

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*

A Study on Urgent Transportation Planning using a Simulation in case of Earthquake Disasters*

中川 大**・若山 真樹***・伊藤 雅****

By Dai NAKAGAWA **, Masaki WAKAYAMA ***, Tadashi ITOH ****

1. はじめに

阪神淡路大震災では震災直後の緊急対応期に、被災地内の全域において大きな渋滞が発生した。震災直後の限られた交通容量の中で迅速な救助活動や効率のよい物資輸送を行うためには、残された道路網において面的・時間的な交通配分のコントロールを行うなどの適切な対策が不可欠である。

そこで本研究では、これらの教訓を活かし今後の防災交通計画の立案を支援することを目的として、都市において時々刻々と変化する道路交通と緊急救援物資の供給状況を再現する物資輸送交通シミュレーションシステムを構築する。またケーススタディとして京都市を対象とし、震災時の限られた道路網において、様々な交通が錯綜する混乱状況をシミュレーションによって表現するとともに、緊急物資輸送について都市全体、あるいはゾーンごとの時系列的な供給状況を検証する。このシミュレーションシステムでは、被害状況や車両の発生量などを変化させることが可能であるため、それらの条件の組み合わせを変化させたシナリオを複数設定してシミュレーションを行う。またそれをもとに、被害状況に応じた各種対策の効果を比較することにより、震災緊急時における交通対策について検討する。

2. シミュレーションシステムの構築

震災等の緊急時における輸送交通を取り扱うシミュレーションとしては、その状況の特異性を考慮して、通常交通シミュレーションと比較していくつか特徴的な機能が付加されるべきである。それは、リンクの切断や容量の低下など災害による道路ネットワークの変化に対応できること、輸送車両の行動について管理・誘導策を考慮できること、必要な物資の地域的な過不足状況を常に把握できること等である。本シミュレーションシステムは、それらの機能を加味し、刻々と変化する道路状況と物資の輸送状況をシミュレートするための、汎用性のあるシステムを目指して作成したものである。図-1にその構成とフローを示す。以下、このシミュレーションシステムの流れについて、図-1と対応させながら順に示す。

①基本データ作成

対象都市の規模や特性を捉えたシミュレーションを行うために、その地域の道路ネットワークデータや、ゾーン別の人口データ、パーソントリップ調査などを用いて時間帯別の各ゾーンの滞留人口など、人と車両の1日の動きを捉えるデータを作成する。また災害発生時の緊急物資需要量もゾーン別人口を用いて求める。ここで各ゾーンの滞留人口は、1時間単位で24時間分算出し、地震発生時刻によって該当する時刻のデータを用いる。

②交通車両発生データ作成

基本データをもとに、シミュレーションプログラムで利用できるように、交通車両の発生時刻と積載貨物、及びODに関するデータによって構成される車両の発生データを作成する。発生車両数

