8/28-29 衛星系研究会

外惑星領域における クレータ記録と天体衝突史 (仮)

諸田 智克 (名古屋大)







-太陽系内側と外側の違いは?

- クレータのソース天体は?

-後期重爆撃期はあったか?

クレータ記録

クレータ形状,クレータ数密度 サイズ・時間・空間分布

(1) 太陽系小天体の衝突破壊・軌道進化 - 個々の衝突の情報速度,角度,, - 衝突天体の情報 サイズ,密度,強度,組成,, - 衝突の頻度 - それらの時間変化, 空間変化 (2) 固体天体の地質史 - 惑星表層の構造 強度,密度,層構造 - 惑星表面の形成年代



* クレータ数密度 $N_{cum}(D,t)$

単位面積あたりの直径 *D* km以上のクレータの個数. 時間 (惑星の表面年代) *t*, クレータの直径 *D* の関数.

◆ クレータ生成率 F(D, t)

単位時間,単位面積あたりにできた直径 *D* km以上のクレータの個数.

◆ クレータ数密度とクレータ生成率の関係 $F(D,t) = \frac{\partial N_{cum}}{\partial t}$ *ccではクレータの消去を無視



1. 内惑星のクレータ記録 外惑星との比較対象として

2. 外惑星衛星のクレータ記録 クレータ数密度、サイズ分布の特徴 クレータ生成率のモデリングと観測との比較 クレータ生成率不均質



月試料の年代と試料が採取された 領域のクレータ数密度を関係づけ

- ・古い地域ほどクレータ数密度が 高い
- ・30億年より古い地域では年代 が若くなるとともに急激に クレータ数密度が減少







 $F(D=1, t) = \partial N(D=1, t)/\partial t = 3.77 \text{ x } 10^{-13} \exp(6.93 t) + 8.38 \text{ x } 10^{-4}$

F(*D*=1, *t*) --- クレータ生成率 [km⁻² / Gyr]



クレータサイズ頻度分布

クレータ数密度の高い(古い)領域と低い(若い) 領域で10km<D<50kmのサイズ分布の傾きが 異なる.

古い領域 b = ~-1.2 若い領域 b = ~-2 時間境界 3.8~4Ga





64



惑星表面クレータの直径と数密度の間に は(限られたサイズ範囲において)ベキ 乗の関係が成り立つ

サイズ分布によく使用されるプロット (1) 累積プロット

$$N_{cum}(D) = a D^{-b}$$





内惑星クレータ サイズ分布の比較

- 惑星間で重爆撃期のサイズ頻度 分布は類似
- 惑星間で~39億年前以降のサイズ 頻度分布は類似
- →太陽系内側の衝突天体は同一の ソース

→おそらく共通した時間変化



Strom+ [2014]

小天体観測との比較 サイズ分布

– πグループスケーリングによる衝突天体サイズ
の推定
$$\rho_i = \rho_t = 3000 \ kg / m^3$$

$$v_{i,Moon} = 18.9 \ km \ / \ s, \quad v_{i,Mars} = 12.4 \ km \ / \ s$$

– NEAs

LINEAR (Lincoln Near-Earth Asteroid Research) program 観測バイアス補正済み [Stuart & Binzel 2004]

– MBAs (inner)

Spacewatch [Jedicke & Metcalfe 2004] SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [Ivezic+ 2001] WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) [Masiero+2011] Subaru [Yoshida+ 2003] 小惑星タイプの割合を考慮し平均アルベドからサイズに変換

Population 1 は小惑星帯内側のサイズ分布と一致 Population 2 はNEAのサイズ分布と一致 Strom+ [2014]

Asteroids and Projectiles



メインベルトからのNEA供給過程

Population 2

- MBA間の衝突による破壊
- ヤルコフスキー効果による 軌道移動

(小天体ほど移動速度高い) - 軌道共鳴 → NEAs

Population 1

- 小惑星から直接的に供給





1. 内惑星のクレータ記録 外惑星との比較対象として

2. 外惑星衛星のクレータ記録 クレータ数密度、サイズ分布の特徴 クレータ生成率のモデリングと観測との比較 クレータ生成率不均質









Voyagerデータによるガニメデ,カリストの Cratered terrainのカウンティング [Strom+ 1981] - 大きいクレータ (D>100km) が少ない - 50km<D<100kmでベキ ~-3 内惑星のCSFD形状とは異なる?





