

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：10106

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13528

研究課題名(和文)斑点ぬれ雪の生成メカニズムの解明

研究課題名(英文)Clarify the formation process of white spotted wet snow

研究代表者

亀田 貴雄 (Kameda, Takao)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号：00233974

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：2015/16年冬季から2017/18年冬季までの3冬季にわたり、北見市、新潟市、金沢市にて斑点ぬれ雪の生成過程の観察を実施した結果、斑点ぬれ雪の生成時には、水飽和した濡れ雪に含まれている小さな気泡はほぼ数分以内に合体して、直径1cm以上の大気泡が形成され、それが白い斑点となることがわかった。この過程では白い斑点は浮いており、数cm程度水平方向に移動することもわかった。

また、弾性理論に基づき、白い斑点のパターン形成を検討した結果、白い斑点の間隔は濡れ雪の厚さの $3/4$ 乗、濡れ雪のヤング率の $1/4$ 乗に比例して長くなり、重力加速度の大きさの $1/4$ 乗に反比例することがわかった。

研究成果の概要(英文)：Observations using interval cameras on white spotted wet snow have been extensively carried out at Kitami (Hokkaido pref.), Niigata (Niigata pref.) and Kanazawa (Ishikawa pref.) in Japan from 2015/16 to 2017/18 winter seasons. We also examine the formation process of white spots on wet snow surface using elastic deformation theory.

We found that large air bubbles of 1 cm diameter in soaked wet snow was formed from small air bubbles of about 1mm diameter within a few minutes. The large air bubbles float in snow layer, and the air bubbles move horizontally at 1 to 3 cm during the formation process of the large air bubbles. According to the elastic deformation theory, the distance between the large air bubbles is proportional to the power of $3/4$ of the thickness of soaked snow layer, $1/4$ of Young's modules of the snow layer and $-1/4$ of acceleration of gravity.

研究分野：雪氷学

キーワード：斑点ぬれ雪 生成メカニズム 濡れ雪 水飽和した濡れ雪 白い斑点 白い斑点模様

1. 研究開始当初の背景

2009年11月1日（日）の早朝から午前10時頃にかけて、亀田らは北海道北見市と北海道常呂郡置戸町の一部の道路、歩道、駐車場などの透水性のない路面上の濡れ雪（積雪深5~10mm程度）表面に、直径10~100mm程度の白い斑点模様が多数形成されていることを観察した（図1）。これは雪が丸く集まっているように見えるが、詳しく観察してみると、実際には濡れ雪の中に封入された空気が日射を散乱させ、「白い斑点」を作っていた。このような現象はこれまでに断片的にしか報告されたことがなく、特別な名称もなかったため、亀田はこの現象を「斑点ぬれ雪」（white spotted wet snow）と命名した。

その後、雪氷研究大会で斑点ぬれ雪が形成される気象条件、断面構造、推定した生成過程（亀田・高橋，2010）、全国10ヶ所で実施した広域観測（亀田ら，2011）、白い斑点の水平分布の特徴および斑点ぬれ雪内部の空気量（亀田ら，2012）などを報告した。また、2014年にはこれまでの成果を雪氷学分野の国際学術雑誌で論文として出版した（Kameda *et al.*, 2014）。

これらの結果から斑点ぬれ雪の特徴はかなりわかってきたが、その生成過程、特に小さな気泡が集積し、ある一定の大きな気泡に成長するメカニズムは不明のままである。その解明には集中的な斑点ぬれ雪の観察と再現実験、形成に関する理論的な取り扱いが必要な状況にある。



図1 斑点ぬれ雪

（2009年11月1日北海道置戸町にて撮影）。

2. 研究の目的

斑点ぬれ雪の自然観察、再現実験およびその結果に基づく理論の構築を通して以下の4点を明らかにする。

- (1) 斑点ぬれ雪の分類
- (2) 白い斑点模様の空間分布の特徴
- (3) 観察に基づく斑点ぬれ雪の形成過程の解明
- (4) 弾性理論に基づく斑点ぬれ雪の形成条件の解明

