サーマルマイニングによる月面での水抽出

(第三報) 水蒸気捕獲方法の検討

内田浩基·鹿山雅裕*1

Thermal Mining for Lunar Water Part 3 – Studies on Cold Trap for Water Vaper

Hiroki Uchida · Masahiro Kayama

近年の探査により月の永久影には大量の水氷(H₂O)が存在すると考えられており、水素 燃料や飲料水などの水資源としての活用が期待されている。我々は月面において水氷を抽出 する技術として、月の砂(レゴリス)が含有する水氷をヒーターで直接加熱し、発生した水蒸 気を抽出するサーマルマイニング技術の開発を進めている。本開発において、主な要素技術で ある"レゴリスに付着した氷水を効率よく加熱して水蒸気を発生する技術"の開発を進めてき た。この要素技術に加えて、もう一つの要素技術である"レゴリスから放出された水蒸気を 氷、または(加圧容器内で)水として効率よく捕獲する技術"についても検討を開始した。サ ーマルマイニングによる月面水抽出は太陽光が届かず温度が極めて低い(数+K以下)永久 影内で行うことが想定され、"レゴリスから放出された水蒸気を捕獲する工程"も省エネかつ 短時間に行う必要がある。また、月面のレゴリスに含まれる氷の量は0.1~5 wt%程度と推定 されていることから、少量の水氷から発生した水蒸気の宇宙空間への放出を抑えて効率よく 捕獲する技術の開発が必要である。さらに、月の水氷を水電解や飲料水として使用する上で有 害である多量の不純物(硫化水素やアンモニアなど)が含まれている可能性があることも大き な課題であり、後工程の純水化処理に先立って水抽出の段階から可能な限り不純物を取り除 いていくことが重要と考えられる。

1. 緒言

国際探査ロードマップ¹によると、宇宙経済圏の構築と将来の火星有人探査に向けて、月の探査・開発 は極めて重要な足掛かりとされている。月面の永久影(PSR: Permanently Shadowed Region)に水氷が大 量に存在する可能性が高いことが衛星観測や科学検証により示唆されている^{2,3)}。月面で資源活用に十分 な量の水を抽出できれば、ロケットの推進剤や有人活動用の飲料水などとして利用でき、地球から月への 水の輸送を最低限に抑えて、将来の宇宙ミッションのコストを大幅に削減できる⁴⁾。当社は 2025 年前半 において、世界で初めて月に水電解装置を持ち込み、ロケット推進剤として利用できる水素と酸素を生成 する実証実験を行う⁵⁾。月面における水電解は推薬生成プラント構想^{6,7)}の後工程であり、この前段階と して月の現地での水氷の探査や抽出、抽出した水資源のプラントへの輸送、純水化処理などの工程が必要 となる。さらに現地運用の際には、水電解で生成した水素の圧縮・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。これらの工程のうち、当社では月面水電解技術の開発に加えて、そ の前工程である月面の水資源を効率よく抽出する方法を検討している。

月の水資源抽出において、水氷を含む月の砂であるレゴリスから水のみを抽出する最も簡単な方法は、

レゴリスを加熱して付着する水氷を水蒸気として取り出すサーマルマイニング: Thermal Mining(または Thermal Extraction)である⁸⁾。大気が 10⁻⁷~10⁻¹⁰ Pa と超高真空~極高真空である月では、レゴリスから分 離した水蒸気の分子は加熱地点から放射線状に離散する。その後、水蒸気は加熱地点から離れた昇華温度 が低い領域において氷または加圧条件下で水^(*)として捕獲(コールドトラップ)される。捕獲された氷ま たは水は、氷であれば加熱して水に戻し、最終的には抽出水として貯留するか、あるいは純水化処理など の後工程に渡すのが一般的である。この一連の月面水抽出における主な技術要素としては、以下の2点と 考えている。

① レゴリスに付着する氷を効率よく加熱して水蒸気を発生させる技術

② レゴリスから発生した水蒸気を水、または氷として効率よく捕獲する技術

要素技術①において、大気が薄い月ではレゴリスの熱伝導率が極めて低いため、隙間が多いレゴリスを 広い範囲で一様に加熱することは困難である。そこで前報^{9,10}において、月の地下のレゴリスを加熱して 氷壁に囲まれた与圧空間を形成し、水蒸気を抽出する方法を提案した⁹。また、数値解析により氷が付着 するレゴリスを加熱した際の伝熱の挙動や水蒸気の移動、氷壁の形成プロセスをシミュレーションした ^{10,11}。

本報告では、要素技術①:氷が付着するレゴリスを効率よく加熱する技術に関してレビューし、さらに、 要素技術②:水蒸気を効率よく捕獲する技術に関しても検討を開始したので報告する。

