大規模都市高速道路網の流入制御方法の開発

京都大学大学院　学生員○金　周顯
京都大学工学部　正　員　内田　敬
京都大学工学部　正　員　飯田恭敬

１．はじめに

都市高速道路網が大規模かつ複雑になるとドライバーは都市高速道路上でも経路を選択することが可能になるため、流入制御による渋滞対策においてもドライバーの経路選択行動を考慮することが必要になる。本研究では、流入制御手法として従来用いられているＬＰ制御を拡張したＢＰ制御方式を提案するとともに、現実の大規模都市高速道路網にＢＰ制御を適用することを可能にするような実用的解法を開発する。

２．ＢＰ制御モデルの定式化

前提条件は以下のようにまとめることができる。

①ＯＤペア間に、利用者にとって選択可能な経路(パス)が複数存在する。

②各リンク交通量はその容量を越えないし、各流入ランプの許容流入量は流入需要量以下である。

③リンク所要時間は、リンク交通量の単調増加関数である。

④ネットワークフローは利用者均衡状態にある。

ＢＰ制御はドライバーの経路選択を内生化するために、利用者均衡の考え方を用いて、従来からのＬＰ制御問題を拡張したものである。利用者均衡問題は、ある最適化問題の解として与えられるから、ＢＰ制御問題は最適化問題を制約条件の中に持つ２レベル最適化問題(Bilevel Programming)となる。

ＢＰ制御モデルは、次のように定式化できる。この問題の目的関数としては、総走行距離最大化を用いた。制御変数は許容流入台数Ｕ(＝｛U_i｝)である。

［上位問題］

$$\max \sum_{i\in I} U_i \overline{d}_i \qquad (1)$$

$$s.t.\ \sum_{i\in I} Q^*_{ia} U_i \qquad a\in A \quad (2)$$

$$0 \leqq U_i \leqq U^d_i \qquad i\in I \quad (3)$$

［下位問題］

$$\min \sum_{a\in A} \int_0^{X_a} t_a(x)\,dx \qquad (4)$$

$$s.t.\ \sum_{k\in k_{ij}} h_{kij} = U_i P_{ij} \qquad i\in I,\ j\in J \quad (5)$$

$$X_a = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K_{ij}} \delta_{akij} h_{kij} \qquad a\in A \quad (6)$$

$$h_{kij} \geqq 0 \qquad k\in k_{ij},\ i\in I,\ j\in J \quad (7)$$

U_i :許容流入台数（制御変数），$\overline{d}_i$:平均利用距離
Q^*_{ia} :影響係数，C_a :リンク容量
U^d_i :流入需要量，$t_a(x)$:走行時間関数
h_{kij} :パスフロー，P_{ij} :目的地選択確率
X_a :リンクフロー，δ_{akij} :経路行列
A :リンクの集合，I，J :流入，流出ランプの集合

利用者の経路選択を表現している影響係数Q^*_{ia}が、下位問題を解くことによって内生的に決定される。

３．数値計算法

ＢＰ制御問題は、制約条件式が非線形でかつ陽には与えられない。そこで、この問題の実用的解法として、本研究ではコンプレックス法を応用した。コンプレックス法は目的関数の勾配を利用しない探索法で、制約領域内を単体(シンプレックス)と呼ばれる幾何学的図形を用いて試行探索し、最適解へ収束させる方法である[1]。試行点を更新するごとに下位問題を解く必要があるから、コンプレックス法による解法の実用性は、下位問題の解法にも大きく依存する。そこで、下位問題である利用者均衡フローを求める際には、Frank-Wolfe法、ＩＡ法、勾配射影法の３通りの近似解法を用いて比較する。

４．数値計算例

本研究では、仮想の簡単なネットワーク(道路網Ａ・図１)と放射環状型の都市高速道路を想定したテストネットワーク(道路網Ｂ・図２)を対象として数値計算を行う。ここでの目的は、ネットワーク規模による解法の適性の違いについて考察することによって、さらに大きなネットワークへ適用する場合の解法の適用の方向性についての知見を得ることにある。

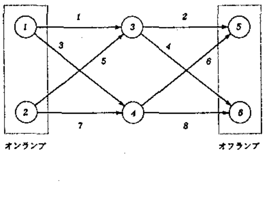

図１ 道路網Ａ

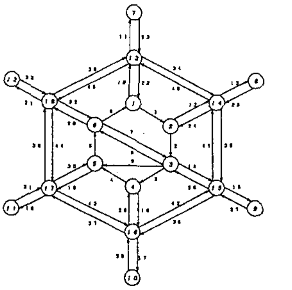

図２ 道路網Ｂ

Ju-Hyun KIM, Takashi UCHIDA, Yasunori IIDA

3．に示したようにここで提案する解法では繰り返し計算によって最適解へ収束させるため、収束条件の設定によって収束解や計算時間に差異が生じると考えられる。収束条件は次のように設定した。上位問題の解法であるコンプレックス法の収束基準においては目的関数値の変動係数によって2通り、下位問題においては、FW法ではリンク交通量の変動率によって4通り、また勾配射影法ではODペア間の平均所要時間とその経路の所要時間の差によって4通り、IA法については分割数によって3通りの収束基準を設定した。表1は、計算ケースの記号と計算条件の対応関係を示している。

