

論 文

塩を含む積雪の含水率測定法

木 村 宏 海¹, 八久保晶弘^{1*}, 館 山 一 孝¹,
谷 川 朋 範², 小 嶋 真 輔³

要 旨

氷点下でも含水する、塩を含む積雪の含水率を測定する方法について検討した。積雪が塩を含むことで凝固点が 0°C を下回るため、このことを考慮せずに熱量式含水率計で含水率を測定すると、これを過小評価してしまう。そこでまず、熱量式含水率計を用いて、試料が氷点下温度から 0°C に至るまでの比熱補正を加える厳密な方法を考案した。次に、試料の液体・固体部分が結氷温度で熱的平衡状態にあると仮定して、熱量式含水率計を用いずに試料の温度と塩分から計算する方法を考案した。その結果、自然積雪および塩化ナトリウムを添加した積雪試料の含水率について、両者の方法で得られたデータはよく一致した。前者は手間がかかる反面、どのような温度・塩分条件下でも測定できる利点がある。一方、後者は雪温が -1°C 以上で誤差が大きくなるが、測定が簡便な点で有用である。これらの手法を北極海海氷上の積雪、およびサロマ湖氷上の積雪の含水率測定に適用し、幅広い条件で測定できることを確認した。

キーワード：積雪含水率，海氷，熱収支，マイクロ波観測

Key words: water content of snow, sea ice, heat balance, microwave observations

1. はじめに

極域の海水面上における熱収支を把握する上で、海氷上の積雪が熱収支に及ぼす影響は大きいと考えられる。積雪が融解すると、 0°C の氷と水との混合物、いわゆる「ぬれ雪」に変化する。海氷上の場合、海氷に含まれるブラインが上方に移動し、海氷上に堆積する積雪に浸透して高塩分のぬれ雪を形成する（滝沢 1983, 1984；小嶋ら，2008）。このことから、海氷上の積雪層は塩分を有し、凝固点降下によって 0°C 以下でも塩水の液体層を含む場合がある。積雪中に存在する液体水はマイクロ

波特性に大きな影響を与えることから（Stiles and Ulaby, 1980），衛星搭載マイクロ波放射計データの解釈をも左右する。例えば、融解期の多年氷上の湿雪の存在が、複雑な輝度温度特性を決定づけている（直木ら，2017）。また、氷点下温度でも積雪中に液体水が存在する現象は、海氷上の積雪特有のものであり、陸域の自然積雪ではみられない。こうした塩を含む積雪がどれだけぬれているか、を現場観測で定量的に評価する方法については、これまで注目されてこなかった。

積雪断面観測において、積雪含水率は古くからその重要性が認識されており、熱量計方式、遠心分離方式、体積差方式、誘電率方式などの測定手法が試みられてきた（木村，1969）。その中でも、熱量計方式（熱量式）は半世紀以上の間、積雪含水率を直接的に求めることのできる方法として利用されている。秋田谷式含水率計（秋田谷，1978）や遠藤式含水率計（河島ら，1996；Kawashima et

1 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165

2 気象庁気象研究所

〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

3 三菱重工冷熱株式会社

〒242-0007 神奈川県大和市中央林間七丁目 8 番 1 号

* 問合せ先：hachi@mail.kitami-it.ac.jp

al., 1998) などの熱量式含水率計は, 野外でも比較的簡便に含水率を測定できるよう, 工夫されている. 測定精度については, 前者では $\pm 1\%$, 後者では $\pm 2\%$ とされている. しかしながら, 塩を含む積雪の含水率測定では, 熱量式含水率計で用いられる計算式をそのまま適用することができない. なぜなら, 熱量式含水率計では試料温度が 0°C であることを前提に計算式が作られているため, 測定時に氷点下温度である積雪試料が 0°C になるまでの試料の比熱補正が考慮されていないからである. 含水していない乾き雪を熱量式含水率計で測定すると, 計算上は負の含水率となるように, 試料の比熱分だけ含水率を過小評価する. この凝固点降下分の試料の比熱補正方法については, いくつかの試みがあるものの (小嶋ら, 2005; 大沼ら, 2011), 手法としては未だ完成されていない.

海水の比熱に関しては, 例えば福迫ら (1988) の総説でまとめられているように, 約 -23°C より高温域では, 0°C に近づくとともに値が増加する. これは, 海水が氷, 塩水, 塩結晶, および気泡の混合物であることに由来する. 海水が温度上昇すると, 相変化によって生じる塩水が潜熱を奪うことから, 海水全体としての比熱は見かけ上増加することになる. 塩を含む積雪の比熱についても海水と同様であるが, 熱量式含水率計による測定では, 試料とお湯の混合直前・直後で成立する熱量保存則を基礎としている. したがって, 「塩を含む氷の比熱」に由来する, 混合途中の熱のやり取りに関する複雑な議論は本来, 不要である. すなわち, 氷, 液体水, および塩の 3 要素に分解し, 試料とお湯との混合前後の熱量保存のみを検討すればよい.

一方, 熱量式含水率計を使用せずとも, 原理的にはぬれ雪の雪温, およびその融解水の塩分の 2 情報から, 凝固点降下の関係式を用いて含水率を求めることができる. しかしながら, この方法についてはこれまでに研究者によって検討された形跡がない. 著者らは既に, 前述の 2 通りの含水率導出法に関する予備実験結果について報告しているが (木村ら, 2020), 人為的に作成した塩を含む積雪の含水率データが少なく断片的であり, また希薄溶液でのみ成り立つ関係 (凝固点降下度が塩

のモル濃度に比例する) を使用していたため, 含水率の見積もりには問題があった.

そこで本研究では, 海水上の塩を含む積雪の含水率に関する測定方法の提案を目的とする. 先行研究 (木村ら, 2020) で報告した含水率導出法を改良し, 氷点下温度の積雪を用いて比熱補正式を検証し, 人為的に塩を加えた積雪試料の含水率データを蓄積しつつ, 北極海海水上およびサロマ湖氷上の積雪含水率データにこれらを適用した結果について報告する.

2. 測定および解析方法

2.1 野外調査および使用した積雪試料

本研究では, 北極海海水上で採取された積雪 (14 試料), 北海道サロマ湖氷上で採取された積雪 (52 試料) のほか, 塩化ナトリウムを添加した自然積雪 (46 試料), 氷点下温度の自然積雪 (70 試料) の 4 種類を測定試料として用いた.

