

# Viscosity of aqueous MgSO<sub>4</sub> solutions at high-pressure and low-temperature: Implications for icy satellites

野崎舜介<sup>1</sup> 鎌田誠司<sup>2,3</sup> 鈴木昭夫<sup>2</sup>

1. 東北大学理学部地球惑星物質科学科, 2. 東北大学理学研究科地学専攻, 3. 東北大学学際科学フロンティア研究所

Some icy satellites, such as Europa, Ganymede, Enceladus, and Titan, have a subsurface ocean under the thick crusts. Though transport properties are essential to discuss the fluid behavior in these subsurface oceans, there are few viscosity data within P-T conditions corresponding to the ocean. Because fluid viscosity is dependent on temperature, pressure, and concentration, understanding these relationships leads to a more accurate view of the subsurface ocean.

The viscosity data of 10 wt% aqueous magnesium sulfate solutions were measured in a previously unexplored P-T region using a diamond anvil cell (DAC). The solutions' viscosity was determined up to 1100 MPa in the temperature range from  $-10$  to  $40^{\circ}\text{C}$  from the falling sphere measurements with DAC by constructing apparatus with a rotating stage, microscope, and camera. The pressure was measured using the ruby fluorescence method (Piermarini et al., 1975), while the temperature was controlled by flowing cooling or warming water through the DAC. The obtained viscosity was in the range of 1–10 mPa s and showed high pressure-dependence of viscosity as well as temperature-dependence. In the case of the measurements in  $10^{\circ}\text{C}$ , the viscosity at the pressure of 1000 MPa was twice that of atmospheric pressure. Assuming that the subsurface ocean is composed of 10 wt% magnesium sulfate and satisfies the P-T condition (0–1500 MPa and 250–300 K; depends on the boundary condition) of Vance et al. (2014), the ocean's dynamic viscosity would be in the range from 3 to 10 mPa s in the pressure condition below 700 MPa, which is higher than the viscosity of Earth's seawater. Because viscosity has a relationship with heat produced by flowing fluid through the seafloor and chemical reaction rate, this property might change the predicted habitability and oceanic composition.

## 氷衛星の内部構造と温度圧力条件



氷地殻	氷地殻
内部海	内部海
高压氷層	
岩石層	岩石層

### 氷衛星 氷衛星内部構造

- ・表層から内部にいたるまで、多様な特徴
- ・一部の氷衛星において、氷地殻の下には「内部海」が存在
- ・内部海を介した熱・物質輸送→内部海が衛星全体の特性に影響

### 内部海

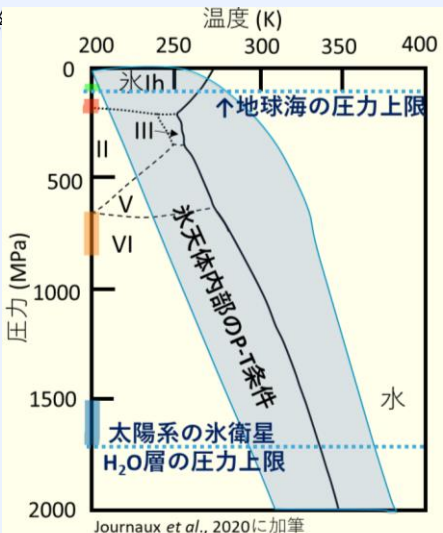
地球（最大100 MPa）と比べ深く 高压の海（最大~1.5 GPa）

組成候補：  
 $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , ...  
 (e.g., Zolotov and Kargel, 2009)

