

都市域における混雑課金の政策分析: レビューと展望*

Modeling Urban Congestion Pricing: Recent Review and Future Prospect*

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、土木工学、交通工学、都市計画、応用数学などの研究者も多数参加し、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。

本稿は、混雑課金についての研究動向を、2000年以降の論文を中心に、また筆者がこれまで取り組んできた分野を重点的に取り上げながらレビューし、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、それぞれ、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。道路混雑の解消のみを目的とするわけではなく、環境負荷の低減、社会的費用の内部化、課金収入の還元策の工夫による都心活性化などが、幅広い意味での混雑課金政策の目的となりうる。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。

レビューの対象を2000年以降としているのは、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ない。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。

(2) 本稿のアプローチ・構成

本稿では、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、理論的 vs 実証的など多数存在する。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.*¹⁾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²⁾、竹内³⁾らによる単著での書籍の出版がされ、關、庭田⁴⁾による編著があり、少し古いもので山田⁵⁾がある。周辺関連分野での書籍として、根本、味水⁶⁾、松川⁷⁾がある。

Yang and Huang⁸⁾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。Santos⁹⁾、Lawphongpanich *et al.*¹⁰⁾による論文集や混雑課金の受容性に特化した専門書¹¹⁾もある。ごく最近でも出版は相次いでいる(Jensen-Butler *et al.*¹²⁾、Verhoef *et al.*¹⁾、Richardson and Bae¹³⁾、Saleh and Sammer¹⁴⁾、Arnott *et al.*¹⁵⁾)。最近の交通経済学のテキストである Small and Verhoef¹⁶⁾にも混雑課金について、広く記述されている。最近のレビュー論文としては、経済学者の視点からの Lindsey¹⁷⁾、より広く分析技術をカバーした Tsekeris and Voß¹⁸⁾がある。また、和文のレビューとしては、文²⁾の第1章がまとまっている。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なりの研究展望を述べることを目指している。

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、その向上を目的と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

*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)

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。

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（ファースト・ベスト）課金

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ため、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のが最適課金であ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、Hau¹⁹⁾、²⁰⁾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²¹⁾、Lo and Szeto²²⁾、文²⁾、付論2-A; Small & Verhoef¹⁶⁾、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、そのモデルと統合的な社会的余剰を定義すれば、適用できる（例えば、円山²³⁾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.*²⁴⁾は、複数交通手段を考慮した最適課金を、Ying and Yang²⁵⁾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.*²⁶⁾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。Ying²⁷⁾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 Hearn²⁸⁾は、需要変動モデルに対して容量制

約等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ら²⁹⁾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³⁰⁾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 Yildirim³¹⁾、Stewart and Maher³²⁾）。Yin and Lawphongpanich³³⁾は、経路ベースの外部性に等しい額が課金されれば、全リンクが課金される必要はないことなどを述べている。

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、円山ら²⁹⁾、Gentile *et al.*³⁴⁾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

すべてのリンクへの課金は、課金システムの運営費用の問題や受容性の問題からも実現が難しいことが多い。この場合、非課金代替経路を残して、一部のリンクのみに課金することが実用上重要となる。一部地域のみ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-Souza³⁵⁾やHau³⁶⁾による分類法は参考になるだろう。表-1と表-2は、2000年以降に公開された、次善の混雑課金の主な研究について一分類を示している。

次善課金の制約には、さらに以下のようにさまざまな種類がありうる。

- 一部のリンクのみが課金可能
- 設定可能な課金レベルの数が限定されている。
- 課金されるリンクの課金額がすべて等しい
- 課金リンク集合が閉じたコードンを形成すること

b) 一般的な次善課金

Verhoef³⁷⁾、³⁸⁾は、一般ネットワークを対象にした次善課金の計算法について考察している。May and Milne³⁹⁾

表-1 2000年以降に発表された主な次善の混雑課金の研究の分類

著者・文献番号	発表年	需要構造	混雑表現	課金方式	次善課金問題の定式化/モデルの決定変数	次善課金問題の計算法	計算対象ネットワーク	知見・備考
May & Milne ³⁹⁾	2000	OD 需要関数	静的	コードン, 距離・時間単位, 混雑応答型	-	-	Cambridge	課金レベルは外生的に設定, 所与の交通需要の削減 (5%,10%,15%)を満たすレベル.
野村, 秋山 ⁵²⁾	2001	OD 需要関数	静的	ゾーン別課金 (所与ゾーンに流入時に課金)	ゾーン別料金の組み合わせ最適化/所与の 11 ゾーンに対する流入課金レベル	GA	岐阜市道路網, 11 ゾーン	課金額は 20 円単位で 0~620 円まで変化. 次善のゾーン別混雑料金で, 最適課金時の 91%便益を達成可能.
Verhoef ³⁷⁾	2002	OD 需要関数	静的	一部のリンクが課金可能	2 段階最適化/課金可能リンクの課金レベル	-	複数の単純ネットワーク	ラグランジュ乗数に基づく次善課金の解析式を導出.
Verhoef ³⁸⁾	2002	OD 需要関数	静的	一部のリンクが課金可能	2 段階最適化/課金可能リンクの課金レベル	感度指標を利用	10リンク, 3 起点, 2 終点	数値計算例では, 線形のリンク・コスト関数, 需要関数を利用. エリア・ライセンシング, レーン単位課金, コードン課金, 駐車課金の計算事例あり.
Yang, Zhang & Huang ⁵⁴⁾	2002	OD 需要関数	静的	コードン課金, リンク単位課金	2 段階最適化 (整数・連続混合変数)/課金位置・課金額	SA, GA	43 リンク, 20 ノード, 10D ペアと上海ネットワーク (187 ノード, 690 リンク)	課金運営費用の考慮の有無による最適コードンの変化など.
May, Milne <i>et al.</i> ⁵⁰⁾	2002	OD 需要関数	静的	コードン課金	コードンの課金レベルと位置の最適化の試み	Verhoef ³⁸⁾ を利用	5 リンクネットワーク, 欧州の中規模都市	SVD などを利用.
May, Liu <i>et al.</i> ⁵¹⁾	2002	OD 需要関数	静的	コードン課金	コードンの課金レベルと位置の最適化の試み	Verhoef ³⁸⁾ を利用	ケンブリッジの簡略ネットワーク	コードン通過リンク別に料金を変化させると便益増加可能.
Yang & Zhang ⁸⁰⁾	2002	OD 需要関数	静的	リンク課金	2 段階最適化 (公平性指標の制約あり)/リンク課金の課金額	ペナルティ関数法, SA	5 ノード, 8 リンク	マルチクラスモデル.
Mun, Koshishi & Yoshikawa ⁴²⁾	2003	単一 CBD への Trip. 弾力需要	静的	コードン課金	最適化問題/コードンの中心部からの距離, 料金水準	微分方程式で解析的な解を導出	単一 CBD を想定した都市空間モデル, ネットワークは捨象	コードン課金は, 最適課金とほぼ同等の経済的厚生を達成しうる. 均一な人口分布を想定. 文 ²⁾ 第 5 章.
秋山, 奥嶋 ⁵³⁾	2003	手段選択	静的	ゾーンへの流入時に課金	非線形混み合わせ最適化問題/各ゾーンの課金レベル	GA	岐阜市ネットワーク	手段選択モデルの導入による分担配分統合型モデル. 代替交通である公共交通機関利用促進効果を計測.
Yang and Zhang ⁴⁰⁾	2003	固定/変動需要	静的	リンク単位課金	2 段階最適化/課金リンクの選択と, リンク別の課金レベル	SA と GA	2 種類の単純ネットワーク (7リンクと 43リンク)	テストネットワークでの数値計算あり. 課金費用を考慮すると, 課金リンクを増やすことにトレードオフが存在. システム最適配分を実現するための課金リンク数最小化問題も考察.
Zhang & Yang ⁵⁵⁾	2004	OD 需要関数	静的	コードン課金 (単一・複数領域・複数中心コードン)	2 段階最適化 (整数・連続混合変数)/各種コードン課金の位置と課金額	SA・GA, Cut set 理論, 格子点探索	上海ネットワーク (187 ノード, 690 リンク)	コードン課金で最適課金の 20-60%の便益を達成可能. コードンでは, 中距離トリップが過大に課金される.
Shepherd & Sumalee ⁵⁶⁾	2004	OD 需要関数	静的	コードン課金, リンク課金	MPEC/ 課金位置・課金額	GA	Leeds 市の簡略ネットワーク (89 リンク, 14 ゾーン)	コードンをまたぐリンクの料金を変化させることを許容すると便益増加. Verhoef ³⁸⁾ による微分を基にした方法の問題点(複数最適解, 収束誤差の影響)を指摘.
Sumalee ⁵⁷⁾	2004	OD 需要関数	静的	コードン課金	MPEC/コードン課金の位置と料金レベル	GA (Branch-tree)	Edinburgh, UK. 350 リンク, 25 ゾーン.	手作業設定のコードン課金に比べて, 最適単一コードンは, 80%の便益向上. 課金システムの運営費用も考慮. Yang <i>et al.</i> ⁵⁴⁾ とは詳細が異なる.
Santos ⁵⁹⁾	2004	OD 需要関数	静的	流入コードン	所与のコードンに対する課金レベル	おそらく総当り	英国 8 都市	単一の最適コードン課金レベルは, 都市によって異なり, 0.8-3.73 £. 二重コードンで, 単一コードンの 1.9 倍程度の便益増可能.
Lawphongpanich & Heam ⁷¹⁾	2004	固定/変動需要	静的	リンク課金	MPEC/課金可能リンクの課金額	Cutting constraint 法	Sioux Falls 及び Hull	線形・非線形問題の商用ソフトウェアを利用して, 現実規模の問題に適用可能.
Akiyama, Mun & Okushima ⁶⁰⁾	2004	重力モデル型の需要関数	静的	両方向(多重)コードン課金, 高速道路の均一・ゾーン料金	最適化問題/所与の課金領域に対する課金額	一次元最適化, および総当り法	大阪都市圏ネットワーク, 241 ゾーン, 630 リンク	単一コードンでは, 大阪市全域対象が最良. 三重コードンでは, システム最適の厚生改善の 77%の効果を達成. 高速道路のゾーン料金で利用者の余剰減少を抑えることが可能.
Ho, Wong, Yang & Loo ⁴⁶⁾	2005	単一 CBD, 需要関数	静的	コードン課金, 対距離課金	2 段階最適化/所与の多重コードンに対する料金レベル	パターンサーチ法 (HJ 法)	連続体モデル	コードン課金でも最適状態に近い便益を達成可能.
Mun <i>et al.</i> ⁴³⁾	2005	重力モデル型	静的	両方向コードン課金	最適化問題/コードン位置と料金水準	格子点探索	線上都市	コードンプライシングが相対的に有効になる条件を整理. 文 ²⁾ 第 6 章.
Verhoef ⁴⁴⁾	2005	住宅・土地市場等も考慮	静的	コードン, 均一, 対距離課金	コードンの位置・課金額など	格子点探索	単一中心都市	コードン課金が有効であると言う Mun <i>et al.</i> ⁴²⁾ の知見は, 住宅・土地・労働供給市場を導入しても成立.

