

都市高速道路ネットワークに対する動的流入制御モデルの開発*

Development of Dynamic On-Ramp Traffic Control Model for Urban Expressway Network†

飯田恭敬**・金 周顯***・宇野伸宏****

By Yasunori IIDA, Ju-Hyun KIM and Nobuhiro UNO

1. はじめに

都市高速道路の主要機能は、街路の交通混雑の緩和と都市レベルでの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交通の迅速な処理を可能とすることにある。しかし、現実の状況を鑑みるに、都市高速道路には大量の交通需要が集中し、渋滞が頻発している。そこで、都市高速道路の効率的な運営のため、道路網の持てる容量を有効利用し、大量の交通需要を処理しつつ、自然渋滞の生じない円滑な交通状態を確保することを目的とした交通制御手法を開発・導入することが必要不可欠である。

都市高速道路の流入制御パターン設定の支援方策としては、従来、各オンランプからの流入量を操作変数とした、線形計画法を用いたLP¹⁾およびBP流入制御手法^{2,3)}が提案されてきた。既存のLPおよびBP制御では、ランプ流入需要ならびに交通流動の定常性が仮定されており、流入制御が交通流動に及ぼす影響を無視できるほど十分長い時間帯でのマクロな制御解を求める構造をとっている。いわゆる静的な制御問題の枠組の中で取扱いがなされてきた。現実には、都市高速道路への流入需要、ならびに、ネットワーク上の交通状態は時間的に変動しており、静的制御問題のフレームの中ではこれらの時間変動に対応した形で、実効性の高い制御手法を構築することには、限界があることは明らかである。また、都市高速道路網の拡大に伴う利用可能経路の複数化により、ドライバーは、都市高速道路上で経路選択をすることが可能となっている。ドライバーの経路選択の状況に応じて、最適制御

パターンも異なることが予測される。そこで、流入制御パターンを設定に際しては、ドライバーの自主的な経路選択を考慮する必要がある。

一方、情報通信技術や観測手法の進歩を基礎とした、高度交通情報システムが近い将来普及することが予想される。これを利用すれば動かつ詳細なODデータの入手も可能となり、現時点では入手困難な流入需要量、目的地選択確率、経路利用率等に関する時間変動データも利用可能となると予想される。今後、都市高速道路の交通制御では、上記の動的な交通データを用い、時々刻々の交通状態に応じた最適制御パターンを設定することが可能となり、制御のリアルタイム性をより強めることがハードウェア的には可能であると考えられる。

以上より、都市高速道路の効率的かつ円滑な運用を図るためには、交通需要および交通状態の時間変動を考慮した交通制御を行うべきであることは明らかであり、ハードウェア面の諸条件は現時点でも概ねクリアできる。そのため、動的な流入制御を実施する上での重要な課題は、流入制御パターンの策定を支援する数理的アプローチの開発と考えられる。

現時点まででは、動的な流入制御問題に取り組んだ研究は数少なく、時間的に変動する交通需要や走行速度の交通量依存性を考慮すべく動的流入制御問題として扱ったC.F Wang⁴⁾の研究、動的LP制御モデルを構築し、単一経路の単純な道路に適用したM. Papageorgiou⁵⁾の研究、非定常な交通流動を対象に、最大原理を用いて流入制御理論を構築している松井⁶⁾など国内外問わずいくつかの研究例があるにとどまっている。また、これらの研究は、回廊状の都市高速道路等のオン・オフランプペア(ODペア)間の利用可能経路が唯一であるネットワークへの適用が前提となっており、ネットワークの拡大及び利用可能経路の複数化については考慮されていない。

* キーワーズ：経路選択、交通制御

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

*** 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 博士後期課程

**** 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,
FAX 075-753-5126)

そこで、本研究では、高度交通情報システムの導入を前提とし、流入需要および交通流動の非定常性を考慮でき、実規模のネットワークにも適用可能な実用的な動的流入制御手法の開発を行う。その際、既往のLP制御をベースとして、その動学化を図り、さらにドライバーの経路選択ルールを明示的に考慮する。また、都市高速道路の制御は、自然渋滞の予防を目的とした平常時制御とともに、突発事象の生起（交通事故、故障車の発生、工事中、気象条件の急変など）に起因する渋滞に対処する非常時制御も重要である。突発事象に起因する渋滞の拡大は急速であり、その影響度も大きい。また、自然渋滞と異なり、ボトルネックの位置は一定ではなく、また、生起する突発事象の程度によって交通への影響度も異なる。つまり、様々な条件に応じて迅速に対処する必要がある。このような非常時制御への適用可能性、ならびにネットワーク規模での数値計算の可能性を考慮して、ドライバーの経路選択および各リンクの交通状態の変動を、シミュレーションにより反映させるモデルとして流入制御手法を開発する。

2. モデルの全体構造

本研究で構築するドライバーの経路選択を考慮した動的流入制御モデルは、ランプでの流入量を決定する動的流入制御モデル、ドライバーの経路選択（交通行動）を表す経路選択モデル及びドライバーの経路選択から交通状態を導き出す動的交通流モデルの3モデルから構成される。これらの3モデルの間には図-1に示すような相互関係があり、これらの関係を明示的に考慮することを通じて、ドライバーの経路選択行動を反映した最適流入制御パターンを求めることが可能となる。ここでの最適流入制御パターンとは、流入需要ならびに交通流動の時間変動を考慮し、都市高速道路の運営者の制御方針に応じて、最も効率的な都市高速道路の利用を可能とするパターンのことである。

この流入制御モデルでは、経路選択モデルにおいて、各ドライバーが走行時間の見込みに基づいて経路選択を決定する。交通流モデルにおいては、ドライバーの経路選択を集計し、それをインプットとして各ネットワーク上のフローの挙動を記述し、走行

