

# 観測と SPH 解析による月面 クレーター形状特性の検討

当流谷 啓一<sup>1</sup>・松島 亘志<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 学生会員 博士前期課程 筑波大学 システム情報工学研究科 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)  
E-mail:s1620905@u.tsukuba.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 博士(工学) 筑波大学教授 システム情報系 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1)  
E-mail: tmatsu@kz.tsukuba.ac.jp

隕石衝突によるクレーター形成プロセスは、惑星表層の地形・地質進化に重要な役割を果たすため、その力学的メカニズムの詳細な解明が求められている。本研究では、NASA の月周回無人衛星(LRO)に搭載されたカメラ(LROC)の高解像度データを利用し、海と高地の比較的若い月面クレーター136個を対象として、その分析を行った。また、2次元 SPH 法を用いた数値解析を行い、様々なサイズのクレーターの形状特性や生成過程を調べて、観測との比較を行った。その結果、クレーターの直径に対する深さの比は、直径が10kmを超えると急激に減少すること、クレーター直径が20km以上では中央丘が現れること、などの特徴に対して、画像解析と SPH 解析の結果が一致した。またクレーター中央丘は、隕石衝突直後に形成される掘削抗の斜面が内側に円弧滑りを生じることによって、より深い場所の岩石物質が表層に持ち上がる事によって形成されること、その円弧滑りメカニズムがクレーター直径深さ比の変化に影響を及ぼしている可能性があることが解析により示唆された。

**Key Words:** Lunar soil, regolith, impact crater

## 1. 序論

固体惑星表層の物質特性は、その惑星の形成・進化過程のみならず、周辺環境の変化の歴史を知る上でも重要な手がかりを提供する<sup>1,2)</sup>。大気のない月面においては、その長い年月に大小様々な隕石が衝突し、岩石が細かく砕かれていくことによって、レゴリスと呼ばれる細かい粉体層が形成されている。レゴリス層の厚さは、黒っぽく見える海(mare)領域で数 m、白っぽく見える高地(highland)で10m程度であり、その下層には、隕石衝突で破碎された岩石層が数 km 程度堆積していると見積もられている<sup>3)</sup>が、深さ方向の堆積情報はきわめて限られており、よくわかっていないのが現状である。

これに対して、大竹ら<sup>4)</sup>は JAXA の月周回衛星かぐやのデータを解析し、Jackson クレーター等の中央丘付近の物質が周辺の物質と異なっていることを見だし、この物質が、より深い地層から上昇して来たのではないかと推論している。このことは、様々なサイズのクレーター内部の物質情報および、クレーター形成プロセスの知見を組み合わせることにより、深さ方向の情報を系統的に取得できる可能性があることを示唆している。

一方、クレーター形成プロセスを数値解析により検討

する試みは、これまでに数多く行われている<sup>5)</sup>が、初期の数値解析は、地盤が衝撃によって流体化していると仮定して解析が行われていたため、クレーターの最終形状などの評価が困難であった。近年、そのような欠点が改善された手法が提案され<sup>6-8)</sup>、また個別要素法や粒子法などを適用した解析も行われるようになり<sup>9-11)</sup>、より詳細な物性の検討が可能となってきた。しかしながら、そのような数値解析結果を、実際の月面クレーターの地形データ解析結果などと比較して詳細な議論を行った例はほとんどない。

そこで本研究では、NASA が公開している月周回無人衛星ルナー・リコネサンス・オービター(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)<sup>12)</sup>に搭載されたカメラ(LROC)の高解像度衛星データを使い、月面地形の深さやクレーター直径等の詳細データを取得し、また岩石率(Rock Abundance)と比較することにより、地形と地盤物性との関係を検討する。その上で、Smoothed Particle Hydrodynamics 法(SPH)を用いて、隕石衝突によるクレーター形成シミュレーションを行い、観測結果と比較することで、シミュレーションの妥当性の検証し、さらに前述の大竹ら<sup>4)</sup>の推論についての検討を行う。

## 2. LROC による月面クレーターの観測

### (1) 概要

本節では LROC の観測データを基に、月面クレーターの「中央丘」と「直径-斜面角度相関」及び「直径-深さ相関」計測する。その際、古いクレーターは、形成後の新しい隕石衝突や宇宙風化によって形状が劣化していることを考慮し、Lunar and planetary institute が掲載している月面地質図<sup>13)</sup>から、比較的若いクレーターを抽出して観測対象とする。図-1はその一部であり、図-2はそれぞれの色が表す年代を示している。それによれば、黄色の部分のクレーターがコペルニクス系で12億年前から現在にかけて形成されたと考えられているもの、黄緑色のクレーターがエラトステネス系で12億~32億年前のものである。本研究では、この形成年代の新しい2種類のクレーターを分析した。また、図-1中の青い部分はインブリアン系の年代であり、32億~38億年前のものである。

### (2) 計測手法

LROC のウェブサイト<sup>14)</sup>では、月面の昼夜の温度差の情報から、地表面の岩石率を評価して公開している。この情報を用いてクレーターの斜面部、リム、中央丘などの岩石率の違いをコンターマップとして取得する。また、同サイトで月面の標高をピンポイントで測定することができる機能を用いてクレーターの断面図を取得し、中央丘の形成有無などの特徴を調べる。なお、断面図はクレーターの中心部を通るように測定した。この測定を形成年代の新しい95個のクレーターにおいて行った。

