

平成 30 年 5 月 22 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06258

研究課題名(和文) 都市鉄道ネットワークの耐災害性に係る脆弱性及び接続性評価手法の開発とその適用

研究課題名(英文) Development and Application of Evaluation Method for Vulnerability and Connectivity on Disaster Tolerance Improvement of Urban Railway Network

研究代表者

金子 雄一郎 (KANEKO, Yuichiro)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：40434112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では都市の重要インフラである鉄道の耐災害性向上に資する知見を得ることを目的に、東京圏を対象として次の分析を行った。1)都市鉄道ネットワーク上の複数リンクが同時に途絶する状況を想定した脆弱性評価手法を開発し、首都直下地震の発生を念頭に置いた分析を行った。2)鉄道の運行状況に基づきOD間の接続性を判定して目的地への到達可能率を算定する手法を開発し、震災時の運行再開のあり方を検討した。3)気象災害時の鉄道の脆弱性について、列車の運休・遅延が利用者へ及ぼす影響という観点からビッグデータを用いて時空間的に分析した。以上の結果を基に、鉄道事業者や行政における災害対策の充実化について検討した。

研究成果の概要(英文)：In this research, three topics were analyzed for Tokyo metropolitan area with the aim of obtaining implication that contributes to improving the disaster response capability of railway which is an important infrastructure of the city. Firstly, a vulnerability indicator was proposed assuming the situation of multiple links on the urban railway network being disrupted, and a case study assuming large-scale earthquake was conducted using this index. Secondly, a method was developed to evaluate the connectivity between OD based on the operation status of the railway and to calculate the reachability to the destination. Thirdly, the vulnerability of railways in meteorological disasters was analyzed using big data from the viewpoint of the influence of train shutoff and delay on users. Based on the above results, discussions were made on the enhancement of disaster countermeasures at railway companies and administrations.

研究分野：土木計画学

キーワード：都市鉄道 ネットワーク 脆弱性 接続性 首都直下地震

### 1. 研究開始当初の背景

大規模地震等の災害が発生した場合、交通の機能低下を可能な限り抑制するとともに、迅速な復旧を図るための対策を講じることは、国民生活上きわめて重要である。中でも鉄道は都市の経済活動を支える重要なインフラであり、一旦長期にわたり運行が停止された場合、多方面へ甚大な影響を及ぼすことから、対策の立案が社会的要請となっている。

このような問題に対して、平時よりネットワークの脆弱性や接続性の特性を把握できれば、国や鉄道事業者が対策を立案する上で有益な情報となるものと考えられる。インフラ施設の脆弱性については、平成25年12月に公布された国土強靱化基本法の前文において、事前防災及び減災に係る施策の優先順位を定め、これを的確に実施していくためにも必要であるとの指摘がなされている。

研究代表者はこれまで、都市鉄道を対象にネットワークの脆弱性及び接続性を評価する指標を検討し、実ネットワークレベルで計算可能な手法を開発してきたが、いくつかの課題が残されていた。このうち脆弱性評価については、途絶リンクを路線単位もしくは駅間単位で設定していたことが挙げられる。これは信号や架線トラブル、土砂災害など半日から数日程度の局所的な輸送障害を念頭に置いたものであるが、大規模地震の場合、過去の阪神・淡路大震災の例を見ても明らかに、複数のリンクが同時に途絶する可能性が高い。一方の接続性については、経路配分にあたり震災時の交通行動特性や再開した路線の容量制限が考慮されていなかった。

これらの課題を解決することで、都市鉄道の耐災害性向上に資するより実用性の高い検討が可能となるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

