

震災時における都市内滞留者の帰宅意思と帰宅行動のモデル化

○大佛俊泰¹⁾, 田中 怜²⁾

- 1) 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻, osaragi@mei.titech.ac.jp
 2) 東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻, stanaka@os.mei.titech.ac.jp

1. はじめに

大地震を想定した帰宅困難者数の推定が試みられている。従来までは、帰宅可能か否かの判断は発災時の居場所から自宅までの直線距離（以下、帰宅距離）を基に判断されてきた（図 1）。しかし、帰宅可能か否かを判断するためには、帰宅意思があるか否かについて議論しておく必要がある。また、被災者の帰宅意思は、帰宅距離だけでなく、発災時の時刻や被災者の属性、家族の安否情報にも依存していると考えられる。

そこで、都市内滞留者の帰宅行動に関するアンケート調査を試み、それを原データとして、発災日当日に自宅に向かおうとする確率（以下、帰宅意思率）を推定するモデル（以下、帰宅意思モデル）を構築した。さらに、このモデルと、平成 10 年東京都市圏パーソントリップ調査（以下、PT データ）より得られる都市内滞留者の情報を用いて、発災日当日に発生する帰宅困難者の時空間分布を推定し、防災計画支援のための基礎的考察を試みた。

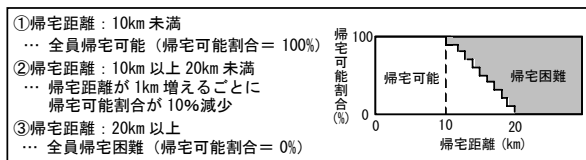


図 1：帰宅距離別帰宅可能割合^{文1)}

2. アンケートによる帰宅意思調査

アンケート調査を Web 上で行った。その概要を図 2 に示してある。回答者が発災時の居場所を具体的にイメージできるように、日常利用している鉄道駅（各人最大 4 駅）からの帰宅行動について尋ねた。具体的には、発災時刻を 3 通り（8 時・12 時・18 時）設定し、震災発生日に最終的に向かう場所（以下、最終目的地）について回答してもらった。また、家族の安否情報の有無が、帰宅行動に影響する可能性もあるので、同居家族のいる人については、家族の安否情報の有無別にも回答してもらった。

帰宅距離は図 3 に示す要領で、発災時の居場所として想定した鉄道駅から自宅までのネットワーク距

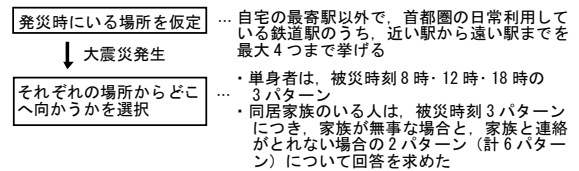
離を用いた。ここでは有料道路を除く幅員 3m 以上の道路を歩行することを想定した。

調査対象：Web 調査会社の保有するモニターのうち、首都圏（東京駅から約 40km 以内）に在住し、かつ月 2・3 回以上電車を利用する人

調査依頼数	10代	20代	30代	40代	50代	60代以上
948	51	55	50	51	50	51
有効回答数	37	40	45	51	33	50
564	45	44	52	54	44	53
	43	51	43	48	39	48

※年齢、性別、同居家族の有無がほぼ均一になるようにサンプリングした

調査方法：Web 上で回答 調査期間：2007/1/18 ~ 2007/1/22



向かう先の選択肢（※その日に向かう最終目的地を尋ねた）

1 自宅	2 自分の勤務先・通学先
3 同居家族のいる自宅以外の場所（例えば父の勤務先）	4 知人の家
5 別居している家族の家	6 近くの広域避難場所（ただし所在地を知っている場合のみ）
7 その駅の周辺（どこへも向かわない）	8 その他 ※別の記入欄に記入

