

Macroscopic Fundamental Diagramを用いた 東京都心部におけるオリンピックレーン導入の 広域的評価

壇辻 貴生¹・福田 大輔²

¹学生会員 東京工業大学博士後期課程 環境・社会理工学院 土木・環境工学系
(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1-M1-11)
E-mail:t.dantsuji@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系
(〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1-M1-11)
E-mail:fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

経済活動の中心である都市において、効率的なマルチモーダル交通システムを構築する施策の1つとして、バスなど公共交通の専用レーンの導入が挙げられる。専用レーンの導入は、公共交通の定時性を向上させるなど利点を有する一方で、道路ネットワークの交通容量を低下させることから一般自動車の渋滞を悪化させる要因にもなりうる。本研究では、Macroscopic fundamental diagram (MFD)に基づき、専用レーンの導入評価をエリアレベルで行った。具体的には、2020年の東京オリンピックで計画されているオリンピックレーンを対象に交通シミュレーションを実施し、MFDを推計した。その結果、オリンピックレーンの導入時には東京都心部の最大交通量が7%程度低下することや、混雑時の交通量の低下などが確認された。

Key Words : Macroscopic fundamental diagram, Multimoda system, Olympic lanes

1. はじめに

(1) 背景

経済活動の中心である都市において、効率的で持続可能な交通システムの構築が求められている。そのようなニーズを満足させるためには、マルチモーダルな交通システムの構築が必要不可欠であると考えられる。しかし、都市における交通渋滞は、限られた道路空間を様々な交通モードが利用しているため、非常に複雑な要因によって発生している。効率的な交通システムを実現するために様々な交通需要マネジメントが施されており、各地で数多く実施されている施策として、バスなど公共交通の専用レーンが挙げられる。専用レーンの導入により、公共交通の定時性の向上などサービスレベルが向上する。しかし一方で、道路車線の一部が専用レーンとして利用されるため、一般交通への交通容量が低下し、深刻な交通渋滞を招く可能性も危惧される。すなわち、過剰なバス専用レーンの導入は、道路ネットワーク全体のパフォーマンスの低下に繋がると考える可能性があり、政策決定者は、公共交通のサービスレベルだけでなく、一般交通への影響を考慮して、バスレーン整備量の最適化を志

向する必要があると考えられる。

さて、世界有数の都市である東京において、2020年にオリンピック・パラリンピックが開催されることが決定している。開催期間中は、選手、大会関係者、メディアや観客など多くの人々が国内外から東京を訪れることが予想され、渋滞の少ない交通システムのために様々な観点からの交通需要マネジメントの実施が必要となる。実際に東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会においても、輸送に関して以下の四つの目標¹⁾を設定している：

1. 各クライアントのニーズを踏まえた質の高い輸送サービスの提供；
2. 充実した公共交通網を活用した円滑な観客輸送；
3. 大会にかかわる輸送需要が一般の市民生活や都市活動に与える影響の最小化；
4. 徹底した環境負荷の低減。

Curie and Shalaby²⁾によると、過去のオリンピック・パラリンピックにおいては、交通信号のアップグレードや大会期間中の自転車や徒歩の利用を促進するプログラムなど様々な交通需要マネジメントが実施されている。そ

これらの有用なマネジメント施策の一つとして、オリンピックレーンが挙げられる。オリンピックレーンとは、既存の道路の車線の一部をオリンピックファミリーのみが利用できる専用レーンのことであり、実際に2012年ロンドンオリンピック・パラリンピックの際に導入されている。これにより、オリンピックファミリーの迅速かつ快適な輸送を確保することが可能となる。一方、先述の通り、一般交通への影響を最小化することも同時に求められているため、リアルタイムで対応できる緻密な交通マネジメントを行う必要がある。

