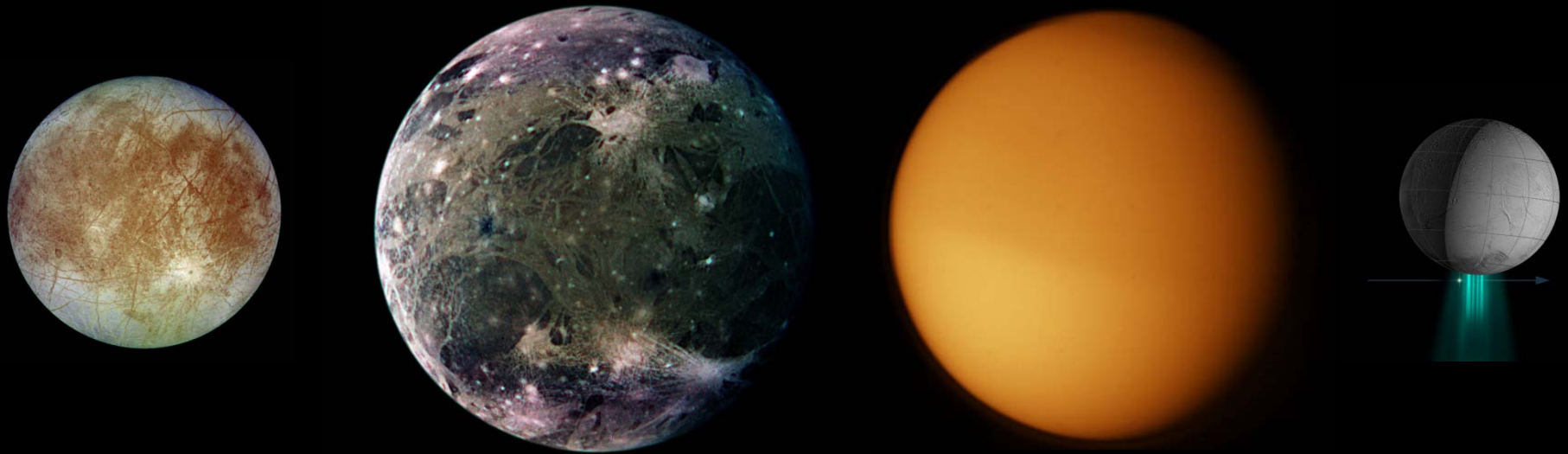


太陽系における生命発生場

- 氷衛星と“地下海”の存在可能性 -



惑星科学研究センター 専任スタッフ

北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻研究員 木村 淳(きむら じゅん)

第二回惑星科学最前線セミナー 2012/12/22

太陽系



地球での生命発生場とは？

ひとつの候補は
海の底



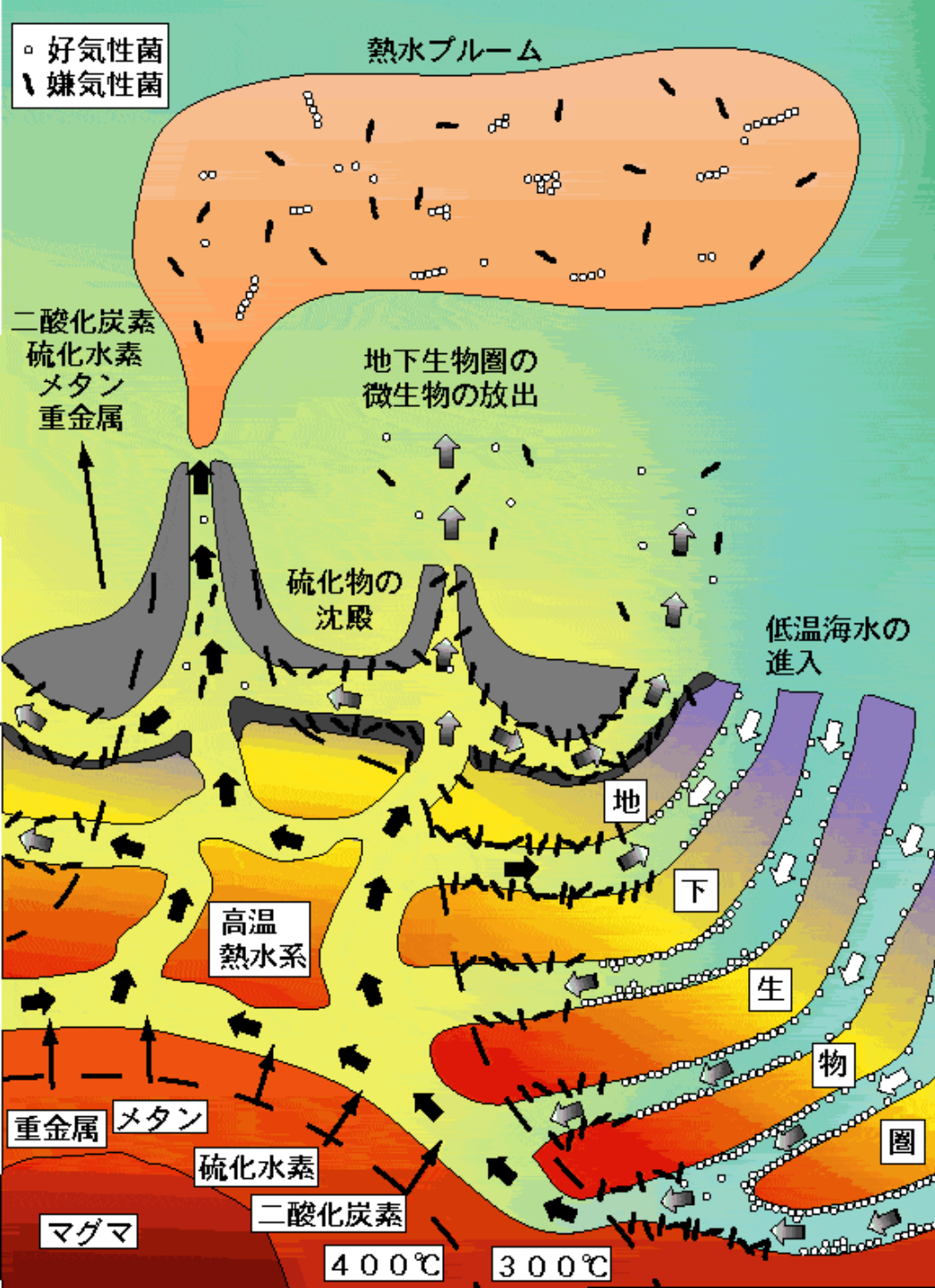
謎の深海生物 チューブワーム



消化器官(口・胃腸・肛門)がない
食えることをやめた動物

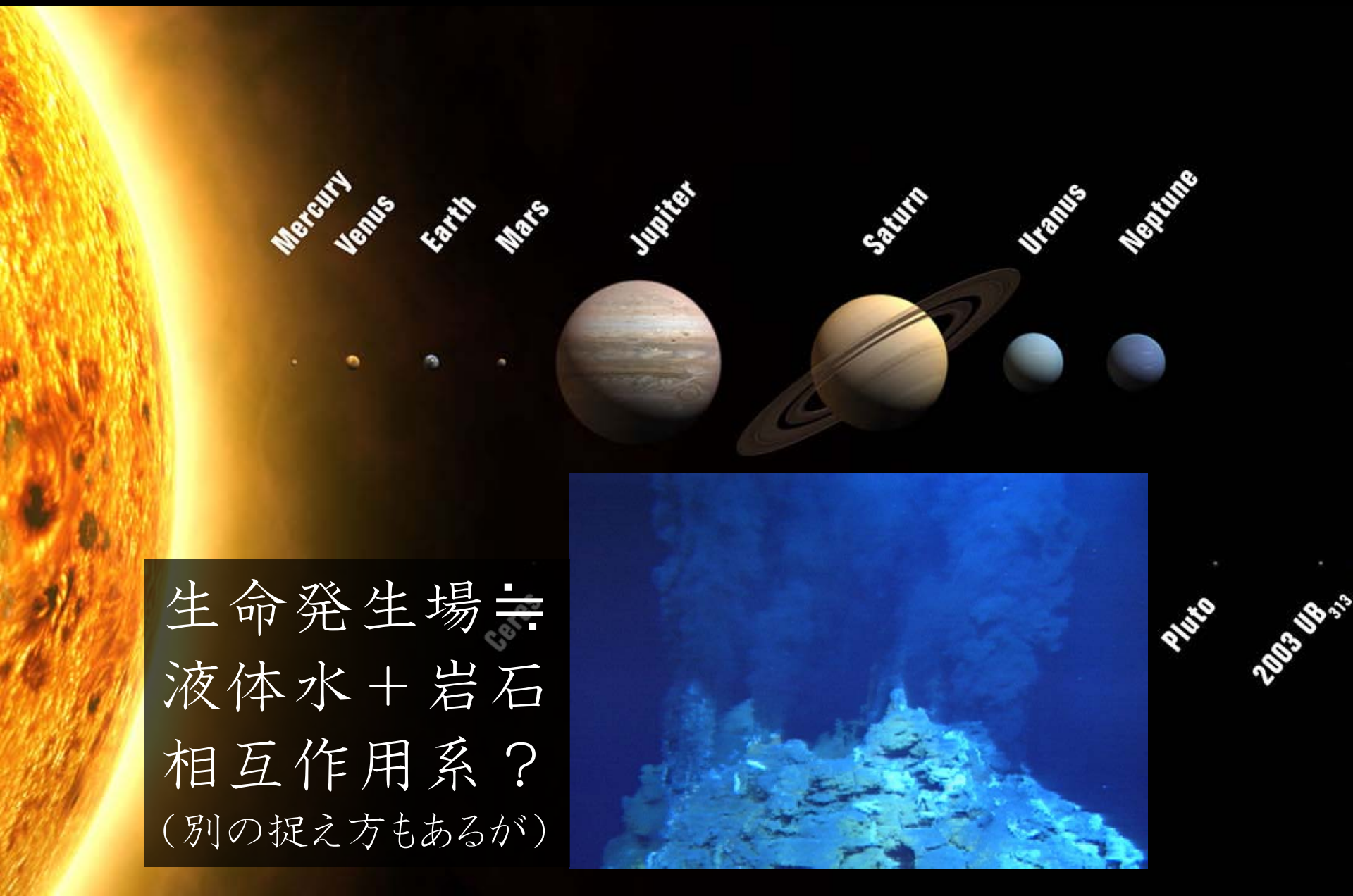
栄養供給は体内の
共生微生物に依存する

海底火山(熱水噴出孔)などに生息



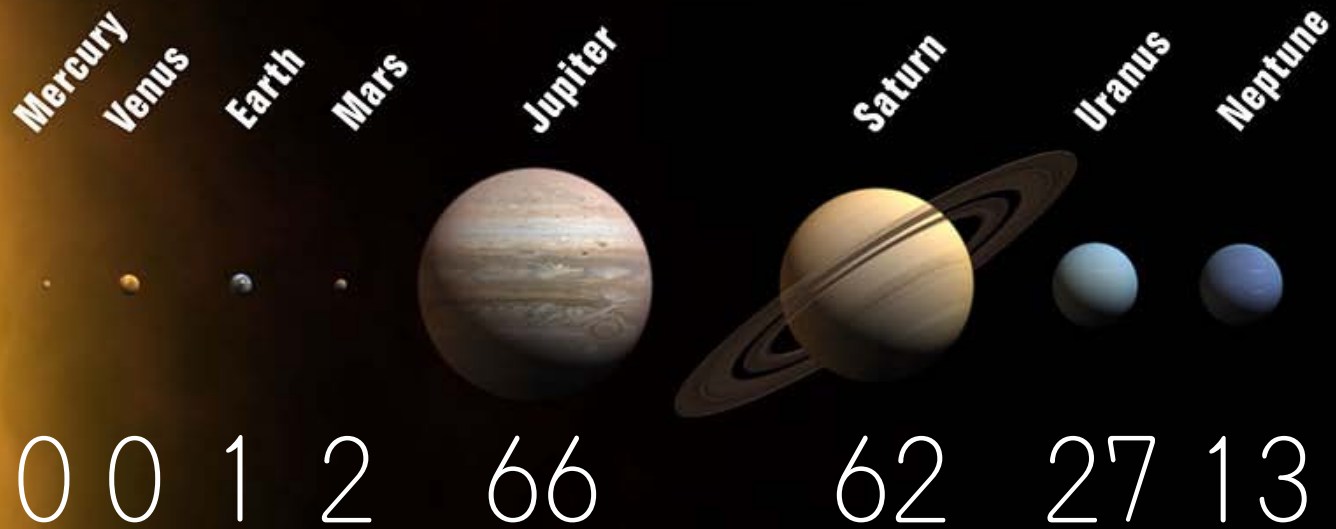
液体水 + 岩石
相互作用系

太陽系における(地球と火星以外の)生命発生場



生命発生場 ≡
液体水 + 岩石
相互作用系？
(別の捉え方もあるが)

