

CBD街路網を対象としたMFDの形状分析

吉井 稔雄¹・坪田 隆宏²・Stephanie GITURU³・白柳 洋俊⁴

¹正会員 愛媛大学大学院 教授 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番地)
E-mail:yoshii@cee.ehime-u.ac.jp

²正会員 愛媛大学大学院 助教 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番地)
E-mail:t.tsubota@cee.ehime-u.ac.jp

³学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番地)
E-mail: stephanie.gituru.18@cee.ehime-u.ac.jp

⁴正会員 愛媛大学大学院 講師 理工学研究科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町3番地)
E-mail:shirayanagi@cee.ehime-u.ac.jp

本稿では、プローブ観測結果に基づいて算定される集計交通流率と集計交通密度を、1ヶ月平均の時間集計交通流率ならびに時間集計交通密度で正規化し、それぞれエリア交通流率、エリア交通密度と定義し、これらの2変数によってネットワーク交通流状態（以下、“集計QK”）を記述する方法を考案する。続いて、47都道府県の県庁所在地の実CBD街路網を対象として、集計QKを観測し、各道路ネットワークのMacroscopic Fundamental Diagramを推定してその形状を分析する。

既往研究では、集計交通密度が一定の値を超えた場合に、集計交通密度の増加に伴って集計交通流率が減少すること（以下“渋滞側領域”）が示されているが、47の実道路ネットワークにおいてMFDを推定した結果、多くのネットワークにおいて、推定されたMFDが渋滞側領域を含まない形状を示し、一部のネットワークにおいてのみ推定されたMFDが渋滞側領域を含む形状を示した。

Key Words : MFD, shape, CBD, road network

1. はじめに

東日本大震災直後には、被災地¹⁾や首都圏²⁾の道路ネットワークにおいてグリッドロック現象が観測された。グリッドロック現象は、ネットワークの一部が機能不全に陥ることを示すが、機能不全がネットワーク全体に拡がり、やがて広域道路ネットワーク全体で激しい渋滞を引き起こすこととなる。また、機能不全に至らないまでも、ネットワーク内の複数地点のボトルネックで発生した渋滞が相互に影響を及ぼし合うことでも激しい渋滞が発生しうる。これまで、多数の研究³⁾によって単一ボトルネックにおける渋滞現象の解明がなされているのに対し、グリッドロックや複数ボトルネックの相互作用による複雑な渋滞現象に関する研究はその報告が限られている。また、同研究では個々のボトルネックの代わりに道路ネットワーク全体を対象とした交通現象の解析が必要となる。

近年では、道路ネットワーク全体の交通流状態を集計量で表現し、集計された交通流率と集計された交通密度

の関係を評価するMacroscopic Fundamental Diagram⁴⁾(以下“MFD”)が提案され、同MFDを用いた交通制御に関する研究⁵⁾が進められている。これらは、単路部におけるFundamental Diagramと同様に、MFDの形状が上に凸であり、最大の集計交通流率を実現する集計交通密度の存在が期待されている。しかしながら、横浜市内の道路ネットワークにおいて上に凸のMFDが得られたとの報告⁷⁾がなされているものの、MFDの形状に関しては、未だ不明な点が多く残されている。

そこで、本研究では街路網におけるMFD形状に関する知見を得るために、多数の実ネットワークにおけるMFDを推定し、それらの形状に関する分析を行う。

2. 集計QKの算定方法

(1) 集計交通流率と集計交通密度

対象道路ネットワークエリア内を走行したプローブ車両軌跡データを用いて、1時間単位でのプローブ車両による総走行台キロと総走行台時を算定し、それぞれ式

(1), 式(2)にて, 集計交通流率と集計交通密度として定義する. また, 両集計量を用いた2次元空間に位置づけられるネットワーク交通流状態を集計QK状態と定義する.

$$q_t = \sum_{i \in A_t} d_{it} \quad (1)$$

$$k_t = \sum_{i \in A_t} o_{it} \quad (2)$$

ここで

- q_t : 時間帯 t における集計交通流率[台・km/1時間]
- k_t : 時間帯 t における集計交通密度[台・時/1時間]
- d_{it} : 時間帯 t におけるプローブ車両 i の走行距離[km]
- o_{it} : 時間帯 t におけるプローブ車両 i の走行時間[時間]
- A_t : 時間帯 t に対象エリア内を走行したプローブ車両の集合

(2) 集計交通流率と集計交通密度の正規化

式(1), 式(2)にて算定される集計交通流率と集計交通密度は, 道路ネットワークエリア内のプローブ車両, すなわち一部の車両による総走行台キロと総走行台時を示すものである. このため, 道路ネットワークの交通状況に変化がない場合でも, 全車両に占めるプローブ車両の割合が変化すると算定される集計QKは変化する. また, プローブ車両の混入率を計測することは容易ではない. そこで, プローブ車両台数が全車両に占める割合が変化した場合においても, 全車両による集計QKの観測を可能とするために, 以下にて両集計量の正規化を行う.

