

月面開発と建設機械

金森 洋史

2020年には人が再び月に行き、本格的な月面拠点の建設を始める。その目標に向けて、世界各国では月面開発に関わる様々な活動が計画されている。しかしながら、これらの計画において考慮すべき技術的な課題は多い。特に月面における建設作業には様々な困難が予想されることから、それを支援できるような建設機械が不可欠と考えられている。本報では、今後の月開発の計画とそこに必要とされる建設機械の開発状況を紹介する。

キーワード：宇宙開発，月，建設，建設機械，ロボット

1. はじめに

人類が太古の昔から慣れ親しみ、また時として神とも崇められる「月」は一体どのようなところなのだろうか。それまで地球から観測するしかなかった我々の好奇心は、1960年代後半～70年代前半における米国と旧ソ連による月開発競争によって、より一層膨らむこととなった。特に米国のアポロ計画では、人が月面に降り立ち、様々な観測機器を使うことによって月に関する多くの新事実が解明された¹⁾。当然、「次は月面拠点」という機運が高まることとなったのだが、地上には様々な問題が山積しており、その後の月面開発は必ずしも順調と言える状況ではなかった。

そのような状況において我が国は、科学探査を目的に着実な月探査を推進してきている。特に2007年9月に打ち上げられた月探査衛星「かぐや」による観測では、14種類の科学機器を使ったデータ収集に加え、NHKのカメラによるハイビジョン映像(図-1)も



図-1 「かぐや」によるハイビジョン映像(提供 JAXA/NHK)

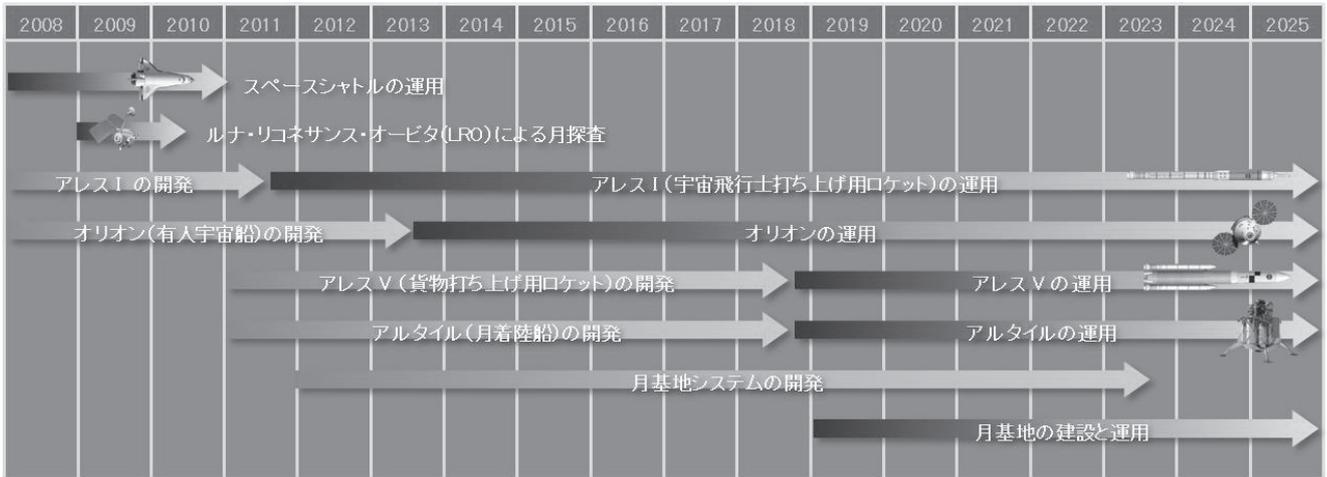
撮られ、科学者のみならず一般の人にとっても月探査をより身近なものにした²⁾。

現在、日本のみならず宇宙開発に関わる主要国が月探査を表明しており、再び人類が月に降り立つことを計画している。本稿では、これらの月探査計画の概要を紹介すると共に、その後の“月で暮らす”場合の課題について解説する。さらに、その実現のためにどのような性能のどのような機械が必要となるか、現在開発中の機械を含めて紹介する。

