

# スマートフォン収集ビッグデータによる冬期歩行空間転倒危険度の評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 31～令 3

担当チーム：寒地交通チーム

研究担当者：佐藤昌哉、畠山乃、  
徳永ロベルト、大廣智則、  
齊田光、奥村航太

## 【要旨】

冬期歩行空間における転倒事故を防止する上で転倒の危険性を把握することは重要である。本研究では、スマートフォンの加速度センサを用いた転倒危険箇所検出手法を開発するとともに、札幌市内においてスマートフォンの歩行挙動データを収集し、転倒危険箇所を安価かつ簡単に検出が可能であるか検証実験を行った。その結果、スマートフォン搭載加速度センサを用いることで計測者の年齢等を問わず転倒危険度を計測できること、住民協働等により歩行挙動データを多数収集することで転倒危険箇所を安価・詳細かつ広域にわたり検出できる可能性があることが明らかになった。

キーワード：冬期歩行空間、歩行者、転倒事故、スマートフォン、転倒危険箇所検出

## 1. はじめに

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、高齢化の進展に伴い転倒事故件数は増加傾向にある<sup>1)</sup>。冬期に転倒が発生しやすい箇所（転倒危険箇所）の出現状況は天候や周辺の建築物の有無、歩行者交通量の多寡などにより時々刻々と変化すると考えられるが、転倒危険箇所の出現状況を把握することが出来れば重点的な除雪・防滑材散布による路面状態の改善や歩行時のルートや靴等の選定、転倒危険箇所での注意深い歩行など道路管理者・道路利用者の双方にとって転倒防止に役立つと考えられている<sup>2)</sup>。このため、既往の研究では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。

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<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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な

いほか、リアルタイムな歩行危険箇所の検出や転倒危険度の評価を行うことは困難である。

冬期歩行空間における転倒危険度のリアルタイムな把握手法としては、札幌市における紺野らの事例<sup>6)</sup>が存在する。本事例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（中央区、豊平区等の10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、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、定点での路面状態報告結果を用いているため客観的かつ線的・面的な危険度評価は困難であることが課題として挙げられる。

また、車道における路面状態計測手法に着目すると、牽引式装置を用いた路面すべり抵抗値の線的計測手法<sup>7)</sup>や光波の反射を用いた非接触式の路面状態判別手法<sup>8)</sup>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、リアルタイムかつ広域にわたり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大型または高価であり、これらを多数導入して歩行空間における転倒危険度の評価に用いることは困難である。

本研究は上記の課題を解決し、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安価

に把握する手法を開発することを目的とする。

## 2. スマートフォンを用いた冬期歩行空間の転倒危険度評価手法の開発

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かつ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的な機能である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、各種センサで自動的に得た計測値をリアルタイムに送信することも容易である。本研究ではこれらスマートフォンの特徴に着目し、スマートフォン搭載加速度センサを用いて歩行挙動を取得し、住民協働などにより多数の計測者から得られた歩行挙動データを用いて冬期歩行空間の転倒危険箇所を検出する手法を提案する。以下に転倒危険箇所の検出方法を示す。

本研究では歩行加速度データから加速度スペクトル (Acceleration Spectrum ; 歩行加速度のうち任意の周波数帯域における加速度の大きさ、以下 AS) を算出して歩行挙動の規則性を周波数帯域毎の振幅で表現し、転倒危険度の評価に用いる。

歩行加速度データから算出されたASは路面状態に応じて異なる傾向を示す。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、ASは特定の狭い周波数の範囲で大きくなる (図-1(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るためASのピーク値は非積雪路面のそれと比較して小さくなる (図-1 (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、ASは平常歩行時と比較して高い周波数帯でも大きくなる (図-1 (c))。また、転倒危険度の評価にASを用いるとスマートフォン搭載加速度センサのオフセット誤差(加速度計測値に定常的に発生する誤差)による影響を受けないため、スマートフォンの機種や端末毎の加速度センサの精度が転倒危険度の評価に与える影響を小さくすることが可能になる。これらのことから、冬期歩行空間の転倒危険度はAS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。例えば、積雪が存在しない条件下では図-1 (a)のように特定の狭い周波数帯にASの成分が集中するため、AS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-1 (b)のようにASのピー

