

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

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)

都心部において交通需要が急増した場合、グリッドロックと呼ばれる極端な交通混雑現象が発生することがある。そのような状況に対する動学的な制御方法を導出するための基礎的な研究として、本研究では、Physical queue を考慮した動学的な交通流モデルを用いてグリッドロック現象を定式化し、混雑現象の進展挙動が、グリッドロックを形成する閉ループ内の各リンク間の流入率と流出率を用いて算出されるパラメータによって表現できることを示した。この結果は、交通流分布が一様で分岐率が時間変動しない特殊なケースにおいては、従来から知られている制御エリア内車両数とグリッドロック現象の関係と一致している。

Key Words: traffic gridlock, physical queue, taxi probe

1. はじめに

高密度の道路ネットワークを有する都心部では、一旦渋滞が発生するとその影響は広範囲に及び¹⁾、多大な経済損失が発生する²⁾。特に、大幅な需要超過によって道路ネットワークが過飽和状態に陥った場合、交通の流れは渋滞中の車両の滞留によって妨げられて無秩序な状態となるため、その状況を正確に予測することは難しい^{3),4)}。このような大幅な需要超過によってもたらされる交通混雑現象として、グリッドロック現象が知られている。Mazloumian ら⁵⁾によると、「グリッドロック (Gridlock)」という用語は、一般的には、道路渋滞によって滞留する車両が原因で極端な混雑が発生して交通スループットが極めて小さくなる状態を指し、また、狭義にはその交通スループットが完全にゼロとなる状態を指す。

日本では、2011 年 3 月に発生した東日本大震災の際に東京都区内の道路でグリッドロック現象が観測されている⁶⁾。このときには、都市鉄道の運行が長時間にわたって停止したことが原因で大量の帰宅需要が短時間に発生したことが原因で、自動車交通の著しい渋滞が発生した。都心部の幹線道路は滞留車両によって完全に麻痺し、緊急車両の通行にも支障をきたした。このように短時間で交通需要が大幅に増加する状況下において、交通混雑を緩和し、優先的に通行すべき車両の動線確保のための交通制御の方法はまだ確立されていない。

本研究は、グリッドロック現象の動的な挙動に注目することで、このような状況下において適切な動的交通制御に関する基礎的な知見を得ることを目的とする。滞留する車両による渋滞の列 (physical queue) の動的な挙動を定式化し、グリッドロック現象の進展を特徴づけるパラメータを抽出する。

2. 関連研究

(1) 渋滞待ち行列 (Physical queue) の記述

渋滞の待ち行列は、時間経過とともに上流に延伸し、上流側の交差点における通行に支障をきたす。このような渋滞の延伸状況を解析する方法として、Kinematic-Wave 理論が良く知られている^{7),8)}。また、Kinematic-Wave 理論と待ち行列理論を統合し、距離軸、時間軸、累積交通流軸の 3 次元空間上で渋滞の延伸を考慮する 3 次元待ち行列モデルが Newell^{9),10),11)} によって提案されている。

(2) 渋滞待ち行列の動的制御

都心部では、渋滞待ち行列は交通信号によって発生することが多い。Abu ら¹²⁾ は、上流交差点の通行を阻害するような信号待ち行列の延伸を防ぐために、渋滞待ち行列の長さや交通需要に応じて適応的に青時間や近隣信号とのオフセット時間を変化させる交通信号管制モデルを提案した。また、その他にも多くの信号管制モデルが提案されており¹³⁾、実際の道路に導入さ

れている。

交通信号制御に加えて、流入規制や経路規制などのあらゆる交通制御を通じて、道路ネットワークのスループットを最大化する理論的な試みとして、動的システム最適 (Dynamic System Optimal:(DSO) 配分が研究されている。Friesz ら¹⁴⁾ は、最大値理論を用いて DSO 制御を定式化した。そのモデルは First-in First-Out(FIFO) 制約を満たさない "exit function" を用いて定式化されており、実用には適さない。FIFO 制約を考慮した DSO 配分の研究としては、全ての車両の出発地もしくは目的地が 1 地点に限定されている場合、および道路ネットワーク上のボトルネックが 1 か所に限定されている場合について DSO 制御を定性的に示した Lovell ら¹⁵⁾ の研究が存在する。また、桑原ら¹⁶⁾ は、高速道路の流入制御 (ランプメタリング: Ramp Metering) を題材に、2 本の並行リンクのみで構成されるシンプルなネットワークにおける動的最適制御の定性的に示している。しかし、一般ネットワークを対象とした DSO 配分問題は、その非凸性により、モデルの構築やその数理的分析が困難であることが Lovell ら¹⁵⁾ によって示されている。

