

特集「日本における衝突研究の軌跡」

クレータサイズ頻度分布からさぐる月惑星表面の地質進化

諸田 智克¹, 平田 成²

2015年6月1日受領, 査読を経て2015年7月13日受理.

(要旨) 月惑星表面のクレータの数密度は表面の形成年代推定に広く用いられる. また, クレータのサイズと数密度の関係, つまりクレータサイズ頻度分布から表層地質の物理特性や層厚についての情報を読み解くことが可能である. 近年, 小惑星探査機「はやぶさ」や月周回衛星「かぐや」の成功によって, 膨大な量の高解像度画像データを取得することに成功し, 日本におけるクレータ統計研究が花開きつつある. 本稿では, 月惑星表面におけるクレータのサイズ頻度分布の調査から月や小惑星における地質過程, 物理過程に関して, どのような情報が, どのように読み解かれるかを解説するとともに, 「はやぶさ」や「かぐや」で得られた筆者らの科学成果を紹介する.

1. 月惑星表面におけるクレータの統計研究

一般に固体惑星や衛星の表面では, 古い地域ほど宇宙空間に露出した時間が長いことから, 多くの天体衝突を経験しており, そのため多くのクレータが存在する. 一方で若い地域ではクレータは相対的に少ないと考えられる. このような簡単な考え方に基づき, 単位面積あたりのクレータ個数(クレータ数密度)から, その地域の年代を見積もる方法をクレータ年代学と呼ぶ[1, 2]. クレータ年代学は, 画像データから年代決定ができるといった簡便さのため, 岩石試料の放射年代とのキャリブレーションがなされている月のみでなく, 火星や金星や水星, 小惑星や水衛星などの画像データが得られているすべての固体天体に広く用いられ, 多くの成果をあげている.

クレータ統計からえられる情報は月惑星表面の年代だけではなく, 形成されるクレータのサイズと形状は, 衝突速度や角度, 表面の物理特性や構造などで異なる. また, 一度形成されたクレータは表面の様々な地質プ

ロセスによって変形・消去される. しかも, 変形・消去を受けるクレータのサイズはそれを引き起こす地質プロセスの規模に依存する. よって, クレータのサイズと数密度の関係, つまりクレータサイズ頻度分布の形状には, そのような衝突環境や表層地質の状態・構造, その時間変化についての情報が様々なかたちで残されている[3].

約10年前までは日本におけるクレータの統計研究は, 海外の探査データに頼っていたために, 明らかに欧米に遅れをとっていた. しかし近年の小惑星探査機「はやぶさ」や月周回衛星「かぐや」の成功によって, 膨大な量の高解像度画像データを取得することに成功し, 日本におけるクレータ統計研究が花開きつつある. 本稿では「はやぶさ」や「かぐや」で得られた筆者らの科学成果の紹介をとおして, 月惑星表面におけるクレータのサイズ頻度分布の調査から月や小惑星における地質過程, 物理過程に関して, どのような情報が, どのように読み解かれるか, について解説する.

2. 月面の標準クレータサイズ頻度分布の導出

1960年代に入り, ルナオービター計画によって月の全球の画像データが取得され, また, サーバイヤー

1. 名古屋大学大学院環境学研究所
2. 会津大学コンピュータ理工学部
morota@eps.nagoya-u.ac.jp

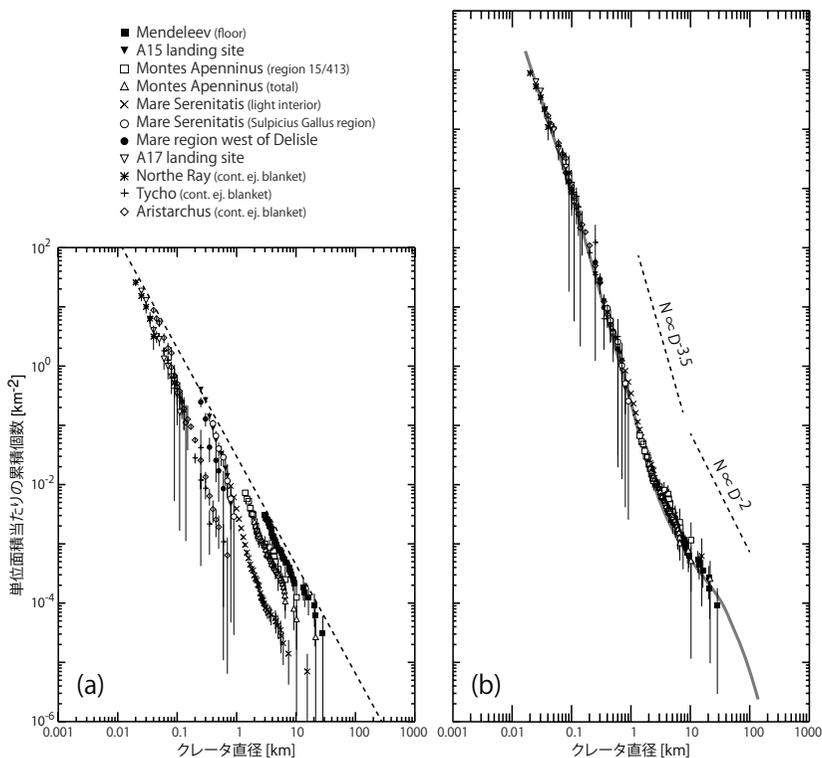


図1：(a)月の様々な領域で観測されたクレータのサイズ頻度分布。点線はクレータ数密度の経験的な平衡状態(ここでは $N(\geq D)=0.045D^2$ を採用した[5])を示す。(b)アポロ15号サイトのサイズ頻度分布に重なるようにそれぞれを平行移動させた分布。曲線は標準サイズ頻度分布を示す。比較のために、点線で-2と-3.5のべき数のべき乗則を示す。Neukum et al. [3]のデータを使用した。

