

交差点の方向別交通流率に着目した 交通需要急増時の動的交通制御手法の提案

早川 敬一郎¹・羽藤 英二²

¹非会員 (株)豊田中央研究所 (〒 480-1192 愛知県長久手市横道 41 番地の 1)

E-mail: kei-hayakawa@mosk.tytlabs.co.jp

²正会員 東京大学大学院 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

本研究では、方向性を持つ需要が突発的かつ大量に発生する状況を想定して、ネットワークが過飽和状態に陥ることを予防する動的な交通制御手法を提案する。まず、極端な交通混雑の原因となるグリッドロック現象の発生を防ぐために、ネットワーク中に存在する閉ループに着目する。閉ループ内の各交差点における方向別通過交通流率から算出される変数が、閉ループ内の交通混雑が改善しているか悪化しているかを表す指標となっていることを示し、この変数を制御変数として活用する交通制御手法を提案する。また、数値計算によって、ネットワーク中の車両密度を制御変数とする従来手法に対する提案手法の優位性を示す。

Key Words: traffic congestion, traffic gridlock, dynamic traffic control, adaptive control

1. はじめに

道路ネットワークにおいて交通渋滞が発生すると、その交通容量が低下することが知られている。特に、都心部の高密度な道路ネットワークでは過飽和状態の道路交通は非常に無秩序な状態となり^{1),2)}、場合によってはグリッドロック現象³⁾などの極端な交通混雑が発生する。そのため、交通管制においては、道路ネットワークを過飽和状態にしないことが目標とされる⁴⁾。しかし、災害などの突発事象によって、平常時と比較して極端に大きな需要が発生すれば、道路ネットワークを非飽和状態に保つことは容易ではない。このような需要は平常時とは異なる出発地と目的地を持っているため、平常時には意識しない地点が交通ボトルネックとして顕在化し、激しい混雑が発生する。そのため本研究では、平常時の混雑状況を観察することで得られるパラメータを用いずに、突発的に発生した予測不可能な交通需要に対して、道路ネットワークを非飽和状態に保つための動的な交通制御手法について基礎的な検討を実施する。

平常時の交通管制の具体的な実施方法としては、交通信号制御と流入制御の研究が多く報告されている。都心部の面的な道路ネットワークに適用される交通信号制御は、感知器によって観測された交通需要に対して、主に、サイクル長、スプリット、オフセットの3種類のパラメータを制御することで、「総遅れ時間」と「停止回数」の重み付き和で定義されるパフォーマンスイ

ンデックス (PI) を最適化する⁵⁾手法が一般的である。一方で、主に高速道路網などに適用される流入制御は、想定される需要に対して、各ランプの流入量を制御することで、総交通量を最大化する⁶⁾ことを目的としている。これらの制御はいずれも、需要が既知であるか、もしくはある程度推定できることを前提としており、災害時など需要が短時間に大きく変化し、その予測が難しい状況には対応できない。また、ネットワーク中の一部のエリアのサービス・レベルを向上させる交通制御は、ネットワーク全体の渋滞の状況を悪化させる可能性があることも知られており⁷⁾、交通混雑が激しい場合には、これらの個々の交通制御ではネットワーク全体のサービス・レベルを向上させるのは困難である。

これに対して、Daganzo⁸⁾は、ネットワーク中の車両密度と当該ネットワークからの流出交通流率の関係を示す MFD (Macroscopic Fundamental Diagram) が需要量に依らずほぼ一定であることを示し、ネットワーク中の車両密度を好ましい値に保つことで道路ネットワークを非飽和状態に保つ交通制御を提案している。この制御方法は、実際の需要が未知であっても適用できるため、平常と異なる突発的な需要の急増にも対応することが可能である。しかしこの制御は、制御対象エリア内の交通の均質性、等方性を仮定しており、制御の実施を判断するパラメータである交通密度の閾値は平常時の交通状態を観察することで決定されているため、災害時など特定の方向を目指す需要が大量に発生する状況では、平常時に得られたパラメータが有効で

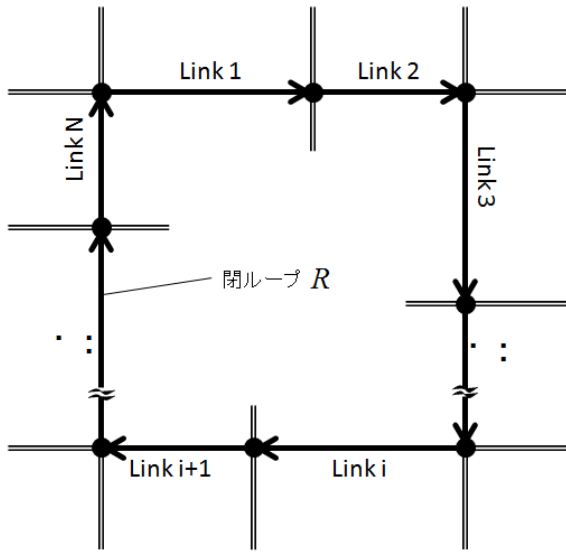


図-1 ネットワーク中の閉ループ

ない可能性がある。また、この制御は静的な制御方法であるため、突発事象による需要や供給の急変への対応方法は不明である。また、制御の実施方法は対象エリアへの流入制御に限られており、対象エリア内部の交差点での個別具体的な制御の善し悪しを判断することは難しい。

