

リンクの容量増強および走行時間を考慮したカットの探索手法 Formulation of CutMatrix by Considering Capacity and Travel Time of Links

十二里 孝生*・下村 光弘**・榎谷 有三***・田村 亨****・斉藤 和夫*****
by Takao JUNIRI, Mituhiro SHITAMURA, Yuzo MASUYA, Tohru TAMURA and Kazuo SAITO

1. はじめに

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、分布交通量（OD交通量）、配分交通量等）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各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。著者らは、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を表わすカット行列の作成、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を表わすOD-カット行列の作成を試みてきた。また、求められたカット行列およびOD-カット行列を基に対象道路網の道路網感度分析についても種々考察してきた。

しかしながら、既往のアルゴリズムの場合、特に面的な広がりをもった大規模道路網を対象としたとき、次のような問題が生じる。感度分析に必要な、最小カットよりフロー水準の大きいカットを探索するとき、①新たなカットを探索するためのリンク容量増強過程において、増強すべきリンクの数が多いため容量増強量の計算が困難となる。②また、新たに探索されるカットが、最小カットを含めすでに探索されたフロー水準の大きなカットを構成するリンクを含んだ形で多く出現することから、リンク容量増強もより一層困難になる。

そこで、本研究ではこれらの大規模道路網を対象

としたときの課題に対応したアルゴリズムについて考察した。すなわち、①既出のカットを構成するリンクが、新たに探索されるカットに含まれないようなリンク容量の増強法、②既出のカットを2度通過するOD交通が出現しないようなリンク走行時間の設定等を踏まえたカット探索アルゴリズムである。

2. 道路網容量の算定手法

本研究では、大規模道路網にも適用可能な配分シミュレーション法を用いて道路網容量の算定を行う。算定手順は図-1のフローチャートに示すとおり、総トリップを漸次増加させる段階で、容量を超過したリンクを順次除去してゆき、除去されたリンクがカットを構成するかどうかを検討する。カットが探索されれば、フロー水準 F_i を式(2)で求め、この最小値が道路網容量 NC となり、最小のフロー水準をとるカットが最小カットとなる。なお、配分過程における走行時間関数はBPR関数(式(4))を用いた。

$$P_i = \left\{ \sum_{a \in T_i} C_a + \sum_{k \in R} \Delta T_k^m \right\} / (n \Delta T) \quad (1)$$

$$F_i = \sum_{a \in T_i} C_a / P_i \quad (2)$$

$$NC = \min \{ F_i \} \quad (3)$$

T_i : カット i を構成するリンクの集合

R : 配分不可能となったOD交通の集合

ΔT^m : 未配分OD交通量

$$t_a(V_a) = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha (V_a / C_a)^\beta \right\} \quad (4)$$

C_a : リンク a の交通容量

V_a : リンク交通量

t_{a0} : 初期走行時間

α, β : パラメータ

Key words: 道路網容量、配分シミュレーション、カット行列

* 学生員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻

(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1 TEL 0143-47-3177 FAX 0143-47-3279)

** 正会員 工修 苫小牧工業高等専門学校助教授 環境都市工学科

*** 正会員 工博 専修大学北海道短期大学教授 土木科

**** 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 建設システム工学科

***** フェロー 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科

3. 配分シミュレーション法によるカット探索

カット行列を作成するためには、道路網容量を規定する最小カットのみならず、最小カットよりフロー

水準の大きいカットを探索しなければならない。この最小カットよりフロー水準の大きいカットを探索する場合には、道路網容量を越える交通需要（OD交通量）を処理するために、カットを構成するリンクの容量増強をどのように行うかが問題となる。既往の手法は、探索するカットをフロー水準の大小順に探索するため、各OD交通が配分でき得だけの容量増強を行っている。すなわち、道路網容量に相当するOD交通を配分したときの各リンクの配分率を踏まえて、交通需要の増大に対する各リンクの容量増強を行っている。そうすると、前述のように大規模な道路網に適用したとき、探索されたカットを構成する多くのリンクを対象に、容量増強しなければならない。あるいは同じリンクを含むカットが多く出現して、容量増強の計算が困難となる等の問題がある。

