

Multimodal Macroscopic Fundamental Diagram に 基づくバス専用レーンの都市空間内最適配置に 関する研究—東京都心部への適用—

壇辻 貴生¹・郑 楠²・福田 大輔³

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院博士課程 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非会員 Associate Professor Beihang University
(Xue Yuan Road No. 37, Haidian District, Beijing, 100191, China) E-mail:nan_zheng@buaa.edu.cn

³正会員 准教授 東京工業大学 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

Key Words: *Dedicated bus lane, Optimization, Road space allocateon, Multimodal system*

1. 背景

都市部における深刻な渋滞は、多大な経済損失につながる。そのため、経済の根幹を成す都市部においては、効率的でマルチモーダルな交通システムが必要である。バス専用レーンは、そういった交通システムを構築するために世界中で最も用いられている交通需要マネジメントの一つである。これまでに、バス専用レーンの計画や運用に関する研究は多くされてきたが、未だにチャレンジングなトピックである。それは、都市部の渋滞のメカニズムは複雑で、様々な要因が重なって発生していることに起因している。

バス専用レーンの最適配置に関する研究の嚆矢として、Radman and Beneveli (1983) や Black et al. (1992) が挙げられる。しかしこれらの研究は、静的な交通状況を仮定しており、動的な変動や深刻な渋滞状況などは考慮されていない。Truong et al. (2015) は、バス専用レーンの位置や長さが一般交通に与える影響をマイクロシミュレーションにより分析し、コリドーレベルでは、不連続であってもバス専用レーンはバス運行には負の影響がないことを明らかにしている。当該バスコリドーだけで見るとこの主張は正しいように思われるが、ネットワークレベルで見たとき、バス専用レーンの導入は一般交通の交通容量を低下させるため、交通需要が高い状況化では *spill back* や *gridlock* の原因となりうると考えられる。また、完全にバスと一般自動車が物理的に分離されない限り、バス自体の交通もその反射影響を受けることとなる。

以上の議論から、ネットワークレベルでの分析が必要となってくる。Mesbah et al. (2008), (2010) は、システムとユーザーの2段階の最適化問題によって、バス専用レーンの配置を決定する枠組みを提案している。しかし、これらの研究もまた、静的な交通モデルを利用しているため、動的な渋滞を捕らえきれないという限界がある。交通渋滞の影響が動的に複雑に波及する状況下での分析としては十分ではない。そうした中、Zheng and Geroliminis (2013) では、Geroliminis and Daganzo (2008) によって都市部において存在が確認された *Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)* に基づき、渋滞の特性を適切に捉えたバス専用レーンの最適量を決定する最適化問題の枠組みを提案した。しかし、実際の配置場所や配置量の検討は行われていない。これに対し、Zheng et al. (2017) は、Geroliminis et al. (2014) によって提案された公共交通システムの特性を都市スケールで評価できる *Multimodal Macroscopic Fundamental Diagram (mMFD)* または *3D-MFD* を用いて、バス専用レーンの配置場所・量を定めるシミュレーションベースでの最適化手法を提案している。しかし、提案手法の適用は、スイス・ジュネーブ都市圏のみに留まっており、手法の普遍性・頑健性等の確認は十分ではない。

そこで本研究では、Zheng et al. (2017) によって提案されたバス専用レーンの都市空間内最適配置手法を東京のCBDエリアに適用し、分析結果の比較を通じて、手法の普遍性・頑健性の検証や課題の抽出を行う。

2. 手法

本章では、Zheng et al. (2017)で提案されたバス専用レーンの都市空間内最適配置手法を概説する。

(1) シミュレーションに基づいた2段階の空間最適配置手法の枠組み

バス専用レーン最適化の基本的な考え方は、シミュレーションを用いて道路ネットワーク混雑度合いと交通分担を計算し、その上で、バス専用レーンの配置場所と配置量に関する最適化を行うというものであり、「シミュレーションに基づいた2段階の空間最適配置手法の枠組み」と称することとする。その計算アルゴリズムの手順は以下の通りである。

- I. シミュレーションの実行
- II. 移動費用の算出と3D-MFDの取得
- III. 後述の式(1)によって計算された交通分担率の変化が閾値以下の場合、手順Vへ。それ以外の場合は、手順IVへ。
- IV. IIIで計算された変化分の需要をシミュレーションに適用し、手順Iへ。
- V. 3D-MFD 内に混雑領域が存在する場合は、手順VIへ。それ以外の場合は、手順VIIへ。
- VI. 空間最適化として、バス路線が敷かれているリンクの中で、最も交通密度が高いリンクからバスレーンを配置する。
- VII. 3D-MFD によって表された渋滞のない最適なバス専用レーンの計画の取得

