

# 地域における避難時間最小化のための 動的流入制御モデル

浦田 淳司<sup>1</sup>・羽藤 英二<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院工学系研究科・日本学術振興会特別研究員 DC (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: urata@bin.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)  
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

車避難の円滑化のためには、渋滞を防ぎ、早期避難を実現するための制御が必要である。本研究では、避難時の合流部における動的流入制御を提案する。全員避難完了時間の最小化を目的とし、合流部の動的流入制御方策を理論的アプローチを用いて求める。many-to-one のネットワークにおいて、交通量保存則・FIFO 原則・Physical Queue が成立する一般的な動的交通流モデルを用いる。最適制御のための動学的最適化を行うため、最大値原理を用いる。このアプローチを用いることで、最適な制御変数を直接求めることができる。制御変数の制約には動的交通流の成立条件を用い、動学的避難時間最小化問題の定式化を行う。

**Key Words :** *Dynamic Evacuation Strategies, Adaptive Inflow Control, Dynamic Traffic Assignment, Maximum Principle*

## 1. はじめに

東日本大震災において、津波からの避難の途中で渋滞に遭遇し、逃げ遅れた死者・行方不明者は数多い。しかし、これからの災害避難においても、車の利用を禁止することはできないだろう。災害時要援護者の移動に必要であり、車でなければ安全地帯に到達できない地域もある。水害や大火からの避難などは避難必要距離が長くなり、車利用が不可欠となる。車避難の円滑化のためには、渋滞を防ぎ、早期避難を実現するための制御が必要である。例えば、So&Daganzo(2010)<sup>1)</sup>では、ランプ流入量の制御により渋滞による待ち時間が最小化され、全体の避難所要時間が最小化される可能性をシンプルなモデルにより示している。これはランプ流入部の制御の例であるが、早期避難のための制御方策には様々なものがある。

制御方策を大きく二つに分けると、交通マネジメントとネットワークマネジメントがある。交通マネジメントによる制御に関する既存研究には、避難者の反応を考慮したうえで経路情報を提供する制御方策<sup>2)3)</sup>や、時空間上のリスクの違いを考慮して経路情報を提供する方策<sup>4)</sup>、エリアによって利用可能交通手段制約を設ける制御方策<sup>5)</sup>などがある。これらは情報提供、空間特性、交通手段規制に着目した制御である。全車両の自動運転制御が実現できれば、自動車速度や経路などを含めた完全制御も可能となる。次に、ネットワークマネジメントによる制御に関する既存研究には、一方通行

規制による制御<sup>6)7)8)9)</sup>や交差点での進行方向規制<sup>10)</sup>、合流部(ランプ・交差点)での流量規制<sup>1)11)12)13)14)</sup>がある。ここでいうネットワークマネジメントとは、リンクへの流入制御方策である。

交通マネジメントは避難者の行動規範・行動モデルに対して働きかける制御方策である。ネットワークマネジメントは避難交通流に対して働きかける制御方策である。前者は、避難者の行動を確率的に扱う必要があるのに対して、後者は確定的に扱うことも可能である。どちらがより避難最適な制御が可能であるかは一概には言えない。また、最終的には両者を活用した避難制御の検討が必要である。本研究では、後者の流入制御方策を対象とする。行動を確定的に扱うことで、最適避難状態への到達可能性についてより明確に評価できる。

流入制御方策を分類する。まず、一方通行規制と進行方向規制は離散的流入制御である。通行有無の規制により、避難者の経路選択を制御し、渋滞の発生を間接的に制御している。合流部流量規制は連続的流入制御である。通行可能量を制御することで、渋滞の発生を直接的に制御できる。自動運転制御も直接制御と言える。連続量制御のほうが離散量制御よりも、より最適な避難状態に到達できるだろう。一方で、連続量制御の社会実装のためには、災害時運用にあたってシステム頑健性が求められる。