(2) 目的

以上の背景を踏まえ、オリンピックレーンの導入の評価には、ネットワークレベルかつ動的に行う手法が必要となるが、Li et al.³などのネットワークレベルでの公共交通専用レーンのデザインに関する既存研究のほとんどは、静的な配分モデル等を用いている。一方、公共交通専用レーンの動的評価を行った研究の多くは、コリドーレベルでの検討にとどまっている。しかし、全ての道路は物理的に繋がっているため、ある道路で起こった事象の波及はそのコリドーにとどまらず、ネットワーク全体に拡がると考えられる。そこで、本研究では、公共交通専用レーン導入の効果をネットワークレベルで動的に評価することが可能なMacroscopic Fundamental Diagram (MFD) に基づいて、東京都心部におけるオリンピックレーンの導入効果を広域的に評価することを目的とする。

2. 既存研究の整理

本章では、マルチモーダル交通システムの評価、及び、MFDに関する関連研究を整理する。

(1) マルチモーダル交通システムに関する研究

マルチモーダル交通に関する研究は数多く存在する。Mesbah et al.⁴やFan et al.⁵では、何らかの価値基準のもとでの専用レーンの最適配置問題を定式化している。具体的にMesbah et al.では、ネットワークレベルでのバス専用レーンの配置場所を、ネットワークをデザインするシステムマネージャーという観点と、交通モード選択及び経路選択を行う自動車ユーザーの観点から最適化問題を考えられている。しかし、静的な枠組での分析であり、動的なネットワークパフォーマンスの評価へと拡張する上では計算量などの面において困難が伴うと思われる。

一方Truong et al.⁶、Christofa et al.⁷、Eichler et al.⁸などでは、マルチモーダル交通をよりミクロな視点から評価している。例えばTruong et al.では、カナダのモントリオールのある道路区間をケーススタディとして、バス専用レーン

の長さや場所がどのようにバスや一般交通の交通状況に影響をもたらすかマイクロ交通流シミュレーションベースで評価し、バス専用レーンが導入されたリンクの数が増えるほどバスの旅行時間は減り、一般交通の旅行時間が増えることが確認されている。しかし前節で述べたように、コリドーレベルの評価では十分ではなく、ネットワークレベルでの評価が必要となる。

(2) MFDに関する研究

MFDは、ネットワークを動的に評価することが可能な集計モデルの一つであり、アイデア自体は1969年にGodfrey⁹によって提案されたものである。そして近年、Daganzo¹⁰によりMFDのアイデアが理論的に再構築されると共に、さらにGeroliminis and Daganzo¹¹では、感知器データとプローブデータを用いて、実際のネットワークにおいてもMFDが存在することが実証的に確認された。

MFDはネットワーク内の車両の存在台数と交通量の関係を表したもので、最大交通量や最適な密度などのネットワークの性質を把握することができる。図-1に理論的に導かれるMFDの概形を示す。最大交通量に達する存在台数より少ない台数の車両がネットワークに存在する場合は、ネットワークとして混雑していない状況である。一方、最適な存在台数より多い場合は、ネットワークは混雑している状態である。その後、車両が増え続けると、車両でネットワークは満たされ、それぞれの車両が移動できない“gridlock”と呼ばれる状態になる。Geroliminis and Daganzo¹¹によると、仮に渋滞が均一に発生している場合、MFDはネットワークそれ自体の性質となり、交通需要などに依らない信号や車線数などの交通インフラに依存することが確認されている。

(3) MFDによるマルチモーダル交通システムの評価

現在、MFDに関する研究が世界的に進展しているが、マルチモーダルな交通システムのMFDに関するもの^{12,13,14}も幾つか見られる。Geroliminis et al.¹²では、単一モ

