

## 2020年頃に実現を目指す月探査に関するご意見、ご質問

平成21年11月18日（水）に開催された月探査に関する懇談会第3回会合について、意見交換の時間が十分に取れなかったため、懇談会構成員より、メールでご意見、ご質問をいただくこととなった。

### 1. いただいたご意見、ご質問

以下の11名の構成員の方からご意見、ご質問をいただいた。

井上構成員	2ページ
折井構成員	4ページ
國井構成員	6ページ
久保田構成員	7ページ
里中構成員	9ページ
鈴木構成員	10ページ
鶴田構成員	12ページ
葉山構成員	13ページ
広瀬構成員	17ページ
的川構成員	24ページ
水嶋構成員	25ページ

### 2. 上記のうち、質問事項を取出して26ページに一覧として示す。

### 3. 構成員からの文書による回答を添付する。

長谷川構成員の回答（折井構成員、鈴木構成員からの質問）	27ページ
葉山構成員の回答（折井構成員からの質問）	30ページ
広瀬構成員の回答（鈴木構成員からの質問）	32ページ
井上構成員の回答（鈴木構成員からの質問）	33ページ
水嶋構成員の回答（鶴田構成員からの質問）	36ページ

## 第3回懇談会を踏まえた第4回懇談会におけるコメント

井上博允

(1) 2025年までの月探査計画の総額は、輸送系、着陸機、帰還機まで含めると数千億規模になり、そのうちロボット関係は総額の15～20%程度になると思います。これほどの予算額になると単に月に科学をするために行くという説明では説得力が弱いと思います。毛利さんが宇宙開発戦略専門調査会で提案されたように、月探査には多様な視点が必要であり、フロンティア開拓としての有人探査につながる形で計画することが大事だと思います。現在2つの案が議論になっています。(1)月の表と裏から各1回のサンプルリターンなる科学的ミッションを行うロボットの場合、世界では既に多くの事例があり、中国も我が国より早く実施予定と聞くので、キャッチアップの印象は拭えないと思います。このロボットでは、過酷な月環境におけるミッション遂行に特化した確実性のある設計が主な開発課題になると思われます。ロボット技術としては先進性に乏しく、また産業への波及効果も期待薄だと思います。従って、科学的意義が計画の価値を左右することになると思います。(2)これに対して、月基地の構築や人型ロボット等高機能ロボットによる月探査の場合、科学的ミッションだけでなく、ICT・RT及び蓄電技術イノベーションの先導、少子高齢化社会を支援する産業技術フロンティア開拓への波及効果等、高度技術立国を象徴する開発としての意義が加わることとなります。

即ち、この二つの案は、月探査という舞台上、科学をするか、技術立国につながる新手段開拓の上で科学をするか、ということの選択になるのではないかと思います。私は、後者を支持します。

(2) 私はテクノロジーのグランドチャレンジを通じて、宇宙開発や月探査に携わる科学者に新しい手法を提供できればと考えており、そのことを通じてロボット工学が宇宙科学の進歩にも貢献できればうれしいと思います。同時に、当然のことながら地上の生活や産業への波及効果が期待できなければ、協力する企業としても真剣にコスト感覚を導入したり、その技術開発に最優秀人材の投入は出来ないと思います。また、多額の資金を投入するということになれば国家としての戦略的な意志が必要になると思っておりますが、この件に関しては宇宙基本計画策定時に検討済みのことと理解しています。なお、ヒューマノイドという新しい手段が提供された場合、科学者は、月のどこで、どのような探査をしようとするか、順序をつけて知りたいと思っています。月でフィールドスタディをする際の具体的な作業内容は、ロボットの要求機能を具体的に整理する上でぜひとも必要なことだからです。

(3) ヒューマノイドはロボット技術をひとつのシステムに統合するときの象徴的な対象であり、それを実現するための鍵を握る技術内容はロボット技術というよりも実世界と人間を対象とする情報技術だと考えます。開発には、組み込みソフトから、OS、シミュレーション、ユーザインターフェイス、作業や動作のコンテンツ、等、多様なレベルのソフトウェア開発を包含しており、欧米や印中に比べて比較劣位になりつつある情報産業に対して具体的な目標の旗を立てることになると思います。また、そのようなプロジェクトを通じて育成される優秀で先端的な技術者は適当な時期にプロジェクトからスピナウトして、ICT、RTそしてEVなどの新産業創生の場で活躍することがわが国の産業活性化に資するものと期待されます。

(4) 第3回の懇談会で葉山委員が示された移動車と複数のヒューマノイドをパッケージした月探査システムは、移動基地という現実的な方向を示したものとしてよく検討されていると思います。イラストがきれいに書かれているためSF的な印象を受けますが、このイラストを描くにあたっては、技術陣はその実現可能性を十分に検討したはずです。また、私はもう少し簡単なシステムを念頭において人型ロボットの開発を中心とした開発項目と工程表を作ってみました。この思考実験を当てはめて見ても、葉山提案は月面での実現時期は多少遅れるかも知れないが、地上ではそう遅くない時期に十分実現可能な内容であると判断されます。葉山案を見て、私は、月面基地としては移動式の方が固定式より有効ではないかと考えるようになりました。機動性のある拠点構築提案だと思います。

(5) 懇談会が始まってからの短時日のあいだに、レゴリスの中に微小な水がるとか月の南極に比較的大量の氷があるとか言う研究結果が発表され、月をめぐる情報はホットになってきたようです。月に探査に行くとすれば、南極に行って基地を作り氷や水がどんな状態であり、それを利用して有人探査につなげることが我々の関心を引きます。日照の関係からも、基地を作るのにも丁度いい場所のようですから、そこを拠点として、有人探査に向けたグランドピクチャが描けると良いと思います。中国やインドも国威発揚だけでなく資源探査も考えるでしょう。貧弱な予算体制に置かれてとはいえ、日本の宇宙開発が月の科学だけを意味あるものとして掲げるのは、一般の人から見たら緊急性は感じられないと思います。第3回の懇談会で、科学目的のほかに産業への波及効果が見込め、国家のプレゼンスを高めるものとして、月面基地の建設とヒューマノイドを活用した月探査計画を提案しましたが、この計画により、わが国の科学者が、遠隔制御で安全にフィールドワークを実施出来る新しい研究手段とインフラを世界に先駆けて手に入れることになれば、いち早く多様かつオリジナルな月の科学を展開するのに役立つのではないのでしょうか。

以上

## 月探査に関する懇談会 第3回会合(H21.11.18)についての意見

折井

「日本が世界に貢献する宇宙開発をやる」為の一つとして「有人を視野に入れたロボットによる月探査」があげられ長谷川委員・葉山委員・広瀬委員・井上委員・小久見委員・水嶋委員から説明頂き、それぞれの提案と見識に対して勉強になった。

月を知り・・・月で活動し・・・月をベースに更なる宇宙活動へ・・・といった繋がりがこれまでも検討されている。実行するからには、国際社会と協調・競争を視野に入れて時間と投資と得られるであろう成果を、国民によりわかりやすく説明し、理解を得る努力が望まれる。 今後を語るためにも、過去の経緯も踏まえて、2つの意見を述べさせていただきたい。更に座長からの検討課題と質問について記載します。

1. これまでも宇宙開発は、国際貢献・競争の意味合いもあり、日本の国旗を背中に背負って活動し成果を出してきた。少ない国家予算の中で知恵と工夫を駆逐して、日本の宇宙の将来を見据えて、一つ一つ確実に階段を上って、国際社会からも一目が置かれる地位を築いてきた。その意味で、これまでの文科省や研究者をはじめ関連企業のご苦勞に感謝を申し上げたい。

なぜ今日に至ることが出来たのか？最も重要なポイントは、物事を探求・知る際に、最も効率の良い手段・道具（ロボット）（衛星や探査機も一種のロボットである）を研究・開発し実現してきた事実である。

また、その一連の活動の中で、例えば日本初の人工惑星ハーレー探査「さきがけ・すいせい」、「はやぶさ」や「かぐや」など国民に「わくわく」感を与えたのではないかと思う。

大切なことは、何かを成し遂げるために最適な道具（ロボット）を選択することが、国民にもよく理解頂けるものと思う。その意味で、今回説明いただいた「人型ロボット」が月探査に最適なものであるとの説明をし、支持が得られるものでなければならぬと判断する。本視点での議論をもっと時間をかけて検討すべきである。

考慮しなくてはならないこととして、今後とも日本の財政状況を考えれば、益々より効率的な宇宙計画と運営の実現である。

2. 「有人を視野に入れたロボットによる月探査」と題した検討で、人型ロボットの実現により、有人にかかわる研究や開発そのものの機会が失わ

れるのではないかと懸念が出ているのではないかと思う。人命に対する日本人の感性、有人なるが故の多種多様なサポート体制を考えれば日本独自で行うところの議論は大いにあると思うが、人が行く前に人型ロボットで実証することがあるにしても最終的には有人活動を実現できる研究・開発活動を行なえるようにすることである。人型ロボットが人間をサポートできることには、メリットを感じるが、サポートと人にとって代わることは異なる。

宇宙環境下での活動を行える仕掛けや道具を考える時には、人を対象にすることとロボットとでは、根本的に大きく異なる点がある。それは「命」を扱うかどうかである。人の命を保障することの物事の仕組みが大きく異なっている点である。今後とも、日本が先進国の一員として宇宙における国際協力をイコールパートナーとして貢献してゆくためにも、まず有人の打上げや地球への帰還などで支援できるような研究・開発の促進が重要と考える。

以上 2 点の意見を述べさせていただきました。

長谷川委員の提案に対する I 案と II 案の意見について(座長より)

両案とも月面に軟着陸し、探査ロボットで移動し、サンプルを採集し一部のサンプルを地球に持ち帰る提案であり、今後の宇宙探査に必要な最低限の習得すべき技術とその実証が実現できる点を評価する。

