

震災時の利用可能道路網からみた最大集中交通量の推計*

Maximizing Model of Zone Attraction Trips for Degraded Road Network

倉内文孝**, 飯田恭敬***, 杉本昌彦****

By Fumitaka KURAUCHI**, Yasunori IIDA***, Masahiko SUGIMOTO****

This study aims to calculate the maximum trip attraction volume that the remained network after the earthquake can afford to. By adapting the idea of on-ramp control method on an expressway, the model is formulated as a bi-level optimization problem. Calculation results will be informative when area traffic demand control scheme is carried out. Calculation model of maximum trip attraction volume is adapted to hypothetical network in order to check the performance of the model. The result shows that moderate traffic demand control is needed in an emergency and through traffic should be excluded as much as possible.

Keywords : Network Analysis, Maximum Traffic Attraction Volume, Bi-level Optimization Problem, Transportation Demand Management

1. はじめに

阪神淡路大震災においては、阪神高速道路神戸線の倒壊にはじまり、道路の陥没・破損、鉄道高架橋の落下、岸壁の破壊等、あらゆる交通機関の施設が何らかの被害を受けた。そのため、都市交通システムは震災時に発生した大量の移動需要を十分に満足することができなかった。結果として、急を要する救急救助活動、消防活動、さらにはそれ以降の復旧・復興のための諸活動を阻害し、市民の日常生活に多大な影響を及ぼした。

このような状況下において、災害対策基本法に基づき、様々な交通規制が行われた。にもかかわらず、深刻な交通渋滞が発生していたことは、多くの

調査によって示されている^{1,2}。一方、交通規制による道路の最適利用の必要性³や、地震が起こる前の事前対策としての体制の整備やマニュアルの作成などの必要性も多く叫ばれている⁴。さらに、実際に行なわれた交通規制に対する住民意識は、肯定的である^{5,6}。交通規制を行なうことに対してはコンセンサスが得られているものの、その方法については現在まで多くの議論はなされてこなかった。

以上のような背景をもとに、本研究においては被災したネットワークの円滑な通行を保証する時に、各ゾーンにおいて最大集中することが可能な交通量を求めることを目的とする。本研究において算定される最大集中交通量は、エリアを単位として交通規制を行なう際の規制交通量決定に対して、有用な情報を提供するものといえる。

上記のような災害時における最大発生集中交通量を求める研究としては、枅谷らの研究が挙げられる⁷。彼らは、ネットワークをフローインディペンデントと仮定し、バス交通量を変数としてLP（線形計画）問題を定式化し、ネットワークの容量を越えない最大の発生集中交通量の算定法を提案している。この手法は、LP問題を解くことによって発生

* **Keywords :** ネットワーク分析, 最大集中交通量, 2レベル最適化問題, 交通需要管理

** 正員 工修, 京都大学大学院土木工学専攻 (京都市左京区吉田本町, Tel 075-753-5126, Fax 075-753-5907)

*** フェロー会員 工博, 京都大学大学院土木工学専攻 (京都市左京区吉田本町, Tel 075-753-5124, Fax 075-753-5907)

**** 正員 静岡県浜松土木事務所都市計画課都市計画係 (浜松市東田町 87 番地, Tel 053-458-7277, Fax 053-458-7195)

集中交通量を決定することが可能であり、実用性に優れているといえる。しかしながら、現実の交通においてはフローは交通需要によって変動するため、より厳密な最大発生集中交通量を求めるためには、交通量に応じてリンク所要時間が更新されるような状況下での最大交通量を算定する必要があるだろう。

一方、飯田・李は土地利用と交通網の整合性に関する研究において、与えられた道路網に対して受け入れ可能な最大OD需要分布を求めるモデル（OD最大化モデル）を開発・提案している⁸。この方法は都市高速道路の流入制御手法と同様の考え方を利用したもので、その目的である「流入ランプにおける適切な流入制御による都市高速道路上を走行する車両台数の最大化」において、流入ランプをセントロイド、都市高速道路網を利用可能一般道路網と見なすことで、最大OD需要分布、結果的にはセントロイドにおける発生・集中交通量の和の形で道路網容量をも算定可能なモデルとなっている。本研究においてはこのOD最大化モデルに若干の改良を加えた最大集中交通量算定モデルを構築した後、ケーススタディとして仮想ネットワークにモデルを適用し、モデルの有用性および被災時ネットワークの有する特徴の把握を試みる。

