

# 首都圏大規模水害時の江東デルタ地帯に必要な避難場所 の収容力に関する分析

—域内避難・広域避難の双方を考慮して—

Study on Necessary Capacity of Evacuation Centers in Koto Delta Area  
during Metropolitan Large-scale Flood

-Considering both Inland Evacuation and Wide-area Evacuation-

牧之段 浩平<sup>1</sup>, 藤生 慎<sup>2</sup>, 大原 美保<sup>3</sup>

Kohei MAKINODAN<sup>1</sup>, Makoto FUJIU and Miho OHARA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>元・東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻修士課程

Master Course, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup>東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

<sup>3</sup>東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター／東京大学生産技術研究所

Center for Integrated Disaster Information Research(CIDIR), Interfaculty Initiative in Information Studies,  
／Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

In recent years, it is reported that the Koto Delta Area in Tokyo including areas whose elevation are lower than sea level has the risk of large-scale flood. In this paper, considering both inland and wide-area evacuation, we estimated the number of people who should evacuate to evacuation centers using GIS data of flood, population distribution and building inventory. And then, we evaluated the capacity in each area and the possible use of existing buildings as additional evacuate centers. Finally, we discussed necessary approaches to prepare appropriate evacuation centers.

**Keywords:** flood, risk analysis, evacuation, evacuation center, GIS

## 1. はじめに

江東デルタ地帯は東京都東部に位置し、墨田区・江東区の全域および江戸川区の一部が含まれる。全域での昼間人口は約80万人、夜間人口は約70万人である。この地域は、東に荒川、西に隅田川、南に東京湾と水に囲まれており、図1<sup>1)</sup>に示した通り、海拔ゼロメートル地帯が広がっているため、大規模水害の危険性が指摘されている。内閣府中央防災会議の「大規模水害対策に関する専門調査会」では、荒川が氾濫したと仮定し、江東デルタ地帯が水害に見舞われた場合の状況をシミュレーションしている<sup>2)</sup>。本シミュレーションでは200年に1度の確率で発生する降雨量を想定し、8ケースの排水状況と3パターンの事前避難率(0%, 40%, 80%)を条件として、死者数と孤立者数を算出している。これによれば、最大ケースでの死者約は3,500人、直後の孤立者は約73万人にのぼり、被害は極めて甚大である。排水施設が稼働するケースでは1週間後には孤立者0人となるが、排水施設が稼働しない最悪のケースでは4週間経過後も孤立者数は約70万人と変わらず、長期に渡る社会的影響が懸念される。大規模水害発生後の被害を最小限に抑えるための具体的な対策の計画・実施は緊急の課題である。

大規模水害による被害軽減策としては、氾濫水到達地

域外への広域避難が有効と考えられ、「大規模水害対策に関する専門調査会」においても検討されている<sup>2)</sup>。また、桑沢・片田ら<sup>3)</sup>は、東京都江戸川区において、自動車や徒歩で区内の避難場所に避難を行う際のシミュレーションを行い、道路渋滞や避難施設の容量超過などの都市特有の問題を明らかにした。一方、宮川・加藤<sup>4)</sup>は、東京都葛飾区において、鉄道を用いた広域避難の所要時間に関する分析を行っている。しかし、避難勧告・指示の発令の遅れや、交通網の混雑により、地域外への広域避難が困難な場合も想定されるため、広域避難の計画とともに、事前の広域避難ができない場合の緊急的な域内避難の計画立案や避難場所の確保についても十分に検討しておく必要があると考える。

そこで本研究は、洪水氾濫シミュレーション・人口および建物分布のGISデータを用いて、首都圏大規模水害時に江東デルタ地帯において必要とされる避難場所の収容力に関する分析を行った。まずは、江東デルタ地帯内のみでの避難を想定し、避難場所が不足／充足する地域を把握した。また、収容力を増やすためにその他の公共建物や民間建物を活用した場合の収容力増大効果の分析も行った。次に、江東デルタ地帯外への広域避難も行う場合も想定し、気象条件に基づく交通機関の運行条件や災害時要援護者の歩行可能範囲を踏まえた上で、いくつ

かのケースにおいて避難場所における避難者の収容状況についての分析を行った。最後に、避難場所を増強する際の留意すべき事項の検討も行った。

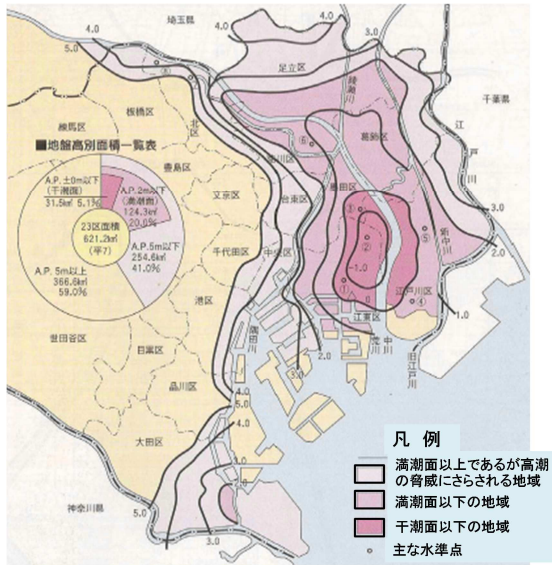


図1 江東デルタ地帯周辺の海拔高度<sup>1)</sup>

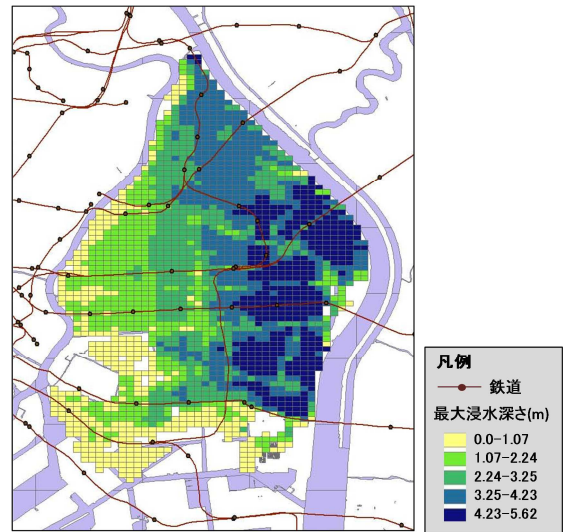


図2 荒川破堤時の江東デルタ地帯内の最大浸水深さ

対して構造（木造・非木造）、階数、用途（住居・公共建物など）、延床面積などの属性が入力されたポリゴンデータである。避難経路としては、ESRIジャパン株式会社によるArcGISデータコレクションプレミアムシリーズ道路網（東京都版）<sup>10)</sup>を用いた。

## 2. 避難場所の収容力に関する分析方法

### (1) 用いたデータ

本研究では、江東デルタ地帯全域を対象とし、洪水氾濫シミュレーション・人口および建物分布のGISデータを用いて、大規模水害時の避難場所の収容力に関する分析を行う。洪水氾濫シミュレーションデータ<sup>5)</sup>としては、国土交通省が荒川水系の浸水想定区域図作成の際に行った、荒川下流右岸10km地点が破堤した場合の氾濫解析結果のデータを用いた。これらは、125mメッシュでの最大浸水深さ、流体力のデータである。浸水想定区域図作成に設定されたいくつかの破堤点のうち、荒川下流右岸10km地点からの破堤は、江東デルタ地帯に対して最も広域に渡る浸水をもたらすシナリオであるため、本研究で対象としている。地帯内の最大浸水深さは図2の通りであり、最大深さは5.62mである。人口データとしては、東京都総務局による町丁目単位の夜間人口データ<sup>6)</sup>を用いた。災害時要援護者に関しては、町丁目ごとの人口データを入手することができなかつたため、東京都内の総人口に対する災害時要援護者の人口比<sup>7・8)</sup>を用いて、人数の算出を行うこととする。用いた人口比は表1に示す通りである。建物のGISデータとしては、東京都建物現況調査による1棟ごとのデータ<sup>9)</sup>を用いた。これは、各建物に