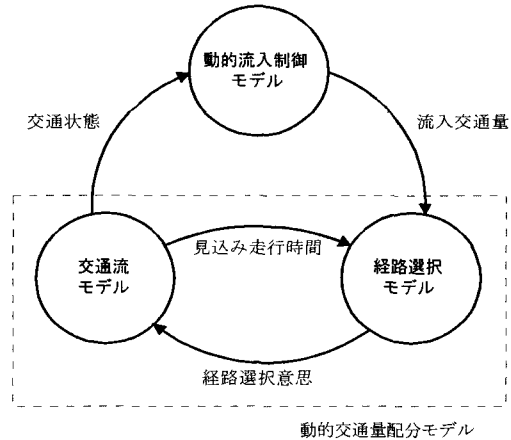


図-1 動的流入制御モデルの基本構造

時間を求める。さらに交通流モデルから得られた交通状態を動的流入制御モデルに渡して、制約条件を満足するような流入量を求める。以上の操作を単位制御時間帯ごとに繰り返して、その収束計算を行う。

都市高速道路網が大規模化して、ネットワーク内の各ODペア間で複数の利用可能経路が存在する場合、ドライバーの経路選択の記述が必要となる。本研究で提案する動的流入制御モデルでは、ドライバーの経路選択およびフローの動態を記述するため、ある種の動的交通量配分モデル（交通流モデルおよび経路選択モデル）を内包した構造とする。

3. 動的流入制御モデル

本研究では、交通混雑の影響を考慮可能な動的流入制御手法の開発を目指す。特にシミュレーションタイプの動的交通配分モデルを流入制御問題に組み込むことで、突発事象による渋滞の発生時にも基本的には制御解を計算可能なモデルとして構築する。

流入需要ならびにネットワーク上の交通流動に応じた流入制御を行うには、制御対象となる全時間帯（全制御時間）をいくつかの単位制御時間帯に区分し、各々の単位制御時間帯ごとに流入制御パターンを求め、これを逐次更新する方法をとる。

(1) 前提条件と目的関数

まず、モデル作成に当たっては、以下の前提条件を設ける。

- ① 各ランプの流入需要量が予測可能である。
- ② ランプ間OD確率（目的地選択確率）が予測可能である。

これらの条件は、現時点では満足することが困難であるが、近い将来その普及が予想される高度交通情報システム等を利用すれば、ランプ需要量および動的かつ詳細なODデータの入手も可能となると考えられる。特に、交通需要の時間変動を日々繰り返して観測することにより、平均的な需要の時間変動（交通需要の平均時間変動）を把握することは可能となると考えられる。

動的流入制御問題の目的関数は、都市高速道路の運営者の政策あるいは方針を反映したものとなる。そこで、異なる目的関数を用いたときの交通制御の効果を比較・検討することも効率的な都市高速道路の交通管制方策を確立する上で重要である。本研究では目的関数として、総流入台数最大化と総走行台キロ最大化を採用する。総流入台数最大化は、現行のLP制御で用いられている考え方であり、均一料金制度の下では、利用台数最大とともに料金収入最大を意味している。一方総走行台キロ最大化は総流入台数最大化と比較して長距離トリップの利用を優先させる傾向があり、これは通過交通、長距離トリップの円滑な処理により、一般街路の混雑緩和を目的とした都市高速道路の重要な機能に沿うものと考えられる。本研究でもこれら2つの目的関数を設定して、モデルの構築、および数値計算を行う。

(2) 影響係数の取り扱い

LP制御手法をベースとして、動的な流入制御問題を定式化する場合、静的な問題と最も大きく異なる要素は、各オンランプから流入した車両が各リンクに及ぼす影響を示す影響係数である。静的問題の影響係数 Q_{ia} とは、あるランプ i から1台の車が流入した場合にリンク a に存在する確率のことである。

静的な制御問題では、この影響係数あるランプから流入した交通が制御時間帯に全て流出ランプに到着すると仮定して作成するため、当該制御時間帯に流入した各ランプ間のOD交通量は経路上に常に一様に分布しているとみなされ、オンランプからオフランプまでの到達経過時間が無視されている。流入制御をいくつかの時間帯に分割して実施する場合、

前の制御時間中にオフランプから流出できなかった交通は本線上に残留しているはずであるが、この残留交通の影響が次の時間帯では全く無視されている（制御時間相互の独立性の仮定）といった問題を残していた。

本研究では交通需要ならびに交通流動の非定常性を考慮できる実用的な動的流入制御モデルを構築するため、①ランプ需要量の時間的変動および、②本線上の交通量の時間的変動に対応できるモデルとする。そのため、影響係数に関しては、オンランプから車両が流入した時間帯と、その車両が各リンクに実際に影響を及ぼす時間帯を明示する必要がある。すなわち、動的流入制御での影響係数 $Q_{ia}^{t-k,t}$ は、時間帯 $t-k$ にオンランプ i から1台流入したとき、時間帯 t に本線上のリンク a に存在する確率を意味している。（ $k=0,1,2,\dots,t-1$ ）

なお、本研究では後に示す動的流入制御モデルを用いた数値計算例に基づき、上記の制御時間相互の独立性の仮定の有効性について簡単な検討を試みる。

(3) 動的流入制御問題の構築

本研究で提案する動的流入制御問題の制約条件は、「リンク容量に関する制約」および「決定変数の上・下限に関する制約」である。

a) リンク容量に関する制約

この制約条件は本線上のリンク交通量が交通容量を越えないというもので、自然渋滞の予防を目的としたLP制御の基本的な制約条件である。これは(2)で説明した影響係数を用いると次の式で表せる。

$$\sum_i Q_{ia}^{t,t} U_i^t + \sum_i Q_{ia}^{t-1,t} U_i^{t-1} + \sum_i Q_{ia}^{t-2,t} U_i^{t-2} + \dots \leq C_a^t \quad (1)$$

上式の左辺の第1項は現時間帯 t の流入量のうちリンク a を時間帯 t に通過する交通量を表す。第2項以降は時間帯 $t-1$ 以前に流入した交通の残留分のうち、時間帯 t にリンク a を通過する交通を表している。また、上式で U_i^t は制御変数であるが、 $U_i^{t-1}, U_i^{t-2}, \dots$ などは過去の時間帯における制御により決定済の既知の流入台数である。(1)式は集約すると(2)式のようにになる。

$$\sum_i \sum_k Q_{ia}^{t-k,t} U_i^{t-k,t} \leq C_a^t \quad (k=0,1,2,\dots,t-1) \quad (2)$$

