

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

The Influence of Depot Location and Travelling Speed on Relief Goods Delivery Time

岡部 和広^{*}、徳永 幸之^{**}、須田 熙^{***}

by Kazuhiro OKABE, Yoshiyuki TOKUNAGA, Hiroshi SUDA

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18万棟もの家屋が倒壊または焼失の被害にあり、また水道・電気・ガス等のライフラインも寸断されたため、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1153カ所に達した。予期せぬ大災害であったため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、配送や仕分けの人員・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、避難所への救援物資の配送は数日間に渡り混乱した。

この震災を契機として全国の多くの自治体で地域防災計画の見直しが進められており、あらゆる面での危機管理が重要視されてきている。しかし、自治体の地域防災計画¹⁾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各部署の担当や食糧・物資の調達方法等の事務処理についてのみ記載されているにすぎず、その見直し作業²⁾も被害想定の見直し³⁾が中心であり、具体的な配送計画までは言及されていない。この状態で大震災に遭遇した場合、早急に配送体制を整えることは不可能であると考えられる。

震災後早急に配送体制を整えるためには、事前に物流施設の配置、緊急路の設定、車両や人員の確保方策など、具体的な配送計画の検討が必要不可欠である。救援物資配送問題は一般の配送問題と異なり、被災状況や交通状況、物流施設や人員確保等の条件の違いにより効率的な配送形態が異なると考えられ

る。そこで本研究では、これらの要因のうち物流施設と交通条件が配送に及ぼす影響をシミュレーションモデルによって分析する。その結果より防災計画において物流施設候補地の選定や緊急路の設定など、事前に検討しておくべき項目についてその考え方を示すことを目的とする。

2. 救援物資の配送問題

(1) 阪神・淡路大震災での問題点

阪神・淡路大震災における救援物資配送の実態について、その輸送形態やそこで発生した問題点などが報告されている。^{3),4)} これらの報告書を参考に阪神・淡路大震災での救援物資配送の問題点をまとめてみる。

震災直後、全国から寄せられた救援物資は、被災地内にある市役所に集められたが、物資の集積スペースの不足や混乱した指揮系統のもと不慣れな市職員やボランティア等が作業していたため、十分な対応がとれなかった。そこで1月20日以降は市内4カ所に避難所への配送拠点が設けられ、配送、倉庫管理、荷捌き等の配送実務については物流事業者に委託したため、配送の混乱は幾分改善された。しかし、以下のような問題が残された。

- ① 配送車両の調達の困難さ
- ② 交通渋滞による物資配送の遅れ
- ③ 避難所での必要物資把握の困難さ
- ④ 在庫管理の困難さ

このうち、③④は情報管理の問題であり、本研究では対象としない。①は少なくとも震災直後の数日間は調達困難と考えられるため、本研究では配送車両不足を前提とする。②は交通渋滞を制御できないとすれば、物流施設を適切に配置することにより効率化することが検討課題となる。一方、緊急路の設定

キーワード：防災計画，物資流動

*正会員 情修 福山コンサルタント 東北支店調査部

**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
TEL 022-217-7499 FAX022-217-7500)

***正会員 工博 八戸工業大学教授 工学部土木工学科

により配送車両の走行速度を向上させることができれば、これによっても効率化が可能である。阪神・淡路大震災ではこれらについて事前の検討がなされていなかったため、震災後早期に配送を効率化することができなかつたことから、これらの方策の効果を事前に検討し、震災直後に適切な処置がとれるよう準備しておく必要がある。

(2) 一般の配送計画との違い

一般の配送計画においては、交通条件や施設配置、配送貨物量を所与として配送にかかるコストを最小化しよう線形計画法をはじめとする数理計画手法を用いて最適解あるいは近似解を求めている。⁶⁾しかし、救援物資の配送を考える場合、コストではなく時間最小化問題として定式化される。

