

仙台市一般道路ネットワークにおける Macroscopic Fundamental Diagram に関する実証研究

王鵬飛¹・和田健太郎²・赤松隆³・原祐輔⁴

¹非会員 東北大学大学院 情報科学研究科 博士後期課程 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-3-09)

E-mail: wpf@plan.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東京大学 生産技術研究所 助教 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

E-mail: wadaken@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東北大学大学院 情報科学研究科 教授 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻青葉 6-3-09)

E-mail: akamatsu@plan.civil.tohoku.ac.jp

⁴正会員 東北大学 未来科学技術共同研究センター 助教 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-10)

E-mail: hara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、仙台市の一般道路ネットワークを対象として、Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) の特性を明らかにする。5分刻みの観測データから描かれた毎日のMFDを1年間(2012年5月1日~2013年4月30日)に渡って実証的に観測した結果、仙台市ネットワークのMFDには以下の顕著な特徴があることが明らかとなった：(1) 悪天候でない平日(標準的な条件下)のMFDには、必ず午前と午後のピーク時間帯に対応したヒステリシス・ループが形成される、(2) その形状は、1年を通じて、ほとんど変化しない、(3) 交通需要のピーク・レベルが平日に比べて小さい休日のMFDでは、ループは形成されない、(4) 車両走行環境が平日時と大きく異なる悪天候日のMFDでは、典型的なMFDよりも大きなループが形成される、(5) MFD描画のための対象エリアを小さく設定するほど、MFDのバラツキが大きくなる。

Key Words : Macroscopic fundamental diagram, traffic congestion, hysteresis loop, detector, Sendai

1. はじめに

交通渋滞は、いまなお、世界中の都市が解決すべき問題である。現在、交通渋滞の観測やモニタリングは、様々なセンサー(e.g., 感知器, プローブ車両)によって、個別リンク或いは道路区間毎に行われている。しかしながら、これらの個別の情報から、道路ネットワークの面的な交通状態や交通性能を直接把握・評価することは必ずしも容易ではない。これは、混雑した道路ネットワークの(非集計)交通流ダイナミクスが、非線形な交通流現象と利用者の経路選択との相互作用により複雑かつカオス的な挙動をするためである。

このような非集計アプローチに代わる方法として、Daganzo²⁾は、集計的なレベルでネットワークの交通状態を捉える巨視的な混雑指標 *Macroscopic Fundamental Diagram* (MFD) を提案している。MFDは、混雑が一樣に分布している、かつ、需要が徐々に変化するエリアに対して、車両存在台数(平均交通密度)とトリップ完了率(平均交通量)の関係を表すものである。Geroliminis and Daganzo³⁾は、横浜エリアの道路ネットワークに対して、需要パターンが within-day が day-to-day で変

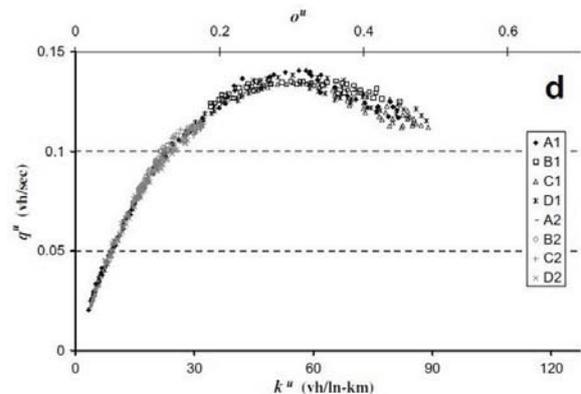


図-1 Well-defined MFD (Geroliminis and Daganzo³⁾)

化しても不変かつ再現される well-defined MFD が存在することを実証的に示した(図-1に参照)。

このような well-defined MFD は、平均交通密度のみを用いてエリアの交通状態を簡便に把握することができるため、リアルタイム交通制御に繋がる有効な指標である。例えば、MFDの臨界密度以下に平均密度を保つように流入制御を行うことにより、道路ネットワー

クが渋滞状態に陥ることを回避することができる (e.g., Daganzo²⁾, 吉井ら⁸⁾).

しかしながら, 高速道路や不均一性の高いネットワークにおいては, バラツキ (i.e., 同一平均密度に対して, 複数の平均交通量が対応) やヒステリシス・ループを伴ったMFDが現れることも報告されている (e.g., Buisson and Ladier¹⁾, Geroliminis and Sun⁴⁾, Knoop and Hoogendoorn⁵⁾, Saberi and Mahmassani^{6),7)}, 土生ら⁹⁾). MFDの概念を実際に活用していくためには, well-defined MFDの発現するための条件を明らかにする必要がある. しかし, MFDに関する実証研究の蓄積は乏しい. さらに, いずれの研究も数日間のデータを用いてMFDを解析したのみであり, MFDの再現性を分析するには十分とは言えない.

本研究では, 仙台市の一般道路ネットワークを分析対象として, 1年間 (5/1/2012-4/30/2013) の感知器データを用いて, 仙台市のMFDの特徴を明らかにすることを目的とする. 1年間に渡って実証的に観測した結果, 仙台市ネットワークのMFDには以下の顕著な特徴があることが明らかとなった: (1) 悪天候でない平日 (標準的な条件下) のMFDには, 必ず午前と午後のピーク時間帯に対応したヒステリシス・ループが形成される, (2) その形状は, 1年を通じて, ほとんど変化しない, (3) 交通需要のピーク・レベル, 悪天候, MFD描画のための対象エリアはMFD形状に非常に大きな影響を与える. このようなMFD特性に関する実証研究は, MFDの概念を活用する前に, 非常に必要であると考えられる.

