

道路網感度分析におけるカット行列作成に関する実証的研究

—室蘭市を例として—

Cut Martix for Sensitivity Analysis of Road Network

A Case study of Muroran City

樹谷有三*・篠原修司**・斉藤和夫***

By Yuzo MASUYA, Shuji SHINOHARA and Kazuo SAITO

A road network has a capacity for a traffic flow as an upper bound of the ability of traffic acceptance, because each node and link in road network has a traffic capacity. In this paper, the road network capacity is estimated by the Incremental Assignment Simulation. We discuss the method of formulating the Cut Matrix required to quantitatively analyze the effects that the changes of link capacity have on the road network capacity. Proposed method is applied to the real scale road network in Muroran City.

1. まえがき

道路網容量による道路網の感度分析は、道路網容量が一般にネットワーク特性およびフロー特性によって規定されることから、これらの特性が変化する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、この感度分析を行うためにまず道路網容量増強問題をLP問題として定式化するとともに、LP問題の相補性から最小カット（すべてのカットのうちでフロー水準が最小のカット）を含めてよりフロ

ー水準の大きいカットを逐次探索した。さらに、グラフ理論を応用して、これら探索されたカットから感度分析に必要なカット行列及びODカット行列の作成を試みた。そして、作成されたカット行列等を通して、計画道路網の交通処理能力の把握、道路網容量増強計画、自動車交通量の抑制策、公共輸送機関への転換策あるいは土地利用パターンの変更による道路網容量増強など既存道路網の交通処理能力を上回るような自動車交通需要の増大に対処する各種の対策手法を考察してきた。^{1), 2)}

しかしながら、LP問題を基礎にしたカットの探索は、LP問題の定式化にあたって事前に各OD交通の走行可能な経路を選定しているとはいえ、必ずしも各OD交通の経路選択挙動を十分に踏まえたものとはなっていない。また、実際規模の道路交通ネットワークへ適用するにあたっては演算上種々の困難が伴う。そこで、本研究では従来のLP問題を基礎にしたカットの探索手法で得られた成果を踏まえ

* 正会員 工博 苫小牧工業高等専門学校助教授

土木工学科 (〒059-12 苫小牧市錦岡443番地)

** 正会員 工修 NTTデータ通信(株)公共システム事業本部

(〒105 港区芝3丁目2-18 芝Aビル)

***正会員 工博 室蘭工業大学工学部教授

建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

て、各OD交通の経路選択挙動を考慮するとともに大規模な道路交通ネットワークにも適用可能なカット行列の作成手法について考察する。^{*)}

2章では、各OD交通の経路選択挙動を考慮できる配分シミュレーション法(分割等時間配分で行う方法)の手順を基に、道路網容量の算定手法について考察する。3章で、道路網容量を規定する最小カットの探索手法を、4章では最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索手法についてそれぞれ考察する。さらに、5章では室蘭市の道路網を対象とした適用計算例を通して、感度分析に必要なカット行列の作成手法について実証的検討を試みる。

2. 道路網容量の算定手法について

前述のように、本研究の目的とすることは道路網容量を規定する最小カット及び最小カットよりフロー水準の大きいカットを逐次探索して、感度分析に必要なカット行列を作成することである。そこで、ここでは既往の各種の配分シミュレーション法を基に道路網容量の算定について考える。配分シミュレーション法としては、OD構成比一定のもとで総トリップ数を漸次増加させながら各OD交通を分割等時間配分で行う方法^{(1),(5)}を用いる。また、配分シミュレーション法を基に道路網容量を規定する最小カットを探索する手法として、ひとつは配分の段階ごとにリンク交通量を調べ、容量に達したあるいは超過したリンクの集合がカットを構成するかを検討する方法がある。他のひとつは、総トリップ数を漸次増加させる段階で、容量に達したあるいは超過したリンクを順次除去してゆき、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方法である。本研究では、後者の方法を通して最小カットを探索するが、このとき需要(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た最小カットを求めるため、配分交通量がリンク容量を超えることなく容量に達した時点で当該リンクを除去する方法を考察した。したがって、ある配分段階で容量に達したリンクが出現したときには、当該リンクを通過するOD交通のなかには他の経路に再配分されるものもある。そうすると、道路網容量は探索されたカットのうち、フロー水準が最小と