配送ネットワークには、一般に巡回輸送システムや直接輸送システムが考えられる。巡回輸送システムは、配送先各々の需要が配送車両容量に対して小さい場合には輸送コスト及び輸送時間ともに削減され有効であるが、輸送コストを考慮する必要が無く、避難所で必要とされる大量の救援物資を短時間で運ぶことが要求される場合には適さない。一方、阪神・淡路大震災で実際にとられていた直接輸送システムは、配送拠点から避難所まで直接輸送するため、配送車両数が避難所数より多い場合には各避難所から見て最短時間で配送できるという利点がある。しかし、配送車両数が制限されている状況では、1台の配送車が複数の避難所と配送拠点を往復しなければならぬため、全避難所への配送完了時刻は大幅に遅れることになる。このような状況においては、総配送時間を短縮することで全避難所への配送完了時刻も早めることが可能となる。

徳永⁷⁾は配送コスト削減のために中継基地を設置することの有効性を検討しているが、中継基地経費がかかることから中継基地の設置は限定的なものとなっている。しかし、緊急物資の配送においては積み替え時間のみを考慮すればよいことから中継基地利用による効率化の可能性が高い。また、通常中継基地の設置は用地取得等の制約により政策としての自由度は低い、緊急時においては一時使用であることから多数の設置も可能であると考えられる。

一般に配送拠点は配送区域の中央にあったほうが

効率的である。しかし、震災時においては被災地域外からの救援物資の流入、配送拠点から避難所への配送ともに交通渋滞の影響を受けることになる。また、配送拠点での仕分けのための人員確保の点からも被災地域外縁部に配送拠点を設置することが望ましいと考えられる。

(3) 本研究における考え方

以上の検討を踏まえ、本研究で対象とする震災後数日間に渡る継続的な救援物資配送問題をまとめる以下のようなになる。

- ① 1 サイクル当たりの総配送時間を最小化する問題として考える。
- ② 幹線道路については交通規制により速度もコントロール可能な政策変数と考える。
- ③ 配送拠点は被災地域外縁部に設置する。
- ④ 中継基地は比較的自由に設定可能である。

このような問題に対して湯浅⁸⁾は配送時間最小化モデルを構築したが、感度分析が十分でなく、交通条件や輸送条件などの要因が配送システムに与える影響までは分析されていない。そこで、本研究では湯浅らが定式化した配送時間最小化問題をシミュレーションモデルの一部と位置づけ、緊急路の設定や避難所の分布が異なる状況の下で走行速度や中継基地における積み替え時間を変化させ、システムの挙動をみることで緊急路の設定や中継基地の設置の効果を検討する。

3. 配送システムの定式化

(1) 配送システムの考え方

本研究で用いるネットワークは図-1に示すような階層型配送システムであり、ノードが配送拠点、中継基地、避難所の3種類ある。ここで、これらのノードについて説明しておく。

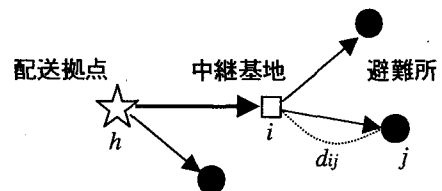


図-1 階層型配送システム

a) 配送拠点…被災地以外からの救援物資の集積場所であり、被災地域内への救援物資配送の拠点となる所である。在庫管理、各避難所毎の仕分けはここで行う。阪神・淡路大震災の教訓から被災地域内部には設置せず、被災地域外縁部に設置する。

b) 中継基地…大型車通行可能な幹線道路沿いに設置し、配送拠点から大型車で輸送した物資をここで小型トラックに積み替え、各避難所へ配送を行う。ここでは保管や仕分け作業は行わず、配送拠点で避難所毎のゲージなどに仕分けられたものを積み替えるだけの施設である。モデルでは候補地を設定し、最適化問題を解くことにより設置個所が選定される。

