

# 防災船着場整備による負傷者搬送への効果に関する研究

## — 東京都江東区を対象として —

竹之内 洋樹<sup>1</sup>・森田 哲夫<sup>2</sup>・藤田 慎也<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学工学部都市環境システム学科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)

<sup>2</sup>正会員 東北工業大学工学部都市マネジメント学科 (〒982-8577 仙台市太白区八木山香澄町35-1)  
E-mail:ttmorita@tohtech.ac.jp

<sup>3</sup>前橋工科大学工学部総合デザイン工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460-1)

本研究では、兵庫県南部地震以降、整備が進められている防災船着場について、数学分野のグラフ理論を用い、負傷者搬送への効果を分析することが目的である。まず、東京都江東区を対象地域とし、幹線道路ネットワークに防災船着場と水路を組み込んだグラフを作成した。次に、本研究で考案した評価指標を用い、防災船着場と水路を組み込むことで変化するグラフ構造を分析し、防災船着場整備による負傷者搬送への効果を把握した。その結果、防災船着場の整備による負傷者の病院への搬送効果を検証できた。また、負傷者搬送の観点から重要度の高い防災船着場の選定できた。

**Key Words :** traffic network, graph theory, disaster prevention, wharf for rescue ship

### 1. はじめに

#### (1) 研究の背景と目的

防災船着場とは、震災等の災害発生時において、河川や運河を物資輸送経路に利用できるよう整備された船着場のことである。東京都は、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震での水上輸送による救援活動の教訓を踏まえ、防災船着場整備計画<sup>1)</sup>を施行し、防災船着場の整備、計画を進めている。また、東京都は2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を受け、新たな首都直下地震の東京の被害想定<sup>2)</sup>を公表したが、多数の負傷者を想定したものとなっている。したがって、今後東京都内の各地域防災計画において、防災船着場の負傷者搬送への利用が検討されると考えられる。

しかし、地域防災計画における震災時の防災船着場の運用方法については、未だ不明確な点が多いことが知られている。このことについて、伊堂寺ら<sup>3)</sup>が東京都地域防災計画における水上輸送に関わる機関の役割などに関する検討を行っており、震災後の救援活動についての計画は具体的に定められていないとしている。また、現在計画されている防災船着場の多くは水上バスの停船場などを転用したものも多く、負傷者搬送など、防災的機能

を定量的に評価し整備されたものは少ない。そのため、現在計画されている防災船着場の多くは、その利用用途や利用頻度などにおいても明確な区分がなされていないと考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究では、防災船着場の負傷者搬送への効果に着目した研究を行った。また、その方法として、数学分野のグラフ理論を用いるものとした。

対象地域である東京都江東区の負傷者搬送ネットワークとして作成したグラフに、防災船着場および水路によるグラフを組み込むことで変化するグラフの構造を、グラフ理論を適用した評価指標により防災船着場の負傷者搬送への効果を評価するとともに、負傷者搬送の観点から重要度の高い防災船着場の選定を行うことが本研究の目的である。

東京都は、発表した被害想定を踏まえて、2012年11月に新しい地域防災計画<sup>4)</sup>を公表したが、計画の柱の一つとして、物流・備蓄・輸送対策の推進を掲げている。本研究を通じて、地域防災計画における水上輸送に関して示唆を得られることを期待している。

#### (2) 既存研究と本研究の位置づけ

既存研究を、土木計画学分野における災害時の負傷者

搬送に関する研究と、グラフ理論の計画系課題への応用に関する研究、防災船着場に関する研究の3点から整理するとともに、本研究の位置づけを述べる。

#### a) 災害時の負傷者搬送に関する研究

災害時等の負傷者搬送に関する、土木計画学分野における研究は、道路網評価や、施設の最適配置問題を扱ったものが多くみられる。特に、道路網評価を扱った研究では、通常時のOD交通量をもとに災害時のOD交通量を算定し、所望の搬送人数、搬送時間を得るための道路の耐震整備の優先度などを決定する手法が主流である<sup>9)</sup>。しかし、地震直後の交通流は道路網システムの損傷の他にも、搬送車等の緊急車両により非定常状態にあるため、十分な定量化をするのは困難との指摘がみられる<sup>9)</sup>。

本研究では、負傷者の搬送に船舶を用いた水上輸送を想定しているため、この指摘と合致した問題を孕んでいるものと考えられる。そこで、交通量によらない評価指標として、数学のグラフ理論を用い、水上輸送により搬送ネットワークの幾何的性質が変化することに着目した評価指標を提案した。

#### b) グラフ理論の計画系課題への応用に関する研究

グラフ理論とは、頂点と頂点間を結ぶ辺により表現される図形の諸性質を分析する数学の研究分野の一つである。グラフ理論の土木計画系課題への応用に関する研究は多数知られており、小林<sup>7)</sup>による道路網システムの信頼性への研究、古山<sup>8)</sup>による地域間ネットワークの評価指標に関する研究などにおいてその有用性が示されている。また、これらの研究を体系的に整理した森田ら<sup>9)</sup>の研究がある。そこでは、グラフ理論を交通計画系課題へ応用した従来の研究は、主に道路ネットワーク単体の形態を評価するものとしたうえで、道路ネットワークの評価のみならず、人口分布と都市施設を考慮に入れたグラフの分析手法の可能性について言及している。この研究を受け、松村ら<sup>10)</sup>は、グラフ理論を適用した都市計画道路ネットワークの評価方法に関する研究として、人口分布と利用施設の組み合わせに地着目したグラフの分析を行うための独自の評価指標を提案している。

