

# 被災状況と対応策に応じた 救援物資配送計画の検討

首藤 敦<sup>1</sup>・徳永幸之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 情修 国土交通省 苫小牧港湾建設事務所 (〒053-0011 北海道苫小牧市末広町 1-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東北大学助教授 大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

阪神・淡路大震災では、防災計画が不十分であったこと等により、救援物資配送は大いに混乱した。災害後、迅速且つ円滑に配送を行うには、事前に想定される様々な被災状況に応じて、どのような配送方法が有効であるか把握しておく必要がある。本研究では、阪神・淡路大震災での救援物資配送の問題点に焦点を当てて、救援物資配送計画の効果をモデル分析により考察した。考慮した対応策としては、配送拠点の配置、緊急路の配置と速度、配送形態（効率的配送と公平な配送の違い）、投入車両台数である。分析の結果、緊急路の速度が決定的に重要な影響を与え、その速度に応じてその他の対応策において採るべき方策が異なってくることを明らかにした。

**Key Words :** *disaster prevention planning, relief goods distribution, vehicle routing and scheduling, genetic algorithm*

## 1. はじめに

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、約18万棟の家屋が倒壊或いは焼失の被害に遭った。また水道・ガス・電話等のライフラインも寸断された為、ピーク時で32万人もの人々が避難所生活を余儀なくされ、避難所数も1,153箇所に達した。予期せぬ大被害であった為、各自治体の防災計画が十分に機能しなかったことに加え、救援物資の配送や仕分けの人員・スペース不足、更には交通網寸断に伴う大渋滞も影響し、避難所への救援物資配送は数日間に渡り混乱した。

この震災を契機に多くの自治体で地域防災計画の見直しが進められている。しかし、多くの自治体の防災計画<sup>1)</sup>では、食糧供給計画、物資供給計画等については自治体内での事務処理についてのみ記載されているに過ぎず、その見直し案<sup>2)</sup>も大部分が被害想定に留まっており、具体的に詳細な配送計画まで言及している例は少ない。この状況では、大震災に遭遇した際、迅速に円滑な救援物資配送を行うことは困難であろう。

最適な配送方法は、配送拠点や緊急路の選定、機材・人員の確保方策、備蓄等の事前の準備状況だけでなく、実際の被災状況や機材・人員の確保状況等

によっても変わると考えられる。事前にこのような様々な要因全ての組合せを想定して最適配送計画を立てておくことや、事後の情報も混乱している中で厳密な最適配送計画を早急に作成することは実用上困難であろう。したがって、防災計画策定に際しては、事前対策としてより重視すべき要因を明らかにしておく必要がある。特に、配送拠点用地の確保や緊急路の耐震強化等の対策といった事前対策を行う場合には、その効果や必要性についての十分な議論が必要である。また、事後においては、様々な状況に応じて迅速に対策を講じることが求められる。

本研究では、先ず救援物資配送における問題点と配送に影響を及ぼす要因を、阪神・淡路大震災の調査報告を基に整理する。次いで、災害時の配送においては効率性だけでなく公平性についても考慮することから、効率性と公平性の観点からの最適化問題を定式化する。被災状況と対応策に応じて最適配送計画も異なると考えられることから、仮想都市上で様々な状況を想定してモデル分析する。これにより、事前に準備すべき配送拠点の候補地や緊急路の候補路線といった対応策間のトレード・オフを被災状況別に明らかにし、防災計画作成の際に考慮すべき点を考察するとともに、事後に採るべき方策について考察する。

## 2. 救援物資配送計画問題の考え方

### (1) 救援物資配送の実態、問題点、対策

阪神・淡路大震災以降、災害時の物資配送に関する調査や提言が幾つか報告されている。そこで挙げられている救援物資配送の問題点や対策案を整理すると以下ようになる。

関西交通経済研究センター(1995)<sup>9)</sup>や運輸経済研究センター(1995)<sup>10)</sup>は、公表資料や独自のアンケート・ヒアリング調査から、災害時の救援配送の実態や問題点を整理し、その対策案を提言している。ここで挙げられている問題点としては、避難所の需要把握の困難さ、県と市からの二重配送があり、配送拠点と避難所を結ぶ情報ネットワークの確保や指揮系統の確立といった情報面の課題が指摘された。また、配送拠点の位置が被災地内では渋滞に巻き込まれ非効率であり、域外に配置すべきであるという意見も多い。渋滞に関しては、その影響で物資の到着が不定期になり、避難所の需要とタイムラグが生ずること、その為在庫管理がより困難になるといった問題が発生する。渋滞改善案として、交通規制を行い緊急路を確保するなどの対策もあるが、備蓄を充実させることも必要である。その他に、震災直後の車両不足という問題がある。更に、積載容量と配送量がアンバランスであり、配送力はより小さくなる。また、阪神・淡路では救援配送は多品目配送で行われ、仕分けが困難であった。しかも物流の素人が在庫管理と共に行っていた為、一層非効率となった。この問題は後に物流業者に委託することで改善されたが、災害直後からこういった体制に速やかに移行されなければならない。

中川(1995)<sup>9)</sup>は、阪神・淡路大震災の経験を踏まえた上で、災害時救援配送の問題点とその対策を私的見解として述べている。ここでは渋滞は不可避であり、渋滞を想定した防災体制(備蓄の充実、自動車に頼らない防災システム等)が必要であると指摘している。また、ここでも指揮系統の問題や被災地外拠点配置案が述べられている。