太陽系の衛星

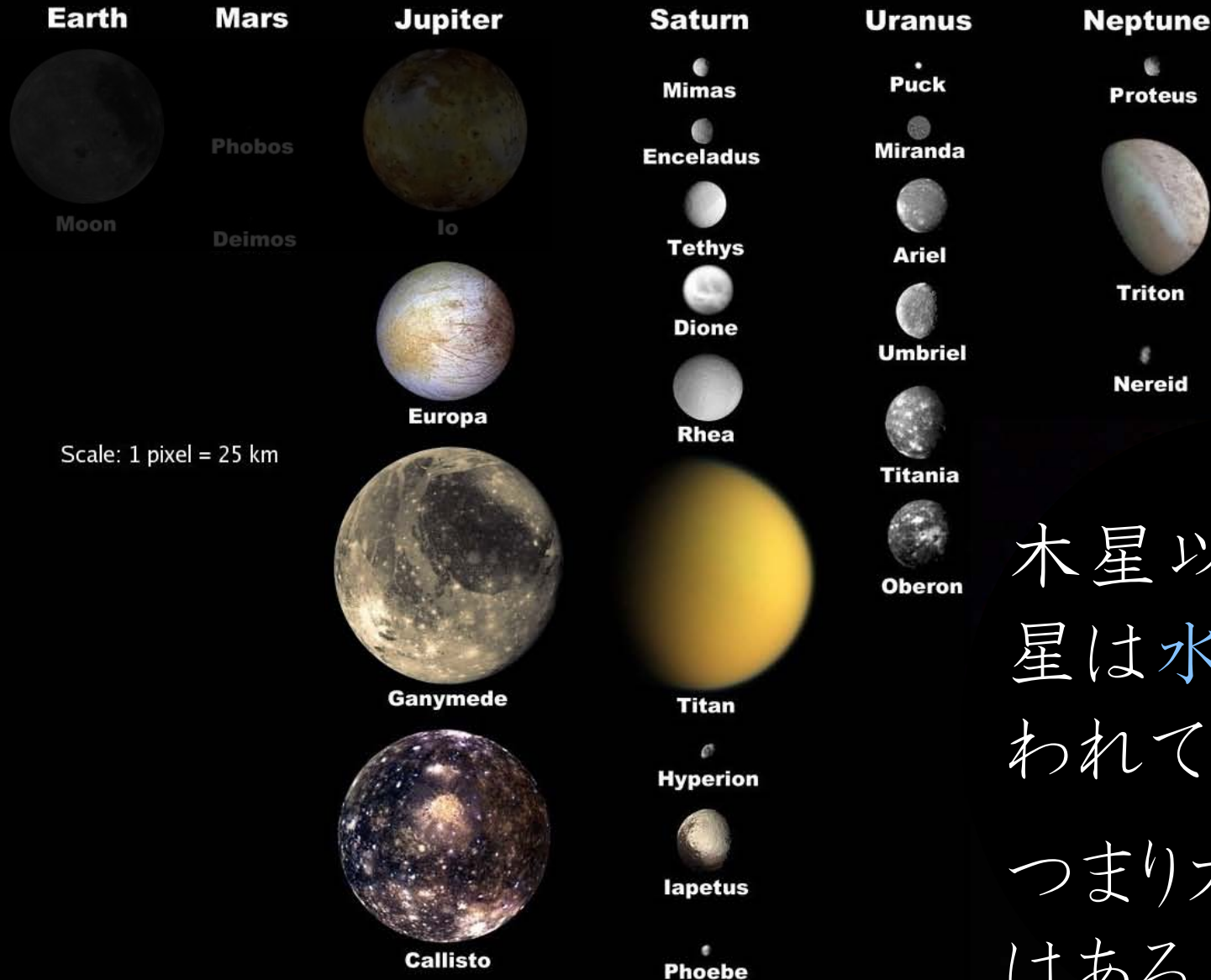


Ceres

Pluto

2003 UB₃₁₃

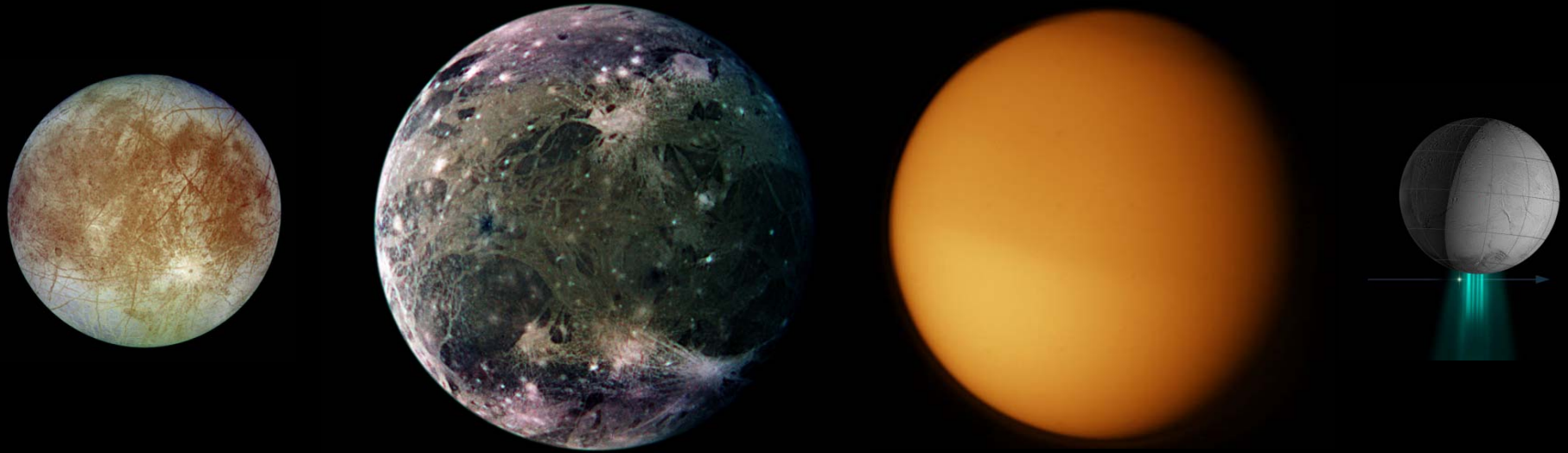
太陽系の(主な)衛星たち



木星以遠の衛星は水の氷で覆われている。

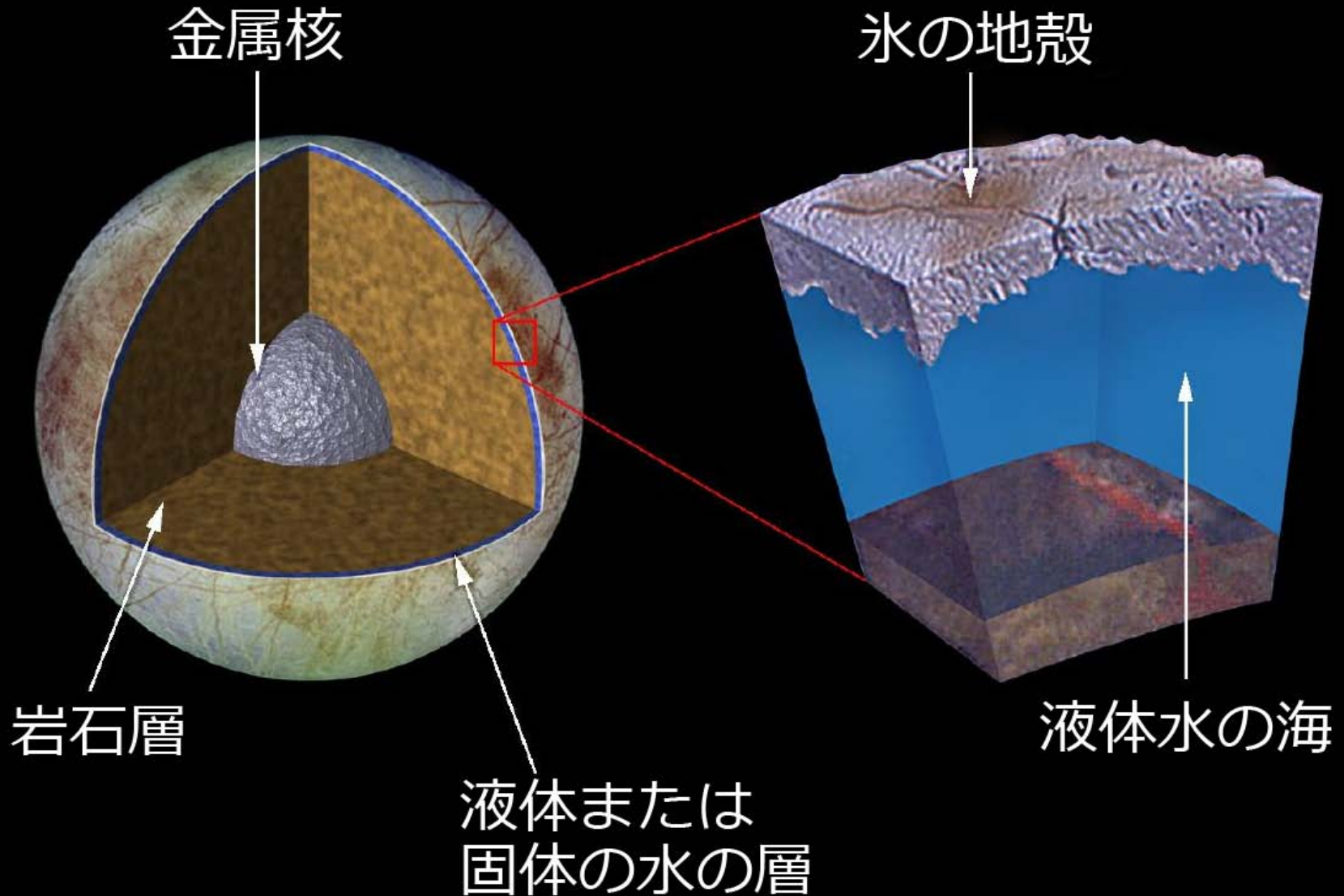
つまり大量の水はある。

氷衛星と“地下海”



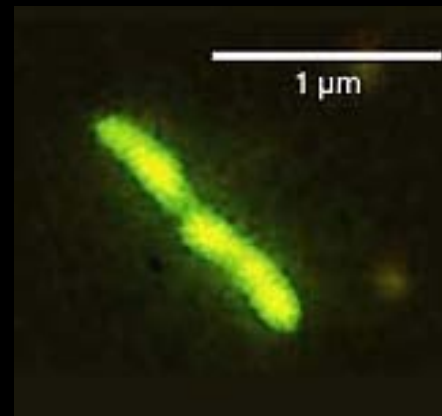
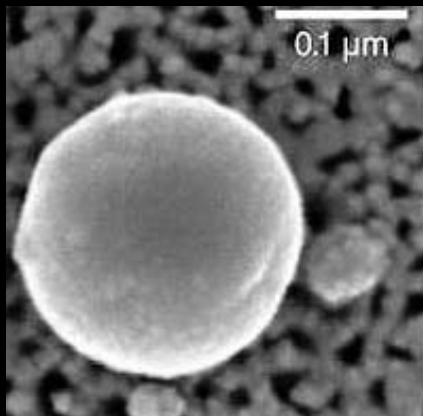
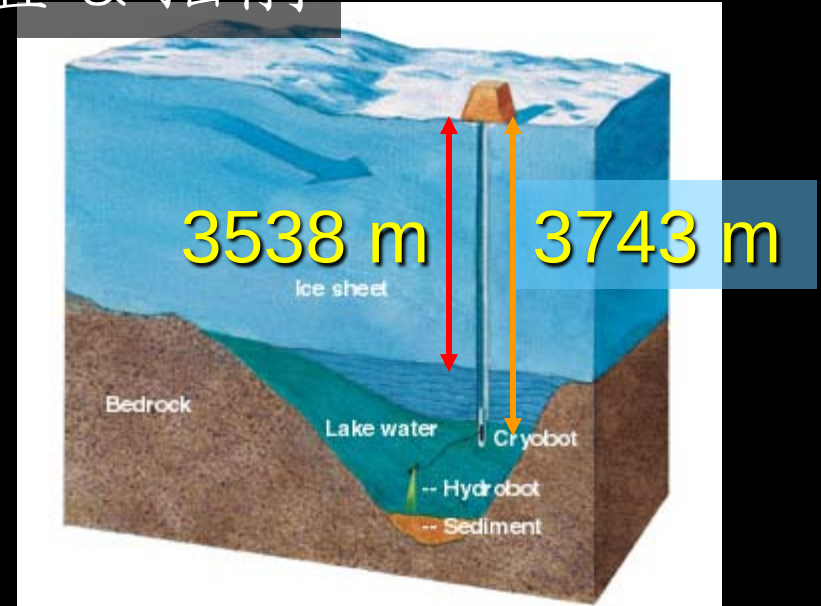
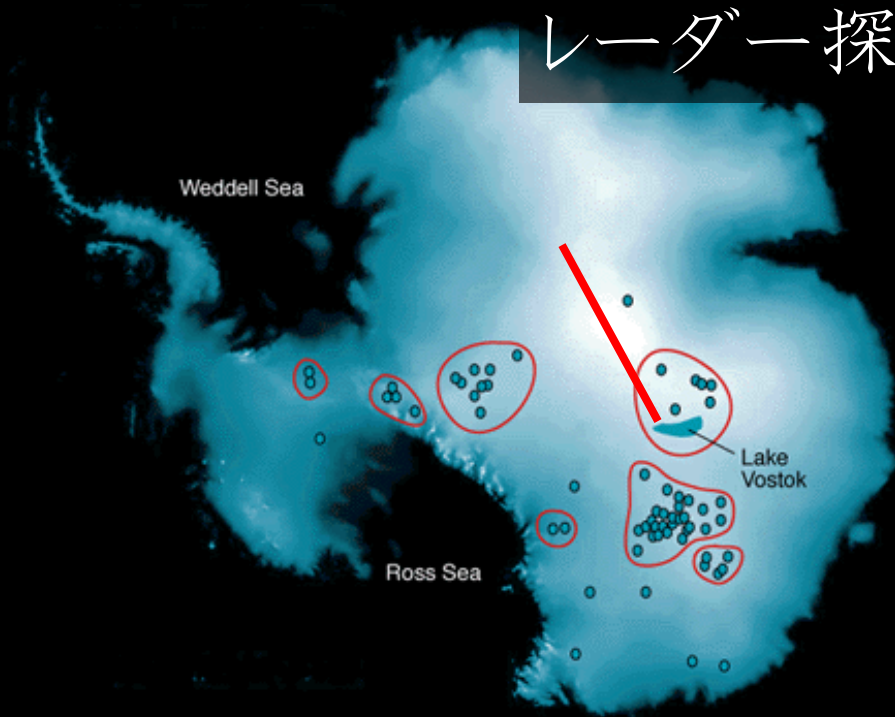
氷衛星と地下海

木星衛星エウロパ



南極氷床下湖(ボストーク湖)

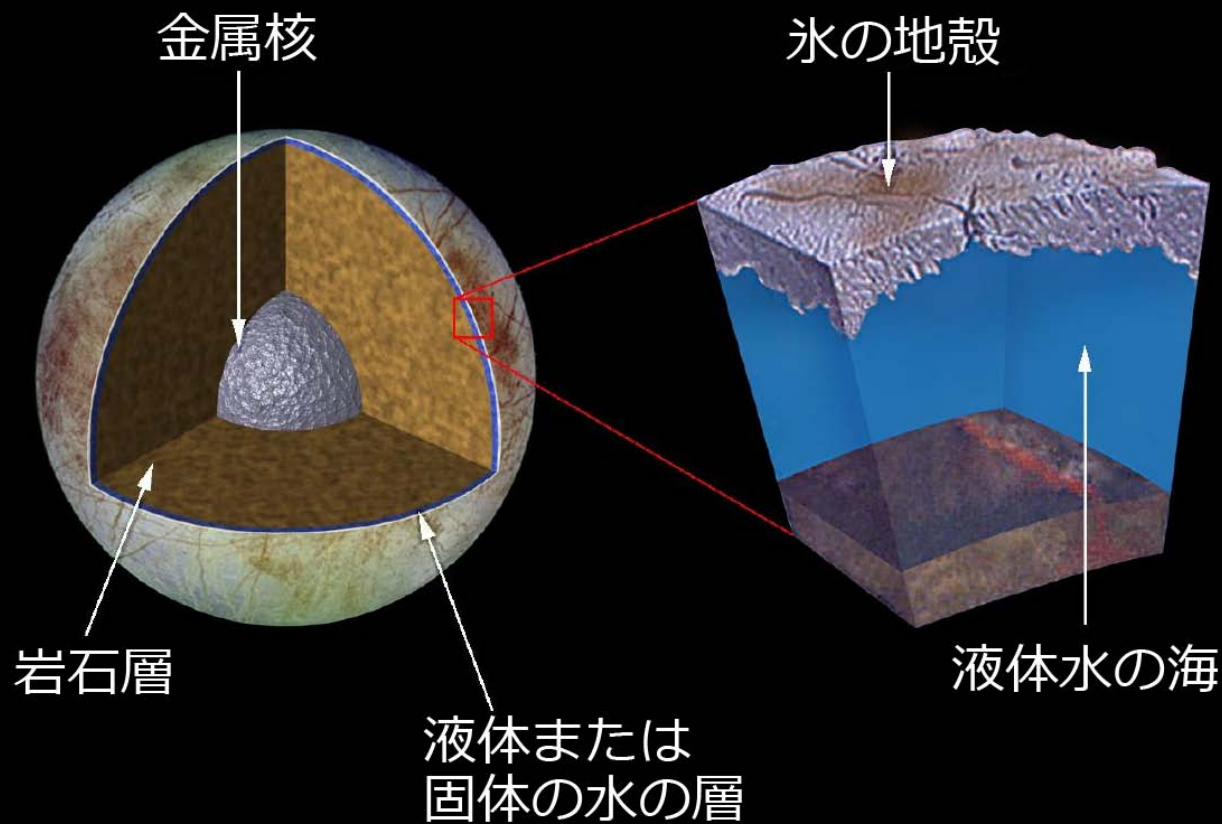
レーダー探査 & 掘削



深度3603 m
で観察された
微生物

氷衛星と地下海

どうやって見つけたか？
(どうやって内部を知るか？)



氷衛星と地下海

どうやって見つけたか？

(どうやって内部を知るか？)

木星衛星エウロパ(など)を例に

1. 水はどれだけあるか？(平均密度から)

- 表面に薄く張り付いているだけではあまり嬉しくない

2. 地下海はあるか？

- a. 地形から推測
- b. 電磁氣的観測から推測
- c. 内部熱収支計算から推測
- d. 直接に確認

天体の大きさ, 重さ, 密度

天体が何でできているか, について, ある程度の予想がつく

	質量 (10^{20} kg)	半径 (km)	平均密度 (kg/m^3)
イオ	893.2	1822	3528
エウロパ	480.0	1565	3014
ガニメデ	1481.7	2634	1942
カリスト	1075.9	2410	1834



地球	59736	6371	5515
----	-------	------	------

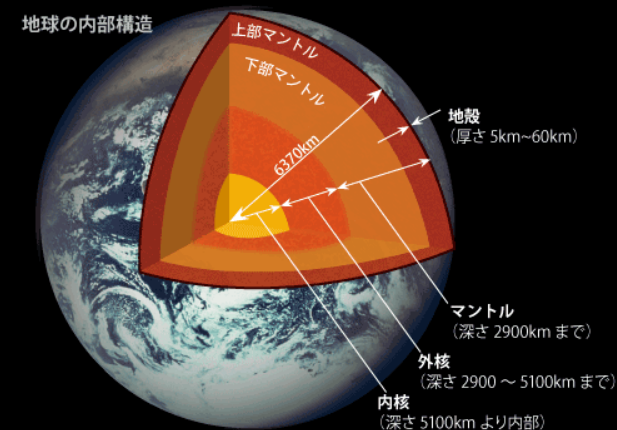
平均密度から分かること

● 衛星を作る3つの主成分とその密度

- － H_2O (密度 1000)
- － 岩石 (密度 3000~4000)
- － 金属(鉄) (密度 6000~8000)

