

オフランプの容量制約を考慮した都市高速道路の 準動的流入制御手法

An Approach to Quasidynamic Traffic Control for Urban Expressway
with Constraint of Off-ramp Outflow Capacity

楊 曉光*・飯田恭敬**・宇野伸宏***

By Xiao-Gang YANG, Yasunori IIDA, Nobuhiro UNO

1. はじめに

既存の都市高速道路の効率的運用を目的として、交通管制システムが導入されている。特に、入路閉鎖・ブース数の制限を通して、高速道路の通行台数をコントロールする流入制御手法は、交通管制の実施上有効であり、これに関する研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾が盛んに行われてきた。

ところで、流入制御問題を静的な枠組みで捉えるか、動的な問題とするかに関わらず、既往の研究においては、オフランプの流出容量制約は考慮されてこなかった。実際には、オフランプからの流出交通が、接続する平面道路への流出容量により制約されるので、時として、オフランプでの待ち行列の延伸が本線交通の通行に直接的な影響を及ぼし、渋滞となる場合がある。リンク容量制約だけを考慮する流入制御手法では、オフランプでの待ち行列が本線に影響を及ぼさないということは必ずしも保証できない。そこで、都市高速道路本線の交通渋滞を防ぐためには、リンク容量制約とオフランプの流出容量制約条件を同時に考慮して、流入制御を実施することが望まれる。この際、流入交通需要や流出容量などは時間的に変動するので、動的流入制御問題としての定式化が都市高速道路の効率的運用には望まれる。

本研究では、線形計画問題としての(準)動的流入制御手法を基礎としてオフランプの流出容量制約条件を考慮した、新たな都市高速道路の流入制御モデルを提案する。提案したモデルの挙動を簡単な数値計算を通して検討するとともに、オフランプの容量制約を考慮しない流入制御結果と比較することで、

流出容量制約導入の意義について検討する。

2. オフランプの容量制約

都市高速道路の流出交通は、接続道路への流出容量により制約される。単位制御時間当たりの流出需要が、オフランプの流出容量と許容待ち台数の和を超えると、待ち行列が本線にも延伸し、本線上の交通に悪影響を及ぼすため、交通渋滞を引き起こす可能性がある。そのため、流入制御問題において、流出容量制約を考慮することが望まれる。制約条件を模式的に表したものが図-1である。

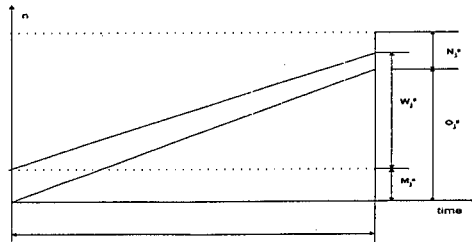


図-1 オフランプの容量制約条件の各要素の関係

図-1の縦軸はオフランプの到着台数、横軸は時間である。制約条件は

$$M_j^s + W_j^s - O_j^s (= M_j^{s+1}) \leq N_j^s \quad (1)$$

となる。ここで、 M_j^s :時間帯sの最初におけるオフランプjの待ち台数、 W_j^s :時間帯sの到着台数、 O_j^s :時間帯sのオフランプの流出容量、 N_j^s :オフランプの許容待ち台数である。

本研究では、オフランプでの車両の流出に対して、以下の前提条件を設ける。

①単位制御時間内での各ランプの車両の到着は一樣である。

②簡単のため、流出容量 O_j^s は一定かつ所与とする。

本来ならば、流出容量 O_j^s 、許容待ち台数 N_j^s はオフランプの実際の道路・交通条件に基づき与えられるべきである。特に、流出容量 O_j^s は接続道路の交通状態や、近傍の交差点の信号パラメータの影響を受

キーワード：交通管制、交通容量、ネットワーク交通流

* 学生員 工修 京都大学留学生 工学部交通土木工学教室
(〒606-01 京都市左京区吉田本町、Tel 075-753-5126)

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室
(〒606-01 京都市左京区吉田本町、Tel 075-753-5124)

