

首都直下地震による鉄道利用 通勤・通学客の被害想定

鳥海 重喜, 川口 真由, 田口 東

1. はじめに

首都直下地震を対象とした被害想定は、行政を中心に行われている[1][7]。それらの報告では、建物倒壊などの物的被害、要因別死傷者などの人的被害、さらに帰宅困難者についても想定されている。例えば、文献[1]によると、平日の昼12時に地震が発生し、すべての公共交通機関が運行不能となった場合、1都3県（東京都、神奈川県、埼玉県、千葉県）で約650万人の帰宅困難者が発生すると推計されている。また文献[7]では、推計した帰宅困難者の区市町村別発生数が記載されている。一方、地震発生時刻によって、帰宅困難者の数が大幅に変化すると考えられるが、既存の報告では、包括的な被害の推計を行っているため、これについてほとんど言及されていない。

大佛ら[4]は、東京都市圏パーソントリップ調査データを用いて鉄道利用者の時空間分布を推計し、帰宅困難者の推計を行っている。人々の移動の時間的変化は捉えられているものの、利用している鉄道ネットワークは静的なものであり、時刻によって鉄道ネットワークの状況が異なる（つまり、鉄道ネットワーク上を時々刻々と電車が移動する）という点についてはモデルに組み込まれていない。

本研究では時空間に拡張した鉄道ネットワーク[5]を用いて、首都直下地震が発生した際の鉄道利用者

（通勤・通学客）の被害を詳細に見積もる。特に、被害の空間的分布と時間的変化に注目する。鉄道利用実態調査を分析した文献[3]によれば、鉄道を利用する通勤・通学客の80%以上（利用人員比）は定期券利用者であることから、本研究では鉄道定期券利用者を対象とする。現在、首都圏における鉄道定期券利用者は約800万人にのぼり、地震による鉄道利用者の被害を見積もることは、今後、地震の対策を立てるにあたり有用である。

本研究の特長は、(i)電車を利用中の人の時間的、空間的分布に注目する、(ii)走行中の電車の被害を考える、という点である。

2. 首都圏鉄道ネットワーク

著者らはこれまで、首都圏鉄道ネットワークを時間軸方向に拡張した時空間ネットワークを考え、電車1本1本の運行を表現することで、鉄道利用者の動的な流れを表現してきた[2][5][8]。本研究でも同様の手法を用いる。

本研究で対象とする鉄道ネットワークは、2000年に実施された大都市交通センサス[9]が対象としている首都圏128路線、1,815駅である。図1に対象範囲の鉄道ネットワークを示す。

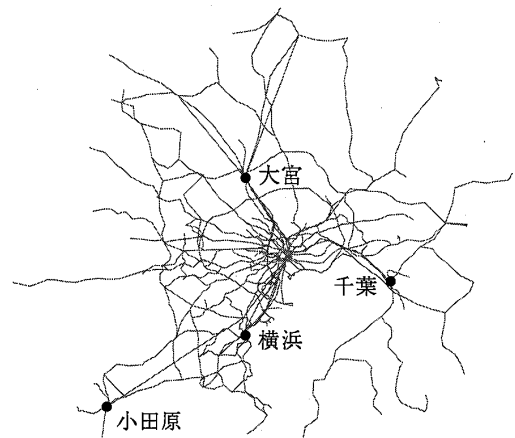


図1 大都市交通センサスの対象範囲

とりうみ しげき

中央大学 大学院理工学研究科
(現) 舩海上技術安全研究所
〒181-0004 三鷹市新川6-38-1

かわぐち まゆ

中央大学 大学院理工学研究科
(現) 全日空システム企画(株)
〒144-0041 大田区羽田空港3-5-10

たぐち あずま

中央大学 理工学部
〒112-8551 文京区春日1-13-27

受付 07.6.6 採択 07.11.28

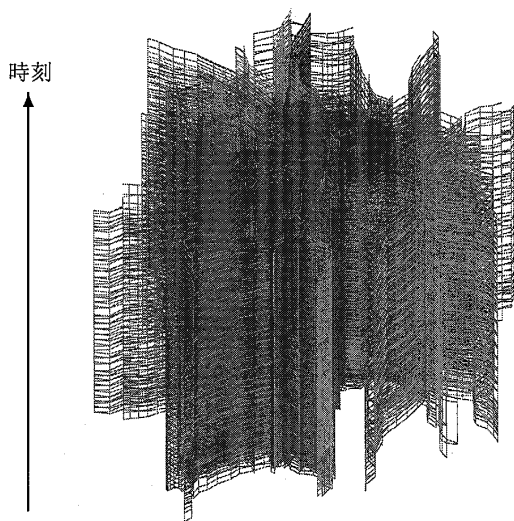


図2 時空間ネットワーク

2.1 時空間ネットワークの構築

乗車から降車までの鉄道利用者の行動をネットワークで表現するために、鉄道ネットワークを時間軸方向に拡張する。具体的には、各駅における各電車の停車を「停車ノード」、電車に乗って次の駅に移動する行動を「走行リンク」、駅で次の電車を待つ行動を「待ちリンク」、駅で別の路線に乗り換える行動を「乗り換えリンク」として表現する。電車の発着時刻は、市販の時刻表の電子データ（以下、電子時刻表とする）である全国JR時刻表2005年1月号とJTBパブリッシングの私鉄データ（2005年2月10日現在）より取得する。