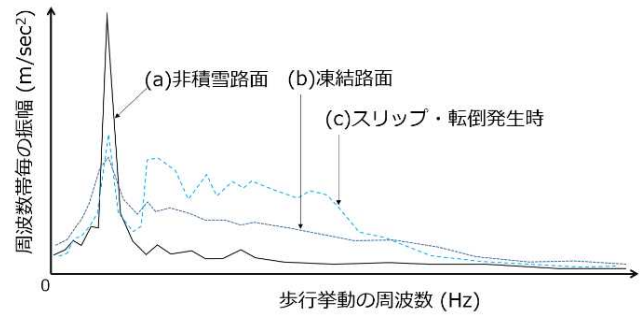


図-1 路面状態・歩行状態と  
加速度スペクトル(AS)の関係

クは不明瞭となるため、AS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、一定時間毎に取得した歩行加速度データのうち  $t$  から  $k$  個前のデータを起点、 $t$  から  $k-1$  個後のデータを終点とした  $2k$  個のデータを用いて高速フーリエ変換を行う。これにより、歩行加速度の周波数帯毎の振幅の大きさ (AS) を求める。本提案手法では、現在広く使用されているスマートフォンのうち初期に発売された機種の加速度サンプリング周波数が100Hz程度である<sup>9)</sup>ことを踏まえ、歩行加速度のサンプリング周波数を50Hzとすることでスマートフォンの機種や性能に依存せず歩行挙動を計測できるよう考慮した。高速フーリエ変換は256個のデータ ( $k=128$ ) を用いて行い、計算量削減のため高周波領域のASを歩行安定度の計算から除外、すなわちASのうち1番目から  $n$  番目に周波数帯が小さいデータを用いてその後の計算を行った。なお、本研究では  $n=32$  とした。歩行安定度は、ASの各周波数帯の成分のうち1番目から  $m$  番目に振幅が大きい成分の和を求め、ASの各周波数帯の振幅の和で除することで指標化した (ただし、 $n \geq m$ )。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、 $amp_i$  : AS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 ( $m/sec^2$ )、および  $amp_j$  : AS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、ASのうち1番目から4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 ( $m=4$ )。以上の手法を用いると、歩行者の年齢や性別、計測に使用する端末機種などの影響を低減しつつ歩行安定度を計測することが可能となる<sup>10)</sup>。また、このようにして得られた歩行安定度データは、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の空間分布データを生成した。

### 3. 冬期歩行空間の転倒危険度情報配信システム開発

図-2に本研究で構築した歩行挙動データ収集、集計および転倒危険箇所可視化システムの概要を示す。本研究では、2.で計測・算出した歩行安定度データをスマートフォンのモバイル回線またはwifiによりWebサーバーに送信することで転倒危険箇所に関するデータの収集を行った。本研究では住民協働等により不特定多数の歩行者が歩行挙動計測を行うことを想定し、歩行挙動計測用のアプリケーションとしてネイティブアプリケーション（端末にインストールして使用するアプリケーション）に加えてWebアプリケーション（Webブラウザ上で動作するアプリケーション）を開発した。また、歩行安定度データの収集方式は計測終了時にデータをまとめて送信する方式のほかに、歩行挙動計測中にデータを逐次サーバーに送信するリアルタイムな収集方式を開発した。

スマートフォンで計測された歩行安定度データはデータ集計・集計結果表示用サーバーにアップロードされたのち、歩行安定度計測結果を集計し転倒危険度の判別を行った。転倒危険度は各エリアで計測された歩行安定度の最頻値を用いて表現した。

その後、転倒危険箇所情報をWebサイト上に表示した。Webサイトでは不安定な歩行の出現率グラフ形式で表示する機能のほか、転倒危険度の空間分布を地図上に表示する機能を実装した（図-3）。これらの情報はPCおよびスマートフォンの両方から閲覧可能なものとすることで外出先などからも転倒危険箇所情報を確認できるようにした。

### 4. 住民協働を想定した冬期歩行空間の転倒危険度情報収集実験

本研究では、令和元年度、令和2年度および令和3年度の札幌市内の屋外歩行空間を対象として、スマートフォンを用いて転倒危険箇所を安価かつ広域にわたり検出することが可能であるか検証実験を行った（図-4）。以下に実験方法の詳細を示す。