北極海調査については, カナダ沿岸警備隊の砕氷船 *Louis S. St-Laurent* 号による調査航海 (Joint Ocean Ice Studies (JOIS) 2019, IOS Cruise ID 2019-87) にて, 2019 年 9 月 19-20 日に北緯 $80-81^{\circ}$ 度, 西経 $135-140^{\circ}$ 度付近の位置で海水上の積雪調査を実施した (Zimmermann, 2019). 積雪断面観測については, Site 1 で 2 回 (Site 1 A および 1B), Site 2 で 1 回 (Site 2B) の計 3 回実施した.

サロマ湖調査では, 2020 年 2 月 22-25 日に湖水上 (北緯 $44^{\circ} 07' 20.6''$, 東経 $143^{\circ} 57' 59.0''$) で積雪調査を実施した (Tanikawa *et al.*, 2021). なお, サロマ湖は汽水湖であるために, 湖氷上の積雪は下部の海水からしみ上がった塩分を有することがある (小嶋ら, 2008). 積雪断面観測については, 観測期間中に計 3 回実施した.

上記の 2 つの野外調査では, 海水上・湖氷上の積雪試料の含水率測定および塩分測定を行った. 積雪断面観測では, 対象とする積雪層の雪温 (氷点下温度) と雪質を記録した.

これらの塩分を有する自然積雪のほか, 塩化ナトリウムを添加した自然積雪を準備した. 試料生成方法の詳細については木村ら (2020) の方法と同様である. 温度計をセットした発泡スチロール製断熱容器 (容積約 10 L) の中に適量の積雪 (初期重量 1 kg 程度) と塩化ナトリウムを入れてよ

く攪拌し、雪温が安定した後にこれを記録し、試料を採取して含水率測定を行った。含水率測定用の試料は 1 回につき数 10 g 程度であり、断熱容器の積雪試料の塩分の一様性を確認するために、塩分測定用の試料も合わせて少量採取した。

また、後述する比熱補正の検証のために、塩化ナトリウムを添加せず、試料の塩分が 0.1 psu (psu は実用塩分、実質的に‰) 以下で氷点下温度 (−18℃~0℃) の場合の自然積雪に関する含水率測定も合わせて行った。

2.2 含水率および塩分の測定方法

積雪含水率の測定には、自作の秋田谷式含水率計を使用した。秋田谷式含水率計は、遠藤式など他の熱量式含水率測定法と比較して、重量測定等の精密作業を室内で測定前後に行う特徴を有する。そのため、野外では悪天候下においても湯と積雪試料の混合作業と温度測定に集中でき、強風条件での海水上でも運用しやすい利点がある。基本的には、秋田谷 (1978) にある測定手順をそのまま踏襲した。なお、温度測定についてはサーミスタ温度計 (D617, テクノ・セブン, 分解能 0.01℃, 精度 0.1℃) を用いた。センサについては、予め 0℃ の氷水を用いて校正を施した。

本研究での積雪試料の多くは塩分を有するため、積雪試料の初期温度を合わせて記録し、さらにお湯と積雪試料の混合後のぬるま湯の塩分と、初期状態のお湯に含まれるわずかな塩分を、電気伝導率計 (LAQUAtwin EC-33B, 堀場製作所) で測定した。濃度が既知の塩化ナトリウム水溶液を用いて校正曲線を予め作成し、電気伝導率から実用塩分 (psu) に換算した。これらのデータから、積雪試料中の塩分を計算した。

2.3 熱量式の含水率計算式

塩分を含む積雪試料は凝固点降下により、氷点下温度である。すなわち、熱量式含水率計でこれらの試料の含水率を求める場合、含水率計の中で試料が初期温度から 0℃ に達するまでの比熱分の見積もりが肝要となる。

本研究が対象とする塩を含んだぬれ雪は、固体結晶である氷、液体水、塩、空気 の 4 成分の混合物である。このうち、空気は他の成分と比較して質量が約 3 桁小さいため、熱量保存の式では無視できる。したがって、質量保存の式は、塩を含ん

だぬれ雪試料の質量 M_s (g)、試料中の氷の質量 M_i (g)、試料中の液体水の質量 M_w (g)、試料中の塩の質量 M_{NaCl} (g) を用いて (1) 式のように表される。

$$M_s = M_i + M_w + M_{NaCl} \quad (1)$$

塩は実際には液体水に溶解した状態であるが、熱量式含水率計の操作過程で塩結晶が析出することはないため、塩の溶解熱に起因する熱の出入りを考慮する必要はない。したがって、熱量式含水率計による測定前後の熱量保存の式は、以下の (2) 式で表現される。

$$\begin{aligned} M_{hw} \frac{1000 - S_{hw}}{1000} \int_{T_2}^{T_1} C_p^w dT &+ M_{hw} \frac{S_{hw}}{1000} \int_{T_2}^{T_1} C_p^{NaCl} dT = (M_i + M_w) \int_0^{T_2} C_p^w dT \\ &+ M_i \int_{T_3}^0 C_p^i dT + M_w \int_{T_3}^0 C_p^{scw} dT \\ &+ M_{NaCl} \int_{T_3}^{T_2} C_p^{NaCl} dT + M_i C_f \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 M_{hw} は湯の質量 (g) であり、 T_1 、 T_2 、 T_3 はそれぞれ、湯の温度 (℃)、湯と試料の混合後の温度 (℃)、試料の初期温度 (℃) である。 S_{hw} は最初の湯に含まれるわずかな塩分 (psu) である。水の比熱 C_p^w については、0~100℃ の範囲内でも $4.1779 \sim 4.2174 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ に収まり (日本化学会編, 1993)、その差は 1% 以内であるため、本研究ではこれを $4.186 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ とする。氷の比熱 C_p^i 、過冷却水の比熱 C_p^{scw} 、塩の比熱 C_p^{NaCl} についてはそれぞれ、以下の (3) 式 (Dorsey, 1940)、(4) 式 (Tombari *et al.*, 1999)、(5) 式 (Vu *et al.*, 2019) で表現され、いずれも温度 T (℃) の関数であり、単位は $\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ とする。

$$C_p^i = 2.116 + 0.007795 T \quad (3)$$

$$C_p^{scw} = 0.00244 \left(\frac{T + 273.15}{222} - 1 \right)^{-2.5} + 4.125 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_p^{NaCl} &= 5.46 \times 10^{-2} + 7.71 \times 10^{-3} (T + 273.15) \\ &\quad - 2.55 \times 10^{-5} (T + 273.15)^2 \\ &\quad + 2.97 \times 10^{-8} (T + 273.15)^3 \end{aligned} \quad (5)$$

なお、(4) 式第 1 項の係数については、原論文 (Tombari *et al.*, 1999) では 0.44 (単位は J K^{-1}

mol^{-1}) となっているが, 原論文の図と照合すると明らかに 0.044 の誤りと考えられる.

