

しもざらめ雪の形成および雪面の昇華蒸発に伴う 安定同位体組成の変化

八久保晶弘¹・鎌田慈²・佐藤篤司³・橋本重将⁴・中尾正義⁵

(1:北見工業大学 2:産業技術総合研究所 3:防災科学技術研究所

4:名古屋大学大学院理学研究科 5:総合地球環境学研究所)

1.はじめに

積雪はそれ自身が広大な面積の氷表面を持ち、氷と水蒸気との間で莫大な量の水分子を交換し合っている。すなわち、気象学で用いられる積雪のマクロな昇華量は、ミクロな視点から見れば氷表面における莫大な昇華蒸発量と昇華凝結量との間の僅かな差に過ぎない。またその際、水素・酸素の安定同位体で構成される HD^{16}O や H_2^{18}O などの「重たい水」の存在比（それぞれ δD および $\delta^{18}\text{O}$ ）が、相変化に伴う分別によって僅かに変化する。降雪の安定同位体比は水蒸気の凝結温度や水蒸気輸送過程などに依存しているため、積雪は安定同位体比について層構造を形成しているが、雪面や積雪中での活発な昇華によってこの安定同位体比のプロファイルがどのように変化していくのか、が本研究の興味の対象である。

雪面を含む積雪表層近傍では大きな温度勾配がかかりやすく、マクロな水蒸気移動が見られるので、安定同位体比プロファイルは容易に変化する。例えば、Satow and Watanabe (1985)は氷板入りの積雪試料に温度勾配をかけた実験を行ない、氷板の有無によって酸素同位体比プロファイルがどのように変化するかを考察した。また、Sommerfeld (1991)は同様の実験から $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$ の変化を求め、積雪内の水蒸気輸送距離は少なくとも粒子サイズ以上であると結論づけた。加えて、Sommerfeld (1991)は積雪試料の上方をオープンにして雪面における昇華の影響を調べる実験も行っており、表層の δD および $\delta^{18}\text{O}$ が1ヶ月でそれぞれ50%、12%ほど増加するという結果を得ている。

一方、Hachikubo *et al.* (1997)は野外において

放射冷却した雪面への水蒸気輸送の集中について調べ、積雪表層の $\delta^{18}\text{O}$ の変動を求めた結果、雪面が昇華蒸発すると $\delta^{18}\text{O}$ が数%増加し、昇華凝結すると逆に減少する傾向が得られた。また、Hachikubo *et al.* (2000)は低温室でしもざらめ雪を人工的に作成し、 $\delta\text{D} \cdot \delta^{18}\text{O}$ プロファイルが温度勾配方向に定量的にどの程度変化するかを調べた。その結果、積雪試料の δ 値は高温側で増加・低温側で減少したこと、そして積雪内の対流の効果や動的同位体効果による安定同位体分別の昇華速度依存性の存在が示唆された。これらの成果については、八久保ほか(2000)によってさらに解析された結果が報告されている。

本研究では、以上の成果についてさらに精密な環境コントロールを行ない、安定同位体分別の温度・積雪密度依存性を明らかにすることを目的としている。すでに鎌田ほか(1999)は、精密な温度コントロールが可能でかつ大きな温度勾配をかけられる実験装置を用いて、しもざらめ雪結晶の粒度解析から求めた成長速度と温度・温度勾配・水蒸気フラックスを求めている。今回、この実験装置を改良したものを用いて以下の実験が行なわれた。

2.実験装置および実験方法

防災科学技術研究所新庄雪氷防災研究支所の低温室にて、積雪に大きな温度勾配をかけてしもざらめ雪を短時間で作成する実験 1、および積雪試料の上面を昇華蒸発させる実験 2 の2種類が行なわれた。

2.1 実験 1

実験装置の概要図を図1に示す。まず、約

-10℃の低温室内に木製の恒温箱(0.6m×0.7m×1.2m)を設置し、ヒータとファンから構成される温度調節装置によって恒温箱内の温度を-10±1℃に保った。恒温箱内に設置された実験装置本体は、Cold plate(上下に1個ずつ、外部の循環型恒温槽に接続)・断熱壁・10個のパンで構成される。パンは図のような内径0.25m×0.25m×0.02mの木枠にポリエステル製ネット(製品名:プランクトンネット)が張られたもので、水蒸気を透過させることができる。これにこしまり雪をふるい入れ、重箱状に重ねた後に断熱壁で囲んで2個のCold plateで挟んだ。なお、こしまり雪には新庄雪氷防災研究所の雪氷防災実験棟で人工的に作られた新雪を保管して作られたものを、ふるいでよくほぐして用いた。したがって、本研究では初期状態の積雪試料の安定同位体組成は同様であると仮定して解析を行なう。

