

災害時における緊急支援物資の 最適配分モデルの提案と適用

伊坂 早織¹・大窪 和明²

¹非会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail: s.isaka.179@ms.saitama-u.ac.jp

²正会員 愛媛大学 防災情報研究センター (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)
E-mail: okubo@cee.ehime-u.ac.jp

本研究は、Cell based Merchant-Nemhauserモデルに基づく緊急救援物資の最適配分モデルを提案する。供給地点から避難所までの総輸送時間及び総滞留時間を最小限に抑え、動的なシステムで緊急支援物資と労働力を物資集積所に最適に配分する。本研究ではさいたま市の地震災害にこのモデルを適用して、集積所の位置の変化による影響の評価を行う。近年のさいたま市と民間の宅配業者の協定により利用可能となった物資集積所を追加することで、短時間で輸送できるようになったことがこのモデルからわかった。また、供給量の不確実性に対する輸送の堅牢性も向上させることができる。本研究では、最適な労働力の配分について検討し、計画期間内に緊急救援物資を迅速に配送するために、多くの労働力を配分すべき重要な物資集積所を明らかにした。

Key Words : emergency relief supply, disaster, cell based M-N model, stagnation, shortage of manpower

1. はじめに

(1) 社会的背景

災害時において迅速な緊急支援物資輸送は多くの人命を救い、被災者に対し精神的な安心感を与える。東日本大震災、熊本地震など大規模災害を経験してきた中で、道路途絶や人員不足などの不確実性に伴う緊急支援物資輸送の様々な問題点が指摘されてきた。その中で、全国各地から寄せられた大量の緊急支援物資が避難所に届かないという問題がある。

緊急支援物資が避難所に届かない原因として、峯¹⁾によると、被災による道路ネットワークの寸断や燃料不足・運転手不足による車両不足等が原因として生じる輸送力の低下を挙げている。それ以外にも、苦瀬²⁾の報告から、被災地に届けられる緊急支援物資が大量かつ不規則に到着すること、物資集積所で仕分けを行う労働者自身が被災することで生じる労働力不足、市役所等の自治体の職員による普段の業務と異なる不慣れた作業といった物資集積所での非効率な作業が原因となり、被災地内物資集積所で大量の緊急支援物資が滞留し、避難所まで届かなくなることが指摘されている。

現在の緊急支援物資の供給体制³⁾は、国など被災地外の物資提供者、被災地内の県単位の一次集積所、被災地

内の市区町村単位の二次集積所、からなる3段階体制をとっている。これまでも被災地内での物資集積所に当たる一次集積所、二次集積所での労働力不足の解消や輸送計画の改善に関わる対策が考えられてきた。例えば、埼玉県では防災基地や大規模施設、防災拠点校といった広域防災拠点の選定を行っており、さいたま市では平成28年に集配を通常業務とする佐川急便と協定を結び、災害時の緊急支援物資輸送への協力体制を確保している⁴⁾。しかし、このような対策の効果を議論するための定量的な分析枠組みは整備されておらず、新たな業務提携や、集積所を確保することの必要性を定量的に評価できない。また、限られた労働力を配分する上で、目指すべき規範となるような配分を算出できるような枠組みもない。

(2) 既存研究

緊急支援物資の輸送に関する既存研究で、熊谷⁵⁾は、マイクロ交通シミュレーションを用いて、災害時の陸上交通環境が及ぼす影響に重点を置き、一般車両の混入を考慮した車両の動きを把握する研究を行っている。

また、間島⁶⁾は、災害時輸送シミュレータを作成し、避難所における需要と実際の供給の関係から需要地点の優先順位付けを行い、マルチエージェントの考えに基づいたシステムを構築した。さらに、荷上げ、荷下ろしの

時間を考慮するなど実際の災害の状況を考慮したシミュレータを作成している。

Xinhua⁷⁾の研究では、待ち行列を考慮した緊急支援物資のサプライチェーンに関する研究を行っている。商品の待機時間や輸送にかかる時間を待ち行列として表現できるもので、すべての作業を終えるまでの時間と、それに伴う経済的損失を最小化する最適化手法のモデルを提案した。