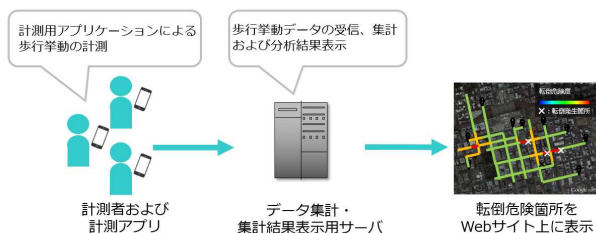


図-2 本研究で構築した歩行挙動データの収集、集計および転倒危険箇所の可視化システム

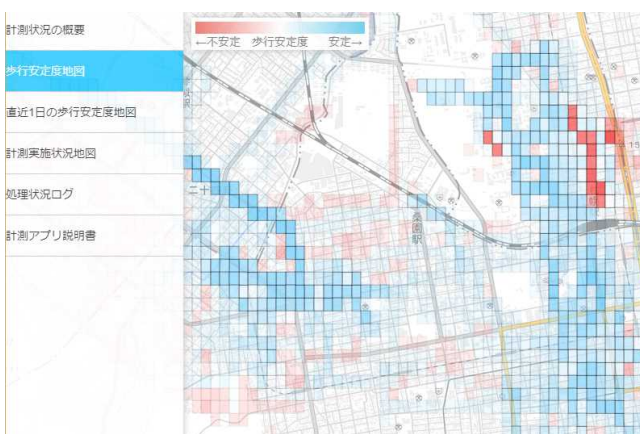
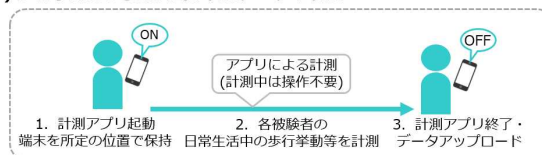


図-3 Webサイト上での転倒危険度地図表示機能

#### (1) 歩行挙動および路面雪氷状態データの収集



#### (2) 転倒危険箇所の検出可能性検証



図-4 転倒危険度情報収集実験の方法

### 4.1 実験の方法

#### 4.1.1 歩行挙動および路面雪氷状態データの収集

本実験では住民協働を想定して、札幌市および札幌市周辺市町村在住の被験者（令和元年度：30名、令和2年度：約40名、および令和3年度：約80名）の歩行時における加速度および位置情報をスマートフォンにより収集した。被験者は実験実施期間（令和元年度、令和2年度および令和3年度の12月上旬から翌年2

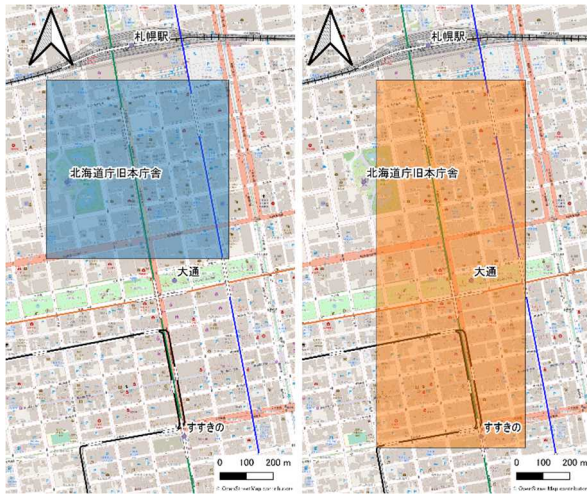


図-5 転倒危険箇所 検出可能性検証の対象範囲  
(左：札幌駅-大通公園間、右：札幌駅-すすきの間)

