

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：14501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840049

研究課題名（和文） 中性子回折実験で解き明かす氷・岩石混合物のレオロジー

研究課題名（英文） Rheology of ice-rock mixtures: New approach from neutron diffraction experiments

研究代表者

保井 みなみ (YASUI MINAMI)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環・助教

研究者番号：30583843

研究成果の概要（和文）：氷衛星の熱進化を解明するために必要なレオロジーモデルを構築するため、重水氷を用いた中性子回折実験を行い、塑性変形時の結晶粒径・軸方位の変化を調べた。さらに、氷・岩石混合物の流動則に対する氷粒子及び岩石粒子の粒径依存性を調べるため、等歪速度変形実験を行った。中性子回折実験の結果、時間変化に伴う結晶粒径・軸方位の変化は観測できなかった。変形実験の結果、氷・岩石混合物は岩石粒径で変形強度が大きく変化し、岩石濃度が高い場合は岩石粒径が 50 μm 以下では純氷より変形強度が大きく、1mm 以上では逆に小さくなった。

研究成果の概要（英文）：To construct a rheological model used for thermal evolution of icy satellites, neutron diffraction experiments were carried out to study a time variation of crystal properties for D₂O ice, and deformation experiments were also carried out to determine a flow law of ice-rock mixtures depending on the ice and rock particle sizes. From neutron diffraction experiments, the crystal properties were found not to change with time. From deformation experiments, the deformation strength was found to change significantly with a rock particle size at high rock fractions: the strength of ice-rock mixtures with a rock particle size smaller than 50 μm was larger than that for pure ice while the strength with a rock particle size larger than 1 mm was smaller than that for pure ice.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,250,000	375,000	1,625,000
2011年度	1,150,000	345,000	1,495,000
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：

科研費の分科・細目：数物系科学・固体地球惑星物理学

キーワード：氷衛星，熱進化，流動則，変形機構，中性子回折，氷粒子粒径依存性，岩石粒子粒径依存性

1. 研究開始当初の背景

太陽系に存在する氷衛星は、その密度から氷と岩石が様々な割合で混合していると推測されている。直径 3000km 以上の巨大氷衛星は、マントル対流などの熱進化を経て、氷と岩石の分化が進行し、現在推測されている

氷地殻・岩石マントル・コアの層構造に至ったと考えられている。また、氷衛星表面には、地質学的時間スケールでの氷・岩石混合物の流動により形成された地形が数多く存在する。従って、氷衛星の熱進化過程やテクトニクスを知る上で、氷・岩石混合物のレオロジー

一を明らかにすることが重要となる。

氷衛星の熱進化やテクトニクスを議論するためには、塑性変形速度と応力の関係を表す流動則が必須である。そこでこれまでは、氷・岩石混合物の等歪速度一軸圧縮実験を行い、多結晶氷の流動則に対する岩石含有率や温度の依存性を明らかにしてきた。一方、実験室で得られた流動則を氷衛星へ応用するには、氷・岩石混合物の支配的な変形機構が地質学的時間スケールでは何であるのかを調べる必要がある。多結晶氷のクリープ実験から、氷の流動速度は歪量と共にその振る舞いに変化することが知られており、これは氷結晶の粒径や結晶軸配向性の変化によって起こると推測されている。流動則は氷の流動速度が歪量によらず一定になる定常クリープの状態を表すものであるが、それは氷の変形機構である転位・拡散クリープによる氷結晶の変形やすべり、再結晶による結晶粒径や配向性の変化を反映している。従って、氷衛星のテクトニクスに応用可能な氷・岩石混合物の流動則を構築するためには、流動速度の変化と氷の変形機構の関係を調べ、さらに各変形機構に対する岩石粒子の影響を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