略語注) GA: 遺伝的アルゴリズム, SA: 焼きなまし法, MPEC: 均衡制約つき数理最適化問題 (表-2でも利用)

表-2 2000年以降に発表された主な次善の混雑課金の研究の分類 (続き)

著者・文献番号	発表年	需要構造	混雑表現	課金方式	次善課金問題の定式化/モデルの決定変数	次善課金問題の計算法	計算対象ネットワーク	知見・備考
Sumalee, May & Shepherd ⁽⁶⁵⁾	2005	OD 需要関数	静的	コードン	2 段階最適化/コードンの位置, 課金額	GA	Edinburgh, UK.	手作業で設定したコードン課金に比べて, 最適設計コードンは便益 2 倍以上. コードンが閉じた領域であるという制約を外すとさらに便益増加可能.
Joksimovic, Bliemer & Bovy ⁽¹⁰⁹⁾	2005	経路・出発時刻選択	動的	時間均一課金と時間変化課金	2 段階最適化問題	グリット・サーチ	1OD, 2 経路	数値計算事例を提示. 総需要は固定.
de Palma, Kilani & Lindsey ⁽¹¹⁴⁾	2005	経路・手段・出発時刻選択	動的	動的最適課金, 次善均一・階段型コードン課金, 階段型課金	各課金額	評価指標の 2 次関数近似などを利用	放射環状型ネットワーク	階段型 Step Toll 課金が均一課金よりも優れているなど. 動的シミュレータ (METROPOLIS)を利用.
de Palma, Kilani & Lindsey ⁽¹¹⁵⁾	2005	経路・手段・出発時刻選択	動的	対象リンクのみの渋滞を除去する課金, その他次善課金	各課金額	評価指標の 2 次関数近似などを利用	放射環状型ネットワーク	渋滞除去課金(no-queue tolling, third-best 課金とも呼んでいる)の有効性を提示. 少ない情報量で実行可能.
Safirva Gillingham <i>et al.</i> ⁽¹⁶⁵⁾	2005	発生・目的地・手段・時刻・経路選択	-	コードン課金, リンク課金	所与のコードン領域に対する課金額	-	Washington, D.C.	戦略モデル (START) を利用. 広い課金領域へのコードン課金の有効性は, 課金収入の還元法に依存.
Maruyama & Harata ⁽⁶⁷⁾	2006	Trip-chain 需要関数	静的	流入コードン課金, エリア課金	それぞれ所与の課金領域についての課金レベル	料金レベルの変化のみ	沖縄(67 ゾーン, 12,308 リンク, 5,462 ノード)	最適エリア課金>最適コードン課金など.
Akiyama & Okushima ⁽⁶²⁾	2006	重力モデル型変動需要	静的	多重コードンの組み合わせ	2 段階, 組み合わせ最適化課金額 0~750 円, 50 円きざみ	GA	岐阜ネットワーク (21 ゾーン)	6 つの想定コードンのうち 3 つ程度が課金されることが多いなど.
文, 秋山, 奥嶋 ⁽⁶¹⁾	2007	重力モデル型の需要関数	静的	高速道路の均一料金・ゾーン料金制	最適化問題/料金レベルの組み合わせ	総当り法	大阪都市圏ネットワーク (241 ゾーン, 630 リンク)	三重コードンでは, システム最適の厚生改善の 77%の効果を達成. 高速道路のゾーン料金は, 利用者の余剰減少を少なく抑えることが可能.
Sumalee ⁽⁶⁴⁾	2007	OD 需要関数	静的	多重コードン課金	MPEC/コードンの位置・課金額	GA ベースの解法 (GA-AS)	Edinburgh, UK. (350 リンク, 25 ゾーン)	手作業設定のコードン課金に比べて, 最適単一コードンは, 80%の便益向上, 多重コードンだとさらに 110%向上.
Maruyama & Sumalee ⁽⁶⁸⁾	2007	Trip-chain 需要関数	静的	流入コードン課金, エリア課金	それぞれ所与の課金領域についての料金レベル	料金レベルの変化のみ	宇都宮(1345 リンク, 84 ゾーン)	最適エリア課金>最適コードン, 課金区域の変化の影響, 公平性インパクトなどを比較.
Chiou ⁽⁷³⁾	2007	変動固定	静的	リンク課金	MPEC/課金レベル	Projected subgradient method	9 リンク	既存計算手法との比較により有効性を示す.
Friesz <i>et al.</i> ⁽¹⁰⁶⁾	2007	固定	動的	経路への課金	MPEC/経路への動的課金額など	-	3 リンク, 3 ノード	day-to-day と within-day の動的モデルの定式化と解法を提示.
金森, 森川, 山本, 三輪 ⁽¹⁵⁴⁾	2007	活動・目的地・手段・経路選択	準動的	駐車デポジットシステム	外生的に課金額/返金額を設定	-	名古屋都市圏 (7,600 ノード, 22,463 リンク, 515 ゾーン)	PDS によって課金エリアへの来訪者の減少を改善可能.
Chu & Tsai ⁽⁴⁵⁾	2008	変動需要	静的	コードン課金と解積できる	新規高架道路の位置, 課金額	微分方程式など	線上都市 (corridor)	社会的最適な高架道路の入り口位置, 次善課金の数値例を示す. Mun <i>et al.</i> ⁽⁴²⁾ の拡張例.
Shepherd, May & Koh ⁽⁶⁵⁾	2008	OD 需要関数	静的	コードン課金	コードンの位置と課金額	select link analysis による short cut	Edinburgh, UK	short cut 法は, 少ない計算回数で済み, プロセスの可視化が可能.
Lu, Mahmassani & Zhou ⁽¹⁰²⁾	2008	時間帯別 OD 所与	動的	リンク課金, 課金レーン	所与の時間変化課金の評価	-	Irvine, Baltimore - Washington DC, Fort Worth, Texas	時間価値の連続分布を考慮している. 結果の均一時間価値をモデルとの比較など提示. 動的シミュレータ (DYNASMART)を利用.
Lu & Mahmassani ⁽¹⁰³⁾	2009	出発時刻選択考慮	動的	新規有料道路の追加	所与の時間変化課金の評価	-	Fort Worth, Texas (180 ノード, 445 リンク, 13 ゾーン)	モデルの動作確認, 動的課金シナリオの評価事例を提示.
Sumalee, Shepherd & May ⁽⁶⁶⁾	2009	OD 需要関数	静的	コードン課金	制約付多目的最適化/コードンの位置と課金額	NSGA-II . dynamic self-adaptive penalty 法	Edinburgh, UK. 350 リンク, 25 ゾーン.	Sumalee ⁽⁵⁷⁾ の多目的問題への改良. バレート・フロンティア(2 次元および 3 次元)の描画など.
Ekström <i>et al.</i> ⁽⁷⁴⁾	2009	OD 需要関数	静的	課金リンク数が所与での課金位置・レベル	組み合わせ 2 段階最適化問題	増分法と連続近似の Heuristic	2 つの単純ネットワーク	増分法の問題点と連続近似法の利点を提示.
Dimitriou <i>et al.</i> ⁽¹⁰⁵⁾	2009	変動需要	静的	均一課金と入口別・出入口別変課金	2 段階 (混合整数) 最適化問題/道路料金, 私企業による運用レーン数	GA	ギリシャ, アテネ, 54 リンク, 1000D ペア	マルチクラスモデル. 均一料金から多様な料金体系の変化により収入増加可能など.
Ban & Liu ⁽¹⁰⁸⁾	2009	固定需要	動的	(時間変化) リンク課金	2 段階最適化問題/所与の課金リンクに対する動的変化課金レベル	2 段階→1 段階問題へ変換.	6 リンク, 2 起点, 1 終点	次善解の存在条件などの整理

