



| | |
|------------------|---|
| Title | 雪氷混相流の研究 I : 雪氷混相流の定義と分類 |
| Author(s) | 前野, 紀一; MAENO, Norikazu; 成瀬, 廉二 他 |
| Citation | 低温科学. 物理篇, 44, 131-137 |
| Issue Date | 1986-03-10 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/18524 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 44_p131-137.pdf |



Norikazu MAENO, Renji NARUSE, Kouichi NISHIMURA, Iwao TAKEI, Takao EBINUMA, Shigeki MURAKAMI, Shun'ichi KOBAYASHI**, Atsushi SATO*** and Hiroshi NISHIMURA**** 1985 Studies on Mixed-phase Snow Flows. I. Definition and Classification of Mixed-phase Snow Flows. *Low Temperature Science*. **A**, **44**. (With English Summary p. 137)

雪氷混相流の研究 I*

—雪氷混相流の定義と分類—

前野 紀一・成瀬 廉二・西村 浩一
竹井 巖・海老沼孝郎・村上 茂樹
小林 俊一**・佐藤 篤司*** 西村 寛****

(低温科学研究所)

(昭和60年10月受理)

I. はじめに

筆者等はこれまで「流動状態の雪 (fluidized snow)」の構造と物性を実験的に調べ¹⁻⁴⁾、吹雪や雪崩等の雪氷現象を雪の流動化現象として理解すべきであることを示した⁵⁾。その後、幾つかの相からなる「混相流 (mixed-phase flow)」という立場からは、流動状態の雪が、雪氷学以外の種々の分野において重要研究課題として調べられている、火砕流、土石流、泥流、流砂、乱泥流等、あるいは化学工学における粉体輸送等、に基本的に類似していることが明らかとなった。しかし、雪氷粒子の特徴を反映して、相異点も存在し、特に「雪氷混相流」という術語が作られた⁶⁾。雪氷混相流の立場は、流動状態の雪の立場より広く、後で述べるように多種多様の雪氷現象を包含する。

本研究の目的は、雪氷混相流の構造と物性を明らかにし、自然および人工の諸々の雪氷現象との関連と応用を調べる点にある。本論文では、雪氷混相流の定義と分類を行い、雪氷混相流の特徴と流体力学モデルの可能性について述べる。雪氷混相流の実験と解析の結果については別論文⁷⁻⁹⁾として報告する。

II. 雪氷混相流の定義

雪氷粒子を含む流体を「雪氷混相流 (Mixed-phase snow flow)」と定義する。雪氷粒子としては、降雪粒子や積雪粒子だけでなく、 H_2O の固相からなるすべての粒子を含むことにする。したがって、物理的生成過程の違いに着目すれば、雪氷粒子は、水蒸気の昇華凝結で生じた氷 (雪結晶、霜、積雪粒子等) の場合もあるし、水の凍結で生じた氷 (フラジール・アイス、凍結水滴、等) の場合もある。

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2783号

** 現在 新潟大学積雪地域災害研究センター

*** 現在 科学技術庁国立防災科学技術センター新庄支所

**** 現在 (株) MTS 雪氷研究所

混相流は、文字通り2つ以上の相 (phase) が混合した流体を意味する。雪氷混相流の場合、固相の雪氷粒子は、気相あるいは液相の流体と混合して混相流を形成する。雪氷粒子が気相の流体と混合しているとき、もしも温度が氷の融点の近辺にあるならば、雪氷粒子は種々の原因により部分的に融解して液相を生じ、三相の混相流となることがある。雪氷粒子が液相の流体と混合しているときも同様で、たとえば何らかの原因で空気が混入したりすると三相の混相流となる。

たとえば、雪は積雪粒子と空気からなる二相の混合物であるから、それが水に混入した流れは、典型的な三相の混相流である。除雪中の濡れ雪や流雪溝の流れがその例と考えられる。

化学工学の分野では、二相か三相かを明確にし、固気二相流、固液二相流、気液二相流、あるいは固気液三相流という術語が使われることがある¹⁰⁾。しかし、雪氷混相流においては、後で述べる雪氷混相流の特徴のために、これらの区別は困難あるいは無意味の場合が多い。なお、混相流のかわりに「多相流 (multi-phase flow)」という術語が使われることもある。