● 地球の平均密度**5515**の意味

- － 表面には岩石(密度3000~4000)
- － 内部にはもっと高密度の物質がある



● エウロパの平均密度**3014**の意味

- － 表面には H_2O (密度 1000)
- － H_2O の量はそんなに多くなさそう. 内部は岩石が多い

エウロパの平均密度 3014 kg/m^3 の意味

- 表面には H_2O （密度 **1000**）
- H_2O の量はそんなに多くなさそう. 内部は岩石が多い

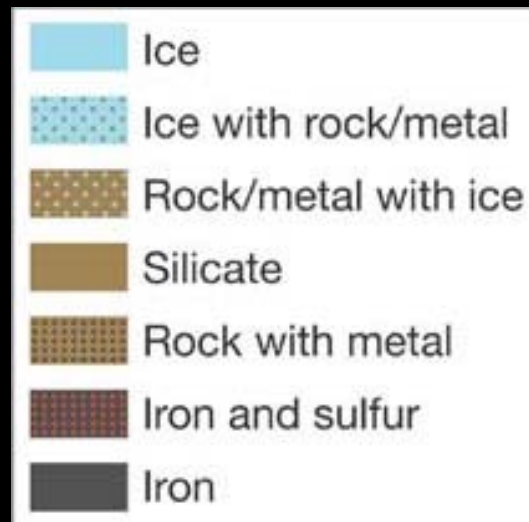
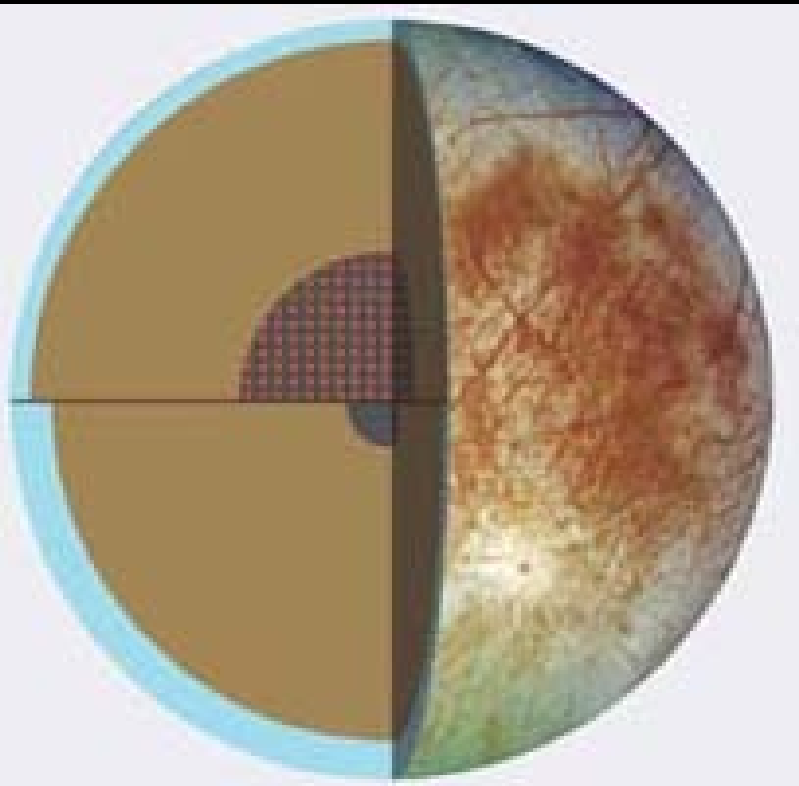
H_2O と岩石 (& 金属) の比率

10~20 % の H_2O

70~80 % の岩石

(もしかしたら)

10~20 % の金属



他の木星衛星はどうか？

	質量 (10^{20}kg)	半径 (km)	平均密度 (kg/m^3)
イオ	893.2	1822	3528
エウロパ	480.0	1565	3014
ガニメデ	1481.7	2634	1942
カリスト	1075.9	2410	1834

ガニメデ・カリストが持つ H_2O は、全体の約50%

氷衛星と地下海

どうやって見つけたか？

(どうやって内部を知るか？)

木星衛星エウロパ(など)を例に

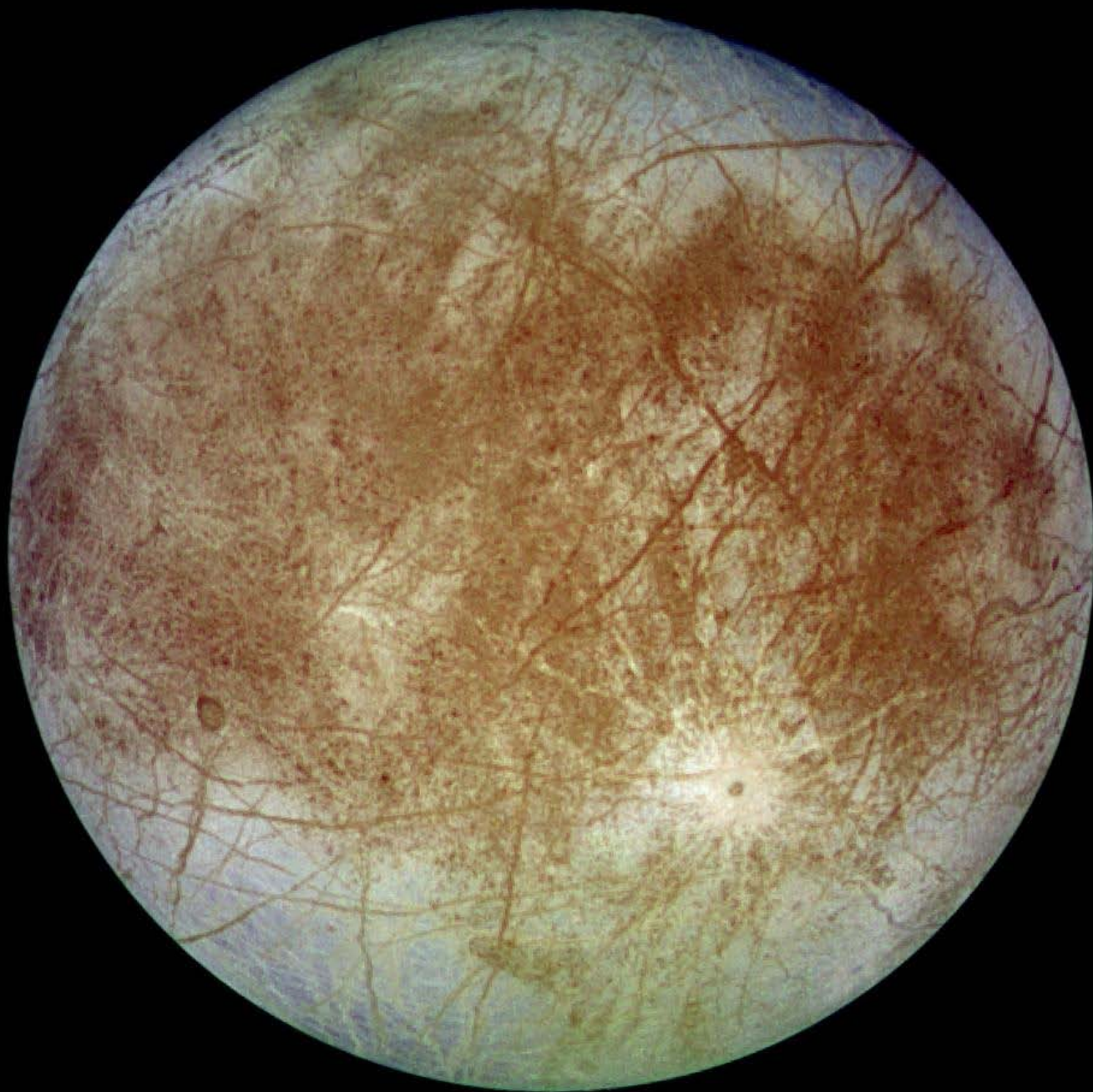
1. 水はどれだけあるか？(平均密度から)

- 表面に薄く張り付いているだけではあまり嬉しくない

2. 地下海はあるか？

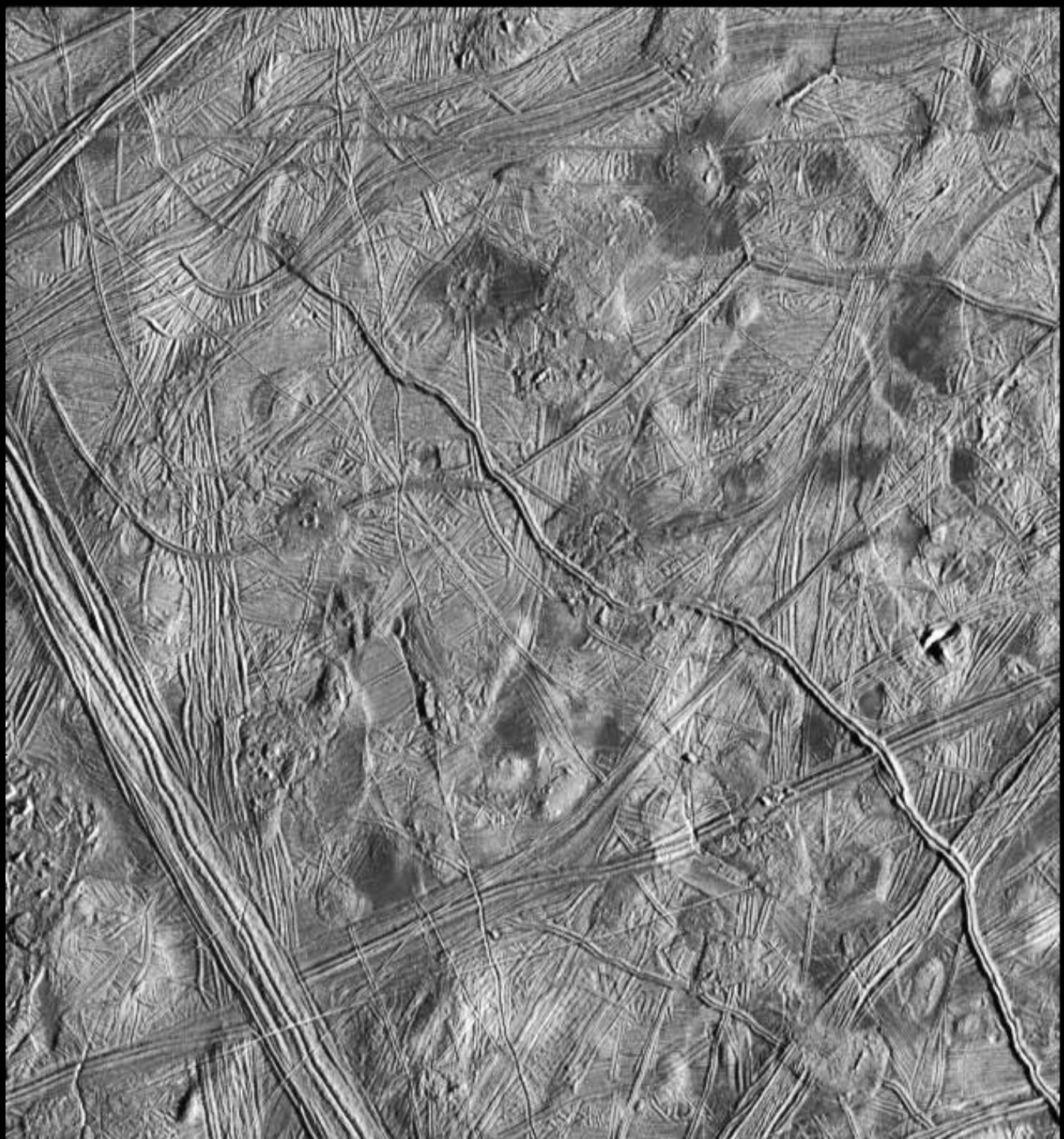
- a. 地形から推測
- b. 電磁氣的観測から推測
- c. 内部熱収支計算から推測
- d. 直接に確認

