

Ⅳ-40

中継基地の配置を考慮した震災時の発生・集中可能交通量

室蘭工業大学工学部	○学生員 増 田 耕 治
苫小牧工業高等専門学校	正会員 下 夕 村 光 弘
専修大学北海道短期大学	正会員 榎 谷 有 三
室蘭工業大学工学部	正会員 田 村 亨
室蘭工業大学工学部	フェロ - 斎 藤 和 夫

1. まえがき

道路交通システムは、移動、通勤、物資輸送など生活するうえで欠かせないが、さらに震災時には避難路、救急活動、あるいは復旧活動等の輸送路として必須なライフラインである。そのため震災に伴ってシステムの機能が低下した場合でも交通渋滞や麻痺を引き起こすことなく円滑な交通機能の確保が必要である。交通渋滞や麻痺は、交通需要が供給よりも上回る結果生じるもので、道路網の交通処理能力を上回る交通需要は何らかの抑制策を施さなければならぬ。

著者等は、災害による道路の損壊等によって道路容量が大きく低下した道路網において、需要と供給のバランスを図るためにはどのような抑制策を施すべきかを考えるうえで基礎となる発生・集中可能交通量の算定手法についてLP（線形計画問題）の定式化を通して考察してきた。このとき、一般車両のOD交通に対しては、被災地域内を移動する交通（内内トリップ）、被災地域内から地域外へあるいは被災地域外から地域内へ移動する交通（内外トリップ）、および被災地域内を通過する交通（通過トリップ）の3つに区分して定式化を試みた。また、OD交通パターンに対しては、OD構成比及び目的地選択比率を用いて、一般車両の発生・集中可能交通量の算定を種々考察してきた。しかしながら震災時には、人命救助、生活物資運搬および復旧活動等の優先的に輸送路を確保すべきための緊急車両について考慮しなければならない。そこで本研究では緊急車両の輸送経路および緊急車両の中継基地配置や数が道路網全体の交通処理能力に及ぼす影響を踏まえた一般車両の発生・集中可能交通量の算定手法について種々考察を試みた。

2. 震災時の発生・集中可能交通量について

震災によって道路網の一部が損壊等によって交通リンク容量が低下した場合、道路網全体の交通処理能力（道路網容量）は大きく低下する一方、緊急車両、避難あるいは安否確認のための交通など平常時とは全く異なる交通が発生し、被災地域内では交通供給に対しての交通需要超過による交通渋滞や麻痺を引き起こす。また震災後道路状況は刻々と変化し、ある程度復旧してくると、企業活動の交通や通勤・通学交通のような平常時の交通も必要とされてくる。

そこで著者等は震災後、平常時に近い交通が要求されるときにどのような交通需要抑制策を施すべきかを考えるうえで基礎となる発生・集中可能交通量の算定について考察してきた。まず一般車両のOD交通は対象地域との係わり合いによって内々交通、内外交通、および通過交通の3つに区分し、様々な抑制策を考慮した。しかしながら被災地域内を発生および集中する内々交通の規制は困難である。したがって、まず最も規制・制御しやすい通過交通に対して被災地域内を通過しないで他のルートに経路変更を促がした場合を考慮した。次に内外交通に対して、被災地域内への流出入の規制・制御が可能であることを踏まえ、OD交通パターンの相対比率としての目的地選択比率（ゾーンごとの行き先別比率）およびOD構成比（OD交通量の相対的比率）を用いて定式化を行ってきた。

本研究ではこの2つの場合において、優先的に輸送路を確保すべき緊急車両をも考慮した2モードの多品種流問題として考慮し、さらにその緊急車両の中継基地の位置および数が交通網容量に影響を与えることを踏まえて発生・集中可能交通量についてLP問題を基礎に種々考察を試みたものである。

Determination of Allowable Private Vehicle Flows Considering Location of Depots Following Earthquake Disaster
by Kouji MASUDA, Mitsuhiro SHITAMURA, Yuzo MASUYA, Tohru TAMURA and Kazuo SAITO