計画、アポロ計画からの着陸探査によって、一部の領域で高解像度の画像データが取得された。それらのデータを用いて、多くの研究者が月面の様々な領域においてクレータの形状や統計を調査してきた。月面のクレータ統計研究における最初のステップは月面につくられるクレータの「標準的な」サイズ頻度分布を調査することであった[e.g., 3-5]。特にNeukumらのグループは様々な年代の領域において、広いサイズ範囲のクレータに対してサイズ頻度分布を調査し、月面クレータの標準サイズ頻度分布(クレータ生成関数, crater production functionとも呼ぶ)の導出に成功している[2, 3]。一般に、観測されるクレータサイズ頻度分布に標準サイズ頻度分布をフィッティングして年代情報が得られるし、また、標準サイズ頻度分布からの形のズレを検出して、その地域固有の地質過程の解釈を行うことから、標準サイズ頻度分布の導出過程を理解しておくことは、この後の議論の助けとなる。そのため、近年の探査データによる成果を紹介する前に、この章

ではまずどのようにして月面の標準クレータサイズ頻度分布が得られてきたかについて解説する。

月面のクレータ記録から月でつくられるクレータの標準サイズ頻度分布を広いサイズ範囲で導出することは、実はそう簡単なことではない。その理由はクレータの飽和、または平衡と呼ばれる現象と関係する。一般に、月や惑星、小惑星の表面のクレータ数密度は表面が形成されてからの時間とともに増加するが、あるレベルに達すると生成されるクレータ数と消去されるクレータ数が等しくなり、それ以上はクレータ数密度が増加しなくなる。これをクレータ数密度の平衡状態と呼ぶ。経験的に、月面で平衡状態に達した領域のクレータサイズ(D)と数密度(N)の関係は $N(>D) \propto D^{-2}$ に従うことが知られている[6]。大部分のクレータサイズ範囲において、月面クレータのサイズ頻度分布の傾きは-2よりも急勾配であるため、小さいクレータほど早くにクレータ平衡状態に達する。クレータ平衡に達しているサイズ範囲ではクレータの消去が起きて

いるため、そのサイズ範囲の分布は月でつくられたクレータのサイズ頻度分布形状が失われてしまっている。そのため、そのサイズ範囲の分布は標準クレータサイズ頻度分布の導出に用いることができない。

図1aはNeukumらによって調べられた月面の様々な領域におけるクレータサイズ頻度分布である。衝突盆地(一般に直径300 km以上の衝突クレータを衝突盆地と呼ぶ)のフロアやリングなどの古い領域(>38億年)は多くのクレータが作られており、その分、大きいクレータも存在する。しかし、直径1 kmより小さいクレータはクレータ平衡の状態に達してしまっている。一方、40から30億年の年代を持つ海の領域は数百m以下のクレータが平衡状態となっており、過去10億年間につくられた若いクレータのフロアやエジクタブランケットではクレータ平衡は数十m以下のクレータで起こっている。このように表面年代によって、つくられたクレータのサイズ頻度分布の形状を残しているサイズ範囲は異なっている。そこでNeukumらは重複しているサイズ範囲を使って、互いの分布が重なるようにそれぞれの分布を縦方向に平行移動させてみた。そうするとすべての分布は1つの曲線上にのることが分かった(図1b)。Neukumらはこの曲線を11次多項式で表現しており、これが月面の標準クレータサイズ頻度分布として約40年たった現在でも広く用いられている[2]。観測領域の年代によって計測されたクレータサイズ範囲に偏りがあるとはいえ、このように広い年代範囲のサイズ頻度分布が同一の関数形で表せるとは驚きである。この結果からNeukumらは過去40億年間に月に衝突してきた天体のサイズ頻度分布や衝突速度は大きく変化しなかったと考えている。

標準サイズ頻度分布をみて分かるように、月面クレータのサイズと頻度の関係は限られたサイズ範囲においてはおおよそベキ乗則の関係が成り立っている。直径約5 km以上のクレータでは-2のベキ数を持つ。この傾きは、地球や月に衝突する可能性のある地球近傍小天体のサイズ頻度分布の傾きとおおよそ一致していることから、衝突天体のサイズ頻度分布を反映していると考えられる[7, 8]。一方、直径5 km以下のクレータはより大きな傾きを持っていることが知られており、そのベキ数は-3から-4の間である。この急勾配の原因として、クレータが形成されたときに放出さ

れた破片が再び月面に衝突してできる二次クレータが混入している可能性や[9-11]、衝突天体のサイズ頻度分布そのものが急勾配となっている可能性[12]などが考えられているが、いまだ決着はついていない。

