

土星系氷衛星におけるクレーター生成率についての考察

平田直之

神戸大学 理学研究科

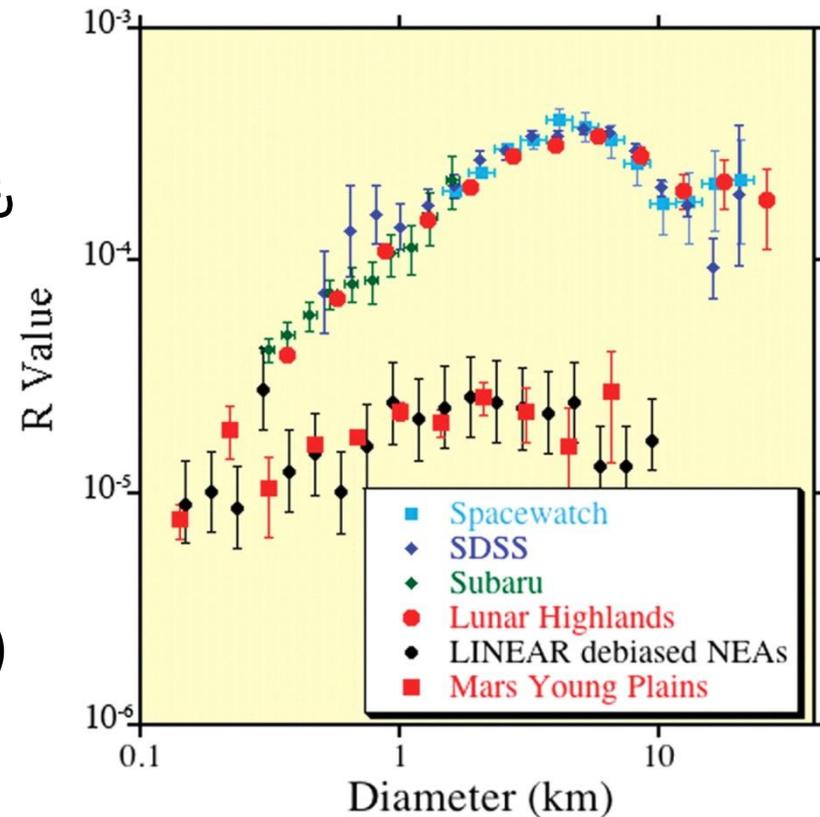
研究の目的

外側太陽系における
衝突天体(インパクター)の
起源を明らかにしたい

インパクターの起源

インパクターの起源解明は

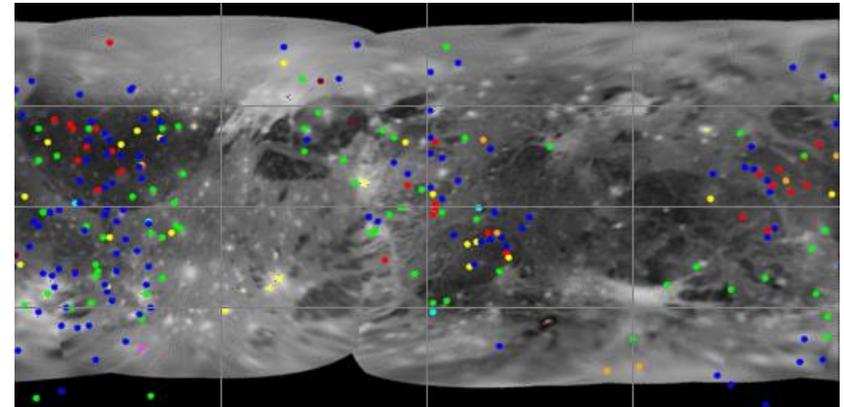
- 小天体の軌道進化を理解する上でも、クレーター年代を研究する上でも最も基礎となる重要な情報
- 内側太陽系では、
 - 3.8億年前はMain belt Asteroids
 - 3.8億年以降はNear Earth Asteroid (NEA)
 - とクレーターサイズ頻度分布(CSFD)から言われている(Strom et al. 2005)
- 外惑星と内惑星ではインパクターが違らしい、クレーター生成率も違らしい。
- では、外惑星系では何が主要なインパクターなのか？



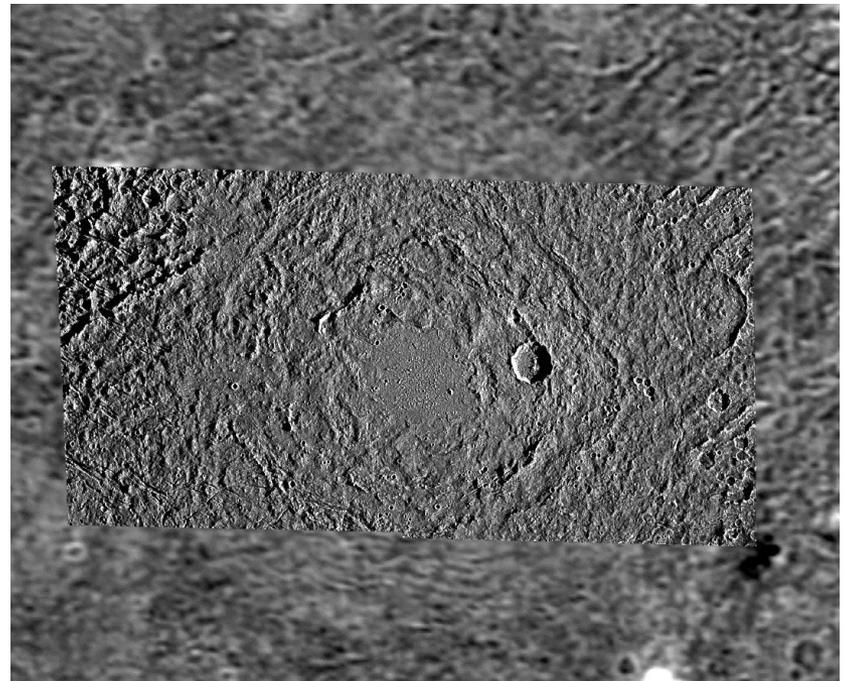
月のインパクターサイズ頻度分布 (CSFD)と、小惑星帯・地球近傍小惑星のサイズ頻度分布 (Strom et al. 2005)

外惑星系での問題点

- 外惑星系インパクターの起源
特定の難しさは以下の理由による
- 木星系の氷衛星での問題点
 1. 画質がよくない
 - かなり大きなクレーターでないと
全球分布調査ができない
 2. 大きなクレーターがあまりない
 - ガニメデ・カリストでは直径30km
以上のクレーターは激減し、
100kmを超えるクレーターはほぼ
ない。
 - 粘性緩和によるものとされる
- 土星系の氷衛星での問題点
 - 他衛星由来の二次クレーターが
多すぎる。



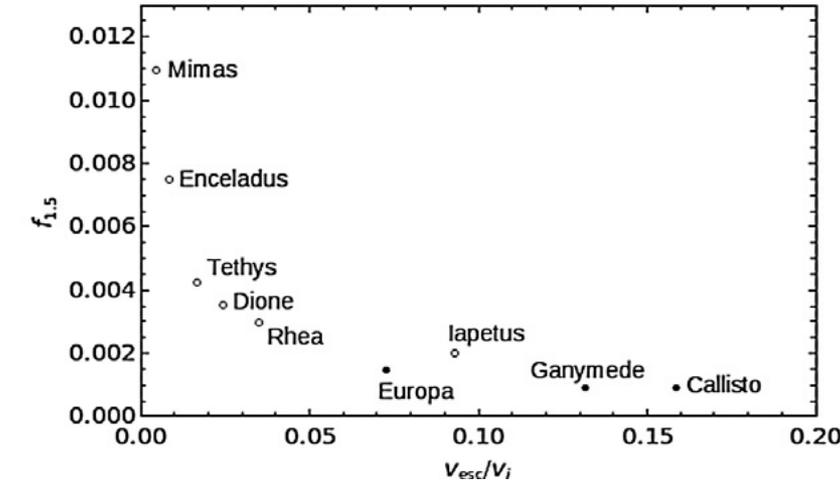
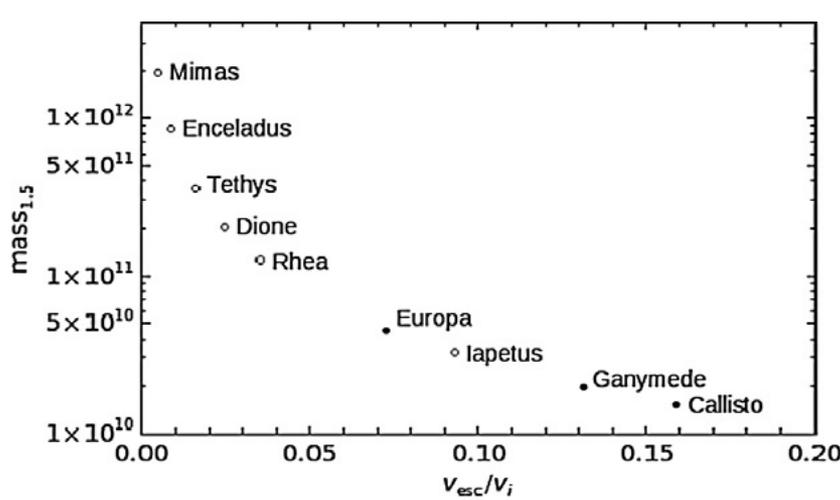
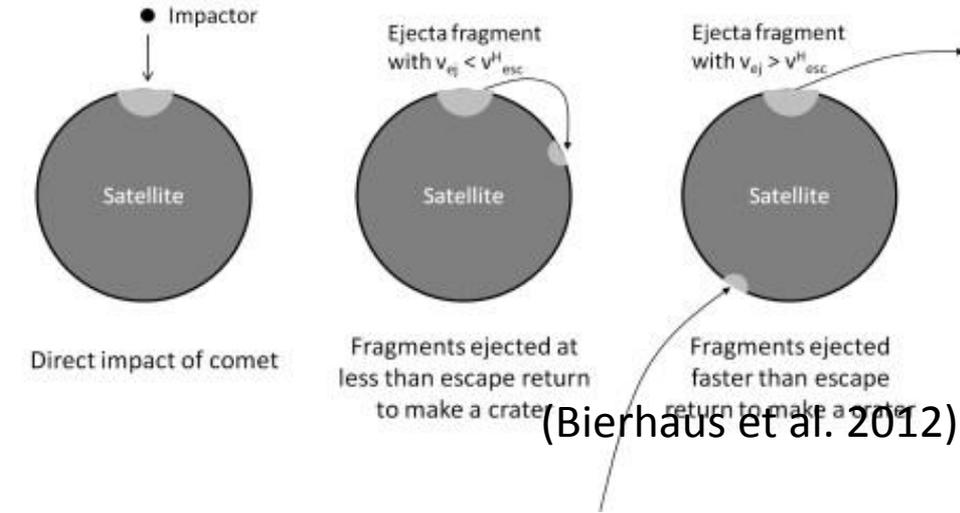
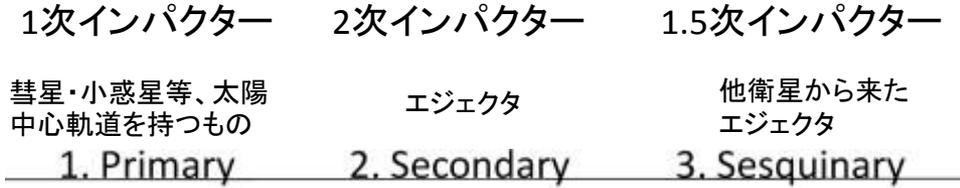
<http://www.lpi.usra.edu/resources/gc/gchome.html>



PIA01659 Buto Facula
ガニメデ 直径50kmのクレーター

土星系で二次インパクターの寄与は大きい

この発表では特に断りない場合
1.5次インパクターも2次インパクターと呼ぶ



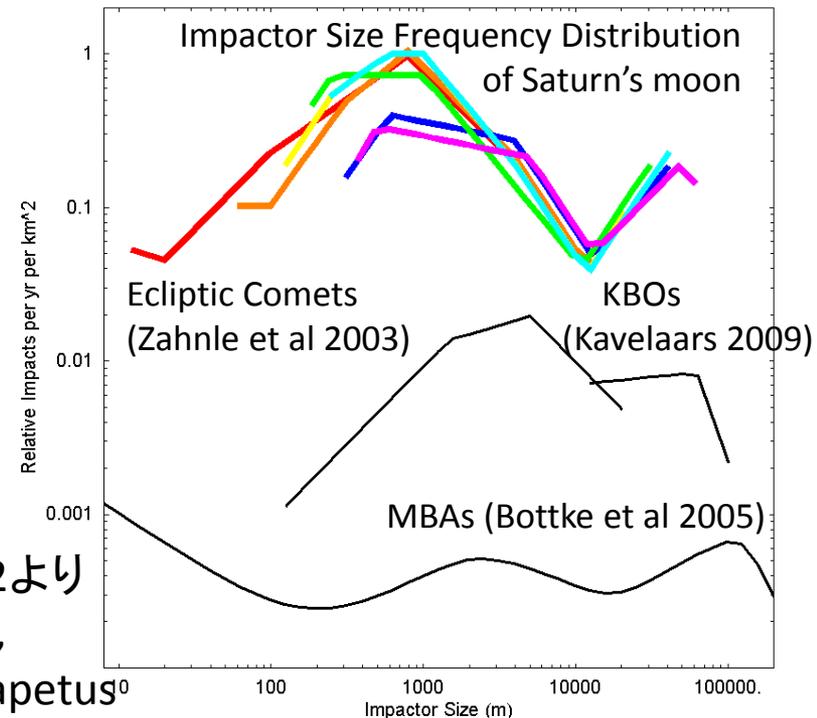
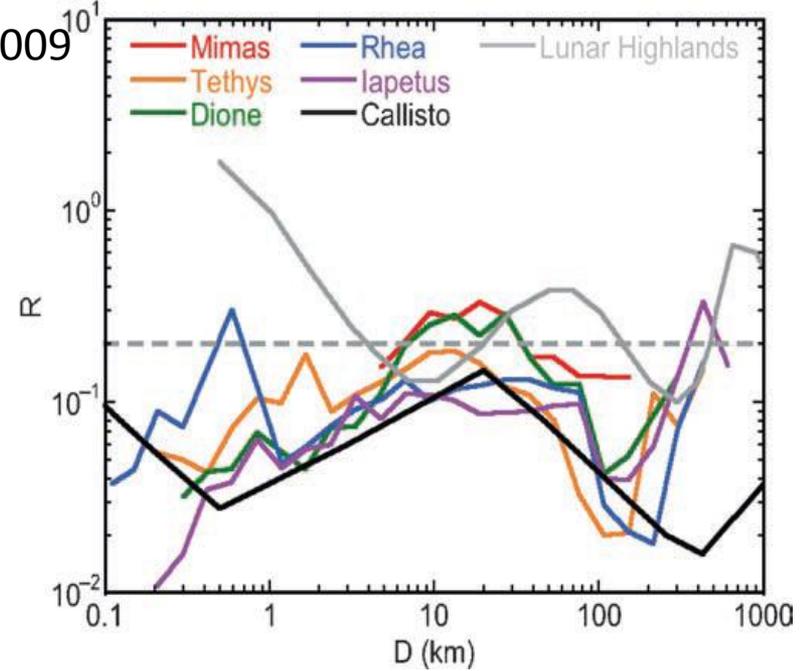
←土星系の衛星は小さく重力が小さいため、多くの微天体が系内に撒き散らされる (Bierhaus et al. 2012)

