

スマートフォンを用いた冬期転倒危険度の 定量評価手法に関する研究

齊田 光¹・徳永 ロベルト²・高橋 尚人³・渡部 武朗⁴・高野 伸栄⁵

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:saida-a@ceri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail:Roberto-1097ga@ceri.go.jp

³正会員 国立研究開発法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail:takahashi-n573bs@pwri.go.jp

⁴非会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail:take-0707@eis.hokudai.ac.jp

⁵正会員 北海道大学 工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail:shey@eng.hokudai.ac.jp

近年の冬期歩行者転倒事故の増加により、冬期歩行空間の転倒危険度を把握することの重要性は増しつつある。しかしながら、冬期歩行空間の転倒危険度を定量的、リアルタイムかつ広域にわたり簡便に評価する手法は確立されていない。

本研究では上記課題を解決するために、スマートフォン搭載加速度センサにより歩行挙動を計測し転倒の危険性を定量的に示す指標（歩行安定度）を求める手法を開発した。また、様々な路面雪氷状態で被験者実験を行い、歩行安定度と路面雪氷状態およびスリップ発生状況の関係について検証を行った。

検証の結果、歩行安定度は路面雪氷状態の悪化およびスリップ発生回数の増加に伴い低下し、この傾向は被験者の年齢や性別などによらず共通して現れたことから本手法による冬期歩行空間の転倒危険度評価の可能性が示された。

Key Words : *Winter walkway, Fallover, Smartphone, Intelligence transport system*

1. はじめに

(1) 研究に至る背景

積雪・凍結路面における歩行者の転倒事故は積雪寒冷地域を中心に多数発生しており、解決すべき課題の1つとなっている。例えば、近年の札幌市では冬期道路での転倒による救急搬送は1シーズンに千件以上発生しており、かつ件数は増加傾向にある¹⁾。時々刻々と変化する冬期歩行空間の転倒危険度に関する情報を提供することは、外出時の歩行ルート選択や靴の変更など歩行者自身が転倒を防止する効果があると推察されている²⁾。また、冬期歩行空間の転倒危険度を時間的および空間的に詳細に把握することは、重点的に除雪や防滑材散布を行うべき区間の選定など冬期道路管理の適正化を進める上でも

重要となる。

このような背景から、冬期歩行空間の転倒危険度を時間的および空間的に詳細に把握・評価する手法は、今後の冬期歩道管理の高度化などに必要不可欠になると思われる。このため、後述する様々な手法により冬期歩行空間の転倒危険度評価が試みられている。

(2) 冬期歩行空間の転倒危険度評価に関連する既往の研究

冬期歩行空間における転倒危険度評価の方法として、橋本^{3)・4)}は札幌市消防局によって記録された冬期の転倒による救急搬送発生件数データを用いて転倒事故発生傾向の分析を行っている。また、新谷ら⁵⁾は消防局によって記録された救急搬送発生件数データを用いて転倒事故

発生傾向の分析を行うとともに、定点ビデオカメラ撮影により救急搬送に至らない転倒事故発生状況の把握を行った。これらの救急搬送データを用いた歩行危険箇所の把握手法は転倒発生地点や時刻に加えて転倒者の性別・年齢など詳細な情報が得られる長所がある一方で、救急搬送に至らない転倒の発生や転倒に至らないスリップ等の事象を捕捉することはできず、潜在的に転倒が発生しやすい地点や時間帯の把握は困難である。また、上記の手法では歩行危険箇所の検出や転倒危険度の評価をリアルタイムで行うことは著しく困難である。

冬期歩行空間転倒危険度のリアルタイムな把握手法としては、札幌市における事例⁹⁾が存在する。本事例ではボランティアの目視による路面状態データおよび路面状態撮影による画像データを収集・集計し、札幌市内歩道のすべり易さを区毎に算出することで転倒危険度のリアルタイム把握を可能としている。一方で、本事例では計測地点での手作業による路面状態の報告が必要でありボランティアの負担が大きいこと、報告される路面状態は各ボランティアの主観に左右されることや定点での路面状態報告結果を用いているため定量的かつ空間的に詳細な危険度評価は困難である点が課題として挙げられる。

一方で、車道における路面雪氷状態計測手法に着目すると、牽引式の装置を用いた路面すべり抵抗値の線の計測手法⁷⁾や光波の反射を用いた非接触式の路面状態判別手法⁸⁾などが提案されており、これらの手法を用いることで路面状態を定量的かつリアルタイムに把握することが可能となっている。しかしながら、これらの手法で用いる計測装置は総じて大型かつ高価であり、これらを転倒危険度の評価に用いることは著しく困難である。

