

一方通行システム導入による道路網容量増強について

INCREASING THE ROAD NETWORK CAPACITY BY INTRODUCING THE ONE-WAY STREET SYSTEM

梶谷 有三*

By Yuzo MASUYA

One-way streets are the important means which reduce the congestion and increase the capacity of an existing road network without having to construct entirely new streets or street system. In the planning for a one-way street operation, the basic question to be considered is what effect would the proposed new system have on the capacity of existing road network. In this paper, author tried to formulate this question as a 0-1 mixed integer programming problem under consideration of maximizing the road network capacity. An algorithm was developed based on the complementary theorem of linear programming problem. Calculations were carried out for a 10-node network model. The results showed that optimum solution is easily obtained by only solving fewer LP problem as compared with the branch and bound method which is generally used to work out the optimization problem.

1. ま え が き

自動車交通の増大に伴って生ずる種々の道路交通問題に対処する方法について、著者らは既存道路網の各リンクの容量増加あるいは新たなリンクの建設によって対処する道路網容量増強問題¹⁾、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道路網の感度分析²⁾などを通して考察してきた。本研究は、既存道路網の有効・適切な利用という観点から、交通管理的な手段の1つである一方通行システムを導入して道路網容量の増強を図る方法について考察する。一方通行システム導入に関する研究としては、Hershdorfer³⁾、佐佐木・近藤⁴⁾、松井ら⁵⁾などがあるが、これらの研究においてはいずれも道路網容量の増強という点についてまでは言及していない。道路網容量の観点からシステム導入について考察した研究としては、わずかに飯田らの研究⁶⁾がある。しかし、この研究はいくつかの代表的なシステム導入パターンを選定して、いずれのパターンが網容量の増強を期待することができるかどうかを考察している。一般に、 m 本のリンクからなる道路網においては 2^m 個のシステム導入パ

ターンが考えられるので、どのように数多くあるパターンから網容量の増強が期待できるパターンを探索するかという問題までは言及していない。そこで、本研究は道路網容量増強問題でも指摘したように、この種の問題は交通量配分問題ときわめて関連が深いこと、さらに一方通行の方向づけ問題が一種の組合せ最適化問題でもあることを考慮して、問題を0-1混合整数計画問題として定式化した。そして、問題の解法にあたっては一方通行システム導入に伴う問題の特質を考慮するとともに、問題が道路網容量の増強という点からLP問題の相補性定理を基礎に逐次LP問題を解く方法を考察した。

2. 一方通行システム導入と道路網容量

道路網容量は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が、本研究は一方通行システム導入によってネットワーク特性としてのリンク交通容量が増加することに着目したものである。したがって、このシステム導入による道路網容量の増強も容量増強問題と同様に、最小カットを含めたフロー水準の小さいカットを構成するリンクにシステム導入を行って網容量の増強を図るものである。しかし、このシステム導入の場合には迂回によって走行距離が増大するOD交通の出現、いわゆる迂回交通量の増大によって網容量の増強が期待

* 正会員 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)

できない場合もあることが指摘されている⁶⁾。すなわち、迂回交通の出現のためカットによっては通過する OD 構成比の和が増加して、システム導入による容量増加だけではカットを通過する交通量を処理できなくなってカットのフロー水準の低下を招き、ひいては道路網容量の低下を招くこともある。本研究はこのような迂回交通によって網容量の低下を招く場合もあることを踏まえるため、逐次システム導入する過程において発生する最小カットおよび最小カットを通過する迂回交通をも含めた OD 交通を LP 問題の相補性定理により求めた。そして、システム導入に伴う網容量の増強の可能性を探りながらシステム導入パターンを探索する方法を考察した。

3. 一方通行システム導入問題の定式化

いま、 m 本のリンク ($2m$ 本のアーク) からなる道路網 (有向グラフ) 上に q 個の OD 交通が存在するものとし、 k 番目の OD 構成比を p_k とする。このとき、各 OD 交通の配分交通量の変数としてはルート交通量を用いる。そして、 k 番目の OD 交通の走行可能なルートの本数を n_k 、そのうちあるルート r に配分される交通量を Y_r^k とする。さらに、道路網で処理可能な交通量 (道路網容量) を F とする。制約条件としては式 (1) の OD 交通に関する連続条件、式 (2)、(3) の各アークの交通容量制限に関する条件、式 (4) の各 0-1 整数変数の条件、さらに式 (5)~(8) の各変数の条件などがある。

