

Macroscopic Fundamental Diagram による 東日本大震災時のグリッドロック現象分析

清田 裕太郎¹・郡山 義章²・岩倉 成志³・野中 康弘⁴

¹正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2丁目13-14 マルヤス機械ビル)
E-mail:kiyota@doro.co.jp

²学生会員 芝浦工業大学 (〒135-8584 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:h10056@shibaura-it.ac.jp

³正会員 芝浦工業大学 (〒135-8584 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

⁴正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2丁目13-14 マルヤス機械ビル)
E-mail:nonaka@doro.co.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震時、都区部の道路では大混雑が発生した。その際にグリッドロック現象の発生が国内で初めて観測された。しかし、観測されたプローブカーの速度情報データから、震災時の都区部の急激な速度低下は捉えられたものの、未だグリッドロック現象発生の定量的証明には至っていない。本研究では、震災当時の都区部約1500地点の断面交通量データと3種類のプローブデータおよび渋滞統計データより得られる速度情報から道路空間の面的交通状態を表現するMacroscopic Fundamental Diagramを用いることで、東日本大震災発生時の交通状態を表現し、グリッドロック現象の発生を定量的に示す。

Key Words : Great East Japan Earthquake, Urban gridlock, MFD, Probe data

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災時の都区部の道路では、我が国においてこれまで観測されなかったグリッドロック現象を伴った長時間かつ大規模な渋滞現象を観測した。著者ら¹⁾²⁾は、震災当時複数の箇所が発生したと考えられるグリッドロック現象の発生要因解明および発生箇所特定のため、これまでに複数のプローブデータを使用し当時の交通状況の分析を進めてきた。しかしながら、プローブデータから得られる情報は速度情報と位置情報に限られ、震災直後から都区部で発生した急激な速度低下やその時空間的拡大は捉えられるものの交通量を加味した定量的分析には至っていなかった。

これまでの研究成果では、より高密度かつ確度の高いデータを用いて解析を行うため、複数のプローブデータおよび渋滞統計データをデジタル道路地図(以下 DRM)のリンクベースに統合する手法を開発し、都区部(環状八号線内側)の平均リンクカバー率約75%となる高密度な速度統合データの構築に成功している。

本研究では、DRMリンクベースに統合した複数の速度センサデータと警視庁の協力により入手した都区部約1500地点の断面交通量データをDRMリンクベースに統合することにより、交通量と交通密度を得ることができ、従前からDRMリンクベースの速度データを基盤に置いた、ネットワーク解析を進めてきたが、震災時の交通量データの入手に伴いDaganzo³⁾が提案した、Macroscopic Fundamental Diagram(以下 MFD)を用いることで、面的なエリア特性や震災時のグリッドロックを伴った渋滞拡大を巨視的に捉えられる可能性が高い。

Mahmassani⁴⁾らの研究成果では、シミュレーションによる仮想データから、MFD指標を用いてグリッドロック理論を定義している。本研究では、DaganzoやMahmassaniらのシミュレーション解析結果に基づくグリッドロックの定義が、東日本大震災時に観測された実データにおいて同様の傾向が確認されるかの検証を行う。

2. 既往研究の概観

Daganzo³⁾は、グリッドロック現象の定義として、都市内交通において流出制限がない状態で、ネットワーク内の交通量が過剰に増えた時、最適な累積交通量に達する前にネットワークの機能を失う渋滞としている。

Mahmassani⁴⁾はネットワーク内の最大車両台数に達せずにネットワーク内のヒステリシスによって、zero-flow（またはminimal-flow）となる渋滞現象。また、MFDは任意のゾーン内のリンク交通量と交通密度の集計値を指標としたものでDaganzoが提案しており、グリッドロック現象の発生及び拡散をとらえられる可能性を指摘している。

Mahmassaniらが定義したグリッドロックの概念図を図-1に示す。グリッドロックの規模は、MFDの交通量が0または極めて小さい場合の交通密度の大きさを指す。この図は教科書的なQK曲線と異なり、ヒステリシスループを描いているが、高速道路や不均一な交通密度をもつネットワークでは、このようなループを描くことがGeroliminis⁵⁾らやMahmassani⁴⁾らなどから報告されている。

