携帯電話の位置情報集計データを用いた 2022 年大規模札幌雪害時の交通行動変容

佐藤　陽介[1]・蛯名　将平[2]・佐々木　悠貴[3]・
Tran Vinh Ha[4]・ 有村　幹治[5]

[1]学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）
E-mail:22041041@muroran-it.ac.jp

[2]学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）
E-mail:23041011@muroran-it.ac.jp

[3]学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）
E-mail:22041034@muroran-it.ac.jp

[4]非会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）
E-mail:tranvinhha@muroran-it.ac.jp

[5]正会員 室蘭工業大学教授 大学院工学研究科 もの創造系領域（〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1）
E-mail:arimura@muroran-it.ac.jp (Corresponding Author)

2022 年 2 月札幌市では，大規模な雪害が発生した．JR・バスでは運休や遅延，自動車では渋滞が発生し，交通全体が大きな影響を受けた．これに対応するため，雪害時のあらゆる交通手段の移動変容とその要因を理解した上で優先すべき手段・地域を特定し，効果的な対策を行う必要がある．そこで本研究では，携帯電話の位置情報集計データを使用する．このデータは各メッシュの出発・到着トリップを交通手段別を把握できる．加えて，降雪情報を組み合わせることにより，交通利用数を減少させる降雪パターンを把握した．また，地域別の利用増減を客観的に評価するためエシェロン解析を行う．これにより利用の増加・減少傾向のある地点を地図上に示し，地域別の交通手段間の関連性を明らかにした．

Key Words: *Heavy Snow, Mobile spatial statistics , Snow removal information*

1. はじめに

近年，地球温暖化に伴う異常気象が人々の移動に大きな影響を与えている．特に人口密集地や都市部においては鉄道の大規模な運休等により大きな混乱が生じる．この一例として，2022 年 2 月の大規模札幌雪害が挙げられる．札幌都市圏においては 2022 年 2 月 6 日～7 日と 2 月 21 日～23 日の 2 度に渡って大規模な雪害に見舞われた．この大雪の影響により，2 月 7 日には札幌駅発着の列車が終日運休，計 704 本運休となり一部再開に 3 日間要した．道路については，幹線道路とバス路線の除雪作業を優先し，生活道路の排雪量を 7 割に抑える対策を取ったものの，除雪能力が追い付かず路面状況悪化，道央道一部通行止めの影響もあり，一般道でも渋滞が多く発生した．都市間高速バスもその多くが運休となり，物流においても郵便，戸別配達，コンビニへの入荷に遅れが発生した．

大雪時には道路幅員の狭量化や路面悪化により道路容量が急激に低下する．また電車の運休により自動車利用需要が増加することで大規模な渋滞が発生する．電車の運休による移動の取りやめや代替交通の選択状況，利用者数の変化，またその地区特性については明確な情報を得ることは難しい．そのため雪害発生時における除排雪作業の効率化や，移動需要に対する代替交通手段の迅速な提供は困難な状況にある．

大規模な雪害時における都市圏全体の移動状況を需要サイドと供給サイドの両側から把握することは異常気象時のおける移動のマネジメントのために必要不可欠である．したがって，本研究では携帯電話の位置情報集計データを用いて，2022 年 2 月の札幌都市圏における大規模

な雪害時の交通行動について分析する．現在，携帯電話位置情報データは携帯電話基地局の運用データとGPSから得られるトレンドデータを組み合わせることで，出発・到着地点・人口と使用した交通手段を把握することが可能となっている．本研究では，この移動手段付きの携帯電話位置情報と降雪・運搬排雪データを使用して分析を進める．最初に降雪量と各交通手段の利用数を時系列にグラフ化を行い，雪害時の交通サービスレベルの推移を明らかにする．次に地域性について客観的な解釈を行うことのできるエシェロン解析を行う．これにより各交通機関の利用数が増加傾向にある地域をホットスポット，減少傾向のある地域をコールドスポットとして空間的に抽出する．その後，各交通機関・地域別の移動変容や関係性について考察し，雪害時における都市交通全体の改善に必要な情報を整理する．