a 地形から推測



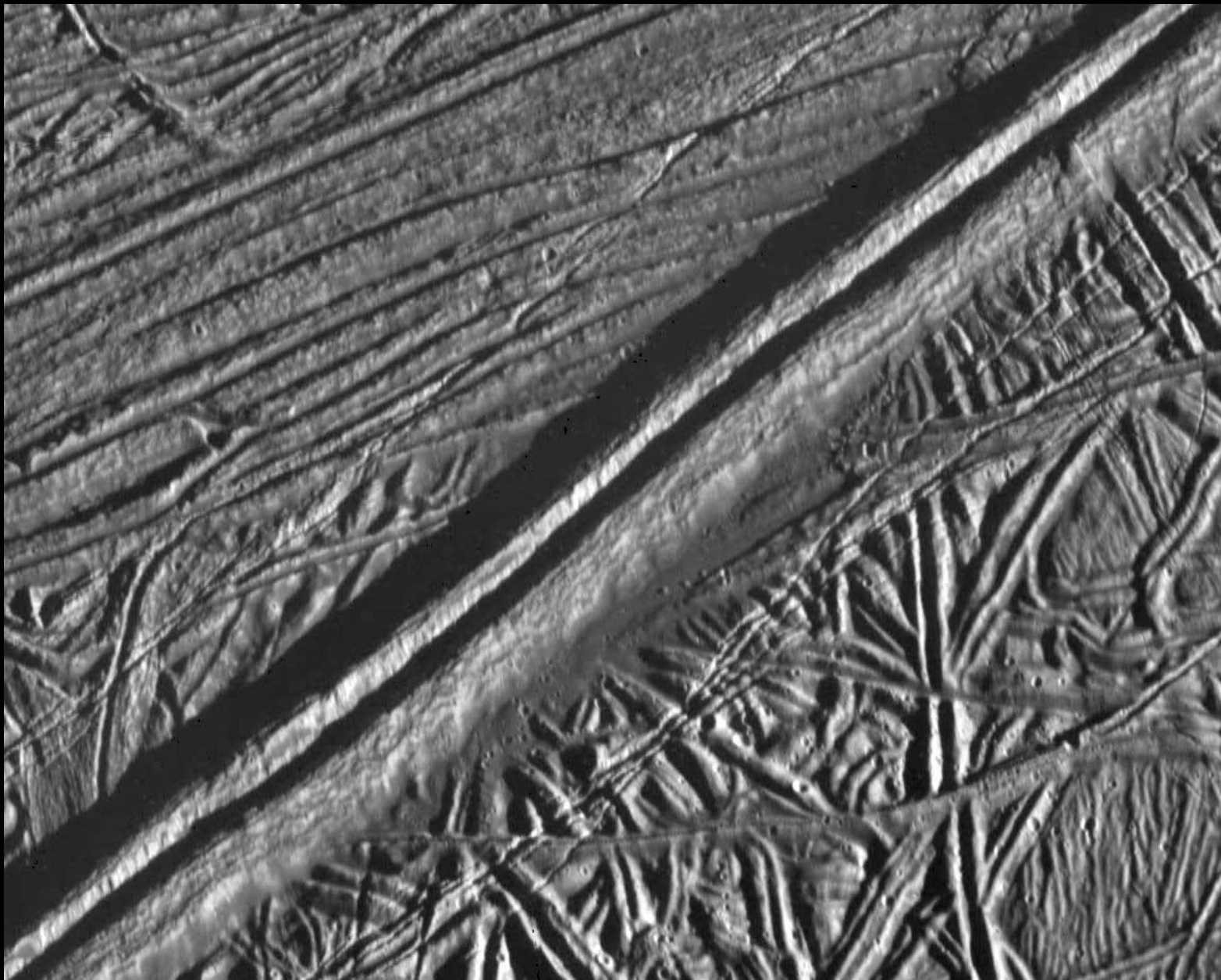
筋模様・シミ模様

筋模様



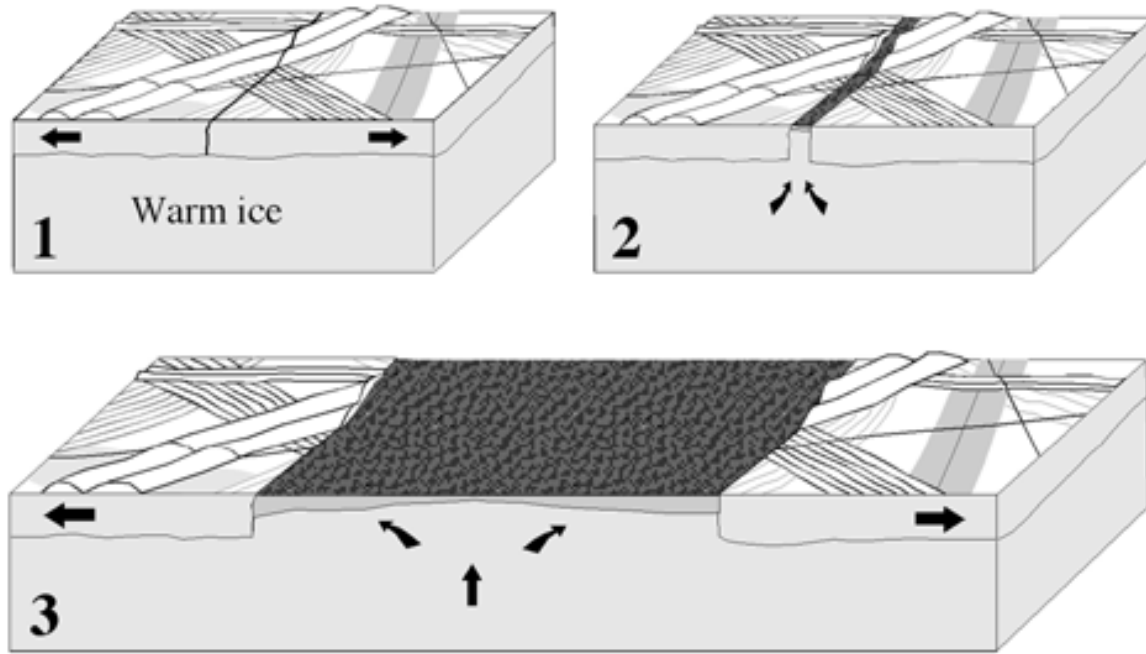
筋模様

大小の筋（うねうね）が縦横
無尽に折り重なっている



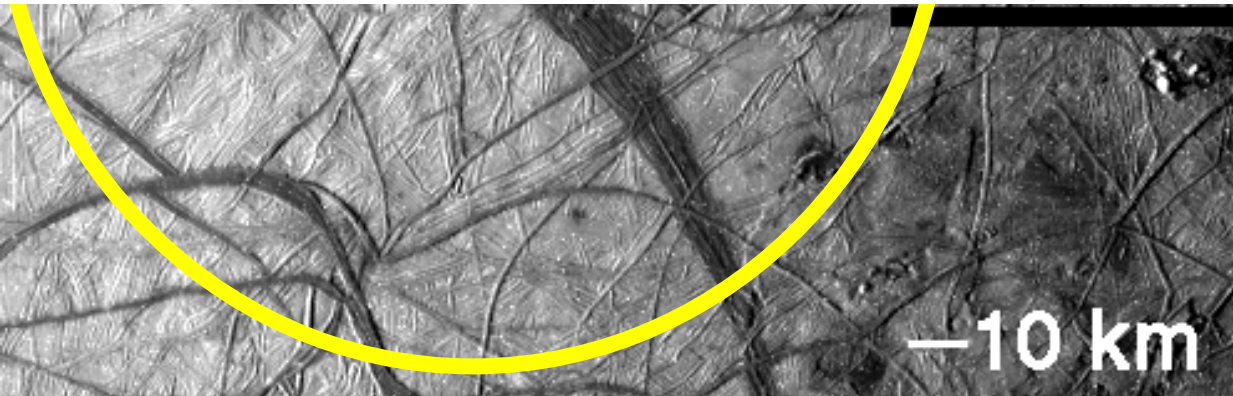
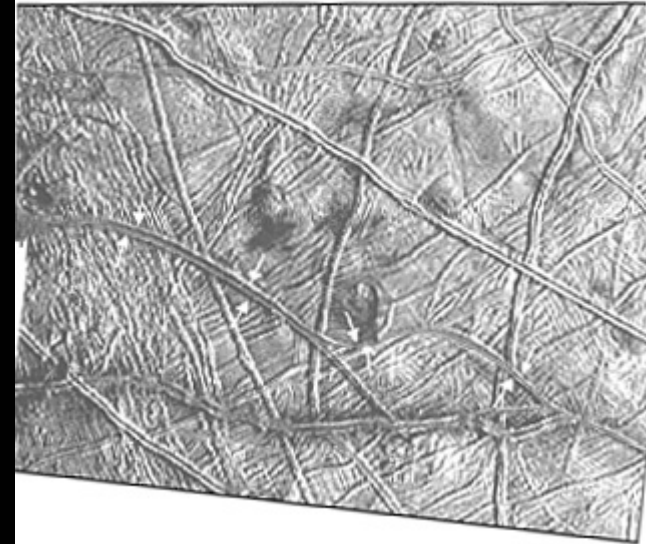
筋模様は「亀裂」

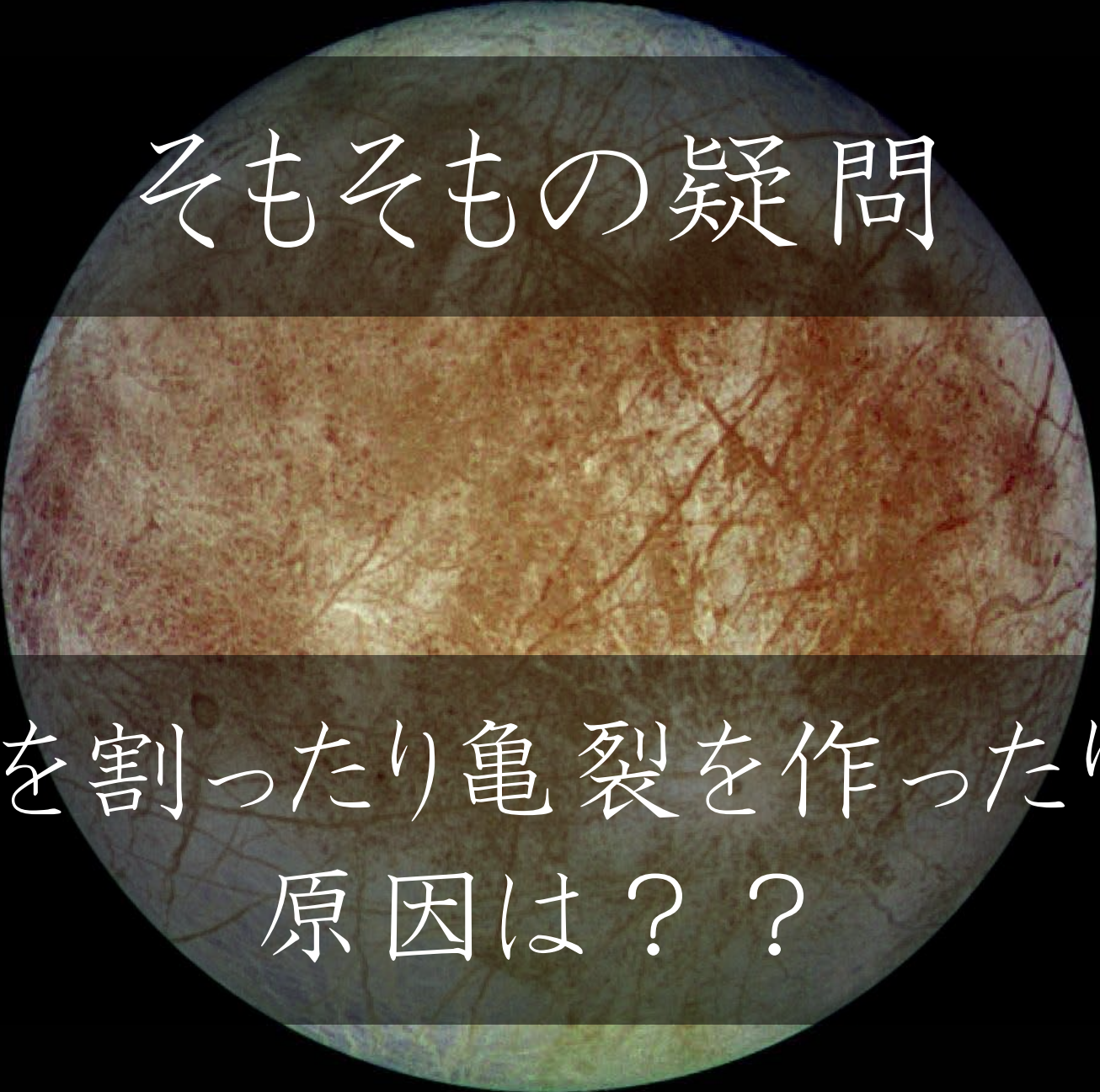
"Fast"-spreading band



(from Prockter *et al.*, 2002, *JGR*, 107(E5), 10.1029/2000JE001458)

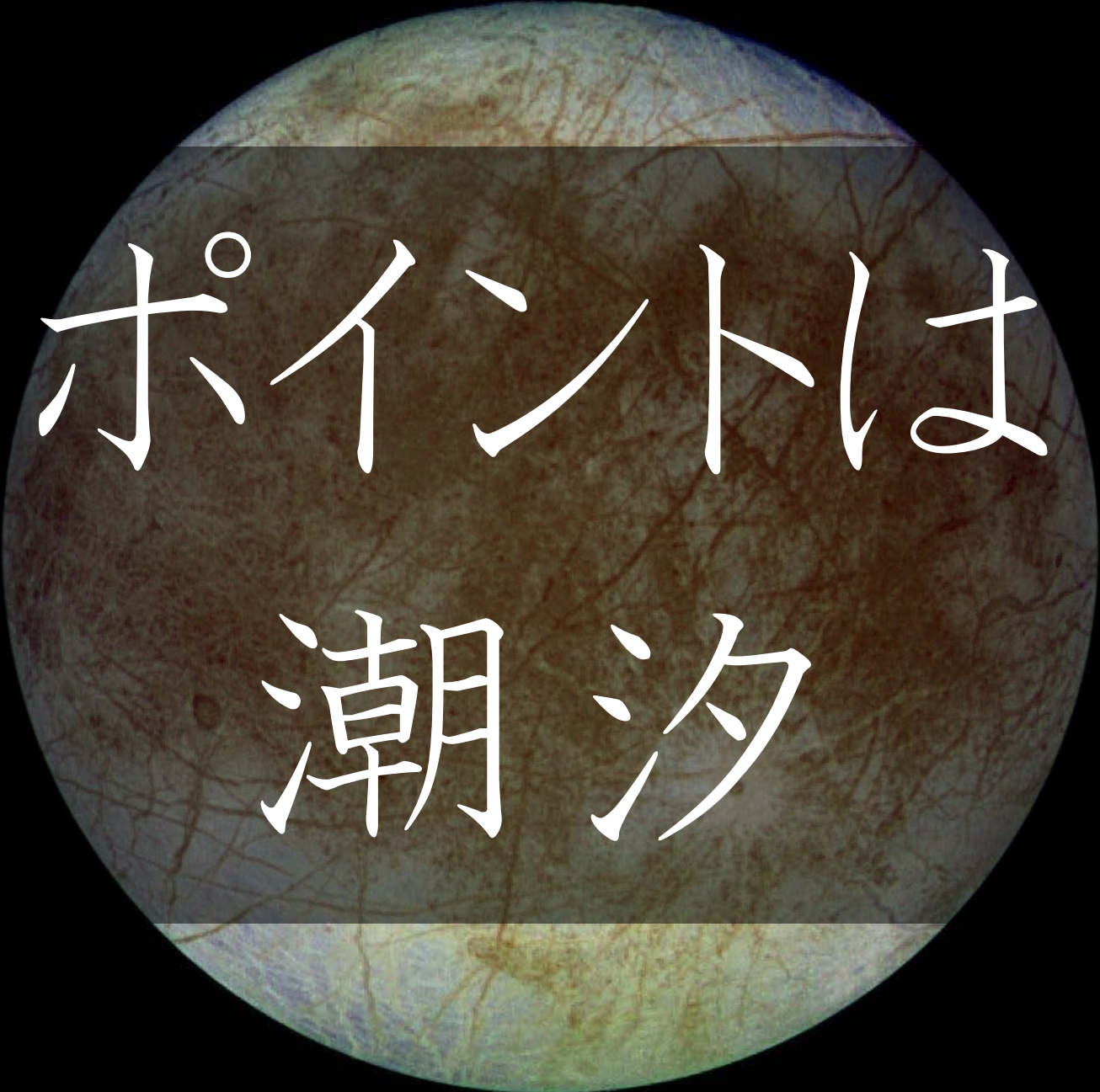
50 km





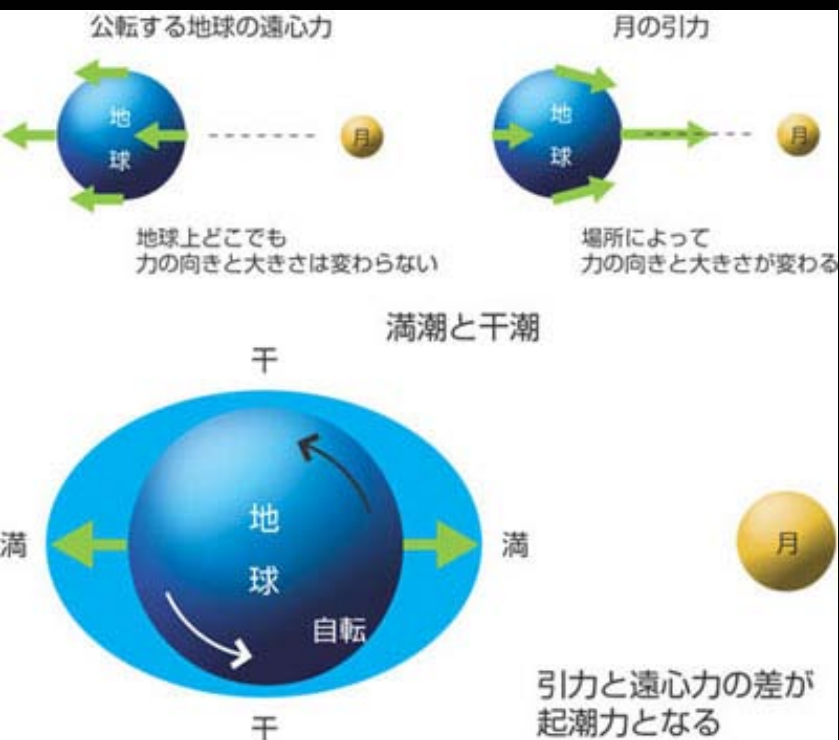
そもそも疑問

表面を割ったり亀裂を作ったりする
原因は??

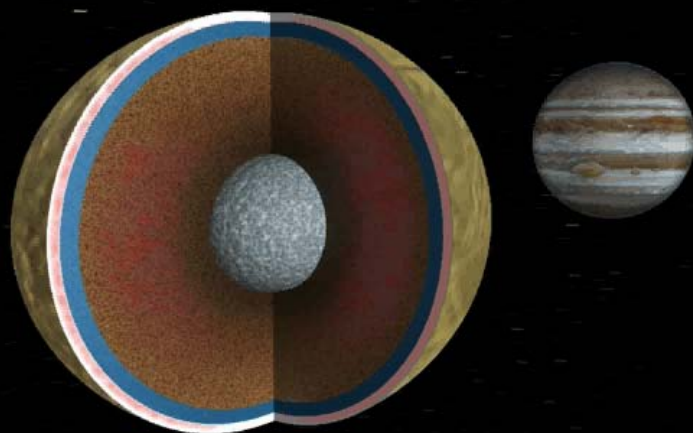
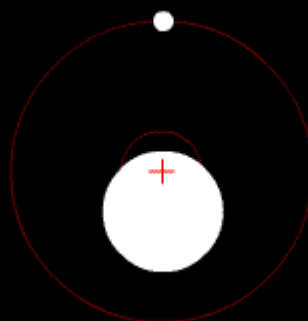


