

## 第1部 「世界の月探査計画と将来戦略」

### 「将来有人／無人月探査と宇宙インフラストラクチャー」

John C. Mankins  
米国航空宇宙局 (NASA) 先端システム次長



おはようございます。本日は皆様とご一緒させて頂きうれしく思います。また、新年、そして月探査の新しい時代を迎えうれしく思います。予定では皆様に NASA の最近の研究や技術的な成果をお話する予定でしたが、先週ジョージ・ブッシュ大統領が新しいアメリカの宇宙政策を発表し、その中で、宇宙の探査が取り上げられておりますので、急遽内容を変えたいと思います。今朝は皆様に新しいビジョンのお話をしたいと思います。

昨年冬、コロンビア号宇宙飛行士のメモリアル式典が行われた際、ブッシュ大統領は、「こういった探査また発見の大儀というのは我々が選んだ選択肢ではなく、これは、人間の心、いわゆるヒューマンハートの中で描かれた希望である」と述べました。さらに引き続いて、探査というアドベンチャーを続けるという表明を行いました。そこで、それから一カ年にわたり徹底的なレビューを行って、宇宙探査のアメリカの新しい方針が策定されたわけです。

しかし、これは新しいチャレンジではありません。五代先生も先ほど述べられたように、NASA、またその他の国際機関においても、過去 30 年に亘り実現可能な共有のプラン・ビジョンをもって、宇宙の探査を行うと奮闘してきたわけです。いわゆる冷戦後のチャレンジ

という事で、ポストアポロ時代を睨んだわけです。1960 年代、アメリカにおいてスペース・タスクグループが作られました。それを率いたのが当時のアグニュー副大統領でした。このプランは、まさにバーナー・フォン・ブラウンのビジョンを表したものです(資料1)。ちょうどロケット科学者としてドイツから来た人であり、NASA の初期のリーダーとなったわけです。しかし、このスペース・タスクグループのビジョンと

Exploration Beyond Apollo Struggle to Establish a Shared Vision	
• For more than 30 years, NASA and various international organizations have struggled to establish a viable, shared vision for space exploration in the post-Apollo era	
• Within the U.S., these efforts have included...	
1960s	Space Task Group and the vision of von Braun
1970s	Space Shuttle and the idea of space application
Early 1980s	The Space Station - Diverse Goals and Means, focused on enabling microgravity research
Late-1980s	Space Exploration Initiative - A Grand Vision of large-scale permanent outposts and in space operations
Early 1990s	First Lunar Outpost and early Lunar Robotic Missions
1998-2002	Decade Planning Team (DPT), the NASA Exploration Team (NExT) and the idea of multiple paths
2002-2003	Transformational Space Infrastructures (TSI) and the concept of modular space systems
2004	A New Vision for Space Exploration

資料1 Exploration Beyond Apollo

というのは、非常に大規模なインフラストラクチャーを月に作るという事で、大規模な常設の宇宙ステーションの増設を行うという事でした。しかし、これはニクソン政権にとってはコストがかかりすぎたというわけです。従って非常に最初の部分、もともと NASA のビジョンにあったわずかな部分だけが受け入れられました。これにより、スペースシャトルを作るという事になったわけです。しかし、スペースシャトルを開発する上で投資の正当化が必要でした。1970 年代のビジョンは、もっと宇宙利用を拡大する方向へと移行していきました。微小重力の研究や、大規模な宇宙システムを作るという事、そのために非常に低コストの宇宙輸送機が求められたわけです。

スペースシャトルの完成で 1980 年代前半に打ち上げ機会が拡大するなかで、国際宇宙ステーションの決定が下されるという事になりました。これは、もともとは宇宙ステーション・フリーダムと呼ばれ、その後国際宇宙ステーションとなりました。さまざまな目標設定が議論されましたが、国際宇宙ステーションでは、微小重力の研究を低軌道で行うというのことに焦点が当てられました。

80 年代後半になると最初の大統領、いわゆる父親のブッシュ大統領ですが、まず宇宙探査を打ち出しました。非常に大胆なそして壮大なビジョンでした。宇宙タスクグループ、フォン・ブラウンのものに似た大規模な常設基地を作り活動を行うというものでした。しかし残念ながら、累積的な予算がまとめられましたが、壮大過ぎて予算的にも対応できなかったわけです。それからさらに何年か検討を行い、アイデアが集められました。そこから生まれた二つのミッションが、五代先生が述べられたように、クレメンタインとルナープロスペクターという月ミッションでしたが、宇宙探査の戦略的なプログラムは無かったというわけです。

今度は 80 年代後半において一連の小規模な検討が NASA の中で行われました。ひとつはディケイド（10 年）プランニングチームというのがありました。それから、NASA 探査チームというのが生まれました。そのような研究からいくつかのアイデアが生まれました。これは将来の宇宙探査で月に行く道もひとつではなく、途中で大規模な望遠鏡、あるいはプラットフォームを作る事でやっていこうというもので、直接火星に行くかもしれないし、小惑星に行くかもしれないという検討を行いました。それぞれの異なった経路の意味を検討して、それぞれが何を表すかということを検討したわけです。そういった検討の結果最近生まれたのが、トランスフォーメーション・スペースインフラストラクチャー、TSI です。すなわち共通の新しい宇宙システムや宇宙のインフラストラクチャーを有する事で広範な将来のミッション、宇宙活動を行う拠点にしようとしたわけです。

このような、ディケードプランニングチームと NASA 探査チームの活動から最近の新しいスペース・インフラストラクチャーが生まれました。そして、ここ 12 ヶ月の間にコロンビア号の事故が起こり、また、新しいビジョン、宇宙探査ビジョンが生まれたわけです。先程も言いましたが、このプロセスとしては何ヶ月も時間をかけたわけです。非常に上級の組織間で会合が開かれました。すなわち NASA 以外のアメリカ政府、NASA 以外の上級、トップの人たちが関わり、アメリカ議会との議論も行われました。いくつかのオプションが示され、結局それは大統領に付与されて、最終決定が下されたわけです。数週間前、火星探査機スピリットが成功裏に着陸しました。ここで申し上げたいのはこの新しい宇宙政策に対する最終決定は、スピリットが火星に着陸する前に出されたという事です。ですから、

関係はないという事を強調したいと思います。しかし、スピリットの上陸により、いかに変化が重要かという事を強調出来たと思います。新しい技術の重要性も必要とされています。率直に言いますと、新しい探査ビジョンによって、NASA の中で相当の進歩がありました。ひとつの機関として自分自身を変換する事が出来たわけです。3年前には、国際宇宙ステーションを巡る予算やスケジュール超過などに対してブッシュ政権の中でも懸念がありました。NASA のマネジメントの懸念もあったわけですが、最近では、大統領マネジメント・アジェンダ (PMA) の中で、NASA は重要な分野で高い評価を得ています。いくつかマネジメント改革も実施しました。国際宇宙ステーションその他のプログラムの中でも改革を行って、新しいビジョンをNASA が成功裏に推進できるということを、より満足のいく形でブッシュ政権に示そうとしたわけです。

1月14日ちょうど一週間ぐらい前になりますが、ブッシュ大統領が新しいNASA のビジョンを発表したわけです。何人かの非常に素晴らしい人が参加した事でエキサイティングなミーティングでした。NASA 本部の色々な部門が参加したわけですが、少数精鋭で私も宇宙飛行局から選ばれて参加しました。大統領は、ちょうどラテンアメリカのサミット、いわゆる中南米サミットの開かれた直後で疲れていましたが、大変意気軒昂でした。そして、新しい政策についても熱心でした。そして、出席者からプレゼンテーションに対する大変強い反応も見られました。そこで新しいビジョンとして、ここでは持続可能な、またアフォーダブルな有人ロボットプログラムを実行しよう、それによって太陽系それ以遠の探査を行おうとするものです。また、目標として、アメリカの宇宙プログラムでは、太陽系において人間の活動範囲を拡大していこうという事です。まず、月に人間を戻そうという事で、2020年までにそれを実現しようというところから始まります。しかし、その目的は、将来火星その他の目的地に人間を送る準備とされています。そこで焦点としているのは、技術革新、革新的な技術を使い、知識を習得し、インフラを開発していく事です。また、有人探査の目的地についての決定をサポートするものでもあります。そして探査への国際的あるいは商業的な参加を推進して行く事によって、アメリカの科学・安全保障、経済的な利害も推進して行こうとするものです。

基本的な政策としてホワイトハウスのホームページにでている内容をここに示していま

**A New Vision - 2003**

- **After months of White House and NASA interagency meetings, and exchanges of ideas and visions, a new comprehensive exploration vision has been developed**
  - Given its importance, final decisions made by President
  - Final decisions preceded successful Spirit landing on Mars
- **New exploration vision builds on NASA's vision and mission statements**
  - Other NASA activities remain an important element of NASA's mission such as aeronautics and climate change research
- **New exploration vision enabled by NASA's progress in strengthening our management foundation and agency credibility**
  - NASA received top scores in key areas of the President's Management Agenda
  - NASA successfully implemented management reforms as demonstrated in key programs such as the International Space Station
  - Other NASA programs continue to be successfully executed

す (資料2)。ここでは、アメリカの宇宙探査に対するビジョンが示されています。そして、明確な民間の宇宙プログラムへの方向性が出ています。例えばコロンビア事故調査委員会 (CAIB) が数ヶ月前に出した報告の中で懸念が表明されています。アメリカ議会のサポーターからも過去数ヶ月、数年の間に懸念が表明されました。ビジョンはそれらに答えています。また、ビジョンは実際にただ単に月に人が戻るという以上に広義なものです。前のデ

