

都市域における混雑課金の政策分析: レビューと展望*

Modelling Urban Congestion Pricing: Recent Review and Perspective*

円山 琢也**

By Takuya MARUYAMA**

1. はじめに

(1) 背景と目的

交通混雑という現実の都市問題に対するひとつの根本的な解決策として、混雑課金政策は、前世紀にまず理論の構築が経済学者を中心になされた。その後、工学系、計画系の研究者なども多数参加し、さまざまな既存学問の蓄積を下に、理論のみならず、実証研究も多数なされてきた。その後、混雑課金政策は、2003年2月から大都市ロンドンで導入されたことで、より注目を浴び、一気に学術研究が加速・展開した。事例・実践研究も蓄積され、研究活動は最近も大変活発である。新たに政策の導入を検討している都市も数多い。都市問題の解決策としての、このような混雑課金政策の提案・実行・研究展開の流れは、土木計画学の学術活動のあり方についてもひとつの示唆を与えうると思われる。

本稿は、2000年以降の論文を中心に混雑課金についての研究動向をレビューし、この研究分野の将来展望をまとめることを目的としている。

本稿のタイトルにある混雑課金は、この他、日本語では、混雑料金、道路課金、混雑税、ロード・プライシングなどと呼ばれることがある。英文では、congestion pricing, congestion charging, congestion tax, road pricing, road user charging, toll, tolling, peak-load pricing などと呼ばれる。これらの名称は、政策の目的、性質、特徴などを表現していることもある。ただ、本稿では、混雑課金政策を、「道路利用に対して、料金を課すことで、需要を時間的・空間的に変化させることを目指す政策」と比較的広く定義し、その政策の分析技術を扱った研究のレビュー・展望を試

みる。また、「都市域における混雑課金」としているのは、近年の研究の多くが都市空間・ネットワークを明示したものになっていることを意識している。

レビューの対象として、混雑課金に関する2005年以降の最近の論文は、私の主観的評価(学術的貢献の大小)にかかわらず、なるべくフォローすることを心がけた。2000~2004年に発表された、少し古い論文は、比較的インパクトが大きいと私が主観的に判断したものを中心にレビューしている。それ以前の論文は、本稿で紹介した論文・書籍の参考文献から容易にたどれるだろう。このように対象を絞っているのは、紙面の制約および最近の爆発的な論文数の増加が主な理由であり、私が古典的論文を軽視しているわけでは断じてない。2004年8月時点での筆者による研究レビューとして、円山¹⁾を挙げておきたい。

(2) 本稿の意義・アプローチ

実際のところ、検索技術の向上、引用論文データベースの構築により、関連論文の検索は、一昔前よりも格段に容易になっている。したがって、レビュー論文の執筆も、索引的なものを作成するだけであれば、比較的容易な作業とも思われよう。その点を考慮すると、本稿が含んでいる(最低限の)オリジナルな意義は、筆者の意見を踏まえた将来の研究展望の部分と思われる。

さて、一般に対象を絞ることは、学術研究の常套手段であるし、それは、レビュー論文にも当てはまるだろう。しかし、対象分野が細分化することで俯瞰的な視点が欠如し、問題の本質を見失う可能性がある。また、他分野の研究の方法論は、今後の参考になることも多い。これらのことから、本稿では、甚だ無謀な試みかもしれないが、混雑課金の分析技術を対象として、ネットワーク均衡分析アプローチ、行動分析アプローチ、シミュレーション、経済モデル等

*キーワード: ロード・プライシング, 交通ネットワーク分析, TDM, 計画手法論

** 正会員, 博, 熊本大学 政策創造研究教育センター
(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, Fax: 096-342-2042)

なるべく広い研究分野をレビューする。なお、このほか混雑課金の分析手法の分類軸としては、記述 vs 規範、動的 vs 静的、確率的 vs 確定的 など多数存在する。ここで、一般に整理としては、図表を使うことも奨励されるが、(現時点の) 本稿ではあえてそれは避けている。さまざまな視点・軸が組み合わさった研究も多く、勝手な軸を設定してそれらを分類整理することで、読者を安易に理解した気分させることを筆者は好まない。混雑課金研究に対する、学際的(*Multi-Disciplinary*) アプローチの重要性は、Verhoef *et al.*²⁾ でも強調されているが、本稿でもそのアプローチを一部試みる。

さて、混雑課金に関しては、和書では、文³⁾、竹内⁴⁾らによる単著での書籍の出版がされ、關、庭田⁵⁾による編著があり、少し古いもので山田⁶⁾がある。Yang and Huang⁷⁾には、交通ネットワーク均衡モデルをベースにした混雑課金の分析体系が示されている。Santos⁸⁾、Lawphongpanich *et al.*⁹⁾による論文集や混雑課金の受容性に特化した専門書¹⁰⁾もある。ごく最近でも出版は相次いでいる (Jensen-Butler *et al.*¹¹⁾、Verhoef *et al.*²⁾、de Palma *et al.*¹²⁾)。最近の交通経済学のテキストである Small and Verhoef¹³⁾にも混雑課金について、広く記述されている。主に経済学を中心とした混雑課金の最近のレビュー論文として Lindsey¹⁴⁾がある。また、和文のレビューとしては、文³⁾の第1章を読むのが良いと筆者は思う。混雑課金の概論・歴史の紹介などはこれら良書を参考にされたい。本稿は、より最新の研究紹介と筆者の研究展望を述べることを目指している。

また、筆者は、混雑課金研究の一分類として、以下があり、これは土木計画学の研究にも当てはまると思っている。

- ・理論 (Theoretical Studies)
- ・実証 (Empirical Studies)
- ・事例 (Case Studies)
- ・実践 (Practical Studies)

事例・実践研究に比べて、優れた理論研究の論文は、数十年後も引用され続けるといった違いがある。

だからといって、前者より後者が優れていると一概に言えるわけでもなく、歴史・現実から学ぶことも重要であるのは当然である。本稿では、これら4つのアプローチの視点でも混雑課金研究のレビュー・展望を試み、土木計画学の活動のあり方への示唆を探ることも意図している。

本稿の具体的な章構成は以下のとおりである。以降、2. では、効率性の観点からの最適・次善課金の最近の研究を紹介する。3. では、公平性の視点も含め、課金の分配効果の問題、利用者の異質性に関する研究を述べる。4. では、交通混雑の的確な表現に必須な動的モデルと、その他さまざまな動学的研究展開を紹介する。5. では、課金の受容性の研究と、その向上を目的した新たな制度などを紹介する。6. では物流等へ、7. では、課金の土地利用へのインパクトを含めたさまざまな分析の展開を示す。8. で事例研究を簡単に紹介する。9. が、筆者のオリジナルな意見を含めた今後の研究展望であり、10. で、少し私見も交えながら、本稿を締めくくる。

これらのうち、2.、4.、7. は主に理論研究、3.、5.、6. は、実証的研究と分類できるものが多く、8. は事例研究の一部の紹介である。実践的な研究展開の例については、9. の一部で触れる。

2. 最適(ファースト・ベスト)・次善(セカンド・ベスト)課金

混雑課金の文脈でのファースト・ベストとは、全リンクへの課金が可能とする想定が多い。一方、セカンド・ベスト課金とは、一部のリンク・一部の地域のみ課金できるという想定が多い。

(1) 限界費用形成原理による最適課金

経済学における限界費用形成原理に関する古典的論文の和訳・解説としては大石¹⁵⁾が参考になる。限界費用形成原理の交通混雑問題への適用は、基本的な考えの一つとして知っておく価値はあると思う。

(a) 基礎理論

混雑課金の基礎理論といえる(静学的)限界費用課金についての単一リンク対象の図を用いた分析は、

交通経済学のほぼすべての教科書・専門書に記載されているものである。ここでは、繰り返さない。社会的限界費用曲線と、私的費用曲線の差分に相当する額を混雑課金として設定するという議論である。

この理論について、90年代以前の論文などの整理を知りたいければ、Hau^{16), 17)}が参考になるかもしれない。ただし、超混雑と呼ぶ渋滞現象を、彼の図にある反転曲線を用いて静的な枠組みで分析する妥当性には、疑問が残され、これは最近では多くの研究者が同意している点だろう(桑原¹⁸⁾; Lo and Szeto¹⁹⁾; 文³⁾, 付論 2-A; Small & Verhoef¹³⁾, 3.4.1 など)。

(b) 交通ネットワークを考慮した限界費用形成原理の拡張・一般化

需要固定型利用者均衡配分で、各リンクに限界費用課金を課すことで、総所要時間が最小になるシステム最適配分が達成されることは、交通工学の研究者には周知の事実であろう。この理論は、需要変動型モデルについても、社会的余剰の最大化を目的関数に設定すれば適用できる。利用者の行動モデルを確率モデルに拡張しても、そのモデルと整合的な社会的余剰を定義すれば、適用できる(例えば、円山¹⁾ 2.9.1.1. を参照)。

最近の研究でも、この理論の適用範囲のさらなる拡張・一般化を意図したものが見受けられる。Yang *et al.*²⁰⁾ は、複数交通手段を考慮した最適課金を、Ying and Yang²¹⁾ は、規模の経済も考慮した2手段均衡モデルでの最適課金を分析している。Bellei *et al.*²²⁾ は、一般的なランダム効用型行動モデルと交通ネットワーク・モデルを前提とした最適課金を議論している。Ying²³⁾ は、土地利用・交通統合モデルでの最適混雑課金を考察している。Yildirim and Hearn²⁴⁾ は、需要変動モデルに対して容量制約も考慮した最適課金をまとめている。これらの研究と独立して進められた円山²⁵⁾ でも、複数交通手段を考慮したNested Logit型の確率的利用者均衡モデル下での最適課金が分析されている。以上、すべての研究において、ネットワーク上の全リンクへの限界費用課金が最適混雑課金の基本であることが示されている。確率的行動モデルに基づく均衡配分を想定すれば、この最適課金は、確率的システム最適配分²⁶⁾

の一種を実現するとも解釈できよう。

(静学的) 限界費用課金の適用範囲の一般化は、指摘されれば納得できる基本的な性質であるのにもかかわらず、今まであまり理解されていなかった点である。

(c) 最適課金の徴収法

最適混雑課金による交通量パターンを実現する課金は、一つではない。その中から、課金収入を最小化するなど、別の基準を導入した研究も進められている(例えば、Hearn and Yildirim²⁷⁾, Stewart and Maher²⁸⁾)。