次に、その断面図の最大斜面角度を測る。中央丘等の

特殊な地形の起伏による影響を排除するために、近似曲線を用いて斜面をならした。そしてその近似曲線の微分値の最大値を求めて最大斜面角度とした。この測定も形成年代の新しい95個のクレーターにおいて行った。

次に、図-3のように対象とするクレーターを含む領域を選択して、その領域の標高の最大値と最小値を求め、両者の差をクレーター深さとする。なお、データは高地と海で別々に整理した。この測定を形成年代の新しい136個のクレーターにおいて行った。

### (3) 分析結果

#### a) 中央丘観測の結果

図-4に、得られたクレーターの直径(km)、岩石率のコンター図、そしてクレーター断面図とクレーターの最大斜面角度の例を示す。岩石率図は赤になるほど岩石の比率が高く、青になるほど砂層(レゴリス)の比率が高いことを示す。コンター図の白い直線は断面図の位置を示している。また、断面図は、横軸の幅はクレーターサイズに合わせて設定したが、縦軸の幅は常に5kmとなるように描画した。

まず、抽出した95個のクレーターの断面図より、クレーター直径が約20km付近から中央丘が出現することが確認できた。これは図-4の断面図からも、クレーターの直径が大きくなるにつれて中央丘が出現する様子がわかる。この傾向は、文献<sup>15)</sup>でも示されている。また、岩石率コンター図から、中央丘領域はその周辺に比べて岩石率が高いことがわかる。これは、中央丘が月面表層の下層から露出して出現したものであるという大竹ら<sup>4)</sup>の推論と整合的である。一方、直径が小さなクレーター(11km)は、クレーター斜面部分の岩石率が高くなっている

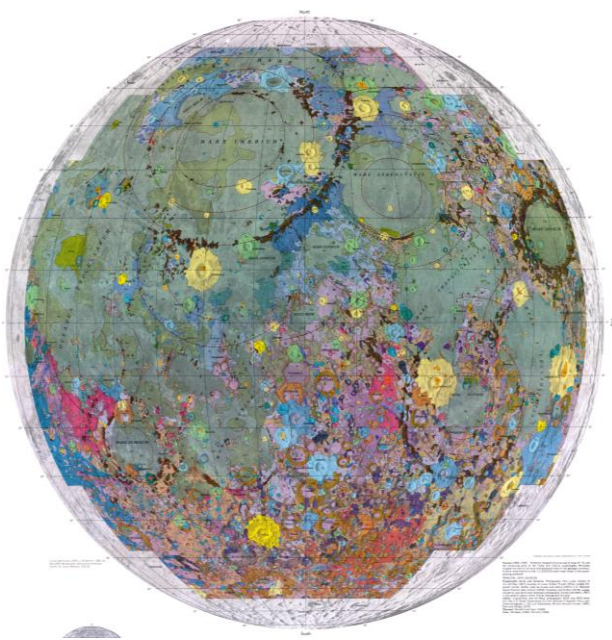


図-1 月面表側地質図 (縮尺: 1:5,000,000)<sup>13)</sup>

COPERNICAN SYSTEM	ERATOSTENIAN SYSTEM	IMBRIAN SYSTEM
12億年~現在	32億年~12億年	32億年~38億年
Ce <sub>2</sub>	Ec	Ic <sub>2</sub>
Ce <sub>1</sub>		Ic <sub>1</sub>