本研究では、これらの課題を解決するために、道路ネットワーク中に存在する閉ループに着目して、閉ループ内の各交差点における方向別通過交通流率から算出されるパラメータを制御変数とする新たな制御手法を提案する。このパラメータが閉ループ内の交通混雑が改善しているか悪化しているかを表す指標となっていることを示し、数値実験によって提案手法の優位性を示す。

2. 提案する交通制御手法

(1) 制御変数の導入

ノードの集合 V 、有向リンクの集合 E からなるネットワークを考える。図-1に示すように、ネットワーク中に存在する閉ループ R を考え、ループ R を構成する N 本の有向リンクを $\{1, 2, \dots, N\} \in R \in E$ とする。リンク $i \in R$ の終点はリンク $i+1 \in R$ の始点と接続しており、リンク $N+1$ はリンク 1 を指すものとする。時刻 t におけるリンク $i \in E$ の流出交通流率および流入交通流率を $\mu_i(t), \lambda_i(t)$ で表す。また、リンク $i \in E$ からリンク $j \in E$ への流出交通流率を $\mu_{i \rightarrow j}(t)$ と表し、リンク $j \in E$ からリンク $i \in E$ への流入交通流率を $\lambda_{j \leftarrow i}(t)$ と表す。このとき、定義より、

$$\mu_{i \rightarrow j}(t) = \lambda_{j \leftarrow i}(t) \quad (1)$$

である。また、各交差点における分流量 $\zeta_{i \rightarrow j}(t)$ を、

$$\zeta_{i \rightarrow j}(t) = \frac{\mu_{i \rightarrow j}(t)}{\mu_i(t)} \quad (2)$$

で、合流率 $\eta_{j \leftarrow i}(t)$ を

$$\eta_{j \leftarrow i}(t) = \frac{\lambda_{j \leftarrow i}(t)}{\lambda_j(t)} \quad (3)$$

で表す。また、リンク $i \in E$ で発生した渋滞流側の密度波がリンクの先端から後端まで到達するのにかかる時間を τ'_i とおき、

$$\tau'_{ij} = -\tau'_i + \sum_{k=i}^j \tau'_k \quad (4)$$

とおく。

ここで、変数 $Z_i(t)$ を以下のように定義する。

$$Z_i(t) = \prod_{k \in R} \frac{\eta_{(k+1) \leftarrow k}(t - \tau'_{ik})}{\zeta_{k \rightarrow (k+1)}(t - \tau'_{ik})} \quad (5)$$

筆者らは前報⁹⁾で、閉ループ R を構成する全リンクが先詰まり状態であれば、

$$\mu_i(t) \leq Z_i(t) \cdot \mu_i(t - \sum_{k \in R} \tau'_k) \quad (6)$$

が成立し、

$$\forall t : Z_i(t) < 1 \quad (7)$$

であれば

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mu(t) = 0 \quad (8)$$

となることを示した。すなわち、先詰まり状態の閉ループ R において $Z_i(t) < 1$ の状態が続けばグリッドロック現象が発生および進展すると考えられるため、交通制御においてはこれを避ける必要がある。

(2) 制御変数の特徴

前節で導入した制御変数 $Z_i(t)$ について、定常状態および非定常状態のそれぞれにおける特徴を示す。

a) 定常状態

まず、交通流が安定している定常状態のときの $Z_i(t)$ について考える。式 5 で表された変数 $Z_i(t)$ は、式 1,2,3 を用いて、

$$Z_i(t) = \prod_{k \in R} \frac{\mu_k(t - \tau'_{ik})}{\lambda_{k+1}(t - \tau'_{ik})} \quad (9)$$

と、変形することが出来る。定常状態においては、交通量保存則より、

$$\forall t, t' : \lambda_i(t) = \lambda_i(t') = \mu_i(t) = \mu_i(t') \quad (10)$$

が成立するから、

$$Z_i(t) = 1 \quad (11)$$

となる。

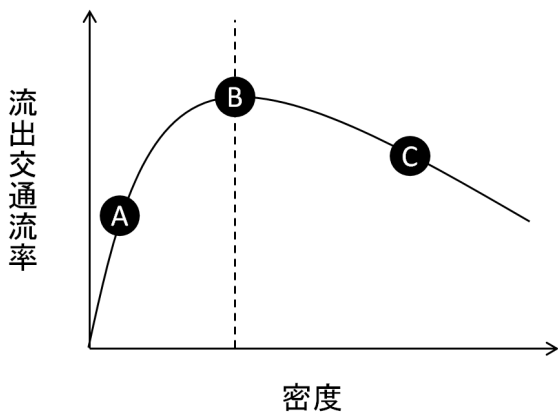


図-2 密度と流出交通流率の関係

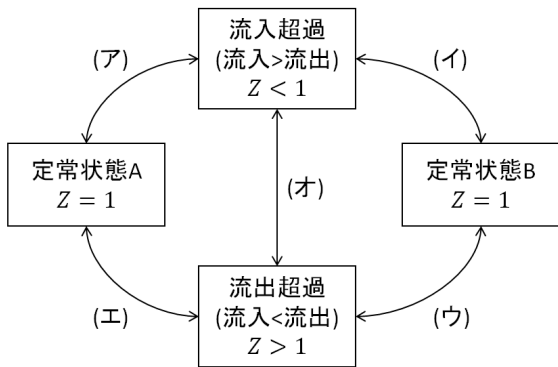


図-3 状態の遷移

b) 非定常状態

次に、非定常状態における $Z_i(t)$ の値の変化について説明する。ここでは簡単のために、ネットワークの交通密度と流出交通流率の関係が図-2のように表されるとする。

