Laboratory experiments and telescope observations: Implications for geochemical environments of Europa
（氷衛星エウロパの表層物質環境の理解に向けた室内実験・望遠鏡観測研究）

S. Tan[12], Y. Sekine[1], M. Kuzuhara[3], H. Kurokawa[1]

[1]Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, [2]Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, [3]Astrobiology Center

Europa, the Jupitar's icy satellite, has been found to possess an interior ocean beneath its icy crust. Europa's surface has been recently observed in the wavelength range 1.5–2.5 μm with large ground-based telescopes. Those observed reflectance spectra suggest that Cl-bearing salts exist on Europa's geologically active chaos terrains. Those salts would reflect the chemical composition of the interior ocean. Moreover, the abundance and grain size of Cl-bearing salts would provide constraints on the formation mechanism of chaos terrains. However, those chemical composition of Cl-bearing salts on the surface are not well constrained due to the limitation in existing observation wavelengths. In addition, spectra of Cl-bearing salts would be changed due to irradiation by high-energy particles on Europa's surface. Those spectra of irradiated Cl-bearing salts on the surface are not well constrained due to the lack of laboratory experiments.

Here, we observed Europa's surface in the wavelength range 1.0–1.8 μm using the Subaru telescope/IRCS and adaptive optics AO188 with high spectral resolution and high signal-to-noise ratios. Our observed spectra show no significant absorption features at ~1.2 μm due to hydrated salts (e.g., $NaCl{\cdot}2H_2O$, $MgCl_2{\cdot}nH_2O$, $Mg(ClO_3)_2{\cdot}6H_2O$, $Mg(ClO_4)_2{\cdot}6H_2O$), suggesting that surface salts would be likely anhydrous sodium chloride (NaCl).

We also performed irradiation experiments on NaCl by 10-keV electrons to obtain the optical constants of irradiated NaCl in near-infrared wavelengths. To constrain grain size and abundance of irradiated NaCl on Europa's surface, we performed spectral model fitting of the observational data using the obtained optical constants. Our results of the spectral fitting show the non-irradiated NaCl cannot reproduce dark reflectance well in wavelength of 1.1−1.3 μm. On the other hand, irradiated NaCl greatly improves the fitting because irradiated NaCl has a red slope in the relevant wavelength range. The best fit of the observations suggests that the abundance and grain size of irradiated NaCl are 40−50% and > a few μm, respectively.

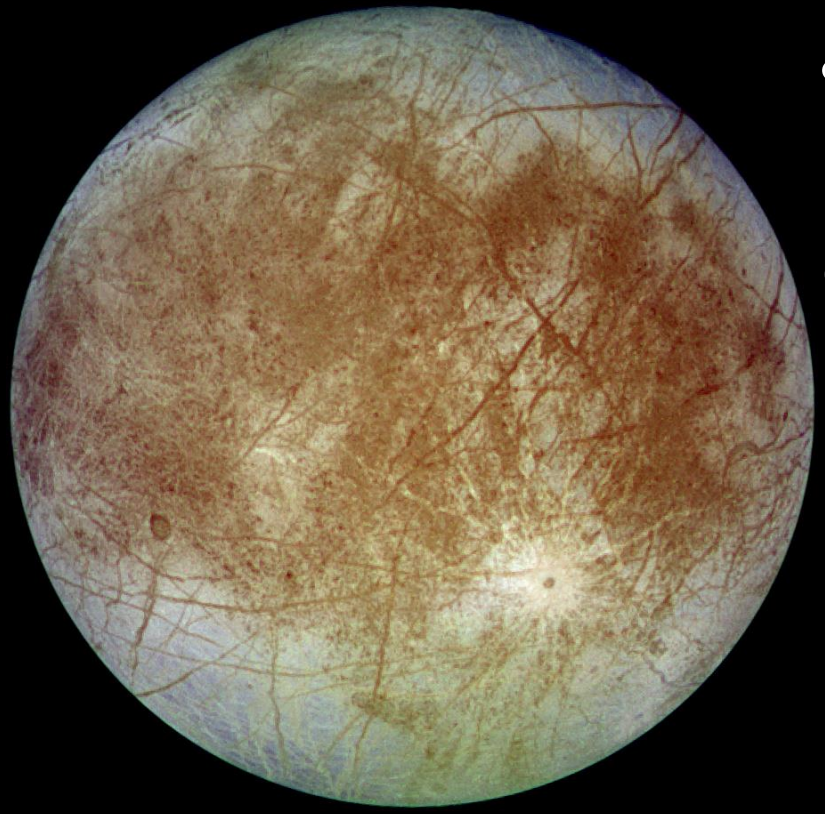
Those high abundance and large grain size of NaCl on Europa's surface can be explained if subsurface brine reservoirs were frozen slowly within the icy crust, and subsequently slurry brines containing NaCl-particles erupted to the surface.

氷衛星エウロパの表層物質環境の理解に向けた室内実験・望遠鏡観測研究

*丹秀也[12], 関根康人[1], 葛原昌幸[3], 黒川宏之[1]
[1]東工大ELSI, [2]東大地惑専攻, [3]アストロバイオロジーセンター

東京工業大学 地球生命研究所

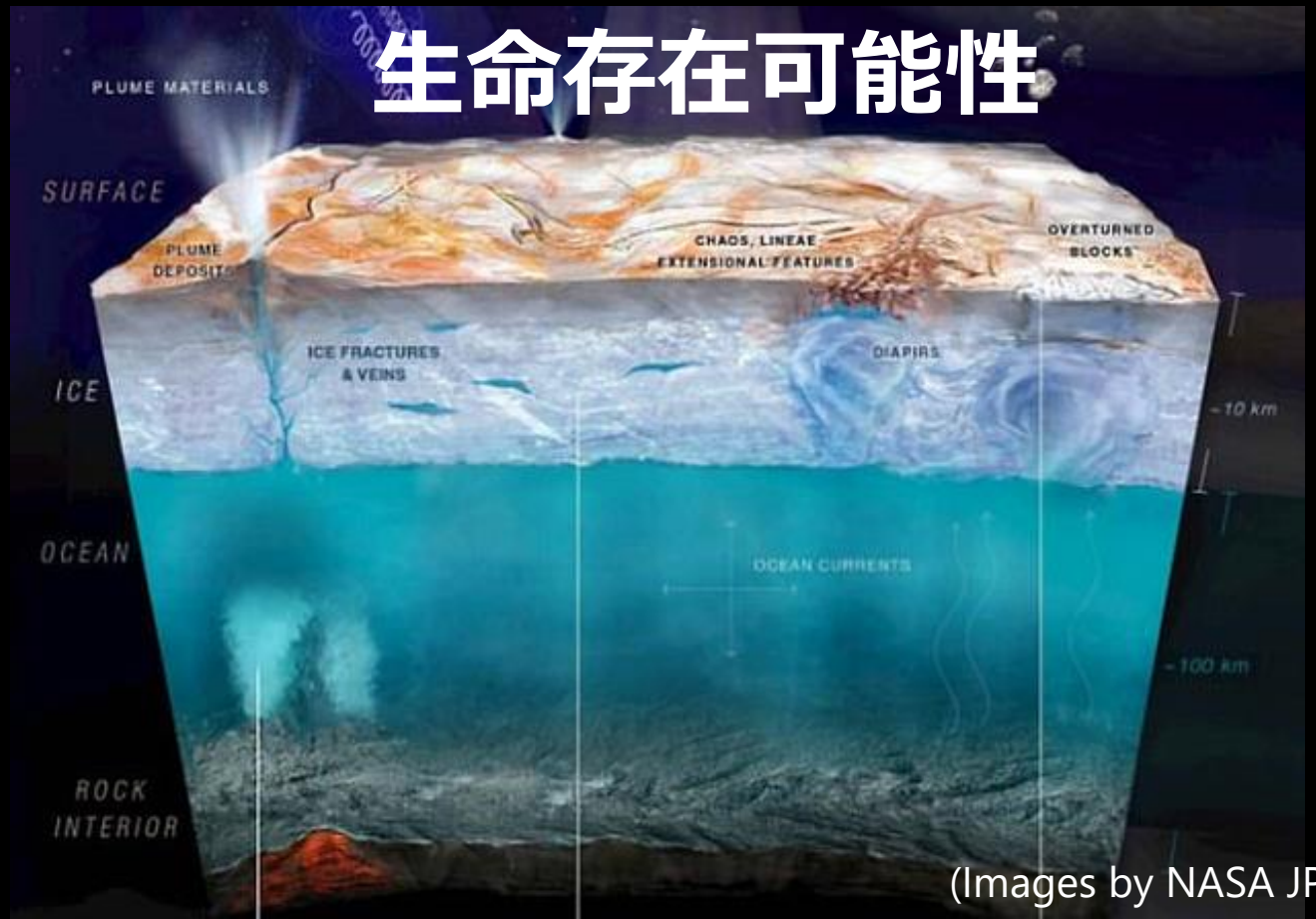
エウロパ



- 木星の潮汐（潮汐加熱）
- 内部海が存在か (磁場・自転運動; e.g., Kivelson et al., 2000)

