

## 氷河氷形成過程のその場観察 —水が介在した乾雪から氷河氷への変態実験—

南 銀河<sup>1</sup>・島田 瓦<sup>2</sup>

(1:富山大学大学院 理工学教育部 地球科学専攻 2:富山大学学術研究部 理学系)

### 1. はじめに

近年、立山に存在する雪渓のいくつかが学術的に氷河であると認定された(福井ら, 2018)。これらの氷河は温暖氷河に分類され、その存在条件としては、充分な量の降雪といった気候要素に加え、谷の向き、風向きや、面積といった地形要素が必要である。氷河内部に存在する氷体の生成には、夏期の降水や雪解け水の流入および、帶水層での加圧が深く関わっている(Kawashima, 1997)。これまでに積雪薄片を圧縮する実験(若浜, 1960)や水が介在した場合の雪粒子の成長過程を観察する実験(若浜, 1965)は行われているが、それらの実験では、雪試料が加圧される過程での1つ1つの粒子の成長を追うことは難しい。そこで本研究では、そこで、本研究では、氷試料を一軸圧縮し、これに0°Cの水を加えて氷粒子の成長過程を観察、解析した。

### 2. 実験装置および実験方法

図1に示すような2枚のガラス板によって作られた空間(厚さ1.3 mm)に雪試料を詰めた。この雪試料は、イオン交換水を用いて作成した氷をカンナで削ったものである。これを恒温箱に入れ、氷の温度が0°Cになるように温度制御する(±0.01°C)。試料を入れた空間にスライドガラスを挿入し、雪試料を一軸圧縮した(図1右→左方向)。このときの加圧は、実験Iでは0.1 MPa、実験IIでは0.2 MPaとした。試料の収縮が落ち着いた後、0°Cの水を注入し、圧縮を続けた。これらの過程をクロスニコルの状態で観察し、4Kビデオカメラのタイムラプス機能を用いて記録した。

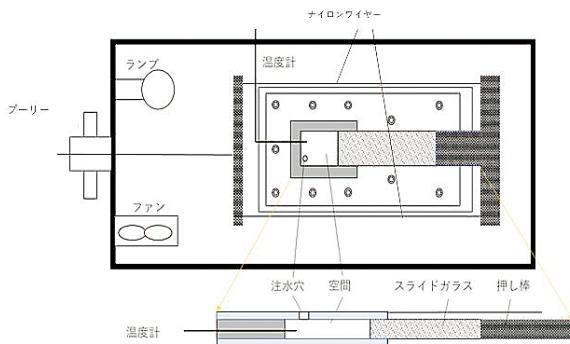


図1 実験装置の概要

恒温箱内部の温度はランプとファンを用いて一定となるように制御してある。ブーリーの部分におもりをつり下げることでナイロンワイヤーと連結した押し棒が、画像右から左方向へ試料に加圧する。

### 3. 実験結果の概要

まず、雪試料のみを加圧したところ、体積が縮小した。このとき、粒子サイズに変化は見られなかった。その後、試料に水を加えたところ、雪試料を圧縮したときに比べ急速に圧密が進み、粒子間の空隙が気泡として独立した。注水直後および、注水から4時間加圧した際の試料の様子を図2に示す。圧密の過程で粒子数は大きく減少し、残った粒子は大きく成長した。

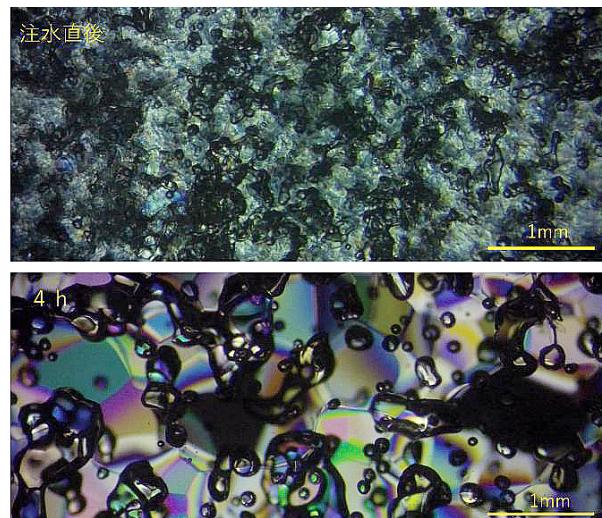


図2 実験I 注水直後(上)および注水4時間後(下)