1を踏まえ本研究では、以下の2つの目的をおいて研究を行った。

- (1) 氷衛星を模擬した氷・岩石混合物を用いて変形実験と中性子回折測定を同時に行うことを試みる。この中性子線による「その場観察」実験によって、試料のクリープ曲線と共に変形機構に重要な物理量（結晶格子間歪や結晶粒径・軸配向性）を同時に取得することが可能か検証する。そして、その結果を踏まえ、氷衛星のテクトニクスに応用可能なレオロジーモデルを構築する。この手法を用いて中性子回折実験を行うためには、中性子ビーム径を考慮して氷・岩石混合物の粒径を変化させる必要がある。なぜなら、ビーム径よりも試料中の構成要素の粒径を小さくしなければ、局所的な単結晶領域での変形を見るに留まってしまうからである。
- (2) これまで、氷・岩石混合物の流動則に対する構成物質の粒径依存性は調べられていない。そこで、氷および岩石粒子の粒径を系統的に変化させた等歪速度変形実験を行う。

3. 研究の方法

- (1) 氷試料の変形実験は、日本原子力研究開発機構研究原子炉内の中性子回折装置に設置した一軸圧縮用変形試験機を用いて行った。これは既存の中性子回折用

圧密装置の圧密システム部分を、一軸圧縮型クリープ実験（一定応力）装置に取り替えることで、準備されたものである。最初に、応力変化に伴って回折パターンが変化するかどうかの確認を行うため、歪み測定システムは導入せず、応力変化のみをモニターして実験を行った。応力は油圧ポンプによる荷重により1~4MPaと変化させた。氷試料には、中性子回折強度を考慮して重水氷を用いた。この重水氷のブロックをブレンダーで粉碎し、ふるいで直径1mm以下の氷粒子粉末を作成し、直径20mm、高さ40mmの型に粉末と重水を少量ずつ交互に入れ、押し固めて作成した。実験は日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置されている多目的単色熱中性子ビームポート（低角、L-MUSASI）で行った。変形試験機は、大型の真空チャンバー内に設置されており、低温ヘリウム冷凍機により低温度を実現している。試料温度は -10°C とした。

- (2) 氷・岩石混合物の流動則に対する氷および岩石粒子の粒径依存性を調べるため、以下のような方法で試料を作成した。試料は粒径の異なる氷粒子および岩石を模擬した球形ビーズ（シリカ、アルミナ、ガラス）を混ぜて準備した。氷の粒径は1mmと $100\mu\text{m}$ の2種類、ビーズは $0.25\mu\text{m}$ から3mmまでの10種類とした。ガラスビーズの質量含有率は30wt.%と80wt.%の2種類である。予め氷粒子とビーズを混ぜた混合物を、直径30mm、高さ60mmの型に少量入れ、次に液体の H_2O 水（ 0°C ）を少量入れて押し固めた。この作業を型が試料で満たされるまで繰り返し、その後型から外して -10°C の低温室内で1日以上保管して凍結させた。実験は、北海道大学・低温科学研究所の大型低温室内に設置された変形試験機（TENSILON-2.5T）を用いて行った。流動則を求めるため、歪速度を一定とした等歪速度一軸圧縮実験を行った。歪速度の範囲は $9.0\times 10^{-7}\text{s}^{-1}\sim 6.0\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ と設定した。温度は -10°C である。

4. 研究成果

(1) 重水氷の中性子回折実験

中性子回折用変形装置を用いて、応力緩和に伴い回折パターンが変化するか確認するための実験を行った。その結果を図1に示す。

図1は中性子線の入射角 θ に対する結晶の散乱強度を示しており、結晶の種類、配向性や歪量、粒径によってその強度パターンが変化する。実験を行った結果、強度パターンは一般的に調べられている重水氷（応力なし、

