

エンセラダスの潮汐加熱

東京大学地震研究所

庄司大悟

木星，土星系の衛星

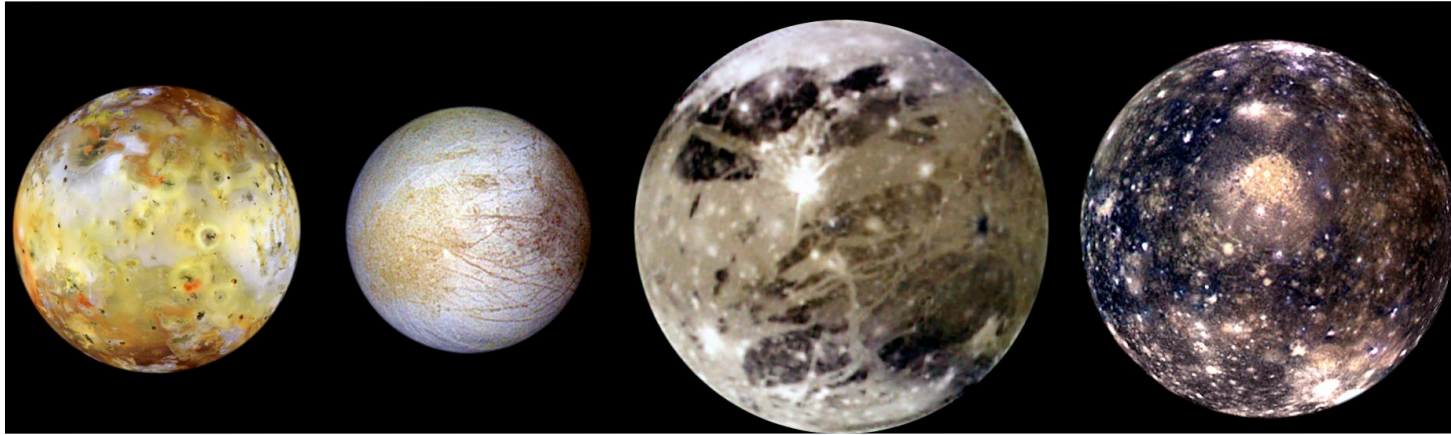
ガリレオ衛星

イオ

エウロパ

ガニメデ

カリスト



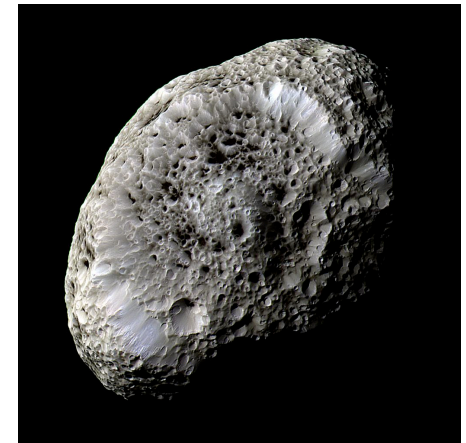
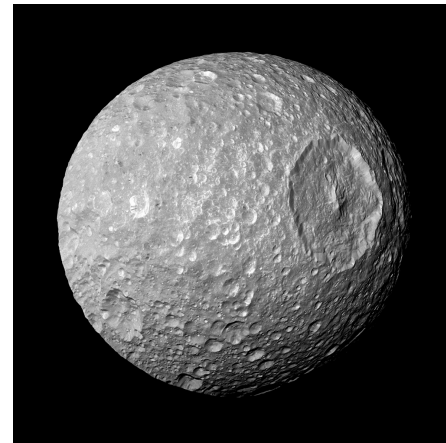
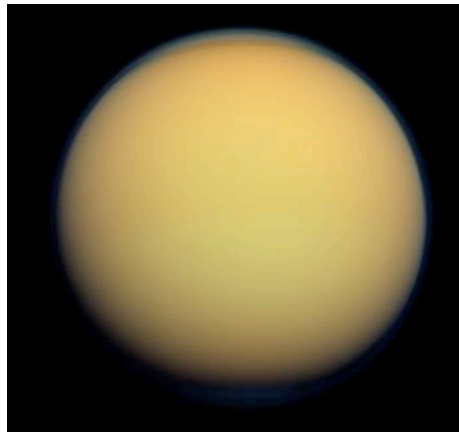
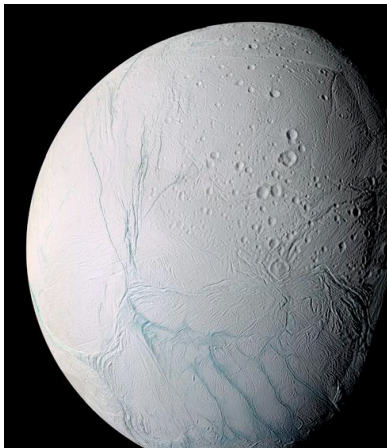
土星系の衛星の例

エンセラダス

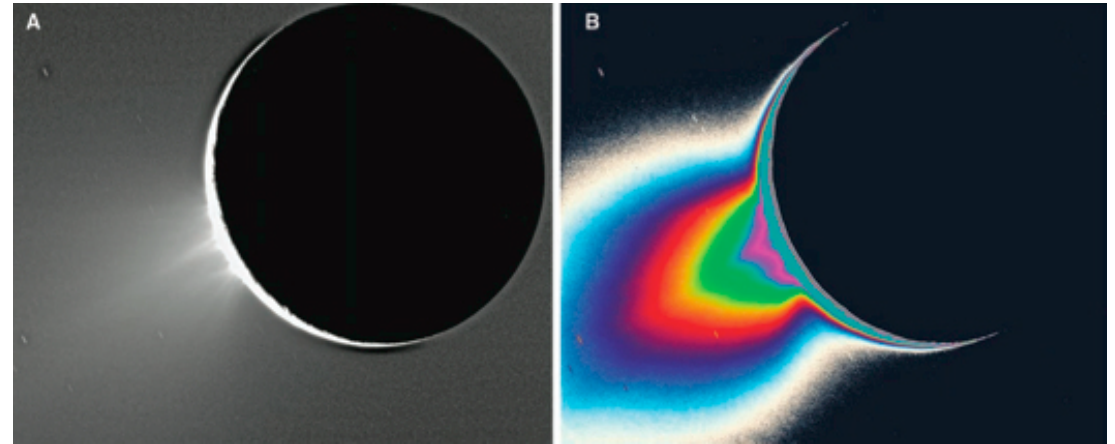
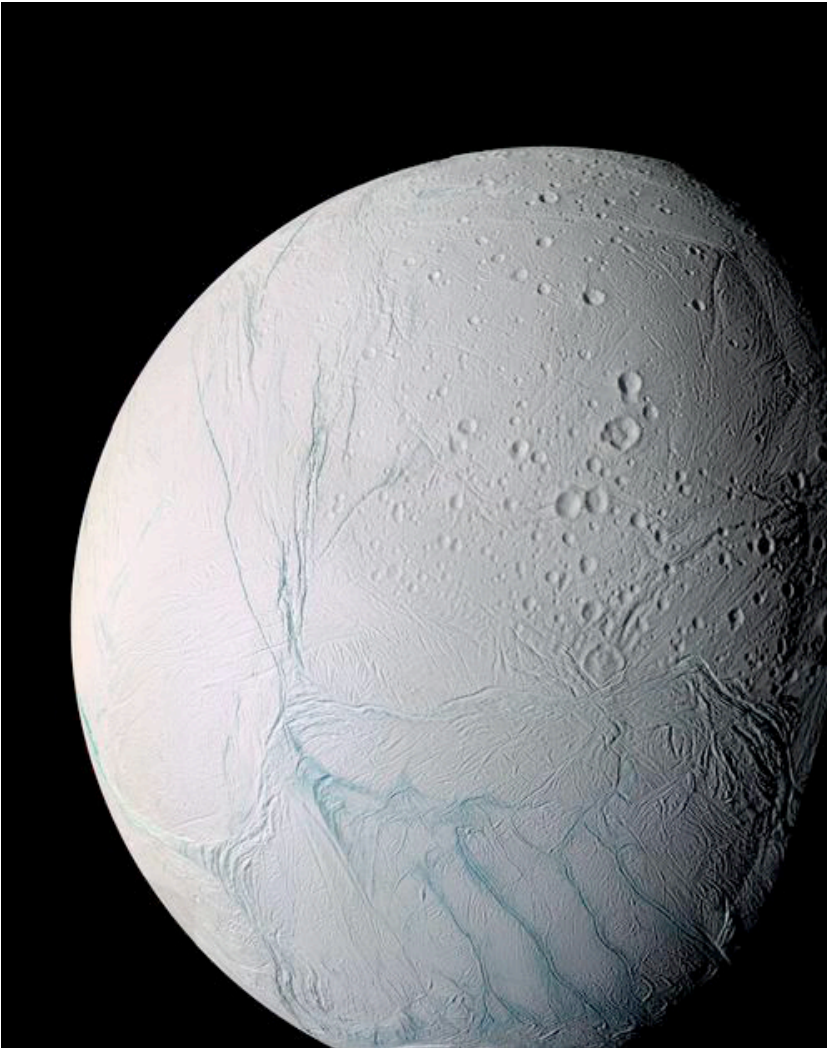
タイタン

ミマス

ヒペリオン



エンセラダス



平均半径：252.1 km

平均密度: 1608 kg/m³

公転周期: 1.37日

離心率: 0.0047

水蒸気が噴出している(Eリングの源).

→内部に水があるかもしれない

南極付近から約16 GWの熱放射(Howett et al., 2011)

熱源

よく聞く熱源の候補

放射壊変による熱

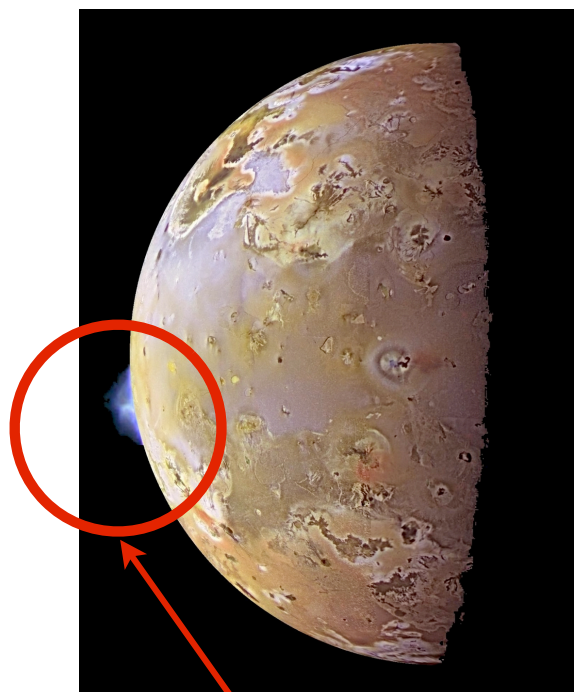
Accretion energy

潮汐加熱

←今回はこれに限る

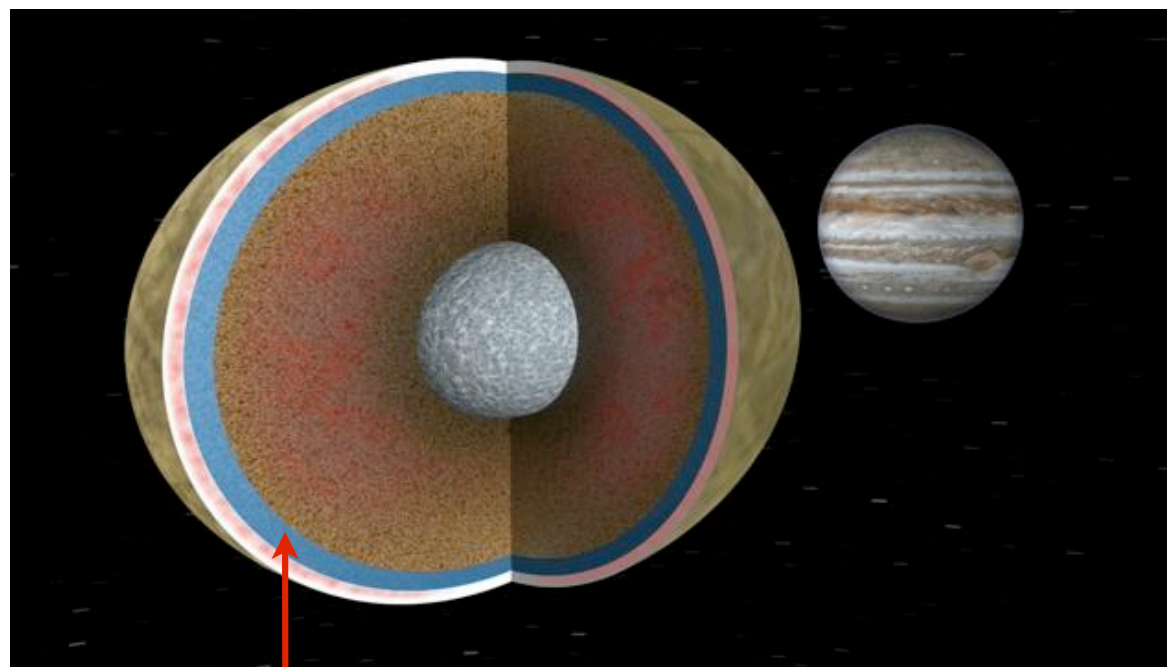
潮汐の有効性

イオ



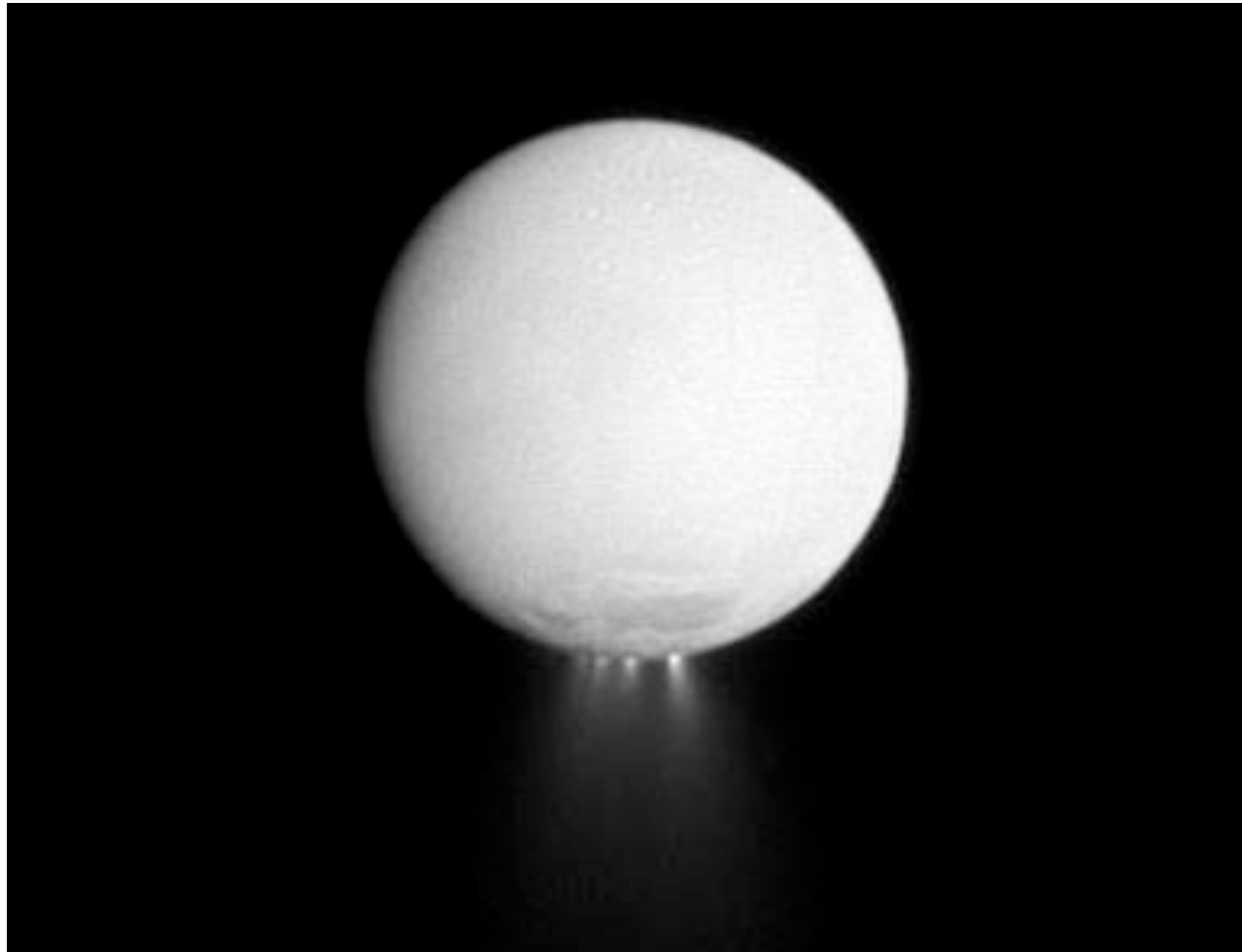
噴火活動

エウロパ



内部海が存在?

