

特集「月科学の最先端と今後の展望：月はどこまでわかったのか？」

LCROSS衝突の放出物のすばる望遠鏡による地上観測

洪 鵬¹, 岡村 奈津子¹, 杉田 精司¹, 関根 康人¹, 寺田 宏², 高遠 徳尚²,
早野 裕², 布施 哲治², 河北 秀世³, 黒澤 耕介¹, 春山 純一⁴, 古荘 玲子²,
門野 敏彦⁵, 中村 良介⁶, 羽村 太雅¹, 関口 朋彦⁷, 渡部 潤一²

2010年4月14日受領, 2010年5月6日受理.

(要旨) LCROSS探査とは, 月極域の永久影における氷の有無を, 人工衝突によって表層を掘削して直接的に観測する探査である. 我々はLCROSSの羊飼いの探査衛星とは独立に月面上の水の有無を確認することと, 羊飼いの探査衛星の観測からは得られない放出物の鉛直分布に関する制約条件を得ることを目的として, すばる望遠鏡を用いて近赤外波長域での放出物の高分散分光および撮像観測を行った. 事前の数値計算による予想では, かなりの量の水やダストの放出物が観測される見込みであったが, 実際の観測データからはそれらは検出されなかった. そのため, 水の分布などに対する情報は得られなかったが, 本観測の結果はLCROSSの衝突が従来の標準的なクレーター形成モデルの予測とは大きくかけ離れたものであったことを示唆している.

1. LCROSS探査とは

月の極域には一年中太陽の光が当たらず極低温が保たれている永久影と呼ばれる領域があり, そこには彗星や隕石の衝突でもたらされた水が氷として保存されている可能性が指摘されてきた[1, 2]. 氷が存在するとなると, 将来の有人活動にとって貴重な資源になるため重要である. また, その組成やD/H比を調べられれば, 月にもたらされた水の起源を知る重要なデータともなる. 初めて氷の存在を示唆するデータを得たのは, Clementineによるレーダー観測においてだった[3]. しかしその後の再解析[4]や地上からのレーダー観測[5, 6, 7], 理論計算[8]ではいずれも否定的あるいは必ずしも支持しない, という結果が出された. しかし, さらにその後のLunar Prospector (LP) の中性子線観測は,

極域における水素の濃集を発見し[9, 10, 11], 氷の存在を強力に支持したため, 大きな議論が巻き起こった. その議論には3つの主要な論点がある. 一点目は, 水素はどのような分子状態(H_2O , H , 炭化水素, など)で存在しているのかという点である. これは水素の起源に密接に関わる問題であり, 隕石や彗星によって水分子を持ち込む以外に, 太陽風の埋め込み, 月内部からの供給, 地球磁気圏や星間分子雲由来, など様々なプロセスが提唱されている[12]. 二点目は, H はどのような鉛直分布を持っているのかという点である. レーダー観測と中性子線観測は, 地下数十cmから数m程度の深さまでのデータが得られるが, 水素の濃集が見られたShackletonクレーターの永久影領域表面をかぐやが撮影したところ, 地表に露出した純粋に近い氷は存在しないことが報告された[13]. そのためどの程度の深さから下に氷が分布しているのが重大な関心事となっていた. 三点目は観測された水素の水平分布についてである. LPのデータからは, 永久影だけでなく日照面にも水素が分布している可能性が残されていた. さらにLCROSS衝突の直前に, 月高緯度地域の日照面において3 μm 付近の水和物と調和的な吸収ス

1. 東京大学大学院新領域創成科学研究科

2. 国立天文台

3. 京都産業大学理学部

4. ISAS/JAXA

5. 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

6. 産業技術総合研究所

7. 北海道教育大学

hong@astrobio.k.u-tokyo.ac.jp

ベクトルが見られることが報告され[14, 15, 16], 月面におけるHの安定性, 挙動について我々の知らない側面が数多く残されていることが改めて強く認識させられることとなった. このように月には水以外の形でHが存在し得るため, 永久影中の水素の存在は直接に氷の存在を裏付ける決定的な証拠とはならないのである.

2009年10月9日に行われたLunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS) ミッションは, これらの疑問, 特に氷の有無(水素の分子状態)とその鉛直分布に答えを与えることを企図した探査である. 燃料を抜いた質量2000 kg, 密度28 kg/m³のアトラスVロケット胴体を衝突体として速度2.5 km/s, 衝突角85° ± 5° で永久影に衝突させ, 表層物質を掘削して水の有無を直接的に探査する. 最初に月面に突入していくロケット胴体の後方からはLCROSS羊飼い探査衛星が追尾しており, 掘削された放出物の観測を行う. この羊飼い探査衛星自体も質量700 kg の衝突体として約4分後にやはり同じ衝突条件で永久影に衝突していく.