2. 氷レゴリスの加熱方法

月面において氷を含むレゴリスから"サーマルマイニング"によって水抽出を行う方法は Sowers によって提案された¹²⁾。月のレゴリス層は、砂(ソイル)の空隙が体積の半分以上を占める多孔質である⁹⁾。サーマルマイニングは、氷が付着するレゴリスごと加熱して氷のみ水蒸気に相変化(昇華)させ、ソイル間の隙間を通して月面に水蒸気を放出させて抽出する方法である。

Sowers が提唱したサーマルマイニングは、月面にドーム状の簡易テントを設営し、テント内のレゴリス表層に太陽光を集光させて加熱して、氷から昇華した水蒸気を抽出する(図1)。しかしレゴリス内の伝熱は、月の極めて薄い大気圧下では、砂の間のわずかな点接触による熱伝導と砂の表面からの輻射伝熱のみによるため、実効熱伝導率が極めて低いことが知られている¹³⁻¹⁵⁾。このため、レゴリス表面からの熱流は表面から数 cm 程度の深さまでしか到達できず水抽出可能な範囲も表面から深さ数 cm までに限られる。そこで著者らは、ドリルで月面から深さ1m ~数m程度の小孔を掘削し、孔の先端を加熱することで加熱部を中心とした氷壁に囲まれた与圧空間を形成し、氷壁内側のレゴリスを加熱して水蒸気を取り込む方法(図2)を提案した⁹⁻¹¹。現在も引き続き有効な氷壁形成方法について実験と数値シミュレーションの両面から検討を進めている。

レゴリスから氷を効率よく加熱する方法として、Hab¹⁰、および Kiewiet ら¹⁷は Sowers のドーム状テントによりレゴリスを加熱する方法と物理的な機械採掘により氷を含むレゴリスをるつぼ(Crucible) 容器内に密閉し加熱する方法を比較している(図3)。図中の In-situ Extraction がドーム状テントを用いてレゴリスを加熱する水抽出方法、Excavated Extraction が機械採掘により収集したレゴリスをるつぼ内で加熱する水抽出方法である。比較の結果、In-situ Extraction 法による水抽出は簡便さ(Complexity)や装置の長寿命化(Lifetime)に有利である一方、抽出率(Extraction Rate)やエネルギー効率(Energy Efficiency)はるつぼ加熱が優れることが示された(表1)。In-situ Extraction 法とるつぼ加熱法はいずれも一長一短であり、個々のプロジェクトに適した水抽出方法を選択する必要がある。さらに、るつぼ容器内の加熱方法に関してはHeitkampら¹⁸⁾によって氷を含むレゴリスを素早く均一に加熱する方法が提案されており、複数の棒ヒーターを用いてるつぼ内のレゴリスを機械的に攪拌する加熱機構が検討されている(図4)。

^(*) 月の大気圧(10⁻⁷~10⁻¹⁰ Pa)は三重点以下であり液相の水は存在しないが、レゴリスに付着する氷を加熱することによる 水蒸気の発生により加圧が生じ、蒸気圧が三重点を超える場合は水として存在する可能性が考えらえる。



図1 テントを設置し月面の水を収集する方法 12)



図2 高砂熱学サーマルマイニングによる月面水抽出 9-11)



図3 テント設置による月面加熱とるつぼ容器内加熱による水抽出の概略モデル^{16,17)}



表1 テント設置による月面加熱とるつぼ加熱による水抽出の Trade-off 比較¹⁶⁾

図4回転する複数の棒ヒーターによる氷レゴリスの攪拌、加熱シミュレーション¹⁸⁾

3. コールドトラップの方法

月面でのサーマルマイニングにおいて、月の水氷は最終的には液相(水)として貯留するか純水化処理 などの後工程に渡すことを想定している。このため、レゴリスを加熱することで発生した水蒸気は、水ま たは氷(液相か固相)の状態で捕獲・回収する必要がある。

レゴリスから発生した水蒸気を捕獲・回収する一般的な方法としては、凝華温度以下に冷却したコール ドトラップで水蒸気から水、または氷に相変化させて捕獲する手法(Cold Trap 法、以下 CT)が考えられ る。サーマルマイニングにより、レゴリスに付着する氷の状態から CT を経て液相の水として抽出するま での相変化における温度と圧力の関係を図5に示す¹⁹⁾。図中 A は極低温・極低圧に保たれたレゴリスの 氷であり、この状態の氷をレゴリスごと加熱し B の気相(水蒸気)の状態でレゴリスから抽出する。抽 出した水蒸気(B)は、2a の経路で一旦氷(C)にして 2b の経路で水(D)に戻すか、あるいは3の経路 で直接水(D)に戻すか、の二通りが考えられる。