本論文の構成は以下ようになる: 第2章では, 仙台市の一般道路ネットワークの構造と感知器データの基本情報を説明する. 第3章では, MFDを定義し, 典型的なMFDの特徴を明らかにする. そして, MFD形状に影響を与える交通需要, 天候状況とMFD描画のための対象エリアなどの要素を分析する. 第4章では, 本研究のまとめと今後の課題について議論する.

2. 観測データ

本研究では, 仙台市都市圏の (高速道路を含まない) 一般道路ネットワークを分析対象とする. 仙台市は東北地方で最大の都市であり, その人口は約107万人である. 対象ネットワークのリンクは, 片側2~4車線, 制限速度は約60km/hである. 交差点間の距離は100~300mであり, 大部分の交差点は複数現示の交通信号で制御されている (信号サイクル長は1日の時間帯によって変化し, 一般的に, 昼は90s, 夜は120sである).

分析 (MFD描画) に用いるデータ・セットは, 図-2に示す878地点の感知器で計測された交通量と交通密度

である. 対象期間は, 2012年5月1日~2013年4月30日の1年間 (総計365日) であり¹, 毎日, 24時間を5分刻みで分割した時間帯別 (総時間帯 $T = 288$) の観測値が得られている. 感知器による観測項目は, 各時間帯 t における感知器 i で観測されたリンク断面交通量 q_t^i (複数車線の場合, その合計値) と車両速度 v_t^i である. 交通密度 k_t^i は, $k_t^i = q_t^i / v_t^i$ によって計算される.

3. MFDの描画と特徴づけ

本節では, 1年間の感知器データを用いて毎日のMFDを描画し, その定性的な特性を明らかにする. まず, 3.1節では, 以降で分析するMFDの定義 (および描画方法) を示す. 3.2節では, 1年間を通じた観察から明らかとなったMFD特性の概要を述べる. 3.3節では, 典型的なMFDの特徴をより詳しく議論し, 3.4~3.6の各節では, 各々, 交通需要, 天候, およびエリア分割がMFDの特性に与える影響を分析する.

(1) MFDの描画方法

以降の分析で用いるMFDの定義および描画法を, MFDが描かれた図-3を例として, 説明する. この図の横軸は車両存在台数, 縦軸はスループットを表す. また, この図にプロットされた各点は, 一日の各時間帯 $t (t = 1, 2, \dots, T)$ で観測された (車両存在台数 N_t , スループット P_t) ペアである. ここで, 時間帯 t に対応するプロットの水平座標 (車両存在台数 N_t) は, 時間帯 t に対象ネットワークの各地点 i で観測された交通密度 k_t^i のネットワーク全体での総和:

$$N_t = \sum_{i=1}^I (q_t^i / v_t^i) \quad (1)$$

であり, 垂直座標 (スループット P_t) は, 時間帯 t に観測された交通量 q_t^i のネットワーク全体での総和:

$$P_t = \sum_{i=1}^I q_t^i \quad (2)$$

である. 上記総和操作の対象とする観測地点は, 3.2-3.5節の分析では, 図-2に示す感知器集合 I_0 である.

なお, 図-3では, 1日24時間を4つの時間帯: 0:00-6:00, 6:00-13:00, 13:00-20:00と20:00-24:00, に分割し, プロットされた各点が属する時間帯を異なる色・印の組合せで示している (例えば, 6:00-13:00のデータは「赤色の○」, 13:00-20:00のデータは「青色の+」でプロットされている).

¹ ただし, 分析期間365日のうち29日 (約7.9%) のデータでは, 一部の観測レコードが, 感知器の故障により, 欠損していた. そのようなデータがある日は, 分析対象から除外した.

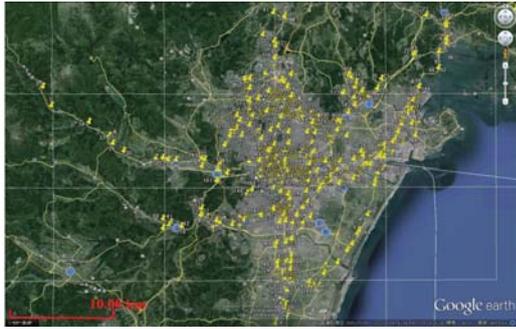


図-2 仙台市感知器の分布

(2) MFD の特徴と分類

本研究では、図-2 に示す感知器集合 I_0 をベンチマーク・ケースとして、1年間の毎日の MFD を描画した。その多数の MFD の観察から、1年間を通じた毎日の MFD は、その形状に応じて、幾つかのタイプに分類できることが判った。なかでも、悪天候でない平日という(1年間で最も多い)標準的な条件下で現れる「典型的な MFD」は、

- 必ずループを形成する (i.e., ヒステリシスが存在する),
 - その形状の変化は、1年間を通じて、ごく僅かである、
- という共通の特徴を持つ。この特性に関するより詳しい分析は、続く 3.3 節で示される。

