

災害時における被災者への 救援物資輸送に関する研究

京都大学大学院工学研究科 教授 谷口 栄一
京都大学防災研究所 教授 小野 憲司
京都大学大学院工学研究科 助教 中村 有克

概要：

本研究においては、災害時における被災者への水、食料、日用品などの救援物資輸送について、二つの観点から検討を行った。一つは救援物資輸送にフェリーを活用する場合の課題について、その効率性・有効性について検討を行った。もう一つは、避難所に避難した被災者へのトラックによる救援物資配送について、効率性のみならず、被災者の困窮を最小化することも考慮した多目的配車配送計画モデルを構築し、適用性を検討した。フェリーは大量輸送交通機関であり、東日本大震災における事例より、フェリーの自己完結性、優れた操船性、マルチモーダル輸送機能は大災害時の救援物資輸送に適しているといえる。しかし、長距離フェリー航路の維持、港湾の耐震バースの建設、港湾へのアクセス道路の確保などの課題がある。また、避難所への救援物資配送について、多目的配車配送モデルを構築し、実際のケースに適用し、効率性のみならず、被災者の困窮の最小化を図ることの重要性が指摘された。

キーワード：災害、物流、救援物資輸送、フェリー、最適化モデル

1. はじめに

災害時に避難所に避難した被災者に水、食料、日用品などの救援物資を配送することは人道上、非常に重要な事柄である。しかし、1995年の阪神淡路大震災、2011年の東日本大震災において見られたように、被災者への救援物資配送は、必要なものが必要な時に届かないあるいは物資が途中のデポで滞ってしまう、また公民の連携がうまくできないなどの様々な課題がある。同じような救援物資配送問題は2005年のハリケーンカトリーナや2010年のハイチ地震のときにも発生した。¹⁾

これらの問題を解決するために、本研究においては、災害時の救援物資輸送にフェリーを活用する場合の課題について、その効率性・有効性について検討を行う。また、陸上のトラックを用いた避難所への救援物資配送について、多目的配車配送モデルを構築し、効率的かつ被災者の困窮を最小にするような救援物資配送について検討を行う。いずれも2011年の東日本大震災の事例を用いるとともに、今後予想される南海トラフを震源とする大地震について、高知県を対象として検討を行う。

2. 大規模な広域災害発生時の海上多量輸送システムの検討

本節では、災害現場での効率的な大量輸送手段としての長距離フェリーの利便性に注目して、フェリーを活用した救援部隊や緊急支援物資の海上輸送の可能性について検討する。

(1) 東日本大震災時のフェリーによる緊急支援物流

現在、日本の沿岸域で海運輸送に従事している長距離フェリーは51隻、総トン数59万7千総トンであり、その総輸送力は、乗客3万人、乗用車3,800台、トラック・トレーラー7,192台となっている。²⁾東日本大震災時に実際に緊急支援輸送活動に従事したフェリーの大多数は、MOLフェリー株式会社が運航するサンフラワー型フェリーのような10,000及びそれ以上の大型フェリーで、人員、車両の大量一括輸送のメリットを出すためには大型の長距離フェリーが適切であると言う事実が示唆された。³⁾

これらの長距離フェリーは、船首と船尾に複数のスラスタ（補助推進器）に装備しており、一般貨物船よりはるかに高い操作性を有し、狭い港内でも速やかに回

頭、離棧し、沖合に避難することが可能であることから、災害直後においても直ちに動員が可能な緊急支援輸送活動資源となった。⁴⁾

東日本大震災時においては、津波に対する長距離フェリーの安全性と耐波性が確認され、将来の大規模災害時においても緊急支援輸送活動のための効率的で有効な海上輸送手段となりうるとの期待が高まった。

緊急支援輸送活動時のフェリーの利点は、車両を直接積載するため、

- i) 陸側からのクレーン等の支援が無くとも積み荷の揚陸が可能な自立性の高い輸送手段である、
- ii) 海上輸送と陸上輸送をシームレスに接続することができるマルチモーダル輸送手段である、
- iii) JSDF や PD と FD の捜索救助活動のための多数の隊員及び車両・重機・装備類を一括輸送できる、ことにある。⁵⁾