本研究においては、これらの問題に対処するため、リンクの容量増強方法およびリンク走行時間の設定を考慮したカット探索のアルゴリズムについて考察した。①最小カットを含め、探索されたカットを構成するリンクが、新たに探索されるカットに含まれないように、当該リンクの容量増強を相当大きな値で行う。②既出のカットを2度通過するような走行経路を最短経路とするOD交通が出現しないように、カットを構成するリンクの走行時間を大きな値にする。

以上の条件をもとに、配分シミュレーション法を用いたカット探索の手順は以下となる。

Step. 1 道路網容量に相当する交通需要（総トリップ数）を配分したときの各リンクの配分率を式(5)で求める。

$$W_a = V_a / NC \quad (5)$$

$$W_a = \text{配分率} \quad V_a = \text{配分交通量}$$

Step. 2 総トリップ数 NC がすでに配分されている道路網に、逐次 ΔT のトリップ数を配分するため、最小カットを構成するリンクに対して、再度容量超過とならないような相当大きな値で容量増強を行う。

Step. 3 容量増強された各リンクに対して、当該カットを2度通過するような走行経路を最短経路とするOD交通が出現しないように、リンク走行時間に大きな値を与える。

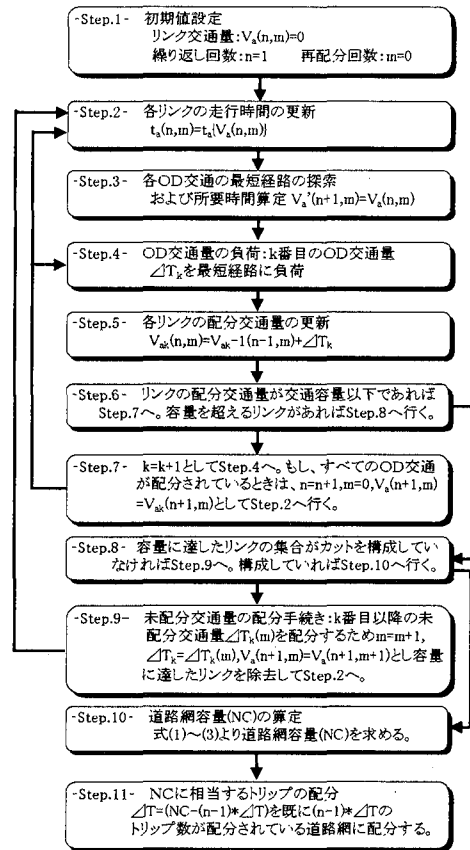


図-1 道路網容量の算定手法

Step. 4 リンク容量およびリンク走行時間を更新した道路網を対象に、道路網容量の算定手順に従い各OD交通量を逐次配分する。

Step. 5 各OD交通を配分する過程で、容量に達したリンクの集合がカットを構成するときは、当該カット i のフロー水準 F_i を式(5)で求める。また、このとき探索されたカット i は、最小カットを含めて既出のカットを構成するリンクは含まない。

Step. 6 Step. 5 で探索されたカット i を構成する各リンクに対して、最小カットを構成するリンクと同様に容量増強を行う。

Step. 7 カット i の発生によって、配分されていないOD交通量を配分するため、Step. 3 へ行く。

Step. 8 すべてのOD交通量が配分されるまで、Step. 3~Step. 7 を繰り返す。もし配分終了のときは、Step. 9 へ行く。

Step. 9 感度分析に必要なカットを考慮して、あるトリップ数に達するまで逐次 ΔT を配分する。

以上のような手順を通して、配分シミュレーション法を用いたカットの探索を行うことができる。

4. 行列演算によるカット探索

(1) 接続行列を用いたカット探索

3.で述べた手順でカットの探索を行うと、既往の容量増強法に比べて探索されるカットの本数は少なくなる。このことは、本研究の手順の場合、既出のカットを構成するリンクは新たに探索されるカットに含まれることがないため、異なるカットを構成するリンクから成るカットが探索されないためである。