表-1 歩行挙動データのポイント数

エリア	A 群	B 群
札幌—大通間	558	22931
札幌—すすきの間	849	83955

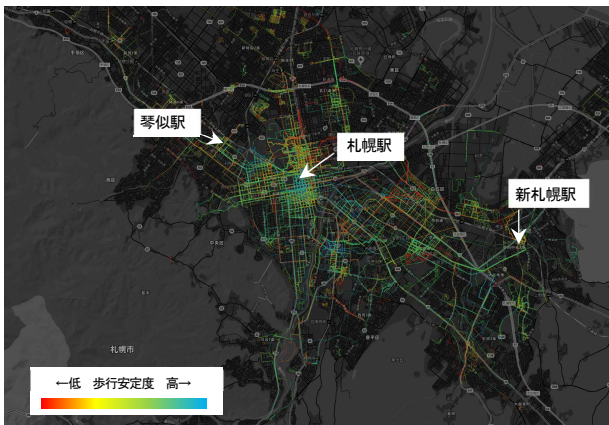


図-6 札幌市における歩行挙動計測結果の空間分布

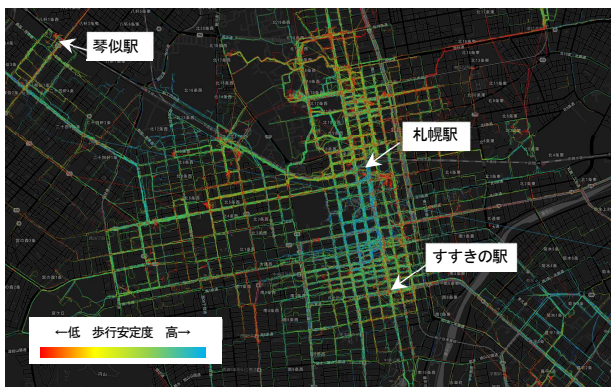


図-7 札幌駅付近における歩行挙動計測結果の空間分布

月下旬)において屋外で歩行を開始する際に計測用アプリケーションを用いて計測開始操作を、歩行を終了する際に計測終了操作をそれぞれ行うことで、歩行中の加速度および位置情報の計測を行った。実験中のスマートフォン保持位置は胸ポケット、腰ポケット、ズボンポケット、ハンドバッグまたはリュックサックのいずれかとした。また、個人情報保護のため歩行起終点から一定距離以内のデータ収集は行わなかった。

本実験では、実験実施者(寒地土木研究所)からの貸し出し端末(ASUS Zenfone 3 Max ZC520TL および Zenfone 4 Max ZC520KL)のほか、各被験者が所有する端末(Android OS および iOS 搭載スマートフォン)を用いて歩行挙動の計測を行った。

なお、本実験の参加応募者には事前に実験内容を説明し、実験参加の同意を得ている。

#### 4.1.2 転倒危険箇所の検出可能性検証

本研究では、4.1.1 で示した方法により計測した歩行挙動データにより、転倒危険箇所の検出可能性について検証を行った。本検証では、歩行挙動データと自己転倒による救急搬送の発生位置および発生日時情報を結び付け、歩行挙動データから算出される歩行安定度と自己転倒による救急搬送発生件数に関連が見られるか分析した。具体的には、歩行安定度の計測データが救急搬送の発生時刻に対して前後 60 分以内、かつ救急搬送の発生地点から 150 m 以内に観測されたもの、つまり時空間的近傍に救急搬送事例がある場合(以下、A 群とする)と、それ以外(以下、B 群とする)に計測データを分類した。その後、表-1 に示す A 群および B 群の二群間について歩行安定度の出現状況を集計し、両群の歩行安定度出現状況を比較した。なお、本検証は図-5 に示す 2 つの領域(札幌駅-大通公園間および札幌駅-すすきの間)について、平成 30 年度から令和 2 年度に得られた歩行挙動データおよび救急搬送発生位置および発生日時情報を用いて行った。

#### 4.1.3 転倒危険度情報配信システムの処理性能および保守性検証

本研究では、一般に広く使用されている機器やサービスを用いて 3. で述べた転倒危険箇所検出システムを構築し、安価なシステムで広域にわたる転倒危険箇所の検出が可能であるか検証を行った。実験では、図-2 のうちデータ集計・集計結果表示用サーバーに一般的なレンタル Web サーバ(ディスク容量 100GB)を用いて転倒危険度情報配信システムを構築した。実験期間中は本システムを終日稼働させ、歩行挙動データの処理時間、保守管理の頻度や所要時間などを記録し、本