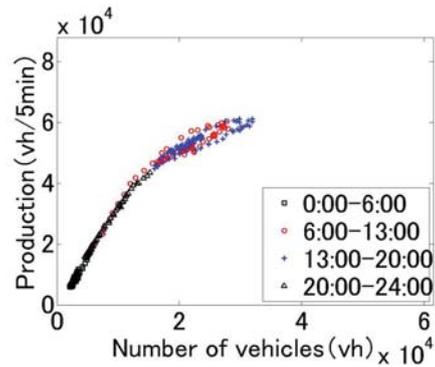
ただし、様々な条件下での MFD をより詳しく観察すると、

- 道路ネットワーク・サービスの需要条件,
- 道路ネットワーク・サービスの供給条件,
- 対象ネットワークのエリア設定,

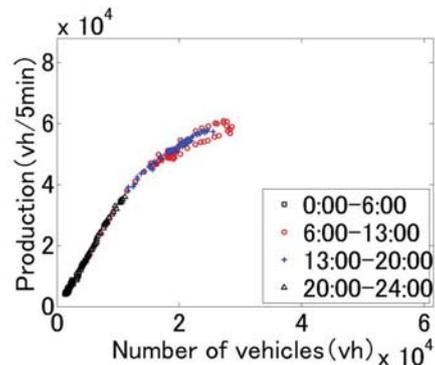
によって、MFD の形状は変化することが判った。より具体的には、(1) については、交通需要の推移パターンが平日と大きく異なる休日の MFD では、ループは形成されない(あるいは、典型的な MFD とは異なったループが現れる)。(2) については、車両走行環境が平常時と大きく異なる悪天候日 (e.g., 雪) の MFD では、典型的な MFD よりも大きなループが形成される。これらの需要・供給要因が MFD に対して与える影響については、各々、3.4 節と 3.5 節でより詳しく議論する。(3) については、MFD 描画のためのエリア (i.e., 感知器集合) を小さく設定するほど、MFD のバラツキが大きくなる。これについての詳しい分析は、3.6 節で示される。

(3) 典型的な MFD

悪天候でない平日という「標準的な条件下」で観測された MFD は、図-3 にその典型例を示すように、必ずループを形成するという顕著な特徴がある。この特徴を



(a)2012年9月14日(金曜日, 晴)



(b)2012年11月19日(月曜日, 晴)

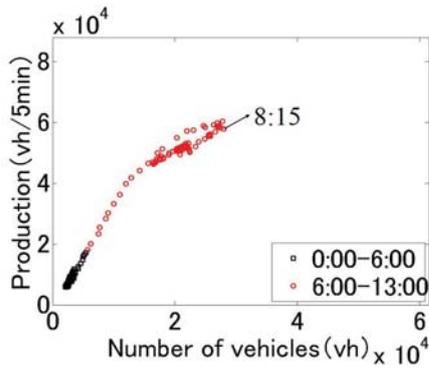
図-3 仙台市の典型的な MFD

より明確に示すために、一日のデータを午前 (i.e., 0:00-12:55) と午後 (i.e., 13:00-23:55) に 2 分割し、MFD を描画した (図-4, 図-6 参照)。この図から、さらに、

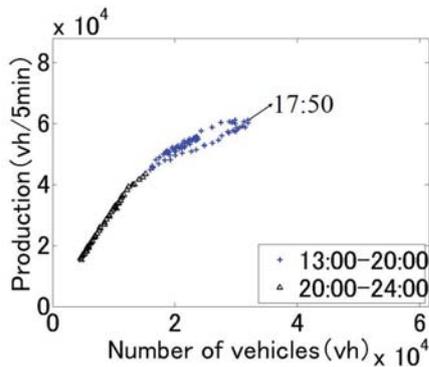
- 午前中は、必ずループを形成する,
- 午後は、ループを形成する場合 (図-4) と形成しない場合 (図-6) がある,

ことが判る。

典型的な MFD においてこのようなループが形成される理由は、図-5 に示すスループットと車両存在台数の時間的推移パターンと関連付けて説明できる。まず、図-4 (a),(b) と 図-5 (a),(b) の対応から明らかのように、MFD のループ上のプロットは、(突出した) ピーク時間帯のスループットと車両存在台数のペアと対応している。実際、午前中の MFD でループが形成される時間帯は、朝のスループットピークが現れる 7:30-8:30、午後にループが形成される時間帯は、夕方スループットピークが現れる 17:30-18:30 である。さらに、このピーク時間帯のスループットと車両存在台数の推移過程を (図-5 (a),(b) から) 詳しく観察すると、スループットは最大値を達成した時刻 (17:45) の直後に降下し始めるが、車両存在台数は、最高値付近にしばらく (17:50-18:20 の

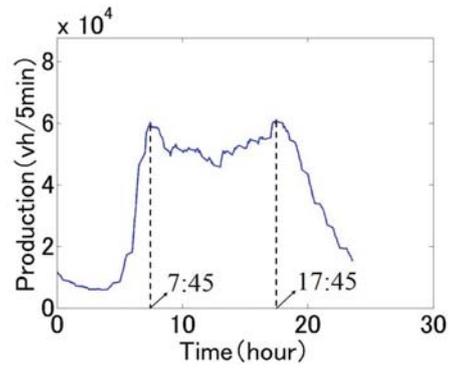


(a)0:00~12:55

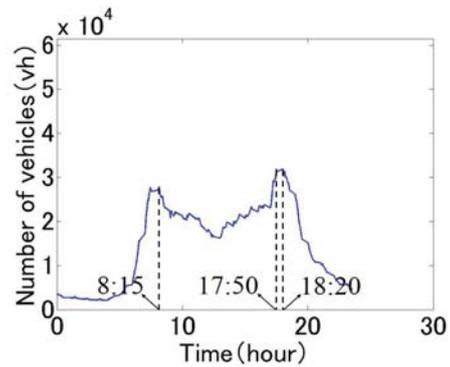


(b)13:00~23:55

図-4 2012年9月14日の午前と午後のMFD



(a)スループット



(b)車両存在台数

図-5 2012年9月14日の時間的推移

約30分間)留まっていることがわかる。これは、MFD上では、ループ上側曲線の右端付近で、車両存在台数は大きく下がらないまま、スループットのみが(上側曲線よりも値の低い)下側曲線に推移することを意味している。このように、標準的な条件下では、スループットのピーク終了後、車両存在台数が速やかに減少しないため、MFD上にループ(ヒステリシス)が現れることが判る。なお、午後にループが形成されないケース(図-3(b))については、続く3.4で議論する。

