

## 積雪の寒冷変態と硬度

和 泉 薫\*

Metamorphism below the freezing point and hardness of snow pack

by

Kaoru IZUMI

融解過程の関与しない寒冷気候下での積雪の変態は、寒冷変態とも呼ばれている。その一つが新雪からしまり雪へと変態するしまり化過程で、突起の多い降雪結晶が丸みを帯びた氷の粒に変化し、粒同志の結合も形成され、密度は増加し、積雪は安定化する方向に向かう。他方、積雪中にかなりの温度勾配が存在する場合には、それに応じて水蒸気の移動が盛んになり、積雪内に新たに霜の結晶が形成され、積雪がしもざらめ雪に変態するしもざらめ化過程が起こる。この積雪のしもざらめ化は、積雪の力学的強度を低下させ斜面積雪を不安定化する原因にもなり、このため寒冷気候下でのなだれ発生の原因の一つにあげられている。北海道のような寡雪寒冷気候下では積雪のしもざらめ化はよく見うけられるが、本州においても高山地帯には気候条件に応じてその形成が十分に考えられることから、山岳道路の冬期開通等、人間活動としもざらめ雪との関連が具現化された場合、問題視されよう。

しもざらめ化過程によって積雪は組織を変え、それにより力学的性質も変化するが、しもざらめ雪にまで十分発達する前段階であるこしもざらめ雪の段階でも、力学的に非常に脆くなる場合がある。そこで、しもざらめ雪ばかりでなくこしもざらめ雪及びそれら2雪質の混った雪をも含めて、雪の物理的性質である木下式硬度 $R(kg/cm^2)$ と密度 $G(g/cm^3)$ の関係を調べてみた。資料は、筆者が北海道天塩郡幌延町字間寒別にある北大低温科学研究所の雪崩観測実験室付近で行った測定及び札幌、間寒別、大雪山における積雪観測資料(小島・他, 1969・1970; 遠藤・他, 1972・1974・1975・1976・1977・1978・1979; 藤岡・他, 1974・1975・1976・1977・1979; 山田・他, 1974 C)を使用した。これらをまとめたものが図-1で、×はこしもざらめ雪を、○はしもざらめ雪を、⊗はそれら2雪質の混った雪を、そして曲線はしまり雪に関する木下の式(木下, 1960)を示している。自然状態における全体的な比較の意味から、木下の式と同様、基準温度への補正(対馬, 1972)は行っていない。なお、この図中の測定値の温度範囲は $0 \sim -8^{\circ}C$ であった。

図-1によれば、こしもざらめ雪の中には非常に脆いものがあり、同密度のしまり雪の $1/15$ や $1/45$ といった小さい硬度に及んでいる。斜面積雪のなだれ現象を考える場合、しもざらめ雪ばかりでなく、こしもざらめ雪も考慮しなければならないことがわかる。また、全体の傾向としては、密度 $0.3 \sim 0.35 g/cm^3$ 付近を境にして、それより低密度の場合しもざらめ化過程を受けた雪はしまり雪より硬度が小さく脆いこと、またそれより高密度ではしまり雪より硬度が大きく丈夫なことがわかる。この丈夫なしもざらめ雪は、極地によく発達しHard Depth Hoarと呼ばれている。この全体的傾向は、主にしもざらめ雪について同じ

\* 新潟大学積雪地域災害研究センター

まとめを行った Aki taya (1974) の結果と類似しており、しもざらめ化を受けた雪については、こしもざらめ雪を加えても同様の結果が成り立つことがわかった。

