

## 災害時緊急物資輸送計画に影響を与える要因の分析\*

### *An Analysis of Impact Factors to Urgent Transportation Planning in case of Earthquake Disasters*

首藤 敦\*\*, 徳永 幸之\*\*\*

*By Atsushi SUTO and Yoshiyuki TOKUNAGA*

#### 1. はじめに

緊急物資輸送計画問題は一般の輸送計画と異なり、災害時という状況下で様々な要因により制約を受ける。例えば、阪神・淡路大震災では、輸送や仕分けの為の人員・スペース不足、更には交通網の寸断に伴う大渋滞も影響し、避難所への緊急物資輸送は大いに混乱した。被災という状況下では、効率性だけでなく公平性も考慮して緊急輸送が行われなければならない。被災後迅速に輸送体制を整えるには、そのような制約を踏まえて、事前に物流施設の配置、緊急道路の設定、車両や人員の確保等の、具体的計画の検討が必要不可欠である。そこで本研究では、被災時において人為的にコントロール可能と考えられる要因が緊急物資輸送に与える影響を分析し、事前に検討すべき政策を考える。また、輸送形態を決定する上では、効率性と公平性をどのように考えるかが問題であり、これについても議論する。

#### 2. 緊急物資輸送計画問題の考え方

##### (1) 調査・提言による緊急物資輸送の問題点

阪神・淡路大震災以降、災害時の物資輸送に関する調査や提言<sup>1)</sup>が幾つか報告されている。

これらが挙げている問題点としては、避難所の需要把握の困難さ、県と市からの二重輸送があり、物流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、物

流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。この渋滞を改善する案として、交通規制を行い緊急路を確保する等の対策もあるが、完全に解消することは困難である為、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、積載容量と輸送量がアンバランスであり、輸送力はより小さくなる。また、阪神・淡路では緊急輸送は多品目輸送で行われ、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。

##### (2) 緊急物資輸送計画に関する既往研究

緊急物資輸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、次のよう研究がある。

中川ら<sup>2)</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、物流拠点が考慮されておらず、その為輸送が域外からの直接輸送となり、非効率且つ非現実的であり、課題が残されている。

岡部ら<sup>3)</sup>は、仙台市を想定した仮想都市上で総配送時

\* key words: 防災計画, 物資流動, 経路選択

\*\* 学生員 東北大学大学院情報科学研究科 博士前期課程  
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

Tel: 022-217-7502, Fax: 022-217-7500)

\*\*\* 正員 工博 東北大学助教授 大学院情報科学研究科

間最小化問題を整数計画法により解いている。ここでは物流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、他に緊急路の走行速度を外生変数として与え、配送時間と中継基地の配置、利用避難所数を求めている。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方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ることがわかり、その候補地選定が重要であると述べている。しかし、災害直後は車両不足が懸念され、このような所要時間最小化のみに主眼を置いたピストン輸送の実行は困難であり、結果的に後回しになる避難所も発生するであろう。つまり、公平性が問題となる。

### (3) 本研究の考え方

緊急物資輸送の問題点は次のようにまとめられる。車両確保の困難さ、物資の一時大量・不定期到着への対応（在庫管理の問題）、非効率である多品目輸送（仕分けの問題）、物流拠点の配置、交通渋滞による物資輸送の遅れ、である。

これらを踏まえて本研究では、少数車両を有効利用する為、巡回輸送及び車両配分計画を考える。在庫・仕分けに関しては、少数少品目輸送（ここでは食料品を想定）を想定しており考慮しない。拠点の位置に関しては、被災地外配置が効果的であるという報告が多数有る為、これを採用する。渋滞については、交通規制のみで渋滞を解消することは困難であるが、規制する道路を緊急路として限定すれば幾分改善される可能性がある。また、災害時では大型車は通行障害等の影響を受け易い為、2t車両を用いて一般道も比較的スムーズに走行することを期待する。

