

土星系小型衛星の表層進化

平田直之

東京大学 総合研究博物館

宮本英昭研 博士2年

小型衛星は面白い！

理由は二つ

土星の衛星として

小型衛星は

1. 大衛星とは違った環境
(微小重力 熱的変成が無い)
2. 周囲からの影響を大衛星と対比可能
(環や近傍衛星による汚染など)

小天体として

小型衛星は

1. 小惑星や彗星とよく似た環境
(微小重力 熱的変成が無い)
2. 小型衛星特有の環境
(短期間で回る軌道や混雑した系に位置)
3. 数が多い
(小惑星彗星よりも探査数は多い)

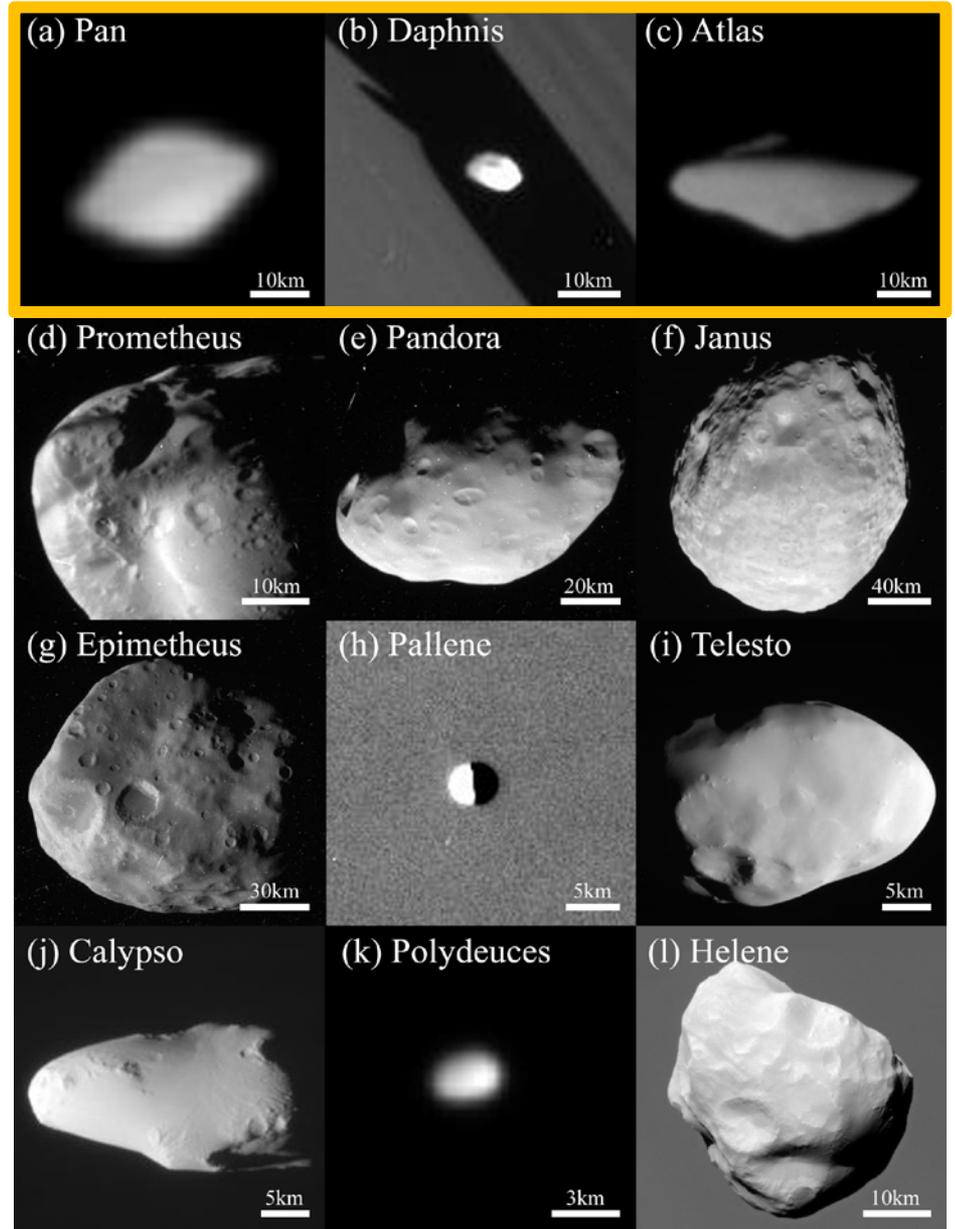
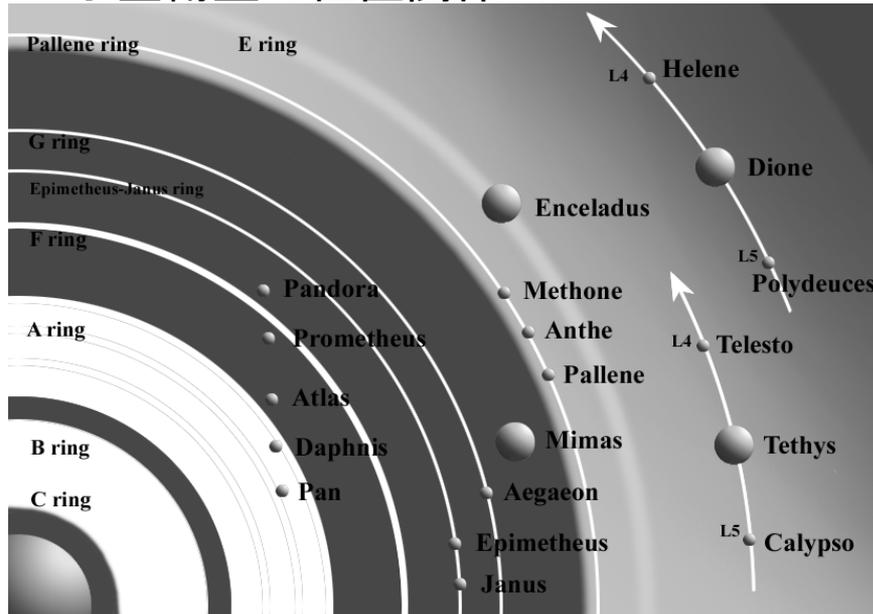
巨大ガス惑星周囲の衛星系の進化、
太陽系小天体の一般的理解につながる

近年特に、カッシーニの活躍で小型衛星の様子が良く解ってきた

土星系の小型衛星

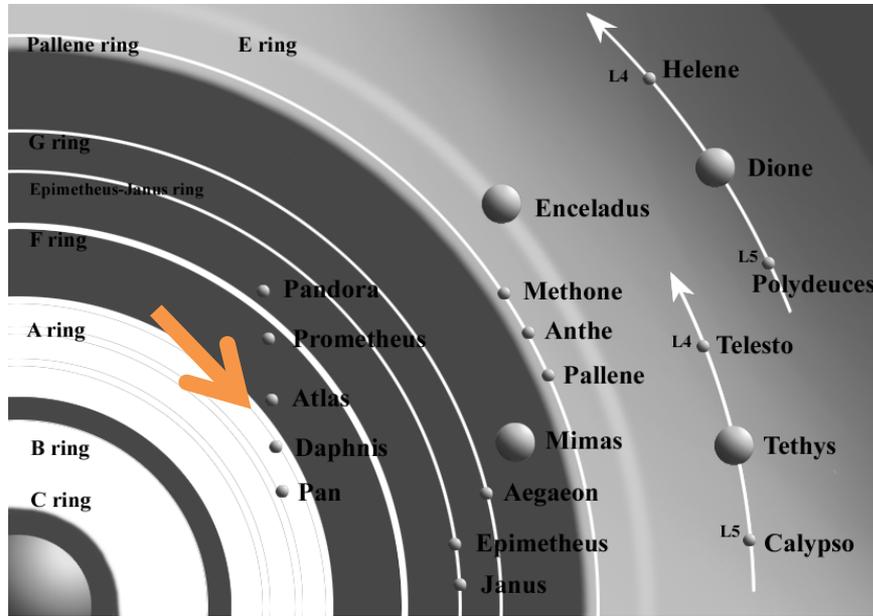
- A環外縁
 - アトラス、パン、ダフニス
- F環
 - パンドラ、プロメテウス
- ヤヌス、エピメテウス
- E環の衛星
 - パレネ、メトネ、テレスト、カリプソ、ヘレネ

小型衛星の位置関係



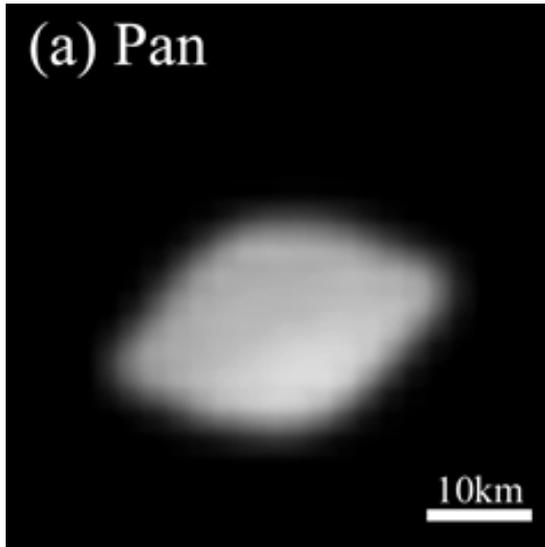
Saturnian small satellites: (a) Pan (PIA08405), (b) Daphnis (N00156643), (c) Atlas (PIA08405), (d) Prometheus (N00150211), (e) Pandora (N00039262), (f) Janus (N00152953), (g) Epimetheus (N00098337), (h) Pallene (N00164310), (i) Telesto (N00041296), (j) Calypso (N00151485), (k) Polydeuces (PIA08209), and (l) Helene (PIA12723).

