

走行速度の時間変化を考慮した動的LP制御モデル

楊 暁光¹・飯田恭敬²・宇野伸宏³

¹正会員 工博 同济大学助教 土木学院道路與交通工程系 (〒200092 中国・上海市四平路1239号)

²フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 博士(工学) 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

線形計画法を用いた都市高速道路の流入制御モデル (LP制御モデル) は、理論的に明快であり、かつモデルの操作性、実用性の点でも優れているが、基本的には交通状態の定常性を仮定できる場面への適用に限定されている。本研究では、流入交通需要と本線上の交通状態の時間変化を考慮可能な流入制御モデルを構築するため、LP制御モデルを基礎として、その動学化を図る。渋滞予防の制約条件としてリンク容量制約に加えてリンク走行速度制約を導入し、交通状態が非定常な場合あるいは本線上に軽微な渋滞が存在している場面にも適用可能な制御モデルとする。提案した動的制御モデルを用いた数値計算を通して、モデルの挙動を確認するとともに、動的流入制御手法の役割を明確にする。

Key Words: inflow control, dynamic traffic control, linear programming

1. はじめに

都市高速道路の主な存在意義は、街路の交通混雑の緩和と交通処理能力の向上を図り、さらに都市活動が集中する状況下で緊要なる交通の迅速かつ効率的な処理を可能とすることと考えられる。したがって、渋滞の発生による高速道路の機能低下の影響は大きく、単にドライバーの利便性を低下させるだけではなく、都市の社会経済活動にも支障をきたすと考えられる。そのため、渋滞の予防を目的とした交通制御の役割は非常に大きく、入路閉鎖・開口ブース数の制限、アクセス道路の信号制御、交通情報提供などの各種手法を用いて、高速道路の利用台数を適切にコントロールすることはきわめて重要と考えられる。特に利用台数を直接的にコントロールできる入路閉鎖・開口ブース数制限による流入制御手法は、自然渋滞の予防方策としてはその効果が明らかであり、適切な制御パターンを策定するための手法の開発・研究が、これまででも多く行われてきた。

J.A.Wattleworth¹⁾や佐木・明神等²⁾は本線上の各区間の容量制約の下で、高速道路利用台数を最大化する問題を定式化し、これを解くことで制御解を求める流入制御手法を提案した。この問題は線形計画問題 (Linear Programming) として定式化され得るため、一般にLP制御と呼ばれている。LP制御は理論的に明快であり、都市高速道路の運営者の制御方針を目的関数により反映することができ、さらに求解も比較的容易である。そのため、

より実用的な制御手法の開発を目指して、LP制御を基礎とした多くの改良モデルがこれまで提案されてきた。例えば明神等³⁾は、オンランプでの待ち行列制約を考慮したモデルを開発している。これは都市高速道路本線とともにオンランプの待ち行列に起因する平面道路の自然渋滞の予防も目指した方法論である。また、オンランプでの実際の流入調整は入路閉鎖、開口ブース数制限方式が一般的であることから、許容ブース数の決定を整数LPにより求めた井上等⁴⁾の研究もある。このほかYuan等⁵⁾、Wang等⁶⁾、Chen⁷⁾によっていくつかのLP制御手法の改良型が提案されている。また近年の都市高速道路ネットワークの拡大に対応すべく、利用者の経路選択を利用者均衡問題として明示的に取り入れ、2レベル最適化問題として定式化した流入制御モデル⁸⁾も提案されている。

上記の手法は、その多くが線形計画問題を解くことで最適解を求める構造となっているため理論的に明快であり、求解性の点でも優れた実用的な方法論と考えられる。一方、LP流入制御手法では、ネットワーク上の交通状態ならびにランプ流入交通の時間的変化が一定と見なせる定常状態を仮定しているため、その適用範囲に制限が加えられることとなる^{9),10)}。実際のところ流入制御手法がその効力を発揮するのは、ネットワーク上の交通状態が自由流状態から臨界状態へと遷移していく過程であり、何らかの制御方策が実施されなければ、自然渋滞が生じる可能性が高い状況下においてである。すなわち、自然渋滞を予防し、都市高速道路の効率的運用を図るためには、

交通状態が非定常な場合にも適用可能な流入制御手法を構築することが必要と考えられる。

そこで松井等¹¹⁾、Wang¹²⁾、Isaksen等¹³⁾は流入需要ならびに本線の交通状態の時間変動を考慮するため、動的流入制御手法の開発を試みてきた。これらはLP制御手法と比較して、モデル構造の複雑化と計算量の増加を伴うため、制御手法としての実用性、操作性等の点で課題が残されている。そのため近年では、理論的な明解さと実用性を兼ね備えたLP制御モデルを動学化する試みが、Papageorgiou¹⁴⁾、松井等⁹⁾によって行われている。これらの研究ではネットワークフローの空間的分布を明示することで、流入交通が時々刻々本線上の各区間に及ぼす影響を考慮可能な制御モデルを提案している。しかしながら、本線上の走行速度を一定としているため、流入需要の急変時等には十分対応できないという課題も残されている。最近では交通データの収集技術ならびにコンピュータ性能の進展を背景とした、動的流入制御モデルの開発が盛んに行われている。朝倉等は観測データの利用を前提とした動的LP制御モデルを提案している¹⁰⁾。また森地等は交通シミュレーションと遺伝的アルゴリズム(GA)による最適化問題を組合せたリアルタイム制御手法を提案している¹⁵⁾。今後は豊富な動的交通データの利用を前提とした制御手法の開発が一層望まれると考えられる。

以上の背景を踏まえて、本研究では交通状態が非定常な場合にも適用可能である、実用的な動的流入制御手法を提案する。理論的に明快であり、かつモデルの操作性と実用性に優れたLP制御手法の枠組みを活用して、流入需要ならびにネットワーク上の交通状態の時間変化を考慮可能な動的流入制御モデルの構築を試みる。特に、交通状態の悪化を防止するための制約条件として、新たにリンク走行速度制約条件を導入することで、ネットワークの一部区間に軽微な渋滞が生じている場合にも適用可能なLPタイプの動的流入制御モデルを構築する。以下、2章では流入制御モデルの基本構造について示す。3章では、交通状態の悪化を防止するための制約条件であるリンク容量制約条件および走行速度制約条件について説明し、その両者の関係について整理する。4章では、LPタイプの動的流入制御モデルの定式化を示し、5章では簡単な仮想ネットワークを対象とした数値計算例を示し、その結果を踏まえて提案したモデルの特徴を把握する。

2. 動的流入制御モデルの基本構造

(1) 動的流入制御モデル構築の前提条件

本論文では、次に示す2つの条件を満足するLPタイプの動的流入制御モデルを提案する。

- ①流入需要の時間変化を明示的に考慮できるモデルとする。この場合の「流入需要」とは、オンランプの流入

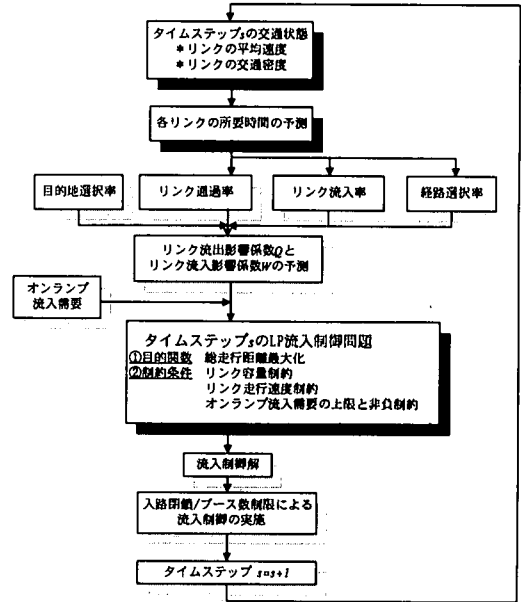


図-1 LPタイプの動的流入制御モデルの構造

需要および流出オフランプの選択状況を意味する。

- ②ネットワーク上の交通状態の時間変化を考慮可能なモデルとする。交通状態は各リンクの交通密度ならびに速度で表されるものとする。

この条件を満足するため、数分から数十分を流入制御の単位時間（「単位制御時間」と呼ぶ）として、流入制御が必要となる期間をいくつかのタイムステップに分割し、流入需要に応じた各タイムステップごとの流入可能量をLP問題として求める流入制御モデルを構築する。ネットワーク上の交通状態の時間変化を考慮して制御解を求めるためには、流入交通が各リンクに及ぼす影響の時間遅れを流入制御モデルにおいて勘案する必要がある。あるオンランプから流入した交通が各リンクの交通状態に及ぼす影響は、時間遅れを伴って発現し、その遅れの大きさは一定ではなく、流入ランプからより遠方のリンクほど、またネットワーク上の混雑が激しいほど大きくなる。そこで、あるタイムステップに高速道路に流入した交通が、後続のタイムステップ $t+1$, $t+2$, ...において下流側のリンクの交通状態にどのように影響するかを後述の影響係数によりモデル化する。この影響係数はネットワーク上の交通状態の時間変化に応じて求められる。