### (2) 要避難者の定義

本研究ではまず、建物の全ての階が浸水するか、倒壊・流出する場合に、居住建物外への避難が必要になると考える。佐藤ら<sup>11)</sup>、河田・中川<sup>12)</sup>によれば、氾濫水による建物被害は流体力との相関が高い。佐藤らの調査結果によれば、流体力が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ 未満では建物に被害が生じる可能性は低いが、 $1.5\sim 2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ の場合に木造家屋に少なからず被害が生じる。また、流体力が $2.5\sim 20\text{m}^3/\text{s}^2$ の場合には木造建物に居住が困難な程の被害が生じ、 $20\text{m}^3/\text{s}^2$ 以上で木造建物の流失の可能性がある。よって、氾濫シミュレーションと建物のGISデータを重ね合わせ、建物立地点の流体力が $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ の場合、その建物を「要避難」と定義する。

また、建物の全ての階が浸水せず、氾濫水による流失や倒壊の恐れがない場合、屋外にある自治体指定の避難場所等に避難する行動は、移動中の危険性から考えて適切ではない。近年、自治体による洪水ハザードマップでも、浸水深さに応じて建物内避難を行うように示唆されている。よって、これらの建物以外で、全ての階が浸水せず、浸水しない階がある場合には、避難場所へは避難せず建物内の上層階に避難するものとする。浸水想定区域図作成マニュアル<sup>13)</sup>に基づき、浸水深さが4.0mとなる4階建ての建物の場合には、3階および4階に避難可能であるため、この建物の居住者は「要避難者」としてカウントされない。一方で、建物立地点の浸水深さが0.5~2.0mの場合、平屋建ては「要避難」となる。また、浸水深さが2.0~5.0mの場合に2階建ては「要避難」となり、浸水深さが5.0~6.0mの場合に3階建ては「要避難」となる。

### (3) 域内避難／広域避難の前提条件

「要避難」の場合、江東デルタ地帯内での「域内避難」と江東デルタ地帯外への「広域避難」の双方がありうる。本章および次章においては、まずは「域内避難」のみを行う場合を想定する。「域内避難」での避難先としては、

表1 災害時要援護者の人口比

災害時要援護者タイプ		歩行の可否	人口比率
障害者	視覚障害者	簡単な助けが必要	0.3
	聴覚障害者	自力で歩ける	0.34
	言語障害者	自力で歩ける	0.05
	肢体不自由者	車椅子等を用いた助けが必要	1.89
	内部障害者	車椅子等を用いた助けが必要	0.92
	難病・特定疾患患者	車椅子等を用いた助けが必要	0.74
	知的障害者	簡単な助けが必要	0.53
	精神障害者	自力で歩ける	0.47
高齢者	一人暮らしの高齢者、高齢者夫婦のみの高齢者	自力で歩ける	12.88
	認知症高齢者	簡単な助けが必要	2.19
	要介護高齢者	車椅子等を用いた助けが必要	3.33
	乳幼児	簡単な助けが必要	4.08

自治体が指定する避難場所がある。江東デルタ地帯には、東京都墨田区および江東区の全域、江戸川区の一部が含まれる。江東デルタ北部に位置する墨田区では、区内の小中学校42校を「水害時避難場所」に指定し、墨田区ハザードマップ<sup>14)</sup>に記載している。江東デルタ南部に位置する江東区や中部に位置する江戸川区では、「水害時避難場所」という名称は用いず、「避難場所」としての指定を行っている。江東区ハザードマップ<sup>15)</sup>によれば、江東区内の避難場所は小中学校63校箇所および公共建物19箇所である。江戸川区ハザードマップ<sup>16)</sup>によれば、江東デルタ地帯に位置する避難場所は、小中学校10校である。本研究では、これらの134箇所を「水害時避難場所」とみなす。

#### (4) 避難場所の収容力の分析方法

分析の流れを図3に示す。まず、氾濫シミュレーションデータと建物データから、前節で述べた定義に従い、「要避難」となる建物の選別を行う。また、町丁目単位の人口を、各建物の延床面積を用いて建物ごとに按分することで、「要避難」の建物内にいる要避難者数を算出する。建物現況調査データには、戸建・集合住宅という区別がないため、集合住宅の場合に共用部を差し引いて各世帯の住居部分のみに人口を按分することはできていない。しかし、延床面積に応じて建物内人口を算出することにより、結果的には、大規模マンションには戸建住宅よりも多くの人口が割り当てられることとなる。(1)節で述べた通り、災害時要援護者数は町丁目単位の人口に表1に示す人口比を乗じて算出し、これらを各建物に按分することで求めた。このため、本分析では、町丁目ごとの要援護者の分布の差異までは考慮はできておらず、対象地域内での一様な分布を仮定している。

域内避難に際しては、要避難者は道路ネットワーク上で最も直近の避難先に避難するものとする。具体的には、道路距離を基に各母点間の勢力圏を決定するネットワークボロノイ分割という手法を用いて、各水害時避難場所を母点とする勢力圏を推定し、その勢力圏内に含まれる「要避難者」をそれぞれの水害時避難場所への避難者としてカウントする。ネットワークボロノイ図作成にあたっては、東京大学で開発されたソフトウェア「SANET(A Spatial Analysis on a Networks)」<sup>17)</sup>を使用する。図4は、水害時避難場所を母点としたネットワークボロノイ図である。各水害時避難場所の勢力圏に含まれる道路網は、それぞれ異なる色で着色されている。

以上の手順により算出した各水害時避難場所への要避難者数を、既存の水害時避難場所の「収容可能人数」と比較することにより、避難場所が充足／不足する地域を把握する。なお、災害時要援護者が広域避難および域内避難する際には、付添の健常者1名も行動をとると仮定し、避難場所へ避難する人数を算出する。各避難場所の収容可能人数は区の地域防災計画により記載されているが、これは施設の全階が使用可能な状況下での収容可能人数であるため、水害時にそのまま適用できる値ではない。そこで、「収容可能人数」は、浸水深さに応じて水害時に使用不可能となる階と体育館分を除いた延べ床面積に基づき、2人/3.3m<sup>2</sup>および1人/1m<sup>2</sup>という2パターンの収容密度を用いて算出する。

さらに、避難場所が不足する地域に対しては、非木造かつ3階建て以上のその他の公共建物や事業所・集合住宅などの民間建物を活用した場合の「収容可能人数」も算出し、収容力の増大効果の分析も行う。なお、民間建

物では、外部者が避難できる空間は事業所の会議室やマンションの共用部・廊下などと限られているため、利用可能な面積は浸水しない階の床面積の10%とする<sup>4)</sup>。