資料2 A New Vision - 2003

イスカッションや計画とは異なったものです。その中核というのはビジョンとしてまたプランとしても宇宙の探査というのをまずは NASA の活動として行っていくということです。これは、有人、ロボットの探査も含めての話です。月に対して火星に対して、それぞれの目的地に対して送り出そうとする広義なものとなっています。アポロのように具体的な期日に向かって進めるのではなく、どれだけ迅速に、効果的に我々が経験を獲得できるかということです。どれだけ迅速に新しい技術の開発が出来るか、またどれだけうまく我々が実証でき、そして、将来のシステム、インフラストラクチャーやミッションといったものが達成可能か、大統領が適切な予算の枠組みの中で実行できるかといったことに基づいて計画が決まります。実行というのは何年待つわけでもなく、今スタートしています。主なミッションというのはすでに進行中です。そのなかには、火星プログラムも入っています。他の太陽系のターゲットを訪問するという事。それからオリジンというプログラムもあります。このプログラムは、近傍の惑星を探索するといったものです。我々がこれから帆を進めるに連れ、時間がなくなっていくという事だけには確かです。

では、ここで幾つかの概要を申し上げます。宇宙を探査する上で、まず、とりわけ申し上げたいことは、知的欲求について考えて頂きたいということです。その答えは納税者にとっては重要だという事です。科学者だけにとっての問題はないからです。科学者が探査するのではない、探査するのはやはり人間の一環として、我々何を達成したいかという事があります。月だけではありません。そこで、さらに重要な点として、3番面の項目にあります。やはりこのアイディアとなるのは、我々としては、月とその他の天体、例えば、地球近傍の小惑星を使って新しい技術、能力、システムを実証します。そうしますと、太陽系の別の箇所ですら使えよう。また、加えて一言強調したい点としては、この戦略として、探査戦略はただ単に新しい有人のミッションのみならず、新しい形で実際に考え、組織化し、計画します。すなわち NASA の宇宙活動を人間、そしてロボットも含めた形でやっていくという事です。ですから非常に慎重な計画であり、そして、有人とロボットの探査機、探査車をパートナーとして使います。それぞれ最も有益な形で、お互いの能力を活用するという事です。具体的な探査の目標に鑑みて互いの能力を生かします。実際には最初にロボットが新しい世界に行きます。その後、有人の探査により、実際に科学として達成できるように推進する

という事で、道程を組んでいくわけです。

次に、探査を持続可能なものにするためについてです。まず実際にアメリカに取っても、あるいは宇宙プログラム、あるいは宇宙コミュニティーにとっても、これは一回だけのもの、一つの大きなミッションでこれっきりで終わりというようなものではありません。ちょうどアポロ計画を成功させた



### New Space Exploration Vision

---

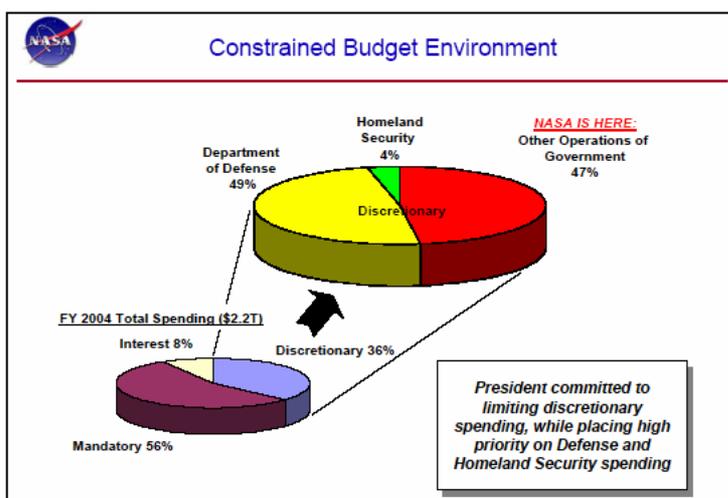
- **On January 14, the President announced a new vision for NASA**
  - Implement a sustained and affordable human and robotic program to explore the solar system and beyond;
  - Extend human presence across the solar system, starting with a human return to the Moon by the year 2020, in preparation for human exploration of Mars and other destinations;
  - Develop the innovative technologies, knowledge, and infrastructures both to explore and to support decisions about the destinations for human exploration; and
  - Promote international and commercial participation in exploration to further U.S. scientific, security, and economic interests.
- **The vision affirms the nation's commitment to space exploration and provides a clear direction for the civil space program**
  - Vision responds to concerns expressed by the CAIB, Congress, and elsewhere on the need for a long-term vision for human space exploration
  - Vision broader than some reports that it is about returning humans to Moon. Indeed, robotic activities and exploration of other destinations are critical elements
  - Activities will be paced by experience, technology readiness, and affordability
  - Implementation begins now with key missions that are already in progress such as Mars exploration, visits to other solar system targets, and Origins activities

資料3 New Space Exploration Vision

NASA を彷彿とさせますが、そうではありません。このビジョンというのは、アメリカの方でも持続可能な探査を行うという事であり、定期的なプログラムと、定常的な予算でやっていきたいという事です。ですから、そのビジョンとか、アプローチとしては新しい技術を推進するという事です。惑星資源を使っていく。そして、さらに進行形のプログラムを整合していく事によって、まさに新しい技術、新しいシステム、新しい戦略を策定、開発することで宇宙探査を行おうという事です。この定期的な進捗を図っていく事で、我々のビジネスにも繋がるというものです。それはただ単に一回だけの実証ではありません。これはまさに、堅剛なコミットメントであり、そして持続的活動を行う事でもあります。我々としても、なんとしてもまず刷新をする事です。それによってコスト削減をいざなうことです。NASA の方でこのビジョンをまず最優先事項として推進します。

2005 年財政会計年度の予算がちょうど 10 日のうちに出されますが、それを受けて NASA は直ちに検討します。そして、このプログラム、組織といったものの整合を図る事によって、新しい技術のデモンストレーション、立証を図り、必要な先進的なロボットを月、火星に送り出すという事になります。それをこの年末までには行うという計画です。

2, 3 のハイライトですが、ご存知の通り政策を読んで頂くと、明らかに大統領が決定として下したのがスペースシャトルの飛行再開と、国際宇宙ステーションの完成です。出来るだけ早く、2010 年頃に国際宇宙ステーションが完了するならば、スペースシャトルを引退させる、リタイアさせるという事です。新しいクルー探査船 (CEV) の開発を行います。また目標として掲げているのは、この宇宙船により宇宙飛行士がまず低軌道以上に行くという事です。そうする事でロボットの火星、月のミッションを 2008 年には行うという事です。そして持続可能な活動といったものを行っていく。それぞれ詳細はこれからプランを練るわけです。また、月への有人探査については、可能かどうかわかりませんが、大体タイムフレームは 2015 から 2020 年となっています。火星探査はロボットを使って続行します。そこではやはり、新しい技術の多様化を図る。そこで火星環境に関するデータ情報を取得するということが焦点です。人間は後ほどのミッションはサポートしますが、そのミッションの日程を決めるのもやはり進捗状況によります。どれだけ、新しい技術や新しいシステム、また更に経験が月の探査から獲得できるかという事に依拠しています。ですから、いつ、人間が火星に行くかという事のデッドラインや日程はありません。その他の太陽系の探査も続行されます。そのなかに含まれるが、まず、惑星、衛星、また木星であるとか、それから火星の探査も含まれます。この戦略のなかに含まれるのが、いわゆる金星、地球近傍、いわゆる大きな地球観測所も含めますが、そういった地球近傍の星等の探索も行います。そこで新しい技術いわゆる、新しいシステムを開発していくわけです。さらに生命維持、発電電力なども他の技術に伴ってやっていきます。NASA のなかで大統領が NASA に関して強調したように、こういった宇宙プログラムを活動、活用する事で、またそれを方途として技術革新、進歩といったものを新しい技術の分野にも推進していきたい。そうしたことを言っています。そういう事に絡めて、例えば QOL、地球におけます QOL も推進していくという事を称しています。



資料 4 NASA の予算環境

このチャートで示しているのは、また予算環境です（資料 4）。下の左を見ると、アメリカの連邦予算額が出ています。大体 60% が社会保障であるとか年金であるとかそういったものです。8% が金利であり、3分の1 だけがいわゆる自由裁量予算です。しかし、その自由裁量支出のうち半分が国防総省 (DoD)、それから国土防衛安全保障 (DHS) です。ですから、NASA というのはそのうちの 3分の1 の中の 2分の1 以下

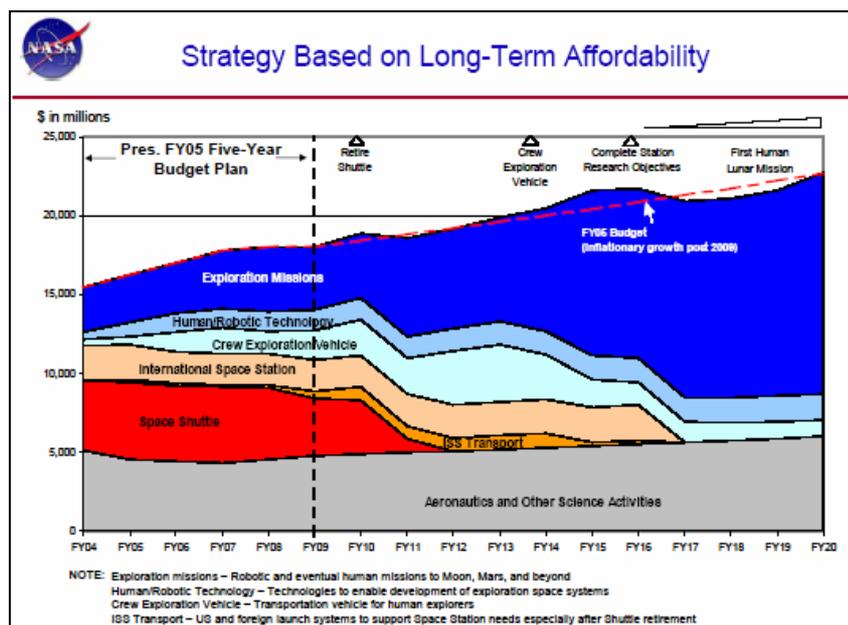
の予算です。トータルのアメリカ連邦予算の中でこれだけ少ないのです。アポロ時代においては、NASA は大体全体のアメリカ連邦予算の 4% だったわけです。しかし、こういったビジョンは、新しい宇宙探査の戦略の一環となっていないわけです。ですから我々としては、むしろこのようなきっちりとした、しかし、適切な予算レベルでやっていく、それゆえ国際、国内の優先順位に基づいた中でやっていくという事です。新しい技術を推進して、我々の大胆な目標達成を図りたいと思っています。それぞれ追加的な資産といった展望も含んでいますが、今予算の制約があります。また更にその中で、アメリカの財政赤字のコントロールを取りたいと、均衡を図りたいという希望もあるので、こういった成長をこれから数年において実現するという事は、かなり強いコミットメントが必要ですが、しかし、これも対応可能なものと考えます。

