

サーマルマイニングによる月面水採取

(第二報) 再凝縮・凝固を考慮した氷レゴリスの伝熱解析

内田 浩基・中田 拓司・川上 理亮・河南 治^{*1}

Thermal Mining for Water on Lunar Regolith Part 2 - Thermal Analysis of Icy Regolith with calculation of Condensation and Solidification

Hiroki Uchida・Takuji Nakata・Yoshiaki Kawakami・Osamu Kawanami

月極域の永久影領域にある氷水を採取する新たな方法として、氷レゴリス層をヒータで直接加熱し、発生した水蒸気を採取する独自の方法を考案した。この方法は、月面の真空中で氷が昇華した際に水蒸気が拡散・消失しないようレゴリス内に氷壁に囲まれた閉塞空間を形成し、水蒸気を内部に貯留した後、月面上の凝縮器で吸い上げる方法である。重機を月面に持ち込む必要がないことから低コストに月の氷水を採取できると考えている。現在、この方法の実現可能性を様々な観点から検討中であり、その一つとして数値解析により氷レゴリス層に氷壁が形成される様子をシミュレートした。まずは OpenFOAM のソルバーをカスタマイズすることで、月の氷レゴリス内の伝熱解析を可能とした。更に、このソルバーを用いてヒータにより氷レゴリスを加熱したときの伝熱解析を行った。その結果、ヒータに近接する領域（3 mm 以内）のレゴリスにおいて、氷の昇華は短時間で完了し乾燥領域が出現した。この領域の水蒸気はヒータから離れる方向に流動し、ヒータから 10mm 前後の位置で再凝縮・凝固して氷リッチな領域（氷壁）を形成した。

1. 緒言

当社は 2024 年以降、世界で初めて月面に水電解装置を持ち込み、月面環境下において水素と酸素を生成する実証試験を行う予定である²⁾。月面における水電解は推薬生成プラント構想の後工程であり、この前段階として月面下の氷水の探査や採取、採取した氷水のプラントへの輸送、水の純水化处理などの工程が必要となる。更に水電解で生成した水素は月面での圧縮・液化や貯留が必要であり、今後各工程において確立すべき技術課題は多い。これらの工程の内、当社では月面水電解技術の開発に加えて、月面下に存在すると考えられている水資源の採取方法を検討している。月極地に存在する氷水の採取方法として、氷水を含有するレゴリス層を太陽光にて直接加熱し、水蒸気を回収する“サーマルマイニング法”が Sowers によって提案された³⁾。この方式は、月面に多くの重機を持ち込む機械採掘に比べて輸送コストや装置整備の面で有利である。一方、月面レゴリスの実効熱伝導率はソイル（乾燥した砂粒）が詰まった状態でも $0.007 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ と極端に熱を伝え難い⁴⁾。このため表層から 1~2 cm 以上深い位置の氷水を加熱しにくく、深さ方向に広範の氷水を採取できないといった問題がある³⁾。そこで我々は、月面のレゴリス層内に真空から隔てられ氷壁に囲まれた閉塞空間を形成し、内部に高温の乾燥気体を循環させレゴリスから昇華した水蒸気を吸い上げる新しいサーマルマイニング方式（高砂サーマルマイニングと呼ぶ）を考案した⁵⁾。

※本論文は、第 67 回宇宙科学技術連合講演会論文¹⁾を加筆修正したものである。

^{*1} 兵庫県立大学 大学院 工学研究科

2. 高砂サーマルマイニングの概要

装置概要とイメージを図1に示す。月面では地下のレゴリス層内も真空と考えられるため、水採取のため何らかの方法で氷を加熱しても昇華した水蒸気は真空中に拡散し消失すると考えられる。そこで昇華した水蒸気を留め置くための"容器"として氷壁に囲まれた空間を地下のレゴリス層内に形成することを考えた。

月面レゴリス層内に氷壁を形成する具体的な方法としては、図2のように月面にある程度の深さの孔をドリルにより削孔し、電気ヒータを差し込んで深い位置の孔の側壁を加熱する。月極地の永久影(PSR)は110K以下⁹⁾と極低温であり、地下のレゴリス層も同様に低温と考えられる。また層内の氷も真空中で昇華しない極低温であり、真空に近い非常に小さな水蒸気圧に保たれていると推測される。このようなレゴリス層深部の孔の側壁をヒータで加熱した場合、レゴリス中のソイルと氷は昇温し、氷が昇華/再凝縮することで、ヒータ近傍に氷壁(氷リッチな層)が形成できると予想している。

