

ボトルネック通行権取引制度に基づく エリア流入制御

和田健太郎¹・赤松隆²・

¹学生員 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: wadaken@plan.civil.tohoku.ac.jp

²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

本稿は、制御可能リンクが制限されている状況を対象とし、ボトルネック通行権取引制度の性質、及び、そのインプリメンテーション法を明らかにする。具体的には、都市エリアへの流入制御スキームとして、Macroscopic Fundamental Diagram に基づく通行権取引制度を考える。そしてまず、通行権取引制度導入後の出発時刻選択均衡状態が、システム最適状態に一致すること示す。続いて、通行権取引市場をインプリメントするための動的オークションを構築する。このオークションは動的計画法に基づいており、時刻の進行順に通行権の割当・価格を決定できるという特徴を持つ。最後に、ある条件下では、提案オークションは誘因整合的であり、システム最適配分状態を達成できることを証明する。

Key Words : TDM, tradable permits, macroscopic fundamental diagram, auction mechanism

1. はじめに

(1) 背景と目的

都市道路ネットワークに対する従来の交通渋滞解消施策の多くは、交通流の将来予測に基づいている。そして、予測モデルの精緻化にとまない (e.g., 動的交通シミュレーションモデル)、施策も詳細化、複雑化している。しかし、これらのモデルは膨大な入力データ (e.g., OD 情報、利用者の選好情報) を必要とし、そのようなデータが正確に得られない場合、信頼性の高い結果が得られるかは確かではない。すなわち、予測モデルに過度に依存する交通施策の有効性を保証することは易しくない。従って、詳細な予測に依存しない頑健な交通施策の構築が求められる。

詳細な利用者情報を必要としない交通需要管理施策として、赤松・佐藤・Nguyen¹⁾、赤松²⁾は“ボトルネック通行権取引制度”を提案している。これは、(a) ネットワーク上の各リンクに対して、そのリンクを予め指定された時間帯に通行できる権利 (ボトルネック通行権) を道路管理者が発行し、(b) その時間帯別の通行権を自由に売買できる市場を創設する、というものである。この施策下では、通行権発行枚数は容量以下に抑えれば渋滞は完全に解消される。また、市場取引によって通行権価格が決定されるため、道路管理者が詳細な利用者情報を把握する必要はない。そして、動的利用者均衡条件が動的システム最適配分に一致することが示されている。さらに、Wada and Akamatsu³⁾は、通行権取

引制度を、需要サイドのみならず、供給サイドの制御 (i.e., 信号制御) も含む枠組みに拡張し、自律分散的にシステム最適配分状態が達成できることを明らかにしている。

通行権取引制度は、上記のように望ましい性質を有しているが、既存研究では、対象ネットワークの全リンクで制度が導入可能である状況のみを対象としている。このような状況は、比較的単純なネットワークを対象とすれば現時点でも可能であると思われるが、都市街路のような複雑なネットワークでは困難である。従って、制度可能リンクに制限がある状況を考え、通行権取引制度を拡張することが求められる。

本研究では、制御可能リンクが制限されている状況を対象とし、ボトルネック通行権取引制度の性質、及び、そのインプリメンテーション法を明らかにする。具体的には、都市エリアへの流入制御スキームとして、Macroscopic Fundamental Diagram に基づく通行権取引制度を考える。そしてまず、通行権取引制度導入後の出発時刻選択均衡状態が、システム最適状態に一致すること示す。続いて、通行権取引市場をインプリメントするための動的オークションを構築する。このオークションは動的計画法に基づいており、時刻の進行順に通行権の割当・価格を決定できるという特徴を持つ。最後に、ある条件下では、提案オークションは誘因整合的であり、システム最適配分状態を達成できることを証明する。

(2) 既存研究

Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) は、道路ネットワーク上のあるエリア内の (空間) 平均フローと (空間) 平均密度の関係を表しており、エリア内の交通状態を巨視的に捉えるための指標である。MFD のコンセプトは、詳細な交通流予測に頼らない制御 (i.e., gridlock management) の構築を目的として Daganzo⁴⁾により提案され、Geroliminis and Daganzo⁵⁾によってその存在が実証的に確認された。また、トリップ完了率 (または、ネットワーク流出フロー) が平均フローと比例関係にあることも確認されているため、直接観測することが困難なトリップ完了率を MFD を用いて評価することができる。