(d) 大規模ネットワークでの試算

限界費用課金が一般に最適課金であることを利用すれば、モデル内部での社会的最適状態は、比較的容易に計算できる。この性質を利用した大規模ネットワークへの最適課金の適用計算例として、円山²⁵⁾, Gentile *et al.*²⁹⁾がある。

(2) 次善(セカンド・ベスト)混雑課金

(a) 次善課金の分類例

一部地域のみでの課金方式にはリンク単位課金、コードン課金、エリア課金などさまざまな形式がありうる。この他、課金の時間変化を含むかなど分類軸は多い。一例として、DeCorla-Souza³⁰⁾やHau³¹⁾による分類法は参考になるだろう。

(b) 一般的な次善課金

Verhoef^{32), 33)}は、一般的なネットワークを対象にしたセカンド・ベスト課金の計算法について考察している。May and Milne³⁴⁾は、コードン方式、走行距離方式、所要時間方式、混雑応答式などのさまざまなセカンド・ベスト課金の結果を比較している。Zhang and Ge³⁵⁾は、限界費用と比例する課金という次善課金下での需要変動モデルを分析している。

(c) コードン課金: 都市空間モデル

Mun *et al.*^{36), 37)}は、都市経済学における都市空間モデルを用いて最適コードン課金を分析している(文³⁾, 第5章, 第6章)。Verhoef³⁸⁾は、同様なモデルに、住宅土地市場、労働供給市場を導入して次善の混雑課金を考察している。Chu and Tsai³⁹⁾は、Mun *et al.*³⁶⁾モデルを用いて、コードン課金の最適レベ

ル・位置決定問題を分析している。Ho *et al.*⁴⁰⁾ は、連続体モデルによるコードン課金の分析を示している。

(d) コードン課金: ネットワーク・モデル

ネットワークを明示した分析では、May *et al.*⁴¹⁾,⁴²⁾ は、仮想的なネットワークにおけるコードン課金のパフォーマンスを比較している。野杵, 秋山⁴³⁾, Akiyama and Noiri⁴⁴⁾, 秋山, 奥嶋⁴⁵⁾ は、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いたゾーン別料金設定について考察している。Yang *et al.*⁴⁶⁾, Zhang and Yang⁴⁷⁾ は、コードン課金の位置と課金額を決定する2段階最適モデルの定式化と GA による解法を示している。同様な研究は、Shepherd and Sumalee⁴⁸⁾, Sumalee⁴⁹⁾ にも見られる。Santos⁵⁰⁾ は、通常のコードン課金と二重コードンの効果を比較しており、多数の都市での比較分析⁵¹⁾,⁵²⁾ なども行っている。Akiyama *et al.*⁵³⁾, 文ら⁵⁴⁾ は、コードン課金と高速道路への混雑課金政策を比較検討している。Akiyama and Okushima⁵⁵⁾ は、現実的に設定可能な課金額は、連続値ではなく離散値であることに着目し、課金設定問題を組み合わせ最適化問題として分析している。Sumalee *et al.*⁵⁶⁾ は、行政担当者が決定するコードン課金領域と、最適領域などを比較している。Sumalee⁵⁷⁾ は、多重コードン課金設計の最適化を分析している。Shepherd *et al.*⁵⁸⁾ は単純な計算法で最適コードン課金を設計する方法などを分析している。

(e) エリア課金

一般にコードン課金は区域への流入のたび (per entry) に課金されるのに対し、エリア課金は1日単位で (per day) 区域内走行への課金がなされる。筆者ら⁵⁹⁾,⁶⁰⁾,⁶¹⁾ は、新たに提案した非加法コストを考慮したトリップ・チェーン型ネットワーク均衡モデルを用いて、エリア型課金とコードン型課金の比較分析を示している。その結果、適用地域において以下のことが成立することを明らかにしている。

- ・(次善の) 最適課金レベルは、エリア課金のほうがコードン課金よりも高い。
- ・(次善の) 最適課金時における社会的余剰は、エリア課金とコードン課金でほぼ等しい。または、前者がわずかに高い場合がある。

- ・(次善の) 最適課金時における料金収入は、エリア課金よりもコードン課金のほうが少ない。
- ・エリア課金よりもコードン課金のほうが社会的余剰関数の形状が鋭いため、慎重な料金設定が必要とされる。

なお、Maruyama and Harata⁵⁹⁾ は、ネットワーク均衡モデルの基礎となる Beckmann モデルのトリップ・チェーン型、非加法型モデルへの拡張、等価最適化問題としてのこれら3つのモデルの比較も提示している。Maruyama and Sumalee⁶⁰⁾ は非加法型モデルの変分不等式による再定式化、課金収入の再分配メカニズムを考慮した修正ジニ係数という指標の提案、課金区域の面積の変化の影響を分析している。円山⁶¹⁾ は、これらの研究の解説である。

(3) 2段階最適化問題とその応用

最適 (or 次善) 課金問題を、上位問題は課金レベルなどを決定変数とする問題、下位問題を各種ネットワーク・モデルとする2段階最適化問題は古くから研究されてきた。最近でも研究が進んでいる。

Chen and Bernstein⁶²⁾ は、ネットワーク課金設定問題について複数ユーザクラスの場合の拡張を示すとともに、いくつかの仮定を設けることで、この2段階の問題が、1段階の非線形最適化問題に置き換えることができることを示した。2段階最適化問題は、より一般的には、MPEC として定式化できる。Lawphongpanich and Hearn⁶³⁾ は、cutting constraint 法などで、MPEC として定式化された次善最適課金問題を解いている。Connors *et al.*⁶⁴⁾, Chiou⁶⁵⁾ も2段階最適化による課金の最適化の一分析例を示している。この項のほかで紹介する研究でも、2段階最適化の考え方を利用したものは多い。

3. 利用者の異質性・課金の公平性

課金のインパクトに関する公平性についての研究も歴史は古く、それとの関係も深い利用者の異質性のモデル化と含めて、最近の研究例を紹介する。

(1) 混雑課金の分配効果

Santos and Rojey⁶⁶⁾ は、混雑課金の分配インパクトについて、逆進的にも、累進的にもなりうることを示している。Bureau and Glachant⁶⁷⁾ は、パリ都市圏を対象にしたシナリオ分析により、課金インパクトの分配パターンは、交通量の削減レベルに依存すること、などを明らかにしている。Eliasson and Mattsson⁶⁸⁾ は、コードン課金の公平性への効果をストックホルムにおいてモデル分析している。Schweitzer and Taylor⁶⁹⁾ は、売上税の影響も考慮しながらも、混雑課金の分配効果を分析している。Yang and Zhang⁷⁰⁾ は、次善のネットワーク料金設定問題に、さまざまな公平性の制約を導入した。円山ら⁷¹⁾ は、課金の所得逆進性の問題と、課金収入によるその緩和策について、マルチクラス・ネットワーク・モデルを用いて分析している。

(2) 利用者の異質性

Yang and Huang⁷²⁾ は、時間価値の異質性を考慮したマルチクラス利用者均衡条件下での最適課金について、明快な整理を示している。まず、金銭単位の総所要時間の最小化を目的関数とすると、通常的全リンクへの限界費用課金原理を利用者の時間価値の期待値を用いて自然に拡張したものが、最適課金の一つになることである。一方、時間単位の総費用時間の最小化を考えると、一般には利用者クラス別に異なる課金が最適課金とみなせること、などである。

関連した研究も、Yin and Yang⁷³⁾、Zhang *et al.*⁷⁴⁾ らによって引き継ぎなされている。特に、Clark *et al.*⁷⁵⁾ は、マルチクラス利用者均衡下での課金について、需要変動型で時間単位で考えると最適課金が存在しないことがある点などを示している。また、Yang and Zhang⁷⁶⁾ は、混合均衡 (mixed equilibrium) 下における無名性の性質をもつ混雑課金の存在を明らかにしている。

Engelson and Lindberg⁷⁷⁾ 時間価値の異質性を考慮したネットワーク分析を展開しており、Han and Yang⁷⁸⁾ マルチクラス・多基準モデルにおける課金の効率性について Price of Anarchy という概念で分析している。Mahmassani *et al.*⁷⁹⁾、Lu *et al.*⁸⁰⁾、Lu *et*

*al.*⁸¹⁾ は、動的配分への適用に向けた、利用者の異質性を考慮したモデル構築を試みている。

4. 動的モデル

ボトルネック・モデルを代表とした交通混雑の動学モデルに対する分析も進められている。

(1) Within Day 動学

動的課金の議論は、このテーマで、現在最も研究が盛んな分野の一つである (Friesz *et al.*⁸²⁾; Chow⁸³⁾). 動的課金の設計問題^{84),85)} の研究も進められており、Shen and Zhang⁸⁶⁾ は、動的システム最適と最適課金の関係などを分析している。Li *et al.*⁸⁷⁾ は、さまざまな要素を組み込んだ動的モデルで、時間依存課金などの多目的最適問題を分析している。Teodorović and Edara⁸⁸⁾ は、動的計画法とニューラルネットワークを用いた、リアルタイム課金法について分析している。

(2) 動的シミュレータ

de Palma *et al.*⁸⁹⁾ は、出発時刻選択も考慮した動的シミュレータによる課金分析を示している。de Palma *et al.*⁹⁰⁾ は、同じ動的シミュレータを用いて、一部の課金対象リンクを混雑させないような課金設定 (サード・ベスト課金) の分析を行っている。この他、パリ都市圏⁹¹⁾ への適用なども報告されている。

(3) 長期的時間変化課金 (Day-to-Day など)

Szeto and Lo⁹²⁾、Szeto and Lo⁹³⁾、Lo and Szeto⁹⁴⁾ は、長期のネットワーク改良と課金戦略について分析している。Sumalee⁹⁵⁾ も混雑課金の最適導入パスを考察している。長江⁹⁶⁾、Nagae and Akamatsu⁹⁷⁾ は、利潤最大化を基本目的とした動的な料金更新問題を分析している。

正確な需要関数の情報なしに、試行錯誤的に課金額を変更するという課金システムについての研究も、Yang *et al.*⁹⁸⁾ をはじめとして、数多くされている^{99), 100), 101), 102)}。また、Day-to-Day の課金変更戦略も

研究されている (例えば, Friesz *et al.*¹⁰³⁾, Yang *et al.*¹⁰⁴⁾).