2. 最大集中交通量算定モデル

本研究においては、最大交通量は、以下の状況下で図られるものと仮定する。

- (a) 道路計画者は、各セントロイドの交通需要量を規制・抑制できる。
- (b) 道路計画者は、道路利用者の行動規範に関する全ての情報を持っているが、交通行動に直接的には干渉できない。
- (c) 道路利用者は、各自の行動基準に従い、合理的な判断に基づき交通行動を行う。
- (d) 道路計画者は、道路利用者の交通行動を予想しながら、各セントロイドの交通需要量の適正化を行う。
- (e) 道路利用者は全てのリンクについての所要時間を知っており、仮定(c)の結果として、利用者均衡状態が実現されている。

上記のような仮定を設けることによって、この問題は道路計画者をプレーヤー 1、道路利用者をプレーヤー 2 とする非協力ゼロ和 2 人ゲームのうち、Stackelberg問題と呼ばれる問題であると解釈できる。

この結果、集中交通量最大化モデルは、2 レベル最適化問題として、以下のように定式化できる。

【上位問題】

$$\max \sum_{i \in C} D^i \quad (1)$$

subject to

$$D'_{di} \leq D^i \leq D'_{du} \quad \text{for all } i \in C \quad (2)$$

$$X^a \leq \mu_a \cdot Ca_a \quad \text{for all } a \in L \quad (3)$$

【下位問題】

$$\min \sum_{a \in L} \int_0^{X^a} t_a(x) dx \quad (4)$$

subject to

$$\sum_{k \in K_j} h_{kij} = D^i \cdot P_{ij} \quad \text{for all } i \in C, j \in C \quad (5)$$

$$X^a = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} \sum_{k \in K_{ij}} \delta_{akij} h_{kij} \quad \text{for all } a \in L \quad (6)$$

$$h_{kij} \geq 0 \quad \text{for all } k \in K_{ij}, i \in C, j \in C \quad (7)$$

ただし、

- C** : セントロイドの集合
- L** : リンクの集合
- K_{ij}** : セントロイド *i* からセントロイド *j* までの交通が利用するパスの集合
- Dⁱ** : セントロイド *i* の集中交通量
- D'_{du}** : セントロイド *i* の集中交通量の上限值
- D'_{di}** : セントロイド *i* の集中交通量の下限值
- X^a** : リンク *a* のリンク交通量
- μ_a** : リンク *a* の許容渋滞度
- Ca_a** : リンク *a* の容量
- t_a(x)** : リンク *a* の走行時間関数
- h_{kij}** : セントロイド *i* からセントロイド *j* までの交通のうち、*k* 番目のパスを利用する交通量
- P_{ij}** : セントロイド *j* に到着する交通の出発地がセントロイド *i* である確率

$$\left(\sum_j P_{ij} = 1\right)$$

δ_{ahj} : セントロイド i からセントロイド j までのパス k が, リンク a を利用していれば 1, さもなくば 0

上位問題は, トータル交通量 (各セントロイドの集中交通量の和) を最大化する最適化問題である (式 (1)). 制約条件は, 各セントロイドの集中交通量の制約を表す式 (2), 各リンク交通量の渋滞度の制約を表す式 (3) である. 一方, 式 (4) から式 (7) で表される下位問題は道路利用者の経路交通量を決定する記述モデルであり, 需要固定型の利用者均衡問題を表している.

モデルに対するインプットデータは, 道路網の要素 (リンク, ノード, セントロイド), リンク容量, リンク許容混雑度, リンク走行時間関数, セントロイドの集中交通量の許容範囲および出発地選択確率である. アウトプットは, 道路網全体として処理可能な各セントロイドへの集中交通量である. 集中交通量が与えられれば, 出発地選択確率を用いて, 発生交通量および OD 交通量が求められる.

先にも述べたが, 本モデルは所与のネットワークを最大限に有効利用する集中交通量を求めるモデルである. あるセントロイドに, モデルにより得られた集中交通量を超えた需要が集中すると, ネットワーク全体に遅れが生ずることになる. よって, 本モデルを被災前後のネットワークに適用することにより得られる各セントロイドにおける被災前後の最大集中交通量の差は, ブロックレベルでの交通規制量を決定する一助となることが期待できよう.