(2) 動的流入制御モデルの基本構造

動的LP流入制御モデルの基本構造は図-1に示す通りとなる。タイムステップの解を求めるためには、まず当該タイムステップの交通状態に基づき、各リンクの所要時間を予測し、LP制御問題を構成するために必要となる各種パラメータを予測する。このパラメータについては、第3章で説明する。次にタイムステップのLP制御問題を

解き、得られた解に基づき流入制御を実施する。タイムステップを $s=s+1$ と更新し、同じプロセスを繰り返すこととする。以上より、ここで提案しているLPタイプの動的流入制御モデルでは、タイムステップの数だけ流入制御問題を線形計画問題として構成し、これを逐次解くこととなる（「逐次最適化モデル」と呼ぶ）。

いま仮に、流入制御の実施が望まれるピーク時間帯全体について、流入需要データが事前に分かっており、さらに、流入制御モデルで計算された通りに、ネットワーク上の交通状態が経時的に変化する様な理想的な状態を想定する。この様な状況下では、タイムステップ毎にLP問題を繰り返し解く形の動的流入制御モデルから得られる解は、流入制御が必要であるピーク時間帯全体で見れば、最適解でないことは明らかである¹⁰⁾。タイムステップ s の流入量を求める際に、 $s-1$ 以前の流入交通が、 s の交通状態に及ぼす影響は考慮しているが、操作変数であるタイムステップ s の流入量が、 $s+1$ 以降の交通状態に及ぼす影響は考慮していないためである。この様な状況下でピーク時間帯全体で最適となる流入制御解を求めるためには、対象時間帯全体で1つのLP制御問題を構成し、各タイムステップの流入量を一括的に最適化することが必要である（「一括最適化モデル」と呼ぶ）。

ここで、既存の研究に基づき、逐次最適化モデルと一括最適化モデルの特徴について簡単に触れておく。本研究の第二・第三著者を含む研究グループは、参考文献16)の中で簡単な数値計算に基づき、両制御モデルの特徴把握を試みている。両モデルとも基本的には流入需要の増加に応じて制御が強まっており、需要の時間変化に対応した形で制御解を求めることができることが分かっている。ただし、逐次最適化モデルではピーク時において制御解が大きく変動し、流入需要が同一レベルであっても、制御解が大きく異なっていた。先に述べたように、これはタイムステップ s の流入量を求める際に、 $s-1$ 以前の流入交通が、 s の交通状態に及ぼす影響は考慮しているが、操作変数であるタイムステップ s の流入量が、 $s+1$ 以降の交通状態に及ぼす影響は考慮していないためと考えられる。すなわちモデル的には一括最適化モデルの方が優れていると考えられる。

しかしながら、ピーク時全体を一括で最適化して制御解を求めるという状況設定は非現実的であり、ピーク時間帯全体での流入需要の時間変動データを、事前に精度高く入手することは困難と考えられる。また、一括最適化モデルでは(対象タイムステップ数) \times (オンランプ数)分の操作変数を持つ巨大なLPを解く必要があり、モデルの求解の面から見た実用性の点でも問題がある。本研究では、流入制御モデルとしての実用性の点を重視するため、逐次最適化型の動的流入制御モデルについて検討する。

(3) 基本的仮定

本研究では以下に示す基本的仮定に基づいて、動的LP流入制御モデルを構築する。

- ①流入需要および目的地選択率は、交通状況の実測ならびに実測値を踏まえた予測に基づくものであり、流入制御モデルにおける外生変数とする。したがって、本研究では簡単のため所与として取り扱う。また、各タイムステップごとに流入可能量を線形計画問題(LP)として求めるため、各タイムステップの間では流入需要と目的地選択率は一定とする。
- ②各リンクの交通状態はリンク内の密度と平均速度により代表される。密度と速度の関係($K-V$ 式)は既知とし、ここでは、式(1)に示す線形の関係式を用いる。

$$V_a = \alpha - \beta K_a \quad (1)$$
 ここで、 V_a および K_a はリンク a の速度(m/分)と密度(台/m)、 α と β は定数とする。
- ③リンク内の交通状態は一様であり、各タイムステップでは一定とする。またオンランプからの流入量とオフランプからの流出量の変化も各タイムステップ内では小さく、一定と見なすことができると仮定する。

3. 渋滞防止のための制約条件

本章では流入制御モデルにおいて渋滞防止の役割を果たす、リンク容量制約条件ならびにリンク走行速度制約条件について説明する。各制約条件の意義、定式化とともに、これら2つの制約条件の関係について述べる。さらに、流入交通量とリンクの交通状態との関係づけのため必要となる、リンク流出影響係数およびリンク流入影響係数について説明する。

(1) リンク容量制約条件

リンク容量制約条件は、各タイムステップごとに構成され、タイムステップ s にリンク a を通過する交通量は、その容量を超えないとする条件である。この制約条件は、渋滞防止の条件としては一般的であり、既存のLP制御モデルに必ず含まれている。リンク容量制約は次の式(2)のように表すことができる。

$$X_a^s = \sum_{r \in I} Q_{ia}^{rs} U_i^r \leq C_a^s \quad (a \in A) \quad (2)$$

ここで、 X_a^s はタイムステップ s にリンク a の下流端を通過する交通量、 U_i^r はタイムステップ r ($r \leq s$)におけるオンランプ i からの流入量(U_i^r が操作変数)、 Q_{ia}^{rs} はタイムステップ r ($r \leq s$)にオンランプ i から流入した1単位の交通が s にリンク a の下流端を通過する割合(リンク流出影響係数)である。また C_a^s はタイムステップ s におけるリンク a の交通容量、 A はリンク a の集合、 I はオン

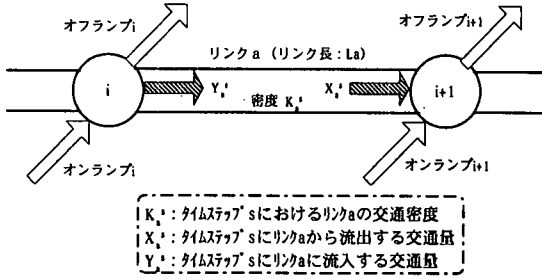


図-2 リンク交通量の保存則

ランプ i の集合である。なおリンク流出影響係数 Q_{ia}^s の求め方は、本章の(4)節で説明する。

(2) リンク走行速度制約条件

リンク走行速度制約条件は、リンクの走行速度が各リンク内で一様であり、各タイムステップで一定との仮定の下で、その走行速度が交通管理者が設定した許容速度を下回らないとする条件である。2.(3)で述べた基本的仮定を踏まえて、リンク交通量の保存則を適用すると、次の関係式を得ることができる(図-2)。

$$K_a^s L_a + (Y_a^s - X_a^s) = K_a^{s+1} L_a \quad (3)$$

X_a^s はタイムステップ s においてリンク a から流出する交通量(リンク流出交通量)、 Y_a^s は s にリンク a へ流入する交通量(リンク流入交通量)、 K_a^s はタイムステップ s におけるリンク a の交通密度、 L_a はリンク長である。

タイムステップ s のリンク a の密度 K_a^s 、リンク流出交通量 X_a^s 、リンク流入交通量 Y_a^s が既知と仮定すると、式(3)および(1)より、タイムステップ $(s+1)$ におけるリンク a の走行速度 V_a^{s+1} の推定値は、次の式(4)の等式部分のように導かれ、リンクの走行速度制約条件は

$$V_a^{s+1} = \alpha - \beta \left\{ K_a^s + \frac{(Y_a^s - X_a^s)}{L_a} \right\} \geq V_a^{\min} \quad (4)$$

