

CTC05-II-024

歩道のつるつる路面に関する室内実験

- 細谷 尚 弘 (社)北海道開発技術センター)
- 金田 安 弘 ()
- 新谷 陽 子 ()
- 永田 泰 浩 ()
- 石川 信 敬 (北海道大学 低温科学研究所)
- 西村 浩 一 (独)防災科学技術研究所)

Laboratory experiment on extremely slippery sidewalks covered with ice and snow in winter

- N. Hosotani (Hokkaido Development Engineering Center)
- Y. Kaneda (Hokkaido Development Engineering Center)
- Y. Shintani (Hokkaido Development Engineering Center)
- Y. Nagata (Hokkaido Development Engineering Center)
- N. Ishikawa (University of Hokkaido Environmental Earth Science/ Low Temperature)
- K. Nishimura (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)



COLD REGION TECHNOLOGY CONFERENCE 2005

1. はじめに

近年、都市部を中心として冬期の歩行者転倒事故が増加している(図1)。事故の増加原因には、転倒してケガをし易い高齢者の増加や、冬期にも軽装備で活動する人が増えたというようなライフスタイルの変化が挙げられる。図1を見ると、札幌ではスパイクタイヤの装着率の低下と共に、転倒事故による救急搬送者数が急増している。スパイクタイヤ禁止が歩道の雪氷路面に影響を与えているかどうかはわからないが、滑りやすいつるつる化した雪氷路面の出現が歩道でも多くなった結果として、転倒事故が増えた可能性も否定はできない。

つるつる路面と言われる滑りやすい路面は、水が凍結した路面であるが、路面分類¹⁾²⁾では氷板や氷膜に相当する。氷板は、融け水がしみ込んだ圧雪などが寒気で凍ったものである。氷膜は、約1mm以下の薄い氷の膜で、2通りの出来方がある。一つは、舗装面に広がった水膜が凍ったもので、2つ目は、乾いた圧雪の表面に生じた薄い氷膜である。²⁾

これまで、路面の研究は車道を中心に行われてきたが、車道であれ歩道であれ、形成される路面形態としては同じと考えられる。ただ、車道と歩

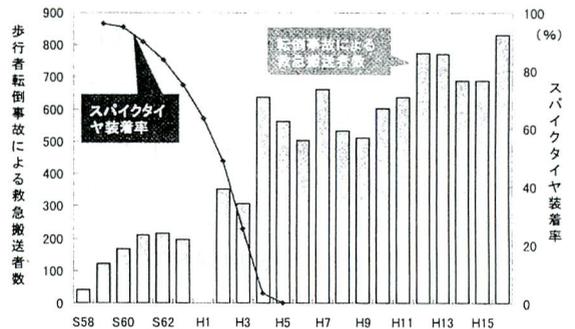


図1 冬期の転倒事故による救急搬送者数の推移
札幌市、12~2月(事故資料:札幌消防局)

道の雪氷路面では、2つの大きな環境の違いがある。一つは、降り積もった雪を機械的に圧密することになるのが、車両と歩行者と言う違いである。1台の重量が数千kgの車両が強力な駆動力でタイヤを回転させながら圧密すると、体重数十kgの人間が歩きながら圧密するのでは、雪を押し固めたり、破壊、攪拌する機械的效果に大きな違いがある。また、車道では走行中のタイヤの発熱や雪面との摩擦熱などによって雪氷路面を融解させるが、歩道ではこのような外部からの多量の熱の供給はない。

2番目は、車道と歩道との除雪の仕方の違いである。主要な車道では除雪レベルの向上により、路上の雪は降るたびに除雪で除去される場合が多い。一方、歩道では、車道ほど頻繁な除雪はされないため、降り積もつ

第21回寒地技術シンポジウム (2005)

た雪は変態しつつ比較的長期間、歩道上に残る。

こうした車道と歩道の環境の違いは、少なからず雪氷路面の形成過程に影響を与えているであろう。本調査の目的は、気象条件のコントロールが可能な低温室において歩道の凍結路面を再現し、歩道がつるつる化する過程を明らかにすることである。