***正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室
(〒606-01 京都市左京区吉田本町、Tel 075-753-5126)

けるため、時間的に変動する。ただし、本研究では、流入制御問題の基本構造とその特性を示すことを目的としているので、 O_j^s は一定として簡略化する。

時間帯 s の初期待ち台数 M_j^s 及び時間帯 s の到着台数 W_j^s は実時間的に予測(あるいは、観測)しなければならない。時間帯 s にオフランプ j に到着する交通需要は、次の式で表すことができる。

$$W_j^s = \sum_{r \leq s} \sum_i U_i^r R_{ij}^s \quad (2)$$

ここで、 U_i^r :時間帯 r のオンランプ i の流入量、 R_{ij}^s :時間帯 $r(r \leq s)$ にオンランプ i から流入した1単位の交通が時間帯 s にオフランプ j に到着する確率(流出影響係数)。 R_{ij}^s は時間帯 $r(r \leq s)$ におけるオンランプ i の流入交通のオフランプ j の選択確率(所与) P_{ij}^r 、及びその流入交通が、オフランプ j に時間帯 s に到着する確率 ξ_{ij}^s を用いて、次の式のように書くことができる。

$$R_{ij}^s = P_{ij}^r \xi_{ij}^s \quad (3)$$

3. 流出容量制約を考慮した準動的流入制御モデル

(1)モデルの前提条件

LP制御モデルというのは、線形計画法(Linear Programming)による高速道路の流入制御モデルである。これは理論的に明快であり、かつ、実用性の点でも優れているので、本研究では、LP制御モデルを基本として、オフランプの容量制約を考慮した準動的流入制御問題の構築を検討する。

準動的LP流入制御問題では、数分から数十分を流入制御の単位時間(単位制御時間)と考え、各時間帯での流入量をLP手法により求める。流入需要の時間変動が都市高速道路の交通状態に及ぼす影響を反映するため、ある時間帯 s に高速道路に流入した車両が、あとに続く時間帯 $s+1, s+2, \dots$ に下流側の道路区間に及ぼす影響をモデル化して、流入制御問題に内包する。

ただし、本研究は流入制御問題を動学化を試みる初期の段階であり、問題構造の過度の複雑さを排除するため、次の前提条件を設けている。

①各単位制御時間帯の中では、流入需要及び交通状態の変動は小さいとする。

②ピーク時において流入制御の結果として出現する走行速度は自由走行速度より遅く、一定とする。

③簡単のため、ODペア間の経路が1本に限定される都市高速道路を対象として、流入制御問題を構築する。この前提条件は、基本モデルを構築した後に緩和する。

(2)モデルの定式化

宇野・飯田らの研究³⁾を基礎として、前述の流出容量制約条件を導入する。

$$\max \sum_i U_i^s \quad (\text{for } \forall s) \quad (\text{逐次最適化の目的関数}) \quad (4)$$

$$\text{or} \\ \max \sum_{s \in S} \sum_i U_i^s \quad (\text{一括最適化の目的関数}) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \\ \sum_{r \leq s} \sum_i Q_{ira}^s U_{ir} \leq C_a^s \quad (\text{for } \forall a, \forall s) \\ (\text{リンク}a\text{の容量制約}) \quad (6)$$

$$0 \leq U_i^s \leq U_i^{sd} \quad (\text{for } \forall s) \quad (\text{オフランプ}i\text{の需要制約}) \quad (7)$$

$$M_j^s + W_j^s - O_j^s \leq N_j^s \quad (\text{for } \forall s) \quad (\text{オフランプ}j\text{の容量制約}) \quad (8)$$

ここで、 C_a^s :時間帯 s のリンク a の容量、 Q_{ira}^s :リンク影響係数であり、時間帯 $r(r \leq s)$ にオンランプ i から流入した交通が時間帯 s にリンク a に与える影響を係数化したものである。

二つの目的関数の意味あいであるが、逐次最適化問題は時々刻々収集される交通データも利用した、オンラインでの流入制御パターンの策定に適用可能と考えられる。一方、一括最適化問題は蓄積された統計的な交通データの利用を前提としており、オフラインでの平均的な動的流入制御パターンの策定への利用が適切と考えられる。ところで、純粋に最適化問題として、この二つの流入制御問題を捉えたと、一括最適化問題は流入制御が必要な全時間帯での最適化が保証されているのに対して、逐次最適化問題では必ずしも最適性が保証されないという問題点がある。本研究において、後に示す数値計算例は、逐次最適化問題を解いたものである。