となる。 V_a^{\min} はリンク a の許容速度である。この許容速度は提供すべきサービスレベルに応じて、管理者が設定することとなる。なお、タイムステップ s におけるリンク流出交通量 X_a^s ならびにリンク流入交通量 Y_a^s は、次の式(5)、(6)により求められる。

$$X_a^s = \sum_{r \leq s} \sum_{i \in I} Q_{ia}^{rs} U_i^r \quad (5)$$

$$Y_a^s = \sum_{r \leq s} \sum_{i \in I} W_{ia}^{rs} U_i^r \quad (6)$$

ここで、 W_{ia}^{rs} はタイムステップ $r (r \leq s)$ にオンランプ i から流入した1単位の交通が、タイムステップ s にリンク a の上流端から流入する割合(リンク流入影響係数)である。なお、リンク流入影響係数 W_{ia}^{rs} の求め方については、本章の(4)節で述べる。

式(5)および(6)をリンク走行速度制約条件式(4)に代入し

て、不等式の左辺が操作変数 U_i^r を含む項のみになるように整理すると、次の式(7)で表すように U_i^r に関する線形式となる。

$$\sum_{r \leq s} \sum_{i \in I} \left(W_{ia}^{rs} - Q_{ia}^{rs} \right) U_i^r \leq L_a \left(\frac{\alpha - V_a^{\min}}{\beta} - K_a^s \right) \quad (7)$$

(3) リンク走行速度制約条件と容量制約条件との関係

本研究で提案している LP タイプの動的流入制御モデルは、実用性の点で優れた LP 制御モデルを、流入需要ならびに本線上の交通状態が時間的に変化する状態に対しても適用できるよう改良したモデルである。このモデルの対象としては平常時のみならず、ネットワーク上の大部分の区間は自由流であり、ごく一部の区間に渋滞が発生しているケースも対象としている。具体的には落下物や軽微な事故等の短時間でその原因が除去できる突発事象による渋滞も考慮することを試みている。このようなケースでは、ネットワーク全体に対しては、いわゆる緊急時制御ではなく平常時制御を適用する方が望ましい場合も多いと考えられるためである。すなわち、渋滞区間に関してはその回復を促進し、非渋滞区間に関しては、自然渋滞の予防を目的とした制御を行いつつ、ネットワーク全体としては可能な限り多くの交通の利用を保障する様な制御方策の必要性が高いと考えられる。なお、この場合、許容速度 V_a^{\min} は交通状態に対する管制官の判断により、臨界速度より低い水準に一時的に引き下げることが可能である。

仮にネットワークの一部区間の交通状態が渋滞領域にある場合に、リンク容量制約のみを考慮した流入制御モデルを適用することを考える。ここでは交通量 (q) と速度 (V) ならびに交通密度 (k) と速度 (V) の関係に関するモデルを念頭に置いている。 q - V 関係から明らかなように、ある一つの交通量に対して2つの走行状態(自由流状態・渋滞流状態)が存在するため、リンクの通過交通量が容量以下という制約条件は、渋滞領域まで対象とすると実質上意味を持たなくなる。リンク交通量を一つの値に定めても、モデル上はそれが自由流状態にあるのか渋滞流状態にあるのかは不明である。その結果、総流入台数あるいは総走行距離最大化という目的関数の下では、リンクの交通状態に関する制約が実質上機能せず、ある時間帯の目的関数値の最適化を図るため、本来制御すべきであるのに、制御が不要との解が求められる可能性が考えられる。そして計算上、渋滞区間の交通状態が回復しない様な制御解が求められてしまう可能性が考えられる。そこで、交通状態と走行速度は1対1対応し、渋滞流領域でも有効と考えられることから、リンク走行速度制約条件を導入する。

一方、渋滞の予防を目的とした制約条件として、リンク走行速度制約のみを導入した場合、どの様な不都合が

生じる可能性があるか考えてみよう。この動的LP制御モデルについて、その実用性と求解性を考慮した場合、各タイムステップが、ある程度の時間の幅(例えば5分)を持つように設定するのが望ましいと考えられる。しかし、タイムステップを長めに設定すると、あるタイムステップに流入需要が急増した場合に、流入量の増加がネットワークの交通状態に反映されることなく、本線上をフローが過剰に流れてしまう様な制御解が求められる可能性がある。その結果、リンク走行速度制約条件が満たされているにも関わらず、容量を超えた交通量が流れる様な計算結果が求められる場合が考えられる。このような好ましくない制御解が算出されることを防止するため、本研究で提案する動的LP制御モデルでは、各リンクの容量制約条件と走行速度制約条件(いずれも対象時間帯毎に設定)を併用している。

リンク走行速度制約はタイムステップ冒頭での走行速度を許容速度以上に保つという制約であるのに対して、リンク容量制約は各タイムステップの間にリンク下流端から流出する交通量を容量以下に抑えるという条件であり、対象としている時間が異なると言える。このリンク容量制約と走行速度制約を併用することの必要性の有無については、後述のモデルの適用計算によって確認する。

(4) 影響係数について

a) リンク流出影響係数と流入影響係数

リンク流出影響係数 Q_{ia}^{rs} とリンク流入影響係数 W_{ia}^{rs} は、流入制御モデルの操作変数であるオンランプからの流入交通量 U_i^r と、ネットワーク上の交通状態とを関係づける係数である。これらの影響係数はネットワーク上の交通状態の時間変化を受けて、各タイムステップごとに更新されるものである。タイムステップ s の解を求める場合、 Q_{ia}^{rs} 、 W_{ia}^{rs} ($r=1, 2, \dots, s$) が s 時点での交通状態と $Q_{ia}^{r(s-1)}$ 、 $W_{ia}^{r(s-1)}$ に基づき更新されることとなる。

Q_{ia}^{rs} および W_{ia}^{rs} はリンク容量制約とリンク走行速度制約を導くために必要であり、それぞれ式(8)と(9)のように表すことができる^{16),17)}。

$$Q_{ia}^{rs} = \sum_{j \in I} \sum_{h \in H_j} P_{ij}^r F_{jh}^r \eta_{ijha}^{rs} \quad (8)$$

$$W_{ia}^{rs} = \sum_{j \in I} \sum_{h \in H_j} P_{ij}^r F_{jh}^r \mu_{ijha}^{rs} \quad (9)$$

ここで、 P_{ij}^r はタイムステップ r ($r \leq s$) にオンランプ i から流入した1台の車がオンランプ j を流出オンランプに選択する割合(目的地選択率)、 F_{jh}^r はタイムステップ r ($r \leq s$) にオンランプ i から流入しオンランプ j に向かう交通が経路 h を選択する割合である。 η_{ijha}^{rs} はタイムステップ r ($r \leq s$) にオンランプ i から流入しオンランプ j に向かう交通が、タイムステップ s に経路 h 上のリンク a の下流端を通過する割合(リンク通過率)、 μ_{ijha}^{rs} は r ($r \leq s$) にオンランプ i から流入しオンランプ j に向かう交通が s に

経路 h 上のリンク a の上流端から流入する割合(リンク流入率)である。なお、 J はオフランプの集合、 H_j はランプ j 間の経路の集合である。

これらの変数のうち、目的地選択率 P_{ij}^r は実測値あるいは実測結果に基づく推定値として求められると考え、本論文では P_{ij}^r は所与とする。また、経路選択率 F_{jh}^r について交通状態の観測結果に基づき、後述の経路選択モデルを利用して、あるいは路車間通信等による動的データを用いて、推定することになると考えられる。ここでは P_{ij}^r 、 F_{jh}^r 以外のリンク通過率 η_{ijha}^{rs} とリンク流入率 μ_{ijha}^{rs} の求め方について検討する。

なおここでは便宜上、 F_{jh}^r は交通が流入する時点 r の交通状態に基づき推定された経路選択率を用いている。また、本研究では、流入制御モデル内で推定した交通状態と、実際の交通状態が一致するものと仮定している。しかしながら、流入需要の観測やリンク交通状態のモデル化の難しさのため、推定された交通状態と実際の交通状態は一致しない可能性が高いと考えられる。このため時間の経過、モデル的に言えば制御解を繰り返し求めるうちに、モデル内で推定している交通状態と実際の交通状態の乖離が大きくなる可能性も考えられる。これを防ぐためには、観測可能な範囲については、実測交通状態を用い、観測できない部分については、本研究で提案している影響係数の更新法を用いることが考えられる。これについては今後の研究課題としたい。

b) リンク通過率 η_{ijha}^{rs} とリンク流入率 μ_{ijha}^{rs} の求め方

リンク通過率 η_{ijha}^{rs} とリンク流入率 μ_{ijha}^{rs} は、ネットワークの物理的状況(リンク長・接続状況など)とネットワーク上の交通状態に基づき推定することとなる。リンク流入率 μ_{ijha}^{rs} は、リンク a の始点ノードがオフランプ j の場合は $\mu_{ijha}^{rs} = 0$ 、それ以外は $\mu_{ijha}^{rs} = \eta_{jh(a-1)}^{rs}$ として求めることができるので、ここではリンク通過率 η_{ijha}^{rs} の算出手法についてのみ説明する。なお、リンク $(a-1)$ は経路 h 上のリンク a の直前のリンクとする。