3. 「かぐや」の成果

我々は「かぐや」地形カメラデータを用いて月の海や衝突盆地においてクレータカウンティングを行ってきた。そして観測されたクレータサイズ頻度分布と月面の標準サイズ頻度分布の比較から、月で起こった地質活動についての興味深い情報を得ている。本節ではその科学成果を紹介する。

3.1 火成活動史復元への応用

火成活動は地球型惑星で最も共通にみられる地質活動の一つであり、マグマ噴出のタイミングと噴出量の関係は天体内部の熱進化を制約する重要な情報である。我々は月におけるマグマ活動の歴史の復元を目指して、月の海でクレータサイズ頻度分布の計測を進めてきた。それによって得られたマグマ噴出の年代学的成果については諸田[13]ですでに詳しく述べているため、ここでは溶岩流の層構造に関する知見について解説する。

これまで我々は過去に高解像度データが不足していた月の裏側の海、活動が長く続いていたと考えられていた表側の嵐の大洋・雨の海地域を中心に調査を進めてきた[14-17]。特に、月の裏側と表側の海の被覆面積の違い、すなわち月の二分性の原因を考える上で鍵となる月の裏側北半球最大の海であるモスクワの海については詳細なクレータサイズ頻度分布計測を行っている[15]。

モスクワの海は月の裏側にある直径445 kmのMoscoviense盆地のフロアを埋める海である。分光データからモスクワの海は少なくとも4つの地質ユニットに分類される(図2)[18]。図3は4つの溶岩流ユニットとMoscoviense盆地のフロアにおいて計測されたクレータサイズ頻度分布である。これをみるとMoscoviense盆地のフロアのサイズ頻度分布はおおよそ41億年の等時曲線(41億年の年代に対応するクレータ数密度を持つ標準クレータサイズ頻度分布)にのっていることから、盆地の形成は41億年前に起こったことがわかる。また、南にある溶岩流ユニットIm

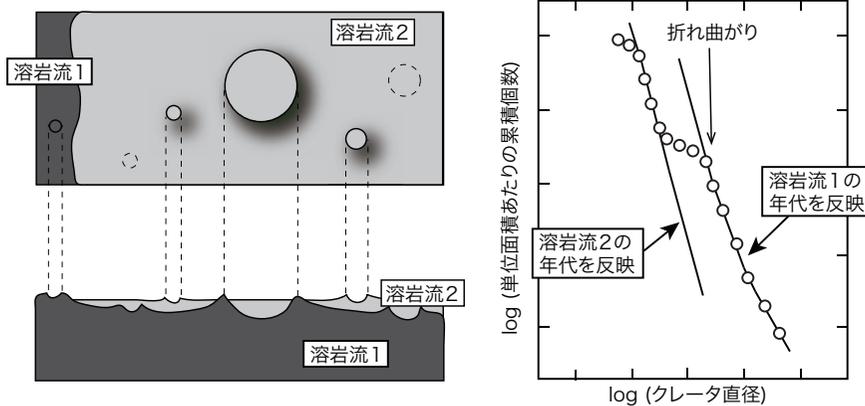


図4：クレータサイズ頻度分布へのマグマ噴出の影響。(左)溶岩流1が表面を覆った後、天体衝突によって表面にクレータが形成される。その後、新たなマグマ噴出(溶岩流2)によってそれまでにつくられたクレータのうち選択的に小さいもののみが覆い隠される。さらにその後にクレータが形成される。(右)その結果として観測されるクレータサイズ頻度分布には特徴的な折れ曲がりを作られる。

サイズ頻度分布の切片の値から溶岩流1の形成年代が決定でき、溶岩流2によって完全に消去されたクレータのサイズ範囲の分布の切片からは溶岩流2の噴出年代が決定できる(図4)。また、溶岩流がクレータを覆い隠すためには溶岩流の厚さがクレータのリム高より大きいことが条件であるため、サイズ頻度分布で折れ曲がりが起こっているクレータサイズ、つまり消去が起こった最大クレータのサイズから溶岩流2の層厚が推定できる。

我々はこのような複数回の溶岩流の噴出による表面再更新でモスクワの海のクレータサイズ頻度分布の折れ曲がりがつくられていると考えた。その場合、溶岩流ユニットIltmの噴出年代は直径1 km以下のサイズ範囲におけるサイズ頻度分布から35億年前と見積もられる。また、直径1.3 km以上の分布からその下層には37億年前に噴出した溶岩流が隠されていると考えられる。同様にユニットEhtm表面の溶岩流は0.8 km以下の分布から26億年前に噴出したと推定され、直径1 km以上の分布から、その下には35億年の年代をもつ溶岩流が存在していることがわかる。ユニットIltmの表面とユニットEhtmの下層の年代が一致していることから、Iltmの表面を覆っている溶岩流がEhtmの下に広がっていることが推定される。また、IltmとEhtmの表面を覆う溶岩流の厚さは、クレータの直径とリム高の経験的な関係から[19]、それぞれ50 mと40 mと見積もられる。