これらの強みを生かして、東日本大震災発生後の 4 か月の期間に、15 のフェリー会社の 48 隻のフェリーが 899 航海の緊急支援輸送活動を行う中で、JSDF からの 45,500 人の隊員および 12,800 台の車両を含む 60,500 人の人員、16,600 台が輸送された。特に、発災後の 6 日間に、MOL フェリー、新日本海フェリー、太平洋フェリーの 3 社による 13 航海が実施され、6 千人の要員と 2 千台の車両類が、被災地へと輸送されたことは、災害直後の初動における長距離フェリーの利便性を如実に示す。⁶⁾

(2) 港湾・海運部門の対応能力

被災した港湾施設の緊急復旧は、東北地方太平洋岸で最大 51 時間継続した津波警報・注意報に妨げられ、2011 年 3 月 14 日から本格化した。

青森県、岩手県宮城県は、航路・泊地に浮遊または海底に沈んだ瓦礫等の撤去（啓開作業）による船舶入港時の水深確保が必要となった。啓開作業は、茨城港常陸那珂港区で約 1 日、釜石港および小名浜港で約 2 日、宮古港は約 3 日で終了した。一方、養殖いかた等の流出浮遊物が多かった大船渡港や石巻港、茨城港大洗港

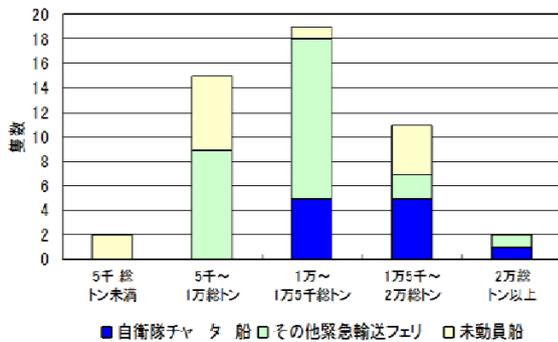


図-1 フェリーの緊急支援輸送活動への動員傾向

区では啓開作業に 7～9 日を要した。

これらの結果、東北地方における緊急支援船の第 1 船は 3 月 16 日に宮古港に入港し、その後 3 月 18 日には小名浜港及び仙台塩釜港、3 月 19 日には釜石港、3 月 23 日には大船渡港と続いた。これらの港湾を通じた緊急支援物資の供給ルートによって、2011 年 8 月 15 日まで緊急支援物資搬入のために 871 隻が被災地港湾に入港した。

しかしながら、被災港湾の係留施設や水域施設の応急復旧後も、港湾の荷役、保管機能や岸壁上のガントリークレーンや上屋、倉庫、旅客ターミナル等のスーパーストラクチャーの復旧の遅れから、すべての海運輸送需要に対して港湾が自由に使用できるようになったわけではなかった。例えば、ガントリークレーンが倒壊した仙台塩釜港では、岸壁の補修を行うとともに、自走式のクレーンを使って内航コンテナ輸送サービスを再開するのに 3 か月を要した。⁷⁾

図-2 は、長距離フェリー、Ro-Ro 貨物船、外貿及び内貿コンテナ船について、港湾管理者や船会社によって公表されたデータと情報に基づいて、東日本大震災後に定期航路の再開に必要な期間を比較する。図の鉛直軸は、東日本大震災の前に存在した運航総数に対する震災後の再開運航数の比、水平軸は震災の後の経過日数を示す。

図-2 では、フェリー定期航路は、震災 15 日後には 89% が再開し、また Ro-Ro 貨物船航路についても震災 50 日後には 50% が回復したが、内航コンテナ輸送サービスについては 3 か月後に 52 パーセントが回復、一方、国際コンテナ航路はその半分の運航回数を回復するのに 1 年かかっている。このことから、Ro-Ro 船、特に長距離フェリーは、災害復旧の初期段階で緊急支援輸送活動に従事することが可能となることが分かる。⁸⁾