3. 中継基地の配置を考慮した発生・集中可能交通量の算定

震災時における発生・集中可能交通量は前述のように OD 交通パターンおよび OD 交通区分によって種々の問題の定式化が可能である。ここでは、最も規制・制御しやすい通過交通に対して被災地域内を通過しないよう他のルートに経路変更をうながした場合について考える。そして、優先的に確保すべき緊急車両、あるいはその緊急車両の中継基地を踏まえたうえで発生・集中可能交通量を最大化する問題について考える。

(1) 通過交通を排除したときの算定

まず、被災地域内を発生ゾーン、あるいは、集中ゾーンとする OD 交通を対象とした発生・集中可能交通量最大化の LP 問題は以下のように定式化することができる。

$$\sum_{r \in n_{ij}} Y_r^{ij} = p_{ij} \cdot F \quad (i \in I - I_o, j \in J - J_o) \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^M E_{mn} \geq E_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N E_{mn} \leq y_m \cdot E_m \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M y_m \leq P \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in n_{ij}} \alpha \delta_r^{ij} \cdot Y_r^{ij} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{r \in e_{mn}} \alpha \delta_r^{mn} \cdot E_r^{mn} \leq C_a \quad (a \in A) \quad (5)$$

$$Y_r^{ij} \geq 0 \quad (6)$$

$$E_{mn} \geq 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M \quad n = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

$$F \rightarrow \text{Max} \quad (8)$$

ここで、

Y_r^{ij} : OD 交通 ij の r 番目の経路の交通量

p_{ij} : 被災地域内を発着する OD 交通 ij の構成比 ($\sum p_{ij}=1$)

E_m : 中継基地 m で供給可能な緊急車両数

E_n : 需要点 n で要求される緊急車両

y_m : 中継基地が配置されるとき 1、そうでないとき 0 を取る変数

M : 中継基地の数

N : 避難所等の需要点の数

P : 中継基地候補数

n_{ij} : OD 交通 ij 間の走行経路の集合

e_{mn} : 緊急車両の mn 間の走行経路の集合

$\alpha \delta_r^{ij}$: OD 交通 ij 間の r 番目の経路交通量が a を通過するとき 1、そうでないとき 0 を取る定数

E_r^{mn} : 中継基地 m から需要点 n への r 番目の経路の緊急車両数

C_a : リンク a の交通容量

A : リンクの集合

I : 発ゾーンの集合 ($I=I_i \cup I_o$)

J : 着ゾーンの集合 ($J=J_i \cup J_o$)

I_o : 被災地域外を発ゾーンとする集合

J_o : 被災地域外を着ゾーンとする集合

I_i : 被災地域内を発ゾーンとする集合

J_i : 被災地域内を着ゾーンとする集合

式 (1) は OD 構成比に対する需要交通量 F を配分するために、満足しなければならない OD 交通量に関する連続条件式であり、式 (2) および (3) は緊急車両に関する制限式である。また、式 (3) の右辺の E_m は中継基地において供給可能な緊急車両数で、 y_m は中継基地を配置するとき 1、配置しないとき 0 になる 0-1 変数である。そして、式 (4) は中継基地の候補地数に関する制限式である。式 (5) は各リンクの交通容量に関する制限式で一般車両と緊急車両について考慮している。そうすると、式 (1) ~ (7) を制約条件とし、式 (8) の発生・集中可能交通量 F を最大化する問題となる。

(2) 内外交通を考慮したときの算定

次に、被災地域内のゾーンを発生および集中する OD 交通（内々交通）に対する規制・制御は困難であるが、被災地域内を流入および流出する OD 交通（内外交通）に対しては流出入の抑制も可能であることを踏まえた定式化を試みた。また、OD 交通パターンとしては内々 OD 交通に対しては OD 構成比を、内外 OD 交通に対して目的地選択比率をそれぞれ用いた。そして、(1) 通過交通を排除したときと同様に緊急車両、あるいは

