資料５

中央防災会議
「首都直下地震避難対策等専門調査会」
（第７回）

帰宅行動シミュレーション手法について

平成１９年７月２４日

内閣府（防災担当）

１．　シミュレーションの目的

大規模地震が発生した場合、公共交通機関等がストップし、外出中の人々は徒歩帰宅を余儀なくされる。このような人々の行動について、シミュレーションを行う。

シミュレーションでは、「滞在する」、「帰宅する」、「避難所に行く」等の各行動に関する効用関数を求め、より高い期待効用をもたらす行動を選択するという考え方をベースとした行動選択の基本モデル（ランダム効用モデル）を用いた。このモデルでは、天候や混雑状況等の諸条件も踏まえて効用関数が変化するものとした。また、帰宅困難者の移動に関しては、道路幅員等道路属性を考慮した道路ネットワークモデルを用いた。

これにより膨大な数の発生が予想される帰宅困難者等の動向を明らかにするとともに、次のような事象を把握する。

・道路の混雑状況はどうなるか。特にどの時間帯・どの道路で激しい混雑が発生するか。
・どの地域をどのくらいの徒歩帰宅者が通過するのか。
・徒歩帰宅者は帰宅までにどのくらい時間を要するのか。
・外出先に留まる人はどのくらいか。　　等

２．　シミュレーションの前提

（1）シミュレーションの対象とする人の属性

・一般業務従事者
・買い物客等
・学生
・防災担当業務従事者

（2）対象とする道路ネットワーク

基本的に一般国道と主要地方道（都県道・指定市市道）とする。ただし、道路の一部区間がこのネットワークの範囲に含まれていない場合には、その区間の道路を補完し加えた。

図　対象とする道路ネットワーク

（3）帰宅行動の起点・終点

表　帰宅行動の起点・終点

	説明
起点	帰宅行動のスタート地点は 1km メッシュの中心とする。ただし、各地点における滞在者の数は、平成 10 年の東京都市圏パーソントリップ調査における計画基本ゾーン*の人口を地域メッシュ統計における昼間人口**に応じてゾーン内 1km メッシュに配分したものとする。
終点	帰宅行動のゴール地点は、居住ゾーン（計画基本ゾーン）の重心に位置するメッシュの中心とする。なお、起点が含まれる計画基本ゾーンから終点が含まれる計画基本ゾーンの間の通勤・通学者等の数についても同じパーソントリップ調査の結果を用いる。

＊　パーソントリップ調査で設定されているゾーンであり、基本的に市や区がさらに複数に分割されており、単位としては、市や区より細かい。ただし、人口が多くない地域では、複数の町村が一つのゾーンを形成している場合もある。

＊＊国勢調査における非労働力人口、完全失業者及び農林水産業就業者等に、事業所・企業統計調査における第二次・第三次産業従業者数及び生徒・学生数を加えることで計算されている。

３． シミュレーション手法の概要

（１）徒歩帰宅ルート

基本的に最短距離ルートをとる。ただし、「迂回行動有」のモデルにおいては、混雑状況等に応じて、後に示す迂回路選択モデルにより経路選択の変更を行う場合があるものとする。

（２）歩行速度

歩行速度は道路の混雑状況によって異なるものとする。

表　歩行速度の基本設定

混雑度（人／㎡）d	1.5 未満	1.5～6	6 以上
歩行速度（m／時）v	4,000	直線的に速度が減少 (6 人／㎡で 400m／時)	400×6／d

・混雑度 1.5 人／㎡未満の場合

混雑度が 1.5 人／㎡以下の場合は、一般に自由歩行が可能*とされていることから、歩行速度は時速 4,000mとしている。

・混雑度 1.5 人／㎡以上６人／㎡未満の場合

この間の混雑度と歩行速度の関係については様々な式が提案されているもの、ここでは大都市大震災軽減化特別プロジェクト（文部科学省）「帰宅困難者の行動と対策に関する調査研究」にならって、直線的に速度が低減することとした。

・混雑度６人／㎡以上の場合

混雑度が６人／㎡前後になると、移動可能な混雑度としては限界に達し*、それ以上混雑度が高まるよりも渋滞長が長くなっていく傾向になるものと思われる。このため、混雑度が６人／㎡以上になった場合にそのリンクへは他からそれ以上人が入れないという論理を適用することも検討したが、同じ道路上を両方から群集が集まった場合、ラグビーのスクラムを組んだような状態となって、両者の動きがその道路上で完全にストップしてしまうといった問題が生じることが確認された。そこで、混雑度が６人/㎡以上の場合には、交通容量が一定になるという仮定に基づいたモデルとした。

＊「火災便覧第３版」（共立出版）では、「群集移動に関するクリティカルな密度は、1.5 人/㎡（自由歩行の限界）→約 4 人/㎡（渋滞の始まり）→約６人/㎡（群集移動の停止)」とされている。

なお、混雑度６人／㎡は次の写真のようなイメージである。

図　混雑度　6人／㎡のイメージ

（3）シミュレーションの基本時間間隔

１分毎に徒歩帰宅者の動きを計算

（4）ランダム効用モデル（多項ロジットモデル）に基づく行動

「滞在する」、「帰宅する」、「避難所に行く」の各行動から得られる期待効用を比較し、より高い効用をもたらす行動を選択するものとする。ただし、人による選択のばらつきを表現するため、ランダム項（行動のばらつきを確率的に表現する誤差項）を加えて期待効用を評価するものとする。