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次善課金の結果を比較している。Yang and Zhang⁴⁰は、リンク単位の次善課金を精査している。Zhang and Ge⁴¹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.*^{42), 43)}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², 第5章, 第6章)。Verhoef⁴⁴⁾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 Tsai⁴⁵⁾は、Mun *et al.*⁴²⁾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.*^{46), 47)}は、連続体モデルによるコードン課金等の分析を示している。Geroliminis and Levinson⁴⁸⁾は、マクロ動的な交通流モデルによるコードン課金分析を提示している。de Palma *et al.*⁴⁹⁾も、単一中心都市に対する二重コードン課金の有効性などを、都市経済モデルを用いて、長期的インパクトを含めて分析している。

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.*^{50), 51)}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⁵²⁾, 秋山, 奥嶋⁵³⁾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.*⁵⁴⁾, Zhang and Yang⁵⁵⁾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 Sumalee⁵⁶⁾, Sumalee⁵⁷⁾にも見られる。Santos⁵⁸⁾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⁵⁹⁾なども行っている。Akiyama *et al.*⁶⁰⁾, 文ら⁶¹⁾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 Okushima⁶²⁾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.*⁶³⁾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。Sumalee⁶⁴⁾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.*⁶⁵⁾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。Sumalee *et al.*⁶⁶⁾は、課金の目的を多目的最適化問題に拡張し、さまざまな制約を考慮した場合の分析を行っている。

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^{67), 68), 69)}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はほぼ等しい。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 Harata⁶⁷⁾は、ネットワーク均衡モデルの基礎となるBeckmann *et al.*モデルのトリップ・チェーン型、非加法型モデルへの拡張を行い、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 Sumalee⁶⁸⁾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⁶⁹⁾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 Bernstein⁷⁰⁾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 Hearn⁷¹⁾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.*⁷²⁾, Chiou⁷³⁾, Ekström *et al.*⁷⁴⁾も2段階最適化による次善課金の最適化の1分析例を示している。Koh *et al.*⁷⁵⁾は、cutting constraint法による次善課金と道路容量増強の同時最適化問題などを示している。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。

以上、次善の混雑課金の研究動向としては、表-1, 表-2にまとめているように、当初、単純なOD需要関数が想定されていたが、多様な利用者の行動が表現されるようになり、混雑表現も静的から動的(動学モデルの詳細は後述)に拡張されてきている。また、外生的に与えられることも多かった課金レベルについて、多様な課金体系を前提に次善の最適化が、現実の大規模ネットワークでも試みられているという状況にあるといえよう。

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・公平性インパクト

Santos and Rojey⁷⁶⁾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。Eliasson and Mattsson⁷⁷⁾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。Bureau and Glachant⁷⁸⁾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。Schweitzer and Taylor⁷⁹⁾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 Zhang⁸⁰⁾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⁸¹⁾は、課金の所得逆進性の問題と、課金収入の還元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。Armelius and Hultkrantz⁸²⁾は、単純な手段選択モデルで課金収入の還元の有無などによる厚生変化を数値実験で示している。Karlström and Franklin⁸³⁾による分析では、明確な公平性へのインパクトは見られなかったとしている。

この他にも課金の公平性に関する研究は最近多数発表されており(例えば、Maruyama and Sumalee⁶⁸⁾, Ungemah⁸⁴⁾, Wu and Lam⁸⁵⁾, Ecola and Light⁸⁶⁾, Levinson⁸⁷⁾)にも包括的なレビューがされている。

経済学のみならず土木計画学でも議論されてきたように、効率性と比べた場合、公平性を計測する絶対的な指標は存在しない。効率性を基準にした最適課金は、多くの研究者が同意する展開がなされてきたのに比べて、公平性は様々な分析軸、評価指標が設定可能となる。したがって、混雑課金の公平性評価についての決定的な研究論文というものは書きにくく、本項でも紹介したようにシナリオ分析的な研究を中心に、多様な論文が公開されている。

(2) 利用者の異質性

Yang and Huang⁸⁸⁾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、通常の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を示した。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も示している。

関連した研究も、Yin and Yang⁸⁹⁾, Zhang *et al.*⁹⁰⁾らによって引き継ぎなされている。特に、Clark *et al.*⁹¹⁾は、マルチクラス利用者均衡下での課金について、需要変動型において、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 Zhang⁹²⁾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。Guo and Yang⁹³⁾は、利用者の異質性と多基準システム最適との関係を示している。Engelson and Lindberg⁹⁴⁾は、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 Yang⁹⁵⁾は、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 (Yang *et al.*⁹⁶⁾も参照) で分析している。Verhoef and Small⁹⁷⁾は、利用者の異質性を無視することで次善課金の厚生効果は大幅に過少評価されることを単純なネットワークでの分析で示している。Light⁹⁸⁾も、時間価値の異質性を考慮したモデルで幹線道路を課金・無料レーンに分離する Value Pricing 政策を分析している。Holguín-Veras and Cetin⁹⁹⁾は、車種の異質性を考慮した最適課金について、出発時刻選択を考慮したモデルで考察を進めている。

Mahmassani *et al.*¹⁰⁰⁾, Lu *et al.*^{101), 102)}, Lu and Mahmassani^{103), 104)}は、動的課金評価への適用に向けた、利用者の異質性を考慮した動的配分モデルの構築を試みている。Dimitriou *et al.*¹⁰⁵⁾は、利用者の異質性を考慮した、道路投資と課金の統合型設計問題を分析している。

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(例えば、Friesz *et al.*¹⁰⁶⁾; Chow¹⁰⁷⁾; Ban and Liu¹⁰⁸⁾)。動的課金の設計問題^{109), 110)}の研究も進められており、Shen and Zhang¹¹¹⁾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.*¹¹²⁾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 Edara¹¹³⁾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.*¹¹⁴⁾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.*

