

カット行列およびOD-カット行列を基礎とした 数理計画問題による道路網感度分析

Sensitivity Analysis of Road Network by Mathematical Programming
based on Cut Matrix and OD-cut Matrix

榎谷有三*・田村 亨**・斎藤和夫***

by Yuzo MASUYA, Tohru TAMURA and Kazuo SAITO

1. まえがき

道路網において処理し得る最大交通量を表わす道路網容量は、一般にネットワーク特性（道路網形態、リンクの交通容量等）およびフロー特性（発生・集中交通量（土地利用パターン）、分布交通量（OD交通量）、配分交通量（経路交通量）等）によって規定される。したがって、道路網容量による道路網の感度分析は、これら道路網容量を規定する要因が変化したとき道路網容量がどのような影響を受けるかを定量的に分析することによって行うことができる。著者等は、この道路網感度分析を行うために、道路網を構成する各リンクがいずれのフロー水準のカットに含まれているかどうかを表わすカット行列および道路網上の各OD交通がいずれのカットを通過しているかどうかを表わすOD-カット行列の作成を試みてきた。その結果、これらの行列を通してリンクの交通容量あるいはOD交通等の変化が道路網容量に及ぼす影響を容易に分析することができた¹⁾。また、格子型あるいは梯子型など代表的な道路網形態を対象に、土地利用パターンの相違によって道路網容量がどのように異なるか、あるいは土地利用パターンによって道路網容量の増強を図る対策手法はどのように異なるかなどに関する感度分析についても考察を試みてきた^{2), 3)}。さらには、カープール、バンプールなどによる自動車利用の効率化、自動車交通から公共輸送機関への交通手段の変更、時差出勤ある

いは駐車規制等の各種の交通需要マネジメント（TDM）が道路網容量に及ぼす影響についてもカット行列およびOD-カット行列を基礎とした簡単な行列演算を通して考察してきた⁴⁾。

これらカット行列およびOD-カット行列を通して、個々のリンクあるいはOD交通を対象とした感度分析は前述のように可能である。しかしながら、数本のリンクを同時に対象としたとき、あるいは多くのOD交通、特に本研究のように同じカットを2度通過するOD交通を対象としたときの道路網容量の増強効果および対策等に関する感度分析はカット行列およびOD-カット行列だけでは必ずしも十分に考察することはできない。そこで、本研究においてはこれら従来の道路網感度分析に関する成果を踏まえて、さらにカット行列およびOD-カット行列を基礎に線形計画問題（LP問題）、整数計画問題（IP問題）および混合整数計画問題（MIP問題）を定式化した。そして、これら定式化された数理計画問題を通して、自動車交通需要の増大に対処するための各種の道路網容量増強策を考えるうえで有用な道路網感度分析について種々考察を行った。本研究では、まず各リンクの拡張あるいは新設等による道路網の整備拡充計画によって容量増強策を図る、いわゆるネットワーク特性の面からの道路網感度分析について考察した。次に、フロー特性の面からの感度分析としては、経路誘導あるいは運転者情報システム等の導入による迂回制御などの管理運用計画が道路網容量に及ぼす影響について考えた。さらに、これら道路網整備計画および運用管理計画を同時に考慮した道路網感度分析についてもカット行列およびOD-カット行列を基礎に定式化した問題によって考察した。その結果、簡単な数理計画問題を定式化することによって、ネットワーク特性およびフロー特性それぞれの面からの道路網感度分析を種々考察することができた。

