

# 小天体のサイズ分布から探る太陽系衝突史 —38億年前に月に孔をあけた天体の正体—

吉田 二 美

〈自然科学研究機構/国立天文台/ハワイ観測所研究員 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yoshdafm@cc.nao.ac.jp

太陽系の歴史は衝突の歴史といってもよいほど、原始太陽系星雲誕生→微惑星形成→惑星形成→現在の太陽系へと至るすべての場面で、衝突現象は常に進化の鍵でした。過去の衝突現象は今となっては再現できませんが、現在惑星表面に残るクレーターや小天体群のサイズ分布などから探っていくことができます。例えば、火星と木星軌道の間にあるメインベルト小惑星群の現在のサイズ分布や空間分布は、太陽系初期にメインベルト領域にあった物質の総質量やこの小惑星群の一部が軌道進化した近地球小惑星群の形成率を見積もるうえでの基礎情報になりますし、近地球小惑星の軌道分布と総数がわかればそれらが地球に衝突する確率も見積もれます。また、木星軌道にいるトロヤ群天体の総質量と空間分布は、太陽系初期の大惑星の移動や木星形成域での原始太陽系星雲ガスの量を物語るといわれています<sup>1)4)</sup>。こうした理由から私はすばる望遠鏡を使って太陽系小天体のサイズ分布を調べる仕事をしてきました。

本研究は、小天体群のサイズ分布と地球型惑星表面に残されたクレーターの記録から、今から約38億年前以前とその後では月面に衝突した天体群が異なることを発見したというものです。本研究の内容は2005年9月16日号のScience誌に“The Origin of Planetary Impactors in the Inner Solar System”というタイトルで掲載されました<sup>5)</sup>。本研究は月や惑星のクレーターと月の岩石を分析した惑星科学者・地質学者とクレーターを作った衝突体の源を調べ、小天体の軌道進化を計算した天文学者たちのコラボレーションです。本稿はこの論文の内容にその後半年間の私の小惑星研究で明らかになった部分を加筆したものです。

## 1. 「後期重爆撃期」の謎に挑戦

太陽系では一般に、約45億年前に惑星形成は終了し、その時点で微惑星の惑星への降着もほぼ終了したと思われています。しかしその後数億年を経た、今から約38億年前頃、再び何らかの理由で地球型惑星の表面に激しい天体衝突が起り、これらの惑星の表面状態を完全にリセットしたとする説があります<sup>6)11)</sup>。これは「後期重爆撃期」(Late Heavy Bombardment または Lunar cata-

clysm) 説と名づけられ、月面クレーターやアポロ宇宙船が持ち帰った月面サンプル(アポロ・サンプル)、月起源の隕石(これはアポロ・サンプルよりずっと広範囲の月面から飛来した試料とされています)の衝突年代の分析から支持されています<sup>12)14)</sup>。また火星の高地から地球に飛来したとされるAllan Hills 84001隕石<sup>15)17)</sup>の衝突年代は39.2億年前と知られており、39.2億年前に火星で起こった大規模衝突によって火星を飛び出した衝突破片が時代を経て地球へ運ばれたものと思われ

ます。火星から隕石が飛び出した時期と後期重爆撃期の年代の一致から、後期重爆撃が月だけでなく内部太陽系全域にわたって影響を及ぼしたイベントであったと推察されます。

どのような天体が後期重爆撃期に内部太陽系に降って来たのか？ その衝突体の起源を確認することはひじょうに難しく、これまでに地球や太陽周りを公転するデブリを起源とするモデルや小惑星や彗星を起源とするさまざまなモデルが提案されていますが<sup>18)</sup>、これといった決め手はありませんでした。衝突溶解が見られるアポロ・サンプルの化学分析からは、後期重爆撃期の衝突体は彗星のような氷に富んだ天体ではなく、岩石質の小惑星的天体のほうが適当だろうともいわれます<sup>16)</sup>。衝突天体の起源が明確でないため、後期重爆撃の原因となるメカニズムも研究者の推論の域を出ないものが多く、この説が提案されてから30年以上にわたり惑星科学上の重大な謎として研究者の間で喧々諤々の議論がなされてきました。しかし誰も手持ちの資料では確信に近づけませんでした。これは特に衝突天体候補である太陽系小天体群の観測データの不足、なかでも小天体のサイズ分布の不詳性が原因であったと思われます。最近では続々と太陽系小天体のサーベイ観測が行われ<sup>19)-29)</sup>、小天体群の空間分布やサイズ分布のデータが驚くべき勢いで増えました。特に大口径望遠鏡を用いてより小さい小天体のサイズ分布が明らかにされつつあり、地球型惑星のクレーターのサイズ分布とクレーターを作った衝突体のサイズ分布の直接比較が可能になりました。クレーターのサイズ分布は衝突天体のサイズ分布を反映し、衝突体の力学的・物理的起源に関する貴重な情報を内包しています。特に月面クレーターの形成年代はアポロ・サンプルのおかげでよく知られています。その中から約38億年前の後期重爆撃期に形成されたクレーターのサイズ分布を詳しく調べることで、それを作った衝突体の正体に関する手がかりを得ることができるはずです。そうした古い

衝突体と現在の太陽系小天体の比較から後期重爆撃期から現在に至る太陽系史の一つの側面を知ることができるかもしれません。私たちは新たに得られた小天体のデータを使って惑星科学業界が抱えてきた謎に挑戦しました。そしてデータ不足により30年間不完全燃焼のままくすぶっていたホットな論争に再び火をつけたのです。

本稿ではまず月や地球型惑星のクレーターを概観し、そのサイズ分布を調べます(2章)。次にクレーターを穿った候補天体である太陽系小天体のサイズ分布を示し(3章)、クレーターと小天体群のサイズ分布の比較から衝突天体の起源に迫ります(4章)。最後に、衝突天体を地球型惑星領域へと運ぶ力学機構について考えます(5, 6章)。

## 2. 地球型惑星のクレーターとそのサイズ分布

### 2.1 月、火星、水星、金星、地球のクレーター

月と地球型惑星表面のクレーターの様子を図1にまとめました。月には大気や水がないので風化・浸食作用が極めて少なく、そのうえプレート運動もないので地質構造が単純で、月の表面地形は過去数十億年にわたって形成時のままによく保存されているといわれています。月面には地球から少し暗く見える海の部分と高地の部分がありますが、これらの地域の形成年代はアポロ・サンプルの年代測定と地層学的法則に従って絶対年代が推定されており、高地は約46-38億年より前に作られ、海は約38-32億年前にできたことと推定されています。約38億年前の大規模な天体衝突で月面のあちこちから溶岩が流出し、それまでの地形を埋めて海ができたこととされています。図1(a)(b)は典型的な高地(a)と海(b)の部分の写真ですが、高地ではクレーターが多く、海では少ないことが明らかです。月の高地は四十数億年間の天体衝突の記録で、海は三十数億年間の天体衝突の記録ですから、新しい分だけ海のクレーター数が少ないのは当然ですが、しかしよく考えると、小天

