氷衛星の化学情報を読み解く エンセラダス・プリュームのシリカと熱水反応の示唆

関根 康人

東京大学・新領域

2013年8月8日・衛星系研究会



ボイジャー探査の知見:地質活動、表層環境、 内部構造、化学組成に大きな多様性

Low geological activity

Europa, Ganymede, Enceladus, Titan

Extensive & prolonged

activity, interior ocean

Cassini mission to the Saturnian system (2004–2017)



- ・ホイヘンスプローブ → タイタン大気化学組成
- ・高空間解像観測 → 地質と表層物質を合わせて理解
- ・エンセラダス・プリュームその場分析 → 内部海物質









原始太陽系円盤と氷微惑星

・ 分子雲の材料物質+>10AUイオン反応 ⇔ 彗星観測

 (CO_2, CO, CH_4, NH_3) (Gibbs et al., 2000; Aikawa et al., 1999; Bockelee-Morvan et al., 2004)

• 固体氷成分に凝縮 (Multiple snowlines) (e.g., Hersant et al.,

2004; Alibert & Mousis, 2007)

 \bullet





周惑星系円盤:2つのモデル

厚い円盤(高温高圧) e.g.,最小質量モデル (Lunine & Stevenson, 1982; Mosqueira & Estrada, 2003)



(Prinn & Fegley, 1991; Sekine et al., 2005)

熱力学平衡組成へ(?) (CO+CO₂+H₂ → CH₄+H₂O) (N₂+H₂ → NH₃)

H₂O, CH₄, NH₃-rich組成

薄い円盤(低温低圧) e.g., gas-starved モデル

(Canup & Ward, 2006; Alibert & Mousis, 2007)



(Mousis e al., 2005; Alibert & Mousis, 2007)

原始太陽系円盤組成を保持 ただし氷微惑星が円盤に突入する際の ショック加熱はうける?

彗星(-a)組成

エンセラダス・プリュームの気体組成 プリューム組成 ⇔ 彗星(-a)組成 (Waite et al., 2005) 10² C₂H₆ H_2S CH₃CHO CO_2 N₂ H₂CO C_2H_2 CH₄ NH₃ HCN nce with respect to water C_2H_4 CH₃OF 10¹ 10⁰ • 土星衛星は彗星組成に近い材料物質 → 厚い周惑星円盤 (活発反応)とは不一致 10-3



他の衛星表面に も普遍的に CO₂ +NH₃? (Cruikshank et al., 2005)



エンセラダス:プリューム組成(Waite et al., 2005) タイタン:ホイヘンス着陸機 (Niemann et al., 2005)



もう1つのトレーサー:同位体組成

- D/H in H₂O, H₂:太陽系で一様でない
- エンセラダスは彗星と同じ D/HのH₂O
 - ⇒ 周土星系円盤でH2Oはつくられなかった



- エウロパ、ガニメデの氷の厚さ
- 氷地殻の化学組成のマッピング
- 高度マッピング
- ガニメデの磁気圏

2022年打ち上げ、2030-2034年まで

JUICE mission: diffuse H₂O atmospheres on Ganymede & Callisto



多様な惑星系における太陽系の位置づけ

なぜ化学情報が大事か? 現在の組成 = 初期組成(氷微惑星)+化学進化(内部表層進化) Protoplanetary disk **Geochemical processes Giant planet formation** • Habitability Europa, Enceladus Callisto: "fossils" Satellites that are not active Active satellites 物理状態を探るトレーサーになる

土星の衛星:エンセラダス

 基本情報:プリューム ガス成分と固体微粒子 (200 kg/s) (ガス/固体 > 10) 噴出速度 ガス: 300-500 m/s 固体: 50-300 m/s 噴出孔は tiger stripe 上の数十地点

表面shear heating vs 内部海



Tiger stripe 上に集中する熱 (3-7 GW)

エンセラダス・プリュームの気体組成 ガス組成 (Cassini INMS) H₂O (> 90%) + CO₂ (1-5%), CH₄ (1%), 炭化水素 (≦0.1%) + NH₃ (1%), HCN (< 1%) (Waite et al. 2009)





エンセラダス・プリュームの固体組成

固体微粒子(Cassini CDA) (Postberg et al., 2009; 2011)