このため、交通流の動的制御を考えるに当たっては、ネットワークや制御手法等の解析条件を限定した上で、その特性を検証することが必要であり、上述した信号制御モデルは、その一例と考えられる。しかし、グリッドロック現象が発生するような過飽和のネットワークに対して、有効なマイクロ制御 (信号制御を含む) は確立していない。

(3) MFD(Macro Fundamental Diagram) を用いたグリッドロック現象の研究例

あるエリアの交通流の平均速度がエリア内の交通流量と密度の関数で表されることは、Harman ら¹⁷⁾ によって示されていた。Daganzo¹⁸⁾ はこの関係を、エリア内の車両台数が n のときにエリアからの流出台数が $g = G(n)$ と表される MFD(Macro Fundamental Diagram) によって表現し、交通スループットを最大化する制御を定式化した。均質な単一エリア (single reservoir) を考えた場合、最適制御は、エリア内の車両台数を出来る限り $\mu = \operatorname{argmax}_n G(n)$ に近づける制御となる。Geroliminis ら¹⁹⁾ は、横浜市における実際の交通データを用いて、MFD が需要によらずネットワーク固有の関数として定義できることを示唆しており、その後、グリッドロック現象を含む都市部の交通混雑を MFD を用いて表現する取り組みは、数多くなされている。

Daganzo¹⁸⁾ は、エリア内の車両台数が $\mu = \operatorname{argmax}_n G(n)$ より多い場合、エリア内の滞在車両によって流入交通量が制限され、最終的には流出交通量と流入交通量が均衡することでグリッドロック現象が発生

することを示している。Mazlounian ら⁵⁾ は、エリア内の密度の分散が MFD にとっての重要なパラメータであることを示しており、交差点で進路変更 (右左折) を行う割合 α の車両ごとのばらつき (標準偏差) が大きいほど短時間でグリッドロック状態に陥ることを示している。これは、エリア内の車両分布のばらつきによって、渋滞待ち行列が上流交差点と干渉する確率が上がることが原因であると考えられている。また、Daganzo ら²⁰⁾ は、交差点で進路変更 (右左折) を行う車両の割合が大きいほど、また、エリアに流入する需要の増加率が大きいほど、短時間でグリッドロック状態に陥ることを示している。一方、Mahmassani ら²¹⁾ は、道路空間の不均質性を考慮するために、エリア間の車両密度のばらつき σ を用いて MFD を $g = G(n) + H(n, \sigma)$ の形で定義し、グリッドロックの進展や解消の過程を表現している。これらの他にも、MFD のヒステリシスを理論および実験データの両面から分析した研究^{22),23),24)} から、グリッドロックの進展や解消の過程を類推することが可能である。

MFD を用いてグリッドロック現象を評価するこれらの研究によって、エリア全体の車両台数などの集計量を制御する方策を考えることができる。しかし一方で、エリア内での個別具体的な制御方法を考えるときには、時間的に変化する待ち行列の制御について、より深く検討することが必要である。

(4) グリッドロック現象に関するその他の研究例

次に、MFD を用いずにグリッドロック現象を表現した研究例について述べる。Mendes ら²⁵⁾ は、電気回路をアナロジーとする "electrical model" を提案し、電圧上昇によるレジスタの破壊によってグリッドロック現象を表現しており、エージェントシミュレーションによる簡易実験によりその正当性を検証している。またその他にも、エージェントシミュレーションを用いてグリッドロック現象を表現し、その対策を提案する研究例^{26),27)} は数多く存在する。さらに、大島ら²⁸⁾ は、グリッドロック現象の発生条件を静学的 (static) な交通容量制約に基づいて示しており、清田ら⁶⁾ は、東日本大震災後に発生したグリッドロック現象について実データを観察している。

しかし、渋滞待ち行列を Physical queue として扱ってその進展をモデルに導入した上で、グリッドロック現象の動学的な発生条件を示し、具体的なマイクロ交通制御の方向性を示す研究例は存在しない。

