



月と火星の探査はロボットとともに

ブッシュ米大統領は、月面基地を建設し、火星に人間を送るという大胆な将来構想を打ち出した。だが実現させるには、宇宙飛行士はさまざまな作業をロボットに助けてもらわなければならないだろう。米航空宇宙局(NASA)にはその技術があるのだろうか。Tony Reichhardtが報告する。

原文：Planetary exploration: A job for the droids?

Nature Vol.428(888-890)/29 April 2004; www.naturejpn.com/digest

1 1960年1月、スイスの物理学者 Jacques Piccard と米海軍大尉 Donald Walsh は、海の最深部に人類で初めて到達した。潜水艇「トリエステ」に乗った2人は、水深11キロのマリアナ海溝の泥質の海底で20分間を過ごした。トリエステは、海面よりも1,000倍大きい水圧から2人を守った。2人は帰還の際、歴史的な航海の記念に、米国旗を入れた重しつきのプラスチック容器を海底に残した。

それから44年。海の最深部に再び潜ろうとした者はいなかった。その代わりに、無人の潜水艇が使われてきた。有人潜水艇を強く擁護する研究者はいるが、深海調査のほとんどは

ロボットに任せるようになった。同じような傾向はほかでも見られる。沖合の油田の試錐から軍事偵察にいたるまで、単調な仕事や汚い仕事、危険な仕事はロボットが引き受けることが多くなっている。

宇宙でも、同じような変化が起きるのだろうか。宇宙では有人探査のコストと危険性は海よりもはるかに大きい。ぱっと見には有人宇宙飛行は魅力的なイベントなので、宇宙と海とは事情が違うように思えるかもしれない。ブッシュ大統領が示したNASAの将来構想は、1972年(アポロ17号の飛行時)以来初めて、地球近傍を回る軌道の外に人間を送る

計画を打ち出した。宇宙飛行士を送り出すことが、宇宙の探査で最善の方法かどうかについては、とりわけ科学者の中で懐疑的な人が多いにもかかわらず、だ。しかし、「アポロ計画とは異なり、今回はロボットも主役になるだろう」とNASAの上級職員は言う。NASAの長期計画立案を担当する「スペースアーキテクト」である Gary Martin はこのほど、「実際に火星に行くときは、仕事のほとんどはロボットとともにすることになるだろう」と米科学アカデミーの宇宙科学研究委員会述べた。

▶ 予算削減の嵐

南カリフォルニア大学(同州ロサンゼルス)のロボット工学者Peter Willは、この意見を歓迎する。ロボット工学界のベテランであるWillは、IBMの最初の産業用ロボットを1980年代初めに作った人物で、人間の長期月面滞在用の居住室や関連インフラの建設は人間だけではできないと考えている。「すべての作業にロボットが必要だろう」とWillは話す。「結局、スポットライトを浴びるのは人間だけだろう」と彼は認めるが、そのおぜん立てをするのはロボットということになりそうだ。

では、NASAは壮大な計画を実現するのに必要なロボット工学の経験と技術を持っているだろうか。1990年代、NASAは一般的なロボット工学研究にそれほど多くはないものの安定した予算を配分し、ピーク時の1997年には年間2,400万ドルが投入された。この予算は、カーネギーメロン大学(ペンシルベニア州ピッツバーグ)が開発した「ダンテ2」や、NASAのジョンソン宇宙センター(テキサス州ヒューストン)が設計した「ロボノウト」などの計画に使われた。ダンテ2は、8本足の歩行ロボットでアラスカ州の活火山の噴火口内に降りた。ロボノウトは人間型で、宇宙遊泳する宇宙飛行士のロボット助手として設計された。

だがそれ以後、一般的なロボット工学研究へのNASAの支援はなえてしまった。1990年代後半、当時のDan Goldin長官はバイオテクノロジーやナノテクノロジーのほうに熱心だった。スペースシャトルや国際宇宙ステーションなどの計画も財政上の問題を抱えはじめ、ロボットなど「余分なもの」に使う予算は残っていなかった。メリーランド大学宇宙システム研究所のDavid Akinは、こうした要因が重なって「NASAにおけるロボット工学研究を破壊した嵐」がいかに起きたのかを忘れられない。