衝突地点は南極付近のCabeusクレーター内の永久影である. この標的位置は, 衝突の1週間ほど前に標的クレーターが変更となり, 地上観測者達を驚かせたが, この変更はLCROSSと同時に打ち上げられた Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO) の中性子線計測器(LEND)による高空間分解能の観測によってCabeusクレーターに水素が特に濃集していることが確認されたことを反映した結果であった. Cabeusクレーターの底部から十分な量の放出物が高さ2 kmのCabeusクレーターのリムを越えれば地上からも観測可能である. 事前のSPHシミュレーションによると2 kmを越える放出物の量は 2×10^4 kg であり, LPで観測された典型的な水含有率1 wt%を仮定すると, 水の質量は200 kgにも及ぶことが示された[17]. これはすばる望遠鏡のような大型の地上望遠鏡であれば十分検出可能な量である. 地上望遠鏡から放出物を観測する利点は, 放出物を横方向から鉛直構造を観測できる点である. このため, 上から見下ろしながら観測を行う羊飼い探査衛星とは異なり, 地上望遠鏡観測は水の深さ分布に制約を与える重要な情報を与えられることである. 衝突探査と連携した地上望遠鏡観測としてはDeep Impact ミッションの際に, すばる望遠鏡によって彗星の表層の鉛直構造を制約することに成功した例がある[18].

LCROSS衝突は無事に予定通り行われ, これまでに公表された羊飼い探査衛星のデータからは, 直径28 ± 2 mのクレーターが生成され, 直径約8 kmほどの衝突蒸気雲が生成し, その中から90 kg以上もの水蒸気が検出され, 水銀なども存在することを示唆する報告がなされている[19, 20, 21]. 地上観測の成否を左右する重要な要素である観測当日のマウナケア山頂の気象条件は, 決して良いとは言えなかった. 湿度の時間変化が大きかった上に(観測直前まで80%以上あったのが, 観測開始直前に急速に減少し, 観測終了時点では30%程度にまで落ちていた), 上空には強い散乱を引き起す巻雲が漂っていたためである.

2. すばる望遠鏡による地上観測

2.1 撮像観測

我々は, すばる望遠鏡の近赤外波長域の装置(InfraRed Camera and Spectrograph (IRCS))を用いて放出物の撮像観測を行った. IRCSは1024 × 1024ピクセルの画像を得る事ができ, 同時に分光観測も行うことができる. 大気による吸収があまり強くない近赤外K' バンドのフィルター(中心波長2.12 μm, 波長幅0.35 μm)を用い, 0.5秒露光の画像を4秒おきに, 衝突前後において取得した.

図1は撮像観測で得られたCabeusクレーター周辺の全景である. 図2にあるように, 分光観測のためにスリットを衝突地点上空に置くのだが, 大気の屈折率が時間変化するためにスリットが月面上をゆらぐことは避けられない. スリットが所定の場所から動いてしまうと観測対象を外してしまいかねない. そこで我々はすばる望遠鏡の補償光学系を使うことでスリットのゆらぎを抑える方法を採用した. その際, 通常の補償光学観測では参照光として点光源である恒星を用いるが, 本観測では空間的な広がりを持った月面の日照面領域を参照光とせざるを得ないため, 当日に補償光学系が有効に機能するかについては大きな不確定性があった. しかし本番の観測においては, 月面上で光のコントラストが強い部分をうまく見つけられたため, 補償光学系が効果的に機能し, スリットのゆらぎを1ピクセル程度(月面上で約100 m)まで抑えることに成功した.

分光観測については次節で詳しく述べるが, 分光観

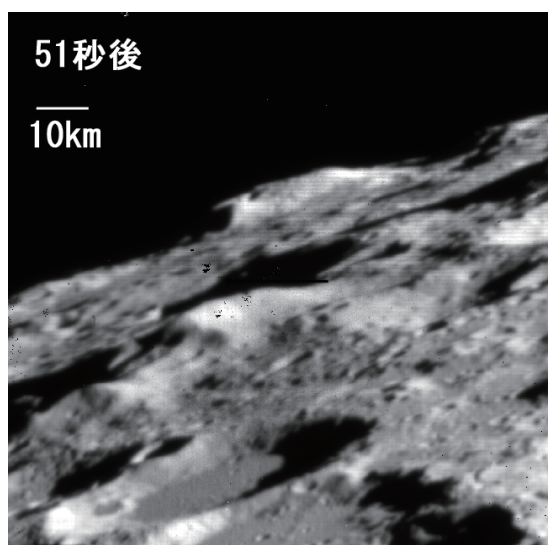


図1：最初の衝突から51秒後のCabeusクレーター周辺の画像。中央の黒い水平線は分光観測のためのスリット。スリット中央の下辺りに衝突地点があるが、手前にある山とクレーターのリムによって隠されている。