*キーワード：防災計画、シミュレーション

**正員、工博、京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻
(〒606-01 京都市左京区吉田本町、Tel 075-753-5138)

***学生員、京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻

****正員、博士(都市・地域計画)、京都大学大学院工学研究科
土木システム工学専攻

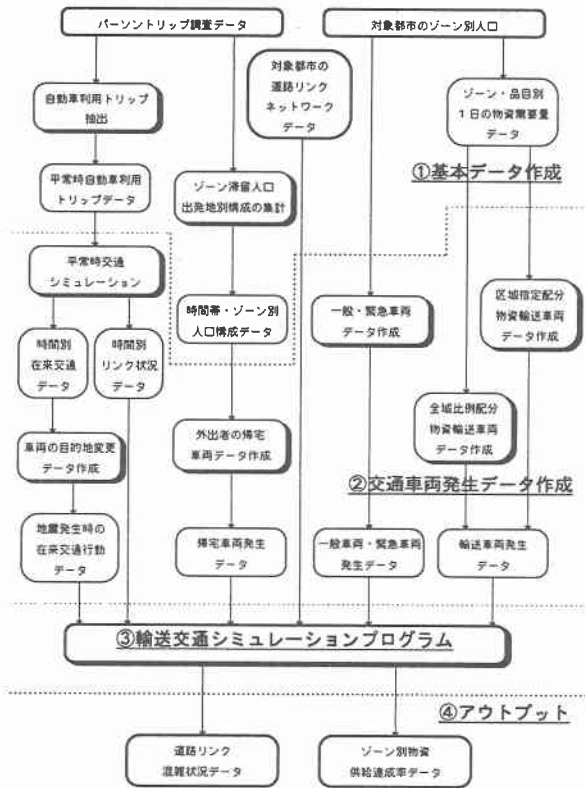


図-1 シミュレーションシステムのフロー

は1日単位で設定し、午前中に出発する車両の比率を高くして発生時刻別に分割している。ここで特長として挙げられることは、地震発生時刻における平常時の交通状況をまず再現し、その時刻に道路上を走行している車両数を求めた上で、その在来交通が目的地を変更する行動を考慮していることと、地震発生時に自宅とは異なるゾーンにいる人口を計算し、その出先からの帰宅車両トリップを考慮している点である。また新たな車両の発生については、通常時の交通とは異なることを考慮して、パーソントリップ調査のデータではなく各ゾーンの人口に比例した発生集中交通量を作成する。このうち一般車両は内々、内外、外内のそれぞれについて設定し、緊急車両と物資輸送車両についてはゾーンの人口に比例した必要量を市外から流入するように設定する。特に物資輸送車両については、日単位で変化する物資需要の種類に応じた車両発生を行う。

③輸送交通シミュレーションプログラム

以上のインプットデータをもとに、実際に与え

られた道路ネットワーク上で交通シミュレーションを行う。ここでリンク上における車両の運行速度は、各リンクの交通密度をもとに密度-速度曲線(K-V式)によって決定する。車両は1分単位でリンク上を移動し、所要時間が最短となる経路を検索して目的地へ向かうものとする。取り扱う車両には、一般市民の車両(以下、一般車両とする)、物資輸送車両、緊急車両があり、特に一般車両については都市の内外に移動するものや都市内での移動などの行動パターンを考慮する。またそれぞれの車両については、目的地到着後に物資の積み下ろし等の作業を行い、終了後に復路の車両として再び出発地に戻る行動も考慮している。

④アウトプット

アウトプットデータとしては、時間ごとの道路リンクの混雑状況とゾーン別物資供給達成率を記録する。これらは時系列的かつ面的なデータとして得られ、各種対策の効果を検討するために利用できるものである。

3. 京都市へのシステムの適用

(1)ゾーニング

平常時においても、それぞれの地域に滞留する人の数や、道路を走行中の車両の数は刻々と変化している。従って災害発生の際によってその後の人や物資の流れは大きく異なるものとなる。そこで、日常の人々の行動を捉えるために第3回京阪神都市圏パーソントリップ調査を用いて、ゾーン間を移動する人や車の数をその移動目的別時間別に集計する。また各ゾーンにおける、他ゾーンからの時間ごとの訪問人口を算出し、地震発生時刻の違いによる状況の変化をシミュレーションに反映させることができるようにする。この際、基本ゾーニングとして、パーソントリップ調査で捉えられる最も詳細なゾーンを用いて京都市を51のゾーンに区分する¹⁾。

(2)緊急物資需要推定

震災時に必要な物資は種々あり、またその需要の発生する時機や地域は様々であるため、本研究

においては物資を（飲料水、食料、衣料品、日用品、テントシート、住宅資材）の6項目に分類して取り扱う。また設定した51ゾーンについて、その常住人口に品目別の原単位を乗じ、物資ごとの緊急度（食料や毛布は早めに、復旧資材はその後に、など）を考慮して、震災発生からの各日ごとに1日に必要なゾーン別物資需要量を算出し、物資輸送車両の発生のための基礎データとする。

なおシミュレーション中では、各物資は全て市外より供給されるものとし、市内に存在した物資は備蓄として需要量を削減させるものとする。

(3) 道路ネットワークの構築

道路ネットワークは、国道、府道等の主要幹線に加えて、ゾーン間を結ぶ道路等、幹線的な道路はすべて網羅して選定した。そのネットワークを図-2に示す。またノードとしては各路線の交差点とともに、救援活動や物資供給の上でゾーンの拠点となるべき地点を設定した。なおこの際、道

路の上下方向の流れを区別して扱うために一本の道路は双方向の2本のリンクとして捉えた。その結果リンク総数779本、ノード総数234個を京都市の道路ネットワークとして設定した。またそのうち市の内外を結ぶ流入路線は計10本であり、ここを通して物資の供給が行われるものとする。

