

平成 7 年度 科学技術庁委託

月探査に関する調査研究(その2)  
報 告 書

(概 要)

平成 8 年 3 月



財団  
法人

未来工学研究所

THE INSTITUTE FOR FUTURE TECHNOLOGY

月探査に関する検討委員会 構成委員 (ア行順)

主査	松尾 弘毅	宇宙科学研究所教授
委員	磯部 琇三	国立天文台助教授
	海部 宣男	国立天文台教授
	唐牛 宏	国立天文台教授
	武田 弘	東京大学名誉教授
	田邊 徹	東京大学工学部航空宇宙工学科教授
	鶴田浩一郎	宇宙科学研究所教授
	中澤 清	東京工業大学理学部地球惑星科学科教授
	的川 泰宣	宇宙科学研究所教授
	水谷 仁	宇宙科学研究所教授
	宮本 晃	日本大学医学部医学科助教授
	飯田 尚志	通信総合研究所企画部長
	大坪 孔治	(財)環境科学技術研究所主任研究官
	木部勢至朗	航空宇宙技術研究所宇宙グループ・グループリーダー
	輿石 肇	航空宇宙技術研究所技術委員
	古宇田亮一	地質調査所主任研究官
	富樫 茂子	地質調査所地殻化学同位体地学課長
	富田二三彦	通信総合研究所宇宙環境室長
	石澤 禎弘	宇宙開発事業団理事
	岩田 勉	宇宙開発事業団軌道上システム研究室長
	長島 隆一	宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室長
伊藤 隆宏	三菱重工業(株) 宇宙技術部 次長	
村上 卓司	日産自動車(株) 宇宙航空事業部長代理	
松本 信二	清水建設(株) 宇宙開発室長	
折井 武	日本電気(株) 宇宙開発事業部総括部長	
アドバイザー	有賀 輝	科学技術庁宇宙政策課宇宙輸送研究調整官
	川本 武史	科学技術庁宇宙政策課調整係長

## ワーキンググループ

### 月の科学及び利用可能性の調査のための月探査ワーキンググループ

主査	水谷 仁	宇宙科学研究所教授	
副主査	岩田 勉	宇宙開発事業団軌道上システム研究室長	
委員	飯島 祐一	宇宙科学研究所COE研究室助手	
	大野 哲二	資源環境技術総合研究所地殻工学部研究官	
	古宇田亮一	地質調査所国際協力室主任研究官	
	佐々木 晶	東京大学理学部地質学研究室教授	
	佐々木 進	宇宙科学研究所助教授	
	武田 弘	千葉工業大学付属研究所教授	
	富樫 茂子	地質調査所地殻化学同位体地学課長	
	中澤 清	東京工業大学理学部月惑星科学科教授	
	オブザーバー	滝沢 悦貞	宇宙開発事業団主任開発部員

### 月からの観測（天文学パイロットミッション）ワーキンググループ

主査	海部 宣男	国立天文台教授
副主査	唐牛 宏	国立天文台教授
委員	稲谷 順司	国立天文台教授
	上野 宗孝	東京大学助手
	戎崎 俊一	理化学研究所主任研究員
	大橋 正健	国立天文台助手
	芝井 広	宇宙科学研究所助教授
	坪井 昌人	茨城大学理学部助教授
	西川 淳	国立天文台助手
	平林 久	宇宙科学研究所教授
	オブザーバー	滝沢 悦貞

## 月からのモニタリング（スペースガードや宇宙天気予報等）ワーキンググループ

主査	磯辺 瑋三	国立天文台助教授
副主査	富田二三彦	通信総合研究所宇宙環境研究室長
委員	巖本 巖	通信総合研究所宇宙科学部宇宙計測研究室長
	古宇田亮一	地質調査所主任研究官
	河野 毅	理化学研究所宇宙放射線研究室副主任研究員
	輿石 肇	航空宇宙技術研究所技術委員
	藤原 顯	宇宙科学研究所惑星研究系助教授
	松島 弘一	航空宇宙技術研究所室長
	森岡 昭	東北大学理学部教授
	吉川 真	通信総合研究所主任研究官
研究協力	高木 俊治	三菱総合研究所（株）
オブザーバー	青木 宏	宇宙開発事業団副主任開発部員

## 月面インフラワーキンググループ

主査	石澤 禎弘	宇宙開発事業団理事	
副主査	長島 隆一	宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室長	
委員	井尻 憲一	東京大学理学部アイト・プ総合センター教授	
	小川 修	東京大学工学部教授	
	木部勢至朗	航空宇宙技術研究所グループリーダー	
	鈴木 弘一	石川島播磨重工業（株）宇宙開発事業部 専門部長	
	鳥居 啓之	川崎重工業（株）宇宙開発部 課長代理	
	大石 晃嗣	清水建設（株）宇宙開発室 課長	
	金森 洋史	清水建設（株）宇宙開発室 課長	
	青木 滋	清水建設（株）宇宙開発室	
	高木 健二	清水建設（株）宇宙開発室	
	小林 秀生	大成建設（株）技術開発第一部 機械システム開発室課長	
	神喜 良二	東洋インテリソク（株）技術研究所 宇宙技術部副部長	
	辻 政俊	東洋インテリソク（株）プロジェクトマネージャー	
	小野寺利浩	（株）東芝宇宙プログラム担当主管	
	栗山 義雄	（株）東芝宇宙企画担当主管	
		（ 続 く ）	

四宮 康雄	(株) 東芝宇宙プログラム担当主管
足立 忠司	日産自動車(株) 宇宙航空事業部基盤技術部課長
吉井 実	日揮(株) 宇宙開発プロジェクト外部次長
田淵 光彦	日揮(株) 宇宙開発プロジェクト外部アシスタントプロジェクトマネージャ
小池 達也	日本電気(株) 宇宙開発事業本部主管技師長
市川 憲二	日本電気(株) 宇宙開発事業本部 担当部長
前田 利秀	(株) 日立製作所宇宙システム部技師 副参事
内山 隆	(株) 富士通研究所宇宙システム研究部長
駒田 聡	(株) 富士通研究所宇宙システム研究部 主任研究員
木原 弘毅	三菱重工業(株) 神戸造船所 電子・宇宙技術部主管
南 隆一	三菱重工業(株) 宇宙技術部 基礎設計課 主務
尾原 弘晃	三菱電機(株) 宇宙部宇宙機プロジェクトグループ
オブザーバー 板垣 春昭	宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室主任開発部員

# 概要

## I. 調査研究の目的

月面を拠点とする宇宙活動は、宇宙科学の発展に寄与するばかりではなく、人類の活動領域の拡大のための第一歩となるものである。その活動の可能性を検討するためには、月に関する科学的知見を蓄積し、月全体の体系的な探査が実施されることが必要であると考えられる。

宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会が平成6年7月にとりまとめた報告書「新世紀の宇宙時代の創造に向けて」においては、2000年初頭以降、科学探査及び月の利用可能性を目的とした体系的な無人月探査計画を実施すべきことを述べ、本年決定された宇宙開発政策大綱では第2章第1節（宇宙開発の重点活動）2項（宇宙科学及び月探査の推進）において「人類にとって身近な天体である月については、科学的知見の蓄積とともに利用の可能性を検討するため、その探査を進める」とされている。本調査は、宇宙開発政策大綱が示した方向に沿った月探査について前年度の調査結果を踏まえて月探査ミッションの具体化、重要技術の抽出、シナリオの検討を行った。検討に際して、関連領域から代表的な専門研究者に参加を求め、調査研究委員会を設け、更に調査研究委員会の下に「月の科学及び利用可能性の調査」、「月からの観測」、「月からのモニタリング」、「月面インフラストラクチャー」の4つのワーキンググループを設け具体的な検討を行った。

## II. 調査研究の結果概要

### 1) 基本的考え方

月探査を進めるにあたっては、長期にわたり段階的に探査活動を発展させていくことが必要である。本調査研究では、科学的意義が強調されるフェーズI、人類の活動圏の拡大が強調されるフェーズIIの2段階に分けて検討することが適当と考え、特に2000年代初頭から2015年までフェーズIに重点をおいて、実施が期待されるミッションを具体的に検討しシナリオを作成した。

フェーズIを支えるインフラストラクチャーの開発は、当然のことながら、将来の大規模な月面活動への準備の側面をも有する。フェーズIIについては国民的な合意の形成、必須となるであろう国際協力の枠組みなど格段に流動的な要素が多いが、ここでは有人活動の一つのイメージを与え、技術的な検討を深めて、フェーズIからのインフラストラクチャー構築の流れを示した。

フェーズI	2000年～2015年
フェーズII	2015年～2030年
	第1段階 昼間のみ滞在
	第2段階 常時滞在

## 2) 月探査に関する内外の動向

### A. 米国

- ・NASA は 1996 年 2 月「NASA 戦略計画」をまとめ、米国の航空宇宙プログラムに対する戦略的決定及びその方向を示した。月探査の方向は、人類の営みのための宇宙探査・利用・開発として位置づけられており、短・中期的には無人ミッションによる探査、2010～2020 年以降の長期的には月面基地での大型観測施設を含む有人による宇宙科学プログラムの実施を描いている。
- ・財政的に厳しい環境にある米国では低コストで効率的なミッションが求められており、1994 年に国防総省と NASA が共同で打ち上げた低コスト、小型月探査機クレメンタインは月面全域におよぶマッピングを行い、重要なデータを提供した。1997 年 10 月にはさらにルナープロスペクターが打ち上げられる予定である。

### B. ESA

- ・1995 年 10 月に ESA 閣僚会議に提出された「2000 年以降の欧州宇宙政策に関する報告書」では、ESA が月探査に積極的に取り組む姿勢を打ち出している。
- ・さらに、月探査計画は遠隔操作等の情報通信技術の発展により多くの人々に開放されるとともに、長期にわたって欧州の様々なハイテク分野における研究開発を促進するものであると位置づけている。具体的な探査構想として、月オービターミッション MORO が提案されていたが予算獲得には至っていない模様である。

### C. 中国及びロシア

- ・1995 年 1 月、中国科学院が 2000 年を目処に月周回衛星を打ち上げる構想を持っていると報じられ、中国も月探査を進めていることが明らかになってきている。宇宙活動を進めるためにスペースシャトルを睨んで有人往還機の開発計画も検討されている。
- ・ロシアとの協力も進んでおり、1996 年 4 月には中ロ共同宣言が調印される予定であり、宇宙を含めた科学技術開発の大規模プロジェクトの協力を推進するとしている。

### D. 日本

- ・平成 8 年の新宇宙開発政策大綱では、我が国でも体系的な月探査計画を実施することが方向づけられ、関係機関間の連携による検討が進められている。
- ・平成 9 年には、宇宙科学研究所の Lunar-A が M-V ロケットで打ち上げられる予定であり、月の内部構造に関するデータを収集する本格的科学探査を開始する。

## 3) 月探査・利用ミッション

### (1) 月の科学と利用可能性調査をめざして

#### ◆月科学の課題 - 第 3 世代を迎える月の科学

- ・月研究は、天文学的手法から地球科学手法へと発展。
- ・月誕生の謎に迫るにはもっと緻密な研究戦略が求められている。
- ・今後展開される第 3 世代の月科学は次の 3 ステップを踏むべきである。

第1ステップ：月表層の全球的な把握（月地質学の確立）

第2ステップ：月内部構造の大局的な把握（月内部構造学の確立）

第3ステップ：月の全球的な化学組成と鉱物形成年代の把握（月物質学と月年代学の確立） 本格的かつ、実証的な月起源論が展開可能となる。

- ・第3世代の月科学は、さらに進んで惑星系、太陽系の起源にも新たな展開をもたらす。

◆近未来の月探査と将来の月探査 - 科学探査と利用可能性調査

- ・平成9年に打ち上げられる我が国の Lunar-A ミッションは、ペネトレータにより月内部の地震学的データ、熱流量の測定を行い、月起源の解明に大きく貢献することが期待されると同時に、将来の月探査の高度化に向けたステップとなるものである。
- ・月のグローバルマッピング、月面ローバ探査、サンプルリターン等の諸ミッションを密接にリンクさせることにより効果的な探査を実現する。
- ・月資源利用や月面活動など将来の月面利用の可能性を想定し以下の月探査ミッションの検討を行った。観測データは、利用可能性検討にフィードバックされる。

①ネットワークサイエンス主体のミッション：

宇宙環境モニタリング、通信システム構築、エネルギー供給、有人居住等への利用

②ルナローバ主体のミッション：

物資輸送インフラ形成、通信システム構築、構造物建設、資源回収等への利用

③サンプルリターンミッション：

資源回収、物資製造、エネルギー供給、居住環境、ライフサイエンス等への利用

(2) 月からの宇宙観測

- ・月面からの宇宙観測は、短・中期的に見たときに必ずしも天文観測にとって理想郷ではないという点もあるが、長期的に見るとき極めて大きな可能性を秘めている。
- ・短・中期的段階においても、目的によっては月面からの観測には大きな魅力があり、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。
- ・短・中期的なミッションは、有人活動が期待出来る将来において軌道上では困難な長基線の干渉計等各種の大型アレイの展開など大きな可能性の展望をひらくためのステップとしても重要である。

「パイロットミッション」

第一段階（2010年頃まで）を想定し科学的に意義があり、かつ、将来の月面天文台へのステップとなる十分見込みのある小型計画として、以下のパイロットミッションの技術的・科学的検討を行った。

- ・月面小型光学・赤外線望遠鏡
- ・宇宙背景放射観測用月面電波望遠鏡
- ・赤外線観測望遠鏡ミッション

さらに、第二段階（2010年代）に想定されるテーマとして次のミッションを提案した。

- ・月面赤外線干渉計
- ・宇宙背景放射観測アレイ望遠鏡
- ・月面重力波望遠鏡
- ・低周波電波アレイ

これらのミッションを実現するための共通課題としては、①高緯度地方、できれば極地、裏面への設置（低周波電波アレイを除く）、②熱・放射線源の排除、③高い位置安定度・指向精度、④夜間観測への要求などがある。

### （3）月面からのモニタリング

#### A. 月面からの宇宙環境モニタリング

- ・地球周辺の宇宙環境や地上の生活にも大きな影響を及ぼす太陽活動を常に監視し、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。
- ・また、月面での各種活動を支えるためには、「その場」の放射線監視が必須である。
- ・長期間の連続的な宇宙環境モニタリングとして、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を行う。
- ・具体的なミッションとして、軽粒子／重粒子観測望遠鏡、月面からの磁気圏撮像、月面電波望遠鏡などが想定される。第一段階では衛星搭載の小型観測システムにより、月の利点を活かした科学観測が開始され、その後月面上の大型観測システムが展開される。

#### B. 地球衝突小惑星監視プロジェクト

- ・観測技術の高度化により、地球軌道の内部に入り込む近地球小惑星の発見数が飛躍的に増えている。これらの天体について正確に把握することが緊要である。
- ・地球に大災害を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年後の衝突を予測出来、衝突回避が可能になる。
- ・太陽方向から地球に接近する小惑星の検出には大気圏外からの天文学的手法による観測が不可欠であり、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。

- ・月面上観測施設としてランダー上面に搭載したツイン望遠鏡の検討を行った。
- ・地球に近づく小惑星は、物質的資源あるいは科学的な知的資源としての活用も同時に考えるべきである。
- ・現在、国際的な地上観測体制は徐々に構築されつつあるが、日本がこのような国際的ネットワークの構築に参加していくことが必要である。

#### (4) 月面インフラストラクチャー

##### 〔月面活動のイメージ〕

月面活動を無人での活動を行うフェーズⅠ（2000年～2015年）と有人活動を行うフェーズⅡ（2015年～2030年）に分けて各々のフェーズにおける活動のイメージを想定した。

さらにフェーズⅡについては、昼間のみ滞在とする第一段階と常時滞在する第二段階とに分けた。

##### A. 無人月面活動（フェーズⅠ）

- ・月の理解を目的とした科学探査ミッションが先行し、基礎データが収集されるとともに、月の環境利用ミッションが開始される。
- ・先ず、天文観測のパイロットミッションが実施され、その後、地球観測装置が設置されグローバルな地球観測が行われる。
- ・フェーズⅡの有人活動に先行して、ライフサイエンス基礎実験、月面物質から建築材料の製造、酸素の抽出等が無人実験され、データが収集される。
- ・月の理解が進むに従って、地球への資源供給を目的としたヘリウム3抽出等々のパイロット実験が実施されるようになる。

・フェーズⅠにおける代表的ミッションには以下のものが想定される。

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| ① 月周回衛星ミッション    | 月表面のグローバルマッピング     |
| ② 月面着陸ミッション     | 局所的な月表面の科学探査       |
| ③ 月面移動探査ミッション   | ローバーによる広域科学探査      |
| ④ サンプルリターンミッション | 月サンプルの地球への持ち帰り     |
| ⑤ 月面利用観測ミッション   | 小規模天文観測パイロットミッション  |
| ⑥ 無人実験ミッション     | 月からの地球モニタリングミッション等 |

## B. 有人月面活動（フェーズⅡ）

フェーズⅠで行われた実験や観測をより本格的に実施するため、様々なシステムが導入される。システムは、居住系、電力系、熱制御系、通信管制系、実験／観測系、運用系、輸送系に大別される。

**第一段階（昼間のみ滞在）：** 期間は初期の3年間とし、有人拠点システムが導入され、クルー3名が昼間の10日間滞在可能。比較的小型の装置を用いた居住モジュール内ライフサイエンス実験や屋外での観測、資源利用実験等が実施されるとともに、ロボットも導入され、運搬・設置作業等を補助する。

**第二段階（常時滞在）**： 第一段階のシステムを拡張し、最大5名のクルーが最大6ヶ月連続滞在可能となる。また、実験専用モジュールや食料生産／貯蔵モジュールが導入されるとともに、水やガスの再利用や食料の自給も徐々に行われる。酸素、ヘリウム3の採集に加えて建設材料の製造実験、与圧システムのレゴリスによる被覆作業の実施される。さらに月高緯度地方や裏側への活動範囲の拡大が図られる。

### <有人拠点システムの要素技術>

第Ⅱフェーズにおいて求められる以下の要素技術について技術的検討を行った。

- |              |                 |
|--------------|-----------------|
| ・有人サポートシステム  | ・資源加工パイロットプラント  |
| ・エネルギー供給システム | ・ロボット           |
| ・熱制御システム     | ・輸送システム         |
| ・通信システム      | ・ライフサイエンス実験システム |

### 4) 重要技術開発課題

フェーズⅠで想定される各ミッションについて、重要技術開発課題及び技術開発計画の検討を行った。共通する重要技術課題として、①輸送システムの確立、②エネルギー技術（効率化、長寿命化）、③通信技術（テレオペレーション、データ処理等）、④小型、軽量化、⑤熱制御（放熱及び夜間保温技術）等が挙げられる。特に、再使用型月輸送機や月離着陸機、ロボット等の開発には高度な新規技術の開発も含み、フェーズⅡに向けて基盤技術の確立・実証を段階的に進める必要がある。尚、各ミッションにおける重要技術課題については、本報告書表5.3.5（255頁～261頁）に示す通りである。

## 5) 月探査活動の展開に関するシナリオ

2000～2015年の間にまず月の本格的な科学的探査を行い、加えて月面からの天文観測および宇宙環境モニタリングのための萌芽的・先行的研究の実施するものとして具体的なシナリオの作成を試みた。これを支えるためのインフラストラクチャーの開発は将来の大規模な月面活動への準備の側面をも有し、期待される科学的成果とあわせて、このシナリオの価値を支えるものである。

シナリオの作成にあたっては、規模、予算、頻度等様々な与件を整理する必要があるが、ここでは、

「H-II Aを用いた6～7機のミッション」

という前提をアприオリに与えて、全てをこれに吸収させた。含意の一つは、国際協力は当然視野に入れることとして、我が国の主体的な実施ということである。

研究者層の育成を中心とする実施体制等解決すべき課題は多々あり、2015年までとしたことで先行して実施されたミッションからのフィードバックもかなり窮屈であるが、最大限の努力目標たりうるものとする。

2003年頃、月面着陸実験機を相乗りさせた月探査周回衛星を打ち上げ、月軌道上から月の観測ならびに月面軟着陸実験を実施する計画が進行中である。このミッションを通して、2000年初頭に、月面軟着陸技術ならびに月の裏側からの通信を可能とするデータリレー衛星技術が修得されるものとする。

上記の探査周回衛星を1号機とよぶとき以下の月ミッションを順次実施する。ただし、これらの時期や順番、相乗りの組み合わせ等は、技術の開発状況やミッション目的の見直し等に伴い変更されうるものである。

ペネトレータミッション／小型望遠鏡

月面ローバミッション

宇宙背景放射観測装置／宇宙環境監視装置

月面ローバ（親子方式）

中型赤外線望遠鏡／地球衝突小惑星監視装置

サンプルリターンミッション

## 2号機 (2005年) ペネトレータミッション/小型望遠鏡

地震計、熱流量計、VLBI電波源等を搭載したペネトレータ7台とランダー1台を組み合わせ、月面上に複数の観測点を設置し、月中心核、マントル、地殻等の月の内部構造を調査する。このようなネットワークを構築し、観測を行うことにより、月の進化と起源について鍵となる貴重なデータが得られる。ペネトレータは、既にLUNAR-Aで開発済みのものを使用することができる。ランダーは1号機で技術検証を行ったものをベースに、月面での電力供給、耐環境性等の点でより高機能化を図る。

本ミッションでは、ランダーを高緯度地方に着陸させる予定であるため、併せて非常に小型軽量の望遠鏡(口径30cm程度)をランダーに搭載し、天文観測の予備実験を行う。

## 3号機 (2007年) 月面ローバ

月の広域・直接探査のためにはローバが有効である。本ミッションを実施し、月の地形、地質、環境等の基礎データを取得することにより、これ以降に続くミッションをより確実に遂行することが可能になる。重量的に余裕がある場合は小型の天文観測ミッションまたは技術検証ミッションを相乗りさせる。

探査地点は、現時点では高地の多様性、マントルの不均一性を観測できることが期待されるSouth Pole Aitken盆地内または、月裏側の中緯度地域のクレータのいずれかの地域とし、CCDカメラ、蛍光X線分析装置等をローバに搭載し観測を実施する。

## 4号機 (2009年) 宇宙背景放射観測装置 / 宇宙環境監視装置

月天文台のパイロットミッションで、口径1.5m程度の高感度ミリ波アンテナを北極に近い高緯度地域(北緯80°)の月面に設置し、大気がなく安定して冷たい月環境を利用して、宇宙の背景放射のゆらぎを高精度で測定する。これにより宇宙がビッグバンから銀河を生みだし、恒星の宇宙へと進化した道筋を解明することができると期待される。重量に若干余裕がある場合は、小型宇宙環境監視装置を相乗りさせることも考えられる。なお、欧米での計画もあり、早期の実現が科学的意味からも重要である。

## 5号機 (2011年) 月面ローバ(親子方式)

2007年のローバ1号機をベースに、より高機能な親子方式のローバを開発し、大型ローバでは探査することが困難なクレータの壁などを含めた月面の調査を実施する。探査地域は、ローバ1号機で探索できなかったエリアが選択される。さらにローバに月面試料の長期保管機能を持たせ、後から到達するサンプルリターン機(2015年)に引き渡すことも検討する。なお、月探査周回衛星によるリモートセンシングやローバ1号機の探査結果等から、より詳細な試料分析が必要となった場合、本ミッションはサンプルリターンミッションに変更される可能性もある。

## 6号機（2013～2015年） 中型赤外線望遠鏡 / 地球衝突小惑星監視装置

月天文台のパイロットミッション No.2で、中口径赤外線望遠鏡により近傍銀河の赤外線撮像観測を行う。地上に比べてはるかに暗い部分まで効率よく観測できると予想され、銀河の構造の研究、形態分類、質量の定量等の分野に極めて質の高いデータを提供できるものと期待される。状況によっては小型赤外線干渉計の可能性もある。同時に小惑星監視ミッションや磁気圏観測ミッションを組み合わせることで、100m以上の地球近傍小惑星を検出することや地球周辺の宇宙環境監視も可能となる。また重量的に余裕がある場合は、将来の月面拠点建設に必要なインフレータブル構造等の縮小モデルを用いた技術検証ミッションを相乗りさせる。

## 7号機（2013～2015年） サンプルリターン

リモートセンシングやローバ探査では実施することのできない、精密な同位体分析や極微量分析等は、サンプルリターンミッションによってのみ可能である。サンプルリターン候補地は、この時期までに周回衛星やローバ探査等で、より興味深い地点（現在は South Pole Aitken 盆地や月裏側の pyroclastic な堆積物があるところが候補地である。）を決定し、試料を採取し、地球に持ち帰る。サンプルリターンは、唯一の地球帰還ミッションであり、ここで修得された技術は有人を前提とした将来の地球帰還技術に反映しうるものである。なお、2011年に打ち上げたローバが採取し月面上の定位置に保管しておいた試料を受け取り、地球に帰還させることができれば、1回のサンプルリターンミッションで、より広範囲の地域の試料の分析を実施することが可能となる。

以上のようなミッションで取得、確立された技術やデータは、将来の有人を含めた月面活動に必要な技術の基礎をなすものである。ここでは科学の側面を強調したが、状況によっては月面活動へ向けての技術実証のためのパイロット実験ミッションを8号機として実施することとなる。

## 6) 今後の課題

月探査を進めていくためには、関係研究機関の整備とともに全体的な研究推進体制を整備していくこと、質量備わった研究人材の確保、安定的な研究資金の確保、国際協力の具体的検討など重要な課題が残されている。また官民における技術蓄積も速やかに進めなければならない。また次代へ向けた宇宙探査・開発利用の国民的なコンセンサスを形成していくことはとくに重要である。

表1 月無人ミッションとインフラ技術

ミッション	取得データ、技術	月インフラ技術への反映
ペネトレータ	環境制御技術 月内部構造データ	月着陸機
ローバ	月面移動技術 遠隔操作技術 移動体熱制御技術 地形、地質、環境データ	月面車 月面作業ロボット 資源調査、利用
天文台	無人設置技術 遠隔操作技術 夜間電力供給技術	月面構造物 夜間大電力供給システム (本格的月天文台)
親子式ローバ	クレータ等の登坂技術 遠隔操作技術 試料採取、保管貯蔵技術	ローバとほぼ同じ
小惑星、宇宙環境 監視装置	天文台とほぼ同じ	天文台とほぼ同じ (スペースガードシステム、 宇宙天気予報システム)
サンプルリターン	試料採取、保管技術 地球帰還、再突入、回収技術	月輸送システム 月面作業ロボット 資源調査、利用