- ・Type I: ほぼ純粋な氷(粒経小: 10-100 nm)
- ・Type II:有機物やケイ酸塩を含む氷
- ・Type III:塩化物、炭酸塩に富む氷 (Na, K: 0.5-2%)



エンセラダス・プリュームの固体組成

固体微粒子(Cassini CDA) (Postberg et al., 2009; 2011)

- ・Type I: ほぼ純粋な氷(粒経小: 10-100 nm)
- ・Type II:有機物やケイ酸塩を含む氷
- ・Type III:塩化物、炭酸塩に富む氷 (Na, K: 0.5-2%)

Ice vent



岩石と触れ合う液体 の存在を強く示唆

NaCl \sim 200 mM NaHCO₃ \sim 100 mM pH \sim 8-10

エンセラダス:低温 or 高温? 内部が高温ならば NH₃から N₂が生成される: 2NH₃ ⇒ N₂ + 3H₂ (Matson et al. 2007; Glein et al., 2008).



ナノシリカとは?

 Siに富む鉱物と熱水の反応(温泉、熱水脈) 3MgSiO₃ + 2H₂O → Mg₃Si₂O₅(OH)₄ + SiO_{2,aq}
 SiO₂は高温ほど多く溶存、低温になると析出 SiO_{2,ag} → SiO₂ (e.g., Iler, 1978)





目的

- エンセラダス内部海でのシリカの析出を 条件に、内部の温度、鉱物組成を室内実 験と数値計算により制約
 - -シリカ濃度の決定要因は何か?
 - -N₂がないことと両立するのか?
 - 熱史・形成時期に対する制約は?



エンセラダス内部~ 地球海底熱水噴出孔

$P = 400 \text{ bar } \& T = 200 - 400^{\circ} \text{C}$

Starting materials







・熱力学平衡計算

平衡定数 ⇒ SUPCRT92 (Johnson et al., 1992)

鉱物9種: serpentine, brucite, saponite, magnesite・・・ イオン10種: H⁺, OH⁻, Na⁺, Mg²⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, NH₄⁺・・・ 溶存4種: CO₂, NH₃, SiO₂, H₂SiO₃ 塩2種: NaHCO₃, NaOH









溶液中のシリカ濃度は 二次鉱物組成+温度 (+pH)で決まる





~0°C

Warm

シンプルな仮定(熱水循環)
 1.内部の高温部で熱水反応
 →岩石と溶液が平衡に
 2.0℃の海で冷やされる
 ← H₂Oガスの熱速度~0℃
 (Schumidt et al., 2007)



Serpentine-brucite buffer(岩石組成 Mg/Si > 1.5) \rightarrow 高温でも0°Cでの溶解度を上回らない \rightarrow シリカ生成は起きない



シリカ生成するには岩石コアは炭素質コンドラ イトのような組成 (c.f. セレス: Milliken & Rivkin, 2009)

考察: 内部温度と岩石組成の制約 0℃でシリカ生成が起きるための最低温度 300 Na^T concetration 0.05 mol/L 250 内部温度は100℃以上 0.1 mol/L ູ່ວ 0.3 mol/L (pH 8-10) 200 **Femperature** 150 100 50 0 10 6 7 8 9 11 12 Warm pН >100-150°C



- 潮汐による変形で岩石コア内 100 km 程度まで破砕 (Vance et al., 2009) → コア深部までの熱水活動
- ・ 氷マントルに熱水ホットスポット → 潮汐散逸 → 融解 (正のフィードバック):表面の熱異常は内部熱由来? (Tobie et al., 2009)
- Cassiniによる高解像度のプリューム噴出孔と熱異常地点の一致 → shear heating ではなく内部由来の熱 (Porco et al., 2013)





- 内部海でのシリカ粒子の寿命は短い ← アグリゲイトに なってしまう (Hsu et al., in prep):地質的に最近(もしくは現 在)の100℃以上の熱水活動(内部温度)
- 100℃以上が維持されるためには、Enceladus が太陽系形 成後 3-5 Maで形成される必要 (Castillo-Rogez et al., 2007)
- 高いH₂濃度 (> 1mM) を予測 ← 今後の観測で検証可能
 CAIs形成後 7 Ma
 CAIs形成後 4 Ma





氷衛星の化学情報

・熱進化を経ていない天体
 → ガス惑星形成領域の温度のトレーサー

・地質活動が活発な天体
 → 内部進化度、温度・酸化還元状態の比較

土星系の形成条件に対する制約