2. 既存研究と本研究の位置付け

2022 年 2 月の札幌雪害に関して，以下の研究が行われている．大川戸ら[1)]は札幌近郊の通勤・通学者に対してアンケート調査を実施し，大雪による通勤・通学への影響を報告している．雪害時に通勤・通学において，50%の人に遅れや目的地にたどり着けないといった影響が出た．特に JR 利用者は約 50%が別の手段（地下鉄・自動車）で移動し，約 20%が通勤先への移動を断念しており，他の移動手段より影響が大きいことを把握した．また，丹治ら[2)]は，様々な機関で観測されている気象データを分析することで気象状況の地域差や過去の降雪との比較による本雪害の特徴，降雪の原因を明らかにした．さらに，道路管理者や除雪業者へのヒアリングの結果も合わせ，気象条件の除雪作業への影響を考察している．高橋ら[3)]はTwitterデータと人流データ（携帯電話のGPS位置情報）を用いて，大雪の影響を評価している．ツイートのマイニングから降雪の状況やその影響の内容を推察し，携帯電話の GPS 位置情報から札幌駅周辺の人出を分析することで，大雪の市民への影響を明らかにしている．倉田ら[4)]は札幌市内で撮影されたカメラ画像を用いて．画像検知により路肩の堆積幅を計測し．またタクシー車載 GPS データを基に．旅行時間と速度を集計した．彼らの研究から．降雪量が増加とともに旅行時間がわずかに長くなり．堆雪幅が大きくなった場合は旅行時間がより顕著に長くなることが判明した．Ha ら[5)]は ETC2.0 プローブデータを使用し，降雪により自動車のトリップ数・速度が大幅に減少し，旅行時間が増大することを明らかにした．また，トリップ数の減少傾向にあるエリアをホットスポットとして示し，交通状況が特に悪化した地域を可視化している．澤村ら[6)]はモバイル空間統計を利用し，1 時間毎の滞在人口から通勤者数・移動距離を推定を行った．この手法を 2022 年 2 月札幌雪害に適用し，雪害時に通勤者数と総移動距離が減少することを明らかにした．

以上のように，アンケート調査や携帯電話情報を活用しこの雪害の影響を把握する研究は存在する．しかし，2022 年 2 月の札幌雪害はまだ直近の出来事であるため，特定の交通機関・天気情報・除雪の効果等の関係性や地域性に関する研究はまだなされていない．よって，本研究は都市交通全体の実態把握を面的・計量的に行えることに新規性がある．

3. 分析対象都市と使用データの概要

3.1 対象都市の概要

対象都市である札幌市の人口は 197 万人である．年平均 479㎝ の降雪があり，世界有数の豪雪は大都市である．しかし，除排雪の担い手は減少傾向にあり 2017 年には 3,940 人であったが，22 年には 3,573 人，37 年には 2,403 人に減る見通しである[7)]．そのため，今後マンパワーに頼った雪害対策は難しく，限られたリソースで被害を減らす工夫が必要である．

3.2 使用データ

(1) 移動オプション付きモバイル空間統計

モバイル空間統計とは，NTT Docomo の携帯電話ネットワークの運用データから拡大推計された人口統計である．特定のエリアに滞在する推定人口について 24 時間 365 日の情報の取得が可能である．移動オプションでは，さらに GPS からの移動データから得られる移動データを加える事でモバイル空間統計に出発/到着，交通手段を付与している．**表-1** に移動オプション付きモバイル空間統計の概要を示す． 出発・通過・持続滞在合わせて一時間当たり 169.7 万人のデータがある．自動車のみの出発人口は平均 4,630 人/時であり，ETC2.0 プローブデータが 2022 年 2 月のデータで平均 2,872 台/時で

表-1 移動オプション付きモバイル空間統計の概要

集計期間	通常時	2022年1月29（土），30（日），31（月） 2月14（月），15（火），16（水）
	雪害時	2022年2月 5（土），6（日），7（月） 2月21（月），22（火），23（水）
取得時間	0時-23時（1時間毎）	
集計範囲	札幌市全域	
集計単位	3次（1km）メッシュ	
データ数	全交通手段合計　約169.7万人/時間	
属性	日付，出発時間，出発エリア，交通手段（徒歩のみ，自動車，電車，通過，持続滞在），出発/滞在人口	

あるため[5]，十分なデータ数であるといえる．

ホットスポット分析を行う際，各メッシュで滞在人口に大きな差があるため．メッシュ毎の雪害時の交通量の増減を標準化増減比S_iで表した．

$$S_i = \frac{o_i}{n_i \cdot P} \quad (1)$$

o_i：メッシュiの雪害時出発人口
n_i：メッシュiの通常時出発人口
P ：全メッシュ平均増減率
その上で，出発人口が増加傾向にあるメッシュを示すホットスポット検知を客観的に行うため，エシェロン解析を使用した．

(2) 道道・市道の運搬排雪データ

札幌市内の道道と市道の運搬排雪データを使用した．運搬排雪とは，道路脇の堆雪をダンプトラックに積み込み，雪堆積場や融雪槽に運び出す作業である．これにより，道路幅員の拡大や雪山の高さの引き下げ，歩行者の安全確保が図られる．本研究では札幌市行政区別の運搬排雪の延長距離を一日毎に集計した．

4. エシェロン解析によるホットスポット分析

移動オプション付きモバイル空間統計を使用し，交通発生量が増加・減少傾向のある地点を可視化するため，本研究ではエシェロン解析を使用した[9]．一般的に地図情報システムで可視化を行う際には，コロプレスマップのように観測地の絶対量を単純に色分けすることが多い．しかし，解釈を行う際この地図から受ける印象は階級分類の数や色・エリアのサイズが大きく影響を与える．また，偶然の変動の範囲で高い値が観測されたため．ホットスポットのように見えることも多い．そのため，客観的な判断とは言えず説得力に欠ける．エシェロン解析では，位置情報を持つ観測データの相対的に高い値と低い値を持つ領域に分割し，領域をデンドログラムで階層的に表現する．そのため，エシェロン解析によるホットスポット分析では「空間集積性の有無」と「集積性の範囲」を客観的に求めることが可能である．具体的には，このエシェロン解析によって得られる階層構造より各領域のパターンを調べ，ホットスポット検出を行うエシェロンスキャン法を使用した．次のステップで行う．