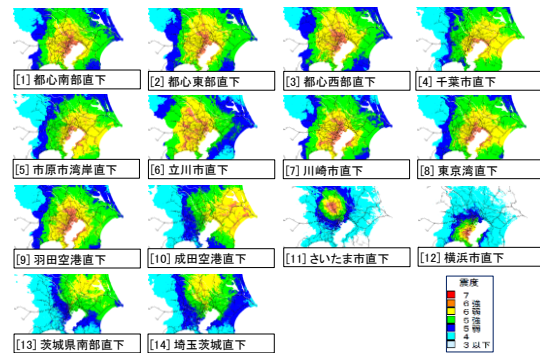
上述した背景を踏まえた本研究の目的は、次の3つに大別される。

- (1) 都市鉄道ネットワーク上の複数リンクが同時に途絶する状況を想定した脆弱性評価手法を開発する。
- (2) 震災時の交通行動特性やリンク容量制約を考慮して OD 間の接続性を判定する手法を開発し、運行再開のあり方を検討する。
- (3) 以上の開発した手法を首都直下地震の発生が予測されている東京圏の鉄道ネットワークへ適用し、得られた結果を基に鉄道事業者や行政における災害対策の充実化について提案する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 都市鉄道ネットワークの脆弱性評価

本研究では、都市鉄道ネットワークにおける高架橋及び橋梁を含むリンクが途絶した場合を想定した脆弱性評価を行う。具体的には、図-1に示した首都直下地震の想定震度分布で一定震度以上の地域に含まれるリンクのうち高架橋及び橋梁を含むものを抽出し、



注：内閣府：首都直下地震モデル検討会によるデータを利用。

図-1 首都直下地震の想定震度分布

これらの複数のリンクが途絶した場合の脆弱性指標値を算出する。

ここで脆弱性指標値について、鉄道ネットワークの特定リンクが途絶した場合、利用者が他の経路へ迂回することで一般化費用は増大する。本研究では研究代表者らの既往研究を参考に、OD間の一般化費用をOD交通量で重み付けしたものの合計値の変化分を用いることとする。この指標の位置づけとして、路線途絶時のアクセシビリティ低下という機能面に加えて需要面を考慮した評価を行うものである。指標値を  $V$  とすると、式(1)のように表わされる。

$$V = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{with} \cdot Q_{ij} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} GC_{ij}^{without} \cdot Q_{ij} \quad (1)$$

ここで、 $GC_{ij}$ : ゾーン  $ij$  間の一般化費用、 $Q_{ij}$ : ゾーン  $ij$  間 (OD 間) の交通量である。なお、特定のリンクを途絶させた場合 (震災時) を *with*、途絶させない場合 (平常時) を *without* と表記している。指標値が高いほど当該リンクの途絶による影響が大きいことを表している。

一方で想定震度分布 (既出の図-1 参照) を見ると、ケースによっては震度6強以上の地域が広範囲にわたっており、ゾーン間で利用可能な経路がすべて途絶する場合も生じうる。そのような場合、移動を中止することも想定されることから、本研究では上述した脆弱性指標に加えてゾーン間ごとに移動不可能な OD 交通量を求め、当該ゾーン間の全 OD 交通量に対する割合を算出する。

#### (2) 都市鉄道ネットワークの OD 間接続性評価

本研究では、鉄道の運行状況に基づく目的地への到達可能性を定量的かつ視覚的に捉えるために、交通需要分析手法と GIS を活用したシステムを開発する。評価システムにおける計算手順は次のとおりである。

まず入力変数は、鉄道 OD 表 (トリップ目的別) と鉄道ネットワークデータ (駅間所要時間、運賃、待ち時間、乗り換え時間等) であり、経路配分モデルを用いてリンク交通量 (輸送人員) を算出する。この際、各リンク交通量が所定の容量を超過しないように制

限を設ける。具体的にはリンクごとに輸送力に混雑率の許容値を乗じた容量を設定した上で、分割配分法の概念を用いて段階的に経路配分を行うことで容量超過が生じないようにする。なお、OD表の分割数は、計算時間等を考慮して10回に設定する。

また、震災時の交通行動特性を把握するため、東京圏の鉄道利用者を対象に直近の大規模震災である東日本大震災発生時における行動に関して回顧式の調査を行った。その中で、仮に震災時に運行再開した線区を乗り継ぐことで帰宅可能と想定した場合の追加所要時間の許容値を尋ねた。その結果、平常時の所要時間が長い程許容追加時間も長くなる傾向が見られるが、平常時の所要時間が30分以内と短い場合でも追加時間が2時間以上の割合が約6割と高いことがわかった。このことは、震災時におけるOD間の接続性を評価する際にはより多くの経路を選択肢集合に設定する必要性を示唆するものであり、本研究における経路配分の選択肢集合には最大16経路まで設定した。

