

カット探索手法の札幌都市圏道路網への適用について

室蘭工業大学大学院 ○学生員 十二里孝生
 室蘭工業大学工学部 学生員 村井 正英
 専修大学北海道短期大学 正員 榎谷 有三
 室蘭工業大学工学部 正員 田村 亨
 室蘭工業大学工学部 フェロー 斎藤 和夫

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¹⁾²⁾。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³⁾⁴⁾。

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（第2、第3のカット）を、配分シミュレーション法を用いて探索するとき、①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新たに探索されるカットが、既出の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。

そこで本研究は、これらの大規模道路網における課題に対応した、新たなカット探索アルゴリズムについて考察し、さらに実際の道路網への適用を試み、新たなアルゴリズムの実証的検証を行うことを目的とする。

2. 道路網容量の算定手法

本研究では、大規模道路網において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である。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いき、除去されたリンクの集合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

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

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

以上の手法で最小カットが探索されるのだが、感度分析を行なうためには、最小カットよりフロー水準の大きいカットが必要となる。これらのカットを探索するための手順は、①配分シミュレーション法を用いて基本的なカットを探索し、②配分シミュレーション法で探索できなかった他のカットを、行列演算により探索を行う、となる。これらの手順について、以降の章より順に考察していく。

3. 配分シミュレーション法によるカット探索

配分シミュレーション法を用いて、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。既往の手法では、カットをフロー水準の大小順に逐次探索するため、交通需要の増加量に相当するリンクの容量増強を行っている。これは、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から、最小の増強量を算出する手法である。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、既出の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ぬ。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起こる。

本研究は、これらの問題に対処するため、リンク増強過程において次の2つの条件を設定した。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に（つまり排他的なカットを求めするために）当該リンクの容量増強を相当大きな値で行う。②既出のカットを構成するリンクが走行経路に選択されないよう走行時間を大きな値にする。すなわち、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更新を行なう。

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 : リンク a の配分率 V_a : リンク a の配分交通量

Step.2 総トリップ数 NC が既に配分されている道路網を対象に、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だけの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。

Step.4 リンク容量およびリンク走行時間を更新した道

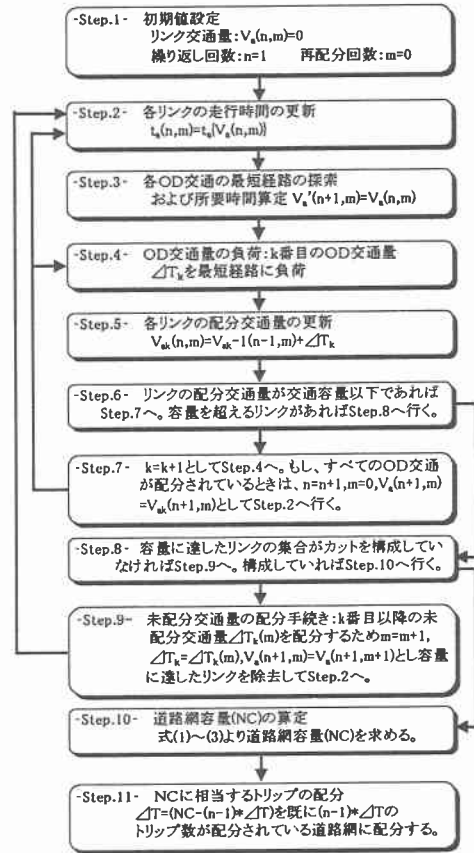


図-1 道路網容量の算定手法

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(6)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。

$$F_i = \sum_{a \in T_i} C_a / \sum_{a \in T_i} W_a \quad (6)$$

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て基本的な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