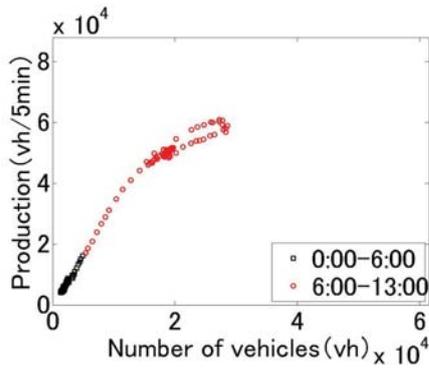
(4) 交通需要の影響

MFDの形状・特性は、交通需要のレベル及び推移パターンに応じて変化する可能性がある。そこで、標準的条件と交通需要パターンが大きく異なる土曜・休日のMFDを1年を通じて観察した結果、以下の共通特性が見いだされた：

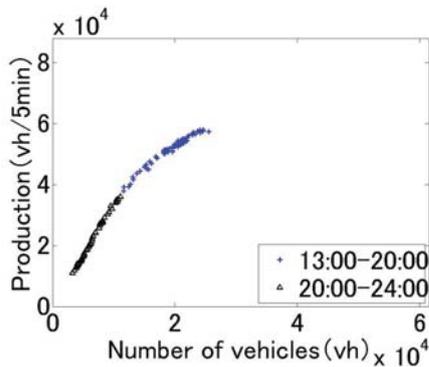
- 土曜日のMFDには、常に明示的なループが形成される(図-8(a)).
- そのループ形状は標準的条件下でのMFDとは異なり、1日で1つの大きなループが形成される。
- 休日(日曜日・祝日)には、明示的なループは(ほ

とんど)現れない(図-9(a)).

このような土曜・休日のMFDの特性は、その交通需要の推移特性と関連づけて理解することができる。以下では、図-8(a)に示す土曜日のMFDと交通需要の推移パターンの関係性を詳しく見てみよう。土曜日のスループットは、図-8(b)に示される様に、午前中は(標準条件下で見られる様な)突出したピークを持たず、7:30-17:25まで非常に緩やかな傾き S_1^f で上昇し、その後、20:00まで、傾き S_2^f で大きく減少する。一方、車両存在台数は、図-8(c)から判るように、13:00-17:15まで傾き S_1^d で徐々に増加する。この17:15までの増加過程は、MFD曲線上では、傾き S_1^f/S_1^d を持つループの上側曲線上での状態推移に対応している。その後、車両存在台数は、17:15-17:35にかけて高いピーク値を持続し、スループットの減少開始時刻(17:25)より遅れた時刻(17:35)から、傾き S_2^d で減少し始める。この減少過程は、MFD曲線上では、傾き S_2^f/S_2^d を持つループの下側曲線上での状態推移に対応している。この過程では、渋滞進展にともなうスループットの低下が大きいため、MFDの傾き S_2^f/S_2^d が、増加過程におけるMFDの傾き S_1^f/S_1^d よりも大きい。その結果、増加過程では

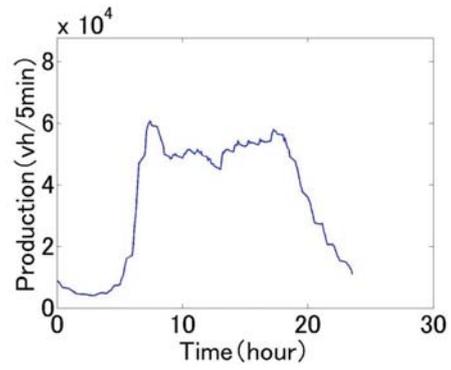


(a)0:00~12:55

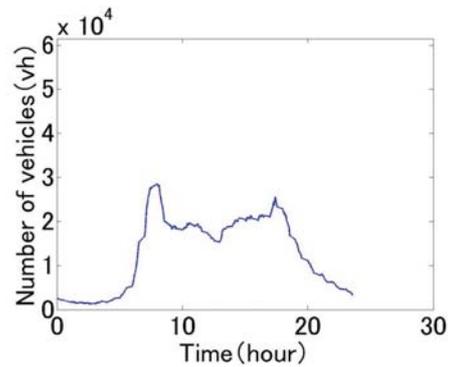


(b)13:00~23:55

図-6 2012年11月19日の午前と午後のMFD



(a)スループット



(b)車両存在台数

図-7 2012年11月19日の時間的推移

上側曲線，減少過程では下側曲線に沿った時計回りの状態変化(ヒステリシス・ループ)が観測される．なお，休日については，需要レベルが一日を通じて高くない(図-9(b))ため，車両存在台数のレベルも低く，終日，突出したピークを持たない(図-9(c))．そのため，MFDのループも形成されないと考えられる．

ここまでの分析では，需要条件が大きく異なる平日と土曜・休日という2グループの対比的な観察によって(i.e., ヒューリスティックな方法で)，MFDを分類した．この分類の妥当性は，MFD形状をより客観的な統計学的手法で分類することによっても，確かめることができる．図-10は，2012年10月²の全てのMFDを階層的クラスタリング法で分類した結果である．

- 普通の平日のMFDには，(午前と午後に対応した)2つのループが存在する(図-3(a))．
- 休日あけのMFDには，午前中のループのみが存在する(図-3(b))．