表2 月インフラ技術開発計画

月面での実験を必要とする重要技術  
JEM等による宇宙実験が必要な技術  
地上試験で確立できる技術

主要ミッション	クリティカルな 要素技術	技術開発フロー (▲ 打ち上げ; 同時期は相乗りを想定)					備考
		2000	2005	2010	2015 (将来システム)	2030	
月周回/着陸衛星	<ul style="list-style-type: none"> <li>月周回軌道投入技術</li> <li>衛星システム/追跡管制技術</li> <li>月面着陸技術</li> </ul>					1号機は月周回観測衛星、2号機は月ペネトレータクミミッションを想定 軟着陸、月面耐環境技術確立	
月面ローバ	<ul style="list-style-type: none"> <li>走行技術</li> <li>探査、制御技術</li> <li>移動体熱制御技術</li> </ul>					観測機器だけでなく分析装置も搭載する 平坦地走行だけでなく、がけをよじ登ったり、降りる機能 (孫ロボット使用等)が必要	
月サンプリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>試料採取技術</li> <li>地球帰還技術</li> </ul>					ローバが採取した試料を回収する可能性あり ダイレクトリターンかLEOで回収	
月面天文台	<ul style="list-style-type: none"> <li>天文台無人設置技術</li> <li>遠隔操作技術</li> <li>夜間の電力供給技術</li> </ul>					小口径望遠鏡で予備実験 必要電力100W、昼間は陽電池式冷却機使用、防振対策要、背景放射はミリ波帯観測	
月からのモニタリング	天文台とは同じ					小口径望遠鏡で予備実験、最終的に口径1mのツイン望遠鏡要	
システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>システム構築手順</li> <li>月面データへの応用</li> </ul>					放射線、地球磁気圏及び電波の観測で、現状の技術で実現可能 月面は無人ミッションで取得したデータが利用可能 最小限の機材の輸送と単純かつ短時間の有人作業によるシステム構築	
有人サポート	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境制御・生命維持技術</li> <li>宇宙服</li> </ul>					宇宙服の汚染防止、塵除去方法	
エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> <li>流化固体燃料電池</li> <li>太陽電池/エネルギー貯蔵技術</li> </ul>					月面における大型の太陽電池パネル設置方法 初期のエネルギー確保、非常用2次電池の重量大	
熱制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射面積可変型ラジエータ</li> <li>二相流体ループ</li> </ul>					機材の月面到着から拠点建設開始までの設置期間の熱保護方法	
通信	月の資源との交換手段					高週・大帯域通信、月周回観測衛星の成果を反映	
ロボット	<ul style="list-style-type: none"> <li>電力供給技術</li> <li>モジュール化技術</li> <li>ケーブル、耐熱技術</li> </ul>					無人のローバミッションの成果を反映 クレーン/運搬/月面車のロボット機能が必要 ロボット自身にある程度の重量が必要 (レゴリスをカウンタウエイトとして利用)	
資源加工実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>Or.Ule回収プロセス</li> <li>加熱炉本場型</li> </ul>					当面酸素製造実験が主体となる	
ライフS実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射線環境の応用</li> <li>生物試料輸送技術</li> </ul>					低重力環境下における人間科学と宇宙放射線の生体への影響がメインテーマ 月からのモニタリングの成果を活用	
輸送	<ul style="list-style-type: none"> <li>軌道上整備作業</li> <li>ロボット再使用技術</li> </ul>					2015年以降、可能な限り早い時期に再使用型月輸送システムを開発、運用開始する	

# APPENDIX

(各ミッションの概要)

## #1 ペネトレータミッション

月の起源と進化を探るためには、月の内部構造を詳細に解明することが必要である。このためには、科学観測ネットワークを月面に設置することが必要となる。これにより、月中心核の大きさや密度、月深部マンツルの地震波構造、月の表側と裏側の違いを含む地殻構造、重力異常、熱流値等、月の起源と進化について鍵となる貴重なデータが得られると考えられる。このようなネットワークを構築するには、既にLUNAR-Aで開発済みのペネトレータを利用することがもっとも技術的実現性が高く、さらに我が国の独自性という点からも適当と考えられる。

本ミッションは、7台のペネトレータとランダー1台により実施するものとした。月の裏側にペネトレータ4台、表側に3台設置し、このうち5台には地震計と熱流量計、2台には地震計とVLBI電波源を搭載する。ランダーには広帯域地震計、VLBI電波源を搭載するため、2003年打ち上げ予定の月面着陸実験機で習得した技術をさらに高度化（定点着陸、電力供給、月面環境下での長期間の作動等）する必要がある。ペネトレータは低温による電力制限のため低緯度地域に設置し、ランダーは高緯度地帯に軟着陸させる。

参考までにLUNAR-Aで使用されるペネトレータを図1に示す。

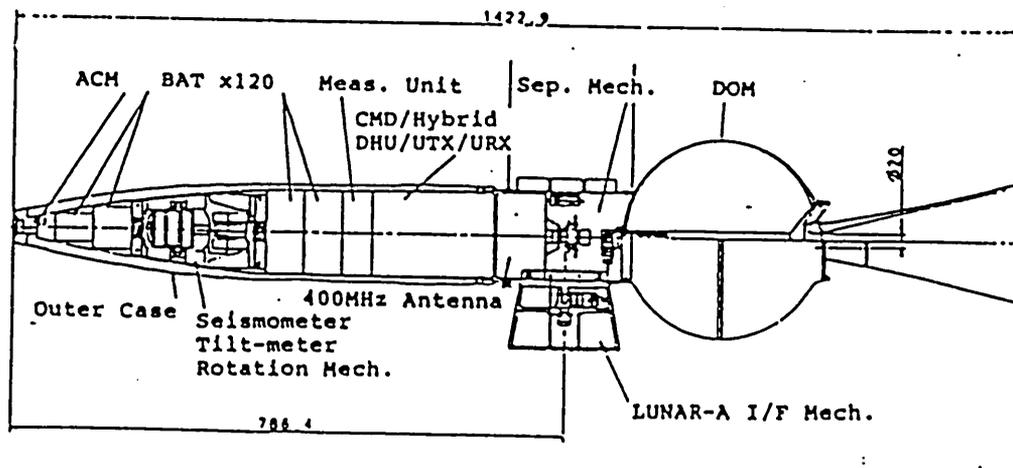


図1 ペネトレータモジュール (LUNAR-A)

## # 2 月面ローバミッション

月周回衛星による観測だけでなく、ローバを月におろし、より詳細な観測、探査を行うことは、科学面はもちろんのこと、将来の月資源利用に反映しうる基礎データを取得できる点からきわめて重要である。

さらに、ローバの探査により他の月着陸ミッションのための候補地等のより具体的なデータの取得が可能となる。

また、ローバを月面で運用すること自体が将来の月面車や有人活動支援ロボット等の開発につながる貴重な技術検証ミッションとなる。

ローバを月面各地に多数展開できればより短期間に広範囲の探査が可能となるが、数少ない打ち上げ機会からして1～2回が限度ではないかと考えられる。そのため走行能力や寿命は大きいことが望ましい。

実際の探査を行う前に技術検証用ローバを送り込むことが望まれるが、そのために貴重なフライト回数を減らすよりは、地上実験やシミュレーションを厳重に実施することにより対処すべきであろう。

ただし、他のミッションとの相乗りで小型、軽量のマイクロローバで技術検証実験を行う可能性はある。

図 2 はローバの一例であるが、全重量 500 Kg のうち観測機器等のミッション重量は約 60 Kg、走行距離は 100～1000 Km、平均走行速度 1 Km/hr、最大登坂角度 25°、発生電力 300 W、寿命 1 年を目標性能とし、分析等のミッションは原則として停止時に行うものとし、夜間は最小限の保温電力のみ使って冬眠状態とする。このようなローバの技術課題は夜間の保温といかに安全に走らせるかというナビゲーションが重要である。

寿命や信頼性要求によりローバの開発の難易度は変化するが、上記のようなローバは 2005～2007 年頃までには実現できると考えられる。

上記ローバは平坦地を長距離走行するのにむいているが、急傾斜の崖やクレータを登ったり降りたりすることは困難である。傾斜面等を探査するにはそのような機能のみを有した小型ローバを使用することにより実現できる可能性がある。

崖を登りはい降りることができる小型、単機能ローバを前述の親ローバに搭載し、親ローバが崖のふもとまで近づき、その後子ローバが親ローバの支援（電力、通信、監視、分析等）を得ながら崖をよじ登り、映像やサンプルを取得し、再び親ローバに戻るといった方式が採用できるかもしれない。

子ローバの重量は数 10 Kg 以内、移動距離も数 10～100 m 程度となろう。このような子ローバには歩行型のような新たな移動メカニズムが必要であり、重量だけでなく、親ローバとの組み合わせインタフェース上解決すべき技術課題が多いものの、開発は可能と考えられる。

ローバミッションは後述するサンプルリターンミッションと組み合わせることにより月探査の能力や精度を一層向上させうる可能性がある。

ローバに月面試料の採取、長期保管機能を持たせることにより、例えば1年間にわたりローバが移動する間、各地で興味ある試料を取得、保管しておき、後からフライトしてくれるサンプルリターン機に引き渡すことにより一回で、多くの場所のサンプルリターンミッションが可能となる。

このようなジョイントミッションを可能とするためには、ローバとサンプルリターン機の月面上におけるランデブー方式や試料の受け渡し機能等を明確にする必要がある。

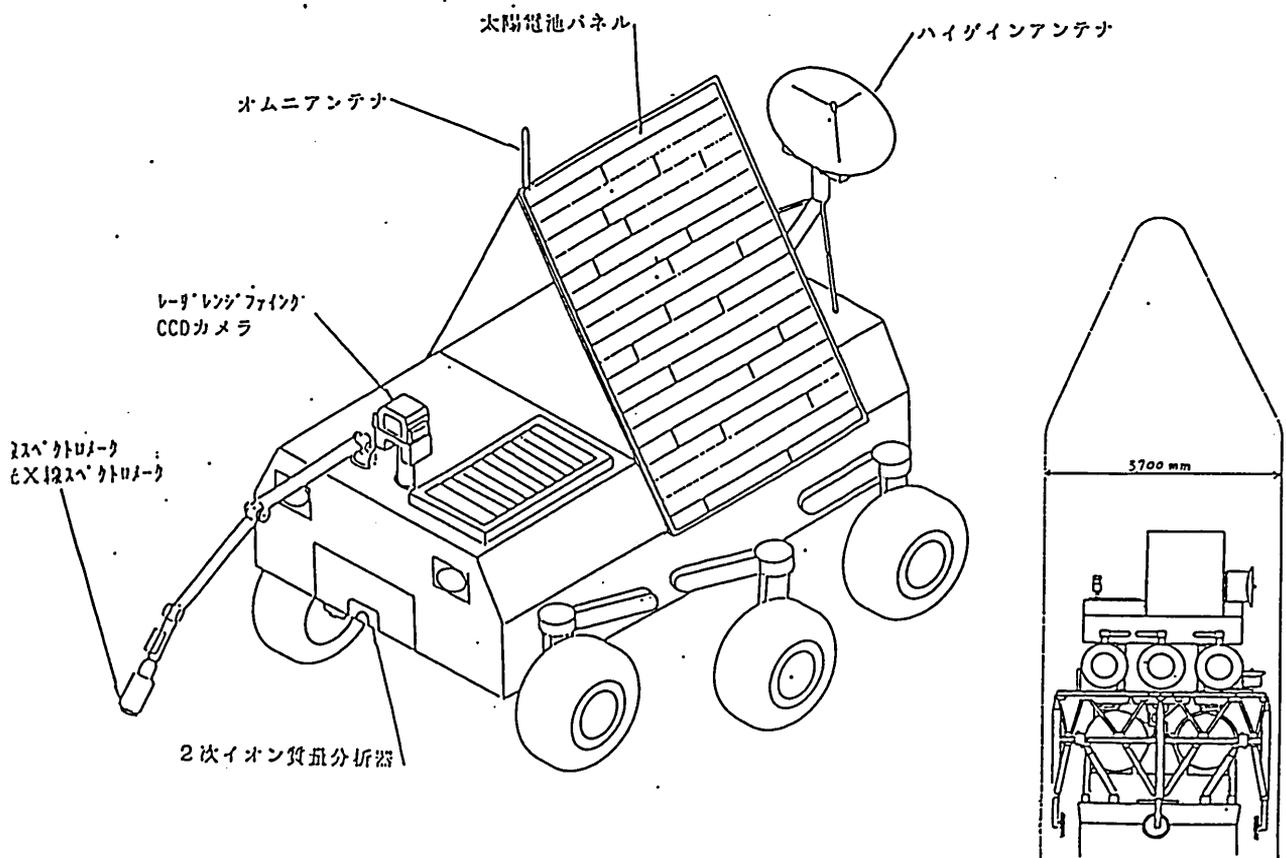


図2 月面ローバの構想（一例）

### #3 サンプルリターンミッション

サンプルリターンミッションを実施することによりリモートセンシングやローバでは困難な月面試料の詳細な分析、評価が可能となり、月探査上大きな意義がある。サンプルリターンには新たに地球帰還技術が必要で、これは有人を含む将来の月面活動に不可欠な技術である。

サンプルリターン機は帰還用燃料まで月に到達させなければならず、重量的に厳しい状態である。従って、サンプルリターン機に月表面を移動できるような機能を持たせることは難しく、着陸地点のごく近い周辺から試料を採取することになる。多数の離れた地点から採取したい場合は、ローバミッションと組み合わせるか、サンプルリターン自体を多数回実施することになる。

月面到着時のサンプルリターン機の重量は帰還用推薬を含めて約1.5 t（着陸・帰還船700 Kg、サンプラー50 Kg）、このうちランダーの空になったタンク、一部電子機器、サンプリング機構、着陸脚等のランダ構体の一部は月に残し（500 Kg）、残りの約1 t（うち推薬700 Kg）が月面から離陸する。帰還船が地球軌道に到達すると試料2 Kgを納めたカプセル（50 Kg）が分離され、最終的にこのカプセルのみが再突入し回収される。

このようなサンプルリターン構想案の1つを 図3 に示す。

以上のようなサンプルリターンミッションは月面での試料採取、離陸、再突入カプセルの回収等の点で技術課題があるものの、ある程度の期間（8～10年程度）があれば十分開発可能と考えられる。

もし、エンジンをNTO（四酸化二窒素）/N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>（ヒドラジン）からLOX/LH<sub>2</sub>に変更できれば、月面到着重量を約2 tまで向上させることができる。月面からの帰還方式としても、ダイレクトリターンより月軌道上で地球帰還船が待機する方式の方がランデブー・ドッキングが必要になるものの、推薬上有利になる。

なお、サンプルリターンミッションは月試料を地球に持ち帰るということから、資料の受入、保管、分配、分析・試験等の地上側体制、施設の整備が必要になると考えられる。



#### #4 月面天文台パイロットミッション

月の低雑音、日陰状態における低音、大気がない、ゆっくりとした月周運動、地面が存在するといった月特有の環境を利用した天文観測は人類の宇宙理解に新たな可能性をひらくもので、例えば長基線干渉計等は月面のみで可能で、将来これらが実現すると現在の宇宙像が一新される可能性さえある。

このような本格的な月天文台の設置に先立って、以下に述べるような小型、無人のパイロットミッションを打ち上げることは、それ自体科学的に意義があるだけでなく、将来の展開のための第一ステップとして、あるいは月面活動のための基礎技術開発として重要である。

##### (1) 宇宙背景放射観測装置

極地に近い高緯度地方(85°)に口径1.5m程度のミリ波受信用パラボラアンテナを設置し、宇宙の背景放射を高精度で測定することにより、宇宙がビッグバン(混沌)から銀河(秩序)へと進化した道筋を解明する。

観測装置は、アンテナ本体、放射シールド、受信機、データ処理・通信系からなり、ミリ波帯の3バンドを使用し、通信量は50~100Kbps、受信器検出部はスターリングクーラにより50K程度に冷却する必要がある。

アンテナは1軸制御で月の自転ごとに仰角を変えればよく(数ヵ月おき)、天体追尾は不要である。図4にこのミッションのイメージを示す。

重量的にはアンテナ100Kg、受信器50Kg、データ処理・通信系45Kg、シールド50Kgで、トータル250Kg程度となる見込みである。必要電力は100W以内(アンテナ5W、受信器45W、データ処理・通信系20W)である。

放射シールドは月に着陸後展開する方式を考える必要があるが、技術的には可能である。高精度のアンテナ追尾・駆動メカニズムは不要なので、この点も問題ない。ただし、着陸時のランダーの姿勢、方向をミッション側要求通りにできない場合が予想されるため、ランダー脚または観測装置自身に姿勢、方向可変メカニズムが必要となる。さらにランダーあるいは観測装置に機械的稼働部(常時)がある場合は、防振メカニズムを組み込む必要があるかもしれない。

最大の問題は夜間の電力供給である。14日間にわたる月の夜をバッテリー(NiH<sub>2</sub>)で対応すると、バッテリーシステムの重量だけで660Kgとなり、本観測装置をランダーに搭載することは難しい。これに対して、再生型燃料電池システムを搭載すると約320Kgとなり、ミッションはおよそ500Kgをわりあてることができ、重量的には本観測装置に加えてさらに250Kgのペイロードが搭載可能となる。もっとも、宇宙背景放射観測装置は寸法的にかなり大きいため、相乗りペイロードは小さな形状でないと難しそうである。

(2) 小型赤外線望遠鏡

40 cm程度の小口径赤外線望遠鏡を月の高緯度地方に設置し、近傍銀河の近赤外線撮像観測を行って、地上に比べてはるかに暗い部分まで効率よく観測することにより銀河の研究に寄与する。

重量、必要電力、概略寸法、設置・追尾精度、通信容量等はTBD

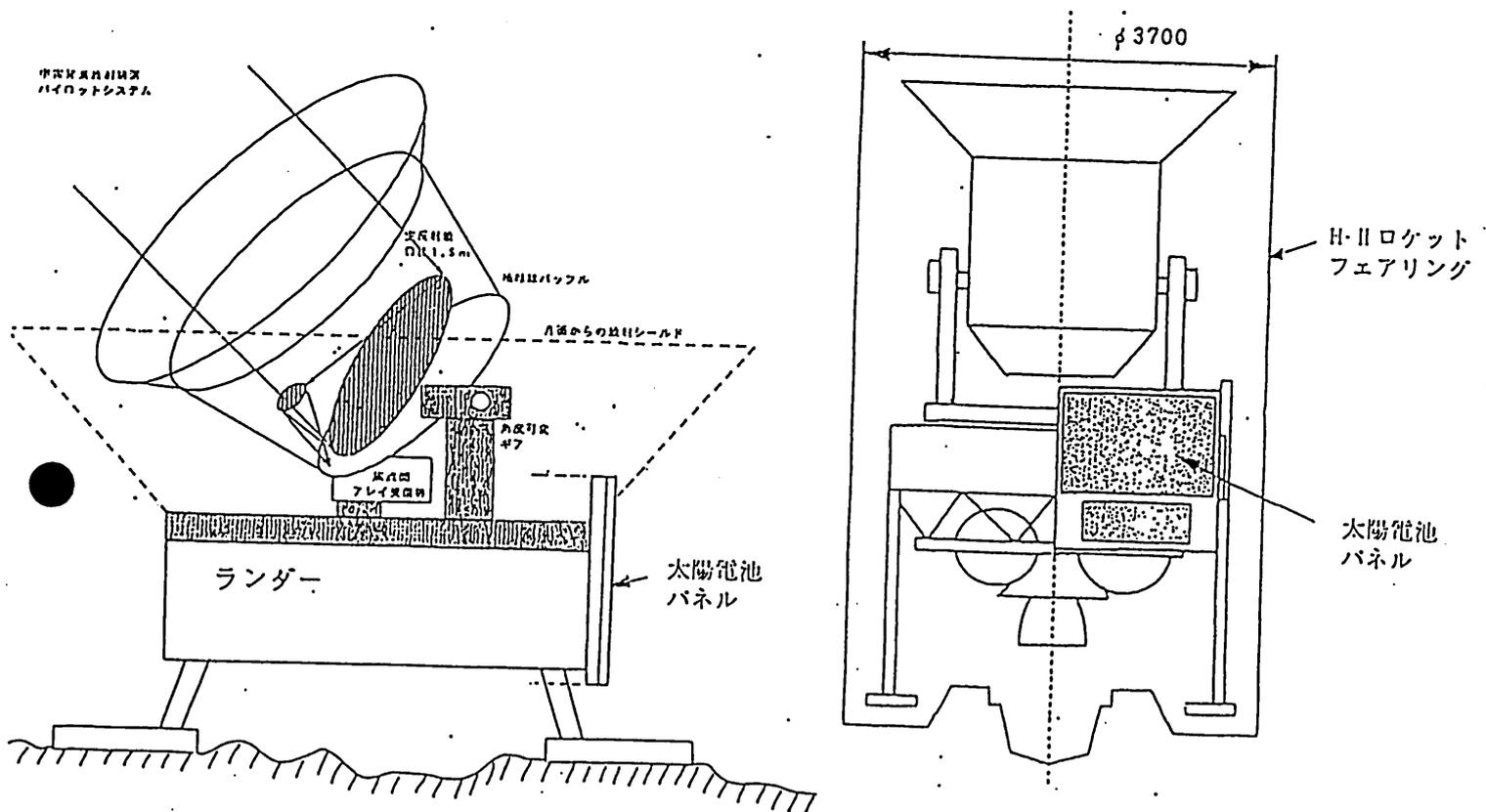


図4 天文台パイロットミッションの例

## # 5 宇宙環境監視／地球衝突小惑星監視ミッション

太陽フレア等の太陽活動は、地球の高層大気や磁気圏に影響を及ぼし、通信の障害、途絶、遠距離送電線への地磁気誘導など地上の生活に悪影響を与えると同時に、宇宙空間においても衛星の寿命劣化や放電事故、放射線障害等の原因となり、さらに宇宙で活動する人体に対しても重大な悪影響を与えると予測される。このため太陽活動や地球近傍の宇宙環境を常時監視し、異常事態に警報を発する体制を整える。

月はその半面を常に地球に向けているため、地球及びその周辺を広い視野で、長期間連続して監視するにはきわめて適している。

また、口径0.5～1 m程度の望遠鏡を月面に設置し、地球近傍小惑星を検出することにより、地球衝突小惑星の監視、回避が可能になると考えられる。ただし全ての小惑星を検出するには最終的に数十台の望遠鏡が必要となり、これは次のフェーズの、おそらくは国際共同ミッションになると考えられる。従って当面は、1台の望遠鏡で比較的大きな小惑星のみ監視しつつ、小惑星監視技術を確立する。

### (1) 宇宙環境監視装置

放射線測定、地球磁気圏の紫外線撮像、太陽・惑星圏の電波監視（とくに低周波の観測）を実施する。将来的には大規模なアンテナシステム等を整備することとなるが、書記のミッションは将来から実績がある小型の観測機器をそのまま、または若干の改良を加えることにより比較的容易に実現可能（フライトモデル製作まで約5年間）と考えられる。具体的には以下のような観測機器を打ち上げることになるが、これらは監視という目的以外に科学的意義も大きい。とくに地球磁気圏の撮像観測は世界的にも初の試みとなる。

#### 粒子測定装置

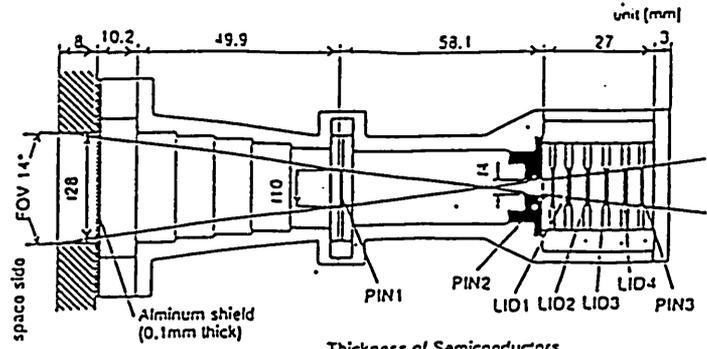
軽粒子 : シリコン半導体検出器を用いた互いに直角方向に視野を持つ2組の望遠鏡  
重量8 K g、消費電力10 W

重粒子 : 2次元位置検出器とPIN型検出器を組み合わせた望遠鏡  
重量15 K g、消費電力20 W

#### 地球磁気圏観測装置

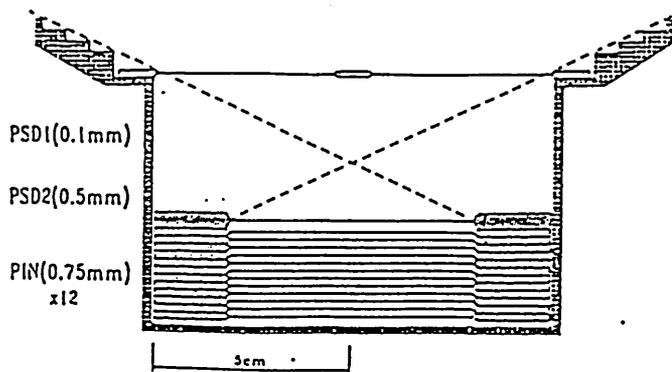
極端紫外線検出器を用いた口径、焦点距離ともに数10 cmの反射望遠鏡  
重量10 K g、消費電力30 W

これらの装置の概略を 図5 に示す。

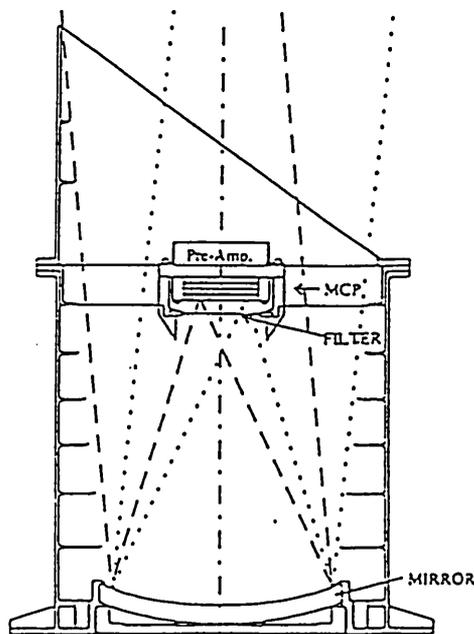


Thickness of Semiconductors  
 • PIN-type Semiconductors = 0.2mm (PIN1, PIN2, PIN3)  
 • Li-Drift Semiconductors = 3mm (LID1, LID2, LID3, LID4)

轻粒子望远镜



重粒子望远镜



地球磁気圏観測装置

图5 宇宙環境監視装置

## (2) 地球衝突小惑星監視装置

駆動操作をできるだけ少なくし、かつ月の自転による星像移動により数時間で次々に同じ星野を観測するため、 $2^{\circ}$  程度離れた方向に向けた CCD 受光器付き望遠鏡（口径 35 cm）2 台を月面に設置する。

緯度方向のみ可動とする案もあるが、ランダーの着地方向や姿勢が厳密でないため、架台は経緯儀式にせざるをえない。

重量は望遠鏡 100 Kg、コントローラ 100 Kg の計 200 Kg であるが、必要電力は CCD 100 W、駆動系 200 W で計 300 W となる。

もし夜間常時 300 W 消費する場合は本ミッションは重量的に成立しない。燃料電池重量だけでランダーのペイロード重量を占めてしまう。夜間は例えば望遠鏡の駆動を止めて観測するならば、消費電力は 100 W となり実現の可能性は高くなる。この場合さらに約 300 Kg の相乗りミッションが可能となる。ただし夜間の電力は 100 W をシェアして利用するなどの運輸上の工夫が必要となる。