MFD指標を取り上げた研究は、シミュレーションを使用した仮想ネットワーク上での研究が多く報告されているが、現実のネットワークにおいて実証する研究は多くない。

我が国におけるMFD指標を用いた研究は近年盛んに行われているものの、グリッドロック現象について言及したものはない。一般道の渋滞を対象とした研究として、王ら⁷⁾は、那覇市のネットワークを対象に市内133箇所の車両感知器で観測されたデータを用いて、1年間のMFDの渋滞領域が現れるメカニズムを分析している。また、仙台市および京都市を対象に、市街に設置されている車両感知器1年分のデータを用い、ヒステリシスループが描かれる頻度や交通状況を実データを用いて、分析を行っている。さらに、描かれるヒステリシスループと日々の渋滞発生パターンと関連付けを行っており、

結果として、平日のタピークと雨の休日ではMFDにおける平均交通量が増加と平均交通密度を高くなり頂点から折り返してループを描く領域を捉え、渋滞領域としこれらが、明示的に発生することを確認している。

上記2偏の共同著者である和田ら⁸⁾は、これらの結果を踏まえ、MFDと空間的な渋滞パターンの関係を理論的に関連付ける研究を行っている。

以上の様に、グリッドロック現象に着目した、MFDの研究は、国外で多く行われており、これらは、シミュレーションによる仮想ネットワークによる理論研究に留まっているものが多い。また、近年わが国では、車両感知器データと実ネットワークにおいて、MFDを用いて

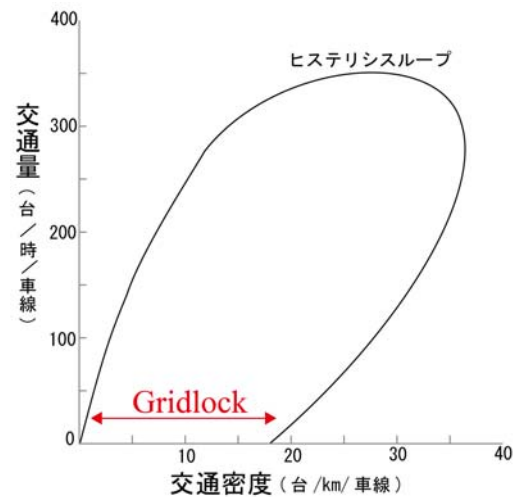


図-1 MFDによるグリッドロック現象の概念図

渋滞発生パターンや渋滞発生時のヒステリシスループの特性を解明する実証研究が行われており、本研究においても参考とする点が多い。

本研究では、これらの先行研究を参考に、MFD指標を用いた巨視的解析を東日本大震災時の実データより分析することでDaganzoやMahmassaniらのシミュレーション解析結果に基づくグリッドロックと同様のヒステリシスループが描かれるか確認する。

3. MFDによるグリッドロック現象の分析

(1) 分析データ

以降で後述するが、MFDの分析には、MFDを算出するエリアの1車線あたりの平均交通量と平均交通密度が必要となる。本研究では、震災時の環状八号線の内側の幹線道路137路線1552地点の1時間ごとの交通量データを使用する。

交通密度の算出には著者ら⁹⁾が、これまでの研究成果で構築した、タクシードロブデータ、民間プローブデータ、NAVITIME点列データの3種プローブデータおよびJARTICの渋滞統計データの計4種類のデータをDRMリンクベースの統合した速度データベースを使用する。ただし、渋滞統計データは、10km/h以下（渋滞）、20km/h以下（混雑）の2区分の速度区分でしかないので、3種のプローブデータの調和平均によって求めた、1時間ごとの速度データを使用する。期間は2011年3月11日の0時台～23時台の24時間である。

(2) 交通量データのDRMマッチング

本研究で使用する交通量データは、車両感知器の正確な位置情報がなく、リンク端の交差点名のみを収録したデータであるため、交差点間のどの位置に車両感知器

の設置されているか不明である。

そこで、車両感知器を把握するため、Google Street View を用いて都内約 1500 箇所の車両感知器の位置特定を行った。ここで各データの正確性を検討する為、車線数、車両感知器数、オーバーパス・アンダーパスの有無、車両感知器の種類を合わせて観測地点のデータ化を行いその後、DRM リンクとマッチングを行った。

