

平成 21 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18540426  
 研究課題名（和文） 小惑星とクレーターのサイズ分布から探る後期隕石重爆撃期の起源  
 研究課題名（英文） Size-frequency distribution of asteroids and craters and its implication to the origin of the lunar terminal cataclysm  
 研究代表者  
 伊藤 孝士 (ITO TAKASHI)  
 国立天文台・天文データセンター・助教  
 研究者番号：40280565

研究成果の概要:小惑星は太陽系の進化に於いて常に中心的な役割を果たして来た天体である。その中でも地球に接近して衝突の可能性すらある天体は地球接近小惑星と呼ばれ、活発なサーベイ観測の対象となっている。本研究での各種の光学観測と数値シミュレーションの結果より、約 40 億年前に太陽系内部で発生したとされる後期隕石重爆撃期の衝突天体は地球接近小惑星であり、その力学起源は巨大惑星の動径方向の移動であることがだいぶ有力となった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	750,000	4,050,000

研究分野： 数物系科学  
 科研ひの分科・細目： 地球惑星科学・固体地球惑星物理学  
 キーワード： 固体惑星、衛星、小惑星、クレーター

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星は太陽系の衝突進化に於いて常に中心的な役割を果たして来た天体である。その中でも地球に極めて接近して衝突の可能性すらある天体は地球接近小惑星と呼ばれ、活発なサーベイ観測の対象となっている。地球接近小惑星の力学進化や惑星との具体的な衝突史については昔から多くの研究者が様々な仮説を立てて様々な推論を述べて来たが、実はその多くは単なる推測や憶測に過ぎず、精密な実証的研究はまだほとんど為されていないというのが現実である。とりわけ、約 40 億年前に太陽系内部で発生したとされる後期隕石重爆撃期はそれが実際に発生し

たかどうかすら確実とは言えず、その発生機構の不確定さとも相俟って、40 年近い議論の歴史にも関わらず依然として仮説の範疇を出るものになってはいなかった。

## 2. 研究の目的

一般に地球型惑星は約 46-45 億年前の太陽系初期の段階で形成したと思われているが、その後数億年を経て再び地球型惑星や月の表面に激しい天体の衝突が発生し、表面状態をリセットしたとする説がある。この突発的な隕石爆撃の時期は約 40 億年前に始まって約 38 億年前に終わったとされ、後期重爆撃期と名付けられている。本研究ではこの後期重爆

撃期の原因、および、その発生に重要な役割を果たした可能性が高い小惑星の力学過程を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究の主要な観点は後期重爆撃期の古いクレーターを作った衝突天体のサイズ分布と小惑星のサイズ分布の詳細な比較であり、主要な手法は地上望遠鏡による小惑星の光学観測と計算機シミュレーションによる軌道進化の数値実験である。また私達が現在目にすることが出来るのは後期重爆撃期から40億年を経た「進化した」小惑星達なので、この間の小惑星の衝突進化がどのようなものであったかを知るための数値シミュレーションも並行して実施する。

### 4. 研究成果

(1) 地球接近小惑星やクレーターの起源に関する実証的で定量的な研究が少ないのは、議論の根幹となる観測データがそもそも存在しないことがひとつの理由である。例えば小惑星の軌道進化や惑星への衝突の数値実験結果を月や惑星上のクレーターのサイズ分布と比較検証するには、小惑星のサイズ分布のデータが必要である。しかし現時点では比較的大きな小惑星（直径2-3km以上）のサイズ分布しか知られておらず、個数がより多いと思われる直径1km以下の小惑星に関するサイズ分布の情報は殆ど存在しない。また、小惑星破片の自転速度の分布は太陽エネルギーの吸収放散による小惑星の軌道変動過程（Yarkovsky効果と呼ばれる）に於いてとても重要な意味を持つが、これを知るための観測である小惑星の光度曲線の観測もごく限られた小惑星に関してのみしか行われていない。そこで本研究ではまず、小惑星のサイズ分布を得るための光学観測を実施した。始めにメインベルト小惑星についての観測をハワイ島にある国立天文台すばる望遠鏡を使って行った。ここでは各小惑星を検出してから、それぞれについてカラーを測定した。カラーから各小惑星の分光型を決定し、適切なアルベドを仮定してより正確に各小惑星の直径を推定してサイズ分布を求めた結果、小さいメインベルト小惑星で累積サイズ分布の傾きが浅いという事実が確認された。また、木星のラグランジュ点(L4, L5)付近にあるトロヤ群天体についても同様な観測を行った。ここでもすばる望遠鏡を使ってL4とL5の周辺にある木星トロヤ群小惑星を検出し、各群のサイズ分布と総数を調べた。この結果、同じサイズ範囲でL4群とL5群では累積サイズ分布の傾きが異なることがわかった。すなわち、L4群の累積サイズ分布の傾きはL5群のそれより浅い。また、直径が2kmより大きいL4群天体とL5群の総数を比較す