本研究では、防災船着場を利用した負傷者搬送の効果を評価するために、負傷者人口と利用施設のみならず、防災船着場および河川をその要素として組み込んだグラフの分析を行っている。そのため、人口と施設の組み合わせに関して中継地点となる、グラフ上の点要素である防災船着場を評価の中心に据えている。したがって、本研究は都市計画道路の整備、すなわちグラフ上の辺要素を評価の中心に据えている松村ら<sup>10)</sup>とは評価観点を異にした評価指標を要請している点に特徴を持つ。

#### c) 防災船着場に関する研究

防災船着場に関する研究は、前述した伊堂寺ら<sup>3)</sup>の研究や、吉川<sup>11)</sup>による日常的な利用の促進への提言などがあ

る。これらの研究は、防災船着場が、まだ整備により年数が経過していないことなどから、防災船着場の認知度が低いこと、地域防災計画における、水上輸送に関する行政機関の役割等が整理されていないことを課題とした研究である。したがって、防災船着場を実際に負傷者搬送などの救援活動に利用した場合の機能評価を扱った研究は、ほとんど知られていない。

本研究は、数学のグラフ理論を用いて、防災船着場を負傷者の搬送活動に利用することで負傷者が病院へ搬送されやすくなることを評価するとともに、負傷者搬送の観点から重要度の高い防災船着場を選定するものである。これにより、防災船着場の救援活動への寄与を定量的に確認することができるとともに、居住地域別の防災船着場の配置計画や、発生負傷者数等を考慮した整備の優先案など、地域防災計画への応用が可能になるものと考えている。

## 2. 研究方法

本研究では、まず、対象地域において負傷者人口と病院、陸路によって構成される負傷者搬送ネットワークとなるグラフを作成する。さらに、地域内の防災船着場および水路によるグラフを新たに組み込む。作成したグラフについて、本研究では以下の二つの分析を行う。

### 分析1：負傷者の搬送効果の検証

震災時の負傷者搬送に関して重要となる観点を、グラフ理論で用いられている諸概念と対応させたいうせで、独自の評価指標を提案する。さらに、提案した評価指標に基づき、陸路による搬送ネットワークと水路を導入した搬送ネットワークにおける負傷者の病院への搬送のしやすさを評価する。

### 分析2：防災船着場の選定

グラフ理論の人文・社会系分野で用いられている「中心性」の概念に着目し、対象地域内で現在計画されている防災船着場の、地域内で発生する負傷者人口との近接度や、病院と負傷者人口との媒介度を評価することで、震災時に負傷者搬送に関して利用頻度の高いと想定される防災船着場の選定を行う。

これらの分析により以下の2つの知見を得ることが本研究のねらいである。

- (i) 防災船着場の導入によって、負傷者と病院との距離が小さくなること、搬送に用いられる経路が増えることから、負傷者が病院へ搬送されやすくなる効果を、グラフ上の点要素の組み合わせに着目して評価すること。
- (ii) 防災船着場の、対象地域の負傷者人口との近接度および病院と負傷者人口の媒介度から、負傷者の搬送活動に関して重要度の高い防災船着場を把握すること。

### 3. 対象地域のグラフ化

#### (1) 対象地域の選定

本研究の対象地域は東京都江東区である。江東区は一級河川が区内の至るところに遍在しており、震災時に船舶を利用した水上輸送が多く行われると予想される地域である。また、区内13か所に防災船着場が設置されており<sup>12)</sup>、防災船着場の機能評価を行う意義のある地域ともいえる。また、その用途に関しても、2012年に公表した被害想定<sup>2)</sup>において負傷者の発生数が震災前と比べて増加しているケースも見られることから、負傷者搬送に着目した機能評価が有用であると判断した。

#### (2) グラフの作成方法

対象地域において、搬送経路と人口要素、施設要素で分析の対象となるグラフを作成する。本研究では、グラフの作成には「江東区施設配置図」を用いた。グラフの頂点となるのは甚句要素、施設要素、搬送経路における交差点である。グラフの辺となるのは対象地域内で任意に定めた搬送経路である。

施設要素は対象地域内の病院である。本研究では、東京都福祉局<sup>13)</sup>により定められている、江東区内の災害拠点病院4病院を対象とする。人口要素は、対象地域内で発生する負傷者の人口代表点とする。負傷者人口代表は、対象地域内の各町丁・大字別にて発生する負傷者の分布を一つの頂点として代表するものである。本研究は、住民基本台帳に基づき<sup>14)</sup>、江東区内の町丁145か所に負傷者人口代表点をプロットした。搬送経路および交差点は、負傷者の搬送に用いられる主要な道路のうち、区内の都市計画道路およびそれらと接続する交差点を選定した。病院及び負傷者人口代表点は最も近い交差点と辺で結ぶものとする。