¹¹⁵⁾ 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 ¹¹⁶⁾ への適用なども報告されている。前章で紹介した、Mahmassani ら ^{100), 101), 102), 103), 104)} も動的シミュレータをベースに、動的課金の評価を試みているが、彼らの研究では、課金レベルは外生的に与えられている。

(3) 長期的時間変化課金 (Day-to-Day など)

Szeto and Lo ^{117), 118)}, Lo and Szeto ¹¹⁹⁾ 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。Sumalee ¹²⁰⁾ も混雑課金の最適導入パスを考察している。長江 ¹²¹⁾, Nagae and Akamatsu ¹²²⁾ 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.* ¹²³⁾ をはじめとして、数多くされている ^{124), 125), 126), 127), 128)}。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.* ¹²⁹⁾, Yang *et al.* ¹³⁰⁾)。

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、古くから知られた混雑課金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 Steg ¹³¹⁾ 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.* ¹³²⁾, Podgorski and Kockelman ¹³³⁾, Harrington *et al.* ¹³⁴⁾, Schade and Baum ¹³⁵⁾, Jou *et al.* ¹³⁶⁾, Cain and Jones ¹³⁷⁾ が挙げられる。

国内では、藤井 ¹³⁸⁾ 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 ¹³⁹⁾ 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。後に紹介する駐車デポジットシステムに関しての受容性の研究 ^{140), 141)} も進められている。

(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的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 Gracia ¹⁴²⁾ 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 ¹⁴³⁾ 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 Kockelman ¹⁴⁴⁾ 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 ¹⁴⁵⁾ 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。最近の研究では、Liu *et al.* ¹⁴⁶⁾ などがある。

(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-Souza ¹⁴⁷⁾ 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 ¹⁴⁸⁾ など、さまざまな課金制度 ¹⁴⁹⁾ 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 ^{150), 151), 152)}。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(PDS)と呼ぶ新たな課金政策が提案されている ¹⁵³⁾。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 ¹⁵⁴⁾。

このほか、吉村、奥村 ¹⁵⁵⁾ も課金の還元策についてモデル分析している。Parry and Bento ¹⁵⁶⁾ も還元策のひとつの経済モデルを提示している。

6. 行動分析・関連主体へのインパクト

(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 ¹⁵⁷⁾, ファジィ交通行動モデルによる分析例 ¹⁵⁸⁾ が見られる。Arentze らは、Web 調査に基づいて、混雑課金実施時の、短期的な活動・出発時刻等の変化 ¹⁵⁹⁾, 長期的な職場・住居の変更 ¹⁶⁰⁾ を行動モデル分析している。Ozbay and Yanmaz-Tuzel ¹⁶¹⁾ 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。Wen and Tsai¹⁶²⁾ は、課金による利用者の出発時刻・経路選択の行動を分析している。Sumalee *et al.*¹⁶³⁾ 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¹⁵⁴⁾、Kanamori *et al.*¹⁶⁴⁾ 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。Safirova *et al.*¹⁶⁵⁾ も Nested Logit 型のモデルによるワシントン D.C. での課金のシナリオ分析を示している。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、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。

この他、交通政策の一つの将来代替案として混雑課金政策を取り上げ、行動モデルなどで分析している研究は多数見られる^{166), 167), 168)}。また、Bonsall *et al.*¹⁶⁹⁾ は、現実の人間が複雑な課金制度を正確に理解するのは難しい点を指摘し、政策実施に当たり既存のプロスペクト理論などから示唆される点などを論じている。

(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¹⁷⁰⁾ が、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¹⁷¹⁾ 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¹⁷²⁾ 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¹⁷³⁾ 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.*¹⁷⁴⁾、Hensher and Puckett¹⁷⁵⁾ が混雑課金によるサプライチェーンの変化を述べ、Hensher and Puckett¹⁷⁶⁾ は、SP 調査を基にした選択モデルによる対距離課金の物流への影響を調べている。また、Holguín-Veras¹⁷⁷⁾、Holguín-Veras *et al.*¹⁷⁸⁾ は、時間帯別料金の貨物配送への影響を分析し、Friesz *et al.*¹⁷⁹⁾ 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^{180), 181), 6)}。

(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 Preston¹⁸²⁾、Zou and Levinson¹⁸³⁾、Zhang *et al.*^{184), 185)} などにより行われている。交通流のマイクロ・シミュレーションと行動モデルを組み合わせた分析も Win *et al.*¹⁸⁶⁾ に見られる。

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 Lindsey¹⁸⁷⁾ 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 Hino¹⁸⁸⁾ 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 Rhee^{189), 190)} 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政策を比較している。de Palma *et al.*¹⁹¹⁾ は、MOLINO と呼ぶ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。Gupta *et al.*¹⁹²⁾ も土地利用交通モデルを用いたテキサス州オースティンでの課金政策の比較分析を示している。CGE^{193), 194)}、地域間一般均衡モデルなど¹⁹⁵⁾ を用いた分析例も報告されつつある。Proost and van Dender¹⁹⁶⁾ は、Nested CES 型経済モデルを用いた課金分析を示している。国内では、高速道路料金値下げ効果の都市モデル分析¹⁹⁷⁾ なども示されている。

(2) オークション

Teodorovi *et al.*¹⁹⁸⁾ は、オークション型混雑課金という制度を提案している。Ubbels and Verhoef¹⁹⁹⁾ は、道路免許業務のオークションを分析している。この他、Verhoef²⁰⁰⁾ による分析例もある。関連して、ボトルネック通行権取引制度^{201), 202)} も提案されている。ボトルネック通行権取引制度とは、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。

(3) ゲーム理論の応用

Sandholm^{203), 204), 205)} 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注目された。混雑課金のゲーム理論の基礎づけ²⁰⁶⁾ の研究もある。Joksimovic *et al.*²⁰⁷⁾ 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。Wie²⁰⁸⁾ 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。Dimitriou and Tsekeris²⁰⁹⁾ は、動的課金の評価・設計に向けた動的学習過程などを考慮した進化ゲーム理論モデルを提示している。

(4) 公共交通

Small²¹⁰⁾ は、単純な経済モデルを用いて、混雑課金による公共交通のサービスレベルの向上について分析している。Ahn²¹¹⁾ は、バス運賃と運行頻度について、様々な制度下での最適化ルールを導き、さらに混雑課金が実

施された場合の変化を分析している。Hamdouch *et al.*²¹²⁾ 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。

(5) 競争

Ubbels and Verhoef²¹³⁾ 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.*²¹⁴⁾ は、有料道路運営主体間の競争の分析を示している。Verhoef²¹⁵⁾ は、交通ネットワーク上での主体間の課金競争の特集号を組んでいる。Mun and Ahn²¹⁶⁾ は、私的主体・公的主体が課金する場合及び無料の場合の組み合わせにおける経済厚生などについて分析している。de Palma *et al.*²¹⁷⁾ は、先述した出発時刻と経路選択を考慮した動的シミュレータ¹¹⁴⁾ で、私的主体が課金する場合、公的主体が課金する場合の比較分析などを示している。

(6) その他の展開例

Li *et al.*²¹⁸⁾, Chan and Lam²¹⁹⁾ は、信頼性を考慮した課金、Arnott²²⁰⁾ は、規模の経済を考慮した混雑課金を分析している。頑健性(Gardner *et al.*²²¹⁾)の視点も見られる。Zhang *et al.*²²²⁾ は、線上都市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。Shepherd²²³⁾ 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 Rouwendal²²⁴⁾ は、課金と容量拡大、ファイナンス、Verhoef²²⁵⁾ 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(Yang *et al.*⁹⁶⁾, Ho *et al.*²²⁶⁾, Xiao *et al.*²²⁷⁾). Hyman and Mayhew²²⁸⁾ による単純化した都市モデルによる最適課金分析、Hyman and Mayhew²²⁹⁾ 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' home and Bocarejo²³⁰⁾ 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^{231),232)}、小売業の売上高への影響^{233), 234)}、買い物頻度の変化²³⁵⁾ も分析されている。書籍²³⁶⁾ 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²³⁷⁾ も発表されている。シンガポール²³⁸⁾、コペンハーゲン²³⁹⁾、米国の事例比較²⁴⁰⁾ なども、ある。少し古い事例は、Hau²⁴¹⁾ に整理されている。de Palma *et al.*²⁴²⁾ にも事例の分類表がある。Santos⁹⁾ の Part 2, Small and Verhoef¹⁶⁾ 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。Edinburgh において課金政策が本格導入