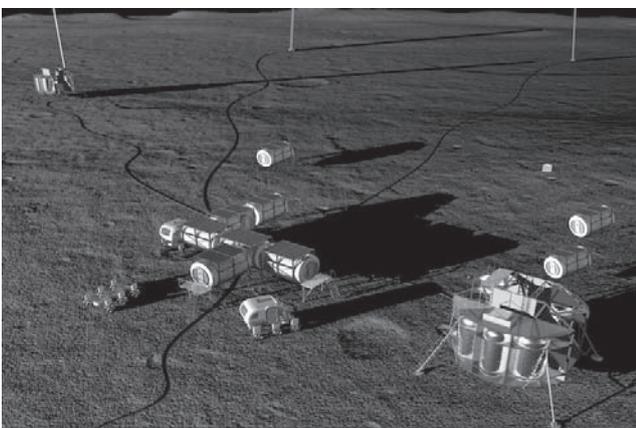
2. 各国の月探査計画

2004年のはじめ、米国のブッシュ大統領は新しい米国の宇宙政策を発表した³⁾。その新政策にはスペースシャトルの退役や宇宙ステーションの終了計画が含まれているが、中でも注目されたのは、2020年までに再び月に人類を送り、月面拠点を構築するという項目である。これによって、「月探査」が世界中で注目を集めるようになり、NASA(米国航空宇宙局)ではこれを実現するための具体的な開発が開始された。図-2にその開発シナリオを示す⁴⁾。まずスペースシャトルに代わって人を宇宙に送り出すために、人が搭乗するオリオンと呼ばれる有人宇宙船とそれを打ち上げるアレスIと呼ばれるロケットの開発が行われる。さらに、約40年前にアポロを打ちあげたサターンV型に匹敵する貨物用のロケット(アレスV)ならびに月着陸船(アルタイル)の開発が進められる。

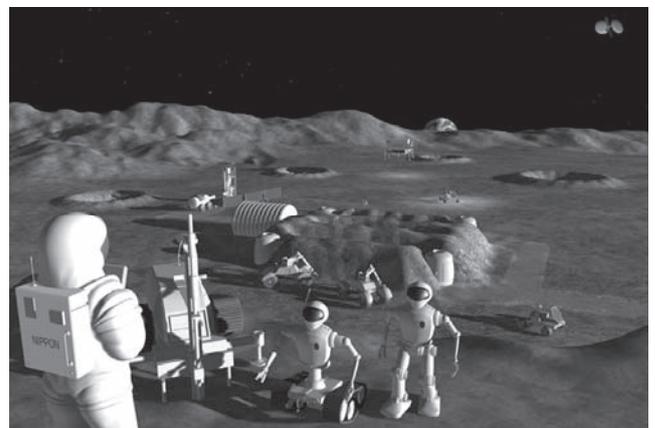
これらの開発がほぼ終了する2018年以降に、本格的な月面拠点の建設が行われる。その建設場所の候補



図一2 NASAの月開発シナリオ



図一3 NASAの月面拠点構想 (提供 NASA)



図一4 JAXA2025月面拠点 (提供 JAXA)

の一つとして、シャクルトンクレータという月の南極に近いクレータの縁が考えられている。この場所は高緯度で高台になっているため、地球の白夜のように長時間の日照（太陽エネルギー）が得られることに加え、水（氷）の存在可能性など、科学的に興味深い永久陰と呼ばれる地域の近くとなっている。図一3に、NASAの月面拠点構想の例を示す。

一方我が国では、2005年に宇宙航空研究開発機構（JAXA）がJAXA2025という長期計画を発表した。これによると、2015年頃までに月周回衛星（かぐや）等による月探査、月の利用可能性の探査ならびに将来に向けた先端技術開発が行われる。この段階で一旦計画の見直しを行った後、国際計画における国際的貢献や役割分担、長期滞在を可能にするための技術開発などを2025年頃までに実施することになっている。図一4は、JAXAが考える2025年頃の月面拠点の構想図である⁵⁾。

