

降雪遮断による酸素同位体比の変化

*山崎学・宍戸真也・石井吉之・児玉裕二(北大低温研)・橋本哲(島根大)

1. はじめに

常緑針葉樹林における樹冠遮断昇華蒸発(以下、遮断蒸発と呼ぶ)は降雪量に対し無視し得ない量であり、林内の積雪水量が一般に開地より少なくなる原因となっている。このため、降雪に対する遮断蒸発の研究は積雪地域における水資源や森林が気候に与える影響を考える上で重要である。しかし、降雪の遮断蒸発量は、森林の不均質性、地形、雪の再配分などの影響により求めることが困難であるため、様々な気象条件や森林状態及びそれらの変化に対する遮断蒸発量の研究は不十分である。

また、酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)は地球上のさまざまな水循環を調べる研究で数多く使われているが、降雪の遮断蒸発に関して $\delta^{18}\text{O}$ の変化を調べた研究は多くない。

そこで本研究では、厳冬期のある一定期間、開地と林内に降り積もった降雪量とその雪の $\delta^{18}\text{O}$ を測定し、林内降雪における $\delta^{18}\text{O}$ の特徴及び遮断蒸発量と $\delta^{18}\text{O}$ の関係を調べた。

2. 観測概要

観測は北海道北部にある母子里試験流域(図1)内の SiteA(開地と林内), SiteB(林内のみ)で行った。SiteAとSiteBはそれぞれ標高が290mと320m、植生がドイツウヒ(樹高8m)とトマツ(樹高6m)である。林内は空が直接見えない程度に密に枝葉で覆われている。2地点の林内気温(雪面上1.5mほど)を図2に示す。SiteAはSiteBに比べ朝方の冷え込みがきつくなっている。これは観測地が盆地のため、晴れた日の朝には放射冷却による気温逆転層が生じるためである。日中の気温は2地点で差はなかった。林内の平均気温

(1/23~2/26)はSiteAで -11.7°C , SiteBで -9.7°C であった。

観測方法は、2003/1/23にSiteA(開地と林内), SiteB(林内のみ)で雪面上にシートを敷いた。その後、2/26にシート上に積もった降雪をスノーサンプラーで採取すると共に降雪量を測った。

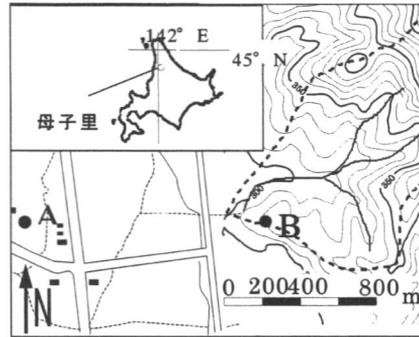


図1 母子里試験流域

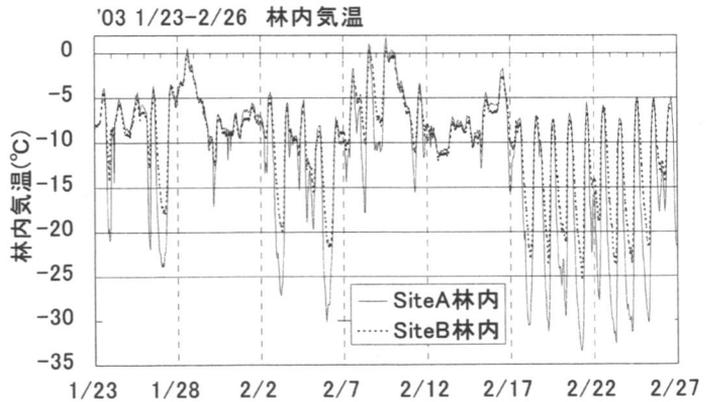


図2 SiteA, SiteBにおける林内気温

SiteA 開地ではシート上の降雪深が一定であったため、サンプルを2個採取した。SiteA 林内ではシート上を 40cm 四方の小区画(3×6=18 区画)に分け、小区画の中央で降雪量の測定とサンプリングを行った。SiteB 林内ではシート上を 50cm 四方の小区画(4×6=24 区画)に分け、同様の観測を行った。また、2/26 に SiteA において樹冠上の冠雪を採取した(樹冠上 0-4m, 10 個; 4-8m, 3 個)。

採取した雪の化学分析項目は、電気伝導度、pH、主要無機イオン濃度、酸素同位体比である。

3. シート上の降雪量を決定する諸要素

林内のシート上の降雪量は図3で示された要素で決まる。ただし、積雪表層で融雪による流出は起こらないと仮定する。この時、林内の水収支は以下の式で表される。

$$S = P - I_c - \Delta C - (E + R) \quad (1)$$

ここで、S はシート上の降雪量、P は降水量、I_c は遮断蒸発量、ΔC は冠雪量差(=C_{2/26} - C_{1/23})、E は雪面昇華蒸発量、R は積雪の再移動量である。