MFD を用いた交通制御手法についても既にいくつかの研究がある。Daganzo⁴⁾, Geroliminis and Daganzo⁶⁾, Yoshii et al.⁷⁾では、MFD によって評価される交通容量付近にエリア内の交通密度 (または、車両の存在台数) を維持するように流入交通量を制御する手法が提案されている。これらの方法は、リアルタイム観測情報に基づき制御を行うことができる (i.e., 予測は必要としない)。さらに、制御の導入により、エリア内の集計フローが高いレベルに維持されることを明らかにしている。ただし、いずれの研究でも、流出フロー (または、トリップ完了率) の最大化を目標にしており、利用者の選択行動は考えられていない (i.e., 単純割当)。

一方、Geroliminis and Levinson⁸⁾, Arnott,⁹⁾ Zheng et al.¹⁰⁾は単一エリアのコードン課金を分析している。このモデルでは、MFD における出発時刻選択問題を考察し、社会的最適状態を実現する最適混雑料金を導出している。また、Gonzales and Daganzo¹¹⁾は、複数のモードを考慮した出発時刻選択問題を考え、最適な混雑料金を導出している。しかし、詳細な利用者情報 (i.e., 希望到着時刻, 時間価値) が必要となることから、そのような最適混雑料金を設定することは容易ではない。

通行権取引制度は、“数量規制”のアプローチに“利用者が自由に出発時刻を選択する”仕組み (i.e, 通行権取引市場) を加えたスキームである。従って、MFD と通行権取引制度を組み合わせることで、エリア内の詳細な情報および利用者情報を必要とせず、効率的な資源配分を達成するエリア流入制御の構築が期待される。

2. 状況設定および通行権取引制度

(1) 分析対象とする交通空間条件

本稿では、単一中心都市の街路ネットワークにおける通勤交通を対象とする。動的な交通流を考える時間は、離散的であるとし、各時間帯を $t \in T$ で表す。街路ネットワークは1つのエリアに区切られており (図-1), 時

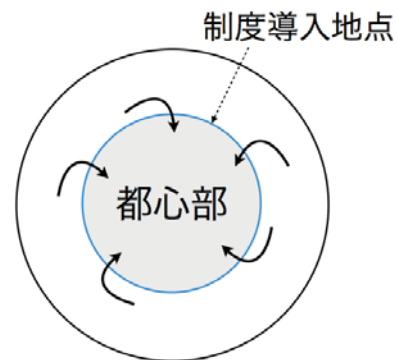


図-1 対象とするエリアと通行権取引制度導入地点

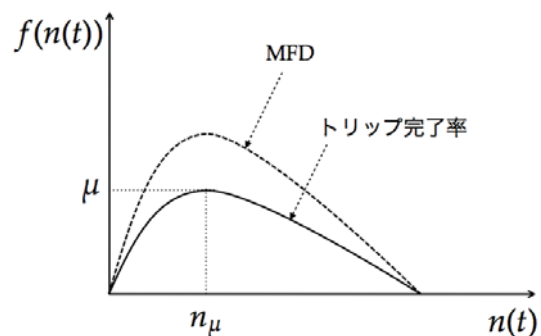


図-2 対象とするエリアと通行権取引制度導入地点

間帯 t のエリア内部の平均フローは MFD $q(n(t))$ により表現されているとする (図 2)。ここで、 $n(t)$ は、時間帯 t にエリアに存在する車両の台数である。また、MFD とトリップ完了率は比例関係にあると仮定すると、ある時刻にエリアを流出するフロー (i.e., 終点に到着する交通量) は MFD に定数をかけた値 $f(n(t)) = \kappa q(n(t))$ と評価することができる (図 2)。なお、エリアからの最大トリップ完了率を μ で表し、そのときの車両存在台数を n_μ と表記する。

(2) 行動主体

本研究で分析するモデルに表れる主体は、道路ネットワークの管理者と利用者である。道路管理者はネットワークで発生する渋滞を抑制し、ネットワーク上の社会的余剰の最大化を目指す主体である。そのために、エリアの境界において“時間帯別のボトルネック通行権”を設定・発行する。通行権の定義および発行法については、以下の (3) でより詳しく述べる。

利用者は郊外の居住地から都市内の目的地 (i.e., CBD) へ、このネットワークを通過してトリップを行う主体である。時間帯を通じてトリップする利用者の総数は所与として、各利用者を $i \in I$ で表す。また、通勤時間