5. 課金の受容性とその向上施策

課金の導入に対して, 住民・関連主体が反対することは, 古くから知られたこの政策の根本的な問題の一つであった。この政策の受容性に関連した研究も大変盛んである。

(1) 受容性研究

Schuitema and Steg¹⁰⁵⁾ は, 課金収入の分配が, 課金政策の受容性に与える影響を体系的に分析している。このほか, 受容性, 課金の認知に関する研究は数多く, 最近の研究だけリストしても, Jaensirisak *et al.*¹⁰⁶⁾, Podgorski and Kockelman¹⁰⁷⁾, Harrington *et al.*¹⁰⁸⁾, Schade and Baum¹⁰⁹⁾, Jou *et al.*¹¹⁰⁾ が挙げられる。

国内では, 藤井¹¹¹⁾ が, 課金の受容意識を高める広報のあり方に関する心理実験のひとつの結果を示している。また, 北村ら¹¹²⁾ は, 東京への混雑課金導入に際しての物流関係者の問題認識の構造化を試みている。

(2) パレート改善混雑課金

課金収入の還元を前提とせずともすべての利用者の一般化交通費用を減少させることができる課金方式 (パレート改善混雑課金) についての研究も進められている。Daganzo and Gracia¹¹³⁾ は, 課金と割当 (rationing) 制の組み合わせによるパレート改善混雑課金について単一ボトルネックを対象に分析している。早崎, 赤松¹¹⁴⁾ は, Daganzo モデルの一般のネットワーク上での経路選択行動を対象にした分析フレームを提示している。Nakamura and Kockelman¹¹⁵⁾ は, San Francisco Bay Bridge を対象に Daganzo モデルの実証研究を試みている。田中, 河野¹¹⁶⁾ は, 混雑課金と道路投資の実施によりパレート改善が生じる条件を分析している。

(3) クレジット型・デポジット型混雑課金制度

課金政策の受容性の課題に対し, DeCorla-Souza¹¹⁷⁾

は, FAIR レーンの仕組みを提案・解説している。FAIR レーンは, 道路区間を「高速レーン」と「通常レーン」に区分する。「高速レーン」では, 動的に変化する課金がされる。その一方で, 「通常レーン」を走行する車両は, 同時刻の課金額に基づくクレジット (credit) が, 補償されるという仕組みである。このクレジットを累積させることで, 課金レーンの料金や, 公共交通機関などの料金として利用することができる仕組みである。この他, DeCorla-Souza は, FAST マイル制度¹¹⁸⁾ など, さまざまな課金制度を提案している。

また, クレジット型混雑課金という政策も提案され, 実都市圏での分析も進められている^{119), 120), 121)}。この課金システムは, 対象都市圏で登録された車両の所有者に, 月単位で交通補助金がクレジットとして支給され, 利用する道路区間の混雑外部不経済に応じた額が, クレジットから差し引かれていくという仕組みである。混雑課金の収入総額が, 車両保有者に均等に分配され, 課金の一部を相殺しているとみなすことができる。

日本では, 駐車デポジットシステムと呼ぶ新たな課金政策が提案されている¹²²⁾。これは, 課金対象地域に流入する全車両に対し, 一時的に課金を徴収するが, 地域内で買い物また駐車場に駐車したドライバーには, それらの代金の一部に充当するように, 課金分から返金が行われるという仕組みである。大規模なモデルを用いた導入評価も行われている¹²³⁾。

このほか, 吉村, 奥村¹²⁴⁾も課金の還元策についてモデル分析している。Parry and Bento¹²⁵⁾も還元策のひとつの経済モデルを提示している。

6. 関連主体へのインパクト・行動分析

(1) 発展型行動モデルの応用

混雑課金による活動・交通行動の変化の分析¹²⁶⁾, ファジィ交通行動モデルによる分析例¹²⁷⁾もある。Ozbay and Yanmaz-Tuzel¹²⁸⁾は, 動的課金下での行動結果から得られる時間価値について分析している。Sumalee *et al.*¹²⁹⁾は, プロビット型確率均衡モデルの場合の課金設定問題について分析している。金森

ら¹²³⁾は、活動選択を含めた多次元選択のモデルによる課金評価の例を示している。課金に対する人の行動変化の研究は、相当の蓄積がされているため、最近では、次節で紹介する、物流関連主体の行動変化、立地行動変化などの研究も盛んである。

(2) 物流へのインパクト

混雑課金による物資流動、貨物車の移動への影響が研究されるようになったのは、ごく最近のことである。

まず、日本国内では、兵藤ら¹³⁰⁾は、配送計画問題によるシミュレーションにより混雑課金が物流配送行動に与える影響を分析している。細谷ら¹³¹⁾は、出発時刻やトラックサイズ選択等の企業行動を考慮したモデルを構築し、混雑課金の政策評価例を示している。古川ら¹³²⁾は、課金による貨物車の積み替え行動の変化を物資流動調査のデータから構築した離散選択モデルで分析している。谷口ら¹³³⁾は、貨物車の配車配送計画と交通流シミュレーションとを組み合わせたモデルによる政策分析の一例として課金政策のシナリオ分析を行っている。

海外では、Puckett *et al.*¹³⁴⁾、Hensher and Puckett¹³⁵⁾が混雑課金によるサプライチェーンの変化を述べ、Hensher and Puckett¹³⁶⁾は、SP調査を基にした選択モデルによる距離ベース課金の物流への影響を調べている。また、Holguín-Veras¹³⁷⁾、Holguín-Veras *et al.*¹³⁸⁾は、時間帯別料金の貨物配送への影響を分析し、Friesz *et al.*¹³⁹⁾は、動的課金の貨物輸送への影響などを分析している。事例としては、欧州の貨物車走行への課金制度に関する研究も発表されつつある¹⁴⁰⁾。

(3) エージェント・シミュレーション

エージェント・シミュレーションによる課金政策分析の研究も Takama and Preston¹⁴¹⁾、Zou and Levinson¹⁴²⁾などにより行われている。

7. モデル化要素・概念の拡大・展開

(1) 空間経済へのインパクト

課金による土地利用・都市地域経済へのインパクトも重要な視点である。de Palma and Lindsey¹⁴³⁾は、一般均衡モデルで利用者の異質性を考慮した混雑課金分析を示している。Sato and Hino¹⁴⁴⁾は、SCGEモデルによる東京都市圏への混雑課金政策の評価を示している。Anas and Rhee¹⁴⁵⁾、¹⁴⁶⁾は、都市のスプロールを抑止する手段として、混雑課金と都市成長境界線 (Urban Growth Boundary) 政策を比較している。de Palma *et al.*¹⁴⁷⁾は、一つの経済モデルを用いた、課金政策と課金収入の利用法の比較分析を示している。

(2) オークション

Teodorovi *et al.*¹⁴⁸⁾は、オークション型混雑課金という、ボトルネック通行権取引制度¹⁴⁹⁾、¹⁵⁰⁾に似た制度を提案している。ボトルネック通行権取引制度は、特定のボトルネックを特定の時刻のみに通行できる権利を道路管理者が設定・発行し、その通行権を道路利用者が市場で自由に売買取引するものである。Ubbels and Verhoef¹⁵¹⁾は、道路免許業務のオークションを分析している。

(3) ゲーム理論の応用

Sandholm¹⁵²⁾、¹⁵³⁾、¹⁵⁴⁾による一連のポテンシャル・ゲーム理論の混雑課金への応用も最近注目されている。混雑課金のゲーム理論の基礎づけ¹⁵⁵⁾の研究もある。Joksimovic *et al.*¹⁵⁶⁾は、ゲーム理論を用いて、効用最大化、課金収入最大化、社会的余剰最大化の3つの政策目標が与える影響を分析している。Wie¹⁵⁷⁾も動的混雑課金問題を、Stackelberg ゲームとして定式化して分析を行っている。

(4) その他の展開例

Li *et al.*¹⁵⁸⁾は、信頼性を考慮した最適課金、Arnott¹⁵⁹⁾は、規模の経済を考慮した混雑課金を分析している。Hamdouch *et al.*¹⁶⁰⁾は、複数交通手段均衡で、hyperpathなどを考慮した乗客配分モデルを利用した場合の混雑課金を分析している。Kim¹⁶¹⁾は、料金所 (Toll Plaza) の最適設計問題の一例を示している。

Zhang *et al.*¹⁶²⁾ は、線上市場における通勤パターンと最適混雑課金と駐車料金の関係を分析している。Ubbels and Verhoef¹⁶³⁾ では、課金導入による都市間の競争の要素も分析に導入されている。Xiao *et al.*¹⁶⁴⁾ は、有料道路運営主体間の競争の分析を示している。Shepherd¹⁶⁵⁾ は、CO2 排出モデルの複雑さが、最適課金の設定レベルに与える影響を精査している。Verhoef and Rouwendal¹⁶⁶⁾ は、課金と容量拡大、ファイナシング、Verhoef¹⁶⁷⁾ は、フランチャイズ制の分析である。課金の効率性限界の研究も盛んである (Ho *et al.*¹⁶⁸⁾, Xiao *et al.*¹⁶⁹⁾). Hyman and Mayhew¹⁷⁰⁾ による単純化した都市モデルによる最適課金分析, Hyman and Mayhew¹⁷¹⁾ による放射環状道路を想定した仮想都市に対する橋の通行料金最適化に関する分析も興味深い。

8. 事例

Prud'homme and Bocarejo¹⁷²⁾ は、ロンドンの混雑課金政策について運営費用がかかりすぎる点などの問題点を指摘し、議論をよんだ。ロンドンの課金政策に関する研究は多く^{173),174)}、小売業の売上高への影響^{175), 176)}、買い物頻度の変化¹⁷⁷⁾ も分析されている。書籍¹⁷⁸⁾ も刊行されているし、Transport for London の Web ページにも豊富な情報がある。

ロンドンとシンガポールの課金政策の比較研究¹⁷⁹⁾ も発表されている。シンガポール¹⁸⁰⁾、コペンハーゲン¹⁸¹⁾、米国の事例比較¹⁸²⁾ なども、ある。Hau による導入事例の整理¹⁸³⁾ は事例が古く更新されていないのが残念である。de Palma *et al.*¹⁸⁴⁾ にも事例の分類表がある。Santos⁸⁾ の Part 2, Small and Verhoef¹³⁾ 4.3 にもシンガポール、ノルウェー、英国、米国の事例が紹介されている。

和文の事例紹介・研究としては、ごく最近のものではストックホルムとオスロの政策の紹介¹⁸⁵⁾があり、ロンドンの導入事例の紹介も数え切れない (一例として太田¹⁸⁶⁾)。