図-1は作成した陸路のみによる搬送ネットワークのグラフである。各交差点間の距離を均等にするため、概ね300m毎に頂点を設置している。この頂点を細分点と呼ぶものとする。

本研究では、さらに対象地域の防災船着場と河川搬送経路および水路を、作成したグラフに組み込む。グラフの頂点となるのは『江東区地域防災計画』<sup>12)</sup>において定められている江東区内の防災船着場13施設と搬送経路となる河川の交差点である。グラフの辺となるのは江東区内の搬送経路となる河川である。防災船着場は最も近いそれぞれの交差点と辺で結ぶものとする。

図-2は水路を導入したグラフである。陸路と同様に、水路も概ね300m毎に細分点を導入している。また、図中の防災船着場には番号を付記してある。この番号と対応した、防災船着場を次頁表-1に示す。



図-1 対象地域のグラフ化（陸路のみ）

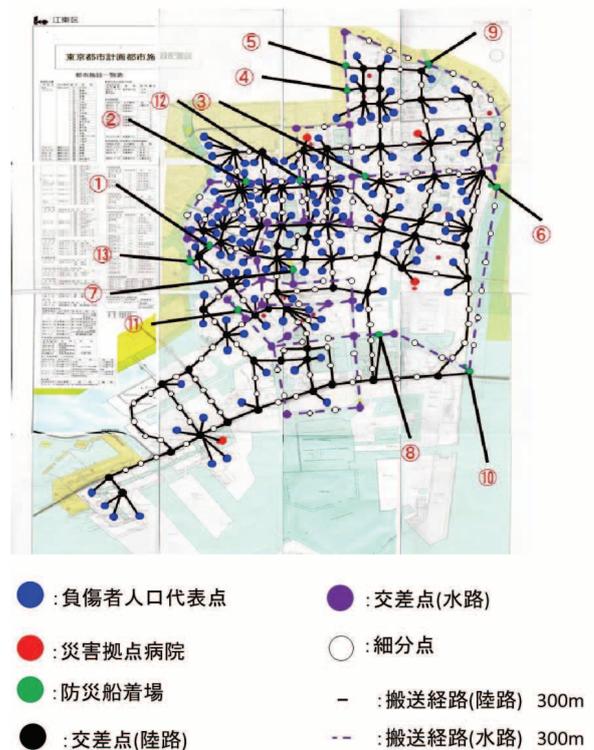


図-2 対象地域のグラフ化（陸路+水路）

表-1 防災船着場

| 番号 | 名称           | 場所      |
|----|--------------|---------|
| ①  | 黒船橋乗船場       | 門前仲町一丁目 |
| ②  | 高橋乗船場        | 高橋      |
| ③  | 小名木川ローパー橋乗船場 | 北砂一丁目   |
| ④  | 亀戸乗船場        | 亀戸二丁目   |
| ⑤  | 天神橋乗船場       | 亀戸三丁目   |
| ⑥  | 番所橋乗船場       | 東砂二丁目   |
| ⑦  | 木場六丁目乗船場     | 木場六丁目   |
| ⑧  | 夢の島乗船場       | 夢の島     |
| ⑨  | 亀戸中央公園乗船場    | 亀戸八丁目   |
| ⑩  | 新砂リバーステーション  | 新砂三丁目   |
| ⑪  | 番所橋乗船場       | 越中島一丁目  |
| ⑫  | 扇橋閘門防災船着場    | 猿江一丁目   |
| ⑬  | 豊洲三丁目船着場     | 豊洲三丁目   |

## 4. グラフ理論を適用した分析

### (1) 負傷者の搬送効果の検証

ここでは、負傷者搬送の観点とグラフ理論を対応させるうえでの考察と、評価指標の考え方およびそれを用いた計算方法について述べる。

#### a) 負傷者搬送の評価観点と評価指標の提案

震災時に、区内に遍在している負傷者が病院へ搬送される際の観点として、本研究では次の2つを挙げる。

- (i) 負傷者と病院の間の距離が小さいほど搬送が容易になる。
- (ii) 負傷者と病院を結ぶ経路の本数が多いほど搬送が容易になる。

観点(i)は、負傷者人口代表点から距離の近い病院ほど、搬送が容易になるという直観に基づいている。本研究では、この観点を2頂点間の最短経路と呼ばれる概念で対応させた。

