

【レビュー】

サーマルマイニングによる月面水採取 (第一報) レゴリス内の伝熱解析と水採取方法の検討

内田浩基・川上理亮・松風成美^{*1}・森田健^{*1}

Thermal Mining of Water on Lunar Regolith Part 1 - Thermal Analysis of Regolith and Examination of Lunar Water Mining Method

Hiroki Uchida・Yoshiaki Kawakami・Narumi Matsukaze・Ken Morita

近い将来、人類は月近傍や月面に生存圏を拡大し、月と地球が一体となった新たな経済システムが実現すると予想される。当社は、株式会社 ispace とコーポレートパートナー契約を結び、民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」にて、月面着陸船に搭載した水電解装置により世界で初めて月面環境下で水から水素と酸素を作り出すことを目指している。近年の観測によれば月面の土砂（Regolith、以下レゴリス）中には水が存在することが明らかになっており、将来は、月面での水電解には月のレゴリスから採取した水を使用する予定である。そこで当社はレゴリスから水を直接採取する「サーマルマイニング」技術の新規開発に取り組んでいる。

月面レゴリスからの水採取の実現に至るまでには、月面上で水（氷）の存在が有望視される地域での地質学的調査や水氷の正確な位置、含有量、範囲などを確定するための分析など、いくつかのステップが必要になると考えられる。本報では、これらのステップを経た後、月の水資源を実際に採取することを考えながら、水氷の状態を予想するとともに、世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取できるサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考察した。更に、月の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、レゴリスを効率よく加熱する方法について検討したので報告する。

1. はじめに

有史以来、人類は新たなフロンティアを開拓することで、生存圏や経済圏を拡大してきた。近い将来、人類は月近傍や月面にも生存圏を拡大し、月と地球が一体となった新たな経済システムが実現すると予想される。世界各国の政府や先駆的な民間企業はこの機運をすでに捉えはじめている。我が国では、米国が推進するアルテミス計画¹⁾への参画を決定し、欧州やカナダなどと共に月面開発の基本設計を開始した。またアルテミス計画に参画しない国々でも独自に月面探査計画を立ち上げるなど開発・検討が進められている²⁾。

当社が宇宙関連の技術開発を行う目的は、①宇宙事業開発のパートナーシップの強化、②宇宙事業開発の成果を応用した地上向けビジネスの展開、③当社本業の成長に向けた知見獲得などである³⁾。宇宙産業に無縁である当社が宇宙関連の技術開発をはじめるとは業界に精通したパートナーが必要であった⁴⁾。そこで宇宙産業に精通し世界的に知名度が高いスタートアップ企業である株式会社 ispace（アイスペース）を協業先として選定しコーポレートパートナー契約を締結した³⁾。ispace 社への出資を通じて事業パートナー関係を構築するとともに、同社と繋がる海外の宇宙開発機関や企業と連携し、宇宙関連の事業創出機会を獲得していく計画である。ispace 社は HAKUTO-R⁵⁾

*1 本社 経営企画部

と呼ばれる日本初の民間月面探査プログラムを推進しており、独自の月着陸船「ランダー」と月面探査車「ローバー」を開発し2022年の月面着陸（Mission 1）と2023年の月面探査（Mission 2）を目指している。我々はHAKUTO-RプログラムのMission 2にて、当社が開発する月面環境下での作動信頼性を高めた水電解装置により月面で世界初となる水素と酸素の生成を目指す。

HAKUTO-Rプログラムでランダーに搭載する水電解装置は、水から酸素と水素を生成する装置である。将来、月面で水電解により生成した水素はロケットの推進燃料として使用でき、酸素は空気がない月面で人間が生存する上で欠かせない元素である。月面水電解において電気エネルギーと水は必須であり、このうち電気エネルギーに関しては、月面の太陽光が当たる場所にソーラーパネルを設置して発電することや将来的には月面での原子力発電が考えられている⁷⁾。一方の水に関しては、近年の月軌道衛星や地上レーダーからの観察により月面には水が存在することが明らかになっており、月面のレゴリスから直接採取できると考えられている。月面レゴリスから水資源を採取する方法として、地上と同様に重機を使って機械的に採掘する技術⁸⁾や太陽光により月面レゴリスを直接加熱して水を取り出す「サーマルマイニング」技術が考えられている⁹⁾。

これらの取り組みに関連し、当社は政学産連携のワーキンググループ「月面産業ビジョン協議会」のメンバーとして2021年7月に月面ビジネスのエコシステム構築に向けた「月面産業ビジョン ～Planet 6.0時代に向けて～」を共同で取りまとめ日本政府に提出した⁶⁾。また新たなチャレンジとして、月面に存在する水資源を当社の熱マネジメント技術を応用して採取する「サーマルマイニング」技術の開発、および採取した水資源をエネルギー利用するための「月面エコシステム」の構築に向けた検討を開始している⁶⁾。

本報告では、近い将来に月面の水資源を実際に採取することを目的として、想定される月面の水の状態を予想するとともに、現在世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取を行うサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考案した。更に、月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、サーマルマイニングによる月面水採取においてレゴリスを効率よく加熱できる方法について検討した。

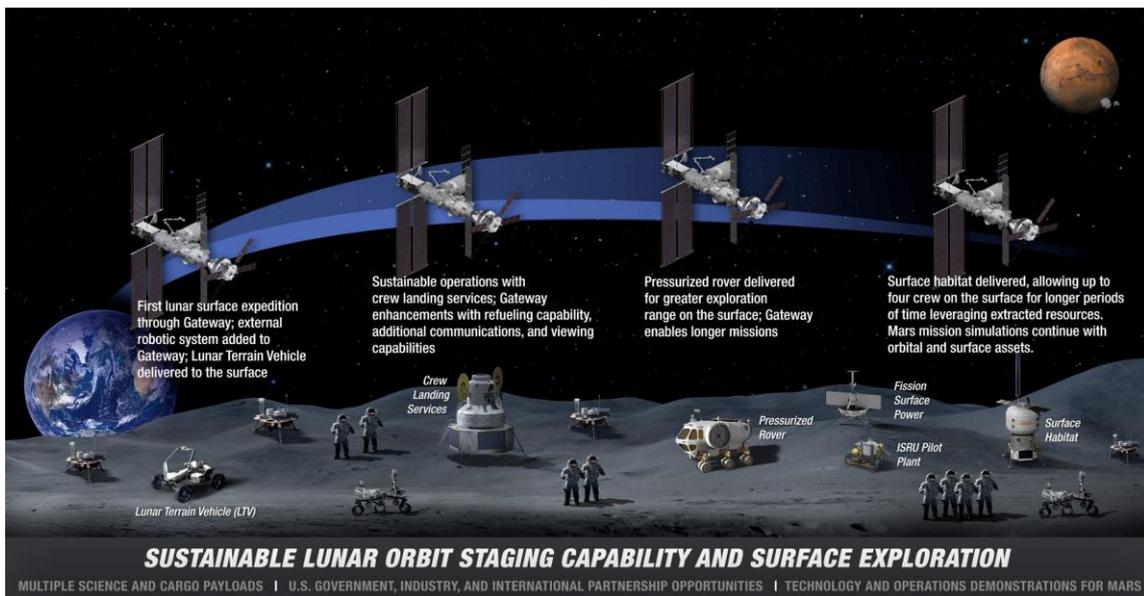


図1 米国アルテミス計画(拠点活動要素)¹⁾

2. 月面水資源の存在の可能性について

2.1 アポロ計画で持ち帰った月面サンプル¹⁰⁾

1961～1972 年にかけて行われた米国アポロ計画において、アポロ 11 号, 12 号, 14～17 号の計六回で、合計 381.7 kg のサンプルが持ち帰られた (表 1)。また月の表面に露出しているサンプルだけでなく、アポロ 15～17 号では筒状ドリルにより月表面から 2.21～2.92 m の深さの位置のサンプルも持ち帰られた。サンプルを取得した緯度は 0～26° と赤道付近であり、極地に近い緯度のサンプルは持ち帰られなかった (図 2)。

これらの米国アポロ計画で、地上に持ち帰られた月面サンプルからは明確な水の痕跡は見つからなかった。サンプル中から検出されたわずかな水の痕跡は地球上で汚染された結果だと結論付けられた。このため、一般には月の表面の大部分は完全に乾燥していると考えられた¹¹⁾。