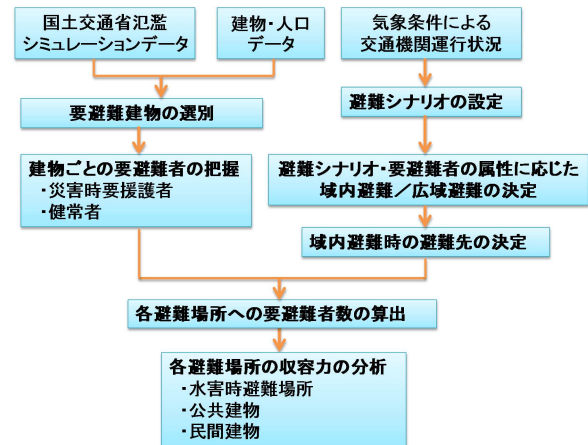


図3 研究の流れ



●: 母点 = 水害時避難場所

図4 ネットワークボロノイ図の例

### 3. 域内避難を行う場合の避難場所の収容力の分析

本章では、域内避難のみを行う場合（以後「CASE1」とする）の避難場所の収容力の分析結果を記す。対象地域の総人口は703,614人である。表1に示した定義によれば、地域内の健常者は515,653人、災害時要援護者は187,961人となった。災害時要援護者のうち自力で歩ける者は93,355人、簡単な助けが必要だが歩行可能な者は46,197人、車椅子等を用いた助けが必要な者が52,080人となった。2章(2)に示した「要避難」の定義に従い、域内避難する要避難者数を算出したところ、123,945人となり、総人口の17.62%に相当した。内訳は健常者71,865人、災害時要援護者および付添者52,080人である。

#### (1) 水害時避難場所のみを用いた場合

ここで、まずは域内避難に際して、要避難者の全てが前述した水害時避難場所に避難する場合を想定する。水害時避難場所134か所について、2章(4)節で述べた「収容可能人数」の定義に従い、浸水しない階の延べ床面積に基づき、2人/3.3m<sup>2</sup>および1人/1m<sup>2</sup>という2パターンの収容密度を用いて収容可能な人数を算出した。全ての水害時避難場所の合計収容可能人数は、2人/3.3m<sup>2</sup>の場合に

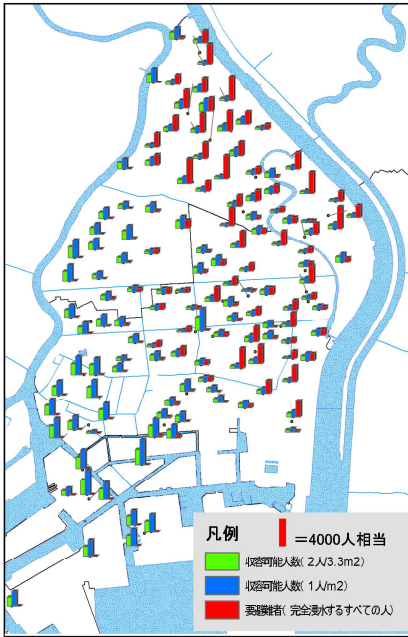


図5 各水害時避難場所への要避難者数

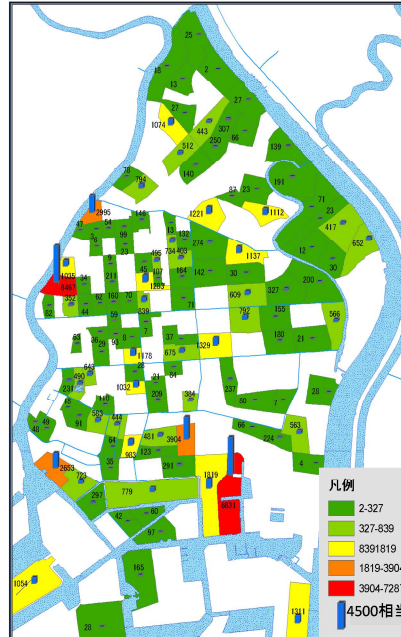


図6 その他の公共建物の収容可能と収容可能人数 (CASE1)

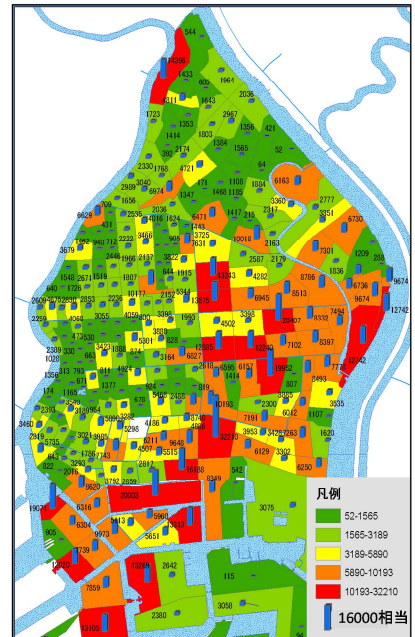


図8 民間建物の収容可能人数

95,748人, 1人/1m<sup>2</sup>の場合に157,977人となった。各水害時避難場所の平均収容可能人数は, 各パターンでそれぞれ715人, 1179人となった。

前章で述べた方法に従い, 水害時避難場所を母点としてネットワークボロノイ分割を行い, 各水害時避難場所を母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数を集計し, 各水害時避難場所への避難者とした。図5は, この結果を図示したものであり, 各水害時避難場所ごとの要避難者数と収容可能人数が棒グラフで表されている。これより, 江東デルタ地帯東部の荒川沿いの広い地域において, 各水害時避難場所への要避難者が収容可能人数を大幅に上回ることがわかる。最も多くの要避難者が集まるのは, 墨田区立押上小学校であり, 要避難者数は3,797人である。押上小学校は4階中2階まで浸水するため, 1人/1m<sup>2</sup>での収容可能人数は968人である。収容可能人数に対する要避難者数の倍率は3.92倍となり, 現実的には避難が難しい状況が想定される。

(2) その他の公共建物も活用した場合

次に, 水害時避難場所に加えて, 水害時避難場所に指定されていないその他の公共建物も避難場所として活用した場合の分析も行った。なお, これらの公共建物は自治体により指定された避難場所ではないため, あくまで仮定の上での検討である。本研究で用いている東京都建物現況調査データのうち, 官公庁施設, 教育施設, 文化施設を抽出し, 既に水害時避難場所に指定されていない非木造・3階建以上の全階が浸水しない建物を「その他の公共建物」とした。例えば, 都立高等学校, 区民会館, 区役所, 図書館などが含まれる。対象地域内には, 避難先となりうる237棟のその他の公共建物が存在した。

図6は, 各町丁目におけるその他の公共建物の収容可能人数を図示したものである。1m<sup>2</sup>あたり1人を収容した場合を示しており, 5段階での自然分類の結果に基づいて, 各町丁目に色づけを行った。この図より, その他の公共建物の立地にはばらつきがあり, その他の公共建物が存

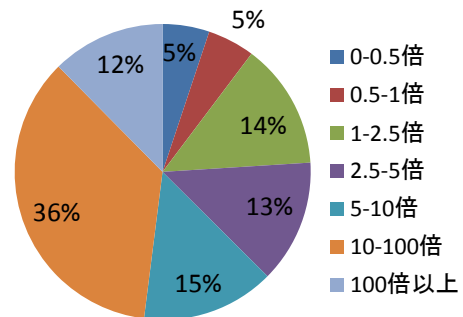


図7 その他の公共建物も用いた場合の空間利用率

在しない町丁目があることがわかる。また, 図中では赤色で示した2つの町丁目収容可能人数が6,000人を超えているが, 約半数は300人以下であり, 収容力を増大させる効果は一部の地域に限られることもわかる。

水害時避難場所およびその他の公共建物を母点として再度ネットワークボロノイ分割を行い, これらを母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数に基づいて, これらの建物への避難者数を算出した。ここで, 各地域内に立地する建物の浸水しない床面積に対して, 何倍の床面積を活用すれば全ての要避難者を収容することができるかを, 「空間利用率」として定義した。つまり, 空間利用率が1倍以下の場合, 立地する建物の浸水しない床面積を活用すれば全ての人を収容できることを意味する。図7は, 水害時避難場所およびその他の公共建物をあわせた371建物の空間利用率の割合を示したものである。全建物132棟の89.9%で空間利用率が1倍を上回っており, 10~100倍が35.6%と最も多かった。その他の公共建物を活用しても, 多くの地域において十分な収容力を得ることが現実的には難しいことがわかる。

