

短冊形多結晶氷の塑性変形に現れる強い温度依存性

—中等理科教育への導入に向けた教材化—

Strong temperature dependence of plastic deformation in polycrystalline ice plates: An attempt to develop teaching materials for secondary science education

永山 昌史¹, 佐々木 美季¹, 齋藤 友貴¹, 二村 真由¹, 田中 之博¹, 内田 努²
Masafumi Nagayama¹, Miki Sasaki¹, Yuki Saitoh¹, Mayu Futamura¹, Yukihiro Tanaka¹, Tsutomu Uchida²

Corresponding author: nagayama.masafumi@a.hokkyodai.ac.jp (M. Nagayama)

¹北海道教育大学 旭川校, ²北海道大学大学院 工学研究院

¹Asahikawa Campus, Hokkaido University of Education, ²Faculty of Engineering, Hokkaido University

We developed an experimental system comprising a time-lapse camera, heater, and household freezer, enabling the long-term observation of plastic deformation in polycrystalline ice plates. The results show that both the onset time of creep (t_{initial}) and the creep-rate were significantly altered by a temperature difference of only 5K. Additionally, in ice plates where individual crystal grains grew approximately 1.5 times larger through slow freezing, t_{initial} increased by up to a factor of four. These findings highlight the pronounced temperature dependence of plastic deformation in polycrystalline ice.

1. はじめに

1. 1 中学校理科教員の養成現場から

理科教材としての氷は、小学校4年生および中学校1年生の化学分野において物質の状態変化を扱う中で水(H₂O)の固体として登場するため、固い、冷たい、とけるといったイメージが一般的である。他方、氷河に代表されるような地学分野における氷の物性、すなわち曲がる、延びるといった流動性は、時間・空間スケールが大きいこともあり、学校現場で実験・観察を行うことが難しい。そのため、中学校3年生で地球温暖化を扱う際にも、温度上昇の影響をより強く受ける氷河の流動・塑性変形、それが引き起こす末端崩壊といった現象に踏み込むことができず、「氷河がとけて海水面が上昇する」という表現にとどまってしまふ。100年間で1℃程度という一見するとわずかな平均気温上昇が壊滅的被害につながるイメージを持たないのが現状である。

1. 2 本研究の目的

上述の背景をふまえ、中等教育現場で実施することを想定して市販冷凍庫内で氷の塑性変形を直接観察でき、かつ強い温度依存性を実感できる実験系を構築することを本研究の目的とする。

なお、本論文は第2～第4著者である3名の卒業論文をまとめたものである¹⁻³⁾。

2. 実験方法

2. 1 短冊形多結晶氷板の作成

簡便さを優先し、作成が難しい単結晶氷ではなく、多結晶氷を試料として用いることとする。A4サイズのクリアファイルを切り抜き、底面が50 mm×150 mmの長方形で壁の高さが20 mmの容器を組み立てる。この容器に20 mLの蒸留水を注ぎ入れ、冷凍庫内に静置することで短冊形の氷板を作成する。クリアファイルの撥水性によって氷が取り出しやすくなる一方、注ぎ入れた蒸留水が液滴となり均一には広がらない。そこで、ひとまわり小さい容器を上から載せて液滴を押しつぶすことで、入れ子となった2つの容器底面の隙間に蒸留水を閉じ込め、長方形の容器の隅々にまで蒸留水を行き渡らせた。

この容器を予め電源を入れておいた冷凍庫に2時間静置することで蒸留水を凍結させ、およそ50 mm×150 mm×2.5 mm厚の短冊形氷板を作成した。また、多結晶氷の各結晶粒を成長させることを期待し、一度電源を切って庫内を室温に戻し、さらに容器を発泡スチロール製断熱箱の中に静置してから電源を入れ、できるだけ緩やかに凍結させた氷板も作成した。

凍結したかを確認するため、センサー部の先端を蒸留水に接触させた温度ロガー(島津理化 PS-3201)を用いて温度プロファイルを測定した。

2. 2 塑性変形の長時間観察

大型の家庭用冷凍庫（アイリスオーヤマ IUSD-18A-W）の棚板に自作の木製台座を設置し、氷板の片方の端から 30~50 mm の位置を挟んで固定することでカンチレバーとした。また、たわみ方向への荷重を加えるため、反対の端から 10 mm 以内を目安に 10 mL (0.01 kg) の蒸留水を凍らせた氷キューブを載せた。これを庫内の奥に寄せ、屋外使用が可能なタイムラプスカメラ（サンワダイレクト 400-CAM109）をできるだけ手前に設置することで画角を確保し、氷板の塑性変形の長時間観察を行った（図 1）。また、温度プロファイル測定用の温度ロガーを台座に設置した。