帯に都市内部から発生交通量などは十分小さいと仮定する。利用者は、自分の効用が最大となるように、終点到着時間帯を選択する。なお、利用者が都市内へ流入するために、自分の選択する終点到着時間帯に対応した通行権を“通行権取引市場”で購入する必要がある。通行権取引市場と通行権の購入法については以下の(3)および4章でより詳しく述べる。

(3) ボトルネック通行権取引制度

“時間帯別ボトルネック通行権”とは、予め指定された地点を、予め指定された時間帯にのみ通行できる権利である。本研究では、道路管理者がエリアに流入する境界において、最大流出フロー μ に等しい枚数の時間帯別通行権を発行する状況を考える。時間帯別通行権の定義より、利用される時間帯別通行権の枚数は、エリア流入率になる。従って、この発行条件下では、エリアの存在台数が n_μ 以上になることはない。

道路管理者が発行したボトルネック通行権は、通行権取引市場を通して利用者に市場販売される。利用者は、いずれかの時点の通行権取引市場に参加し、希望する到着時間帯の通行権を購入する。取引市場では、時間帯別の通行権に対して、オークションによって、価格と購入者が決定される。具体的な取引ルールについては、第4章以降で詳しく示す。

3. 実現目標とする通行権配分パターン

本章では、制度の導入によって実現を目指す通行権配分 (i.e., システム最適配分) を定義する。以下では、まず、利用者が持つ私的評価額および効用を定義する。そして、システム最適配分問題を定式化する。

(1) 利用者の交通費用および効用の定義

各利用者 i が1回のトリップで費やす交通費用は、終点への希望到着時間帯 t_i と実際の到着時間帯 t との際に応じて決まる“スケジュール費用”と、遅れ時間を金銭換算した“遅れ費用”から構成される¹。スケジュール費用は $s_i(t, t_i)$ と表される。一方、遅れ時間は、Geroliminis and Levinson⁸⁾と同様に、エリアが混雑状態 (i.e., 容量を超えた存在台数がある) にあるときに追加的にかかる時間とする：

$$c_i(n(t)) = \alpha_i [\tau(n(t)) - \tau(\min\{n(t), n_\mu\})]. \quad (1)$$

ここで、 α_i は時間価値係数、 $\tau(n(t))$ は時間帯 t においてエリアに流入しトリップ完了するまでにかかる平均走行時間であり、エリア流入時間帯の車両存在台数にのみ依存すると仮定する。この設定は、従来のボトルネックモデル¹²⁾と整合的であり、 $n(t) \leq n_\mu$ ならば、遅

¹ ここでは、簡単のために、自由走行時間を0としている。

れ時間は0となる。通行権取引制度導入下においても、エリアの存在台数が n_μ を超えることはないため、遅れ時間は0である。

各利用者は、各終点到着時刻に対して、私的な評価額を持っているとする。この私的評価額は、各人の持つトリップ効用 w_i から、その交通費用を差し引いたものであると定義する：

$$v_i(t) = w_i - s_i(t, t_i). \quad (2)$$

さらに、各利用者の効用は準線形効用関数で表現されると仮定する。すなわち、利用者 i が到着時間帯 t の通行権を購入したときの効用は、

$$u_i(t) = v_i(t) - p(t) \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 $p(t)$ は、4章で示すオークションによって決まる通行権購入費用である。

(2) システム最適配分

道路管理者が目標とする通行権配分パターンは、社会的余剰を最大化する配分パターンである。ここで、社会的余剰は、利用者の評価額の和であり、利用者から管理者への所得移転である通行権費用は含まれない。従って、社会的に最適な配分を求める問題 [SO] は、以下の最適化問題として与えられる：

$$SS \equiv \max_{(y, z) \geq 0} \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} v_i(t) y_i(t) \quad (4)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} y_i(t) \leq \mu \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$z_i(t-1) - y_i(t) = z_i(t) \quad \forall t = 1, \dots, T-1, \forall i \in I \quad (6)$$

$$y_i(T) \leq z_i(T-1) \quad \forall i \in I \quad (7)$$

ここで、 $y_i(t)$ は、各利用者への各時間帯の通行権の割当を表す変数であり、 $z_i(t)$ は各利用者が次の時間帯の通行権を購入できる権利 (i.e., 購入オプション) を保有していることを表す変数である。本稿では利用者は1枚の通行権のみを必要とするので、 $z_i(0) = 1$ である。