日本として、かつ国際貢献度合いを将来の有人活動の視点で考えれば、水が存在すると言われている極域で探査拠点を置く II 案のほうが良いと考える。

質問 下記に 2 件の質問をさせていただきます。

1. 長谷川委員への質問

中村宇宙理学委員長の「月探査と科学」の説明と長谷川委員の「月探査の全体シナリオと技術的課題(案)」の内容とのつながりに少しギャップを感じた。お互いによく議論されているとは思いますが、科学と工学の連携はうまくいっているのでしょうか？

2. 葉山委員への質問

「人型ロボット」のイメージ提案に対して、月に運び、運用するまでの具現化(実用)に関する技術課題と投資額及び実現するまでの期間は、どのように考えられておられるのでしょうか？

以上

## 月探査懇談会

國井秀子

### 意見

- 月探査を科学のためだけのよう捉える考え方は問題である。科学と技術の両面からバランスよく推進することが重要である。科学と技術はお互い絡み合って進化する。また、技術の発展によって人間の生活の向上や環境問題の解決などがあり、技術発展のための月探査という観点も必要である。
- 毛利委員のご指摘のように、日本単独での有人飛行による月探査は非常にむずかしい状況がある。半身であろうとも、ヒト型ロボットは、これからの社会に有用な技術の発展に資する。介護ロボットの経験をみても機能のみを重視したロボットは必ずしも成功しない。人間との相性や心理を重視すべきである。
- 総合的なシステム力が弱体な日本において、井上委員がご提案のロボット構築のためのオープンなソフトウェアプラットフォームは、産業的にも、また、今後の惑星探索の効率化のためにも極めて重要である。個々の研究の最適化のみならず今後の長期の開発効率も考えるべきである。
- 石を持ち帰るか、探査拠点の構築か、という二者択一しかないとしたら、後者を選びたい。持続的に探査出来るような環境作りは、技術の発展にも大いに資する。

## 11月18日の「月探査に関する懇談会」での議事に関する意見とコメント

久保田 弘敏

### 1. 長谷川委員の「月探査の全体シナリオと技術的課題(案)」に関する意見

#### (1) 月探査のシナリオについて

I 案は、2020年頃に月の表側への往還と月の石を地球に持ち帰ること、2025年頃に月の裏側の石を地球に持ち帰ることを目標としており、II 案は2020年頃に月の極周辺に探査拠点を構築し、2025年頃にはその探査拠点を活用した発展的探査を行なうことおよび月の極周辺への往還を実現することを目標としている。両案とも、将来的には有人対応の月面拠点をを用いた探査を念頭に置いているが、プロセスと理念が異なると理解している。

I 案には、月の石を持ち帰るという短期的に目に見える成果を挙げ得る可能性があるが、長期的・総合的に見て、私は **II 案の方が有効である** と考える。理由は次の通り。

- ① 探査拠点を置いて、長期的な探査を行なうことにより、本質的で、よりレベルの高い探査結果が得られるのではないかと。資料 2 によって、例えば地質探査、内部構造探査と天測観測による組み合わせは、拠点を置いて探査してこそ行えるものであると理解した。
- ② 私は日本学術会議総合工学委員会の「フロンティア人工物分科会」のメンバーであるが、ここでは、宇宙探査も海洋探査もともに極限状況での科学技術と位置づけ、ともに地球の成り立ちを知り、人類の持続的発展を保持し得るものとして討議している。人類の持続的発展保持の努力は、地球をよく知ることだけでなく、フロンティアへの活動範囲を広げてゆくことにつながり、宇宙で長期的に活動することにも通じる。月に長期的な探査拠点を置くことはその一つの活動であると考ええる。
- ③ 私が出席できなかった第 2 回会合の議論では、月探査と有人活動は別に考えるべきという議論もあったとのことであるが、月での人の活動（探査、生活等）を実現することは、広い意味の宇宙での有人活動の一部として意義があるのではないかと思う。つまり、月探査のための有人活動というより、有人宇宙活動のうちの月探査と考えられないだろうか。II 案にあるように、月面に拠点を作り、長期的な有人活動環境ができれば、ロボットだけでは不可能な、あるいはロボットと協同して長期的な有人活動を行なうことができ、さまざまな知見が得られるだろう。日本でも、宇宙での人間滞在の技術、たとえば生命維持システムや資源・エネルギー自給システムなどの研究が進められている

ので、それを月に応用できるだろう。月での人による探査や生活を日本が主体性を持って行うことにより、月で人が活動できるということを実証することができ、人の活動範囲を地球から月まで広げる効果があるだけでなく、人々の知的好奇心を高揚させ、若い世代に希望を与えるだろう。大学生の教育現場に携わる者として、そのようなチャレンジングな試みが若者の意欲を高める原動力になることを痛感している。第2回の議論の中にあつたという国民に信頼される宇宙活動とは、結局そういうものを具体的に示すことだろうと思う。

- ④ 世界に先がけて月の探査拠点を作ることにより、国際貢献をスムーズに行なうことができる。
- ⑤ 単に月の石を持って帰るのであれば、2017年に予定されているという中国の月面サンプル回収の3年後となり、二番煎じになる恐れを免れない。
- ⑥ 一概に比較はできないかも知れないが、南極観測の場合も拠点（基地）を置いて活動することが有効であつたと思う。（月探査が南極観測に似ているということは、第2回会合で青木委員から発言があつたことを後で知った。）

## (2) 輸送系の重要性について

どのケースも輸送系の果たす役割は大きい。特に探査拠点を作るII案の場合には、多頻度・大容量の輸送が必要となる。当然地球への往還が必要となるので、その技術力の向上がキーテクノロジーとなるだろう。宇宙から地球への回収については、日本は未経験のことが多い（HYFLEX、USERSくらいしかやっていない）ので早めに研究開発のレベルを上げるべきである。その意味でも、「はやぶさ」の成果も期待される。

## 2. ロボット技術およびエネルギー技術について

具体的なコンセプトと現状技術について聞かせていただいた。いずれも、日本の技術力の高さが推察された。今後さらに宇宙環境対応技術（微小重量、熱、宇宙線等）が必要と思われる。

以上



## 「月探査」計画実行は国の未来を作る！

里中 満智子

- ☆ 「科学」は常に、当初の目的以外の分野の発展にも寄与する。
- 宇宙開発に関わるには科学力が必要、実行可能な科学の力を育む事で、宇宙開発だけでなく、他の分野にも生かせる最新の科学力を持つ。
- 軍事利用を伴わない形でスタートした我が国の宇宙開発のあり方をもっと PR して、世界に貢献すべき。
- 月探査に伴う科学的実力を新エネルギー開発に生かし、世界と地球の未来に貢献出来る。
- ☆ 3年後の事を考えていては20年後には取り残されている。  
100年先の事を考えてこそ、20～30年後からの発展に繋がる。  
目先の経済効果だけで判断するよりも長く利用出来る「金の成る木」を育てる忍耐力こそが、国の未来を作る。

## 11月18日の説明に対するコメント

鈴木章夫

- (1) 2015年、2020年、2025年の3ステップのプログラムには基本的に賛成。  
エンジニアのライフサイクル(多分 Scientist も?)は通常5年程度であり、  
従って技術の連続性を考えると、5年ペースの開発は妥当である。
  
- (2) Apollo 計画は、既存の技術(チャレンジングな技術では無く、実現性の目処  
が得られている技術)を組合せて、リスクミニマムで人を月に送り、安全に  
帰還させることを目的としたプログラムであったと理解している。わが国の  
月探査ミッションも、先ず技術的にどのような位置付けと考えるかを明確に  
することが必要である。ロボットの技術開発が最優先の目的では無い筈であ  
るので、それぞれのステップのミッションを達成するためにはどの程度のロ  
ボット技術が必要か、またその技術は必要とする時期までに開発可能かどう  
かを分析することが必要である。
  
- (3) 宇宙基本計画では「有人を視野に入れたロボットによる月探査」となってい  
る。本懇談会においても、有人ミッションに関する展望の議論をすることが  
必要である。将来有人ミッションがどのような形になるとしても、将来の有  
人ミッションにおいてわが国が独自性を持つためには相当の期間と努力を  
要すると思われるので、並行して有人に向けた技術開発の方向付けを行なう  
ことも必要であると考えます。
  
- (4) 2020年以降のミッションでは現行の基幹ロケット(H-IIB)の2倍以上の打  
上げ能力が必要と説明されている。10年程度先のことではあるが、我が国  
の宇宙輸送系の将来像も踏まえて、方向付けが必要である。
  
- (5) 月の科学探査は未知の点が多いので実施する筈であるが、調査した結果、当  
初予測していなかった、更に調べたいことが次々と出てくるのでは無いだろ  
か。そう考えた場合には、矢張り長期に亘っての調査が必要であり、そのた  
めには、連続した観測乃至は繰り返し調査が出来る拠点を作りが最も望まし  
いのでは無いか。探査ミッションでは科学的には当然意義はあると思うが、  
一般に与える印象は Apollo のロボット版と取られる恐れもあり、また1つ  
のミッションを達成しても、その後の機会は5年後というのは、かなり悠長  
な計画のように思われる。専門家のご意見をお聞きしたい。

## 11月18日の説明に対する質問

鈴木章夫

### (1) 広瀬委員

ロボットの形態を種々変えることが出来るのはロボットを月まで運搬する上でも極めて有用であり、また月探査ミッションに有効な手段で、研究が相当進んでいることに意を強くしました。ロボットが月で活動するのは移動および資料収集、電線敷設等の軽作業のみでは無く、発電設備の設営、基地設営あるいは地下探査等のかかなりの重作業も必要であり、多機能ロボットの開発が望ましいと思いますが、凡そのミッション要求が決まってから、開発にどの程度の時間が掛かるものでしょうか。或いは2020年をターゲットとしたロボット開発を行なうには、どのようなステップで作業を進めるべきとお考えですか。