111



図5月面水抽出における水の温度/圧力の相変化図¹⁹⁾

赤字の A~D は著者が記入

本報では、水蒸気から氷としてトラップした後に水に戻す経路(2a→2b)を「氷トラップ」、水蒸気から直接水としてトラップする経路(3)を「水トラップ」と呼ぶ。

ここで注意すべき点は、月の氷には H₂O だけでなく水資源活用において有害な多くの不純物が含まれることである^{2,19,20}。不純物をある程度含む抽出水を水電解する場合、電解効率の低下、装置の劣化や破損を引き起こす可能性があるため、水電解を行う前処理として抽出水から不純物を取り除く純水化処理が必要となる。

レゴリスに付着する氷からの水蒸気を CT にて捕獲する際、水トラップに比べて溶存率が少なく、より 低温で水蒸気を捕獲できる氷トラップの方が水資源活用において有害な不純物を大幅に除去できること が報告されている²⁰⁾(図6)。水抽出の段階で水蒸気を氷トラップすることで不純物を事前に大幅に低減 できれば、後工程(水電解の前処理)の純水化処理が容易になる。



青はコールドトラップにて 0.1 atm 下で液相(水)としてトラップした場合、赤はコ ールドトラップで氷としてトラップした後、水に戻した場合の抽出水に含まれる不純 物の含有量

図6 レゴリスからの抽出水に含まれる不純物の含有量予測値²⁰⁾

一方、月の氷に含まれている不純物の種類と量に関しては、得られている科学データが少ないため、具体的に氷トラップと水トラップのいずれの方式が実現的あるいは効率的であるかは現時点で結論付けられていない。

3.1 氷トラップの仕組み

月面の永久影などの極低温環境の水氷の抽出を想定し、拡散真空ポンプを用いた超高真空以下(10%~ 10⁻¹¹ Pa)の圧力下において極低温に冷却した氷を加熱し、昇華した水蒸気を離れた位置に設置された CT 表面(液体窒素にて冷却)に着氷させる氷トラップの実験が行われている ²¹⁾ (**図 7**)。 **図 7** (a)の真空ポン プにより減圧された装置内で Water Container (WC)内の氷 (-50 ℃) が昇華し、発生した水蒸気が CT (図中 Ice Collection Area、~-150 ℃) に移動および着氷する。蒸気の移動は WC と CT の温度差で発生 する水蒸気圧差により、WCからCTへの水蒸気の移動が生ずると考えられる。CTに接触した水蒸気は 潜熱に相当する熱エネルギーを奪われ氷に相変化(凝華)して着氷する。CT 近傍の昇華温度における飽 和水蒸気圧が、CT に着氷した氷表面の温度における飽和水蒸気圧より高い状態の場合、CT 表面の水蒸 気は凝華して図7(b)のように氷が成長して厚みを増すと考えられている²¹⁾。しかし、CT 表面の氷(約2 W/(mK)²²⁾)はCTの構成材料である銅(400W/(mK)²³⁾)やステンレス(16W/(mK)²³⁾)に比べて熱伝導 率が低いため、氷が厚みを増すにつれて CT 表面の冷熱が氷最表面に伝わりにくくなる。厚みが増すごと に水蒸気の収集効率が低下すると考えられるため、水蒸気を効率よく捕獲するためには、氷がある程度の 厚みまで成長した時点で氷を取り除き、低温がより保たれている CT 表面を露出する必要がある。氷は CT 表面に密着しているため、CT 表面に薄いフィルムヒーターを貼り付けて加熱することで、CT 表面と氷 の間に"蒸気潤滑層"を形成し氷を剥離する手法を検討している(図7(c)A,B)。氷を剥離するため、熱 容量が大きい金属製の CT 全体の温度を上げるには長時間の加熱と大きな電力を要する。したがって、熱 容量が小さく短時間で昇温可能なフィルムヒーターを CT 表面に張り付けることで、CT 最表面のみ省エ ネかつ短時間で昇温させ氷を剥離することが可能であると考えられる。