このような場合の本装置の構想案を 図 6 に示す。

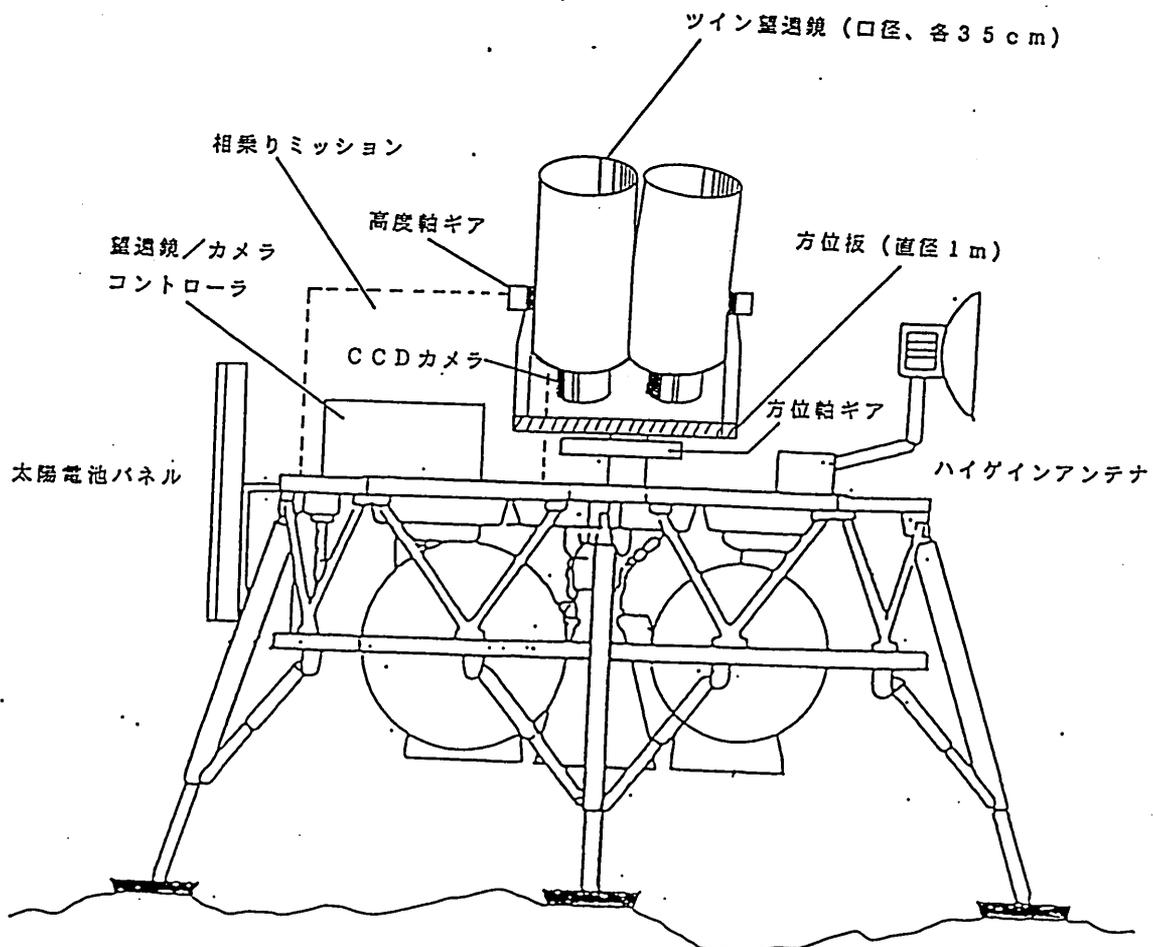


図 6 地球衝突小惑星監視装置の構想

報告書の著作権は、科学技術庁にありますので、  
無断転載を禁止します。

月探査に関する調査研究（その2）報告書（概要）

平成8年3月

財団法人 未来工学研究所

〒135 東京都江東区深川 2-6-11 富岡橋ビル

TEL:03-5245-1012 FAX:03-5245-1061

07-01-07

平成7年度 科学技術庁委託

# 月探査に関する調査研究(その2) 報告書

平成8年3月



財団法人 未来工学研究所

THE INSTITUTE FOR FUTURE TECHNOLOGY

## まえがき

本報告書は、平成7年度に財団法人未来工学研究所が科学技術庁から委託を受けた「月探査に関する調査研究(その2)」の調査結果を取りまとめたものである。

H-II ロケットに表わされる様に、我が国が蓄積してきた無人を中心とした宇宙開発技術は今や欧米と肩をならべるに至った。この様な高度な技術を最大限活用し、新たな宇宙開発の領域を切り開いていくことは、21世紀を目前に控えた人類社会の更なる発展にも貢献する重要な活動である。

1994年に打ち上げられた米国の月探査機クレメンタインは、月のグローバルなマッピングを行い、未だ解明に至らない月の起源等一層の探査の必要性を示すとともに、月の利用の可能性を示唆する数々のデータを提供した。しかし、月探査は一国で実施するには限りが有り、利用を想定する場合国際的な協力が不可欠である。かかる観点から、我が国でも我が国の特色を活かした月探査の必要性が専門家の中で検討され、平成6年7月に宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会が報告書「新世紀の宇宙時代の創造に向けて」をまとめ、2000年初頭以降、科学探査及び月の利用可能性調査を目的とした体系的な無人月探査計画を実施すべきとの方向が打ち出された。これを受けて昨年度調査では、長期ビジョン懇談会が示した方向に沿って長期的視点から月探査探査及び月利用可能性を検討するため「月探査に関する調査研究」を実施した。平成8年1月には宇宙開発政策大綱が改定され、我が国の月探査の方向として、段階的な月周回観測や月面着陸探査を始めとした体系的な無人探査計画を進めることが明確に示されるとともに、国際協力による月面天文台などへの発展に備えて、着実に技術の蓄積と高度化を図ることが示された。

このような我が国の宇宙開発の新たな目標の実現を目指す具体的な検討を行うため、本年度調査では、前年度の調査結果を踏まえて月探査ミッションの具体化、重要技術の抽出、シナリオについての検討を行った。検討に際しては、関連領域から代表的な専門研究者に参加を求め、調査研究委員会を設けて全体的な検討を行うとともに、調査研究委員会に更に「月の科学及び利用可能性の調査のための月探査W/G」(主査:水谷仁宇宙科学研究所教授)、「月からの観測W/G」(主査:海部宣男国立天文台教授)、「月からのモニタリングW/G」(主査:磯部 瑋 三国立天文台助教授)、「月面インフラW/G」(主査:石澤禎弘宇宙開発事業団理事)を設け専門的な視点から調査研究の具体化を図った。ここに、昨年度に引き続き委員会主査を努めて頂いた松尾弘毅宇宙科学研究所教授並びに各W/G主査を勤めていただいた諸先生、そして本調査研究にご指導、ご協力頂いた多くの方々に感謝の意を表するものである。

平成8年3月

財団法人 未来工学研究所  
所長 細田 彰

## 概要

### I. 調査研究の目的

月面を拠点とする宇宙活動は、宇宙科学の発展に寄与するばかりではなく、人類の活動領域の拡大のための第一歩となるものである。その活動の可能性を検討するためには、月に関する科学的知見を蓄積し、月全体の体系的な探査が実施されることが必要であると考えられる。

宇宙開発委員会長期ビジョン懇談会が平成6年7月にとりまとめた報告書「新世紀の宇宙時代の創造に向けて」においては、2000年初頭以降、科学探査及び月の利用可能性を目的とした体系的な無人月探査計画を実施すべきことを述べ、本年決定された宇宙政策大綱では第2章第1節（宇宙開発の重点活動）2項（宇宙科学及び月探査の推進）において「人類にとって身近な天体である月については、科学的知見の蓄積とともに利用の可能性を検討するため、その探査を進める」とされている。本調査は、宇宙開発政策大綱が示した方向に沿った月探査について前年度の調査結果を踏まえて月探査ミッションの具体化、重要技術の抽出、シナリオの検討を行った。検討に際して、関連領域から代表的な専門研究者に参加を求め、調査研究委員会を設け、更に調査研究委員会の下に「月の科学及び利用可能性の調査」、「月からの観測」、「月からのモニタリング」、「月面インフラストラクチャー」の4つのワーキンググループを設け具体的な検討を行った。

### II. 調査研究の結果概要

#### 1) 基本的考え方

月探査を進めるにあたっては、長期にわたり段階的に探査活動を発展させていくことが必要である。本調査研究では、科学的意義が強調されるフェーズⅠ、人類の活動圏の拡大が強調されるフェーズⅡの2段階に分けて検討することが適当と考え、特に2000年代初頭から2015年までフェーズⅠに重点をおいて、実施が期待されるミッションを具体的に検討しシナリオを作成した。

フェーズⅠを支えるインフラストラクチャーの開発は、当然のことながら、将来の大規模な月面活動への準備の側面をも有する。フェーズⅡについては国民的な合意の形成、必須となるであろう国際協力の枠組みなど格段に流動的な要素が多いが、ここでは有人活動の一つのイメージを与え、技術的な検討を深めて、フェーズⅠからのインフラストラクチャー構築の流れを示した。

フェーズⅠ	2000年～2015年
フェーズⅡ	2015年～2030年
	第1段階 昼間のみ滞在
	第2段階 常時滞在

## 2) 月探査に関する内外の動向

### A. 米国

・NASAは1996年2月「NASA戦略計画」をまとめ、米国の航空宇宙プログラムに対する戦略的決定及びその方向を示した。月探査の方向は、人類の営みのための宇宙探査・利用・開発として位置づけられており、短・中期的には無人ミッションによる探査、2010～2020年以降の長期的には月面基地での大型観測施設を含む有人による宇宙科学プログラムの実施を描いている。

・財政的に厳しい環境にある米国では低コストで効率的なミッションが求められており、1994年に国防総省とNASAが共同で打ち上げた低コスト、小型月探査機クレメンタインは月面全域におよぶマッピングを行い、重要なデータを提供した。1997年10月にはさらにルナープロスペクターが打ち上げられる予定である。

### B. ESA

・1995年10月にESA閣僚会議に提出された「2000年以降の欧州宇宙政策に関する報告書」では、ESAが月探査に積極的に取り組む姿勢を打ち出している。

・さらに、月探査計画は遠隔操作等の情報通信技術の発展により多くの人々に開放されるとともに、長期にわたって欧州の様々なハイテク分野における研究開発を促進するものであると位置づけている。具体的な探査構想として、月オービターミッションMOROが提案されていたが予算獲得には至っていない模様である。

### C. 中国及びロシア

・1995年1月、中国科学院が2000年を目処に月周回衛星を打ち上げる構想を持っていると報じられ、中国も月探査を進めていることが明らかになってきている。宇宙活動を進めるためにスペースシャトルを睨んで有人往還機の開発計画も検討されている。

・ロシアとの協力も進んでおり、1996年4月には中ロ共同宣言が調印される予定であり、宇宙を含めた科学技術開発の大規模プロジェクトの協力を推進するとしている。

### D. 日本

・平成8年の新宇宙開発政策大綱では、我が国でも体系的な月探査計画を実施することが方向づけられ、関係機関間の連携による検討が進められている。

・平成9年には、宇宙科学研究所のLunar-AがM-Vロケットで打ち上げられる予定であり、月の内部構造に関するデータを収集する本格的科学探査を開始する。

## 3) 月探査・利用ミッション

### (1) 月の科学と利用可能性調査をめざして

- ◆月科学の課題 - 第3世代を迎える月の科学
- ・月研究は、天文学的手法から地球科学手法へと発展。
  - ・月誕生の謎に迫るにはもっと緻密な研究戦略が求められている。
  - ・今後展開される第3世代の月科学は次の3ステップを踏むべきである。

第1ステップ: 月表層の全球的な把握 (月地質学の確立)

第2ステップ: 月内部構造の大局的な把握 (月内部構造学の確立)

第3ステップ: 月の全球的な化学組成と鉱物形成年代の把握 (月物質学と月年代学の確立) 本格的かつ、実証的な月起源論が展開可能となる。

・第3世代の月科学は、さらに進んで惑星系、太陽系の起源にも新たな展開をもたらす。

### ◆近未来の月探査と将来の月探査 - 科学探査と利用可能性調査

- ・平成9年に打ち上げられる我が国のLunar-Aミッションは、ペネトレータにより月内部の地震学的データ、熱流量の測定を行い、月起源の解明に大きく貢献することが期待されると同時に、将来の月探査の高度化に向けたステップとなるものである。
- ・月のグローバルマッピング、月面ローバ探査、サンプルリターン等の諸ミッションを密接にリンクさせることにより効果的な探査を実現する。
- ・月資源利用や月面活動など将来の月面利用の可能性を想定し以下の月探査ミッションの検討を行った。観測データは、利用可能性検討にフィードバックされる。

#### ①ネットワークサイエンス主体のミッション:

宇宙環境モニタリング、通信システム構築、エネルギー供給、有人居住等への利用

#### ②ルナローバ主体のミッション:

物資輸送インフラ形成、通信システム構築、構造物建設、資源回収等への利用

#### ③サンプルリターンミッション:

資源回収、物資製造、エネルギー供給、居住環境、ライフサイエンス等への利用

### (2) 月からの宇宙観測

- ・月面からの宇宙観測は、短・中期的に見たときに必ずしも天文観測にとって理想郷ではないという点もあるが、長期的に見るとき極めて大きな可能性を秘めている。
- ・短・中期的段階においても、目的によっては月面からの観測には大きな魅力があり、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。
- ・短・中期的なミッションは、有人活動が期待出来る将来において軌道上では困難な長基線の干渉計等各種の大型アレイの展開など大きな可能性の展望をひらくためのステップとしても重要である。

### 「パイロットミッション」

第一段階 (2010年頃まで) を想定し科学的に意義があり、かつ、将来の月面天文台へのステップとなる十分見込みのある小型計画として、以下のパイロットミッションの技術的・科学的検討を行った。

- ・月面小型光学・赤外線望遠鏡
- ・宇宙背景放射観測用月面電波望遠鏡
- ・赤外線観測望遠鏡ミッション

さらに、第二段階（2010年代）に想定されるテーマとして次のミッションを提案した。

- ・月面赤外線干渉計
- ・宇宙背景放射観測アレイ望遠鏡
- ・月面重力波望遠鏡
- ・低周波電波アレイ

これらのミッションを実現するための共通課題としては、①高緯度地方、できれば極地、裏面への設置（低周波電波アレイを除く）、②熱・放射線源の排除、③高い位置安定度・指向精度、④夜間観測への要求などがある。

### (3) 月面からのモニタリング

#### A. 月面からの宇宙環境モニタリング

- ・地球周辺の宇宙環境や地上の生活にも大きな影響を及ぼす太陽活動を常に監視し、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。
- ・また、月面での各種活動を支えるためには、「その場」の放射線監視が必須である。
- ・長期間の連続的な宇宙環境モニタリングとして、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を行う。
- ・具体的なミッションとして、軽粒子／重粒子観測望遠鏡、月面からの磁気圏撮像、月面電波望遠鏡などが想定される。第一段階では衛星搭載の小型観測システムにより、月の利点を活かした科学観測が開始され、その後月面上の大型観測システムが展開される。

#### B. 地球衝突小惑星監視プロジェクト

- ・観測技術の高度化により、地球軌道の内部に入り込む近地球小惑星の発見数が飛躍的に増えている。これらの天体について正確に把握することが緊要である。
- ・地球に大災害を起し得る地球近傍小惑星の軌道を全て決めてしまえば、100年後の衝突を予測出来、衝突回避が可能になる。
- ・太陽方向から地球に接近する小惑星の検出には大気圏外からの天文学的手法による観測が不可欠であり、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。

- ・月面上観測施設としてランダー上面に搭載したツイン望遠鏡の検討を行った。
- ・地球に近づく小惑星は、物質的資源あるいは科学的な知的資源としての活用も同時に考えるべきである。
- ・現在、国際的な地上観測体制は徐々に構築されつつあるが、日本がこのような国際的ネットワークの構築に参加していくことが必要である。

### (4) 月面インフラストラクチャー

#### 〔月面活動のイメージ〕

月面活動を無人での活動を行うフェーズⅠ（2000年～2015年）と有人活動を行うフェーズⅡ（2015年～2030年）に分けて各々のフェーズにおける活動のイメージを想定した。

さらにフェーズⅡについては、昼間のみ滞在とする第一段階と常時滞在する第二段階とに分けた。

#### A. 無人月面活動（フェーズⅠ）

- ・月の理解を目的とした科学探査ミッションが先行し、基礎データが収集されるとともに、月の環境利用ミッションが開始される。
- ・先ず、天文観測のパイロットミッションが実施され、その後、地球観測装置が設置されグローバルな地球観測が行われる。
- ・フェーズⅡの有人活動に先行して、ライフサイエンス基礎実験、月面物質から建築材料の製造、酸素の抽出等が無人実験され、データが収集される。
- ・月の理解が進むに従って、地球への資源供給を目的としたヘリウム3抽出等々のパイロット実験が実施されるようになる。

・フェーズⅠにおける代表的ミッションには以下のものが想定される。

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| ① 月周回衛星ミッション    | 月表面のグローバルマッピング     |
| ② 月面着陸ミッション     | 局所的な月表面の科学探査       |
| ③ 月面移動探査ミッション   | ローバーによる広域科学探査      |
| ④ サンプルリターンミッション | 月サンプルの地球への持ち帰り     |
| ⑤ 月面利用観測ミッション   | 小規模天文観測パイロットミッション  |
| ⑥ 無人実験ミッション     | 月からの地球モニタリングミッション等 |

## B. 有人月面活動（フェーズⅡ）

フェーズⅠで行われた実験や観測をより本格的に実施するため、様々なシステムが導入される。システムは、居住系、電力系、熱制御系、通信管制系、実験／観測系、運用系、輸送系に大別される。

**第一段階（昼間のみ滞在）：** 期間は初期の3年間とし、有人拠点システムが導入され、クルー3名が昼間の10日間滞在可能。比較的小型の装置を用いた居住モジュール内ライフサイエンス実験や屋外での観測、資源利用実験等が実施されるとともに、ロボットも導入され、運搬・設置作業等を補助する。

**第二段階（常時滞在）：** 第一段階のシステムを拡張し、最大5名のクルーが最大6ヶ月連続滞在可能となる。また、実験専用モジュールや食料生産／貯蔵モジュールが導入されるとともに、水やガスの再利用や食料の自給も徐々に行われる。酸素、ヘリウム3の採集に加えて建設材料の製造実験、与圧システムのレゴリスによる被覆作業の実施される。さらに月高緯度地方や裏側への活動範囲の拡大が図られる。

### <有人拠点システムの要素技術>

第Ⅱフェーズにおいて求められる以下の要素技術について技術的検討を行った。

- |              |                 |
|--------------|-----------------|
| ・有人サポートシステム  | ・資源加工パイロットプラント  |
| ・エネルギー供給システム | ・ロボット           |
| ・熱制御システム     | ・輸送システム         |
| ・通信システム      | ・ライフサイエンス実験システム |

## 4) 重要技術開発課題

フェーズⅠで想定される各ミッションについて、重要技術開発課題及び技術開発計画の検討を行った。共通する重要技術課題として、①輸送システムの確立、②エネルギー技術（効率化、長寿命化）、③通信技術（テレオペレーション、データ処理等）、④小型、軽量化、⑤熱制御（放熱及び夜間保温技術）等が挙げられる。特に、再使用型月輸送機や月離着陸機、ロボット等の開発には高度な新規技術の開発も含み、フェーズⅡに向けて基盤技術の確立・実証を段階的に進める必要がある。尚、各ミッションにおける重要技術課題については、本報告書表5.3.5（255頁～261頁）に示す通りである。

## 5) 月探査活動の展開に関するシナリオ

2000～2015年の間にまず月の本格的な科学的探査を行い、加えて月面からの天文観測および宇宙環境モニタリングのための萌芽的・先行的研究の実施するものとして具体的なシナリオの作成を試みた。これを支えるためのインフラストラクチャーの開発は将来の大規模な月面活動への準備の側面をも有し、期待される科学的成果とあわせて、このシナリオの価値を支えるものである。

シナリオの作成にあたっては、規模、予算、頻度等様々な与件を整理する必要があるが、ここでは、

「H-ⅡAを用いた6～7機のミッション」

という前提をアприオリに与えて、全てをこれに吸収させた。含意の一つは、国際協力は当然視野に入れることとして、我が国の主体的な実施ということである。

研究者層の育成を中心とする実施体制等解決すべき課題は多々あり、2015年までとしたことで先行して実施されたミッションからのフィードバックもかなり窮屈であるが、最大限の努力目標たりうるものとする。

2003年頃、月面着陸実験機を相乗りさせた月探査周回衛星を打ち上げ、月軌道上から月の観測ならびに月面軟着陸実験を実施する計画が進行中である。このミッションを通して、2000年初頭に、月面軟着陸技術ならびに月の裏側からの通信を可能とするデータリレー衛星技術が修得されるものとする。

上記の探査周回衛星を1号機とよぶとき以下の月ミッションを順次実施する。ただし、これらの時期や順番、相乗りの組み合わせ等は、技術の開発状況やミッション目的の見直し等に伴い変更されうるものである。

- ペネトレータミッション／小型望遠鏡
- 月面ローバミッション
- 宇宙背景放射観測装置／宇宙環境監視装置
- 月面ローバ（親子方式）
- 中型赤外線望遠鏡／地球衝突小惑星監視装置
- サンプルリターンミッション

## 2号機(2005年) ペネトレータミッション/小型望遠鏡

地震計、熱流量計、VLBI電波源等を搭載したペネトレータ7台とランダー1台を組み合わせ、月面上に複数の観測点を設置し、月中心核、マントル、地殻等の月の内部構造を調査する。このようなネットワークを構築し、観測を行うことにより、月の進化と起源について鍵となる貴重なデータが得られる。ペネトレータは、既にLUNAR-Aで開発済みのものを使用することができる。ランダーは1号機で技術検証を行ったものをベースに、月面での電力供給、耐環境性等の点でより高機能化を図る。

本ミッションでは、ランダーを高緯度地方に着陸させる予定であるため、併せて非常に小型軽量の望遠鏡(口径30cm程度)をランダーに搭載し、天文観測の予備実験を行う。

## 3号機(2007年) 月面ローバ

月の広域・直接探査のためにはローバが有効である。本ミッションを実施し、月の地形、地質、環境等の基礎データを取得することにより、これ以降に続くミッションをより確実に遂行することが可能になる。重量的に余裕がある場合は小型の天文観測ミッションまたは技術検証ミッションを相乗りさせる。

探査地点は、現時点では高地の多様性、マントルの不均一性を観測できることが期待されるSouth Pole Aitken盆地内または、月裏側の中緯度地域のクレータのいずれかの地域とし、CCDカメラ、蛍光X線分析装置等をローバに搭載し観測を実施する。

## 4号機(2009年) 宇宙背景放射観測装置 / 宇宙環境監視装置

月天文台のパイロットミッションで、口径1.5m程度の高感度ミリ波アンテナを北極に近い高緯度地域(北緯80°)の月面に設置し、大気がなく安定して冷たい月環境を利用して、宇宙の背景放射のゆらぎを高精度で測定する。これにより宇宙がビッグバンから銀河を生みだし、恒星の宇宙へと進化した道筋を解明することができると期待される。重量に若干余裕がある場合は、小型宇宙環境監視装置を相乗りさせることも考えられる。なお、欧米での計画もあり、早期の実現が科学的意味からも重要である。

## 5号機(2011年) 月面ローバ(親子方式)

2007年のローバ1号機をベースに、より高機能な親子方式のローバを開発し、大型ローバでは探査することが困難なクレータの壁などを含めた月面の調査を実施する。探査地域は、ローバ1号機で探索できなかったエリアが選択される。さらにローバに月面試料の長期保管機能を持たせ、後から到達するサンプルリターン機(2015年)に引き渡すことも検討する。なお、月探査周回衛星によるリモートセンシングやローバ1号機の探査結果等から、より詳細な試料分析が必要となった場合、本ミッションはサンプルリターンミッションに変更される可能性もある。

## 6号機(2013~2015年) 中型赤外線望遠鏡 / 地球衝突小惑星監視装置

月天文台のパイロットミッション No.2で、中口径赤外線望遠鏡により近傍銀河の赤外線撮像観測を行う。地上に比べてはるかに暗い部分まで効率よく観測できると予想され、銀河の構造の研究、形態分類、質量の定量等の分野に極めて質の高いデータを提供できるものと期待される。状況によっては小型赤外線干渉計の可能性もある。同時に小惑星監視ミッションや磁気圏観測ミッションを組み合わせることで、100m以上の地球近傍小惑星を検出することや地球周辺の宇宙環境監視も可能となる。また重量的に余裕がある場合は、将来の月面拠点建設に必要なインフレーション構造等の縮小モデルを用いた技術検証ミッションを相乗りさせる。

## 7号機(2013~2015年) サンプルリターン

リモートセンシングやローバ探査では実施することのできない、精密な同位体分析や極微量分析等は、サンプルリターンミッションによってのみ可能である。サンプルリターン候補地は、この時期までに周回衛星やローバ探査等で、より興味深い地点(現在はSouth Pole Aitken盆地や月裏側のpyroclasticな堆積物があるところが候補地である。)を決定し、試料を採取し、地球に持ち帰る。サンプルリターンは、唯一の地球帰還ミッションであり、ここで修得された技術は有人を前提とした将来の地球帰還技術に反映しうるものである。なお、2011年に打ち上げたローバが採取し月面上の定位置に保管しておいた試料を受け取り、地球に帰還させることができれば、1回のサンプルリターンミッションで、より広範囲の地域の試料の分析を実施することが可能となる。

以上のようなミッションで取得、確立された技術やデータは、将来の有人を含めた月面活動に必要な技術の基礎をなすものである。ここでは科学の側面を強調したが、状況によっては月面活動へ向けての技術実証のためのパイロット実験ミッションを8号機として実施することとなる。

## 6) 今後の課題

月探査を進めていくためには、関係研究機関の整備とともに全体的な研究推進体制を整備していくこと、質量備わった研究人材の確保、安定的な研究資金の確保、国際協力の具体的な検討など重要な課題が残されている。また官民における技術蓄積も速やかに進めなければならない。また次代へ向けた宇宙探査・開発利用の国民的なコンセンサスを形成していくことはとくに重要である。

表1 月無人ミッションとインフラ技術

ミッション	取得データ、技術	インフラ技術への反映
ベネトレータ	環境内月 制御部 技術 御構造 データ	月着陸機
ローバ	月面移動 環境内月 移動制御 技術 御構造 データ	月面車 月面作 月面源 ロボット 利用
天文台	無人設置 隔間 夜間 電力 供給 技術	月面構 物大 造電 的月 給文 台)
親子式ローバ	ク退試 レ隔料 操取、 等の 技術 登坂 技術 保管 貯蔵 技術	ローバ とほ ぼ同 じ
小惑星、 監視装置	天文台 とほ ぼ同 じ	天文台 (宇 宙探 査予 報シ ステ ム、 システ ム)
サンブルリタター	試地 採球 採帰 選、 保管 技術 突入、 回收 技術	月面輸 送シ 業ス ロ調 査、 ボ リ 用

表2 月インフラ技術開発計画

月面での実験を必要とする重要技術  
JEM等による宇宙実験が必要な技術  
地上試験で確立できる技術

主要ミッション	クリティカルな要素技術	技術開発フロー (▲ 打ち上げ; 同時期は相乗りを想定)					備考
		2000	2005	2010	2015	2030	
月周回/着陸衛星	月周回軌道投入技術 衛星システム/追跡管制技術 月面着陸技術					1号機は月周回観測衛星、2号機は月ペネトレータミッションを想定 軟着陸、月面耐環境技術確立	
月ローバ	走行技術 探検、制御技術 移動体熱制御技術					観測機器だけでなく分析装置も搭載する 平坦地走行だけでなく、がけをよじ登ったり、降りる機能 (探ロボット使用等)が必要	
月サンプリング	燃料収集技術 地球帰還技術					ローバが採取した試料を回収する可能性あり ダイレクトリターンかLEOで回収	
月面天文台 バイロケット	天文台無人設置技術 遠隔操作技術 夜間の電力供給技術					小口径望遠鏡で予備実験 必要電力100W、早期は機械式冷却機使用、防振対策要、背景放射はミリ波帯観測	
月からのモニタリング	天文台とは同じ					小口径望遠鏡で、最終的に口径1mのフライング望遠鏡要	
システム	システム構築手順 月環境データの把握					放射線、地球磁気圏及び電波の観測で、現状の技術で実現可能	
有人サポート	環境制御・生命維持技術 宇宙服					月探検は無人ミッションで取得したデータが利用可能 最小限の機材の輸送と単純かつ短時間の有人作業によるシステム構築	
エネルギー	酸化還元燃料電池 太陽電池パネル設置技術					宇宙服の汚染防止、廃棄方法	
熱制御	放射面値可変型ラジエータ 二相液体ループ					月面における大型の太陽電池パネル設置方法 初期のエネルギー確保、非常用2次電池の重量大	
通信	月の表裏との通信手段					機材の月面到着から拠点建設開始までの設置期間の熱保護方法	
ロボット	電力供給技術 モジュール化技術 シール、耐熱技術					高速・大容量通信、月周回観測衛星の成果を反映	
資源加工実験	O <sub>2</sub> /He回収プロセス 加熱用太陽炉					無人のローバミッションの成果を反映 クレーン/運搬/月面車のロボット機能が必要 ロボット自身にある程度の重量が必要 (レゴリスをカウンタウエイとして利用)	
ライフS実験	放射線環境の把握 生物試料輸送技術					当面機業製造実験が主体となる	
輸送	軌道上整備作業 ロケット再利用技術					低重力環境下における人間科学と宇宙放射線の生体への影響がメインテーマ 月からのモニタリングの成果を活用 2015年以降、可能な限り早い時期に再使用型月輸送システムを開発、運用開始する	

月探査に関する検討委員会 構成委員 (ア行エ順)

