

# ロボットに関する専門家打合せ における検討結果

井上 博允、長谷川 義幸  
葉山 稔樹、広瀬 茂男

平成22年4月26日

## 月探査ロボットの検討のポイント

第4回懇談会における白井座長からの、「ロボットに関する論点についてロボットの専門家により検討を深める」という提案に対し、4名で検討を行ってきた。検討のポイントは以下の3つ。

### ① 科学探査や利用に必要な機能の実現

科学探査や利用に必要な機能要求(柔軟な機能の拡張性などへの対応含む)に対して、月の環境で使うための制約条件も踏まえ、今後想定される技術レベルの進捗度合いなどに照らして技術開発のシナリオを設定し、実現性を検討。

### ② 次世代ロボット技術の革新やロボット産業への波及への期待

地上の次世代ロボット技術の革新が期待できる具体的な技術とその有効性・重要性、将来のロボット産業への波及効果の大きさや、国民の安心・安全に直結するなどの重要性などについて、それぞれのロボットについて提案できる具体的内容を検討。

### ③ 日本らしさの発揮、国民の支持や共感を得られる工夫

探査を含めた月面活動において、日本らしいオリジナリティのあるロボットで実現すること、日本のロボット技術の高さを世界に示すこと、国民に夢や希望やチャレンジ精神を示すことなど、それぞれのロボットについて、専門家の視点から、日本らしさの発揮や国民の支持や共感を得られる工夫について検討。

なお、懇談会メンバー以外の、以下の4名のロボット専門家とのディスカッションも行い、それらも踏まえ検討結果をまとめた。

- ・大道武生 名城大学理工学部機械システム工学科教授 (元三菱重工業)
- ・高西淳夫 早稲田大学理工学術院教授 早稲田大学ヒューマノイド研究所所長
- ・田所諭 東北大学大学院情報科学研究科教授
- ・広瀬真人 (株)本田技術研究所上席研究員

## 月探査ロボット検討での基本的認識

- 月探査ロボットは、以下の点で極めて高度な技術を必要とする難易度の高いものであり、設計上、一切の妥協を排除したシステムとすることが必要不可欠。
  - 日本が初めて重力天体の表面移動探査を行うロボットであり、未経験なことが多い
  - 地上で実現できた技術をさらに宇宙用の環境に対応させるための開発に5年以上を要する
  - 放射線や温度環境が厳しいため、地上で使用している最先端の部品・材料がそのまま使えない可能性が高く、防護設計などを含めて、満たすべき機能を最大限最適化する必要がある
  - 長期間の夜間があり、電源に対する設計要求が厳しい
  - 費用も含めた輸送能力を考慮し、最大限小型、軽量であることが求められる
  - 一度月へ送り込んだら、一切の改修等のアクセスができない、また電波伝送遅れを考慮する必要があるため、高度に自律化したものが求められる
  - 地上では月の環境(例えば低重力)を完全に模擬した試験ができないため、不安定要素を極力排除する必要がある
  - 不整地での活動であり、詳細な地形や岩石の配置、地盤の状態などは事前に判らないため、ロバストな性能・構成が求められる
- 目的を確実に達成し、かつ限られたリソースの中で最大限の機能を発揮できるように、軽量・低コストで、かつ高い信頼性を有する効率の良いものとする必要がある。
- これらより、月探査用のロボット開発による技術革新や産業波及、国民の支持などについては、副次的な波及効果として考えるという立場で整理を行った。ただし、将来のロボット技術の革新も考えれば、技術革新のシンボルとしての先行的な開発も視野に入れるべきとの考え方もあり、そのような観点から、ヒューマノイドロボットに関する検討結果をまとめたものを資料1-1に示す。