c) 避難所…避難所への救援物資は1箇所の中継基地または配送拠点から配送されるものとし、複数の中継基地または配送拠点から同時に配送されることは考えない。

なお、本論文では配送拠点と中継基地を併せて物流施設と呼ぶことにする。

リンクは、国道などの幹線道路に交通規制を行った緊急車両用道路と一般の道路の2種類を考え、2種類の走行速度を用いる。

(2) 定式化

本研究では、総配送時間最小化問題を整数0-1計画問題として、以下のように定式化する。

目的関数

$$z = \sum_{k=1}^{l+m} \sum_{j=1}^n t_{kj} r_{kj} x_{kj} + \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m t_{hi} r_{hi} y_{hi} \rightarrow \min \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{j=1}^n q_j x_{kj} - \sum_{h=1}^l c_{10} r_{hi} y_{hi} \leq 0 \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{l+m} x_{kj} = 1 \quad (3)$$

ここで、 $h=1 \sim l$: 配送拠点

$i=1 \sim m$: 中継基地

$j=1 \sim n$: 避難所

$k=1 \sim l+m$: 物流施設 (配送拠点, 中継基地)

$$x_{kj} = \begin{cases} 1: \text{避難所}j\text{が物流施設}k\text{から配送を受ける} \\ 0: \text{避難所}j\text{が物流施設}k\text{から配送を受けない} \end{cases}$$

$$y_{hi} = \begin{cases} 1: \text{配送拠点}h\text{から中継基地}i\text{に配送する} \\ 0: \text{配送拠点}h\text{から中継基地}i\text{に配送しない} \end{cases}$$

$$t_{kj} = d_{kj}^1 / v_1 + d_{kj}^2 / v_2 + s_2$$

$$t_{hi} = d_{hi}^1 / v_1 + s_1$$

t_{kj} : 物流施設 k -避難所 j 間の輸送時間

t_{hi} : 配送拠点 h -中継基地 i 間の輸送時間

d_{kj}^1 : 物流施設 k -避難所 j 間の最短経路幹線道路長

d_{kj}^2 : 物流施設 k -避難所 j 間の最短経路一般道路長

d_{hi}^1 : 配送拠点 h -中継基地 i 間の最短経路長

v_1 : 幹線道路でのトラックの平均速度

v_2 : 一般道路でのトラックの平均速度

s_1 : 配送拠点-中継基地輸送に係る積み卸し時間

s_2 : 物流施設-避難所輸送に係る積み卸し時間

r_{kj} : 物流施設 k -避難所 j 間の必要トラック台数

$$(c_2 r_{kj} \geq q_j)$$

r_{hi} : 配送拠点 h -中継基地 i 間の必要トラック台数

q_j : 避難所 j の必要物資量

c_2, c_{10} : 2t, 10tトラックの積載可能量

(1) 式の第一項は、配送拠点と避難所間の配送時間、または中継基地を選択した場合は中継基地と避難所間の配送時間を表す。第二項は、中継基地経由が選択された場合の配送拠点から中継基地への配送時間を表す。(2)式は、中継基地で取扱う救援物資の容量制約である。(3)式は、一つの避難所は必ず1箇所の配送拠点または中継基地から配送を受けるという制約である。

この問題を解くに当たっては分枝限定法を用い、厳密解を求めた。なお、本研究では計算効率を上げるため、 x_{kj} は総ての組み合わせではなく、一つの避難所につき1~ l の配送拠点及び2~4の中継基地のみを組み合わせることにより変数を大幅に減らしている。

4. 仮想都市によるシミュレーション

(1) 基礎データ

本研究の目的は救援物資配送に影響を与える要因の分析であり、様々な交通条件及び輸送条件の下で配送問題を解く必要がある。そのためデータ作成が容易である仮想都市を用いることとする。ここで、シミュレーションに用いる前提条件を示しておく。