ところで、本研究で使用する電子時刻表には着時刻と発時刻が別々に記載されている。それゆえ、停車ノードを各駅における各電車の到着を表す着ノード、各駅における各電車の出発を表す発ノード、電車の到着から出発までの停車を表す着発間リンクに分けて表現する。これにより、各駅停車の電車が後続の優等電車（急行、快速等）を待つ発車するような、駅での待ち合わせも表現できる。この時間軸を取り入れた3次元の鉄道ネットワークを時空間ネットワークと呼ぶ。構築した時空間ネットワークを図2に示す。対象とした電車41,495本に対して、総ノード数は746,871、総リンク数は3,053,930である。

2.2 大都市交通センサス

大都市交通センサス[9]は（以下、センサスと呼ぶ）、5年ごとに行われている公共交通機関（鉄道、バス）の利用実態調査である。ここでは、2000年の首都圏鉄道定期券利用者を対象として、平日の午前中

に通勤・通学のために利用した電車について、各乗客の出発駅から目的駅までの利用路線、乗換駅、利用電車種別（普通、急行等）、出発駅の乗車時刻（分単位）、前日の帰宅における乗車駅、降車駅、乗車時刻（分単位）に関するデータを利用する。図1の地域全体で、定期券利用者は約800万人であり、サンプルとして約30万件のデータが集められている。3節以降では、サンプルデータを元に推計した通勤客の全数について議論する。

2.3 交通量配分

センサスでは、鉄道利用者の利用路線（出発駅～乗換駅（複数）～目的駅）は与えられているが、どの電車に乗ったのかまではわからない。そこで、センサスで与えられる駅間の経路を以下のように決定する。鉄道利用者は出勤経路上の出発駅、乗換駅、目的駅の各駅間で、所要時間が最も短い経路を選択すると仮定し、時空間ネットワーク上でダイクストラ法を用いて最短時間経路問題を解き、通勤経路を定める。ただし、センサスに基づき、鉄道利用者ごとに利用できる路線、電車種別を限定する。例えば、利用電車種別が普通の場合は、経路探索に含める電車リンクは普通電車のみとし、急行の場合は、急行電車もしくは普通電車を含めるものとする。一方、帰宅に関しては、鉄道利用経路および利用電車種別が明示されていないので、次のように決定する。出勤時の乗車駅と帰宅のための降車駅が同じで、かつ、出勤時の降車駅と帰宅のための乗車駅が同じ場合には、通勤・通学の経路と同じとする。それ以外の場合は、乗換駅、電車種別を考慮しないで、最短時間経路を求める。対象データでは、前者が約88%、後者が約12%である。

3. 鉄道利用者の時空間分布

前節のように、時空間ネットワーク上で鉄道利用者の流れを再現することで、各時点の各電車の利用者数を求めることができる。

3.1 時刻・利用状況別利用者数

電車ごとではなく、利用者の置かれている状況（以下、利用状況と呼ぶ）ごとに利用者数を集計することもできる。例えば、利用状況を

- 電車（走行中） 走行中の電車に乗っている
- 電車（停車中） 駅で停車している電車に乗っている
- ホーム ホームで電車を待っている
- 乗り換え 駅で乗り換えのために移動している

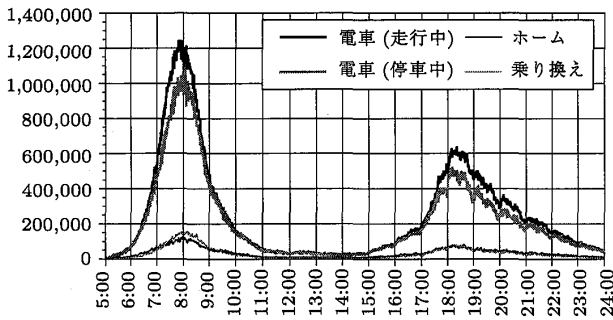


図3 時刻・利用状況別利用者数

の4つに分類し、時間軸に沿って利用者数を集計すると図3が得られる。

図3から、鉄道利用が活発になる朝夕のラッシュ時には、走行中の電車内にいる利用者も多く、出勤時の8時ごろには約120万人、帰宅時の18時ごろには約60万人が走行中の電車に乗っていることがわかる。また、そのほかに、停車中の電車の中にいる利用者や、ホームで電車を待っている利用者、別の路線に乗り換えをする利用者も多く、8時ごろには約120万人、18時ごろには約62万人が駅にいることがわかる。