(2) 3D-MFD による渋滞評価

マルチモーダルを考慮した上でネットワークスケールでの動的な渋滞現象を捉えるため 3D-MFD を用いる。3D-MFD は、Geroliminis et al. (2014)によって提案された一般車とバスなどの公共交通の混在したマルチモーダルな交通システムを評価できる拡張 MFD である。Geroliminis et al. (2014)では、サンフランシスコのネットワークを用い、交通ミクロシミュレーションの結果を利用して 3D-MFD を図化している。図-1(a)は、3D-MFD の等高線図で、暖色になるほどエリア内の車両ベース交通量が多いことを表している。この図より、バスの存在台数（縦軸）の増加に伴い総交通量（コンター図）が単調に減少して

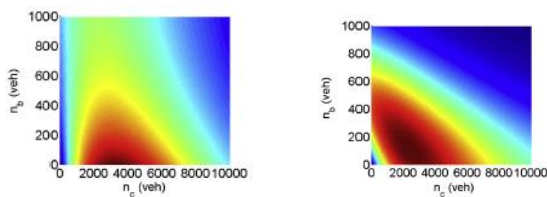


図-1 (a) 3D-MFD の等高線図 (b) 3D-pMFD の等高線図

(出典：Geroliminis et al. (2014))

いることから、バスが混在しない交通状況の方がネットワークの総交通量が高くなり望ましいことがわかる。しかし、バスの乗客人数が一般乗用車に比べて多いことを考えると車両ベースでの評価方法は適切だとは言えない。そこで、図-1(b)のように人ベースの 3D-pMFD が新たに提案されている。3D-pMFD では、バスなどの公共交通の混在は、一定程度までは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示している。

本研究では、このバイモーダルな交通システムを評価できる mMFD を用いて、ネットワークの評価を行う。

(3) 集計型交通手段選択モデルの構築

バス専用レーン最適化を行うにあたり、交通手段選択モデルは重要な役割を果たす。バス専用レーンによって、バスの定時性や輸送スピードが向上する一方、一般交通にとっては交通容量の低下により利便性が低下する。このため、バス専用レーン導入がなされると、自動車からバスへのモーダルシフトが生じる。

本研究では以下の式のような、集計型の二項選択ロジットモデルによって交通手段選択行動を記述する。

$$P_i = \frac{e^{-\mu U_i}}{\sum_{j \in J} e^{-\mu U_j}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_B = \alpha + \beta_B \cdot TT_B \\ U_C = \beta_C \cdot TT_C \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 P_i を交通手段 i の選択確率、 μ をスケールパラメータ、 U_B 、 U_C をそれぞれバスと自動車の効用関数、 TT_B 、 TT_C をそれぞれバスと自動車の平均旅行時間、 α 、 β_B 、 β_C をパラメータとする。本研究では、 α と β に関しては、Zheng et al. (2017)で用いている値を適用する。そして、 μ は、現況のシミュレーションを行い、出力であるバスと自動車のトリップ終了台数とそれぞれの平均乗車人数から選択確率を求め、スケールパラメータを算出する。

(4) バス専用レーンの再配置

バス専用レーンの再配置の社会的目標は、エリア全体の（人ベースでの）渋滞量を減少させること、すなわち、前述の 3D-pMFD のスループットを最大化させることに相当すると考える。どのリンクを専用レーンとするかという問題は、原理的には組合せ最適化問題の考え方になり、多様な再配置方法が考え、Zheng et al.



