

都市高速道路における料金調整による 流入制御モデルに関する基礎的研究

宇野 伸宏¹・野見山 祥吾²・嶋本 寛³

¹正会員 京都大学大学院経営管理研究部 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)
E-mail: uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²学生員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)
E-mail:nomiyama@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター)
E-mail:shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では、都市高速道路の料金調整による流入制御の有効性の検証を目的とする。料金調整による流入制御は、全ドライバーに対して高速道路の利用可能性を保障した上で制御可能との利点がある一方、交通状況に応じて設定される課金・割引額に対する利用者の反応により、制御効果が異なるとの課題もある。本研究では当該流入制御の可能性を模索する第1段階として、課金・割引額を操作変数とした動的流入制御モデルを提案した。先行研究にて構築した料金調整を考慮した経路選択モデルを流入制御モデルに組み込み、GAを用いたアルゴリズムによりその近似解を求めた。仮想ネットワークに対する数値計算では、流入需要の増加及びリンク速度の低下に応じて制御強度が高まるという流入制御モデルの基本特性は確認でき、交通集中渋滞の予防効果は確認された。

Key Words : *Traffic control, Toll adjustment, Inflow control model, Genetic Algorithm*

1. はじめに

都市高速道路は、首都圏、京阪神都市圏などの大都市圏において、緊要な道路交通を効率的かつ安全に通行させることを企図した自動車専用道路であり、都市内道路交通ネットワークの基幹として、重要な役割を担っている。都市高速道路上での渋滞は、単に当該道路施設の処理能力の低下に留まらず、都市内道路ネットワーク全体としての機能の低下につながる可能性が高く、その結果、渋滞、事故の発生をはじめとして、環境負荷の増大などの道路交通の負のインパクトを増大させる可能性も高まる。このため、管制システムによる交通のコントロールに期待されることも少なくなく、これまでリアルタイム情報の提供と入路閉鎖ブース制限方式による流入制御を中心とした制御が実施されてきた。学術面に着目すると、都市高速道路を最大限効率的に利用することを目的としつつ、渋滞を予防するために必要な流入制御量を決定する数理計画問題として、佐佐木、明神¹⁾によるLP制御の研究に端を発し、その後、対象ネットワークの拡大や動的データの利用可能性を考慮しつつ、各種の制御モデルが提案されてきた(例えば、2)、3)など)。しか

しながら、現状ではETCによる通行料金支払いが主となってきており、従来型の入路閉鎖ブース制限方式による制御では、そのときの混雑状況に適した制御の実施が難しくなってきている

一方、ETCの普及によって、技術的には柔軟な料金設定・徴集が可能となる。交通状態に応じて通常の通行料金にさらなる課金や割引の“料金調整”を行うことで、ドライバーの行動変化を期待した、流入制御の可能性も考えられる。料金調整による流入制御には、全ドライバーに対して高速道路の利用可能性を残した上で、渋滞の予防・緩和に資する制御が可能という利点がある。その一方で、制御効果が、設定金額に対する利用者の反応に左右されるという課題もある。そこで本研究では、料金調整による流入制御の可能性を模索する第一段階として、オンランプでの課金・割引額を操作変数とした動的流入制御モデルを提案する。なお、料金調整に対する利用者の反応については、進藤らのテーラーメイド型SP調査による経路選択分析の結果を利用することとする⁴⁾。

2. モデルの概要

(1) 料金調整による流入制御の基本的な考え方

本研究では、”料金調整”として、図-1に示すように、2通りの方法を想定する。一つは、主として混雑区間の上流側入口から本線に流入しようとする車両に対して、通行料金に加えて一定額の課金を適用することで、迂回を促す方法である。もう一つは、同じく混雑区間上流側入口からの都市高速道路利用を予定していた車両が、当該区間を迂回して入口変更を行った場合に一定額の割引を実施することで、渋滞流中への車両の流入を抑制する方法である。割引に関しては、都市高速道路本線の混雑緩和に対するある種のインセンティブと解釈できる。