3.2 時刻・走行速度別利用者数

電車の発車から停車までの運転速度（以下、運転パターンと呼ぶ）を仮定すると、走行速度ごとの利用者数を集計することができる。

今、所要時間が T である駅間を図4に示す運転パターン（加速→定速→減速）で走行すると仮定する。ただし、電車の加速度と減速度は等しいものとし、加減速度 a を車両緒元を参考にJR在来線、私鉄、地下鉄では $a=3.0$ [km/h/s]、新幹線では $a=1.6$ [km/h/s] とする。このとき、ある駅を出発してからの時間を $t (> 0)$ とすると、走行速度 v は、

$$v = \begin{cases} at & (t < T_a \text{ のとき}), \\ aT_a & (T_a \leq t < T - T_a \text{ のとき}), \\ a(T - t) & (T - T_a \leq t < T \text{ のとき}), \end{cases} \quad (1)$$

と表せる。ここで、加減速する時間 T_a は、駅間距離 D 、所要時間 T 、加減速度 a の関係から求める。

このような運転パターンのもとで鉄道利用者を時間軸に沿って走行速度別に集計すると、図5を得る。通勤・通学時間帯では、走行速度の速い電車の利用者数が最も多くなる時間帯は、走行速度の遅い電車の利用者数が最も多くなる時間帯より早く、帰宅時間帯ではその逆であることがわかる。これは、駅間の距離が長い郊外では速い走行速度で走行する区間が長くなるためである。

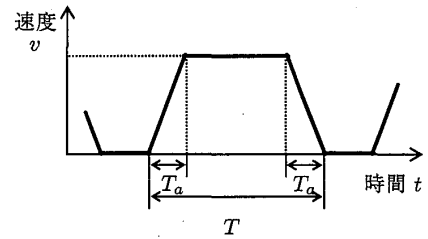


図4 運転パターン

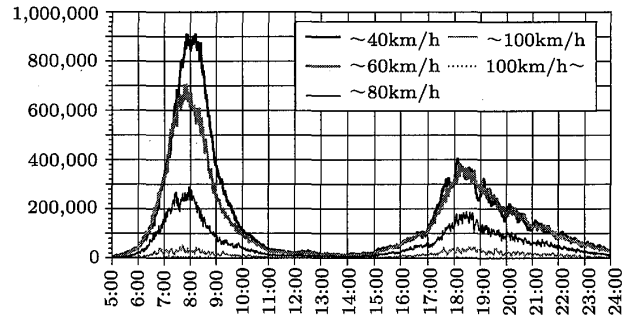


図5 時刻・走行速度別利用者数

4. 帰宅困難者

鉄道利用者の時空間分布から、大地震が起きたときに発生する帰宅困難者の数を推計する。ただし、本研究では「地震発生時に鉄道を利用中の人」を対象に推計を行う。したがって、勤務地・就学地に到着している鉄道利用者を推計に含まない。

まず、鉄道利用者の時空間分布から、時間軸に沿って各利用者の、(a)現在地から自宅の最寄駅までの直線距離、(b)現在地から自宅の最寄駅あるいは勤務地・就学地の最寄駅までの直線距離、を算出する。2つのケースを比較することにより、地震発生時に自宅に帰ることだけを考えるのではなく、勤務地・就学地に向かうことも考慮した場合の効果を評価することができる。

ケースbについて、5 km刻みで利用者数をまとめたものを図6に示す。

得られた距離から、地震が発生したときに徒歩で帰宅可能かどうかを判定する。また、帰宅が困難である割合（帰宅困難割合）は、帰宅先までの移動距離に応じて異なるものとし、文献[1][7]を参考に、図7のように設定する。

以上の判定方法に従って帰宅困難者数を推計した結果を図8、図9に示す。ここで、ケースaは全員が自宅に向かう場合、ケースbは自宅あるいは勤務地・就学地のうち近いほうに向かう場合である。両者を比較することで、地震発生時には、自宅に帰ることだけ

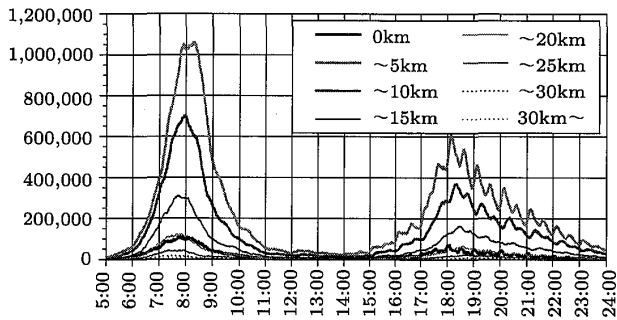


図6 自宅最寄駅あるいは勤務先最寄駅からの距離別利用者数 (ケース b)