月の探査に関しては、我が国や米国のみならず、欧州（ESA: European Space Agency）、中国ならびに

インドなども多くの関心を寄せている。欧州では、2003年～2006年にかけて、月周回衛星（SMART-1）によって極地などの探査を行った。中国は、「かぐや」打ち上げの約1ヵ月後の2007年10月に、「嫦娥（じょうが：中国読みはチャンア）1号」と呼ばれる月周回探査機を打ち上げた。現在、この探査機は月を周回しながら様々なデータを収集していると思われる。将来的には、中国は月に着陸機を送り、表土などを地球に持ち帰ることも計画している。インドは2008年10月に、「Chandrayaan-1（チャンドラヤーン-1）」と呼ばれる月周回探査機を打ち上げた。これには11種類の科学機器が搭載されている。また、米国も2009年4月に、LRO（Lunar Reconnaissance Orbiter）およびLCROSS（Lunar CRater Observation and Sensing Satellite）と呼ばれる探査機を2つ同時に打ち上げる予定である。LROは高度50km（「かぐや」は高度約100km）を周回し、高解像度カメラによる月面拠点候補地の探査や、水氷の存在可能性などを観測する。一方LCROSSは月の極地に物体を衝突させ、それに

よって発生した粉塵のデータを集めながら自らも月に衝突するという探査機である。これらの粉塵は地上からも観測されることになっている。

以上のように、これからの10年はこのような無人による月の探査が数多く行われ、まだ知られていない月の素顔が明らかにされると期待される。さらにその先の10年では、有人による月面探査が展開されることは必至である。

3. 月で暮らすために

(1) 拠点の発展シナリオ

有人による月面探査は、しだいにその探査領域や探査項目を拡大し、それに伴い月面での滞在に必要な施設の重要性が高まっていく。2020年から2030年にかけて構築された初期の月面拠点は、その後20～30年の間に都市（規模の大きな拠点）へと発展し、これに伴い月面で必要となる技術も増えていく（図—5）。

まず必要となる技術は、人が生きていくための技術である。人が大量に消費する酸素や水を可能な限り循環再生利用する閉鎖生態システムや、月面での生活を考慮した居住施設などである⁶⁾。また、拠点を運用するためのエネルギー施設なども必要となる。比較的初期の拠点では、これらに必要な物資の大部分を地球に依存するため、長期間の月面滞在は困難である。

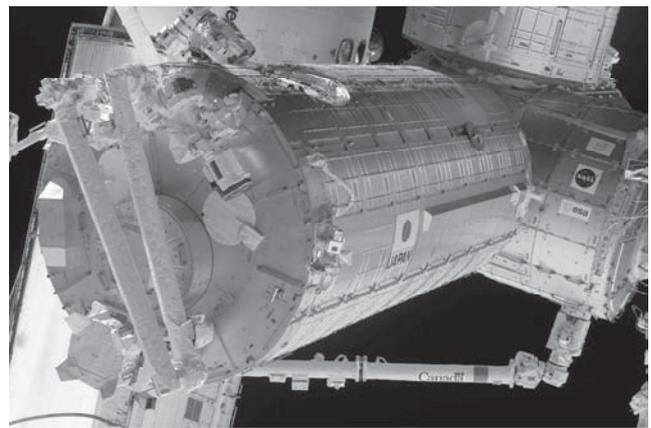
月の資源やエネルギーを有効に活用し自給率を高めていくことで、本格（長期）的な月面での生活が可能となる。特に重要な酸素や水に関しては、再生利用できない損失分が現地生産で賄われる。月面を覆うレゴリスと呼ばれる岩石や砂は、地球上の岩石と同様に大部分が酸化物となっており、これから酸素を取り出すことができることから、すでにその具体的な技術の研究開発も進められている。エネルギーに関しては、地球か