また、制御方策の他の分類として、動的制御と静的制御がある。時間軸上で制御内容を変化させる動的制御

方策に関する既存研究には、Hsu and Peeta(2014) など<sup>4)8)13)</sup>がある。避難開始時刻の分布や経路状態の動的変化を考えれば、静的制御よりも動的制御のほうがより最適な避難状態に到達できるだろう。Liu et al.(2007)<sup>12)</sup>では、車両位置観測と動的制御の組み合わせによる制御方策が示されている。避難開始時刻や情報認知、経路選択などの不確実性が特に高く、リアルタイムモニタリング<sup>15)16)</sup>との組み合わせによる動的制御の有用性は高い。

本研究では、避難時の合流部における連続量の動的流入制御方策を対象とする。今後の社会技術の発展が必須となるが、連続量の動的流入制御は制御方策の中でもより最適避難に到達しやすいと考える。また、連続量制御を離散量制御へ、動的制御を静的制御へ変更することは、制御変数の制約の設定により可能であり、その逆よりもやりやすい。

連続量の動的流入制御による避難最適化問題を解くためには、理論的アプローチが必要となる。動的制御に関する理論研究としては、Dynamic System Optimal(DSO)配分がある。交通流の再現に exit function<sup>17)18)</sup>を用い、Pontryaginの最大値原理<sup>19)</sup>により最適値を求める Friesz et al.(1989) など<sup>20)21)</sup>の研究がある。交通流モデルに FIFO 原則を満たさないモデルを用いており、課題がある。河上・劉(1993)<sup>22)</sup>では FIFO を満たす交通流モデルを用いているが、解の収束性については厳密には明らかにされていない。また、Ziliaskopoulos(2000) など<sup>23)24)25)26)</sup>の研究では車両の利用経路・速度の完全制御できる状態 (holding) を仮定した中で DSO 配分を行っている。また、2リンクネットワークにおいて、動的ランプ制御ルール・パターンを解析的に明らかにする研究<sup>27)28)</sup>もある。これらの研究の課題や一般ネットワークでの DSO 配分の複雑性については、赤松(1996)<sup>29)</sup>、赤松(2007)<sup>30)</sup>に詳しい。

本研究では、全員避難完了時間の最小化を行うための合流部の動的流入制御方策を理論的アプローチを用いて検討する。合流部動的流入制御による最適避難問題を扱うにあたり、many-to-one のネットワークを用いる。また、交通量保存則・FIFO 原則・Physical Queue が成立する一般的な動的交通流の再現を行う。動学的最適化の理論的アプローチには、最大値原理を用いる。このアプローチを用いることで、最適な制御変数を直接求めることができる。

## 2. 動的交通流の最適制御問題

### (1) 動的交通流の記述

動的交通流を再現するため、交通量保存則、FIFO 原則、物理的な長さを持つ待ち行列 (Physical Queue)<sup>31)</sup>

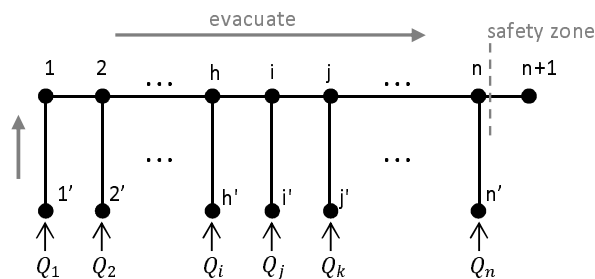


図-1 n 起点 1 終点のネットワーク

を導入する。n 起点 1 終点の分岐のないネットワークを導入する。なお、分岐がないため、経路選択行動は生じない。

### a) ネットワークと交通需要

ネットワークは n 起点 1 終点とする (図-1)。終点と合流ノードを繋ぐ主道路リンクと、主道路と起点をつなぐ合流リンクで構成する。合流ノードを  $i$  で示し、起点ノードを  $i'$  で示す。時刻  $t$  での起点  $i'$  から出発する累積交通量は  $Q_i'(t)$  で示す。到着ノードはノード  $n+1$  であり、避難を想定した場合の安全地帯となる。全ての需要はノード  $n+1$  に向かうとする。

リンク  $ij$  への流入流出を表す累積交通量を次で定義する。

$A_{ij}(t)$ : リンク  $ij$  に時刻  $t$  までに流入した台数

$D_{ij}(t)$ : リンク  $ij$  から時刻  $t$  までに流出した台数

時刻  $t$  での交通流率は、それぞれを微分して次となる。

$\lambda_{ij}(t)$ : 時刻  $t$  でリンク  $ij$  への流入交通流率 ( $= \frac{dA_{ij}(t)}{dt}$ )