図-2 クレーター生成年代

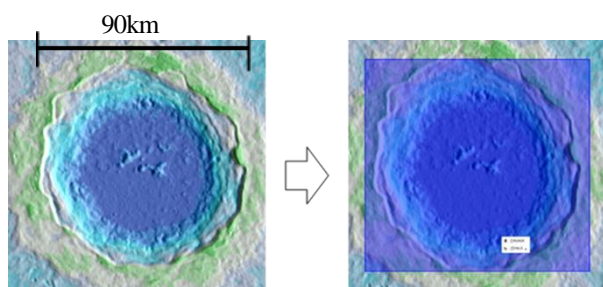


図-3 LROC の高解像度データの選択域の例

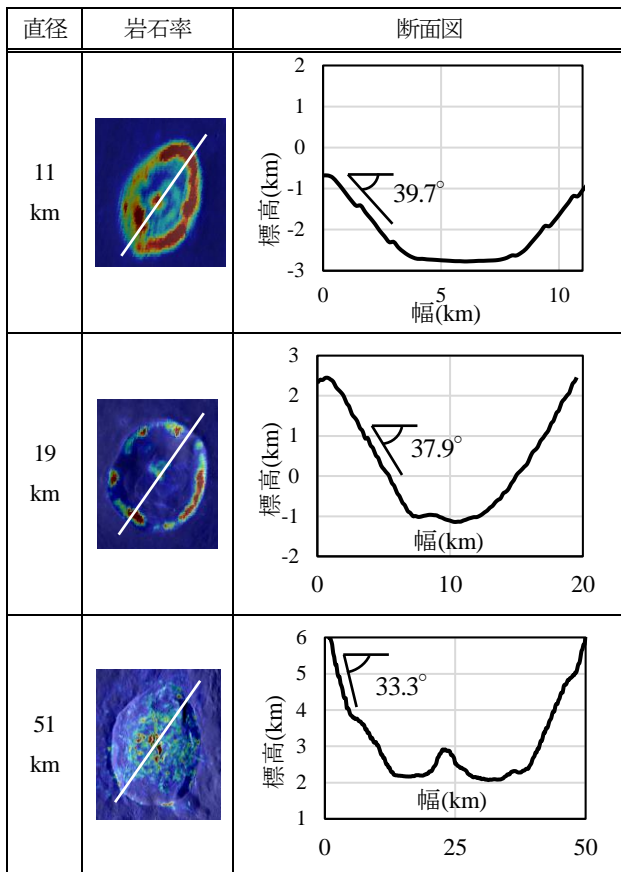


図-4 クレーターの岩石率コンター図と断面図の例

るが、これは、隕石が衝突した際に月面表層が削られ岩盤が露出したものだと考えられる。大きなクレーターの場合も同様に表層は削られるが、隕石衝突の衝撃で巻き上げられた大量の砂が、露出した岩石層の上に積もることで岩石層が見えなくなってしまうのではないかと推察できる。

#### b) 直径-斜面角度関係の計測結果

抽出した 95 個のクレーターの断面図より、クレーター直径が約 20km 付近からクレーターの最大斜面角度/直径比が小さくなることが確認できた。これは図-4 の断面図からも、クレーターの直径が大きくなるにつれて最大斜面角度/直径比が小さくなることがわかる。この傾向は文献<sup>15)</sup>でも示されている。この要因としては、地盤物性の違いが挙げられる。図-4 のコンター図から分かるように、クレーターの直径が小さいほど斜面の岩石率が高くなっており、砂層が堆積している斜面角度よりも大きい値が出たと考えられる。

#### c) 直径-深さ関係の計測結果

クレーターの深さと直径の関係は、両対数軸で図-5 のようになった。オレンジのプロットが比較的古い地盤といわれる月の高地部分に生成されたクレーターの値、青色のプロットが比較的若い地盤といわれている月の海に

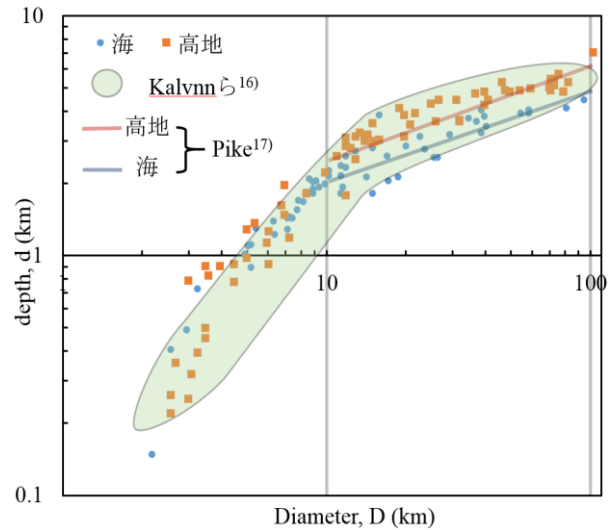


図-5 クレーターの直径-深さ関係

生成されたクレーターの値である。図には既往の観測結果<sup>16,17)</sup>も合わせて示してある。図より月の高地、海のクレーターとも深さ約 10km 以上で、深さ/直径の比が小さくなっていることがわかる。この傾向は、図-5 に同じく示した既往の研究結果<sup>16)</sup>とよく一致している。この深さ直径比の変化の原因は、クレーターサイズが大きくなると、直径 10km 付近からクレーターの形状がお椀型クレーターから中央丘を伴う複雑クレーターへと変化するからだと説明されている<sup>2)</sup>が、その具体的なメカニズムについては、きちんと理解されていない。

また、高地のクレーターと海のクレーターの深さ直径比を比較すると直径約 20km 以上のクレーターで高地の方が海よりも大きくなることがわかる。これについても、既往の研究<sup>17)</sup>と整合的であるが、その原因については明確な説明がなされていない。高地が斜長岩から構成されているのに対して、海が玄武岩から構成されている、という表層岩石の違いはあるが、もっと深い部分の物質の違いが影響している可能性もある。

なお、直径 1km 未満の微小クレーターについては、月面地質図に生成年代の新しい微小クレーターのサンプル数が少なかったため、分析対象から外している。

### 3. SPH によるクレーター解析

#### (1) SPH 法の概要

本節では、粒子法的一种である SPH(Smooth Particle Hydrodynamics)法<sup>18,19)</sup>を用いて、隕石衝突によるクレーター形成のシミュレーションを行う。SPH 法によれば、有限要素法などに比べて精度の面では劣るが、衝突時の衝撃波の伝播や固体材料としてのせん断挙動のような連続体としての振る舞いと同時に、表層での土砂の飛散な