そこで、容量超過リンクの組み合わせによって構成される新たなカットを探索する為に、接続行列を用いてカットの探索を行う。その手順は以下となる。

Step.1 カット探索のための配分作業を終えた道路網を対象に接続行列 E を作成する。ここで行列 E の要素はノード i がリンク j の端点であれば 1 を、そうでないとき 0 をとる。

Step.2 対象道路網のリンクを内部領域だけに接するリンク（以下、内部リンクという）と、外部領域にも接するリンク（以下、外部リンクという）に分ける。

Step.3 行列 E の各行において、外部リンクの列ベクトルの要素を 2 つ以上もつ行ベクトルを探索し、容量超過リンクの列ベクトルの要素のみ 1 をとる行ベクトルが存在すれば、このリンクの集合はカットを構成しているので、新たなカットとする。

Step.4 新たに探索されたカットのフロー水準を前述 3. の Step.5 の式 (5) より求める。

(2) 行列演算によるカット探索

これまでに述べてきた、配分シミュレーション法を基にしたカットの探索手法では、2 つ以上のカットが同時に発生した場合等、必ずしも感度分析に必要なすべてのカットを求めることができない場合がある。そこで、対象とするカットが極小カットであること、およびグラフの性質を利用し、既出のカットで構成されるカット行列から、行列演算を行うことで感度分析に必要な他のカットを探索する。この手順は以下となる。

Step.1 既出のカットだけでカット行列 C を作成する。ここで行列 C の要素は、当該カットがリン

クを含むとき 1、含まないとき 0 をとる。

Step.2 行列 C において、外部リンクに対応する列に 1 の要素をもつ行ベクトル（カット）が 2 つ以上存在するかを調べる。もし存在すれば、それぞれのカットはその外部リンクで交わっているの

で、該当する行ベクトル同士を mod2 で加えて新たなカットとする。存在しなければ計算を終了する。

Step.3 Step.2 で探索された新たなカットと、既出のカットとの間で、前述のように外部リンクで交わっているカット同士を求めて、さらに新たなカットを探索する。

なお、Step.2 で要素 1 をもつ行ベクトルが複数存在する場合は、そのうちの 2 つを取り出すすべての組み合わせを考えればよい。

以上のような手順を通して、感度分析に必要な他のカットをすべて探索することができる。

5. 計算例

本研究で考察した新たなカット探索アルゴリズムと既往の手法と比較検討するため、文献 1) と同様に表-1 および図-2 に示す、各 OD 交通の構成比と各リンク間の距離を与えた 10 ノードモデルを対象に、道路網容量の算定および感度分析に必要なカットの探索を試みる。各リンクの交通容量を 12,000 台、走行時間関数 (2. の式 (4)) の各パラメータを $\alpha=2.62$ 、 $\beta=5.0$ とし、一回の配分交通量を $\Delta T=10,000$ とした。そして図-1 の道路網容量算定手順に従ってトリップ数を漸次増加させると、 $n=7$ (トリップ数 70,000 台) のときリンク (1, 7) からなるカット 1 (最小カット) が発生した。このときのフロー水準は 69,767 台であり、これが道路網容量となる。

表-1 各OD交通量の構成比と各リンク間の距離(m)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0.095	0.077	0.095	0.084	0.104	0.056	0.014	0.019	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	0.003	0.004	0.020	0.001
5	*	*	*	300		0.070	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	