事例研究は、学術論文・書籍として出版されることには既に情報が古くなっていることも多く、最新の情報収集は、Wikipedia の関連項目、

(http://en.wikipedia.org/wiki/Congestion_pricing) 及びその参照リンクなどをたどったほうが、まとまっていて便利な場合もある。

9. 今後の研究展望

(1) 最適 (ファースト・ベスト) 課金

(a) 限界課金原理の拡張

(静学的) 限界費用課金の拡張は、ネットワークの考慮、利用者行動の一般化、土地利用モデルとの統合などで、一応の一般化・拡張は済んだと思われる。適切に設計されたモデルであれば、全リンクへの限界費用課金は、モデルと整合的な社会的余剰をもたらすという意味での最適課金といえるだろう。

現実には交通量に依存する可変型の課金を、全リンクに課金することは容易ではなく、この制度は実用的ではないと思われるかもしれない。ただし、任意のモデルについて、そのモデル内部で実現しうる社会的余剰の最大値という重要な参照点を計算できるという意義は大きい。記述的に豊かなモデルであっても、規範的な視点も導入できるわけである。

この他、動的限界費用理論¹⁸⁷⁾ との統合、行動モデル以外の確率要素の導入の影響など、限界費用課金理論には、まだ幾つか研究課題は残されていると思われる。

限界費用課金の考え方の実用的な価値は少ないかもしれないが、基本的な定理の証明は、数値計算を相当数繰り返しても得られない、一般的な価値があると、私は信じている。

(b) 最適課金理論の応用

前項の最適課金の一般化は、交通経済学の基本定理の一つである Self-Financing (Mohring-Harwitz) 定理¹⁸⁸⁾ の一般化にもつながっていくと予想される。このほか、Braess のパラドックス¹⁸⁹⁾ として交通工学の研究者にはよく知られた交通容量のパラドックスの生起条件の一般化もできると思われる。固定需要配分の場合、最適課金が課されていれば、交通投資による総走行時間の増加というパラドックスは生じないのだろう。同様に、(需要変動を含めた) 任意のモデルであっても、最適課金が課されていれ

ば、交通投資による社会的余剰の減少というパラドックスは生じないのであろう。ただし、竹内⁴⁾は、最適課金が課されていてもパラドックスは生じうる」と主張しており、今後精査をしておきたい。

これらの定理・性質の動学化も研究課題である。また、一口に、動的といっても、Within-day ほか、Day-to-Day, Week-to-Week, Year-to-Year の動学など、発展的要素は多い。

(2) 次善課金 (セカンド・ベスト)

(a) コードン課金

コードン課金については、通常交通モデルで評価が容易なこともあり、相当量の研究がされ尽くされた感がある。課金の目的を多目的最適化問題に拡張した場合の分析の蓄積、GA をベースに開発されている課金位置・課金レベルの最適化解決法の実都市圏への適用の蓄積、簡略解決法の開発などが、今後の課題としてありうる。

また、一口に、コードン課金といっても、流入のたびに必ず課金されるのか、1日あたりの課金回数の上限が決まっているのか、流入だけでなく流出時も課金されるのか、といった微妙な違いもある。現実都市での適用でも、都市によって、これらの違いが生じている。それらの違いが適切なのか、都市の特性にあっているのかどうか、分析する実務的価値はあるかも知れない。

(b) エリア課金

コードン課金とエリア課金について、今までは、一見ほぼ類似した政策と思われてきた。エリア課金政策の特徴の本質を指摘し、それらを比較するための simple & fundamental な分析手法の一つを提案した Maruyama & Harata⁵⁹⁾, Maruyama & Sumalee⁶⁰⁾ 論文の価値は少なくないと筆者は思っている。この研究の方法論は、トリップ・チェーン単位の直接需要関数を定めるという大胆な仮定に基づいている。しかし、その仮定に基づくフレームの中では、整合的な政策分析が可能であり、現実政策にも有用な結果が導けると筆者は信じている。

コードン課金に対して行われてきた研究とほぼ同じ視点での研究が、この方法論の元で構築できる。

例えば、GA をベースに開発されているコードン課金位置・課金レベルの最適化解決法のエリア課金への応用のための改良は容易だろう。また、この方法論は、国内であれば、道路交通センサスのマスターデータがあれば、任意の都市圏に適用できる。したがって、放射環状型、格子型といった、さまざまな道路ネットワークの形状が、最適混雑課金の設定に与える影響について、実都市のデータを用いて精査することも可能である。また、ピストン型トリップ・チェーンが多いのかどうか等の交通需要構造の影響も、分析可能である。

また、都市の空間的構造と関連付けて、望ましい課金方式を分析した先行研究は少ない。Mun *et al.*³⁷⁾, 文³⁾ (第6章) は、都市空間モデルを用いた分析から、コードン課金が相対的に有効になる条件を以下のようなものであることを明らかにしている。都市の空間構造が単一中心構造に近い、人口密度勾配が急である、トリップ需要の弾力性が小さい、道路容量が多い、という条件である。しかし、この分析は、コードン課金と最適課金を比較したもので、コードン課金とエリア課金のどちらを選択すべきかという問題には答えていない。都市空間構造の条件とコードン課金とエリア課金の優位特性の関係を分析するのは興味深い研究課題と考えられる。

筆者らの研究^{59), 60)}の方法論の大胆な仮定のもとでは、エリア課金で一旦課金額を支払ってしまえば、この後区域内を自由に走行できるので、需要が増えるといった現象は、必ずしも適切には分析できていない。ただ、そもそも社会現象を対象とした完全なモデルなどありえず、学術研究は切り口の鮮やかさで勝負すべきと筆者は考えている。単純でもその前提の枠内では、論理整合したモデルを構築するというのは、一つの重要なアプローチであろう。その意味では、ネットワークを明示しない都市空間モデル(都市解析的アプローチ)でのエリア/コードン課金の比較も有用かもしれない。解析的な比較結果の提示が可能になる場合もあるかもしれない。

(3) 動的な課金レベル・方式の更新問題

ロンドンで実施されている混雑課金政策は、導入

当初の課金領域から拡大がされた。一般的に、小規模な地域で先行的に課金を実施し、その後対象地域を拡大するという戦略はありうる。しかし、このような動的な課金政策の望ましい更新タイミングなどについて分析はまだ少ない。また、課金対象領域のみならず、料金レベル、さらには、課金制度（コードン方式からエリア方式への変更）などの変更オプションも考えられる。一般に最適な料金レベルを政策導入当初から決定するためには、利用者の行動変化に関する完全な予測モデルが必要であり、現実には困難である。関連して、試行錯誤的に料金レベルを変更することで最適な料金レベルを達成することを目指した研究もある⁹⁸⁾。しかし、料金レベルのみならず、課金領域、課金制度の変更を含めた試行錯誤的な実行についての研究も求められよう。例えば、システム運営コストが比較的小さいコードン方式を最初に導入し、導入結果の交通状況を元に交通需要の特性を吟味し、運営コストが比較的大きなエリア方式に変更し、課金地域も拡大するというような課金政策の動的な更新戦略についての理論的・実証的な分析の重要性は高い。

(4) 物流へのインパクト

混雑課金の政策分析に限らず、交通政策の評価手法全般に当てはまることであるが、人の動き（旅客交通）のモデルは、相当洗練化されたものを構築しておきながら、物流のモデルは結局、貨物車の固定OD表ベースであることが多い。これは、既存モデルの多くは、課金政策などの交通政策による物流関連主体の行動変化の一部しか扱っていないことを意味する。

混雑課金政策に対する物流関連の変化は、関わる主体が多数であり、旅客交通よりも多様な変化が生じる。旅客交通では生じない変化だけ挙げても、トラックサイズの変更、配送頻度の変更、積み替え行動の変化、配送地域の変更、共同集配送の実施、物流拠点間流動の変更、発注頻度の変更、在庫管理の変更、運送業者の変更（配送手段の変更）、配送センター・倉庫・デポの位置の変更（新設、変更、削除）及びそれと同時の配送地域の変更、物流拠点（流通セ

ンター）の位置の変更（新設、変更、削除）、工場・倉庫・店舗の立地変更、など数え切れない。

台数単位の貨物車の移動の根源になっているのは、トン単位の物資流動であり、さらに、円（orドルなど）単位の商流（商取引流通）が背後にありうる。課金のインパクトをよりの確に表現するためには、これらのモノとカネの動きも分析する必要があるのだろう。筆者も課金分析を目的に、一部試みているが、実際のところ、これらをよりの確に表現しようとする、モデルが大規模化、複雑化しすぎることを防ぎきれない。また、政策シナリオ分析という単なる計算結果の提示以上の一般的な知見・研究結果を導くのが難しくなるようにも感じている。物流にかかわる主体の行動をすべてマイクロ・シミュレーションで表現すれば、一見、問題は解決できるようにも思えるが、システム全体としての論理整合性を保つことは難しいなどの問題もあろう。計算のフロー・チャートを構築しても、収束の根拠が曖昧な *heuristic convergence* に依存した分析技術は、一般には適切な数理モデルとはいいいにくいという考え方もある。この点では、サプライ・チェーン・ネットワーク均衡モデル¹⁹⁰⁾などの研究蓄積の応用も期待される。

安易に個別要素を複雑、精緻化することよりも、貨物車の移動のトリップ単位、あるいはトリップ・チェーン単位での需要関数を大胆に想定し、その弾力性を仮定したモデルのほうが有効となる可能性もある。仮定する弾力性を、既存の複数時点のデータなどから入念にチェックし、また、政策分析においても弾力性の感度分析を丁寧に行うという姿勢でいたほうが、作業量は少なく、かつ解釈しやすい分析結果を提示できるかもしれない。もちろん、個別の主体の行動の丁寧な分析も不可欠であるが、集計量に対する弾力性を（物流関連の）個別の主体の行動結果の集積から、近似して求めてやるというような研究も価値があるかもしれない。

(5) 異分野融合研究

本稿でいくつか紹介した単純化した都市モデルによる最適課金分析は、「都市解析」の分野との関連

が出てくるかもしれない。動的なモデリングに関しては、(既存の交通工学の研究者よりも事実上国内での認知度が高い)「渋滞学」¹⁹¹⁾との共同研究による展開がありうるかもしれない。「ネットワーク科学」¹⁹²⁾の都市間交通の課金分析の適用などもありうる。