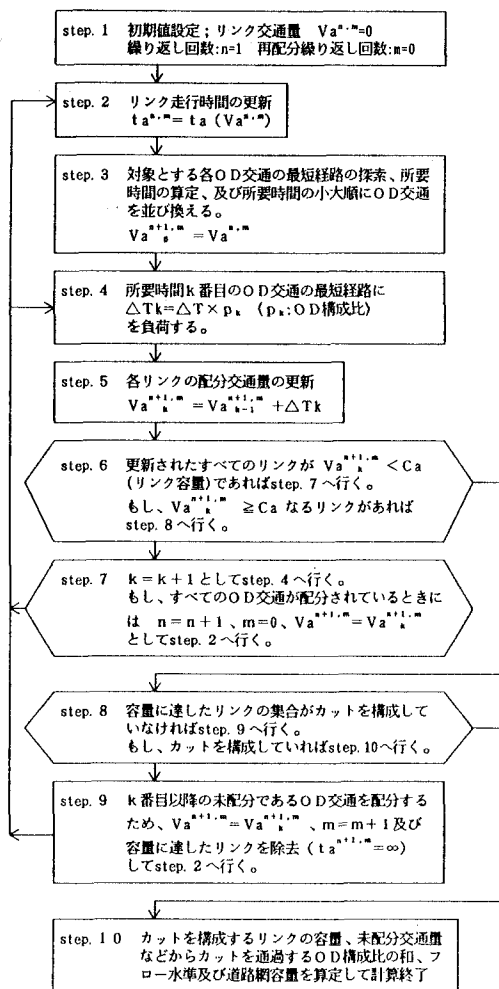


図-1 道路網容量の算定手順

なるカットのフロー水準として求められる。

道路網容量の算定手順は図-1に示すフローチャートのように以下となる。

step. 2は、リンク走行時間の計算であり、ここでは式(1)のBPR(Bureau of Public Roads)タイプの関数を用いることとする。

$$S_a(V_a) = t_{a0} \{1 + r (V_a / C_a)^k\} \quad (1)$$

ここで、

V_a : リンク交通量 C_a : リンク容量

t_{a0} : $V_a = 0$ のときの走行時間

r, k : パラメータ

step. 3は、step. 2で求められた各リンクの走行

時間を用いて各OD交通の最短経路を探索とともに、step. 4でOD交通量(ΔT_k)を各OD交通の所要時間順(小大順)に配分するため、各OD交通の配分順序をも決める。

step. 4, 5は、step. 3で求められた配分順序に従って各OD交通の最短経路にOD交通量(ΔT_k)を負荷して各リンクの配分交通量(ΔV_a)を求めるとともに、各リンクの配分交通量を更新する。step. 6, 7は、step. 5で更新された配分交通量が当該リンクの交通容量を超えているかどうかを検討する。もし、すべてのリンクがリンク容量以下のときには、step. 7へ行き、step. 4~6をすべてのOD交通が配分されるまで繰り返す。そして、すべてのOD交通配分終了の時にはstep. 2へ行き、次のトリップ数を配分する。

一方、配分交通量が容量に達したリンクがあるときにはstep. 8へ行く。

step. 8は、容量に達したリンクの集合(あるいは部分集合)がカットを構成するかどうかを検討するものであり、このカットの探索手法については3章で詳述する。

step. 9は、OD交通を順次配分する過程で容量に達したリンクが出現したとき、当該リンクを最短経路とする未配分のOD交通を他の経路に配分するプロセスである。このとき、未配分のOD交通だけを対象に再配分を行うため、容量に達したリンクを除去してstep. 2~8を行う。

step. 10は、step. 8で探索されたカットを対象に式(2)、(3)で通過するOD構成比の和 P_q 及びフロー水準 F_q を求めるとともに、そのうちフロー水準が最小となるカット(最小カット)をも求める。そうすると、式(4)に示すように最小カットのフロー水準が道路網容量となる。

$$P_q = \{ \text{カットの容量} + (\text{配分不可能な未配分OD交通量の和}) \} / (\text{配分された総トリップ数}) \quad (2)$$

$$F_q = (\text{カットの容量}) / P_q \quad (3)$$

$$NC = \min \{ F_q \} \quad (4)$$

以上、従来用いられている配分シミュレーション法(分割等時間配分で行う方法)の手順を基に、各リンクの配分交通量がリンク容量を超えることがな

いリンクからなるカット(最小カット)が探索できるとともに、道路網容量をも容易に算定することができる。

3. 道路網容量を規定する最小カットの探索手法

道路網容量を規定する最小カットの探索は、前述のように総トリップ数を漸次増加させる段階で容量に達したリンクを順次除去してゆき、除去されたリンクの集合あるいは部分集合がカットを構成するかどうかを検討しながら行う。最小カットを探索する手法、いわゆるネットワークの非連結性の検定法としては各OD交通間の最短経路探索を用いた方法³⁾、あるいは接続行列を用いた方法⁴⁾などがある。本研究においては後者の接続行列を用いた方法を基に、最小カットを構成するリンクをも容易に求められる方法について考察する。