### 3. 緊急物資輸送計画の定式化

本研究では緊急物資輸送計画を車両配分計画と輸送経路計画との複合計画と位置づけ、その上で輸送時間最小化問題として解く。このモデルでは、評価関数をCES型に設定することにより、効率性と公平性の両方で解を求めることが可能となっている。緊急輸送計画モデルは(1)～(7)式のように定式化される。

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

where,

$$T^m(s^m, c) = \begin{cases} \sum_{i_k, j_k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{k,j+1}^m & (s^m \leq c) \\ \sum_{i_k \in I_2} t_{ik} y_{k,i+1}^m + \sum_{i_k \in I_2} \sum_{z \in I_2} \sum_{k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{z,j+1}^m + \sum_{i_k \in I_2} \sum_{z \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{z,j+1}^m & (m \in M) \\ \sum_{i_k \in I_2} t_{ik} y_{ij}^m y_{k,j+1}^m & (s^m > c) \end{cases} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_{j \in J_2} y_{ij}^m = x_{mi} \quad (i \in I_2, \quad m \in M) \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J_2} y_{ij}^m = x_{mi} \quad (i \in I_2, \quad m \in M) \quad (4)$$

$$y_{00}^m = 1 \quad (m \in M) \quad (5)$$

$$s^m = \sum_{i \in I_2} x_{mi} \geq 1 \quad (m \in M) \quad (6)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mi} = 1 \quad (i \in I_2) \quad (7)$$

ここで、 $i, k$ を物流拠点 ( $i=1$ ) 及び避難所を表す添字、 $j$ を輸送順序を表す添字、 $m$ を輸送車両を表す添字、 $n$ を避難所の数、 $z$ を車両台数、 $s^m$ を車両 $m$ が担当する避難所の数とする。但し、

$M = \{1, \dots, z\}$  : 車両を表す添字集合

$I_i = \{0, \dots, n\}$  : 拠点と避難所を表す添字集合

$I_s = \{1, \dots, n\}$  : 避難所を表す添字集合

$J_i = \{0, \dots, s^m - 1\}$  : 物流拠点から最後に訪れる1つ手前の避難所までの巡回順序を表す添字集合

$J_s = \{1, \dots, s^m\}$  : 避難所の巡回順序を表す添字集合

$e$  : 評価関数

$T^m(s^m, c)$  : 車両 $m$ の所要時間

$\gamma$  : パラメータ

$c$  : 車両の積載容量 (1台当たり輸送可能避難所数)

$t_{ik} (=d_{ik}^e/v^e + d_{ik}^s/v^s)$  : 地点 $ik$ 間の輸送時間

$d_{ik}^e$  : 地点 $ik$ 間の最短経路緊急道路路長

$d_{ik}^s$  : 地点 $ik$ 間の最短経路一般道路路長

$v^e$  : 緊急道路平均走行速度

$v^s$  : 一般道路平均走行速度

$L$  : 積み卸し時間

$x_{mi}$  : 避難所 $i$ に車両 $m$ で輸送する場合を1、しない場合を0とする0-1整数変数

$y_{ij}^m$  : 車両が地点 $i$ を $j$ 番目に訪れる場合を1、訪れない場合0とする0-1整数変数

$l$  : 拠点への帰還回数を表す添字

[ ] : Gauss's notation

である。(1)式は、CES型で表したこの問題の評価関数であり、(2)式は各車両の輸送時間である。輸送量が積載容量に満たない場合 ( $s^m \leq c$ ) と、積載容量を超過する為、拠点に帰還し再度積み荷をして発車する場合 ( $s^m > c$ ) に分けている。(3)、(4)、(5)式は経路選択に関する制約を表し、(6)、(7)式は車両配分に関する制約を表している。