まず式(3), 式(4)にて, 平日と休日の別に1ヶ月平均の時間集計交通流率ならびに時間集計交通密度を算定する. 同平均値を用いて各時間帯における集計交通流率と集計交通密度を正規化し, 式(5), 式(6)にて正規化された時間帯 t の集計交通流率と集計交通密度を算定し, それぞれエリア交通流率, エリア交通密度として定義する.

$$\bar{q}_m = \frac{\sum_{t \in M} q_t}{\sum_{t \in M} 1} \quad (3)$$

$$\bar{k}_m = \frac{\sum_{t \in M} k_t}{\sum_{t \in M} 1} \quad (4)$$

ここで

M : 1ヶ月間の平日または休日の時間帯の集合

$$Q_t = \frac{q_t}{\bar{q}_m} \quad (5)$$

$$K_t = \frac{k_t}{\bar{k}_m} \quad (6)$$

3. 集計QKの特徴把握

(1) 折れ線回帰モデルによるMFDの推定

集計QKの特徴を把握するために, 47都道府県の県庁所在地CBDの道路ネットワークエリアを対象に, 2014年4月から2015年3月までのETC2.0データを用いて, 式(5), 式(6)で定義したエリア交通流率とエリア交通密度の関係(以下“集計QK関係”)を調べた. 結果は付録の表1, 表2を参照されたい. なお, 各県庁所在地のCBDエリアには, 県庁を中心とする9km×9kmの範囲を選定した. 図1には, 集計QK散布図の例として, 平日の東京CBD道路ネットワークの集計QK図を示す. 各プロットは1時間単位の集計QKを示しており, 図中の折れ線は, 式(7)に示す回帰式を用いて推定したMacroscopic Fundamental Diagram(以下“MFD”)を示す.

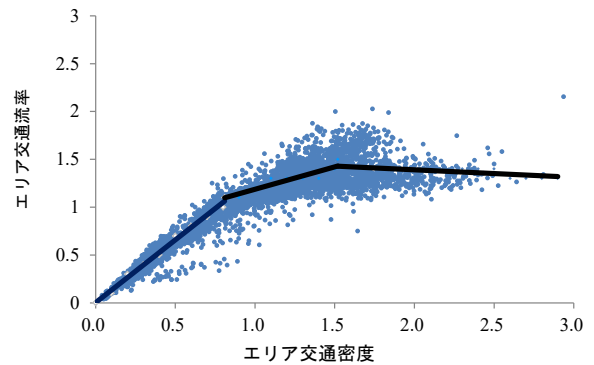


図1 東京CBD道路ネットワーク(平日)における集計QK図

$$y = \beta_1(xd_1 + P_1d_2 + P_1d_3) + \beta_2((x - P_1)d_2 + (P_2 - P_1)d_3) + \beta_3(x - P_2)d_3 \quad (7)$$

y : エリア交通流率 []

x : エリア交通密度 []

P_{123} : ブレークポイント

d_1 : ダミー変数(1 if $x \leq P_1$)

d_2 : ダミー変数(1 if $P_1 < x \leq P_2$)

d_3 : ダミー変数(1 if $x > P_2$)

β_{23} : 係数

図2に示すように, ブレークポイントと係数は, それぞれ微分不可能な点と各折れ線の傾きを示す係数である. エリア交通密度の小さい領域は, ネットワーク全体が自由流であることを示していることから, 「自由領域」,

エリア交通密度がブレイクポイント P_1 を超えた領域は、ネットワークの一部で渋滞が発生している状態を示していることから「混雑領域」、さらにエリア交通密度が大きくなりブレイクポイント P_2 を超えると、ネットワークによってはエリア交通密度の増加に伴ってエリア交通流率が減少に転じる領域が出現する。この領域では、ネットワークのいずれかでブレイクダウン現象が発生しているものと考えられることから「渋滞領域」と命名する。なお、傾きは変わっても β_3 が正値を示している場合には、同領域は「混雑領域」とする。