システムが実用に耐えうるものであるか考察した。

## 4.2 実験の結果および考察

### 4.2.1 歩行挙動データの計測結果

本実験では 4.1.1 に示す方法で歩行挙動データの計測を行い、令和元年度は約 1140km、令和 2 年度は約 3320km および令和 3 年度は約 2170km の歩行挙動データおよび歩行安定度の空間分布データを得た。図-6 および図-7 は札幌市および札幌駅付近における計測結果の空間分布を歩行安定度毎に色分けして示す。なお、計測結果空間分布の線の太さは計測データ数を示す。本実験では札幌市中央区、豊平区や白石区などにおいて多数の計測が行われた。これらの地区では主に幹線道路において同一時間帯に複数の被験者による計測が行われたほか、生活道路などの歩行者交通量が少ない区間においても多くの計測が行われ、従来の手法と比較して非常に詳細なデータを得ることができた。一方

で、西区や東区の北部などでは計測データ数は少なく、地区により得られた計測データ数は大きく異なった。これは各被験者の日常生活における行動範囲に起因するものであり、更に多数の歩行挙動データを得ることが出来ればより広域における転倒危険箇所検出が可能になると考えられる。

### 4.2.2 歩行安定度と自己転倒による救急搬送発生状況の関係

表-2、図-8および図-9に札幌駅-大通公園間および札幌駅-すすきの間の分析対象範囲で計測された歩行安定度の統計的指標と出現頻度分布をA群およびB群のそれぞれについて示す。札幌駅-大通公園間および札幌駅-すすきの間の分析対象範囲では、時空間的近傍に救急搬送事例があるA群とそれ以外であるB群の二群間のT検定から求めたP値は共に0.01未満であり、二群間の歩行安定度には有意な差がみられた。歩行安定度の

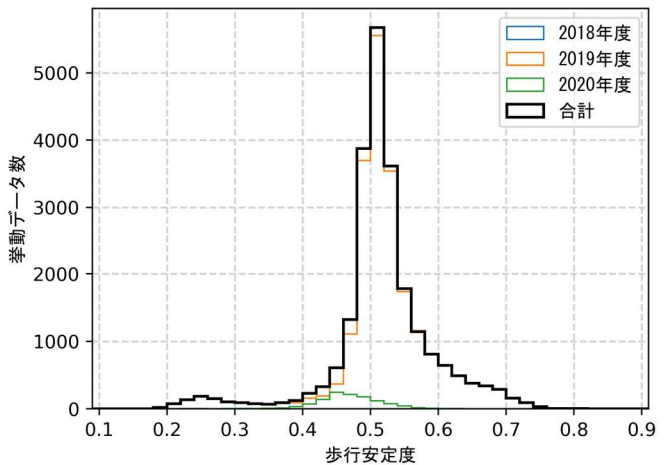
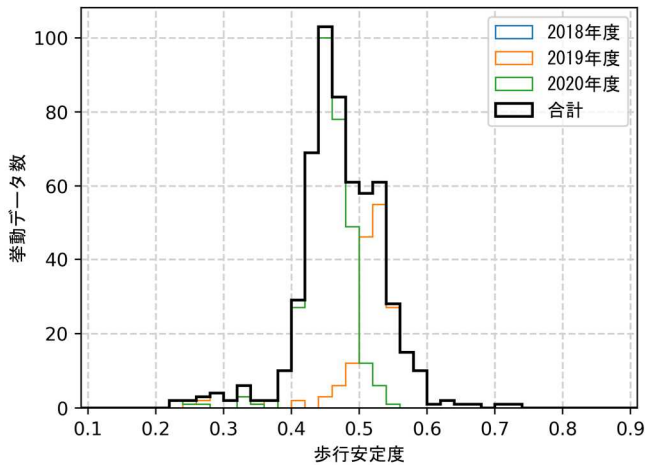


図-8 札幌—大通間における歩行安定度の出現頻度 (左 : A 群, 右 : B 群)