$\mu_{ij}(t)$ : 時刻  $t$  でリンク  $ij$  からの流出交通流率 ( $= \frac{dD_{ij}(t)}{dt}$ )

交通流率は非負である。

$$\lambda_{ij}(t) \geq 0 \quad (1)$$

$$\mu_{ij}(t) \geq 0 \quad (2)$$

また、累積交通量と交通流率の関係は、微小時間  $\Delta t$  を用いて、次となる。

$$A_{ij}(t + \Delta t) = A_{ij}(t) + \lambda_{ij}(t)\Delta t \quad (3)$$

$$D_{ij}(t + \Delta t) = D_{ij}(t) + \mu_{ij}(t)\Delta t \quad (4)$$

$A_{ij}(t)$  または  $\lambda_{ij}(t)$  を定めることで、ネットワーク上の交通流配分を行う。終点は 1 つであり、ここでは目的地的な定式化は行わない。

### b) 交通量保存則

ノードにおける交通量保存則を説明する。ノード  $i$  における保存則は、次となる。

$$-\sum_h D_{hi}(t) + \sum_j A_{ij}(t) = Q_i(t) \quad (5)$$

ノード  $i$  への流入量は  $D_{hi}$  と  $Q_i$ , 流出量は  $A_{ij}$  で表す. ノード  $i$  が起点でない場合は,  $Q_i(t) = 0$  である. 単位時間あたりのノード  $i$  を起点とする交通量を  $q_i(t) = \frac{dQ_i}{dt}(t)$  とし, 式 (5) は次式と等価である.

$$-\sum_h \mu_{hi}(t) + \sum_j \lambda_{ij}(t) = q_i(t) \quad (6)$$

### c) First-In-First-Out 原則

リンクにおける First-In-First-Out 原則 (FIFO 原則) を説明する. リンクの FIFO とは, 車両のリンクからの流出順序と流入順序は等しいということである. 時刻  $t$  にリンク  $ij$  を通過した車両の経験リンク旅行時間  $T_{ij}(t)$  を用いて, 次式が成立する.

$$A_{ij}(t) = D_{ij}(t + T_{ij}(t)) \quad (7)$$

累積交通量  $A, D$  は交通流率  $\lambda, \mu$  の関数である. そのため, リンク旅行時間は交通流率  $\lambda, \mu$  と関連付いた定義となる.

### d) Physical Queue の導入

動的交通流における渋滞の再現のため, 物理的な長さを持つ待ち行列 (Physical Queue) を導入する. Physical Queue を導入することで, 渋滞の待ち行列が上流に向かって延伸する状況を再現できる. また, 下流側リンクが渋滞の待ち行列により一杯になった場合 (先詰まりが生じた場合) に, 上流側リンクからの流出が影響を受ける状況を再現できる.

まず, 渋滞判定と可能流入交通流率を説明する. Physical Queue の記述に係するパラメータを定義する.

$l_{ij}$ : リンク  $ij$  のリンク長

$f_{ij}^{max}$ : リンク  $ij$  の最大交通流率

$k_{ij}^{max}$ : リンク  $ij$  の渋滞時の交通密度

$w_{ij}$ : リンク  $ij$  の自由流側の Wave Speed

$w'_{ij}$ : リンク  $ij$  の渋滞流側の Wave Speed

なお, ここでリンク内はすべて同じ道路状況である. リンク  $jk$  が全体が渋滞しているかを判定する  $\beta_{jk}(t)$  は次式で与えられる.

$$\beta_{jk}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } A_{jk}(t) > D_{jk}(t - \frac{l_{jk}}{w_{jk}}) + k_{jk}^{max} l_{jk} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

リンク  $jk$  の累積流入台数  $A$  と, 累積流出台数  $D$  とリンク上がすべて渋滞列で占められた場合の車両台数の和を比較して, 判定する. この先詰まり判定パラメータ  $\beta_{jk}(t)$  を用いて, 下流リンク  $jk$  への可能流出交通流率  $Y_{jk}$  は次で与える.