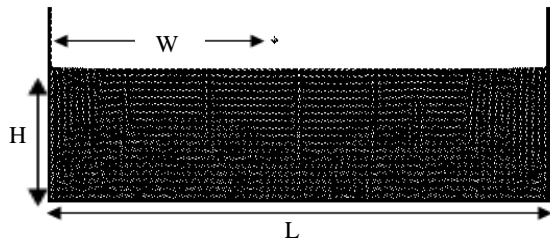


図-6 地盤モデル

表-1 解析パラメータ

1 粒子のサイズ	500(m) × 500(m)	
地盤サイズ	L : 200(km) H : 49(km) W : 96(km)	
粒子数	39470	
隕石サイズ	1 粒子 ~ 18 粒子	
隕石速度	1.13 ~ 4.00(km/s)	
時間増分	1.0 × 10 <sup>-2</sup> (s)	
重力	1.635 (m/s <sup>2</sup> )	
初期密度	2.0 × 10 <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	
せん断弾性係数	1.0 × 10 <sup>10</sup> (Pa)	
ポアソン比	0.3	
	モデル 1 (c 材)	モデル 2 (φ 材)
内部摩擦角 φ	0°	30°
粘着力 c	5.0(MPa)	0(MPa)

どの離散的な振る舞いを簡単な処理で表現することができるというメリットがある。また、本研究は2次元で行っているが、3次元への拡張も容易であり、更に、今後衝突による熱の発生や固体物質の熔融や気化といったマルチフィジックスを組み込むことも容易であるという利点もある。

用いたプログラムは著者らのグループで開発されたものであり、これまでに液状化に伴う流動の解析<sup>20)</sup>や粒子堆積層内の間隙流体運動の解析<sup>21)</sup>、斜面崩壊の解析<sup>22)</sup>、液状化した粒状体の解析<sup>23)</sup>などに用いられている。

また、本研究の SPH 解析は直交座標系での2次元解析であり、実際の3次元物体の天体衝突とは異なる条件の解析となっている。しかし、本研究では完全に月面の隕石衝突を模擬することは期待しておらず、LROCによる多数の統計情報と解析結果を数値的に比較することで、クレーターの形成過程において、2次元と3次元の違いが影響しない現象を模擬できることを示唆することを目標としている。

表-2 隕石の速度と粒子数

番号	隕石速度(km/s)	隕石を構成する粒子数
c 材①	1.70	1
c 材②	2.83	1
c 材③	3.96	1
c 材④	1.13	4
c 材⑤	1.70	4
c 材⑥	2.83	4
c 材⑦	3.77	9
c 材⑧	4.00	9
c 材⑨	4.00	18
φ 材①	3.77	9
φ 材②	4.00	18

## (2) 解析条件

本研究では、隕石のサイズや落下速度を変えて、形成されるクレーターの直径-深さ関係や中央丘の形成条件を求めた。図-6 にシミュレーションで用いた地盤モデルを示し、その解析条件を表-1 に示す。1 粒子のサイズは 500(m)×500(m)を模擬した。今回は、数 km~数 10km のサイズのクレーター形成を対象としているため、10m 程度の厚さのレゴリス層のモデル化は行わず、地盤は巨視的には均質な、亀裂性の岩盤層を想定した。構成モデルとしては、ひずみ硬化/軟化を伴わない単純な Drucker-Prager モデルを使用した。月の地盤材料は、高地には比較的斜長岩が多く、海には比較的玄武岩が多いことが知られているが、特に深い地層の材料物性については未だによく知られていない<sup>24)</sup>。そこで本研究では、材料物性として密度、せん断弾性係数、ポアソン比 ( $\rho=2.0(\text{kg/m}^3)$ ,  $G=1.0 \times 10^{10}(\text{Pa})$ ,  $\nu=0.3$ ) については岩石の標準的な値を使用した。材料の塑性パラメータに関しては、2 つの極端なケースとして、亀裂のない岩石のモデル 1(c 材)と多数の亀裂が入った岩石のモデル 2(φ 材)の 2 種類を設定した(表-1)。また、各粒子は地盤、隕石ともに格子状に配置した。地盤の縦横の粒子数は、縦:98 個、横:400 個である。

なお、簡単のため、衝撃波の反射の影響は少ないと仮定し、地盤モデルの底面および側面境界は剛体壁としている。隕石衝突速度の目安は、天体の脱出速度であり数 (km/s) ~ 10(km/s)<sup>25)</sup> であることから、解析では 1.13 (km/s)~4.00(km/s)と定めた。また、隕石の材料定数を地盤と同一とした。

表-2 に行った解析ケース(c 材①~⑨, φ 材①, ②)を示す。なお、SPH 粒子のサイズについては、本来なら他の条件を同一にして、粒子サイズのみを小さくし、結果を比較する必要があるが、計算時間の観点から、今後の課題としたい。隕石を構成する粒子数が少ない場合においても、解析の精度が問題になるが、計算時間の観点から、今後の課題としたい。

