は、単に人類に「恐怖」や「危機感」といったものをもたらすだけではない。例えば地球上の人類に連帯感を生み出すとか、人類の将来の進む方向を考える上で一つのガイドラインを提供するといった、大きな効果も考えられるわけで、これは人類に対する文化的資源として積極的に受け入れるべきものである。

このように、地球に接近する小天体は我々人類に多様な資源を提供してくれる。したがってもっと積極的にこれらの天体に対する対応を考えていくべきであろう。地球に衝突する小惑星が発見されたとき、その軌道を少し修正して衝突を回避するという、現在研究されている防御の技術は、物質資源活用技術の転用と考えることもできるわけである。あるいは月や小惑星を含む宇宙空間に人類が活動領域を広げることができるのであれば、衝突してくる天体に対してもより適切な対処をすることも可能かもしれなし。

いづれにしても、当面重要なことは地球に近づく天体を対象としたシステムティックなサーベイに早く着手すること、そのためには宇宙技術を含め、現在我々が持っている技術を総動員することである。それが実行できれば、今後これらの天体にどう対処すべきかということも、より現実的な議論が可能になってくるであろう。

2.5.2 物質的資源としての小惑星

資源は燃料・電力等のエネルギー資源、素材・化合物等の物質資源、空間・冷却・大気等の環境資源に分けられる。小惑星に期待される資源は、太陽風によってもたらされる揮発性のエネルギー資源や、鉱物資源のような物質資源もあり、宇宙観測基地や中継所等に使われる環境資源としても期待できるかも知れない。このように、資源利用を図るときに

必要なファクターは、資源としての品質と存在量、及び、運搬と精製にかかるコストである。一般に、地球外の宇宙資源が極めてコスト高で、実用性がないとみられているのは、単独の資源として運搬されることを想定するためである。実は、地球上の遠隔地域の資源開発でも、港湾設備や道路建設等のインフラ整備が伴わなければ、資源開発には取り掛かることができない。これと同じように、宇宙でもある程度のインフラ整備のための投資が先行しなければ、資源としての開発要素が成立しないであろう。宇宙インフラは、現状ではロケットのような運搬手段しかなく、極めて高価である。しかし、宇宙基地や月面基地のような前進基地が設けられ、開発目的が明確になり、運搬のほとんどを大気と重力の希薄な宇宙空間で済ませるようになれば、逆にコストが低く押さえられて、十分に地球上の資源開発と競争可能になるだろう。地球上の開発は、常に環境と生態系への悪影響の危険性を孕んでいる。生態系から切り放された宇宙空間での開発は、地球生命の調和をもたらす可能性が高く、総合的には全体のコストを下げる効果がある。

小惑星が実際に問題になるのは、むしろ、既述のような地球衝突の可能性に対する観測と対策である。そのために、月面観測基地を含めた観測体制が必要で、得られたデータは解析と対策に活用される。ここで、観測基地に投入されるインフラ整備を利用した小惑星資源の活用が提案できる。小惑星が太陽風資源を多く含むなら、エネルギー資源として活用でき、水を多く含むなら宇宙では希薄な水の供給源になる。水を含む彗星であれば、月面に衝突させて月に大気圏を生み出す構想もある。窒素等をどこから運ぶのかはともかく、衝突先を地球からそらせるだけでなく、月面に当てることで、衝突回避にかかるコストを回収する事につながるかもしれない。

運搬や精錬等のインフラ整備が進んだ段階で、小惑星上の資源回収を図るとすれば、まず資源探査を精密に実行する必要がある。これは、得られる利得を算出する根拠になるので、リモートセンシングのようなあいまいで不確かなデータしかもたらさない手段ではなく、ローバーによる接地探査やサンプルリターンを含む精密分析が伴われる必要がある。また、小惑星の開発を図るときの設計根拠となるため、精密な地形測量も必須である。ある程度の深さまで開発を進める目的があるなら、その深さまでのボーリングで確認する必要がある。例えば、物質回収が表面だけでおわらなければ、深度方向の精密探査が必要であり、居住空間や基地建設が行われるならば、数m以上の精密深度探査が必要になる。探査が進んで、目的実現のための情報蓄積が進んだ段階で、開発の決断が下される。始めは宇宙空間で使われる素材の回収か、揮発性物質資源の回収が先行するかもしれない。また、小惑星の軌道によっては、小惑星環境を利用した宇宙発電所が建設できるだろう。更に、小惑星の小ささを利用した宇宙観測基地も建設できるかもしれない。このような、小惑星の物質・エネルギー・環境資源開発の目標と探査項目を表 4.2 に示す。月面から大規模な天文施設で小惑星探査を図れるかも知れない。小惑星のリモートセンシングは、月面上の高分解能な観測装置による方法が望まれるであろう。

表 4.2 小惑星資源探査と開発目標

目 標	資源の課題	調査・探査課題
宇宙観測基地建设	建設位置・環境 構造安定性	適地調査 構造安定性調査
発電所建設	発電素材 建設位置・環境・安定性	S i 等素材資源探査 適地・環境調査
揮発性資源回収	ヘリウム等揮発性資源回収 ヘリウム等揮発性資源賦存状況	資源物質探掘 資源物質評価
小惑星人間居住	居住環境 エネルギー供給 物質供給	適地・環境調査 太陽光調査 生活物質探査
宇宙開発素材回収	酸素・水素等製造 金属・セラミクス等製造 資源開発・製造	揮発性資源物質探査 固体資源物質探査 資源開発・製造適地調査
小惑星探査	エネルギー供給 資源物質詳細 現場検証・深度方向探査 (マッピングリモートセンシング)	太陽・原子力等発電 サンプルリターン ロボット探査

3. 月面からの宇宙環境モニタリング

(1) はじめに ー宇宙環境じょう乱の地球への影響と監視の必要性ー

地球周辺の宇宙環境じょう乱の根源は主に太陽活動にある。その原因のひとつである太陽フレア（太陽面爆発）はX線や高エネルギー粒子線（放射線）などを多量に放出するが、まず最初に地球に到達するのが紫外線などの光やX線で、地球の高層大気環境に大きな影響を及ぼし、短波放送や、航空機などの航行用通信などを妨害する。次に到達するのがフレア粒子線で、地球近傍に数十分から数十時間で到達する。これは、特に高緯度地方では、通信途絶、高高度航空機の放射線被曝、地球環境に関連してはオゾン層への影響等がある。一方宇宙空間では、衛星搭載機器の誤動作や急速な劣化などの悪影響を及ぼす。実際、太陽電池の劣化（図 4.11）や衛星搭載機器への障害など多数の例があるだけでなく、宇宙で活動する人体に対しても放射線被曝や皮膚のガン化、脳細胞の損傷などの危険があり、最悪の場合は死に至るほどの重大な悪影響があると予測されている。最後に、フレア発生から約2日後に地球に到達するのがプラズマ雲である。これが地球周辺の磁気圏（地球磁場の勢力範囲）に衝突すると磁気嵐が発生し、磁気嵐は再び電離圏じょう乱を通じて短波放送や衛星通信等VLFからSHF帯の電波伝搬に障害をもたらすほか、長距離送電線や海底ケーブルなど長い導電線に対しては地磁気誘導による悪影響を及ぼす（このような例としては、1989年にカナダで9時間に及ぶ停電が発生し、約600万人の人々が被害を被った（図 4.12））。宇宙空間では数kVにも達する衛星の異常帯電とそれに伴う放電事故や放射線障害の原因となる（例えば、1994年にはカナダの通信衛星が使用不能になった）。さらに、大気抵抗の増大により衛星軌道が変化したり衛星の寿命が予想以上に短くなったりする影響もある。なお、宇宙環境じょう乱の要因としては、フレアの他、フィラメント（暗条）消失等にも関連するCME（Coronal Mass Ejection）や太陽の自転にともなって回帰する高速太陽風の吹き出し口（コロナホール）などが知られている。また、宇宙空間での「定常的」な放射線被曝は、地球周辺ではバン・アレン帯（放射線帯）、その外では銀河宇宙線が最大の要因であり、特に宇宙空間における人体や機器への影響の大きさから、重粒子／HZE粒子（High Z and high Energy particles）やLET（Linear Energy Transfer）の観測とその障害に関する研究も重要である。以上のように、太陽活動は地球周辺の宇宙環境に大きな影響を及ぼし、実用衛星の利用などにより地上の生活にも直接的あるいは間接的に様々な影響を及ぼしている。よって、太陽活動や地球近傍の宇宙環境を常に監視し、異常事態が発生した場合や予測される場合には警報を発令できるようにしておくことは、地上の生活を守る上でも必要になってくる（図 4.13）。

さらに、太陽活動を始めとする宇宙環境のじょう乱は、オゾン層をはじめ地球の超高層大気を通じて地球環境にも影響を及ぼしていることが明らかになりつつある（図 4.14）。これまでは地球環境の変動に関してはフロンや炭酸ガス等人為的な影響のみが主に取り上げられてきたが、今後は太陽活動やそれに伴う地球周辺の宇宙環境の変動を詳しく観測し、

地球の外からの自然現象による影響と人為的な影響を正しく分離して対策を講じていかなければならない。このような地球環境の変動に対する影響という観点からも宇宙環境の監視が必要である。

月はその半面が常に地球方向を向いているため、地球そのものの観測のほか、その周辺の宇宙環境を広い視野で長期間連続して監視するために最も適した場所である。よって月面は、地球人の生活にさまざまな影響を及ぼす地球周辺の宇宙環境を監視し、更にそのじょう乱予報や警報を発令していくための観測拠点としてきわめて有効な場所といえることができる。

一方月面は、21世紀には月面ステーションのような形で人類の居住空間となっていく可能性があるが、特にその放射線環境は過酷で、銀河宇宙線や太陽フレア粒子線による機器や人体への影響が大きい（図 4.15, 4.16）。よって、月面での各種活動を支えるためには「その場の」放射線環境監視が必須であり、その観測データは上記の地球周辺の宇宙環境監視の一部としても大いに役立つ。

以上の観点から、月面を含む地球周辺空間、及び太陽地球間空間の宇宙環境をモニタリングするために、21世紀に入ってからのも月面探査の中で、「利用」及び「科学」の観点から何ができるか、何をやっていくべきかに関して報告する。