- |        |       |                          |
|--------|-------|--------------------------|
| 主査     | 松尾 弘毅 | 宇宙科学研究所教授                |
| 委員     | 磯部 瑋三 | 国立天文台助教授                 |
|        | 海部 宣男 | 国立天文台教授                  |
|        | 唐牛 宏  | 国立天文台教授                  |
|        | 武田 弘  | 東京大学名誉教授                 |
|        | 田邊 徹  | 東京大学工学部航空宇宙工学科教授         |
|        | 鶴田浩一郎 | 宇宙科学研究所教授                |
|        | 中澤 清  | 東京工業大学理学部地球惑星科学科教授       |
|        | 的川 泰宣 | 宇宙科学研究所教授                |
|        | 水谷 仁  | 宇宙科学研究所教授                |
|        | 宮本 晃  | 日本大学医学部医学科助教授            |
|        | 飯田 尚志 | 通信総合研究所企画部長              |
|        | 大坪 孔治 | (財)環境科学技術研究所主任研究官        |
|        | 木部勢至朗 | 航空宇宙技術研究所宇宙グループ・グループリーダー |
|        | 興石 肇  | 航空宇宙技術研究所技術委員            |
|        | 古宇田亮一 | 地質調査所主任研究官               |
|        | 富樫 茂子 | 地質調査所地殻化学同位体地学課長         |
|        | 富田二三彦 | 通信総合研究所宇宙環境室長            |
|        | 石澤 禎弘 | 宇宙開発事業団理事                |
|        | 岩田 勉  | 宇宙開発事業団軌道上システム研究室長       |
|        | 長島 隆一 | 宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室長      |
|        | 伊藤 隆宏 | 三菱重工業(株) 宇宙技術部 次長        |
|        | 村上 卓司 | 日産自動車(株) 宇宙航空事業部長代理      |
|        | 松本 信二 | 清水建設(株) 宇宙開発室長           |
|        | 折井 武  | 日本電気(株) 宇宙開発事業部総括部長      |
| アドバイザー | 有賀 輝  | 科学技術庁宇宙政策課宇宙輸送研究調整官      |
|        | 川本 武史 | 科学技術庁宇宙政策課調整係長           |

ワーキンググループ

月の科学及び利用可能性の調査のための月探査ワーキンググループ

主査	水谷 仁	宇宙科学研究所教授	
副主査	岩田 勉	宇宙開発事業団軌道上システム研究室長	
委員	飯島 祐一	宇宙科学研究所COE研究室助手	
	大野 哲二	資源環境技術総合研究所地殻工学部研究官	
	古宇田亮一	地質調査所国際協力室主任研究官	
	佐々木 晶	東京大学理学部地質学研究室教授	
	佐々木 進	宇宙科学研究所助教授	
	武田 弘	千葉工業大学附属研究所教授	
	富樫 茂子	地質調査所地殻化学同位体地学課長	
	中澤 清	東京工業大学理学部月惑星科学科教授	
	オブザーバー	滝沢 悦貞	宇宙開発事業団主任開発部員

月からの観測（天文学パイロットミッション）ワーキンググループ

主査	海部 宣男	国立天文台教授	
副主査	唐牛 宏	国立天文台教授	
委員	稲谷 順司	国立天文台教授	
	上野 宗孝	東京大学助手	
	戎崎 俊一	理化学研究所主任研究員	
	大橋 正健	国立天文台助手	
	芝井 広	宇宙科学研究所助教授	
	坪井 昌人	茨城大学理学部助教授	
	西川 淳	国立天文台助手	
	平林 久	宇宙科学研究所教授	
	オブザーバー	滝沢 悦貞	宇宙開発事業団主任開発部員

月からのモニタリング（スペースガードや宇宙天気予報等）ワーキンググループ

主査	磯辺 瑋三	国立天文台助教授	
副主査	富田二三彦	通信総合研究所宇宙環境研究室長	
委員	敵本 敵	通信総合研究所宇宙科学部宇宙計測研究室長	
	古宇田亮一	地質調査所主任研究官	
	河野 毅	理化学研究所宇宙放射線研究室副主任研究員	
	興石 肇	航空宇宙技術研究所技術委員	
	藤原 顯	宇宙科学研究所惑星研究系助教授	
	松島 弘一	航空宇宙技術研究所室長	
	森岡 昭	東北大学理学部教授	
	吉川 真	通信総合研究所主任研究官	
	研究協力	高木 俊治	三菱総合研究所（株）
	オブザーバー	青木 宏	宇宙開発事業団副主任開発部員

月面インフラワーキンググループ

主査	石澤 禎弘	宇宙開発事業団理事	
副主査	長島 隆一	宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室長	
委員	井尻 憲一	東京大学理学部7イット-7°総合センター教授	
	小川 修	東京大学工学部教授	
	木部勢至朗	航空宇宙技術研究所グループリーダー	
	鈴木 弘一	石川島播磨重工業（株）宇宙開発事業部 専門部長	
	鳥居 啓之	川崎重工業（株）宇宙開発部 課長代理	
	大石 晃嗣	清水建設（株）宇宙開発室 課長	
	金森 洋史	清水建設（株）宇宙開発室 課長	
	青木 滋	清水建設（株）宇宙開発室	
	高木 健二	清水建設（株）宇宙開発室	
	小林 秀生	大成建設（株）技術開発第一部 機械システム開発室課長	
	神喜 良二	東洋エンジニアリング（株）技術研究所 宇宙技術部副部長	
	辻 政俊	東洋エンジニアリング（株）プロジェクトマネージャー	
	小野寺利浩	（株）東芝宇宙プログラム担当主管	
	栗山 義雄	（株）東芝宇宙企画担当主管	
		（続く）	

四宮 康雄	(株) 東芝宇宙プログラム担当主管
足立 忠司	日産自動車(株) 宇宙航空事業部基盤技術部課長
吉井 実	日揮(株) 宇宙開発プロジェクト外部次長
田淵 光彦	日揮(株) 宇宙開発プロジェクト外部アシスタントプロジェクトマネージャ
小池 達也	日本電気(株) 宇宙開発事業本部主管技師長
市川 憲二	日本電気(株) 宇宙開発事業本部 担当部長
前田 利秀	(株) 日立製作所宇宙システム部技師 副参事
内山 隆	(株) 富士通研究所宇宙システム研究部長
駒田 聡	(株) 富士通研究所宇宙システム研究部 主任研究員
木原 弘毅	三菱重工業(株) 神戸造船所 電子・宇宙技術部主管
南 隆一	三菱重工業(株) 宇宙技術部 基礎設計課 主務
尾原 弘晃	三菱電機(株) 宇宙部宇宙機プロジェクトグループ
オブザーバー 板垣 春昭	宇宙開発事業団未来宇宙システム研究室主任開発部員

## 目次

# 目次

まえがき  
概要

第1章 序論	1
1. 本調査研究について	1
1.1 調査研究の背景と目的	1
1.2 調査研究の内容	1
1.3 本報告書の方法	1
1.4 月探査に関する調査研究(その1)との関連について	2
2. 基本的考え方	3
2.1 月探査を行う意義	3
2.2 基本的な考え方について	4
2.3 月探査活動を検討するにあたって採用した検討指針(或いはシナリオ)	6
2.4 超長期目標設定に際しての与件の限定	7
3. 月探査に関する内外の動向	8
3.1 宇宙開発政策大綱における月探査の位置づけ	8
3.2 海外の動向	8
第2章 月の科学及び利用可能性調査をめざして	13
1. 月科学の課題	13
2. 近未来の月探査から期待される科学的成果	14
2.1 LUNAR-A	14
2.2 月周回衛星	23
3. 将来の月探査	28
3.1 ネットワーク・サイエンス主体のミッション	28
3.1.1 科学目的	
3.1.2 本ミッションにより開かれる利用目的の可能性	
3.2 ルナー・ローバ主体のミッション	37
3.2.1 科学目的	
3.2.2 本ミッションにより開かれる利用目的の可能性	
3.3 サンプルリターンミッション	45
3.3.1 科学目的	
3.3.2 本ミッションにより開かれる利用目的の可能性	
4. 今後の課題	53
第3章 月からの宇宙観測	55
1. 月からの宇宙観測の意義と基本的方向	55
1.1 月面における宇宙観測	55
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	55
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	56
1.4 第一期探査の初期段階での実験的ミッション・調査	57
1.5 第一段階に向けた天文パイロット・ミッションの案	59
1.6 第一期以降に向けた提案	60
1.7 今後の課題	60

2. 第一段階に向けた天文パイロット・ミッションの提案	62
2.1 月面小型光学・赤外線望遠鏡	62
(1) 目的	62
(2) 科学的意義	62
(3) 望遠鏡諸元	64
2.2 宇宙背景放射観測用月面電波望遠鏡	67
(1) 月面からの宇宙背景放射観測	67
(2) 月面宇宙背景放射観測システムの提案	71
2.3 赤外線観測望遠鏡ミッション	76
(1) 目的	76
(2) 望遠鏡の諸元	76
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	78
3.1 夜間のエネルギー	78
3.2 設置の安定性	78
3.3 熱制御	79
3.4 雑音	81
4. 第一段階以降の天文ミッションについて	82
4.1 月面赤外線干渉計	82
(1) 概要	82
(2) 月面赤外線位置天文干渉計	83
(3) 干渉計の仕様	84
(4) 検討事項	84
(5) むすび	86
4.2 月面重力波望遠鏡	86
(1) 月面重力波望遠鏡の意義	87
(2) 月面重力波望遠鏡概要	87
(3) 月面重力波望遠鏡の具体案	88
(4) 重力波源と観測可能性	89
(5) まとめ	90
5. 将来展望	92
5.1 月面における宇宙観測推進のための体制上の課題	92
5.2 月面での天文学における有人と無人	93
第4章 月面からのモニタリング	95
1. 月面からのモニタリングについて	95
2. 地球衝突小惑星監視	95
2.1 地球衝突小惑星の地上観測と宇宙観測	95
2.1.1 なぜこのような観測をおこなうか	95
2.1.2 現在実施されている観測および月面観測の意味	99
2.2 地球衝突小惑星の月面観測へのストラテジー	101
2.2.1 1998年—2008年の地上観測	101
2.2.2 2000年以降の月面観測	102
2.3 月面からの地球衝突小惑星の観測	103
2.3.1 月面における全検出望遠鏡システム	103
2.3.2 フェーズ I の月面望遠鏡	108

2.3.2 フェーズ I の月面望遠鏡	108
2.3.3 月面望遠鏡以前の望遠鏡	112
2.4 地球衝突小惑星の軌道運動解析システム	116
2.4.1 検出小惑星の軌道運動解析システムの確立	116
2.4.2 データセンターの確立	122
2.5 地球衝突小惑星観測の人类的意義	125
2.5.1 地球衝突小惑星観測の人类的意義	125
2.5.2 物質的資源としての小惑星	127
3. 月面からの宇宙環境モニタリング	130
(1) はじめに	130
(2) なぜ月面で宇宙環境モニタリングをおこなうか	136
(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	137
3.1 月面におけるその周辺の宇宙環境監視	140
3.1.1 概要	140
3.1.2 具体的なミッション検討(フェーズA, フェーズB)	140
3.1.3 波及効果	141
3.2 地球近傍の宇宙環境監視—光や粒子によるリモートセンシング	144
3.2.1 概要	144
3.2.2 具体的なミッション検討(主としてフェーズA)	147
3.2.3 波及効果	150
3.3 太陽惑星間空間の監視—電波による太陽惑星磁気圏のリモートセンシング	152
3.3.1 概要	152
3.3.2 具体的なミッション検討(主としてフェーズB)	152
3.3.3 波及効果	154
3.4 宇宙環境モニタリング(まとめ)	154
第5章 月面インフラストラクチャーの形成と展開	157
1. 月面活動のイメージおよび技術開発シナリオの概要	157
2. 月面活動及び必要技術	163
2.1 無人月面活動(フェーズ I)	163
2.1.1 フェーズ I (2000~2015年)の月面活動	163
2.1.2 フェーズ I (2000~2015年、無人)の必要技術	168
2.2 有人月面活動(フェーズ II)	172
2.2.1 第一段階	172
2.2.1.1 有人月面拠点システムイメージ	172
2.2.1.2 要素技術	176
2.2.1.2.1 有人サポートシステム	176
2.2.1.2.2 エネルギー供給システム	179
2.2.1.2.3 熱制御システム	183
2.2.1.2.4 通信システム	185
2.2.1.2.5 資源加工パイロットプラント	192
2.2.1.2.6 ロボット	195
2.2.1.2.7 輸送システム	200
2.2.1.2.8 ライフ・サイエンス実験システム	203

2.2.2 第二段階	205
2.2.2.1 有人拠点システムイメージ	205
2.2.2.2 要素技術	216
2.2.2.2.1 有人サポートシステム	216
2.2.2.2.2 エネルギー供給システム	218
2.2.2.2.3 熱制御システム	219
2.2.2.2.4 通信システム	220
2.2.2.2.5 資源加工パイロットプラント	221
2.2.2.2.6 ロボット	222
2.2.2.2.7 輸送システム	223
2.2.2.2.8 ライフ・サイエンス実験システム	224
3. 技術開発計画 (フェーズI)	225
3.1 無人ミッション	225
3.1.1 月周回観測/着陸衛星	225
3.1.2 月面移動探査	227
3.1.2.1 ローバ	227
3.1.2.2 作業ロボット	230
3.1.3 サンプルリターン	233
3.1.4 月面天文台パイロットプラント	235
3.1.5 月からのモニタリング	236
3.2 有人拠点	237
3.2.1 有人拠点システム	237
3.2.2 要素技術	239
3.2.2.1 有人サポートシステム	239
3.2.2.2 エネルギー供給システム	241
3.2.2.3 熱制御システム	242
3.2.2.4 通信システム	244
3.2.2.5 資源加工パイロットプラント	245
3.2.2.6 ロボット	247
3.2.2.7 輸送システム	249
3.2.2.8 ライフ・サイエンス実験システム	252
3.3 フェーズIにおける技術開発計画のまとめ	253
第6章 月探査活動の展開に関する資料 (前章までのまとめ)	263
1. 月面活動のイメージ	263
2. ミッション候補	263
3. まとめ	274
第7章 今後の課題	279
1. 研究人材の確保と養成について	279
2. 国際協力について	279
3. 国民的なコンセンサス形成に向けて	280

## 第1章 序論

## 第1章 序論

### 1. 本調査研究について

#### 1.1 調査研究の背景と目的

月面を拠点とする宇宙活動は、宇宙科学の発展に寄与するばかりでなく、人類の活動領域拡大のための第一歩となるものである。その活動の可能性を検討するためには、月に関する科学的知見を蓄積し、月全体の体系的な探査が実施されることが必要であると考えられる。

改定された政府の宇宙開発政策大綱では長期ビジョン懇談会が平成6年7月に取りまとめた報告書「新世紀の宇宙時代の創造にむけて」を踏まえて科学探査及び月の利用可能性調査を目的とした体系的な無人月探査計画を実施すべき方向を明示している。

本調査研究では、宇宙開発政策大綱が示した方向に沿った月探査について、前年度に実施した調査「月探査に関する調査研究」（その1）の結果を踏まえ、ミッション要求の具体化、重要技術のフィジビリティの検討、さらに国際動向を踏まえた我が国としての月探査シナリオの策定を目的としている。

#### 1.2 調査研究の内容

本研究では、以下の項目について昨年度に引き続き関係領域から代表的な専門研究者に参加を求め、調査研究委員会を設置し検討を行った。主たる検討項目と内容は次の通りである。

##### (1) 月探査のミッション要求の調査

これまでに行われた月探査の結果を踏まえ、昨年度に引き続き将来行うべき月探査のミッションを明確にし、更にそのミッション要求の概略検討を行う。

##### (2) 月探査のための重要技術のフィジビリティ調査

月探査を実施するために、重点的に研究開発すべき技術を抽出し克服すべき課題をあきらかにする。

##### (3) 月探査のシナリオの提案

月探査に向けた具体的な開発シナリオについて検討を行う。

#### 1.3 調査研究の方法

調査研究委員会は全体的な検討を行う委員会とし、その下に次の4つのワーキンググループを設置しテーマの掘り下げを行った。

- (1) 月の科学及び利用可能性
- (2) 月からの観測 (天文学パイロットミッション)
- (3) 月からのモニタリング (スペースガードや宇宙天気予報等)
- (4) 月面インフラストラクチャ

調査研究委員会および4つのワーキンググループのメンバーは冒頭概要に示した。  
なお未来工学研究所の研究体制は次の通りである。

稗田 浩雄	(財) 未来工学研究所	技術・国際関係研究センター長
秋山 順一	同	主任研究員
光盛 史郎	同	研究員
佐藤 ちひろ	同	研究員

#### 1.4 月探査に関する調査研究 (その1) との関連について

平成6年度科学技術庁委託調査「月探査に関する調査研究」(その1と略称)では、これから展開される月探査活動全般について、初めて包括的な検討を行ったものである。

本年度の調査(その2)では、2000年初頭に実施される活動、おおよそ2000年~2015年における活動について深く検討を行い報告書の内容はこの点について焦点を当てた記述となっている。

本報告書では(その1)について執筆された事項について更に展開、深化した。例えば第2章月の科学及び利用可能性を目指して(主として惑星科学の観点)、第3章月からの宇宙観測(主として天文学)、第4章月面からのモニタリング(小惑星衝突監視、宇宙環境監視)などである。技術開発を中心に月利用を検討した第5章は有人月面活動へ拡張する意味で詳細な技術的検討を行っている。

(その1)について執筆された事項で、重複を避けるために本報告書で触れていない重要事項がある。これについては、(その1)を参照し、本報告書の補充とされたい。これは、(その1)の報告書で以下の項目である。

将来のエネルギー問題に関する選択肢の確保 (4.3.2節 p155 ~p216)

更なる活動領域拡大のための実験基地・検疫基地 (4.4.3節 p278 ~p305)

その他(その1)で総合的な観点から検討した月探査の他分野への波及(第5章)、地球・月環境に対する検討(第6章)の章についても、月探査の理念検討のためには欠かせられないことに留意したい。

## 2. 基本的考え方

### 2.1 月探査を行う意義

#### 1. 知的フロンティア

人類史において、宇宙観は文明の発展と文化の創出に大きく貢献してきた。太古の遺跡が語る様に、精密な宇宙観測の技術は豊かな生活を維持するためにかけがえのないものであり、そこから得られた宇宙観は、人々に哲学的、思想的に大きな影響を及ぼした。近代の科学技術の発展とともに人類は宇宙について多くの知識を得てきた。しかし、太陽系の起源、地球形成の過程、生命の起源といった根源的な疑問を解明するまでにはなお長い道程を残し、宇宙は未だ人類にとって多くの謎を秘めた領域である。宇宙を科学的に探究することは、21世紀の次代に向けて知的フロンティアを拡大し、人類の新たな発展の可能性を切り開くことにも繋がる重要な課題である。今日の高度な文明社会は、このような人類の知的好奇心充足への絶ゆみない努力と未開拓領域への臆せぬ挑戦が築いてきたといっても過言ではない。月面は、宇宙観測をはじめとする未知への探究において、人類に全く新しい活動の場を提供する。人類、社会が未来にわたって着実に発展していく上で、新しい科学の拠点としての月面を活用して知的探究活動は不可欠かつ重要なものとなるだろう。

#### 2. 人類の宇宙への活動領域拡大の拠点

地球低軌道の宇宙ステーションにおける有人活動から月の本格的探査へと、人類の宇宙活動の舞台は着実に拡大して行くであろう。26年前、人類が初めて月に降り立つことを可能にした原動力は、国家の威信であり、冷戦時代における軍事力を背景にした国家・社会体制であった。しかし、21世紀に展開される宇宙活動は、冷戦時代とは異なった推進力によって発展していくことが予測され、また、必要とされる。それは、国家威信のような目に見えて強力な力ではないが、有限な地球の制約を克服し、将来の永続的な社会・文明発展の可能性を追求しようとする人類の潜在的意思であり、世代を越えて極めて長期にわたって作用し続けるものである。このような短期的には微弱であるが、長期的には計り知れない力となる自らの意思によって人類は宇宙へと活動領域を広げようとしているのであり、再び月を目指すことは、数百年、数千年と受け継がれていく人類進化の新たなステップとしてとらえる方がむしろ自然である。月が地球から38万Kmという宇宙では極めて近距離にあること、そして片面が常に地球に面しているという条件を改めて考えてみると、人類の宇宙への活動領域拡大の拠点としてこの上ない場を提供していると言えよう。この、踏み台を将来最大限に活用するため、われわれはまず月についての詳細な知識を得る必要があり、月全般についての精緻な探査を開始する必要がある。

### 3. 国家・社会・経済システムの拡大・発展

月の探査、そして開発利用は、国家、社会、経済等地球上のあらゆるシステムに直接、間接的に影響を及ぼすことが予測される。本格的な月探査が進むことによって、このプロジェクトを支える人・物・金の流れが生まれ、規模の拡大とともに社会システムにおける位置づけが明確化され、長期にわたる国際協力の推進によって月をキーワードとする国際的な流動が創出され、地球-月圏へとシステム全体が拡大、発展していく可能性がある。

また、この試みは、国家、民族、社会、経済等、既存の概念や価値観の枠を越え、次代の新価値社会を築くために多大な貢献をもたらすことに繋がるものである。

### 4. 地球にとっての意味

地球の限られた環境を保護しつつ文明の継続的発展の方向を模索する上で月は貴重な情報と場をもたらす可能性がある。月の起源は地球誕生の起源と密接に関わっていると考えられており、月の起源や進化の過程を解明することで地球の形成過程についてより深い理解を得ることが出来る。このことは、今日の地球環境がどのような過程を経て創出されてきたかという問題についての理解を助けることにも繋がる。地球形成過程の解明と、現在の地球環境監視データの蓄積等が包括的に組合わさって環境のグローバルなリサイクルや変動システム等の解明が進み、有限な地球環境を永続的に維持して行くために人類が取るべき行動が自ずと導かれることとなる。

また、月は、有限な地球の資源を克服し、太陽エネルギーやヘリウム3、鉱物資源等の宇宙資源の利用の可能性を探る上でも重要な実証の場を提供するものである。将来の地球におけるエネルギー供給源として、または、宇宙活動の発展を支える手段として宇宙資源の利用は、先に述べた地球環境の永続的維持のために欠かすことのできないものとなる。月は、このような宇宙資源利用の可能性を探るための探査、実験の場として、我々の持っている技術の延長線上にあり、次世紀に向けて取り組むに相応しい目標といえる。

さらに、地球環境をより広い視野から監視するため、月に観測施設を設置することも想定される。昨年話題になった、シューメーカー・レビー第9彗星の木星衝突が事実として示すように、天体の惑星衝突は可能性としてはゼロではなく、小天体が地球に衝突し大規模な災害をもたらす危険性への対応についても、地球環境の永続的維持の観点から追求されるべき課題である。また、このような月面上施設は、大規模な気候変動等地球規模の災害などについても月からの精緻な監視を可能とする安定した観測場所を提供するものである。

#### 2.2 基本的な考え方について

##### 1. 短期的視点と中・長期的視点

短期的には、初期フェーズの月探査の目的は、まず月自身を良く知ること、科学的探査に重点が置かれたものとなる。次フェーズとして、初期探査の結果を踏まえ、局所

的により精緻な探査が行われるとともに、月環境を利用した科学観測、あるいは基礎的実験等が行われる。また、同時に将来の月の資源利用や月面基地建設に向けての利用面からの探査が行われることとなる。科学的探査と利用の面からの探査には、地形、鉱物分布等共通項目が多々含まれ、初期の探査では、共通の探査機によってデータを共有することで探査の効率化が図られよう。しかし、中・長期的に考えれば、科学探査と利用面からの探査はいずれかの時点で分岐され、それぞれ細分化したよりの絞った探査が専用の探査機によって実施されることとなる。今後、月の本格的探査を開始するに当たって、月探査実施の体制も含めて長期的視点からの基本シナリオを十分練り直していくことが肝要である。

##### 2. 我が国の視点

月の本格的探査を開始するに当たって、前項の短期的、中・長期的視点を踏まえ、我が国としてどのように取り組んでいくか、我が国の有する探査技術、輸送システム、研究開発の現状等を鑑みて我が国としての月探査の位置づけが行われなければならない。宇宙開発政策大綱では我が国の月探査への取組みの姿勢として、「人類にとって身近な天体である月を拠点とする宇宙活動は、地球外天体に人間が宇宙活動を広げていく場合の第1歩である。月に関する科学的知見を蓄積し、月全体の地形、地質、鉱物組成やその分布等の詳細な探査を進めることは重要な意義を有するものである。(1) 無人探査； 宇宙開発事業団と宇宙科学研究所等が連携・協力し、月探査および月の利用可能性調査を目的として、関連技術の進展状況や国際的な動向を勘案しつつ、段階的に月周回観測や月面着陸探査をはじめとした体系的な無人探査を進める。(2) 月面からの科学観測および探査； 各国の月探査の成果を踏まえつつ、国際協力による月面天文台等の月面からの科学観測および月面の長期探査への発展に備えて、国立天文台、宇宙科学研究所、宇宙開発事業団等が連携・協力し、関連観測技術や月面インフラストラクチャー技術等の研究や開発を着実に進め、技術の蓄積と高度化を図る」と我が国自身の努力の必要性を強調している。

##### 3. 国際協力の視点

宇宙にまで人類の活動領域、知的フロンティアを拡大していくことは、有限な地球環境からくる限界を克服するのみならず、人類自身の意識をも宇宙にまで拡大し、地球の尊さ、世界平和の重要性の認識へと結びつくものである。我が国は、これまで平和利用に徹するとの基本的立場に立って宇宙開発を推進してきたが、将来においても我が国の特色を活かし、平和目的の観点から国際社会において相応しい役割を果たすことが必要である。月探査は、まさに各国が協力し、人類の更なる発展に向けた国際共同事業として相応しい試みであり、新世紀における世界平和の維持のための象徴的事業と成りえるものである。

将来の月探査は、ローバーなどを使った地球物理学的ローカルネットワーク調査や地形地質の詳細な調査、多地域からの月岩石サンプルリターン、さらには、月面天文台構築の

ための詳細調査、資源利用の為の地域調査等大規模かつ多様な探査が必要になり、このような段階では、国際共同による探査が不可欠になると考えられる。また、月探査は人類的取り組みとして長期に渡って継続される事業であり、国際協力の在り方を十分に検討しておく必要がある。宇宙ステーション計画等の国際協力プロジェクトの経験を踏まえ、国際情勢の変化も考慮しつつ、長期的・安定的な協力が行われるべく参加国が十分な意見交換と政策協調を図ることが肝要である。我が国の国際協力の視点として、宇宙開発政策大綱では「(2)月面からの科学観測および探査；各国の月探査の成果を踏まえつつ、国際協力による月面天文台等の月面からの科学観測および月面の長期探査への発展に備えて、国立天文台、宇宙科学研究所、宇宙開発事業団等が連携・協力し、関連観測技術や月面インフラストラクチャー技術等の研究や開発を着実に進め、技術の蓄積と高度化を図る」としており、人類全体の取り組みとして国際協力による月探査に我が国が積極的に参加することをうたっている。

### 2.3 月探査活動を検討するにあたって採用した検討指針（或いはシナリオ）

本調査研究では、無人で活動を行うフェーズⅠ、有人活動が行われるフェーズⅡの2段階に分けて月探査の段階的發展シナリオの検討が妥当であると考えられた。フェーズⅠは2000年から2015年、フェーズⅡは2015年から2030年とし、さらにフェーズⅡについては、昼間のみ滞在する第1段階と常時滞在する第2段階とに分けて検討を行った。

2000年初頭から実施が期待されるミッションについて、具体的かつ重点的な検討を実施することとした。月の科学的探査、月面からの天文観測、宇宙環境モニタリング、などに大別してそれぞれ専門家による分科会を設定し、サイエンス主体であるがエンジニアリングの面からの検討を補うことが必要とされた。

2015年以降のフェーズⅡでは、フェーズⅠの蓄積に則り、月の利用のための活動に関わる月面活動の為のミッションに焦点が当てられる。

月科学探査の大きな目的は、月起源の解明に迫ろうとするものである。天文観測施設では、月面の特徴が最も生かされ、無人設置可能で高い成果が期待されるものとして準備的小型ミッションが有益であると予測された。