(3) 民間の事業所・集合住宅建物も活用した場合

また, 水害時避難場所およびその他の公共建物に加えて, 事業所・集合住宅などの民間建物も避難場所として

活用した場合の分析も行った。東京都建物現況調査データのうち、集合住宅・事業所建築物を抽出した。対象地域内に存在する非木造3階建て以上の事業所は3096棟、集合住宅は8112棟である。なお、東京都建物現況調査データ上では民間の集合住宅と都営・区営の集合住宅を区別することができないため、都営の集合住宅は本節で扱う建物に含めることとした。

図8は、各町丁目における民間の事業所・集合住宅建物の収容可能人数を図示したものである。1㎡あたり1人を収容した場合を示しており、5段階での自然分類の結果に基づいて、各町丁目に色づけを行った。本研究で扱う氾濫シミュレーションでの破堤点である江東デルタ北端部にはこれらの建物が少ない。民間の事業所・集合住宅は全町丁目に存在するが、江東デルタ東南部および西南端部に集中していることがわかる。

水害時避難場所、その他の公共建物、民間の事業所・集合住宅という全ての建物を母点として再度ネットワークボロノイ分割を行い、これらを母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数に基づいて、これらの建物への避難者数を算出した。図9は、これらの全建物の空間利用率の割合を示したものである。空間利用率が1倍を下回る建物が38.4%となり、最も建物数が大きくなる空間利用率は0-0.5倍となった。民間建物も活用することにより、空間利用率が著しく高い避難先を減らすことができた。しかし、依然として空間利用率が10倍を超える建物が1000棟以上(15.1%に相当)存在しており、広域避難を行わない場合には全ての避難者を収容することは現実的に難しいことも明らかとなった。

なお、本研究で用いたネットワークボロノイ分割では、地域住民を最も近い避難先に避難させることを前提として、建物に対する要避難者を算出した。ここでは、危険性が切迫し、周辺の空いている避難先を探して移動するなどの迂回行動を行う時間的余裕がない場合を想定して、最も近い避難先に避難するものとした。避難情報が早めに発表され、避難に時間的余裕がある場合には、最も近い避難先以外への避難も行われ、避難者が分散する可能性もありえる。

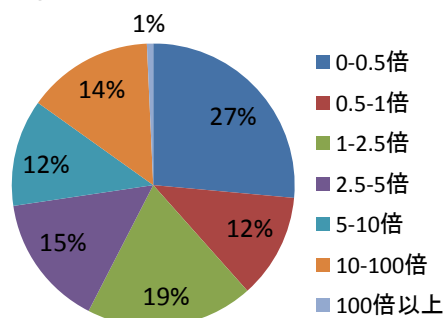


図9 民間建物も用いた場合の空間利用率

#### 4. 域外避難も行う場合の避難場所の収容力の分析

##### (1) 広域避難の前提条件

前章では域内避難に限定していたが、本章では江東デルタ地帯の外に避難する「広域避難」も行う場合を想定する。広域避難の手段としては、徒歩、鉄道、自動車などが考えられる。大規模水害時には、自動車による避難は渋滞発生の観点から現実的でない。特に、江東デルタ地帯では橋梁部での道路渋滞が懸念されるため、実際に

浸水前に自動車により避難できる人数は限定的であると考えられる。鉄道による避難は、豪雨時の運行可能性に課題が残るものの、短時間における広域への大量輸送が可能である。そこで本研究では、江東デルタ地帯外への広域避難の手段としては鉄道のみを仮定する。

ただし、鉄道での広域避難者は、気象条件に応じて鉄道の運行が可能な際に駅まで到達可能な人々に限られる。よって、気象条件による鉄道の運行状況に基づいて、広域避難の可否が異なる複数の避難シナリオを設定する。また、鉄道が運行していたとしても、駅が著しく遠い場合や自力での歩行が困難な災害時要援護者(表1)の場合は、広域避難が不可能である。よって、本研究では、災害時要援護者の定義<sup>18)</sup>に基づき、障害者・高齢者等を、「自力で歩行可能な人」、「簡単な助けがあれば歩行可能な人」、「車いす等を使用しなければ移動は困難な人」という3種類に分類し、広域避難の可否を判定する。これらの健常者および災害時要援護者が駅に到達して広域避難できるかどうかは、交通需要予測手法の一つである駅アクセス交通関選択モデル<sup>19)</sup>を用いて判定する。

##### (2) 鉄道の運行状況に基づく避難シナリオ設定

既存の文献<sup>20・21)</sup>の整理と事業者へのインタビューによれば、JR、私鉄(東武鉄道、京成電鉄)、地下鉄(都営地下鉄、東京メトロ)は、一定量以上の強風または豪雨時に運行停止する運行規則を有する。これらを参考に、鉄道の運行状況の異なる6つのシナリオを設定する。各シナリオの詳細を表2に記す。CASE1は前章で結果を述べた「域内避難のみを行う場合」である。この他、CASE2は全鉄道が運行し全ての駅が利用可能な場合、CASE3は、強風によりJRと私鉄が運行停止するものの、地下鉄のみが運行する場合とする。ただし、橋梁部分は通行不可能とし、それ以外の区間で折り返し運転するものとする。CASE4は、全ての鉄道が運行しているものの、強風により橋梁部分は通行ができず、それ以外の区域で折り返し運転をしているものとする。CASE5は、JRは運行停止するものの地下鉄と私鉄は運行する場合とし、CASE6は地下鉄のみが利用可能な場合とする。例えば、CASE5は時間雨量が40mm/hの場合に相当し、CASE6は時間雨量が60mm/hに相当する。私鉄の京成電鉄は時間雨量60mm以上で運行停止するため、CASE6では運行停止する。東京メトロには強風時の運行停止規則があるが、降雨による運行停止規制がないため、CASE6は橋梁部分も含めて地下鉄が運行可能とする。

