

# 自然災害時の救援物資における配送計画問題

## - 愛知県名古屋市を対象として -

M2011MM062 千田裕士

指導教員：鈴木敦夫

### 1 はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、救援物資配送における問題点が数多く残された。その問題の1つとして震災直後、全国から救援物資が集積所に届けられたのにも関わらず、避難所に十分に届かないという事態が起こった。この理由として、トラック不足や予定していた集積所の被災、そしてこれまでの自然災害ではなかった燃料不足などが挙げられる[1]。ゆえに震災直後、避難所に物資を十分に届けるためには、トラック確保や効率的に資源を活用するような巡回路選定などを考慮したロジスティクス構築のための事前準備が重要となる。

本研究では、東日本大震災で明らかになった救援物資の配送問題に関することを教訓とし、愛知県を中心に発生すると言われている東海・東南海大地震に備え、シミュレーションにより必要トラック台数や所要配送時間などを示すことを目的とする。定量的な評価を行うことで効率的に資源を利用した物流ネットワークを構築する。また実被害の想定が複雑であるため、いくつかの典型的なシナリオのもとでシミュレーションを行う。研究対象は最も避難者数が多くなると言われている愛知県名古屋市とする。名古屋市は人口2,265,112人(平成24年1月1日現在)に対して物資を避難所に届ける役割を果たす集積所は5ヶ所、自宅待機が困難になった人のための避難所は781ヶ所(合計で256,240人収容可能)指定されている。また東海・東南海大地震2連動時の予測避難者数は約17万人である[2]。そして本研究の結果が名古屋市の災害対策を考える上での物資輸送の指針の1つとなるようにする。

### 2 救援物資配送について

#### 2.1 概要

救援物資配送とは、地震などの自然災害時に正常な生活が困難になった人に対して物資を支援するための配送である。一般的には被災地外と被災地内の配送に分けて考えられ、階層型の配送システムで実務が行われる。実際に東日本大震災で被害のあった宮城県仙台市での配送システムを図1に示す。

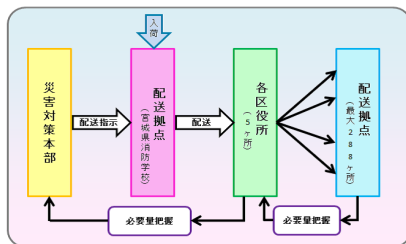


図1 震災直後における仙台市の配送システム

また救援物資配送では迅速かつ円滑な対応が求められる。迅速ということに関しては、震災直後に避難者数が最大ピークを迎えるからである。また円滑ということに関しては、震災直後はトラックや燃料など、配送のための利用できる手段が限られてくるので、その中でいかにして円滑に配送を行うかが重要となる。

#### 2.2 仙台市および名古屋市の聞き取り調査

東日本大震災で実際に被害のあった宮城県仙台市、および研究対象とする名古屋市で聞き取り調査を行うことにより、救援物資配送の実態を把握した。それぞれの地域での聞き取り調査で得られた知見を表1、表2に示す。

表1 仙台市の聞き取り調査結果

第1段階(初期期) 震災直後～3,4日	第2段階(応急対策活動期) 震災後3,4日～1週間	第3段階(復旧活動期) 震災後1週間以降
震災直後、事前に協定を締結していた県から救援物資が届く	震災直後、集積所の決定が行われたが(住宅街の小学校)、翌日に変更となる(宮城県消防学校)	震災直後、事前に協定を締結していた県から救援物資が届く
配送を担当したのは市職員(作業員は5～60人程度)	必要物資量の把握が難航した → 需要と供給のミスマッチが発生	約1日分の備蓄物資(少量)
輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	確認はすべて使用可能
約1日分の備蓄物資(少量)	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	震災2日後に、最大避難者数を記録(105,947人)
確認はすべて使用可能	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	自衛隊の協力により配送担当は自衛隊となり、配送システムは変更
震災2日後に、最大避難者数を記録(105,947人)	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	輸送車や燃料などの問題は解消
	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	震災後4日後までに電力インフラの回復
	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	震災後5日後には避難者数が最大ピーク時の半分になる
	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	ガソリン供給の回復
	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	余剰した救援物資のための倉庫開設(3/18)
	輸送車および燃料不足による輸送能力の逼迫	ガソリンの正常供給開始(4/1)