3. 研究の方法

2015/16年冬季から2017/18年冬季までの3冬季にわたり、北見市、新潟市、金沢市にて斑点ぬれ雪の生成過程に関して、インターバルカメラを用いた観察を実施した。つくば市および東広島市でも観測を実施した。得られた画像を解析し、斑点ぬれ雪の生成過程を調べた。

また、濡れ雪に弾性変形を与えたときの復元力を計算することで、白い斑点のパターン形成についての理論的な検討を実施した。

4. 研究成果

(1) 斑点ぬれ雪の分類

斑点ぬれ雪の観察結果をまとめた結果、斑点ぬれ雪は、図2に示すA型からD型の4種に分類できることがわかった。

A型とは、新たに堆積した3cm深程度以下の自然積雪から生成、広域に分布することが特徴である。B型はいったん堆積した自然積雪の融解過程で生成し、比較的狭い領域（5m×5m未満程度）で観察されることが特徴である。C型は、車のタイヤや人の足跡など、圧雪に生成されることが特徴である。D型は、自然積雪または圧雪から生成されたが、マイナスの気温のため、表面が氷で覆われていることが特徴である。

なお、A型が観察されるのは比較的稀だが、それ以外のタイプは、1~3cm程度の濡れ雪

がアスファルトやコンクリート路面にあれば、比較的容易に観察される。

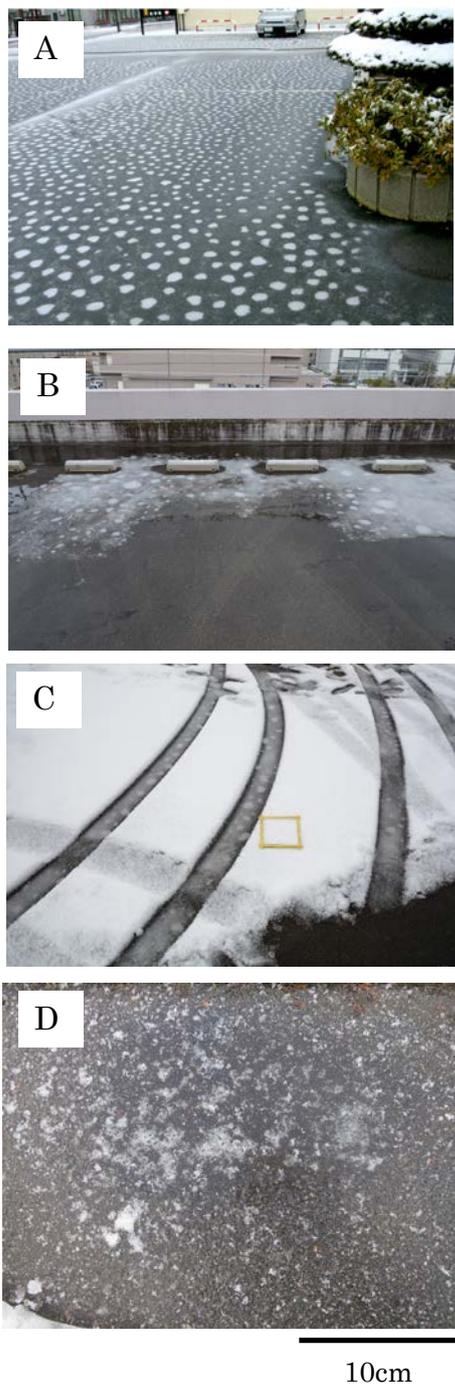


図2 4種類 (A型~D型) の斑点ぬれ雪。
(撮影者 A: 山口久雄, B および C: 藤野丈志, D: 亀田貴雄)

(2) 白い斑点模様の空間分布の特徴

図3に解析の対象とした観測事例を示す。それぞれ濡れ雪に視覚可能な大きさの白い斑点模様が形成された直後あるいは成長期と考えられる斑点模様の鉛直上方からの写

真であり、(a), (b) は自然積雪でアスファルト舗装面, 土の上の積雪, (c) はコンクリート舗装面上の車のタイヤの圧雪に形成されたものである。解析には MATLAB で作成した画像処理プログラムを用いて、斑点部分の抽出と認識を行って、斑点の個数 N [個], 数密度 n [個/m²], 平均相互間隔 l_{ave} [mm], 円相当直径 d_c [mm]などを求めた。なお, 平均相互間隔は数密度から $l_{ave} = 1/\sqrt{n}$ で求めた。