図-3に示した模式図を用いて、リンク通過率 η_{ijha}^{rs} の考え方を示す。オンランプ i から流入する交通の中で各タイムステップの先頭車両の動きに着目する。ネットワーク上の交通状態は時々刻々変化するため、先頭車が時間-距離平面上で描く軌跡は、各リンクの交通状態に応じて、各タイムステップ・リンクごとにその傾きが変化すると考えられる。いまタイムステップ s におけるリンク通過率を求めるための計算の手順を考える。まず最初に行うことはタイムステップごとに、流入交通の先頭車の走行軌跡を描くことである。先頭車の走行軌跡の例を図-3に示す。タイムステップ s までのネットワーク上の交通状態が既知であるならば、それ以前の各タイムステップの最初に流入した車両の走行軌跡を描くことは容易であ

(2) 動的流入制御モデルの定式化

これまでの議論を踏まえると、LPタイプの動的流入制御モデルは次の式(15-a)~(15-d)のように定式化できる。

$$\max \sum_{i \in I} \bar{d}_i^s U_i^s \quad (15-a)$$

s.t.

$$\sum_{r,s} \sum_{i \in I} Q_{ia}^{rs} U_i^r \leq C_a^s \quad (\text{for } \forall a) \quad (15-b)$$

$$\sum_{r,s} \sum_{i \in I} (W_{ia}^{rs} - Q_{ia}^{rs}) U_i^r \leq L_a \left(\frac{\alpha - V_a^{\min}}{\beta} - K_a^s \right) \quad (\text{for } \forall a) \quad (15-c)$$

$$0 \leq U_i^r \leq U_i^{sd} \quad (\text{for } \forall i) \quad (15-d)$$

制約条件式(15-b)はリンク容量制約を、式(15-c)はリンク走行速度制約を、そして式(15-d)は流入可能量の上・下限に関する制約を各々表す。なお U_i^{sd} はタイムステップ s におけるオンランプ i の流入需要を表す。上記の定式化はタイムステップ s の流入制御解を求めるためのLPを示しており、流入制御が必要となるタイムステップ1から S まで同様の問題をタイムステップ毎に構成し、これらを逐次解くことによりタイムステップ s ($s=1, \dots, S$)の制御解を求める。なおタイムステップ r ($r < s$)の流入量 U_i^r は既知であり、式(15)のLP流入制御モデルでは定数として扱われる。言い換えれば、タイムステップ s の制御問題は U_i^r を操作変数として、 $s-1$ 時点までに流入した交通がタイムステップ s に本線上の交通状態に及ぼす影響を考慮しつつ、 s 時点で自然渋滞を生じさせないような U_i^s を求める問題である。 U_i^s が $s+1$ 以降に本線交通に及ぼす影響は、求解時点では考慮していないため、2(2)で述べたような流入制御解の振動や、時間帯ごとの都市高速道路の利用可能性のばらつきを招くことも考えられる。この様な問題点に対処するためには、複数時間帯の制御解を一括で求める構造のモデルの採用を検討する必要性がある¹⁰⁾。

上でも述べたように、式(15)に示したLP制御問題はタイムステップ s の制御解を求める問題であるので、 s 以前のタイムステップである r ($r < s$)の流入交通量 U_i^r やネットワーク上の交通状態(速度・密度・交通量等)を観測することは技術的には可能と考えられる。そのため利用可能な観測データを用いて、LPタイプの流入制御問題をタイムステップ毎に構成することも可能と考えられる。その際、流入制御モデルでは流入交通ならびに本線上の交通が、時々刻々各リンクに及ぼす影響を明示する必要があるため、目的地の選択状況がデータとして入手可能であることが必要となる。

なお、式(15)に示した定式化では、これらの観測値や観測結果に基づく推定値を明示的に区別して表していない。これは主に、モデルの表記を簡明にするためであり、

また後に示す数値計算例では、仮想ネットワークを対象としており、流入交通量や交通状態に関する観測値を利用することができないためでもある。なお、本研究で提案しているLPタイプの動的流入制御モデルの実用化を図る際には、観測データの有効利用についても検討する必要があると考えている。

後の数値計算例では、まず、動的流入制御モデルの特徴およびその有用性について検証するため、既往の静的LP制御モデルおよび準動的LP制御モデルによる制御解との比較分析を行う。静的LP制御モデルでは、流入交通が各リンクに及ぼす影響の時間遅れを考慮していない、言い換えれば、影響係数について流入時刻とリンクやオフランプに影響を及ぼす時間などを明示的には区別していないモデルである。静的LP制御モデルは、元来交通状態の定常性を前提条件として、構築されたモデルであるが、後で示す数値計算例では、他の動的流入制御モデルとの比較分析を行うため、流入需要が時間的に変化する状況に対して、敢えてこの静的モデルを適用している。準動的流入制御モデルでは、流入交通が各リンク・オフランプに影響を及ぼす際の時間遅れを考慮することで、流入需要の時間変化と、本線上の交通状態とを対応づけている^{9),14),16),17)}。なお準動的流入制御モデルでは計算を簡略化するため、ネットワーク上の走行速度は一定としており、これが動的モデルと準動的モデルの最大の違いである。上記の二つのモデルとともに、自然渋滞予防のための条件として、リンク容量制約を内包した流入制御モデルとなっている。数値計算を通してリンク容量制約とリンク走行速度制約を併用することの有用性についても検討する。そこで、提案した動的流入制御モデルのリンク容量制約(式(15-b))とリンク走行速度制約(式(15-c))をそれぞれ除いた動的流入制御モデルを比較対象として利用することとし、同一条件下で計算を行うこととする。

以後説明の便宜上、本研究で提案した動的流入制御モデルとその比較の対象となる各種の流入制御モデルを下記のように分類し、略号で表す。①リンク容量制約とリンク走行速度制約をととも含む動的LP制御モデルDMCS(Dynamic LP Model with Constraint of Link Capacity and Link Speed)、②リンク容量制約を含まない動的LP制御モデルDMS(Dynamic LP Model with Link Speed Constraint)、③リンク走行速度制約を含まない動的LP制御モデルDMC(Dynamic LP Model with Link Capacity Constraint)、④静的LP制御モデルSMC(Static LP Model with Link Capacity Constraint)および⑤準動的LP制御モデルQMC(Quasi-dynamic LP Model with Link Capacity Constraint)である。

5. 動的流入制御モデルの挙動検証

(1) 数値計算条件

動的流入制御モデル(DMCS, DMC, DMS), 静的LP制御モデル(SMC), 動的LP制御モデル(QMC)の数値計算の比較分析を通して, 動的流入制御モデルの挙動を検証し, その基本特性, 有用性等について検討する. ここでは仮想ネットワークを対象として簡単な数値計算を行う.

数値計算に用いるネットワークおよびその関連データをそれぞれの図-4, 表-1に示す. 時間変化する各オンランプからの流入需要は図-5, 6に示す2通りを用意している. 図-5に示した需要パターンは1つだけピークを持つものであり, 120分間にわたる変化を表している. 表-2には図-5の流入需要パターンに対応するオンランプからの流入交通の目的地選択率を示す. 図-6に示した需要パターンは, 180分間にわたる需要の時間変化を表しており, ピークを2つ持つパターンである. 需要パターン1と比較して, 流入需要の時間変化がより大きく, 非定常な交通状況下での各モデルの制御解の特性を検討するために用意した. これに対応する目的地選択率としては, 表-2に示した時間0~30分における選択率を用いることとし, 目的地選択率は時間的に変化しないと仮定する. 各リンクの交通処理能力に関連するK-V曲線のパラメータやリンクの許容速度などの条件を表-3に示す. 許容速度は各リンクとも共通とし, リンク容量に対応する臨界速度 $V_c=760\text{m/分}(45.6\text{km/h})$ に等しいとする. なお, 単位制御時間は交通データの更新周期および制御の実行可能性に基づき決定されると考えられる. 現行の交通管制システムではデータの更新等の単位時間として, 5分程度としている場合が多いこと等を考慮に入れ, ここでは, 5分を一つのタイムステップの単位制御時間とする.