1kmの彗星が衝突した時の1.5次エジェクタ質量

母天体との質量比

土星系のCSFD

- CSFDをとったとしても、二次クレーターのCSFDだったら比較できない
- 二次クレーターの影響を評価したい。

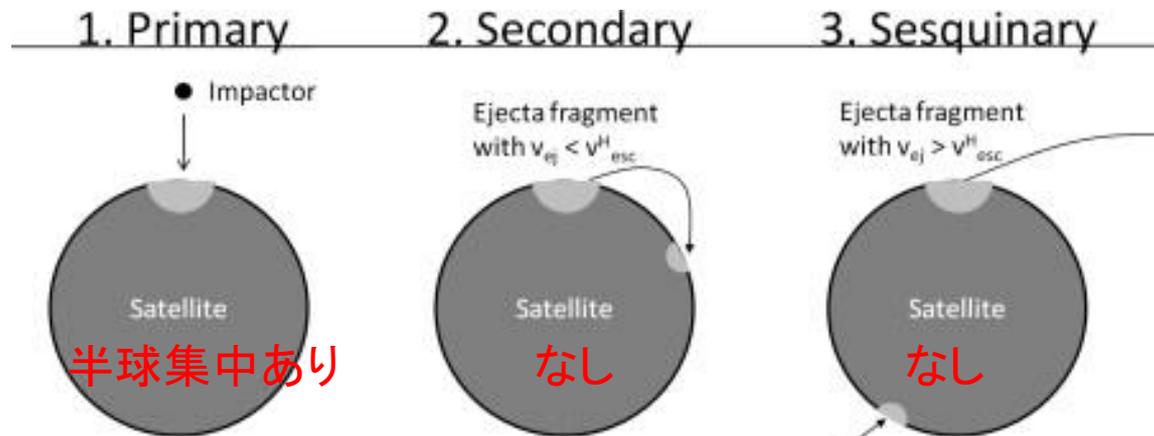


Minton et al. 2012より

red=Phoebe, orange=Hyperion, yellow=Mimas,
green=Tethys, cyan=Dione, blue=Rhea, purple=Iapetus

半球集中に着目

- 一次インパクトター
 - 同期回転衛星では、
先行半球に15倍～100倍衝突しやすい (Zanhle et al 2001)
 - 衛星が非同期回転やPolar wanderでも起こしていない限りは、クレーター密度につよいダイコトミーがおきる
 - ガニメデでは実際に4倍程度の差が生じている
- 二次インパクトター
 - **強い半球集中は起こさない。**
- 半球集中があれば、太陽中心軌道由来インパクトターが主要であることを示唆する

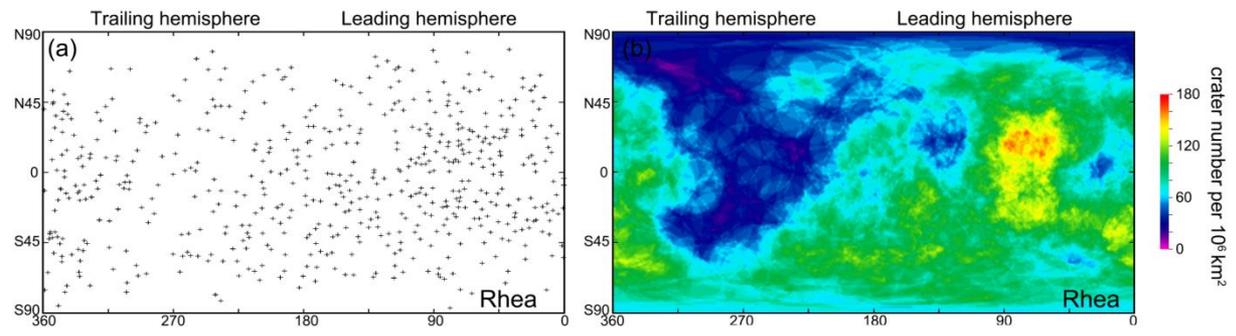
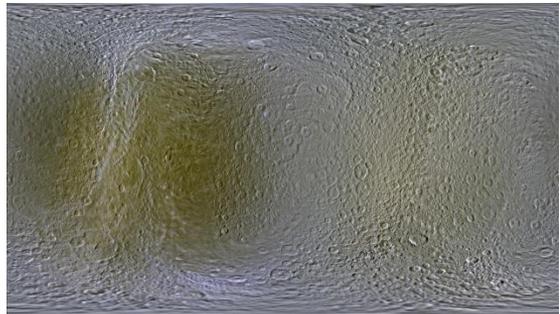
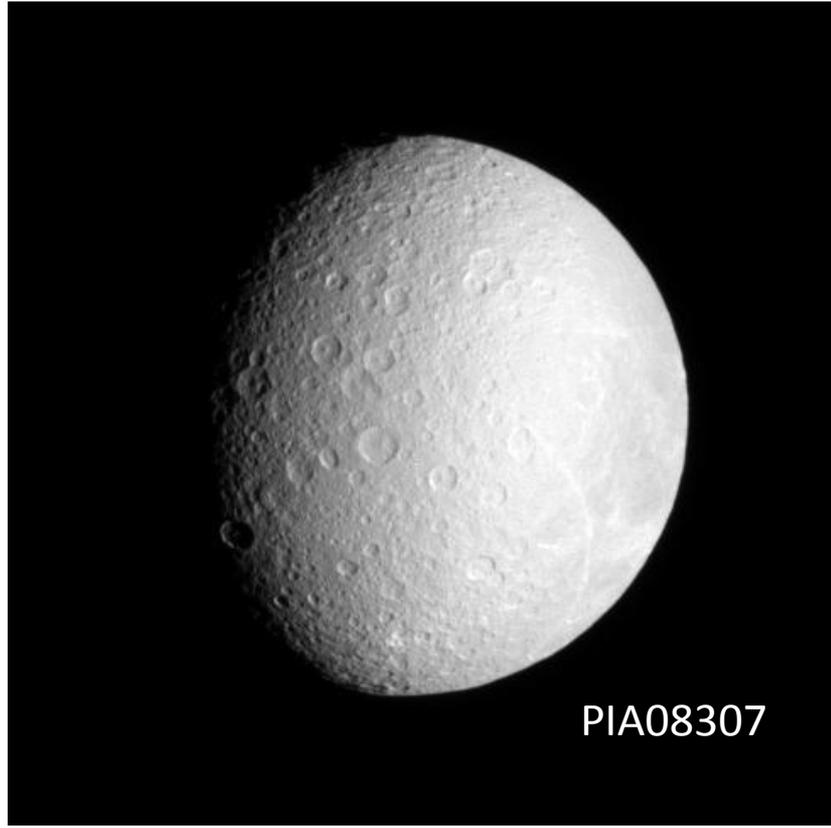


クレーター調査

- カッシーニが撮影した画像を使用して、
- 土星の主要な衛星を調査した
- 土星の衛星はほぼどこでも1km/pixel以上の解像度で画像が得られている。
- 直径15km以上のクレーターなら、ほぼすべて見つけ出せる
- 位置と直径の計測を行う。
- 合計5000個ほどのクレーターを認めた
- DioneとTitanは公開されているクレーターデータベースがあるので、それも利用した。

• Rhea

- 調査にあたって最適な天体
 - 地質学的な活動の痕はなし
 - 新しい巨大衝突盆地もない
 - 面積もクレーター数も大きい
 - 100%の領域が1km/pixel以上の解像度で得られている
- 2500個のクレーターを認めた。

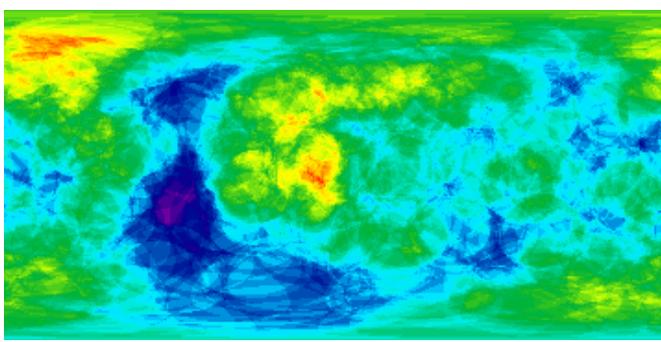


D > 30kmの位置

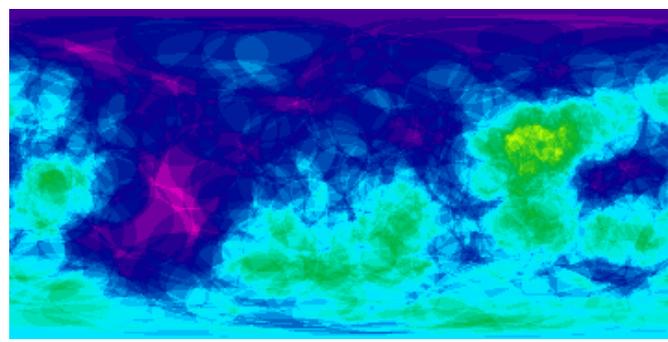
D > 30kmの数密度分布

D > 30 km のサイズでは、半球集中が明瞭に認められる。

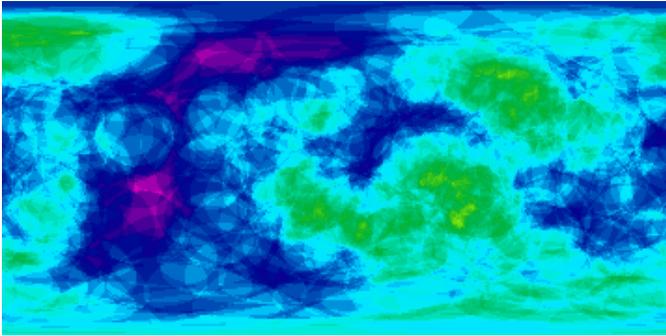
20 > D > 15



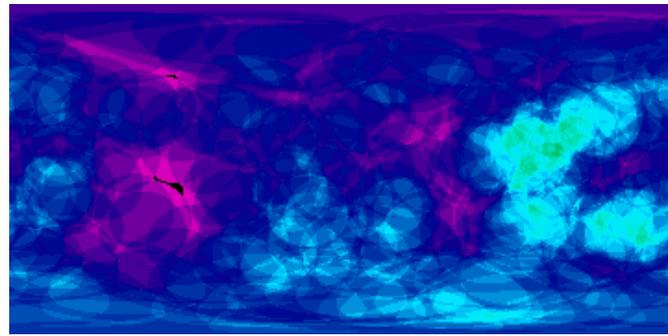
30 > D > 50



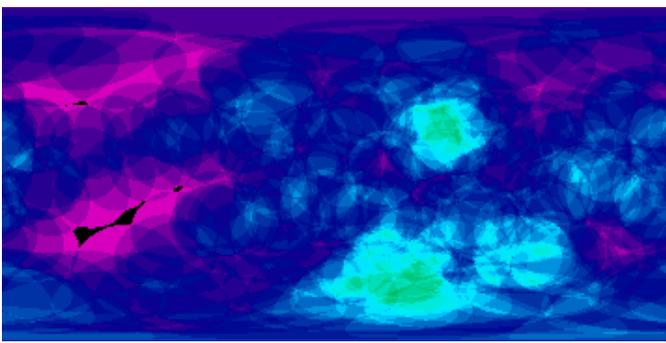
25 > D > 20



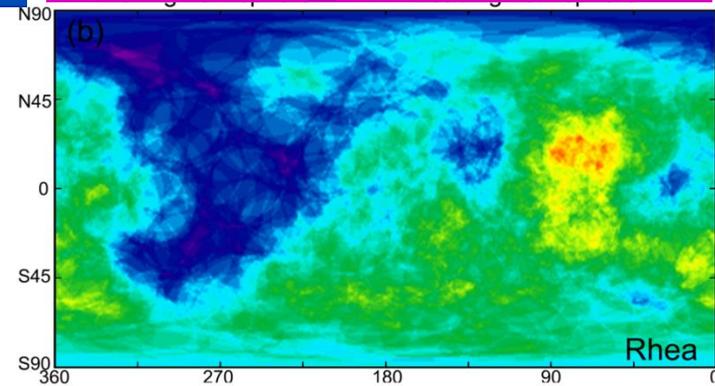
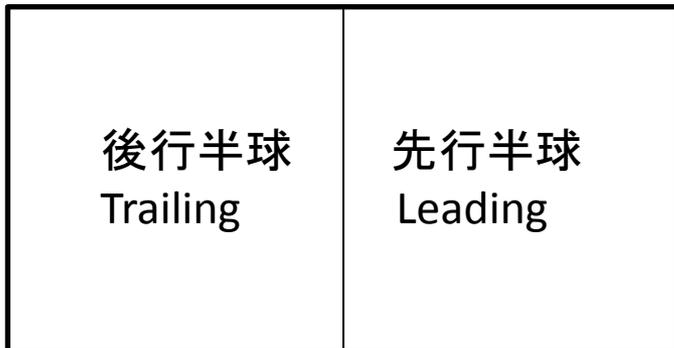
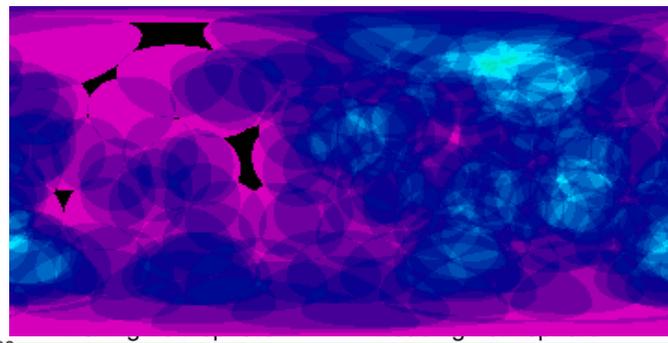
40 > D > 30