4. シミュレーションのためのシナリオ作成

構築したシミュレーションシステムは、道路ネットワークに関する条件、地震発生時刻に関する

表-1 シナリオの設定

	道路リンク被害	輸送配分方法	交通規制
シナリオ1	レベル 1	全域比例配分	なし
シナリオ2	レベル 1	全域比例配分	段階1
シナリオ3	レベル 1	全域比例配分	段階2
シナリオ4	レベル 1	区域指定配分	なし
シナリオ5	レベル 0	全域比例配分	なし
シナリオ6	レベル 2	全域比例配分	なし
シナリオ7	レベル 2	区域指定配分	なし

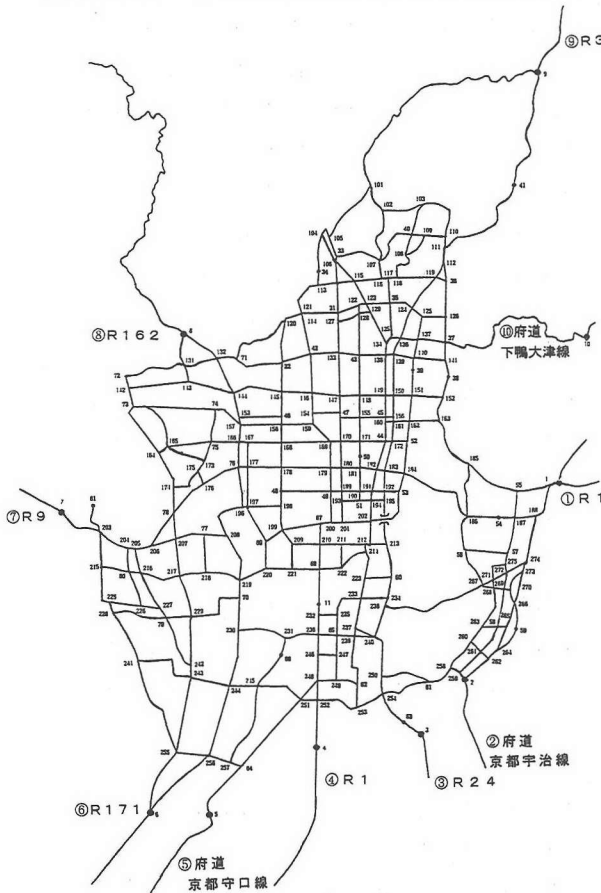


図-2 京都市の道路ネットワーク

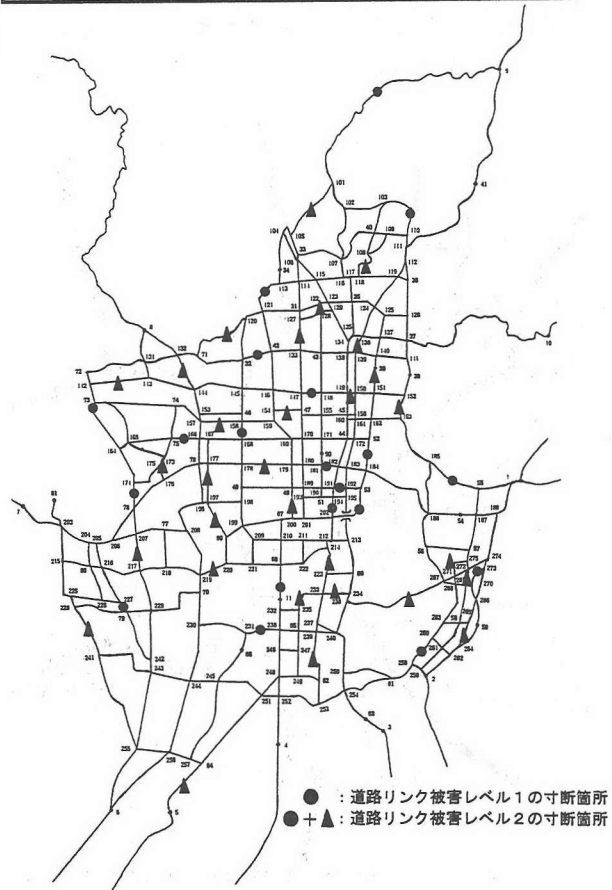


図-3 道路リンク被害箇所

条件などを変化させることによって、様々なシナリオにおける交通状況の変化や物資供給に関する効果を比較することができる。そこで以下では、いくつかの条件を変化させてシミュレーションを行う。具体的には、交通規制、道路リンク被害、輸送配分方法の3つの項目を変化させた7つのシナリオを設定する(表-1)。