このように、既往の冬期歩行空間の転倒危険度評価手法は、定量性、リアルタイム性、広域にわたる転倒危険度の評価可能性および実施の容易さの面で改善の余地があり、これらの課題を全て克服した実用的な冬期歩行空間の転倒危険度評価手法は世界的に見ても存在しない⁹⁾ことが報告されている。

(3) 研究の目的

本研究は、既往の冬期歩行空間の転倒危険度評価手法の課題である定量性、リアルタイム性、広域にわたる転倒危険度の評価可能性および実施の容易性を改善するために、

- 1) スマートフォン搭載センサを用いて歩行経路上の歩行挙動を自動的に計測し、転倒危険度を定量的かつリアルタイムに評価する手法を構築する、
- 2) 上記手法によって得られた転倒危険度と路面雪氷状態の関係を明らかにし、転倒危険度評価結果の妥当性について検証することを目的とする。

2. 冬期歩行空間転倒危険度の定量評価手法

スマートフォンは一般に広く普及しており取り扱いが容易な一方で様々なセンサ類を内蔵している。中でも加速度センサおよびGPSはスマートフォンの基本機能（端末の向きに合わせた画面の回転や現在位置の把握）を実現する上で必要不可欠であるためほぼ全ての機種に搭載されている。また、スマートフォンは通信機能を有するため計測結果をリアルタイムに収集することも容易であ

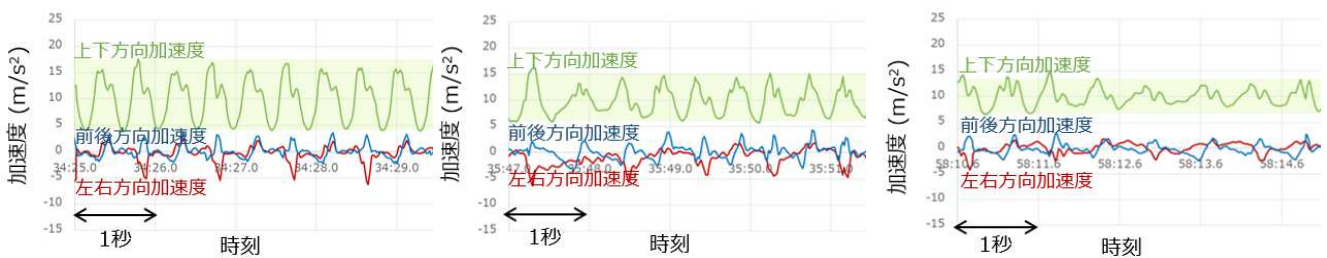


図-1 路面雪氷状態毎の歩行時加速度計測結果（端末位置：胸ポケット，左：乾燥路面，中央：積雪路面，右：凍結路面）

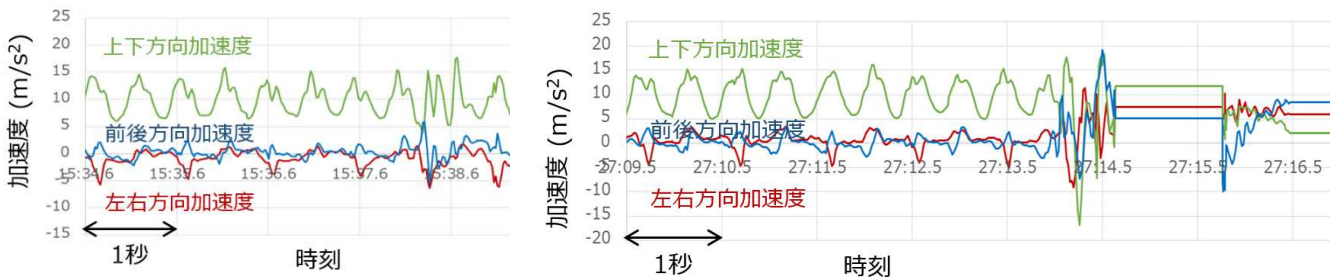


図-2 歩行状態毎の歩行時加速度計測結果（端末位置：胸ポケット，左：スリップ時，右：転倒時）

る。本研究ではこれに着目し、スマートフォン搭載加速度センサの値を取得することで歩行挙動を、GPSを用いて現在位置をそれぞれ取得し、多数の計測結果を収集することで冬期歩行空間の転倒危険度を評価する手法を提案する。

これまでに筆者らが行った実験の結果¹⁰⁾からは、積雪がない条件下では歩行者は比較的規則的な動作で歩行を行う一方で、凍結路面では滑りやすい箇所を避けて歩行するために歩行の規則性が低くなる傾向にあることが明らかとなっている(図-1)。また、スリップ発生時は転倒防止のため踏みとどまる動作により、転倒発生時は急激な姿勢変化によりそれぞれ歩行の規則性が失われることが示されている(図-2)。これらの結果を踏まえ、本研究では歩行加速度データから加速度スペクトル密度(Acceleration Spectral Density, 以下ASD)を算出して歩行挙動の規則性を周波数毎の振幅で表現し、転倒危険度の評価に用いることを提案する。