アトラス、パン、ダフニス

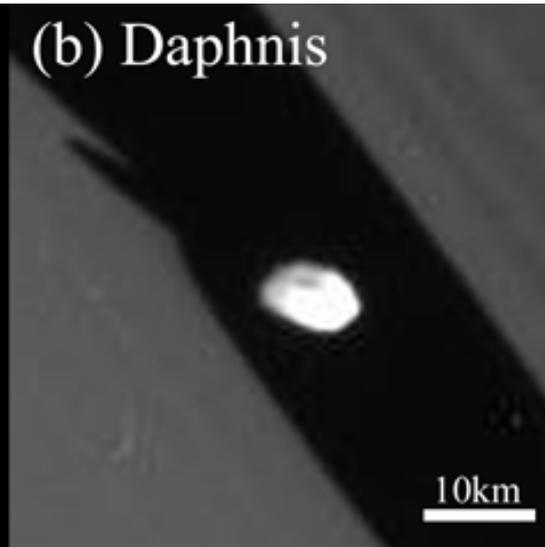


- A環外縁部に位置
 - パン エンケの間隙
 - ダフニス キーラーの間隙
 - アトラス A環外縁
- 円盤に近い形状

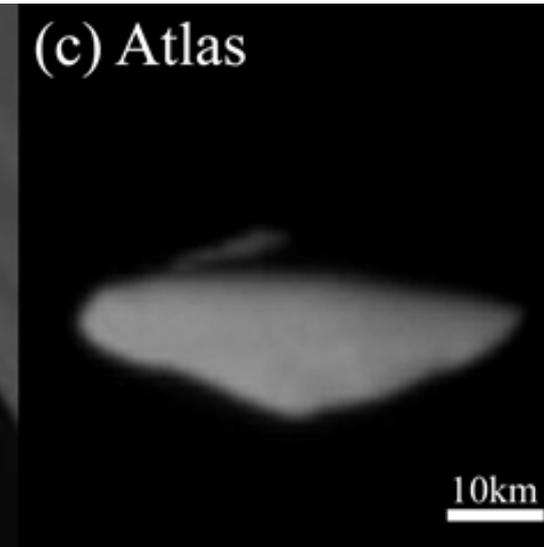
(a) Pan



(b) Daphnis



(c) Atlas

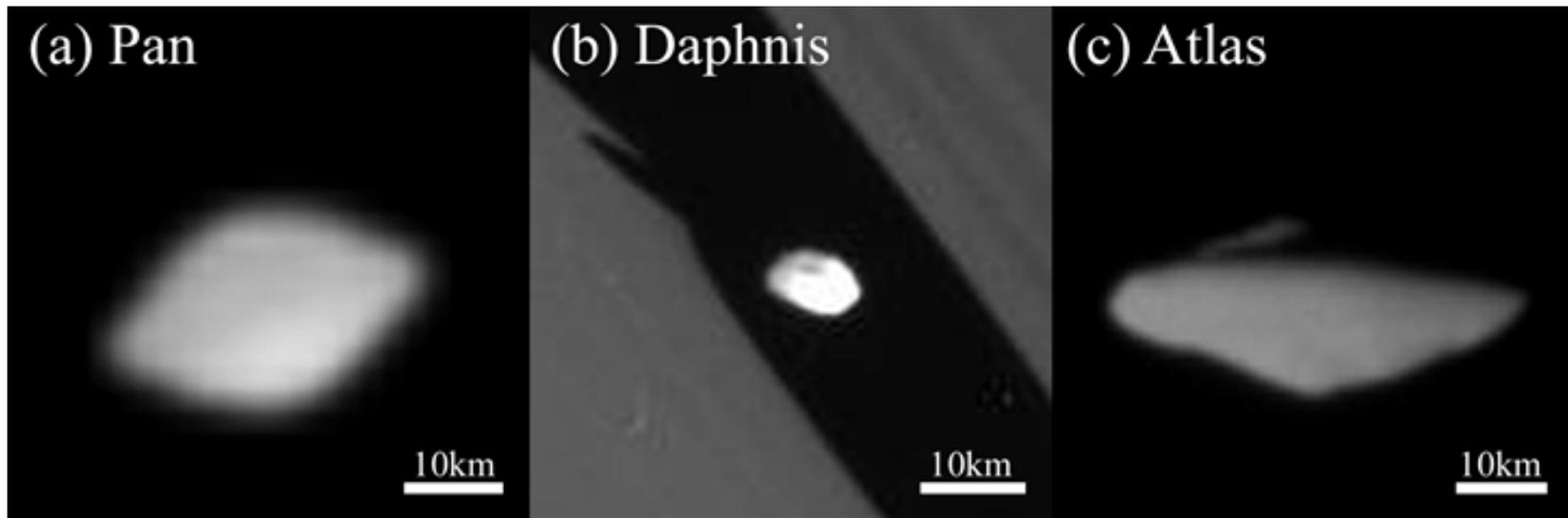


円盤型の成因

- 円盤型の小天体が実は存在する (1999kw4)
 - 1999kw4と同じ成因が当初疑われた
 - YORP効果で自転が加速
- しかし、パンやアトラスの自転速度は、形状を変形させるほどではなかった

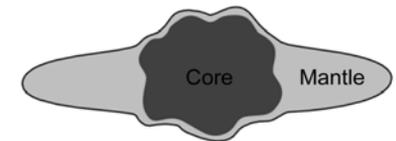
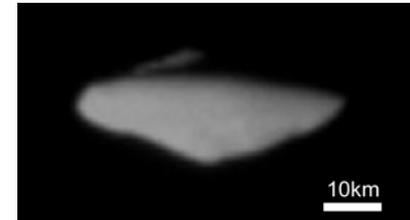


1999kw4系の想像図 (Ostro et al. 2006)

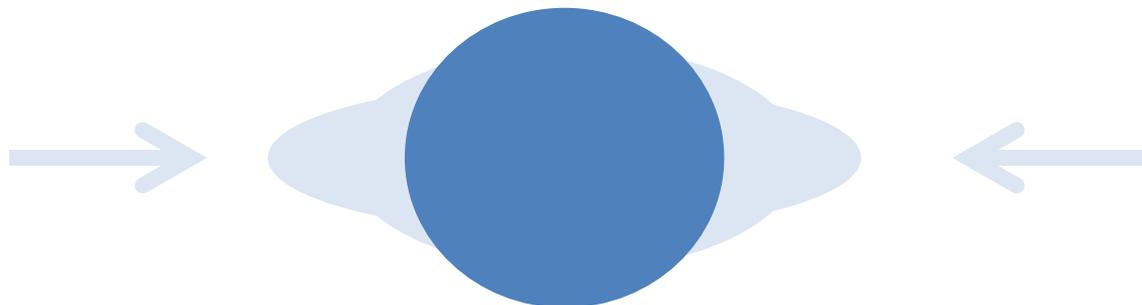


主要環を集積したラブルパイル天体

- アトラス、パン、ダフニスの赤道部分は、A環の粒子を集積したものであることが分かった
 - スペクトルがA環と一致 (Tiscarno et al. 2010)
 - 密度が低くがれきの集合体であることを示唆 (Porco et al. 2007)
 - 天体の実体積はロッシュローブと一致 (Porco et al. 2007)
 - 環との衝突確率が実際の形状と良く一致 (Chernoz et al. 2007)



↑アトラスの内部構造

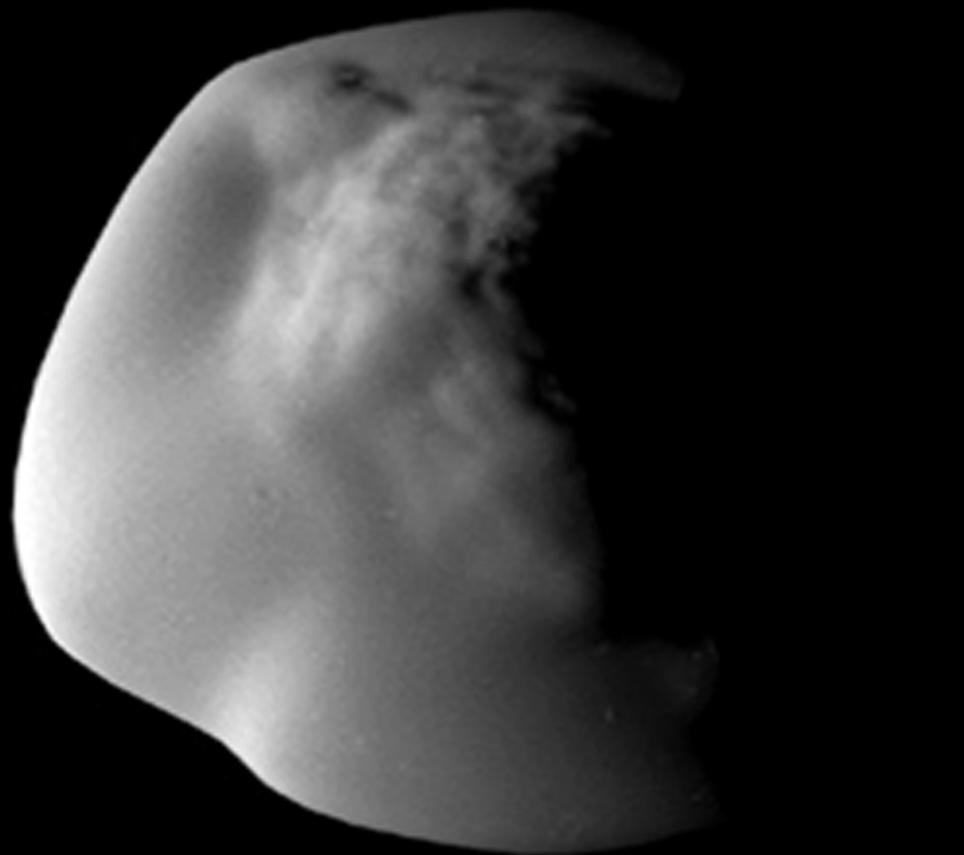


1. 高密度のコアが当初存在
2. 環の集積が始まり
3. 赤道部分の膨らみが形成

アトラスの最も特異な特徴はその異様なまでの表層の滑らか

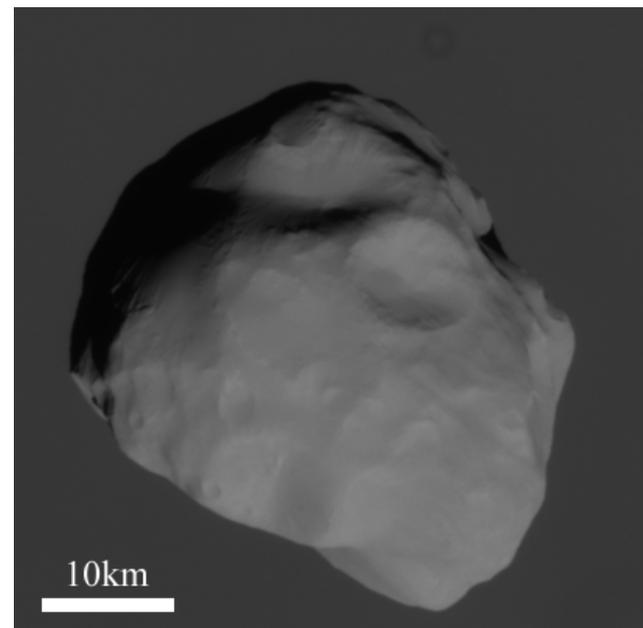
問題

アトラスを滑らかに保つ
表層更新プロセスはどういった
ものなのか？



アトラスの南半球・先行半球側
(PIA08405)

10km

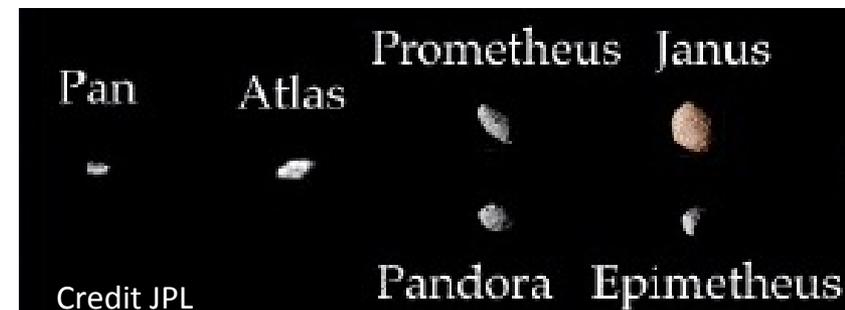
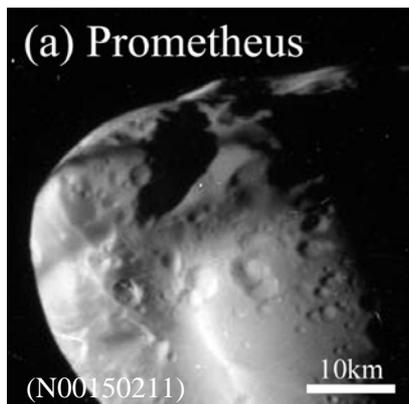


ヘレネの遠土星側
(N1646319549)

既知の地表更新プロセス

- Seismic sharking (e.g. Richardson et al. 2004)
 - クレーターも同時に存在
 - アトラスはクレーターがほとんどない
- Micro-impact gardening (e.g. Chapman et al. 2002)
 - もしそうだとしたら、近くに位置するプロメテウスもまた滑らかになってなければならない
- Flying dune model (Romay 2007)
 - 全ての土星系小型衛星の表層が滑らかになるはず
 - 小天体における既知のクレーター消去プロセスではどうも説明つかない

