5. 地震火災リスクを考慮した避難危険性の評価に関する研究

Evaluating Evacuation Vulnerability Considering the Risk of Fire in Large Earthquake

武末裕樹* ・鈴木 勉** ・糸井川栄一**
Hiroki Takematsu*, Tsutomu Suzuki**, Eiichi Itoigawa**

The purpose of this study is to evaluate the evacuation vulnerability quantitatively considering the risk of fire in large earthquake. First, we define three indices which assess the vulnerability: unattainability to evacuation site, expected evacuation distance, and refugee density. Second, we construct a network model on which we assume refugees evacuate toward evacuation sites avoiding fire, based on the calculation of the probability of fire on each node. Third, we consider the pattern where fire could occur by using Monte Carlo Simulation, and evaluate the evacuation vulnerability in Tokyo ward area. We found out that the risk of fire makes evacuation distance longer, especially in areas with higher probability of fire or inadequate assignment, and that change in destination or route to evacuation site results in decrease of unattainability or expected evacuation distance.
Keywords: risk of evacuation, evacuation site, probability of fire, Monte Carlo simulation
避難危険性，広域避難場所，出火確率，モンテカルロシミュレーション

1. はじめに

大地震発生時において火災から市民の安全を守るためには，①火災発生の防止，②延焼遮断，③避難の順に幾重もの対策が必要である．③は，①②がうまく機能しない場合に最終的に人命の確保を行うためのものであり，避難計画は市民の安全を確保する上で非常に重要である [1]．一方，1923 年に発生した関東大震災や 1995 年に発生した阪神・淡路大震災の一部地域では，火災により行く手を遮られ，当初予定していた避難経路や避難施設を使用できなかったという報告がある [2)3)4)]．すなわち，大地震時の火災によって住民は臨機応変に避難経路や避難先を変えると考えられる．そのため，火災状況を確定的に捉えた避難計画に加え，地震火災発生場所の不確実性を考慮した上で避難行動の変更による避難危険性への影響を考えることが重要である．

市街地のモデル化を行った地震火災からの広域避難の危険性に関する研究は，(1) ミクロな視点のものと (2) マクロな視点のものの 2 つに大別できる [5]．(1) は現実の道路網などの詳細なデータに基づき，避難者や火災延焼の時系列的変化などを考慮することで住民の避難行動を詳細に記述し，避難経路上での危険性を道路ごとに個別評価するものであり，例えば小坂(1994)[6]や高橋・兵藤(2005)[7]がある．一方，(2) は優先的に整備すべき地域を特定するために相対的な危険性評価を都道府県レベルから町丁目単位で評価するものであり，例えば東京都(2002)[8]がある．この中では，避難の危険性は指定の避難場所までの単位町丁目面積当たりの延べ避難時間が評価指標とされ，火災延焼や建物倒壊，液状化による路面性状の悪化等の避難阻害要因を避難時間の増加として算定している．火災延焼については，火災被害を出火危険度と焼失危険度に基づき延焼面積期待値として算出している．しかし，火災の発生の仕方を確定的に捉えており，実際には火災発生の有無により避難の危険性が大きく異なる可能性も考えられ，火災の不確実性を考慮した危険性評価も必要であろう．

そこで本研究では，震災直後の大火災から身の安全を確保する広域避難場所（以下，避難場所）までの避難に焦点をあて，地震火災リスクを考慮することにより避難時の危険性が受ける影響と，避難行動の変更や避難場所の整備が危険性の減少にもたらす効果を定量的に明らかにすることを目的とする．これにより，火災被害の影響も加味したよりリスクの少ない避難計画を策定することが可能となると考えられる．なお，本研究ではミクロスケールで避難に関わる事象を詳細に記述するのではなく，東京都(2002)[8]のように町丁目単位といったマクロな視点から，大規模かつ同時多発的な地震火災からの広域的な避難に的を絞った概略的なモデルを扱うこととする．

2. モデルの仮定と避難危険性の指標

本章では，避難の危険性を評価するためのモデルの仮定について述べ，避難経路上での危険性として避難場所までの到達不能率と平均避難距離，避難先における危険性として避難者密度の計 3 つの避難危険性の指標を定義する．