図-2 対象地域の概況図

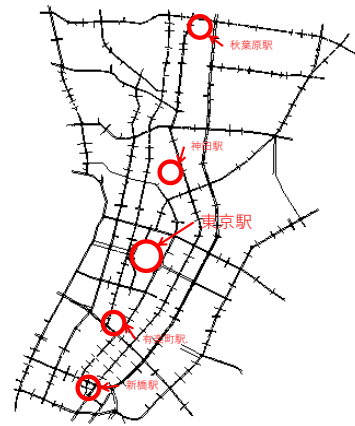


図-3 構築した道路ネットワーク

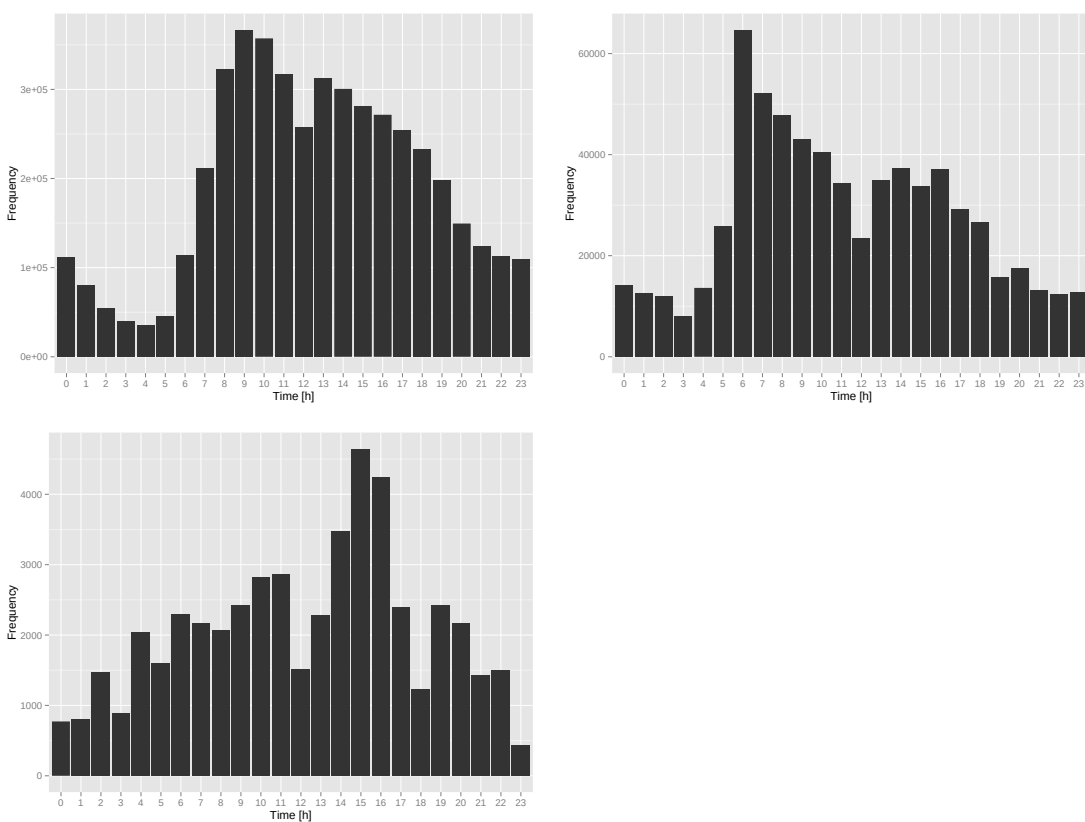


図-4 自動車交通の出発時刻分布 左上：東京 23 区，右上：東京市郡部，千葉県，埼玉県，神奈川県，左下：その他の道府県

(2017) で四つの具体的な再配置方法が提案されている。本研究ではこのうち、まずリンクベースでの配置を実施する。これは、「バス専用レーンの導入が可能なリンクの中で、単位距離当りの旅行遅れ時間のランクが高いリンクからバス専用レーンを配置する」というものである。

3. 東京 CBD の道路ネットワークの構築

(1) シミュレーションの概要

本研究では、Zheng et al. (2017)と同様、マイクロ交通シミュレータ Aimsun を用いて交通流動を再現する。対象

地域は、東京都心部でも特に深刻な渋滞が発生している東京駅周辺のエリアとする。対象地域の面積は約 9 km²で、図-2 の赤枠内の地域に相当する。また、シミュレーションの対象となる時間帯を午前七時から正午までとする。自動車の経路選択行動は、Zheng et al. (2017)と同様、3分間隔で提供される 3つの候補パスの中から Casetta et al. (1996)によって提案された C-Logit モデルによって記述されるものとする。なお、期待旅行時間のみが効用関数に含まれ、誤差項のスケールパラメータ θ 、Commonality Factor (CF) 項のパラメータ β (期待旅行時間係数)、CF

表-1 統合したエリア

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, 千代田3区
Tokyo_2	文京, 板橋, 荒川, 練馬, 足立, 北
Tokyo_3	江戸川, 葛飾, 墨田, 台東, 江東
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

項乗数部分の γ を, それぞれ 0.01, 0.15, 1, 1 とする. 総道路長は約 131km であり, 一般道路の信号現示は伊藤・岩倉(2012) のデータを基に, 道路規格に基いて信号パターンを分類した. その結果, 信号サイクル長は 102 秒から 141 秒の範囲で設定された.