尚、組合せ最適化問題であるこのモデルの解法とし

て、大規模な問題に対して短時間で解が得られる遺伝的アルゴリズムを適用する。

#### 4. 緊急物資輸送計画に影響を与える要因の分析

##### (1) 影響要因の考察

本研究では様々な要因が緊急物資輸送に与える影響を分析する。その為に、先ず影響を与える要因としてどのようなものがあるか考察する必要がある。

先ず、要因は大きく外生的要因と政策的要因に分類される。外生的要因としては、被災地の面積や避難所の分布密度のような被害状況が考えられる。

一方政策的要因としては、使用可能車両台数、物流拠点の選定、緊急路の選定、緊急路の速度、積み卸し時間等が考えられる。これらの政策には、人員配置が大きく関わってくる。例えば、緊急路の速度を向上させる場合も積み卸し時間を短縮させる場合も、その効果は配置された人員の人数に大きく依存する。しかしながら、災害時という状況下では配置出来る人員に限りがあり、緊急路の規制と積み卸しに人員をどのように配分するかというトレードオフの問題が生ずることに留意しなければならない。

今回はこの内、政策的要因である緊急路の選定、緊急路の速度、積み卸し時間に絞って、効率性・公平性の観点から分析する。

##### (2) 基礎データ

本研究では、データの作成が容易である仮想都市上でシミュレーションを行う。ここで、シミュレーションに用いる前提条件を以下に示す。

- ・各避難所必要物資量（食料品）…300kg/回
- ・車両積載容量…2t（避難所6箇所分）
- ・避難所数…182箇所
- ・一般道路の走行速度…5km/h

必要物資量は、避難所の規模を阪神・淡路大震災時の平均人数300人として定めた。

以上の条件下で、図1のような仮想都市（8km×4km）を用いてシミュレーションを行う。メッシュは一般道路網を表し、200m間隔である。避難所は全域にほぼ均等分布させる。

##### (3) 緊急路走行速度と積み卸し時間の影響

本研究では緊急路走行速度と積み卸し時間を以下の

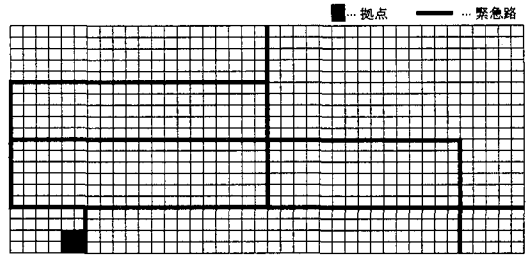


図1 仮想都市

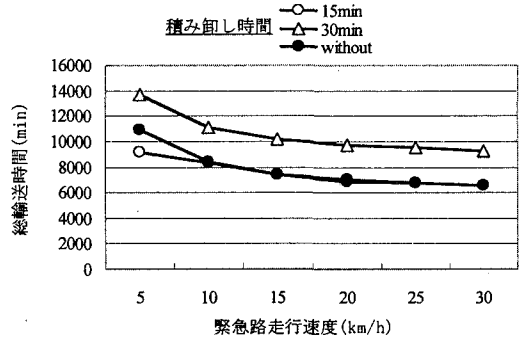


図2 総輸送時間 ( $\gamma=-1$ )

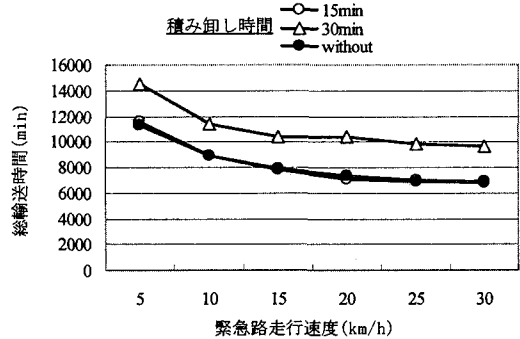


図3 総輸送時間 ( $\gamma=\infty$ )

ように変化させ、輸送時間に及ぼす影響を分析する。

- ・緊急路の走行速度…5, 10, 15, 20, 25, 30km/h
- ・積み卸し時間…15, 30分

但しパラメータは、今回極端な効率性 ( $\gamma=-1$ ) と公平性 ( $\gamma=\infty$ ) に基づいて定める。

結果を図2～図5に示す。図2, 図3は、緊急路走行速度と総輸送時間の関係を、積み卸し時間別に表している。一方図4, 図5では、輸送の公平性について分析する為に、1回の輸送において最も物資の到着が遅い避