図 2：アンケート調査概要

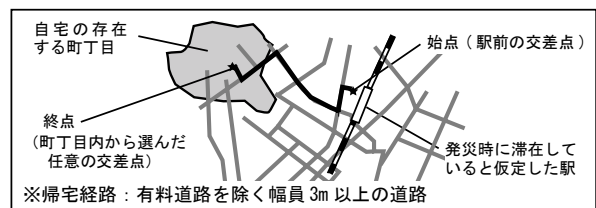


図 3：帰宅距離の計測方法

3. 帰宅意思モデルの構築

帰宅意思率の推定には、ニューラルネットワークを用いた。その概要を図 4 に示してある。アンケート調査より得られた帰宅意思に関するデータを学習させた。

3.1 入力信号・教師信号の設定

入力信号には、帰宅意思に影響を及ぼすと考えられる 5 つの要因（発災時刻・同居家族の有無・性別・年齢・帰宅距離）を用いた。帰宅距離のみ実数を入力し、それ以外の要因については、その要因のカテゴリー数に応じて入力層のニューロンの数を設

け、「0」か「1」を入力した。教師信号は、帰宅意思があるか否かの情報とし、発災日当日の最終目的地が自宅である場合は「1」を、自宅以外である場合は「0」とした。

また、アンケート調査データでは帰宅距離が長いサンプル数が十分得られなかったことから、長い帰宅距離では帰宅意思は極めて低いと考えて、仮想データを属性ごとに設定した。

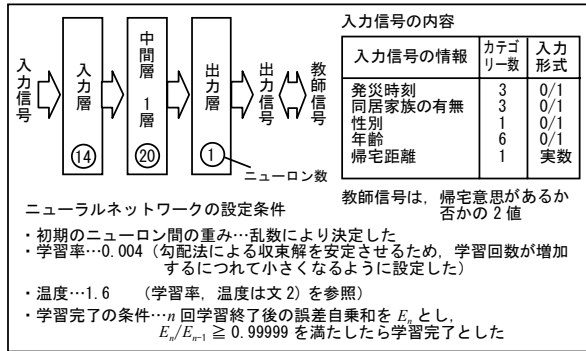


図4：帰宅意思モデルの概要

3.2 誤差逆伝播法による学習方法

入力層から出力層に向けて各ニューロンの出力を計算し、出力層の出力信号と教師信号の誤差から、誤差逆伝播法を用いてニューロン間の重みを更新した。学習は出力信号と教師信号との誤差自乗和に0.001%以上の減少がみられなくなった時点で終了した。

3.3 帰宅意思率の推定方法

学習後のニューラルネットワークに推定したい条件を入力信号として入力することで、帰宅意思率を推定することができる。

ここでは、帰宅意思モデルを2種類構築した。一つはアンケート調査データのすべてのサンプルを入力データとして学習させたモデル（以下、帰宅意思モデル①）であり、もう一つはアンケート調査データのうち帰宅距離が短いにも関わらず、あえて帰宅しないと回答した人のサンプルを除外したデータで学習させたモデル（以下、帰宅意思モデル②）である。帰宅意思モデル②で除外したサンプルは、帰宅距離が歩行可能距離の1/10以下であるにも関わらず、最終目的地を自宅以外と回答した人のサンプルである。なお、除外したサンプルにおいては、多くの人が発災日当日の最終目的地を「広域避難場所」と回答していた。

3.4 帰宅意思率の推定結果

帰宅距離と帰宅意思モデル①で推定した帰宅意思率の関係を図5に示してある。

発災時刻別・同居家族の有無別にみると、朝・昼よりも夕刻の方が帰宅意思率は低いことがわかる。また、同居家族がいる人の方が単身者よりも帰宅意

思は高い。

家族の安否情報の有無別・発災時刻別にみると、帰宅距離が長くなるほど家族の安否情報の有無による差は大きい。特に昼は夕刻に比べその差は大きい。

性別・家族の安否情報の有無別にみると、女性よりも男性の方が高い帰宅意思率を示している。特に家族の安否が確認できない場合の男性は、帰宅距離が長くても帰ろうとする意思が読みとれる。

年齢別・発災時刻別については、当初は体力のある若年層の方が高齢層より帰宅意思は高く、長い距離を歩いて帰宅しようとする意思が強いと予想していた。20代は予想通り帰宅距離が長くても帰ろうとする意思は高いが、10代は他の年齢に比べて極端に帰宅しようとする意思が低い。また、40代は全ての年齢の中で最も帰宅しようとする意思が高いことがわかる。このように年齢別にみると、若年層の方が高齢層より帰宅意思は高いとは限らない。また、帰宅意思率の年齢による序列は発災時刻によって大きく入れ替わることはない。

