

2015年度前期 第2回衝突勉強会

テーマ：氷天体におけるイジェクタサイズ分布

Secondary craters from large impacts on Europa and Ganymede

Ejecta size-velocity distributions on icy world, and the scaling of ejected blocks

Kelso N. Singer , William B. McKinnon , L.T. Nowicki
Icarus 226 (2013) 865-884

神戸大学 理学研究科

M2 松榮 一真

Outline of this study

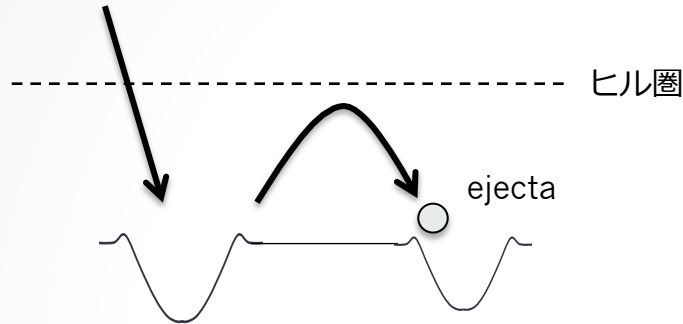
- ◇ 本研究では、EuropaとGanymedeの巨大クレーターの解析を行った
 - 2次クレーターを調べることで、イジェクタのsize-velocity distribution(SVD)を詳細に調べることが可能
 - ejection velocity, ejection position, mass of material ejected, number of fragment (Alvarellos et al.2002, Housen and Holsapple, 2011)

◇ 本研究のアウトライン

1. イントロダクション
2. 今回調べた3つクレーターの2次クレーター場とカウンティング方法
3. 重力支配域における2次クレーターを形成したイジェクタ破片サイズと速度の見積もり方法
4. SVDの上限を決定した結果とスケーリング則から求めることのできる関係式との比較
5. 氷衛星の結果を岩石天体との結果と比較
6. 本研究の結果を踏まえ、氷衛星に存在する1.5次クレーターのサイズの見積もり
7. まとめ

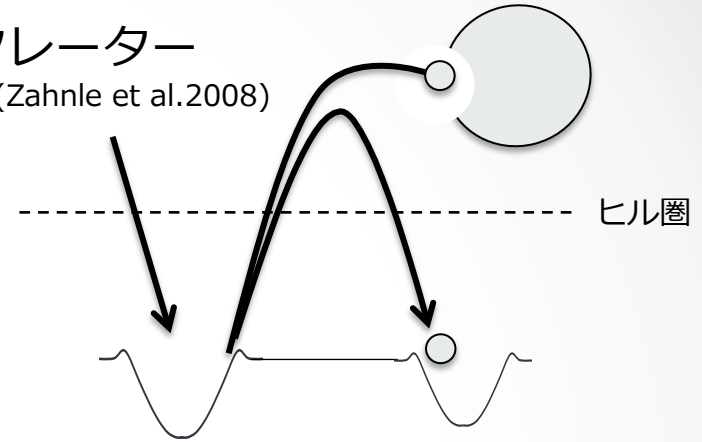
Introduction

◇ 2次クレーター



◇ 1.5次クレーター

(Zahnle et al.2008)

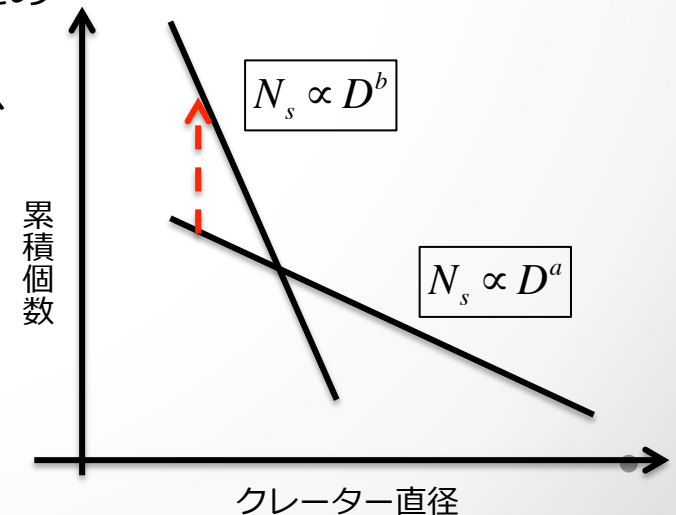


◇ Europa上の直径<1kmのクレーターの95%は2次クレーター (Bierhaus et al.2005)

- 2次クレーターの空間分布はランダムであるため、クレーターカウンティングによる地表年代決定に影響がでる
- 小天体or彗星の衝突と見分けることが難しくなるため

◇ 2次クレーターを1次クレーターとカウントすると、クレーター年代を過大評価することがある

- 小さなクレーターの累積個数が大きくなる
- クレーターカウンティングによる年代決定するためには、1次クレーターと2次クレーターを見分ける必要がある



Introduction

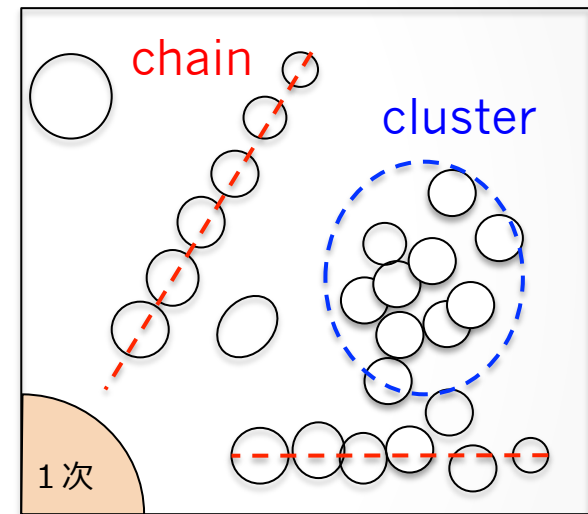
◇ 1次クレーターと2次クレーターの見分け

1. 1次クレーター近傍

- 2次クレーターの数密度は、1次クレーターからの距離とともに減少
- 形状が不規則
- 2次クレーターの特徴
 - clustersやradial chainsを形成

2. 1次クレーター遠方

- 形状は円形で、空間分布がランダム
- 1次クレーターと区別することは難しい



◇ 氷衛星上でのクレーターのSVDについて調べた研究が少なくあまりわかっていない

- 破片のSVDは小さなクレーターの分布に寄与する (Zahnle et al.2008, Bierhaus et al.2012)
- 岩石天体(水星・月・火星)でのSVDは調べられている

Introduction

Strom et al.1981

◇ 岩石天体と氷天体の違い

➤ 月とGanymedeを比較

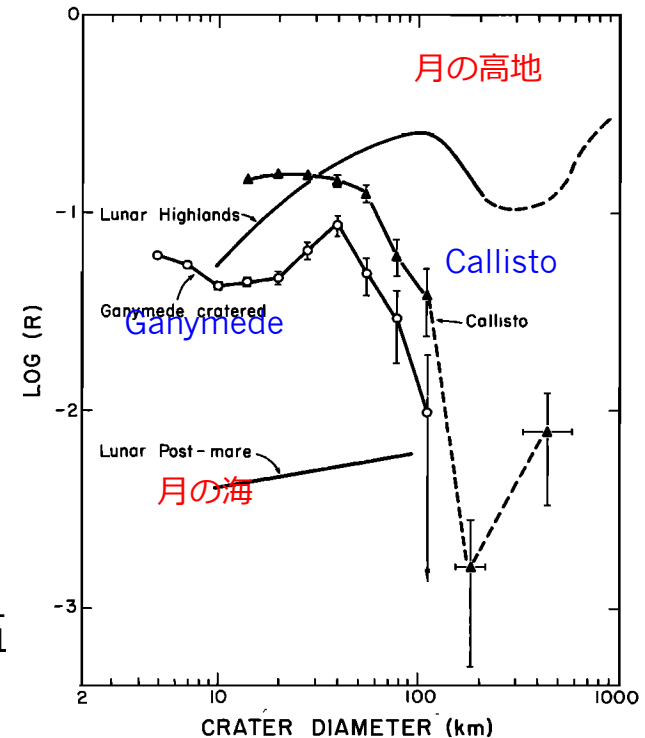
- Ganymedeでは大きなクレーターが少ない
- $50 < D < 100 \text{ km}$ でベキ ~ -3 ($D > 100 \text{ km}$)