配分シミュレーション法を用いたカットの探索手法では排他的なカットしか求めていない。これは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ることがないためである。これまでに探索された基本的なカットを構成するリンクの組み合わせにより新たに構成されるカットを求めるために、接続行列およびカット行列を用いた2段階の行列演算を行い、感度分析に必要なカットを探索していく。その手順は以下となる。

i) 接続行列を用いたカット探索

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(6)より求める。

ii) カット行列を用いたカット探索

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 $\text{mod}2$ 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。なお、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。

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。

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(6)より求める。

以上のような手順を通して、感度分析に必要な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が実際の大規模道路網に適用可能かどうかを札幌市の道路網において検証する。

対象とした札幌都市圏道路網は、第2回道央都市圏パーソントリップ調査の結果に基づいて作成したものである。道路網はアーク数1,969本（そのうち一方通行48本）、ノード数644個（そのうちセントロイド168個）で構成されている（図-2）。各アークのゼロフロー時所用時間、交通容量等はパーソントリップ調査の結果を基に設定し、走行時間関数の各パラメータは $\alpha=2.62$ 、 $\beta=5.0$ とした。

配分シミュレーション法では等分率配分法を用い、一回の配分交通量を $\Delta T=100,000$ 台とし、2.で述べた手順に従って漸次トリップ数を増大させていくと、 $n=11$ （総トリップ数110万台）のとき、容量超過アーク16本から構成される最小カット（図-2、 $Cut1$ ）が発生した。このカットのフロー水準は1,047,619台であり、これが札幌道路網の道路網容量となる。

さらに、最小カットよりフロー水準の大きいカットを探索するため、3.および4.で述べた手順に従って、総トリップ数160万台まで配分計算を行い、カットの探索を試みると、数多くのカットが探索された。このうち、感度分析に必要と思われる、道路網を分断する代表的なカットを図-2に示した。

また、感度分析に必要なカットのフロー水準を求め、取りまとめると表-1のようになる。

表-1における各カットのフロー水準(F_j)は、式(6)の道路網容量に相当する交通量を配分したときの配分率(W_j)を基に算出している。この値は各OD交通の経路選択挙動を踏まえた結果であることから、カット発生によって発生・集中不可能となるOD交通のみならず、同じカットを2度通過しているOD

