



Title	大きな温度勾配の下でのしもざらめ雪成長実験 (1)
Author(s)	福沢, 卓也; FUKUZAWA, Takuya; 秋田谷, 英次 他
Citation	低温科学. 物理篇, 50, 9-14
Issue Date	1992-03-25
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/18599">https://hdl.handle.net/2115/18599</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	50_p9-14.pdf



## 大きな温度勾配の下でのしもぎらめ雪成長実験(I)\*

福 沢 卓 也・秋田谷 英 次

(低温科学研究所)

(平成3年11月 受理)

### I. 緒 言

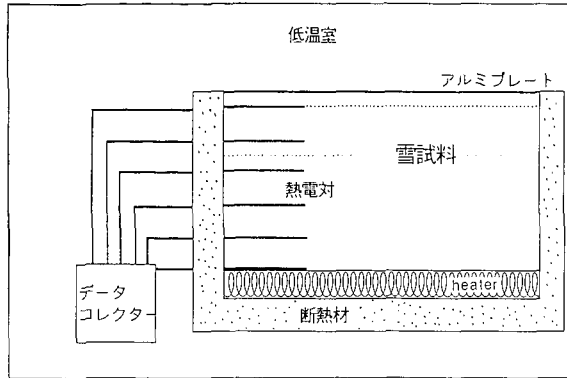
積雪表層におけるしもぎらめ雪の急速な成長を検証するために、大きな温度勾配の下での成長実験を行った。これまで、積雪中におけるしもぎらめ雪の成長速度を実験的に求めた研究は少ない。Marbouty<sup>1)</sup>は、限られた温度および密度領域において、最大0.75°C/cmまでの温度勾配の下で成長実験を行った。しかしながら、積雪表層に現れる大きな温度勾配( $\approx 2^\circ\text{C}/\text{cm}$ )の下での成長速度に関しては未だ実験報告はない。本研究の目的は、低密度の積雪を大きな温度勾配の下におき、積雪内部で成長するしもぎらめ雪の成長速度を得ることである。今回は、雪面温度 $-18^\circ\text{C}$ 、表層の密度 $0.08\text{ g}/\text{cm}^3$ の積雪について、温度勾配を $1.0\sim 3.0^\circ\text{C}/\text{cm}$ の範囲で変化させ成長速度を求めた。また、観測によって得られた成長速度との比較を行い、積雪表層におけるしもぎらめ雪の急速成長が実験的に再現されることを確かめた。さらに、理論的に求められる成長速度との比較を定量的に行い、理論式の妥当性について考察する。

### II. 実験方法

実験は、低温室内で第1図に示した装置を用いて行われた。装置の中に幅40 cm、奥行40 cm、高さ最大10 cmの雪サンプルを入れ、アルミのプレートで蓋をする。実験に用いた雪サンプルは、密度( $\rho$ ) $0.30\text{ g}/\text{cm}^3$ 程度の下層の上に厚さ3 cmで $\rho=0.08\text{ g}/\text{cm}^3$ の上層がのる二層構造とした。低密度の雪は、電動氷削り機で市販氷を削って作られた。使用した氷削り機は、初雪「Ice slicer」(HC-7N)である。氷削り機の刃の位置を調節することによって雪の密度を $\rho=0.08\sim 0.35\text{ g}/\text{cm}^3$ の範囲で調節することができる。このようにして作られた低密度の雪は、小さい氷の粒が集まった薄い平板状のものである。

この雪サンプルを実験装置に入れて、上面と下面に温度差を与える。サンプル下面の温度は、装置の底に組み込まれたヒーターと温度コントローラーによって $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の精度で設定温度に維持される。上面の温度は実験室の温度を変えて調節するが、その精度は $\pm 1.5^\circ\text{C}$ である。このようにして、二層構造の雪サンプルを温度勾配下におき、サンプル内でもしもぎらめ雪を成長させる。サンプル上面の温度は $-18^\circ\text{C}$ に設定し、下面の温度と下層の厚さを変えて温度勾配を調節し、 $1.0\sim 3.0^\circ\text{C}/\text{cm}$ の範囲で $0.5^\circ\text{C}/\text{cm}$ ずつ変化させて実験を行った。

