

塩濃度測定と融点降下から求める積雪含水率測定法

Methodology for water content of snow using salinity and melting point depression

木村 宏海¹, 八久保 晶弘¹, 谷川 朋範²

Hiromi Kimura¹, Akihiro Hachikubo¹, Tomonori Tanikawa²

Corresponding author: hachi@mail.kitami-it.ac.jp (A. Hachikubo)

極地における海氷面上の熱収支の把握は重要課題である。海氷上の積雪は、海水のしみ上がりにより塩分を有し、凝固点降下により0°C以下でも液体層を含むことがある。原理的には、塩を含む積雪の含水率測定に、熱量計による直接測定はそもそも不要であり、ぬれ雪の雪温と融解水の塩分からモル凝固点降下の式を用いて含水率は求まる。本研究では、自然積雪のざらめ雪にNaClを混ぜた試料を用いて、熱量式による含水率の直接測定値に比熱補正を施す方法、および雪温、塩分とモル凝固点降下式を用いた方法について、野外実験を通して、塩を含む積雪の含水率測定法に関する比較・考察を行なった。

1. はじめに

ぬれ雪は氷と水との混合物であり、その混合の割合は、ぬれ雪の熱的状态を表わす重要なパラメータである。積雪の含水率は、雪氷気象の分野で古くから直接測定の対象となっており、様々な測定方法が試みられてきた。その中でも熱量式含水率計は開発されてから50年以上もの間、標準的な装置として使用されてきた歴史があり、秋田谷式含水率計²⁾や遠藤式含水率計³⁾などの熱量式含水率計が未だに現場で用いられ、野外でも比較的簡便に含水率を測定することができる。

極地における海氷面上の熱収支の把握は重要課題であるが、海氷上の積雪の素性については不明な点が未だに多い。海氷上の積雪は、海水のしみ上がりにより塩を含むことがあり、その場合は塩の効果で凝固点降下が起こり、0°C以下でも液体層を含む。すなわち、陸域の季節積雪とは異なり、潜熱による「熱溜め」が0°C以下の環境でも、海氷上に存在することを示唆する。

積雪中の液体水はマイクロ波特性に大きな影響を与えるため⁴⁾、衛星搭載マイクロ波放射計による同期観測、および海氷上での検証観測が期待される。しかしながら、従来の熱量式含水率測定法は氷が0°Cで融解することを前提に考案されているため、塩を含んだぬれ雪試料の含水率測定にそのまま適用することはできない。塩分をパラメータとした、凝固点降下の影響に関する試料の比熱補正方法については、複数の研究グループでこれまでに試みられているものの^{5,6)}、未だ確立

されていない。一方、測定原理の異なる誘電式含水率計は、より測定操作が簡便であるものの、塩水が試料の誘電率に直接影響を及ぼすため、測定にそもそも使用できない。

原理的には、塩を含む積雪の含水率測定にこうした含水率計はそもそも不要である。というのも、ぬれ雪の雪温と融解水の塩分の2つの情報から、モル凝固点降下の式を用いて含水率は求まるはずである。この点については、先行研究で検討された形跡がない。しかしながら、自然積雪での雪温の代表性、含水率の空間的な不均一性などの問題があり、従来の熱量式含水率測定法とは異なる利点、欠点を有すると考えられる。

秋田谷式含水率計²⁾は熱量式の代表格であり、野外で行なう測定操作を簡便かつスピーディーに行なうことができ、重量測定等の時間のかかる面倒な作業を現地で行なう必要がない、という重要な特徴を有する。このため、他の熱量式含水率計と比較して、吹きさらしの海氷上での重量測定などが不要であり、悪条件の天候下でも対応が可能と言える。

本研究は、塩を含む積雪含水率を測定するためのいくつかの方法の比較検討を目的とする。具体的には、自然積雪のざらめ雪にNaClを入れた試料を用いて、(1)比熱補正を行なわない、熱量式含水率計での直接測定方法、(2)塩水を含む氷の比熱補正を施す方法、および(3)塩分と雪温からモル凝固点降下式を用いた方法について、野外実験を通して測定値を比較し、考察を行なった。