氷の融解潜熱 C_f は 333.6 J g^{-1} とする (Dorsey, 1940). また, 含水率測定後に湯と試料が混合したぬるま湯の塩分 (psu) を S_w とすると, 塩に関する保存式は以下の (6) 式で表現される.

$$M_{\text{hw}} \frac{S_{\text{hw}}}{1000} + M_{\text{NaCl}} = (M_{\text{hw}} + M_s) \frac{S_w}{1000} \quad (6)$$

したがって, これらの (1)~(6) 式から M_i , M_w , M_{NaCl} の 3 つの未知数に関する連立方程式を解くことで, それぞれの質量を求めることができる. その結果, 比熱補正された含水率 W_r は以下の (7) 式で求められる.

$$W_r(\%) = \frac{M_w + M_{\text{NaCl}}}{M_i + M_w + M_{\text{NaCl}}} \times 100 \quad (7)$$

なお, 本研究で扱う, 塩を含む積雪の含水率は, (7) 式で表されるように積雪試料全体に対する塩水の重量濃度として定義する.

比較のために, 比熱補正をあえてしない, つまり塩分の存在を無視した場合を考える. 通常の熱量式含水率計による計算式では, 含水率 W_i は以下の (8) 式で表される (秋田谷, 1978).

$$W_i(\%) = \left\{ 1 - \frac{M_{\text{hw}} C_p^w T_1 - (M_{\text{hw}} + M_s) C_p^w T_2}{M_s C_f} \right\} \times 100 \quad (8)$$

試料中の塩の質量 M_{NaCl} を 0 g, 塩分 (S_{hw} および S_w) を 0 psu, T_3 を 0°C とすると, (1) 式および (2) 式は (8) 式に帰着する. なお, 試料の初期温度 T_3 から 0°C に達するまでの比熱を考慮していない分, 比熱補正後である W_r と比較すると, 比熱補正前である W_i は過小評価となる.

2.4 塩分と雪温のみで求める場合の含水率計算式

試料中の氷および塩水部分が初期温度 T_3 ($^\circ\text{C}$) で熱的平衡状態にあると仮定すると, 凝固点降下から塩水部分の塩分を見積もることができる. 本研究では, UNESCO (1983) による塩分と結氷温度との関係から, 試料の塩水部分の塩分 S_1 を T_3 から見積もる式を作成した. S_1 (psu) に関する回帰式は (9) 式で表される.

$$S_1 = 4.519 \times 10^{-6} T_3^6 + 2.696 \times 10^{-4} T_3^5 + 5.843 \times 10^{-3} T_3^4 + 4.534 \times 10^{-2} T_3^3 - 0.3409 T_3^2 - 18.97 T_3 \quad (9)$$

さらに, この試料を融解させると, 氷部分には塩が含まれないために, 希釈されて塩分が低下し S_2 となる. S_2 (psu) については, 前述の含水率計を用いた測定における実測値から (10) 式で求められる.

$$S_2 = \frac{M_{\text{NaCl}}}{M_s} \times 1000 = \frac{(M_{\text{hw}} + M_s) S_w - M_{\text{hw}} S_{\text{hw}}}{M_s} \times 1000 \quad (10)$$

したがって, 最終的に求めたい試料の含水率 W_{eq} は, 熱量保存の (2) 式を使うことなく, 雪温 T_3 と塩分 S_2 のみを入力データとして, (11) 式で容易に計算できる.

$$W_{\text{eq}}(\%) = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (11)$$

3. 測定結果および考察

3.1 北極海海氷上の積雪物理条件

北極海調査におけるデータの概要を表 1 に示す. 海氷上では計 3 回の積雪断面観測が実施され, そのうちの 2 回は場所がほぼ同一で観測時刻

表 1 北極海調査における観測サイト情報, および積雪の初期温度 T_3 , 積雪試料の塩分 S_2 , 熱量計を使用して求めた含水率 W_i (比熱補正前), W_r (比熱補正後), 塩分と雪温から求めた含水率 W_{eq} . T_3 は積雪全層の鉛直温度分布の平均値, 塩分 S_2 および含水率 W_i , W_r は複数回測定した平均値とその標準偏差を表す.

場所名	日付	緯度	経度	T_3 [$^\circ\text{C}$]	S_2 [psu]	W_i [%]	W_r [%]	W_{eq} [%]	データ数
Site 1A	2019/9/19 09:00	80° 55' 05.3" N	135° 28' 39.1" W	-10.4	0.0 ± 0.0	-8.1 ± 1.0	-1.7 ± 1.1	0.0	6
Site 1B	2019/9/19 13:30	80° 55' 05.3" N	135° 28' 39.1" W	-9.4	2.5 ± 0.2	-2.0 ± 0.2	+4.0 ± 0.3	1.8	2
Site 2B	2019/9/20 13:30	80° 02' 30.4" N	140° 09' 31.8" W	-10.9	0.0 ± 0.0	-9.2 ± 1.7	-2.5 ± 1.8	0.0	6

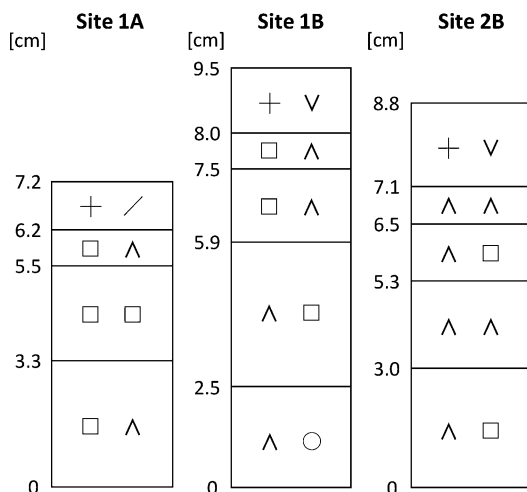


図 1 北極海調査での海水上の積雪断面観測結果 (2019 年 9 月 19 日～20 日)。

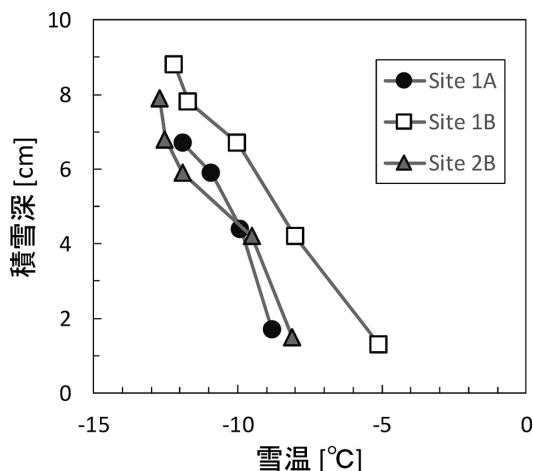


図 2 北極海調査における海水上の積雪の鉛直温度分布。

が異なる。気温は $-14 \sim -11^{\circ}\text{C}$ であり、積雪深はいずれも 10 cm に満たなかった (図 1)。表層の 1 cm 程度は雲粒付結晶が多く、表面霜もみられ、その下層ではこしもぎらめ、しもぎらめが発達していた。Site 1B では最下層がややぎらめ化していた。観測時における積雪の鉛直温度分布を図 2 に示す。 $0.6 \sim 0.9^{\circ}\text{C cm}^{-1}$ の比較的大きな温度勾配がかかり、しもぎらめが発達と調和している。また、最下層の雪温は Site 1B が最も高く、約 -5°C であった。