中継基地を踏まえた発生・集中可能交通量最大化の LP 問題は以下のように定式化することができる。

$$\sum_{r \in \eta_{ij}} U_r^{ij} = p_{ij} \cdot F \quad (i \in I, j \in J_i) \quad (9)$$

$$\sum_{r \in \eta_{ij}} V_r^{ij} = q_{ij} \cdot Q_i \quad \begin{cases} i \in I, j \in J_o \\ i \in I_o, j \in J_i \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M E_{mn} \geq E_n \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

$$\sum_{n=1}^N E_{mn} \leq y_m \cdot E_m \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (12)$$

$$\sum_{m=1}^M y_m \leq P \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in \eta_{ij}} \alpha \delta_r^{ij} \cdot U_r^{ij} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{r \in \eta_{ij}} \alpha \delta_r^{ij} \cdot V_r^{ij} \\ + \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{r \in \epsilon_{mn}} \alpha \delta_r^{mn} \cdot E_r^{mn} \leq C_a \end{aligned} \quad (14)$$

$$U_r^{ij} \geq 0 \quad (15)$$

$$V_r^{ij} \geq 0 \quad (16)$$

$$E_{mn} \geq 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M \quad n = 1, 2, \dots, N) \quad (17)$$

$$F \geq F^L \quad (18)$$

$$Q_i \geq Q_i^L \quad (19)$$

$$\sum Q_i \rightarrow \text{Max} \quad (20)$$

ここで、

U_r^{ij} : 被災地域内の OD 交通 ij の r 番目の経路の交通量

V_r^{ij} : 被災地域外から被災地域内へ、または被災地域内から被災地域外への OD 交通 ij の r 番目の経路の交通量

Q_i : 目的地選択比率に対するゾーン i の需要交通量

Q_i^L : 目的地選択比率に対するゾーン i の発生・集中可能交通量の下限値

η_{ij} : 内外 OD 交通 ij の目的地選択比率

$$\sum_{j \in J} q_{ij} = 1 \quad i \in I$$

F^L : 内々 OD 交通の需要交通量の下限値

式 (9) は OD 構成比に対する需要交通量 F を配分するために、満足しなければならない内々

OD 交通量に関する連続条件式で、式 (10) は目的地選択比率を考慮した各ゾーンに対する内外 OD 交通に関する連続条件式である。式 (11) と式 (12) は (1) 通過交通を排除した時と同様な緊急車両に関する制限式で、式 (13) は 0-1 変数を用いた中継基地の配置に関する制限式である。また、式 (14) は内々交通量 U_r^{ij} 、内外交通量 V_r^{ij} 、緊急車両 E_r^{ij} を踏まえた各リンクの交通容量制限式である。式 (18) は被災地域内の需要交通量の下限値で、式 (19) は目的地選択比率に対する各ゾーンの発生・集中可能交通量の下限値である。下限値は、各ゾーンからどの程度の交通量を発生・集中させるべきかを勘案のうえ適宜設定すればよい。そして式 (9) ~ 式 (19) を制約条件として式 (20) でそれぞれのゾーンの発生・集中可能交通量 $\sum Q_i$ を最大化する問題となる。