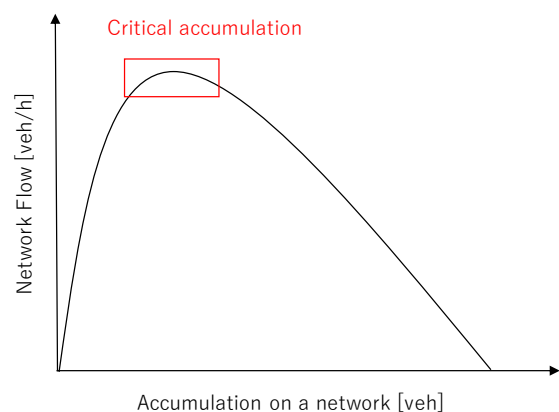


図-1 理論的に導かれたMFDの概形

ードのMFDをバイモーダルを考慮したMFDへと拡張している。バイモーダルを考慮したThree Dimensional (3D)-MFDは、ネットワークにおけるモード間の相互作用の効果を評価することや、それぞれの交通モードの最適な密度を把握することが可能である。Geroliminis et al.¹²⁾では、サンフランシスコのダウンタウンのネットワークを対象に、エリア内の総交通量を式 (1)によって求めることで3D-MFDを作成している。

$$Q = Q(n_c, n_b) = Q_c(n_c, n_b) + Q_b(n_c, n_b) \quad (1)$$

ここで、 Q を総交通量、 n_c, n_b をそれぞれ車とバスのネットワーク内の存在台数とする。図-2より、バスの存在台数の増加に伴い総交通量が単調に減少していることから、バスの存在台数が少ないほどネットワークのパフォーマンスが良くなることが示唆されている。また、車の存在台数が3,000台となる付近で、ネットワークの最大交通量になることを確認することができる。

しかし、バスの乗車人数は一般自動車に比べて多いことを考慮すると、交通量の指標として総乗客交通量を用いる方が適切にネットワークを評価できると考えられる。Geroliminis et al.¹²⁾では、式 (2)によって人ベースの3D-pMFDを作成している。図-3に示したように、車両ベースのMFDの形状と異なり、バスの存在がネットワークのパフォーマンスに正の影響を与えることを確認している。

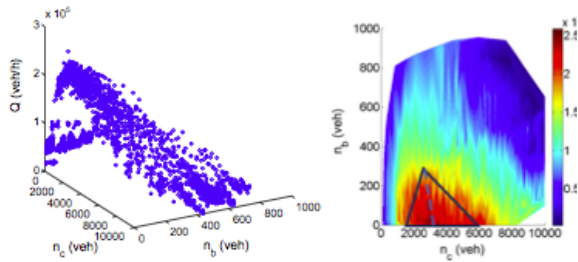


図-2 (左)3D-MFD・(右)3D-MFDの等高線図
(出典：Geroliminis et al.¹²⁾)

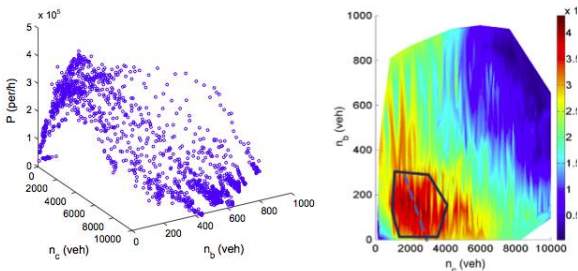


図-3 (左)3D-pMFD・(右)3D-MFDの等高線図
(出典：Geroliminis et al.¹²⁾)

$$P(n_c, n_b) = h_c Q_c(n_c, n_b) + h_b Q_b(n_c, n_b) \quad (2)$$

ここで h_c, h_b はそれぞれ車とバスの乗車人数とする。

このように、既存研究ではマルチモーダルな交通システムへのMFDの適用可能性も示されつつあるが、専用レーンの場所や長さに関する研究は見当たらない。そこで、本研究では、MFDを用いたマルチモーダル交通評価の最初の段階として、東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会で検討されている専用レーン導入の評価をエリアレベルで行う。

3. 交通需要データ・ネットワークデータの構築

本研究で、Geroliminis et al.¹²⁾同様、交通流シミュレーターAimsunを用いてシミュレーションによりMFDを構築する。本章では、シミュレーションの概要及びAimsun上でネットワークを作成する際に用いるデータについて示し、構築した交通需要データとネットワークデータについて概説する。