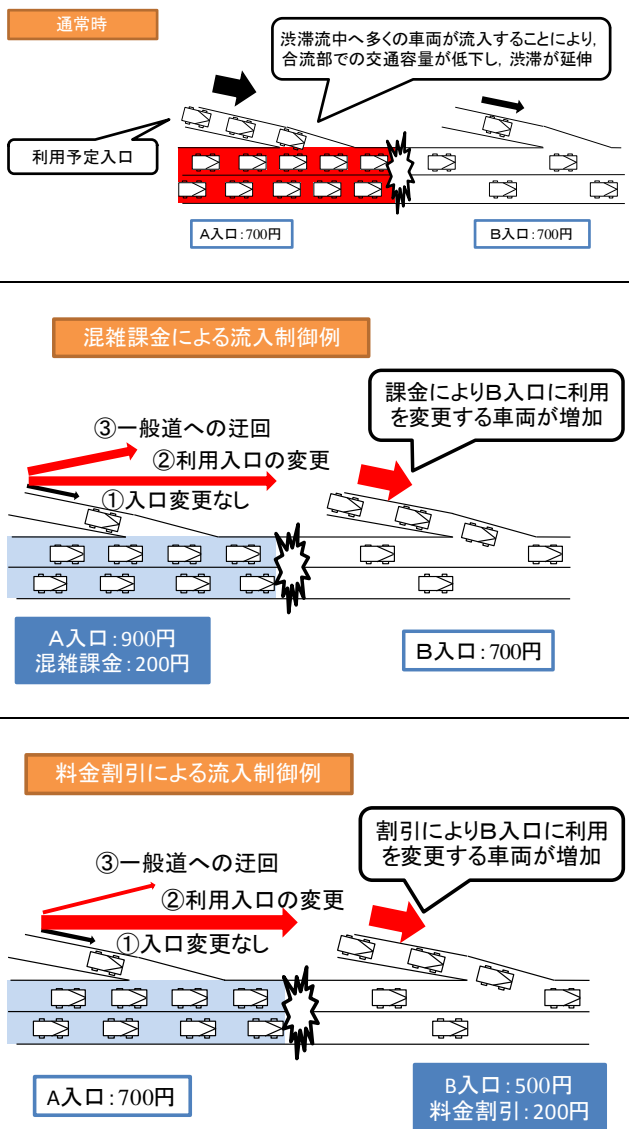


図-1 料金調整による流入制御

(2) 定式化

本研究では、動的LP制御モデルに関する先行研究³⁾等を踏まえて、5分間を制御の単位時間とし、単位時間内での交通状態・流入需要の定常性を仮定し、渋滞の予防を可能にする各時間帯での料金調整額を決定する流入制御モデルを提案する。この流入制御モデルの目的関数として、トリップ長の長い交通を相対的に優先して流入させる傾向をもつ、総走行距離の最大化を適用する。なお、流入制御率ならびに料金調整額の時間帯間での大きな変化を抑える意味もあり、複数制御時間帯に関して目的関数を一括で最適化するように定式化しつつ、実際には直近の時間帯の解のみを採用する様に仮定している(式(1))。また、制約条件として、流入交通量の上・下限に関する条件(式(2))と、リンク走行速度に関する条件(式(3))を設ける。なお、制御交通量 U_i^s は、後述の通り設定される課金・割引額により決定されると仮定している。各変数については表-1に示す。

$$\max \sum_{s=t_s}^{t_L} \sum_{i \in I} \bar{d}_i^s U_i^s \quad (\text{for all } s) \quad (1)$$

s.t.