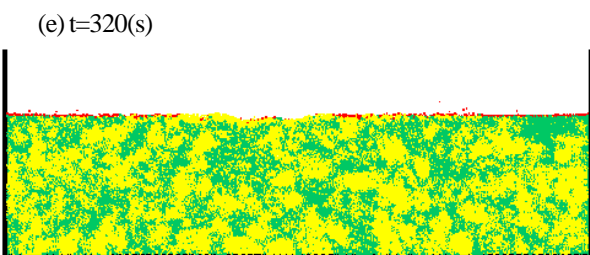
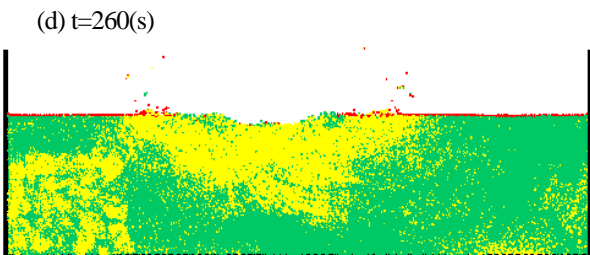
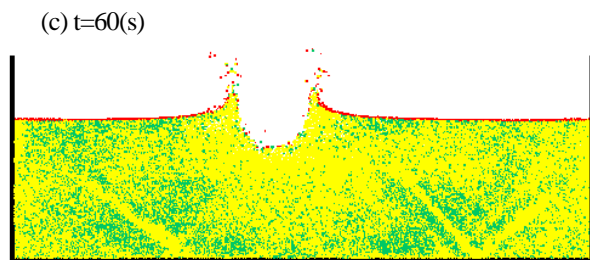
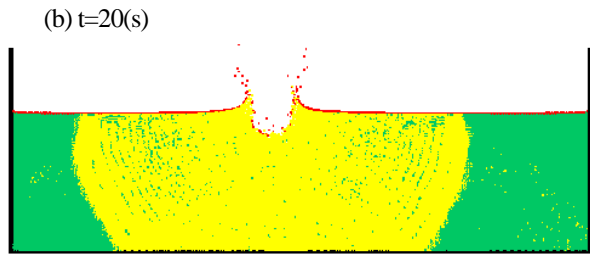
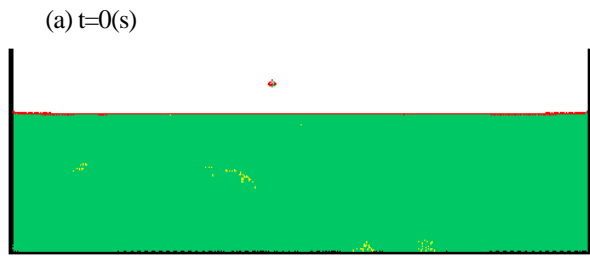


図-7 弾性領域(緑)と塑性領域(黄)の時刻歴 (c材⑧)

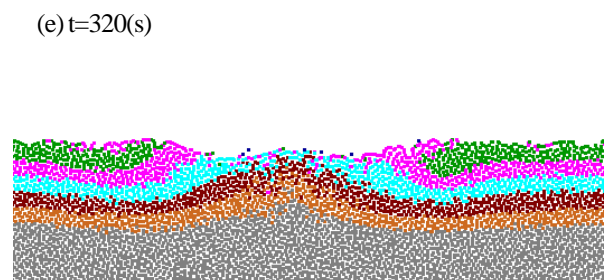
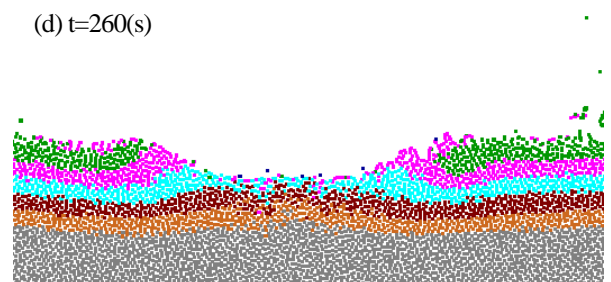
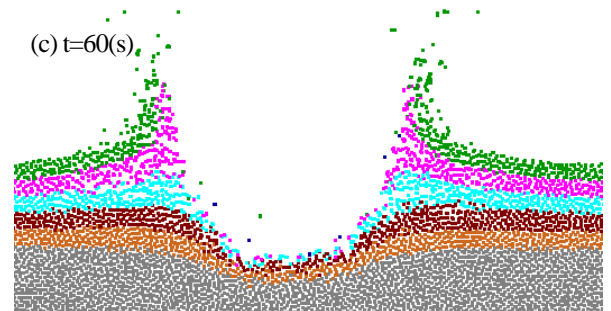
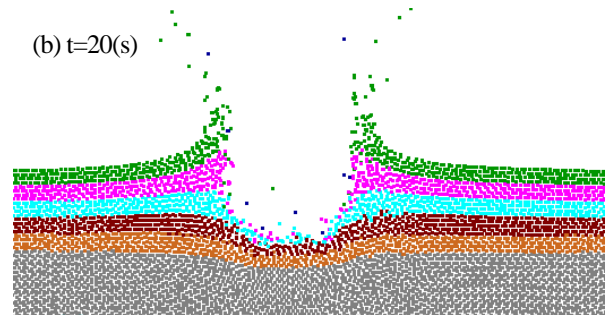
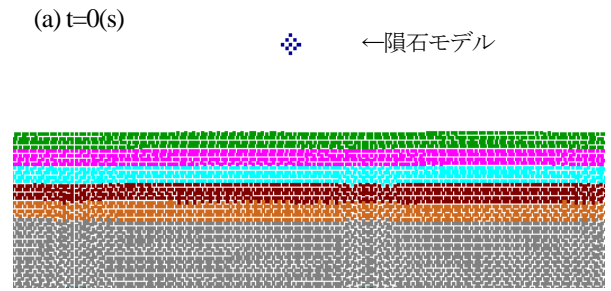