氷壁形成後、図1の装置によりレゴリス層内の氷壁内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氷壁内の水蒸気を回収する。ソイル間の空隙はレゴリス層内の体積の半分以上を占め、気体はソイル間の空隙を流通すると予想している⁹⁾。レゴリス層内に低温真空から切り離された与圧空間を形成できれば、固体間熱伝導のみによらず気体を介した対流熱伝達による熱拡散が可能となり、より広範のレゴリス層を容易に加熱できると考えている。氷壁内を循環させる乾燥気体は、例えばN₂や水電解で生成するO₂、H₂などが利用できる。乾燥気体は図1中の気体加熱器で加熱し飽和水蒸気量を高めた後、注入ノズルを介してレゴリス層内の氷壁内部に送り込む。乾燥気体は氷壁内部を循環してレゴリス層を加熱するとともに水蒸気を吸湿し、この吸湿した高湿度の気体を抽出ノズルにより水分凝縮器に取り込む。水分凝縮器内の低温コンデンサにより気体中の水分が凝縮・凝固することで、レゴリス層内の氷水を装置内に取り込むことができると考えている。

3. 氷含有レゴリス内の氷壁形成メカニズム

図3に氷含有レゴリスをヒータで加熱した場合の氷壁形成のメカニズムを示す。図の左側からヒータなどで熱を入力した場合、ヒータに接触する左端近くのソイルは熱伝導により昇温する。昇温の範囲は氷水を含むレゴリスの熱伝導率に依存する。真空中の乾燥レゴリスの熱伝導率は非常に低い⁴⁾が、レゴリスが氷水を含むソイル間の空隙に氷が入り込んだ場合、熱伝導率は大きくなる可能性が考えられる⁴⁾。ソイル周囲の氷は、ソイルからの固体内熱伝導、および輻射により昇温する。氷の昇温により氷表面の水蒸気圧は上昇し、氷から水蒸気に昇華すると考えられる。氷表面から発生した水蒸気は真空よりも大きな水蒸気圧であるため、真空(ここでは図右側)に向かって水蒸気が移動する。前述の通り、ソイル内を伝わる固体間の熱伝導は非常に小さく水蒸気の移動速度に比べて小さい⁵⁾。このため、水蒸気が移動したところのソイル表面は水蒸気温度に比べて低温であり飽和圧力を下回るため、水蒸気はソイル表面で再凝縮・凝固すると考えられる。このような現象はSowersの氷含有模擬レゴリスを赤外線で加熱した実験において

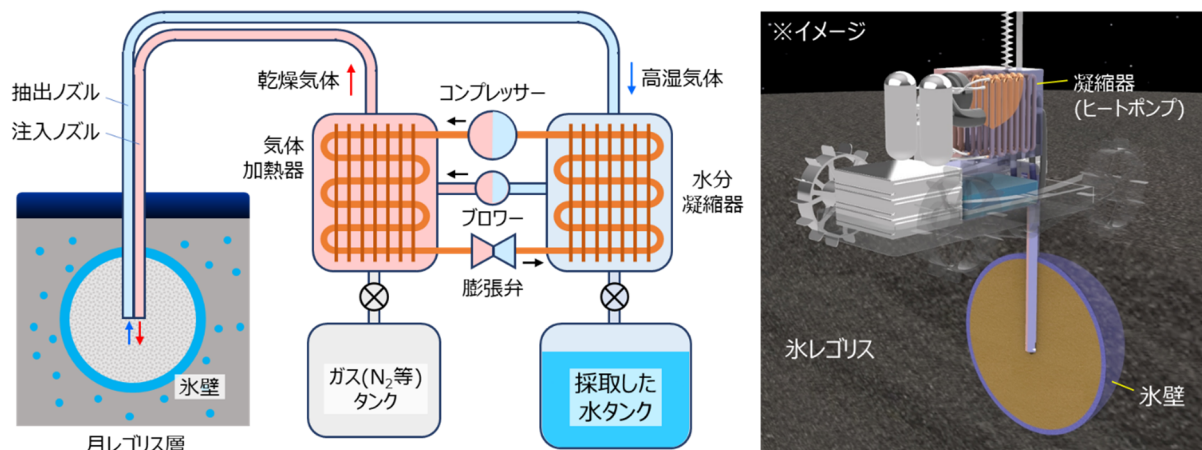


図1 高砂サーマルマイニング装置概要

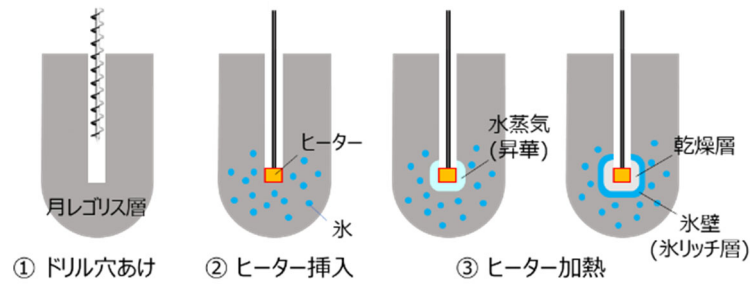


図2 レゴリス層内への氷壁形成方法

も観察されている³⁾。

本報では、上述の低温に保たれた氷水を含むレゴリスを加熱した場合の伝熱、および昇華と凝縮・凝固による氷壁形成の様子をシミュレーションにより再現した。また氷壁形成の数値シミュレーションの妥当性を検証する目的で氷結した真空下の模擬レゴリスを加熱する実験装置を構築したので報告する。