III. 雪氷混相流の分類

1. 構成要素による分類

雪氷混相流を、構成要素の一つである流体の違いで分類すると第1表のようになる⁶⁾。雪氷粒子を含む流体が気相の場合が気相雪氷混相流、液相の場合が液相雪氷混相流である。

第1表 雪氷混相流の分類と例

| | |
|---------|---|
| 気相雪氷混相流 | 空気と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例： 雪崩，吹雪，降雪，除雪中の雪，等 |
| | 空気以外の気相と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例： 地球以外の惑星の降雪，土星の輪，等 |
| 液相雪氷混相流 | 水と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例： フラジル・アイス，流雪溝，融雪流出（雪崩），等 |
| | 水以外の液相と雪氷粒子からなる雪氷混相流 例： 雪氷粒子を含む掘削原油，等 |

気相雪氷混相流の中で最も重要なのは、流体が空気の場合である。雪崩、吹雪、降雪、除雪中の雪、等がその例である。空気以外の気相からなる雪氷混相流は将来地球以外の惑星で見出される可能性がある。

液相雪氷混相流の中で流体が水の場合の代表例は、流雪溝を流れる雪である。融雪期の濡れ雪の底雪崩等もこの例と考えられる。この他、河や海の水が風による乱流熱拡散で冷却し凍結する時の、微小氷結晶 (frazil ice) を含む流れも、液相雪氷混相流の典型的な例の一つとみなすことができる。

2. 発生機構による分類

雪氷混相流においては、粒子と流体の間の相互作用が特に大きく、構造決定の重要な要素となる。したがって、雪氷混相流の発生および持続過程において、運動の原因となる駆動力が

流体にあるか、あるいは雪氷粒子にあるか、によって混相流の構造は著しく異なる。

一つは、運動の駆動力が雪氷粒子にある場合である。この場合、何らかの原因で初めに雪氷粒子が運動を開始すると、その結果として粒子の周りの流体も動き始め、雪氷混相流を形成する。雪崩や機械除雪中の雪の流れは、この場合に相当する。特に、大規模な新雪雪崩のとき発生するといわれる「雪崩風 (avalanche blast あるいは avalanche wind)」は、その好例といえる。

他の一つは、運動の駆動力が流体にある場合である。このとき、流体の流れが雪氷粒子の運動を促し、雪氷混相流を形成する。吹雪や流雪溝の雪の流れがその例である。また、空気流によって作られる、いわゆる「流動層 (fluidized bed)」¹⁾ もこの例に分類される。

IV. 雪氷混相流の特徴

雪氷混相流の重要な特徴は二つある。一つは、雪氷粒子間の相互作用に関するものであり、他の一つは粒子・流体間の相互作用に関するものである。次に各々について説明する。

第一の特徴は、雪氷粒子間の付着力が大きく、かつその値が粒子の大きさや形、あるいは温度等の違いで大きく変化する点である。雪氷粒子の場合の付着力は、通常の機械的なひっかかりの他に、接触部における氷の実質的結合、すなわち焼結現象によって発生する。これは、われわれが取扱う雪氷混相流の多くが、物理的には水の融解温度 ($T_m = 273 \text{ K}$) の 80~100%、すなわち $-55^\circ\text{C} (= 0.8 T_m) \sim 0^\circ\text{C} (= T_m)$ の間で出現するからである。雪氷粒子間のこのような相互作用は、温度が高いほど大きい。

雪氷混相流の第二の特徴は、粒子と流体の間の相互作用が大きい点である。一般に混相流における粒子 (体積 V , 密度 ρ_P) と流体 (密度 ρ_F) の間の相互作用は、次の粒子の運動方程式で表現される。

$$\rho_P V \frac{du}{dt} = F - D \quad (1)$$

ここで、 u は速度、 t は時間、 F と D は、それぞれ粒子に作用する外力と抵抗力である。いま、外力としては重力、抵抗力としては粘性を考えると、 F と D は、

$$F = (\rho_F - \rho_P) g V \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho_F A C_D u^2 \quad (3)$$