$$Y_{jk}(t) = (1 - \beta_{jk}) f_{jk}^{max} + \beta_{jk}(t) \mu_{jk}(t - l_{jk}/w'_{jk}) \quad (9)$$

先詰まりが生じていない場合は最大交通流率により与える. 先詰まりが生じている場合は, リンク上流端か

らの流出台数により与える. 次に, 時刻  $t$  でリンク  $ij$  から可能流入交通流率  $X_{ij}(t)$  は次で与える.

$$X_{ij}(t) = \begin{cases} f_{ij}^{max} & \text{if } A_{ij}(t - l_{ij}/w_{jk}) > D_{ij}(t) \text{ or} \\ & \lambda_{ij}(t - l_{ij}/w_{ij}) > f_{ij}^{max} \\ \lambda_{ij}(t - l_{ij}/w_{ij}) & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

リンク  $ij$  上で渋滞が発生している場合は, 最大交通流率が上流リンクから下流リンクへの流入可能交通流率となる. それ以外の場合は, リンク  $ij$  の下流端の流入交通流率と上流端への伝搬速度を用いて与える.

リンク  $ij$  の流出交通流率  $\mu_{ij}(t)$  を定める. 流出交通流率  $\mu_{ij}(t)$  は, 下流リンクへの可能流出交通流率  $Y_{jk}(t)$  と上流リンクからの可能流入交通流率  $X_{ij}(t)$  を比較し, 与える. ノード  $j$  が単純に 2 本のリンクを結合する直線ノードの場合は次となる.

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), Y_{jk}(t)\}, \quad j: \text{line} \quad (11)$$

可能流出交通流率  $Y_{jk}(t)$  と可能流入交通流率  $X_{ij}(t)$  を比較し, 小さいほうの値がリンク  $ij$  の流出交通流率  $\mu_{ij}(t)$  となる. 次に, ノード  $j$  が合流ノードの場合は次となる.

$$\mu_{ij}(t) = \min\{X_{ij}(t), \eta_{ij}(t) Y_{jk}(t)\}, \quad j: \text{merge} \quad (12)$$

$$\eta_{ij}(t) = \begin{cases} 1 - \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t)/Y_{jk}(t) & \text{if } \sum_{i' \neq i} X_{i'j}(t) < (1 - \eta_{ij}^*) Y_{jk}(t) \\ \eta_{ij}^* & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

$\eta_{ij}^*$  は, ノード  $j$  におけるノード  $i$  からの交通流の合流率の参照値パラメータであり, 本来は交差点形状等で決定する. 可能流出交通流率  $Y_{jk}(t)$  を下流側の各リンクで分配する形となっている. 式 (13) は, 分配された流出交通流率に満たない流入交通流率の合流リンクがある場合は, それ以外の合流リンクからの流入が増加する形となっている. このように, Physical Queue と交通流率の関係を記述する. なお, 分岐部の流出交通流率やリンク旅行時間の定義も可能である. しかし, 以降では特に用いないため, ここでは言及しない. それらも含めた詳細な記述は, Kuwahara and Akamatsu(2001)<sup>31)</sup> が参考となる.

## (2) 最適制御問題の記述

上述の動的交通流の動的制御の最適化のため, 最適制御理論を導入する. ここでは, まず, 複数の状態変数, 複数の制御変数の場合についての最適制御理論を説明する. 最適制御理論では時間変数  $t$  と状態変数  $y(t)$  以外に制御変数  $u(t)$  を導入し, 時間軸上の最適制御変数経路  $u^*(t)$  を求める. これにより, 最適状態変数経路  $y^*(t)$  が導出され, また時間軸上での目的関数の最適化を行う. 最適化にあたって Pontryagin の最大値原理を用い, 最適制御変数経路を求める. なお, 制御変数は非連続であってもよい. 状態変数は連続である (ただし

鋭点が存在してもよく、状態変数は区分的に連続となる)。制御変数が非連続でもよい点が、このアプローチの利点の一つである。また、制御変数を直接求める形の問題構造となっている。また、後述するが、連続時間の積分形の最適化問題の目的関数を、非積分系の全ての時間における最適化問題へと変換できる点も、利点である。

