凍結路面の発生メカニズム

Generating Mechanism of Road Icing Phenomenon

福 原 輝 幸^{*1}・渡 邊 洋^{*2}

Teruyuki Fukuhara Hiroshi Watanabe

藤 本 明 宏^{*3}

Akihiro Fujimoto

1. はじめに

路面凍結現象は積雪寒冷地域に限らず、太平洋側地域においても発生し、冬期における代表的な交通障害である。また、この現象は気象条件や路面の雪氷状態に依存して多様な形態で出現し、路線内で路面のすべり易さに局所的な相違を生じさせるケースもあることから、発生予測も難しく、重大事故の誘発要因となっている。路面凍結の対応策として、凍結防止剤やすべり止め材の散布が一般的となるが、インフラに与える様々な弊害も指摘されていることから、冬期道路管理を総合的に支援する手段として、路面凍結の発生メカニズム解明とその現象を予測する技術開発が早急な課題となっている。

2. 路面凍結の種類

路面凍結現象は、概ね以下に大別できる。

- ①「圧雪凍結」：スタッドレスタイヤの普及に伴って顕在化した、いわゆる「ツルツル圧雪路面」が代表的である。これは路面積雪が車両によって圧雪化され、さらに日射や車両のタイヤ熱で凍結融解を繰り返すことにより発生する。写真-1は「ツルツル圧雪路面」の発生プロセスを室内実験で再現したものであり、車両が低速で走行する場合、車両輻射熱やタイヤ熱が雪氷路面に及ぼす影響は無視し難い¹⁾。
- ②「液状水付着型凍結」：路面に存在する水分が氷結してできる凍結路面である。この現象では湿潤路面との区別が判断し難く、速度超過・スリップ

によって死亡事故に至るケースも多い。また、特筆すべき事例として、冬期夜間の放射冷却時に濃霧を伴って発生する路面凍結もあり、写真-2では大気中の水蒸気が路面に結露した後に凍結し、氷膜路面となって極めて危険な路面状態（ブラックアイス路面）となる²⁾。

- ③「蒸気状水型凍結」：写真-3も夜間の放射冷却時に橋梁・高架橋道路で発生し易い路面凍結であり、大気中の水蒸気が路面に霜として付着・集積して、危険な凍結路面に至る³⁾。この現象では路面が真っ白な霜で覆われるために、ドライバーからの視認性は②に比較して良い。しかしながら、路線高架部でのみ局所的に発生（乾燥路面→凍結路面）するため、パニックブレーキなどにより、スリップするケースや橋詰交差点部での追突事故の要因となるケースが多い。

写真-1 室内実験で再現した圧雪凍結路面（積雪路面→圧雪凍結）

* 1 福井大学工学部

* 2 水工工学研究所

* 3 福井大学大学院

写真-2 霧の発生に伴う液状水型路面凍結
(乾燥路面→大気水蒸気の結露現象→
湿潤→ブラックアイス凍結)

写真-3 霜付着による蒸気状水型路面凍結
(乾燥路面→大気水蒸気の昇華凝結現象
→着霜路面凍結)

Atmosphere

Snow covered surface

Snowfall or compressed snow

Snow compressing
and mixing due
to wheel pass

G.L. S_s L_c S_v L_i L_d L_h L_e S_r R_g R_s S_a R_v T_s G $T(z)$ z $490[mm]$

G: Heat conduction

Rv: Vehicles long-wave radiation

S: Sensible heat

(Sa: air flow, Sr: rainfall, Ss: snowfall, Sv: tyres of vehicle)

R: Radiation

Long-wave radiation (Rs: sky, Ru: road surface)

Short-wave radiation

(Rg: global radiation, Rf: reflection component of Rg)

L: Latent heat due to water phase change

(Le: evaporation, Li: ice-melting, Lc: condensation)

Latent heat due to salting(spreading deicing chemical)

(Ld: endothermic reaction, Lh: hydration reaction)

1. Albedo meter
2. Wind vane and anemometer
3. Thermo-hygrometer
4. Infrared radiometer
5. Reflection meter

Wet surface

Rainfall or melted water

(CaCl₂)