30 > D > 25



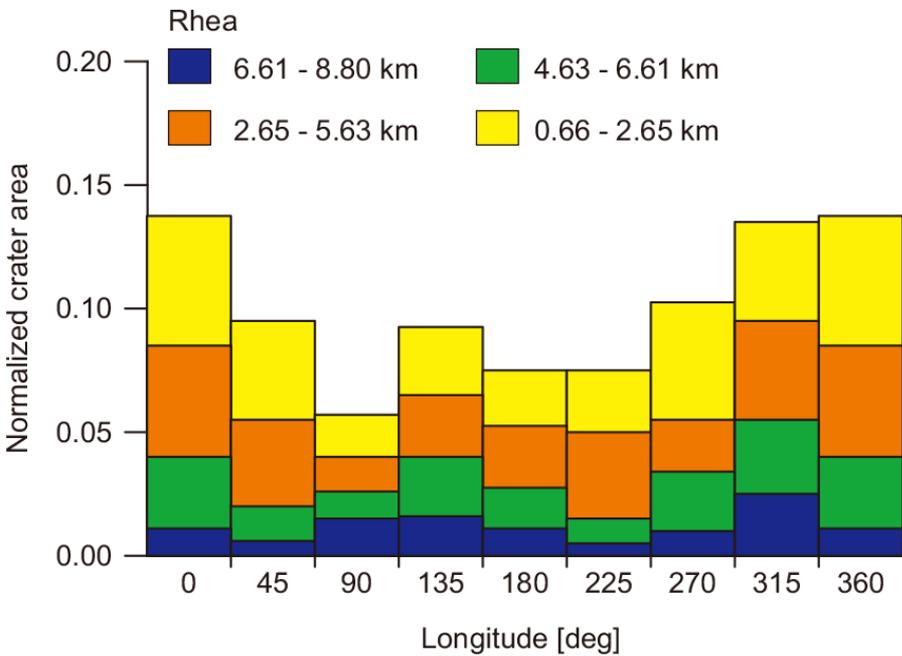
450 > D > 50



crater number per 10⁶ km²

180
120
60
0

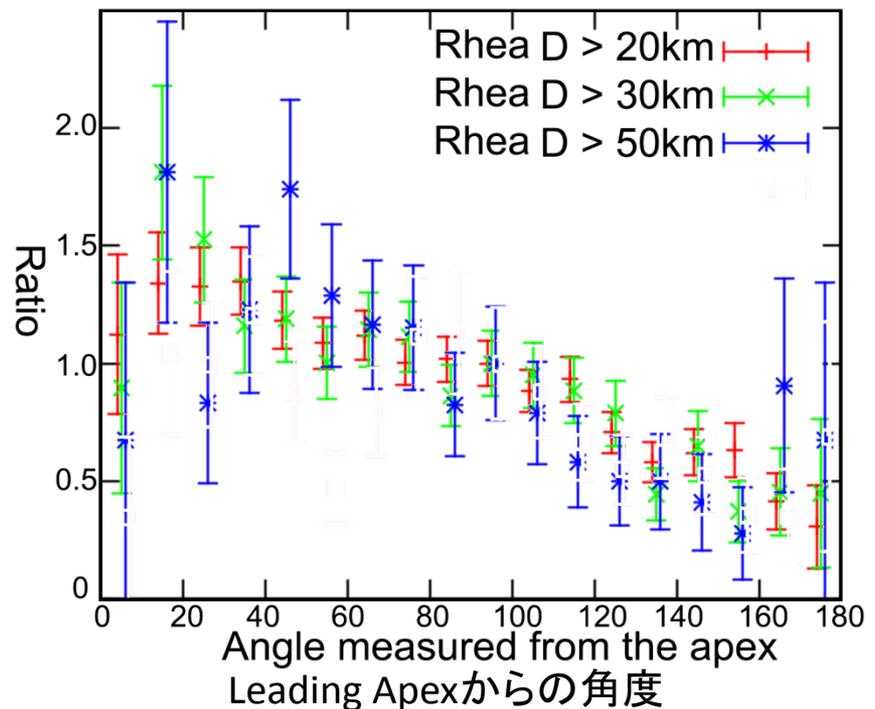
450 >
D > 30



15km以下のクレーターの全球分布調査は難しい。
Leliwa-Kopystynski et al. (2012)によって部分的な
密度調査がされており、半球集中がないことを報
告している

Rheaの場合

- $D < 20$ kmに半球集中なし
- $D > 20$ kmに半球集中あり
 - 最大10倍程度の密度差がある



縦軸 90度を1としたときの密度

↑
先行半球側

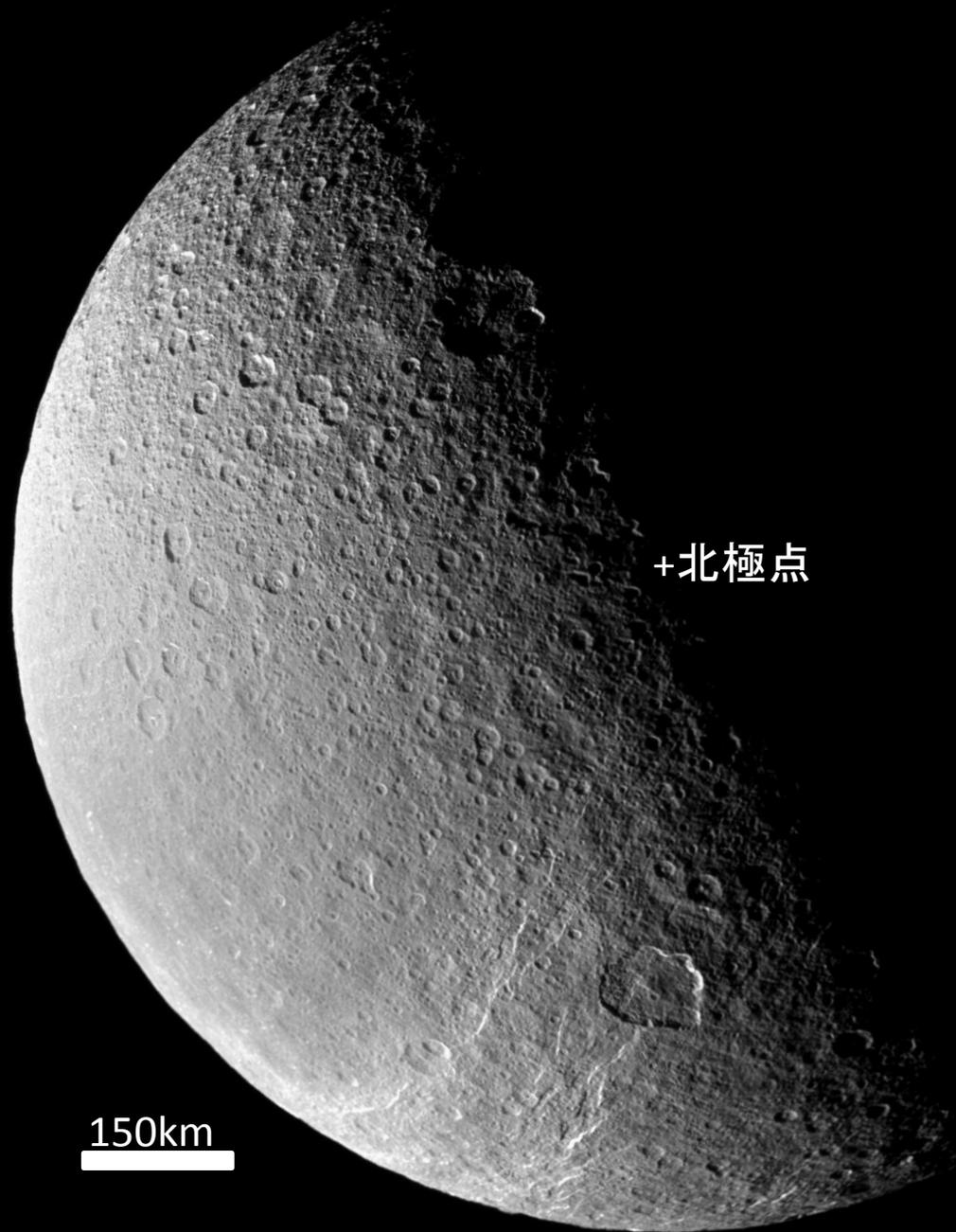
北極側から見た
レア

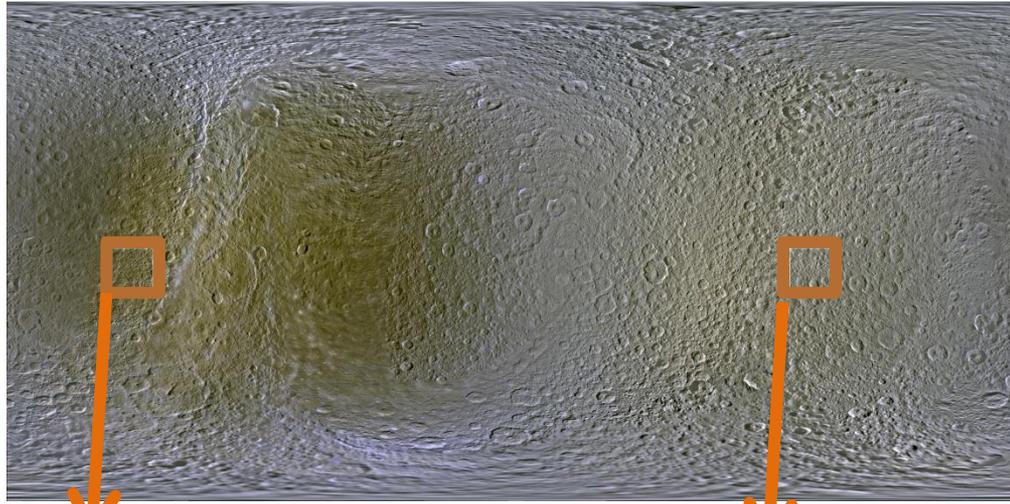
↓
後行半球

+北極点

150km

PIA11458

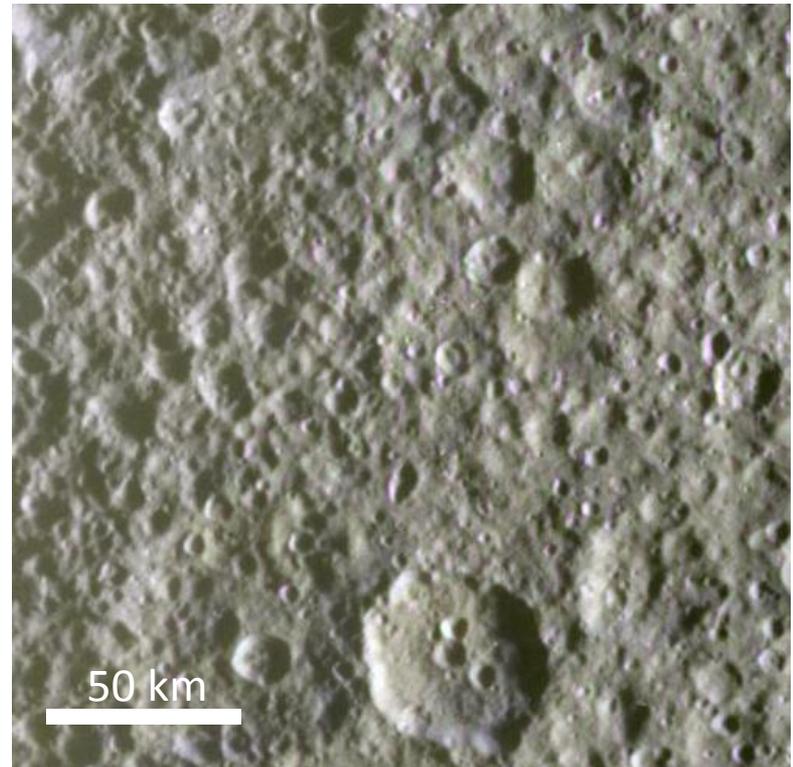
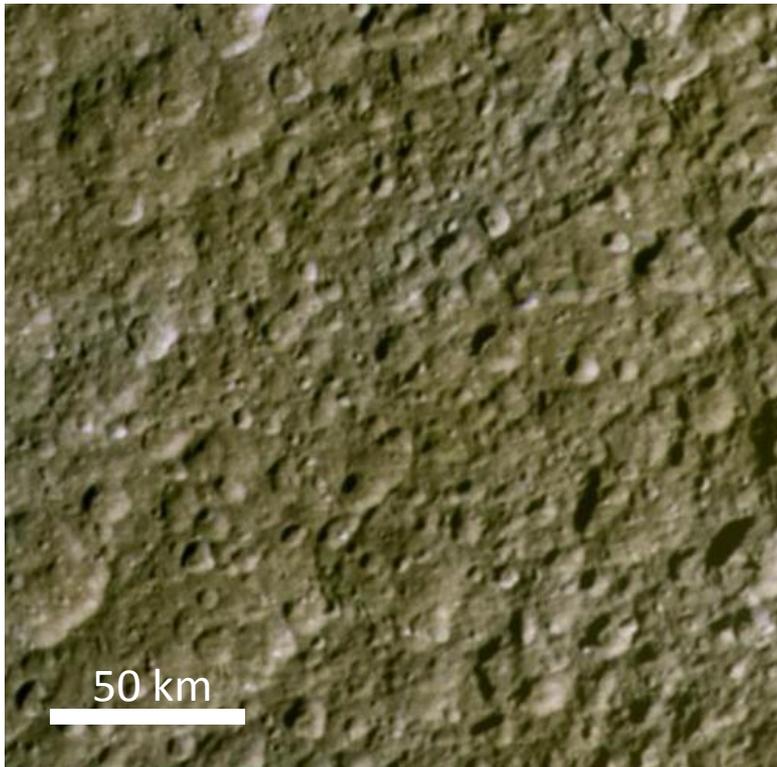