表 1 米国アポロ計画で持ち帰られた月面サンプル¹⁰⁾

	Apollo 11	Apollo 12	Apollo 14	Apollo 15	Apollo 16	Apollo 17	Total
サンプル数	58	69	227	370	731	741	2196
サンプル重さ	21.6 kg	34.3 kg	42.3 kg	77.3 kg	95.7 kg	110.5 kg	381.7 kg
採取地名	静かの海 (Mare Tranquillitatis)	嵐の大洋 (Oceanus Procellarum)	フラ・マウロ・ク レーター (Fra Mauro)	ハドリー・アペニン (Hadley-Apennine)	デカルト高地 (Descartes Highlands)	タウルス・リットロ ウ (Taurus Littrow)	---
緯度	0.67408°N	3.01239°S	3.42°S	26.1322°N	8.97301°S	20.1908°N	---
月面地表か らの最大深さ	---	---	---	237 cm	221 cm	292 cm	---

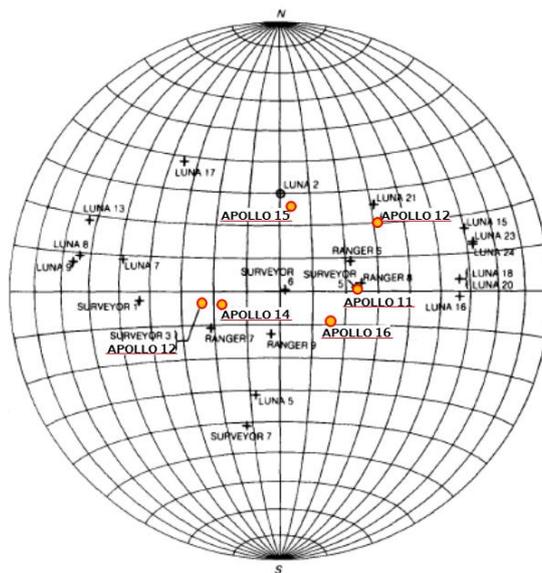


図 2 米国アポロ計画で持ち帰られた月面サンプル採取場所¹⁰⁾

2.2 月周回軌道からの月面レゴリスの分析^{12), 13)}

1972 年までの米国アポロ計画では、月面における水の存在は確認されなかったが、近年になって月軌道周回衛星や月面探査機などにより、極地付近の永久影 (永続的に太陽光が当たらない日陰の領域) に水が存在する可能性が高い証拠が見つかった。インド宇宙研究機関 (ISRO : Indian Space Research Organisation) の「チャンドラヤーン 1 号」ミッションにおいては、NASA の月面鉱物マッピング装置 (Moon Mineralogy Mapper: M(3)) を用いて、高い山やクレーター壁面で乱反射し永久影に到達する太陽光の近赤外線を検出した三色合成により、世界ではじめて地球に面する月の側面全体に各種物質のマッピングが行われ、さまざまな場所で少量の水とヒドロキシル分子 (図 3 の青色) を検出した¹²⁾。また M(3) で水氷が検出された領域について、米国の月周回無人衛星 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) に

搭載された LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) による月表面の反射率測定、DLRE (Diviner Lunar Radiometer Experiment) による年間の月地表最高温度分布、および LAMP (Lyman-Alpha Mapping Project) による紫外線検出マッピングなどの結果が比較・分析され、水氷が存在する可能性が高い位置 (緑シアン色の部分) の分布図 (図 4) が作成された^{13,14)}。

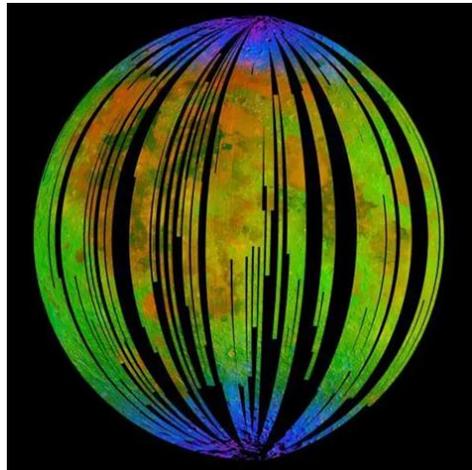


図 3 インド「チャンドラヤーン 1 号」ミッションにおける月側面の鉱物マッピング¹²⁾

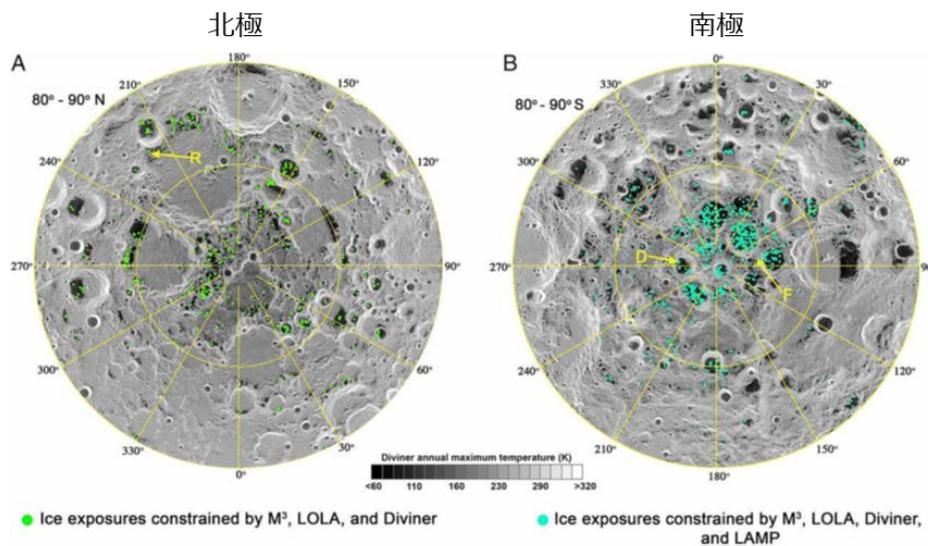


図 4 米国「LRO」搭載機器の測定結果による月極地付近の水氷分布¹³⁾

2.3 航空機からの月面分析結果¹⁵⁾

NASA の成層圏赤外線天文機 (SOFIA) は、永久影以外の太陽があたる月の表面で水を初めて確認した。水が月面全体に分布している可能性があり、低温の永久影に限定されないことを示した。今回の観測では、一立方メートルの月面レゴリスに 100~412ppm の濃度の水 (350mL ボトルの飲料水相当) が存在している可能性があることがわかった。

過去の米国「LRO」やインド「チャンドラヤーン 1 号」の分析結果では、月面の水素 (H) は、水 (H_2O) の状態で存在するか、水酸化物 (OH) の状態で存在するか、いずれかであるが判別が困難であった。今回、SOFIA の調査結果から、一地域 (クラビウスクレーター) のレゴリスではあるが、月面の水素が水の状態であるとの分析結果から、

極地の水素も水 H₂O の状態で存在する可能性が高まったと考えられる。

月面レゴリス内の水氷の存在の形態に関しては、① 微小隕石衝突時の高熱によって水がレゴリス内に閉じ込められているカプセル状態、② レゴリス粒子間の空隙に挟まれ太陽光が届かず低温に保たれ昇華していない状態の二通りが考えられている¹⁵⁾。アポロの調査結果では、北緯 20°の月面下 2.9 m の深さのレゴリスを持ち帰っているが、水の痕跡がほとんど見られなかった。もし、水氷がレゴリス内にカプセル状態で閉じ込められているのであれば、アポロ計画で地中から持ち帰ったサンプルに関しても、レゴリス内にカプセル状態で閉じ込められた水氷の痕跡は残ると考えられる。アポロ計画でのサンプル取得方法はオーガードリル（筒状ドリル）でサンプルを収集する方法であり、ドリルの回転により多くの摩擦熱が発生したと記載されている¹⁰⁾。レゴリス表面に水氷が付着している状態の場合はオーガードリルの摩擦熱により水氷は昇華するため、サンプルから水氷の痕跡を見つけるのは難しいのではと考えられる。



図 5 成層圏を飛行する航空機に搭載された赤外線天文台「SOFIA」による月面観測¹⁵⁾

2.4 月面の水資源の状態について

月面において、多量の水が存在すると考えられている主な領域は、月の北極や南極にあるクレーター内など、永続的に太陽光が当たらない日陰の領域であり、永久影、または PSR (Permanently Shadowed Regions) と呼ばれている。永久影内は、月面の年間の最高温度が 110 K 未満と非常に低い温度に保たれており、かつ大気が存在しない真空状態 (10^{-7} ~ 10^{-10} Pa) である。月面の水は真空下の氷の状態が存在しており、飽和水蒸気圧がほぼゼロの昇華温度以下の氷の状態と考えられる。アポロ計画で水 (氷) の痕跡が見つからなかった原因の一つとして、月面レゴリスのサンプル採取が永久影内で行われなかったためと考えられる。