ポイントは
潮汐

潮汐

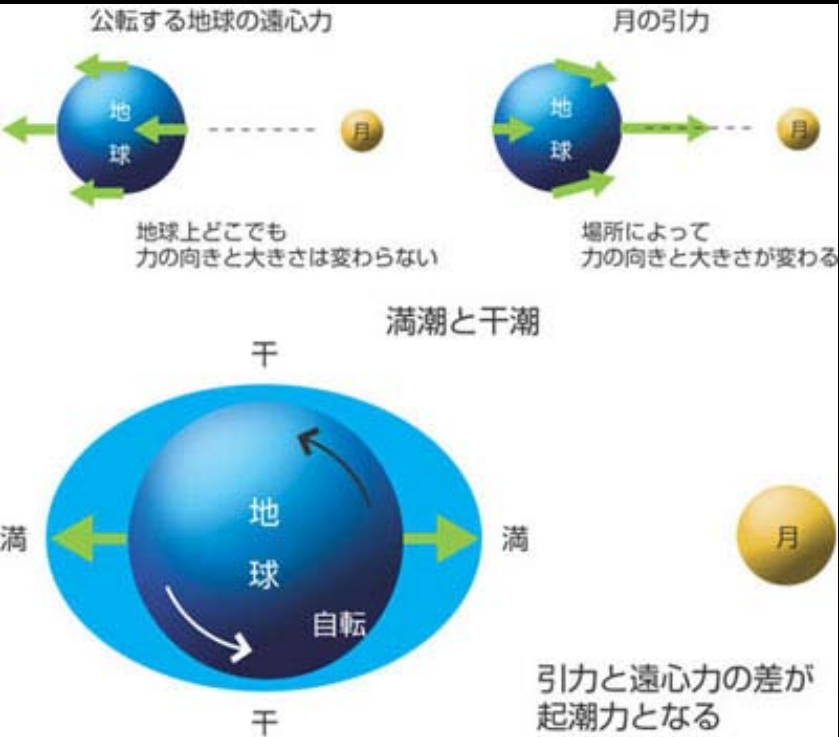


$$\text{遠心力} + \text{重力} = \text{潮汐力}$$

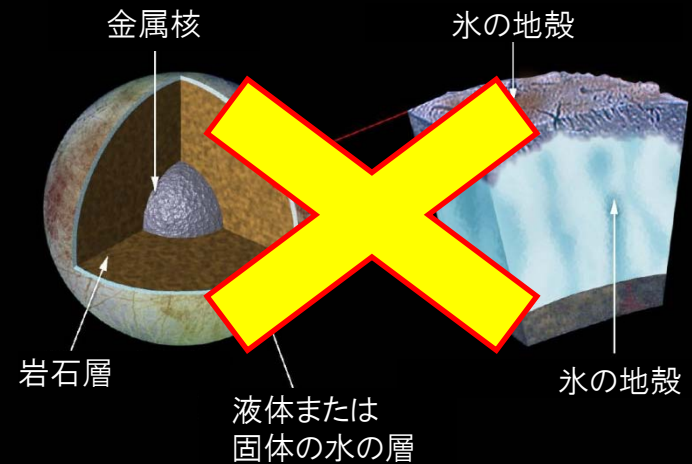


- 木星から受ける強い潮汐力によって衛星が変形。特に氷地殻や海が大きく変形する。
- 表面の破壊や、摩擦による発熱が起こる。

海の有無と潮汐の、だいじな関係

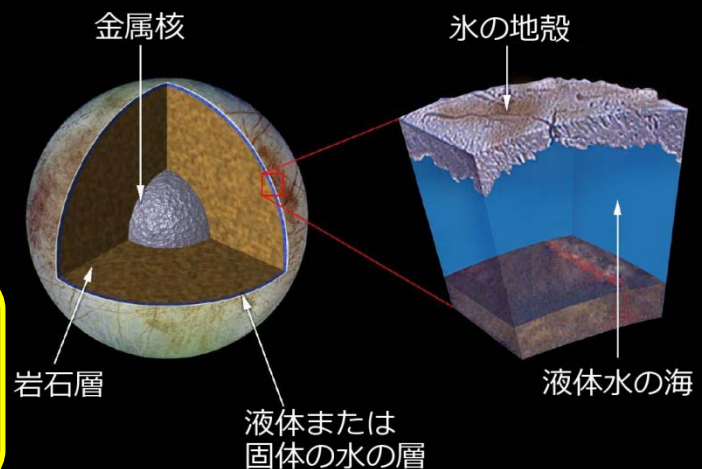


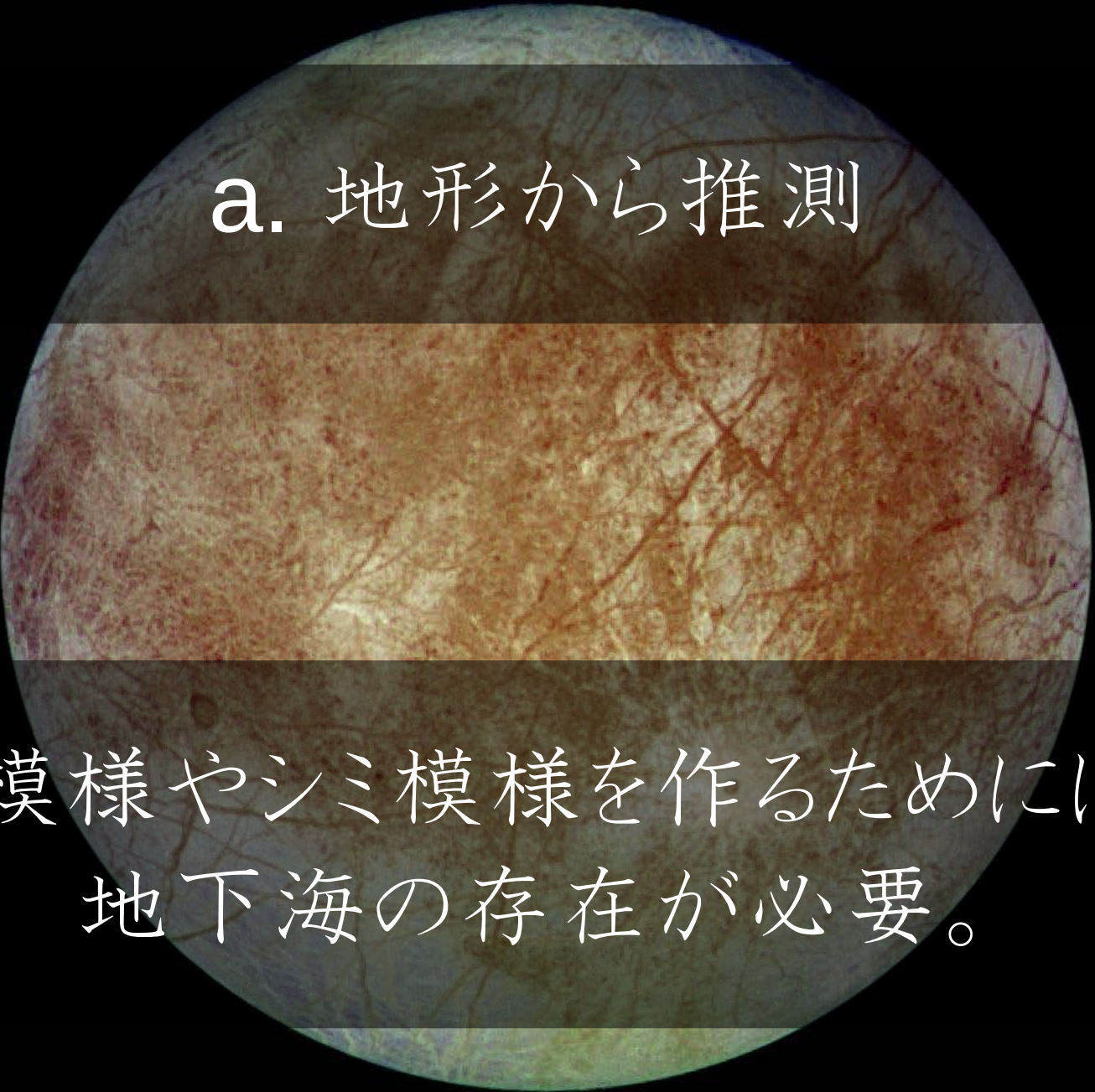
海があると、潮汐力による変形量が大きくなる→表面に大きな力が働く→亀裂



例) 潮汐によるエウロパ表面の変形量
- 海がない場合... 約1 m
- 海がある場合... 約60 m

表面に亀裂を作るためには、海の存在が必要.



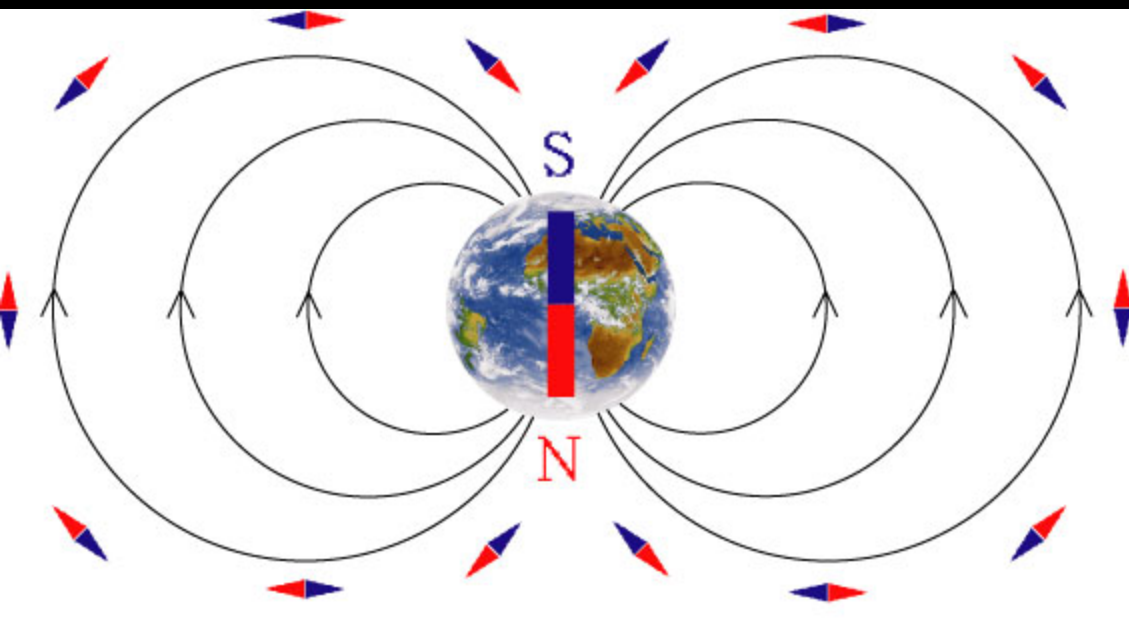
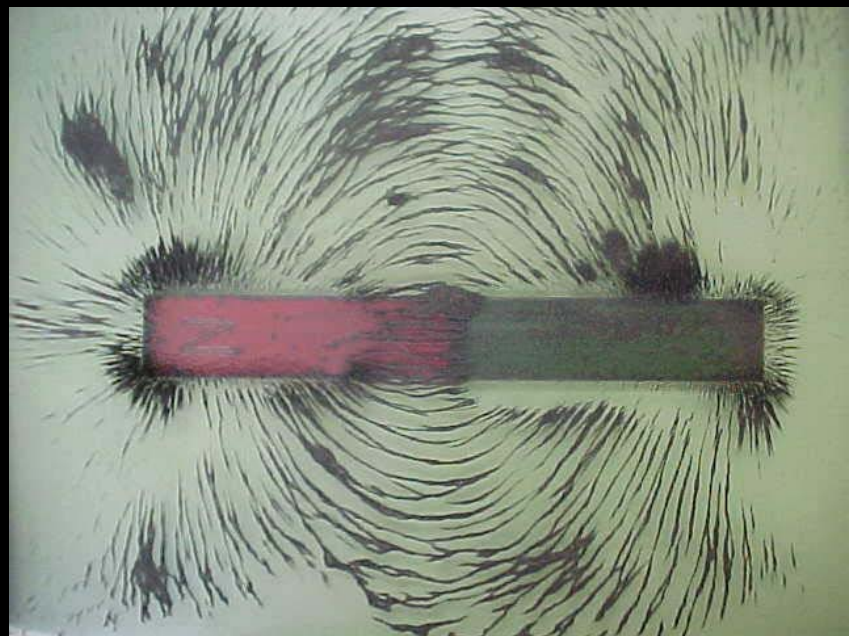


a. 地形から推測

筋模様やシミ模様を作るためには、
地下海が存在が必要。

b. 電磁氣的觀測から推測

地球は磁場を持っている



木星も持っている

ガリレオ衛星は木星磁場の中を公転する

木星の自転軸

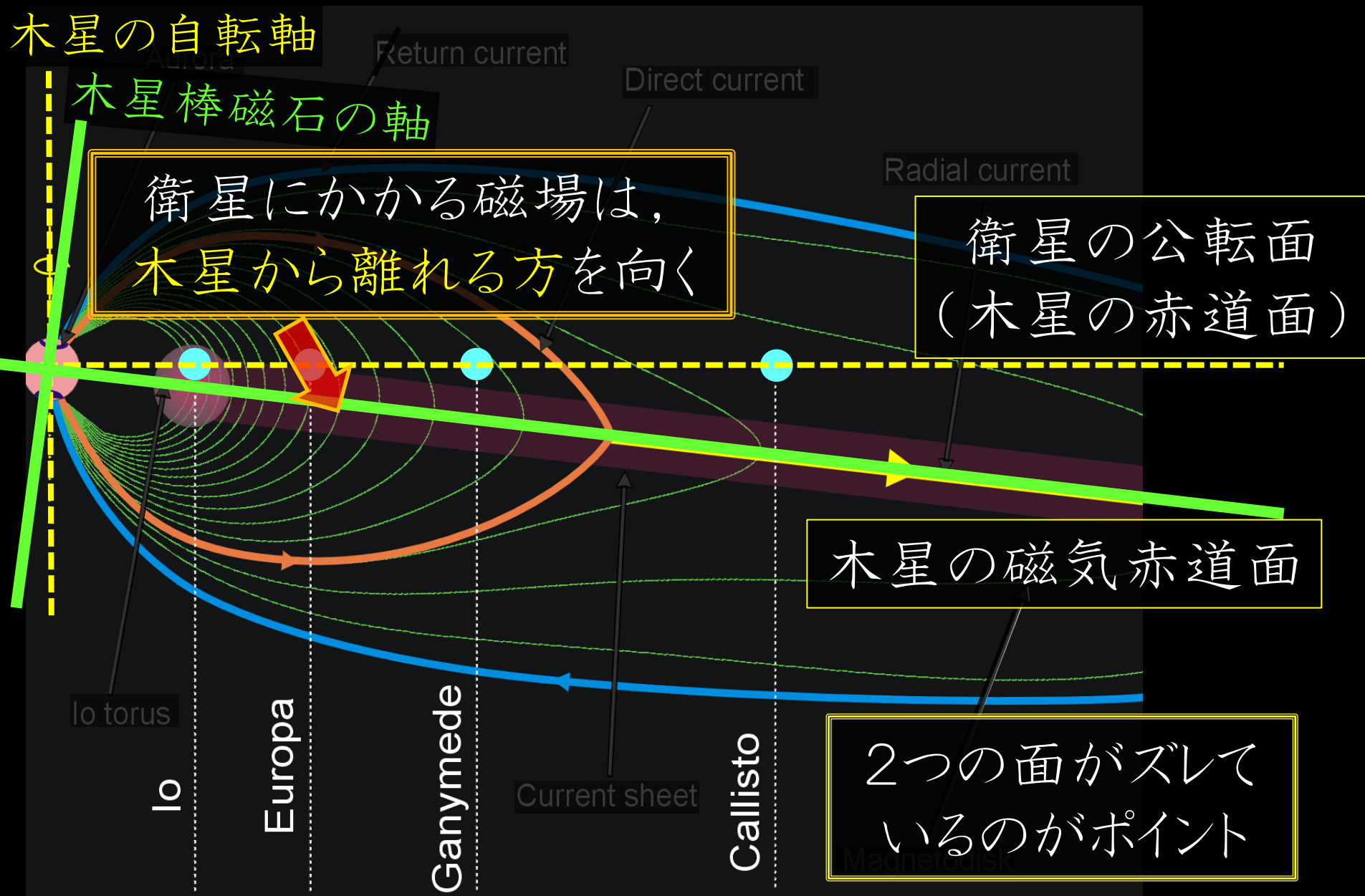
木星棒磁石の軸

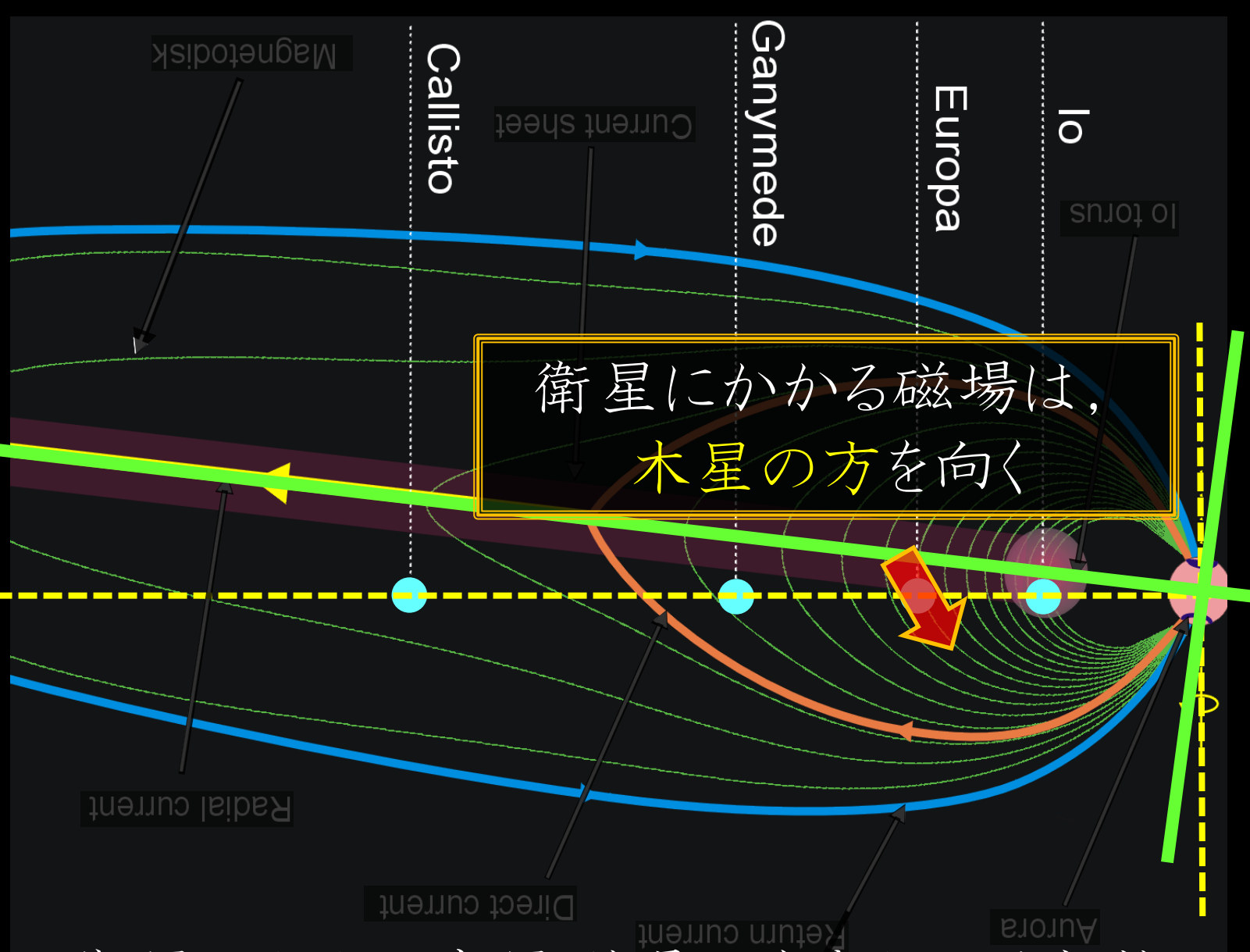
衛星にかかる磁場は、
木星から離れる方を向く

衛星の公転面
(木星の赤道面)