まず、最適制御の最も基本的な問題を記述する。状態変数ベクトル  $\mathbf{y}(t) = (y_1, \dots, y_j, \dots, y_n)(t)$  と制御変数ベクトル  $\mathbf{u}(t) = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)(t)$  を用いて、次となる

$$\max_{\mathbf{u}} \left( V = \int_0^T F(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) dt \right) \quad (14)$$

subject to

$$\frac{dy_j}{dt}(t) = f^j(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}), \forall j \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(0) = C, \mathbf{y}(T) = \text{自由} (C, T \text{ は所与}) \quad (16)$$

$$\mathbf{u}(t) \in \mathcal{U} \quad (17)$$

式 (14) は目的関数の最大化、式 (15) は状態変数の運動方程式、式 (16) は初期条件と終端条件、式 (17) は制御変数の範囲を示している。運動方程式により、最適制御変数経路  $\mathbf{u}^*$  と最適状態変数経路  $\mathbf{y}^*$  は 1 対 1 に対応する。

最大値原理を用いて、この問題は次の最大化問題となる。ハミルトニアン  $H$  を導入する。

$$\max_{\mathbf{u}} H(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{s}), \quad \forall t \in [0, T] \quad (18)$$

$$(H \equiv F(t, \mathbf{y}, \mathbf{u}) + \sum_j s_j f^j(t, \mathbf{y}, \mathbf{u})) \quad (19)$$

subject to

$$\frac{dy_j}{dt} = \frac{dH}{ds_j}, \quad \forall j \quad (20)$$

$$\frac{ds_j}{dt} = -\frac{dH}{dy_j}, \quad \forall j \quad (21)$$

$$[H]_{t=T} = 0 \quad (y_T \text{ 固定の場合}) \quad (22)$$

$$s_j(T) = 0 \quad (T \text{ 固定の場合}) \quad (23)$$

$\mathbf{s}$  は随伴変数である。式 (20) は状態変数の運動方程式である。式 (21) は随伴変数の運動方程式である。式 (22)、式 (23) は横断性条件である。元の問題が時間積分した関数の最大化であるのに対し、最大値原理を用いたハミルトニアンの最大化は積分のない最大化問題となる。

### (3) 流入制御問題の定式化

最小避難時間を求める流入制御問題を定式化する。避難交通の記述には動的交通流を用いる。制御目的は全員避難完了の時間の最小化である。

目的関数と運動方程式を与える。状態変数は、累積流入交通量  $A_{ij}(t) (\forall ij)$  とする。制御変数は流出交通流率  $\mu_{ij}(t), \mu_{i'i}(t) (\forall i)$  とする。下流リンクへの流入交通

の最適制御を行う。運動方程式にはノードの交通量保存則を用いる。

$$\frac{dA_{ij}(t)}{dt} = \lambda_{ij}(t) = \mu_{hi}(t) + \mu_{i'i}(t) \quad \forall ij \quad (24)$$

目的関数は全員避難時間の  $T$  の最小化である。

$$\begin{aligned} \min T &= \min \int_0^T 1 dt \\ &\Leftrightarrow \max(-T) = \max \int_0^T -1 dt \end{aligned} \quad (25)$$

式 (19) における関数  $F = -1$  となる。これは、最適制御理論の中でも時間最適化問題と言われる問題である。また、これは水平的終点直線問題である。なお、目的関数を一定時間以内の避難完了人数最大化とすることもでき、その場合は固定された終点の問題となる。終点条件は次である。

$$A_{n,n+1}(T) = \sum^n Q_i(T) \quad (26)$$

全起点から交通量がノード  $n$  を通過した時点が全員避難完了の時間である。なお、 $Q_i(t)$  は所与とする。

ハミルトニアンを与え、最大値原理により最適制御問題を定式化する。まず、ハミルトニアンは次となる。

$$H = -1 + \sum_{ij} s_{ij}(t)(\mu_{hi}(t) + \mu_{i'i}(t)) \quad (27)$$

最適制御問題は次となる。

$$\max_{\mu} H \quad \forall t \in [0, T] \quad (28)$$

subject to

$$\frac{dA_{ij}}{dt} = \frac{dH}{ds_{ij}}, \quad \forall ij \quad (29)$$

$$\frac{ds_{ij}}{dt} = -\frac{dH}{dA_{ij}}, \quad \forall ij \quad (30)$$

$$[H]_{t=T} = 0 \quad (31)$$

水平的終点直線問題であるため、横断性条件は  $y_T$  固定の場合の条件となる。

動的交通流を再現するにあたり、制御変数に制約条件を与える。合流ノードにおける Physical Queue の条件により、全ての  $t \in [0, T]$  に対して制約条件は次となる。