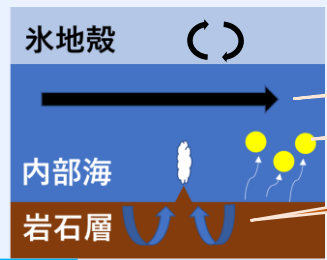
内部海流体の挙動・性質が天体の理解に重要

H<sub>2</sub>O-岩石層境界

■ 地球	■ タイタン
■ エウロパ	■ ガニメデ



## 内部海と粘性

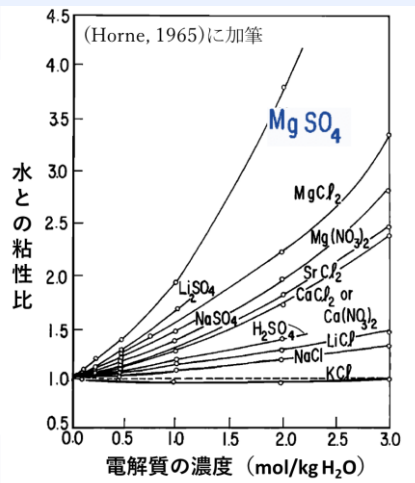


### 流体の粘性

- 流体の流れ
- 物質の拡散
- 岩石層中の浸透

### 粘性

流体の移動や物質・熱の輸送に関連  
 温度・圧力・組成依存性がある  
 シミュレーションなどでは地球海水や純水の値を想定  
 (e.g., Vance et al., 2007; Soderlund, 2019)



### MgSO<sub>4</sub>水の粘性

粘性への影響が大きい & 内部海の組成候補

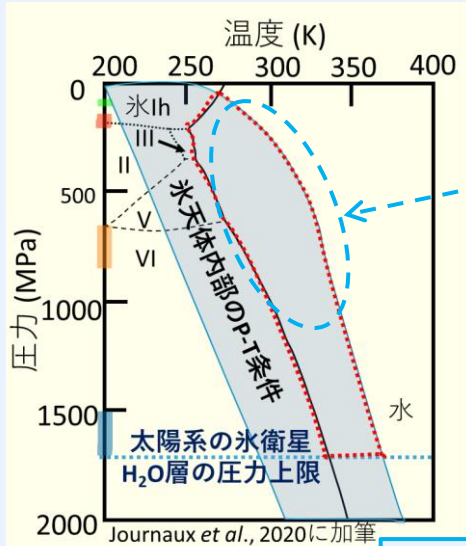
内部海条件下での粘性データがない  
 MgSO<sub>4</sub>水の粘性測定例：  
 <30 MPa; e.g., Abdulagatov et al., 2007  
 1900–3300 MPa; Nakamura, 2011

### 研究目的：

- ①低温高压下における粘性測定装置の構築
- ②MgSO<sub>4</sub>水溶液の粘性から内部海流体への示唆を得る

## MgSO<sub>4</sub>水溶液 (10 wt%) の粘性測定；ダイヤモンドアンビルセル (DAC) を使用した落球法

### 測定条件・方法



#### 測定条件

**温度 263–313 K**

(不凍液・温水を流して調節  
熱電対を用いてモニター)

**圧力 < 1100 MPa**

(測定：ルビー蛍光法@常温  
； Piermarini *et al.*, 1975

温度変化による試料室の(膨張  
収縮による)圧力変化を考慮し  
て決定)

#### 落球法

流体中を落下する球の速度を測定する  
ことで、流体の粘性 $\eta$ を得る手法

$$\eta = \gamma \frac{2a^2(\rho_s - \rho_f)g}{9v}$$

壁係数 $\gamma$   
( $0 < \gamma < 1$ )

試料室形状に依存  
粘性既知の条件下 (<30 MPa;  
Abdulagatov *et al.*, 2007) での測定により決定  
(純水の粘性測定実験により、正当性を確認)

球径 $a$

カメラを用いて撮影、ImageJを用いて測定

球密度 $\rho_s$

シリカガラスの状態方程式  
(Maede and Jeanloz, 1987)