ると、L4群天体の方がL5群天体よりも1.3-2.5倍多いことがわかった。これは既知の木星トロヤ群小惑星の観測結果とも調和的である。

(2) 太陽系小天体の観測的情報をクレーター記録と照合するためには、小天体と地球型惑星の衝突確率に関する理論的な情報が必要である。このために本研究では太陽系小天体の軌道進化と衝突確率に関する数値シミュレーションも実施した。この数値シミュレーションはメインベルトの共鳴領域からやって来る小惑星破片と地球型惑星の衝突確率・衝突速度を計算し、それと地球型惑星上のクレーターのサイズ分布を比較するためのものである。その結果、メインベルトからやって来る小惑星の惑星との衝突確率は最大でも数%を越えることは無く、月へのそれは最大でも0.1%程度であることが分かった。またこうしたシミュレーション結果を月面上にある古いクレーターのサイズ分布と詳細に比較したところ、現在のメインベルト小惑星と40億年前の後期重爆撃期のクレーター衝突体のサイズに極めて高い相関が確認された。これは後期重爆撃期の力学的要因に対する強い制約を与えるものである。

(3) 上記した太陽系小天体の軌道進化に関連して、前述のYarkovsky効果などによる軌道進化への影響を見積もるためには、小惑星のサイズと自転速度の関係を何らかの観測的手法で取得することが必要となる。そのために、太陽系に於ける衝突破壊現象の直接証拠である若い小惑星族構成員の光度曲線観測も実施した。本研究期間ではKarin族、Veritas族、Iannin族と呼ばれるごく若い族構成員の光度曲線を数十個以上収集し、自転速度と天体形状・サイズの統計的關係についての検証を行った。こうした若い天体のうち特定のもの、とりわけKarin族最大構成員の832 Karin表面には宇宙風化起源と思われる特異な色変化の存在を確認した。

(4) 後期重爆撃期のクレーターを作った衝突天体は約40億年前の存在であるが、私達が今観測できるのは現在の太陽系小天体のサイズ分布であり、両者を比較する際にはその間にある40億年という時間の存在を常に念頭に置く必要がある。この目的のため、私達は小惑星の衝突破壊進化を検分する予備的な数値実験（重力多体計算）を行った。太陽系天体の衝突進化計算に関しては天体を流体粒子で近似する方法（SPH法等）が採用されることが多い。本研究の予備的計算でわかったことは、重力多体計算では実際の太陽系小天体（岩石や氷）のような固体の天体を固体のまま扱えるので、個々の天体の自転等を

考慮することが容易であるということである。一方、重力多体計算の短所としては物質の相転移が簡単には表現できないということも判明した。だが中小の小惑星の多くが不規則な形状をしている事実から推測するに、それらの衝突合体では大規模な熔融や蒸発が発生したわけではなく、天体がぶつかって「壊れる」という日常的な意味での破壊現象が卓越したと考えられる。従ってこの点は私達の最終研究目的にとって重大な問題にはならないことも確認された。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