3.2 水トラップのメリット

CTの表面温度を0℃以上に設定し、水蒸気を液相(水)として捕獲する「水トラップ」のメリットと して、氷トラップのように着氷後に CT 表面を加熱して氷を取り除く作業が必要ないため、連続的かつよ り効率的な水収集が可能であることが挙げられる。図8に(a)氷トラップと(b)水トラップの工程モデル を示す。水トラップの場合は、CTの表面温度は0℃以上であり、レゴリスから発生する水蒸気圧は0℃ の水蒸気圧、つまり三重点に相当する 611 Pa を超える必要がある。たとえば、CT の表面温度を 5 ℃、過 冷却度を10 ℃と仮定した場合、レゴリスに付着する氷を15 ℃まで加熱する必要がある。氷レゴリスか ら発生した水蒸気の CT 表面への移動は、氷トラップと同様、飽和水蒸気圧差(レゴリスの温度である 15℃の飽和蒸気圧 1,704 Pa と CT の表面温度である 5℃の飽和水蒸気圧 872 Pa の差)による。CT 表面に 接触した水蒸気は 0 ℃以上のため水に相変化するが、氷トラップのように固体(氷)の付着ではない点 において、水トラップがより効率的に水収集できる可能性がある。水トラップの場合、CT 表面で凝縮し た水滴は表面張力によって隣り合う水滴同士で連結し、粗大化すると考えられる。また重力がある場合、 水滴は CT の下方に移動し表面から滴り落ちる。 月のように重力が弱い場合でも、 CT 表面近傍の気体 (水 蒸気)の流速を大きくすることで容易に水滴を移動できる。CT 表面から自律的に水滴を取り除くことに より、より低温を保持した CT 表面が露出し水蒸気と接触することができる。したがって、凝縮効率が低 下することなく連続的な水収集が可能と考えられる。たとえば、地上の技術として一般的なコイル状の凝 縮管やキャピラリー管を CT として利用し、管内に水蒸気を通過させ凝縮した水を収集する方法なども考 えられる。

また、氷トラップの場合、少なくとも氷を付着させる CT 最表面の温度は冷却(着氷)と加熱(氷剥離) のサイクルを繰り返す運用が必要であり、昇温と降温のために CT の熱容量に応じた加熱と冷却の電力が 必要である。一方、水トラップは CT 表面への水蒸気の付着(結露)による昇温を抑え表面温度を一定に 保持するコントロールであり、氷トラップに比べて消費する電力に無駄がないと考えられる。



(a)真空中で氷を加熱し昇華した水蒸気を捕獲(コールドトラップ)する装置



(b)コールドトラップ表面において水蒸気が凝華し氷が成長する様子



(c) A:真空中でコールドトラップ表面に凝華した氷(左)、B:フィルムヒーター加熱により剥離、落下した氷片(右)

図7 テキサス大学における真空中の水蒸気トラップ実験²¹⁾



図8(a)氷トラップと(b)水トラップの水蒸気捕獲工程のモデル図

上述の通り水トラップは氷トラップに比べて消費電力に無駄がないと考えられるが、トラップ方式の 選択において、水資源利用の観点から抽出水中の不純物の種類や量が純水化可能なレベルであることが 必須条件である。すなわち、不純物の量が少ない、あるいは純水化工程において問題となりうる不純物が ない場合、水トラップは成立する。一方で、水トラップでは抽出水中の不純物の量が多すぎる、または少 量でも水電解においてクリティカルである不純物が存在する場合、抽出水中の不純物量が少ない氷トラ ップが成立解となる。水トラップか水トラップかの選択において、今後十分な実験的検証が必要と考えら れる。

3.3 非凝縮性ガスの影響

図9に月のレゴリスに付着する氷を加熱した際に発生する各種揮発性物質の相図と Holquist らが提案 したコールドトラップの運用条件を示す²⁴⁾。ここで揮発性物質は、水と3章冒頭に記載した不純物に相 当する気化ガスである。各種揮発性物質が昇華または凝縮、凝華する温度と圧力において、水銀(Mercury) 以外は気体であり、CT 表面においては非凝縮性ガス(Non-Condensable Gas: NCG)として働く。一般的 に(サーマルマイニングと同様に)冷媒の蒸発や凝縮などの相変化による伝熱を利用したヒートパイプや 冷凍機は、数パーセントの NCG の混入により大幅に性能が低下することが知られている(たとえば、吸 収冷凍機は数パーセントの NCG 混入により 80%の性能低下)^{25,26)}。これは、以下のメカニズムにより 蒸発(昇華) –凝縮(凝華)のサイクルが滞るためと考えられる。

- ① CT 表面において水蒸気は冷却され凝縮(凝華)により体積が収縮する一方、NCG は凝縮せず体積は(ほぼ)一定で滞留する。このため CT 表面近傍において、空間に占める NCG の体積割合が増加し NCG が濃化する。
- ② NCG が CT 表面近傍で濃化すると逃げ場のない NCG は CT 表面で滞留する。これにより CT 表面 が NCG に覆われ、CT 表面において水蒸気が凝縮(凝華)する実効面積が減少する。
- ③ CT 表面が NCG に覆われ水蒸気の凝縮(凝華)が妨げられるため、装置内の水蒸気は体積縮小せず、一方で氷レゴリスの加熱により水蒸気の発生が続く場合、装置内の圧力が高くなる。
- ④ 装置内の圧力が上昇するため、凝華・凝縮温度も上昇する。低い温度で蒸発部(氷レゴリス表面) から冷媒(水蒸気)が蒸発しなくなるため、過冷却度(CT 表面とレゴリスに含まれる氷の温度差) が大きくなる。