$$UL_i^s \leq U_i^s \leq U_i^{\max} \quad (t_s \leq s \leq t_L) \quad (2)$$

$$v_a^{s+1} = \alpha - \beta \left\{ K_a^s + \frac{(Y_a^s - X_a^s)}{L_a} \right\} \quad \left(\text{for } \forall a, \right. \\ \left. t_s \leq s \leq t_L \right) \quad (3)$$

$$\geq v_a^{\min}$$

表-1 流入制御モデルの変数

s	タイムステップを表す添え字
i	オンランプ番号を表す添え字
I	オンランプ i の集合
t_s	制御対象のタイムステップ
t_L	一括最適化の最終タイムステップ
\bar{d}_i^s	流入交通1台あたりの平均トリップ長
U_i^s	流入交通量(制御交通量)
UL_i^s	流入可能交通量の最低保証値
U_i^{\max}	オンランプ i の最大処理能力(台/5min)
v_a^s	リンク a の走行速度
v_a^{\min}	リンク a の許容速度(臨界速度)
K_a^s	リンク a の交通密度
X_a^s	リンク a からの流出交通量(U_i^s の関数)
Y_a^s	リンク a への流入交通量(U_i^s の関数)
L_a	リンク a の長さ(km)
α, β	定数パラメータ

都市高速道路の入り口近傍での料金調整額に対する利用者の反応を、進藤ら⁴⁾が構築した料金調整を考慮した経路選択モデルを用いて表現すると、流入制御モデル中の U_i^s 、迂回交通量 Z_i^s 、一般道路利用量 A_i^s 、およびその効用関数は次の通りに表される。経路選択モデルの各変数については表-2に、設定パラメータについては表-3に示す。なお、本研究の流入制御モデルは渋滞予防を前提としているので、式中の表示渋滞長 l_i^s は常に0kmに設定し

ている。また、進藤らが構築した経路選択モデルには個人属性に関する変数が含まれている。料金負担・勤務先ダミー p とは高速道路の利用料金の負担先が勤務先ならば「1」、アンケート回答者・同乗者ならば「0」となる変数であり、時間制約ダミー tl とは時間制約があるトリップならば「1」、時間制約がないトリップならば「0」となる変数である。本研究ではこれらの変数を、進藤らが行ったアンケートデータの回答比率により定数化した上で流入制御モデルに組み込んでいる。

$$\begin{aligned} U_i^s &= P_{Ei}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)UD_i^s + z_{(i)}^{(s)} \\ Z_i^s &= P_{Di}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)UD_i^s \\ A_i^s &= P_{Ai}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)UD_i^s \end{aligned} \quad (for \forall i \in I)$$

$$\begin{aligned} P_{Ei}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s) &= e^{V_{Ei}^s} / (e^{V_{Ei}^s} + e^{V_{Di}^s} + e^{V_{Ai}^s}) \\ P_{Di}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s) &= e^{V_{Di}^s} / (e^{V_{Ei}^s} + e^{V_{Di}^s} + e^{V_{Ai}^s}) \\ P_{Ai}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s) &= e^{V_{Ai}^s} / (e^{V_{Ei}^s} + e^{V_{Di}^s} + e^{V_{Ai}^s}) \end{aligned}$$

$$V_{Ei}^s = b_1 cf_i^s + b_2 df_i^s + b_3 p$$

$$V_{Di}^s = b_4 tl + a_1$$

$$V_{Ai}^s = b_5 lj_i^s + b_6 \overline{od}_i$$

表-2 経路選択モデルの変数

Z_i^s	UD_i^s のうち、入口を変更しての高速道路利用に切り替える量
$z_{(i)}^{(s)}$	タイムステップ s にオンランプ i に迂回してくる交通量
A_i^s	UD_i^s のうち、一般道路の利用に切り替える量
UD_i^s	予測流入需要量
$P_{Ei}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)$	高速道路利用選択率
$P_{Di}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)$	迂回経路選択率
$P_{Ai}^s(cf_i^s, df_i^s, lj_i^s)$	一般道路選択率
cf_i^s	課金額
df_i^s	割引額
$lj_i^s (= 0)$	表示渋滞長(km)
$p (= 0.516667)$	料金負担・勤務先ダミー
$tl (= 0.316667)$	時間制約ダミー
\overline{od}_i	トリップのOD間距離(km)
$a_1, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$	パラメータ

表-3 設定パラメータ

説明変数	パラメータ
課金情報(b_1)	-0.005
割引情報(b_2)	-0.002
料金負担・勤務先ダミー(b_3)	0.825
時間制約ダミー(b_4)	0.590
定数項(a_1)	-0.335
渋滞情報(b_5)	0.258
OD間距離(b_6)	-0.069