木星の磁気赤道面

2つの面がズレて
いるのがポイント





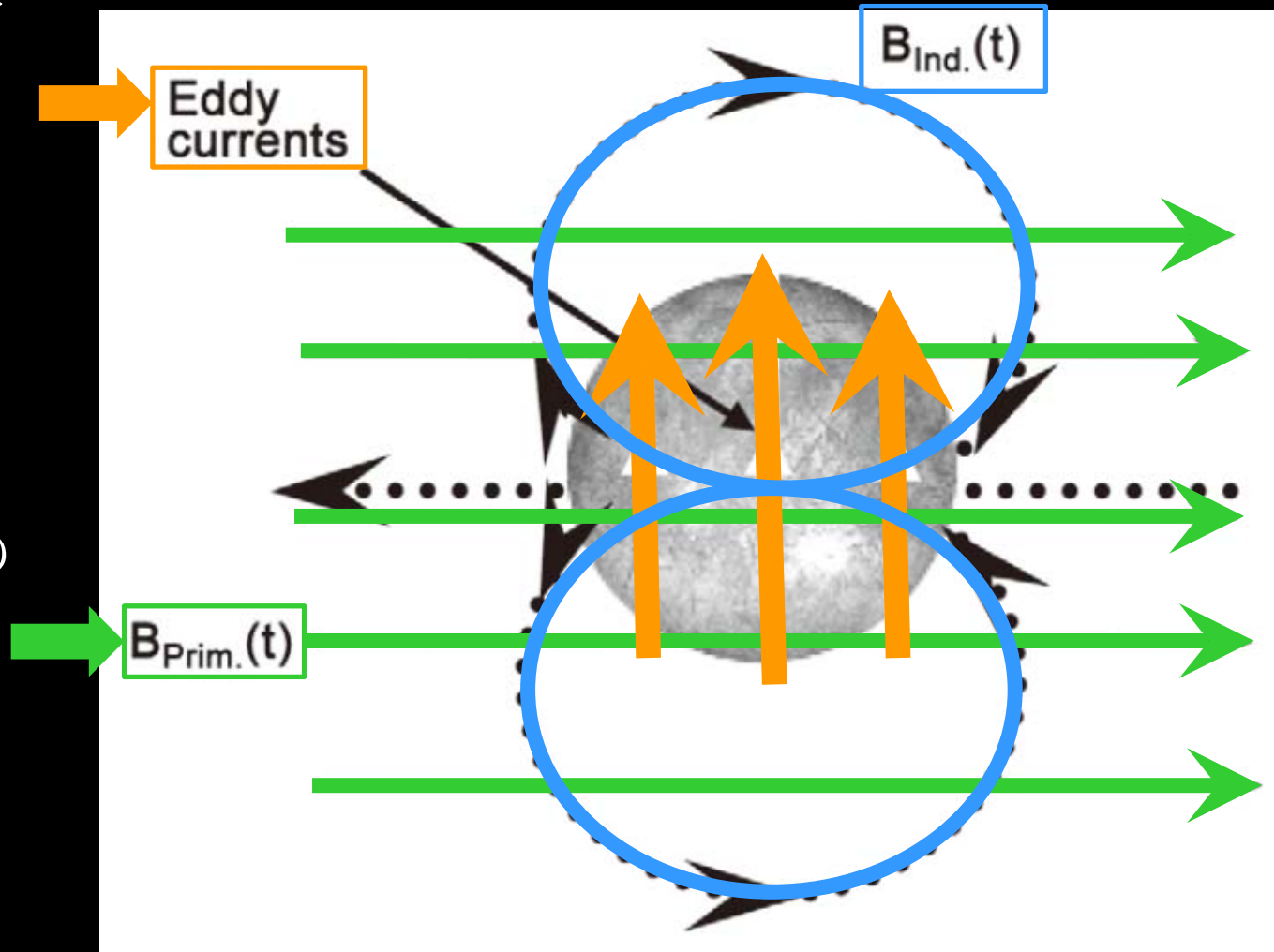
衛星にかかる木星磁場の向きが、周期的に変わる

電磁誘導(誘導磁場)の発生

3. 衛星内部で生じた電流が、二次的な磁場を作る

2. 電磁誘導によって、衛星内部で電流が発生

1. 木星磁場の強さと向きが周期的に変化

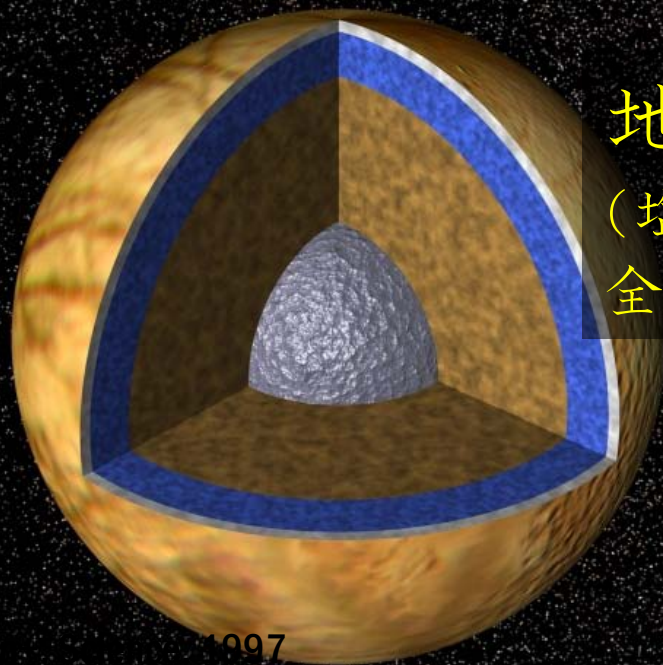


氷の下に海？

1. 衛星にかかる木星磁場の強さと向きが周期的に変化
2. 衛星内部で電流が発生
3. その電流によって二次的な磁場が発生

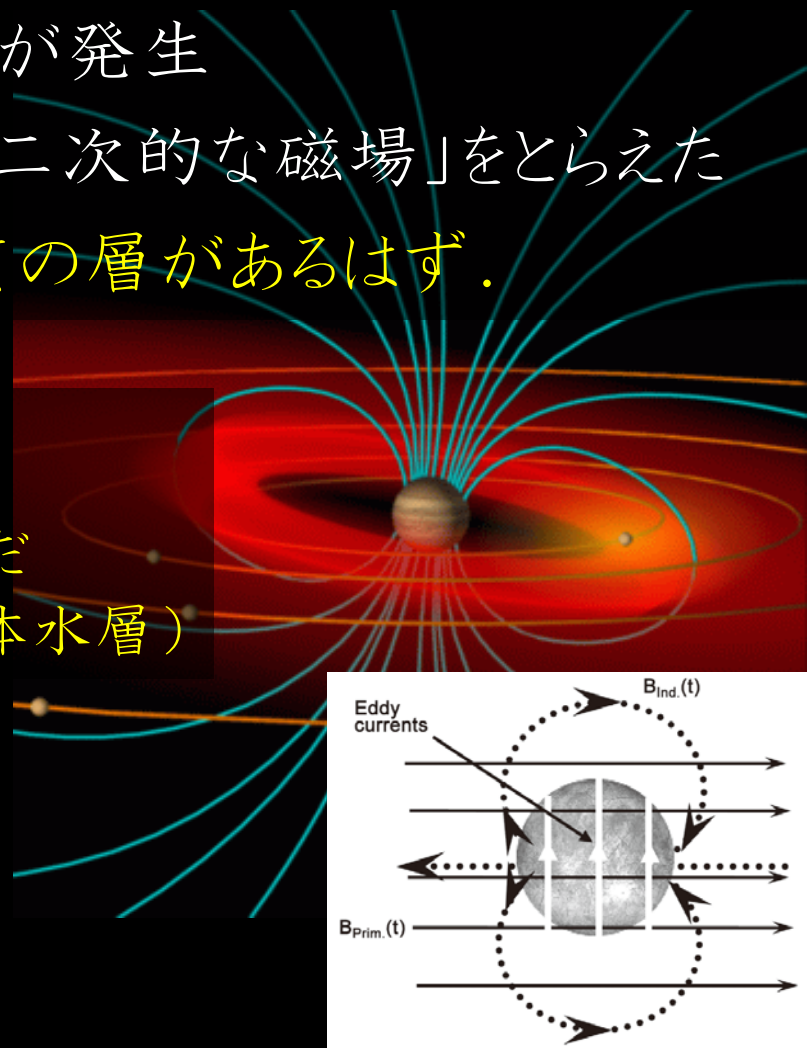
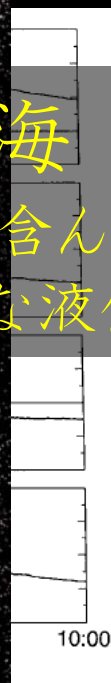
探査機ガリレオは、エウロパなどで「二次的な磁場」をとらえた

→ エウロパ内部に電気を通す物質の層があるはず.



地下海！

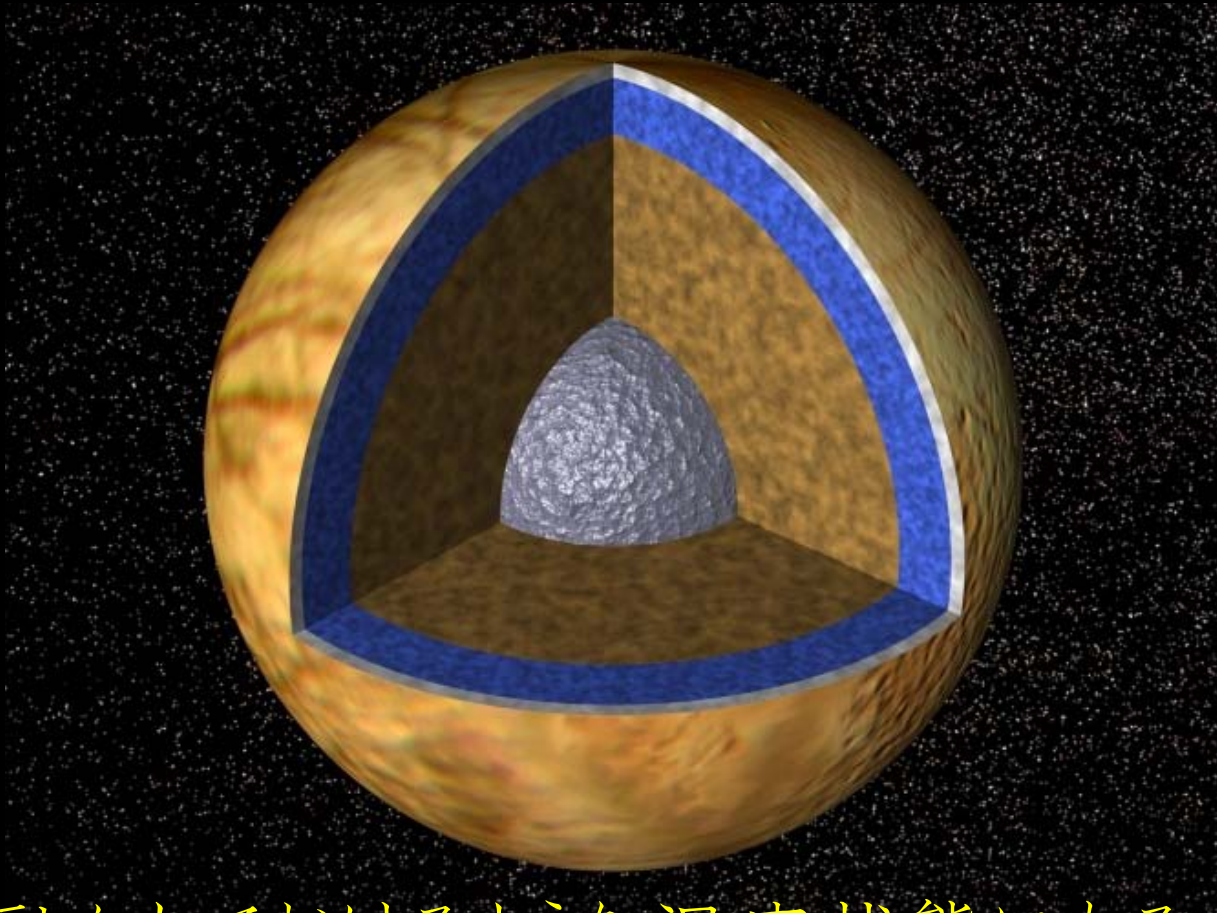
(塩分を含んだ
全球的な液体水層)



c. 内部熱収支計算から推測

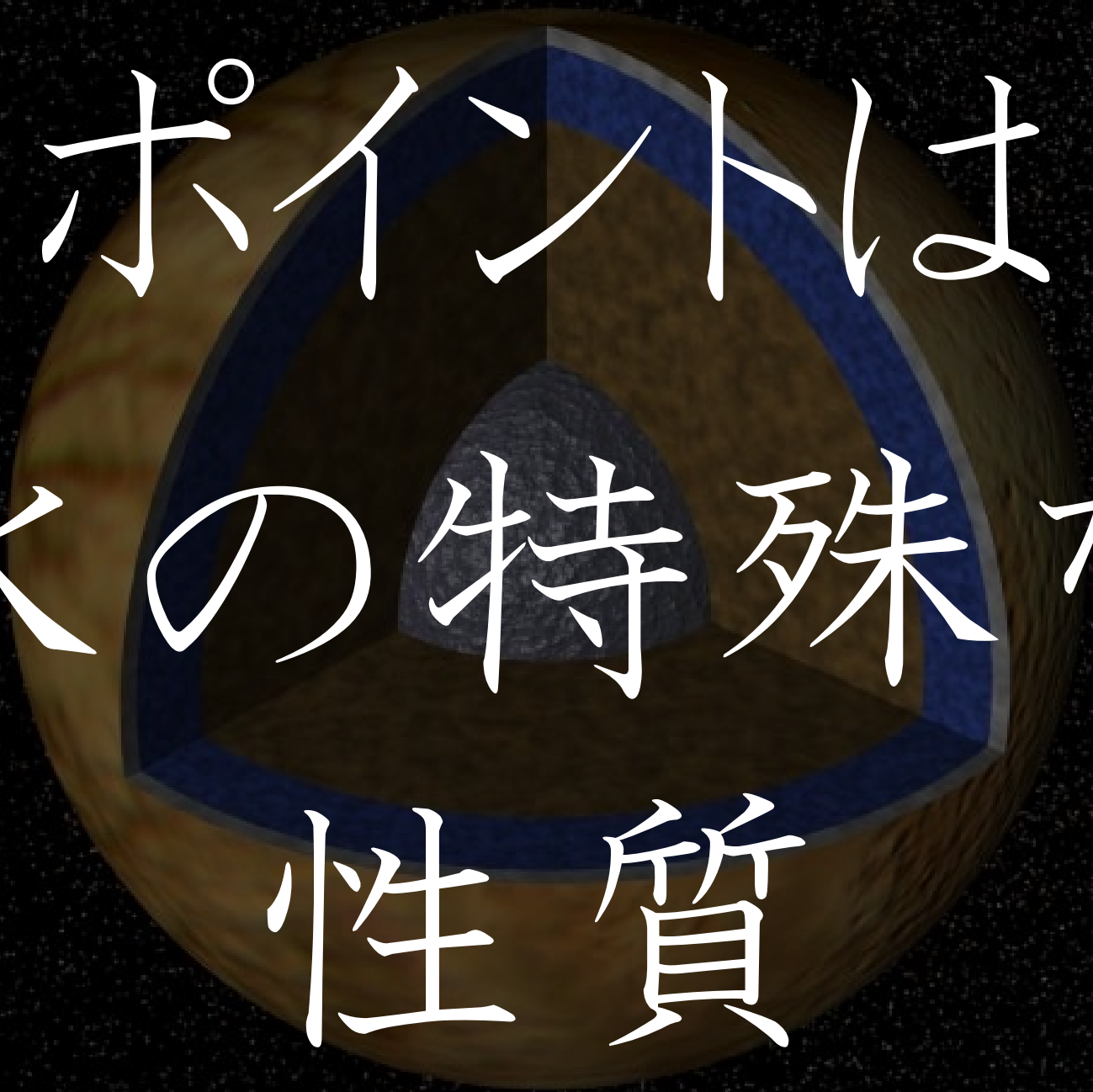
天体内部の温度構造を計算

氷の下に海がある
→氷の層が内部で融けている



氷を融かしておけるような温度状態にある。
大気もないし、太陽から遠い…可能なのか？

ポイントとは
氷の特殊な
性質





氷は、圧力をかけると融けやすくなる

(岩石は、圧力をかけると融けにくくなる)