冷凍庫は縦長の庫内が冷却パイプの通った棚板で仕切られ、幅 0.39 m×高さ 0.17~0.29 m×奥行 0.38 m のスペースが 3 つある。そこで、水道管に巻き付けて使用する凍結防止用のヒーター（カクダイ）を塩ビ管に巻き付けて保温シートで覆ったものを作成し、これを中段に設置することで、上段の温度を下段と比べておよそ 5K だけ高温にした。そして観察装置を 2 セット準備し、上下段のそれぞれに設置することで、異なる温度条件下での同時観察が可能なシステムを構築した。

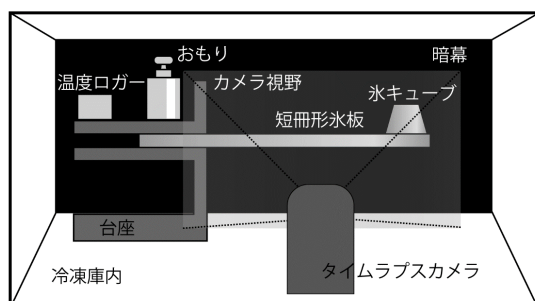


図 1 長時間観察装置（冷凍庫内）の模式図

2. 3 偏光観察

氷板よりもひと回り大きい 80 mm×170 mm の短冊形かつクロスニコルになるように、厚手の偏光シート（ケニス）を 2 枚カットする。作成した氷板を予め冷凍庫で冷やしておいた偏光シートに挟み、ライトボックス（フジカラー ライトボックス 5000）に載せて結晶粒を素早く観察し、スマートフォンで撮影を行った。観察後、いくつかの氷板はそのまま塑性変形実験に供した。

3. 実験結果

3. 1 塑性変形の時間変化

下段で撮影した典型的な観察結果を図 2 に示す。5 日後では、カンチレバーがたわむような弾性変形ではなく、根元で折れ曲がるような塑性変形をしていることが確認できる。この間、5 分ごとに静止画を撮り続けているため、塑性変形する様子を詳細に観察することが可能である。

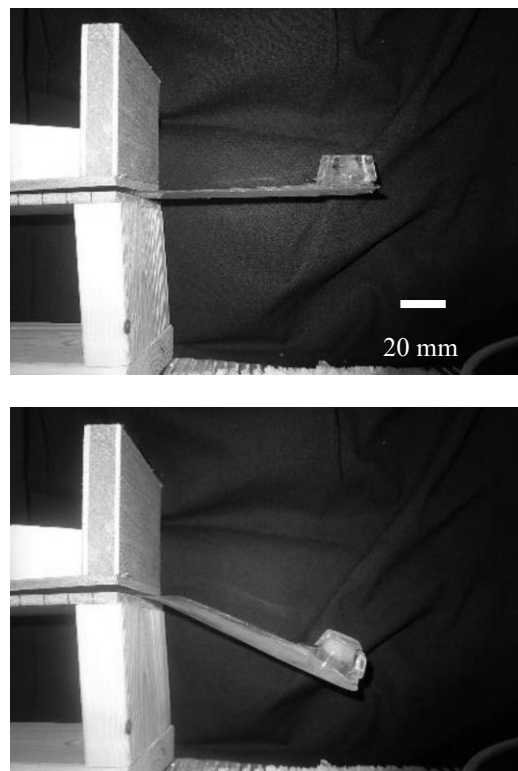


図 2 短冊形氷板の塑性変形
（上：観察開始直後，下：5 日後）

上下段のそれぞれで 4 回以上の実験を行ったところ、氷板は一定時間経過後に曲がり始めること、下段（低温）では曲がり始めるのが上段に比べて数日単位で遅いことが分かった。これらの「曲がり方」や「曲がり始める時間」を定量的に評価・比較するため、各画像での氷板先端の座標を ImageJ で測定し、これをもとに観察開始時からの変位を計算した。上下段のそれぞれで典型的な変位-時間グラフを図 3 に示す。

このグラフからは、測定を開始した直後から 0.1 mm h⁻¹ 程度の速さで少しずつ曲がっており、その後、上段では 32 時間、下段では 110 時間経過するとそれぞれ 30.0 mm h⁻¹、2.8 mm h⁻¹ の速さで急激に曲がり始めることが見てとれる。そこで、東⁴⁾によって示された単結晶氷のクリープ曲線に倣い、後半部分を直線近似して得られた傾きをクリープ速さ、横軸切片をクリープ開始時間と定

義した. 上段 5 回, 下段 4 回の実験結果についてこれらを求め, 平均値と標準偏差を表 1 に示す.