直径20km以上の
クレーターのみに
半球集中がある

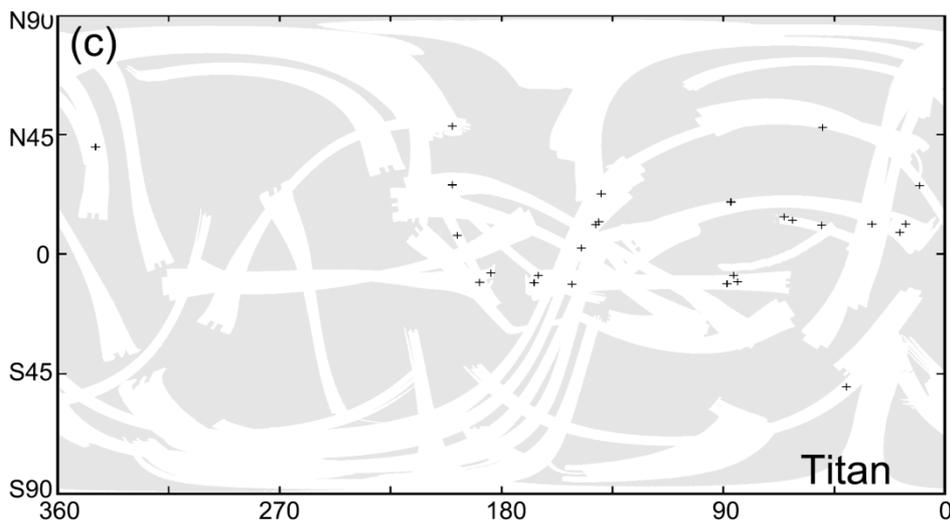
後行半球

先行半球



- Titan
 - 地質学的に活発で10億年以下の表面年代
 - 赤道域は砂漠地帯で、比較的古い
 - 大気があるため1km以上のインパクトは地表に達しない [Ivanov et al., 1997]
 - 50%の領域が1km/pixel以上の解像度で撮像
 - これまで60個のクレーター(445 ~ 3 km)が報告
[Buratti et al., 2012; Neish and Lorenz, 2012; Wood et al., 2010]

- 結果
 - $D < 20\text{km}$ には半球集中なし
 - 合計33個 18個対15個
 - $D > 20\text{km}$ には半球集中あり
 - 合計27個 L/T = 20対7個
 - 半球全体で3倍くらいの差



+ 20km以上のクレーターの位置
 灰色 画像の無い領域

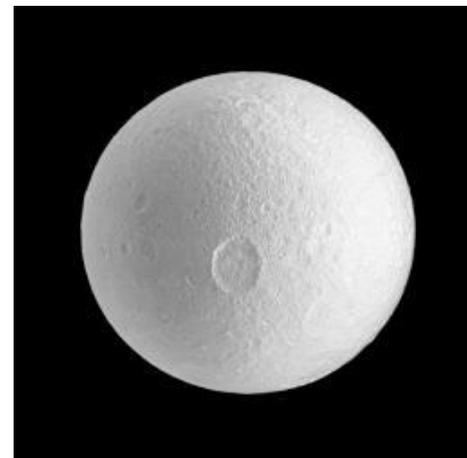
– ここまでの結論を述べると

– レア・タイタンには

- 20km以上のクレーターには密度差10倍の半球集中
- 20km以下のクレーターには半球集中なし

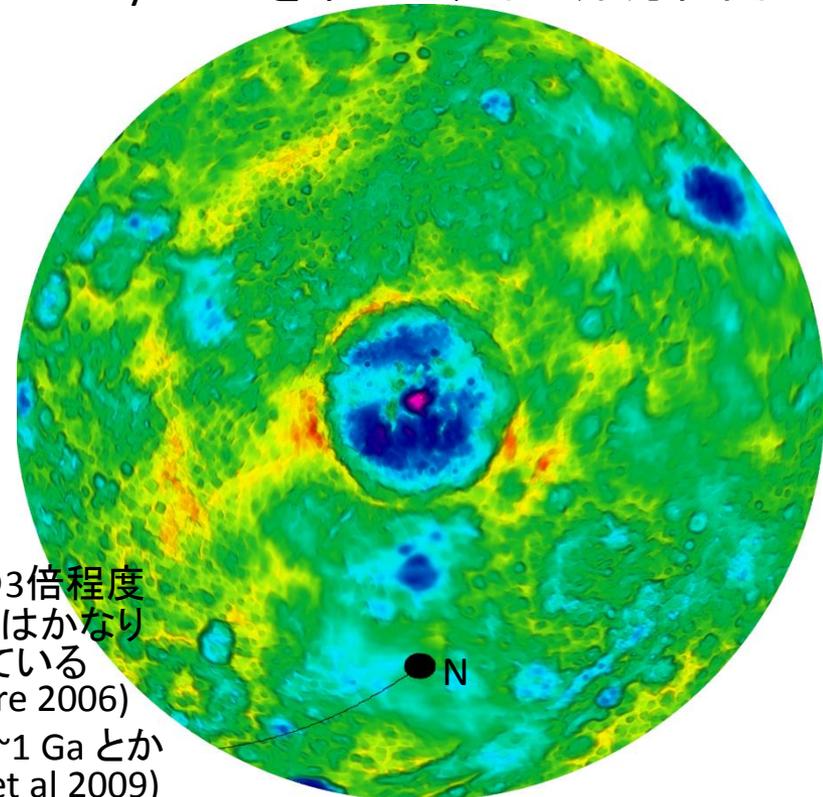
- Tethys

- 基本的には不活発だが
- Ithaca chasmaやOdysseus basinのような新しい構造帯・衝突盆地が存在している。
- 100%の領域が1km/pixel以上の解像度で得られている



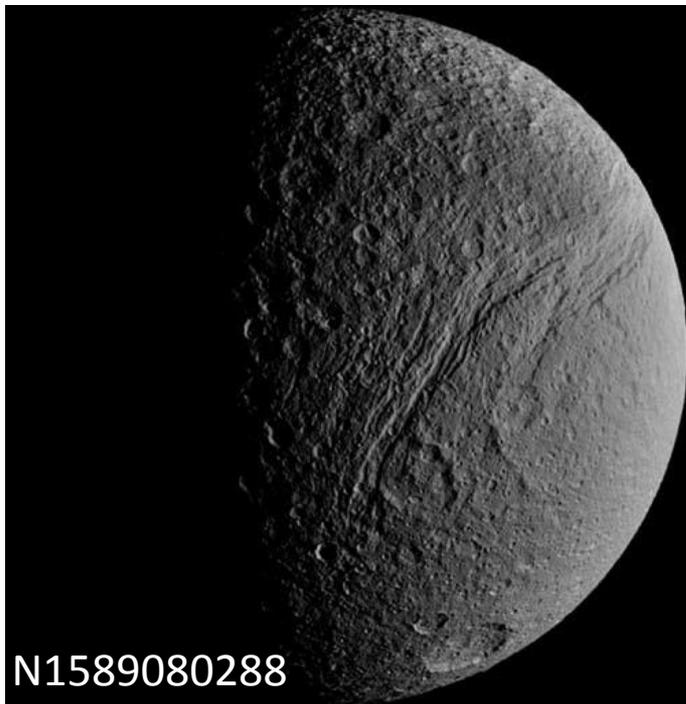
半径 531km
PIA11624

Odysseus を中心とする正距方位図



Ithaca Chasma
幅100km
年代はハッキリとはわかっていないが、クレーターがあまり無いことから新しいと考えられている

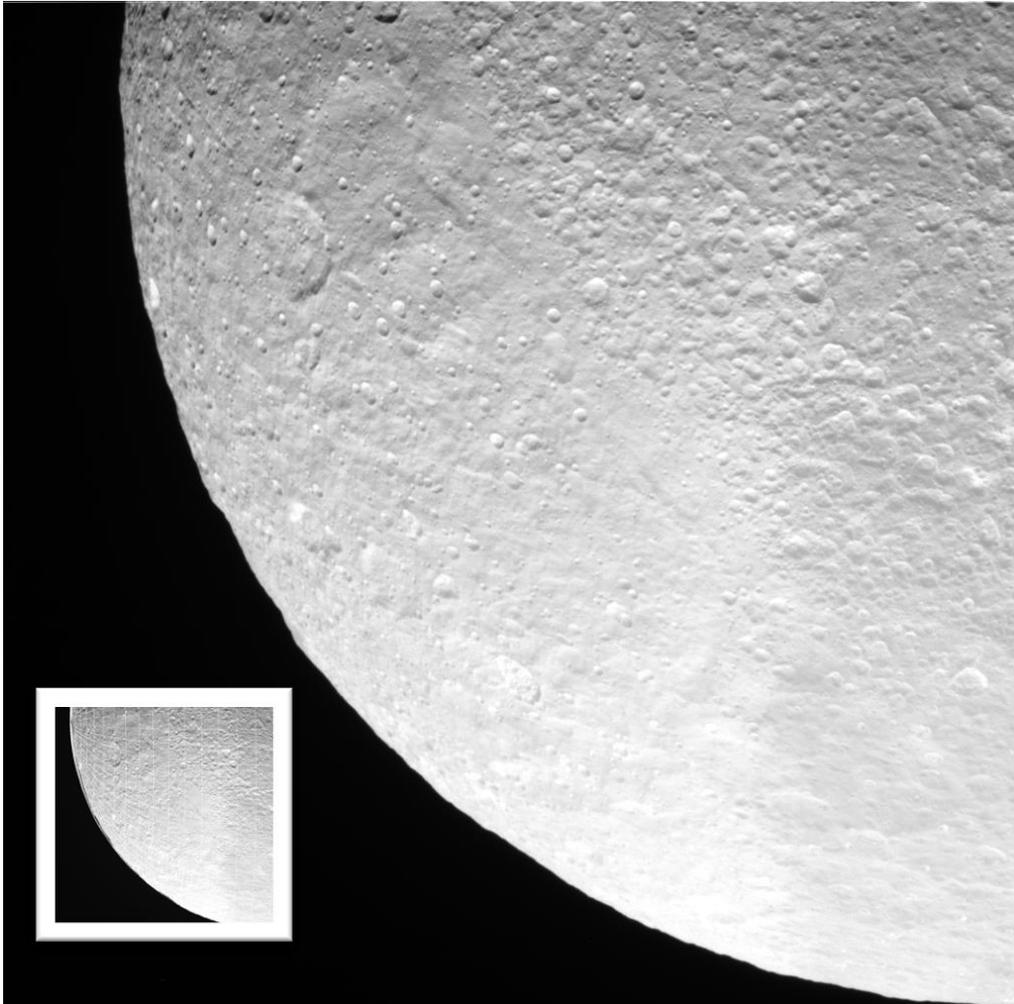
クレーター半径の3倍程度のところまで周囲はかなり広範に破壊されている (Schenk and Moore 2006)
年齢はおよそ0.4~1 Ga とかなり若い (Dones et al 2009)



N1589080288

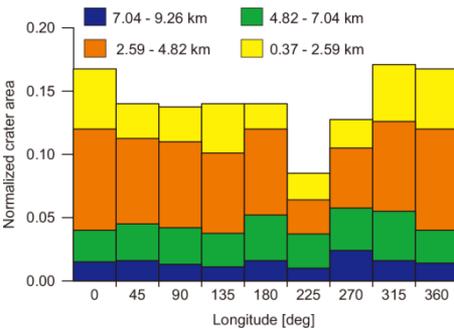
Tethys' south pole

N1567099348

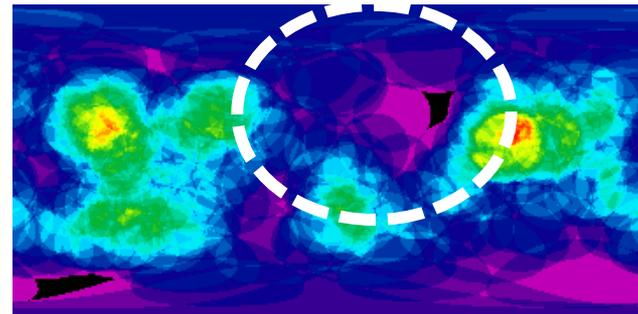


Tethys の南極付近にはクレーターがあまりない領域がある

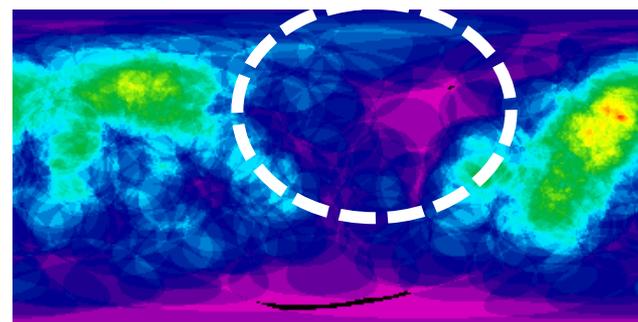
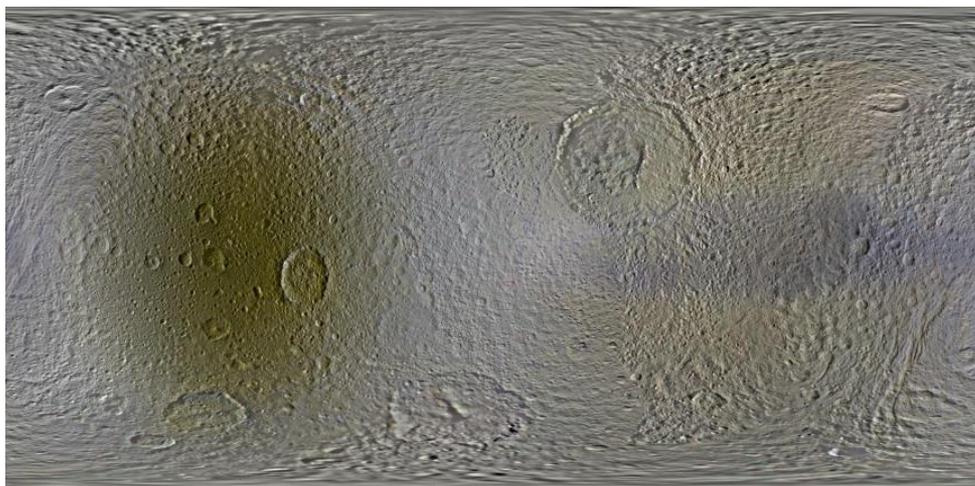
Tethys (Leliwa-Kopystynski et al. 2012)