➤ 天体表層の違い

- 月：岩石質地殻 Ganymede：氷質地殻
- 標的物質の強度が異なる

◇ 衝突後の破片サイズ

- 氷の強度は岩石より小さいため、氷のSpall破片は岩石に比べ小さくなる
- 形成される2次クレーターのサイズが異なる可能性



本研究：

EuropaとGanymede上の巨大クレーターのまわりの2次クレーターをカウンティングした

- 岩石天体の、水星・月・火星の結果と比較
- 氷天体におけるイジェクタ破片サイズと速度の関係を明らかにする

Sites and mapping methods

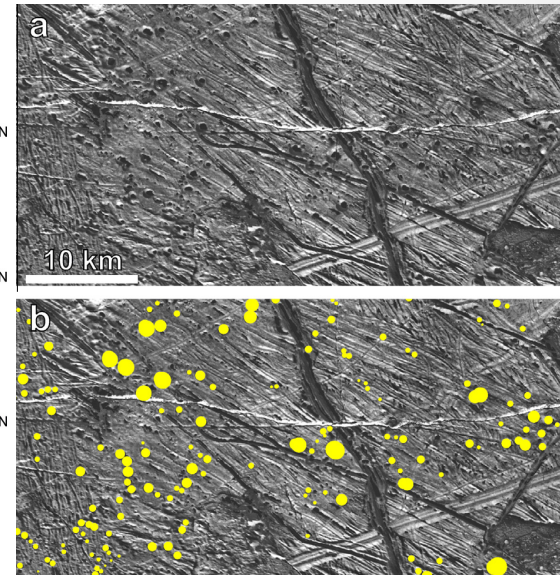
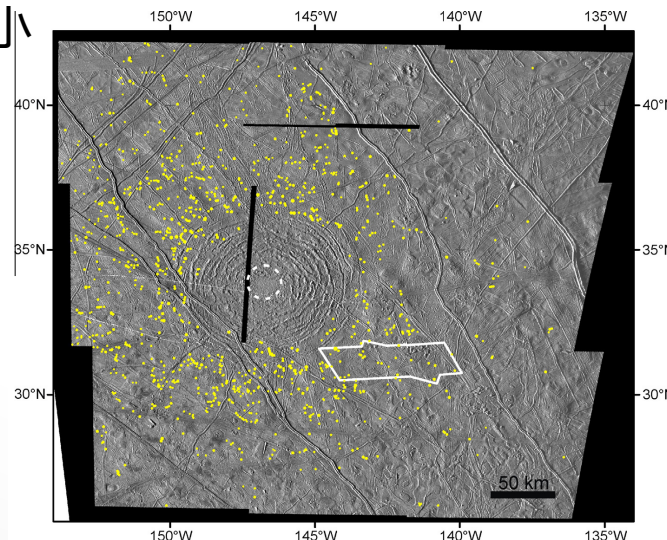
◇ GalileoとVoyager2 missionで得られた画像を用いた

- ejecta blanketの外側に位置する2次クレーターをカウンティング
- サイズと形状が周りの2次クレーターと大きく異なるクレーターは除外

1. Tyre-Europa

直径が~38kmで、比較的若くクレーターが少ない領域に位置する(Bierhaus et al.2005,2009)

- 中心から~175kmまで円形の溝が存在
- 画像に限りがあるが、①解像度が 170mpx^{-1} ②高解像度($\sim 30\text{mpx}^{-1}$)
- ①1165個 : 0.5-2.8km
- ②375個 : ~180mが最小

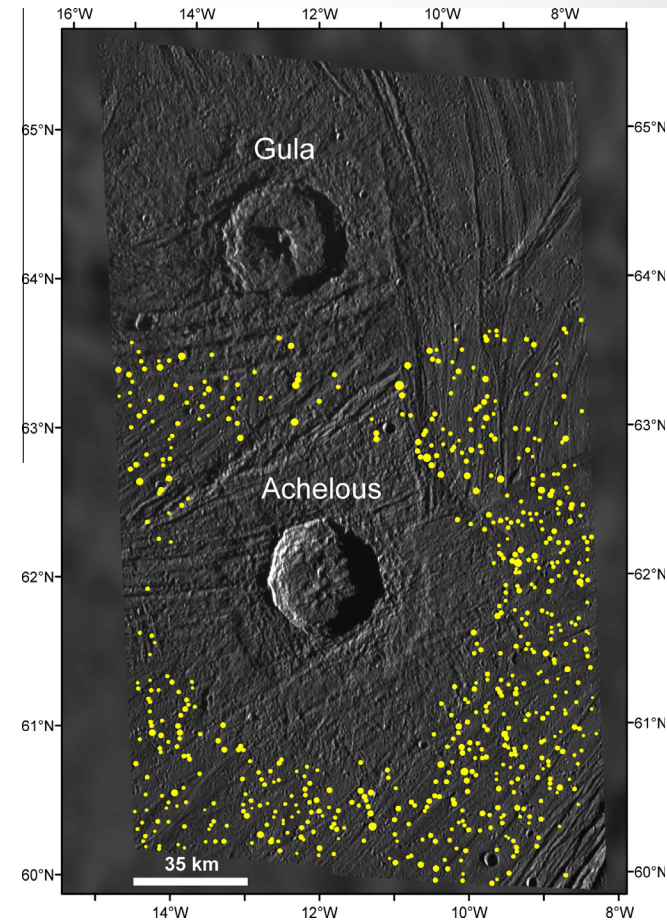


Sites and mapping methods

2. Achelous-Ganymede

直径が～35kmで、比較的新鮮なクレーター

- 解像度はTyreの画像とほぼ同じ 180mpx^{-1}
- 630個：0.7-2.7km
- 明確なイジェクタ堆積がある
- 北側に同サイズのGulaクレーターがある
- Gulaはクレーター内部に小さなクレーターがあるがAchelousには存在しない
 - AchelousはGulaより年代が若い
 - ほとんどがAchelousの2次クレーター
- GulaとAchelousクレーターのイジェクタブランケットが重なっている領域がある
 - 63.5度より北の部分のクレーターはカウントしていない