(3) 長距離フェリーによる緊急支援輸送活動の可能性

長距離フェリーの運航の過程をシミュレーションするための逐次計算アルゴリズムを作成して、南海トラフの巨大地震が発生した際の緊急支援輸送におけるフェリー輸送の効率性と有効性の評価を行った。

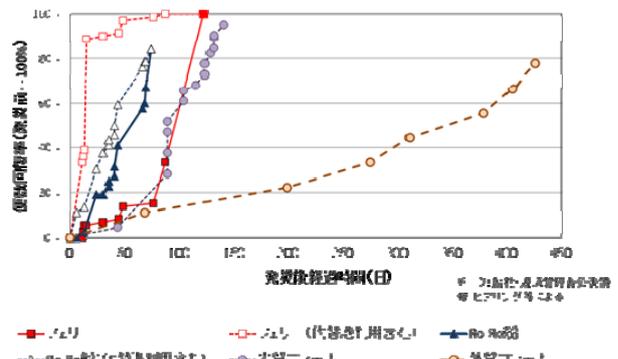


図-2 東日本大震災時後の海運輸送サービス復旧の比較

アルゴリズムの主な仮定は以下のとおりとした：

- ・ 支援港（仕出し港）と被災地港（仕向け港）の 2 港間を、北九州港、大分港各 3 隻計 6 隻のフェリーが往復、
- ・ 貨物はトラックのみを考慮、
- ・ トラックは、被災地において積み荷を降ろした後、一定比率で仕向け港に帰還し、その時点で乗船可能なフェリーで仕出し港に帰還、
- ・ フェリーは航行や入出港の順番を変えない、
- ・ 航路の入出港は同時 1 隻のみ可能、
- ・ バース（1～3）に空きがない場合は、沖合で待機、
- ・ 被災地港湾での荷役に、夜間荷役制限及び潮位による制限を考慮、
- ・ 荷役時間は、トラックの台数に係らず一定。

被災地にある高知港では夜間荷役作業のための照明設備等が失われている可能性が高いため、アルゴリズムでは、夜間荷役は行わないこととした。また、高知港にはフェリー用の可動橋が無くサイドランプによる荷役を行うため、潮位が低い場合はランプの勾配が大きくなり過ぎトラックの円滑な乗り降りが出来ないことから、潮位 0.5m 以下では荷役しないこととした。またフェリーが周防灘や別府湾を夜間に巡航する際、浮遊瓦礫や漁網等に遭遇し航行障害を生じる可能性に鑑み、瓦礫等の監視が可能なよう巡航速度を毎時 5 ノットとした。

フェリーの出発港を北九州港及び大分港とし、それぞれの港に朝 6 時に集結した 3 隻の大型フェリーが、100 台のトラックを積載して高知港に向かうこととした。洋上でのフェリーの巡航速度は昼間 20 ノット、夜間は上述の通り 5 ノットとし、トラック 1 台当たりの緊急支援物資積載量は平均 7 トンとした。

高知港では耐震強化された 1 バースに加えて、現存する -12m～-14m の 3 バースの内 1 バースが接岸可能であると仮定した。被災地である高知港においては、夜間は入出港や荷役ができないこと、高知港から 30 km 離れた高知中央地区の 2 か所の総合防災基地まで緊急支援物資を搬送したトラックは翌日 70%、翌々日に 25%、3 日目に 5% が高知港に戻ってくるものと仮定した。

シミュレーションから得られたフェリーの運航ダイアグラムを図-3 に示す。

シミュレーションによると、毎日 1 隻ないし 2 隻のフェリーが高知港に到着し、200 台～400 台のトラックを揚陸することから、日平均 1,700 トンの緊急支援物資が総合防災基地に搬入される計算となった。これは、高知中央地域のピーク時の支援物資必要量の 32.7 パーセント（又は避難者 11 万 7000 人分の日用品等）に相当する。

シミュレーションではフェリーによる緊急支援輸送に従事するトラック台数も求めた。トラックは被災地で揚陸された後、総合防災拠点まで陸送し、緊急支援物資を荷卸ししたのち高知港まで戻り、フェリーで帰還するというサイクルをとる。図-4 は、フェリー積載中のトラック及び現地で走行中のトラックの台数を示す。