以上の結果を基に目的地への到達可否を判定する。具体的には、OD間の利用可能な経路のうち容量以下の経路が1本以上存在する場合は目的地へ到達可能なODとして、容量以下の経路が1本も存在しない場合は目的地へ到達不可能なODとしてそれぞれ判定し、その結果を基にゾーンごとに目的地到達率を算出する。目的地への到達状況を表す指標として、式(2)のような指標を設定する。

$$P_j(k) = \frac{\sum_i Q_{ij}^{(k)}}{\sum_i Q_{ij,all}} \quad (2)$$

ここで、 $P_j$ :リンク  $k$  が途絶した場合のゾーン  $j$  への到達可能率、 $Q_{ij}^{(k)}$ :リンク  $k$  が途絶した場合のゾーン  $ij$  間の到達可能な交通量、 $Q_{ij,all}$ :ゾーン  $ij$  間の交通量である。

以上より、鉄道ネットワークの代替性と利用者のODパターン、再開列車への混雑集中を考慮して目的地への到達可能率を地域別に算出することが可能になり、その結果をGIS上に表示し分析を行う。

### (3) 評価対象地域の範囲と使用データの概要

本研究の評価対象地域については、東京駅から概ね80km圏内とし、ゾーン数は2,910である。各ゾーンの中心からは、国土交通省の大都市交通センサスの実績に基づき、最低1駅以上のアクセスリンクが設定されている。仮にゾーン中心から最寄り駅が2箇所あり、いずれの路線も途絶した場合、目的地へ到達することは不可能となる。

分析に用いるデータについて、OD交通量は国勢調査や東京都市圏パーソントリップ調査等を基に作成した日単位(平成17年時点)のものを用いており、鉄道ネットワークは平成17年度のデータを基本に、以降の開業した路線を追加して構成している。

## 4. 研究成果

### (1) 都市鉄道ネットワークの脆弱性評価

まず、震度分布ケースごとに脆弱性指標値  $V$  を算出する。算出にあたっては、途絶リンク以外では列車が運行される、すなわちリンクの途絶・非途絶の境界となる駅で折り返し運転が可能であるものと仮定する。

脆弱性指標値の算出結果を図-2に示す。なお、上述したゾーン間で移動不可能なOD交通量の値は0であることから、当該ODペアは指標値の算出には含めていない。これよりケース間で脆弱性指標値が大きく異なっているが、特に震源が都心直下のケースのケース([6]立川市直下,[7]川崎市直下,[8]東京湾直下,[9]羽田空港直下)において指標値が高くなっており、リンク途絶による利用者行動への影響が大きいがわかる。これに対して他のケースでは、途絶による影響は限定的である。

ここで、脆弱性指標値  $V$  と途絶させたリンク数の関係を示したものを図-3に示す。これより指標値が高いのは概して途絶リンク数が多いケースであるものの、[1]都心南部直下,[3]都心西部直下,[6]立川市直下,[7]川崎市直下,[9]羽田空港直下の各ケースでは、途絶リンク数がほぼ同水準にも関わらず、指標値に比較的大きな差異がみられる。特に[3]都心西部直下,[6]立川市直下の値が高いが、前者は震度6強以上のエリアが都心部をほぼカバーしていること、後者は広域にわたっていることがそれぞれ関係しているものと考えられる。