表2 名古屋市の聞き取り調査結果

初期期の対応 (震災直後～3,4日)	初期期以降の対応 震災3,4日後～
まずは備蓄物資の配送(40万人分)、その後救援物資の配送を行う	まずは備蓄物資の配送(40万人分)、その後救援物資の配送を行う
備蓄物資は各避難所・区役所および備蓄倉庫(住所非公開)に保管	備蓄物資は各避難所・区役所および備蓄倉庫(住所非公開)に保管
備蓄物資の保管は1人1食、少量のみで飲料水の備蓄はなし	備蓄物資の保管は1人1食、少量のみで飲料水の備蓄はなし
地下水栓から給水予定であるが、液状化などによって使用不可になることもあり	地下水栓から給水予定であるが、液状化などによって使用不可になることもあり
救援物資に対して、事前に協定を締結しているため物資の調達が可能	救援物資に対して、事前に協定を締結しているため物資の調達が可能
輸送車についても、協定による10台の確保が可能(台数は未定)	輸送車についても、協定による10台の確保が可能(台数は未定)
約1日分の配送を想定	約1日分の配送を想定
集積所は市内5ヶ所を指定(1ヶ所は津波被害の出る可能性あり)	集積所は市内5ヶ所を指定(1ヶ所は津波被害の出る可能性あり)
配送に関する実務は市職員および配送業者で行う	配送に関する実務は市職員および配送業者で行う
実務に関する役割は明確に決定していない	実務に関する役割は明確に決定していない
燃料に関する対策は行われていない	燃料に関する対策は行われていない
	自衛隊の協力要請は可能だが、明確な協力日程は決定されていない

共通していることは、自衛隊からの協力を得ることができれば問題はほとんど解消されるが、それまでの対応が困難だということである。名古屋市では、自衛隊に協力要請を出すことは可能だが、具体的に何日後に協力できるという明確なものはないため、震災後3～4日以上かかる恐れもある。また、物資供給の協定が締結されている集積所までの配送と異なり、集積所 - 避難所間の配送には協定がないため、より災害対策が重要となる。その他にも仙台市で問題となった燃料や備蓄物資などの資源不足においても名古屋市では対応不十分な部分があり、効率的に資源を使用した配送が求められる。

以上のことを踏まえ、本研究では「名古屋市における集積所 - 避難所間の救援物資配送において、各資源(輸送車・燃料・時間)を効率的に利用した上での物流ネットワークを構築すること」を目標とする。

### 3 救援物資配送計画問題

限られた資源を効率的に利用し、効果的なロジスティクス構築を実現するために、本研究では配送計画問題 (Vehicle Routing Problem, 以下 VRP) として定式化を行う。VRP とは物資の配送拠点である集積所および配送先である避難所の位置情報と需要量が与えられたとき、需要量を満たすような最適なルートを求めることである。これまでも VRP に関して数多くの研究がなされている [3]。そしてこれによって必要トラック台数や各トラックの配送時間、どの避難所にどれだけ配送すれば良いかを決定する。また目的は必要トラック台数を最小限に抑えること、全体の配送を可能な限り早く終えることの 2 つである。概念図を図 2 に、問題解決の手順を以下に示す。