一方、開地での水収支式は次式であらわされる(添え字 o は開地を表す)。

$$S_o = P_o - (E_o + R_o) \quad (2)$$

上式の各項のうち、本研究で測定したのは S および S_o である。そのため、遮断蒸発量 I_c を直接評価することができない。そこで本研究では、I_c の代わりに開地と林内の降雪量差 I を用いて、δ¹⁸O との関係調べた。式(1)、(2)から、I は次式で表される。

$$I = S_o - S = I_c + P_o - P - E_o + E - R_o + R + \Delta C = I_c + N \quad (3)$$

ここで N は I と I_c の残差であり、I を用いることによる評価誤差をあらわす。

4. 観測結果と考察

SiteA における降雪量と δ¹⁸O の結果を図4に示す。また、それらの平均値を表1に示す。林内は開地に比べて降雪量が 67mm 少なく、δ¹⁸O は 1.66‰ 重かった。これは遮

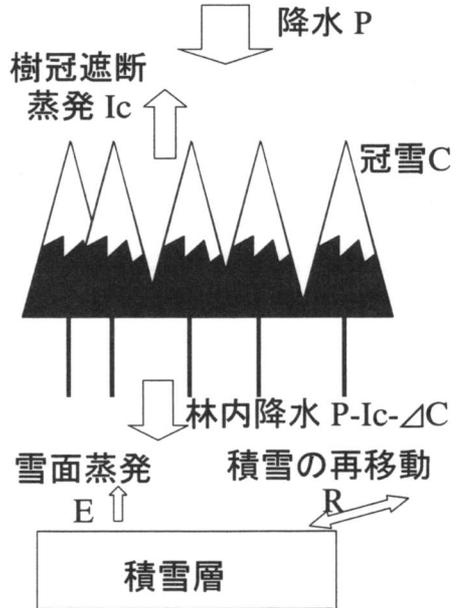


図3 林内の降雪量を決定する諸要素

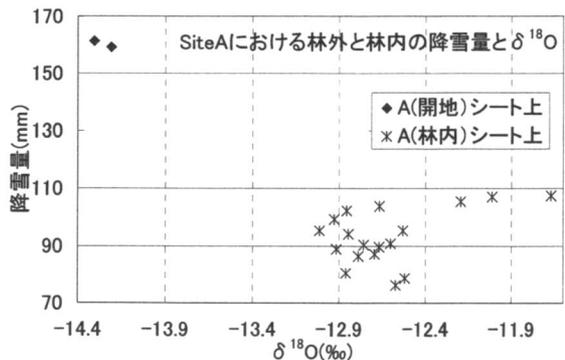


図4 SiteA における開地と林内の降雪量と δ¹⁸O

断蒸発によって $\delta^{18}\text{O}$ の軽い水蒸気が雪から除去され、相対的に残った雪の $\delta^{18}\text{O}$ が重くなるためである。林内の $\delta^{18}\text{O}$ は 15 個のサンプルが $-13.01\sim -12.52\text{‰}$ のあいだを示したのに対し、3

つのサンプルがとびぬけて重い値を示した。これら 3 つのサンプルはシート上の隣り合った区画で採取されていた。また、林内の降雪量のばらつきと $\delta^{18}\text{O}$ に相関は見られなかった。

次に SiteA のシート上の雪と 2/26 に採取した冠雪の比較を図5に示す。図の縦軸は Cl 濃度である。冠雪の $\delta^{18}\text{O}$ は他と比べて明らかに重く、Cl 濃度も非常に高かった。この結果は冠雪が樹冠上で非常に長い間滞留し

つづけたことを示唆する。これら滞留時間の長い雪が林床に落ちると図4でみられた局所的に $\delta^{18}\text{O}$ の重い雪が観測されると考えられる。すなわち、冠雪には比較的短い滞留時間で林床に落ちるタイプと、長期間樹冠上に滞留するタイプに分けられる。

SiteA と SiteB の結果を図6に示す。SiteB 林内の平均値は降雪量 119.7mm, $\delta^{18}\text{O}$ -12.75‰ で、開地と比べて降雪量が 40.5mm 少なく、 $\delta^{18}\text{O}$ は 1.55‰ 重かった。SiteA 林内と比べると降雪量は約 30mm 多いが $\delta^{18}\text{O}$ は同じような値を示した。このことは同一期間、同一地域で観測された林内降雪であっても開地と林内の降雪水量差 I と酸素同位体比変化には必ずしも関係が見出せないことを示している。2 地点の林内降雪量が 30mm も異なるのは、式(3)より遮断蒸発量 I_c か、残差 N のどちらかが原因と考えられる。残差 N についてはこれ以上論ずることができないので、以下では遮断蒸発量 I_c が林内降雪量差(30mm)の原因だった場合について考察する。