基本的な小天体表層における力学に立ち返って解析を行ってみた



小天体表面での力学

- 天体表面では色々な力が働いている

- 重力

$$F_{grav} = m_r \frac{4\pi G \rho_r R}{3}$$

- 遠心力

$$F_{cen} = \frac{4\pi \rho_r r^3}{3} \omega^2 R \cos \theta$$

- 摩擦力

$$F_{vdW} = \frac{A}{48(t+d)^2} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \quad (\text{e.g. Castellanos 2005})$$

- 静電氣的な力

$$F_{es} = Q_d E_0 = \frac{32\pi \varepsilon_0 \Phi_s^2}{\lambda_D} r^2 \quad (\text{e.g. Lee 1996, Colwell et al. 2005})$$

- ローレンツ力

$$F_L = 4\pi r^2 C_{amp} \varepsilon_0 E_0 \left(\sqrt{\frac{GM_s}{A} - \frac{2\pi A}{10.8 \times 60 \times 60}} \right) \times 2.0 \times 10^{-5} \left(\frac{R_s}{A} \right)^3$$

- 太陽光圧

$$F_{vdW} = \frac{G_{srp} (1 + \sigma)}{d_{sun}^2} \pi r^2 \quad (\text{Burns et al. 1979})$$

- 潮汐力

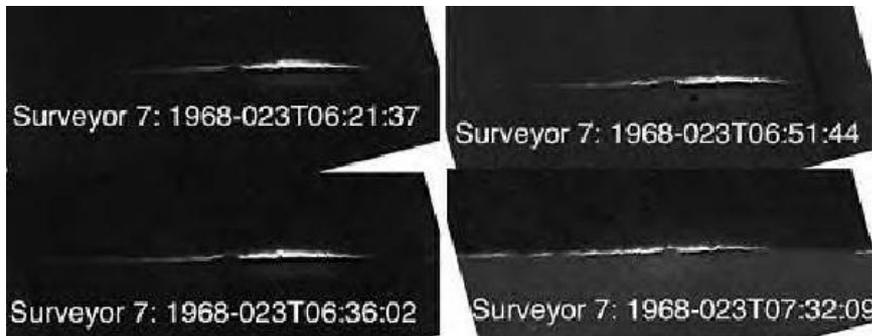
$$F_{tidal} = \frac{4\pi G \rho_r r^3}{3} \frac{2GM_s R}{A^3}$$

- これらを比較、解析したところ静電氣的な力が有望であることがわかった

静電氣的な力による粒子の運搬

- Dust levitation
 - 他天体で知られる天体表面での微粒子の運搬として知られる
 - 光電効果で表層が正よりに帯電し、静電氣的な力で数 μm サイズ粒子が浮かび上がる現象 (Gold 1973 Whipple 1981)
 - 小惑星、月などで知られている

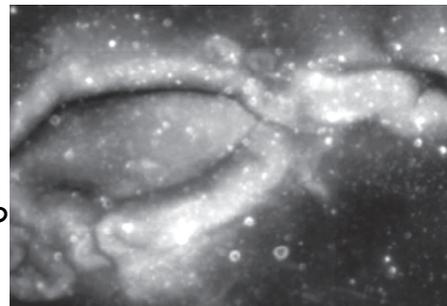
月



↑サーベイヤー7によってとらえられた、月面で浮かび上がったダストの散乱光 (Colwell et al. 2005)

→Lunar Swirls

帯電した微粒子が、月面の磁気異常に沿って運搬され、形成されられている (Garrick-Bethell et al. 2011)



エロス

→エロスのPonded deposits 池のようにダストが平たく堆積している. 電氣的に浮かび上がった粒子がクレーターの影にトラップされて形成され则认为られている (Richardson et al. 2001)



アトラスではDust levitationが起きる環境か？

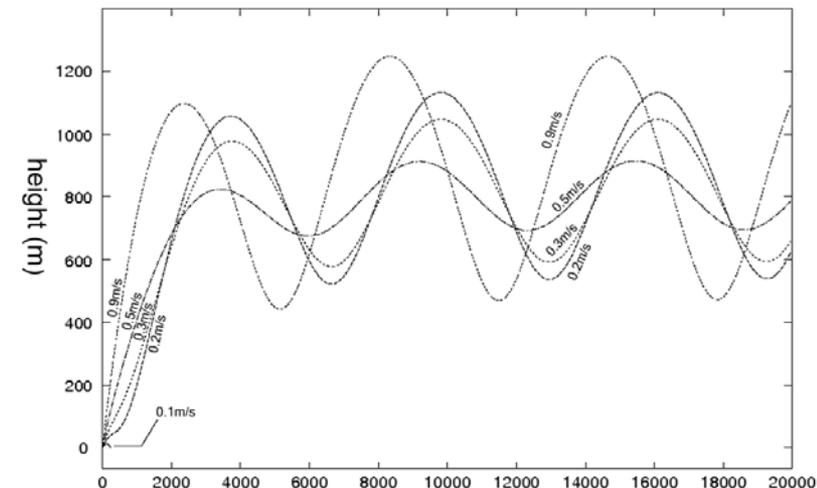
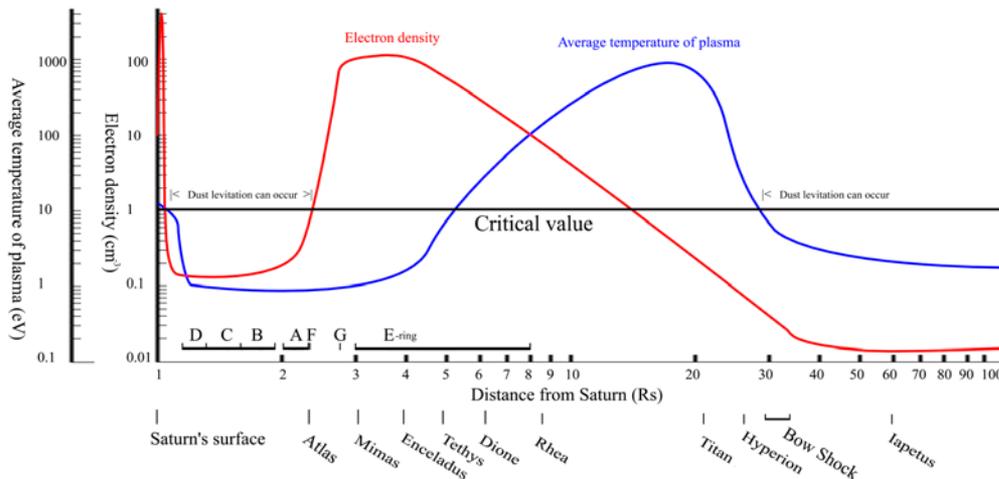
- 答えは Yes

1. 電氣的に帯電するには十分な環境

- 電子温度が10eV以下、電子密度が 1cm^3 以下であれば、土星系の衛星は帯電
- 環が土星系のプラズマを遮るので、アトラスではこれを満たす
- 計算ではアトラスは3~5Vほど帯電する

2. 表層粒子は浮遊するのに十分な小ささ

- アトラスはA環を集積した天体 (Filacchione et al. 2010, Buratti et al. 2010)
- Aの環の粒子は数 μm の粒子から構成されている (Cuzzi et al. 2009)
- 数 μm の粒子は電氣的に浮遊できる大きさ

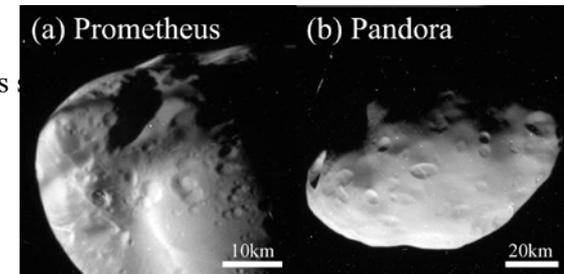
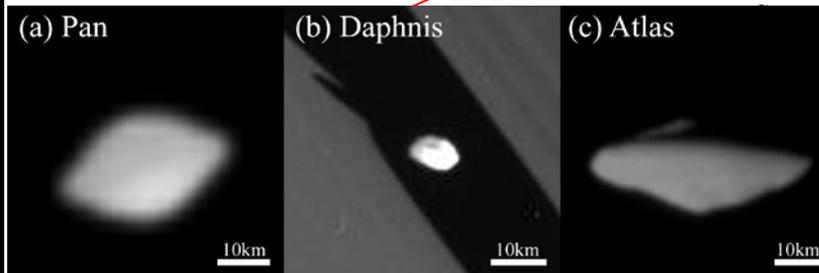
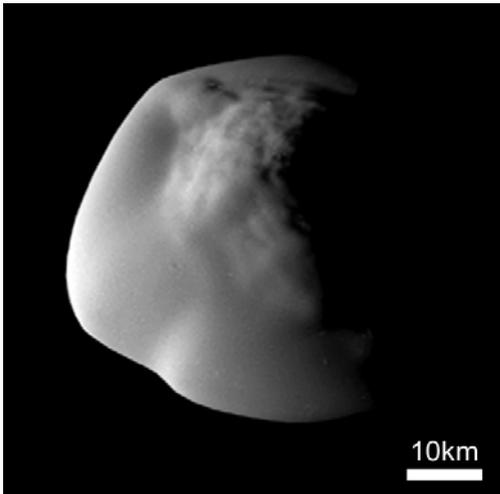
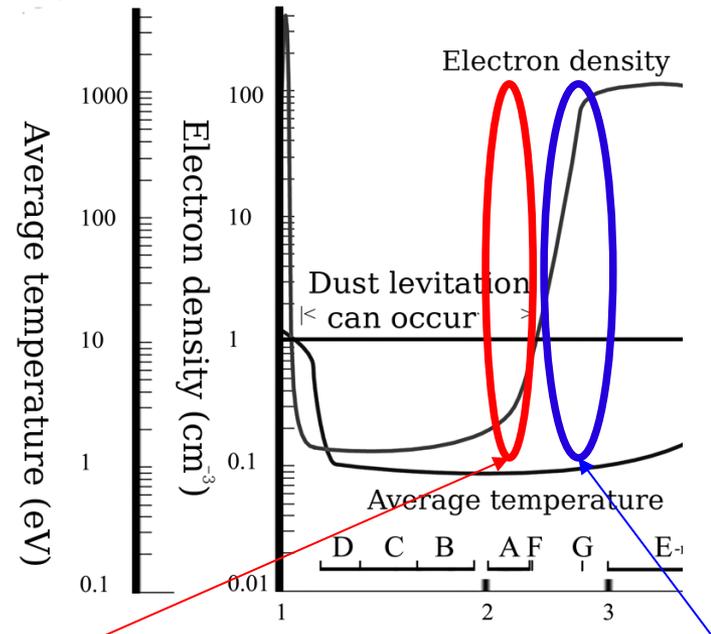


(Coates et al. 2005 を参考に作成)

Hirata and Miyamoto 2012

Dust Levitationだと、いろいろ説明できる

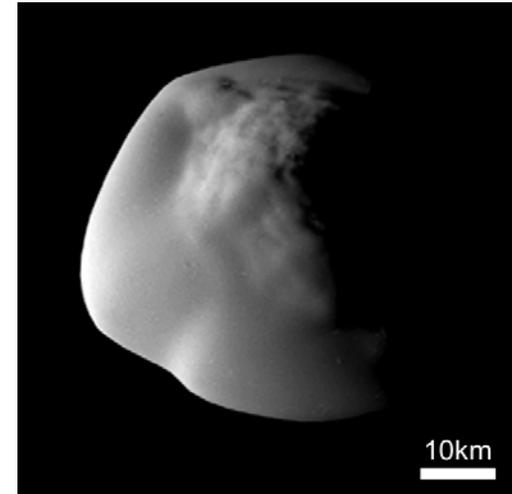
1. アトラス表層の極端な滑らかさ、クレーターの欠乏、物質的な均質さを説明できる
2. すぐ外側の衛星(パンドラ、プロメテウス)との差異も説明できる
 - アトラスのすぐ外側の軌道では電子密度が急増するため、パンドラ、プロメテウスではdust levitationは起きない