歩行加速度データから算出されたASDは路面雪氷状態に応じて異なる傾向を示すものと考えられる。非積雪路面では、規則的な歩行挙動により加速度変化の周期はほぼ一定となるため、ASDは特定の狭い周波数の範囲で大きくなると考えられる(図-3(a))。一方で、凍結路面では不規則な歩行挙動により加速度変化の周期も不規則となり、ASDのピーク値は非積雪路面のそれと比較して小さくなり、それ以外の幅広い周波数帯でより大きな値を示すことが予想される(図-3(b))。さらに、スリップ時や転倒時は急激な姿勢変化が発生するため、ASDは平常歩行時と比較して高い周波数帯でも大きくなると考えられる(図-3(c))。

これらのことから、冬期歩行空間の転倒危険度はASDのうち振幅が大きい周波数帯の成分が全周波数帯の振幅に占める比で表すことが可能になると考えられる。例えば、積雪が存在しない条件下では図-3(a)のように特定の狭い周波数帯にASDの成分が集中するため、ASDのうち振幅が大きい周波数帯の成分が全周波数帯の振幅に占める比率は大きくなる。対照的に、凍結路面では図-3(b)のようにASDのピークは不明瞭となるため、ASDのうち振幅が大きい周波数帯の成分が全周波数帯の振幅に占める比率は小さくなる。

本研究で提案する手法では、歩行中の任意の時刻 t における転倒危険度を求めるために、50Hzで取得した歩行加速度データのうち t から k 個前のデータ $\sim t$ から $k-1$ 個後のデータを用いて高速フーリエ変換によりASDを求める。本研究では、ASDの周波数分解能を極力大きくしたうえで一定以上の時間分解能を確保し、さらに高速フーリエ変換に要する計算量を小さくするために $k=128$ (周波数分解能0.20Hzおよび時間分解能5.12秒)としてASDを求めた。その後、ASDの各周波数帯の成分のうち1番

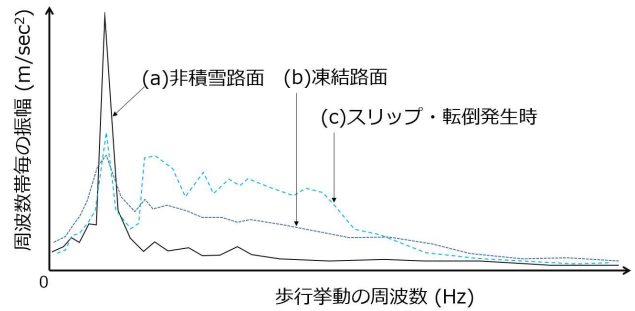


図-3 予想される路面雪氷状態・歩行状態と加速度スペクトル密度の関係

目から m 番目に振幅が大きい成分の和を求め、ASDの全周波数帯の振幅の和で除することで歩行の安定度合いを指標化する。すなわち、

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m amp_i}{\sum_{j=1}^n amp_j} \quad (1)$$

ここに、 $S : t$ を中心とした5.12秒間における歩行安定度、 amp_i : ASDのうち i 番目に振幅が大きい周波数帯における振幅の大きさ(m/sec^2)、 n : ASDの周波数成分および amp_j : ASDのうち j 番目に振幅が大きい周波数帯における振幅の大きさ(m/sec^2)である。歩行安定度は0から1の間の値を取り、値が小さい場合は歩行が不安定であり転倒危険度が高いことを表す。本研究では、規則的な歩行をしている場合でも生じる歩行周期のわずかな変化や高調波の発生を考慮し、ASDのうち1番目から8番目に振幅が大きい周波数帯の成分を用いて歩行安定度を算出した($m=8$)。なお、本研究では3軸加速度のうち上下方向加速度のみを用いてASDおよび歩行安定度を算出した。

このようにして得られた歩行安定度は、GPSによる1秒毎測位結果および時刻情報と紐づけることで、歩行経路上の歩行安定度を自動的に求めた。

3. 転倒危険度定量評価手法の検証実験の概要

本研究では、最初に転倒危険度の定量評価の可能性を検証するための実験を行い、次いで歩行個人差が転倒危険度の評価結果に与える影響を検証するための実験を行うことで、前章で提案した手法によって計測者の個人差によらず転倒危険度の定量評価が可能か検証実験を行った。なお、実験実施の際には安全確保を徹底するために安全管理者を置くとともに、本実験の被験者には実験内容・安全・留意事項等の詳細な説明および個人情報保護に関する説明を行い同意を得ている。以下に詳細を示す。