緑川・吉田(1996)<sup>9)</sup>も中川と同様に私見を述べている。ここでも課題として情報の問題、交通渋滞、車両不足、物流業者への委託について挙げている。特に車両不足に関しては、必要車両台数を事前に予測し、確保することが重要であると述べている。

小谷(1996)<sup>7)</sup>は、阪神大震災時における救援物資の流れを整理した上で、食糧配送に関しては定期的な需要がある為に、他の救援配送とは別体系で配送されたことを強調している。食糧配送は食事時間と賞味期限という厳しい時間制約の下、交通状況を踏

まえた配送が求められる。

小谷ら(1997)<sup>9)</sup>は、神戸商船大対策本部の記録とアンケート調査(因子分析)から救援配送の実態を明らかにし、その問題点を考察している。ここでは、拠点配置やタイムラグの問題など、従来の調査報告と同様の結論に達している。

### (2) 救援物資配送に関する既往研究

救援物資配送計画へのシミュレーションもしくは最適化分析の適用事例としては、以下のような研究がある。

中川ら(1997)<sup>9)</sup>は、時系列的物資輸送交通シミュレーションを京都市に適用している。このシミュレーションは、輸送の地域区分や交通規制といった事前に準備可能な政策と、災害の規模によって異なる道路リンク被害を外生変数として、道路リンク混雑状況と物資供給達成率を求めている。その結果、交通規制のみでは地域全体に対応不可能であること、事前の車両配分は効果的であること、緊急路の確保や交通量配分の誘導が必要であること等が結論として述べられている。しかし、配送拠点が考慮されておらず、その為に輸送が市外から各地域への直接輸送となっている。現実には、市外から市内又は市周辺の配送拠点を經由して、各地域へ輸送される。

岡部ら(1998)<sup>10)</sup>は、仙台市を想定した仮想都市上で総配送時間最小化問題を整数計画法により解いている。ここでは配送拠点以外に中継基地を配置することで効率化を図っている。この中継基地の容量と積み替え時間、緊急路の走行速度を外生変数として与え、中継基地の配置、その中継基地を利用する避難所を求めている。その結果、緊急路の走行速度向上の為に交通規制を迅速に行える体制、人員配置等の積み替え時間短縮策が必要であるという結論に達している。また、中継基地は効果的であり、各避難所に各々1台配車する形態においては、その候補地選定が重要であると述べている。しかし、食料品に代表されるような定常的な配送では、1台が複数の避難所を巡回する形態を採ることが想定される。また、効率性を優先する為に後回しになる避難所も発生し、不公平な物資配送となる恐れがある。

### (3) 本研究の考え方

以上から、定常的な配送となる食料品の救援物資配送においては、以下の点について検討しておく必要がある。すなわち、配送拠点の配置、交通渋滞、効率性と公平性の問題、車両確保の困難さ、物資の一時大量・不定期到着(在庫管理の問題)、非効率である多品目配送(仕分けの問題)、である。本研

究では、配送拠点から避難所までの配送部分に焦点を当て、在庫管理及び仕分けに関しては考慮しない。また、前述したように、定常的配送では巡回配送されることを想定する。

配送拠点の配置は、被災地内配置と外配置の両者について比較検討する。配送拠点を被災地内に配置することは、被災地外から配送拠点までの幹線輸送の困難さが指摘されているが、配送拠点から避難所までの配送のみを考えれば有利であることから、配送の効率性の比較対象として設定する。ただし、実際には配送拠点への幹線輸送を別途考慮して判断を下す必要がある。なお、配送拠点には用地や設備の確保が必要であること、事前に被災地域を特定することは困難であることから、防災計画では複数の候補地を選定しておく必要がある。

渋滞に関しては、殆どの調査報告で最も重要な問題の1つに挙げており、対策が必要不可欠である。本研究では、交通規制により緊急路の速度向上が可能であるが、その配置や延長、速度等は交通規制に投入する人員によって変わると考え、その配置（放射状ネットワーク、環状ネットワーク）と速度について検討する。

救援物資配送には避難者の生活が懸かっていることから、一般の配送とは異なり、効率性のみならず公平性も重視しなければならない。しかし、限られた車両台数では公平性を重視すると効率性が悪化し、平均的な到達時間が遅くなることも懸念される。したがって、どちらの配送形態が適しているかについては、配送の効率性、被災者の不公平感、配車計画の立て易さの視点から考察する必要がある。

車両台数については、災害後しばらく経過すれば、阪神大震災の事例からも解るように十分な台数が確保出来るが、配送の混乱を招くのは災害直後の車両不足時である。本研究では、被災から数日～1週間後の期間を想定し、車両台数の変化による救援物資配送への影響についても考察する。

### 3. 救援物資配送計画の定式化

#### (1) 定式化

本研究では、救援物資配送計画を車両配分計画と配送経路計画との複合計画と位置づけ、所要時間最小化問題として解く。災害時といえども費用も考慮すべきであるが、配送拠点や車両に関わる固定費用を除けば、配送費用は所要時間とほぼ比例関係にあると考えられ、拠点配置や車両台数など同一条件化では費用も最小化されていると考えられる。

前提条件として、需要は各避難所毎に一定であるとし、需要量の違いは避難所の数として外生的に与える。供給制約は、配送拠点においては考慮せず、車両の積載容量として考慮する。また、配送拠点は1箇所とするが、複数拠点による配送の場合は各々の担当エリアを分割することで対応可能である。ただし、その分割方法については今後の課題である。