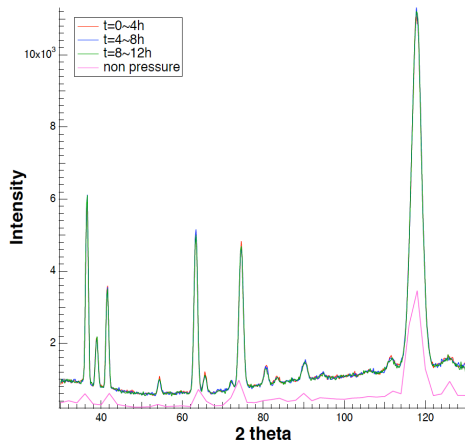


図1 応力 4MPa の場合の多結晶重水氷の回折パターンの時間変化

図1のピンク色の線)と一致し、重水氷を正確に測定していることが確認された。しかし、応力を与えた場合(図1の赤、青、緑線)、時間変化に伴うピーク強度と半値幅の変化は見られなかった。この原因として、使用した多結晶重水氷の氷粒子粒径と中性子ビームのビーム径がほぼ同じで(約1mm)、1つの単結晶の強度時間変化を見ているに過ぎなかった可能性が考えられる。その場合、mm単位の局所的な単結晶領域での結晶粒や配向の変化が回折パターンに表れることは難しい。そのため、今後はより小さな粒径を持った氷・岩石混合物を用いて実験を行う必要があると考える。

一方で、レオロジーモデル構築に必要な流動則データが1mm以下の粒径を持った氷・岩石混合物の場合は全く無い。そこで、先行研究で得られている粒径1mmの氷・岩石混合物の流動則データが1mm以下の氷粒径の場合で適応可能かを確認するため、次の(2)の実験を行った。

(2) 氷・岩石混合物の流動則に対する氷粒子及び岩石粒子の粒径依存性

流動則は応力・歪み曲線上の最大応力 σ_{max} と歪速度 $\dot{\epsilon}$ を用いて、次の式で示される。

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma_{max}^n \quad (1)$$

A と n は定数で、氷粒子粒径、岩石粒子粒径、空隙率、温度などに依存する。従って、定数 A と n に対する氷粒子及び岩石粒子の粒径依存性を調べることにした。

① 氷粒子粒径依存性

低温室に設置された変形試験機を用いて、純氷および氷・ビーズ混合物の変形実験を行い、一定歪速度における最大応力の氷粒子粒径依存性を調べた。その結果を図2に示す。

図2は歪速度と最大応力の関係を示し、純氷及び氷・ビーズ混合物(ビーズ含有率30wt.%)で、氷粒子の粒径が1mmの場合と100 μ mの場合を表している。この図から、純氷

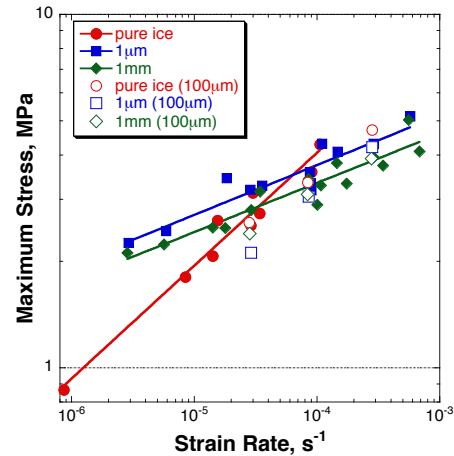


図2 H₂O 氷および氷・ビーズ混合物(ビーズ含有率30wt.%)の応力・歪速度の関係。塗りつぶしたプロットが氷粒径1mm、白塗りのプロットが氷粒径100 μ mの結果。四角がビーズ直径1 μ m、ダイヤがビーズ直径1mmを示す。

と1mmビーズ混合物は氷粒子の粒径依存性が見られないことがわかった。一方、1 μ mビーズ混合物の場合は、歪速度が小さくなるほど氷粒子粒径の依存性が大きくなり、直径1mmの氷粒子の方が直径100 μ mに比べて最大応力が大きくなることがわかった。先行研究から、氷粒子粒径が10 μ m以下になると純氷でも氷粒子の粒径依存性が見られることが報告されている。よって今後は、氷粒子の粒径をさらに小さくして粒径範囲を広げ、さらに詳細に氷粒子の粒径依存性を調べる必要がある。また、純氷およびビーズ混合物のデータが流動則を求めるには少ないため、今後さらにデータ数を増やして流動則を求め、氷粒子粒径依存性が定数 A や n に現れるかを調べる必要がある。