まず、ネットワークが非飽和状態の場合を考える。図-2のAの状態から定常状態であったネットワークで一時的に需要が急増し、最終的にBの状態に定常状態になったとし、その間の $Z_i(t)$ の値の変化を考える。このとき、最初と最後は定常状態であるため、前節に示した通り、 $Z_i(t) = 1$ である。AからBへの遷移する過程においては、流入交通流率が流出交通流率を上回って推移するため $\mu_k(t) < \lambda_{k+1}(t)$ となり、式9から、 $Z_i(t) < 1$ となる。すなわち、AからBへの状態遷移では、 $Z_i(t)$ の値は、図-3の(ア)→(イ)のように遷移する。逆に、定常状態Bから定常状態Aへ遷移する場合は、流出交通流率が流入交通流率を上回るため $\mu_k(t) > \lambda_{k+1}(t)$ となり、 $Z_i(t) > 1$ であるため、 $Z_i(t)$ の値は、図-3の(ウ)→(エ)のように遷移する。

次に、ネットワークが過飽和状態の場合を考える。図-2のBの状態から定常状態であったネットワークに一時的に多くの交通流が流入してCの状態に至った後、次

節に流入交通量が減少してBの定常状態に戻る場合の $Z_i(t)$ の変化を考える。このとき、最初は流入交通流率が流出交通流率を上回るため $Z_i(t) < 1$ であるが、その後は流出交通流率が流入交通流率を上回り $Z_i(t) > 1$ となる。つまり、 $Z_i(t)$ の値は、図-3の(イ)→(オ)→(ウ)のように遷移する。

(3) 交通制御手法の提案

本節では、前節まで示した特徴を持つパラメータ $Z_i(t)$ を用いた交通制御を提案する。既に示したように、先詰まり状態の閉ループ R において $Z_i(t) < 1$ の状態が続けばグリッドロック現象が発生および進展すると考えられるため、このときは閉ループへの流入交通を制御することが望ましい。このときの交通制御の目的はネットワークからの流出交通流率が最大となる状態(すなわち、図-2のBの状態)に持つことである。すなわち、ループからの総流出交通流率を $F_R(t)$ とすると、制御の目的は、 $F_R(t)$ を最大値とし、かつ $Z_i(t) = 1$ とすることである。一方で、非飽和状態のネットワークにおいて流入交通流が増加すれば $Z_i(t) < 1$ となることも既に示した。この場合は流入交通を制御する必要はない。そこで、本研究では、 $F_R(t)$ の変化 $\Delta F_R = F_R(t) - F_R(t - t_R)$ に注目し、以下のような交通制御を考える。

「時刻 t において $\Delta F_R < 0$ かつ $Z_i(t) < 1$ であれば、将来の時刻 $t' > t$ において $Z_i(t') = 1$ を目指す交通制御」ここで、 t_R は、閉ループの状態推移を観察するために適した時間を示す制御パラメータである。本研究では、この制御を Z 制御と呼ぶ。 Z 制御の具体的な実行手段としては、交通信号管制や経路誘導、進路規制など多くの方法が考えられるが、ここでは特に、閉ループ R の各交差点において、ループへの流入交通量を制御する流入制御の一例を示す。

まず、閉ループ中のリンク $k \in R$ の終点であり、かつリンク $k + 1 \in R$ の起点であるノード K を考える。時刻 t のこの交差点における閉ループ R 外部から内部への流入交通流率を $f_k^{in}(t)$ 、内部から外部への流出交通流率を $f_k^{out}(t)$ とすると、交差点における交通量保存則により、

$$\mu_k(t) + f_k^{in}(t) = \lambda_{k+1}(t) + f_k^{out}(t) \quad (12)$$

の関係が成立するから、

$$\frac{\mu_k(t)}{\lambda_{k+1}(t)} = 1 + \frac{1}{\lambda_{k+1}(t)} (f_k^{out}(t) - f_k^{in}(t)) \quad (13)$$

である。すなわち、交差点 K において流入制御 $f_k^{in}(t) = 0$ を実行すれば、 $\frac{\mu_k(t)}{\lambda_{k+1}(t)}$ の値を最大とすることができ、その値は1より大きい。式9によると、 $\frac{\mu_k(t)}{\lambda_{k+1}(t)}$ の値は $Z_i(t + \tau'_{ik})$ に影響する。この値は、リンク $i \in R$ の時刻 $t + \tau'_{ik}$ における Z 値である。ここで、 $Z_i(t + \tau'_{ik})$ を、未来のパラメータと過去のパラメータ

に分解すると,

$$Z_i(t + \tau'_{ik}) = \prod_{k' > k \in R} \frac{\mu_{k'}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})}{\lambda_{k'+1}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})} \cdot \frac{\mu_k(t)}{\lambda_{k+1}(t)} \\ \times \prod_{k'' < k \in R} \frac{\mu_{k''}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik''})}{\lambda_{k''+1}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik''})} \quad (14)$$

となる. 将来時刻のパラメータは未知であるため, 流入制御の実行にあたってはその値を現在時刻のもので代用した変数 $Z'_i(t + \tau'_{ik})$ を以下のように考える.