4. 解析方法

月極地のレゴリス内の伝熱は、極低温かつ真空下の氷から水蒸気の昇華と凝縮・凝固、物質移動を含む伝熱形態であり、地上で類似する現象は見当たらない。このため一般的な地上の伝熱を扱う既存の商用ソフトウェアを用いて解析することは難しい。そこでオープンソースソフトウェアである OpenFOAM の熱流体解析ソルバーをカスタマイズすることで氷水を含む月面レゴリス内の伝熱解析を試みた。カスタマイズしたソルバーの計算フローを図4に示す。

本解析では、計算領域全体において固体部分(ソイルと氷)の熱伝導解析とソイル間を流れる流体部分(水蒸気)の熱流動解析のそれぞれを行う連生解析⁷⁾を行った。計算要素の個体部分の温度 T_{solid} と流体温度 T_{fluid} 間で授受する熱量を計算した。ここで個体部分はソイルと氷、流体は水蒸気である(固体部分と流体部分を含む計算領域全体はレゴリスと表現する)。ソイル間を流れる水蒸気の流動解析においては、平均粒径 d_{soil} のソイル粒子が充填された多孔質体内流れと仮定し、流動抵抗を Ergun の式⁸⁾から計算した。水蒸気の熱物性値に関しては、理想気体と仮定し比熱、粘性、熱伝導率を OpenFOAM 内の既存の温度依存関数式から計算している。

固体部分の熱伝導解析においては、固体をソイルと氷からなる複合材と考え、それぞれの物性値を元に質量分率から計算した。真空中のソイル固体内の熱伝導率は、空隙部分を含む実効熱伝導率 k_{soil} として以下の式⁴⁾から求めた。

$$k_{\text{soil}} = 6.12 \times 10^{-3} (1 - \varepsilon)^2 \left(1 + 1.82 \varepsilon \left(\frac{T_{\text{solid}}}{350} \right)^3 \right) \quad (1)$$

また氷の熱伝導率 k_{ice} は以下の温度依存式⁴⁾より計算した。

$$k_{\text{ice}} = 1.582 + 11.458 \times \exp \left(-\frac{T_{\text{solid}}}{95.271} \right) \quad (2)$$

氷の熱伝導率 k_{ice} とソイルの熱伝導率 k_{soil} から求まる固体部分の複合熱伝導率 k_{solid} は、氷がソイルを覆うように付着していると仮定して、以下の直列接続の複合熱伝導率を考えた。

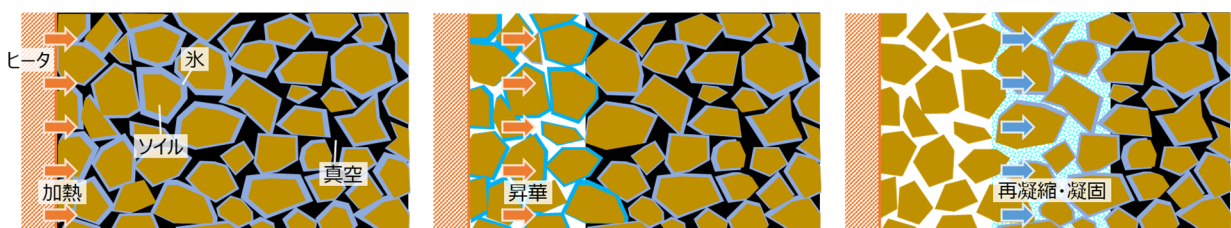


図3 レゴリス内の氷壁形成メカニズム

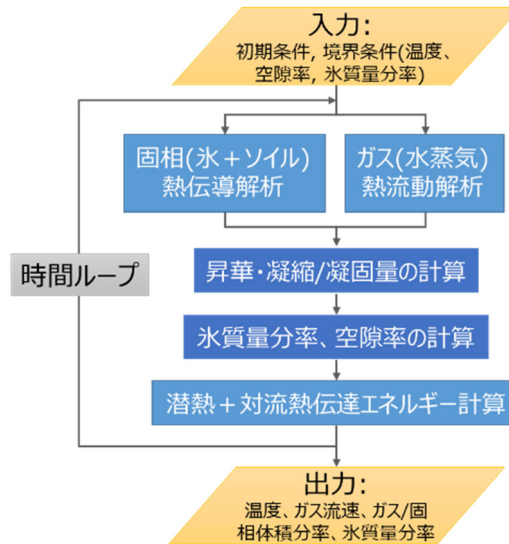


図4 レgris伝熱解析計算フロー

$$k_{\text{solid}} = \frac{k_{\text{soil}} \times k_{\text{ice}}}{\alpha_{\text{ice}} k_{\text{soil}} + \alpha_{\text{soil}} k_{\text{ice}}} \quad (3)$$