歩道に形成された氷板と、圧雪の表面が氷膜化した、共に滑りやすいつるつる路面の写真を図2、図3に示す。本論文では、後者の圧雪表面の氷膜化に関する実験について報告する。



図2 氷板が形成された歩道。氷板は周囲の雪に比べると、光の散乱が押さえられ灰色っぽく見える。



図3 圧雪表面が氷膜化した歩道。薄い氷膜を通して内部の圧雪が透けて見えるため、白っぽく見える。

2. 実験方法

2.1. 実験条件および実験手順

表1の設定条件に基づき、実験は以下の流れで実施した(図4)。

①人工降雪装置により、5m×3mの実験エリアに深さ40~50cmの新雪を降らせる。実験エリアは図5のように分割した。

②1時間踏み固めることにより、圧密する。

③最初、区画Aについて日射照射装置により20分間照射する。照射終了前5分間は、雪面を踏み固める。他の区画はアルミ箔を張った断熱シートで覆うことで日射を遮断した。

④区画Aを2分割し半分は放置して、残り半分は区画で1分踏み固め、1分休止を30分間継続する。

⑤室内温度を変化させ、区画B~Eについて③~④を繰り返す(図6)。

表1 実験の設定条件

実験NO	区間	室内設定温度(°C)	日射量(W/m ²)	歩数(歩/分)	実験開始からの経過時間		
					0~15分	15~20分	20~50分
実験1	A	-10	300	180~190	日射あり	日射あり 踏み固め(1)	日射なし 踏み固め(2)
実験2	B	-8	同上	同上	同上	同上	同上
実験3	C	-6	同上	同上	同上	同上	同上
実験4	D	-4	同上	同上	同上	同上	同上
実験5	E	-2	同上	同上	同上	同上	同上

注1) 踏み固め(1): 5分間連続して踏み固め

注2) 踏み固め(2): 1分踏み固め、1分休止を30分間継続(総踏み固め時間: 15分)

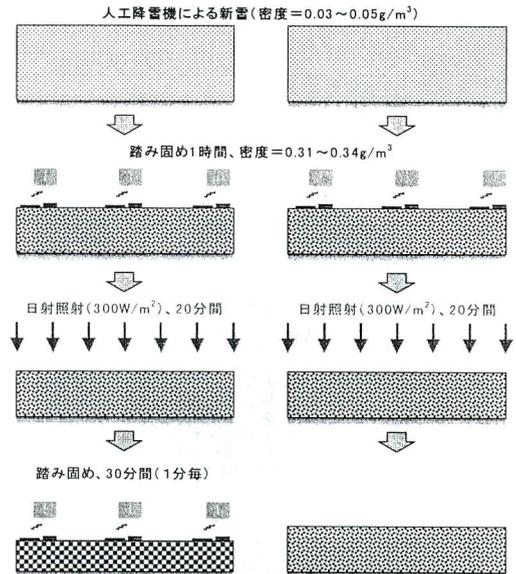


図4 実験の手順

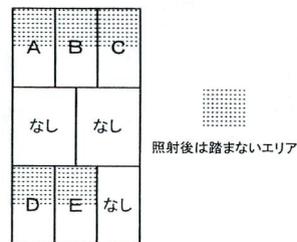


図5 実験エリアの設定

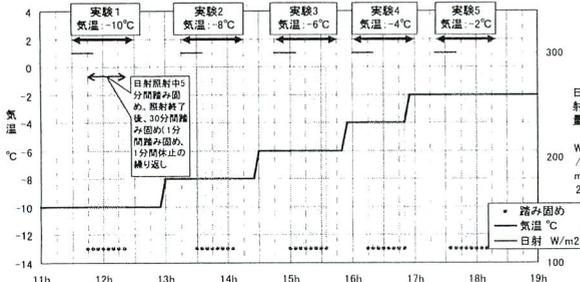


図 6 実験の流れ

2.2. 測定項目

表 2 に測定項目を、図 8 に実験風景を示す。静止摩擦係数の測定には、アメリカで ASTM (米国材料試験協会) の標準値として規定され、床の摩擦係数測定等に用いられている簡易型の測定器を用いた(図 7)。