キーワード：ネットワーク交通流、交通制御

* 正会員 工博 専修大学北海道短期大学教授
土木科（〒079-01 美唄市光珠内町）
（TEL 01266-3-0250, FAX 01266-3-4071）

** 正会員 工博 室蘭工業大学助教授
建設システム工学科（〒050 室蘭市水元町 27-1）

*** 正会員 工博 室蘭工業大学教授
建設システム工学科（〒050 室蘭市水元町 27-1）

2. ネットワーク特性の面からの道路網感度分析

個々のリンクの拡幅・新設等による交通容量の増加が道路網容量に及ぼす影響あるいは道路網容量を増強するためにはいずれのリンクを対象に容量増加を図るべき等は、前述のように各リンクがいずれのカットに含まれているかどうかを表わすカット行列を通して容易に考察できる。しかしながら、数本のリンクを対象に交通容量を増加させようとしたとき道路網容量の増強効果はどの程度あるか、あるいは道路網容量をある値に増強するためにはどの程度のリンク交通容量の増加が必要か等の道路網感度分析についてはカット行列だけでは必ずしも十分考察できない。そこで、ここではカット行列を基礎に定式化した数理計画問題を通して、ネットワーク特性の面からの道路網感度分析について考える。

いま、 n 個のノードと m 本のリンクからなる道路網上に q 個の OD 交通が存在するものとし、 k 番目の OD 交通の構成比（OD 交通量の相対比）を p_k とする。また、最小カット（すべてのカットのうちでフロー水準が最小のカット）を含めて感度分析に必要なカットは配分シミュレーション法を基にしたアルゴリズムを通して W 本探索されているものとする。そして、これらのカットを基に式（1）、（2）に示すカット行列 C および OD-カット行列 K も既に作成されているものとする¹⁾。なお、各カットのフロー水準は、後述のように交通容量と通過する OD 構成比の和との比で求められる。

ここで、カット行列 C の要素 C_{wa} は、カット w をリ

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \cdots & m \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ W \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{W1} & C_{W2} & \cdots & C_{Wm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

$$K = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \cdots & q \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ W \end{matrix} & \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1q} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{W1} & K_{W2} & \cdots & K_{Wq} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

ンク a が構成するとき 1、そうでないとき 0 を取る。また、OD-カット行列 K の要素 K_{wk} は、カット w を OD 交通 k が 1 度だけ通過するとき 1、2 度通過するとき 2、そうでないとき 0 をそれぞれ取る。

まず、制約条件としては式（3）の各カットごとの容量制限に関するカット条件式、式（4）の道路網全体で増加可能な交通容量の値に関する条件式、さらに式（5）の各リンクの容量増加に関する変数 x_a の条件もある。

$$\sum_{a \in R_w} c_a \cdot x_a + C_w \geq NC \cdot P_w \quad (w = 1, 2, \dots) \quad (3)$$

$$\sum_{a=1}^m c_a \cdot x_a \leq TC \quad (4)$$

$$x_a \geq 0 \quad (a = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

そして、目的関数としては式（6）の道路網容量 NC を最大化することとなる。

$$NC \rightarrow \text{最大化} \quad (6)$$

ここで、

c_a : 単位幅員あるいは車線数当たりの交通容量

R_w : カット w を構成するリンクの集合

C_w : カット w の交通容量

P_w : カット w を通過する OD 構成比の和

TC : 増加可能な幅員（交通容量）あるいは車線数

式（3）は、各カットごとの需要（カットを通過する OD 交通量）と供給（カットの交通容量）のバランス、すなわち各カットの交通容量は少なくとも当該カットを通過する交通需要以上でなければならない制限式である。第 1 項は、交通需要の増大に伴い増加させなければならない交通容量であり、第 2 項は既存道路網にけるカットの容量を表わす。また、右辺の P_w の値は既存道路網を対象に、道路網容量に相当する交通需要を配分シミュレーション法で配分したときの当該カットを通過する OD 構成比の和である。また、式（3）、（4）の容量増加に関する変数 x_a は、各リンクの容量増加の単位を幅員とするか車線数とするかによって、連続変数あるいは離散変数（整数変数）を取り得るとともに、定式化される問題も LP 問題あるいは IP 問題となる。こ

ここで、増加単位の幅員は、車線幅員の拡幅あるいは交通容量を増加させる要因（たとえば、側方余裕幅の拡幅、沿道条件の整備等）の改善によって対応しようとするものである。そうすると、式（４）の増加可能な幅員（交通容量）あるいは車線数 TC をパラメータとして、式（６）の道路網容量を最大化させると、数本のリンクを対象に容量増加を図ったときの道路網容量の増強効果を容易に把握することができる。また、道路網容量をある値に増強するために必要な増加幅員量あるいは車線数は、道路網容量 NC に上限値を設定した制約条件を定式化するとともに、式（４）を目的関数とすることによって算定できる。

