解説

宇宙ロボットの未来像

Space Robot in the Future

中 谷 一 郎* *愛知工科大学

Ichiro Nakatani* *Aichi University of Technology

1. は じ め に

未来を語る前に歴史に一言触れることをお許しいただきたい。宇宙ロボットの歴史は誤解の歴史であるといつてよい。宇宙開発のごく初期から、いくつかの神話が創られそして消えていったし、現在も依然として、宇宙ロボットは正しく認識されているとはいいがたい。本稿はその歴史と現状を背景に、筆者の新たな見解を述べてみたい。この見解が新しい神話となっていないことを祈るばかりであるが、それは本稿をお読みいただいた読者のご判断にゆだねるしかない。

宇宙ロボットの歴史上に存在した数多くの神話の中から、思いつくままに例を挙げると、次のような具合である。

【神話その1】宇宙ロボット技術は宇宙開発が熟してから初めて可能になる最高級の技術である。

【神話その2】宇宙ロボットの主流は、スペースシャトルや宇宙基地で活躍するロボットアームである。

【神話その3】宇宙での主役は人間であり、ロボットはその補助手段である。

【神話その4】宇宙ロボットは（鉄腕アトムのように？）手や脚があり眼や耳がある。

【神話その5】ロボットミッションを目的とした衛星が存在する。

これらは、宇宙開発の歴史上のある特定の時代またはある限定した局面では成り立つ命題であるが、宇宙ロボットに関する一般的な命題と誤解すると、たちまち立派な神話が生まれる。

以下ではこのような神話を検証して宇宙ロボットの本質を議論しながら、併せて、編集部からいただいた表題にあるような未来像を探ってみたい。本稿の目的は、これに加えて、究極的には宇宙ロボットは人間に融合する—あるいは区別ができなくなるという仮説を述べることにある。こ

こで用いる「未来」は来年とか10年後とかいうような近未来ではなく、1万年後とか10万年後というようなスケールの未来を意図している。

2. 宇宙ロボットとは？

2.1 宇宙ロボットの定義

宇宙ロボットとはそもそも何だろうか？ 手を持っていることが必要条件か？ 脚は？ 眼は？ 耳は？ そして脳は？… 鉄腕アトムや鉄人28号で育った旧世代も、そしてドラえもんやマジンガーZになじんだ新世代も、頭に刷り込まれているロボットのイメージは共通のようだ—人間を模した2本足のロボットでありながら、人間の能力を大きく超えた能力をもつ機械。近年、我が国で大変大きな関心を集めているのが2足歩行ロボットやヒューマノイドであるのもその延長線上で理解される。

しかし宇宙開発の歴史を振り返ってみると、ロボットは、むしろ人間を代替する機械、というほどの軽い意味で用いられてきたことが分かる。宇宙コミュニティで、robotic mission と言えば無人ミッションを意味し、manned mission（有人ミッション）と対になる言葉である。日本では、ときにrobotic mission をロボットミッションというように誤訳して用いる例を見かけるのは、上に述べたようにロボット漫画の洗礼を受けて育った日本人の事情によるところが大きいと思われる。

宇宙ロボットを、宇宙で人間に代わる仕事をする機械と定義するなら、スプートニク1号（1957年）やエクスポラ1号（1958年）などに始まる宇宙開発の歴史が、実は宇宙ロボットそのものの歴史であったと言えよう。つまり宇宙ロボットは必ずしもアームや移動機構（車輪や脚または飛翔機構）などのアクチュエータを持つ必要はないし、眼や耳などのセンサを持つことが必要条件とも言えない。プロセッサを持たないロボットだって宇宙で十分、活躍しているのである。

2.2 宇宙ロボットの目的

宇宙コミュニティの中で、いまだに、しばしば出される不合理な要請に次のような例がある。いわく、「魅力的な宇宙ロボットミッションを提案せよ」。あるいは「月・惑星

原稿受付 2009年2月25日

キーワード: Space Robot, Space Development, Robotic Mission, Expansion of Human Frontiers, Evolution of Human Being

*〒443-0047 蒲郡市西迫町馬乗 50-2

*Gamagori-shi, Aichi

探査におけるロボットミッションを示せ」これらの要請に応えようと四苦八苦している技術者を見るに付け、虚しい気がするの、この要請そのものの前提がそもそも大きく誤っているからである。

本来、宇宙ロボットは、ロボット自身が目的ではなく、何か別のミッションを実現するための道具であり手段である。したがって、上の要請にあるように、宇宙ロボットそのものをミッションとした宇宙プロジェクトはあり得ない。