溶岩流の厚さが推定できると、表面積を掛けること

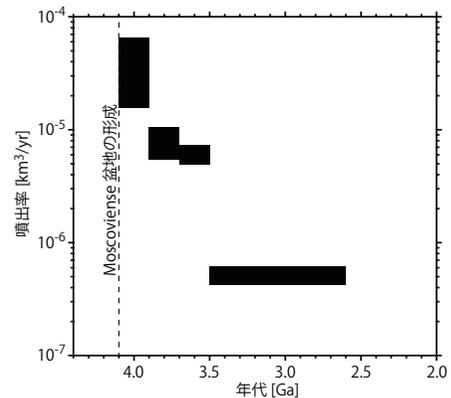


図5：モスクワの海におけるマグマ噴出率の時間変化。モスクワの海全体の厚さはマグマによって部分的に埋没したクレータのリム高から600～1000kmと見積もられることから[15]、最下層のユニットIltmを構成する溶岩流の厚さを見積もっている。

で噴出量が算出できる。図5は各層の体積を噴出間隔で割って算出した平均のマグマ噴出率の時間変化を示す。モスクワの海ではマグマ噴出率が40億年前から26億年前にかけて1/100に減少してきたことがわかる。このマグマ噴出率の減少は、月内部のマグマ生成率の減少、つまりは月マンツルの冷却過程を反映している。月の熱史シミュレーション研究との比較を通して、さらに研究を進めているが、これ以上の議論は本論文の主題からはずれるので割愛する。

3.2 衝突盆地放出物の厚さ推定への応用

惑星表面上で起こる表面再更新はマグマ噴出だけで

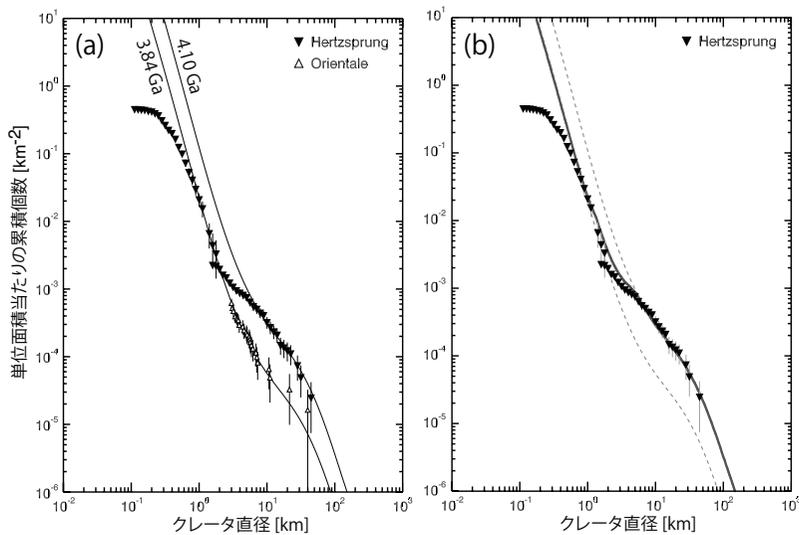


図6：Hertzprung盆地のフロアで計測されたクレータサイズ頻度分布。(a)Orientale盆地のフロアのクレータサイズ頻度分布との比較。(b)各衝突盆地からの放出物の厚さと堆積年代を考慮して模擬したクレータサイズ頻度分布(実線)との比較。

はなく、天体衝突によるクレータ形成と、それに伴う放出物の堆積もその要因である。一般に直径300 km以上のクレータを衝突盆地と呼び、このような巨大衝突によるクレータ形成過程の理解は初期の月惑星の構造や熱進化を理解する上で重要である。特に衝突盆地の放出物は広範囲にわたって月表面を覆い、水平方向の表層物質の混合を引き起こした。衝突盆地の放出物の厚さや分布の理解はリモートセンシングやサンプルリターン試料の物質科学的な情報を解釈する上で欠かせない。

当初、我々は月の初期の天体衝突の歴史の復元を目指して、「かぐや」地形カメラデータを用いて月の裏側の衝突盆地上でクレータカウンティングを行っていた[13]。図6は月裏側北半球にあるHertzprung盆地のフロアにおいて計測されたクレータのサイズ頻度分布である。観測されたサイズ頻度分布の直径7 km以下の範囲では41億年の等時曲線に沿っているが、直径2 km以下の分布は38.4億年の等時曲線と一致して

おり、先のモスクワの海の例と同様に表面再更新と思われる特徴的な折れ曲がりが発見された。このHertzprung盆地のフロアでは溶岩流は存在していないため、表面再更新の原因としてマグマ噴出は考えられない。別の原因として考えられるのが他の衝突盆地からの放出物による表面再更新である。Hertzprung盆地よりも後に形成された衝突盆地は複数存在するため、それらからの放出物の飛来は複数回起こったと考えられる。折れ曲がりが起こるクレータサイズは放出物の総厚を反映しており、直径2 km以下のクレータサイズ頻度分布の切片は最後の放出物の堆積年代を反映していると予想される。実際に、月面で最も若い盆地であるOrientale盆地の上で計測されるクレータサイズ頻度分布と比較すると[17]、Orientale盆地上のサイズ頻度分布は38.4億年の等時曲線に沿っており、Hertzprung盆地で起こったと考えられる最後の表面再更新の年代と合致している(図6a)。

クレータからの距離と放出物厚の関係は次元解析と

表1：Hertzprung盆地における各衝突盆地からの放出物の厚さ。

	衝突盆地				計
	Orientale	Imbrium	Serenitatis	Others	
形成年代 [億年] [2]	38.4	39.1	3.98	-	
一時クレータ直径 [km]	212.8	472.6	340.1	-	
Hertzprungとの距離 [km]	1191	3272	4177	-	
放出物厚さ [m]	50.6	113.4	31.1	2.9	198.2