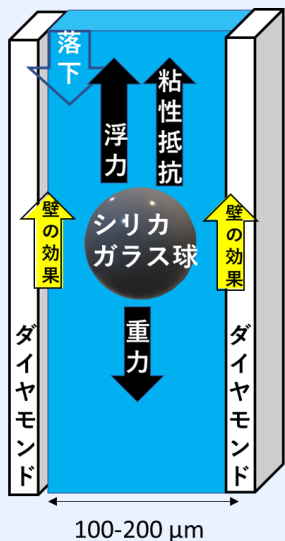
流体密度 $\rho_f$

swEOSchooser (matlab)より計算  
(Marion *et al.*, 2005; Vance and Brown, 2005; 2013)

終端速度 $v$

録画した後、ImageJ Fiji, Pythonを使用して算出  
3回測定した平均を使用

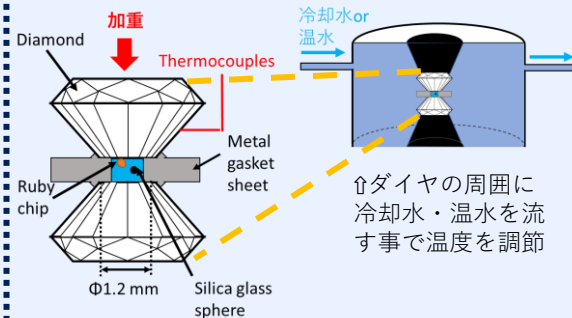
重力加速度 $g$



### 実験装置

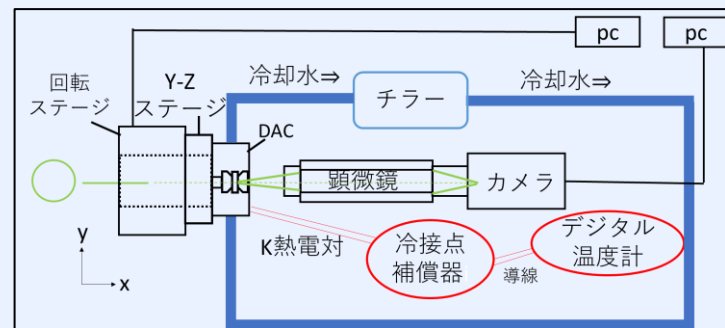
ダイヤモンドアンビルセル (DAC)

非常に硬いダイヤモンドの小さな面に力を加えることで、  
高圧力を発生する装置

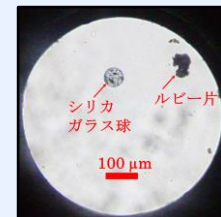


用いたDAC

DACを回転ステージに取り付けて半周回転させることで、  
球を試料室上部に持ち上げ、落下する様子をカメラで撮影



装置のイラスト

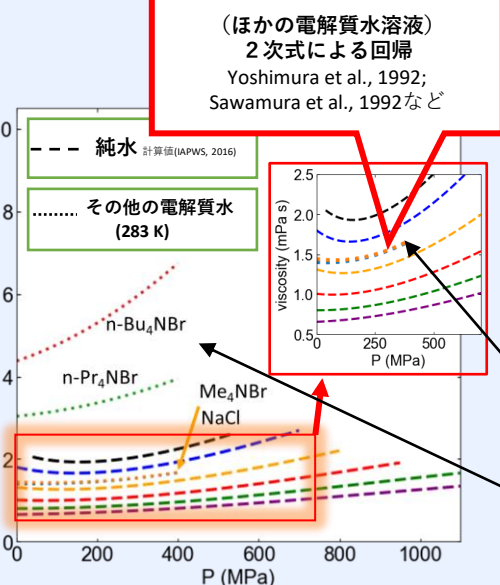
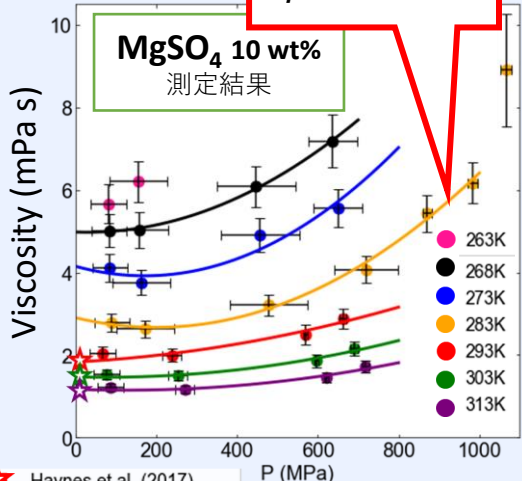