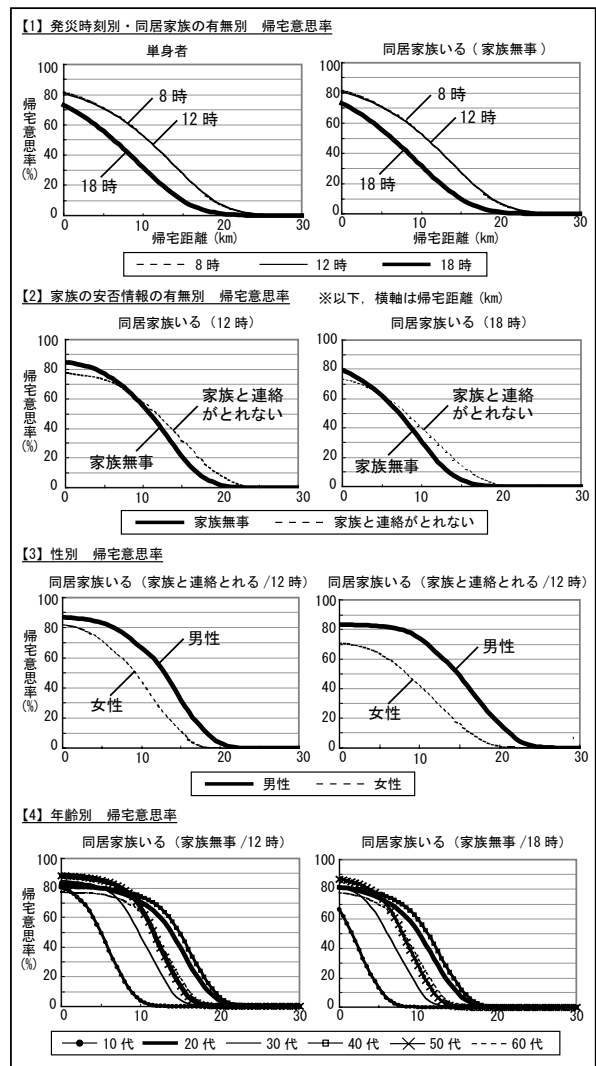


図5：帰宅意思率の推定結果の一部

帰宅意思モデル①と帰宅意思モデル②の比較を図6に示してある。帰宅距離が短いにも関わらず帰宅しないと答えた回答者を除くと、短い帰宅距離における帰宅意思率が1に近づくことがわかる。

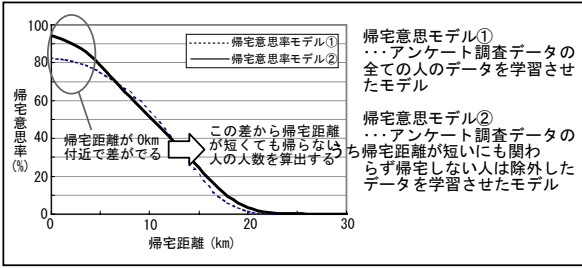


図6：帰宅意思率モデル①・②の比較

4. 帰宅行動シミュレーション

4.1 帰宅開始時間の設定方法

帰宅開始時間を3パターン設定した。一つは発災後直ぐに一斉帰宅する「パターンI」、二つ目は帰宅開始時間は確率的に決まると想定し、ポアソン分布(図7)に従い帰宅開始時間を遅らせる「パターンII」、三つ目は、会社や学校などに滞留している人のみ、帰宅開始時間を1時間・2時間・3時間と遅らせる「パターンIII-1」、「パターンIII-2」、「パターンIII-3」である。

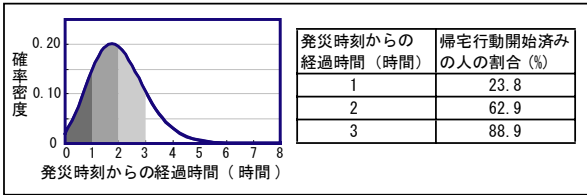


図7：帰宅開始時間の設定(パターンII)