このような配車・配送計画に関してはORの分野で既に多数の試みが成されている。本研究では、Koskosidis et al.(1992)<sup>11)</sup>に倣って、車両配分計画を内包する配送経路計画として捉え、整数計画による定式化を行うものとする。ただし、ここで提案する定式化は、車両が配送拠点に一旦帰還し、再度積み荷をして配送する行動を新たに記述している。また、評価関数をCES型に設定することにより、効率性基準に従った配送と公平性基準に従った配送の両方での記述が可能になっていることも特徴である。

まず、 $i, k$ を配送拠点( $i=0$ )及び避難所を表す添字、 $j$ を配送順序を表す添字、 $m$ を車両を表す添字、 $n$ を避難所数、 $z$ を車両台数、 $s^m$ を車両 $m$ が配送を担当する避難所数として、以下のような添字集合を定義する。

- $M = \{1, \dots, z\}$  : 車両を表す添字集合
- $I_1 = \{1, \dots, n\}$  : 避難所を表す添字集合
- $J_1 = \{1, \dots, s^m\}$  : 車両 $m$ の配送順序を表す添字集合
- $I_2 = \{0, \dots, n\}$  : 拠点と避難所を表す添字集合
- $J_2 = \{0, \dots, s^m-1\}$  : 拠点から最後に訪れる1つ手前の避難所までの配送順序を表す添字集合

これらを用いて、救援配送計画は式(1)~(8)のように定式化される。

$$e = \left[ \sum_{m \in M} \{T^m(s^m, c, y^m)\}^\gamma \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \Rightarrow \min. \quad (1)$$

where,

$$s^m \leq c; (m \in M) \\ T^m(s^m, c, y^m) = \sum_{i \in I_2} \sum_{j \in J_2} \sum_{k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{k,j+1}^m \quad (2)$$

$$s^m > c; (m \in M) \\ T^m(s^m, c, y^m) = \sum_{i=1}^{G+1} \sum_{k \in I_2} t_{0k} y_{k,c(i-1)}^m + \sum_{i=1}^G \sum_{j=c(i-1)+1}^{c i} \sum_{k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{k,j+1}^m \\ + \sum_{i=1}^G \sum_{j=c i} t_{i0} y_{i,c i}^m + \sum_{i \in I_2} \sum_{j=c G+1}^{s^m-1} \sum_{k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{k,j+1}^m \quad (3)$$

subject to

$$s^m = \sum_{i \in I_1} x_{mi} \geq 1 \quad (m \in M) \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mi} = 1 \quad (i \in I_1) \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J_1} y_{ij}^m = x_{mi} \quad (i \in I_1, m \in M) \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} y_{ij}^m = 1 \quad (j \in J_1, m \in M) \quad (7)$$

$$y_{00}^m = 1 \quad (m \in M) \quad (8)$$

ただし、

$e$  : 評価関数

$\gamma$  : パラメータ

$T^m(s^m, c, y^m)$  : 車両  $m$  の所要時間

$c$  : 車両の積載容量  
(1台当たりの配達可能避難所数)

$y^m = \{y_{ij}^m \mid i \in I, j \in J\}$  : 車両  $m$  の配送経路を表す行列

$l$  : 拠点への帰還を表す添字

$G = \lfloor s^m / c \rfloor$  : 拠点への帰還回数

[ ] : Gauss's notation

$t_{ik} = d_{ik}^e / v^e + d_{ik}^s / v^s + L$  : 地点  $ik$  間の配送時間

$d_{ik}^e$  : 地点  $ik$  間の最短経路緊急道路長

$d_{ik}^s$  : 地点  $ik$  間の最短経路一般道路長

$v^e$  : 緊急道路平均走行速度

$v^s$  : 一般道路平均走行速度

$L$  : 救援物資荷卸し時間

$x_{im} \in \{0, 1\}$  :  $= 1$ ; 避難所  $i$  に車両  $m$  で配達  
 $= 0$ ; otherwise

$y_{ij}^m \in \{0, 1\}$  :  $= 1$ ; 車両  $m$  が避難所  $i$  を  $j$  番目に訪問  
 $= 0$ ; otherwise

である。式(1)は、CES型で表されたこの問題の評価関数であり、パラメータ $\gamma$ の設定により配送形態が異なる。この評価関数算出に必要な各車両の所要時間は、担当する避難所数と配送経路によって定まる。ただし、配送量が積載容量未満の場合(式(2))と、積載容量を超過する為に拠点へ帰還し再度積み荷をして発車する場合(式(3))に分けている。また、式(4)(5)は車両配分に関する制約を表している。式(4)は全車両が最低1箇所の避難所へ配送を行う制約を意味し、式(5)は各避難所が1台の車両で配達されることを意味する。一方、式(6)(7)(8)は経路選択に関する制約を表している。式(6)は各車両が担当する避難所のみを訪問する制約を、式(7)は避難所への配送が1回の訪問で終了することを、式(8)は全車両が配達拠点を起点に配送を行うことを意味する。