¹ 北見工業大学
² 気象研究所

Kitami Institute of Technology
Meteorological Research Institute

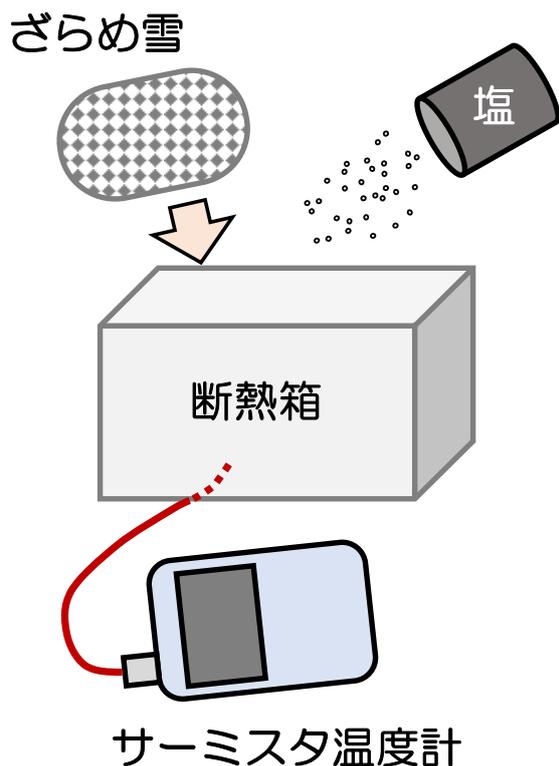


図1 塩を含む積雪試料の生成方法

2. 実験方法および解析方法

2020年3月15-16日の午前中、気温が0℃前後の時間帯を選んで、野外で実験・測定を行なった。概念図を図1に示す。自然積雪のざらめ雪を採取し、底にサーミスタセンサを埋め込んだ小型の断熱箱（容積約10L）にこれを入れて、適量のNaCl粉末をふりかけては、フタを閉めた断熱状態で、温度が安定するまで数分程度、箱全体を振ることで攪拌した。そして、断熱箱のフタを素早く開けて、このざらめ雪試料を3回ずつ少量採取し、秋田谷式含水率計²⁾で試料の含水率を求めた(図2)。また、比較・検証のために塩分測定用の試料も合わせて少量採取した。さらに、断熱箱内のざらめ雪試料にNaCl粉末を加えては、断熱箱内を攪拌し、試料を採取しては含水率を求める、の作業を数回繰り返した。このようにして、積雪試料は測定を迫るごとに徐々に塩分が増加し、凝固点降下により温度は氷点下となり、明らかに含水している様子を示した。

実験室内では、秋田谷式含水率計による通常の導出方法にしたがい、試料の含水率を求めた(解析方法1)。この解析方法1で得られた含水率は、塩分効果が考慮されていない未補正の値である。

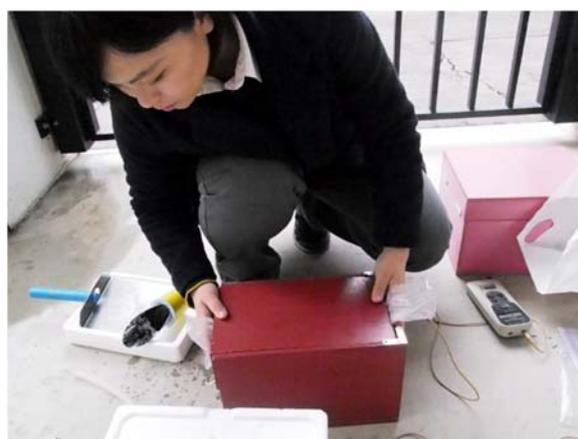


図2 含水率測定作業の様子

一方、含水率測定のために野外から持ち帰った、お湯と融解したぬれ雪との混合水の塩分を電気伝導率計(EC-33B, HORIBA)で測定し、元のぬれ雪試料の塩分を計算により求めた。

解析方法2は、解析方法1で求めた含水率に関して、凝固点降下した状態から0℃の状態までの氷の比熱補正を加えたものである。基本的には先行研究^{5,6)}と同様の考え方であり、主要な補正部分は氷の定圧比熱の式⁷⁾を積分して求められる。

解析方法3は、含水率計を全く使用しない方法である。すなわち、塩を含むぬれ雪の雪温および融解水の塩分からモル凝固点降下の式を用いて計算する。まず、氷粒子は塩を含まず、塩は全て結晶外に塩水の形で存在すると仮定する。雪温からモル凝固点降下の式を用いて、ぬれ雪を構成する塩水部分のみの塩分が計算できる。この塩分は、試料温度、NaClの分子量、および水のモル凝固点降下を用いて求められる。一方、塩を含むぬれ雪試料は、採取後に融解させればその塩分は低下する。秋田谷式含水率計を用いる方法では、お湯と融解したぬれ雪との混合水の塩分が得られる