各ゾーンを発生・集中可能な交通量 T_i は式 (21) に示すように内々交通と内外交通の和として求めることができる。また、被災地域全体で発生・集中可能な交通量 O は、式 (22) あるいは各ゾーンの T_i の和として算定することができる。

$$T_i = \sum_{r \in \eta_{ij}} U_r^{ij} + \sum_{r \in \eta_{ij}} V_r^{ij} \quad (21)$$

$$O = F + \sum Q_i \quad (22)$$

4. 計算例

本研究では、図 - 1 に示す 19 個のセントロイド (対象地域内セントロイド 13 個、対象地域外セントロイド 6 個) を含む 65 個のノードおよび 100 本のリンク (方向別に 200 本) からなる道路網および表 - 1 の平常時の OD 構成比を用いて様々な場合の発生・集中可能交通量の算定を試みる。また、緊急車両の中継基地を被災地域内に設けると被災地域外からの救援物資輸送車等の車両と、中継基地から被災地の各ゾーンへ向かう緊急車両が錯綜することによって被災地域内での交通混雑を助長したり、被災地域内では十分な物資の収納スペースを確保するのが困難であるという理由から、本研究では被災地域外の 6 箇所のセント

ロイド（図-1 に示す⑭～⑰）を中継基地候補と考えた。

まず、平常時において各リンクの交通容量が1,2,4,10,12,13,29,30,50,51,71,72 では1200 台、3,39～42,83～86 では480 台、62～68 では2160 台であるとき、表-1 のOD 構成比を対象に一般車両の発生・集中可能交通量としての道路網容量を算定したところ21131 台となった。ここで双対変数を用いてカットを探索すると、図に示すリンク番号13,41,62,83 からなるカットが最小カットとして求められた。

次に、震災に伴い中心部の主要な幹線道路の交

通容量は平常時と同様だが、外側の幹線道路の交通容量は75%減少、その他のリンクの交通容量は50%減少とする。このとき、リンク番号1,2,4,10,12,13,82 の交通容量は900 台、3,83 は360 台、58,62,～68,76,79,93 は1080 台に減少となる。そして何ら規制・制御せずに道路網容量を表-1 のOD 構成比を対象に算定したところ13794 台と平常時に比べ大きく減少した。このとき、最小カットを探索すると平常時の時と同様にリンク番号13,41,62,86 からなる最小カットが求められた。このモデルではこれらのリンクがボトルネックとなる。次に、緊急車両および中継基地の配置を踏まえて前述した（1）通過交通を排除したとき、（2）内外交通を考慮したとき、と2 パターンの規制・制御について種々考察を試みた。

まず、3.（1）で述べた通過交通に対して規制・制御した場合について算定を行う。ここで、式（1）のOD 交通の構成比 p_{ij} は、表-1 の値のうち通過交通に関するOD 交