2.1 モデルの仮定

避難行動を記述するにあたって，対象とする都市空間はゾーン（本論文では町丁目）に分割され，隣接するゾーンの代表点同士を結ぶネットワーク構造で表現されるものとする．広域避難場所もゾーンと同じく代表点を持ち，上のネットワークと接続されているとし，各ゾーンから避難者が避難することを考える．モデル上，以下の仮定を置く．

(i) 対象地域の住民は，地震直後に広域避難場所に避難を行う．東京都では指定された広域避難場所があるが，対比ケ

* 正会員 エース損害保険（株）(ACE Insurance, Co.Ltd.)
** 正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科(University of Tsukuba)

ースとして，火災発生パターンに対して，火災状況を完全に把握し，火災を避けた経路が最短となる場所を選定して一斉に避難する場合を考える．本研究では，比較的大きな地震が発生し，しかも相応の同時多発火災が発生するといういわば最悪の状況に近いシナリオに対して，概略的ではあるが広域的な評価を行うことを試みる．したがって，東京都の避難計画に従った避難の是非を伴う二段階避難は，評価方法が複雑になるためこれを踏襲しない．東京都の避難計画を評価することを意図したものではないため，あくまで一般論として広域避難場所までの距離や容量，火災の発生しやすさとの関係を明らかにすることを目的とする．

(ii) ある町丁目で 1 件以上の出火が起こった場合，その町丁目全体に延焼し，その町丁目を通過して避難することが不可能となると仮定する．1923 年に発生した関東大震災では東京市で 129 件の出火が発生し，一部が 40 時間以上の延焼火災に発展し，火災 1 件あたりの平均焼失面積は約 0.5km^2 と広範囲に及んだが [2]，東京都の首都直下地震の被害想定 [9]では，最悪ケースで東京 23 区で 1008 件の出火が発生し，1 件あたりの平均延焼面積は約 0.10 km^2 となることが想定されているので，東京 23 区の町丁目面積の平均値約 0.20km^2 とほぼ同等であると判断した．東京 23 区においては，出火した場合であっても大規模な延焼の恐れがなく広域的な避難の必要がない地区として地区内残留地区が指定されている [10]が，本論文ではこの地区で出火した場合でも，住民はその地区を通行できないと仮定して分析を行う．

実際には，全住民が避難を要するほど火災が発生しないケースや，延焼が小規模に留まり，避難のための通過が可能なケースも考えられるが，本研究では最悪のケースに近い状況を考慮することを狙いとし，上記の仮定をおく．

2.2 到達不能率

地震火災が同時多発した場合，火災に取り囲まれてしまい，避難場所まで到達できなくなる地域が発生する可能性がある．出火したノード（出火ノード）の組み合わせ（火災発生パターン）によって，当該町丁目から出火した場合あるいは当該町丁目のノードが出火した町丁目に周囲を取り囲まれ，その内部に広域避難場所が存在しない場合に，終点（避難場所）ノードまで到達できなくなるノード（到達不能ノード）が発生すると判断する．火災に囲まれることで避難場所まで到達できなくなる危険性を評価する指標として，地域全体の到達不能率 R とノード別の到達不能率 r_i を定義する．地域全体の到達不能率は，全火災発生パターンの到達不能ノードの総数 N^c が，全火災発生パターンにおける起点ノードの総数に占める割合である．N は全火災発生パターン数，n はネットワーク内の全ノード数である．

$$R = \frac{N^c}{N \cdot n} \tag{1}$$

ノード別到達不能率は，あるノードが到達不能ノードとなる回数 n_i^c が全火災発生パターン数 N に占める割合である．

$$r_i = \frac{n_i^c}{N} \tag{2}$$

2.3 平均避難距離

避難場所まで到達できる場合であっても，途中の経路上で火災に遭遇すれば住民はそこを避けるように避難を行うと考えられ，最近隣避難場所やそこまでの最短距離（避難距離）は変化する．そこで，様々な火災発生パターンに対する避難距離の指標として，地域全体の平均避難距離 L とノード別の平均避難距離 l_i を考える．前者は，あるノード i から発生する避難者数 m_i，避難距離 d_i を用いて，

$$L = \frac{\sum_i m_i \cdot d_i}{\sum_i^n m_i} \tag{3}$$

となる．後者は，ノード i における全火災発生パターンの避難距離の総和 D_i を用いて，次式により求められる．

$$l_i = \frac{D_i}{N} \tag{4}$$

火災に囲まれる場合であっても，計算の対象から除外せず平均避難距離を算出する．なお，次章以降では避難者数 m_i の値として 2000 年国勢調査による夜間人口を用いる．