約 600 台のトラックが洋上にあり、約 400 台のトラックが高知中央地域で緊急支援物資輸送に従事していることから、合計で約 1,000～1,300 台程度のトラック台数を確保する必要があるとみられる。

一方、大型フェリーの接岸・荷役による高知港の 2 バースの占有率は、フェリー到着のタイミングや潮位条件によって概ね 20%～60%、平均 37.9% となり、概ね満杯状態となることが分かった。

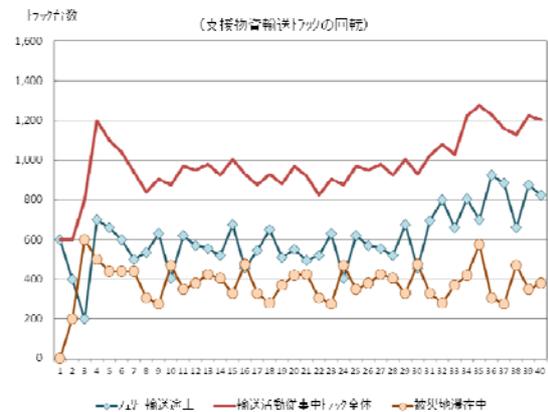


図-4 緊急支援物資輸送に従事するトラック台数

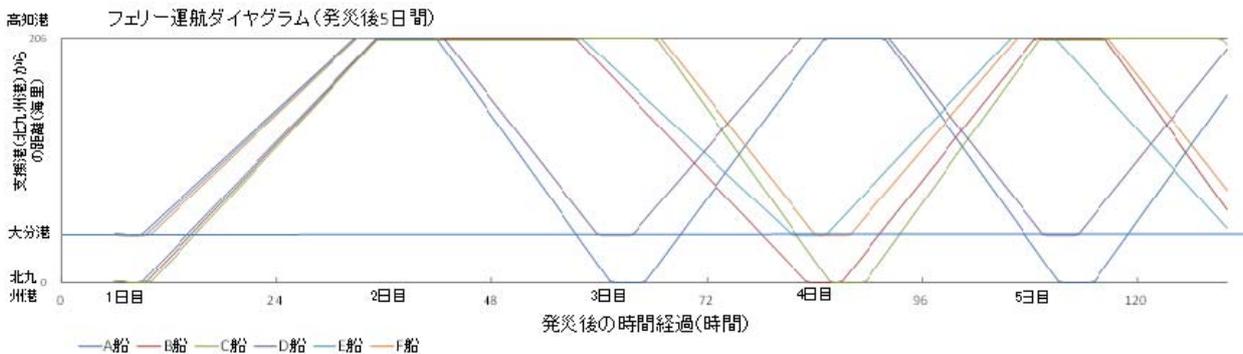


図-3 シミュレーションに基づくフェリー運航ダイアグラム

(4) フェリーを活用した緊急支援輸送の課題

緊急支援輸送における海上大量輸送手段としての長距離フェリーの自己完結性、優れた操船性、マルチモーダル輸送機能は、今後、南海トラフの巨大地震のような大規模災害に対処するための事前準備を進める上で、有効な手段の1つであると考えられる。

一方で長距離フェリーを緊急支援輸送に活用するためにはいくつかの課題が挙げられる。

まず、緊急支援輸送への長距離フェリーの動員上、長距離フェリー航路及びフェリー船団の維持が今後増々重要な課題となって来る。すなわち、高速道路網の拡張と近年の高速道路料金の政策的引き下げによって、トラック等陸上輸送との競争において長距離フェリーの競争環境は大きく悪化した。このため、経営収支改善のためのフェリー航路の縮小と保有フェリー隻数の削減が進んでおり、これらは災害時の長距離フェリーの対応能力を著しく低下させている。従って、将来の大規模自然災害に的確に対応するとの観点から、戦略的にフェリー航路の維持とフェリー船腹量の確保を図っていく必要がある。

また、岸壁等の港湾施設は一旦被災するとその普及には多大な時間を要することから、耐震岸壁のような地震力に対抗可能な構造強度とターミナルの液状化防止工を有する港湾を全国に適切に配置することが、災害時に長距離フェリーを運航する上で不可欠である。