これとともにNASAの宇宙科学部門は、重点課題を火星探査計画用の惑星ローバー(探査車)の開発にほぼ絞った。現在の火星ローバー、「スピリット」と「オポチュニティ」の成功はだれもが認めるところだ。だがそのミッションの目標は、今度の「月・火星計画」ほど野心的ではない。スピリットやオポチュニティは主に遠隔制御され、写真を撮影したり、岩に穴を開けたりなど、一度にひとつのかな

り単純な仕事をこなす。この最先端の「徒歩旅行者」ロボットを見る限り、自律的な建設ロボットを使って決められた期限までに月面基地を作ることは不可能な任務に思える。

NASAが有人宇宙飛行という目標を達成するためには、ロボット工学研究の優先度をもっと上げる必要があるだろう。これまでの歴史を振り返ると、有人計画が財政面で厳しい局面に入ると、ロボット工学などの先端技術研究はまず最初に放棄されがちだった。「有人宇宙飛行にかかわる人たちは、常に次のミッションのことまでしか考えていない」とAkinは話す。要するにNASAは、宇宙飛行士の安全を確保し、スペースシャトルを飛ばし続けることにくれば、技術開発は常に二の次とみなしてきた。

自律性が不可欠

例えば最近では、2001年にNASAは国際宇宙ステーションの予算が不足していたため、軌道上での修理作業用にAkinが設計したロボットのスペースシャトルでのテストを取りやめた。新しい月・火星計画に向けた人間系技術・ロボット技術プログラム(HRT)の責任者であるJohn Mankinsは「今回はこれまでとは事情が違う」と言う。Mankinsによると、NASAは来年度予算要求で「技術の成熟」のために1億1,500万ドルを計上したという。「技術の成熟」にはロボットシステムをテストし、宇宙空間で性能を実証することも含まれている。だがロボット工学者たちは、歴史は繰り返すかもしれないとまだ恐れている。

人間の手をほとんど借りずに、あるいは、まったく人間の手を借りずに月面基地を建設するというような野心的な目標を設定すれば、NASAの多様な関心をこの分野に集中させることになるだろう、と言うのはカリフォルニア大学パークレー校のロボット工学専門家であるKen Goldbergだ。その結果行われる研究は、「地上での生活に役立つ副産物がほとんどない」(Goldberg)スペースシャトルや軌道上のステーションよりも、日常生活への応用がずっと豊富な技術を育成することだろう。

NASAは、月面居住室の可能性についていくらか研究したものの、それを実際にどうやって建設するかについて詳細な検討はほとんどしなかった、とWillは言う。何トンもの原材料を地球から打ち上げるには、ばく大な費

用が必要だ。居住室の建設には月の土を使うのが最良の方法だろう。さらに、宇宙飛行士を肉体労働者として使うことは、財政面から判断して(また、ほかのいかなる観点からも)賢明ではない。月の原材料を採掘し、溶かし、粉にして、基地の自動組み立て用の部材にするには機械が必要だろう。「そのような機械を設計することは、自律性から機械どうしの協力にいたるまで、ロボット工学のあらゆる側面を推し進めることになるだろう」とWillは説明する。

次世代の宇宙ロボット開発は、米国、日本、欧州で進んでいる本流のロボット工学研究の成果を生かすことになるだろう。NASAエームズ研究センター(カリフォルニア州モウフェットフィールド)のIllah Nourbakhshは「商業ロボット技術は日一日と進んでいる」と話す。たとえば、SONYのロボット犬「AIBO」の最新バージョンは、先進の視覚パターン認識アルゴリズムを使い、未知の環境でさえバッテリー充電器を探し出す。これは、ロボットの自律的動作を実現するための重要なステップだ。

人間の手助けなしにエラーから回復する能力など、ロボットの自律性を高めることはきわめて重要だろう。例えば、今年1月にスピリットが火星表面で停止してしまったとき、地球の操縦者は数日間スピリットの活動を止め、新しいソフトウェアをアップロードしなければならなかった。こうした処置は、月面基地を建設するロボットたちの大型チームでは不可能だろう。「もし、1,000台のロボットの面倒を見なければならぬとしたら、そのために1,000人の宇宙飛行士を用意するだろうか」とWillは言う。「おそらく、そんなことはしないだろう」

遠隔操作(遠くにいる人間の操縦者がコントロール装置でロボットの動きを指示すること)という方法も考えられなくはない。しかし、地球から月へ電波で命令を送ると、反応が帰ってくるまでに数秒かかるため、この方法は難しい。この時間の遅れは地球-火星間ではさらに大きな問題になるため、専門家の多くは自律的動作しか選択肢はないと主張する。