前言の通りですが、ちょっとまとめたいと思います。私達としては、既存のシステムを引退させます。例えば、スペースシャトルです。実際に我々としても、我々の国際宇宙ステーションが終わりました。そうしますと、それに関わる予算を使って、探査、開発というものをこれから 10 年やっていく事が出来ます。そこで、技術革新にフォーカスを絞り込んで新しい探査戦略、これを達成可能なものにしていきたいと思っています。

このチャートはダイアグラムとして示していますが、どのようにしてこういった投資を推進していくかという事です（資料 5）。例えば、スペースシャトルというのが、完了するのは大体この 10 年末ぐらいとなります。そうすると新しいシステムがこれに沿って出てくるという事で、日程として、最初の有人月のミッションとなります。青色の部分を見て頂くと分かりますが（もっとも拡大する部分）、これが宇宙の探査プログラム、またロボットも含まれています。それから、さらに統合的な将来のロボット、有人の探査、活動といったものも入っているわけです。また、その中に見て頂きますと強いコミットメントを示しているのが有人ロボット技術開発でもあります。これも、今進行形で新しい戦略の中の一翼を占めているというものです。

結論として、一番言及したいのが大統領の宇宙探査委員会です。これで、戦略あるいはプランとして大統領のビジョンの実行に関してはそれを大統領委員会が検討して国家のコ

ンセンサスをプラン  
 に対しては確立して  
 いきます。まもなく、  
 10日以内に大統領  
 の2005年予算が発表  
 されるでしょう。詳  
 細についても煮詰  
 められ、公に発表さ  
 れるでしょう。それ  
 に従い、探査構想の  
 内容が発表されまし  
 ょう。詳細について  
 活動計画も詳述され  
 るでしょう。それか  
 ら2006年は集中的  
 な活動を行います。



資料5 長期投資戦略

それによると、2006

年の予算として、今から1年後に策定されていくわけですが、その中では、実際に探査構想を実行する上でどういった不確実性があるか、予算の策定をどう調整をするかという事、あるいはプログラムの再調整を行うわけです。

そこで、少し組織についても言及したいと思います。マスコミ等でご覧になったことがある方もいると思いますが、新しいNASA本部のオフィスがあります。オフィス・オブ・エクスプロレーションシステム（探査システム局）と言われるものが新設されました。私個人も今移行期にあります。先週末であります私荷物を梱包し、新しいオフィスに移動したばかりです。今回渡した私の名刺はもう無効になります。使用しても、無効です。しかし、次回参りましたあかつきには、願わくは（5月に宮崎で開催される宇宙技術及び科学の）国際シンポジウム（ISTS）の会議で新しい名刺を持ってこれればと思っています。新しいポジションが記載したものがご紹介できればと思います。この新しいオフィスの責任としましては、研究、新しいシステム、新しい技術開発という事になります。さて、そのオフィスでありますけれども、先週NASAフレデリック・グレゴリー副長官によって命じられたものですが、それを管理するのが新しい私の新しい上司、グレイグ・スタイドル (Creig E. Steidle) 少将です。何人の方が彼にお会いしたかわかりませんが、彼は、素晴らしく頭のいい人であり、インテリジェントな人であり、深い洞察をする方です。研究開発についてもしかり、また特にコスト効率の高い開発、ハイテクの新しいシステムについても精通しています。グーグルサーチで彼の名前でサーチして頂ければ興味深い彼のリファレンスが発見できると思います。

それにくわえてエアロスペース・テクノロジーオフィス、コードRというのがNASAの本部で再調整されます。そしてさらにオフィス・オブ・エアロノーティクスになります。これによってNASAの持続的なコミットメントを行って、航空研究を行うことになるでしょう。しかし、宇宙活動といったものはやはり移行期にあるという事です。

まとめます。ここで申し上げたい点としてはこういった広範な、いわゆるエージェンシー間のレビューを宇宙方針に関して行った結果、宇宙の探査によって、重要な利点がアメリカにとってあるという事です。この新しい構想によって必要な決定を下して長期的なアメリカの宇宙リーダーシップが確保できるでしょう。また加えて、一つ新聞記事からブッシュ大統領のスピーチを引用したいと思います。我々は他の国を招聘し、チャレンジ、機会を共有したいと思う。この新しい発見の時代に対して招聘したい。ブッシュ大統領にとっては、まさに旅です。競争ではない、旅です。他の国に対しても我々に賛同して頂きたい。そして協力の精神のもとで、友情のもとにこの旅に皆さん同行頂きたい、という言葉です。これも我々のコミットメントです。国際的な旅、グローバルな旅があります。宇宙探査のグローバルな旅です。それが非常に重要なものであると謳っているわけです。加えて、この新しいビジョンでNASAにおいても再調整、再構築します。その構想、目的を中心に宇宙探査を再調整していくわけです。また我々は厳しい選択を下していきます。これはすなわち、新しいシステムからプログラムを再調整、再編することによって、政府の方で打ち出された予算内で活動を推進したいと思います。またそれにより、太陽系の有人そしてロボットの探査を行おうと思っています。これが進んでいくにつれて、新しい月の探査を行い、また更に、そこで開発を行っていきたいと言うのがこれから20年に掛けてのビジョンです。ご清聴感謝します。ありがとうございました。



### Summary of New Vision

---

- **Benefits the Nation**
  - Makes needed decisions to secure long-term US space leadership
  - Encourages innovation and strengthens industrial base
  - Pursues compelling science and inspires the next generation of explorers
- **Refocuses NASA**
  - Establishes exciting long-term vision
  - Integrates robotic and human exploration programs around focused science goals
  - Responds to CAIB Recommendations (Shuttle retirement, new long-term goal)
- **Provides exciting set of major milestones such as:**

- Implement Vision; Reorganize NASA	~2004
- Initial Flight Experiments	~2006
- Crew Exploration Vehicle First Test Flight	~2007-8
- Start Annual Lunar Robotic Missions	~2008
- Retire Shuttle and Complete Station Assembly	~2010
- "Safe on Mars" Lander Mission	~2011
- Mars Robotic Sample Return	~2013
- Nuclear In-Space Power/Propulsion Demo	~2015
- Moon Human Landing/Exploration Testbed	~2015-20

資料 6 米国新宇宙探査計画のサマリー

## 【質疑応答】

<会場から>

大変面白いお話ありがとうございました。一つお聞きしたいのが国際宇宙ステーションについての関与です。宇宙ステーションが完成した後にアメリカとして、この宇宙ステーションをどう活用していくのか、新しい政策によって宇宙ステーションが、完成した後ほとんど活用されないのではないかという気憂があるのですがそれについてはどうお考えでしょうか。



<Mankins 氏>

もちろん明確なきっちりとしたコミットメントが国際宇宙ステーション（ISS）に対してもあります。それから、さらに利用に関してもコミットメントがありますが、しかしながら、大統領の予算、あるいは新しい探査構想ドキュメントというのが公開され、また、さらにこれから進行形でプログラムを検討するにつれ、ますますアメリカの国際宇宙ステーションの利用といったものが、結局フォーカスされ重要な研究を行ったり、そしてさらに新しい技術の検証を行うという事に移るでしょう。そこで新しい宇宙の探査をサポートするというようなものになりましょう。従いまして、純粋な材料研究やライフサイエンスの研究にとっても同じような重要性が置かれていたと思います。あるいは有人の人間の研究といった事にも同じような強調がおかれていましたが、今強調しているのはむしろ人間のいわゆる長期の宇宙生活に関係した研究という傾向ですが、詳細についてはこれからもっと明らかになるでしょう。



## 「欧州の月探査計画」

**Bernard Foing**  
欧州宇宙機関 (ESA)  
チーフ・サイエンティスト  
SMART-1 プロジェクト・マネージャー



「月に行きましょう！」

日本に来て非常に嬉しく思います。欧州の月探査に関して話をさせていただきます。現在、月に到達する欧州初のミッション SMART-1 が月に向かっています (資料1)。打ち上げは9月でした。そして、現在この SMART 1 というミッションは地球を越えそして最初の観測を開始しようとしています。先週、初めて搭載カメラで画像を取得しました。これから数日間でまた出てくると思います。

それでは、SMART-1 の説明をさせていただきます。SMART-1 というのは先端技術研究の小さなミッションを複数持つものです。科学の発展に役立つものですが、将来の火星探査にもつながる様々な赤外線や X 線の観測機器を搭載しています。2月には彗星探査ミッション (Rosetta) がありますが、これも将来の技術開発に役立っていきこうというものです。SMART-1 にはイオン化燃料を使った電気推進エンジンが搭載されており、3年という短期間で実証していきこうというものです。1999年に製作され、2003年9月27日にアリアン5号で打ち上げられました。全て含めて1億1,000万ユーロ未満の非常に小型の宇宙船でして、1立方メートルの食器洗い機のような大きさです。ちょうど鳥のような感じで、14メートルの太陽電池パネルを持っています。

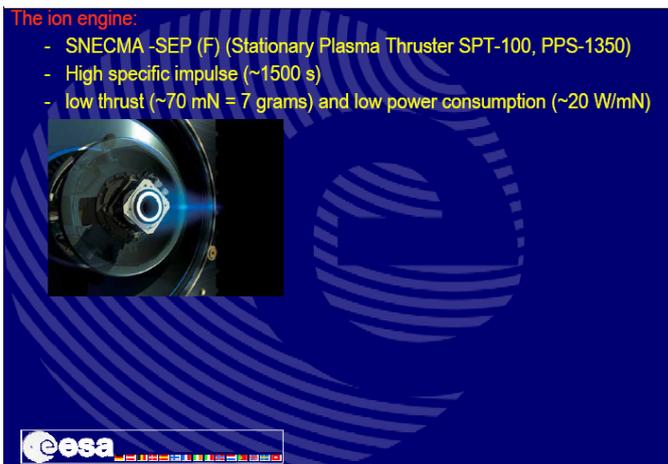
まず、イオン化燃料を使った電気推進エンジンですが、比推力 (Isp) で燃料効率化学推進の十分の一で、地球軌道から月までの燃料も60リットルで済むわけです (資料2)。そして7グラムの低スラストです。ちょうどポストカードのような大きさで、まさに手の