表1にそれぞれの斑点模様の空間分布に関する解析結果をまとめる。斑点の数は画像の視野面積に依存するものであり, 空間分布の比較をする上で重要ではない。数密度 n は, (a), (b), (c) の順で減少し, (c) の圧雪の場合には極端に少ないものとなっている。一方, 斑点の平均相互間隔 l_{ave} と円相当直径 d_c は (a), (b), (c) の順で大きく, 数密度とは逆の関係にある。また, 斑点の大きさはそれぞれの場合でほぼ均一であることもわかる。すなわち, 生成・成長期における斑点はほぼ大きさが一定であるととともに, 単位面積内

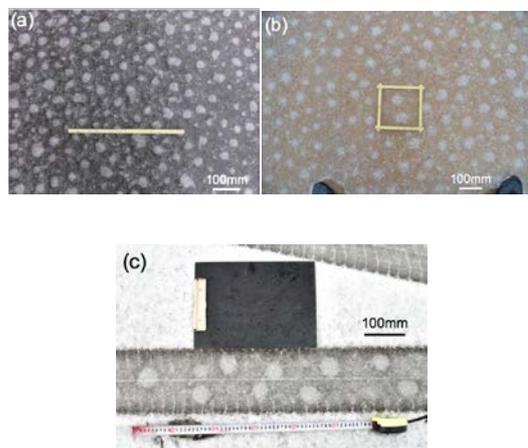


図3 解析に用いた3種類の白い斑点模様の鉛直写真。

表1 斑点の空間分布の特性と円相当直径。

| | (a) | (b) | (c) |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| 個数 N [個] | 502 | 51 | 10 |
| 数密度 n [個/m ²] | 312.8 | 125.4 | 83.2 |
| 平均相互間隔 l_{ave} [mm] | 56.5 | 89.3 | 109.7 |
| 円相当直径 d_c [mm] | 22.8 ± 6.5 | 26.9 ± 8.3 | 39.8 ± 3.6 |

に形成される斑点の数が多い場合は斑点相互の間隔は狭く小さい斑点が形成され、逆に斑点の数が少ない場合は間隔が広く、大きな斑点が形成されていることがわかる。斑点の大きさと相互間隔が比例することは、斑点が相互の間の積雪中に含まれる空気を取り込んで形成されることから説明できる。

斑点が形成される間隔（大きさ）が何で決まるかとなると、今回の結果からは積雪の厚さ((a)と(b)の比較)と濡れ雪の硬度 ((a), (b)と (c)の比較) が関与しているのではないかと考えられる。

(3) 観察に基づく斑点ぬれ雪の生成過程

図 4 にこれまでの観察に基づき新たに判明した斑点ぬれ雪の生成および消滅過程をまとめる（以下の 1) から 9)は図 4 の図の番号に相当する）。

- 1)湿った降雪（みぞれ）がアスファルトなどの道路上に降る。
- 2)路面上に湿った積雪が堆積する（1～3cm程度）。
- 3)積雪が部分的に融解し、水を含有する。
- 4)融雪が進み、積雪全体が水飽和となる。濡れ雪中の空隙が小さな気泡となり、それが集積して、大きな気泡に成長する。
- 5)～7)濡れ雪下部の路面に接触した雪が融け、路面上に水層が生成される。大きな気泡は浮力により水層と濡れ雪の境界に位置する。濡れ雪表面は気泡のため、盛り上がる。また、濡れ雪が厚い部分では内部の大きな気泡には周囲よりも大きな圧力がかかるため、気泡は濡れ雪が薄い部分へ移動する。金沢と新潟での観察では、白い斑点が水平方向に数 cm 移動することがわかったが、これは上記のような濡れ雪内部での圧力差が原因であると考えられる。