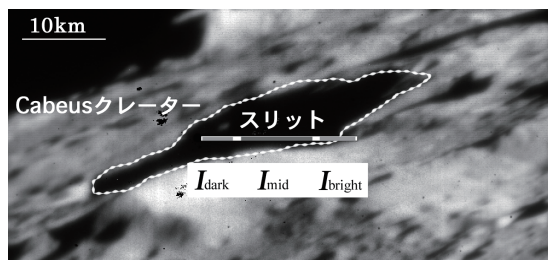


図2：Cabeusクレーターの拡大図。スリット中で色分けした領域それぞれに入ってきた光を、下に書いてある3つのスペクトルとしてそれぞれ抽出した。

測では放出物中のダスト成分を検出することは難しい。ダスト散乱光のスペクトル成分は輝線ではなく連続光の形で現れる。月面の反射光もダストと同様の連続スペクトルであるので、月面光とダストによる散乱光を見分けるのが極めて難しいからである。したがってダスト成分の検出には撮像による観測の方が分光観測より有効である。また撮像観測は光の放射束の計測に適している。ダスト散乱光の放射束が観測できれば、LCROSS衝突による放出物の量の推定も可能となる。放出物の量の観測は、掘削された永久影内の表層物質の水の含有率を求める際に必須であるだけでなく、数少ない実際の惑星表面上での衝突実験という観点からも重要である。

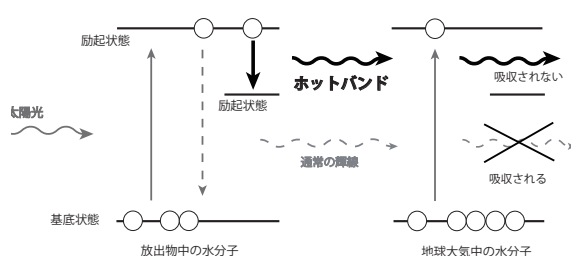


図3：水分子のホットバンドと通常輝線の遷移の模式図。

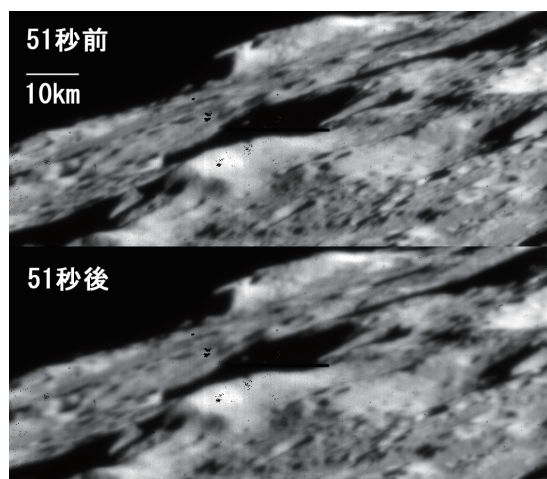


図4：撮像で得られたCabeusクレーターの拡大画像。時間は最初の衝突の時間に対しての値。スリット周辺に見える黒いしみは機器由来。

2.2 分光観測

LCROSS探査の最大の目標は水の直接的な検出である。我々が狙うのも水分子そのものが出す輝線である。しかし通常、地上から大気圏外の水分子の輝線を観測するのは非常に困難である。なぜなら地球大気自体に大量の水蒸気が含まれるので、観測対象から放射された水分子の輝線の大部分は著しく吸収されてしまうからである。しかしホットバンドと呼ばれる励起振動準位間の遷移に由来する輝線群は大気に吸収されずに地上まで到達することができる（図3）。放出物中に含まれる水分子は太陽光に照射される高度にまで到達すると励起される。励起された水分子はしばらく後に緩和して遷移エネルギーを放射するが、この時通常の輝線の遷移は基底状態まで落ちる共鳴遷移であるのに対し

て、ホットバンドの遷移は基底状態までは落ちずに中間の状態までしか落ちない遷移である。共鳴遷移によって放射された光が地球大気に入射すると、基底状態に分布する大気中の大量の水分子を励起させてしまうので、結果的に吸収されてしまう。一方、ホットバンドの遷移によって放射された光が地球大気に入射した場合には、励起させるべき中間状態にある水分子が大気中にほとんど存在しないため、大気を透過できるわけである。また、このことからホットバンドが吸収線ではなく輝線として地上で観測される。ホットバンドを用いた水の観測はこれまで実際に彗星の観測で用いられてきており、有効性が示されている[e.g., 22, 23]。しかしホットバンドの観測には、分子の回転輝線の1本1本を分解できるだけの高分散が必要である。そのためすばる望遠鏡のような大集光力を持つ地上望遠鏡が必要である。ホットバンドが出現する波長域は様々であるが、我々は特に強い輝線が集中することが確認されている近赤外の2.9 μm 付近に狙いを絞った。