問題 [SO] は、社会的余剰を最大化する最適な通行権の割当を求める問題である。具体的には、目的関数(4)は社会的余剰を表しており、(5)は各時間帯における容量制約 (i.e., 通行権販売枚数制約) を表している。制約条件(6), (7)はあわせて、全時間帯を通して利用者が高々1枚の通行権を購入することを表している。なお、この問題は線形計画問題として定式化されているが、制約条件の係数行列が totally unimodular であるため、0-1整数解 (i.e., 割当) が求まる。

問題 [SO] の最適性の必要十分条件は、以下の Kuhn-

Tucker 条件で与えられる：

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} y_i(t) = \mu & \text{if } p(t) > 0 \\ \sum_{i \in I} y_i(t) \leq \mu & \text{if } p(t) = 0 \end{cases} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\begin{cases} v_i(t) - p(t) = \pi_i(t) & \text{if } y_i(t) = 1 \\ v_i(t) - p(t) \leq \pi_i(t) & \text{if } y_i(t) = 0 \end{cases} \quad \forall t \in T, i \in I \quad (9)$$

$$\begin{cases} \pi_i(t+1) = \pi_i(t) & \text{if } z_i(t) = 1 \\ \pi_i(t+1) \leq \pi_i(t) & \text{if } z_i(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\forall t = 1, \dots, T-1, \forall i \in I$$

$$\begin{cases} y_i(T) - z_i(T-1) = 0 & \text{if } \pi_i(T) > 0 \\ y_i(T) - z_i(T-1) \leq 0 & \text{if } \pi_i(T) = 0 \end{cases} \quad \forall i \in I \quad (11)$$

+ 保存則 (6).

ここで、 \mathbf{p} は制約条件 (5) に対応した Lagrange 乗数、 π は制約条件 (6), (7) に対応した Lagrange 乗数である。最適性条件 (8)~(11) は、Lagrange 乗数 \mathbf{p}, π を、それぞれ時間帯 t の通行権価格、購入オプションの価値とみなせば、市場均衡条件と解釈できる。具体的には、最適性条件 (8) は、各市場の市場清算条件を表しており、最適性条件 (9)~(11) は、通行権価格を与件とした利用者選択 (i.e., 到着時間帯選択) の均衡条件と解釈できる (その詳細は、和田ら¹³⁾を参照)。すなわち、次の命題が成立する：

命題 1. 通行権取引制度を用いた都市内流入制御によって実現する通行権の均衡割当パターンは、問題 [SO] の解である社会的余剰を最大化する割当パターンと一致する。

命題 1 は、利用者が“価格に影響を与えるような戦略的な行動”をとらない (または price-taker である) という前提に依存する。そのため、戦略的な行動をとるインセンティブが働かないようなメカニズムの設計が求められる。次章では、このようなメカニズムについて詳述する。

4. 通行権取引市場の動的オークション

問題 [SO] は、競争的な通行権取引市場における均衡状態と等価な問題であった。しかし、その問題は、全ての時間帯の通行権取引を同時に取引されることを示しており、通行権の利用順序という時間の流れが現れていない。ただし、現実的への適用においては、利用順序に従って、通行権取引が行われるのが望ましい。従って、本章では、まず (1) において、ある条件下では、市場が時間の流れと整合的に分解可能であることを示す。続く (2) では、各時間帯の通行権取引市場が非常にシンプルな Vickrey オークション¹⁴⁾でインプリメント可能で

あることを示す。本稿で示すメカニズムは、複数時点の通行権取引制度に対して和田ら¹³⁾によって提案されたオークションをベースにしている。大きく異なる点は、分解された各時間帯のオークションが非常にシンプルになる点である。

(1) 通行権取引市場の時間分解

まず、問題 [SO] の双対問題 [SO-D] を考えよう：

$$\min_{(\mathbf{p}, \pi) \geq 0} \cdot \sum_{t \in T} \mu p(t) + \sum_{i \in I} \pi_i(1) \quad (12)$$

subject to

$$\pi_i(t) \geq v_i(t) - p(t) \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (13)$$

$$\pi_i(t) \geq \pi_i(t+1) \quad \forall t = 1, \dots, T-1, \forall i \in I. \quad (14)$$

さらに、この問題の目的関数を次のように変換する：

$$\sum_{t \in T} \mu p(t) + \sum_{s=1}^{T-1} \sum_{i \in I} (\pi_i(s) - \pi_i(s+1)) + \sum_{i \in I} \pi_i(T) \quad (15)$$