である。 g は重力加速度、 A は粒子の流体力学的断面積、 C_D はレイノルズ数で決まる抵抗係数である。式 (1)~(3) より、運動方程式は

$$\frac{du}{dt} = (s-1)g - \frac{s}{2} (A/V) C_D u^2 \quad (4)$$

となる。ただし s は、流体と粒子の密度の比である ($s = \rho_F / \rho_P$)。

雪氷混相流における粒子・流体間の相互作用は式 (4) から二つの理由で大きいことが理解できる。一つは、雪氷粒子の形が一般に複雑で表面積が大きいいため、流体力学的断面積 A が大きい点である。 A が大きいと、式 (4) から流体の粘性に関する抵抗が重要となることが明らか

かである。

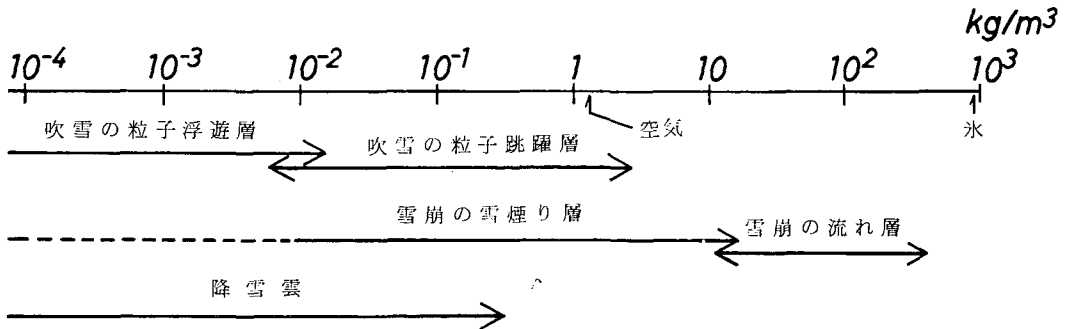
もう一つの理由は雪氷粒子の密度が他の粒子に比べて小さい点である。第2表から明らかなように、雪氷粒子の密度比 (s) の値は、他の粒子に比べてかなり大きい。 s の値が大きいならば、式(4)において右辺第1項、第2項が重要となり、粒子・流体間相互作用が大きくなる。なお、雪氷粒子が水と混相流を作る場合、 $s > 1$ となる点は特別の注意が必要である。

第2表 種々の混相流における流体の密度 (ρ_F) と粒子の密度 (ρ_P) の比 ($s = \rho_F / \rho_P$)

| 流体 (F) 粒子 (P) | 空 気 (0°C, 1 気圧) | 水 (0°C) |
|------------------|-----------------------|------------|
| 氷 | 14.2×10^{-4} | 1.09 |
| ポリ塩化ビニル | 8.1~10.8 | 0.63~0.83 |
| 土, 砂 | 4.3~5.6 | 0.33~0.43 |
| セメント | 4.1~4.6 | 0.32~0.36 |
| 金属焼鉱 | 2.6~3.3 | 0.20~0.25 |

上述した雪氷混相流の二つの特徴の他に、雪氷現象全体を見渡したとき明らかとなる雪氷混相流の特徴がある。それは、雪氷混相流における雪氷粒子の空間密度が極めて広範囲に分布する事実である。

たとえば、気相雪氷混相流の代表例である吹雪と雪崩における雪氷粒子空間密度を第1図に示す。ここで、空間密度は、単位体積に含まれる雪氷粒子の総質量である。典型的な吹雪は雪面近傍の「粒子跳躍層 (saltation layer)」とその上の「粒子浮遊層 (suspension layer)」からなることが知られている。粒子跳躍層の粒子空間密度はオーダーでおおよそ $10^{-2} \sim 1 \text{ kg/m}^3$ 、粒子浮遊層のそれは $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ である。



第1図 吹雪と雪崩の雪氷粒子空間密度
水と空気の密度は 0°C, 1 気圧の値

同様に、典型的な乾燥雪崩は下部の「流れ層 (flowing layer)」と「雪煙り層 (snow-dust layer)」からなる。流れ層の粒子空間密度はおおよそ $10 \sim 400 \text{ kg/m}^3$ 、雪煙り層のそれは $10^{-4} \sim 10 \text{ kg/m}^3$ の範囲にある。ただし、雪氷粒子の空間密度 10^{-2} kg/m^3 は視界約 10 m に相当するから、雪崩の場合、それ以下となると、目視では雪崩 (の雪煙り層) とは判定されにくい¹¹⁾。しかし、雪崩風による被害の存在や、雪氷混相流の実験^{7,8)} で明らかとなるように、雪崩の粒子密度としては 10^{-2} kg/m^3 以下の層も考慮する必要がある。