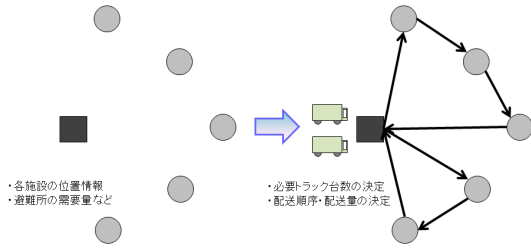


図 2 VRP の概念図

#### [ 準備 ]

- ・ 需要量の入力を含む、各数値の設定
- ・ 1 台のトラックが配送できる施設数  $C$  の設定
- ・ 避難所間の移動可能距離  $L$  の設定

#### [ Step 1 ]

VRP として問題を解き、

- ・ 必要トラック台数
- ・ 各トラックの巡回ルートおよび配送量
- ・ 各トラックの所要配送時間

を決定 (最も遅いトラックの配送時間を最遅配送時間とする)。

#### [ Step 2 ]

[ Step 1 ] で得られた必要トラック台数を削減した際の最遅配送時間の変化から最終的なトラック台数を最遅配送時間を変化から決定する。

[ 準備 ] の需要量に関しては、名古屋市の聞き取り調査をもとに 1 食分の救援物資量を定義し、さらに各避難所に収容できる人数分を掛け合わせることで避難所の必要物資量とする。その他の数値設定についても、シナリオごとに変更を行う。また避難所間の移動可能距離の設定を行うことで、離れた避難所を 1 台のトラックが配送することを許容しないようにする [ Step 1 ] では暫定的な必要トラック台数を決定し [ Step 2 ] ではそれを最遅配送時間の変化から何台まで減らすことができるかを決定する。対象とする配送は、名古屋市における備蓄物資配送後の集積所 - 避難所間の救援物資配送とする。条件は以下に記述する。

#### [ 条件 ]

- (1) 決定している 5 つの集積所からの配送とする。
- (2) 領域は区単位で分割し、最も近い集積所から物資が配送されるものとする。
- (3) 各避難所の需要量は、避難所の限界収容人数分を需要量と仮定する。
- (4) 輸送車はすべて同一であるとする。
- (5) 輸送車は  $Q$  人分の物資を運べるものとする。
- (6) 被害想定はシナリオで設定する。
- (7) 避難所間を移動する際のトラックに、移動距離の制限を設ける。

#### 3.1 記号の定義

VRP として定式化するにあたり、以下の記号を定義する。

##### [ 定数 ]

$N$ : 施設の集合  $i, j \in N$

( $\{0\}$ : 集積所  $\{1, \dots, n-1\}$ : 避難所)

$K$ : トラックの集合  $k \in K$

$R$ : 実数全体の集合

$d_i$ : 避難所  $i \in N - \{0\}$  の需要量 (人分)

$l_{ij}$ : 施設  $i, j \in N$  間の距離 (km)

$L$ : トラックの施設  $i, j \in N$  間の最大移動可能距離 (km)

$Q$ : トラックの最大積載量 (人分)

$C$ : トラックの最大訪問避難所数

$P$ : トラックが避難所 1ヶ所に対して最低限配送しなければならない量 (人分)

$T$ : 避難所に配送可能なトラック台数の上限 (台)

##### [ 決定変数 ]

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1: \text{トラック } k \in K \text{ が施設 } i \in N \text{ から } j \in N \text{ に} \\ \quad \text{配送する。} \\ 0: \text{上記以外。} \end{cases}$$

$y_{ik}$ : トラック  $k \in K$  が避難所  $i \in N - \{0\}$  に配送する量。

$$z_k = \begin{cases} 1: \text{トラック } k \in K \text{ を使用する。} \\ 0: \text{上記以外。} \end{cases}$$