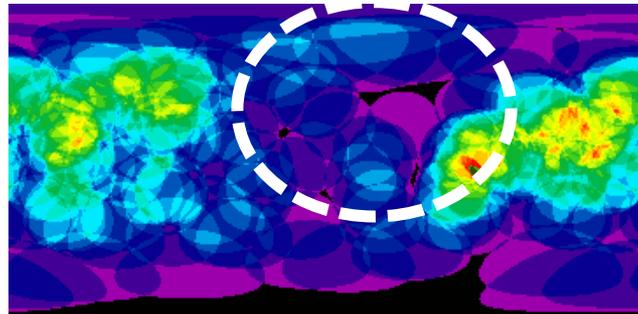
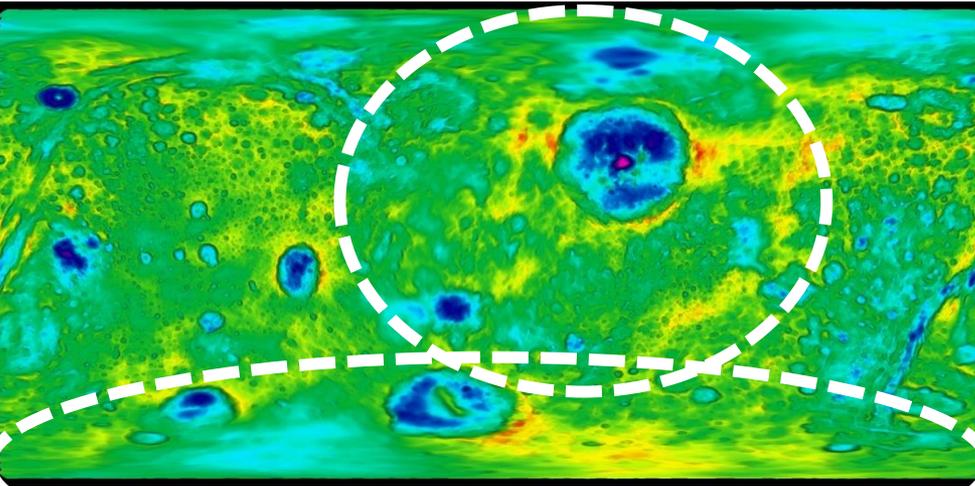
Odysseusの二次クレーターではないサイズ



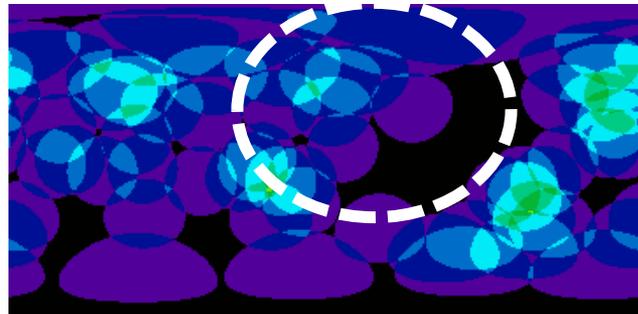
20 > D > 15



D > 20



30 > D > 20

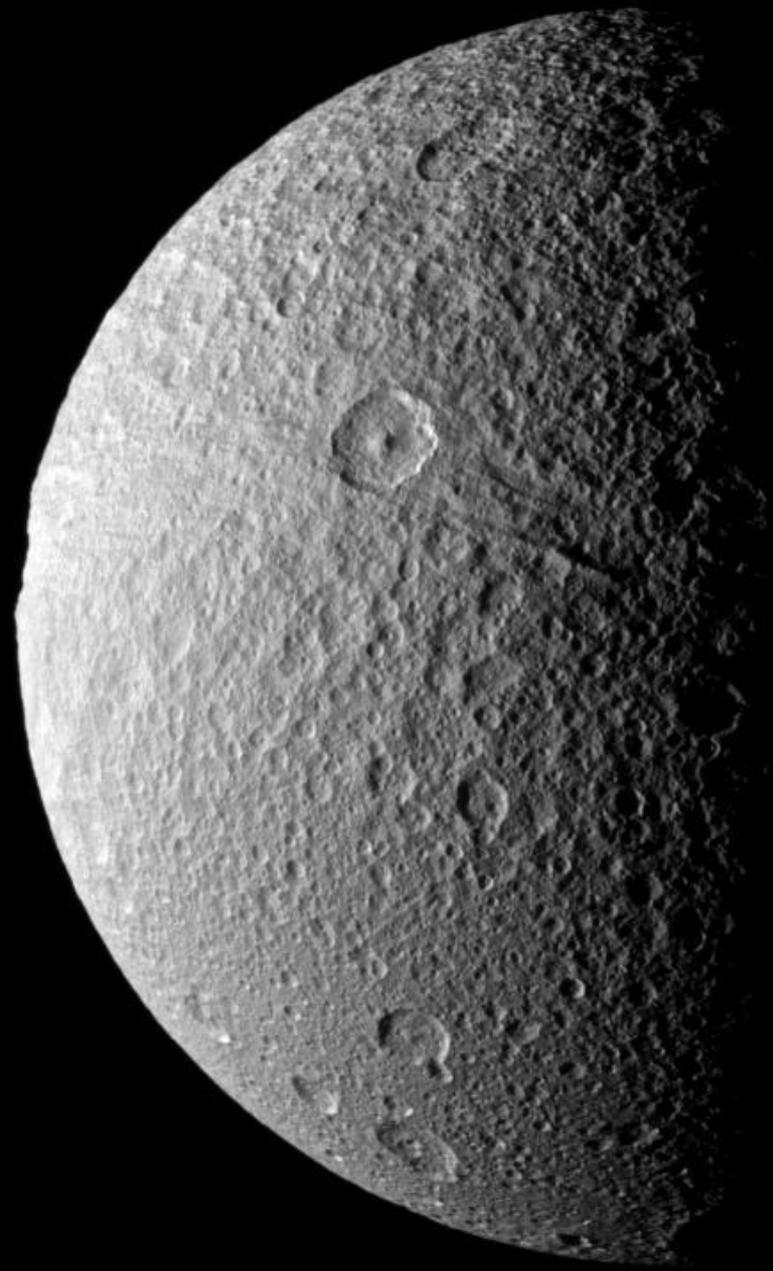


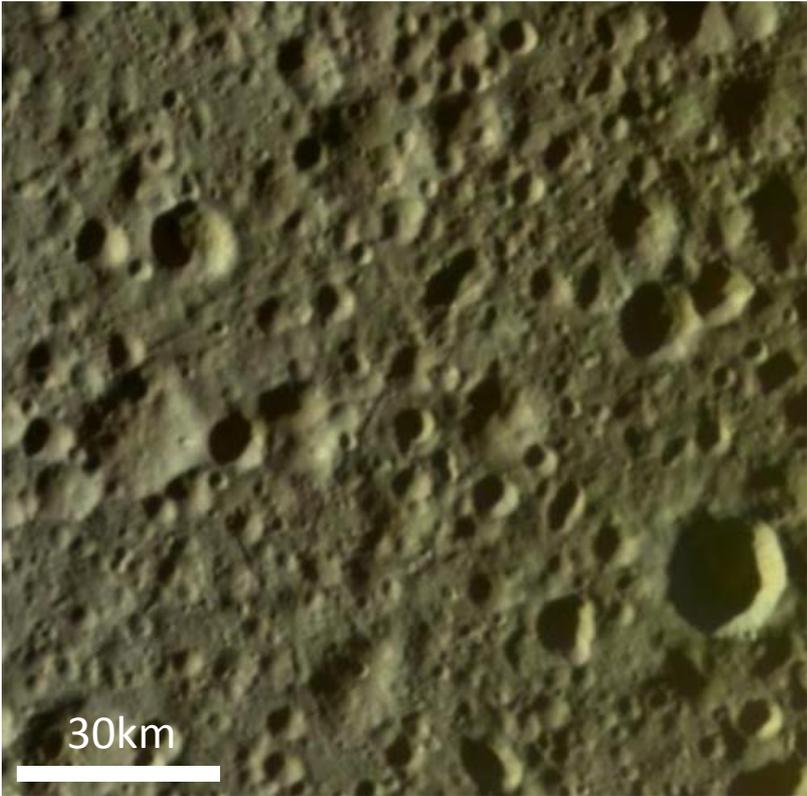
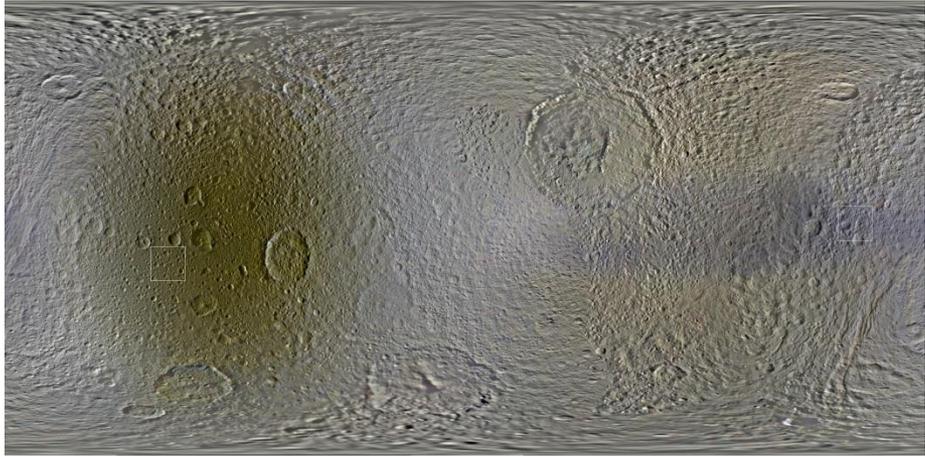
D > 50

↑
先行半球側

北極側から見た
ティティス

↓
後行半球



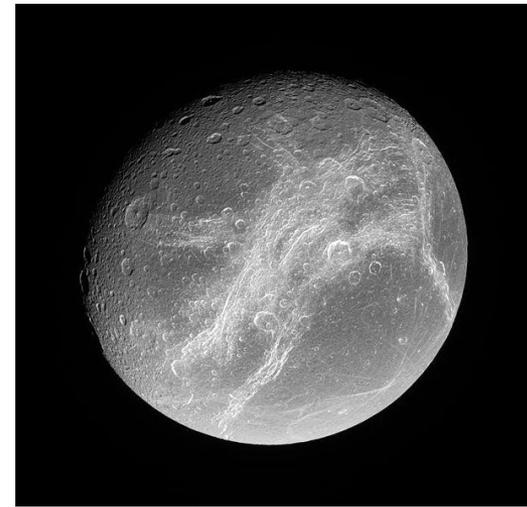


• Dione

– かなり活発な活動の痕跡、若い衝突盆地がある

- Smooth plain, Evander basin など

– 100%の領域が1km/pixel以上の解像度で得られている



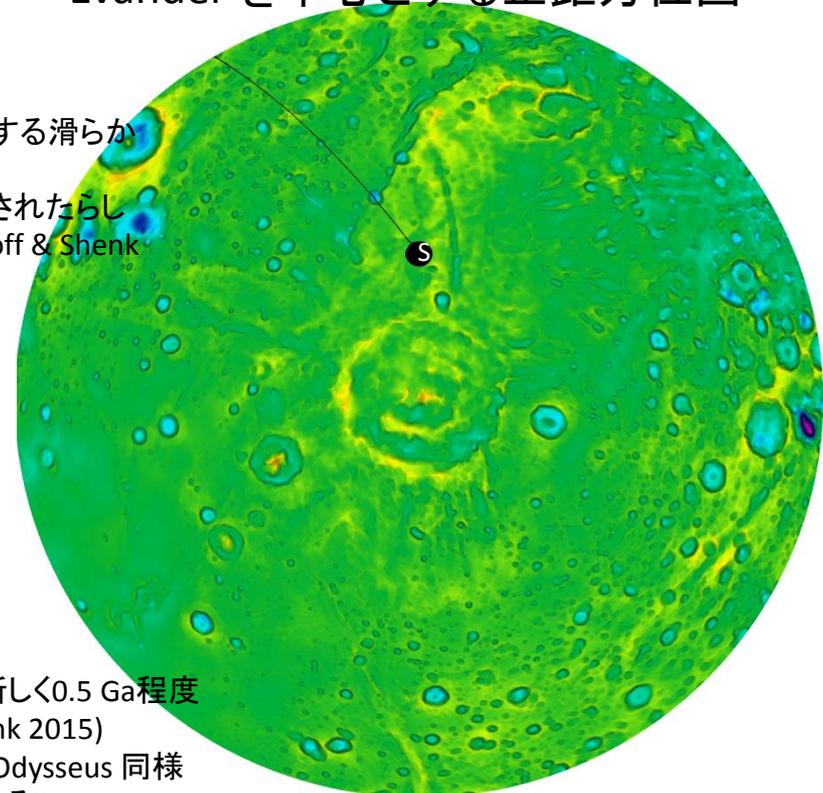
Dione
半径561km

Evander を中心とする正距方位図



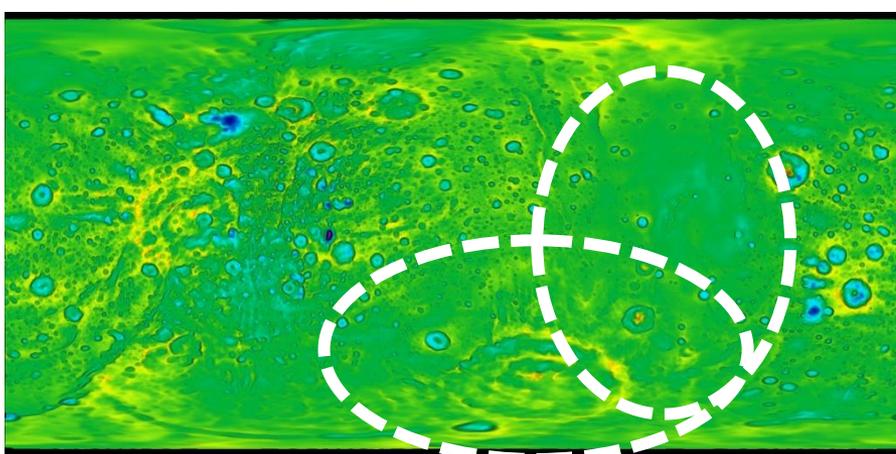
Smooth plain

先行半球側に存在する滑らかな領域
一度全面的に更新されたらしい (~1.7 Ga) (Kirchoff & Shenk 2015)

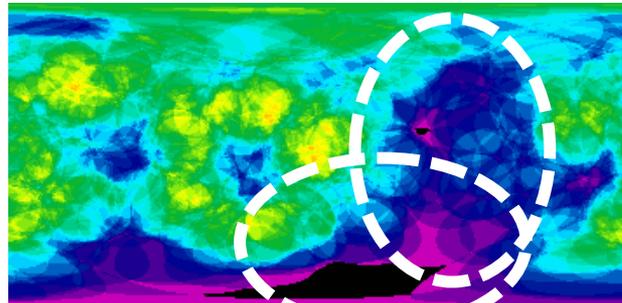
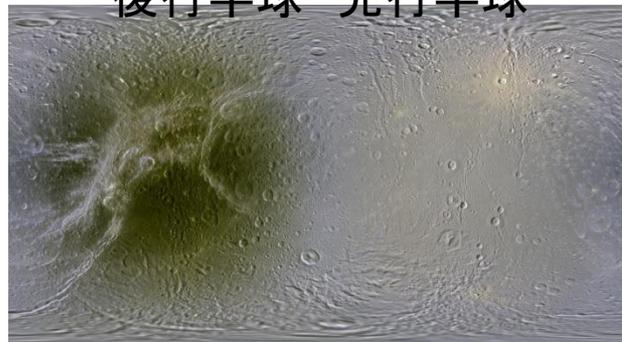


Evander basin

年代がかなり新しく0.5 Ga程度
(Kirchoff & Shenk 2015)
Evander周辺もOdysseus 同様に破壊されている?