## 科学探査や月の利用に必要となる機能の実現

- 月探査ロボットの実現性を考えるにあたって、ミッション要求から必要となる機能を、大きく自律移動機能(モビリティ)と操作機能(マニピュレーション)に分けて検討。
- マニピュレーションについては、センサ類なども含め地上の先端技術を宇宙用途にどのように取り入れるかという課題はあるものの、「きぼう」のロボットアームなどの実績を踏まえ、それを発展させることで実現は可能。
- 一方モビリティについては、月探査に要求される不整地での広範囲な移動能力を重視する必要があることを踏まえれば、ローバタイプのロボットが地上での技術成熟度も高く、最も実現性が高い。また、脚タイプ、特に二足歩行タイプのロボットについては、現時点では地上でも不整地を歩行できないなど月探査に向けた技術成熟度は高くないので、2020年頃までの実現を目指すためには、月環境のような不整地・砂地における歩行の実現性を早期に見極める必要がある。なお、今後の地上サービスロボット等での技術開発の進捗次第では、2020年以降、人との連携などが想定される場合には月探査への活用も考えられる。
- 想定される作業に対するロボットの制御については、月面である程度自律的な活動を可能とする必要があり、従来の宇宙用ロボットの知見に加え、地上の知能ロボット等の研究成果を積極的に取り込んで高度な制御および自律化の研究・開発を進める。



- 2015年頃のロボットについては、月探査を確実に実行するという観点でローバタイプのロボットで実施するのが妥当。
- 2020年頃のロボットについては、現時点では、技術の実現性や確実性の観点から、2015年頃のロボットの発展型であるローバタイプが有力。ただし、今後のロボットの技術開発の進展如何で、2015年頃を目処に2020年頃の月探査ロボットとして適用可能な最適な技術を選定するのが妥当。
- 2025年頃のロボットについては、それまでの月探査の成果や月探査ロボットの活動成果、地上のロボット技術の進捗などを踏まえ、最適な技術について検討・選定するのが妥当。

## ロボットの開発にかかる費用

- 月探査ロボットの環境は、地球周回衛星の環境と比較して大幅に厳しい環境であり、既存の宇宙用部品の性能保証範囲を逸脱した環境での使用となる部分も多いため、既存の宇宙用部品/要素の月面(模擬)環境での耐性評価が必要である。
- 地球周回衛星の環境と比較して大幅に厳しい環境であるため、専用の月面環境試験装置/設備が必要となる
- 地球周回衛星と比較して、試験項目も増えるため、プロジェクト開発費用も大幅に増加する。
- それぞれの月探査ロボットの実現にあたって、概ね以下のような費用が考えられる。
  - 概念設計検討、シナリオ検討
  - 新規部品/要素開発(開発、試験、評価)
  - 既存宇宙用部品/要素の月面耐環境性試験、評価
  - 月面環境試験用試験装置/設備の開発
  - 地上モデル製作、試験、評価(地上実証)
  - プロジェクト開発(搭載系/地上系の設計/解析、製作、試験、評価)
  - 運用(運用計画、運用実施、運用解析/評価)
- なお、民生用部品の活用においても新規部品/要素開発と同等の試験、評価が必要となる。

## 次世代ロボット技術の革新やロボット産業への波及

地上におけるロボットの技術革新があつて、世界をリードできる低コストと信頼性が両立した月探査ロボットの実現が可能となる。そのために、世界における競争が激化しつつあるロボット開発において民生利用でかつ平和利用分野における日本の技術革新を加速させ、この基盤にたつて、月探査の厳しい要求に応えられるステップ的な革新が更なるイノベーションを起こすことに繋がる。このことがロボット産業の競争力強化に資するものとなる点を整理した。

- 移動技術は、砂地まで含めた不整地での着実な移動を可能とし、農林業機械/ロボット、建設機械/ロボット、災害救援ロボットなどの屋外作業機械/ロボットの移動性能の向上に繋がる。
- 月面の高真空環境用の機構要素技術は、塵を嫌う半導体や液晶パネル製造技術に繋がる。
- レーザセンサ等を使ったセンシング技術は、地上民生技術では、ここ十年では実用ロボット等への適用は進まないが、月ロボットでの開発により、五年で小型のセンサで屋外での障害物や地形の着実な計測を可能とし、屋外作業機械/ロボットや自動車の安全性向上や高度な自動/自律化技術に繋がる。
- 月面の厳しい放射線環境に耐える耐放射線技術や高信頼性化技術は、原子炉ロボットなどの放射線環境で機能する機器の耐性を向上させるだけでなく、異常検知・誤り訂正技術として醸成され、各種の機械の信頼性向上に繋がる。
- また、これらに加えて、月面の宇宙機システムとして、電力、通信、熱制御、構造、ソフトウェア、操作系などを統合した上で低消費電力化を行う省エネ技術や、故障時に自己修復・自己回復可能とする高信頼性システム技術などは、より高度化、複雑化する各種の地上システムの発展に繋がる。