(1) シミュレーションの概要

シミュレーションの概要を以下に示す。対象地域は、都心三区と江東区とした。都心三区は東京においても経済的に最も重要なエリアであること、江東区はオリンピックの選手村が予定されているということから、対象地域として設定した。ピーク時・オフピーク時両方を含めて、時間帯は午前7時から正午とする。また、自動車は自由交通流時の最短経路に基づいて、経路の選択を行うものとする(表-1)。

表-1 シミュレーションの概要

対象地域	都心三区+江東区
対象時間帯	7:00 - 12:00
自動車の経路選択	自由交通流時の最短経路

(2) 自動車OD表の作成

自動車OD表作成には、平成17年に実施された道路交通センサスのデータを用いる。道路交通センサスは、国土交通省によって概ね5年毎に行われている調査で、道路の整備状況や利用状況を把握することを目的として実施されている。本研究では、平成17年に実施された道路交通センサスを用いて、東京都心部のOD表を作成する。OD表の作成する際に用いるデータを以下に示す。

- 出発地
- 到着地
- 出発時刻
- 拡大係数

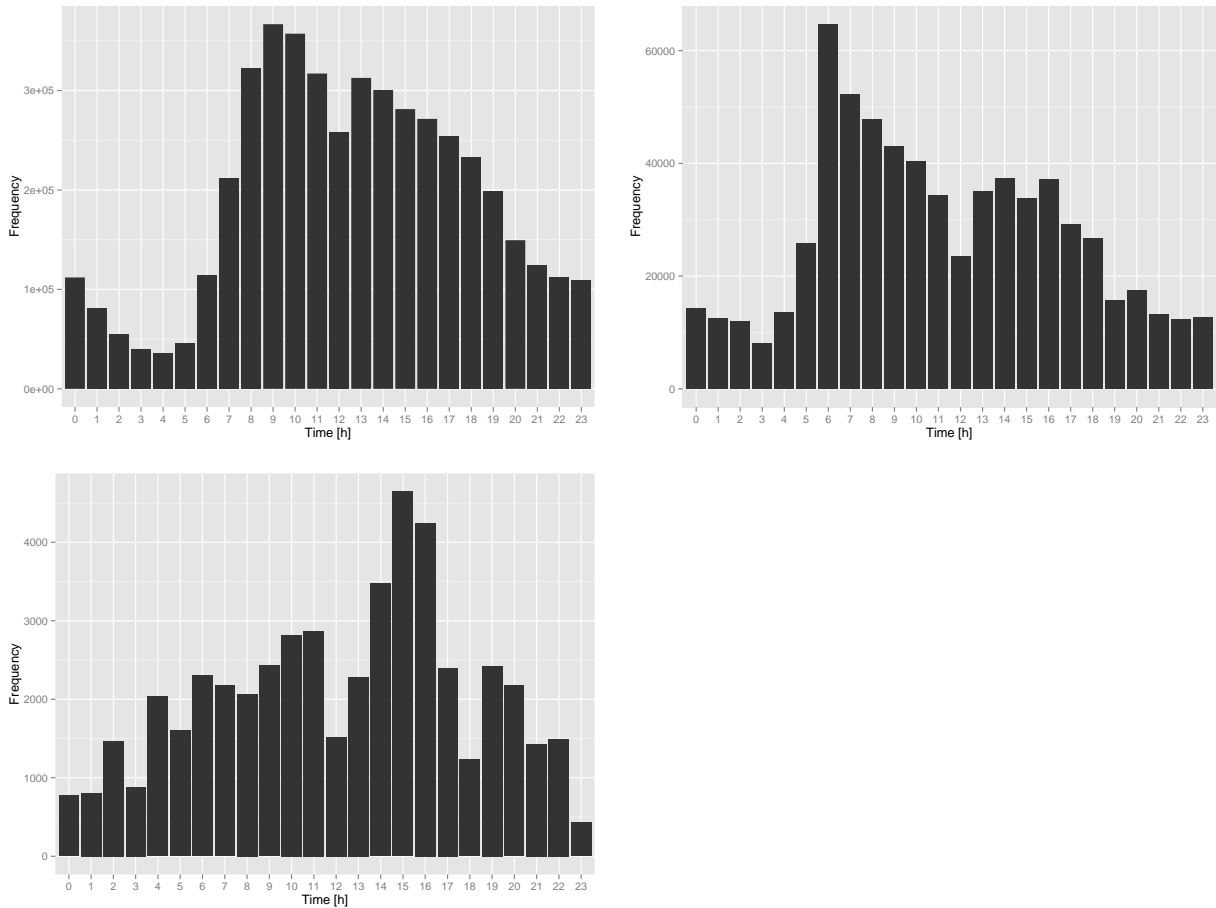


図-4 想定する出発時刻分布(左上：グループ1, 右上：グループ2, 下：グループ3)

出発地・到着地のエリアは、道路交通センサに基づいて、対象地域に関してはBゾーン単位（ゾーン数：21）で分割する。周辺地域に関しては、簡略化のため、地域毎に交通需要を統合して、外-内OD交通量等を設定した(表-2)。

表-2 発生集中エリアの分類

グループ	地域
Tokyo_1	中野, 新宿, 渋谷, 世田谷, 杉並, 豊島, 目黒, 品川, 大田
Tokyo_2	文京, 板橋, 荒川, 練馬, 足立, 北
Tokyo_3	江戸川, 葛飾, 墨田, 台東
Other_1	東京市郡部, 神奈川, 西日本
Other_2	埼玉, 北関東, 中部
Other_3	千葉, 東北