積雪層が薄いため、層毎に分けずに全層の試料を複数回採取し、含水率測定を行った。試料の初期温度 T_3 については、積雪の鉛直温度分布の平均値とした。 T_3 はいずれも約 -10°C であり、積雪試料の塩分 S_2 は Site 1B で 2.5 psu であったほかは、Site 1A, Site 2B ともほぼ 0 psu であった。したがって、Site 1A, Site 2B では含水率はゼロであるのに対し、Site 1B では氷点下でも含水している。

比熱補正前の含水率 W_i は、いずれも負の値であるのに対し、補正後の含水率 W_r は、Site 1B では約 4% であった。Site 1A, Site 2B では約 -2% と過小評価しているが、この点については後述する。塩分と雪温から求める含水率 W_{eq} は、Site 1B では約 2%, Site 1A と Site 2B では 0% であった。したがって、Site 1B では -10°C の環境下

においても W_r , W_{eq} ともに数 % 程度は含水していたことが確実である。

3.2 サロマ湖氷上の積雪物理条件

サロマ湖調査におけるデータの概要を表 2 に、また積雪断面観測結果を図 3 に示す。積雪断面は、ほぼ完全に含水している下層 (ピットを掘るとこの層の上面まで冠水する)、海水がしみ上がってスラッシュとなっている中層、通常の積雪層である上層、の 3 層に大まかに分けられる。含水率測定では、スラッシュ層とその直上の積雪層を対象とし、2/22 は積雪表層も比較のために採取した。

積雪の鉛直温度分布を図 4 に示す。積雪の最下層は $-1.8 \sim -1.6^{\circ}\text{C}$ であり、塩分が 30 psu 弱程度にやや薄められた海水が凝固点降下を引き起こしているとみられる。積雪表層では、2/22 および 2/23 は 0°C に達しており、気温は $0 \sim +1^{\circ}\text{C}$ で好天であったことから、気温による積雪表面からの融解や内部融解が起こっていたと考えられる。

含水率測定については、各層で複数回の採取を行った。なお、試料毎に採取層の雪温を測定して T_3 とした。海水のしみ上がりによるスラッシュ層では、積雪試料の塩分 S_2 は 9 \sim 17 psu であるのに対し、2/22 および 2/23 におけるスラッシュ直上の積雪層 (こしまりが主体) ではほぼ 0 psu であり、海塩の影響はみられなかった。2/25 に採

表 2 サロマ湖調査における各積雪層の初期温度 T_3 , 積雪試料の塩分 S_2 , 熱量計を使用して求めた含水率 W_i (比熱補正前), W_r (比熱補正後), 塩分と雪温から求めた含水率 W_{eq} , および雪質 (国際分類表記: Fierz *et al.*, 2009) と積雪層の位置. 各積雪層では複数回測定し, 表中の値は平均値と標準偏差を表す.

日付	T_3 [°C]	S_2 [psu]	W_i [%]	W_r [%]	W_i, W_r データ数	W_{eq} [%]	W_{eq} データ数	雪質	層位置 [cm]
2020/2/22 11:40	+0.0 ± 0.0	+0.1 ± 0.3	+9.9 ± 2.4	+9.9 ± 2.5	4	—	—	++	31-34
2020/2/22 11:40	-0.7 ± 0.0	-0.1 ± 0.1	-1.1 ± 2.5	-0.6 ± 2.5	6	-0.7 ± 1.1	7	/ /	17-20
2020/2/22 11:40	-1.8 ± 0.0	+15.1 ± 0.7	+48.8 ± 2.0	+50.3 ± 2.0	7	+45.4 ± 2.2	7	○○	14-17
2020/2/23 10:40	-1.1 ± 0.4	+0.1 ± 0.1	-0.6 ± 3.0	+0.1 ± 2.9	9	+0.8 ± 0.7	10	/ ●	8.5-11.5
2020/2/23 10:40	-1.6 ± 0.0	+16.6 ± 1.4	+62.0 ± 5.1	+63.3 ± 5.2	7	+57.3 ± 4.1	10	○○	5.5-8.5
2020/2/25 10:40	-2.5 ± 0.4	+9.4 ± 0.4	+23.4 ± 8.7	+25.2 ± 8.5	9	+20.7 ± 2.1	9	○○	23.5-26
2020/2/25 10:40	-1.9 ± 0.1	+11.8 ± 0.7	+34.8 ± 4.1	+36.3 ± 4.1	10	+34.6 ± 2.1	10	○○	20-23

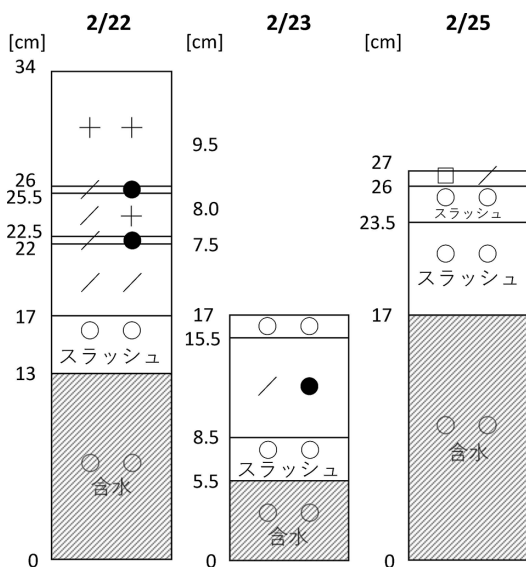


図 3 サロマ湖調査での湖水上の積雪断面観測結果 (2020年2月22日~25日).