Salting

Hydration reaction Lh

Surface layer

Ie: Internal energy

Ts

G

T(z)

z

490[mm]

RHa: Relative humidity

Ta: Air temperature

Ts: Surface temperature

Vw: Wind velocity

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

490[mm]

z

T(z)

G

Ts

Ie: Internal energy

Surface layer

Hydration reaction Lh

Salting

(CaCl₂)

Rainfall or melted water

Wet surface

Snowfall or compressed snow

Snow covered surface

Atmosphere

Ground

Temperature profile

Thermocouples

20

75

145

270

図-1に路面の道路雪氷を取り巻く支配的因子を、熱収支的な観点から示した。同図に従えば、道路表層の内部エネルギー I_e の時間的な変化 ($\partial I_e / \partial t$) は次式で与えられる。すなわち、

$$\partial I_e / \partial t = G - L - S + Rn + Rv \quad (1)$$

ここに、 G ：道路表層を出入りする熱伝導、 L ：水分の相変化に伴う潜熱、 Rn ：長波および短波放射の純放射エネルギー、 S ：空気移動、降雨および降雪に伴う顕熱、 Ru ：通行車両から路面に供給される熱エネルギー、 t ：時間、である。なお、表-1には同図に示した各々の物理量の一覧を抜粋して示した。

以上より、時々刻々と変化する路面温度および雪氷温度は、気象、車両、薬剤などの熱収支因子を定量的に把握することにより、既知となる。しかしながら、路面温度、雪氷温度は路面凍結現象を説明する必要条件であり、決して十分条件ではない。よっ

て、路面凍結の発生メカニズムを知るためには、さらに熱収支に加えて路面の雪氷の水収支および氷収支にも着目する必要がある。すなわち、これは路面の雪氷を氷、水、空気の混合物であると捉え、熱収支に加えて路面の雪氷の水収支および氷収支を併せて解き明かすことを意味する。

3.2 統計モデル

図-2に統計的手法による路面状態予測モデルの概要を、また表-2には筆者らの知る範囲で整理した当該手法の研究・実用例の一覧を、それぞれ示す。これらの統計的手法は、国内で主流となっている予測手法であり、一般的には気象台・道路テレメータなどで観測された複数の気象因子を用いて、任意地点、任意路線の路面凍結の発生を統計学的に判別し、予測するものである。近年では、ニューロコンピューティングなどを用い、路面のすべり摩擦係数 μ の予測を試みた新しい手法も報告されている⁴⁾。

表-1 道路表層における熱エネルギー収支の支配因子

熱収支因子	基礎式	備考
熱伝導 G	$(\rho c) \partial T / \partial t = \nabla (\lambda \nabla T)$	(ρc) ：地盤構成要素の体積熱容量、 T ：温度、 λ ：熱伝導率
潜熱 L		
蒸発 Le	$Le = \alpha_m h_v (\rho_{vs} - \rho_{va})$	α_m ：蒸発のバルク係数、 h_v ：水の蒸発潜熱、 ρ_{vs} ：表面水の水蒸気密度、 ρ_{va} ：大気の水蒸気密度
昇華 Lc	$Lc = \alpha_c h_c (\rho_{va} - \rho_{vs})$	α_c ：昇華バルク係数、 h_i ：水の蒸発潜熱
氷融解 Lm	$Lm = Mm hi$	Mm ：融解のフラックス密度、 hi ：氷の融解および凝固の潜熱
凝結 Li	$Li = Mi hi$	Mi ：凝結のフラックス密度
純放射 Rn		
路面放射 Ru	$Ru = \varepsilon_s \sigma Ts^4$	Ts ：路面絶対温度、 ε_s ：路面射出率、 σ ：ステファン・ボルツマン定数
天空放射 Rs		長波放射計の実観測値
短波放射 Rg		アルベド計の実観測値
短波反射 Rf		アルベド計の実観測値
顕熱 S		
大気移動 Sa	$Sa = \alpha_h (Ts - Ta)$	α_h ：熱伝達係数、 Ta ：気温
降雨顕熱 Sr	$Sr = Mr hr$	Mr ：降雨のフラックス密度、 hr ：降雨のエンタルピー
降雪顕熱 Ss	$Ss = Ms hs$	Ms ：降雪のフラックス密度、 hs ：降雪のエンタルピー
車両熱 Rv	$Rv = \varepsilon_v \sigma Tv^4 (m_v l_v / V_v)$	m_v ：単位時間当たり通過した車両台数、 V_v ：車両速度、 l_v ：車両長、 Tv ：車両底面の絶対温度、 ε_v ：車両底面射出率
薬剤潜熱 Ld	$Ld = Md hi + Ds hs$	融氷量 Md 、塩化ナトリウム散布量 Ds 、 hs ：固形塩化物の融解に伴う水和熱量と吸熱量の差