(2) ネットワークの構築

対象となる道路ネットワークは, 日本デジタル協会マップの DRM データを用いて, 道路規格の分類によるその他の道路などを除いた主要な幹線道路をインポートし, 修正を加えた上で構築した. 構築したネットワークを図-3 に示す. 構築したネットワークは, 2,655 リンクと 804 ノードで構成されている.

(3) 自動車 OD 表の作成

自動車 OD 表は, 平成 17 年度道路交通センサスより作成した. まず, あらかじめ決められているセンサスゾーンより, 対象地域である千代田区 1, 2 区, 中央区 1, 2, 3 区, 港区 5 区, 台東区 1, 2 区, 文京区を抽出する. ただし, 文京区などのエリアの一部分のみが対象になっている場合は, 対象道路ネットワークがカバーしている面積に基づいて需要を配分するものとする.

但し道路交通センサスでは, 日単位 OD 交通量としてのみデータが提供されているため, 与えられているため, マスターデータに立ち戻り, 各車両に付与された拡大係数で重み付けを行った上で出発時刻分布を出発地別に求め (図-4), これを日 OD 交通量に乗じることで時間帯別 OD 表を作成した. その際簡易化のため, 地域毎に交通需要を統合して, 外-内, 外-外 OD 交通量を設定した. 統合したグループを表-1 に示す. その上で, それぞれ計算された需要を, 高速道路と一般道路利用に配分した. これは, 交通センサスの高速道路有無に関するデータから, 出発時刻分布の分類ごとにそれぞれの利用割合を算出し, 適用している. その結果, 16×16 の時間帯別 OD 表に集約された.

表-2 ネットワークの比較

	東京	ジュネーブ
面積 [km ²]	9	7
総道路長 [km]	131	105
リンク数とノード数	2655 and 804	1356 and 543
バス路線の本数	40	24

(4) バスルート・運行頻度の設定

バスに関しては, 都バスのみを考慮している. また, バスの運行頻度は, NAVITIME の時刻表から 8 時~12 時の運行本数を 4 時間で割った頻度を適用した. 運行頻度は路線によって異なり, 5 分間隔から 45 分間隔までとなっている. また, 各バス停での停車時間は, 平均 15 秒標準偏差 10 秒と仮定した.

4. 分析結果と考察

本章では, 構築したネットワークのシミュレーションを行い, 結果の考察とジュネーブ NW の結果との比較を行う. 最初に基礎的な NW の比較を行い, その後シミュレーションの結果について述べる.

(1) 東京 NW とジュネーブ NW の比較

本節では, Zheng et al. (2017) のケーススタディで扱われたジュネーブ NW と本研究の対象エリアである東京 NW の比較を行う. ネットワークの諸元を表-2 に示す. 前述の通り東京 NW の対象エリアの面積が 9 km² であり, ジュネーブ NW の対象エリアは約 7 km² となっており, ジュネーブの方が若干小さくなっている. 総道路長についても, ジュネーブ NW の方が小さいが, 面積との対比で見ると, 対象エリア内は東京 NW と同程度の道路密度となっている. また, バス路線数は, 1 路線の上りと下りをそれぞれ個別にカウントしたとき, 東京 NW が 40 線, ジュネーブ NW が 24 線となっている.

(2) 東京 NW の 3D-MFD

まず, 現状のネットワークにおいて, バスの運行頻度を変化させ, 3D-MFD を作成した. 作成した 3D-MFD を図-5(a) に, 等高線図を図-6(a) に示す. バスの混在しない交通状況が自動車交通量を最大化することが分かる. 特に, 一般車の交通密度が 20 veh / km 付近では, その傾向が顕著に出ている. しかし, 前述のとおり, バスと一

般車の一台あたりの乗車可能人数を考慮すると適切な評価とは言えない。そこで、バスと一般車の乗車人数の平均をそれぞれ、15 人と 13 人と仮定をおき、以下の式より乗客交通量ベースの 3D-pMD を作成する。

$$P(n_c, n_b) = h_c Q_c(n_c, n_b) + h_b Q_b(n_c, n_b) \quad (3)$$

ここで、 P を乗客交通量、 P_i をモード i の平均乗車人数、 Q_i 、 n_i をそれぞれモード i の交通量、存在台数とする。作成した 3D-pMFD を図-5(b) に、等高線図を図 6-(b) に示す。これらの結果より、人ベースの観点からでは、バスの一定程度の混在が、ネットワークのパフォーマンスを向上させることが確認できる。これらの結果は、Geroliminis et al. (2014) の結論と整合的である。また、図 6