●2000年頃のGalileo探査以降、大型探査なし

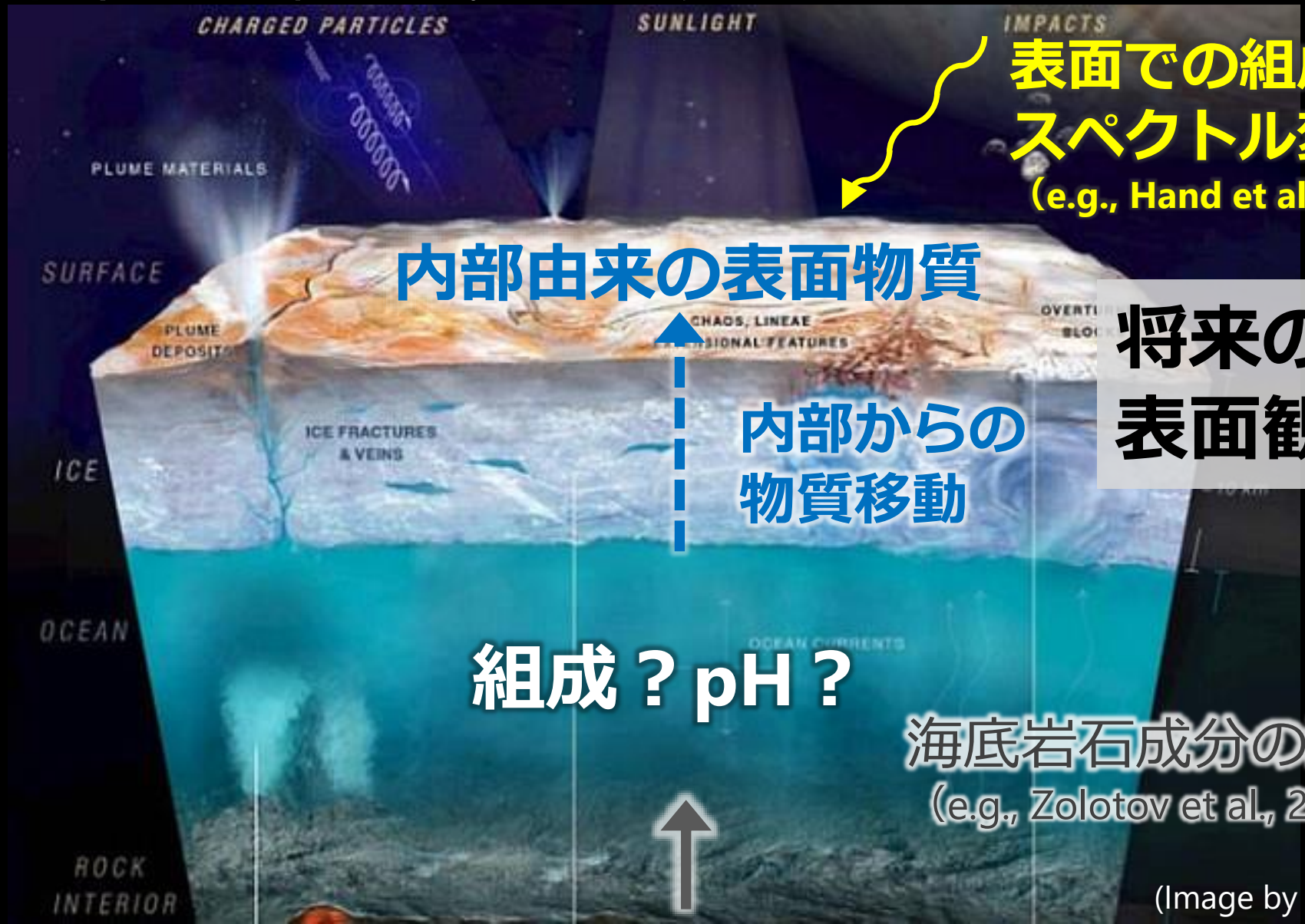
今後の太陽系内探査の主要ターゲットの一つ (JUICE, Europa Clipper)



(Images by NASA JPL)

エウロパ内部海の化学的状態

生命存在可能性の議論に必要な情報



表面での組成・
スペクトル変化
(e.g., Hand et al., 2015)

内部由来の表面物質

内部からの
物質移動

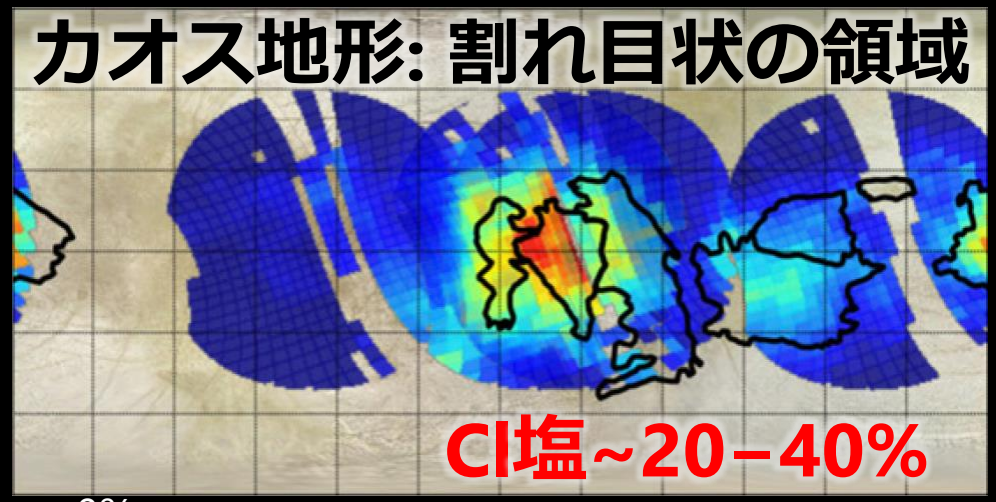
組成？pH？

海底岩石成分の溶出
(e.g., Zolotov et al., 2009; Tan et al., 2021. Icarus)

**将来の探査に向けた
表面観測・室内実験**

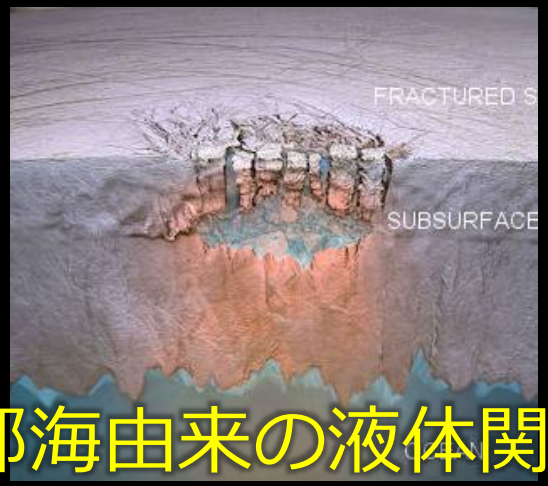
(Image by NASA JPL)

内部に由来する可能性の物質

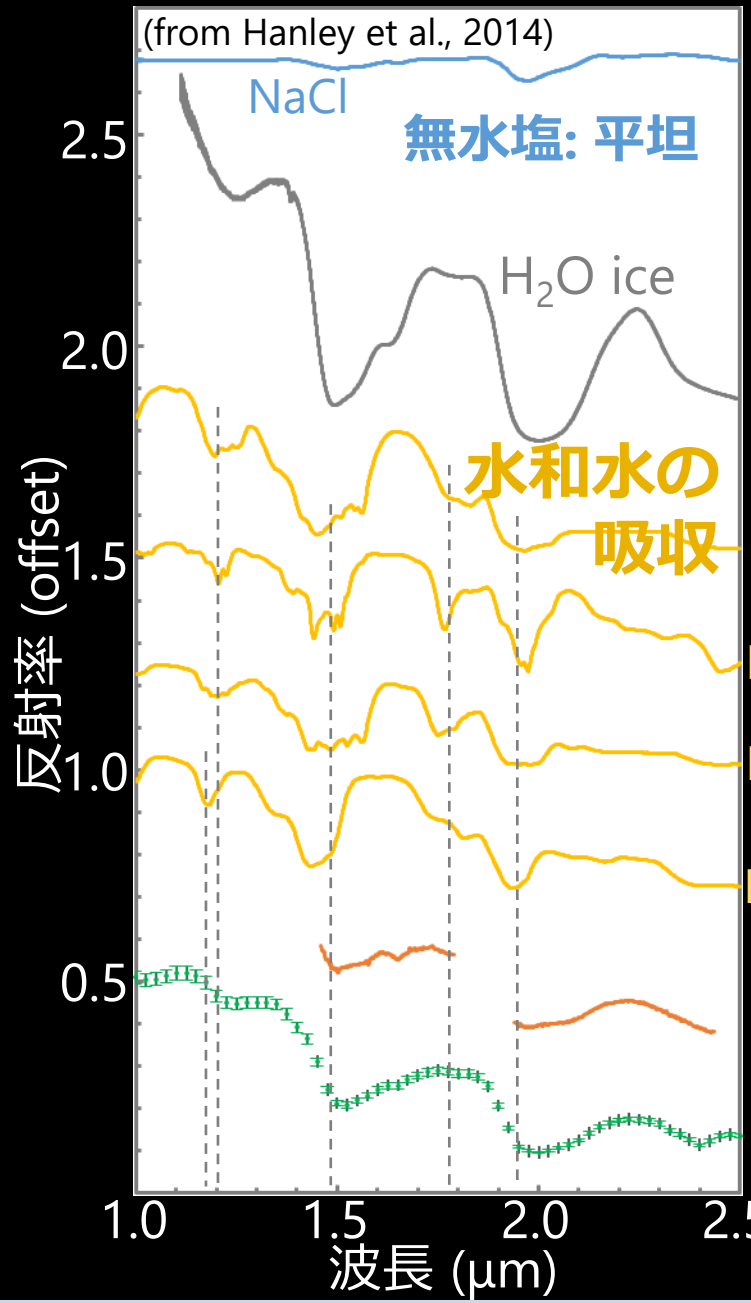


(Fischer et al., 2015)

再凍結



内部海由来の液体関与？



Cl塩の組成候補:
Na, Mgの塩

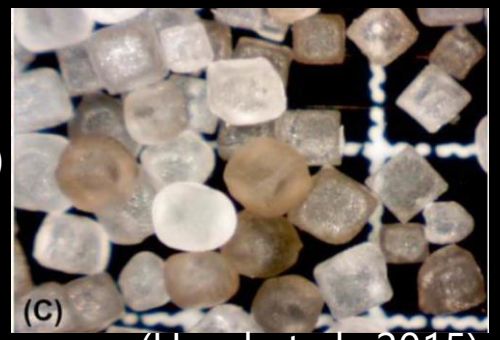
(e.g., Hanley et al., 2014; Fischer et al., 2015; Ligier et al., 2016)

限られた波長域の観測データ: 組成・含有量は諸説

表面物質への外部からの影響

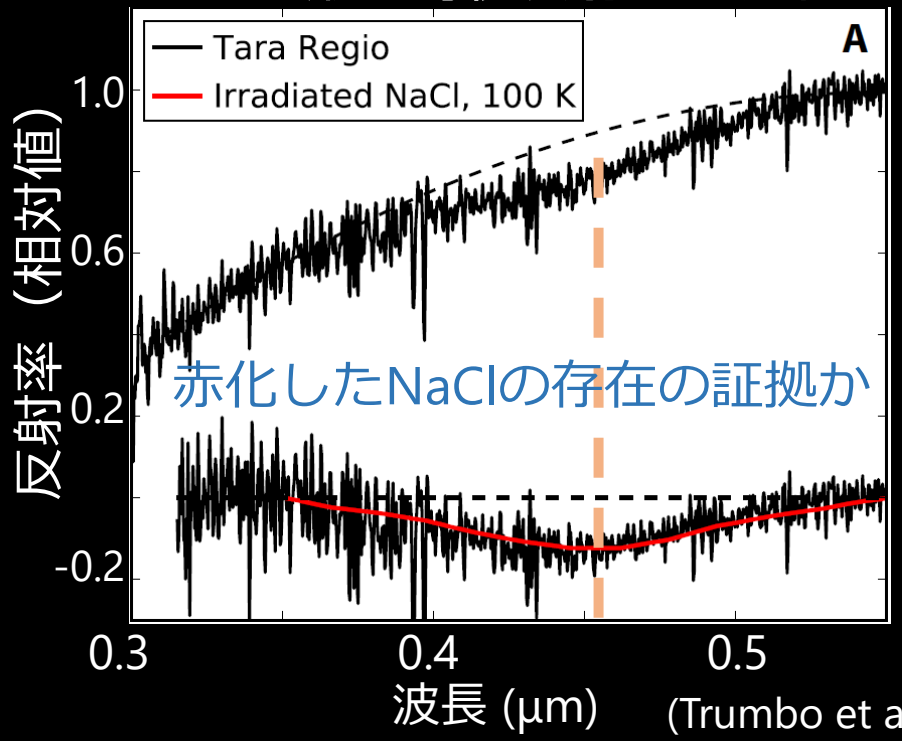
木星磁場で加速された高エネルギー粒子（電子など）(e.g., Paranicas et al., 2009)