いま、 n 個のノードと m 本のリンクからなる道路網の接続行列を E (行列 E は $(n \times m)$ 行列)とする。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、そうでないとき0を取る。そうすると、容量に達したリンクの集合(あるいは部分集合)がカットを構成するかどうかの探索手法は以下となる。

step. 1 対象道路網のリンクを容量に達したリンク(以下、容量リンクという)と容量以下のリンク(以下、以下リンクという)に分ける。

step. 2 行列 E の各行において、容量リンクに対応する列のみが1で、他の列(以下リンクに対応するリンク)がすべて0を取る行ベクトルが存在するかどうかを調べる。もし、存在すればstep. 4へ、存在しなければstep. 3へ行く。

step. 3 最上位(便宜上このようにする)にある行ベクトルにおいて、以下リンクの要素が1である列を探索し、次にこの列ベクトルにおいてその要素が1である行を求め、この行を最上位の行にmod 2で加えて接続行列を退化させる。そして、step. 2へ行く。

step. 4 当該行ベクトルは、容量リンクによって構成されるカットによって他のノードと切断されていることから、当該行ベクトルを行列 E から除去してstep. 2へ行く。もし、行列 E に行ベクトルがなくなったときにはstep. 5へ行く。

step. 5 step. 4 で除去された各行ベクトルを対象にノード集合及びカットを構成するリンクを求める。このとき、ノード集合は各行ベクトルが step. 2 で加えられてきた行ベクトルに対応するノードによって求められる。また、カットを構成するリンクは行ベクトルの要素（容量リンクに対応する列ベクトルの要素が1であるリンク）から求められる。

このような手順を通して、カットによって切断されるノードの集合のみならずカットを構成するリンクをも容易に求めることができる。また、この探索手法は最小カットも含めた他のカットが同時に発生する場合にも適用できる。そして、道路網容量を規定する最小カット及び道路網容量は2章の step. 10 の手順によって求められる。

4. 最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索手法

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、道路網容量を超えるような交通需要に対応する各OD交通量をどのように配分するか、あるいは最小カットも含め容量不足カットを構成する各リンクの容量増強をどのようにするかなどの問題がある。本研究においては、カットを探索して需要（各OD交通の需要交通量）と供給（既存道路網における各リンクの交通容量）とのバランスを分析することが目的であることから、次のような仮定を前提としてカットの探索を試みる。①道路網容量を超えるような交通需要に対する各OD交通の配分対象経路は、道路網容量に相当する交通需要を配分したときに得られた各OD交通の配分対象経路と同じで且つ配分率も同じとする。②すなわち、交通需要が道路網容量を超えたときの各リンクに配分される交通量の比率は、交通需要が道路網容量に達したときに得られた各リンクの配分率と同じとする。③したがって、道路網容量を超えるような交通需要のときには、最小カットも含めて容量不足となるリンクでは各リンクの配分率に相当する容量増強が行われるものとする。そうすると、最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索手順は以下となる。

step. 1 2章の step. 10の式(4)で得られた道

路網容量に相当する交通需要（総トリップ数）を分割配分法で配分する。

step. 2 各リンクの配分交通量から、式(5)、(6)で各リンクの配分交通量の比率 W_a 及び残余容量 $Ca^{(1)}$ を求める。また、繰返し回数を $i=1$ とする。

$$W_a = V_a^{(n+1)} / NC \quad (5)$$

$$Ca^{(1)} = Ca - V_a^{(n+1)} \quad (6)$$

step. 3 残余容量 $Ca^{(1)}$ が正值であるリンクに対して次式(7)で計算される $fa^{(1)}$ を求める。

$$fa^{(1)} = Ca^{(1)} / W_a \quad (7)$$

この $fa^{(1)}$ は、総トリップ数を $fa^{(1)}$ だけ増加させると、リンク a においては配分交通量と交通容量とが等しくなることを意味する。さらに、各リンクの $fa^{(1)}$ のうち式(8)にて最小値を取るリンクを求める。そして、この fi に相当するトリップ数を配分する。