吹雪と雪崩の例でも明らかなように、一般に雪氷混相流の粒子空間密度は極めて広い範囲 ($10^{-4} \sim 10^3 \text{ kg/m}^3$, すなわち約 10^7 倍) に分布する。したがって、その構造や物性も多様である。また、雪氷混相流の環境温度が 0°C をはさんで変動するような場合、雪氷粒子の物性や相の数

の変化が起りうる。

V. 雪氷混相流の流体力学モデル

雪氷混相流の流体力学モデルは、まだ完全な形では提出されていない。しかし、これまでに断片的あるいは特定の雪氷現象に関連して提出された取扱いは1)多相流的取扱い、および2)単相流的取扱いの2種類に分けることができる。

1. 多相流的取扱い

この取扱いでは、雪氷混相流は固体粒子と流体の多相流とみなされる。基本的には、初めに粒子間あるいは粒子・流体間の力学的相互作用を考慮して、粒子に関する基礎方程式が組立てられ、解かれる。次に、混相流全体の挙動を得るために、空間的あるいは時間的平均操作が行なわれる。

吹雪の場合の粒子跳躍や乱流拡散の取扱いはこの場合に分類される⁵⁾。

2. 単相流的取扱い

この取扱いでは、固体粒子と流体を一体と考え、雪氷混相流全体を単相の流体とみなす。雪崩に関する Voellmy¹²⁾ の理論は、雪崩を雪氷混相流と見なした時の最初の単相流的取扱いといえる。Voellmy は雪崩を一定の内部粘性を持った流体と仮定し、運動量とエネルギーの保存則から雪崩の速度と滑走距離を求めた。ただし、速度勾配とせん断応力との関係を表わす構成方程式や流体力学モデルの問題には立入らず、単に、雪崩の表面と底面でせん断応力が速度の2乗に比例するという仮定を置くにとどまった。

雪氷混相流の見掛けの粘性係数 (η) は、西村達^{2,4)} により、雪の流動層 (fluidized bed) において測定された。値は、雪氷粒子の粒径、空間密度、気流速度等の違いにより変化したが、空間密度約 200 kg/m³ 以上の流動層の内部ではおおよそ $\eta=0.001\sim 0.4$ Pa·s の値を示した。(ちなみに、0°C、1気圧における水と空気の粘性係数は、それぞれ 0.0018 Pa·s および 1.7×10^{-5} Pa·s である)。この値は、動粘性係数 ($\nu=\eta/\rho$, ρ は密度) で表わすと、 $\nu=4\times 10^{-6}\sim 8\times 10^{-4}$ m²/s に相当する。最近 Lang 達¹³⁾ は、雪面のせん断・変形の実験を行ない、密度 400 kg/m³ の流動状態の雪の動粘性係数として $\nu=4\times 10^{-4}\sim 2.5\times 10^{-3}$ m²/s という値を得た。西村達と Lang 達とは、雪の流動状態も測定方法もまったく異なる。したがって、測定結果の類似性にどのような意味があるかは、このような測定をもっと積み重ねてから明らかになるであろう。

測定された見掛けの粘性係数の物理的解釈は、雪氷混相流の流体力学モデルの選択と関係している。土石流の理論的取扱い¹⁴⁾ から類推すると、雪氷混相流の流体力学モデルとしては、ニュートン流体、ビンガム流体、あるいはダイラタント流体が適用できそうである。ビンガム流体では、せん断応力 (τ) と速度勾配 (du/dy) の関係は

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dy} \quad (5)$$

と書き表わされる。ここで、 τ_0 は降伏応力で、 $\tau_0=0$ のとき、式(5)はニュートン流体の構成方程式となる。

ダイラタント流体は、変形あるいは流動の過程で、体積が変化するのが特徴である。この

流体モデルは、理論的にも実験的にも、Bagnold¹⁵⁾によって初めて組立てられた。Bagnoldの研究結果によれば、粒子の空間密度が小さい領域ではニュートン流体として振舞うが、粒子密度が高くなると、粒子同士の衝突等による慣性効果が卓越し、流れに垂直の方向に、速度勾配の2乗に比例するせん断応力、

$$\tau \propto \rho_p (d\lambda)^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (6)$$