されなかった経緯は Rye *et al.*²⁴³⁾ にまとめられている。Edinburg での課金導入への 2005 年の住民投票での否決と対比して、ストックホルムでの 2006 年 9 月での住民投票賛成多数の結果は興味深い。ストックホルムでは、本格導入前に 7 ヶ月の試行実験が行われており、関連した研究成果が多数報告されている。ストックホルムの混雑課金の本格実施前の試行結果については、詳細な分析が報告されている^{244), 83), 245), 246)}。ロンドンと異なり、ストックホルムの事例では、課金による小売業への影響は無かったと報告されている²⁴⁷⁾。

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^{248), 249)}があり、欧州の動向²⁵⁰⁾、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²⁵¹⁾)。また、久米²⁵²⁾ は、海外における道路課金政策の導入事例を幅広くかつ簡潔に整理している。日本における高速道路の料金割引社会実験のデータを利用した分析も見られる^{253), 254)}。

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²⁵⁵⁾ 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考えられる。

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²⁵⁶⁾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²⁵⁷⁾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る。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 (セカンド・ベスト) 課金の分析技術の改良

a) コードン課金

コードン課金については、通常の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手法の実都市圏への適用の蓄積、簡略化の開発などが、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(課金額)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。例えばストックホルムでの政策は両方向コードン課金(一回あたり SEK [スウェーデンクローナ] 10-20)で、かつ日支払いの上限は SEK 60 である²⁴⁴⁾。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も、分析する実務的価値はあるだろう。

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。Maruyama & Harata⁶⁷⁾、Maruyama & Sumalee⁶⁸⁾ は、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。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った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考えている。

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手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.*⁴³⁾、文²⁾(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は未解決である。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^{67), 68)}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、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、2.(2c)で紹介した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りうる。

(3) 計算法の改良

混雑課金問題に限らないが、2段階最適化問題の計算法の改良が必要である。大域的最適解を求める方法、大規模都市圏に適用可能な方法などが求められている。交通量配分のアルゴリズムは、静的配分に限っては、1990年代には、既に完成されたと思われていたところがあるが、最近でも、計算法の改良に関する論文が出版されている。動的課金の評価のための動的配分の計算効率化、また動的最適/次善課金の計算法の開発等も重要な課題であろう。さらに、課金レベルを少しずつ変化させたものを多数回計算するのに有効なアルゴリズムの開発・適用、またマルチコア CPU 等の利用を前提とした(超)並列計算による計算時間削減も今後の実務的価値は高いと思われる。

(4) 動的な課金レベル・方式の更新問題

a) 課金方式更新の基本問題

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¹²³⁾。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と思われる。

b) 課金制度の拡張性に着目した次善課金の比較

コードン型課金は、日均一の料金だけでなく、時間帯別の料金設定がしやすい。流入時あるいは、境界をまたぐ時刻に応じて課金額を変化させれば良いためである。それに対して、エリア課金は時間帯別の設定は、一般には容易ではない。コードン課金とエリア課金には、このように時間変化型の動的課金への拡張可能性の面でも異なっているといえる。現実都市での適用事例を見ても、シンガポールの当初制度の Area Licensing Scheme、ロンドンの Congestion Charging の2つのエリア型課金は、1日単位の課金額の設定であった。一方、シンガポールの現行制度 Electronic Road Pricing やストックホルムの Congestion Tax の2つのコードン型課金は、時間帯別の課金額を設定している。混雑課金の初期事例では、エリア課金が利用され、その後コードン型への変更が行われている点、また新規導入例では、時間変化型のコードン課金が採用されているという事実は興味深い。この視点での比較分析も有用であろう。

(5) 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

扱え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。

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。

(6) 実測データの活用

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都市間高速道路の料金無料化の議論、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。これら多様な料金に対応したデータ蓄積手法、需要変化のモニタリング手法、モデルの改良への連結方法などを検討・精査する価値があると思われる。

(7) 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、PDS 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。筆者ら^{258), 259)}も、複数日にまたがる課金・デポジット政策を提案している。課金収入の還元を含めた制度設計の研究のさらなる進展が望まれる。

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。長らく机上の空論と思われてきた混雑課金は、今や現実的な都市交通政策の代替案の一つとなっている。このテーマの学術研究は、もともと理論研究から進められたが、ネットワーク・モデル、行動モデルなど先進的な交通の分析技術が活用されて、多様な視点からの研究が活発になされるに至っている。既存の交通モデルが評価しうる一つの政策としてのみとらえるのではなく、望ましい課金制度のデザインについての研究も盛んである。また、現実都市の導入事例での経験・疑問を踏まえて、新たな研究課題が発見され、その解決により現実政策にも有用な知見が導かれていることも少なくない。

混雑課金の分析は、交通研究の分野において、最も世界的競争の激しく、活動が盛んなトピックのひとつになっている。本稿で紹介した最近の研究論文のリストが、わが国のより多くの研究者/学生の方々がこのテーマの研究に様々なアプローチで取り組まれるきっかけとなれば、大変幸いである。

