



Title	大きな温度勾配の下でのしもざらめ雪成長実験（Ⅱ）
Author(s)	福沢, 卓也; FUKUZAWA, Takuya; 秋田谷, 英次 他
Citation	低温科学. 物理篇, 51, 23-30
Issue Date	1993-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18610
Type	departmental bulletin paper
File Information	51_p23-30.pdf



大きな温度勾配の下でのしもぎらめ雪成長実験(II)*

福沢 卓也・秋田谷英次・松本 慎一

(北海道低温科学研究所)

(平成4年11月受理)

Abstract : A series of experiments were carried out to understand the relationship between growth rates and temperature gradients of large magnitude, which appear in the surface layer of snow cover on nights with clear skies. A snow sample, whose density of upper-layer was 80 to 100 kg/m³, was set into the device.

Each temperature at the bottom and surface of the snow sample was maintained at a set a temperature within 0.2 °C. During the experiment snow samples were taken 5 to 7 times from the level with a temperature of -6°C, and microscopic photographs of them, scattered at random on the grass, were taken simultaneously. These photos were analyzed to have average size of snow crystals using an image analyzer.

The average size increased with time and the ratio of depth hoar crystals of skeleton-type also increased with time. The average size in each experiment increased linearly with time ($r^2 > 0.97$). The larger the temperature gradient was, the larger the growth rate of the average size was. Compared with the results of experiments at a temperature of -16°C, growth rates at -6°C were about 20% larger. This tendency could be seen in Marbouty's results. Although it can be considered this tendency is largely due to temperature dependency of vapor diffusivity in air, quantitative discussion is difficult because the average size used in this study is the size of the projected area. To derive the mass growth rate from the average size in this study experiments in direct measurement of crystal mass are necessary.

要旨：積雪の表層部で起こるしもぎらめ雪の急速な成長が温度や温度勾配にどのように影響されるかを明らかにするために、大きな温度勾配下におけるしもぎらめ雪の成長実験を行った。温度-6°C、密度80~100 kg/m³の雪試料について、100~300°C/m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。平均粒径は時間とともに直線的に増加し、しもぎらめ雪の顕著な成長が観察された。また、その成長速度はこれまでに報告されていた上限値をとることなく、与えられた温度勾配の増加とともに大きくなった。今回の実験によって得られた成長速度は-16°Cにおける同様の実験で得られた成長速度に比べ約20%大きな値をとった。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第3624号

key word : depth hoar, growth rate, metamorphism, temperature gradient.

キーワード：しもざらめ雪，成長速度，変態，温度勾配

I. 結 言

乾いた積雪内の温度を測定すると地面との境界では 0°C 近傍を示し、積雪表面に近づくにつれて雪温は低くなる。しかし、よく晴れた日には、積雪表面から数 cm の深さのところで日射の吸収による内部昇温¹⁾ (ときには内部融解²⁾) が見られ、さらに雪面に近接すると再び急激に低下する温度プロファイルとなる。すなわち、積雪のごく表層において大きな温度差が現れる温度分布となる。

地面に近い積雪底部においては $10\sim 30\text{ K/m}$ 程度の温度勾配が冬期間の長期にわたって持続するのに対して、積雪表層では条件が揃えば $100\sim 300\text{ K/m}$ もの大きい温度勾配が数日間現れることがある³⁾。これらの温度勾配に起因する水蒸気の密度勾配が駆動力となって、積雪内で氷結晶が新たに成長する。こうして成長した結晶はしもざらめ雪と分類され、古くから主に雪崩の研究分野で研究対象とされてきた。しかしながら、積雪表層に現れる大きな温度勾配のもとで成長するしもざらめ雪に着目した研究は少なく、表層雪崩の発生機構を理解するうえで近年研究が急がれている。