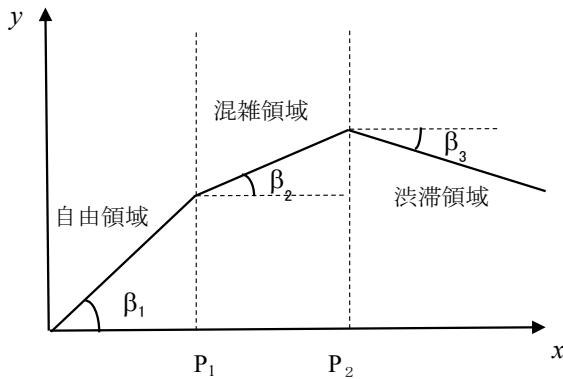


図2 MFDと集計QKの3領域

MFDを推定した結果、渋滞領域が出現、すなわち係数 β_3 値が負値を示したのは、以下の都道府県であった。

平日：福島，千葉，東京，神奈川，富山，兵庫，徳島
 休日：東京，山梨

これらのCBD道路ネットワークのうち、渋滞領域が出現するMFDの例として、休日における山梨県甲府市のCBD道路ネットワークにおいて推定されたMFDと集計QKを図3に示す。図中の網掛けで示した集計QKは、高いエリア交通密度にもかかわらず、エリア交通流率が低い値を示しており、ネットワーク内のいずれかの場所でブレイクダウン現象が発生していると推察される。

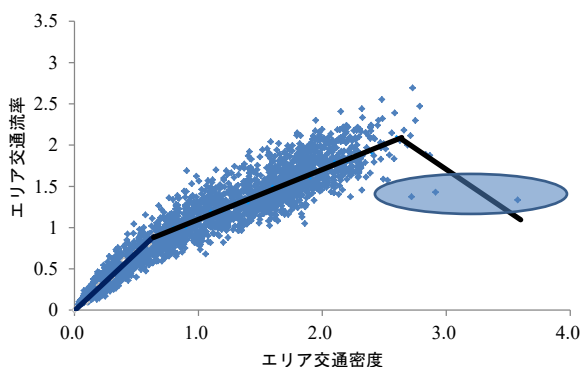


図3 渋滞領域が出現するMFDの例
 甲府市（休日）

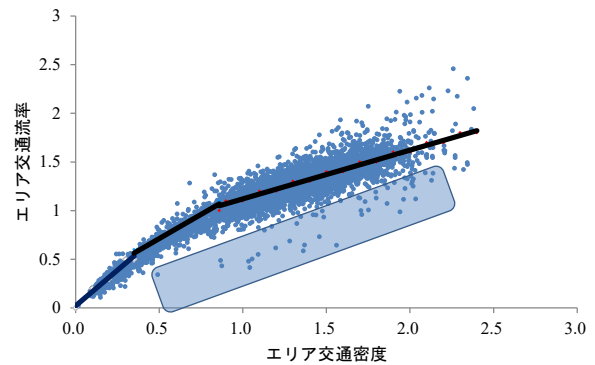


図4 渋滞領域が出現しないMFDの例
 さいたま市（平日）

一方の渋滞領域が出現しないMFDの例として図4には、平日における埼玉県さいたま市のCBD道路ネットワークにおいて推定されたMFDと集計QKを示す。図に示すように、エリア交通密度の増加に従ってエリア交通流率が単調増加しているが、図中の網掛け部に示すように、自由領域、混雑領域のいずれの領域においても、MFDから乖離してエリア交通流率の低い集計QKが出現しており、これらの交通流状態では、ネットワークに何らかの異常事象が発生していたと推察される。

4. おわりに

本稿では、47都道府県の県庁所在地の実CBD街路網を対象としてMFDの推定を行い、多数のネットワークにおいて、エリア交通密度の増加に伴ってエリア交通流率が単調に増加し、限られたネットワークにおいてのみ推定されたMFDが上に凸の形状を示し、エリア交通密度の増加に伴ってエリア交通密度が低下する「渋滞領域」が存在するとの結果を得た。すなわち、多くのネットワークにおいては、集計交通流率の極大値を得る集計交通密度が存在しない可能性があることを示した。

今後は、対象道路ネットワークの形状やサイズの違い、あるいはネットワーク内の交通量の違いに着目して、MFD形状の分析を行う。

謝辞：本研究は、国土交通省による道路政策の質の向上に資する技術研究開発の助成を受けた研究「交通流理論とAI学習による非日常の発見とアラート発信」の一部として実施しました。また、本研究を進めるにあたり、国土交通省よりETC2.0のデータを提供頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