$$fi = \min \{ fa^{(1)} \} \quad (8)$$

step. 4 step. 3で求められた fi が配分されたとき、各リンクには $fi \cdot W_a$ の交通量が配分されることから、式(9)にて各リンクの残余容量を更新する。このとき、式(8)で最小値を取るリンクの残余容量は0となる。

$$Ca^{(i+1)} = Ca^{(1)} - fi \cdot W_a \quad (9)$$

一方、容量に達しているリンクに対しては、式(10)で求められる容量 $Za^{(1)}$ が増強されるものとする。

$$Za^{(1)} = fi \cdot W_a \quad (10)$$

step. 5 step. 4で残余容量が0になったリンクとすでに容量に達しているリンクとの組み合わせで新たなカットが発生するかどうかについて、3.で述べたカットの探索手法を通して検討する。もし、カットが発生しなければ $i = i + 1$ として step. 3へ行く。カットが発生していれば step. 6へ行く。

step. 6 新たに発生したカットのフロー水準 Fq を求めるために、当該カットを構成するリンクを対象に式(11)の計算を行う。

$$Fq = \{NC + \sum_i f_i\} - \sum_i \sum_j Z a^{(1)} / \sum_j W a \quad (11)$$

step. 3から5 をすべてのリンクの残余容量が0になるまで、あるいは感度分析に必要なカットを考慮してあるフロー水準に達したとき計算を終了する。

以上のような手順を通して、最小カットよりフロー水準の大きいカットを容易に探索することができる。しかし、ここでは感度分析に必要なすべてのカットが探索できな。最小カットも含めここで探索されたカットを基に感度分析に必要なカット及びそれらのカットから作成されるカット行列は、行列演算によって容易に求められるが、詳細は文献(1)を

表-1 各総トリップ数における除去リンク

総トリップ数	除去リンク
120,000	ノード 98-99
130,000	ノード 5-8
140,000	ノード 17-20
150,000	ノード 70-44 ノード 122-123 ノード 91-94

表-2 各カットのフロー水準

カット	容量	OD構成比の和	フロー水準
1	29000	0.1958	148110
2	40000	0.2652	150830
3	29000	0.1910	151832
4	30000	0.1947	154083
5	29000	0.1726	168018
6	30000	0.1703	176160
7	36000	0.2006	179462

参照されたい。

5. 室蘭市の道路ネットワークへの適用結果

対象とする室蘭市の道路ネットワークは、昭和56～57年度総合都市交通体系調査報告書(室蘭圏)⁶⁾をもとに作成したものである。道路ネットワークは、図-2に示されているようにリンク数176本、ノード数123個(そのうちセントロイド数は44個で、図中の○印である)から構成されている。また、対象地域における配分対象交通量は173,670トリップ数である。各OD交通の構成比は、この配分対象交通量で除して求めた。さらに、各リンクの自由走行時間、交通容量等の設定は報告書をもとに作成するとともに、走行時間関数には式(1)に示すBPR関

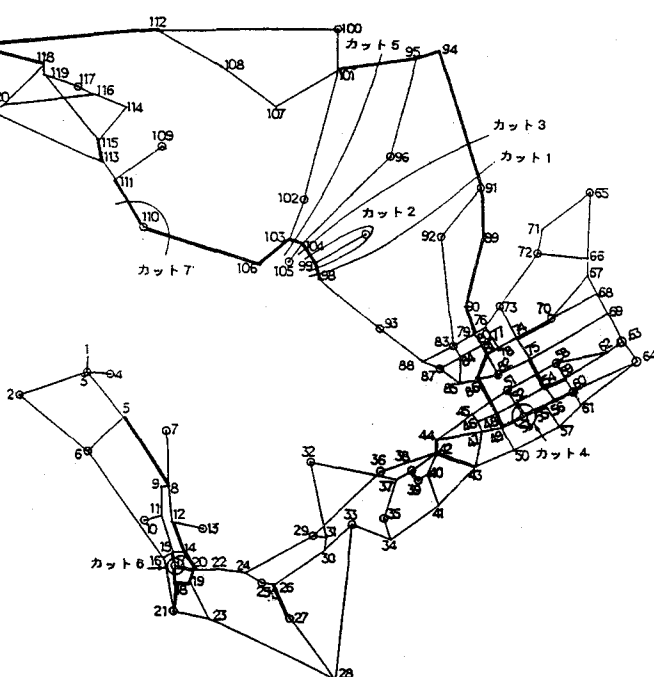


図-2 室蘭市の道路ネットワーク図及び探索されたカット

	15-17	17-18	17-20	49-53	52-53	53-55	91-94	95-101	98-99	99-104	103-104	106-110	110-111
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
6	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