(1) 転倒危険度の定量評価の可能性検証実験

本実験は、前章で提案した手法を用いて転倒危険度を

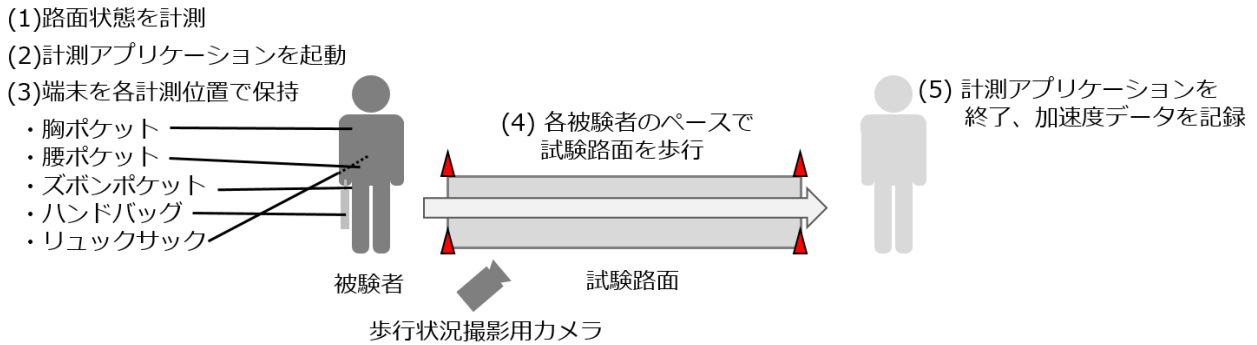


図-4 歩行危険度定量評価手法の検証実験概要



図-5 実験(1)実施区間の路面雪氷状態

定量的に評価可能であるか検証することを目的として、2017/11/10から11/16、2017/12/10および2017/12/14に北海道大学構内で行った。図-4に実験概要を示す。実験では、3種類の試験路面（乾燥路面：L=150m、圧雪路面、氷膜路面：L=50m）を作成・設定し、路面すべり摩擦係数をポータブル静摩擦係数測定器で、表面温度を赤外放射温度計でそれぞれ計測した。その後、スマートフォンを所持した被験者が各自のペースで試験路面上を歩行した際の歩容を計測した。歩容計測では、スマートフォン（ASUS ZenFone 3 Max ZC520TL、分解能0.01m/sec²以下）を胸ポケット、ズボンポケット、ハンドバッグおよびリュックサックで保持した被験者が試験路面を歩行した時の3軸加速度を50Hzで計測するとともに、歩行時の歩行安定度を算出した。また、歩行加速度の計測結果を用いて歩行速度、歩幅、ステップ間時間を算出した。さらに、シャーベット路面および氷板路面では歩行状況をビデオカメラで撮影することでスリップ発生回数を記録した。なお、スリップ発生回数は歩行状況動画から目視で判別し、接地または離床時に踵・つま先の位置が概ね5cm以上滑った場合をスリップ発生と判定した。被験者は21歳から33歳の男女12名（男性10名・女性2名、身長150cm台～180cm台、積雪寒冷地域の在住年数4年～22年）であり、実験実施時の服装は被験者各自の普段着および履き慣れた靴とし、その上からヘルメット等の防護具を装着した。

(2) 歩行個人差が転倒危険度の評価結果に与える影響の検証実験

本実験は、歩行の個人差（年齢、性別や積雪寒冷地の在住年数など）によらず転倒危険度を評価可能であるか検証することを目的として、2018/1/16および1/17に苫小牧寒地試験道路で行った。実験では、3種類の試験路面（乾燥路面、圧雪路面、氷膜路面：L=20m）を作成・設定し、路面すべり摩擦係数をポータブルスキッドテストで、表面温度を赤外放射温度計でそれぞれ計測した。その後、実験(1)と同様に、スマートフォンを所持した被験者が各自のペースで試験路面上を歩行した際の歩容を計測した。歩容計測では、スマートフォン（ASUS ZenFone 3 Max ZC520TL、Sony XPERIA AXおよびXPERIA XZ、SHARP AQUOS PAD SH-05G、Samsung Galaxy S7 EdgeおよびGalaxy Note 2、全機種分解能0.01m/sec²以下）を胸ポケット、腰ポケット、ズボンポケット、ハンドバッグおよびリュックサックで保持した被験者が試験路面を歩行した時の3軸加速度を50Hzで計測するとともに、歩行時の歩行安定度を算出した。同時に、歩行状況をビデオカメラで撮影した。被験者はウインターライフ推進協議会¹⁾を通して募集した21歳から65歳の男女31名（男性25名・女性6名、身長150cm台～180cm台、積雪寒冷地域の在住年数4年～65年）であり、実験実施時の服装は実験(1)と同様とした。