$u_i$ : 部分閉路除去のためのダミー変数 ( $i \in N$ )。

#### 3.2 定式化

[ Step 1 ] は以下のように定式化することができる。

$$\min. \sum_{k \in K} z_k \quad (1)$$

subject to

$$z_k - \sum_{j \in N - \{0\}} x_{0j}^k = 0 \quad k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N - \{0\}} x_{0j}^k - \sum_{i \in N - \{0\}} x_{i0}^k = 0 \quad k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N - \{i\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in N - \{i\}} x_{ji}^k = 0 \quad i \in N - \{0\}, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = d_i \quad i \in N - \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N - \{0\}} y_{ik} \leq Q \quad k \in K \quad (6)$$

$$P \sum_{i \in N - \{j\}} x_{ij}^k \leq y_{jk} \leq Q \sum_{i \in N - \{j\}} x_{ij}^k \quad j \in N - \{0\}, k \in K \quad (7)$$

$$l_{ij} x_{ij}^k \leq L \quad i, j \in N - \{0\}, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N - \{0, i\}} x_{ij}^k \leq C z_k \quad k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N - \{j\}} x_{ij}^k \leq 1 \quad j \in N - \{0\}, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N - \{j\}} \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq T \quad j \in N - \{0\} \quad (11)$$

$$u_i - u_j + n x_{ij}^k \leq n - 1 \quad i \in N - \{0\}, j \in N - \{0, i\}, k \in K \quad (12)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad i, j \in N, k \in K$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad i \in N - \{0\}, k \in K$$

$$z_k \in \{0, 1\} \quad k \in K$$

$$u_i \in R \quad i \in N - \{0\} \quad (13)$$

目的関数である (1) は、必要トラック台数の最小化を示している。これは配送ルート数の最小化と同値である。

制約条件である (2) はトラックを使用した際、出発地は集積所であることを示しており、(3)(4) はトラックを使用した際の施設間におけるフローに関する制約である。(5) は各避難所の需要量を満たす制約であり、(6) はトラックの最大積載量に関する制約を示している。(7) はトラックが避難所に配送した際の配送量に関する上下限を示しており、(8) は避難所間におけるトラックの移動可能距離に関する制約を示している。(9) はトラックが配送できる最大避難所数に関する制約であり、(10) は同じトラックが同じ避難所に配送するのは1度までとする制約である。(11) は1つの避難所に対して配送できるトラック台数の上限を示しており、(12) は部分閉路除去制約、(13) は各変数制約になっている。

### 3.3 様々な状況を想定したシナリオについて

次に、前述で示した解法を適用するシナリオについて示す。災害の大きさによって被害の度合いが異なることから様々な被害を想定しておく必要があるため、あらゆる被害にも対応できるようなシナリオを設定して解くことが重要である。本研究では以下の4つのシナリオについてシミュレーションを行い、評価および考察する。

[シナリオ 1: 施設・道路に障害が出ない場合]

最良解としての比較対象とするために行う。

[シナリオ 2: 道路障害が発生した場合]

延長率  $\alpha$  とし、ランダムで選定された道路長に対して  $\alpha$  倍することで道路障害を発生させる手法をとる。

[シナリオ 3: 新たに集積所を選定した場合]

後の図3で集積所および避難所の位置関係を示すが、現状の集積所は名古屋市全体で見ると配置に偏りがある。そこでカバーできていない領域で集積所の候補地を選定した場合にどれだけ解が良くなるかを示すために行う。

[シナリオ 4: 橋が崩壊した場合]

道路障害に加え、橋の崩壊した場合についても考える。橋を渡る配送ルートのみを抽出し、 $n$ 本の橋を渡るルートに対して  $\beta n$  倍することで橋の崩壊による迂回した距離を考える。