さらに引き続いて、地球観測のための機器が設置され、地球近傍の宇宙環境モニターを含めたグローバルな地球観測や、地球接近小惑星監視のための技術開発の必要性が浮かんしており、これらは純粋に科学的知見という域を超えたグローバル・イシューの範疇といえ我が国が冷戦後の世界に果たさなければならない課題に属するものである。

これらのミッションを踏まえて、フェーズⅡに向けた本格的な月面利用観測ミッションのための基礎データの収集が図られる。

本調査研究ではフェーズⅠ（2015年まで）において、打ち上げを数ミッションに集約した。これによって月探査活動の具体的なシナリオを描くことが可能となり、宇宙関連機関が

活動展開するベースラインとしての意義を持たせようとしたものである。

### 2.4 超長期目標設定に際しての与件の限定

長期にわたる月探査のような超長期目標設定においては、さまざまな不確定要素、不安定要因を抱えたまま検討することを余儀なくされる。なかでも下記の与件については、一定の前提を定めて検討を行った。

- ①地球環境の極端な変動がないこと
  - ②地球規模の政治的変動の発生と不安定化が続かないこと
  - ③地球規模の経済危機の発生と不安定化が続かないこと
  - ④地球規模の社会的不安定化が続かないこと
  - ⑤我が国の政治経済社会および外的環境に激変がもたらされないこと
  - ⑥宇宙活動において月以外の天体、あるいは他の宇宙活動等に関して、国際社会が緊急かつ全体的に協力して対処せねばならないテーマが発生しないこと
- などである。

### 3. 月探査に関する内外の動向

#### 3.1 宇宙開発政策大綱における月探査の位置づけ

平成8年1月24日に改訂された我が国の宇宙開発政策大綱では、宇宙開発の重点活動の中で宇宙科学及び月探査の推進を挙げ、「人類にとって身近な天体である月については、科学的知見の蓄積とともに、利用の可能性を検討するため、その探査を進める。」と我が国が月探査に取り組むことを明確に謳っている。また、月探査活動について「(中略)月を拠点とする宇宙活動は、地球外天体に人間が宇宙活動を広げていく場合の第一歩である。」と位置づけ、基本的な取り組みの方向として、「宇宙開発事業団と宇宙科学研究所等が連携・協力し、(中略)段階的に月周回観測や月面着陸探査をはじめとした体系的な無人月探査計画を進める。」としている。さらに、「国際協力による月面天文台等の月面からの科学観測及び月面の長期的探査への発展に備えて、(中略)関連観測技術や月面インフラストラクチャー技術等の研究や開発を着実に進め、技術の蓄積と高度化を図る。」と、将来の月面活動の拡大に備えて我が国が取り組むべき月探査の方向を示している。

宇宙開発政策大綱は、今後10年の我が国の宇宙開発活動の方向を示す基本政策であり、上述の様に我が国が取り組むべき月探査の方向が初めて明確に示されたことは、21世紀の我が国の宇宙開発活動を展望した場合極めて重要な意味を持つものである。今後、具体的な月探査計画の策定・実施に向けて関連機関の連携・協力が活発化してこよう。

#### 3.2 海外の動向

##### 3.2.1 米国

NASAは1996年2月「NASA戦略計画」をまとめ、米国の航空宇宙プログラムに対する戦略的決定及びその方向を示した。従来の体制を見直し、新しい時代を迎えた今日のNASAのあるべき姿を内外に示すとともに、新生NASAを実現するための変革に向けた5つの戦略事業を打ち出している。「戦略計画」では、1996～2002年、2003～2009年、2010～2020以降の短・中・長期の戦略ロードマップによって5つの事業における目標を明確に描いている。月探査の方向は、『宇宙科学事業』において、人類の営みのための宇宙探査・利用・開発として位置づけられており、短・中期的には無人ミッションによる探査、2010～2020年以降の長期的には月面基地での大型観測施設を含む有人による宇宙科学プログラムの実施を描いている。

財政的に厳しい環境にある米国の今日の宇宙開発においては、低コストで効率的かつ多大な波及効果が期待されるミッションであることが求められる。1994年1月に打ち上げら

れたクレメンタインは、国防総省(DOD)とNASAが共同で開発した低コスト、小型軽量探査機であり、6つの高精度センサーにより月面全域に及ぶ多波長画像データを収集し重要な科学的情報を提供した。このクレメンタインの成果により月の詳細観測の必要性が一層高まり、NASAは次の月探査プログラムとしてルナープロスペクター計画を推進中である。ルナープロスペクターはDiscovery Programの一つであり、クレメンタインを含むこれまでに行われた月探査データを補完するため、高度100Kmの月極軌道からの観測・実験を実施する計画である。センサーにガンマ線スペクトロメータ、中性子スペクトロメータ、磁力計、電子リフレクトメータ、アルファ粒子スペクトロメータを搭載し、ドップラー重力実験も実施される。中性子スペクトロメータによる観測では、クレメンタインのデータが示唆した極付近の氷の存在の可能性が確認されることが期待されている。ルナープロスペクターは1～3年間月を周回し、月の起源、進化、資源に関する詳細なデータを提供することになっている。打ち上げは、1997年10月で(95年12月13日時点)、総費用はUS\$51 million(92年時点)である。

一方、カーネギーメロン大学(CMU)と民間のLunaCorp, Inc.は、共同で初めての民間による月ミッション"Lunar Rover Initiative"を構想している。同構想は、2000年までに、月にビデオカメラを搭載したローバーを設置し、月からのライブ映像をテーマパーク、テレビ、コマーシャルや研究、教育など幅広い分野で利用することを目指している。CMUとLunaCorpのコンソーシアムは94年に設立され、テレプレゼンス等の中核技術の開発にはNASAも協力している。94年7月、Dante IIと呼ばれる8本脚のプロトタイプローバーの走行及び遠隔操作実験がアラスカのSpurr火山で既に実施されている。

##### 3.2.2 ESA

ESA閣僚会議長期宇宙政策委員会(LSPC)は、95年10月に開催されたESA閣僚会議において「2000年以降の欧州宇宙政策に関する報告書」を提出した。同報告書は、今後50年の長期にわたる欧州の宇宙プログラムについて検討を行うとともに、ESA自身の改革の必要性を打ち出したものとなっている。

月探査に関しては、6つの提言の内3番目に「欧州は、宇宙科学において第一線で常に活躍し、国際協力による月探査プログラムを積極的に推進する」として、ESAが月探査に積極的に取り組む姿勢を示している。また、報告書では、月探査の科学的重要性として以下の3つを挙げている。

- ①地球と月との関係の起源の解明に資する。さらに、新たな惑星探査の幕明けとなる。
- ②安定した月固有の性質を利用した科学的実験の実施や、天体物理学、惑星天文学、太

陽物理学に新たな発見をもたらす。

③微小重力下での生理学、放射線保護、生命維持システムの研究。これらの結果の火星及びそれ以遠の惑星探査への適用。

さらに、月探査計画は遠隔操作等の情報通信技術の発展により多くの人々に開放されるとともに、長期にわたって欧州の様々なハイテク分野における研究開発を促進するものであると位置づけている。

また、この月探査を含めた欧州の長期的宇宙計画を達成するために、技術、組織体制、リソースの3つの分野の発展が不可欠としている。まず、技術の分野では、重要テーマとして打ち上げコストの大幅な削減とロボティクス及び遠隔操作、センサー、人工知能及び超小型化技術の発展を挙げている。次に、組織体制として、①他の宇宙開発機関との関係の向上及び強化、宇宙開発のグローバル化による既存パートナー以外（国連等）の関連国際機関との協力関係の拡大、② ESA 内の意思決定プロセスの改善、③政府及び民間の資金拠出における改善、を挙げ、リソースに関しては、財政及び人材等の現行リソースを少なくとも維持し、長期的には大幅な向上が図られなければならないとしている。

現在 ESA の月探査計画として MORO(the Moon Orbiting Observatory)が提案されているが（Phase A 段階）、予算獲得には至っていないようである。提案では、2003年にアリアンVロケットによって月極軌道に投入されるとしている。MOROは、アポロ及び最近のクレメンタインによる観測を補完する役割を有しており、スモール(450kg)とラージ(1300kg)の2つのバージョンが提案されている。中核的な観測機器としてステレオカメラ、マイクロ波計測器、サブサテライトの3つが搭載される予定である。また、先に打ち上げられるルナープロスペクター及びルナーAの結果を考慮して補足的な観測機器を搭載することも検討されている。スモール、ラージのどちらの案も高度200kmと100kmの2軌道での観測を行うことになっている。

### 3.2.3 中国及びロシア

95年1月、中国科学院（Chinese Academy of Science）宇宙センターの Jiang Jingshan 主任が新華社通信に2000年を目処に月周回衛星を打ち上げる構想を進めていると語ったことなどから中国も月探査を目指していることが明らかになってきている。同年9月には "Military Space" がロシアのラボーチキン研究所（NPO Lavochkin）が中国と月探査機に使用される姿勢制御エンジンを売ることで合意したと報じている。このエンジンは、もともとロシアが火星のフォボス探査機用に開発したもので、\$20 million で売られ、中国空間技術研究院（Chinese Academy of Space Technology）によって1997年に長征2Eロケットで打ち上げられる月探査衛星に使用されるという。

中国の国防科学技術工業委員会の副主任は本年4月、中国が低コストの再利用型宇宙輸送手段の開発を計画中であると伝えている。宇宙基地などへの資材輸送を一つのねらいとしている。中国がシャトル型の開発計画を持つことは1993年の「当代」6月号で初めて紹介されていたもの。

国防科学技術工業委員会や中国科学院などで計画の調整が行われている（1996年3月現在）。

しかし、その後の進展については殆ど情報が伝わってきていない。ただ、ロシアとの協力が深まっているのは確かであり、96年4月25日、ロシアのエリツィン大統領が北京を訪問して中ロ共同宣言が調印され、科学技術開発の大規模プロジェクトに関する協力を、二国間協力の水準を高める重要な推進力と見なし、こうした協力に一層の注意を払うとし、エネルギー、機械製造、航空、宇宙、農業、通信、ハイテクの分野が優先されることが盛り込まれている。

## 第2章 月の科学および利用可能性調査をめざして

## 第2章 月の科学及び利用可能性調査をめざして

### 1. 月科学の課題—第3世代を迎える月の科学—

月は天文学の対象として、専ら地上からの観測によってその研究が進められてきた。古来よりつづいた古典的月研究、いわば第1世代の月研究から、第2世代の月研究へとその扉を開いたのはアポロ月ミッションであった。人が月面上でサンプルを分析し、あるいは、それを実験室に持ち帰り、月物質の直接分析を行なう一方、周回衛星による重力探査、月面地震計による月内部構造探査など、地球物理学的探査が試みられるようになった。月研究は、天文学的手法から地球科学手法へとバトンタッチされたのである。ミッションの目標は無論「月起源」の解明にあった。

アポロミッションは月表層地形や内部構造、月の土、岩石の化学組成など、多くの新たな知見をもたらした。しかし、月誕生の秘密についてはその片鱗すら手にすることはできず、むしろ謎を深める結果となった。ピンポイント的なサンプル採取にとどまり、月裏面の情報がほとんど入手できなかったため、月の全体像を描くことができなかったことが「月起源」にせまられなかった最大の理由であろう。

アポロミッションと時代を同じくして、太陽系、惑星系の起源に関する研究は大発展し、60年代以前の「太陽系誕生のシナリオ」を一変した。古くカントの時代より60年代まで、単一の物理過程で惑星系のあらゆる特性を一気に説明しようと試み続けられた。しかし新しい起源論は「惑星は長時間、多段階の非可逆的物理・化学過程の結果として作られた」ことを教えている。月もまた、多くの過程を経て誕生した、と考えなければならない。そして、少なくとも誕生直後の月は地球から絶大な影響を受けたはずであり、また、46億年にわたって隕石の襲来など他天体からの影響も蓄積しているに違いない。第2世代の月研究はこのような認識が希薄であり、結果として、安易な道を辿ってしまったことになる。月誕生の謎に迫るにはもっと緻密な研究戦略が求められている。幸い、断片的とはいえ第2世代の月研究で得られた知見、太陽系起源論の飛躍的な発展、ここ20~30年の革新的な宇宙技術の向上、そして、地球科学の新たな展開が合いまって、月科学はいま新しい世代へ突入しようとしている。

今後展開される第3世代の月科学は次の3ステップを踏むべきであろう。第1ステップは、月表層の全球的な把握、すなわち、月地質学の確立である。月面全体の地形、地殻の構造、表層鉱物組成分布など、詳しい観測データに基づき、月の表と裏の本質的な相違性と共通性を調べるのがまず必要である。同時に、第2ステップ以降の研究の準備として、月表面地形の成因をつぶさに調査し、月が固有に持っていた特性と誕生後変化した特性がきちんと仕分けられるべきである第2ステップは、月内部構造の大局的な把握、すなわち、月内部構造学の確立である。我が国が独自に開発を進めてきた月震計を十分な密度で配置し、地震波速度分布を克明に解析することにより、月内部の成層構造、化学組成分布、温

度分布が明らかにされるべきである。この時点で、月科学ははじめて現代地球科学のレベルに達する。第3ステップは、月の全球的な化学組成と鉱物形成年代の把握すなわち、月物質学と月年代学の確立である。第1ステップの成果を基礎に月面の精細な探査を行ない、月表層物質、月内部物質の多くのサンプルを手に入れ、月全体の化学組成を明確にするとともに、その年代を特定しなければならない。これらの知見と、第1、第2ステップの研究と合いまって、初めて本格的かつ、実証的な月起源論が展開可能となる。

最近我が国の地球科学者たちは世界に先駆けて過去40億年にわたる地球の歴史を読み出す手法を確立しつつある。このことは地球科学に新たなページを開くとともに、月の科学に対しても全く新しい局面を提供することになる。地球の自転は月と地球の相対位置によって決っている。地球の岩石サンプルから遠い過去の自転定数を読み出すことにより、月が冷え固まり、地球に対して「表」のみを向け、月の表裏2極性が固定化した時代の年表が作成できるようになってきた。この地球科学的な成果と第1ステップの月研究を結びつけるだけでも、形成直後の月・地球の共進化の姿を明らかにするという、画期的な成果が期待できる。月科学の第3世代の最初の20年に、仮にその間月探査が順調に遂行されたとすればおそらく月と地球の起源に関する基本的なデータを手に入れ、その本質に迫るまでに至るであろう。人類は自らのルーツである生命の起源、地球、月を含む太陽系の起源、そして遠く宇宙の起源に飽くなき探求心を抱き続けてきた。そのうちの1つ、太陽系の起源解明の緒である月起源の本質に迫ることができることになる。このことは、人類の知的フロンティア拡大への大きな貢献である。

第3世代の月科学は、さらに進んで惑星系、太陽系の起源にも新たな展開をもたらすに違いない。今後20年、30年先には、火星、金星、水星など地球型惑星を始めとし、他惑星の探査がはるかに進むことは間違いない。それでもなお、他惑星の探査で得られる知見には限りがある。しかし、月は小天体であるが故に太陽系形成史の初期にその活動を休止し、その当時の記録をそのまま保持しているにちがいない。精細なデータ解析を通してその過去の歴史を読み出すことができれば、惑星系、太陽系の誕生そのものに迫れることにもなる。その意義もまた大きい。

## 2. 近未来の月探査から期待される科学的成果

### 2.1 LUNAR-A 計画

#### 2.1.1 はじめに

わが国初の月探査ミッションLUNAR-Aは、1997年夏に打ち上げられる予定である。打ち上げには、宇宙科学研究所で現在開発中の新しいロケットM-Vの2号機が使われる。こ

れまでの米国、旧ソ連の月探査が、表面の地形や岩石の調査が主であったのに対して、LUNAR-A ミッションでは、地球物理学的手法を使って月の内部構造を探ることを目的としている。これは月の起源と進化を理解するためには、月の内部構造についての知識が不可欠であると考えられるためであり、ペネトレータにより月面上に地震計、熱流量計の観測ネットワークを設置して行われる観測をもとにするものである。また月を周回する衛星にはカメラ(LIC)が搭載されており、月面地形についても新しいデータが得られるものと思われる。本節ではLUNAR-A計画の科学に重点をおいてその全体的な概略を述べることにする。

#### 2.1.2 LUNAR-A ミッションの概略

LUNAR-A ミッションを特徴づける最大のものは、3台のペネトレータを月面に投下することであろう。ペネトレータとは、直径14cm、長さ90cmの槍型をしたケースに入った観測装置で、月を周回する衛星から月面に投下され、観測ネットワークを構築する。図2.1に、LUNAR-A衛星の月周回軌道投入までの軌道を示す。1997年夏に打ち上げられた探査機は直接に月周回軌道には投入されずに、月引力を利用して一度月から大きくはずれた軌道に投入され、その後、太陽の引力を利用して月に再接近する。このとき、月と探査機の相対速度は小さくなり、月周回軌道に投入するときの探査機の世界修正量は少なくなる。これは燃料の軽減に役立ち、その分だけ探査機を軽くすることができる。このような衛星軌道の制御技術は、すでに「ひてん」衛星や「GEOTAIL」衛星で修得されている。軌道傾斜角約25度の月周回軌道投入からペネトレータの投下にいるシーケンスを、図2.2に示す。衛星は最初に、月面からの高さで45km×200kmの楕円軌道に投入されたあと、近月点付近でペネトレータを衛星から切り放す。衛星から切り放されたペネトレータは、その後端に取り付けられたロケットモータを使って減速され、高度25kmから自由落下をする。自由落下の間にガスジェットを使ってペネトレータの姿勢を月面に対して垂直にした後、月面に衝突させる。この時の衝突速度は約270m/秒で、衝突時にペネトレータ本体が受けると予想される衝撃は約5000Gになる。いろいろな実験結果からこの衝突によってペネトレータは月面の地下約2mの深さにまで潜り込むと推定される。

ペネトレータは月面の3地点に投下される。そのうち1点はアポロ12号着陸地点の近傍、次の1点は危難の海、最後の1点はアポロ12号地点のほぼ反対側にあたる月の裏側に設置される。これらのペネトレータでは、月震計測、および熱流量計測を約1年間実施し、月の内部の地震学的構造、熱的構造についてのデータを取得する。観測データはペネトレータ内部のメモリーに一時記録され、周回衛星がペネトレータ上空に来て通信できるようになった時点で、そのデータを母船に送信し、母船から地上局に送ることになる。月周回軌道上にある衛星母船は、カメラ(LIC)を搭載している。このカメラは、将来の惑星探査にそなえて光学航法の技術を習得するための工学的な用途を考えて、搭載するこ

とが決められたものであるが、月表面の地形を約 25 m の空間分解能で撮像できるので、理学的にも意義のあるデータが得られるものと思われる。さらにペネトレータの投下時には、母船は月表面から 45km の低高度にまで軌道を下げるので、数mの大きさのものまで判別できるようになる。残念ながらこの分解能でも、ペネトレータそのものをとらえるわけにはいかないが、これまでの画像で特に興味深い地形をこの精度で写すことができれば、きっと新たな発見があるに違いない。

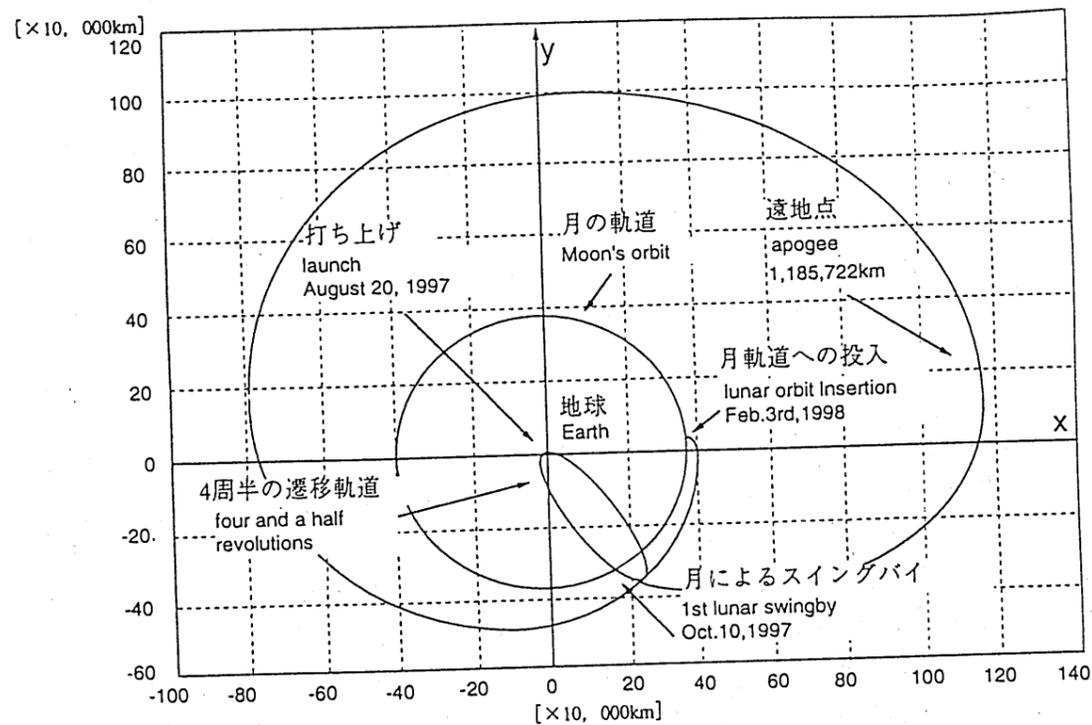


図 2. 1 月周回軌道投入までの軌道 LUNAR-A translunar orbit

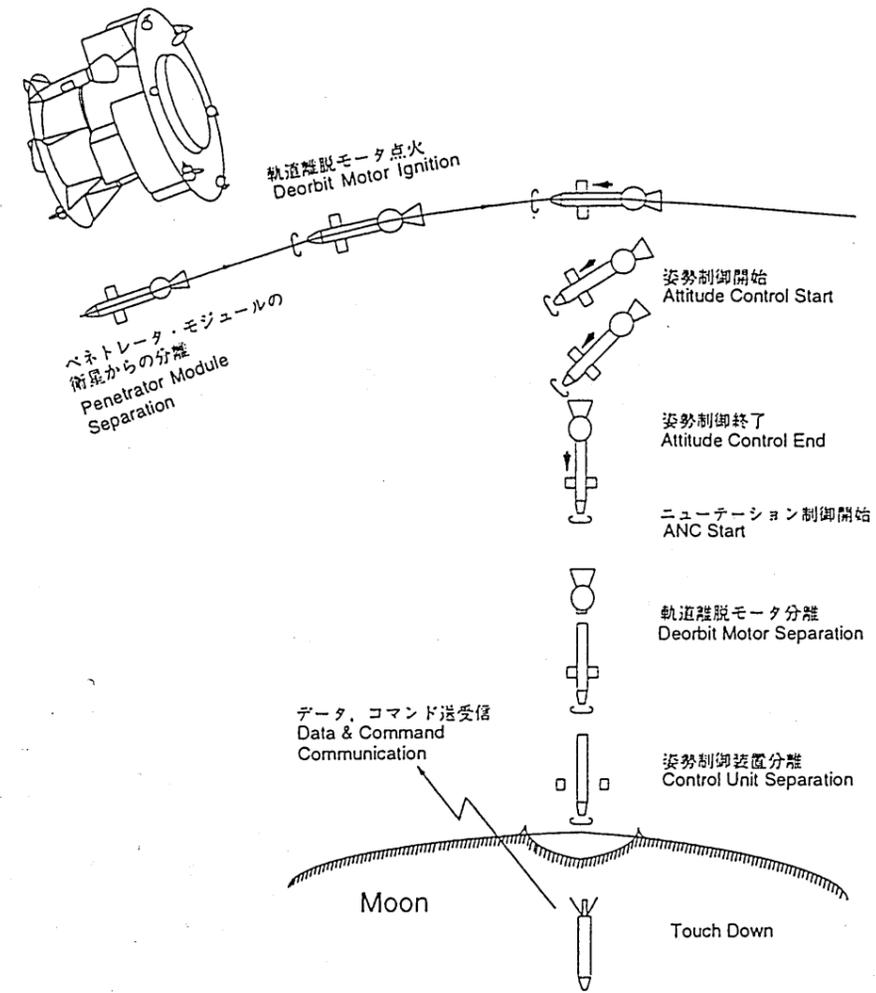


図 2. 2 ペネトレータの投下にいたるシーケンス Sequence of penetrator deployment

### 2.1.3 LUNAR-A 衛星の概略

LUNAR-A 衛星は、月トランスファー軌道への投入後、月スイングバイ、月周回軌道投入、ペネトレータ・モジュールの分離、ペネトレータとのデータ送受信、地球局との送受信、LIC による月面観測などさまざまな作業を行う。このため多数の機器からできている。この衛星の外観を図 2.3 に示す。

衛星の主構体は CFRP (炭素繊維強化プラスチック) 製の円柱状のスラストチューブからなり、その外壁に 120 度間隔で、3 本のペネトレータ・モジュールと 3 枚の太陽電池パネルが取り付けられている。この太陽電池は将来の惑星探査のために新たに開発されたもので、17.3% という高いエネルギー変換効率をもつシリコン太陽電池セルからできている。この 3 枚の太陽電池パネルにより、1 周回平均で 300W 以上の電力を発生できる。

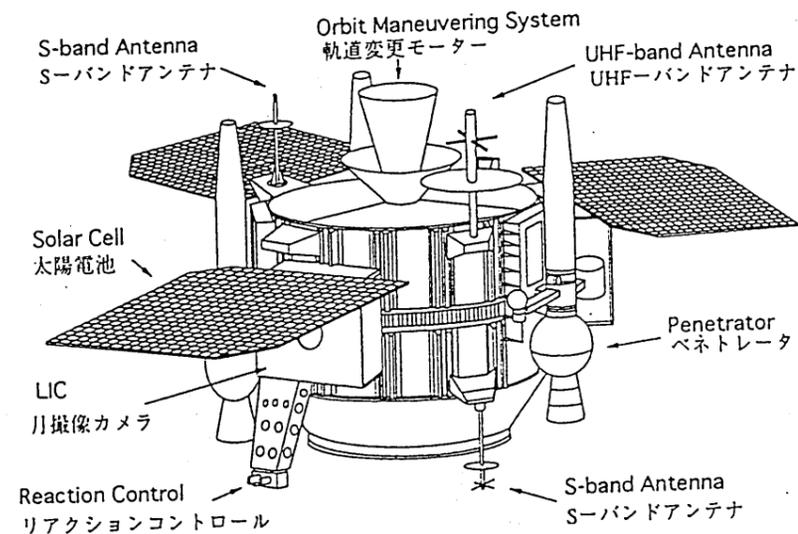


図 2.3 Lunar-A 衛星の概観 Configuration of LUNAR-A

衛星の推進系は、500N（ニュートン）の2液式（ヒドラジン N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> と NTO）エンジンと1N/20Nの1液式（ヒドラジン）エンジンからなっている。2液式エンジンは、主に月トランスファー軌道から月周回軌道への投入時に使われるもので、その逆円錐型のスラスタが図2.3の中央に見えている。1液式エンジンは、軌道修正および衛星の姿勢制御、スピン制御などに用いられるもので、20Nのスラスタを6機、1Nのスラスタを4機もっている。これらのエンジンの燃料は、衛星本体の中央部にある（2.3図では見えない）涙型をしたタンク6個に貯蔵されている。衛星の姿勢は、衛星自身のスピンによって安定化されている。定常時には6rpm（10秒で衛星1回転）を想定しているが、LICにより月面を撮像するときには3rpmに変更できる。衛星の姿勢・スピン状態は、2次元太陽センサー、スピン型太陽センサー、スタースカナーによって常時モニターされる。

衛星と地球局の交信には、Sバンド（2GHz帯）の電波を使う。宇宙研臼田局の64mのパラボラアンテナを使えば、月周回中の衛星から地上局までのデータ転送率は、通常時で8kbps（kbits per second）、良い条件の時には32kbpsになると予想される。ペネトレータと衛星の交信はUHFバンドが使われる。基本的には月周回衛星がペネトレータ上空に2週間に1回程度飛翔するときをねらいペネトレータのデータを衛星に送信することになる。この時のデータ転送率はペネトレータの貫入条件にもよるが約1Kbps程度になると期待される。