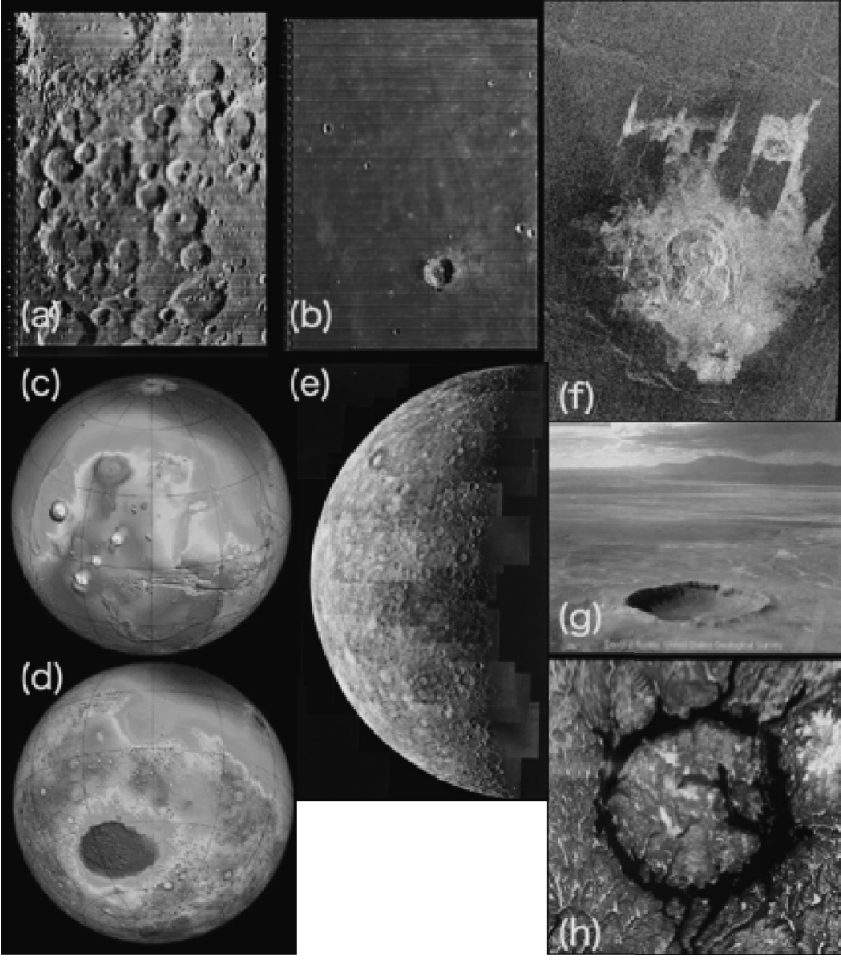


図1 月，地球型惑星のクレーター (a) Luna Orbiter による月面の撮像（経度約0度，南の極付近の高地），(b) 同じく雨の海の北端．両図でスケールは同じ．(c) 火星の北半球，中央左よりに火山帯が見える．(d) 火星の南半球，中央左下には大衝突の痕と思われる大きな盆地と多数のクレーターが見られる．(e) Mariner 10 によって撮像された水星の表面．(f) Magellan によって撮像された金星の多重クレーター．(g) アメリカ・アリゾナ州のパリンジャークレーター，直径 1.2 km. (h) カナダの森林地帯のマニクーガンクレーター，直径 100 km. (a) (b) (e) (f) (h) NASA 提供，(c) (d) MOLA サイエンスチーム提供.

体が一定の割合で衝突し続けてきたとするなら，海のクレーター密度は高地と比べてどう見ても低すぎます．クレーター密度と年代の対比から計算すると，もし天体衝突率が過去 40 億年にわたって一定ならば，海には現在の 10 倍以上のクレーターがあってもよいことになります．ということはある時期（つまり海が形成された約 38 億年前（この時期は後期重爆撃期にも一致します））を境

に月面への天体衝突が「何らかの理由」で激減したことを示唆します．この衝突天体数の減少は地球に住む生命にとっては幸いでした．天体がポコポコ衝突している地球では安心して住めませんから．衝突天体を減少させた，すなわち後期重爆撃期を収束させた「何らかの理由」は太陽系史上極めて重大なイベント（5 章参照）と深く結びついているはずで

火星の北半球は滑らかでクレーターは少なく、南半球は全体的に高地でクレーターに覆われています。火星の地質年代はまだ岩石サンプルを持ち帰って調べたことがないので絶対年代は知られていません。地球以外の地球型惑星の表面年代は絶対年代のわかっている月面のクレーター密度を指標に推定され、月面で38億年前に形成された表面のクレーター密度と同じクレーター密度をもつ表面は38億年前に形成された表面であるというように推測します。この表面年代推定方法は天体衝突率が地球型惑星領域でほぼ一様という仮定に基づきます。もしかしたらこの仮定は間違っていると思う人がいるかもしれませんが、ある時期だけ特定の惑星の表面だけを狙い撃ちするように大量の天体が降る理由は考えにくく、例えば、火星表面に大量の天体が外側から落下するなら、その内側の領域にも天体は飛んでくるはずですが、あってある時期の天体衝突率は地球型惑星領域で一様とする仮定はそれほど現実離れしているとは思えません。とはいえ岩石サンプルの年代測定なしでの地質年代の推定には大きな誤差はつきものです。現時点では火星の古い表面でクレーター密度が高く、新しい表面ではクレーター密度が低いというのがせいぜいでしょう。

水星はこれまでの惑星探査で表面の約半分しか写真が撮られていませんが、ほぼ全面がクレーターで覆われているので、表面年代は古いと思われる [図1(e)]。

金星は比較的新しい時代に火山活動で大量の溶岩が流れ出して古い表面を埋めたために、古いクレーターが消え、現在は新しいクレーターしか残っていません<sup>30)</sup>。また厚い大気のおかげで、小さい衝突体は大気中で燃え尽きて表面には届かず、金星表面の小さいクレーターの数は少なくなります<sup>31)</sup>。大きい衝突体の場合でも大気を通過する間にばらばらに分裂し、図1(f)のようないくつもの小さいクレーター（直径9 km以下）を同時に作るようなクレー