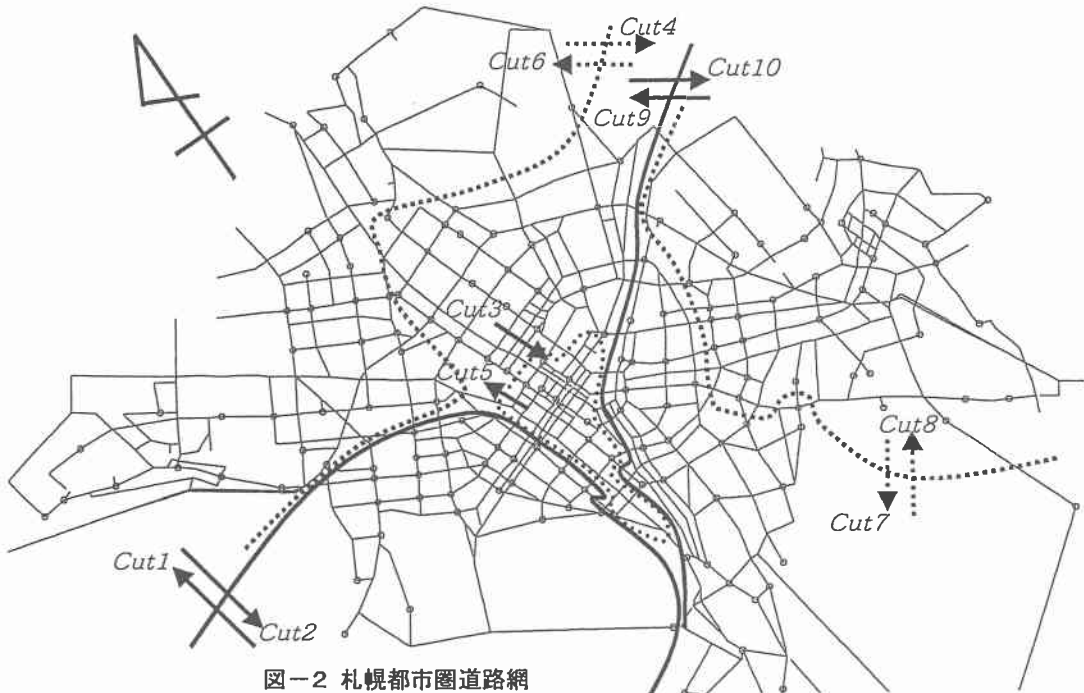


図-2 札幌都市圏道路網

表-1 各カットのフロー水準

| Cut | ΣCa | ΣWa | ΣPi | Fi | Fi' | Ui |
|-----|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-------|
| 1 | 132,000 | 0.126 | 0.118 | 1,047,619 | 1,118,644 | 6.3% |
| 2 | 132,000 | 0.116 | 0.108 | 1,137,931 | 1,222,222 | 6.9% |
| 3 | 320,500 | 0.263 | 0.168 | 1,218,631 | 1,907,738 | 36.1% |
| 4 | 156,000 | 0.124 | 0.092 | 1,258,065 | 1,695,652 | 25.8% |
| 5 | 282,400 | 0.216 | 0.122 | 1,307,407 | 2,314,754 | 43.5% |
| 6 | 156,000 | 0.116 | 0.084 | 1,344,828 | 1,857,143 | 27.6% |
| 7 | 136,400 | 0.100 | 0.078 | 1,364,000 | 1,748,718 | 22.0% |
| 8 | 136,400 | 0.098 | 0.075 | 1,391,837 | 1,818,667 | 23.5% |
| 9 | 193,300 | 0.130 | 0.112 | 1,486,923 | 1,725,893 | 13.8% |
| 10 | 167,200 | 0.107 | 0.054 | 1,562,617 | 3,096,296 | 49.5% |

交通についても考慮したものである。そこで、排他的な2つのノード集合間の OD 交通のみからなる OD 構成比の和 (ΣPi) に対するフロー水準を算定した値が (Fi') である。これらは配分率と構成比の和、あるいはフロー水準 Fi と Fi' との比較から、同じカットを2度通過する OD 交通、すなわち各カットにおける迂回交通の影響等について考慮することができる。表-1の Ui は、同じカットを2度通過する OD 交通の割合 ($Ui = 1 - \Sigma Pi / \Sigma Wi$) を算定したものである。この結果からも、特に都心部のカット (Cut 3, 5) において、通過交通が多いことが窺える。

また、求められたカットで地域を分割して考えると、カットを通過しようとする OD 交通が出現しないような施設配置や土地利用の問題、発生・集中交通量に関する問題等に対して、カットを用いることでマ

クロ的な分析・評価を行うことができる。

6. おわりに

以上、本研究は大規模な道路網を対象としたときの感度分析に必要なカットを探索する新たなアルゴリズムについて考察した。さらに実際の大規模道路網への適用を試みた結果、本研究のアルゴリズムの有用性を確認することができ、計算量も軽減することができた。

しかしながら、接続行列を用いたカット探索の過程において、セントロイドとダミーノードが混在した道路網では、探索されるカットの本数が膨大となる問題点を確認されたことから、今後は、この点をさらに改良を加えるとともに、大規模道路網の縮約手法についても考察していく。また、求められたカットを用いて道路網感度分析を行い、さらに各種の問題への適用を試みていく。

【参考文献】

- 1) 梶谷有三・加来照俊：道路網容量による道路網感度分析について、土木学会論文報告集、第343号、p73-82、1984
- 2) 梶谷有三・田村亨・斎藤和夫：道路網容量から見た土地利用活動の立地適応、交通工学、Vol. 22, No. 4、1987
- 3) 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、p43-462、1994
- 4) 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、土木計画学会・論文集、No. 13、1996