産業用ロボットは、同じ仕事を同じ環境の中で繰り返すので、完全に自律的に動作する。変化する一定でない環境の中を動き回りながら、物理的で複雑な仕事を協力しながら行うことは、同じ環境よりもずっと難しい課題だ。▶

さらにその環境が月面(小さい重力、いたるところにあるちり、地球外環境のそのほかの物理的特徴がともなう)となると問題はもっと多くなる。

協調プログラムを開発

それでも、進歩はある。スタンフォード大学(カリフォルニア州)の Oussama Khatib らは、予測できない「現実世界」の環境の中で、かさばる物を運ぶこともある仕事に対して、ロボットどうしが協力したり、ロボットと人間が協力したりするためのアルゴリズムを作ろうとしている。NASA ジェット推進研究所(JPL、カリフォルニア州パサデナ)の研究チームは、長い横材を一緒につかんで運ぶロボットたちを作った。さらに、太陽電池パネル群を包みから取り出し、展開するといった単純な仕事でロボットたちが協力して働くためのコンピュータープログラムを開発した。しかし、こうした成果も月面基地を組み立てることに比較すればわずかな前進にすぎない。目標を実現しようと思えば、NASA のロボット研究開発予算を少なくとも1ケタ増やす必要があるだろう、とこの分野の専門家は話す。それは多額の研究資金ではあるが、計画中の月・火星計画で必要となりそうな数百億ドルの予算の一部にすぎない。

Goldberg らロボット工学者は、新しいロボット技術を実際に宇宙に送る前にテストすることができる地上の試験設備の整備などを含め、大学を拠点とする幅広い研究プロジェクトをNASAに展開してもらいたいと考えている。そうした着実なアプローチこそが、月面基地の建設といった大きな目標の実現につながる。「共通の目標に向かって研究者がそれぞれの研究成果を持ち寄ってテストできるような、壮大な挑戦を行うのはすばらしいことだろう」と Goldberg は話す。

NASA の計画は、早ければ2015年に月ミッションを行い、その約10年後に火星への有人飛行を目指すことを掲げている。それまでに火星基地建設と資源採取用のロボットチームは、人間の探検者のために準備をしておく必要があるだろう。この次世代の宇宙ロボットは多くの新しい技能を必要とするだろうが、決定的に重要な特徴の一つ(すなわち自律的な走行)について少し考えただけでも、まだどれほど多くの進歩が必要かがうかがえる。

火星探査では、NASA のもっとも優秀なローバーでさえ、火星表面を動き回る速度はまだ苦痛に感じるほど遅いことが分かった。NASA の Sean O'Keefe 長官はこのほど開かれた公開フォーラムで「将来の火星探検者は、スピリットとオポチュニティが2カ月で集めたのと同じだけの量の試料を、8時間の作業1回で集めることができるだろう」と述べた。それに向けての第一歩として、JPL のエンジニアたちは火星ローバーに新しいソフトウェアをアップロードし、ある範囲の地形が安全に横切ることがどうかを今までより独自に決定できるようにし、ローバーが1日に移動できる距離を数メートルから数十メートルに増やした。

砂漠を駆けるローバー

勇気づけられる話がある。地球上の火星に似た地形で、ずっと遠くまでもっと速く走行するロボットが開発されているのだ。オクラホマ大学のロボット工学者 David Miller は、「SR2」という名称の太陽電池で動く自律的なローバーを、カリフォルニア州の砂漠でテストした。このローバーは、人間の操縦者が一つの命令を与えるだけで、人間の手助けなしに1キロを超える距離を走行できる。カーネギーメロン大学の「ヒュペリオン」というローバーも、チリのアタカマ砂漠で同程度の距離を自律的に走行した。「ゾーイ」という次世代ローバーは今春、アタカマ砂漠で生物学的調査を行うことになっている。人間の操縦者が火星で想定される状況に似せて、遠くのベースキャンプにいることになっている。