これらの研究は、緊急支援物資の動きを見ることに重点を置いており、間島の研究では荷上げ・荷下ろしの時間は考慮しているものの、仕分け・配分を行う集積所での労働力の問題については考慮されていない。そこで、集積所での労働力を変数として扱うことのできるモデルが必要である。本研究ではNie⁸⁾のCell based M-Nモデルを用いる。このモデルは、時間・場所ごとのセルの容量を把握でき、混雑と渋滞の伝播や、複雑な道路状況をセルとノードを使って簡便に表現することができるモデルである。したがって、各セルは変数を持つことになり、先述した集積所での労働力を操作変数として扱うことが可能である。

(3) 研究目的

本研究では複数の物資集積所の配置及び使用を与件として、緊急支援物資総輸送時間を最小にするような最適な輸送形態を算出する最適配分モデルを考える。物資集積所における物資の滞留を考慮するために、緊急支援物資の滞留や交通渋滞といった動的なシステム最適配分を可能にする緊急支援物資の最適配分モデルの開発を行う。その後、さいたま市で想定されている大規模地震に適用を行い、現状の取り組みを定量的に評価する、集中的に労働人員を配置すべき集積所を明らかにする、新たな集積所の追加がもたらす影響を明らかにするといったことについて調査することを目的とする。なお、本研究では発災直後ではなく、発災後3日を過ぎた時点で、被災地からの需要が発生してからの適用を考える。

2. 緊急支援物資最適配分モデルの提案

(1) 緊急支援物資最適配分モデル

本研究で用いる緊急支援物資の最適配分モデルは、動的なシステム最適配分を可能にしたNie⁸⁾のCell based M-Nモデルを基本として開発を行う。これは、ハリケーンや津波等の災害の避難計画の際の、人々の最適避難行動の表現には用いられているが、緊急支援物資の輸送に対し用いられた例はまだない。そこで本研究で扱う緊急支援物資の最適配分モデルを“Emergency Relief Supply(緊急支援物資)”の頭文字をとりCell based ERSモデルと名付ける。

(2) 緊急支援物資最適配分モデルの定式化

式(1)は、緊急支援物資の輸送時間・滞留時間の最小化を目的とする関数である。 a はセルを表し、その範囲は A の集合であり、この集合は A_0 供給セル、 A_B 集積所セル、 A_S 避難所セルに分けられる。ここで、供給セルは供給を始めるセル、集積所セルは物資を仕分け・配分し、避難所に配送するセル、避難所セルは供給を受け取る需要店となるセルを指している。各セルは、時刻 t にセル a から流出・セル a に流入・滞留している物資量をそれぞれ v_a^t, u_a^t, x_a^t 、集積所セル a で配分に携わる人員数を l_a とする変数を持つ。

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{a \in A} d_a x_a^t \quad (1)$$

s.t.

$$x_a^t = x_a^{t-1} - v_a^{t-1} + u_a^{t-1} \quad t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \setminus A_0 \cup A_S \quad (2)$$

$$x_a^t = x_a^{t-1} - v_a^{t-1} \quad t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_0 \quad (3)$$

$$x_a^t = x_a^{t-1} + u_a^{t-1} \quad t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_S \quad (4)$$

$$\sum_{a \in O(i)} u_a^t = \sum_{a \in I(i)} v_a^t \quad t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A, \forall i \in N \quad (5)$$

$$x_a^t \leq \begin{cases} c_a & \forall a \in A \setminus A_B \\ C_a & \forall a \in A_B \end{cases} \quad t \in \{1, \dots, T\} \quad (6)$$

$$u_a^t \leq Q_a \quad t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (7)$$

$$v_a^t \leq \begin{cases} Q_a & t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \setminus A_0 \cup A_B \\ l_a \cdot R & t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A_B \end{cases} \quad (8)$$