このように、探索されたカットを対象にした制約条件式を基に数理計画問題を定式化することによって、ネットワーク特性の面からの道路網感度分析を容易に行うことができる。そして、このような分析を通して交通需要の増大に対する道路網整備拡充計画などを考えるうえで有用な指針を与えることができるものと思われる。

3. フロー特性の面からの道路網感度分析

フロー特性の面からの道路網感度分析としては、前述のように４段階推定法の各段階の発生・集中交通、分布交通量あるいは交通手段別交通量などと道路網容量の関係も考えられるが、ここでは配分交通量のうち特にフロー水準の小さいカットを２度通過する OD 交通を対象に考察を試みる。最小カットも含めフロー水準の小さいカットを２度通過する OD 交通は、各 OD 交通の経路選択挙動を踏まえた結果であり、これらの OD 交通をフロー水準のより大きいカットを通過する他の経路を走行させて発生・集中させることも可能である。すなわち、最小カットも含めフロー水準の小さいカットを２度通過する OD 交通を対象に、経路誘導あるいは運転者情報システム等の導入による迂回制御など既存道路網を最大活用することによって道路網容量の増強を図ろうとするものである。各 OD 交通が同じカットを２度通過するかどうかは、式（２）に示す OD -カット行列の要素の値（２を取る）によって容易に求めることはできる。

したがって、 OD -カット行列において要素２の値を取る OD 交通を対象とした経路誘導等が道路網容量に

及ぼす影響は、 OD -カット行列あるいは OD -カット行列から作成される OD -カット感度行列を通して考察することはできる¹⁾。しかしながら、リンクと同様に多くの OD 交通を対象に迂回制御等を考えたときの道路網容量の増強効果はどの程度あるか、あるいは道路網容量をある値に増強するためにはどの程度の OD 交通を対象に迂回制御等を行うべき等の感度分析は OD -カット（感度）行列だけからでは十分に考察できない。また、迂回制御の場合は OD 交通を他の経路に迂回させるため、カットによっては逆に通過する OD 構成比の和も増加してフロー水準も低下することもある。このような点からも、多くの OD 交通を対象としたときには OD -カット（感度）行列だけからでは、容易に道路網感度分析を行うことができない場合もある。

まず、制約条件としては式（７）の迂回制御対象となる OD 交通に関する連続条件、式（８）の各カットごとの容量制限に関するカット条件式、さらに式（９）のルート交通量 Y_r^k の条件もある。

$$\sum_{r=1}^{n_k} Y_r^k = p_k \cdot NC \quad (k \in K) \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r=1}^{n_k} w \delta_r^k \cdot Y_r^k + (P_w - \sum_{k \in K} \delta_r^k \cdot p_w^k) \cdot NC \leq C_w \quad (w = 1, 2, \dots, W) \quad (8)$$

$$Y_r^k \geq 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} k \in K \\ r = 1, 2, \dots, n_k \end{array} \right\} \quad (9)$$