静止摩擦係数および雪面硬度は数箇所所で測定し、その平均値を測定値とした。

表 2 測定項目

計測項目	計測方法/計測機器
全層平均密度	円筒サンブラーにより資料を切りだし重量を計測
雪面硬度	プッシュプルゲージ
静止摩擦係数	ASM725(アメリカン・スリップ・メーター社製)
雪面表面温度	接触型表面温度計
雪中温度	サーミスター温度計



図 7 静止摩擦係数測定器

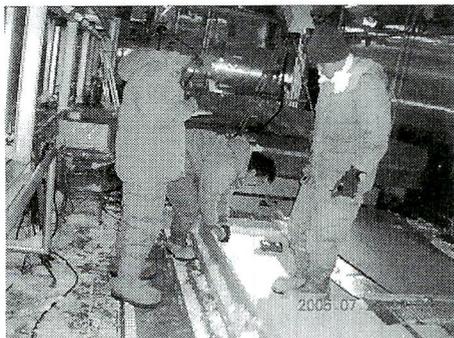


図 8 実験風景

3. 実験結果

3.1. 実験結果の概要

5段階に室内温度を変化させた各実験時の全層平均密度、静止摩擦係数、硬度、雪面温度、雪中温度(サーミスター温度計のプロープを雪の中に突き刺すことで、積雪の中間付近の深さの雪温を測定)の一覧を表 3 にまとめて示す。

人工降雪機で形成された新雪の密度は 0.03 ~ 0.05g/m³ と非常に小さいが、1 時間踏み固めることにより(約 1 万 1 千歩)、密度 0.31 ~ 0.33 g/m³ の圧雪が形成された。

実験(日射の照射と踏み固め)開始前後の各計測値を比較すると、設定室内温度 -10°C、-8°C では、明瞭な計測値の違いは表れておらず、雪面状況にも大きな変化は見られなかった。実験 1(設定室内温度 -10°C)で、実験終了後に静止摩擦係数が低下しているが、これは雪面の凹凸が踏み固めにより平滑化した結果と考えられる。

設定室内温度 -6、-4、-2°C の 3 つの各実験の詳細について以下に述べる。

なお、日射装置からの発熱により、日射照射中は設定室内温度 -10、-8、-6°C では最大 -6°C 程度まで、設定温度 -4、-2°C では最大 0°C 程度まで室温が上昇した。したがって、各実験とも実験中は約 4°C 程度の気温変化がある。

表 3 実験結果一覧

実験 NO	設定室内温度 (°C)	測定時	全層平均密度 g/m³		静止摩擦係数		硬度 kPa		雪面温度 (°C)	雪中温度 (°C)
			踏み固め有り	踏み固め無し	踏み固め有り	踏み固め無し	踏み固め有り	踏み固め無し		
実験 1	-10	実験開始前	0.31	—	0.49	—	0.80~1.14	—	-9~-6	-7~-6
		実験終了後	0.29	—	0.36	0.41	1.21	—	—	—
実験 2	-8	実験開始前	0.33	—	0.49	—	0.80~1.14	—	-8~-6	-8~-6
		実験終了後	0.32	—	0.45	0.44	1.10	—	—	—
実験 3	-6	実験開始前	0.31	—	0.49	—	0.80~1.14	—	-8~-7	-8~-6
		実験終了後	0.34	—	0.30	0.36	0.90	—	—	—
実験 4	-4	実験開始前	—	—	0.46	—	0.80~1.14	—	-4~-1	-4~-3
		実験終了後	0.35	—	0.15	0.20	0.79	—	—	—
実験 5	-2	実験開始前	0.34	—	0.34	—	0.80~1.14	—	-4~-1	-4~-3
		実験終了後	0.42	—	0.11	0.25	0.79	—	—	—

第21回寒地技術シンポジウム (2005)

3.2. 設定室内温度 -6°C (実験3)の実験結果

実験前の静止摩擦係数は0.49であったが、20分間の日射照射と5分間の踏み固めにより0.32~0.35まで低下した。その後の踏み固め(1分毎)により、静止摩擦係数は変動しつつ徐々にではあるが低下し、実験終了後の値は0.30であった。

雪面温度は実験中 $-8\sim-6^{\circ}\text{C}$ であったことから、日射による雪面の融解はない。雪面状態は圧雪のままであり、摩擦係数の低下は踏み固めにより、凹凸が平滑化されたことによるものと考えられる。