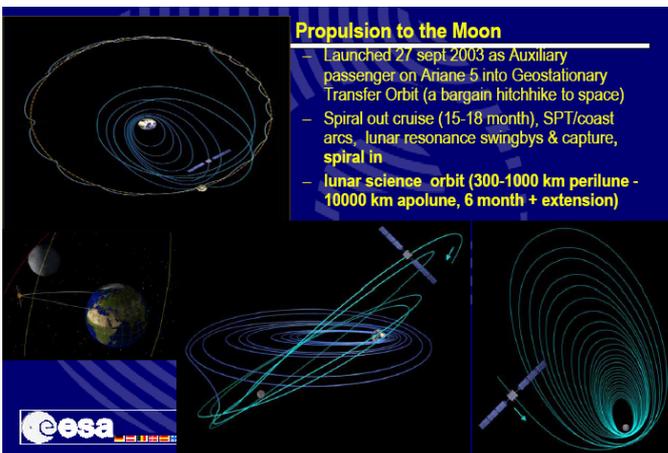
資料1 SMART-1 月探査機 (ESA)

上に乗る大きさです。これで、6ヶ月あれば月に達することが出来るわけです。宇宙船自体は370Kgで、様々な先端技術が搭載機器に使われています。

こちらが軌道ですが、イオン化燃料を用いて、最小限の燃料でこのポイントまで来て、重力を利用してこのように動き、そして今年の12月に月の引力に捕獲され月への軌道に入ることになります (資料3)。そこでもう一度、電気推進を用いて月を回る軌道に入ります。



資料 2 SMART-1 のイオンエンジン



資料 3 SMART-1 の月への軌道



資料 4 各種搭載観測機器

また SMART-1 プロジェクトでは新しい技術、観測機器をいろいろと試しています(資料4)。6つあるいは7つのハードウェアの実験もあります。新世代のX線の実験装置もあります。5Kg という次世代型の軽量なものです。それから赤外線スペクトロメーター、重量は 2.3kg。これはその前の世代のものと比べると、1/10 程度の重さで済んでいます。初めて搭載されました。またマイクロカメラがあり、電子処理を行うため2cm<sup>3</sup> くらいの大きさです。まさに人の目位の大きさです。そして、これらを使ってマルチカラー画像を高解像度で生成します。クレメンタインのカメラよりも優秀です。そして、ブームの上にモニターを搭載し、宇宙船周りの環境をモニターします。深宇宙マイクロ波アンテナを用いて、将来の深宇宙通信のために活用する事も考えられています。実験装置の合計重量は 19kg です。

来月 2 月に地球の軌道から離れていき、各種実験を行っていきます。共振に関する実験もあります。そして 2 月以降、科学観測なども航行中に行います。月に到着した後、赤外線、X線も活用して月の観測を行います。レーザーリンクの実験も行います。レーザーが 1m の望遠鏡に搭載され、カナリア諸島とつないで、レーザーリンクを試します。SMART-1 のカメラについていて、レーザー変調して情報をレーザーリンクで伝達しようというものです。これは将来の深宇宙通信に使われる可能性があるわけです。多くの情報をより広い帯域幅で送ることが出来ます。また月ではマイクロカメラ

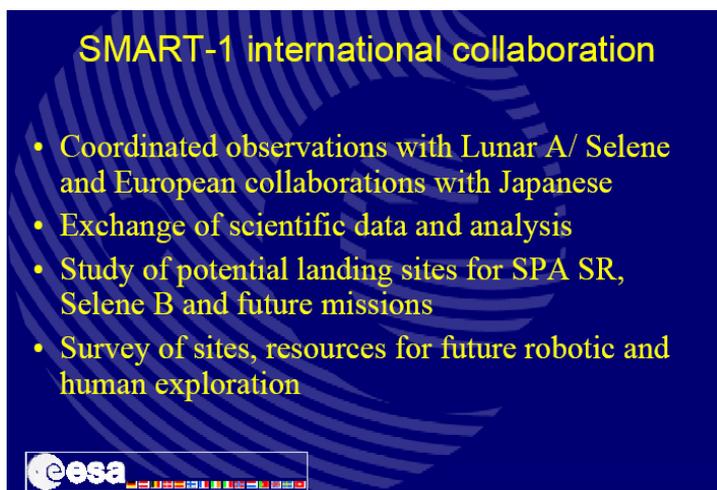
を用いて、マルチカラー画像を取得し、高解像度の地形学の情報を獲得します。立体カメラで月の極地帯を観察します。影になっている部分がありますが、そこに水素やその他の火山堆積物があると考えられています。そして将来の着陸地点の考慮もできるわけです。また将来の月探査、あるいは月基地にも役立つという事になります。そして赤外線スペクトルメーターがあり、一連の鉱物を調べます。これを使えば、その鉱物が火山活動によるものなのか、古代の巨大な隕石が衝突する事によって生じたものなのかといった区別が出来ます。そして極地帯に於ける探査を行い、水、あるいは氷の痕跡がないかを調べます。

もちろんアポロの時代から月の探査は行われていますが、部分的なデータであり、月の全表面における化学物質、例えばマグネシウム、シリコン、アルミ、鉄といった元素を調べ、月の一層の理解を深めていきます。そして、月の起源を探り、月及び地球の進化を明らかにしていきます。太陽系に於ける様々な衝突がどのように起きたかということを見ていくわけです。例えば火星の半分くらいの大きさの小天体が月に衝突したという説もあり、それが月にどういった影響を与えるかを見るわけです。このように、元素の分布を解析する事によって、地球自体の解析にも役立つわけです。

SMART-1 の状況報告ですが、成功利に打ち上げられました。すべて、順調で、一週間以内に宇宙機をサブシステム、例えばバッテリーやコンピューターや姿勢コントロール、あるいはスタートラッカー等を正常に作動させました。6つの観測機器も問題ありません。10月に太陽フレア、ストーム（磁気嵐）が予測されますが、うまく乗り越えようと努力しています。11月にスイングバイを行い、月への到着は12月です。

SMART-1 は同時に国際協力を進めていく非常に良い場でもあります（資料5）。月の研究のみならず、一般的な科学研究に於いても同じです。特に月には LUNAR/SELENE の直前に到達するわけですが、LUNAR/SELENE との協調観測について、既に欧州の科学者と日本の科学者との間で協力が進められています。それを非常に楽しみにしています。SMART-1 は小さな宇宙機ですが、SELENE は非常に大きくある意味ロールスロイス的な衛星で、色々な形で協力できると期待しています。同時に SMART-1 を使って、潜在的な着陸場所を検討することにも繋がります。南極からのサンプルリターンに対し、2008年、2009年に予定されているミッションの着陸地点の研究にもつながり、SELENE-B などの将来ミッションにも役立つわけです。また、着陸場所の調査、将来のロボット、有人探査にも役立ちます。

まとめになります。SMART-1 ミッションは電気推進であり、月の起源を調べ、それによって地球もより良く知ろうというものです。そして、科学的な様々なパフォーマンス、データを用い、様々なオペレーションをやっていきます。このミッションは、将来のロボット及び有人探査にも役立つもの



**SMART-1 international collaboration**

- Coordinated observations with Lunar A/ Selene and European collaborations with Japanese
- Exchange of scientific data and analysis
- Study of potential landing sites for SPA SR, Selene B and future missions
- Survey of sites, resources for future robotic and human exploration



資料5 SMART-1 国際協力

であり、SMART-1 に対する関心が高まっています。月、更にその先を考えていく中で、将来、各国が様々な場面で関わっています。一般的な科学的な探査としても、欧州のみならず全世界に開かれているものです。

## ■ 欧州の将来月・火星探査構想

次に、話を変えて、将来、これからの月探査及び ESA のプログラムの紹介をしたいと思えます。

欧州では月と火星、ロボットと有人探査の両方を考えています。これは一連の研究のなかで作り上げていくもので、国際的な月探査のワーキンググループがあります。水谷先生が 1996 年この月探査のワーキンググループを開設されたわけです。欧州で開設されており、一連の国際戦略を考え、各宇宙機関が係わっていこうというものです。アポロの時代からそして、SMART-1 や SELENE などの先駆的なミッション、そして、将来的には月面基地というのも考えられるわけです。探査は 4 段階で構成されます。まず最初はロボット探査です。SMART-1、ルナ A、あるいはセレーネです。そして次の段階では、着陸船を用いて定期的にロボットを滞在させます。例えばセレーネ B、そしてその他のランダー、着陸船です。そしてその後には、更に進んだ最先端の人工知能ロボットを月に下ろします。そして、大規模なインフラを作り上げた上で、国際的な例えばロボットビレッジを形成し、資源の利用も行い、あるいは居住区、そして生命サポートシステムを作り上げ、最終的には月面基地として存在させていくものです。さまざまな宇宙機関が協力して実証していこうと考えています。

実際、月は探査技術の試験台にもなります（資料 6）。SMART-1 でも示しましたが、小型装置を用いて様々な観測を行います。ロボットは最初は限られた移動性ですが、その後 10 キロといった形で移動性を高めていきます。局地帯の氷を含めて地理学的、地質学的な調査を行います。

そして、産業界もそれを活用する事により、最先端ロボット技術を高めていきます。メカエレクトロニクスセンサーなどを活用し、あるいは、テレコントロール、テレプレゼンス、あるいは仮想現実、バーチャルリアリティーも活用します。そして、ロボットがますますより賢いロボットになり、これらによって月での人間の活動を補うものになっていきます。

The infographic is titled "Moon as Testbed for Exploration Technologies" and lists several key areas of focus for lunar exploration. It includes the ESA logo and a list of technologies and goals such as "Remote sensing miniaturised instruments", "Surface geophysical and geochemistry package", "Instrument deployment and robotic arm", "Close mobility, nano-rover, sampling, drilling", "Regional mobility: rover, navigation", "Robotic laboratory", "Mecha-electronics-sensors", "Tele control, Telepresence, Virtual reality", "Autonomy, Navigation, Artificially intelligent robots", "In-Situ Utilisation of lunar resources", "Regolith, Oxygen, glasses, metals utilisation", "Long term: He 3 extraction", "Establishment of permanent lunar infrastructure", "Life sciences laboratories & Life support systems", "Large astronomical facilities", and "Environmental protection aspects of human expansion to the Moon". The infographic also features three small images: a rover on the moon, a satellite in orbit, and a lunar lander on the surface.