影響係数 Q_{ira}^s は、(9)式で表される。

$$Q_{ira}^s = \sum_{j \in J} P_{ij}^r \eta_{ijra}^s \quad (\text{リンク}a\text{の影響係数}) \quad (9)$$

ここで、 η_{ijra}^s :時間帯 $r(r \leq s)$ にオンランプ i から流入したオフランプ j に向かう交通が、時間帯 s にリンク a を通過する確率。 η_{ijra}^s は、ネットワークの物理的形状(リンク長など)とネットワークの交通状態(速度)に基づき算出される。なお、3.(1)の前提条件より、 η_{ijra}^s を算出する場合には、速度一定(40km/h)

表-3. 流出容量制約を考慮した流入制御結果(流出容量の組合せ4による計算結果)

制御 時間帯 (時刻)	オンランプ1			オンランプ2			オンランプ3			オンランプ計		
	需要 (台/10分)	流入 (台/10分)	制御率 (%)	需要 (台/10分)	流入 (台/10分)	制御率 (%)	需要 (台/10分)	流入 (台/10分)	制御率 (%)	需要 (台/10分)	流入 (台/10分)	制御率 (%)
1 1~10	400	400	0	300	300 (300)	0 (0)	400	400 (400)	0 (0)	1100	1100 (1100)	0 (0)
2 11~20	400	400	0	350	350 (350)	0 (0)	400	250 (376)	37.5 (6.0)	1150	1000 (1126)	13.0 (2.0)
3 21~30	450	450	0	400	318 (400)	20.5 (0)	450	222 (339)	50.7 (24.7)	1300	990 (1189)	23.8 (8.5)
4 31~40	450	450	0	450	199 (400)	57.8(11.1)	450	320 (287)	28.9 (36.2)	1350	969 (1137)	28.2 (15.8)
5 41~50	500	500	0	450	187 (362)	70.0(19.6)	500	500 (359)	0 (28.2)	1450	1137 (1221)	21.6 (15.8)
6 51~60	500	500	0	450	180 (345)	71.1(23.3)	500	460 (328)	8.0 (34.4)	1450	1090 (1173)	24.8 (19.1)
7 61~70	450	450	0	400	253 (389)	36.8 (2.8)	450	447 (335)	0.7 (25.6)	1300	1150 (1174)	11.5 (9.7)
8 71~80	400	400	0	400	336 (400)	16.0 (0)	450	352 (293)	21.8 (34.9)	1250	1080 (1083)	13.0 (12.6)
9 81~90	400	400	0	350	329 (350)	6.0 (0)	400	375 (351)	6.3 (12.3)	1150	1104 (1101)	4.0 (4.3)
10 91~100	350	350	0	350	350 (350)	0 (0)	400	354 (349)	11.5 (12.8)	1100	1054 (1049)	4.2 (4.6)
11 101~110	350	350	0	350	350 (350)	0 (0)	400	178 (317)	55.5 (20.8)	1100	878 (1017)	20.2 (7.6)
12 111~120	350	350	0	300	300 (300)	0 (0)	400	214 (339)	46.5 (15.3)	1050	864 (989)	17.7 (5.8)
計	5000	5000	0	4550	3352 (4296)	26.3 (5.6)	5200	4072 (4073)	21.7 (21.7)	14750	12416 (13369)	15.8 (9.4)

※()内の数値は流出容量制約を考慮しない場合の計算結果

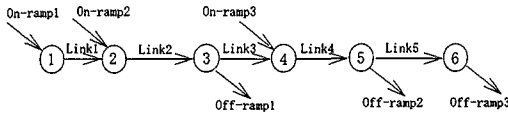


図-2 単一経路の計算例のネットワーク

表-1. 目的地選択率、リンクの容量

オンランプ	時間帯	オフランプ1	オフランプ2	オフランプ3
1	0~30	0.3	0.2	0.2
	31~60	0.4	0.4	0.2
	61~90	0.3	0.3	0.4
	91~120	0.2	0.5	0.3
2	0~30	0.4	0.4	0.2
	31~60	0.4	0.3	0.2
	61~90	0.4	0.2	0.4
	91~120	0.3	0.4	0.3
3	0~30	0	0.5	0.5
	31~60	0	0.4	0.6
	61~90	0	0.5	0.5
	91~120	0	0.7	0.3
リンクの容量		85台/分		