次に、震度分布ケース([1]~[14])ごとに、移動不可能な交通量の割合を算出する。

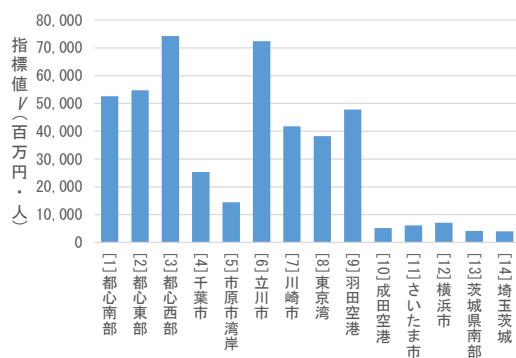


図-2 各ケースの脆弱性指標値

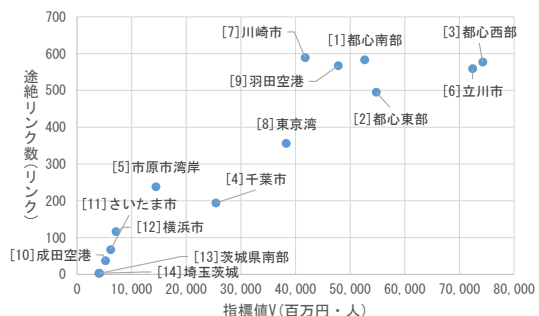


図-3 脆弱性指標値と途絶リンク数との関係

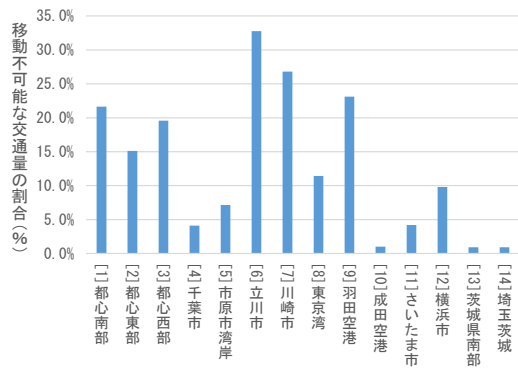


図-4 各ケースの移動不可能な交通量の割合

ここで移動不可能の定義は上述したとおり、リンクの途絶によって OD 間で利用可能な経路が存在しない、すなわち鉄道を利用して目的地へ到達できない状態とし、移動不可能な割合とは、このような状態にある全 OD ペアの交通量を総交通量（対象地域の生成交通量）で除した値である。算出結果を図-4 に示す。これより[1]都心南部直下、[6]立川市直下、[7]川崎市直下、[9]羽田空港直下の各ケースで移動不可能な割合が 20%超と、他のケースより大きくなっている。これらのケースについては図-1 で示したとおり、震度 6 強以上のエリアが広範にわたっていることが影響しているものと考えられる。

以上の分析結果の活用について、本研究における試算で脆弱度が高い結果となった震度分布ケースでは、例えば鉄道事業者が把握している高架橋及び橋梁の状態や耐震性能と照合させることで、震災時における点検や復旧作業を優先させるリンクの抽出が可能となることが考えられる。また、2016 年 4 月の交通政策審議会答申「東京圏における今後の都市鉄道のあり方について」において指摘された「曲げ破壊先行型」の耐震対策を講じる場合、重点リンクを選定する際の参照とすることも活用方策の一つとして考えられる。

(2) 都市鉄道ネットワークの OD 間接続性評価

一般に大規模震災時は、被災状況によって施設の点検や復旧工事のための要員、資材等に制約が生じる可能性もあることから、運行再開を優先する線区をあらかじめ設定し、重点的に点検や復旧工事等を行っていくことが望ましい。一方で地域別や線区別の被災状況を事前に想定することは困難であることから、被災状況は同一との仮定の下、複数のシナリオを設定して運行再開に関するシミュレーションを行っておくことは、一定の意義があるものと考えられる。

本研究では震災時における運行再開線区に関する検討にあたり、次の 2 つのシナリオを設定する。なお、両者で再開延長に大きな差が生じないように留意する。

シナリオ 1：各鉄道事業者の代表的な 1 線区（JR 東日本は 7 線区）を優先して再開

シナリオ 2：地域間流動特性を踏まえて再開

このうちシナリオ 1 については、鉄道事業者における人員や資機材等の制約、ネットワークにおける代替性を考慮したものであり（並行する線区がある場合、一方を優先して再開させることが可能）、広範囲な需要に対応でき、資源配分の観点からも一定の有効性は存在するものと考えられる。具体的には図-5 に示したとおり、東京地下鉄及び都営地下鉄の全線、JR 東日本は主要 7 線区（東海道線、中央線、宇都宮線、高崎線、京浜東北線、常磐線（各停）、総武線（各停））、大手民鉄は各 1 線区（複数線区を有する場合、輸送人員が最も多い線区を抽出：東武伊勢崎線、西武池袋線、京成本線、京王線、小田急小田原線、東急東横線、京急本線、相鉄本線）を再開線区とする。これらの営業キロの合計は 1081.0km である。