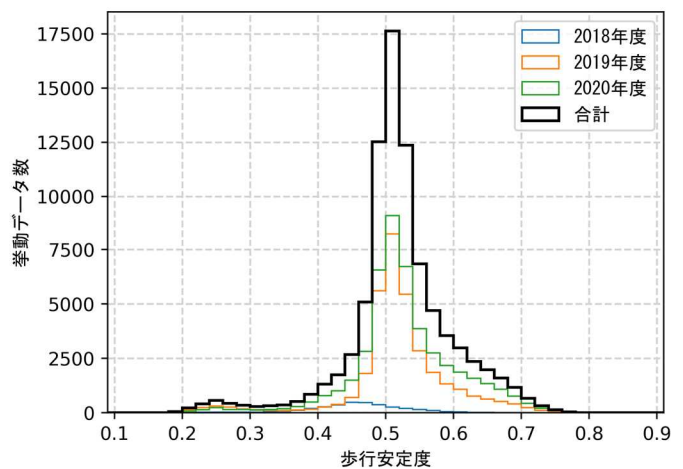
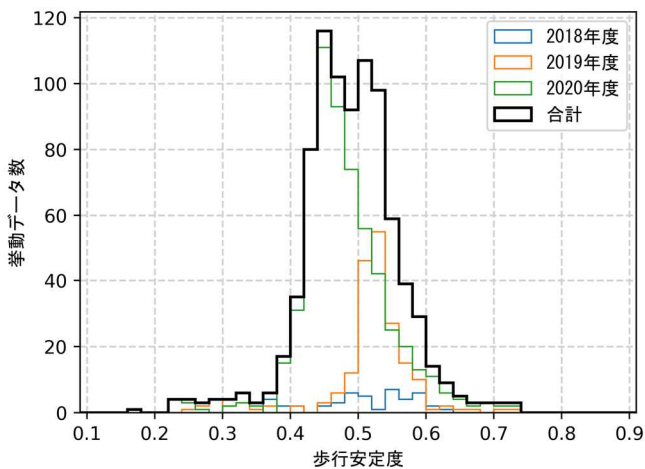


図-9 札幌—すすきの間における歩行安定度の出現頻度 (左 : A 群, 右 : B 群)

平均値は、A群はB群に対して札幌駅-大通公園間では0.043、札幌駅-すすきの間では0.032ほど小さな値となった。同様に、A群はB群に対して歩行安定度の出現分布は全体的に低いことがわかる。一方で、歩行安定度の標準偏差はA群よりもB群で大きくなった。救急搬送事例がなかったB群については、転倒に大きな影響を与えないシャーベット路面や乾燥路面などが出現していたと予想される。シャーベット路面や乾燥路面における歩行安定度は差が大きくなるため、すべりやすい氷板路面が主に出現していたA群と比較し標準偏差が大きくなったと考えることができる。以上の結果より、救急搬送者が発生するようすべりやすい路面においては、スマートフォンの加速度センサから得られる歩行安定度は有意に低下することが示された。

#### 4.2.3 転倒危険度情報配信システムの処理性能および保守性

図-10は令和4年1月における転倒危険度情報配信システムへのアクセス状況(上段:1日当たりWebページ・ファイルへのアクセス数(件)、中段:1日当たり延べ訪問者およびユニーク訪問者数(人)、下段:ファイル転送量(KB))を示す。本システムへのアクセス状況は天候や曜日等の影響を受け大きく変動し、1日当たりのWebページ・ファイル等へのアクセス数は平均で3,700、最大で17,900程度であった。一方で、1日当たりのファイル転送量は平均で50MB、最大で500MB程度であり、本システムを廉価なレンタルWebサーバー上などに構築した場合でも支障が生じない程度の転送量となった。

本システムは、令和3年度の運用期間中(令和3年12月1日～令和4年2月28日)はシステム障害等による運用中断は発生しなかった。また、歩行挙動計測結果のアップロードから転倒危険度の算出、転倒危険箇所情報の配信までに要する処理時間はおおむね10秒程度であり、歩行挙動データ処理の遅延などの問題も発生しなかった。他方、本システムは運用期間を通して特段のメンテナンス作業は必要としなかった。

以上の結果より、本研究で開発した転倒危険度情報配信システムを用いると、一般的なレンタルWebサーバーを用いて安価かつ簡単に路面の $\mu$ 推定や $\mu$ 推定結果の集計・配信を実現できる可能性があることが明らかとなった。

## 5. まとめ

本研究では、スマートフォン搭載センサの計測値を住民協働などにより多数収集し、転倒危険箇所を安価かつ広域にわたり検出する手法およびシステムを構築

表-2 二群間の統計的指標

エリア	代表値	A 群	B 群
札幌駅-大通公園間	平均値	0.474	0.517
	標準偏差	0.0608	0.0756
	中央値	0.471	0.513
札幌駅-すすきの間	平均値	0.489	0.5203
	標準偏差	0.0705	0.0781
	中央値	0.489	0.516