その一方でNASAは、2009年打ち上げ予定の数十キロを動き回れる可能性のある長距離火星ローバーの計画を練っている。地球外文明探索計画(SETI)研究所(カリフォルニア州マウンテンビュー)の惑星科学者 Nathalie Cabrol は、長距離惑星ローバーには斬新な探査戦略が必要だと言う。例えば、広い場所でサンプルを採取する場合、これまで以上に広い地域をカバーする必要があるため、現在の火星ローバーのように興味深い岩を見つけたらいつも停止するというわけにはいかないかもしれない。Cabrol は、ヒュペリオンとゾーイのアタカマ砂漠探検の科学者チームを率いており、現在の火星ローバー運用にもかかわっている。もっとも最近行われたヒュペリオン

のアタカマ砂漠での走行では、科学的データの収集に長距離ローバーがどれほど有効かが証明された。エームズ研究センターにいた科学者たちはローバーからのデータだけを使って、その場所の地質を「驚くほど高い」精度で知ることができたと Cabrol は話す。

NASA の惑星ローバーが着実な進歩をとげる一方で、自律的ロボットによる宇宙探検の研究は米国防総省から歓迎され、支援されている。軍が自律的走行に関心を持つのは、人間が乗っていなくても敵陣に入り込むことができる車両が必要だからだ。国防総省国防高等研究計画局(DARPA)主催のイベント「グランドチャレンジ」は、ロサンゼルスーラスベガス間の228キロのレースで、完全に自律的な地上車両の開発奨励を目的としている。だが今年3月に行われた第1回レースは、始まるやいなや終わってしまった。スタートラインから12キロ以上進めた車両がなかったためだ。それでもロボット工学者たちは、レースによってロボット開発に関心が高まり、この分野の発展につながるだろう期待している。

ロボット工学者たちは、レースの結果に驚いたり、落胆したりはしなかった。もっとも遠くまで進んだカーネギーメロン大学の「サンドストーム」は、故障するまで毎時15マイルの目を見張る平均速度で進んだ。この研究チームは2005年10月の2回目のレースに備え、すでに航行アルゴリズムを改良中だ。

そうこうするうちにロボットたちは、これまで宇宙飛行士頼みだったハッブル宇宙望遠鏡の修理という晴れ舞台で、ロボットにもその能力があることを証明するチャンスを得るかもしれない。NASAは、昨年のスペースシャトルコロンビア号事故をふまえて、ハッブル宇宙望遠鏡の5回目の点検・修理のために宇宙飛行士を送ることは危険すぎると判断した。このためNASAは、次回の点検・修理ミッションをどうすればロボットで行うことができるかについてアイデアを募った(*Nature* 428, 353; 2004 を参照)。

有人・無人の垣根を低く

メリーランド大学の Akin らの研究チームは、まさにその課題のためのロボットを長きにわたって開発してきた。NASA の研究予算で Akin が開発した「レンジャー」と「ヘラクレス」は、アームと交換可能なツールを備え、人

間によって遠隔操作されることも、自律的に動作することもできる。1980年代から行われている水中での大規模テストでハッブル宇宙望遠鏡修理のシミュレーションを行ったところ、ロボットは宇宙遊泳中の宇宙飛行士の手助けをすることができ、かなりの時間さえ節約できることをAkinは証明した。2002年の修理ミッションの作業をAkinが分析してみると、宇宙飛行士は1860の個別の作業をしたが、うち82%は単純なツールを使えばロボットにも可能だったことが分かった。さらに複雑なツールを使えば、すべての作業がロボットの能力の範囲内だった。

Akinが開発したシステムは、いずれも宇宙空間での動作が実証されていない。また、これまでの開発計画では、常に宇宙飛行士とともに働くという想定を優先してテストが行われた。修理作業すべてをロボットが行うとなると難易度がさらに高くなるが、それでも可能だ、とAkinは考えている。

ハッブル宇宙望遠鏡の点検・修理という注目を集めるミッションで成功を収めれば、NASAのトップも、月・火星計画でロボットにもっと重要な任務を与える必要があると考えられるようになるかもしれない。NASAは有人宇宙技術と無人宇宙技術の垣根を低くする必要性をよく理解していると、Mankinsは言う。有人技術と無人技術の区別があるため、ロボット工学は軽視され、予算削減の際に犠牲となってきたのだ。

だが、今回は基礎研究への予算投入は不可欠だ。有人火星ミッションに必要と見積もられている600億ドルのほとんどがロケットと生命維持システムの開発に使われるにしても、ロボット技術開発にも数十億ドルを回すべきだ。