謝辞: 経験の浅い筆者に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。さらに、本研究については、日本交通政策研究会 平成20年度若手研究プロジェクト、文部科学省・日本学術振興会 科学研究費補助金 若手研究(B) (研究課題番号: 21760402) の支援を受けました。重ねて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Verhoef, E., Bliemer, M., Steg, L. and van Wee, B. (eds.): *Pricing in Road Transport: A Multi-Disciplinary Perspective*, Edward Elgar Publishing, 2008.
- 2) 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.
- 3) 竹内健蔵: 都市交通ネットワークの経済分析, 有斐閣, 2006.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 根本 敏則, 味水 佑毅(編著): 対距離課金による道路整備-日本交通政策研究会研究双書 24, 勁草書房, 2008.
- 7) 松川 勇: ピークロード料金の経済分析―理論・実証・政策, 日本評論社, 2003.
- 8) Yang, H. and Huang, H. J.: *Mathematical and Economic Theory of Road Pricing*, Elsevier, 2005.
- 9) Santos, G. (ed.): *Road Pricing: Theory and Evidence, Research in Transportation Economics*, Vol. 9, 2004.
- 10) Lawphongpanich, S., Hearn, D.W. and Smith, M.J.(eds.): *Mathematical and Computational Models for Congestion Charging*, Springer, 2006.
- 11) Schade, J. and Schlag, B. (eds.): *Acceptability of Transport Pricing Strategies*, Elsevier Science, Oxford, 2003.
- 12) 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.
- 13) Richardson, H. W. and Bae, C.-H.C. (eds.): *Road Congestion Pricing In Europe: Implications for the United States*, Edward Elgar Publishing, 2008.
- 14) Saleh, W. and Sammer, G. (Eds.): *Travel Demand Management and Road User Pricing: Success, Failure and Feasibility*, Ashgate, 2009.
- 15) Arnott, R., Rave, T. and Schöb, R.: *Alleviating Urban Traffic Congestion*, The MIT Press, 2005.
- 16) Small, K.A. and Verhoef, E.T.: *The Economics of Urban Transportation*, Routledge, 2007.
- 17) 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.
- 18) Tsekeris, T. and Voß, S.: Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances, *Netnomics*, Vol. 10, No.1, pp. 5-52, 2009.
- 19) Hau, T.D.: Economic fundamentals of road pricing: a diagrammatic analysis, Part I - Fundamentals, *Transportmetrica*, Vol.1, No.2, pp. 81-117, 2005.
- 20) 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.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 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, 学位論文, 2004.
- 24) 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
 - 28) 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.
 - 29) 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.
 - 30) Maher, M., Stewart, K. and Rosa, A.: Stochastic social optimum traffic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 39, Issue 8, pp. 753-767, 2005.
 - 31) 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.
 - 32) 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.
 - 33) Yin, Y. and Lawphongpanich, S.: Alternative marginal-cost pricing for road networks, *Netnomics*, Vol. 10, No.1, pp. 77-83, 2009.
 - 34) 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.
 - 35) 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.
 - 36) Hau, T.D.: Congestion charging mechanisms for roads, Part I - Conceptual framework, *Transportmetrica*, Vol.2, No.2, pp. 87-116, 2006.
 - 37) 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.
 - 38) 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.
 - 39) 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.
 - 40) Yang, H. and Zhang, X.: Optimal toll design in second-best link-based congestion pricing, *Transportation Research Records*, No.1857, pp. 85–92, 2003.
 - 41) 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.
 - 42) Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K.: Optimal cordon pricing, *Journal of Urban Economics*, Vol. 54, No. 1, pp.21-38, 2003.
 - 43) 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.
 - 44) Verhoef, E.T.: Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city, *Journal of Urban Economics*, Vol. 58, No. 3, pp. 367-388, 2005.
 - 45) 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.
 - 46) 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.
 - 47) Ho, H.W., Wong, S.C. and Hau, T. D.: A multi-class congestion-pricing problem in a continuum transportation system, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 7 pp. 238-253, 2007.
 - 48) Geroliminis, N. and Levinson, D.M.: Cordon pricing consistent with the physics of overcrowding, in Lam, W.H.K., Wong, S.C. and Lo, H.K. (Eds.) *Transportation and Traffic Theory 2009*, Chapter 11, pp.219-240, 2009.
 - 49) de Palma, A., Kilani, M., Lara, M. D. and Piperno, S.: Cordon pricing in monocentric city model: Theory and application to Ile-de-France, presented at TRB 88th Annual Meeting, # 09-2597, 2009.
 - 50) May, A.D., Milne, D.S., Shepherd, S.P. and Sumalee, A.: Specification of optimal cordon pricing locations and charges, *Transportation Research Record*, Vol. 1812, pp. 60-68, 2002.
 - 51) 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.
 - 52) 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.
 - 53) 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.
 - 54) 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*, 15th ISTTT, pp. 519-540, Adelaide, Australia, 2002.
 - 55) 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.
 - 56) 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.
 - 57) 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.
 - 58) Santos, G.: Double cordon tolls in urban areas to increase social welfare, *Transportation Research Record*, Vol. 1812, pp. 53-59, 2002.
 - 59) Santos, G.: Urban congestion charging: A second-best alternative, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, No. 3, pp. 345-369, 2004.
 - 60) 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.
 - 61) 文世一, 秋山孝正, 奥嶋政嗣: 道路ネットワークにおける改善の混雑料金 —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.
 - 62) 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.
 - 63) Sumalee, A., May, T. and Shepherd, S.: Comparison of judgmental and optimal road pricing cordons, *Transport Policy*, Vol. 12, Issue 5, pp. 384-390, 2005.
 - 64) Sumalee, A.: Multi-concentric optimal charging cordon design, *Transportmetrica*, Vol. 3, No. 1, pp. 41-71, 2007.
 - 65) 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.
 - 66) Sumalee, A., Shepherd, S. and May, A.: Road user charging design: dealing with multi-objectives and constraints, *Transportation*, Vol. 36, No. 2, pp. 167-186, 2009.
 - 67) 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*, Vol. 1964, pp.1–8, 2006.
 - 68) 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.
 - 69) 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.
 - 70) 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.
- 71) 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.
 - 72) Connors, R., 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.
 - 73) 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.
 - 74) Ekström, J., Engelson, L. and Rydergren, C.: Heuristic algorithms for a second-best congestion pricing problem, *Netnomics*, Vol. 10, No.1, pp. 85-102, 2009.
 - 75) Koh, A., Shepherd, S. and Sumalee, A.: Second best toll and capacity optimisation in networks: Solution algorithm and policy implications, *Transportation*, Vol. 36, No. 2, pp. 147-165, 2009.
 - 76) Santos, G. and Rojey, L.: Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth, *Transportation*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-42, 2004.
 - 77) 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.
 - 78) 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.
 - 79) Schweitzer, L. and Taylor, B.D.: Just pricing: the distributional effects of congestion pricing and sales taxes, *Transportation*, Vol. 35, No. 6, pp. 797–812, 2008.
 - 80) 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.
 - 81) 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.
 - 82) Armelius, H. and Hultkrantz, L.: The politico-economic link between public transport and road pricing: An ex-ante study of the Stockholm road-pricing trial, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 2, pp. 162-172, 2006.
 - 83) Karlström, A. and Franklin, J.P.: Behavioral adjustments and equity effects of congestion pricing: Analysis of morning commutes during the Stockholm Trial, *Transportation Research Part A*, Vol. 43, Issue 3, pp. 283-296, 2009.
 - 84) Ungemah, D.: This land is your land, this land is my land: Addressing equity and fairness in tolling and pricing, *Transportation Research Record*, Vol. 2013, pp.13-20, 2007.
 - 85) Wu, Z. X., Lam, W. H. K. and Huang, H.-J.: Equity and efficiency analysis of pricing strategies in a bimodal network with heterogeneous user groups, *Transportation Research Record*, 2089, pp.43-50, 2008.
 - 86) Ecola, L. and Light, T.: Equity and congestion pricing: a review of the evidence, RAND Corporation technical report series, 2009. http://www.rand.org/pubs/technical_reports/TR680/
 - 87) Levinson, D.: Equity effects of road pricing: a review, University of Minnesota: Nexus Research Group in its series Working Papers with number 000059. 2009. <http://nexus.umn.edu/Papers/TransportEquityReviewPaper.pdf>
 - 88) 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.
 - 89) Yin, Y. and Yang, H.: Optimal tolls with a multiclass, bicriteria traffic network equilibrium, *Transportation Research Record*, Vol. 1882, pp. 45–52, 2004.
 - 90) 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.
 - 91) 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*, Vol. 5, Issue 2, pp. 141 – 157, 2009.
 - 92) 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.
 - 93) Guo, X. and Yang, H.: User heterogeneity and bi-criteria system optimum, *Transportation Research Part B*, Vol. 43, Issue 4, pp. 379-390, 2009.
 - 94) 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.
 - 95) 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.
 - 96) Yang, H., Xu, W. and Heydecker, B.: Bounding the efficiency of road pricing, *Transportation Research Part E*, in press. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.05.007>.
 - 97) Verhoef, E. T. and Small, K. A.: Product differentiation on roads: constrained congestion pricing with heterogeneous users, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, No. 1, pp. 127–156, 2004.
 - 98) Light, T.: Optimal highway design and user welfare under value pricing, *Journal of Urban Economics*, Vol. 66, Issue 2, pp. 116-124, 2009.
 - 99) Holguín-Veras, J. and Cetin, M.: Optimal tolls for multi-class traffic: Analytical formulations and policy implications, *Transportation Research Part A*, Vol.43, Issue 4, pp. 445-467, 2009.
 - 100) 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*, Vol. 1923, pp. 28-36, 2005.
 - 101) 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*, Vol. 1964, pp. 19-26, 2006.
 - 102) 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.
 - 103) Lu, C.-C. and Mahmassani, H. S.: Modeling user responses to pricing: Simultaneous route and departure time network equilibrium with heterogeneous users, *Transportation Research Record*, Vol. 2085, pp. 124-135, 2008.
 - 104) Lu, C.-C. and Mahmassani, H. S.: Dynamic pricing with heterogeneous users: Gap-driven solution approach for bicriterion dynamic user equilibrium problem, *Transportation Research Record*, Vol. 2090, pp. 75-85, 2009.
 - 105) Dimitriou, L., Tsekeris, T. and Stathopoulos, A.: Joint pricing and design of urban highways with spatial and user group heterogeneity, *Netnomics*, Vol.10, No.1, pp. 141-160, 2009.
 - 106) 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.
 - 107) Chow, A.H.F.: Toward a general framework for dynamic road pricing, in Heydecker, B.(ed.) *Mathematics in Transport*, pp. 245-257, Elsevier, 2007.
 - 108) Ban, X. and Liu, H. X.: A link-node discrete-time dynamic second best toll pricing model with a relaxation solution algorithm, *Networks and Spatial Economics*, Vol.9, No.2, pp. 243-267, 2009.
 - 109) 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*, Vol. 1923, pp. 61-72, 2005.
 - 110) 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. 170-190, 2008.