図-8 粒子運動の時刻歴(層厚 2km で色分け) (c材⑧)

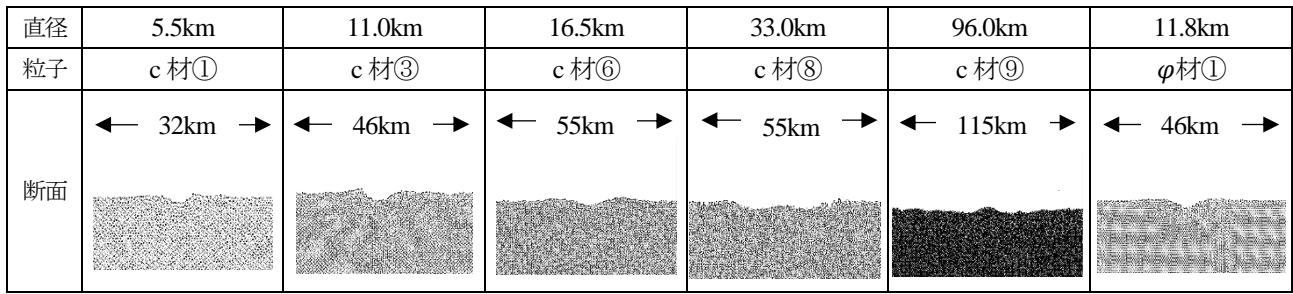


図-9 SPH 解析による直径とクレーター断面図

### (3) 解析結果

#### a) クレーター形成過程

図-7 にクレーター形成過程の時刻歴挙動を示す。図では、塑性域を黄色で、弾性域を緑色で示している。また、地盤表面に見られる赤色の粒子は、密度が設定初期密度  $\rho=2.0(\text{kg/m}^3)$  の 95% 以下になった低密度粒子で単体として分離した土塊を表している。隕石衝突直後の 20 秒後は衝撃波が地盤に伝播していることが塑性域の範囲から分かる。波の伝播速度はおおよそ  $3.6(\text{km/s})$  で、弾性係数から計算される弾性波速度  $4.1(\text{km/s})$  と同程度となっている。

衝突による掘削孔の深さが最大となるのは、約 60 秒後である。その後、図-7 の(d)に見られるように、掘削孔の斜面が円弧すべりによって内側に流動する、いわゆる修正(modification)過程が観察される。その際、左右の円弧滑りの先頭部が衝突して上に持ち上がり、結果として中央丘が形成されていることがわかる。すなわち、修正過程では動的な流動よりも準静的な固体滑りのメカニズムが卓越し、それが中央丘形成に重要な役割を果たしていると考えられる。

図-8 では、図-7 と同じ変形過程の時刻歴を、深さ 2km ごと 5 層に地盤を色分けした図を示す。この図より、本

ケース(c 材⑧)において中央丘は表層から 6km 以下の層の物質が持ち上がって形成されていることがわかる。この結果は、大竹らの推論<sup>4)</sup>を裏付けるものであり、更に、観測によって得られた中央丘の物質が存在していた深さを定量化するのに役立つものである。

図-9 は SPH 解析で求めたクレーター最終形態の断面図を拡大したものである。クレーターの直径が大きくなるにつれてクレーター形状も変化し、特に直径 20km 以上のクレーターで中央丘が形成されることが分かる。この直径 20km 以上という中央丘形成条件は、無作為に抽出した LROC による中央丘の観察結果と一致している。ただし、c 材⑨のケースでは中央丘がリムよりも高くなるという、LROC の観察では確認されなかった結果が得られた。これは解析が 2 次元解析で、3 次元に比べて円弧滑りの先端同士の衝突による抵抗が少なかったためと考えられる。

#### b) 直径-深さ関係

クレーターの直径-深さ関係における解析結果と前節の観測結果の比較を図-10(c 材)と図-11( $\phi$ 材)に示す。それぞれの図に記された数字は表-2 における番号を表している。図からわかる通り、LROC による観測結果と SPH