(3) 数値計算の前提条件

数値計算の初期設定条件を表-4に、数値計算用ネットワークを図-2に示す。提案する制御モデルに関して、過度な複雑さを排除するため、迂回交通に対する設定条件として、入口変更を選択した車両は必ず1つ下流のオンランプへ迂回し、その際迂回先オンランプで適用される別の料金調整施策の対象にはならず、利用者が迂回先での新たな経路選択行動はとらないものと仮定する。

本研究では、課金・割引額を離散的（今回は課金・割引なし、低い課金・割引額、中程度の課金・割引額、高い課金・割引額の4種類）に設定し、GA（遺伝的アルゴリズム）を用いた解法を適用することで流入制御モデルの近似解を求める。その際、a)課金の実施、b)割引の実施、c)課金と割引の両方の実施の3ケースを設定する。ただし、割引制度については迂回先オンランプが存在するオンランプ4までの実施とし、オンランプ5では制御を行わない。

表-4 数値計算の条件設定

項目	内容	
1 タイムステップ	5(min)	
自由走行速度 v^{free}	88.11(km/h)	
臨界速度 v_a^{min}	44.0(km/h)	
流入交通量の最低保証値 UL_i^s	0(台/5min)	
オンランプ i の最大処理能力 U_i^{max}	60(台/5min) × ブース数	
各オンランプのブース数	on1	4
	on2	2
	on3	6
	on4	2
	on5	2
設定金額	課金	150 円, 300 円, 450 円
	割引	-350 円, -750 円, -1000 円
	両方	100 円, 200 円, 300 円 -50 円, -100 円, -150 円
GAに関する条件	初期染色体数	100個
	停止条件	100世代に到達 or 20世代同じ最適解が続く
	再生	ランキング選択 + エリート保存選択
	交叉	交叉確率 0.50 の一点交叉
	突然変異	突然変異確率 0.02

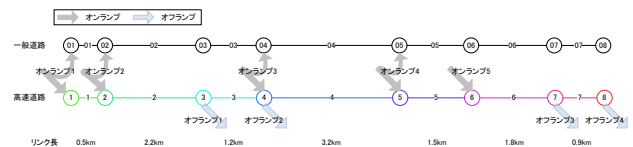


図-2 数値計算用ネットワーク

3. 数値計算結果

(1) GAを用いた解法の妥当性

図-3は、課金の実施を想定したケースのタイムステップ（時間帯）17（流入需要のピーク時）における解の収束状況を示す。最適値を下げることなく世代更新が行われ、最適値以外の解についても全体として値が高い方に集中していく傾向が読み取れる。また、29世代目で最適値に収束するまでは解の多様性が保たれていることがわかる。

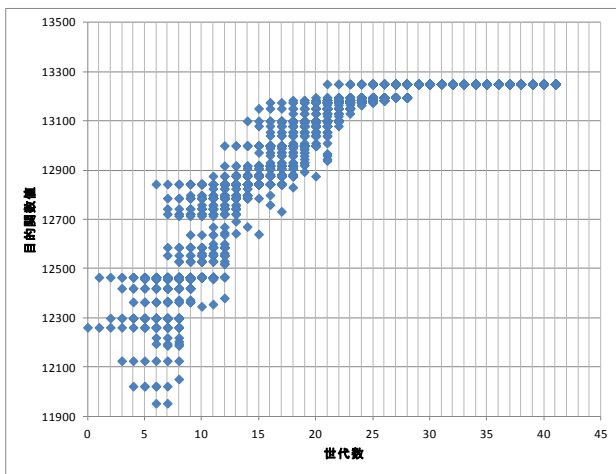


図-3 解の収束状況

(2) 制御解の傾向

本研究で提案した、流入制御モデルにより求められた制御率および迂回を含む制御率を図-4に示す。なお、一般道路利用へと経路変更した交通量を流入需要量で除した値を「制御率」、迂回もしくは一般道路利用へと経路変更した交通量を流入需要量で除した値を「迂回を含む制御率」と定義する。a)課金のみ、b)割引のみ、c)課金と割引の3ケースとも流入需要の増加に対応して流入制御を実施し、その強度を高めていくことを推奨する解が得られていることが分かる。課金と割引の両方を実施した場合は制御率、迂回を含む制御率の時間変化は比較的穏やかな変動になり、割引のみを実施した場合は制御率が大きく変化することを読み取れる。