(3) MFD算出範囲の設定と算出方法

今回算出する MFD の集計範囲の大きさは地域メッシュの基準地域メッシュ (3 次メッシュ : 1km 四方) として集計を行った。この地域基準メッシュに属するリンクの速度データと交通量データの集計値から、各メッシュの平均交通量 Q 及び平均交通密度 K の算出を行った。

そして、縦軸を平均交通量、横軸を平均交通密度とした MFD を描く。各データの算出式は次式の通りである。

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^M l_i q_i}{\sum_{i=1}^M l_i r_i} \quad K = \frac{\sum_{i=1}^M l_i k_i}{\sum_{i=1}^M l_i r_i}$$

ここに、

Q : 1 車線当たり平均交通量 l_i : リンク i の長さ
 K : 1 車線当たり平均交通密度 r_i : リンク i 車線数
 k_i : リンク i 平均交通密度 M : 全リンク数

(4) グリッドロック発生時に想定されるMFD

Daganzo や Mahmassani らがシミュレーション解析結果に基づき定義したグリッドロック現象は、現実ネットワークでは、観測する可能性は極めて低い。図-2 上段に示した MFD によるヒステリシスループの最下点は、平均交通量 $Q=0$ となっている時、交通密度 K が残る状態となっている。これは、グリッドロックリンク以外のネットワークが完全に需要を流し切り収束したとき、グリッドロックによって zero-flow となった車両による密度により算出されている可能性が高い。このような場合、MFD によるヒステリシスループは、交通密度をもったまま、平均交通量 Q が 0 として表される。

一方、実際のネットワークにおけるグリッドロック現象は、図-2 下段の様に表されることが想像される。震災時の様に主要幹線の様なリンクに対して、交通需要が集中し、グリッドロックが極所的に発生する。このとき、MFD による集計エリア内の細道路や、都心方面 (震災時に大渋滞は、郊外方向が顕著であった) へ向かうリンク等では、交通量が観測されれば最下点が記録されることはない。しかしながら、グリッドロックが発生したエリアでは車両がまったく動かない状態が続くため、極めて 0 に近い交通量を観測する可能性が残されている。