4. 実験の結果と考察

(1) 転倒危険度の定量評価の可能性検証実験

a) 試験路面の路面雪氷状態

図-5は歩容計測実施区間の路面状態を示す。試験路面の表面温度は氷板路面で-1℃から-3℃の範囲にあり、シャーベット路面では0℃前後であった。また、シャーベット路面では雪氷層下部が部分的に圧雪・氷板となっていたためすべり摩擦係数は0.25前後と低くなり、氷板路面のすべり摩擦係数は0.15前後と最も低くなった。

試験路面表面の状態に着目すると、乾燥路面では平坦

であったが、シャーベットおよび氷板路面では最大10cm程度の凹凸が生じたため歩行中の接地時および離床時にすべりが発生しやすい状態となった。

b) 歩行速度、歩幅、ステップ間時間およびスリップ回数

表-1は試験路面歩行時の歩行速度、歩幅、ステップ間時間（1歩当たりの所要時間）およびスリップ発生回数の全被験者平均値を示す。また、表中には歩行速度、歩幅およびステップ間時間が乾燥路面と比較して有意に低下したかT検定によって判定した結果を併せて示す。シャーベットおよび氷板路面では歩行速度が有意に低下し、特に氷板路面では乾燥路面と比較して30%近い歩行速度の低下が見られた。また、路面状態毎の歩幅に着目すると、シャーベットおよび氷板路面では乾燥路面と比較して有意に歩幅が小さくなった。一方で、ステップ間時間は路面状態によって有意な差は発生しなかった。また、スリップ発生回数はシャーベット路面では0.40回/20m、氷板路面では1.26回/20mとなり、非常にスリップが発生しやすい路面状態であった。

c) 歩行安定度

表-2は試験路面歩行時に各保持位置で計測された歩行安定度の全被験者平均値を示す。また、表中には乾燥路面と比較して歩行安定度が有意に低下したかT検定によって判定した結果を併せて示す。歩行安定度は端末保持位置によらず乾燥路面で最も大きく、シャーベット、氷板路面の順に小さくなった。これは表-1に示したスリップ発生回数と逆相関の関係にあり、歩行安定度が低くなるに従いスリップ発生回数が増えることを示している。また、乾燥路面とシャーベット路面における歩行安定度

表-1 実験(1)の各路面雪氷状態における歩行速度、歩幅、ステップ間時間およびスリップ発生回数

路面状態	歩行速度 (km/h)	歩幅 (m)	ステップ間時間 (sec/歩)	スリップ回数 (回/20m)
乾燥	4.65	0.69	0.54	0.00
シャーベット	4.39**	0.61**	0.54	0.40
氷板	3.35**	0.48**	0.53	1.26

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定、

* : p<0.05, ** : p<0.01

表-2 実験(1)の各路面雪氷状態における端末保持位置毎の歩行安定度平均値

路面状態	歩行安定度：胸ポケット	歩行安定度：ズボンポケット	歩行安定度：ハンドバッグ	歩行安定度：リュックサック
乾燥	0.472	0.353	0.484	0.458
シャーベット	0.386**	0.332**	0.434**	0.404**
氷板	0.346**	0.298**	0.402**	0.365**

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定、* : p<0.05, ** : p<0.01

平均値の差はズボンポケット以外で0.05以上、乾燥路面と氷板路面における歩行安定度平均値の差はズボンポケット以外で0.08以上となり、路面状態悪化に伴い歩行安定度は大きく低下した。端末をズボンポケットで保持した場合の歩行安定度は他のケースと同様に路面状態の悪化に従って有意に小さくなったが、路面状態悪化による歩行安定度平均値の低下幅は胸ポケットやリュックサック、ハンドバッグにおけるそれより小さくなった。この理由としては、スマートフォン端末をズボンポケットに入れた場合は図-6に示すように足の動きに伴って上下方向以外にも前後左右に複雑な加速度変化が生じ、乾燥路面歩行時であっても上下方向加速度のみからは規則的な歩行動作を捉えることが難しいためであると考えられる。

また、各保持位置で計測された歩行安定度の標準偏差は概ね0.03程度であった。これらの結果から、胸ポケット、ハンドバッグおよびリュックサックで端末を保持した場合、歩行安定度の出現傾向は乾燥路面とシャーベット路面および氷板路面の間で明確な差が見られることが明らかとなった。以上より、本研究で提案した手法を用いると、スマートフォンを胸ポケットやリュックサック、ハンドバッグで保持した場合に路面状態悪化による歩行安定性の低下を検出でき、歩行危険度を定量的に評価可能となることが示された。