表-2. オフランプの流出容量及び許容待ち台数

容量の組合せ	オフランプ1	オフランプ2	オフランプ3
1	2.5	4.5	4.5
2	2.5	4.5	4.5
3	4.5	4.5	4.5
4	2.5	4.5	5.5
5	3.5	4.5	5.5
6	4.5	4.5	5.5
7	5.5	4.5	4.5
8	5.5	4.5	5.5
9	5.5	5.5	5.5
許容待ち台数	1.0	1.5	1.4

と仮定している。

4. 数値計算の諸条件

提案したモデルの挙動を検討するため、簡単な数値計算を行う。特に、提案したモデルの意義を理解するためには、流出容量制約を考慮しない流入制御モデルと比較分析することが有用と考えられる。そこで、計算例の諸条件は、基本的に準動的流入制御手法を対象とした研究3)と同じとする。

数値計算に用いるネットワークと関連データを上記の図-2、表-1, 2に示す。表-1に示すリンク容量は各リンク同じ値とする。単位時間あたりの流入需要は、計算例の一つを示す表-3に併記する。

実際には、オフランプは1車線の場合が多く、平面道路との接続部で信号制御などが行われていなければ、その容量は本線リンクの1車線の容量に近い

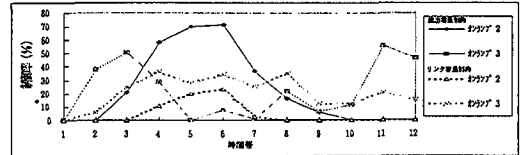


図-3 流出容量の組合せ4による計算結果の変化

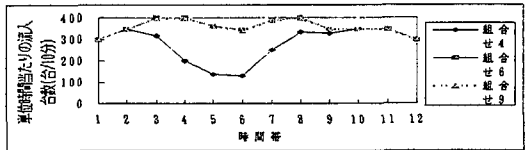


図-4 流出容量の各組合せによるオンランプ2の計算結果の変化

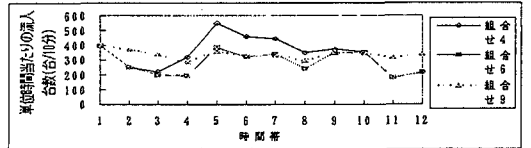


図-5 流出容量の各組合せによるオンランプ3の計算結果の変化と考えられる。なお、流出容量の変化が流入制御に及ぼす影響を分析するため、計算例では各ランプの流出容量を表-2に示す通りに変化させた。

5. 流入制御結果に関する分析

(1) 基本的特性に対する検討

表-3及び図-3は、流出容量の組合せ4($O_1=25$ 台/分, $O_2=45$ 台/分, $O_3=55$ 台/分)の場合の制御解を示している。流出容量の組合せ4の計算結果については、後で詳しく説明するが、流出制約が制御解に及ぼす影響が大きく表れたケースである。ここでは、その計算結果の分析を通して、提案した流入制御モデルの基本的特性を検討する。

表-3と図-3の計算結果から分かるように、提案した流入制御モデルは動的制御手法が持つべき基本的特性を有している。すなわち、流入量及び流入制御率が、流入需要の時間変動に応じて変化する。各オ

ンランプの流入需要のピークはほとんど時間帯3~8に集中し、この期間では流入制御率が上昇する。

オンランプ毎の流入制御率に着目して分析する。オンランプ2に対しては、時間帯4~6での制御率が高く、特に時間帯6で最高となっている。これは、流入需要の増加に対応して、流出容量の最も小さいオフランプ1における流出制約を満足するため、影響力の大きなオンランプ2の流入を制御する解が得られたためと考えられる。この結果と、表-3及び図-3に示した、流出制約条件の導入による制御率の全般的な上昇が見られる点を考えあわせると、流出容量の組合せ4を適用した場合には、流出制約条件が制御解に大きく影響を及ぼしていると言える。