- S^+由来の硫酸 (H_2SO_4) の蓄積 (e.g., Dalton et al.,2013)
- **NaClの赤化（色中心の形成）(e.g., Hand et al., 2015)**

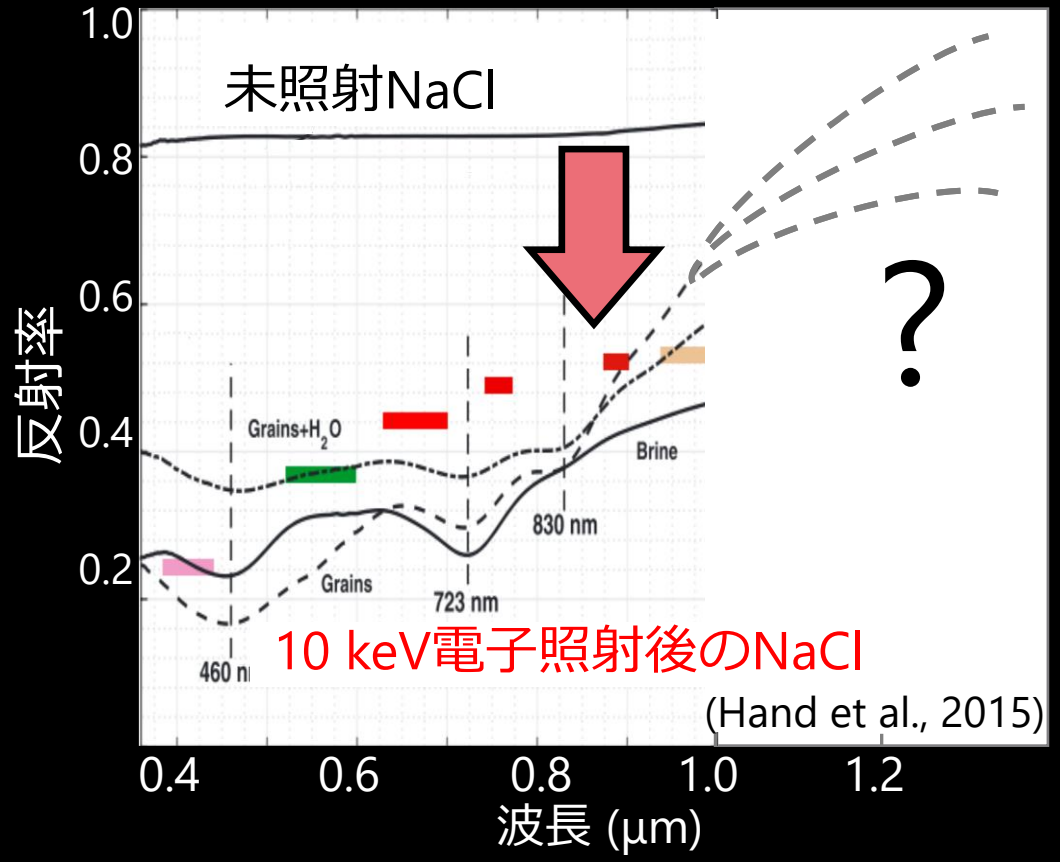


(Hand et al., 2015)

カオス地形の可視反射スペクトル



(Trumbo et al., 2019)



(Hand et al., 2015)

観測・実験研究不足: 広い波長範囲での対応・粒径の効果不明

エウロパ表層物質環境の不明点

目的：Cl塩の物理化学性質の制約

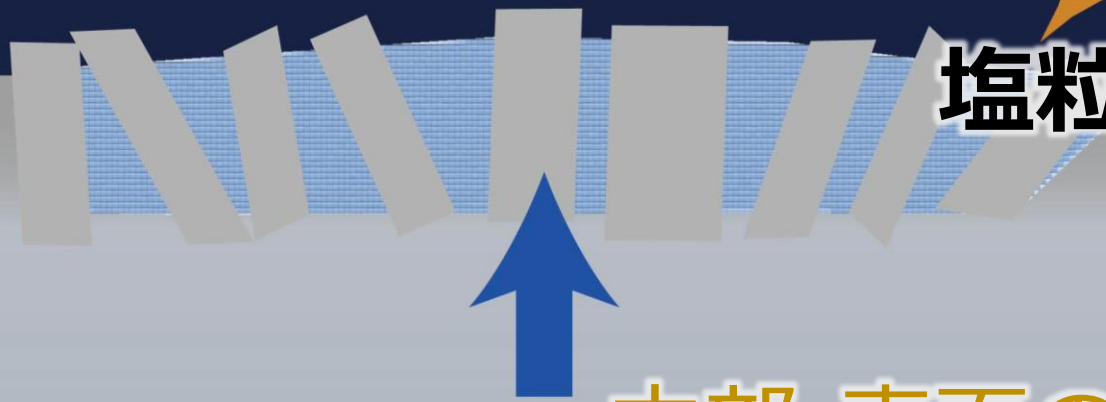
→ 観測データ，室内実験データを用いたスペクトルモデル

内部由来Cl塩の主成分：？

(e.g., $NaCl$, $NaClO_4 \cdot 2H_2O$, $MgCl_2 \cdot nH_2O$, $Mg(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$)

塩含有量：?%

塩粒径：？μm



内部-表面の物質移動

内部海組成

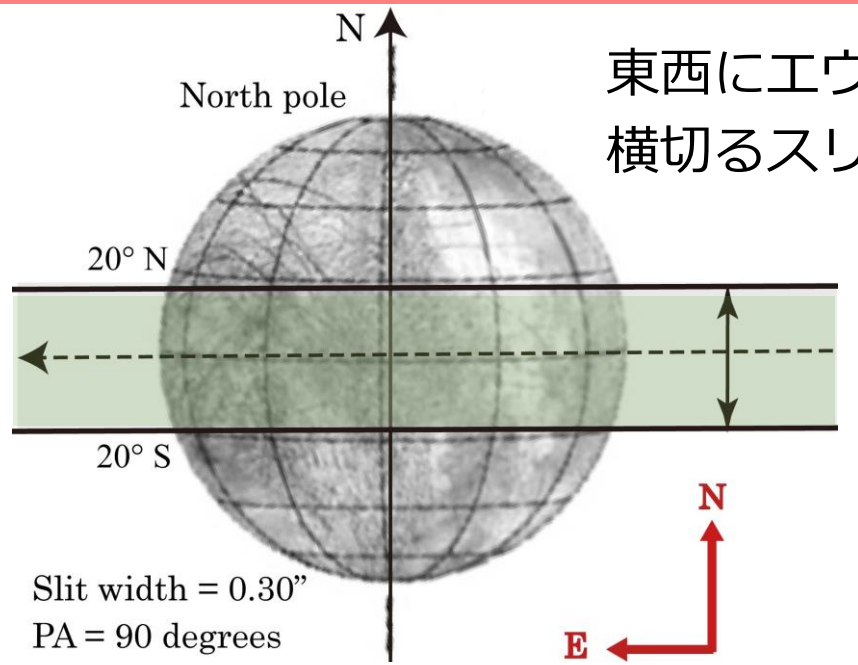
すばる望遠鏡によるエウロパ観測

観測日: 2019/05/17–18の2夜
Proposal ID: S19A0119 (PI:丹)

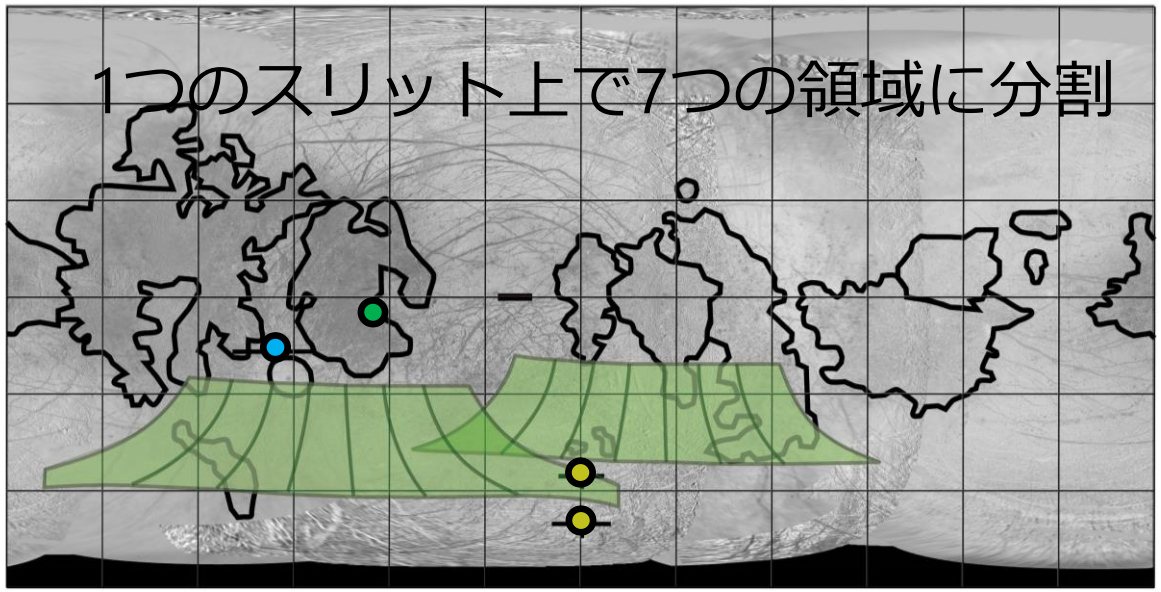
IRCS (IRスリット分光撮像) w/AO188

① **0.95–1.5 μm** (δλ~1.0 nm)
短波のため技術的難易度高
Cl水和塩の吸収が存在 (~1.2 μm)
② 1.5–1.83 μm (δλ~ 0.9 nm)