取された2層はいずれもスラッシュ層であるが, 上下で若干の S_2 の差があった. 含水率の値に注目すると, 冠水した積雪層直上のスラッシュ層は W_r の値で 38~63% と日によって違いがあった. また, W_r の値の標準偏差が2~5% と比較的大きいことから, 同じスラッシュ層でも採取箇所によって含水率が大きく異なることがうかがえる. 2/22・2/23 のスラッシュ層直上の積雪層では, 含水率はおおむね 0% であった. 一方, 2/22 の積雪

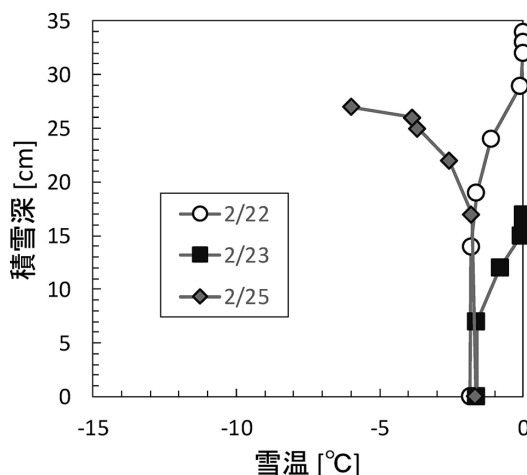


図 4 サロマ湖調査における湖水上の積雪の鉛直温度分布.

表層の含水率は約 10% であり, 気温による積雪表面からの融解, ないし内部融解により含水していたことがわかる.

含水率のデータを詳細に見ていくと (表 2), 塩分と雪温から求める含水率 W_{eq} は, 比熱補正後の含水率 W_r と比較するとやや小さめであるものの, よく一致している. また, 比熱補正前の含水率 W_i は, 塩分を有する場合に過小評価しているものの, W_r との差は 1~2% 程度に過ぎない.

なお, 2/22 の積雪表層の W_{eq} については, T_3 がほぼ 0°C であったために計算不能だった.

3.3 塩分の小さな氷点下の積雪を用いた比熱補正の妥当性の検証

本研究における含水率 W_r は、熱量式含水率計を用いて、積雪試料の初期温度 T_3 および塩分 S_2 の情報を加えて求められる。この方法では、氷点下温度である T_3 から 0°C に至るまでの試料の比熱補正の妥当性を検証しておく必要がある。そこで、氷点下温度でかつ S_2 が 0.1 psu 以下の通常の自然積雪試料について、測定された含水率を図 5 にまとめた。なお、図 5 には北極海調査における Site 1 A および Site 2 B のデータも加えた。

これらの試料は塩を含まず、かつ氷点下であるため、含水率は当然 0% である。 W_r の値は、全 49 データで $-0.8 \pm 1.3\%$ (平均値および標準偏差) となり、やや過小評価気味ではあるものの、おおむね 0% となり、比熱補正方法に問題はないとみられる。一方、比熱補正を施さずに計算された含水率 W_i は、 T_3 とともに低下して負の値となり、 -15°C の積雪試料では約 -10% となる。なお、北極海のデータも他の試料とほぼ同様の傾向を示した。

ここで、 W_r がやや過小評価される点について注目する。図 6 は、同じデータセットについて、 W_r を湯の温度 T_1 に対してプロットしたグラフである。顕著な傾向ではないものの、 T_1 が 60°C

以上の高い領域で W_r がやや減少する (負方向に増加する) ことがわかる。(1)~(7) 式を用いた感度実験によれば、 T_1 を 0.5°C 過大評価すると含水率は約 3% 低下する。すなわち、本研究では T_1 が比較的高めであったために、試料の混合直前に読み取る T_1 が若干過大評価された結果、 W_r の過小評価につながった可能性がある。秋田谷式含水率計の内部壁はスタイロフォーム製であるが、それでも断熱は完璧ではなく、 T_1 は読み取りの瞬間にも少しずつ低下する。 T_1 の読み取り直後に行う湯と試料の混合作業には $15\sim 20$ 秒程度を要するため、その間にも系外への熱漏れが起きると考えられる。一方、 T_1 が低ければ熱漏れが小さくなるが、融解させることのできる試料重量が減少する欠点がある。したがって、含水率計の断熱性能や混合様式、試料サイズ等によって最適な T_1 があると考えられる。図 6 からは、 T_1 は 50°C 程度であることが望ましいと判断される。なお、秋田谷 (1978) では T_1 を $40\sim 50^\circ\text{C}$ としており、装置の仕様が異なる遠藤式含水率計では、測定誤差の減少のために 40°C 以下が推奨されている (河島ら, 1996)。

3.4 各種含水率 (W_i , W_r , W_{eq}) 間の相関

熱量計を使用して求めた含水率 W_i および W_r と、塩分と雪温から求めた含水率 W_{eq} との相関

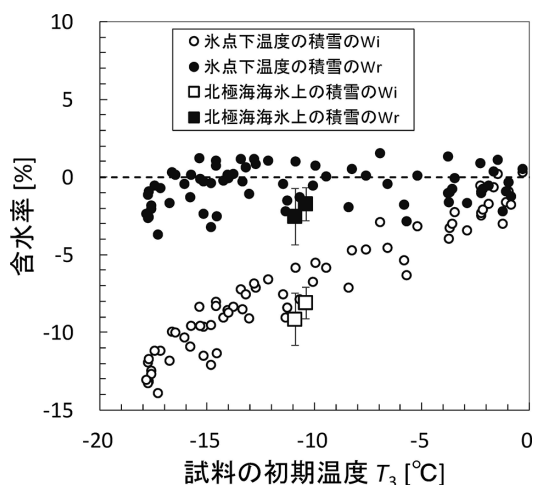


図 5 塩分の小さい試料についての初期温度 T_3 と含水率 (比熱補正前: W_i , 比熱補正後: W_r) との関係。北極海試料のエラーバーは、複数回測定されたデータの標準偏差を表す。