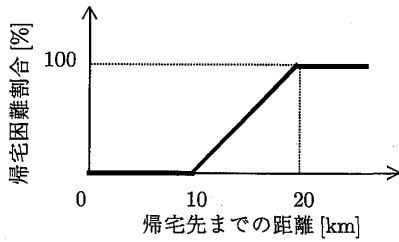


図7 帰宅困難割合

を考えるのではなく、勤務地・就学地に向かうことも考えると、帰宅困難者が大幅に減ることがわかる。鉄道利用者が最も多くなる8時に地震が発生した場合、帰宅困難者数は、ケース a では約 86 万人、ケース b では約 21 万人となり、ケース a の約 1/4 に減少する。

東京都地域防災計画[6]や文京区防災対策条例などでは、災害時の体制整備に関して、事業所や学校に対して、食料や飲料水、生活必需品等の備蓄を努めるよう規定している。これを受けて、いくつかの大企業等では、それらの備蓄を進めている。また、公共交通機関が運行不能となった場合に、通勤・通学者が一齐に徒歩で帰宅すると、歩道が渋滞し、混雑により負傷者が発生するなどの危険性が高まることが懸念されており、文京区防災対策条例では、帰宅困難者に対し一齐に帰宅行動をとらないよう努めることを求めている。これらを踏まえれば、もし家族の安否が確認できれば、無理に自宅へ帰宅するのではなく、勤務先や通学先に一時避難するのも現実的な選択肢となるだろう。

5. 鉄道利用者の被害推計

5.1 想定する地震

文献[1]で想定されている 18 タイプの地震のうち、東京湾北部地震と都心西部直下地震を対象とする。東京湾北部地震は、東京湾の江東区沿岸を震源とするマグニチュード (以下、M と表記) 7.3 の地震で、想定されている 18 タイプの地震の中でも発生の可能性が

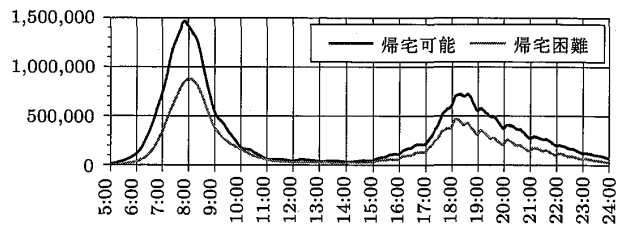


図8 帰宅困難者数 (ケース a)

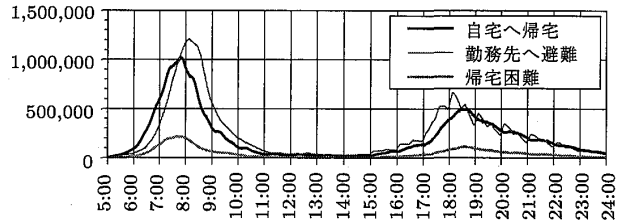


図9 帰宅困難者数 (ケース b)

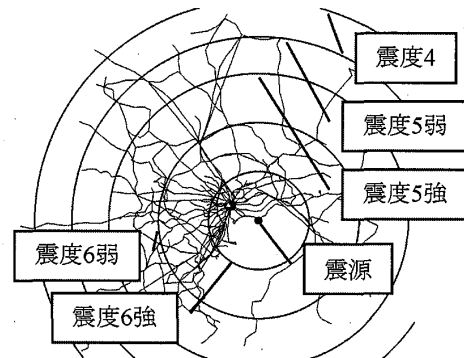


図10 震度分布 (東京湾北部地震)

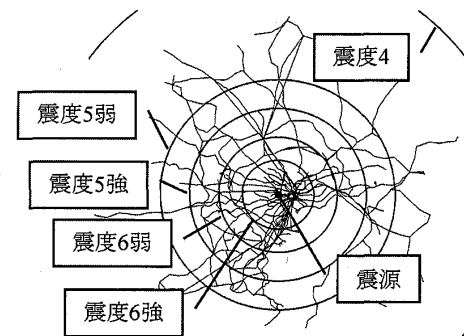


図11 震度分布 (都心西部直下地震)

高いとされている地震である。一方、都心西部直下地震は、西新宿の都庁直下を震源とする M 6.9 の地震で、発生の可能性は低い、18 タイプの地震の中で人的被害が最も大きくなると考えられている。

以下の計算では、それぞれのタイプの地震について、文献[1]で想定されている震度分布にあうような同心円によって震度分布を簡略化する (図 10, 図 11)。そして、鉄道利用者の時空間分布に、上記の震度分布を

重ねることにより、被害の時間的、空間的分布を調べる。

5.1.1 東京湾北部地震

東京湾北部地震では、最も鉄道利用者の多い8時ごろには、強い揺れを受ける震度6強の地域を約2,500本の電車が走行しており、鉄道利用者数は110万人を超える(図12)。