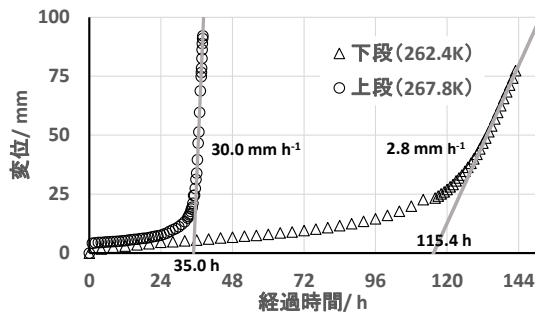


図 3 氷板先端の変位

表 1 クリープ速さ・開始時間の温度依存性

	上段	下段
平均温度/ K	268.0	262.6
(平均温度/ °C)	(-5.2)	(-10.6)
クリープ速さ/mm h ⁻¹	15.2 ± 10.6	1.7 ± 0.7
クリープ開始時間/h	29.8 ± 4.7	95.5 ± 46.1

これを見ると, 約 5K の温度差によってクリープ速さは約 9 倍, クリープ開始時間は約 3 倍の違いが現れ, 温度の高い上段ではクリープ開始が早く, かつクリープも速いことが分かる. しかしながら, 実験ごとのばらつきを確認すると, 上段のクリープ速さで標準偏差が 10.6 mm h⁻¹, 温度の低い下段のクリープ開始時間で標準偏差が 46.1 h と平均値に対して非常に大きくなっていた.

3. 2 緩やかに凍結させた多結晶氷の塑性変形

上述のようにクリープ速さおよび開始時間に明確な温度依存性が見られた一方, 実験ごとのばらつきが大きかった. このばらつきが氷の多結晶性に起因するのであれば, 氷板を緩やかに凍結して結晶粒を成長させることで, クリープ速さか開始時間もしくはその両方が変化するはずである. そこで, 冷凍庫を室温に戻し, さらに庫内に断熱箱を設置して, その中で緩やかに凍結させた氷板を作成した. 温度ロガーで測定した温度プロファイルから確認したところ, 通常は 1 時間程度で完全に凍結するのに対し, 想定よりは早かったものの 2.5 時間以上かかっていることが分かった.

次に, 結晶粒の大きさを確認するため, 作成した氷板をクロスニコルにした 2 枚の偏光板に挟み, 観察・撮影を行った (図 4 上). 結晶粒の大

きさを評価するにあたり, 結晶が重なっていることを考慮し, 面積ではなく横方向 (短冊の長手方向) の最大長さで定量化を試みた. まず偏光観察写真をもとに結晶粒を抽出し (図 4 下), 次にその画像に 5 mm 間隔のグリッドを重ね, 各結晶粒の長さを測定した. 通常凍結の氷板 9 枚 (結晶粒 186 個) と緩慢凍結の氷板 6 枚 (結晶粒 96 個) を解析した結果を表 2 に示す. 緩やかに凍結させることで, 結晶粒の平均サイズがおよそ 1.5 倍となる一方, ばらつき (変動係数 = 標準偏差 / 平均値) が 65% に抑えられていることが分かる.

表 2 結晶粒の大きさ

	通常凍結	緩慢凍結
平均値/ mm	32.5	47.0
標準偏差/ mm	28.5	27.0
変動係数	0.88	0.57

最後に, この緩やかに凍結させた氷板を用い, 塑性変形の様子をタイムラプス観察した. 観察時の温度条件は表 1 に示した下段 (低温) と同じである. また, 氷板が折れ曲がる位置と結晶構造の関係を明らかにする目的で, 図 4 に示した氷板をそのまま塑性変形実験に供した. 図 5 に示した結果を見ると, 通常凍結させた氷板での結果と比較して (表 1), クリープ速さ (1.9 mm h⁻¹) はそれほど変化していない一方, クリープ開始時間 (191.0 h) が 2 倍にも遅くなったことが分かる. なお, この氷板は図 4 下の矢印で示した位置で折れ曲がった. 緩慢凍結した別の氷板を使って実験を行ったところ, クリープ開始時間がさらに 2 倍の 360.8 h となった (未掲載). つまり, 測定開始

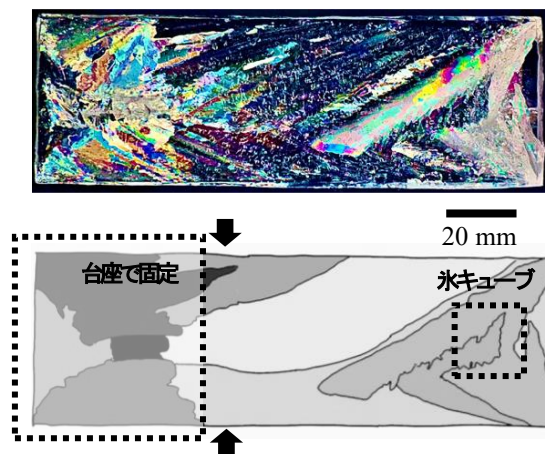


図 4 偏光観察 (上) と抽出した結晶粒 (下)