ターはマルチブルクレーターと呼ばれ、金星クレーターの約16%を占めています。

現在、地球にはクレーターと思われる構造が170個以上確認されています [図1(g)(h)]。地球にも大気があるので、地表まで達する衝突体の数は少なくなり、さらに地球の場合は水や大気による風化・浸食作用によってクレーターはどんどん消されていくので、現在まで残っているクレーター数は他の地球型惑星に比べ断然少なくなっています。

このように地球や金星の上にもクレーターはあるのですが、大気により落下天体が遮断されることと、地表での激しい侵食によりクレーターの保存状態が極めて悪いので、精密なサイズ分布比較の議論には使えません。

## 2.2 クレーターのサイズ分布

私たちはまず始めにクレーターで覆われた表面をもつ月、火星、水星のさまざまな年代の表面のクレーターのサイズ分布を調べました。サイズ分布とは「どの大きさのクレーターが何個あるか」という統計ですが、この統計の方法には何種類かあります。あるサイズ範囲のクレーター数を数えてヒストグラムを作る「サイズ頻度分布」、あるサイズより大きいクレーターを全部足し合わせて統計を取る「累積度数分布」、そして本稿で使った「Rプロット」などがあります。Rプロットとは、一般にクレーターや小天体の個数が、サイズの3乗におよそ反比例する（例えば、直径1 kmのクレーターは直径2 kmのクレーターに比べて8倍ほど多い）ことがわかっているので、クレーターサイズ頻度分布の統計を直径の3乗で規格化し、直径の3乗に反比例する分布からの詳細なずれを測定する手法です。これはクレーターの研究では頻繁に用いられています<sup>32)</sup>。小惑星のサイズ分布の研究にはふつう累積度数分布が使われていますが、本稿ではクレーターのサイズ分布と比較するためにすべてRプロットに統一してサイズ分布を示しました。

図2に月，水星，火星のさまざまな表面のクレーターのサイズ分布を示します．図2の縦軸はクレーターの数密度に対応します．この図から以下のことが読み取れるでしょう．

- 1) 月，水星，火星の古い高地のクレーター密度は高く，サイズ分布はRプロット上で波打った曲線になる．
- 2) 火星の北半球の平原に多い比較的若い（新しい）表面のクレーター密度は低く，サイズ分布曲線はほぼ平坦になる．Class 1と呼ばれる月面の白い噴出物を伴った新しいクレーターのサイズ分布も若い平原同様平らな分布になる．

このように古い表面と新しい表面ではクレーターのサイズ分布に明確な違いが見られるのです．この2種類のサイズ分布の存在は，従来から薄々気づかれてはいたものの，私たちはかつての惑星探査で得られた画像データ<sup>33), 34)</sup>を再度長時間かけて洗い直し，精密なクレーター勘定を行った結果，この2群性が紛れもない事実であることを確認しました．私たちは波打った形のクレーターのサイズ分布を **Population 1**，平らなほうを **Population 2** と呼びます．

以上の事実から推察される事柄は以下のとおりです．

- 1) 古い時代には地球型惑星に非常に多くの天体が衝突し，多数のクレーターを作った．
- 2) 古い時代のクレーター (**Population 1**) を作った衝突天体はRプロット上で波打つサイズ分布をもつ集団であった．
- 3) 新しい表面のクレーター (**Population 2**) の密度は低いので，大量の天体が衝突した時代は月の海ができた38億年前頃に終了し，その後は比較的少数の天体が衝突した．
- 4) 新しい時代の衝突天体はRプロット上で平らなサイズ分布をもつ集団である．

新しいクレーターと古いクレーターとのサイズ分布の違いは，それらを作った天体群が異なること

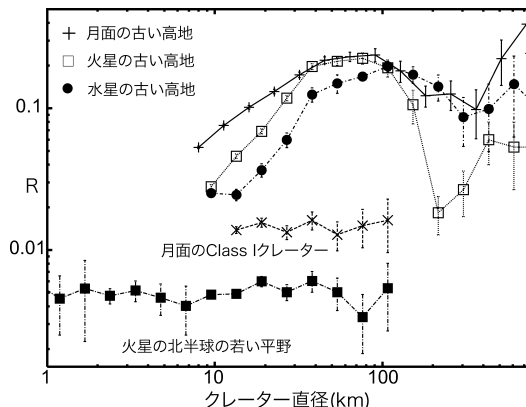


図2 月，水星，火星のさまざまな領域でのクレーターのサイズ分布．縦軸はクレーターの数密度に対応する．

を示唆すると思われます．以上から，私たちは，地球型惑星はこれまでにサイズ分布の違いで区別できる2種類の天体群の衝突を受けてきたと結論します．

### 3. 小天体のサイズ分布

#### 3.1 太陽系小天体群の分類

今度は惑星表面から視線を上げて衝突体のほうに目を向けましょう．太陽系には惑星の他に多数の小天体が存在します．地球上で恒星の間を縫うように動く明るい惑星は，発見者の名が歴史に残ってないくらい昔から知られ，古くは国や人々の運命を導く占星術に利用されたりしました．一方，小天体のほうは肉眼では見えないので，今から約200年前（1801年）に小惑星セレス（Ceres）が発見されるまで人々には知られないままでした．衝突の危険が現実的に存在する小天体のほうが，人類のみならず，地球の命運さえ握っているにもかかわらずです．

太陽系小天体は大きくは，主に岩石からなる「小惑星」と，氷を主成分とする「彗星」に分けられます．両者は生まれた場所が違うので，原始太陽系星雲の物質分布や温度分布を反映して構成物質が異なり，そのため諸々の物理性質も異なると