ところで、前述のように、積雪は変態の進行に伴ってその組織が変化し、それと対応して物理的性質に変化が現われる。しもざらめ化過程においては、変態の進行に従って積雪組織に温度勾配方向（平地では鉛直方向）の縦構造が形成される。すなわち、粗大化した雪粒が鉛直方向にのびかつその方向によくつながり、組織の異方性が顕著となる。この組織の異方性は、積雪の物理的性質である木下式硬度にも当然反映されるはずである。そこで、しもざらめ化を受けた積雪を硬度測定に支障のない程度のブロックに切り出し、鉛直と水平方向の木下式硬度を測定し、その方向による違いを次式のように異方度  $r$  (和泉, 1975) で表した。

$$r = \frac{R_V - R_H}{R_V + R_H} \quad \left( \begin{array}{l} R_V ; \text{鉛直方向の木下式硬度} \\ R_H ; \text{水平方向の木下式硬度} \end{array} \right)$$

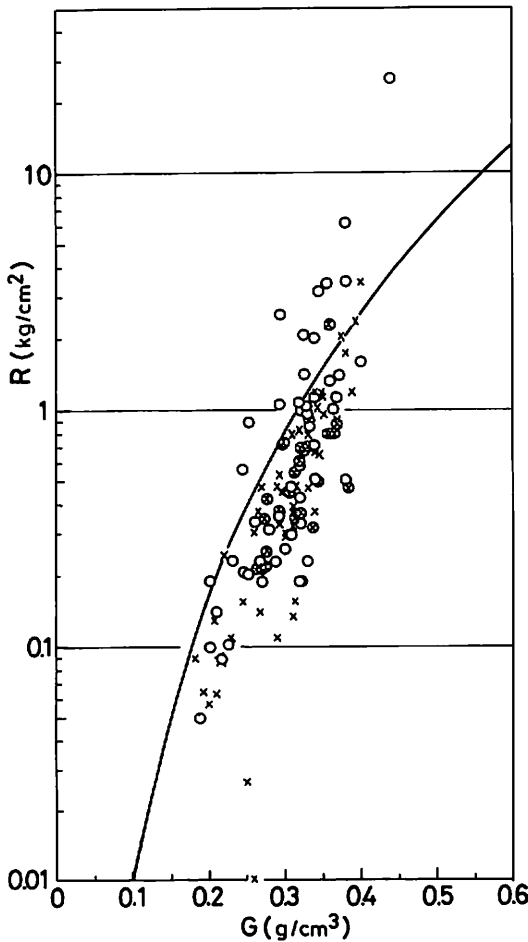


図-1 積雪の木下式硬度  $R$  と密度  $G$  の関係  
 (×): こしもざらめ雪, (○): しもざらめ雪, (⊗): 左の2雪質の混った雪  
 直線はしまり雪に関する木下の式  $R = 100G^4$  を示す。

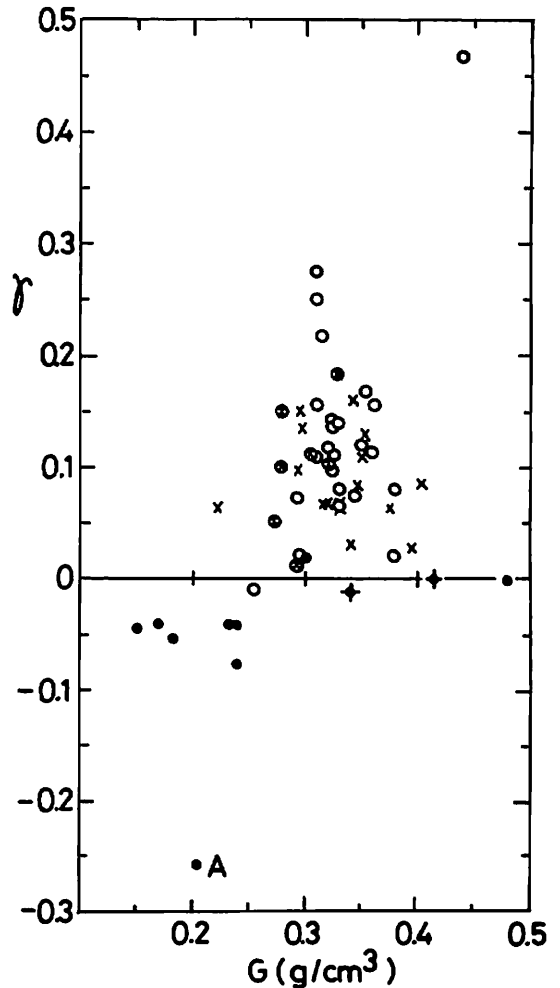


図-2 積雪の木下式硬度についての異方度  $r$  と密度  $G$  の関係  
 (×): こしもざらめ雪, (○): しもざらめ雪, (⊗): 左の2雪質の混った雪, (●): しまり雪こしまり雪, (⊕): ざらめ雪