なお, この定式化において, 下位問題である利用者均衡問題は, 凸計画であるが, 上位問題は下位問題に均衡条件が含まれているため, 関数の凸性は保証されていない. そのため, trial and error 的に解を探索する必要がある. ここでは, 下位問題の解法としては Frank-Wolfe アルゴリズムを用い, 上位問題においては Complex 法 (Constrained Simplex Method) を利用している².

本稿においては, 制御変数として各セントロイドにおける集中交通量としたが, これは企業へ需要抑制を依頼するといったように, 交通の集中地点に

おいて交通規制を行なう方がより効率的と考えるからである. なお, 発生集中量を最大化するモデルについても上記の定式化を用いて計算可能である.

3. 数値計算例

(1) 仮想ネットワークの基本設定

数値計算に用いるネットワークの基本となる, 被災前のネットワーク (以下, 基本ネットワークと呼ぶ) を図-1 に示す. リンク数は 88, ノード数は 29, そのうち交通の発生集中がおこるセントロイドは 13 である. 13 個のセントロイドは 9 個の内部セントロイド (No. 1~9) と, 4 個の外部セントロイド (No. 10~13) に分類できる. 内部セントロイドによって囲まれる地域をモデル計算の主な対象となる, 主要地域とみなす. この対象地域から外部へ流出する, あるいは外部からこの地域に流入する交通の発生は, 外部セントロイドに集約されるものとする. 主要地域内に属する 80 のリンクは以下に示す 3 種類の道路のいずれかに分類し, それぞれの昨日ごとにリンク容量と自由走行時間を定める.

- 主要幹線 (Link No.1~16)

リンク容量:2000veh/h, 自由走行速度:60km/h

- 幹線道路 (Link No.17~48)

リンク容量:1400veh/h, 自由走行速度:50km/h

- 一般道路 (Link No.49~80)

リンク容量:700veh/h, 自由走行速度:40km/h

なお, リンクの走行時間関数は修正 BPR 関数

$$t_a = t_{0a} \left\{ 1 + 2.62 \left(\frac{X^a}{C_{a_a}} \right)^5 \right\} \quad (8)$$

で与える. ただし,

t_a : リンク a の所要時間

t_{0a} : リンク a の自由走行時間

である.

次に, 被災時のネットワーク (被災ネットワークと呼ぶ) であるが, まず, 主要区域内の各ノード間を結ぶ 40 対の双方向リンクのそれぞれにリンクの種類に応じて被災確率を与え, 2 割のリンク (8 対, 16 本) をランダムに選択し被災リンクとする. 被災リンクの被災の程度として, 完全閉塞, 一部閉塞の 2 段階を設定する. 完全閉塞とは, リンクの通行

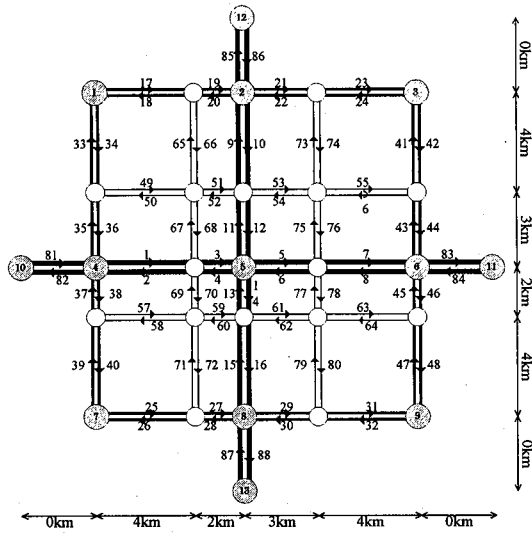


図-1 基本ネットワーク

が全く不可能な状態を意味し、モデル計算においては該当リンクの自由走行時間を十分大きな値とすることにより表現する。一方、一部閉塞とはリンクの通行が一部不可能な状態を意味し、モデル計算においては該当リンクのリンク容量を半分に減じることによってこれを表現する。数値計算に用いた被災ネットワークを図-2 に示す。図-1 と比較して、線が無いリンクが完全閉塞リンク、点線で表現されているリンクが一部閉塞リンクである。