藤野による観察ではこの過程では小気泡は移動と合体を繰り返し、直径 1mm 前後の小気泡が 1 分未満の時間で集まり、直径 1cm

程度の大気泡が生成されることがわかった。この時には積雪は水飽和であり、アスファルト路面などの上には薄い水の層があり、飽和した積雪がその水に浮いた時に小気泡が集積して大気泡が形成されることもわかった。8)プラスの気温のため、濡れ雪に含まれている氷粒が融解し、水が蒸発する。気泡上の濡れ雪と周囲の濡れ雪との厚さが等しくなった時に、濡れ雪内部での圧力分布が等しくなる。このため、水平方向への大きな気泡の移動が止まり、停滞期となる。また、白い斑点の位置で濡れ雪表面が盛り上がるため、白い斑点の動きは抑制される。

9)プラスの気温のため、濡れ雪中の氷粒が融け、水分がさらに蒸発する。このため大きな気泡は接地する。大きな気泡上の氷粒が融けると、そこから空気が抜けて、白い斑点は消滅する。

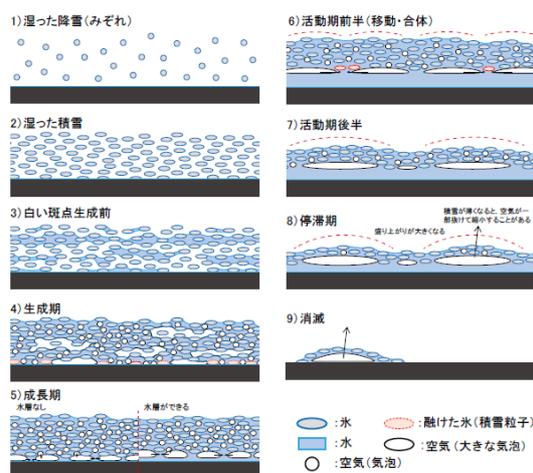


図 4 斑点ぬれ雪の生成・消滅過程。

(4) 弾性理論に基づく斑点ぬれ雪の形成条件 ① 空気の底面への集積と斑点パターン発生のトリガー

斑点ぬれ雪が形成されるためには積雪底面における空気の集積と、底面に集積した空気の瞬間的な水平方向への移動集中を説明するメカニズムが必要である。積雪底面への空気の集積は底面に形成された水で飽和された積雪層内に孤立して閉じ込められた気

泡が底面からの積雪融解に伴って順次底面に運ばれ、そこに集積すると考える。しかし、底面に空気が集積したとしても、積雪層が路面に着地していれば気泡は底面を自由には水平移動できない。水平移動が可能になるのは積雪層が底面の水層に浮遊できる条件のときと考える。このとき積雪層の厚さ h_s と全層平均密度 ρ_s 、底面の水位 h_w と水の密度 ρ_w から

$$\rho_w h_w / \rho_s h_s = 1 \quad (1)$$

を境にして、底面融解の進行、圧雪などもこの値を大きくする方に働くため、この条件が斑点ぬれ雪形成のトリガーと考えることは自然である。

②一様状態の不安定とパターン形成

底面の水の水層に浮遊している水で飽和した一様無限の多孔質の固体層があり、それが覆いとなって、底面に一様に分布した空気層がある。多孔質内の水は横方向には自由に動ける。このとき、固体に仮想的に $w = w(x)$ の非一様な弾性変形を与える。このときの復元力 q は弾性板の式を用いて

$$q = Dd^4w/dx^4 \quad (2)$$

となる。ここで、 D はヤング率 E 、ポアソン比 σ から

$$D = Eh_s^3 / 12(1 - \sigma^2) \quad (3)$$

と表される。ここで非一様な変形を図5のように与える。

$$w = \delta \sin kx \quad (4)$$

$$k = 2\pi / \lambda \quad (5)$$

この仮想変形により、多孔質内の水は凸から凹に移動再配分され、それに伴う荷重の非一様な部分 f は

$$f = \alpha \rho_w g w \quad (6)$$

となる。

ここで $f = q$ を満たす λ を λ_c とすると

$$\lambda_c = 2\pi(D/\alpha\rho_w g)^{1/4} \quad (7)$$

$q > f$ すなわち $\lambda < \lambda_c$ のとき非一様な状態は一様状態にもどり、パターンは発生しない。

逆に $q < f$ すなわち $\lambda > \lambda_c$ のとき一様状態は不安定となり、 λ_c 以上の波長のパターンが形成される。

この λ_c は以下のような関係がある。

$$\lambda_c \propto h_s^{3/4} \quad (8)$$

$$\lambda_c \propto E^{1/4} \quad (9)$$

$$\lambda_c \propto g^{-1/4} \quad (10)$$

つまり、気泡間隔は固体層の厚さの4分の3乗に比例して大きくなり、ヤング率の4分の1乗に比例して大きくなる。また重力に関しては、4分の1乗に反比例し、無重力では ∞ となり、発生しないという自然な結果となり、仮想変形の大きさ δ にはよらない。