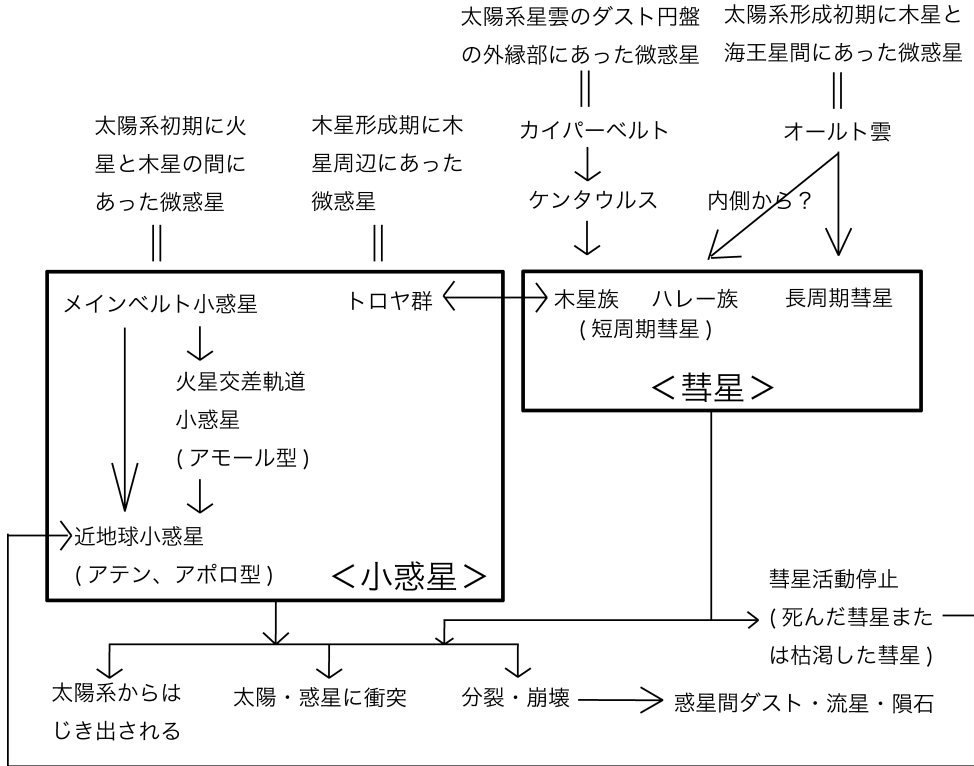


図3 太陽系小天体の起源と軌道進化.

考えられています。軌道分布も異なり、各天体群の太陽系内での位置や軌道の形に応じて図3のように分類されています。図3中の矢印は軌道進化の方向を示します。彗星は黄道面に対して傾いた楕円軌道をもつものが多いのですが、そうでないものもいるので、軌道の形だけで小惑星と彗星を区別せず、その天体がコマや尾（彗星活動）を見せると彗星として分類されます。最近では小惑星として発見され、その後の追観測でコマや尾が見つかり、彗星として登録される天体が増えました。近地球小惑星 (NEAs) 群は主にメインベルト小惑星 (MBAs) が軌道進化した小惑星で構成されていますが、10% くらいは揮発性分を失って彗星活動を終えた枯渇した彗星が混じっていると考えられています<sup>35)</sup>。木星軌道にあるトロヤ群は、ふつうは小惑星の仲間に入られますが、力学的には木星族彗星との相関関係も示唆され、最近

トロヤ群に属する **Patroclus** という天体の密度が彗星に匹敵するほど低いことがわかるなど<sup>36)</sup>、微妙な天体群です。

これらの天体群でサイズ分布が明らかになったもの、あるいは明らかになりつつあるものは、**MBAs**, **NEAs**, そしてトロヤ群です。ケンタウルス、オールト雲天体はまだ発見例が少なく、統計的な取り扱いはできません。カイパーベルトでは直径約 100 km 以上の大きい天体のサイズ分布しかわかってないので<sup>37)</sup>、私たちがこの研究で試みようとしている地球型惑星のクレーター (km-数百 km サイズ) との比較には適しません。彗星のサイズ分布を得ることは極めて困難です。なぜなら、彗星は太陽に近づくと彗星活動のため彗星核本体が外から見えず、太陽から離れて彗星活動が止んだ頃には、暗くて見えなくなっている場合が多いからです。彗星核の大きさを測るには探査機

で傍まで行って写真を撮る必要がありますが、このようにして調べられた彗星はまだたったの4個しかありません<sup>38)-41)</sup>。したがって彗星核のサイズ分布はまだよくわかっていません。

3.2 小惑星のサイズ分布

小惑星のサイズ分布の取得は広範囲の観測が必要なので一般的に難しいのですが、昨今の観測技術の進歩に伴い効率的にサーベイ観測ができるようになり、小惑星のサイズ分布に関する私たちの知識は以前には想像もつかないほど増えました。NEAsのサーベイで有名なSpacewatchサーベイ<sup>19)</sup>やLINEARサーベイ<sup>21)</sup>、銀河やクエーサーサーベイに加えて、多数の小惑星も発見したスローン・デジタル・スカイ・サーベイ(SDSS)<sup>20)</sup>、そして私たちのすばる望遠鏡を用いた小惑星サーベイ<sup>21)-28)</sup>(SMBAS: Subaru Main-Belt Asteroids Survey)などが、以前は知られることのなかった微小な小惑星のサイズ分布や空間分布の詳細を明らかにしつつあります。特にMBAsのサイズ分布はこれまでに幾度もサーベイ観測が行われ、段階的に明らかにされてきました(表1)。天文観測に写真が使われていた時代にはヤーキス・マクドナルド(YMS)<sup>42)</sup>とパロマー・ライデン(PLS)<sup>43)</sup>サーベイが比較的大きな小惑星のサイズ分布を決定しました。直径数十kmより大きい小惑星は、赤外線衛星IRASによる熱放射の観測も行わ

れ<sup>44)</sup>、かなり正確に直径が求められています。Spacewatchでは直径数十km-数kmのMBAsのサイズ分布が得られました。SDSSでは数十km-400mのサイズ分布が推定され、ついに数百m級の小惑星が小惑星帯で捕らえられるようになりました。ただし、SDSSの1km以下のMBAsのサイズ分布は大きい誤差を含んだものでした。今回はこれらのデータに2001年から私たちが始めたSMBASの結果を付け加えました[図4(a)]。SMBASはすばる望遠鏡の8.2mという大口径を活かし、直径1km以下の微小MBAsを2,000個近く検出し、直径1km-300mのMBAsのサイズ分布を明らかにしました。SMBASのおかげで、SDSSで誤差の大きかった1km以下の小惑星のサイズ分布が確定し、小さい天体を多く含むNEAs群のサイズ分布との直接比較が容易になったのです。

NEAsサーベイは地球に衝突する可能性のある小惑星の早期発見のために世界中で精力的に取り組まれています(LINEAR, Spacewatch, NEAT, LONEOS, Catalina Sky Survey, 美星スペースガードセンターなど)。NEAsの特徴は、軌道分布が全天に広がっていることと平均的サイズがMBAsに比べて断然小さいことです。最大のNEAsでも直径10kmほどしかありません。NEAsの最新のサイズ分布はLINEARサーベイ

表1 メインベルト小惑星のサーベイ観測.