もちろん、技術実証を目的とした純粋なロボットミッションはありうるが、その場合は、実証した技術を用いる、いわば本番としての将来ミッションがシナリオとして描けているはずである。したがってその場合も将来のミッションを実現するための道具としての宇宙ロボット技術の実証がミッションであり、ロボットそのものがミッションであるとは決して言えないであろう。実はこの観点から落第のミッション設定の例は世界の宇宙開発の過程では枚挙にいとまがないのが実情である。

つまり、魅力的な宇宙ロボットミッションの提案を期待するのは誤りで、「魅力的な宇宙ミッションのシナリオを提案しなさい。そのなかで必要ならロボットを最大限、活用しなさい」というのが正しい。また、月・惑星探査におけるロボットミッション・デフィニションを要求するのは誤りで、「魅力的な月・惑星探査ミッションを提案しなさい。そのなかで必要に応じてロボットを用いなさい」というのが正解。

3. 月・惑星探査とロボット

3.1 宇宙開発の目的

人類はなぜ宇宙開発をするのか？ そもそも巨額の予算とマンパワーの投入に見合ったリターンが本当にあるのだろうか？ —これは宇宙開発に携わる人々が繰り返し答え、今後も繰り返し真摯に答え続ける義務のある根源的な質問である。

宇宙開発の目的は次の四つに集約して考えることができる。

1) 実利用：宇宙空間を利用した通信、放送、気象観測、測位、資源探査などは実生活に直接恩恵をもたらす。多くの場合、費用対効果比が数字で示され地上の方式と比較される。通信、放送衛星などは商用化されているので市場経済の中で公平に評価される。

2) 科学観測：直接の経済効果はなく、私達の明日の生活に経済的な恩恵をもたらさないが、宇宙の謎を解くことにより人類の知的好奇心を充たし文化的な蓄積に寄与する。宇宙の起源と進化、太陽系の成り立ち、地球外生命の存在の可能性、などはいずれも人類の基本的な「知りたい」という素朴な要求に根ざす課題であろう。

3) 安心、安全：地震や大規模火災の早期発見、環境汚染の監視、国防などを目的とした宇宙からの地上のモニタは、

国民の安全で安心な生存を確保する目的で行われる。

4) 人類の宇宙への進出：上記三つの目的だけを考えるなら、人間が宇宙に出て行く理由はないであろう。無人ミッション (robotic mission) のほうがほとんど如何なる目的に対しても、費用対効果比がずっと優れているからである。しかし、人間の活動は経済効果だけで規定されるものではない。身に降りかかる危険と巨額の予算を顧みず、人類は宇宙に進出していく宿命にあるのではないか。これに関しては次節以降に少し立ち入って考察してみたい。

3.2 月・惑星への進出

2004年1月に当時のブッシュ米大統領が米国の宇宙探査プログラムとして新しい宇宙開発のビジョンを発表した[1]。それによれば、米国はアポロ計画以来久しく途絶えていた、有人の月探査ミッションを再開するとしている。月の次には火星への有人ミッションを、そしてそれ以遠の太陽系探査を、と高らかに宣言したのである。その後米国は世界の各国に対して、この太陽系探査計画への参加を呼びかけ、これを受けて世界の主要宇宙開発先進国は、これに前向きに応じて太陽系探査に乗り出すことを表明している。

人間を宇宙に送り出すのはロボットを送り出すのに比して、はるかに巨額の資金が必要で、かつ高いリスクを覚悟する必要がある。しかも有人の科学観測で得られる効果はロボットで得られる成果とほとんど変わらないであろう。ではなぜ有人宇宙探査が人類の次の大きな挑戦の対象になるのだろうか？

上の3.1節に述べた宇宙開発の四つの理由のうち、第4項にあるように、人類の宇宙への進出に関しては、費用対効果比を超えたもっと根源的な理由がある—それはフロンティア拡大への人間の欲求である。人類のフロンティア拡大の歴史をたどってみれば、それが歴然とする。

まず、効率的な輸送手段を持っていなかった原始時代の人類を考えてみよう。彼らの活動領域は住居の周辺に限定されていたであろう。やがて、文明が進み、村落⇒都市⇒国家、と集積の規模が増し、相互の交流や争いが増えるとともにその活動範囲は広がっていき、いわゆる辺境が次第に遠くに押しやられる。そして15世紀から17世紀にかけての大航海時代を迎える。コロンブスの新大陸発見に象徴されるように、人類は新しい大陸に活動領域を拡げていった。

そして、ヒマラヤや南極が観光の対象となった21世紀には、地球上の辺境がほぼ消失し、新たなフロンティアは宇宙に残るのみである。米国の主導する宇宙基地計画は、様々な目的が掲げられているが、基本的には、ただ一つ、恒常的に人類が宇宙に生活することを狙っている。しかし、宇宙の辺境は今の段階では近地球軌道に限定されている。上述のブッシュ米大統領の宣言は、これを月に拡張しようというものであった。このような観点から、上の⇒を延長

すると次のようになるであろう：

村落 ⇒ 都市 ⇒ 国家 ⇒ 新大陸 ⇒ 近地球の宇宙空間 ⇒ 月 ⇒ ?