(2) 歩行個人差が転倒危険度の評価結果に与える影響の検証実験

a) 試験路面の路面雪氷状態

図-7は歩容計測実施区間の路面状態を示す。試験路面の表面温度は乾燥、氷膜、圧雪路面で-1℃から-3℃の範

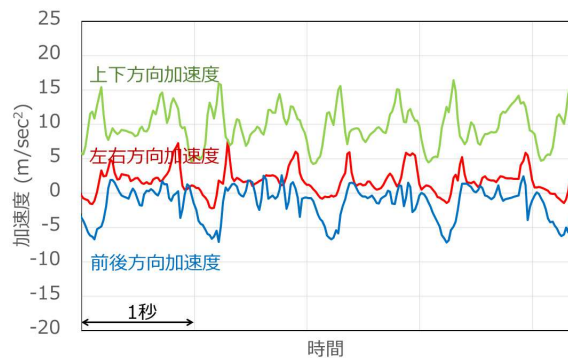


図-6 ズボンポケットで計測された乾燥路面歩行時の3軸加速度の経時変化

圃にあった。また、路面すべり摩擦係数は乾燥路面では0.6以上であったが、圧雪路面では0.55前後、氷膜路面では0.35前後となった。

試験路面表面の状態は、乾燥、氷膜および圧雪路面のいずれも概ね平坦であった。また、氷膜路面の氷膜厚は概ね1mm未満であり、部分的に舗装骨材が露出した状態であった。

b) 歩行速度、歩幅、ステップ間時間およびスリップ回数

表-3は試験路面歩行時の歩行速度、歩幅、ステップ間時間（1歩当たりの所要時間）およびスリップ発生回数の全被験者平均値を示す。また、表中には歩行速度、歩幅およびステップ間時間が乾燥路面と比較して有意に低下したかT検定によって判定した結果を併せて示す。圧雪および氷膜路面では歩行速度の有意な低下が見られた。また、氷膜路面では乾燥路面と比較して有意に歩幅が小さくなった一方、ステップ間時間は路面状態によって有意な差は発生しなかった。なお、これらの傾向は被験者の年齢や性別によらず見られることが確認された。スリップ発生回数は圧雪路面で0.17回/20m、氷膜路面では0.10回/20mとなり、氷膜路面のような歩行速度や歩幅が小さくなる条件下でもスリップは発生しにくい場合があることが確認された。

c) 歩行安定度

表-4は試験路面歩行時に各保持位置で計測された歩行安定度の全被験者平均値を示す。本実験の乾燥路面で計

測された歩行安定度は、ハンドバッグでの計測値を除いて実験(1)で得られた値とほぼ同じであった。端末保持位置毎の歩行安定度に着目すると、歩行安定度は乾燥路面で最も大きく、氷膜、圧雪の順に小さくなった。なお、本実験においては乾燥路面－圧雪路面、乾燥路面－氷膜路面および圧雪路面－氷膜路面の歩行安定度の間にはそれぞれ有意な差が見られた（ハンドバッグで計測された乾燥路面－氷膜路面の歩行安定度では $p < 0.05$ 、その他のケースでは $p < 0.01$ ）。このことは、本研究で提案した歩行安定度を用いると積雪・非積雪路面の判別に加えて雪氷路面における路面状態の違いを検出できる可能性があることを示している。また、乾燥路面と圧雪路面における歩行安定度平均値は0.03から0.04程度の差が見られ、この差は胸ポケットおよびリュックサックでの計測時に特に大きく、転倒危険度の評価により適していると考えられる。他方、ズボンポケットでは圧雪路面において乾燥路面より歩行安定度が有意に小さくなったが、乾燥路面－圧雪路面間の歩行安定度平均値の差は他の保持位置におけるそれより小さくなった。この理由は、実験(1)と同様にスマートフォン端末に複雑な加速度変化が生じるためであると推察される。

図-8は胸ポケットで計測された全被験者の乾燥路面、氷膜路面および圧雪路面における歩行安定度の出現頻度を示す。また、同図には実験(1)で得られたシャーベット路面および氷板路面における歩行安定度出現頻度を合わせて示す。歩行安定度出現頻度のピークは路面雪氷状



図-7 実験(2)実施区間の路面雪氷状態

表-3 実験(2)の各路面雪氷状態における歩行速度、歩幅、ステップ間時間およびスリップ発生回数

路面状態	歩行速度 (km/h)	歩幅 (m)	ステップ間時間 (sec/歩)	スリップ回数 (回/20m)
乾燥	4.40	0.69	0.58	0.00
圧雪	4.09*	0.65	0.57	0.17
氷膜	4.16*	0.63**	0.55	0.10