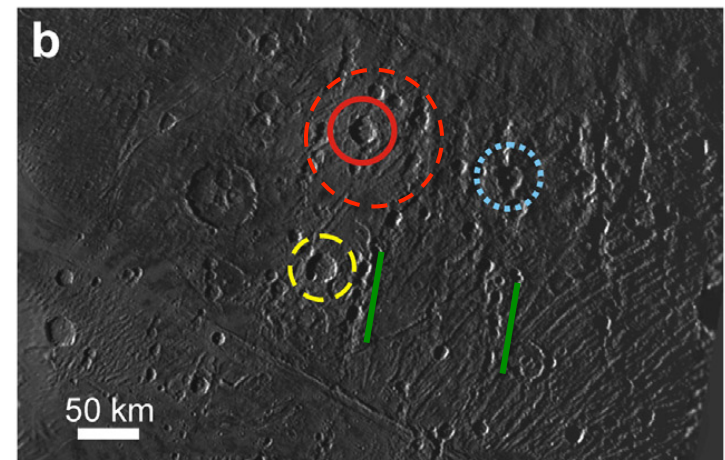
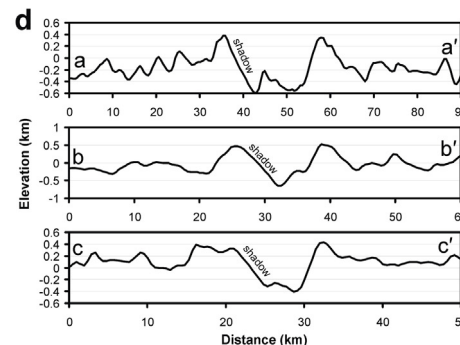
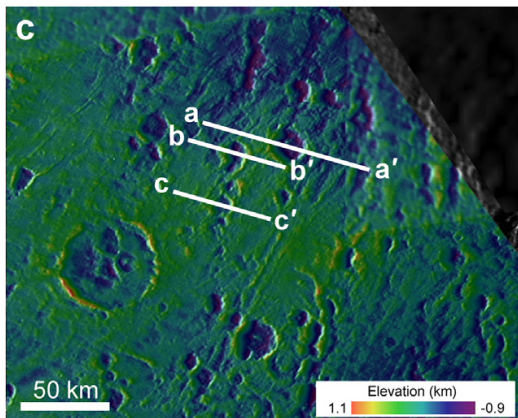
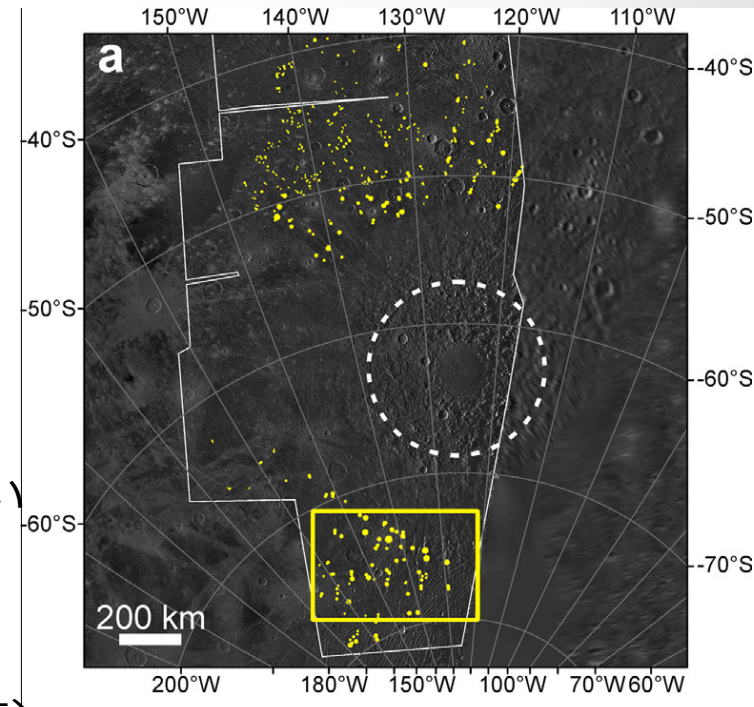
Sites and mapping methods

3. Gilgamesh-Ganymede

直径が~585kmの最大盆地 (Schenk et al.2004)

- Voyager2の画像で解像度550mpx⁻¹
- 445個 : 2.3-21.3km
- chain構造とcluster構造
- 2次クレーターがクレーターの北部と南部に集中

- ◇ 1次クレーターと2次クレーターの判別が難しい
- clusterとchain構造をなしている比較的大きなクレーターのみカウンティング
 - リム構造の傾斜が大きく、chain状に位置していなく、周りより大きなクレーターは除外(図b黄色)

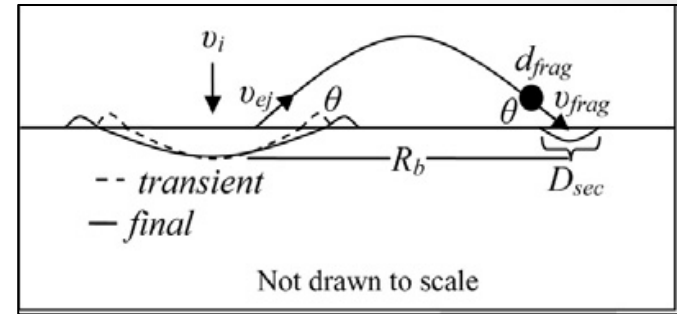


Fragment velocity of ejecta

◆ 破片サイズ・破片速度の導出

- ◇ 2次クレーターの存在領域→エジェクタの破片速度
- ◇ 2次クレーターサイズ→エジェクタ破片サイズ

- エジェクタは弾道軌道を仮定
- エジェクタ放出角度は45° (Cintala et al.1999)
- 0.25D_{tr}から破片が放出
- D_{tr}の見積もりは $D_{final} \sim 1.176 D_{tr}^{1.108}$ を用いる
(McKinnon and Schenk,1995)



- ◇ エジェクタ破片速度の推定
(Melosh,1989)

$$R_b = 2R_p \tan^{-1} \left(\frac{v_{ej}^2 \sin \theta \cos \theta / R_p g}{1 - v_{ej}^2 \cos^2 \theta / R_p g} \right)$$

R_p:天体半径
g:重力加速度

◇ クレータースケーリング則から破片サイズと2次クレーターサイズの関係式を導く

サイズスケーリング則 (Hoslapple,1993)

$$\pi_V = K_1 \left(\pi_2 + K_2 \pi_3^{\frac{2+\mu}{2+\mu}} \right)^{\frac{-3\mu}{2+\mu}}$$

規格化クレーター体積

$$\pi_V = \frac{\rho V}{m}$$

規格化重力

$$\pi_2 = \frac{ga}{U^2}$$

規格化強度

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho U^2}$$

D_{tr}:トランジェントクレーター直径
D_{final}:最終クレーター直径 ρ:標的密度
m:弾丸質量 g:重力加速度
Y:標的物質強度 U:衝突速度
a:弾丸直径 V:クレーター体積

- ※ 2次クレーターは標的物質の破片が弾丸になるため
 $\pi_4=1$ となる

Fragment size of ejecta

◆ クレーター形成メカニズム

◇ 氷のパラメータをスケーリング則に適応

◇ 2次クレーターは“重力支配域”で形成

➤ 観測したクレーターの条件(π_2)が、右図の灰色の領域になったため

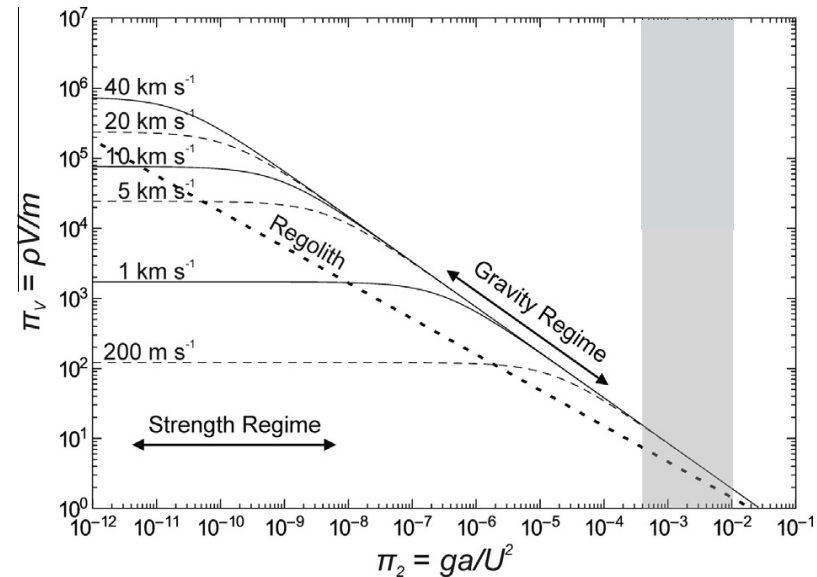
(衝突速度は200-1000m/s)