水が存在する場合の月面レゴリスは氷とソイル (Soil) が混じり合った状態と考えられるが、ソイルに氷が付着しているか、ソイルの中に氷がカプセル状に取り込まれているか、或いはソイルと氷の粒が入り混じった状態であるかは明らかになっていない¹⁵⁾。レゴリス中の水氷の存在量に関しては、月面に水は存在する可能性はない、又はあっても数%程度¹⁶⁻¹⁸⁾といった観測結果の分析から 5~10wt%^{19, 20)}、或いは 20~30 wt%^{21, 22)}の水氷が存在する証拠について考察した文献もあり様々である。直近の報告²²⁾では、スペクトルデータの詳細な分析結果から走査範囲の一部において約 30wt%の氷を含む可能性が示されたように、比較的豊富な量の水氷が存在するという議論が多いように見受けられる。しかし、これらの水資源が存在する (或いは存在しないとする) 証拠はいずれも月軌道衛星や地上からの遠隔

的な観測であり、月面において直接的な現地調査は行われていない。未だ月面上で水が存在する位置や存在量、範囲や堆積物の分布、形態、組成などの詳細は十分に明らかになっておらず、月面水採取に至る次のステップとしては、水の存在が有望視される地域での地質学的調査と考えられる。

3. 月面の水採取方法

月面の水採取は、前章の月面における地質学的調査が行われ水が確実に存在する地域が判明したのち行われると考えられる。当社独自の伝熱技術や熱エネルギー利用技術を活用した月面水採取も水の存在が確実に視される地域において可能となる。月面水資源の採掘方法として、地上と同様に、月面レゴリスを機械採掘・運搬した後、プラントで水を抽出する方法が考えられている(図6)⁸⁾。この場合、極低温、真空、低重力で作動する重機やプラントが必要となる。月面は重力が地上の1/6と小さいため、機械採掘時に微細なガラス状レゴリスが中空にとどまりやすく、重機の作動部に粉塵が入り込み、動作不良を引き起こす問題なども考えられ、解決すべき課題が多い。またこれらの機械採掘用の重機は地上から大型ロケットにより月面に持ち込む必要があるため、長期的に採掘システムの構築や展開を行っていく必要があり、メンテナンスにかかるコストが大きい。

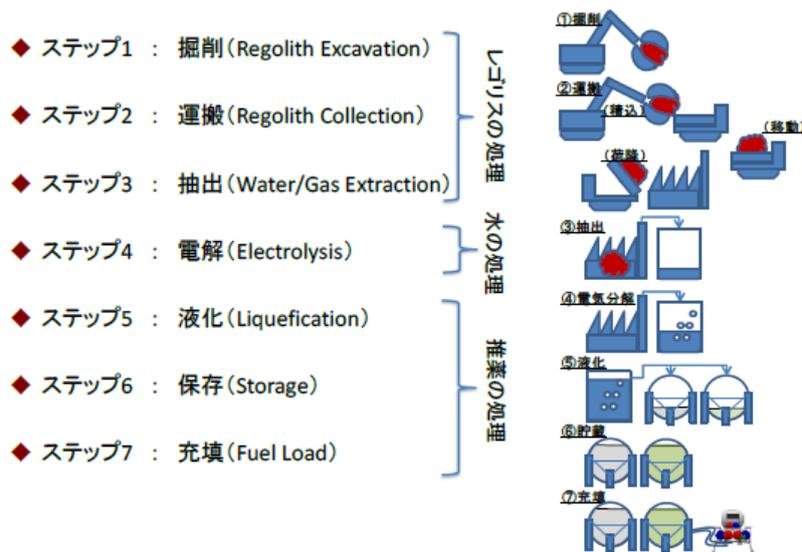


図6 月面の水利用プロセス(JAXA)⁸⁾

月面レゴリスを機械的に掘り返すなどの採掘を行わず、レゴリスに直接熱を加えて水採取を行う「サーマルマイニング」は、採掘システム全体の簡略化、軽量化が可能であり、多くの重機を稼働させる必要がないため、コスト低減や信頼性、保守性を向上できる可能性が高い⁹⁾。

「サーマルマイニング」の考え方による月面水採取方法の検討は、コロラド鉱山大学(米国)⁹⁾が行っている(図7)。この方法は、月面に直接太陽光を照射し、太陽光の熱により月面を加熱する方法であり、図7の装置例では浅く入射する太陽光を反射ミラーで向きを変えて月面レゴリス上に直接照射している。月の極地付近の大きなクレーター内の永久影は更に太陽光が届きにくいいため、クレーター外縁部にも反射ミラーを設けて水採取を行う位置に太陽光を送り届ける必要がある。太陽光で加熱する月面はドーム状のテントで覆うことで、レゴリス中の氷が昇華して発生した水蒸気が真空中に放散しないようにする。太陽光の加熱によりレゴリスから発生しテント内を満たした水蒸気は、テント側面に設置したコールドトラップで収集される仕組みである。この方法により月面の広い面積のレゴリス中から水資源を採取できれば、図6のように多くの採掘用重機を用いることがないためより低コストな月面水資源の採取が可能となる。

一方、この方法の問題点として、月の地表表面から深い位置に存在する水を採取できないことが挙げられる。月面レゴリス表面に太陽光の熱を照射した場合、最表面から昇温し表面レゴリスにある氷が昇華するため、最表面のレゴリスから乾燥していくと考えられる。月表面の乾燥したレゴリスの熱伝導率は $7 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ ²³⁾ と非常に小さくほとんど断熱である。このため一旦レゴリスの表面が乾くと太陽光により表面を加熱してもレゴリスの深さ方向に熱がほとんど伝わらず、深い位置にある氷を加熱して水を採取することができない。

図8にコロラド鉱山大学において行われた模擬の月面レゴリスを加熱して、水蒸気を採取する実験の様子を示す。この実験は月面同様の真空状態に保たれたチャンバー内で行われ、氷と混合した模擬レゴリスは液体窒素により 100 K (-173 °C) 以下に冷却されている。太陽光を模したハロゲンランプで氷を混合した模擬レゴリスの表面を 20 時間加熱した結果、表面から 1~1.5 cm の厚さのレゴリスは氷が昇華し乾燥したが、それよりも深い位置の氷は昇華せず水の採取はできていない⁹⁾。

月面レゴリスに氷として存在する水資源はレゴリスの最表面だけに存在するのではなく、隕石衝突により月表面が掘り返されていることから地表面から深い部分にも存在する可能性も考えられている。同一の地表面積からより多くの水資源を採取するためには、レゴリスの深い位置に氷として存在する水資源を何らかの方法で加熱して効率よく採取していく必要があると考えられる。