表-1 平常時のOD 構成比 $\times 10^{-2}$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1		0.07	0.03	0.04	0.08	0.05	0.00	0.08	0.06	0.00	0.06	0.00	0.05	0.33	0.05	0.24	0.00	0.00	0.08
2	0.07		0.02	0.06	0.12	0.04	0.00	0.12	0.11	0.00	0.17	0.00	0.05	0.41	0.08	1.02	0.00	0.02	0.36
3	0.03	0.03		0.10	0.13	0.18	0.00	0.13	0.08	0.02	0.17	0.07	0.09	0.29	0.64	0.26	0.02	0.10	0.47
4	0.03	0.04	0.12		0.12	0.12	0.00	0.12	0.06	0.00	0.21	0.05	0.07	0.48	1.01	0.67	0.00	0.13	0.35
5	0.10	0.11	0.10	0.08		0.30	0.00	0.30	0.25	0.01	0.38	0.06	0.21	0.57	0.57	1.24	0.10	0.28	1.04
6	0.04	0.07	0.15	0.11	0.35		0.00	0.35	0.13	0.02	0.36	0.09	0.15	0.37	0.65	0.43	0.09	0.21	0.43
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	0.37	0.67	0.00	0.00	0.00
8	0.10	0.11	0.10	0.08	0.30	0.30	0.00		0.25	0.01	0.38	0.06	0.21	0.69	0.74	1.60	0.10	0.28	1.04
9	0.08	0.10	0.07	0.07	0.27	0.10	0.00	0.27		0.00	0.27	0.07	0.09	0.47	0.34	1.46	0.03	0.14	0.83
10	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00		0.04	0.03	0.02	0.01	0.11	0.00	0.00	0.00	0.03
11	0.08	0.13	0.14	0.23	0.44	0.37	0.00	0.44	0.31	0.03		0.14	0.31	0.52	0.79	1.50	0.17	0.44	1.59
12	0.01	0.03	0.07	0.06	0.10	0.10	0.00	0.10	0.08	0.03	0.21		0.14	0.12	0.38	0.00	0.08	0.17	0.35
13	0.05	0.05	0.08	0.08	0.25	0.16	0.00	0.25	0.13	0.03	0.33	0.11		0.27	0.47	0.37	0.14	0.22	1.04
14	0.32	0.46	0.20	0.42	0.59	0.41	0.00	0.69	0.41	0.02	0.83	0.12	0.25		0.00	0.00	0.00	1.09	3.03
15	0.03	0.14	0.76	1.00	0.73	0.72	0.35	0.89	0.36	0.13	0.99	0.46	0.50	0.00		0.58	0.00	0.87	3.30
16	0.23	1.13	0.21	0.60	1.41	0.57	0.62	1.65	1.54	0.00	1.86	0.07	0.43	0.00	0.69		0.00	0.65	0.00
17	0.00	0.00	0.02	0.02	0.14	0.08	0.00	0.14	0.03	0.00	0.20	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00		0.00	1.13
18	0.05	0.02	0.11	0.12	0.39	0.27	0.00	0.39	0.21	0.00	0.65	0.16	0.31	0.57	0.74	0.77	0.00		0.00
19	0.09	0.17	0.45	0.35	1.52	0.65	0.00	1.52	0.95	0.01	2.19	0.36	1.01	1.93	2.17	0.00	1.10	0.00	

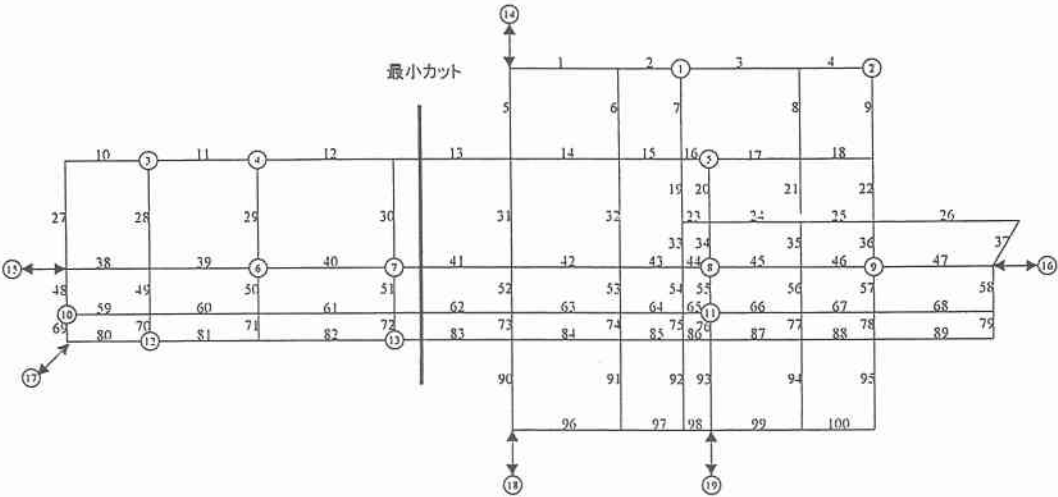
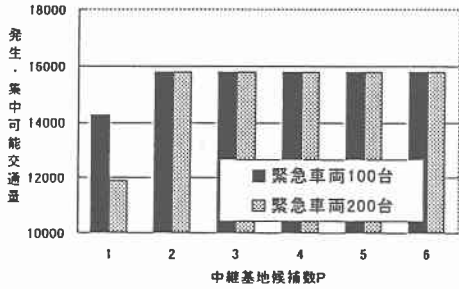