サーベイ	実施年	出版年	望遠鏡口径 (m)	限界等級 ( $V_p$ は写真等級)	掃天面積 (deg <sup>2</sup> )	検出天体数 (MBAs以外も含む)	検出された小惑星の大きさ (km)	サイズ分布曲線の傾き*
YMS	1950-52	1958	0.25	$V_p < 14-16$	14,400	1,550	$30 < D < 300$	3.4
PLS	1960	1970	1.25	$V_p < 20-21$	216	>2,000	$D > 5$	2.8
Spacewatch	1992-95	1998	0.90	$V < 21$	3,740	59,226	$D > 5$	2.8
SDSS	1998-2000	2001	2.5	$r^* < 21.5$	500	-13,000	$0.4 < D < 40$	2.3
SMBAS 0	2000 June	2001	8.2	$V < -24$	0.2	27	$0.4 < D < 5$	$2.0 \pm 0.3$
SMBAS I	2001 Feb.	2003	8.2	$R < 24.4$	3	1,111	$0.1 < D < 5$	$2.2 \pm 0.03$
SMBAS II	2001 Oct.	2005	8.2	$R < 24.5$	4	1,838	$0.08 < D < 8$	$2.3 \pm 0.02$

\* 累積度数分布のベキ (b) ( $N(>D) \propto D^{-b}$ )

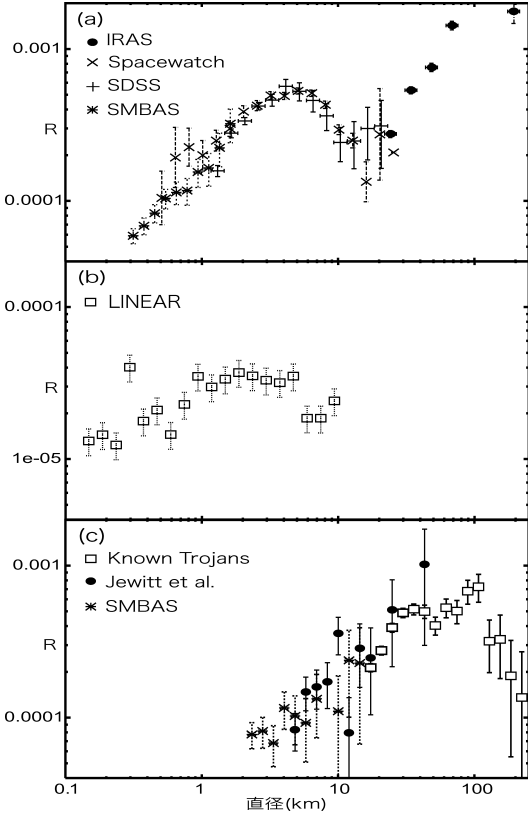


図4 小惑星のサイズ分布 (a) MBAs のサイズ分布, (b) NEAs のサイズ分布, (c) トロヤ群天体のサイズ分布 (既知のトロヤ群のデータは MPC<sup>45)</sup> より).

から得られました [図 4(b)]. MBAs のサイズ分布 [図 4(a)] と NEAs のサイズ分布 [図 4(b)] を見てみると, MBAs のサイズ分布は, 古いクレーターのサイズ分布と同様に, R プロットで波打つような曲線をなし, NEAs のほうは新しいクレーターのサイズ分布と似て比較的平らな形をしていることがわかります. つまりクレーターのサイズ分布に見られた明確な 2 群性が現在の小惑星のサイズ分布においても顕著に見られるのです. このことはつい最近まで知られていませんでした. SMBAS の結果が出るまでは, 直径 500 m-10 km の範囲で両者はまあ似ているという反対の解釈がなされていたのです. MBAs と NEAs のサイズ分

布の違いの発見は SMBAS の非常に重要な仕事の一つといえます<sup>26)</sup>.

トロヤ群はハワイ大の Jewitt らがカイパーベルトサーベいの副産物として発見した木星の L4 トロヤ群<sup>29)</sup>と, SMBAS が検出した木星の L4, L5 トロヤ群天体から直径 2 km までのサイズ分布<sup>27), 28)</sup>が明らかになりました [図 4(c)]. トロヤ群のサイズ分布は MBAs や NEAs のものとは明らかに異なるようです.

#### 4. クレーターと小天体のサイズ分布の比較

さて, 地球型惑星にクレーターを穿った犯人を特定するために 2.2 節で述べた地球型惑星のクレーターのサイズ分布を上述の小天体のサイズ分布と比較してみましょう. ここで留意すべき点の一つあります. それはクレーターのサイズ分布を直接小天体のそれと比べることはできないということです. 天体衝突で形成されるクレーターサイズは衝突天体の大きさのほかに密度や衝突速度にも依存するので, 直径 10 km の天体がぶつかって

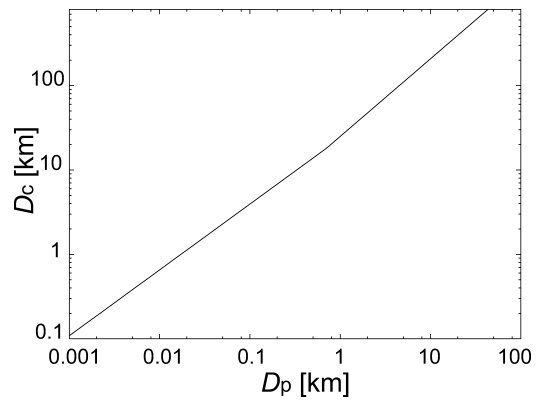


図5 Pi スケーリングの例. ここでは月面にメインベルト小惑星が衝突した場合を考えている. 月面の密度 (2,700 kg/m<sup>3</sup>) と重力加速度 (1.67 m/s<sup>2</sup>), 岩石的小惑星の密度 (3,000 kg/m<sup>3</sup>), および内側メインベルト小惑星の月面への平均的衝突速度 (17 km/s) を与えた場合の衝突天体の直径 (横軸,  $D_p$ ) とそれが月面に作るクレーターの直径 (縦軸,  $D_c$ ).