我々は高分散であるだけでなく複数の波長帯をカバーできる近赤外分光撮像装置IRCSのEchelle分光モードを用いて観測を行った。用いたスリットは 170×4 ピクセルのものであり、これは月面において $18.7 \text{ km} \times 0.54 \text{ km}$ ($9.37'' \times 0.27''$)に対応し、達成した波長分解能は $\lambda/\Delta\lambda \sim 10000$ であった。補償光学系によって大気屈折のゆらぎの影響を抑えて、スリット位置のゆらぎを最小限にしたことは前述の通りである。スリットは図2にあるように、Cabeusクレーターのリムに平行になるように置いた。分光データは最初の衝突の前から、最後の衝突の直後まで、赤外線アレイが飽和しないように、それぞれ40秒間露光したスペクトルを何枚も連続的に取得した。データの読み出し時間等のため、各スペクトルの露光終了時間と次のスペクトルの露光開始時間は最低でも20秒程度間隔が空いている。Goldstein et al. [2009]の数値シミュレーションによれば太陽光に照射されて昇華した水蒸気は、重力によって直ちに月面に引き戻されるのではなく、多くが宇宙空間に膨張し続ける。そのため20秒の観測遮断時間内に放出物中の水分子が一旦視野に入ってまた去ってしまうという可能性は考えにくい。

3. データ解析

3.1 撮像データ

図4は撮像で得られたCabeusクレーターの拡大図である。図4上は最初の衝突の51秒前、図4下は51秒後であり、大気の散乱の影響が小さい画像を選んでいる。得られた画像は衝突前から約4秒ごとに取得されているので、慎重に観察することで放出物の視認を試みた。また衝突前後で画像の差分を取って衝突蒸気雲の検出も試みた。

撮像で得られた画像は像のぼやけ具合の時間変化がかなり大きかったが、それは上述の通り、観測当日の気象条件があまり良くなかったからである。そこで上空に漂っていた、高高度にできる水の粒子で形成された巻雲による散乱の影響を最小限に抑えるため、像が鮮明に写っている画像だけを抽出することも行った。画像のぼやけ具合を定量的に評価するため、日照域と影域の境界部分の画像の光度プロファイルを取り、その傾きが大きいほど像が鮮明だと判断した。図4はそうようにして選んだ好条件下での画像である。

3.2 分光データ

得られた分光データは大気による吸収の影響を大きく受けているだけでなく、大気自体の放射や月面の反射光の成分が大部分を占めているので、その中から水の輝線のみを抽出していかなければならない。我々は一つの観測データをスペクトル強度に応じてスリットの長さ方向に3分割した。図2に示すとおり、最も暗い領域のデータを I_{dark} 、スリットの中央部のデータを I_{mid} 、最も明るい領域のデータを I_{bright} とした。スペクトル強度が変化するのは、スリットがどれだけクレーターのリムから離れているかによって、スリットに入り込んでくる月面反射光の量が変化するためである。したがって、 I_{bright} のデータでは月面光が卓越しており、 I_{dark} のデータでは月面光が弱いかわりに相対的に大気放射が卓越している。 I_{mid} には放出物による連続的な散乱光と水の輝線が含まれていることが期待される。 I_{mid} の領域の幅は、放出物が 45° の角度で噴出してクレーターの底からスリットの高さにまで到達した時に、放出物が幾何学的に広がる幅と同程度に取っている。それぞれの領域のスペクトルに含まれる成分を

書き下すと以下の式ようになる。

$$I_{\text{bright}} = (F_{\text{moon,bright}} + F_{\text{sky}}) \times \text{Trans} \times S + I_{\text{dark}}$$

$$I_{\text{mid}} = (F_{\text{moon,mid}} + F_{\text{sky}} + F_{\text{H}_2\text{O}} + F_{\text{dust}}) \times \text{Trans} \times S + I_{\text{dark}}$$

$$I_{\text{dark}} = (F_{\text{moon,dark}} + F_{\text{sky}}) \times \text{Trans} \times S + I_{\text{dark}}$$

ここで F_{moon} は月面で反射した太陽光、 F_{sky} は大気放射、 F_{dust} は放出物中の水以外のダスト成分による散乱光を表す。 Trans は大気の透過率、 S は装置の感度、そして I_{dark} は検出器の暗電流成分を示す。この中で F_{sky} と Trans は大気中の水蒸気濃度などに強く依存するため時間変化が激しい。これらの中から水の輝線の成分 $F_{\text{H}_2\text{O}}$ のみを抽出するために以下のようにスペクトル同士の演算を行った。水の輝線の放射フラックスに対する月面光の比 η は、

$$\eta = \frac{I_{\text{mid}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{bright}} - I_{\text{dark}}} = \frac{F_{\text{H}_2\text{O}}}{F_{\text{moon,bright}} - F_{\text{moon,dark}}} + C \quad (1)$$