4.2 体力的な脱落のモデル化

体力モデルの概要を図8に示してある。被災者の属性(性別・年齢)を j で表現し、歩行可能距離を変量 $s(s \geq 0)$ で表現する。属性 j の滞留者が帰宅距離 X において体力的に脱落する確率を $P_j(X)$ とすると、 $P_j(X)$ は歩行可能距離 s の確率密度関数 $F_j(s)$ を用いて、以下のように表させる。

$$P_j(X) = \int_{\infty}^X F_j(s) ds$$

ここでは、歩行可能距離 s の確率密度関数 $F_j(s)$ を、体力・運動能力調査データ^{文3)}の属性 j に対応する体力得点 y の平均値と標準偏差に基づく正規分布で代替した。そのためには歩行可能距離 s を体力得点 y に変換する必要がある。そこで、アンケート調査で尋ねた歩行可能距離と、体力得点には単純な相関関係(図8左下)があることをもとに帰宅距離 X を体力得点 Y に変換した。また、体力的に脱落する人については、帰宅距離 X に体力的に脱落する確率 $P_j(X)$ を乗じて脱落する距離を求めた。

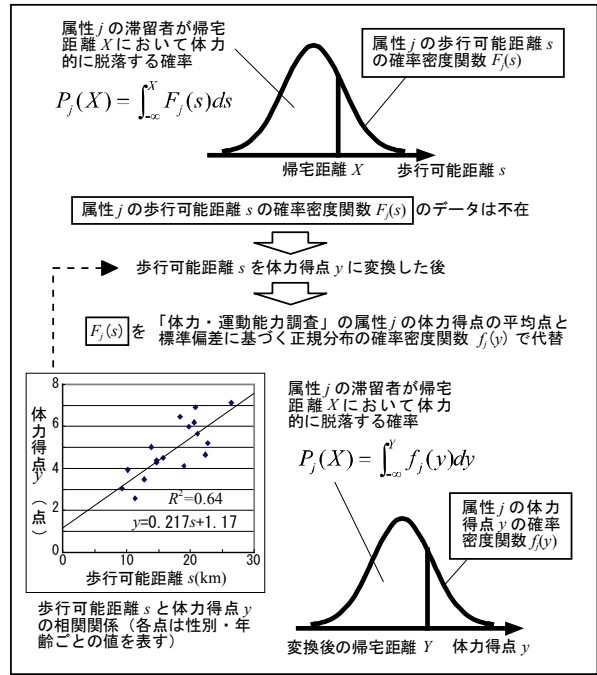


図8：体力的な脱落のモデル化

4.3 日没による帰宅断念のモデル化

日没時刻はアンケート調査において17時と設定している。日没により帰宅を断念するのは発災時刻が8時と12時の場合のみ発生する。日没によって帰宅を断念する確率は、帰宅意思モデル①における、発災時刻が12時の帰宅意思率に対する18時の帰宅意思率の割合をもとに、帰宅距離ごとに算出した(図9)。

ここで、帰宅意思モデル①における帰宅距離は、発災時に滞留している地点から自宅までの帰宅距離であるが、日没により帰宅を断念するか否かは、日没時に滞留している地点から自宅までの帰宅距離をもとに判断した。

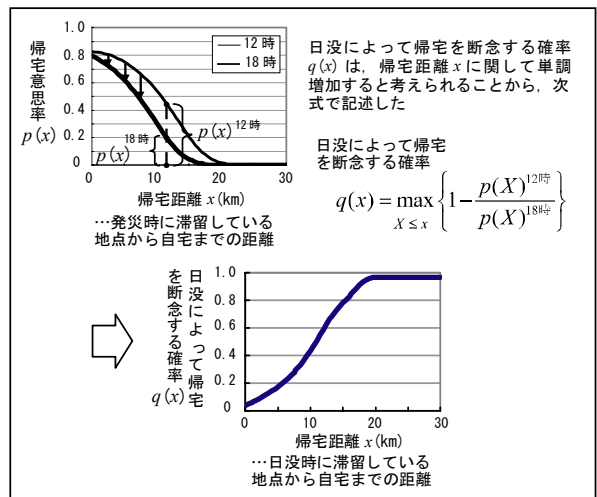


図9：日没による帰宅断念のモデル化

4.4 帰宅行動シミュレーションの構成

第3章で求めた帰宅意思モデルを用いて、首都圏における都市内滞留者の帰宅行動シミュレーションを行った。その流れを図10に示してある。PTデータのうち移動者を除く滞留者の中から1/100のサンプルで分析を行った。まず、主要道路ネットワーク上において、居住地小ゾーン内の任意の交差点と発災時刻別滞留地小ゾーン内の任意の交差点までの帰宅経路と帰宅距離を計測した。次に帰宅距離と属性に応じた帰宅意思モデル①を適用することで、帰宅意思があるか否かを判断した。