$$Z'_i(t + \tau'_{ik}) = \prod_{k' > k \in R} \frac{\mu_{k'}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})}{\lambda_{k'+1}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})} \cdot \frac{\mu_k(t)}{\lambda_{k+1}(t)} \\ \times \prod_{k'' < k \in R} \frac{\mu_{k''}(t)}{\lambda_{k''+1}(t)} \quad (15)$$

この $Z'_i(t + \tau'_{ik})$ ができるだけ 1 を下回らないようにするために, 以下の式 16 を流入制御の実施条件とする.

$$\prod_{k' > k \in R} \frac{\mu_{k'}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})}{\lambda_{k'+1}(t + \tau'_{ik} - \tau'_{ik'})} \cdot \prod_{k'' < k \in R} \frac{\mu_{k''}(t)}{\lambda_{k''+1}(t)} < 1 \quad (16)$$

すなわち, 式 16 が成立する場合, ノード K において流入制御を実施して $f_k^{out}(t) = 0$ とする.

(4) ベンチマーク

提案する流入制御に対するベンチマークとしては, ネットワーク固有の MFD に基づいて対象エリアの交通密度を制御する方式を考える. この方法は, 閉ループ R 内の交通密度 ρ が事前に設定した閾値 ρ_0 を超過した場合に, 閉ループへの全ての流入交通を遮断する. 本研究では, この方法を **MFD** 制御と呼ぶ.

3. 数値実験

提案する交通制御の有効性を検証するため, 数値計算実験を行った. 実験では, 仮想ネットワーク上に一定の需要を負荷した定常状態を初期状態とし, ある時刻に特定の目的地を持つ需要を大量に発生させたときの混雑状況を, FIFO(First-In-First-Out) 条件と Physical Queue を考慮した動学的な交通流方程式¹⁰⁾ を離散時間ごとに近似的に解くことで分析した. 本章では実験方法と得られた結果を示す.

(1) 交通流の計算方法

時間 Δt 毎に離散化した時間ステップ $t = \{1, 2, \dots, T\}$ を考える. 本実験では, 単位時間ステップ Δt は 1 秒としている. 各リンク $i \in E$ の交通流特性を表す Fundamental Diagram (FD) は, 自由流側の密度波の速度 w_i , 渋滞流側の密度波の速度 w'_i , 渋滞密度 k_i^{max} , 飽和交通流率 S_i をパラメータとする三角形で表されるもの

と仮定し, 各時刻の流入交通流率 $\lambda_i(t)$ および流出交通流率 $\mu_i(t)$ を計算する. 本実験では, $\lambda_i(t)$ および $\mu_i(t)$ は連続値として計算を行う.

まず, 時刻 t におけるリンク $i \in E$ からの最大流出交通流率 $X_i(t)$ は,

$$X_i(t) = \begin{cases} r_i(t) \cdot S_i & \text{if } A_i(t - \tau_i) > D_i(t) \\ & \text{or } \lambda_i(t - \tau_i) > r_i(t) \cdot S_i \\ \lambda_i(t - \tau_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

で与えられる. ここで, $A_i(t)$ は時刻 t までのリンク i への累積流入交通量を, $D_i(t)$ は時刻 t までのリンク i からの累積流出交通量を表しており, $\tau_i = \frac{l_i}{w_i}$ はリンクの自由旅行時間を表している. また, $r_i(t)$ は, 交通信号によってリンク i に与えられた通行優先権の比率 (スプリット) である. 次に, 時刻 t におけるリンク $i \in E$ への最大流入交通流率 $Y_i(t)$ は,

$$Y_i(t) = \begin{cases} \mu_i(t - \tau'_i) & \text{if } A_i(t) > D_i(t - \tau'_i) + k_i^{max} l_i \\ S_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

で与えられる. 以上の $X_i(t)$ および $Y_i(t)$ を踏まえてると, $\mu_i(t)$ および $\lambda_k(t)$ は, 以下の制約条件を満たす必要がある.

$$\forall i : \mu_i(t) \leq X_i(t) \quad (19)$$

$$\forall i : \lambda_k(t) \leq Y_k(t) \quad (20)$$

$$\forall i : (\mu_i(t) - X_i(t)) \cdot \prod_{k \in O_i} (\lambda_k(t) - Y_k(t)) = 0 \quad (21)$$

ここで, O_i は, リンク k に流入する全てのリンクの集合を表している.

また, リンク内では FIFO 条件が成立するものとした. 時刻 t にリンク i に流入した交通がリンク i を流出するまでの所要時間を $T_i(t)$ とおくと, 連続時間系における FIFO 条件は

$$\frac{\lambda_i^d(t)}{\lambda_i(t)} = \frac{\mu_i^d(t + T_i(t))}{\mu_i(t + T_i(t))} \quad (22)$$

と表すことが出来る. ただし, 添え字の d はその交通の目的地が d であることを示している. 今回の計算ではこれを離散時間系に適用し, 各時刻 t において,

$$A(t' - \Delta t) < D(t) + \mu(t + \Delta t) \leq A(t') \quad (23)$$

を満たす $t' \leq t$ に対して,

$$\mu_i^d(t + \Delta t) = \max(A_i^d(t' - \Delta t) - D_i^d(t), 0) + \frac{\lambda_i^d(t')}{\lambda_i(t')} \mu_i(t + \Delta t) \quad (24)$$

となることを, 制約条件として適用した.

最後に, リンクに先詰まりが発生している場合の合流比については, 流入する全てのリンクから均等な比率で合流するものとした.