図 10 に CT 表面において NCG が濃化する①~②のモデルを図解する。装置内の多量の NCG の存在は サーマルマイニングにおいても水氷の相変化を妨げ、水抽出の効率の低下を招く原因となると推察され る。このため、レゴリスを加熱した際に発生するガス中から水蒸気を残し、NCG のみを効率よく装置内 から取り除き、CT 表面での NCG の濃化を防止する必要がある。



図9月の揮発性物質の相図とHolquistら提案のコールドトラップ運用範囲²⁴⁾



図 10 コールドトラップ表面近傍における NCG 濃化モデル

表2に月の氷を加熱した際に発生し得る揮発性物質の質量と体積の割合を示す。揮発性物質の質量は、 Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS)の観測データ²⁾を元に月における水の存在形態の前 提条件から算出された「水共存物質の質量」²⁷⁾を参照にした。LCROSSの観測データに基づく水共存物質 量は表中のB)ワーストケースであるが、地上の既存の水処理技術等を加味した場合、この条件設定は過 剰と考えられた。そこで条件を緩和した A)限定ケースも設定された²⁷⁾。各揮発性物質の体積割合は、各 成分の分圧から以下の式(1)により計算した。

$$V_x = \frac{P_x}{P_{Total}} \tag{1}$$

ここで、 V_x :成分xの体積割合、 P_x :成分xの分圧、 P_{Total} :混合気体の全圧。各成分の分圧は以下の式(2)より計算される²⁴⁾。

$$P_x = P_{H20} \times \frac{n_x}{n_{H20}} \tag{2}$$

ここで、 P_{H20} : 飽和水蒸気圧力、 n_x : 成分xのモル数、 n_{H20} : 水氷のモル数であり、各成分のモル数は **表2**の各成分の質量をモル質量 [g/mol]で除すことにより求めた。また P_{H20} は0 ℃における飽和水蒸気圧 (611 Pa)を用いた。

表2の各成分の体積割合から、A)限定ケースであればNCGは0.14 vol%であり、効率低下は無視できる可能性がある。一方、B)ワーストケースの場合、17 vol%と水抽出の効率が大きく低下すると予想され

高砂熱学イノベーションセンター報 No.38 2024.

る。

さらに LCROSS のデータは人工物(セントールロケットと呼ばれる燃料タンク)を月面に衝突させた 際に発生する高温・高圧下での揮発性成分のプルーム(ガス)を分析した結果であることから、月の元々 の氷の揮発性成分を表していない可能性が指摘されている^{20,28)}。月の氷の起源の一つである彗星衝突を 仮定し、明確な化学組成が報告されている彗星の観測データ^{20,29)}を用いて、月のレゴリスに含まれる氷 を加熱した際に発生する揮発性成分の体積割合を上述の方法で計算した。その結果、C/1996 B2 (Hyakutake 彗星)の場合、NCG は 26.6 vol%、C/1995 O1 (Hale-Bopp 彗星)は 32.5 vol%であった。彗星のみを起源 とする月の氷の場合、3 割近くの NCG が発生することとなり、水抽出の効率は大きく低下すると考えら れる。

| | 質量 [% Relative to H ₂ O]* | | 体積割合 [vol%]** | |
|--------------------|--------------------------------------|-----------|---------------|-----------|
| 揮発性成分 | A) 限定ケース | B)ワーストケース | A) 限定ケース | B)ワーストケース |
| H ₂ O | 100 | 100 | 99.859 | 82.903 |
| H_2S | 0.13 | 16.75 | 0.069 | 7.340 |
| NH ₃ | 0.05 | 6.03 | 0.053 | 5.288 |
| SO_2 | N/A | 3.19 | N/A | 0.744 |
| C_2H_4 | N/A | 3.12 | N/A | 1.661 |
| CO ₂ | 0.02 | 2.17 | 0.008 | 0.736 |
| CH ₃ OH | N/A | 1.55 | N/A | 0.723 |
| CH ₄ | 0.01 | 0.65 | 0.011 | 0.605 |