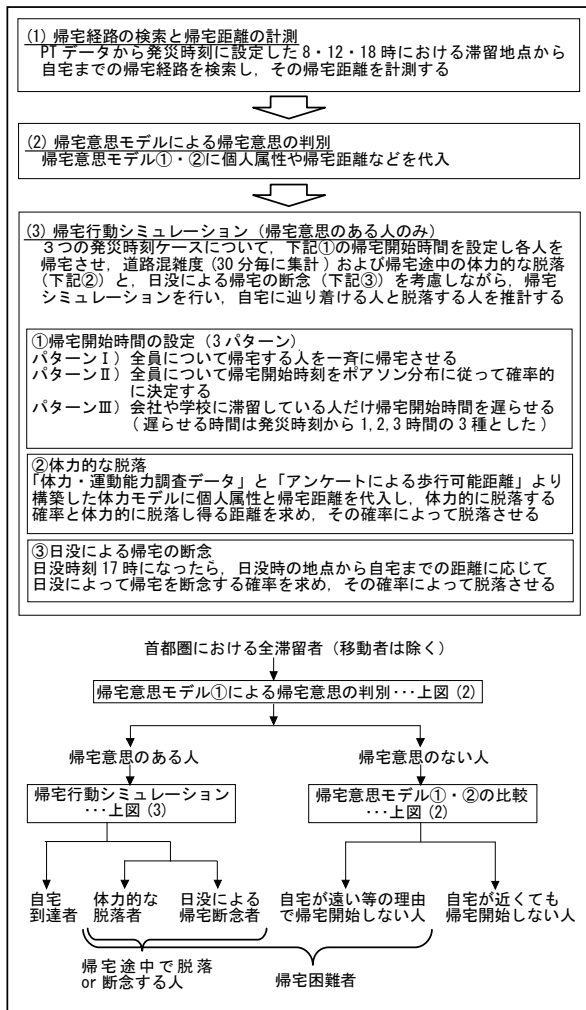


図10：帰宅行動シミュレーションの概要

帰宅意思のない人は、帰宅距離が短いにも関わらずあえて帰宅しない人と帰宅距離が長いなどの理由で帰宅しない人に分類した。具体的には、モデル②で推計した帰宅意思のない人数が、帰宅距離が長いなどの理由で帰宅しない人数である。また、モデル①で推計した人数から、モデル②で推計した人数を引いた人数が、帰宅距離が短いにも関わらずあえて帰宅しない人数である。

帰宅意思のある人は、発災時刻から帰宅行動を開始するまでの時間（以下、帰宅開始時間）を設定した。

また、体力調査データから構築した体力モデルにより、体力的に脱落する確率と体力的に脱落する距離を求める。その後、道路の混雑度に応じた歩行速度の変動（図11）や、体力的な脱落・日没による帰宅の断念を考慮しながらシミュレーションを行った。

ただし、帰宅の際は歩道を歩行すると想定し、歩道幅員は道路交通センサデータの歩道幅員を用いた。また歩道幅員情報がない道路については、最低歩行幅員として1mの歩道幅員を設けた。

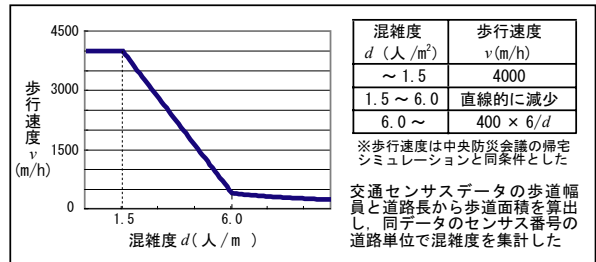


図11：歩行速度のモデル化

5. 帰宅行動シミュレーション結果

5.1 一斉帰宅について

一斉帰宅の道路混雑ピーク時（発災時刻12時の直後）における道路混雑状況を図12に示してある。道路密度が2(人/m²)以上の道路が、都心に限らず首都圏全域に分布していることがわかる。道路混雑度が4(人/m²)以上という非常に混雑する道路も数本みられる。滞留者の少ない郊外よりも滞留者の多い都心の方が、一般的に道路混雑による危険性が高いと考えられているが、都心では広幅員な歩道が多いため、郊外に比べて際立った混雑に陥るとい現象はみられない。むしろ、郊外の歩道幅員の狭い道路が混雑する可能性がある。