シミュレーションでは時間帯毎のOD表を必要とするが、道路交通センサからは一日の交通需要しか把握することができない。そこで、出発時刻分布より日交通量から時間帯別交通量への分配を行うことで時間帯別OD表を構築する。出発時刻分布を作成するに当たり、出発地によ

って出発時刻の選択パターンが異なると考えたため、表-3のように3つのグループに分類した。

表-3 出発地・到着地の分類

グループ	出発地	到着地
1	東京23区	東京23区
2	東京市郡部, 千葉, 埼玉, 神奈川	
3	その他の道府県	

また、出発時刻分布を作成する際には、式(3)のように拡大係数を考慮して重み付けた数値を用いる。

$$F_i = \sum_k m_k \cdot t_{i,k} \tag{3}$$

ここで、 F_i は時間*i*における頻度、 m_k はサンプル*k*の拡大係数、 $t_{k,i}$ はサンプル*k*の出発時刻に関するダミー変数である。出発時刻分布の結果を図-4に示す。グループ1の分布形は午前9時をピークに次の日の午前4時まで頻度が減少するパターンが見てとれる。そして、グループ2は分布の形状はグループ1と似ているものの、頻度がピークになるのは、少し早く、6時となっている。一

方で、グループ3の形状は2つの分布形と少し異なり、ジグザグな形状をもっている。これらの結果を踏まえ、本研究では、道路交通センサスで得られた日交通量を表-4のように時間帯別交通量として分配する。

表-4 各時間帯における交通需要の配分

時台		7	8	9	10	11
割合 [%]	グループ 1	2	5	7	8	8
	グループ 2	10	8	7	6	6
	グループ 3	4	4	5	6	6

次に、トリップの発生及び集中箇所を設定する。今回、ネットワークの対象地域を都心3区と江東区にしたため、周辺の地域からの車両の流入、流出を表-2のように分類し、集中・発生箇所を図-5に示すように設定した。ただし、Other_1からOther_3エリアの需要は、一般道と高速道路からの需要に等配分し、高速道路の需要は、エリア内にある高速道路出入口で発生・集中するものとした。