なお、これらの耐震バースは一般貨物船の接岸を念頭においた延長の短いものが多い。現在、全国において、整備中のもも含めて40バースのみが10,000総トンを超える大型の長距離フェリーに対処可能となっているため、より多くの港湾で大型の長距離フェリーの接岸が可能となるように耐震バースの基準を変えてくることが必要である。

3. 避難所への救援物資輸送システムの検討

(1) 救援物資配送モデルの概要

災害時において、避難所に避難している多数の被災者に水・食料・日用品などの救援物資を配送することは重要な問題であるが、困難を伴う。救援物資を被災者に迅速に配送するとともに、需要に対して供給不足が生じる場合も想定し、的確に割り当てることも重要である。このような2つの目的を持つ多目的救援物資配送モデルを構築する。図-5に本研究のモデルの概要を示す。

本研究で用いる救援物資配送最適化モデルを以下に示す。⁹⁾

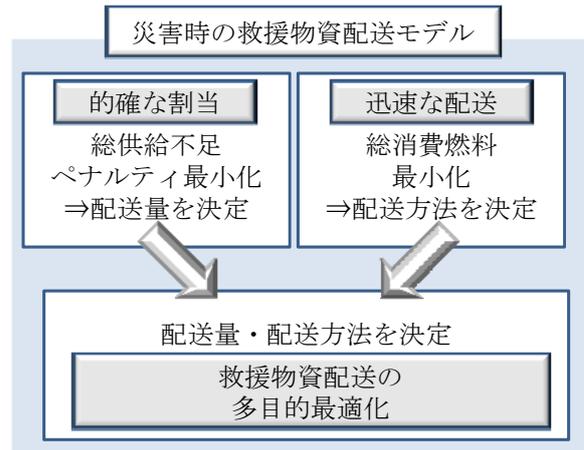


図-5 救援物資配送モデルの概要

$$\text{Minimize} \left\{ \sum_{i \in N} p_i (d_i - q_i), \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} / E_k \right\}$$

Subject to

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ijk} &= 1 && \forall i \in N, \\ \sum_{j \in V} x_{0jk} &= 1 && \forall k \in K, \\ \sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} &= 0 && \forall h \in N, \forall k \in K, \\ \sum_{i \in V} x_{i,n+1,k} &= 1 && \forall k \in K, \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in V \setminus S} x_{ij} &\geq 1 && \forall S \subset V, (S \neq \phi, S \neq V), \\ \sum_{i \in N} q_i \sum_{j \in V} x_{ijk} &\leq Q && \forall k \in K, \\ \sum_{i \in N} q_i &\leq T \\ q_{\min} &\leq q_i \leq d_i && \forall i \in N, \\ x_{ijk} &= \{0,1\} && \forall i, j \in N, \forall k \in K, \end{aligned}$$

ただし、

- i, j, h, n : 避難所番号、0及びn+1は配送拠点を表す
- N : 避難所の集合
- p_i : 避難所*i*における単位配送量あたりの供給不足ペナルティ値
- d_i : 避難所*i*における需要量 (個)
- q_i : 避難所*i*における配送量 (個)
- K : 配送トラックの集合
- k : 配送トラック番号
- A : リンクの集合
- c_{ij} : 避難所*i-j*間の距離(m)
- x_{ijk} : 配送トラック*k*が避難所*i-j*間を移動するときは1、それ以外のときは0をとる変数
- E_k : 配送トラック*k*の燃費(m/L)
- V : 避難所及び配送拠点の集合
- S : V の部分集合

- Q : 配送トラックの積載容量 (個)
- T : 配送拠点に存在する総供給量 (個)
- q_{min} : 避難所に対する最低限の配送量 (個)