パラメータ $\gamma$ は、 $-1$ 及び $-\infty$ の2通りを考慮する。前者は総配達時間最小化行動(式(9))を表し、これを効率的配達と呼ぶ。後者は救援物資の到着が最も遅い避難所の到着時刻を最早化、すなわち最遅配達時刻最早化行動(式(10))を表す。いわゆるMINIMAX行動となり、弱者救済の観点による公平性と考えられることから、これを公平な配達と呼ぶ。

$$e|_{\gamma=-1} = \sum_{m \in M} T^m(s^m, c, y^m) \Rightarrow \min. \quad (9)$$

$$e|_{\gamma=-\infty} = \text{Max}_{m \in M} [T^m(s^m, c, y^m)] \Rightarrow \min. \quad (10)$$

## (2) 問題の解法

NP-困難な組合せ最適化問題であるこの問題の解法として、大規模な問題に対して短時間で近似解が得られるヒューリスティック手法が有効である。今回は、Taniguchi et al.(2000)<sup>12)</sup>と同様に、そのうちの1つである遺伝的アルゴリズム(GA)を計算過程に組み込むことにする。GAを用いる理由としては、車両配分や配送経路の表現が容易で、多数の制約条件を導入出来ること、集団を対象とした多点探索であること等の利点からである。

一般的にGAの計算過程は、再生、交叉、突然変異の操作により成り立っている。本研究では再生の過程ではルーレット選択法を用いているが、適応度の大きい個体が死滅しないようにエリート保存選択も併用している。交叉の過程では順序交叉を用いている。これは、本研究ではパス表現により配送経路をコーディングしている為に、他の交叉手法では不都合が生ずること、順序交叉は順序を保存する性質が有る為に経路選択には適切であること等の理由による。また、突然変異の過程では削除挿入法を用いている。終了条件は世代交代回数としている。

## 4. シミュレーションによるモデル分析

### (1) 分析項目及び前提条件

本研究では、データ作成が容易である図-1のような仮想都市(8km × 4km)に上述のモデルを適用し、シミュレーションを行う。メッシュは一般道を表し、200m間隔である。この仮想都市上で、表-1に示す分析項目及び前提条件に従い、シミュレーションを行う。道路ネットワークや一般道走行速度は被災程度により変化するが、ここでは分析ケースが過多になること、防災計画において細街路まで全て被害想定することは困難と考えられることの2つの理由から一律5km/hとした。緊急路走行速度は交通規制の程度により変化するものと考え、5km/hのケースは交通規制の無い状態で一般道走行速度に一致した状態を表す。避難率は、

$$(\text{避難率}) = \frac{(\text{域内避難者数})}{(\text{域内人口})} \quad (11)$$

と定義し、1避難所当たり300人として避難所数を設定した。なお、阪神・淡路大震災での避難率は神戸市全体で約30%であった。一様な人口分布を想定しているため、避難所分布は同じ避難率の地区内

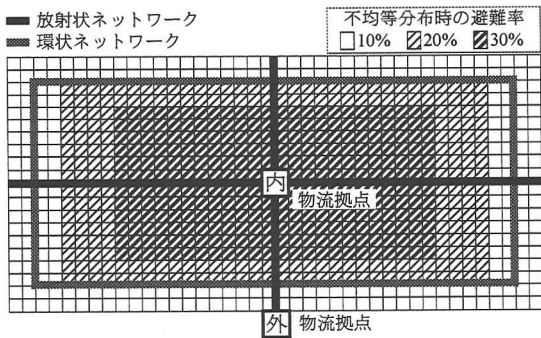


図-1 仮想都市

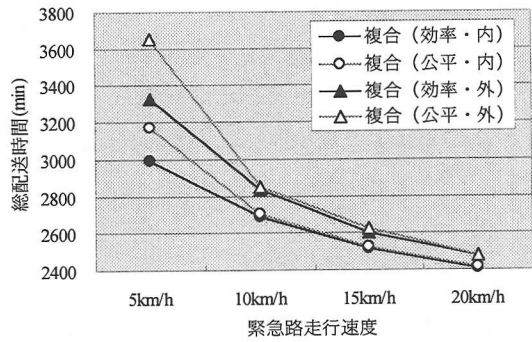


図-2 拠点配置と配送形態 (総配送時間, 避難率20%)

表-1 前提条件

項目	設定
緊急路走行速度	5, 10, 15, 20km/h
物流拠点の配置	・被災地内配置 ・被災地外配置
緊急路の配置	・複合型ネットワーク (=放射状+環状) ・放射状ネットワーク ・環状ネットワーク
配送形態	・効率的配送 ( $\gamma = -1$ : 総配送時間最小化) ・公平な配送 ( $\gamma = -\infty$ : 最遅配送時刻最早化)
投入車両台数	30~50台
避難所分布	・避難率30% (避難所180箇所, 均等分布) ・避難率20% (避難所120箇所, 均等分布) ・避難率20% (避難所180箇所, 不均等分布)
前提条件	避難所必要物資量 300kg 車両積載容量 2t (避難所6箇所分) 一般道走行速度 5km/h

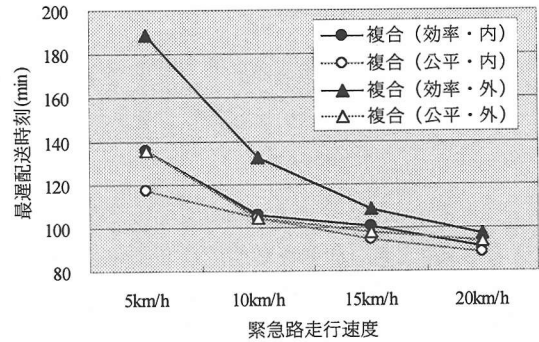


図-3 拠点配置と配送形態 (最遅配送時刻, 避難率20%)