\* 北海道大学低温科学研究所業績 第3507号



第 1 図 実験装置の模式図

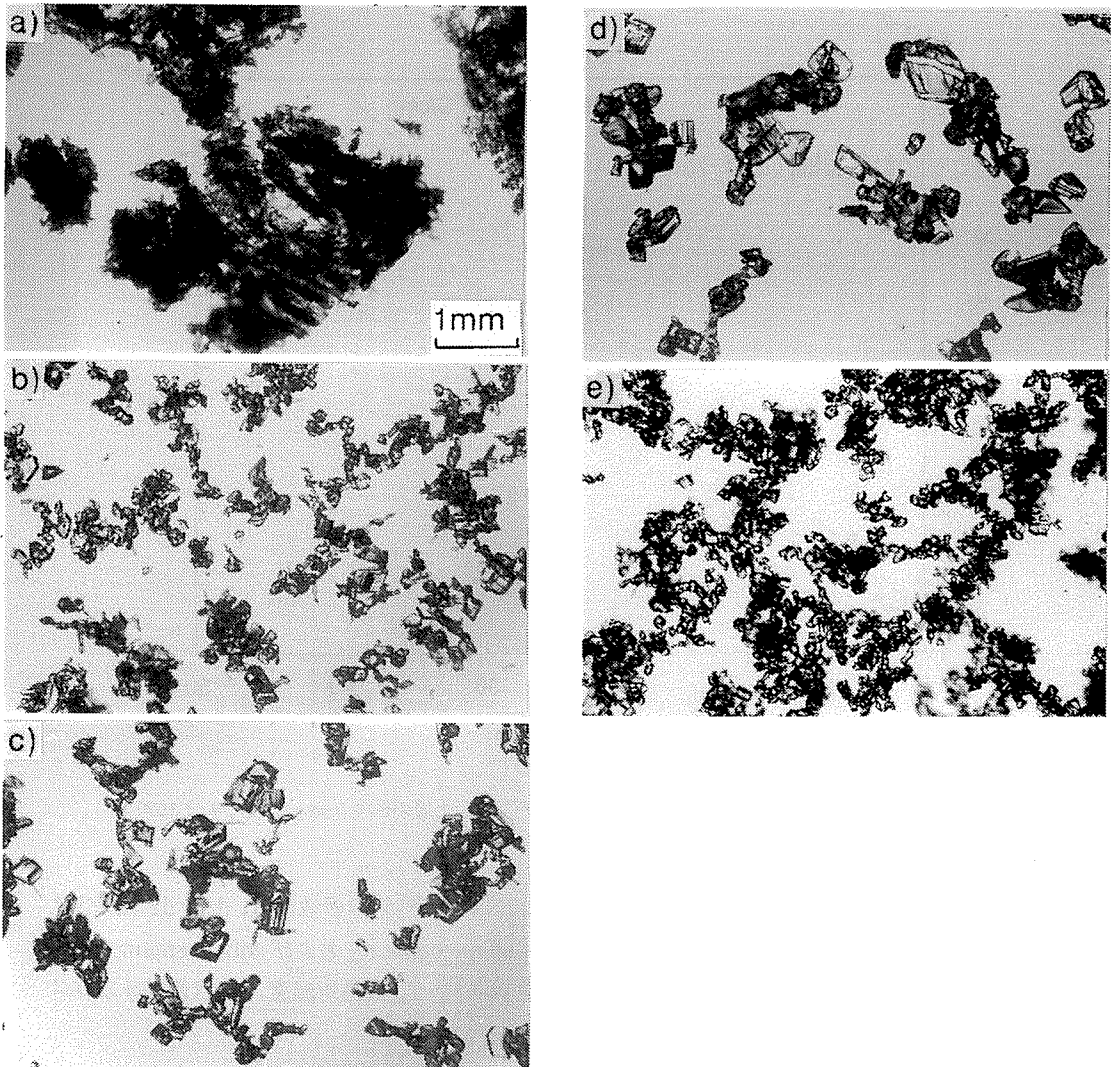
実験時間は24-48時間で、その間3-4回のサンプリングを行って顕微鏡下で変態の過程を観察した。同時にサンプルの接写を行い、その顕微鏡写真をもとに前報<sup>2)</sup>と同様の方法で平均粒径( $\bar{d}$ )を解析した。