### (2) 井上委員

ある公演で、2足歩行ロボットは立っているだけでエネルギーを消費するので活動時間が限られる、また重力によっても歩行に大きな影響が出、更に月のレゴリスは崩れ易いので雪の中を歩くようであり、技術的に極めて難しいとの話を聞きました。人間が宇宙服を着た状態で月面で活動すると同等の機能を持った2足歩行の人間型ロボットの開発には、どの程度の期間（とお金）が掛かると予想されますか。或いは、ミッションを成功させるためには要求仕様を満足するロボットを所定の時期までに確実に完成させる必要がありますが、その意味から、2020年をターゲットとしたロボットはどのようなものが適切とお考えですか。

### (3) 長谷川委員

この委員会で技術内容に関して何処までの議論をすべきかは分かりませんが、ミッションの実現性は明確にしておくことが必要と思います。2015年および2020年に提案しているミッションに対して、どのような新規技術の開発が必要か、また技術的には達成できる目処は付いているが主な開発作業にはどのようなものがあるか、凡その検討は実施済みですか？

### 第3回懇談会に対する意見

鶴田 浩一郎

これから具体的な月探査シナリオの議論に入っていくのだと思います。シナリオで設定される目標の実現に向けて個々の探査計画の最適化が行われることを望みます。シナリオそのものを十分議論する時間の確保が大切だと思います。

-----  
質問

水嶋委員殿

先日は電池に関して有益な話を聞かせていただきありがとうございました。月面での活動では電池の能力がキーとなると思っていました。先日のお話でおよその考え方が理解できた気がします。その後、日本経済新聞（2009年11月23日付け）で大阪府立大学が、リチウムイオン電池の5倍の蓄電性能を引き出せる「リチウム-硫黄電池」の基盤技術を開発したとの記事を見つけました。もし、記事のようにLiイオン電池の5倍の蓄電能力があるとなれば電源周りが一層すっきりするのではないかと興味をそそられました。本当のところはどう考えるべきでしょうか教えていただけると幸いです。

-----

### 第3回会合に対する総括意見

## 「ロボットによる無人月探査」と「JAXA 探査シナリオ」に関する意見

トヨタ自動車(株) 技監 葉山稔樹

### 1. ロボットによる月探査の狙い

科学探査の成果だけを意義とした月探査ではなく、ロボットによる無人探査計画を実現して、広範囲に及ぶロボティクス産業のイノベーションを促す。

### 2. その意義

- ロボットはクリーンエネルギー化、環境、医療・介護、食料危機、生活支援、など早期に解決を迫られている世界的課題を解決していく大きな力となる。  
月面活動は日本のロボット関連産業も含めた技術開発を促す原動力となり、最先端の技術を手に入れる事になり、日本の国益実現と世界への貢献が出来る。
- これらの実現にあたっては、ロボット関連の広範囲なフィールドに対する継続的なサポートが望まれる。従って実用化を促進させていく為にも、2020年から25年頃を見据えたロボットによる無人月探査計画を実行していく意義は大きい。
- 月の探査費用は科学探査のための費用ではなく、幸せな未来社会を得るための費用と考えたい。ロボットやエネルギーが最先端の技術力を持つための月探査シナリオを計画することによって、社会の理解を得ると考える。

### **3. 月面活動ロボットの研究開発と地上のイノベーションの繋がりについて**

#### **～最先端技術力を飛躍的に高める具体的事項～**

#### **1. 遠隔制御技術の高度化**

- …地上よりも大きな時間遅れを持つ月面活動を可能とする遠隔制御技術は自律制御との融合も含めて、遠く離れた場所からの制御技術の革新をもたらし、この技術の地上での活用シーンは非常に多い。

#### **2. 熱制御に関する技術革新**

- …真空における熱放射の効率性を向上させた材料開発や高低温環境に対する熱制御技術のロボットへの適用はロボットの活動領域を大きく広げる。

#### **3. 自己修復技術の確立**

- …高度な修理が不可能な月面での長期活動を可能とする自己修復技術は、信頼性の概念を大きく変え、過酷な環境下におけるロボットの長期活動を可能とする。

#### **4. 自律行動技術の高度化**

- …自ら危険を察知して瞬時に危険回避行動を取る必要性が高い月における活動を可能とするための環境認識技術と素早い自律行動技術はロボットの活動領域を大きく拡大させる。

#### **5. 障害物検知、地形計測、自律移動経路生成などの制御技術の確立**

- …行動するのに必要な詳細地図情報が入手できない月面において、周辺状況を計測把握しつつ、安全に効率よく行動できる技術は、建物内や周辺環境が常に変化する環境における自律移動ロボットの先端技術力となる。

#### **6. 多種作業対応技術(多指協調、両腕協調、全身協調)の確立**

- …採取、組立、保全、交換など多種作業への対応が要求される月面において汎用的にそれらの作業に対応できる技術は多作業対応の学習型ロボット技術と併せてロボットの先端技術力となる。

#### 4. 人型ロボットの提案理由について

- 月における個々の探査作業目的の達成だけを考えた、一回毎の開発から脱却して継続性を持って進行していく開発戦略に変換する事が、技術ノウハウの蓄積、と開発期間の短縮およびロボット関連産業の継続的な育成の観点から重要である。
- 地上であれ宇宙であれ、人が使用する事を前提に開発された装置やツールをうまく活用する事が、それらの進化改良も含めて合理的である。人のサポートを実施する場合も人型に合理性がある。従って移動のような目的を達成する為にその目的に特化した形態の中で進化させるロボットと、多種作業を可能とする人型ロボットとの合理的な協調関係を構築することが重要である。
- 二足形態は、手を含めた4足体系や屈んだり、丸まったり、跨いだり、といった体勢が取れ、環境変化や人への支援に対する適応能力に優れている。  
四肢を含めた全身協調動作制御技術は、月の活動に要求される高度な環境対応能力と多種作業対応能力の実現を可能とする。  
地上において人型二足ロボットの実用化が予測される2020年以降の月探査シナリオの中で開発テーマとして継続していく事を提案する。
- 探査シナリオの年次ロードマップに沿って、様々な目的に応じた作業を行うロボットと中長距離移動用のロボットについて継続的な開発シナリオを提言していく事がロボット最先端技術力向上とロボット産業の発展に結びつく。

## 5. 第3回会合における JAXA殿の月探査全体シナリオについて

科学探査の成果だけを意義とした月探査ではなく、月面の極限環境活動を可能とする技術革新と、そこから生み出される産業イノベーションを月探査の意義として捉えたい。その視点での2015年、20年、25年におけるロードマップの提言が望ましいと考える。2015年は月面軟着陸と岩石採取と成分分析となっているが、2015年の活動内容は2020年や25年頃に日本として達成すべき産業イノベーションの視点から見た探査の提言が望ましいと考える。また、米国や中国など諸外国に対して、日本の月探査に対するスタンスは、「優れた先端技術力を基礎とした産業イノベーションによる世界貢献にある」事を表明することが、社会の理解を得る意味でも重要だと考える。日本の月探査に対するスタンスは、国家発揚や国家能力の誇示ではなく、日本の産業イノベーションの成果による人類への貢献と宇宙科学の両立を図るというものだと考える。宇宙理学委員会から、「科学をせんとて月世界へ」「月探査の第一の動機として科学を掲げよう」というご説明があったが、「産業イノベーションをせんと宇宙へ、そして科学探求・宇宙の解明も」が、もの造り日本の取るべきスタンスと考える。そういった視点で2015年の探査活動を捉えると、先端技術力の月環境における検証、および、将来の長期活動のための環境基礎調査とした方が、継続性からみても望ましい。



## 第3回会合に関する意見

東京工業大学 機械宇宙システム専攻  
広瀬茂男

第3回会合でトヨタの葉山委員からヒューマノイドを用いた月探査計画の概要の発表があったが、私は月探査に用いるロボットについて、今の段階からヒューマノイドという形態に固定して開発を進めようという意見には強く反対する。

そのような方向性を取るのではなく、我々はまず2020年頃に月面でロボットに実施させるべき具体的なミッションを出来る限り明確化しながら、そのミッションを実現する最も合理的なロボットの形態をあらゆる側面から検討して比較実験を行うべきである。そして出来るだけ早く、多分数年後に、その中で最も合理的なロボットの形態とその制御システムを最終的に選抜し、その後はその選抜されたロボットシステムを実用化するための試作と試験を繰り返し、それによって現実的な月面探査ロボットを実現すべきである、と私は考えている。

誤解をしてもらいたくないのは、私が反対している最大のポイントは、遂行すべきミッションと諸々の制約条件について総合的な考察を行い、その中からロボットの最適な形態を浮かび上がらせるというごく常識的な開発プロセスを取らずに、「ロボットの形態はヒューマノイドに固定する」という立場をはじめから取ろうとする開発の手順に対してである。上述の比較実験の結果、他の方式を押さえる高い性能を発揮する可能性を示せるのであれば、ヒューマノイドの導入に異議を唱えるつもりは無い。

私はこれまで、数多くのロボットを開発してきており、また企業とも多くの実用的なロボットの共同開発を続けているが、その過程で毎回のように痛感させられることは、常に単純さを追求すべきであること。そして、余計な思い入れや先入観を出来る限り排除し、ミッション達成のために必要でかつ十分な形態と機構を、自由な立場で出来る限り合理的に探る努力をすべきこと、の2点である。

ロボットに汎用性を付与しようとして、複雑な多くの駆動自由度を付け加えていくと、ロボットの機能性は確かに高まるが、その代わりに重量が過多になったり、また信頼性が低下したりして、結果として総合的な機能性は低下してしまう。つまり汎用性を追求して、複雑な機構を追求した結果、結局何も実用的な機能性を持たない、ただの見せ物としてのロボットに終わってしまうというロボット開発の事例は、これまで枚挙にいとまがない。その意味で常に単純さを常に心掛けるべきである。