ら運び込んだ発電装置と太陽エネルギー（太陽電池ならびに太陽炉）が併用して使われることになる。拠点の規模拡大と共に、太陽エネルギーへの依存度は高くなることが予想される。

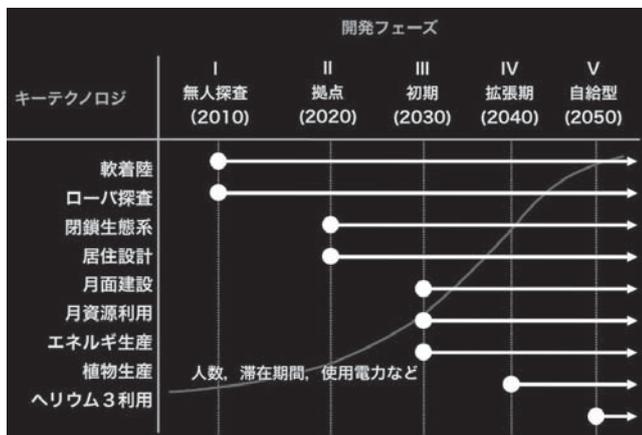
以上のほかに必要な施設・設備には、離着陸施設、物資の保管や搬送などの物流施設、通信設備、人間の船外活動支援施設（エアロック、宇宙服保管・装着など）および各種作業機械などが挙げられる。さらに、科学探査のための天文観測施設や地質探査施設、ライフサイエンスの実験施設なども必要になる。

(2) 拠点施設の構造形式

月面拠点の施設には、その発展段階や施設の用途に応じて様々な形式の構造物が適用される。比較的初期の段階では、地上で製作した金属製のモジュールを月面に設置して使う方法が有効と考えられている。これは、2008年6月に星出宇宙飛行士によって組み立てられた国際宇宙ステーションの日本モジュール（きぼう：図—6）のようなもので、現場作業が少ない金属



図—6 「きぼう」に使われた金属製のモジュール（提供 JAXA）



図—5 月面都市の発展シナリオ



図—7 インフレータブル構造（提供 NASA）

製の予圧モジュールを組み合わせることから、高い信頼性が期待される。拠点の発展と共に、膜で構成されるインフレイタブル構造（厚手の風船のような構造：図一7）や将来的にはコンクリート構造の生活空間も提供されると予想される⁷⁾。

(3) 建設方法

前述のようないずれの構造形式においても、月面での主な建設作業項目は以下の通りとなる。

- ・建設機械・資材の荷降ろし
- ・測量・位置出し
- ・基礎工事・仮設工事
- ・資材運搬・位置決め
- ・構造体建設（組立て・展開）
- ・内装・設備
- ・覆土工事

最後にあげた覆土工事は、施設内部の人や機器類を過酷な月面環境から保護する目的で実施される項目であるが、その他については地上の作業項目と変わらない。

しかし地球上とは環境が大きく異なるため、これらの作業の内容は大きく異なる可能性がある。建設作業において特に考慮すべき月の特殊環境を以下に列挙する。

- ・作業員が限られる（科学者も工事に参加する）
- ・資材の過不足による損失が大きい（地球からの運搬費が高い）
- ・空気が無く、潤滑や廃熱が困難
- ・風景のコントラストが強く視認性が悪い
- ・月表土（レゴリス）の細かい粒子（ダスト）が作業に悪影響を及ぼす
- ・外部で水が使えないので洗浄が困難
- ・温度環境が厳しい（昼夜の温度差約 300 度）
- ・日照周期が 29 日である

以上のような特殊環境を考慮しながら、建設作業の内容や施工計画を検討していくことが必要になる。これらの詳細な検討は今後の課題となっており、建設機械の開発などもこれと並行して進められる。