#### 2.1.4 ペネトレータによる観測

ペネトレータに搭載される観測機器は月震計と熱流量計である。月震計は上下動成分と水平成分の2成分を観測するリーフスプリングを使った電磁地震計である。熱流量計はペネトレータの機軸方向にそって設置された複数の温度センサーと熱伝導率計から構成されている。

ペネトレータ地震観測網は3点だけであるので、それだけで月震の精密な震源位置を決めるのは難しいと思われる。そこでこの観測網では主にアポロ地震計測で明らかになった深発月震のおもしろい性質を使う事にする。深発月震の震源は深さ500キロから900キロの深さにあり、約100個の震源からほぼ1月に1度の頻度で月震が発生していることが知られている。この月震の波形は各々の震源ごとに違っていると同時に、地球による潮汐歪みとの位相がそれぞれ異なっている。したがって月震波形と発震時から1地点の記録だけでもおおよその震源の位置を決めることが出来る。これによりペネトレータ3地点の観測によりアポロ計画では不可能であった月の深部の構造をより正確に決めることが出来ると思われる。

図2.4は深発月震から来た地震が月の内部をどのように伝搬するかを示したものである。月の中心に約500キロの半径の金属鉄コアがあれば、これは地震波に対してレンズの役目を果たし、震央の反対側でエネルギーの集中がおこると推定される。コアの大きさが200キロ以下ならばこのような事は起こらない。従って色々な場所でおこる深発月震を広い角距離範囲で観測し、深発月震の伝搬の様相を調べれば月のコアの大きさと性質がかなりはっきりと推定できると思われる。ペネトレータは地震計だけではなく、熱流量計を搭載している。これは月のレゴリス内部の温度をの測定とレゴリスを構成する物質の熱伝導率を測定する。月のレゴリスの熱伝導率は幸いにきわめて小さく、月表面の昼夜の温度差は50cmより深い場所ではきわめて小さくなり、月の内部から出てくる熱流量を測定する事が可能になる。しかし実際にはペネトレータ自体が月レゴリスの温度分布を乱すために、レゴリスの本当の温度分布を推定するためには、ペネトレータ外壁に沿っておかれていく多くの温度センサーのデータを使ったかなり精密なシミュレーションが必要になるとと思われる。現在このための解析が行われているが、20%以下の誤差で熱流量値決めることが出来ると思われる。この精度はこれまでのアポロ計画によって得られた2地点での熱流量（Langseth et al., 1976, see also Hood, 1984）の差よりずっと良いので、月全体の平均的熱流量を決めるのに有力なデータとなるであろう。

Model 1 (  $R_{\text{core}} = 500 \text{ km}$  )

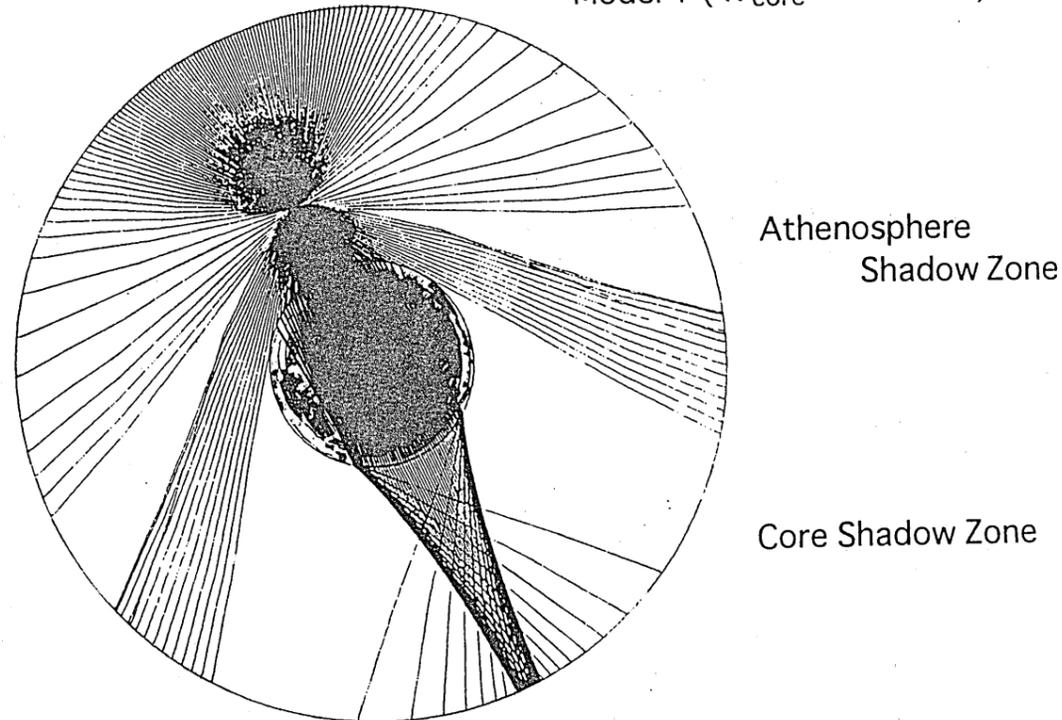


図 2.4 深発月震からでた地震の月の内部の伝搬

### 2.1.5 LUNAR-Aの科学的成果と月の起源

月の起源を解明する上で現在もっとも望まれているデータは月全体としてどのような元素組成を持っており、これが地球や始源的隕石の組成とどのような違いがあるかを明らかにするものであろう。この意味で LUNAR-A ミッションによる地震学的データ、熱流量の測定はきわめて大きな意義を持つことになると思われる。もし月震観測により月の中心核の大きさが分かれば、月全体として親鉄性元素の存在度がかなりはっきり分かることになる。これまで月物質は親鉄性元素に不足していると信じられているが、もし月の中心核の大きさが400~500キロ程度の半径を持っていれば、むしろ月を作った原料物質は親鉄性元素存在度に関して始源的組成に近いものであることになる。この事は図 2.5 にしめす Newsome (1984) の結果を見るとよく分かる。この図では月の岩石の分析から示されている親鉄性元素の欠乏は、もともとコンドライト組成をもった岩石中の親鉄性元素が中心核の鉄に吸収されたと解釈することによってよく説明出来ることを示している。もしそうであれば、月の地球からの分裂説、あるいは巨大衝突説はきわめて困難な立場になろう。これらの起源説では月岩石に見られる親鉄性元素の欠乏は月を構成した材料そのものの性質と考えており、その不足分は地球にあると考えているためである。一方、月の材料物質そのものには親鉄性元素存在度の欠乏が見られないことになれば、これは月と地球が兄弟関係にあったとする説、あるいは月の捕獲説に有利な考えを指示することになる。

いずれにしても月震観測により、月のコアの大きさを知ることは月を構成した材料物質の特徴を知る上できわめて大きな意義を持つものであり、月の起源を明らかにするための必須のデータとなる。

月震観測によりまた月のマンツルの地震は速度をより精密に決めることが出来るようになるであろう。もしこれができれば月マンツルの岩石中のMg #をさらに正確に推定できるようになる。これまでは月のマンツルのMg #は地球よりも小さい値をとるものと信じられているが、地球物理学的根拠はきわめて薄弱である。月のマンツルのMg #が明らかになれば、これも月の材料物質と地球の材料物質の違いを明らかにすることに繋がり、月の起源と進化を考える上できわめて重要なデータを提供することになる( Shervais and Taylor, 1984)。

一方熱流量計は月の熱的な状態を教える直接的な観測データを与えてくれるが、それ以外に月全体の難揮発性元素の存在度についても教えてくれる。これは月の熱流量のかなりの部分が放射性元素の崩壊によって現在発熱されている量に依存しているからである。アポロ計画による熱流量観測値から月はU, Thのような難揮発性元素富んでいると信じられている(e.g. Drake, 1984)。これは月を構成した物質がある段階で加熱され、揮発性元素を散逸し、難揮発性元素を濃集させるような事件があったことを意味していると思われる。しかしアポロの熱流量値がどの程度平均的なものかについては疑問があるし、その解釈にも問題があることが分かっている。もしLUNAR-Aで3地点での熱流量計測ができれば、アポロ計画で得られている熱流量のこのような問題が解決され、月全体としての平均的な難揮発性元素存在度のついてはかなり確度の高い推定が出来るようになるであろう。

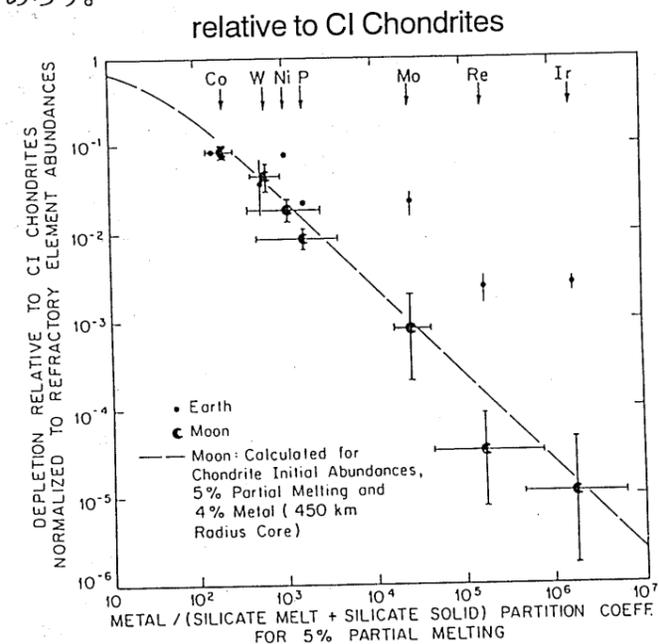


図 2.5 Newsome (1984) の結果

### 2.1.6 終わりに

ここで簡単に述べたようにわが国の月探査ミッションLUNAR-Aはペネトレータを使った地球物理学的観測により月の起源を解きあかすのにきわめて大きな役割を果たすと思われるデータを収集する。このミッションで月の全てが分かるわけではないが、これまで米国や旧ソ連邦による惑星探査によるデータの受け売りしか出来なかった日本の惑星科学コミュニティから世界にむけて月の科学の第1次的データを発信できる時代に到達したと言えるだろう。

#### 参考文献

- 藤村彰夫、早川雅彦、LUNAR-A計画——わが国初の月ミッション、遊星人、1、2—9、1992。  
 Drake, M. J., Is lunar bulk materials similar to Earth's mantle?, In: Origin of the Moon, edited by W. K. Hartmann, R. J. Phillips and G. J. Taylor, Lunar & Planetary Institute, pp. 105-124, 1984.  
 Hood, L. L., Geophysical constraints on the lunar interior, In: Origin of the Moon, edited by W. K. Hartmann, R. J. Phillips and G. J. Taylor, Lunar & Planetary Institute, pp. 361-410, 1984.  
 Langseth, M. G., Keihm, S. J., and Peters, K., Revised lunar heat flow values, Proc. Lunar Sci. Conf. 11<sup>th</sup>, 3143-3171, 1976.  
 Newsome, H. E., Constraints on the origin of the Moon from the abundance of molybdenum and other siderophile elements, In: Origin of the Moon, edited by W. K. Hartmann, R. J. Phillips and G. J. Taylor, Lunar & Planetary Institute, pp. 203-234, 1984.  
 Shervais, J. W. and L. W. Taylor, Petrologic constraints on the origin of the moon, In: Origin of the Moon, edited by W. K. Hartmann, R. J. Phillips and G. J. Taylor, Lunar & Planetary Institute, pp. 173-203, 1984.

### 2.2 月周回衛星

アポロによる探査以降、月は惑星探査のなかでは忘れられた存在になっていた。月の科学の重要性は多くの研究者が認識していたにも関わらず、極軌道衛星による全面探査は、アポロから20年以上たった1994年、Clementineによって、ようやく行なわれた。すでに、金星ではMagellan探査機による全面地形サーベイが行なわれ、火星でも事故さえなければ、Mars Observerが全面の高解像度の地形・分光データを取得していたはずであった。

Clementineは、NASAが米国防省と協力して開発した軽量の探査機である。1994年1月25日に打ち上げられ、2月19日より約2ヶ月間、極軌道(高度400km - 2940km、周期5時間)より月の観測を行なった。極軌道衛星としてはLunar Orbiter 4, 5号以来のもので、月の全表面を撮像した初めての探査機である。主な観測機器は4台のカメラとレーザー高度計で、新技術を使った著しい軽量化がされている。

		バンド数	波長域	解像度
全面	紫外可視	(5+1)	0.415-1.0 (0.4-0.95)	150m
	近赤外	(6)	1.1-2.78	200m
視野中心	高分解紫外可視	(4+1)		10m
	赤外	8-9.5 μm		<100m

そのほかに、電波計測による重力測定や極域での氷探査が行なわれた。成果としては、月のグローバル、シームレスな分光観測を初めて行なったことがまず挙げられる。これにより、全球的な鉱物分布、元素分布に関しての情報が得られた。例えば、Lucey et al. (1995)は分光データの解析から、微笑隕石衝突による風化の効果も考慮して、鉄さらにはチタンのグローバルな分布を求めている。アポロのガンマ線のデータと比べると、定量的にはまだ、問題がありそうだが、定性的な傾向を表わすデータとしては役に立つものである。さらに、峡谷やクレーター内のスペクトルの違いから、物質の鉛直分布も論じることができる。

また、レーザー高度計と重力計測によって、月のグローバルな高度、重力、さらには地殻の厚さの変化が、初めて明らかにされた。月の裏側の南極エイトケン盆地が標高が低く、地殻も薄いこと、表側のマスコン地域などでは、地殻に穴があいていると考えられること、がわかった。

一方で、分光撮像のため太陽角の高いときの撮像が主であったため、カメラによる地形のデータからは、あまり新しい情報は得られていない。高分解能のデータの撮像範囲は狭く、短冊状に間隔が空いている。クレーター密度分布を精密にすることは役に立つが、広い範囲の地形データの解析には向いていない。撮像の重なった極域では、太陽の入射方

向が様々な方向のデータが得られたため、永久影領域の判定や逆に日照時間が非常に長い地点の調査に利用された。

月の裏側については、地球と電波で直接結ばれないため、軌道決定の精度は悪い。結果として得られた重力のデータの精度は高くない。裏側の重力を求めるためには、リレー衛星などを用いて衛星の運動を常時トラッキングすることが必要である。

現在、計画中の月ミッションについては表にまとめてある。1997年に、日本の LUNAR-A、アメリカの Lunar Prospector が打ち上げられる。2002年に H-II による大型月探査1号機、2003年にヨーロッパの MORO が計画されている。このうち、H-II には電波源と蛍光X線装置を搭載した着陸実験機も搭載している。H-II 月探査1号機と MORO には孫衛星が計画されている。これらの探査によって得られることが期待できる成果を以下にまとめる。

#### (1) 月表面の元素及び鉱物のグローバルマッピング

月科学探査の大きな目的は、月の地殻の組成やバルク組成を推定して、さらに月起源の解明にせまろうとするものである。月の化学組成は、蛍光X線分光計、ガンマ線分光計、可視赤外撮像分光計を組み合わせることにより定量的な情報が得られる。Prospector、H-II 月探査は、それぞれはじめて、ガンマ線、蛍光X線による元素のグローバルマッピングを行なう。これにより、Mg, Fe, Si の主成分元素、U, Th, K の放射性元素の他、Na, Ca, Ti などの元素の分布の情報も得る。幸い月周回ミッションの実施が想定されている 2000 年初頭には太陽活動が盛んであり、月面からの蛍光X線の励起が強いと予測されるため、主要要素以外の元素の検出も可能であると期待されている。太陽活動が盛んである点は、誘導核のガンマ線計測にとっても有利である。この点は、Prospector と比較すると H-II 月探査や MORO の方が有利である。

可視赤外分光計では、5nm 幅の連続分光により、化学組成の情報以上に、カンラン石、斜方輝石、単斜輝石、斜長石などの鉱物組成や変成度を求めることが期待できる。Clementine などは連続分光は行なわれていないため、鉱物組成まで踏み込んだ議論はしにくい。クレーターの中央丘や、溶岩峡谷の壁などに着目して、表層の下に隠れている層の情報が得られる。南極エイケン盆地などでは、マントル物質の情報も得られることが期待される。また、様々な月隕石資料のスペクトルに対応するような地点を、表面にみつけることができれば、月の進化を議論する大きな手がかりになる。

斜長石地殻からなる高地は、マグマオーシャンから軽い斜長石が分化し表面に浮上して形成されたものか、またはマグマが何度も地殻に貫入した結果形成されたものとの二説があるが、地殻の組成の水平方向・鉛直方向のばらつきを観測することにより、これらの問題に一定の制約を与えることができる。

#### (2) 月表面の地形のグローバルマッピング

Clementine は全球を 150m の精度でマッピングをしたが、中低緯度では太陽高度が高いため、地形解析上の分解能は陰影のあるデータに比べると劣る。LUNAR-A では、カメラ LIC で月面の緯度 25 度以内の領域をモノクロであるが 25m の精度で全面マッピングを行なう。月の裏側の広い領域ではこれまで最高の精度の画像が得られる。また、H-II 月探査では 5-10m の高解像度のステレオカメラにより、部分的な高分解能マッピングを行なう計画である。MORO でも高解像度のステレオカメラによる撮像が計画されている。

地形のマッピングの主目的は、地質構造の成因とそれを支配した熱史や衝突現象の解明にある。これには、地形データの他、分光データやサウンダーや重力計測のデータと合わせた解析が必要である。H-II 月探査では、地形と同時にレーザー高度計により、高度のデータを逐次得られる。これも、地形解析には重要な手段になる。例えば、溶岩流の流向と現在の高度分布を比較することで、海のグローバルな構造変化を検知できる可能性がある。溶岩流地形の細かい観察から、その物性や噴出率を推定できる。また、リッジの形態の非対称性などの観察から、サウンダーのデータと併せて、成因や応力方向を議論できる。一連の探査により、特に、月の火成活動の形態や成因、海のテクトニクスに関する研究は大きく進歩するであろう。

月の表面には、40 億年以上前の激しい隕石の衝突の歴史が刻まれている。これらのクレータとその周辺を探査することにより初期太陽系空間の様相を明らかにすることができる。また、地形の情報は、将来の地震計設置場所やサンプリング場所などの選定や、月面天文台など科学施設の設置場所の選定にも必要である。

#### (3) 月の内部構造

LUNAR-A では、長さ 90cm の 3 台のペネトレーターに地震計と熱流量計を搭載して、月面に落下させ、観測ネットワークを構成する。約 1 年間にわたり、月震と熱流量計測を行ない、月の内部の地震学的、熱的な構造を明らかにする。観測点の 1 点は月の裏側にあるため、月の中心核の大きさも制約づけることが可能である。また、マントルの速度構造や観測点直下の地殻の厚さも求めることができる。

H-II 月探査では、周回衛星及び月面に電波源をセットすることにより、月の慣性能率の精密決定を行なう。月の慣性能率の精密な値と、月の中心核の大きさの情報と組み合わせることにより、中心核の成分を正確に推定することが可能となり、ひいては月起源の解明に寄与できると期待されている。

H-II 月探査に搭載されるレーダーサウンダーは、HF 波を使って地下 5km 程度までの反射面を 100m 程度の分解能で捕らえて、月の地下浅部構造のグローバルマッピングを行なう計画である。地形データと併せて、月の層序や応力史を明らかにする、さらには海の下弾性的リソスフェアの厚さを明らかにする。また、MORO に搭載される波長の短い、マイクロ波サウンダーでは、月の表層のレゴリスの厚さのマッピングが行なわれる。

また、Prospector、H-II 月探査、MORO のいずれも、電波のドップラー効果を利用した重力計測を行なう。このうち特に H-II 月探査では、リレー衛星を用いて、月の裏側の重力を 100km 以下できれば数 10km 程度の高精度で求める計画である。

(4) 磁場のマッピングと月の電磁的性質の計測

月表面や月岩石の磁場・磁化の形成機構として、初期のダイナモ作用、月形成時の宇宙空間磁場の残留、隕石の衝突による励起磁場の焼きつきなどが提案されているが、決定的な説はない。月磁場がなぜ形成されたかを解明することは、月科学の重要な課題の一つとされている。また月の電磁応答を調べるための磁場探査は月の電気伝導度や内部構造を解明するための有力な方法とされている。Lunar Prospector と H-II 月探査に搭載される磁力計・電子反射計により、月表面の磁場のグローバルマッピングを行なう。いずれのミッションでも最終段階で、数 10km に高度を下げたときの運用期間で、よいデータが得られることが期待される。

(5) 月環境の計測

月の放射線環境、ダスト環境、電磁環境の研究は、将来の月環境利用のために不可欠であるだけでなく、それぞれ固有の重要な科学的意義を含んでいる。磁場の影響を受けない月面での放射線の精密観測は、太陽フレア粒子と銀河宇宙線の研究に大きな寄与をすると期待される。H-II 月探査 1 号機に搭載される、質量分析機能付きダスト分析機は、太陽系外起源のダストの分析も目指しており、宇宙空間ダストの研究に新しい展開を与える。太陽風粒子計測器や波動観測装置は、太陽風そのものの観測だけでなく、太陽風と月との相互作用を明らかにすることができる。また、コヒーレントな S,X バンド波を利用した電波科学により、高度 30km 付近まで存在していると言われている月電離層についても検証が可能であると考えられている。

(6) 月からの科学観測

この分野の研究としては、H-II 1 号機では、月周回衛星からの惑星電波の観測と地球周辺環境の撮像計画が提案されている。衛星が月の裏側にまわり込んだ時には、地球からの電磁ノイズが遮蔽されるため、木星電波などの惑星電波を高感度で観測することができる。地球撮像計画は、月付近の軌道が地球周辺を撮像する観測点として適していることを利用したものであり、これにより地球磁気圏の巨視的な構造を解明しようとするものである。現在、撮像対象として、極端紫外光、真空紫外から近赤外領域の分光、高速中性粒子が検討されている。

表 2.1 今後実施が予定あるいは検討されている月ミッションの比較

ミッション	Lunar-A	Lunar Prospector	H-II-Aによる月遠隔探査 (下記は全て検討中の案)	モロ(MORO: Moon-orbiting Observatory)
打上年	1997年	1997年	2002年	2003年
打上機	M-V	Lockheed Launch Vehicle	H-II-A	Arian-5 Share Flight
軌道	軌道傾斜角25度 200 - 300 km	極軌道 100 km	準極軌道 100 km前後	極軌道 100 km
探査	ハッブル 遠隔(TV)	遠隔	遠隔、着陸実験機	遠隔
衛星重量	540 kg	233 kg	2800 kg	1200 kg
科学観測項目	・月震 ・熱流量 ・カメラ(遠隔探査)	・γ線分光計 ・中性子分光計 ・磁力計、電子反射計 ・α粒子分光計 ・ドップラ重力計測実験	(検討中の項目) ・蛍光X線 ・γ線分光計 ・レーザカウンタ ・可視赤外撮像分光計 ・可視カメラ ・レーザ高度計 ・電波源による相対VLBI ・磁力計 ・高エネルギー粒子線 ・宇宙ダスト ・電磁環境 ・惑星電波観測 ・地球周辺イメージャー ・リレー衛星による重力計測	(候補) ・ステレオカメラ ・紫外可視赤外撮像分光計 ・γ線分光計 ・マイクロ波計測器 ・サブミリメートル実験

衛星重量は燃料を含んだ重量。H-II-Aを利用した月遠隔探査ミッションの内容については、1996年3月現在、月周回衛星ワーキンググループが検討している暫定的な案である。

### 3. 将来の月探査

#### 3.1 ネットワーク・サイエンス主体のミッション

##### 3.1.1 科学目的

月の起源と進化を明らかにするために、月の内部構造を詳細に解明する事が必要である。遠隔探査やローバやサンプルリターンミッションでは月の内部構造の詳細を明らかにするのは不可能であるので、内部構造の解明のためには、月面上に複数の観測点を設置する事が必須である。これは LUNAR-A 計画における科学目標でもあるが、将来的にさらに LUNAR-A にはじまる月内部構造探査をさらに高精度化することが必要であると思われる。このようなネットワークにより次のような観測を行うのが、このミッションの科学目標になるであろう。

- (1) 月中心核の大きさ、密度、弾性率
- (2) 月深部マントルの地震波構造、低速度層の有無
- (3) 月裏側の地殻構造、表側地殻との違い
- (4) 月地殻、上部マントルの非均質性
- (5) 月地殻の密度構造、重力異常分布
- (6) 月全面の熱流量値分布
- (7) 地殻、マントルの電磁気学的構造

これらの目標を達成することにより月の起源と進化について鍵となるいくつかの重要なデータが得られる。これらの多くのものは第1号機によるリモートセンシングによるデータと組み合わせることにより、より精度の高い議論が出来るものであることも強調しておこう。

LUNAR-A では月の内部に関するグローバルな第1近似的な構造を得ようとしているものであるのに対して、将来のネットワーク主体のミッションでは上で述べたように LUNAR-A の科学目標をさらに発展させ、月の裏側と表側の構造の違いなど、LUNAR-A で得られたものよりもさらに詳細な内部構造を求めることに主眼が置かれるべきであろう。

##### 3.1.1.1 ネットワークによる観測と観測点の数

上述の目的のためには、観測点を Global に分布させる必要がある。地域的な非均質性を論じられるようになるためには、地質学的に分かっている大きな地質構造区分程度の領域を明らかにできる程度の観測点数が必要であろう。月の大きな盆地の大きさは  $1000 \text{ km} \times 1000 \text{ km}$  程度の大きさを有しているので、観測点のおよその数は月の表面積 ( $38 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) を  $10^6 \text{ km}^2$  で割った数、すなわち40点ほどが必要になる。しかしこれだけの観測点を一気に設置するのは実際的ではなく、最初はこの4分の1程度の数から始めるのが現実的な

目標となるであろう。これだけの数の観測網を設置するにはやはり、LUNAR-A で開発されているペネトレータを利用するのが日本の独自性を生かし、もっとも効率的な方策と思われる。またペネトレータの利用方法として LUNAR-A で行われる地震観測、熱流量観測以外にも新しい計測も考えるべきである。具体的には提案されている計測としては、月面電波源を用いた相対 VLBI 手法より新しい測地学的方法による探査、長周期地震計による月震観測、月の自由振動検知、太陽風磁場の変化を利用した電磁誘導探査などがある。このうち相対 VLBI を用いた計画は1号機の周回衛星計画でも行うが、ネットワークを主体とするミッションでは月面上に複数点の電波源を設置することによって、より精度の高い月の秤動や重力場の観測を行うことが出来る。

このように月面に観測機器のネットワークを設置する事により月の起源と進化の解明に直結する新しい科学データが得られる。この意味でネットワーク探査は将来の月科学の大きな柱になるものと考えられる。

##### 3.1.1.2 ネットワークサイエンス探査の1例：LUNAR-B

###### (1) LUNAR-B 計画の概要

この計画は LUNAR-A にはじまる月内部構造探査をさらに高精度化し、月の起源と進化を明らかにするのに必要な地震学的、測地学的データを得ようとするものである。この目標のために LUNAR-A 計画で開発されたペネトレータを使い、7地点にペネトレータを設置すると共に、1地点にランダーを軟着陸させ、合計8ヶ所の科学観測ネットワークを設けようとしている。これにより LUNAR-A では不可能である高緯度地域の構造、表側と裏側の構造、月中心核の物性（密度、弾性率）の解明に資する多くの地球物理学データが得られる。本ミッションで形成されるネットワークの配置案を図2.6に示す。この配置は遠隔探査ミッションの成果が得られた段階で再考すべき余地（特に着陸船の着陸点）があるが、現時点でもっとも現実的と考えられる配置を示したものである。