そして、この「？」には、何が来るのであろうか？ 太陽系が来ることは、ほとんど論を待たないであろう。

なぜ人類はこのように存在領域を拡張してきたのか。それは、人間の DNA に刷り込まれた生存領域の拡大への希求であろう。人間の本能と好奇心に根ざす飽くなきフロンティアの拡大欲は、人類の持続的な発展をもたらしたといえよう。

人類が月・惑星に進出するには巨額の予算と、人命への大きなリスクを覚悟する必要がある。少なくとも当面（というのは、ここ 100 年スケールで）は、経済的な理由はないし、新しい資源の開発の期待もない。いわんや人口問題の解決などはまったくない。人間の生活領域拡大の本能の命ずるところであるとしかなえない。

しかし、1 万年スケールで見ると話はまったく別である。むしろ、人類が数万年、あるいは数 100 万年のスケールで持続的に繁栄していくためには、太陽系に、そして銀河系にフロンティアを拡張していくのが、唯一の手段となるであろう。

これに関しては、後に立ち入って検証することにする。

4. 人間とロボット

当面の（つまり 100 年スケールの近未来の）宇宙ロボットの役割は多くの場合誤解されていて人間の補助役とされている。これは、スペースシャトルのロボットアームに代表される補助ツールとしての機械の活躍が大きく注目されてきたことによるであろう。

しかし 2.1 節に述べたように、宇宙開発のごく初期から無人のロボット衛星が活躍してきたし、今でも主流はロボットである。人が宇宙に出かけていくのは誤解を恐れずに言うなら、象徴的な意義しかない。宇宙では主役はロボットであり、人間が補助役を果たすに過ぎないと言えよう。

すぐ出てくる反論は、ロボットには、突発的な事態に対して人間のような臨機応変な対応ができない、というものである。しかし、そもそもロボットの対応できないような非常事態は宇宙ではあってはならないことで、人命の尊重という意味では臨機応変を廃するようなシステムを作るのが王道であるし、人間に対する予想外の危険を前提にした有人ミッションは論外であろう。

また、ロボットは人間に比して不器用で細かい作業をこなすという意味で劣っているという議論も多くされる。たしかにロボットにネクタイを締めよといったら、苦勞するかもしれないし、靴の紐を結ぶのもロボットにとっては難事業であろう。しかしこれは、ユーザインターフェースの設計の問題であり、本来、人間にフレンドリーに設計され

たインターフェース（例えば、靴の紐！）をロボットに扱わせるのが間違っているだけである。ロボットフレンドリーに設計されたインターフェース（例えば、ロボット用の治具を備えた高速な溶接作業）では人間よりもロボットのほうが格段の正確さと素早さを示すであろう。

特に、真空、低温、高い放射線レートなどの厳しい宇宙環境下での宇宙服を着た人間の作業は、制約が大きく宇宙飛行士の活動は必ずしも能率がよいとは言えない。宇宙ではロボットが主役になるようなシステム設計が必要なゆえんである。

「宇宙ではロボットか？ 人間か？」という古くて新しい議論がある。上述のような考察から得られる結論は、「実質的な作業はロボットで、人間の宇宙での存在は象徴的な意義をもつ」ということになるだろう。

人類のフロンティアの拡大という意味では、まず人間の分身である宇宙ロボットが宇宙に進出し、それから少し遅れて人間が宇宙へ進出、というのが妥当であろう。もっとも、次章に述べるように、遠い未来には、そもそもロボットと人間を区別するのが困難になっていくであろう。つまりロボットか？ 人間か？ という議論はやがて（というのは、多分、1 万年という時間スケールで）消えてしまうであろう。

5. 宇宙ロボットの未来像

5.1 ロボットの進化

前章で述べたように 100 年のスケールで未来を考えると、月・惑星に人類が進出していくのに、経済的なご利益は期待できない。巨額の予算と生命のリスクを覚悟して太陽系に人間を送り出す唯一の根拠としては、フロンティア拡大の本能と人間に備わった好奇心しかないであろう。