- ① T. Kadono, M. Arakawa, T. Ito, and K. Ohtsuki, Spin rates of fast-rotating asteroids and fragments in impact disruption, *Icarus*, 200, 694-697, 2009, 査読有.
- ② K. Ohtsuka, T. Ito, M. Yoshikawa, D. J. Asher, and H. Arakida, Quasi-Hilda comet 147P/Kushida-Muramatsu: Another long temporary satellite capture by Jupiter, *Astron. Astrophys.*, 489, 1355-1362, 2008, 査読有.
- ③ F. Yoshida and T. Nakamura, A comparative study of size distributions for small L4 and L5 Jovian trojans. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 297-301, 2008, 査読有.
- ④ T. Nakamura and F. Yoshida, A new surface density model of Jovian trojans around triangular libration points. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 60, 293-296, 2008, 査読有.
- ⑤ T. Fuse, F. Yoshida, D. Tholen, M. Ishiguro, J. Saito, Searching satellites of asteroid Itokawa by imaging observation with Hayabusa spacecraft. *Earth, Planet, Space*, 60, 33-37, 2008, 査読有.
- ⑥ 武田隆顕, 小久保英一郎, 林満, 岩下由美, 縣秀彦, 牧野淳一郎, 観山正見, 加藤恒彦, 高幣俊之, 奥野光, 額谷宙彦, 三浦均, 大規模天文シミュレーションの可視化 - 国立天文台 4D2Uプロジェクトでの試み, 可視化情報学会誌, 28, No. 110, 186-192, 2008, 査読有.
- ⑦ T. Ito and K. Tanikawa, Trends in 20th century celestial mechanics. *Publ. Natl. Astron. Obs. Japan*, 9, 55-122, 2007, 査読有.
- ⑧ T. Ito and F. Yoshida, Color variation of a very young asteroid, Karin. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 269-275, 2007, 査読有.
- ⑨ 伊藤孝士, 阿部彩子, 第四紀の氷期サイクルと日射量変動. 地学雑誌, 116, No. 6, 768-782, 2007, 査読有.
- ⑩ K. Tanikawa and T. Ito, Subsystems in a stable planetary system. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59, 989-1004, 2007, 査読有.
- ⑪ K. Ohtsuka, H. Arakida, T. Ito, T. Kasuga, J. Watanabe, D. Kinoshita, T. Sekiguchi, D. J. Asher, and S. Nakano, Apollo Asteroids (1566) Icarus and 2007 MK6: Icarus Family Members?, *Astrophys. J.*, 668, L71-L74, 2007. 査読有
- ⑫ F. Yoshida and T. Nakamura, Subaru main belt asteroid survey (SMBAS). *Planet. Space Sci.*, 55, 1113-1125, 2007, 査読有.
- ⑬ D. Kinoshita, K. Ohtsuka, T. Sekiguchi, J. Watanabe, T. Ito, H. Arakida, T. Kasuga, S. Miyasaka, R. Nakamura, and H.-C. Lin, Surface heterogeneity of 2005 UD from photometric observations, *Astron. Astrophys.*, 466, 1153-1158, 2007, 査読有.
- ⑭ T. Takeda and K. Ohtsuki, Mass dispersal and angular momentum transfer during collisions between rubble-pile asteroids, *Icarus*, 189, 256-273, 2007, 査読有.
- ⑮ T. Ito and R. Malhotra, Dynamical transport of asteroid fragments from the nu6 resonance. *Advances in Space Research*, 38, 817-825, 2006, 査読有.
- ⑯ T. Ito and F. Yoshida, Lightcurves of the Karin family asteroids, *Advances in Geosciences* (vol. 3 Planetary Science), 317-329, World Scientific, Singapore, 2006, 査読有.