この場合、SiteA と SiteB で遮断蒸発量が 30mm 異なるにもかかわらず酸素同位体比は同じような変化をしたことになる。すなわち氷と水蒸気間で相変化する時の同位体分別係数が 2 地点で異なっていたことになる。一般に水と水蒸気間における蒸発でも同位体分別係数は気温や湿度などで変わるとされているので、

表1 SiteA, 開地と林内における平均値

	降雪量(mm)	$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$
A(開地)シート上平均値	160.2	-14.26
A(林内)シート上平均値	93.2	-12.60

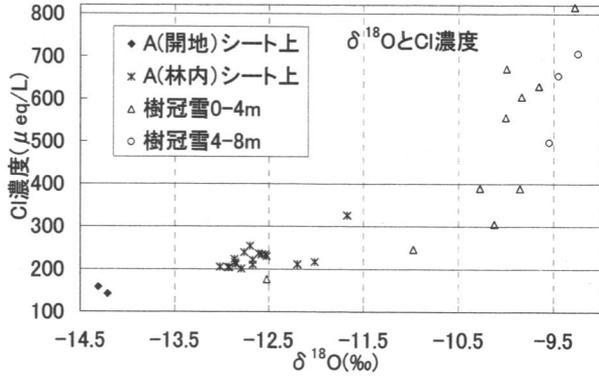


図5 シート上の雪と樹冠上の冠雪(2/26)の比較

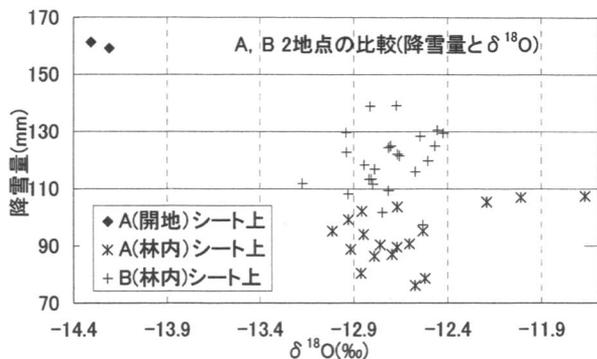


図6 SiteA と SiteB の比較

同様のことが氷と水蒸気間においても十分起こりえると考えられる。

レイリーの式は、同位体分別を伴う物質の除去(蒸発, 凝結など)がある場合の同位体比変化を表すのに使われる。蒸発前を開地のシート上の降雪, 蒸発後を林内のシート上の降雪としてレイリーの式に当てはめると, 2 地点における遮断蒸発時の同位体分別係数をそれぞれ求めることができる(ただし, $E=E_0=R=R_0=\Delta C=0$, $P=P_0$, 同位体分別係数は $1/23\sim 2/26$ のあいだ一定とする)。

レイリーの式は以下のように表される。

$$\ln\left(\frac{1+10^{-3} * \delta^{18}O}{1+10^{-3} * \delta^{18}O_o}\right) = \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right) * \ln\left(\frac{S}{S_o}\right)$$

ここで, α は氷-水蒸気における同位体分別係数, $\delta^{18}O$ は降雪の酸素同位体比, S はシート上の降雪量である(添え字 o は開地を表す)。

計算の結果, SiteA 林内での同位体分別係数は 1.0027, SiteB 林内では 1.0054 と見積もられた。遮断蒸発の違いはこのように同位体分別係数を使って表すことができる。

また, 氷-水, 氷-水蒸気のあいだで, 平衡状態のときの同位体分別係数(0°C)を表 2 に示す。SiteA と SiteB の分別係数は氷-水蒸気の分別係数に比べて非常に小さく, 氷-水の分別係数に近い値を示した。

表 2 平衡同位体分別係数

相	a	温度	文献
氷-水	1.0031	0(°C)	O'Neil,1968
氷-水蒸気	1.0117	0(°C)	Majoube,1971

5. おわりに

林内降雪の酸素同位体比($\delta^{18}O$)は開地に比べ重く, ばらつきも大きかった。このばらつきは樹冠上での滞留時間が異なる冠雪が林床に落ちることによって生じると考えられた。2 地点の林内降雪を比較したところ, 開地との降雪量差が異なるにもかかわらず酸素同位体比が同じであった。このような結果が生じる原因の一つとして, 2 地点での同位体分別係数の違いがあげられ, その時の同位体分別係数を求めることができた。

今後は, 残差 N が入ってこない条件下で, 降雪に対する遮断蒸発と酸素同位体比の変化を調べる必要がある。その上で, さまざまな条件下における同位体分別係数の変化を調べていきたい。

参考文献

O'Neil, J.R., Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water, J.Phys.Chem., 72, 3683-3684, 1968.

Majoube, M., Fractionnement en ^{18}O entre la glace et la vapeur d'eau, J.Chem.Phys.Phys.Chim. Biol., 68, 625-636, 1971.