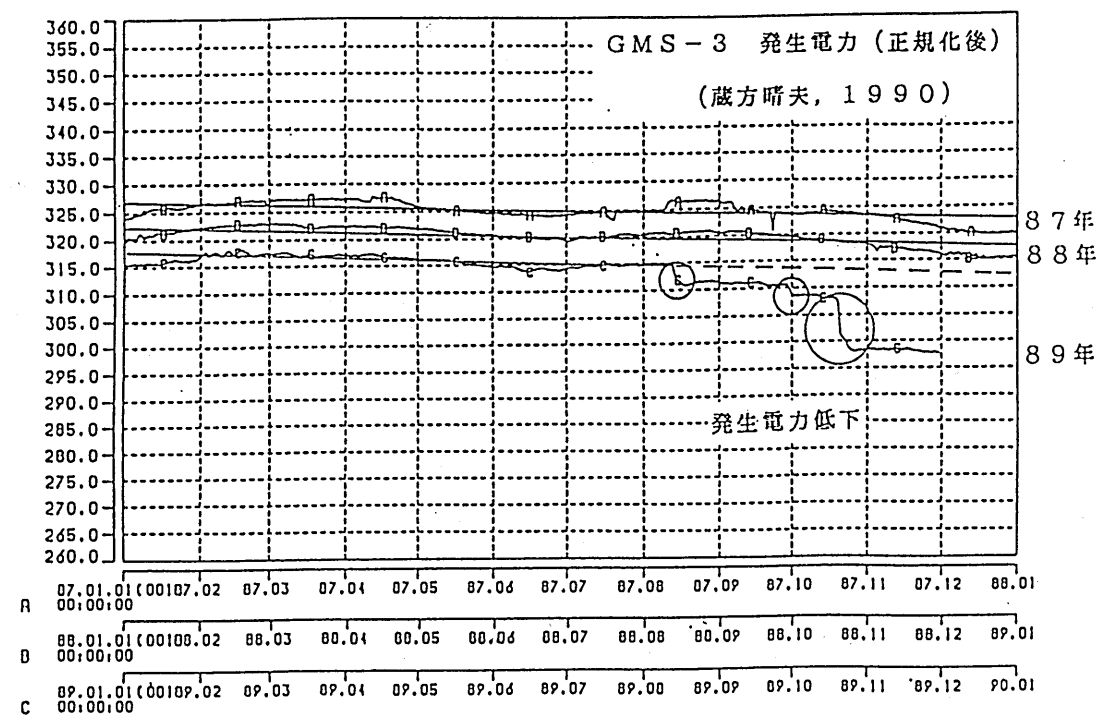
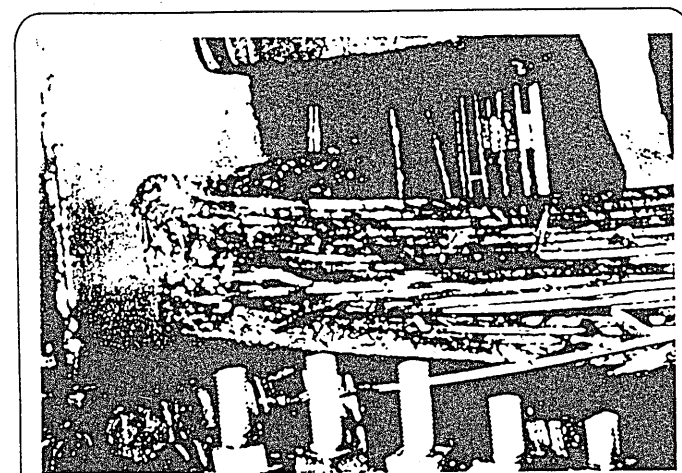


図 4.11 衛星の太陽電池出力が高エネルギーのフレア粒子線により低下した例



1989年3月13日未明、太陽フレアの影響でカナダのケベック州で9時間に及ぶ停電事故が発生し、約600万人が被害を受けた。太陽フレアによる地磁気擾乱は、大陸北部の長距離送電線に誘導電流を流した。写真は誘導電流により焼けただれたトランス内部のコイル。

図 4.12 地磁気擾乱により焼損した地上の電力会社のトランス

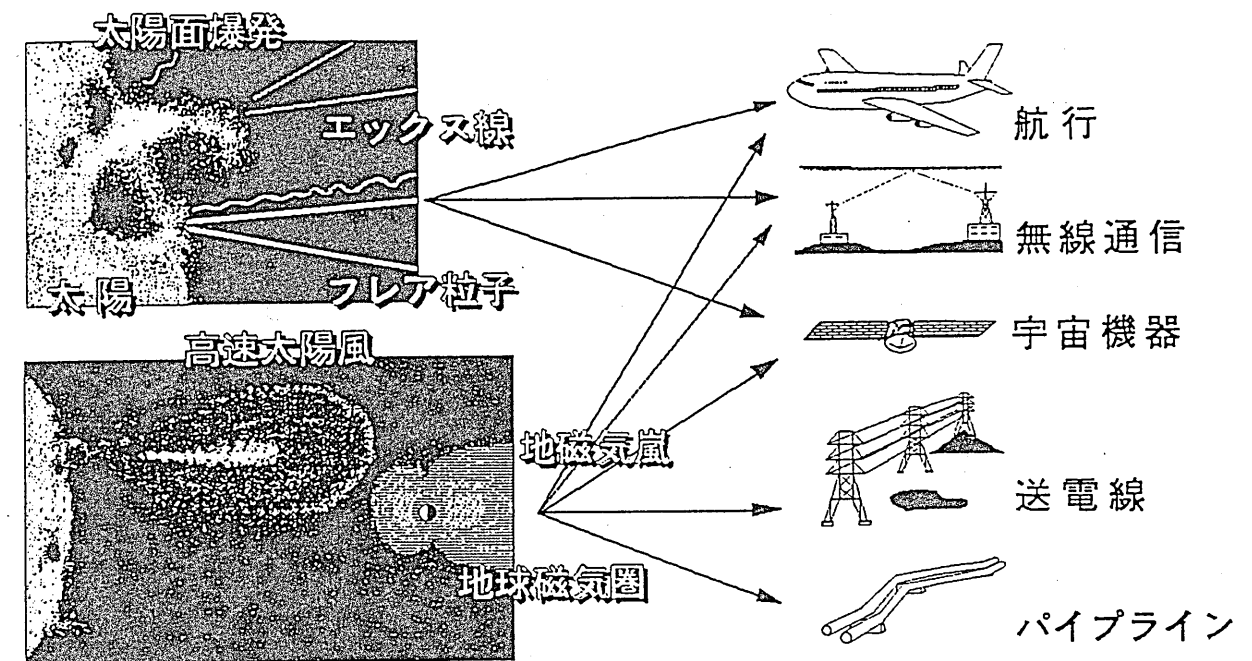


図 4.13 太陽活動とその地球周辺への影響

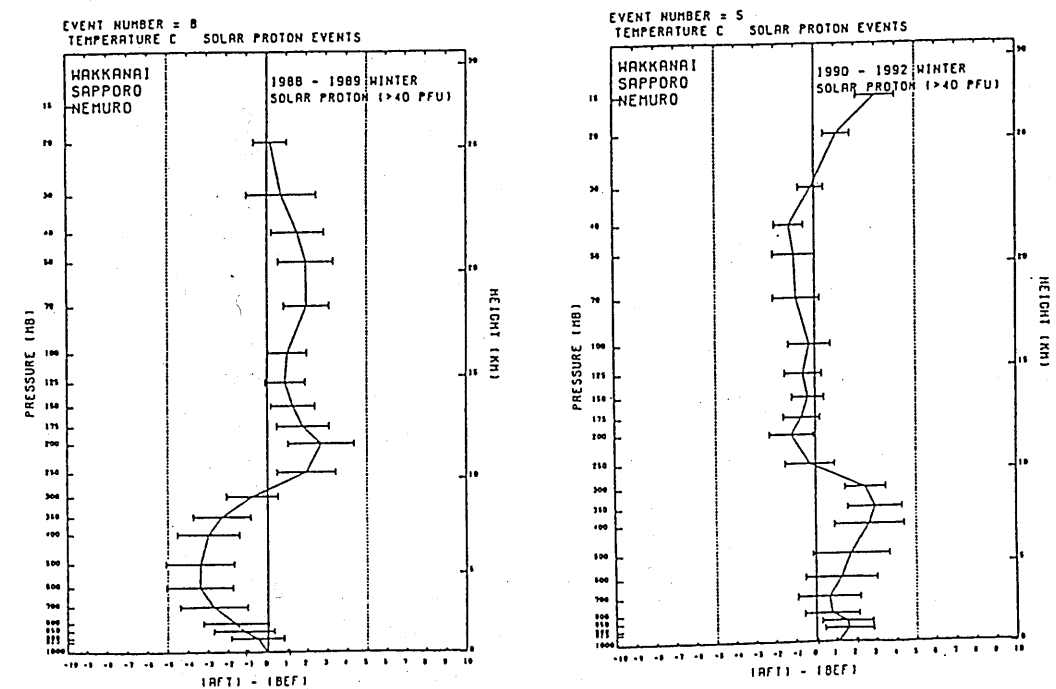


図 4.14 太陽プロトン現象に伴う北海道上空の対流圏、成層圏における温度変化。
横軸は発生後一発生前の温度差。左：1988-89年冬、右：1990-91年冬。
[Watanabe and Fujita, 1994]