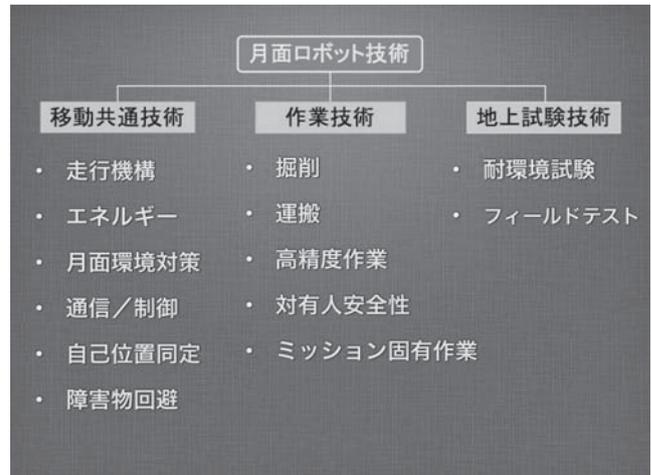
4. 月面の建設機械

(1) 月面作業用ロボットの構成技術

前述のように、月面での建設作業の内容や施工計画は地上とは大きく異なることが予想されるが、これらを具体的に決定するために、地球上では様々な実験やタスク分析あるいはシミュレーションなどが行われる。その結果から、それらの作業を人がやるのかあるいは機械やロボットがやるのか決められる。また、

機械やロボットが必要な場合には、それらがどのような機能や特性を持っていないかにならないかについての検討も必要となる。

月面作業用の機械に求められる技術を図一8にまとめる。なお、月面で使用される機械の多くは知能化される可能性が高いため、以降は建設やその他作業用機械を総称してロボットと呼ぶ。



図一8 月面作業用ロボットの構成技術

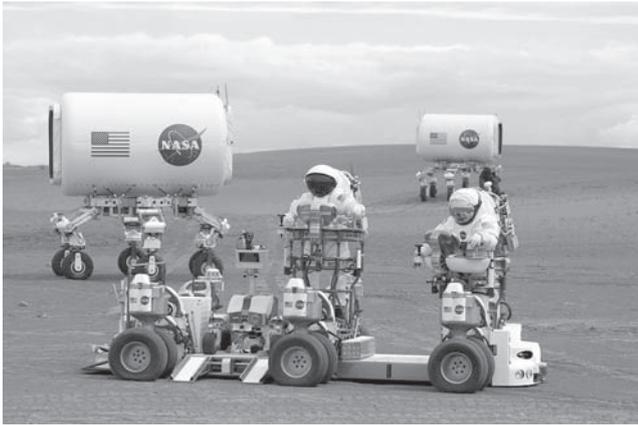
地上と同様に月面作業に移動は不可欠となるが、活動時間が限られている月面では、移動に多くの時間を割くことをなるべく避けたい。図一8の左列には、そのための自律移動に必要な技術が挙げられている。また、地上よりも小さい重力で十分なトラクションを得るための検討も重要となる。

中央の列は、具体的な作業に必要な技術を示している。基本的には左列の移動技術と組み合わせて、ロボットの機能を作り上げていく項目である。

右列には、宇宙システム特有の試験技術が挙げられている。ロケットの打ち上げ振動や着陸衝撃、月面での真空環境や温度条件に適合するように、地上で可能な限りの耐環境試験を実施する。これは、一般に全ての衛星に対して実施されている項目である。さらに、タスク分析に不可欠なフィールドテストも重要である。リハーサルも兼ねたフィールドテストによって、人とロボットの連携が試験される。

(2) NASA の検討

NASA を中心として進められている月面建設用ロボットの開発では、人間とロボットの作業分担が難しいことから、ロボットのプロトタイプと人（宇宙飛行士）との協調による作業の分析を行っている⁴⁾。図一9～図一12に、NASA で開発中の作業用ロボットを



図一〇 人と居住部の搬送車 (提供 NASA)



図一〇 ショベルロボット (提供 NASA)



図一〇 人間型作業ロボット (提供 NASA)



図一二 月面クレーン (提供 NASA)

紹介する。

(3) 建設機械に及ぼす月の環境要因

2. (3) で示したような建設作業に影響を及ぼす月面の特殊環境は、当然建設機械の設計においても十分考慮される必要がある。主な作業用機械の設計において、さらに考慮すべきその他の事項を以下に示す。