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定、

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

表-4 実験(2)の各路面雪氷状態における端末保持位置毎の歩行安定度平均値

路面状態	歩行安定度：胸ポケット	歩行安定度：腰ポケット	歩行安定度：ズボンポケット	歩行安定度：ハンドバッグ	歩行安定度：リュックサック
乾燥	0.465	0.425	0.350	0.448	0.455
圧雪	0.433	0.390	0.327	0.408	0.421
氷膜	0.456	0.398	0.338	0.437	0.441

※乾燥－圧雪、乾燥－氷膜、圧雪－氷膜間の歩行安定度は全て5%水準で有意差あり

態毎に異なり、各路面での歩行安定度出現頻度は概ね正規分布に従った。なお、胸ポケット以外で計測された歩行安定度の出現頻度も概ね正規分布となった。また、歩行安定度の標準偏差は約0.02から0.05の範囲内にあり、歩行安定度の出現頻度分布はそれぞれの路面状態間で差が見られた。

表-5は被験者の年齢層（若年層：30代以下，中間層：40～50代，高齢層：60代以上）毎の各路面雪氷状態下における歩行安定度の平均値を示す。全ての年齢層において、圧雪路面における歩行安定度は乾燥路面における歩行安定度より低くなった。また、歩行安定度は氷膜路面においても全ての年齢層で乾燥路面と比較して有意に小さくなったが、高齢層では歩行安定度の低下は非常に小さいものとどまった。

表-6は被験者の性別毎の各路面雪氷状態における歩行安定度の平均値を示す。圧雪路面における歩行安定度は性別を問わず乾燥路面のそれと比較して有意に小さくなった。一方で、氷膜路面における歩行安定度は女性被験者の場合は乾燥路面と比較して有意に小さくなったが、男性被験者では両者に有意差は見られなかった。

表-7は積雪寒冷地在住年数毎の各路面雪氷状態下における歩行安定度の平均値を示す。歩行安定度は積雪寒冷地在住年数を問わず路面状態悪化に伴って有意に小さくなったが、歩行安定度の低下幅は積雪寒冷地在住年数が長いほど小さくなった。これは積雪寒冷地在住年数が長い被験者は雪氷路面での歩行に慣れており、圧雪・氷膜路面においても非積雪路面とほぼ同様な歩行が可能であるためと考えられる。

以上の結果より、本研究で提案した手法を用いると年齢や性別などの個人差によらず路面状態の悪化を歩行安定度の低下という形で評価可能であること、積雪・非積雪路面の判別のみならず積雪時の路面雪氷状態の変化を捉えられる可能性があることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究では、スマートフォンを用いて広域にわたる転倒危険度を定量的、リアルタイムかつ容易に評価する手法を提案した。また、本手法により得られた転倒危険度評価結果と路面雪氷状態の関係を実験により明らかにし、転倒危険度評価結果の妥当性検証を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- 路面雪氷状態の悪化に伴い歩行の規則性が失われる点に着目し、歩行加速度から加速度スペクトル密度を算出しその上位成分を用いて歩行安定度を定量的に評価する手法を開発した
- 上記手法によって得られた歩行安定度は路面雪

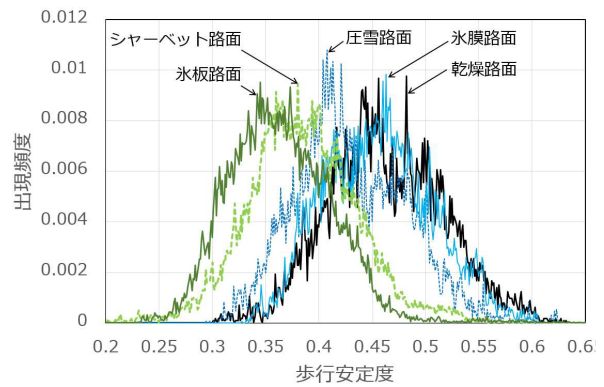


図-8 路面雪氷状態毎の歩行安定度の出現頻度（計測位置：胸ポケット）

表-5 実験(2)の年齢層毎の各路面雪氷状態下における歩行安定度の平均値

路面状態	若年層 (30代以下)	中間層 (40-50代)	高齢層 (60代以上)
乾燥	0.452	0.476	0.477
圧雪	0.405**	0.445**	0.444**
氷膜	0.438**	0.462**	0.472**

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定,

* : p<0.05, ** : p<0.01

表-6 実験(2)の性別毎の各路面雪氷状態下における歩行安定度の平均値

路面状態	男性	女性
乾燥	0.467	0.457
圧雪	0.437**	0.417**
氷膜	0.462	0.436**

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定,

* : p<0.05, ** : p<0.01

表-7 実験(2)の積雪寒冷地在住年数毎の各路面雪氷状態下における歩行安定度の平均値

路面状態	20年未満	20年以上 40年未満	40年以上
乾燥	0.457	0.445	0.475
圧雪	0.410**	0.399**	0.446**
氷膜	0.435**	0.439**	0.467**