ここで α_{ice} は固体部分に占める氷の体積分率、 α_{soil} はソイルの体積分率であり、 $\alpha_{\text{ice}} + \alpha_{\text{soil}} = 1$ である。

以上の連生解析により求まる固体の温度場 T_{solid} と流体の圧力場 p から、各計算要素における固体部の氷から流体部の水蒸気に変化する相変化量（昇華量）と水蒸気から氷に変化する相変化量（凝縮量）を計算した。昇華、または凝縮による相変化量 S は以下の式から計算した⁹⁾。

$$S = (p_{\text{sat}} - p) \left(\frac{M_w}{2\pi R T_f} \right)^{1/2} \quad (4)$$

ここで M_w は水の分子量、 R は気体定数、 T_f は固/気相間の界面温度、 p_{sat} は T_f における飽和水蒸気圧、 p は流体の圧力である。飽和蒸気圧 p_{sat} は Murphy and Koop による予測式¹⁰⁾から計算した。式(5)から計算した T_f と p_{sat} の関係を図5に示す。

$$p_{\text{sat}} = \exp(9.550426 - 5723.265/T_f + 3.53068 \ln T_f - 0.00728332 T_f) \quad (5)$$

各計算要素における氷の昇華量、水蒸気の凝縮量 g から、次のタイムステップの氷の質量分率、空隙率を計算した。また氷の質量分率や空隙率の変化に応じて、次のタイムステップにおける各熱物性値（熱伝導率、比熱、密度）を再計算した。

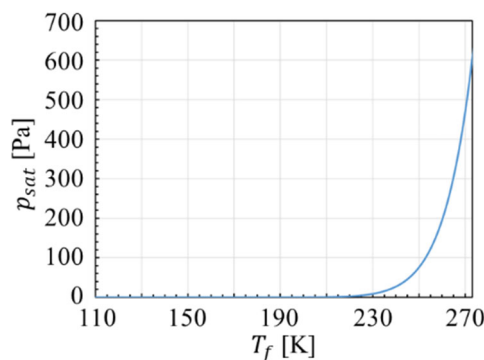


図5 低温域の飽和水蒸気圧曲線¹⁰⁾

次式で計算される各計算要素の気体/固体間の熱移動量 Q は、次のタイムステップの連生解析においてエネルギー保存式の生成項として加味した。

$$Q = Q_{\text{subl}} + Q_{\text{conv}} \quad (6)$$

ここで Q_{subl} は昇華、または凝縮・凝固による気体/固体間の潜熱移動量であり、凝縮/凝固熱と式(4)から求まる相変化量 S の積である。 Q_{conv} は気体/固体間の対流熱伝達による移動熱量である。

以上の非定常計算を OpenFOAM の時間ループ（圧縮性流体 PIMPLE）により行った。

5. 解析モデル

解析モデルは後述する実験装置と同様に中央に加熱ヒータがあり、2 次的に放射状に熱が広がるモデルを考えた（図 6）。解析領域は、計算時間短縮のため周方向の対称性から角度 3° のケーキカット形状とし、半径方向に 50 等分の計算要素に分割した 1 次元伝熱モデルとした。解析領域内は氷含有レゴリスであり、ソイルまたは周りに氷が付着したソイルの粒が詰まった粒状多孔質体と仮定した。ソイルの平均粒径は $90\text{ }\mu\text{m}$ 一定と仮定し、氷の昇華や凝縮・凝固により粒内の氷とソイルの体積割合、及び粒子間の空隙率に変化するものとした。解析領域の氷含有レゴリスの初期条件は、空隙率 0.54、氷含有率 5～15 wt%、温度 110 K とし、レゴリス内の空隙は真空（0 Pa）と仮定した。外周の境界条件は真空であり、モデル中心に設置したヒータから $1.1\sim 3.2\text{ kW/m}^2$ の熱流 q を印可したときの水蒸気の昇華と凝縮・凝固を考慮した伝熱シミュレーションを行った。加熱時間 t は 0～6 h（21,600 s）間とし、この間の非定常解析を実施した。