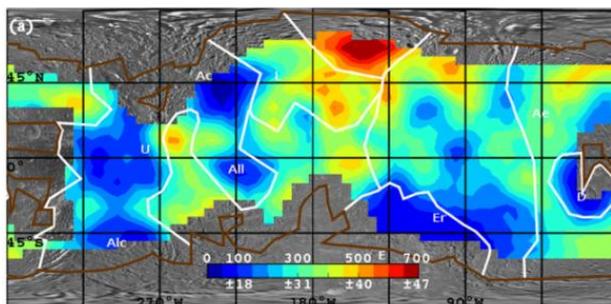


後行半球 先行半球

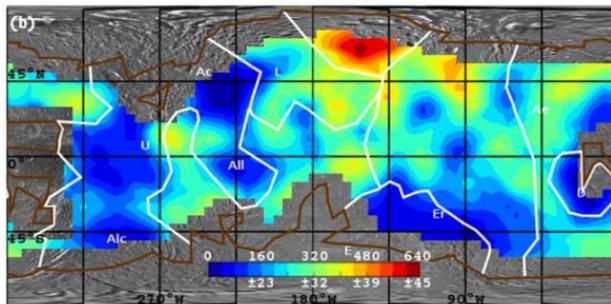


20 D > 15

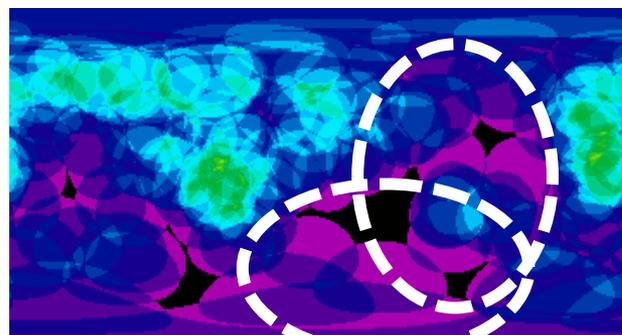
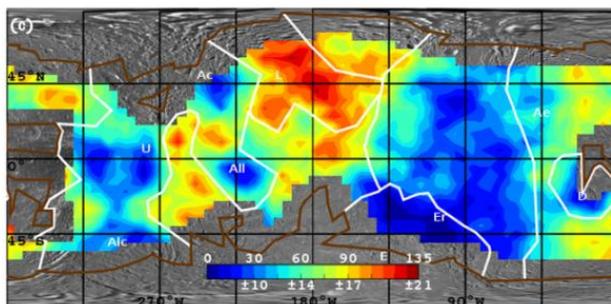
D > 10km



4 < D < 10

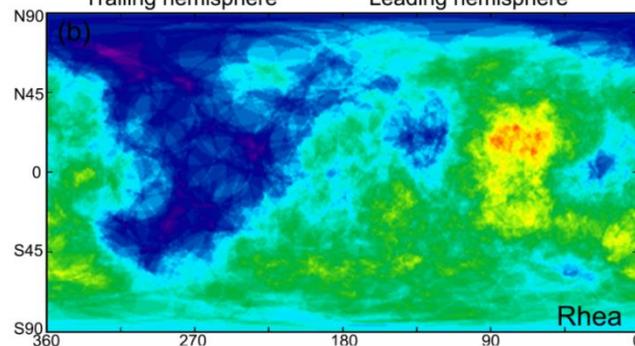


D > 4 km
(Kirchoff & Shenk 2015)



D > 30

Trailing hemisphere Leading hemisphere



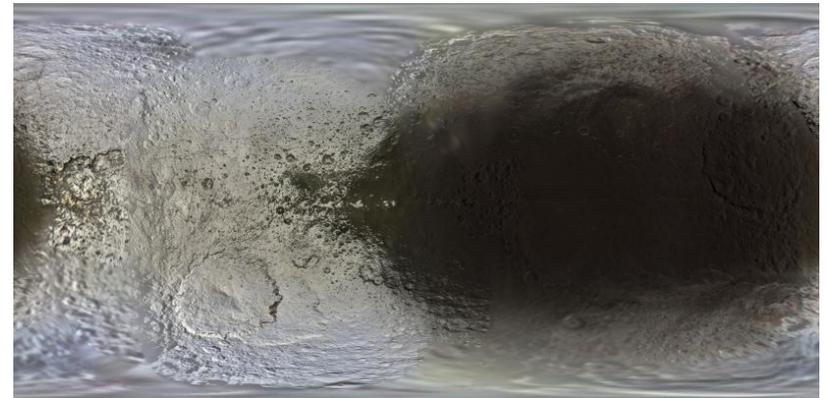
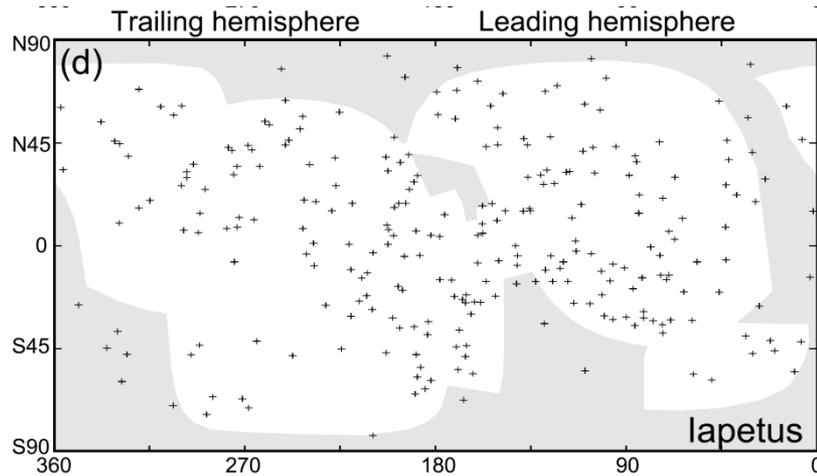
Rhea D > 30

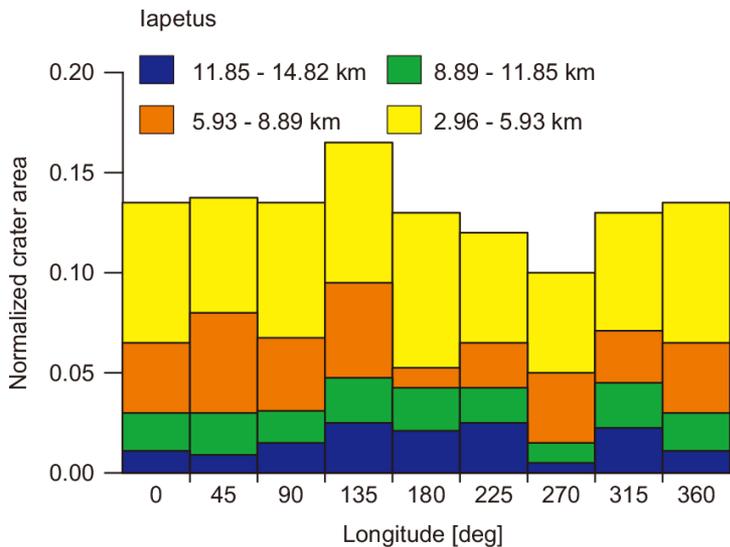
crater number per 10⁶ km²

180
120
60
0

- lapetus

- 直径743km
- タイタンよりもずっと遠い軌道を持つ
- レア同様に地質的な活動がない古い天体
- 78%の領域が1km以上の解像度で得られている

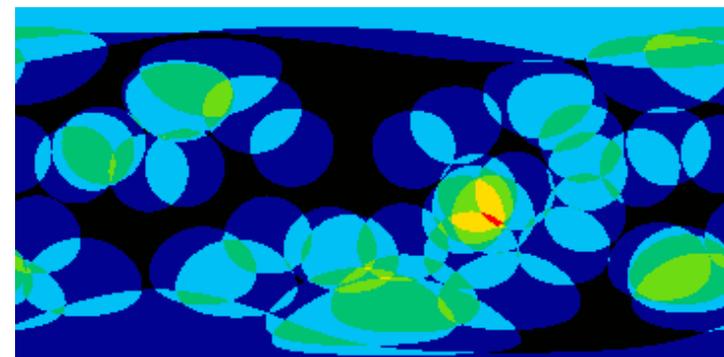
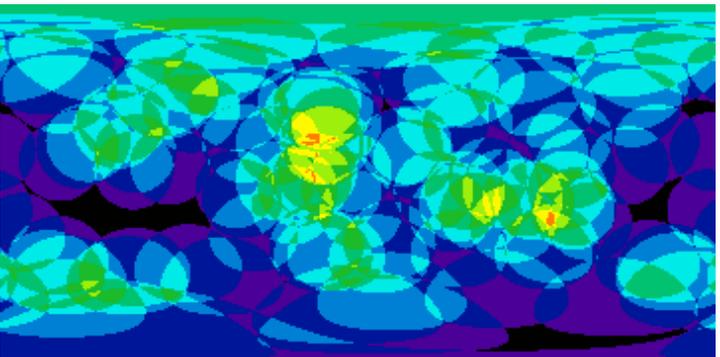
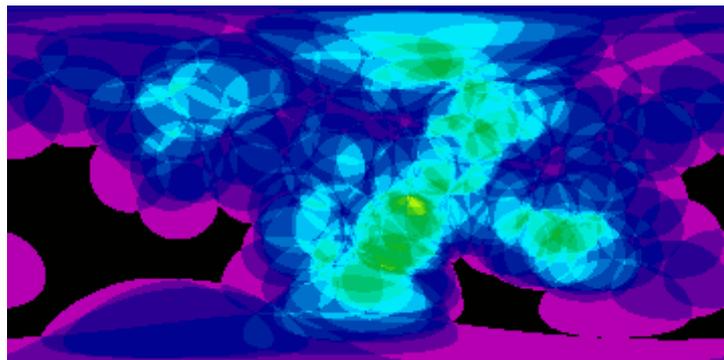
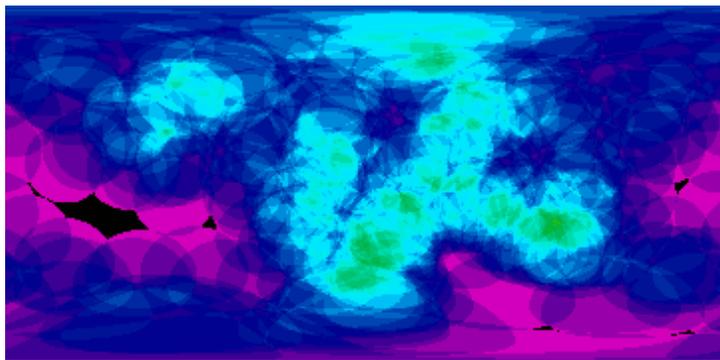




イアペタスでもLeading/Trailing の半球集中はある
 ただlapetus は巨大な衝突盆地が極めて多い

- $D > 300\text{km}$ の盆地が6個 (Rheaは2個)
- 基本的に盆地の分布を反映している

Leliwa-Kopystynski et al. (2012)によって部分的な密度調査がされているが、15km以下では明瞭な集中はない。



議論1 20kmの違い

– ここまでの結論を述べると

– 観測結果

- 20km以上のクレーターには密度差10倍の半球集中
- 20km以下のクレーターには半球集中なし

– つまり、

- 20km以上のクレーターは主に太陽中心軌道由来
- 20km以下のクレーターは主に惑星中心軌道由来

– なのか？

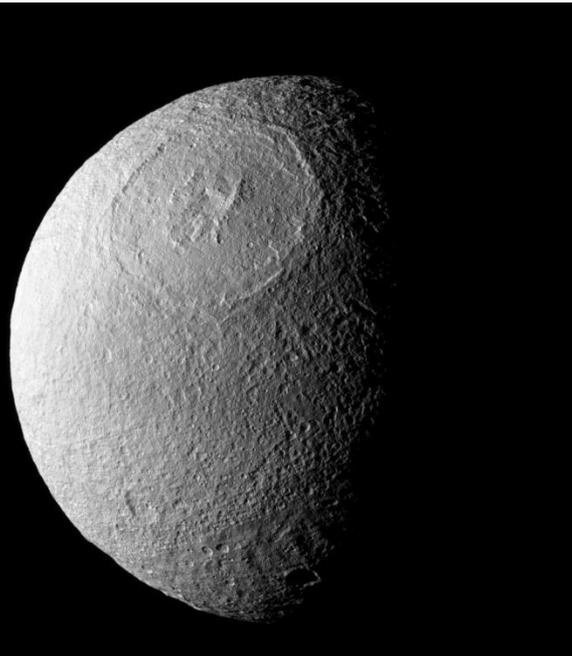
議論1 20kmの違い

$D > 20\text{km}$ で明らかな半球集中があるが、 $D < 20$ では集中はない。

- おそらくこの20km前後という数字には意味がある。
- 最大の二次クレーターは親クレーターの4%程度というのが知られている(Melosh 2011)
- 土星系の巨大クレーターは、300~500kmくらい。
- 衛星の破壊そのもの起きない限りは、直径20kmくらいが二次クレーターが上限になる
- 20km以上のクレーターで一次クレーター優位になるのだろう。