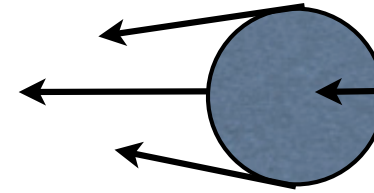
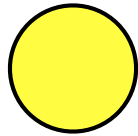
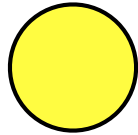
イオやエウロパでは潮汐加熱が大きな熱源となっている



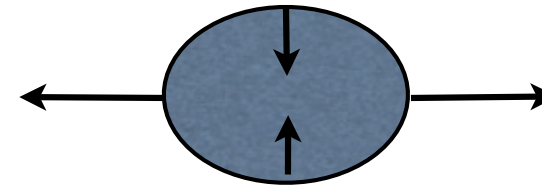
エンセラダスでは潮汐加熱はどのような
働きをなすだろうか

潮汐について

別の天体



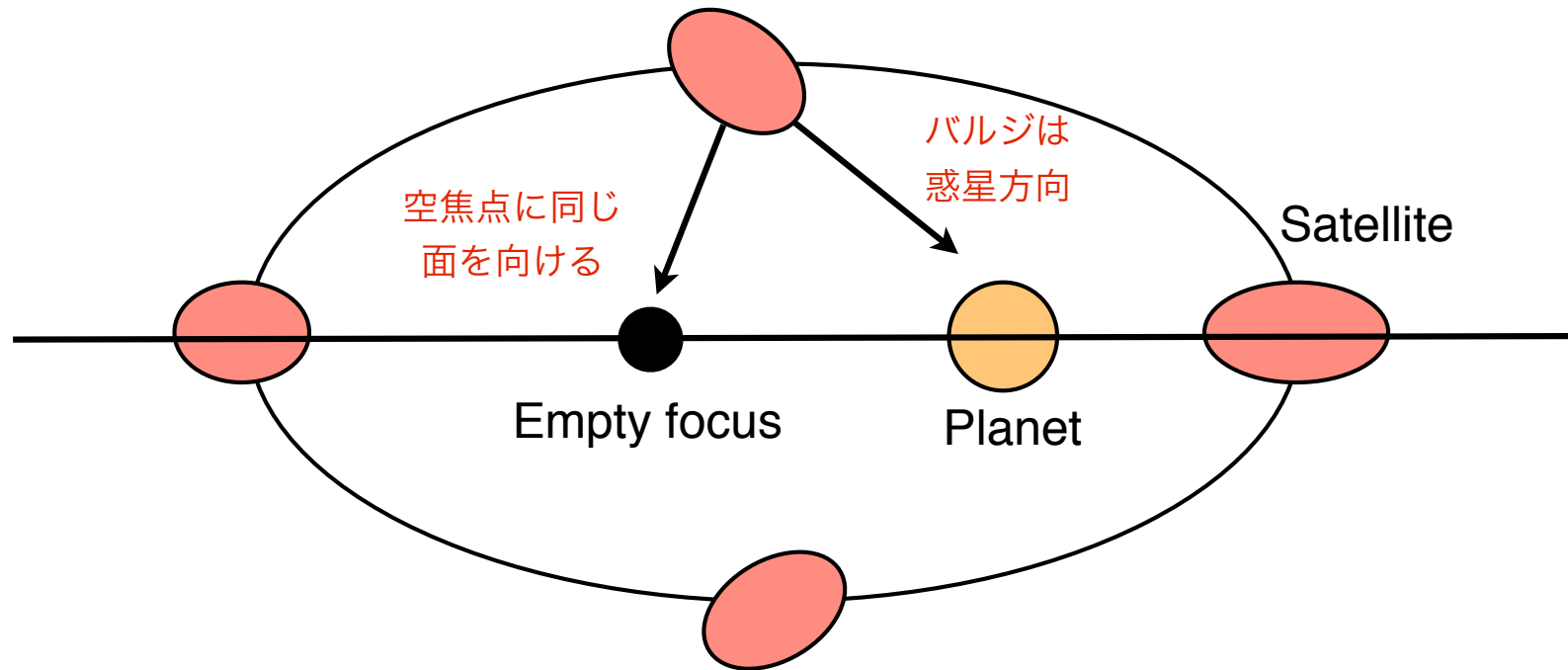
この場所から見た場合



働く重力の違いによって、
形が歪む

各部分に働く重力の違いから物体を変形させるように見える力が働く

エンセラダスでの潮汐



二つの要因で変形の度合いが変化する(同期回転の場合)

1. 楕円軌道による引力の変化(Radial tide)
2. バルジ(出っ張っている部分)の移動(Optical libration)

→衛星を構成する物質の粘性によって摩擦熱が発生(潮汐加熱)

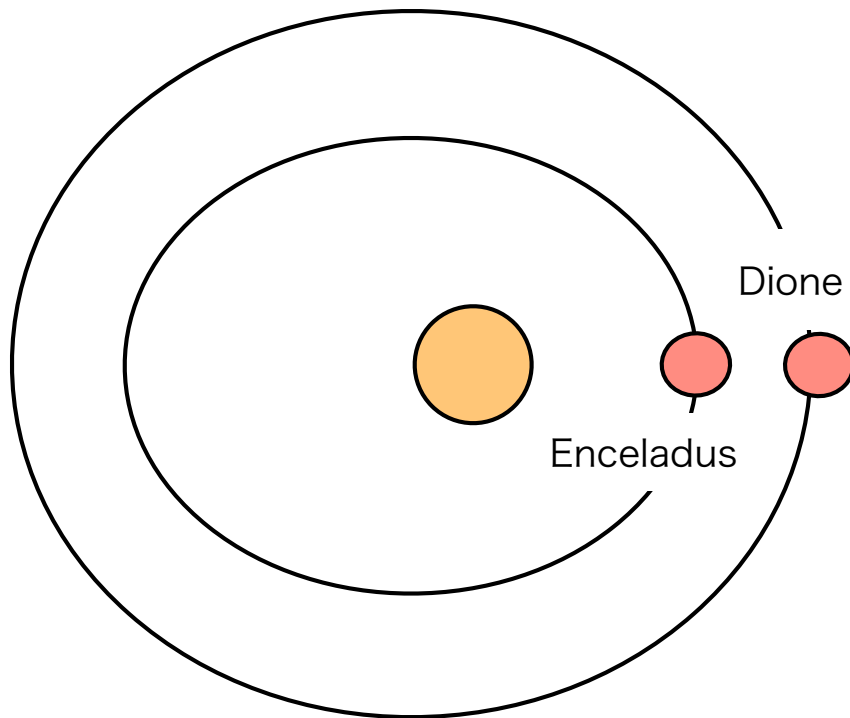
軌道共鳴

衛星が単独で回っているときの離心率の変化

$$\dot{e} \approx -\frac{\dot{E}}{2eE}$$

e: 離心率, E: 衛星が持つエネルギー
(Murray and Dermott, 2000)

→他の衛星が無い場合軌道は円に近づいて行く



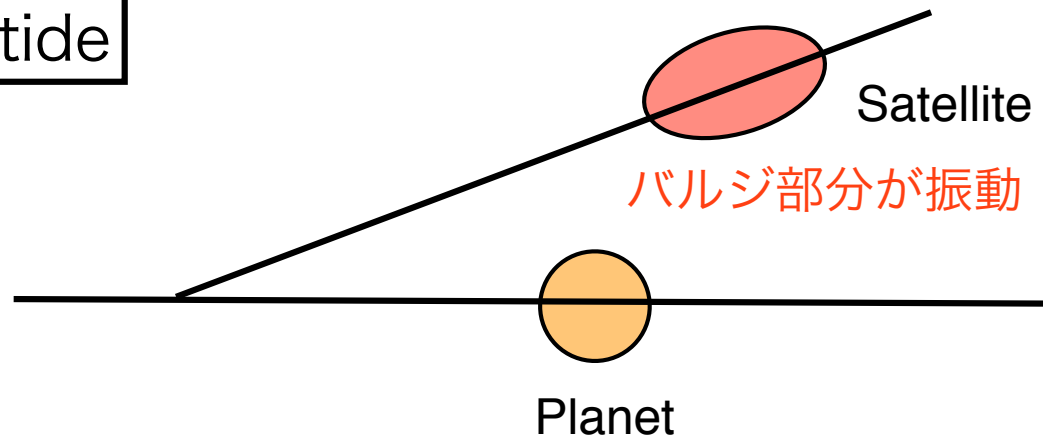
・複数の衛星の公転周期の比が整数になると軌道共鳴が起こる.

・エンセラダスはディオーネとの共鳴によって離心率が高く維持されている.

エンセラダスとディオーネの公転周期の比は1:2

エンセラダスでの潮汐

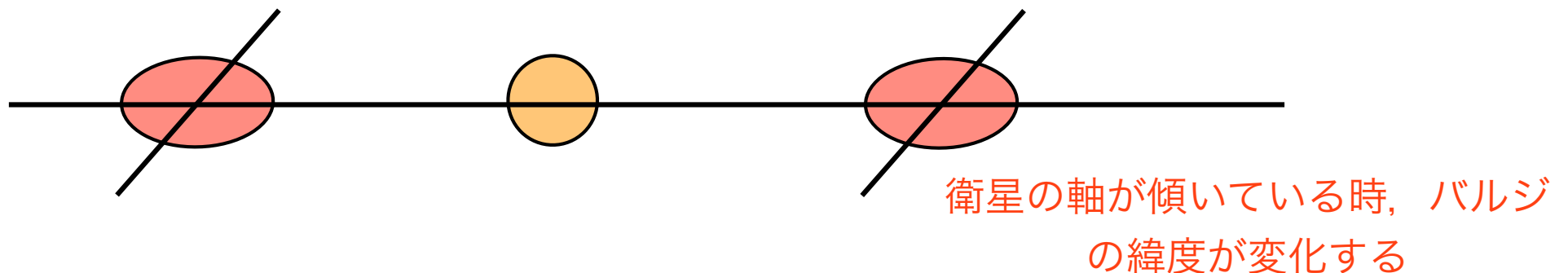
Libration tide



Librationの詳細はMurray and Dermott "Solar System Dynamics"参照

Obliquity tide

横から見た図



これらの影響については後述

物質の変形をモデル化する

物体の変形には主に二種類ある

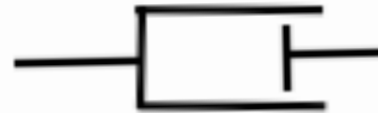
弾性



剛性率 μ

$$\sigma = \mu \epsilon$$

塑性(流体)



粘性率 η

$$\sigma = \eta \dot{\epsilon}$$

σ : stress, ϵ : strain

弾性変形をバネ、塑性変形をダッシュポット(ダンパー)で表す

物質の変形をモデル化する

しかし、実際の物質は両方の性質を持つものが多い(粘弾性)

例

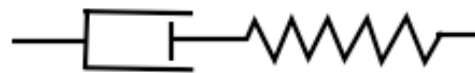


氷や岩石も粘弾性体

粘弾性体はバネとダッシュポットを組み合わせでモデル化される

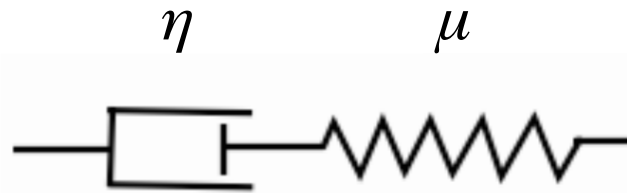
例

Maxwell model



マクスウェルモデル

地球、惑星科学の現象ではマクスウェルモデルがよく使われる



Maxwell time

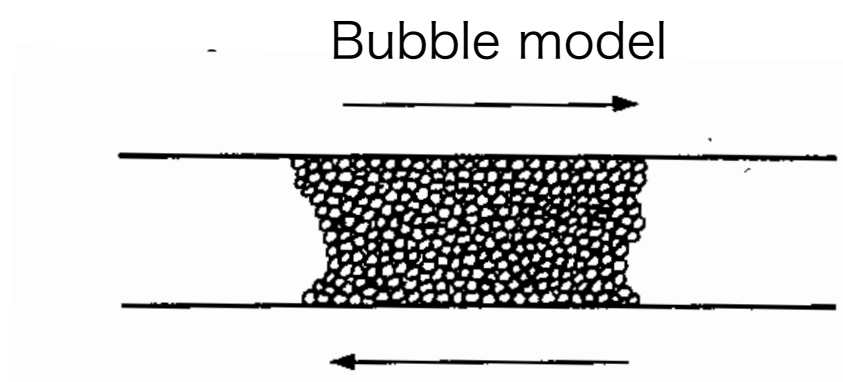
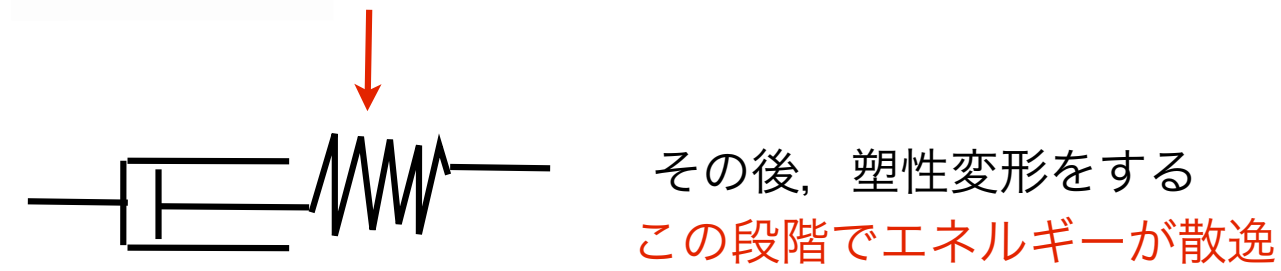
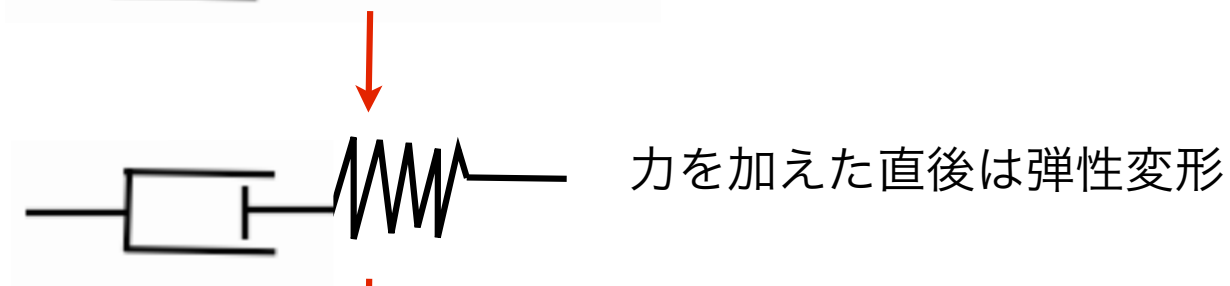
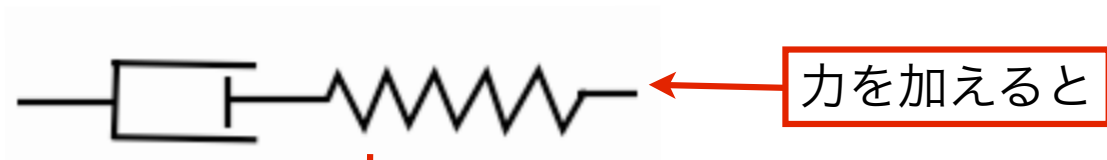
$$\tau = \frac{\eta}{\mu}$$

tを力の周期とすると

$t < \tau \rightarrow$ 弾性

$t > \tau \rightarrow$ 塑性

この性質が物質の挙動とよくあっている.



粒は弾性だが、粒子が移動することで流体の振る舞いを始める

Cathles, 1975

潮汐のような比較的長い周期の力に関してはこのシンプルなモデルで表すことができる(Sotin et al., 2009).

対応原理

マクスウェルモデルの関係式

$$\dot{\sigma}_{ij} + \frac{\mu}{\eta} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) = 2\mu \dot{\epsilon}_{ij} + \left(K_E - \frac{2}{3} \mu \right) \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} \quad K_E: \text{Bulk modulus}$$

フーリエ変換すると

$$\tilde{\sigma}_{ij} = 2\tilde{\mu}_M(\omega) \tilde{\epsilon}_{ij} + \left[K_E - \frac{2}{3} \tilde{\mu}_M(\omega) \right] \tilde{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} \quad \leftarrow \text{フックの法則}$$

弾性の式と同じ!!

$$\text{ここで、} \tilde{\mu}_M(\omega) = \frac{\mu\omega^2\eta^2}{\mu^2 + \omega^2\eta^2} + i \frac{\mu^2\omega\eta}{\mu^2 + \omega^2\eta^2} \quad \leftarrow \text{Complex shear modulus}$$

重要な点：バネ-ダッシュポットモデルは弾性体と同様に扱うことができる。

弾性体の球の振る舞いについては自由振動の解明のため、地震学の分野でよく研究されている。

同期回転する天体の平均加熱量

$$\dot{E} = -\frac{21}{2} \text{Im}(\tilde{k}_2) \frac{(\omega R_s)^5}{G} e^2 \quad \text{Segatz et al., 1988}$$

ω : mean motion, R_s : 半径, G : 重力定数, e : 離心率, k_2 : Love 数

Love数は表面での重力ポテンシャルから求めることができる

$$y_i = Y_{ij} C_j$$

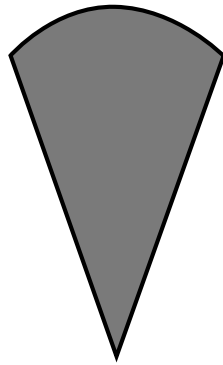
y_1 : radial displacement, y_2 : tangential displacement, y_3 : radial stress, y_4 : tangential stress, y_5 : potential ratio, y_6 : boundary condition

$$Y_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{l r^{l+1}}{2(2l+3)} & r^{l-1} & 0 & \frac{(l+1)r^{-l}}{2(2l-1)} & r^{-l-2} & 0 \\ \frac{(l+3)r^{l+1}}{2(2l+3)(l+1)} & \frac{r^{l-1}}{l} & 0 & \frac{(2-l)r^{-l}}{2l(2l-1)} & -\frac{r^{-l-2}}{l+1} & 0 \\ \frac{(l\rho g r + 2(l^2-l-3)\mu)r^l}{2(2l+3)} & (\rho g r + 2(l-1)\mu)r^{l-2} & -\rho r^l & \frac{(l+1)\rho g r - 2(l^2+3l-1)\mu}{2(2l-1)r^{l+1}} & \frac{\rho g r - 2(l+2)\mu}{r^{l+3}} & -\frac{\rho}{r^{l+1}} \\ \frac{l(l+2)\mu r^l}{(2l+3)(l+1)} & \frac{2(l-1)\mu r^{l-2}}{l} & 0 & \frac{(l^2-1)\mu}{l(2l-1)r^{l+1}} & \frac{2(l+2)\mu}{(l+1)r^{l+3}} & 0 \\ 0 & 0 & -r^l & 0 & 0 & -\frac{1}{r^{l+1}} \\ \frac{2\pi G \rho l r^{l+1}}{2l+3} & 4\pi G \rho r^{l-1} & -(2l+1)r^{l-1} & \frac{2\pi G \rho (l+1)}{(2l-1)r^l} & \frac{4\pi G \rho}{r^{l+2}} & 0 \end{pmatrix}$$