ただし、都心でも局所的には非常に混雑する道路は存在する。明治通りや早稲田通りなどでは歩道幅員に対する滞留者人数が多いことから、道路混雑度が非常に高くなり歩道から人が溢れ出す可能性があり、緊急車両等の通行に支障をきたす可能性がある。

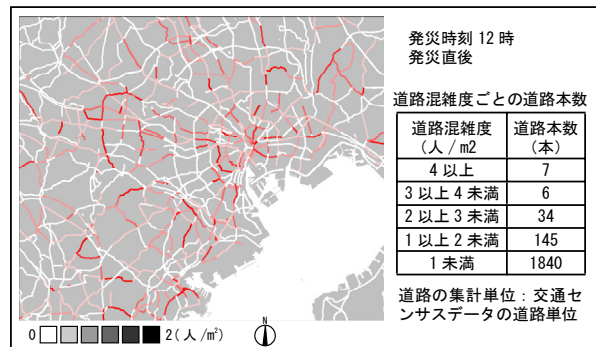


図12：一斉帰宅(パターンⅠ)の道路混雑状況

(2) 帰宅開始時間を遅らせたパターンについて

① 道路混雑度について

図 13 には発災時刻 12 時のケースについて、道路混雑度ピーク時における道路混雑度ごとの道路本数を、帰宅開始時間のパターンごとに示してある。会社・学校などに滞留している人の帰宅開始時間を 1～3 時間遅らせても、一斉帰宅に近い道路混雑状況となることがわかる。一方、帰宅開始時間を確率的に分散させるパターンでは、他のパターンに比べて道路混雑度の極端に高い道路本数は少なくなる。

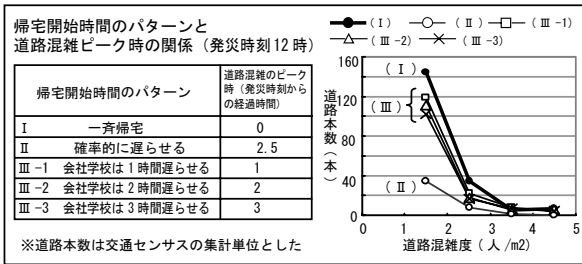


図 13：混雑ピーク時の道路混雑度

② 体力的な脱落者について

発災時刻 12 時のケースについて、体力的に脱落する人の空間分布と、属性構成比率を図 14 に示してある。都心と郊外を結ぶ道路で体力脱落者が発生する様子がみてとれる。具体的には、早稲田通り、新目白通り、蔵前橋通り、桜田通り、王子から荒川を渡る橋梁周辺で多くの人脱落する。また脱落者の属性をみると、男女ともに 50 代と 60 代が過半数を超えている。帰宅を開始しようという意思があっても、帰宅途中で脱落してしまう中高齢者が多く発生すると考えられる。

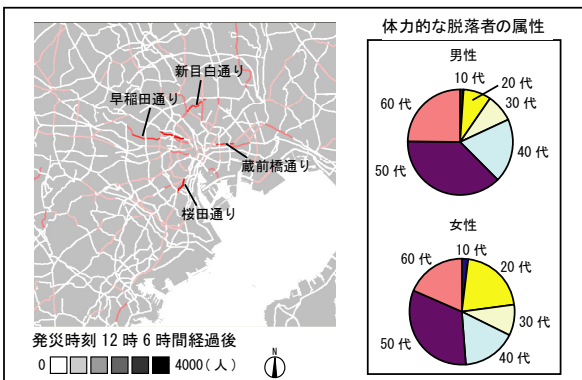


図 14：体力脱落者の空間分布と属性（パターン II）

③ 日没による帰宅断念者について

発災時刻 12 時のケースについて、帰宅開始時間を遅らせたパターンごとの日没による帰宅断念者数を図 15 に示してある。帰宅開始時間が遅れるほど、日没による帰宅断念者数は増加する。日没による帰宅断念には、日没時に滞留している地点から自宅までの距離が関係している。学校・会社に滞留してい

る人の 3 時間遅れの帰宅断念者数は、2 時間遅れの人数の 2 倍以上の値となっていることから、帰宅を開始（指示）する時刻（タイミング）が大きく影響することを示している。