効用関数のイメージは次のとおりである。

①基本的な関数形状

> 効用関数の基本的な形状は、次図に示すように、現在地から対象地までの移動負荷の増大に応じて低減するものと考える。

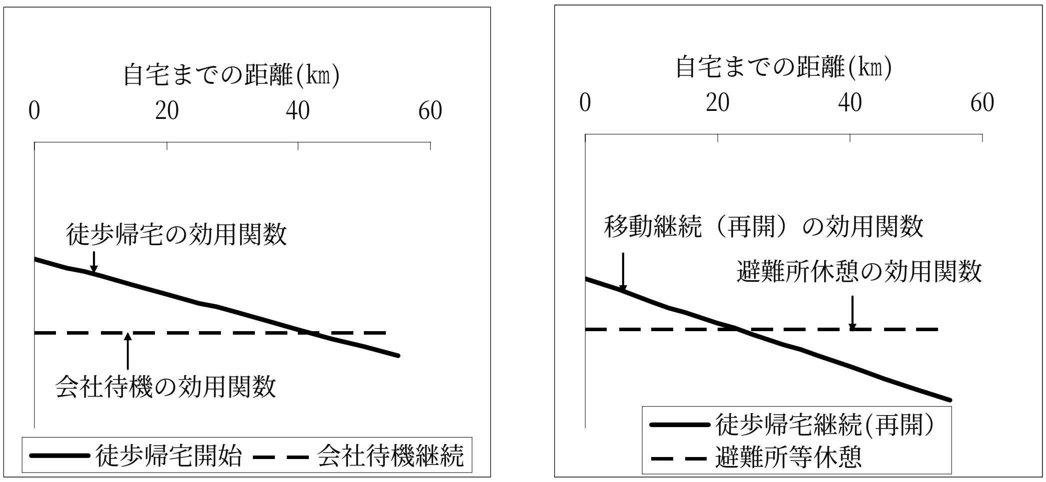


図　効用関数のイメージ（１）（左：一般業務従事者オフィス等滞在時の効用関数のイメージ、右：一般業務従事者徒歩帰宅行動中の効用関数のイメージ）
＊オフィス滞在時は、晴れ、昼、家族軽傷、時速2㎞で移動可能とした場合
徒歩帰宅時は、晴れ、昼、徒歩継続３時間、家族軽傷、時速2㎞で移動可能とした場合

移動行動については、次図に示すように、移動に関する選択肢の中で大きな効用を与えるものを選択する確率が高くなるものとして表現される。

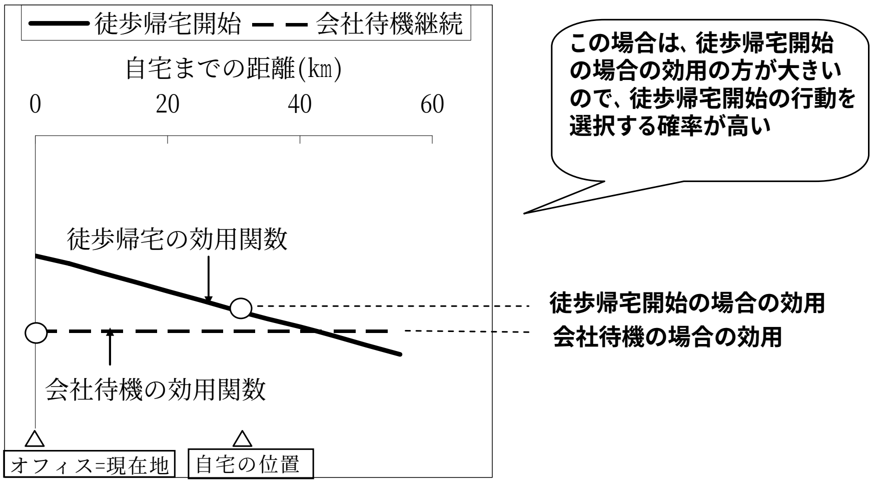


図　効用関数のイメージ（２）
一般業務従事者オフィス等滞在時の会社待機と徒歩帰宅開始の効用比較
＊晴れ、昼、家族軽傷、時速2㎞で移動可能とした場合

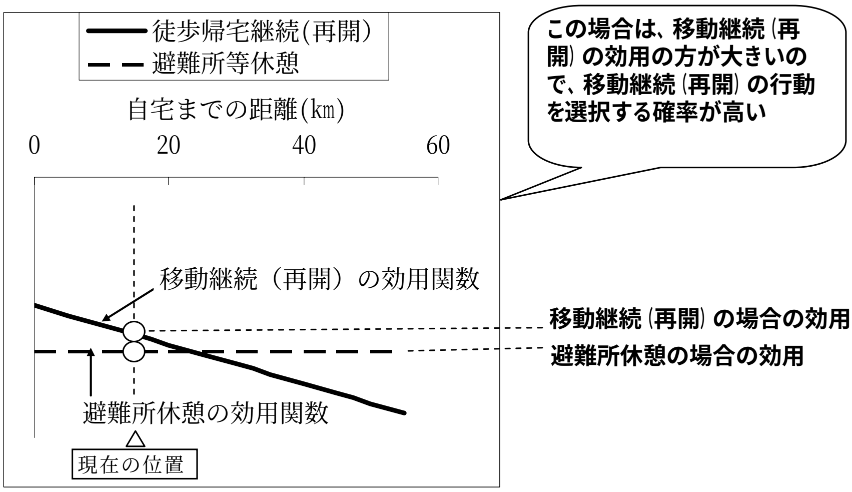


図　効用関数のイメージ（３）
一般業務従事者徒歩帰宅中の徒歩帰宅継続（再開）と避難所休憩の効用比較
＊晴れ、昼、徒歩継続３時間、家族軽傷、時速2㎞で移動可能とした場合

②属性による効用関数の相違

属性毎に効用関数を設定する。

例えば、防災業務従事者や、その他の事業継続の必要が高い業務に従事する人々については、一般業務従事者と比べて、次図に示すように、オフィス等滞在／帰社の効用関数（オフィス等にそのまま滞在したり、出先からオフィスに戻ることにより得られる効用を表す関数）が大きな値を示すものとして設定する。