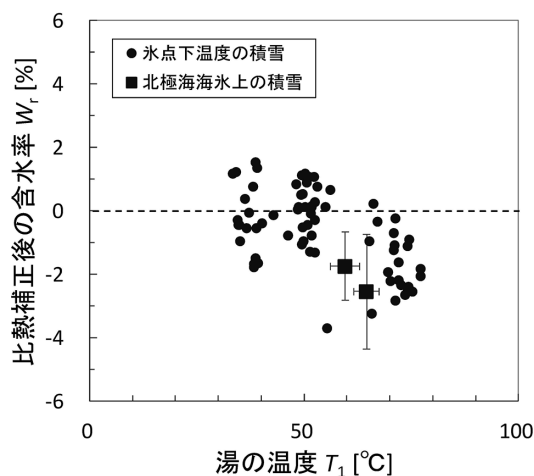


図 6 塩分の小さい試料についての湯の温度 T_1 と比熱補正後の含水率 W_r との関係。北極海試料のエラーバーは、複数回測定されたデータの標準偏差を表す。

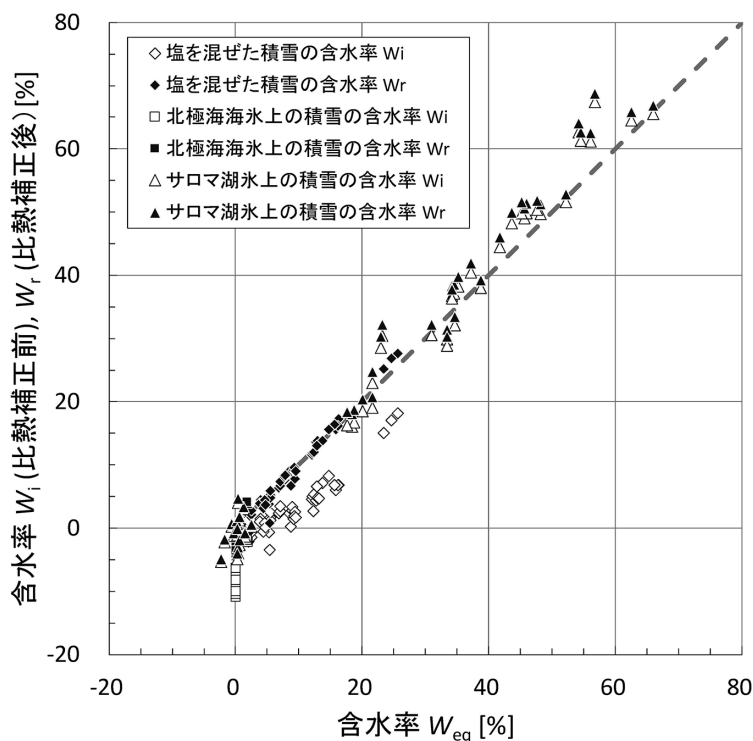


図 7 塩分と雪温のみで求めた含水率 W_{eq} と、熱量計で求めた含水率（比熱補正前： W_i ，比熱補正後： W_r ）との関係。破線は 1:1 のラインを表す。

を図 7 にまとめた。なお、データは塩化ナトリウムを添加した積雪 46 試料、北極海海水上の積雪 14 試料、サロマ湖水上の積雪 53 試料である。

一見すると、 W_{eq} に対する W_i および W_r は概ね 1:1 の関係（図 7 中の破線）に乗っていることがわかる。含水率の差（ $W_{eq} - W_r$ ）の平均値および標準偏差を全データで求めると、 $-1.0 \pm 3.0\%$ であり、 W_r と W_{eq} は含水率 0~70% の広範囲においてよく一致し、誤差は 3% 程度である。このことは、塩を含む積雪の水および塩水部分が熱的平衡状態にある、との前提が正しく、 W_{eq} が実用的であることを示している。

詳細にみていくと、比熱補正を施していない W_i は W_{eq} に対して過小評価であり、特に塩化ナトリウムを添加した積雪試料でその傾向は顕著である。これに対し、サロマ湖水上の積雪試料では W_i と W_r の差が小さく、高塩分の試料でもその差は 1~2% 程度である。また、 W_r と W_{eq} との関係では、特に塩化ナトリウムを添加した積雪試

料で相関が極めて良いことがわかる。

W_{eq} に対する含水率の差（ $W_r - W_i$ ）を図 8 に示す。塩化ナトリウムを添加した積雪試料では、 W_{eq} とともに（ $W_r - W_i$ ）は増加し、最大で 11% 近くに達している。北極海海水上の積雪試料でも、 W_{eq} が小さい割には（ $W_r - W_i$ ）が約 6% と大きい。これらに対し、サロマ湖水上のスラッシュ層の積雪試料では、前述のようにおおむね 1~2% の範囲に収まっている。

このように、「サロマ湖水上の積雪試料では、比熱補正をしてもしなくても含水率の結果は大差ない」理由は、試料の初期温度 T_3 の違いにある。図 9 は、含水率の差（ $W_r - W_i$ ）を T_3 に対してプロットしたものである。塩化ナトリウムを積雪に添加していく実験では、最も低温のもので -17°C 近くに達し、そこから -1°C までの広い温度範囲でデータを得ている。北極海海水上の積雪試料も、これとほぼ同様の傾向である。（ $W_r - W_i$ ）が T_3 と直線関係にあるのは、 T_3 から 0°C までの温