混雑課金政策の数理分析手法については、その基礎理論の構築に有用な役割を果たした経済学にとどまらず、物理学など他分野の視点も学び、それを発展させることが有益かもしれない。その成果は、土木工学だけにとどまらず、さまざまな科学分野への応用につながる可能性がある。

(6) クレジット型・デポジット型課金制度

混雑課金は、利用者に課金という追加的な負担を強いるので、通常、利用者のメリットは少ない。それでも、導入の必要性が主張されるのは、利用者の負担増分だけの課金収入が新たに生み出され、社会全体で見れば、導入後に、混雑緩和などのメリットが生じうると考えられるためである。

課金収入を如何に分配するかが、政策の導入の成功のカギの一つであり、これは、古くから理解されていたポイントと思われる。最近も 5.(3)で紹介したように、クレジット型課金、FAIR レーン制度、駐車デポジット制度など、課金と課金収入の再配分に着目した制度の提案、分析手法の進展がなされている。

本章の最後に、筆者が最近提案し、現在も研究を進めている新たな二つの課金制度の紹介をしたい。

第一の制度は、既存の有料道路、ボトルネックを有する一般道路、あるいは混雑の激しい鉄道路線を想定して、円山¹⁹³⁾によって提案されたものである。

ピーク・ロード・デポジット制度 (PLD, 仮称)

ピーク時の料金値上げを実施するが、その値上げ分を利用者にデポジットとして付与し、そのデポジット額は、そのまま翌日以降のオフ・ピーク利用時の料金の割引に使用できるとする。

この制度は、利用可能時間を限定しながらも、料金値上げ分を利用者に完全に還元することで、受容

性が高いプライシング施策を目指している。同時に、ピーク時利用者について、1 週間のうち数日のみをオフ・ピーク利用に転換してもらうことで、ピーク時の混雑緩和を目指す施策である。ETC や IC カード型乗車券の仕組みを少し改良すれば、既存の交通施設を利用しながら、すぐに実装できる点の特徴である。

第二の制度は、この制度と原理的には類似しているが、都心部の限定された地域への適用を念頭においた制度である。まず、既存のコードン/エリア課金と同様に、都心部に課金対象地域を設定する。その課金区域を目的地とする公共交通機関は整備されており、課金区域の外で自動車からその公共交通機関に乗り換えることのできる Park & Ride (P&R) 駐車場も整備されるものとする。そして、以下のような課金・デポジット制度を設計する¹⁹⁴⁾。

エリア型課金デポジット制度 (APD, 仮称)

課金区域に流入する車両に、流入毎 (or 1 日単位) に課金を行う。ただし、その課金の全額または一部は、その車両 (もしくは個人に) デポジットされ、その額は、翌日以降、対象地域流入時の公共交通機関、P&R 駐車場の料金の一部に充当できる。

この制度は、駐車デポジット制度の考え方と一部類似するところがあるが、複数日での課金・返金を行っている点が最大の違いである。各利用者がトータルで支払う課金額はデポジットによって異なることになる。利用者の金銭負担増加を限定しながら、都心部の混雑の緩和を期待する施策である。

円山¹⁹³⁾、円山ら¹⁹⁴⁾は、これら 2 つの制度を評価するための手法として、1 週間単位の時空間ネットワーク均衡モデルを新たに提案し、分析フレームの一例も示している。

これらの制度の設計においては、シンガポールの都心課金システムのように、数ヶ月ごとに、前期間の区域内の平均速度を元に、時間帯別の料金を変更するというルールが有効に機能しうる。PLD であれば、ピーク時に混雑が発生しない程度まで、APD であれば、区域内に混雑が発生しない程度に、課金額

を値上げするという考えである。かなりの高額な値上げになる可能性もあるが、デポジットとして、利用者に一部を還元する仕組みを作ることによって、受容性も高まると考えられる。この試行錯誤的な料金設定の理論的な裏づけなども研究の余地がある。

さらに、最適課金である全リンクへの限界費用課金と比べて、本制度は次善課金の一種類といえる。この場合、最適課金による社会的余剰の最適値と比較して、本制度がどの程度効率的といえるのかどうか、限界があるのかどうかを、実証的に明らかにしておく価値は高いと思われる。

これらのモデル分析は重要である一方で、未だ実行されたことのない政策であるので、理論分析をいくら積み重ねても、想定した仮定に依存した結論しか導けない可能性も高い。その意味では、社会実験のような、実践的研究を行う意義も大きく、日本発の新たな課金制度の提案、実用化につながる可能性もある。

繰り返すが、このシステムは、ETCやICカード型乗車券の仕組みを少し改良すれば、既存の交通施設を利用しながら、すぐに実装できる点が特徴である。機会があれば、実用化の実験、利用者の受容性の分析および問題点・課題の抽出などに取り組んでいきたい。

10. おわりに

本稿では、混雑課金政策に関する最近の研究レビューと、筆者なりの研究展望を述べた。

日本では古くから有料道路制度が導入され、高速道転換率モデルなど道路課金制度に対する分析手法の実務的な蓄積は少なくないと思われる。最近でも、時間帯別料金割引実験、都市高速道路の料金制度の均一料金制から対距離料金制へ変更検討や、ETCマイレージ制度、ガソリン価格高騰・急落による影響など、価格変化に伴う交通需要の変化について、貴重なデータが得られる機会が多い。また、もう繰り返し主張されつくされたことだが、それらのデータの観測技術も進化を続けている。本研究で紹介した論文も一部参考として、既存改良の分析手法の改良、

洗練化が行われ、さらには世界に向けたアピールをしていくことも求められよう。

土木計画学という学問分野の一つの望ましい姿は、理論・実証・事例・実践のさまざまなアプローチの研究者が、互いに偏見・先入観を持たずに切磋琢磨し、広い視点からの活動が継続的に行われていることであろう。混雑課金の研究は、そのためのひとつの共通の切り口となる可能性があり、本稿がその一助となれば幸いである。

謝辞: 招待論文の執筆の機会を頂いたことを大変感謝しております。また、筆者の研究活動に対しては、この限られた欄には記しきれない数の、多くの先生方・同輩の若手研究者の方から、ご助言・叱咤・激励をいただいております。重ねて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 円山琢也: ネットワーク均衡モデルを応用した都市圏レベルの交通政策分析, 博士学位論文, 東京大学 第16089号, 2.9節ほか, Web上で全文Download可, 2004.
- 2) Verhoef, E., Bliemer, M., Steg, L. and van Wee, B. (eds.): *Pricing in Road Transport: A Multi-Disciplinary Perspective*, Edward Elgar Publishing, 2008.
- 3) 文世一: 交通混雑の理論と政策 — 時間・都市空間・ネットワーク, 東洋経済新報社, 2005.
- 4) 竹内健蔵: 都市交通ネットワークの経済分析, 有斐閣, 2006.
- 5) 關哲雄, 庭田文近 (編著): *ロード・プライシング—理論と政策*, 日本交通政策研究会研究双書 23, 勁草書房, 2007.
- 6) 山田浩之(編): 交通混雑の経済分析—ロード・プライシング研究, 日本交通政策研究会研究双書 15, 勁草書房, 2001.
- 7) Yang, H. and Huang, H. J.: *Mathematical and Economic Theory of Road Pricing*, Elsevier, 2005.
- 8) Santos, G. (ed.): *Road Pricing: Theory and Evidence, Research in Transportation Economics*, Vol. 9, 2004.
- 9) Lawphongpanich, S., Hearn, D.W. and Smith, M.J.(eds.): *Mathematical and Computational Models for Congestion Charging*, Springer, 2006.
- 10) Schade, J. and Schlag, B. (eds.): *Acceptability of Transport Pricing Strategies*, Elsevier Science, Oxford, 2003.
- 11) Jensen-Butler, C., Sloth, B., Larsen, M. M., Madsen, B. and Nielsen, O. A. (eds.): *Road Pricing, the Economy and the Environment*, Springer-Verlag, 2008.
- 12) de Palma, A., Lindsey, R. and Proost, S. (eds.): *Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport Sector, Research in Transportation Economics*, Vol. 19, Elsevier, 2007.
- 13) Small, K.A. and Verhoef, E.T.: *The Economics of Urban Transportation*, Routledge, 2007.
- 14) Lindsey, R.: Do economists reach a conclusion on road