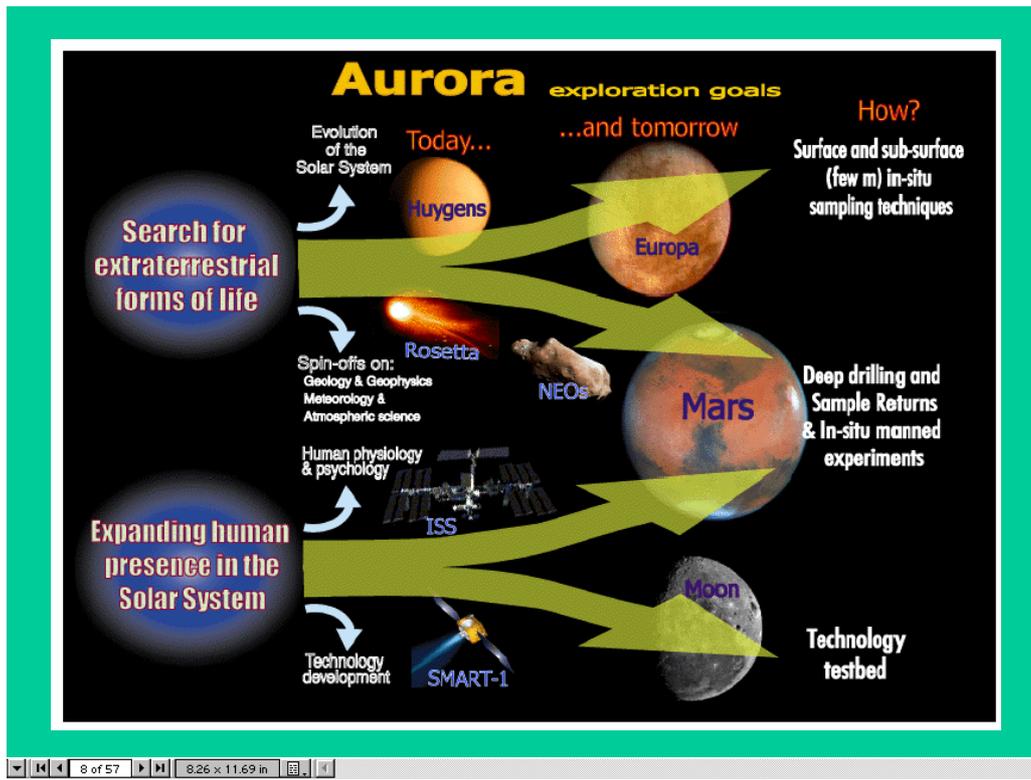
資料 6 探査技術の実証の場としての月

2015年以降にこういった、国際ロボットビレッジを建設しようと考えています。また、月資源、つまり土壌、酸素、ガラス、金属、氷などの活用を考えます。また長期的にはヘリウム3の抽出物を活用しようと考えられています。さらに惑星として月に住む事も研究していきます。ライフサイエンス系ラボを設置し、ライフサポートシステムを確立していきます。それは、クルーが別の惑星に行く助けになります。

したがって、月システムとして単に科学的な地球のような惑星の研究だけではなくて、月を研究する事によって地球と比較し、また火星とも比較する事が出来ます。地球のような惑星、あるいは地球が将来どうなるかという研究にも繋がり、様々な技術、あるいはロボットのアウトコースにもなります。そして月の周りの軌道で、また太陽系としてどうかという事を研究します。月ですから最も経済的で効果よく人間及びロボットの協調について考えられるわけです。また、さらに永続的に月の基地、例えば月におけるバイオスフィアが考えられます。そして太陽系における人類の更なる拡大、発展にも携わっています。

80年代半ばからこのような月探査を考えてきたわけですが、90年代になり、大きな調査を科学者として協力して進めてきました。ESAの月研究では、モローという月周回衛星の研究があります。そしてセレーネもあります。また、中規模のランダー、着陸船の研究もあります。そして、月の南極におけるユーロムーンの研究もあります。クレーター中心部のピークに常にその太陽光が見える場所がありますが、そこを研究するという事もあります。永久な影における氷も探査していきます。SMART-1でも触れましたが、様々な装置を将来の科学技術ミッションのために活用したり、国際パートナーとの協力も進めています。平行して、推進、あるいは着陸システム、ナビゲーションシステム、危険回避、ロボット工学、テレプレゼンス、資源利用といった分野の研究も行っています。こういった調査研究を重ねる事によって、技術を推し進め、より全体の探査の枠組みのため役立てようというものです。また、一般研究として、宇宙探査のアーキテクチャーも研究し、人間に関する研究も行われています。また、「オーロラ」計画というものがあり、ポスト国際宇宙ステーション（ISS）における有人月探査が考えられています。国際スペースステーションの後の有人飛行という事です。

これがオーロラプログラムです（資料7）。このようなミッションに続いて、更なる探査を進めます。月、火星、そして地球を研究していくわけです。オーロラ計画は、元々はブッシュ大統領が新しい宇宙ビジョンを発表する3年前からはじめていますが、人間およびロボットの探査イニシアティブです。



資料7 オーロラ計画

欧州委員会において、2001年にプログラムとしてスタートしました。そして、2001年1月に閣僚会議で承認されました。このプログラムの各ブロックは5年ごとになっています。3年間の準備期間でスタートしました。今現在その3年の準備期間の最中です。現在までの参加国はこうした国々です。さらにこの参加国、国際パートナーを増やそうとしています。

これが当初の研究公募の結果ですが、非常に多くの反応がヨーロッパ各国からありました。また国際パートナーの反応も楽しみにしています。オーロラにおいて、産業界での能力を構築し、例えば国際宇宙ステーションプログラムに対する貢献を継続して、更に新しいチャレンジを取り組んでいくものです。また、長期的な戦略を提示し、人間及びロボット探査として、月及び火星を対象とするも

**esa** Exploration Scenario

*Two interconnected development streams preparing and culminating in missions to the Moon and the first human mission to Mars:*

**Low Earth Orbit Infrastructure stream builds on:**

- ATV (Automatic Transfer Vehicle),
- ARD (Atmospheric re-entry Demonstrator)
- Columbus (ISS European module) and extending them to Moon and long term Mars mission

**Planetary exploration capabilities stream builds on:**

- Mars Express, SMART-1,
- planetary missions, etc., and extending capabilities progressively towards human size vehicles

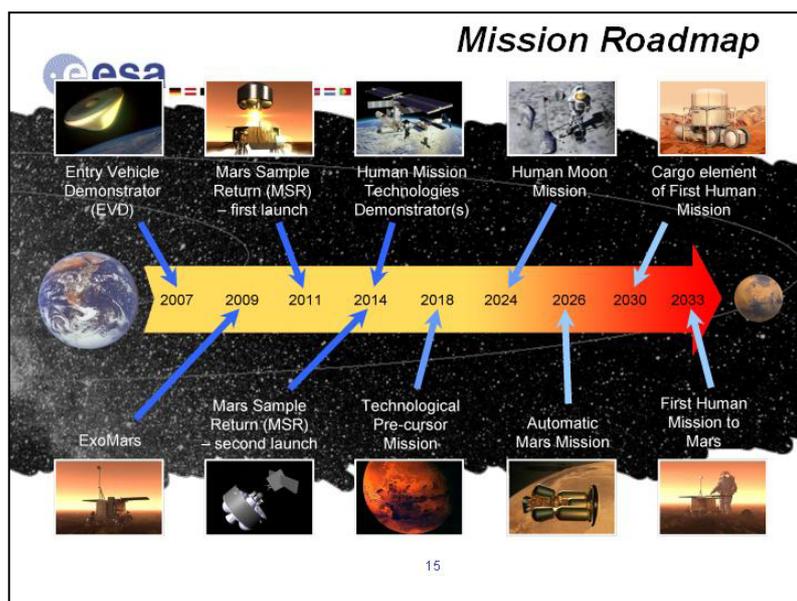
13

資料8 探査シナリオ

のです。そして、インフラを構築し、技術開発を連携させて、ミッションシナリオに役立てようというものです。また、研究開発を刺激し、新しいアプローチを高めようというものです。これが関連している目標でもあります。五代先生がお話になりましたが、この宇宙での探査を活用しながら、より社会に対して科学、あるいは技術への関心を高めてもらう、そして、一般市民からの関心を高めてもらう、そういったものに役に立つわけです。オーロラ計画は現在、まさにこれから進化してくる、生きているドキュメントとして議論が進んでおります。そこには政界、産業界、専門家の観点から、あるいは技術的、科学的な観点も入ってきます。そして、現在その初期の技術的な取り組みを進めているところです。

また、各国の例えばアメリカ、ロシア、日本、その他の国際パートナーの様々な研究やその結果を解析しています。したがって欧州のパッケージとしてスタートしていますが、欧州のみならず、同等なパートナーからの貢献に対してもオープンです。そして計画上の総意として、この国際パートナーとの協力が不可欠といえます。今まで、国際宇宙ステーションのインフラの取り組みがありました。例えば、ATV や大気圏再突入実証を行う ARD、そしてコロンバスもありました（資料8）。同時に、これらのロボット施設、例えば SMART-1 ミッションあるいは、マーズエクスプレスもありました。それによって、大きな宇宙機そういったものでさえまた可能になってくるわけです。オーロラ、そして火星への探査という事でお話したわけですが、ミッションロードマップを示します（資料9）。大気圏再突入実証、そして火星サンプルリターン、有人技術実証、地球高軌道での組み立て、そして有人月着陸（2024年）、更に火星への無人ミッション、そして火星有人ミッションです。火星有人ミッションを2033、2034年あたりに考えています。