一方、シナリオ 2 については、東京圏における地域間の流動特性、すなわち東京区部とその周辺の東京多摩部、横浜市、埼玉南部、千葉北西部との間のトリップ数がきわめて多いという特性を踏まえて再開手順を設定する方法である。具体的には図-6 に示したとおり、東京駅から 30km 圏内の JR 東日本の主要線区（東海道線、横須賀線、山手線、中央線、宇都宮線、高崎線、京浜東北線、常磐線、総武線、埼京線、京葉線）、大手民鉄のターミナルを拠点とする線区（東武伊勢崎線・東上線、西武池袋線・新宿線、京成本線・押上線、京王線・相模原線、小田急小田原線・多摩線、東急東横線・田園都市線・目黒線、京急本線、相模本線）を再開線区とする。これらの営業キロの合計は 1094.7km である。

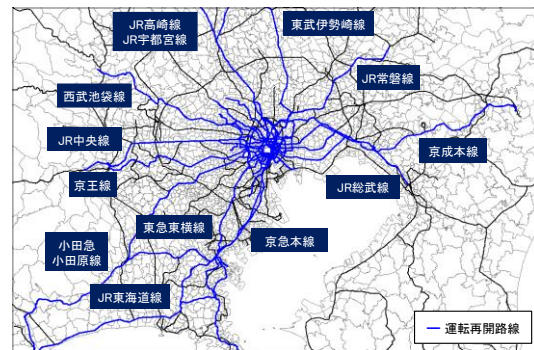


図-5 シナリオ 1 の運行再開線区

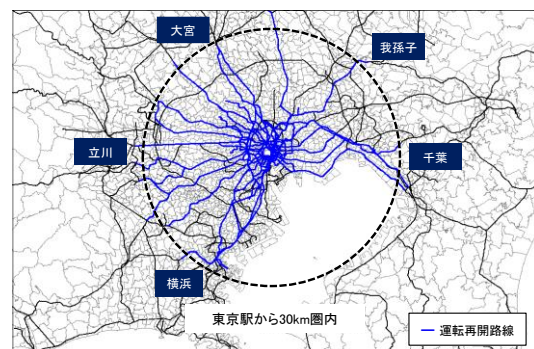


図-6 シナリオ 2 の運行再開線区

まず、シナリオ1の検討結果を図-7に示す。東京圏の広範囲で帰宅可能な状況であり、帰宅可能率の平均は 60.1%である。地域別では東京多摩部や神奈川県、埼玉県が多くゾーンが 60%超であるのに対して、千葉県や茨城県南部では 50%以下のゾーンが多いなど地域間で偏りが見られる。その要因として、これらの地域は JR 常磐線や総武線、京成線の他に輸送力の高い線区がないことから都心近傍のリンクで混雑率の上限値を超過し、それ以遠のリンクに交通量が配分されない、すなわち目的地へ到達できないことが挙げられる。

一方、シナリオ2の検討結果を図-8に示す。30km 圏内の主要な線区を再開させたことから、これらの地域の大半のゾーンで帰宅可能率が 80%超と高い傾向が見られる。なお、帰宅可能率の平均は 60.5%である。

ここで図-9は、シナリオ1とシナリオ2の帰宅可能率の差をゾーンごとに算出したものである。図中の赤色のゾーンはシナリオ1の方がより高い帰宅可能率であることを、青色のゾーンはシナリオ2の方がより高い帰宅可能率であることを表わしている。

これより2つのシナリオ間で運行再開線区の営業キロや平均帰宅可能率はほぼ同水準であるが、地域別に見た場合、帰宅可能状況は大きく異なっていることがわかる。特に東京圏の郊外部の多くの地域（神奈川県、埼玉県、千葉県の一部地域）において両者の差が60%以上と顕著であることは、運行再開線区の検討にあたり、都心ターミナルと郊外地域を結ぶ線区を含めることの重要性を示唆したものと考えられる。