観点(ii)は、震災の影響で道路や橋が寸断された場合において、負傷者と病院の間で確保されている経路が多いほど搬送が容易になるという予想に基づく。本研究では、経路の本数をグラフ理論における局所辺連結度と呼ばれる概念で対応させた。経路の本数に関する考察については付録に示した。本研究では、このふたつの概念を組み合わせ、以下の評価指標の式(1)を考案した。

$$F_i = \sum_{j=1}^n \frac{d_G(R_i, B_j)}{\lambda_G(R_i, B_j)} \quad (1)$$

ここで、 $d_G(R_i, B_j)$ とは地点*i*の病院 $R_i$ と地点*j*の負傷者人口代表点 $B_j$ とを接続する最短経路の距離である。ここで、距離とは、2頂点間の辺の個数を指す。 $\lambda_G(R_i, B_j)$ とは $R_i$ と $B_j$ の局所辺連結度である。この評価指標は、防災船着場の整備により、防災船着場および水路の導入により、負

傷者と病院の間の距離が小さくなることや、負傷者と病院を結ぶ経路の本数が増えることにより、搬送ネットワーク内のある地点の病院が、各負傷者人口代表点に対してどれほど搬送が容易となったかを示すものである。本研究で行った分析では、陸路のみの搬送ネットワークにおける評価指標 $F_i$ と、水路を導入した搬送ネットワークにおける評価指標 $F'_i$ を求め、 $F_i > F'_i$ であるとき、負傷者搬送の効果が向上したものとみなす。

#### b) 評価指標の計算方法

簡易的なグラフを用いて、前項で紹介した式(1)によるグラフの評価方法について説明する。次頁図-3は防災船着場および水路を導入する前のグラフG、次頁図-4は防災船着場および水路を導入した後のグラフG'である。図-1および図-2で示した凡例に従い、それぞれのグラフのうち、赤色で着色された点は病院、青色で着色された点は負傷者人口代表点を表しており、それぞれをR、Bと呼ぶことにする。黒および紫で着色された頂点はそれぞれ陸路、水路の交差点である。また、黒色の直線は陸路の搬送経路を、紫色の破線は水路の搬送経路を表している。前項で述べた負傷者搬送の観点からRとBを結ぶ、辺を共有しない経路の本数を数える。ここで、RおよびBは、最も近隣の交差点と結ぶものとしているため、定義通りに2頂点の経路の本数を数えようとする、その本数は必ず1本になってしまう。そこで、本研究では条件を調整し、各2頂点と結んでいる交差点間の経路の本数を2頂点間の経路の本数として数えた。Mengerの定理より、2頂点間の辺独立経路(辺を共有しない経路)の最大数と2頂点間の局所辺連結度は等しいことが理論上保障されているため、数えた2頂点間の経路の本数は、2頂点間の局所辺連結度となる。

この考え方に従って、まず、図-3のグラフ(防災船着場を導入していないグラフ)Gの評価指標値 $F(G)$ を求める。RとB1を結ぶ最短経路の距離 $d_G(R, B1)$ は8であり、RとB1の間の局所辺連結度 $\lambda_G(R, B1)$ は1である。同様に、RとB2について、それぞれ $d_G(R, B2)$ は5、 $\lambda_G(R, B2)$ は1である。したがって、 $F(G)$ の値は13となる。

次に、図-4のグラフ(防災船着場を導入したグラフ)G'について説明する。G'では、緑色に着色された点である防災船着場と、紫色に着色された水路が、新たにグラフに組み込まれている。防災船着場をWと呼ぶことにする。本研究で考案した評価指標は、防災船着場および水路の導入により負傷者と病院の間の距離が小さくなることや、負傷者と病院を結ぶ経路の本数が増えることを評価するものである。すなわち、考案した評価指標は、2頂点間の最短距離に比例し、2頂点間の局所辺連結度に反比例する構造であるため、前述したグラフの変化によって、評価指標の値が小さくなることが望ましい。

図-3のグラフGと同様の方法で、図-4のグラフG'の評

価値指標値 $F(G')$ を求める。RとB1を結ぶ最短経路の距離 $d_G(R,B1)$ は6であり、RとB1の間の局所辺連結度 $\lambda_G(R,B1)$ は2になる。同様にRとB2について、それぞれ $d_G(R,B2)$ は5、 $\lambda_G(R,B2)$ は2になる。したがって、 $F(G')$ の値は5.5となる。

以上の結果から、 $F(G) > F(G')$ となるため、防災船着場の導入によって負傷者搬送への効果が向上したと結論できる。評価指標値の現象が、実際の搬送活動にどれほど寄与するかについての考察は今後の課題としたい。

## (2) 防災船着場の選定

ここでは、負傷者搬送の観点から重要度の高い船着場を、グラフ理論で用いられている指標を用いて選定する方法について説明するとともに、それを用いた計算方法について説明する。

### a) 防災船着場選定に関するグラフ理論適用の考え方

防災船着場の負傷者搬送の負傷者搬送に関する重要度を評価する観点を述べるとともに、それと対応したグラフ理論の評価指標の選定経緯を述べる。

本研究では、防災船着場の重要度を評価する観点として、「負傷者との距離の近接度」と「負傷者と病院との媒介度」を挙げる。これらはそれぞれ、発生する負傷者人口に対して総合的に距離の近い船着場は、搬送を行われる頻度が高いこと、負傷者と病院との最短経路を探索する際に頻繁に通っている船着場は重要である、という考え方に基づく。