$$\mu_{hi}(t) \leq X_{hi}(t), \quad \forall hi, i'i \quad (32)$$

$$\mu_{hi}(t) + \mu_{i'i}(t) \leq Y_{ij}(t), \quad \forall i \quad (33)$$

式 (12) は可能流入交通流率  $X_{hi}$ 、可能流出交通流率  $Y_{ij}$  のうち小さい値、つまり実際に通行することが可能である交通流率を流出交通流率  $\mu_{hi}$  として与えている。ここでは、流入制御を行うため、流出交通流率  $\mu_{hi}$  は式 (12) の可能交通流率以下の値であればよい。そのため、ここでは不等式制約を設定している。また、流出交通流率は非負制約を持つ。

$$\mu_{hi}(t) \geq 0, \quad \forall hi, i'i \quad (34)$$

不等式制約を持つハミルトニアン  $H$  をラグランジアン  $L$  に拡張する.

$$L = H + \sum_{hi, i'i} \theta_{hi}(t) (X_{hi}(t) - \mu_{hi}(t)) + \sum_i \theta'_i(t) (Y_{ij}(t) - \mu_{hi}(t) - \mu_{i'i}(t)) \quad (35)$$

ここで,  $\theta_{hi}$ ,  $\theta'_i$  はラグランジュ乗数であり,  $t$  の関数である.  $L$  の最大化の条件は KKT 条件と非負制約により, 全ての  $t \in [0, T]$  に対して, 次となる.

$$\frac{dL}{d\mu_{hi}} \leq 0, \mu_{hi} \geq 0, \mu_{hi} \frac{dL}{d\mu_{hi}} = 0, \forall hi, i'i \quad (36)$$

$$\frac{dL}{d\theta_{hi}} = X_{hi} - \mu_{hi} \geq 0, \theta_{hi} \geq 0, \theta_{hi} \frac{dL}{d\theta_{hi}} = 0, \forall hi, i'i \quad (37)$$

$$\frac{dL}{d\theta'_i} = Y_{ij} - \mu_{hi} - \mu_{i'i} \geq 0, \theta'_i \geq 0, \theta'_i \frac{dL}{d\theta'_i} = 0, \forall i \quad (38)$$

全ての  $t \in [0, T]$  に対して, 最大値原理の残りの条件である状態変数と随伴変数の運動方程式, 横断性条件が必要となる.

$$\frac{dA_{ij}}{dt} = \frac{dL}{ds_{ij}}, \forall ij \quad (39)$$

$$\frac{ds_{ij}}{dt} = -\frac{dL}{dA_{ij}}, \forall ij \quad (40)$$

$$[H]_{t=T} = 0 \quad (41)$$

以上から求められる最適制御変数経路が十分であるために, 制約条件が制約限定条件を満たすこととアローの十分条件を満たすことが必要となる. 前者については, 制約条件式 (32), (33) が制御変数  $\mu_{ij}$  に対して線形であるため, 満たされる. 後者については, ラグランジアン  $L$  が, 全ての  $t \in [0, T]$  に対して,  $(A, \mu)$  について線形であるため, 満たされる.

### 3. おわりに

本研究では, 全員避難完了時間の最小化のための合流部の動的流入制御についてを検討した. 最適動的流入制御を求めるため, 最適制御理論を用いた定式化を行った. many-to-one のネットワークにおける合流部制御の問題を動的配分かつ動学的最適化を用いて記述した. 動的配分では, 交通量保存則・FIFO原則・Physical Queue を再現し, 最大値原理を用いて, 最適制御変数を求める問題とした. 上流リンクから下流リンクへの流出交通流率を制御変数とし, 動的配分により与えられる可能交通流率を制御変数の制約条件として設定した. これにより, 動的配分の条件を満たす妥当な流入制御問題として記述することができた.