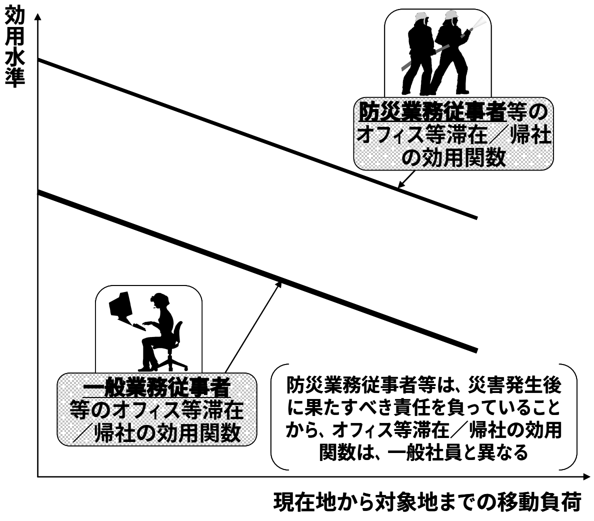


図　効用関数のイメージ（４）

③状況変化に応じた効用関数の変化

状況変化に応じた効用関数の変化の例として、安否情報の明暗による効用関数の変化の状況を次図に示す。

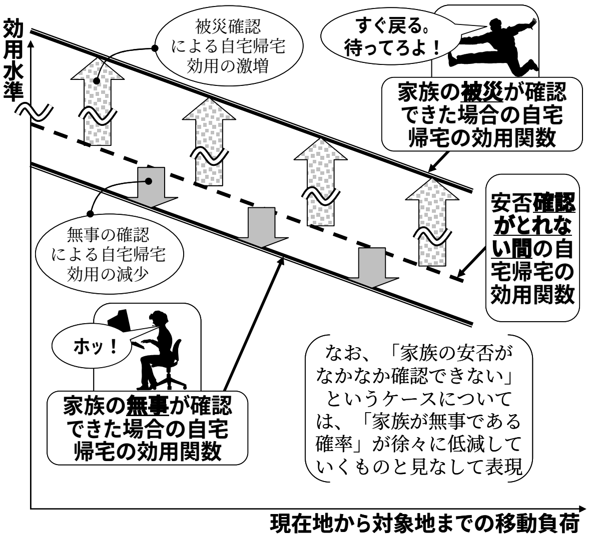


図　効用関数のイメージ（５）

この場合、家族の被災等の情報が得られた場合に、自宅帰宅の効用関数の値が大幅に大きくなる状況を示している。

効用関数に係る個別の具体的要因は別資料にあげるが、おおむね次の各項目が影響要因としてあげられる。

・自宅までの距離
・周辺の混雑状況（移動可能速度）
・家族の安否、自宅被害の状況
・企業、学校等における食料、水、電気等の状況
・徒歩継続時間（蓄積疲労等の代理指標）
・現在時刻（昼夜別）
・帰宅途中の夜の時間
・天候
など

④効用関数の算出方法

効用関数の基本的な算出方法は次の通り。

ア) 選択しうる行動と効用関数

効用関数は、各場面において選択しうる行動ごとに算定する。算定される効用関数は、状況別に次のとおりである。今回は、それぞれのケースにおいて、2 種類の行動から選択することになるため、2 つの効用関数 V_1、V_2 を設定する。

- **会社等待機中**
  1. 徒歩帰宅開始(V_1)
  2. 会社等待機継続(V_2)

- **徒歩帰宅途中**
  1. 徒歩帰宅継続（再開）(V_1)
  2. 避難所等で休憩(V_2)

- **迂回路に差し掛かった場合**
  1. 迂回しない(V_1)
  2. 迂回する(V_2)

イ）行動選択のモデル化

帰宅困難者等の行動選択については、効用が確率的に変動するもと仮定して，多項ロジットモデルを適用し、確率的に行動選択を行うものとして，以下に示すようにモデル化する。

すなわち、今回は、選択可能な行動の種類数を２種類としているため、効用関数値に基づき行動１，行動２をとる確率はそれぞれ次の通りである。

$$P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V2}}$$

$$P_2 = \frac{e^{V2}}{e^{V_1} + e^{V2}}$$

V_i は行動 i を選択した場合の効用関数（確定項）を表わしている。効用関数は、選択しうる行動 i ごとに設定され、一般に線形関数が用いられる。本検討では，以下の線形効用関数を導入する。

■　効用関数

$$V_i \ = \sum_{k=1}^{K} \beta_{ik} \cdot x_{ik} + \gamma \cdots (1)$$

V_i :帰宅困難者 n の行動 i に関する効用関数値

x_{ik} :説明変数 k の行動 i に関する変数値

β_{ik} :説明変数 k の係数

K :説明変数の総数

γ :定数項

ここで、説明変数 x_{ik} が行動選択の際に考慮される因子、すなわち効用関数の値に影響を与える因子である。

説明変数の係数 β_{ik} は、回答者への質問結果に基づいてパラメータ推定を行う。

行動を選択する状況下では、状況を規定する因子が定まるため、説明変数の値が決まる。よって、各行動に関する効用関数値 V_i が求まる。シミュレーション中では、この効用関数値に基づき、確率的に行動が選択される。

ここで、$\Delta V = V_1 - V_2$ とすると、ΔV は、行動 1 と行動 2 の効用関数値の差である。よって、ΔV が大きいほど、V_1 の方が V_2 に比べて相対的に効用が高

い、すなわち行動１を選択する確率P_1が高くなる。また、$\Delta V = 0$、すなわち、$V_1 = V_2$のときには、$P_1 = P_2$となり２つの行動を選択する確率は何れも 50%となる。

このように、今回のモデルは、効用関数の値に基づき行動が確率的に選択されるものとなっている。

（５）歩行空間の設定

①倒壊建物を考慮しない場合

現在、区間（リンク）別に、下図に示すような歩道設置状況別の歩道幅員情報が得られているとする。この場合、左右各サイドの歩道それぞれについて、歩道幅または最低みなし歩道幅（１m）のうち大きな方をモデル上の歩道幅とする。そして、区間（リンク）別に平均歩道幅員Wを求める。

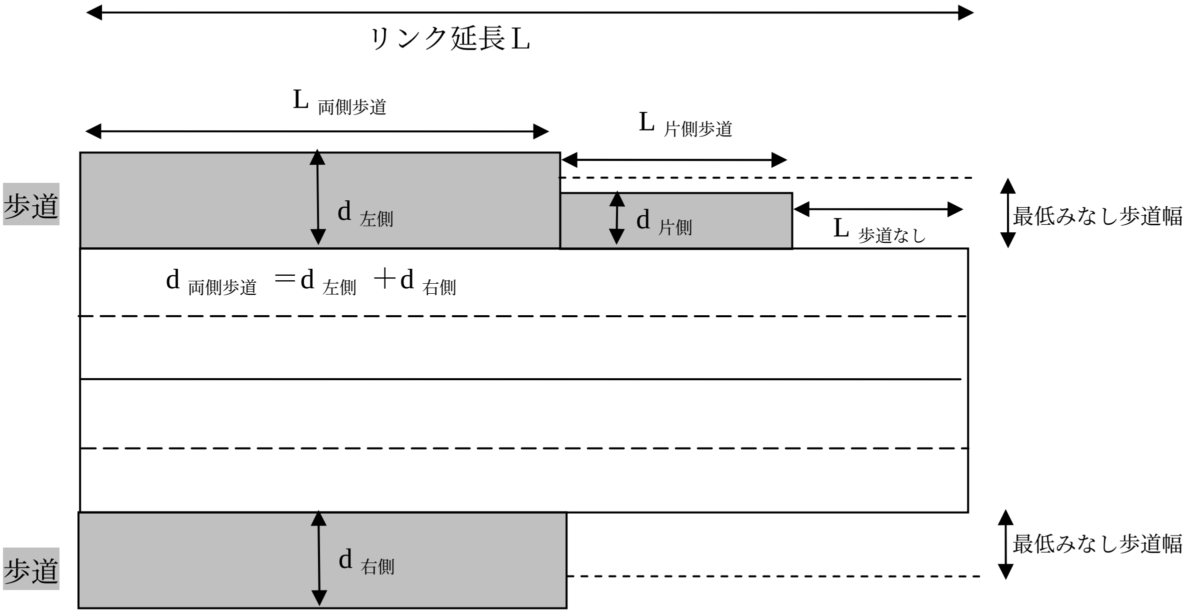


図　検討対象とする歩道・道路構成のイメージ

また、この区間（リンク）の最も狭隘な断面の幅員を W_m とすれば、この区間の歩行速度は、密度 N/(WL)から計算される速度と、密度 N/(W_mL)から計算される歩行速度の間に入ると考えられる。（ここで N は滞在人数である）