2.4 避難者密度

避難場所 j における危険性として，避難者密度 E_j を考える．これは，各避難場所における避難者の混雑度を示すものであり，避難場所 j に集まる避難者数 M_j，避難場所の有効面積 s_j を用いて，次式で定義する．

$$E_j = \frac{M_j}{s_j} \tag{5}$$

東京都地域防災計画 [10]によれば，1 人あたり避難場所有効面積の値が 1 m^2/人よりも大きくなるよう，すなわち E_j が 1 人/m^2 よりも小さくなるよう避難場所を整備することが望ましいとしている．また避難者密度 E_j は地域ごとのばらつきが大きく，公平性の観点から問題があることが指摘されている一方 [7]，住民の避難の仕方によってはそのばらつきが変化することも考えられる．そこで，E_j が 1 人/m^2 を超える避難場所箇所数および E_j の標準偏差を用いて評価する．

3. 東京 23 区を対象とした地震火災の不確実性を考慮した避難危険性の定量的評価

本章では，前章の 3 指標を用いて，東京 23 区での地震火災の不確実性を考慮した避難危険性の定量的評価を行う．

3.1 広域避難ネットワークの構築

避難危険性の算出フローを図 1 に示す．まず東京 23 区において避難者の概ねの流れを表現する仮想的なネットワーク（広域避難ネットワーク）を構築する．2002 年および 2008 年時点における東京 23 区の避難場所を図 2 に示す [10][11]．町丁目単位で危険性を把握するために，ノードは町丁目の面積重心および避難場所敷地の面積重心と仮定し，東京都 (2002)[8] における避難危険量の測定時に設定した手法に概ね基づくものとする．ただし，図形的な影響を少なくするため，敷地が複数の町丁目にまたがるような避難場所につ

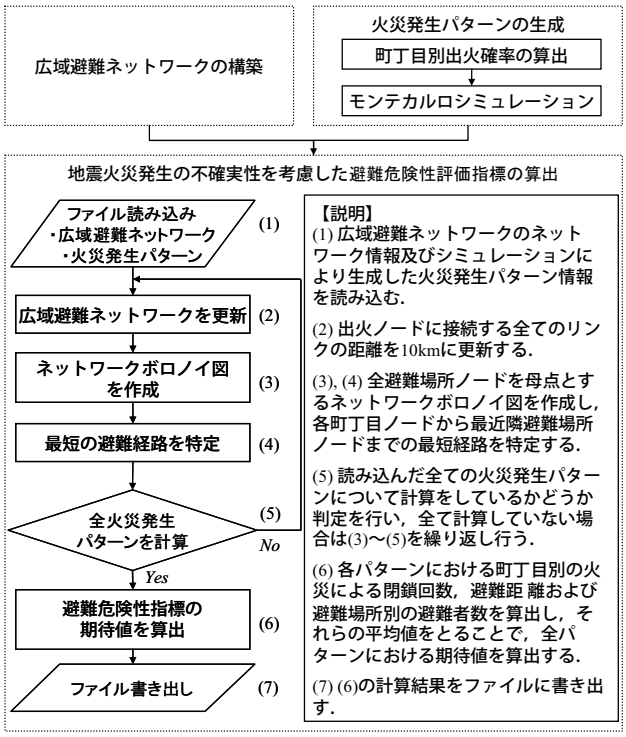

図1 避難危険性評価のフロー

いては町丁目境界で分割した上で，各敷地の重心をノードとする．リンクは①町丁目同士を接続するものと②町丁目と避難場所を接続するものの2つを考え，リンク長はノード間の直線距離とする．①については，町丁目境界が一辺で接する町丁目同士を接続する．ただし，臨海部および河川をまたぐ町丁目ペアについては，架橋の有無によって接続の有無を判断した．②については，避難場所の敷地を含む町丁目および避難場所の敷地境界と町丁目境界が一辺で接するものを接続することとし，複数の避難場所の敷地を含む場合は，直線距離で近い避難場所と接続した．東京23区について構築した広域避難ネットワークを図3に示す．