アトラス、パン、ダフニスは

土星の衛星として

1. 主要環から形成された衛星(Chernoz et al. 2007)
2. 潮汐力によって現在の大きさが決められている(Porco et al. 2007)
3. 環の存在によって磁気圏内にプラズマの空白ができています。その強い影響を受けている天体



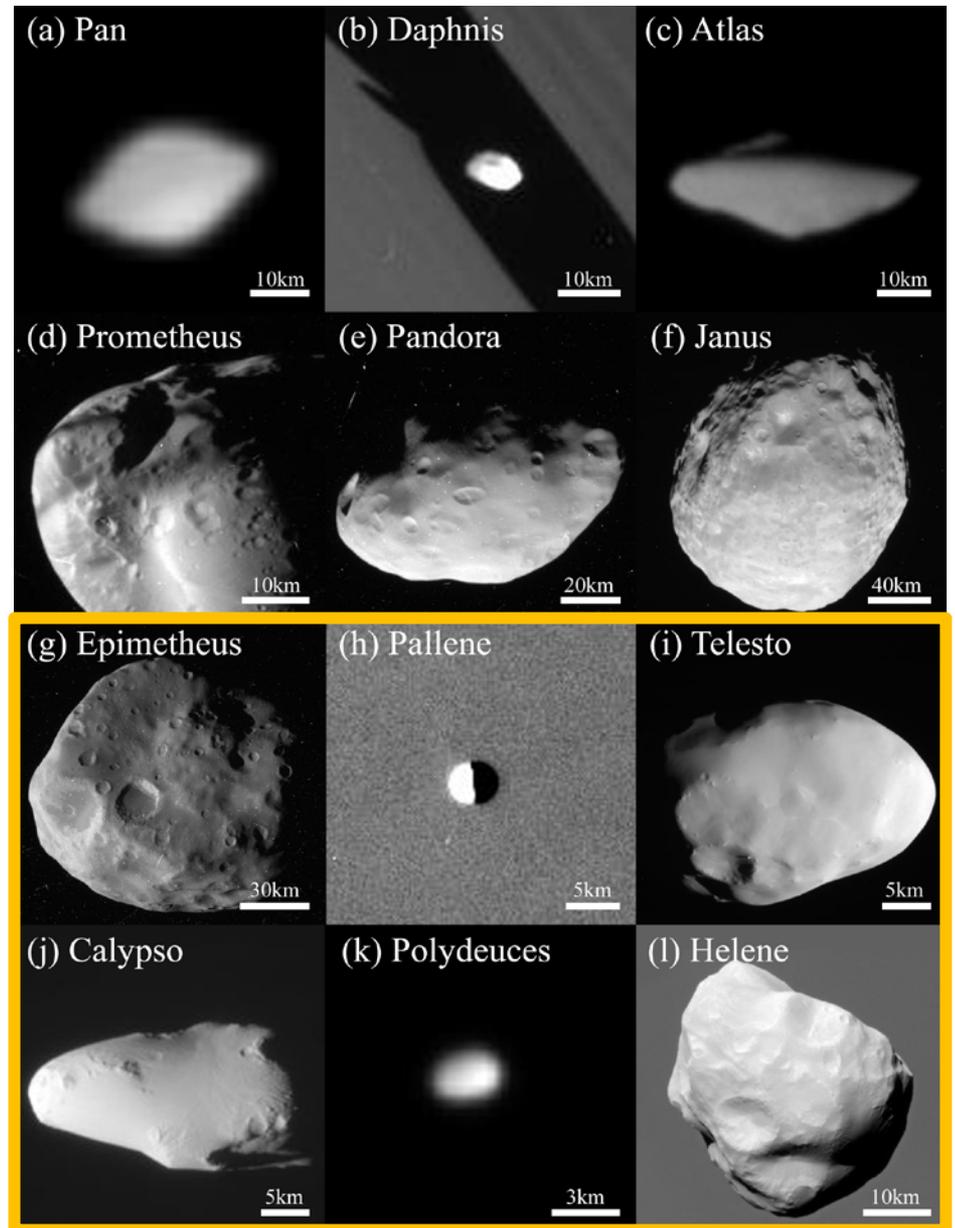
小天体として

1. 周囲の粒子を集積して形成された、円盤型をしている(1999kw4とは異なる)
2. 静電的な営力によって表層が更新されている初の天体である可能性がある

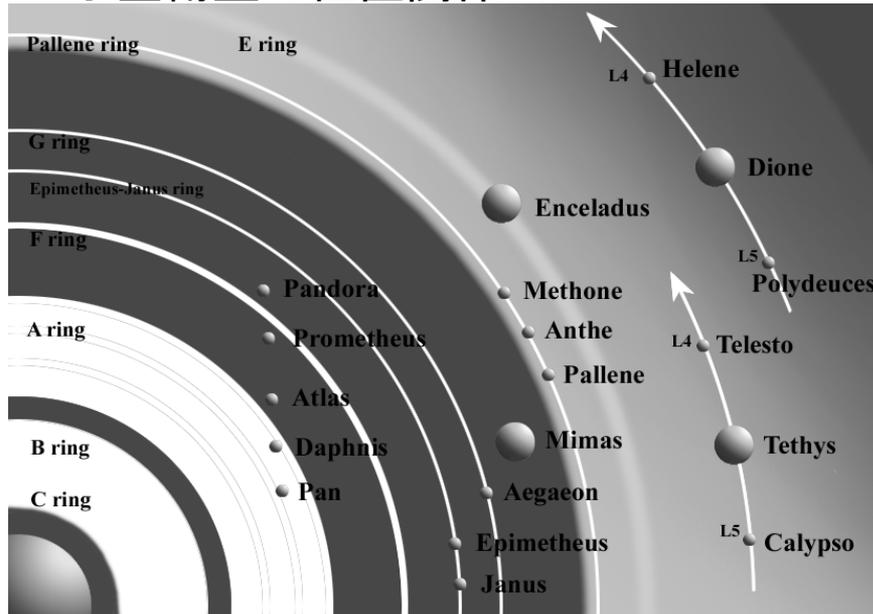


土星系の小型衛星

- A環外縁
 - アトラス、パン、ダフニス
- F環
 - パンドラ、プロメテウス
- ヤヌス、エピメテウス
- E環の衛星
 - パレネ、メトネ、テレスト、カリプソ、ヘレネ

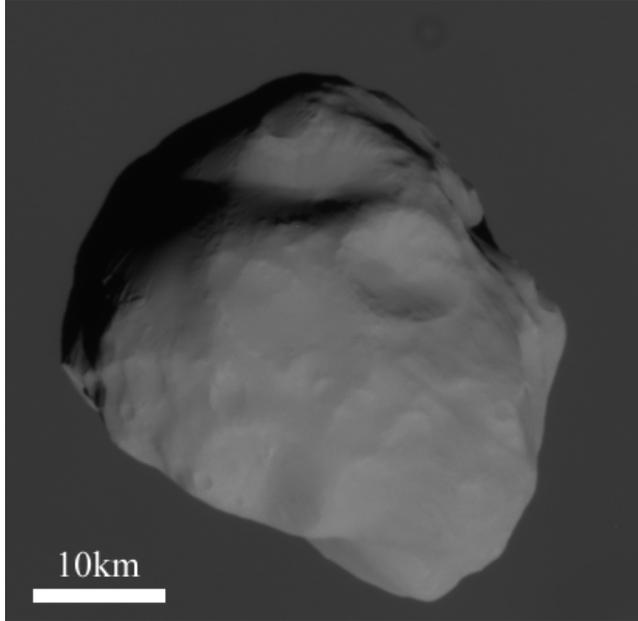


小型衛星の位置関係



Saturnian small satellites: (a) Pan (PIA08405), (b) Daphnis (N00156643), (c) Atlas (PIA08405), (d) Prometheus (N00150211), (e) Pandora (N00039262), (f) Janus (N00152953), (g) Epimetheus (N00098337), (h) Pallene (N00164310), (i) Telesto (N00041296), (j) Calypso (N00151485), (k) Polydeuces (PIA08209), and (l) Helene (PIA12723).

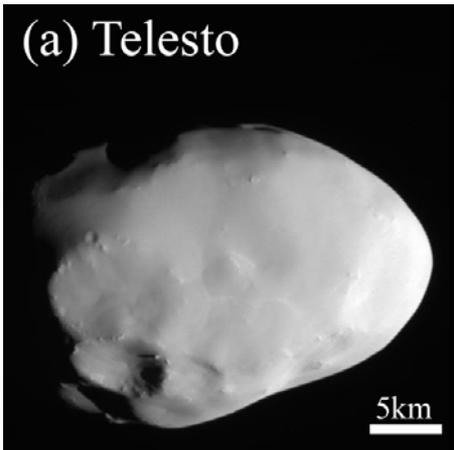
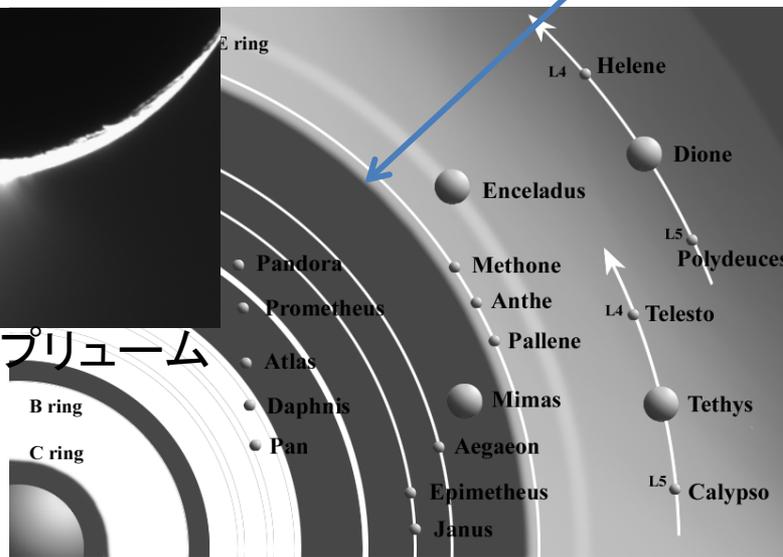
E環の小型衛星



←ヘレネ(Helene)
ディオオーネのL4
1980年に発見
平均半径16.5km



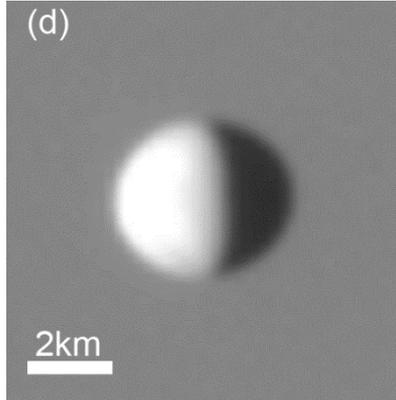
↑エンセラダスのプリューム
(PIA07762)