で表される。ここで、 C は連続スペクトルの成分であり、

$$C = \frac{F_{\text{dust}}}{F_{\text{moon,bright}} - F_{\text{moon,dark}}} + \frac{F_{\text{moon,mid}} - F_{\text{moon,dark}}}{F_{\text{moon,bright}} - F_{\text{moon,dark}}} \quad (2)$$

で表され、月面反射光とダストの散乱光の両者に起因する項である。(2)式の第1項は時間変化する成分であるが、第2項は時間変化しない定数である。これらの式が成り立つのは、 F_{sky} と Trans が厳密に同じ時刻の値であり、分割した領域ごとに同じ値を持つからである。大気条件が異なる別の観測時間のデータを用いた場合には、この関係式は近似的にしか成り立たない。したがって、同じ観測時間内のスペクトル同士の演算するというこの手法は、原理的には最もきれいに大気の影響を除くことができる。以下で紹介するスペクトルは(1)式の計算の結果である。

4. 結果

4.1 撮像の結果

図4は衝突直前と衝突直後の画像である。スリット中央の直下点付近に衝突点があり、もし衝突により大量の放出物が噴出されるとスリット中央付近に逆三角形の形に放出物が見えるはずである。しかし、いかなる時間においてもそのような放出物の像は確認できな

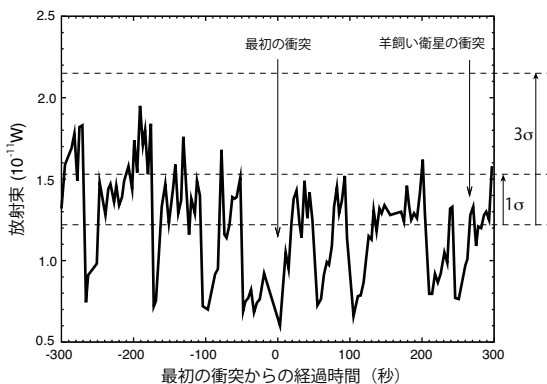


図5：スリット直上領域での光量の時間変化。3 σ が検出に必要な放出物の最低放射束。

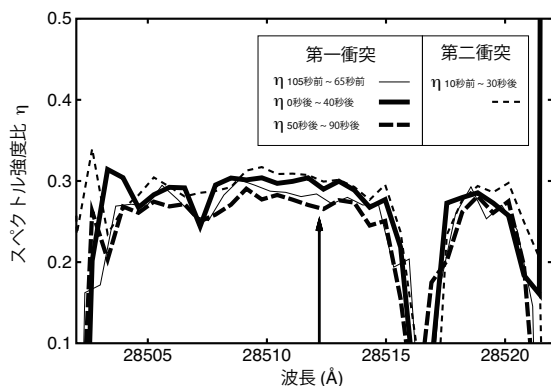


図6：大気の吸収も考慮した上で最も強いホットバンド輝線周辺でのスペクトルの時間変化。

かった。画像同士の時間差分を取ったり、像が鮮明に写っている画像を集中的に解析したが、やはり肯定的な結果は得られなかった。図5はスリット直上領域での光量の時間変化である。最初の衝突の直後に光量の増加が見られているが、これはスリット直下の明るい日照面から漏れ込んでくる光によるものであると結論づけられた。なぜなら、画像では放出物のような形状を持つ像が見られていないこと、および光量の増加量が著しいものでなく、衝突前から続く自然な光量の変化と同程度であり、これは主に大気の散乱率の時間変化によって画像のぼやけ具合が変化した結果だからである。