$$x_a^0 = 0 \quad \forall a \in A \quad (9)$$

$$u_a^t \geq 0 \quad t \in \{1, \dots, T-1\}, \forall a \in A \quad (10)$$

$$x_a^t, v_a^t \geq 0 \quad t \in \{1, \dots, T\}, \forall a \in A \quad (11)$$

$$0 \leq l_a \quad \forall a \in A_B \quad (12)$$

$$\sum_{a \in A_B} l_a = L \quad (13)$$

$$x_a^T = D_a \quad \forall a \in A_S \quad (14)$$

ここで、 N はノードの集合、 $I(i), O(i)$ はそれぞれノード i の上流側、下流側でつながっているセルの集合、 c_a, C_a はセルに収容可能な緊急支援物資の最大容量、 Q_a はセル a での流出入可能な緊急支援物資の最大容量である。

式(2)~(5)は交通量保存則、式(6)~(8)は物資量がフローとセルの最大容量以下であることを示しており、式(9)はどのセルにおいても初期物資量は0であること、式(10)~(12)は内生変数の非負制約を表している。また、式(13)は、人員数の合計が最大人員数以下であること、式(14)は避難所セルの最終物資量が需要と等しくなることを示している。

本モデルでは、道路や集積所の収容容量制約により、

その道路・集積所セルに入りきれない車両の、待ち行列としての表現が可能になる。また、外生的にODを与えていないため、輸送車両の進路選択は、目前の道路を通る際の輸送時間・滞留時間の最小化に則りおこなっている。そのため、求められた最適解に応じて、どの道路・集積所セルに物資が集中しやすいのかを検討することが可能である。

3. ケーススタディ

(1) 対象地域と被害想定

埼玉県⁹⁾によると、埼玉県は関東平野北西縁断層帯地震による被害が最も大きいと予想されている。本研究ではこの地震による被害が最も大きくなると予想される埼玉県さいたま市西区の避難所を需要点とし、その周辺で道路ネットワークを形成する。また避難者数については、埼玉県⁹⁾が公表しているさいたま市西区の避難者予測人数より9600人分として仮定した。

(2) 集積所の選定^(10), 11)

埼玉県では、災害発生時に迅速・適切な応急対策を行うため、被災地域に対する広域的な救援活動を行う防災活動拠点が必要であるとして、防災基地をはじめ広域的でかつ主要な施設を防災活動拠点として位置づけ整備している。本研究では、その中から緊急支援物資の備蓄機能及び集配機能を持つ防災基地から、中央防災基地・新座防災基地・越谷防災基地の3施設を、大規模施設からさいたまスーパーアリーナ・埼玉スタジアム2002の2施設を、加えてさいたま市が新たに協定を結んだ佐川急便さいたま営業所を集積所セルに選定した。さらに、被災地に近い地点に集配機能を持つ施設を増やしたときの影響を考慮するために、備蓄機能のみを持つ防災拠点校から埼玉県立いずみ高等学校(以下、いずみ高校)・埼玉県立岩槻商業高等学校を、防災拠点として指定されていないが防災についての研究を行っているレジリエント社会研究センターを持つ埼玉大学と、通常集積所として扱われることの多い埼玉県庁を集配可能施設として集積所セルに選定した。

(3) ネットワークの構築

全ての集積所セルをつないで道路ネットワークを作成した。この際、さいたま市西区付近は詳細に、そのほかの地区は簡略的に表現する、ネットワークの縮約化の考えの下、ネットワークを設定した。

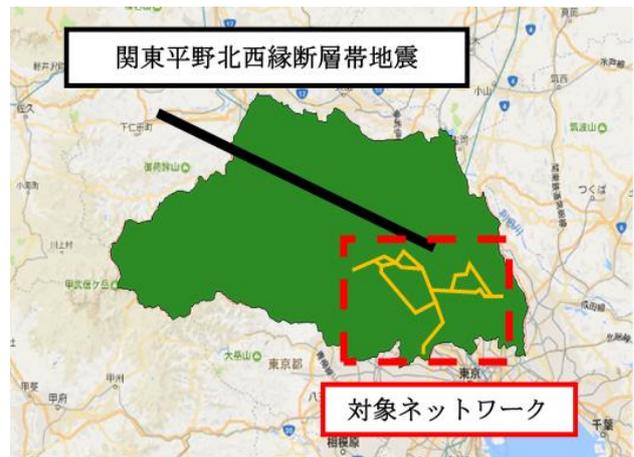


図-1 対象地震と対象ネットワークの位置関係(地図: Googleマップより)