①標準化増減比S_iを利用して，エシェロンデンドログラムを作成する．
②デンドログラムの上位階層から順に各領域 Z を加えながら，$Z = \{Z_1, Z_2, \cdots\}$ を構築する．
③対数尤度比 $LLR(Z_i)$の大きい順にホットスポットの候補を決める．
④モンテカルロ法によってホットスポットの有意性を評価する．
⑤有意であると評価されたホットスポットを GIS で可視化を行う．
この結果より，交通量が増加・減少した地域を把握する．

5. 分析結果

5.1 降雪による各交通利用の変化

図-1 に札幌市の降雪量の推移を示す．これらの図は，本研究で使用するモバイル空間統計の集計期間と合わせた 12 日間を表示している．この図より，1 回目の雪害では，2/5（土）15 時～23 時と 2/6（日）3 時～12 時に一時間当たり 10 ㎝程度の非常に集中した降雪があった．また，2 回目の雪害では，2/21（月）5 時～2/23（水）8 時まで断続的な降雪があった．

図-2 に交通手段別の出発人口の変化を示す．また，**図-3** に自動車の出発人口の変化のみを拡大して示す．まず，全体の傾向として，徒歩・電車について休日は，昼間にピークがあり，平日は朝，夕方にピークがある．自動車は朝のピークは大きいが夕方のピークは見られない．

次に通常時と雪害時を比較すると，雪害に伴い，すべての交通機関で出発人口が減少していることが確認できる．休日は正午頃のピークが多く減り，朝，夕の減少は少ない．一方，平日の雪害時はピークの時間帯を変えず，全体的に減少している．また，自動車の減少率は，徒歩・電車の減少率より大きい．電車に関して，JR は全便運休したが地下鉄は正常に運行していたため，減少が比較的少なかったと考えられる．

特に注目すべきは 2/7（月），2/23（水・祝）における自動車の出発人口の減少である．これらの日は昼間に雪が降らなかったにもかかわらず，出発人口が大幅に減少した．この現象は，深夜の除雪作業が難航し，朝までに間に合わなかったことに起因していると考えられる．1 回目の雪害では，24 時間で 60 ㎝もの大雪が降り，観測史上最大の降雪となった．2 回目の雪害では，深夜から早朝にかけて雪が降り続けたことが道路の除雪作業を妨げた要因と推測される．また，丹治ら[2]の研究で行われた道路管理者や除雪作業者へのヒアリングにおいても「朝方の 3～4 時頃に雪が降っていて，除雪が終わったらまたやらないといけない状況だった」とのコメントがある．さらに，2/21～23 の交通量の減少は，強風による地吹雪が発生したこと[2]による影響も大きい．2/22（火）は深夜の降雪・強風・昼間の降雪の 3 つの要素により，平日にもかかわらず自動車の減少量は最大となった．