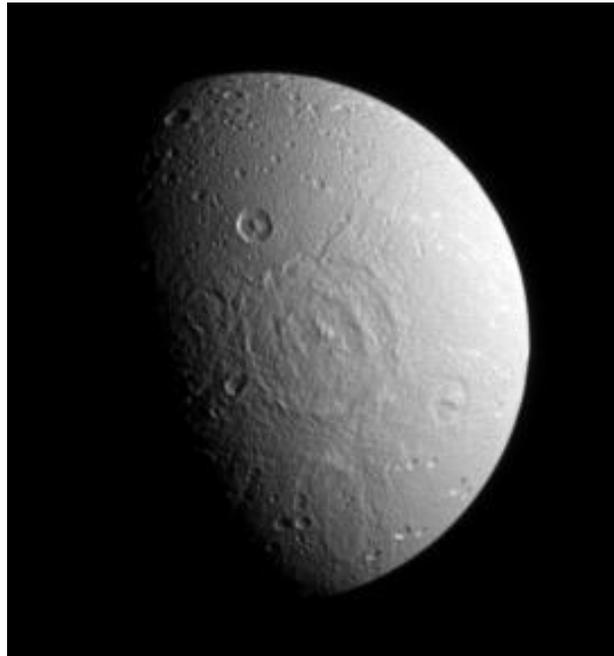
Odysseus Crater @Tethys

450 km in D PIA12588



Evander Crater @Dione

350 km in D PIA11456



Mamaldi Crater @Rhea

480 km in D PIA07686



議論2 先行研究との比較

- Voyager 時代の研究(e.g. Smith et al 1982)
 - Population I と II の二つの Impactor Population がある。

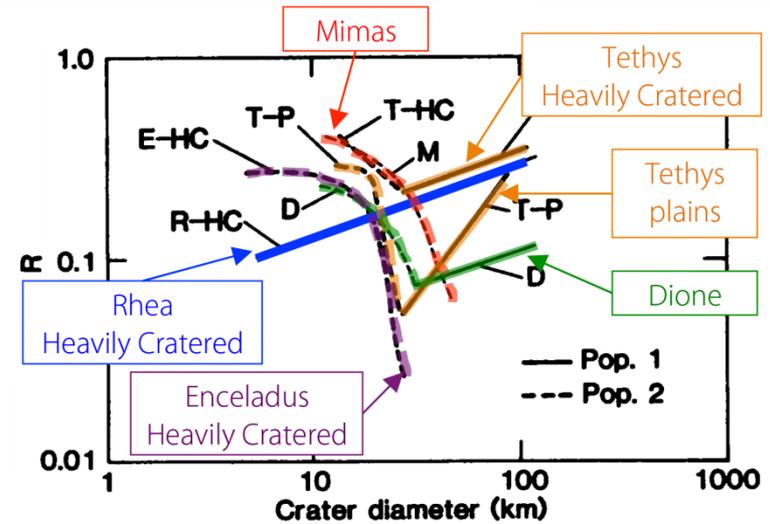
Population I

- 20km以上の大クレーターに富む
- 古い地域に特徴的
- 太陽中心軌道を持つ彗星等が起源

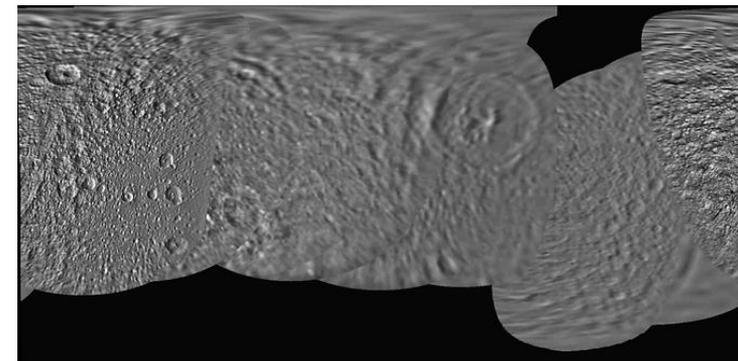
Population II

- 20km以上のクレーターが欠乏している
 - 新しい地域に特徴的
 - 二次クレーター由来
- 月の高地と海の関係に似ていると言われる

2014年氷衛星研究会での
諸田先生の発表スライドから

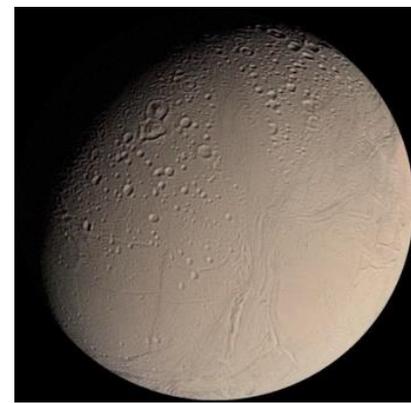


Voyager Map of Tethys



PI、PIIを代表するとされた
領域の違いは半球集中に
よって生じた？

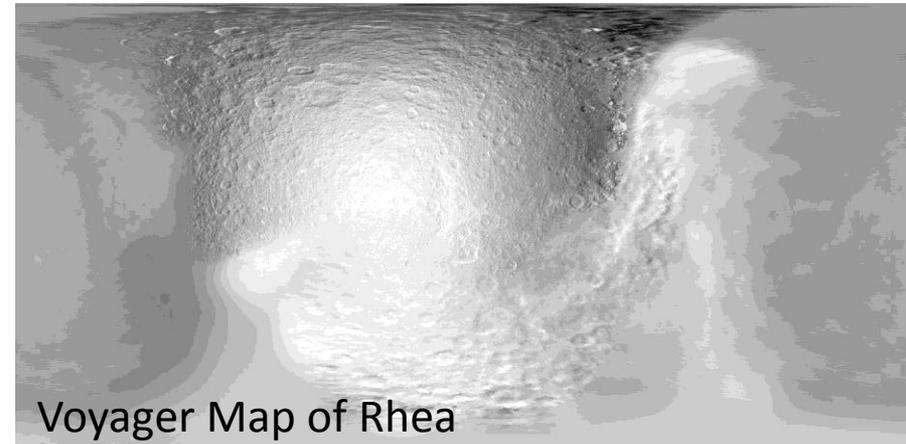
議論2 先行研究との比較



Voyager
Enceladus

先行半球

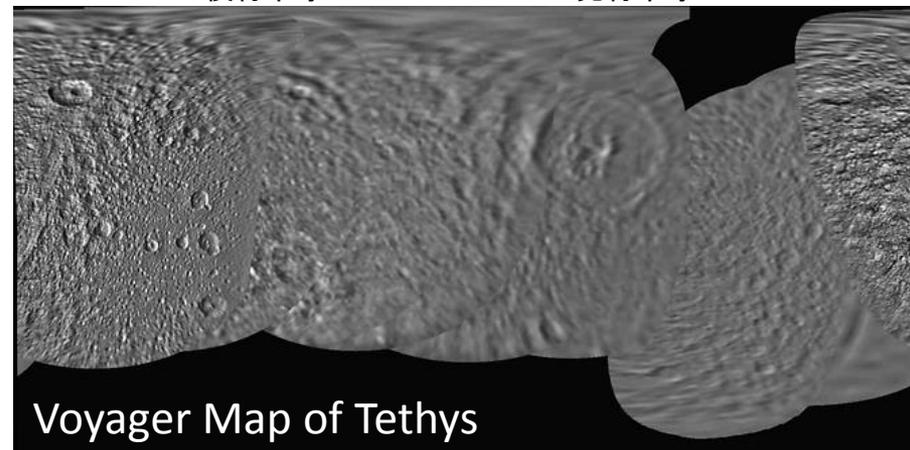
後行半球



Voyager Map of Rhea

後行半球

先行半球



Voyager Map of Tethys

- Voyager時代の研究では、
 - Population I は古く大きなクレーターを作った
 - Population II は新しく小さいクレーターを作った
- Population I とされた地域は、概ね先行半球側の領域を占める
- Population II とされた地域には、二種類含まれている
 1. 実際に新しい地域
 - Enceladus, Dione's smooth plain
 - 単に大クレーターが未蓄積
 2. 大クレーターができにくい領域
 - TethysあるいはRheaの後行半球
- 20km以上のクレーターは今でも作られ続けていると見られる。
 - タイタンのような10億年以下の年齢の天体でも半球集中がある
 - Evander Odysseus のような10億年以下の年齢の新しい巨大衝突盆地
 - そのためPI(太陽中心軌道をもつインパクトという意味で)は現役。

議論2

- 土星衛星の後行半球は、Smooth plainあるいはLess cratered terrain等と名前がついている
- これらは極端な半球集中の結果、衝突を経験していないと考えると整合的に説明ができる

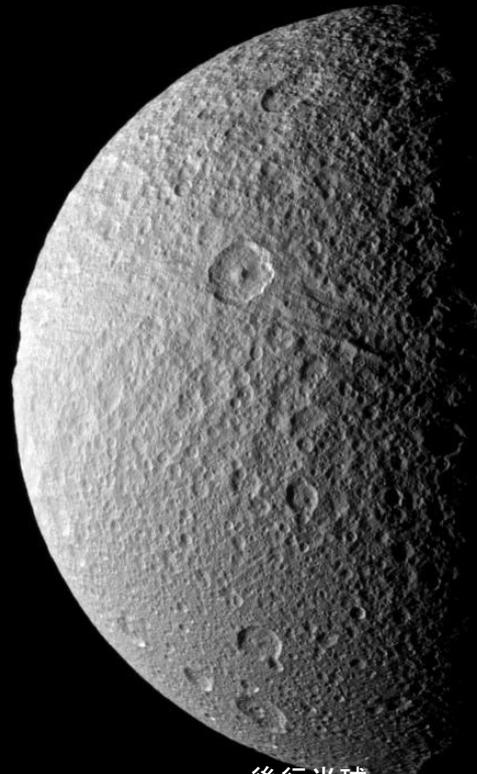
先行半球



後行半球
PIA11458

レア

先行半球



後行半球
PIA10570

テティス

先行半球



後行半球

PIA11565

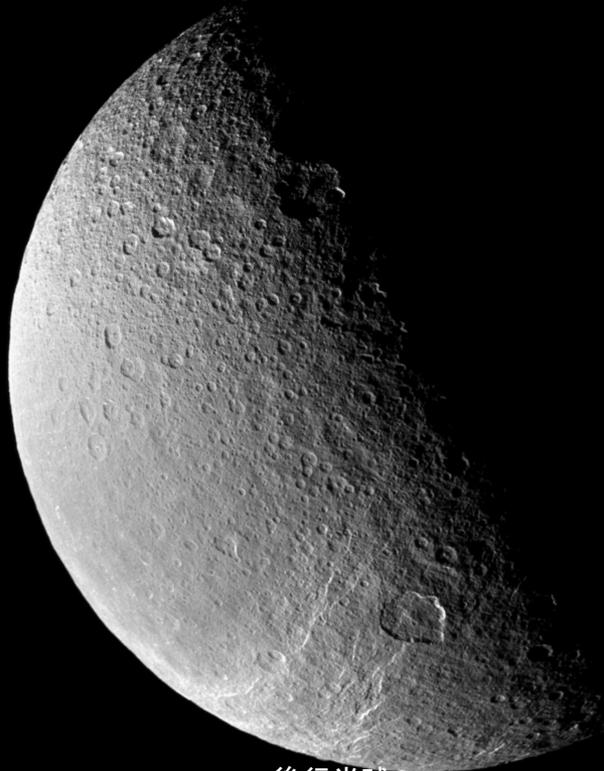
ディオオーネ

議論3

生成率からみたインパクト起源

- クレーター密度差ではおおむね10倍
- 先行半球側はクレーターが飽和しているが、後行半球側はそうではない
- おそらくクレーター生成率は10倍よりもずっと大きい

先行半球



後行半球

PIA11458

レア

先行半球



後行半球

PIA10570

テティス

後行半球

PIA11565

ディオオーネ

議論3 生成率から見たインパクトターの起源

- 半球集中の強さから、インパクトターの起源を推定できる
 - 土星との相対速度が小さいインパクトターほど、半球集中は強まる
 - 衛星の公転速度(10km/s) >> インパクトター速度 だったら半球集中大
 - 衛星の公転速度(10km/s) << インパクトター速度 だったら半球集中小
- 定量的に言うと、

$$\dot{N} \propto \left(1 + \frac{v_{\text{orb}}}{\sqrt{2v_{\text{orb}}^2 + v_{\infty}^2}} \cos \beta \right)^{2.8}$$

v_{orb} 衛星の軌道速度

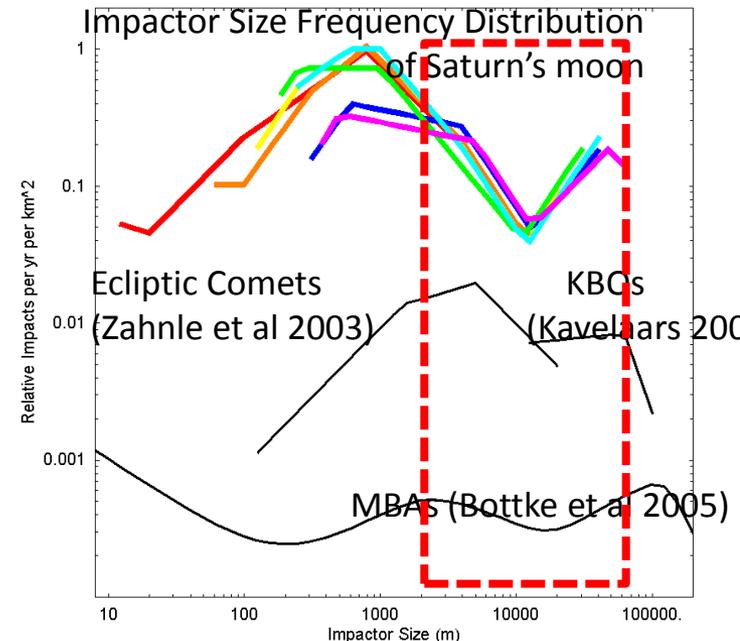
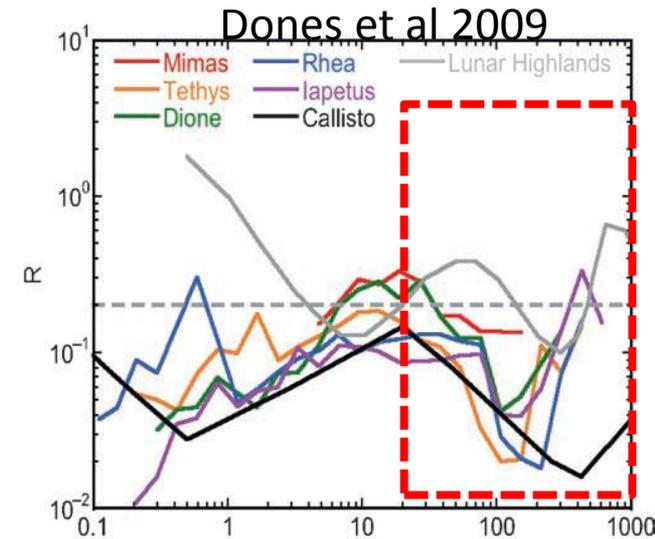
v_{∞} 衝突天体の惑星に対する相対速度