それぞれの詳細ですが、EVD、大気圏突入実証機です。非常に高速です。また、エグゾマーズミッションがあります。火星の表面を観察するものです。ローバーも表面の様子を見ていきます。軌道に上がり軌道船とランデブーします。過去現在の生命体の兆候を調査します。また、このエグゾマーズに対応し、多くの関心が世界中の研究者から示されました。日本あるいは、国際パートナーもさらに貢献が期待されているわけです。こちらが火星サンプルリターンですが、突入そして下降、着陸、そして、サンプルとして、土壌、岩石、大気も収集します。また、科学的な目的としてももちろん生



資料9 オーロラミッションのロードマップ

**esa** **European Human Mission to the Moon**




Primary Objectives:

- **Demonstration of Life Support System**
- **Demonstration of Habitation Module for interplanetary trajectory**
- **Demonstration of In-space and Surface EVA**
- **Demonstration of Re-entry to Earth**
- **Crew aspects following long term isolation**
- **Crew performance aspects in reduced gravity after prolonged  $\mu$ -g**
- **Demonstration of operational capability**

Secondary Objectives:

- **Perform exploration tasks on the Moon**
- **Perform science tasks on the Moon**



22

資料 10 欧州の有人月面探査ミッションの目的

命体の兆候も調べるわけですが、そのみならず地質学や、鉱物学からの観点も調査、解析が進められます。

また有人ミッションですが、技術実証においては、月への有人、またプライズリーミッションにおける軌道上での組み立てを実証し、そして生命維持技術の面も進めていきます(資料 10、11)。ライフサイエンスの実験も行われます。

我々の現在のスケジュールについては述べたとおりです。今年末にまた会議があり、このプログラムの最終的な実施について話し合われます。そして、詳細計画はこのように定まっています。現在の現状ですが、今年は3年の準備期間、その最終年になるという事です。オーロラ計画に対してはECからの資金提供もあります。また、将来的に、エクゾマーズやサンプルリターンなどに関して、より詳細なワークプランが作られ、国際協力シナリオを検討していきます。オーロラ計画は確かに欧州の更なる包括的な探査の機会となるものですが、しかし、欧州側から進めていくのみならず、国際パートナーとの協力を模索しています。

まとめですが、こちらが月探査、そして右側の方が火星探査です。そのために必要な技術が真中に書いてあります(図略)。また、資金を得た上で、赤の部分がロボット関連の開発項目です。そして青色が将来の有人飛行のための開発です。したがって、国際ワーキンググループとして、すでにもう10年になるわけですが、このように成長しています。ルナA、セレーネそして、中国の月オービターも打ち上げられます。それから火星サンプルリターン。これらが、次の第二フェーズにも役に立ちますし、その後の、有人探査にも役立つわけです。また、着陸船の開発も様々な国際コミュニティーに非常に役立つはずで、セレーネBは、さらにまた国際的な月探査に役立つものです。その後、アストロバイオロジー(宇宙生物学)や生命科学といった研究、そして2020年には永続的に月に存在し、研究が進められていきます。科学においても、月のサンプルを収集したものを科学的に解析して行き、さらに月にある早期の地球起源物質がどういうものであるかという事も研究されていきます。そして、月基地、月ビレッジという事も進めていきます。

これが最後のスライドです(資料 11)。人間の火星及び月への探査は、ロボット工学を活用して進められていきます。打上げ、つまり宇宙のアクセス、また、トランスポーターで通信も考えられます。また、発電を月で行います。そして、その場での燃料生産や、有人基地の居住スペース、ライフサポートシステム、グリーンハウス、あるいは、医療の分野

からの考慮というものもあるでしょう。そして、これらの一連のステップを経て、将来のバイオスフェアにもつながり、火星探査にもつながっていくわけです。

「月に行きましょう！」 ご清聴ありがとうございました。

 Elements for Human Moon/Mars Exploration

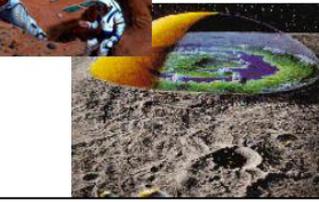
- Advanced Launch /access to space
- Orbital Infrastructure
- Transport/ communication
- Habitable Descent / Ascent Vehicle



- Surface Power Generation
- In-Situ Fuel Production
- Robotic outposts and rovers



- Habitation Modules
- Workshop
- Scientific Laboratories
- Greenhouse / Agriculture Module
- Medical Centre



- Pressurized Rover
- Advanced EVA Suit
- Life Support Systems

資料 11 有人月・火星探査に向けて

## 【質疑応答】

<会場>

昨年のクリスマスに、マーズエクスプレス、ビーグル2のランダーが失敗したという事なのですが、その周回軌道を回っている、マーズエクスプレスの母船の方は今どんな状態なのでしょう。マスコミを通じてはぜんぜん情報が入ってこないの、少し知りたいと思います。よろしくお願いします。



<Foing 氏>

今日プレスカンファレンスがありまして、マーズ・エクスプレスオービターは最初の火星の様々な画像を紹介する予定になっています。そして、サイエンスミッションの80%がオービターにあるわけで、成功裏にうまくいっています。確かに、ビーグル2のイギリスのランダーに関しては、残念でしたが、こういった高いリスクがあり、ビーグル2に関しての経験から学べるわけですが、しかし、マーズエクスプレスのオービターは完璧に動いており、そして現在、だんだん軌道を下げてきています。そしてすでに画像をマスコミに提供しています。そして新しい画像、及び赤外線スペクトル画像、更にまた、大気サンプル、そういったマーズエクスプレスからの情報を公開していきます。ですから、非常に大きな3次元の画像を見る事が出来るでしょう。これはすでに公開され、今日また新しい画像が公開されます。是非ホームページをご覧ください。このマーズエクスプレスでは非常に成功したと言えます。3億ユーロ、3年間のスケールという、非常に大きなチャレンジのプログラムでありながら、成功しました。マーズエクスプレス、SMART-1で教訓を学びこれによってさらに次のフェーズとしてオーロラ計画を進めようと考えています。

(SMART-1 のホームページ)

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=10>

## 「インドの月探査構想」



**J. N. Goswami**  
インド国立科学アカデミー  
インド宇宙研究機関 (ISRO) フェロー

皆さんこんにちは。インドの月探査について発表させていただきます。インドがどのような月探査を手がけているのかということですが、まず月と言うのは宇宙活動全体の第一ステップになるのではないかと位置づけています。私自身色々な（月の）サンプルを研究したり勉強したりしましたが、そういったことは過去のものと思われがちですが、私はやはりもう一度月を目指すべきであると思っています。

本日は、まず第一点目としてどうして更に月を探査する必要があるのかという事、第二点目、非常に重要なのは国際協力であるという事、そして最後に、インドとしての計画をお話したいと思います。

まず、なぜ、あえて月なのかという事ですが、これは非常に重要な質問です。やはり隣を知るという事は、いつでも重要だと思います。隣はただの知り合いだという事ではなく、やはりよりよく知ると言うことがとても重要ではないのでしょうか（資料1）。月と言うのは地球にとっての隣であるという事は、ほとんどの人が知っていますが、本当に知っているかというところまでは理解が進んでいないのではないかと私は感じているわけです。そして、これは後ほど詳しく述べたいと思いますが、科学的にもやはりしっかりとした根拠があるという事です。今日、他の講演者の方が色々な論点からお話されているとおり、やはり、天文学的に見ても、月に天文台があったら良いと私は思いますし、更にロボット工学が発展してくれば、月を一つの拠点としてさらに探査を進めていく、あるいは資源探査

を行う、あるいは月旅行を行うという観光的な側面もあるでしょう。ここでは私は科学面を論じてみたいと思います。

何故、月がそれだけ特別なのかということですが、これは月が地球型惑星の衛星であるということに関係があります。月は、地球型惑星の中で唯一の衛星です。ここに書き出している水星、金星、火星どれをとっても衛星は持っていません（資料2）。つまりその中で、特異であるということです。それから、いわゆる地球型惑星の中で、地球だけがこの月という衛星を持っており、

India's Lunar Exploration Programme

Why go to the Moon again ?