図－２ 統計的手法による路面状態予測の概要図

図－３ μ 計測時の車両走行速度と雪氷路面（圧雪・氷板路面）のすべり摩擦係数の関係

図－４ 路面状態とすべり摩擦係数の関係とシャーベット路面が介在する領域に関する概要

3.3 熱収支モデル

表－３に熱収支法による路面凍結予測の研究・実用例の一覧を示す。同表より、近年の路面凍結予測は路面温度予測のみならず、路面の雪氷状態を予測することも可能である。しかしながら、凍結防止剤の散布に対応し得る予測モデルの構築は依然として研究開発の域にある。これは、路面の雪氷が塩分を含有することにより、雪氷の物性変化が極めて複雑化することに起因する。

3.4 凍結路面のすべり易さ

凍結路面のすべり易さの基準として、すべり摩擦係数 μ がある。図－３に μ 計測時の車両走行速度と雪氷路面（圧雪・氷板路面）のすべり摩擦係数の関係を示す。この結果は筆者らのグループが開発した高精度すべり摩擦試験車（MASS 車⁵⁾）を用いて、開発土木研究所の苫小牧試験コースにおいて、氷板および圧雪路面の μ を３種類の走行速度で試験したものである。同図より、圧雪路面における μ は走行速度の上昇とともに低下する。一方、氷板路面のそ

れは速度の依存性は見受けられない。よって、走行速度に依存する凍結路面の危険性は圧雪路面で大きく、氷板路面で小さいことが判る。

図－４に路面状態とすべり摩擦係数の関係とシャーベット路面が介在する領域に関する概要を示す。筆者らのこれまでの調査では、北陸地方におけるシャーベット路面の出現頻度は冬期のおよそ55%を占める⁶⁾。また、地域特性に依存せず、冬期の初期および終期にはいずれの地域であっても、その出現頻度は高いことが知られている。しかしながら、これまでの研究でシャーベット路面に関する重要な知見は極めて少なく、依然として不明な点も多い。これまでの筆者らの検討では、シャーベット路面の μ は同図に示すように0.3～0.8の範囲で広く分布することを確認している⁷⁾。これはシャーベット路面が湿潤路面と雪氷路面の間に介在する遷移領域状態であることに起因し、シャーベット層の厚さ、含水状態および車両の走行速度に依存して μ が大きく変化するためである。

表－２ 統計的手法による路面凍結予測の研究

対象	研究機関	手法	予測	気象	路面温度	雪氷	地形	交通	道路構造	薬剤
路面温度	長岡国道事務所	重回帰分析法	路線	○			○			
	日本道路公団	重回帰分析法 判別関数法	路線	○	○		○			
	(独)防災科学技術研究所 長岡雪氷防災実験研究所	パターン解析法	定点	○	○					
	富山河川国道事務所	パターン解析法	路線	○	○	○				
	武市靖 (北海道学園大学)	パターン解析法	定点	○	○					
	日本気象協会北陸センター	重回帰分析法	定点	○	○	○				
	Voronezh State University, RU	N・N 法	定点	○	○	○				
路面状態	(独)土木研究所新潟試験所	判別関数法	定点	○			○	○		
	(独)防災科学技術研究所 長岡雪氷防災研究部門	判別分析法	定点	○	○					
	沼田実(北斗・横河電子雪対策 P.J.T)	判別分析法	定点	○	○	○		○		○
	堀井雅史 (日本大学)	N・N 法	定点	○	○	○				
	日本気象協会北陸センター	重回帰分析法	定点	○	○			○		
μ	中辻隆(北海道大学)	N・N 法	路線	○	○	○		○		
	Goteborg University, SE	判別分析法	路線	○	○					