この評価観点は、グラフ理論の人文・社会系分野において「中心性」という概念で表現されている。中心性を評価するグラフ理論の評価指標は複数存在する<sup>15)</sup>が、本研究では、特に「近接中心性」と呼ばれる概念を用いた評価指標と「媒介中心性」と呼ばれる概念を用いた評価指標を適用するものとする。

近接中心性とは、他の多くの頂点へ少ないステップで行ける、ネットワークの中心にいるような頂点は重要である、という観点に基づいた指標である。グラフの近接中心性を評価する指標として「シンベル指数」と呼ばれるものがある。シンベル指数とは、Shimbel<sup>16)</sup>が考案したグラフ上の点の近接度を示す指標であり、地点kの防災船着場 $W_k$ のシンベル指数 $S(W_k)$ は次式(2)で表される。

$$S(W_k) = \sum_{j=1} d_G(W_k, B_j) \quad (2)$$

ここで、 $S(W_k)$ は頂点 $W_k$ の近接度、 $d_G(W_k, B_j)$ は頂点 $W_k$ の近接度、 $d_G(W_k, B_j)$ は頂点 $W_k$ と頂点 $B_j$ の最短距離である。シンベル指数が小さいほど対象の点はグラフの中心であり、大きいほどグラフの辺境である、と定義されている。本研究では、防災船着場を導入した搬送ネットワーク内の各防災船着場のシンベル指数を調べ、値の小さいものを重要度の高い防災船着場として選定した。

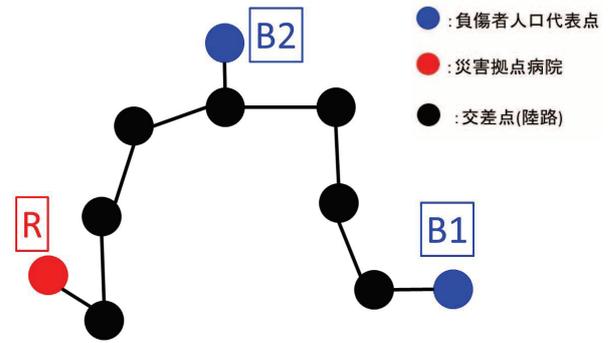


図3 防災船着場導入前のグラフG

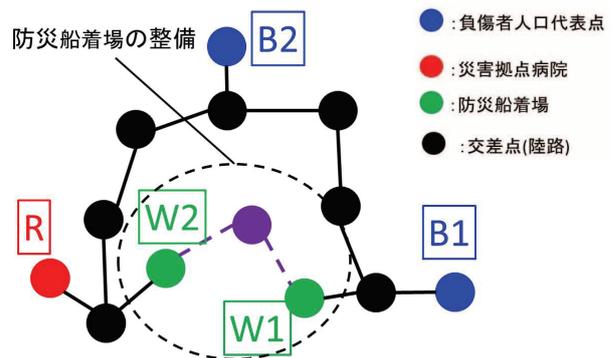


図4 防災船着場導入後のグラフG'

媒介中心性とは、多くの頂点間の橋渡しをしている頂点は重要であるという観点に基づいた指標である。参考文献<sup>15)</sup>で紹介されている式に基づき、グラフ上の地点kの防災船着場 $W_k$ の媒介度 $bwc(W_k)$ を以下の式(3)で定義する。

$$bwc(w_k) = \sum_{R_i \in V} \sum_{B_j \in V} \frac{\sigma_{R_i B_j}(W_k)}{\sigma_{R_i B_j}} \quad (3)$$

ここで、 $V$ はグラフの節点集合、 $\sigma_{R_i B_j}$ は地点 $i$ の病院 $R_i$ と地点 $j$ の負傷者人口代表点 $B_j$ の最短経路の本数、 $\sigma_{R_i B_j}(W_k)$ は防災船着場 $W_k$ を通る $R_i$ と $B_j$ の最短経路の本数である。この評価指標は、グラフ上の病院と負傷者人口の最短経路のうち、地点kの防災船着場を媒介しているものの割合を示している。

本研究では、防災船着場を導入した搬送ネットワーク内の各防災船着場の媒介度を上の式により調べ、その値の大きいものを重要度の高い防災船着場として選定するものとする。

### b) 評価指標の計算方法

簡易的なグラフを用いて、前項で紹介した式(2)および式(3)による分析方法について説明する。初めに、近接中心性指標による分析方法について説明する。図5は、5つの負傷者人口代表点が存在し、3つの防災船着場が整

備されているグラフGである。それらをそれぞれB, Wと呼ぶことにする。点および辺の着色ルールは前述したものと同様である。このグラフを用いて、各防災船着場のシンベル指数を求める。計算例として、W1のシンベル指数 $S(W1)$ は、W1と、グラフ中の負傷者人口代表点の最短距離を調べ、それらを合計したものが、防災船着場のシンベル指数となる。したがって、W1とB1~B5の最短経路はそれぞれ番号順に5, 6, 5, 3, 2であるため、シンベル指数はそれらを合計した19となる。W2, W3のシンベル指数 $S(W2)$ ,  $S(W3)$ についても同様に、18, 24を得る。以上の結果から、シンベル指数の最も低い防災船着場はW2であり、負傷者搬送の観点から重要度の高い防災船着場となる。