➤ 破片をm-scaleにしても、 π_V は遷移領域に位置した

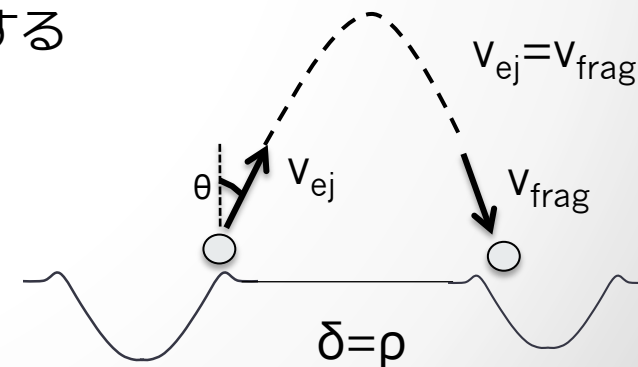
➤ EuropaとGanymedeには強度支配域の2次クレーターは観測されなかった

◇ クレータースケリング則は重力支配域のみで考察をする

➤ 放出後の大気による抵抗は無視する



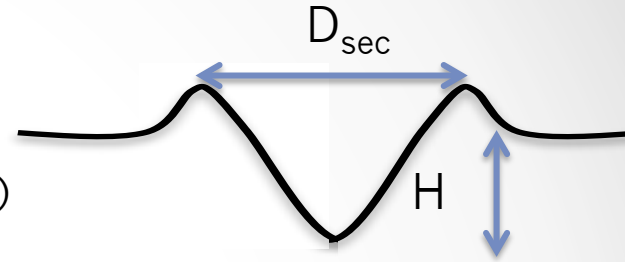
$$\pi_V = K_1 \pi_2^{\frac{-3\mu}{2+\mu}} \rightarrow \frac{V_{\text{sec}}}{V_{\text{frag}}} = K_1 \left(\frac{g(f_{\text{frag}}/2)}{(v_{\text{frag}} \cos \theta)^2} \right)^{\frac{-3\mu}{2+\mu}}$$



Fragment size of ejecta

◇ クレーター体積から直径へ

- Europaの2次クレーターの直径深さ比 $H/D=0.135$
(Bierhaus and Schenk 2010)
- スケーリング則は表面からの深さをを用いるので、
 $H/D = 0.125$ を用いる



◇ イジェクタのスケーリング則

$$\frac{0.05D_{sec}^2}{\left(\frac{4}{3}\right)\pi\left(\frac{d_{frag}}{2}\right)^3} = K_1 \left(\frac{g(d_{frag}/2)}{(v_{frag} \cos\theta)^2} \right)^{\frac{-3\mu}{2+\mu}}$$

- ※ Gilgameshの2次クレーターは数kmより大きく形状が複雑になっている
- ※ Schenk 2002によって、Ganymedeのクレーターの深さ H は、直径 D の0.42乗に比例

$$\frac{H}{D} = 0.125 \left(\frac{D_{sec}}{3km} \right)^{0.58} \quad D_{sec} > 3km$$

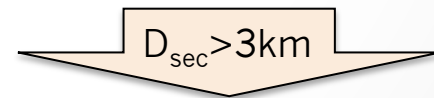
2次クレーターサイズと破片サイズの関係式

solid ice surface

icy regolith

$$d_{frag} = 1.003 D_{sec}^{1.277} \left(\frac{g}{v_{frag}^2} \right)^{0.277}$$

$$d_{frag} = 0.878 D_{sec}^{1.205} \left(\frac{g}{v_{frag}^2} \right)^{0.205}$$



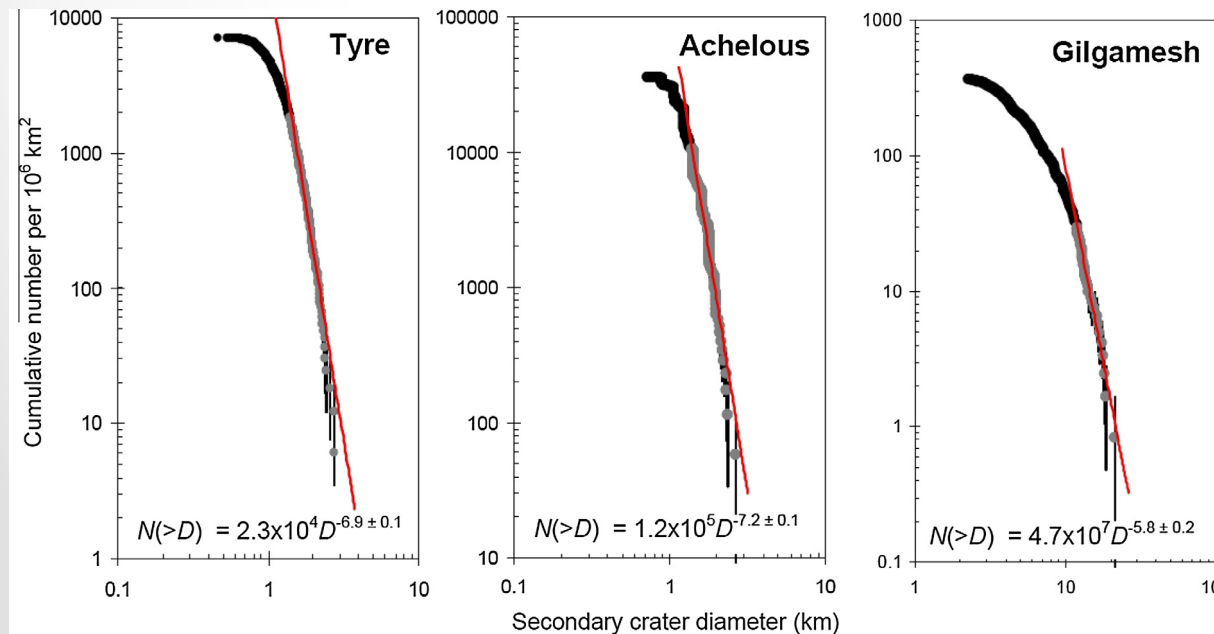
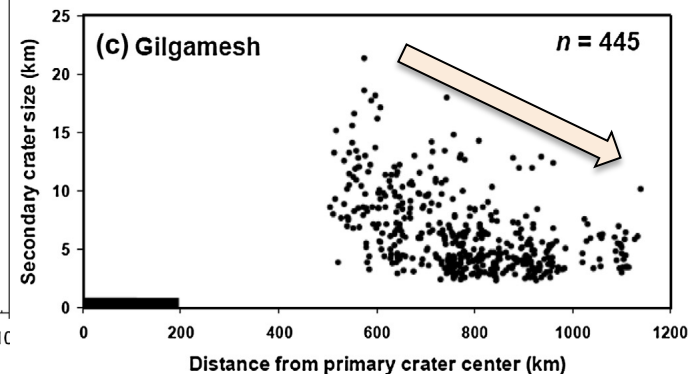
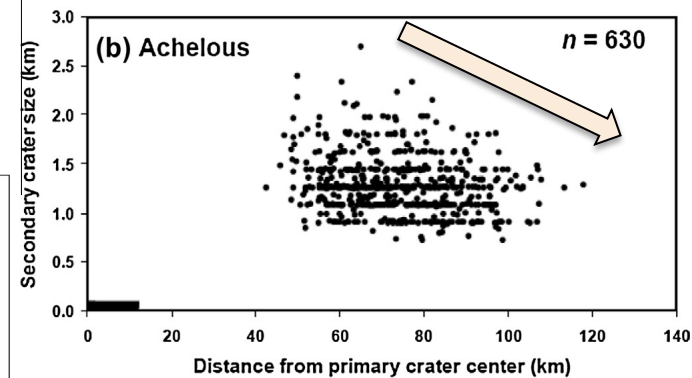
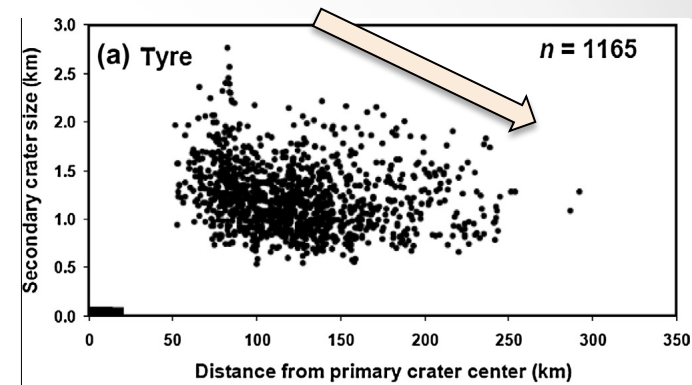
$$d_{frag} = 1.304 D_{sec}^{1.03} \left(\frac{g}{v_{frag}^2} \right)^{0.277}$$

$$d_{frag} = 1.126 D_{sec}^{0.972} \left(\frac{g}{v_{frag}^2} \right)^{0.205}$$

Size-distribution of secondary craters

◇ 2次クレーターのサイズ分布

- 1次クレーターからの距離と2次クレーターのサイズの関係 (右図)
 - 黒線は1次クレーターのサイズ
 - 遠くなるにつれてクレーターサイズは小さい
- 2次クレーターのサイズ頻度分布 (下図)
 - 1次クレーターと傾きが異なる
 - 解像度や観測場所によって変化する