- ・各避難所の必要物資量…避難所一箇所当たり2t
- ・中継基地候補地…幹線道路(緊急路)沿線に設定
- ・一般道路の走行速度…10km/h

救援物資の種類や必要量は震災後時間の経過とともに変化する。本研究では震災後数日間の継続的な救援物資の配送を想定しているため、1回の配送は2t車満載を考えた。なお、2tは避難所の規模を阪神・淡路大震災時の平均300人（ピーク時避難者数約32万人、避難所数約1100箇所）とすると一人当たり6kgとなる。中継基地での積み替え時間は、中継基地と避難所の間を走るトラック1台につきかかる時間とする。

以上の前提条件の下、本研究では以下のような要因を変化させ、配送時間にどのような影響を与えるかを分析する。

- ・中継基地での積み替え時間…12,36,60分
- ・中継基地での取り扱い可能容量
 - …中継基地一箇所当たり10t,20t
- ・幹線道路（緊急路）の走行速度
 - …10km/h,15km/h,20km/h,30km/h

（2）仮想都市によるシミュレーション

ここでは仙台都市圏を想定し、図-2のような仮想都市（26km×36km）を用いてシミュレーションを行った。メッシュは道路網を表し500m間隔である。基本ケースとして、4箇所の配送拠点と17箇所の中継基地候補地、195箇所の避難所を持つケース（ケース1）を設定した。避難所数は仙台市の指定避難所数程度であり、全域にほぼ均等に分布させた。中継基地候補地は幹線道路沿いに5～10km間隔に配置した。この基本ケースに対し被災状況が変化した場合として、幹線道路と中継基地候補地を2箇所減少させたケース（ケース2）、避難所数を322箇所に増やしたケース（ケース3）も設定した。追加避難所は図-2の白丸に示すとおり密度を変えて分布させた。これらのケースにおいて中継基地の容量、幹線道路の速度、積み替え時間を変化させシミュレーションを行った。シミュレーション結果を以下に示す。

まず、ケース1の結果を図-3、表-1に示す。図-3には比較のため中継基地を使わない直接輸送システムの配送時間も示している。幹線道路の速度が10km/h、すなわち交通規制がなされていない状態の場合、中継基地利用の効果が顕著に表れている。また、積み替え時間が短い場合、中継基地の取り扱い可能容量が大きいことでより多くの避難所が中継基地経由の