では均等分布となり、不均等分布は、図-1に示されているように、避難率に応じて中心部に避難所が集中している状態を意味する。

## (2) 拠点配置及び配送形態の分析

### a) 基本ケース (避難率20%)

避難率 20%で、複合型ネットワークにおける緊急路走行速度と総配送時間及び最遅配送時刻の関係を拠点配置別、効率性・公平性に示したのが図-2、図-3である。これより、緊急路の速度を高く維持出来れば、拠点配置や効率性・公平性といった配送形態による影響は小さいが、速度が低下すると拠点配置や配送形態により大きな差が発生することが解る。これは、緊急路の速度が大きくなれば、拠点配置や配送形態の違いによる配送距離の差も、緊急路の利用により時間的な差が小さくなる為である。緊急路の速度向上効果は、速度が向上するにつれて低減する。換言すれば、緊急路の速度を一般道に比べ僅かでも速くすることが重要であるとも言える。また、配送形態の違いは拠点配置の違いや緊急路速度の違いと比べて小さく、特に緊急路の速度向上によりその差は殆ど無くなる。したがって、配送形態は

計画の作成し易さも考慮すべきであろう。

配送拠点を被災地外配置とし、交通規制無し (緊急路速度: 5km/h) の場合で、効率的配送及び公平な配送の配送経路は、図-4、図-5に示す通りである。ただし、全ての配送は配送拠点から発車しているが、簡略化の為に最初のトリップは省略している。効率的配送の配車がほぼ地域分割で実行可能であるのに対し、公平な配送は非常に複雑な配車となることから、配送計画担当者にとっては前者が望ましい配送形態であると言える。

### b) 避難率向上のケース (避難率30%)

避難率を上げて阪神大震災クラスの 30%とし、同様のシミュレーションを行う。緊急路は複合型とし、緊急路走行速度と総配送時間及び最遅配送時刻の関係を拠点配置別、効率性・公平性に示したのが図-6、図-7である。ここでも、緊急路の速度を高く維持出来れば、拠点配置や配送形態は問題ではないが、速度が低下すると差が発生することが解る。このように、避難率が大きい場合は、全体に占める時間差の割合が幾分縮小する傾向がある。これは、避難率が大きいほど避難所の分布が密になる為、1台が担当するエリアが小さくなり、公平な配送を行

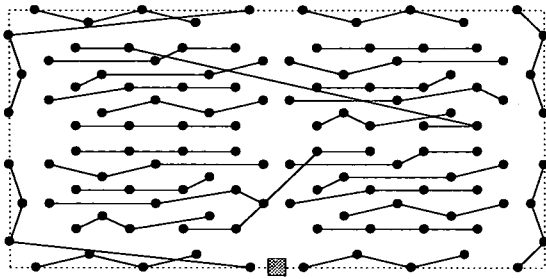


図-4 効率的配送の車両配分・配送経路

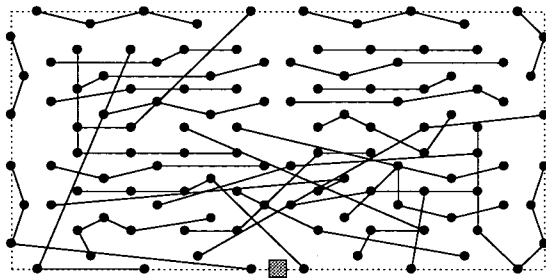


図-5 公平な配送の車両配分・配送経路

っても効率性に及ぼす影響が小さくなる為と考えられる。ただし、時間差は絶対量として大きいことから、避難率が大きい場合には緊急路の速度維持がより重要になってくると言える。

### c) 不均等分布のケース

避難率 20%で、避難所が不均等分布（図-1参照）している場合を考え、同じ 20%で均等分布の基本ケースと比較する。不均等分布にしても総配送時間は環状以外で僅かに減少するのみで、傾向に大きな変化は無い。そこで、最遅配送時刻のみを示す。図-8は緊急路走行速度と最遅配送時刻の関係を拠点配置別、効率性・公平性別に示したものである。緊急路は複合型である。この場合、速度が低下すると配送形態による差が依然として発生するが、拠点配置による差は殆ど無い。被災地内配置の場合に変化があったわけではなく、被災地外配置の場合に均等分布時と比べて極端に減少した結果である。これは、最遅配送時刻が拠点から最遠の避難所までの距離に決定的に依存することから、避難所が集中する地域で効率良く配送されることにより負担が軽減されても、被災地内配置では改善の余地が殆ど無いのに比べ、被災地外配置では距離が遠い分だけ最遅配送時刻が短縮されたものと思われる。

不均等分布時の効率的配送と公平な配送の配送経路の違いも図-4、図-5に示した均等分布時と同様に、効率的配送の場合はほぼ地域分割の配車となるのに対し、公平な配送の場合には非常に複雑で、避難所