一方、もっと長い時間スケール（例えば、10 万年のスケール）ではまったく別の話になる。以下では動物の進化の過程という観点から人類と宇宙ロボットの未来を考えてみよう。

マイクロソフト社の生みの親である Bill Gates がロボットに関して、次のような予言をしている [2]。

今のロボットの発展の状況はちょうど 1970 年代のコンピュータに似ている。当時は大型コンピュータが大学や大きな研究所に設置されているのみで、個人が直接コンピュータに触れる機会はまったくなかった。それが 30 年後には、コンピュータがマイコンとして家庭やオフィスの隅々まで浸透することになり、ネットワークと結びついて社会の仕組みが大きく変革するような影響を持つに至ったのは周知のとおりである。

一方、今のロボットも工場や流通業の現場に入っているが、状況は 30 年前のコンピュータと同様、家庭やオフィスには見られず、いわば「マイロボット」の出現前夜である。今から 30 年も経てば、ロボットは生活の中に溶け込み、社

会の仕組みを根底から変えていくことになる。アメリカの科学評論家 Ray Kurzweil は、ロボットの能力は指数関数的に進化し、30 年も経てば、人間の能力を上回ると予測している [3] [4]。Bill Gates や Ray Kurzweil の予言はこれくらいにして次に進もう。

その後は、どうなるか？ SF の世界に近くなってしまうが、大胆な予測をしてみよう。人間の能力を超えたロボットはやがて、人間と同じような意識を持つことになり、次世代の子孫を自ら生み出していくことになる。しかし、そもそもロボットが持つに至る意識とは何か？ だれもが納得する定義は困難で、心と体の両者が独立に存在すると主張する心身二元論と、体（脳）の物理的な活動だけで意識を説明できるとする一元論とが平行線を描いて久しい。

一方、人間に特徴的と考えられていた自由意志は幻想であり、実は脳が勝手に決めたことを後追いで自由に選択したと錯覚しているに過ぎないという説が、最近になって実験的にも実証され現実味を帯びてきている [5]。

さらに、人間が意識だと思っている精神活動も、幻想であり、脳がそのように錯覚しているに過ぎないという一元論が主張されている [6] [7]。この説によれば、脳があたかも意識が存在するように錯覚することが、生存により適しているために、ダーウィンの進化論どおり淘汰に耐えて生き残ったということである。

そしてこれらの一元論の延長線上には、人間とまったく同じように意識や自由意志をもった（と自身が錯覚する！）ロボットが作られるという帰結が待っている。

5.2 人類の進化と宇宙ロボット

視点を変えて、生命の進化という切り口から 100 万年スケールの未来を考えてみよう。ビッグバンに始まる 137 億年の宇宙の歴史の中で、原始生命の誕生が 38 億年前、ホモサピエンスが生息したのは、そのなかでも最後の 0.6 億年に過ぎない。ここで注目されるのは、38 億年の生物の歴史は大半は水の中で進み、動物が両生類として水の外に出たのはわずか 3.6 億年前のことだということである。つまり、生命の環境は次のように進んで来たわけである。

水中の生物（35 億年）⇒ 空気中の生物（3.6 億年）⇒ ???

この ??? には、何がくるだろう。そう、真空中の生物！一部の生物はかつて、35 億年も過ごした居心地のよい水中を捨てて、空気中に出てきた。ダーウィンのいう自然淘汰による進化の結果、空気中がより彼らの生存に適していたわけである。

人類が、この次の 100 万年、生存し続けるためには、真空環境に適応するような進化が必要になる。ただし、人類が有機物を基本構成要素としている限り真空に適応するのは困難である。近年、人間の臓器は次々と人工物で置き換えられるようになってきたが、究極的には人間の体は、脳も含めてすべてが人工臓器で構成されるようになるであろう。

これに対して、いわゆる心身問題（mind body problem）が大きく立ちはだかつてきた。つまり人間の持つ意識をコンピュータに移植可能か？ という古くして新しい問題である。この問いに関する、新しい回答は、上記 5.1 節に述べたように、人間の意識も自由意志も幻想または錯覚である、ということであった。そしてその「錯覚」をロボットの脳に実現するのに、それほど大きな困難は予想されない。かくして脳をシリコンチップ上のコンピュータという人工臓器で置き換えたシリコン人間の登場である。（ここでシリコンとは単なるニックネームで、有機物ではない材料、というほどの象徴的な意味である。）