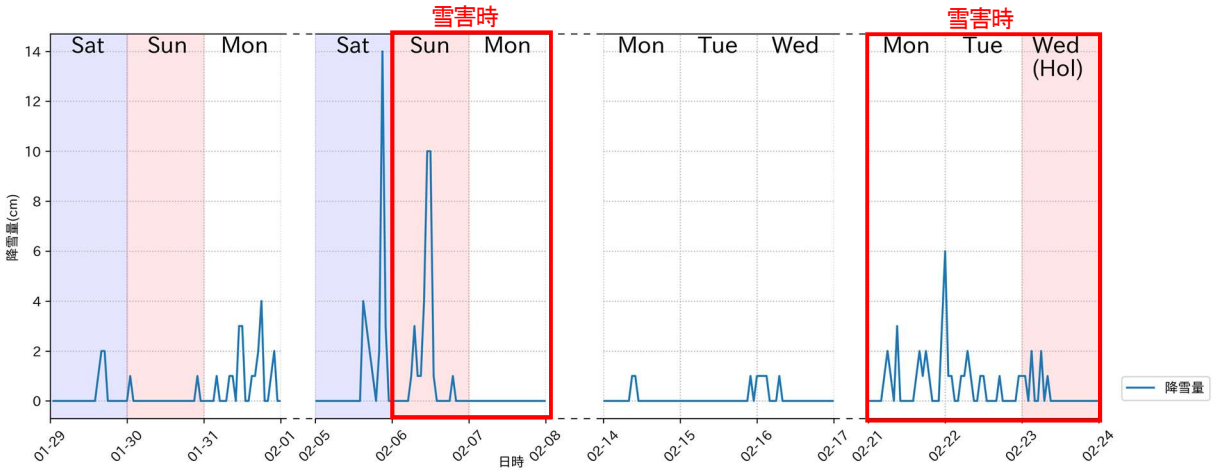


図-1　札幌市の降雪量の推移

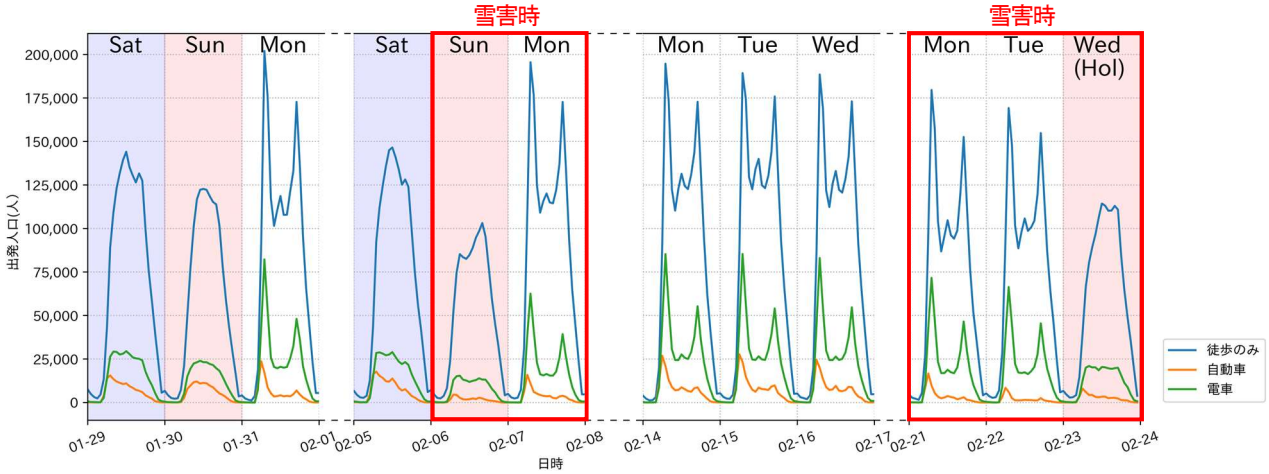


図-2　交通手段別，出発人口の変化

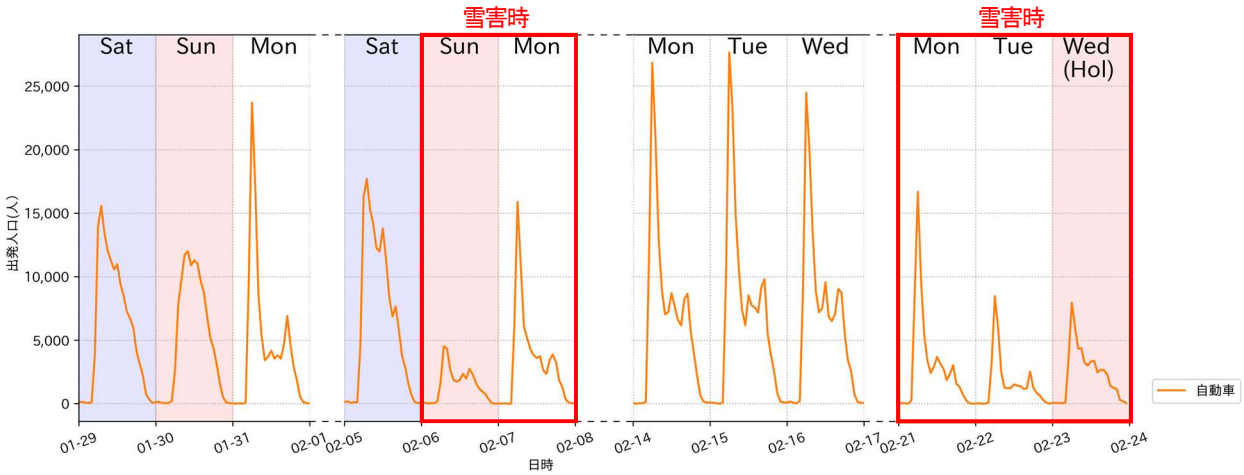


図-3　自動車の出発人口の変化

5.2　滞在人口のホットスポット分析

図-2 からわかるように，雪害時は全ての交通手段で出発人口が大きく減少していたことから，通勤・通学先に行けなかったもしくは取りやめた人が多くいたと考えられる．特に，2/22（火）の減少量が大きい．ここで，**図-4** に雪害時 2/22（火）午前 10 時の滞在人口の減少数（左）と標準化増減比を利用したエシェロンスキャン（右）の結果を地図上に示す．標準化増減比を求める際には，通常時の出発人口として 2/15（火）午前 10 時のデータを使用している．まず，左図の増減数に注目する．札幌市の中心部である，札幌駅・大通駅周辺の滞在人口が非常に大きく減少，JR 白石駅周辺で大きく増加していることが読み取れる．次に右図のエシェロンスキャンの結果に注目する．赤く示されたホットスポットが他の地域に比べ，滞在人口の増加傾向があった地域の範囲を示している．郊外の人口が全体的に増加傾向にあることが分かる．したがって，通常の日には中心部に出勤している人々の多くが，午前 10 時になってもまだ郊外にと