また、都市高速道路の拡大に伴い、ドライバーの都市高速道路路上での経路選択を考慮する必要がある

と考えられる。本研究では、次章に示す動的交通量配分モデルにより、ドライバーの経路選択に影響係数 $Q_{ia}^{t-k,t}$ の中に反映させる。

b) 決定変数 U_i^t の上限と下限に関する制約

各オンランプからの許容流入交通量 U_i^t は、そのランプでの各時間帯 t における流入需要量を越えないという条件と非負条件を満たさなければならない。ただし、各ランプからの流入需要量は外生的に与えられるとする。なお、流入需要量は、統計的に蓄積される流入需要の平均的な時間変動を基礎として、リアルタイムでの観測値を加味して、数十分程度先の需要に関する短期的な予測を行い、これを流入需要として利用する。予測手法に関しては、今後の研究課題として検討していく。

$$0 \leq U_i^t \leq U_i^{dt} \quad (3)$$

以上の問題をまとめると次のように定式化できる。

[目的関数 (総流入台数最大化の場合)]

$$\max \sum_i U_i^t \quad (4)$$

[目的関数 (総走行台キロ最大化の場合)]

$$\max \sum_i U_i^t \bar{d}_i^t \quad (5)$$

$$s.t. \sum_i \sum_k Q_{ia}^{t-k,t} U_i^{t-k,t} \leq C_a^t \quad (6)$$

$$0 \leq U_i^t \leq U_i^{dt} \quad (7)$$

ここで、

t : 単位制御時間帯 ($t = 1, 2, \dots, T$)

U_i^t : 時間帯 t におけるオンランプ i からの流入交通量 [決定変数]

$\bar{d}_i^t$: 時間帯 t におけるオンランプ i からの流入車の平均利用距離

$Q_{ia}^{t-k,t}$: 時間帯 $t-k$ にオンランプ i から 1 台流入したとき、時間帯 t リンク a にその車両が存在する確率 [影響係数] ($k = 0, 1, 2, \dots, t-1$)

C_a^t : 時間帯 t におけるリンク a の容量 (所与)

U_i^{dt} : 時間帯 t におけるオンランプ i からの流入需要量 (所与)

4. 動的交通量配分モデル

動的流入制御問題における動的配分モデルの役割は、時々刻々の影響係数 $Q_{ia}^{t-k,t}$ の変動を予測することである。すなわち、各制御時間帯において、ドライバーの経路選択と経路上の各リンクの交通状態の変

動を予測することである。流入制御を実施した場合、都市高速道路の運営者は、ランプ流入量のある程度決定することはできるが、ドライバーの経路選択行動を直接的に制御することはできない。そのため、ドライバーの自由な経路選択、および、その選択の結果としてのネットワークフローを予測し、流入交通の各ランプへの影響度を考慮しつつ、制御解を求める必要がある。本研究では、単位時間の大きさを容易に変更できる点、ネットワークレベルでの計算の実行可能性を考慮し、ボックスモデル⁷⁾の考え方に基く動的配分モデルを用いる。ボックスモデルは、都市部を想定した大規模なネットワークを対象としているため、都市高速道路網の規模の拡大にも対応しやすいと考えられる。

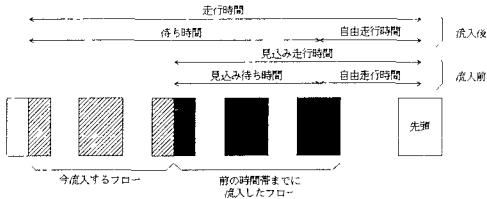
(1) モデルの基本的な考え方

実際に走行する時点でのネットワークの状態は、経路選択の意志決定を行った時点でのネットワークの状態から変化している。このような状況でのドライバーの経路選択行動を考慮するために、モデルの構築において配分原則は動的利用者最適配分 (Dynamic User Optimal : DUO)⁸⁾⁻¹⁰⁾を用いる。DUOの配分原則の定義は「全ての利用者が、目的地までの通過ノードごとに、その通過時点で実現している目的地までの見込み走行時間が最小になる経路を選択した結果として成立する動的フローパターン」である。ここでいう見込み走行時間とは、利用者が見込む走行時間であり、リンクフローの関数として表されとする。DUOでは時々刻々変動するネットワーク上のフローに基づき、見込み走行時間が最小となる経路を“近視眼的に”予測し、その経路を選択するため、事後的に見た場合、必ずしも走行時間が最短となる経路を選んでいるという保証はない。

ドライバーの経路選択行動は、上記の見込み走行時間により説明されると考え、経路選択ルールを明示的に取り扱ったシミュレーションモデルとして、動的配分モデルを構築する。

(2) 交通流モデル

リンクフローの動態は、図-2のようにフローの箱間の移動によってモデル化される。リンクフローをモデル化する際、以下の仮定をおく。



図－２ リンクフローのモデル化

- ① 各箱の大きさは単位時間当たりの流出容量に等しい。
- ② 箱内部のフローは一樣に混ざりあっている。
- ③ 箱の内部にはその箱の大きさに相当する交通量を越えるフローは存在できない。
- ④ 箱一つを通過するのに要する時間は、離散化された交通シミュレーションの単位時間の長さである。したがって、時間帯が一つずつ進行するにともない、箱内に存在している全てのフローはその箱から流出して一つ下流側の箱・リンクに流入しようとする。
- ⑤ リンク走行時間は自由走行時間とリンク終端での待ち時間との和で表す¹¹⁾。また、フローの存在していないリンクにおいても自由走行時間分の空の箱を設定する。

上記の仮定に基づきモデル化されたリンクを構成要素とする道路ネットワークを考えた場合、フローは次のように流れる。

発生ノードにおける経路選択の結果求められるフローは、その経路に含まれるリンクに流入する。リンクに流入したフローは下流側の交通状態に応じて、移動していき、リンクの先頭に到着する。ここで再び目的地が同じである車群単位で経路選択を行い下流側リンクへ流入する。このようにして、フローは集中ノードへ向けて進行し、やがて集中ノードへ到着する。

(3) 経路選択モデル

ドライバーは経路選択を行う時点における、ネットワーク上の全リンクの見込み走行時間を知っていると仮定する。経路選択及び見込み走行時間の更新を繰り返すことによって、時々刻々と変動する交通状況に対応したドライバーの経路選択行動をモデル化する。