乾燥路面と比較した場合の歩行安定度の有意差判定,

* : p<0.05, ** : p<0.01

氷状態の悪化およびスリップ発生回数の増加に従い低下する

- 歩行安定度を用いることで、路面の積雪・非積雪の判別に加えて路面雪氷状態の違いを検出できる可能性がある
- 端末を胸ポケットおよびリュックサックで保持した場合は路面雪氷状態の悪化による歩行安定

度低下が大きく、両保持位置は転倒危険箇所の検出に適している

- 歩行安定度は計測者の年齢、性別および積雪寒冷地在住年数などの個人差によらず、路面状態の悪化に伴って有意に低下する
- 本研究で提案した手法を用いることで、一般に広く普及しているスマートフォンを用いて冬期歩行空間の転倒危険度を定量的、リアルタイムかつ簡易に計測することが可能となる

今後は本研究で提案した手法を改良し冬期歩行空間の転倒危険度判別精度を改善するとともに、実道において多人数による転倒危険度計測を行うことで図-9に示すような広域にわたる冬期歩行空間の転倒危険度評価が可能であるか検証を行う。

謝辞：本研究の実施にあたり、ウインターライフ推進協議会の皆様には実験への参加をはじめとして研究の推進にご協力いただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 永田泰浩, 金田安弘, 富田真未: 札幌市における転倒による救急搬送車の分析, 雪氷研究大会講演要旨集, p. 113, 2014.
- 2) Anttila, V.: Pedestrians during wintertime-slippery conditions, slipping accidents and information service, Technical Research Center of Finland (VTT) Tiedotteita-Meddelanden 2119, 2001.
- 3) 橋本好弘: 冬期自己転倒による救急出動分析 (その1 全体の傾向), 札幌市消防科学研究所報, No. 9, pp. 35-39, 2002.
- 4) 橋本好弘: 冬期自己転倒による救急出動分析 (その2 すすきの地区・気象との関係), 札幌市消防科学研究所報, No. 9, pp. 40-47, 2002.
- 5) 新谷陽子, 原文宏, 秋山哲男: 札幌中心市街地の冬の歩行者転倒事故—現状と今後の対策—, 総合都市研究, Vol. 85, pp. 57-68, 2005.
- 6) 紺野裕乃, 富田真未, 川村文芳, 金田安弘, 星野洋, 金村直俊, 高野伸栄: 住民との協働による冬期歩道路面情報収集・提供システムの構築について, 雪氷研究大会講演要旨集, p. 46, 2010.
- 7) 徳永ロベルト, 舟橋誠, 高橋尚人, 浅野基樹, 中野雅充: 連続路面すべり抵抗値による冬期路面管理の高度化に関する研究, 寒地土木研究所月報, No. 661, pp. 11-18, 2008.
- 8) 中島知幸, 高橋尚人, 館山一孝: 近赤外線を用いた路面状態評価に関する研究, 日本道路会議論文集, No.32, 2017.
- 9) Leif Sjögren: Friction requirements on roads, paths and cycleways in summer road condition in Sweden, Proceedings of Road Safety on Five Continents, 2018.
- 10) 齊田光, 高橋尚人, 石田樹: スマートフォンを用いた冬期歩行危険箇所検出に関する基礎的検討, 第32回日本道路会議論文集, No.32, 2017.
- 11) ウィンターライフ推進協議会 Webサイト: <http://www.winter-life.jp/>

(2018. 7. 31 受付)

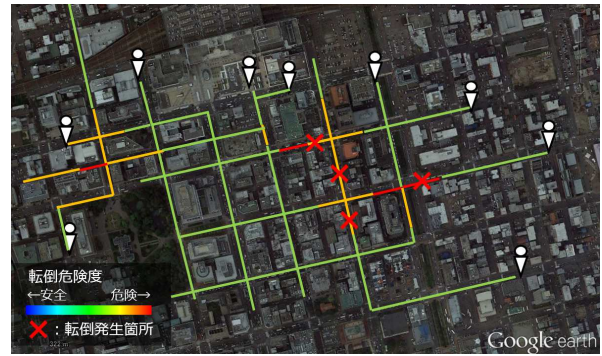


図-9 多数の計測者による歩行危険度の評価イメージ

A STUDY OF QUANTITATIVE EVALUATION METHOD OF FALLOVER DANGERNESS ON WINTER WALKWAY USING SMARTPHONES

Akira SAIDA, Roberto TOKUNAGA, Naoto TAKAHASHI, Takerou WATANABE and Shin-ei TAKANO