## 次世代ロボット技術の革新やロボット産業への波及

前ページに整理した技術の革新により、以下のようなロボットの実現を加速することが可能。

技術項目		技術内容	応用が想定される産業分野
表面移動	走行機構	不整地走行/登坂、 砂地走行	農林業機械/ロボット、建設機械/ロボット、 災害救援ロボット
	機構要素	真空潤滑・機構	半導体製造装置、表示パネル製造装置
操作制御	自動/遠隔制御	高度遠隔操作、 自動/自律制御	海洋探査ロボット、医療ロボット、 災害救援ロボット、ホームロボット
	センシング	地形計測、 物体認識/分析	農林業機械/ロボット、建設機械/ロボット、 災害救援ロボット、自動車
作業	マニピュレーション	組立/展開・結合・ 分析等の作業	農林業機械/ロボット、建設機械/ロボット、 災害救援ロボット、医療ロボット
	土壌ハンドリング	土木作業、掘削	農林業機械/ロボット、建設機械/ロボット、 災害救援ロボット
耐環境性	耐放射線性	電子部品、 異常検知/対処	原子炉ロボット
システム		ソフトウェア インテグレーション	各種の高度・複雑なシステム 各種の大規模システム

## 日本らしさの発揮、国民の支持や共感を得られる工夫

日本らしさの発揮、国民の支持という点についても副次的な波及効果であるが、以下の点が日本としての特色としてあげられる。

### <日本らしさ>

日本らしさという点では、優れた民生技術の活用や適材適所での高い品質と信頼性などが特色として挙げられるほか、ロボットの手などの部分の工夫やツールチェンジャの適用などの実作業への適用技術やコンパクトな中に多機能性や汎用性を盛り込む技術なども日本らしさと言える。また、ヒューマノイドロボットも日本が先行した特徴的な技術の一つである。

### <国民の支持>

国民の支持の観点では、例えば、ロボットの活動の映像を地上に伝送することによる臨場感の形成やロボット等の一部の操作を地上の子供達が体験できるような機能を併せ持つことで理科教育に活用するなどの工夫が考えられる。また、ロボットの名前を広く国民から募集するなど、キャラクター化することも国民の関心を高める一定の効果があると考えられる。

## (参考) 外部の専門家からのご意見(1/2)

現在検討中の内容を紹介し、どのようなロボットを目指すべきか、以下の観点などから外部の専門家からご意見をいただいた。

- ① 技術の実現性の観点
- ② 次世代ロボット技術の革新やロボット産業への波及の観点
- ③ 諸外国との競争、日本の特色といった観点
- ④ 実施する場合の研究開発体制の観点
- ⑤ 極限環境である月探査のロボット開発に期待すること

- 主な意見は以下の表(～次頁)に示すとおり。

表 外部の専門家からの主な意見(1/2)

### ○技術の実現性、目指すべき月探査ロボット

- 技術は覚悟すれば達成は可能である。何を目的にするかを明確にすべき
- 科学探査/調査をメインに考えるなら重点化、最適化してやり切り型で考えるべき
- 必須の部分と失敗しても良い部分を分けて取組むべき。一台で色んなことをやるのは無理がある。ミスしても致命傷にならないという発想での取組が必要
- 次フェーズの開発へ向け2015年の段階で何を判断するのか判断基準を明確にしておくべき
- 可変・成長し、多機能なものを目指すべき 単機能のロボットでは発展性なし
- ロボットとしては人が行けないところへ行ってサンプリングして帰ってくるのは特色
- 作業は多種多様なので、ツールチェンジャーなどの構造が必要

## (参考) 外部の専門家からのご意見(2/2)

表 外部の専門家からの主な意見(2/2)