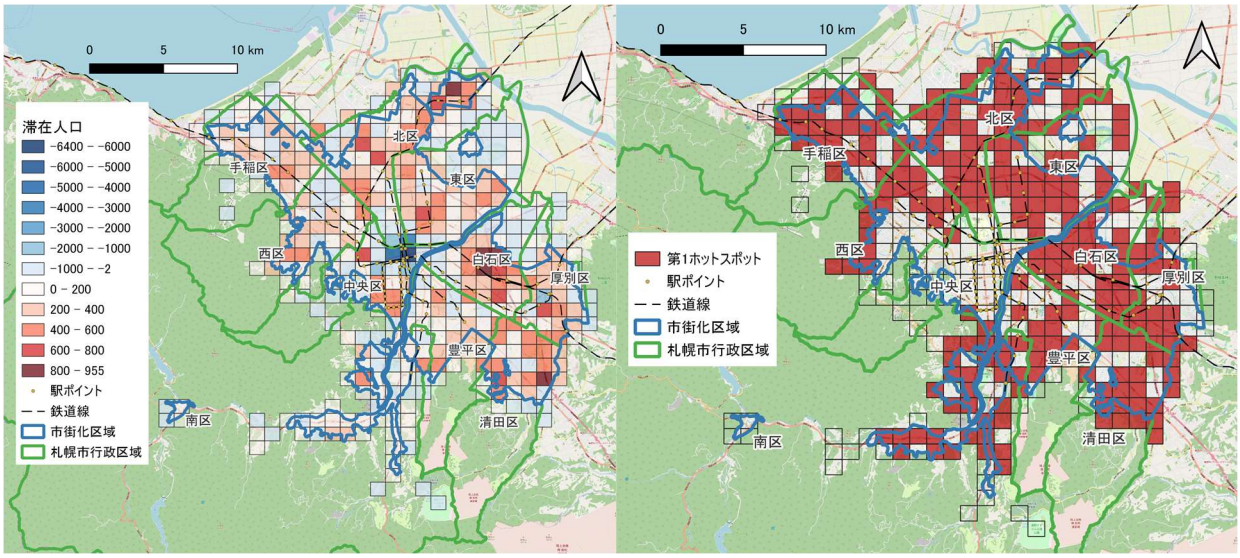


図-4　雪害時 2/22（火）午前 10 時の滞在人口（左：増減数，右：エシェロンスキャン）

どまっている可能性が高いと考えられる．

5.3　各交通手段のホットスポット分析

最も出発人口の減少が大きい 2/22（火）の朝のピーク時間である午前 5 時～午前 10 時について，交通手段別にホットスポット分析を行う．これにより，朝の通勤時間帯における雪害の影響を各交通手段別に明らかにする．雪害時 2/22（日）午前 5～午前 10 時・出発人口について，**図-5**，6，7 にそれぞれ徒歩・自動車・電車の結果を地図上に示す（左：標準化増減比，右：エシェロンスキャン）．標準化増減比は 1 以上が札幌市全体と比較して増加傾向，1 以下が減少の傾向を示している．エシェロンスキャンでは，ホットスポットが全体と比較し増加傾向にあった範囲，コールドスポットが減少傾向にあった範囲を示している．また，気象状況の地域差を確認するため，**図-8** に札幌市区別の降雪量の推移を示す．

図-5 右図に示す徒歩の標準化増減比の分布より，徒歩利用の地域差は少ないことが読み取れる．しかし，**図-5** 左図，エシェロンスキャンの結果より中央区・手稲区・西区で徒歩利用が他の地域に比べ多く，東区・厚別区の一部で少ない傾向が分かる．この差異は，**図-8** からわかるように，2/22（火）の降雪が東部で多かったことによるものと考えられる．

図-6 右図に示す自動車の標準化増減比の分布より，増減比の大小が入り混じり変動幅が大きいことから，他の交通手段より雪害時に大きな変化があったことが推測される．**図-6** 左図，エシェロンスキャンの結果より，札幌駅周辺と JR 札沼線の沿線・手稲駅周辺で出発数が多い傾向が読み取れる．これは，普段 JR を使っている人が JR の運休に伴い自動車での移動に切り替えたためと考えられる．大川戸ら[1] のアンケート調査の結果によると，一回目の雪害において，普段 JR を利用する人の内 3 割が自家用車に変更したことが確認されている．一方，白石区の JR 線沿線や清田区では出発数が少ない傾向がある．2/22（火）の東部の集中した降雪により，道路状況が極度に悪化，自動車への変更が進まなかったためと考えられる．**図-4** 左図，午前 10 時の滞在人口の増減数から見て取れるように，白石駅周辺の滞在人口が増加しており，代替交通がなかったことから通勤・通学が中止されたことが予測される．