以上の条件によって, 各時刻 t の $\mu_i(t)$ および $\lambda_k(t)$ の値を一意に決定することが出来る.

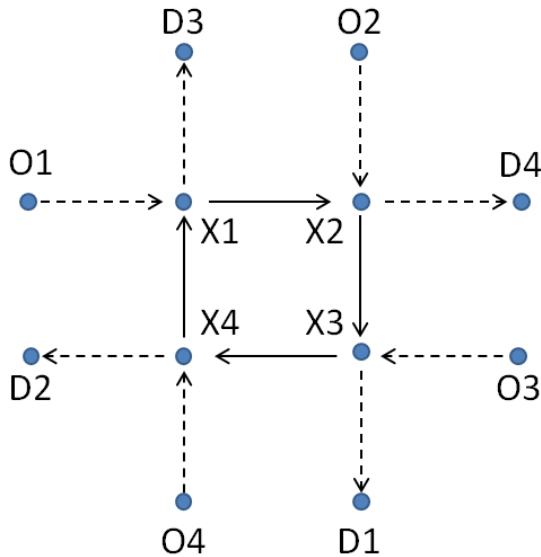


図-4 シングルグリッドネットワーク

表-1 リンクのパラメータ

リンク長 l_i	100 (m)
飽和交通容量 S_i	1800 (台/h)
渋滞密度 k_i^{max}	150 (台/km)
自由流側の密度波の速度 w_i	10 (m/s)
渋滞流側の密度波の速度 w'_i	5 (m/s)

表-2 設定した OD 交通量

発生ノード	集中ノード	需要 (台/h)	
		$t < 0$	$t \geq 0$
O1	D1	300	300
O2	D2	300	720
O3	D3	300	300
O4	D4	300	300
O3	D2	0	300

(2) 流入制御の実装

実験では、2.章に示した Z 制御と MFD 制御を、以下のように実装した。

まず Z 制御については、時刻 t にリンク $i \in R$ が $\Delta F_R = F_R(t) - F_R(t - t_R) > 0$ を満たし、かつ式 16 を満たすとき、 $r_i(t + \Delta t) = 1$ とし、また、リンク i の終点ノードに流入する他の全てのリンク $j \in E$ について $r_j(t + \Delta t) = 0$ とする。

MFD 制御については、制御を実施する際の密度の閾値 ρ_0 をパラメータとして、流入制御の対象のリンク $j \in E$ について、

$$r_j(t + \Delta t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \rho > \rho_0 \\ r_0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

とし、 $r_j(t + \Delta t) = 0$ のときには、リンク j の終点ノードにする他のリンク $i \in E$ について、 $r_i(t + \Delta t) = 1$ とする。

(3) シングルグリッドネットワークにおける分析

まず、図-4 に示すようなシングルグリッドのネットワークを考え、特定の目的地を持つ需要が突発的かつ大量に発生した状況を想定して、提案する Z 制御の基礎的な効果を検証する。

a) 実験条件

図-4 のネットワークには、4 つの信号交差点ノード {X1, X2, X3, X4} が存在し、それらを結ぶ 4 本のリンクで閉ループ R が構成されている。各リンクのパラメータは全て同一で表-1 に示す通りとし、制御を実施しない場合は、ノード {X1, X2, X3, X4} に流入する全てのリンクに対して $r_i(t) = 0.5 \equiv r_0$ とした。このネットワー

クに、表-2 で示す需要を負荷する。時刻 $t < 0$ においてはネットワーク全体に均一かつ少量の需要が存在しているが、時刻 $t = 0$ を境にノード $D2$ へ向かう大量の需要が発生する。

実験は、流入制御を実施しない場合、Z 制御を実施する場合、MFD 制御を実施する場合のそれぞれについて行った。Z 制御ではパラメータ t_R は 40 秒とし、MFD 制御では図-4 の実線で示すエリアを制御対象とし、制御エリアに流入する 4 リンクを流入制御の対象とした。

b) 実験結果

まず、流入制御を実施しない場合の累積流入流出交通量の計算結果を図-5 (a) に示す。図の点線は総需要を、実線および破線は、閉ループ R に対する累積流出交通量および累積流入交通量を示している。需要が増加する時刻 $t = 0$ 以降に発生した渋滞が解消せずにグリッドロック現象が発生し、10 分程度で交通流率がゼロとなることが分かる。このときの、閉ループ R 内の車両密度と流出交通流率の関係を図-6 に示す。流出交通流率は、車両密度が 0.032 のときに最大値 1748 となる。もし仮にネットワーク中に車両が均一に存在していれば、表-1 に示したリンクパラメータから、各リンクの流出交通流率が最大となる車両密度は 0.050 と計算できるが、ノード $D2$ を目的地とする大量の需要によってネットワーク内の車両分布に偏りが生じ、流出交通流率が最大となる車両密度が低下したと考えられる。