本研究では多目的最適化問題の解法として非優越ソート遺伝的アルゴリズム(以下、NSGA-II)¹⁰を用いる。NSGA-II の最大の特徴は、Goldberg¹¹)によって提案された個体のランク付け方法の 1 つである非優越ソート(non-dominated sorting)の概念に基づいて設計されている点である。よりランクの高い個体に優位な適応度を割当てているため、探索は必ずパレート最適フロントへ進む。また、混雑距離の導入による個体の多様性の維持や、探索過程において見つかった非優越解の保存などの特徴も有しており、災害時の救援物資配送計画策定のためにできるだけ多くの有用な選択肢を提示することが求められる本研究のような状況において有効であると言える。NSGA-II 内で用いる個体の適応度は、その配送量の組み合わせの下、最小化された総供給不足ペナルティ及び総消費燃料を基に非優越ソートにより決定する。また、総消費燃料の最小値及び配送トラック台数は、組合せ最適化手法であるタブーサーチによって算出する。遺伝的操作(混雑度トーナメント選択、交叉、突然変異)を用いて次世代を生成し、解の探索を進める。設定した世代数だけ探索を繰り返し、最終世代における非劣解を本モデルにおける解とする。

(2) 計算ケース

本研究では、南海トラフ地震が発生した際に大きな被害を受けると想定される高知市の救援物資配送計画に関する分析を行う。高知県では、南海トラフ巨大地震による被害想定を進めている。被害想定のための地震・津波として、「現時点の最新の科学的知見に基づく発生しうる最大クラスの地震・津波」と「発生頻度の高い一定程度の地震・津波」を用いており、それぞれ、L2、L1 としている。本研究では、高知県にヒアリングを行い、上記のような被害想定に関する情報収集を行うとともに、L1、L2 の津波により浸水被害の影響を受けることが想定されている高知市の救援物資配送に関する分析を行う。高知市で 149 箇所の避難所が選定されている。現在、L1、

L2 の地震が起きた場合に備え、津波による浸水区域内にあるか否か、耐震性が有るか否か、収容可能人数が何人であるかを調査している。これらのデータを参考に、救援物資の配送を想定して、計算を行った。具体的には、L2 の地震が起きた場合に、津波による浸水被害を受けない避難所(68 箇所)において、需要に対し、半分の量の供給しか用意できないケースを考える。各避難所の優先度、つまり単位配送量あたりの供給不足ペナルティ値は、0.8~1.2 の間の 0.1 刻みの値をランダムに割り当てた。配送の拠点は、「高知県総合防災拠点基本構想」において中央エリアの広域拠点として定められている「県立春野総合運動公園」とした。

(3) 計算結果

図-6 に需要に対して半分の量の供給しかできない場合の多目的最適化計算により得られたパレート最適解を示す。総供給不足ペナルティ及び総消費燃料について、複数のパレート最適解が得られている。このような図を用いることによって、総供給不足ペナルティ及び総消費燃料の 2 つの目的関数のバランスを考慮しながら、解を選ぶことができる。

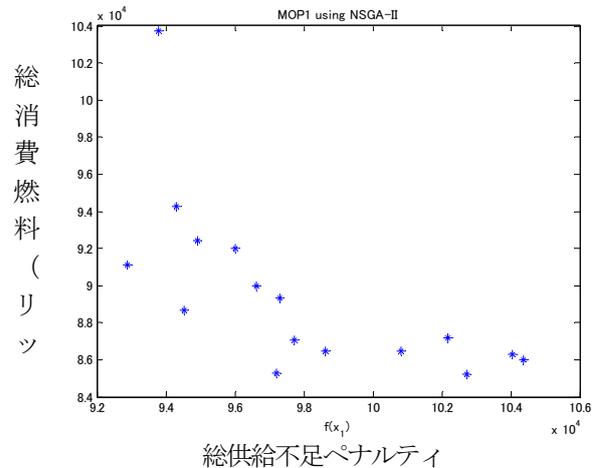


図-6 パレート最適解

図-7 は、図-6 中の総供給不足ペナルティが 9.45×10^4 、総消費燃料が 8.87×10^4 (リットル) の場合について各避難所の配送物資の充足度を示す。この図において各避難