次に、各リンク内の平均速度と料金調整額を図-5に示す。リンク内平均速度が低下し、混雑状態に近づくにつれて料金調整が実施され、制御の強度（課金額）が高まることを読み取れる。また、リンク内平均速度は常に許容速度の44km/h以上（非渋滞領域）となっており、本研究の流入制御モデルによってリンク内の交通密度が常に非渋滞領域に保たれていると考えられる。しかし、制御

後の各リンクの平均速度が許容速度を大きく上回っており、課金・割引額を離散的に設定しているために、過剰制御となっている可能性も否定できない。

制御モデルより得られた料金調整金額に注目すると、割引のみ実施した場合は、都市高速道路で一般的に想定される料金額よりも大幅に割引引かないと十分な制御効果が発揮されないことがわかる。得られる制御解は、進藤らの研究4)に基づき推定された経路選択モデルの影響を受けているため、断定的なことは言い難いが、割引に対する利用者の感度の方が、課金よりも相対的に鈍い可能性も十分に考えられる。

また、制御パターンから3ケースともオンランプ2とオンランプ3での制御強度が強いことがわかる。

図-4と図-5を比較すると、課金や割引を実施していない時間帯にも常に一定の制御が行われていることがわかる。これは、渋滞長 $l_{ij}^0=0$ [km]という設定が料金調整額に対する利用者の反応を表現するために用いた経路選択モデルの推定に用いたデータの範囲外にあり、実際の利用者の反応とは差異がある可能性があるためと考えられる。この点は、今後の課題として認識しており、料金調整時の経路選択モデルの精緻化を必要に応じて実施すべきと考えている。

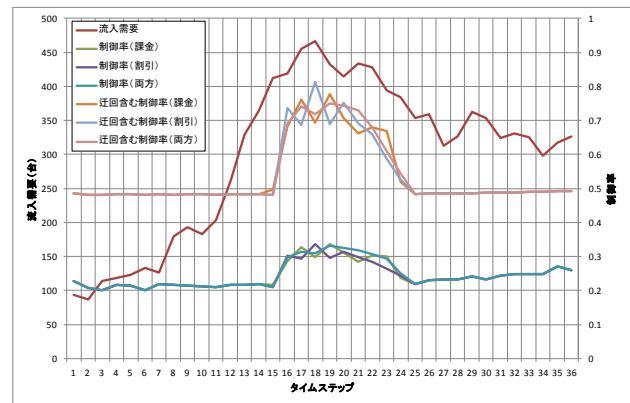


図-4 各タイムステップの制御率と迂回を含む制御率

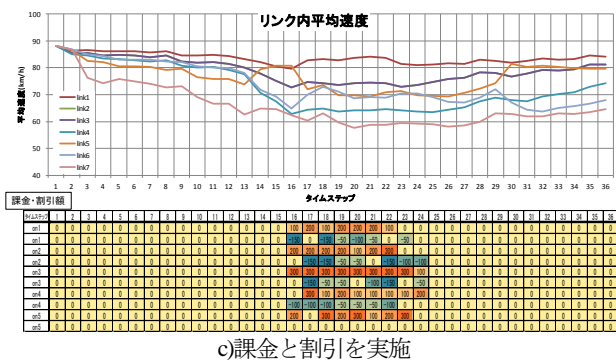
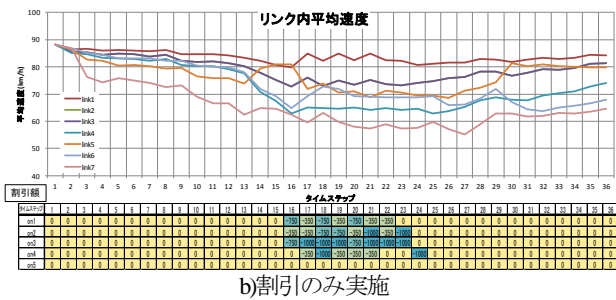
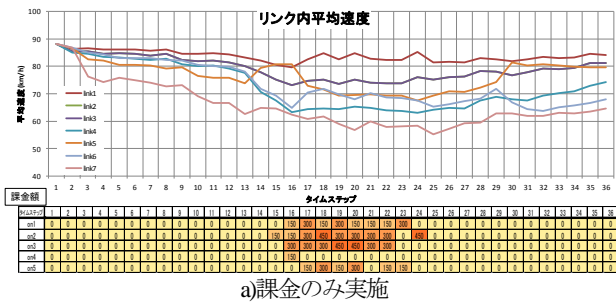