ここで道路リンク被害は、橋梁、山間部路線など、災害時に寸断される危険度の大きい地点を文献2を参考にして段階別に設定したものであり、Level 0は被害のない場合、Level 1は20箇所のリンクが被害を受け寸断された場合、Level 2はさらに大きな被害を受け50箇所のリンクが寸断された場合として図-3に示すように設定した。

輸送配分方法は、物資輸送車両の目的地の設定に関するもので、全域比例配分は市内への各流入路線からの物資を各ゾーンの需要量に応じて均等配分する方法であり、流入してきた方向にかかわらず目的地を定めるものである。これは被災地の東から流入してきた車両が被災地内の西端を目的地とする場合があるなど、阪神淡路大震災で観測

された³⁾一種の混乱状況を表している。一方、区域指定配分は、市内での車両の錯綜を減少し、車両の総走行距離を減少させることを目的として、各流入路線から輸送される物資をその路線に近いゾーンに優先的に配分する方法として定める。具体的には各流入路線ごとに図-4に示す輸送区域を設定している。

また交通規制は、緊急度が低いと思われる一般車両を二段階のレベルで総量的に削減させたものである。段階1は規制のない場合と比較して、総車両発生数を約75%に、段階2はさらに強い規制として、同じく総車両発生量を約60%に減少させている。

5. 輸送交通シミュレーションの実行

(1)シミュレーションの実行

設定した各シナリオごとに、震災発生後1週間に渡って輸送交通シミュレーションを行った。その際、地震発生までは平常時の交通状況が続いているので、まずその時刻における平常時の交通状況(リンクごとの交通量とその目的地・目的地別内訳)をパーソントリップ調査のデータを用いたシミュレーションにより求める。次に、そのリンク上を走行中の車両が、震災発生によって目的地を変更する行動を考慮して、震災後の新たな目的地を設定する。今回のシミュレーションでは、業務目的以外の車両について、目的地を自宅へと変更するように設定している。一方で、先に求めた1日のゾーン別訪問人口を基にして、外出している人が地震発生により自宅へ帰宅するために発生する車両の数も発生地別・目的地別に算出する。

このような手順によることによって、震災発生時刻は任意に設定可能であり、シナリオの中に組み入れることができるが、今回は正午に地震が発生した場合を設定してシミュレーションを行っている。

(2)シミュレーションのアウトプット

シナリオ1を基本として、シナリオごとのシミュレーションの結果を以下に比較する。

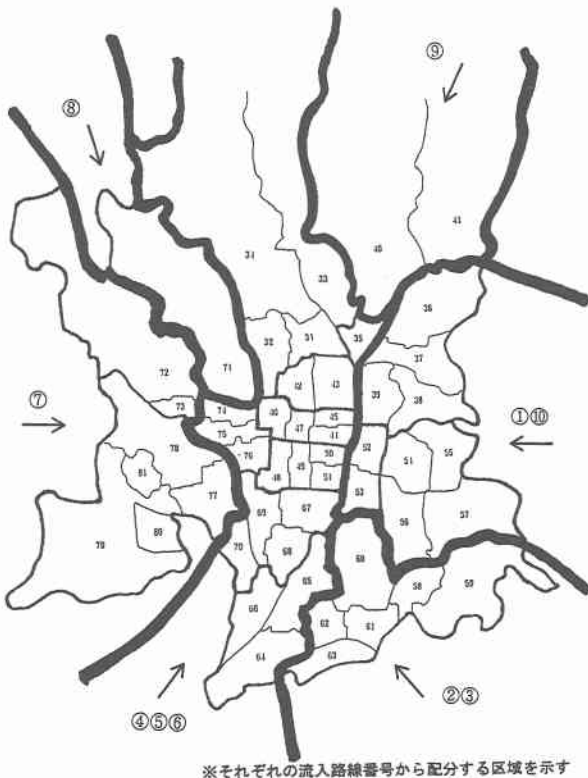


図-4 区域指定配分における輸送区域

まず、飲料水について市内全域の総需要量に対する4日目までの累積供給達成率のグラフを図-5(1)~(4)に示す。ここでは交通規制レベルや被害の程度など、シナリオを構成する条件ごとの比較を行っている。図中の細直線は累積の需要量すなわち供給達成目標を表したもので、1日目終了時点をも100%、2日目終了時点をも200%としている。従って、供給達成率曲線が直線を上回っている時点では物資が充足、下回っている時点では物資が不足していることを示している。なお、1日の終わりで達成率が下がっている箇所があるのは、その日の供給達成目標を上回って運ばれた飲料水・食料については次の日に持ち越せないこととしているためである。