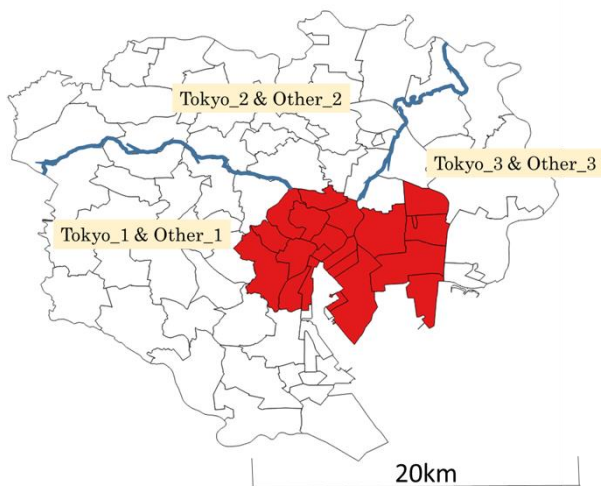


図-5 トリップの発生箇所及び集中箇所

(2) ネットワークの構築

道路ネットワークは、通常用いられるDRMではなく、Open StreetMap (OSM)からインポートして構築した。OSMは、ユーザーが自由に地図を利用、編集ができるフリーの地理情報データを作成することを目的としたプロジェクトのことであり、教育、産業や観光など様々な分野で活用されている。交通ネットワークだけでなく、建物などの地物データなども取得できる利点がある一方で、OSMの欠点の一つとして、車線数などネットワークが正確でないことが挙げられる。そこで、本研究ではGoogle Mapと比較することで、車線数の変更や信号の設置などネットワークの修正を行った。なお、高速道路はネットワークから除外した。なぜなら、

Gerolimimis and Sun¹⁵⁾で指摘されているように、高速道路と一般道のMFDの性質は異なるためである。また、今回は主要道路での自動車の動きに着目しているため、OSM上の”unclassified”や”residential”などの細街路も同様に除いた。そして、オリンピックレーンの導入箇所は、東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会の資料を参考に、図-6中の赤線のように設定した。ただし、オリンピックレーンは、各リンクの左から2番目の車線に導入した。

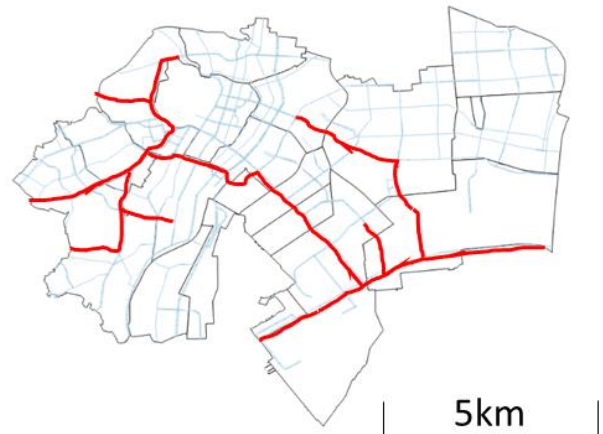


図-6 対象ネットワーク(赤線：オリンピックレーン)

4. シミュレーション結果と考察

以上の設定を踏まえ、交通流シミュレーションを行った。シミュレーションのアウトプットとして、5分毎のネットワーク全体の平均交通量、トリップを開始した車両数、トリップを終了した車両数を取得し、ネットワークの存在台数を以下のように定義する。

$$n_t = n_{t-1} + I_t - O_t \tag{4}$$

ここで、 n_t と n_{t-1} をそれぞれ時刻 t 及び $t-1$ における存在台数、 I_t を時間におけるトリップを開始した車両数、 O_t を時刻 t におけるトリップを終了した車両数と定義する。そして、5分間隔で取得した平均交通量と存在台数のペアをプロットして作成したMFDを図-7に示す。

図よりわかることとして、主に3つの点が挙げられる。まず、最大交通量について述べる。オリンピックレーンが導入されることによって、最大交通量がおおよそ7%低下することが確認できる。一方で、最大交通量に達する最適密度は概ね等しい。