## 4 実行結果

### 4.1 各データの設定

対象領域を図3に、各数値設定を表3に示す。尚、候補地はバランスを考慮して図の2ヶ所とした。

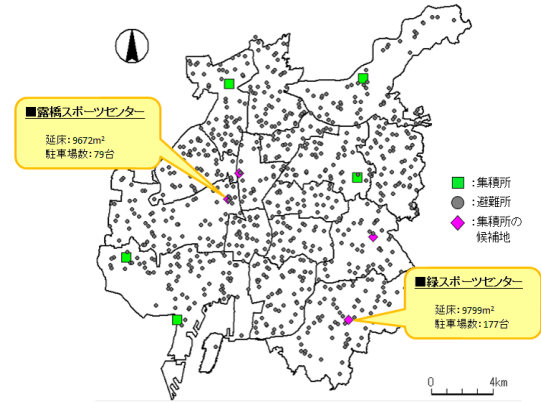


図3 名古屋市における各施設の位置関係

表3 各数値設定

対象地域	名古屋市全16区	C L	
		C	L
施設数	781ヶ所(集積所:5, 避難所:776)	中区	7 1.5kmまで
測定距離	直線距離から道路距離を推定	千種区	8 2.0kmまで
需要量	256,240人分	北区	10 2.0kmまで
トラックの最大積載量	3000人分	西区	5 2.0kmまで
避難所での作業時間	15分	東区	8 2.5kmまで
集積所での作業時間	60分	名東区	13 1.4kmまで
$\alpha$	1.3~1.7で計算	守山区	7 1.5kmまで
$\beta$	1.1~3.0で計算	中川区	6 1.5kmまで
		中川区	8 2.5kmまで
		熱田区	8 1.0kmまで
		昭和区	7 1.5kmまで
		瑞穂区	8 1.5kmまで
		天白区	7 1.5kmまで
		港区	11 1.5kmまで
		南区	10 1.3kmまで
		緑区	10 1.4kmまで

### 4.2 計算結果

IBM<sup>1</sup> ILOG<sup>1</sup> CPLEX<sup>1</sup> Optimization Studio12.4 を用いて、各トラックに避難所の割り当てを行った。使用した計算機のCPUはIntel<sup>2</sup> Celeron<sup>2</sup> (1.73GHz)、OSはMicrosoft<sup>3</sup> Windows XP<sup>3</sup>、メモリは2GBである。

#### 4.2.1 [Step 1]

[Step 1]では各施設の需要量を配送量と仮定して数値設定し、移動速度ごとの最遅配送時間やそのときの巡回路を示すことができた。また、いかなるシナリオにおいても必要トラック台数(配送ルート数)は102という結果になった。

#### 4.2.2 [Step 2]

次に [Step 1] の結果を元に最終的な必要トラック台数を示す。結果はすべてトラックは 20km/h 走行時,  $\alpha=1.5$  とした。

[シナリオ 1・シナリオ 2]

図 4 に既存集積所における必要トラック台数の比較結果を示す。

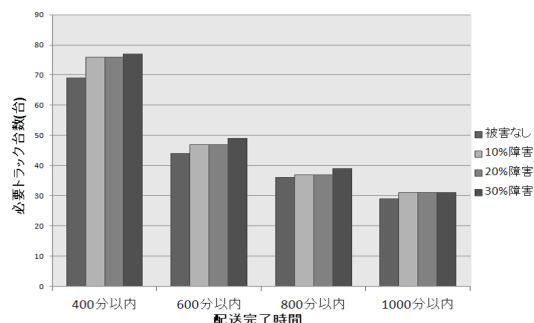


図 4 配送完了時間とトラック台数の関係

結果としては障害を大きくしても、また  $\alpha$  の値を変化させた場合でも大きく影響がない結果が得られた。障害率の変更により代替的に経路も変更されるということ、また最遅配送時間が数十分単位の延長となることが理由として考えられる。今後は  $\alpha$  の値を大きく変えることで解の変化を分析する必要がある。

[シナリオ 3]

シナリオ 3 では集積所の候補地を選定した場合について考える。必要トラック台数の比較では、候補地を選定した場合でも改善があまり見られなかった。理由としては、配送量が変わらないことやトラックの運用時間に制約を設けていないことが考えられる。よって必要トラック台数に重点を置くのであれば、候補地を新たに選定する必要はないという結果になる。次に割当が集積所の候補地に変更された区のみを抽出し、トラックの移動距離の観点から評価を行った。移動距離の比較を図 5 に示す。