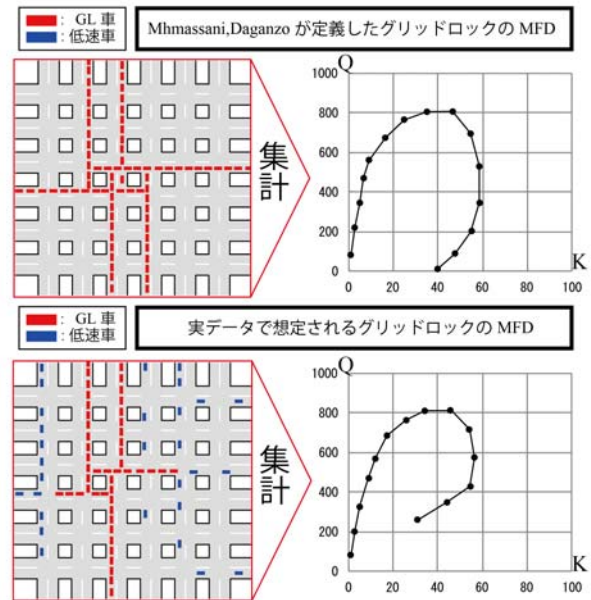


図-2 グリッドロック発生時に想定される MFD

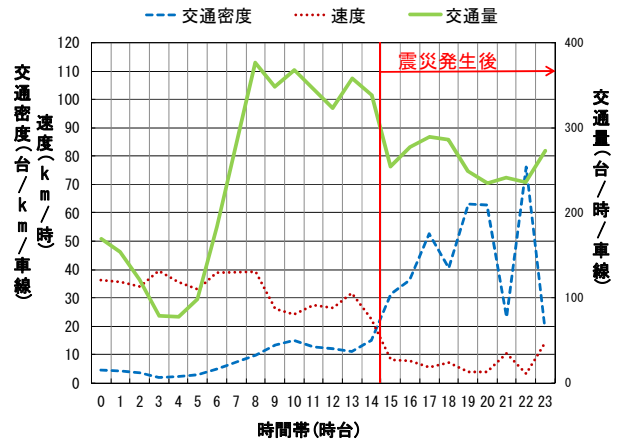


図-3 日本橋エリア (永代通り) の交通状況

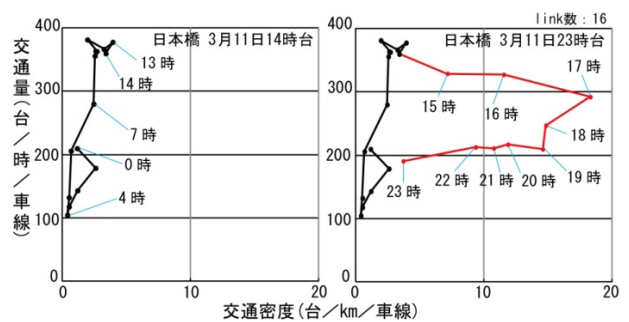


図-4 日本橋エリア MFD

現時点では基礎的な作図結果に留まっているが、震災時に増大したと言われる新規の道路交通発生量 (流入交通量) の制御量の解析や、情報提供等による迂回交通量や抑制量の解析ができる可能性は示すことができた。

本研究では、1 時間ピッチの断面交通量データを使用

しているため、交通量 0 を観測されない。そのため現時点では実証することはできないが、より時間分解能の高い 5 分間交通量データを用いることで実証する必要がある。

(5) 震災時MFDの図化

震災時のボトルネック候補箇所の一つである、日本橋周辺の永代通り（江戸橋一丁目→日本橋）の交通状態を表す交通量、車両速度、交通密度の関係を図-3 に示す。また、当該エリアのMFDを図4に示す。

震災日である、3月11日の交通量は震災の発生した、14時台まで震災1週間前の3月4日と同じ軌跡を辿っていることが確認されている。図-5から、震災前の交通密度は10台/km前後、速度は30~40km/hであり、交通流が円滑であることが分かる。

一方、15時台以降では交通量及び速度が急激に低下し、それに伴い交通密度は急上昇し、路線の交通機能が著しく低下しており、渋滞状態に陥っていることが分かる。

日本橋周辺ゾーンの11日14時台までと、同日23時台までのMFDを図-5に示す。

日本橋周辺の9メッシュ分のMFDを図-7に示す。日本橋エリアのみならず、日本橋近辺に隣接する各グラフがMahmassaniらのシミュレーション結果と類似のヒステリシスループが描かれていることが分かる。MFDのエリア集計では、グリッドロックが発生したリンクの他、渋滞影響の少ないリンクも含めて集計されるため、シミュレーションで検証した状態は、実データにおいては起こり得ない。したがって、グリッドロックが発生したリンクを含むエリアは、エリア内で交通密度の分散が激しくなることから、図-5のようなヒステリシスループを描くと考えられる。

これを踏まえ、日本橋周辺の平均交通密度 K を算出し、1時間ごとの標準偏差を図-6に示す。15時台以降の標準偏差が大きくなり、震災発生後からリンク間の交通密度の不均一性が大きくなっていくことを確認した。

4. おわりに

DRM上に展開した3種類のプローブ速度データと警視庁から得た断面交通量データを用いてMFDを作成した。震災日に観測された実データを使用しても、DaganzoやMahmassaniらのシミュレーション結果と類似したヒステリシスループ構造を描くことがわかった。