次にオンランプ3に着目する。流入需要のピークに対応する時間帯5~7では、その制御率は逆に減少する傾向にある。これは上記の通り上流にあるオンランプの流入が制御されたことと関係があると考えられる。そのため、オンランプ2の流入制御率が低い時間帯では、オンランプ3の制御率は流入需要の増加に伴って増加に転ずる。

(2) 流出容量制約の影響

一般的に、オフランプの車線数は本線より少なく、その処理能力は平面道路から影響を受ける可能性がある。そのため、流出容量制約が流入制御解に対して強く影響することも考えられる。

流出容量の組合せ4の計算結果は、その典型的な例であり、5(1)で分析したように、流入制御解は明らかに流出容量制約の影響を受けており、リンク容量制約は実質的には機能していない。ここでは、流出容量の組合せ4に加えて、組合せ6($Q_1=45$ 台/分、 $Q_2=45$ 台/分、 $Q_3=55$ 台/分)及び9($Q_1=55$ 台/分、 $Q_2=55$ 台/分、 $Q_3=55$ 台/分)の結果も利用して、流出容量制約の影響について検討する。

図-4及び図-5は、オンランプ2及び3の時間帯毎の流入交通量を表している。最初に、流出容量の組合せ9の計算結果は、流出容量制約を考慮しない場合の制御解と同一であることを述べておく。この場合(各オフランプの流出容量が55台/分)には、流出制約は実質的には機能せず、リンク容量制約により解空間が規定される。

流出容量の組合せ6を適用した場合、その制御解はオンランプ2に関しては、組合せ9のそれと類似し

ており、オンランプ3に関しては組合せ4とも9とも異なる制御解が得られている。特に、時間帯2~4ならびに時間帯11・12では、オンランプ3の流入が非常に厳しく制御されている。流出容量制約が機能していない組合せ9の結果と大きく異なることから、上記の時間帯では流出容量制約が制御解の算出に影響を及ぼしていると推測される。組合せ6では、3オフランプ計で10分間当たり1450台の流出能力を有しており、一見したところ、流入需要と比較しても十分と思われるが、実際には流出容量制約の影響を受けて解が求められている。これは流入需要の持つOD特性の影響があらわれた結果と考えられる。すなわち、数値例の最初の30分と最後の30分では、目的地選択率から考えてオフランプ2を目的地とする流入需要が非常に多く、流出容量を超過してしまうため、選択率から判断して影響力の大きいオンランプ3の流入が厳しく制限されたと考えられる。

6. おわりに

本論文では、オフランプの容量制約を考慮した都市高速道路の準動的流入制御手法を提案した。その数値計算結果によると、オフランプの流出容量制約を無視すれば、本線上の渋滞が引き起こされる可能性があると考えられる。特に、流入需要のOD特性が時間的に大きく変動する場合は、流出容量制約を考慮する価値があると考えられる。

なお、提案した最適流入制御のLPモデルは問題構造の過度の複雑さを排除するため、まだ準動的なモデルであり、本線上の交通状態の変動は明示的には考慮されていない。また、オフランプの容量制約をより詳細に考慮する場合には、流出容量に影響を及ぼす要因の特定とその関係のモデル化が必要となる。今後は、これらの課題に取り組むつもりである。

【参考文献】

- 1) 明神証：都市高速道路の交通管制手法に関する研究、京大工学学位論文、1974
- 2) Papageorgiou, M.: A New Approach to Time-of-day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model, Transportation Research B, Vol. 14B, pp. 349-360, 1980
- 3) 宇野伸宏・飯田恭敬・郷田浩二・金周顯：流入需要の時間変動を考慮した準動的LP制御問題、第15回交通工学研究会論文集(投稿中)、1995
- 4) 松井寛・佐藤佳郎：都市高速道路の動的流入制御理論に関する研究、土木学会論文集No. 326, pp. 103-114, 1982, 10
- 5) 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網における最適流入制御モデルの定式化と解法、土木学会論文No. 449/IV-17, pp. 135-144, 1992, 7
- 6) 明神証・坂本破魔雄・岩本俊輔：流入待ち行列を考慮したLP制御、交通工学Vol. 10, No. 4, pp15-23, 1975