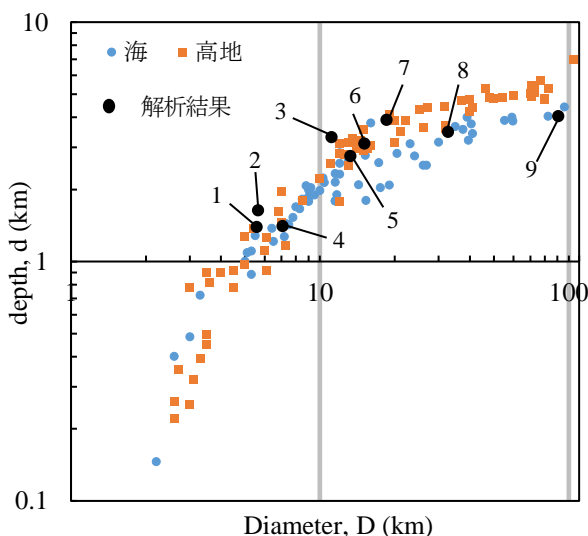


図-10 直径-深さ相関の LROC と SPH の比較(c 材)

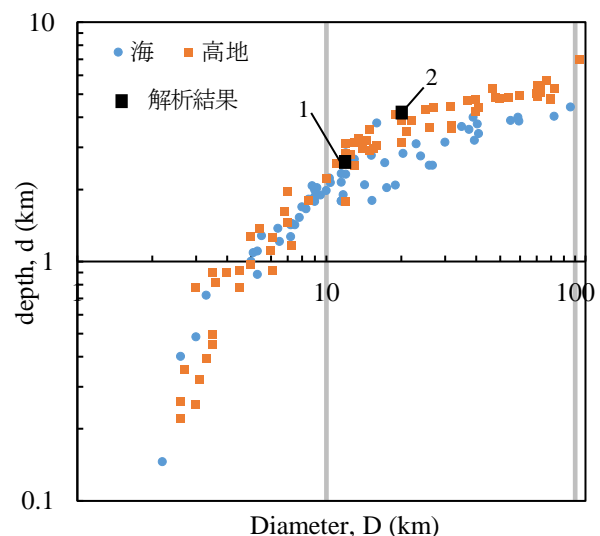


図-11 直径-深さ関係の LROC と SPH の比較( $\phi$ 材)

法による解析結果では、直径 10km 前後の直径深さ比の変化も含めて、一致が見られた。また、図-7の結果と合わせると、直径深さ比の変化は、円弧滑りの有無と関係していることが示唆される。すなわち、直径約 20km 以上のクレーターでは、修正過程で大規模な円弧滑りが発生することにより、直径に対して深さが小さくなると考えられる。

なお、直径が 10(km)より小さな結果は、SPH 粒子サイズに比べてクレーターサイズが十分でなく、直径深さ比の値には多少の誤差が含まれる。

また、隕石の入射角については、既往の研究で斜め衝突によるクレーター形状の変化がないことが示唆されていることから<sup>26)</sup>、本研究では鉛直下向きのみで初速度を与えて地盤に垂直に衝突させた。

最後に、 $\phi$ 材は c 材と比較すると、同一直径のクレーターを形成するために、より大きな隕石衝突エネルギーが必要であることがわかった。これは $\phi$ 材が拘束圧依存の性質を持ち、深い層ほど滑りにくいことが影響していると考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、LROC による高精度月面クレーターの詳細観察と、SPH シミュレーションによる月面クレーター形成過程の解析の結果を比較し、以下の結論を得た。

- (1) LROC データによるクレーターの直径-深さ関係、中央丘形成条件、岩石率等の分析結果は、既往の研究と総合的であった。また直径-斜面角度関係においては、直径が小さいクレーターほど斜面の岩石率が高く、斜面角度が大きくなるという地形と地盤物性の関係性を検討できた。
- (2) 2次元 SPH 法による解析は、実際の 3 次元的なクレーター形成を定量的に模擬できるわけではないが、クレーターの直径-深さ関係、中央丘形成条件などの点では、LROC データによる結果との一致を確認できた。
- (3) SPH 解析の結果から、クレーターの中央丘が形成されるメカニズムとして、隕石衝突により表層が掘削され、一時的に形成された掘削孔斜面が円弧滑りによって内側に流動し、その結果、地盤の深い部分の物質が上昇して中央丘が形成される、というメカニズムが明らかとなった。また、クレーターの直径深さ比が、直径約 20km を境に変化する原因についても、この大規模な円弧滑りの発生がクレーター形状に影響を及ぼすためであることが示唆された。

今後は、LROC のデータの詳細な分析と共に、より精緻な構成モデルを用いた 3 次元 SPH によるクレーター形成解析を行い、惑星表層の地形・地質進化についての定量評価を行う予定である。