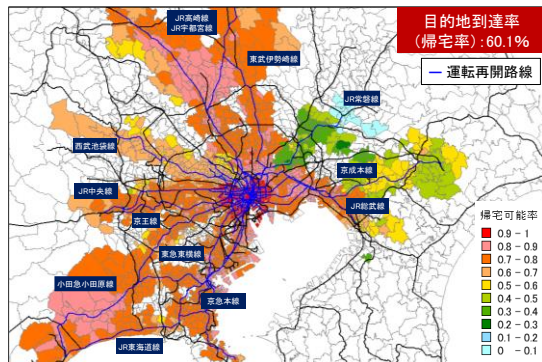


図-7 シナリオ1の帰宅可能状況

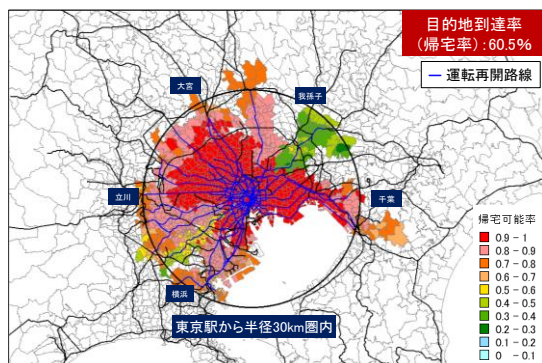


図-8 シナリオ2の帰宅可能状況

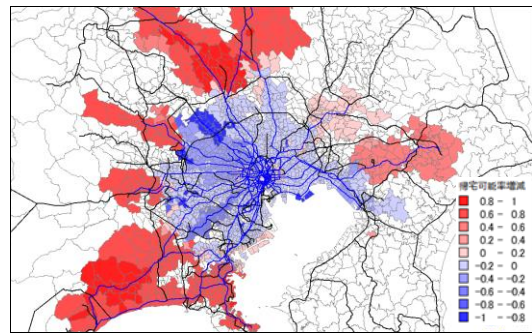


図-9 シナリオ間での帰宅状況の比較  
(シナリオ1とシナリオ2の差分)

一方で30km 圏内では、両者の差は20%以下が比較的大きいことや、上述した回顧調査の結果から徒歩で帰宅を開始した人が一定割合存在したことなどを勘案すると、都心に比較的近い地域では、例えば徒歩など鉄道以外の交通手段と適切な分担を行うという視点が、より円滑な帰宅行動を実現する上で重要であるものと考えられる。そのためには、本研究で構築したシステムに交通手段選択モデルを追加することで、徒歩を含む選択を可能として評価を行う必要がある。

### (3) 交通ビッグデータを用いた脆弱性評価

(1)及び(2)の成果については、当初の研究計画に基づくものである。一方で本研究の対象地域である東京圏では近年、豪雨や降雪等の気象災害による列車の運転見合わせが相次ぐなど、大規模地震以外の面での鉄道ネットワークの脆弱性が指摘されている。このような運転見合わせに伴う利用者への影響は時々刻々と変化することから、パーソントリップ調査や大都市交通センサス等の既存の交通統計データでは解明が困難であり、新たなアプローチによる分析が必要である。

そこで本研究では、携帯電話の位置情報を基にした人口データであるモバイル空間統計を用いて、東京圏における鉄道輸送障害による利用者への影響を時空間的に把握した。具体的には、2016年1月18日の未明から発生した関東地方の降雪に伴う列車の運休・遅延事象を対象に、地域別滞在人口の平常時からの変化分を1時間ごとに測定した。

図-10は、一例として午前9時台における降雪時(1月18日)と平常時(1月25日)の市区町村別滞在人口の差分を算出したものである。これより東京の西部地域(東京多摩部、神奈川県、埼玉県)や北部地域(埼玉県)を中心に平常時より滞在人口が大幅に増加していること、一方で東部地域(主に千葉県)はほとんど増加がみられず、従業地である東京都心部は減少していることがわかる。

このような傾向を端的に示したのが図-11である。これより東京都(区部)では降雪時の滞在人口が平常時から大きく減少(図では負値)しているのに対して、その他の地域はいずれも滞在人口が増加(図では正値)していることがわかる。この傾向は9時台をピー

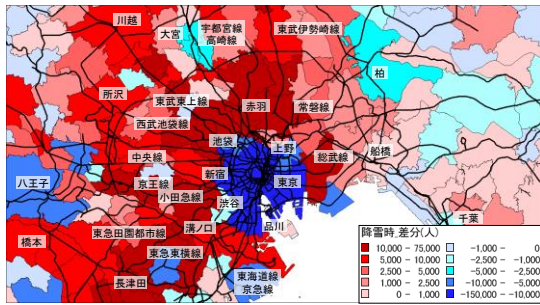


図-10 降雪時と平常時の滞在人口の差分  
(午前9時台・市区町村別)