また、ロボットで使用可能な機構や制御機器の性能は、毎年少しずつその性能が向上してきてはいるものの、まだまだ理想とはほど遠い。そのため、ロボットで与えられたミッションを達成できるようにすることは、通常著しく困難である。そのため、ミッションを達成するためには、無駄な目標設定をそぎ落とし、必要最小限にロボットに想定する目標を絞り込み、それに向かってすべての機構と形態の候補をあらゆる方向から構築し、その中で最適なものをなんとか探り出すという、いわば妥協に妥協を重ねる作業が不可欠である。そのような作業をしなければならぬとき、「ヒューマノイド」という形態にはじめから決められることは、ロボット設計者を著しく拘束し、あたかも手足を縛って泳げと言っているようなもので、決して日の丸月探査ロボットの成功には結びつかないであろう。

毛利委員が、宇宙開発戦略本部の宇宙開発戦略専門調査会において二足歩行ロボットの活用を提案されたが、それはヒューマノイドという形態がロボットの月での作業に適すると考えた結果というよりは、ヒューマノイドは日本型技術の「象徴」としての価値があるから、ヒューマノイドを月で動かしてみたい、という立場での発言であったと私は推察している。しかし私には、人間の形をしているということが世界にアピールするロボットにとってそれほど重要であるとは、どうしても思えない。形はどうであれ、月面において無人で十分信頼性高く諸々の探査や観測活動を行うことが出来れば、そのことで日本の技術力を世界にアピールでき、また日本だけでなく世界の子供たちに大きな夢を与えられるのではないであろうか。

また今後膨大な予算をかけるのであれば、月のレゴリスの上を早く駆け回ったり、人が使う工具を駆使して月面基地を組み立てたりできるヒューマノイドも実現出来るかもしれない。しかし、それと同様な機能性は、改良された車輪型移動機構や、目的の形態に展開する機構などの導入により、はるかに少ない予算で、より軽量の構成で、そしてより信頼性高く遂行出来るであろう。

井上委員から提案のあったヒューマノイドの実現性を高める数々の設計方針は著しく有効性が高いと考えられるが、これらはヒューマノイドだけでなく、より自由度の少ない単純形態のロボットにも同様に適用が可能である。

このように考えていくと、10年後というある意味大変近い将来に、月のような劣悪な環境で与えられたミッションを遂行できるロボットを開発しなければならないのであれば、ヒューマノイドという形態には拘らずに、必要最小限の機能を確実にこなせる現実的な形態のロボットを探るべきである、と私は考えている。

これまでの委員会では、ヒューマノイドを推進する立場の委員方々の意見を尊重して、あえてヒューマノイドを直接的に批判することは避けてきた。しかし、これからの日本の宇宙開発とロボット開発の方向性に重大な影響力を与える決断をすべき時期が迫ってきているので、あえて率直に意見を述べさせていただいた。

なお、前回の会議で私は、形状可変形であるトランスフォーマー型ロボットの開発をすることを提案したが、その真意は、ヒューマノイドを選択しなくても、目的に応じて形態を変える奇想天外な形態のロボットが開発されたとき、それを日本から世界に広まった「トランスフォーマー」であると表現しておく、それはそれで日本型技術の「象徴」になるのではないか、という若干軽い発想に基づくものであった。ただ、この発言で最も主張したかった点は、トランスフォーマー形にすべきであるということよりは、トランスフォーマーのように「形に拘らない」ことこそ拘るべきであり、そのような立場で最適形態を見つけてゆく開発手順が重要であるという点である。

参考資料として、10年以上前にヒューマノイド開発に関して私が感じている懸念点をまとめた文章を添付しておく。ここで述べた考え方は今でもまったく変わっていない。

解 説

# ヒューマノイドから機械知能発現型ロボットへ

From Humanoid to Robot with Emerged Machine Intelligence

広瀬 茂 男\* \*東京工業大学

Shigeo Hirose\* \*Tokyo Institute of Technology

## 1. ま え が き

(株)ホンダが昨年発表した2足歩行ロボットP2とP3は実に衝撃的であった。テレビの番組で初めてみたとき、夢を現実に見るような異様な感激で鳥肌が立つ思いであったのを正直に白状しておきたい。このホンダの開発研究が一つの契機となって、人間型ロボット「ヒューマノイド(humanoid)」を研究しようとする気運が今高まり出している。そもそも、ロボットの研究は人造人間を作りたいという欲求から出発した。そして、これまでも幾度となく人間型ロボットの試作の試みがなされてきた。その意味では、今またヒューマノイドに興味を持たれるのも自然な成り行きであろう。また、技術レベルの進展に合わせて、適当な時期ごとにその時代の技術力を結集し、総合システムとしてのヒューマノイドの創成を試みることは、通常の解析的学問に対峙する、総合の学問としてのロボット工学の特異性を確認することになり、この意味でも有意義といえよう。

しかし一方で、「ヒューマノイド」を研究しようとする立場にはいくつかの問題点が潜んでおり、ロボット工学の研究過程では当然ヒューマノイドを作らなければならないというような固定概念が、ロボット工学の健全な進化を阻害することがあるのではないかと筆者は懸念している。

本稿では、筆者の考えるヒューマノイドに対する疑問と懸念を具体的に指摘し、ロボット開発の望ましい方向性を探ることとする。

### 1.1 ヒューマノイド開発についての疑問

筆者がヒューマノイドを開発していこうとする研究の方向性について懐疑的な見方をする第1の根拠は、「社会全体の技術進化の流れとの不適合性」を感じとる点である。そして、ヒューマノイドの開発は、

- a. 人間の形状特有の過剰反応を引き起こす
- b. 人間の自然な本性と適合しない

c. 人間を真似た行動原理は妥当な行動を生起しない場合がある

d. 物まねの姿勢を増長させる

などの問題点を生ずる恐れがあると感じている。本章ではこれらの問題点を個別に論ずる。

## 2. 社会全体の技術進化の流れとの不適合性

映画「トータルリコール」の中に、アーノルド・シュワルツェネガー扮する主人公が、未来社会でタクシーに乗るシーンがある。そのタクシーの運転席には人間型のロボットが据え付けられており、このロボットが客に対応し状況判断しながら自動車を運転する様子が描かれている。このようなシーンは、SF小説やSF映画には典型的に現れる場面であり、ある意味では懐かしい未来の光景といえるかもしれない。

しかし私はこの映画を見たとき、大変な違和感を感じた。なぜなら、このタクシーの運転ロボットは、結構間の抜けた問答を主人公とするものの、ちゃんと路面状況を判断するなど恐ろしいハイテックロボットである。とすると、この物語の想定はこのようなロボットが作り出される、たぶん100年も先の話であろう。ところが、映画に出てくる自動車は今ある自動車とほとんど変わらないのである。ここがいかにも不自然なのだ。そのような遠い未来の時代に至るまで、自動車会社のエンジニアはいったい何をしていたのだろうか。こんなヒューマノイドが開発できる時代になれば、そのヒューマノイドに使用されたであろう高性能な小型アクチュエータ、センサ、制御システムは、自動車会社のエンジニアも十分安価に入手可能なはずである。だとすれば、未来の自動車会社のエンジニアが旧体然としたタクシーを作るはずがない。視覚センサや人工知能を埋め込んで自動車を自律型とし、運転席はなくしてゆったりと座れる座席構成とし、それをセールスポイントにして販売するであろう。未来のロボット企業が一生懸命にヒューマノイドを作ったとしても、まるで売れないだろう。

同様のことは、ヒューマノイドについて語られるほかの夢にも当てはまる。例えば、未来社会ではヒューマノイドが掃除機で掃除をし、洗濯機から衣類を出して畳み、蛇口

原稿受付 1998年5月12日

キーワード: Humanoid, Robot with Emerged Machine Intelligence

\*〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

\*Meguro-ku, Tokyo

の下で皿を洗ってくれるというようなもっともらしい未来像が描かれることがある。しかし、そのようなヒューマノイドを実現できるだけの技術が確立された頃には、自律的に動き回る掃除機は当然作られ、洗濯機は洗濯物を折り畳んで棚に入れてくれ、皿洗い機は汚れた皿を集める作業までしてくれるであろう。ヒューマノイドで旧式の機器を使用することなどあり得ないのではないか。

筆者は10年ほど前から、ジャーナリストから受ける、未来のロボット化社会はどうか、という門切り型の質問に対し、「未来社会にはロボットはなくなる」というやや刺激的な表現の意見を述べてきた[1]。筆者がここで言いたかったのは、ロボットが本当になくなってしまおうということではない。ロボットは今後もますます普及していく。しかしその普及の仕方が、通常の間人が考えるようなヒューマノイドという形態に凝縮されていく方向性は取らないだろうということであった。逆に、現在人間が使用しているすべての機器がロボット化してゆく、つまりロボットがすべての機器に埋め込まれてゆくような状況になってゆく結果、もしも今の人々が未来社会をのぞいても、今一般に言われているようなヒューマノイドはそこに発見できないのではないかという予測を述べたのだ。

以上のような観点から、筆者は、世の中に広く流布している「ロボットは進化してゆくに従って必然的にヒューマノイドになってゆく」という定型化された考え方に根本的な疑問を呈したいのである。

## 2.1 人間の形状特有の過剰反応を引き起こす

我が家の愛犬ハリーは元気なパピヨン犬である。よく一緒にテレビを見るが、テレビの画面の中で人間が動き回ってもほとんど何の興味も示さない。しかし、4足動物が画面に出てくると、ぴくっと耳を上げ、画面に駆け寄ってわんわんと吠える。4本足で歩くものには鋭く反応するのである。同じように人間でも、人間に近い形状のものには鋭く反応するような神経回路が埋め込まれている。例えば、エリマキトカゲが2本足で駆け出すと大いに喜んだりする。