図-5 リンク内平均速度と料金の関係

(3) 速度制約の緩和

ここでは、一般的な都市高速道路の通行料金から見て、妥当と考えられるc)課金と割引の両方を実施したケースに着目し、ある種の感度分析として、許容速度 v_a^{min} (=44.0km/h)を34.0km/hに緩和して計算を行った。図-6には流入量を、図-7には制御時のリンク内平均速度が特に低いリンク4、リンク6、リンク7の結果を、表-5には制御が行われたタイムステップ中の制御パターンを示す。

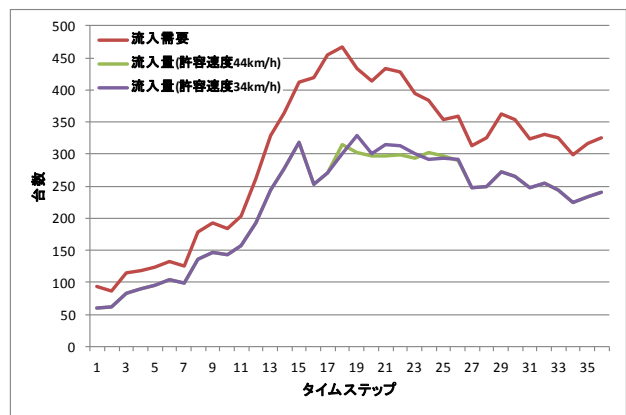


図-6 許容速度と流入量の関係

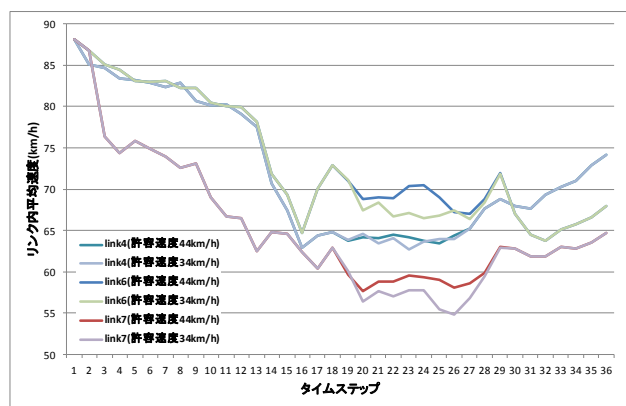


図-7 許容速度とリンク内平均速度の関係

表-5 許容速度別の制御パターン

		(許容速度44km/h)								
タイムステップ		16	17	18	19	20	21	22	23	24
on1	流入量	100	200	100	200	200	200	100	0	0
	流入需要	-150	0	-150	-50	-100	-50	0	-50	0
on2	流入量	200	200	200	200	100	200	300	0	0
	流入需要	0	-150	-150	-50	-50	0	-150	-100	-100
on3	流入量	300	300	300	300	300	300	300	300	100
	流入需要	0	-150	-50	-50	0	-100	-150	0	-50
on4	流入量	0	300	100	200	100	100	100	100	200
	流入需要	-100	-100	-100	-50	-50	-50	-100	0	0
on5	流入量	200	0	300	200	300	100	200	300	0
	流入需要	0	0	0	0	0	0	0	0	0