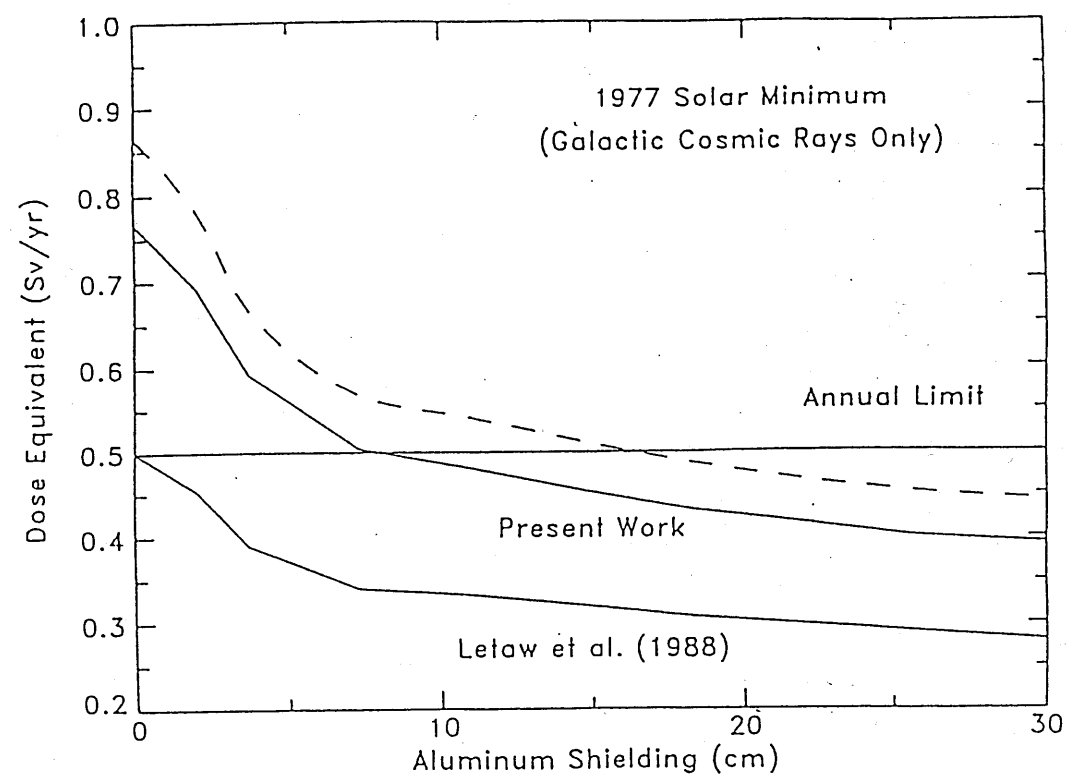


図 4. 15 月面の銀河宇宙線による定常的な放射線環境（銀河宇宙線モデルによる推定値）

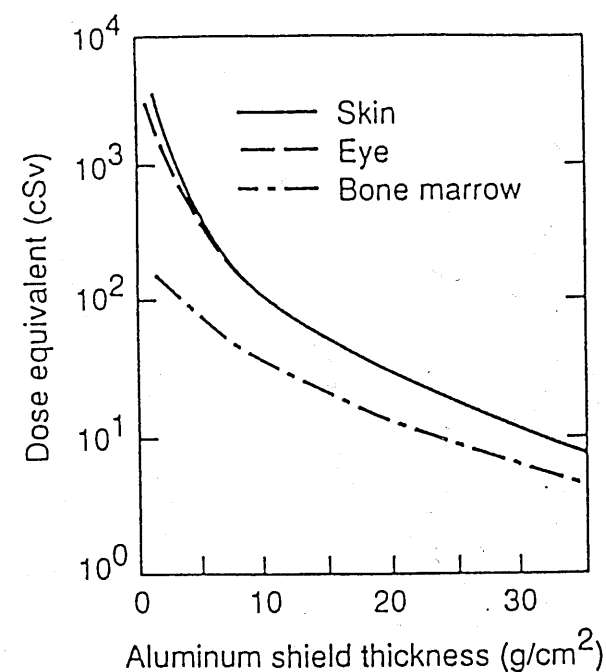


FIG. Cumulative dose equivalent to the skin, ocular lens, and bone marrow from the fall 1989 solar particle events.

図 4. 16 月面でのフレア粒子線による放射線環境（静止軌道等での観測による推定値）

参考文献

- Adames Jr. J. H., Introduction to the Proceedings, Galactic Cosmic Radiation: Constraints on Space Exploration, NRL Publication 209, 1991.
- Adams Jr. J. H., Badhwar G. D., Mewaldt R. A., Mitra B., O'Neill P. M., Ormes J. F., Stemwedel P. W., and Steitmatter R. E., The Absolute Spectra of Galactic Cosmic Rays at Solar Minimum and Their Implications for Manned Space Flight, Proc. 22nd International Cosmic Ray Conf., OG 5.2.7., 151, 1991.
- Allen, J. H., and D. C. Wilkinson, Solar- Terrestrial Activity Affecting Systems in Space and on Earth, Proc. of Solar Terr. Predictions Workshop, 1992.
- Heiken G. H. et al. ed., LUNARsourcebook user's guide to the moon, Cambridge Univ. Press, 1991. Joselyn J. A., SESC Methods for Short-term Geomagnetic Predictions, Solar-Terrestrial Predictions: Proc. of Workshop at Meudon., 404, 1984.
- Joselyn, J. A. and Whipple, E. C., Effects of the Space Environment on Space Science, American Scientist, 78, 126, 1990.
- Letaw J.R. et al., Radiation hazards on space missions, NATURE, 330, pp.709-710, 1987. Maehlum, B., PIMS Status Report, 7th Team Meeting, Aug., 1989.
- Nealy, J.E., et al., Solar-Flare Shielding with Regolith at a Lunar-Base Site, NASA Tech. Paper-2869, 1988.
- Nymmik R. A., Panasyuk M. I., Pervaja T. I., and Suslov A. A., Model of Galactic Cosmic Ray Fluxes, Proc. 22nd International Cosmic Ray Conf., 77, 1991.
- Nitta, K., et al., Lunar Habitat Construction Scenarios and Items to be Considered, CELSS J., vol.2, no.1, 1, 1990.
- Shea M.A., & Smart D.F., ENERGETIC PARTICLE RADIATION ENVIRONMENT FOR MANNED SPACE OPERATIONS, Solar-Terrestrial Predictions: Proc. of Workshop at Meudon, 390, 1984.
- Townsend, L. W., et al., Risk Analyses for the Solar Particle Events of August through December 1989, Radiat. Res., 130, 1, 1992.
- Watanabe, T., and E. Fujita, Meteorological Correlations with Solar-Terrestrial Phenomena: A Provisional Study, Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys., 7, 60, 1994.
- Williams, D. J., E. C. Roelof, and D. G. Mitchell, Global Magnetospheric Imaging, Review of Geophys., 30, 3, 183, 1992.
- 宇宙科学研究所搭載機器基礎開発報告書 Vol.4, 1991.
- 宇宙科学研究所磁気圏・電離圏シンポジウム, 1994.
- 宇宙科学研究所 PLANET-B 中間報告書, 1995.
- STEP 計画への準備, STEPシンポジウム報告, 1986.

(2) なぜ月面で(月面から)宇宙環境モニタリングを行うか

以下に、なぜ月面で、あるいは月面から宇宙環境モニタリングを行うのか、その必要性と月面観測の長所及び短所のポイントを列挙する。

(利点1) 2000年頃から低高度周回軌道が宇宙ステーションにより定常的な有人宇宙活動の拠点となるが、同様に2015年頃以降には月面も人類の定常的な居住場所となる可能性がある。よってその場の宇宙環境、特に機器にも人体にも大きな障害が予想される放射線環境に関しては、事前に十分な(できれば太陽活動周期の約11年間程度にわたる精密な)観測と研究が行われなければならない。特に生体への影響を正しく評価、研究するためには数十%以下の精度での絶対値計測が必要であり、特に影響が大きな重粒子線(高LET粒子線)の観測は不可欠である。なお波及効果として、この定常観測データは地球磁気圏外の放射線環境のリファレンスとして、将来の惑星探査などにも役立つ。

(利点2) 同一面が常に地球指向のため、地球周辺の宇宙環境を連続的に観測するのに最適である。特に地球磁気圏全体の監視場所として絶好の位置にある。(ラグランジュポイントでは遠すぎ、静止軌道は磁気圏内部のため全体が見渡せない。)さらに、将来、S/N比の高い精密な観測を行うためには大きな口径の観測設備の設置が理想的であるが、月面上にはそのような観測ステーションが整備できる可能性がある。

(利点3) 大気がなく電離層がないため、長波長(低周波数)の電波観測が可能である。地球から遠く離れるため、地球からの電波雑音を低減することができ、月の裏側では特にクリーンな観測が可能になる。更に、長波長でしかも高い空間分解能の電波観測を行うためには、衛星では搭載不可能な広開口面積のアンテナが将来月面上に設置できる可能性がある。

(利点4) 月が約28日で地球を周回する期間の約8日間程度月は地球磁気圏の尾部を通過する。よって、月面周回軌道は磁気圏のリモートセンシングだけでなく、直接観測(in-situ observation)や地球の掩蔽を利用した太陽惑星間空間の観測場所としても有用である。

(負点1) 自転のため、連続した太陽方向の観測や太陽エネルギー確保には工夫が必要である。特に夜間の小電力観測に関する検討が必要である。

これらの点を考慮し、さらに数十年先の将来にわたって月面利用を行っていくための基盤として、長期間の連続的な宇宙環境モニタリングを以下に提案する。今回検討したその柱は、

- 1) 放射線等のその場の監視、
- 2) 地球磁気圏の監視、
- 3) 太陽惑星圏の電波監視、

である。これらを月面上で行うことができれば、その効果は実用面のみならず学術的な波及効果も大きい。

(3) 宇宙環境モニタリングに関する研究開発スケジュール

各観測項目に関する具体的な記述は次章以降に詳解するが、この項では特に各観測の実現性、研究開発計画の進展に関して考察する。また、今回検討の対象とするのは西暦2000年から2015年の第1フェーズ期間であるが、便宜上これを二つに分け、どちらかという科学的な貢献度が大きな前半の時期をフェーズA、比較的大型の観測設備の開発も進み、実用的な貢献も生じてくるであろう後半の時期をフェーズBとして解説する。これらのフェーズはそれぞれ7~8年間を想定しているが、観測項目によってはフェーズAの期間中から実用的な要素も加味されたり、またフェーズBの後半まで科学的な観測が必要であると予測されるものもある。(表4.3参照)

1) 放射線等のその場の監視

エキスプローラ衛星による世界初の観測以降、高エネルギー粒子線の観測に関しては国際的にも我が国にも長年の宇宙観測の実績がある。荷電粒子観測に関しては、小型軽量化された観測機器がすでに多くの衛星観測に成功しているので、宇宙開発事業団、理化学研究所、早稲田大学及び宇宙科学研究所などに実績のある開発研究がそのまま利用できる。LET(Linear Energy Transfer)計測や重粒子線計測など有人月面活動など実利用にも必要な観測項目についてさらに詳細な観測を行うためには1996年時点で若干の技術開発要素が残されているが、1997~1998年には基礎開発が完了するめどがある。よって、2000年以前にフライトモデルの製作に着手することが可能である。一方、特に人体への影響が懸念される中性子の観測に関しても基礎研究が進んでいるので、宇宙空間での観測はやや遅れて可能になると考えられる。