このことを利用すれば、問題 [SO-D] は等価な多段階の問題へと変換可能である：

[SO-D^t]

$$\min_{p(t) \geq 0, \pi(t) \geq 0} \cdot \mu p(t) + \sum_{i \in I} (\pi_i(t) - \pi_i(t+1)) \quad (16)$$

subject to

$$\pi_i(t) \geq v_i(t) - p(t), \quad \pi_i(t) \geq \pi_i(t+1) \quad \forall i \in I \quad (17)$$

[SO-D^T]

$$\min_{p(T) \geq 0, \pi(T) \geq 0} \cdot \mu p(T) + \sum_{i \in I} \pi_i(T) \quad (18)$$

subject to

$$\pi_i(T) \geq v_i(T) - p(T), \quad \forall i \in I \quad (19)$$

ここで、 $t = 1, \dots, T-1$ の通行権取引市場は [SO-D^t] で表され、最終時間帯の通行権取引市場のみ [SO-D^T] となる。この多段階問題より、次のことが分かる：最終時間帯 T の問題は (他の時間帯に関係なく) 独立に扱うことができる；時間帯 t の問題は次の時間帯のオプション価値 $\pi_i(t+1)$ を与件とすれば、独立に扱うことができる。すなわち、各利用者が自らのオプション価値を予め知ることができるならば、各時間帯の問題を“時間帯の進行順”に分解できる。本稿では、このオプション価値を利用者が予め把握していると仮定する。

利用者が次の時間帯のオプション価値 $\pi_i(t+1)$ を予め把握しているとき、時間帯 t の通行権取引市場 [SO-D^t] に対し、利用者 i が持つ評価額と購入オプション価値との差をあらわす、新たな変数 (ネットの評価額) $\hat{v}_i(t) \equiv v_i(t) - p(t)$ を導入しよう。このとき、問題 [SO-D^t]

は、 $\hat{\pi}_i(t) \equiv \pi_i(t) - \pi_i(t+1)$ を未知変数とした以下の問題と等価である：

$$\min_{p(t) \geq 0, \hat{\pi}_i(t) \geq 0} \cdot \mu p(t) + \sum_{i \in I} \hat{\pi}_i(t) \quad (20)$$

subject to

$$\hat{\pi}_i(t) \geq \hat{v}_i(t) - p(t), \quad \forall i \in I. \quad (21)$$

この問題は、 $\hat{v}_i(T) \equiv v_i(T)$, $\hat{\pi}_i(T) \equiv \pi_i(T)$ とおいた問題 [SO-D^T] と全く同型の問題である。これらの双対問題を主問題になおすことで、各々の市場に対する独立な割当問題 [SO-Pⁱ] が得られる：

$$\max_{y(t) \geq 0} \cdot \sum_{i \in I} \hat{v}_i(t) y_i(t) \quad (22)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} y_i(t) \leq \mu \quad (23)$$

$$y_i(t) \leq 1 \quad \forall i \in I. \quad (24)$$

以上より、ある時間帯の通行権取引市場において、各利用者がネットの評価額 $\hat{v}(t)$ を正直に申告するならば、問題 [SO] を時間の流れに整合的に解決できることが分かった。

(2) Vickrey オークション

Vickrey オークション¹⁴⁾ (2 位価格オークション) は、1 つの財の場合、最も入札額の高い買い手が 2 番目に入札額が高い買い手の価格で財を落札するという、シンプルな封印価格入札のオークションである。同質財が μ 個ある場合は、 $\mu + 1$ 番目の入札額で、上位の入札者が落札する。このオークションにおいては、効率的な割当が実現し、入札者が真の評価額を入札することが支配戦略 (i.e., strategy-proof) になるという非常に優れた性質を持っている¹⁵⁾。本研究における、時間帯で分解されたそれぞれの通行権取引市場 [SO-Pⁱ] は、同質な μ 枚の通行権を利用者に販売する問題であるので、割当メカニズムとして Vickrey オークションを採用することが可能である。このとき、次の命題が成立する：

命題 2. 利用者が次の時間帯のオークションで実現する自らのオプション価値を予め把握していると仮定する。このとき、全ての時間帯の通行権取引市場は *strategy-proof* である。また、利用者が各時間帯のオークションにおいてネットの評価額を正直に申告するとき、利用者の市場選択は最適である。