ドライバーは、あるノードから目的地までの見込み走行時間（各リンク内の箱の数であり、経路選択時点での交通状態をあらわす）にもとづき、それが最短の経路を選択する。ドライバーは発生ノードから出発する時点および経路上で経路変更が可能な地点（すなわち、ノード）において経路選択の意志決定を行う。

経路選択モデルでは、同一ノードに存在し、かつ、目的地を共有する一群のフローで経路選択単位を構成し、経路選択単位ごとに、経路の選択およびルートへの配分を行う。その際の配分方法はALL OR NOTHING配分法である。すなわち、同じ経路選択単位に所属する車両は、全て同一経路を利用する。

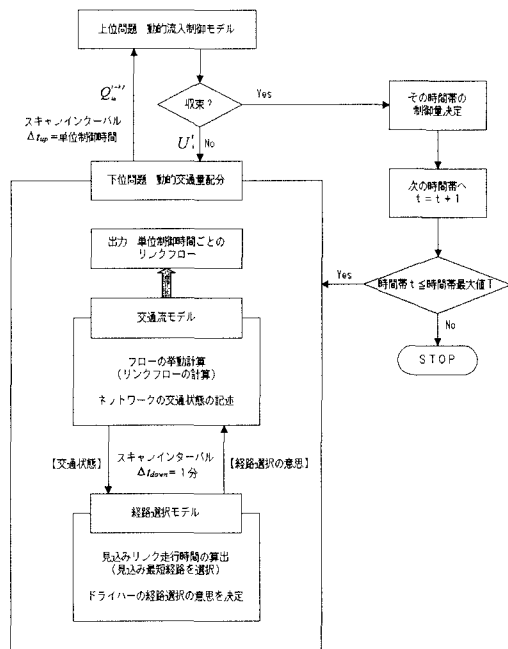
以上の動的交通量配分モデルをまとめると、経路選択シミュレーションにおいて、各ドライバーが見込み走行時間に基づいて選択経路を決定する。フローシミュレーションにおいては、ドライバーの経路選択を集計してフローとしてネットワーク上に流し、交通状態を表す各リンクの走行時間を更新する。以上の操作を離散化した時間帯ごとに繰り返し、時々刻々変動する動的なフローの挙動を再現する。出力として、各時間帯ごとのリンクフローを得て、これに基づき影響係数 $Q_{ia}^{t-k,t}$ を求める。

5. 数値アルゴリズム

本研究で提案した動的流入制御モデルの計算アルゴリズムを図－3に示す。

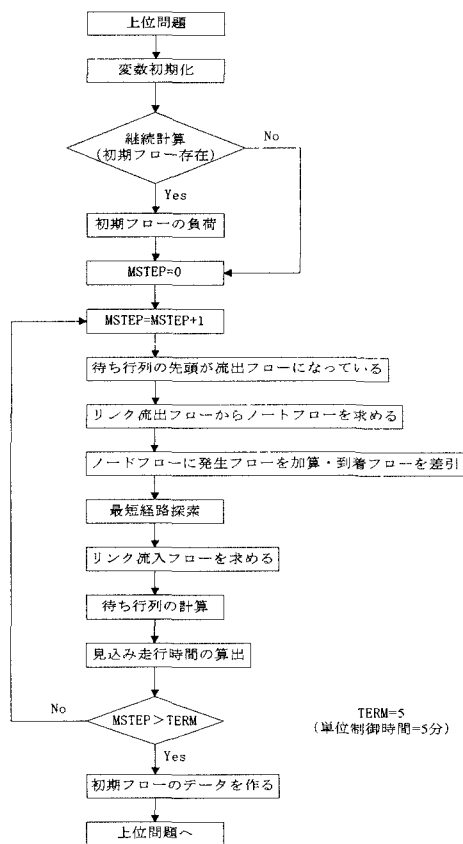
制御問題の全体構造は、形式上動的交通量配分をその制約条件の中に持つ2レベル問題¹²⁾¹⁹⁾とも考えられる。上位問題の動的流入制御モデルは、都市高速道路システムの操作変数を決定する。すなわち、流入制御システムの運用者の意志決定プロセスを記述するものである。また、上位問題の容量制約条件を考慮する上で必要な影響係数 $Q_{ia}^{t-k,t}$ は、下位問題として位置づけられる動的交通量配分モデル（交通流モデル、経路選択モデル）により更新される。

オンランプ閉鎖などの流入制御が、ある程度の効果を得るためには、一定の時間同じ制御パターンが継続されるべきである。したがって、上位問題のスキューンインターバルは数分～30分程度とすべきであろう。一方、ネットワーク上の交通状態を詳細に予



図－3 動的流入制御モデルの計算アルゴリズム

測することを考えれば、下位問題のスキャンインターバルは、できるだけ短い方がよい。下位問題の動的配分モデルでは、時々刻々ネットワーク状態が変化するので、ノードに到達するたびにフローは、その時点における交通状態の関数として与えられる見込み走行時間を用いたときの最短経路に流入する。そのため、一定のスキャンインターバルごとの繰り返し計算を行う必要がある。そこで、スキャンインターバル ($\Delta t_{down} = 1$ 分) で計算した下位問題の結果に基づき、単位制御時間の影響係数行列 $Q_{ia}^{t-k,t[1]}$ を求め、上位問題がこれを受けて制御変数 $U_i^{t[1]}$ を求める。次に与えられたランプ流入量に対するネットワーク交通流を記述するため、 U_i^t を下位問題に与えて、さらに $Q_{ia}^{t-k,t[2]}$ を求める。この繰り返しで収束計算を行い、その時間帯の制御量を決定する。以上の操作を単位制御時間帯毎に更新して計算を行う。その結果、全制御時間帯について交通需要の時間変動およびフローの非定常性を考慮した流入制御パターンを求めることができる。参考のため、図－4に下位問題の動的交通量配分モデルの計算アルゴリズムを示す。