図10に、表2に示したCASE1~6の際に利用可能な駅の位置を赤丸で示す。

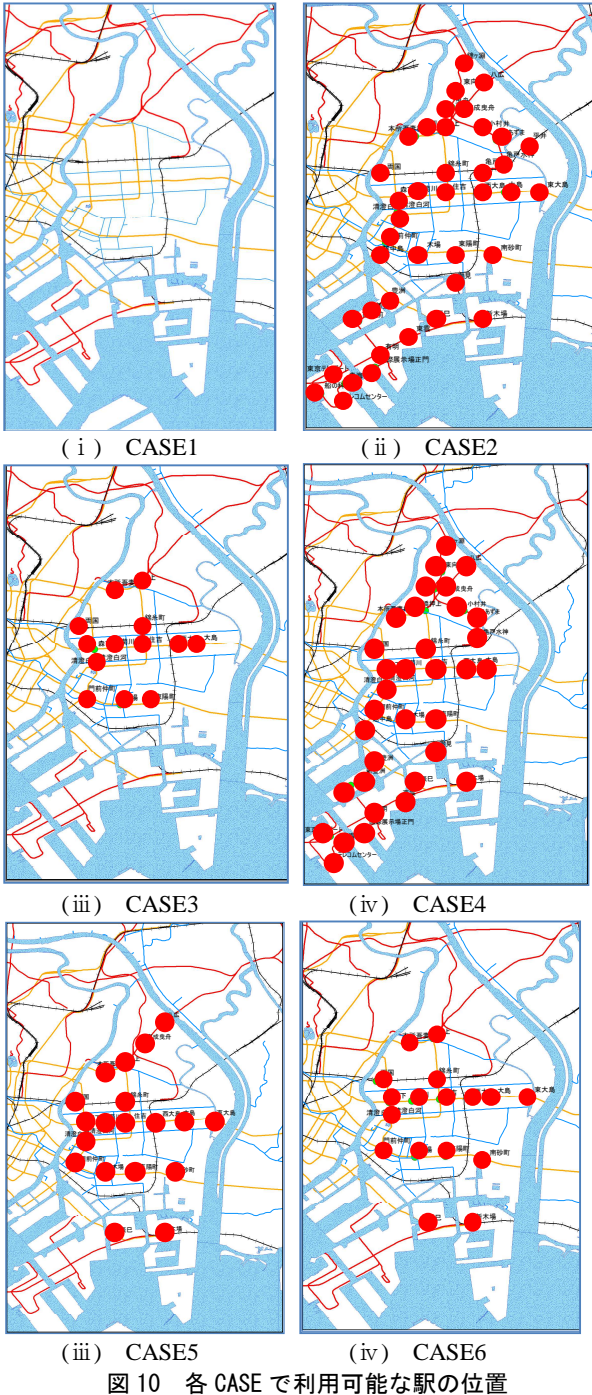
##### (3) 駅勢力圏に基づく広域避難可能エリアの推定

前述の通り、健常者および災害時要援護者が駅に到達して広域避難できるかどうかは、交通需要予測手法の一つである駅アクセス交通関選択モデル<sup>19)</sup>を用いて判定する。駅アクセス交通関選択モデルとは、東京都市圏パーソントリップ調査に基づいて駅までの交通関選択確率を算出し、駅までの交通手段を予測するモデルである。このモデルにより、各駅を中心とした、その駅の平常時の利用者の範囲である「駅勢力圏」を求めることができる。一般に、徒歩による選択確率が65%以上となる範囲が、その駅の「駅勢力圏」と定義される。本研究では、各駅の駅勢力圏内に存在する住民は鉄道による広域避難が可能であり、駅勢力圏外に存在する住民は域内避難のみを行い、近隣の避難場所に避難することとする。

表 2 天候と鉄道運行状況の関係

ケース	気象条件	利用可能な 駅数	鉄道運行状況		
			JR	地下鉄	私鉄
CASE1	-	0	×	×	×
CASE2	-	40	○	○	○
CASE3	瞬間最大風速25km/s	13	×	△	×
CASE4	瞬間最大風速25km/s	35	△	△	△
CASE5	時間雨量40mm/h	19	×	○	○
CASE6	時間雨量60mm/h	17	×	○	×

注) △は橋梁部以外の運行を示す



以下に、駅勢圏に基づく広域避難可能エリアの推定方法を述べる。式[1]は、駅アクセス交通関選択モデル<sup>19)</sup>による駅までの交通機関選択確率の算出式である。式[1]のうち、各交通機関を利用した場合の時間  $T_i$  および費用

$C_i$  は、それぞれ式[2]～[9]までの式で求める。各種のパラメータとしては、文献19に記載された値を用いる。これにより、二輪車の速度には都内の平均平均旅行速度 9.6km/h、乗用車およびバスの速度には都内の平均平均旅行速度 18.8km/h、交通時間価値には 42.3円/min を用いる。式[9]に示したバス利用時の費用には、都バスの23区内均一運賃200円を用いた。歩行速度は健常者および災害時要援護者に応じて様々である。よって、式[2]中の歩行速度  $Vel_w$  は、津波避難計画立案時の歩行速度<sup>22)</sup>を参考に、健常者では 80m/s、表1に示した自力で歩ける災害時要援護者では 66m/s、助けが必要な災害時要援護者では 48m/s とする。また、車椅子等が必要な災害時要援護者は広域避難が難しいことから、歩行速度 0m/s とする。式[1]における各説明変数にかかるパラメータ  $\alpha$  としては、表3に掲載した値<sup>19)</sup>を用いる。文献19では、通勤・通学・私事などの行動別パラメータ値が推奨されているが、ここでは表3に示す通勤時のパラメータを用いることとする。

以上の式およびパラメータを用いて、徒歩の選択確率  $P_w = 0.65$  となる直線距離  $D$  を算出した。この  $D$  がそなわち、駅勢圏の半径となる。計算にはソフトウェア mathematica<sup>23)</sup>を用いた。この結果、駅勢圏の半径は、健常者で 1,091m、表1に示した自力で災害時要援護者で 798m、助けが必要な災害時要援護者で 502m となった。なお、車椅子等が必要な災害時要援護者は 0m である。

図 11 に、表 2 に示す CASE2 での各避難者の駅勢圏を示す。図中で、駅を中心として着色した領域（バッファ）が駅勢圏に相当する。駅勢圏に存在する住民は、鉄道を利用した広域避難が可能であるが、駅勢圏に含まれない無着色領域の住民は広域避難ができない。特に、助けが必要な災害時要援護者の場合、広域避難できずに域内避難をせざるを得ない地域が広く存在することがわかる。

$$P_i = \frac{\exp(V_i)}{\exp(V_w) + \exp(V_c) + \exp(V_p) + \exp(V_k) + \exp(V_b)} \quad [1]$$

$$V_i = \alpha_0 + \alpha_1 T_i + \alpha_2 C_i + \dots$$

ただし、 $i$ : 各交通機関を示す ( $i=W$ ...徒歩,  $i=C$ ...二輪,

$i=P$ ...乗用車運転,  $i=K$ ...乗用車送迎,  $i=B$ ...バス)

$P_i$ : 交通機関の選択確率

$\exp$ : 自然対数

$V_i$ : 交通機関を利用した場合の効用

$T_i, C_i$ : 交通機関を利用した場合の時間 ( $T_i$ ), 費用 ( $C_i$ )

$\alpha$ : 効用を計算する際に各説明変数 ( $T_i, C_i, \dots$ ) にかかるパラメータ

$$\text{徒歩: } T_w = D[m] / Vel_w[m/min] \quad \dots [2]$$

$$C_w = T_w \times 42.3[\text{円}/\text{min}] \quad \dots [3]$$

$$\text{乗用車: } T_p = D[m] / 18.8[\text{km}/\text{h}] \quad \dots [4]$$

$$C_p = T_p \times 42.3[\text{円}/\text{min}] \quad \dots [5]$$

$$\text{二輪車: } T_c = D[m] / 9.6[\text{km}/\text{h}] \quad \dots [6]$$

$$C_c = T_c \times 42.3[\text{円}/\text{min}] \quad \dots [7]$$

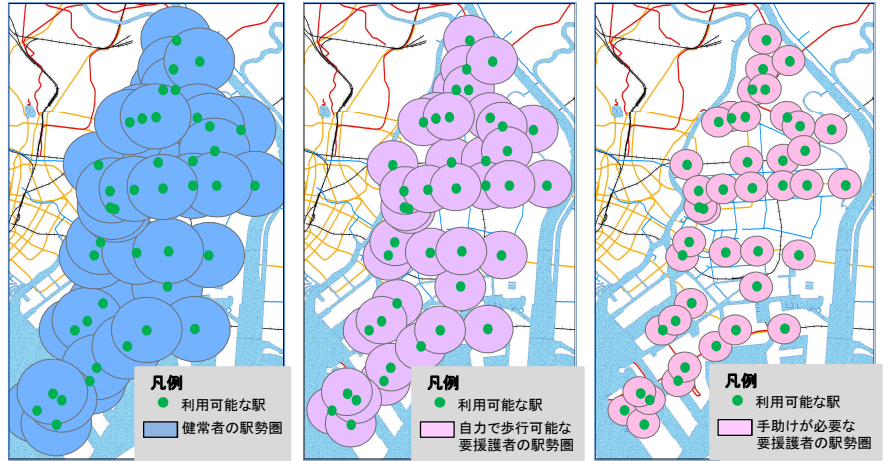
$$\text{バス: } T_b = D[m] / 18.8[\text{km}/\text{h}] \quad \dots [8]$$

$$C_b = 200[\text{円}] + T_b \times 42.3[\text{円}/\text{min}] \quad \dots [9]$$

$Vel_w$ : 徒歩の場合の歩行速度,  $D$ : 駅からの直線距離

表3 式[1]のパラメータ $\alpha$ に用いた値

項目		値
時間(分)にかかるパラメータ	徒歩	-0.191
	二輪車	-0.177
	乗用車(送迎)	-0.239
	バス	-0.121
費用(円)にかかるパラメータ		-0.00181
定数	徒歩	4.97
	二輪車	2.22
	乗用車(送迎)	-2.33