空間分解能:
~300–400 km (東西)×~800 km (南北)
→ カオス地形に注目可能

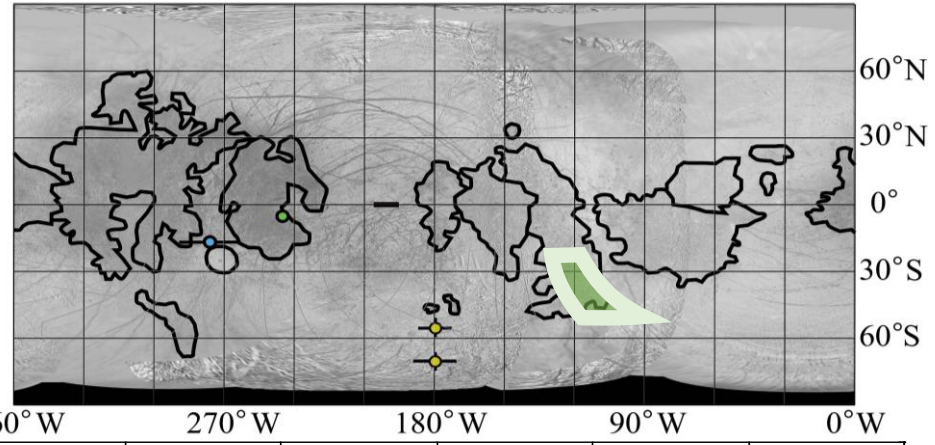


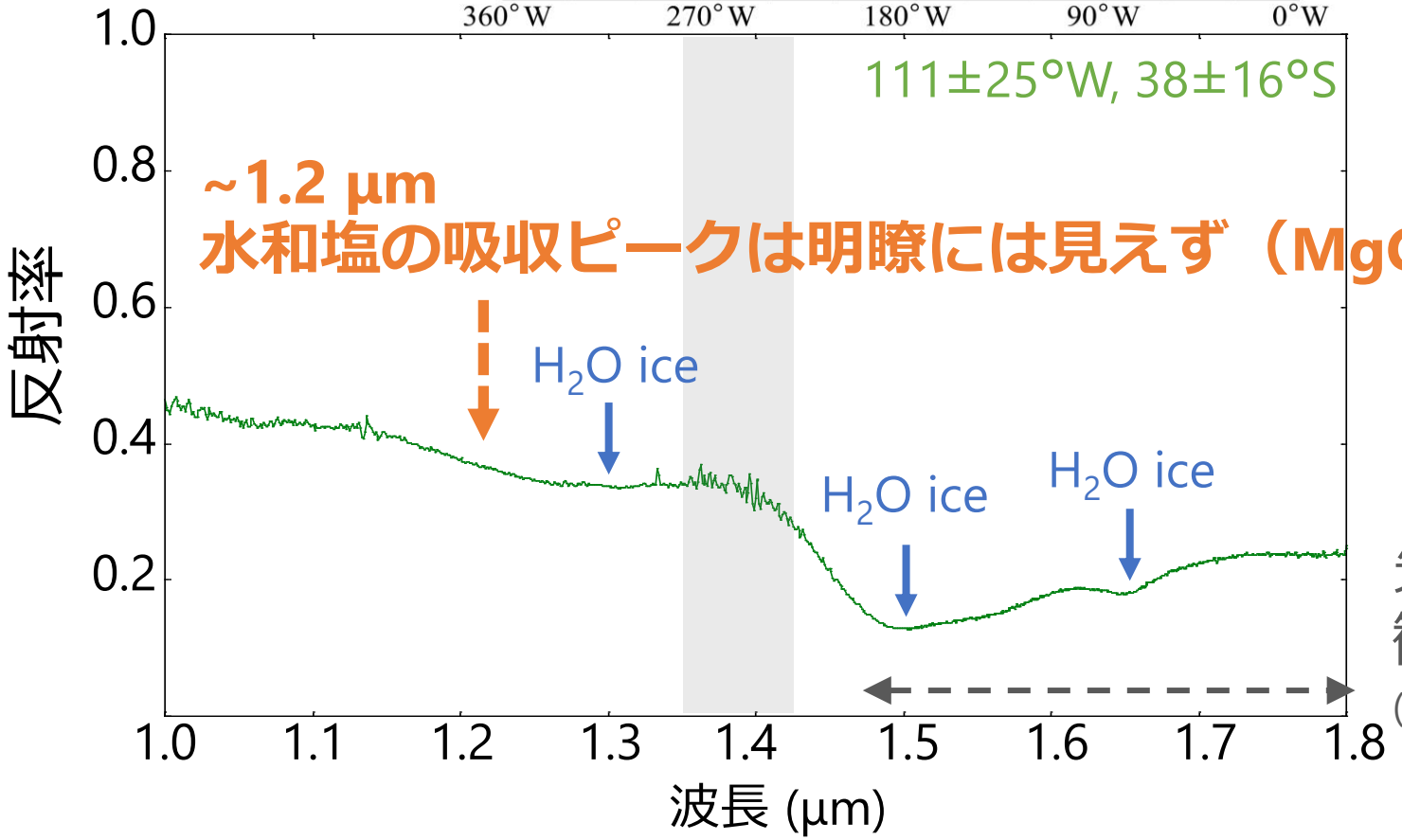
東西にエウロパを
横切るスリット配置



観測されたエウロパのスペクトル

典型的スペクトル：
公転前面中心付近の
カオス地形





先行望遠鏡研究で
観測の範囲
(e.g., Ligier et al., 2016)

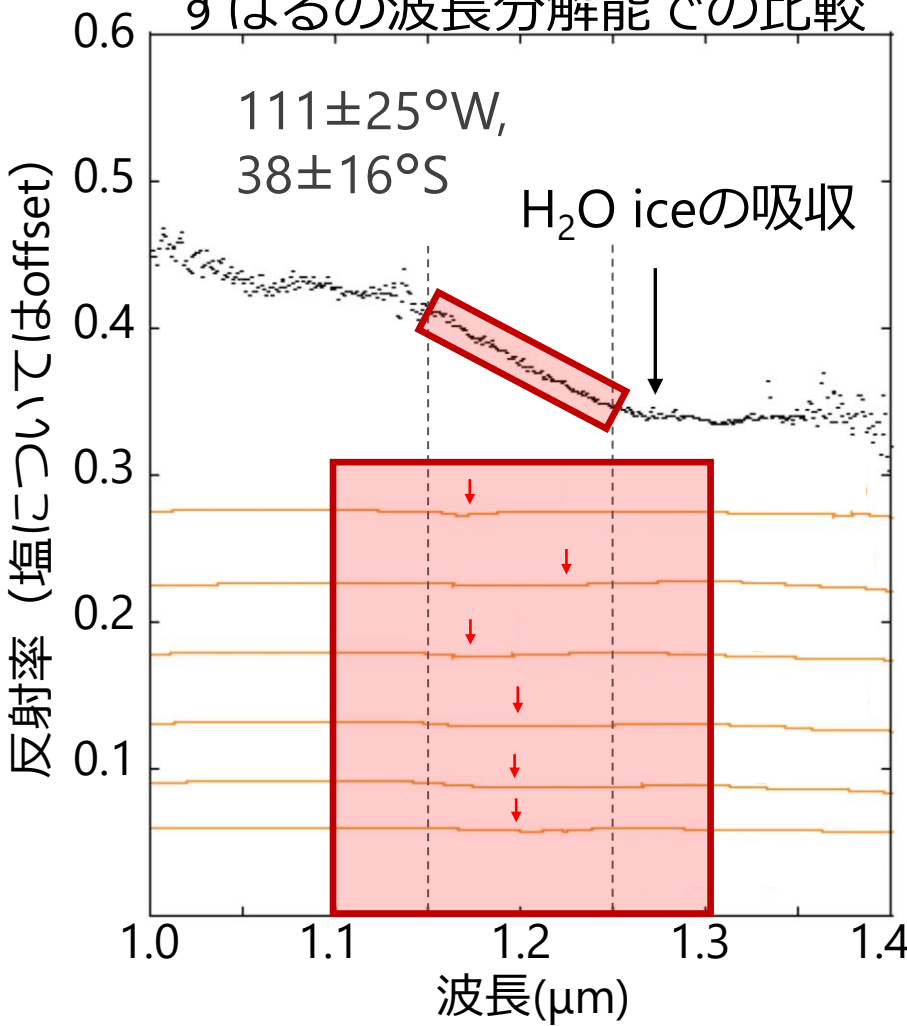
(Tan et al., in prep. a)

Cl水和塩の量の評価

Subaru/IRCSの性能
- 分解能: 0.001 μm
- SN比: 300–500程度

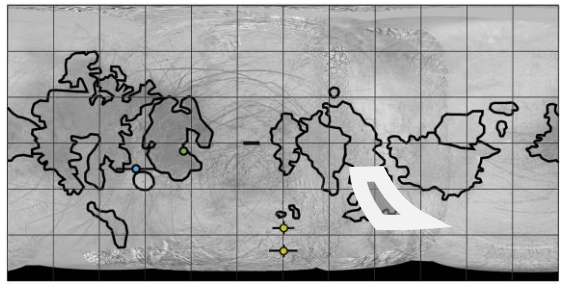
すばるデータのSN比の1σ~0.002
→ 水和塩の含有量 < ~3–10%

すばるの波長分解能での比較



$NaClO_4 \cdot 2H_2O$: 3%
$NaCl \cdot 2H_2O$: 10%
$Mg(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$: 3%
$Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$: 5%
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$: 3%
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$: 3%