次に、媒介中心性指標による分析方法について説明する。図-6は3つの負傷者人口代表点と、1つの病院が存在し、4つの防災船着場が整備されているグラフG'である。それらをそれぞれR, B, Wと呼ぶことにする。このグラフを用いて、各防災船着場の媒介度を求める。計算例として、W3の媒介度 $bwc(W3)$ は、BとRを結ぶ最短経路を調べ、その中に、W3を媒介しているかどうかを調べる。グラフ中の各負傷者人口代表点と病院を結ぶ最短経路のうち、W3を通るものはB1とRを結ぶ最短経路のみであり、 $bwc(W3)$ は1/3となる。W1, W2, W4の媒介度 $bwc(W1)$ ,  $bwc(W2)$ ,  $bwc(W4)$ についても同様に計算すると、それぞれ、0, 0, 1/3を得る。以上の結果より、媒介度の最も高い防災船着場はW3, W4であり、負傷者搬送の観点から重要度の高い防災船着場となる。

各評価指標の防災船着場選定に関する適用可能性に関する考察は後述する。

## 5. 分析結果

### (1) 負傷者の搬送効果の検証

各ネットワークにおける、4病院を対象とした評価指標およびそれらを比較したときの減少率を次頁表-2に示す。表-2より、全ての病院について防災船着場および水路の導入により評価指標値が減少していることから、グラフ全体に関して負傷者搬送の効果が向上していることがわかる。また、評価指標値の減少率が最も大きい、すなわち、負傷者搬送の効果が最も大きい病院は大島6丁目の「江東病院」であることがわかった。

### (2) 防災船着場の選定

#### a) 近接中心性の分析

グラフ中の各防災船着場のシンベル指数を、小さい順に以下の次頁表-3に示す。表-3より、シンベル指数の最も小さい防災船着場は猿江一丁目の「扇橋閘門防災船着

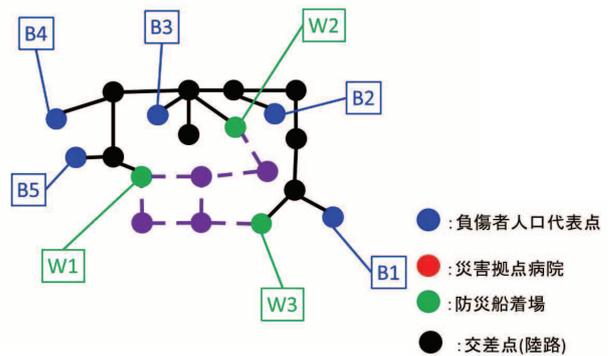


図-5 防災船着場の複数存在するグラフG

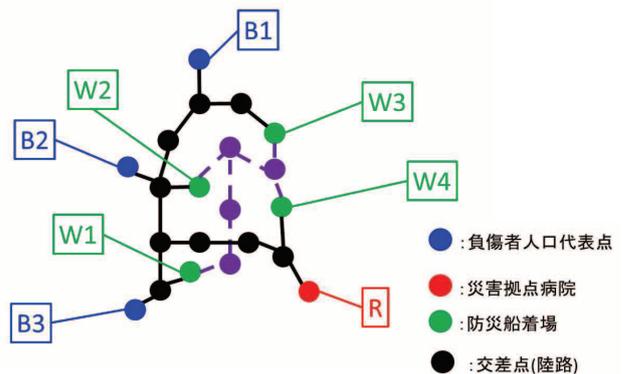


図-6 防災船着場の複数存在するグラフG'

場」であり、負傷者搬送の観点から重要度の高い船着場であると考えられる。扇橋閘門防災船着場は、『江東区地域防災計画』<sup>12)</sup>においても、「第二次緊急輸送道路延長700mで災害拠点病院と隣接している防災船着場」として挙げられているため、その重要性があらためて確かめられたといえる。

#### b) 媒介中心性の分析

次頁表-4にグラフ中の各防災船着場を導入した搬送ネットワーク内の各防災船着場の媒介度を大きい順に示す。表-4より、媒介度の最も大きい船着場は、猿江一丁目の「扇橋閘門防災船着場」であり、前項の分析結果において最もシンベル指数の小さい船着場と同じであることが分かった。また、シンベル指数が二番目に低い、木場6丁目の「木場6丁目防災船着場」は媒介度が0であり、病院と負傷者人口代表点の最短経路の中で一度も媒介していないことが分かった。

#### c) 防災船着場選定への適用可能性に関する考察

前項、前々項の分析結果に基づき、中心性を評価する両指標の、防災船着場選定への適用可能性について以下の結論が得られると考える。すなわち、媒介中心性の指標は、病院と負傷者人口代表点の組み合わせを考慮できている点に優位性が認められるが、実際の搬送活動においては、必ずしも病院への最短経路を選択するとは限ら