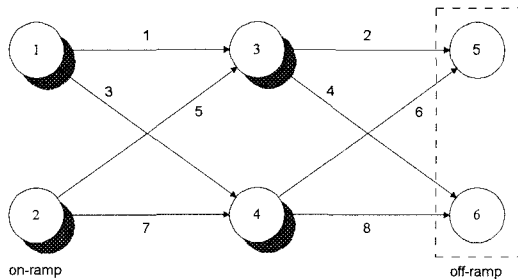
図－4 動的交通量配分モデルの計算アルゴリズム

6. 数値計算例

提案したモデルの挙動の確認ならびに動的流入制御の効果・影響の一端を示すため、簡単なネットワークを対象とした数値計算を行う。上位問題である動的流入制御モデルの単位制御時間は $\Delta t_{up} = 5$ 分として計算する。

まず最初に、提案したモデルを用いて時間帯別流入台数、時間帯別制御率、ネットワーク上の存在台数の推移などを求め、構築した動的流入制御モデルの挙動について検討する。

次に1台当たりの平均走行時間、特定のOD間の平均走行時間、累積到着率などの指標を求め、都市高速道路の運営者の制御方針の影響と流入制御の効果について分析を行う。さらに、この制御方針の相違および、流入需要の相違が、制御解にどのような

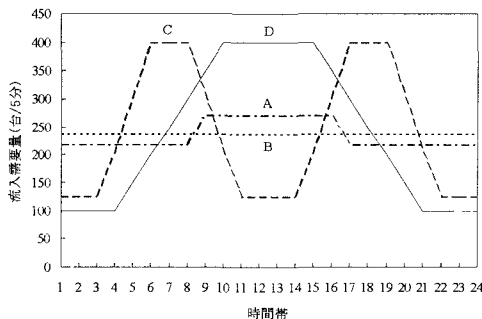


図－５ 数値計算用ネットワーク

影響を及ぼすかを知ることによって、交通状況に適した動的流入制御手法と静的流入制御手法の適用場面を把握する。

(1) 計算の前提条件

1組のオンランプ－オフランプ間に利用可能経路が複数あるネットワークを対象として、モデルの適用計算を行う。数値計算に用いたネットワークを図－５に示す。ノード①、②、③、④が制御対象となるオンランプで、ノード⑤、⑥はオフランプである。図－５のネットワークでは、8つのオン・オフランプペアがあり、オンランプ①、②とオフランプ⑤、



図－６ 流入需要パターン

に、ランプ間ODパターンを表－２に示す。

OD交通需要は5分ごとの総流入需要に対応するODパターン（基準化されたOD表）を設定し、与える。流入需要の時間変動パターンの違いが制御パターンにどのような影響を及ぼすかを明らかにするため図－６に示す4つの需要パターンを用いた。想定されている時間は実時間で2時間分である。ここで用いた4つの流入需要パターンは需要の時間変動の違いが及ぼす影響を純粹に比較するため、総需要量は全て同じとしている。すなわち、各々の流入需要量パターンの面積は等しい。

表－１ リンク自由走行時間・リンク流出容量

リンク No.	リンク自由走行時間（分）	リンク流出容量（台/分）
1	2	20
2	3	30
3	3	20
4	3	30
5	3	20
6	4	30
7	3	20
8	2	30

表－２ ODパターン

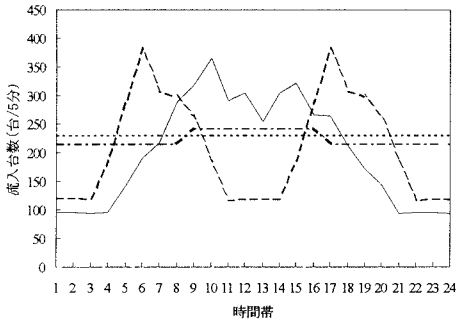
オンランプ	オフランプ	
	5	6
1	0.2	0.05
2	0.15	0.1
3	0.2	0.05
4	0.15	0.1

⑥の各々のオン・オフランプペア間では、利用可能な経路がそれぞれ2本ずつ存在する。数値計算に用いたリンク自由走行時間・リンク流出容量を表－１

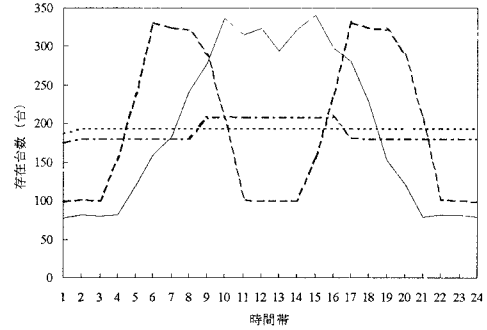
(2) 構築したモデルの挙動

流入需要は時間の経過とともに変化し、さらにドライバーの経路選択も交通状態に応じて変化するので都市高速道路ネットワーク上の交通流は時々刻々変動すると考えられる。このような流入需要および交通流動の動的特性を反映し、最適な交通状態を保つよう、各時間帯の流入制御パターンが求められているか否かについて検討する。図－７は、総走行台キロ最大化を目的関数とした場合の時間帯ごとの流入台数を示している。この図での流入台数は、各時間帯ごとの全オンランプでの合計値である。

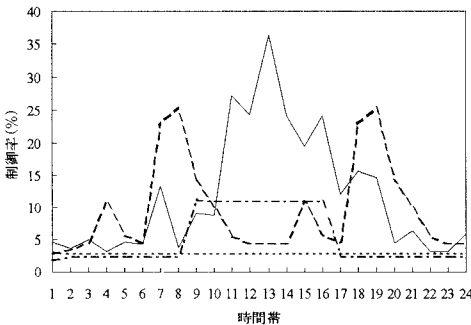
流入需要パターンA、Bのようにその時間変動が一定、あるいは変動が小さい場合は、時間帯ごとの流入台数の変動は流入需要パターンとはほぼ同じである。しかし、流入需要パターンC、Dの場合は各々のピーク時間帯においても需要パターンと異なる形で変動している。特に、流入需要パターンDのよ



図－7 時間帯別流入台数(総走行台キロ最大化)



図－9 存在台数推移



図－8 時間帯別制御率(総走行台キロ最大化)