次に、流入制御を実施した場合について考える。流入制御の方法としては、2.章に示した Z 制御と MFD 制御のそれぞれの手法で行った。MFD 制御のパラメータ

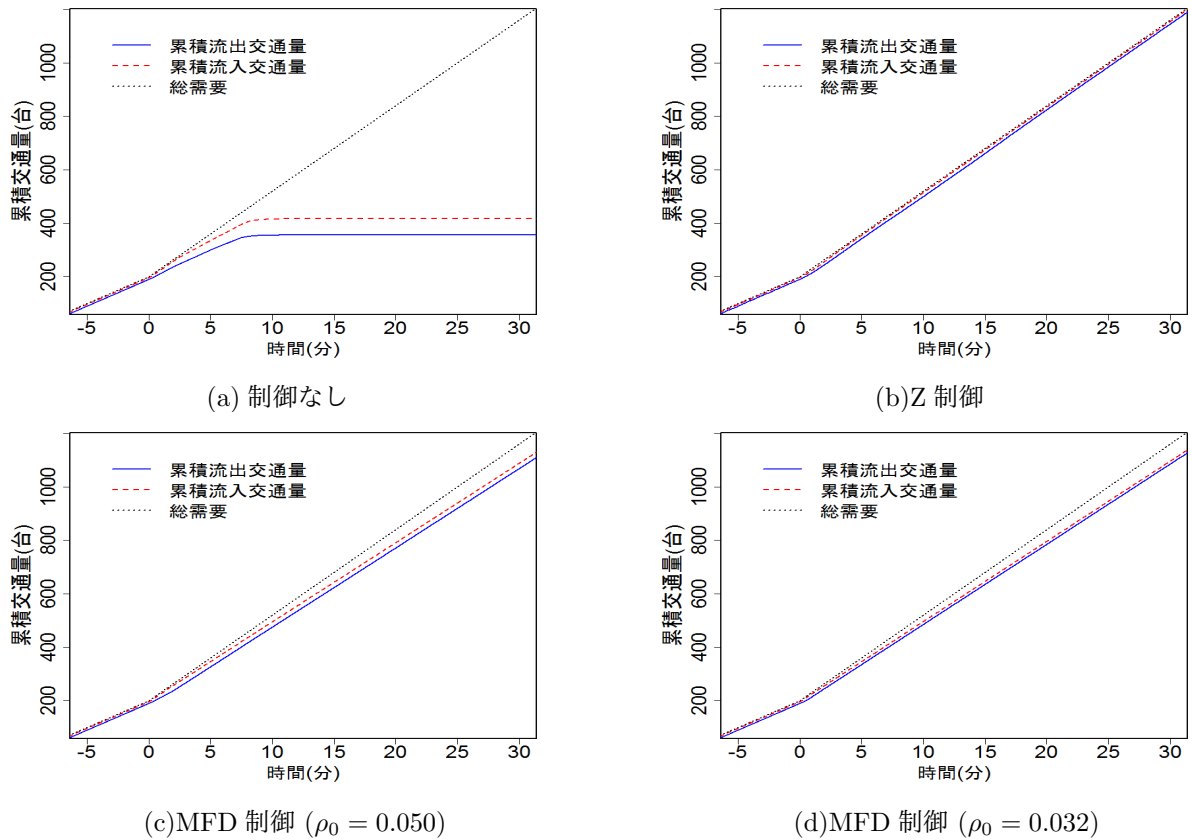


図-5 累積流入流出交通量の計算結果

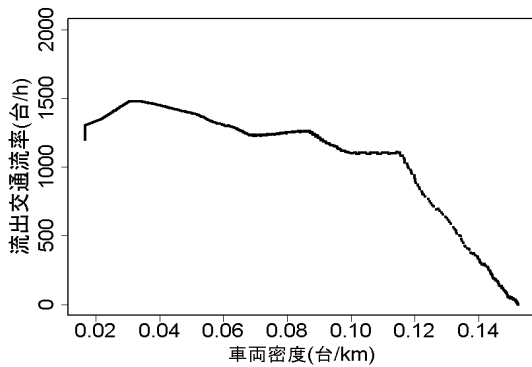


図-6 車両密度と流出交通流率の関係 (流入制御なし)

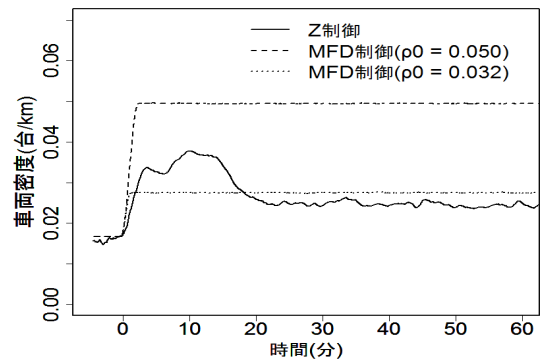
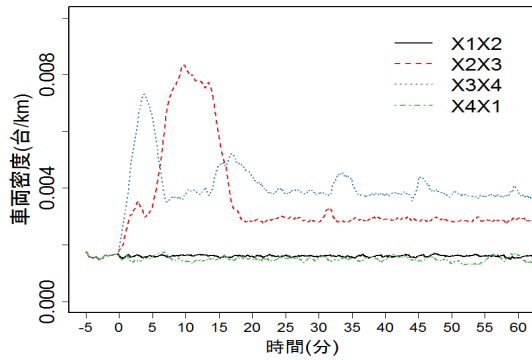


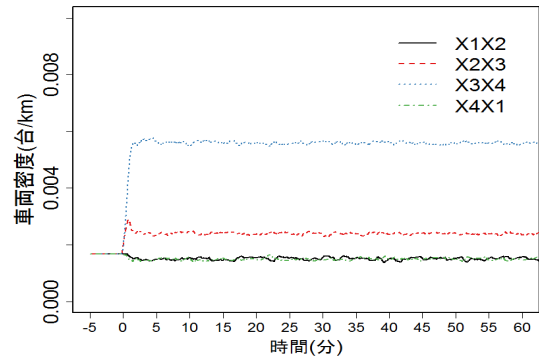
図-7 車両密度の推移 (流入制御あり)