そこでスリット直上領域での光量の時間変化から放出物の上限質量を見積もった。まず図5において、光量の時間変化の3 σ を放出物が観測されるのに必要な

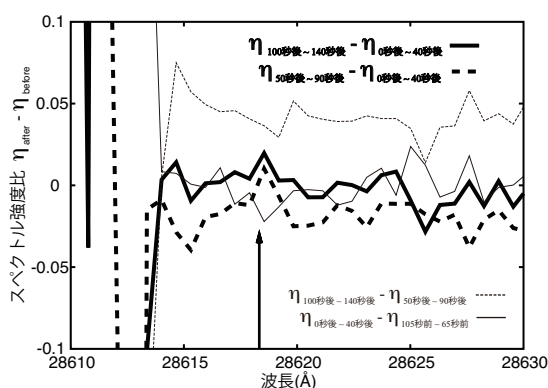


図7：4番目に強いホットバンド輝線周辺のスペクトルの時間差分。凡例の数字はそれぞれ最初の衝突時刻から測った露光時間である。

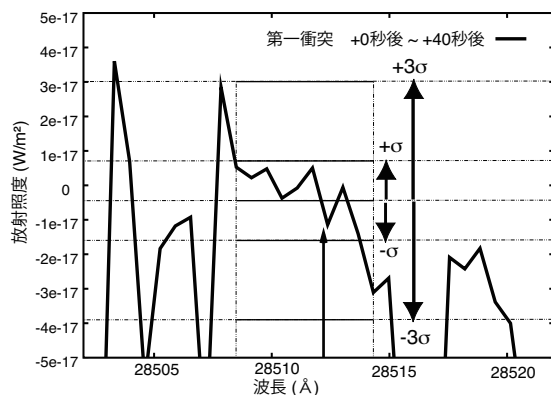


図8：最も強い輝線が期待される波長での、0秒後から40秒後の放射フラックス。3σが検出に必要な最小放射フラックス。

最低放射フラックスとした。次にレゴリスの粒子サイズとアルベドを仮定することで、図5中でのスリット直上領域での放出物の上限質量は1000 kgと見積もられた。この推定には、放出物中のダスト粒子のサイズ分布が、月の平均的なレゴリスのサイズ分布に従うと仮定した。具体的には、粒子は直径1 mm ～ 1 μmの間において、粒子数 n は直径 D を用いて

$$n(D) \propto D^{-3.94} \quad (3)$$

という関係が成り立つ[24]。このような分布において、直径が1 mm ～ 1 μmの粒子による等方散乱を考えた。光量の見積もりにおいては、直径が小さい粒子のほうが、総幾何断面積が大きくなるので、どの程度まで小さい粒子を考えるかが重要になる。ここでは我々が撮

像観測を行った波長(～2.1 μm)と同程度の直径を持つ、直径1 μmの粒子までを考慮した。ここで、もし直径0.1 μmの粒子までを考慮したとしても放出物の上限値はさらに小さい値になるだけである。逆に、最大粒径としてもっと大きい値を仮定すると放出物質量の上限値は大きい値となるが、(3)式のサイズ分布のベキが大きい負の値であるため、最大粒径を10倍としても放出物量は15%しか上昇しない。アルベドは0.1としたが、これは比較的暗い海のアルベドに相当する。より明るい、月面のクレーター(例えばティコやアリストアルコス等)周辺の放出物のアルベドの値(～0.3)を用いると、放出物の上限質量はさらに小さくなるため(～300 kg)、上の値は最も控えめな見積もりである。

4.2 分光の結果

図6は、大気吸収の効果も考慮した上で、最も強いホットバンド輝線が現れることが期待される波長でのスペクトルである。縦軸は(1)式の計算結果であるスペクトル比 η である。しかしながら、いかなる時間のスペクトルにも有意な輝線は確認されなかった。他にも強いH₂O輝線が現れる複数の波長を同様に調べたが、やはり明らかな輝線は検出されなかった。

次に時間的に後のスペクトルから前のスペクトルを引いて、時間差分を取った。図7は4番目に強いホットバンド輝線の波長でのスペクトルの時間差分である。水の輝線である可能性がある2つのスペクトルが得られた。しかし輝線のピークが極めて弱く、より強い波長ではいかなる肯定的な結果も得られなかった。これを有意な輝線と断定することはできなかった。総合すると、現段階においては有意な水の輝線を確認することはできなかったとの結論となる。

水分子の検出はされなかったが、上述のように観測自体は成功している。事前の理論的予測からは、かなりの質量の水が観測されるはずであったので、すばる望遠鏡で観測されなかったということは、実際のLCROSS衝突が理論予測値と大幅に異なっていたことを強く示唆する。またマウナケア山頂の主要な大型地上望遠鏡(ケック、ジェミニ、IRTF)のいずれからでも放出物検出の報告はされていない。そこで、水の質量の上限値を求めた。図8は最も強い輝線が期待される波長での、放射フラックスである。ホットバンド輝線の波長周辺でのノイズの3σを、有意な検出に必要

な水の最低放射フラックスとした。この得られた 3σ の放射フラックスを図2中でのImid領域での水の質量に換算すると、30 kgとなる。この量が、スリットが位置する、クレーターの底から2.5 kmの高さにまで放出された水の上限質量である(Cabeusクレーターのリムの高さは約2 kmだが、スリットが置かれた高さは約2.5 kmである)。この量は水蒸気のための質量であり、氷として存在している水の質量は含まれていないが、平均的なレゴリスの粒子サイズである70 μm の氷粒子なら太陽放射の照射により、1分以内に昇華してしまうことが示されているので、氷粒子として存在し続ける水分子の量は少ないと考えられる[25]。