### III. 実験結果

温度勾配  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  での実験の結果を第2図に示す。第2図(a)は、氷削り機で削ったばかりの実験前のサンプルの顕微鏡写真である。たくさんの細かな氷粒子が集まって、薄い板状の雪を形成している。第2図(b)は、実験開始16時間後の1cm深試料の顕微鏡写真である。角張った小さなこしもざらめ雪の結晶が多くみられる( $\bar{d}=0.20\text{ mm}$ )。24時間後(第2図(c))の1cm深試料は、より大きな( $\bar{d}=0.26\text{ mm}$ )、角張った形をしたこしもざらめ雪としもざらめ雪からなっている。48時間後には、さらに大きさを増した( $\bar{d}=0.39\text{ mm}$ )散晶状のしもざらめ雪が成長している。第2図(e)は、実験前の雪を $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ の等温に保って48時間経過した試料の顕微鏡写真である。等温下におかれていた試料も、焼結によりその大きさを増してはいるが( $\bar{d}=0.13\text{ mm}$ )、温度勾配の与えられた試料ほどの急速成長はみられない。また、温度勾配を与えられた試料に比べてまろみを帯びた形のこしまり雪が多いのが特徴的である。

さらに温度勾配を変えて、上と同様の実験を行った。いずれの実験においても、24時間前後からしもざらめ雪が見られ、その後さらに成長する過程が観察された。第3図に、それぞれの実験における1cm深試料の平均粒径の時間変化を示す。どの温度勾配の実験でも、平均粒径は温度勾配下におかれている時間とともに増加している。また、温度勾配とともにその傾きは急になり、成長速度が増加している。

ここで、前報<sup>2)</sup>で報告した1月の観測例と今回の実験とを比較してみることにする。1月24-25日夜間の観測では、表面温度が平均 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、表層における積雪密度は $0.07\text{ g}/\text{cm}^3$ 、温度勾配は平均して約 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であり、15:50-23:00-7:00の間に平均粒径は $0.20-0.24-0.29\text{ mm}$ と変化した。第3図の\*はこの粒径の変化を表わしたものである。多少の違いはあるものの、実験値は観測値をよく再現している。ただしここでは、平均粒径が等しく変態のステージが同等であることから、観測時刻15:50は実験開始16時間後に対応していると考えた。



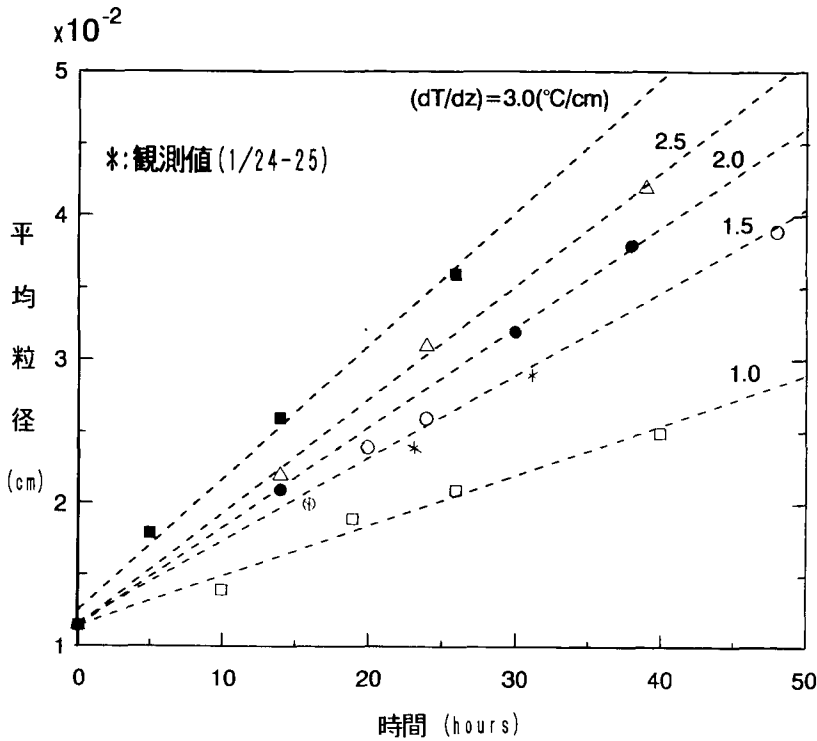
第2図 表面下1cmの試料の顕微鏡写真

- (a) 実験開始直前の試料，細かな氷粒子からなる薄い板
- (b) 16時間後，こしもざらめ雪 ( $\bar{d}=0.20$  mm)
- (c) 24時間後，こしもざらめ雪としもざらめ雪 ( $\bar{d}=0.26$  mm)
- (d) 48時間後，しもざらめ雪 ( $\bar{d}=0.39$  mm)
- (e) 等温下48時間後，こしまり雪 ( $\bar{d}=0.13$  mm)