(2) 動的流入制御モデルの基本特性

ここでは, 初期状態における各リンクの走行速度として, 自由走行速度を仮定する. 表-1に示したケースAの初期速度を適用して, 動的流入制御モデルDMCSと比較対象としてのQMC, SMCの解を求め, その挙動を比較し,

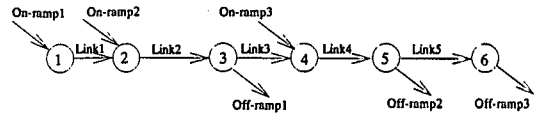


図-4 数値計算用ネットワーク

表-1 数値計算用ネットワークのデータ

| リンク番号 | 距離 (km) | 容量 (台/分) | 初期速度 (km/時) | |
|-------|---------|----------|-------------|-------|
| | | | ケースA | ケースB |
| 1 | 1.2 | 85 | 91.2 | 78.6 |
| 2 | 1.8 | 85 | 91.2 | 49.8 |
| 3 | 1.5 | 85 | 91.2 | 75.0 |
| 4 | 1.5 | 85 | 91.2 | 39.6* |
| 5 | 1.8 | 85 | 91.2 | 75.6 |

*: 渋滞領域の速度

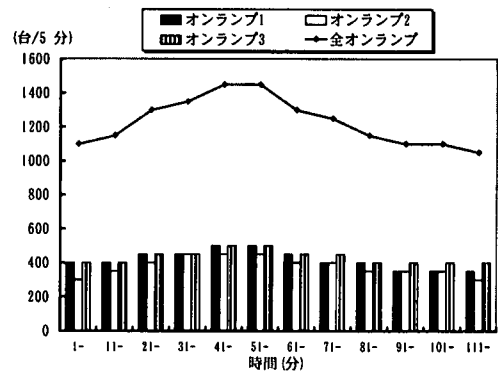


図-5 流入需要の時間変化 (需要パターン1)

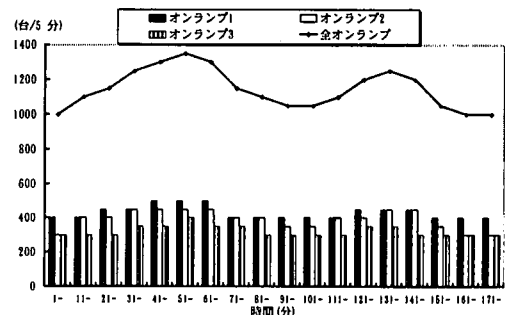


図-6 流入需要の時間変化 (需要パターン2)

表-2 目的地選択率

| オンランプ | 時間(分) | オンランプ1 | オンランプ2 | オンランプ3 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0~30 | 0.3 | 0.5 | 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 | 0.3 |
| | 61~90 | 0.4 | 0.2 | 0.4 |
| | 91~120 | 0.3 | 0.4 | 0.3 |
| 3 | 0~30 | 0.0 | 0.5 | 0.5 |
| | 31~60 | 0.0 | 0.4 | 0.6 |
| | 61~90 | 0.0 | 0.5 | 0.5 |
| | 91~120 | 0.0 | 0.7 | 0.3 |

表-3 各リンクの交通処理能力に関する条件

| リンクパフォーマンスを規定する項目 | 内容 |
|-------------------|--|
| K-V式 | $V=1520-6795 \cdot K$ 速度Vの単位は(m/分), 密度kは(台/m) |
| 臨界速度 (許容速度) | 760 (m/分) (45.6 (km/時)) |
| 臨界密度 | 0.112 (台/m) (112 (台/km)) |
| 自由速度 | 1520 (m/分) (91.2 (km/時)) |
| 飽和密度 | 0.223 (台/m) (223 (台/km)) |
| リンク容量 | 85 (台/分) |

動的流入制御モデルの特性をまとめる。

動的流入制御モデルの基本モデルであるDMCSは、渋滞防止のための制約条件として、リンク容量制約とともにリンク走行速度制約条件を含んでいる。DMCSの比較対象であるQMCおよびSMCとは制約条件の点でも異なっているが、後に示すように自由流領域に限定して制御解を求める場合は、DMCSとリンク容量制約条件のみを含んだDMCの制御解はほぼ一致するので、ここではDMCSとQMC、SMCの比較分析を行う。需要パターン1(図-5)と需要パターン2(図-6)を適用した場合の、タイムステップ別・モデル別の全オンランプ平均制御率をそれぞれ図-7、図-8に示す。また、DMCSの流入制御解に対応する走行速度の計算結果を図-9、10に示す。全オンランプでの平均制御率は式(16)により求められる。

$$\overline{CR^s} = \frac{\sum_i (U_i^{sd} - U_i^s)}{\sum_i U_i^{sd}} \quad (16)$$

ここで、 $\overline{CR^s}$ はタイムステップ s における平均制御率である。この全オンランプ平均制御率は、制御解の特徴を概括的に捉えるために有用である。

詳しい分析は後で示すが、動的流入制御モデル DMCS による制御解の基本的な特徴を簡単に述べておく。まず図-9 ならびに図-10 に着目すると、対象ネットワーク内のリンク 2 と 4、特にリンク 4 の走行速度がリンク容量に対応する臨界速度(許容速度)に近く、これらのリンクに交通量が集中していることがうかがえる。需要パターン1を用いた数値計算では(図-7、図-9)、大部分のタイムステップで流入制御が必要との解が得られているにもかかわらず、タイムステップ 14,15 以外では、リンク走行速度が臨界速度(許容速度)を上回っている。これと類似の傾向は需要パターン2を用いた数値計算結果(図-8、図-10)からも確認することができる。以上より、動的流入制御モデル DMCS を用いて求めた制御解の特徴を、次の様にまとめることができる。

- ①リンク 2 および 4 に交通が集中した結果、これらの2つのリンクの制約条件(容量制約あるいは走行速度制約)が有効となり、解空間が規定されたと考えられる。これは適用計算に用いたネットワークの形状、ランプ配置等を考慮すれば妥当と考えられる。
- ②リンク走行速度は臨界速度を上回っているにもかかわらず、流入制御が必要との解が得られているタイムステップが多く存在している。DMCS では初期の交通状態を自由流領域と仮定する場合、主にリンク容量制約が有効となり制御解が求められていると考えられる。本研究では、提案した動的流入制御モデル DMCS の基本特性を、次の2つの観点から確認を試みる。

a) 流入需要の時間変化に対する制御モデルの反応

b) 本線上の交通状態の取り扱いと制御解の関係

特にb)ではDMCSのもつ特徴をより明確にするため、い

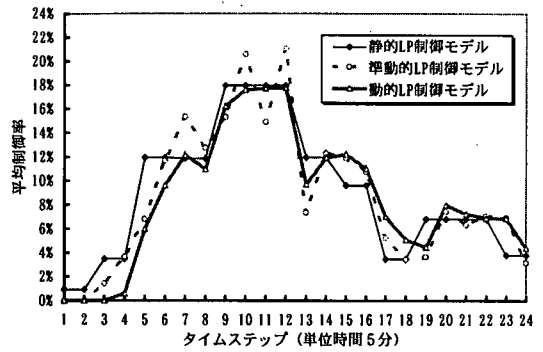


図-7 モデル別の平均制御率(需要パターン1)

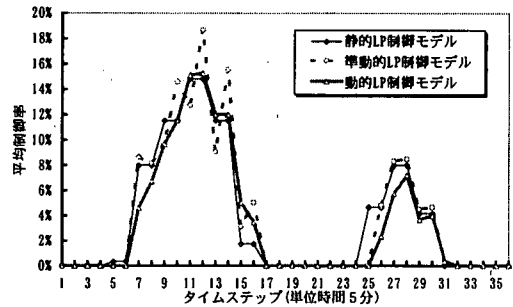


図-8 モデル別の平均制御率(需要パターン2)

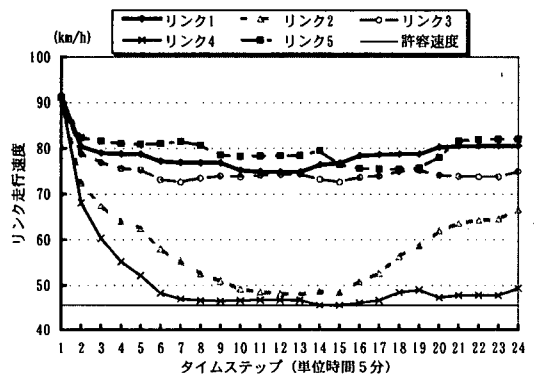


図-9 DMCSによる推定リンク走行速度(需要パターン1)