休日あけのMFDで午後にループが形成されない理由は，スループットと車両存在台数の時間的推移パターンと関連付けて説明できる．図-7(a)に示される休日あ

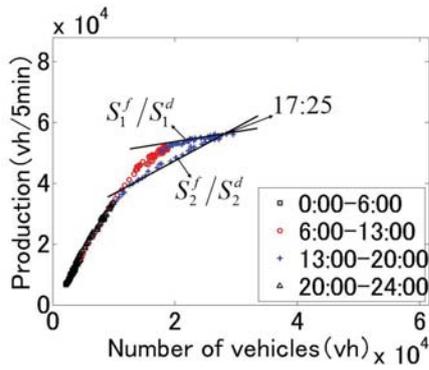
けのスループットの推移を見ると，午前中のパターンは通常の平日とほぼ同様である(1つの大きなピークがある)が，午後はピーク・レベルが小さい．また，図-7(b)に示される車両存在台数の推移も，午後のピーク・レベルは小さく，そのピークは持続していない．すなわち，休日明けの夕方へのピーク時間帯は，(曜日に応じた利用者の行動特性の結果)需要レベルが低く，その結果，渋滞の進展度も低いいため，午後のMFDにはループが形成されないと考えられる．

(5) 天候の影響

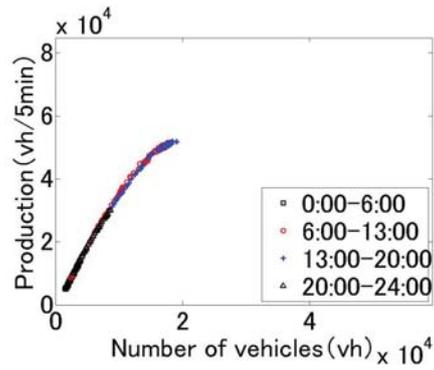
3.4で述べた需要条件に加え，道路ネットワーク・サービスの供給条件の変化(e.g., 雪や雨による車両走行環境の変化)も，MFDの形状・特性に影響を与える可能性がある．そこで，標準的な条件と車両走行環境が大きく異なる悪天候日のMFDを1年を通じて観察した結果，以下の共通特性が見出された：

- 悪天候日のMFDには，標準的条件下でのMFDと異なる形状のループが形成される．
- そのループの下側曲線は，標準的条件下のループと比べ，より広範囲の密度区間に形成される(図-

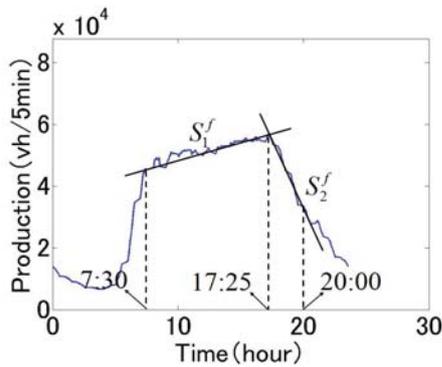
² 1年間の中で，データ・レコード欠損がない1ヶ月を選択した



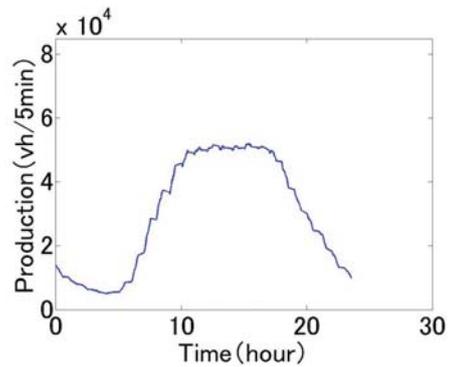
(a)MFD



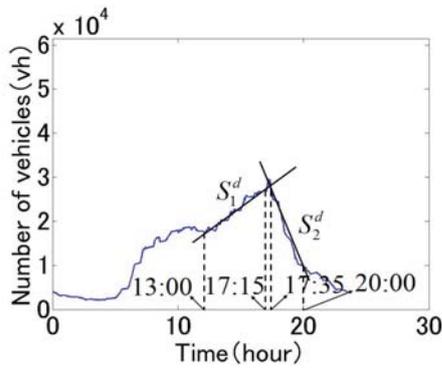
(a)MFD



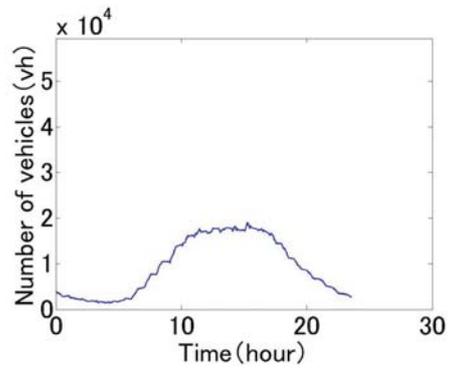
(b) スループットの時間的推移



(b) スループットの時間的推移



(c) 車両存在台数の時間的推移



(c) 車両存在台数の時間的推移

図-8 2012年11月10日(土曜日, 晴)

図-9 2013年3月24日(日曜日, 晴)

11 (a), 図-12 (a) 参照).