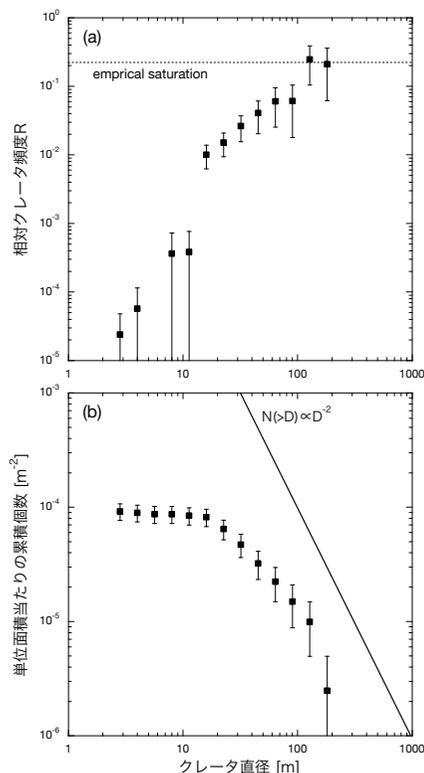


図7：小惑星イトカワのクレータ候補地形のサイズ頻度分布。Hirata et al. [23] のデータを (a) 相対サイズ頻度分布プロット (R-plot) と、(b) 累積サイズ頻度分布プロットの二種類の形式で示す。クレータ候補地形リストで確度クラス1-4の全てを直径ビンサイズの倍率は $\sqrt{2}$ 倍でプロットした。R-plotにおける相対サイズ頻度の計算方法はCATWG [22] による。R-plotにはクレータ数密度の経験的平衡レベルを、累積サイズ頻度分布プロットにはベキ乗則における傾き-2のライン(平衡状態のラインではないことに注意)を追記している。イトカワのクレータ候補地形のサイズ頻度分布は累積サイズ頻度分布プロットで全て傾き-2よりも勾配が小さいため、R-plotでは左下がりにプロットされている。

実験にもとづいて [20] 得られている。衝突盆地の層序関係は知られているので [21]、それぞれの衝突盆地の上に、それよりも若い盆地からの放出物がどれだけ堆積しているかはその放出物厚モデルを用いて推定できる(表1)。それによりその場所でいつの時代にどれだけのサイズ以下のクレータが消失したかを算出することができ、それから最終的なクレータサイズ頻度分布形状をシミュレートすることが可能である。これを実際に観測されるサイズ頻度分布と比較を行ったところ(図6b)、次元解析にもとづく放出物厚モデルで観測されたサイズ頻度分布形状を非常に良く再現できるこ

とが分かった。この結果は、観測されたサイズ頻度分布の折れ曲がりや他の衝突盆地からの放出物による表面再更新によってつくられたことを強く支持するだけではない。室内衝突実験から得られた放出物のスケールリング則が数百 km スケールの実際の衝突現象に適用可能であることも意味している。

衝突盆地の放出物厚が次元解析と実験にもとづくスケールリング則でよく説明できることがわかった。それにより、月面の衝突盆地の放出物によって引き起こされた水平・垂直方向の表層混合の程度を定量評価できるようになった。現在その検討を進めており、今後の課題としたい。

4. 「はやぶさ」の成果

月以外の天体に対し探査機が送り込まれるようになると、それらの天体表面でもクレータが重要な地形要素であることが明らかになった。これにより、月における研究で培われてきたクレータ年代学をはじめとするさまざまなクレータ統計の概念が他の天体にも適用されるようになっていく。月以外の天体でクレータ統計を考える際には、岩石試料の放射年代とのキャリブレーションが現時点では月以外の天体では行えないこと、クレータを生成する衝突現象の発生頻度・クレータ生成効率・消失速度が天体毎に異なることを考慮する必要がある。本章では、小惑星探査機「はやぶさ」の結果得られた小惑星イトカワにおけるクレータ統計に関する科学的成果を紹介する。

さて、本論に入る前に、クレータサイズ頻度分布のプロット形式について簡単に述べておきたい。小惑星のクレータサイズ頻度分布を図示する際に、他の天体で一般に用いられている累積サイズ頻度分布プロットの代わりに相対サイズ頻度分布プロット(以下R-plot)という形式のグラフがよく用いられている。双方の形式は古くから並行して用いられていたものであり、同じクレータ統計データからいずれの形式のプロットでも作成することができる [22]。これらが対象天体毎に使い分けられるようになったのは、主に使用するプロットが異なる研究グループが、それぞれの天体の研究に関わっていた影響もあるのではないかと考えられる。しかし、R-plot形式はクレータサイズ頻度を微分的に表現し、さらに累積サイズ頻度分布の場合に

生じる左上がりのトレンドを規格化(累積サイズ頻度分布プロットで傾きが -2 となるデータをR-plotでプロットすると傾きは 0 となる)しているため、クレータサイズ頻度分布の細かな形状を表現するには適している。本稿において、前章までは累積サイズ頻度分布プロットのみを取り扱っていたため、特にプロット形式について明示を行わなかったが、本章においてプロット形式の差異が問題になる場合はこれを明示することとしたい。