こしもざらめ雪を×, しもざらめ雪を○, それら2雪質の混った雪を⊗で表わし, それらの $r$ と密度 $G$  ( $g/cm^3$ )の関係を示したのが図-2である。測定は主に問寒別の雪崩観測実験室付近で行ったが, 大雪山におけるしもざらめ雪の測定結果(山田・他, 1974C)も4個加えてある。測定値は対馬の式(対馬, 1972)により $-5^{\circ}C$ の値に換算した。

図-2からは, しもざらめ化を受けた雪の組織の縦構造によって生じた木下式硬度の異方性(縦構造の方向である鉛直方向の硬度が水平方向より大きい)が見てとれ, 大半の異方度 $r$ が正の値で最高0.47にも達していることがわかる。しもざらめ雪に関しては, 弾性波の伝搬速度(山田・他, 1974A)及び熱伝導率(和泉・他, 1975)という物理的性質にも, この正の異方度 $r$ が現われている。また, 図-1で述べたように, 密度 $0.3 \sim 0.35 g/cm^3$ 付近でもしもざらめ化を受けた雪としまり雪の硬度がほぼ等しくなるが, 図-2によれば, この密度付近のしもざらめ化を受けた雪の硬度の異方度にかかなり大きなものがあることがわかる。すなわち, 鉛直方向にはしまり雪と同等に丈夫でも水平方向には比較的脆いことを示し, 水平方向の強度は積雪層の層に沿った剪断破壊強度と密接に結びつくことから, しもざらめ雪層の弱層破壊と関連して, 斜面積雪を考える場合考慮しなければならない点であると思われる。

ところで, 図-2には, 木下式硬度の異方度をしまり化過程にあるこしまり雪・しまり雪(●), 及び温暖変態により形成されたざらめ雪(◐)について行った結果もあわせて示してある。これによれば, しまり雪, ざらめ雪といった等方的な積雪組織を持った雪は, 木下式硬度の異方性がほとんどないことがわかる。ところが, こしまり雪( $G = 0.15 \sim 0.25 g/cm^3$ )の異方度 $r$ は負で, 鉛直方向より水平方向の硬度が大きいことを示している。こしまり雪, しまり雪についての, この硬度の異方性, 等方性は, 熱伝導率(和泉・他, 1975)や弾性波の伝搬速度(山田・他, 1974A)にも同様に現れているし, しまり雪についての硬度の等方性は山田・他(1974B)が述べている。

こしまり雪についての負の異方度の原因は, 平面的な板状結晶(広幅六花)を持った新雪が堆積した際, たとえその結晶配置がランダムでも, しまり化過程の自重による圧密によって, 折りたたまれるように面を水平にして並んだ組織に変化したためと考えられる。もちろん最初から結晶面を水平にして堆積すれば, このような組織状態から, 水平方向の硬度が大きくなることは当然だろう。斜面積雪の観点からすれば, 安定化傾向と見えるが, こうした平面的な板状結晶が保存され面を水平にして並んだ層や, 堆積時すでに板状結晶が水平に並んでいた層は, 積雪内の弱層と考えられ, なだれのすべり面となって表層なだれを起こすことがある(秋田谷, 1976; 清水, 1978)ことに注意しなければならない。これは, しもざらめ化と同様, 変態の進行に伴って生ずる組織の異方性が斜面積雪をなだれ発生条件へ導くことの一例である。この新雪からこしまり雪への変態過程における組織変化を確かめるために次の実験を行った。