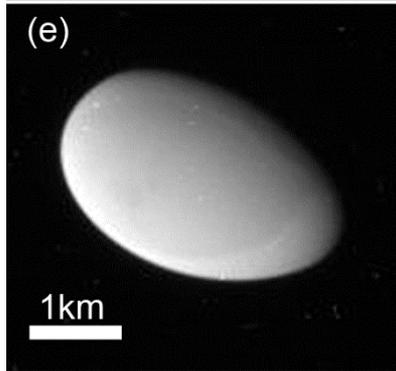
↑テレスト(Telesto)
ティティスのL4点
平均半径12.4km



↑カリプソ(Calypso)
ティティスのL5点
平均半径10.6km



←パレネ(Pallene)
エンセラダスの内側の
軌道に位置
2004年に発見
[Porco et al. 2005]
平均半径2.2km



←メトネ (Methone)
エンセラダスの内側の
軌道に位置
2004年に発見
[Porco et al. 2005]
平均半径1.6km

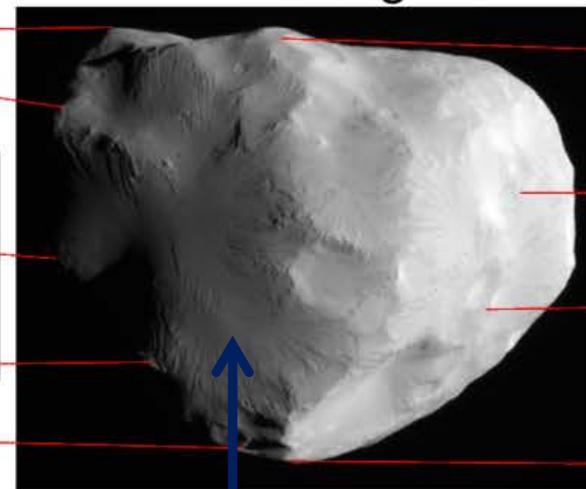
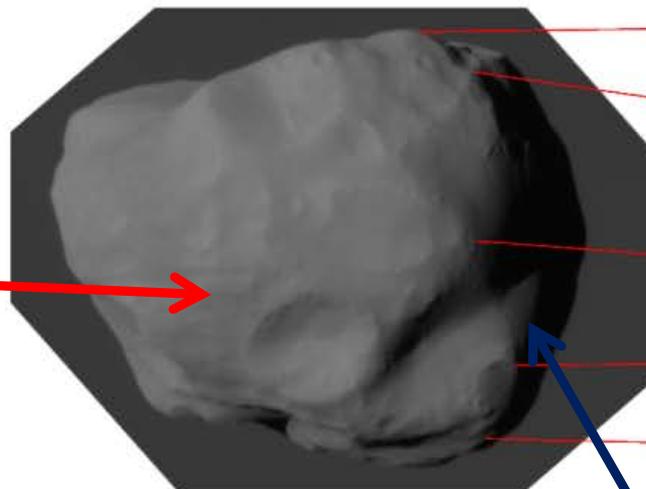
ヘレネは画像数も多く(7度のflyby),解像度も良い (24m/pixel)
後行半球の一部と、北極域を除く全球の画像が得られている

(N1646319549, N00172897)

Anti-Saturn

Leading

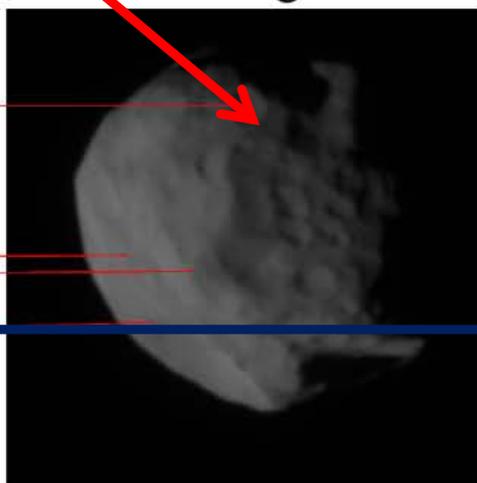
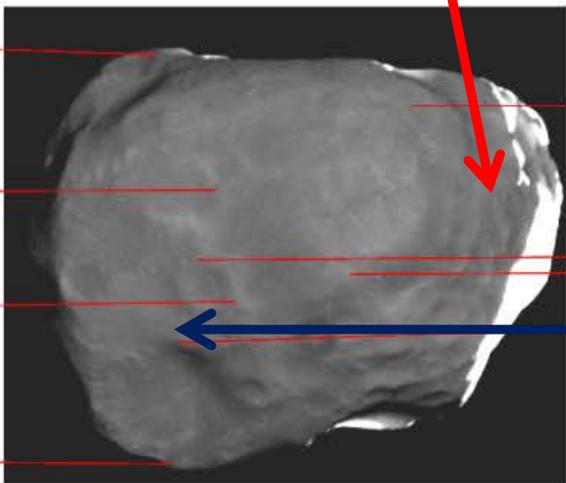
明瞭な二分性を持つ



クレーターに
富む領域

Sub-Saturn

Trailing

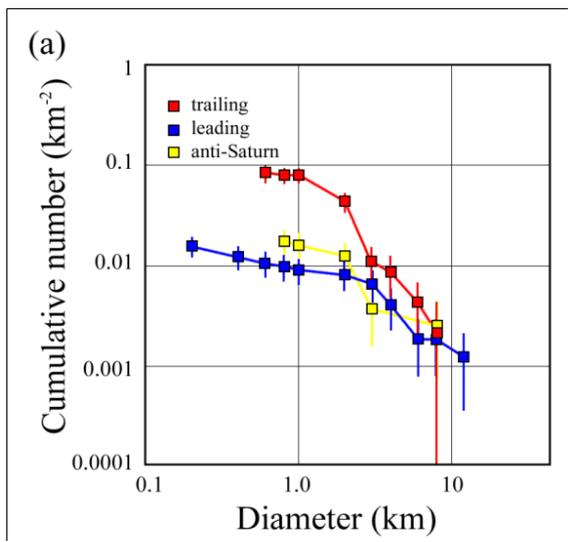


筋状の構造が
多くみられる
小さいクレー
ターは少ない

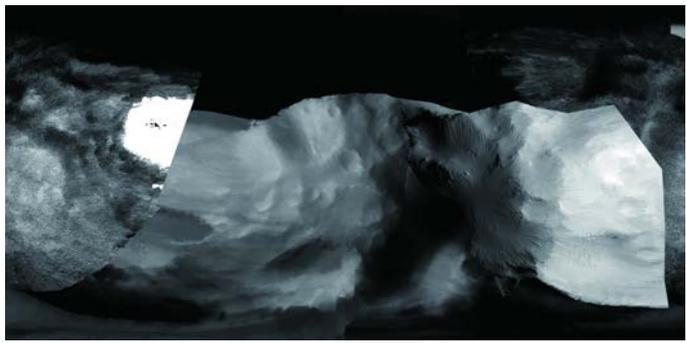
(N1646315085, N1563643679)

ヘレネの調査

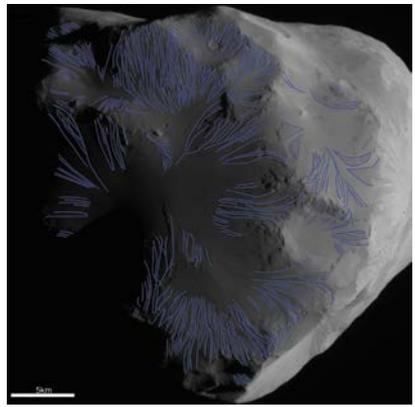
クレーターカウント



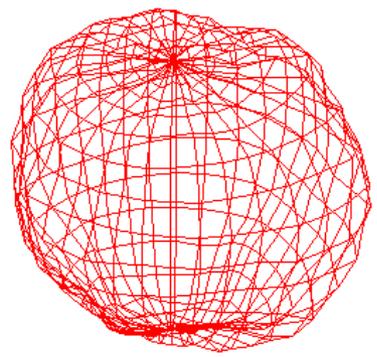
円筒投影図



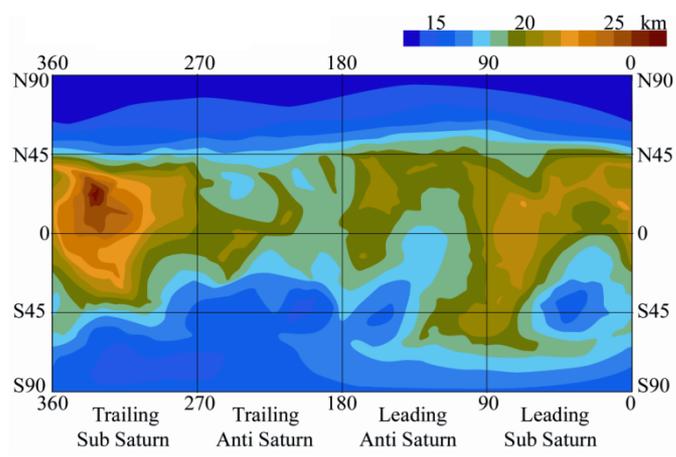
筋状構造の記載



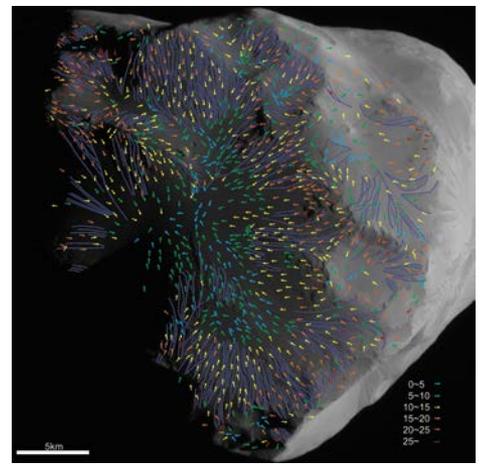
形状モデル



全球標高図



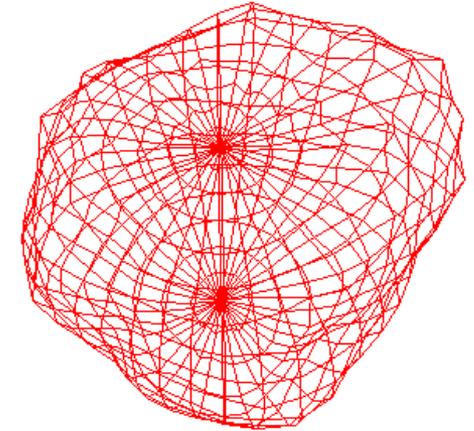
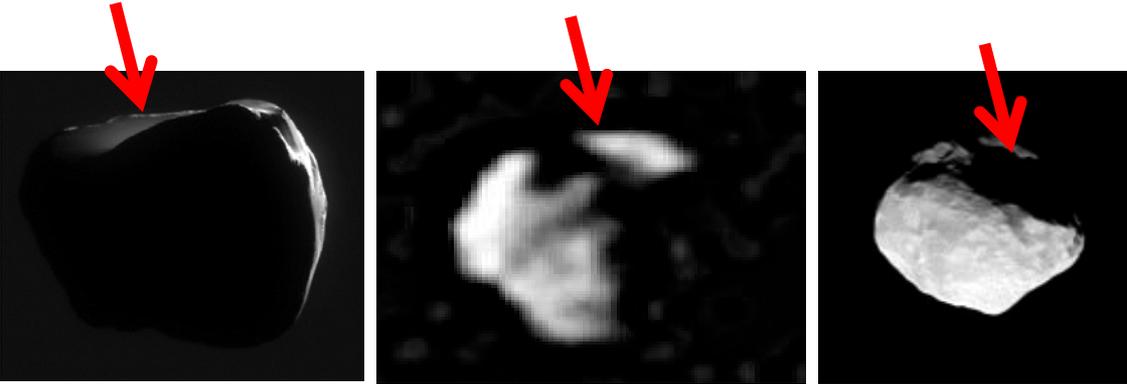
表層重力解析



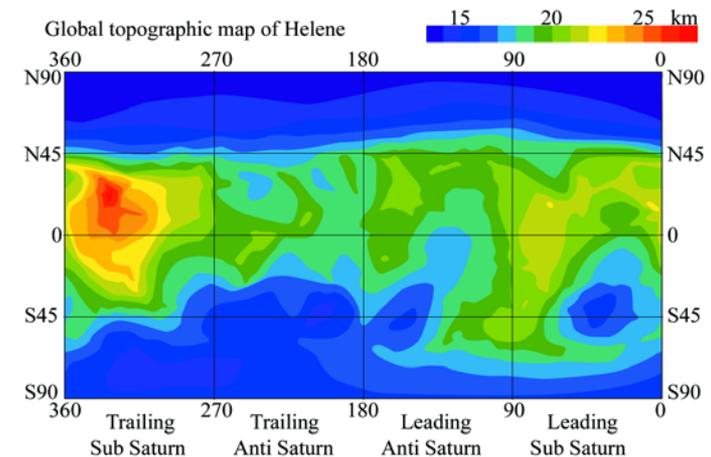
形状解析の結果

longitude 1 latitude 60

- ヘレネの北極には大きな窪地がある(15km以上)