試料室

落球の様子(GIF)の  
画像処理前後  
黄色の線 = 球の軌跡  
この終端速度から、  
粘性を算出

## 測定結果：圧力依存性

2次式による回帰  
 $\eta = aP^2 + bP + c$



400 MPaまでの圧力条件で、様々な電解質水溶液の粘性を細かく測定した先行研究... 2次の圧力依存性  
MgSO<sub>4</sub>水においても、2次式で回帰→合致  
(1100 MPa, 283 Kの値は、相図上では固相領域のため除外)

- ・ 圧力依存性が（他の電解質水と同様）二次式  $\eta = aP^2 + bP + c$  で表される
- ・ 283 K: 常圧から1100 MPaで一桁程度の変化がある
- ・ 粘性は純水と比べ非常に大きく、温度によっては明確な極小値がある

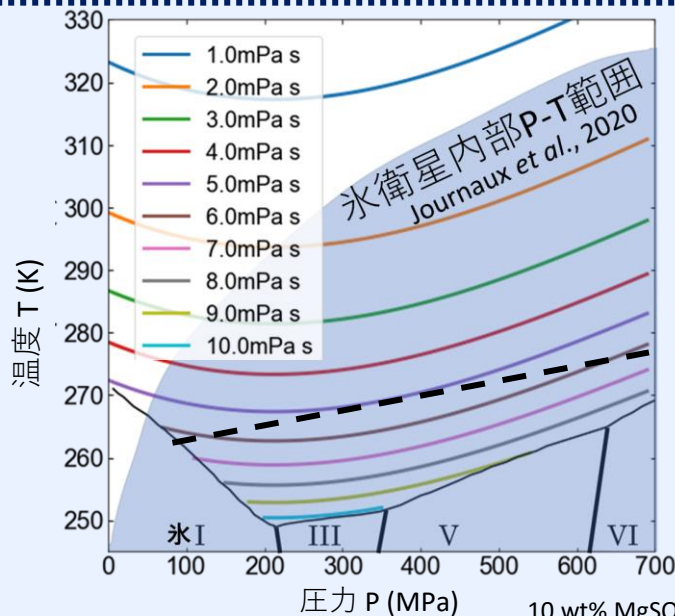
- ..... NaCl 1mol/kg 283K (Sawamura et al., 1992)
- ..... Me4NBr 1mol/kg 283K (Yoshimura et al., 1992)
- ..... n-Pr4NBr 1mol/kg 283K (Yoshimura et al., 1992)
- ..... n-Bu4NBr 1mol/kg 283K (Yoshimura et al., 1992)

IAPWS: International Association for the Properties of Water and Steam

10 wt% MgSO<sub>4</sub>水の粘性 (比較) 純水やその他の電解質水の粘性

- ★ Haynes et al., (2017)
- ★ Abdulagatov et al., (2007)
- ★ Abdulagatov et al., (2007)

## 等粘性線



10 wt% MgSO<sub>4</sub>aq相図(Vance et al., 2014)

## 内部海の粘性

MgSO<sub>4</sub> 10 wt%の内部海：

粘性は1–10 mPa s

→1ケタの幅を持つ

cf. 地球海水 ~2 mPa s @ 273 K (Qasem et al., 2021)

--- : ガニメデ内部の  
温度圧力プロファイルの一つ  
(Vance et al., 2014)