- ⑰ T. Ito, R. G. Strom, R. Malhotra, F. Yoshida, D. A. Kring, Size distribution of asteroids and old terrestrial craters. *Advances in Geosciences* (vol. 3 Planetary Science), 337-343, World Scientific, Singapore, 2006, 査読有.
- ⑱ S. Sasaki, T. Sasaki, J. Watanabe, F. Yoshida, H. Kawakita, N. Takato, B. Dermawan, T. Fuse, T. Ito, and T. Sekiguchi, A new-born asteroid 832 Karin with old and new surfaces - SUBARU Spectroscopy, *Adv. Space. Res.*, 38, issue 9, 1995-1999, 2006, 査読有.
- ⑲ T. Sasaki, S. Sasaki, J. Watanabe, T. Sekiguchi, F. Yoshida, T. Ito, H. Kawakita, T. Fuse, N. Takato, and B. Dermawan, Difference in degree of space weathering on newborn asteroid Karin, *Advances in Geosciences*, vol. 3 Planetary Science (Anil Bhardwaj and Wing-Huen Ip, eds.), 331-336, World Scientific, Singapore, 2006, 査読有.
- ⑳ K. Ohtsuka, T. Sekiguchi, D. Kinoshita, J. Watanabe, T. Ito, H. Arakida, and T. Kasuga, Apollo asteroid 2005 UD: split nucleus of (3200) Phaethon? *Astron. Astrophys.*, 450, L25-L28, 2006, 査読有.
- ㉑ J. Saito, F. Yoshida (14 番目) ら著者全 34 名, Detailed images of asteroids 25143 Itokawa from Hayabusa, *Science*, 312, 1341-1344, 2006, 査読有.
- ㉒ W.-H. Ip, F. Yoshida (7 番目) ら著者全 18 名, A mission called SAPPORO, *Advances in Geosciences* (vol. 3 Planetary Science), 241-253, World Scientific Publishing, Singapore, 2006, 査読有.
- [学会発表] (計 13 件)
- ① Takashi Ito, Asymmetric cratering on the Moon and very slow NEAs, Subaru Users Meeting 2008, National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, Japan, 14-16 January, 2009.
- ② Takaaki Takeda, About the 4D2U Theater of the National Astronomical Observatory of Japan, International Symposium for Immersive Science Visualization, Preparatory Event 2009 futuring Full Dome & Stereoscopic Moves for The International Festival of Scientific Visualization, National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, 22-23 March, 2009.
- ③ Takashi Ito, Asymmetric Impacts of the Near-Earth Asteroids on the Moon, Asteroids, Meteors, and Comets, Baltimore Marriott Waterfront, Baltimore, Maryland, USA, 13-18 July, 2008.
- ④ Takashi Ito, Asymmetric Impacts of the Near-Earth Asteroids on the Moon, Asia-Oceania Geoscience Society 5th Annual Meeting, Bexico, Busan, Korea, 16-20 June, 2008.
- ⑤ Takashi Ito, Boundary condition in collisional evolution given by size frequency distribution observation of astronoids, Subaru Users Meeting 2007 National Astronomical Observatory of Japan, Mitaka, Tokyo, Japan, 29-31 January, 2008.
- ⑥ Fumi Yoshida, An insight into the solar system history through the size distribution of Jupiter's Trojans, Asteroids, Meteors, and Comets, Baltimore Marriott Waterfront, Baltimore, Maryland, USA, 13-18 July, 2008.
- ⑦ Fumi Yoshida, Size distributions and total populations of L4 and L5 Jovian trojans, Asia-Oceania Geoscience Society 5th Annual Meeting, Bexico, Busan, Korea, 16-20 June, 2008.
- ⑧ Takashi Ito, Collision probability of asteroid fragments from the nu6 resonance, Asia-Oceania Geoscience Society 4th Annual Meeting Queen Sirikit National Convention Centre, Bangkok, Thailand, 30 July - 4 August, 2007.
- ⑨ Fumi Yoshida, Photometric observations of young asteroid families at Maidanak observatory in Uzbekistan, 7th East Asian Meeting on Astronomy - East Asian Network of Astronomy : Research, education and

popularization, Fukuoka, Japan,  
October 8-12, 2007.

- ⑩ Fumi Yoshida, Observations of Young Asteroid Families at Maidanak Observatory, Asia Oceania Geosciences Society 4th annual meeting, Bangkok, July 30 - August 4, 2007.
- ⑪ Takaaki Takeda, Visualization of Astronomical Many-Particle Simulation Data in 4-Dimensional Digital Universe Project (4D2U Project), DCAJ session, SIGGRAPH 2007, San Diego Convention Center, San Diego, California USA. 7 August, 2007.
- ⑫ Takashi Ito, Dynamical transport of asteroid fragments from the nu6 resonance, Second East-Asia Numerical Astrophysics Meeting, KASI, Daejeon, Korea, Nov 1-3, 2006.
- ⑬ Takashi Ito, Size distribution of asteroids and old terrestrial creators: Implications for asteroidal dynamics during LHB, Asia-Oceania Geosciences Society 2nd Annual Meeting, Singapore, June 20-25, 2006.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 孝士 (ITO TAKASHI)  
国立天文台・天文データセンター・助教  
研究者番号：40280565

### (2) 研究分担者

(平成18年度～平成19年度)  
吉田 二美 (YOSHIDA FUMI)  
国立天文台・国際連携室・専門研究職員  
研究者番号：20399306  
武田 隆顕 (TAKEDA TAKAAKI)  
国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・専門研究職員  
研究者番号：70413961

### (3) 連携研究者

(平成20年度)  
吉田 二美 (YOSHIDA FUMI)  
国立天文台・国際連携室・専門研究職員  
研究者番号：20399306  
武田 隆顕 (TAKEDA TAKAAKI)  
国立天文台・天文シミュレーションプロジェクト・専門研究職員  
研究者番号：70413961