そして、目的関数としては前述と同様に式（６）の道路網容量 NC を最大化することとなる。

ここで、

K : 迂回制御対象となる OD 交通の集合

n_k : 迂回対象となる OD 交通 k の走行経路の本数

$w \delta_r^k$: OD 交通 k の r 番目のルート交通量がカット w を１度通過するとき１、２度通過するとき２、そうでないとき０をとる定数

p_w^k : 迂回制御対象となる OD 交通 k のカット w を通過していた構成比

式 (8) は、前述の式 (4) と同様に各カットごとの需要と供給のバランスを考えたものである。ここで、第2項は道路網容量に相当する交通需要を配分シミュレーション法で配分したときに、迂回制御対象となるOD交通 k がカット w を通過していた構成比の値を引いたものである。このことは、迂回制御対象となるOD交通は他経路に再配分され、通過するカットも異なってくることもあるからである。迂回制御対象とするOD交通は、前述のようにOD一カット行列から容易に求められる。そして、この問題の場合は取り扱う変数がルート交通量（連続変数）だけであることから、定式化される問題もLP問題のみである。なお、最小カットを2度通過するOD交通がないときには、通過するOD構成比の値の変化によって最小カットのフロー水準を改善することができないことから道路網容量の増強も不可能となる。したがって、迂回制御による容量増強も最小カットを2度通過するOD交通を中心に考えなければならない。

このように、迂回制御対象とするOD交通の連続条件式とカット条件式だけからなるLP問題を定式化することによって、迂回制御等による運用管理計画の面からの道路網容量増強の可能性について容易に考察することができる。

4. ネットワーク特性およびフロー特性の面からの道路網感度分析

ここでは、リンクの拡張あるいは新設によるネットワーク特性の面からの道路網容量の増強のみならず、さらにフロー特性の面からとしての同じカットを2度通過するOD交通を対象とした迂回制御等をも併せて考えようとするものである。すなわち道路網整備拡充計画と運用管理計画を同時に考慮した道路網感度分析について考えるものである。前述のように、同じカットを2度通過するOD交通を対象とした迂回制御も、最小カットを2度通過するOD交通がないときには制御効果は期待できない。したがって、最小カットを2度通過するOD交通がないときには、最小カットを構成するリンクを対象とした容量増加を図ったうえで、最小カット以外のカットを2度通過するOD交通を対象とした迂回制御による道路網容量の増強も可能である。そして、このような最小カットを2度通過するOD

交通がないような場合に、特に有用な施策と思われる。また、後述の計算例でも示されるように2つの計画を同時に考える施策は、道路網整備拡充計画を単独で行うより容量増強の効果も期待できるものと思われる。

2. および 3. で定式された2つ問題を基に考えると、式 (10) ~ (14) のように定式化することができる。また、目的関数は前述と同様に式 (6) の道路網容量 NC を最大化することとなる。

$$\sum_{r=1}^{n_k} Y_r^k = p_k \cdot NC \quad (k \in K) \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{r=1}^{n_k} \delta_r^k \cdot Y_r^k + (P_w - \sum_{k \in K} \delta_r^k \cdot Y_r^k p_w^k) \cdot NC \leq \sum_{a \in W} c_a \cdot x_a + C_w \quad (w = 1, 2, \dots, W) \quad (11)$$

$$\sum_{a=1}^m c_a \cdot x_a \leq TC \quad (12)$$

$$x_a \geq 0 \quad (a = 1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

$$Y_r^k \geq 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} k \in K \\ r = 1, 2, \dots, n_k \end{array} \right\} \quad (14)$$

式 (11) は、各カットの需要と供給のバランスを考慮した式 (3) および (8) を踏まえて、迂回制御対象となるOD交通のルート交通量と各リンクの容量増加量を組み込んだものである。式 (10)、(12) 等は2. および 3. で定式化されたものと同じである。そうすると、問題は2. で述べた各リンクの容量増加に関する変数を連続変数とするか、整変数とするかによって異なってくる。変数を幅員としたときには問題もLP問題となる。一方、整変数（車線数）としたときには、ルート交通量が連続変数であることから問題は混合整数計画 (MIP) 問題として定式化される。そして、これらの問題を通して交通容量の増加と迂回制御とを考慮した道路網感度分析が可能となる。