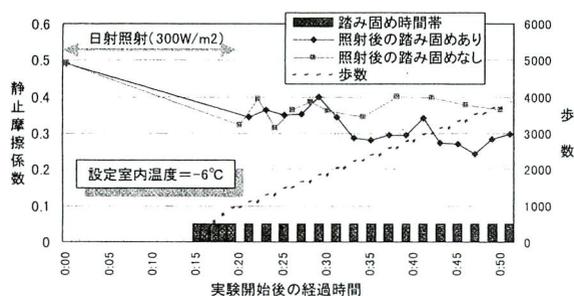


図9 踏み固めによる静止摩擦係数の推移(実験3)

3.3. 設定室内温度 -4°C (実験4)の実験結果

実験前の静止摩擦係数は0.46で、20分間の日射照射と5分間の踏み固めにより0.22~0.26まで低下した。

実験中の雪中温度は $-3\sim-4^{\circ}\text{C}$ であったが、日射照射中の雪面温度は -0.5°C で室温も 0°C 近くまで上昇し、雪面には日射による融解が見られた。日射照射終了直後、室温は -3°C に低下し、その後は設定温度である -4°C 程度で経過した。雪面温度も室温に追従して、照射後は -4°C 程度に低下した。

日射終了後も踏み固めを継続した雪面の摩擦係数は、時間と共に低下し、歩数約2,000歩(日射終了後約10分)時点で0.16程度になった。その後は、摩擦係数0.13~0.17で推移し、踏み固めによる大きな値の変化は見られなかった。

実験終了後の踏み固めを行った雪面状況の写真を図11に示す。雪面には滑りやすい氷膜が形成されている。

日射照射後に踏み固めを行わなかった雪面の摩擦係数は0.2前後で、踏み固めを行った雪面ほどではな

いが、比較的滑りやすい状態であった。

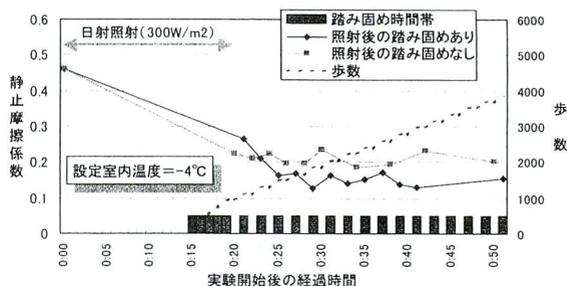


図10 踏み固めによる静止摩擦係数の推移(実験4)



図11 設定室内温度 -4°C で、日射照射後踏み固めた後の雪面状況(実験4)。

3.4. 設定室内温度 -2°C (実験2)の実験結果

実験前の静止摩擦係数は0.34で、20分間の日射照射と5分間の踏み固め後の値は、0.41~0.44であった。

日射照射中は雪面に融解が見られ、設定室内温度 -4°C の実験3よりも融解が進んだため、踏み固め中の雪面は幾分ざくざくした状態であった。日射照射後の摩擦係数の増加は、雪面が融解して柔らかくなっている際に踏み固めたことにより、靴による足跡など、踏み固めが逆に細かな凹凸を生じさせた影響とも考えられる。

実験3と同様に、日射照射中の室温は 0°C 近くまで上昇したが、照射終了後の室温は -2°C で安定した。実験中の雪中温度は $-2\sim-4^{\circ}\text{C}$ であった。

日射照射後に踏み固めを行わない雪面の静止摩擦係数は、0.25程度で大きな変化はなかった。日射終了後も踏み固めを継続した雪面の摩擦係数は、時間と

第21回寒地技術シンポジウム (2005)