表2月の水氷に含まれる揮発性物質の質量と体積割合

* 水 100g に対して共存する対象物質の質量²⁷⁾、** 著者が計算

多量の NCG が発生する場合の対策として、Holquiest らは Flow-through コールドトラップ(図11)を提 案している²⁴⁾。発生した NCG を宇宙空間に放出することで装置の内圧を下げつつ、CT 表面で水蒸気を 凝縮(凝華)する仕組みである。一方で、貴重な水蒸気の一部を不要な NCG と一緒に宇宙空間に放出し てしまう。元々の月の水氷の含有率は LCROSS や LRO 等の各種月衛星探査の結果、0.1~5 wt%前後と推 定されており^{2,27,30}、貴重な水資源をなるべく宇宙空間に放出することなく活用することが望ましい。こ のため、NCG のみを放出できる装置や技術開発が重要課題の一つであると考えられる。

また、レゴリスから発生する NCG を低減する観点から、図4の Heitkamp ら¹⁸⁾のような方法でレゴリ スに含まれる氷を均一に加熱(レゴリス内の温度差が1K程度)することも重要と考えている。レゴリス は多孔質でありレゴリスの隙間である空間がそれぞれ連通しているとすれば、レゴリス内の圧力は均一 と考えられる。レゴリス内の圧力が均一かつ温度差がほとんどなければ、加熱による昇温過程においてあ る瞬間(ある温度)のレゴリスに含まれる氷から発生する揮発物質は図11に元づくとほぼ一種類である と考えられる。水氷が昇華する直前の温度までレゴリスを均一に加熱し(つまり、水の昇華温度以下では あるが、他の揮発性成分の昇華温度以上である温度・圧力条件)、一旦装置を開放系にすることでレゴリ スから発生し装置内に充満した NCG を宇宙空間に放出し、その後、装置を閉鎖系にした後であらためて レゴリスに残存する水氷から水蒸気を発生させることで、NCG をほとんど含まない水蒸気を発生できる と考えている。このようにレゴリスを均一加熱する方法によっても、CT 表面近傍を(NCG を含まない) 水蒸気のみとし理想的な凝縮(凝華)が可能になると予想している。



図 11 Holquiest ら提案の Flow-through コールドトラップの概念図²⁴⁾

4. 月面における水抽出の場所

「月面におけるエネルギー関連技術開発(技術課題整理)」コンソーシアムの「水素WG」(三菱総合研究 所・日本宇宙フォーラム主催)において、水抽出を行う月面の「場所」と「適用方法」の組み合わせで生 ずるメリット・デメリットの比較が行われた⁷⁾。巨大なクレーターの底部に位置する永久影は極めて低い 温度環境であり、水氷が大量に存在すると目されているものの、ソーラーパネルなどから容易にエネルギ ーを得にくい地形である。このため水抽出の後工程であり多くの電力を使用する水電解は、PSR外でもあ る程度温度が低い PSR 近傍のクレーター外縁の日照域で行うか、あるいは地下に埋蔵される水氷を対象 に行うことが考えられている。

レゴリスに付着する氷からの水抽出工程は、図12(a)のように日照域(クレーター外縁)で行う場合と 図12(b)のように PSR 内で行う場合が想定されている。水抽出を日照域で行う場合、太陽光などから水抽 出に使用するエネルギーを得やすい反面、PSR 内と比べて水氷の量は相対的に少なく、鉱物重量が高いレ ゴリスを輸送する必要がある。輸送の難しさは、クレーターの大きさや形状によるが、たとえば VIPER³¹⁾ の着陸地点候補となった Nobile Crater³²⁾の場合、クレーター直径は約 79 km でありクレーター中央の PSR からクレーター外縁(日照域)までの距離は 40 km 程度、PSR とクレーター外縁部の高低差は 5,000 m 以 上(クレーター深さ/直径比³³⁾を 0.07 と仮定の場合)と予測される。クレーターの外縁にあるリッジを超 えるレゴリスの輸送は、上昇/下降のスロープがきつい悪路でありデメリットが大きい。このため水抽出 後の鉱物を有効利用する技術が確立するまでは、PSR から日照域までのレゴリスの輸送の際には水氷の みを抽出するアプローチでの軽量化も必要になるかもしれない。

図12(b)のように水抽出を PSR 内で行うことで、輸送重量を 1/20(水氷含有率 5wt%の場合)に削減で きる。当社の月面水抽出サーマルマイニング技術は、レゴリスからその場で水抽出すること、さらにはド ーム状テントと異なり移動も可能であることからも極めて画期的な手法であり、水のみを日照域に運ぶ ため輸送エネルギーに関して効率性は極めて高い。一方で、日照域と PSR 間に送電線が設備されていな い月の水資源開発における初期段階では、水抽出はバッテリー電力のみで行う必要があり、PSR 内で水抽 出を行う場合は省エネ運転が必須と考えられる。