P_{ij} についても説明しておく。 P_{ij} は、セントロイド j ($j=1, \dots, 13$) に到着する交通の出発地が内部セントロイド i_1 ($i_1=1, \dots, 9$) である確率を $P_{i_1 j}^{in}$ 、外部セントロイド i_2 ($i_2=10, \dots, 13$) である確率を $P_{i_2 j}^{out}$ とし、それぞれを以下の式で定義する。

$$P_{i_1 j}^{in} = \frac{\alpha_{i_1} \alpha_j \cdot r_{i_1 j}^{-2}}{\sum_{i=1}^9 \alpha_i \alpha_j \cdot r_{ij}^{-2}} \quad (i=1, \dots, 9, j=1, \dots, 13) \quad (9)$$

$$P_{i_2 j}^{out} = \frac{\alpha_{i_2} \alpha_j \cdot r_{i_2 j}^{-2}}{\sum_{i=10}^{13} \alpha_i \alpha_j \cdot r_{ij}^{-2}} \quad (i=10, \dots, 13, j=1, \dots, 13) \quad (10)$$

ただし、

α_i : セントロイド i の魅力度

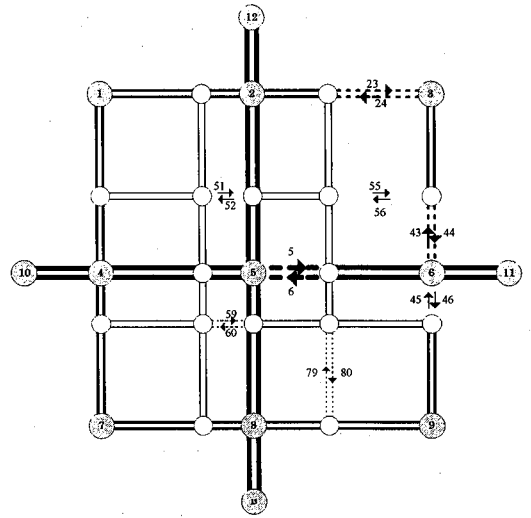


図-2 被災時ネットワーク

表-1 各セントロイドの魅力度

セントロイド (番号)	魅力度 α
中心 (5)	4.00
対角 (1, 3, 7, 9)	1.00
その他の内部 (2, 4, 6, 8)	2.00
外部 (10, 11, 12, 13)	1.50

r_{ij} : セントロイド ij 間の距離

である。セントロイド j に到着する交通の出発地選択確率 P_{ij} を、パラメータ α を用いて次のように与える。

$$\begin{cases} P_{ij} = (1-\lambda) \cdot P_{ij}^{in} & (i=1, \dots, 9) \\ P_{ij} = \lambda \cdot P_{ij}^{out} & (i=10, \dots, 13) \end{cases} \quad (11)$$

結果的に λ は、対象とするネットワークの全交通量に占める、外部セントロイドを出発点とする交通量の割合に等しく、これを外部交通流入率と呼ぶこととする。基本ネットワークにおいては、 $\lambda=0.5$ とし、各セントロイドの魅力度を表-1 のように与えた。また、震災時のODパターンの構造がどのような要因によって決定されるのか未だに明らかになっていないことより、便宜的に被災時の各セントロイドにおける出発地選択確率は平常時と変化はないものとする。なお、リンクの許容渋滞度 μ_a は全てのリンクにおいて 1.0 とした。

(2) 計算結果の考察

基本ネットワークおよび被災時ネットワークに対して集中交通量最大化モデルを適用した結果として得られた、各セントロイド別およびトータルの最大集中交通量を比較したものを図-3 に示す。ネットワークのトータルで見ると、被災前後で最大集中交通量は 24,979 から 16,823 となり、およそ 33% の減少率となっている。リンク本数で見れば 88 本中の 16 本、20% 程度の被災であるが、ネットワークを利用可能な交通量に与える影響は、それ以上に大きいことがわかる。これを内部セントロイド、外部セントロイド別に分けて見ても減少率は 33% 程度であり、トータルでの値とほぼ同様であった。また、各セントロイドレベルで見ると、セントロイド 3, 4, 8, 9, 11, 13 については被災後、大幅に集中可能な交通量を減少させており、いずれも平常時のほぼ 3 割程度に落ち込んでいる。それに対して、セントロイド 1, 2, 10 のように被災前後で最大集中交通量が増加しているセントロイドも存在する。被災リンクはネットワークの上半分の方が相対的に多いが、セントロイドレベルで受けている影響はネットワークの下半分の方が大きいことがうかがえる。