次に、最大交通量に達する前後のMFDの形状に着目する。最大交通量に達する前のネットワークが混雑して

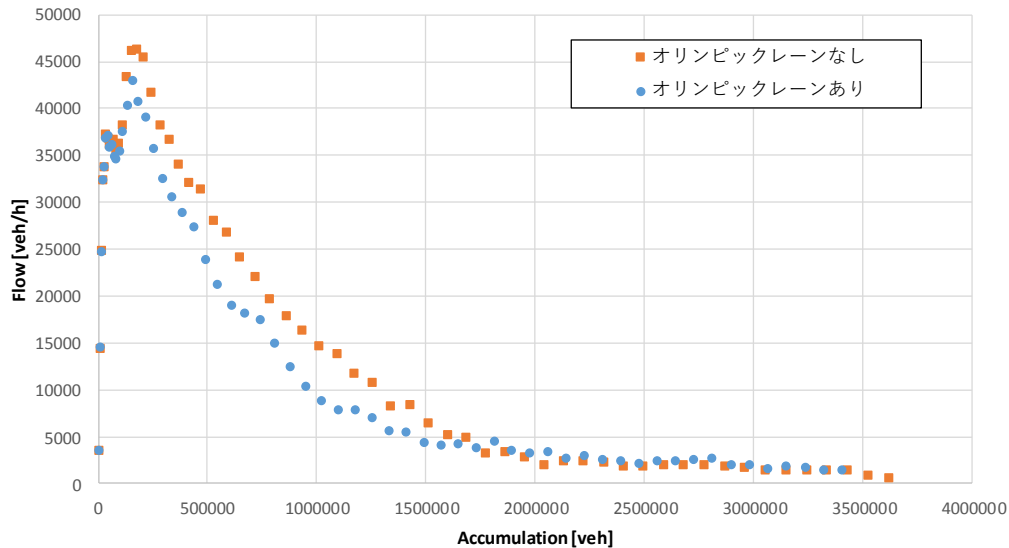


図-7 各ネットワークにおける MFD

いない状態では、オリンピックレーンの影響はほとんどないことが確認される。一方で、ネットワークが混雑している状態の場合、オリンピックレーンを導入しているネットワークでの平均交通量の低下が著しい。そのため、オリンピック開催時には、混雑した状況を回避することができるならば、周辺的一般交通への影響は少なくすることができることが示唆される。

最後にMFDの形状に着目する。理論上のMFDの形状は、2章に示したような上に凸の形状で、**gridlock**と呼ばれる車両がネットワークを満たし、どの車両も動くことのできない状態になる交通量がゼロになる点が存在する。しかし、シミュレーション結果から得られたMFDはどちらも右に長い裾野を有している。これらの原因としてネットワークの不均一性が挙げられる。2章で述べたように、**well-defined**なMFDを得るためには、ネットワークが均一であることが仮定として挙げられている。しかし、このネットワークにおいては、渋滞が不均一に発生している。例えば、千代田区のエリアでは、渋滞がみられるが、江東区では、渋滞していないエリアが大きいという現象が同時間帯で確認することができる。それにより、ネットワークの西地区では、グリッドロックの状態になっているが、東地区では、自動車が移動可能な状態なため、MFDの形状が右に長い裾野を有する結果となったと考えられる。そのため、**well-defined**なMFDを得るためには、適切にエリアを分割する必要性が示唆される。

5. 結論と今後の課題

本研究では、オリンピックレーンの導入の評価を東京

都心3区及び江東区のネットワークを用いて行った。まず、シミュレーションを構築するにあたり、OD表を道路交通センサスのOD調査より作成した。そして、OSMから東京都心3区及び江東区のネットワークのインポートを行い、**Google map**を活用して、ネットワークの修正を行った。以上のデータから構築したネットワークと、それにオリンピックレーンを導入したネットワークのMFDの比較を行った。その比較から、オリンピックレーン導入により、最大交通量は7%すること、混雑したネットワークにおいては、パフォーマンスが著しく低下することが確認された。