である基準交通密度 ρ_0 については、表-1 に示したリンクパラメータから得られる理論値 0.050 の場合と、図-6 の結果を参照した 0.032 の 2 通りで実験を行った。Z 制御の場合の累積流入流出交通量の計算結果を図-5 (b) に、MFD 制御で $\rho_0 = 0.050$ とした場合と $\rho_0 = 0.032$ とした場合の計算結果をそれぞれ図-5 (c) および (d) に示す。この結果によると、いずれの場合においても、流入制御の効果によって閉ループ R 内部で渋滞は発生していない。しかし、Z 制御では全ての需要が捌けている

のに対して、MFD 制御の場合は ρ_0 の値に関わらず閉ループへの流入待ち交通が発生している。ネットワークの交通状態をより詳細に確認するために、それぞれの方式による閉ループ R 内の車両密度の推移を図-7 に示す。さらに、Z 制御の場合と MFD 制御で $\rho_0 = 0.032$ とした場合について、各リンク毎の車両密度の推移を図-8 に示す。MFD と比較して Z 制御は混雑状況の変化に応じて動的に車両密度をコントロールできており、空間的により良い車両配分を達成していることが分かる。



(a)Z 制御



(b)MFD 制御 ($\rho_0 = 0.032$)

図-8 リンク毎の車両密度の推移

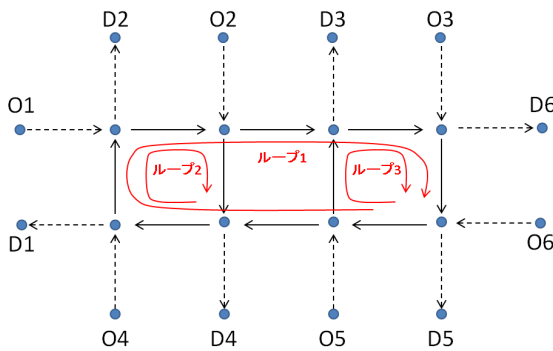


図-9 梯子型ネットワーク

表-3 設定した OD 交通量

発生 ノード	集中 ノード	需要 (台/h)	
		$t < 0, t > 1800$	$0 \leq t \leq 1800$
O2,O3	D1	各 40	各 400
O4,O5	D1	各 40	各 400
O6	D1	各 40	各 400
O1	D2,D3,D4,D5,D6	各 40	
O2,O3	D4,D5,D6	各 40	
O4,O5	D2,D3,D6	各 40	
O6	D2,D3,D4,D5	各 40	

(4) 複数グリッドネットワークにおける分析

次に、図-9 に示すような梯子型のネットワークを考えて同様の実験を行い、複数の閉ループを含むネットワークにおける提案手法の有効性と課題の検証を行う。

a) 実験条件

図-9 に示すように、このネットワークは3つの閉ループを含んでいる。各リンクのパラメータは前節の実験と同じく表-1 に示す通りとし、制御を実施しない場合は全ての合流リンクに対して $r_i(t) = 0.5 \equiv r_0$ とした。このネットワークに、表-3 で示す需要を負荷する。時刻 $t = 0$ からの 30 分間、ノード D1 へ向かう大量の需要が設定されている。この条件において、Z 制御および MFD 制御による流入制御を実施した場合の交通流の推移を計算した。Z 制御では、ネットワーク中の3つの閉ループ全てに対して、2. 章で示す制御を実施した。ただし、2リンクが合流するノードにおいて、両方の流入リンクが共に流入制御の条件を満たした場合には流入制御を行わないこととした。MFD 制御については、図-9 の実線で示した全リンクを含む範囲を制御対象エリアとして設定し、表-1 に示すリンクパラメータから

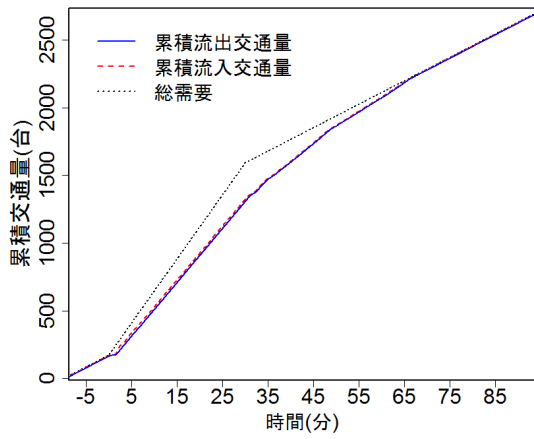
得られる理論値である $\rho_0 = 0.05$ を密度閾値パラメータとして用いた。