うに制御が必要な時間が長くなるほど周期的な変動の程度は激しくなる。提案したモデルを適用する場合、混雑が激化すると制御を行うため、その時間帯での流入台数は減少する。流入が抑制される時間帯が1～2有ると、その次の時間帯では混雑が緩和されるため、その時間帯では再び流入台数が多くなる。制御が必要な時間が長くなるとこの様な状況が繰り返されるため、周期的な変動が生じると考えられる。

図－8は、時間帯別制御率を表している。この計算結果も総走行台キロ最大化を目的関数としている。制御率は全オンランプでの平均値である。流入需要パターンA、Bの場合は、制御率の変動も小さく安定している。流入需要パターンC、Dの場合は、ピーク時間帯に近くなるにつれて制御率が高くなり変動している。これも図－7の時間帯別流入台数と同様に、流入需要パターンDのように制御が必要な時間が長くなるほど変動の程度は激しくなる。

図－7、図－8からは、流入需要の時間変動によりネットワーク上の交通状態も変化し、それらに応じて、時間帯ごとの制御パターンならびに流入台数が変動する。つまり、流入需要の時間変動に対応した流入制御がなされることがわかる。

先に示したように、図－6、図－7、図－8の計算結果を用いて、制御時間相互の独立性の仮定が妥当と考えられるケースを例示する。制御時間相互の独立性を仮定できるのは、流入需要量が比較的多く、流入制御を実施することが必要であるが、ある制御時間帯の残留交通が、次の時間帯以降に及ぼす影響については変化が小さく安定しているケースと考えられる。この場合、同じ流入需要量に対しては、ほぼ同じ流入量・制御率が求められると考えられる。図示した計算結果の中で、上記の条件に該当するのは、流入需要Aのケースである。すなわち、ピーク時には流入制御が必要であるが、オフピークとピーク時の需要の差が小さいケースは、制御時間相互の独立性が成立する一つの例と考えられる。

図－9は、都市高速道路ネットワークに存在するフローの総存在台数の推移を示す。総存在台数は、ネットワークに存在している全交通量を表しており、ネットワーク上の交通状態を表す集計的な指標と考えられる。この場合の目的関数も総走行台キロ最大化である。総存在台数は比較的流入需要パターンと似通った推移をしている。総存在台数の推移と図－8の制御率を比較してみると、ある時間帯において存在台数が多い場合、その時間帯以降の時間帯で影響を受け、制御率が高くなることがわかる。つま

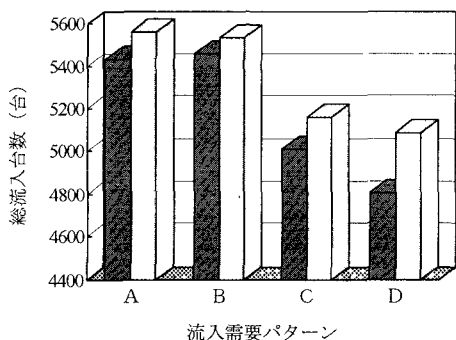


図-10 目的関数・流入需要パターンと総流入台数

り、ネットワーク上の交通状態と制御パターンには関連性があり、交通状態の変動からみれば若干の時間遅れを伴って制御パターンが変化すると考えられる。なお、ネットワークが単純で小規模であったこともあり、各OD間の利用経路は、この数値計算例では、自由走行時間最小の経路と一致していた。

(3) 流入制御方針の影響

ここでは数値計算を通じて、都市高速道路の運営者の制御方針を表す目的関数の違いが、制御パターンおよびネットワークの交通状態に及ぼす影響を把握するとともに、流入制御実施の効果についても合わせて検討する。

図-10は、目的関数・流入需要パターンと総流入台数の関係について示している。4つのパターンのうち、どの流入需要パターン仮定しても総走行台キロ最大化よりは、総流入台数最大化を目的関数として用いた方が総流入台数が多い。流入需要パターンに対しては、流入需要パターンA、Bのように流入需要パターンが一定あるいはその変動が小さい場合は、総流入台数が多く、静的流入制御を行ったときの総流入台数とあまり変わらない。流入需要パターンC、Dの場合は図-8からもわかるようにピーク時間帯において制御率が高いため、総流入台数は少ない。

図-11～図-13を用いて、制御を行った場合と制御なしの場合、さらに制御を行った場合は目的関数の相違（すなわち、制御方針の違い）による影響を把握し、流入制御の効果を評価する。

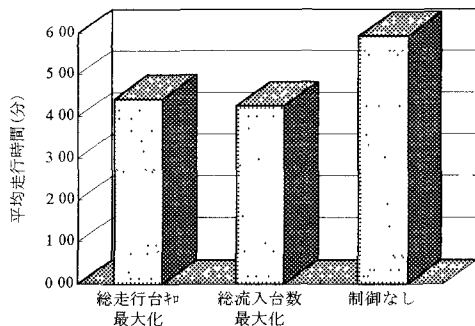


図-11 1台当たりの平均走行時間(需要パターンD)

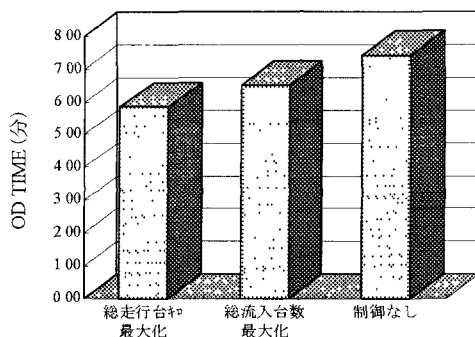


図-12 OD間の平均走行時間
(需要パターンD, 時間帯15, ランプ①→⑤)

図-11は、1台当たりの平均走行時間を表している。制御なしのときは5.93分、総走行台キロ最大化を用いたときは4.41分で制御なしのときに比べて25.6%、総流入台数最大化を用いたときは4.26分で28.2%短縮されている。図-10から総流入台数を比較してみると、目的関数として総走行台キロ最大化を用いたときより、総流入台数最大化を用いた方が総流入台数が多い。それにもかかわらず、総流入台数最大化を用いたときの平均走行時間が短いということは、総流入台数最大化の場合は短距離トリップが優先され、総走行台キロ最大化の場合は長距離トリップが優先されていることがわかる。