Fragment diameter and velocity

◇ 破片速度 v_{ej} と v_{ej} における最大破片サイズ d_{fmax}

➤ d_{fmax} と v_{ej} の関係

$$d_{fmax} = Av_{ej}^{-\beta}$$

➤ 分位点回帰法でフィッティング (Koenker, 2005)

— データの99%回帰線より下に位置する

1. 太線：すべてのデータ

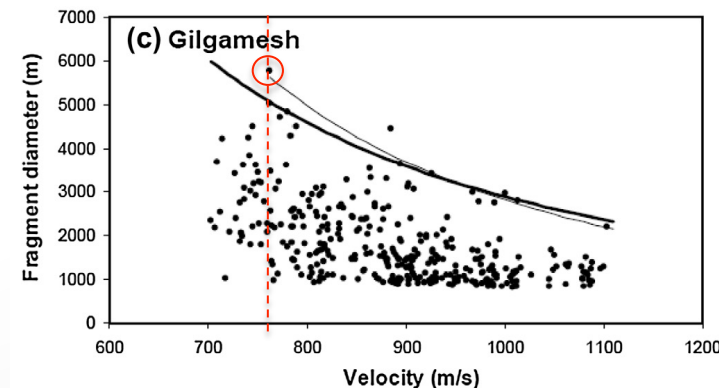
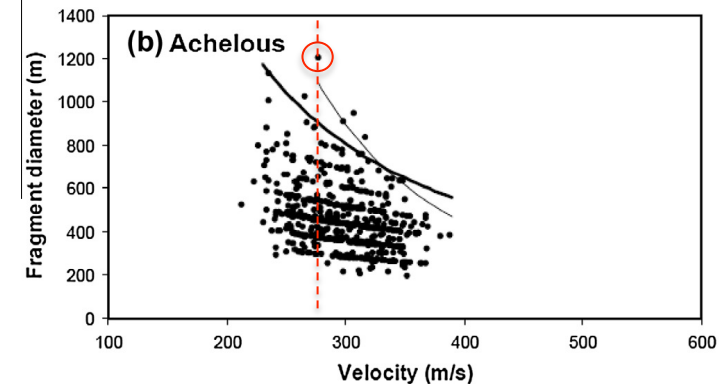
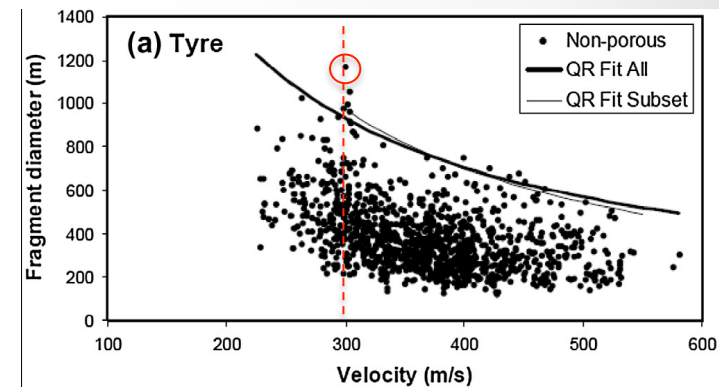
— 破片速度が大きいと破片サイズは小さい

2. 細線：最大破片の持つ v_{ej} を下限値と設定

— 最大破片が最も速度が遅いわけではない

Primary crater (diameter in km)	All secondaries		
	β	$\ln(A)$	A
Solid target			
Pwyll ^b (27)	1.21		3.4×10^5
Tyre (38)	0.96 ± 0.13	12.3 ± 0.7	2.24×10^5
Achelous (35)	1.41 ± 0.45	14.7 ± 2.6	2.52×10^6
Gilgamesh (585)	2.07 ± 0.34	22.3 ± 2.3	4.73×10^9

Primary crater (diameter in km)	Velocity-limited subset		
	β	$\ln(A)$	A
Solid target			
Pwyll ^b (27)			
Tyre (38)	1.13 ± 0.16	13.3 ± 1.0	6.12×10^5
Achelous (35)	2.44 ± 0.80	20.7 ± 4.6	9.83×10^8
Gilgamesh (585)	2.55 ± 0.44	25.5 ± 3.0	1.24×10^{11}



Fragment diameter and velocity

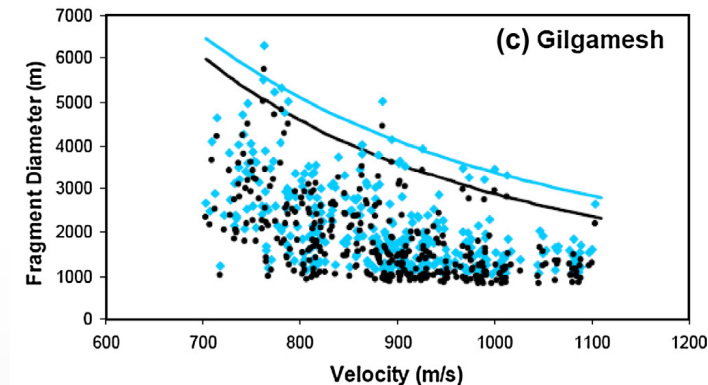
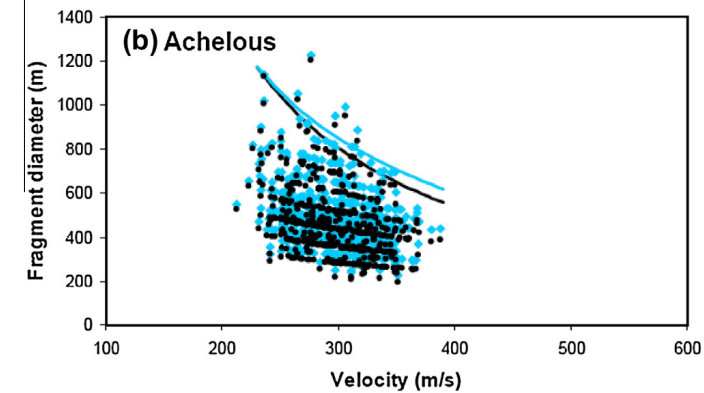
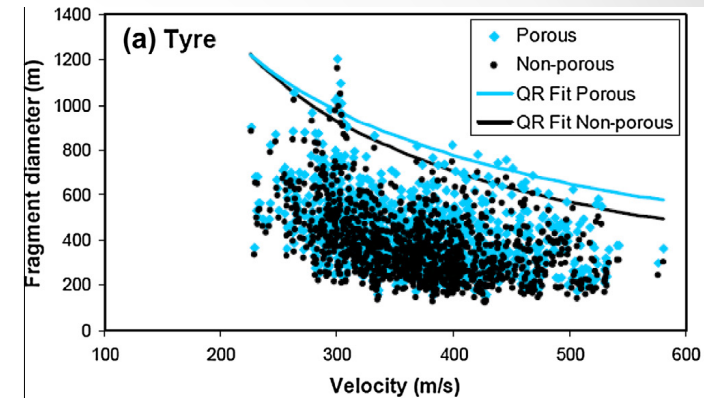
◇ 破片速度 v_{ej} と v_{ej} における最大破片サイズ d_{fmax}