8時における震度別の各状況の鉄道利用者数を調べた結果を図13に、震度別、走行速度別に鉄道利用者数を調べた結果を図14に示す。

図13から、8時ごろに地震が発生し、走行中の電車に事故が起きた場合、被害者が非常に多いことが予想される。また、停車中の電車に乗っている利用者も多いため、ホームの混雑による危険も大きいと考えられる。

また、図14から、震度6強、震度6弱の地域では、

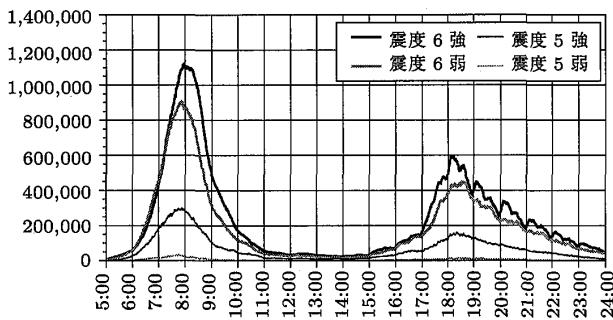


図12 震度別鉄道利用者数(東京湾北部地震)

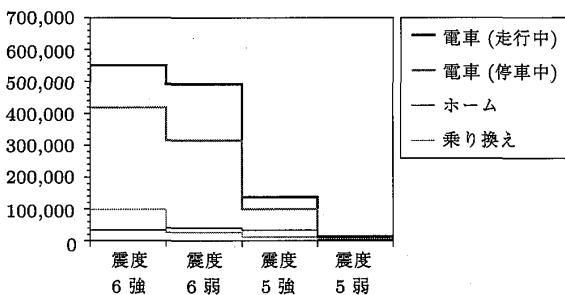


図13 震度・利用状況別鉄道利用者数(東京湾北部地震)

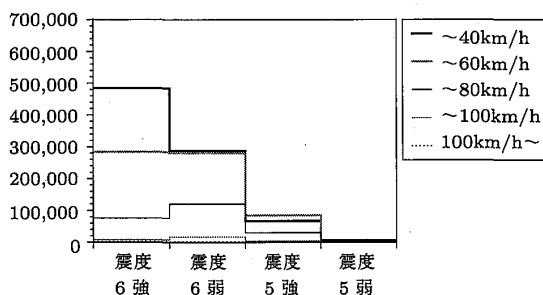


図14 震度・走行速度別鉄道利用者数(東京湾北部地震)

比較的走行速度が遅い電車に乗っている利用者が多いことがわかる。これは、それらの地域が勤務地の集中する都心部であり、都心部では駅間の距離が短く、走行速度が遅いところが多いためである。

5.1.2 都心西部直下地震

都心西部直下地震では、8時ごろに、震度6強の地域を約2,600本の電車が走行し、鉄道利用者数はおよそ122万人にのぼる(図15)。

東京湾北部地震と同様に、8時における震度別、各状況別に鉄道利用者数を集計した結果を図16に、震度別、走行速度別に集計した結果を図17に示す。

東京湾北部地震と比べて、震度6弱の地域における鉄道利用者は少ないものの、震度6強の地域にはほぼ同数の鉄道利用者があることがわかる。また、走行速

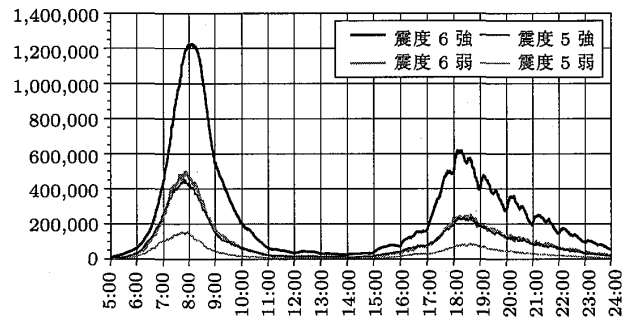


図15 震度別鉄道利用者数(都心西部直下地震)

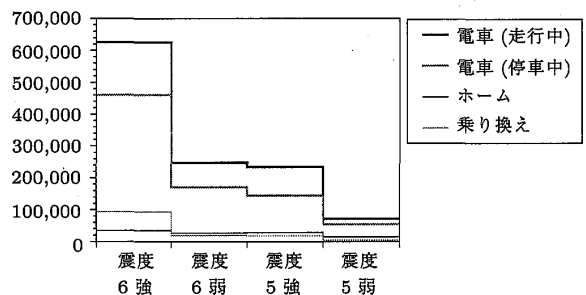


図16 震度・利用状況別鉄道利用者数(都心西部直下地震)