公転前面カオス付近



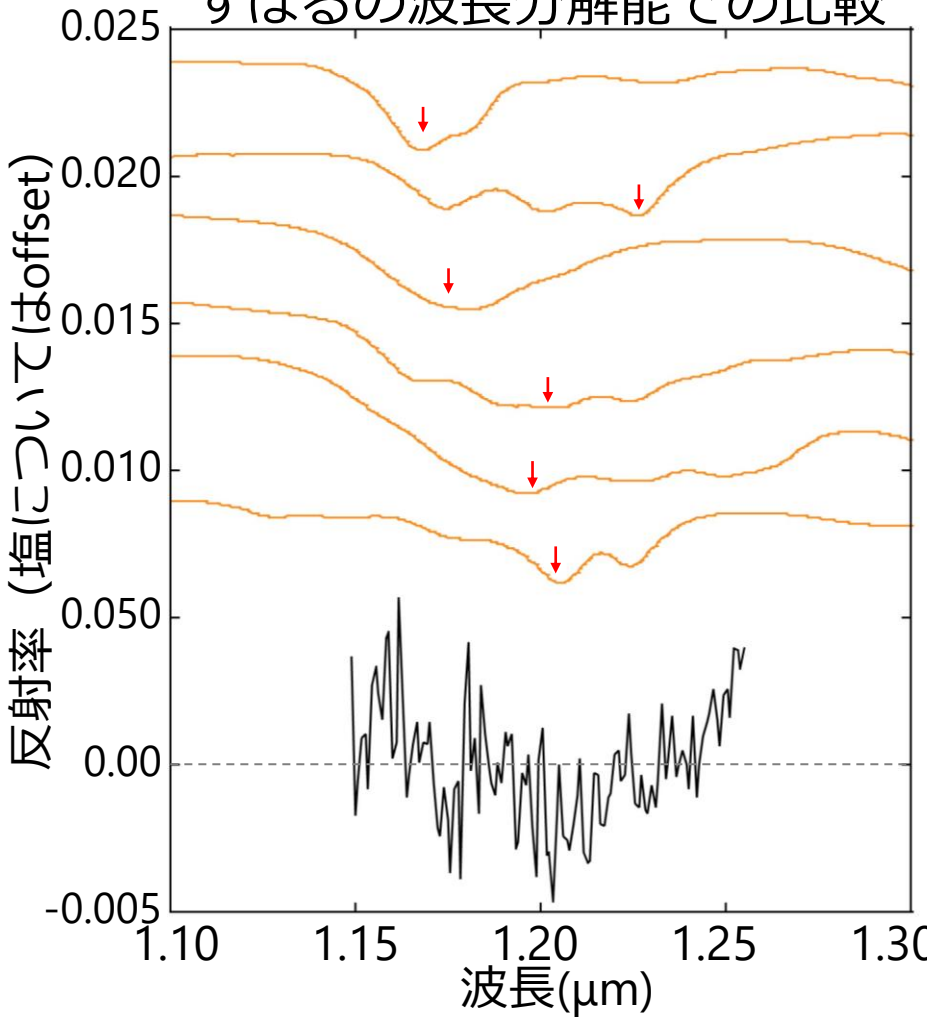
(Tan et al., in prep. a)

CI水和塩の量の評価

Subaru/IRCSの性能
- 分解能: 0.001 μm
- SN比: 300–500程度

すばるデータのSN比の1σ~0.002
→ 水和塩の含有量 < ~3–10%

すばるの波長分解能での比較



$NaClO_4 \cdot 2H_2O$: 3%
$NaCl \cdot 2H_2O$: 10%
$Mg(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$: 3%
$Mg(ClO_3)_2 \cdot 6H_2O$: 5%
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$: 3%
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$: 3%

すばるデータの1.15–1.25 μmでの
近似直線からのずれ (111±25°W, 38±16°S)
（H_2O iceの吸収による変動ができる限り小さく、
ノイズの効果をみれる波長範囲）

CI水和塩 <~10%

先行研究のCI塩~20–40%
(e.g., Ligier et al., 2016)

水和塩は主でない
→ 主成分は無水塩
= NaCl
Mg含有塩はminor

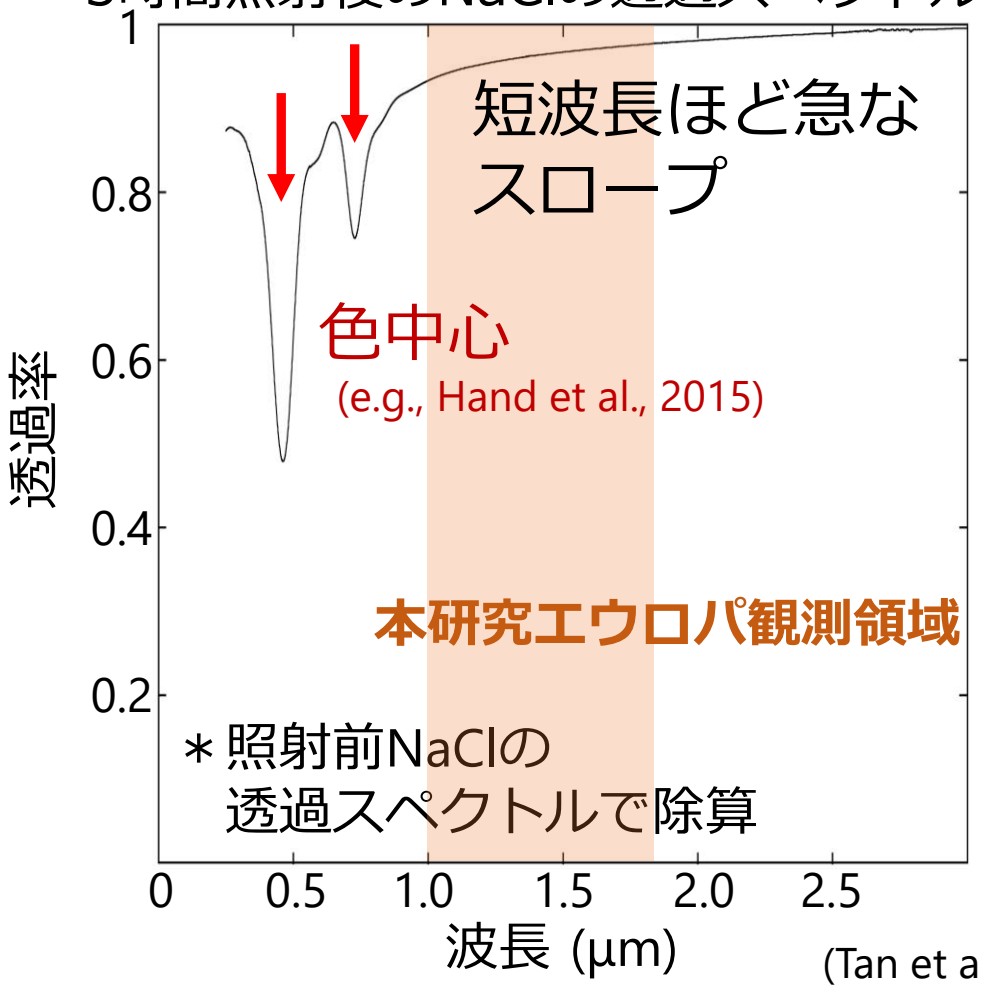
(Tan et al., in prep. a)

電子照射後のNaClの光学定数取得

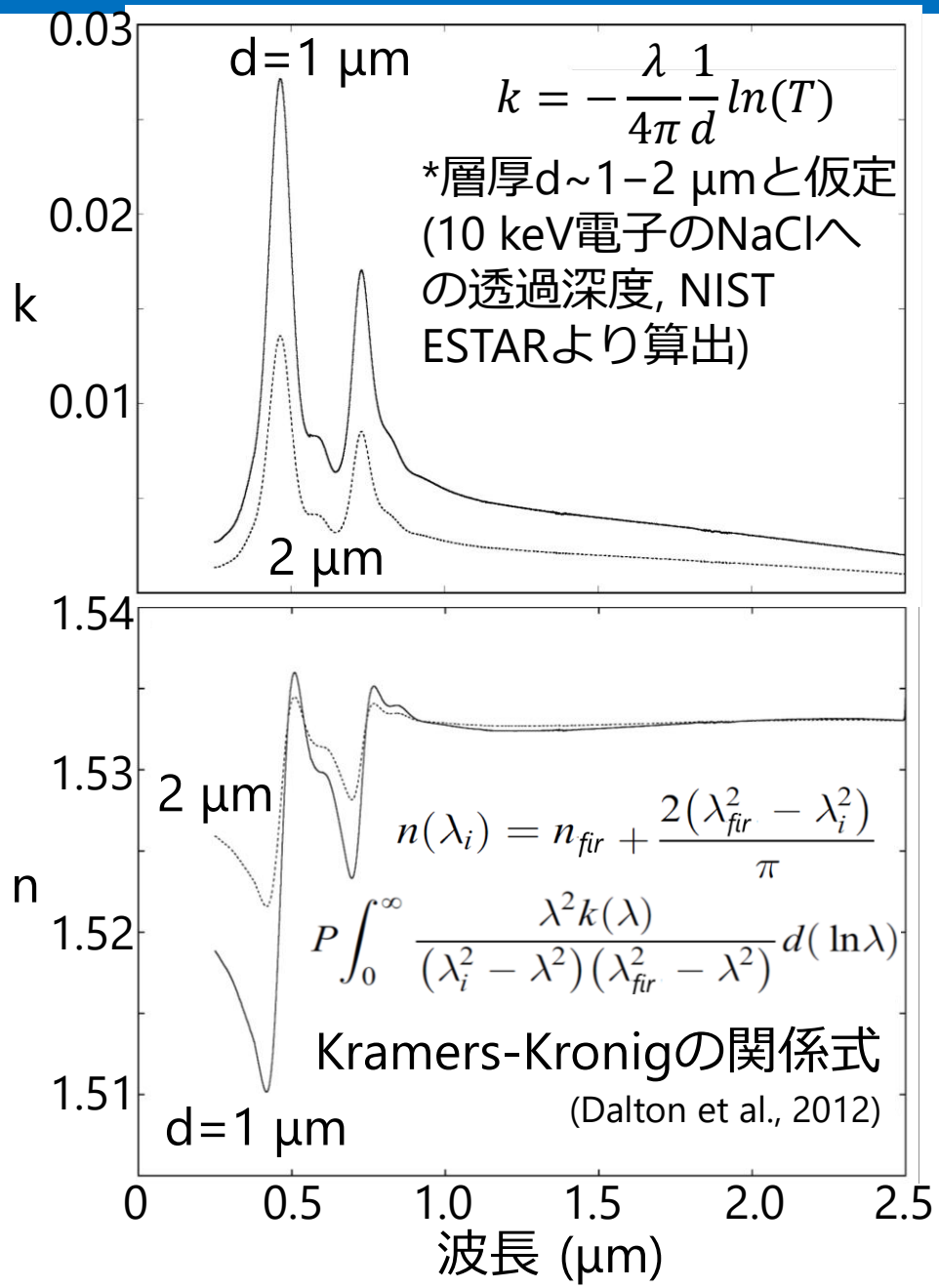
粒径ごとの反射スペクトル計算

- **光学定数が必要 (n, k; 複素屈折率m=n+ik)**
- 透過スペクトルから計算

3時間照射後のNaClの透過スペクトル



(Tan et al., in prep. b)