悪天候日のMFDの特性も、3.4で見た土曜日のMFDと同様、スループットと車両存在台数の時間的推移パターンと関連付けて説明できる。以下では、図-11 (a)に示す雪の休日のMFDを例として、そのループ形成とスループットおよび車両存在台数の時間的推移パターン(図-11 (b),(c))の関係を詳しく見てみよう。この日のスループットは、図-11 (b)に示される様に、10:40-16:10まで非常に緩やかな傾き S_3^f で上昇し、その後、20:00まで、傾き S_4^f で大きく減少する。一方、車両存在台数は、図-11 (c)から判るように、13:00-16:20ま

で傾き S_3^d で徐々に増加する。この増加過程は、MFD曲線上では、傾き S_3^f/S_3^d を持つループの上側曲線上での状態推移に対応している。その後、車両存在台数は、16:20-16:50にかけて高い値を持続し、スループットの減少開始時刻16:10より遅い16:50から、傾き S_4^d で減少し始める。この減少過程は、MFD曲線上では、傾き S_4^f/S_4^d を持つループの下側曲線上での状態推移に対応している。この減少過程でのMFDの傾き S_4^f/S_4^d は、増加過程におけるMFDの傾き S_3^f/S_3^d よりも大きい。その結果、増加過程では上側曲線、減少過程では下側曲線に沿った時計回りの状態変化(ヒステリシス・ルー

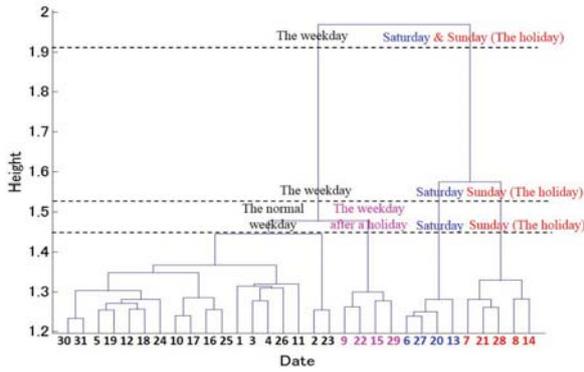


図-10 クラスタリング方法による分類結果

表-1 異なるエリアの感知器数と面積

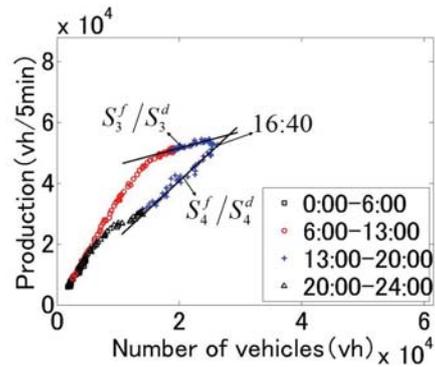
エリア	1	2	3	0
面積 (km ²)	5.5	23.7	79.5	—
感知器数	100	203	411	878

プ)が観測される。また、この日のループが、悪天候でない日(例えば、晴の土曜日)のループよりも大きい理由は、この車両存在台数の減少過程の傾き S_4^d が、晴の土曜日の傾き S_2^d (図-8 (c) 参照) と比べて緩やかなためである。これは、積雪によって車両走行環境が悪化(ネットワークの性能が低下)し、渋滞状態が解消するのに要する時間が長くなることを意味していると考えられる。なお、雨の休日に形成されるループ(図-12 (a))についても、同様のメカニズムで解釈できる。

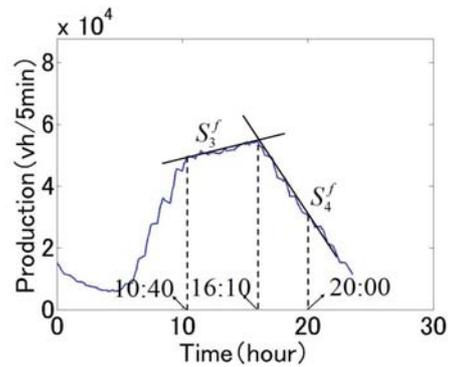
(6) エリア分割の影響

ここまででは、仙台都市圏ネットワーク(図-2)に対するMFDを分析したが、そのエリア(感知器集合)設定の変化も、MFDの特性に影響を与える。その影響を検証するための最初のステップとして、サイズの異なる以下の4種類のエリア:

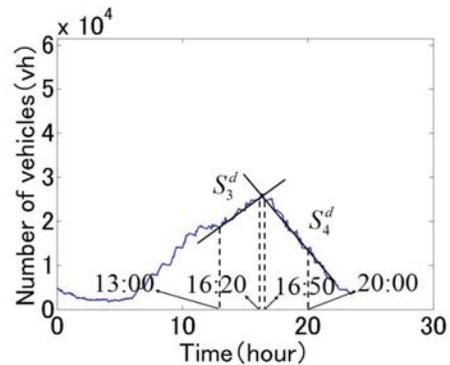
- エリア1: 仙台市CBDのみに対応した最小エリア(図-13の緑線で囲まれたエリア)
- エリア2: エリア1の周辺主要道路を含むエリアで、その感知器数はエリア1の約2倍(図-13の青い線で囲まれたエリア)
- エリア3: 仙台都市圏の環状高速道路に囲まれたエリアで、その感知器数はエリア2の約2倍(図-13の赤い線で囲まれたエリア)
- エリア0: 仙台都市圏全域(3.5節までの分析エリア)で、その感知器数はエリア3の約2倍(図-2)



(a)MFD



(b) スループット時間的推移



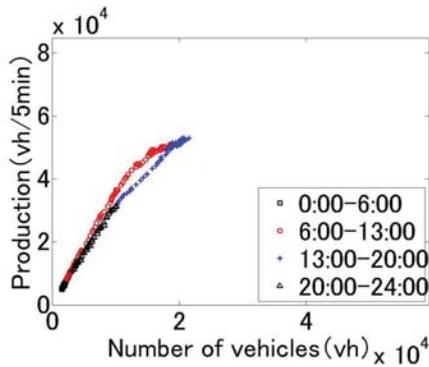
(c) 車両存在台数時間的推移

図-11 2012年12月23日(日曜日, 雪)