また図-6は震災発生2日目午前6時における、衣料品のゾーン別供給達成率の塗り分け図である。ここでは京都市の区分ゾーンごとに供給達成率を見ることにより、地域的な物資の過不足状況を捉えることができる。また図-7は、震災発生後2

日目について、輸送配分方法の違いによる飲料水の供給達成率の時系列的な比較を示したものである。

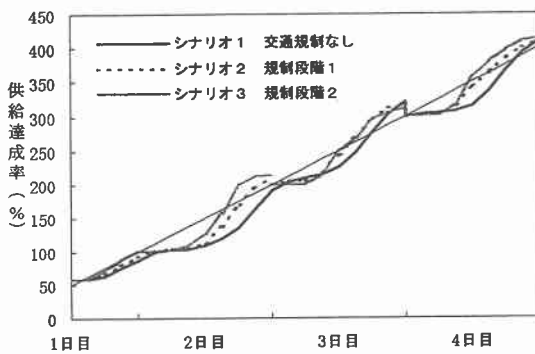
(3) アウトプット結果の特徴と比較

a) 交通規制を行った場合（シナリオ1, 2, 3）

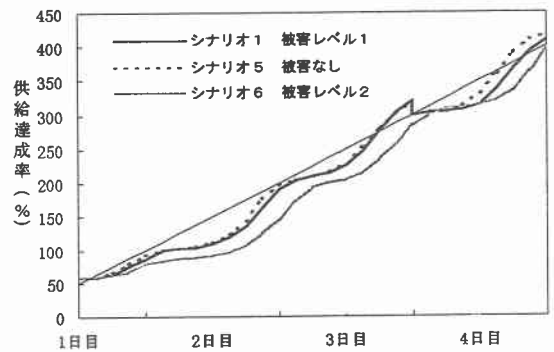
図-5(1)より、交通規制の強化による総走行車両数の減少に従って、供給達成率が早期に上昇していることが分かる。また図-6からも、規制の強化により全域について物資の供給に改善効果が表れていることが分かる。ただし、強い交通規制を実施したとしても、依然として低い供給達成率にとどまっているゾーンも存在している。なお、これらのシナリオに加えて道路リンクの被害がレベル2である時の交通規制の影響も計算したが、この場合においても規制によって全域的な効果がみられるものの大幅な状況の改善は得られないという、被害レベル1の時と同様の傾向がみられた。