#### IV. 考察—実験値と理論値との比較—

Colbeck<sup>3,4)</sup> は，比較的大きな温度勾配下におかれた積雪中においては，水蒸気の拡散過程が結晶成長の律速過程であると考え，成長速度を次の式で表わした。

$$\dot{a}_{\text{tiny}} = D \left( \frac{dT_a}{dz} \right) \left( \frac{C}{a} \right) \left( \frac{g}{a} \right) \left( \frac{d\rho_v}{dT_a} \right) / \rho_i \quad (1)$$



第 3 図 平均粒径( $\bar{d}$ )の時間変化

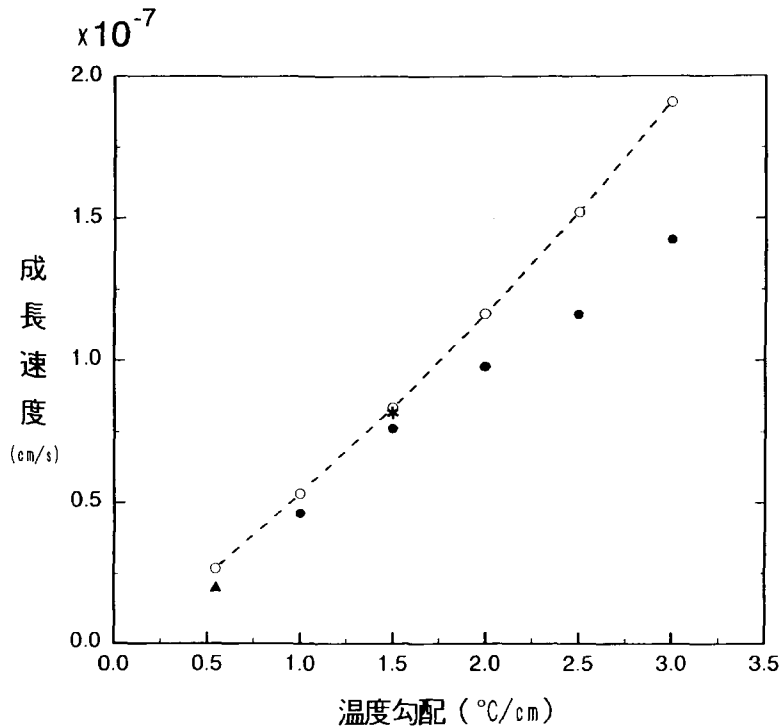
パラメーターは温度勾配( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ) (表面温度 $-18^{\circ}\text{C}$ , 上層の密度 $0.08\text{ g}/\text{cm}^3$ ), \* は 1990 年 1 月 24-25 日の観測値

ここで、 $\dot{a}_{thy}$  は結晶半径の成長速度、 $D$  は空気中における水蒸気の拡散係数、 $dT_a/dz$  は積雪の温度勾配、 $a$  は雪粒子の半径、 $C$  および  $g$  はそれぞれ shape capacity および enhancement factor と呼ばれ、雪粒子の大きさとその配列により決定される<sup>5)</sup>。  $T_a$  は絶対温度、 $\rho_v$  は飽和水蒸気密度、 $\rho_i$  は氷の密度 ( $0.92\text{ g}/\text{cm}^3$ ) である。

(1) 式を使って理論的に求められた成長速度 ( $\dot{a}_{thy}$ ) と、今回の実験から求められた成長速度 ( $\dot{a}_{exp}$ ) を比較してみる。ただし、 $\dot{a}_{exp}$  は、

$$\dot{a}_{exp} = \frac{d(\bar{d}/2)}{dt} \quad (2)$$

と定義され、平均粒径  $\bar{d}$  の時間変化を直線近似した傾きの 1/2 である。ここで  $t$  は実験開始後の時間である。第 4 図に、理論的に求められた成長速度 ( $\dot{a}_{thy}$ ) と実験から求められた成長速度 ( $\dot{a}_{exp}$ ) を示す。今回の実験領域において成長速度のオーダーは  $10^{-8} \sim 10^{-7} (\text{cm}/\text{s})$  と両者に良い一致がみられるが、その値を比較すると  $\dot{a}_{thy}$  は  $\dot{a}_{exp}$  に対し 10-35% 大きく見積もっている。しかし、実際には積雪中で対流が起きていることも考えられるので<sup>6)</sup>、拡散のみによる水蒸気輸送を考えた (1) 式は、成長速度をむしろ小さく見積もるはずである。この矛盾の最大の原因は、一方で成長している結晶が、また一方では蒸発していることを (1) 式は考慮していない点にある。このた