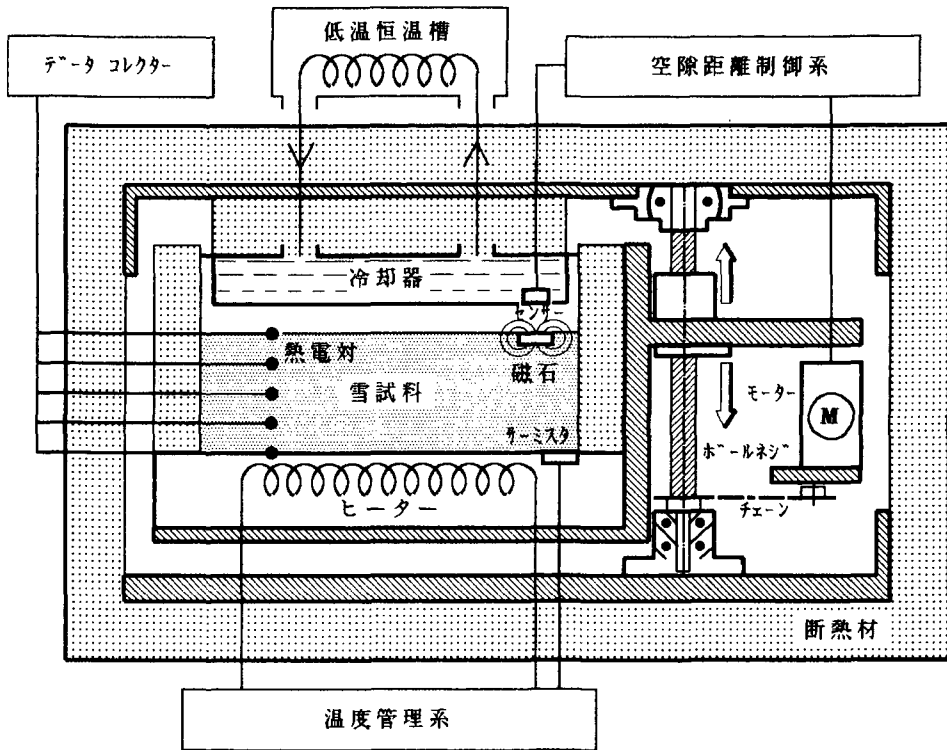
本研究の目的は、低密度の積雪を大きな温度勾配の下におき、積雪内部で成長するしもざらめ雪の成長速度を得ることである。今回は、温度 -6°C 、密度 800 kg/m^3 の積雪について、温度勾配を $100\sim 300\text{ K/m}$ の範囲で変化させ成長速度を求めた。また、前報⁴⁾で求めた -16°C における成長速度および過去に行われた実験結果との比較を行う。

II. 実験方法

第1図に低温室内で使用した実験装置を示す。この装置は、前報⁴⁾で指摘された温度管理精度の問題点を解決することを目的に開発されたもので、リニアガイドに支持された雪試料台がボールネジに沿って昇降する構造となっている。

実験に用いた雪試料は、密度(ρ) $300\sim 340\text{ kg/m}^3$ の下層の上に厚さ数 cm で $\rho=80\sim 100\text{ kg/m}^3$ の上層がのる二層構造とした。低密度の上層は、電動氷削り機で市販氷を削って作られた。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 $\rho=80\sim 340\text{ kg/m}^3$ の範囲で調節することができる。

上で作成された雪試料を実験装置に入れ、次のようにして試料の上面と下面に温度差を与えた。側方を断熱材で囲った雪試料(幅 40 cm, 奥行 40 cm, 高さ最大 10 cm)を温度制御されたヒーター上にセットし、モーターにより冷却器に 0.5 mm/s の速度でゆっくりと近付ける。冷却器の中を流れる液体の温度は、低温恒温槽を用いて制御された。また、実験装置には冷却器と



第1図 実験装置の模式図

上面下面の温度制御系に空隙距離制御系を加え温度精度の向上を図った

雪試料上面との距離が設定値 (1~5 mm) になると磁気センサーが作動しモーターを停止させ空隙距離を一定に保つ制御系が組み込まれており、この空隙距離制御系により雪試料の表面位置が沈降しても表面は一定温度に維持された。これらの制御系によって雪試料の上面と下面の温度精度は 0.2℃ となり、とくに上面に関しては精度の著しい向上が見られた。

このようにして、二層構造の雪サンプルを一定の温度勾配下におき、サンプル内でもざらめ雪を成長させた。サンプリングする深さでの温度が -6℃ になるよう上下面の温度を調節し、100~300 K/m の間の一定の温度勾配下で成長実験を行った。