観測反射スペクトルへのフィッティング

観測スペクトルに対する線形合成スペクトル計算

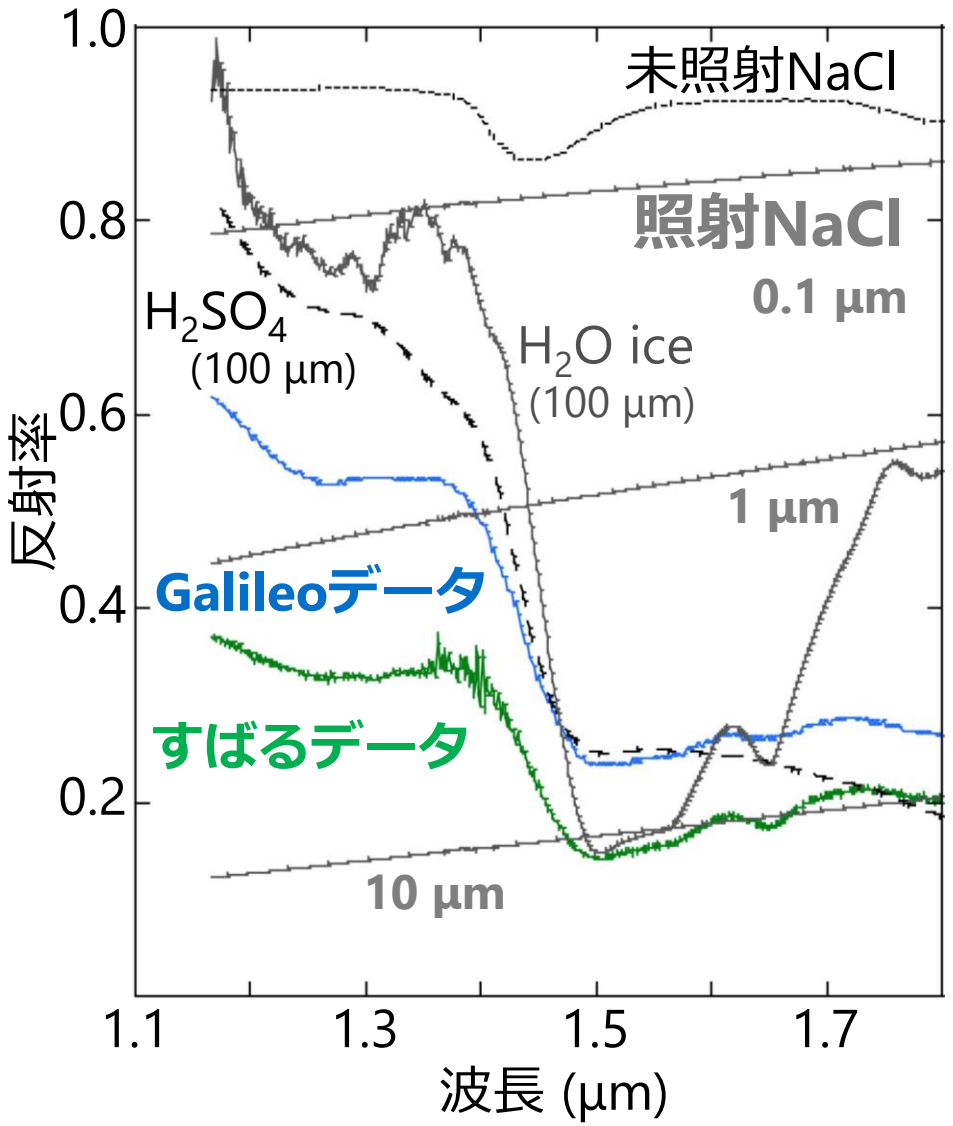
- 各成分のスペクトル計算
  (粒子層の多重散乱・吸収, Hapke et al., 1981; 1993; 2002)
  H_2O ice + H_2SO_4 + **電子照射後のNaCl**

  粒径の設定

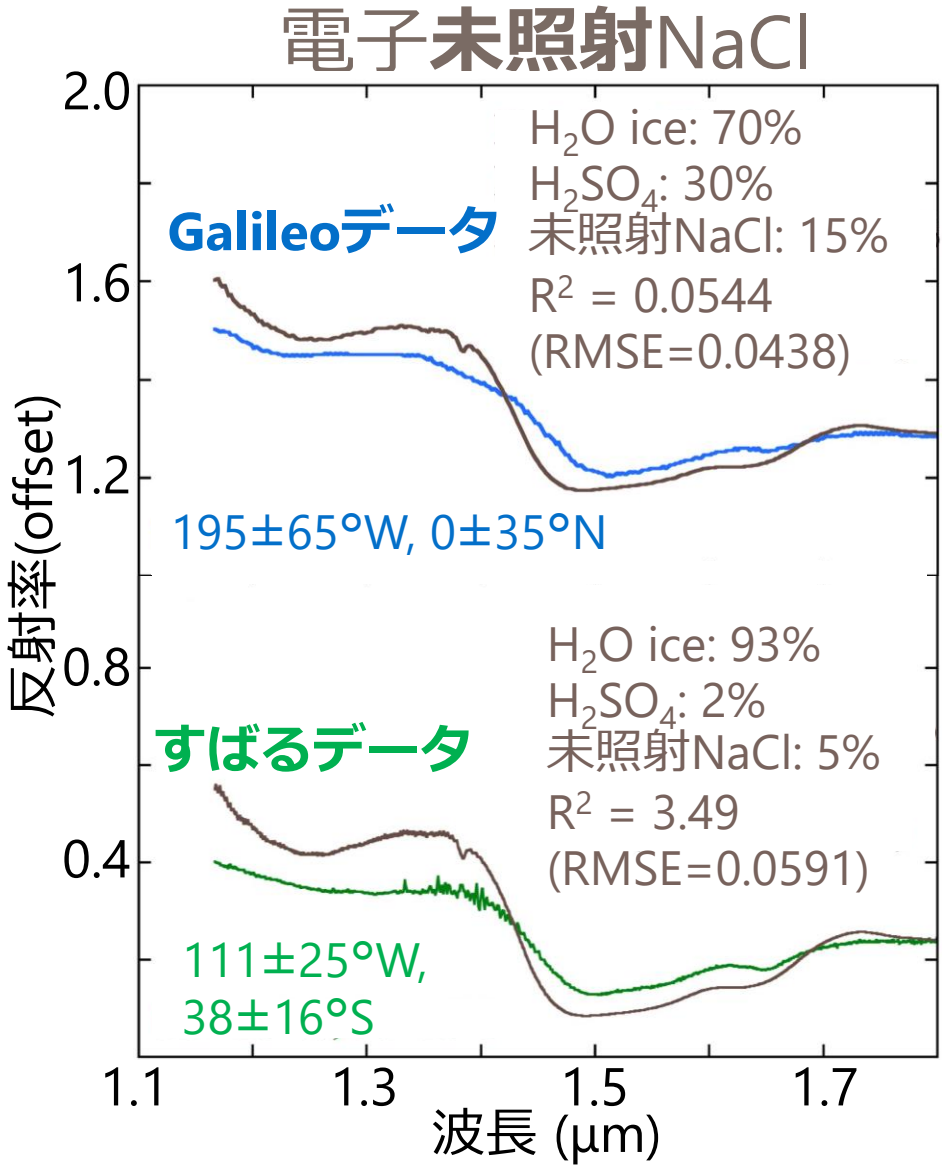
  H_2O ice, H_2SO_4: 10–500 μm
  - **電子照射後のNaCl: 0.1–100 μm**

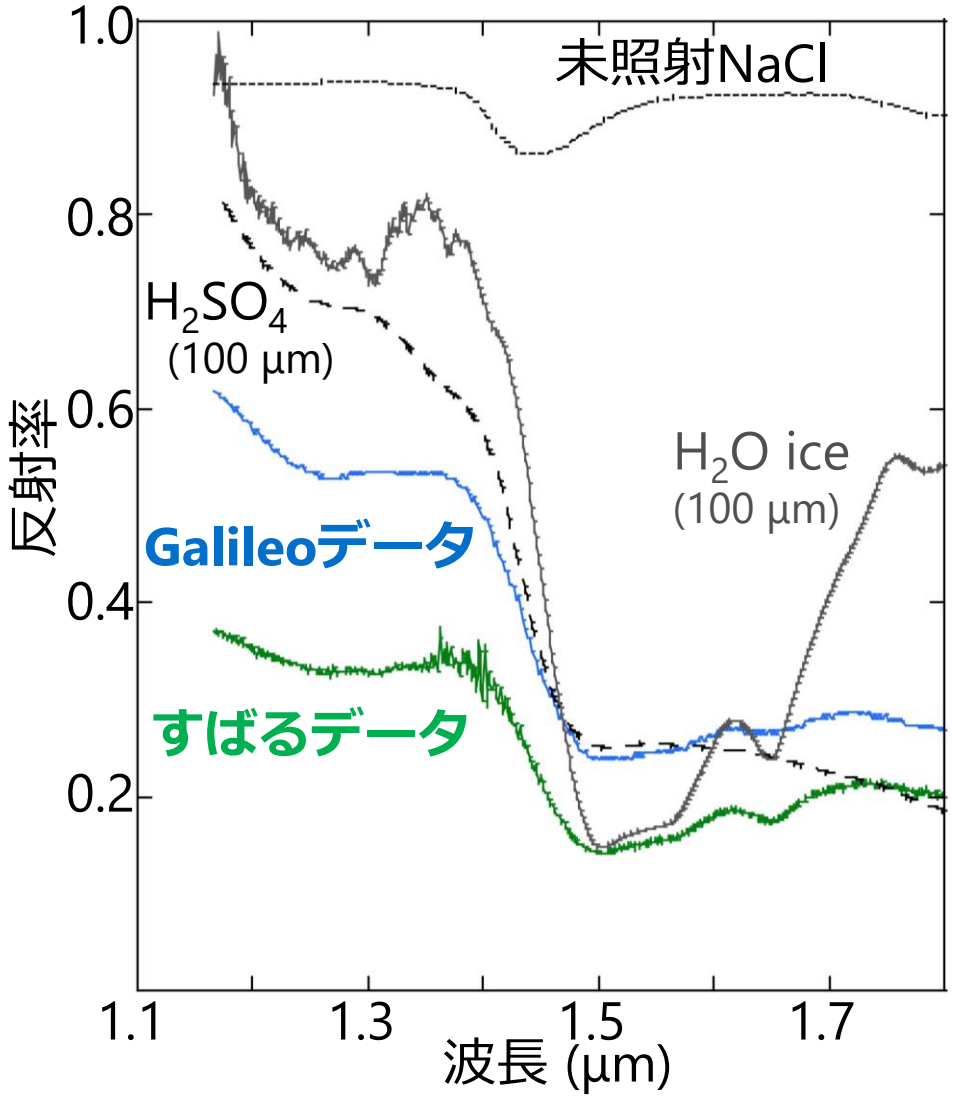
- フィッティング対象
  1. すばるデータ（本研究）
  2. Galileo探査機データ (McCord et al., 1999)