共に急激に低下し、歩数約 2,300 歩(日射終了後約 15 分)時点で 0.11~0.13 程度になった。

実験終了後の踏み固めを行った雪面状況の写真を図 13 に示す。雪面には氷膜が形成され、非常に滑りやすい、いわゆるつるつる路面状態であった。

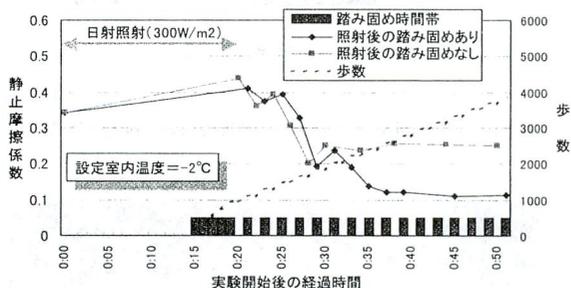


図 12 踏み固めによる静止摩擦係数の推移(実験 5)



図 13 設定室内温度 -2°C で、日射照射後踏み固めた後の雪面状況(実験 5)

4. 考察

全実験での静止摩擦係数の推移を図 14 に、踏み固めをした場合としない場合との実験後の静止摩擦係数を図 15 にまとめて示す。

今回、室温を -10°C から -2°C まで 5 段階に変化させたが、 $300\text{w}/\text{m}^2$ 程度の日射量を与えて雪面が融解するのは、室温 -4°C 以上の場合であった(ただし、前述したように日射装置からの発熱により照射中は室温が上昇するため、実際の室温は設定温度よりも高い)。

雪面が融解しない場合は、踏み固めは大きな凹凸を平滑化させる効果はあるものの、雪面の

変態には寄与しないため、摩擦係数に大きな変化を与えることはない。

雪面が融解すると柔らかくなるため、適度な踏み固めは凹凸をなくし平滑化させる役目を果たす。日射が照射されて融解しつつある圧雪表面では(実験 4、5)、融解した雪粒が多数の水滴となっている状況が観察された。踏み固めは、こうした水滴を圧雪表面の空隙部分に浸透させる効果を持つ。圧雪表面に水を含んだごく薄い層が形成され、その層が外気と下の積雪層(雪温が氷点下)により冷却されて氷膜となる。

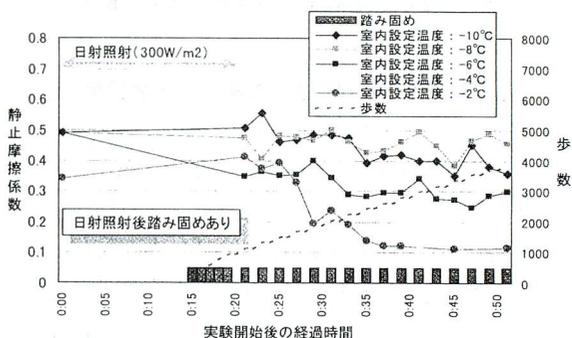
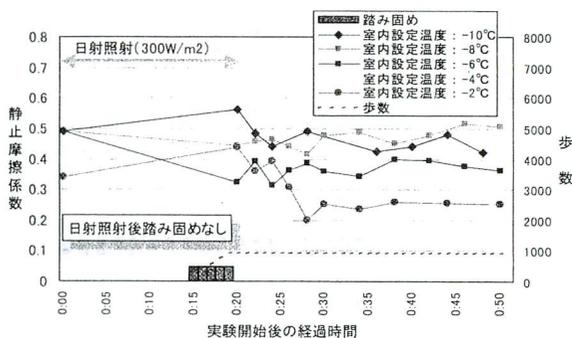


図 14 静止摩擦係数の推移(上段:日射照射後踏み固めなし、下段:日射照射後踏み固めあり)

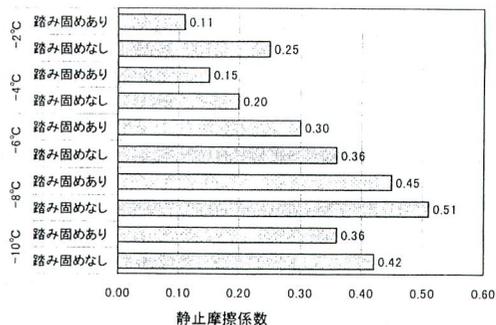


図 15 日射照射後踏み固めた場合と踏み固めない場合の静止摩擦係数の比較

図 16 は、日射照射および踏み固め後の圧雪の鉛直薄片写真である。踏み固めの機械的な充填により圧密されているが、積雪内部は空隙が不均一に散在している。積雪内部は雪粒の変態が進行していない圧雪(しまり雪)状態であるが、積雪表面には厚さ2mm程度の薄い再結晶で氷化した層が形成されている(黒い矢印)。この氷の表層が、静止摩擦係数 0.11 という滑りやすい氷膜となっている。

