

月のクレーター記録から知る「遅い」近地球小惑星の存在

Asymmetric cratering on the Moon and its implication to a hidden "slow" NEA population

伊藤孝士 (自然科学研究機構 国立天文台 天文シミュレーションプロジェクト・天文データセンター) tito@cfca.nao.ac.jp

動機と背景: 月の光条クレーター分布の非対称性

- 多くの衛星ではその公転と自転が同期している (1:1 共振関係)

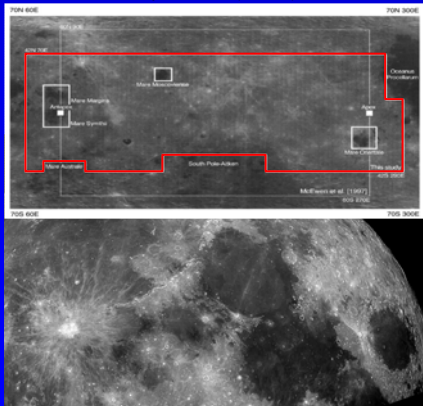
- apex周辺に多くのクレーター

Typically observed on Galilean satellites of Jupiter
Shoemaker & Wolf (1982)
Zahnle et al. (1998, 2001)

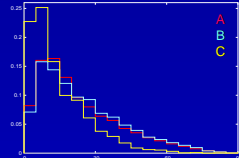
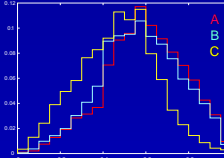
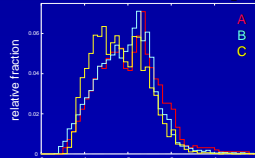
- 月でも確認された

Morota & Furumoto (2003)
Clementine 750nm basemap images
Young, rayed craters
~1 Gyr

Search area by Morota & Furumoto (2003, *EPSL* 206, 315-323)
Total 222 rayed craters ($D > 5\text{ km}$) detected



数値実験[1]: 天体群と軌道要素初期分布



Debiased NEA population (A)

- Bottke et al. (2002, *Icarus*, 156, 399-433) 18,000 particles
- 5種類の始原領域
 - ν_6 resonance
 - 3:1J MMR
 - Mars-crossers
 - outer MB
 - TNO disk

Debiased NEA population (B)

- Morbidelli (2006, unpublished) 18,000 particles
- 5+2種類の始原領域
 - ν_6 resonance
 - 3:1J MMR
 - Mars-crossers (+2: 高軌道傾角成分)
 - outer MB
 - TNO disk

"Raw" NEA-like particle population (C)

- Apollos, Amors, Atens-like 18,000 particles as of 2010 July (~7,000 original + clones)
- No debiasing procedure, mostly $H > 18$
- Hungaria
- Phocaeas

Small v_{relative} (vs. v_{orbit})
非対称衝突は顕著

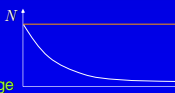
Large v_{relative}
非対称性は弱い

衝突天体の力学的性質を制約する重要な情報となる

- この発表 - 月のクレーター分布の非対称性を数値実験で再現し、衝突天体の力学的特性を制約する
- w/ debiased NEA populations
- w/ steady-state NEA model
- See Ito & Malhotra (2006, *Adv. Space Res.*, 38, 817-825; 2010, *Astron. Astrophys.*, 519, A63) for more detail

定常的なNEAフラックス

- 先行研究の多くでは...
 - N_{particle} just decreases
 - v_{impact} distribution changes
 - along with orbit distribution change



- NEA flux ~ constant over 3 Gyr
 - From lunar crater record
 - Constant supply of particles

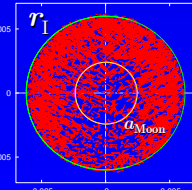
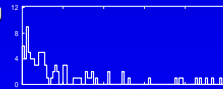
Steady-state NEA flux in numerical model

$$(r_{\text{final}}; v_{\text{final}}; t_{\text{final}}) \rightarrow (r_{\text{initial}}; v_{\text{initial}}; t_{\text{initial}})$$

- これにより NEA の定常的なフラックスを再現可能

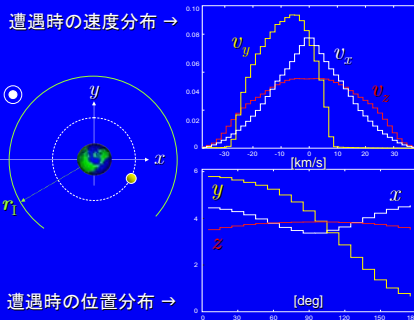
非常に多くの天体が必要

~3,000 test particles at ~2AU
→ ~100 collisions on the Earth
→ a few collisions on the Moon
→ 統計的に無意味?



が、地球の作用圏では多数の接近遭遇が発生している ($r_1 \sim 144 R_{\text{Earth}}$)
"activity sphere"
→ ~10° 接近遭遇
→ Good to make an orbital distribution function $f(a, e, i, \dots; t)$

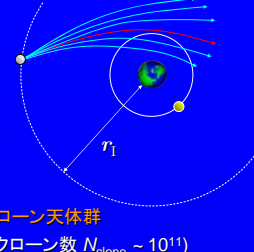
作用圏での近接遭遇の状況



より多くの天体を生成する

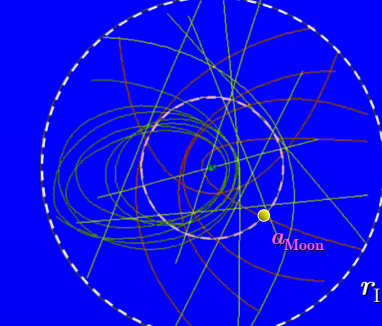
軌道要素分布関数 $f(a, e, i, \dots; t)$ を元に多数のクローン天体を生成する (cloning)