平常時、被災時のリンク混雑度をそれぞれ図-4、

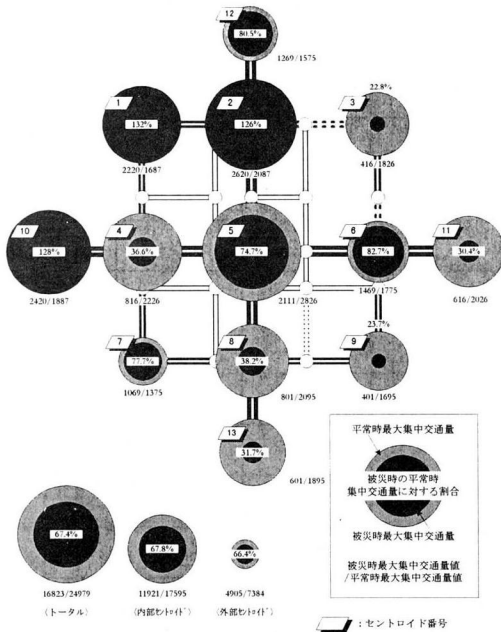


図-3 被災前後の最大集中交通量の比較 (基本ネットワーク)

図-5 に示す。本モデルは規範モデルであり、所与のネットワークを最大限に有効利用することを目的

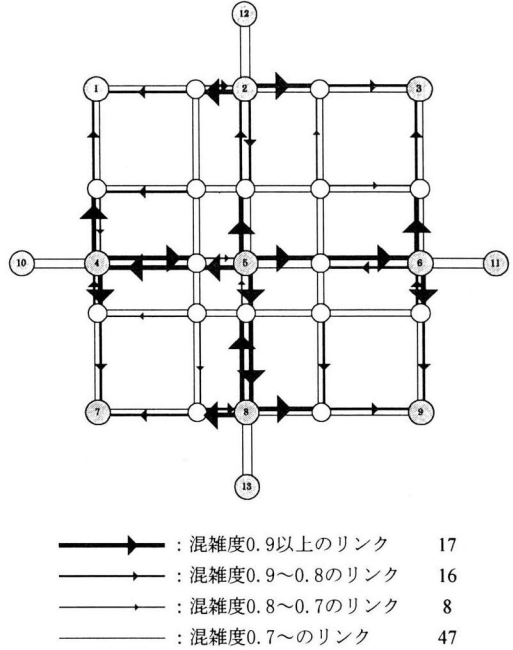


図-4 平常時のリンク混雑度

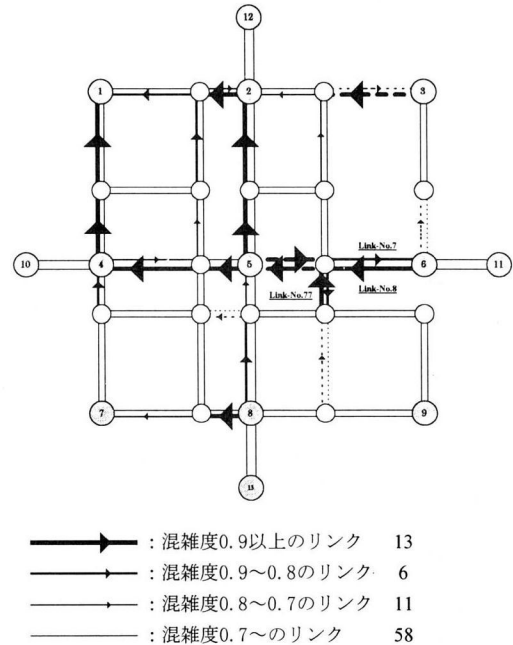


図-5 被災時のリンク混雑度

としているので、混雑度の高いリンクが全体的に多くなる方がネットワークの有効利用には望ましい、つまりネットワークが効率的に利用されている状態であると考えられることを述べておく。それを踏まえた上で平常時の状態を表す図-4を見ると、主要幹線、および幹線道路の混雑度が平均的に高くなっており、ネットワーク中で比較的大容量を持つリンクが有効に利用されることにより集中交通量の最大化が図られていることがうかがえる。一方、被災時の状態を表す図-5を見ると、ネットワークの上半分、特にセントロイド 1, 2, 4 に向かう主要幹線、幹線道路の混雑度が高いのに対し、ネットワークの下半分のリンクは混雑度が低い状態のものが多い。これは、被災前後に最大集中交通量を増減させているセントロイドの位置と傾向が類似している。また、一般道路で唯一リンク 77 の混雑度が 0.9 を超えており、付近のリンクの被災状況と合わせ考えると、このリンクがボトルネックとなり交通量をこれ以上流せない状態に陥っていることが予想される。

4. ケーススタディによるモデルの挙動確認

(1) 平常時最大集中交通量を被災時ネットワークに流した場合