今後の課題としては、主に以下の4つが挙げられる。まず、**well-defined**なMFDを得るために、**Aboudolas and Geroliminis¹⁶**のように適切にエリアを分割する必要がある。二番目に、今回シミュレーションにより東京都心部のMFDを再現したが、実際の感知器データ等よりMFDの再現性を検証する必要がある。三番目に、計画されているオリンピックレーンを導入した場合の評価にとどまっているため、一般観客の輸送BRTを考慮したものなど、様々なオリンピックレーン導入のシナリオを作成し、それらを比較する必要がある。なお、先に述べたように、大会中は様々な交通需要マネジメントが施される計画があるため、それらを組み合わせたシナリオを比較するのも興味深い。最後に、現状ではシミュレーションベースの評価にとどまっているため、解析的なアプローチを並行して行うことも必要である。MFDを解析的なアプローチから研究したものとしては、**Chiabaut¹⁷**や**Daganzo and Geroliminis¹⁸**などが挙げられる。

謝辞

研究は国土交通省道路局道路政策の質の向上に資する技術研究開発「ETC2.0 プローブ情報等を活用したデータ駆動型交通需要・空間マネジメントに関する研究開発（代表：福田大輔）」からの支援を受けて行われた。分析の道路交通センサスODデータは国土交通省関東地方整備局よりご提供頂いた。また本研究を実施するにあたり、スイス連邦工科大学ローザンヌ校Nikolas Geroliminis 准教授及びNan Zheng博士から多くの有益なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会：立候補ファイル
<https://tokyo2020.jp/jp/games/plan/data/candidate-section-13-JP.pdf>
- 2) Currie, G and Shalaby, A: Synthesis of Transport Planning Approaches for the World's Largest Events", *Transport Reviews*, 32:1, pp. 113-136, 2012
- 3) Li, J., Song, M., Zhang, W. : Planning for bus rapid transit in single dedicated bus lane: *Transportation Research Record*. 2111, pp. 76-82, 2010.
- 4) Mesbah, M, Sarvi, M, Ouveysi, I and Currie, G: Optimization of transit priority in the transportation network using a decomposition methodology: *Transportation Research Part C*, 19, pp. 363-373, 2011.
- 5) Fan, W and Machemehl, R, B: Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach: *Journal of Transportation Engineering*, 132(1), pp. 40-51, 2006.
- 6) Truong, T, L, Sarvi, M and Currie, G: Exploring Multiplier Effects Generated by Bus Lane Combinations: *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2533, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2015, pp. 68-77, 2015.
- 7) Christofa, E, Aboudolas, K and Skabardonis, A: "Arterial traffic signal optimization: a person-based approach" *Transportation Research Part C*, 66, pp. 27-47, 2013.
- 8) Eichler, M and Daganzo, C: Bus lanes with intermittent priority: strategy formulae and an evaluation: *Transportation Research Part B*, 40, 2006, pp. 731-744, 2008.
- 9) Godfrey, J: The mechanism of a road network: *Traffic Engineering Control*, 11, pp. 323-327, 1969.
- 10) Daganzo, C: Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches.: *Transportation Research Part B*, 41, pp. 49-62, 2007.
- 11) Geroliminis, N and Daganzo, C: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings: *Transportation Research Part B*, 42, pp. 759-770, 2008.
- 12) Geroliminis, N, Zheng, N and Ampountolas, K: A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks: *Transportation Research Part C*, 42, pp. 168-181, 2014.
- 13) Zheng, N and Geroliminis, N: On the distribution of urban road space for multimodal congested networks: *Transportation Research Part B*, 57, pp. 326-341, 2013.
- 14) Gonzales, E, Chavis, C, Li, Y and Daganzo, C: Multimodal transport in Nairobi, Kenya: insights and recommendations with a macroscopic evidence-based model: The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA, 23-27 January 2011.
- 15) Geroliminis, N and Sun, J: Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic: *Transportation Research Part B*, 45, pp. 605-617, 2011.
- 16) Aboudola, K and Geroliminis, N: Perimeter and boundary flow control in multi-reservoir heterogeneous networks: *Transportation Research Part B*, 55, pp. 265-281.
- 17) Chiabaut, N: Evaluation of a multimodal urban arterial: The passenger macroscopic fundamental diagram: *Transportation Research Part B*, 81, pp. 410-420, 2015..
- 18) Daganzo, C and Geroliminis, N: An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic: *Transportation Research Part B*, 42, pp. 771-781, 2008.

(2016. 7. 31受付)