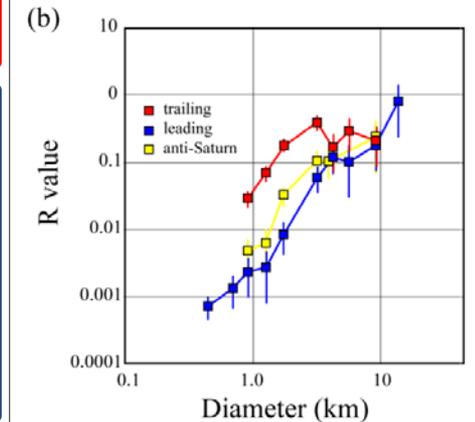
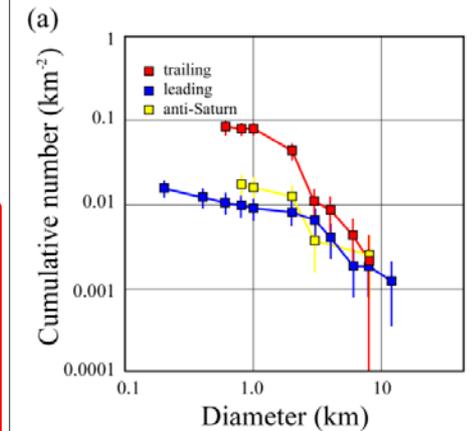
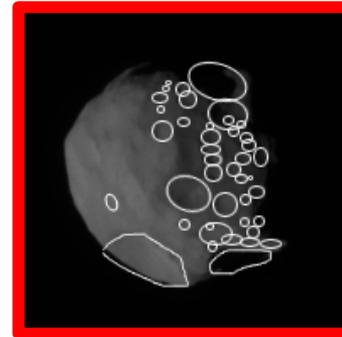


- 窪地によって質量に大きな偏りを生じている
- ヘレネの現在の自転軸は、幾何学的な主慣性モーメントが最大値になる軸とほぼ一致している
 - 自転軸は力学的に最も安定した場所にある

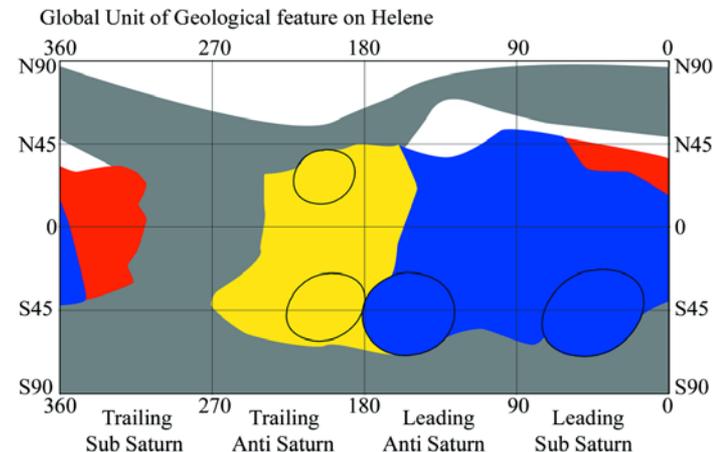


クレーターカウントの結果

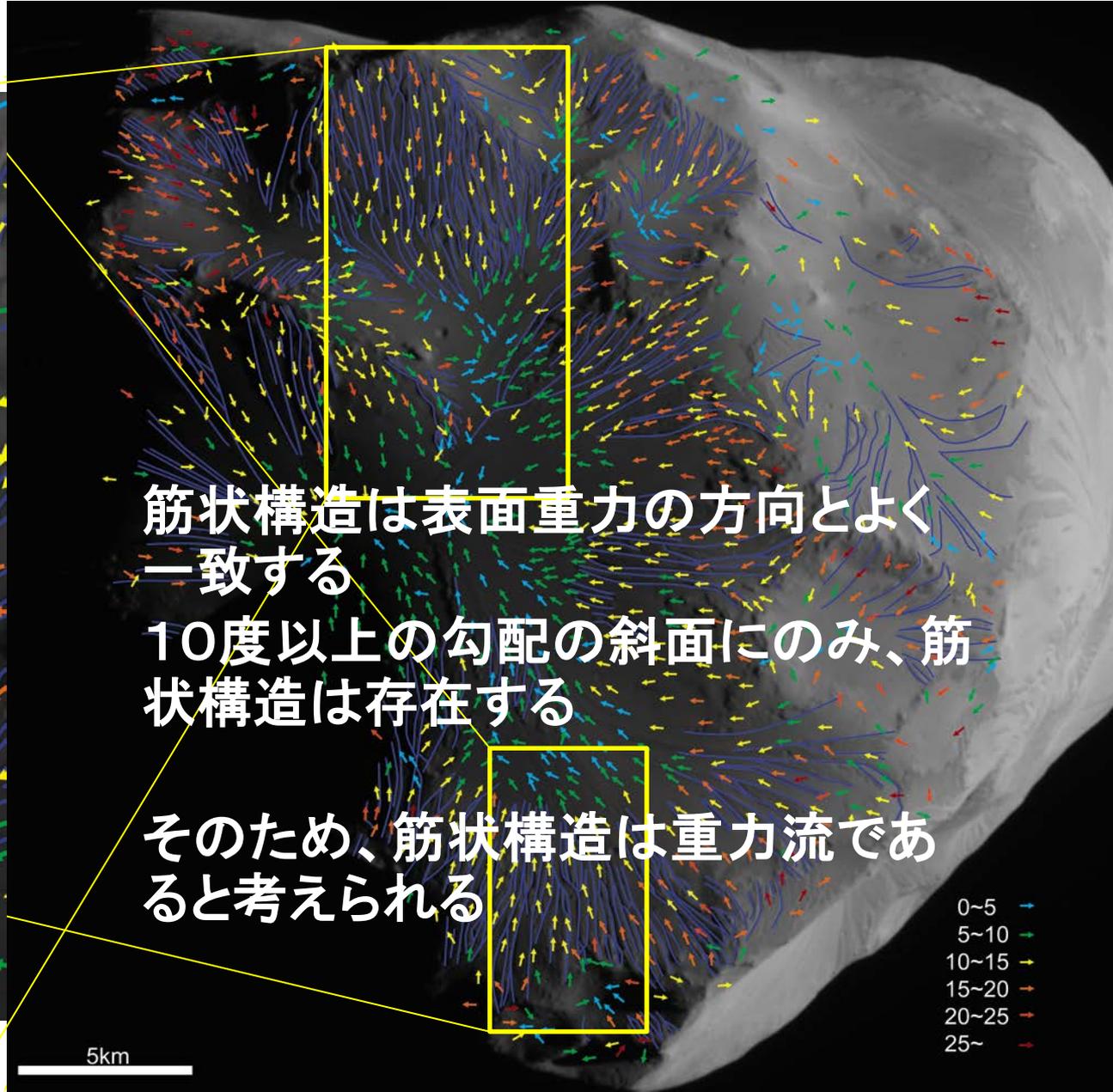
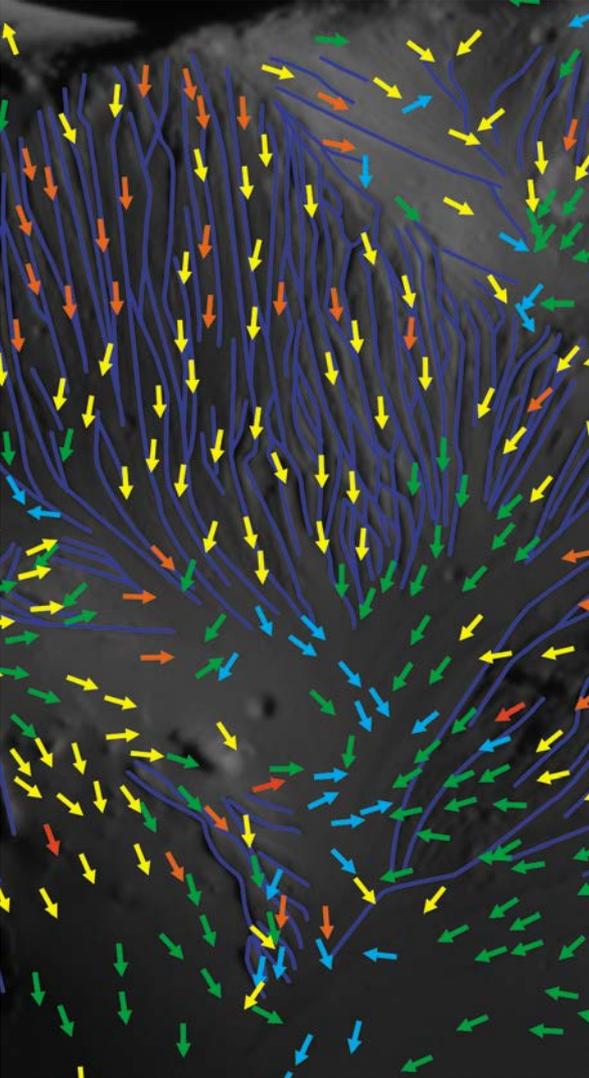
- 小さなクレーター(5km以下)
 - 赤 クレーター密度大(ほぼ飽和)
 - 後行半球の近土星側に特徴的
 - 黄 中間的
 - 後行半球の遠土星側に特徴的
 - 青 小さなクレーターが少ない
 - 先行半球に特徴的
- 直径5km以上のクレーター
 - 全球にほぼ均質に分布
 - 密度は極めて高い(ほぼ飽和)