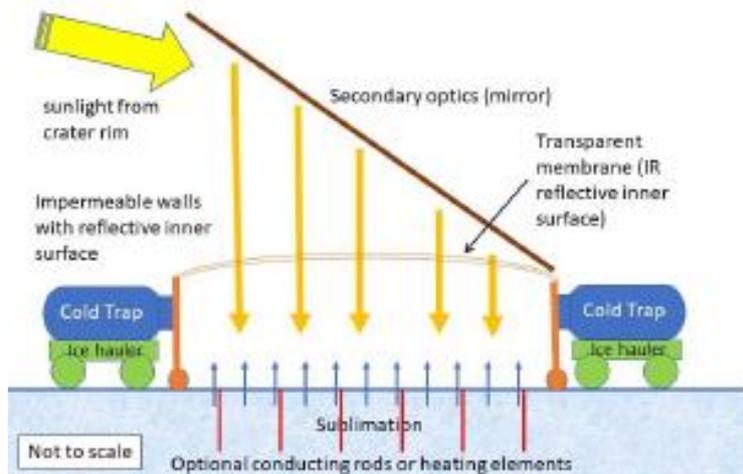


図7 コロラド鉱山大学の「サーマルマイニング」⁹⁾

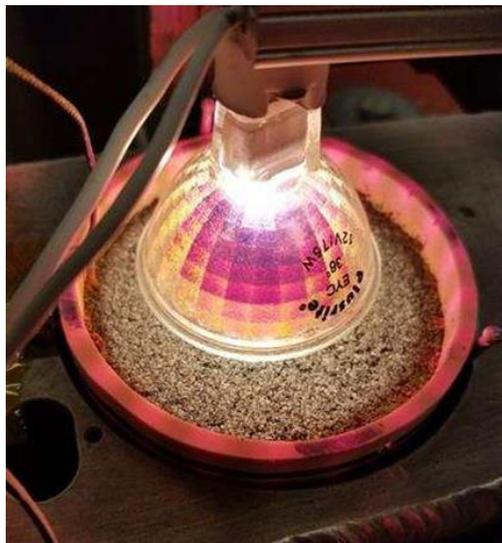


図8 模擬月面レゴリスの加熱・水採取実験(コロラド鉱山大学)⁹⁾

4. 新規サーマルマイニング方法の提案

4.1 レゴリス内のソイルの加熱方法

サーマルマイニングによる月面水採取においては、水氷が含まれるレゴリスを平面方向、及び深さ方向に広い範囲を効率よく加熱する必要がある。しかし、レゴリス内のソイル間は真空であることから、レゴリス内の伝熱はソイル固体内の熱伝導とソイル間の接触のみのため、月面レゴリスの熱伝導率は $7 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ (表層から深い位置、水氷を含まない状態)²³⁾と空気の熱伝導率 $26.2 \times 10^{-3} \text{ W/m/K}$ (@300 K, 0.1 MPa)²⁴⁾の 1/4 程度とほぼ断熱である。このため、広い範囲の月面レゴリスを熱伝導だけで加熱することは難しいと考えられる。そこで月面レゴリスを効率よく加熱する方法として、レゴリス内に水蒸気や窒素、或いは月面で水電解により調達可能な水素や酸素などのガスを注入して循環させ、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱により加熱する方法を考えた。月面レゴリスは、乾燥レゴリスのかさ密度^{23,25)}とソイルの比重¹⁰⁾から空隙率が 0.4 程度の多孔質体と考えられるため、ソイル間の空隙に気体を流通させることができると予想している。しかし、月面レゴリスの内部においてもソイル以外の空隙は真空であるから、気体を注入しても拡散・消失すると予測される。レゴリス内部に気体を流通・循環させるためには、気体を閉じ込める“容器”をレゴリス内に形成する必要がある。レゴリス内に気体を閉じ込める容器として、以下のような方法で氷の壁をレゴリス内に作製することを考えている。

4.2 氷の壁の作製方法

図9に月面レゴリス内部に氷の壁を作成する方法を示す。レゴリス地表面からある程度深い位置までドリルで穴を開け、例えば電気ヒーターを穴の中のレゴリス壁面に押し付け熱伝導により加熱する。ヒーターに接触する部分を起点にして狭い範囲のレゴリス中の氷は加熱され昇華し水蒸気になると考えられる。発生した水蒸気は、飽和水蒸気圧が低い低温側、すなわちヒーターから離れる方向に向かって移動するはずである。ヒーターから離れた位置のレゴリスは温度が低いため、水蒸気は低温のソイル表面に接触し、ソイル間の空隙内で再び凝縮・凝固すると考えられる。この予想と同じ現象はコロラド鉱山大学の実験でみられた⁹⁾。この実験結果によれば、赤外線により加熱されるレゴリス表面から 1~1.5 cm の範囲の氷は昇華して乾燥した層が現れる。この乾燥層の下は氷レンズ (ice lense) と呼ばれる初期の氷含有率よりも高い氷リッチな層であり、乾燥層の水蒸気が移動して凝縮・凝固したと考えられる。コロラド鉱山大学の実験と同様に、レゴリス内部を電気ヒーターを接触させて加熱することで、電気ヒーター表面から少し離れた位置に氷リッチな層が作成できると考えている。更に、この層の内側を水蒸気の供給による凝縮・凝固や対流熱伝達により加熱することで氷リッチな層の気密性を高め、内部に気体を留め置くことが可能な氷の壁を作製できると予想している。

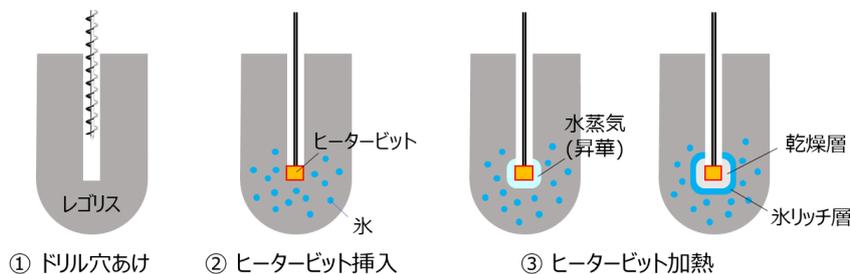


図9 月面レゴリス内部の水壁形成方法の例

4.3 新規サーマルマイニング装置の概要

月面レゴリス内部の水採取を行う新規サーマルマイニング装置の概要を図10に示す。前節の方法で形成したレゴリス内の氷壁の中心部に乾燥気体を送り込む注入ノズルと高湿気体を還流させる抽出ノズルを差し込んで使用する。

月面レゴリス内に氷の壁に囲まれた空間（球ではないかもしれないが、ここでは氷球と呼ぶ）が形成できれば、氷球内部を氷球外部の真空低温の空間から切り離して水採取が容易にできるのではと予想している。氷球内部のソイル間の空隙を（ソイルに対して反応しにくい）不活性な気体で満たすことで、熱伝導のみの熱拡散によらず、対流熱伝達による熱拡散が可能となり、より広範囲のレゴリスを容易に加熱できると考えている。熱を拡散する媒体としては、水蒸気や窒素、或いは月面水電解で容易に入手可能な水素や酸素などの気体を考えているが、いずれのガスも低圧力・低密度の場合は希薄気体であり、熱輸送の効率が低下するため、できるだけ高圧・高密度である気体を熱媒体としたい。ソイルの平均粒径 $D_p = 30 \text{ mm}$ である粒子充填層の多孔質体を飽和水蒸気が通過する場合、 $263 \text{ K} (-10^\circ\text{C})$ 以上の飽和蒸気圧であればクヌーセン数は $1/1000$ 以下であり、連続体として熱輸送が可能であると考えられる²⁶⁾。263 Kにおける飽和水蒸気圧は 290 Pa であり、真空の氷球の外部と内部を隔てる氷壁はこの内圧によっても壊れない必要がある。氷のみの強度から考えて 290 Pa の飽和水蒸気圧に耐える氷壁の厚さは数 mm 程度が必要と考えている。

レゴリス内に安定した氷壁が形成できた後、氷球内部の水採取を行う場合、氷球内に水蒸気ではなく乾燥気体（窒素ガスや水電解で生成できる酸素や水素を想定）を循環させることを考えている。図10の気体加熱器で乾燥気体を加熱して飽和水蒸気量を高めた後、注入ノズルを介してレゴリス内の氷球内部に送り込む。乾燥気体は氷球内部を循環し、氷球の内部の水蒸気を吸湿すると考えられる。この吸湿した高湿度の気体を抽出ノズルを介して水分凝縮器に取り込む。水分凝縮器の内部で低温コンデンサにより気体中の水分が除湿されることで、レゴリス内の水を装置内に取り込む仕組みである。

上述のように氷球内部のレゴリスから十分に水を取り込み内部レゴリスが乾燥した時点で、氷球を大きくしてレゴリス内で水採取可能な範囲を拡大するよう制御する。この方法としては、氷球内の水蒸気を飽和状態とし加熱した気体を循環する（凝縮器を冷却せず水分を取り込まない）ことで氷球の内側を加熱する。氷球の内側から熱伝導によりは氷球の最外表面が昇温する。氷球の最外表面の温度が昇華温度を越えた時点で、最外表面の氷は水蒸気となり外側に向かって移動、レゴリス細孔内で再凝縮し、結果氷球サイズの拡大が可能と考えている（初期の氷壁形成と同様のメカニズム）。このように氷球内側の水分取り込みと氷球サイズの拡大を繰り返すことで月面下の広い範囲のレゴリスの水分を採取可能と考えている。この方法で月面レゴリス中の水採取が可能であれば、レゴリス中の氷含有率 $4 \text{ wt}\%$ とした場合、直径 1 m の氷球の内部からは $35\sim 40 \text{ kg}$ 程度の水の採取が可能であると予測している。