$$\sum_{r=1}^{n_k} Y_r^k = p_k \cdot F \quad (k=1, 2, \dots, q) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{n_k} \delta_i^k \cdot Y_r^k \leq C_i \cdot x_i + C'_i \cdot y_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{n_k} \delta_{m+i}^k \cdot Y_r^k \leq C_{m+i} \cdot x_i + C'_{m+i} \cdot y_{m+i} \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (3)$$

$$x_i + y_i + y_{m+i} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (4)$$

$$Y_r^k \geq 0 \quad \left(\begin{array}{l} k=1, 2, \dots, q \\ r=1, 2, \dots, n_k \end{array} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$x_i = 0, 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (6)$$

$$y_i = 0, 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (7)$$

$$y_{m+i} = 0, 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$\delta_i^k, \delta_{m+i}^k$: k 番目の OD 交通の r 番目のルート交通量がアーク $i, m+i$ を通過するとき 1, そうでないとき 0 をとる定数

C_i, C_{m+i} : アーク $i, m+i$ の交通容量

C'_i, C'_{m+i} : リンク i を i 方向あるいは $m+i$ 方向の一方通行としたときの交通容量

x_i : リンク i を相互通行のままにしておくかどうかを表わす 0-1 整数変数

y_i, y_{m+i} : リンク i を i 方向か $m+i$ 方向いずれかに一方通行を導入するかどうかを表わす 0-1 整数変数

この問題の定式化の場合、対象とするネットワークが有向グラフなので、それぞれのリンク i を方向別にアーク i と逆方向のアーク $m+i$ に分ける。したがって、取り扱う 0-1 整数変数も $3m$ 個となる。なお、式 (4) はリンク i を既存の相互通行のままにしておくのか、あるいは一方通行を導入するとすれば i 方向、 $m+i$ 方向いずれなのかの三者択一の条件を設定している。目的関数としては、式 (9) の道路網容量 F の最大化とする。そうすると、連続変数であるルート交通量と 0-1 整数変数 x_i, y_i, y_{m+i} からなる 0-1 混合整数計画問題として定式化することができる。

$$F \rightarrow \text{最大化} \dots\dots\dots (9)$$

4. 問題の解法

0-1 混合整数計画問題の解法としては、分岐限定法を始めとする多くのアルゴリズムが開発されているが、LP 問題のシンプレックス法のように「一般的な問題を一般的に解く」強力なアルゴリズムはなく、問題に応じたアルゴリズムの開発が望まれている。一方通行システムの導入にあたっては次の点について配慮しなければならない。(1) システムの導入は偶数本であり、反対向きになる路線の車線数は互いに等しいというペアの原則を踏まえること。(2) 互いに逆方向の交通を流す一対の道路は、混雑地域を乗り越えて交通が分散するところまで連続していること。すなわち、混雑地域の交差点においては出入次数 (出入するアークの本数) を等しくすること、などである。また、この問題の場合にはペアの原則を考えると対称的なパターンも考えられるため、分岐限定法を用いてすべての導入パターンを探索することは多大の計算時間を必要とすると思われる。そこで、これらシステム導入に伴う問題の特質を考慮し、さらに LP 問題の相補性定理を応用すると、容量増強が可能なシステム導入パターンの探索手順は次のとおりである。

(1) 変数 x_i をすべて 1 と固定した LP 問題を解いて、既存道路網容量 F_0 と最小カットを構成するアークを通過する OD 交通をそれぞれ相補性定理によって式 (2), (3), (1) の双対変数から求める。

(2) 最小カットを構成するアークを対象に、ペアの原則、各ノードの出入次数などを考慮したシステム導入を考える。最小カットを構成するアークの本数によってはいくつかの導入パターンが考えられるが、対称的なパターンを除くすべての導入可能なパターンを考える。

(3) (2) で考えたすべての導入パターンに対して、システム導入に伴う最小カットのフロー水準を式 (10), (11) で求める。このとき、対象とする道路網は有向グラフなので、発生した最小カットの方向をも考慮する。

$$P_i = \sum_{k \in P_i} P_k \dots \dots \dots (10)$$

$$F_i = \left\{ \sum_{i, m+1 \in R_i} (C_i + C_{m+1}) + \sum_{i, m+1 \in R_i} (C'_i + C'_{m+1}) \right\} / P_i \dots \dots \dots (11)$$

ここで、

P_i, P_i : 最小カットにおいて、新たに通過する OD 交通 (迂回交通) も含めて最小カットと同じ方向を通過する OD 構成比の和, OD 交通の集合

R_i, R_i : 最小カットと同じ方向を有するアークのうち一方通行としたアークを除くアークの集合, および一方通行としたアークの集合

(4) 式 (11) の F_i が F_c を超えない導入パターンに対しては、これ以上システム導入を図っても迂回交通によって網容量の増強が期待できないので計算を打ち切る。すべての導入パターンが F_c を超えないときには、網容量の増強の可能性がないので計算を終了する。