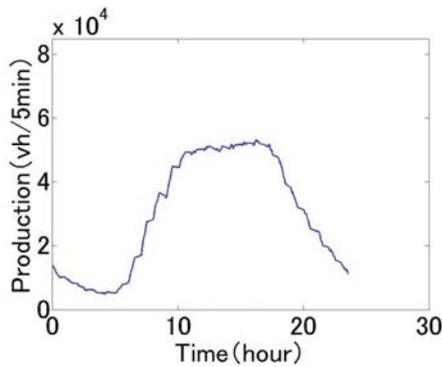
を定義し、その各々に対する1年間のMFDを計算した。その典型的な例(各エリアでの標準的条件下での典型的なMFD)を(図-14)に示す。

これらのMFDの比較から、以下の事実を読み取ることができる:

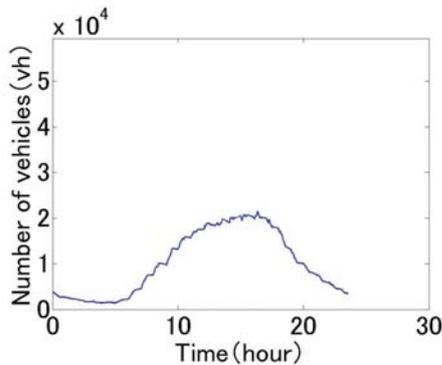
- エリアを大きく設定するほど、MFDの「バラツキ」は小さくなる。ここで、MFDのバラツキとは、各車両存在台数に対して観測される複数のスループットの分散である。
- エリアを大きく設定するほど、渋滞領域が現れなくなる。



(a) MFD



(b) スループット時間的推移



(c) 車両存在台数時間的推移

図-12 2013年3月10日(日曜日, 雨)

この第一の特性は、スループットと車両存在台数の時間的推移と関連付けて解釈できる。図-15(a)と(b)、(c)と(d)はそれぞれエリア1、エリア0のスループットと車両存在台数の時間的推移を表現している。これらの図により、エリア0の(スループットと車両存在台数の)時間的推移はエリア1のより滑らかであると示している。これは、エリア・サイズが大きくなるにつれ、感知器数が増えて、その中の1つの感知器(1つの感知器の観測データのバラツキは非常に高い)は、(MFD描画用の)感知器全体に与える影響は弱くなるためである。

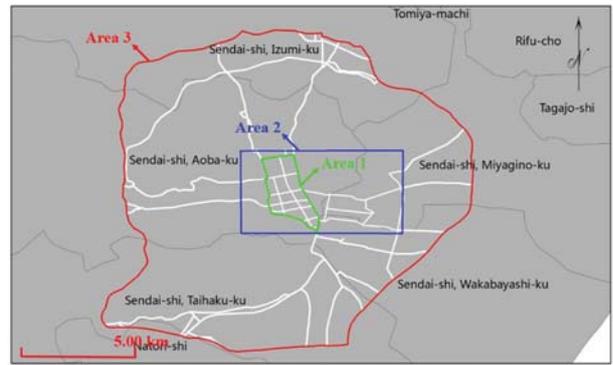


図-13 仙台市の異なるエリア分割

第二の特性は、エリアの設定が大きくなるにつれ、局所的な渋滞がエリア全体での車両存在台数に与える影響度が小さくなるためと考えられる。実際に、今回のエリア設定では、エリア・サイズが大きくなるにつれ、あまり混雑しない郊外の道路がより多く含まれるため、各時間帯における全感知器数に対する渋滞道路区間数のシェアは小さくなる。

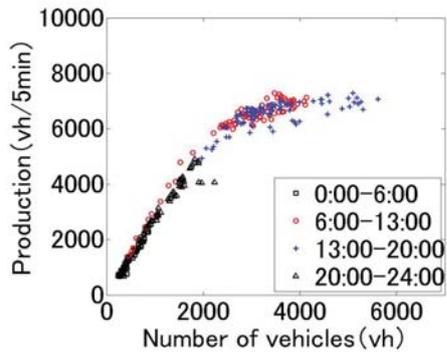
このように、エリア・サイズの拡大には、良い性質をもつ(i.e., バラツキが小さく、ネットワークの性能を良く反映した)MFDを抽出するという観点からは、トレード・オフ関係がある。このトレード・オフ関係を定量化し、最適なエリア(あるいは感知器集合)設定法を開発することは、今後の課題である。

4. おわりに

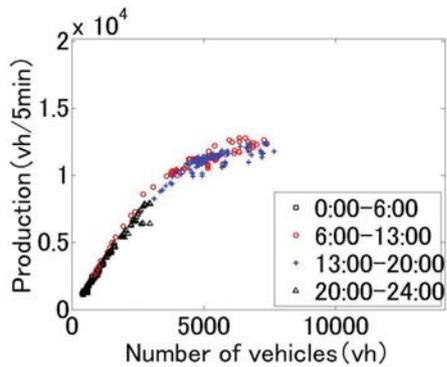
本研究は、仙台市の一般道ネットワークを対象として、スループットと車両存在台数の関係を表現するMFDの特性を実証的に特徴づけた。5分刻みの観測データから描かれる毎日のMFDを1年間(2012年5月1日～2013年4月30日)に渡って検証した結果、仙台市ネットワークのMFDには以下の顕著な特徴があることが明らかとなった：

- 悪天候でない平日のMFDには、午前と午後のピーク時間帯に対応したヒステリシス・ループが必ず形成される。
- 土曜日のMFDでは、1日で1つの大きなループが形成される。
- 休日のMFDでは、ループは形成されない。
- 悪天候日のMFDでは、典型的なMFDよりも大きなループが形成される。
- MFD描画のための対象エリアを小さく設定するほど、MFDのバラツキが大きくなる。