から実に 15 日後に曲がり始めたことになる。結晶粒を大きくすると、より大きなクリープ開始時間の遅延を引き起こすことが明らかとなった。

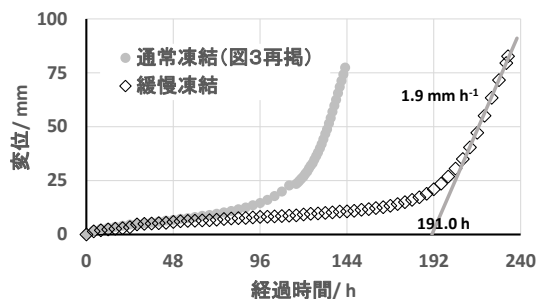


図5 緩やかに凍結させた氷板の塑性変形

4. 考察

多結晶氷のクリープ試験が数多く実施され、定常クリープ速度がアレニウス型の温度依存性を示すことが報告されている。Barnes らは多結晶氷の一軸圧縮試験によって、265.2K (−8℃) を境に高温側と低温側でクリープ主要因および活性化エネルギーが異なることを示した⁵⁾。すなわち、262.6K (本研究の下段) では基底面滑りが主要因で活性化エネルギーが 78.1 kJ/mol、268.0K (上段) では粒界滑りや粒界融解が主要因で活性化エネルギーが 120.0 kJ/mol と報告している。

一方、カンチレバー型試料を用いた塑性変形の実験報告は少ないため、本研究で観測されたクリープ速度の温度依存性を Barnes ら⁵⁾のモデルに基づき検討する。まず、カンチレバーの根元に作用する曲げ応力を材料力学に基づいて 0.3 MPa と算出し、上述のモデルに適用して計算したところ、268.0K でのクリープ速度は 262.6K での約 2 倍となった。これに対して、実験結果は約 9 倍となった。オーダーレベルでの一致にとどまる理由として、薄い板状構造のため、高温での結晶粒界の寄与が相対的に大きい、もしくは昇華により薄くなるとともに曲げ応力(厚さの⁻²乗に比例)が大きくなったことなどが考えられる。

多結晶氷で降伏おくれ時間の定量解析を行った例はほとんどないが、遷移クリープから定常クリープへの移行時間の指標であると考えれば、高温でクリープ開始が早いことは主要因が上述のように変化したためであると理解できる。

最後に、クリープ速度に対する結晶粒径依存性を考察する。基底面滑りがクリープ主要因の場合、

粒界が障害になるため粒径が小さいほどクリープ速度が小さくなるはずであるが、本研究では 262.6K において粒径が大きいほど定常クリープ開始が遅れるのに対し、クリープ速度はほとんど変わらない結果が得られた(図5)。粒径が数 10 mm と大きい場合、結晶方位の特異性が表れた等の要因が考えられる。

5. まとめ

氷の塑性変形実験を中等理科教育現場に導入することを目指し、短冊形多結晶氷の塑性変形を長時間にわたって観察する実験システムを独自に構築した。実験結果から、実験温度や結晶凍結時間(結晶粒の大きさ)のわずかな違いが、塑性変形の速さおよび開始時間に大きな変化として現れることを明らかにした。

わずかな温度上昇が劇的な変化を引き起こす氷の物性を顕在化できる本実験を探究活動に取り入れることで、地球温暖化によって氷河がとけるというだけでなく、むしろ流動性の増大がより破滅的な影響を及ぼすことの理解へつながる。

【謝辞】

本研究の基盤である家庭用冷凍庫を用いた実験系を立ち上げた大野尊氏(北海道教育大学旭川校)に、この場を借りて深謝申し上げる。

【参考文献】

- 1) 二村真由(2024): 温度差数 K が多結晶氷の変形速度を単結晶氷よりも増大させる機構—転位の寄与—. 北海道教育大学旭川校 卒業論文。
- 2) 佐々木美季(2025): 多結晶氷における塑性変形の遅延とばらつきの増大—温度低下による結晶粒界の寄与—. 北海道教育大学旭川校 卒業論文。
- 3) 齋藤友貴(2026): 緩やかに凍結させた多結晶氷の塑性変形—結晶粒径の増大が引き起こす変形開始時間の遅延—. 北海道教育大学旭川校 卒業論文。
- 4) 東晃(1965): 氷の単結晶の塑性. 応用物理, **34** (2), 80-90.
- 5) Barnes, P., Tabor, D. and Walker, J.C.F. (1971): The friction and creep of polycrystalline ice. *Proc. Roy. Soc. Lond. A.*, **324**, 127-15