- 黒：表面がsolid
- 青：表面がicy regolith

◇ ポーラスな標的に、同じ速度で同サイズのクレーターを形成するためには大きな破片が必要になる

- 弾丸の運動エネルギーが標的物質の圧密に使われたり、散逸が生じるため (Holsapple 1993)
- 破片サイズは大きくなるがSVDのベキ乗数 β は、標的物質によらず同じような値をとる

Primary crater (diameter in km)	All secondaries	Velocity-limited subset
	β	β
<i>Solid target</i>		
Pwyll ^b (27)	1.21	
Tyre (38)	0.96 ± 0.13	1.13 ± 0.16
Achelous (35)	1.41 ± 0.45	2.44 ± 0.80
Gilgamesh (585)	2.07 ± 0.34	2.55 ± 0.44
<i>Porous target</i>		
Pwyll ^b	1.02	
Tyre	0.79 ± 0.12	0.95 ± 0.15
Achelous	1.21 ± 0.41	2.18 ± 0.72
Gilgamesh	1.84 ± 0.34	2.29 ± 0.41



Fragment diameter and velocity

◇ 分位点回帰法でフィッティング (Koenker, 2005)

- データ範囲を99%,95%,90%に変更
- 一般的に範囲を下げた方が値は正確になる

◇ Tyreのデータが最も信頼出来る

◇ Gilgameshの β がTyre,Achelousより大きくなり、傾向が異なることを示唆



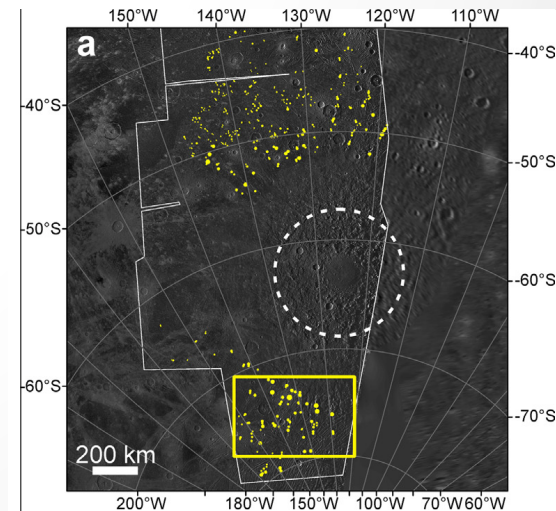
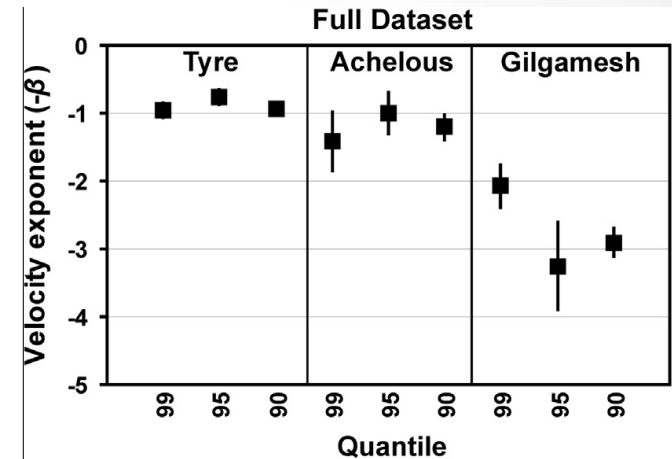
◇ Gilgameshの2次クレーターはclusterとchainのみカウント

- 別の100個のクレーターをカウンティング
- サイズが小さいため、 β が減少する

◇ クレーターの北側と南側に2次クレーターが集中

- 南側が多少大きく、2次クレーターのチェーン構造が卓越している部分がある
 - North:2.15、South:2.45
- チェーン状に位置する大きな2次クレーターが多い

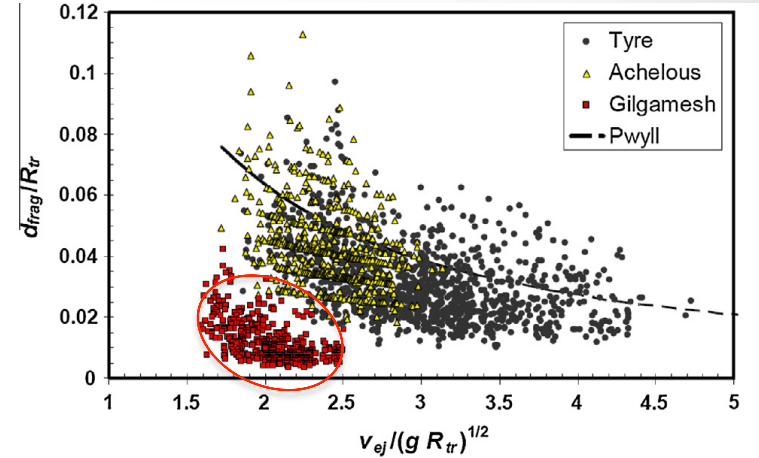
$$d_{f \max} = A v_{ej}^{-\beta}$$



Ejecta fragment scaling

◇ Ejectaのスケール則 (Housen and Hoslapple,2011)

- 規格化したイジェクタ破片速度： $v_{ej}/(gR_{tr})^{1/2}$
- 規格化したイジェクタ破片サイズ： d_{frag}/R_{tr}

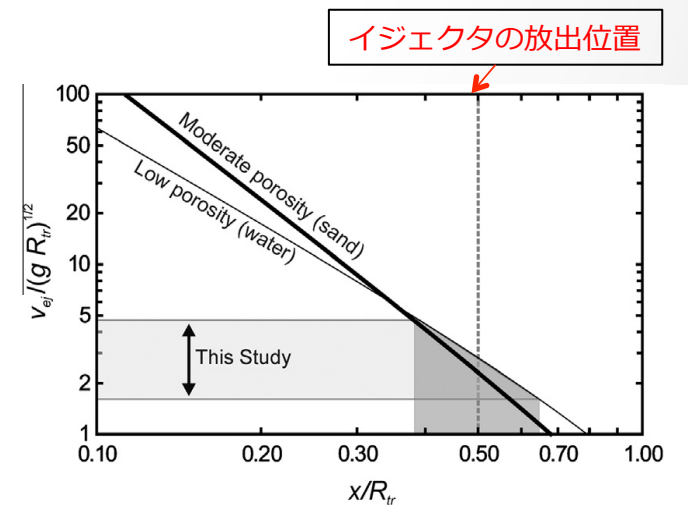


◇ Gilgameshのみデータにオフセット

- Gilgameshのトランジェントクレーターサイズを大きく見積もったため
- イジェクタブランケットから推測すると、1.5倍小さくなる (Housen et al.1983)

◇ 放出位置と速度の関係 (Housen and Holsapple2011)

- 規格化放出速度のデータ範囲:1.6-4.7
- 放出位置の範囲の中に、 $x/R_{tr}=D_{tr}/4=0.5$ を含む
- イジェクタ速度と放出位置についての理論とデータを比較することが可能
- 放出位置が $D_{tr}/4$ であることは妥当