実験時間はおよそ 100 時間で、その間 1 cm の深さから 5~7 回のサンプリングを行って顕微鏡下で変態過程を観察した。ガラスの上にランダムにほぐされたサンプルの接写を行い、その顕微鏡写真をもとに画像解析機を用いて投影粒子の円相当径(d)を平均粒径として解析した。

III. 実験結果

各々の実験における粒径の時間変化を第1表に示す。ここでは、温度勾配 157 K/m の実験結果を例に構成雪粒子の変態の過程を詳しくみてゆくことにする。第2図はある時刻にサンプリングされた 1 cm 深試料の顕微鏡写真 (ばら写し) である。第2図(a)は氷削り機で削った直後

第1表

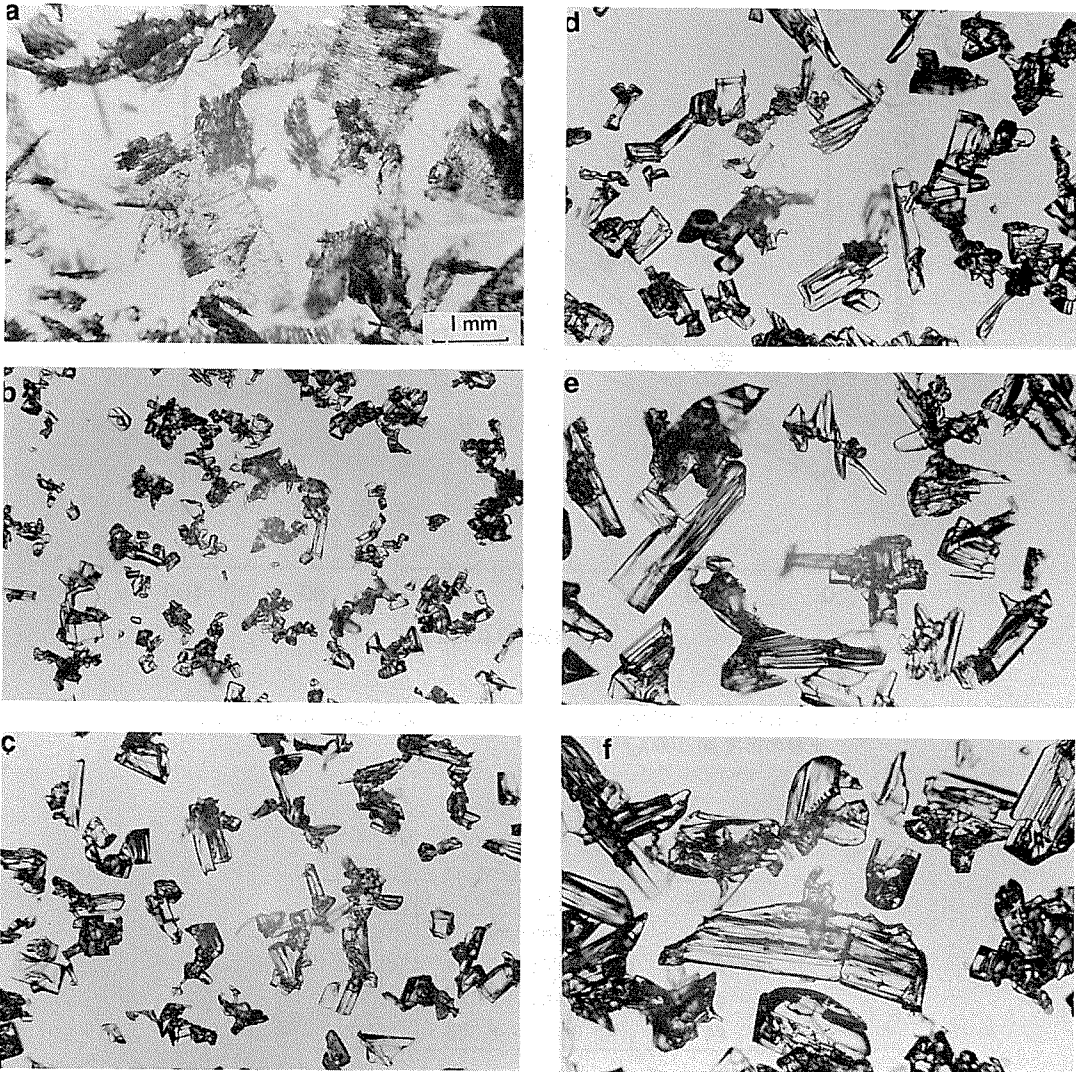
No.	実験環境			画像解析結果			
	温度 (°C)	温度勾配 (°C/cm)	経過時間 (hour)	粒子数 (個)	平均粒径 (mm)	標準偏差 (mm)	統計誤差 (mm)
#1	-6.09	1.17	18	231	0.187	0.064	0.0042
			24	273	0.247	0.105	0.0064
			48	149	0.389	0.169	0.0138
			72	152	0.515	0.228	0.0185
			98	123	0.558	0.308	0.0278
#2	-5.87	1.57	12	271	0.199	0.067	0.0041
			24	254	0.295	0.120	0.0075
			36	176	0.348	0.160	0.0121
			46	176	0.430	0.160	0.0121
			72	124	0.600	0.236	0.0212
			84	126	0.661	0.229	0.0204
			98	118	0.779	0.295	0.0272
#3	-6.16	1.78	12	286	0.203	0.079	0.0047
			18	306	0.304	0.114	0.0065
			48	170	0.583	0.304	0.0233
			72	115	0.746	0.389	0.0363
			84	124	0.843	0.476	0.0427
#4	-6.00	2.85	16	242	0.329	0.121	0.0078
			35	189	0.477	0.207	0.0151
			46	146	0.632	0.268	0.0222
			69	122	0.906	0.375	0.0340
			80	102	1.051	0.378	0.0374