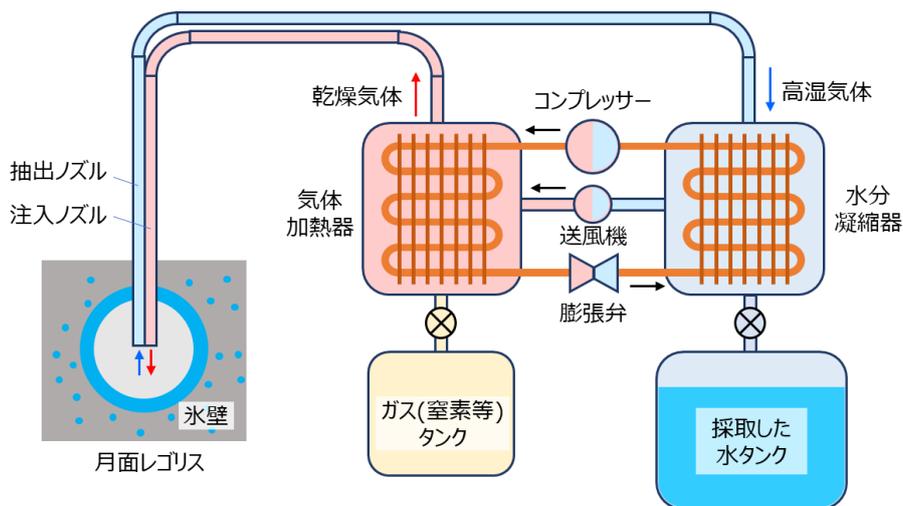


図10 新規サーマルマイニング装置の概要

5. 月面レゴリス内の伝熱計算

前章の新しいサーマルマイニング方法は、真空レゴリスを熱伝導のみにより加熱するのではなく、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱により効率よく加熱することを特徴とする。そこで、新規サーマルマイニング方法の効果の見通しを得るため、まずは真空レゴリス内の伝熱解析を行い、伝熱手段として熱伝導のみにより加熱した場合と対流熱伝達、及び水蒸気の凝縮・凝固の潜熱移動により加熱した場合の昇温状態を比較した。

5.1 計算方法

月面レゴリス内の伝熱計算を行うにあたってレゴリス内の状態を**図 11**のように仮定した。レゴリスは不定形のソイル粒子の充填層と考えられ多孔質体とみなした。熱伝導のみの伝熱計算においてはソイル間の空隙は真空と考えた。また対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固潜熱を計算する場合はソイル間の空隙を気体(水蒸気)が流動すると仮定した。

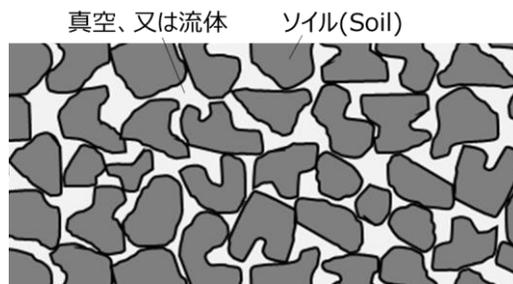


図 11 レゴリスの計算モデル

(a) 月面レゴリス内の熱伝導計算

レゴリス内の熱伝導による移動熱量の計算は、以下の式から計算した²⁷⁾。レゴリス内の空隙率 ε や比熱、密度、熱伝導率などの熱物性は場所によらず一定と仮定した。

$$\rho_{reg}(1-\varepsilon)Cp_{reg} \frac{\partial T_{soi}}{\partial t} = k_{reg}(1-\varepsilon) \left(\frac{\partial^2 T_{soi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{soi}}{\partial y^2} \right) + Q \quad \dots (1)$$

ここで、 T_{soi} はソイルの温度[K]、 ρ_{reg} はレゴリスのかさ密度[kg/m³]、 Cp_{reg} は比熱[J/kg/K]、 k_{reg} は熱伝導率[W/m/K]である。 ρ_{reg} や k_{reg} は固体ソイルの密度と熱伝導率ではなく、固体ソイルとソイル間の空隙を複合したレゴリスのかさ密度と熱伝導率である。**表 2** に乾燥レゴリスの熱物性値の算出方法を示す。レゴリスは月面の重力により深さ方向にかさ密度が大きくなる^{23, 25)}。本計算において密度は0.5 m相当の深さのレゴリスを想定し $\rho_{reg} = 1,800 \text{ kg/m}^3$ (const.)とした。乾燥レゴリスの比熱、熱伝導率に関しては温度依存の値を用いた。

また、式(1)の Q はレゴリス内の空隙に流体がある場合にソイルと流体間で授受する熱量であり、以下の式から計算した。

$$Q = ha(T_{soi} - T) \quad \dots (2)$$

ここで h は流体とソイル間の対流熱伝達係数[W/m²/K]、 a は流体とソイル間の接触面積[m²]、 T は流体温度[K]である。熱伝達係数や接触面積はレゴリスを粒子充填層と仮定した近似式²⁷⁾や実験式²⁸⁾により計算した。ソイル間の空隙

が真空の場合は流体との熱のやり取りはないため $Q=0$ とした。

表 2 伝熱計算で用いた月面レゴリスの熱物性値

物性値	記号	単位	値	参考
密度	ρ_{reg}	kg/m ³	1,800	Deep layer density ^{23, 25)}
比熱	$C_{p_{reg}}$	J/kg/K	$C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + T_4T^4$	文献 ²³⁾ より
比熱計算の係数	C_0	J/kg/K	-23.173	"
	C_1	J/kg/K ²	2.127	"
	C_2	J/kg/K ³	0.01501	"
	C_3	J/kg/K ⁴	-7.3699×10^{-5}	"
	C_4	J/kg/K ⁵	9.6552×10^{-8}	"
熱伝導率	k_{reg}	W/m/K	$k_s + (k_d - k_s)\rho_{reg}(1 + X(T/350)^3)/(\rho_d - \rho_s)$	文献 ²³⁾ より
	k_s	W/m/K	0.0006	loose surfical soil ²³⁾
	k_d	W/m/K	0.007	dense soil ²³⁾
熱伝導率計算に使用した値	ρ_s	kg/m ³	1,300	loose surfical soil ^{23, 25)}
	ρ_d	kg/m ³	1,800	dense soil ^{23, 25)}
	X		2.7	Radiative conductivity parameter ^{23, 25)}

(b) レゴリス内の対流熱伝達の計算

レゴリス内の空隙に流体を通過させた場合の対流熱伝達計算における二次元流れは以下の方程式により計算した^{29, 30)}。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \dots (5)$$

ここで、 u 、 v は x 方向 y 方向の流速の無次元化数、 p は圧力の無次元化数、 Re はレイノルズ数である。 F_x 、 F_y は x 軸および y 軸方向の単位質量あたりに働く体積力の無次元化数である。レゴリス内の流れが粒子充填層の多孔質体内の流れと仮定した場合、流体に働く力 F_x 、 F_y は多孔質内を流れる圧力損失と考えられる。多孔質体内流れの圧力損失 ΔP は以下のErgunの式から計算した³¹⁾。

$$\Delta P = \frac{150\mu Lu\varepsilon(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75L\rho(u\varepsilon)^2(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \quad \dots (6)$$

ここで、 D_p はソイルの平均的な直径[m]、 μ は流体の粘性係数[Pa s]、 L は流体の移動距離[m]、 u は流体速度[m/s]（層内速度）である。式(4)と式(5)の F_x 、 F_y は式(6)により x 、 y 方向の流速 u 、 v から圧力損失を求め無次元の体積力に換算した。

流体温度はソイルとの熱の授受を考慮して以下の方程式により計算した。

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad \dots (7)$$

ここで Pr はプラントル数、 Q は式(2)により計算したソイルと流体間の対流熱伝達による伝熱量である。

(c) レゴリス内の凝縮・凝固反応を伴う熱伝達計算

レゴリス内のソイル間を飽和水蒸気が通過する場合の凝縮・凝固反応を伴う対流熱伝達の計算に関しては、水蒸気の潜熱エネルギー E が流体の持つエネルギーであり水蒸気の流れによって運ばれると考え、以下の方程式を用いた。

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u \frac{\partial E}{\partial x} + v \frac{\partial E}{\partial y} = Q_{ex} \quad \dots (8)$$

レゴリスはソイル間に空隙を持つ多孔質体であり、飽和水蒸気が空隙を通過すると仮定した。解析領域の入口の飽和水蒸気は 100% 気相であり、凝縮熱 (2,442 kJ/kg) と凝固熱 (334 kJ/kg) の合計 2,776 kJ/kg の潜熱量を持つと仮定した。レゴリス内の多孔質体内を通過するに従い、ソイルと水蒸気間で熱交換が行われ水蒸気流の潜熱エネルギー E が減少し、 E がゼロとなった時点で水蒸気はすべて凝縮・凝固し氷になると考えた。またソイルが水蒸気から受けるエネルギー Q_{ex} は全てソイルの温度上昇に消費されると仮定した。水蒸気からソイル表面に移動する熱量 Q_{ex} は以下の式から計算した。

$$Q_{ex} = Q_1 + Q_2 \quad \dots (9)$$

ここで Q_1 は水蒸気の顕熱移動量、 Q_2 は水蒸気が氷となる際の潜熱移動量である。 Q_1 、 Q_2 は以下の式から計算した³²⁾。

$$Q_1 = \alpha_f A (T_{vapor} - T_{ice}) \quad \dots (10)$$

$$Q_2 = W (E_{vapor} - E_{ice}) \quad \dots (11)$$

α_f はソイル表面の熱伝達率 [W/m²/K]、 A はソイル表面積 [m²]、 T_{vapor} は水蒸気温度 [K]、 T_{ice} は氷の表面温度 [K]、 W は単位時間の氷結 (凝縮・凝固) 量 [kg/s]、 E_{vapor} 、 E_{ice} はそれぞれ水蒸気と氷の潜熱エネルギー [J/kg] である。単位時間の氷結量は以下の式から計算した³²⁾。

$$W = kA (X_{vapor} - X_{ice}) \quad \dots (12)$$

k は物質移動速度 [m/s]、 X_{vapor} 、 X_{ice} はそれぞれ水蒸気温度における飽和水蒸気量 [kg/m³] とソイル温度における飽和水蒸気量 [kg/m³] である。物質移動速度 k は真空中の飽和水蒸気の密度差による物質移動であり、弾性媒質中の微小な圧力変動と考えられることから 0 °C 付近の飽和水蒸気の音速 (約 410 m/s) を用いた。また本計算においては、ソイル表面へ霜の付着による空隙率の変化、氷結によるソイルの熱伝導率の変化は無視して計算した。