- pricing? The intellectual history of an idea, *Econ Journal Watch*, Vol. 3, No. 2, pp. 292-379, 2006.
- 15) 大石泰彦 (編, 監訳): 限界費用形成原理の研究 I, 勁草書房, 2005.
 - 16) Hau, T.D.: Economic fundamentals of road pricing: a diagrammatic analysis, Part I - Fundamentals, *Transportmetrica*, Vol.1, No.2, pp. 81-117, 2005.
 - 17) Hau, T.D.: Economic fundamentals of road pricing: a diagrammatic analysis, Part II - Relaxation of assumptions, *Transportmetrica*, Vol.1, No.2, pp. 119-149, 2005.
 - 18) 桑原雅夫: 渋滞現象と需要解析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21(1), pp. 1-9, 2004.
 - 19) Lo, H. K. and Szeto, W.Y.: Road pricing modeling for hyper-congestion, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 705-722, 2005.
 - 20) Yang, H., Meng, Q. and Hau, T.D.: Optimal integrated pricing in a bi-modal transportation network, in Lee, D.-H. (ed.) *Urban and Regional Transportation Modeling: Essays in Honor of David Boyce*, Chapter 8, pp. 134-156, Edward Elgar Publishing, 2004.
 - 21) Ying, J.Q. and Yang, H.: Sensitivity analysis of stochastic user equilibrium flows in a bi-modal network with application to optimal pricing, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, Issue 9, pp.769-795, 2005.
 - 22) Bellei, G., Gentile, G. and Papola, N.: Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, Issue 9, pp. 779-798, 2002.
 - 23) Ying, J.Q.: Optimal congestion pricing design methods in integrated location/transport models, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 153 - 165, Elsevier, 2007.
 - 24) Yildirim, M.B. and Hearn, D.W.: A first best toll pricing framework for variable demand traffic assignment problems, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, Issue 8, pp. 659-678, 2005.
 - 25) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: Nested Logit 型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20 (3), pp.555-562, 2003.
 - 26) Maher, M., Stewart, K. and Rosa, A.: Stochastic social optimum traffic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, Issue 8, pp. 753-767, 2005.
 - 27) Hearn, D.W. and Yildirim, M.B.: A toll pricing framework for traffic assignment problems with elastic demand, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 9, pp. 135-145, Kluwer Academic Publishers, 2002.
 - 28) Stewart, K. and Maher, M.: Minimal revenue network tolling: system optimisation under stochastic assignment with elastic demand, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 45 - 57, Elsevier, 2007.
 - 29) Gentile, G., Papola, N. and Persia, L.: Advanced pricing and rationing policies for large scale multimodal networks, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 612-631, 2005.
 - 30) DeCorla-Souza, P.: Recent U.S. experience: Pilot projects, in Santos, G. (ed.) *Road Pricing: Theory and Evidence, Research in Transportation Economics*, Vol. 9, pp. 283-308, 2004.
 - 31) Hau, T.D.: Congestion charging mechanisms for roads, Part I - Conceptual framework, *Transportmetrica*, Vol.2, No.2, pp. 87-116, 2006.
 - 32) Verhoef, E. T.: Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 32, No. 3, pp. 281-310, 2002.
 - 33) Verhoef, E. T.: Second-best congestion pricing in general networks: Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, Issue 8, pp.707-729, 2002.
 - 34) May, A. D. and Milne, D. S.: Effects of alternative road pricing systems on network performance, *Transportation Research Part A*, Vol. 34, Issue 6, pp. 407-436, 2000.
 - 35) Zhang, H. M. and Ge, Y. E.: Modeling variable demand equilibrium under second-best road pricing, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, Issue 8, pp. 733-749, 2004.
 - 36) Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K.: Optimal cordon pricing, *Journal of Urban Economics*, Vol. 54, No. 1, pp.21-38, 2003.
 - 37) Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K.: Optimal cordon pricing in a non-monocentric city, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 723-736, 2005.
 - 38) Verhoef, E.T.: Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city, *Journal of Urban Economics*, Vol. 58, No. 3, pp. 367-388, 2005.
 - 39) Chu, C.-P. and Tsai, J.-F. The optimal location and road pricing for an elevated road in a corridor, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 5, pp. 842-856, 2008.
 - 40) Ho, H.W., Wong, S.C., Yang, H. and Loo, B.P.Y.: Cordon-based congestion pricing in a continuum traffic equilibrium system, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 813-834, 2005.
 - 41) May, A.D., Milne, D.S., Shepherd, S.P. and Sumalee, A.: Specification of optimal cordon pricing locations and charges, *Transportation Research Record*, No. 1812, pp. 60-68, 2002.
 - 42) May, A. D., Liu, R., Shepherd, S. P. and Sumalee, A.: The impact of cordon design on the performance of road pricing schemes, *Transport Policy*, Vol. 9, No. 3, pp. 209-220, 2002.
 - 43) 野村貴博, 秋山孝正: 遺伝的アルゴリズムによる都市道路網ゾーン別混雑料金の設定, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18 (3), pp. 455-462, 2001.
 - 44) Akiyama, T. and Noiri, T.: The analysis of zonal congestion pricing on urban network, *Selected Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, 2003.
 - 45) 秋山孝正, 奥嶋政嗣: 都市交通政策としてのゾーン別混雑料金設定-遺伝的アルゴリズムを用いた分析-, 交通学研究/2002年研究年報(通巻 46号), pp. 201-210, 2003.
 - 46) Yang, H., Zhang, X. and Huang, H.J.: Determinations of optimal toll levels and locations of alternative congestion pricing schemes, in Taylor, M.A.P. (ed.) *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, the 15th ISTTT, pp. 519-540, Adelaide, Australia, 2002.
 - 47) Zhang, X. and Yang, H.: The optimal cordon-based network congestion pricing problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, Issue 6, pp. 517-537, 2004.
 - 48) Shepherd, S. P. and Sumalee, A.: A genetic algorithm based approach to optimal toll level and location problem, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No. 2, pp. 161-179, 2004.
 - 49) Sumalee, A.: Optimal road user charging cordon design: a heuristic optimization approach, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 377-392, 2004.
 - 50) Santos, G.: Double cordon tolls in urban areas to increase social welfare, *Transportation Research Record*, No. 1812, pp. 53-59, 2002.
 - 51) Santos, G., Newbery, D. and Rojey, L.: Static versus demand-sensitive models and estimation of second-best cordon tolls: An exercise for eight English towns, *Transportation Research Record*, No. 1747, pp. 44-50, 2001.

- 52) Santos, G.: Urban congestion charging: A second-best alternative, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, No. 3, pp. 345-369, 2004.
- 53) Akiyama, T., Mun, S. and Okushima, M.: Second-best congestion pricing in urban space: Cordon pricing and its alternatives, *The Review of Network Economics*, Vol. 3, No. 4, pp. 401-414, 2004.
- 54) 文世一, 秋山孝正, 奥嶋政嗣: 道路ネットワークにおける次善の混雑料金 —都市高速道路の役割に着目して—, *応用地域学研究*, No. 12, pp.15-25, 2007.
- 55) Akiyama, T. and Okushima, M.: Implementation of cordon pricing on urban network with practical approach, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 40, No. 2, pp. 221-248, 2006.
- 56) Sumalee, A., May, T. and Shepherd, S.: Comparison of fundamental and optimal road pricing cordons, *Transport Policy*, Vol. 12, Issue 5, pp. 384-390, 2005.
- 57) Sumalee, A.: Multi-concentric optimal charging cordon design, *Transportmetrica*, Vol. 3, No. 1, pp. 41-71, 2007.
- 58) Shepherd, S., May, A. and Koh, A.: How to design effective road pricing cordons, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol. 161, Issue 3, pp. 155-165, 2008.
- 59) Maruyama, T. and Harata, N.: Difference between area-based and cordon-based congestion pricing: Investigation by trip-chain-based network equilibrium model with non-additive path costs, *Transportation Research Record*, No. 1964, pp.1-8, 2006.
- 60) Maruyama, T. and Sumalee, A.: Efficiency and equity comparison of cordon- and area-based road pricing schemes using a trip-chain equilibrium model, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 7, pp. 655-671, 2007.
- 61) 円山琢也: エリア・プライシング政策の評価技術, *都市計画*, 264, pp. 42-47, 2006.
- 62) Chen, M. and Bernstein, D. H.: Solving the toll design problem with multiple user groups, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, Issue 1, pp. 61-79, 2004.
- 63) Lawphongpanich, S. and Hearn, D. W.: An MPEC approach to second-best toll pricing, *Mathematical Programming B*, Vol. 101, No. 1, pp. 33-55, 2004.
- 64) Connors, R. and Smith, M. and Watling, D.: Bilevel optimisation of prices in network equilibrium models, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 27 - 43, Elsevier, 2007.
- 65) Chiou, S.-W.: A new solution scheme for the link toll optimisation problem, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 59-70, Elsevier, 2007.
- 66) Santos, G. and Rojey, L.: Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth, *Transportation*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-42, 2004.
- 67) Bureau, B. and Glachant, M.: Distributional effects of road pricing: Assessment of nine scenarios for Paris, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 7, pp. 994-1007, 2008.
- 68) Eliasson, J. and Mattsson, L.G.: Equity effects of congestion pricing: Quantitative methodology and a case study for Stockholm, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 7, pp. 602-620, 2006.
- 69) Schweitzer, L. and Taylor, B.D.: Just pricing: the distributional effects of congestion pricing and sales taxes, *Transportation*, in press.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11116-008-9165-9>
- 70) Yang, H. and Zhang, X.: Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints, *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 128, No. 5, pp. 420-428, 2002.
- 71) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策に関する研究, *都市計画論文集*, No. 37, pp. 253-258, 2002.
- 72) Yang, H. and Huang, H.: The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem. *Transportation Research Part B*, Vol.38, Issue 1, pp. 1-15, 2004.
- 73) Yin, Y. and Yang, H.: Optimal tolls with a multiclass, bi-criteria traffic network equilibrium, *Transportation Research Record*, No. 1882, pp. 45-52, 2004.
- 74) Zhang, X., Yang, H. and Huang, H.: Multiclass multicriteria mixed equilibrium on networks and uniform link tolls for system optimum, *European Journal of Operational Research*, Vol.189, Issue 1, pp. 146-158, 2008.
- 75) Clark, A., Sumalee, A., Shepherd S. and Connors, R.: On the existence and uniqueness of first best tolls in networks with multiple user classes and elastic demand, *Transportmetrica*, accepted.
- 76) Yang, H. and Zhang, X.: Existence of anonymous link tolls for system optimum on networks with mixed equilibrium behaviors, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, Issue 2, pp. 99-112, 2008.
- 77) Engelson, L. and Lindberg, P.O.: Congestion pricing of road networks with users having different time values, in Lawphongpanich, S., Hearn, D.W. and Smith, M.J.(eds.) *Mathematical and Computational Models for Congestion Charging*, Springer, pp. 81-104, 2006.
- 78) Han, D. and Yang, H.: The multi-class, multi-criterion traffic equilibrium and the efficiency of congestion pricing, *Transportation Research Part E*, Vol. 44, Issue 5, pp. 753-773, 2008.
- 79) Mahmassani, H.S., Zhou, X. and Lu, C.-C.: Toll pricing and heterogeneous users: Approximation algorithms for finding bi-criterion time-dependent efficient paths in large-scale traffic networks, *Transportation Research Record*, No. 1923, pp. 28-36, 2005.
- 80) Lu, C.-C., Zhou, X. and Mahmassani, H.S.: Heterogeneous users and toll pricing: Model and solution algorithm for the bi-criterion dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Record*, No. 1964, pp. 19-26, 2006.
- 81) Lu, C.-C., Mahmassani, H.S. and Zhou, X.: A bi-criterion dynamic user equilibrium traffic assignment model and solution algorithm for evaluating dynamic road pricing strategies, *Transportation Research Part C*, Vol. 16, Issue 4, pp. 371-389, 2008.
- 82) Friesz, T.L., Kwon, C. and Mookherjee, R.: A computable theory of dynamic congestion pricing. In: Allsop, R.E., Bell, M.G.H. and Heydecker, B.G. (Eds) *Transportation and Traffic Theory*, 17th ISTTT, Elsevier, pp. 1-26, 2007.
- 83) Chow, A.H.F.: Toward a general framework for dynamic road pricing, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 245-257, Elsevier, 2007.
- 84) Joksimovic D., Bliemer, M.C.J. and Bovy, P.H.L.: Optimal toll design problem in dynamic traffic networks with joint route and departure time choice, *Transportation Research Record*, No. 1923, pp. 61-72, 2005.
- 85) Bliemer, M., Joksimovic, D. and Bovy, P.: Dynamic toll design problem: A dynamic network modelling approach, in Verhoef, E., Bliemer, M., Steg, L. and van Wee, B. (eds.) *Pricing in Road Transport: A Multi-Disciplinary Perspective*, Edward Elgar Publishing, Chapter 9, pp. 170-2008.
- 86) Shen, W. and Zhang, H.M.: On the morning commute problem in a corridor network with multiple bottlenecks: Its system-optimal traffic flow patterns and the realizing tolling scheme, *Transportation Research Part B*, in press.