付録

表1：47都道府県庁所在地CBDネットワークにおけるMFD推定結果（平日）

都道府県	P_1	P_2	β_1	β_2	β_3	R^2	sample
北海道	0.50	1.80	1.3	0.8	0.6	0.989	5,901
青森	0.18	1.54	1.8	0.9	0.7	0.967	5,870
岩手	0.30	2.00	1.6	0.7	0.6	0.970	5,897
宮城	0.11	0.64	2.1	1.1	0.7	0.985	5,905
秋田	0.69	2.12	1.3	0.7	0.5	0.980	5,878
山形	0.08	0.74	2.2	1.1	0.7	0.976	5,898
福島	0.43	2.78	1.7	0.5	-0.2	0.972	5,907
茨城	0.11	0.61	1.6	1.2	0.8	0.986	5,900
栃木	0.52	0.95	1.6	0.5	0.6	0.990	5,907
群馬	0.40	1.29	1.7	0.6	0.8	0.986	5,906
埼玉	0.35	0.86	1.5	1.0	0.5	0.991	5,908
千葉	0.58	2.31	1.3	0.7	-0.1	0.990	5,906
東京	0.81	1.52	1.3	0.6	-0.1	0.989	5,907
神奈川	0.64	1.80	1.2	0.8	-0.1	0.991	5,906
新潟	0.58	1.96	1.3	0.8	0.3	0.988	5,907
富山	0.35	2.83	1.7	0.6	-0.4	0.984	5,906
石川	0.53	1.30	1.5	0.4	0.7	0.978	5,906
福井	0.52	1.13	1.7	0.3	0.6	0.979	5,905
山梨	0.28	1.00	1.6	0.9	0.6	0.980	5,907
長野	0.79	1.42	1.2	0.6	0.8	0.983	5,895
岐阜	0.78	-	1.2	0.7	-	0.989	5,902
静岡	0.60	1.14	1.6	0.2	0.7	0.984	5,906
愛知	0.69	2.24	1.3	0.7	0.1	0.990	5,906
三重	0.17	1.12	1.7	1.0	0.6	0.976	5,894
滋賀	0.48	-	1.4	0.6	-	0.983	5,906
京都	0.71	2.56	1.3	0.7	1.1	0.990	5,906
大阪	0.40	1.10	1.2	1.0	0.6	0.984	5,905
兵庫	0.73	2.62	1.3	0.6	-1.0	0.981	5,905
奈良	0.64	1.21	1.4	0.5	0.8	0.987	5,903
和歌山	0.53	2.15	1.3	0.8	0.3	0.989	5,905
鳥取	0.12	0.95	1.6	1.0	0.7	0.972	5,887
島根	0.19	1.39	1.5	0.9	0.7	0.975	5,874
岡山	0.48	1.00	1.3	0.9	0.6	0.987	5,905
広島	0.88	-	1.1	0.7	-	0.990	5,906
山口	0.20	1.30	1.8	0.9	0.7	0.967	5,617
徳島	0.77	2.55	1.2	0.7	-0.1	0.986	5,900
香川	0.53	2.28	1.3	0.8	0.6	0.987	5,901
愛媛	0.65	1.70	1.2	0.8	0.7	0.985	5,904
高知	0.56	-	1.3	0.8	-	0.979	5,796
福岡	0.59	1.59	1.2	0.9	0.4	0.982	5,906
佐賀	0.72	1.21	1.2	0.7	0.8	0.985	1,436
長崎	0.78	2.29	1.2	0.7	0.5	0.959	5,661
熊本	0.51	1.21	1.4	0.7	0.6	0.977	5,886
大分	0.68	-	1.2	0.7	-	0.988	5,901
宮崎	0.71	2.10	1.1	0.8	0.5	0.978	5,874

都道府県	P_1	P_2	β_1	β_2	β_3	R^2	sample
鹿児島	0.57	1.87	1.3	0.8	0.6	0.980	5,864
沖縄	0.30	1.60	1.6	0.8	0.5	0.942	5,266