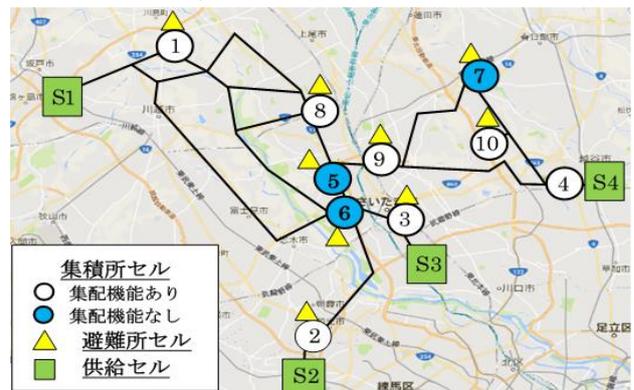


図-2 対象ネットワークと主要セル(地図: Googleマップより)

表-1 集積所セル名

番号	集積所セル名	番号	集積所セル名
1	中央防災基地	6	埼玉大学
2	新座防災基地	7	岩槻商業高校
3	埼玉県庁	8	佐川急便
4	越谷防災基地	9	さいたまスーパーアリーナ
5	いずみ高校	10	埼玉スタジアム2002

単位時刻は5分、自由速度を一般道路では30km/h、高速道路では85km/hとする。4個の供給セルを用意し、ここから緊急支援物資の供給を行う。また、避難所セルは各集積所からの直接配送を考慮するため、集積所セルに直接接続することで表現している。道路ネットワーク上の道路は約1kmで区切られており、輸送は大型トラックによるものと仮定している。そのため、1つのセルの収容容量は大型トラック1台分として考える。また、本研究では車両を1として考えるのではなく、1台の車両に積載可能な緊急支援物資の個数として表し、その単位を[人分]とする。大型トラックの体積から、1台の容量は600人分として設定している。また、道路セルのフロー容量は、最大容量と等しく600人分とする。供給セル及び避難所セルの収容容量・フロー容量はともに無限大として考え、制限していない。

4. 設定条件

(1) 最適配分ケース

最適配分を実行するにあたり、避難所セルにおける需要を均等に配分することを考え、その到着時刻の差から、緊急支援物資を輸送する上で重要となる集積所セルを認識する。また、さいたま市では平成28年に佐川急便株式会社と協定を結び、災害時にさいたま市西区に位置する佐川急便株式会社さいたま営業所(以下、佐川急便)を利用することができるようになった。このような集配機能の強化を評価するために、次の、「現状と等しく、佐川急便との協定があり、防災拠点校に集配機能がない現状ケース」、「現状ケースで佐川急便との協定がない非協定ケース」、「現状ケースで防災拠点校に集配機能を持たせた強化ケース」の3つのケースを最適配分ケースとして設定する。

(2) 供給の方法

供給の方法は、4つの供給セルからランダムに需要と等しい量の緊急支援物資を供給するランダム供給と、4つの供給セルのうちの1つを選択し、枚単位時間供給を行う固定供給、そして全ての供給セルから枚単位時間供給を行う全地点供給を用いる。さらに、本研究では緊急支援物資が避難所に届き、計画期間内に避難所の需要を満たすことができた場合を成功、できなかった場合を不成功として、その結果の検証を行う。