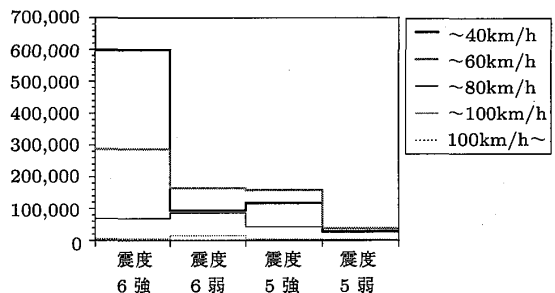


図17 震度・走行速度別鉄道利用者数(都心西部直下地震)

度をみると、震度6強の地域で時速40km以下の電車に乗っている人が多いことがわかる。

5.2 地下鉄

首都圏では地下鉄が網の目のように発達しており、多くの鉄道利用者が地下鉄を利用している。地下空間では、ひとたび大地震が発生すると、地上への出口が限られていることなどにより、パニックが発生しやすいと考えられる。また、比較的新しく開通した地下鉄路線は、地下深くに駅があることが多く、地震により停電した際に地上までの避難が非常に困難になると予想される。

そこで、東京地下鉄と東京都交通局が運営する12の地下鉄路線の利用者について、地下鉄駅の階数をもとに、深度別に集計する。ここで、地下7階から地下3階を「深い」、地下2階から地下1階を「浅い」、1階から3階を「地上」とする（1つの駅で複数の階にホームがある場合は、最も深い階をその駅の階とする）。また、駅間を走行している電車に乗車している利用者については、隣接する2つの駅のうち、より深い階をその利用者が滞在している深度とする。対象とする地下鉄路線は、想定する2タイプの地震において、震度6強と震度6弱の地域のみを走行しており、どの路線も強い揺れを受けると考えられる。集計した結果を図18に示す。

図18から、8時15分ごろに地下鉄利用者は最も多くなり、「深い」に約13万人、「浅い」に約25万人、「地上」に約4万人の利用者がいることがわかる。また、地下鉄利用者が最も多くなる時刻は、地下鉄以外の利用者が最も多くなる時刻よりも遅いことがわかる。これは、多くの地下鉄は、勤務地の集中する都心部を走行しているためである。

5.3 死傷者数

脱線率、死傷率を仮定することにより、首都直下地震による鉄道利用中の死傷者数を推計する。

まず、脱線率をもとに、脱線する電車をランダムに決定する。そして、脱線する電車に乗車している鉄道利用者を、死傷率をもとに死亡、負傷、重傷、無傷の4つの状態に分類する（脱線しない電車の乗客は全員無傷とする）。

脱線率は文献[7]に準じ、震度6強の地域では23.1[%]、震度6弱以下の地域では0[%]とし、比較的深部を通る地下鉄（有楽町線、半蔵門線、南北線、都営浅草線、都営三田線、都営新宿線、都営大江戸線）は地表より1ランク低い震度を受けるとする。

次に、死傷率も文献[7]に準じ、JR在来線および私鉄、地下鉄、新幹線の種別に表1のように仮定する。ここで、負傷率には重傷者率も含まれるものとする（したがって、重傷者数は負傷者数の内数となっている）。

以下では、各時刻において、脱線率に応じて脱線する電車をランダムに選ぶことを10,000回繰り返した結果の平均を用いて議論する。

5.3.1 東京湾北部地震

まず、東京湾北部地震が発生した際の死傷者数を推計する。推計した結果を図19に示す。鉄道利用中の死傷者数が最も多くなる8時ごろには、死者が1,000人を超え、負傷者も約24,000人（重傷者約4,000人を含む）にのぼる。このときの負傷者を行政区別に集計した結果を図20(a)に示す。負傷者が最も多いのは、千代田区の約2,200人であり、次いで渋谷区、豊島区、港区と続く。また、周辺部である大田区や船橋市でも

表1 死傷率

		在来線 私鉄	地下鉄	新幹線
死傷率 [%]	死者率	0.47	0.23	17.00
	負傷率	11.50	5.80	39.00
	重傷者率	1.90	0.94	14.00