←Dark terrain





天王星衛星のCSFD

Voyagerデータによるカウンティング [Smith+ 1986] – 古い領域のクレータ数密度は月高地と同程度 – 土星衛星と同様に2つのpopulationに分類 <u>20km以上</u>で高い数密度 Population I <u>20km以下</u>で高い数密度 Population II

Population 1 (Miranda, Oberon, Umbriel)

-古い領域

- 大クレータが多い

– 内惑星の重爆撃期のクレータ記録に類似

=> 集積後 (>4Ga) の日心軌道の天体による爆撃

Population 2 (Titania, Ariel)

– 若い領域 – 小クレータが多い – 大クレータの欠如 – 二次クレータのベキに近い

=> 一次クレータからの衝突放出物が起源?





クレータサイズ分布のまとめ

◆ すべての外惑星に共通の特徴 – 月の高地並みに高いクレータ数密度の領域が存在 – サイズ分布形状は内惑星と異なる 反論:内惑星のサイズ分布と類似 衝突速度の違いで説明可能[Neukum+ 1998; 2005; Schmedemann+ 2008; 2009]

◆ 土星系,天王星系に共通の特徴

 - 古い領域と若い領域でサイズ分布形状が異なる
 さい領域 Population I 大クレータ (D > 20km) が支配的

 ・内惑星の重爆撃期のサイズ分布形状と一部類似
 おい領域 Population II 小クレータ (D > 20km) が支配的
 ・コンクレータのサイズ分布形状と類似
 ・分により、していいいでも存在
 反論: Population IのD<20kmのクレータ欠損はクレータ平衡の影響
 PlもPllも同じ衝突天体で説明可能[Lissauer+ 1988]



外惑星領域における衝突天体候補

(1) メインベルト小惑星 (MBAs) 2.1-3.3 AU, ~10⁶ 個 (d > 1km) (2)(木星,海王星の)トロヤ群 木星トロヤ群 > 4500個 (3) 黄道彗星, ケンタウルス族 カイパーベルト,散乱円盤 起源 ~10⁵ 個 (d > 100km), kmサイズは不明 [Fuentes+ 2009] (4) 長周期彗星, ハレー型彗星 オールト雲起源,~10¹¹ 個 (d > 1km) 土星軌道より内側に近日点 ~10⁸ 個 [Mazeeva 2007] (5) 不規則衛星 日心軌道の天体の捕獲 (6) 惑星中心軌道天体, 破片 1次クレータの放出物,一時的に捕獲された天体

[Dones+ 2009]

黄道彗星による外惑星領域の衝突率

複数の観測事実,数値計算結果にもとづき算出

 Crater Density on Ganymede Bright Terrain 年代上限~3.9 Gyr, 衝突率一定 → 8×10^{-4} [yr⁻¹] for d ≥ 2km ◆ Ganymede, Callistoの4つの若い衝突盆地 10⁻² 過去4Gyrに形成,衝突率一定 → 2.5 x 10⁻⁶ [yr⁻¹] for d ≥ 30km 10⁻³ ◆ KB~黄道彗星の数値計算 [Levison+2000] → 1.4 x 10⁻³ [yr⁻¹] for d \ge 1km ✤ JFCsの観測 [Bottke+ 2002] 10⁻⁴ Satu → 1.8×10^{-3} [yr⁻¹] for d ≥ 1.7km ◆ 過去350年間の木星への衝突/接近例 10⁻⁵ 3木星半径以内,6サンプル per → 1.7 x 10⁻³ [yr⁻¹] for d \ge 1km mpact 10^{—6} ◆ 1950~1999年の木星への衝突/接近例 Callisto軌道よりも内側, 9サンプル → 3×10^{-3} [yr⁻¹] for d ≥ 0.5km 10⁻⁷ ◆ 土星と軌道交差するケンタウルス族 → 2×10^{-8} [yr⁻¹] for d ≥ 150km 10^{—8} ✤ Ganymede, Europaのサイズ分布形状 0.1 Tritonのサイズ分布形状