体力的な脱落と日没による帰宅断念をあわせた脱落者の空間分布を図 16 に示してある。世田谷通り、新宿通り、尾久橋通りにおいて日没による帰宅断念者が発生することがわかる。このような道路の沿線に対しては、予め重点的に対策を施しておく効果的であると考えられる。

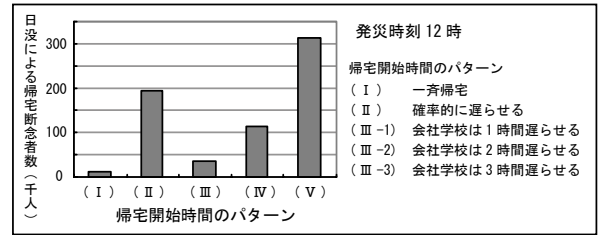


図 15：帰宅開始時間ごとの日没による帰宅断念者

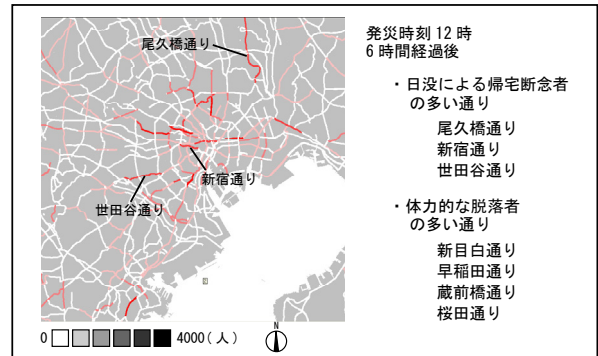


図 16：体力による脱落者と日没による帰宅断念者の空間分布（パターン II）

(3) 帰宅困難者数について

都市内滞留者がおかれた状態の時間的変化を図 17 に示してある。ただし、帰宅開始時間のパターンはポアソン分布を用いた結果である。ここでの帰宅困難者とは、「遠いなどの理由で帰宅しない人」と、帰宅意思のある人のうち、「帰宅行動を開始していない人」、「帰宅中の人」、「体力的に脱落した人」、「日没により断念した人」のいずれかに該当する人である。

図 17 をみると、帰宅困難者全体に対して、体力や日没による脱落者の占める割合はそれ程大きくないことがわかる。発災時刻別にみると、朝と夕刻に比べ昼は発災時刻に自宅外に外出している人が多いため、帰宅困難者の絶対数も多くなる。朝と夕刻を比較すると、夕刻は日没による帰宅断念の影響で、朝よりも夕刻の方が帰宅困難者数は多くなる。また、発災時刻から 6 時間が経過すれば、いずれの発災時刻についても帰宅中の人数（帰宅断念者は除く）は少なくなる。

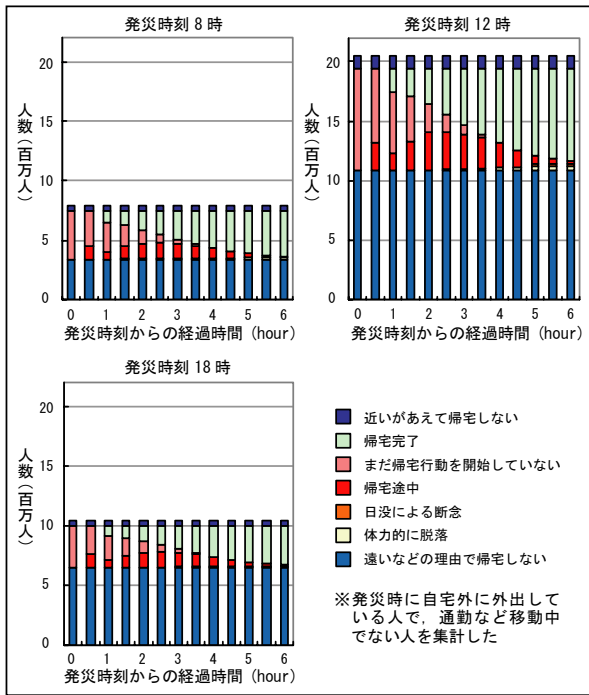


図 17：都市内滞留者の時間的变化(パターンⅡ)