電子照射されたNaClの粒径ごとに各成分の含有量を計算



電子照射したNaClのフィット上の効果

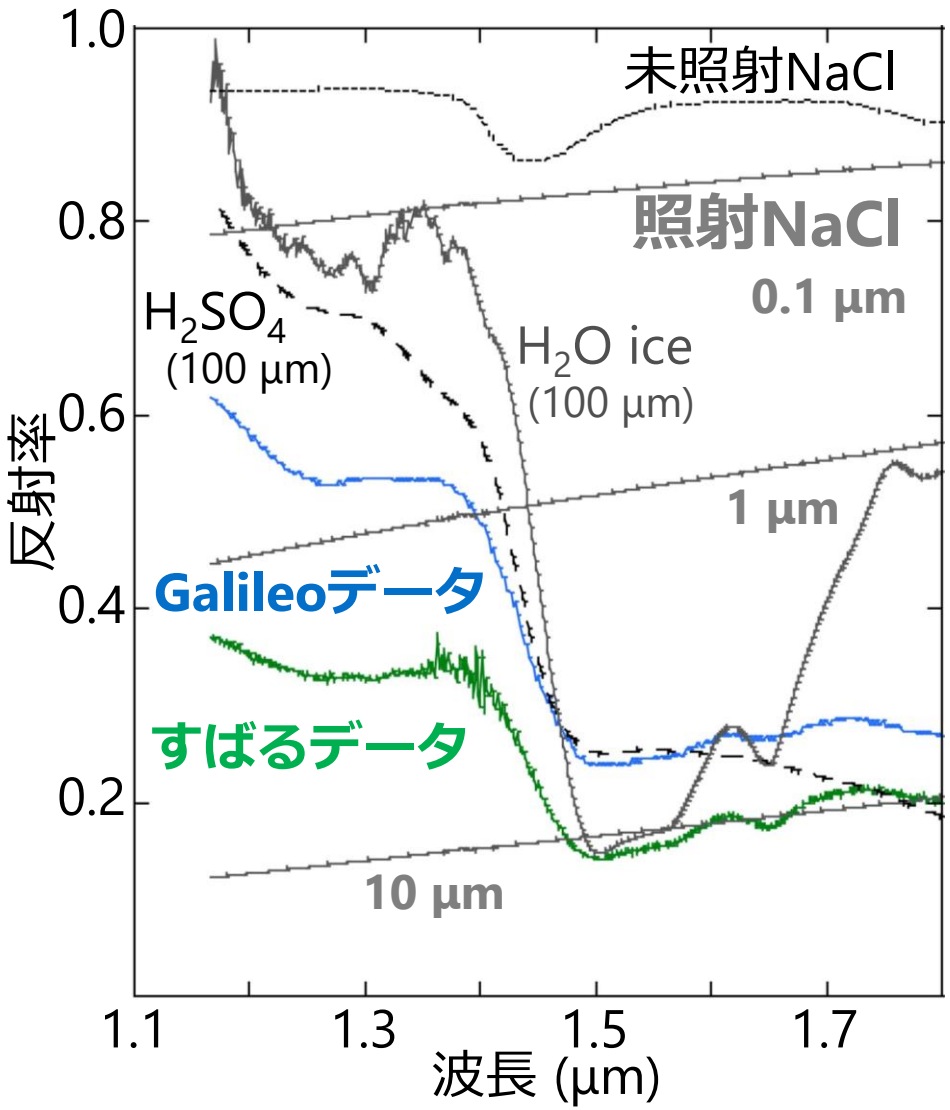


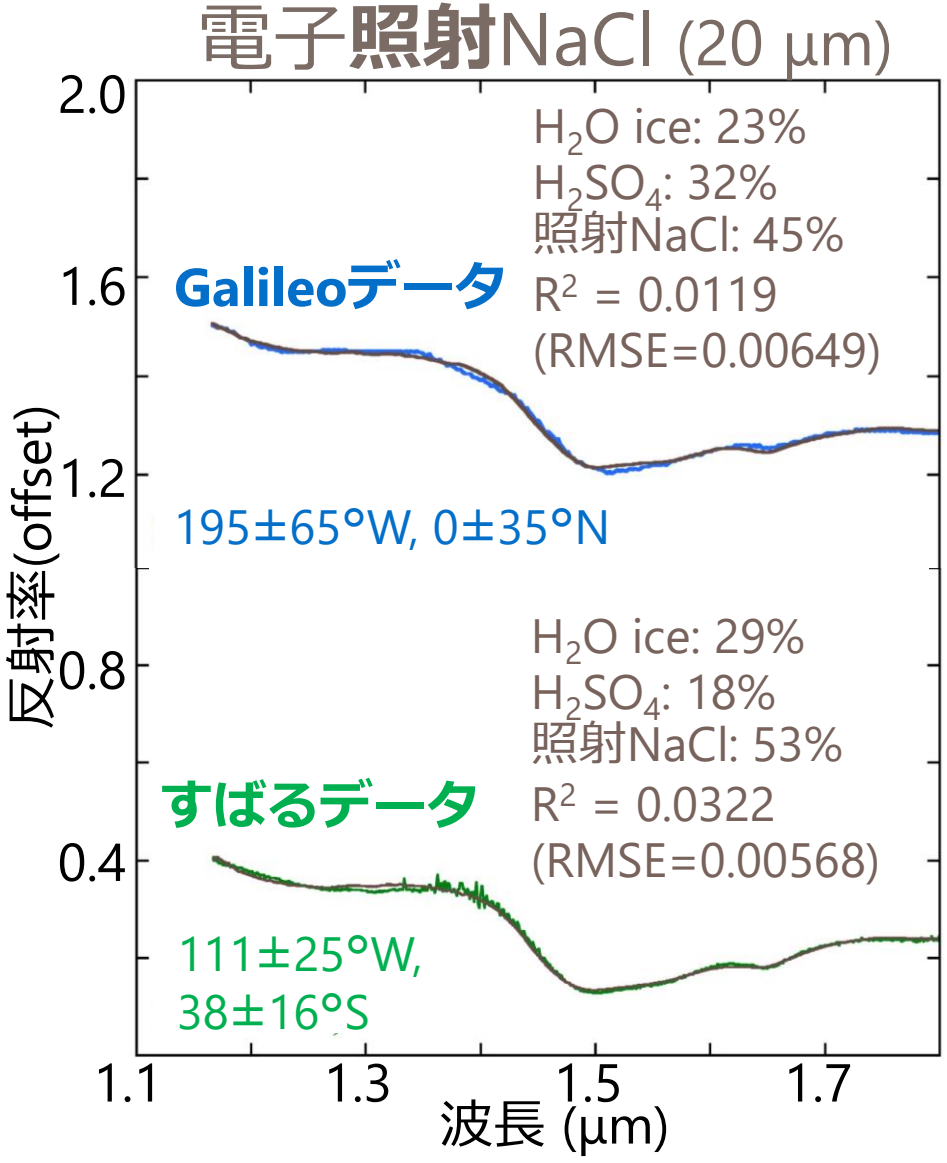


未照射のNaCl：
反射率がほぼ1
slopeがない
→ 1.1–1.3 μmの
暗い反射率が
再現できず

(Tan et al., in prep. b)

電子照射したNaClのフィット上の効果





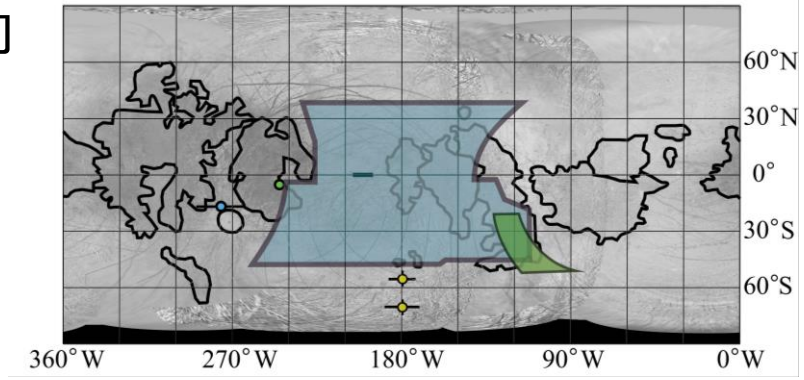
電子照射後の
NaCl：
暗く左下がりの
スロープ
→ **1.1–1.3 μmの暗い反射率の再現に必要**

(Tan et al., in prep. b)

フィット結果のNaCl粒径依存性

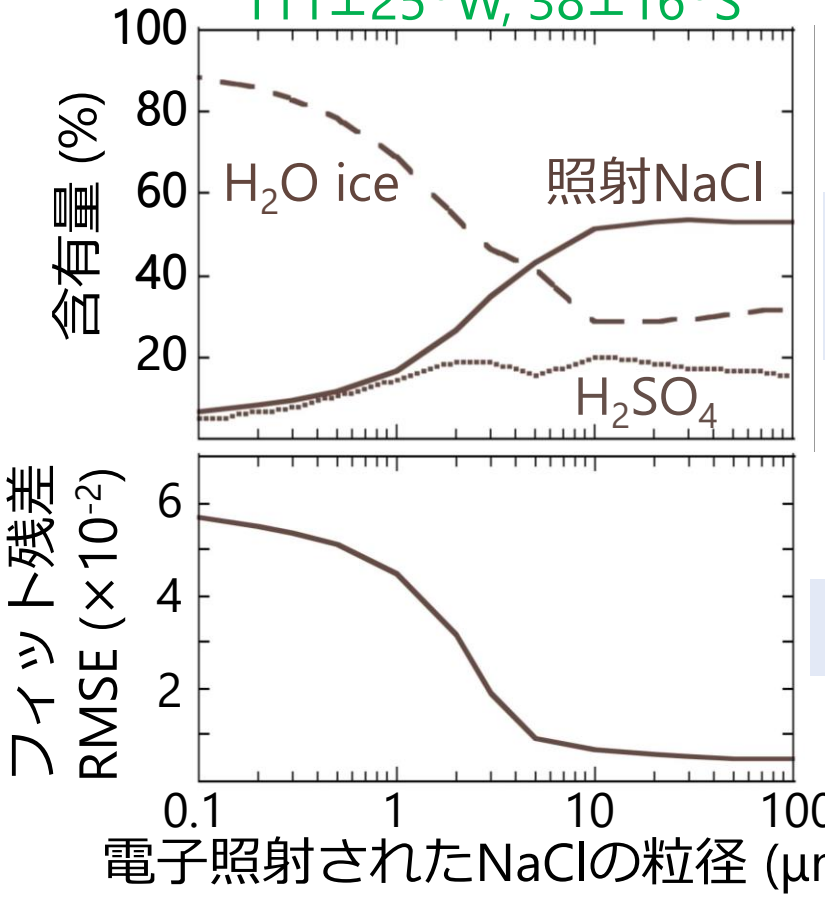
公転後面東-公転前面西の傾向

(Tan et al., in prep. b)