以上のことから、フェーズAの前半から小型観測システムによる「科学」主体の荷電粒子(LET)観測が開始され、その後中性子観測も追加される。これらの一部はフェーズA後半からの実用的なモニタリングシステムへと進化していく。一方、科学観測は月面での大面積(1m²程度)の観測装置を用いた更に高分解能の観測開発へと移行し、その成果はフェーズB後半には定常モニタリングにも活かされていくことになる。

2) 地球磁気圏の監視

東京大学、極地研究所、宇宙科学研究所、通信総研などを中心に観測のための基礎研究と開発が行われている。すでに宇宙科学研究所のロケット(S-520-19)による観測に成功し、今後のPLANET-B(1998年打ち上げ予定)搭載のXUV、スウェーデンのプラズマ圏撮像衛星AKKA(1998年打ち上げ予定)搭載のXUVIも開発中なので、2002年頃までにはフライトモデルの開発が可能である。これらの技術開発はいずれも世界初の試みであり、初期の観測は「科学」として「観測すること」に大きな意義がある。よって、フェーズA前半には衛星搭載用の小型観測システムで例えば月周回軌道上からの観測を行い、十分な科学的な成果を上げると共にその後のより高いS/N比の高精度な観測に向け

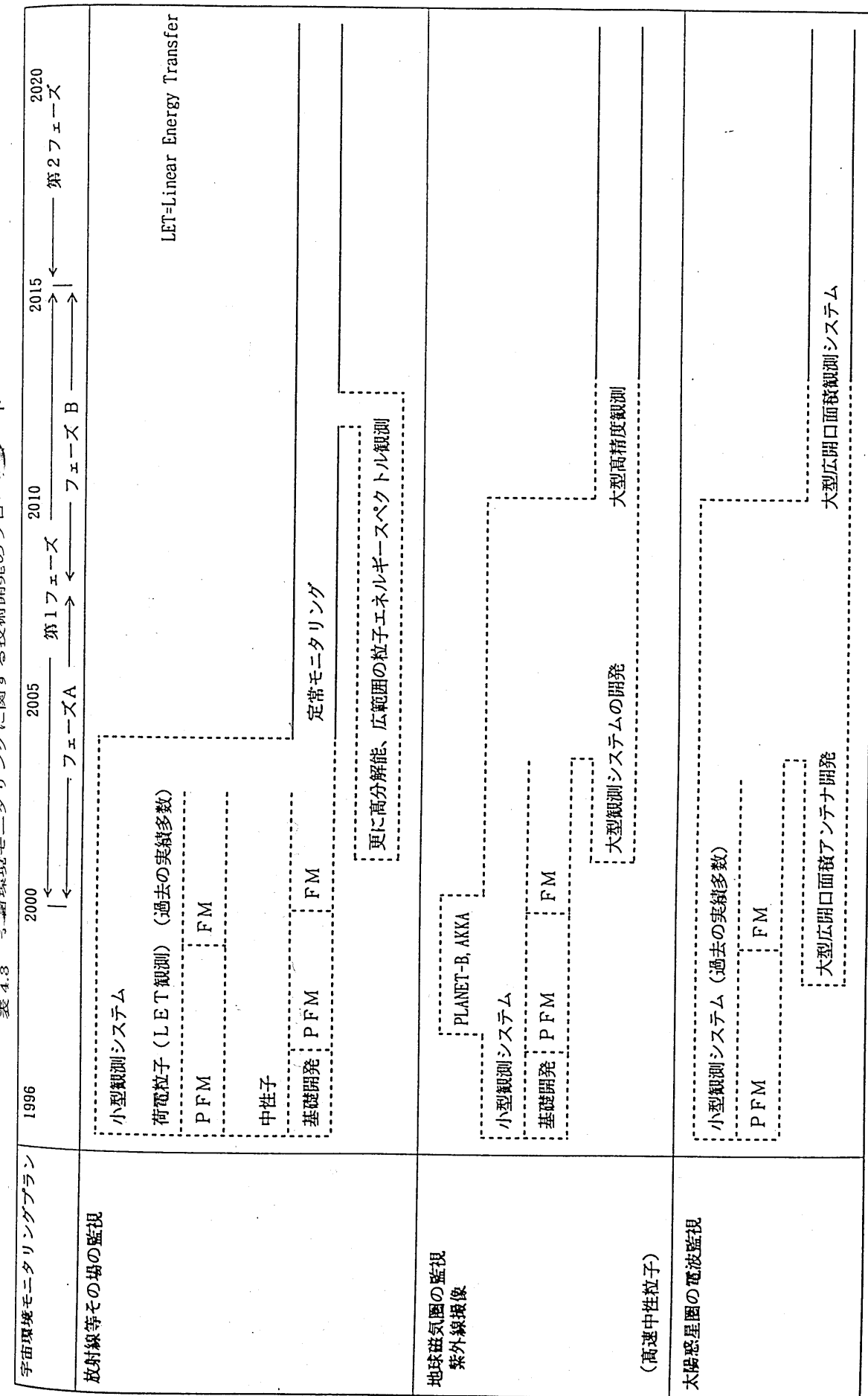
でのノウハウを蓄積し、例えばフェーズA後半からは月面上での更に規模の大きな光学観測施設により、まず科学的に地球周辺のプラズマ環境を観測するというスケジュールが想定できる。これらの科学探査が約11年間の太陽活動周期程度行われた後、それまでのノウハウを最大限に活かして実用的なモニタリングシステムへの移行がフェーズB後半から行われることになる。

3) 太陽惑星圏の電波監視

地上からの低周波の電波を用いた宇宙観測の歴史は長く、わが国では例えば東北大学における木星磁気圏の観測や名古屋大学の太陽風シンチレーションの観測などに実績がある。地球の電離層の外側で数MHz帯域以下の低周波電波を観測する試みも以前から行われ、特に地球磁気圏からの電波観測では数多くの科学的な成果が得られてきている。以上のことから、宇宙空間における受信システムなどバックエンド部の観測技術に関しては特に解決しなければならない技術課題はない。よって、従来の技術の応用により、小型観測装置による月周回軌道や月面からの太陽電波バーストの観測、惑星電波広帯域放射スペクトルの観測、地球周辺の電波観測などは2000年頃までに可能である。更に効率よく、より高い空間分解能の観測を行うためには、月面上に数百m以上の規模の広開口面積のアンテナシステムを整備する必要があるので、そのための月面上の大規模アンテナの設計、設置に関する部分では今後解決すべき技術的課題がある。これは、月面からの電波天文観測と共通の課題でもあり、例えば月周回衛星や月面探査機による観測と、月面からの観測に関するノウハウの蓄積が行われた後の次の世代の月面利用(2010頃?)の時期までには解決されていると考えられる。

よって、フェーズAでは、まず衛星搭載の小型観測システムにより、月または月周回の利点(電波雑音、地球掩蔽など)を活かした科学観測が開始され、その後月面上の広開口面積のアンテナの開発が進行した時点(フェーズB)で、より高精度な観測が可能になると考えられる。特に科学と実用との切り分けは明確ではないが、フェーズB後半からは太陽惑星間環境監視など実用面でも利用価値の高い監視データが入手できると考えられる。

表 4.3 宇宙環境モニタリングに関する技術開発のロードマップ



実用的な貢献度が大きな時期

科学的な貢献度が大きな時期

(注)

3.1 月面におけるその周辺の宇宙環境監視

3.1.1 概要

宇宙環境利用などに大きな影響を及ぼす要因として、太陽や銀河系を源とする宇宙放射線（陽子や重イオン、中性子などの放射線）がある。これら宇宙放射線の特長は、物質に異なった LET（Linear Energy Transfer：単位長さ当たりのエネルギー損失）を与える多くの種類の粒子線を含んでいることにあり、それらによる放射線量を算出するためには正確な LET 分布（粒子組成と各エネルギースペクトル）を観測しなければならない。この観測は大気圏外を飛行する全ての宇宙機は自らの安全運用のためにそれぞれ必須のものであるが、月面においても、月面上の各種機器や有人宇宙活動の安全運用を図るためにその観測を行わなければならない。特に、将来には月に人間活動が拡大することを考慮すると、居住する人間への影響という観点から、できるだけ早いうちに正確なデータを、できればわが国独自に収集しておく必要がある。月面上での銀河宇宙線による定常的な放射線強度にはモデルが存在するが、それもまだ開発途上（図 4.15 参照）であり、さらに、大きな太陽フレアなどから放出されたフレア粒子線による被曝はかなり高レベルとなると推測されている（図 4.16 参照）ため、月面上での放射線計測は実用面からも欠かすことができない。将来には、月面を利用した大きな面積を用いた粒子観測やさまざまな種類の粒子線の幅広いエネルギースペクトルにわたった観測を行えば、地球磁気圏外における基準観測点（リファレンス）として、学術的にも重要な役割を果たすことになる。

また、月は 28 日の地球一周の期間のうち 20 日間は太陽風の中に、約 8 日間は地球磁気圏の中（その中の 4 日間は磁気圏尾部）にすることになる。よって、月面や月周回軌道上で、これまでに多くの磁気圏探査衛星で開発された標準的な構成の環境観測（磁場／電場、電子・イオンエネルギー分析器、イオン質量／エネルギー分析器など）を行えば、地球磁気圏内部の直接観測も可能である。多点観測などにより観測点を複数個配置することができれば、従来の地球周回衛星による観測では、時間変化なのか、空間変化なのかを区別するのは困難な場合が多かった難点を解決し、磁気圏物理学に貢献する観測も可能になる。

3.1.2 具体的なミッション検討（フェーズ A, B）

高エネルギー放射線（電子、陽子、 α 粒子、Li から Fe までの重粒子）の計測について詳解する。

計測に関しては既に宇宙空間での観測実績があるので、フェーズ A の初期から観測可能なミッションを中心に述べる。月での LET 分布の観測は世界的にも例がないため、初期の観測は科学への貢献度が大きい。小型システムはその後の改良を経て実用的なモニタリ

ングシステム（フェーズ B）へと進化すると考えられる。なお、太陽系内の元素及び同位体組成をより詳しく観測するというような科学観測も並行して進められると考えられる。