3.2 避難危険性評価指標の算出手順

次に，ある町丁目内で1件以上出火する確率 P_i（町丁目別出火確率）を補注の方法により算出し，これを基に火災発生パターンを生成し，その各パターンについて危険性指標を繰り返し計算する．地震火災リスクの考慮，避難行動の変更，避難場所の整備が避難危険性をどの程度変化させるかを示すために算出ケースを設定し，算出値が十分収束する回数として N を1ケースにつき10000として計算を行った．計算環境はPentiumIV, CPU 3.2GHz, 2GB RAMで，火災の発生件数，すなわち設定震度にも依るが，1火災発生パターンの計算時間はおよそ1.5～2.0秒であり，1つの算出ケースについての計算時間は5時間前後である．

大規模な地震火災から避難を行う場合，特別な事情を除き火災の方向への避難は行わないと考えられる．そこで最短経路上に火災を通り抜けるリンクが存在するかどうかを判断できるように出火ノードに接続するリンクの距離を便宜上10kmと設定し，その他のリンク長は直線距離とした．

そして，火災を考慮した広域避難ネットワークを用いて

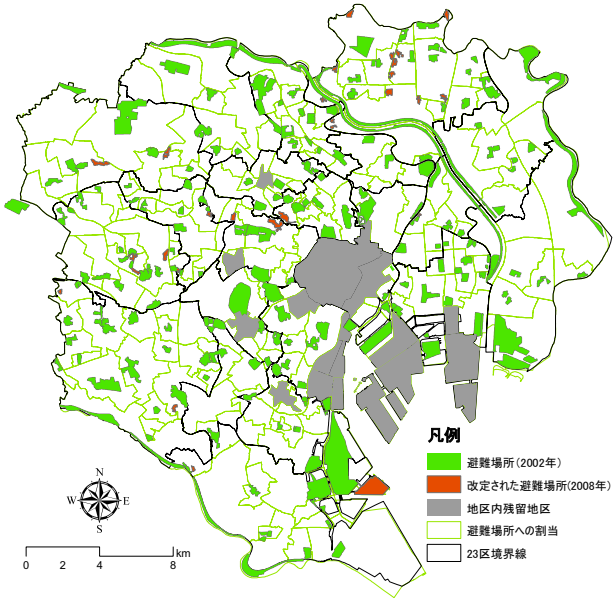

図2 東京23区における避難場所[10)]