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の値はいずれも5%有意

表2：47都道府県庁所在地CBDネットワークにおけるMFD推定結果（休日）

都道府県	P_1	P_2	β_1	β_2	β_3	R^2	sample
北海道	0.51	1.14	1.2	1.0	0.7	0.993	2,857
青森	0.19	1.74	1.6	0.9	0.7	0.971	2,842
岩手	0.20	1.00	1.6	1.0	0.6	0.978	2,860
宮城	0.10	1.00	2.1	1.0	0.6	0.988	2,860
秋田	0.68	1.29	1.2	0.9	0.7	0.984	2,839
山形	0.09	1.09	2.0	1.0	0.7	0.977	2,858
福島	0.39	1.51	1.6	0.7	0.5	0.975	2,858
茨城	0.19	1.26	1.4	1.0	0.6	0.981	2,860
栃木	0.44	1.46	1.5	0.8	0.5	0.989	2,859
群馬	0.26	1.17	1.6	0.9	0.6	0.986	2,858
埼玉	0.68	1.96	1.4	0.6	0.2	0.992	2,880
千葉	0.62	1.72	1.3	0.7	0.2	0.986	2,880
東京	0.78	1.54	1.2	0.7	-0.2	0.990	2,880
神奈川	0.67	1.27	1.2	0.8	0.6	0.995	2,880
新潟	1.01	-	1.2	0.6	-	0.988	2,858
富山	0.36	1.13	1.5	0.8	0.6	0.984	2,858
石川	0.07	0.55	1.7	1.3	0.7	0.984	2,857
福井	0.33	0.94	1.6	0.8	0.6	0.980	2,857
山梨	0.64	2.64	1.4	0.6	-1.0	0.981	2,880
長野	0.84	-	1.2	0.2	-	0.988	2,856
岐阜	0.50	1.00	1.2	1.0	0.7	0.993	2,880
静岡	0.46	1.07	1.5	0.8	0.5	0.988	2,880
愛知	0.69	1.30	1.3	0.8	0.5	0.994	2,880
三重	0.19	1.13	1.6	1.0	0.4	0.981	2,879
滋賀	0.66	1.73	1.3	0.6	0.2	0.988	2,880
京都	0.79	2.25	1.3	0.6	0.3	0.993	2,880
大阪	1.10	-	1.1	0.7	-	0.989	2,880
兵庫	0.61	1.65	1.3	0.8	0.3	0.985	2,880
奈良	0.44	1.01	1.4	1.0	0.6	0.989	2,880
和歌山	0.42	1.13	1.3	1.0	0.6	0.989	2,880
鳥取	0.31	1.21	1.3	1.0	0.7	0.980	2,869
島根	0.10	1.15	1.7	1.0	0.7	0.973	2,868
岡山	0.86	-	1.2	0.6	-	0.989	2,880
広島	0.35	0.93	1.1	1.2	0.6	0.993	2,880
山口	0.20	1.30	1.6	1.0	0.7	0.971	2,820
徳島	0.67	1.07	1.2	1.0	0.6	0.989	2,879
香川	0.49	1.18	1.3	0.9	0.7	0.987	2,880
愛媛	0.90	-	1.2	0.7	-	0.989	2,880
高知	0.51	1.00	1.2	1.0	0.7	0.982	2,858
福岡	0.80	1.20	1.1	1.0	0.5	0.987	2,880
佐賀	0.50	1.00	1.2	1.1	0.7	0.985	648
長崎	0.71	1.20	1.1	1.0	0.7	0.969	2,832

都道府県	P_1	P_2	β_1	β_2	β_3	R^2	sample
熊本	0.52	1.00	1.3	0.9	0.6	0.978	2,878
大分	0.78	1.39	1.2	0.9	0.6	0.988	2,880
宮崎	1.00	-	1.2	0.6	-	0.983	2,876
鹿児島	0.92	-	1.2	0.6	-	0.986	2,868
沖縄	0.30	1.68	1.5	0.8	0.6	0.948	2,628

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の値はいずれも5%有意

参考文献

- 1) 桑原雅夫, 原祐輔: 災害時の渋滞現象モニタリングー東日本大震災直後の石巻中心部の事例, 高速道路と自動車, 第56巻, 第9号, pp.48-51, 2013.
- 2) 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地路のボトルネック箇所の考察, 土木学会論文集 D3, Vol.70, No.5, I_1059-I_1066, 2014.
- 3) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和: 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458, pp.65-71, 1993.
- 4) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.41, No.1, pp.49-62, 2007.
- 5) Yoshii, T., Yonezawa, Y., and Kitamura, R.: Evaluation of an Area Metering Control Method Using the Macroscopic Fundamental Diagram, The 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal, July 11-15, 2010.
- 6) Keyvan-Ekbatani, M., Kouvelas, A., Papamichail, I., and Papageorgiou, M.: Exploiting the fundamental diagram of urban networks for feedback-based gating, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.46, No.10, pp.1393-1403, 2012.
- 7) 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.

(2019.3.10 受付)