図-7 左図に電車の標準化増減比，右図にエシェロンスキャンの結果を示す．どちらも比較的地下鉄駅に近いメッシュで利用増加の傾向にある．北区の地下鉄沿線で自動車の利用減少が見られたが，この地点では電車が増加傾向にあり自動車→地下鉄の利用変更が考えられる．一方，手稲区と北区の北部で減少の傾向が見られる．この周辺は地下鉄から遠く，先述した通り，自動車の増加傾向にあった箇所である．よって，JR→自動車への変更が起こったと考えられる．また，手稲区では徒歩の増加もみられるため，JR→徒歩の変更も想定される．

5.4　道道・市道の運搬排雪距離

日々の積雪・除雪作業の実施によって，道路の路肩堆雪は大きく成長する．この路肩堆雪を減らすため，運搬排雪は行われている．**図-9** に 1 月 29 日～2 月 28 日の運搬排雪距離を日毎に集計したグラフを示す．運搬排雪作業は，雪害時には大きく減少し，その後大きく増加していることが読み取れる．よって，多量の降雪により一時的に運搬排雪が行えない状況になるが，その後，道路幅員の拡幅のため通常時以上に排雪作業が行われた．これにより，自動車の移動速度と交通量は徐々に回復していったものと予想される．

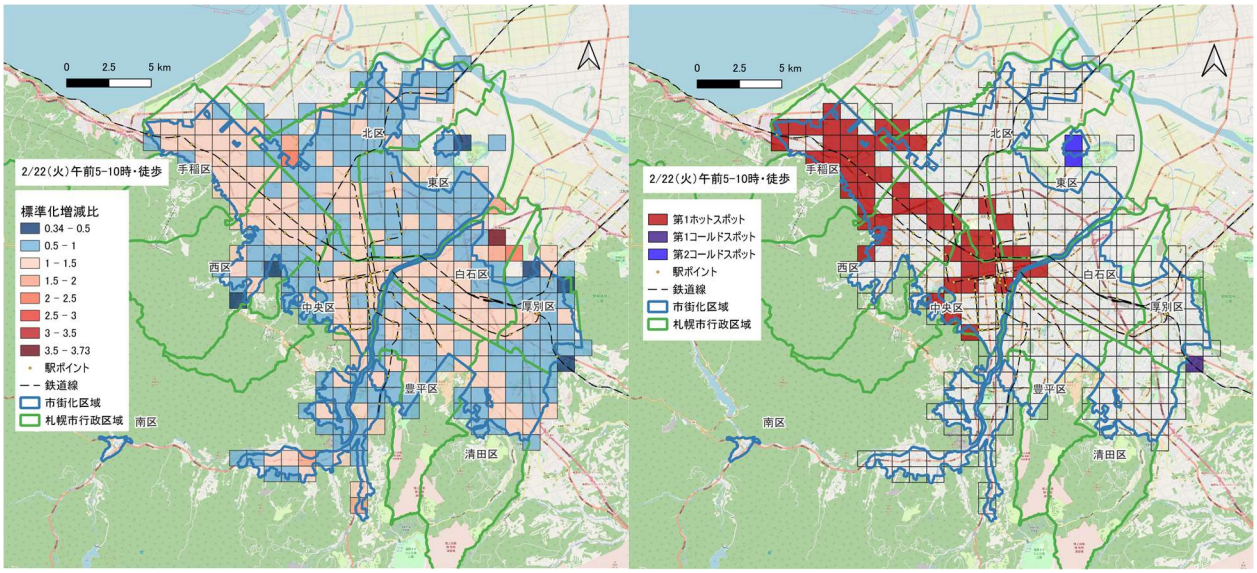


図-5　雪害時 2/22（火）午前 5～10 時出発人口・徒歩（左：標準化増減比，右：エシェロンスキャン）

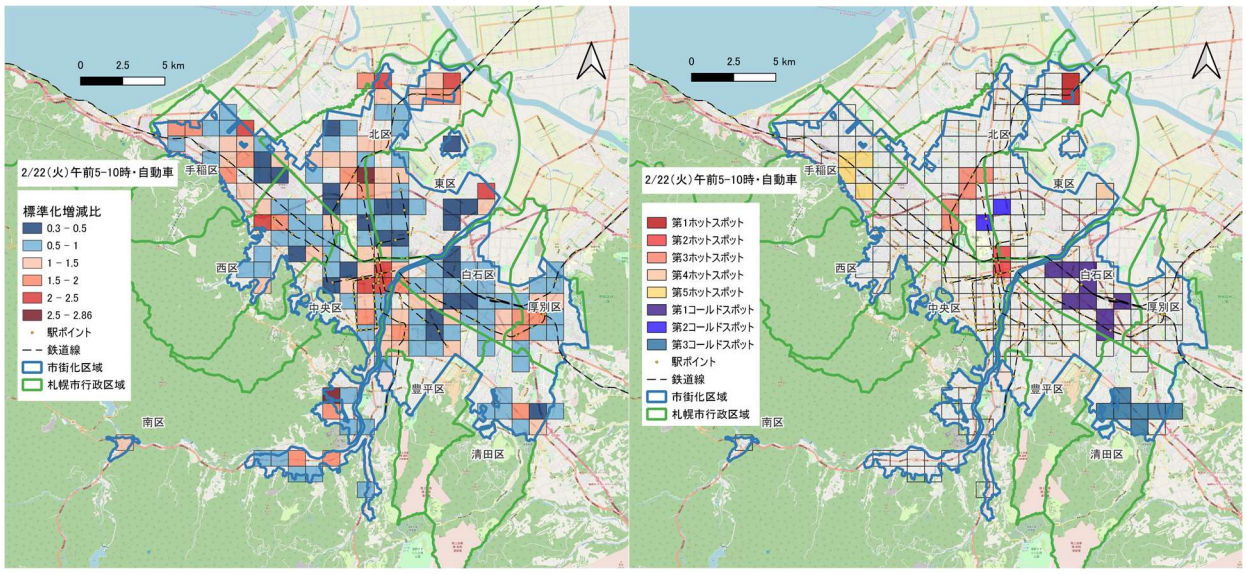


図-6　雪害時 2/22（火）午前 5～10 時出発人口・自動車（左：標準化増減比，右：エシェロンスキャン）

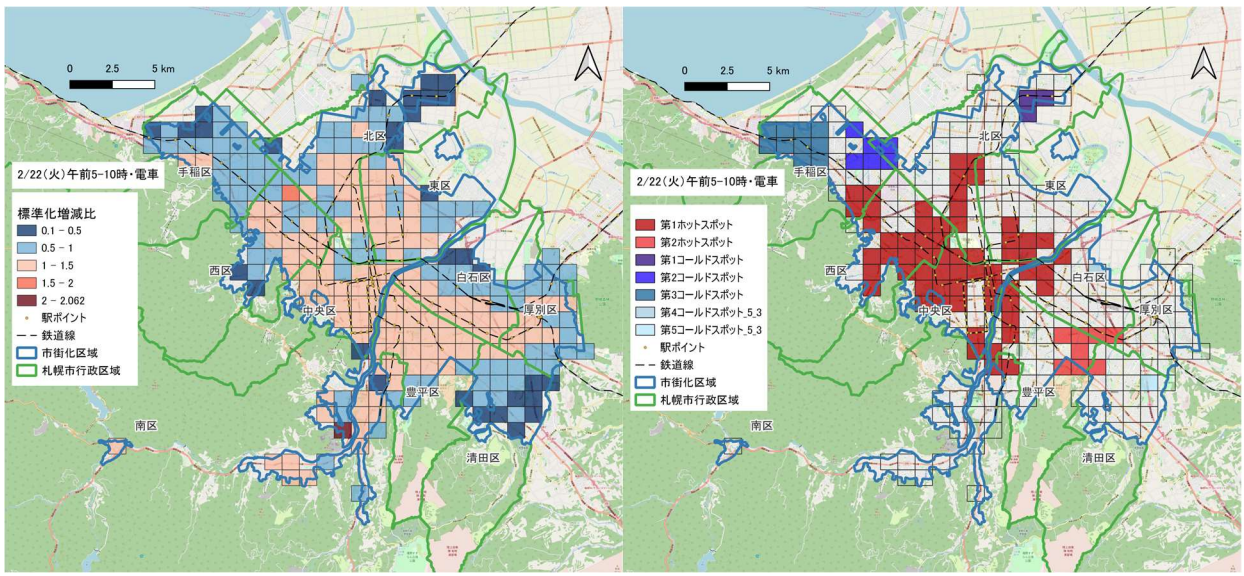


図-7　雪害時 2/22（火）午前 5～10 時出発人口・電車（左：標準化増減比，右：エシェロンスキャン）

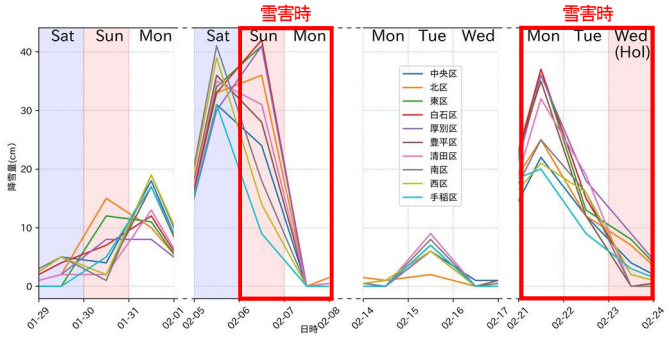


図-8　札幌市区別の降雪量の推移（日毎）

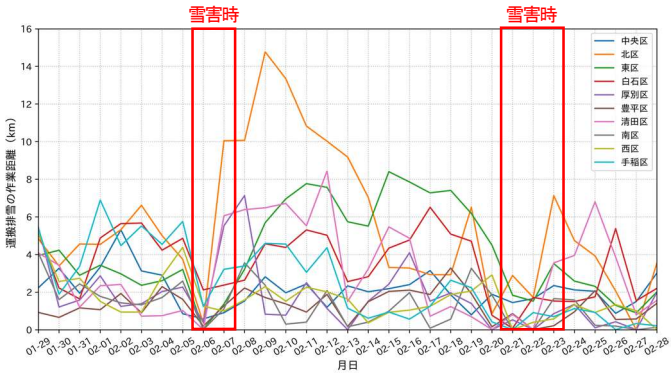


図-9　道道・市道の運搬排雪距離（日毎）

6.　おわりに