表-2 各ネットワークの評価指標

|                       | Fi       | Fi       | 減少率<br>% |
|-----------------------|----------|----------|----------|
| 江東病院                  | 783.750  | 735.833  | 6.114    |
| あそか病院                 | 870.000  | 851.500  | 2.126    |
| 順天堂大学付属順天堂江東高齢者医療センター | 661.333  | 653.167  | 1.235    |
| 財団法人癌研究会有明病院          | 1441.500 | 1424.500 | 1.179    |

表-3 防災船着場のシンベル指数

| 番号 | 名称            | S(k) |
|----|---------------|------|
| ⑫  | 扇橋閘門防災船着場     | 1377 |
| ⑦  | 木場6丁目乗船場      | 1382 |
| ②  | 高橋乗船場         | 1389 |
| ③  | 小名木川クローバー橋乗船場 | 1440 |
| ①  | 黒船橋乗船場        | 1485 |
| ⑪  | 越中島防災船着場      | 1507 |
| ⑬  | 豊洲3丁目乗船場      | 1594 |
| ④  | 亀戸乗船場         | 1790 |
| ⑧  | 夢の島乗船場        | 1895 |
| ⑤  | 天神橋乗船場        | 1929 |
| ⑥  | 番所橋乗船場        | 1951 |
| ⑩  | 新砂リバーステーション   | 2158 |
| ⑨  | 亀戸中央公園防災船着場   | 2338 |

表-4 防災船着場の媒介度

| 番号 | 名称            | bwc(wk) |
|----|---------------|---------|
| ⑫  | 扇橋閘門防災船着場     | 0.064   |
| ⑬  | 豊洲3丁目乗船場      | 0.047   |
| ③  | 小名木川クローバー橋乗船場 | 0.041   |
| ①  | 黒船橋乗船場        | 0.024   |
| ②  | 高橋乗船場         | 0.021   |
| ⑨  | 亀戸中央公園防災船着場   | 0.014   |
| ⑩  | 新砂リバーステーション   | 0.014   |
| ④  | 亀戸乗船場         | 0.003   |
| ⑤  | 天神橋乗船場        | 0.002   |
| ⑥  | 番所橋乗船場        | 0.002   |
| ⑦  | 木場6丁目乗船場      | 0.000   |
| ⑧  | 夢の島乗船場        | 0.000   |
| ⑪  | 越中島防災船着場      | 0.000   |

ず、むしろ負傷者搬送人口に対して距離の近い船着場を利用しようとする事を考えれば、近接中心性の指標の方が有用である。したがって、現段階では負傷者搬送の観点から重要な防災船着場の選定には両指標を用いた分析を行い、その結果を比較検討すべきである。また、媒介中心性を評価する式(3)は、最短経路を媒介する点のみに着目しているが、このサイズの条件を任意に緩める方法が確立できれば、より有用な指標となり得ると考えられる。

## 6. おわりに

### (1) 研究成果

本研究の目的、分析のねらいに沿い、本研究の成果を以下に述べる。

(i)防災船着場の導入による負傷者搬送への効果を検証する評価観点をグラフ理論の概念と対応させ、独自の評価指標を提案した。さらに、実際に対象地域である東京都江東区において評価指標を用いた分析を行い、定量的にその効果を示すことができた。

(ii)現在防災的機能が不明確なまま計画されている防災船着場をグラフ理論で用いられている評価指標により評価し、負傷者搬送に関して重要度の高い船着場を選定することができた。

### (2) 今後の研究課題と展開

本研究の成果を踏まえた、今後の研究課題と研究の展開について、以下の3点を挙げる。

#### a) 本評価指標に関する課題

本研究で提案した評価指標は、評価指標値の変化が実際に搬送されるかどうかの判断材料とはなっていないのが現状である。過去の震災をケーススタディとした、負傷者搬送に意義のある搬送距離、搬送時間を考慮した評価指標に関する詳しい考察が必要である。

#### b) グラフの作成方法に関する課題

本研究で作成した負傷者搬送のネットワークのグラフは陸路、水路に関わらず辺を300mに細分していることや、震災時の道路の閉塞性や都市計画道路の整備率などを考慮していないことなどの課題を持つ。グラフ理論側の手法と対応した、これらの修正、操作方法を検討していく必要がある。

その具体的な例として、「グラフの多重化」の操作を挙げる。本研究での分析に用いたグラフは、多重辺(2頂点間に2つ以上の辺がある)グラフではない「単純グラフ」と呼ばれる構造のグラフである。そのため、分析を行う際に、2頂点間の局所辺連結度を求めようとすると、病院および負傷者人口代表点に接続する交差点と隣接している辺の本数(次数と呼ばれる)よりも小さくなってしまい、という課題を抱えていた。一方で、分析の対象となグラフは、その辺の要素として、都市計画道路を採用しているが、都市計画道路はそれぞれ車線数および幅員が異なる。したがって、この2点の要請から、分析に単純グラフを用いることは適当ではなく、条件に応じた辺の操作が必要であると考えた。