4.1 小惑星イトカワの衝突地形とクレータ統計

2005年9月に小惑星探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワにランデブーを行い、多数の画像データを取得することに成功した。Hirata et al. [23]では「はやぶさ」が取得した画像を用いて、イトカワ表面の衝突地形のサーベイを行っている。画像を一見したところでは、イトカワ表面には他の天体で普遍的・典型的に観察されるお椀型の単純クレータは存在しないように見えるが、画像データと小惑星形状モデルの詳細な解析により、衝突クレータの可能性のある準円形の凹地形が存在することが明らかになった。これらのクレータ候補地形は以下の特徴を持つ；(1)円形度が典型的な衝突クレータに比べて悪い、(2)深さ-直径比が非常に小さい、(3)内部が細粒の土砂で覆われている場合がある、(4)リムの盛り上がりほとんどない、(5)断面の方向によっては完全な凹地形ではない場合がある、(6)リム周辺の物質のアルベドが高くなっている場合がある。他の小惑星で観測されている衝突地形と共通する特徴もある一方、イトカワ特有の要素も存在する。イトカワの衝突地形がこのような特異な特徴を持っているのは、低重力環境であること、イトカワ表層がボルダー層に覆われていること、表面の重力ポテンシャルの変化が大きく、高地から低地への物質移動が全球的によく発達していることなどが影響していると考えられている。また、イトカワ自体のサイズに匹敵する大きなクレータ候補地形も多く、地表面の曲率がクレータ形成プロセスに影響を与える可能性も指摘されている。典型的クレータから大きく異なる形状を持つ一部の凹地形は、イトカワ上で起きた衝突現象で形成されたクレータではない可能性(非衝突起源地形の誤認や、イトカワ母天体表面に存在していた地形の残存物である可能性を含む)もあることを考慮して、Hirata et al.

[23]では発見されたクレータ候補地形について、衝突クレータとしての確度の分類を行ったうえでクレータ(候補地形)統計としてまとめている。これを累積と相対、二種類の形式でサイズ頻度分布プロットとして図示したものが図7である。

図7を、前章までで示した月の場合と比較して見ると、いくつかの特徴があることがわかる。累積サイズ頻度分布プロットでは最大クレータ(候補地形)以下、全体にサイズ頻度の傾きが常に -2 より緩やかになっていること、さらに直径 10 m以下ではプロットはほぼ水平になっている。これはこのサイズ範囲に属するクレータが極めて少ないことを意味する。同様の傾向はR-plotでも見て取ることができる。先に述べた通り、累積サイズ頻度分布の傾きが -2 のとき、R-plotの傾きは 0 となるよう規格化が行われているため、イトカワのサイズ頻度分布はR-plotでは常に右下がりとなっている。また、R-plotは微分的であり、サイズビンごとのクレータ頻度を示しているため、直径 10 m以下のクレータ数の減少が、直径 5 - 10 mと 5 m以下の二段階で起きているように見えることもわかる。これは累積サイズ頻度分布プロットでは判別しにくく、R-plotを用いる利点がよく現れている。

このサイズ頻度分布は何を意味しているのだろうか？ まず考えられるのは小クレータの数え落としてあるが、「はやぶさ」のイトカワ観測時の典型的な画像分解能は 0.7 m/pixelであり、一般には直径 10 m以上のクレータを同定するのに不足はない。イトカワの表面の約 80% は多数のボルダーに覆われているため、ボルダーの作る凹凸にクレータが紛れて同定をしにくくなる可能性はあるが、残り 20% の表面は細粒の土砂に覆われた滑らかな表面であり、この地域でもクレータの欠乏が生じていることは説明できない。

次に、クレータを作るインパクトのサイズ頻度分布を反映したものであるという可能性を検討してみる。典型的な軌道進化のタイムスケールから考えて、イトカワはある程度の期間メインベルト小惑星として存在し、その後現在の近地球型小惑星としての軌道に移行したと考えられている[24-26]。メインベルト小惑星のクレータ生成頻度は近地球型小惑星のそれに比べて3桁ほど大きいと考えられているので[26]、イトカワ表面のクレータのほとんどは、イトカワがメインベルト小惑星だった期間に他のメインベルト小惑星との衝突

により形成されたものと考えてよい。イトカワ表面のクレータを作った小さいサイズ(直径10 m以下)のメインベルト小惑星の頻度分布は直接観測することは困難であるが、一般的にはより大きいサイズ範囲からほぼ同じベキ乗則(累積サイズ頻度のベキにして約-2.7)が成り立っていると考えられている[26]。しかし一方で、Yarkovsky効果による天体軌道の変化は、天体サイズが小さくなるとより効率的に働くため、小さいサイズの小惑星がより効果的にメインベルトから除去されるという機構が働いている可能性もあり、議論の余地は残っているかもしれない。

さらにイトカワの表層環境にクレータ欠乏の原因を求める考え方もある。まず、イトカワ表面のボルダー層では、衝突のエネルギーはまず個々のボルダーの破壊に消費されるため、細粒のレゴリス層に対する衝突よりもクレータ生成効率が悪くなるというアイデアが提案されている[23]。ボルダー層がインパクトに対する装甲であるかのように振る舞うと考えることから、この効果は装甲効果(armoring effect)と呼ばれている。装甲効果の定量的評価を行った室内実験では、少なくとも低速度衝突では顕著にクレータ生成効率が落ちることが示されている[27]。しかし、高速度域での衝突実験では装甲効果によるクレータ生成効率の変化は見いだせなかった、という報告もある[28]。イトカワで本当に装甲効果が働いているかはまだよくわかっていない。