本研究では，降雪・運搬排雪情報の供給情報と利用交通手段が把握可能な携帯電話位置情報を用いた．まず，降雪と各交通の利用人口を比較することにより，交通サービスレベルが低下する状況を推定した．記録的な大雪が影響することはもちろん，特に深夜帯の断続的な積雪が除雪の妨げになり，翌日の交通に大きな悪影響を及ぼすことが示唆された．

次に，昼間の滞在人口をホットスポット解析することにより，雪害時に通勤・通学が不可能であった地域を推定した．

最後に，通勤時間帯における各交通手段の利用人口をホットスポット解析を通じて評価し，天候条件の地域差による影響や各交通手段の相互の影響を明らかにした．電車利用が減少した地域では自動車利用の増加が確認され，その逆もまた確認された．したがって，近くに利用可能な代替交通がある場合，移動手段の変更が行われる．しかし，白石区や清田区等，一部の地域ではそのどちらも減少傾向が見られた．これらの地域では郊外部であるにも関わらず昼間人口の大幅な増加傾向が確認された．よって，代替交通がないことによる移動中止が推測される．

これらの情報から考えられる新たな対策として，深夜帯の降雪に備えて除雪機器の追加と最適化が必要である．処理が難しい場合は事前に市民に除雪の不足を伝え，交通需要を減らす TDM 施策も考慮すべきである．また，代替交通のない地域の道路や線路の除雪を優先し，早急に代替交通を確保することで，都市の人々の移動を維持できると考える．

今後の課題としては，集計期間・地域の拡大が挙げられる．本研究では，雪害時 6 日間のデータのみを使用したため，交通のサービスレベルが復旧する様子を確認できていない．各交通手段別のレジリエンスカーブと地域差を調査を通じて，運搬排雪との関連性の明確化が期待される．また，本研究では札幌周辺の都市からの通勤者について考慮されていない．今後はこの情報を取り入れることで札幌圏全体の被害削減に貢献できると考える．

謝辞：本研究は国交省新道路技術開発「デジタルツインによる冬期道路交通マネジメントシステムの技術開発」，また JSPS 科研費 JP23K04070 の助成を受けて実施したものである．分析で使用した除排雪データは札幌市からご提供頂いた．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