- 111) 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*, Vol. 43, Issue 3, pp. 267-284, 2009.
- 112) 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.
- 113) 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.
- 114) 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.
- 115) de Palma, A., Kilani, M. and Lindsey, R.: Comparison of second-best and third-best tolling schemes on a road network, *Transportation Research Record*, Vol. 1932, pp. 89-96, 2005.
- 116) de Palma, A. and Lindsey, R.: Modelling and evaluation of road pricing in Paris, *Transport Policy*, Vol. 13, Issue 2, pp. 115-126, 2006.
- 117) 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.
- 118) 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.
- 119) Lo, H.K. and Szeto, W.Y.: Time-dependent transport network design under cost-recovery, *Transportation Research Part B*, Vol. 43, Issue 1, pp. 142-158, 2009.
- 120) 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.
- 121) 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.
- 122) 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.
- 123) 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.
- 124) Meng, Q., Xu, W. and Yang, H.: Trial-and-error procedure for implementing a road-pricing scheme, *Transportation Research Record*, Vol. 1923, pp. 103-109, 2005.
- 125) 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.
- 126) 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.
- 127) Han, D. and Yang, H.: Congestion pricing in the absence of demand functions, *Transportation Research Part E*, Vol. 45, Issue 1, pp. 159-171, 2009.
- 128) Yang, H., Xu, W., He, B.S. and Meng, Q.: Road pricing for congestion control with unknown demand and cost functions, *Transportation Research Part C*, in press.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2009.05.009>.
- 129) 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.
- 130) Yang, F., Yin, Y. and Lu, J.: Steepest descent day-to-day dynamic toll, *Transportation Research Record*, Vol. 2039, pp. 83-90, 2007.
- 131) Schuitena, 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.
- 132) 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.
- 133) 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.
- 134) 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.
- 135) 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.
- 136) 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.
- 137) Cain, A. and Jones, P.M.: Does urban road pricing cause hardship to low-income car drivers?: An affordability-based approach, *Transportation Research Record*, Vol. 2067, pp. 47-55, 2008.
- 138) 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.
- 139) 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.
- 140) 三輪富生, 新井秀幸, 山本俊行, 安藤章, 森川高行: 都心来訪者の駐車デポジットシステムに対する受容性に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.25(1), pp.165-174, 2008.
- 141) 安藤章, 森川高行, 三輪富生, 山本俊行: 道路課金政策に対する事業者の賛否意識構造と駐車デポジット制度 (PDS) の有効性に関する研究, 都市計画論文集, No.43-3, pp.859-864, 2008.
- 142) 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.
- 143) 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.
- 144) 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.
- 145) 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.
- 146) Liu, Y., Guo, X. and Yang, H.: Pareto-improving and revenue-neutral congestion pricing schemes in two-mode traffic networks, *Netnomics*, Vol.10, No.1, pp. 123-140, 2009.
- 147) DeCorla-Souza, P.: FAIR lanes: A new approach to managing traffic congestion, *ITS Quarterly*, 8, pp. 5-13, 2000.
- 148) DeCorla-Souza, P.: FAST miles: Benefits and financial feasibility of multimodal investment and pricing strategy, *Transportation Research Record*, Vol. 1960, pp. 152-158, 2006.
- 149) DeCorla-Souza, P.: New active traffic management approach for metropolitan freeway networks, *Transportation Research Record*, Vol. 2065, pp. 1-8, 2008.
- 150) Kalmanje, S. and Kockelman, K.M.: Credit-based congestion pricing: Travel, land value and welfare impacts, *Transportation Research Record*, Vol. 1864, pp. 45-53, 2004.
- 151) 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.
- 152) 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.