3,000 particles
⇒ 10^6 encounters
↓ x 1,000
 10^9 clones
⇒ 3,000,000 particles

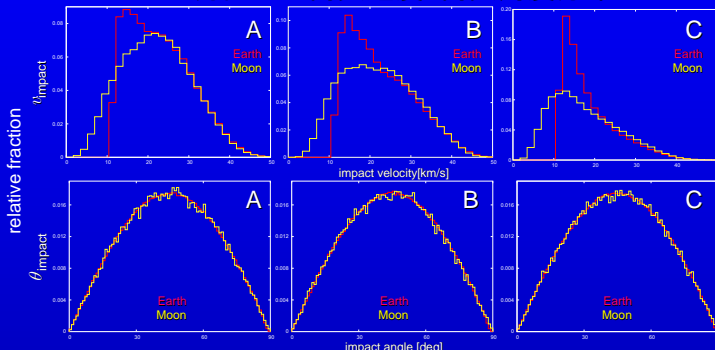


Orbital integration of 地球 + 月 + 太陽 + クローン天体群
→ 数値実験 [2] (全クローン数 $N_{\text{clone}} \sim 10^{11}$)

作用圏内での典型的な粒子軌道



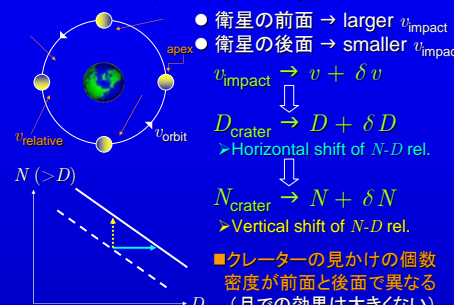
月面での衝突速度・衝突角度分布



	$N_{\text{clones}} (10^{10})$	$N_{\text{imp, E}} / N_{\text{imp, M}}$	$\bar{v}_{\text{impact, M}} (km/s)$
A	2.11	20.4	22.4
B	1.87	17.9	22.3
C	2.74	25.5	17.7

- Impact velocity on the Moon
 - Debiased population (A,B) → larger
 - Daw NEA population (C) → smaller
- Impact angle
 - Quite isotropic for both of the Earth and the Moon

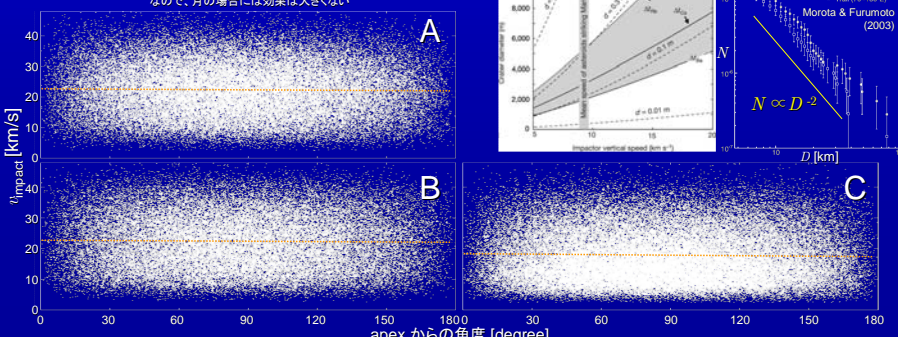
非対称な衝突速度分布



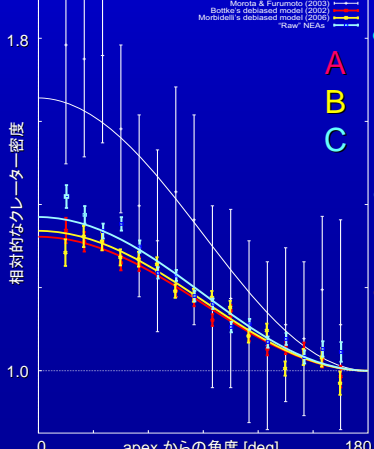
- 衛星の前面 → larger v_{impact}
- 衛星の後面 → smaller v_{impact}
- $v_{\text{impact}} \rightarrow v + \delta v$
- $D_{\text{crater}} \rightarrow D + \delta D$
- Horizontal shift of $N-D$ rel.
- $N_{\text{crater}} \rightarrow N + \delta N$
- Vertical shift of $N-D$ rel.
- クレーターの見かけの個数密度が前面と後面で異なる (月での効果は大きくない)

非対称な衝突速度分布

$v_{\text{orbit, M}} (\sim 1 \text{ km/s}) \ll v_{\text{impact, M}} (\sim 22 \text{ km/s})$
なので、月の場合には効果は大きくない



- ✓ スケーリング則: $D \propto v_{\text{impact}}^{0.44}$ (Pi-group scaling (Melosh 1989))
- ✓ サイズ頻度分布: $N \propto D^{-2}$ (Morota, Furumoto (2003); Strom et al. (2009))



結論

- Debiased NEAモデル(A,B)はクレーターの非対称生成に関して似たような結果を与える
- 実際のクレーター記録と比べて有意に小さな非対称性: 「遅い」近地球天体群の存在示唆
- "Raw" NEAは v_{impact} が小さく非対称性はやや顕著となる
 - 地球近隣天体が観測されやすい
 - クレーター記録とはまだ非整合
- すばる HSC を使った太陽系小天体サーベイ観測により検証が可能!
 - 吉田二美氏のポスター参照

Also check: Gallant et al. (2010, *Icarus*, 202, 371-382), Le Feuvre & Wieczorek (2008, *Icarus*, 197, 291-306), Werner & Medvedev (2010, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 295, 147-158, 2010)