b) 道路リンク被害レベルが変わった場合（1, 5, 6）

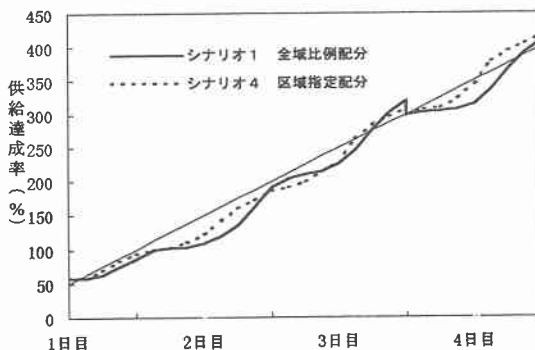
図-5(2)より、特に被害レベルが1から2に



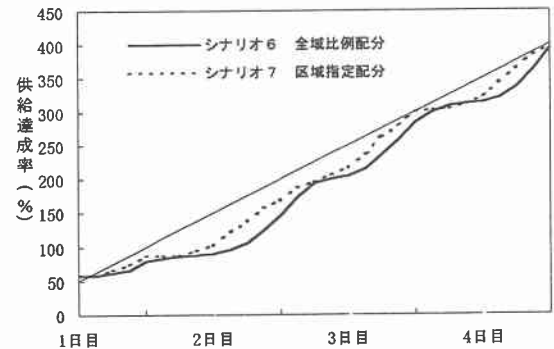
(1) 交通規制レベルの違いによる比較



(2) 道路リンク被害の違いによる比較



(3) 輸送配分方法の違いによる比較（被害レベル1）



(4) 輸送配分方法の違いによる比較（被害レベル2）

図-5 区域指定配分による輸送区域

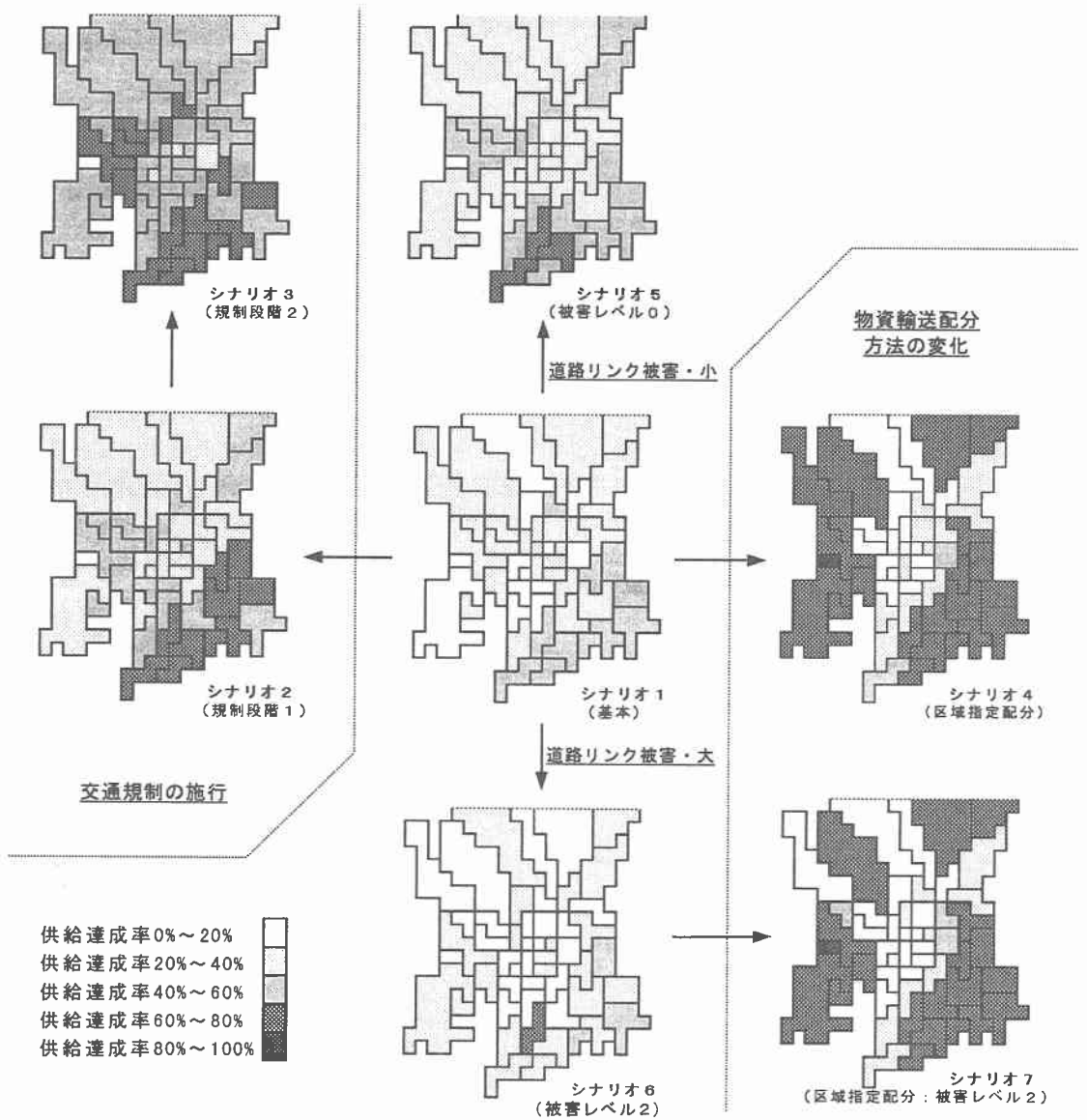


図-6 ゾーン別の衣料品の供給達成率のシナリオ間比較（震災発生後2日目午前6時）

なると、供給達成率に大きな遅れが見られることが分かる。一方、図-6からは、被害レベル0と1の間でも全域的に供給達成率に差があることがわかる。また基本シナリオと被害レベル2の間では、全体として被害が大きくなるにつれ供給達成率が低いゾーンが増えているが、一部では供給が増えているゾーンも見られる。これはネットワークの変化によって交通量の密なところと疎なところが生じているためと考えられる。同様に被害レベル0の場合においても交通状況の影響によって供給達成率に違いが表れている。

c) 輸送配分方法が変わった場合(1, 4) (6, 7)