難所までの所要時間を「最遅輸送時間」と定義して、その変化を示している。

また、最適車両配分を行わずに、避難所を各車両に均等配分し最適ルートのみ計算したケースを'without'として示しておく。但し、この場合の積み卸し時間は15分とする。

これらの図から次のようなことが解る。まず、交通規制が無い状態（緊急路走行速度：5km/h）から規制が行われて速度10km/hになることにより、大きな時間短縮効果を示している。だが、速度が向上するにつれてその効果は薄れ、20km/hを超えると殆ど影響を与えない。逆に、わずか10km/hまで速度を向上させる程度の交通規制でも十分効果があると言える。渋滞を交通規制で解消することは困難であるという意見があるが、わずかででも一般道に比べ速度を向上出来る見込みがあれば、交通規制を実行する価値は十分にある。

また、積み卸し時間を短縮することにより輸送時間が短縮されるが、積み卸し時間を15分にするよりも走行速度を10km/hにする方が効果的である。故に、これらに要する人員が等しいならば、緊急路に優先的に人員を配置する方が有効と思われる。

車両配分については、各車両に避難所を均等な数で配分（without）しても顕著な差は見られない。これは避難所を被災地に均等・高密度で分布させているからと考えられる。より偏った分布ならば、均等に配分せず評価関数が最小になるような柔軟な配分をする意味が現れると予想される。

次に、効率性と公平性の問題について考えてみる。効率性に主眼を置いた輸送と公平性に主眼を置いた輸送では、前者の方が後者と比較して5%前後総輸送時間が短縮されているに過ぎない。一方最遅輸送時間に関しては、公平性のケースの方が効率性のケースよりも約15%の短縮効果が見込まれる。更に、各車両の所要時間の標準偏差を比較すると、前者は後者の約2/3である。以上から、災害時という特殊な場合を考慮するのならば、僅かに総輸送時間を短縮させる効率性よりも、公平性を優先した輸送体制を採るべきである。

## 5. おわりに

本研究では、災害時における緊急物資輸送計画に影響を与える要因を、シミュレーションにより分析する

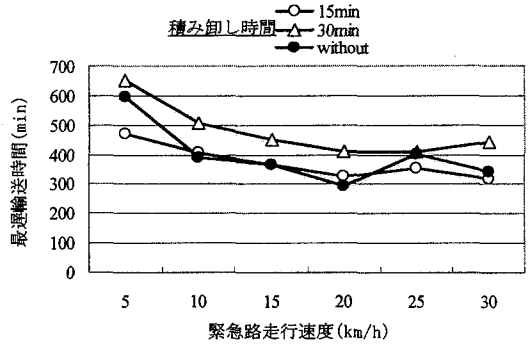


図4 最遅輸送時間 (γ=-f)

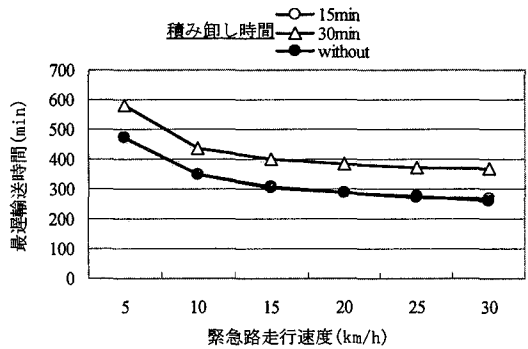


図5 最遅輸送時間 (γ=∞)

ことで、事前に準備すべき対策を検討した。その結果、緊急路が一般道路に比べて僅かでも速度向上が見込まれるのならば、緊急路の設定は十分効果的であること、災害時輸送においては公平性の基準で計画しても十分効率性を維持出来ること等がわかった。

今回は、緊急路の選定、緊急路の速度、積み卸し時間、効率性・公平性の観点を要因として分析を行ったが、今後はその他の政策的要因や外生的要因についても広く検討する予定である。

## 【主要参考文献】

- 1) 例えば、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。
- 2) 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。
- 3) 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。