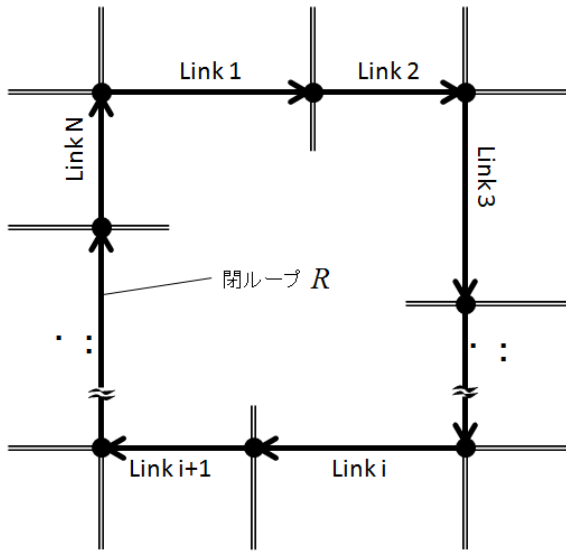


図-1 閉ループを有するネットワーク

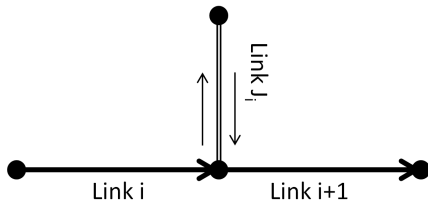


図-2 仮想リンクによる模式化

3. グリッドロック現象の記述

(1) ネットワーク

図-1 のようなネットワークを考える。ネットワーク中には、 N 本の有向リンクから成る閉ループが存在する。閉ループ中のリンクを、 $R = \{1, 2, \dots, N\}$ で表し、リンク $i \in R$ の終点はリンク $i+1 \in R$ の始点と接続するものとする。ただし、リンク $N+1$ はリンク 1 のことを指すものとし、同様にリンク $N+k$ はリンク k のことを指すものとする。

一般に、リンク i と $i+1$ の接続ノードにおいては、複数のリンクが閉ループ外に分岐するが、本研究では、図-2 に示すように、これらのリンクの集合を仮想的な一本のリンク J_i で表す。また、閉ループ R から分岐する全てのリンクの集合を $J = \{J_1, J_2, \dots, J_N\}$ で表す。なお、閉ループ R 上には需要の発生ノードおよび集中ノードは存在しないものとする。

(2) 交通流の定式化

時刻 t におけるリンク $i \in (R \cup J)$ への流入および流出交通量を、以下のように表す。

$A_i(t)$: 時刻 t までにリンク i に流入する累積交通量
 $D_i(t)$: 時刻 t までにリンク i から流出する累積交通量
 $\lambda_i(t)$: 時刻 t にリンク i に流入する交通量率
 $\mu_i(t)$: 時刻 t にリンク i から流出する交通量率

時刻 t にリンク $i \in R$ を流出した車両は、 $i+1 \in R$ か $J_i \in J$ のどちらかに流入する。それぞれの交通量を、 $\mu_i^{(i+1)}(t)$ および $\mu_i^{(J_i)}(t)$ で表す。交通量保存則より、

$$\forall t: \mu_i(t) = \mu_i^{(i+1)}(t) + \mu_i^{(J_i)}(t) \quad (1)$$

が成立する。ここで、閉ループ内流出率 $\zeta_i(t)$ を、

$$\zeta_i(t) = \frac{\mu_i^{(i+1)}(t)}{\mu_i(t)} \quad (2)$$

で定義する。このとき、 $0 \leq \zeta_i(t) \leq 1$ である。

一方、時刻 t にリンク $i+1 \in R$ に流入する車両の流入元リンクは、 $i \in R$ か $J_i \in J$ のどちらかである。それぞれの交通量を、 $\lambda_{i+1}^{(i)}(t)$ および $\lambda_{i+1}^{(J_i)}(t)$ で表す。交通量保存則より、

$$\forall t: \lambda_{i+1}(t) = \lambda_{i+1}^{(i)}(t) + \lambda_{i+1}^{(J_i)}(t) \quad (3)$$