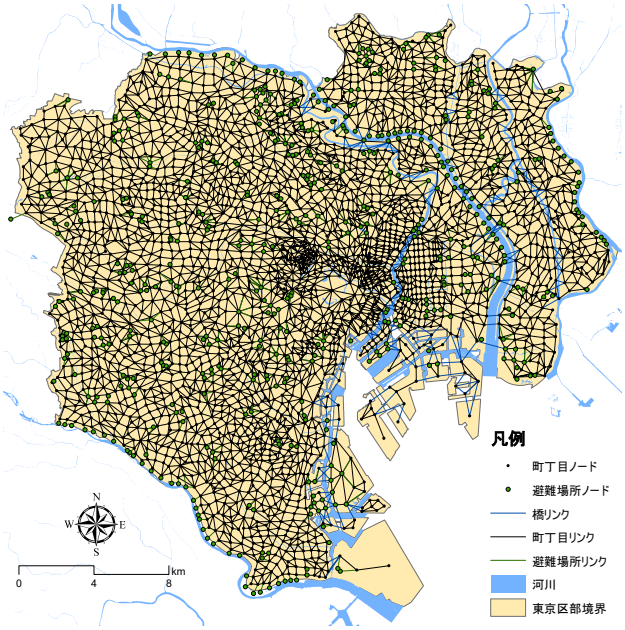

図3 東京23区における広域避難ネットワーク

各避難場所ノードを母点とするネットワークボロノイ図を作成し，各町丁目から最近隣避難場所となる避難場所とその経路を特定し，前記の3指標を算出した．

3.3 算出ケースの設定

避難パターンとしては，以下のような地震時における住民の避難行動を想定する．

A指：東京23区で指定されている避難場所への割当に従い，火災発生を考慮せずに指定の避難場所へ最短経路で避難を行う避難パターン

B指：上と同様，避難先は指定されているが，経路については火災を避けた上で最短となる経路選択を行う避難パタ

表1 ケース別にみる地区全体の避難危険性

算出ケース	避難パターン	震度	避難場所箇所数	火災考慮	避難危険性指標			
					到達不能率 R 【変化率(%)】	平均避難距離 L(m) 【変化率(%)】	避難者密度 E_j(人/m²) 1人/m²以上箇所数	避難者密度 E_j(人/m²) 標準偏差
A指	指定	—	170	無	—	975.0 【 0.00】	7	0.291
B指	指定	6強	170	有	0.0981 【 0.00】	1177.7 【 20.78】	7	0.291
C自	自由	—	170	無	—	789.2 【-19.06】	29	1.061
D自6+	自由	6強	170	有	0.0040 【-95.92】	865.5 【-11.24】	29	1.022
D自6+'	自由	6強	189	有	0.0036 【-96.33】	848.3 【-13.00】	9	0.323
D自7	自由	7	170	有	0.0316 【-67.79】	984.5 【 0.98】	30	1.023

ーン

C自：火災発生は考慮せず，住民が自由に避難先を変更することを想定し，最近隣避難場所へ最短経路で避難を行うパターン

D自：火災の発生状況によって住民が臨機応変に避難先および経路を変更可能とし，火災を避けて移動した場合に距離が最小となる避難場所へ避難するパターン

D自については，震度7の場合や避難場所箇所数を増加させた場合の感度分析も行う．ケースD自6+'は，避難場所の新設や区域変更によってどの程度避難危険性が変化するかを示すために，2008年2月に改定された東京23区の避難場所[11]を参考に，避難場所の位置情報を再設定して算出したものである．

3.4 東京23区全体での避難危険性評価

表1に東京23区全体でみた各算出ケースにおける地域全体の到達不能率 R および平均避難距離 L，避難者密度 E_j の算出結果をまとめ，図4に L と E_j≧1人/m² となる避難場所箇所数の関係を示す．ケースA指，B指の比較により，地震火災リスクを考慮することで到達不能となる地域が発生し，平均避難距離は8.8%増加することがわかる．また，A指とC自を比較すると L が-19.06%変化し，更にB指とD自6+との比較より，住民が臨機応変に避難先を変更すると，到達不能率 R は95.9%，L は11.24%削減され，経路上での危険性を大きく回避できることがわかる．一方，E_j については，B指とD指6+の比較より，住民が自由に避難を行うことで避難場所間のばらつきが大きくなり，避難者密度が1人/m²以上になる避難場所数も多くなる．そこでケースD自6+'のように避難場所数を増加させると，住民が避難場所を自由に選択するにも関わらず，平均避難距離 L を増加させることなく避難者密度 E_j が1人/m²はとなる避難場所箇所数も，B指と同程度に保つことができる．

3.5 町丁目別の避難危険性評価

次に，町丁目別の避難危険性評価の結果を示す．図5に火災の不確実性を考慮した4つのケースにおける町丁目別到達不能率 r_i を示し，図6-①にケースA指における町丁目別平均避難距離 l_i を，②～④にそれぞれケースB指，D自6+，D自6+'のケースA指における l_i に対する比および各

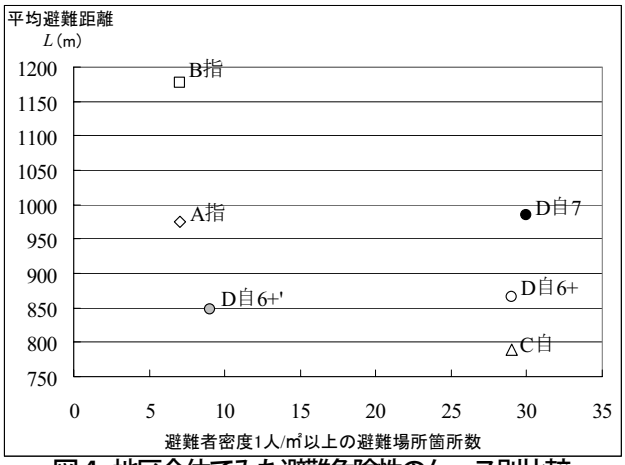

図4 地区全体でみた避難危険性のケース別比較

避難場所における避難者密度 E_j を示す．なお使用データの違いにより図5，6のケースA指，B指で区境界と割当境界が一部一致しない地域が存在していることを断っておく．