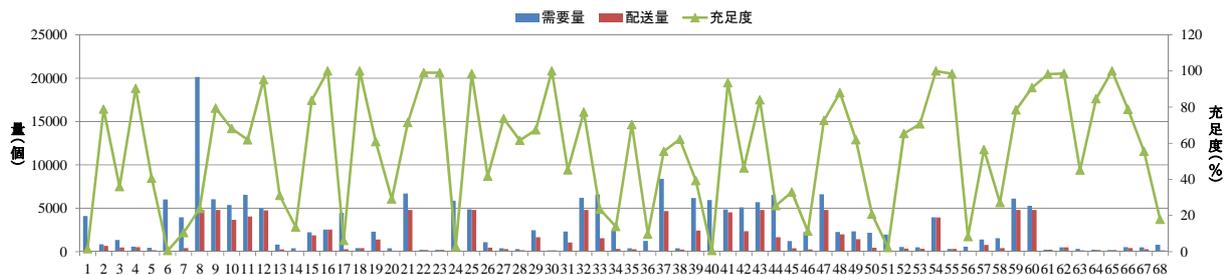


図-7 各避難所における需要量、配送量、充足度

所の充足度は高いところと低いところがあるが、これは、各避難所の優先度をランダムに割り当てたためである。充足度の不均衡を平準化するためには多期間にわたって、充足度の低い避難所について、次の日の配送の優先度を上げる方策などが考えられる。

4. おわりに

本研究においては、災害時の救援物資輸送について、効率化および被災者の困窮の最小化という観点から、フェリーの活用のご検討およびトラックによる避難所への配送の最適化モデルの構築を行った。フェリーは大量輸送交通機関であり、自己完結性、優れた操船性、マルチモーダル輸送機能は大災害時の救援物資輸送に適している。しかし、長距離フェリー航路の維持、港湾の耐震バースの建設、港湾へのアクセス道路の確保などの課題がある。また、避難所への救援物資配送について、多目的配車配送モデルを構築し、実際のケースに適用し、効率性のみならず、被災者の困窮の最小化を図ることの重要性が指摘された。今後はさらに物資配送拠点の配置に関する研究が必要である。

謝辞：

本研究の実施にあたって、ケーススタディの対象とした高知県及び四国地方整備局並びに四国運輸局からデータ等の提供を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Holguin-Veras, J., Jaller, M., Taniguchi, E. and Aros-Vera, F., The lessons from catastrophic events for post-disaster humanitarian logistic efforts: The Port au Prince earthquake and the Tohoku disasters, 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board, 2013.
- 2) 日刊海事通信社, フェリー 旅客船ガイド, 2011年8月
- 3) Ono, K., An impact of the east Japan great earthquake on the local and global logistics, Presented at the International seminar on humanitarian logistics and emergency management, Kyoto, November. 2012.
- 4) 小野憲司, 災害時物流の担い手としてのフェリー、Ro-Ro 船の役割と課題, 日本船長協会誌「船長」, 3月号, 130巻, 8頁~22頁, 2013.
- 5) Ono, K., The possible policy development for facilitating ER operations by ro-ro vessels, Presented at the International seminar on resilient and sustainable road freight systems and humanitarian logistics, Kyoto, April, 2013.
- 6) Suzuki, O., Expected activities of the mega ferry boats when extensive disaster has taken place, Presented at the International seminar on resilient and sustainable road freight systems and humanitarian logistics, Kyoto, April, 2013.
- 7) Ono, K., Kanda, M., Impact of the east Japan great earthquake and tsunami on the local logistics, Presented at International conference on transport and logistics, Busan, August 2012.
- 8) 小野憲司, 赤倉康寛, 東日本大震災における港湾物流へのインパクトと海運・港湾部門のレジリエンス機能, 京都大学防災研究所年報, Vol.56B, 23頁~36頁, 2013
- 9) 岡林楠博, 中村有克, 安東直紀, 山田忠史, 谷口栄一, 災害時における配送量の優先度を考慮した救援物資配送モデルの構築, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, pp.1887-1897, 2011.
- 10) Deb, K., Agrawal, S., Pratab, A. and Meyarivan, T., A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II, Parallel Problem Solving From Nature -PPSN VI, pp.849-858, 2000.
- 11) Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesly Longman Publishing Co., 1989.