(a) 運搬

レゴリスで覆われた月面を走行するために、十分なトラクションが得られるような走行機構が必要となる。特にクレータ縁部のような傾斜地の走行には、走行の機構や制御において様々な工夫が求められる。不整地の走行には多くのエネルギーが使われるので、綿密な運搬計画を立て、場合によっては軌道の設置なども考慮する。

(b) 掘削

掘削には、ボーリングのような穿孔掘削や図一〇のようなショベル掘削あるいはブルドーザやスクレーパなどのような表面切削などがある。

ボーリング掘削で特に考慮すべき事項は、月面では水が使えないことである。掘削ビットに発生する熱や

排土の処理をどのようにするかが課題となる。

ショベル掘削や表面切削では、掘削抵抗に十分対応できるような支持構造が必要となる。地上の機械をそのまま月面で使用すると、重力が地上の1/6と低いために機械本体の安定性が不足し、場合によっては本体が浮き上がってしまう事も予想される。

(c) 荷揚げ・荷降ろし

NASAでは図一〇に示すようなクレーンの開発も進めているが、場所によっては表層のレゴリスが厚く、柱の基礎部分で十分な支持力が得られない可能性もある。より安定的な荷揚げ・荷降ろし機械として、ジャッキあるいはリフトのような機械も検討されている。

5. まとめ

各国の宇宙開発計画によれば、月で人が活動を開始することは必至であり、そのために必要な拠点の建設についても現実的な検討が始められている状況にある。月面での建設は、「きつい」一人の長時間活動、「汚い」一月面の細かいダストで汚れる、「危険」一ハザードな環境の俗にいう3K現場である。しかし、これ

らの作業要求を明確化し、適切な建設機械の開発を行うことによって、人はロボット（＝建設機械）と作業を分担し、これらの3Kを軽減・克服する事ができると考えられる。その結果として、効率的な月面都市の建設ならびに運用への道が大きく広がるものと期待される。

J C M A

《参考文献》

- 1) D. W. Reynolds : Apollo - The epic journey to the moon, Tehabi books (2002)
- 2) NHK「かくや」プロジェクト編：かくや月に挑む, 日本放送出版協会 (2008)
- 3) NASA : The Vision for Space Exploration (2004)
- 4) 米国の宇宙開発関連情報はNASA ホームページより, http://www.nasa.gov/mission_pages/exploration/main/index.html
- 5) 日本の宇宙開発関連情報は, JAXA ホームページより, <http://www.ispec.jaxa.jp/enterprise/moon.html>
- 6) 清水建設宇宙開発室編：宇宙に暮らす, 裳華房 (2002)
- 7) 清水建設宇宙開発室編：'月へ, ふたたび', テクノライフ選書, オーム社 (1999)

[筆者紹介]

金森 洋史 (かなもり ひろし)
清水建設(株) 技術研究所
宇宙・ロボットプロジェクトリーダー



建設の施工企画 2005年バックナンバー

平成 17 年 1 月号 (第 659 号) ～平成 17 年 12 月号 (第 670 号)

1 月号 (第 659 号) 建設未来特集	6 月号 (第 664 号) 建設施工の環境対策特集	10 月号 (第 668 号) 海外の建設施工特集
2 月号 (第 660 号) 建設ロボットと IT 技術特集	7 月号 (第 665 号) 建設施工の環境対策—大気環境特集	11 月号 (第 669 号) トンネル・シールド特集
3 月号 (第 661 号) 建設機械施工の安全対策特集	8 月号 (第 666 号) 解体・再生工法特集	12 月号 (第 670 号) 特殊条件下での建設施工機械特集
4 月号 (第 662 号) 建設機械施工の安全対策特集	9 月号 (第 667 号) 専門工事業・リースレンタル特集	■体裁 A4 判 ■定価 各 1 部 840 円 (本体 800 円) ■送料 100 円
5 月号 (第 663 号) 災害復旧・防災対策特集		

社団法人 日本建設機械化協会

〒 105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>