（1）観測項目

a. 軽粒子観測

陽子 : 7 - 400 MeV

電子 : 0.3 - 30 MeV

α 粒子 : 7 - 400 MeV/nuc

を各チャンネルに分けてカウント数を測定する。計測の時間分解能は 16 秒。

最大計測範囲は 3000 カウント／秒。

b. Li から Fe までの重粒子

C, N, O : 20 - 150 MeV/nuc

Fe : 35 - 350 MeV/nuc

の重粒子の線種（元素）、核質量（同位体）、エネルギー、到来方向を計測する。核質量の分解能は 0.3 amu。対象は主として、太陽フレア粒子、銀河宇宙線およびアノマラス成分であるが、月が磁気圏尾部を通過するときも興味深い。

（2）機器概要

a. 小面積のシリコン半導体検出器を用いた望遠鏡。

互いに直角方向に視野を持つ 2 組の望遠鏡を用いる。図 4.17 参照。

重量 : 2 台で 8 kg。

消費電力 : 計 10 W

b. 大面積の 2 次元位置検出器と PIN 型検出器を組み合わせた望遠鏡。

各検出器の出力波形の 16 bit ADC 出力を伝送する。図 4.18 参照。

重量 : 15 kg

消費電力 : 20 W

視野 : $120^\circ \times 120^\circ$

3.1.3 波及効果

特に「科学」への貢献として、以下の項目があげられる。

○星内の重元素合成過程の解明

銀河宇宙線中の重粒子、特に鉄グループ核の同位体の存在比の測定を行うことにより、

超新星爆発に伴う爆発環境、陽子中性子比、密度、温度の情報を得て、星内元素合成過程に制限を与える。

○宇宙線の閉じこめ時間と星間物質量の観測

Al-26 や Cl-36 の観測により銀河系内での宇宙線閉じこめ時間の推定と平均的な星間物質の密度の推定を行い、宇宙線伝搬途上のハロの存在などに関する情報を得る。

○宇宙線の加速時間の測定

電子捕獲 β 崩壊核と安定核との同位体比 (Fe、Co、Ni 等) を測ることにより、宇宙線の種となる原子核の合成から宇宙線粒子までの加速機構を推定する。

○太陽フレア粒子線の発生、加速機構、および高エネルギー粒子を加速する衝撃波などの惑星間空間における伝搬機構の解明

一方、これらに関連する「実用」的成果としてはつぎのものがある。

○銀河宇宙線による放射線被曝量予測モデルの開発

○太陽フレア粒子線による被曝予測モデルの開発

○太陽フレア粒子線など太陽面現象に起因する高エネルギー粒子線の予測に関する研究

Light Particle Telescope

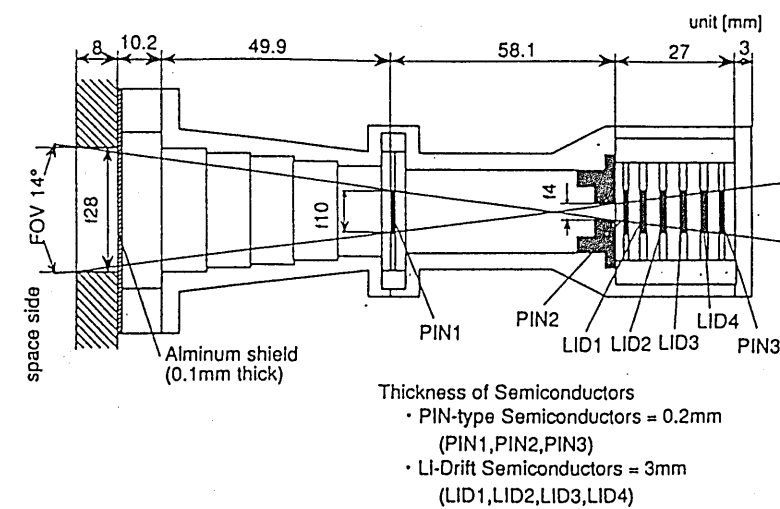


図 4.17 軽粒子観測望遠鏡

Heavy Ion Telescope

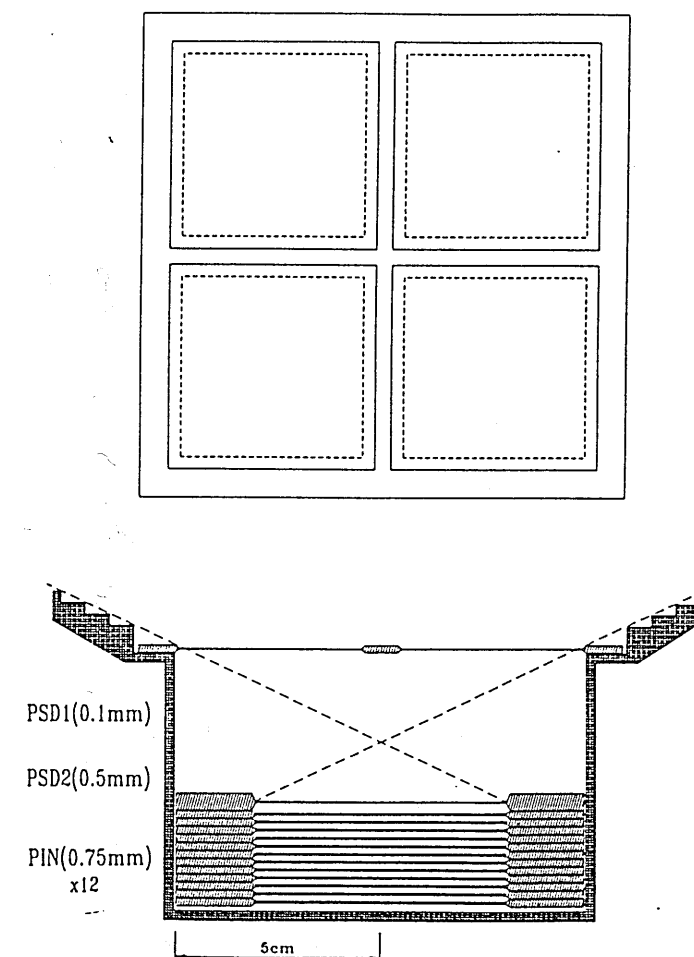


図 4.18 重粒子観測望遠鏡

3.2 地球近傍の宇宙環境の監視 —光や粒子によるリモートセンシング—

3.2.1 概要

(1) はじめに

地球のように磁場を持つ惑星の周辺には、太陽太陽風に対抗して、惑星固有の磁場の勢力範囲が存在する。これを磁気圏という。これまでの多くの直接観測を総合することにより、地球磁気圏は図 4.19-1 のような構造を持つものと考えられている。図に示すように地球磁気圏では、Bow Shock、Magnetosheath、Magnetopause、Plasmasphere、Cusp (Cleft)、Plasmasheet、Mantle、Lobe などの様々な特徴的な領域が発見されている。Bow Shock は超音速の太陽風と地球磁場とが衝突してできるショックフロントであり、地球から 10 Re 程度の位置にある。このショックフロントの場所は刻々の太陽風の圧力で変化するものと考えられている。Plasmasphere は静穏時では L=4 程度の磁力線で囲まれた比較的プラズマ密度の高い領域であり、有名なバンアレンの放射線帯、地球起源のプラズマの供給元である電離圏を含んでいる。この領域は地磁気活動が活発になると縮小し、地磁気嵐の回復と共に拡大していくことが知られている。磁気圏尾部 (Magnetotail) の中心部の Plasmasheet は磁場が弱く比較的プラズマ密度が高い領域で、この領域の地球方向の延長はオーロラオーバルに接続している。オーロラブレークアップなどの激しい現象の源はこの Plasmasheet にあると考えられている。ここでは反平行な磁場が近接して存在するために、磁場のつなぎ換え (Reconnection) が発生し磁気圏嵐 (Substorm) の原因となると考えられている。この結果、例えば、いくつかの領域で高エネルギー粒子、または Plasmoid の発生など様々な Substorm 関連現象が観測されている。このつなぎ換えが発生するのは 10-100 Re 程度の場所とみられている。

以上代表的な領域を簡単に見てきたように、磁気圏の各領域は常にダイナミックに変動しているのが特徴である。そして、この磁気圏のじょう乱は、太陽から直接降り注ぐ電磁波や放射線とともに地球環境や地上での生活に影響を及ぼすほか、地球周辺の人工衛星には直接にさまざまな悪影響を及ぼす。ところが、宇宙空間の磁場やプラズマは微惑星/デブリなどの物質と異なり、直接目で見るのがむずかしい。よってこの地球周辺のじょう乱に関しては、個々の人工衛星によるその場の「点」の観測と、地上における地磁気観測など「点」の観測を組み合わせ、宇宙で何が起きているかを推測することにより研究が行われてきた。最近になってやっと複数の衛星の同時観測による地球磁気圏の立体的な観測が行われるようになってきたが、それでもまだ広大な宇宙空間では点の集合であって、時間変化と空間変化を分離して全体像を完全に把握することはむずかしい (図 4.19-2)。つまり、これまでの研究の最大の難点は非常に大規模な構造を対象にしているにも関わらず、直接測定はきわめて局所的であることである。もし地球磁気圏のプラズマの様子を画像として撮像でき、その中で同時に衛星による直接計測が行われるようになれば、地球周

辺の宇宙環境の状態をより完全に理解し把握することができるようになる。そのような考え方から、磁気圏撮像 (Magnetosphere Imager=MI) の計画が国外・国内で精力的に取り上げられている [例えば、Armstrong and Johnson, 1995; Williams et al., 1992]。上に述べたように、地球磁気圏は $\sim 50 \text{ Re} \times 250 \text{ Re}$ にわたる大規模構造であり。その内側から見るのではその全貌を捉えることは難しいので、月面基地はこの MI のための最適なプラットフォームとなる (図 4.19-3)。

(2) 特に月面からの磁気圏監視の利点

月面は常に半面が地球方向を向きながら地球の周りを公転しておりしかも大気がない。また、地球磁気圏の全体を広い視野で監視するのに適した軌道にある。よって地球をとりまいて広がる磁気圏全体を監視する (磁気圏撮像) ためには最適な観測場所となる。特に磁気圏撮像ではごく微弱な極端紫外光を観測することが必要で、十分な S/N を得るためには、できるだけ大口径の光学系を高い精度で駆動し、かつ実利用段階では大容量の画像データをできるだけ即時的に地球に向けて送信する必要がある。このような要求に対して月面はきわめて有利な条件を備えている。ただし、月面でのダストの影響、及び月の夜の期間にいかにして観測システムを駆動するための電力を確保するかなど今後検討すべき課題も残っている。