前章までのサーマルマイニングにおける水蒸気の捕獲方法の検討では、3章冒頭において水トラップに 比べて氷トラップの方が捕獲した水に含まれる不純物の量を大幅に除去できることを述べた。また、3-2 節では氷トラップと比べて、水トラップは省エネで水収集できる可能性を述べた。月面の水抽出の工程全 体における消費エネルギーや水抽出の効率の詳細な見積もりは必要であるが、抽出水中の不純物量の低 減と省エネ性を両立する水抽出の一方法として、図13のように PSR 内で水トラップにより水抽出し、日 照域で氷トラップにより再抽出を行う方法を考えている。PSR内においては、水トラップにより省エネ、 かつ短時間でレゴリスの鉱物と水を分離して水抽出する(ただし、氷トラップに比べて不純物を多く含む と想定)。たとえば、輸送中に不純物を含む抽出水を再凍結し、その後、日照域にて氷を再度昇華して氷 トラップすることにより不純物を大幅に取り除けることが期待でき、水抽出において省エネかつ不純物 の大幅な除去が両立できると考えている。



(b) PSR 内固定抽出のイメージ図





5. まとめ

月面で水抽出するためのサーマルマイニングにおける主な要素技術として、①レゴリスに付着する氷 を効率よく加熱して水蒸気を発生させる技術、②レゴリスから放出された水蒸気を水(または氷)として 効率よく捕獲する技術が考えられる。本報告では要素技術①:レゴリスに含まれる氷を効率よく加熱する 技術についてレビューし、要素技術②:水蒸気を効率よく捕獲する技術に関しては、月面環境やレゴリス に含まれる氷の状態など現時点で得られる情報から課題を抽出し、以下のように考察した。

 サーマルマイニングにおいて、水抽出を行う月面の場所は容易に太陽光エネルギーが得られない永久 影(PSR)の内部である。月の水資源開発における初期段階では、水抽出をバッテリー電源により行う 可能性が考えられるため、省電力かつ短時間で水抽出を完了する必要がある。

- 月のレゴリスに含まれる水氷の量は0.1~5 wt%であると推定されている。この貴重な水資源を活用する上で、水抽出において不要な揮発性物質と一緒に宇宙空間に排出される水蒸気量を少なくし、レゴリスに含まれる水氷の量に対して高い抽出率が得られる水抽出技術の開発が必要である。
- 月面での水抽出における水の純度に関しては、後工程の純水化処理を容易にするため、可能な限り不 純物を事前に除去する必要がある。

水抽出の電力効率や抽出率、抽出水の純度などの各性能は、装置の設計やレゴリスの加熱温度、コール ドトラップの制御温度、装置内圧力などの各パラメータに影響を受けると考えられる。現状では、性能に 影響を及ぼす各パラメータと水抽出の性能値のベースライン自体が不明であるため、今後は実験的な検 討により明らかにしていく予定である。

文 献

1) ISECG(国際宇宙探査協働グループ): 国際宇宙探査ロードマップ(Glocal Exploration Roadmap) 改訂版, (2024).

- A. Colaprete, P. Schultz, J. Heldmann, et al.: Detection of water in the LCROSS ejecta plume, Science vol. 330 (6003), pp. 463-8 (2010).
- 3) S. Li, P. G. Lucey, R. E. Milliken, et al.: Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions, The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) vol. 115 (36), pp. 8907-12 (2018).
- Henning Wache, Luca Kiewiet, editors. Investigation on the Thermal Properties of an Lunar Icy Regolith Simulant. Space Resources Week 2024 (SRW); 2024 25-27 March 2024; Luxembourg.
- 5) 津村柊吾, 加藤敦史, 馬場大輔, et al.: 2D14 月面実証用水電解装置の開発, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会 (2024).
- 6) 宇宙航空研究開発機構:日本の国際宇宙探査シナリオ(案) 2021, EZA-2021001 (2021).
- 7) 三菱総合研究所,日本宇宙フォーラム:令和3年度宇宙開発利用推進研究開発 (月面におけるエネルギー関連技術開発 (技術課題整理))報告書,(2022).
- Luca Kiewiet: Space Resources:Water Extraction Technologies on the Moon (and Mars), Management course Space Exploration lecture Politecnico di Torino (2023).
- 9) 内田浩基, 川上理亮, 松風成美, et al.: 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, 高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 35 (2021).
- 10) 内田浩基,中田拓司,川上理亮, et al.: 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,高砂熱学イノベーションセンター報 vol. 37 (2023).
- 内田浩基,川上理亮,河南治: 2L09 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).
- 12) George Sowers: Thermal Mining of Ices on Cold Solar System Bodies, NIAC Phase I Final Report: Colorado School of Mines (2020).
- 13) P. T. Metzger: Modeling the Thermal Extraction of Water Ice from Regolith, Earth and Space 2018 pp. 481-9 (2018).
- 14) Naoya Sakatani, Kazunori Ogawa, Masahiko Arakawa, et al.: Thermal conductivity of lunar regolith simulant JSC-IA under vacuum, Icarus vol. 309 pp. 13-24 (2018).
- 15) Stephen E. Wood: A mechanistic model for the thermal conductivity of planetary regolith: 1. The effects of particle shape, composition, cohesion, and compression at depth, Icarus vol. 352 (2020).