(d) レゴリス内伝達計算モデル

上述の計算方法により、月面レゴリスをソイルの熱伝導のみで加熱した場合、ソイル間の空隙に水蒸気を通過させ対流熱伝達により加熱した場合、更に水蒸気の凝縮・凝固による潜熱により加熱した場合のレゴリス内の伝熱計算を

行った。図 12 に各加熱方式の計算モデルを示す。対流熱伝達 (図中②) と凝縮・凝固熱 (図中③) による加熱方法に関しては、レゴリスを多孔質体と仮定し、ソイル間の空隙に熱媒体として水蒸気を浸透・流通させることでレゴリスを加熱することを考えた。月面レゴリス内は真空であるため、月の水氷は液相として存在せず、温度が低い場合は固体 (氷) として、温度が高い場合は気体 (飽和水蒸気) として存在すると考えられる。飽和水蒸気と氷の境界となる温度は昇華温度であり、170~200 K と考えられている⁵⁾。また飽和水蒸気である場合も昇華温度に近い低温の場合は低圧・低密度の希薄気体であり、分子振動である熱エネルギーを輸送できないと考えられる。一般的に気体を連続体として扱うことができナビエ・ストークス方程式が成り立つのはクヌーセン数が 1 より十分に小さい必要があるため²⁶⁾、飽和水蒸気の温度はクヌーセン数 <0.001 である 263 K (-10 °C) 付近と仮定した。

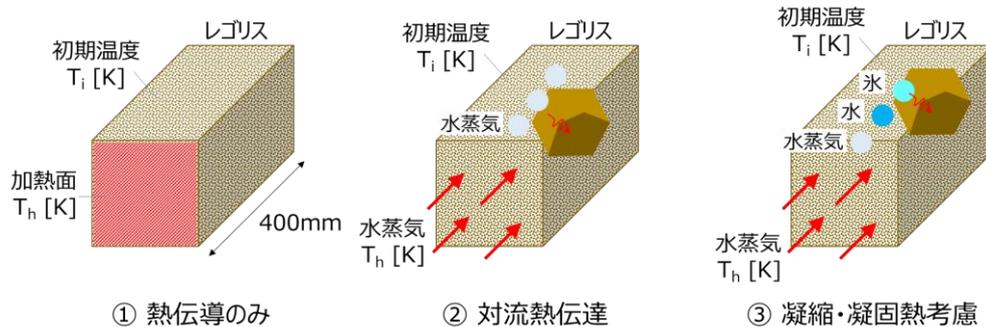


図 12 レゴリス内の伝熱計算モデル

5.2 計算結果

各加熱方式のレゴリスの昇温状態を比較・評価するための値として、計算結果から $(T-T_i)/(T_h-T_i)$ を算出した。ここで、 T_h は加熱源の温度であり熱伝導の計算では加熱面の温度、対流と凝縮・凝固の計算では水蒸気の流入温度、 T_i はレゴリスの初期温度、 T はある経過時間後のレゴリスの温度 (計算結果) である。 $(T-T_i)/(T_h-T_i)$ の値が 1 に近いほど加熱源温度に近くよく加熱された状態であり、0 に近い場合はほとんど加熱されない状態である。

各加熱方式によるレゴリスの昇温状態を比較するため、加熱面 (水蒸気流入面) からの距離 $D=10, 20, 50$ mm における 150 sec 間の昇温状態を図 13 (a)~(c) にプロットした。レゴリスを熱伝導のみで加熱した場合、加熱面から近い $D=10$ mm においては、時間と共にレゴリスが昇温するが、加熱面から $D=50$ mm と離れた位置においては昇温しない。対流熱伝達の場合は水蒸気流入面からの位置によらず、各位置のレゴリスはほぼ一定の傾きで昇温した。凝縮・凝固を考慮した加熱方法に関しては、 $D=10\sim 50$ mm のいずれの位置においても、レゴリスの温度は非常に短い時間で水蒸気の流入温度とほぼ等値になり、対流熱伝達や熱伝導による加熱方法に比べて短時間でレゴリスが昇温した。熱伝導のみの加熱の場合、150 sec 間と短い時間では 20 mm 以内の近い距離であれば加熱できるが、50 mm 以上と距離が離れた位置は加熱できないと考えられる。対流熱伝達に関しては、50 mm 以内の範囲であればほぼ均一にレゴリスを加熱できる。また凝縮・凝固反応を伴う熱伝達においては、ソイルへの水蒸気の付着と凝縮・凝固の大きな潜熱量 (2,776 kJ/kg) により非常に短い時間 (1 sec 以内) で昇温できることがわかった。

レゴリスを熱伝導のみで加熱した場合の加熱面からの距離と時間による昇温状態を知るため、加熱開始から 60 min 間の各距離における昇温状態のプロファイルを図 14 にプロットした。時間経過と共に加熱面から 120~130 mm 以内の範囲であればレゴリスは昇温していくが、60 min 経過しても $D=100$ mm の位置のレゴリスの昇温状態は 0.1 未満であり、昇温速度は遅い。また加熱面からの距離 $D=130$ mm 以上の位置では 60 min 経過してもほとんど昇温しないことがわかった。これらの計算結果から、月面レゴリスの広い範囲を熱伝導のみで加熱することは難しく、対流熱伝達や凝縮・凝固反応を伴う熱伝達による加熱が必要と考えられる。

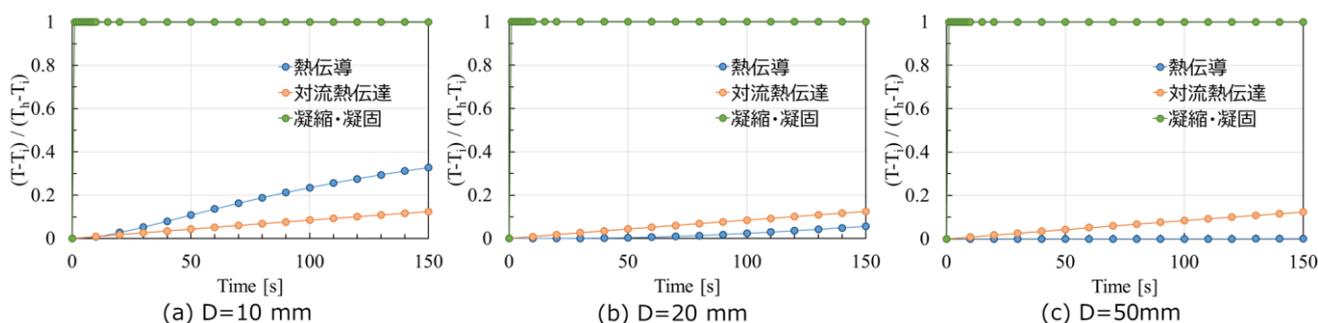


図 13 各位置における加熱方法による温度変化の比較

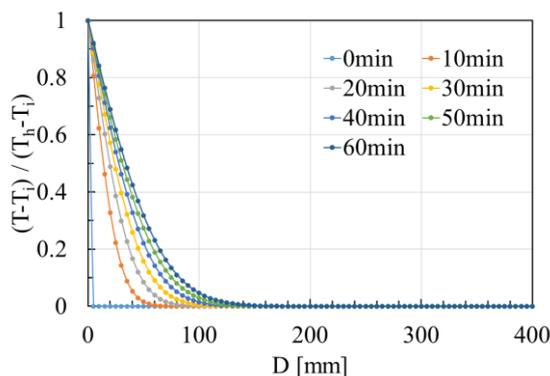


図 14 熱伝導加熱による各位置のレゴリス昇温状態の計算結果

ソイル粒子間の空隙を飽和水蒸気が通過し、ソイル表面で水蒸気が凝縮・凝固した場合のレゴリスの昇温の様子を計算した。ソイル間の空隙率が 0.4、ソイル粒径が 10~30 mm の場合の計算結果を図 15 に示す。