#### 参考文献

- 1) Melosh, H. J.: *Planetary surface processes* (Vol. 13). Cambridge University Press, 2011.
- 2) 宮本英昭, 平田成, 杉田精司, 橘省吾編集: 惑星地質学, 東京大学出版会, 2008.
- 3) Heiken, G., Vaniman, D., French, B.M.: *Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*. CUP Archive, 1991.
- 4) Ohtake, M., Matsunaga, T., Haruyama, J., Yokota, Y., Morota, T., Honda, C., Ogawa, Y., Torii, M., Miyamoto, H., Arai, T., Hirata, N., Iwasaki, A., Nakamura, R., Hiroi, T., Sugihara, T., Takeda, H., Otake, H., Pieters, C.M., Saiki, K., Kitazato, K., Abe, M., Asada, N., Demura, H., Yamaguchi, Y., Sasaki, S., Kodama, S., Terazono, J., Shirao, M., Yamaji, A., Minami, S., Akiyama, H., Josset, J.-J.: The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature*, 461(7261), pp.236-240, 2009.
- 5) Melosh, H. J.: *Impact cratering: A geologic process*. Oxford University Press (Oxford Monographs on Geology and Geophysics, No. 11), 1989.
- 6) Senft, L. E., & Stewart, S. T.: Modeling impact cratering in layered surfaces. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E11), 2007.
- 7) Collins, G. S., Kenkmann, T., Osinski, G. R., Wünnemann, K.: Mid - sized complex crater formation in mixed crystalline - sedimentary targets: Insight from modeling and observation. *Meteoritics & Planetary Science*, 43(12), pp.1955-1977, 2008.
- 8) Bray, V. J., Collins, G. S., Morgan, J. V., Melosh, H. J., Schenk, P. M.: Hydrocode simulation of Ganymede and Europa cratering trends—How thick is Europa's crust?. *Icarus*, 231, pp.394-406, 2014.
- 9) Wada, K., Senshu, H., & Matsui, T.: Numerical simulation of impact cratering on granular material. *Icarus*, 180(2), pp.528-545, 2006.
- 10) Jutzi, M., Benz, W., & Michel, P.: Numerical simulations of impacts involving porous bodies: I. Implementing sub-resolution porosity in a 3D SPH hydrocode. *Icarus*, 198(1), pp.242-255, 2008.
- 11) Schill, W., Wasem, J. V., Owen, J. M.: Modelling and Simulation of Cratering and Ejecta Production During High Velocity Impacts. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, pp.1-9, 2017.
- 12) NASA, Space Exploration Resources, Arizona State University, <http://lroc.sese.asu.edu>.
- 13) Lunar and planetary institute, Geologic Atlas of the Moon, <http://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/usgs>.
- 14) Quick map, <http://target.lroc.asu.edu/q3/>, 2011.
- 15) 当流谷 啓一, LROC 画像を用いた月面クレーター形状パ

- ラメーターの検討, 筑波大学卒業論文, 2015.
- 16) Kalynn, J.D., Johnson, C.L., Barnouin, O.S., Osinski, G.R.: LUNAR COMPLEX CRATERS, 44th Lunar and Planetary Science Conference, 2013.
- 17) Pike, R.J.: Depth/diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data. *Geophysical Research Letters*, 1(7), pp.291-294, 1974.
- 18) Lucy, L.B.: A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, 82, pp.1013-1024, 1977.
- 19) Gingold, R.A. and Monaghan, J.J.: Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, pp.375-389, 1977.
- 20) Naili, M., Matsushima, T., Yamada, Y.: A 2D Smoothed Particle Hydrodynamics method for liquefaction induced lateral spreading analysis, *Journal of applied mechanics, JSCE*, 8, pp.591-599, 2005.
- 21) Saomoto, H., Matsushima, T., Yamada, Y., Hatano, Y.: Development of Digital Toyoura Porous Model and Porous Media Flow Simulation using SPH, *Journal of applied mechanics, JSCE*, 9, pp.649-657, 2006.
- 22) 豊田 衛, 斜面流動による土砂災害危険度評価手法の開発, 筑波大学院博士論文, 2014.
- 23) Otake, K., Guo, S., Matsushima, T., Experiments of Cylinder Drag through Density-Matching Particle-Fluid Mixture and SPH Simulation., *Proc. JSCE.*, A2 (applied mechanics), 72(2), pp.I\_399-I\_407, 2016.
- 24) Heiken, G., Vaniman, D., French, B.M.: *Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*. CUP Archive, pp.184-185, 1991.
- 25) 中村昭子, 宇宙科学研究所, 小惑星から微惑星へ—太陽系小天体の衝突, *天文月報*, pp.329-334, 1994.
- 26) 辻堂さやか, 原田竣也, 藤田陽一, 鈴木絢子, 長谷川直, 黒澤耕, 門野敏彦, 中村昭子, 荒川政彦, 杉田精司, 堆積岩への斜め衝突クレーター形成実験, [http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2014/image/0227\\_pl asma\\_proc/19.pdf](http://www.isas.jaxa.jp/j/researchers/symp/2014/image/0227_pl asma_proc/19.pdf), 2014.

(2017. 6. 23 受付)

## ANALYSIS OF SHAPE CHARACTERISTICS LUNAR CRATER BY OBSERVATION AND SPH SIMULATION

Keiichi TORYUDANI, Takashi MATSUSHIMA

Dynamic mechanism of crater formation process caused by meteorite impacts plays an important role in the evolution of topography and geology on planet surface. The present study surveyed the morphological features and rock abundance of 136 relatively fresh impact craters on the moon by using Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) of NASA and compared with 2-D Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) simulations. The simulation results quantitatively reproduced the diameter-depth relation and central peak formation. Moreover, it turned out that the material forming the central peak comes from several kilometers deep underground because of the circular slip mechanism commonly observed in slope failure analysis in geomechanics. It was also found that the large-scale circular slip modifies the morphological trend of crater which causes the bilinear relation of diameter-depth curve in log-log plot.