(Sabadini and Vermeersen., 2004)

$$k_2(\omega) = -y_5(R_s) - 1$$

マクスウェルモデルでのエンセラダス



一様モデルでの加熱量

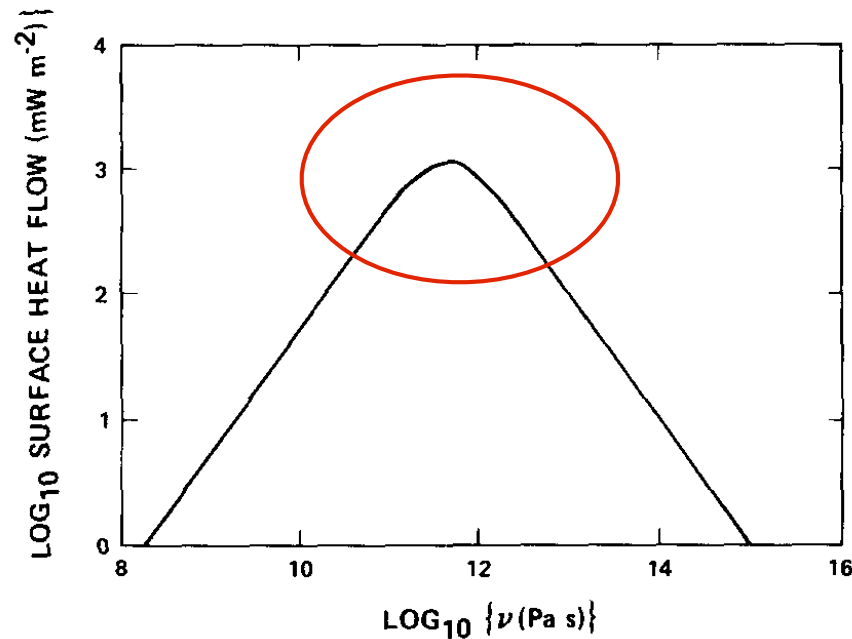
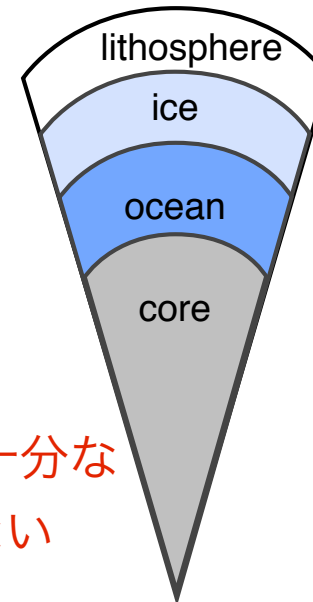
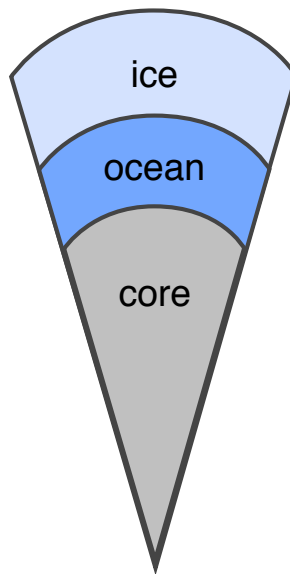


FIG. 1. Tidal heating in a homogeneous Maxwell model of Enceladus as a function of mantle viscosity for $e = 0.0044$. Mantle shear modulus equals 4×10^9 Pa. The heating is represented by the equivalent surface heat flow.

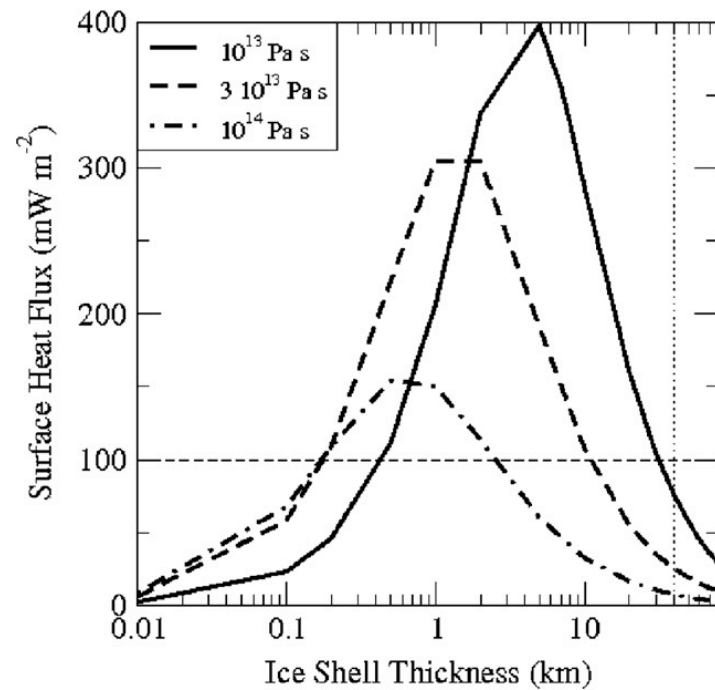
- 均質なモデルの場合，加熱量は最大1000mW/m²
- エンセラダス全体で約960GW
- ただし，粘性係数は10¹² Pa s以下

Ross and Schubert (1988)

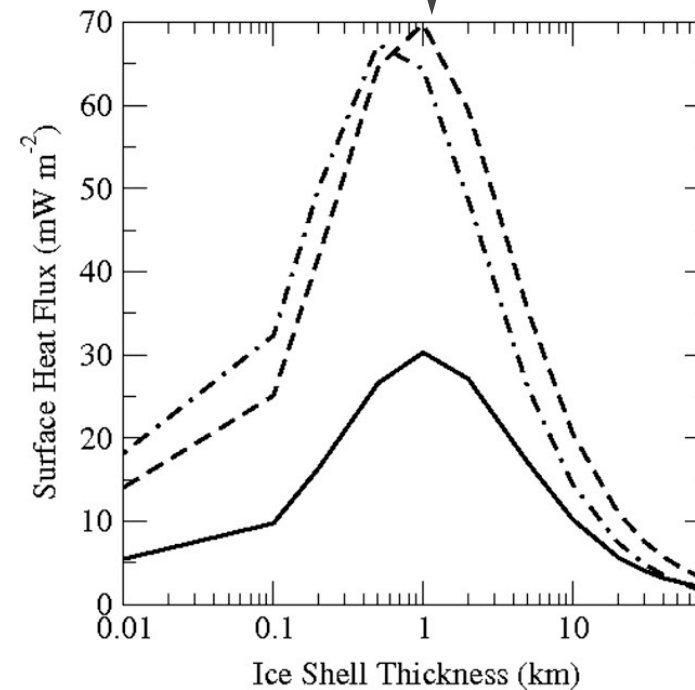
マクスウェルモデルでのエンセラダス



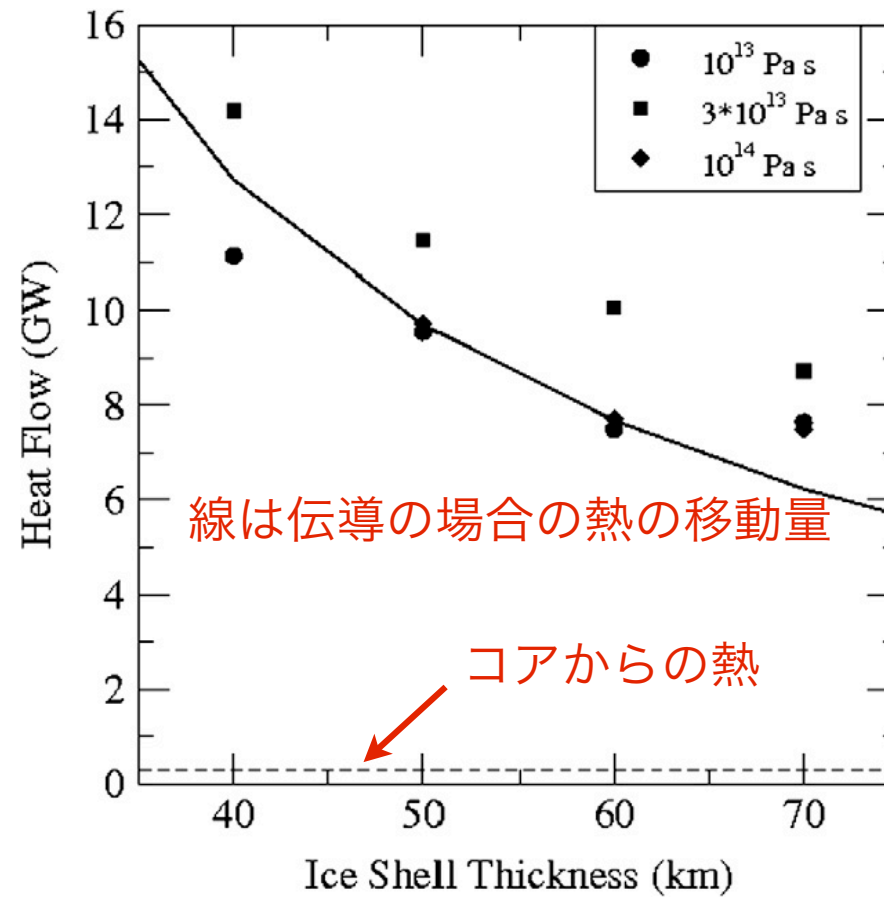
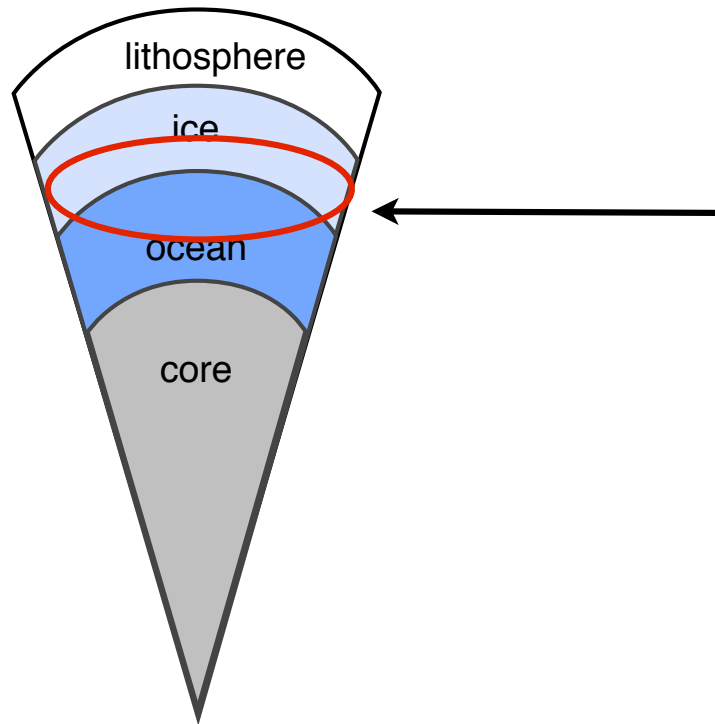
4層のモデルでは十分な
熱量は得られない



観測量



氷層の底での熱の移動量



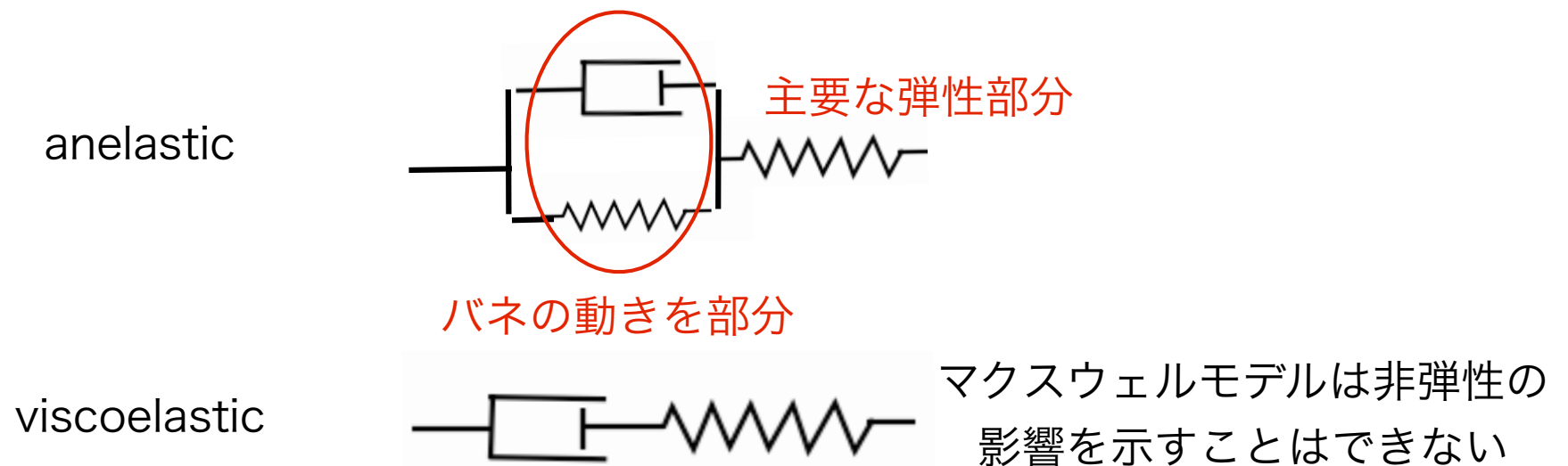
Roberts and Nimmo (2008)

氷の状態(伝導、対流)に関わらず、奪い取る熱量が入ってくる熱量より大きい。
→内部海があったとしても、すぐに凍ってしまう。

マクスウェルモデルはエンセラダスにとって適切か

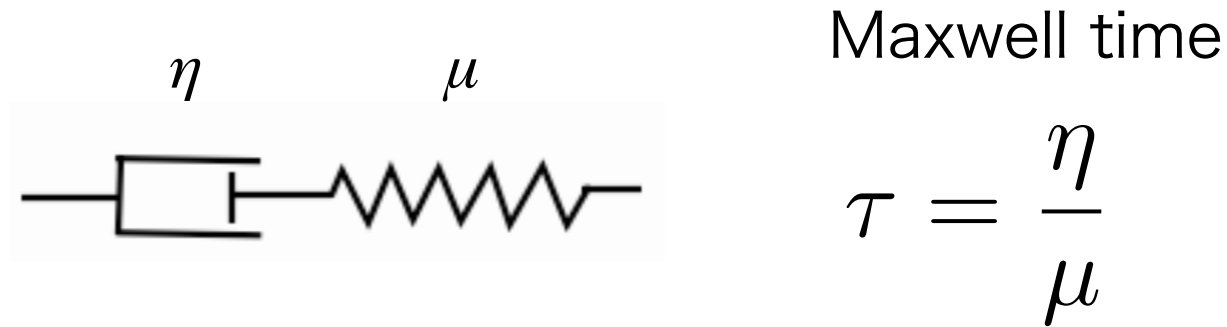
物質は粘弾性以外に非弾性(anelastic)の振る舞いをする。

非弾性(anelastic)とは：加えた力に対して変形が瞬時に現れるわけではないが、ある一定の平衡状態を保つもの(Karato and Spetzler, 1990)



氷の粘性が高くなると弾性の影響が強くなる。非弾性の影響がないマクスウェルモデルは実際の挙動とずれる。

マクスウェルモデルはエンセラダスにとって適切か



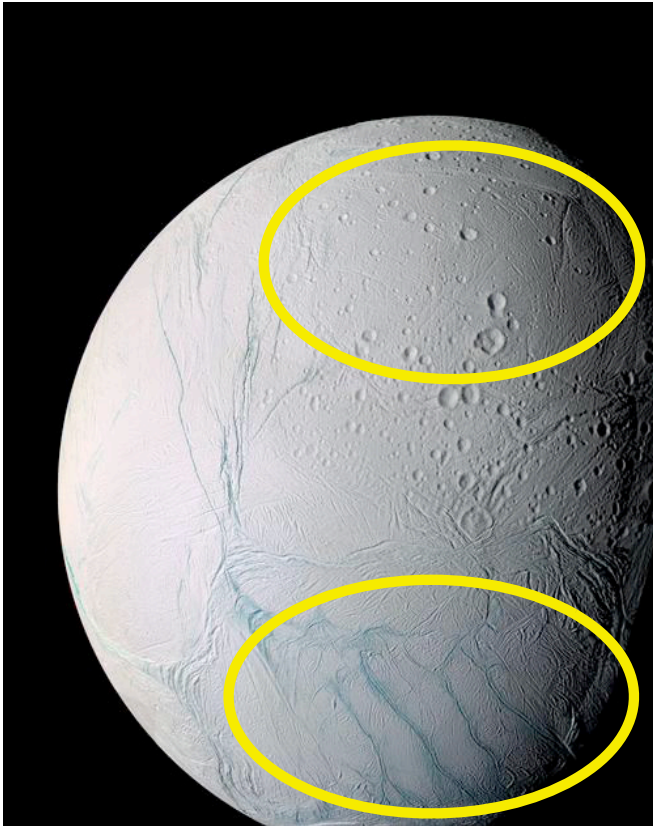
マクスウェルモデルの問題：力の周期がマクスウェルタイムより非常に小さい場合、物質の挙動を正確に表すことができない. (Efroimsky, 2011)

エンセラダスの公転周期: 1.37 days = 1.2×10^5 s

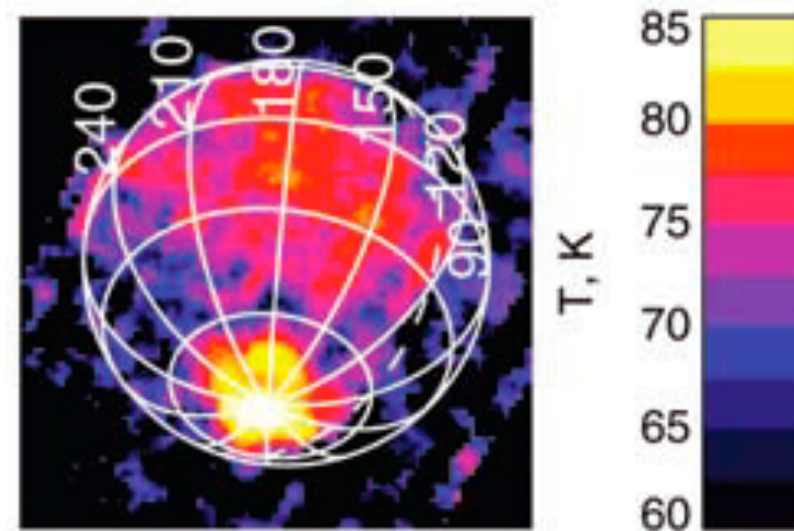
→氷の剛性率を数GPaとすると、粘性率が 10^{15} Pa s以上の場合マクスウェルモデルは不適切になる.