そこで、速度計算用の Wc を

$$W_C = (W + W_m)/2$$

として、歩行速度を計算する。

なお、最低の幅員を１mとしたのは、次の写真の通り、１mの幅員があれば、ぎりぎり双方向の歩行が確保されたと考えられるためである。

図　幅員１mのイメージ

②倒壊建物を考慮する場合

倒壊建物がある場合についても、先の歩行空間の決め方に準じ、倒壊する建物の種類によらず、一棟でも倒壊があれば、最も狭隘な歩行空間 W_m を 2 mとする。

この場合、倒壊建物がある区間における歩行空間 $W_{倒壊建物}$ の補正について、倒壊建物１棟の幅を $L_{倒壊建物}$ として、

$$W_{倒壊建物} = \frac{W(L - L_{倒壊建物}) + W_m L_{倒壊建物}}{L}$$

の式によって計算する。

③歩行者が歩道のほか、車道も歩くと考えるケース

効用関数を作成した際のアンケート対象者に対して、混雑度１人／㎡、２人／㎡、５人／㎡の３種類の混雑状況の写真を示した上で、それぞれの混雑度において、自らは車道を歩くと思うか質問した。

この結果は、次の通りである。（車両が通っている場合、通っていない場合の両者について聞いているが、それらについては総計した上で、平均値を出した）

表　混雑度と車道に出る人の割合

混雑度（人/㎡）	1	2	5
車道に出る人の割合(%)	18%	45%	68%

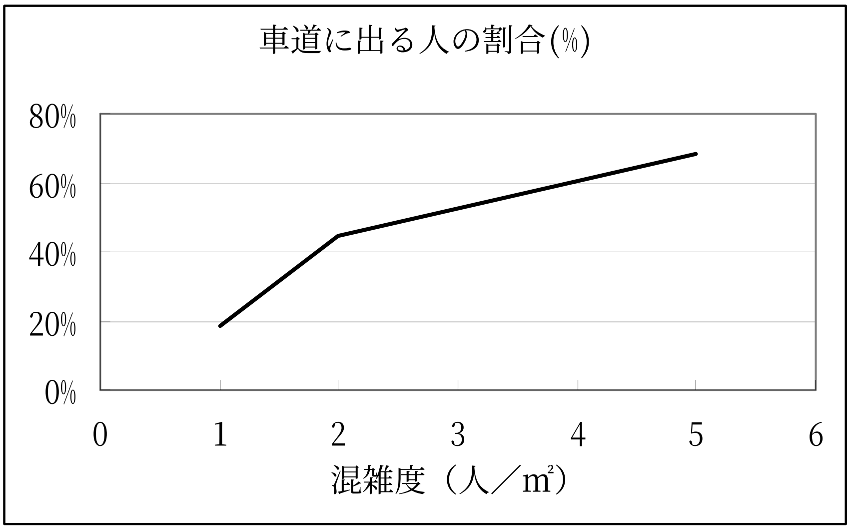


図　混雑度と車道に出る人の割合

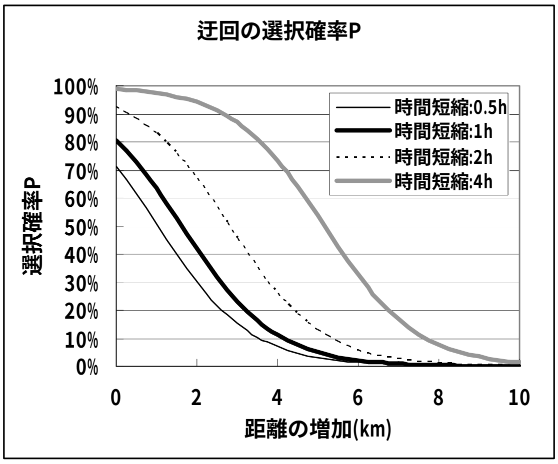
今後、このデータを用いて、歩行者が車道を歩行することを制御できない場合の歩行速度の補正モデルを検討する。

（6）交差点での迂回路選択について

帰宅行動のシミュレーションを単純に実施する場合、元々いた地点から自宅のあるゾーンまでの最短経路をとって帰宅すると仮定することが考えられる。

しかし、このような仮定を行うと、ある幹線道路は極端に混雑し、その周辺の幹線道路は空いているという状況も生じうる。この点、現実には、最短経路となる幹線道路が混雑していれば、別のルートを取る人もある程度いると考えられる。

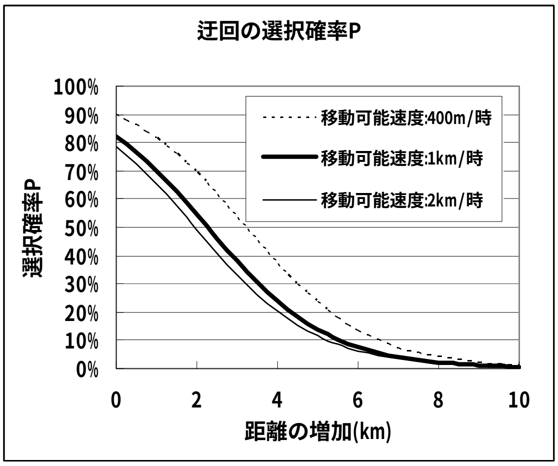
したがって、迂回した場合の距離の増加と時間短縮が分かっている場合（完全情報の場合）と、距離の増加は分かっているが時間短縮については分かっていない場合（不完全情報の場合）について、それぞれ効用関数を算定した。それぞれの効用関数に基づく迂回選択確率の形状は次の通り。