- 153) 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, 都市計画論文集, No.42-3, pp.907-912, 2007.
- 154) 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.
- 155) 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.
- 156) 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.
- 157) 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.
- 158) 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.
- 159) Arentze, T.A., Hofman, F. and Timmermans, H.J.P.: Predicting multi-faceted activity-travel adjustment strategies in response to possible congestion pricing scenarios using an internet-based stated adaptation experiment, *Transport Policy*, Vol. 11, Issue 1, pp. 31-41, 2004.
- 160) Arentze, T.A. and Timmermans, H.J.P.: Congestion pricing scenarios and change of job or residential location: Results of a stated adaptation experiment, *Journal of Transport Geography*, Vol. 15, Issue 1, pp. 56-61, 2007.
- 161) 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.
- 162) Wen, C.-H. and Tsai, C.-L.: Traveler response to electronic tolls, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6 pp.1804-1817, 2005.
- 163) 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.
- 164) Kanamori, R., Miwa, T. and Morikawa, T.: Evaluation of road pricing policy with semi-dynamic combined stochastic user equilibrium model, *International Journal of ITS Research*, Vol.6, No.2, pp.67-77, 2008.
- 165) Safirova, E., Kellingham, K., Harrington, W. and Lipman, P. N. A.: Choosing congestion pricing policy: Cordon tolls versus link-based tolls, *Transportation Research Record*, Vol. 1932, pp. 169-177, 2005.
- 166) Nielsen, O.A.: Behavioural responses to pricing schemes: description of the Danish AKTA experiment, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 233-251, 2004.
- 167) Yagi, S. and Mohammadian, A.: Policy simulation for new BRT and area pricing alternatives using an opinion survey in Jakarta, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 31 Issue 5, pp. 589-612, 2008.
- 168) Dissanayake, D.: Sustainable urban policies for developing countries by integrating center-based telecommuting with transit and road pricing: Case study of Bangkok, Thailand, Metropolitan Region, *Transportation Research Record*, Vol. 2067, pp. 137-145, 2008.
- 169) Bonsall, P., Shires, J., Maule, J., Matthews, B. and Beale, J.: Responses to complex pricing signals: Theory, evidence and implications for road pricing, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 7, pp. 672-683, 2007.
- 170) 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.
- 171) 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(3), pp.759-770, 2003.
- 172) 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.
- 173) 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.
- 174) 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.
- 175) Hensher, D.A. and Puckett, S.M.: Refocusing the modelling 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.
- 176) 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.
- 177) Holguín-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.
- 178) Holguín-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.
- 179) Friesz, T.L., Mookherjee, R., Holguín-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.
- 180) Viegas, J. M. (ed.): *Interurban Road Charging for Trucks in Europe, Research in Transportation Economics*, Vol. 11, 2005.
- 181) 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.
- 182) 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.
- 183) Zou, X. and Levinson, D.: A multi-agent congestion and pricing model, *Transportmetrica*, Vol. 2, No.3, 237-249, 2006.
- 184) Zhang, L. and Levinson, D.: Road pricing with autonomous links, *Transportation Research Record*, 1932, 147-155, 2005.
- 185) Zhang, L., Levinson, D. M. and Zhu, S.: Agent-based model of price competition, capacity choice, and product differentiation on congested networks, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 42, No. 3, pp. 435-461, 2008.
- 186) Win, Z. N., Kubota, H. and Sakamoto, K.: Study on the characteristics of congestion pricing, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 7, pp. 254-268, 2007.
- 187) 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.
- 188) 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.
- 189) 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.
- 190) 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.
- 191) 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.
- 192) Gupta, S., Kalmanje, S. and Kockelman, K. M.: Road pricing simulations: traffic, land use and welfare impacts for Austin, Texas, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 29, No. 1, pp. 1-23, 2006.
- 193) Munk, K.J.: Evaluation of the introduction of road pricing using a computable general equilibrium model, in Jensen-Butler, C. et al.(eds.) *Road Pricing, the Economy and the Environment*, pp. 167-191, 2008.
- 194) Steininger, K.W., Friedl, B. and Gebetsroither, B.: Sustainability impacts of car road pricing: A computable general equilibrium analysis for Austria, *Ecological Economics*, Vol. 63, Issue 1, pp. 59-69, 2007.
- 195) Madsen, B., Jensen-Butler, C., Kronbak, J. and Leleur, S.: A systems approach to modelling the regional economic effects of road pricing, in Jensen-Butler, C. et al.(eds.) *Road Pricing, the Economy and the Environment*, pp. 229-265, 2008.
- 196) Proost, S. and Van Dender, K.: Optimal urban transport pricing in the presence of congestion, economies of density and costly public funds, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 9, pp. 1220-1230, 2008.
- 197) 山崎清, 上田孝行, 岩上一騎: 開発人口及び誘発・開発交通を考慮した東京湾アクアラインの料金値下げ効果の計測, 高速道路と自動車, 第51巻, 第6号, pp. 20-32, 2008.
- 198) 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.
- 199) Ubbels, B. and Verhoef, E.T.: Auctioning concessions for private roads, *Transportation Research Part A*, Vol. 42, Issue 1, pp. 155-172, 2008.
- 200) Verhoef, E.T.: Private roads: Auctions and competition in networks, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 42, No. 3, pp. 463-493, 2008.
- 201) 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.
- 202) 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.
- 203) Sandholm, W.H.: Evolutionary implementation and congestion pricing, *Review of Economic Studies*, Vol. 69, No.3, pp.667-689, 2002.
- 204) Sandholm, W.H.: Negative externalities and evolutionary implementation, *Review of Economic Studies*, Vol. 72, No. 3, pp. 885-915, 2005.
- 205) Sandholm, W.H.: Pigouvian pricing and stochastic evolutionary implementation, *Journal of Economic Theory*, Vol. 137, Issue 1, pp. 367-382, 2007.
- 206) 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.
- 207) 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.
- 208) Wie, B.-W.: Dynamic Stackelberg equilibrium congestion pricing, *Transportation Research Part C*, Vol. 15, Issue 3, pp.154-174, 2007.
- 209) Dimitriou, L. and Tsekeris, T.: Evolutionary game-theoretic model for dynamic congestion pricing in multi-class traffic networks, *Nemomics*, Vol.10, No.1, pp. 103-121, 2009.
- 210) Small, K.A.: Road pricing and public transport, *Research in Transportation Economics*, Vol. 9, pp. 133-158, 2004.
- 211) Ahn, K.: Road pricing and bus service policies, *Journal of Transport Economics and Policy*, Volume 43, No. 1, pp. 25-53, 2009.
- 212) Hamdouch, Y., Florian, M., Heam, D.W. and Lawphongpanich, S.: Congestion pricing for multi-modal transportation systems, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, Issue 3, pp. 275-291, 2007.
- 213) 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.
- 214) 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.
- 215) Verhoef, E.T.: Toll competition in transport networks, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 42, No. 3, pp. 361-366, 2008.
- 216) Mun, S. and Ahn, K.: Road pricing in a serial network, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 42, No. 3, pp. 367-395, 2008.
- 217) de Palma, A., Lindsey, R. and Wu, F.: Private operators and time-of-day tolling on a congested road network, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 42, No. 3, pp. 397-433, 2008.
- 218) 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.
- 219) Chan, K.S. and Lam, W.H.K.: Impact of road pricing on the network reliability, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 2060 - 2075, 2005.
- 220) Arnott, R.: Congestion tolling with agglomeration externalities, *Journal of Urban Economics*, Vol. 62, Issue 2, pp. 187-203, 2007.
- 221) Gardner, L. M., Unnikrishnan, A. and Waller, S. T.: Robust pricing of transportation networks under uncertain demand, *Transportation Research Record*, Vol. 2085, pp. 21-30, 2008.
- 222) 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.
- 223) Shepherd, S. P.: The effect of complex models of externalities on estimated optimal tolls, *Transportation*, Vol. 35, No. 4, pp. 559-577, 2008.
- 224) Verhoef, E.T. and Rouwendal, J.: Pricing, capacity choice and financing, *Journal of Regional Science*, Vol.44, No.3, pp. 405–435, 2004.
- 225) Verhoef, E.T.: Second-best road pricing through highway franchising, *Journal of Urban Economics*, Vol. 62, Issue 2, pp. 337-361, 2007.
- 226) 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.
- 227) 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.
- 228) Hyman, G. and Mayhew, L.: Optimising the benefits of urban road user charging, *Transport Policy*, Vol. 9, Issue 3, pp. 189–207, 2002.
- 229) 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.
- 230) 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.
- 231) 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.
- 232) Santos, G. and Fraser, G.: Road pricing: lessons from London, *Economic Policy*, Vol. 21, Issue 46, pp. 263-310, 2006.
- 233) 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.
- 234) 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.
- 235) 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.
- 236) Richards, M.: *Congestion Charging in London: The Policy and the Politics*, Palgrave, Basingstoke, 2006.
- 237) Santos, G.: Urban congestion charging: A comparison between London and Singapore, *Transport Reviews*, Vol. 25, No. 5, pp. 511–534, 2005.
- 238) Phang, S. Y. and Toh, R. S.: Road congestion pricing in Singapore: 1975-2003, *Transportation Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 16-25, 2004.
- 239) 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.
- 240) Holguin-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.
- 241) Hau, T.D.: Congestion charging mechanisms for roads, Part II - Case studies, *Transportmetrica*, Vol.2, No.2, pp. 117-152, 2006.
- 242) 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.
- 243) Rye, T., Gaunt, M. and Ison, S.: Edinburgh's congestion charging plans: an analysis of reasons for non-implementation, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 31, Issue 6, pp. 641 – 661, 2008.
- 244) Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L. and Rosqvist, L. S.: The Stockholm congestion - charging trial 2006: Overview of effects, *Transportation Research Part A*, Vol. 43, Issue 3, pp. 240-250, 2009.
- 245) Eliasson, J.: Lessons from the Stockholm congestion charging trial, *Transport Policy*, Vol. 15, Issue 6, pp. 395-404, 2008.
- 246) Eliasson, J.: A cost-benefit analysis of the Stockholm congestion charging system, *Transportation Research Part A*, Vol.43, Issue 4, pp. 468-480, 2009.
- 247) Daunfeldt, S.-O., Rudholm, N. and Ramme, U.: Congestion charges and retail revenues: Results from the Stockholm road pricing trial, *Transportation Research Part A*, Vol. 43, Issue 3, pp. 306-309, 2009.
- 248) 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.
- 249) 福田大輔: ストックホルムにおける道路混雑課金恒久実施までの計画・施策調整プロセス, *交通工学*, Vol. 44, No. 2, pp. 45-48, 2009.
- 250) 野口直志: 欧州等における道路課金の動向, *高速道路と自動車*, 第51巻, 第9号, pp. 32-37, 2008.
- 251) 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.
- 252) 久米 良昭: 諸外国におけるロードプライシングの導入事例, *日本不動産学会誌*, Vol. 19, No.3, pp.85-101, 2006.
- 253) Matsuda, W., Tsukada, Y., and Kikuchi, M.: Flexible charge measures used on toll roads: An analysis of demonstration projects in Japan, *Transportation Research Record*, 1932, 137-146, 2005.
- 254) Senbil, M. and Kitamura, R.: Policy effects on decisions under uncertain conditions: Simulation with mixed logit models of toll expressway use, *Transportation Research Record*, Vol.2076, pp. 1-9, 2008.
- 255) Kuwahara, M.: A theory and implications on dynamic marginal cost, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 7, pp. 627-643, 2007.
- 256) Verhoef, E.T. and Mohring, H.: Self-financing roads, *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 3 Issue 5 & 6, pp. 293 – 311, 2009.
- 257) Braess, D., Nagurney, A. and Wakolbinger, T.: On a paradox of traffic planning, *Transportation Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 446-450, 2005.
- 258) 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.
- 259) 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, #195, 2008.

(2008. 9. 12 第一稿提出)
(2009. 9. 25 最終稿提出)

都市域における混雑課金の政策分析: レビューと展望*

円山 琢也**

近年, 世界各地の都市が交通混雑などの都市問題の解決策のひとつとして混雑課金政策の導入を検討もしくは実施している. 混雑課金政策については, 経済学, 土木工学, 交通工学, 都市計画, 応用数学など様々な分野の研究者が理論・実証・事例などの様々なアプローチで活発な研究を行ってきている. 本稿は, 筆者がこれまで取り組んできた分野を重点的に取り上げながら, 既存研究のレビューと今後の展望をまとめることを目的としている. より具体的には, 最適・次善課金, 利用者の異質性・課金の公平性, 課金収入の新たな返金スキーム, 動学モデルなどの切り口で既存研究の知見の体系化を試みた.

Modeling Urban Congestion Pricing: Recent Review and Future Prospect*

By Takuya MARUYAMA**

Recently, cities around the world have tried to introduce congestion-pricing policies or have already implemented such policies in order to alleviate urban traffic congestion. Researchers in economics, civil engineering, transportation engineering, city planning and applied mathematics and other fields have used broad approaches, such as theoretical, empirical, and case studies, to investigate the topic. This article reviews recent papers on this topic including my previous studies and tries to offer its future prospect. Especially, this review attempts to synthesize previous findings regarding first-best and second-best pricing, equity issues, new schemes for refunding revenues, dynamic modeling, and so on.