板状結晶を多く含んだ新雪(密度 $0.103 g/cm^3$ )を採取し, 新雪の木下式硬度の測定が困難であることから積雪組織に敏感な物理量である熱伝導率の異方度を測定し, その値が0, すなわち組織の異方性がないことをまず確かめた。次にこの新雪層を $90^{\circ}$ 横倒しにし,  $-10^{\circ}C$ の低温室で約1ヵ月かけて密度 $0.203 g/cm^3$ のこしまり雪の状態までしまり化させ, 木下式硬度の異方度を測定した。この時の $r$ は図-2のAに示すように $-0.26$ で, 横倒しにした状態での水平方向の硬度が大きい。すなわち, 新雪堆積時における方向とは無関係に, しまり化過程によって, その過程における水平方向に板状結晶が並んで組織の異方性が生みだされたことが明らかになった。一方, 木下式硬度とほぼ同時に測定した熱伝導率の異方度もマイナスで, 水平方向の熱伝導率が大きいという組織の異方性を現わしていた。ところがその値は $-0.03$ と少なかった。これは, 硬度のように雪粒子の配列にも影響される物理的性質と違い, 熱伝導率の場合は粒子間の水の実

質結合部分の熱伝導が大きいことから、 $-10^{\circ}\text{C}$ という低温環境での変態と低密度のために粒子間の結合の発達が悪く異方度の度合が低くでたものであろう。

このように積雪の組織状態が各物理的性質の異方度に違って現れるということは、逆に、その違いによって積雪の組織状態を明確に規定できる可能性を示している。この点は、これからの課題として追求してゆきたい。

なお、北海道大学低温科学研究所雪害科学部門の皆様、特に秋田谷英次博士からは有益な助言と多大な御協力をいただいたことに感謝いたします。この研究の費用の一部は、文部省科学研究費（自然災害特別研究）から支出された。

## 文 献

- AKITAYA, E. (1974): Studies on depth hoar, Contributions from the Institute of Low Temperature Science, No 26, 1-67.
- 秋田谷英次 (1976): 積雪内のすべり面の観察, 低温科学, 物理篇, 34, 241-244.
- 遠藤八十一・他 (1972・1974・1975・1976・1977・1978・1979): 札幌の平地積雪断面測定資料報告, 低温科学, 物理篇, 資料集, 30, 10-28, 32, 1-9, 33, 1-6, 34, 1-6, 35, 1-5, 36, 1-6, 38, 1-5.
- 藤岡敏夫・他 (1974・1975・1976・1977・1979): 雪崩観測実験室実験斜面の雪質調査報告Ⅷ~Ⅻ, 低温科学, 物理篇, 資料集, 32, 15-30, 33, 17-23, 34, 21-26, 35, 27-33, 38, 17-32.
- 和泉 薫・藤岡敏夫 (1975): 積雪の変態と熱伝導率の研究 I, 低温科学, 物理篇, 33, 91-102.
- 木下誠一 (1960): 積雪の硬度 I, 低温科学, 物理篇, 19, 119-134.
- 小島賢治・他 (1969・1970): 札幌の平地積雪断面測定資料報告, 低温科学, 物理篇, 資料集, 27, 1-4, 28, 25-36.
- 清水 弘 (1978): なだれ, 日本気象学会機関誌ノート, No 136, 63-123.
- 対馬勝年 (1972): 温度による積雪の硬度変化 II, 低温科学, 物理篇, 30, 47-52.
- 山田知充・長谷美達雄・和泉 薫・佐藤篤司 (1974 A): 積雪組織の異方性と積雪の弾性波の伝搬速度及び熱伝導率について, 低温科学, 物理篇, 32, 72-80.
- 
- (1974 B): 大雪山旭岳の森林限界より上部の積雪の観測, 低温科学, 物理篇, 32, 273-277.
- 
- (1974 C): 森林限界上部の山岳積雪観測資料, 低温科学, 物理篇, 資料集, 32, 15-30.