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2008.07.004>
- 87) Li, Z.-C., Huang, H.-J., Lam, W.H.K. and Wong, S. C.: Time-differential pricing of road tolls and parking charges in a transport network with elastic demand, In: Allsop, R.E., Bell, M.G.H. and Heydecker, B.G. (Eds), *Transportation and Traffic Theory*, 17th ISTTT, Elsevier, pp. 55–85, 2007.
- 88) Teodorović, D. and Edara, P.: A real-time road pricing system: The case of two-link parallel network, *Computers and Operations Research*, 34(1), pp. 2-27, 2007.
- 89) de Palma, A., Kilani, M. and Lindsey, R.: Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 588-611, 2005.
- 90) de Palma, A., Kilani, M. and Lindsey, R.: Comparison of second-best and third-best tolling schemes on a road network, *Transportation Research Record*, No. 1932, pp. 89-96, 2005.
- 91) de Palma, A. and Lindsey, R.: Modelling and evaluation of road pricing in Paris, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 2, pp. 115-126, 2006.
- 92) Szeto, W.Y. and Lo, H.K.: Transportation network improvement and tolling strategies: The issue of intergeneration equity, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 3, pp. 227-243, 2006.
- 93) Szeto, W.Y. and Lo, H. K.: Time-dependent transport network improvement and tolling strategies, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 2, pp. 376-391, 2008.
- 94) Lo, H.K. and Szeto, W.Y.: Time-dependent transport network design under cost-recovery, *Transportation Research Part B*, in press.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2008.06.005>
- 95) Sumalee, A.: Optimal implementation-path of road pricing schemes with time-dependent model, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 624 - 639, 2005.
- 96) 長江剛志: 交通需要の不確実性を考慮したネットワークの動的有料道路料金更新問題, 土木計画学研究・論文集, Vol. 23 (4), pp.955-961, 2006.
- 97) Nagae, T. and Akamatsu, T.: Dynamic revenue management of toll road projects under transportation demand uncertainty, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 345-357, 2006.
- 98) Yang, H., Meng, Q. and Lee, D.-H.: Trial-and-error implementation of marginal-cost pricing on networks in the absence of demand functions, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, Issue 6, pp. 477-493, 2004.
- 99) Meng, Q., Xu, W. and Yang, H.: Trial-and-error procedure for implementing a road-pricing scheme, *Transportation Research Record*, No. 1923, pp. 103–109, 2005.
- 100) Yang, H., Xu, W. and Meng, Q.: A sequential experimental approach for analyzing second-best road pricing with unknown demand functions, in Mahmassani, H. (ed.) *Transportation and Traffic Theory: Flow, Dynamics and Human Interaction*, 16th ISTTT, Chapter 2, pp. 23-42, Elsevier, 2005.
- 101) Zhao, Y. and Kockelman, K.M.: On-line marginal cost pricing across networks: incorporating heterogeneous users and stochastic equilibria, *Transportation Research Part B*, Vol. 40, Issue 5, pp. 424-435, 2006.
- 102) Han, D. and Yang, H.: Congestion pricing in the absence of demand functions, *Transportation Research Part E*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2008.03.002>
- 103) Friesz, T.L., Bernstein, D. and Kydes, N.: Dynamic congestion pricing in disequilibrium, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No.2, pp. 181-202, 2004.
- 104) Yang, F., Yin, Y. and Lu, J.: Steepest descent day-to-day dynamic toll, *Transportation Research Record*, No. 2039, pp. 83-90, 2007.
- 105) Schuitema, G. and Steg, L.: The role of revenue use in the acceptability of transport pricing policies, *Transportation Research Part F*, Vol. 11, Issue 3, pp. 221-231, 2008.
- 106) Jaensirisak, S., Wardman, M. and May, A.D.: Explaining variations in public acceptability of road pricing schemes, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 39, Part 2, pp. 127–153, 2005.
- 107) Podgorski, K.V. and Kockelman, K.M.: Public perceptions of toll roads: A survey of the Texas perspective, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 10, pp. 888-902, 2006.
- 108) Harrington, W., Krupnicka, A.J. and Alberinib, A.: Overcoming public aversion to congestion pricing. *Transportation Research Part A*, Vol. 35, Issue 2, pp. 87–105, 2006.
- 109) Schade, J. and Baum, M.: Reactance or acceptance? Reactions towards the introduction of road pricing, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 1, pp. 41-48, 2007.
- 110) Jou, R.C., Lam, S.H. and Wu, P.H.: Acceptance tendencies and commuters' behavior under different road pricing schemes. *Transportmetrica*, Vol.3, No.3, pp. 213-230, 2007.
- 111) 藤井聡: ロードプライシングの公共受容におけるフレーミング効果, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 2, pp.239-249, 2006.
- 112) 北村英隆, 村上裕一, 加藤浩徳, 城山英明: 東京都ロード・プライシング導入に対する物流関係者の問題構造認識に関する分析, 社会技術研究論文集, Vol.5, pp.40-51, 2008.
- 113) Daganzo, C.F. and Gracia, R.C.: A pareto improving strategy for the time-dependent morning commuter problem, *Transportation Science*, Vol. 34, No.3, pp. 303-310, 2000.
- 114) 早崎俊和, 赤松隆: 混雑料金と割り当て制の合成スキームによるパレート改善, MPEC 研究会 編: MPEC にもとづく交通・地域政策分析, 中京大学経済学部附属経済研究所研究叢書, 第9輯, 第3章, pp. 37-59, 2003.
- 115) Nakamura, K. and Kockelman, K. M.: Congestion pricing and roadspace rationing: An application to the San Francisco Bay Bridge corridor, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, Issue 5, pp. 403-417, 2002.
- 116) 田中大輔, 河野達仁: 混雑料金・道路投資政策による異質な利用者のパレート改善性, 土木計画学研究・論文集, Vol. 24(1), pp. 91-101, 2007.
- 117) DeCorla-Souza, P.: FAIR lanes: A new approach to managing traffic congestion, *ITS Quarterly*, 8, pp. 5–13, 2000.
- 118) DeCorla-Souza, P.: FAST miles: Benefits and financial feasibility of multimodal investment and pricing strategy, *Transportation Research Record*, No. 1960, pp. 152-158, 2006.
- 119) Kalmanje, S. and Kockelman, K.M.: Credit-based congestion pricing: Travel, land value and welfare impacts, *Transportation Research Record*, No. 1864, pp. 45–53, 2004.
- 120) Kockelman, K. M. and Kalmanje, S.: Credit-based congestion pricing: A policy proposal and the public's response, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 671–690, 2005.
- 121) Gulipalli, P. K. and Kockelman, K.M.: Credit-based congestion pricing: A Dallas-Fort Worth application, *Transport Policy*, Vol. 15, Issue 1, pp. 23–32, 2008.
- 122) 安藤章, 森川高行, 三輪富生, 山本俊行: ロードプライシングの受容意識構造を踏まえた駐車デポジット