まず到達不能率 r_i については，図5-①より指定通りに避難した場合，割当境界線に近くかつ町丁目別出火確率が高い地区で大きくなる．また図5-④より住民が自由に避難先を変更できる場合は，臨海部や対象地区の縁などネットワークの構造上孤立しやすい地域や，中野区中央部等の町丁目別出火確率の高い地域で大きくなることが読み取れる．また，図5-②と③との比較により避難場所が整備された地域では局所的に到達不能率が減少することもわかる．

次に平均避難距離 l_i については，図6-①より，割当境界周辺や，避難場所が十分整備されていないと考えられる杉並区西部や品川区，大田区などで長く，これらの地区では早急に避難場所の整備を進める必要があると言える．また，図6-②より，火災を考慮すると町丁目別出火確率が高い地域で避難距離がさらに大きく算定されることがわかる．一方，図6-③より，自由に避難先を決定することにより，多くの地区で平均避難距離が改善されることが確認され，図6-④から，避難場所が整備されるとその地区周辺での平均避難距離の改善効果が大きいことがわかる．

4. まとめと今後の課題

本研究では地震火災リスクに着目し，地震火災により避難経路が遮断される可能性があることが広域避難にどの程度影響を与えるかについて，東京23区を事例として評価を行い，以下の結論を得た．

①到達不能率から見ると，地震火災リスクを考慮することで避難場所まで到達不能となる地域が生じるが，指定通りに避難する代わりに住民が避難先を自由に決定することによりほとんどなくなる．また周囲に出火確率が高い地域が存在する地域ほど，火災に囲まれる確率が高くなるため，到達不能率が高くなる傾向がある．