図-12は、ランプ①からランプ⑤への交通の平均走行時間を制御方針ごとに示した図である。これは図-6に示した流入需要パターンDを用いた数値計

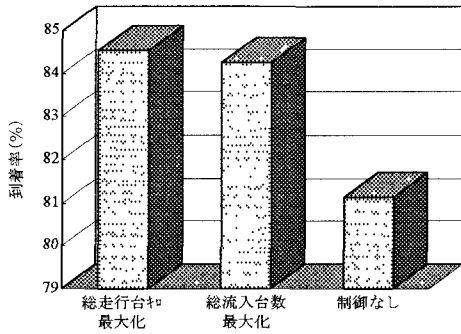


図-13 時間帯11における到着率
(流入需要パターンD)

算結果の中でピーク時の時間帯15に出発した交通についての平均走行時間を表している。制御なしのときは744分、総走行台キロ最大化を用いたときは586分で制御なしのときに比べて21.2%、総流入台数最大化を用いたときは6.51分で12.5%改善されている。このODペアに限ってみれば総走行台キロ最大化の場合の方が、交通状態の改善の程度は大きい。これは、総流入台数最大化の場合は、短距離トリップの流入を増やし流入台数を多くすることで目的関数が満たされるのに対して、総走行台キロ最大化は、総流入台数よりも長距離トリップを優先することで目的関数が満たされるためと考えられる。

図-13は、流入需要パターンDを用いたときの時間帯11までの累積到着率を表している。総走行台キロ最大化を用いた場合は、時間帯11までに時間帯1～11の間に出発した交通のうち84.54%が到着している。総流入台数最大化を用いた場合は84.26%が到着している。制御を行わない場合は、累積到着率が最も低く、81.16%が到着しているだけである。本研究では、仮想の小規模ネットワークを用いて数値計算を行っているため到着率の差はそれほど大きくはないが、実規模ネットワークへの適用を考えると到着率の差はより大きくなると考えられる。

(4) 動的と静的流入制御手法の適用

流入需要量の違いが制御解にどのような影響を及ぼすかを知らるため、需要の変動を同一として需要量を変化させた数値計算を行う。図-14では、平常時とピーク時交通需要量の差が小さい、すなわ

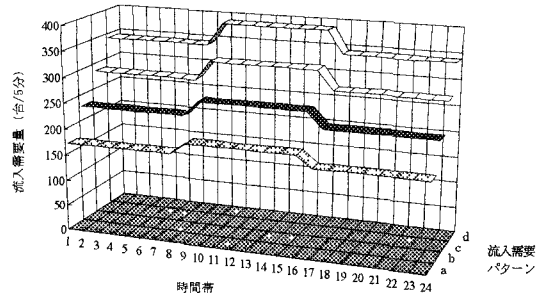


図-14 流入需要量

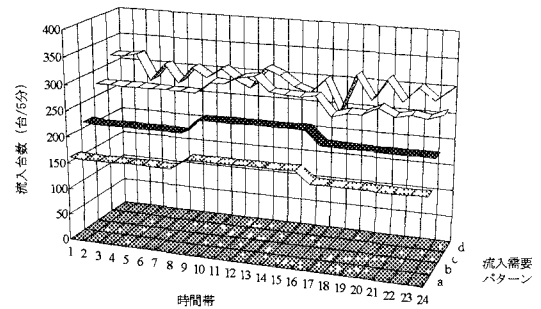


図-15 時間帯別流入台数 (総走行台キロ最大化)

ち変化が小さい流入需要パターンを用いた。図-15は、時間帯別流入台数を示している。流入需要パターンa、bの場合、流入制御パターンは需要パターンと相似であり、ほとんど変化が認められないが、cの場合はピーク時間帯以降に流入台数の変動が認められており、dのように常に需要量が明らかにネットワークの交通容量を越えているような場合は、周期的な変動が現れている。このように流入需要量が常に容量を越えている場合は、動的流入制御手法は本来の役割を果たせないと考えられる。これまでの検討結果より動的流入制御手法は、急激な流入需要の変化、事故等による道路網上の交通状態の急変等が生じる場合（つまり、制御が不要な状態から必要となる遷移状態）での適用が有効と考えられる。逆に、図-14のような平常時とピーク時の交通需要量の差が小さい、すなわち、変化が小さい流入需要パターンの場合は、静的流入制御手法でもあまり無理がなく、十分有効であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、LP制御モデルを基礎としてその動化学化を試み、動的配分モデルと統合することにより、交通需要の変動とドライバーの経路選択行動を考慮できるシミュレーションタイプの動的流入制御モデルを構築した。このモデルを用いて、仮想の都市高速道路ネットワークに対する数値計算を行い、構築したモデルの挙動の確認および流入制御方針が制御・交通状態に及ぼす影響について検討した。

以下は、本研究で得られた研究成果である。

- ① 流入需要の時間変動によりネットワーク上の交通状態が変化し、制御パターンが異なってくる。それによって、時間帯ごとの流入台数も変動していることがわかった。
- ② 都市高速道路の運営者の制御方針を表す目的関数の違いが、制御パターンおよびネットワークの交通状態に及ぼす影響を把握するとともに、流入制御実施の効果についても合わせて検討した。
- ③ 実際流入制御を適用する場合には、その交通状況に適合した制御手法を検討すべきであると考えられる。例えば、交通需要が急変する場合は動的流入制御手法、交通需要が一定あるいは変動が小さい場合は静的流入制御でも十分有効であると考えられる。

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

- ① 現時点では実際道路網への適用計算を行うには至っていないので、実規模のネットワークへの適用可能性の検討を行う必要がある。
- ② 実測データの利用可能性について検討する必要がある。本研究では、下位問題に動的配分シミュレーションを置き、ネットワーク上の交通状態の変動を予測している。しかし、近い将来その普及が予想される高度交通情報システム等を利用すれば、動的かつ詳細なODデータや、リンクフローの時間変動データの利用が可能となると予想される。今後は、交通情報提供システムから得られるデータは観測値、シミュレーションから得られるデータは予測値として、その双方を明確に仕分けしつつ、有効に活用することが必要と考えられる。観測値は実際の交通状態・需要を反映したものであり、制御問題の本質を考え合わせれば、利用可能な範囲