Rambaux et al. (2010)では 4×10^{14} Pas 以上

エンセラダスの多様な表面状態



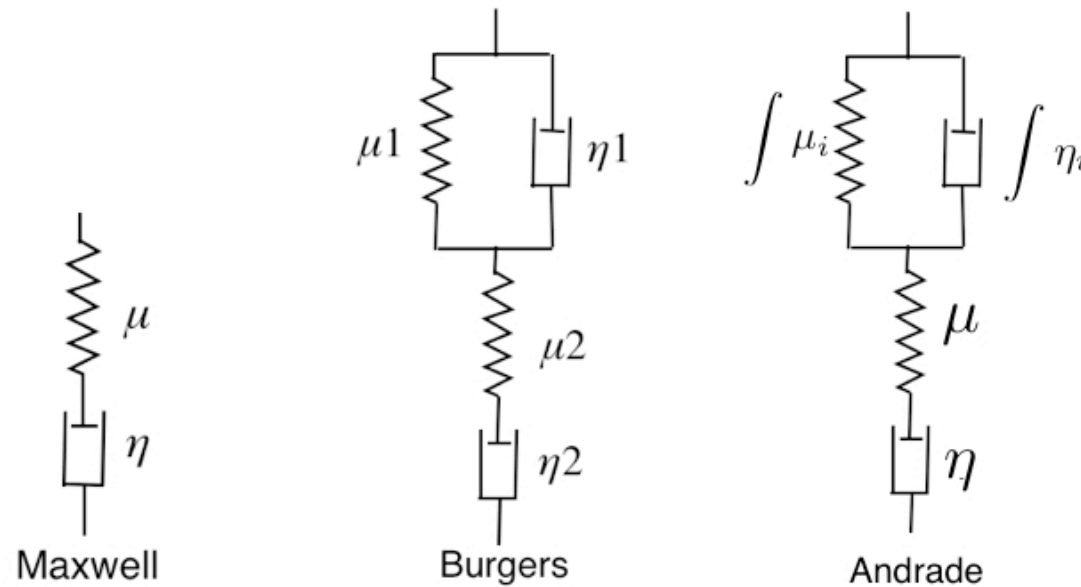
エンセラダスの場合，表面の状態が大きく異なっている．また，温度も一様ではない．



Spencer et al., (2006)

マクスウェルモデルはエンセラダスのモデルとしては不適切かも

マクスウェルモデル以外のレオロジーを考慮してみる



図はCastillo-Rogez et al., 2011を改変

バーガースモデル：マクスウェルモデルを拡張した古典的なモデル。
広い周期の力の応答を記述できる。

アンドレイドモデル：実験から得られた物質の挙動に合うように構成された、経験的なモデル。

$$\dot{E} = -\frac{21}{2} \text{Im}(\tilde{k}_2) \frac{(\omega R_s)^5}{G} e^2 \quad (\text{Segatz et al., 1988})$$

ω : mean motion, R_s : Radius, G : gravity constant, e : eccentricity

Love数 k_2 がレオロジーのshear modulus に依存

Maxwell body

$$\tilde{\mu}_M(\omega) = \frac{\mu\omega^2\eta^2}{\mu^2 + \omega^2\eta^2} + i\frac{\mu^2\omega\eta}{\mu^2 + \omega^2\eta^2}. \quad (\omega: \text{mean motion}, \mu: \text{rigidity}, \eta: \text{viscosity})$$

Burgers body

$$\tilde{\mu}_B(\omega) = \frac{\omega^2(C_1 - \eta_1 C_2 / \mu_1)}{C_2^2 + \omega^2 + C_1^2} + i\frac{\omega(C_2 + \eta_1 \omega^2 C_1 / \mu_1)}{C_2^2 + \omega^2 C_1^2}$$

$$C_1 = \frac{1}{\mu_1} + \frac{\eta_1}{\mu_1 \eta_2} + \frac{1}{\mu_2}$$

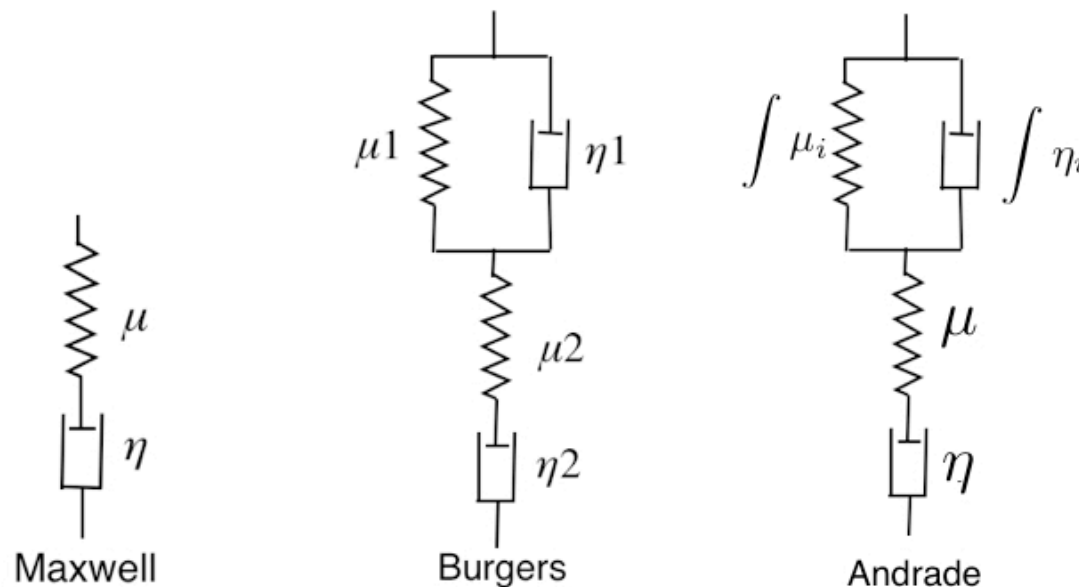
$$C_2 = \frac{1}{\eta_2} - \frac{\eta_1}{\mu_1 \mu_2} \omega^2$$

Andrade body

$$\tilde{\mu}_A(\omega) = \frac{1}{\tilde{J}_A(\omega)}.$$

$$\tilde{J}_A(\omega) = \frac{1}{\mu} + \omega^{-\alpha} \beta \cos\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \Gamma(\alpha + 1) - i \left[\frac{1}{\eta\omega} + \omega^{-\alpha} \beta \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \Gamma(\alpha + 1) \right]$$

問題点: マクスウェルモデルに比べてパラメータの数が増える.



マクスウェルモデルはパラメータの数が少なく, 物理量(剛性率と粘性率) のみで表すことができる点で優れている.

バーガース: 地球の氷河の観測から $\mu_1 = \mu_2$ (Reeh et al., 2003), イアペタスのスピンに関するシミュレーションから $\eta_2 / \eta_1 = 50$ (Robuchon et al., 2010)

アンドレイド: エンセラダスのLibrationのシミュレーションから, $\alpha = 0.33$ を使用 (Rambaux et al., 2010)

エンセラダスの内部構造

従来の計算では、エンセラダスは分化したコアを持つとして、計算されてきた。

ところが、最新の観測結果によると...

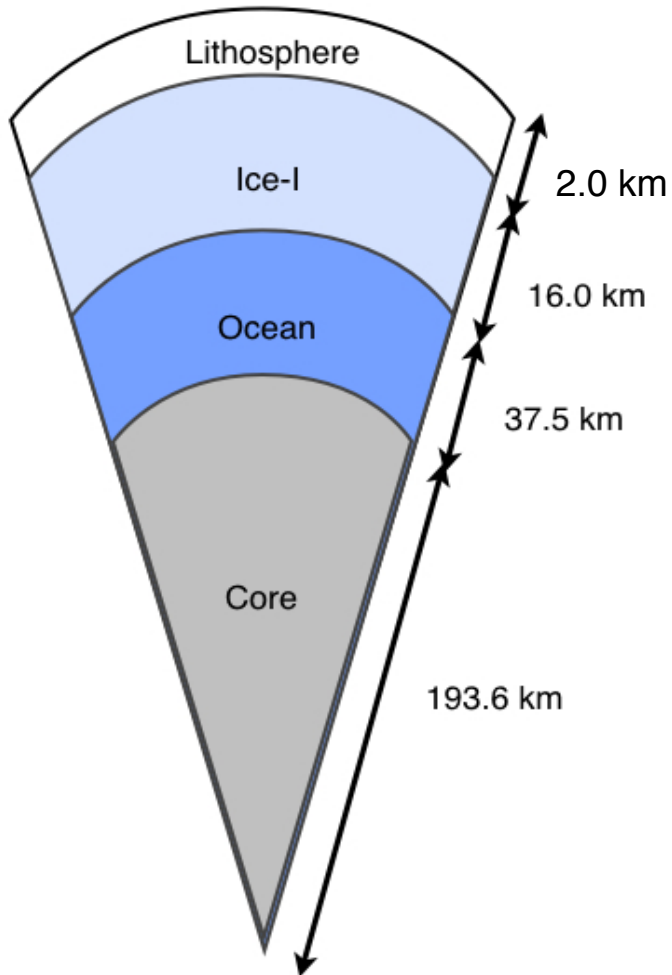
エンセラダスの慣性モーメント
0.34-0.36 (less et al., 2010)

カリスト: 0.3549 ± 0.0042 (Anderson et al., 2001)

ここから何がいえるか

エンセラダスのコアは岩石に完全に分化していないのかも知れない。

新しい内部構造モデル

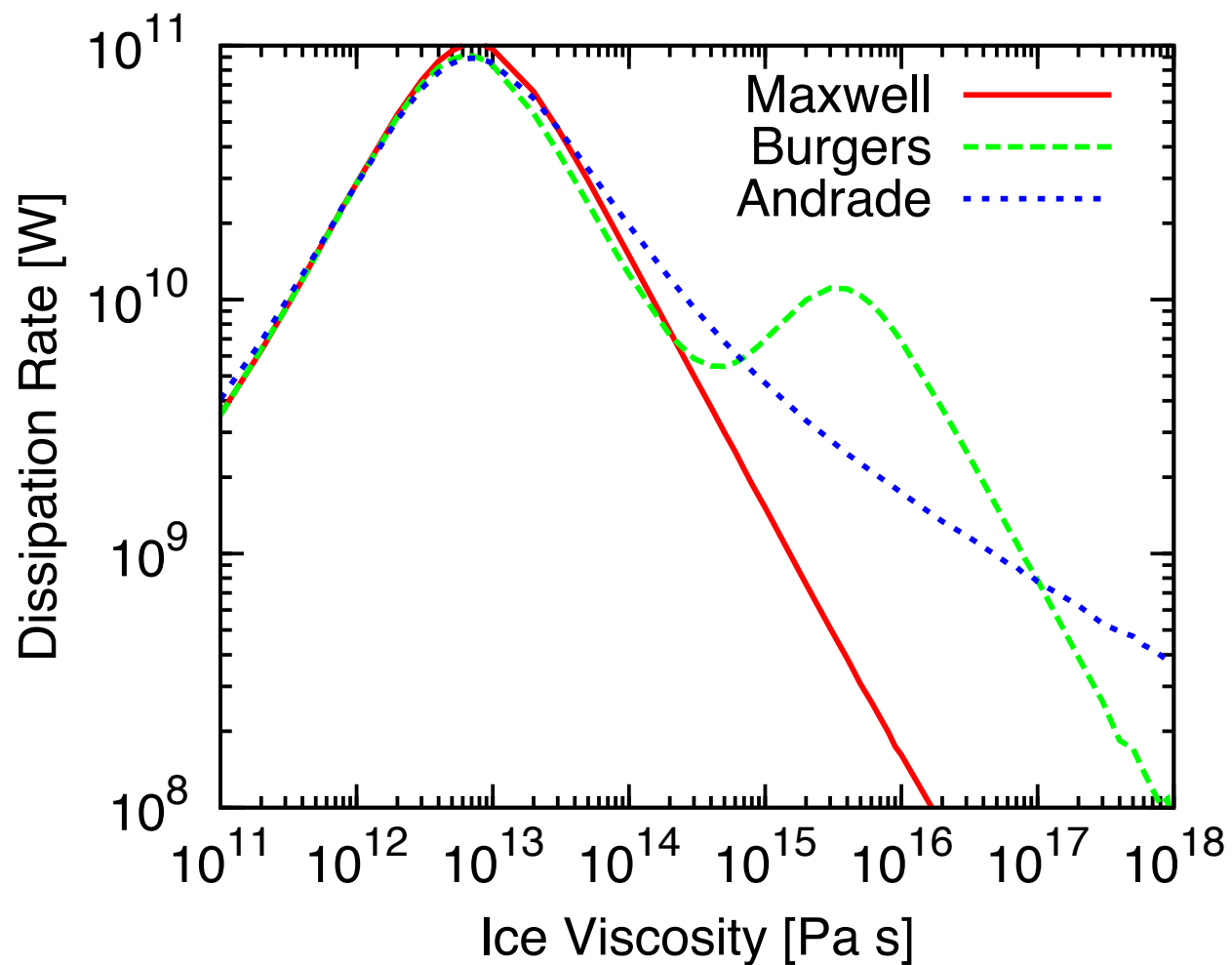


Material property of each layer

Layer	Density (kg/m^3)	Rigidity (GPa)	Viscosity (Pa s)
Core	2300	50	10^{17}
Ocean	1100	0.4	10^7
Ice-I	950	3.3	
Lithosphere	950	3.3	10^{20}

- アンモニアを含む海を仮定.
- 地形の分析から氷層の上部2kmはリソスフェアとした (Giese et al., 2008).

加熱量の変化



At 10^{15} Pa s

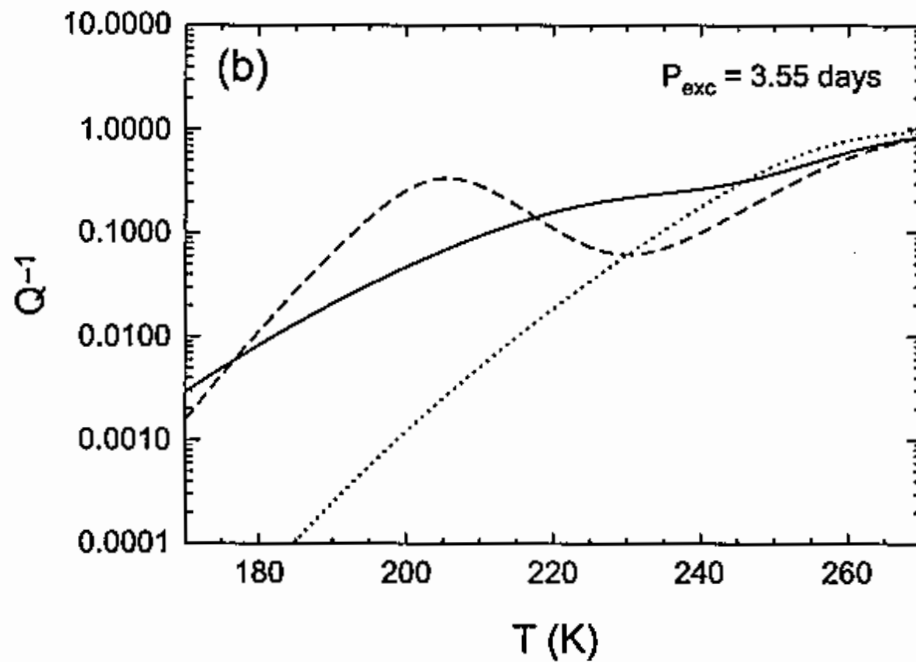
Maxwell body: 1.5 GW

Burgers body: 7.0 GW

Andrade body: 4.7 GW

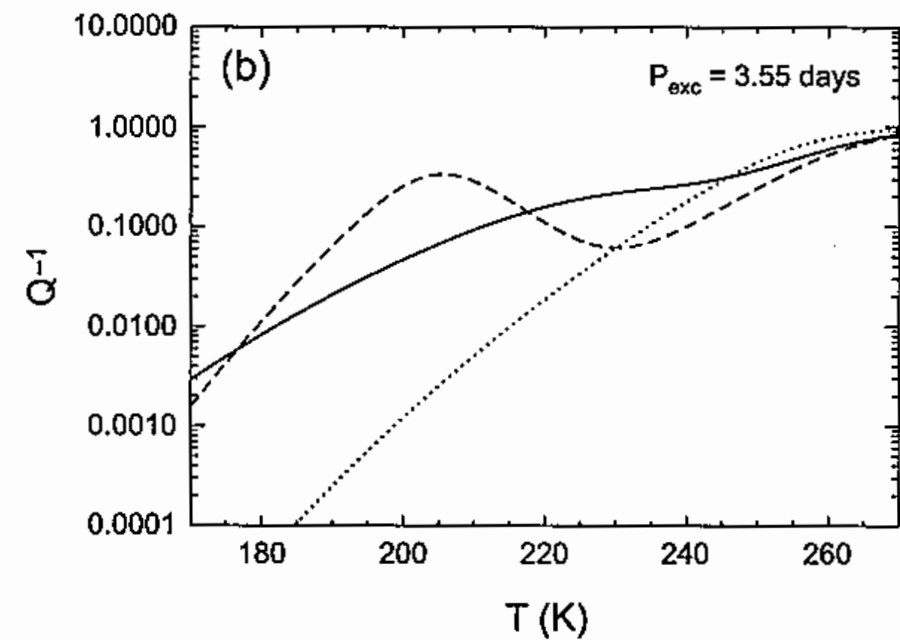
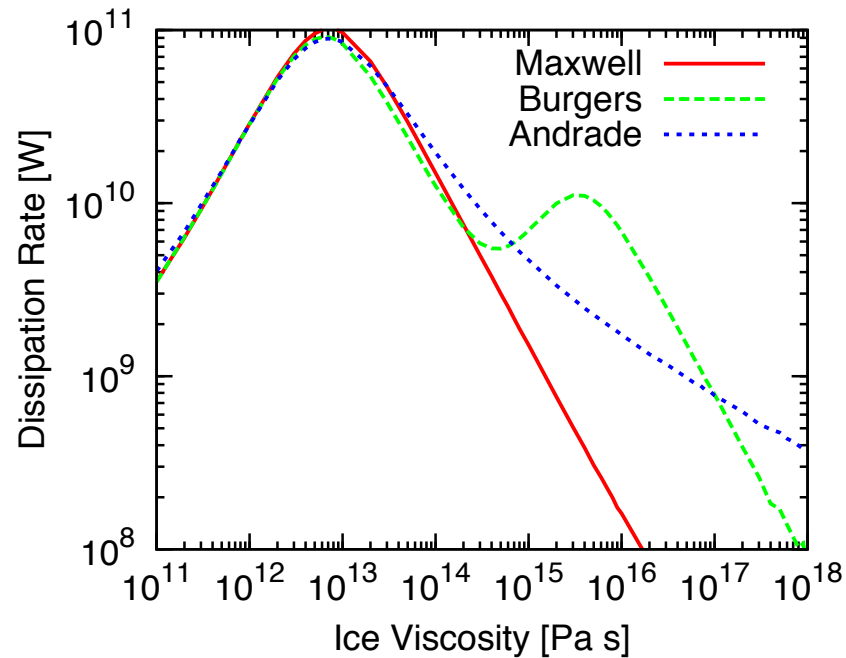
果たしてどれが最も正確なのだろうか