今後の課題としては, まず, 本研究での定式化を用いて制御変数の解の特性を求める必要がある. その際,

各リンクの渋滞生起のパターン分けに応じた解の特性をまず整理したうえで, ネットワーク全体の解の特性を明らかにすることとなるだろう. また, 一般的な問題とするため, ネットワークを分岐ノードを含む形に拡張する必要がある. その際には, 避難時の情報の非対称性<sup>9)</sup>を考慮した経路選択として記述するべきである. また, 早期の社会実装のためには, 複雑な機械制御が必要な制御方策は適さない. そこで, 制御ルールの変更の回数を極力少なくするための制約を含んだモデルの定式化も求められる. 避難行動では避難前に他者支援・合流行動<sup>32)33)</sup>が生じており, トリップチェーン交通までを評価できる制御モデルが最終的には求められる.

謝辞: 本研究に関し, 熊本大学の円山琢也准教授から助言を頂いた. また, 本研究の一部は JSPS 科研費 26-10821 の助成を受けたものである. ここに感謝の意を表します.

### 参考文献

- 1) So, Sk., Daganzo, C.F.: Managing Evacuation Routes, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 514-520, 2010.
- 2) Paz, A., Peeta, S.: Behavior-consistent real-time traffic routing under information provision, *Transportation Research Part C*, Vol. 17, pp. 642-661, 2009.
- 3) Fu, H., Pel, A.J.: Optimal traffic management to ensure emergency evacuation compliance, *Proceedings of 13th IEEE ICNSC, Paris, France*, pp. 532-537, 2013.
- 4) Hsu, Y.T., Peeta, S.: Risk-based spatial zone determination problem for stage-based evacuation operations, *Transportation Research Part C*, Vol. 41, pp. 73-89, 2014.
- 5) Shi, F., Xu, G., Liu, B., Huang, H.: Optimization Method of Alternate Traffic Restriction Scheme based on Elastic Demand and Mode Choice Behavior, *Transportation Research Part C*, Vol. 39, pp. 36-52, 2014.
- 6) Kalafatas, G., Peeta, S.: Planning for Evacuation Insights from an Efficient Network Design Model, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 15, pp.21-30, 2009.
- 7) Xie, C., Lin, D.Y., Waller, S.T.: A Dynamic Evacuation Network Optimization Problem with Lane Reversal and Crossing Elimination Strategies, *Transportation Research Part E*, Vol. 46, pp. 295-316, 2010.
- 8) Karoonsoontawong, A., Lin, D.-Y.: Time-Varying Lane-Based Capacity Reversibility for Traffic Management, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 26, pp.632-646, 2011.
- 9) 浦田淳司, 羽藤英二: 動的交通制御による最適避難ネットワーク計画, 第 49 回土木計画学研究発表会, CDROM, 2014.
- 10) Xie, C., Turnquist, M.A.: Lane-based Evacuation Network Optimization: An Integrated Lagrangian Relaxation and Tabu Search Approach, *Transportation Research Part C*, Vol. 19, pp. 40-63, 2011.
- 11) Daganzo, C.F., So, Sk.: Managing evacuation net-