ヘレネはかなり古い天体
だが先行半球は若い



先行半球の地質



筋状構造は表面重力の方向とよく一致する

10度以上の勾配の斜面にのみ、筋状構造は存在する

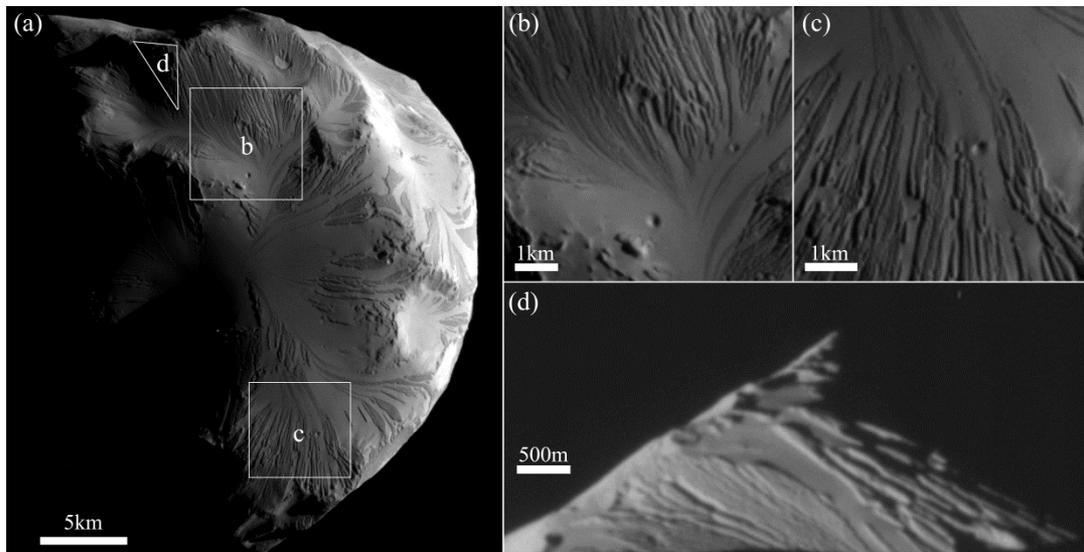
そのため、筋状構造は重力流であると考えられる

- 0~5
- 5~10
- 10~15
- 15~20
- 20~25
- 25~

5km

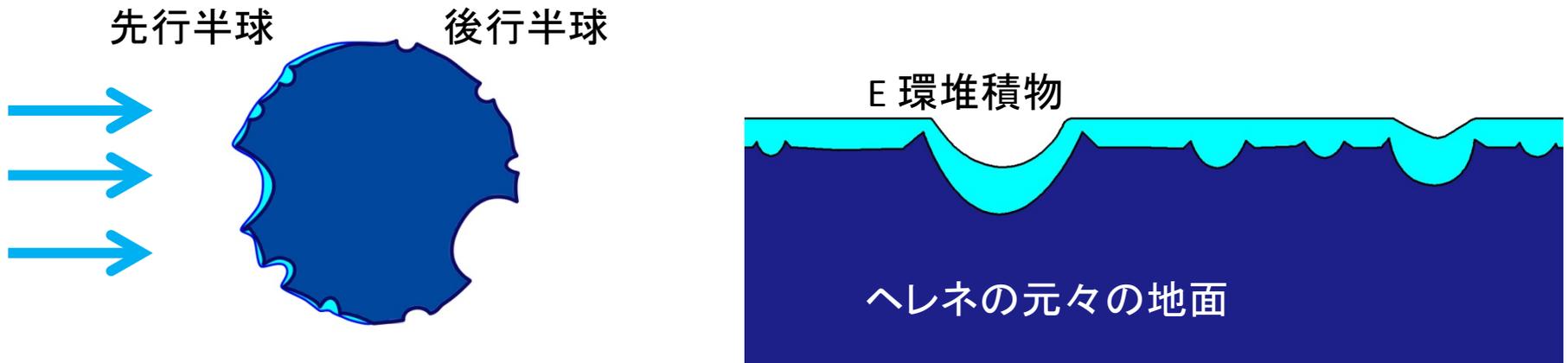
Mass movementがある天体

- Mass movementは重力を駆動力とする
- HeleneのMass Movementは、明瞭なアルコーブ、チャンネル、ファンを備えている
 - 既知の天体としては最小の存在

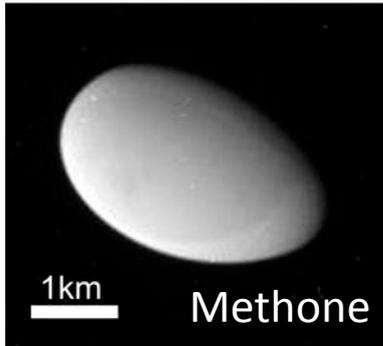
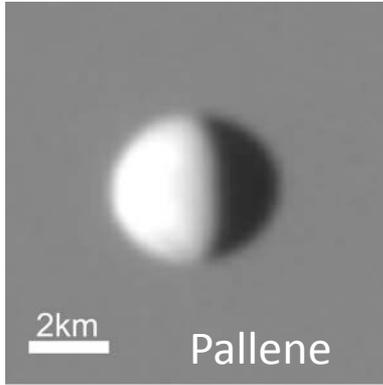


先行半球の成因

- これら先行半球の性質はE環による汚染で説明可能
 - 先行半球だけが汚染されている点
 - E環粒子は軌道要素の関係上、先行半球に衝突しやすい
 - 実際に、ディオーンの先行半球は、後行半球よりもE環汚染が顕著であることが知られている (Hamilton & Burn 1994)
 - E環粒子が降り積もれば、斜面を不安定化させ地すべりを引き起こし、微小なクレーターを消去することが期待できる
 - 実際にスペクトルデータはE環による汚染を示唆



他のE環領域の天体は？



他のE環衛星も、ヘレネと同様にE環堆積物があるはず
しかし、その表層の様子は、ヘレネとはずいぶん異なる

Upper N1665947247
Lower N00189072

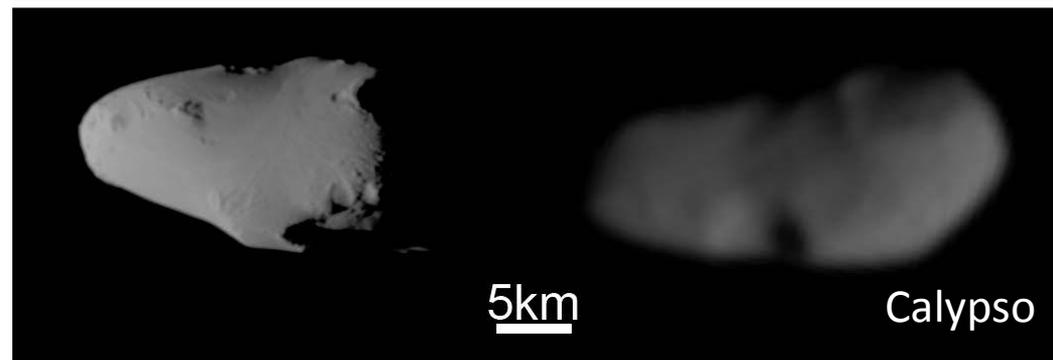
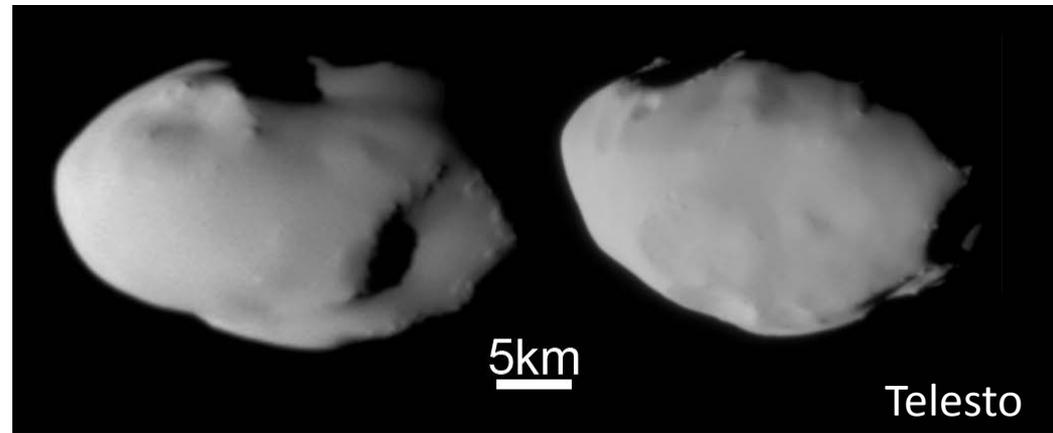
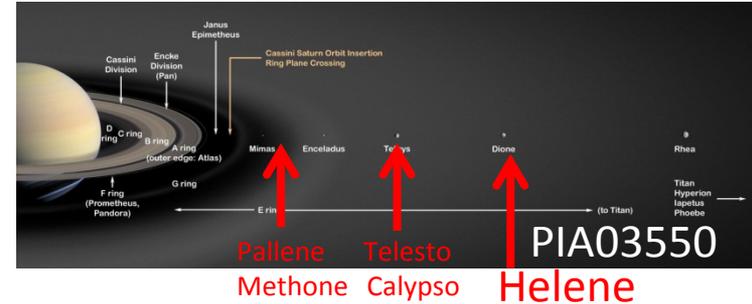
一点目

ヘレネは先行半球のみが汚染
他の衛星には二分性がない？

二点目

ヘレネのE環堆積物の厚みは高々100m程度

他の衛星はそれより遥かに分厚い？



Upper N1630076968, N1514163666, lower N1644754662, N1506184171

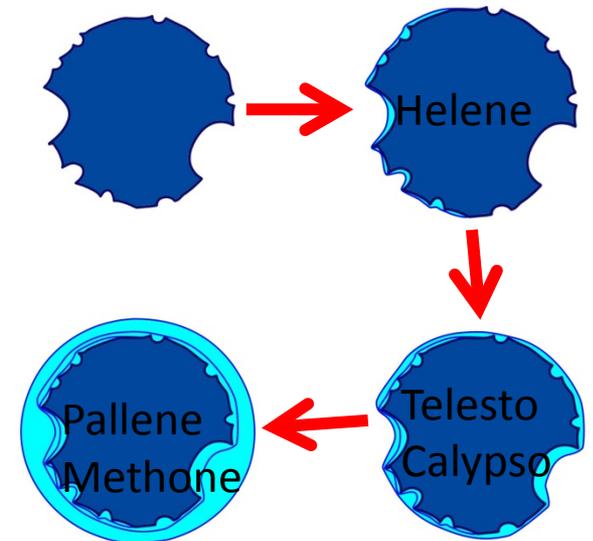
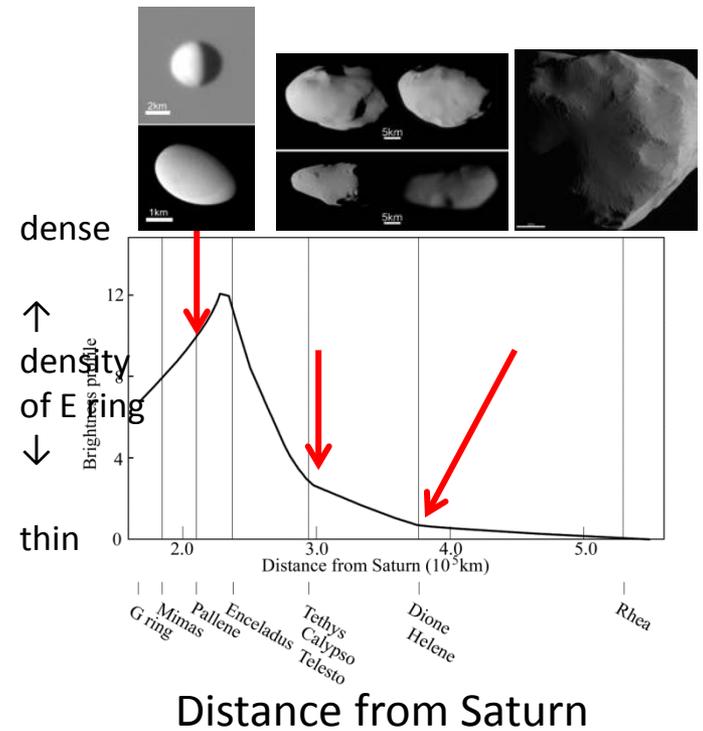
E環領域の他衛星の特徴も、E環の汚染によって説明できる

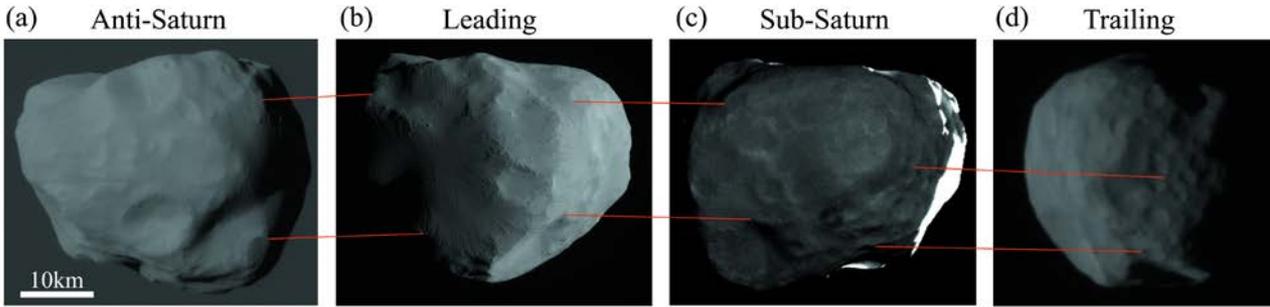
– テレスト、カリプソ

- ヘレネ軌道よりもE環濃度が高い
- より多くのE環堆積物が供給されるはず
- もともとあった地形を大きく埋めてしまったのかもしれない

– パレネとメトネ

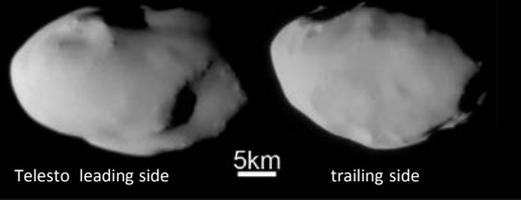
- E環濃度が最も高い軌道
- もともとあった地形を何もかも埋め尽くして、完全な球体になったと見られる