図-1 計算対象の道路網

通を除いて新たに作成した OD 構成比を対象にする。そして、中継基地の配置数、緊急車両を踏まえて発生・集中可能交通量の算定を行った結果が図一2である。

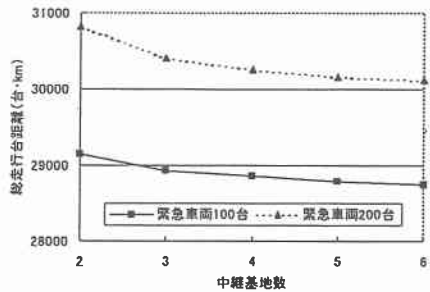


図一2 道路網全体で発生集中可能な交通量

ここでも、最小カットは、1～6 の中継基地候補数においていずれもリンク番号 13,41,62,86 で発生した。発生・集中可能交通量については中継基地候補数が 2 ヶ所以上では道路網容量である 15764 台となっている。また 2 ヶ所以上の中継基地の配置を見るとボトルネックとなっているカットを通過しないように最小カットを挟んで両方向から緊急車両が供給されているため一般車両の発生・集中可能交通には影響を与えていない。しかしながら、中継基地が一ヶ所の場合には緊急車両は必ずカットを通過しなければならないため、一般車両の発生・集中可能交通量は減少することもわかる。さらに、緊急車両数が増えれば一般車両の発生・集中可能交通量に与える影響は大き

くなる。そして、中継基地の配置によって発生・集中可能交通量がどの程度影響を受けるかを見るために式 (3) の y_m の 0-1 変数を 0 または 1 に固定することによって中継基地を固定し算定を試みた。 E_n が 100 台、中継基地 2 ヶ所固定したときの算定結果を図一3に示した。

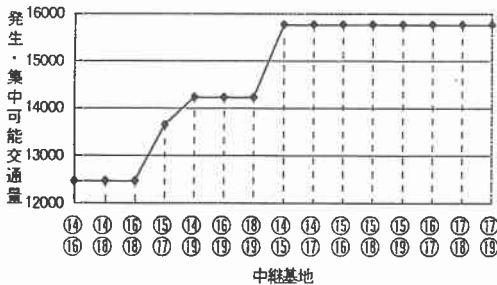
この結果からも、リンク番号 13,41,62,86 による最小カットを挟んで左右両方向に中継基地が配置されると、いずれの場合も道路網容量である 15764 台が発生・集中可能となる。しかしながら、カットを挟まずに同方向に中継基地が配置されると発生・集中可能交通量は大きく減少する。次に、一般車両と緊急車両の総走行台距離の算定を行う。まず、緊急車両は緊急性を要しているため各中継基地からの最短ルートのみを設定し、一般車両については迂回路を含め、できる限りのルートを与えた。そこで、中継基地数と総走行台距離の関係を図一4に示した。



図一4 総走行台距離

この結果から、中継基地が増えるに従い緊急車両の長距離トリップは減少し、中継基地に近い被災ゾーンへ行くため総走行台距離は減少していく。

さらに、3. (2) で述べた内外交通に対しても規制・制御をした場合について算定を行う。ここで、式 (9) の内々交通の OD 構成比 p_{ij} は、表一1 の値のうち内々交通のみを抽出して新たに OD 構成比を作成し、式 (10) の目的地選択比率 q_{ij} も表一1 より内外 OD 交通区分にあたる各ゾーンの行き先別比率を考慮し作成した。そして E_n を 100 台とし、式 (18) の内々交通の需要交通量 F^L



図一3 中継基地 2 ヶ所を固定したときの発生・集中可能交通量

を 1000 台 3000 台と設定していき、それぞれのときに各ゾーン発生・集中可能交通量の下限値 Q_L^L を 100 台、300 台と、表-2 のように 4 つのケースに分けた。それぞれの場合の中継基地数と発生・集中可能交通量の関係が図-5 である。