図-3 作成されたカット行列

数タイプを用いた。このとき、関数のパラメータは $r=2.62$, $k=5$ とした。

図-1 に示すフローチャートに従って道路網容量の算定を行う。 $\Delta T=10,000$ トリップ数としてトリップ数を漸次増加させると、表-1 に示すように総トリップ数 120,000 台、130,000 台及び 140,000 台等でそれぞれノード 98-99, 5-8, 17-20 間のリンクの配分交通量が当該リンクの容量に達して除去された。さらに、150,000 台では未配分 O D 交通の発生にともなう再配分が 3 回繰り返されるとともに、ノード 70-44, 122-123, 91-94 間等のリンクが順次除去され、O D 2-123, 4-123 等 19 個の O D 交通が発生・集中不可能となった。

これら除去された 6 本のリンクを対象に、3. で考察した手順に従って道路網容量を規定するカットを探索したところ、図-2 に示すノード 91-94, 98-99 間のリンクから構成されるカット 1 のみが探索された。そして、このカット 1 (最小カット) のフロー水準は式 (12), (13) により求められ、道路網容量は 148,110 台となる。配分対象交通量が 173,670 台であることから、道路網の交通処理能力の面からも図-2 の道路ネットワークは必ずしも交通需要を十分に処理できない状況のようである。

$$P1 = (20,000 + 9,000 + 366) / 150,000 \\ = 0.1958 \quad (12)$$

$$NC = 29,000 / 0.1958 \\ = 148,110 \text{ 台} \quad (13)$$

なお、式 (12) における 20,000 及び 9,000 台はそれぞれゾーン 98-99, 91-94 間のリンクの交通容量であり、366 台はカット 1 の発生にともなって発生・集中不可能となった O D 交通量の和である。

次に、最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索を 4. で考察した手法を通して行う。まず、道路網容量 148,110 台を交通需要として分割配分法で交通量配分を行った。そして、配分結果から各リンクの配分交通量、配分率及び残余容量等を求めた。残余容量が正値を取るリンクを対象に、4. の step. 3 から 6 を順次繰り返して計算を行いカットを探索したところ、図-2 及び表-2 に示すカット 3~7 の 4 本のカットが探索された。さらに、カット 1 も含めこれら探索されたカットを基に感度分析に必要

なカットを求めたところカット 2 が得られるとともに、図-3 に示すカット行列を作成することができる。なお、ここでは 200,000 トリップ数以下のカットを示した。また、図-2 の太線のリンクは総トリップ数 200,000 台のときに容量超過となるリンクである。これら道路網容量の面から室蘭市のネットワークをみたとき、取り分け伊達方面からの交通需要に対処する道路網の改善の必要性が窺える。

6. あとがき

以上、本研究においては配分シミュレーション法を基に、各 O D 交通の経路選択挙動を考慮できるとともに大規模な道路交通ネットワークにも適用可能な道路網感度分析のためのカット行列の作成手法について考察した。今後は、4. で考察した最小カットよりフロー水準の大きいカットの探索にあたって設定した仮定についてさらに検討を行うとともに、アルゴリズムについても検討を試みる。また、カット行列の作成手法の成果をを踏まえて、フロー特性と道路網容量の関係を分析するために必要な O D - カット行列の作成手法についても考察を進めて行く。

参考文献

- 1) 榎谷・加来：道路網容量による道路網の感度分析について、土木学会論文報告集，第 343 号，1984
- 2) 榎谷・斉藤・加来：フロー特性と道路網容量の関係について、土木計画学研究・講演集，No. 10，1987
- 3) 榎谷・斉藤：道路網感度分析におけるカット行列の作成手法，土木計画学研究・講演集，No. 13，1990
- 4) 飯田恭敬：道路網の最大容量の評価法，土木学会論文報告集，第 205 号，1972
- 5) 柏谷・朝倉・和田：道路網の最大容量推定に関する実証的研究，土木計画学・講演集，No. 13，1990
- 6) 北海道室蘭圏広域都市計画協議会編：昭和 56~57 年度総合都市交通体系調査報告書（室蘭圏），1983