b) 実験結果

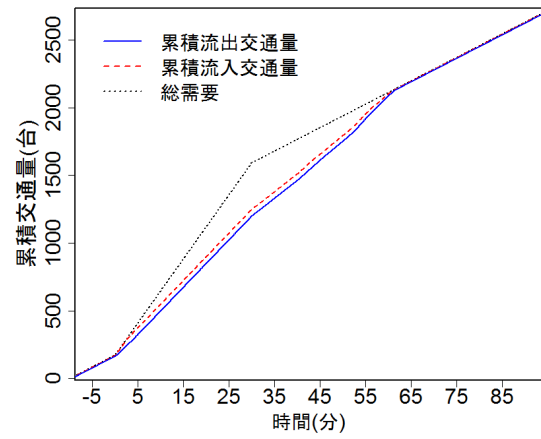
Z 制御、MFD 制御のそれぞれの場合について、実験で得られた累積流入流出交通量を図-10 に示す。図からわかるように、時刻 $t = 0$ 以降の突発的な需要急増に対して、Z 制御は MFD 制御よりも多くの交通を捌いている。一方で、 $t = 1800$ 以降、突発的な需要が収まったあとで渋滞が解消に向かう時間帯においては、MFD 制御の方が Z 制御よりも多くの交通を捌いている。図-11 に、それぞれの方式による閉ループ R 内の車両密度の推移を示す。Z 制御では、渋滞が解消に向かう時間帯においてネットワークの車両密度が非常に小さい値となっているにもかかわらず捌け交通量が少なくなっており、過剰な流入制御が行われていることが考えられる。この点については今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、方向性を持つ需要が突発的かつ大量に発生する状況を想定して、ネットワークが過飽和状態に陥ることを予防する動的な交通制御手法について考えた。まず、極端な交通混雑の原因となるグリッドロッ



(a)Z 制御



(b)MFD 制御

図-10 累積流入流出交通量

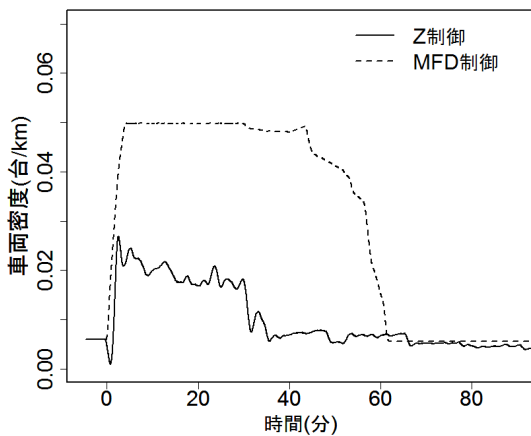


図-11 車両密度の推移 (流入制御あり)

ク現象の発生を防ぐために、ネットワーク中に存在する閉ループ内の各交差点における方向別通過交通流率から算出されるパラメータに着目した。このパラメータが閉ループ内の交通混雑が改善しているか悪化しているかを表す指標となっていることを示し、このパラメータを用いた Z 制御を提案した。Z 制御とは、交通状況が過飽和状態の閉ループ内において、閉ループからの流出交通流が最大となる定常状態を目指す制御である。数値実験による分析では、まずシングルグリッドネットワークにおいて偏りのある大きな需要が突発的に発生する状況を想定して Z 制御を適用し、ネットワーク中の車両密度を制御変数とする従来手法と比較した。実験の結果、Z 制御は混雑状況の変化に応じて動的に車両密度をコントロールできており、空間的により良い車両配分を達成していることが分かった。さらに、複数の閉ループを有するネットワークにおいても、

同様の実験を行った。この場合も、需要が発生して混雑が増加する段階における Z 制御の優位性を確認することができた。

今回 Z 制御を提案したが、理論的な説明はまだ十分とは言えない。また、数値実験においても、混雑解消段階においては Z 制御の優位性を確認することはできなかった。これらの点については、今後の課題であると考えられる。今回は、閉ループへの流入制御に絞って分析を実施したが、提案する Z 制御は「流入制御」に加えて「経路誘導」、「進入規制」など多様な方法で実現可能であると考えられる。混雑の発生から解消に至るまでの動的な制御を理論的に明らかにした上で、より具体的な交通制御手法を提案していきたい。

参考文献

- 1) Daganzo, C. F.: The nature of freeway gridlock and how to prevent it, *International symposium on transportation and traffic theory*, pp. 629-646, 1996.
- 2) Daganzo, C. F.: Queue spillovers in transportation networks with a route choice, *Transportation Science*, Vol.32, No.1, pp.3-11, 1998.
- 3) Mahmassani, H. S., Saberi, M., and Zockaie, A.: Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.36, pp.480-497, 2013.
- 4) Papageorgiou, M., Ben-Akiva, M., Bottom, J., Bovy, P. H., Hoogendoorn, S., Hounsell, N. B., Kotsialos, A., and McDonald, M.: Its and traffic management, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.14, pp.715-774, 2007.
- 5) Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., and Wang, Y.: Review of road traffic control strategies, *Proceedings of the IEEE*, Vol.91, No.12, pp.2043-2067, 2003.
- 6) 佐佐木綱 and 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.
- 7) Smith, M.: In a road network, increasing delay locally

- can reduce delay globally, *Transportation Research*, Vol.12, No.6, pp.419–422, 1978.
- 8) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.1, pp.49–62, 2007.
- 9) 早川敬一郎 and 羽藤英二: 都心部における交通需要急増時の動的交通制御に関する基礎的研究, *土木計画学研究・講演集*, Vol.53, 2016.
- 10) Kuwahara, M. and Akamatsu, T.: Dynamic user optimal assignment with physical queues for a many-to-many od pattern, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.35, No.5, pp.461–479, 2001.

(2016. 7. 29 受付)

Dynamic Traffic Flow Control on Rapidly Increasing Traffic Demands based on Traffic Flow Rate at Intersections

Keiichiro HAYAKAWA and Eiji HATO