この計算例の場合でも、(1) のときと同様に、カットを挟んで左右両方向が中継基地となり、中継基地が一ヶ所では発生・集中可能交通量は減少

表-2 4 ケースの計算例

ケース	内々交通の F^L	内外交通の Q_L^L
ケース 1	1000 台	100 台
ケース 2	1000 台	300 台
ケース 3	3000 台	100 台
ケース 4	3000 台	300 台

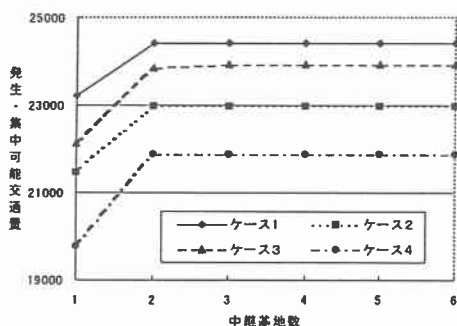


図-5 道路網全体で発生・集中可能な交通量

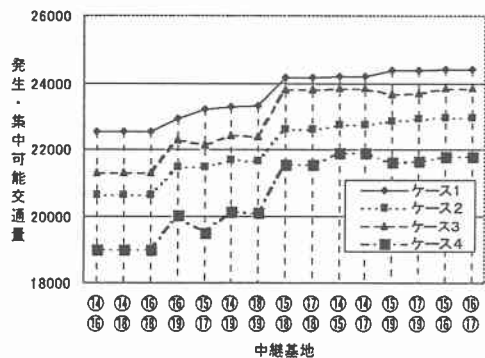


図-6 中継基地を固定したときの発生・集中可能交通量

するが、2 ケ所以上では道路網容量と同じ値、もしくは道路網容量に近い値となった。また、中継基地の配置と発生・集中可能交通量の関係を図-6 に示した。このときも、道路網容量と同じ値、あるいは近い値を示す中継基地の配置は、いずれもカットを挟んで左右両方向に分かれている。

5.あとなぎ

以上、本研究は震災時に道路の損壊等によって交通機能が大きく低下した道路網において、需要と供給のバランスを図るためには、どのような交通需要抑制策を施すべきかを考えるうえで基礎となる発生・集中可能交通量の算定について試みた。本研究では優先的に輸送路を確保すべき緊急車両と一般車両とを区分した 2 モードの多品種流問題を中継基地の配置を踏まえて LP 問題として定式化するとともに、一般車両の発生・集中可能交通量の算定手法について考察した。また、OD 交通について被災地域内を通過する通過トリップ、被災地域外から地域内へあるいは被災地域内から地域外へ移動する内外トリップ、および被災地域内を移動する内々トリップの 3 つに区分した。そして、これらを基に通過トリップのみを排除した場合及び内外トリップを規制・制御した場合について種々考察を試みた。その結果、いずれの場合も一般車両の発生・集中可能交通量は中継基地の配置数あるいは位置によって影響を受けることが分かった。このことから震災時には、混雑や渋滞等の交通情報、道路の損壊や建物の倒壊等の被害情報、あるいはどのゾーンで物資が不足しているか等リアルタイムでの情報が重要となってくる。

参考文献

- 1) 富田・林：震災後の交通システム機能障害—需要と供給のミスマッチ—、土木学会誌、第 80 巻 6 号、1995
- 2) 小谷：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、交通工学 Vol.25、1996
- 3) 中川・吉川・伊藤・小林：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、No19(1)、1996
- 4) 下村・増田・榎谷・田村・斎藤：OD 交通区分を考慮した震災時の発生・集中可能交通量について、土木学会北海道支部論文報告集、第 54 号(B)、1998
- 5) 榎谷・下村・浦田・田村・斎藤：緊急車両を考慮した震災時における発生・集中可能交通量、土木計画学研究論文集、No14、1997