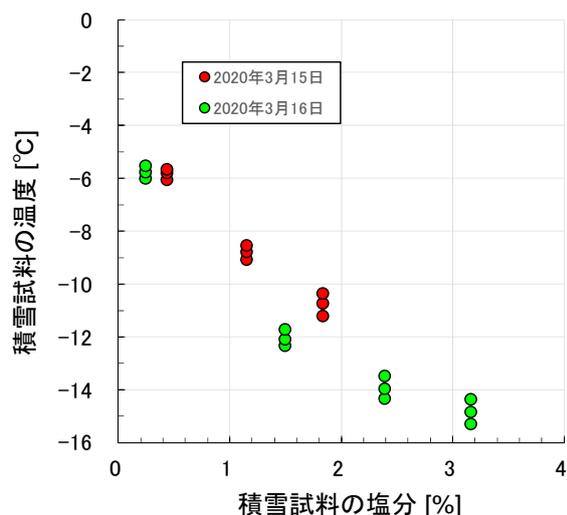


図3 塩を含む積雪試料の温度と塩分との関係

ことから、初期状態のぬれ雪が融解した状態の塩分を見積もることができる。これらの情報から、初期状態の含水率を推定することができる。

3. 測定結果および考察

まず、含水率測定前に求めた積雪試料の素性について説明する。図3は、塩を含む積雪試料の温度と塩分の関係である。オリジナル状態の積雪試料に塩を加えていくと、温度が次第に低下していく様子がわかる。積雪試料全体としての塩分は、最大で3%台に達し、温度は -15°C 近くまで低下した。また、各塩分の状態で3回ずつ、秋田谷式含水率計用に試料を採取しては、含水率測定を実施し、断熱箱を再度攪拌する、を繰り返すが、図で示されるように、その間の試料の温度上昇は最大でも 0.5°C 程度に留まっている。なお、塩の投入量は3/15より3/16の方が多めである。

図4は、解析方法1と解析方法2の含水率の差を、積雪試料の塩分に対してプロットしたグラフである。縦軸は値が負であることから、比熱に関して未補正の解析方法1の含水率は、比熱補正された解析方法2に対して過小評価する、ということを示している。端的に言えば、秋田谷式などの熱量式含水率計を用いて、塩を含む積雪の含水率を測定すると、数%程度は小さめの値となる。なお、秋田谷式含水率計の測定精度は $\pm 1\%$ 程度であり²⁾、この差は有意である。また、塩分の上昇とともにこれらの含水率の差は開いていき、塩分約3%で含水率の差は約9%に達した。現実の海氷上の積雪で、海水が積雪の空隙に染み込むイメージで考えても、積雪試料全体で塩分が3%を越える

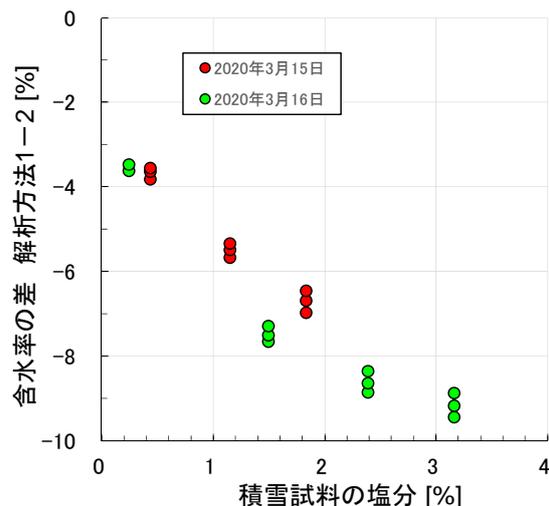


図4 塩を含む積雪試料の塩分に対する、含水率の解析方法1と解析方法2の差

ことは少ないと思われるが、体積の半分が氷、もう半分が海水であれば塩分は1.5%程度にはなりうる。すなわち、熱量式を原理とする含水率計では6、7%程度は含水率を過小評価すると言える。

最後に、解析方法1および2の含水率を、解析方法3の含水率に対してプロットしたグラフを図5に示した。まず、注目すべきことは、解析方法2と解析方法3の相関は極めて良く、ほぼ1:1の直線上にある。これに対し、解析方法1は解析方法3に対し、過小評価している傾向が明瞭にわかる。なお、既に図3および図4で示されているとおり、塩分は0.2%~3.2%の範囲であり、海氷上の自然積雪で考える塩分範囲をほぼ網羅している。

解析方法2と解析方法3の相関がよい、という事実だけでは、両者とも塩分を含む含水率測定法として問題ない、との証明にはならないが、モル凝固点降下を基本原理とする、相対的に単純な解析方法3に大きな問題があるとは考えにくい。解析方法3の問題点があるとすれば、塩分が小さい場合に含水率の誤差が大きくなることである。しかしながら、今回の実験における塩分の範囲であれば、解析方法3も十分、適用可能であると考えられる。