人間がこのような特性を有するため、昔から人間型の動く機械を作る行為は特別の目で見られてきた。それは、中世ヨーロッパのカラクリ人形師が貴族にもてはやされたように、現代のカラクリ「ロボット」についての研究も、他の工学とは比較にならないほど強い興味が注がれてきた。

このようなロボットの特性は、多くの有能な人材をロボット工学の分野に引きつけてきたという点で、著しく有効であった。我々は今後もロボットのこのような特性を十二分に生かし、どしどし有為な若者をロボットコミュニティーに引き込んでゆくべきである。

しかしロボットのこの特性は、ロボットに対する過大な期待感を世間に引き起こし過大な期待感を与えてしまう分、実状が暴露したときに逆に強い幻滅感を世間に与え、

ロボットに対する過小評価を引き起こしていた部分もあったのではないだろうか。

1980年はロボット元年といわれ、このころ多くのジャーナリズムがロボットに注目し、今にもロボット化時代が来るような騒ぎを引き起こした。そして、多くの企業もまたロボットに注目し、ロボット開発を試みた。この騒ぎには、我々の研究室も若干参画しているので、自戒を込めて発言しているのであるが、その後、ジャーナリズムがはやし立てたようなロボットは、結果的にほとんど実現できず、企業のロボットに対する興味は急激に萎んでいった。

このような騒ぎを引き起こしてきたロボット工学が、今また、ホンダの2足歩行ロボットに便乗してヒューマノイド、ヒューマノイドと叫んで研究費を集め、その成果を出すべきときが来たとき、世間を再び幻滅させないでいられるであろうか。狼少年の運命をロボット工学が迎えるのではないか。この点を私は強く心配するのである。筆者がこのような危惧を特に強く感じたのは、昨年(社)日本機械学会の100周年記念事業の一環として実施した「ロボットと未来社会」というシンポジウムにおいてであった。このときジャーナリストの立花隆さんは、ホンダの2足ロボットを実際に触ったときの感激を述べた後、ロボットは今まさに人間の領域を侵し出すところまで来ており、その無制限な開発を抑制するため、遺伝子工学におけるアシロマ会議<sup>†</sup>と同様なロボットについての会議を開催すべきではないかと発言されたのである。

確かに、ホンダのロボットは凄い。しかし、まだまだ実用的な作業をさせるために利用できる代物ではない。また歩くという機能以外のロボット工学で研究されている多くの分野、例えば物のハンドリングの工学、視覚系や触覚系センサや知的制御系などに関する研究などは、別にホンダのロボットができたからといってすぐ進化が加速されるわけでもない。2足でうまく歩けたというだけで、ロボット工学全体に対する過大評価をされるのはまずいと見え、筆者は同シンポジウムの議論では、ロボット開発の現状はそのような状況にはまったく至っていないことを一生懸命説明したのである。

現在のロボット工学の研究は、そのような騒ぎとは離れて、ロボット工学の目前に立ち足はだかる崖を乗り越えるため、着実に一歩一歩這い上がろうとしている。そのような努力を持続的に援助する体制を、ヒューマノイドの騒ぎが殺ぐことがないように是非とも留意すべきである。

## 2.2 人間の自然な本性と適合しない

ヒューマノイドに対するもう一つの懸念は、人間と区別

<sup>†</sup>1975年2月米国カリフォルニア州の保養地アシロマで行われた遺伝子組み替え実験に関する会議。無制限な組み替えDNA実験の拡散を防ぐ方法が議論され、実験指針の作成が合意された。

できないような形態と感情を持つヒューマノイドが実現できるのはあと何百年も後になり、今我々が常識的に考えるヒューマノイドとは、人間に似てはいるが人間とは明らかに異種のものとして判別される存在である、という筆者個人の予測を前提としたものである。なおこのような前提を想定することは、ロボット開発に直接携わっておられる研究者であれば、まず問題なく承していただけるものと考えている<sup>††</sup>。

さてこのようなヒューマノイドを想定したとき、人間はそれを本当に喜んで人間社会に組み込もうと考えるであろうか。例えば寝たきり老人の看護の問題を考えよう。本当に寝たきり老人はヒューマノイドに介護されたいと希望するだろうか。寝たきり患者の最大の問題は下の世話である。寝たきり老人にとって下の世話を人にやってもらうのはいかに気が重い。夜中に看護人を起こして頼むのはなおさらである。これを、ヒューマノイドがやってくれば確かにいい。しかし、ヒューマノイドはやはり人間に似せている。その点で心理的に抵抗があるのではないか。それよりは、ヒューマノイドを作る技術力によって下の世話もしてくれる特殊ベットを作った方が、はるかに気楽で、また安価で普及するだろう。

それでは、ベットの横にいて「大丈夫ですか」と言ってくれるようなヒューマノイドはどうだろうか。この場合には、いかに老人でもその言葉がプログラムされた機械仕掛けのものであることは容易に分かり鬱陶しく感ずるのではないか。もちろん自動販売機が「有り難うございます」と言ってくれたとき程度のありがたさはあるかもしれないが。

このように考えると、寝たきり老人の看護の場合、下の世話から入浴、食事の世話などは機械化された看護補助機械が行い、看護人は看護疲れのないゆったりとした心で寝たきり患者とできるだけ多くの接触を行うというような状況を作り出す方がはるかに望ましい。ここにヒューマノイドの出番はない。

もちろん、例えば長時間飛行を行う宇宙飛行士の相手をするなどの特別の状況では、ヒューマノイドが人間の相手をしてくれて有効かもしれない。しかし通常の生活では、ほかの社会性動物と同じように群をなして生活していくことに慣れた人間は、やはり生身の人間同士の接触を望むであろう。そして、そのような人間の特性は、遠い未来にわたってもまずほとんど変わるまい。であるとすれば、そのような人間社会に、人間まがいのヒューマノイドを混在さ

せることには強い抵抗が生じるであろう。ヒューマノイドを作る技術があるのであれば、使いやすい道具としてのロボット、家電製品が進化した知能化マシンをたくさん作り、それを人間の周りにふんだんに配備して人間を自由にし、そのことで人間同士の密接な接触を可能にするほうが、健全な社会を生むであろう。

### 2.3 人間を真似た行動原理は妥当な行動を生起しない場合がある

人間を真似るため、形態だけでなくその行動原理までも人間の心理を学び、それをロボットに移植しようとする試みがある。ロボットに植え付けるべき心を検討するため、人の心を研究している心理学者を呼んで議論してみたり、また、ロボットに人間的な感情を生成するというを目的として、生物特有の自己保存欲に相当する行動原理をロボットに植え付け、それによって生成されるロボットの行動を検討するというような研究がこれまで行われている。

このように、ヒューマノイドの研究においては、人間の心さえも真似ることが当然のこととされている。筆者は、この点についても著しく懐疑的である。この問題については、筆者はこれまで何度か議論してきたので [3]、その概要のみを以下に示す。

生物の本質は生き続け死を避けようとする存在である。そのため、その行動原理には、もっとも根元的に、なによりもまず死を避け、生き続けようとするメカニズムが組み込まれている。そのほかの多様な評価基準がありそれらも達成しようとするとしても、生物の行為の深層にはこの生存の行動原理が厳然としてあり、それをできる限り達成するような行動が選択される。この意味で、生物的な行動をロボットに生起しようとするとき、自己保存欲を生ずる行動原理をまず最初に組み込む試みは正鵠を得ている。ところがロボットは、生物のように生存競争を勝ち抜き、種を生き続けさせることによって存在し得る存在ではない。ある目的のために突然存在を始めることができる存在である。また、電源を切って「死んでしまっても」、再度電源を入れればすぐ生存状態に復帰できる。このようにロボットは、種火をともし続けるようにして一瞬たりとも死んでしまわないようにしてすることでのみ存在してられる生物とは、その存在の形態を根本的に異にしている。つまり、ロボットは死を恐れる必要がなく、生物が有する自己保存欲を、原理的に持つ必要がない。

さて人間が抱え込んでいる自己保存欲は、人間を生かし続ける源動力であるとともに、人間行動の諸悪の根元ともなっている。そのため、人類の歴史上で聖人と呼ばれた人たちは、一言で言えばこの自己保存欲を長年の修練によって克服した人たちである。この点に注目すると、ロボットは、人間の諸悪の根元である自己保存欲を必要としない存在であるという点で、原理的に聖人的な行動を生成しやす

<sup>††</sup> 1981年の産業用ロボットの長期需要予測をデルファイ法で調査した結果 [2] によると、ホテル、病院などで案内、荷物運びを行うロボットは1989年頃、また、交通整理や群衆整理を行うロボットは1988年頃には実用化されていることになっている。このような楽観的な予測が行われたときから今までにどれだけロボット技術が進化したかを考えれば、人間と判別できないロボットの実現に要する絶望的な時間の長さが予測できる。

いという特異な特性を有していることが分かる。

このことから、ロボットに行動原理を植え付けるとき、人間と同じような自己保存欲を植え込み、人間と同じような行動原理を持たせることは決して得策でないことが分かる。自己保存欲を埋め込んで人間と同じようないやな性格を作り出すより、生存のあり方が根本的に異なるロボットの特性を積極的に利用して、ヒューマニズムに溢れ聖人のごとき行動を生成できるロボットを作り出す方向性を指向する方がはるかに健全であろう。

このような点からも、人間の無批判なコピーを作ろうとする立場には疑問を感ずるのである。

#### 2.4 物まねの姿勢を増長させる

さらにヒューマノイドの研究には、その基本的な研究の立場に、物まねを良しとする、何か後ろ向きの姿勢があると感じられる点も懸念の一つである。よく生物模倣工学 (biomimetics) を従来の工学の手法を乗り越えた新しい方法論であるように宣伝することが多い。生物を模倣するというと何か新しい研究姿勢のような響きがあり、ジャーナリズムの受けがよい。