の低密度層（上層）である。低密度層は、薄い板状の雪から成っていることがわかる。第2図(b)は、実験開始12時間後の試料である。角張った形をしたファセット状のこしもざらめ雪の結晶が多くみられる($d=0.199$ mm)。24時間後(第2図(c))には、より大きな($d=0.295$ mm), こしもざらめ雪とコップ型でごつごつした表面を持つ骸晶状のしもざらめ雪からなっている。46時間後($d=0.430$ mm), 72時間後($d=0.600$ mm)と時間の経過とともに結晶は成長し骸晶状のしもざらめ雪の割合が多くなっている(第2図(d),(e))。98時間後、平均粒径は0.755 mmとなりほとんどの結晶が骸晶状のしもざらめ雪となっている(第2図(f))。

この間の粒径の変化は、第3図に白ぬき四角(□)のマーカで示されている。第2図で示された以外の経過時刻(36および84時間後)における結果も第3図には示されている。図中の直線はこれらのデータに対し最小2乗法によって求められた回帰直線である。両者に良い相関($r^2=0.998$)が見られることから粒径は時間とともに直線的に増加すると考えると、その成長速度は回帰直線の傾きで与えられ、この実験の場合 1.807×10^{-9} m/s (=0.156 mm/day)となる。

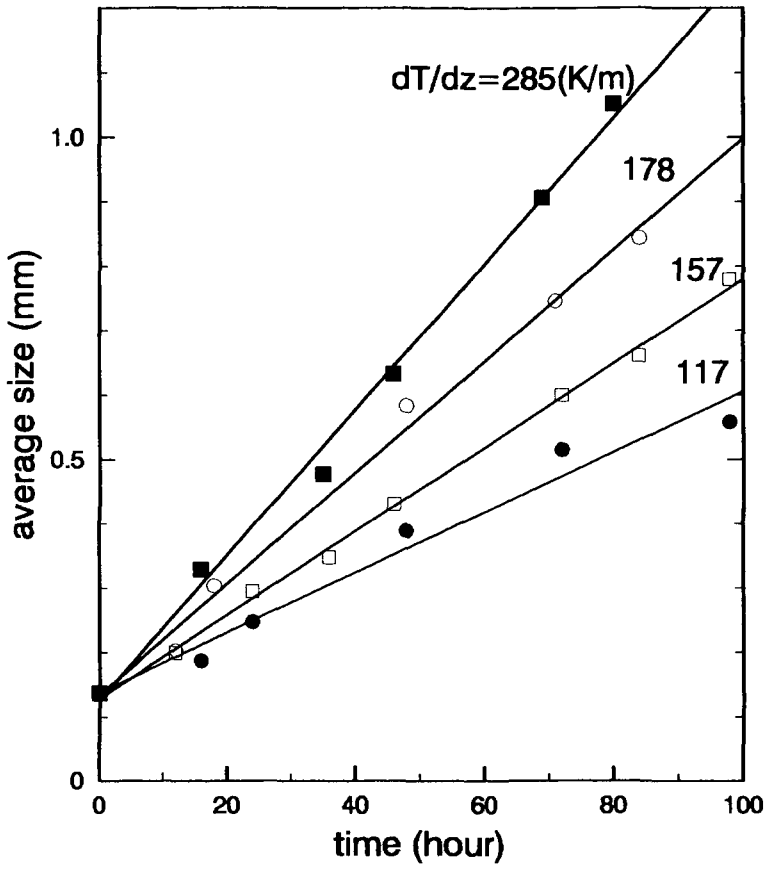
さらに温度勾配を変えて、上と同様の実験を行った。いずれの実験においても、10数時間後の観察ではすでに骸晶状のしもざらめ雪が見られ、その後さらに成長する過程が観察された。