Ejecta fragment scaling

◇ 新たなファクターを導入

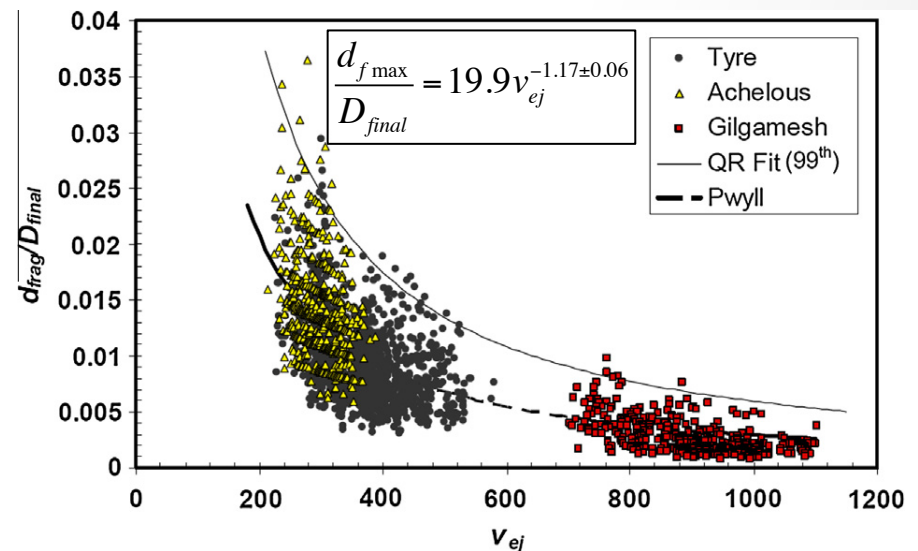
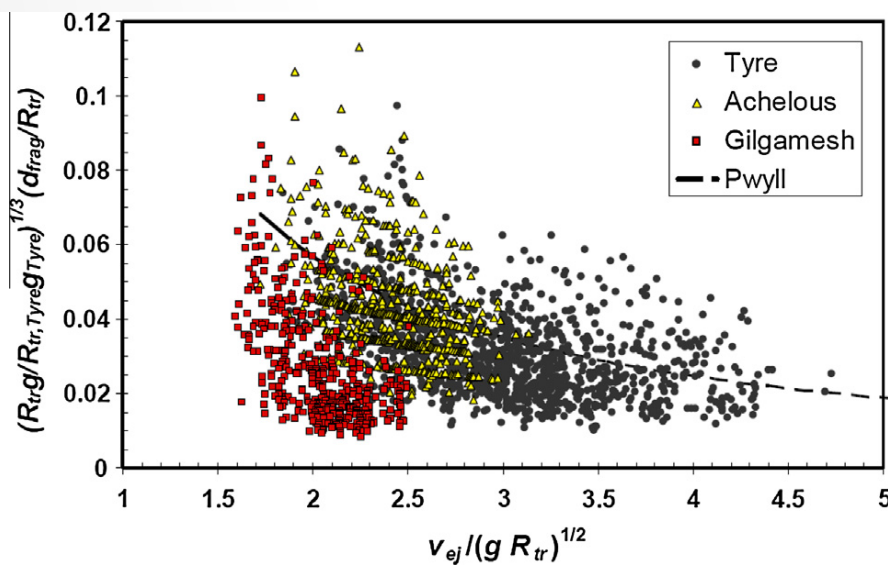
- 3つのクレーターを比較することが可能
- 月のクレーターリム上にあるイジェクタブロックの最大値が $D^{2/3}$ で変化する (Moore 1971)
- 最大イジェクタブロックの質量はイジェクタ総質量の0.8乗に比例 (O'Keefe and Ahrens 1987)
- 速度のベキ乗数 β は 0.91 ± 0.09
- Gilgameshのクレーターサイズより、 β の値が大きくなる可能性

ejectaスケールング則
(Housen and Holsapple 2011)

◇ 放出速度と2次クレーターを形成する破片サイズ

- Pwylで得た結果より大きな破片が放出している
- 先行研究との結果とは合わない

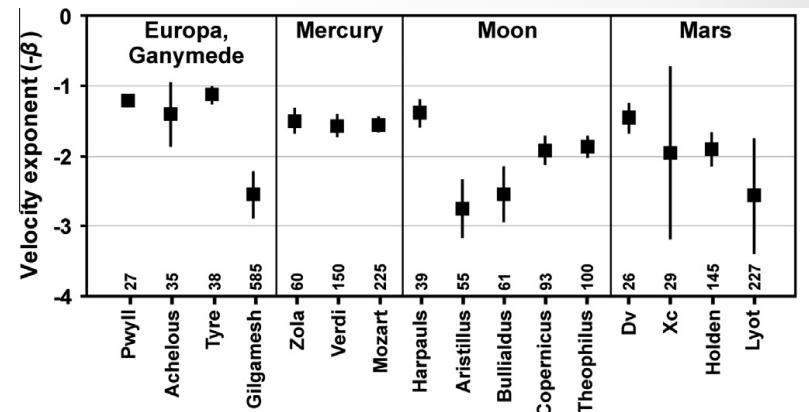
$$\frac{d_{f \max}}{R_{tr}} \propto \left(\frac{\rho g R}{T} \right)^\alpha \left(\frac{v_{ej}}{\sqrt{gR}} \right)^\beta \quad \alpha = -1/3$$



Comparison with terrestrial planet secondaries

☆ 速度のベキ β を比較

- 岩石天体に比べ氷衛星のイジェクタ破片のほうが小さい
- 氷衛星の β は岩石天体に比べて小さい
- Gilgameshのみ β が大きい
 - 月のOrientaleの2次クレーターより大きい



Vickery 1986, 1987

☆ 月のKeplerとAristarchusクレーターと水星上の3つのクレーター周りの2次クレーターについて調べた(Hirase et al.2004)

- SVDの上限を決定しておらず、距離と破片サイズの減少の傾向が見られなかった

☆ 月のTychoクレーターで同様の研究を行った(Hirata and Nakamura 2006)

- SVDの上限は決めていないが、Copernicusクレーターのデータとほぼ一致
- 玄武岩層ではなくMegaregolithを深くまで掘削したことを示唆 (Wieczorek et al.2013)

☆ 18個の月クレーター周りのSVDを求めた (Bart and Melosh 2010)

- クレーターサイズが大きくなるに従い β が大きくなる(β : -0.3~-3.7)
- 大きなクレーターほど、破片サイズ分布の傾きが大きくなる

Secondaries and spallation theory

- ◇ クレーター形成時に発生する標的物質の破片
 - Spall破片が地表面付近において高速で放出される
 - Grady-Kipp fragments : 掘削流による破片の大部分

◇ hydrodynamic ejection model

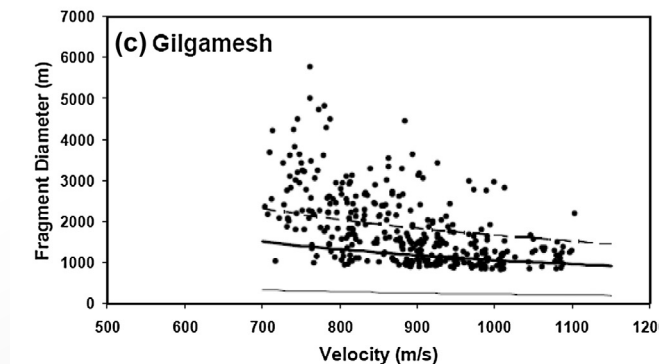
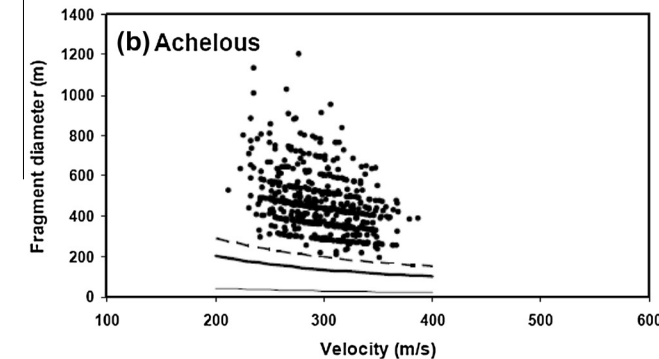
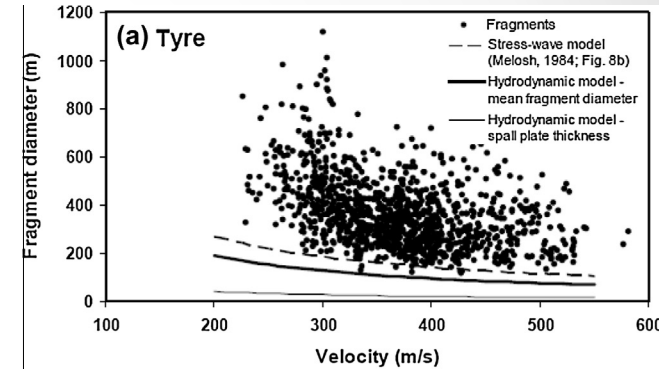
$$l_{spall} = \frac{2a_i T (\delta/\rho)^{1/2}}{\rho C_L v_{ej}}$$

l_{spall} : スポール破片厚さ
 a_i : 衝突体半径 ρ : 標的密度
 δ : 衝突体密度 T : 引っ張り強度
 C_L : P波速度 a_i : 弾丸直径