## 付録 評価指標における経路の本数に関する考察

グラフ理論において、2頂点 $u,v$ の経路(ここでは $u-v$  path

と名付ける)の本数を数える際に、通常3つの考え方がある。それらは以下の通りである。

(i)uとvを結ぶpathで少しでも異なるものは全て数える。

(ii)uとvを結ぶpathで点素なものだけ数える。つまり、各u-v pathで点を共有しないもの本数を数える。

(iii)uとvを結ぶpathで辺素なものだけ数える。つまり、各u-v pathで辺を共有しないもの本数を数える。

(i)は、2頂点間を結ぶ経路を数える際、一つでも違う辺や点を通ってしまうと、すでに数えた点および辺を通ってもよい、という方法である。この方法を採用すると、ほとんど重なっている2つの経路でもわずかに違っているものがカウントされてしまうため、本分析には適当ではないと判断した。

(ii)は、「点連結度」と呼ばれる概念である。この方法は、2頂点間を結ぶ経路を数える際、一度数えた点は通れないという制約のもとで経路を数えるものである。この方法は、震災の影響で道路および交差点が使用できなくなった場合を考慮できる。しかし、この方法を採用すると、平面グラフの連結度に関する定義により、数えることのできる経路の本数は必ず5本以下となってしまうため、本分析に対応させるのは難しいと判断した。

以上の理由により、本研究では経路の本数の数え方として(iii)を採用した。(iii)は「辺連結度」と呼ばれる概念である。この方法は、2頂点間を繋ぐ経路を数える際、一度数えた辺は通れないという制約のもとで経路の本数を数えるものである。この方法は、(iii)に対して震災の影響で交差点が使用できなくなった場合を考慮できないという欠点があるが、道路が使用できなくなった場合を考慮することができる。本研究では、負傷者の水上搬送の効果を評価することが目的なので、震災の影響により河川をまたぐ道路が寸断した場合を扱うことのできるこの方法に対応させることは妥当であると判断できる。

本研究では、負傷者人口と病院の2頂点間の経路の本数について議論したいため、グラフ中の2頂点間のみを対象とした辺連結度の概念である「局所辺連結度」を負傷者人口代表点と病院の間の経路の本数として対応させた。局所辺連結度の定義については、参考文献<sup>18)</sup>を参照されたい。

#### 参考文献

- 1) 東京都建設局：防災船着場整備計画〈改訂版〉，2009.
- 2) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定

報告書，2012.

- 3) 伊堂寺淳志・近藤健雄・山本和清・宮崎渉・榎同子：震災時における水上輸送での救援活動の可能性に関する研究—東京都地域防災計画に着目して—，平成23年度日本大学理工学部学術講演会論文集，pp.683-684，2011
- 4) 東京都総務局総合防災部防災管理課：東京都地域防災計画（震災編）．2012.
- 5) 例えば、高田至郎・中山学：震災時における都市道路網のリンク容量低下の経済的評価に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部，第55巻，pp.534-535，2000.
- 6) 楢田泰子・高田至郎：震後救命活動に関わる道路システムの機能評価法，土木学会論文集，No.731/I-63，185-193，2003.
- 7) 小林正美：道路網・ネットワークシステムの信頼度解析法に関する研究，日本都市計画学会都市計画論文集，No.15，pp.385-390，1980.
- 8) 古山正雄：地域間ネットワークの評価指標Uの値について，日本都市計画論文集，No.23，pp.25-30.
- 9) 森田哲夫・藤田慎也・塚田伸也：交通計画課題に対応したグラフ理論の応用に関する研究，土木学会土木計画学研究講演集，No.36，CD-ROM (V-177)，2007.
- 10) 松村祐太・森田哲夫・藤田慎也：グラフ理論を用いた都市計画道路ネットワークの評価指標に関する研究，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，Vol.67，I-813-I-821，2011.
- 11) 吉川勝秀：日常に根ざした防災船着場の利用の可能性，第62回土木学会年次学術講演会概要集 IV，pp.291-292，2007.
- 12) 江東区：江東区地域防災計画（資料編），p.257，2010
- 13) 全国の病院・診療所データベース：<http://hospital.jpn.org/erea/kanto-erea/tokyo/city130624>，2013.4.26（閲覧）
- 14) 東京都：住民基本台帳による東京都の世帯と人口（町丁別・年齢別），2011
- 15) 伏見卓恭・斉藤和巳・武藤伸明・池田哲夫：ノード集合に対する媒介中心性の提案，DEIM forum 2012 C11-4，2012.
- 16) Alfonso Shimbel：Structual parameters of communication network, Bulletin of Mathematical Biophysics, 15, 501-507, 1953.
- 17) 江東区：江東区都市計画マスタープラン〈改定版〉，2011.
- 18) 茨木俊秀，永持仁，石井利昌：グラフ理論—連結構造とその応用—，朝倉書店，2010.

## A STUDY ON THE EFFECT ON THE TRANSPORT OF THE INJURED BY THE MAINTENANCE OF THE WHARF FOR RESCUE SHIP

Hiroki TAKENOUCI, Tetsuo MORITA and Shinya FUJITA