加圧 0.1 MPa・クロスニコルで観察を行った。

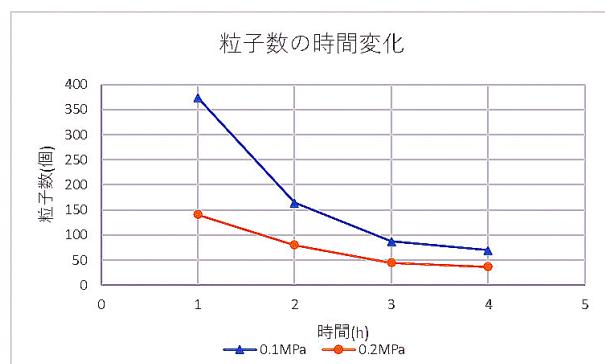


図3 粒子数の時間変化

0.1 MPa、0.2 MPaで加圧を行った際の粒子数の時間変化。粒子数のカウントは目視にて行った。

#### 4. 粒子数および個々の粒子サイズの時間変化

解析には「Image J」を用いた。実験で撮影した動画から1, 2, 3, 4時間後の画像を静止画像として取り出し、その粒子数をカウントした。粒子数の時間変化を図3に示す。粒子数は時間の経過とともに減少した。また、その減少率は注水直後～注水後1時間にかけて最も大きく、時間が経過するごとに減少率は低下した。

次に、4時間後の画像に映っている全粒子のサイズを画像解析して測定した。これらの粒子のサイズを3, 2, 1時間後の順に調べ、各粒子の成長を追った。解析の例を図4に、実験での個々の粒子サイズの時間変化を図5に示す。調べた各粒子のサイズは、時間経過と共に増加する傾向が見られた。しかし、いくつかの粒子では単調な増加ではない特異な変化が見られた。この変化は大きく分けて「一度成長した後、粒子サイズが減少する粒子」「はじめは小さな粒子であったにもかかわらず、後に急成長する粒子」の2種類に分けられる。

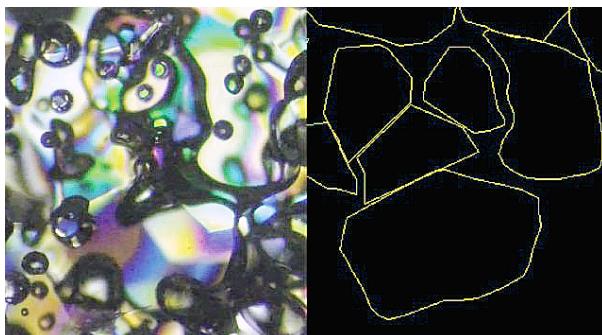


図4 粒子サイズの解析例

画像は、実験Ⅰでの4時間後の画像の一部を拡大したものである（それぞれ解析画像（左）、粒子境界（右）。粒子の半別は、撮影した動画像を参考に行った。粒子は複数の層となっているため、静止画像や動画像で判断できない粒子は解析の対象外とした。

#### 5. 圧力の違いによる比較

粒子の成長速度は、加圧の大きな実験Ⅱの方が実験Ⅰに比べて大きかった。気泡が独立・合体し、変化が起こらなくなるまでの時間は、実験Ⅱの方が短く、実験Ⅰの半分程度であった。

なお、図4では、加圧0.1 MPaの実験Ⅰの方が加圧0.2 MPaの実験Ⅱに比べて粒子数が大きく減少しているように見えるが、これは実験Ⅱにおいて、注水直後～1時間後にかけて、急速に粒子数が減少したためである。

粒子サイズの時間変化を見ると、実験Ⅰに比べて実験Ⅱでは、増加傾向が大きいことが分かる。

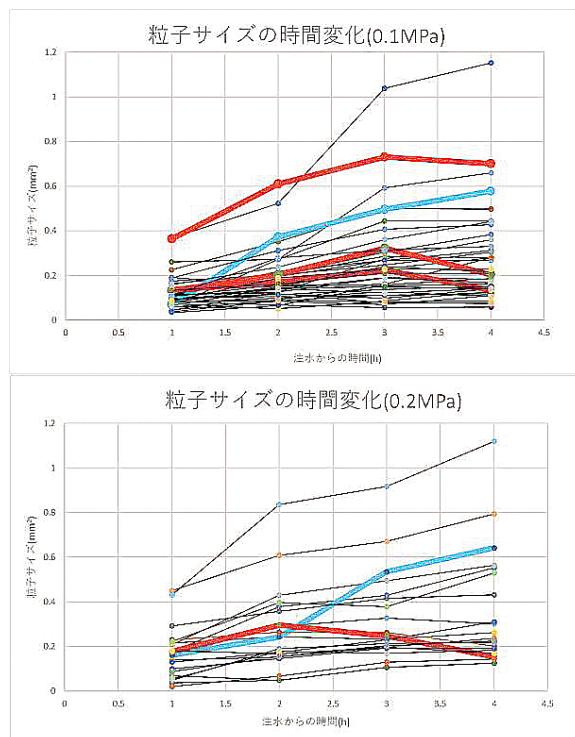


図5 粒子サイズの時間変化

0.1 MPa(上)、0.2 MPa(下)で加圧を行った際の個々の粒子のサイズ変化。単調増加以外の特異な変化をした粒子の線を太くして示した。

#### 6. 非加圧実験結果との比較

本実験と、加圧を行わない2つの実験結果（若浜（1965）、対馬（1978））を比較した。なお、これらの実験において、初期の平均粒径分布に多少の差は存在するが、粒子の平均サイズはおおよそ等しい。本実験および若浜（1965）、対馬（1978）の平均粒径の変化を図5に示す。粒子の成長速度は本実験の結果の方が圧倒的に大きく、粒子の平均粒径が0.6 mmになるまでの時間は、1/8～1/16ほどであった。