- works, *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 1424-1432, 2011.
- 12) Liu, H.X., Ban, J.X., Ma, W., Mirchandani, P.B.: Model Reference Adaptive Control Framework for Real-Time Traffic Management under Emergency Evacuation, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol.133, pp.43-50, 2007.
  - 13) Zhang, H.M., Shen, W.: Access Control Policies without inside Queues: Their Properties and Public Policy Implications, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 1132-1147, 2010.
  - 14) Daganzo, CF., So, SK.: Managing evacuation networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 45, pp. 1424-1432, 2011.
  - 15) 大畑 長, 浦山 利博, 花井 健太, 彦坂 健太, 花房 比佐友, 今井 武, 津田 博之, 江藤 和昭: 災害時と平常時の交通マネジメントのためのデータ融合解析システムの紹介, 第 47 回土木計画学研究発表会, CDROM, 2013.
  - 16) 村上圭子: 災害ビッグデータ”活用の今後, 都市計画, Vol.62-6, pp.28-33, 2013.
  - 17) Merchant, D.K., Nemhauser, G.L.: A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problem, *Transportation Science*, Vol.12 (3), pp. 183-199, 1978.
  - 18) Merchant, D.K., Nemhauser, G.L.: Optimality conditions for a dynamic traffic assignment model, *Transportation Science*, Vol.12 (3), pp. 200-207, 1978.
  - 19) A. C. チャン (訳 小田正雄, 仙波憲一, 高森寛, 平澤典男): 動学的最適化の基礎, シーエーピー出版, 2006.
  - 20) Friesz, T.L., Luque, J., Tobin, R.L., Wie, B-W.: Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem, *Operations Research*, Vol. 37(6), pp. 893-901, 1989.
  - 21) Yueming, C., Deyun, X.: Emergency Evacuation Model and Algorithms, *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol.8(6), pp. 96-100, 2008.
  - 22) 河上省吾, 劉正凱: 動的なシステム最適化交通量配分モデルとその解法の開発, 土木計画学研究・論文集, Vol. 11, pp.121-128, 1993.
  - 23) Ziliaskopoulos, A.K.: A Linear Programming Model for the Single Destination System Optimumdynamic Traffic Assignment Problem, *Transportation Science*, Vol. 34, pp.37-49, 2000.
  - 24) Qian, Z., Shen, W., Zhang H.M.: System-optimal dynamic without queue spillback: Its path-based formulation and solution cost, *Transportation Research Part B*, Vol. 46, pp.874-893, 2012.
  - 25) Ma, R., Ban, X., Pang J.S., Liu, H.: Continuous-Time Dynamic System Optimal for Single-Destination Traffic Networks Considering Queue Spillbacks, *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington*, No. 01478179, 2013.
  - 26) Chiu, Y., Zeng, H., Villalobos, J., Gautam, B.: Modeling no-notice mass evacuation using a dynamic traffic flow optimization model, *IIE Transaction*, Vol. 39, pp. 83-94, 2007.
  - 27) 桑原雅夫, 吉井稔雄・熊谷香太郎: 動的システム最適配分とランプ流入制御に関する研究: 簡略ネットワークにおける基礎的分析, 土木学会論文集 IV, Vol.50, pp.59-71, 2001.
  - 28) 長江剛志, 赤松隆: リアルタイム観測情報を活用した動的なシステム最適交通配分: 確率制御アプローチ, 土木学会論文集 D, Vol. 63(3), pp.311-327, 2007.
  - 29) 赤松 隆: 交通流の予測・誘導・制御と動的なネットワーク配分理論, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, pp. 23-48, 1996.
  - 30) 赤松隆: 交通ネットワーク流の動的制御モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 35, CD-ROM, 2007.
  - 31) Kuwahara, M., Akamatsu, T.: Dynamic User Optional Assignment with Physical Queues for a Many-to-many OD Pattern, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, pp. 461-479, 2001.
  - 32) Urata, J., Hato, E.: Modeling the Cooperation Network Formation Process for Evacuation Systems Design in Disaster Areas with a Focus on Japanese Megadisasters, *Leadership and Management in Engineering*, Vol. 12, pp.231-246, 2012.
  - 33) 浦田淳司, 羽藤英二: 複雑ネットワークモデルを用いた豪雨災害時の協調行動形成に関する研究, 土木学会論文集 D3, Vol. 69, pp. 29-40, 2013.

## Dynamic Inflow Control Problem for Optimal Evacuation in a Devastated Area

Junji URATA, Eiji HATO

The optimal control is needed to prevent the emergence of traffic congestions for early evacuations by car. This paper propose an adaptive and dynamic inflow control model on traffic intersections. The purpose of this model is to minimize the time required to conclude the refugee's evacuation. The optimal inflow controls is calculated by theoretical approach. The model treats the flow conservation, the first-in-first-out discipline and the physical queues in many-to-one network. The Pontryagin's maximum principle is applied to have the complete evacuation time. This principle can calculate the optimal control variables directly. The constrained conditions of these control variables is defined by the conditions of dynamic traffic assignment. The dynamic optimization of the evacuation time are formulated by these constrained conditions.