It is always better to know your close neighbour, **WELL**

Often, we think we know them well, when in fact it is NOT the case

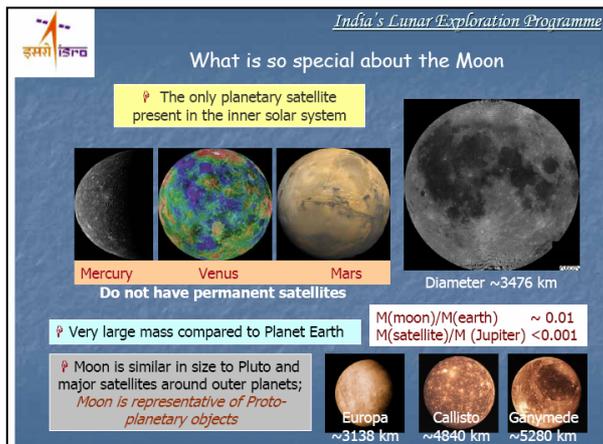
This is PARTICULARLY TRUE in the case of the MOON, our close neighbour

There are very strong **SCIENTIFIC REASONS** to go back to Moon

**Other Reasons:**

- Moon as a base for Astronomical Observation and Planetary Exploration
- Resource Utilization (minerals, water, fusion fuel)

資料1 なぜ再び月か？



資料2 月の何が特別なのか？

質量がとても大きい。地球に対する月の大きさは、木星に対する衛星の大きさに比べるととても大きいわけです。それも特徴的です。つまり、惑星の冥王星ぐらいの大きさを持っているし、あるいは、外惑星が持っている、大きめの衛星に匹敵するだけの規模を持っているという事でとても重要なわけです。

月の進化、起源はとても重要だと思います。それを科学的に理解することは、十分意義があるのではないかとことです。月に関してはデータベースも充実しています。では、何故更に？という事で

すが、これは、旧ソ連、アメリカ、無人有人、周回、アポロ計画などなど、様々な計画が実施されてきており、データも相当累積しています。しかしながら、未解決のまだ答えの出ない点もたくさんあるのではないかとことです。米国のクレメンタインあるいはルナー・プロスペクターミッション以降、こういった未解決の事項というのがとても重要視されていて、やはり月をもっと探査した方が良いのではないかと考えられています。また、最近になり国際協力の気運が高まってきているということで、国際協力の側面からも意義があるのではないかとことです。

それでは、次に、そもそも月はどうのようにして誕生したのかということをお話したいと思います。様々なデータがそろって来ているわけですが、どうも偶然の出来事として月が誕生したというのが一般的な考え方になっているわけです。まず、原始期に地球に火星程の大きさの巨大な物体が衝突し、その物質が地球のマンテルから噴出して、それが、短期間の間に集積する事によって月が出来上がり、やがて分裂していったということです。これは45億年前と言われております。この衝突は、おそらく太陽系が出来てからそれほど期を置かずして発生したのではないのでしょうか。そして月の表面が固まりました。月の表面を見ますと、きらきらと光るような場所がいたる所にあります。密度の低い鉱物と言われていますが、いわゆるマグマオーシャンの名残ではないかということです。一千万年か、二千万年かその年次はわかりませんが、ある時期、これは月誕生の歴史の中では後期ですが、微惑星、衛星、惑星によって重度の衝撃が発生した。そして、32億年ぐらい前に海、暗黒部ですが、海が埋まったと考えられます。そして、その鉱物の組成を見る事により年譜というのも徐々にですが明らかになってきているというのが今までの状況です。

ただアポロ計画におきましても、着陸しやすい赤道部近くに関してはわかっていますが、月全体をしっかりと探査したという例はこれまでにないわけです。そこで、何がわかっているのかということですが、表と裏はずいぶん違うということ。表に関してはよくわかってきたけれども、裏を覗いてみたら表とずいぶん違うではないかということが言われました。同時に、裏側にあるSPAという、大きな太陽系最大の盆地ではないかと言われておりますが、そういうのが発見されました。これも画期的な発見と言われたものでした。そして、一つの可能性として、月に水が存在する、その証拠があるのではないかとことが言わ

れました。例えば、月の表面下には20億トンほどの氷がある可能性があると言われていたのです。

という事で、一連の新しい質問が出てくるわけです。そもそも、そのマグマオーシャンと言うのはどういう特性のものであったのかと言うことです。そして、それが、影響を受けたのは月全体であったのか、局部現象だったのかと言うこと。一体いつその大規模な衝突が起こり、どのくらいの間続いたのかということ。どうしてこれが重要かということもお話いたします。



月の化学組成と言うことで、特に、鉄、ウラニウム、云々と、そういったものに関して、どういう状況になっているのかを知る必要があります。また、特に裏側に関してさらに検証を進めたいと言う要望が高まってきているわけです。サンプルを回収してくると言うようなこと。そして、表対裏と言うこと。やはりその非対称性であるということですが、どうなっているのかをもっと詳しく探査したいということ。そして、その月の地殻の性格がどうなっているのか、構造がどうなっているのか、層化されているのかということですが、日本の計画はとても興味深いと思います。

後は、月の水ということですが、揮発物質がどのようにして運搬、動いてきているのかということ、その辺りもこれから探査の対象になってくるのではないかと思うわけです。ちなみに、インドのこれから先の計画、目的の一環としてこれを定義しております。

地球対月ということですが、親子説というものがあります。もし、巨大衝突という事であったならば、本当に単一の一つの月だけだったのでしょうか。複数の月のようなものももしかして形成されたとすると、もう少し小さかったかもしれませんが、他の月的な存在はどうなってしまったのだろうかということ。そして、原始期にあった地球全体に対するところの影響はどうだったのかということ。42億あるいは38億年前の出来事として、その誕生期の後期に衝突があったとすると、いわゆる星間現象とするならば、この影響は月だけではなかったはずであって、地球にも相当な影響が及んだはず。それはどうなのだろうかということ。そして、単純な計算をしてみると、このような巨大な衝突という事になると、相当の深度を持つ海洋でも蒸発してしまったということが考えられます。地球に関してはどうなのかなと言うことです。しかしながら最近になり、例えば地球にも42億年前には水が存在した、そして38億年前には生物の活動の痕跡が見られるという事も言われていますので、再度やはりこれは月に戻って探査した方が良いのではないかなということになってくるわけです(資料3)。戦略的には、とても簡単な考え方は。アポロ計画、ルナ計画の時にはあまり蓄積がありませんでしたが、今、我々は様々な実験も進み、そして、経験

*India's Lunar Exploration Programme*

To Answer these questions:  
We need to Go Back to the Moon again!

**The Strategy:**

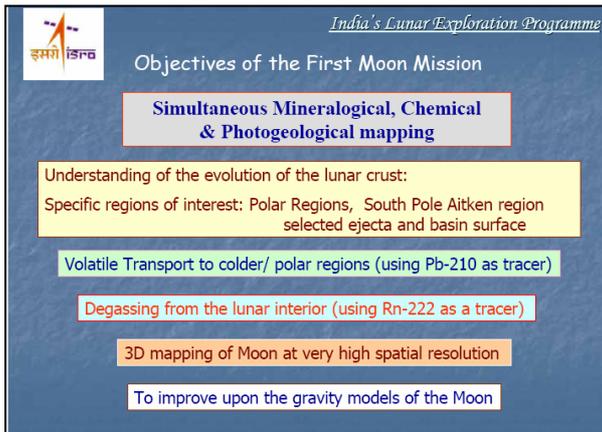
☺ Unlike in the Apollo/Luna era, We now KNOW What to look for and Plan Experiments accordingly

**Options**

<b>Orbiting Mission</b>	Synoptic View of a large area	Topography, Chemistry, Mineralogy
<b>Landing Mission</b>	local	Chemistry, Mineralogy, Internal Properties & Structure
<b>Sample Return Mission</b>	local	Physical Properties; Minor and trace element chemistry; Isotopic effects; Chronology,

*These are complementary & a series of missions must be planned*

資料3 答えは再び月に戻ること



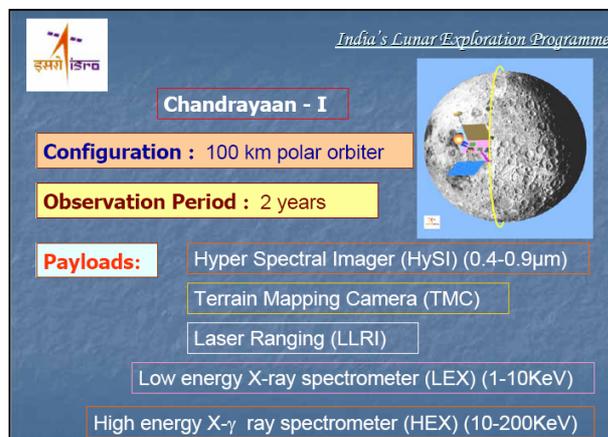
資料4 インドの月探査の目的

も積み重なってきているという利点があります。あるいは多くの考え方があると思います。周回ミッション、着陸ミッション、あるいは、サンプルリターンミッションと、鉱物学、地形学など、何を焦点として据えるのかにより色々なオプションが得られるのではないのでしょうか。ですから、様々なミッションを計画することによって、補完的に検証を進めていくという事に他ならないのではないかと感じるわけです。

### ■ インドの月探査計画

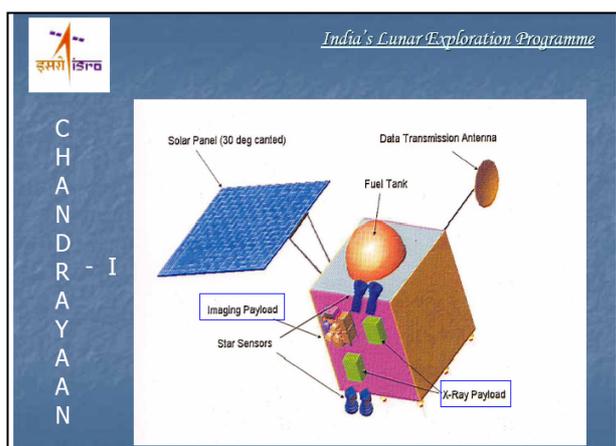
次に、このような中でインドは何をしているのかということをお話ししたいと思います。まず、インドの前にこれは先程お話いたしました、日本がこの領域で非常に先端的な指導的な役割を果たしているということはとても重要だと思います。そして、我々といたしましても、日本あるいはその他の国と国際協力を進めていきたいと思っております。インドの計画では、高度約100km程度の極周回衛星を考えています。グローバル画像、撮像、鉱物学、あるいは科学的なマッピングしたいと思っております。そして、非常に高解像度のセンサーを搭載します。インドでは、月をプラットフォームとして、資源活用のために考えていくということが、とても積極的に検討されてまいりました。インドとして色々な検討をしているところですが、もう既に探査結果としてもたらされている場所を根拠にして、さらに発展させていきたいと思っております。従いまして、まず、第一回目のミッションといたしましては、様々なマッピングをやって行きたいと思っております。色々なクレーターがあります。中部地域のクレーターの火山口というのは、非常に特徴的なものですが、表面には見えない、でも深部に潜んでいる部分をさらに掘り起こしたいと思っているわけです。そして13の元素というものを我々としては意識しているところです。揮発性物質の運搬はどのようにして動いているのかということが我々としては非常に気になるところです。そして、センサー技術。我々といたしましてはとても高度なものを持っています。5mぐらいの解像度を持つセンサー技術を使って行きたいと思っております。そして、また重力分布についても検証を進めたいという事です。