エウロパの氷モデルと実験値



Sotin et al., 2009

- 実験値と比較すると、マクスウェルモデルは低い温度領域で非散逸的。
- バーガースモデルは二つ目のピーク付近では過剰



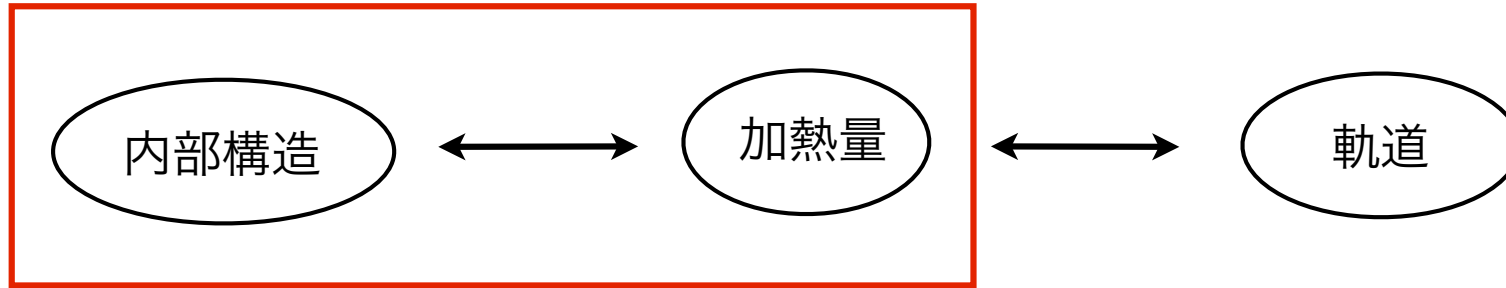
Sotin et al., 2009

- ・ 室内実験の値にはアンドレイドモデルが一番近い
(実験に合うように作られたモデルなので当然)
- ・ 室内実験などに関連させて制約をあたえていきたい

ここまでは加熱量の話

重要な点: 潮汐加熱は軌道及び内部構造の変化と相互に依存している





Stagnant

Convective

Ocean

加熱されると氷の厚さが変化する

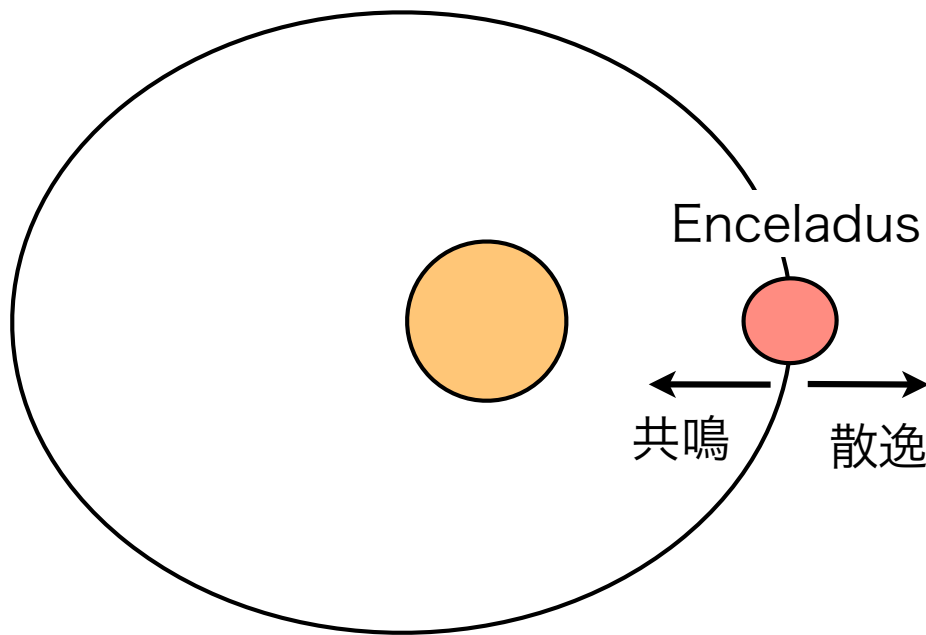


氷の厚さが変化すると加熱量が変わる

$$\dot{E} = -\frac{21}{2} \text{Im}(\tilde{k}_2) \frac{(\omega R_s)^5}{G} e^2$$

Love数は内部構造に大きく依存

共鳴と散逸の関係



離心率の変化 Běhounková et al. (2012)

$$\frac{de}{dt} = Ae^2(1 - 30.69D_e e^2)$$

共鳴の影響

散逸の影響

加熱量

$$\dot{E} = -\frac{21}{2}\text{Im}(\tilde{k}_2)\frac{(\omega R_s)^5}{G}e^2$$

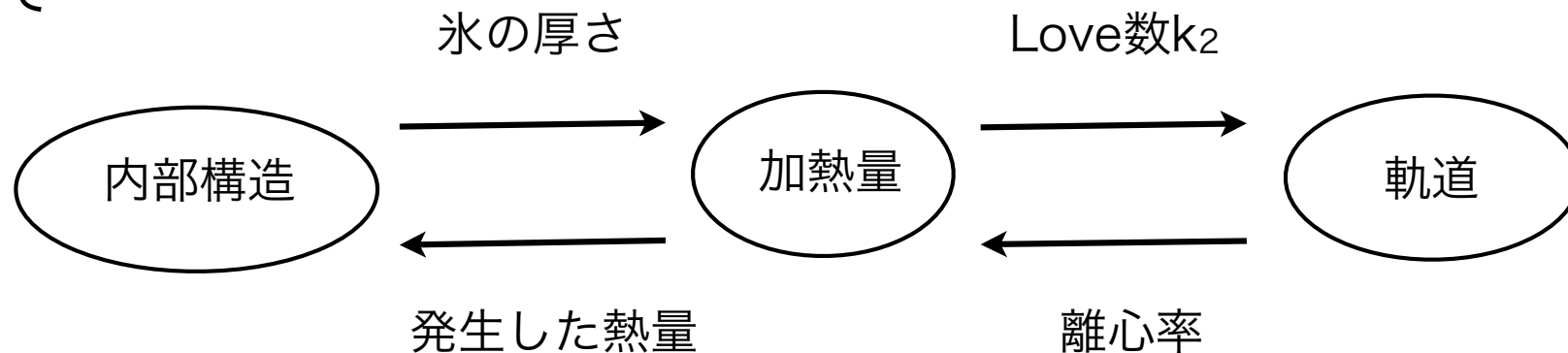
加熱量と離心率は相互関係

相互作用の見積もりが重要になるある問題

現在の離心率が平衡状態である場合、潮汐加熱で生み出せる熱量は1.1 GW (Meyer and Wisdom, 2007)

- ・この計算はエンセラダスの内部構造やレオロジーに依存しない。
- ・ただし、Meyer and Wisdom, 2007はエンセラダスが平衡状態であるとは考えていない。

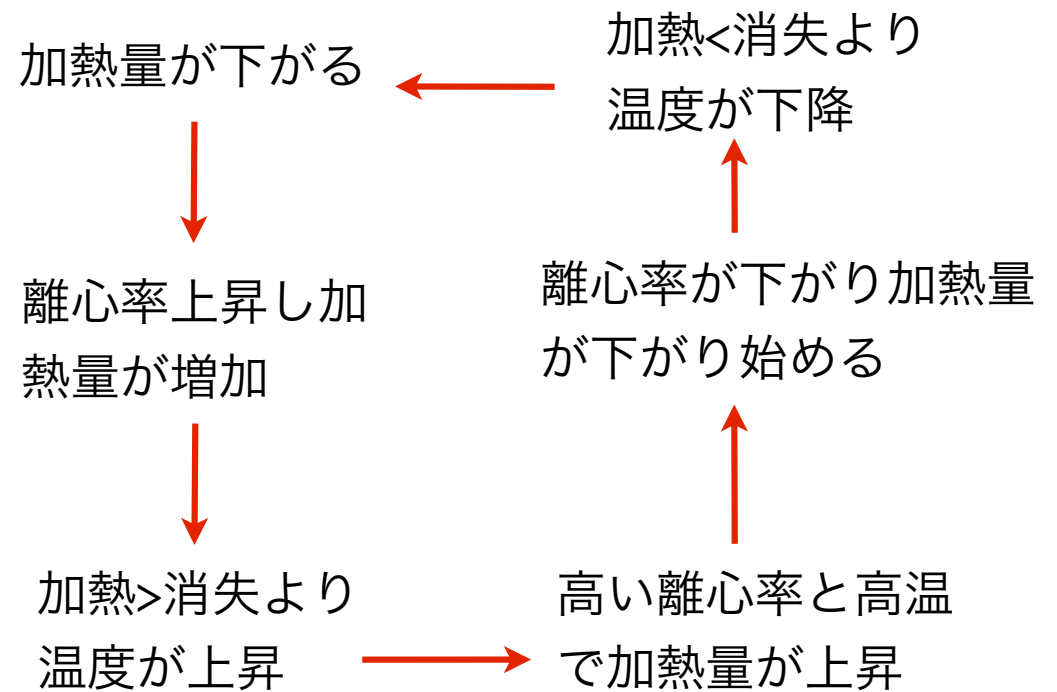
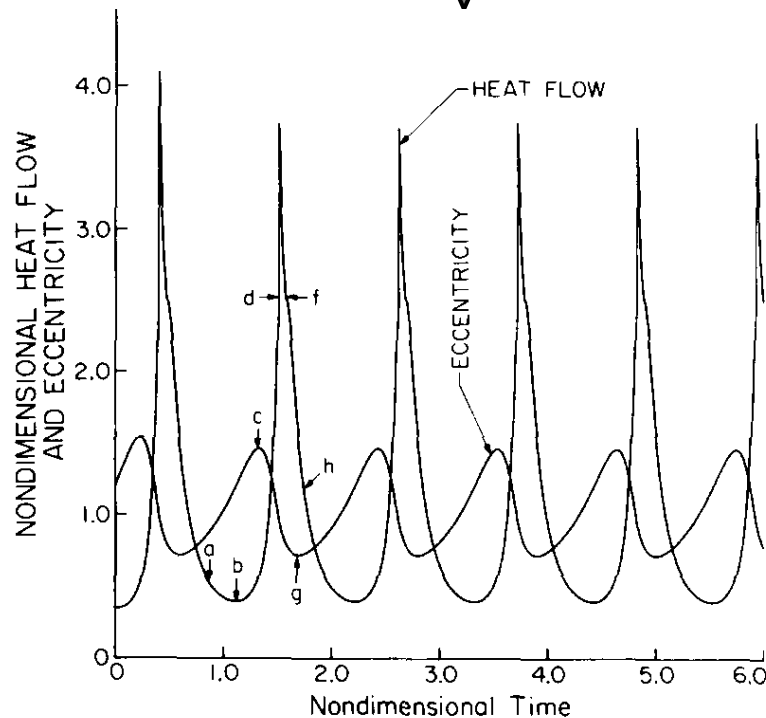
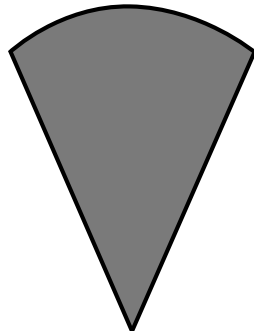
よって



これらの相互作用を考慮して検討する必要がある。

ガリレオ衛星におけるカップリング計算

均質モデル

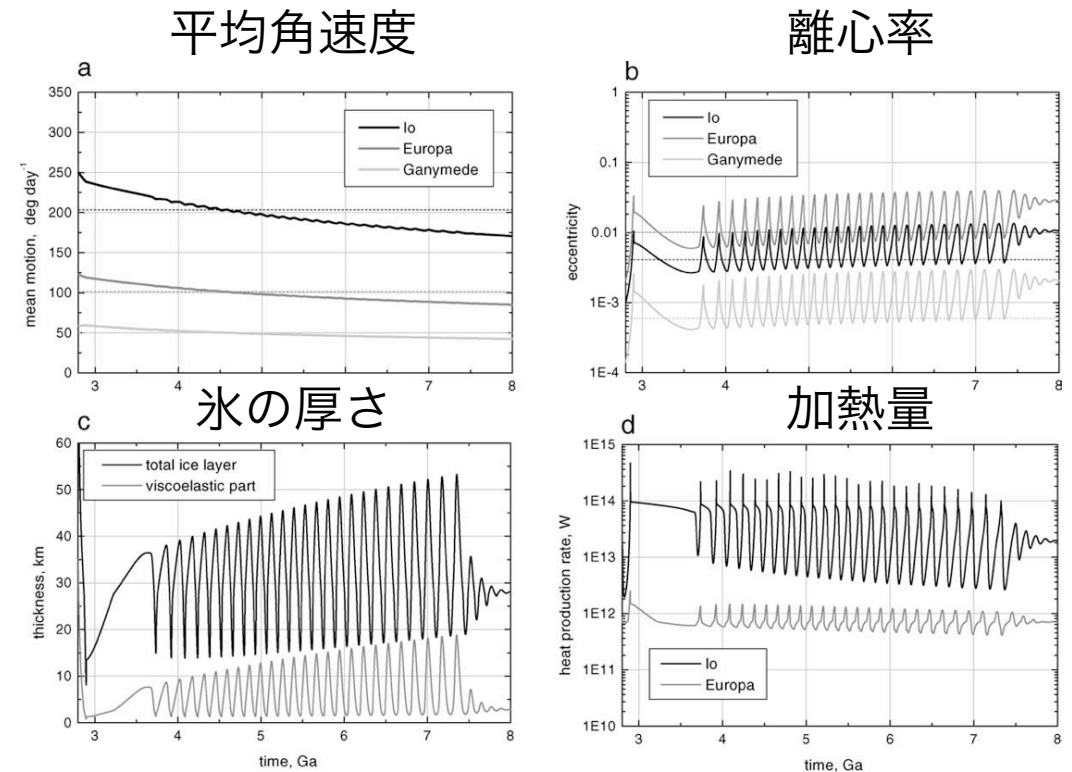
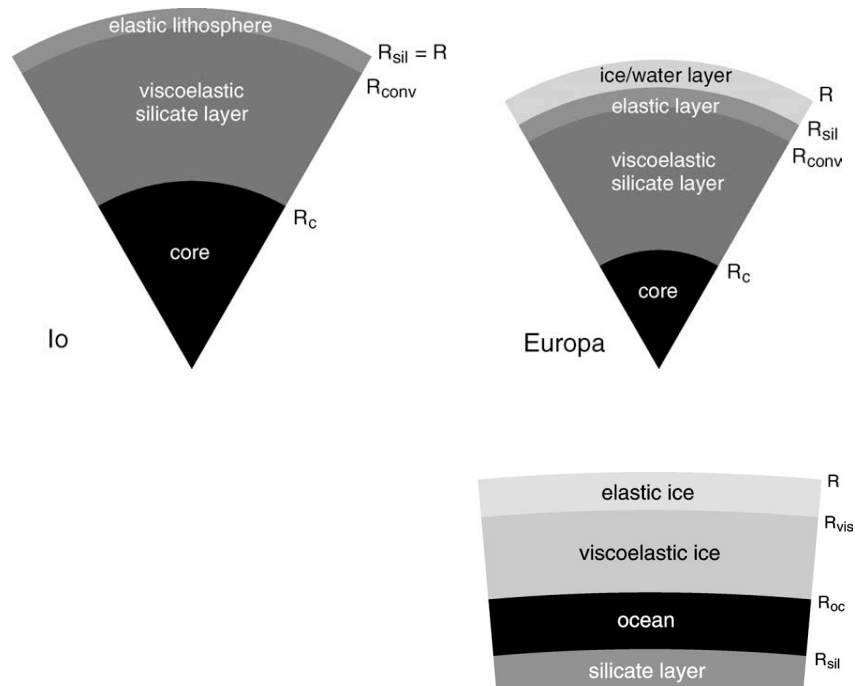


イオの場合、加熱量が振動状態になる可能性がある。

Ojakangas and Stevenson (1986)

ガリレオ衛星におけるカップリング計算

内部構造の変化を含めたカップリング計算例



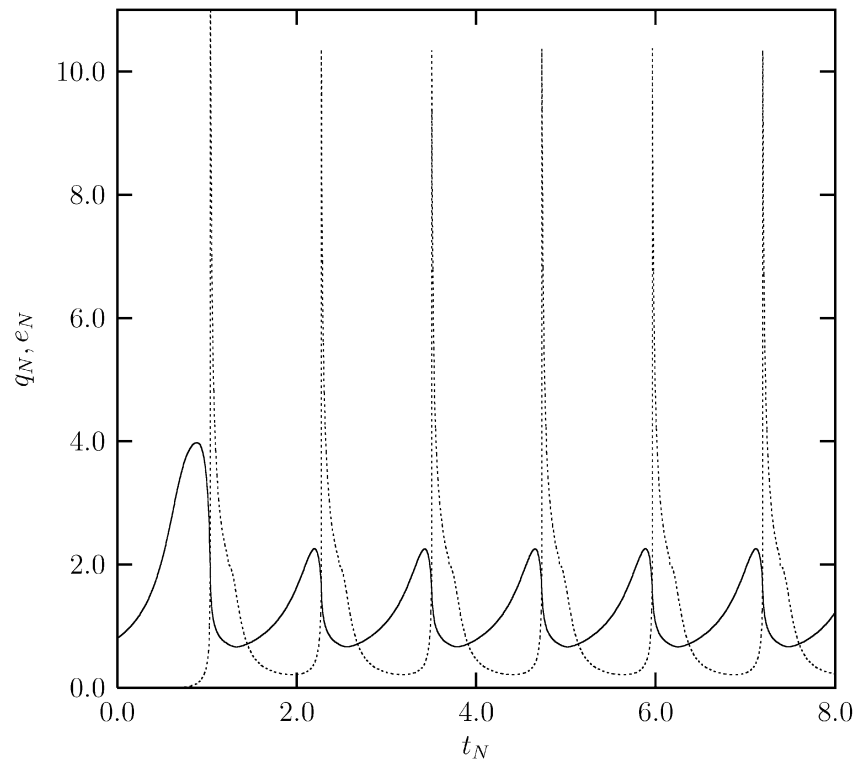
Hussmann and Spohn (2004)

構造, 加熱量, 軌道が相互に関連している.