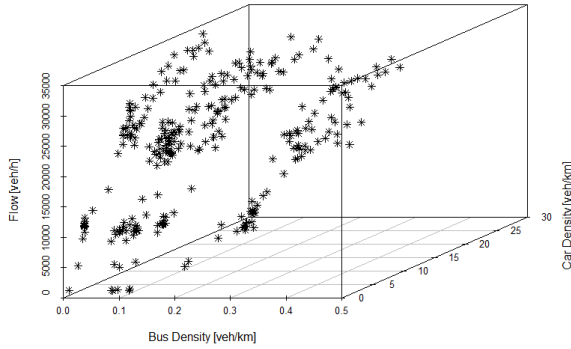
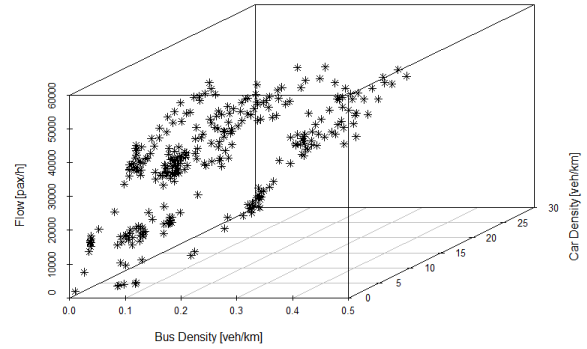


図-5 (a) ネットワークの 3D-MFD



(b) 現況ネットワークの 3D-pMFD

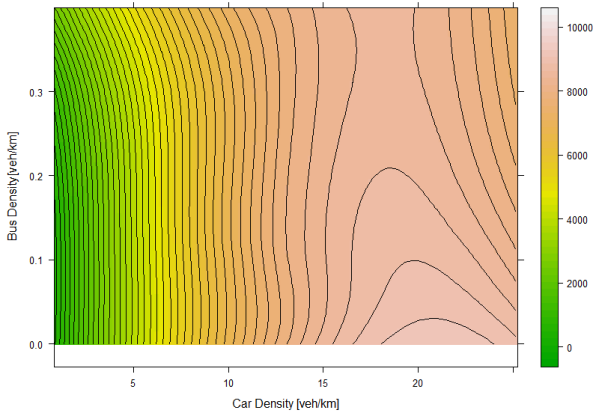
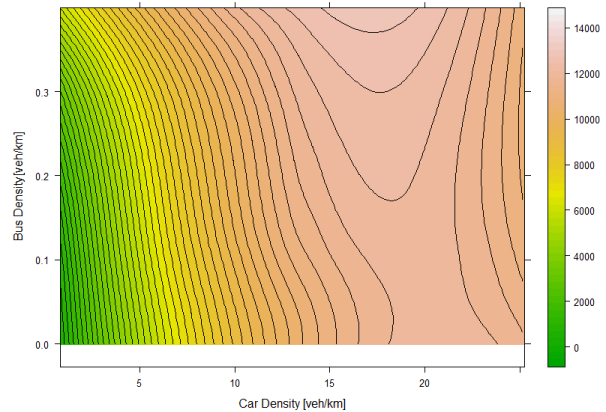