ペネトレータでは耐衝撃性を高め、省電力化するために、比較的短周期の地震計しか使えないが、ランダーでは衝撃の程度も小さいと期待されるので、地球上で最近使われるようになってきた広帯域地震計が設置出来るであろう。このために LUNAR-A では不可能であった、長周期月震波を検知でき、月震発生メカニズムなどの解明にも使えるデータが得られることになる。また規模の大きな月震が発生すれば、月の自由振動を捉えることも可能であり、月内部の構造についても、LUNAR-A では不可能であると予想される領域において、大きな発展を導くであろう。さらにランダーと3台のペネトレータには、S、Xバンド電波源を搭載し、相対 VLBI 手法により月の秤動や重力場の観測を行う。この観測と地震学的観測を合わせるにより、測地学的手法により月の内部構造や物性に関する情報が飛躍的に向上するものと思われる。

本計画の概略をまとめたものを2.2表に示す。

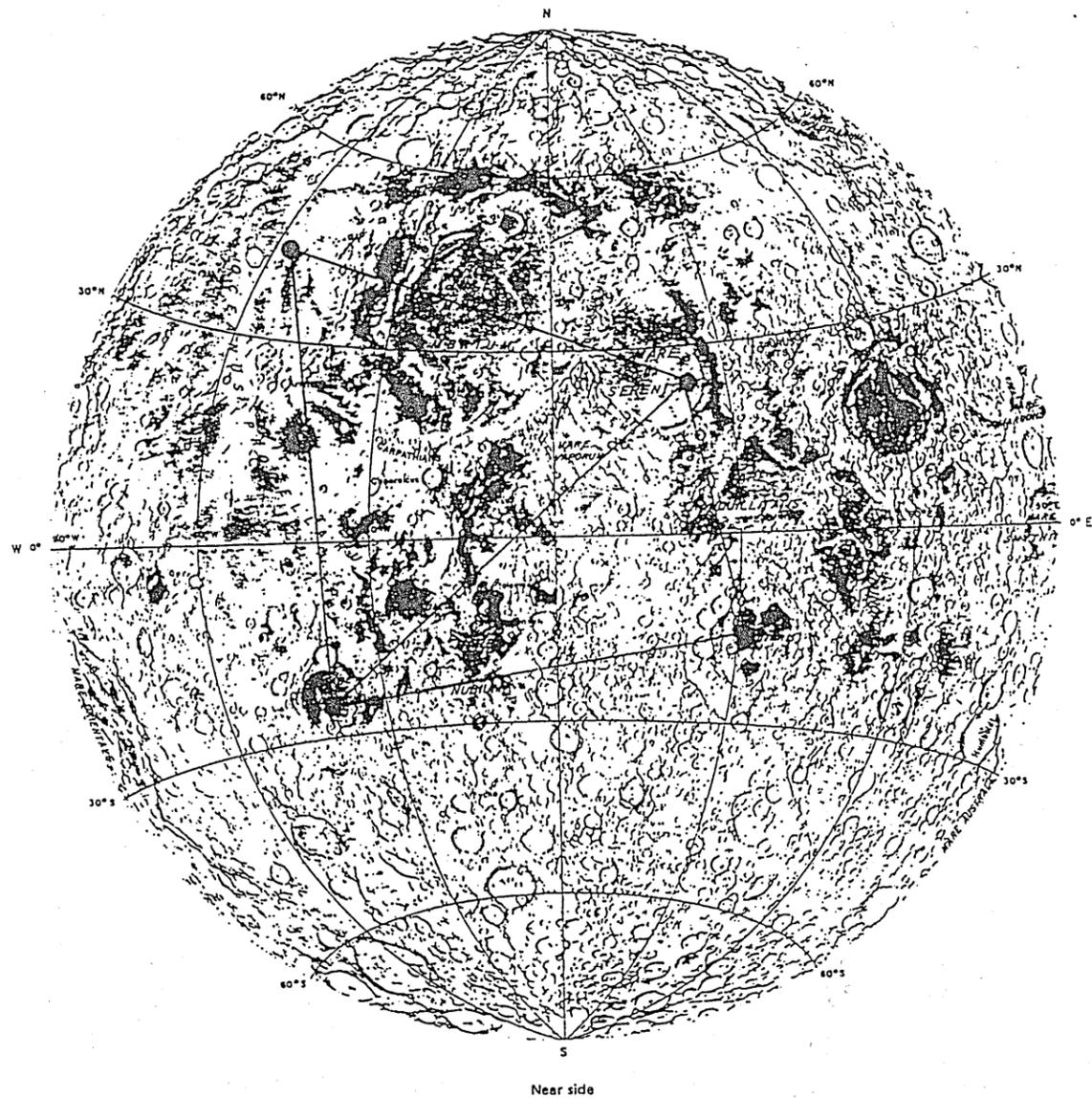


図 2.6-A ネットワークの配置案 (地球側)

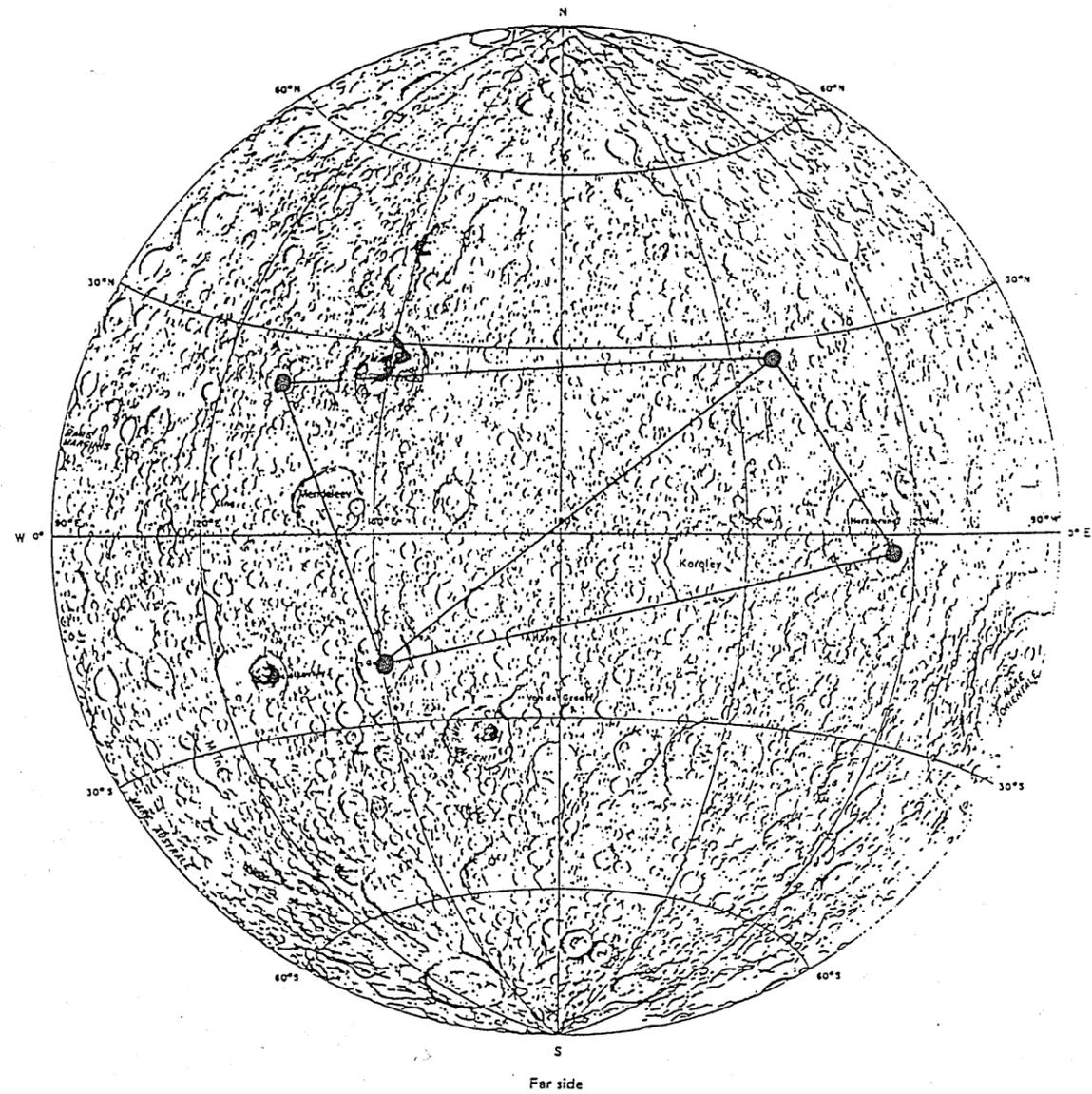


図 2.6-B ネットワークの配置案 (裏側)

表 2.2 月内部探査 (LUNAR-B) ミッションの概要

打ち上げロケット H-I I	月スイングバイを利用して月周回軌道へ投入
軌道	高度 200 km, 円軌道, 傾斜角 45 度以上
母船	3 軸姿勢制御
着陸船	南緯 50 度, 西経 10 度付近 (マクレーの南) 着陸
ペネトレータ	7 台 (4 台は月の裏側, 3 台は月の表側)
観測機器	ペネトレータ 5 台には地震計, 熱流量計 ペネトレータ 2 台には地震計, 月面電波源 着陸船に広帯域地震計, 月面電波源, 月大気計測器
データ転送速度	各ペネトレータから母船へ 2 kbps 以上 (ペネトレータと母船遭遇中) 着陸船から母船へ 4 Kbps 以上 (母船と着陸船遭遇中) 母船から地上へ 1 Mbps (臼田局の S, X バンドを仮定) 着陸船から地上へ 5 kbps
ミッション期間	2.5 年
重量	月トランスファー軌道全備重量 2800 kg 母船重量 (ドライ) 1850 kg ペネトレータ 7 台 560 kg 着陸船 390 kg

(2) ミッション シナリオ

8 地点からなるネットワークの内、1 点はランダーによるものである。これはランダーの工学的技術をさらに信頼性のあるものにする必要があるであろうとする配慮と、長周期地震計を設置するには設置時の衝撃が小さい必要性があるためを考慮したためである。ランダーの位置はこの段階ではおそらく地球に面した表側でなくてはならないと思われるので、ネットワークの内、月の表側の置く 1 機をランダーで設置する。また LUNAR-A ペネトレータでは電力制限のため、温度の低い高緯度地帯には観測点を設置できないので、ランダーにより地震計を高緯度地帯に設置する。各ペネトレータの搭載機器は基本として LUNAR-A のペネトレータを踏襲し、地震計と熱流量計を搭載する。ただし、表側に設置されるペネトレータの 3 台には相対 VLBI 用電波源も搭載する。また観測時間を LUNAR-A よりも長くするために、LUNAR-A 搭載の電池数の約 2 倍を搭載する。観測モードとしては基本的に LUNAR-A と同様とする。すなわちアポロ計画における月震観測と異なり、地震波を検知したときのみ計測系が稼働するイベントトリガー方式を採用する。イベントトリガーのアルゴリズムに関しては LUNAR-A の成果をみるによりさらに効率を上げる方式を採用できるものと予想される。

ランダー搭載の長周期地震計はトランスデューサーにより振り子の変位を検出し、ネガティブフィードバック回路によりその変位に比例した力を振り子にかけ制動する。比例定数を大きくすると力は振り子の慣性力に等しくなり、地動の加速度に比例した電氣的出力を得る方式である。

相対 VLBI 観測ではランダーおよびペネトレータに搭載された電波源からの電波を背景の天体電波源と同時に地球から観測する。これらの電波源を観測する地上の VLBI 観測網として、VERA 計画の水沢、鹿児島、石垣島、父島の 4 局などを予定している。VERA 計画の各局は複数のアンテナで構成されているために、複視野相対 VLBI が可能なのでこの種の観測に最適である。

以上に述べてきたような観測ネットワークを作るための手順は次のようなものになる。H

-II によって打ち上げられた衛星は、LUNAR-A と同じく月スイングバイを行い、月と太陽の重力を用いてなるべく省エネルギーとなる軌道を取り、月周回楕円軌道に投入される。この後、ランダーを衛星から切り放しこれを所定の場所に軟着陸させる。次に衛星軌道を 40 km x 200 km の軌道に変換し、そこから LUNAR-A の方式でペネトレータを 1 台ずつ月面に投下する。7 台のペネトレータを投下するまでには 2 月程度の期間が必要と思われるので、その期間中に衛星の軌道調整は必要になるであろう。

(3) 科学観測機器の概要

(i) ペネトレータ搭載機器 ペネトレータに搭載する地震計、熱流量計は基本的に LUNAR-A のペネトレータに搭載されるものと基本的には同じものである。LUNAR-A の結果をふまえてさらに改良を加えたものがこのミッションで採用される。

- 地震計：リーフスプリングを利用した短周期電磁地震計、3 成分
- 熱流量計：温度センサーと熱伝導率計からなるシステム
- VLBI 電波源：8GHz 帯発信源

(ii) ランダー搭載機器

- 地震計：長周期フィードバック型地震計、3 成分
- VLBI 電波源：2.8 GHz 帯発信源

VLBI 電波源については、ランダー搭載のものには S, X 帯の 2 つの波長帯を用いる。ペネトレータ搭載のものは、設計の発展に伴い軽量、省電力化を図る必要がある。これらの機器の重量、サイズ、必要電力をまとめて表 2.3 にしめす。またランダー搭載の長周期地震計とペネトレータ搭載の短周期地震計の性能の比較を図 2.7 に示す。フィードバック型長周期地震計ではペネトレータ搭載の地震計にくらべ数秒以上の長周期側で感度が高く、表面は、自由振動の検知に大きな力を発揮するものである。

表 2.3 搭載機器一覧

機器名	重量 (g)	サイズ (mm)	消費電力 (W)
短周期地震計 1 成分	400	50φ x 50	0.1
長周期地震計 1 成分	3000	300 x 300 x 100	5
熱流量計	20	10φ x 5 (x 10 個)	0.1
VLBI 電波源	2000	100 x 80 x 130	2

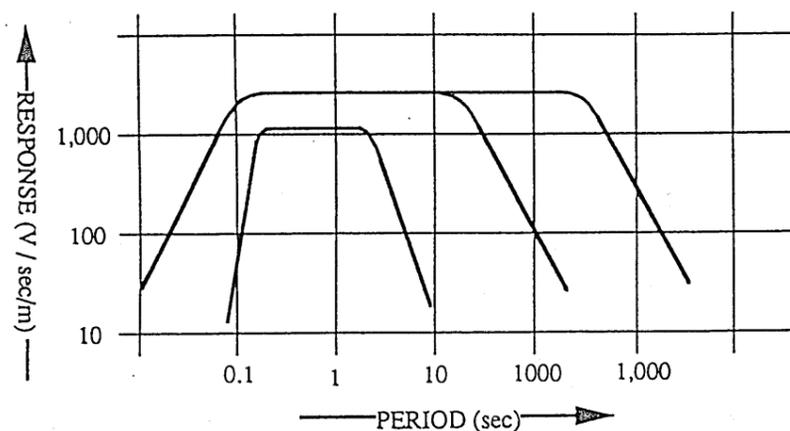


図 2.7 ランダー搭載の長周期地震計とペネトレータ搭載の短周期地震計の性能比較

#### (4) 本ミッションの特徴

このミッションの特徴としてランダーに広帯域フィードバック型地震計の搭載を予定している。広帯域フィードバック型地震計の観測により月震学に大きな飛躍をもたらされると思われる。月震はマグニチュードが小さいため、ほとんどの月震記録は微小な振幅しか持たない。記録されたP波とS波はほとんどの場合短周期成分のみが数 digital unit の微小振幅で記録されているに過ぎず、地震波の解析で行なわれているような波形解析を行なうことは困難である。Apollo 計画では周期 0.1 秒付近に感度のピークを持つ上下動短周期月震計(SPZ)と、周期 1 秒から 10 秒までフラットな感度を持つフィードバック型の 3 成分長周期月震計(flat LP)が設置された。これらは振幅で 0.3 nm の感度を持っていた。ただし、flat LP は安定に動作しなかったため、ほとんどの観測期間ではフィードバック回路を切って周期 2 秒付近に感度のピークを持つ状態(peaked LP)で観測が行なわれた。一方、LUNAR-A 計画では 2 成分短周期月震計が予定されている。これらは SPZ や peaked LP に比べて最大で 5 倍の感度を持つが、周期 10 秒では flat LP と比べると 1/10 の感度になる。従って、Apollo 計画同様、LUNAR-A 計画の月震記録にも長周期成分がほとんど含まれないことになる。現代地震学においては、waveform fitting や長周期自由振動のスペクトル解析が主要な解析手法である。波形解析が可能な数少ない観測例として、1975 年 1 月 3 日に起きた大規模な浅発月震の flat LP での記録がある。これには P 波と S 波が数十 digital unit と比較的大振幅で記録されている。ランダーに高感度フィードバック型月震計を設置することで、あまり大きくない浅発月震でもこのような波形解析が可能な記録を得ることができる。この高感度フィードバック型月震計を用いれば、大きな浅発月震によって励起される減衰しにくい長周期自由振動が記録される可能性もある。それらの解析は月震学に質的飛躍をもたらさるであろう。

#### (5) 本ミッションの科学的意義

このネットワークミッションでは次のような項目について新しいデータが得られる。

- (1) 月中心核の大きさ、密度、弾性率
- (2) 月深部マンツルの地震波構造、低速度層の有無
- (3) 月裏側の地殻構造、表側地殻との違い
- (4) 月地殻、上部マンツルの非均質性
- (5) 月地殻の密度構造、重力異常分布
- (6) 月裏側における熱流量値

これらの目標を達成することにより月の起源と進化について鍵となるいくつかの重要なデータが得られる。これらの多くのものは第 1 号機によるリモートセンシングによるデータと組み合わせることにより、より精度の高い議論が出来るものである。

#### 3.1.2 月の利用可能性について

人類が宇宙活動を拡大して月の利用を計る際には、例えば資源の全てを地球から打ち上げるのではなく、月面を利用して資源を供給し、天文台建設や、中継基地、エネルギー供給基地等による利用を効果的に促進する必要がある[1]。月周回衛星探査に後続する探査で利用面の実効を上げるため、月面形状の地域的な詳細調査や月面環境利用を含む月面表層・内部構造調査、資源探査において、各種・各段階の探査システムを有効に活用することが不可欠である。月面表層環境利用・資源回収が可能となれば、来るべき月面上の建設作業等に月面資源を利用できるだけでなく、人類活動のための資源を他天体に拡大可能となる基本的技術体系が獲得できる。

月面ネットワークを設けて、月内部構造を観測し、また、月からの天体観測を実施するとき、利用可能性として以下があげられる。

- ①宇宙モニタリング・天文台建設
- ②通信システム構築
- ③エネルギー供給と熱制御・放熱利用
- ④有人居住環境とライフサイエンス利用

月からの天体観測は、それ自身が利用可能性であり、月からのモニタリングで詳しく述べられている。ネットワークによる観測で利用可能性につながるものは、月の内部構造のうち、ごく浅い数mから数10mまでの深度の詳細な構造と物性の解明である。これまでに提案されているネットワーク・サイエンスは、月全体の内部構造や、浅くてもマスコンの構造等の観測であり、利用可能性に結び付くものではない。そこで、利用可能性に結び付けるため、複雑な月面下構造の探査に、以下のような精密化が加えられる必要がある。

### 1) 精密弾性波探査

センサの3成分アレイ・ネットワーク配置方式による弾性波の位相制御技術を用い、反射波・屈折波・散乱波を利用して月面地下浅所の精密構造解析を実施する。月面では測定資源が限られ、地球上のように多量の二次元測線とセンサを配置できない可能性があるため、1次元測線調査を基に、地下の3次元構造を捉える技術を開発する必要がある。現在の反射法地震探査の手法では、探査対象が侵食の進んで平地化した平野部や平面に近い海底面として測線を張っているが、これではクレータやリル等の起伏に富む月面での探査解析が困難である。月面上で位相制御技術を用いた3成分アレイ配置方式の実現のためには、月面表面の地形を3次元的に精密に計測して地形補正を実施する必要があり、月面では至るところ必ずしも明るく照らされているわけではないため、レーザやマイクロ波を用いた能動的レーダにより、精密地形測量を実施して補正する事が不可欠である。

### 2) 精密電磁波探査

電磁波による探査は、電場を用いる方法と、磁場のみを用いる方法に分けられる。磁場のみを用いた電磁法探査の時間領域電磁法(TEM法)は、ネットワークに配置された信号源により、大地内に誘導されるスモークリングという環状電流が拡散しながら地中を伝播する時、生成する2次磁場を計測する。地球のように、水による侵食作用で平面的な成層構造をなす地下構造と異なり、月の地下は、微天体等の衝突によるクレータ生成や、マグマ活動による垂直・斜方向の構造生成とテクトニックなものも含む断裂系形成により、複雑な構造になっていると推定されている[2]。月の場合には、地下にある異常構造の有無や、およその位置等、定性的なことしか解析できない。これでは、月面地下を利用するエネルギー供給構想「ガラスの海」や、有人居住環境構築の設計すら不完全で危険である。そこで、3次元有限要素法による電磁波伝播モデル解析法を改良して、計算精度を向上して、定量化をはかる。一方、月面ネットワークを用いた時間領域電磁法用アレイセンサを開発し、送信ループによって形成されたスモークリング拡散過程の変動を検出し、地下の比抵抗異常等を含めた三次元的構造分布を精密解析できる技術開発を先行させることも不可欠である。

### 3) その他の探査

熱流量測定やその他の物理計測もある程度は活用できるかも知れないが、利用可能性につながる精度が得られる可能性は低く、補助的手法として活用することができる。ネットワークに用いられる計測点位置の3次元的なcm精度の計測は、次のローバー探査にも使われる。

## 3.2 ルナー・ローバ主体のミッション

### 3.2.1 科学目的

再び月面での調査を行う意義はどこにあるか。それは月面地質調査にほかならない。アポロの場合のように最初の段階では、転石であっても、鍵となる岩石を発見することは、重要であった。しかし、マグマオーシャンはいかに存在したか、月の2分性、マンツルの進化、月の地殻のテクトニクスなどをさらに具体的に解明するためには、それぞれの岩石や鉱物がどのように存在していたか、つまり、月面の地質調査を行うことが不可欠となる。月面無人ローバー探査は、その場分析をする装置を乗せて、有人では困難な長期間、広範囲の調査を実施することができる。また、サンプルリターンと密接にリンクさせるべきである。

#### (1) 月面ローバー探査の主要な課題

##### ① リモートセンシングデータのグランドトゥールース

グローバルなスケールの多様性が、岩石鉱物のレベルで対応出来るようになり、月全体の2分性についての実態が把握できる。リモートセンシングの空間分解能に応じて離れた、異なる岩石種について実施する必要がある。

##### ② 高地地殻の多様性の空間スケールの把握

特に裏側の高地の岩石の鉱物組成、化学組成の多様性を明らかにし、その多様性の空間スケールの把握や、地質単位の上下や貫入関係の把握により、高地地殻の形成過程を明らかにできる。

##### ③ 月深部物質の探索と採取

地下深部から放出されたマンツル物質や地殻物質の探索と採取を行い、月の起源に関する直接の情報を得る。放出物は偏在していることが多いので、その発見にはクレーター規模の探査が必要である。

##### ④ 月面のクレーターの壁における地殻の構造を観察

月面上の離れた地点からの観察により、地殻の詳細な断面構造を明らかにできる。

##### ⑤ 月面の地形と対応した月テクトニクスを解明

リッジや割れた地点からの観察により、応力の解析などが可能となる。

##### ⑥ ローカルネットワークの構築

クレーター規模の構造を明らかにするための地球物理学的ローカルネットワークの設置

##### ⑦ 周回衛星で見出された興味深い地点周辺の岩石、鉱物、揮発成分の分析

これらの課題はいずれもローバーによる移動なしでは実現しない課題である。

(2) ローバーの観測候補地

先行する周回衛星のデータにより興味深い地点が発見されれば、変更を要するが、現時点では、技術開発の現状から最初のステップとして、表面の新しいクレーター内のローバー探査を行う。これに引き続き、技術的な困難を伴うが、高地の多様性、マンツルの不均一性を観測できることが期待される裏側地域の少なくとも緯度の異なる2ヶ所を候補にあげたい。いずれも、中央丘や Fall Back 堆積物中に高地地殻の岩石やマンツル物質が含まれることが期待され、クレータ壁で地殻構造が観察され、クレータ底を埋める海の玄武岩から源岩マンツルの推定が可能な地域である。

① South Pole Aitken 盆地内のクレータ

13km を越える深さまで掘り起こされ、マンツル物質の放出が期待され、地殻深部やマンツルの構造も観察の可能性もあり、マグマオーシャンの固結過程や地殻の深部についての重要な情報源を取得することで可能である。

たとえば Schrodinger(直径 320km 海の玄武岩 Lower Imbrian、中央丘)  
または Ingenii(直径 560km、海の玄武岩 Upper Imbrian、複数のクレータ)

②裏側の中低緯度地域のクレータ

例えば Tsiolkovskiy (直径 180km、海の玄武岩 Upper Imbrian、基盤は斜長石に富む地殻)

(3) 月面の移動距離

Apollo14,15,16,17 号の月面車では、10km の範囲、道のり 30km 程度が調査された。移動距離は観測対象のスケールに依存する。月の構造のスケールを表 2.4 に示す。候補に挙げた地域について上記の課題についてローバーで探査するには、クレータのサイズから推定して、100km の範囲で少なくとも 300km 位の道のりを動くことが要求される。また、2次元的な把握を観測項目の重点とした場合は、数十 km 以内を詳しく歩きまわることになる。

表 2.4 月の構造のスケール

月の構造のスケール	
赤道一周の長さ	11,000km
盆地の直径	
Procellarum (最大)	3,200km
South Pole Aitken (南極)	2,500km
Schrodinger	320km (裏側海の玄武岩 Lower Imbrian, 中央丘)
Ingenii	560km (裏側海の玄武岩 Upper Imbrian)
神酒の海	860km
多くは	300 - 700km
クレータの直径 (中央丘あり、放出物は直径の 3-5 倍)	
Tsiolkovskiy	180km (裏側 Upper Imbrian)(放出物 500km)
Tycho	85km (表側 Copernican)
Copernics	93km (表側 Copernican)

リッジ、割れ目、ドームなどの構造

数 km - 数十 km

(4) ローバー搭載機器

- 1) 望遠カメラ (地形、地層把握)
- 2) CCDカメラ (鉱物識別)
  - (透過偏光 40-100 倍拡大機能、カラー、鉱物に特有な波長にあわせる
  - ガラス・輝石・カンラン石・斜長石の識別)
- 3) 数 g 程度の粉体試料の採取装置
  - 簡便な試料分別 (ふるい)
  - 加工装置 (偏光顕微鏡用)
    - (蛍光 X 線分析・粉末 X 線回折用)
    - (揮発成分分析加熱用)
- 4) 小型 X 線源エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置 (要冷却装置)
  - Mg/Fe, Si/Al, Si/Mg, Sr, Ba, Zr, Ni, Cr

5) 小型 X 線源粉末 X 線回折装置、

小型 X 線源を蛍光 X 線分析装置と共用可能

6) ローカルネットワーク設置 (地震計重力・熱流量・電気探査など)

7) 示差熱-四重極質量分析計

レゴリス表面の太陽風起源 H, He, Ne

揮発性成分 (H<sub>2</sub>O, CO, 硫黄など)

8) レーザー気化質量分析計

粒子単位の化学組成・同位体組成 (主成分から微量成分まで)

(5) Intelligent robot による月面ローバー探査

月面ローバーが、高度の機能を有し自立的な行動ができる Intelligent robot で行えるならば、探査の対象はレゴリスに限らず、大きな転岩や、地層中の岩石、地下の岩石まで拡張することができる。

第 1 フェーズの周回衛星によるリモートセンシング、月面ローバー、無人サンプルリターンによって詳細な地形図、地質図が作られねばならない。これらの情報を総合的に検討することにより、月面における異なる地質単位について、代表の地域について候補地を絞り込む。複雑な地形の高地や、クレーター内部の壁、中央丘などを含む候補地について、地球からの司令に基づいて、Intelligent robot で詳細な月面地質図を作成し、これに対応した試料採取をする。また、地震計の設置やローカルネットワークによる地球物理探査を行う。さらに、数 m - 数十 m のボーリングを実施し、コアサンプルを採取する。これらを総合することにより、月の地殻の進化過程に対する理解が格段と進歩するであろう。