	初期値	1h	2h	3h	4h
実験Ⅰ		0.395	0.485	0.572	0.591
実験Ⅱ		0.467	0.586	0.635	0.673
若浜(1965)	0.30±0.05				
対馬(1978)	0.1~0.55	0.205	0.257	0.293	0.322
	24h	48h	72h	144h	
実験Ⅰ					
実験Ⅱ					
若浜(1965)			0.60±0.18	0.76±0.18	
対馬(1978)	0.582	0.732	0.837	1.053	

図5 本実験、若浜(1965)と、対馬(1978)の平均粒径(mm)の時間変化

本実験、若浜(1965)の値はすべて実測値である。また、対馬(1978)の初期値は実測値、各時間の値は実験を基に算出した式から求めた値である。

## 7.氷粒子成長のメカニズムに関する考察

注水後の加圧では、非注水の加圧時にほとんど見られなかつた粒子の成長が確認できた。これは、粒子の成長機構が気相成長から融液成長に切り替わったため、成長速度が大きくなり、粗大化が促進されたと考えられる。

まず融液成長環境下では、氷粒子表面の曲率差により平衡温度に差が生じるため、大きな粒子は成長し小さな粒子は消滅する。そのため、粒子の成長前と成長後では粒子数は減少し、粒子の平均粒径は大きくなる。本実験においても大半の粒子に同様の傾向が見られた。しかし、一部の粒子は急に成長したり、逆に小さくなったりする変化が見られた。このような変化が起こる要因は、一軸圧縮環境下での氷の結晶軸には成長に有利な方向と不利な方向が存在し(大伴ら,1983),(Alley et al,1995)、その優位性によるものと考えられる。

次に、圧力の異なる2つの実験を比較すると、圧力の大きい実験の方が粒子のサイズが増加する傾向にあった。また、これまでの加圧を行わない実験と本実験の結果を比較すると、本実験の結果の方が、粒子がある一定のサイズに成長するまでの時間が非常に短くなった。これは、圧力が大きくなることによって粒子がより密になり、粒子同士の距離がより近くなることで、粒子間での単位時間あたりの熱輸送量が増加したことや、また、粒子同士がぶつかり、圧力融解を起こした結果、粒子の成長速度が大きくなつたと考えられる。

## 8.まとめ

水を含んだ氷試料を圧縮したところ、乾いた雪試料を圧縮した際に比べ大きく収縮した。乾いた雪試料を圧縮した際、内部構造はほとんど変化しなかつたのに対し、水を含んだ圧縮では内部構造が以下のように変化した。

- ・粒子数は減少し、平均粒径は大きくなつた。
- ・粒子間に存在していた空隙が気泡として内包された。
- ・一部の成長過程の粒子では、サイズの時間変化において特異な変化が見られた。

一般に粒子が成長する際、粒子表面の曲率差によって大きな粒子は成長し、小さな粒子は消失する。本研究において、大半の粒子に同様な傾向が見られた。しかし、一部の粒子に特異な変化が見られた。この原因是、粒子同士の競合もしくは一軸圧縮による成長の優位性によるものであると考えられる。

粒子の成長速度は、加圧の大きな実験Ⅱの方が実験Ⅰに比べて大きかった。また、これまでの実験と比較した際、水が介在した氷粒子の成長において、加圧時に粒子の平均粒径が0.6 mmになるまでの時間は、非加圧時の1/8~1/16ほどであった。これは、加圧によって粒子がより密になり、単位時間あたりの熱輸送量が増えたことや、圧力融解が起つたことが原因であると考えられる。

## 文献

- Alley, R.B., A.J. Gow and D.A. Meese. (1995): Mapping  $c$ -axis fabrics to study physical to study physical in ice. J. Glaciol.,41(137),197-203
- 福井幸太郎, 飯田肇, 小坂共栄(2018): 飛騨山脈で新たに発見された現存氷河とその特特性. 地理学評論, 91, 1, 43-61
- Katsuhisa KAWASHIMA (1997): Formation processes of ice body revealed by the internal structure of perennial snow patches in Japan. Bulletin of Glacier Research, 15, 1-10
- 大伴武都美, 若浜五郎(1983): 氷河氷の形態と結晶軸方向の関係. 低温科学, 物理編, 41, 151-158
- 対馬勝年 (1978): 水に浸った雪の粗大化。「雪氷」, 40, 155-164
- 若浜五郎 (1960): 積雪の薄片を利用した積雪の組織と内部歪の研究 I: 静荷重における積雪薄片の圧縮. 低温科学, 物理編, 19, 37-71
- 若浜五郎 (1965): 水を含んだ積雪の変態. 低温科学, 物理編, 23, 51-66