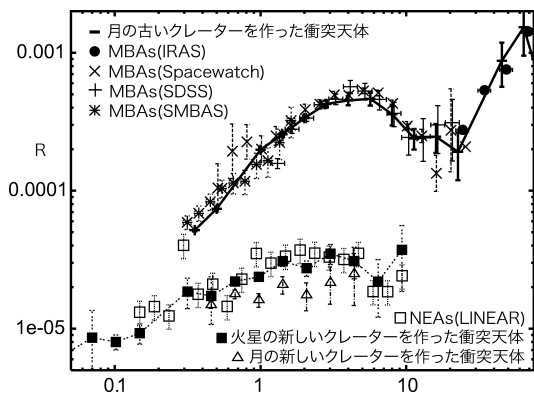


図6 クレーターを作った衝突天体のサイズ分布と現在の小惑星のサイズ分布の比較。横軸は天体の直径 (km), 縦軸は天体の個数密度。ここでは小惑星の天体を仮定してクレーターから衝突体のサイズを導出した。

ちょうど直径 10 km のクレーターができるわけではありません。クレーターと衝突天体のサイズ分布と比較するには、クレーターのサイズを衝突体サイズへ変換する必要があります。固体表面へのクレーター形成の研究は数多くなされており、現在では衝突体の密度と衝突速度などを与えれば、それが作るクレーターサイズの見積もりが可能になっています。私たちは、Population 1 と Population 2 を形成した衝突体のサイズ分布を引き出すために Pi スケーリング則という変換方法(図5)を使いました<sup>46)~49)</sup>。衝突体は小惑星の天体を仮定し、密度  $3 \text{ g/cm}^3$  (玄武岩的な岩の密度)、衝突角 45 度、衝突速度は月で 17 km/s, 火星で 12 km/s と仮定しました<sup>49), 50)</sup>。彗星の天体を仮定した場合は、彗星の平均軌道速度は小惑星より大きいので、惑星表面への衝突速度は大きくなりますが、最近の研究では彗星の密度は小惑星より非常に低いことがわかっており<sup>51)</sup>、同じ大きさの小惑星と彗星が衝突すると、小惑星衝突によるクレーターのほうが彗星衝突によるものより大きくなるようです。

このような手続きを経て換算したクレーター衝突体のサイズ分布を現在の MBAs と NEAs の最

新のデータを使った最新のサイズ分布と比較したものが図6です。これを見ると直ちに以下の事柄に気がつくでしょう。

- 1) 現在の MBAs のサイズ分布は、広いサイズ範囲で古いクレーターを作った衝突体のサイズ分布とほぼ等しい。
- 2) 現在の NEAs のサイズ分布は、比較的新しいクレーターを作った衝突体のサイズ分布と良い一致を示す。

1) は以前 Neukum らによっても指摘されたように<sup>52)</sup>、現在の MBAs のサイズ分布は Population 1 の衝突体のサイズ分布と実質的に同じということです。この結果から、Population 1 を作った後期重爆撃期の衝突体は、小惑星帯からやってきた小惑星であろうと予想されます。このことはアポロ・サンプルの分析結果(後期重爆撃期の衝突体は氷的な天体よりむしろ岩石的な天体である<sup>16)</sup>)と調和的です。彗星やカイパーベルトのサイズ分布は現在のところわかっていないので、これらの天体群を衝突天体の候補から外すことはできませんが、図6のサイズ分布を見る限り、彗星やカイパーベルトが MBAs と完全に同じサイズ分布をしていない限り、MBAs より主な後期重爆撃期の衝突体であることはないでしょう。MBAs とサイズ分布の全く異なるトロヤ群天体は後期重爆撃期の衝突体ではないと思ってよいでしょう。

私たちが不思議に思うのは、どうして後期重爆撃期の衝突体と現在の MBAs のサイズ分布が一致するのかということです。この一致は小惑星帯が過去 38 億年間にわたって同じサイズ分布を保っていたことを意味します。このことは、38 億年前には小惑星帯はすでに定常的なサイズ分布に達していた、あるいは小惑星帯内の天体衝突頻度が 38 億年前以来激減して、衝突破壊がほとんど起こらなくなった、というように解釈できます。小惑星の衝突進化はまだ解決されていない事柄が多く、これからの研究テーマですが、最新の衝突進化モデルを使ったシミュレーションによると、

MBAの衝突進化は従来の予測よりもはるかにゆっくりであるという結果を示し(つまりここ38億年間くらいは変わらない<sup>53), 54)</sup>, 私たちが主張する結果と矛盾しない帰結となっています。

## 5. 「後期重爆撃」の原因についての考察

ではMBAが38億年前に地球型惑星領域に大量に降った原因は何でしょう? 現時点の見識で最も有望な説は、「太陽系初期に巨大惑星の動径方向の移動が起こり、それに伴い小惑星帯で共鳴帯の移動が発生、当時小惑星帯にあった小惑星を片端から押し出し、多くを太陽方向へ落下させた。そして38億年前に巨大惑星らが現在の位置に落ちて共鳴帯の移動が止まり、小惑星の落下も止まった」という考えです。手持ちの状況証拠を挙げてみましょう。

- 1) 後期重爆撃期以来、内部太陽系のクレーターの記録には後期重爆撃期と同じような規模でのいかなる天体衝突イベントの証拠もない。
  - 2) 後期重爆撃期の衝突体のサイズ分布はMBAのサイズ分布と酷似している。
- 1) から後期重爆撃期に地球型惑星領域へMBAを送り込むメカニズムは初期の太陽系(約38億年前)に特有のできごとでなければなりません。
- 2) はそのメカニズムはサイズに関係なく小惑星を小惑星帯から放出するものであったことを意味します。つまり小惑星サイズに依存する非重力的な輸送プロセス(Yarkovsky効果)ではなく、小惑星サイズによらず、MBAのサイズ分布を衝突体のサイズ分布にそっくりそのままコピーするようなプロセスであったと予想されます。いくつかの理論的研究が予想する巨大惑星の動径方向の移動は上記1) 2) の両方の制約を満たしています。力学シミュレーションによれば、外惑星の動径方向の移動は $10^7$ - $10^8$ 年のタイムスケールで起こり<sup>55)-58)</sup>, これにより強い重力共鳴帯が移動、ある