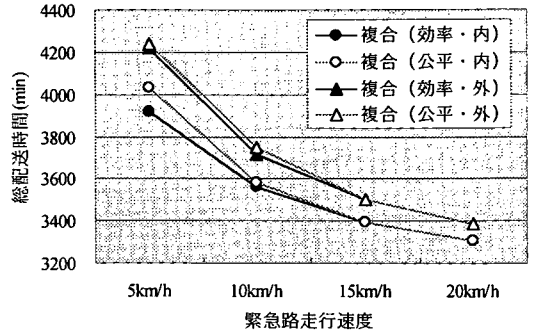


図-6 拠点配置と配送形態（総配送時間，避難率30%）

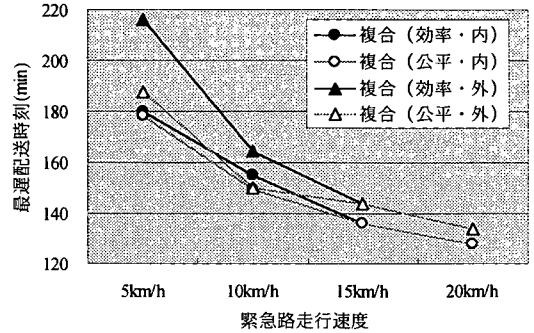


図-7 拠点配置と配送形態（最遅配送時刻，避難率30%）

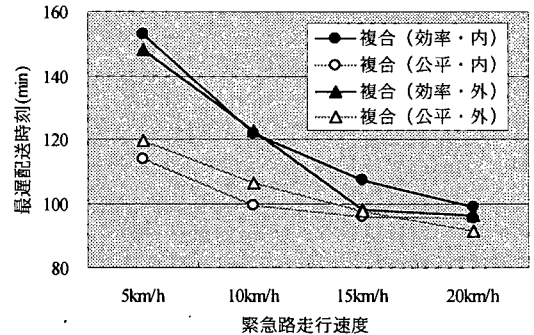


図-8 拠点配置と配送形態（最遅配送時刻，不均等分布）

が中心部に偏っている分だけ均等分布時よりも更にその差は顕著となり、配送計画はより困難な作業となろう。

### (3) 緊急路配置の分析

次に、緊急路の配置（複合型、放射状、環状）について分析する。避難率を 30%、配送拠点を被災地外配置とし、緊急路走行速度と総配送時間及び最遅配送時刻の関係を緊急路ネットワーク別、効率性・公平性別に示したのが図-9、図-10である。なお、図-9では「●（複，効，外）」は「○（複，公，外）」と、図-10では「●（複，効，外）」は「▲（射，効，

外)」とほぼ一致している。これより、複合型ネットワークと放射状ネットワークの差に比べ、複合型ネットワークと環状ネットワークの差は非常に大きいことが解る。つまり、緊急路としては放射状ネットワークが重要な働きをしており、環状ネットワークの効果は小さいものと考えられる。これは、環状ネットワークでは迂回が発生し、最短距離で移動できる放射状ネットワークが有利になる為である。したがって、被災時においては放射状部分の緊急路確保が最優先課題になる。ただし、被災地の中心を通るような緊急路の設定は容易ではなく、環状の検討も必要になるが、その場合にも出来るだけ放射状に近い、すなわち出来るだけ内側の環状が望ましい。

#### (4) 投入車両台数の分析

ここでは投入台数が変化した時の影響を述べる。避難率を 20%、配送拠点を被災地外配置とし、投入車両台数と最遅配送時刻の関係を緊急路速度別、効率性・公平性別に示したのが図-11である。このケースでは 40 台以上増やしても改善効果が殆ど見られないことから、40 台確保出来れば十分な台数と考えられる。十分な台数の確保が出来ても、緊急路が確保出来ない(5km/h)と最遅配送時刻に大きな差が現れることが解る。更に、台数が不足すると、緊急路の速度維持が出来ても台数減少とともに急激に最遅配送時刻が増加する傾向が窺える。特に、効率的配送においてその傾向が強い。これは、最遅配送時刻が最も遠い避難所までの移動に依存する為、台数増加では解決出来なくなる為である。したがって、十分な台数と緊急路の速度維持の両方が重要となる。

#### (5) 標準偏差の観点による避難者の不公平感

本研究では弱者救済の観点(MINIMAX)により公平性を表してきたが、到着時間の標準偏差という観点から避難者の不公平感について考えてみる。

到着時間の標準偏差を表-2に示す。緊急路の速度別では、速度を高く維持出来れば、効率的配送と公平な配送で標準偏差に殆ど差は生じない。しかし、速度が低下すると効率的配送では公平な配送に比べて、更に避難者の不公平感を大きくしてしまうことが懸念される。

また、配送拠点や緊急路の配置を変化させても、到着時間の標準偏差は殆ど変わらず、その場合の効率的配送、(弱者救済の観点による)公平な配送による差も小さい。

したがって、配送拠点や緊急路の配置を変えても、避難者の不公平感に差は生じず、影響を与えるのは

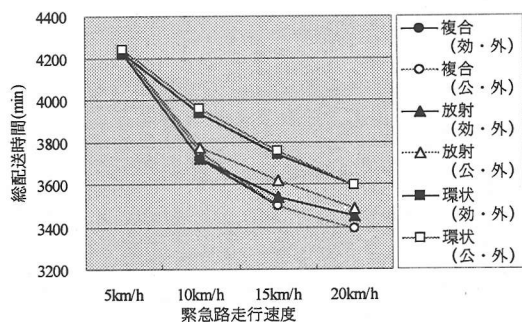


図-9 緊急路の配置 (総配送時間)