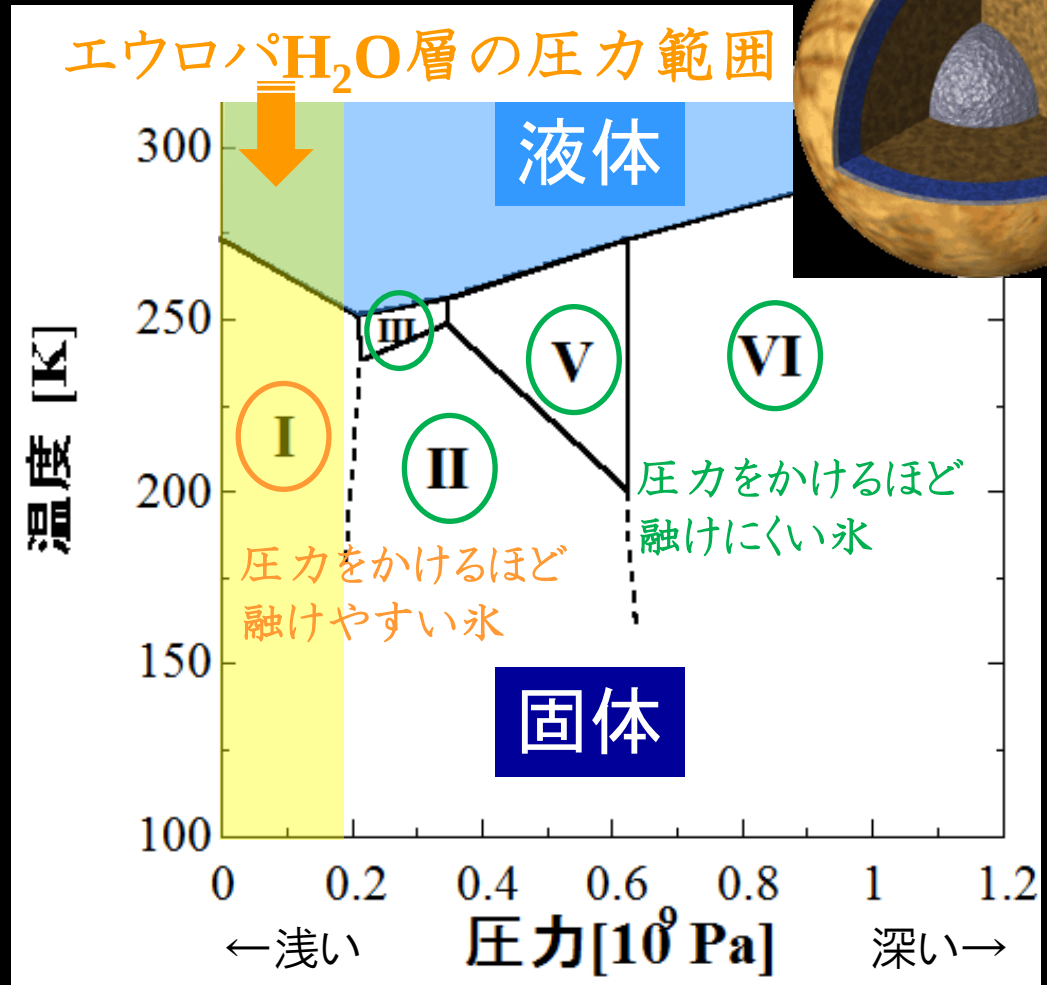


圧力をかけると融けやすい？

(圧力をかけた氷＝深いところにある氷)

氷Iは高圧(深い)ほど低融点(融けやすい)

- H_2O の氷には色々な相がある(高圧では、分子は密な結晶構造をとる)。
- 冷凍庫で作る氷は「氷I相」。
- 天体内部は高圧：氷I→III→V...
- エウロパ内部には氷I相だけが存在。

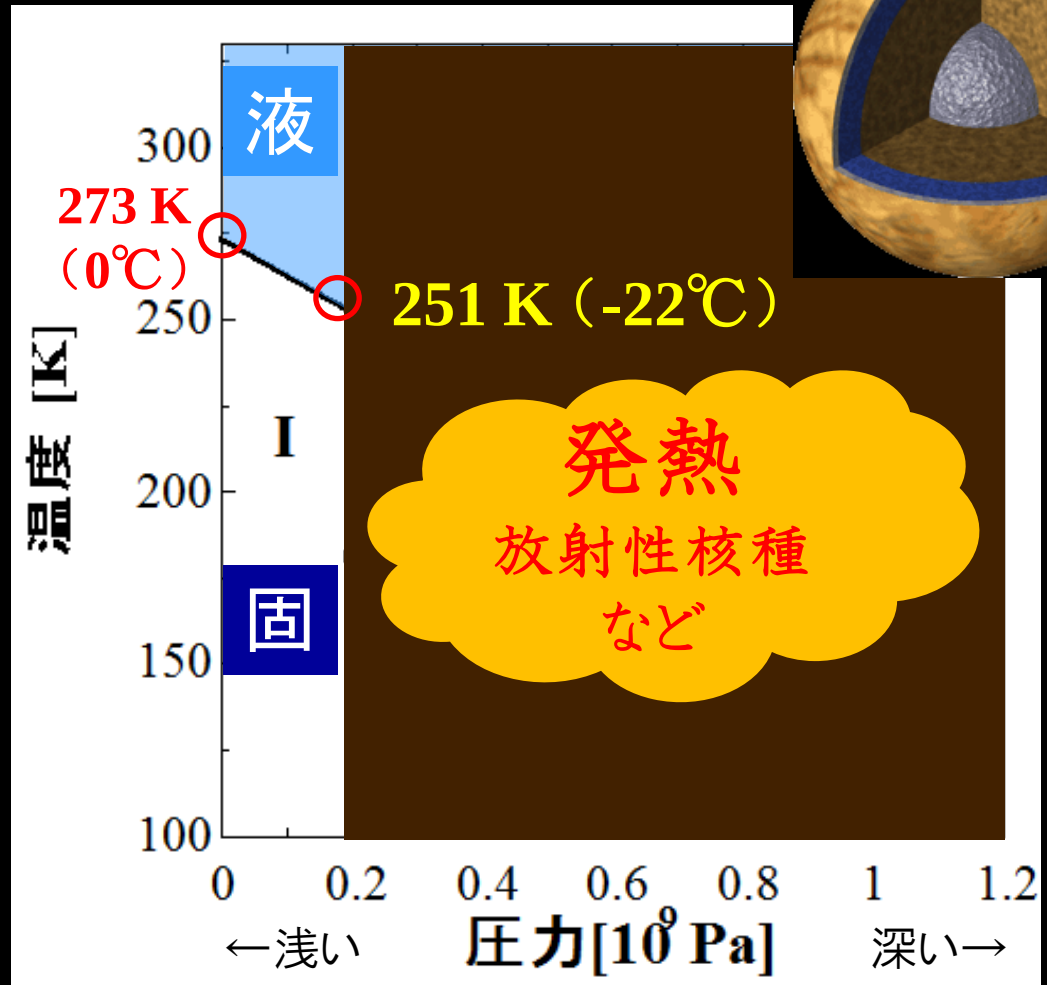


圧力をかけると融けやすい？

(圧力をかけた氷＝深いところにある氷)

氷Iは高圧(深い)ほど低融点(融けやすい)！

- エウロパ内部には氷I相だけが存在．
- 251~273 K 以上の温度なら，融けられる(海でいられる)．
- “地熱”で融かしていられるか？
- 計算してみる．



天体内部の温度を計算する

発熱(温める力)と熱輸送(冷ます力)のバランスを方程式にして, 温度の時間変化を計算する.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{F} + \rho Q$$

熱輸送 熱源

ρ : 密度 (kg/m^3)

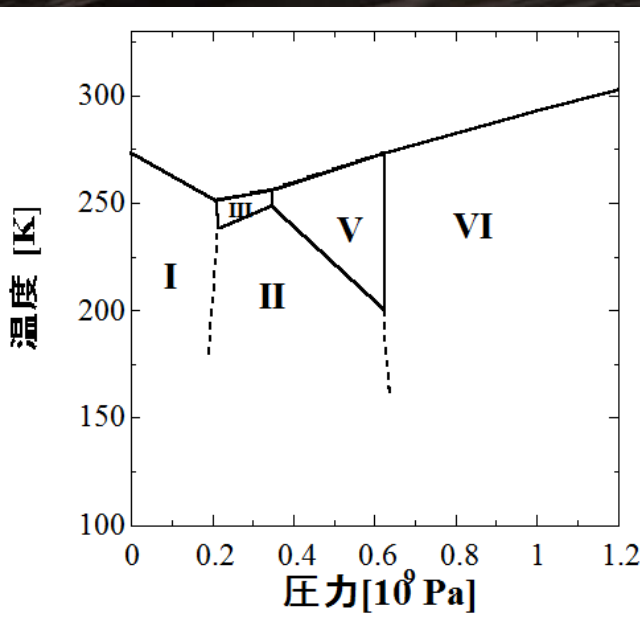
C : 比熱 (J/kg K)

T : 温度 (K)

t : 時間 (s)

F : 熱流量 (W/m^2)

Q : 発熱量 (W/kg)



天体内部の温度を計算して, H₂Oの相図と照らし合わせる.

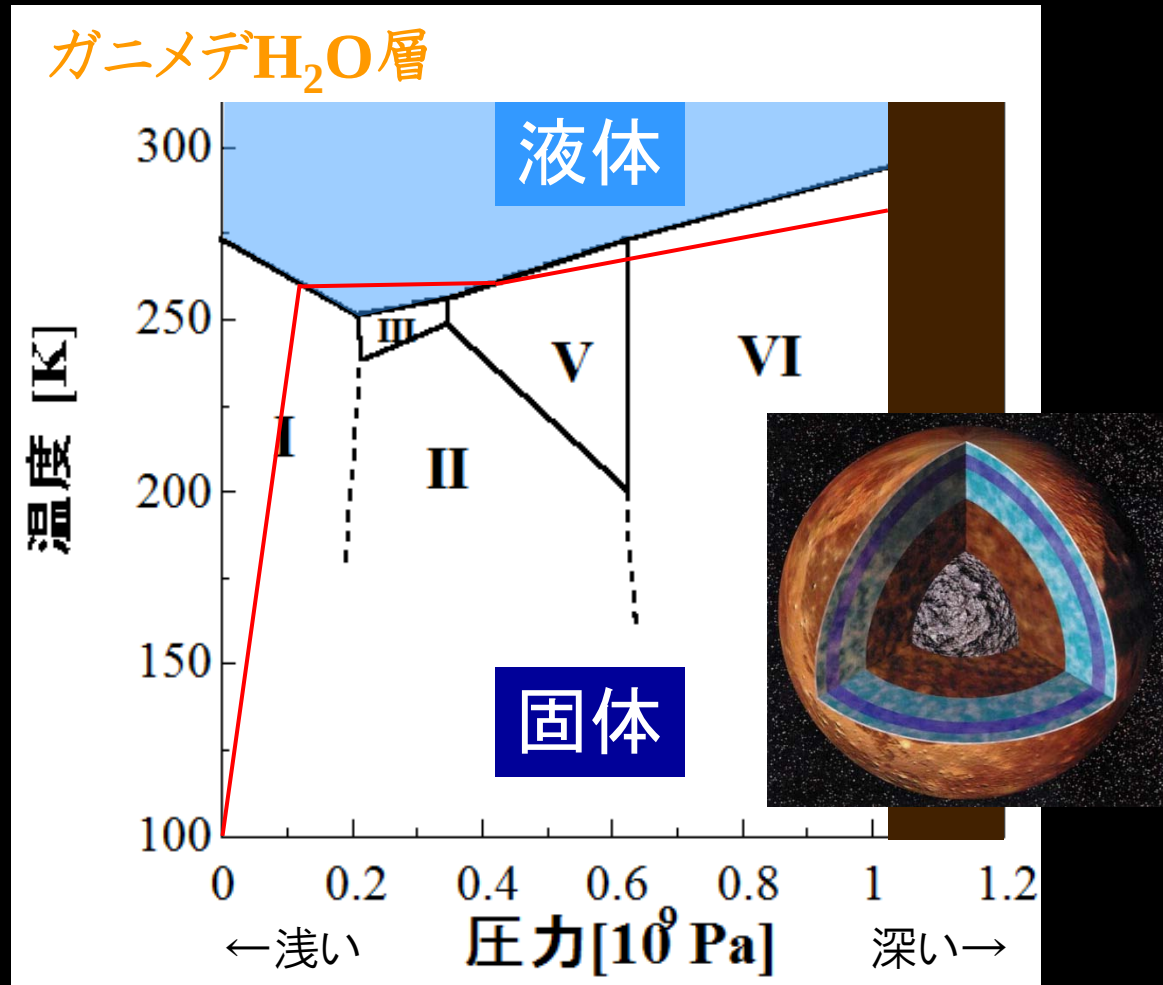
温度 < 融点 → その領域は固体氷

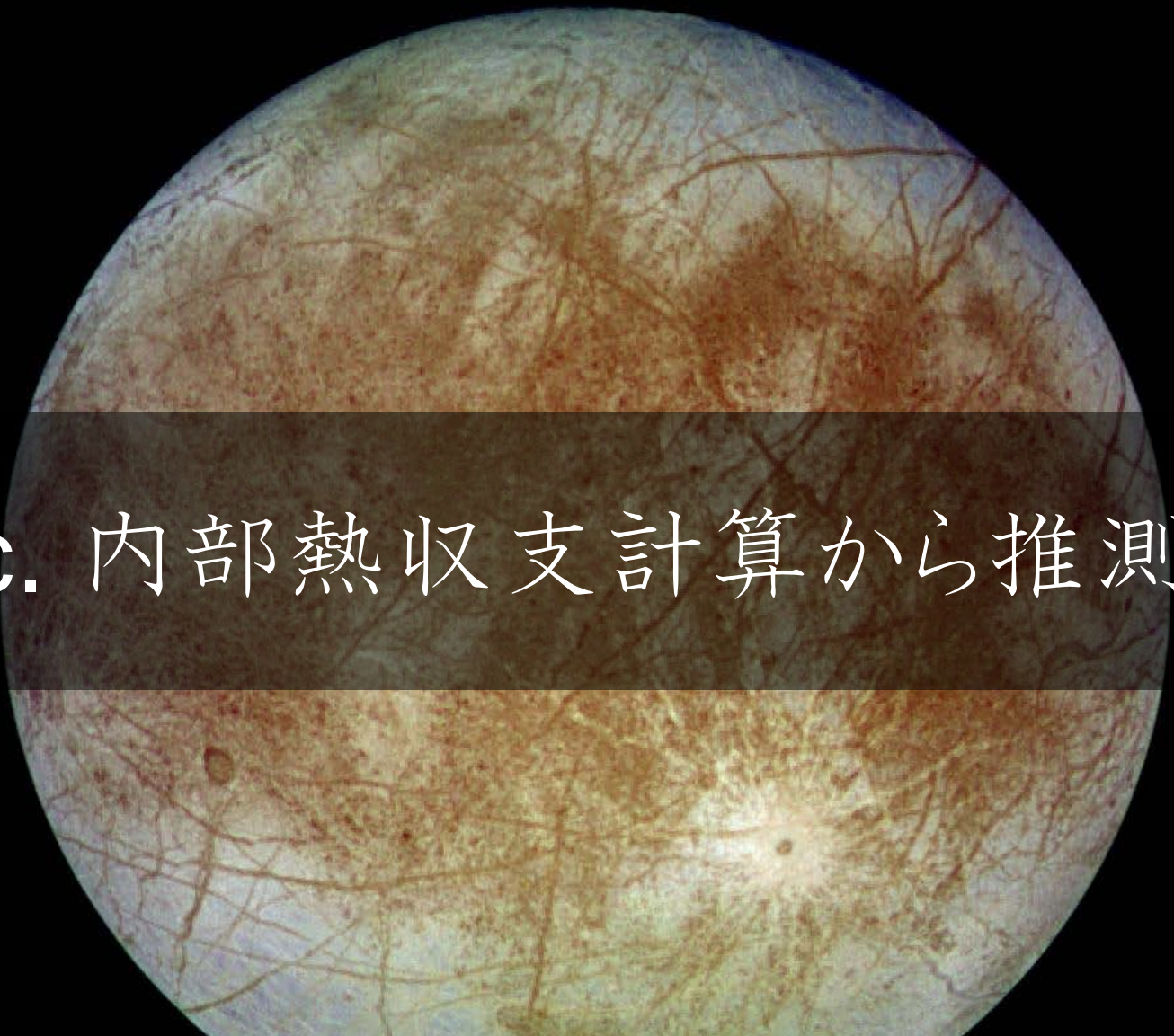
温度 > 融点 → その領域は液体水

ただし、もっと圧力をかけると融けにくくなる

氷III, V, VI,, は高圧(深い)ほど高融点(融けにくい)

- ガニメデで予想される H_2O 層は厚く高圧におよぶ.
- 液体水層と岩石マントルの間に高圧氷層が出現.
- 水-岩石相互作用系がない.





c. 内部熱収支計算から推測

モデル(仮定)に依存するので,これだけでは結論は出ない
(融点降下物質の量,熱源の大小,氷物性...)

d. 直接に確認

エウロパでは未達成だが、
他の天体でいくつか実例がある。

例えば、土星の衛星エンセラダス

Rev 01
Enceladus Flyby
R=252 km

Enceladus erupts

Scientists say subsurface reservoirs of pressurized liquid water could fuel geysers on the Saturnian moon, sending jets of icy material into space.