Impacts per year on Titan



衛星軌道がつくる球の衝突断面積 $S_s^2 = a_s^2 \left(1 + \frac{2v_{orb}^2}{v_{\infty}^2}\right)$

惑星の衝突断面積

$$S_{p}^{2} = R_{p}^{2} \left(1 + \frac{2v_{orb}^{2}}{v_{\infty}^{2}} \left(\frac{a_{s}}{R_{p}} \right) \right)$$

$$v_{orb} -- 衛星の公転速度$$

$$v_{\infty} -- 衛突天体の接近速度$$

衝突率比 (衛星/惑星) $\frac{P_s}{P_p} = \frac{R_s^2}{a_s^2} \frac{S_s^2}{S_p^2} = \frac{R_s^2}{a_s^2} \frac{\upsilon_{\infty}^2 (R_p/a_s)^2 + 2\upsilon_{orb}^2 (R_p/a_s)}{\upsilon_{\infty}^2 + 2\upsilon_{orb}^2}$



衝突天体サイズとクレータサイズ

◆ クレータスケーリング [Zahnle+ 2003]				
$D_{s} = 11.9 \left(U^{2}/g \right)^{0.217} \left(\delta/\rho \right)^{0.33}$	$d^{3}(d / km)^{0.783}$			
$D = \int D_s \qquad (D_s < D)$	$\left(c \right)$			
$D = \int D_s \left(D_s / D_c \right)^{\xi} \left(D_c < D_s \right)^{\xi}$	s)			
D:最終クレータ直径	g:表面重力加速度			
D_s :一時クレータ直径	δ :衝突天体密度			
$D_{\!\scriptscriptstyle c}$:単純-複雑クレータ転移直径	$oldsymbol{ ho}$:標的密度			
U :衝突速度	<i>d</i> :衝突天体直径			

◆ 衝突速度

$$U_{mean} = \sqrt{3v_{orb}^{2} + v_{\infty}^{2} + v_{esc}^{2}} : 平均衝突速度$$

$$U_{slow} = \sqrt{2v_{orb}^{2} + v_{\infty}^{2}} - v_{orb} : 最小衝突速度 (antap)$$

$$U_{fast} = \sqrt{2v_{orb}^{2} + v_{\infty}^{2}} + v_{orb} : 最大衝突速度 (apex)$$



木星衛星のクレータ生成率

Ganymede, Europaの クレータサイズ分布 形状から衝突天体の サイズ分布を推定



Table 3

Cratering rates (uncertain to a factor of 3) at Jupiter, assuming an impact rate on Jupiter of 0.005 comets per annum with d > 1.5 km

	Cratering rates					Cratering time scale	Disruption time scale	
	$\dot{C}_{\rm A}(>1)^{\rm a}$	$\dot{C}_{\rm A}(>10)^{\rm b}$	$\dot{C}_{\rm A}(>30)^{\rm c}$	$\dot{C}_{\rm NIC}(>10)^{\rm d}$	$\dot{C}_{\rm S}(>10)^{\rm e}$	$ au_{\rm A}(>20)^{ m r}$	$ au_{\mathrm{A}}(>2R_{\mathrm{s}})^{\mathrm{g}}$	
Metis	1.1×10^{-11}	5.9×10^{-13}	1.6×10^{-13}	2.2×10^{-14}		130	0.8	
Amalthea	$6.6 imes 10^{-12}$	3.5×10^{-13}	$9.5 imes 10^{-14}$	$1.1 imes 10^{-14}$		60	1.6	
Thebe	$7.8 imes 10^{-12}$	4.1×10^{-13}	1.1×10^{-13}	$1.9 imes 10^{-14}$		1100	2.4	
Io	5.1×10^{-13}	$2.7 imes 10^{-14}$	4.1×10^{-15}	3.6×10^{-16}	$5.2 imes 10^{-14}$	2.7		
Europa	5.0×10^{-13}	3.2×10^{-14}	$8.5 imes 10^{-15}$	1.1×10^{-15}	$4.5 imes 10^{-14}$	2.2		
Ganymede	2.7×10^{-13}	1.8×10^{-14}	4.2×10^{-15}	$7.2 imes 10^{-16}$	$2.3 imes 10^{-14}$	1.4		
Callisto	1.5×10^{-13}	$9.8 imes 10^{-15}$	2.1×10^{-15}	$6.0 imes 10^{-16}$	$1.2 imes 10^{-14}$	3.1		
Himalia	2.4×10^{-14}	1.3×10^{-15}	2.2×10^{-16}	5.5×10^{-16}		21,000		

^a Case A cratering rate, D > 1 km per [km⁻² year⁻¹].