Intelligent robot は、本来地質学者が現場で行うべきことの中で、次のような機能を必要とする。これらにより、単なる組成分布図ではなく、地質学的なプロセスを意味づけを含む地質図を作成することが可能になる。

1) 現在位置観測、周辺微地形の把握と現在地点の位置づけ

2) 遠方から近傍までのダイナミックな地質、岩石、鉱物の観察機能 (望遠、肉眼的視野、顕微)

たとえばクレーターの壁の大きな地質構造の把握、近傍の溶岩や角れき岩の堆積構造、岩石の種類判別、構成物質の判別

3) 岩盤や大きな転石から試料を採取し、測定可能な形態に加工する機能

4) ボーリングおよびコア採取

5) 試料のその場化学組成、鉱物組成、年代の測定・記録

6) リターン試料保存

これらを実現するために必要な基本的機能

1) 障害物、段差、崖など不定形の地形に対し、自律的に対応した移動機能

2) 月面環境への適応 (粉塵、静電気、真空、温度差、低重力)

3) 自己メンテナンス機能

4) 大容量データ通信

5) エネルギー補給

なお、引き続きサンプルリターンのためのローバー精査がどこまで必要かは、ローバー精査のコストとサンプルリターンのコストとの比較検討が必要である。月表面が隕石衝突により均質化されていることを考えれば、安価なサンプルリターン探査ができれば、有効である可能性もある。サンプルリターンの場所を選定するためには、グローバルな近赤外、X 線蛍光分析により、リモートセンシングが行われて以後、楕円軌道により、月表面に近づき、より高精度のデータを得ておく必要がある。この点外国によるリモートセンシングが行われても、なおかつ我が国独自の精密探査は大いに必要と思われる。

3.2.2 月の利用可能性

月面の利用可能性を探る最も効果的な手法は、科学探査の項でも述べられた、移動探査機ローバーを用いた様々な計測である。利用可能性としては、以下が対象となる。

- ①物質輸送インフラ形成
- ②通信システム構築
- ③構造物建設
- ④月面物質資源回収
- ⑤物質製造
- ⑥エネルギー供給、熱制御、放熱
- ⑦有人居住環境、ライフサイエンス
- ⑧宇宙モニタリング、天文台

ローバー探査を利用可能性に活用するには、科学探査と同様、月面地質調査にも重要な意義があるが、より直接的には、精密地形計測が更に重要度が高い。如何にレゴリスが混合されていようと、科学探査においても、計測位置の 3 次元的把握が不可欠である。ローバー探査は、月周回衛星やネットワーク探査の解析結果を活用することになる。しかし、ローバー探査の目的に、利用可能性が保証されるための精度確保が挙げられるならば、まず、精密地形測量の為に機器を主体にした探査計画を企画しなければならない。精密地形測量には、地形基準が不可欠である。地形基準を与えられる cm 以下の精度は、周回衛星では期待できない。この問題の解決法を、緊急に研究開発する必要がある。

### 1) VLBIと(レーザ)レンジ・ファインダ

ローバーの3次元的位置の計測には、地球上ならGPSが適用できるが、月面ではVLBI発信機を用いた位置特定と、それに連動するレンジ・ファインダによる位置測定が必要である。マイクロ波レーダによる方法でもよい。レーザ・レンジ・ファインダは移動体の位置計測技術が進んでおり、VLBIと結合することで、高精度化できる。特に、暗黒域の位置計測には自ら発光する能動型センサが必須である。夜間測定もあるとすれば、能動型は絶対不可欠である。アポロ探査データでも推定したように、月面上で、ほぼ平坦な場所は限定されており、広く移動するためには、単なる障害物検出・退避動作ばかりでなく、遠方まで計測して、予め走行計画を半自動的に決定できる機構が必要である。そこで、プランニングのために移動体から5kmないし10kmまでを計測できる出力を設定する。実際、月面で天体観測用の構築物を建設したり、レゴリスの資源回収にあたるには、少なくとも、この程度の広がりが必要と判断される。このような機構は、対象の形状を測定するだけでなく、移動体を中心とした広がりを3次元的に内部構成して、周回衛星のデジタル・イメージやネットワークの既存データと照合しつつ、認知・判断できる知的メカニズムで実現される必要がある。参照データの精度の粗さをn倍とすれば、参照する地形データの平面的広がりn分の1、高度精度のn倍でサンプリングすることになる。周回衛星で提案されている精度からすれば、nを10から1000の範囲にとることになり、地形分解能を水平10kmから100m以内、高度10cmから10m以内になる。これは、衛星軌道の精密計測とレーザ高度計のデータを組み合わせ、更に、イメージデータの立体視解析も合わせて参照データを得る必要があることになり、周回衛星でどこまで高分解能を実現できるかどうかは、ローバ走行の負荷を制約する。この粗さで、どれだけ実用的精度が確保できるかは、地形起伏状況によるため、予め、移動体の走行シミュレーションを実施する必要がある。同時に、地上オペレータの判断も補助する必要があるため、通信に余裕があればvirtual realityの機構を実現する。このような技術開発は、できるだけ早期に実現できていなければ、ローバ走行の必要項目が決定できない。

### 2) 物理計測による月面・地下構造探査

重力、磁力、弾性波、電磁波、熱等の計測で、ローバ走行測線に沿う物理計測データが得られ、測線に沿う月面地下構造が判明する。対象は、利用可能性のある地下浅所数mから数10mである。弾性波と電磁波については前節に述べた方法を複数の移動探査機の組み合わせで実現できる。例えば、発信源を親ローバにおき、数10台の子ローバに小型センサを組み合わせる方法で広い範囲の計測が可能である。他の手法は、必ずしもローバの連携が必要と限る必要はない。

### 3) 化学・鉱物計測による月面表層物質探査

宇宙発電や宇宙工場、宇宙通信等、宇宙における産業活動の拡大には、重力の大きな地

球から物質を運搬するよりも、月や小惑星等の天体を利用する方が効率がよい。地球大気に遮られない太陽エネルギーの直接利用や、将来の核融合に使われる $^3\text{He}$ が地球上より大量回収可能な利点があり、将来的には地球のクリーンなエネルギー源にも役に立つと考えられている。又、月面天文台建設を始め、資源探査も効率的に進めることができる。このような利用目的には月面の物質探査が必要不可欠である。しかも、物質として利用できるのはごく表面浅所に限られる。どのような物質が月面表層に分布し、利用可能性があるかを精密に調査・解析する必要がある。宇宙開発においては、単なる資源開発にとどまらずに、既存資源の有効利用、閉鎖系における居住性向上や、天文観測の向上等も積極的・継続的に進める必要がある。単に物質回収だけが目的ではない。対象となる物質は、従って、レゴリスだけでなく、構造と合わせて有意義な成果をだせる岩石や、希薄な物質も含まれる。このため、対象によっては、ローバ内に引き込んで計測できないものや、遠過ぎて行き着けないものもある。そこで、接近して細かく観察するために、外部に出せる顕微システムを搭載すると共に、遠方対象の物質計測が可能なシステムを組み込んで、ローバ搭載の化学・鉱物計測システムを補強する必要がある。あるいは、浅いボーリングが可能なら、ボアホール・ビューワで観察する。このためには、能動型センサシステムが必要である。鉱物計測の場合は、近接して、X線やカメラを用い、ある程度は判明する。精密に計測するためには、広いスペクトル領域をカバーする宇宙用のtunable laserの開発が必要になる。産業用や軍事用のtunable laserは既に幾つか知られているが、宇宙用はほとんど知られていない。今後、移動体による近接・遠方計測において、広いスペクトル領域で波長領域nm以下の精度の精密反射率計測により鉱物定量を実現できる宇宙用tunable laserの開発が必要である。また、高精度計測を実現できる精密反射率データベースの構築も伴われる必要がある。この開発がうまくいけば、移動体だけで、X線との組み合わせで鉱物定量が可能になる。揮発性物質もかなり微量なものも含めて定量できるようになるだろう。なお、これほどの精度と正確度の高い定量分析は、周回衛星のリモートセンシングでは不可能であり、ここにもローバによる計測の意義が見いだせる。

### 4) 総合解析

ローバは地形測量、イメージャによる空間的構造や、物理的、化学的、鉱物的な様々なデータを収集する。対象とする地域は、例えば、ヘリウムであれば表側の海の部分に集中するし、天文台であれば極域の永久暗黒域かそれに準ずる地域が選択されるだろう。このような利用可能性に向けて、データとその解析結果を活用するためには、各種の結果と種々の知識を総合的に組みあわせて、正確に評価し、迅速に決定する方法も必要となる。この目的で用いられる従来の統計学的方法、特に、多変量解析手法には限界が知られており、新しい方法が模索されているものの、適切な方法は解明されていない。そこで、従来とは異なる、人間の判断システムを計算機上で運用する人工知能的手法、認知工学的方法を強めたエキスパート・システムや、革新されたニューラルネットによる方法、地球統計

学による方法など、最新の計算機技術を更に高めた基礎的で基盤的な方法を、ローバー探査データの新しい総合解析手法として検討する必要がある。例えば、弾性波、電磁波等の新しい探査データだけでなく、その解析結果を取り入れる方式と、総合解析とのインタフェースに関する検討や、多変量解析に用いる各種解析の論理構造の再検討、新しい認知工学的な方法の検討、および、総合解析のための抽象的論理数学の取り扱いに用いる可視化システムの検討、ニューラルネット等の基礎的研究成果の総合解析システムへの発展可能性検討、および、新しいニューラルシステムによるローバー探査結果の計算機による評価等が提案できるだろう。

### 3.3 月サンプルリターン探査

#### 3.3.1 科学目的

##### 3.3.1.1 アポロ-クレメンタイン探査の成果と今後に残される課題

太陽系や地球の研究において、月が重要なのは、始原的な物質から大きな惑星に至る物質進化の過程の、空白な中間の情報を提供してくれるからである。アポロ計画で持ち帰られた試料による研究で、提唱された仮説のうち、月高地に多く存在する斜長岩の形成を説明するマグマオーシャン説は、アポロ探査の大きな成果といわれてきた。しかしその後、連続的マグマ活動説も提唱されており、マグマオーシャン説は、必ずしも事実にもとづいて証明されたわけではない。

今まで仮定されている月のバルク組成より期待されているマグマオーシャンの組成では、相図よりの推定によると、斜長石の晶出が始まるのは分化の後期であり、大量の斜長石の晶出は期待できない。また、マグマ大洋より大量に沈積したはずのカンラン岩は発見されていなく、まだ架空の説といわざるを得ない。

クレメンタインの探査で明らかになりつつある、月裏側北極近くにある、鉄の少ない大量の斜長岩と、南極エトキンスの巨大で深いクレーターの底のカンラン岩的サンプルの研究は、マグマオーシャン説に再び生命をそそぐものと思われる。そのためには形成年代や微量元素組成などを明らかにする必要があり、どうしても手にして、地球の研究室で分析しなければならない試料である。46億年前にマグマオーシャンから直接に晶出した試料の分析をするには、リモートセンシングやローバーによる探査では困難である。月初期の岩石は度重なる隕石衝突のため、著しい変化を起こしている。これらの影響のない試料についての分析は、鉱物学的、岩石学的にも詳細に、その原始的性質を特性化されたものについて行わなければならない。このためには、サンプルリターンに頼る他はない。

##### 3.3.1.2 サンプルリターンの必要性

すでに月試料にもとづく研究が進んでいる月について、さらなる発展を望むには、今まで試料の得られていない地域よりサンプルリターンする必要がある。月探査関係者のみならず、一般研究者へのインパクトは測り知れない。サンプルリターンによってのみ可能になる研究項目(月に特有な鉱物の特定、精密な同位体分析による惑星の起源、年代測定による惑星進化論、古地磁気の測定など)からも明らかのように、後続の重要な課題である。アポロ当時から現在に至る25年間に、年代測定法、微量元素濃度の測定、同位体比分析の新しい方法が可能になりつつある。結晶質岩石でないために、アポロの当時地質学者をがっかりさせた高地の角れき岩や、レゴリスであっても、現在では粒子単位の解析も可能にな

りつつある。サンプルがリターンされれば、国際的な共同研究体制が整っており、数〜数十グラムの試料でほとんどの分析が可能である。

### 3.3.1.3 サンプルリターンの方法

どのような地域から、どのような方法で試料を集め、どれだけの量を地球に持ち帰るかは、無制限にロケットを利用できないことを考えれば、十分検討しなければならない課題である。リモートセンシングとローバー探査がサンプルリターン以前に十分に行われている必要があり、月表面における物質分布について、今までの研究で得られた情報にもとづいて、もっとも効率的なサンプルリターンの方法が考えられなければならない。地球のような風化により表面にある物質に多様性がある天体とは異なり、月表面では古い時代の物質がそのまま新鮮な状態で残っている。しかし、度重なる大小の隕石様物体の衝突で、月表面はレゴリスと呼ばれるかなり均質な表土でおおわれている。その付近で形成された岩石がそのまま残っていることはほとんどない。

今までの月隕石の国際共同研究の経験からすると、5〜30グラムの表土のサンプルがあれば、その付近数10キロメートルの物質はその中に含まれていることになる。しかし、月の地殻をつくっていた岩石が、そのままの形で残っているものを発見しようと思うとレゴリスだけでは十分な研究はできない。その付近にある代表的な岩石種を手っとり早く多数回収するためには、篩い分けの操作が必要である。

普通の月の岩石で粗粒なものの鉱物結晶の大きさは、直径が1〜3ミリメートルであろう。このような岩石の組織を研究でき、その全体の平均化学組成を得るためには、少なくとも最も大きな鉱物の3倍以上のサイズがないといけないという経験則がある。そうすると最低で直径約1センチメートルの岩石片が必要となる。年代決定、微量元素の分析などを考えると直径3センチメートル位までで、全量5〜30グラムというところが望ましい。このような結晶質の岩石が、角レキ岩中にある確立は非常に低いので、50〜100個の小石状のサンプルが必要となる。

以上のことを考慮すると、もっとも興味ある地域に着陸し、レゴリスのサンプルを上記の量採集するとともに、その付近のサンプルを篩いにかけて、小石状のサンプルを50〜100個集め、これを地球に送るというシステムを確立する必要がある。

### 3.3.1.4 サンプルリターン候補地

このような試料をどういう地点から得ればよいかは、次節の月科学の研究トピックスにより必要とされるサイトについて行う必要がある。月・惑星研究所のライダーらは59の候補地をあげている。クレメンタインで得られた反射スペクトルデータにもとづく、Lucy et al.(1995)の鉄含有量のマップはまだ不確定要素が多いが、裏側北半球の鉄含有量の低い斜

長岩地域があるらしい。これがマグマオーシャンから最初に形成された本当に古い年代の地殻であったら興味深い。サンプルリターンの前に行うローバーミッションの場合、ある一定の地域の精査ができるので、もっと物質に多様性のある場所のほうが良い。裏側南半球の大きなクレーター (Aitoken) 付近また、裏側の pyroclastic なたい積物のあるところが考えられる。どれをとるか限定すると次の二つに限られそう。

具体的には、クレメンタインのデータや、フェイズ I のデータの解析により決定されるべきであるが、以下に地質学的に興味のある場所を列挙する。

- a) 月のマントルに相当する物質が底にある巨大なクレーター (マントル物質の採取、下部の地殻、マントルの不均一性)  
南極エトキンスなど
- b) 最初期の月地殻斜長岩のある地域  
裏側地極地域の鉄のもっとも少ない斜長岩地域
- c) 月の原始地殻をもっとも多く保存している地域  
裏側の高地のもっとも地殻の厚い地域など (地殻多様性)
- d) 裏側のクレーターを埋める玄武岩 (裏側の地殻とマントルの組成変化)
- e) 純粋に近い斜長石よりなる岩石の多い地域 (太陽発電衛星用素子のための資源探査から必要)
- f) もっとも古いベズンと思われる地域  
神酒の海など
- g) 中心峰のあるクレーターの中心峰と側壁  
コペルニクスなど
- h) 月隕石を放出したもっとも新しいクレーター  
月の裏側の可能性
- i) もっとも古い時代に流出した溶岩  
神酒の海など
- j) もっとも新しくまで流出していた溶岩地域  
リヒテンベルグなど
- k) 比較的新しいクレーターの底、側壁

### 3.3.1.5 サンプルリターンにより解決されるべき課題

ここでは本調査でカバーする期間のうちに実施が提案されているサイトについて持ち帰られる試料の研究から期待される課題に限る。

## (1) 月の地殻とマンツルの進化過程

### (a) 月の地殻の形成発展史

これまで、発見された岩石で、月の最初にできた地殻そのものから導かれた岩石は数少ない。42億年を越える年代の月の岩石は10数固しか得られておらず、45億年近くの岩石はたったの2個である。アポロ16号はアポロで探査された唯一の高地であるが、クレメンタインのデータより、必ずしも代表的な高地ではないことが判明した。月の裏側には未踏の高地が広がり、特異な海が存在する。マグマオーシャンがあったとすれば、最初に固化した試料が月の裏側で発見されることが期待されている。これらの試料を化学的・鉱物学岩石学的に調べることによってのみ、月の地殻の形成進化を語る事が可能となる。

### (b) 月のマンツル

月のマンツルを知る方法は二つある。一つはクレーターの形成時に地下深部から掘り出されたマンツル物質を調べることである。そのような試料に相当するマグネシウムに富む試料として1個のダナイトが採取されているが、この試料は集積岩であってマンツルの岩石ではないと考えられるに至った。ガリレオ探査機や、クレメンタインのデータによると、マグネシウムに富むマンツル物質は南極エイトケズなどの深いクレーターの底では採取の可能性がある。もう一つは、火山岩の組成からその源岩のマンツルを推定する方法である。月の裏側にも玄武岩で満たされたクレーターがあり、このような試料を採取できれば、表側と裏側の地殻のアンバランスと対応するマンツルの違いを明らかにできる。

### (c) 月の大激変期の解明

アポロで持ち帰られた試料のうち、高地の角レキ岩の年代、とくに衝突によりつくられた角レキ化した岩石の年代は38.5から39.5億年の間に集中する。その時期を月の大激変期と呼ぶ。この頃に月の主要な海の盆地(ベイソン)が隕石様物体の衝突でつくられたという説と、この年代はそれまで続いた隕石様物体の衝突の最後のものではあったという説がある。このミステリー解決には、神酒の海など、雨の海や晴れの海より古いと思われている盆地がつくられた時の角レキ岩試料の入手が必要である。この衝突でできた岩石の年代が分かれば、いつこれらの海がつくられたかが分かり、その時代が雨の海と同じか古いかで、このミステリーは解決される。

### (d) 惑星物質進化論の構築に向けて

月の研究は月科学の発展のみに貢献するのではなく、広く太陽系科学、惑星科学全般の発展も視野にいれておく必要がある。月の重要な点は、太陽系におけるサイズや天体としての活動度の異なる天体のうちでも、月は、始原的な物体の天体と惑星的に分化した大きな天体とのちょうど中間的な天体である。このような天体が地球の近くにあることは幸運と言うほかない。

過去25年間の惑星探査の結果、形成されつつある重要な概念は、惑星の物質進化という哲学的な考えである。これはちょうど大航海時代に続く地球におけるグローバルな生物分布の情報の爆発的増大によりもたらされた生物の進化論と同じ様に、文化的に重要な意味を持つ。色々な惑星を比較することで、今も進化しつつある地球の環境を考えることができる点でも大切である。

始原的な物質が、天体の太陽系での位置、そのサイズ、化学組成の特徴などにより、天体としての活動期間の異なる物質へと進化していった過程を、総合的にとらえるという科学分野に関連した月科学の発展は、月自身の物質進化過程解明の重要性を越えて、よりこの分野の発展に貢献することが期待される。

### (e) 月での火山活動史の解明とマグマ発生分化過程

この提案でのサンプルリターンとは直接関係がない。

### (f) 月に特有な鉱物の発見とその生成条件の解明

今まで調査されていない地域には、今まで未知の鉱物が発見される可能性がある。

## (2) 月の起源

月の起源の解明には、まず第1節で述べたようなことが解明されている必要がある。

### (a) 月の原料物質はどのような組成であったか

月の原料物質について特に鍵となる元素グループ(揮発性物質、アルカリ元素、難揮発性元素、親鉄性元素)について、地球と比較し得る正確なデータがあれば、比較惑星学的に太陽系の物質構造を明らかにできるであろう。親鉄性元素の相互の比の変化は、巨大衝突説において、月が蒸発の過程を経たかどうかの決め手となり得るが、月の組成の不確定性の為に決着がつけられていない。月の裏側からもたらされたといわれる月隕石の研究によると、表側のアポロ試料と比較して、金やウランなどが一桁少ないことが解っている。これを解決するためには、月の裏側の多様な高地の岩石に微量にしか含まれない親鉄性元素の分析が必要であり、月の裏側のサンプルリターンによってのみ実現される。

### (b) 月の水

アポロの試料では、本来なら水を含むべきリン酸塩鉱物の研究により、月には最初から水がなかったという証拠が存在する。一方、クレメンタインのデータ分析でも、極地の陰の水発見の可能性が大きな課題となっている。これらの水は、水を含む隕石様物体の衝突など、あとから月に供給された可能性がある。月に水があったのか今も極地に存在しているのかは本調査に関連した期間には、そのサンプルリターンは計画されていない。水が現在どのように岩石中に存在するのかは、そのために工夫された試料採取法及び保存運搬法

によりのサンプリング探査のさらなる検討が必要である。

#### (c) 月の揮発性物質

揮発性物質は一部の火山ガラスのみにみとめられている。マントル深部の情報源として、また、元素の濃集メカニズムとの関連で重要であるが、本調査期間中には、これに関連したサンプルリターンは提案されていない。

#### (3) 月外物質との関係

隕石衝突によりもたらされた物質の多くは、揮発して元素レベルで混合している。それを抽出することはできない。月面物質に対する太陽風のインプランテーションは、惑星表面におけるレゴリスの生成プロセスとも関連して研究すべき現象である。どの地点からのサンプルリターンでもレゴリスは採取されるので、この問題に対する情報は得られる。

#### 3.3.1.6 サンプルリターンミッションまでになされるべき調査・研究

サンプルリターン探査が行われるまでには、その着陸地点を決定するため、リモートセンシング、ローバー探査、着陸探査などがおこなわれている必要がある。第1回目のリモートセンシングで興味ある地域が発見されても、着陸点を選定するには、充分でない情報しか得られない場合は、第2回目の機種を限ったリモートセンシングが行える可能性を残しておく必要がある。

#### 3.3.1.7 今後の課題

##### (1) 技術的課題

無人によるリモートセンシング探査については技術的なポテンシャルは既にかなりあるが、実際にサンプルリターンを実施するためには経験が不足しており、これを克服して、短期に完成させられるかがポイントであろう。2015年代までには、前述の重要なサイトについて、1箇所でもサンプル回収を行うよう機器開発が望まれるが、月研究への期待や深宇宙への有人活動の発展を考えると、2005年頃までの実施が理想である。地球への帰還技術を確保することは、我が国にとっても有益であり、将来他の惑星探査に展開するためにも、月での経験は重要な基盤となるであろう。

##### (2) 研究体制

今後、月の試料が持ち帰られるという事態になると、試料処理、配分、初期の特性化から、本格的な研究、資源利用まで、多くの分野と連携する体制をつくることがもとめられ、

定常的に研究して成果を積み重ねていく研究施設や研究所の設置が望まれる。まずは大学研究所にセンターや寄付口座をつくることから発芽させる必要がある。

#### (3) 国際協力

サンプルリターンは月の複数の場所から行われなければならないので、国際的な分担と連携が必要となる。探査された試料は、国境のない月よりとってきたものであるから、国際的な視野で試料配分を行わなければならない。このような機能を果たす委員会の設置も必要である。問題なのは、日本人研究者および施設の質的向上に勤めておかないと、公正な試料配分を行うと、主要な成果は国外研究者が発表するということが充分考えられる。

#### 3.3.2 利用可能性について

サンプル・リターンは、精密計測する上で不可欠である。ただし、ローバー探査なしにアポロの収集サンプルがある地域を対象としても、それほど意味のある新しい成果が期待できるわけではない。前項では、アポロが収集しなかった地域、例えば、月の裏側や極域等は、サンプルリターンにとって極めて興味ある対象であることが説明された。一方、ローバー探査が実施された時、地球上の地質調査と同じ意味があり、位置データと共に採集サンプルの高精度計測を実施することで、これまでにない成果が得られるだろう。鉱物定量がローバー段階で終了できれば、サンプルリターンの目的は、極微量分析と同位体分析に焦点を絞ることができる。利用可能性としては以下が対象となる。

- ①月面物質資源回収
- ②物質製造
- ③エネルギー供給、熱制御、放熱
- ④居住環境、ライフサイエンス

サンプルリターンでは、より多量のサンプルをもたらすために、着陸機だけでいきなり回収する方法もある。しかし、むしろ月面物質の多様性を解明するには、周囲10km程度が解明されるだけでは、費用対効果の面で好ましくない。サンプルリターンは、ローバー探査と組み合わせ、ローバーが広い地域を移動して精密に計測した物質のうちから、精密分析すれば意義の高いものを少量ずつどこかに集約して回収する方法が取られてもよい。アポロの経験では、意味のあるサンプルが役に立った。サンプルリターンの前にローバー探査を実施した方が、新しい月探査としては効果が大きい。ほとんどの月利用の可能性への課題は、ローバー探査で解明可能であると予想される。サンプルリターンの目的が極微量分析と同位体分析に焦点を絞るなら、利用上の目的は、資源回収のための分析が主になる。このような分析は、予測されるローバー計測では困難なため、ここに利用上のサンプルリターンの意義が集約できる。

#### 参考文献

- [1]NASA編：Space Resources. NASA SP-509, 1992.
- [2]G.Heiken, D.Vaniman, & B.M.French：Lunar Source Book. Cambridge University Press, 1991.
- [4]（財）未来工学研究所：平成6年度科学技術庁委託 月探査に関する調査研究報告書, 1994.
- [3]（月・惑星開発利用のためのリモートセンシングミッションに関する調査（その4））.  
（財）リモート・センシング技術センター, 1993.
- [4]月・惑星開発利用のための観測・分析技術に関する調査.（財）リモート・センシング技術センター,  
1994.
- [5]NHK取材班：ザ・スペースエイジ 6 再び月へ. NHK出版, 1993.

#### 4. 今後の課題

これまで述べてきたような月探査を継続的に実施すれば、月の科学だけに留まらず、惑星科学全般にわたりわが国がきわめて大きな世界的貢献をなすことが出来るようになることは明らかである。しかしここに提案された大型の月探査ミッションを実施し、成果を上げていくためには、このミッションを支える開発研究の体制、得られたデータの解析を実施する体制の両方について抜本的な強化が必要と思われる。

そのひとつの開発研究体制の強化としてはこのミッションの実施機関である宇宙科学研究所、宇宙開発事業団に月探査に専念的に従事する事の出来る部局、部門を早急に設置することが必要である。これがなければ本報告で述べられているような大型で継続的な月探査を実施するのはきわめて困難である。また国立天文台、その他の国立研究機関、大学においても月探査にむけての機器開発グループには、十分な人的、資金的支援が必要である。

データの解析については、この月探査計画で得られるデータが膨大なものになること、このデータは学際的に解析されるべきものであることを考慮すると、これまで宇宙開発事業団で実施してきた地球周回衛星による地球観測と同様な月科学解析センターの類の施設が必要になると思われる。このセンターでは、あとで述べる広報活動、国際対応の機能も果たすことが可能にすべきであろう。

得られたデータは国際的に広く利用できる形となるべく早期に公開される必要があると共に、一般国民にも還元できるように広報活動を展開すべきである。このような作業も従来は専門の研究者の負担になっていたが、ここで述べられているような月探査ミッションにおける広報活動その他については、研究者の個々の努力ではもう不可能と思われるのでデータ開示、広報の専門的組織を設立すべきであろう。

またここで提案されている月探査を実行する内に、必ずや思いもかけないような発見があり、探査の方向の変更を余儀なくされる場合も十分にあり得ることも考えておく必要がある。このような事態に柔軟に対処できるためには、地球・惑星科学全般の基礎的体力を養成する事も必要になるろう。