### ○技術革新、産業波及、月探査ロボットへの期待

- 日本がリーダーシップを取って提案し、世界をあっという間に驚かせるチャレンジを掲げて実現して初めて日本は世界から認められる
- 出来そうもないことを目指すことで、革新や波及がある。イノベーションはシーズから出てくるものではない。出来る出来ないよりも、どうやって実現して行くかを考えることが大事ではないか。
- クリーンエネルギーの観点で今後原子力は必須となるが、その環境で作業できるロボット開発への波及効果が高い。原子力発電所でのロボット作業との関連は、盛り込んでいくべき
- 技術的にはフィールドロボティクスとの共通性が高い
- 災害救助ロボットとして有用なものは、月探査で要求されるものと共通性が高い
- 通常宇宙は特殊で、地上への波及効果は望めないが、屋外環境での計測やマニピュレーション機能の実現などは波及効果が大きいと考えられる。また、挑戦的目標のロボット(超軽量, 超省エネルギー運転等)の技術は地上の環境問題の改善に大きく寄与する。

### ○ヒューマノイドロボットについて

- ロングレンジで考えるならヒューマノイドが良いと思う。今の日本の技術をもってすればヒューマノイドで実現可能。何故出来ないかと言えば、体制が作れないからではないか。寄せ集めの体制ではなく国がしっかりトップダウンで責任を持って決めて行けば実現は可能。
- 世界で4番目に宇宙に人を送るよりも、シンボリックなヒューマノイドを宇宙に送ることは価値が高いのではないか。人型ロボットは地上で活動させるイメージが強いが、重力の小さな月や宇宙の方が解決し易い点もある
- 有人を視野にいれるかどうかでヒューマノイドの意味が全く変わってくる。ヒューマノイドの月での必要性を訴えるのは難しいが、2025年以降で人が行く場合には、有人支援や事前の安全検証用のロボットとしてはありうる
- ヒューマノイドの実現は5年では無理。ロングレンジに研究できる理由を積上げて、ローバタイプで出来ていることと同レベルまでいった時点で初めてヒューマノイドを送り込もうと考えるべき
- ロングレンジで議論する場合でも、ヒューマノイドの長期スパンにおける技術の波及をしっかりと考えないと理解を得ることは難しい

## (参考) ロボット月探査におけるロボットの想定作業(1/2)

### 月探査ロボット(2020年～)の想定作業(主要タスク項目)

- 移動:                    — 移動、計測、探索
  
- 採取・掘削・調査:      — 岩石の表面研削／分割／粉碎、分光計等での観察  
                              — 採取、サンプル装填(回収カプセル・分析装置)  
                              — 地盤調査ツールでの調査  
                              — 掘削、コアサンプル採取
  
- 土木作業:               — 整地(ブレード)、溝／穴掘り、砂掛け(バケット)、
  
- ハンドリング・設置:   — 着陸機からの大質量物荷降し作業支援  
                              — 大質量物運搬／牽引／設置、展開支援、アンカリング
  
- 組立・配線・点検:      — ケーブル敷設、コネクタ接続  
                              — 装置の組立、点検

## (参考) ロボット月探査におけるロボットの想定作業(2/2)

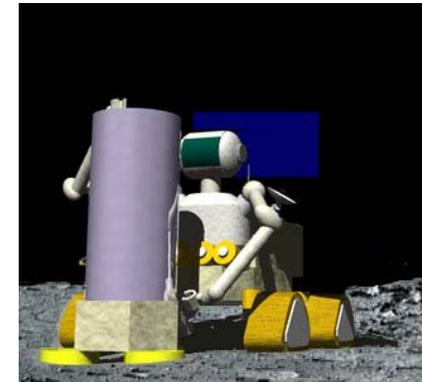
### 2015～2025頃の月探査ロボットへの技術的基本機能要求

ミッション基本要素	2015年頃: 10日間 2020年頃: 日照期間の数ヶ月間 2020年以降: 夜を含む数ヶ月間以上 の活動を可能とする			
大項目	詳細項目	2015	2020	2020～
移動・運搬機能	砂地・不整地走行	1km	100km	1000km
	ハンドリング・運搬	5kg	50kg	50kg
	遠隔操作	○	○(高度化)	○(高度化)
	地形計測・位置同定	○	○(高速化)	○(高速化)
	自動経路生成・自律化	○	○(高速化)	○(高速化)
調査作業機能	岩石研削・観察	○	○	○
	岩石採取・装填		○	○
	深部掘削		2m	10m
設置・組立作業機能	土木作業(整地等)		○	○
	機器設置	○	○(複数の機器間の接続)	○(複数の機器間の接続)
	組立・点検		○	○
有人支援機能実証	有人兼用インタフェース操作		○	○