*時間短縮：迂回による自宅到着までの時間の短縮

完全情報の場合、現在地から自宅までの間の各種道路の混雑度を把握できていると仮定されることから、選択確率Ｐは、迂回による道のりの増加と帰宅までの時間短縮の関数として表すことができる。

図「迂回する」の選択確率（完全情報の場合）



*移動可能速度：これから進もうとする道路の歩行速度

不完全情報の場合、現在地から自宅までの間の各種道路の形状等は知っているものの、混雑度は直近の道路以外は把握できていないと仮定できる。このため、選択確率Pは、迂回による道のりの増加とこれから進もうとしていた道路の歩行速度の関数として表すことができる。

図　「迂回する」の選択確率（不完全情報の場合）

なお、具体的に迂回するか否かを判断する（迂回確率モデルを適用する）条件と迂回対象経路の探索方法等は以下の通りである。

迂回検討条件	迂回経路の探索方法	迂回の判断
以下の条件が同時に成り立つ時 ・交差点到着時 ・前方道路の混雑状況が歩行速度3.5㎞／時未満* ・他方向の道路の混雑状況が前方道路より空いている	・前方道路を歩行不可として最短距離経路を探索 ・ただし、迂回経路方向の道路の混雑状況が前方道路より混んでいる場合は迂回しない	・迂回行動モデルによる迂回確率により決定

＊被験者へのヒアリングにおいて、幹線道路が混雑していた場合に裏道に回ると回答した者に対し、どのくらいの混雑状況で裏道への迂回を始めるか、混雑状況の写真を示しつつ確認したところ、2人／㎡（時速3.5km に相当する）以上の混雑度で裏道を選択するとの回答が出ていることから、同様の条件があてはまる場合に迂回行動が始まるものとした。

（７）徒歩帰宅時の裏道利用について

①裏道選択の可能性

被験者へのヒアリング結果によれば、幹線道路が混雑した場合に裏道を選択するという人が約 1/3 いた。

いくつかの幹線道路において、道路に沿った裏道が存在するかどうかを地図上で確認したところ、以下のことが分かった。

・裏道となり得る道路は橋梁部等を除いて存在するが、碁盤の目状に街路が形成されていて使いやすい裏道がある場所と、非常に複雑で使いにくい裏道しかない場所がある。

・全体を俯瞰した場合、適当な裏道を見つけることはできるが、現場で任意の場所から迂回を開始した場合、その地点から最適なルートを選ぶことは困難である。幹線道路付近に細街路が多数ある場合等は、迷うことなどにより、遠回りになる可能性がある。

一方で、以下のように、シミュレーションを実施する上で、裏道選択を直接的に取り扱うのが困難な点がある。

・どこで迂回を開始し、どこで元の幹線道路に合流するかを定めることができない。

・どれくらいの人が、どのような条件で裏道を選択するかの直接的な情報がない。

・建物の倒れ込みの発生や、車両の放置等により、裏道が通りにくくなることも予想される。

②シミュレーションにおける裏道の設定の仕方

シミュレーションを実施する上で、裏道利用の厳密な条件設定は困難であるが、裏道は一定程度選択される可能性があるため、何らかの設定が必要である。

裏道が利用される状況では、幹線道路のいたる箇所で、裏道への流出、裏道からの流入が発生することが想定されるため、シミュレーションにおいては、混雑度が一定以上の区間では、裏道への迂回の発生により混雑度が緩和すると考えるのが適切であると考えられる。そこで、ここでは、混雑度と歩行速度の関係を補正することで考慮することとする。

被験者へのヒアリングにおいて、幹線道路が混雑していた場合に裏道に回ると回答した人に対し、どのくらいの混雑状況で裏道への迂回を始めるか、混雑状況の写真を示しつつ確認したところ、2 人／㎡で裏道を選択するとの回

答が出始め、混雑度に比例して利用するとの回答が増加し、6 人／㎡で全員が裏道を選択すると回答した。

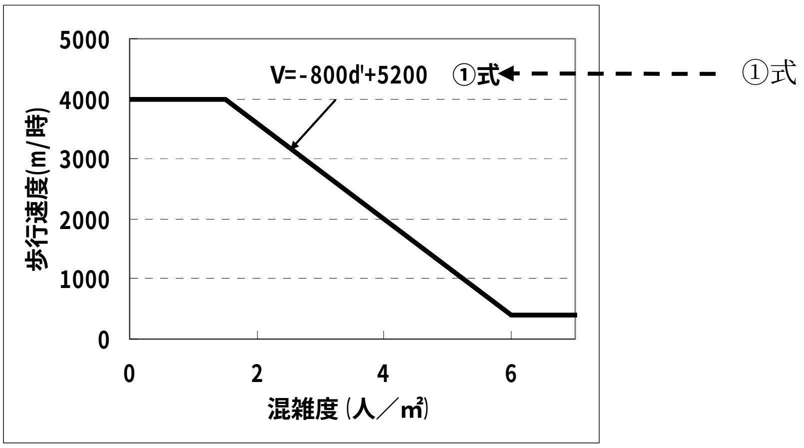
このことを踏まえ、次のパラメータをつかって、幹線道路上の歩行速度を設定する。

ｒ：裏道利用率

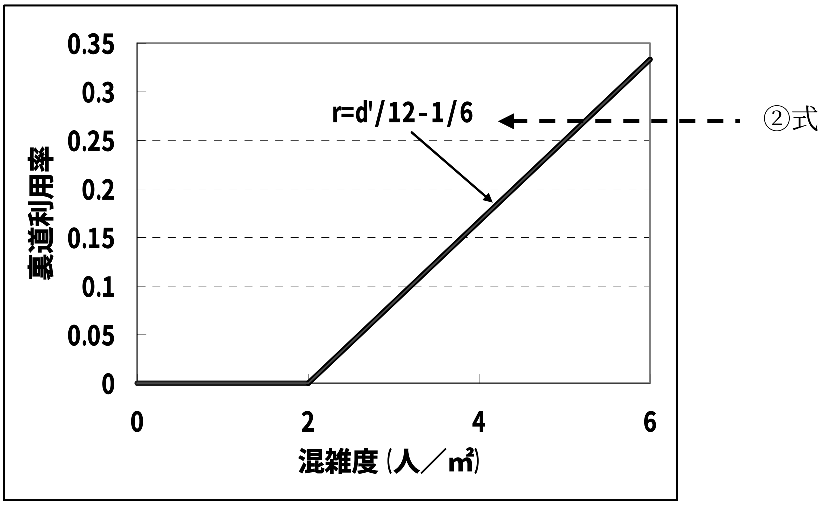
ｄ'：幹線道路上の歩行者数／幹線道路面積

ｄ：幹線道路及び裏道の歩行者数／幹線道路面積

この場合、幹線道路上の歩行速度は、次の図のように表すことができる。



一方、裏道を使うつもりがあると回答した人（歩行者の 1/3）に対し、裏道利用を開始する幹線道路の混雑度の基準を聞いたところ、混雑度が２人／㎡から実際に裏道を使うという回答の人が出始め、６人／㎡で全員が裏道を使うとの回答があった。したがって裏道利用率は幹線道路の混雑度合いに応じて、次の図のように表すことができる。