本計算においては、真空レゴリス内の水蒸気の流れは水蒸気の温度差による飽和蒸気圧差によって生ずると考えた。例えば、高温側の水蒸気温度が 273 K (0°C)、低温側の水蒸気温度が 173 K (-100°C) の場合、水蒸気の流れは飽和水蒸気圧差 611 Pa であり、水蒸気流はこの圧力差によって生ずる。この圧力差によって、水蒸気がソイル間の多孔質を通過する流速は、空隙率 0.4、ソイル粒径 10~30 mm の場合、約 32~85 m/s (空塔速度) であり、水蒸気は非常に短い時間 (0.3 sec 前後) で多孔質内 1 m の距離を通過する。一方、粒径が大きい充填層においては圧力損失が小さいため流速は大きくなる。そこで計算では、レゴリスの解析モデルの入口と出口に水蒸気温度に相当する飽和蒸気圧を設定して予めレゴリス内の水蒸気流速を求め、この水蒸気流速におけるレゴリス内の凝縮・凝固を伴う伝熱計算を行った。

図 15 のグラフではいずれの粒径サイズにおいても、水蒸気入口からの距離 D が 80~300 mm 以内の範囲で距離 D に対してレゴリス昇温状態が直線的に低下する範囲が見られた。この範囲 (直線範囲と呼ぶ) は水蒸気がレゴリス内に流入を開始する加熱初期において、流入した水蒸気がすべて凝縮・凝固し氷に相変化する範囲であり、ソイルの温度が流入する水蒸気の温度と等しくなるまで、水蒸気の潜熱エネルギーはソイルの昇温に使われる。ソイル粒径が大きいほど直線範囲が広がる理由として、ソイル間の空隙を通過する水蒸気の手が速いことが挙げられる。水蒸気の流速が小さい場合、ソイル間の空隙に水蒸気が留まる時間が長いため、狭い範囲で凝縮・凝固が完了すると考えられる。直線範囲でソイルの温度が水蒸気の流入温度と等しくなると水蒸気の潜熱エネルギーは下流に持ち越される。直線範囲の下流においてソイルは水蒸気の潜熱エネルギーによって加熱され、ソイルが昇温する範囲は下流に向かって拡大すると考えられる。今回の計算結果では、いずれのソイル粒径においても D=800 mm の位置の温度は 0.3 sec で水蒸気の流入温度とほぼ同温まで昇温しており、水蒸気の凝縮・凝固潜熱により加熱することでより広い範囲のレゴリスを非常に短い時間で加熱できることがわかった。

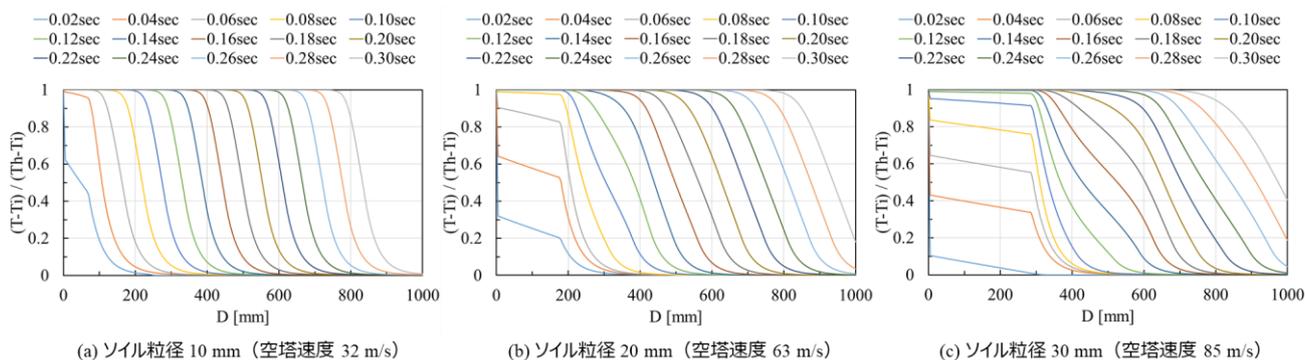


図 15 水蒸気の凝縮・凝固潜熱を加味した計算によるレゴリス昇温状態

今回の計算においては、ソイル表面へ霜の付着による空隙率の変化や氷結によるソイル表面の熱伝導の変化は無視して計算を行った。実際にソイル間に飽和水蒸気を流通させた場合、ソイル表面に水蒸気が氷結・着霜することでソイル表面への熱伝導は氷層を介した伝熱となり、見かけの熱伝達量が減少しソイルの昇温は緩やかになると考えられる。またソイル表面に氷結・着霜する氷の量は時間と共に増加するので、ソイル間の空隙が狭められて流動抵抗が増加し、やがて空隙が閉塞され水蒸気が流れなくなることも考えられる。今後、これらの現象も加味した月面レゴリス内の伝熱計算方法を検討していく。

6. まとめ

近い将来、月面の水資源を採取することを目的に、月面での水の状態を予想するとともに世の中で検討されている月面水資源の採取方法について考察した。また月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱計算を行い、レゴリスを効率よく加熱する方法について検討した。更に、水資源の採掘に多くの重機を必要とせず、レゴリスをその場で加熱して水採取できるサーマルマイニング技術に注目し、当社独自の新しい手法を考案した。得られた知見は以下の通り。

- ① 近年の月軌道衛星や地上レーダーからの観察により月面には多量の水が存在することが明らかになってきた。特に太陽光があたらない月の北極や南極にあるクレーター内に多くの水があると考えられている。
- ② 月面レゴリスから水資源を採掘する方法として、地上と同様に重機を使って機械的に採掘する技術、月面レゴリスを太陽光などにより直接加熱して水を取り出す「サーマルマイニング」技術が考えられている。
- ③ 月面レゴリスを機械的に掘り返すなどの採掘を行わず、レゴリスに直接熱を加えて水採取を行うサーマルマイニングは、採掘システム全体の簡略化、軽量化が可能であり、多くの重機を稼働させる必要がないため、コスト低減や信頼性、保守性を向上できる。
- ④ サーマルマイニングの具体的な方法として、太陽光を利用して月表面を加熱する方法が考えられている。しかし、月表面を加熱して最表面の水を採取できても、最表面のレゴリスが乾燥した場合、熱伝導率が非常に小さくなるため、深さ方向のレゴリスをほとんど加熱できなくなる。このため、深い位置の水を採取することができない。
- ⑤ 広い範囲の月面レゴリスを熱伝導だけで加熱することは難しいことから、月面レゴリス内の空隙に水蒸気、又は月面で水電解により調達可能な水素や酸素などのガスを注入して循環させ、対流熱伝達や水蒸気の凝縮・凝固の潜熱によりレゴリスを加熱する方法について検討した。レゴリス内にガスを注入したときに真空レゴリス中にガスが拡散・消失しないようレゴリス内に氷の隔壁を設ける方法、及び月面の深い位置にある水資源を採取可能な独自のサーマルマイニング方法、及び装置を考案した。
- ⑥ 月面の真空レゴリス内の熱伝導や対流熱伝達、凝縮・凝固潜熱を加味した伝熱シミュレーションを行った結果、

レゴリス内の熱伝導による加熱では、加熱面から 10 mm の位置のレゴリスは時間と共に昇温するが、50 mm 程度離れると 150 秒程度の短時間では温度が変化しない。加熱面から 150 mm 離れると 1 hr.程度加熱してもほとんど昇温しない。一方、対流熱伝達の場合は、加熱面からの距離にかかわらず、150 秒で加熱面温度に対して 10%程度の昇温が見られた。また、凝縮・凝固潜熱による加熱の場合、加熱源（水蒸気入口）から 800 mm 離れた位置のレゴリスを 0.3 秒程度の非常に短い時間で水蒸気入口温度と同温度まで昇温できる。

以上から、考案した新規サーマルマイニング方法により、月面レゴリスを効率よく加熱できる可能性を見出した。今後、更にレゴリス内のソイル表面への着霜の様子を加味した詳細な伝熱計算や本サーマルマイニングを実現した場合の水採取に要する電力や時間などの見積もりを行っていく。また本サーマルマイニング方法は未だ概念段階であるため、地上において真空・極低温な月面レゴリスを模した実験装置を作製し、動作原理を検証する実験を行う予定である。2030 年頃の有人滞在開始フェーズ⁴⁾に合わせて本サーマルマイニングによる月面水採取が可能となるよう技術開発を進めていきたい。