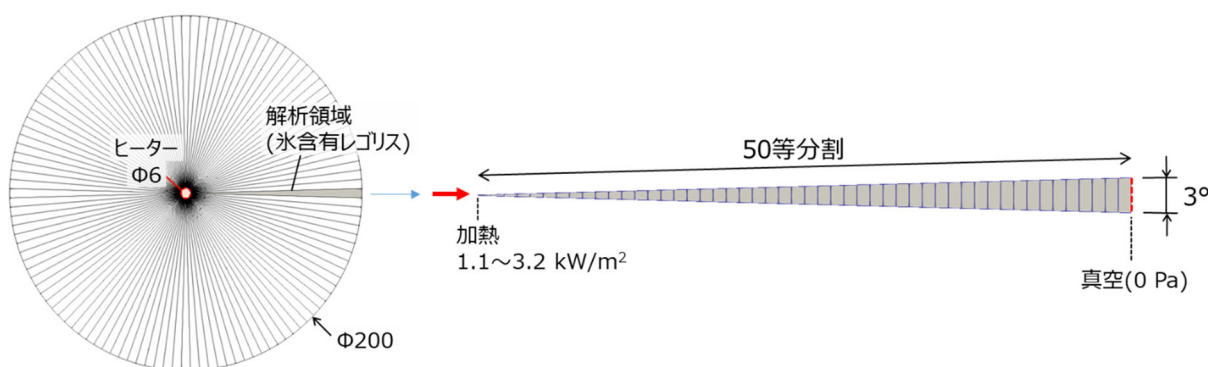


図 6 解析モデル

6. 解析結果と考察

10 wt%氷含有レゴリスを $q=3.2\text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の 6 h 後のヒータ周辺のソイル温度、水蒸気圧力、氷質量分率の各コンター図を図 7 に、ヒータ中心からの距離 $x=0.003\sim 0.06\text{ m}$ の範囲における各時間のソイル温度分布、水蒸気圧力分布、氷質量分率の分布を図 8 に示す。ソイル温度はヒータ直近($x=0.003\text{ m}$)から $x=0.06\text{ m}$ 以上の広い範囲で時間と共に昇温した。一方、水蒸気の圧力や氷質量分率については、 $x=0.017\text{ m}$ 以内の狭い範囲の変化に留まった。水蒸気圧力が大きく変化する位置において、氷質量分率も大きく変化的ことから、氷質量分率は水蒸気圧力の影響が支配的と考えられる。圧力や氷質量が顕著に変化する範囲は、ソイル温度が 230 K 以上の範囲であり、図 5 の飽和水蒸気圧 p_{sat} が急激に立ち上がる温度と一致する。

図 9 に 10 wt%の氷含有レゴリスを $q=1.1\sim 3.2\text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の $x=0.003\sim 0.013\text{ m}$ の各位置における氷質量分率の時間変化を示す。 $q=1.1\text{ kW/m}^2$ の場合、いずれの位置においても昇温が十分でないため、氷は昇華せず氷質量分率は変化しない。 $q=2.2\text{ kW/m}^2$ の場合、1.5 h 以降で氷質量分率に変化が見られ、ヒータ直近の $x=0.003\text{ m}$ の位置では氷が昇華して 2 h 以降で乾燥する(氷質量分率が 0)。 $x=0.005\text{ m}$ の位置では 2 h までに氷質量分率が 8 wt%程度まで低下、 $x=0.007\text{ m}$ の位置では、逆に 13 wt%程度まで上昇するが、

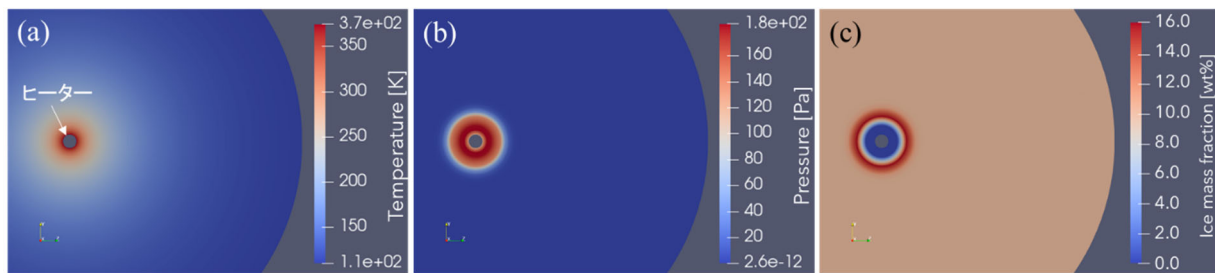


図 7 (a)ソイル温度、(b)水蒸気圧力、(c)氷質量分率 ($q=3.2 \text{ kW/m}^2$, $t=6 \text{ h}$)

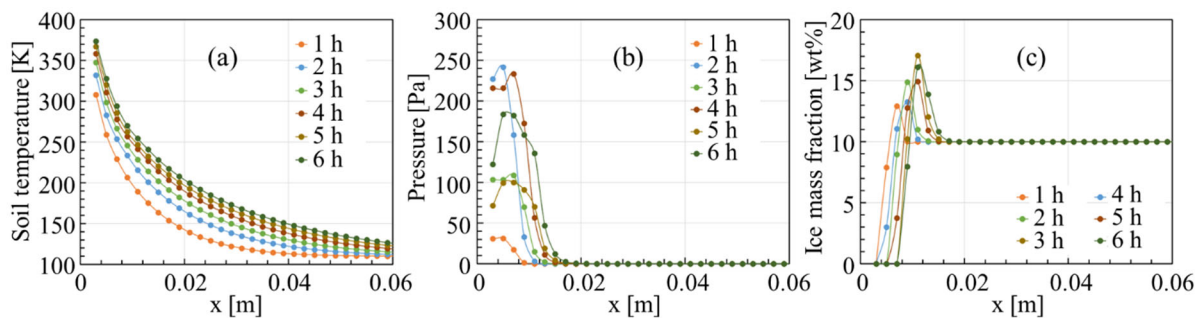


図 8 (a)ソイル温度分布、(b)水蒸気圧力分布、(c)氷質量分率の分布 ($q=3.2 \text{ kW/m}^2$)