$$\forall t: \mu_i^{(i+1)}(t) = \lambda_{i+1}^{(i)}(t) \quad (4)$$

が成立する。閉ループ内流入率 $\eta_i(t)$ を、

$$\eta_i(t) = \frac{\lambda_{i+1}^{(i)}(t)}{\lambda_{i+1}(t)} \quad (5)$$

で定義する。このとき、 $0 \leq \eta_i(t) \leq 1$ である。

(3) 滞留待ち行列 (Physical queue) の定式化

次に、渋滞待ち行列を、Newell^{9),10),11)} に基づいて定式化する。今、リンク $i \in (R \cup J)$ の交通特性を、以下のように表す。ただしここでは、リンク内の交通流率と密度の関係が、自由流側の wave speed w_i と、渋滞流側の wave speed w'_i のみによって表されると仮定している。

l_i : リンク長

k_i^{max} : 飽和密度

f_i^{max} : リンク内の最大交通流率

$n_i^{max} = k_i^{max} l_i$: 飽和時のリンク内最大車両数

$\tau_i = \frac{l_i}{w_i}$: リンクの自由旅行時間

$\tau'_i = \frac{l_i}{w'_i}$: 渋滞時の時間遅れ

このとき、リンク i からの流出可能交通流率 $X_i(t)$ およびリンク i への流入可能交通流率 $Y_i(t)$ は、以下のように表すことができる²⁹⁾。

$$X_i(t) = \begin{cases} f_i^{max} & \text{if } A_i(t - \tau_i) > D_i(t) \\ & \text{or } \lambda_i(t - \tau_i) > f_i^{max} \\ \lambda_i(t - \tau_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$Y_i(t) = \begin{cases} \mu_i(t - \tau'_i) & \text{if } A_i(t) > D_i(t - \tau'_i) + n_i^{max} \\ f_i^{max} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式 6 の場合分けは、リンク i の終点に流出待ち行列が存在するか否かを表しており、式 7 の場合分けは、リンク i の始点に滞留車両が存在するか否かを表している。

(4) グリッドロック現象

リンク i からの流出交通流率が $\mu_i(t)$ のとき、下流のリンク $i+1$ への流出交通流率は、 $\mu_i^{(i+1)}(t) = \zeta_i(t)\mu_i(t)$ 、リンク J_i への流出交通流率は、 $\mu_i^{(J_i)}(t) = (1 - \zeta_i(t))\mu_i(t)$ となる。このとき $\mu_i(t)$ は、

$$\mu_i(t) = \min \left\{ X_i(t), \frac{\eta_i(t) \cdot Y_{i+1}(t)}{\zeta_i(t)}, \frac{Y_{J_i}(t)}{1 - \zeta_i(t)} \right\} \quad (8)$$

で求めることができる。

今、時刻 t において、 $A_{i+1}(t) > D_{i+1}(t - \tau'_{i+1}) + n_{i+1}^{max}$ である場合について考える。このときリンク $i+1$ は混雑してその始点に滞留車両が存在しており、リンク i からの流出に際して先詰まりが発生している。このとき、式 7 より、 $Y_{i+1}(t) = \mu_{i+1}(t - \tau'_{i+1})$ であるから、式 8 より、

$$\mu_i(t) \leq \frac{\eta_i(t)}{\zeta_i(t)} \cdot \mu_{i+1}(t - \tau'_{i+1}) \quad (9)$$

となる。さらに、時刻 $t - \tau'_{i+1}$ において、リンク $i+1$ からリンク $i+2$ への流出に際して先詰まりが発生している場合、すなわち、 $A_{i+2}(t - \tau'_{i+1}) > D_{i+2}(t - \tau'_{i+1} - \tau'_{i+2}) + n_{i+2}^{max}$ である場合、同様に

$$\mu_{i+1}(t - \tau'_{i+1}) \leq \frac{\eta_{i+1}(t - \tau'_{i+1})}{\zeta_{i+1}(t - \tau'_{i+1})} \cdot \mu_{i+2}(t - \tau'_{i+1} - \tau'_{i+2}) \quad (10)$$

である。式 9, 10 より

$$\mu_i(t) \leq \frac{\eta_i(t)}{\zeta_i(t)} \cdot \frac{\eta_{i+1}(t - \tau'_{i+1})}{\zeta_{i+1}(t - \tau'_{i+1})} \cdot \mu_{i+2}(t - \tau'_{i+1} - \tau'_{i+2}) \quad (11)$$