図-5 (3)、(4)は、それぞれ被害レベルが1と2の時の、輸送配分方法の違いによる比較であるが、全域比例配分と比較して、区域指定配分方法を用いると、特に被害が大きい場合において時間的に大きく先行して供給が行われることが分かる。また図-6より、区域指定配分方法を用いることにより、市域の外縁部に近いゾーンの供給達成率が高くなると同時に、全域的にも高い供給達成率が表れていることが分かる。また図-7より、市内の1日の地域的な供給の広がりについても、全

域比例配分に対して、区域指定配分による場合は外周部をはじめとして早期に供給が満たされるゾーンが増え、かつ全域に対して比較的早い物資の供給が行われていることが分かる。

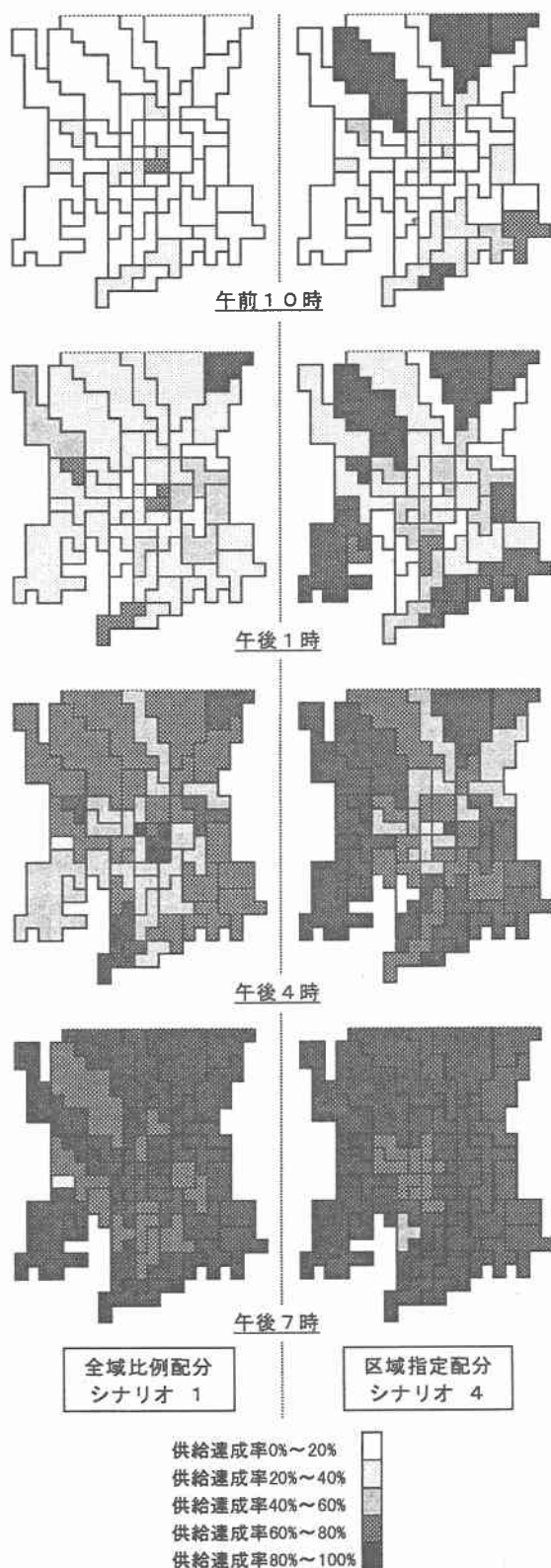
6. 結果の考察

今回のシミュレーションによる各シナリオ間の比較を基に、震災時の輸送交通に関してこれまで指摘され問題となってきた点について考察を加える。

まず、震災による道路の寸断等の被害の影響は、その被害レベルが大きくなるにつれ、都市全体としての物資の供給に大きな遅れをもたらすといえる。それは、単なるリンク数の減少にとどまらず、通行可能道路に車両が集中するため、残された交通容量をさらに下げるといった現象を含むものである。シミュレーションの結果においても、被害レベルが大きいときには残されたリンクの交通密度が増大して走行速度が低下し、そのリンクの本来の容量が活かされないという現象が生じている。そのために、代替経路の整備や緊急輸送路の確保という施設的な対策とともに、交通量の適切な時間的・空間的配分を導くという視点も重要である。