なお、納口は1984年の論文(納口, 1984)ですでに斑点ぬれ雪に関して報告し、その形成を雪えくぼとの関連で説明していたが、今回の考察から、斑点ぬれ雪と雪えくぼは形成過程が全く異なり、似て非なるものであることがわかった。

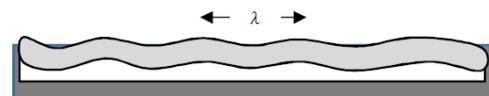


図5 水平一様な固体の板に波長 λ 、振幅 δ の微小な仮想弾性変位を与える。

<引用文献>

- ① Kameda, T., Y. Harada and S. Takahashi (2014): Characteristics of white spots in saturated wet snow. *Journal of Glaciology*, **60**(224), 1075–1083.
- ② 亀田貴雄, 原田康浩, 高橋修平 (2012): 道路上の白い斑点模様(3) — 斑点の大きさ・分布, 空気量 —. 雪氷研究大会講演要旨集, 80.
- ③ 亀田貴雄 他 (2011): 道路上の白い斑点模様(2) — 2010/2011 冬季の11地点で観察結果 —. 雪氷研究大会講演要旨集, 63.
- ④ 亀田貴雄, 高橋修平 (2010): 道路上の濡れ雪の白い斑点模様. 雪氷研究大会講演要旨集, 10.

⑤納口恭明 (1984) : 雪えくぼのパターン形成 2. 国立防災科学技術センター研究報告, **33**, 255-275.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6件)

①藤野丈志, 亀田貴雄, 原田康浩, 納口恭明, 小澤久, 村井昭夫 (2017) : 斑点ぬれ雪の白い斑点の動き観察報告 (その2). 雪氷研究大会講演要旨集, 230.

②藤野丈志, 納口恭明, 亀田貴雄, 原田康浩, 小澤久, 村井昭夫 (2017) : 濡れ雪の浮遊による斑点ぬれ雪の生成. 雪氷研究大会講演要旨集, 128.

③亀田貴雄, 藤野丈志, 村井昭夫, 原田康浩, 納口恭明, 小澤久 (2016) : 斑点ぬれ雪の生成・消滅過程および分類. 雪氷研究大会講演要旨集, 59.

④原田康浩, 藤野丈志, 村井昭夫, 納口恭明, 亀田貴雄, 小澤久 (2016) : 斑点ぬれ雪の白い斑点模様の空間分布の特徴, 雪氷研究大会講演要旨集, 60.

⑤藤野丈志, 村井昭夫, 亀田貴雄 (2016) : 斑点ぬれ雪の白い斑点の動き観察報告. 雪氷研究大会講演要旨集, 61.

⑥納口恭明, 藤野丈志, 原田康浩, 亀田貴雄 (2016) : 斑点ぬれ雪のパターン形成理論ー トリガーと不安定ー, 雪氷研究大会講演要旨集, 62.

[図書] (計 1件)

亀田貴雄, 高橋修平 (2017) : 雪氷学, 古今書院, 346pp.

6. 研究組織

(1)研究代表者

亀田 貴雄 (Kameda, Takao)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 00233974

(2)研究分担者

原田 康浩 (Harada, Yasuhiro)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 80198928

小澤 久 (Ozawa, Hisashi)

広島大学・総合科学研究科・准教授

研究者番号 : 30371743

(3)連携研究者

納口 恭明 (Nohguchi, Takaaki)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・ア
ウトリーチ・国際研究推進センター・契約
専門員

研究者番号 : 50360368

(4)研究協力者

村井 昭夫 (Murai, Akio)

藤野 丈志 (Fujino, Takeshi)