^b Case A cratering rate, D > 10 km [km⁻² year⁻¹].

^c Case A cratering rate, D > 30 km [km⁻² year⁻¹].

^d HTC and LPC (= NIC) cratering rate, $D > 10 \text{ km} [\text{km}^{-2} \text{ year}^{-1}]$.

^e Shoemaker and Wolfe's cratering rates, $D > 10 \text{ km} [\text{km}^{-2} \text{ year}^{-1}]$.

^f Case A time scale for D > 20 km craters [Myr].

^g Case A catastrophic disruption time scale [Gyr].



土星衛星のクレータ生成率

Ganymede, Europaの クレータサイズ分布	Titanの 分布用 サイス	Dクレータサィ ジ状から衝突天 、分布を推定	イズ 注体の Smith	+ [1981]	オールト キャント ハレー型	彗星 彗星
形状から衝突天体の	Cratering rate	S S			Cratering	g times
サイス分布を推定	$\dot{c}_{A}(>10)$	$\dot{C}_{B}(>10)$	$\dot{C}_{S}(>10)$	Ċ _{NIC} (>10)	$ au_{\mathrm{A}}$	$\tau_{\rm B}$
Mimas	$5.6 \cdot 10^{-14}$	$5.0 \cdot 10^{-13}$	$1.6 \cdot 10^{-14}$	$5.6 \cdot 10^{-16}$	80	17
Enceladus	$3.7 \cdot 10^{-14}$	$2.8 \cdot 10^{-13}$	$1.0 \cdot 10^{-14}$	$4.2 \cdot 10^{-16}$	80	19
Tethys	$2.6 \cdot 10^{-14}$	$1.8 \cdot 10^{-13}$	$4.3 \cdot 10^{-15}$	$2.8 \cdot 10^{-16}$	25	6.5
Dione	$1.7 \cdot 10^{-14}$	$1.0 \cdot 10^{-13}$	$2.7 \cdot 10^{-15}$	$2.2 \cdot 10^{-16}$	34	10
Rhea	$1.1 \cdot 10^{-14}$	$6.2 \cdot 10^{-13}$	$1.5 \cdot 10^{-15}$	$1.6 \cdot 10^{-16}$	29	9
Titan	$3.4 \cdot 10^{-15}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$	$1.3 \cdot 10^{-15}$	$9.0 \cdot 10^{-17}$	9	4
Hyperion	$7.0 \cdot 10^{-14}$	$6.2 \cdot 10^{-14}$	$1.8 \cdot 10^{-15}$	$2.3 \cdot 10^{-16}$	1,400	300
Iapetus	$1.1 \cdot 10^{-15}$	$4.2 \cdot 10^{-15}$	$7.9 \cdot 10^{-16}$	$1.1 \cdot 10^{-16}$	380	180
Phoebe	$3.4 \cdot 10^{-16}$	$1.4 \cdot 10^{-15}$	$1.3 \cdot 10^{-15}$	$1.2 \cdot 10^{-16}$	54,000	2,400

These are calibrated to a Saturn impact rate of 0.0012 cometary nuclei with d > 1.5 km per year. Quoted cratering rates should be regarded as uncertain to a factor of 4. The rates given here are typically 0.6 times the rates given in Table 19.4 of Zahnle et al. (2003), primarily because we have adopted a slightly smaller cometary impact rate with Saturn than in Zahnle et al. (2003). The rates given for Titan apply to a body with Titan's mass and size, but without an atmosphere.

 $\dot{C}_A(>10)$: Case A cratering rate D > 10 km[km⁻² year⁻¹].