以降の時間は一定となった。 $q=3.2 \text{ kW/m}^2$ まで加熱量を増加した場合、位置によって昇華により氷質量分率が減少するタイミングと凝縮・凝固により増加するタイミングが異なる。ヒータ近傍 $x=0.003 \sim 0.005 \text{ m}$ の位置においては、昇華により時間と共に氷質量分率は減少する。 $x=0.007 \sim 0.009 \text{ m}$ の範囲においては、一旦は氷の凝縮・凝固により質量分率は増加するが、一定時間後に昇華がはじまり質量分率が減少に転ずる。更にヒータから遠い $x=0.011 \sim 0.013 \text{ m}$ の位置においては、全ての時間(0~6 h)において昇華よりも凝縮・凝固による氷質量分率の増加が上回る。これは、氷が昇華する位置と凝縮・凝固する位置が時間と共にヒータから離れる方向に移動するためと考えられる。すなわち、氷含有レゴリスを十分な熱量で加熱した場合、時間と共にヒータ近傍の乾燥域が拡大し、その外側に氷リッチな層(氷壁)が形成され、この氷壁は時間と共にヒータから離れる方向に移動すると考えられる。

初期空隙率が 0.54、氷含有率 5~15 wt% のレゴリスを $q=3.2 \text{ kW/m}^2$ で加熱した場合の 6 h 間の各位置の空隙率を図 10 に示す。加熱により固相中のソイルと氷の内、氷成分が昇華や凝縮・凝固により変化することで、レゴリス内の空隙率が変化した。ヒータ直近($x=0.003 \sim 0.007 \text{ m}$ 付近)においては、いずれの氷含有率においても氷の昇華により空隙率が大きくなる。また $x=0.010 \sim 0.015 \text{ m}$ のヒータから離れた位置では、凝縮・凝固により空隙率が減少した。氷含有率が多いレゴリスは、少ない場合に比べてヒータから近い位置で空隙率が大きく変化した。これはレゴリスの氷含有率が多い場合、ヒータ近傍の氷の昇華により多くの熱量が消費されるため、氷壁の広がりはややかになると考えられる。

今回の解析においては、空隙率の最小値は 0.49 程度(氷含有率 15 wt%、 $q=3.2 \text{ kW/m}^2$)であった。本研

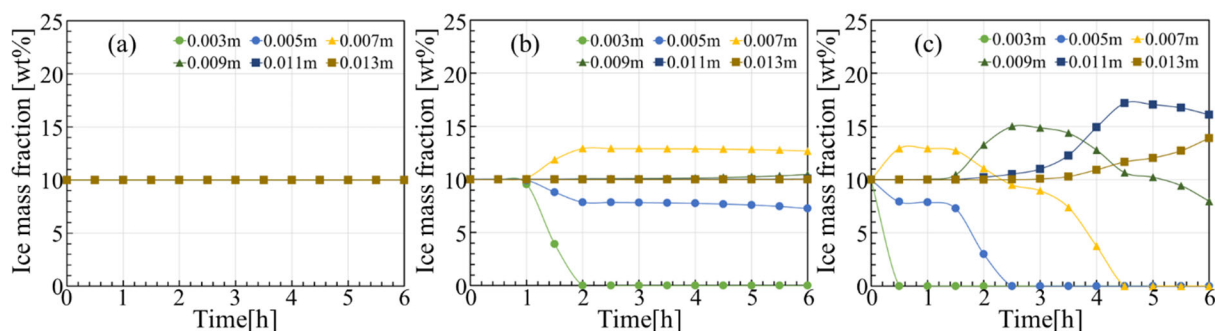


図 9 氷質量分率の時間変化 (a) $q=1.1 \text{ kW/m}^2$ 、(b) $q=2.2 \text{ kW/m}^2$ 、(c) $q=3.2 \text{ kW/m}^2$

究の目的であるレゴリス層内に与圧空間を形成するためには、例えば、**図 11** のようにソイル間の微細な空隙の一部を氷粒によって閉塞すればよく、解析結果の空隙率は必ずしもゼロである必要はないと考えている。一方、解析上の空隙率は小さいほど、氷壁に閉塞された与圧空間を形成しやすいと考えられる。真空中の微細な凝縮・凝固に関する現象を現シミュレーションで再現することは難しいため、実験による検証が必要である。今後、模擬レゴリスを用いた氷壁形成の実験と併せて、解析により氷壁を形成しやすいヒータ加熱条件などを探索する。また氷含有率が小さい場合（1～5 wt%）や空隙率が変化した場合の氷壁形成の可能性についても検討していく。

7. 実験結果との比較(装置構築)