		(許容速度34km/h)								
タイムステップ		16	17	18	19	20	21	22	23	24
on1	流入量	100	200	200	100	200	200	200	0	0
	流入需要	-150	0	-150	-150	-50	-50	-50	0	-50
on2	流入量	200	200	300	300	200	200	300	300	0
	流入需要	0	-150	-100	-150	0	-100	0	-150	-50
on3	流入量	300	300	200	300	200	200	0	100	100
	流入需要	0	-150	-100	-100	-50	-150	-150	-150	-100
on4	流入量	0	300	300	100	200	0	0	0	0
	流入需要	-100	-100	-150	-100	-100	-100	-100	-50	-50
on5	流入量	200	0	0	0	0	0	100	300	0
	流入需要	0	0	0	0	0	0	0	0	0

図-6から、許容速度を緩和した場合の方が概ね流入量が増加しており、また総流入代数が許容速度が44km/h、34km/hのときにそれぞれ7903台、7945台であるので渋滞に関する条件の緩和により制御の強度が弱まることがわ

かる。

また表-5より、許容速度を緩和した場合、オンランプ5での制御がほとんど行われなくなっている。さらに、オンランプ3では緩和により課金の強度が弱まり、割引制度の強度は逆に強まっている。オンランプ4では緩和により課金制度の強度が弱まっている。しかし、オンランプ1とオンランプ2については制御強度の大きな変化は見られない。

図-7からは、特にリンク6とリンク7で許容速度の緩和によってリンク内平均速度が大きく下がっていることが読み取れる。これは渋滞に関する制約条件の緩和により、上述の通りリンク6とリンク7の上流オンランプであるオンランプ5での制御強度が弱まったためだと考えられる。

以上、本研究で提案した料金調整額を決定する流入制御モデルに関しては、走行速度制約の許容速度の影響を強く受けた形で制御解が決定されることが確認された。

4. まとめ

本研究ではETCの普及を踏まえて、都市高速道路の利用可能性をできるだけ保障した形で、渋滞を予防・緩和するため、料金調整による流入制御という考えに着目し、料金調整額を決定するモデルを提案した。需要の増加に伴い制御強度（課金・割引額）が高まるという制御モデルとしての基本特性は、数値計算より確認された。また、制御解は交通管制の実施側が設定する走行速度制約条件の許容速度によって、強く影響を受けることも確認された。

しかし、高速道路利用者の料金調整額に対する反応を表現するために用いた経路選択モデルが渋滞予防の観点で構築されたものではなかったため、それによる課題も生じた。また、本研究で用いた経路選択モデルは定額料金制度を対象としているが、現在、首都高速道路、阪神高速道路では距離別料金制度を採用しており、料金制度が異なれば利用者の経路選択行動も変化すると考えられ、現在の距離別料金制度を対象とした新たな経路選択モデルの構築が必要であると言える。以上より、経路選択モデルの改善は本研究において重要な課題である。

謝辞：本研究の実施に際して阪神高速道路(株)および(財)阪神高速道路管理技術センターよりご支援を頂戴した。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐佐木綱, 明神証: 都市高速道路網における流入制御理論, 交通工学, Vol. 3, No.3, pp.8-16, 1968.
- 2) 朝倉康夫, 柏谷増男, 山内敏通: 観測データの利用による都市高速道路の動的なLP型流入制御モデル, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.923-931, 1996.
- 3) 楊曉光, 飯田恭敬, 宇野伸宏: 走行速度の時間変化を考慮した動的LP制御モデル, 土木学会論文集, No.597/IV-40, pp.113-126, 1998. C. R. ワイリー (富久泰明訳): 工学数学(上), pp.123-140, プレイン図書, 1973.
- 4) 進藤隆弘, 宇野伸宏, 塩見康博: プローブパーソン調査による都市高速道路の料金調整実験時の対応行動分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, CD-ROM, 2010

(?????.?? 受付)

A STUDY ON INFLOW CONTROL MODEL BY TOLL ADJUSTMENT FOR URBAN EXPRESSWAY

Nobuhiro UNO, Shogo NOMIYAMA and Hiroshi SHIMAMOTO