しかし、この言葉を「生物」に学ぶのでなく「欧米の技術」に学ぶ工学と置き換えたらどうであろうか。とたんに、ただの物まね工学で似非工学だと反発をかうであろう。真似るような姿勢からは創造的な成果はまず期待できない。しかし、生物に学ぶと言うとなぜか歓迎されるのである。この点がいかにも変なのだ。

見方を限定せず、生物さえも参考にしてしまうという柔軟な立場は歓迎すべきである。しかしそうでなく、生物に学ぶのだと立場を固定したとき、その根本精神は猿真似にすり替わってしまう。そのような姿勢から創造的な成果は期待できない。

日本は鎖国から目覚めたとき、例えば杉田玄白は洋書を解読して解体新書を著した。また、第2次大戦が終了したとき、日本の工学者は欧米からの新しい情報に驚きそれを手本とし先端技術に追い付こうとした。Scientific AmericanのNCマシンの写真を拡大鏡で解明しながら数値制御機械のための新しい技術を獲得した、などというような話も残されている。現在でも、国のロボット開発プロジェクトが始まる時などには、決まって諸外国の視察団が組まれる。

日本の工学は、常に見本となる先陣がいてそれを十分調査し真似ることから始める手順を取っていた。ところが、そのようにして頑張っただけで追いつけなかった。先頭を駆けるようになってしまった。さて弱った真似るものがない。それでは一つ生物でも真似てみるか。というような心理が生物模倣工学を尊ぶ深層心理にないだろうか。ヒューマノイド研究の姿勢にこのような色合いがないかを筆者は懸念している。

### 3. ヒューマノイドから機械知能発現型ロボットへ

以上、ヒューマノイドを開発していこうとする研究の方向性について問題点を羅列し、それらについての懸念の在処を論じた。

このようなヒューマノイドを作り上げようとする立場に対し、筆者が理想とする研究の方向性は、ロボットの機能性については人間をその発想の源としたとしても、その方法論は別に人間にこだわることなく、唯一研究者の知性と感性を信じてもっとも合理的と考えられる方向に向けて研究を進展させるというものである。これは例えば、「人間」という規範を海図として航海に旅立とうとするのではなく、何の海図も持たずに、ただ水夫の英知のみを頼みとして航海に旅立とうとするような立場である。心許ないようであるが、実は工学はすべてこうした暗中模索の過程を経て作られたことを銘記すべきであろう。鳥を規範とした工学も、やみくもに羽ばたき形態に拘泥することなく、固定翼とプロペラを採用することで空を飛ぶ機能を実現した。ロボット工学だけが例外であるはずがない。

この意味で、重点領域研究「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」で表現しようとした概念は、大変的を得たものであると筆者は考えている。人間をただ真似しようとするのでなく、ロボットとして必要な運動性、感覚性能を持ったシステムを作りだし、そのような機械としてのロボットに内発的に「発現」される知能を研究していこう、という方法論は本物である。

筆者は、本研究プロジェクトで4足歩行ロボット TITAN VIIIを一つの研究用プラットフォームとして製作した。筆者が初めて歩行ロボットの研究を志したのは、8足歩行を行うクモの動きを観察したときであったが、今後の工学的な発展性を考察した結果、4足がもっとも有効であると考え、4足歩行を研究してきている。なぜ4足が望ましいかは幾度も論じてきた [4] のでここでは省略するが、筆者らはその4足機械について、4足獣を真似ずに、生物ではまったく用いられていない特有の機能性を有する脚駆動機構、計算機の特性を生かした歩容制御システム、そして壁面移動用には生物ではまったく観察されていない独自の歩容の導入などの機械としての発展を図る研究を行ってきた。

筆者はこのように、ロボットを機械として捉え、機械特有の特性を最大限生かすハードウェアとソフトウェアを研究することこそがロボットにロボット独自の進化をうながすことになり、そしてそのことで、ロボットはより効率よく人間に近づき、場合によってはヒューマノイドにこだわっている限りは決して不可能な、人間を乗り越えることさえも可能になると考えている。

#### 4. あとがき

本稿では、筆者が考えているヒューマノイド研究に対する疑問点を述べ、ロボット研究の方向性について私見を述べた。このような一方的な意見に対しては多くの異論があると思われる。是非とも反論をいただきたいと思う。日本ロボット学会誌において、このような研究の根本的な方向性に関する議論を続けることは、これからのロボット工学の健全な発展に著しく重要と考えるからである。

#### 参 考 文 献

- [1] 例えば、21世紀、ロボットは姿を消す!? : Trigger, 14-1, 日刊工業新聞社, pp.4-7, 1985.
- [2] (社)日本産業用ロボット工業会:産業用ロボット長期需要予測報告書,項目207,212,1981.
- [3] 例えば,広瀬茂男:人間と共存するロボットの行動規範,計測と制御,vol.34,no.4,pp.315-319,1995.
- [4] 例えば,広瀬茂男,米田完:実用的4足歩行機械の開発に向けて,日本ロボット学会誌,vol.11,no.3,pp.360-365,1993.



広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947年12月6日東京生。1976年東京工業大学博士課程制御工学専攻修了。工学博士。同学の助手,助教授を経て1992年より教授(機械宇宙学科)。ヘビ型ロボット,歩行ロボット,惑星探査ローバーなどの研究に従事。著作に「生物機械工学」,「ロボット工学」,「Biologically Inspired Robots (Oxford University Press)」等がある。

(日本ロボット学会正会員)

## 月探査懇談会について

的川 泰宣

1 宇宙基本計画全体の中での月探査の位置づけが一度も説明されていない。これなしに予算の議論はやりにくい。もし位置づけという点での疑問がある場合は、本懇談会での意見具申を基にして、専門調査会で再度検討していただくことも生じるかも知れない。とりわけ、アメリカの **Space Exploration Initiatives** をめぐる動きが、宇宙基本計画立案の頃と劇的に異なっているので、専門調査会でももう一度議論していただく方がいいように思う。日本独自の戦略を立てることが第一義的に重要だが、その際にも国際的な動きを見極めることが必須である。

2 月探査の戦略を練るのであれば、月の「何を」探るのかを中心に議論すべき。「どうやって」実行するのかということは、目的に従属する事柄である。一方「何を」探るのかということは、月探査に関する世界的な動向を見極めるべきで、本懇談会のメンバーでは見識も力も不足している。長谷川委員の報告の検討をもっと中心にする方がいい。

3 宇宙基本計画についてのパブリック・コメントが一度も紹介されていないが、国民目線という指摘を強調されている委員が大勢おられる状況を勘案すると、その概略を懇談会の席上でまとめて紹介していただくことを提案したい。せっかくのコメントが表に一度も出てこないのは異常である。

4 「有人を視野に入れた」「月探査懇談会」となっていたと思うが、有人の議論は一度もなされていない。このままでは時間切れで有人の議論は棚上げになると予想される。もともと有人と月とは本質的に結びついていることではないので、ぜひ「有人」を正面に据えた懇談会を、現役の宇宙飛行士を交えた形でセットアップしていただきたい。

5 長谷川委員の報告の中では、2015年の月面軟着陸という中間目標は世界の月探査の動向をにらんでも大変妥当な目安であると思う。それを起点として、「石を持って帰る」という方向を重視するのか、「拠点作り」を重視するのかという議論の際に、アメリカの **Augustine Report** の行方に関係した事柄も含めて、世界の情勢を考慮することが肝要。

6 報告ばかりで議論のない懇談会というのは珍しい。もっと焦点を絞り、互いの意見をかみ合わせた話し合いをいっぱいやりましょう。言いつばなしの報告が多すぎる。

以上



## 2020年頃に実現を目指す月探査に関する意見

水嶋繁光

シナリオとして、2015年、2020年、2025年の3ステップでの目標設定での進め方は基本的に賛成であり、目標については更なる議論を深める中で明確化してくるものと考えているが、手段である技術については、各目標に対するリスク要因の分析を行うことが重要と考えている。

その際、リスク要因分析のフィードバックにより目標設定を見直すことも必要となることから、現段階では、案Ⅰ、案Ⅱどちらが良いというには、判断材料が少ないと考えている。

違う視点からの意見として、民間における研究開発投資は、選択と集中の中で短期的な部分に重点を置くようになり、将来必要になると考えている研究開発でもリスク要因が高い場合は、敬遠されがちになっているのが現状であり、月探査では国民に夢を描いて貰うと共に、リスクの高い研究開発に取り組むことで、直接関係する技術以外にも関連する様々な技術でブレークスルーが起こることが期待できると考えている。

以上

## 質問事項一覧

- 長谷川構成員への質問（折井構成員より）

中村宇宙理学委員長の「月探査と科学」の説明と長谷川委員の「月探査の全体シナリオと技術的課題(案)」の内容とのつながりに少しギャップを感じた。お互いによく議論されていると思うが、科学と工学の連携はうまくいっているのでしょうか？
- 長谷川構成員への質問（鈴木構成員より）

この委員会で技術内容に関して何処までの議論をすべきかは分かりませんが、ミッションの実現性は明確にしておくことが必要と思います。2015年および2020年に提案しているミッションに対して、どのような新規技術の開発が必要か、また技術的には達成できる目処は付いているが主な開発作業にはどのようなものがあるか、凡その検討は実施済みですか？
- 葉山構成員への質問（折井構成員より）

「人型ロボット」のイメージ提案に対して、月に運び、運用するまでの具現化(実用)に関する技術課題と投資額及び実現するまでの期間は、どのように考えられておられるのでしょうか？
- 広瀬構成員への質問（鈴木構成員より）