(5) (2) で考えた導入パターンのうちフロー水準が F_c を超えるパターンに対して、一方通行としたアークの変数 y_i あるいは y_{m+1} を 1 と固定して LP 問題を解く、そして、システム導入したときの道路網容量および最小カットを構成するアークおよび迂回交通も含めた最小カットを通過する OD 交通を求めて (2) へ行く。

(6) (2)~(4) を繰り返す過程において逐次発生する最小カットにシステム導入を図ることによって容量増強可能な導入パターンを探索することができる。そして、(2) において最小カットにさらにシステム導入を図ることができないとき既存道路網容量 F_c を超える導入パターンが求められて計算を終了する。

5. 計算例

簡単な適用例を通して、一方通行システム導入による道路網容量の増加について考える。Fig. 1 の 15 本のリンク (30 本のアーク) からなる既存道路網 (図中のアーク上の数字はアーク番号), Table 1 の OD 構成比 (右上半分) およびアーク距離 (左下半分) を与えて行う。なお、計算は四角 OD 表について行うが、対称性を仮定して右上半分だけを示している。各 OD 交通の走行可能な経路は、一方通行システムを導入することも考えて、Table 1 のアーク距離を参考にして求めた最短・次最短経路を中心に 3~6 本選定した。各アークの交通容量は 1800 台とし、一方通行としたときには交通容量を 2 割増の 4320 台とする。まず、変数 x_i をすべて 1 と固定して LP 問題を解くと、Fig. 1 のアーク 1, 4, 27

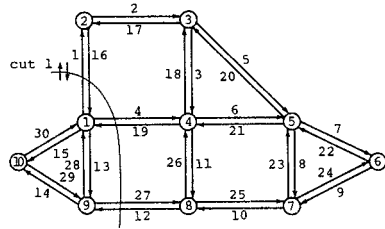


Fig. 1 Existing road network and cut 1.

Table 1 OD traffic pattern ($\times 10^{-4}$) and arc distance (m).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		475	385	475	420	520	280	70	85	25
2	500		190	110	60	65	30	0	120	5
3	∞	300		250	80	75	25	25	0	15
4	300	∞	500		145	110	35	20	100	5
5	∞	∞	600	300		340	65	15	0	0
6	∞	∞	∞	∞	300		160	15	20	10
7	∞	∞	∞	∞	400	300		65	25	5
8	∞	∞	∞	400	∞	∞	300		55	5
9	400	∞	∞	∞	∞	∞	∞	300		20
10	300	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	300	

からなる最小カット (カット 1) が発生して既存道路網の容量 F_c は 18060 台となった。このとき、カット 1 を通過する OD 構成比の和は 0.2990 である。カット 1 を構成するアークが 3 本なので、システム導入の第 1 段階としては Fig. 2 に示される (a), (b), (c) の 3 つの導入パターンがペアの原則などを踏まえると考えられる。そして、システム導入に伴ってカット 1 のフロー水準は式 (12) の値 F_1 に増加する。

$$F_1 = (1800 + 4320) / 0.2990 = 20468 \text{ 台} > F_c \dots \dots (12)$$

この値はシステム導入に伴う容量増強可能な上限値でもある。次に、Fig. 2 の (a)~(c) のそれぞれのパターンに対して、システム導入を図る。まず、パターン 1 の場合、変数 y_1, y_4 を 1 と固定して LP 問題を解くと Fig. 2 (a)

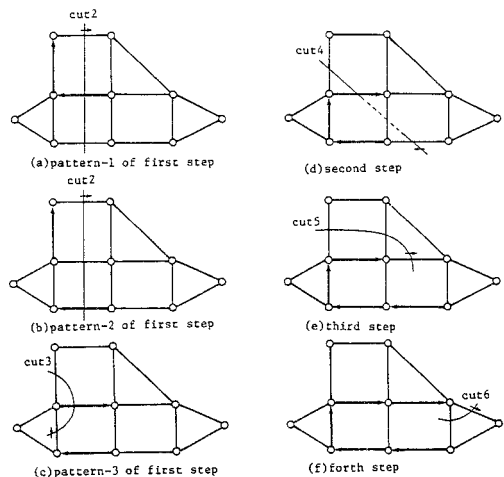


Fig. 2 One-way street system pattern and minimum cut in each calculation step.