本実験の結果は、従来検討されてこなかった、試料の雪温と塩分の測定から含水率を求める方法が実用的である可能性を示している。無論、野外においては、雪温分布や塩分の空間的不均一性が問題となるかもしれないが、多点で測定することにより、海氷上の塩混じりの積雪含水率を、「従

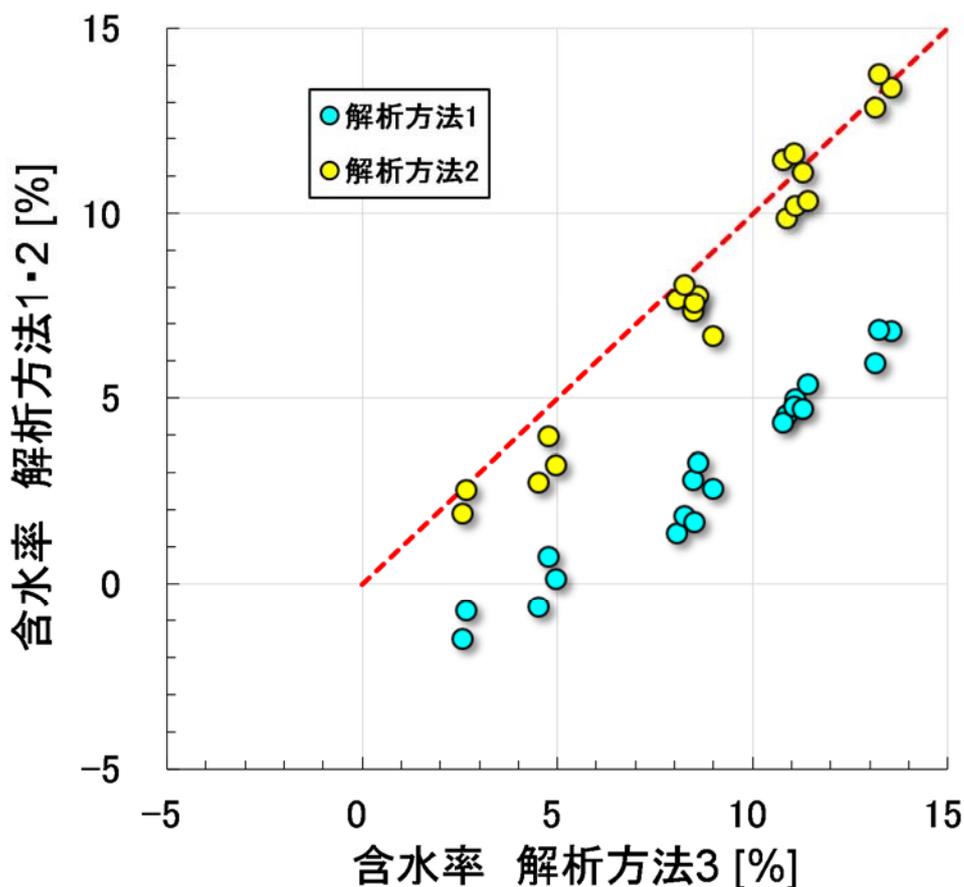


図5 含水率に関する、本実験で求められた3種類の解析方法の相関図（赤点線は1：1のラインを示している）

来型の含水率計を用いずに求められることを示唆する。また一方では、熱量式（秋田谷式）含水率計で現場測定を行ない、実験室に持ち帰って重量測定の後、塩分測定も実施すれば、氷の比熱補正により正しい含水率が求められることもわかった。

4. おわりに

今後は、野外観測データを中心に解析を実施し、本研究で提案された含水率測定法がフィールドで適用可能かどうかについて検討を行なう予定である。

【謝辞】

三菱重工冷熱株式会社の小嶋真輔博士には、塩混じりの積雪含水率測定法について多くの助言をいただいた。

【参考文献】

1) 木村忠志 (1969)：積雪含水率計の小史．雪氷，31(4)，104–107.

- 2) 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.
- 3) Kawashima, K., Endo, T. and Takeuchi, Y. (1998): A portable calorimeter for measuring liquid-water content of wet snow. *Ann. Glaciol.*, 26, 103–106.
- 4) 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.
- 5) 小嶋真輔，谷川朋範，八久保晶弘，榎本浩之，館山一孝 (2005)：海氷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.
- 6) 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.
- 7) Dorsey, N. E. (1940): *Properties of ordinary water-substance in all its phases: water-vapor, water, and all the ices*. New York, Reinhold Pub. Corp.