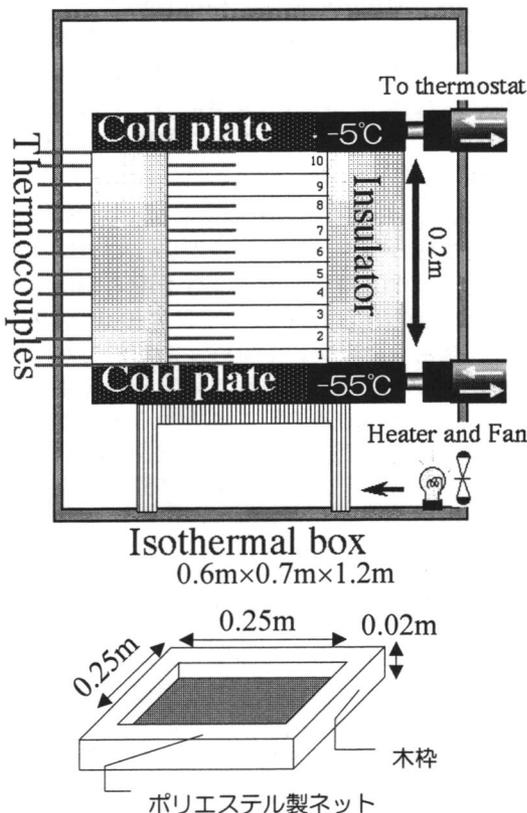


図1 実験装置の概略図(実験1)。

各パンの積雪試料の密度はふるいによって 418 ± 2 (kg m^{-3})に設定された。Cold plateの設定温度については、A:上側-5℃・下側-55℃、B:上側-55℃・下側-5℃の2種類の実験が行なわれ、温度勾配は約 2.5°Cm^{-1} だった。いずれも実験時間は88時間(4日弱)である。実験終了後、重ねたパンを注意深く切り離し、実験前後の各パンの重量を測定した。また、実験中の試料内の温度分布を確認するために、各パンの中央の温度を熱電対で測定した。安定同位体測定用の試料については、各パンの中央部で約100g分がそれぞれ採取された。これに加えて、各パンの位置における積雪粒子の成長速度をもとめるために、積雪粒子の接写写真撮影も合わせて行なわれた。なお、この積雪粒子の粒径・平均成長速度および $\delta^{18}\text{O}$ については現在解析中である。

2.2 実験2

内径が縦207mm(底部分は190mm)、横300mm(底部分は280mm)、高さ48mmのプラスチック製バットを複数用いた。これらのバットに実験1と同様のこしまり雪をふるい入れ、3種類の環境温度(-4℃、-10℃、-18℃)、風の有無、2種類の実験時間(96時間、191時間)で環境条件を変えて行なわれた。積雪密度は 447 ± 11 (kg m^{-3})に設定された。ただし、温度条件については特別な恒温システムを用いなかったため、環境温度のばらつきは比較的大きい。実験終了後は、雪面から5mm~10mmおきにスライスし、安定同位体測定用の試料を採取した。

3.実験結果および考察

3.1 実験1

10個のパンによって区切られた積雪試料各層の δD プロファイルを図2に示す。試料作成時の δD は、試料下側を冷却した実験A、試料上側を冷却した実験B共にそれぞれ $-28.5 \pm 0.4\%$ である。図2より、明らかに有意な δD プロファイルの変化が認められる。特徴的なのは、6~8cm程度の周期で「重たい」層と「軽い」層が現われている点である。この周期現象については後述する。