② 岩石粒子粒径依存性

①と同じく低温室に設置された変形試験機を用いて、純氷および氷・ビーズ混合物の変形実験を行い、一定歪速度における最大応力の岩石粒子粒径依存性を調べた。その結果を図3に示す。

図3は歪速度と最大応力の関係を示し、純氷及び氷・ビーズ混合物(ビーズ含有率80wt.%)で、ビーズ粒径が0.25 μ mから3mmまでの結果を示している。ビーズ含有率が30wt.%の場合、ビーズ粒径の変化による最大応力の違いは見られず、ほぼ純氷と同じになった。しかし図3から、ビーズ含有率が80wt.%と高くなった場合、最大応力や(1)式でフィッティングした線の傾きが、ビーズ粒径で大きく変化することがわかった。特に、ビーズ粒径が100~500 μ mの場合、傾きが非常に小さく、傾きに対応する(1)式の n を計算した結果、10以上になることがわかった。

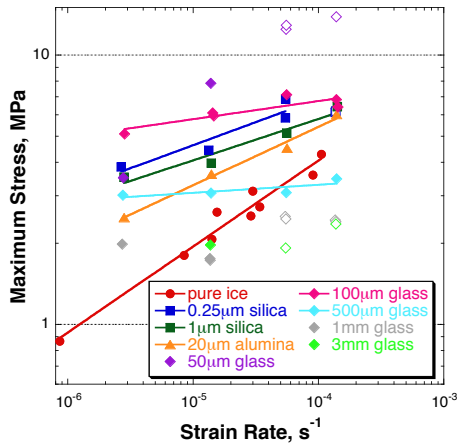


図3 H₂O 氷および氷・ビーズ混合物（ビーズ含有率 80wt.%）の応力・歪速度の関係。色の違いはビーズ粒径の違いを示す。白塗りのプロットは脆性破壊の場合を示す。

これは Yasui and Arakawa (GRL, 2008) で求められているビーズ粒径 1 μ m, 含有率が 80wt.% の $n=6$ とは大きく異なる。つまり、最大応力が歪速度に依存しないということがわかった。ビーズ粒径が 100~500 μ m の場合、回収した全試料が歪速度によらずせん断破壊が起こっていることが確認されたことから、せん断破壊による断層面のずれ圧縮が、 n が大きくなった原因と判断した。

他のビーズ粒径における最大応力の振る舞いをみるため、ビーズ粒径と最大応力の関係を示したのが図4である。

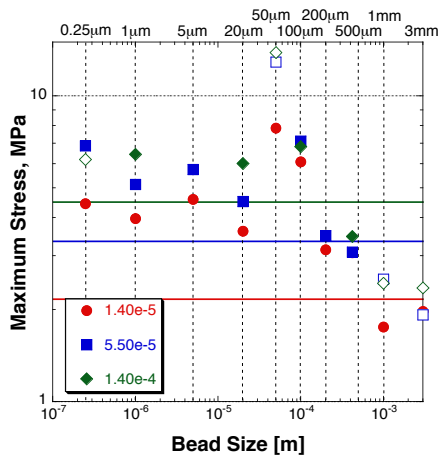


図4 氷・ビーズ混合物（ビーズ含有率 80wt.%）の最大応力とビーズサイズの関係。色の違いは歪速度の違いを示す。白塗りのプロットは脆性破壊を示す。また横の線は、各歪速度における純氷の最大応力を示す。

この図から、ビーズ粒径が 50 μ m 以下と 1mm 以上で振る舞いが異なることが確認された。50 μ m 以下の最大応力は、純氷の最大応力に比べて大きくなった。この最大応力の増加の原