5. 議 論

撮像から得られた1000 kgという放出物の上限質量、あるいは分光から得られた30 kgという水の上限質量は、どちらも事前に予想された量よりかなり低いものである。この2つの量はどちらもスリットが置かれた、クレーターの底から2.5 km上空にまで到達する放出物または水の量であるが、事前のSPHシミュレーションによる見積もりでは2.5 km以上の高さに到達する放出物の量は15,000 kgであり[17]、これまでの中性子線観測の結果を説明するのに必要な平均水含有率(1 wt%)を仮定すると、水の量は150 kgとなる。したがって放出物の量としては予想値の15分の1以下、水の量としては予想値の3分の1以下しか出ていないことになる。このような放出物量の不足を説明するためにすぐ思いつくのは、強度支配的なクレーター形成が起きた可能性である。衝突地点の表面が固かったか、あるいは表層の物質密度に対して、衝突体であるロケット胴体の密度が低すぎれば、強度支配領域で記述されるクレーター形成が起き、放出物が少なくクレーターも小さくなったという可能性は出てくる。しかしNASAの公式webサイトでの発表によると、探査衛星が近赤外で撮影した最初の衝突のクレーターの直径は 28 ± 2 mであることを示しており、レゴリスへの重力支配領域で記述される衝突を仮定して予想されたクレーター直径13 m – 22 mより、むしろ大きいクレーターが生成されている (<http://lcross.arc.nasa.gov/news/arc-101609.htm>)。したがってクレーター直径は大きい、地上観測に受かるほど高い高度まで到達した放出物は少なかったこ

とになる。このような状況は標準的なクレーター形成モデルからは容易に説明できないが、以下のような3つの可能性が考えられる。

第一は、放出物の放出角度が極めて低かったという可能性である。角度が低ければ高い高度まで到達する放出物は少なくなる。衝突現象の際に掘削される物質の流線を簡単に記述する数理モデルとしてZモデル[e.g., 26]と室内実験から得られた衝突による放出物の速度分布を記述するスケーリング則[27]を用いると、高度2.5 kmにまで到達する放出物が1000 kg以下であるためには放出角が約 10° 以下であればよい。上空から放出物の観測を行った羊飼いの探査衛星が撮影した可視画像によると放出物は、太陽に照らされる高度である約1 km上空において、直径約10 kmとかなり広がっているように見えるので、その結果とはおおよそ調和的である。ただしこの時、探査衛星の観測からは約1 km上空では90 kg程度の水が検出されたが、それだけの量の水が出ればスリットが位置する約2.5 kmの高さでも50 – 60 kg程度の水が放出されていてよいことが、一般によく使われるスケーリング則[27]からは示される。これは水の質量は最大でも30 kgという我々の観測値とは矛盾する。

この矛盾をも解決する第二の可能性として、高速で放出される物質質量がスケーリング則で記述される量よりも少ない、という可能性が考えられる。イジェクタの速度・質量の関係に関するスケーリング則[27]は、無限大の速度まで成り立つものではなく、ある速度範囲内のみで良く成り立つ経験式であり、ある速度(カットオフ速度)を越えるとスケーリング則が破綻し、放出物の量が経験式より少なくなるはずである。これは放出物の持つ運動エネルギーを積分すると無限大に発散してしまうことから明らかである。しかしLCROSSの衝突条件に対して行ったSPH数値計算[17]の結果は、カットオフ速度がかなり大きい値となり、高度100 km程度まではスケーリング則通りの量が放出されることを示しており、観測には悪影響を及ぼさないことが予想された。だがLCROSSのような中空の弾丸が衝突した際の高速放出物の質量分布についてはまだよくわかっていない点が多い。そのため実際にはカットオフ速度が小さく、まとまった量の放出物が地上望遠鏡で観測される高度まで上がらなかった可能性も残されている。もしそうだとすると、第一の可

能性である低い放出角を考えなくても、地上望遠鏡で放出物や特に水が観測されなかったことを説明できる。またこの低いカットオフ速度に加えて、低い放出角度の影響があって高速の放出物が少なかったという可能性もある。

最後は、中空の物体を衝突させたことによって、放出物が低角度の成分と高角度の成分の二種類に分かれて放出された可能性である。ミッションに使われたロケット胴体は質量が2000 kgあるものの、細長く密度が低い上に質量の大半は両端部に集中している。そのような物体を用いて室内実験を行った結果[28]、低角度($< 25^\circ$)で主に細かい粒子から形成された放出物のカーテンが確認された。それに加えて、カーテンの中には高角度で高速度の煙状のプリュームが見られ、このプリュームがかなり高く舞上がる様子が報告された。もしこれがLCROSSの衝突においても起こったとすると、低角度の成分はクレーターの壁を越えるには到らず、高角度の成分はクレーターの壁は越えたが、すばる望遠鏡の視線方向には光学的に薄すぎて観測には引っかけなかった可能性がある。一方、羊飼いの探査衛星は高度数100 km上空から観測しているので、水平から見て薄い高角度の放出物を鉛直方向に見下ろすことで水の検出が可能になった可能性がある。しかし実験データが極めて不足しているため、煙状の高角度放出物が実際にどのような形状、スケールを持つかを見積もることは現段階では難しい。このような衝突が中空の衝突体に特有の現象であるかどうかは、室内実験を行うことなどにより解明していく必要がある。