で最大限観測値を使うことが望まれる。しかし、観測値は現時点での交通状態であり、現時点の交通状態だけから最適な制御を行うことは不可能である。例えば少なくとも数分～数十分先の交通状態の予測に基づき現時点の制御パターンを策定する必要が出てくると考えられる。このような予測値の生成にはシミュレーションを用いるという仕分けをする必要がある。データ収集方法の高度化により、配分シミュレーションの役割は現モデルより小さくなり、リアルタイムな交通データの活躍場が増えてくる。次のステップでは、このような制御問題について検討する。

- ③ 全時間帯の制御パターンを一括で決定できる予測型の一括流入制御を行うための目的関数（例えば、 $\max \sum_i \sum_t U'_i$ ）を導入して計算を行い、今回のケースである逐次流入制御（ $\max \sum_i U'_i$ ）との差異を比較検討する。さらに、単位制御時間長を変化させて計算を行い、単位制御時間の設定法が及ぼす影響についても検討する。

今後、都市高速道路における情報提供の高度化も予想され、ドライバーの交通行動に強い影響を及ぼす可能性が高い。本モデルは、見込み走行時間の与え方を変更することによって、情報提供による交通運用方策を評価する手段として活用することができる。

いずれにしても、近い将来、都市高速道路の大規模化、複雑化が進み、ODペア間に複数の利用可能な経路が存在するようになれば、利用者に対する情報提供の重要性が増し、そのことを考慮した流入制御システムの開発がますます重要になるものと思われる。

参考文献

- 1) 佐佐木綱・明神証：都市高速道路における流入制御理論，交通工学，Vol 3，No 3，pp 8-16，1968
- 2) 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。
- 3) 飯田恭敬・内田 敬・金 周顯・吉岡 優：都市高速道路におけるBP流入制御の実用的解法，土木計画学研究・講演集，No 15(1)，pp 331-336，1992
- 4) Wang, C F On a ramp-flow assignment problem, Transpn Sci., Vol 6, No 2, pp114-130, 1972
- 5) Papageorgiou, M. A New Approach to Time-of-Day Control Based on a Dynamic Freeway Traffic Model, Transpn Res., Vol 14B,

- pp 349-360, 1980.
- 6) 松井寛, 佐藤佳朗・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
 - 7) 飯田恭敬, 藤井聡, 内田敬 経路選択を考慮したソフトウェア的交通運用方策のための動的交通流シミュレーション, 土木計画学研究・講演集, No. 16(1), pp 69-76, 1993
 - 8) Wie et al. Dynamic user optimal traffic assignment on congested multi-destination networks, Transp Res 24B, pp 431-442, 1984
 - 9) Ran, B., Boyce, D E and LeBlanc L J A New Class of Instantaneous Dynamic User-optimal Traffic Assignment Models, Operations Research, Vol 41, No 1, pp 192-202, 1993
 - 10) 赤松隆 動的配分理論の現状と役割, 土木計画学・講演集, No 17, pp 1138-1140, 1995
 - 11) 井上博司・混雑した道路網における交通均衡及びその数値解析解法, 土木学会論文集, No 365, pp 125-133, 1986.
 - 12) Bard, J F : An Efficient Point Algorithm for a Linear Two-Stage Optimization Problem, Operation Research, Vol 31, No4, pp 670-684, 1983.
 - 13) LeBlanc, L J and Boyce, D E : A Bilevel Programming Algorithm for Exact Solution of the Network Design Problem with User-Optimal flows, Transpn Res., Vol 20B, No 3, pp 259-265, 1986
 - 14) Marcotte P A Note on a Bilevel Programming Algorithm by LeBlanc and Boyce, Transpn Res., Vol 22B, No 3, pp 233-237, 1988
 - 15) Fisk, C S . Game Theory and Transportation System Modelling, Transp Res., Vol 18B, pp 301-313, 1984.
 - 16) Fisk, C S A Conceptual Framework for Optimal Transportation System Planning with Integrated Supply and Demand Models, Transp Sci., Vol 20, pp 37-47, 1986
 - 17) Lloridan, P and Morgan, J : ε -Regularized Two-Level Optimization Problems Approximation and Existence Results, Optimization, Lecture Notes in Mathematics 1405, Springer-Verlag, pp 99-113, 1989.
 - 18) Kim, T J . Advanced Transport and Spatial System Models Applications to Korea, Springer-Verlag, pp 107-154, 1990
 - 19) 朝倉康夫・利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル, 土木計画学・論文集, No 6, pp 1-19, 1988

都市高速道路ネットワークに対する動的流入制御モデルの開発

飯田恭敬・金 周顯・宇野伸宏

ネットワークの拡大に伴い, 都市高速道路は交通需要の集中により混雑が激化しており, より効率的な交通運用方策が必要とされている。近い将来, 高度交通情報システムが実用化されることにより, 動的かつ詳細な交通データが入手可能となると予想される。そこで, 本研究では, LP制御をベースにして, 交通需要および交通流動の非定常性を考慮できる, 動的流入制御モデルの開発を試みる。都市高速道路網上でのドライバーの経路選択をモデルに組み込むため, 動的配分モデルを内包したモデルとする。平常時の制御とともに, 突発事象(緊急, 事故, 故障車の発生, 工事中, 気象条件の急変など)発生時の制御への適用可能性も考慮して, シミュレーションタイプの流入制御モデルとする。数値計算により, 開発したモデルの挙動の確認および流入制御方針が制御解・交通状態に及ぼす影響について検討した。

Development of Dynamic On-Ramp Traffic Control Model for Urban Expressway Network

Yasunori IIDA, Ju-Hyun KIM and Nobuhiro UNO

Because the traffic condition of urban expressway becomes worse with the expansion of network, effective traffic control system becomes indispensable. In the near future, the operation of the advanced traffic information system makes it possible to obtain the dynamic and detailed traffic data. The propose of this study is to develop the dynamic on-ramp traffic control method based on the Linear Programming control model. The proposed model considers unsteady-state of traffic demand and traffic flow. This model includes a sort of dynamic assignment model in order to take driver's route choice on network into consideration. We built this model as the dynamic simulation model to apply it to the traffic control in emergency as well as on everyday control. This study testifies the performance of this model and the influence of traffic control policy on network condition by some numerical experiments.