震災後、時間が経過するにつれて人々の生活も徐々に震災前の状態に戻っていき、それに伴い、一般交通需要も震災前とある程度同様の質、量を持ったものに近づいていくと考えられる。しかし、被災した道路は、全てが容易に修復されるわけではない。被災後に依然として容量が減少しているネットワークに、平常時と同様の交通需要がそのまま流れるとネットワーク状態は一体どのようになるのであろうか。基本ネットワークに集中交通量最大化モデルを適用した結果として得られる最大集中交通量を平常時交通量と見なし、リンク混雑度に関する制約を無視して被災時ネットワークに Frank-Wolfe 法で配分した結果を以下に示す。

平常時と被災時とのリンク所要時間の比をとったものを図-6 に示す。リンク 45, 46 の被災の影響を受けて、セントロイド 5 と 6 の間のノードを発着点とするリンク、そしてリンク 23, 24 の所要時間が大幅に増加していることがうかがえる。当然、それらの

リンクを OD 間経路として利用することになるセントロイド 3, 6 を発着点とする OD の所要時間は大きく増加している (表-2 参照)。

これらの結果からわかるように、平常時と同様の交通需要が被災ネットワークに流れるとネットワーク状態は著しく悪化する。各セントロイドにおいて、交通需要の発生・集中を抑制していくことの必要性がうかがえよう。その際の、「ネットワークの被災の程度、修復の状況に応じた」適切な交通量を規制するという観点において、本モデルはその決定法に関する一つの方向性を示しているといえる。

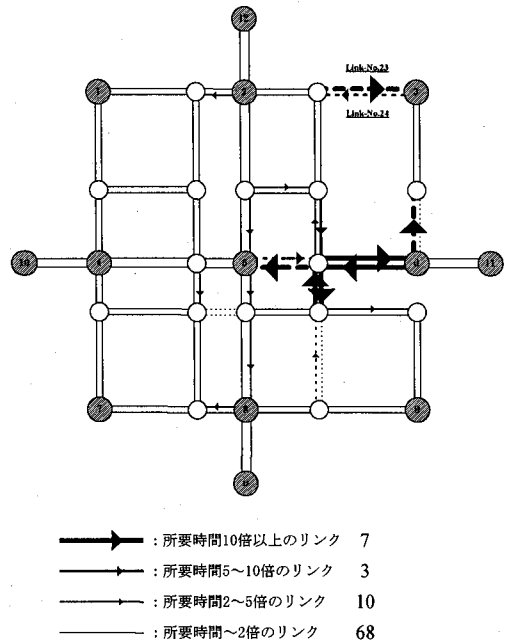


図-6 平常時の最大集中交通量を被災時ネットワークに流した場合のリンク所要時間の比率

(2) 出発地選択確率を変化させた場合

一般的な都市においては、その都市の内部交通のみで交通が完結することはなく、外部からの流入交通、通過交通も多分に存在し、ネットワーク状態はそれらの交通に大きく影響を受けている。このことは、被災後にネットワーク容量を減少させている場合については特にいえることであろう。外部より都市に流入する交通の割合の変化がネットワーク状態にどのような影響を及ぼすのであろうか。震災後、外部から被災地内に流入してくる交通の減少・