因は、材料工学の分野で立証されている転位（純氷が変形する際に発生する欠陥で、氷の変形は転位の移動によって起こる）の微粒子通過に伴うものと判断した。一方、1mm 以上の最大応力は、純氷の最大応力に比べて小さくなった。回収した試料を観察したところ、ビーズが氷から剥がれ落ちているのが確認された。よって、ビーズ周りのせん断応力により微小クラックが大量に発生したことが、最大応力の減少の原因と判断した。以上、ビーズ粒径が 50 μ m 以下、100 μ m~500 μ m, 1mm 以上の 3 領域で見られた最大応力の振る舞いにおいて、現段階では回収した試料の観察等を基に原因を予測したが、今後は各領域での振る舞いの原因をさらに厳密にするため、光学顕微鏡や SEM, X 線 CT などを用いた微小領域での直接観察を行う必要がある。

さらに歪速度が $1.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ と大きい場合、ビーズ粒径が 0.25 μ m, 50 μ m, 1mm 以上の場合に脆性破壊が起こることがわかった。この原因についてはまだ不明なため、更に同条件で実験を重ね、原因について検討する必要がある。

(2)の実験を行った結果、流動則に対する岩石粒子粒径依存性を明らかにすることができた。先行研究における氷衛星の熱進化過程やテクトニクスに対するレオロジーモデルでは、純氷の流動則を用いていることがほとんどであるが、実際の氷衛星は氷に岩石が含まれており、さらにその濃度や粒径は様々であると予想されている。よって、本研究で得られた氷・ビーズ混合物の流動則を用いる事で、より現実に近い氷衛星環境下での熱進化過程やテクトニクスに対するレオロジーモデルを構築することが可能となる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 3 件）

- ① Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Flow law of ice-silica mixtures and the effects of silica content and porosity, Physics and Chemistry of Ice, Hokkaido University Press, 387-395, 2011（査読有）
- ② Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Rate-dependent strength of porous ice-silica mixtures and its implications for the shape of small to middle-sized icy satellites, Icarus, 210, 956-967, 2010（査読有）
- ③ 保井みなみ, 荒川政彦, 氷・シリカ微粒子混合物の流動則に対する空隙の効果：氷衛星の地形緩和への応用, 日本惑星科学会学会誌「遊星人」, vol.19, no.2, 136-147, 2010（査読有）

〔学会発表〕（計6件）

- ① 保井みなみ, 荒川政彦, 火星凍土を模擬した氷・固体粒子混合物のレオロジーに関する実験的研究, 日本惑星科学会 2011年度秋季講演会, 神奈川・相模原, 2011年10月
- ② 保井みなみ, 荒川政彦, 氷・岩石混合物の流動則に対する岩石粒子のサイズと形状の効果, 日本地球惑星科学連合 2011年大会, 千葉・幕張, 2011年5月
- ③ 保井みなみ, 荒川政彦, 圧子圧入試験による氷・岩石混合物の局所的変形強度の測定, 日本惑星科学会 2010年度秋季講演会, 名古屋, 2010年10月
- ④ Minami Yasui, Masahiko Arakawa, Flow law of ice-silica mixtures and the effects of silica content and porosity, 12th International Conference on the Physics and Chemistry of Ice, Sapporo, Hokkaido, September 2010
- ⑤ 保井みなみ, 荒川政彦, 圧子圧入法を用いた氷物質の変形実験: 局所的な変形強度を調べる新しい手法の確立, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉・幕張, 2010年5月
- ⑥ 保井みなみ, 荒川政彦, マクスウェル粘弾性モデルを用いた小・中氷衛星の地形緩和条件の推定, 日本地球惑星科学連合 2010年大会, 千葉・幕張, 2010年5月

〔その他〕

ホームページ等

神戸大学・実験惑星科学グループホームページ:

<http://www.edu.kobe-u.ac.jp/fsci-epsf/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

保井 みなみ (YASUI MINAMI)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環・
助教

研究者番号: 30583843