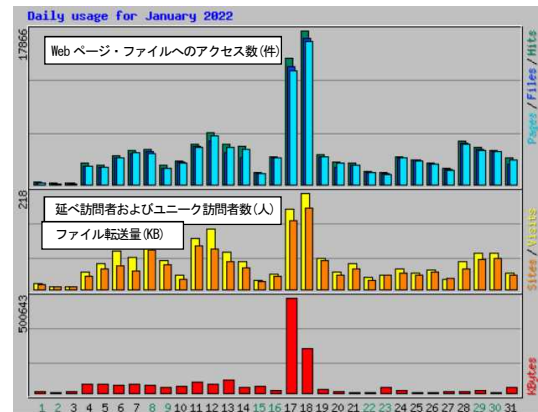


図-10 転倒危険度情報配信システムへのアクセス状況(令和4年1月)

した。加えて、上記手法で得られた転倒危険箇所と実際の転倒事故発生状況の関係を明らかにすることで、転倒危険箇所を安価かつ広域にわたり検出可能であるか検証を行った。以下に得られた知見を列挙する。

- 一般に広く普及しているスマートフォンを用いて複数人からデータを収集することで、従来の手法と比較して時間的・空間的に非常に詳細な歩行挙動データ(転倒危険箇所の検出に利用可能なデータ)を得られることを示した
- 転倒による救急搬送が発生している条件下では、スマートフォン計測による歩行安定度が優位に低下した。これにより、本研究で提案した手法によって転倒の危険性が高い箇所を検出できる可能性が高いことが明らかとなった
- 本実験で使用した転倒危険度情報配信システムは良好な処理性能、稼働率および保守性を有することを確認した。また、本システムは一般的に入手が容易な機器・サービスを用いて非常に安価に構築可能であることが示された
- 以上の結果より、住民協働などによって多量の

スマートフォンセンサ計測データを収集することで、転倒危険箇所を安価、詳細かつ広域にわたり検出できる可能性が高いことが明らかとなった

#### 参考文献

- 1) 橋本濤奈、大橋一仁、永田泰浩、金田安弘：札幌市における冬期の転倒に着目した救急搬送車の動向 その1 — 2018 年度までの経年変化に着目して—、北海道の雪氷、No.38、pp.39-42、2019.
- 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、舘山一孝：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、CD-ROM、2017.
- 9) 沼田宗純、太田賢治、小林明夫、小松高廣、目黒公郎：小型振動台による Smart Phone 内蔵加速度センサの評価試験、生産研究、Vol. 62、No. 6、pp. 65-70、2010.
- 10) 齊田光、徳永ロベルト、高橋尚人、渡部武朗、高野伸栄：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、土木学会論文集 D3、Vol.75、No.5、pp.I\_999-I\_1008、2019.

# A STUDY OF FALL ACCIDENT RISK EVALUATION METHOD IN WINTER WALKWAY WITH BIG DATA COLLECTED BY SMARTPHONE SENSORS

Research Period: FY2019-2021

Research Team: Traffic Engineering Research Team,  
Cold-Region Engineering Research Group

Author: SATOU Masaya,  
TOKUNAGA Roberto,  
SAIDA Akira,  
HATAKEYAMA Osamu,  
OKUMURA Kouta,  
OHIRO Tomonori

**Abstract:** It is important to understand slip risk and hazardous spot on winter walkway to prevent fall accident. In this study, we developed the measurement method of fall accident risk on winter walkway using smartphone sensors. In addition, we verified the possibility, usability and cost of hazardous spot detection in Sapporo city. As a result, this study clarified that there is possibility to detect slippery and hazardous spot on winter walkway with accelerometer in smartphone regardless of attribute of measurer (such as age). This study also clarified that our proposed method can detect area-wide slippery and hazardous spot on winter walkway inexpensively with large amount of sensor data by citizen coproduction.

**Keywords:** Winter walkway, Pedestrian, Fall accident, Smartphone, Hazardous spot detection of fall accident.