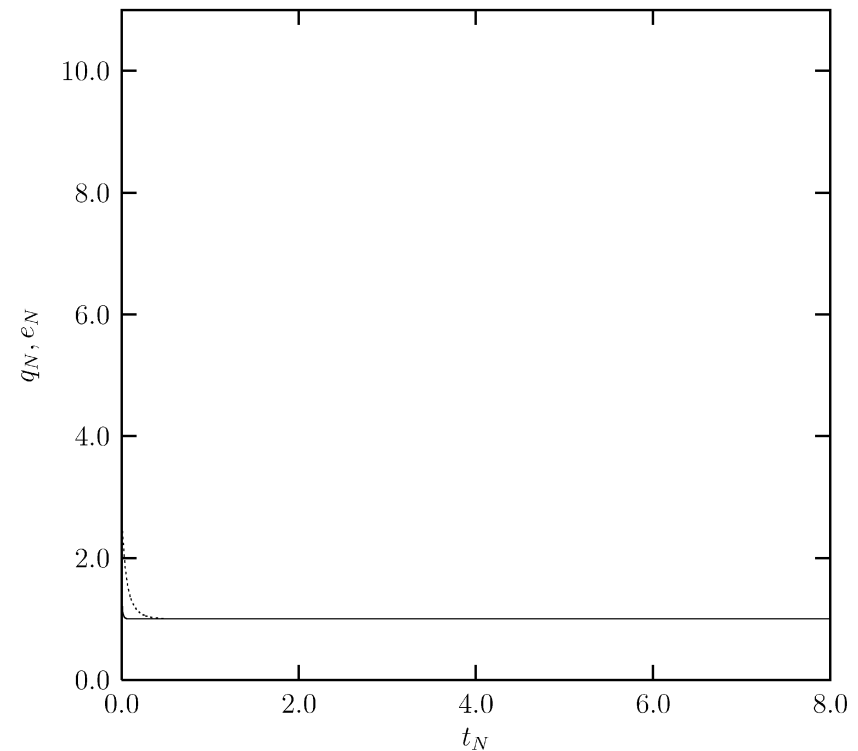
エンセラダスにおけるカップリング計算

Ojakangas and Stevenson (1986)のモデルをエンセラダスに適用

イオの場合



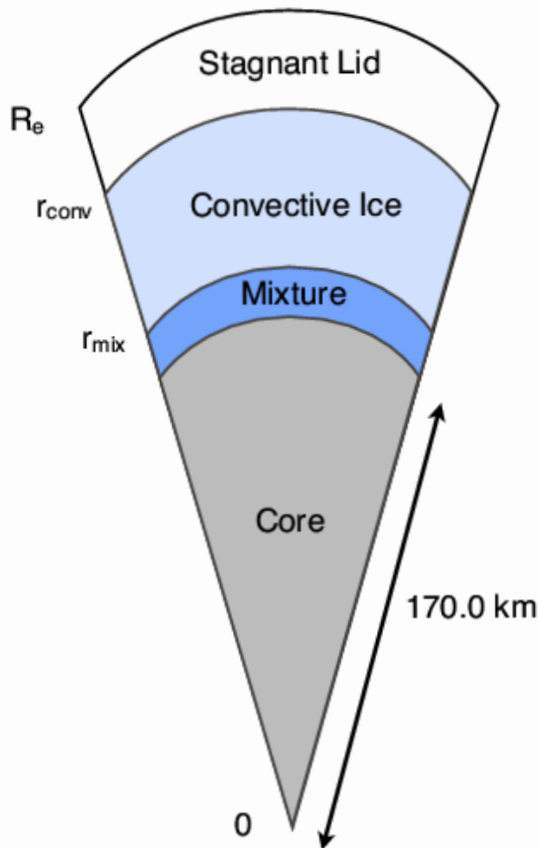
エンセラダスの場合



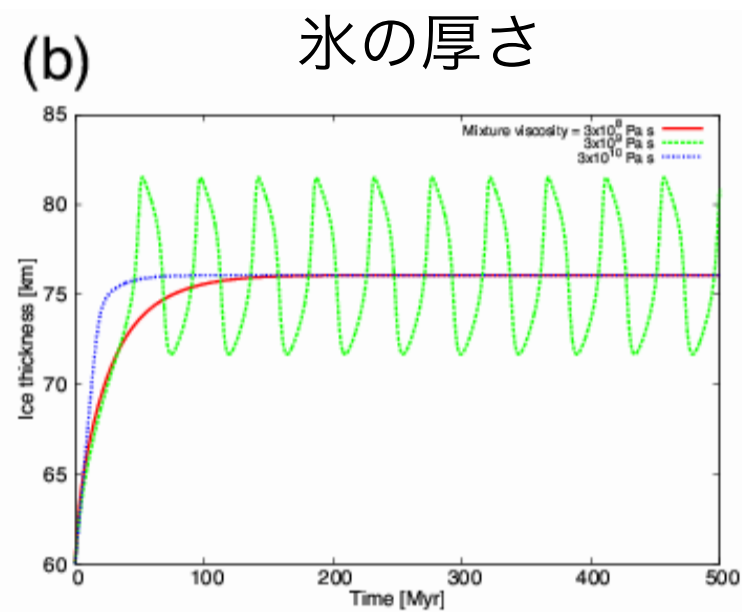
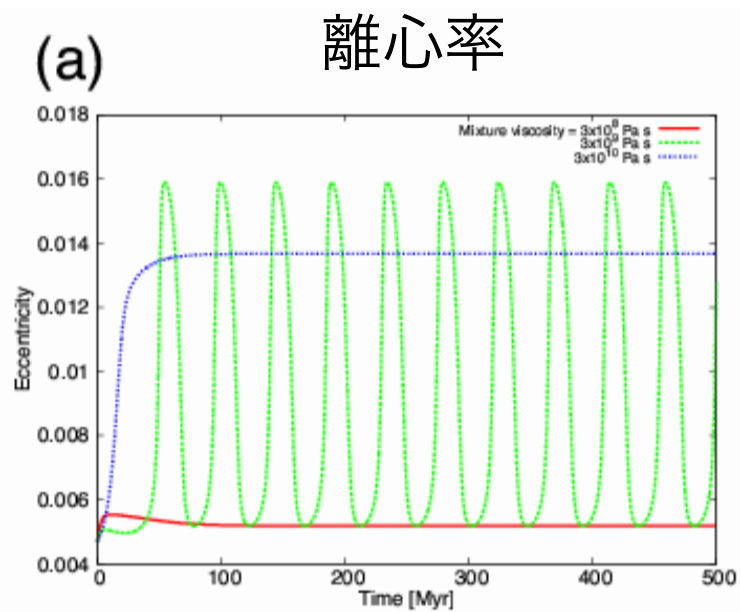
Meyer and Wisdom (2008)

エンセラダスの場合, 振動が起こらずにすぐに平衡状態に達する.

エンセラダスにおけるカップリング計算



- 4層構造の球状モデル(対流層の温度は260K)
- 内部海の代わりに氷と水の混合層を仮(270K)
- 対流による熱放射
- 熱源として放射壊変, 潮汐加熱, shear heat
- 加熱量を計算し, 熱収支と軌道進化の式から内部構造及び軌道の変化を計算

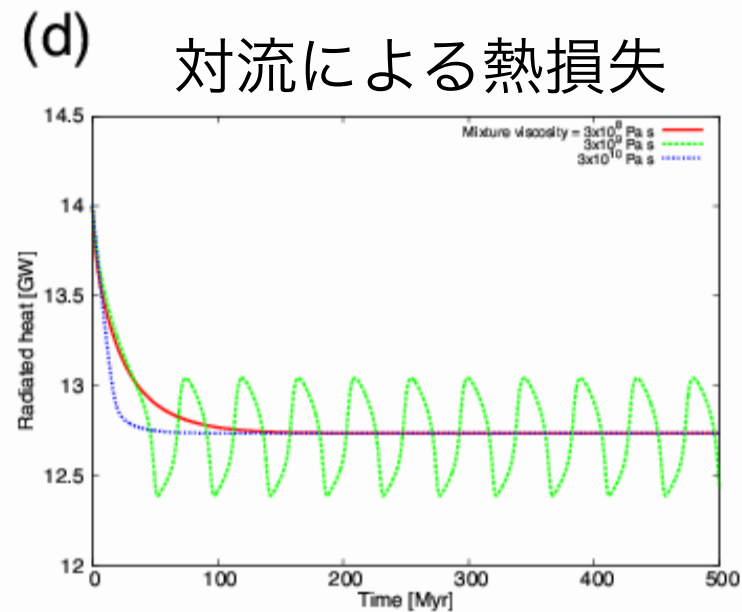
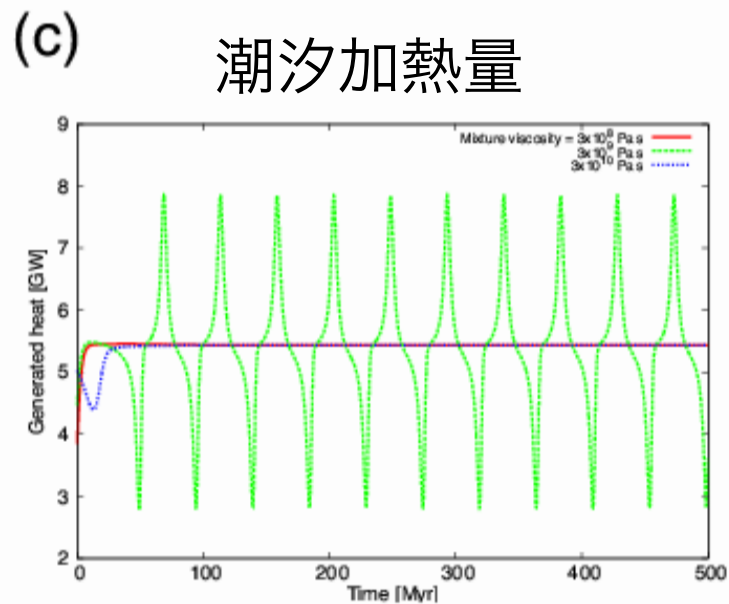


Mixture layer
の粘性率

赤: $3 \times 10^8 \text{ Pa s}$

緑: $3 \times 10^9 \text{ Pa s}$

青: $3 \times 10^{10} \text{ Pa s}$



土星のQ値が3800で、水と氷の混合層を入れると振動状態が起こりうる。
最新の研究では $Q_{\text{sat}}=1500$ 前後(Lainey et al., 2012)

ここまでのまとめ

- ・エンセラダスでは大きな熱量が観測されている。マクスウェルモデルを用いた場合、潮汐加熱で大きな熱量を得ることは難しい。マクスウェルモデルはエンセラダスのレオロジーとして不十分である。
- ・非弾性の影響を考慮した場合、加熱量は数倍に増加する。
- ・潮汐加熱は内部構造や軌道の変化と相互作用の関係にある。エンセラダスのこれらの作用を考慮する必要がある。特にエンセラダスの場合、活動度が大きく変動している可能性が高い。
- ・特に離心率の変化は加熱量に大きな影響を与えるため重要。

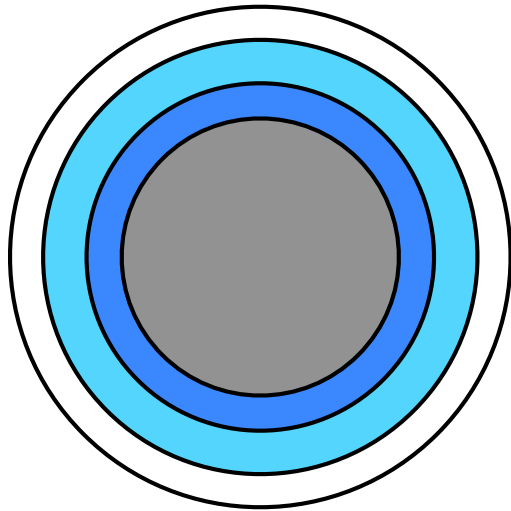
潮汐加熱をエンセラダスの熱源として考える上での問題点

1. 活動領域の不均質性について

2. ミマスパラドックスという問題

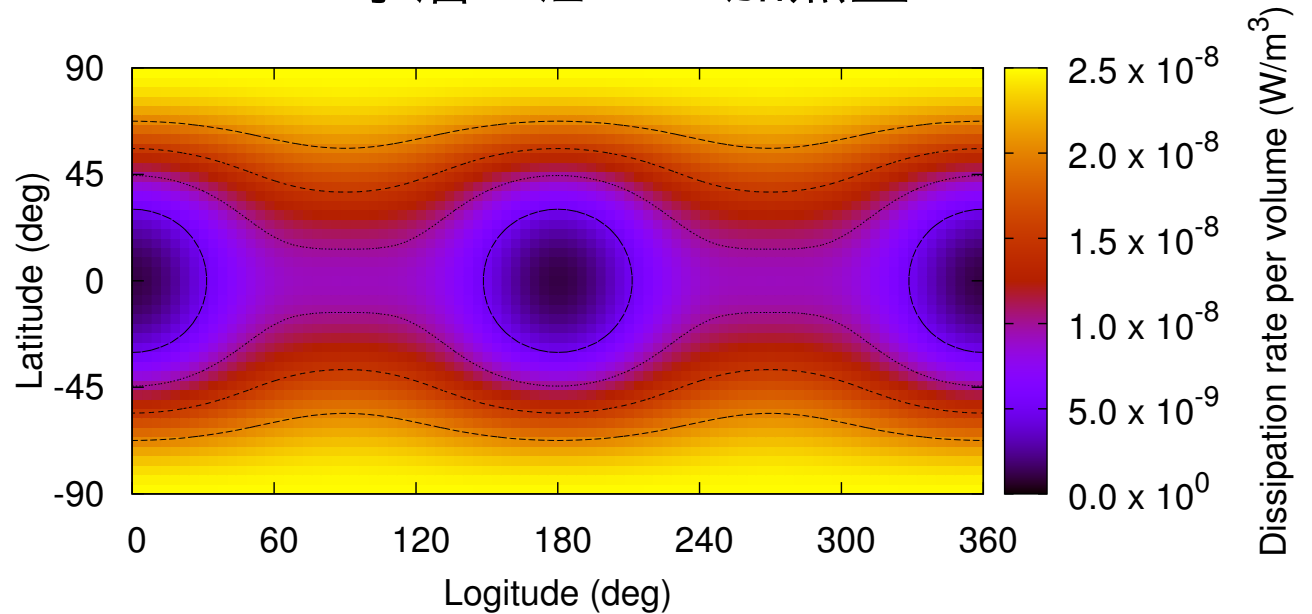
活動領域の不均質性について

球状の内部構造



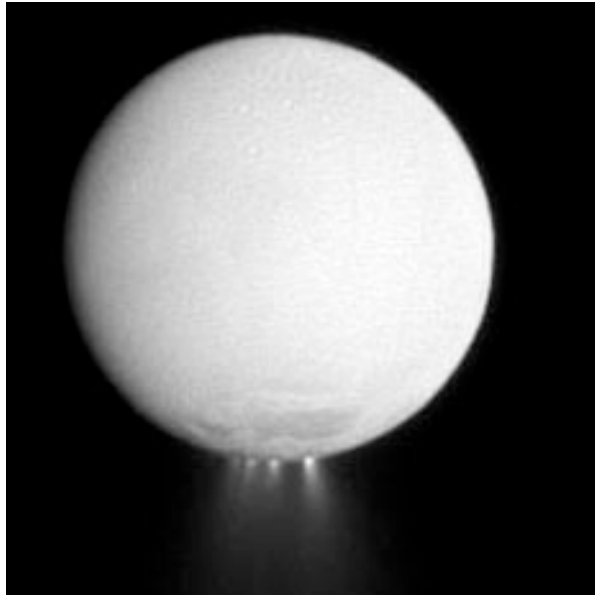
物性は半径にのみ依存

氷層の底での加熱量

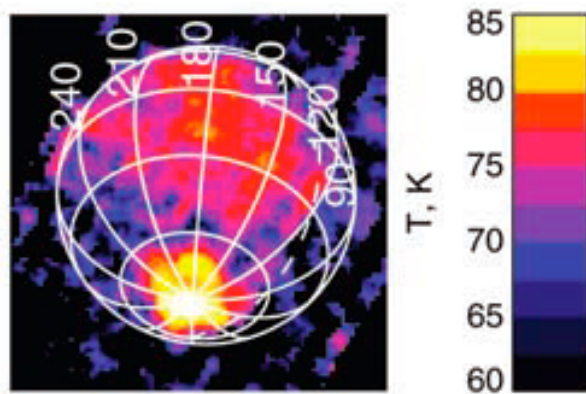


球対称の内部構造モデルでは、南極と北極は同程度に加熱される。

活動領域の不均質性について



- ・エンセラダスの活動領域は南極付近のみ.
- ・北極付近はクレーターに覆われ、活動していない.