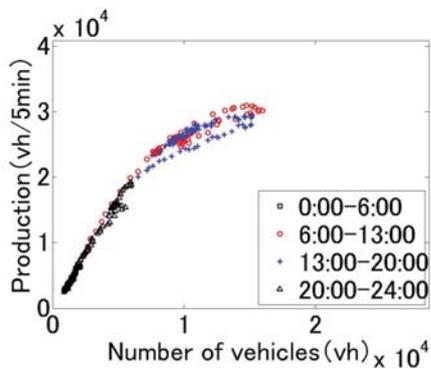
本研究では、これらのMFDの特性が、スループット・車両存在台数の増加・減少過程と関連づけて理解で



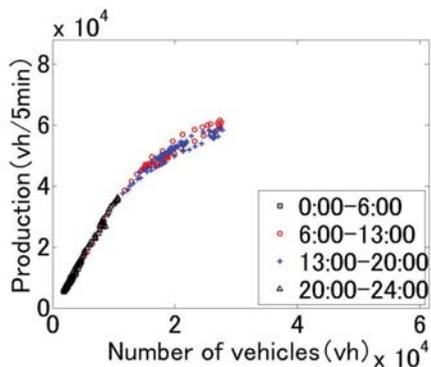
(a) エリア 1



(b) エリア 2

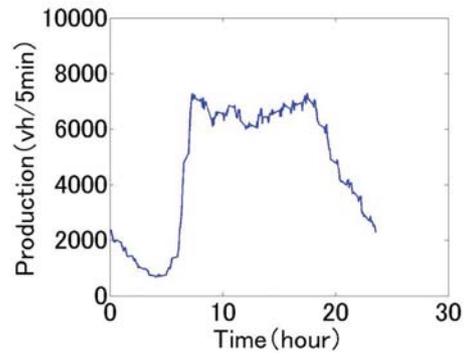


(c) エリア 3

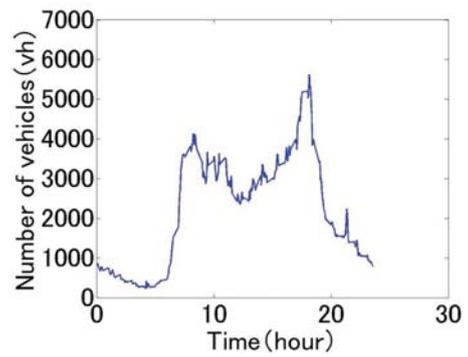


(d) エリア 0

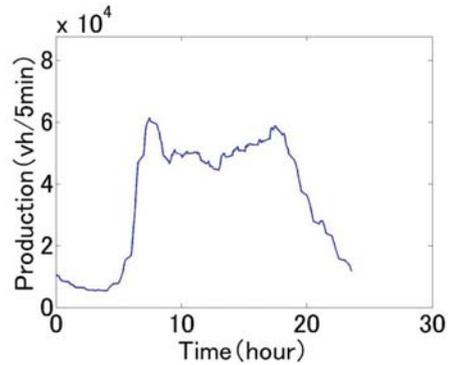
図-14 異なるエリアのMFD(2012年11月7日, 晴)



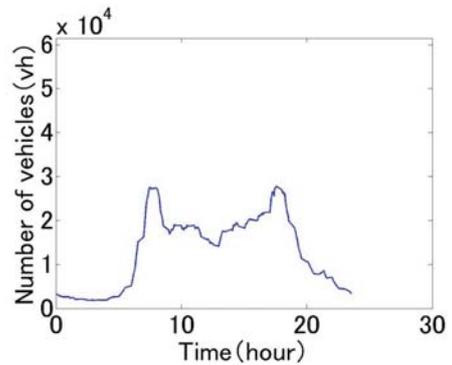
(a) エリア 1 のスループット



(b) エリア 1 の車両存在台数



(c) エリア 0 のスループット



(d) エリア 0 の車両存在台数

図-15 エリア 1 とエリア 0 における時間的推移の比較

きることを示した。特に、スループットの(ピーク達成後の)減少過程において、車両存在台数のピーク状態が続くこと、あるいは、車両存在台数の減少速度が遅いことが、MFDのループ形成と対応していることが示された。このようなスループット・車両存在台数の(時系列)挙動は、渋滞の空間的進展過程に対応していると推測される。その具体的なメカニズムの解明と検証は、今後の重要な研究課題である。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、日本道路交通情報センター(JARTIC)より貴重なデータをご提供いただきました。また、本研究は、日本学術振興会・科学研究費補助金・若手研究(B)(課題番号:26820207)を受けた研究の一部である。ここに記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) Buisson, C. and Ladier, C.: Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2124(12), pp.127-136, 2009.
- 2) Daganzo, C.F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B* 41(1), pp.49-62, 2007.
- 3) Geroliminis, N. and Daganzo, C.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B* 42(9), pp.759-770, 2008.
- 4) Geroliminis, N. and Sun, J.: Hysteresis phenomena of a macroscopic fundamental diagram in freeway networks. *Transportation Research Part A* 45(9), pp.966-979, 2011.
- 5) Knoop, V.L. and Hoogendoorn, S.P.: Empirics of a generalized macroscopic fundamental diagram for urban freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2391(13), pp.133-141, 2013.
- 6) Saberi, M. and Mahmassani, H.S.: Exploring properties of networkwide flow-density relations in a freeway network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2315(16), pp.153-163, 2012.
- 7) Saberi, M. and Mahmassani, H.S.: Hysteresis and capacity drop phenomena freeway networks: Empirical characterization and interpretation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2391(5), pp.44-55, 2013.
- 8) 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*, pp.1-12, 2010.
- 9) 土生恭祐, 桑原雅夫, 原祐輔: 交通状態の時空間変化がMFDに与える影響. *土木計画学研究・講演集 Vol.47*, 136(CD-ROM), 2013.

(2014. 8. 1 受付)