最後に、クレータ生成時に他のクレータが消去される効果も考慮する必要がある。月の場合、クレータから発生する放出物による周囲の埋め立てや、衝突で励起された振動によって生じる水平方向の物質移動によって、次第にクレータの地形特徴が劣化して最終的に消滅するプロセスが働いていることが知られている。重力が弱い小惑星では、月に比べて地表に再落下する放出物の量は減少するため、放出物の埋め立て影響は小さくなる。しかし、衝突励起振動によって天体表面に働く加速度の効果は低重力下でより顕著になる。月の場合は振動の伝搬する範囲はごく限られているが、小惑星では振動が天体全体に伝搬し、地表の全域で重力加速度を超える大きさの加速度が表面の粒子に加わり、物質移動とそれに伴う地形の劣化が起きる可能性がある。小天体における衝突励起振動による地形劣化効果のことを特にseismic shakingと呼んでいる。こ

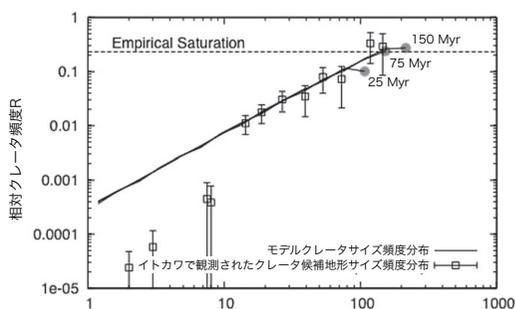


図8：小惑星イトカワのクレータ候補地形のサイズ頻度分布(R-plot形式)をseismic shakingの効果を考慮したクレータ生成・消滅モデルでフィットした例。3本のほぼ重なる曲線はそれぞれ表面年代0.25、0.75、1.5億年におけるモデルサイズ頻度分布(等時曲線)である(曲線右端に付けられた灰色点の左から順)。Michel et al. [26]のFig. 5を引用。

の現象はNEAR-Shoemakerによって明らかになった小惑星エロスのクレータのサイズ頻度分布を説明するために注目されるようになった。エロスもイトカワ同様、小さいサイズのクレータが予想より欠乏している。Richardson et al. [29]は、エロスのクレータサイズ頻度分布を説明できるseismic shaking効果のモデルを構築した。直径70-100 km以下の小惑星ではこの全球的な振動伝搬の効果が働くと思われている。

4.2 Seismic shakingを考慮したイトカワ表面年代と表面地形進化史の推定

Michel et al. [26]は、Richardson et al. [29]のseismic shakingモデルをもとに、Hirata et al. [23]によるイトカワ表面の衝突地形のサーベイの結果得られたクレータ(候補地形)統計データのモデリングを試みた。この研究では、seismic shakingとクレータ放出物の埋め立てによるクレータ消失過程と、一般的なベキ乗則によるクレータ生成スケール則とインパクト数密度モデルによるクレータ生成が考慮されているが、小さいインパクトの欠乏や装甲効果は考慮されていない。また、得られたモデルクレータサイズ頻度分布曲線を観測と比較して、クレータ年代学による表面年代の推定を試みている。

図8に結果の一例を紹介する。三種類(表面年代0.25、0.75、1.5億年)のモデルクレータサイズ頻度分布(等時曲線)は、いずれも直径100 m以下のクレータが欠乏するイトカワの観測結果をよく再現している。しかし、どの表面年代を仮定しても観測結果を再現できるとい

うことは、このサイズ範囲において seismic shaking 効果を考慮した場合のクレータサイズ頻度分布はほぼ平衡状態にあることと、観測された頻度分布曲線全体のモデルによる再現性を基準とした表面年代の決定（これが月などで一般に行われているクレータ年代学の手法である）を行うことができないことを意味している。実際、この研究における結論として示されているイトカワの推定表面年代（重力支配域でのクレータ生成スケーリング則の不確定性を考慮した数値範囲として0.75-10億年）は、直径100 m以上のごく狭いサイズ範囲（イトカワで観測されている最大のクレータ候補地形の直径（短軸径）は134 mである）での再現性で判断されている。極めて数の少ないサンプルを基準とした年代推定になっているため、モデルの不確定性とは別に、大きな統計的な誤差も含まれている可能性があることは認識しておく必要がある。