(3) 労働人員制限とモデル

本研究の仮定として、最大労働人員数を100人に設定した。また、実際の現場において集配機能を持たない集

積所セルは、元々集配機能を持つ集積所セルに比べて人員を配分されることはないと予想される。そこで、少人数で固定値を用いることとし、設定値は仮に5人とした。

また、集積所セルの人員数を最適に配分するモデルを最適人員配分モデル、人数を固定するモデルを人員固定モデルとする。

5. 最適配分結果と考察

(1) 最短計画期間

ランダム供給を1000回行うモンテカルロシミュレーションを実施し、過半数が成功した場合の計画期間をそのケースの最短計画期間として設定した(表-4)。この結果より、強化ケースの計画期間が最も短く、非協定ケースが最も長くなった。このことから、佐川急便との協定が加わることで、需要を満足するまでの時間を短縮することが可能であると分かった。また、集配機能の強化を行うことで、配置人数が少なかったとしても計画期間を短くできる可能性がある。

(2) 佐川急便との協定がもたらす効果

同様のモンテカルロシミュレーションを実施し、現状ケースと非協定ケースで成功した場合の目的関数値の分布の比較を行った(図-3)。この図より、非協定ケースの目的関数値は横に広く分布しており、物資の輸送時間・滞留時間に供給条件が大きく関わることが分かる。一方、現状ケースの目的関数値はより小さい値に集中して分布しており、物資の輸送時間・滞留時間に対して、供給条件は大きな影響を与えず、ほぼ定まった目的関数値で避難所の需要を満たすことができると考えられる。

表-2 各ケース名と条件

		佐川急便	
		協定あり	協定なし
防災拠点校	集配機能なし	現状ケース	非協定ケース
	集配機能あり	強化ケース	-

表-3 供給方法

供給方法	詳細
ランダム供給	4つの供給セルからランダムに需要と等しい量を供給
固定供給	1つの供給セルから毎単位時間供給
全地点供給	全供給セルから毎単位時間供給

表-4 人員配分モデル

モデル名	詳細
最適人員配分モデル	最適な人数を配分
人員固定モデル	人数を固定

表-5 各ケースの最短計画期間

ケース名	最短計画期間
現状ケース	T=13(65分)
非協定ケース	T=15(75分)
強化ケース	T=12(60分)

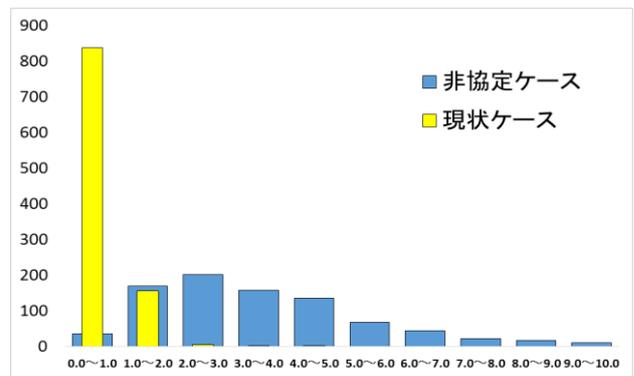


図-3 現状ケースと非協定ケースの目的関数値分布[千人・分]

また、現状ケースでは全ての供給条件で、輸送を成功させている。したがって、佐川急便と協定を結ぶことで、さいたま市西区に緊急支援物資を輸送する効率が上がると予測できる。

(3) 集配機能の強化がもたらす効果

モンテカルロシミュレーションを実施し、現状ケースと強化ケースで成功した場合の目的関数値の分布の比較を行った(図-4)。この図より、現状ケースに比べて強化ケースは目的関数値はより小さい値に集中している。このことから、集配機能を強化することで、緊急支援物資の輸送時間・滞留時間短縮の可能性が考えられる。

(4) 未成功の場合の供給条件

非協定ケースでは全ての供給条件で輸送を成功させているわけではなく、未成功となる供給条件が存在している。このような供給条件に共通しているのが、供給セル2及び3からの供給量が供給セル1及び4からの供給量に比べてかなり多いということである。これは、供給セル2及び3付近の道路ネットワーク、または集積所セルで物資が滞留していることが考えられる。