図-6 (a) 3D-MFD の等高線図



(b) 3D-pMFD の等高線図

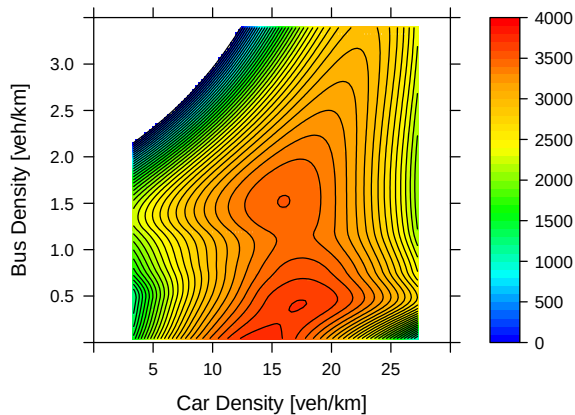
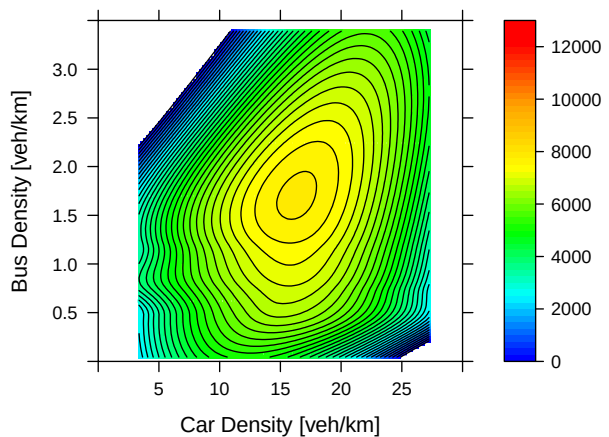


図-7 (a) ジュネーブ NW の 3D-MFD の等高線図



(b) ジュネーブ NW の 3D-pMFD の等高線図

のジュネーブ NW の 3D-MFD と比較してみると、最大交通量となる一般車の交通密度は 15 veh / km 付近であるので、東京 NW の方が少し高い交通密度で最大交通量に到達することがわかる。一方で、3D-pMFD は、東京 NW の乗客交通量が交通密度の増加に伴い、どこまで増加するか不明瞭であるので、バスの運行頻度を増加させて再度シミュレーションをする必要がある。

現時点では、3D-MFD の導出に留まっており、今後は、述のアルゴリズムを用いて、バス専用レーンの最適配置の検証を行う。その成果は講演時に紹介したい。

5. まとめと今後の課題

本研究では、Zheng et al. (2017) で提案されたバス専用レーンの最適配置の手法の普遍性・頑健性の検証を目的として、東京 CBD への適用を行った。OD 表は、平成 17 年道路交通センサスを基に時間帯別かつ地域別のものを作成した。そして、現状ネットワークに対してバス運行頻度を変化させることで、3D-MFD 及び 3D-pMFD を作成した。それらの結果は、Geroliminis et al. (2014) の結果と一貫しているものが得られた。

今後の課題として、まずバス専用レーンの最適化の手法を東京 NW にも適応すること、その上で、手法の頑健性や課題などを抽出する必要がある。

謝辞 本研究は、国土交通省・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），科学研究費補助金・基盤研究(A)「ネットワーク上の交通行動を記述するためのデータ統融合理論とその応用」（代表：羽藤英二，課題番号：25249069）からの支援を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Radman, A. & Beneveli, D. (1983). Bus priority strategy: Justification and environmental aspects. *Journal of Transportation Engineering*, 109 (1): 88-106.

- 2) Black, J., Lim, P. & Kim, G. (1992). A traffic model for the optimal allocation of arterial road space: A case study of Seoul's first experimental bus lane. *Transportation Planning and Technology*, 16 (3): 195-207.
- 3) Truong, L. T., Sarvi, M., & Currie, G. (2015). Exploring multiplier effects generated by bus lane combinations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2533: 68-77.
- 4) Mesbah, M., Sarvi, M., & Currie, G. (2008). New methodology for optimizing transit priority at the network level. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2089: 93-100.
- 5) Mesbah, M., Sarvi, M., & Currie, G. (2011). Optimization of transit priority in the transportation network using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3): 908-919.
- 6) Zheng, N., & Geroliminis, N. (2013). On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 80: 119-138.
- 7) Geroliminis, N., & Daganzo, C. F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(9): 759-770.
- 8) Zheng, N., Dantsuji, T., Wang, P. & Geroliminis, N. (2017). A macroscopic approach for optimizing road space allocation of bus lanes in multimodal urban networks through simulation analysis. *Transportation Research Record*, 2651 (forthcoming).
- 9) Geroliminis, N., Zheng, N., & Ampountolas, K. (2014). A three-dimensional macroscopic fundamental diagram for mixed bi-modal urban networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 42: 168-181.
- 10) Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. & Vitetta, A., (1996). A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: specification and some calibration results for interurban networks. In: Lesort, J.B. (Ed.), *Proceedings of the Thirteenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Pergamon, Lyon, France, 697-711.
- 11) 伊藤勝真, 岩倉成志 (2012). 交通マイクロシミュレータを用いた帝都復興計画案における道路網の復元と評価. 芝浦工業大学修士論文.

(2017.4.28 受付)