 $\dot{C}_B(>10)$: Case B cratering rate D > 10 km[km⁻² year⁻¹].

 $\dot{C}_{S}(>10)$: Smith et al. (1982) cratering rates, $D > 10 \text{ km}[\text{km}^{-2} \text{ year}^{-1}]$.

 $C_{\text{NIC}}(>10)$: NIC (=Halley-type + Long-period comet) cratering rate D > 10 km[km⁻² year⁻¹].

 τ_A : Case A timescale for D > 20 km craters [Myr].

 τ_B : Case B timescale for D > 20 km craters [Myr].

[Dones+ 2009]

観測される数密度との比較



 $\tau_{o} = N(10) / \dot{N}(10) \quad \leftarrow \quad \forall \vec{r} \neq \vec{r} \neq$

- Nig(10ig) :直径10km以上のクレータの数密度
- $\dot{N}(10)$: 直径10km以上のクレータのクレータ生成率

*t*₀ : 4.6 Gyr

生成率一定モデル → 130~220 億年 外惑星のcratered terrainの数密度を説明できない 内惑星と同様に過去は生成率が高かった

t¹に比例して減少したとすると>43億年

		D (km)			
		Model Ages [Gyr]			
	-	Constant	t-1 Decay ^(a)		
Mimas		13.40	4.35		
Tethys		15.45	4.44		
Dione	cratered plain	21.83	4.56		
	smooth plain	15.17	4.43		
Rhea	cratered plain	21.83	4.56		
	smooth plain	16.77	4.48		

 $10^{1} \underbrace{\mathsf{Mimas}}_{\mathsf{Tethys}} \underbrace{\mathsf{Rhea}}_{\mathsf{lapetus}} \underbrace{\mathsf{Lunar Highlands}}_{\mathsf{Cassini}} \underbrace{\overline{\mathcal{T}} - \mathcal{P}}_{\mathsf{[Dones+2009]}}$

Ľ

(a) Data from Dones+ [2009]









- 黄道彗星による衝突を仮定
- 放出物の速度-質量分布 [Housen & Holsapple 2011] を仮定

"rubble" or "spall"

Vmin --- 2次クレータ形成のための下限の速度 Europaにおける2次クレータから~150 m/s Vesc --- 脱出速度

2次クレータ形成放出物割合

ガリレオ衛星 ~25%

土星中型衛星 0.25% (Mimas) ~ 8% (Rhea) 1.5次クレータ形成放出物割合

ガリレオ衛星 ~0.5% 土星中型衛星 1.2% (Rhea) ~ 2.5% (Mimas)







Herschel basin [NASA/JPL] Odysseus basin [NASA/JPL]



1.5

巨大衝突盆地放出物 の軌道計算 [Alvarellos+2005]

- 半減期 10-150年 長半径 大 → 寿命 長

- 放出物の大部分は元の衛星に衝突 >90% 軌道速度 > 脱出速度のため
- 元衛星への衝突の前面/後面の分布 放出点とは反対側の半球に多い 不均質の程度は小さい < 2倍

- 他衛星への衝突

前面からの放出物は外軌道の衛星に衝突 主に前面に衝突

後面からの放出物は内軌道の衛星に衝突

Odysseus放出物の Tethysにおける衝突点

-90





ガリレオ衛星と土星衛星のCSFD形 状の違いの説明

放出物の速度 < 数km/s

2次クレータ形成に必要な速度 >数百m/s

Mimas 脱出速度 160 m/s
 → クレータを形成する放出物
 はMimasのヒル圏を脱出
 → 1.5次クレータが支配的

その他の中サイズの土星衛星 脱出速度 300~700 m/s → 1.5次, 2次クレータの混合

ガリレオ衛星 脱出速度 2~3 km/s → ヒル圏を脱出できない → 2次クレータが支配的



EuropaモデルCSFD

主な寄与 1次クレータ D > ~2 km2次クレータ D < 2 km1.5次クレータ from lo D < 1 km1.5次クレータ from Europa D < 0.3 km

Cumulative Number of Craters on Europa Europaにおけるモデルサイズ頻度分布 と観測の比較 [Zahnle+ 2008]