また、実験 B の最下層は温度が最も高い(約 -5°C) 部分であり、昇華蒸発が卓越してかなり重くなっている一方、温度が最も低い(約 -55°C) 最上層では昇華凝結が卓越して若干ではあるが軽くなっていることが分かる。この傾向は Hachikubo *et al.* (2000) および八久保ほか(2000)で報告されているが、実験 A の結果についてはこのような傾向は認められない。その理由については推測の域を出ないが、対流が起きると考えられる実験 B に対して、実験 A では水蒸気輸送量が自己拡散のみで小さくなるため、上述の傾向は誤差の範囲にとどまったと考えるのが妥当であろう。

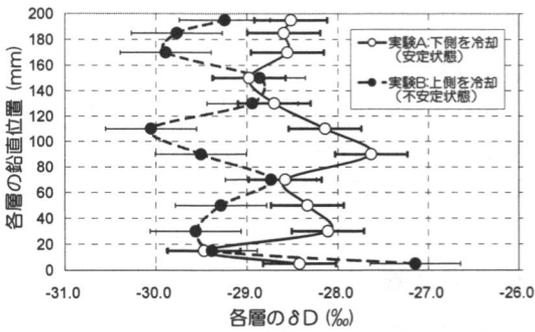


図2 実験1終了後の各層の δD プロファイル。

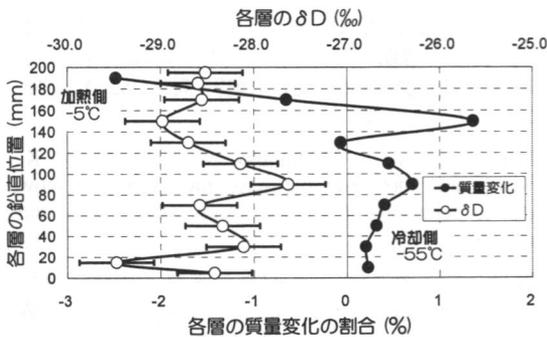


図3 実験1終了後の各層の質量変化と δD (実験A)。

次に、実験 A に関する各層の質量変化と δD プロファイルを図3に表わした。質量変化についても同様の周期模様がみられ、中間層でも明らかな重量の増減が認められる。このことは、ただ単純に高温側で昇華蒸発して重量

が軽くなり、低温側で昇華凝結して重くなるだけではないことを示している。また、重量の増加したある中間層が昇華凝結の卓越した部分であるとすれば、その層の δD は軽い水蒸気の集中によって相対的に減少すると考えられるが、図3では必ずしもそのように対応していない。

なお、実験 B の各層の質量変化については、各層間の癒着が強力で切り離しが困難だったため、今回は残念ながら信頼できるデータが求められなかった。

3.2 実験2

表1 実験2の実験条件。

試料番号	温度($^{\circ}\text{C}$)	風	実験時間(h)	昇華潜熱(W m^{-2})	雪面低下量(mm)
1	-9.5 ± 1.3	なし	96	-2.5	0.7
2	-9.5 ± 1.3	なし	191	-3.2	1.8
3	-9.6 ± 1.9	あり	96	-13.3	3.7
4	-9.6 ± 1.9	あり	191	-11.4	6.3
5	-17.6 ± 1.2	あり	96	-6.6	1.7
6	-4.0 ± 1.8	なし	96	-5.5	1.5

実験2で使用した積雪試料6つに関する実験条件などを表1にまとめた。いずれも温度変化の標準偏差は 2°C 以内であった。また、表中の風については低温室の冷凍機の送風口の前に設置したものとそうでないものとの差であり、風速の測定は行なわれていない。昇華潜熱は $3 \sim 13 \text{ W m}^{-2}$ の範囲内にあり、実験終了までの雪面低下量は最大で6mm近くに達したため、雪面のごく表層部分は完全に昇華蒸発して失われたものと考えられる。