5. 計算例¹⁾

本研究では、図一1に示す10ノードモデルを対象にカット行列およびOD一カット行列の作成を試みるとともに、これら作成された行列を基にした数理計画問

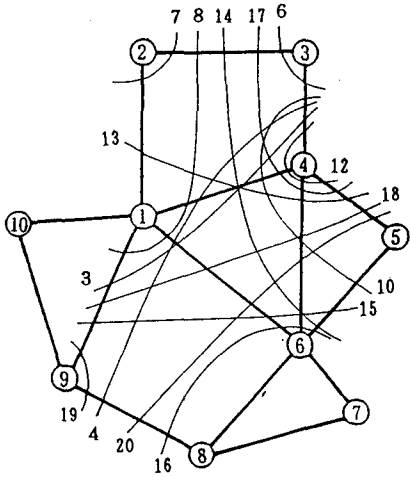
表一 各 OD 交通の構成比とリンク距離 (m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0.095	0.077	0.095	0.084	0.104	0.036	0.014	0.017	0.005
2	500		0.038	0.022	0.012	0.013	0.006	0.000	0.024	0.001
3	∞	500		0.050	0.016	0.015	0.005	0.005	0.000	0.003
4	800	∞	300		0.029	0.022	0.007	0.004	0.020	0.001
5	∞	∞	∞	300		0.068	0.013	0.003	0.000	0.000
6	600	∞	∞	600	400		0.032	0.003	0.004	0.002
7	∞	∞	∞	∞	∞	200		0.013	0.005	0.001
8	∞	∞	∞	∞	∞	500	600		0.011	0.001
9	600	∞	∞	∞	∞	∞	∞	500		0.004
10	400	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	700	

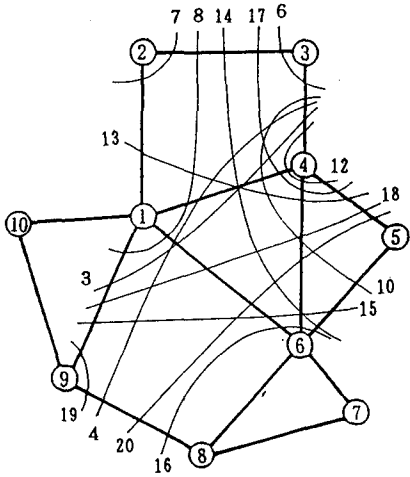
表二 各カットを通過する OD 構成比及びフロー水準

カット	カットによって発生・集中可能となる OD 構成比の和 Q_i	カットを 2 度通過する OD 構成比の和 R_i	カットを通過する OD 構成比の和 $P_i (=Q_i + 2 \cdot R_i)$	交通容量 C_i	フロー水準 F_i
1	0.3440	0.0000	0.3440	24000	69767
2	0.5250	0.0575	0.6400	48000	75000
3	0.4420	0.0990	0.6400	48000	75000
4	0.5420	0.0389	0.6197	48000	77457
5	0.5980	0.0109	0.6197	48000	77457
6	0.2090	0.0469	0.3027	24000	79286
7	0.2110	0.0459	0.3027	24000	79286
8	0.5210	0.0389	0.5987	48000	80174
9	0.5690	0.0047	0.5784	48000	82988
10	0.4170	0.0720	0.5610	48000	85561
11	0.5610	0.0000	0.5610	48000	85561
12	0.2500	0.1361	0.5222	48000	91919
13	0.4500	0.0361	0.5222	48000	91919
14	0.4940	0.0129	0.5197	48000	92361
15	0.3550	0.0818	0.5186	48000	92557
16	0.3590	0.0697	0.4983	48000	96328
17	0.3590	0.0610	0.4809	48000	99813
18	0.4120	0.0339	0.4798	48000	100042
19	0.0400	0.0967	0.2333	24000	102872
20	0.4160	0.0218	0.4595	48000	104461
21	0.2250	0.0000	0.2250	24000	106667

図一 対象道路網と探索されたカット



図二 感度分析に必要な他のカット



題を通して道路網感度分析を行う。図一の道路網のリンク上の数字はリンク番号であり、各リンクの距離は表一（左上半分）に示した。また、各 OD 交通の構成比も表一（右上半分）に示した。まず、この道路網を対象に配分シミュレーション法を基に道路網容量を算定したところ、図一に示すリンク 1、7 からなるカット 1 が最小カットとして発生して 69767 台 (=24000/0.344) を得た。図一に示す他のカットは、需要（各リンクの配分交通量）と供給（各リンクの交通容量）のバランスを考慮して、道路網容量の算定と同様に配分シミュレーション法を基にしたアルゴリズムを通して探索されたものである。さらに、図二に