Europaの小クレータ [NASA/JPL: PIA01404] 10¹³ Europa G-K fragments (sesquinaries and secondaries) 10¹¹ lo G-K fragments 2000000 10⁹ sesquinary spalls (from Europa) equant spalls (secondaries) lo spalls 10^{7} tabular spalls sesquinary spalls 10⁵ (from Europa) secondaries) lo spalls 10³ Observed Primaries 10^{1} 10^{4} 10 100 1000 Crater Diameter [m]



クレータ生成率不均質

◆ 黄道彗星による衝突 地球の月に比べて

(1) 衛星の公転速度 → 大きい
(2) 衝突天体の接近速度 → 小さい
→ 大きい不均質をつくると予想

β --- apexからの角距離

- b --- 衝突天体の累積質量分布のべキ
- → 不均質の大きさ (apex/antapex) は 5~50のオーダー
- ◆惑星中心軌道にある天体による衝突 順行 / 逆行で異なる
 - 順行天体 ほぼ均質 不均質の大きさ <2 - 逆行天体 大きい不均質



クレータ空間分布

D > 30 km のクレータ分布 (Population I が支配的なサイズ範囲)

- ✤ Ganymede
 - 弱い不均質 Lead/Trail 3~4倍
 - 黄道彗星に期待される不均質 (~10倍)よりもはるかに小さい
- ✤ Callisto
 - 不均質無し
 - どちらかというと後面に多い

予測よりもはるかに小さい不均質 考えられる原因

- (a) クレータの飽和
- (b) 同期回転アンロック
- (c) 惑星中新軌道天体による衝突
- (d) Resurfacing



クレータ空間分布

1 km < D < 18 km のクレータ分布 (Population II が支配的?なサイズ範囲)

- ✤ Ganymede
 - 弱い不均質 Lead/Trail < 2
 - D > 30kmでは Lead/Trail ~4 [Zahnle+ 2001]
- ✤ lapetus, Dione
 - 弱い不均質 Lead/Trail < 2
 - 黄道彗星に期待される不均質 (~10倍) よりもはるかに小さい
- Mimas
 - 後面で最大となる弱い不均質
 - → Herschelからの1.5次クレータで説明可能 (antapexの90%, apexの68%)
- ✤ Tethys
 - Odysseus, Penelopeの1.5次クレータの 集中は見ていない

明瞭な不均質なし → PIIは惑星中心軌道の天体起源



Triton クレータ空間分布

5 < D < 25 km のクレータ分布 (他の衛星系ではPopulation II が支配的なサイズ範囲)

全てのクレータは前面に存在 →黄道彗星による衝突では後面の欠如が説明できない. →惑星中心軌道にある天体で説明可能 ソースは内側 or 外側の衛星からのクレータ放出物 or 破片

■問題点
 1次クレータがない → 表面年代は<10Myr
 Tritonの1.5次クレータ (D>5km) のソース1次クレータ
 → D> 60km (@Proteus)

過去1千万年にそのような クレータ形成が海王星系であったか?? _{クレータ}数密度 [Schenk & Zahnle 2007]





-太陽系内側と外側の違いは? 衛星間での衝突破片のやりとり

- クレータのソース天体は?

D>20kmは黄道彗星 小クレータは大クレータからの

放出物が支配的

-後期重爆撃期はあったか?

分からない. しかし少なくとも集積後に重爆撃期はあった. 衝突盆地の年代が鍵

重要な観測

1. 絶対年代-クレータ生成率の校正データ 古い領域と若い領域

e.g., GanymedeのCratered TerrainとGrooved Terrain

→ 外惑星領域のクレータ生成率,時間変化

→後期重爆撃期の検証,太陽系内側との比較

→ 氷衛星の地質史の絶対時間軸

→ 地形緩和等の情報から熱史の制約

2. 小クレータのサイズ分布

小クレータが飽和に達していない若い領域

e.g., Eroupa, Enceladus, Ganymedeなどの若いクレータ内部

→1.5次,2次クレータ統計のモデリング

→ 衛星系内の物質混合の定量評価

→小クレータを用いたクレータ年代学→地質史の詳細化
 →KB小天体のサイズ分布