やすい
やすい

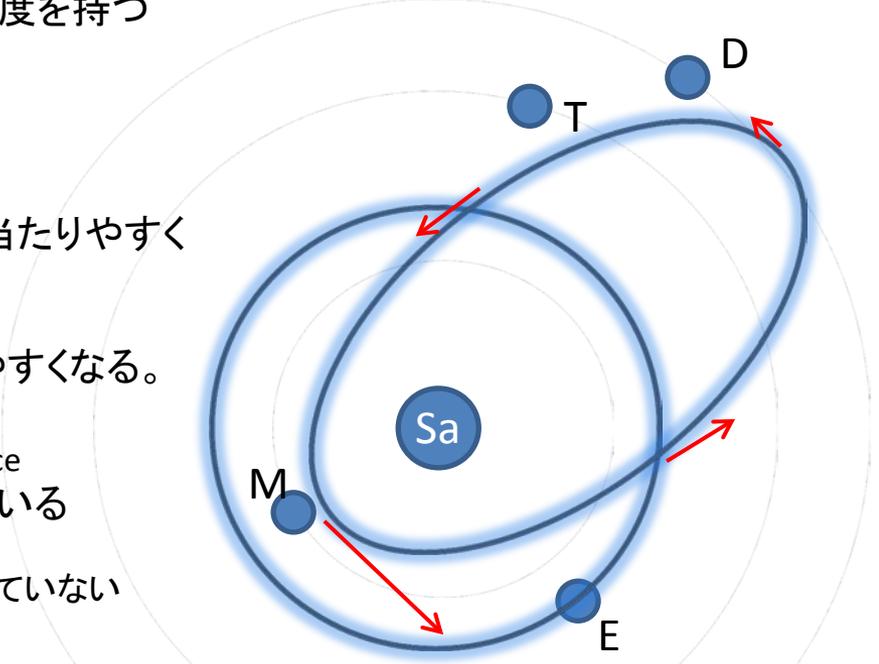
ティティス、エンセラダス軌道では、玉球に衝突しやすい



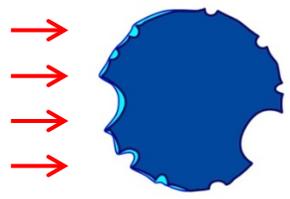
直後は、衛星と同じ軌道速度を持つ
とで、環として拡散していく
ので、

粒子は衛星の後行半球に当たりやすく
粒子はどこにでも衝突する
粒子は先行半球に衝突しやすくなる。

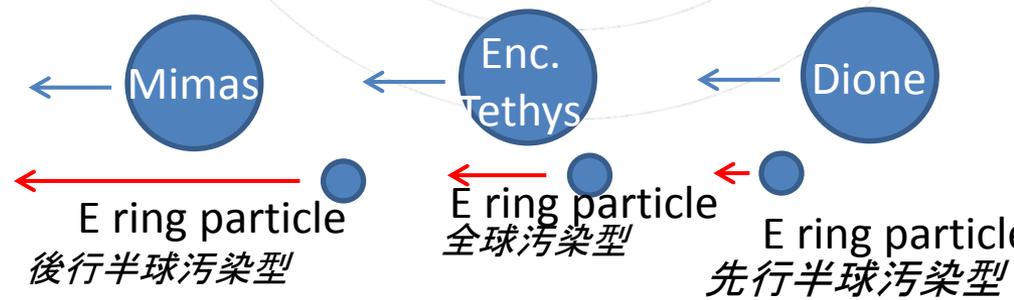
- 実際に、ミマス、ティティス、ディオオーネで起きている
 - Based on the albedo, spectral features, and radar reflectance
- これらの性質は、小型衛星の実際の姿ともよく一致している
 - ヘレネのみが先行半球集中
 - 他のE環衛星はエンセラダスに近いので、半球集中がおきていない



テレスト,カリプソ
(Tethysと軌道を共有)
全球型



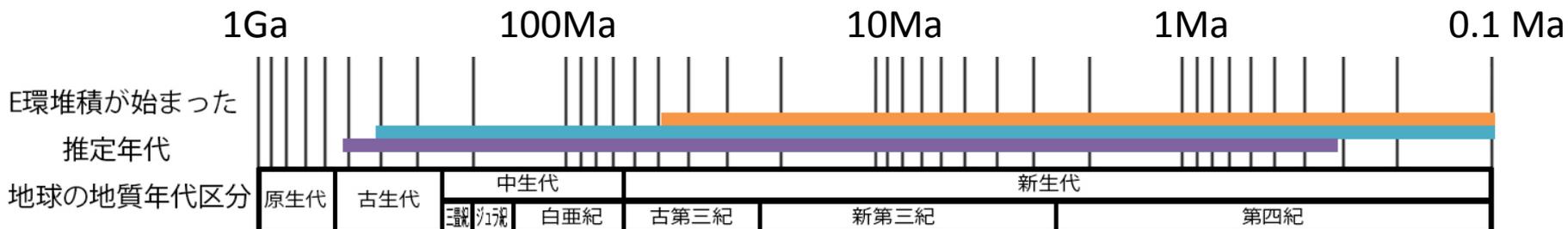
ヘレネ
(Dioneと軌道を共有)
先行半球のみ



示唆 ヘレネの堆積物の年代からエンセラダスの活動 がいつ始まったかが分かるかもしれない

- クレーター年代では

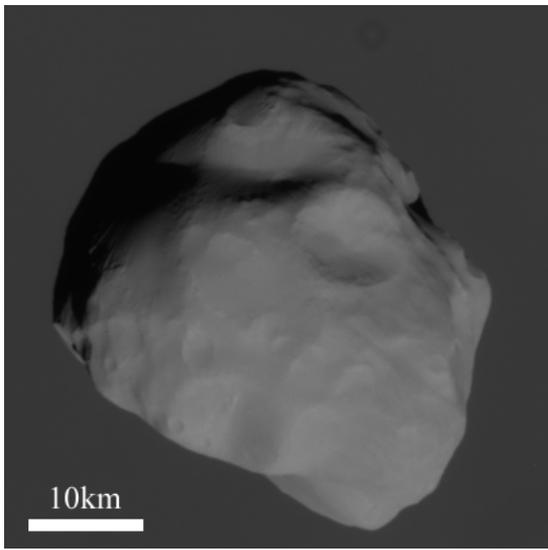
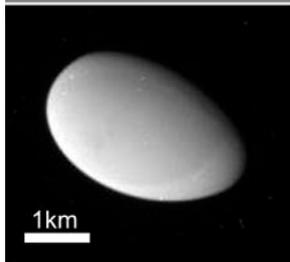
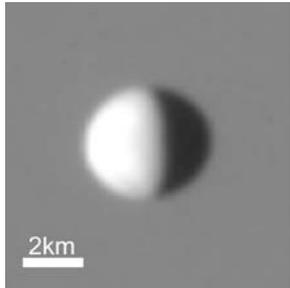
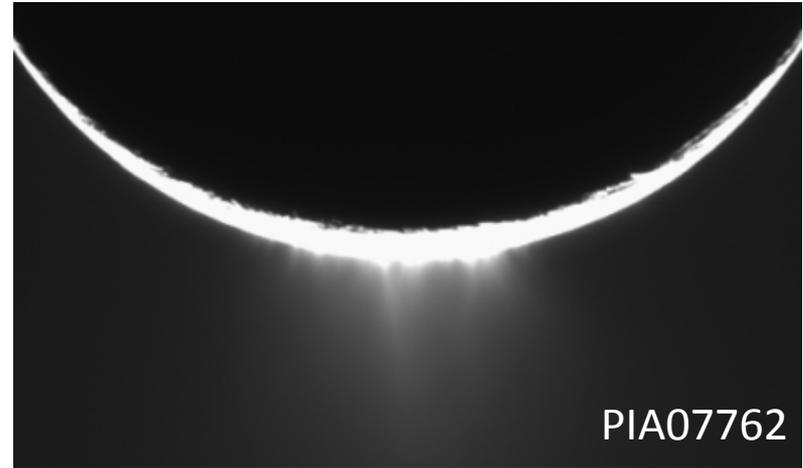
- クレーター生成率がディオオーネと同じだったら
50ma 程度となる
- 後行半球が40億年たっているとすれば、
E環堆積物は4億年未満
- Zahnle et al. 2003 のクレーター年代を用いれば
3 Ma から 500 Ma



ヘレネ、テレスト、カリプソ、パレネ、メトネは

土星の衛星として

1. エンセラダスの火山放出物の汚染を顕著に受けている
2. E環粒子の挙動に影響を受けている



小天体として

1. 明瞭な地すべり地形を有する天体として最小のもの
2. パレネ、メトネは重力以外の営力で球体を維持している天体としても初のもの

まとめ

小型衛星は

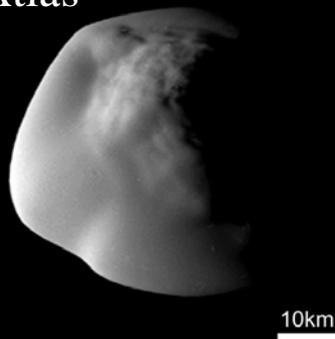
– 小天体として

- 熱的に不活発
- 小天体と異なる表層進化

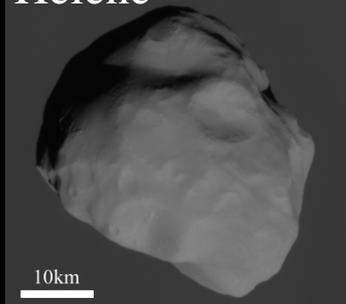
– 土星の衛星として

- 環との相互作用
- 周囲の衛星からの影響

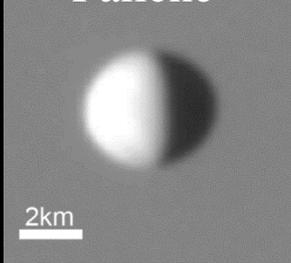
Atlas



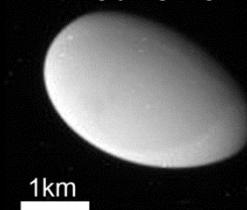
Helene



(d) Pallene



(e) Methone



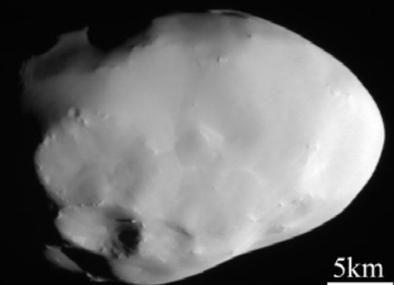
Janus



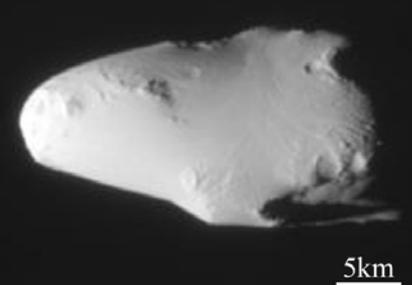
Epimetheus



(a) Telesto



(b) Calypso



(a) Pan



(b) Daphnis