β 衛星のleading apexからの角度

- という式で与えられる。(Zahnle et al 2001)
- 土星や木星の衛星の場合、(Zahnle et al 2003)
 - 黄道彗星(ケンタウルス族やKuiper belt objects)
 - 相対速度は5km/s程度 衛星の速度は10km/s程度
 - 40倍近い密度差が先行半球と後行半球に生じる。
 - Isotopic comet (オールトの雲からくるような彗星) およびメインベルト小惑星
 - 相対速度は20km/s程度
 - 8倍程度の密度差が先行半球と後行半球に生じる。
- 主要なインパクトターは黄道彗星(ケンタウルス族やKBOs)であることが示唆される

議論4 ケンタウルス族かKBOs

- サイズ頻度から推定できる
 - 本研究で20km以上のクレーターは、一次インパクトと考えるとよいことがわかった
 - 1. ケンタウルス族は150km以上のクレーターはかなり難しい(Zahnle 2008)
 - 2. カイパーベルト天体はより大きなクレーターが作れる
-
- 実際のCSFDは150km以上のクレーターがほとんどないことを示唆している。
 - 実際に僕がカウントした限りでも150km以上のクレーターは極端に少なかった
 - 直径20km ~150km はケンタウルス族由来を示唆している
 - Mintonらが言う150km 以上はKBOなのかどうなのか？ → 数が少なすぎて不明



Minton et al. 2012より

全体のまとめ

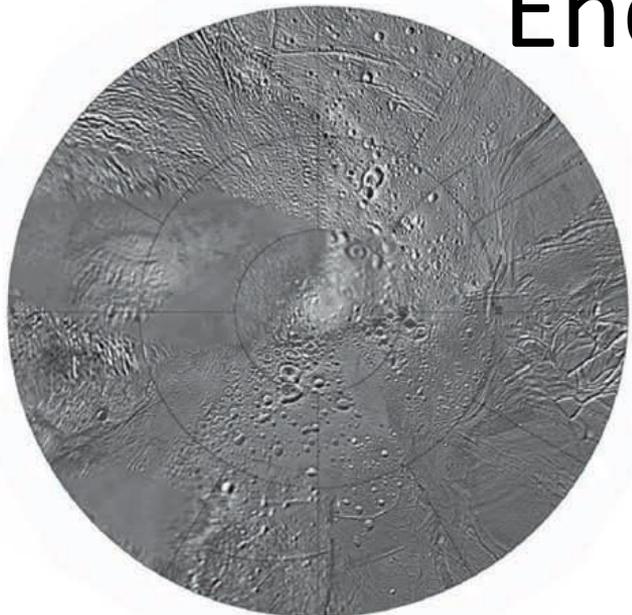
土星系の主要インパクトターは？

半球集中やCSFDから

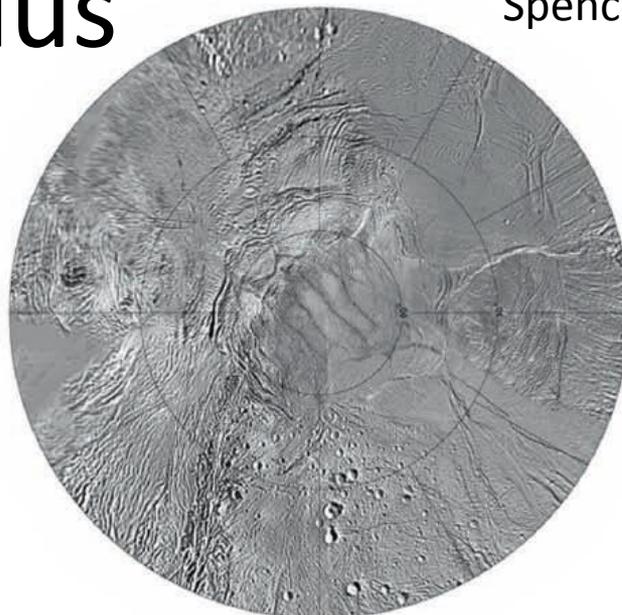
- $D < 20\text{km}$ 二次クレーター由来
- $D > 20\text{km}$ ケンタウルス族由来
 - ただし遷移する大きさは天体で差がある可能性がある。特にlapetus
- 20km以上のクレーターをつかって年代を考える上で、後行半球と先行半球にある構造ではかなり差が出るはず。
- 内側太陽系と異なり、形成年代に違いはない

Enceladus

Spencer et al 2009

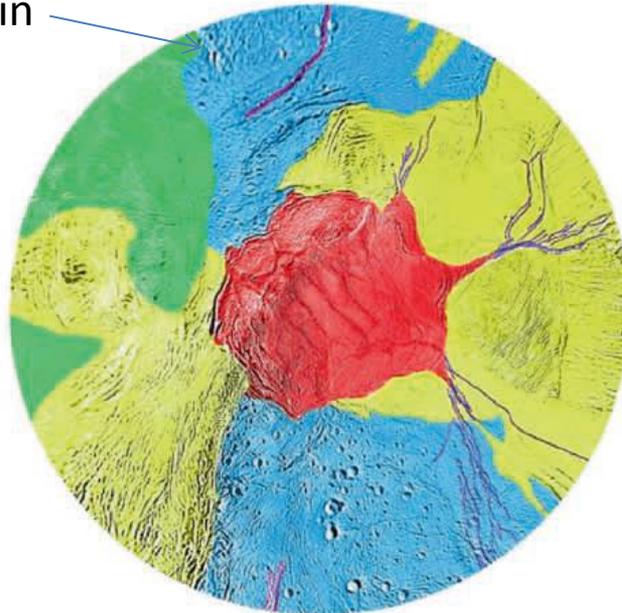
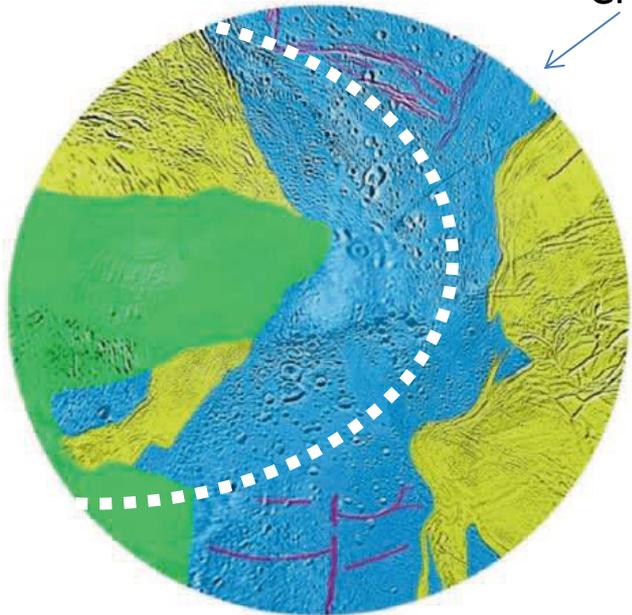


北半球

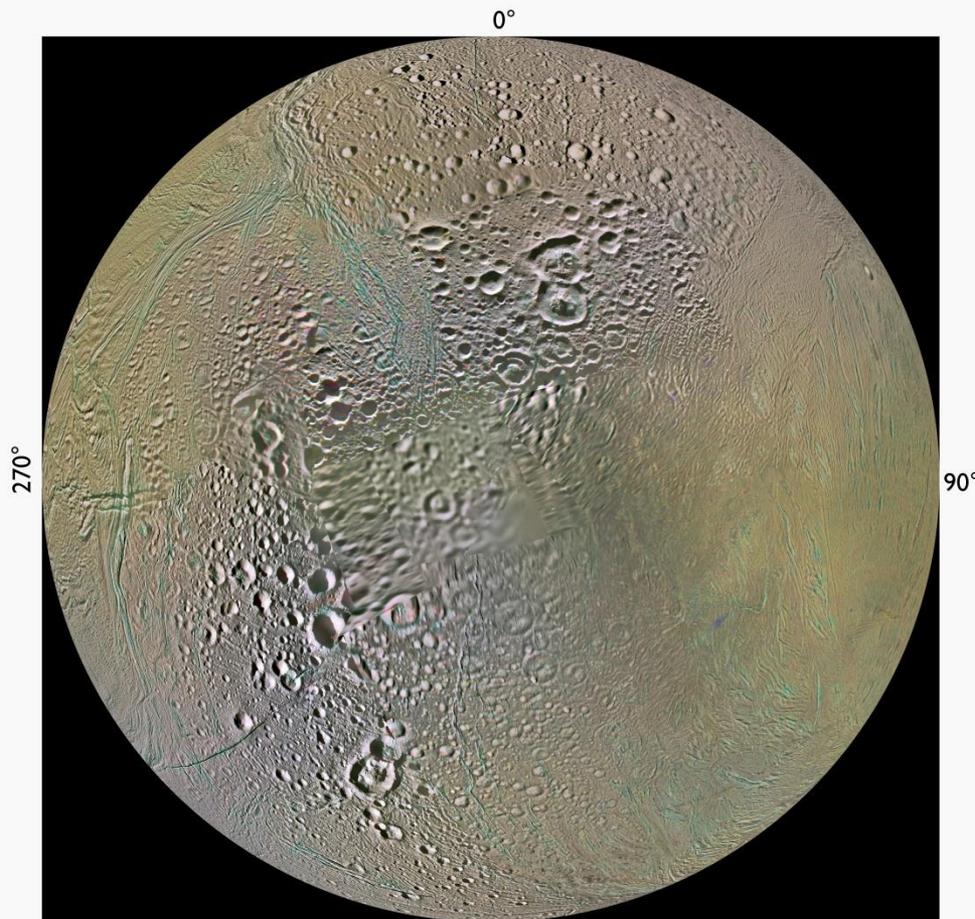


南半球

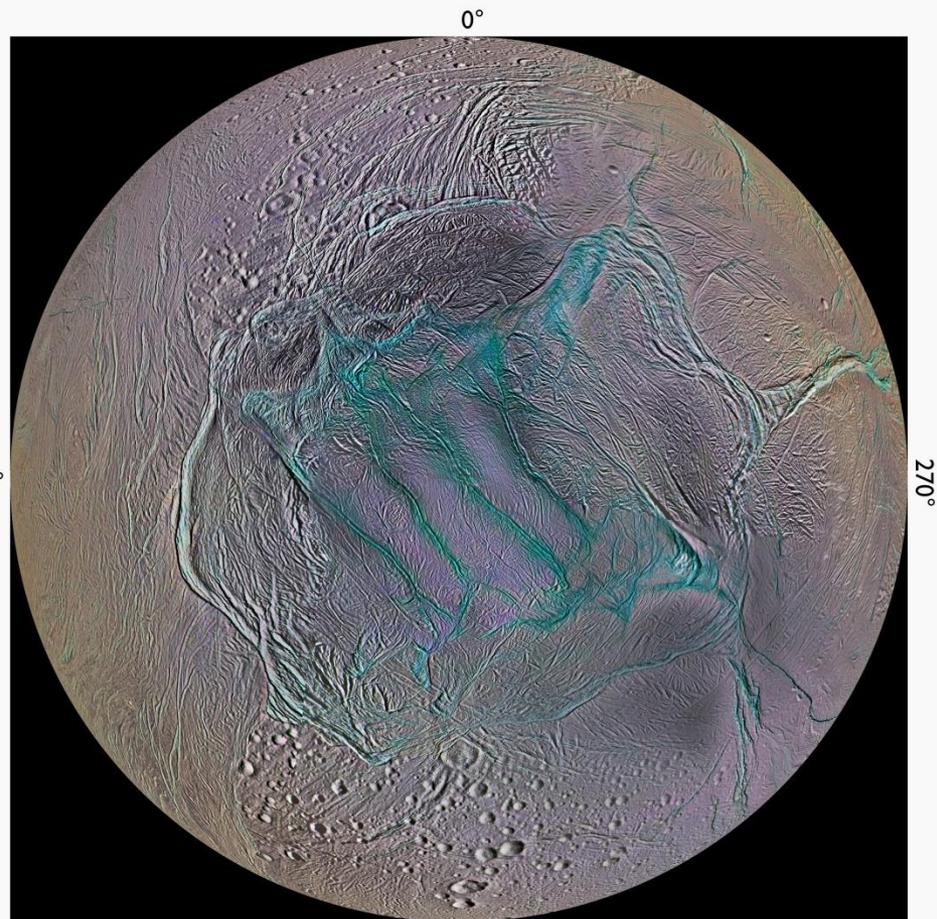
Cratered terrain



エンセラダスには半分ほどクレーター領域が残る。それらの分布はPolar wanderを示唆するかも



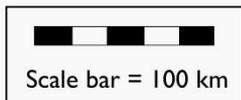
Northern Hemisphere
Orthographic map projection at 100 meters/pixel



Southern Hemisphere
Orthographic map projection at 100 meters/pixel

Global 3-Color Map of Enceladus (IR3-GRN-UV3)

April 2014



Cartographic control and digital mosaic construction by Dr. Paul Schenk (LPI, Houston)
Cassini ISS images acquired 2004-2014