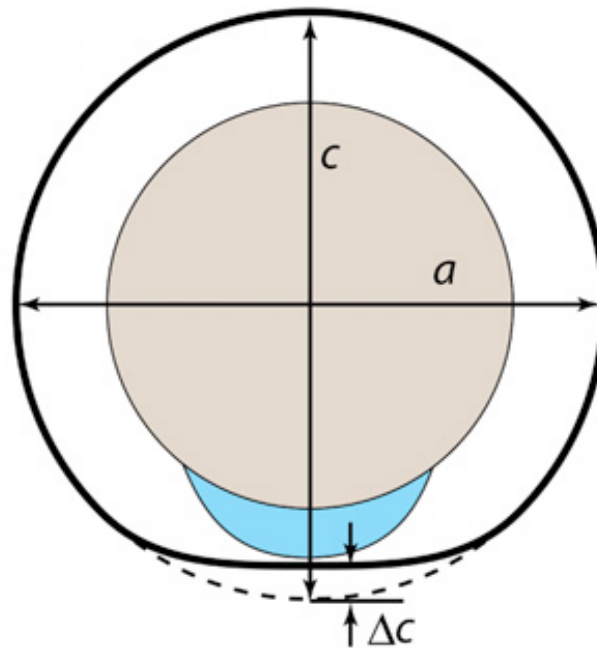


- ・高温域も南極付近にのみ存在

なぜ活発な領域が南極付近に限られているのだろうか.

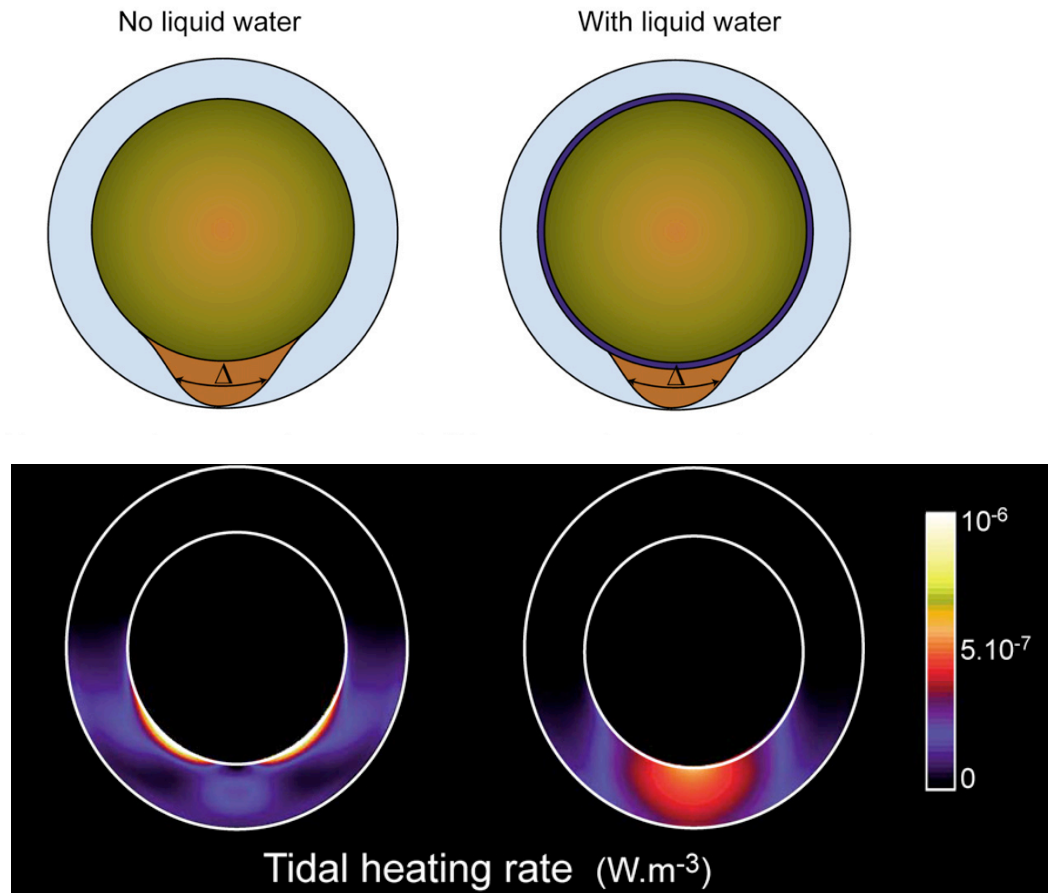
活動領域の不均質性について

活動領域が南極付近に限られていることから、
非球対称の内部構造が提案されている。



Collins and Goodman (2007)

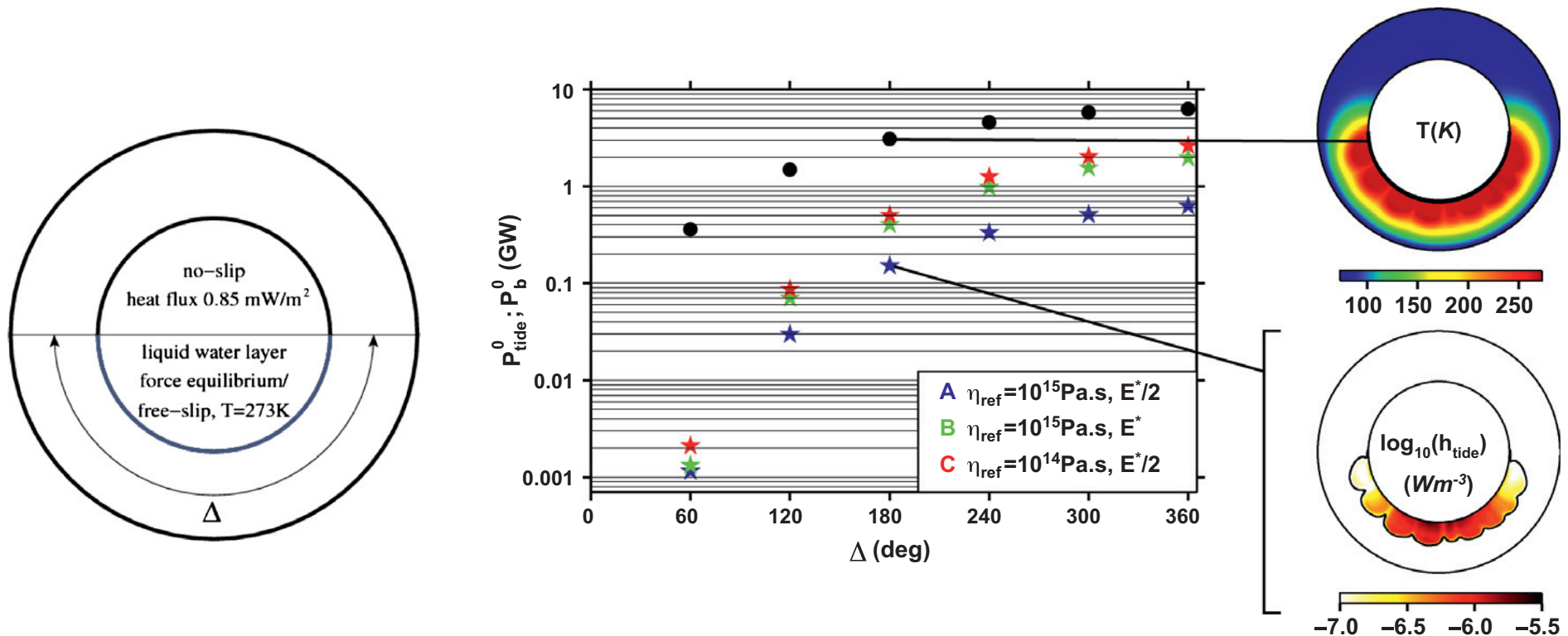
活動領域の不均質性について



Tobie et al. (2008)

- 低粘性率の氷が南極付近に存在し、かつ液体層が存在すれば、加熱量が局在化する。
- 液体層は全域に存在している必要はない(120° 以上あれば極域が加熱される)。

活動領域の不均質性について



Běhounková et al. (2012)

- 液体層が南半球のみに分布していれば，対流が局在化し，南極付近の加熱量が上がる。
- 液体層の領域が狭いと，すぐに固まってしまう. Tobie et al. (2008)の予想とは異なる。
- 現在の離心率では海は液体層は固まる．現在の5倍の離心率があれば部分海は維持される。

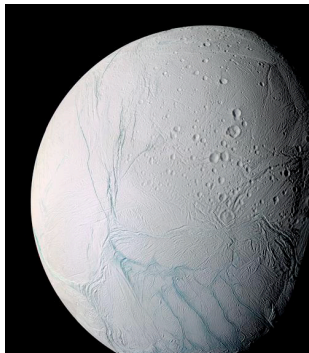
2. ミマスパラドックスという問題

加熱量は角速度, 離心率と共に大きくなる

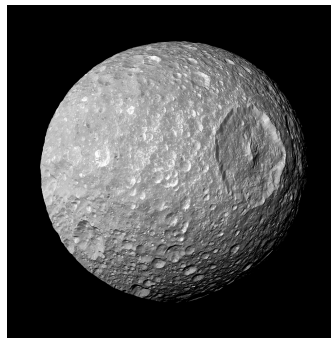
$$\dot{E} = -\frac{21}{2}\text{Im}(\tilde{k}_2)\frac{(\omega R_s)^5}{G}e^2$$

Segatz et al., 1988

エンセラダス



ミマス



平均半径 (km)	252	198
角速度 (rad/s)	5.3×10^{-5}	7.7×10^{-5}
離心率	0.0047	0.02

ミマスパラドックス

- ・ミマスはエンセラダスよりも加熱量が大きくなる
- ・ところが実際はエンセラダスの方が活動的

ミマスパラドックスという問題

ミマスパラドックスを解決するためには二通りの考え方がある

1. エンセラダスにはミマスには無い熱発生メカニズムがある
2. ミマスとは異なった条件で潮汐が働いている

潮汐加熱以外の熱源候補

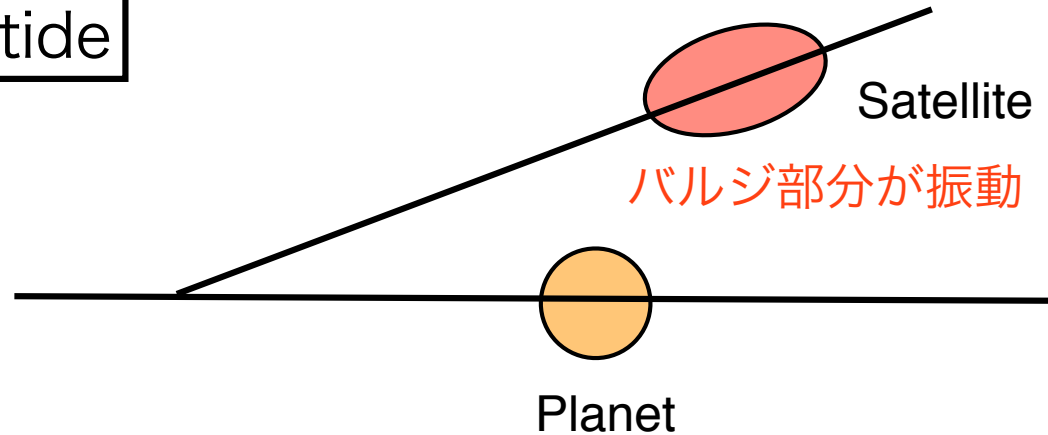
コアの放射破変: 0.3 GW (Roberts and Nimmo, 2008)

ジュール加熱: 150 kW-52 MW (Hand et al., 2011)

Shear heating: 5-7 GW (Nimmo et al., 2007)

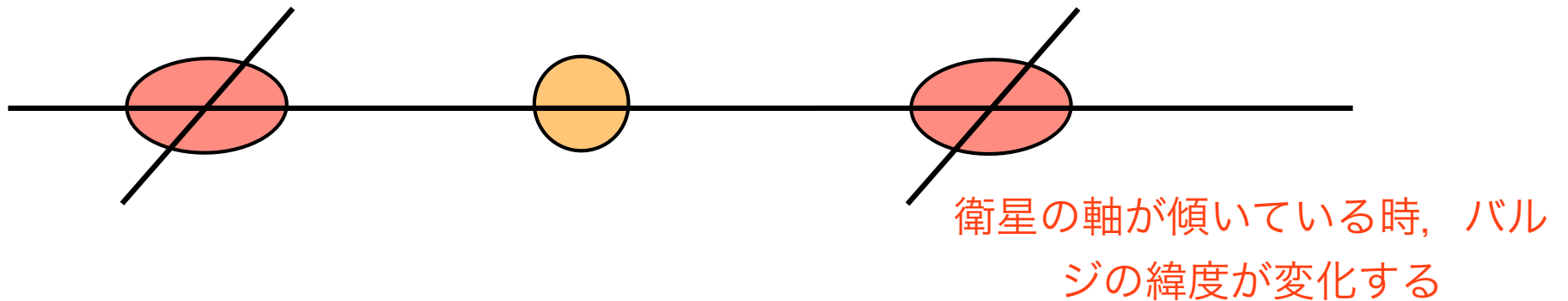
他の潮汐加熱メカニズムはどうだろうか

Libration tide

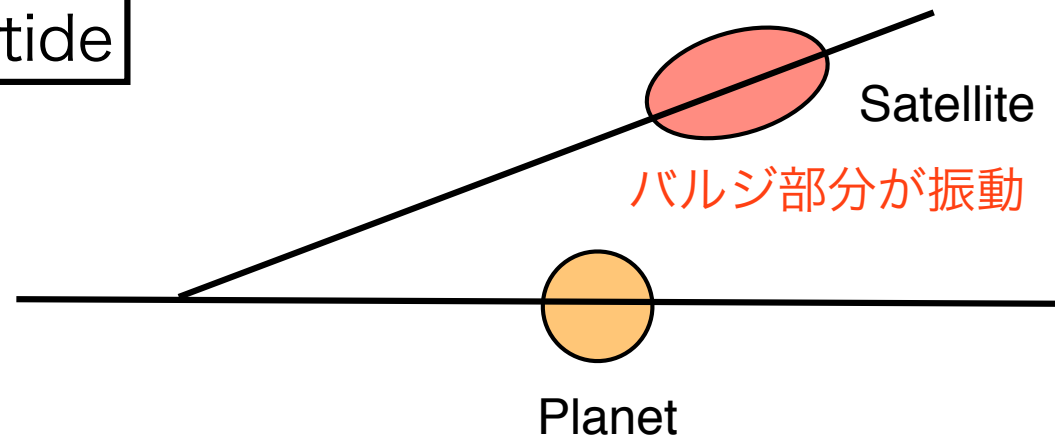


Obliquity tide

横から見た図



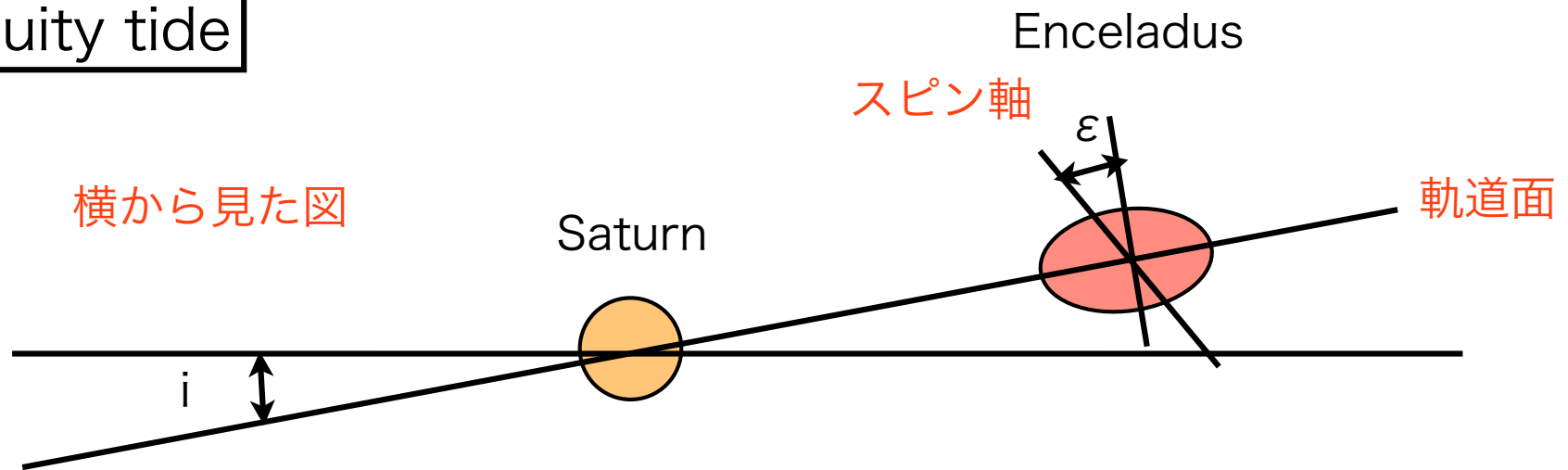
Libration tide



振動の周期と軌道の周期が1:3ならば大きな熱量が発生する
(Wisdom, 2004)

実際の観測では1:4に近い(Porco et al., 2006)