この仮定を検証するため、全地点供給を行った結果、供給セル3付近の道路及び集積所セル(埼玉県庁)で緊急支援物資が滞留していることが分かる(図-5)。したがって、供給セル3から集中的に緊急支援物資を供給するこ

とは避けるべきであると考えられる。

また、固定供給を行い、避難所の需要を満たすことができるかを調査した結果、現状ケース・強化ケースでは供給地点がどの供給セルであっても、輸送を成功させていることが分かった。一方で、非協定ケースでは供給セル2及び3から固定供給を実施した場合、輸送を成功できていない。このことから、供給時には供給セル2及び3方向からの集中した供給は避けるべきであると考えられる。また、このことから、佐川急便との協定を行ったことで、輸送の成功確率を上げ、輸送時間・滞留時間の短縮が可能になったと考えられる。

(5) 最適労働人員配分

本研究では、最適な労働人員配分を把握するため、各集積所セルの労働人員は内生変数として設定している。本研究で実施した最適配分で得られた最適労働人員配分より、さいたまスーパーアリーナ、佐川急便、埼玉県庁に対し、多くの人員を配置すべきであることが分かる(図-6)。また、その他の集積所セルでは、ばらつきが0から始まることもあり、供給条件により最適な人員の配置が変化すると考えられる。この人員数の変化には、供給を行う供給地点に近い集積所セルでの人員数が他よりも多くなるという傾向が見られた。

(6) 労働人員を固定した場合

労働人員の最適配分の効果について調査するため、本節では集積所セルの人員数を固定し、モンテカルロシミュレーションを実施する。また、計画期間は20, 40, 60, 80, 90, 100, 120, 140, 160, 180分とする。

a) 現状ケース(図-7)

どちらのモデルも、全ての供給条件で輸送を成功させているが、人員数を固定した場合は計画期間140分で初めて成功したのに対し、最適な人員配分では計画期間80分で初めて成功している。

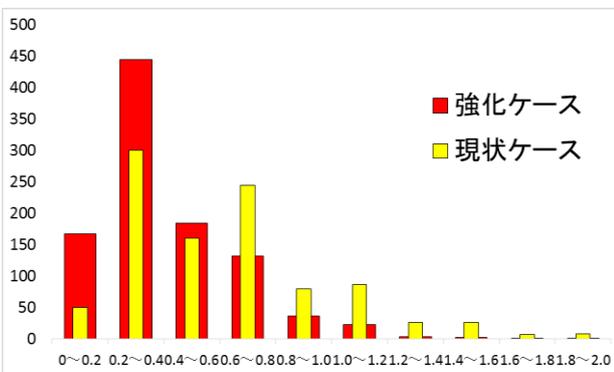


図-4 現状ケースと強化ケースの目的関数値分布[千人・分]

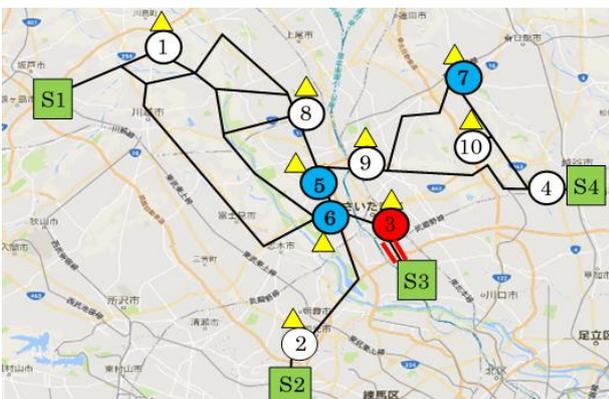


図-5 滞留発生地点(赤色)(地図: Googleマップより)