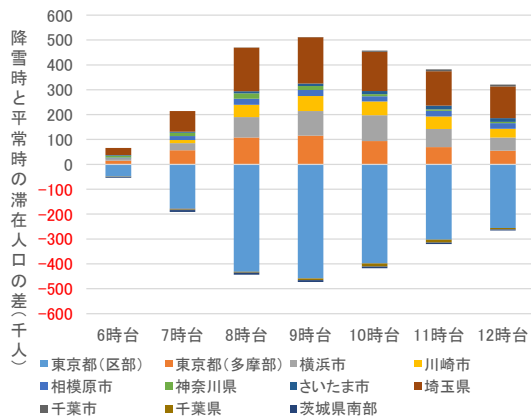


図-11 降雪時と平常時の滞在人口の差分

クとして徐々に縮小しているものの、12時台でも一定の増減がみられる。東京都(区部)は事業所が集積している地域であり、列車の運休や遅延によって勤務先へ到達できない人が多く発生したことが推察される。

以上の分析結果は、駅ホームでの列車の到着待ちや改札での入場規制にともなう時間損失によって勤務先に到達できない状況が発生していたことを示唆するものである。従って今後の対策として、利用者の最適な行動選択に資するように列車の運行状況や駅の混雑状況等を逐次提供することや、悪天候時には出勤を控えることを含めた企業における勤務体制等の見直しについて、検討が必要であると考えられる。

#### (4)まとめと今後の展望

本研究では、都市の重要インフラである鉄道の耐災害性向上に資する知見を得ることを目的に、ネットワークの脆弱性と接続性に着目した評価手法を開発した。主な成果として、脆弱性評価については、震災等で途絶した場合に利用者への影響が大きいリンク群や地域を明らかにしたこと、接続性評価については、開発した手法が震災時の運行再開の検討に活用できることを示したことが挙げられる。なお後者は、今回対象とした震災発生直後の帰宅行動のみならず、発災から一定期間が経過した段階における通勤行動についても同様に取り扱うことが可能であり、例えば復旧が長期に及ぶ場合の運行再開線区の検討にも活用できると考えられる。

一方でこのような通勤交通の支障は、企業等の財・サービスの生産活動へ影響を及ぼすと考えられることから、労働力確保という観点を加味した運行再開のあり方についても、検討が必要である。

また、本研究で開発した手法の実用性をより高める観点から、時間帯別の需要変動を考慮できる交通需要分析手法を組み込むことも重要な課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 中川拓朗, 金子雄一郎, 横山茂樹, 井上真志: 複数リンクの途絶を考慮した都市鉄道ネットワークの脆弱性評価, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I\_809-I\_818, 2017. 査読有
- ② 金子雄一郎, 佐野在人, 横山茂樹, 井上真志: リンク容量制約を考慮した都市鉄道ネットワークの OD 間接続性評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第20号, pp. 233-240, 2016. 査読有

〔学会発表〕(計4件)

- ① 中川拓朗, 金子雄一郎, 長屋知希: モバイル空間統計を用いた都市鉄道の運休・遅延が利用者には及ぼす影響分析—2016年1月の首都圏降雪時を対象として—, 土木学会第45回関東支部技術研究発表会講演概要集, CD-ROM, 2018.
- ② 中川拓朗, 金子雄一郎, 横山茂樹, 井上真志: 複数リンクの途絶を考慮した都市鉄道ネットワークの脆弱性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 54, 2016.
- ③ 中川拓朗, 金子雄一郎, 横山茂樹, 井上真志: 首都直下地震を想定した都市鉄道ネットワークの脆弱性評価, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集, 第VI部門, 2016.
- ④ 金子雄一郎, 中川拓朗: 複数リンクの途絶を考慮した都市鉄道ネットワークの脆弱性評価に関する研究, 第22回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2015)講演論文集, 2015.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

金子雄一郎 (KANEKO, Yuichiro)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号: 40434112