第3図には、それぞれの異なる温度勾配における1 cm 深試料の平均粒径の時間変化が示されている。いずれの実験においても平均粒径は時間とともにほぼ直線的に増加している($r^2 > 0.97$)。各々の回帰式およびその傾きから求められる成長速度をそれぞれ第2表および第4図(■)に示す。図中でハッチした部分は、Marbouty(1980)⁵⁾の実験領域を示している。彼の実験研究で



第2図 試料の顕微鏡写真(-6°C)

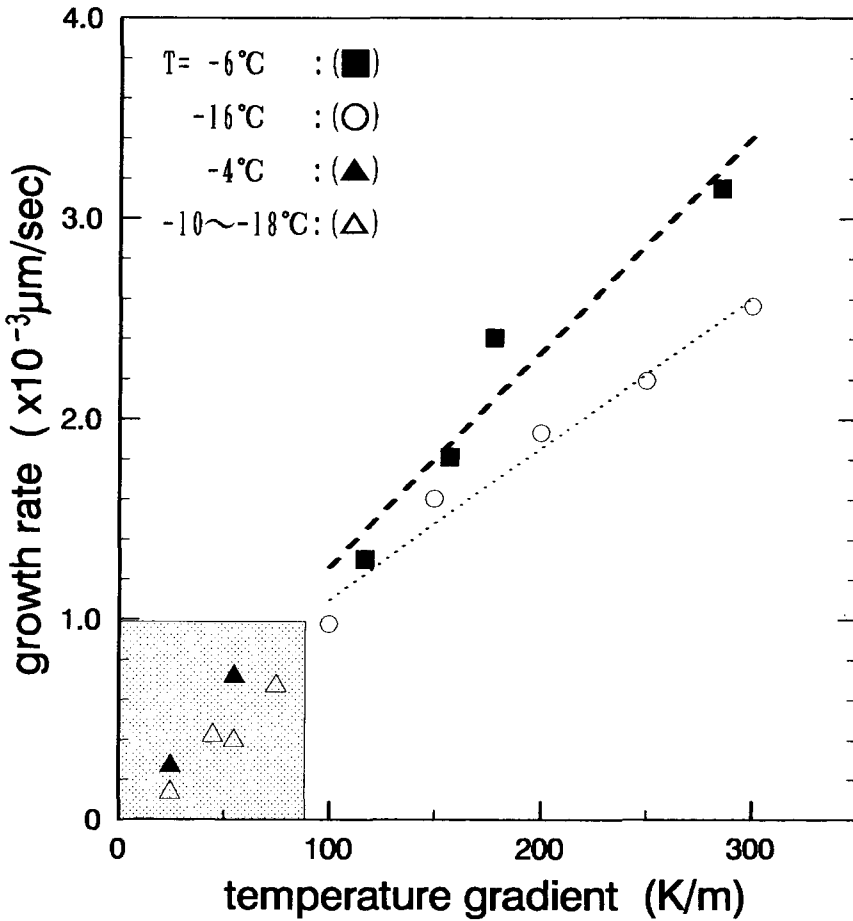
- (a) 実験開始直前の試料, 細かな氷粒子からなる薄い板
- (b) 12 時間後, $d=0.199$ mm
- (c) 24 時間後, $d=0.295$ mm
- (d) 46 時間後, $d=0.430$ mm
- (e) 72 時間後, $d=0.600$ mm
- (f) 98 時間後, $d=0.779$ mm