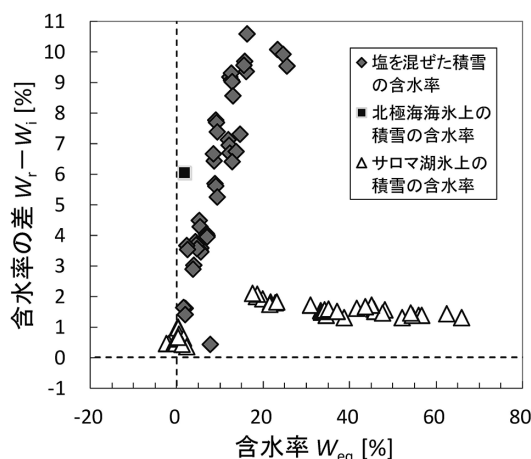


図 8 塩分と雪温のみで求めた含水率 W_{eq} と、熱量計で求めた含水率 (比熱補正前: W_i , 比熱補正後: W_r) の差との関係。

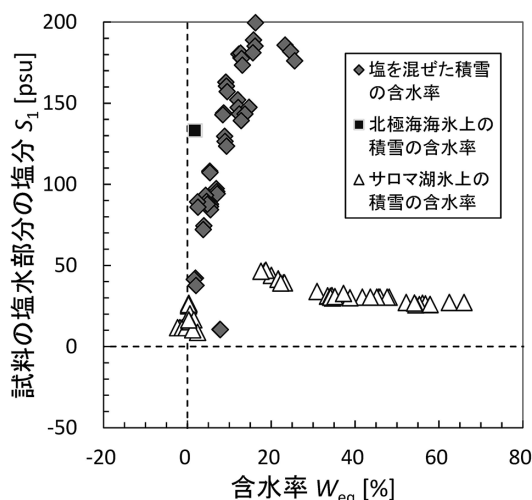


図 10 塩分と雪温のみで求めた含水率 W_{eq} と、試料の塩水部分の塩分 S_1 との関係。

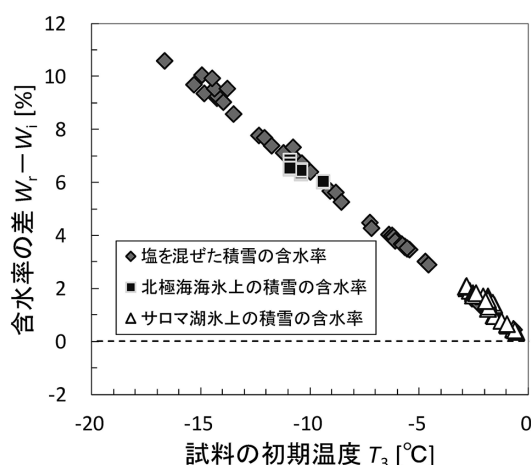


図 9 試料の初期温度 T_3 と、熱量計で求めた含水率 (比熱補正前: W_i , 比熱補正後: W_r) の差との関係。

度差による比熱の分, W_i を過小評価しているからである。一方, サロマ湖水上の積雪試料の温度は最低でも -3°C 程度であり, 塩分があっても含水率計算での比熱補正は最小限に留まったと解釈される。

試料の塩水部分の塩分 S_1 と W_{eq} との関係を図 10 に示す。塩化ナトリウムを添加した積雪試料では, S_1 は W_{eq} とともに直線的に急増している。これは, 積雪に混ぜているのが塩化ナトリウムの

結晶粉末であるために, 試料は凝固点降下により断熱容器内で急激に冷却されるとともに, 融解水に塩化ナトリウムが溶解しているからである。また, 北極海海水上の積雪試料では, T_3 が約 -10°C であるにも関わらず 133 psu の高塩分の液体水 (海水に含まれるブライン) が含水率の値をプラスにしていることがわかる。一方, サロマ湖水上の積雪試料では, W_{eq} が 60% 以上まで達するにも関わらず, S_1 は 30 psu 前後に留まっている。これは, サロマ湖では塩が海水として供給されているからであり, 高い含水率の割には積雪試料の塩分はあまり大きくならない点で, 塩化ナトリウムを添加した積雪試料とは明らかな違いがある。

3.5 W_{eq} の誤差の評価

熱量式含水率計を用いる W_r に対し, 熱量式含水率計が不要な W_{eq} の方が測定は簡便である反面, その導出手法の適用範囲については評価が必要である。ここでは, 測定値の誤差が W_{eq} に及ぼす影響について検討する。

(10) 式および (11) 式から, W_{eq} は以下のようにまとめられる。

$$W_{eq}(\%) = \frac{(M_{hw} + M_s)S_w - M_{hw}S_{hw}}{M_s S_1} \times 100 \quad (12)$$

質量 M_{hw} および M_s については, 数 10 g から 100 g 程度の値となる。最小表示が 0.1 g の一般的

な電子天びんの繰返し性, 直線性を考慮して, 最大で $\pm 0.5\text{ g}$ の誤差があるとするれば, これらの質量の測定誤差が W_{eq} の値に与える影響は, W_{eq} の値そのものの1%程度のオーダーである. また, 電気伝導率計で求められる塩分(S_w , S_{hw})については, 使用した測器の電気伝導率の低濃度領域における測定精度を塩分に換算すると, $\pm 0.002\text{ psu}$ となる. つまり, 塩分の測定誤差が W_{eq} の値に与える影響が, 質量と同様の1%程度のオーダーとなるには, S_w や S_{hw} は 0.2 psu 程度であることがわかる. 現実には, 本研究で使用した湯の初期塩分 S_{hw} は 0.1 psu 程度であることが多く, 塩を含む積雪が測定対象であれば S_w はさらに高いことから, 塩分の測定誤差が W_{eq} に与える影響は小さく, 最大でも質量と同程度であることがわかる.

最後に, 試料の塩水部分の塩分 S_1 について検討を行う. S_1 は, 熱力学的平衡を仮定して T_3 から見積もられる. 簡単のために, モル凝固点降下の考え方を適用し, S_1 と T_3 が比例関係にあるとすれば, S_1 が 35 psu の時に T_3 は約 -1.9°C であり, 誤差評価においては(12)式で S_1 が W_{eq} に与える影響を, T_3 が W_{eq} に与える影響と読み替えても差し支えない. 問題は, T_3 が 0°C 近傍の場合である. 温度計の測定誤差を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ とすれば, T_3 が -1°C の場合に W_{eq} の値に与える影響は10%と相対的に大きい. したがって, 含水率計が不要な W_{eq} の方法は, 目安として T_3 が -1°C 以上の領域では W_{eq} の有効数字2桁目に影響すると言える.

その他, W_{eq} の導出手法の前提として, 試料温度 T_3 が試料全体で一様であることが挙げられる. 試料が自然積雪の場合, 鉛直方向に温度分布があるため, 積雪試料の温度の代表性についても十分考慮する必要がある.

4. まとめ

塩を含む積雪の含水率測定法に関して, 通常の熱量式含水率計での入力データに初期雪温と試料の塩分を加えて比熱補正を施す方法と, 含水率計を使用せずに積雪試料の初期雪温と塩分だけで求める方法の2つについて検証実験を行った. 両者のデータはよく一致し, 含水率としての誤差は3

%程度だった.

このことから, 雪温測定および積雪サンプリング後に融解させて塩分測定のみで含水率を求められる後者のほうが, 手間のかかる熱量式含水率計の運用が不要という利点があり, より実用的とみられる. しかしその一方で, この方法は雪温が 0°C に近い試料, 具体的には -1°C より高い場合には原理的に誤差が大きくなる. したがって, 塩分が未知の試料に対しては, 手間はかかるが万能な前者の方法, ある程度の塩分があるとわかっている, 雪温が -1°C 以下の試料に対しては, 測定が楽な後者の方法を使い分けることが望ましい.

これらの2手法を用いて, 北極海の海水上の積雪, およびサロマ湖の湖水上の積雪について含水率測定を実施した. 試料数は少ないが, 北極海では雪温が -10°C 近くでも重量濃度で数%程度は含水していた, との結果が得られた. 一方, サロマ湖では海水のしみ上がりにより, 60%を超える含水率が見積もられた.

今後の展望としては, 海水上での積雪観測にこれらの含水率測定法が適用されることにより, 衛星搭載マイクロ波放射計データの地上検証観測に寄与することが期待される. また, 本研究では自然積雪を対象として, 海水上の塩を含む積雪の含水率測定に論点を絞ったが, 例えば冬季の寒冷地の道路に散布される融雪剤が, 周辺積雪や着雪等を含水させる効果の検証にも応用が効くと考えられる.