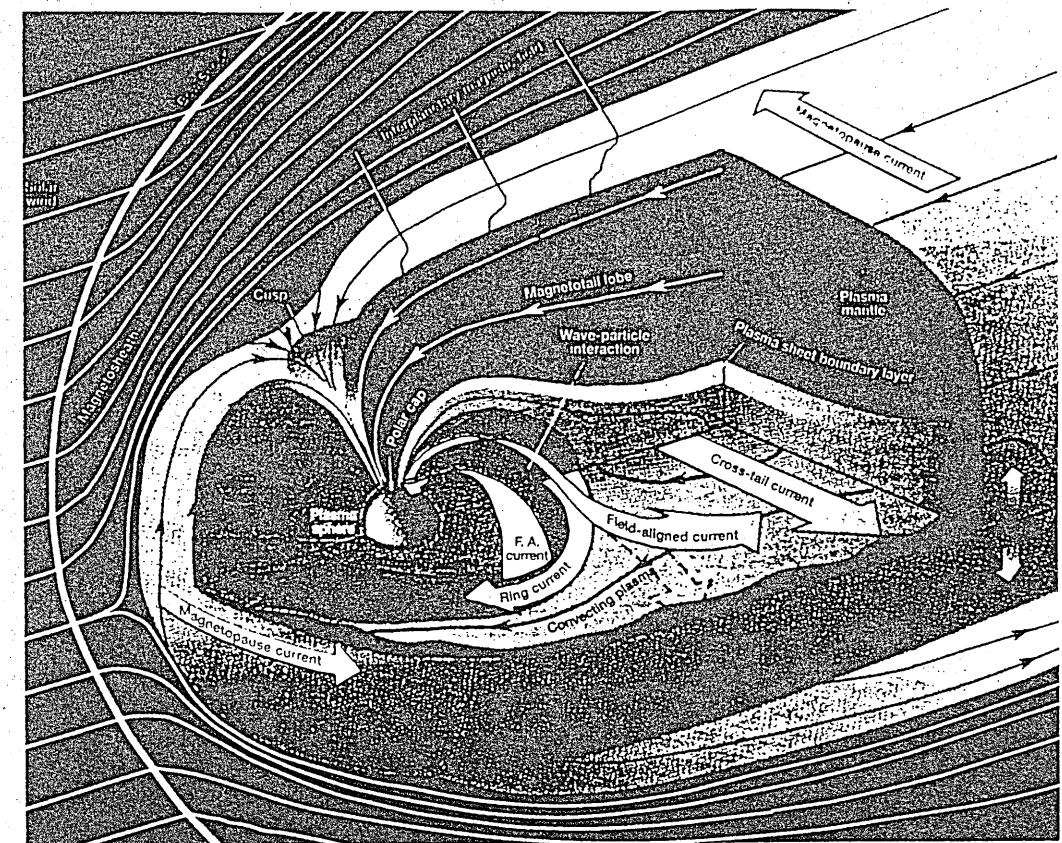


図 4.19-1 従来の観測をもとに描かれた地球磁気圏の構造

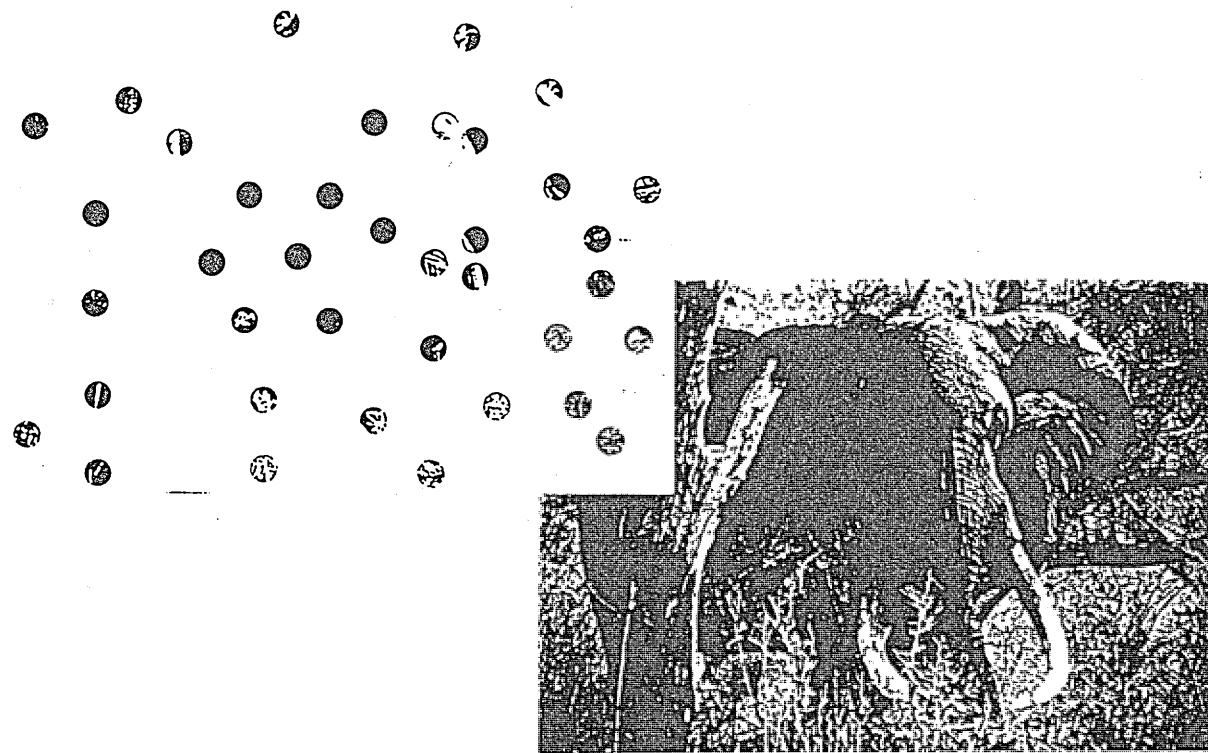


図 4.19-2 点の観測だけから全体像の把握は難しい例。特に時間的な変動と空間的な変化の分離。

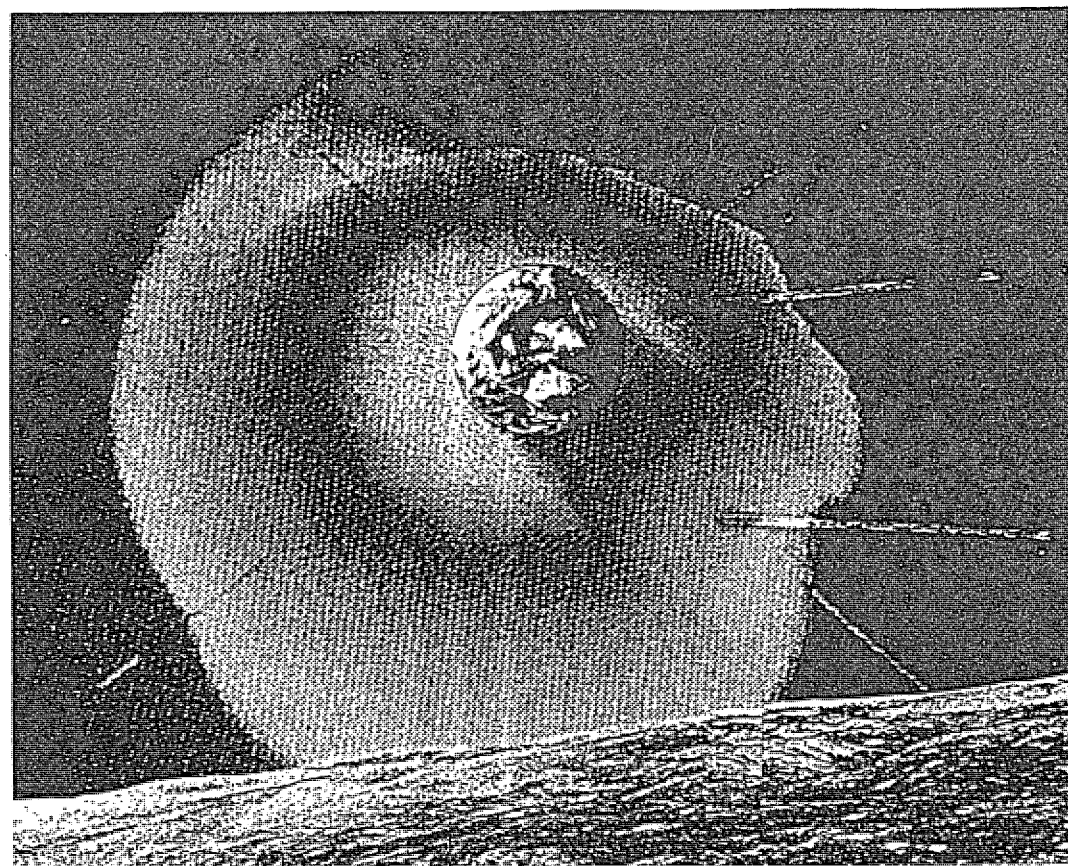


図 4.19-3 月面からの磁気圏撮像（シミュレーション結果を利用した想像図）

3.2.2 具体的なミッション検討（主にフェーズA）

磁気圏撮像を行うためには新しい技術開発が必要であり、現在様々な基礎研究と実験が進行している段階にある。人工衛星を利用した観測が1998年から開始されることもあり、当面は「科学的に」「観測すること」に大きな意義がある。よって、以下には主にフェーズAに開発される科学ミッションに関して説明する。なお、この技術は地球周辺のプラズマ環境監視という観点から実利用的な価値も非常に高いので、更に高精度な科学観測が行われた後の段階には、実用的なモニタリングシステムへの移行が速やかに行われると考えられる。

一般に磁気圏を「見る」ためには、プラズマからの放射を測定する必要がある。その方法として、1) 太陽光によるイオンからの共鳴散乱、2) AKR (Auroral Kilometric Radiation) のような電波放射、及び、3) 高速イオンと電荷交換で発生した高エネルギー中性原子 (ENA=Energetic Neutral Atom) のマッピングが考えられている [Williams et al., 1992]。2) については後の項で述べられているのでここでは省略する。3) については陽子観測や磁気圏全体のモニタリングにメリットがあると考えられるが、現状では検討が十分に行えなかったためここでは述べない。従って、1) の共鳴散乱による撮像について次に述べる。