いは木星や土星の軌道離心率が変化し、そのために外惑星領域の外側と内側とで軌道不安定が生じ、それが小惑星と氷の微惑星体(彗星)による地球型惑星大爆撃を短期間(0.1-1.5億年)引き起こす可能性があると考えられています<sup>59)-62)</sup>。最近提案されたGomesら<sup>62)</sup>の力学モデルによる後期重爆撃の発生状況は次のようなものです。まず、木星・土星・海王星・天王星という大型のガス惑星および氷惑星の軌道間隔はそれらが形成した約46-45億年前では現在よりかなり小さく、とりわけ、土星が木星との1:2平均運動共鳴(土星が1公転する間に木星がちょうど2公転するという整数関係)を生じる軌道位置よりもわずかに内側で形成する(現在の土星はこの位置よりずっと外側にある)と仮定します。また、惑星形成直後にはこれらの惑星の材料物質となった微惑星群がまだ惑星たちの周辺に生き残っていたとします。周辺の微惑星群の軌道と質量の分布によっては、外惑星と微惑星群の重力相互作用によって惑星たちの軌道が動径方向に移動すると考えられます。これにより、土星の軌道がしだいに動径方向に拡大し、数億年を経て土星の軌道が木星との1:2平均運動共鳴の位置にまで到達したとき、共鳴効果により土星軌道の離心率が上昇して木星と近接遭遇を発生し、木星も含めて外惑星たちの軌道が大いに乱れます。例えば、土星以遠の惑星の軌道は動径方向に大きく拡大し、その反作用で木星の軌道が若干縮小します。こうした惑星たちの動径方向の移動は小惑星帯内における共鳴帯の位置を大きく変えるので、MBAの軌道が不安定化し、地球型惑星領域へ天体の大量落下を発生させます。このGomesらモデルでは、惑星が動径方向に移動するような激変が起これば外惑星領域に存在する微惑星たち(氷的天体=彗星)も大量に内惑星系領域に落下したはずだから、後期重爆撃には小惑星同様彗星もおおいに寄与していると推測しています。このモデルはまだ広く合意を得たものではありますが、小惑星帯における共鳴

帯の移動と後期重爆撃期の発生要因の関連について今後しばらくは道標となるモデルといえましょう。しかしながら、先述したように、クレーター衝突体の痕跡の化学分析は、衝突体が小惑星的天体であることを示唆するので、私たちは、彗星は後期重爆撃期のマイナーな衝突体であったか、あるいは彗星の衝突記録は後に衝突した小惑星によってすっかり消されたのだろうと考えます。

Population 1 の衝突体による爆撃は惑星の全表面を完全にリセットしたので、それより古い時代の記録はクレーターの記録からは原理的に知ることができません。

## 6. 「後期重爆撃期」後の衝突についての考察

Population 2 の衝突体のサイズ分布は、後期重爆撃期の衝突体のものとは異なり、NEAs のサイズ分布とよく一致しており (図 6)、したがって 38 億年前以降に作られたクレーターは主に NEAs の衝突で形成されたものと思われます。これは NEAs と MBAs のサイズ分布が似ているとしていた以前の研究結果とは別の結論です<sup>63)</sup>。以前は大きな小惑星のサイズ分布しか得られてなかったことと、分布の違いに敏感でない累積サイズ分布を使った分析に基づいていたために MBAs と NEAs のサイズ分布の違いを見抜けなかったのでしょう。確かに図 6 の直径数 km–10 km の小惑星では NEAs も MBAs もほぼ平らな分布をしており、似ているように見えます。また NEAs は主に MBAs が軌道進化した集団ですから、NEAs とその母集団である MBAs のサイズ分布が大幅に違うはずがないという思い込みもあったのかもしれません。NEAs が MBAs とは異なるサイズ分布をもつことは、新しいクレーターの衝突体を小惑星帯から月や地球型惑星領域に輸送したプロセスが、古い時代に小惑星帯からクレーター衝突体を運んだ輸送プロセスとは異なることを示唆します。図 6 を見ると新しいクレーター衝突体と

NEAs には MBAs と比べて小さい天体が多いことがわかります。このことは、後期重爆撃期より後に衝突体を輸送したプロセスは、サイズの小さな天体により効率的な性質をもつことを示しています。これを説明するのに最も適切と考えられるのは Yarkovsky 効果 (小惑星の自転により生じる効果で小惑星が吸収する太陽エネルギーと放出する太陽エネルギーの非対称性のために小惑星の軌道エネルギーに永年の変化が起き、小惑星の軌道の大きさを徐々に変えてしまう<sup>64)</sup>) です。この効果は直径 20 km 未満の MBAs を地球型惑星交差軌道へ届ける木星との強い共鳴帯へ送り込むのに十分な効果をもたらします<sup>65)</sup>。効果の強さは小惑星サイズに依存し、直径 10 m 以上の小惑星に対して、より小さい小惑星ほど大きい影響を受けます。これは NEAs (Population 2 の衝突体) が MBAs と比べて小さい天体の集団であることの原因をうまく説明するでしょう。

また Population 2 の低い数密度が意味することは、後期重爆撃期は約 38 億年前に完全に終了し、現在は幸いにも地球型惑星領域への衝突体の流入頻度の低い穏やかな時代にあるということです。

## 7. 今後の展望

この研究によって長い間謎とされてきた内部太陽系の衝突史の一部がわかったので、今度は外部太陽系の衝突史に挑戦したいと思います。木星のトロヤ群や木星の衛星であるカリストの表面は私たちが月面で見つけた Population 1 や 2 とは異なるクレーターサイズ分布をもっているようです<sup>66), 67)</sup>、外部太陽系の衝突体は内部太陽系の衝突体とは異なる起源である可能性が高いと思われます。外部太陽系の衝突起源天体の解明はこれからのおもしろい研究テーマです。それには彗星や小さいカイパーベルト天体やオールト雲天体のサイズ分布を明らかにする必要があります。

## 謝 辞

この研究の発端は4年ほど前にスタートしたすばる望遠鏡での小惑星サーベイの結果がようやく海外の研究者の一部で引用され始めた頃に Science 論文の共著者である伊藤孝士さん(国立天文台天文学データ解析計算センター)の仲介による米国アリゾナ大学の研究者たちとの幸せな出会いにあります。小天体の軌道計算の大家, クレーター研究の大家, 岩石分析の大家, そして駆け出しの観測屋の仕事が折よく集合した幸運に感謝します。

また, すばる望遠鏡で小惑星サーベイをいっしょに進めてきた中村 士先生(元 国立天文台光赤外研究部)に, こうしてわれわれの仕事が海外の研究者にも認められ, 彼らとの共同研究によってますます深められていることをここで報告し, とともに喜びたいと思います。