→300 MPa付近に粘性の極小値

# Implications

## MgSO<sub>4</sub> 10 wt%水の粘性：1桁の幅@内部海...氷衛星にどのような影響が考えられるか？

### 流体の流れ

### 物質の拡散

### 岩石層中の浸透・分化過程

(動) 粘性の一桁分の変化

$E = 7.5 \times 10^{-4}$  高粘性  $7.5 \times 10^{-5}$  低粘性

エクマン数

$$E = \frac{\nu}{2\Omega D^2}$$

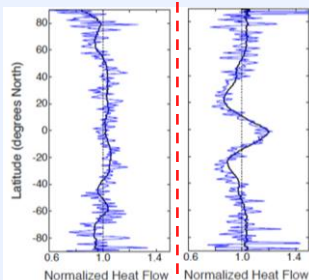
$\nu$  動粘性

$D$  内部海厚さ

$\Omega$  コリオリパラメータ

※動粘性  $\nu = \text{粘性} \eta \div \text{密度}$

$E = 7.5 \times 10^{-4}$  高粘性  $7.5 \times 10^{-5}$  低粘性



内部海から氷地殻へと伝わる熱

流れの形態や速度・熱輸送への影響

内部海の大対流シミュレーション (Soderlund, 2019)

拡散係数

$$D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi\eta r}$$

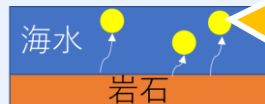
$\eta$  粘性

$D$  拡散係数

$R$  気体定数

$N$  アボガドロ数

$r$  拡散する粒子の半径



岩石中の成分の溶出(拡散律速の場合): 溶けだした成分が拡散で遠くへ取り去られることで進行 (Lasaga, 1984)

粘性変化による拡散速度の変化(~一桁)が溶出の効率に影響する。結果的に内部海の化学進化などに関わる可能性

### ハビタビリティ

粘性の影響

- タンパク質の形態変化速度 (e.g., Jacob and Schmidt, 1999)
- 酵素反応速度 (e.g., Uribe and Sampedro, 2003)
- DNAやRNAなど核酸の複製の容易さ (He et al., 2016)

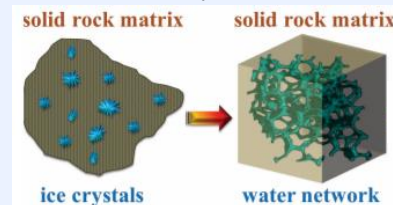
浸透・沈降の速度

① Darcy velocity

岩石中を水が浸透する速度

$$v_D = \frac{K_\phi (\rho_d - \rho_w) g}{\phi_l^w \eta}$$

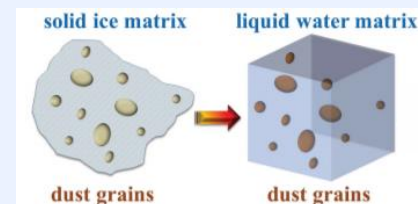
$\rho_d$  ダスト密度  
 $\rho_w$  液体の密度  
 $\eta$  液体の粘性  
 $K_\phi$  浸透率  
 $\phi_l^w$  液体の割合  
 $b$  粒子サイズ



② Stokes velocity

水の中を岩石粒子が沈降する速度

$$v_s = \frac{2(\rho_d - \rho_w) g b^2}{9\eta}$$



Neumann et al., 2015

例えば、粘性が10倍 → 浸透・沈降速度が1/10  
天体の分化速度や、海底下での水循環にも影響

内部海における粘性変化の要因例...

- 内部海の化学進化に伴う濃度変化
- 天体全体の冷却に伴う内部海温度の低下
- 化学反応や潮汐力などに伴う加熱

### Implication

内部海環境における粘性の変化

(e.g., MgSO<sub>4</sub> 10wt%水溶液; 最大一桁)

→ 内部海の化学進化や分化速度、対流や熱輸送、ハビタビリティへ大きく影響する可能性