が現われる。ここで、 d は粒径、 λ は粒子の一次元空間密度である。

雪氷混相流の特徴 (IV節参照) から予想されるように、雪氷混相流を単一の流体力学モデルで表現するのは難かしいかもしれない。しかし流体力学モデルを指定しなければ、実測される粘性係数の物理的意味も明らかとはならない。雪氷混相流の構造と物性には、解決されるべき多くの問題が残されている。

謝 辞

本論文の内容に関して有益な議論をして下さいました北大名誉教授の石田 完博士に感謝致します。この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費補助金から支弁された。

文 献

- 1) 前野紀一・西村浩一 1978 流動状態の雪の研究 I. 低温科学, 物理篇, **36**, 77-92.
- 2) 西村浩一・前野紀一 1978 流動状態の雪の研究 II. 低温科学, 物理篇, **36**, 93-102.
- 3) Maeno, N. and Nishimura, K. 1979 Fluidization of snow. *Cold Regions Sci & Tech.*, Vol. **1**, No. **2**, 109-120.
- 4) Maeno, N., Nishimura, K. and Kaneda, Y. 1980 Viscosity and heat transfer in fluidized snow. *J. Glaciol.* Vol. **26**, No. **94**, 263-274.
- 5) 前野紀一 1982 吹雪の発生機構と雪の流動化. 科学, Vol. **52**, No. **1**, 34-41.
- 6) 前野紀一 1984 雪氷混相流. 混相流の流動のダイナミクスと応用技術. 日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会混相流小委員会編, 25-49.
- 7) 西村浩一・海老沼孝郎・小林俊一・佐藤篤司・成瀬廉二・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 II. 気相雪氷混相流の実験装置と内部構造. 低温科学, 物理篇, **44**, 139-155.
- 8) 海老沼孝郎・西村浩一・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 III. 雪氷粒子と空気との相互作用. 低温科学, 物理篇, **44**, 157-164.
- 9) 成瀬廉二・西村浩一・前野紀一 1985 雪氷混相流の研究 IV. 停止と堆積. 低温科学, 物理篇, **44**, 165-176.
- 10) 辻 正一 1984 容器流れ学. 日刊工業新聞社, pp. 223.
- 11) Mellor, M. 1977 Dynamics of snow avalanches. *In Rockslides and Avalanches* (ed. B. Voight and others). Vol. **1**, Elsevier, Amsterdam, 753-792.
- 12) Voellmy, A. 1955 Über der Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, Jahrg. **73**, Ht. **12**, 159-62.
- 13) Lang, T. E. and Dent, J. D. 1983 Basal Surface-layer properties in flowing snow. *Annals of Glaciol.* **4**, 158-162.
- 14) 芦田和男・高橋 保・道上正規 1983 河川の土砂災害と対策. 森北出版, 東京, pp. 254.
- 15) Bagnold, R. A. 1954 Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in Newtonian fluid under shear. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, **225**, 49-63.

Summary

A mixed-phase snow flow was defined as a fluid containing ice particles; particles may be ice particles formed by the deposition of water vapor (snow, frost, etc.) and by the freezing of liquid water (frazil ice, etc.).

Mixed-phase snow flows were classified into two kinds according to the phase of the fluid. One is gaseous fluids containing ice particles, and the other is liquid fluids containing ice particles. Blowing snow, snow avalanches, snow precipitation, and snow under plowing belong to the former, and frazil ice and wet avalanches belong to the latter.

Mixed-phase snow flows are distinctly characterized by strong interaction, one between ice particles, and the other between ice particles and fluids. The former interaction is attributed to the adhesion or easy formation of bonds between ice particles because of the fast sintering process. The latter interaction is caused by the relatively smaller density of ice compared with other materials and the complex forms of ice particles so that the drag due to the fluid is large. The additional characteristic of the mixed-phase snow flow is that the density of ice particles is found in an extremely wide range in various glaciological phenomena; e. g. in blowing snow and avalanches it varies by the order of 10^7 .

It is suggested that the Newtonian, Bingham, and dilatant flow models may be applied to the treatment of dynamics of mixed-phase snow flows; such a treatment then should make clear the physical implication of the kinematic viscosity of fluidized snow or mixed-phase snow flow, $4 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (Maeno and other, 1979, 1980) and $4 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Lang and Dent, 1983).