1) 大川戸貴浩，天見正和，高野伸栄：札幌圏大雪時における通勤・通学への影響，第 38 回寒地技術シンポジウム（2022 年 11 月 30 日・12 月 1 日・2 日）
2) 丹治和博，小松麻美，金村直俊，松岡直基，尾関俊浩：2021/22 札幌都市圏の大雪の特徴と雪害要因，第 38 回寒地技術シンポジウム（2022 年 11 月 30 日・12 月 1 日・2 日）
3) 高橋尚人：2022 年 2 月の札幌圏での大雪時の Twitter データおよび人流データ分析，第 38 回寒地技術シンポジウム（2022 年 11 月 30 日・12 月 1 日・2 日）
4) 倉田和幸，宗広一徳，飯田美喜，植野英睦，伊東靖彦：2021 年度冬期の交通流変動及び冬期道路交通の円滑化に向けた提案，寒地土木研究所月報，No.838，2022 年 12 月
5) Tran Vinh Ha，Yousuke Sato，Thi Khanh Van Ha，Mikiharu Arimura：A descriptive analysis of heavy snow effects on travel demand patterns using ETC2.0 probe data, the case study of Sapporo city, Hokkaido, Japan.，EAST2023，2023
6) 澤村 悠里，奥村 誠：モバイル空間統計データに基づく都市圏通勤流動の定量的把握，土木計画学研究・講演集,Vol. 67, 2023.
7) 北海道新聞：札幌　今後はドカ雪増える？　温暖化影響. 専門家指摘も，https://www.hokkaido-np.co.jp/article/755032/，（最終閲覧日：2023/10/13）
8) 栗原考次・石岡文生(2021)，エシェロン解析−階層化してみる時空間データ−，共立出版
9) 札幌市：降雪量・積雪深の観測データ，https://www.city.sapporo.jp/kensetsu/yuki/weather-data.html，（最終閲覧日：2023/10/13）