- システム (PDS) の有効性の検証, 都市計画学会論文集, No.42-3, pp.907-912, 2007.
- 123) 金森亮, 森川高行, 山本俊行, 三輪富生: 時間帯別・確率的統合均衡モデルを用いた駐車デポジットシステムの導入評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.24 (4), pp.915-926, 2007.
- 124) 吉村充功, 奥村誠: 自動車・鉄道間の混雑料金賦課・還元スキームの影響分析, 都市計画論文集, No.37, pp.175-180, 2002.
- 125) Parry, I.W.H. and Bento, A.: Revenue recycling and the welfare effects of road pricing, *The Scandinavian Journal of Economics*, Vol. 103, No. 4, pp. 645-671, 2001.
- 126) Keuleers, B., Chow, V., Thorpe, N., Timmermans, H. and Wets, G.: Behavioural change in activity-travel patterns in response to road user charging, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 40, No. 1, pp. 119-134, 2006.
- 127) 小澤友記子, 秋山孝正, 奥嶋政嗣: ファジィ交通行動モデルによる混雑料金政策の影響評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21(2), pp. 607-618, 2004.
- 128) Ozbay, K. and Yanmaz-Tuzel, O.: Valuation of travel time and departure time choice in the presence of time-of-day pricing, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 4, pp. 577-590, 2008.
- 129) Sumalee, A., Connors, R. and Watling, D.: An optimal toll design problem with improved behavioural equilibrium model: The case of the probit model, in Lawphongpanich, S., Hearn, D.W. and Smith, M.J.(eds.) *Mathematical and Computational Models for Congestion Charging*, Springer, pp. 219-240, 2006.
- 130) 兵藤哲朗, 高橋洋二, 清水高広, 坪井竹彦: ロードプライシングが物流配送行動に与える影響に関する基礎的考察, 第 23 回交通工学研究発表会論文報告集, pp.313-316, 2003.
- 131) 細谷涼子, 佐野可寸志, 加藤浩徳, 家田仁, 福田敦: 企業行動構造を明示的に考慮した大都市圏物流施策評価モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, no.3, pp.759-770, 2003.
- 132) 古川雄一, 円山琢也, 原田昇: ロードプライシング実施時の貨物輸送の変化に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 1, pp.74-83, 2006.
- 133) 谷口栄一, 玉川大, 秦健太郎: E コマースの視点から見た将来都市内道路交通並びに貨物車交通施策に関する分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21(3), pp. 697-707, 2004.
- 134) Puckett, S., Hensher, D. A. and Battellino, H.: The adjustment of supply chains to new states: A qualitative assessment of decision relationships with special reference to congestion charging, *International Journal of Transport Economics*, Vol. 33, No.3, pp. 313-339, 2006.
- 135) Hensher, D.A. and Puckett, S.M.: Refocusing the modeling of freight distribution: Development of an economic-based framework to evaluate supply chain behaviour in response to congestion charging, *Transportation*, Vol. 32, No. 6, pp. 573 - 602, 2005.
- 136) Hensher, D. A. and Puckett, S.: Assessing the influence of distance-based charges on freight transporters, *Transport Reviews*, Vol. 28, No.1, pp.1-19, 2008.
- 137) Holguin-Veras, J.: Necessary conditions for off-hour deliveries and the effectiveness of urban freight road pricing and alternative financial policies in competitive markets, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 2, pp. 392-413, 2008.
- 138) Holguin-Veras, J., Wang, Q., Xu, N., Ozbay, K., Cetin, M. and Polimeni, J.: The impacts of time of day pricing on the behavior of freight carriers in a congested urban area: Implications to road pricing, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 9, pp. 744-766, 2006.
- 139) Friesz, T.L., Mookherjee, R., Holguin-Veras, J. and Rigdon, M.A.: Dynamic pricing in an urban freight environment, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, Issue 4, pp. 305-324, 2008.
- 140) McKinnon, A.C.: A review of European truck tolling schemes and assessment of their possible impact on logistics systems, *International Journal of Logistics: Research and Applications*, Vol. 9, No.3, pp. 204-26, 2006.
- 141) Takama, T. and Preston, J.: Forecasting the effects of road user charge by stochastic agent-based modelling, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 4, pp. 738-749, 2008.
- 142) Zou, X. and Levinson, D.: A multi-agent congestion and pricing model, *Transportmetrica*, Vol. 2, No.3, 237-249, 2006.
- 143) de Palma, A. and Lindsey, R.: Congestion pricing with heterogeneous travelers: A general-equilibrium welfare analysis, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-160, 2004.
- 144) Sato, T. and Hino, S.: A spatial CGE analysis of road pricing in the Tokyo metropolitan area, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 608 - 623, 2005.
- 145) Anas, A. and Rhee, H.-J.: Curbing excess sprawl with congestion tolls and urban boundaries, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 36, Issue 4, pp. 510-541, 2006.
- 146) Anas, A. and Rhee, H.-J.: When are urban growth boundaries not second-best policies to congestion tolls? *Journal of Urban Economics*, Vol. 61, Issue 2, pp. 263-286, 2007.
- 147) de Palma, A., Lindsey, R., Proost, S. and der Loo, S.V.: Comparing alternative pricing and revenue use strategies with the MOLINO model, *Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport Sector*, *Research in Transportation Economics*, Vol. 19, Chapter 5, pp. 111-131, 2007.
- 148) Teodorovi, D., Triantis, K., Edara, P., Zhao, Y. and Mladenovi, S.: Auction-based congestion pricing, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 31, No. 4, pp. 399 - 416, 2008.
- 149) 赤松隆, 佐藤慎太郎, Long, N.X.: 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, No. 4, pp. 605-620, 2006.
- 150) 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, No. 3, pp.287-301, 2007.
- 151) Ubbels, B. and Verhoef, E.T.: Auctioning concessions for private roads, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 1, pp. 155-172, 2008.
- 152) Sandholm, W.H.: Evolutionary implementation and congestion pricing, *Review of Economic Studies*, Vol. 69, No.3, pp.667-689, 2002.
- 153) Sandholm, W.H.: Negative externalities and evolutionary implementation, *Review of Economic Studies*, Vol. 72, No. 3, pp. 885-915, 2005.
- 154) Sandholm, W.H.: Pigouvian pricing and stochastic evolutionary implementation, *Journal of Economic Theory*, Vol. 137, Issue 1, pp. 367-382, 2007.
- 155) Levinson, D.: Micro-foundations of congestion and pricing: A game theory perspective, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 691-704, 2005.
- 156) Joksimovic, D., Bliemer, M.C.J. and Bovy P.H.L.: Different policy objectives of the road-pricing problem: a game-theoretic approach, in Verhoef, E., Bliemer, M., Steg,

- L. and van Wee, B. (eds.): *Pricing in Road Transport: A Multi-Disciplinary Perspective*, Chapter 8, pp. 151-169, Edward Elgar Publishing, 2008.
- 157) Wie, B.-W.: Dynamic Stackelberg equilibrium congestion pricing, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, Issue 3, pp.154-174, 2007.
- 158) Li, H., Bliemer, M.C.J. and Bovy, P.H.L.: Network reliability-based optimal toll design, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 42, No 3, pp. 311-332, 2008.
- 159) Arnott, R.: Congestion tolling with agglomeration externalities, *Journal of Urban Economics*, Vol. 62, Issue 2, pp. 187-203, 2007.
- 160) Hamdouch, Y., Florian, M., Hearn, D.W. and Lawphongpanich, S.: Congestion pricing for multi-modal transportation systems, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, Issue 3, pp. 275-291, 2007.
- 161) Kim, S.: The toll plaza optimization problem: Design, operations, and strategies, *Transportation Research Part E*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2008.03.004>
- 162) Zhang, X., Huang, H.J. and Zhang, H.M.: Integrated daily commuting patterns and optimal road tolls and parking fees in a linear city, *Transportation Research Part B*, Vol. 42, Issue 1, pp. 38-56, 2008.
- 163) Ubbels, B. and Verhoef, E.T.: Governmental competition in road charging and capacity choice, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 38, Issue 2, pp. 174-190, 2008.
- 164) Xiao, F., Yang, H. and Han, D.: Competition and efficiency of private toll roads, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, Issue 3, pp. 292-308, 2007.
- 165) Shepherd, S. P.: The effect of complex models of externalities on estimated optimal tolls, *Transportation*, Vol. 35, No. 4, pp. 559-577, 2008.
- 166) Verhoef, E.T. and Rouwendal, J.: Pricing, capacity choice and financing, *Journal of Regional Science*, Vol.44, No.3, pp. 405-435, 2004.
- 167) Verhoef, E.T.: Second-best road pricing through highway franchising, *Journal of Urban Economics*, Vol. 62, Issue 2, pp. 337-361, 2007.
- 168) Ho, H. W., Wong, S. C. and Hau, T.D.: Theoretical bounds of congestion-pricing efficiency for a continuum transportation system, In: Allsop, R.E., Bell, M.G.H. and Heydecker, B.G. (Eds), *Transportation and Traffic Theory*, 17th ISTTT, Elsevier, pp. 263-280, 2007.
- 169) Xiao, F., Yang, H. and Guo, X.: Bounding the inefficiency of toll competition among congested roads, in: Allsop, R.E., Bell, M.G.H. and Heydecker, B.G. (Eds), *Transportation and Traffic Theory*, 17th ISTTT, Elsevier, pp. 27-54, 2007.
- 170) Hyman, G. and Mayhew, L.: Optimising the benefits of urban road user charging, *Transport Policy*, Vol. 9, Issue 3, pp. 189-207, 2002.
- 171) Hyman, G. and Mayhew, L.: Toll optimisation on river crossings serving large cities, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 1, pp. 28-47, 2008.
- 172) Prud'home, R. and Bocarejo, J.P.: The London congestion charge: A tentative economic appraisal, *Transport Policy*, Vol. 12, Issue 3, pp. 279-287, 2005.
- 173) Santos, G. and Bhakar, J.: The impact of the London congestion charging scheme on the generalised cost of car commuters to the city of London from a value of travel time savings perspective, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 1, pp. 22-33, 2006.
- 174) Santos, G. and Fraser, G.: Road pricing: lessons from London, *Economic Policy*, Vol. 21, Issue 46, pp. 263-310, 2006.
- 175) Quddus, M. A.; Carmel, A. and Bell, M.G.H.: The impact of the congestion charge on retail: The London experience, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 41, No 1, pp. 113-133, 2007.
- 176) Quddus, M.A., Bell, M.G.H., Schmöcker, J.-D. and Fonzone, A.: The impact of the congestion charge on the retail business in London: An econometric analysis, *Transport Policy*, Vol. 14, Issue 5, pp. 433-444, 2007.
- 177) Schmöcker, J.-D., Fonzone, A., Quddus, M. and Bell, M.G.H.: Changes in the frequency of shopping trips in response to a congestion charge, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 3, pp. 217-228, 2006.
- 178) Richards, M.: *Congestion Charging in London: The Policy and the Politics*. Palgrave, Basingstoke, 2006.
- 179) Santos, G.: Urban congestion charging: A comparison between London and Singapore, *Transport Reviews*, Vol. 25, No. 5, pp. 511 - 534, 2005.
- 180) Phang, S. Y. and Toh, R. S.: Road congestion pricing in Singapore: 1975-2003, *Transportation*, Vol. 43, No. 2, pp. 16-25, 2004.
- 181) Larsen, M. K. and Nielsen, O. A.: Improving and optimising road pricing proposals for Copenhagen, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol. 161, Issue 3, pp. 123-134, 2008.
- 182) Holguín-Veras, J., Cetin, M. and Xia, S.: A comparative analysis of US toll policy, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 10, pp. 852-871, 2006.
- 183) Hau, T.D.: Congestion charging mechanisms for roads, Part II - Case studies, *Transportmetrica*, Vol.2, No.2, pp. 117-152, 2006.
- 184) de Palma, A., Lindsey, R. and Proost, S.: Research challenges in modelling urban road pricing: An overview, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 2, pp. 97-105, 2006.
- 185) 英直彦, 矢島隆: ストックホルムとオスロのロードプライシング, *交通工学*, Vol. 43, No.2, pp.72-78, 2008.
- 186) 太田勝敏:大都市における TDM とロードプライシング, *高速道路と自動車*, 第 48 巻, 第 8 号, pp.5-8, 2005.
- 187) Kuwahara, M.: A theory and implications on dynamic marginal cost, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 7, pp. 627-643, 2007.
- 188) Verhoef, E.T. and Mohring, H.: Self-financing roads, Tinbergen Institute Discussion Paper, TI 2007-068/3, 2007.
- 189) Braess, D., Nagurney, A. and Wakolbinger, T.: On a paradox of traffic planning, *Transportation Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 446-450, 2005.
- 190) Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D.: A supply chain network equilibrium model, *Transportation Research Part E*, Vol.38, Issue 5, pp.281-303, 2002.
- 191) 西成活裕: 渋滞学, 新潮選書, 新潮社, 2006.
- 192) アルバート・ラズロ・バラバシ (著), 青木 薫 (翻訳): 新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く, NHK 出版, 2002.
- 193) 円山琢也: ピーク・ロード・デポジット制度の提案及びその評価モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, CD-ROM, #306, 2008.
- 194) 円山琢也, 溝上章志, 柿本竜治: エリア型課金デポジット制度の提案及びその評価モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.38, CD-ROM, 発表予定, 2008.

(2008. 9. 12 第一稿提出)