②平均避難距離から見ると，指定通りに住民が避難する場合，地震火災リスクを考慮することで地域全体で約2割増加し，出火確率が高い地区で特に増加が著しい．しか

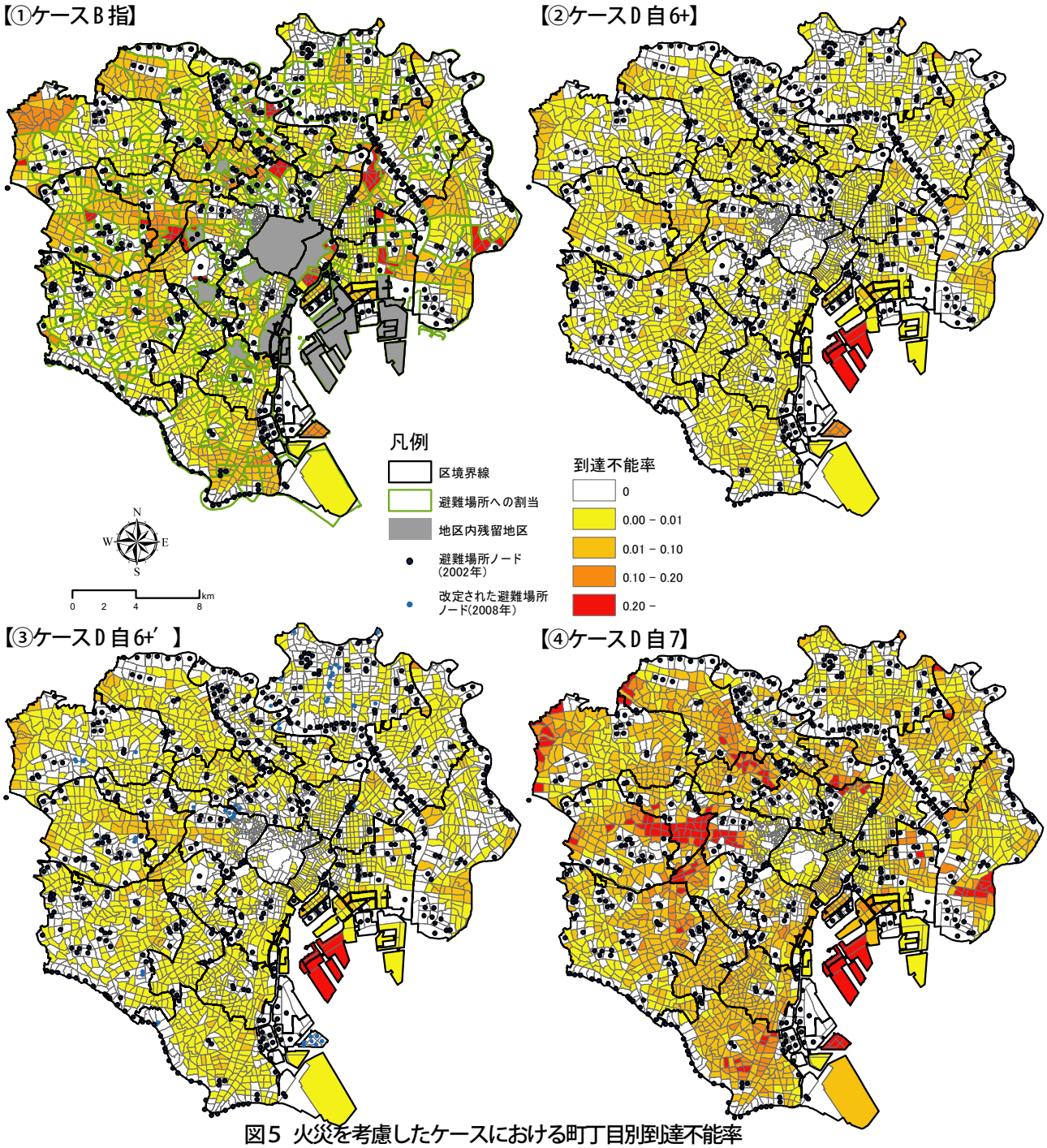

図5 火災を考慮したケースにおける町丁目別到達不能率

し，住民が避難先を自由に決定することにより，平均避難距離は短くなる．特にまた，避難場所の増設は局所的に大きな改善効果をもたらす．

③避難者密度については，住民が自由に避難先を決定することにより，各避難場所間の避難者密度のばらつきが大きくなり，混雑する避難場所も多くなるといったデメリットが顕在化する．しかし，避難場所の増設により，指定通りに避難した場合の避難者密度と同レベルまで改善され，増設の効果が大きいことが確認された．

地震時避難に関連する諸々の事象の時系列的変化や，建物倒壊等その他の避難阻害要因を考慮したモデル化等が今後の課題として挙げられる．

謝辞

本研究の推進にあたっては，東京消防庁より町丁目別建物用途別構造別の事業所・世帯数のデータ提供を得ました．ここに記して謝意を表します．

補注

町丁目別出火確率 P_i を「町丁目 i で少なくとも1件の出火が起こる確率」と定義し，町丁目 i における地震動 z_i，用途 j（19区分）構造 k（木造・非木造）の建物の事業所・世帯数 N_{ijk}，用途 j 構造 k の建物の震度 z に対する事業所・世帯1単位あたりの出火確率 $p_{jk}(z)$ を用いて，次式により算出した．