示すカットは感度分析に必要な他のカットであり、これらのカットは図一のカットを基に簡単な行列演算を通して求められたものである。これら求められた 21 本の各カットを通過する OD 構成比、2 度通過する OD 構成比、交通容量（カットを構成するリンクの交通容量の和）およびフロー水準等を取りまとめたものが表二である。なお、各カットのフロー水準 F_w は式 (15) に示すように、交通容量 C_w と当該カットを通過する OD 構成比の和 P_w とから求めることができる。

$$F_w = C_w / P_w \quad (w = 1, 2, \dots, W) \quad (15)$$

		リ ン ク														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
カ	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
ツ	5	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	7	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ト	9	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	10	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
	11	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	12	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
	13	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	14	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	15	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	16	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
	17	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	20	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
	21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0

図一3 カット行列K

		O D 交 通													
		1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	2-6	2-7	2-9	4-9		
カ	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0		
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2		
	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	4	2	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2		
ツ	5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	2	2	1		
	6	2	1	0	0	0	0	0	0	2	2	2	0		
	7	1	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1		
	8	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
ト	9	2	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2		
	10	2	2	1	1	0	0	0	0	0	2	2	2		
	11	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1		
	12	2	2	1	2	0	0	0	0	0	2	2	2		
	13	1	1	1	2	0	0	0	0	0	1	1	1		
	14	2	1	1	1	0	0	0	0	0	2	2	2		
	15	2	2	0	2	1	1	1	1	1	1	1	1		
	16	2	2	0	2	1	1	1	1	0	1	1	2		
	17	2	1	1	2	0	0	0	0	0	2	2	2		
	18	2	2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
	19	0	2	0	2	2	2	2	2	1	0	0	1		
	20	2	2	0	1	1	1	1	0	1	1	2	2		
	21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		

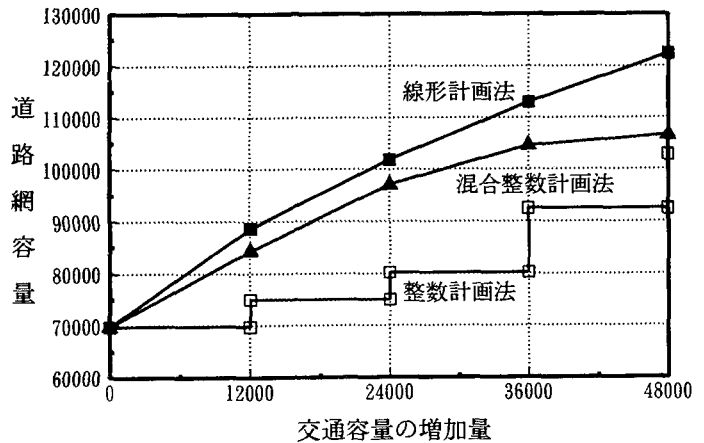
図一4 OD-カット行列C

表一3 交通容量の増加量と道路網容量

交通容量の増加量	線形計画法	整数計画法	混合整数計画法
12000(1車線)	88670	75000	84329
24000(2車線)	101835	80174	97068
36000(3車線)	113012	92557	104651
48000(4車線)	122430	102827	106667

表一2に示す結果は、各カットのフロー水準を算定するとともに、カットをフロー水準の小さ順に並び変えて取りまとめたものである。そして、表一2の結果を基に作成したカット行列Cが図一3である。さらに、このカット行列とともに各OD交通の配分対象経路を基に作成されたOD-カット行列Kが図一4である。ここでは、ノード1を出入りするOD交通および後述の迂回制御対象となるOD交通を中心に行列の一部分を示した。これらの行列を通して、たとえば道路網容量を図るためには少なくとも最小カットを構成してるリンク1あるいは7を対象に拡張・新設等の容量増加を行うべきことが理解できる。また、最小カットに含まれていないリンク2、3などは最小カットを構成するリンクとの組合せで始めて容量増強が可能であることも考察できる。

