

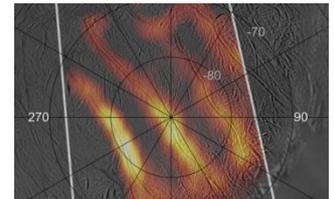


Timing of water plume eruptions on Enceladus explained by interior viscosity structure

Marie Běhouňková^{1*}, Gabriel Tobie², Ondřej Čadež¹, Gaël Choblet², Carolyn Porco³ and Francis Nimmo⁴

At the south pole of Saturn's icy moon Enceladus, eruptions of water vapour and ice emanate from warm tectonic ridges¹⁻⁴. Observations in the infrared⁵ and visible⁶ spectra have shown an orbital modulation of the plume brightness, which suggests that the eruption activity is influenced by tidal forces. However, the observed activity seems to be delayed by several hours with respect to predictions based on simple tidal models^{6,7}. Here we simulate the viscoelastic tidal response of Enceladus with a full three-dimensional numerical model^{8,9} and show that the delay in eruption activity may be a natural consequence of the viscosity structure in the south-polar region and the size of the putative subsurface ocean. By systematically comparing simulations of variations in normal stress along faults with plume brightness data, we show that the observed activity is reproduced for two classes of interior models with contrasting thermal histories: a low-viscosity convective region above a polar sea extending about 45°-60° from the south pole at a depth below the surface as small as 30 km, or a convecting ice shell of 60-70 km in thickness above a global ocean. Our analysis further shows that the eruption activity is controlled by the average normal stress applied across the cracks, thus providing a constraint on the eruption mechanism.

- 土星の衛星エンセラダスの南極から噴出するプルームは潮汐変形による加熱に起因する
- 簡単なモデルで予測された噴出のタイミングより観測されたタイミングの方が遅い
- 3次元の内部構造モデルを用いて、潮汐の粘弾性応答をシミュレーション
- その結果 2 つの内部モデルのパターンで観測された噴出タイミングの遅れを再現できた
 - 厚さ 30 km 程度の対流性の氷地殻+南極から 45-60° に広がる部分海
 - 60-70 km の対流性の氷地殻+全球海



左：プルーム噴出の様子，右：タイガーストライプ(credit NASA/JPL)

エンセラダス(NSSDC より)

- 質量: 1.08×10^{20} kg
- 半径: 257 km
- 平均密度: $1,610 \text{ kg/m}^3$
- 軌道長半径: 3.94 土星半径
- 軌道周期: 1.37 日 (32.88 h)
- 離心率: 0.0045
- 軌道傾斜角: 0.00 度

背景

- Cassini の Imaging Sub-System (ISS) により南極付近からプルームが噴出することが判明
 - 潮汐変形による加熱に起因する可能性
- 可視(ISS)と赤外(Visual and Infrared Mapping VIMS) の観測によりプルームの明るさの周期的な変化を発見
- 観測された明るさのピークが簡単なモデル(elastic thin-shell)で予測されたものより 5 時間遅れる

手法

- 三次元の内部構造モデルを用いて粘弾性潮汐応答のモデリング，氷地殻の粘性率の分布を変えて内部構造と粘性率の応答との関係を調べる(Fig.1)
 - 内部は分化(岩石コア，氷地殻)
 - 内部構造のパラメータ(Fig.1a)
 - ◇ 氷地殻の厚さ L ，最小粘性率 η ，低粘性領域の広がり Δ ，南極のリソスフェアの厚さ L_{sp} ，とその広がる角度 δ ，とその上に広がるリソスフェアの最大の厚さ $L\Delta$
- 4 つの south-polar terrain(SPT) にかかる応力の計算(Method 参照)
 - 質量保存則(1)，運動量保存則(2)，応力に関する式(7) を解くことで SPT にかかる応力の垂直成分を計算(Fig.1b)
- 軌道毎の応力成分の計算と規格化(Fig.2b)

結果:内部構造と粘弾性応答の関係(sensitivity)

- 低粘性領域の広がり Δ を小さくするとピークのタイミングが遅くなる(Fig.2b)
- 最小粘性率 η と SPT の リソスフェアの厚さ L_{sp} が減少するとタイミングが遅くなる(Sup. Fig5,6)
- 部分海を持つモデルより全球海を持つモデルがより厚い低粘性領域が必要(Sup. Fig. 4,9)

観測結果との比較(Fig.3b,4)

- 条件
 - 低粘性領域の上の SPT 周りに薄いリソスフェア($L_{sp} < 5$ km), 最小粘性率($\eta = 1.5 \cdot 10^{13}$ Pa · s)を持つ温かい氷地殻が存在
 - 全球海モデル
 - ◇ 50 km より厚い地殻
 - 部分海モデル
 - ◇ 50 km より薄い地殻+内部海の広がり 90-110°