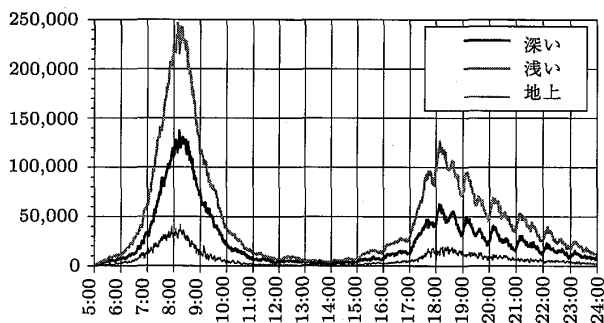


図18 地下鉄深度別利用者数

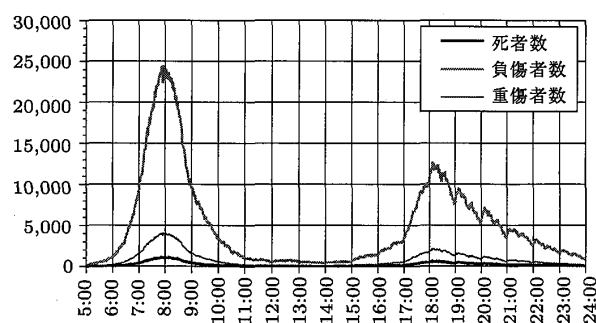
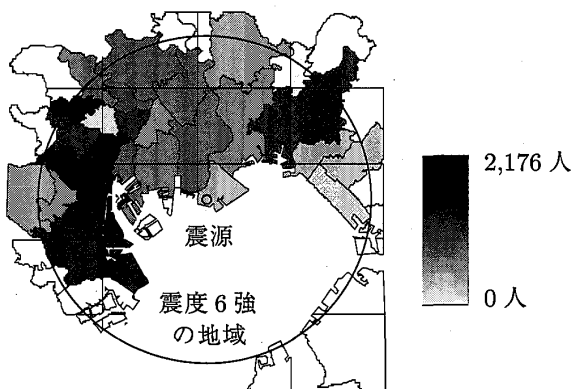
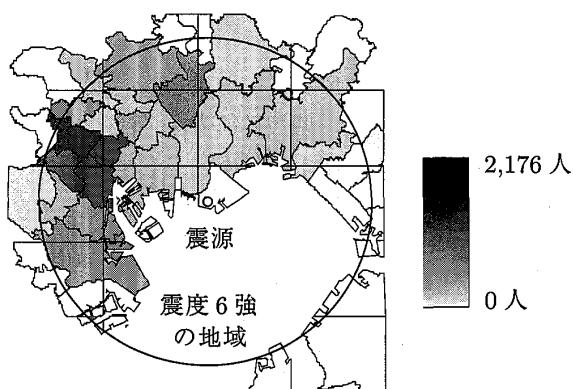


図19 東京湾北部地震による死傷者数



(a) 8時00分



(b) 9時00分

図20 東京湾北部地震による行政区別負傷者数

負傷者が多い。千代田区に隣接している文京区は約150人であり、近隣の区に比べて極端に少ない。これは、文京区には地下鉄しか通っておらず、しかもほとんどの地下鉄は地下深くを通っているため、地震の影響をほとんど受けないからである。

朝の通勤通学ラッシュが落ち着いてくる9時には(図20(b))、全体的に負傷者も減少し、最も多い新宿区でも負傷者は約1,200人である。次いで負傷者が多くなるのは、千代田区、港区、渋谷区であり、都心部に集中している。

推計した死傷者数を既存の報告[1]と比較する(表2)。表2をみると、本研究の推計値は、負傷者数、重傷者数では約2倍、死亡者数では約3倍となっている。この差異の一因として、使用データや推計方法が異なることが考えられる。また、本研究の推計値は10,000回試行した平均値であるが、標準偏差が平均値の約10%程度の大きさであることに注意されたい。

5.3.2 都心西部直下地震

東京湾北部地震と同様に、都心西部直下地震が発生した際の死傷者数を推計する。推計した結果を図21に示す。鉄道利用中の死傷者数が最も多くなる8時ご

表2 東京湾北部地震による死傷者数の比較

	死亡者	負傷者数	
		重傷者数	
本研究	1,000	24,000	4,000
中央防災会議	300	12,200	2,000

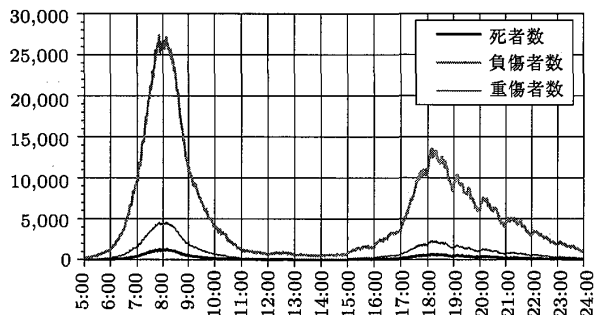
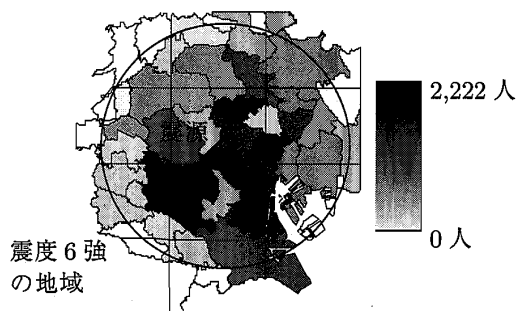
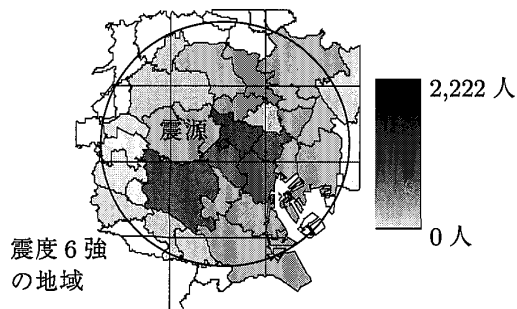