また、この例においては最小カット（カット1）を2度通過するOD交通がないことから、フロー特性の面のみからの道路網容量の増強が不可能であることがOD-カット行列から理解できる。さらに、OD交通を対象とした道路網容量増強のためには、OD2-6、2-7、あるいは1-2等を対象に迂回制御を行うべきことなどもこの行列から容易に考察できる。しかしながら、これらの行列を通して多くのリンクあるいはOD交通を



図一5 交通容量の増加量と道路網容量の関係

対象としたときの容量増強の効果を計量的に把握することは困難である。さらに、リンクとOD交通を同時に考慮したときの増強効果の把握はなお一層困難である。まず、ネットワーク特性の面から感度分析を行うため、探索された21本のカットを対象に作成された図一3のカット行列を基にLP問題およびIP問題を定式化した。式(2)のTCの初期値としては、取り扱う変数を連続変数(LP問題)としたときには12000台、

整変数（IP 問題）としたときには 1 車線としてそれぞれ設定するとともに、TC を逐次増加して道路網容量の算定を行った。各問題に対する結果を取りまとめたものが表－3 および図－5 である。これらの結果から、まず取り扱う変数によって道路網容量の増強程度も異なってくることが理解できよう。LP 問題の場合は、道路網容量を最大化するように多くのリンクを対象に効率よく容量増加を図っている。たとえば、交通容量の増加値 24000 台のときには、リンク 1、7 が 5500 台、リンク 2（6800）、リンク 3（4800）およびリンク 6（1400）などである。一方、道路整備を車線単位で行うとする IP 問題の場合は、限られた本数のリンクだけが容量増加の対象となることから、交通需要の処理の面からみた増強効果は LP 問題の解に比べて小さい。しかしながら、実際の道路網整備計画を考えたとき、LP 問題で得られたような容量増が可能かどうかという問題も考えられる。したがって、これら 2 つの問題から得られた値を道路網整備に伴う道路網容量増強可能な上限値（LP 解）および下限値（IP 解）として、具体的な道路網容量増強策を図るうえでの有用な情報として利用することも考えられる。

また、交通容量の増加値 0～12000 台と 12000～24000 台等において傾きが異なるように、同じ程度の交通容量を増加させても道路網容量への増強効果が異なることも図－5 の直線の変化から理解できよう。このことは、1 車線から 2 車線の道路網容量の変化と 2 車線から 3 車線の変化が異なるように、IP 問題においても同様なことが窺える。このような道路網容量の増強効果の違いは、容量増加されたリンクを構成するカットのフロー水準が容量増加に伴ってどの程度変化したかによるものである。さらに、これらの結果を通して、道路網容量をある値まで増強するためには、少なくとも道路網全体にどの程度の交通容量の増加が必要かも容易に考察することができる。

次に、前述のようにこの例においては最小カットを 2 度通過する OD 交通がないことから、迂回制御だけによる道路網容量の増強は不可能である。したがって、フロー特性の面だけからの感度分析は不可能で、4. で述べたネットワーク特性をも踏まえた分析が必要である。ここで、抑制対象とする OD 交通はフロー水準のより小さいカットを 2 度通過する OD 交通を中心に、

図－4 に示す OD－カット行列のうち OD1-2、1-3、2-6、2-7、2-9 および 4-9 とした。また、各リンクの容量増加の単位を車線数とするとともに、混合整数計画問題を通して分析を行った。各交通容量の増加値に対する結果は表－3 および図－5 である。たとえば、リンクのみを対象に 1 車線の容量増加を行ったときには、カット 2 および 3 のフロー水準（75000 台）までしか増強可能でないが、カット 2、3 を 2 度通過している OD 交通等を対象に他の経路に迂回させることによって道路網容量も 84329 台まで増強可能であることが理解できよう。また、道路網容量の値もリンクのみを対象に 2 車線増加させたときの値（80174 台）よりも大きい。さらに、2 車線および 3 車線増加させたときも、OD 交通を対象とした迂回制御との組み合わせが道路網容量の増強に大きな効果を発揮していることが窺える。このようなことから、交通需要の増大に対しては単にリンクの拡幅あるいは新設等による道路網整備拡充計画だけではなく、経路誘導なども含めた迂回制御による道路網の効率的な運用も併せて考えるべきことを示唆してるものと思われる。