月面を模した低温・真空の環境下にて氷を含有した模擬レゴリスをヒータで加熱して氷壁形成を試みる実験を進めている。実験装置の概略図および試作した実験装置の外観を**図 12～13** に示す。模擬レゴリスを投入する実験セルは 300 mm×300 mm×50 mm の箱形状であり（**図 13(a)**）、模擬レゴリス（砂）は、米国アポロ計画で持ち帰った月レゴリスと成分や粒径などを似せた模擬物質（米国 Exolith Lab 製“LHS-1”）を用いた。レゴリス加熱用のヒータは直径 6 mm の棒形状カートリッジヒータであり、実験セル中心部にガラスと垂直になるようレゴリス内に埋め込んだ。また加熱時のレゴリス内の温度分布と圧力分布が測定できるようヒータと同一水平面内に等間隔に熱電対および測圧プローブを設置した。また実験セルの背面には冷却用コールドプレートを密着させ（**図 13(b)**）、実験開始前にセルごとレゴリス全体の初期温度を所定の温度（230 K 以下）に冷却する。カートリッジヒータにより模擬レゴリスを加熱する際は、**図 13(c)**の円筒状真空チャンバー内に実験セルを設置し、真空中において氷含有レゴリスを加熱する。実験セルの前面と真空チャンバーの側面には円形のガラスがはめ込まれており、ヒータ加熱時の模擬レゴリス内の氷の相変化の様子を観察できるようにした（**図 13(d)**）。

今後、本装置を用いて、実験により低温レゴリス中への氷壁形成を確認すべく検討を進めていく。また実験結果と数値シミュレーションの結果を比較し、計算方法の妥当性を検証する。