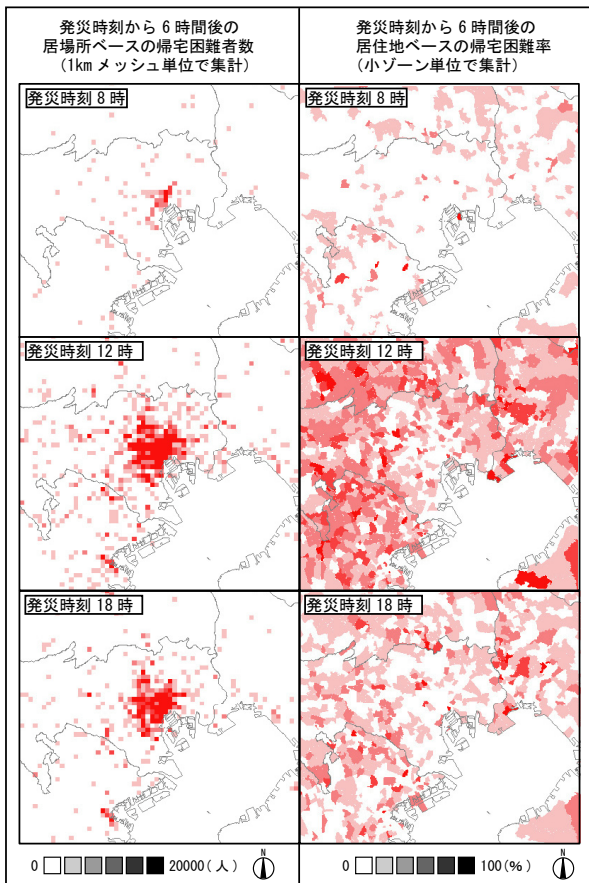


図 18：帰宅困難者の時空間分布(パターンⅡ)

本研究で構築した帰宅意思率モデルによる帰宅困難者数の推定値は、東京都の発表している帰宅困難者数^{文1)}に比べ大きな値となった。その理由として大きく2つ考えられる。一つは、東京都では帰宅距離は直線距離を用いており、ここではネットワーク

距離を用いていることである。もう一つは、東京都では帰宅距離が0km～10kmでは帰宅困難者は発生しないのに対し、本研究で構築した帰宅意思モデルによれば、帰宅距離が近い場合でも帰宅困難者が発生するためである。

帰宅困難者の時空間分布を図18に示してある。滞留者の居場所ベースの帰宅困難者数の分布(左側図)をみると、発災時刻が朝の場合は、発災時刻から6時間経過した後は都心のみに帰宅困難者がみられるだけだが、発災時刻が昼・夕刻の場合は、都心から広範囲(特に西側)にかけて帰宅困難者が発生することがわかる。また、滞留者の居住地ベースの帰宅困難率の分布(右側図)をみると、発災時刻に関わらず郊外に住んでいる人が帰宅困難者となる可能性が高いことがわかる。発災時刻が朝の場合に比べ、昼・夕刻の場合の方が日没による帰宅断念の影響により、都心寄りに住んでいる人も帰宅困難者となる可能性は高いことがわかる。

6. まとめ

都市内滞留者の帰宅行動に関するアンケート調査を実施し、これを原データとして帰宅意思率を推定するモデルを構築した。本モデルは、帰宅距離以外にも発災時刻や被災者の属性、家族の安否情報も考慮しており、従来までの帰宅可能か否かの判断基準の指標に比べ、精緻な推定が可能である。さらに、PTデータを用いて首都圏における被災者の帰宅行動についてのシミュレーションを行い、道路混雑度や脱落者数の推定や時空間分布を示し、防災計画支援のための基礎的資料となり得ることを示した。

参考文献

- 1) 東京都、「首都直下地震による東京の被害想定報告書-手法編 8. 帰宅困難者」
- 2) 熊沢逸夫(1998),「学習とニューラルネットワーク」, 森北出版
- 3) 文部科学省,「平成18年度体力・運動能力調査報告書」
- 4) 文部科学省,「大都市大震災軽減化特別プロジェクト成果報告書-帰宅困難者の行動とその対策に関する調査研究」
- 5) 丹原崇宏・熊谷良雄・糸井川栄一・齋藤正俊(2004),「大都市震災時における徒歩帰宅者の帰宅経路の混雑緩和に関する研究」, 地域安全学会論文集 No. 6, 2004. 11
- 6) 柏原士郎・上野淳・森田孝夫(1998),「阪神・淡路大震災における避難所の研究」, 大阪大学出版会