(i)健康者 (ii)自力で歩ける者 (iii)簡単な助けが必要な者  
図11 CASE2での駅勢圏

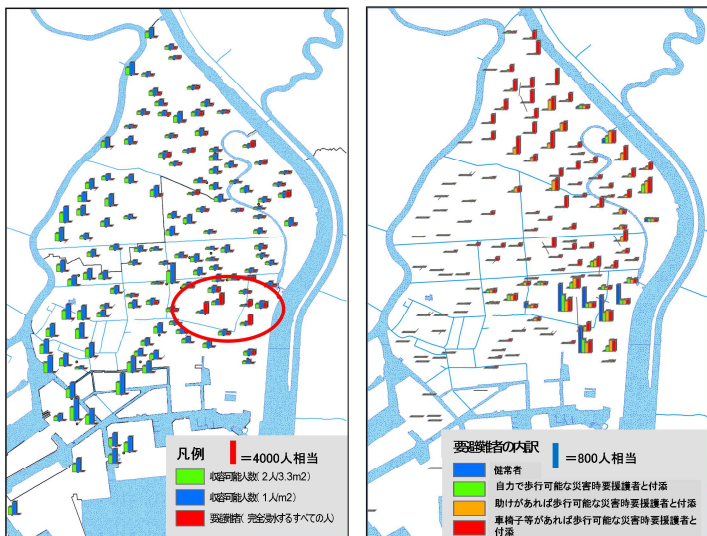


図12 CASE2での水害時避難場所への要避難者数と収容可能人数

図13 CASE2の要避難者内訳

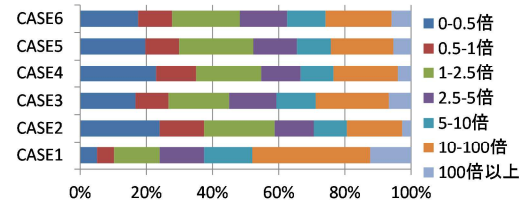


図14 公共建物も活用した場合の空間利用率の比較

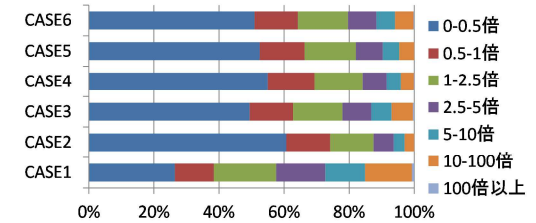


図15 民間建物も活用した場合の空間利用率の比較

表4 各CASEにおける域内避難する要避難者数

ケース	域内避難する要避難者数			域内避難する要避難者の総人口に対する割合(%)
	合計	内訳: 健康者	災害時要援護者および付添者	
CASE1	123,945	71,865	52,080	17.62
CASE2	31,950	4,124	27,826	4.54
CASE3	87,467	41,976	45,491	12.43
CASE4	45,724	14,060	31,664	6.50
CASE5	58,797	21,344	37,452	8.36
CASE6	81,762	37,256	44,506	11.62

(4) 各CASEでの水害時避難場所への要避難者の算出

各CASEにおいて前節で述べた駅勢圏内に存在する住民は鉄道を利用した広域避難を行い、駅勢圏外に存在する住民が域内避難のみを行うものとして、水害時避難場所への要避難者数の算出を行った。対象地域の総人口は703,614人である。このうち、各CASEにおいて域内避難する要避難者数は表4の通りとなった。CASE2は全ての鉄道が運行し、鉄道による広域避難が可能な場合であるため、域内避難する要避難者数は最も少ない。この場合、駅が遠い地域の人々や、要介護者高齢者などの車椅子等を用いた助けが必要な人々が広域避難ができないため、

域内避難を行っており、総人口に対する割合は4.54%に相当する。

まず、広域避難できずに域内避難を行う住民は全て水害時避難場所へ避難するものとして、各水害時避難場所への避難者数を算出した。3章で述べた「域内避難のみ」の手法と同様に、水害時避難場所を母点としてネットワークボロノイ分割を行い、各水害時避難場所を母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数を集計し、各水害時避難場所への避難者とした。図12はCASE2の結果を図示したものであり、各水害時避難場所ごとの要避難者数と収容可能人数が棒グラフで表されている。CASE2では、全ての鉄道による広域避難が可能であるため、要避難者が収容可能人数を上回る水害時避難場所は少ない。ただし、図中で赤丸で示した江東区立砂町小学校、砂町文化センター、第二砂町小学校周辺では、駅がないため広域避難ができず、域内避難するしかない要避難者が水害時避難場所に集中し、収容可能人数を大幅に上回っている。これらの3ヵ所の水害時避難場所への要避難者数はそれぞれ2,049人、1,881人、1,759人である。これに対し、これらの建物は2階まで浸水し、1人/1m<sup>2</sup>として3階以上に収容可能な人数はそれぞれ579人、810人、484人と

なり、現実的には全ての要避難者の収容が難しい状況となる。これらの地域は、図 11 に示した駅勢圏の図のうち、各駅を中心とする駅勢圏に含まれない地域に相当する。このため、健常者でも駅に到達するのが難しく、要援護者の場合はさらに困難となる。図 13 は、水害時避難場所への要避難者の内訳を示したものであり、青い棒グラフは健常者を示す。これらの地域では、多数の健常者が広域避難できずに水害時避難場所に避難を余儀なくされていることがわかる。一方で、これらの地域以外では、浸水によって要避難となる地域でも、駅に到達できる人々は広域避難するため、結果的に水害時避難場所には災害時要援護者とその付添のみが集まることがわかる。

### (5) その他の公共建物も活用した場合

続いて、水害時避難場所に加えて、その他の公共建物 237 棟も避難先とした。水害時避難場所およびその他の公共建物を母点として再度ネットワークボロノイ分割を行い、これらを母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数に基づいて、これらの建物への避難者数を算出した。図 14 は、各 CASE におけるこれらの建物の空間利用率を比較したものである。広域避難を行う CASE2~6 では、城内避難のみの CASE1 と比較して、空間利用率が 10 倍を超える建物が減り、空間利用率が 1 倍未満の建物が増えた。しかし、CASE2~6 では、空間利用率が 10 倍未満の建物の割合は 3 割前後に留まっている。

### (6) 民間の事業所・集合住宅建物も活用した場合

最後に、水害時避難場所およびその他の公共建物に加えて、事業所・集合住宅などの民間建物も避難先とした。水害時避難場所、その他の公共建物、民間の事業所・集合住宅という全ての建物を母点として再度ネットワークボロノイ分割を行い、これらを母点とする勢力圏内に含まれる要避難者数に基づいて、これらの建物への避難者数を算出した。図 15 は、各 CASE におけるこれらの全建物の空間利用率を比較したものである。民間の事業所・集合住宅を活用することで、広域避難を行う CASE2~6 では、空間利用率が 1 倍未満の建物が約 7 割前後と増え、2.5 倍未満の建物であれば約 8 割となった。前節で述べたその他の公共建物も活用した場合に比べて、避難者の収容力が大幅に向上しており、民間の事業所・集合住宅建物を活用する意義が示された。