8. まとめ

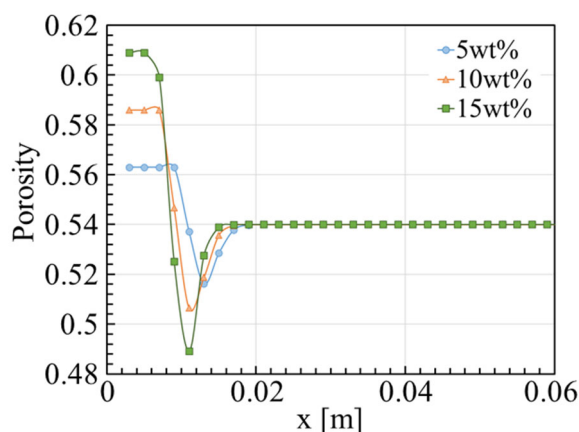


図 10 $t=6$ h における各氷含有率のレゴリス内の空隙率分布

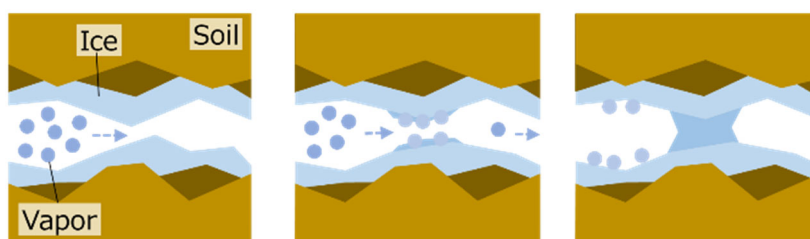


図 11 着氷による空隙の閉塞モデル

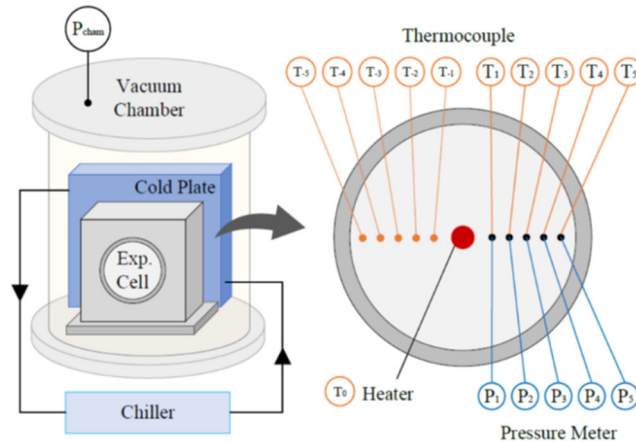


図 12 実験装置概略図

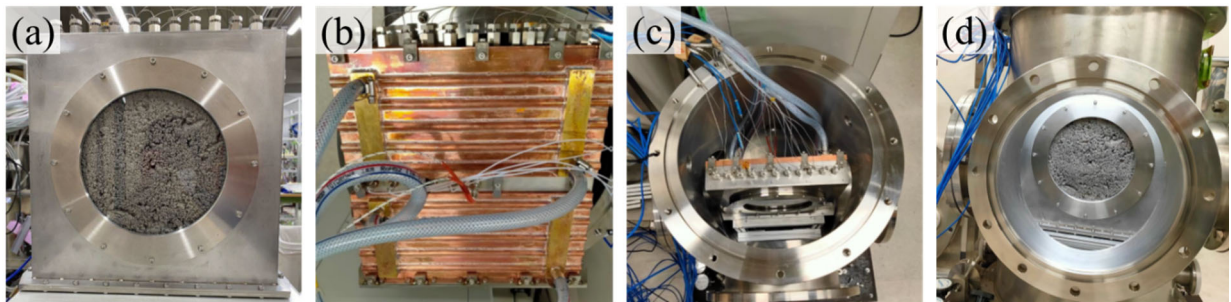


図 13 (a)模擬レゴリスを入れた実験セル、(b)セル背面のコールドプレート
(c)円筒状真空チャンバー、(d)可視化窓

月の極域に存在する氷水を効率よく採取する方法として考案した“高砂サーマルマイニング”の実現可能性を検証するため、月面下の氷レゴリス層内を加熱した場合の数値シミュレーションにより熱・物質移動現象を把握する試みを開始した。低温・真空下における氷の昇華や凝縮・凝固を考慮したレゴリス層内の伝熱解析ソフトを新規開発し、月面における氷含有レゴリスをヒータで加熱した場合の熱流動シミュレーションを行った。この結果、以下の知見を得た。

- (1) 氷含有レゴリスを十分な熱量で加熱した場合、ヒータ直近に氷含有率がゼロの乾燥域が出現し、その外側に氷リッチな層（氷壁）が形成される。
- (2) 加熱時間と共にヒータ近傍のレゴリスの乾燥域は拡大し、氷壁は時間と共にヒータから離れる方向に移動する。

本検討は将来多量の氷水を月レゴリスから採取する方法に関するが、直近では月面で少量のレゴリスから氷水をサンプリングする技術開発が盛んに行われている。レゴリスから水を取り出す最も簡便な方法は、ヒータや赤外線によりレゴリスを水の飽和水蒸気温度以上に加熱することであるが、本報の結果から、極低温・真空下では氷水が加熱面から奥に入り込み容易に取り出せない可能性が考えられる。また月レゴリスをサンプリングする際のドリル掘削においては、ドリル刃先とレゴリスの摩擦熱により、氷水が昇華し初期と異なる場所に氷が再凝縮・凝固する可能性も考えられる。月面で少量の氷水をサンプリングする際には、レゴリスに熱を加えたときの氷水の状態や位置変化を詳しく知ることが不可欠であり、昇華や凝縮・凝固を加味したレゴリス内の伝熱解析技術はますます重要になると考えている。

文 献

- 1) 内田浩基, 川上理亮, 河南治, 月面水採取サーマルマイニング技術の開発～氷水を含む月面レゴリスの熱解析～, 第 67 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2023).
- 2) 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 (2020).
- 3) George Sowers, Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, Colorado School of Mines, NIAC Phase I Final Report (2020).
- 4) P. T. Metzger, Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, Earth and Space (2018).
- 5) 内田浩基, 川上理亮, 松風成美, 森田健, 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, 高砂熱学工業イノベーションセンター報, No. 35 (2021).
- 6) Shuai Li, Paul G. L., Ralph E. M., Paul O. H., Elizabeth F., Jean-Pierre W., Dana M. H., Richard C. E., Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, PNAS, vol. 115, no. 36. (2018).
- 7) 小田豊, 岩井裕, 鈴木健次郎, 吉田英生, 多孔質体内熱流動と固体壁内熱伝導の連生解析, 日本機械学会論文集 (B 編) 69 巻 679 号 (2003).
- 8) 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).
- 9) Kossacki, K. J., J. Leliwa-Kopystynski, Temperature dependence of the sublimation rate of water ice: Influence of impurities, Icarus 233 (2015).
- 10) Murphy, D. M., and T. Koop, Review of the vapor pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications, Q. J. R. Meteorol. Soc. 131, 608 (2005).

ABSTRACT

Thermal mining, which directly heats lunar regolith and captures water vapor, has been proposed as a method for mining ice in permanently shadowed regions (PSRs) on the lunar surface. This method has a problem: it is difficult to heat the deep layer because the effective conductivity of the regolith is extremely low. Therefore, we devised an original method for mining ice in PSR includes the following steps: heat the deep layer of the lunar regolith with a heater, and create a closed space surrounded by a thin ice wall that acts as a shell for water vapor, fill the inside of the shell with high-temperature inert gas to promote heating the icy regolith through convection and sublimate the ice, insert a straw into the shell and suck up the water vapor and condense on the lunar surface. We are currently investigating the feasibility of the above method from various perspectives. As one of these, we examined the feasibility of forming an ice wall through numerical analysis. First, by customizing OpenFOAM, we made it possible to simulate heat transfer in the lunar icy regolith. Next, we used this customized solver to simulate heat transfer when icy regolith was heated with a heater. As a result, ice sublimated quickly in the regolith within 2-3 mm from the heater, and a dry region appeared. The water vapor moved outside the dry region, recondensed, and solidified, forming an ice-rich region (ice wall). Finally, we could quantitatively understand the mechanism of ice wall formation.