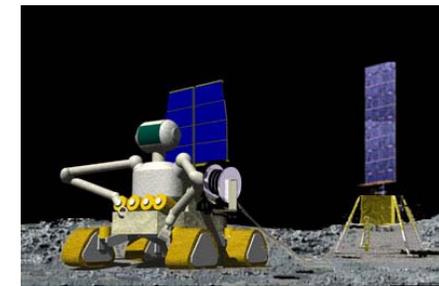
## (参考)月面拠点ロボット(2020年~)の想定性能・構成

表 主要性能諸元

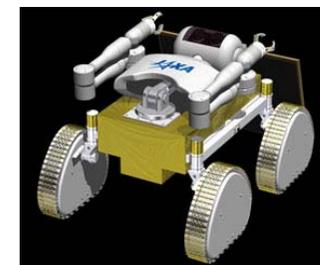
項目		性能	構成・方式
基本	質量	300kg	充電機ユニット:60kg含む
	消費電力	500W	平均、 旋回式太陽電池パドル
	サイズ	1.5×2m	
	通信	2Mbps以上	
表面移動	走行距離	100km以上	低圧走行機構 (弾性クローラ四駆)
	最大速度	30cm/s以上	
	最大斜度	25deg以上	
	可搬質量	100kg以上	
作業	アーム長	2m×双腕	・7自由度双腕アーム ・ツールチェンジャ
	可搬質量	30kg以上	
操作・制御	遠隔操作	・高度遠隔操作 ・自律制御	・障害物検知/回避 ・自動経路生成
	自律制御		
	アーム制御	・力制御、画像F/B制御、双腕協調制御	
	カメラ	高精細、ステレオ、広角、ハンドアイ	
耐環境		南極周辺活動	エネルギー供給システム接続+ 断熱テントによる越夜