となる。同様に、閉ループ R 上の全てのリンク $j \in R$ において、時刻 $\tau'_{ij} = \sum_{k=i}^j \tau'_k - \tau'_i$ においてリンク j からリンク $j+1$ への流出に先詰まりが生じていた場合、 $\tau'_R = \sum_{k \in R} \tau'_k$ として、

$$\mu_i(t) \leq \prod_{k \in R} \frac{\eta_k(t - \tau'_{ik})}{\zeta_k(t - \tau'_{ik})} \cdot \mu_i(t - \tau'_R) \quad (12)$$

が成立する。ここで、

$$Z_R(t) = \prod_{k \in R} \frac{\eta_k(t - \tau'_{ik})}{\zeta_k(t - \tau'_{ik})} \quad (13)$$

とすると、

$$\mu_i(t) \leq Z_R(t)\mu_i(t - \tau'_R) \quad (14)$$

であるから、もし、 $\forall t : Z_R(t) < 1$ であれば、 $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_i(t) = 0$ となり、閉ループ上の全ての車両がリンクから流出することができない、(狭義の)グリッドロック現象が発生する。

一般的には、閉ループ上の全てのリンクで先詰まりが発生した時点で、(広義の)グリッドロック現象と見ることができ。発生したグリッドロックの挙動は $Z_R(t)$

によって決定される。 $Z_R(t) < 1$ であればグリッドロックは進展するが、 $Z_R(t) > 1$ であればグリッドロックは解消に向かう可能性がある。

(5) 交通流分布が一様で分岐率が時間変動しない場合

特殊なケースとして、閉ループ R 上の交通流率 $\mu_i(t)$ の分布が一様で、ループ内流出率 $\zeta_i(t)$ および流入率 $\eta_i(t)$ が時間変動しない場合を考える。すなわち、

$$\forall t, i : \mu_i(t) = \mu_R(t) \quad (15)$$

$$\forall t, i : \zeta_i(t) = \zeta_i \quad (16)$$

$$\forall t, i : \eta_i(t) = \eta_i \quad (17)$$

である。このとき、閉ループ R 上の車両数 n の時間変化 $\frac{dn}{dt}$ は、以下のように求められる。

$$\frac{dn}{dt} = \sum_{k \in R} (\zeta_k - \eta_k) \cdot \mu_R(t) \quad (18)$$

このとき、 $Z_R < 1$ であるとすれば、

$$Z_R = \prod_{k \in R} \frac{\eta_k}{\zeta_k} < 1 \quad (19)$$

であり、両辺の対数を取ると、

$$\sum_{k \in R} (\eta_k - \zeta_k) < 0 \quad (20)$$

であるから、このとき、式 18 より、

$$\frac{dn}{dt} > 0 \quad (21)$$

となる。すなわち、 $Z_R < 1$ であれば閉ループ R 上の車両数が増加する。このため、前節 (4) で示した結果は、交通流分布が一様で分岐率が時間変動しない場合においては、制御対象エリアが混雑状態のときにエリア内の車両数が増加すれば混雑状態がさらに進展することを示した Daganzo¹⁸⁾ の結果と一致する。

4. まとめと今後の課題

都心部において需要が急増した場合、グリッドロック現象が発生する可能性がある。その状況に対する動的な制御方法を導出するための基礎的な研究として、本研究では、Physical queue を考慮した動的な交通流モデルを用いてグリッドロック現象を定式化した。さらに、グリッドロックを形成する閉ループ内の各リンク間の流入率および流出率を用いて算出されるパラメータ $Z_R(t)$ が、グリッドロック現象の進展のための条件の一つであることを示した。交通流分布が一様で分岐率が時間変動しない場合、この結果は Daganzo¹⁸⁾ に示された結果と一致する。今後、実際にグリッドロック現象が多く発生した時のデータを用いて、実際のグリッドロック現象の進展と解消の挙動が、提案したパラメータ $Z_R(t)$ によって説明できるかどうかを検証を行う必要がある。

パラメータ $Z_R(t)$ は、閉ループ内の全リンクに先詰まりが発生している状態、すなわち広義のグリッドロック現象が既に発生している状態において、その混雑の進展と解消の様子を表すものである。実際には、それ以前の混雑したリンクと混雑していないリンクが混在する状況において、グリッドロック現象の発生を防ぐための制御パラメータを導出することがより重要であると考えられる。そのためには、式 8 で表される交通流に関して、周辺リンクの混雑状況に応じた場合分けを行って、より詳細に交通現象の分析を行うことが必要である。