インドの月探査計画の名称は「チャンドラヤーンミッション」と言っております(資料5、6)。チャンドラとい



資料5 チャンドラヤーン ミッション

うのは月、ヤーンというのは車という  
意味です。ですから、月の上を動き回  
る車という意味合いの名称です。極周  
回衛星で 100km 程度という距離です。  
そして 2 年間という観測期間を考えて  
います。そこに色々な定点を設けて観  
測して行きたいと考えております。ペ  
イロードとしては、ハイパー・スペク  
トラル・イメージャー、0.4 ないし 0.9  
ミクロンの新しい技術を使っていく  
ことを計画しています。地形マッピング  
カメラ (TMC)、これも非常に高度なも  
のです。レーザーレンジング技術、低



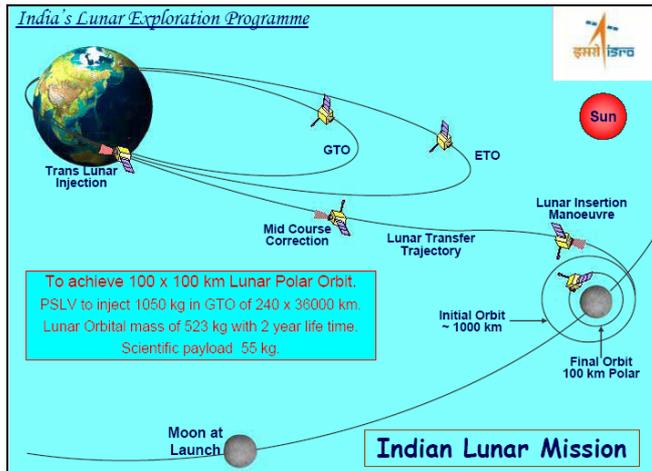
資料 6 チャンドラーヤーン-I

エネルギー X 線分光計、これはやはり、今まで使われている技術ですが、新しい応用を考えています。すなわち、X 線だけではなく、γ 線、X 線分光計を使う事によって、重要視されている元素などの存在を検証していきたいと思っています。

まず、このハイスpekトルイメージャーという画像技術ですが、これはウェッジフィルターという画期的な新技術が備わっています。これにより、32 位のスペクトラルバンド、リージョン・バンドを網羅する事が出来ます。そして次にこのカメラですが、それぞれの層において、3 つの異なる角度からの映像を撮る事ができ、結果的に地上での解像度 5m という仕様を設定しています。様々な新技術あるいは従来技術を応用することも考えています。この観測装置は天文台でも活用している同じ技術ですが、更にそれを発展させていきます。ですから、今までの技術と新技術を組み合わせる事によって高度化していくという事です。レーザーレンジ、これは通常のものです。

それから、いわゆる揮発性物質の運搬です。これが重要ではないかと思えます。これに関しましても色々議論されていました。やはり月の温度差が相当あるということに着目します。月の極部、南極北極というのはいつも影に入っており、太陽光を浴びず温度が一番低い。従ってそちらの方に移動して集中していくのではないかということです。ウラニウムの放射線崩壊では、2、3日の間ですが、ラドンガスが観測されるという事です。そして、実際に今までも検証されています。こういったことを実際に測定する事によって検証する、立証する事ができればという考え方です。

これが、30 度の傾斜角を持つ太陽電池パネルです。それぞれの項目がありますが、全てお話しする時間はありません。特長的な所ですが、新しい地域を対象としているということです。ミッションとしては、ハイパースpekトルイメージャー、画像技術、そして、高解像度の X 線あるいは、よりよい高い解像度を期待しているという事です。マッピングカメラも優秀なものを使います。



資料7 月への飛行経路

これは、月に行く方法ですが、今まで実施されていないやり方があるのではないかと検討したものです(資料7)。宇宙船は、一回楕円軌道上に待機させておいて、タイミングを選んでブーストを掛ける事によって月軌道の方に飛ばしていく。そのようなやり方が考えられるのではないかと思います。これを行うために必要な技術もあるのではないかと思います。ここで ETO というのは楕円軌道ですが、楕円軌道というのはすでに機能していますから、

この部分だけを徹底していくのならばこの考え方というのは充分成り立つのではないかと我々は考えています。このコンセプトを実施する場合、全体のミッションにどのような時間枠を設けているのかということが重要です。我々、そしてその他にも色々な独立したミッションがあり、全てを結集する事によって、チャンドラヤーン1のスケジュールが構成されるという事です。

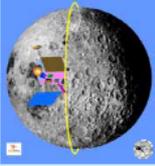
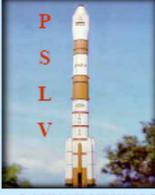
重量は55kgで、10kgの国際的なペイロードが確保されています。その部分を除いてその他の所にペイロードを載せるということを計画しています。つまり、輸入分、横にリザーブとして除く部分がありますので、そちらの方に国際的な協力という事で、ぜひご検討して頂きたいと思うわけです。

これがまとめのページです(資料8)。インドでは月探査計画の月次、年次会議、大会がございます。やはり我々としても、国内外から毎年出来るだけ多くの方々に集まっていたくことによって、計画を更に練り上げたいと思っております。

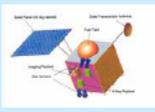
もう時間も押しているようですので私の方からはここで終了させていただきます。ご清聴ありがとうございました。

## INDIA'S LUNAR EXPLORATION PROGRAMME

### CHANDRAYAAN – I

**LAUNCH VEHICLE**

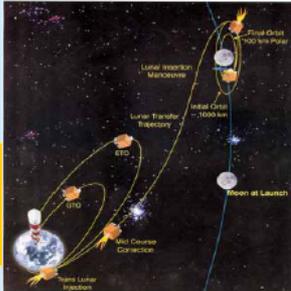


**LUNAR CRAFT**

A low altitude (~100 km) Polar Orbiter for Global imaging, mineralogy & chemical mapping with high spatial & spectral resolution sensors focussing on the South Pole Aitken Region & north and south polar regions. Distribution of several stable and radioactive elements will be obtained to understand the origin and evolutionary history of Moon .

**Launch Strategy**

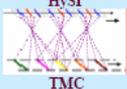
- Earth Parking Orbit
- Elliptic Transfer Orbit
- Midcourse Correction
- Lunar Transfer Path
- Lunar Orbit Insertion



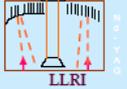
PAYLOADS



**HySI**



**TMC**



**LLRI**



**LEX**



**HEX (CZI)**

- 3D topographic atlas of the Moon with spatial and height resolution of 5 meters.
- High resolution mineralogical mapping of Fe, Ti, Al and Mg bearing minerals.
- Distribution of Mg, Al, Si, Ca, Fe, Ti and their stratigraphic relationship.
- Mapping of  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and other radioactive elements

資料 8 インドの月探査計画のまとめ



## 「中国の月探査計画の科学的目的」

Ziyuan Ouyang, Yongliao Zou, Chunlai Li, Jianzhong Liu, Jianjun Liu  
国家天文台、中国科学院

代読：佐々木進（宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部教授）

中国の月探査「嫦娥」（じょうが）計画は3段階に分かれる。1段階目として、1, 2つの月ミッションが2005に行われる。2段階目として、2006年から2010年までの研究を元に月面軟着陸を伴う宇宙機ミッションが2010年当りに予定される。2011年から2020年は3段階であり、探査機を搭載する軟着陸機が月面で調査し、2020年当りに地球までの月サンプルリターンを予定する。

科学的な観点から、将来の月探査には以下の課題が考えられる。

1. 月のエネルギー資源の分布と利用
2. 月のミネラル資源の分布と利用
3. 月特有の環境利用(高真空性、大気活動がない、惑星に磁場がない、地質学的に安定した構造、弱重力、汚染がない)
4. 月基地の設置場所を決定

月の資源、環境の特性、表面地形をもっとよく知るために、中国初の月ミッションは2005年末に打ち上げられる高度200kmのオービターである。1年間月を回り、その科学目的として、(1)月面の3次元画像をセンシングする。月面の3次元画像の基礎単位を区分し、月の表面、地形、衝突火山口の形、サイズ、分布、密度を分析する。更に、月面の年数とその早期の変遷の痕跡、また月構造の進化にも探りいれる。

(2)月面のいくつかの要素の成分や分布を突き止める。探査対象となる、14種の物質とは、アルミニウム、カルシウム、クロム、鉄、マンガン、マグネシウム、炭素、カリウム、シリコン、ナトリウム、チタン、トリウム、ウラン、REEである。我々の目標は、月の岩石の種類、分布を調べ、月のミネラル資源(特にFe, Ti, REE)を評価し、月の外殻の化学進化にも探りいれる。

(3)月の表土の厚さを測る。前回の探査データと研究の結果では、月の表土に大量の希ガスが存在することが示された。 $^3\text{He}$ とその他の希ガスを調査することによって、月面の土の深さ分布を評価することも我々の重要なミッションの一つである。

(4)月の環境を探査する。主な仕事は月周りの高エネルギー分子流と低エネルギーイオンに関するデータを入手し、月の放射の変遷について理解を深めることである。

以上の4つの目標を達成するために、次のペイロードが必要である。CCDカメラ、多重スペクトル観測装置、レーザー高度計、y/x分光器、マイクロ波計、高エネルギー分子と低エネルギーイオン検知器。中国の2つ目の月探査計画の科学目的は以下の表に示される

表 1. 中国軟着陸ミッションの科学目的とその探査予定

科学目的	作業タスク
局地的な地形、概観、地質を調査する	(1) 軟着陸し、月の局地的な地形、概観、地質を調査。 小衝突火山口の特性とその分布について調査 (2) 月の表面物質の成分を分析
月の地震記録を検知し、内部構造の特性を探る	(1) 月の地震を記録する。表面と内部への衝撃の特徴を調べる (2) 月の表土の厚さを測定、その構造を調べる
地球一月の宇宙環境を観測や天文光学を用いて、探査する	(1) 太陽—地球一月の宇宙環境と天気を観測 (2) 太陽風の放射線を測定 (3) 天文観測

訳：(財) 未来工学研究所