Implication

- 部分海を持つ内部構造では, 大きな熱損失が SPT 付近のみで制限され, その他のリソスフェアでは熱伝導による熱損失は 1-2 GW を超えない
- 一方全球海を持つ内部構造では 15 GW を超える可能性がある
- 内部構造を決定するためにはさらなる geophysical な制約が必要

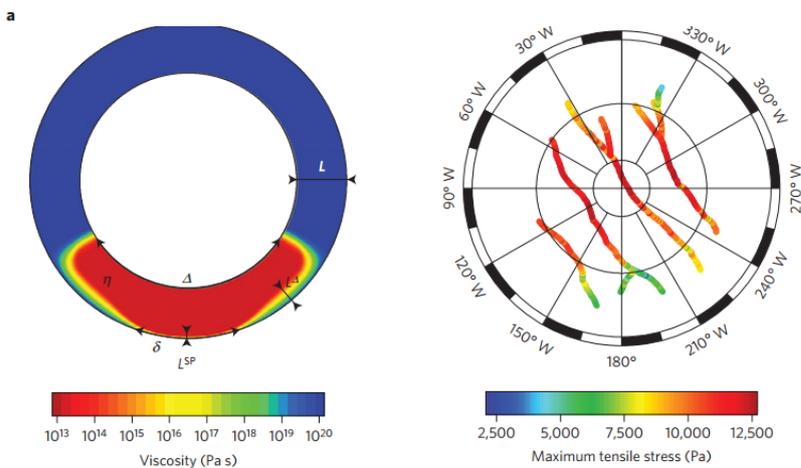


Fig.1 内部構造の一例(a),a の内部構造のときの SPT にかかる最大引張応力(b)

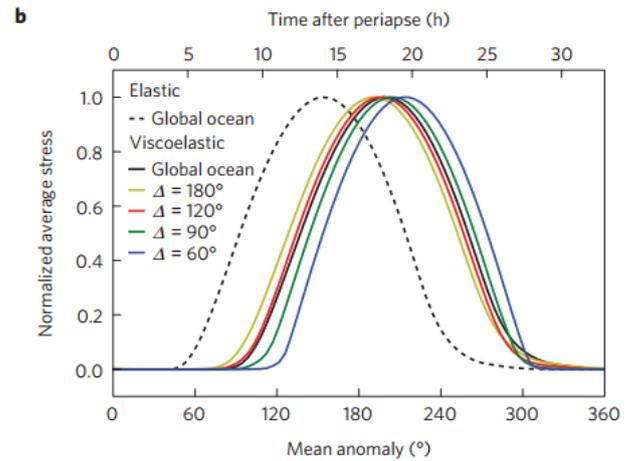


Fig.2b 軌道毎の規格化応力(横軸:平均近点角, 縦軸: 規格化された平均応力, 実線色の違いは海の広がりの違い)

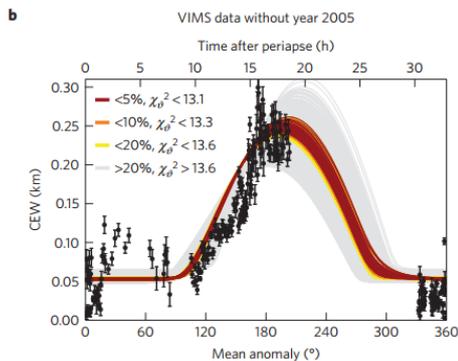


Fig.3b 軌道と補正等価幅との関係(点: VIMS 観測値, 実線色の違いは信頼度(misfit value)の違い, 小さいほど観測値に近い)

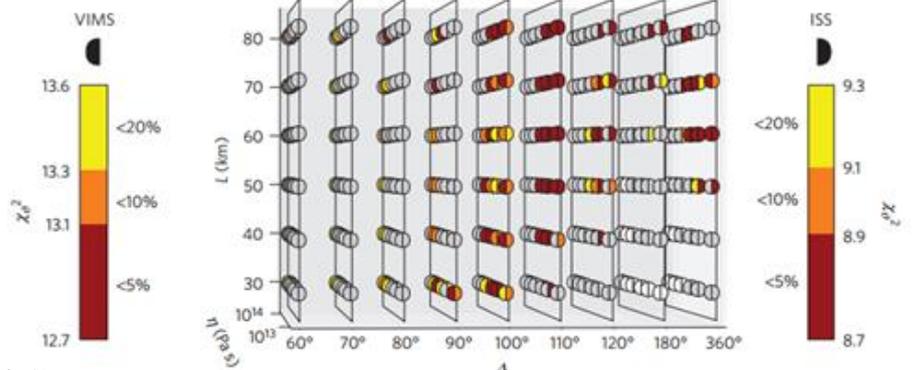


Fig.4 氷地殻の厚さ L, 内部海の広がり幅 Δ , 最小粘性率 η の値を変えたときの結果をまとめた図, 色の違いは 3b と同じ