文 献

- 1) NASA, FY2020 Budget Request, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/fy2022_budget_summary.pdf (2021)
- 2) 文部科学省宇宙開発利用部会, 国際宇宙ステーション・国際宇宙探査小委員会 (第 42 回) 会議資料, https://www.mext.go.jp/kaigisiryomext_00241.html (2021. 6. 30)
- 3) 高砂熱学工業プレスリリース, 高砂熱学工業、民間月面探査プログラム「HAKUTO-R」運営の株式会社 ispace が実施するシリーズ B 投資ラウンドに新規出資, https://www.tte-net.com/topics/2020/pdf/20200820_1.pdf (2020. 8. 20)
- 4) 加藤敦史, 森田健, フロンティアビジネス創出への挑戦-宇宙事業に関する取り組み-, 高砂熱学工業イノベーションセンター報, No. 34, https://www.tte-net.com/lab/report/pdf/2020_17.pdf (2020).
- 5) HAKUTO-R HP, <https://ispace-inc.com/hakuto-r/jpn/about/>.
- 6) 高砂熱学工業プレスリリース, 月面産業ビジョン政学産連携で日本政府に提出, https://www.tte-net.com/topics/2021/pdf/20210713_1.pdf (2021. 7. 13).
- 7) David K, Angel A, Jared A, Jonathan B, Gary B, Dallas B, Brad B, Vanessa C, Justin C, Blair DW, Chris D, Barry F, Jonathan G, Koki H, Laura K, Jim K, Bernard K, Philip M, Laura M, Phillip M, Clive N, Erica O, Gordon R, Jim S, Brandon S, George S, Paul S, Mark S, Kris Z, Guangdong Z, Commercial lunar propellant architecture: A collaborative study of lunar propellant production, REACH - Reviews in Human Space Exploration 13 (2019).
- 8) 日本の国際宇宙探索シナリオ(案) 2019, 宇宙航空研究開発機構, 国際宇宙探査センター, 宇宙探査システム技術ユニット(2019)
- 9) George Sowers, Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, Colorado School of Mines, NIAC Phase I Final Report (2020).
- 10) Grant H. Heiken, David T. Vaniman, Bevan M. French, Lunar Source Book A User's Guide to the Moon, Cambridge university press (1991).
- 11) Andrea Thompson, "It's Official: Water Found on the Moon", <https://www.space.com/7328-official-water-moon.html>, Space.com, 23 September 2009
- 12) <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA12237>
- 13) Li, S, Lucey, P.G., Milliken, R.E., Hayne, P.O., Fisher, E., Williams, J.P., Hurley, D.M., Elphic, R.C., Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions. PNAS (2018). <https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115>

- 14) E. A. Fisher, P. G. Lucey, M. Lemelin, B. T. Greenhagen, M. A. Siegler, E. Mazarico, O. Aharonson, J. Williams, P. O. Hayne, G. A. Neumann, D. A. Paige, D. E. Smith, M. T. Zuber, Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and temperature measurements from the Diviner Lunar Radiometer Experiment, Lunar Polar Volatiles Conference, volume:5011 (2018).
- 15) Felicia Chou, Alison Hawkers, <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-sofia-discovers-water-on-sunlit-surface-of-moon>, NASA Release 20-105, Oct 27 (2020).
- 16) 春山純一, 月周回衛星「かぐや (SELENE)」搭載の地形カメラによる南極シャクルトンクレータ内の永久影領域の水氷存在に関する論文のサイエンスへの掲載について—水氷がクレータ底部の表面に露出した形で多量に存在する可能性がないことを明らかに—, https://www.jaxa.jp/press/2008/10/20081024_kaguya_j.html (2008).
- 17) 春山純一, 月の居住に向けての科学的知見 (月の極の水氷), 宇宙環境利用シンポジウム 第31回 (2016).
- 18) G. Randall Gladstone, Kurt D. Retherford, Anthony F. Egan, David E. Kaufmann, Paul F. Miles, Joel W. Parker, David Horvath, Paul M. Rojas, Maarten H. Versteeg, Michael W. Davis, Thomas K. Greathouse, David C. Slater, Joey Mukherjee, Andrew J. Steffl, Paul D. Feldman, Dana M. Hurley, Wayne R. Pryor, Amanda R. Hendrix, Erwan Mazarico, S. Alan Stern, Far-ultraviolet reflectance properties of the Moon's permanently shadowed regions, *J. of Geophysical Research*, vol 117, E00H04, doi:10.1029/2011JE003913 (2012).
- 19) B. J. Thomson, D. B. J. Bussey, C. D. Neish, J. T. S. Cahill, E. Heggy, R. L. Kirk, G. W. Patterson, R. K. Raney, P. D. Spudis, T. W. Thompson, E. A. Ustinov, An upper limit for ice in Shackleton crater as revealed by LRO Mini-RF orbital radar, *Geophysical Research Letters*, vol 39, L14201, doi:10.1029/2012GL052119 (2012).
- 20) Anthony Colaprete, Peter Schultz, Jennifer Heldmann, Diane Wooden, Mark Shirley, Kimberly Ennico, Brendan Hermelyn, William Marshall, Antonio Ricco, Richard C. Elphic, David Goldstein, Dustin Summy, Gwendolyn D. Bart, Erik Asphaug, Don Korycansky, David Landis, Luke Sollitt, Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume, www.sciencemag.org, *SCIENCE*, Vol 330, pp.463-468 (2010).
- 21) Maria T. Zuber, James W. Head, David E. Smith, Gregory A. Neumann, Erwan Mazarico, Mark H. Torrence, Oded Aharonson, Alexander R. Tye, Caleb I. Fassett, Margaret A. Rosenburg, H. Jay Melosh, Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole, *NATURE*, Vol 486, pp. 378-381 (2012).
- 22) Shuai Li, Paul G. Lucey, Ralph E. Milliken, Paul O. Hayne, Elizabeth Fisher, Jean-Pierre Williams, Dana M. Hurley, Richard C. Elphic, Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, *PNAS*, vol. 115, no. 36, 8907- 8912 (2018).
- 23) P. T. Metzger, Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, *Eath and Space 2018*, pp.481-489 (2018).
- 24) 熱物性ハンドブック編集委員会, 第一版 熱物性ハンドブック, 養賢堂 (1990).
- 25) Paul O. Hayne1, Joshua L. Bandfield, Matthew A. Siegler, Ashwin R. Vasavada1, Rebecca R. Ghent, Jean-Pierre Williams, Benjamin T. Greenhagen, Oded Aharonson7, Catherine M. Elder1, Paul G. Lucey, and David A. Paige, Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment, *AGU J. of Geophysical Research: Planet* (2017)
- 26) 曾根良夫, 青木一生, 希薄気体力学, 応用物理 第54巻 第5号, pp.436-447 (1985).
- 27) (社)日本流体力学会, 第2版 流体力学ハンドブック, 丸善, pp.1053-1060 (1998).
- 28) 宮内照勝, 稀釈球充填層における粒子・流体間境膜物質移動係数, *化学工学* 36, pp.633-640 (1972).
- 29) 八田夏夫, 流れの計算, 森北出版 (1994).
- 30) 河村哲也, 流体解析の基礎, 朝倉書店 (2014).
- 31) 竹内雍, 多孔質体の性質とその応用技術, フジテクノシステム (1999).
- 32) 細田泰生, 埋橋英夫, 熱伝達率に及ぼす霜の影響, *日立評論* 第49巻 第6号, pp.647-651 (1967).

ABSTRACT

It is anticipated that humans will colonize planetary bodies including the Moon. Thus, a new economic system that integrates the Moon and the Earth will likely be developed in the near future. We have signed a corporate partner contract with ispace Co., Ltd. Our aim is to generate hydrogen and oxygen from water that might be present under the lunar surface, for the first time, using the water electrolyzer in the "HAKUTO-R" private lunar exploration program promoted by ispace. Recent observations have increased the possibility that water is present in the lunar regolith. If so, it may be possible to use this water for water electrolysis on the lunar surface in the future. Anticipating this, we have commenced the development of a novel "thermal mining" technology that collects water directly from regolith.

Details including the location, amount, and range of water within the lunar surface have not been clarified fully. The next step required before lunar water mining can become possible is a geological survey in areas where the presence of water is promising. In this study, we went through those steps and then predicted the state of lunar water while considering actual lunar water mining. We also considered the method being studied globally to mine lunar water and focused on thermal mining technology that can heat the regolith at a particular spot and collect water without the need for heavy machinery. We then devised a unique new method for the latter, in connection with which we calculated heat transfer by considering heat conduction, convection, and the latent heat of condensation and solidification in the vacuum regolith and examined how to efficiently heat the lunar regolith.