また、幹線道路を利用している人数は、裏道を歩いている人も含めた人数

の（１－ｒ）倍であるため、次式が成り立つ。

$d' = d(1-r)$ ・・・③式

ここで、③式に②式を代入しｒを消去すると、

$$d' = d\left(\frac{7}{6} - \frac{1}{12}d'\right)$$

となる。これをｄ'について解くと次の結果が得られる。

$$d' = \frac{14d}{12+d}$$ ・・・④式

④式を①式に代入すると、結局、裏道に抜ける人も考慮した場合の幹線道路の歩行速度は、次式で表される。

$$V = -800d' + 5200 = -800\left(\frac{14d}{12+d}\right) + 5200$$

（但し、適用範囲は $2 \le d \le 9$ ）

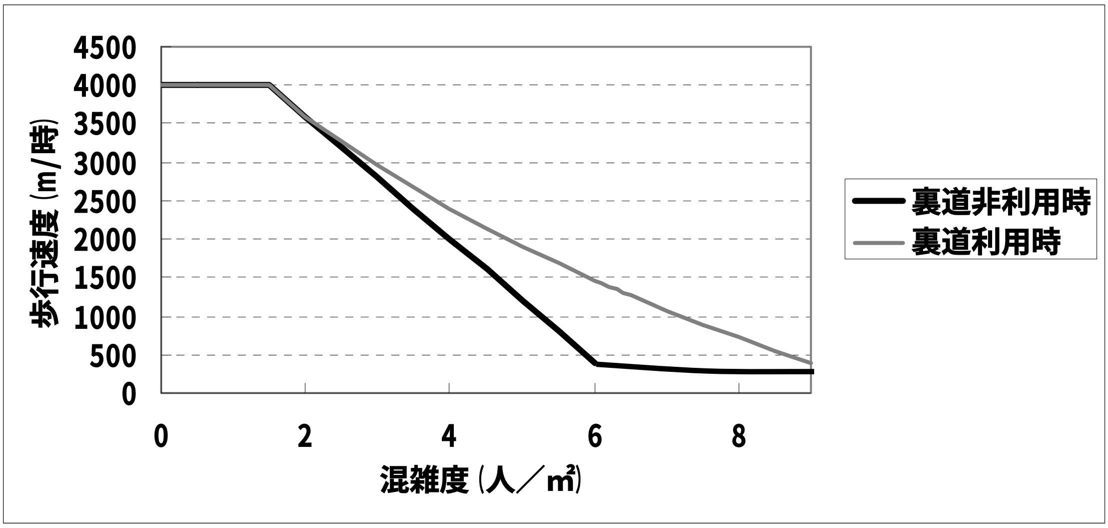


図　裏道への利用を考慮した混雑度と歩行速度の関係

グラフで求められている歩行速度にそのときどきの混雑度をかけると、幅員１ｍあたりの流量（通過する人数／時）が求められる。

この結果は次の通りである。

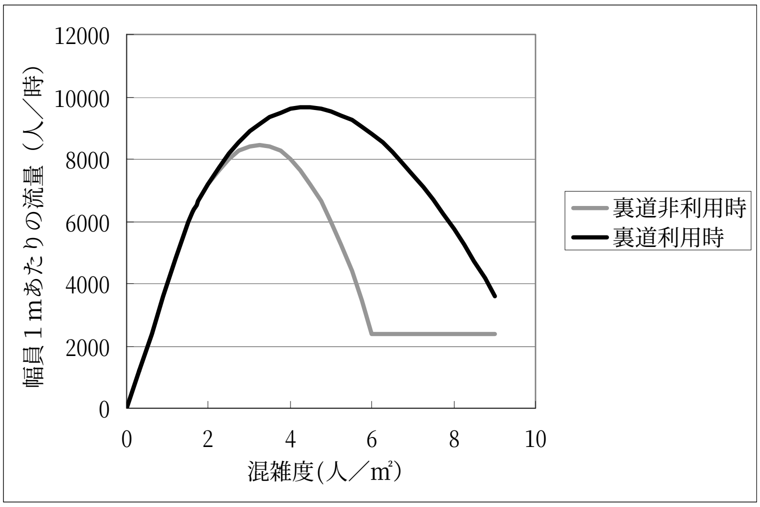


図　混雑度と幅員１mあたりの流量の関係

このグラフから、裏道非利用時の場合、混雑度３人／㎡強で最も多くの人が流れ、裏道利用時には、混雑度４人／㎡強で最も多くの人が流れることが分かる。

（参考）各地域における滞留人口の概要

本項では、パーソントリップ調査※1 データに基づき、首都圏全体及びいくつかの特徴的な地域の時刻別・目的別の滞留人口※2 について概観する。

※1：東京都市圏交通計画協議会による、一定の調査対象地域内における「人の動き」（パーソントリップ）を調べた調査である。交通の根源は「人の動き」にある点に着目し、交通の起点（出発地：Origin）及び終点（到着地：Destination）、交通目的、利用交通手段などを「人の動き」を通して明らかにしている。