ロボットの形態を種々変えることが出来るのはロボットを月まで運搬する上でも極めて有用であり、また月探査ミッションに有効な手段で、研究が相当進んでいることに意を強くしました。ロボットが月で活動するのは移動および資料収集、電線敷設等の軽作業のみでは無く、発電設備の設営、基地設営あるいは地下探査等のかなりの重作業も必要であり、多機能ロボットの開発が望ましいと思いますが、凡そのミッション要求が決まってから、開発にどの程度の時間が掛かるのでしょうか。或いは2020年をターゲットとしたロボット開発を行なうには、どのようなステップで作業を進めるべきとお考えですか。
- 井上構成員への質問（鈴木構成員より）

ある公演で、2足歩行ロボットは立っているだけでエネルギーを消費するので活動時間が限られる、また重力によっても歩行に大きな影響が出、更に月のレゴリスは崩れ易いので雪の中を歩くようであり、技術的に極めて難しいとの話を聞きました。人間が宇宙服を着た状態で月面で活動すると同等の機能を持った人間型ロボットの開発には、どの程度の期間（とお金）が掛かると予想されますか。或いは2020年をターゲットとしたロボットは、どのようなものが適切とお考えですか。
- 水嶋構成員への質問（鶴田構成員より）

先日は電池に関して有益な話を聞かせていただきありがとうございました。月面での先日は電池に関して有益な話を聞かせていただきありがとうございました。月面での活動では電池の能力がキーとなると思っていました。先日のお話でおよその考え方が理解できた気がします。その後、日本経済新聞（2009年11月23日付け）で大阪府立大学が、リチウムイオン電池の5倍の蓄電性能を引き出せる「リチウム-硫黄電池」の基盤技術を開発したとの記事を見つけました。もし、記事のようにLiイオン電池の5倍の蓄電能力があるとすれば電源周りが一層すっきりするのではないかと興味をそそられました。本当のところはどう考えるべきでしょうか教えていただけると幸いです。

## 質問に対する回答

(長谷川構成員、葉山構成員、広瀬構成員、井上構成員、水嶋構成員)

### 1. (1) 長谷川構成員への質問(折井構成員より)

中村宇宙理学委員長の「月探査と科学」の説明と長谷川委員の「月探査の全体シナリオと技術的課題(案)」の内容とのつながりに少しギャップを感じた。お互いによく議論されているとは思いますが、科学と工学の連携はうまくいっているのでしょうか？

### (長谷川構成員からの回答)

第二回の会合にて、JAXAの考える「月探査の意義と目標」について説明しました。月探査の科学的意義については、これまで宇宙理学委員会や学会でまとめられた提言等をもとに、アプローチA(月の地質探査)、アプローチB(月の内部構造探査)、アプローチC(月からの天文観測など)としてまとめています。また、これらの実現に必要な技術については、補足資料に記載していますが、これらは関連学会で議論され、また宇宙工学委員会などで実施されている研究です。

第三回の会合においては、これを実現するための「月探査の全体シナリオと技術的課題」について提案し、2015年頃、2020年頃、2025年頃の3ステップにおいて目標設定し、開発のシナリオとしては、月からのサンプル回収を優先するI案と極域での探査拠点構築を優先するII案を示しました。その際、第二回会合でいただきました各委員の方々のご意見を参考にし、科学目的の他に、人間の生活の向上や環境問題の解決などにむけた我が国の技術開発のロードマップおよびその産業波及効果などを考慮して検討しております。

一方、中村理学委員長の「月探査と科学」の説明につきましては、第二回の会合において、「月探査の科学的意義については、月に関する研究コミュニティのみではなく、科学コミュニティ全体の中での位置づけが重要」とのご意見があったことを受けて、事務局側から我が国の宇宙科学全体を束ねる宇宙理学委員長に説明を求めたものです。

中村先生の説明は、第二回会合の長谷川説明を科学的意義について掘り下げたものであり、第三回会合での長谷川説明は科学以外の目的も重視した全体シナリオとなっています。

JAXA においては、月探査における科学的目標については科学コミュニティの参加を得て議論しており、また、中村委員長の説明のように、宇宙理学委員会における科学の議論も工学的実現性を考慮しながら行っておりますので、両者の連携は十分にできていると考えています。なお、この回答は、中村先生と相談して作成しました。

以上

## 1. (2) 長谷川構成員への質問（鈴木構成員より）

2015 年および 2020 年に提案しているミッションに対して、どのような新規技術の開発が必要か、また技術的には達成できる目処は付いているが主な開発作業にはどのようなものがあるか、凡その検討は実施済みですか？

### (長谷川構成員からの回答)

想定される月探査のための技術は、システム要求を経て、必要なシステム技術と要素技術にブレークダウンし、先行して研究が必要なものを識別して研究を進めています。特に月面探査の実現に重要な新規技術は、月面着陸技術や探査ロボット技術、月面エネルギー技術、輸送系技術などで、例えば、月探査ロボット技術や越夜技術は JAXA の戦略的重点研究に指定し、JAXA 内に留まらず、大学や企業等との共同研究などを行って取り組んでおります。これまで我が国の宇宙開発や航空技術開発等で培ってきた技術をベースに、月探査に要求されるレベルを満足すべく研究・開発を進めているものであり、十分に実現性があるものと考えております。

2015 年に適用しようと考えている技術は、全て地上の実験室レベルでは完成していて宇宙用の設計の目処がたっているもの、あるいは既に宇宙で実績のある技術の改良技術であり、今後 2 年程度で、実際に宇宙用の機器を設計、試作、試験をすることを考えています。1000kg 程度の小型探査

機に使用できる着陸用エンジン、高精度着陸技術、障害物回避技術、ローバ型の探査ロボット（走行機構、誘導技術、岩石サンプルの把持技術等）、数 W 程度の越夜システム（高効率リチウムイオン電池を含む）などです。

一方、2020 年に適用を考えている技術は、実用化まで 5 年程度かけることはできるので、解析検討により、実現性の目処がたっている必要はありますが、実際のハードウェア、ソフトウェアの設計、製作は、今後、産業界や大学の技術を結集して開発していくことが可能と考えています。探査機の離陸技術、地球帰還カプセル技術、拠点構築用ロボット技術、数十 W 程度の越夜システム（高度な熱制御技術、再生型燃料電池を含む）などがこれに相当し、要素技術としては既に宇宙で実証済のもの、あるいは地上においては月面とほぼ等価な環境で動作しているものであり、適切な開発体制と開発予算が確保できれば、5 年程度で十分に完成させることができると考えています。

なお、これらは、補足資料に個々に纏めて示しています。

以上

## 2. 葉山構成員への質問（折井構成員より）

「人型ロボット」のイメージ提案に対して、月に運び、運用するまでの具現化(実用)に関する技術課題と投資額及び実現するまでの期間は、どのように考えられておられるのでしょうか？

（葉山構成員からの回答）

### 1. 月探査の意義と探査計画における人型ロボットの意義

ご質問に答える前に、私が考える月探査の意義と人型ロボット提案の主旨を記載させていただきます。

9月の第2回懇談会で述べましたが、全ての活動を人型ロボットで行うことを提案しているのではありません。

月面移動や基地および発電施設建設などの月面活動ロボットの開発に人型2足ロボットも加えていくことを提案しているものです。

まず、月探査の意義について申し上げたいと思います。

2025年までの月探査計画の費用は、輸送系や往還機まで含めると数千億円規模と思います。これだけの国家費用に対して「科学をするため、宇宙起源の探究のために月に行く」というだけでは、私は社会の合意は得にくいと思います。

これだけのお金を使ってもいいと、社会から賛同を得るためには月探査計画は単に科学的な成果を求めるだけでなく、産業フロンティア開拓によって日本が技術立国として更に成長するための投資であることを説明することが必要だと思います。そして当然のことながら、国民に対して産業への幅広い波及効果や将来の日常生活の姿が、わかりやすく具体的に説明されるべきだと思います。国民にとっての月探査は、「幅広い産業技術イノベーションに基づく将来の豊かな生活の実現が狙い」としていくものだと思えます。

次に、ロボット技術について申し上げます。

過酷な月環境で、与えられたミッションを確実に遂行することだけを目指したロボット開発は米国をはじめ他国でも多くの事例があり、そのため技術の先進性は、あまり出せないと思われます。そして、ある特定の目的達成型ロボット開発のため、その成果に基づく幅広い産業波及効果も期待できないと思います。また、中国などが15年以前に月の岩石採取を実施すれば、どうしても、二番煎じの印象は避けられないかと思えます。

しかし、ヒューマノイドロボットが加わることによって技術開発の裾野が大きく広がります。

特にヒューマノイドのシステム開発分野における、人とのインターフェースや実社会との協調は、多様なソフトウェア開発を包含しており、これらの情報技術分野に月環境という具体的な開発テーマが加わることによって新産業創生も含めた活性化に繋がると思えます。

月探査計画にヒューマノイドの活用を加える事によって産業技術イノベーションを狙うという日本の独自性が国内外に発信できると思います。

## II. 具現化に関する技術課題について

人型ロボットが月探査計画に加わった場合、月面のどのような場所で、どのような活動をするかによって実現すべき技術課題が変わると思います。

例えば、探査機器や発電機器の最終調整作業やメンテナンス作業など人型に適した活動を長期にわたり実施することを想定すると、主な技術課題は下記のようなものと考えます。

1. 遠隔制御技術の高度化・・・時間遅れを持つ月面における細かな活動に必要
2. 熱制御に関する技術革新・・・特に真空中における熱放射の効率を革新的に向上させる
3. 自己修復技術の確立・・・長期的な活動のためには、この技術確立が必要
4. 自律行動技術の高度化・・・環境認識技術と連携した危険回避能力を持たせる
5. 障害物検知、自律行動経路生成などの制御技術の高度化・・・周囲環境認識判断させる
6. 多種作業対応技術(多指協調、全身協調など)