図3は、解と計算時間の関係をまとめている。下位問題の解法と対応させると以下のことが言える。

①収束判定基準を変化させてもFW法を用いた解はあまり差がないが、計算時間の差が大きい。

②IA法で得られる解には若干のばらつきが見られるが、計算時間の差はFW法に比べて小さい。

③勾配射影法はほかの2つの解法を用いた場合よりは解が小さいが勾配射影法の収束基準の変化による解および計算時間の差はみられない。コンプレックス法の収束基準のみによって解および計算時間が異なる。

図4は、ネットワーク規模の拡大が計算時間の増加に及ぼす影響の程度を示している。ここでは、下位問題に用いる解法ごとに、道路網Aに適用したときの計算時間と道路網Bに用いたときの計算時間の比を縦軸にとっている。ネットワーク規模が大きくなった場合、計算時間の増加はFW法が468～1534倍増加で、いちばん著しい増加をみせている。IA法は385～816倍に増加している。勾配射影法は38～62倍の増加であって増加の程度が低い。

図5は、ネットワーク規模と解の安定性の関係を示している。図中の縦軸には、収束基準がいちばん厳しいときの値を1として基準化した解の値を示している。ネットワークの規模が大きくなった場合でも、FW法は安定している。IA法は規模が大きくなるほど精度が高くなる。勾配射影法は大規模ネットワークに対しては2つに分かれて分布しているが、これはコンプレックス法の収束基準によるもので、勾配射影法の収束基準には影響されないため、解は非常に安定していると言える。

以上のことから、さらに大きい現実の大規模ネットワークに対して計算する場合には、①計算精度が下位問題の収束判定基準によらず安定していることと、②ネットワーク規模が拡大しても計算時間の増加の程度が低いことから、勾配射影法が実用的で有効であると考えられる。

5．おわりに

本研究では、大規模都市高速道路網に対応できる流入制御方法を開発するため、BP制御を提案し、ネットワーク規模による下位問題の解法の適用性について検討した。今後の課題としては、本研究では1日の平均的な静的な流入制御であるが、交通需要量は時々刻々と変動するため、動的流入制御方法の検討が必要である。

表1 計算の条件の組み合わせ

		Frank&Wolfe法 収束基準(○)				IA法分割数 (□)			勾配射影法 収束基準(△)			
		0.5%	1.0%	3.0%	5.0%	50	30	10	0.5%	1.0%	3.0%	5.0%
コンプレックス法 収束基準	0.5%	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
	1.0%	5	6	7	8	4	5	6	5	6	7	8

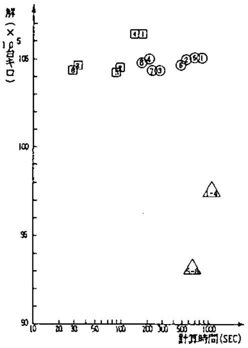

図3 解と計算時間

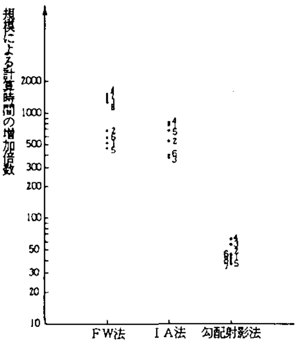

図4 ネットワークの拡大が計算時間に及ぼす影響

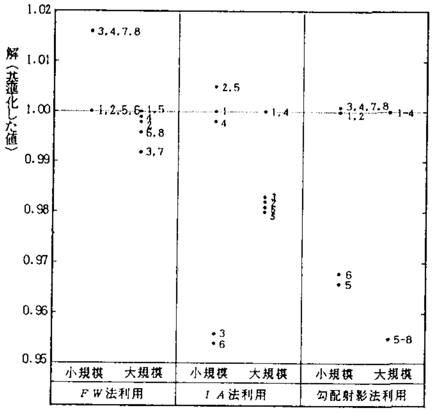

図5 ネットワーク規模が解の安定性に及ぼす影響

【参考文献】

1）飯田恭敬・朝倉康夫・田中啓之：複数経路を持つ都市高速道路の最適流入制御方法，土木計画学研究・講演集，No. 12，pp. 305-312，1989.