H₂O vapor
plume and ice
particles

Hydrothermal
circulation
and convecting
ice

Vent to
surface

H₂O ice

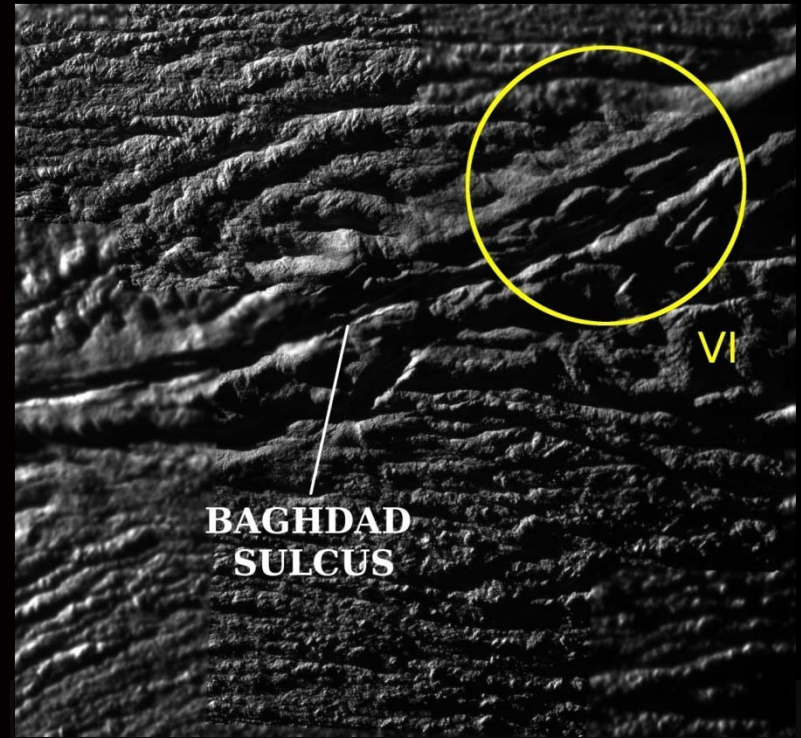
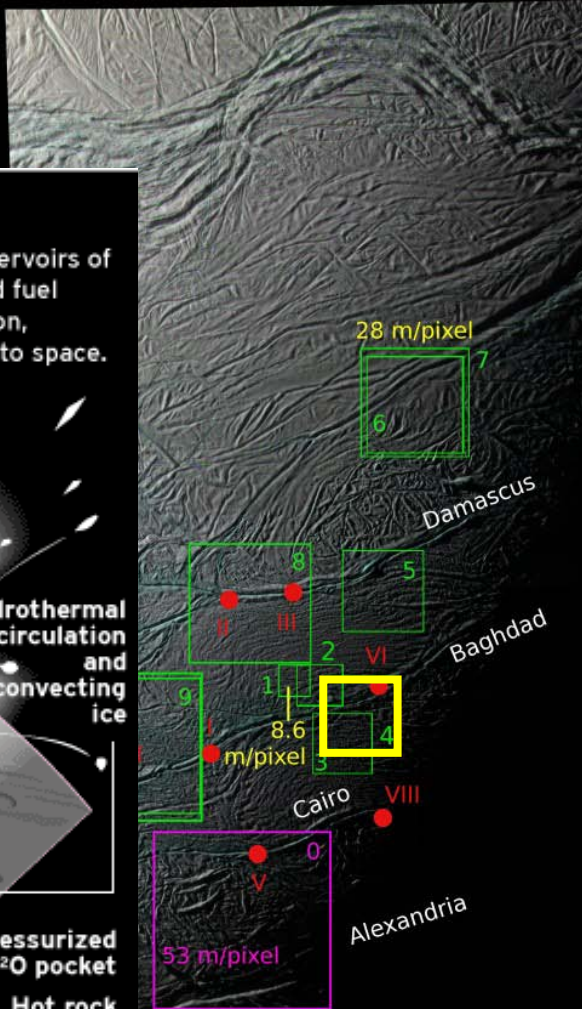
Pressurized
H₂O pocket

Tidal
heating

Tidal heating

SOURCE: NASA

Reuters

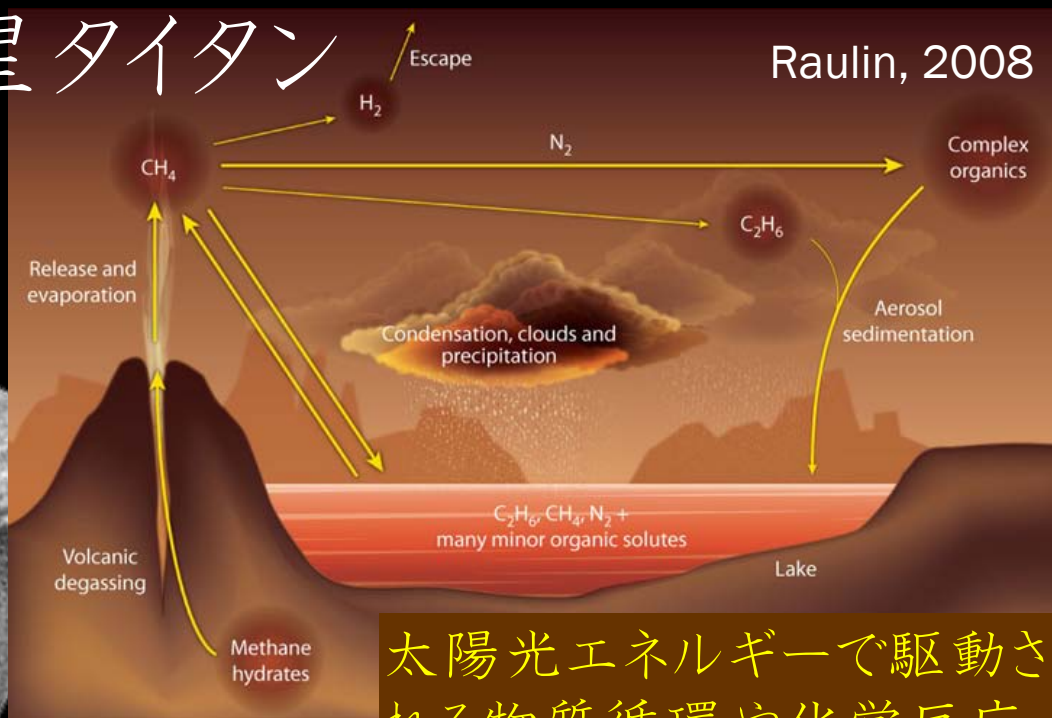
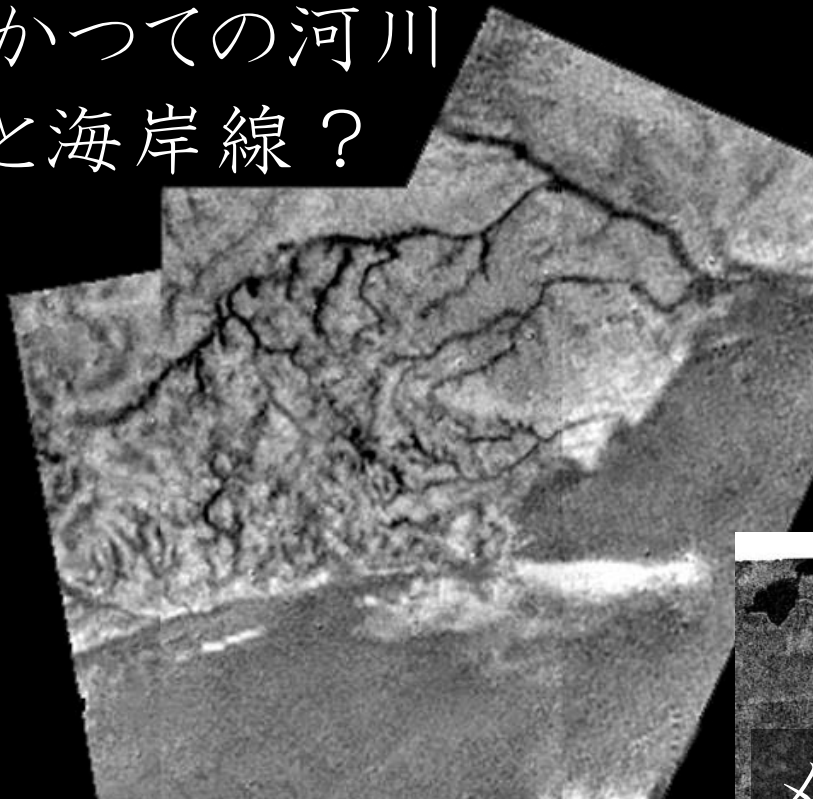


南極からの水噴出

例えば，土星の衛星タイタン

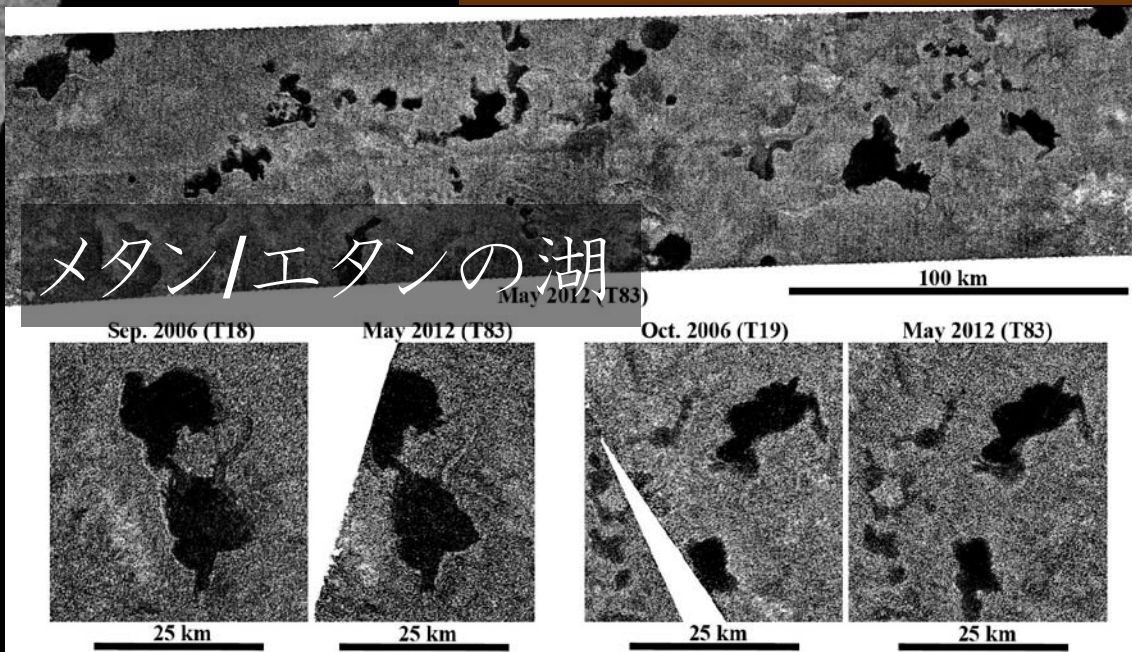
Raulin, 2008

かつての河川
と海岸線？

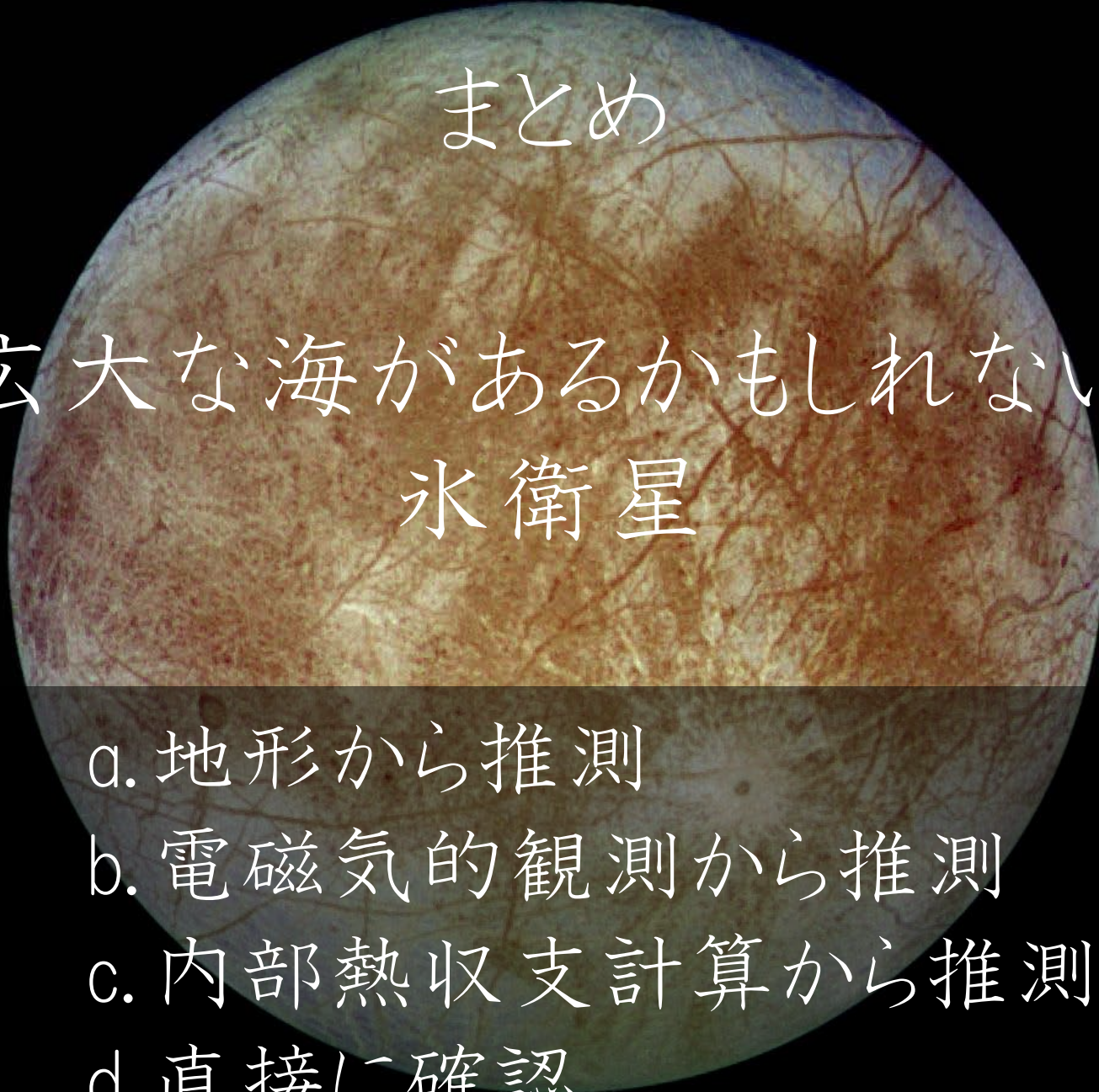


太陽光エネルギーで駆動される物質循環や化学反応

メタン/エタンの湖



湖面の反射光？



まとめ

広大な海があるかもしれない
氷衛星

- a. 地形から推測
- b. 電磁氣的観測から推測
- c. 内部熱収支計算から推測
- d. 直接に確認

	エウロパ	ガニメデ	カリスト	エンセ ラダス	タイタン
地形観察	○	×	×	○	△
電磁氣的 観測	○	△ 自身の固有 磁場が邪魔	○	×	×
内部熱収支 計算	△	△	△	△	△
	モデル依存(融点降下物質の量, 熱源の大小, 氷物性…)				
直接確認	×	×	×	○ 南極からの噴 出	△ 表面に湖
水-岩石 相互作用系	○	×	△ 氷と岩石の 分離が不十 分?	○	○

御清聴ありがとうございました。