また、交通対策としてまず挙げられるものに交通規制があり、その効果は本シミュレーションを用いても確認することができた。特に、平常時においてもかなりの道路混雑が見られるような都市においては、その道路網の持つ容量の限界もあり、規制の必要性が高いことが裏付けられる。ただし、例え強い規制を実施したとしても、供給目標を完全には達成できないこともシミュレーションにおいて同時に明らかになっており、交通規制のみによって緊急輸送に関する問題がすべて解決するとは言えない点も重要である。

また物資輸送配分について、区域指定配分方法は今回の震災で見られた車両の錯綜を減らし、迅速かつ効率的に物資を輸送するための方法として提示したものであるが、各輸送車両に対して目的地が適切に与えられることによって、市内の総走行量の削減とそれに伴う運行速度の上昇や早期の



図一七 輸送配分方法の違いによる飲料水の供給達成率の時系列比較（2日目）

物資供給をもたらすという結果が得られた。特に道路の被害が大きくなった場合に、区域指定配分を用いることにより物資輸送の遅れへの影響を小さくできることが明らかになった。すなわち、道路ネットワーク状況や発生交通量が全く同じであっても、配分が適切に行われることによって、市内全域に対して大きく物資輸送の改善効果が期待できることが示されている訳であり、交通対策として考慮すべき有力な対策の一つであるといえる。

7. おわりに

震災時には、個々の判断による救援救助・復旧活動に任せておいては混乱が大きくなるのが今回の震災の経験から明らかとなっているが、一方では交通規制をはじめとする強制的な措置だけでも対応できないことも大きな教訓であった。震災直後には、緊急自動車から一般車両までが様々な目的を持って刻々と変化する道路ネットワーク上を移動しており、本研究で構築したようなシミュレーションシステムを用いて交通と物資輸送のための対策を広く検討しておくことが求められる。

本研究においては、震災時の被害の程度や幾つかの対策についてシナリオを設定し検証を行った。特に、汎用性を持たせたシミュレーションシステ

ムとして、震災時の交通や人・物の流れについて量的・時間的に現象を表現し、複数のシナリオ間の比較を行ったことが本研究の成果であるといえる。しかし多くの複雑な問題を内包した都市型災害への対策は、机上の検討のみで解決できる問題ではなく、フィールドワークを含めた多方面からの研究資料を基に総合的に検討されるべき課題であるといえよう。特に本研究に関しては、それら種々の研究から新たに提起される問題に対応して随時システムを拡張させ、それらを実際に検証する事により、新たな防災計画案を検討し提示していくことが今後の課題であるといえる。

【参考文献】

- 1) 第3回京阪神パーソントリップ調査報告書, 1993. 3
- 2) 京都市域における総合的な地震被害の想定に関する調査研究, (財) 運輸経済研究センター, pp195-203, 1985. 6
- 3) 中川 大: 震災緊急対応時の交通問題—大震災の教訓と都市災害への対応策—, 自然災害科学 J. JSNDS 特集号, pp18-23, 1995
- 4) 中川 大, 吉川 耕司, 伊藤 雅, 小林 寛: 阪神・淡路大震災における地震発生直後の交通状況に関する研究, 土木計画学研究・講演集 No. 19(1), pp9-12, 1996. 11

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

中川 大・若山 真樹・伊藤 雅

阪神淡路大震災は、都市型の災害として予想を上回る規模で発生したために、すべての活動に大きな混乱をもたらした。特に交通施設の破壊と渋滞による救援活動の遅れは、都市における災害時の交通運用について大きな問題を投げかけたといえる。そこで本研究においては、特に緊急物資の供給に着目して震災時の物資輸送交通シミュレーションシステムを構築し、そこで様々な震災被害における状況をシミュレートするとともに、交通規制や物資輸送配分に関する方策をシナリオとして提示し、それらについてシミュレーションの結果として算出される区域的な物資の供給達成率を比較することにより、震災時における交通対策の評価と検討を行った。

A Study on Urgent Transportation Planning using a Simulation in case of Earthquake Disasters

By Dai NAKAGAWA, Masaki WAKAYAMA, Tadashi ITOH

The Great Hanshin-Awaji Earthquake was a tragic urban disaster which we had never experienced. It caused much confusion with people's activities in the city. Especially, it was pointed out that the delay of relief operations due to traffic congestion was a serious problem. In this paper, firstly, we construct a simulation system which deals with urban transportation in case of earthquake disasters, and simulate for variety of road damages and transportation measures. Then we evaluate and study about transportation policy using simulation outputs about the degree of supply achievement according to zones.