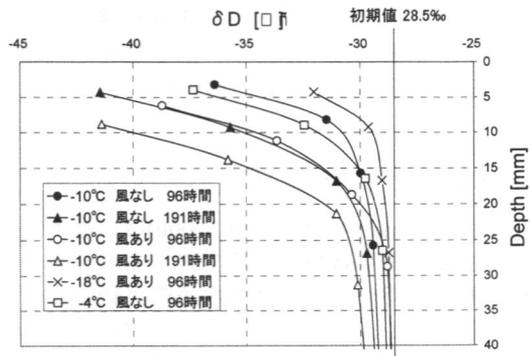


図4 実験2終了後の δD プロファイル。

図4は実験2終了後の積雪試料6つに関する δD の鉛直方向プロファイルである。ただし、図中の縦軸は初期状態の雪面からの深さを表わしている。図4から、 δD プロファイルの変化量はどの試料も深さ方向に指数関数的に減少しており、雪面から少なくとも2-3cm程度の深さまでは安定同位体プロファイルが十分変化していることが分かる。また、同じ温度条件では風のある方もしくは実験時間の長い方が δD プロファイルの変化量は大きく、より深くまで影響が見られる。実験時間が同じで風のない状態では温度の高い方が若干、 δD プロファイルの変化量が大きい。

実験2の結果で注目すべき点は、雪面から以上のような昇華蒸発があったにも関わらず、雪面近傍の δD が減少していることである。氷表面が昇華蒸発するとき、軽い水分子から選択的に飛び出していくとすれば、残された氷表面には相対的に重い水分子が多く取り残されるだろう。例えば、Hachikubo *et al.* (1997)は、野外において雪面が昇華蒸発する際に $\delta^{18}O$ が数%増加したと報告しており、一見するとこの説明は正しいように見える。

しかしながら、冒頭でも述べたように、氷表面と周囲の水蒸気の間では水分子のやりとりが活発に行なわれている。つまり、この水蒸気の安定同位体組成が不明なままでは、氷表面の安定同位体組成を記述することは本来不可能である。本実験の場合は、低温室内の水蒸気の δD が極めて小さい値であったと推定される。そして、雪面付近で莫大な量の水分子のやりとりをするうちに、重い水分子も昇華蒸発して出ていき、氷表面を構成する水分子が次第に軽い水分子に置き換わった結果、 δD が減少したと考えられる。

4.まとめと今後の展望

Sokratov and Maeno (1998, 2000)は、温度勾配をかけた積雪試料の温度分布・密度分布が波状構造を持つことを精密な室内実験によって明らかにし、これを準定常状態であると説明した。本実験ではこの積雪密度の波状分布を追試・確認したことになる。もし、試料内の質量分布がこのように不均一になるとすれ

ば、安定同位体プロファイルも同様に波状分布になると予想される。しかしながら、 δD に関して同様の周期模様が確認されたにもかかわらず、質量変化との対応は見られなかった。この理由については不明であるが、いずれにしても、実験1に関しては試料2個分しか実験が行なわれておらず、データ不足の感は否めない。さらに温度・温度勾配・積雪密度などを変化させた実験を行なう必要がある。

一方、実験2についてもさらに不明な点が多い。特に、昇華によってバルクの試料の安定同位体組成を変化させるほどの水分子の交換が固相～気相間でいかにして行なわれるのか、これは今後の重要な研究課題であろう。

5.謝辞

積雪試料の δD 測定の際には、東工大総合理工学研究科の吉田尚弘教授にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

6.参考文献

Hachikubo, A., H. Motoyama, K. Suzuki and E. Akitaya (1997) Fluctuation of $\delta^{18}O$ of surface snow with surface hoar and depth hoar formation. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Meteorology and Glaciology*, No. 11, 94-102.

八久保 晶弘・橋本 重将・中尾 正義・本山 秀明・鈴木 啓助・西村 浩一 (2000) 霜結晶による積雪表層の安定同位体分別過程, 雪氷, 62巻, 3号, 265-277.

Hachikubo, A., S. Hashimoto, M. Nakawo and K. Nishimura (2000) Isotopic mass fractionation of snow due to depth hoar formation. *Polar Meteorology and Glaciology*, 14, 1-7.

鎌田 慈・セルゲイ A.ソクラトフ・佐藤 篤司 (1999) 極低温下におけるしもざらめ雪の成長. 第15回寒地技術シンポジウム講演論文集, 7-12.

Sokratov, S.A. and N. Maeno (1998) Wavy temperature and density distributions formed in snow. *Annals of Glaciology*, Vol.26, 73-76.

Sokratov, S.A. and N. Maeno (2000) Effective water vapor diffusion coefficient of snow under a temperature gradient. *Water Resources Research*, Vol.36, No.5, 1269-1276.