一方、彼らが定義する交通流が0または最小となる現象は把握できていない。これは、1時間データでは交通

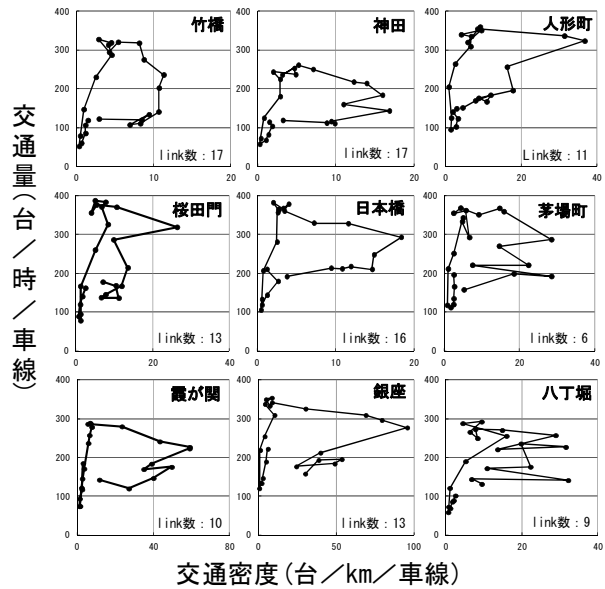


図-5 日本橋近接エリアMFD

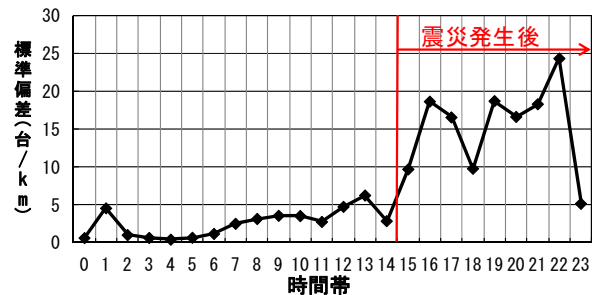


図-6 日本橋エリアの平均交通密度の標準偏差

量0を観測することはないため、分解能の高い交通量データを入手できた場合は、交通流が極めて0に近い状態が観測される可能性が残される。

本研究では、一時間ピッチのデータからエリア内にグリッドロックリンクを含んだと考えられるヒステリシスループを確認した。

今後の展望としては、MFD分析エリアを拡大し、複数のメッシュ単位で震災時系列ごとの特性の分析を進める。また、著者らが従前の研究成果で示した、DRMリンクにおけるグリッドロック箇所と照らし合わせ、都区部における脆弱箇所のを特定していきたい。

謝辞：本研究は日本デジタル道路地図協会ならびに科学研究費挑戦的萌芽課題番号25630219の研究助成を得て実施した。また、本研究を遂行するにあたって、警視庁よりデータ提供いただいた。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘：東日本大震災時のグリッドロック現象に基づく都区内道路のボトルネック箇所の考察, 土木計画学研究論文集 D3, Vol.70, No.5, 2014.

- 2) 清田裕太郎, 月舘権二, 岩倉成志, 野中康弘: プロ
ープデータと渋滞統計データの融合による東日本大
震災時の都区部の渋滞データの構築, 第 34 回交通
工学研究発表会, pp.37-45, 2014.
- 3) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation
approaches, Transportation Research Part B, Vol.41, No.1, pp.49-62,
2007.
- 4) Mahmassani, H. S., Saberi, M. and Zockaie, A.: Urban network grid-
lock: Theory, characteristics and dynamics, Transportation Research Part
C, Vol. 36, pp. 480-497, 2013.
- 5) Geroliminis, N. and Sun, J.: Properties of a well-defined macroscopic
fundamental diagram for urban traffic, Transportation Research Part B,
Vol.45, No.3, pp.605-617, 2011.
- 6) 王鵬飛, 赤松隆, 和田健太郎: Macroscopic Funda-
mental Diagram における渋滞領域発生メカニズムに関
する実証研究, 51 回土木計画学研究発表会講演集,
Vo.51, CD-ROM, 2015.
- 7) 佐津川功季, 和田健太郎: 多起点 1 終点ネットワークに
おける巨視的な交通性能解析, 交通工学研究発表会論文
集 35, 299-306, 2015.

Macroscopic Fundamental Diagram of Tokyo gridlock after the Great East Japan Earth- quake

Yutaro KIYOTA, Yoshiaki KORiyAMA, Seiji IWAKURA,
and Yasuhiro NONAKA