図21 都心西部直下地震による死傷者数



(a) 8時00分



(b) 9時00分

図22 都心西部直下地震による行政区別負傷者数

ろには、死者が1,200人を超え、負傷者も約27,000人(重傷者約4,500人を含む)にのぼる。

このときの負傷者を行政区別に集計した結果を図22(a)に示す。負傷者が最も多いのは、千代田区の約2,200人であり、次いで世田谷区、豊島区、渋谷区と続く。東京湾北部地震と比べて、世田谷区の影響が大きくなっていることが特徴である。

9時になると(図22(b))、新宿区で負傷者が最も多

表3 都心西部直下地震による死傷者数の比較

	死亡者	負傷者数	
			重傷者数
本研究	1,200	27,000	4,500
中央防災会議	400	14,400	2,300

くなり(約1,200人)、次いで世田谷区、千代田区、渋谷区と続く。

次に、8時の死傷者を事業者別に集計してみよう。事業者別では、死傷者数が最も多いのはJRである。JRの死傷者数が最も多くなるのは7時55分から8時05分の間で、この時間帯に地震が起きると、JRだけで700人を超える死者と、約15,000人の負傷者(重傷者約2,600人を含む)が発生すると予想される。JRに次いで死者数が多いのは東急で、最も被害が多くなるときには100人を超える死者が発生すると予想される。

東京湾北部地震と同様に、死傷者数を既存の報告[1]と比較した結果を表3に示す。表3から、本研究の推計値は、負傷者数、重傷者数では約2倍、死亡者数では約3倍となっており、既存の報告とは大きな差異があることがわかる。

6. おわりに

本研究では、発生が懸念されている首都直下地震により、鉄道利用者が受ける被害を詳細に推計した。首都圏鉄道ネットワークの時空間ネットワークを用いることで、被害の空間的分布に加え、時間的変化を捉えることができた。

帰宅困難者を減少させるためには、地震発生時に鉄道を利用中の通勤・通学者に対して、自宅に帰ることだけを考えるのではなく、勤務地・就学地に向かうことも検討してもらうことが有効である。

脱線率や死傷率は、電車の走行速度によって異なると考えられるが、それらと走行速度との関係が明らかではないので、本研究では、既存の報告と同様に走行速度に依らず一定とした。もし、それらの関係が明らかになれば、本モデルに反映させて、より精度の高い被害推計を行うことは容易である。

本研究による被害推計が、中央防災会議[1]や東京

都[7]による被害推計と比べて大きな値となっているのは、5.3.1節で述べた原因に加えて、震度分布を簡略化していることも一因となっている。例えば、東京湾北部地震における震度6強の地域を震源から半径15km以内の円とすると(図10では、震度6強の地域を震源から半径20kmの円としている)、死傷者数は最大約600人、負傷者数は最大約14,300人、重傷者数は最大約2,300人となり、表2に示した本研究の推計結果の約6割程度となる。

したがって、震源や震度分布の設定によって、推計される被害は大きく異なる可能性があるということに注意する必要がある。

鉄道利用者が受ける被害は、時間的、空間的に偏りがみられ、行政や鉄道事業者はこれらを念頭に置いて防災計画を立案する必要があるだろう。

謝辞 本研究は、文部科学省科学研究費「都市内・都市間交通網と公共施設配置に関する数理的ならびに実証的研究」の一環として行われたものである。

参考文献

- [1] 中央防災会議首都直下地震対策専門調査会、『首都直下地震対策専門調査会報告』, 2005.
- [2] 川口真由, 田口東, 「首都直下地震による被害推定のための鉄道利用者の時空間分布」, 『日本オペレーションズ・リサーチ学会2006年秋季研究発表会アブストラクト集』, 10-11, 2006.
- [3] 国土交通省, 『三大都市圏における都市鉄道の現状』, 2003.
- [4] 大佛俊泰, 大谷郁子, 「首都直下型地震を想定した防災計画のための鉄道利用者の時空間分布推定」, 『地理情報システム学会講演論文集』, 14 (2005), 453-458.
- [5] 田口東, 「首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル」, 『日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌』, 48 (2005), 85-108.
- [6] 東京都防災会議, 『東京都地域防災計画震災編』, 2007.
- [7] 東京都防災会議地震部会, 『首都直下地震による東京の被害想定(最終報告)』, 2006.
- [8] 鳥海重喜, 中村幸史, 田口東, 「通勤電車の遅延計算モデル」, 『オペレーションズ・リサーチ』, 50 (2005), 409-416.
- [9] 運輸政策研究機構, 『平成12年度大都市交通センサス』, 2002.