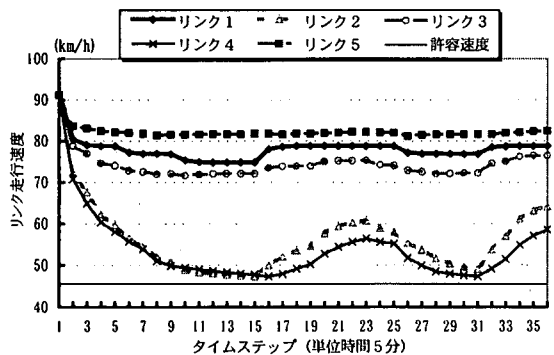


図-10 DMCSによる推定リンク走行速度(需要パターン2)

いわゆる静的LPモデル(SMC)および準動的LPモデル(QMC)により得られた解との比較分析を行うこととする。

a) 流入需要の時間変化に対する反応

先の図-5に示した需要パターン1は、流入需要が41～60分で最大となる1つのピークを持つパターンとなっている。この需要パターン1に対応する動的流入制御モデル(DMCS)の制御率(図-7)に着目すると、その制御率は流入需要のピークである時間帯10～12(46～60)分においても最も高くなっている。

次に表-3に示した流入交通の目的地選択率の時間変化に着目すると、91～120分では他の時間と比べて、オンランプ1～3からの流入交通が、そのリンクの下流にあるオフランプ2を目的地として選択する割合が最も高く、リンク4への交通集中が相対的に大きくなっている。その結果、時間帯19～24(91～120分)については各オンランプからの流入需要がピーク時と比較して相対的に低いにもかかわらず、DMCSから得られた平均制御率はそれぞれ4.5, 8.0, 7.3, 6.9, 6.9, 4.4%に達している。これはOD構造の時間変化による、リンク4への交通の相対的な集中の影響が反映されたものと考えられる。上記の需要パターン1を用いた計算結果から判断して、動的流入制御モデルDMCSは流入需要(需要量およびそのOD)の時間変化に対応することが可能と考えることができる。

DMCSの流入需要の時間変化への対応可能性については、流入需要が2つのピークを持つ需要パターン2を用いた数値計算からも確認できる。図-8の平均制御率に着目すると、流入需要量のピーク(タイムステップ11,12と27,28)と平均制御率のピークがほぼ一致している。

b) 本線上の交通状態の取り扱いと制御解の関係

動的流入制御モデル(DMCS)とこれまでの静的LPモデル(SMC)、準動的モデル(QMC)が根本的に異なるところは、オンランプからの流入交通が、各リンクに流入あるいは通過し、当該リンクに影響を及ぼす際の時間遅れを明示的に考慮するか否かという点と、ネットワークのパフォーマンスの時間変化を流入制御モデルに内包するか否かという点にある。静的モデル(SMC)では元来ネットワーク上の交通状態の定常性を仮定しているため、流入交通が各リンクに影響を及ぼす際の時間遅れは無視されており、さらに走行速度や密度で代表されるパフォーマンスの時間変化も考慮されていない。したがってリンク通過率 η_{ijha}^s は常に1と見なされ、リンク影響係数 Q_{ia}^s は流入交通の目的地選択率と経路選択率によって決定される。動的モデル(DMCS)と準動的モデル(QMC)ではともに、オンランプからの流入交通が各リンクを通過する際の時間の遅れを考慮している。そのためリンク通過率 η_{ijha}^s は1より小さく、流入ランプから隔ったリンクの通過率はより小さくなる。ところで準動的流入制御モデル(QMC)ではモデル構造を簡素化し、求解性を高めるため、本線上

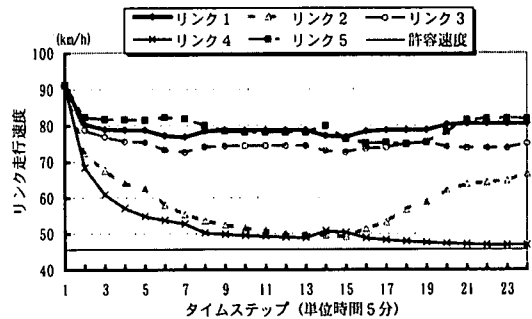


図-11 SMCの制御解から推定したリンク走行速度

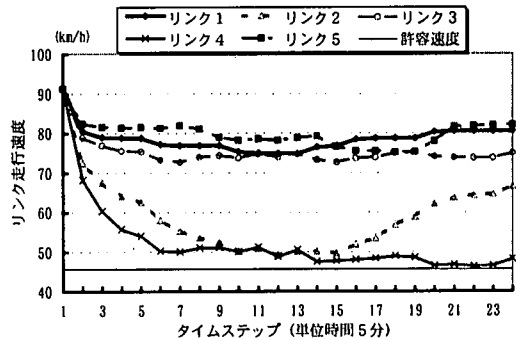


図-12 QMCの制御解から推定したリンク走行速度

の交通状態の時間変化を考慮せず、リンク走行速度は一定と仮定しており、リンク通過率も時間的に変化しない。一方、動的モデルDMCSでは交通状態の観測結果や予測に基づき、タイムステップ毎にリンク走行速度を設定し、これに基づきリンク通過率を推定するので、離散的な変化ではあるがリンクのパフォーマンスの時間変化を考慮した形で制御解を求めることができる。

ここでは動的流入制御モデル(DMCS)から得られた制御解と、準動的モデル(QMC)および静的モデル(SMC)の制御解とを比較分析することにより、流入交通が本線の交通状態に及ぼす影響の取り扱いと、計算される制御解との関係について検討する。なお静的LP制御モデルは、本来交通状態の定常性が仮定できる場面への適用が妥当ではあるが、ここではDMCSの比較対象として、流入需要が時間変動する状況に対して、敢えて静的LPモデルを適用した結果を用いることとする。評価指標としては、各モデルから求められた平均制御率と、リンク走行速度を併せ用いることとする。動的制御モデルについては、各リンクの走行速度は制御解とともに求められるので(図-9、図-10)、ここでは、静的モデル(SMC)と準動的モデル(QMC)の制御解に対応するリンク走行速度を、既出の式(4)の等式部分を用いて推定しておく。SMCの制御解に対応した走行速度を図-11に、QMCのそれを図-12にそれぞれ示す。

①動的流入制御モデルと静的LP制御モデルの比較分析

前出の図-7と図-8に示されているタイムステップごとの平均制御率に着目する。流入需要パターン1および2を用いた計算ケースに共通しているのは、流入需要の増加時において、静的モデル SMC を適用した場合の方が動的モデル DMCS の適用時と比較してより早いタイムステップで流入制御が必要との解を得ている点である。静的流入制御モデルでは、流入交通が各リンクに影響を及ぼす際の時間遅れ、ならびに、各リンクの交通状態の時間変化を明示的に考慮していないため、影響係数が過大評価されている可能性が高い。そのため、需要の増加時に動的モデルと比較して、早めに制御が必要との解が得られたものと考えられる。ところで、需要がピークとなる期間およびその前後では、動的流入制御モデルから得られる解と静的モデルからのそれは、平均制御率の点から見れば大きな差はない。

図-9 および図-11 は、需要パターン1について各々 DMCS ならびに SMC を適用した場合の、タイムステップ・リンク毎の平均走行速度の推定値を示している。これを見るとリンク2および4が、このネットワークにおけるボトルネックであり、その速度低下が大きいことが分かる。DMCS と SMC の走行速度を比較すると、需要のピーク（タイムステップ9～12）およびその前後においても、SMC を適用した場合の走行速度は DMCS を適用した場合ほど低下していない。渋滞を起こさない範囲で最も交通の処理能力が高まるのは、臨界状態であるので、SMC から得られた解はネットワークの容量を十分に利用しているとは言い難い。全時間帯における総流入台数について見てみると、DMCS が13424台であるのに対して、SMC では13380台である。ちなみに本研究の数値計算では、流入制御を受けた車両はオンランプで待つことは無く、他の一般道路などを利用すると仮定している。実用上は、流入制御モデルから得た解に基づき、オンランプを閉鎖することとなり、その情報はドライバーに伝えられると考えられるため、この様な仮定をしている。そのため、総流入台数がモデル間で異なっている。

以上の議論より、本研究の数値計算における総流入台数の差は僅かではあるが、動的流入制御モデル(DMCS)を利用すると、静的LP制御モデル(SMC)を利用する場合と比較して、より効率的な制御を行える可能性が高いと考えられる。特に需要が急増する時間帯では、SMCの方がDMCSより制御率が高くなっており、本線上の交通状態から見れば過剰な制御となっている可能性が高いと考えられる。そこで需要の時間変動が大きい場合等には、動的流入制御モデルの適用が望まれる。