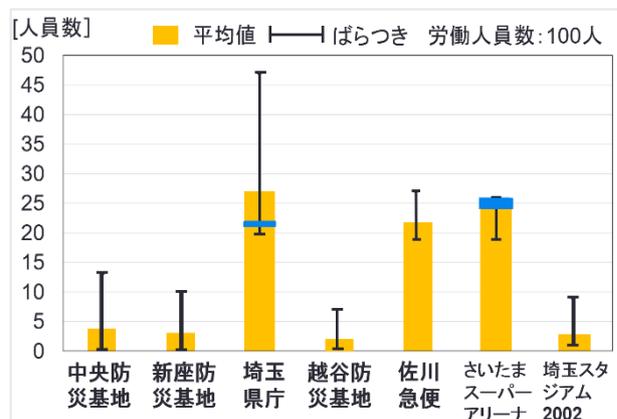


図-6 人員数の平均値とばらつき

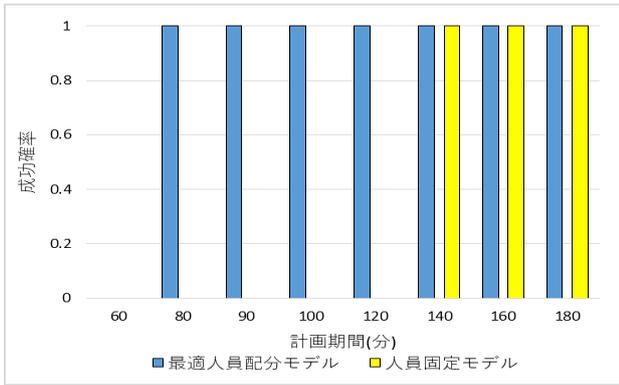


図7 現状ケースの各人員配分モデルの成功確率

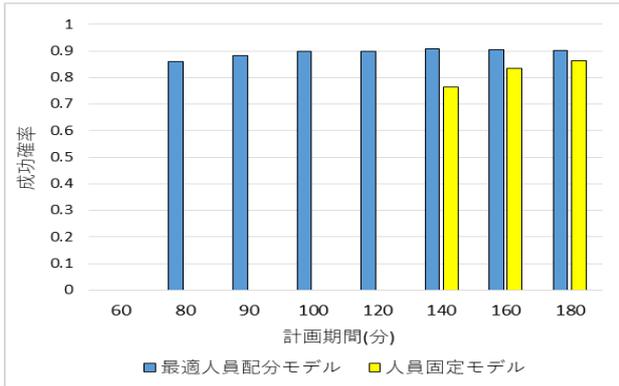


図8 非協定ケースの各人員配分モデルの成功確率

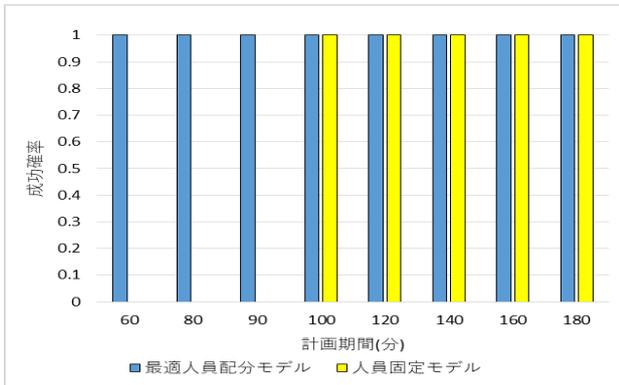


図9 強化ケースの各人員配分モデルの成功確率

b) 非協定ケース(図-8)

初めて成功例が見られた計画期間は、どちらのモデルでも共に、現状ケースのものと同一であった。成功回数は計画期間が長くなるにつれて増加する傾向にあるが、ここでも人員を最適に配分したほうが、短い計画期間で同等の成功回数を得ることができている。

c) 強化ケース(図-9)

現状ケース同様、人員の配置によらず全ての供給条件で輸送を成功しているが、初めて成功例が見られた計画期間は、人員固定モデルでは100分であるのに対し、最適人員配分モデルでは60分であり、両方のモデルで現状ケースよりも良い結果を得られている。

a), b), c)の結果より、集積所の労働人員は、あらかじめ固定して動かさないのではなく、最適な人員を配置できるよう柔軟な対応を行うことで、輸送の成功確率並びに、迅速な輸送を行うことができると考えられる。