## 5. 鉄道による避難者輸送力の検討

前章では鉄道による広域避難を検討したが、現実的にみて、大量の避難者が迅速に広域避難を行えるかについては考察の余地がある。本章では、広域避難者の輸送にかかる所要時間の分析を行い、前章での広域避難シナリオが現実的にはどのような状況に相当するかを考察する。

広域避難時の鉄道の運行状況及び混雑状況について、表 5 に示す 4 つのパターンを想定した。都内の鉄道のラッシュ時の混雑率は多い路線で 200% を超えるが、多くの避難者は大荷物を持ったまま避難を行うことが想定されるため、混雑率 200% といった状況にはなり得ないと考える。本研究では、最大混雑率を 150% と仮定する。運行状況は、ラッシュ時並みの運行本数の場合と、終日平均の運行本数の場合の 2 通りを想定する。また事前に乗客が乗っているか否かで場合分けを行い、計 4 通りの

ケースで計算を行う。表 6 は、最大数の広域避難者が発生する CASE1 について、駅勢圏から広域避難者を駅ごとに算出し、各路線の担うべき避難者数を算出した結果と、1 時間当たりの輸送力を表している。複数駅勢圏内に存在する住民は、最近隣の駅に向かうと仮定し、各路線の担うべき避難者数を算出した。1 時間当たりの輸送力には、平成 22 年度版都市交通年報<sup>24)</sup>の最混雑時の通過人数と終日平均の通過人数を混雑率 150% の値に換算して用いた。また、鉄道は上下線とも運行すると仮定している。最終的に、事前に乗客がいる場合、終日平均の乗車人数を差し引き、各路線の 1 時間当たりの輸送力とした。

図 16 は、最大数の広域避難者が発生する CASE2 について、4 つのパターンでの避難者輸送の所要時間を表している。ラッシュ時並みの運行を行った場合、事前に乗客が乗っていたとしても、新宿線以外のすべての路線で 2 時間以内にすべての避難者を輸送可能となった。一方、終日平均の運行本数の場合、いくつかの路線では避難完了までに約 3 時間かかり、新宿線では 5 時間近くを要する結果となった。よって、前章までで設定した避難シナリオに沿って、実際に広域避難を行うには、これらの時間的猶予を伴った上での避難情報の提示が必要となる。なお、本分析では、駅までの移動に要する時間や駅までの道路の混雑は考慮しておらず、これらによる更なる所要時間の増大は考えられる。なお、迅速な広域避難の実現のためには、ラッシュ時並みの増発や事前の乗客の規制といった鉄道に関する対策と、すいている路線への避難者の誘導や駅までの渋滞等を考慮した上での避難者の誘導といった対策を行う必要があると考える。

表 5 シミュレーションの条件設定

パターン	最大混雑率	運行状況	事前の乗客の有無
1	150%	ラッシュ時並み	なし
2	150%	ラッシュ時並み	あり
3	150%	終日平均	なし
4	150%	終日平均	あり

表 6 各路線の担うべき避難者数と輸送力

路線	担うべき 避難者数	輸送力(1時間当たり)			
		パターン1	パターン2	パターン3	パターン4
浅草線	20,581	66,393	39,393	58,080	34,461
伊勢崎線	78,678	152,194	100,448	64,734	42,725
大江戸線	30,191	44,430	28,435	22,895	14,653
押上線	29,170	63,825	46,380	34,359	24,967
京葉線	20,959	82,973	40,933	37,601	18,550
新宿線	121,174	57,124	39,225	36,126	24,806
総武線(緩行)	83,412	115,588	54,712	57,258	27,102
総武線(快速)	6,766	106,127	55,186	37,294	19,393
東西線	83,262	115,511	54,675	61,858	29,279
有楽町線	14,855	102,231	61,338	45,810	27,486
ゆりかもめ	7,459	19,057	13,975	12,491	9,160
りんかい線	8,469	55,601	44,851	33,535	27,051
半蔵門線	30,285	119,350	70,814	58,080	34,461

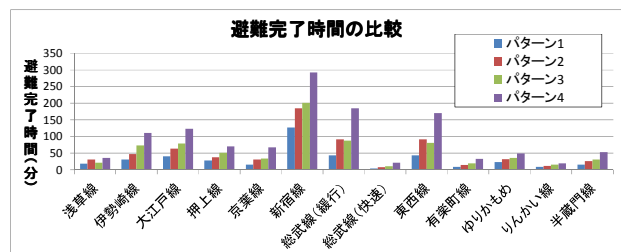


図 16 避難者輸送の所要時間



## 6. 避難場所の計画立案における留意事項

本章では、前章までの分析を踏まえて、水害時の避難場所の計画を立案する際に留意すべき事項についての考察を行う。第3章および第4章では、荒川破堤時の江東デルタ地帯においては、自治体が指定する現行の水害時避難場所では収容力が足りない点、その他の公共建物や民間の事業所や集合住宅を活用することで収容力を増大できうる点を明らかにした。

江東区は、2012年5月時点で、表8のように6つの民間事業所、3つのUR住宅と、水害時における一時避難施設としての使用に関する協定を結んでいる<sup>25)</sup>。しかし、前章での分析結果によれば、これらの事業所が位置する豊洲3丁目、新砂1丁目、東洋2丁目、大島2丁目・3丁目・4丁目・6丁目・北砂5丁目は、既存のその他の公共建物のみで全ての避難者を収容できる地域となった。これらの地域の他にも、公共建物が少なく、民間建物を活用しないと十分な収容力を提供できない地域は多数存在している。民間建物との協定を結ぶ際には、地域ごとの要避難者数と避難場所の収容力を分析し、地域ごとの優先度を考慮した上で、民間建物の活用を行う必要があると考える。

しかし、民間建物の立地には地域に応じた差異があるため、これらの地域特性を踏まえた計画の立案が重要である。民間建物を避難先として活用する必要性の地域傾向を把握するため、ここで2つの地域を例に挙げて、傾向を述べる。まずは、江戸川区立平井小学校周辺に着目する。水害時避難場所のみを避難先とした場合の江戸川区立平井小学校を母点とした勢力圏内に焦点を当て、この勢力圏内に立地する民間の事業所および集合住宅の各CASEにおける空間利用率を集計して、図17のようなレーダーチャートで表現した。平井小学校の収容可能人数は279人である。この勢力圏内には公共建物は無く、民間の事業所16棟、集合住宅128棟が位置する。この勢力圏内での要避難者は最大で5328人であるのに対し、水害時避難場所および公共建物の収容力は279人である。全ての事業所と集合住宅を活用すると収容力は5285人になる。この地域では、図17の通り、多くのCASEにおいて民間建物の床面積をほぼ全て使用しなければ十分な収容力を得られない。このような地域においては、民間建物の活用も重要ではあるが、民間建物の利用だけでは限界がある。よって、新たな避難場所の建設や隣接地域への避難誘導、鉄道を利用した広域避難が必要である。

図18は、江戸川区立小松川第一中学校を母点とした勢力圏について、図17と同様に作成したものである。小松川第一中学校の収容人数は322人であり、この勢力圏内には公共建物2棟、民間の事業所14棟、集合住宅133棟が位置する。この勢力圏内での要避難者は最大で1798人であるのに対し、水害時避難場所および公共建物の収容力は732人である。全ての事業所と集合住宅を活用すると収容力は11455人になる。この地域では、平井小学校エリアと比較して要避難人数が少なく、いずれの鉄道運行状況においても空間利用率は低い。このような特徴を持つ地域では民間建物を活用する効果が高いため、他地域よりも優先して民間建物の避難場所としての活用を進めることが効果的である。以上のように、地域の特性を踏まえたうえで、戦略的に避難計画を拡充していくことが重要である。