表-2 平常時の最大集中交通量を被災時ネットワークに流した場合のOD間所要時間の比

発セントロイド	着セントロイド								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	—	1.439	7.753	1.049	1.059	6.993	1.242	1.476	1.318
2	1.816	—	10.631	1.451	1.307	7.553	1.623	2.130	1.856
3	2.512	4.025	—	2.279	2.882	0.868	2.277	3.011	4.213
4	1.135	1.342	5.755	—	0.966	7.482	1.350	1.427	1.266
5	1.264	1.374	7.182	1.329	—	12.755	1.534	2.290	1.703
6	4.346	5.598	6.338	5.387	11.265	—	4.879	6.488	10.425
7	1.127	1.377	5.403	1.113	1.079	7.751	—	1.555	1.009
8	1.170	1.395	5.830	1.208	1.420	8.573	1.268	—	0.708
9	1.076	1.399	8.865	1.055	1.187	24.415	1.122	0.848	—

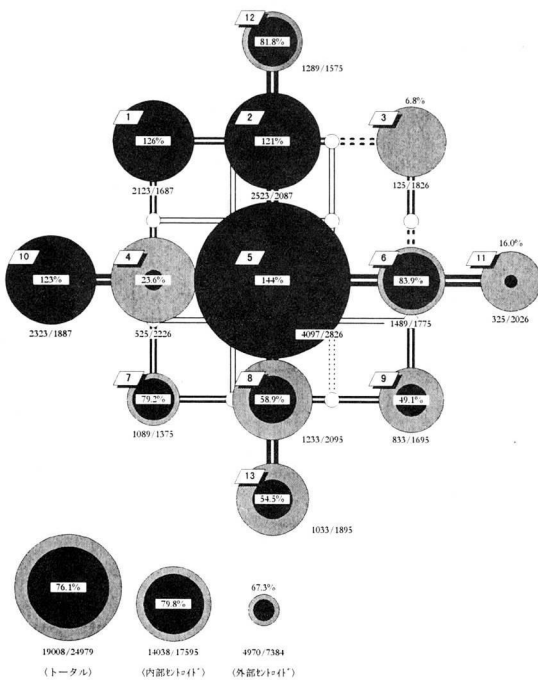


図-7 被災前後の最大集中交通量の比較 (λ=0.1)

または増加を想定して、外部交通流入率を 0.1, 0.9 の 2 段階に変化させ、それぞれのλについて得られる出発地選択確率を用いて被災時最大集中交通量を推定した結果を示す。なお、平常時の最大集中交通量はいずれもλ=0.5 で得られる出発地選択確率を用いて計算を行った結果である。

それぞれのλの値に対する被災前後の最大集中交通量を比較したものを図-7、図-8 に示す。まず、最大集中交通量のトータルを見ると、λの値が大

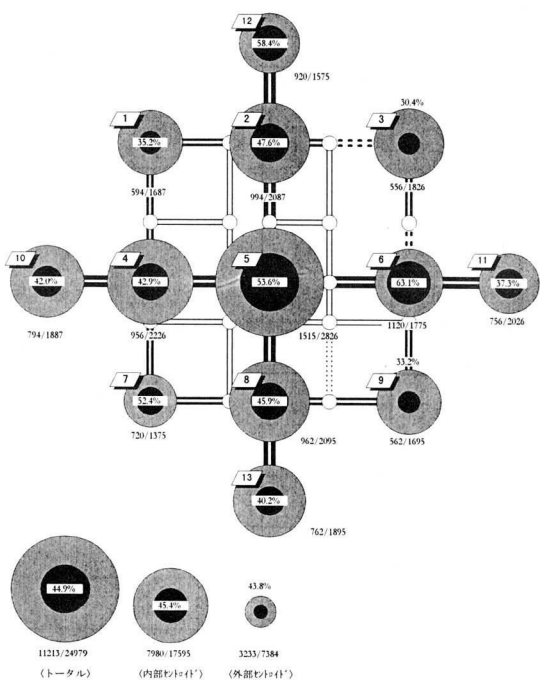


図-8 被災前後の最大集中交通量の比較 (λ=0.9)

きくなる程、つまり外部からの流入交通量が大きくなる程に最大集中交通量の値が小さくなっていくことがわかる。λ=0.9 のときには 55%もの減少率であるのが、λ=0.1 ではわずかに 24%の減少率にとどまっている。内部・外部セントロイド別では、内部セントロイドの減少率がトータルの減少率とほぼ同じ値を取っていることがうかがえる。