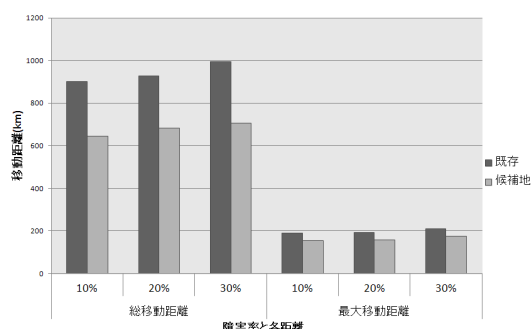


図 5 移動距離に関する比較

移動距離の比較では総移動距離で 30% 弱の改善が可能なので、全体の配送を可能な限り早く終わることに重点を置けば、候補地を選定した方が良いという結果となる。

[シナリオ 4]

シナリオ 4 では橋の崩壊を考慮した場合の影響度について考える [Step 1] で得られた 102 の配送ルートの中で橋を渡らなければならないのは 69 ルートだった。必要

トラック台数という観点での結果は、 $\beta$  を小さくした場合に最遅配送時間を長くとることができれば、必要トラック台数に影響はほとんどないという結果になった。次に全体の配送を早く終わるという観点から見るために、トラックの総移動距離について比較を行った。図 6 に各障害率における総移動距離の変化を示す。

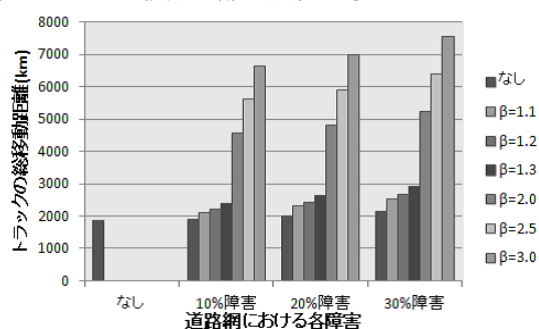


図 6 各障害率における総移動距離の変化

橋の障害がある場合では、道路障害のみよりもさらに総移動距離は延長された。割合としては  $\beta$  の値を大きくするほど総移動距離の伸び率は大きくなった。理由としては、多くの橋を渡る配送ルートがあることが考えられる。名古屋市には多くの橋があることから  $\beta$  を小さい値で評価することが望ましいと考えるが、重要性の高い、つまり橋が崩壊で長く迂回をするという状況となれば  $\beta$  を極端に大きくした場合についても考慮する必要があるだろう。

## 5 おわりに

本研究では救援物資配送における諸問題を明らかにし、それに対する解法を導出した。さらに震災による被害を想定し、様々なシナリオの下でシミュレーションを行い、検証を行うことで、名古屋市で救援物資配送が行われる際に必要とするトラック台数および配送時間を示した。今後は新たなシナリオとして、海沿いの集積所が使用不可となった場合や、区をまたいだ配送を許容した場合について考えていきたい。

## 参考文献

- [1] 苦瀬 博仁, 矢野 裕児: 市民を兵糧攻めから守る「災害のロジスティクス計画」. 都市計画論文集 Vol60-3, 2011.
- [2] 愛知県名古屋市: 名古屋市地域防災計画 附属資料 編 計画資料.  
<http://www.city.nagoya.jp/shisei/category/53-2-4-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0.html>
- [3] 四宮 弘意: 地震災害発生時における救援物資の供給と配送施設の配置に関する研究-柏崎市をケーススタディとして-. 早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻 2008 年度修士論文, 2009.

<sup>1</sup>IBM, ILOG, CPLEX は, IBM Corporation の米国及びその他の国における登録商標です。

<sup>2</sup>Intel, Celeron は, Intel Corporation 及び子会社の米国及びその他の国における登録商標です。

<sup>3</sup>Microsoft, Windows XP は米国 Microsoft Corporation の米国及びその他の国における登録商標です。