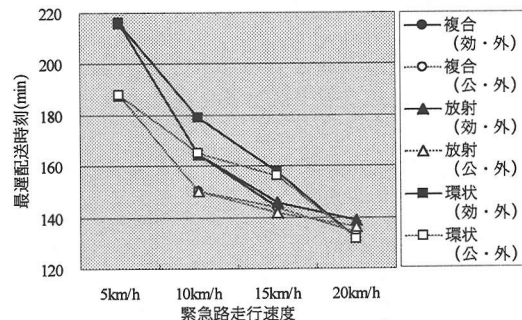


図-10 緊急路の配置 (最遅配送時刻)

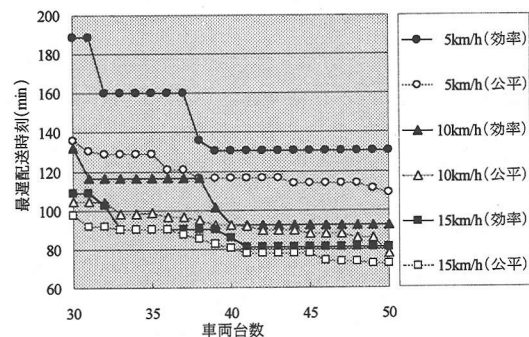


図-11 投入車両台数の分析(最遅配送時刻)

表-2 到着時間の標準偏差

	5km/h	10km/h	15km/h	20km/h
効 率	32.3	24.8	22.7	21.7
公 平	26.6	23.6	22.1	21.3
被災地内配置		被災地外配置		
効 率	25.0		24.3	
公 平	23.2		23.1	
	複合型	放射状	環 状	
効 率	25.1	24.4	26.7	
公 平	22.9	23.2	24.2	

上段：緊急路速度、中段：拠点配置、下段：緊急路配置

緊急路の速度であり、特に、速度が低下すると効率的配送と公平な配送の差が大きい。故に、避難者の不公平感減少の為に、緊急路の速度維持は重要で

あると言えよう。

## 5. 救援物資配送計画における留意点

前章で示した分析結果より、救援物資配送計画の策定に際して考慮すべき要因を整理すると、図-12 のようになる。

今回のケースからは、救援物資配送計画は、緊急路の交通規制による速度維持の程度で決定的に変わってくるのが解った。速度を高く維持出来れば、配送拠点配置や配送形態の差は小さい。したがって、拠点を被災地内に配置すると、拠点までの輸送が困難になることを考慮すれば、被災地外配置にすべきである。ただし、速度が維持出来ない場合には、拠点までの輸送の不利を考慮した上で、被災地内配置の検討も必要であるが、現実的に被災地内での人員確保の問題もあり、被災地内配置は困難であろう。その場合には、後述する緊急路の配置や車両台数等で速度低下を補わなければならない。

配送形態に関しては、緊急路の速度が高く維持出来れば、効率的配送と公平な配送の最遅配送時刻の差は小さい為、配車計画の安易性を考慮すれば効率的配送で計画して構わない。速度が維持出来ない場合は、効率的配送では公平性に関して不利になる為、避難者の不公平感への配慮が必要になる。

緊急路の形態については、速度に依らず放射状部分が必要な機能を果たす為、放射状ネットワークの確保が最優先と言える。ただし、被災地の中心を通る放射状ネットワークの設定が困難な場合には、環状の設定が必要となるが、その場合も出来る限り被災地中心近い路線選定が効果的と考えられる。

投入車両台数については、緊急路速度を高く維持出来れば、比較的少ない台数でも公平な配送が出来るが、速度が低下すると車両台数を増加しても対応に限界があり、公平性を考慮した配送計画を作成する困難さも合わせて考えると、緊急路速度維持とともに車両台数確保も重要な課題である。

また、これらは被害の度合いによっても変わってくることに注意が必要である。例えば、避難率が高くなると、拠点配置や配送形態の差による配送時間や最遅配送時刻の差は、全体に占める割合としてはそれほど大きくはないが、絶対量としては非常に大きくなる為、緊急路の速度維持に一層の配慮が必要となる。また、避難所分布が中心部に集中するような不均等な場合では、拠点配置による最遅配送時刻の差は小さいが、被害が広範囲に均等分布する場合には、拠点配置の選定が重要になる。

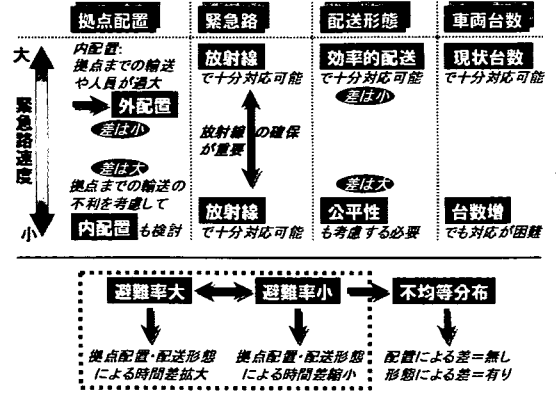


図-12 救援物資配送計画における留意点

実際の防災計画の策定においては、その地域の地理的条件、人口分布、道路ネットワーク、被害想定等、より厳密な条件設定によってモデル分析されることが望まれるが、今回の仮想都市における分析結果からでもある程度定性的な考え方は示せたものと考えている。すなわち、今回の仮想都市のように比較的均質な都市、均質な被災状況が想定される都市における防災計画の策定及び被災後の対策としては以下のように対応すべきと考えられる。まず、事前に配送拠点を被災想定地域外に複数の候補地を用意し、被災地中央を通る放射状の緊急路の耐震強化を進めておく。また、被災後迅速に配送車両確保と交通規制の為の人員確保が出来る体制作りも必須である。実際に被災した場合には、複数の候補地から効率的配送の観点から拠点を選定し、最低限放射状の緊急路の速度維持に努める。しかし、緊急路の速度維持が出来ない場合には、配送拠点までの幹線輸送や拠点での人員確保なども考慮した上で被災地内拠点も検討対象となろう。車両確保や緊急路速度維持が出来た場合には、効率的配送を考慮した配送計画で公平性もある程度達成されるが、車両が不足したり緊急路の速度維持が出来ない場合には公平性に対する配慮が必要となる。