※2：滞留人口とは、ある特定の地域に各目的(在宅、私事、学校、業務)のために滞在する人口のこと。移動中の人は含まれない。

（２）首都圏全体の時間別・目的別滞留人口

首都圏全体の時間別・目的別滞留人口は次のとおりである。

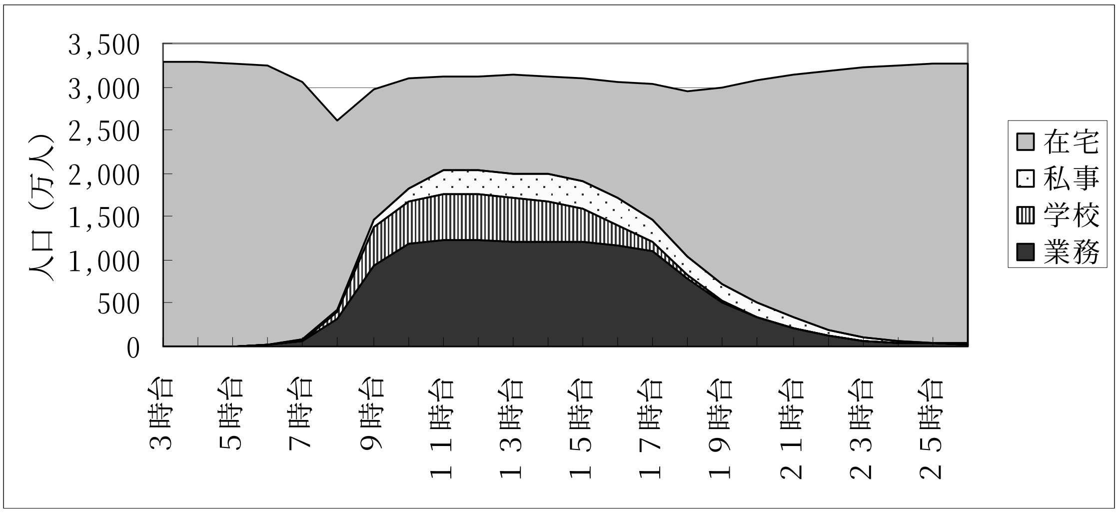


図　首都圏の目的別滞留人口

この図から、午前７時台まではほとんどの人が在宅であり、そこから、学校や会社等に向かう人が増え始めるのがわかる。業務人口は、10 時台から 17 時台までなだらかピークが続き、21～22 時台ごろまである程度の数がいる。学校人口は、10～12 時台ごろにピークを迎え、17 時台ごろには少なくなる。私事人口（買い物等）は、業務人口や学校人口に比べると人数が少ないものの、10 時台ごろから 21 時台ごろまで一定の人数がいる。

なお、合計の滞留人口が午前８時台に減少し、また 18 時台にもやや減少するが、これは、この時間帯において、移動中の人が増えるためである。

（３）主な地域の目的別滞留人口

ここでは、特徴的な地域として、丸の内・大手町地区（事務所地区）、銀座地区（繁華街地区）、高島平周辺地区（住宅街を含む地区）について、時間帯別・目的別の滞留人口をみる。

①丸の内・大手町地区

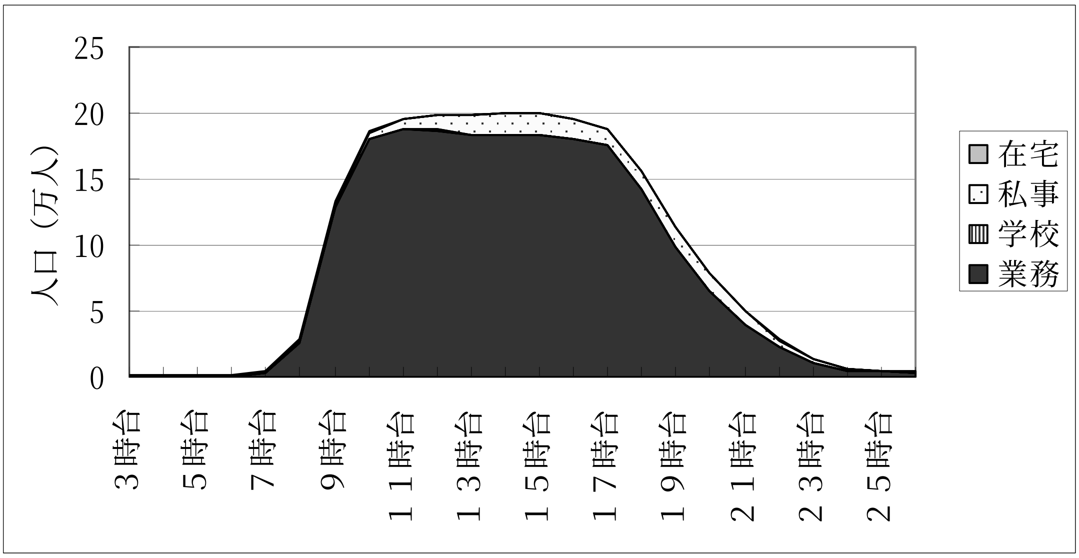


図　丸の内・大手町地区の滞留人口

業務人口がほとんどであり、私事人口も若干存在する。学校人口や在宅人口は、グラフ上では判別がつかない程度である。

②銀座地区

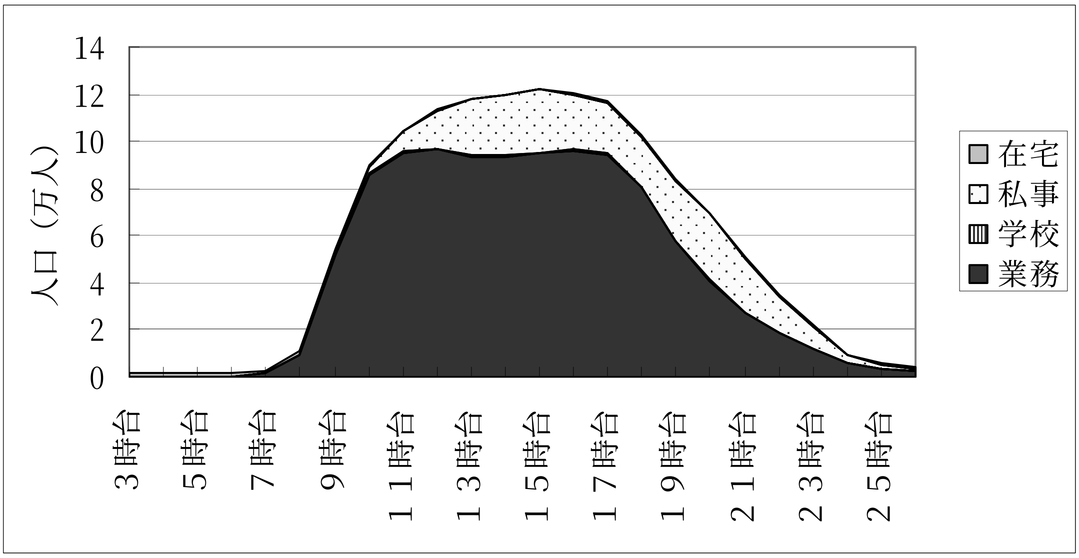


図　銀座地区の滞留人口

銀座の場合も、店舗等の従業員が多いことから業務人口が中心であるものの、事務所地区と比べると私事人口の割合がかなり高いことが分かる。特に夜間になるにしたがい、私事人口の割合が大きくなる傾向が見られる。