(1) 磁気圏撮像

磁気圏プラズマの主要イオンは H^+ 、 He^+ 及び O^+ である。 H^+ は放射光スペクトルがないがライマンアルファ線 ($1216 \text{ \AA}$) は太陽光中の強度も強く、地球外気圏の H による共鳴散乱はジオコロナとして知られているもので、磁気圏撮像時には同時に測定すべきものと考えられる。 He^+ では $304 \text{ \AA}$ 、 O^+ は $834 \text{ \AA}$ の共鳴散乱が有力である。表 4.3 に両スペクトルに対する基本パラメータを示す。このうち $834 \text{ \AA}$ 帯の放射は O^+ だけでなく、 O^{++} の放射も含んでいる [Garrido et al., 1991]。図 4.20-1 は月面基地から、 $O^+ 834 \text{ \AA}$ を撮像した時の見られる像の計算結果である [Swift et al., 1989]。これは平均的な像であるが、このような撮像から、例えば、プラズマ圏についていえば、図 4.20-2 には磁気嵐の時のプラズマ圏からのプラズマの脱離の想像図を、図 4.20-3 には Substorm 時に Plasmasheet における Plasmoid の発生 of 想像図を示すように、リアルタイムでこのような変動の様子を捉えることが可能になると考えられる。

まとめると、磁気圏プラズマの主要イオン H^+ 、 He^+ 及び O^+ について、 He^+ の $304 \text{ \AA}$ 、 O^+ の $834 \text{ \AA}$ の共鳴散乱線、及び H が発するライマンアルファ線 (ジオコロナ) ($1216 \text{ \AA}$) の強度分布を観測する。

表 4.4 O^+ 及び He^+ の共鳴散乱パラメータ

イオン	波長 (Å)	太陽放射強度 (photons/cm ² sec)	共鳴散乱断面積 (cm ²)	散乱率 (photons/atom sec)
O^+	834	0.5×10^9	5×10^{-13}	3.3×10^{-4}
He^+	304	9×10^9	1.76×10^{-13}	1.5×10^{-3}

(2) 観測装置の概要

現在基礎研究と開発が進行中なので以下には一案を示す。

口径数十 cm ϕ 、焦点距離数十 cm の反射望遠鏡の直焦点位置に極端紫外光用検出器としてマイクロチャンネルプレート (MCP) を置く。反射鏡には極端紫外光までを効率よく反射するための多層膜反射鏡を用いる。MCP は 304、834、1216 Å に共通に使用し、波長切り替えはフィルターターレットによって行う (参考図: 図 4.20-4)。

口径 : 数十 cm ϕ 焦点距離: 数十 cm

反射鏡 : 304、834、1216 Å を効率よく反射する多層膜反射鏡

検出器 : 304、834、1216 Å を検出する MCP

重量 : 10 kg

消費電力: 30 W 以下

視野 : 全角数十度

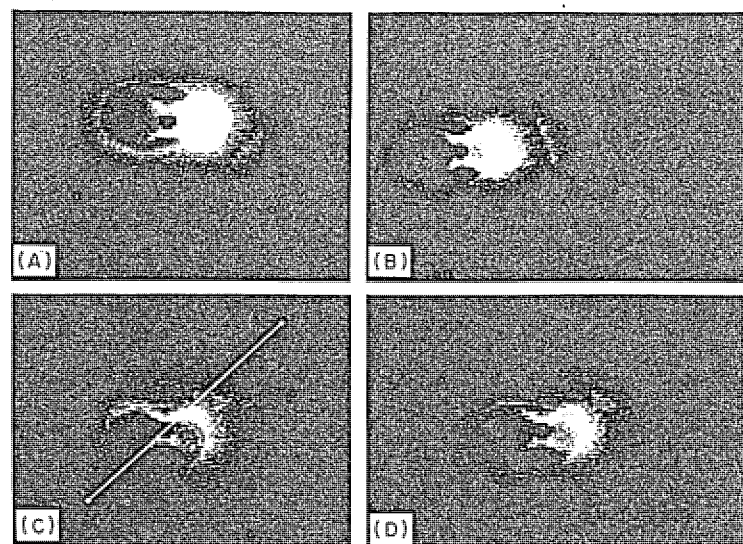


図 4.20-1 Swift et al. [1989] が計算した月面から O^+ 834 Å で撮影したときに期待される磁気圏の像。

A)、B)、C) 及び D) はそれぞれ 20:00、18:00、

0、14:00 及び 16:00 LT の方向から撮影したもの。

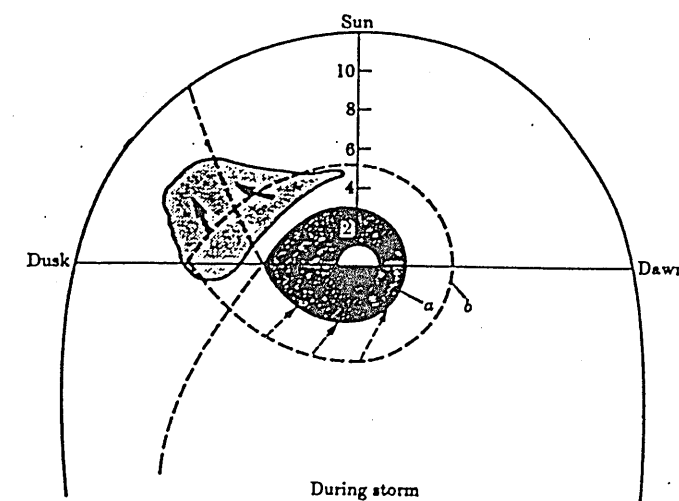


図 4.20-2 磁気嵐時のプラズマ圏からのプラズマ脱離の予想図

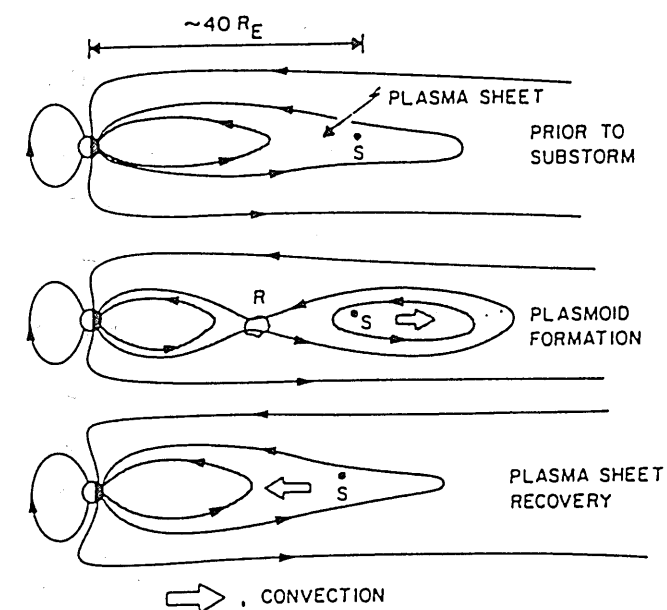


図 4.20-3 プラズマシートにおける Plasmoid の発生の予想図

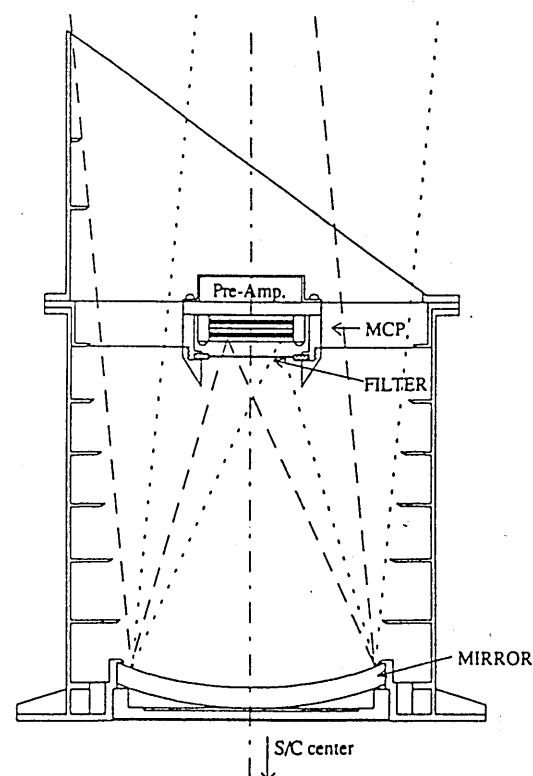


図 4.20-4 Nakamura et al., 1993 から引用の観測装置参考図

3.2.3 波及効果

上に述べたように、このミッションはまだ世界初の試みであり、わが国がフェーズAの段階で月からの磁気圏監視に成功すればその科学的な意義は非常に大きい。また、画像として目では見えない地球周辺のプラズマの様子を「見る」ことができるため、一般人へのインパクトも非常に大きいであろうと推測される。初期の科学観測に続いて、（その後の月探査計画に合わせて）大口径望遠鏡による更に高分解能の科学観測が考えられるが、その次の世代（フェーズB後半か？）には磁気圏の定常的な監視（地球周辺のプラズマ環境モニタリング）として、実用的な観測が継続して行われなければならない。

参考文献

- Armstrong, T. P., and C. L. Johnson, Magnetosphere Imager Science Definition Team Interim Report, NASA R.P. 1378, 1995.
- Garrido, D. E., R. W. Smith, D. S. Swift, S-I. Akasofu, Imaging the Earth's Magnetosphere: Effects of Plasma Flow and Temperature, Planet. Space Sci., 39, 1559-1571, 1991.
- Nakamura, M., T. Ogawa, T. Yamamoto, K. Tsuruda, Y. Saito, K. Yamashita, A. Furuzawa, and S. Chkrabarti, Extreme Ultra Violet Scanner (XUV) on PLANET-B, 科学衛星シンポジウム, 242, 1993.
- Nakamura, M., T. Yamamoto, K. Tsuruda, Y. Saito, K. Yamashita, A. Furuzawa, T. Ogawa, and S. Chkrabarti, Interplanetary He II extreme-ultraviolet observation on PLANET-B, Optical Eng., 32, 3033, 1993.
- Swift, D. W., R. W. Smith and S-I. Akasofu, Imaging the Earth's Magnetosphere, Planet. Space Sci., 37, 379-384, 1989.
- Williams, D. J., E. C. Roelof and D. J. Mitchell, Global Magnetosphere Imaging, Rev. Geophys.30, 183-208, 1992.