以上、各種の簡単な数理計画問題を通して種々考察を試みてきたが、ここで求められる道路網容量の値はひとつ容量増強方法を通して達成可能な値でもある。したがって、具体的に道路網容量の増強策を図ろうとするときには、これらの分析を踏まえて、さらに道路網を評価し得る他の要因を組み込んだ問題の定式化あるいは各種の交通量配分手法を用いた分析などが必要である。

6. あとがき

以上、本研究はカット行列および OD－カット行列を基礎に線形計画問題、整数計画問題および混合整数計画問題を定式化した。そして、これら定式化された各種の数理計画問題を通して、自動車交通需要の増大に対処するための種々の道路網容量増強策を考えるうえで有用な道路網感度分析について考察を試みた。その結果、簡単な各種の数理計画問題を定式化することによって、拡幅あるいは新設による道路網整備拡充計画あるいは迂回制御等による管理運用計画が道路網容量の増強にどのような効果を発揮するかなどについて種々分析することができた。平常時において道路網が

システムの機能的であるためには、少なくとも需要と供給のバランスを図ることが必要なことから、このような道路網容量の面からのアプローチは有用と思われる。

今後は、双対問題をも定式化して双対変数および余裕変数等からも道路網感度分析について考察を試みて行く。また、対象とするカットの本数および取り扱うOD交通の数も道路網の規模とともに莫大となることから、ゾーンあるいは地域レベルを考慮したカット行列およびODーカット行列の作成手法等についても考察を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 榎谷・田村・斎藤：道路網感度分析のためのカット行列およびODーカット行列の作成手法に関する研究、土木学会論文集、No.494/IV-24,PP43-52,1994
- 2) 榎谷・田村・斎藤：道路網容量からみた道路網形態と土地利用パターンの整合性について、第28回日本都市計画学会学術研究論文集、PP337-342、1993
- 3) 榎谷・田村・斎藤：梯子型道路網形態を対象とした道路網容量増強策に関する研究、第30回日本都市計画学会学術研究論文集、PP613-618、1995
- 4) Y. MASUYA: STRATEGIES OF TRAVEL DEMAND MANAGEMENT CONSIDERING ROAD NETWORK CAPACITY, Journal of Hokkaido College, Senshu University, No.28, 1995

カット行列およびODーカット行列を基礎とした数理計画問題による道路網感度分析

榎谷有三・田村 亨・斎藤和夫

本研究においては、カット行列およびODーカット行列を基礎に線形計画問題、整数計画問題および混合整数計画問題を定式化した。そして、これら定式化された数理計画問題を通して、自動車交通需要の増大に対処するための各種の道路網容量増強策を考えるうえで有用な道路網感度分析について種々考察を行った。その結果、簡単な各種の数理計画問題を定式化することによって、拡張あるいは新設による道路網整備拡充計画あるいは迂回制御等による管理運用計画が道路網容量の増強にどのような効果を発揮するかなどについて種々分析することができた。

Sensitivity Analysis of Road Network by Mathematical Programming based on Cut Matrix and OD-cut Matrix

Yuzo MASUYA, Tohru TAMURA and Kazuo SAITO

As urban areas continue to grow in size, and as road travel continue to increase, traffic congestion will extend over larger period of the day. It is necessary to invest sufficiently in highway and street networks that can be fully tackle the problem of increasing traffic congestion. In this paper the mathematical programming for sensitivity analysis of road network is formulated based on cut matrix and OD-cut matrix. We analyze the effects that the strategies of construction of selected high capacity road links or comprehensive traffic management of arterial roads have on the road network capacity by sensitivity analysis.