Obliquity tide



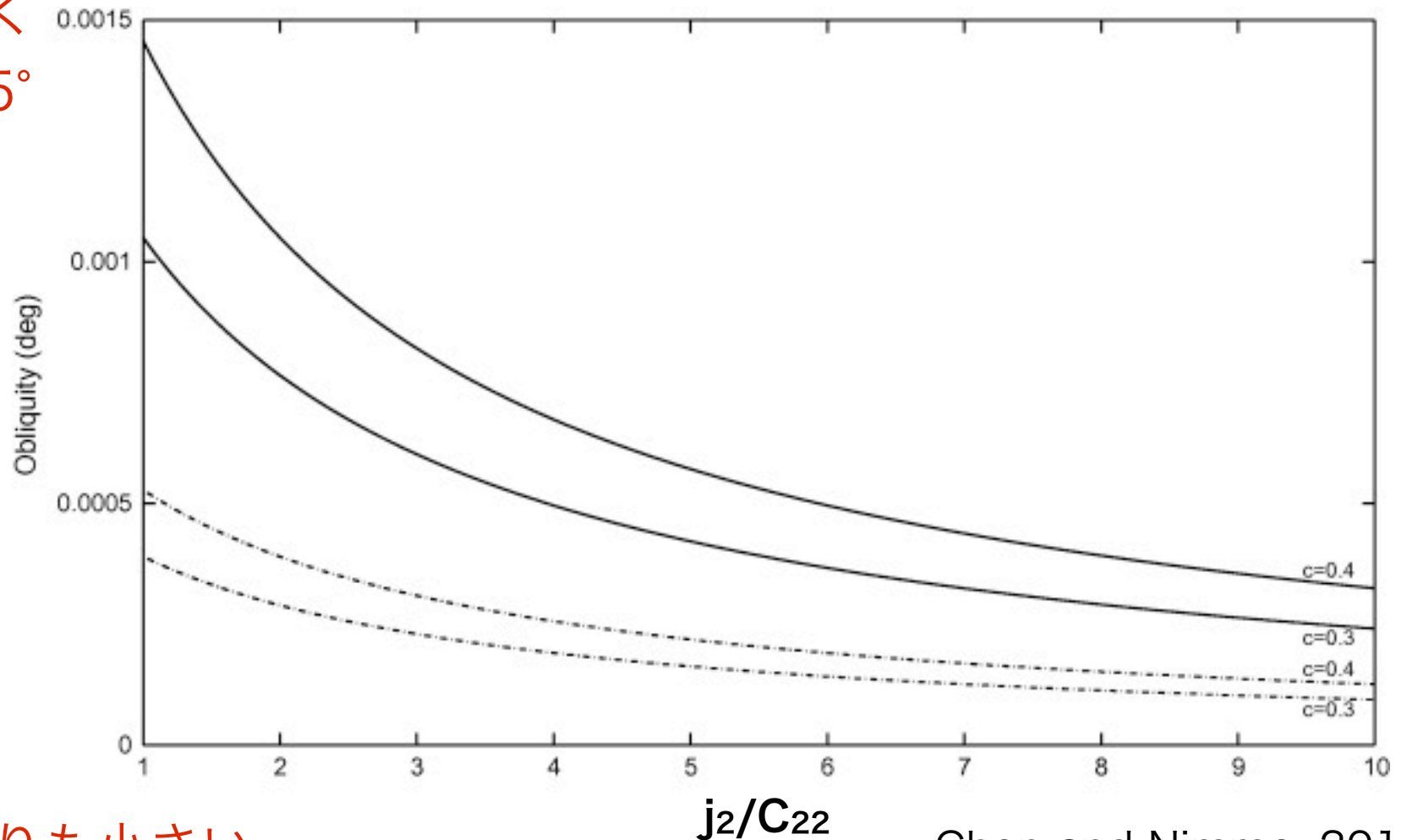
ϵ が 0.1° 以上ならエンセラダスは十分に加熱される (Tyler, 2011)

エンセラダスのスピン軸の傾きはどのくらいになるだろうか

$$\frac{3}{2} \left[\frac{1}{2} C_{22} + \left(J_2 + \frac{3}{2} C_{22} \right) \cos(\epsilon) \right] p \sin(\epsilon) - c \sin(i - \epsilon) = 0.$$

j_2 , C_{22} : 重力係数, $p=-638.92$, c : 慣性モーメント係数

傾きは大きく
ても0.0015°



0.1°よりも小さい

Chen and Nimmo, 2011

ミマスとは異なった条件で潮汐が働いている？

既に観測された物理量の中で、ミマスとエンセラダスで大きく異なるものがある

平均密度 (kg/m^3)

エンセラダス

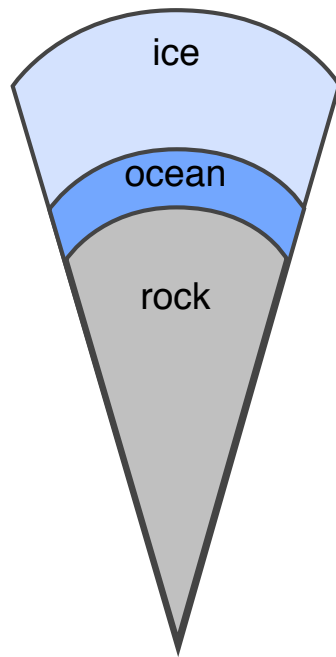
約1600 (Porco et al., 2006)

ミマス

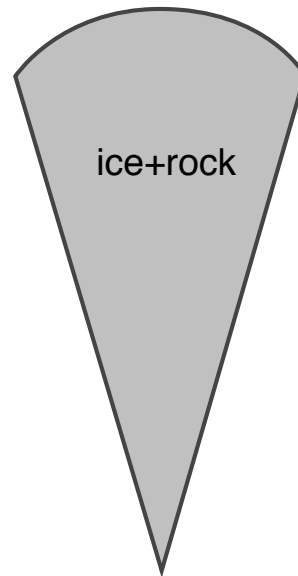
約1100 (Dermott and Thomas, 1987)

ここから何か推測できないだろうか

エンセラダス



ミマス

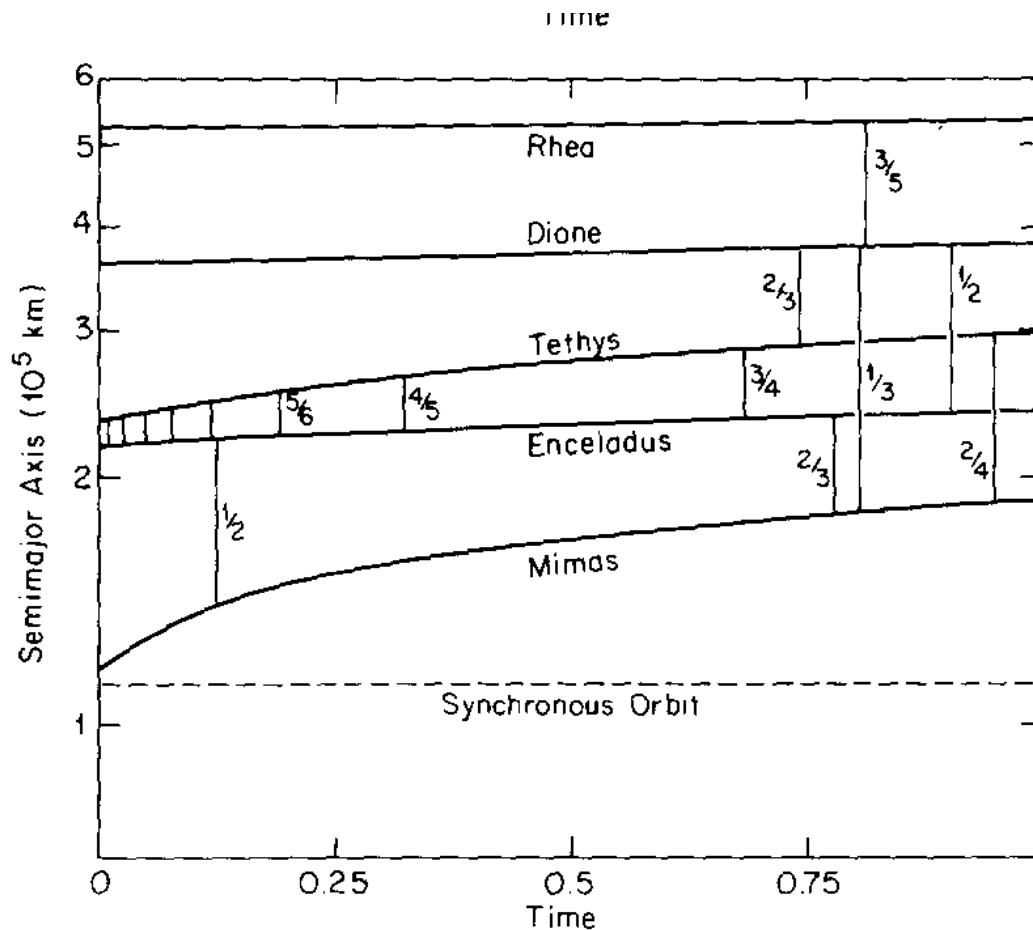


$$\dot{E} = -\frac{21}{2} \text{Im}(\tilde{k}_2) \frac{(\omega R_s)^5}{G} e^2$$

要はLove数が違うのではないかという案

- 平均密度から、ミマスの方が岩石の含有率が低い可能性が高い。
- エンセラダスは分化していてミマスは分化していないのかもしれない。
- コアからの熱でエンセラダスには液体層が発生した?(Schubert et al., 2007) もしくは粘性が異なるのかも。

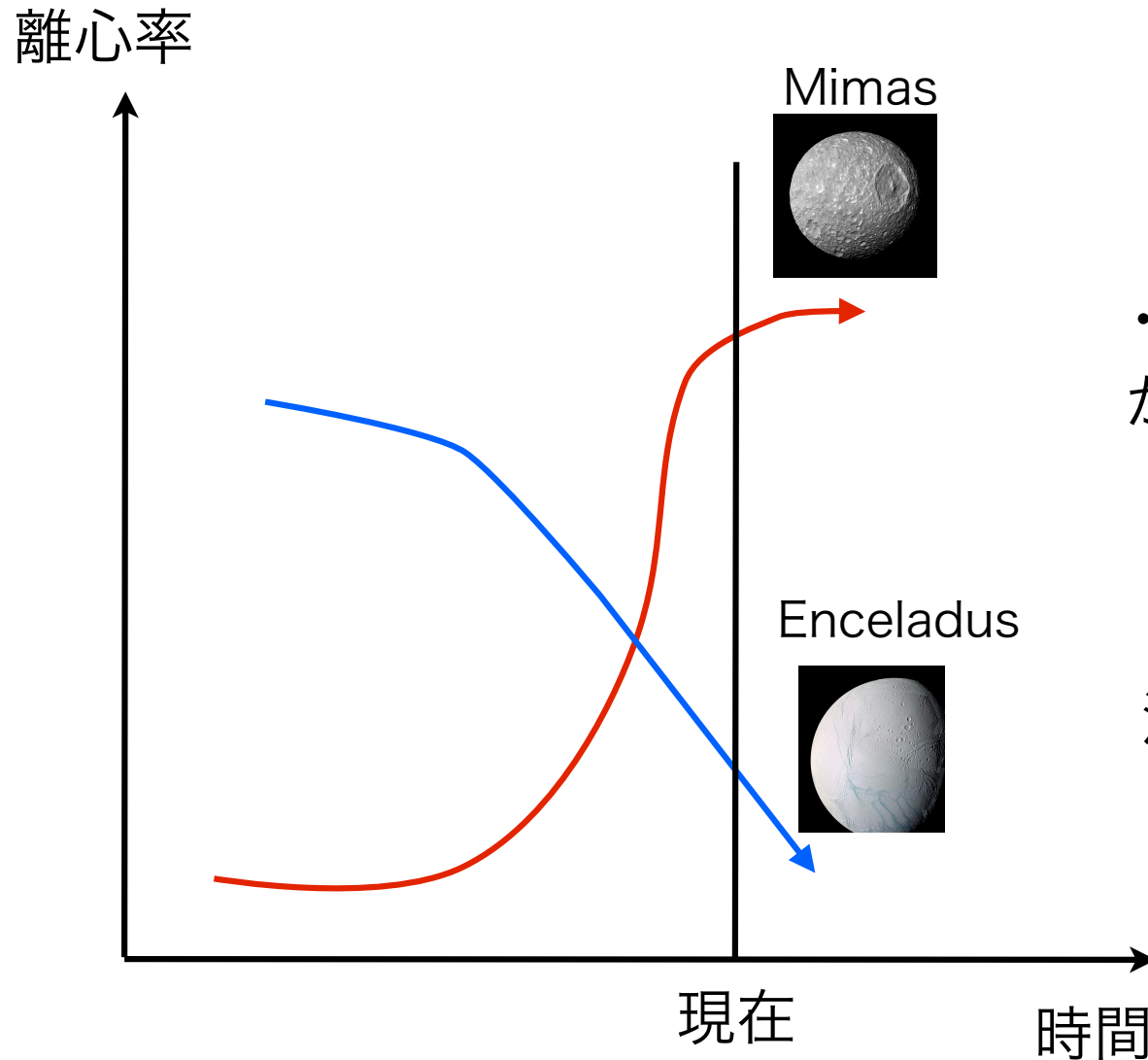
エンセラダスとミマスでは進化の経路が異なっているの
かもしれない(Spencer et al., 2009)



Dermott et al, 1988

エンセラダスやミマスはいくつかの
共鳴状態を経て現在に至っている。

エンセラダスとミマスでは進化の経路が異なっているの
かもしれない(Spencer et al., 2009)

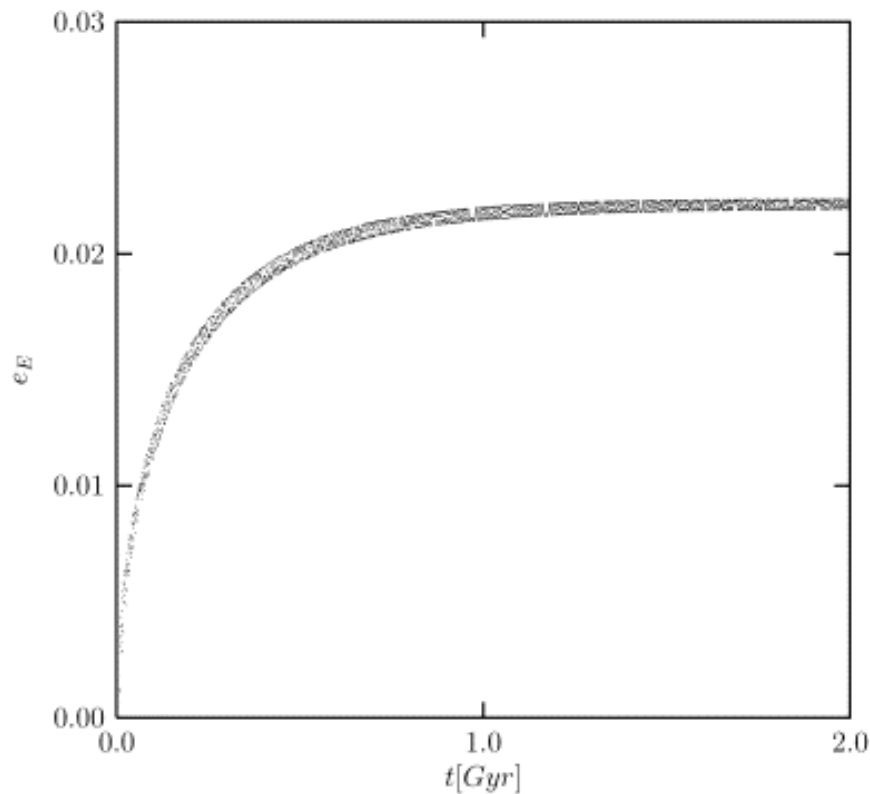


・昔はエンセラダスの方が離心率が高かった?

・エンセラダスの高い熱放射や活動は昔の名残?

エンセラダスとミマスでは進化の経路が異なっているの かもしれない(Spencer et al., 2009)

ミマスとの共鳴におけるエンセラダスの離心率



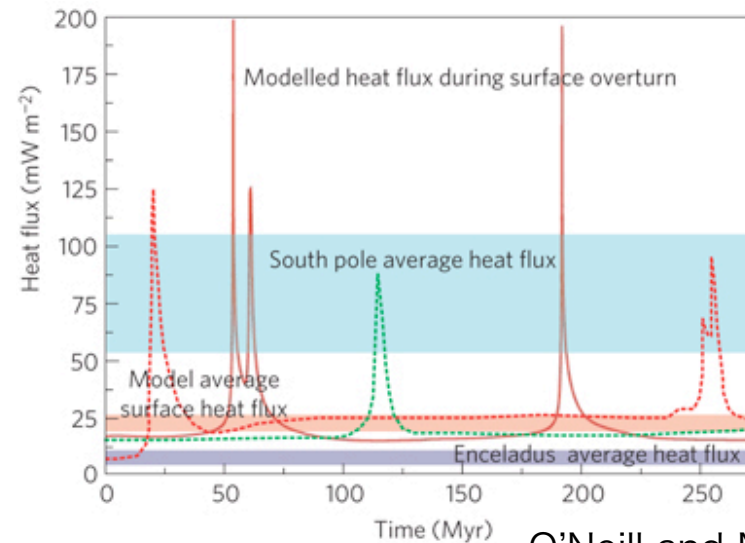
・昔のエンセラダスは約0.02(現在の5倍)の離心率を持っていた可能性がある

・ミマスの軌道進化も考察する必要あり.

Meyer and Wisdom, 2007

熱輸送

熱輸送のおもしろい例(Episodic overturn)



O'Neill and Nimmo, 2010

- ・表面の固い層が壊れ，中の温かい層が非定常的に表面に現れる
- ・定期的に大きな熱が放出される
- ・加熱量が小さくても，大きな放射が一時的に発生

全体のまとめ

- ・他の氷衛星と同様に，潮汐加熱はエンセラダスの熱源として有力となっている．
- ・潮汐加熱は内部構造や軌道の進化と結びついている．
- ・エンセラダスの場合，内部構造の非対称性やミマスパラドックスなど他の氷衛星には無い問題がある．そのため，エンセラダスの潮汐加熱を考えるには，軌道進化や熱輸送との関連が特に重要となる．