証明. 和田ら¹³⁾を参照。

5. おわりに

本研究では、都市エリアへの流入制御スキームとして、MFD に基づく通行権取引制度を考察した。その結

果、単一ボトルネックの場合と同様に、通行権取引制度導入後の出発時刻選択均衡状態が、システム最適配分状態に一致することが示された。ただし、通行権取引制度がもたらすインパクトは単一ボトルネックを考えた場合に比べ大きい。それは、Geroliminis and Levinson⁸⁾ で指摘されているように、エリア内の車両存在台数を MFD の容量を超えないように制御することは、遅れ時間が発生しないのみならず、ラッシュ・アワーの時間を短くする効果があるためである (ボトルネック・モデルと異なり、容量を超えた需要が到着した時に平均フロー低下してしまう)。

さらに、本研究では、そのような最適状態を達成するためのメカニズムを提案した。このオークションでは、各利用者は自分の希望する (複数でも良い) 時間帯の通行権取引市場に参加し、Vickrey オークションを行うのみで良い。従って、現時点でも十分応用可能なメカニズムであると考えられる。ただし、注意が必要なのは、本研究では、利用者が次の時間帯のオプション価値を予め把握できると仮定した点である。定常的な通勤交通においては、日々の経験・学習・情報提供等からこのオプション価値を把握することはできると考えられるが、どのような学習ダイナミクスが望ましいかは自明ではない。従って、シンプルかつ効率的な学習を促すダイナミクスの性質を明らかにすることは、今後の重要な課題である。

本稿では、最大トリップ完了率にフローを制限すれば (通行権取引制度のみで)、最適な存在台数 n_μ が維持されると仮定していた (i.e., エリア内での発生交通量等は MFD に影響を与えない)。しかし、現実には必ずしもこの仮定は成り立たず、現在の存在台数に応じて、制限する交通量 (i.e., 通行権発行枚数) を制御していく必要があるであろう。従って、リアルタイム観測情報に基づく制御を本稿で示した枠組みに導入する拡張については、発表会で報告する予定である。

参考文献

- 1) 赤松隆, 佐藤慎太郎, Nguyen, X. L.: 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 62, pp. 605–620, 2006.
- 2) 赤松隆: 一般ネットワークにおける ボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp. 287–301, 2007.
- 3) Wada, K. and Akamatsu, T.: Distributed Signal Control based on Tradable Network Permits: Design and Evolutionary Implementation, *Proceedings of the 4th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment*, 2012.
- 4) Daganzo, C.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 1, pp. 49–62, January 2007.
- 5) Geroliminis, N. and Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, No. 9, pp. 759–770, November 2008.

- 6) Geroliminis, N. and Daganzo, C.: Macroscopic modeling of traffic in cities, *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, No. 07-0413, 2007.
- 7) Yoshii, T., Yonezawa, Y. and Kitamura, R.: Evaluation of an area metering control method using the macroscopic fundamental diagram, *The 12th World Conference on Transportation Research*, 2010.
- 8) Geroliminis, N. and Levinson, D.: Cordon pricing consistent with the physics of overcrowding, *Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee*, No. 1920, pp. 219–240, 2009.
- 9) Arnott, R.: A bathtub model of downtown traffic congestion, 2011.
- 10) Zheng, N., Waraich, R. a., Axhausen, K. W. and Geroliminis, N.: A dynamic cordon pricing scheme combining the Macroscopic Fundamental Diagram and an agent-based traffic model, *Transportation Research Part A*, Vol. 46, No. 8, pp. 1291–1303, October 2012.
- 11) Gonzales, E. and Daganzo, C.: Morning commute with competing modes and distributed demand: user equilibrium, system optimum, and pricing, *Working Paper, UCB-ITS-VWP-2011-2*, 2011.
- 12) Vickrey, W. S.: Congestion Theory and Transport Investment, *The American Economic Review*, Vol. 59, pp. 251–260, 1969.
- 13) 和田健太郎, 王鵬飛, 赤松隆, 長江剛志: 複数時点で購入可能な通行権取引市場のメカニズム, 投稿中.
- 14) Vickrey, W.: Counterspeculation, Auction, and Competitive Sealed Tenders, *The Journal of Finance*, Vol. 16, pp. 8–37, 1961.
- 15) 横尾真: オークション理論の基礎—ゲーム理論と情報科学の先端領域, 東京電機大学出版局, 2006.

(2012. 8. 3 受付)

AN AREA METERING CONTROL BASED ON TRADABLE BOTTLENECK PERMITS

Kentaro WADA and Takashi AKAMATSU