「将来、人間を宇宙に送るなら、彼らは相当に利口な機械に囲まれていなければならない」とWillは話している。 ■

Tony ReichhardtはワシントンDCを拠点として本誌に寄稿している。

Robonaut

▶ robonaut.jsc.nasa.gov

Carnegie Mellon University Field Robotics Center

▶ www.frc.ri.cmu.edu/project

DARPA grand challenge

▶ www.darpa.mil/grandchallenge

Survey of space robotics

▶ www.tralabs.com/~korten/publications/isairas_space_robotics.pdf

NATURE月刊ダイジェスト|6月号

「きれいな核兵器」という妄想

米国防総省は新型核爆弾開発計画を推進できるのか。

原文：Dreaming of clean nukes

Nature Vol.428(892)/29 April 2004; www.nature.com/nature

Michael A. Levi

米国の核兵力は、今日の安全保障問題に対処するのに十分だろうか。米国防総省はそうでないと考えているようである。同省国防科学委員会(DSB)が今般作成した報告書¹では、「従来型よりも周辺への被害はるかに小さい核兵器が必要である」と主張し、地下施設攻撃用の新型核兵器の開発計画を支持している。

ある意味でこうした、地下施設を攻撃するための「バンカーバスター爆弾」は何ら新しいものではない。1960年代に配備が始まったB-53爆弾は、地下標的を破壊することができ、数十万平方キロメートルにわたって死の灰をまき散らしてしまう。今回の計画が目指すのは、放射性降下物が少なく攻撃力がさらに高い兵器の開発である。しかし、DSBが示す見通しは楽観的過ぎるとともに、通常兵器の相対的な潜在能力が十分に検討されていない。

米国エネルギー省は新型兵器について、現在のところ研究を進めたいが開発を望むものではなく、開発能力を維持することが目的であると強調している。しかし、この説明には疑念を抱かざるを得ない。2002年3月に漏れたブッシュ政権の『核態勢見直し』(Nuclear Posture Review)²には核兵器への積極姿勢が記されており、新型核兵器の潜在的必要性が示唆されていることから、DSBは配備を公然と検討している。

現在のところ議会は懐疑的であり、核兵器予算は削減されているが³、DSBの研究によってこの流れは変わる可能性がある。DSBの報告書の内容は、新型核兵器によって米国の軍事力がいかに強化されるかについて、気をそそるほど詳細につづられている。だが、よく考えればその主張は浅薄なものであり、政策立案者はこれに惑わされてはならない。

DSBの報告書は、冒頭で非核バンカーバスター兵器の改良について素晴らしい提言をし

ている。実際、核兵器にしかできないともいわれる攻撃について、DSBは同等の効果を上げる非核兵器を示している。その上で、新型核爆弾を使えば、近隣住民を多数殺傷することなく、いかに地下施設を破壊することができるかが例示されている。その説明は、かつてないほど長く詳細であるのはいいが、批判の余地もさらけ出している。

核兵器が通常兵器かによらず、現在のバンカーバスター爆弾は、弾頭の爆発前に地中を貫通するミサイルに依存している。核兵器の地中爆発は破壊力が大きいので、爆弾を小型化する必要がある。深度が十分に規模も十分に小さければ、爆発は地中に封じ込められる可能性があり、放射性降下物の発生を防止できるだろう。報告書では、100トン核爆弾は、爆発前に地中30～50メートルまで到達させれば、爆発を完全に地中に封じ込めることが可能であろうと結論づけている。400トン爆弾については地中50～55メートル、3,000トン爆弾については地中100メートルとされている¹。DSBの主張では、いずれの爆弾も、爆発前到達深度の約2倍の深さにある施設が破壊可能とされている。

このような結論は信用できない。この報告書の研究で使われたのは、冷戦時代にネバダ州で実施された核実験のデータ⁴である。だが、ネバダの実験では放射性降下物を防止するため、爆弾を埋めた穴が入念に塞がれていた。これに対して、地中を貫通した核兵器の上には大きな穴が開いており、爆発を封じ込めるのは困難ないし不可能と考えられる⁵。

また、爆発の封じ込めに関するいかなる議論も標的地域の地質によって違ってくるが、DSBは標的の選択に言及しておらず、その結論は現実に即したものであるというより、ただの結論という感じがする。例えば、到達必要深度をネバダの実験から決定する標準的方法(DSBが採用していると考えられる方法)は、水分量の低い地質で有効なものであり、水分