なお、民間建物を活用する際には、これらの民間建物

に避難者を収容できる会議室などの空間があることが前提である。また、停電時にもオートロック扉が開錠出来る事、できれば外階段があることが重要である。前章までの分析では、これらの条件は考慮せずに、存在する建物数のみで議論しているため、実際に活用する建物を決める場合は、これらの条件を考慮する必要がある。

表7 水害時における一時避難施設（江東区）<sup>25)</sup>

名称	所在地	収容可能人数
(株)IH	江東区豊洲3-1-1	200
(株)竹中工務店東京本店	江東区新砂1-1-1	100
日立公共システムエンジニアリング(株)	江東区東洋2-4-18	325
(株)LIXIL	江東区大島2-1-1	250
大島四丁目団地	江東区大島4-1	17000
大島六丁目団地	江東区大島6-1	19000
北砂五丁目団地	江東区北砂5-20	15000
日本ヒューレッド・パッカード(株)	江東区大島2-2-1	250
(株)産学協同センター	江東区大島3-1-11	150

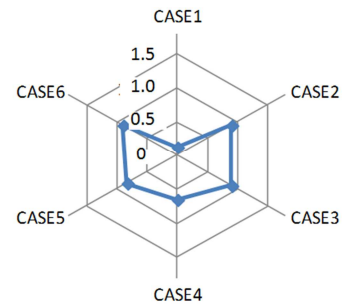


図17 各ケースの空間利用率（平井小学校周辺）

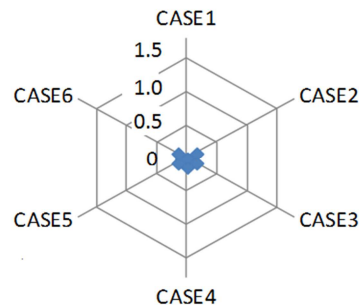


図18 各ケースの空間利用率（小松川第一中学校周辺）

## 6. 結論

本研究では、洪水氾濫シミュレーション・人口および建物分布のGISデータを用いて、首都圏大規模水害時に江東デルタ地帯において必要とされる避難場所の収容力に関する分析を行った。この際、気象条件に基づく交通機関の運行条件や災害時要援護者の歩行可能範囲を踏まえた上で、江東デルタ地帯内での避難と江東デルタ地帯外への広域避難の双方を考慮した検討を行った。この結果、以下に記す知見が得られた。

- ・域内避難者および広域避難者の人数は、気象条件および鉄道の運行状況により、大きく変動する。
- ・本研究で用いた手法によれば、江東デルタ地帯内には多数の駅が存在するものの、一部の地域では著しく駅が遠い。これらの地域では、自力での歩行が可能な災害時要援護者だけでなく、健常者も駅に到達することが困難になるため、鉄道が運行したとしても広域避難が難しく、域内避難をせざるを得ない。

- ・自治体が指定する水害時避難場所のみを避難先とした場合、域内避難のみを行う場合は、特に荒川沿いで、水害時避難場所の収容可能人数を大幅に超えた要避難者が集まり、現実的には収容が難しい。
- ・広域避難が可能な場合でも、上述した駅に遠い地域では、多数の人々が避難場所への域内避難を余儀なくされる。広域避難の効果は地域によって異なることが明らかとなった。
- ・広域避難が可能な地域でも、移動が困難な災害時要援護者と付添は域内避難をせざるを得ないため、取り残される。排水が困難となり、長期の避難生活が続く場合、これらの人々への対応も深刻な問題となりえる。
- ・避難先としてその他の公共建物を活用や民間の事業所・集合住宅を活用することで、要避難者の収容力を大幅に増大することが可能である。
- ・ただし、民間建物の立地には地域に応じた差異がある。建物の「空間利用率」の観点から見れば、いずれの状況においてもほぼ全ての民間建物を活用しなければ要避難者を収容できない地域では、民間建物の利用だけでは限界があり、避難先の新設やいち早い広域避難が必要と言える。このような地域特性を踏まえた上での計画の立案が必要と考えられる。

なお、本研究での分析は、データの制約から夜間人口に基づいた分析であり、今後は、時間帯を考慮した避難行動の検討も必要である。また、鉄道以外の自動車などの道路交通機関を使用した広域避難の検討も、より詳細な避難場所計画を検討する必要があると考える。

## 謝辞

本研究は、国土技術政策総合研究所委託研究：水害時の状況に応じた避難及び避難情報提供に関する調査研究（平成 21-23 年度）の一環として実施した。水害データに関しては国土交通省関東地方整備局荒川下流河川事務所のご協力を得た。建物データに関しては東京都都市整備局のご協力を得た。お世話になったご担当者の方々に厚く御礼を申し上げる。ここに記して、全ての関係各位に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 国土交通省ゼロメートル地帯の高潮対策検討会：我が国におけるゼロメートル地帯の高潮対策の現状，2005.
- 2) 中央防災会議大規模水害対策に関する専門調査会：荒川洪水氾濫時の人的被害想定結果(概要)，2008.
- 3) 桑沢敬行，片田敏孝：大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシミュレーション分析，日本災害情報学会第 13 回研究発表会予稿集，pp.37-42. 2011.
- 4) 加藤孝明，宮川勇二：荒川下流域の海拔ゼロメートル地帯における鉄道による広域避難の可能性の検討，生産研究 Vol.63，pp495-499，2011.
- 5) 国土交通省荒川下流河川事務所：浸水想定区域図作成検討の解析結果，2001.
- 6) 東京都総務局：町丁・字等別夜間人口（推計），2005.
- 7) 東京都福祉保健局：福祉行政・衛生行政統計月報，2011.6.
- 8) 東京都：認知症高齢者自立度分布調査，2008.
- 9) 東京都都市整備局：東京都建物現況調査データ，2001.
- 10) ESRI ジャパン株式会社：ArcGIS データコレクション プレミアムシリーズ道路網（東京都版），2010.
- 11) 佐藤智・今村文彦・首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について—8610 号台風による吉田川の場合—，水理講演会論文集，pp.331-336，1982.
- 12) 河田恵昭・中川一：三隅川の洪水災害—洪水氾濫と家屋の被害—，京都大学防災研究所年報第 27 号 B-2，pp.179-196，1984.
- 13) 国土交通省：浸水想定区域図作成マニュアル，2005.
- 14) 墨田区都市整備部土木管理課：墨田区洪水ハザードマップ - 荒川が氾濫した場合 - 2008.
- 15) 江東区土木部 水辺と緑の課：江東区洪水ハザードマップ～荒川が氾濫した場合に備えて～，2010.
- 16) 江戸川区危機管理室防災危機管理課：江戸川区洪水ハザードマップ 利根川・江戸川・荒川が氾濫した場合，2009.
- 17) 岡部篤行、奥貫恵一と SANET チーム：SANET (A Spatial Analysis on Networks (Ver.4.0))
- 18) 日本赤十字社，災害時要援護者対策ガイドライン，2006.
- 19) 国土交通省：東京圏における高速鉄道を中心とする交通網の整備に関する基本計画について—運輸政策審議会答申第 18 号—フォローアップ調査，2008.
- 20) 小林範俊，島村誠：強風警報システムの研究，JR EAST Technical Review No.03 - Spring 2003，pp.41-44，2003.
- 21) 東日本旅客鉄道株式会社：降雨災害との関連性がよい雨量指標「実行雨量」の導入について，2008.
- 22) 総務省消防庁：津波対策推進マニュアル検討報告書，2002.
- 23) ウルフラム・リサーチ社：Mathmatica ver.8.
- 24) 財団法人運輸政策研究機構：平成 22 年度版都市交通年報，2010.
- 25) 江東区危機管理室（総務部） 防災課 防災計画係：<http://www.city.koto.lg.jp/topics/2114/index.html>，2012.

(原稿受付 2013.1.13)  
(登載決定 2013.7.11)