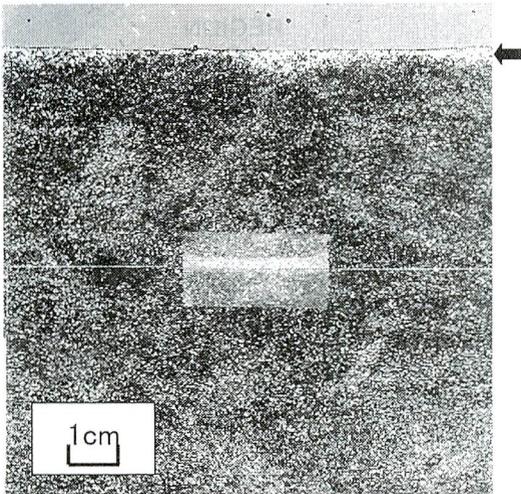


図 16 日射照射および踏み固め後の圧雪の鉛直薄片写真(サンプルNo.18、設定室内温度 -4°C)。密度 $0.35\text{g}/\text{m}^3$ 、摩擦係数 0.11。

図 17は、設定室内温度 -2°C の実験 5における、日射照射および踏み固め後の圧雪の鉛直薄片写真である。

積雪表面には再結晶化した層が形成されているが、完全に氷化はしておらず、空隙も多く見られる。この再結晶層の厚さは2~3cmと、図 17に比較すると厚い。これは、設定室内温度が図 17の実験 4より高いため、雪面付近の融雪がより進んだためとも考えられる。

5. おわりに

車道と比べて、これまであまり対象にされる機会の少なかった歩道の路面雪氷について、室内実験を行った。今回の実験では、歩道のつつ

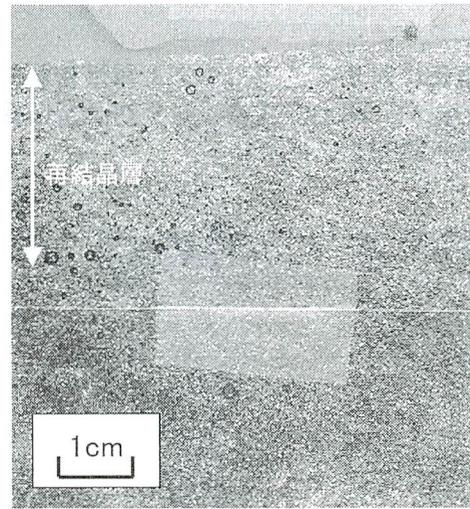


図 17 日射照射および踏み固め後の圧雪の鉛直薄片写真(サンプルNo.20、設定室内温度 -2°C)。密度 $0.34\text{g}/\text{m}^3$ 、摩擦係数 0.12。
路面の内、表面が氷膜化した圧雪を再現することができた。

気温がマイナスで日射のある状況を想定した実験を行ったが、気温が約 -4°C 以上であれば、日射により圧雪表面が融解し、日射がなくなった後の再凍結により表面に氷膜が形成される。

融雪から再凍結に至る過程で、踏み固めがない場合は氷膜は形成されず、つつる路面と呼ばれる非常に滑りやすい状態には至らない。踏み固めは、1)機械的に雪面の凹凸を平滑化させる他、2)融け水を空隙部分に浸透させ、圧雪表面に氷膜の元となる水を含んだごく薄い層を形成させる働きをする。このように、歩道のつつる路面の形成には、気象条件の他、踏み固めも大きな役割を持っていると言える。

本研究を進めるに当たっては、独立行政法人防災科学研究所新庄支所の小杉健二氏、望月重人氏を始め、多くの支所の関係者にお世話になった。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下誠一・秋田谷英次・田沼邦雄 1970 道路上の雪氷の調査Ⅱ. 低温科学,物理編,28,311-323.
- 2) 前野紀一他 1987 道路雪氷の構造と新分類. 低温科学,物理編,46,119-133.