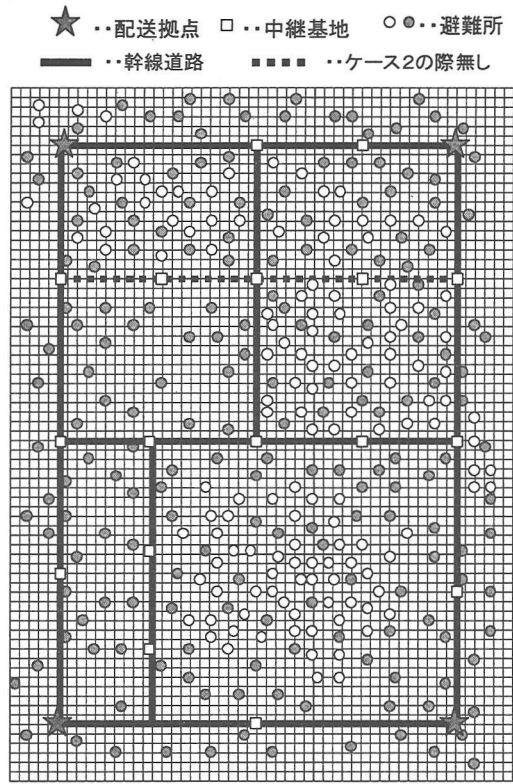


図-2 仮想都市

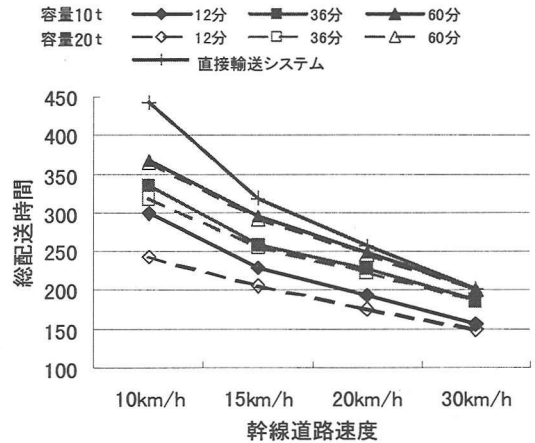


図-3 基本ケースの配送時間

表-1 基本ケースの中継基地選択避難所数

速度 \ 積替	中継基地容量10t			中継基地容量20t		
	12分	36分	60分	12分	36分	60分
10km/h	84	84	83	145	143	133
15km/h	84	84	64	144	131	87
20km/h	84	78	57	144	115	62
30km/h	84	52	22	139	73	32

配送となり総配送時間が短縮される。これは、本ケースの避難所数に対して10tでは中継基地の容量が不足であることを示している。しかし、積み替え時間が36分以上になると、容量の違いは小さくなる。一方、幹線道路の走行速度が速くなるにつれて、配送拠点からの直接輸送になることによる配送時間の増加の方が中継基地での積み替え時間より小さくなることから、中継基地は利用されなくなる。この傾向は積み替え時間が大きいほど顕著である。(表-1参照)。中継基地の利用が少なくなっていることから積み替え時間の差による総配送時間の差も縮まる。幹線道路の速度を10km/hから15km/hにすると、直接輸送システムでも積み替え時間36分のときと同程度まで総配送時間を短縮できる。このことから、幹線道路の設置が総配送時間短縮に大きく影響し、中継基地での積み替え時間は30分以内としなければ効果が少ないことがわかる。

次に、幹線道路が減少したケース2(中継基地の可能容量は20t)とケース1の比較を図-4に示す。幹線道路が減少したケース2では、基本ケースに比べ中継基地数が減少したため、中継基地を利用できなくなった避難所が配送拠点からの直接輸送になるために増加した輸送時間の分だけ、総配送時間が増加している。特に中継基地での積み替え時間が12分の場合、中継基地数減少の影響が大きい。幹線道路の速度が15km/hになると中継基地数減少の影響はほとんどなくなる。しかし、幹線道路の速度が20km/h以上になると幹線道路減少の影響が大きくなり、基本ケースに比べ配送時間が増大する。

避難所数が増加したケース3(中継基地の容量は20t)とケース1の比較を図-5に示す。避難所数が増加したケース3では幹線道路の速度が10km/hから15km/hになった場合の総配送時間短縮効果は基本ケースより大きく、避難所の数が増えた場合に交通規制の効果により大きいことがわかる。幹線道路の速度が向上すると、中継基地を経由しない配送拠点からの直接輸送が増加するが、その際、配送拠点に近い中継基地が利用されなくなる。逆に配送拠点から離れている中継基地は幹線道路から離れている避難所が利用している。よって、幹線道路の速度が速い場合でも、配送拠点から離れている避難所密集地区に中継基地を設置することが効果的である。