次に3. で述べた手順を通して、最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索について考察する。

最小カットを構成するリンク(1, 7)の容量増強を行い(ここでは99,999台とした。)、逐次 ΔT (=10,000台)を増加してカットの探索を行った。ここでは、探索されるカットのフロー水準等を考慮して、総トリップ数109,767台まで計算を行った。そうすると89,767台のときカット9が、109,767台のときカット21が発生した。なおこのときの容量超過リンクを図-2(太線)に示した。

次に4. で述べた手順に従って、接続行列からカット5本(図-2)を、さらに、行列演算により図-3に示す、感度分析に必要な他のカット(13本)を探索し、合計21本のカットを求めることができた。そして、求められたカットをフロー水準の小大順に並べ替えて、取りまとめた結果が表-2である。これにより、これら探索されたカットと、既往の手法で求めたカットと比較すると、全く同様のカットを探索できたことが確認された。このことから、本研究のカット探索手法が、10ノードモデルにおいて有用であることが確認できた。

6. おわりに

以上、本研究は大規模な道路網への適用を踏まえて、リンクの容量増強方法およびリンクの走行時間の設定方法を考慮したカット探索アルゴリズムについて考察した。その結果、カットを探索する段階において、容量増強の計算量を軽減することができた。また、カット探索において、既往の手法を用いた場合と比較検討することで、本研究のアルゴリズムの有用性を確認することができた。

現在、実際の大規模道路網に適用を試みている。今回は第2回道央都市圏PT調査のデータを基に、札幌道路網を対象にカットの探索を行っており、この計算結果の詳細は、発表当日に行う。今後は、大規模道路網に適用した際に発生した問題点への対応策の検討と、求められたカット行列からの道路網感度分析を行っていく。

【参考文献】

1) 梶谷有三・田村亨・斎藤和夫：道路網感度分析のためのカット行列およびOD-カット行列の作成手法に関する研究、土木学会論文報告集、第494号、p43~p52、1994

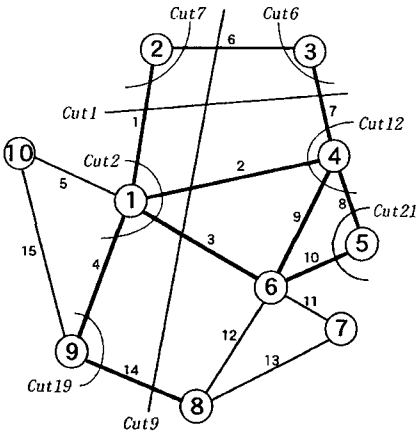


図-2 対象道路網と探索されたカット

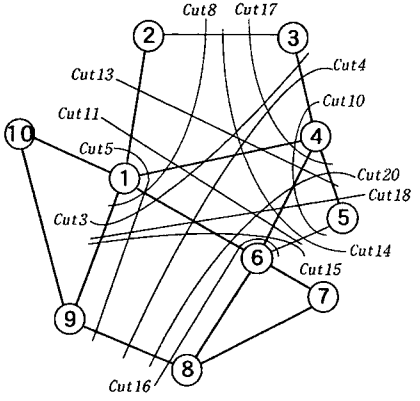


図-3 感度分析に必要な他のカット

表-2 各カットのOD構成比の和とフロー水準

カット	容量	構成比の和	フロー水準
1	24000	0.3440	69767
2	48000	0.6400	75000
3	48000	0.6400	75000
4	48000	0.6197	77457
5	48000	0.6197	77457
6	24000	0.3027	79286
7	24000	0.3027	79286
8	48000	0.5987	80173
9	48000	0.5784	82988
10	48000	0.5610	85561
11	48000	0.5610	85561
12	48000	0.5222	91919
13	48000	0.5222	91919
14	48000	0.5197	92361
15	48000	0.5186	92557
16	48000	0.4983	96328
17	48000	0.4809	99813
18	48000	0.4798	100042
19	24000	0.2333	102872
20	48000	0.4595	104462
21	24000	0.2250	106667

2) 梶谷有三・田村亨・斎藤和夫：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、土木計画学研究・論文集、No.13、p633~p640、1996