この地区も、学校人口や在宅人口はほとんど見られない。

③高島平周辺地区

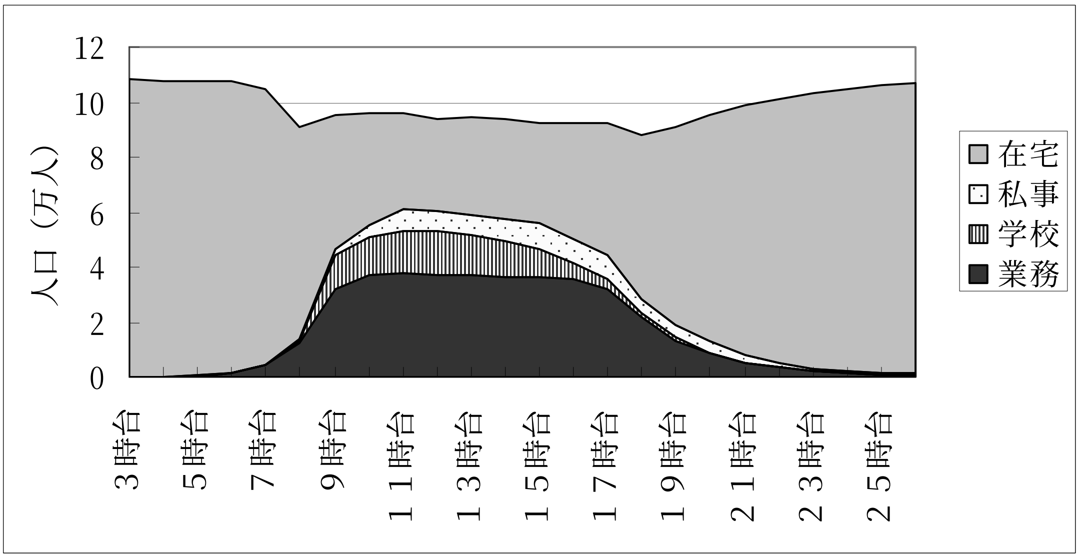


図　高島平周辺地区の滞留人口

この地区では、全体として昼間の滞留人口が少なくなっている。事業所等も存在するため業務人口は多いが、在宅人口や学校人口が多いといった住宅街的な特徴ももつ。

（4）午後 12 時における 1㎞ メッシュ別外出者人口

午後 12 時における外出者人口の分布は下図のとおりとなっている。

※外出者人口とは、業務、学校、私事が目的で滞留している人口及び移動中の人口である。

※パーソントリップ調査では、移動中の人口について、現在どこにいるのかが不明であるため、ここでは、居住ゾーンにおける午前 3 時の滞留人口と、シミュレーション対象時刻におけるそれらの人の外出先における滞留人口の総和との差を求め、この差分（＝移動中の人口）を、シミュレーション対象時刻の滞留人口分布に応じて比例配分することとした。なお、このような移動中の人口は午後 12 時において約 160 万人、全人口の約 5%である。

午後 12 時について求めた 1km メッシュ別外出者人口は次のとおりである。

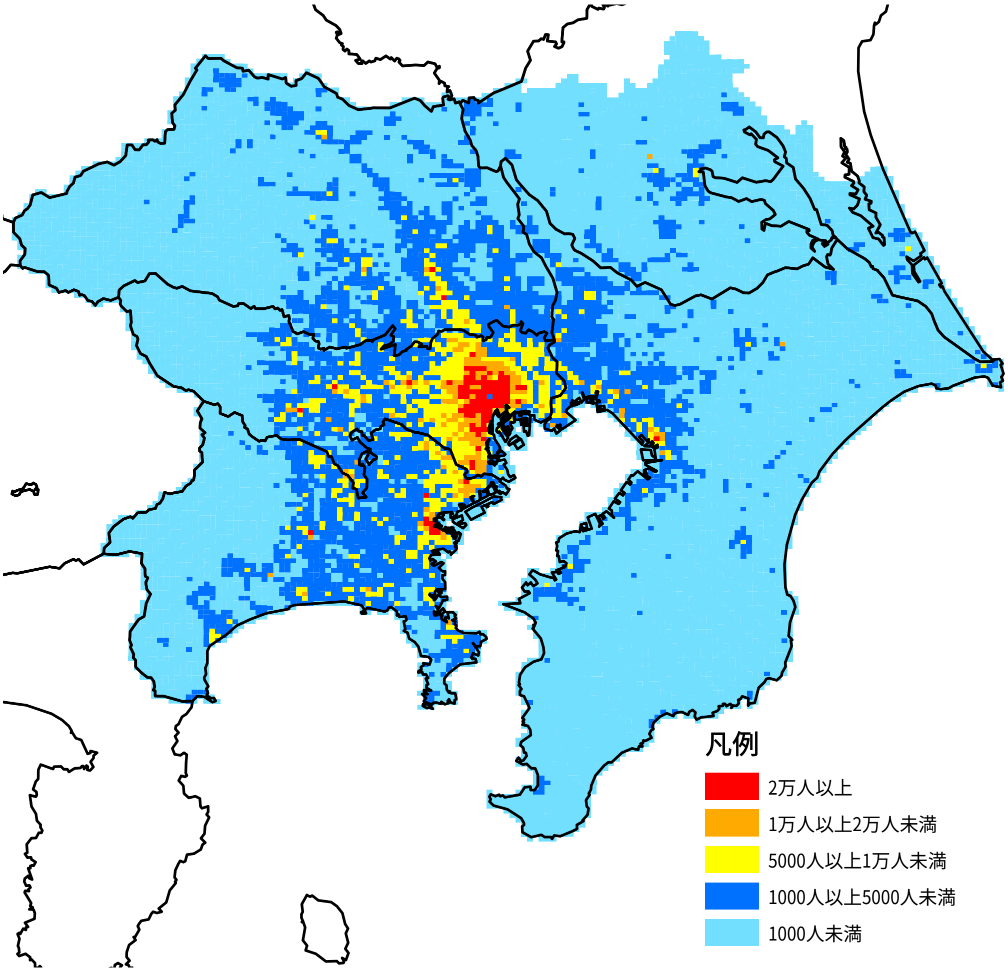


図　午後 12 時における 1㎞ メッシュ別外出者人口分布