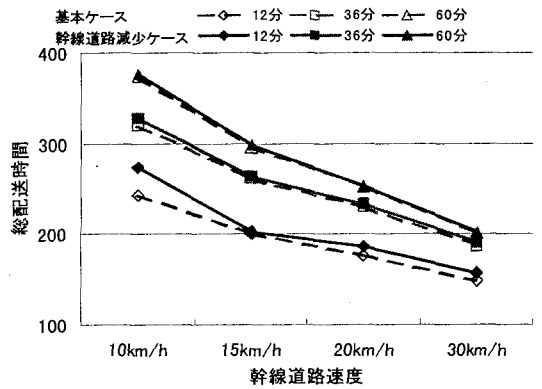


図-4 幹線道路減少ケースの配送時間

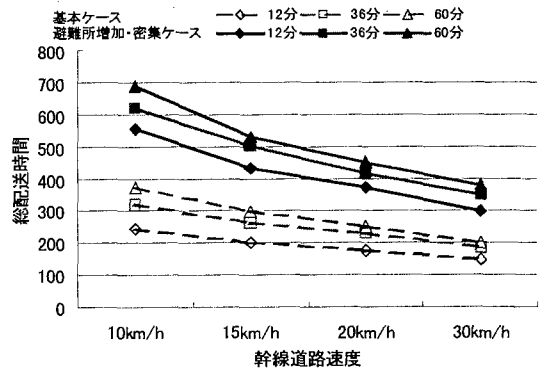


図-5 避難所増加ケースの配送時間

5. 結論

本研究の分析結果より、救援物資配送に対して事前に検討しておくべき事項を整理すると以下の通りである。

- 1) 一般道路の速度10km/hに対し、緊急車両用道路の速度は15km/hでも十分な効果が得られる。特に被害が大きいほどその効果も大きくなることから、交通規制が迅速に行える対策を立てておく必要がある。
- 2) 中継基地での積み替え時間は約30分以内が適当と考えられ、それ以上時間が必要となる場合は中継基地設置の効果は小さい。そこで、人員の配置や積み替え時間短縮の方策を検討しておく必要がある。
- 3) 中継基地での取り扱い可能容量は避難所に対して十分な容量を確保することが望まれる。また、配

送拠点から離れた避難所密集地区でより効果的であることから中継基地候補地の選定が重要である。

以上の結果をふまえ、交通規制や中継基地に必要な人員のトレードオフの関係の検討などが今後の課題となる。また、今回の検討では配送拠点の配置や緊急路となる幹線道路を固定していたが、これらの設定によっても配送効率は大きな影響を受けるため、配送拠点の配置や緊急路の設定についても検討しておく必要がある。

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，1997。
- 3) 小谷通泰：阪神・淡路大震災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.1 No.2合併号，pp.39-42，大阪交通科学研究会，1996。
- 4) 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，財団法人関西交通経済研究センター，1995。
- 5) 大規模地震災害等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，財団法人運輸経済研究センター，1995。
- 6) 例えば，Carlos F.Daganzo, Logistics Systems Analysis, Springer, 1996。
- 7) 徳永幸之、岡田龍二、須田 瀨：宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル，土木計画学研究・論文集，No.12，pp.519-526，1995。
- 8) 湯浅健，徳永幸之，須田 瀨：震災時における緊急物資の被災地域内配送に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.19 (2)，pp.339-342，1996。

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

岡部 和広，徳永 幸之，須田 瀨

阪神・淡路大震災では、30万以上もの人々が避難生活を強いられた。本論文では、阪神・淡路大震災で実際にとられた救援物資配送体制の問題点を分析し、救援物資配送の特徴を理解した上で、「配送拠点位置」や「緊急輸送路の指定」といった防災計画における政策変数の違いが、配送システムに与える影響を評価するためのモデルを構築し、政策変数が配送時間に与える影響を明らかにした。

The Influence of Depot Location and Travelling Speed on Relief Goods Delivery Time

by Kazuhiro OKABE, Yoshiyuki TOKUNAGA and Hiroshi SUDA

In Hanshin-Awaji Great Earthquake, over 300,000 people were forced to refuge. In this paper, we analyze the problem of relief goods delivering system which is taken at Hanshin-Awaji Great Earthquake. After understanding the characteristics of the system, we construct a model to evaluate the difference of policy in disaster prevention planning such as arrangement of delivery base and appointment of emergency transport route. Then, we apply the model in virtual city, and analyze the changes of time which needed in whole delivery system when the policy changed.