以上より、主に外部から流入する交通量が少ない程被災時においてトータルとしての集中交通量が

増加するという結果より、被災地に流入、もしくは被災地を通過していく交通の可能な限りの排除が有効であることが伺える。ただし、その場合は外部からの流入の必要需要分だけは確保する必要があることは言うまでもない。

5. おわりに

本稿においては、所与のネットワークを最も有効利用する各セントロイドにおける集中交通量を求めるための、最大集中交通量算定モデルを定式化し、仮想ネットワークにおけるケーススタディによりモデルの有用性と被災時ネットワークの持つ特徴の把握を行った。本稿において得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 平常時道路網と被災時道路網では、各セントロイドにおける最大集中交通量に大きな差が生じており、平常時の最大集中交通量がそのまま被災時道路網に流れると、道路網の状態がかなり悪化する。被災時においては、道路網の状態を考慮した適切な交通規制の必要がある。
- 2) 被災地域の外部から内部へ流入する交通量を抑えることで、被災地域内を利用可能な交通量は増加する。必要需要は確保した上で、被災地域外からの流入はできる限り排除することが望ましい。

本研究においては仮想ネットワークへの適用のみにとどまり、実ネットワークへの拡張には至らなかった。本モデルを平常時の実道路網に適用し、どのリンクが壊れた場合に道路網容量がどの程度減少するのかを知ることで、重要度の高いリンク、また耐震性を挙げておくべきリンクなどの知見が得られるものと考えられる。また、阪神・淡路大震災時の神戸市実ネットワークに適用し、発生・集中交通量の実際値とモデルにより得られた値を比較することでも、何か有用な知見が得られるだろう。ただし、本モデルは下位問題の解法に Frank-Wolfe 法、上位問題に Complex 法を用いているため、計算時間の制約上、大規模な実ネットワークに適用するのは難しい。より簡便かつ正確性を損なわないアルゴリズムを開発・利用する必要がある。

その他、本モデルの発展可能性として、本研究

においては出発地選択確率を平常時、被災時共に重力モデルによって与えたが、災害時にそれらによって道路利用者の行動が規定されると考えるのには若干無理がある。震災時における利用者の行動規範の解明により、出発地（目的地）選択確率の与え方を現実的なものにしていく必要がある。また、本モデルはあるゾーンに集中可能な交通量を求めているものであるがその交通の質までは考慮していない。車種別や時間帯別にゾーン毎の最大集中交通量を求めることが可能なモデルに発展させることにより、災害時交通管理に生きる、より有用なモデルに近づくと考えられる。

本研究における非常時交通規制の基本概念や基本的なモデルの定式化については、(財)国際交通安全学会(H832 プロジェクト)の一環として、さらにモデルの改良と、ここに示した仮想ネットワークへの適用計算については重点領域研究(1)(研究代表者:京都大学土岐憲三)の一部として行われている。ここに記して感謝したい。

【参考文献】

1. 赤羽弘和:大規模都市災害における道路交通管理, IATSS REVIEW, Vol. 21, No. 2, pp. 95-103, 1995
2. 建設省道路局:道路通行止め, 交通規制等による交通への影響, 道路交通経済, No. 72, pp. 13-17, 1995-7
3. 岡野行秀:災害時における道路資源の最適利用, IATSS REVIEW, Vol. 21, No. 2, pp. 80-85, 1995
4. 紙野桂人編:これからの安全都市づくり, 学芸出版社, 1995
5. 災害時における運転者行動に関する調査研究(1), 自動車安全運転センター, 1997
6. 坪内勇介他:阪神・淡路大震災における交通情報・交通規制に関する意識調査, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要, pp. 70-71, 1996
7. 西尾健太郎他:震災時の交通規制に関する被災地域内の住民意識について, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要, pp. 72-73, 1996
8. 榎谷有三他:災害時における発生・集中可能交通量について, 土木計画学研究・講演集, No. 19(2), pp. 331-334, 1996
9. 飯田恭敬・李燕:交通需要と道路網の整合性に関する研究, 土木学会論文集, No. 506 / IV-26, pp. 109-118, 1995