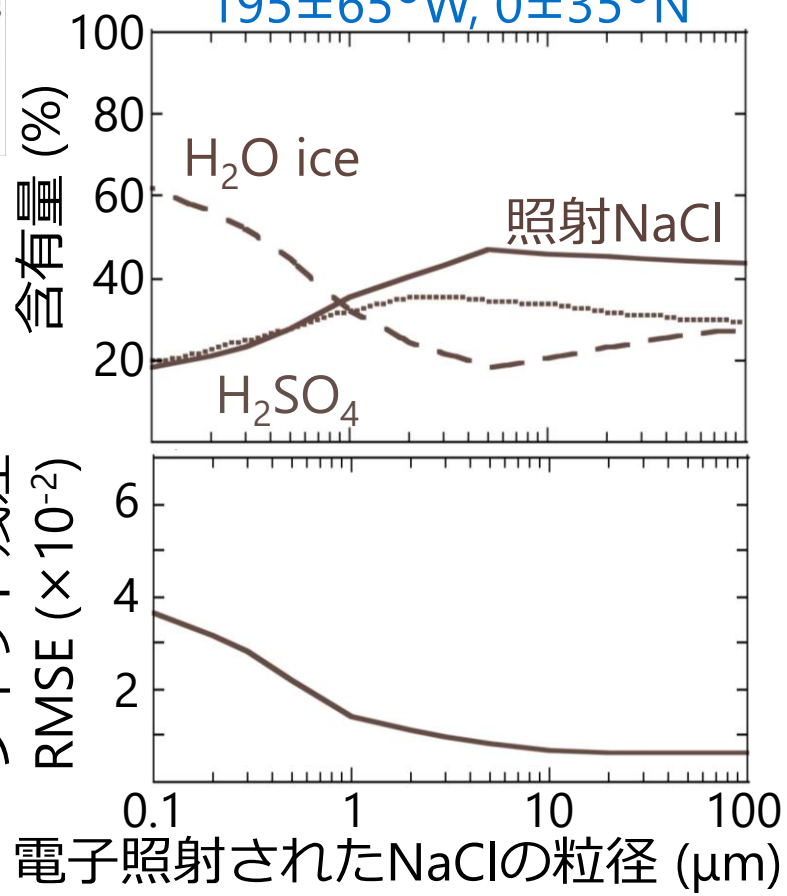
すばるデータ

111±25°W, 38±16°S



Galileoデータ

195±65°W, 0±35°N



NaCl含有~40–50%

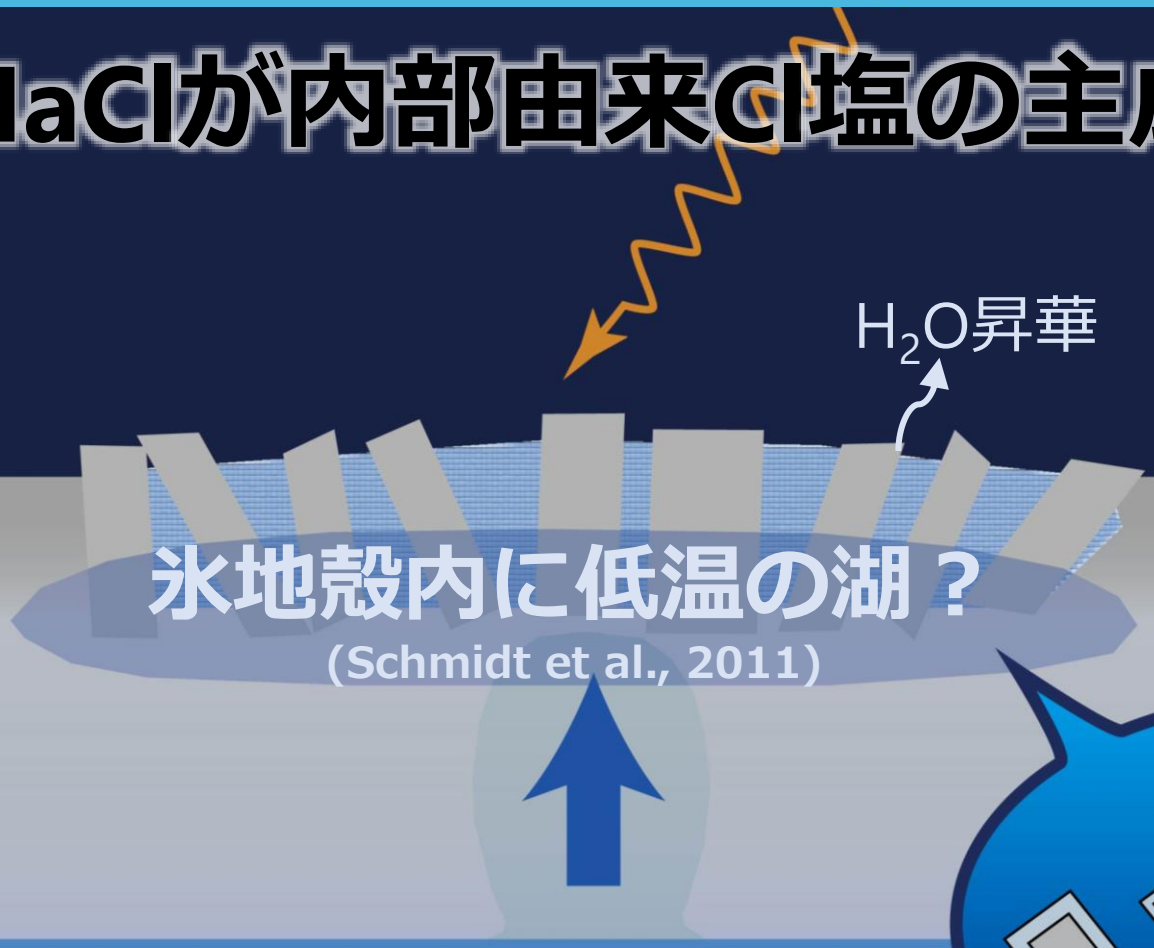
(粒径 >a few μmでほぼ変化なし)

粒径が小さいほど残差大

二つのデータで共通して粒径 < a few μmでは残差が大

内部海組成・内部-表面間のCl塩移動メカニズムの推測

NaClが内部由来Cl塩の主成分



大きい粒径 (> a few μm)
ゆるやかな結晶成長に由来か

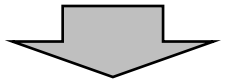
高い含有量 (40–50%)
海水 (~1%) から濃縮か

1. 低温で濃縮
   (共融点組成~10%)
2. 表面での氷の昇華で濃縮(最大~10倍)
   (Hobley et al., 2018)

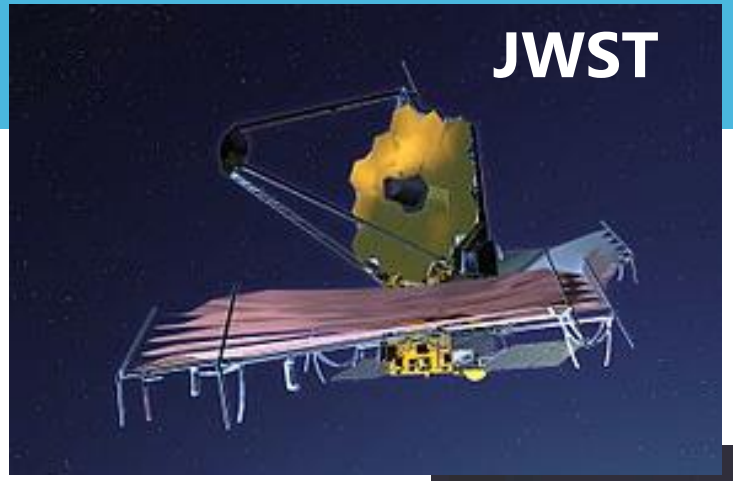
Na^+ >> Mg^{2+}の海洋
中~アルカリ性のpHか
(e.g., Tan et al., 2021, Icarus)

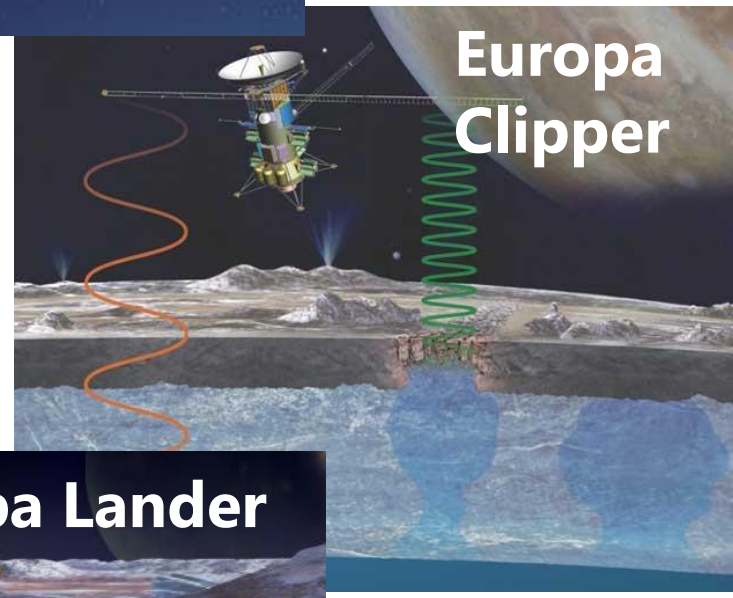
将来の観測への適用

- 表面反射スペクトルの解釈
  NaCl光学定数を用いたスペクトル解析
  NaCl分布, $[Na^+]/[Mg^{2+}]$の分析
  (Blaney et al., 2019; Langevin et al., 2013; Birkmann et al., 2016)



- 着陸サイトの候補選定
  着陸探査 (Europa Lander)でのその場分析
  - 表面NaClの粒径・量 (Lerman, 2018)
    → 氷地殻内の湖の制約
  - より詳細な内部由来物質の組成





(Images: NASA/JPL)

本発表まとめ

エウロパ表面の内部由来Cl塩の組成, 含有量, 粒径の制約

近赤外反射スペクトル観則

- Cl塩の主成分は無水塩 = NaClか

電子照射NaClの光学定数を用いたスペクトルモデリング

- 電子照射NaClは~1.2 μmの暗いスペクトル再現に必要
- NaClの粒径 > a few μm, 含有量~40–50%

- Na >> Mgの内部海か
- NaClは氷地殻内の湖を経由か
- 将来探査に向けたデータとして利用できる可能性