のカット2が最小カットとして発生して道路網容量はOD交通2-1, 2-9, 2-10などの迂回交通の出現によって10449台にしかならない。したがって、このパターンはたとえアーク2にシステム導入を図っても迂回交通によって式(13)のフロー水準値 F_2 までしか増加しないため、システム導入に伴う網容量の増強はできないので計算を打ち切る。

$$F_2 = (1800 + 4320) / 0.2845 + 0.0475 \\ + 0.0120 + 0.005 = 17764 \text{ 台} < F_c \dots \dots (13)$$

このことは、同じカット2が発生するFig.2(b)のパターン2の場合と同様である。次に、Fig.2(c)のパターン3の場合について考える。このパターンの場合、カット3が発生して道路網容量は15126台となり、ノード1の出入次数などを考慮してアーク28の方向を一方通行としたときには式(14)の値にフロー水準は増加する。

$$F_3 = (1800 + 4320) / 0.2380 = 25714 \text{ 台} > F_c \dots \dots (14)$$

このとき、カット3を通過する迂回交通はない。そうすると、3つの導入パターンのうちパターン3だけが容量増強が可能なので、システム導入の第2段階としてFig.2(d)のパターンを得る。

第3段階として変数 y_4, y_{12}, y_{28} を1と固定してLP問題を解くと、道路網容量は17224台となりFig.2(d)のカット4が発生する。このカットはノード1に向かうOD交通によって発生したものであり、他のカットにおいてもカット4のようにノードを排他的な2つの集合に分割していないが、これらはシステム導入に伴う各OD交通の走行便益を考慮しているためである²⁾。しかし、このようなカットおよび当該カットを通過するOD交通も双対変数から容易に求めることができる。そして、すでに導入されているシステムを考えるとアーク10方向のシステム導入が考えられ、カット4のフロー水準は29282台(6120/0.2090)となる。このように、逐次探索された最小カットにシステム導入を行ってLP問題を解いてゆくと、第4, 5段階においてFig.2(e), (f)のカット5, 6が発生する。そして、それぞれのカットにシステム導入を行うとフロー水準は25967台, 21708台となりいずれも F_c を超えるので網容量の増強が可能である。カット6にはノードの出入次数を考慮すると、アーク7, 8いずれかの一方通行が考えられるので、第5段階としてFig.3, 4の2つの導入パターンが求められる。そして、いずれのパターンもFig.1のカット1が発生し、またこれ以上のシステム導入も望めないため、この2つの導入パターンが求める道路網容量の増強が可能な一方通行システムとなる。そして、システム導入に伴って道路網容量は20468台となる。なお、Fig.3, 4の配分交通量は総走行台距離最小化の結果であり、それぞれの総走行台距離は15431, 15742台・kmである。

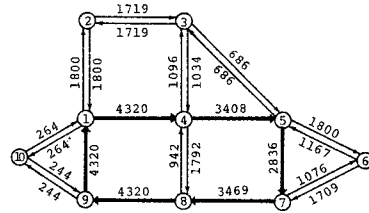


Fig. 3 One-way street system (case of six one-way street).

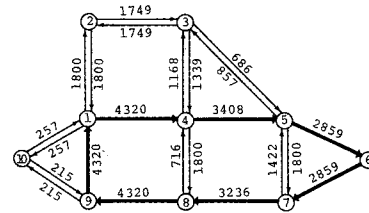


Fig. 4 One-way street system (case of seven one-way street).

ここでは当然Fig.3, 4とは逆方向の導入パターンも考えられる。この計算例においては8回のLP問題を解くことによって求めることができたが、分岐限定法を用いたときには114個の非整数最適解ノードを生成してFig.4と同じパターンしか得られなかった。

6. あとがき

一方通行システム導入に伴う問題の特質を考慮するとともに、LP問題の相補性定理を応用すると分岐限定法に比べて数少ないLP問題の回数で道路網容量の増強が可能な導入パターンを求めることができた。しかし、大規模ネットワークを対象としたときには、探索手順のうち特に手順(2)の第1段階において数多くの導入パターンが考えられるので、この点も含めて大規模ネットワークへの適用について今後検討を進めてゆく。

参考文献

- 1) 梶谷・加来：道路網容量増強問題に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第323号，pp.141~148，1982。
- 2) 梶谷・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，pp.167~176，1984。
- 3) Hershendorfer, A. M. : Optimal Routing of Urban Traffic, M. I. T., 1965.
- 4) 佐佐木綱・近藤勝直：幹線街路網の一方通行づけについて，第10回道路会議論文集，pp.641~642，1971。
- 5) 松井甲子雄ほか：道路の一方通行化に関するネットワーク的考察，交通工学，Vol.15, No.3, pp.13~22，1980。
- 6) 飯田恭敬・峰村博行：道路網容量からみた一方通行システム，土木学会第29回年講概要集，第4部，1974。

(1984.5.4・受付)