- 16) Niklas Hab: Modeling, Simulation and Comparison of Lunar Thermal Water Extraction Methods for Space Resource Utilization, Technical University of Munich (2022).
- L. Kiewiet, N.M. Hab, F.M. Marchese, et al.: Trade-off and optimization for thermal Lunar water extraction system, 73rd International Astronautical Congress (2022).
- Mart Heitkamp, Luca Kiewiet: Accurate modelling of ISRU technologies by CFD and DEM, Space Resources Week 2024 (2024).
- Luca Kiewiet: An overwiew of the LUWEX project, German Aerospace Center (DRL), Oberseminar Geo und Astorphysik (2024).
- 20) 宮本真吾, 松本千誉: 2L11 月面におけるレゴリス抽出水の純水化処理, 第67回宇宙科学技術連合講演会 (2023).
- 21) Nathaniel Ian Jurado: Rarified Water Vapor Deposition From Icy Lunar Regolith On An Engineered Cold Plate, University of Texas at El Paso (2021).
- 22) 福迫尚一郎, 田子真, 山田雅彦: 氷、 雪、 および海氷の熱物性, Netsu Bussei vol. 2 pp. 89-100 (1988).
- 23) 日本熱物性学会: 新編 熱物性ハンドブック,(株)養賢堂 (2008).
- 24) Jordan B. Holquist, Patrick Pasadilla, Chad Bower, et al.: Analysis of a Cold Trap as a Purification Step for Lunar Water Processing, International Conference on Environmental Systems (2020).
- 25) 鈴木洋, 永本渡, 杉山隆英: 吸収冷凍機における吸収器・蒸発器内の不凝縮ガスの挙動, 日本冷凍空調学会論文集 vol. 20 (3), pp. 333-40 (2003).
- 26) 大丸拓郎, 永井大樹: 自励振動ヒートパイプにおける非凝縮ガスの影響, 航空宇宙技術 vol. 13 pp. 17-24 (2014).
- 27) 岡本すず菜,島田 潤,目黒 裕章, et al.: 3D01 国際宇宙探査における水資源利用の役割,第68 回宇宙科学技術連 合講演会 (2024).
- 28) K. E. Mandt, O. Mousis, D. Hurley, et al.: Exogenic origin for the volatiles sampled by the Lunar CRater Observation and Sensing Satellite impact, Nat Commun vol. 13 (1), pp. 642 (2022).
- J. Crovisier, D. Bockelée-Morvan: Remote Observations Of The Composition Of Cometary Volatiles, Space Science Reviews vol. 90 pp. 19-32 (1999).
- 30) A. B. Sanin, I. G. Mitrofanov, Maxim Litvak, et al.: Hydrogen distribution in the lunar polar regions, Icarus vol. 283 (2016).
- 31) Emily Certain: VIPER NASA'S MOON ROVER, (2023).
- 32) USGS Astrogeology Science Center: MOON Nobile, https://planetarynames.wr.usgs.gov/Feature/4321.
- 33) Bo Wu, Yiran Wang, Stephanie C. Werner, et al.: A Global Analysis of Crater Depth/Diameter Ratios on the Moon, Geophysical Research Letters vol. 49 (20), (2022).

ABSTRACT

We continue our research on the efficient collection of water ice that thought to exist in the permanent shadow regions (PSRs) of the Moon. In thermal mining, wherein water vapor is extracted by directly heating icy regolith layers, the technology required to heat the ice in the regolith and generate water vapor efficiently is an important element. In addition to this technology, we have started developing technology that efficiently captures the water vapor rising from the icy regolith in the form of liquid water or ice. As lunar water extraction through thermal mining is expected to be carried out in PSRs, where sunlight does not reach and energy generation is difficult, the process of capturing water vapor must also be energy-saving and rapid. In addition, as the amount of ice water contained in the icy regolith is estimated to be approximately 0.1-5 wt%, it is necessary to develop technology that can sublimate a small amount of ice water and capture all of the water vapor that is generated without any waste. Furthermore, the large amount of impurities (such as hydrogen sulfide and ammonia) contained in lunar water presents a major challenge to using it for electrolysis or as drinking water. It is important to remove as many impurities as possible at the water extraction stage preceding purification process.