②動的制御モデルと準動的制御モデルの比較分析

動的流入制御モデル(DMCS)と準動的流入制御モデル(QMC)から得られる制御解の相違点は、次の2つである。

- 1) 需要の増加時における平均制御率に関して、QMCの方がDMCSより全般的に高い値となっている。
- 2) 需要のピーク（タイムステップ9～12）およびその前後において、QMCの平均制御率は振動する。

QMCでは、流入交通が各リンクに影響を及ぼす際の時間遅れは考慮しているものの、計算を容易にするため、各リンクの走行速度は臨界速度と等しく一定と仮定して解を求めている。そのため需要がピークに達し、ボトルネックリンクの交通状態が臨界状態に達する以前のタイムステップでは、モデル内で想定している交通状態は実際の状態と比較して、かなり悪い状態を想定していることになる。このため、需要の増加時ではDMCSの平均制御率よりQMCの制御率の方が大きくなるものと考えられる。また、需要の増加期のあるタイムステップに必要以上に厳しい流入制御をすると、次のタイムステップではネットワークの交通処理能力に若干余裕ができるため制御が緩やかになり、その次のステップでは逆に交通処理能力の余裕が無くなるため、制御が厳しくなる。この繰り返しの結果として、ピーク時での平均制御率の振動現象がQMCの数値計算結果に生じたものと考えられる。

図-12に示したように SMC 同様、QMC のボトルネックリンクの走行速度が臨界速度に達していない点、QMC の制御タイムステップ全体での総流入台数が13382台で、DMCS のそれより小さい点、および需要の増加時にQMCの制御率の方が高くなる点等を考慮すれば、やはりDMCSを利用した方が効率的な制御ができる可能性は高いと言える。

(3) 自然渋滞予防の制約条件の役割

本研究で提案した動的流入制御モデル(DMCS)は非定常な交通状態を対象として、各リンクの円滑な走行を確保し、効率的なネットワーク利用が可能となるような制御解を求めるためのモデルである。自然渋滞の回避を主目的としているが、先述の通り事故等の突発事象により交通状態が渋滞領域にある場合にも適用することを本研究では検討している。そのため、リンクの交通状態に関する制約条件として、容量制約条件と走行速度制約条件を同時に制御モデルに組み込んでいる。ここでは数値計算を通して、この2つの制約条件を併用することの意義と各制約条件の役割について明らかにする。

a)自由流領域でのモデルの挙動

渋滞防止のための制約条件が異なる3種類の動的流入制御モデル(DMCS, DMS, DMC)を適用した場合の平均制御率を図-13に、リンク容量制約を持たないDMS適用時のリンク終端断面交通量の推定結果を図-14に示す。なお、図-13については、グラフの線が2本しか無いように見えるが、これはDMCSとDMCのそれがほぼ完全に一致したためである。ネットワークの条件等は5章(2)節の計

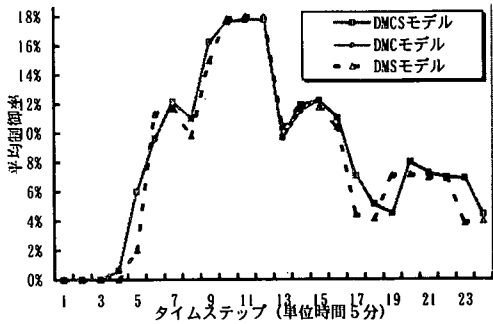


図-13 渋滞防止のための制約条件の影響

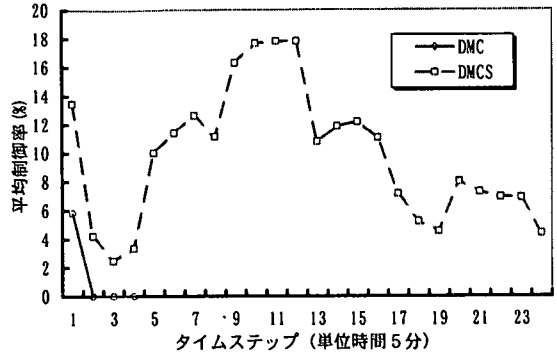


図-15 渋滞リンクを含む場合のモデル別平均制御率

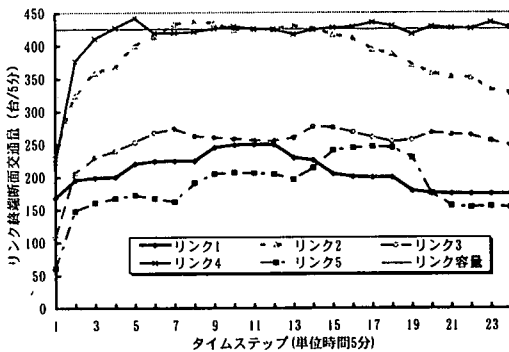


図-14 DMS 適用時のリンク終端断面交通量

算条件と同じとし、ネットワーク上の交通状態に関しては、自由流状態から計算を開始する。流入需要としては需要パターン1を用いる。

①DMCSとDMCの流入制御結果の比較

ここではリンク走行速度制約条件導入の影響を把握するため、リンク容量制約・走行速度制約の両条件を内包したDMCSと、走行速度制約条件を持たないDMCを適用した数値計算結果の比較分析を行う。図-13を見るとDMCSとDMCの平均制御率はほぼ完全に一致しており、タイムステップ14についてのみごく僅かな相違が認められる。DMCSに対応するリンク走行速度(図-9)に着目すると、タイムステップ14と15のリンク4の走行速度が臨界速度に等しいと分かる。これより、タイムステップ14においてDMCSとDMCの平均制御率が僅かに異なったのは、このタイムステップにおいてDMCSの走行速度制約が有効となったためと考えられる。

②DMCSとDMSの流入制御結果の比較

ここではリンク容量制約条件導入の意義について確認するため、DMCSと容量制約条件を持たないDMSの適用結果について比較分析を行う。図-13に着目すると、DMCSとDMSの平均制御率は僅かな量ではあるが、ほぼ全てのタイムステップで異なっており、DMSの制御率の方がDMCSのそれより低いタイムステップが多くなっている。DMS適用時のリンク終端断面交通量(図-14)に着目

すると、平均制御率がDMCSより低いタイムステップにおいては、ボトルネックであるリンク4の終点に到着する交通量がリンク容量を上回っている。たとえば、タイムステップ5と23における平均制御率はDMSの方がDMCSより明らかに低いが、そのタイムステップにおける断面交通量も交通容量(425台/5分)を上回り、各々442、435(台/5分)に達する。各タイムステップ内は、本線上の交通状態を一定と仮定しており、リンク交通量増加の影響は、その次のタイムステップでしか走行速度に反映されない。その結果、DMSでは容量を超える交通量が流れるような制御解が求められてしまったものと考えられる。

なお、DMSを適用した場合に、リンク交通量が容量を上回る分は量的には非常に小さく、それが本線の交通状態に及ぼす影響は、この数値計算だけでは不明である。今後、本制御モデルから得られた解を流入交通需要とする交通流シミュレーションを実施し、その影響の程度を把握する必要がある。その結果を踏まえて最終的に、リンク走行速度制約条件とリンク容量制約条件併用の必要性について判断することとを研究の課題とする。

b) 渋滞区間を含むネットワークに対する適用

既往の流入制御モデルは自然渋滞の防止が主目的であるため、自由流領域のみを対象としており本線の一部区間に渋滞が生じている場合などには対応できない。しかしながら、ここで提案する動的流入制御モデル(DMCS)は、リンク走行速度制約条件を内包することで、ネットワークの一部に軽度な渋滞が生じている場合にも適用可能としている。数値計算の条件は、基本的にはこれまでのものと同じであり、ネットワーク上の走行速度の初期値(表-1)だけを自由走行速度(ケースA)からケースBの速度に変更する。注意すべき点はケースBの初期速度Vでは、リンク4の走行速度が $V_4=660(\text{m}/\text{分})(39.6\text{km}/\text{h})$ で渋滞領域にある点である。なお、流入需要としては、需要パターン1を用いる。動的流入制御モデルDMCSの比較対象である、リンク走行速度制約条件を持たないDMCによる平均制御率を図-15に示す。図-16、図-17は各々DMC、DMCS適用時のリンク走行速度を示している。