第4図 実験により得られた成長速度 $\dot{a}_{exp}$ (●)と理論式から求められた成長速度 $\dot{a}_{thy}$ (○)との比較。\*は1990年1月の観測値から得られた成長速度( $\dot{a}_{jan}$ )、▲はMarbouty(1991)の実験値

め、(1)式により求められた成長速度は、実際の成長量から求めた成長速度より大きく見積もってしまう。そこで、深さ1 cmから表面への水蒸気輸送量を計算し、これを差し引いて成長速度を求めると、今度は60-80%小さく見積もってしまう。また、積雪内の粒子配列についても未解決の問題が多い。したがって、(1)式の適応はオーダーに関する議論に留めておくのが妥当であると考察される。

また、実験上の問題点も指摘される。実験中、試料上方のアルミプレートの下に空間がひろがりサンプルの昇華蒸発を促進した。その結果、サンプル内での成長速度が小さく現れた可能性がある。さらに、温度管理精度の問題、粒度解析の誤差も無視できない。今後、より広い温度・密度領域における、より精度の高い実験が期待される。

## V. ま と め

表面温度 $-18^{\circ}\text{C}$ 、密度 $0.08\text{ g/cm}^3$ の雪サンプルについて、 $1.0\sim 3.0^{\circ}\text{C/cm}$ の温度勾配を与え、積雪中におけるしもぎらめ雪の成長速度を実験的に求めた。実験時間の経過とともに雪粒子の平均粒径は増加し、しもぎらめ雪の顕著な成長が観察された。また、粒径の増加率は与えられた温度勾配の増加とともに大きくなった。成長速度を(2)式のように定義するとそれは $10^{-8}\sim 10^{-7}(\text{cm/s})$ のオーダーの値をとった。実験から得られた成長速度は、実験と同等の温度およ

び密度の積雪表層で観測された成長速度をよく再現した。

次に, Colbeck<sup>4)</sup> の理論式から得られる成長速度と実験により求められた成長速度を比較した。両者のオーダーは一致したが、その大小関係に矛盾が生じた。これは、下方で成長している結晶の上方では昇華蒸発が起こっていることを(1)式は考慮していないこと、および、積雪中における粒子配列の不明確さによってもたらされた問題であると考察される。

今後、様々な温度と密度の領域で、精度よい実験を行なうことにより、理論の適応範囲を明確にし、より現実に即した成長過程および成長速度を明らかにできるものと考えられる。

本研究に使用した費用は、文部省雪崩事業費から支出された。

## 文 献

- 1) Marbouty, D. 1981 An experimental study of temperature-gradient metamorphism. *J. Glaciol.*, Vol. 26, No. 94, 303-312.
- 2) 福沢卓也・秋田谷英次 1991 しもざらめ雪層の急速形成過程の観測. 低温科学, 物理篇, 50,
- 3) Colbeck, S. C. 1983a Ice crystal morphology and growth rates at low supersaturations and high temperatures. *J. Appl. Phys.*, 54(5), 2677-2682.
- 4) Colbeck, S. C. 1983b Theory of metamorphism of dry snow. *J. Geophys. Res.*, 88(C9), 5475-5482.
- 5) American Institute of Physics. 1972 American Institute of Physics Handbook. Section 5, MacGraw Hill, New York.
- 6) Sturm, M. and J. B. Johnson 1991 Natural Convection in Subarctic Snow Cover. *J. Geophys. Res.*, 96(B7), 11657-11671.

## Summary

A series of experiments was performed varying temperature gradients, at a constant surface temperature and density profile, to illuminate the relationship between growth rates and temperature gradients of large magnitude, using the device shown in Fig. 1. The surface temperature was maintained at  $-18^{\circ}\text{C}$ . The snow stratigraphy was such that the layer of 3 cm thick, low density snow overlaid the layer of high density snow, with densities of 0.08 and 0.30 g/cm<sup>3</sup>, respectively. The temperature gradient in the upper layer was set from 1.0 to 3.0  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ .

The results of this series of experiments are shown in Figs. 2 and 3. The average size in each experiment increases in a time progression. The larger the temperature gradient is, the larger the rate of crystal growth in the upper layer can be observed. The experimental result for 1.5  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  is consistent with observed one.

The calculated growth rate using a theoretical model and the measured growth rate of average crystal size versus temperature gradients are shown in Fig. 4. Though the model does not take the convection in the snow cover into account, theoretical values are over-estimated by a maximum of 35%. This over-estimation may be attributable to that the model does not take sublimation form growing crystals into account and also because the stereography of snow crystals is not well understood.