以上の可能性のうち、どれが実際に起こった現象であるか、あるいは他の可能性があるのかは現段階ではわからないが、羊飼いの探査衛星で観測された放出物の量や到達高度、空洞の衝突体を用いた室内実験で得られた放出物の放出角度や速度分布と合わせて議論することで検証が可能である。それによって衝突現象の物理の更なる理解につながるものと期待される。

6. まとめ

月極域の永久影において水が存在するか否かを、表層を衝突によって掘削して直接的に探査を行うLCROSSミッションにおいて、我々はLCROSSの羊飼いの探査衛星とは独立に、月面上の水の有無を確認する

ことと、羊飼いの探査衛星の観測からは得られない放出物の鉛直分布に関する制約条件を得ることを目的として、すばる望遠鏡を用いて近赤外波長域での放出物の高分散分光及び撮像観測を行った。数値計算による事前の予想では、かなりの量の水やダストの放出物が観測される見込みであったが、実際の観測データからはそれらは検出されなかった。そのため氷の有無やその鉛直分布などに対する情報は得られなかったが、観測結果はLCROSSによる人工衝突が従来の標準的なクレーター形成モデルの予測とは大きくかけ離れたものであったことを示唆している。すなわち、高高度にまで到達した放出物の量がスケーリング則や数値計算から示されていた値よりはるかに少なく、遅い放出速度や浅い放出角度の衝突であったことを示唆している。このような衝突を引き起した原因の一つには、衝突体が空洞であったことが関係している可能性があり、今後の衝突探査を計画する上で考慮すべき重要な事項であると考えられる。

謝 辞

本稿を執筆する機会を与えて下さった荒井朋子博士、査読をして下さった北里宏平博士に深く感謝致します。

参考文献

- [1] Watson, K. et al., 1961, J. Geophys. Res. 66, 3033.
- [2] Arnold, J. R., 1979, J. Geophys. Res. 84, 5659.
- [3] Nozette, S. et al., 1996, Science 274, 1495.
- [4] Simpson, R. A. and Tyler, G. L., 1999, J. Geophys. Res. 104, 3845.
- [5] Stacy, N. J. S. et al., 1997, Science 276, 1527.
- [6] Campbell, B. A. et al., 2003, Nature 426, 137.
- [7] Campbell, D. B. et al., 2006, Nature 443, 835.
- [8] Crider, D. H. and Vondrak, R. R., 2003, J. Geophys. Res. 108, 5079.
- [9] Feldman, W. C. et al., 1998, Science 281, 1496.
- [10] Feldman, W. C. et al., 2001, J. Geophys. Res. 106, 23231.
- [11] Lawrence, et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, E08001.
- [12] Lucey, P. G., 2009, Elements 5, 41.
- [13] Haruyama, J. et al., 2008, Science 322, 938.

- [14] Clark, R. N., 2009, *Science* 326, 562.
- [15] Sunshine, J. M. et al., 2009, *Science* 326, 565.
- [16] Pieters, C. M. et al., 2009, *Science* 326, 568.
- [17] Korycansky, D. G. et al., 2009, *Meteorit. Planet. Sci.*, 4, 1.
- [18] Kadono, T. et al., 2007, *Astrophys. J.* 661, L89.
- [19] Heldmann, J. L. et al., 2010, *P. Lunar Planet. Sci. XLI* 1015.
- [20] Wooden, D. H. et al., 2010, *P. Lunar Planet. Sci. XLI* 2025.
- [21] Schultz, P. H. et al., 2010, *P. Lunar Planet. Sci. XLI* 2503.
- [22] Dello Russo, N. et al., 2004, *Icarus* 168, 186.
- [23] Kawakita, H. et al., 2006, *Astrophys. J.* 643, 1337.
- [24] Heiken et al., 1991, *Lunar Sourcebook* (Cambridge Univ. Press), pp. 477.
- [25] Goldstein, D. B. et al., 2008, *AIP Conf. Proc.*, 1084, 1061.
- [26] Melosh, H. J. et al., 1989, *Impact Cratering* (New York: Oxford Univ. Press), pp. 80
- [27] Housen, K. R. et al., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, 2485.
- [28] Hermalyn, B. et al., 2010, *P. Lunar Planet. Sci. XLI* 2095.