図a 観測装置設置作業



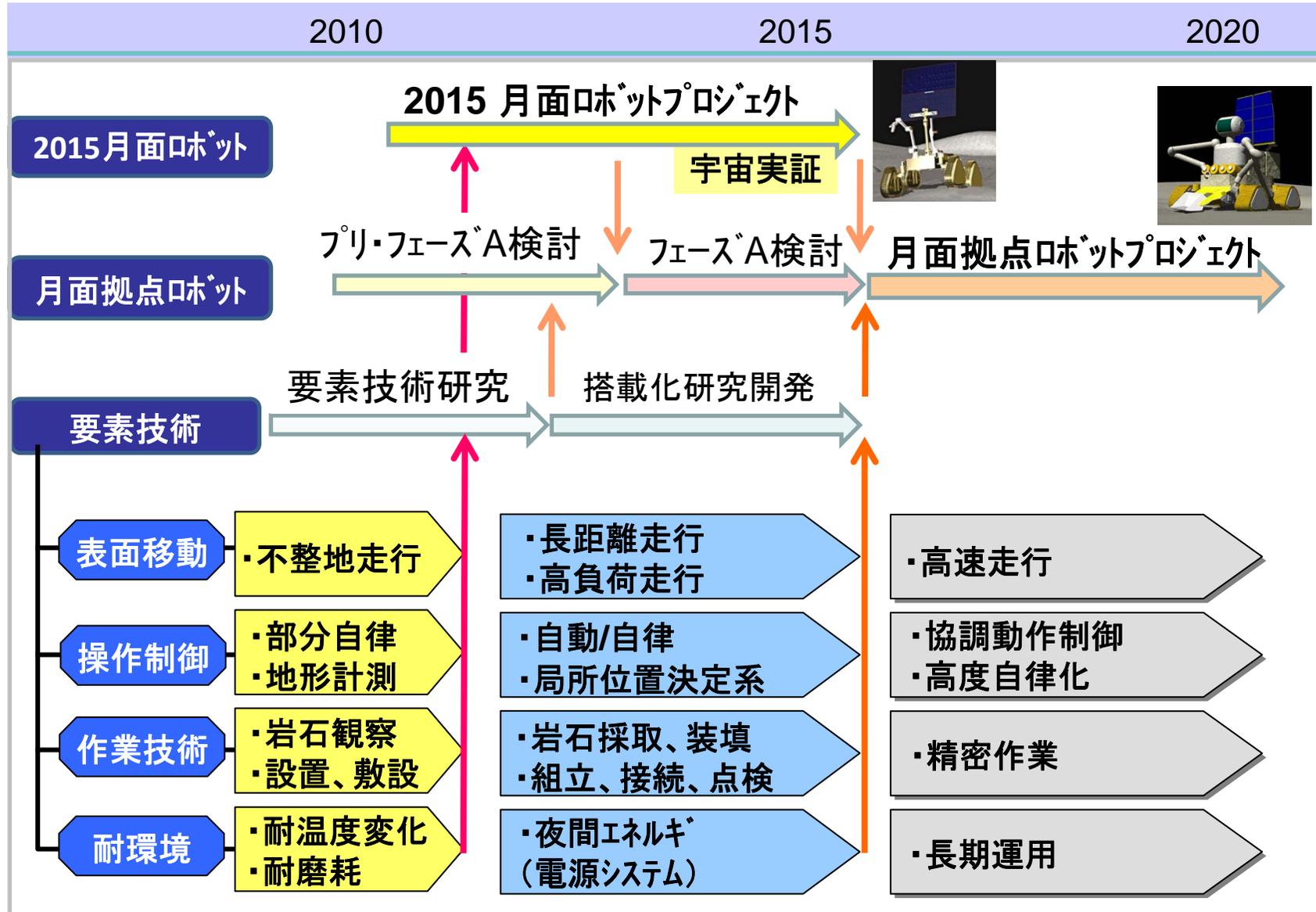
図b ケーブル敷設作業



図c 収納姿勢

(参考) 月面拠点ロボット(2020~)の開発計画(案)

- 基本となる技術要素は、2015年頃の月探査に於いて宇宙実証する。



## (参考) ロボット月探査におけるロボットの技術課題

熱環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大気がないため、昼夜の温度差が激しい</li> <li>・ 赤道域の表面温度は120℃～-170℃、極域では-40℃～-60℃</li> <li>・ 昼間は放熱、夜間は保温が課題</li> </ul>
日照	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 極域では影の領域が多い(影の領域を含めて地形計測が必要)</li> <li>・ 中低緯度では夜が長い(2週間)</li> </ul>
放射線	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大気も磁場も無いため、強い宇宙放射線環境。最先端の電子部品は故障を起こすため使用できない</li> <li>・ 月面の宇宙放射線は100～500mSv/年と推定(地球上では、2.4mSv/年)</li> </ul>
高真空	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 昼間は <math>10^{-7}</math> Pa (<math>10^{-9}</math> Torr)、夜間は <math>10^{-10}</math> Pa (<math>10^{-12}</math> Torr)</li> <li>・ 放熱対策や固体潤滑が必要</li> </ul>
地形・表土	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ クレータ中央丘、基地候補地は、いずれも山岳地帯(平均斜度15度、最大斜度30度程度)。岩石も多い</li> <li>・ 月面は細かい砂(レゴリス)で覆われた不整地(レゴリスが数m～数十m積もっている)であり、砂で滑ったり埋もれたりしてスタックを生じやすい</li> <li>・ レゴリスは数十ミクロンの微粒子が多く、機構部への侵入、磨耗も課題</li> <li>・ 不整地走行、登坂走行能力が必要</li> <li>・ 地形計測、マッピング、自動経路生成や岩石などの障害物の検知も必要</li> </ul>
通信伝送時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地球から往復3秒程度。ある程度の自律化が必要</li> </ul>
重力	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1/6重力の環境下。軽量プラットフォームでは反力の確保が課題</li> </ul>
小型・軽量化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 打上げリソースなどの制約や観測装置などのミッション機器へリソースを極力多く配分するため、小型・軽量化が望まれる</li> </ul>
耐振動・耐衝撃	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ロケットによる打上げ、着陸による振動、衝撃環境への耐性。</li> </ul>