3.3 太陽惑星間空間の監視—電波による惑星磁気圏のリモートセンシング—

3.3.1 概要

太陽と地球の間には、太陽から常に磁場を伴ったプラズマガス（太陽風）が吹いている。この太陽風の中を太陽から発せられた様々なじょう乱が伝わり、地球周辺の宇宙環境に大きな影響を及ぼしている。よって、この太陽地球間の太陽風の中の擾乱の様子を詳しく観測できれば、地球周辺の宇宙環境じょう乱のメカニズムの解明やその予測に大いに役立つ。

これらプラズマ中のじょう乱のうち特に衝撃波を伴うような大規模擾乱は電波により観測できるが、特に太陽から離れた（地球に近い）領域の観測には低い周波数の電波観測が必要である。地上からでは電離層のため観測できない約10 MHz以下の低い周波数による太陽地球間観測は、月面を利用した宇宙環境監視のひとつの候補となる。

一方、木星をはじめとする巨大惑星はその周辺に地球よりはるかに大規模な磁気圏を形成しており、それは太陽惑星間空間の擾乱により大きく変動している。この惑星周辺の環境を飛翔体を用いて明らかにする直接探査は、その場での詳細な物理量の観測により多くの情報をもたらす反面、壮大なスケールで生じている惑星磁気圏のグローバルな事象（惑星のオーロラ、磁気嵐等）を把握する事はできない。しかしながら、惑星磁気圏から放射される電波や光を利用すれば、地球周辺からのリモート探査により惑星磁気圏全体で生じている電磁変動現象を観測することが可能である。この巨大惑星が受ける太陽変動の影響を詳細に観測することにより、地球の近傍の観測のみでは知り得ない、太陽惑星間環境の変動を明らかにしていくことができる。また、このリモート探査と直接探査とが互いに相補しつつ巨大惑星の電磁環境を明らかにしていくことは、太陽系を一つのシステムとしてとらえ、将来人類が宇宙活動の場を惑星系に展開するための基礎研究としても重要である。以上太陽惑星間の監視と惑星磁気圏の監視の2つについて候補をあげた。両者とも地上観測では長年の実績があり、数十mサイズのアンテナを用いた宇宙観測にも実績がある。今回は、特に低周波電波が低雑音で観測できる月面の特長を活かすことを考え、大型の広開口面積のアンテナシステムが設置可能になるフェーズB以降の時期について、特に後者（惑星磁気圏観測）に焦点をあてて具体的なミッションに関する検討を行った。

なお、フェーズAの段階では、まず衛星搭載の小型観測システムにより、月（または月周回）の利点（電波雑音、地球掩蔽など）を活かした科学観測が開始され、その後月面上の広開口面積のアンテナの開発が進行した時点（フェーズB）でより高精度な観測が可能になると考えられる。特に科学との切り分けは明確ではないが、フェーズB後半からは太陽惑星間環境監視など実用面でも利用価値の高い監視データが入手できると考えられる。

3.3.2 具体的なミッション検討（主にフェーズB）

（1）方法

木星の磁気圏で加速されたエネルギー粒子が放射する電波は、図4.21に示す様に周波数

の高い方からデシメートル電波、デカメートル電波、ヘクトメートル電波及びキロメートル電波の4つの成分を持つ。このうちデシメートル及びデカメートル電波は地上から観測可能であるのに対し、惑星のエネルギー粒子の内比較的低いエネルギーの粒子が強く関係するヘクトメートル電波は地球電離層を透過しないため地上からは観測できない。またこの電波は強度が弱い波長が長い人工衛星による観測では詳細な特性を把握するには至っていない。よって月面上で広開口面積のアンテナを展開し、惑星ヘクトメータ電波を観測することにより、惑星磁気圏の低エネルギー粒子の変動とその太陽惑星間空間環境の変動に対する応動を明らかにしていくことができる。

（2）観測システム

月面に広帯域ヘリカルアレイアンテナを設置し、ヘクトメートル電波の高感度受信を行う。

（a）電波望遠鏡

構成 : 広帯域ヘリカルアンテナアレイ (1000m×1000m)
ビーム幅 : 15度
ビーム制御 : フェイズドアレイ方式
設置場所 : 月赤道

（b）受信装置

・周波数 : 1 MHz ~ 10 MHz
・低雑音高感度受信機
・偏波計測

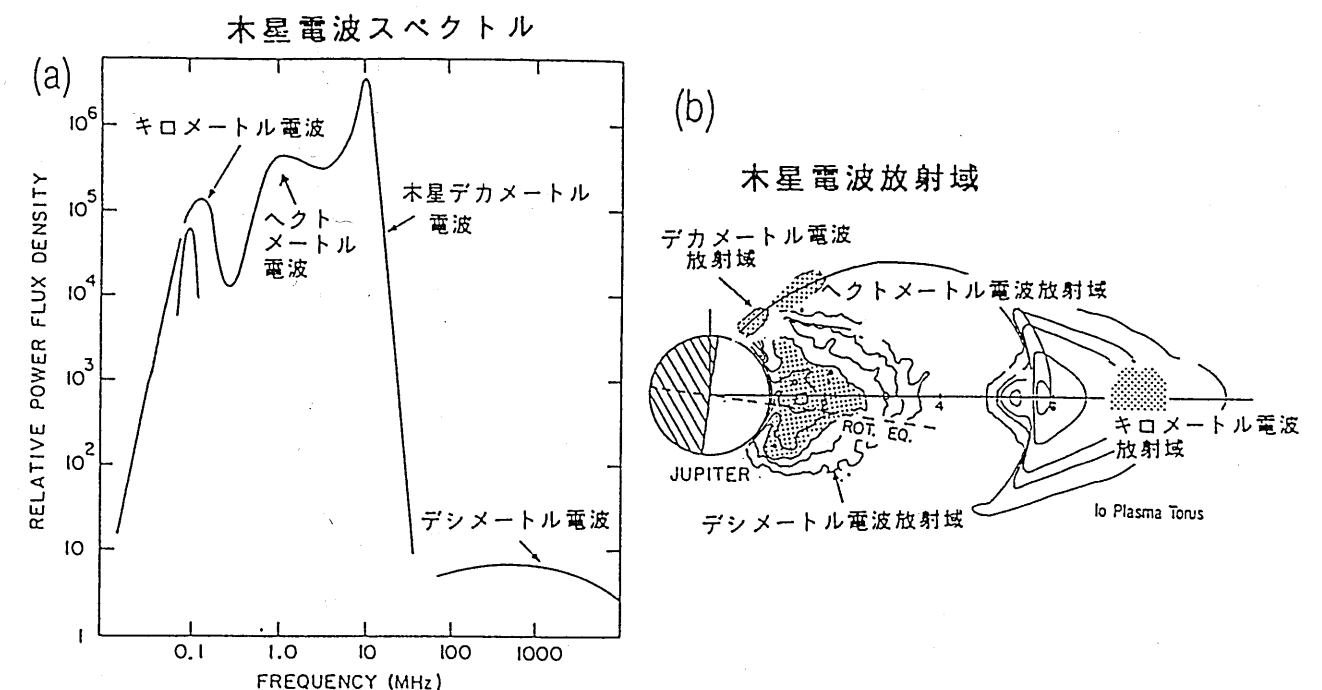


図4.21 木星電波の概要

3.3.3 波及効果

このシステムにより太陽からの自然電波の観測も可能である。太陽フレアから放出される高エネルギー粒子群が惑星間空間で放射する電波バーストの放射分布を観測すれば、太陽活動及び太陽惑星間空間の擾乱の状態を監視できる。

また、地球の自然電波が定点で長期間観測できる。地球の極域から放射されるAKR (Auroral Kirometric Radiation) をはじめとする自然電波を、月から定点観測することにより、地球磁気圏の擾乱と自然電波の放射との間の関連を長いタイムスケールで詳細に究明することができる。

3.4 宇宙環境モニタリング (まとめ)

様々な種類の実用衛星や周回衛星の利用などにより、宇宙空間を利用することが地上での生活に必要不可欠のものとなりつつある。と同時に、地球人自身の活動範囲も宇宙空間に広がりつつある。例えば静止軌道上はすでに各種実用衛星により超過密状態になっているし、また人類の居住範囲も数年後の低高度周回軌道上 (宇宙ステーション) から、月面にまで広がるのはそう遠い未来のことではないだろう。このように拡大し複雑なシステムによって支えられる地球人の生活を守るためには、地球周辺の宇宙環境をモニターするシステムと、そこに大きな影響をおよぼす太陽惑星間環境のモニタリングシステムは、将来必要なインフラストラクチャとなる。月面はこれら宇宙環境のモニタリングを行うために最適の条件をいくつか有しているため、近い将来月が宇宙環境のモニタリングステーションとして地球人の生活に役立つようになっていくと考えられる。

(表 4.5) 今回検討した各観測装置の主要諸元表。各数値は概数であり、性能の向上や技術開発により今後増減する可能性がある。

観測フェーズ		衛星搭載		～	月面からの小型観測		～	月面からの大型観測	
放射線計測									
サイズ (cm)	センサ	A : 5 * 5 * 15を2個		100 * 100 * 50		TBD			
		B : 20 * 20 * 15							
	エレキ	20 * 20 * 20		TBD		TBD			
総重量(kg)		20		TBD		TBD			
電力 (W)		30		TBD		TBD			
備考：センサAの2個は直角方向									
磁気圏撮像									
サイズ (cm)	センサ	30φ * 30		50φ * 50		TBD			
	エレキ	15 * 30 * 15		TBD		TBD			
総重量(kg)		10		TBD		TBD			
電力 (W)		30		TBD		TBD			
備考									
電波観測									
サイズ (cm)	センサ	3000 tip to tip * 2		TBD		1km * 1km			
	エレキ	30*25*20 (30*30*30)		TBD		TBD			
総重量(kg)		15 (33)		TBD		TBD			
電力 (W)		20 (50)		TBD		TBD			
備考 ()内の数値は、月面探査のためのレーダ機能を含めた場合の値を示す。									