## 参考文献

- 1) Peale S. J., 1993, *Icarus* 106, 308
- 2) Murray C. D., 1994, *Icarus* 112, 465
- 3) Marzari F., Scholl H., 1998, *Icarus* 131, 41
- 4) Gomes R. S., 1998, *AJ* 116, 2590
- 5) Strom R. G., et al., 2005, *Science* 304, 1847
- 6) Turner G., Cadogan P. H., Yonge C. J., 1973, *Proc. Lunar Sci. Conf.* 4, 1889
- 7) Tera F., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J., 1973, *Abstr. Lunar Planet. Sci. Conf.* 4, 723
- 8) Tera F., Papanastassiou D. A., Wasserburg G. J., 1974, *Earth Planet. Sci. Lett.* 22, 1
- 9) Ryder G., 1990, *Eos* 71, 313
- 10) Dalrymple G. B., Ryder G., 1993, *J. Geophys. Res.* 98, 13085
- 11) Dalrymple G. B., Ryder G., 1996, *J. Geophys. Res.* 101, 26069
- 12) Cohen B. A., Swindle T. D., Kring D. A., 2000, *Science* 290, 1754
- 13) Cohen B. A., Swindle T. D., Kring D. A., *Meteoritics Planet. Sci.*, in press.
- 14) Daubar I., et al., 2002, *Meteoritics Planet. Sci.* 37, 1797
- 15) Bogard D. D., 1995, *Meteoritics* 30, 244
- 16) Kring D. A., Cohen B. A., 2002, *J. Geophys. Res.* 107, 4

- 17) Turner G., et al., 1997, *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 3835
- 18) Hartmann W. K., et al., 2000, in *Origin of the Earth and Moon*, R. M. Canup, K. Righter, Eds. (Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ), pp. 493–512
- 19) Jedicke R., Metcalfe T. S., 1998, *Icarus* 131, 245
- 20) Ivezić Z., et al., with, SDSS collaboration., 2001, *AJ* 122, 2749
- 21) Stuart J. S., Binzel R. P., 2004, *Icarus* 170, 295
- 22) Yoshida F., et al., 2001, *PASJ* 53, L13
- 23) Yoshida F., et al., 2003, *PASJ* 55, 701
- 24) Yoshida F., Nakamura T., 2004a, *Adv. Space Sci.* 33, 1543
- 25) Yoshida F., Nakamura T., 2004b, in *35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18–25 July 2004, in Paris, France*, p. 3729
- 26) Yoshida F., Nakamura T., 2006, *Planetary and Space Science*, submitted
- 27) Yoshida F., Nakamura T., 2005, *AJ* 130, 2900
- 28) 吉田二美, 中村士, 2005, 太陽系科学シンポジウム集録
- 29) Jewitt D. C., Trujillo C. A., Luu J. X., 2000, *AJ* 120, 1140
- 30) Strom R. G., Schaber G. G., Dawson D. D., 1994, *J. Geophys. Res.* 99, 10899
- 31) Zahnle K. J., 1992, *J. Geophys. Res.* 97, 10243
- 32) Arvidson R. E., et al., 1979, *Icarus* 37, 467
- 33) Strom R. G., Neukum G., 1998, in *Mercury F.*, Vilas C. R., Chapman M. S., Matthews, Eds. (Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ), pp. 363–373
- 34) Strom R. G., Croft S. K., Barlow N. G., 1992, in *Mars H. H. Kieffer et al., Eds.* (Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ), pp. 383–423
- 35) Bottke W., et al., 2002, *Icarus* 156, 399
- 36) Marchis F. et al., 2006, *Nature* 439, 565
- 37) Petit J. M., et al., 2006, *MNRAS* 365, 429
- 38) <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31878>
- 39) [http://www.jpl.nasa.gov/releases/2001/release\\_2001-229.html](http://www.jpl.nasa.gov/releases/2001/release_2001-229.html)
- 40) <http://stardust.jpl.nasa.gov/news/status/040102.html>
- 41) <http://deepimpact.jpl.nasa.gov/home/index.html>
- 42) Kuiper G. P., et al., 1958, *ApJS* 3, 289
- 43) Van Houten C. J., et al., 1970, *A&S* 2, 339
- 44) Tedesco E. F., et al., 2002 *AJ* 123, 1056
- 45) <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/JupiterTrojans.html>
- 46) Schmidt R. M., Housen K. R., 1987, *Int. J. Impact Eng.*

5, 543

47) Croft S. K., 1985, *J. Geophys. Res.* 90, 828

48) Melosh H. J., *Impact Cratering: A Geologic Process* (Oxford Univ. Press, New York, 1989).

49) Ito T., Malhotra R., 2006a, *Icarus*, submitted

50) Ito T., Malhotra R., 2006b, *Adv. Space Res.*, submitted

51) A'Hearn M. F., et al., 2005, *Science* 310, 258

52) Neukum G., Ivanov B. A., Hartmann W. K., 2001, *Space Sci. Rev.* 96, 55

53) Bottke W. F., et al., 2005, *Icarus* 175, 111

54) Cheng A. F., 2004, *Icarus* 169, 357

55) Malhotra R., 1993, *Nature* 365, 819

56) Malhotra R., 1995, *A J.* 110, 420

57) Fernandez J. A., Ip W. H., 1984, *Icarus* 58, 109

58) Hahn J. M., Malhotra R., 1999, *AJ* 117, 3041

59) Liou J., Malhotra R., 1997, *Science* 275, 375

60) Levison H. F., et al., 2001, *Icarus* 151, 286

61) Tsiganis K., et al., 2005, *Nature* 435, 459

62) Gomes R., et al., 2005 *Nature* 435, 466

63) Ivanov B. A., et al., 2002. in *Asteroids III*, W. F. Bottke, A. Cellino, P. Poolicchi, R. P. Binzel, Eds. (Univ. of Arizona Press. Tucson, AZ), pp. 89–101

64) Morbidelli A., Vokrouhlicky D., 2003, *Icarus* 163, 120

65) Farinella P., Vokrouhlicky D., 1999, *Science* 283, 1507

66) Strom R. G., Woronow A., Gurnis M., 1981, *J. Geophys. Res.* 86, 8659

67) Schenk P. M., et al., 2004, in *Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere*, F. Bagenal, T. E. Dowling, W. B. McKinnon, Eds. (Cambridge Univ. Press, Cambridge), pp. 427–456

**Asteroid Shower onto the Moon in the Early Solar System**

**Fumi YOSHIDA**

*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Lunar crater record indicates that the Moon had a huge number of impacts 3.8 billion years ago (which is called the Late Heavy Bombardment (LHB)). After this event, the impact rate became one order smaller. Comparing the size distributions of craters with that of asteroids, we found that there are two kinds of populations that have bombarded on the Moon and other terrestrial planets. One of the projectile populations is the Main Belt Asteroids (MBAs), and the other one is the Near-Earth Asteroids (NEAs). MBAs are responsible for old craters which were created by LHB, while NEAs are responsible for new craters that have been created after LHB was terminated. We think that a potential cause of LHB was migration of outer planets and consecutive moving of strong resonances over the main belt region. This mechanism allows many MBAs to leave the main belt, and then they were transferred to the orbits closer to the inner planets.