H/D=0.2

$$2a_i = 1.215 D_{tr}^{1.277} \left(\frac{g}{v_i^2} \right)^{0.277}$$

- ◇ Spall破片は低速イジェクタでは破壊されないと仮定
 - Spall破片のサイズの予測は、観測された2次クレーターから推測した破片サイズより小さい
- ◇ この違いが何で起きているのか？
 - H/D=0.1では破片サイズが10%減少
 - 速度、衝突角度で説明できない



Secondaries and spallation theory

◇ 氷と岩石の違い

- ポアソン比が液体の0.5により近いため “fluid material” (岩石:0.25、氷:0.325)
- ejectionの力学がより流体力学的になり、放出角度がより大きくなる (Melosh,1984)
- 弾丸半径で規格化した距離(x/a_i)が5-10に増えるに従って放出角度が70°-50°と変化
- 氷衛星の2次クレーターから推測した $v_{ej}(\theta=45^\circ)$ は過小評価

◇ 衝突角度を70°で計算をした

- 破片サイズは30%ほど減少
- 破片に与えられる速度が大きくなるためあるサイズの2次クレーターを形成するために必要な破片サイズは小さくなる

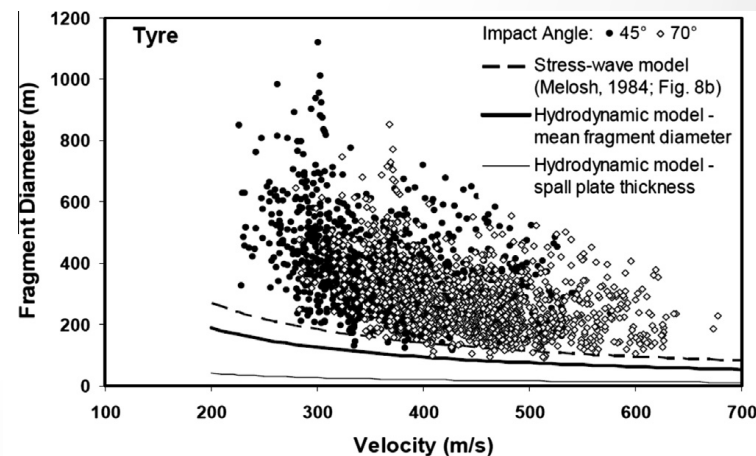
Spall theory

$$l_{spall} = \frac{2a_i T (\delta/\rho)^{1/2}}{\rho C_L v_{ej}}$$

◇ Spall破片サイズ

- 破片の大きさは標的の強度によって決まる
- 氷の強度Tは岩石より小さいため、氷のSpall破片は岩石に比べ小さくなる

Spall理論だけでは岩石天体・氷天体の大きな2次クレーターについて完全に説明できない



Grady-Kipp fragments

◇ Grady-Kipp fragmentsのサイズ (Melosh 1989)

- 2次クレーター領域の内側での最大破片サイズはとても小さい
- Gilgamesh~20m、Tyre~1m
- 観測された2次クレーターを形成するために必要な破片サイズより小さい

$$l_{GK} = \frac{2a_i T}{\rho v_{ej}^{2/3} v_i^{4/3}}$$

l_{GK} : Grady-kipp破片厚さ
 a_i : 衝突体半径 ρ : 標的密度
 T : 引っ張り強度 v_{ej} : 破片放出速度
 v_i : 1次クレーター形成衝突速度

◇ Grady-Kipp fragmentsの問題点

- この理論はcracksがランダムな流れによって活発もしくは成長することを想定
- 地表面構造を想定していない (断層、Megaregolith、層構造など)
- EuropaやGanymedeの表層も破碎されていて、構造的に一様ではない
- ある速度で同じサイズの破片が放出されると予想
- 1次クレーターからの距離に伴い2次クレーターのサイズが変化することを説明できない

Grady-Kipp fragmentsを求める式は、観測された2次クレーターを形成する破片サイズの見積もりには使えない

Sesquinary craters on Europa and Ganymede

◇ 1.5次クレーター

- SVDの速度をヒル圏脱出速度まで外挿して、放出される最大破片を見積もった
- 再衝突速度：Europa, 2.5km/s (Zahnle et al.2008)

Ganymede, 3.5km/s (Alvarellos et al.2002)

◇ Gilgameshからの1.5次クレーターのサイズを見積もった

- 氷破片のスケーリング則で、破片サイズは1km
- 最も速く放出された破片は、最大破片の半分以下のサイズ
- 氷のSpallは生き残ったまま衝突し1.5次クレーターを形成するとする
- Gilgameshで形成された最大の1.5次クレーターサイズは2-3kmより大きくない

◇ 2, 1.5次クレーターのサイズを見積もった先行研究

- Europa: 100mの破片が衝突して0.5~1kmのクレーターが形成 (Alvarellos et al.2002)
- Gilgamesh: 1kmより小さな破片が5km/sで衝突して~5kmほどのクレーターを形成 (Zahnle et al.2001)

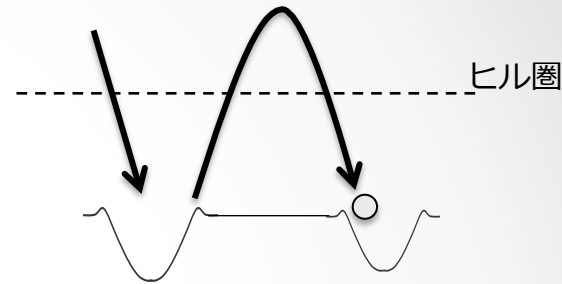


Table 4
Largest sesquinary diameters.

Primary crater	Largest fragment at escape velocity - full dataset (m) ^a	Largest sesquinary crater on the same body - full dataset (km) ^f
<i>Europa</i>		
Tyre	150	1.1
Pwyll	34	0.3
<i>Ganymede</i>		
Achelous	36	0.4 (0.3) ^d
Gilgamesh	360	2.4

D>30kmにおけるクレーターサイズ分布に影響はない

Summary

- ◇ イジェクタサイズと速度の関係を調べるために2次クレーターをカウンティング
 - 速度が大きくなるにつれてイジェクタサイズは小さくなる
 - 2次クレーターのSVDは、天体重力や標的物質が異なることにより生じるクレーター形成、イジェクタの物理過程が異なることによる
 - 25-40kmのクレーターでは $\beta \sim -1$ 、585kmの巨大盆地では $\beta \sim -2$ -3
 - 氷衛星でのSVDの傾きは、岩石天体の同サイズクレーターに比べ小さくなる傾向
 - 岩石天体ではspall theoryで説明できるが、氷衛星では説明できない
- ◇ 本研究の結果をもちいて、氷衛星における1.5次クレーター分布に制約ができる
 - EuropaとGanymedeの巨大クレーターから求めたイジェクタSVDを外挿することで算出
 - 1.5次クレーターはサイズが小さいことがわかった
 - EuropaのTyreクレーターの1.5次クレーターは1kmより小さい
 - Ganymedeの巨大盆地Gilgameshでも2-3kmより小さい
 - β が大きいため、衝突速度が大きいと破片サイズが小さくなるため
 - 先行研究で予測したGilgameshの2次、1.5次クレーターのサイズは、Ganymede上の直径30kmより大きなクレーター分布に影響が出るほど大きいものではないことを確かめた