第3図 平均粒径(d)の時間変化。パラメーターは温度勾配(K/m) (温度 -6°C , 上層の密度 $80\text{-}100 \text{ kg/m}^3$)

第2表

実験No.	回帰式	r^2
#1	$y = 0.00468x + 0.138$	0.971
#2	$y = 0.00651x + 0.129$	0.998
#3	$y = 0.00864x + 0.134$	0.993
#4	$y = 0.01130x + 0.125$	0.995



第4図 ■：本研究により得られた成長速度，○： $T = -16^\circ\text{C}$ ， $\rho = 80 \sim 100 \text{ kg}/\text{m}^3$ における成長実験の結果(福沢・秋田谷, 1991)，▲および△： $T = -4^\circ\text{C}$ ， $\rho = 180 \sim 200 \text{ kg}/\text{m}^3$ および $T = -10 \sim -18^\circ\text{C}$ ， $\rho = 180 \sim 290 \text{ kg}/\text{m}^3$ における実験結果(Marbouty, 1980)．ハッチ部分はこれまでに成長実験が行われてきた領域。

は 70 K/m の温度勾配で成長速度は上限値をとることが報告されているが、本研究では 100 K/m 以上でも温度勾配の増加とともに回帰式の傾きは急になり成長速度が増加することが示された。

粒子が大きいきの Marbouty の粒径解析は標本数が極端に少ないため、大きな統計誤差を含んでいると考えられる。

IV. 考 察

第4図の中で白丸(○)は温度(T) -16°C ，密度(ρ) $80 \sim 100 \text{ kg}/\text{m}^3$ における成長実験の結

果(福沢・秋田谷, 1991), 黒三角(▲)と白三角(△)は, それぞれ $T = -4^{\circ}\text{C}$, $\rho = 180 \sim 200 \text{ kg/m}^3$ および $T = -10 \sim -18^{\circ}\text{C}$, $\rho = 180 \sim 290 \text{ Kg/m}^3$ における実験結果(Marbouty, 1980)を示している。今回の -6°C における成長速度(■)は, -16°C におけるそれ(○)に比べ系統的に20%程度大きくなっている。温度が高いほど成長速度が大きい傾向は▲と△で示したMarboutyの結果と共通している。これには水蒸気圧の温度依存性が大きく影響していると考えられる。しかし, ここで扱っている成長速度は投影粒子の円相当径についてのものなので, その影響の量的な議論は難しい。今後は, ここで得られた平均粒径と実際の粒子の質量との関係を明らかにし水蒸気の輸送量を定量化する必要がある。

V. 結 論

温度 -6°C , 密度 $80 \sim 100 \text{ kg/m}^3$ の雪試料について, $100 \sim 300 \text{ K/m}$ の温度勾配を与え, 積雪中におけるしもざらめ雪の成長速度を実験的に求めた。平均粒径は時間とともにほぼ直線的に増加した。Marboutyは 70 K/m 以上の温度勾配では成長速度はコンスタントであると考えたが, 本実験ではこれに反して成長速度は与えられた温度勾配の増加とともに大きくなった。今回の実験によって得られた成長速度は -16°C における同様の実験で得られた成長速度に比べ約20%大きな値をとった。

本研究で使用した実験装置の空隙距離制御系は低温科学研究所技術部の大井正行技官によって製作された。また, 保温箱は石井弘道技官によって作成された。ここに記し, 両氏には心から感謝いたします。なお, 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) 吉田順五 1960 日射による積雪の内部融解. 低温科学, 物理篇, **19**, 97-110.
- 2) 深見浩司・小島賢治 1980 積雪の内部昇温. 低温科学, 物理篇, **39**, 99-119.
- 3) 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**, 1-7.
- 4) 福沢卓也・秋田谷英次 1991 大きな温度勾配の下でのしもざらめ雪成長実験. 低温科学, 物理篇, **50**, 9-14.
- 5) Marbouty, D. 1980 An experimental study of temperature-gradient metamorphism. *J. Glaciol.*, **26**, 303-312.