$$P_i = 1 - \prod_{k=1}^{2}\prod_{j=1}^{19}(1 - p_{jk}(z_i))^{N_{ijk}}$$

なお，$p_{jk}(z_i)$ の値には三菱総合研究所(2006)[12]の算出値を用いた．

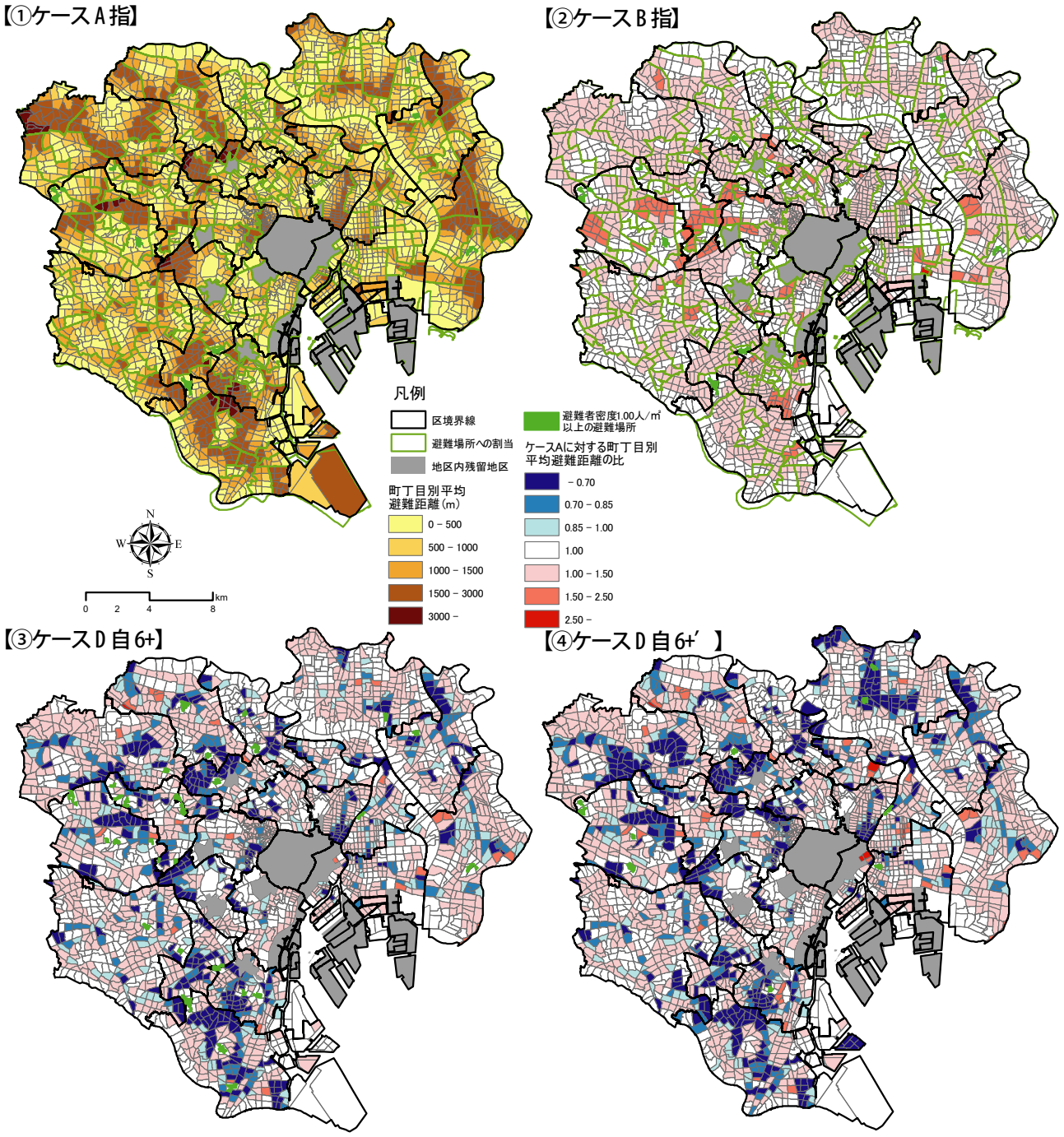

図6 ケース A における町丁目別平均避難距離（①）およびそれに対する各ケースの町丁目別平均避難距離の比および避難者密度が１人/㎡以上となる避難場所（②〜④）

参考文献

1) 小林正美(1981)：広域避難計画論―防火帯地区分割に基づく避難計画―，日本建築学会論文報告集，No.306，pp.126-132.
2) 消防科学総合センター(1982)：地域防災データ総覧 ―地域避難編―.
3) 消防科学総合センター(1997)：地域防災データ総覧 ―阪神・淡路大震災基礎データ編―.
4) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会(1998)：阪神・淡路大震災調査報告 ―建築編6― 火災・情報システム.
5) 久貝壽之，加藤孝明(2006)：地域レベルの領域から道路網防災性能上脆弱な地区を抽出する評価手法の確立 ―パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究（その3）―，日本建築学会計画系論文集，No.600，pp.105-112.
6) 小阪俊吉(1994)：出火確率を考慮した地震時の火災・広域避難シミュレーション手法による人的被害予測，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2347-2352.
7) 高橋洋二，兵藤哲郎(2005)：避難経路および広域避難場所の危険度に着目した避難計画の評価に関する研究 ―江東区地域防災計画における広域避難計画の安全性向上に関するケーススタディ―，都市計画論文集，No.40-3，pp.691-696.
8) 東京都(2002)：地震に関する地域危険度測定調査報告書（第5回）.
9) 東京都(2006)：首都直下地震による東京の被害想定報告書.
10) 東京都防災会議(2002)：東京都地域防災計画（平成14年修正），東京都.
11) 東京都都市整備局 HP「市街地整備　避難場所などの概要」：http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/hinan/hinan01.htm，2008.
12) 三菱総合研究所(2006)：東京都の地震時における地域別出火危険度測定報告書（第7回）.