表－３ 熱収支法による路面凍結予測の研究

対象	研究機関	手法	予測	気象	路面温度	雪氷	地形	交通	道路構造	薬剤
路面温度	武市靖 (北海道学園大学)	熱収支	定点	○	○	○				
	長岡国道事務所	〃	路線	○	○	○	○			
	(独)防災科学技術研究所 長岡雪氷防災研究部門	〃	路線	○	○		○			
	Univ. of Champagne-Srdennes, FR	〃	定点	○	○					
	Seoul National Univ., KR	〃	定点	○	○					
	Montana State Univ., USA	〃	定点	○	○					
	UK Meteorological Office, UK	〃	定点	○	○					
	Univ. of Birmingham, UK	〃	路線	○	○		○			
路面状態	福井県雪対策・建設技術研究所	〃	定点	○	○	○				
	Danish Meteor. Institute., DK	熱収支 水分収支	定点	○	○	○			○	
	Vaisala, UK	熱収支 水分検知	定点	○	○	○				
	Voronezh State Univ., RU	熱収支 N・N 法	定点	○	○					
μ	福井大学	熱・水分・塩 分収支	定点	○	○	○		○	○	△

※ N・N 法:ニューラルネットワーク法、μ:路面の状態をすべり摩擦で評価

４．おわりに

路面凍結の発生メカニズムについて、既往の研究成果を基に概略を述べた。路面凍結は古いテーマという見方もあるが、筆者らは依然として新しく、魅力的なテーマと考える。何故なら、路面凍結現象は

道路雪氷の複雑な性状変化の過程で出現するため、現在も不明な点を多く含んでいるからである。積み残された問題は、道路雪氷技術者や研究者が道路雪氷の物理現象およびその変遷過程を丁寧に分析することで、自ずと解決に至るものと考えられる。

参考文献

- 1) 武士俊也・福原輝幸・横山孝男・渡邊 洋・林健一・藤本明宏：熱収支法による路面凍結解析－車両タイヤ－圧雪層－路面間の熱移動－，寒地技術論文・報告集，第18回寒地技術シンポジウム，pp.71-78, 2002.
- 2) 木曾忠幸・渡邊 洋・福原輝幸：橋梁での微気象が生む橋梁道路と大気との間の熱・水分移動特性と路面結露凍結現象，水工学論文集，第41巻，pp.361-366, 1997.
- 3) 渡邊 洋・木曾忠幸・福原輝幸：橋梁道路における霜の発生に及ぼす橋梁微気象とすべり抵抗，日本雪工学会誌，Vol.16, No.2, pp.3-14, 2000.
- 4) 山川顕吾・花岡真也・小野寺 勇・中辻 隆：ニューラル・カルマンフィルターを用いた冬期路面摩擦係数の予測と推定，寒地技術論文・報告集，第12回寒地技術シンポジウム，pp.189-194, 1996.
- 5) Nagao Miyazaki, Shu Ueno, Hajime Tamaki, Ryoji Hironaka, Tomohiro Yamaguchi and Chunliang Li : Development of High-Quality Multi-Axial Sensing System (MASS) for Direct Measurement of 4 Directional Forces and Coefficient of Friction in Real Time, SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, 2001.
- 6) 独立行政法人土木研究所：平成12年度熱エネルギー収支に基づく路面状態予測モデルに関する研究報告書，2001.
- 7) 藤本明宏・渡邊 洋・福原輝幸・武士俊也・小林一治・宮崎長生・小川明子・浅野基樹：MASS車によるすべり摩擦と道路雪氷との関係，日本雪工学会誌投稿中.