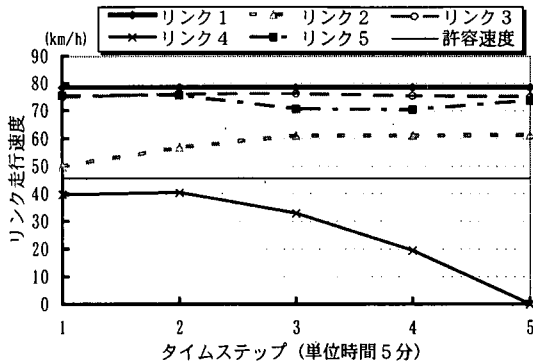


図-16 DMC適用時のリンク走行速度

図-15によると、DMCの制御率は最初のタイムステップ1に5.8%、タイムステップ2から4まではゼロであり、それ以降のタイムステップでは制御解が存在しなくなる。図-16に示した各リンクの走行速度に着目すると、リンク4の速度は渋滞領域から始まり単調減少していき、タイムステップ5で遂に0となってしまう。渋滞領域に交通状態がある場合のリンク交通量は、リンク容量制約を必ず満足するため、総流入台数最大化という目的関数の作用により、より多くの交通がネットワーク内に流入する解が得られることとなる。この様な解が複数タイムステップ連続して求められれば、既に流入した交通がボトルネック区間に及ぼす影響のみで、当該区間の容量が使い切られてしまうため、あるタイムステップ以降では解を求めることができなくなる。

一方、リンク走行速度制約条件を内包した動的制御モデル(DMCS)を適用すると、DMCで見られた上記の問題点を回避することができる。リンク4の初期走行速度を $V_{i1}=39.6(\text{km/h})$ から許容速度 $45.6(\text{km/h})$ に回復するため、図-15に示したようにDMCSの制御率はタイムステップ1に13.5%に達し、初期状態が自由走行速度である場合より、その平均制御率はタイムステップ7まで高くなっている。DMCSを適用した場合のそれに対応する走行速度を図-17に示すが、リンク4の走行速度はタイムステップ2において許容速度に回復しており、タイムステップ14までのリンク4の走行速度はほぼ許容速度に等しい。初期状態が自由走行速度である計算例での速度の変化(図-7)に比べると、リンク4の速度が許容速度に近く、速度制約がよく効いていると考えられる。

6. おわりに

本研究ではLP制御モデルを基礎として、流入交通需要と本線上の交通状態の時間変化を明示的に考慮できる動的流入制御モデルを提案した。渋滞予防の制約条件としてリンク容量制約に加えてリンク走行速度制約を導入し、交通状態が非定常な場合あるいは本線上のごく一部に渋

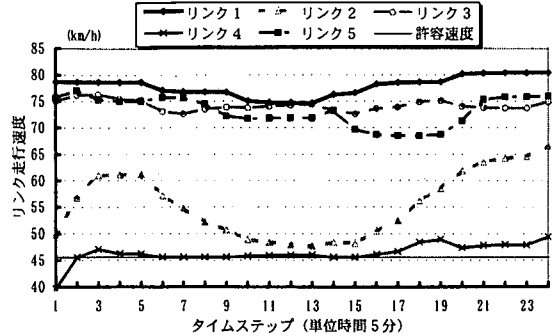


図-17 DMCS適用時のリンク走行速度

滞が存在している場面にも適用可能な制御モデルとした。そして、提案した動的制御モデルを用いた数値計算を通して、モデルの挙動を確認するとともに、動的流入制御手法の役割の明確化を試みた。その結果、次のような知見を得ている。

- ①LPタイプの動的流入制御モデルと、静的および準動的LP制御モデルの挙動を比較すると、動的制御モデルを適用した方が、より効率的な流入制御、換言すれば渋滞を発生させない状況下で、より多くの交通が都市高速道路を利用できる様な流入制御を実現する可能性が高いと言える。特に、流入需要が大きく変化する場合には、動的制御モデルの適用が不可欠と考えられる。
- ②リンク走行速度制約を渋滞回避の条件として導入することで、本線上の一部区間に渋滞が生じる様な場面にも、LPタイプの動的流入制御モデルが適用可能であることが確認された。

最後に今後の研究課題を、以下の3点にまとめておく。

- ①動的流入制御モデルの効果を定量的に評価するため、動的ネットワークシミュレーションモデルを構築する必要がある。動的流入制御の効果を把握するためには、ネットワーク上に存在する車両のODや流入時刻に関する情報を明示する必要がある。そこで、マイクロモデルとして、このシミュレーションを構築する。
- ②本研究で提案した動的流入制御モデル(DMCS)の問題点の一つとして、制御解を求めようとする対象タイムステップの流入交通が後続のタイムステップにおいてネットワークの各区間に及ぼす影響を考慮せずに、制御解を求めている点を挙げる事ができる。この問題に対処するための一案として、逐次最適化タイプの流入制御モデルを基礎として、対象タイムステップおよび後続の複数のタイムステップの流入可能量を、LPでまとめて求めるモデルの構築を検討する。
- ③実際の観測交通データ(流入交通の目的地選別率やリンク交通量・走行速度など)の利用可能性についても把握するとともに、提案した動的流入制御モデルの実用性について検討する。

謝辞：本研究の例題計算は、京都大学大学院瓦谷誠一郎君の協力によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Wattleworth, J.A.: Peak Period Analysis and Control of a Freeway System, *Highway Research Record*, No.157, pp.1-10, 1967.
- 2) 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.
- 3) 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, pp.15-23, 1975.
- 4) 井上矩之, 辻本賀一, 多和健一：整数LPを用いた高速道路ブース数制御, *土木計画学研究・講演集*, No.11, pp.133-140, 1988.
- 5) Yuan, L.S. and Kreer, J.B.: Adjustment of Freeway Ramp Metering Rates to Balance Entrance Ramp Queues, *Transportation Research*, No.5, pp.127-133, 1971.
- 6) Wang, J.J. and May, A.D.: Computer Model for Optimal Freeway On-ramp Control, *Highway Research Record*, No.469, pp.16-25, 1973.
- 7) Chen, C.I., Gruz Jr., J.B. and Paquet, J.G.: Entrance ramp control for Travel rate maximization in expressways, *Transportation Research*, Vol.8, pp.503-508, 1974.
- 8) 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, *土木学会論文集*, No.449/IV-17, pp.135-144, 1992.
- 9) 松井寛, 藤田素弘, 堀尾朋宏：交通量の空間的分布を考慮したファジィLP制御, *土木学会土木計画学研究・論文集*, No.10, pp.95-102, 1992.
- 10) 山内敏通, 朝倉康夫：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.
- 11) 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.
- 12) Wang, C.F.: On a Ramp-flow Assignment Problem, *Transportation Science*, Vol.6, No.2, pp.114-130, 1972.
- 13) Isaksen, L. and Payne, H.J.: Suboptimal Control of Linear System by Augmentation with Application to Freeway Traffic Regulation, *IEEE, Transportation Automation Control*, Vol.AC-18, No3, pp.210-219, 1973
- 14) 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.
- 15) 森地茂, 清水哲夫：都市高速道路における新たなリアルタイム流入制御手法に関する研究 - 遺伝的アルゴリズムの適用 -, *土木計画学研究・論文集*, No.13, pp.915-922, 1996.
- 16) 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回交通工学研究発表会論文報告集, pp.113-116, 1995.
- 17) 楊曉光, 飯田恭敬, 宇野伸宏：オフランプ容量制約を考慮した都市高速道路の準動的流入制御に関する手法, *土木計画学研究・講演集*, No.18(2), pp.249-252, 1995.
- 18) 佐佐木綱, 飯田恭敬：*交通工学*, pp.78-83, 1992.

(1997. 8. 4 受付)

LP TYPE DYNAMIC INFLOW CONTROL MODEL CONSIDERING TIME-DEPENDENT CHANGE IN TRAVEL SPEED

Xiao-Guang YANG, Yasunori IIDA and Nobuhiro UNO

This study proposes the dynamic inflow control model incorporating Linear Programming approach. This model can explicitly consider the time-dependent changes in both the inflow demand and the traffic condition on the network to estimate the optimal inflow at on-ramp which can make the capacity of urban expressway more efficient use. Especially, the speed-density relation of each link is introduced into the inflow control model to predict precisely time-of-day dynamics of traffic condition on the network. In addition, the constraint of link travel speed, as well as the constraint of link capacity, is included in the inflow control model both to prevent traffic jam and to encourage recovery from slight jam. This study examines the significance and usefulness of the proposed model through the simple numerical experiments.