詳細は第3回懇談会の意見書にも記載しましたので、ご参照願います。

## III. 投資額について

月面での活動内容によって、かなり異なると思います。

専門化の意見を聞いて試算する必要がありますが、上記内容を具現化するための開発費を実証実験費用も含めて積み上げると

2025年までの15年間の総額費用で、およそ数百億円規模と考えます。

## IV. 実現までの期間について

2025年頃には人型の形態を上手く活用した月面活動をしたいと思います。

そのために、2020年頃には地上において自己修復機能や高度な自律行動および多種作業対応などが可能な人型ロボットを実現して社会生活への展開を開始しながら、2025年の月面活動を睨んだ実証実験を行っていく必要があると思います。

(計画区分)

要素技術開発	～2015年
要素技術組込みロボット開発評価	～2020年
社会へのヒューマノイド展開(生活支援など)	～2020年～
月面探査ロボット想定試験と25年を睨んだ部分的な実現	～2020年～
月面探査 基地活動	2025年頃

### 3. 広瀬構成員への質問（鈴木構成員より）

ロボットの形態を種々変えることが出来るのはロボットを月まで運搬する上でも極めて有用であり、また月探査ミッションに有効な手段で、研究が相当進んでいることに意を強くしました。ロボットが月で活動するのは移動および資料収集、電線敷設等の軽作業のみでは無く、発電設備の設営、基地設営あるいは地下探査等のかかなりの重作業も必要であり、多機能ロボットの開発が望ましいと思いますが、凡そのミッション要求が決まってから、開発にどの程度の時間が掛かるものでしょうか。或いは 2020 年をターゲットとしたロボット開発を行なうには、どのようなステップで作業を進めるべきとお考えですか。

#### （広瀬構成員からの回答）

開発に掛かる時間はミッションの選択次第でまったく異なります。夢のようなミッションを想定すると、とても長い開発期間が必要で 10 年ではとても無理でしょう。多機能ロボットの開発の進め方としては以下が考えられます。

2011-12 年 10 年後に確実に達成できて実施すべきミッションの確定と、それを遂行する多機能ロボットとそれ以外の機器の形態をほぼ確定する。

2014-15 年 設定した形態の多機能路ロボットの第 1 次モデルの試作と実験の実施。

2017-18 年 月の環境を出来る限り再現した環境での動作実験に実施。そして本番への準備の実施。



#### 4. 井上構成員への質問（鈴木構成員より）

ある公演で、2足歩行ロボットは立っているだけでエネルギーを消費するので活動時間が限られる、また重力によっても歩行に大きな影響が出、更に月のレゴリスは崩れ易いので雪の中を歩くようであり、技術的に極めて難しいとの話を聞きました。人間が宇宙服を着た状態で月面で活動すると同等の機能を持った人間型ロボットの開発には、どの程度の期間（とお金）が掛かると予想されますか。或いは2020年をターゲットとしたロボットは、どのようなものが適切とお考えですか。

#### （井上構成員からの回答）

第3回懇談会における資料5のp.7をご覧ください。これは人型ロボットの開発項目と工程表をまとめたものです。ご質問の最初の3点については、この工程表で言えば、第一段階前期の一番下のブルーのブロック中「月探査活動シミュレータ」で検討される事柄です。月面における行動を想定したロボットは当然その環境に適した制御則やパラメータ調整をする必要がありますが、ご質問の項目に関しては以下のとおり解決可能であると考えられます。

#### （1）立っているだけのエネルギー消費について：

姿勢を工夫することで重力に抗する力を各モータが発生する必要がないようにすることは可能です。低消費エネルギー志向の静止時制御系、モータドライバ等の研究開発を行えば、アクチュエータにおける静止立位時エネルギー消費は、その他の動作制御時の消費に比して、非常に小さいものにとできると考えます。

#### （2）レゴリス環境での歩行

例えば、「かんじき」を履いて設置面積を増大させるようなハードウェア上の工夫、地面に足をなじませ、安定に踏みしめられること確認してから次の足を上げるような歩容上の工夫等で、このような環境での移動性能を確保することは可能であると考えます。また、不連続に着地位置を変えられるとか足を上方に引き上げられるといった特徴は、地形認識・運動制御の研究開発と併せることにより、レゴリス存在環境における車輪移動と比べて利点となるものと考えられます。なお、車輪移動の場合にはレゴリス中でスタックしたり、転倒したりすると、それ以上動けなくなる恐れが大きいのですが、二足歩行ロボットの場合、倒れても回復は可能であり、また、海亀が砂地を移

動するように、這ってでも全身で移動して窮地を脱することも可能であることを付け加えておきます。

### (3) 重力の小さいことの影響

利点：バランスを崩してから、転倒が不可避になるまでの時間が長いため、時間をかけて着地位置を変更する、数歩をかけてバランスを回復する等に有利であり、アクチュエータ能力に比して高いバランス回復能力を実現できる。

欠点：重心の水平位置が地面反力中心から外れることで起こる倒れこむ力を水平方向の加減速に用いているが、この力が小さくなることで、地上に比べ歩行の素早い加速・減速が難しくなる。場合によっては、大きく地面反力の得られるとび跳ねるような動きが有効となると考える。(地面を下方に押すことで、水平方向にも大きな力が得られる。)

### (4) 人型ロボットの開発構想、予算見積もりについて：

ご質問中、宇宙服を着た人間と同等の機能を持ったロボットという場合、どのような水準の同等性を想定しておられるか不明のため答えにくいのですが、ロボットの黎明期より多数の知能ロボット（ヒューマノイドを含む）の全ての要素機能と統合システムの研究開発に取り組んできた経験から言えることは、ロボットの能力は限定的であり、過度な期待をこめた人間と同等な機能を持つロボットは当分実現できないと思います。人の形をしているとはいえ人型ロボットはあくまで機械ですから、実施したい機能に関する要求仕様に従って開発されます。人型ロボットはローバー等に比べて遥かに多目的の機能を提供するものですが、万能と言うことはあり得ず、取り扱う対象物、作業の種類、環境などのセットを、具体的に定める必要があります。

私が第3回の懇談会でご説明した、人型ロボットの開発の場合、自己修復可能な人型ロボットの実現を想定して開発計画の策定を試みた。この程度の機能水準が実現されれば月探査の種々の作業、基地の運用などを実行させることをイメージできると考える。詳細は省略するが、人型ロボットをモジュラーデザイン原理で構成し、あるロボットの一部が故障した場合、同種の人型ロボットが故障したモジュールを分解し交換して修理するという機能を備えた人型ロボットを2020年頃までに、地球上で実現し、2025年頃に月の基地に配置するということを構想している。そして、その開発の工程表としてまとめたものが第三回懇談会資料5のP7である。ここで、第1期前期とは2011～15年頃、第1期後期とは2016～2020年頃を想定している。

最初の5年では、現在の最新技術をもとに、要素技術を開発し、人型ロボットの地上モデルを開発し、ソフトウェアプラットフォームと、月探査行動のシミュレータを作り、地上モデルで実証実験を行う。

次の5年では、月環境対応設計を行って、月の基地へ配置するまえに地上で検証試験を行うフェイズであり、それに関連する開発項目が4つのブロックで示してある。

この工程表は月探査基地に配置する人型ロボットの開発を中心に計画しているが、この他に前提となるのが、数年間にわたって電力を供給し続ける電力システムであり、またこれらを月に運ぶ輸送系、及び、軟着陸機、帰還機、などの開発に関しては、別途並行して開発企画を策定するものとしている。

なお、予算としては、これまでの国プロ実施経験や長谷川委員との議論を踏まえ、この工程表の各ブロック毎の概算見積もりを積み上げてみて、総額数百億円規模（15年）と想定される。

## 5. 水嶋構成員への質問（鶴田構成員より）

先日は電池に関して有益な話を聞かせていただきありがとうございました。月面での先日は電池に関して有益な話を聞かせていただきありがとうございました。月面での活動では電池の能力がキーとなると思っていました。先日のお話でおよその考え方が理解できた気がします。その後、日本経済新聞（2009年11月23日付け）で大阪府立大学が、リチウムイオン電池の5倍の蓄電性能を引き出せる「リチウム-硫黄電池」の基盤技術を開発したとの記事を見つけました。もし、記事のようにLiイオン電池の5倍の蓄電能力があるとすれば電源周りが一層すっきりするのではないかと興味をそそられました。本当のところはどう考えるべきでしょうか教えていただけると幸いです。

### （水嶋構成員からの回答）

リチウムイオン電池のエネルギー密度は仮に2020年に250Wh/kgまで向上したとしても、例えば、消費電力1kWの機器を15日間連続稼動するには重量約1.5t、容積にして約600Lもの巨大な電池を携帯する必要がありますので、燃料電池など他の電池とのハイブリッド型のシステムが有効と考えられます。しかしながら、次世代蓄電池といわれるリチウム-硫黄電池やリチウム-空気電池のような高エネルギー密度が期待される蓄電池が実用化されるようになると、その重量や容積はその分、縮小され、蓄電池だけでも事足りるようになるので、電源周りもすっきりされます。

この度、大阪府立大学がリチウムイオン電池の5倍の蓄電性能を引き出せる電池の基盤技術を開発されたように、次世代蓄電池の開発は日々進行しております。しかしながら、電極材による容量の向上に対して、電極材のかさ密度の違いや電池電圧の違いなどから単純にエネルギー密度もその分だけ向上するとは言えず、また、リチウム合金負極のサイクル特性や硫酸化物の腐食性など信頼性や安全性の面においても実用化に至るまでには数多くのブレイクスルーすべき課題が残されておりますので、大阪府立大学を始め、多くの大学や企業、研究機関で技術開発が続けられております。