謝 辞

本研究はJOIS2019を主催したカナダ海洋科学研究所ならびに米国ウッズホール海洋研究所の乗船研究者, カナダ沿岸警備隊の砕氷船 *Louis S. St-Laurent* の船長および乗組員によって支援されました. また, 2名の匿名査読者からはそれぞれ多数の有益なコメントをいただきました. ここに記して感謝申し上げます. なお, 本研究は北見工業大学経費(機能強化経費・取組2), 科学研究費補助金(17K00534, 20K12142, 20H00206), JAXA第2回地球観測公募, JAXA第2-4回地球環境変動観測ミッション(GCOM), および地球環境保全試験研究費(国1753)の助成を受けて実施され

ました。

文 献

- 秋田谷英次 (1978) : 熱量計による積雪含水率計の試作. 低温科学 物理篇, **36**, 103-111.
- Dorsey, N.E. (1940): *Properties of ordinary water-substance in all its phases: water-vapor, water, and all the ices*. New York, Reinhold Pub.
- Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K. and Sokratov, S.A. (2009): *The international classification for seasonal snow on the ground*. IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1, UNESCO-IHP, Paris, 80 pp.
- 福迫尚一郎, 田子 真, 山田雅彦 (1988) : 氷, 雪, および海水の熱物性. 熱物性, **2** (2), 89-100.
- 河島克久, 遠藤 徹, 竹内由香里 (1996) : 熱量式による簡易積雪含水率計の試作. 防災科学技術研究所研究報告, **57**, 71-75.
- Kawashima, K., Endo, T. and Takeuchi, Y. (1998): A portable calorimeter for measuring liquid-water content of wet snow. *Ann. Glaciol.*, **26**, 103-106.
- 木村宏海, 八久保晶弘, 谷川朋範 (2020) : 塩濃度と融点降下から求める積雪含水率測定法. 北海道の雪氷, **39**, 9-12.
- 木村忠志 (1969) : 積雪含水率計の小史. 雪氷, **31** (4), 104-107.
- 小嶋真輔, 谷川朋範, 八久保晶弘, 榎本浩之, 館山一孝 (2005) : 海水上の湿雪含水率を遠藤式含水率計で求めるには? 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 164.
- 小嶋真輔, 中村和樹, 直木和弘, 榎本浩之 (2008) : 浸み上がりおよび冠水が海水上的における積雪の温度に与える影響. 雪氷, **70** (4), 423-433.
- 直木和弘, 長 幸平, 牛尾収輝 (2017) : 南極昭和基地沖における融解期の多年氷のマイクロ波輝度温度特性. 雪氷, **79** (1), 31-42.
- 日本化学会編 (1993) : 化学便覧基礎編改訂 4 版, 第 II 分冊, 東京, 丸善, 762 pp.
- 大沼友貴彦, 直木和弘, 西尾文彦 (2011) : 塩分を含んだ湿雪の含水率測定. 雪氷研究大会 (2011・長岡) 講演要旨集, 171.
- Stiles, W.H. and Ulaby, F.T. (1980): The active and passive microwave response to snow parameters : 1. Wetness. *J. Geophys. Res.*, **85**, C2, 1037-1044.
- 滝沢隆俊 (1983) : 海水上の積雪の特性とゆき氷の形成. 低温科学 物理篇, **42**, 157-162.
- 滝沢隆俊 (1984) : 海水上の積雪の特性とゆき氷の形成 II. 低温科学 物理篇, **43**, 157-161.
- Tanikawa, T., Masuda, K., Ishimoto, H., Aoki, T., Hori, M., Niwano, M., Hachikubo, A., Matoba, S., Sugiura, K., Toyota, T., Ohkawara, N. and Stamnes, K. (2021): Spectral degree of linear polarization and neutral points of polarization in snow and ice surfaces. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **273**, 107845, doi: 10.1016/j.jqsrt.2021.107845.
- Tombari, E., Ferrari, C. and Salvetti, G. (1999): Heat capacity anomaly in a large sample of supercooled water. *Chem. Phys. Lett.*, **300**, 749-751.
- UNESCO (1983): Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. UNESCO technical papers in marine science **44**, 53 pp.
- Vu, T.H., Piqueux, S., Choukroun, M., Edwards, C.S., Christensen, P.R. and Glotch, T.D. (2019): Low-temperature specific heat capacity measurements and application to Mars thermal modeling. *Icarus*, **321**, 824-840.
- Zimmermann, S. (2019): Joint Ocean Ice Study/Beaufort Gyre Exploration Project 2019 Cruise Report, Report on the oceanographic research conducted aboard the *CCGS Louis S. St-Laurent*, September 12 to October 4, 2019, IOS Cruise ID 2019-87, 128 pp. <http://science.whoi.edu/users/aproshtutinsky/BG-reports/2019-87LSSL-Cruise-Report.pdf> (2021.02.24 閲覧).

Methods for measuring water content of snow containing salt

Hiromi KIMURA¹, Akihiro HACHIKUBO^{1*}, Kazutaka TATEYAMA¹,
Tomonori TANIKAWA² and Shinsuke KOJIMA³

¹ *Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507*

² *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency,
1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052*

³ *Mitsubishi Heavy Industries Air-Conditioning & Refrigeration Corporation,
7-8-1, Chuo-Rinkan, Yamato, Kanagawa 242-0007*

* *Corresponding author: hachi@mail.kitami-it.ac.jp*

Abstract: Methods for measuring the water content of snow containing salt, which contains liquid water at subzero temperatures, were investigated. Since the temperature of wet snow containing salt is below freezing, a conventional method using a calorimeter underestimates the water content. Two methods were devised: one was to use a calorimeter and add a process of correction for the specific heat from the subzero temperature to 0°C, and the other was to calculate the water content from the theory of freezing-point depression using only the temperature and salinity of the sample without using a calorimeter. The dataset of water content of snow obtained by both methods agreed well with an error of 3% for the natural snow samples and artificially salted snow samples. While the former method is rather complex, it is rigorous and applicable for all the salt-contained samples. On the other hand, the latter method is useful because of its simplicity, but it is not applicable when the temperature is above -1°C . These methods were applied to the measurement of the water content of snow on the Arctic sea ice and on the ice of Saroma-ko lagoon, and it was confirmed that they can be applied to a wide range of conditions.

(2021 年 3 月 25 日受付, 2021 年 5 月 17 日改稿受付, 2021 年 5 月 28 日再改稿受付,
2021 年 6 月 15 日受理, 討論期限 2022 年 5 月 15 日)