6. おわりに

さいたま市と佐川急便との協定によって、さいたま市西区を対象とした緊急支援物資の輸送を迅速に行うことができることが示された。また、集配機能の強化により、目的関数値のより良好な分布、計画期間の短縮が見込まれる結果となった。しかし、新たに集配機能を持たせた施設の中で、避難所に近い埼玉大学やいずみ高校はよく利用されていたが、遠い岩槻商業高校はあまり使われていなかった。このことから、集配機能を新たに強化する場合、避難所に近い地点の集配機能を強化することで、迅速な輸送が可能であると考えられる。

また、最適人員配分を行うことで多くの人員を配置すべき集積所を明らかにできたが、それ以外の集積所は供給地点によってばらつきがあるため、実際の適用では、使用可能な道路や人員数を把握した上での適用を行い、最適な人員配置及び供給地点を見極める必要がある。

参考文献

- 1) 峯 猛：東日本大震災における救援物資供給停滞の発生とその要因，pp.16-21，物流問題研究 No.56，2011.
- 2) 苦瀬ら，土木計画学研究委員会 物流調査団：熊本地震報告会 物流被害と対策と提言，熊本地震報告会，2016.
- 3) 桑原雅夫，和田健太郎：東日本大震災における緊急支援物資の流れの記録と定量分析—国および県が取り扱った緊急支援物資の流れの分析—，運輸政策研究 Vol.16 No.1，pp.42~53，一般財団法人 運輸政策研究機構，2013.
- 4) さいたま市：佐川急便株式会社と「災害時等における支援物資輸送拠点としての協力に関する協定」を締結しました，さいたま市公式ホームページ，2016. <http://www.city.saitama.jp/001/011/015/009/001/p049444.html>
- 5) 熊谷 兼太郎，小野 憲司：緊急支援物資輸送（ERL）シミュレーションに関する基礎的検討，第53回土木計画学研究発表会・講演集，pp.820~823，2016.
- 6) 間島隆博：災害時輸送と物資輸送シミュレータ，海上技術安全研究所報告第14巻，第4号，特集号(平成26年度)基調論文，pp.37~44.
- 7) Xinhua He and Wenfa Hu：Modeling Relief Demands in an Emergency Supply Chain System under Large-Scale Disasters Based on a Queuing Network，The Scientific World

- Journal, Volume 2014 (2014), Article ID 195053, 12 pages, 2014.
- 8) Yu (Marco) Nie : Transportation Research Part B Methodological Volume 45, pp.329~342, 2011.
- 9) 埼玉県：平成 24・25 年度埼玉県地震被害想定調査報告書(本編), 埼玉県公式ホームページ, 2014.
<http://www.pref.saitama.lg.jp/a0401/higaisoutei/higai-souteihokoku.html>
- 10) 埼玉県：年次報告書「埼玉県の震災対策」, 埼玉県
 (2017.?? ?? 受付)
- 公式ホームページ, 2017.
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0401/903-20091203-58.html>
- 11) 埼玉県：防災拠点施設紹介, 埼玉県公式ホームページ, 2011.
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a1109/bou-saikyotenarubamu.html>

AN OPTIMAL ALLOCATION MODEL OF EMERGENCY RELIEF SUPPLIES AND ITS APPLICATION

Saori ISAKA and Kazuaki OKUBO

I proposed an optimal allocation model of emergency relief supplies based on cell based Merchant-Nemhauser model. The model minimizes the total transportation time from supply origins to shelters and provides an optimal allocation of the supplies and labor into depots in dynamic setting. I applied the model to an earthquake disaster in Saitama city to evaluate the effect of changes in depot location. I found that the addition of depot, which is provided by the recent cooperation between Saitama city and a delivery service company, enables the transportation in shorter time. And it also improves the robust-ness of transportation against uncertainty in the amount of supply. We also examined the optimal allocation of labor into depots and found critical depots, which should be allocated many labors, to transport the emergency relief supplies efficiently within limited time span.