以上の考察を宇宙ロボットとの関連で整理すると以下のようになる。ただし 100 万年のタイムスケールの話であることにご注意いただきたい。

- ・人類の進化は、DNA の受け渡しに際して、より生存に適した（ダーウィンの言う）自然選択によってではなく、人工的な設計図上の改良による受け渡しによるようになる。
- ・その進化は、DNA の自然選択に比して、格段に（一桁以上）速くなる。人間の 1 サイクルが 20 年の桁であるのに比して、設計の改良は年単位である。
- ・有機物を構成要素とする人間の活動は、地球上の大気の、たかだか 10 [km] の厚さの範囲に限定されてきた。しかし、やがて真空、極低温、高放射線など宇宙環境に適応したシリコン人間に進化していく。
- ・人間の進化のある段階からは、人間と宇宙ロボットの違いはなくなり、宇宙ロボットと人間が融合した新種の生物と呼べるような人間となる。
- ・その活動範囲は太陽系全体に、さらに他の恒星へと拡大する。究極的には宇宙全体にその生存範囲を拡大していく。

6. お わ り に

宇宙ロボットの歴史と現状、そして未来像をごく簡単に概観した。宇宙開発はそもそもロボットで始まり、そして、常にロボットが主役であった。宇宙探査は有人かロボットか、という問いは、経済効率という限定された観点からは、断然ロボット、と答えざるを得ない。しかし、この答えは「ここ百年の近未来では」という条件付である。一方、有人探査は経済効率を超越した、決定的な意義—人類のフロンティアの拡大という意義—を持つ。その意味で、有人宇宙探査は万難を排して追及すべき人類の重要な課題であろう。

しかし、10 万年というような時間スケールでは、有人かロボットかという問いかけそのものが、まったく意味を失うであろう。それは、一方では真空・無重力の環境に適応して進化を続ける人間と、他方では知能の飛躍的な進化を続ける宇宙ロボットが次第に融合して区別がなくなっていくからである。

ここで重要な視点は、生物は 35 億年もの長きにわたつ

てダーウィンの法則に則って（DNA の受け渡しにおける自然淘汰を通して）進化を遂げてきたが、これに終わりを告げることである。つまり、ロボットと人間の融合した生き物が、設計情報の人為的な改良という新しい進化の法則に則って変化していく。そしてこの進化のサイクルはダーウィンの法則に則った進化に比して桁違いに短い—つまり進化が格段に加速されるということになる。

宇宙開発の目的を 3.2 節では 4 項目に分類した。しかしこれらは、実は次の二大項目に集約される。

- (1) 実利：通信，放送，気象，安全確保など
- (2) フロンティアの拡大：有人探査，宇宙科学（知的フロンティア）

人類の文明の進展により最終的にはフロンティアが消失し，上記 (2) はなくなるであろう。知的フロンティア拡大が今でもすでに終焉に近づきつつあるというのは（これも議論を呼ぶ主張であるが，）アメリカの科学評論家 John Hogan が “The End of Science” で述べている（説得力のある）説である [8]。

本稿では宇宙ロボットの問題点と課題を洗い出すために大胆な推量を行ったが，もし本稿をきっかけに論争が澎湃としておければ，望外の幸せである。

参 考 文 献

- [1] Office of the Press Secretary: “Preesident Bush Announces New Vision for Space Exploration Program,” Fact sheet, January 14, 2004.
- [2] B. Gates: “A Robot in Every Home,” Scientific American, January 2007 issue.
- [3] R. Kurzweil: The age of spiritual machines. Penguin Books, 2000.
- [4] R. Kurzweil: The Singularity Is Near. Penguin Books, 2006.
- [5] D.M. Wegner: The illusion of Conscious Will. Bradfrd Book, 2002.
- [6] 前野隆司：脳はなぜ心を作ったのか。筑摩書房，2004.
- [7] 前野隆司：錯覚する脳—「おいしい」も「いたい」も幻想だった。筑摩書房，2007.
- [8] J. Hogan: The End of Science. Helix Books (Addison-Wesley), 1996.

中谷一郎 (Ichiro Nakatani)

1972 年，東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，電子工学専攻。博士（工学）。電電公社電気通信研究所調査役，宇宙科学研究所教授，東京大学大学院工学系研究科教授，JAXA 宇宙科学研究本部教授等歴任，現在，愛知工科大学ロボットシステム工学科教授，東京大学宇宙線研究所客員教授，国際宇宙大学理事等兼務。日本航空宇宙学会，計測自動制御学会の会員。（日本ロボット学会正会員）