## 6. おわりに

本研究では、阪神・淡路大震災での救援物資配送の問題点に焦点を当て、効率性のみならず公平性の観点からも評価できる最適配送計画問題を定式化した。このモデルを仮想都市に適用し、被災状況に応じた救援物資配送の政策効果を考察した。その結果、救援物資配送計画作成の際に留意すべき要因とそれらの相互関係について明らかにすることが出来た。



すなわち、

- ① 緊急路の速度維持が決定的に重要であるが、被災状況や緊急路の速度によってその他の対応策の採り方も異なってくる。
- ② 緊急路の速度が維持出来れば、被災地外配送拠点でも、効率性・公平性の観点で有利と考えられる被災地内拠点と遜色のない配送が可能である。
- ③ 緊急路は、その速度に依らず最低限放射状ネットワークの確保が重要である。
- ④ 緊急路速度が維持出来れば、配送計画の作成容易な効率的配送で公平性もある程度達成される。
- ⑤ 広域で均等な避難所分布において、配送計画の良否が与える影響が大きくなる。

といったことが明らかとなった。

今回の結論は均質な仮想都市という限定された範囲内で得られたものである為、より一般的な防災計画策定指針を示す為には、まだ多くのケース設定による検討が必要である。しかし、考慮すべき要因の関連や重要度とそれらを防災計画においてどのように考えるべきかの方向性は示すことが出来たと考えている。

近年多くの自治体で計画の見直しが進められている。その際には各自治体の条件に合わせて本研究と同様のモデル分析を行い、防災計画を作成していくことが望まれるが、その作業量は膨大なものとなることから、本研究で得られた知見を参考に防災計画を作成し、被災後においてはその状況に応じて対応されることにより、少しでも円滑な救援物資配送に貢献できれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 例えば、仙台市防災会議：仙台市地域防災計画、1992。
- 2) 例えば、仙台市総務局：仙台市防災都市づくり基本計画策定基礎調査報告書、1992。
- 3) 財団法人・関西交通経済研究センター：阪神・淡路大震災復興に伴う神戸市における都市内物流のあり方に関する調査研究報告書、1995。
- 4) 財団法人・運輸経済研究センター：大規模地震災害時における貨物緊急輸送及び代替輸送対策に関する調査報告書、1995。
- 5) 中川大：地震直後の交通渋滞と防災交通計画，交通工学，Vol.30，増刊号，pp.22-27，1995。
- 6) 緑川和徳，吉田満：阪神・淡路大震災を踏まえた災害時における運輸についての考察，運輸と経済，第56巻，第1号，pp.41-45，第2号，pp.53-57，1996。
- 7) 小谷通泰：阪神・淡路大震災時における救援物資の都市内輸送の実態と今後の課題，交通科学，Vol.25，No.1No.2 合併号，1996。
- 8) 小谷通泰，中下光治，長岡数朗：震災時における避難所への救援物資輸送の実態について，神戸商船大学震災研究会研究報告第2号，pp.120-124，1997。
- 9) 中川大，若山真樹，伊藤雅：シミュレーションを用いた震災時の緊急物資輸送計画に関する研究，土木計画学研究・論文集，No.14，pp.353-360，1997。
- 10) 岡部和広，徳永幸之，須田照：中継基地と走行速度が救援物資配送時間に与える影響の分析，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.323-328，1998。
- 11) Koskosidis, Y.A., Powell, W.B. and Solomon, M.M.: An Optimization-Based Heuristic for Vehicle Routing and Scheduling with Soft Time Window Constraints, *Transportation Science*, Vol.26, pp.69-85, 1992.
- 12) Taniguchi, E., Yamada, T. and Kakimoto, Y.: Probabilistic vehicle routing and scheduling with variable travel times, *9th IFAC Symposium Control in Transportation Systems 2000*, 2000.

(2001. 4. 2 受付)

## A STUDY ON RELIEF GOODS DISTRIBUTION PLANNING BASED ON SUFFERING SITUATIONS AND COUNTERMEASURES

Atsushi SUTO and Yoshiyuki TOKUNAGA

In Hanshin-Awaji Great Earthquake, relief goods distribution became very confused, due to the reason that disaster prevention planning did not work sufficient. In order to distribute quickly and smoothly, it is necessary to research what kind of distribution is effective according to various suffering situations which are assumed in advance. Thereupon, this paper surveyed the problems of relief goods distribution, studied an effect of distribution planning by using a model analysis. This paper considers locating a logistic terminal and an urgent road, speed of an urgent road, difference between efficiency and equity, and number of available trucks as countermeasures. As a result, it is concluded that speed of an urgent road is an important factor. And, it was shown clearly that the policies in other countermeasures which should be taken differed according to the speed.