さて、イトカワで観測されたクレータサイズ頻度分布の特徴として、直径100 m以下での連続的なクレータの欠乏に加えて、直径10 m以下でさらなるクレータ数の減少が見られることは既に述べた。このサイズ範囲では seismic shaking を考慮したモデルでも、観測結果を再現できていない。この点に関して、Michel et al. [26]はいくつかの仮説を提示している。まず、このサイズ範囲ではモデルでは考慮に入れていなかった装甲効果によるクレータ生成効率の低下が生じている可能性、そして、直径10 m以下のクレータを全て消失させるような全球規模での地質イベントをイトカワが経験した可能性である。後者で想定されるイベントとして、(1)メインベルト小惑星から近地球型小惑星への軌道遷移、(2)YORP効果による自転状態の変化と天体構造の再構成、(3)イトカワの頭部パーツと胴部パーツの衝突合体が挙げられている。(1)では、メインベルト小惑星から近地球型小惑星への軌道遷移はメインベルト領域でのある程度の規模の衝突によって起き、この衝突によって小サイズのクレータが全て消失したと考える。(2)と(3)は、イトカワがRubble-Pile天体であり、全体形状が頭部と胴部の二大ブロックに分かれていることから発想されている。YORP効果は天体の自転を加速、あるいは減速させるように働くが、全体が複数のブロックで構成されるRubble-Pile天体の場合には自転速度の変化に対応したブロック構成の再配置を起こす可能性がある。このとき、表

層物質は大きく移動するので、小地形が消失したと考えるのが(2)のシナリオである。(3)はブロック構成の再配置が衝突現象によって引き起こされたと考えるものである。

以上、小惑星探査機「はやぶさ」による観測結果にもとづく小惑星イトカワのクレータ統計についての知見を紹介した。一読してお分かりの通り、観測結果の解釈にはまだ議論の余地が多く残されているのが現状である。「はやぶさ」以前の月や他の小惑星への探査で得られていた知識は、「はやぶさ」による観測結果の理解をある程度まで助けてくれる。しかし、イトカワのようなサイズの小天体への探査は「はやぶさ」が初めてであり、微小天体におけるクレータ形成を含むさまざまな地質プロセスが、過去の知識の延長だけでは容易には理解しがたいこともまた明らかになったといえる。

5. まとめ

本稿では「かぐや」や「はやぶさ」データを用いたクレータ統計研究の紹介を通して、月惑星表面の地質進化過程や物理過程を読む解く上でのクレータサイズ頻度分布計測の有効性について解説してきた。これまで述べてきたように、近年、様々な天体の高空間分解能画像の蓄積が進んでおり、クレータ年代研究の対象は小領域・若い領域へと移行しつつある。それによって、小スケールのクレータ統計に寄与する地質学・物理学過程のすべてを我々が把握できていないことが明らかになっており、当該研究の重要性はますます増している。

謝辞

本論文で紹介した成果は、多くの「かぐや」と「はやぶさ」のサイエンスメンバーとの共同研究によるものです。査読者である本田親寿氏からは本稿を改善する上で、非常に有益なコメントをいただきました。長谷川ゲストエディターには本稿の執筆機会を頂きました。心より感謝します。

参考文献

- [1] Hartmann, W.K., 1970, *Icarus* 13, 299.
- [2] Neukum, G., 1983, *Meteoritenbombardement und Datierung planetarer Oberflächen* (Munich: Ludwig-Maximilians-Univ.).
- [3] Neukum, G. et al., 1975, *The Moon* 12, 201.
- [4] Baldwin, R.B., 1971, *Icarus* 14, 36.
- [5] Hartmann, W.K., 1971, *Icarus* 15, 410.
- [6] Gault, D.E., 1970, *Radio Sci.* 5, 273.
- [7] Werner, S.C. et al. 2002, *Icarus* 156, 287.
- [8] Strom, R.G. et al., 2005, *Science* 309, 1847.
- [9] Namiki, N. and Honda, C., 2003, *Earth Planets Space* 55, 39.
- [10] McEwen, A.S. and Bierhaus, E.B., 2006, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 34, 535.
- [11] Hirata, N. and Nakamura, A.M., 2006, *J. Geophys. Res.* 111, doi:10.1029/2005JE002484.
- [12] Werner, S.C., 2005, Ph.D. dissertation, Free University, Berlin, Germany.
- [13] 諸田智克, 2011, *遊星人* 20, 324.
- [14] Haruyama, J. et al., 2009, *Science* 323, 905.
- [15] Morota, T. et al., 2009, *Geophys. Res. Lett.* 36, doi:10.1029/2009GL040472.
- [16] Morota, T. et al., 2011, *Earth Planet. Sci. Lett.* 302, 255.
- [17] Cho, Y. et al., 2012, *Geophys. Res. Lett.* 39, doi:10.1029/2012GL051838.
- [18] Kramer, G.Y. et al., 2008, *J. Geophys. Res.* 113, doi:10.1029/2007JD009168.
- [19] Pike, R.J., 1977, in *Impact and Explosion Cratering*, edited by Roddy, D.J. et al., pp. 489, Pergamon, New York.
- [20] Housen, K.R., 1983, *J. Geophys. Res.* 88, 2485.
- [21] Wilhelms, D.E., 1987, *The geologic history of the Moon*, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.
- [22] Crater Analysis Techniques Working Group (CATWG), 1979, *Icarus* 37, 467.
- [23] Hirata, N. et al., 2009, *Icarus* 200, 486.
- [24] Michel, P. and Yoshikawa, M., 2005, *Icarus* 179, 291.
- [25] Michel, P. and Yoshikawa, M., 2006, *A&A* 449, 817.
- [26] Michel, P. et al., 2009, *Icarus* 200, 503.
- [27] Güttler, C. et al., 2012, *Icarus* 220, 1040.
- [28] Holsapple, K.A. and Housen, K.R., 2014, *LPSC* 45, 2538.
- [29] Richardson, J.E. et al., 2005, *Icarus* 179, 325.