$Z_R(t)$ を含む複数のパラメータで混雑状況を表現し、それらのパラメータを制御するための手法を検討することで、グリッドロック現象が発生するような交通需要の急増が発生した際に有効な動的交通制御手法を導き出すことが、今後の課題である。

参考文献

- 1) 桑原雅夫: 渋滞現象と需要解析, 土木計画学研究・論文集, Vol.21, pp.1-9, 2004.
- 2) Hartgen, D. T., Fields, M. G., and Moore, A. T.: Gridlock and growth: the effect of traffic congestion on regional economic performance, Technical report, Reason Foundation, 2009.
- 3) Daganzo, C. F.: The nature of freeway gridlock and how to prevent it, *International symposium on transportation and traffic theory*, pp. 629-646, 1996.
- 4) Daganzo, C. F.: Queue spillovers in transportation networks with a route choice, *Transportation Science*, Vol.32, No.1, pp.3-11, 1998.
- 5) Mazlounian, A., Geroliminis, N., and Helbing, D.: The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol.368, No.1928, pp.4627-4647, 2010.
- 6) 清田裕太郎, 岩倉成志, and 野中康弘: 東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.46, 2012.
- 7) Lighthill, M. and Whitham, G.: On kinematic waves. i. flood movement in long rivers, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 229, pp. 281-316, The Royal Society, 1955.
- 8) Richards, P. I.: Shock waves on the highway, *Operations research*, Vol.4, No.1, pp.42-51, 1956.
- 9) Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part i: General theory, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27, No.4, pp.281-287, 1993.
- 10) Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part ii: Queueing at freeway bottlenecks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27, No.4, pp.289-303, 1993.
- 11) Newell, G. F.: A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part iii: Multi-destination flows, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.27, No.4, pp.305-313, 1993.
- 12) Abu-Lebdeh, G. and Benekohal, R.: Development of traffic control and queue management procedures for oversaturated arterials, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1603, pp.119-127, 1997.
- 13) 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.
- 14) Friesz, T. L., Luque, J., Tobin, R. L., and Wie, B.-W.: Dynamic network traffic assignment considered as a continuous time optimal control problem, *Operations Research*, Vol.37, No.6, pp.893-901, 1989.
- 15) Lovell, D. J. and Daganzo, C. F.: Access control on networks with unique origin-destination paths, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.34, No.3, pp.185-202, 2000.
- 16) 桑原雅夫, 吉井稔雄, and 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, No.667, pp.59-71, 2001.
- 17) Herman, R. and Prigogine, I.: A two-fluid approach to town traffic, *Science*, Vol.204, No.4389, pp.148-151, 1979.
- 18) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.1, pp.49-62, 2007.
- 19) Geroliminis, N. and Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.42, No.9, pp.759-770, 2008.
- 20) Daganzo, C. F., Gayah, V. V., and Gonzales, E. J.: Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No.1, pp.278-288, 2011.
- 21) 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.
- 22) Gayah, V. V. and Daganzo, C. F.: Clockwise hysteresis loops in the macroscopic fundamental diagram: an effect of network instability, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No.4, pp.643-655, 2011.
- 23) Geroliminis, N. and Sun, J.: Hysteresis phenomena of a macroscopic fundamental diagram in freeway networks, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.45, No.9, pp.966-979, 2011.
- 24) Saberi, M. and Mahmassani, H. S.: Empirical characterization and interpretation of hysteresis and capacity drop phenomena in freeway networks, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *Transportation Research Board of the National Academies*, Washington, DC, 2013.
- 25) Mendes, G., Da Silva, L., and Herrmann, H.: Traffic gridlock on complex networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.391, No.1, pp.362-370, 2012.
- 26) Long, J., Gao, Z., Orenstein, P., and Ren, H.: Control strategies for dispersing incident-based traffic jams in two-way grid networks, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol.13, No.2, pp.469-481, 2012.
- 27) Axhausen, Kay, W., Horni, A., and Herrmann, H.:

Final report: The risk for a gridlock and the macroscopic fundamental diagram, *Transport and planning*, 2015.

- 28) 大島大輔 and 大口敬: シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生条件, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.70, No.5, pp.L629-L635, 2014.
- 29) 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. 4. 21 受付)

Dynamic traffic flow control on rapidly increasing traffic demands in urban area

Keiichiro HAYAKAWA and Eiji HATO