道路課金政策における 課金収入再分配に関する研究

金森 亮¹・新井 秀幸²・山本 俊行³・森川 高行⁴

¹正会員 名古屋工業大学大学院特任准教授 工学研究科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
E-mail: kanamori.ryo@nitech.ac.jp

²正会員 大成建設株式会社 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿1-25-1)

³正会員 名古屋大学教授 エコトピア科学研究所 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: morikawa@nagoya-u.jp

低炭素社会の実現やその原資確保に向けた効率的な交通施策として道路課金政策が注目され、公平性や受容性の観点からは課金収入をいかに再分配するかが重要とされる。本研究では再分配効果を交通状況、効率性、公平性の視点から考察する。具体的には、所得階層（時間価値）別の交通手段選択モデルを組み込んだマルチクラス統合均衡モデルにて課金収入再分配のシナリオ別に社会的余剰を算出し、名古屋都市圏を対象としたコードン型の駐車デポジットシステム（PDS）の導入評価を行う。課金収入再分配の施策メニューとして、高速道路通行料金と鉄道運賃の割引を設定した場合、課金スキームにより分配比率は異なり、再分配を行うことで効率性と公平性は改善し、特に低所得者層に大きな影響が及ぶことを確認した。

Key Words : road pricing, PDS, revenue redistribution, equity, network equilibrium model

1. はじめに

海外の導入事例も多くなり、今後の低炭素社会の実現やその原資確保のための効率的な交通施策として道路課金政策（ロードプライシング）が注目されている。道路課金政策は交通混雑緩和や沿道環境改善の方策として理論的根拠があり効率性の高い施策であるが、導入の際に争点となるのが公平性や受容性に関する問題である^{1),2)}。つまり、自動車利用に対する追加的な課金への心理的負担、水平的・垂直的・空間的に生じる公平性の歪み^{3),4)}が受容性を低下させるのである。従って、ICT/ITSを活用したより受容性の高い課金システムや課金収入を原資とした補償施策メニューの考案が求められており、利害関係者への説明責任を果たすための精緻な交通需要予測モデルも必要とされている。

著者らが提案する新たな課金システムである“駐車デポジットシステム（PDS : Parking Deposit System）”^{5),6),7)}は、住民と事業主を対象としたアンケート調査からコードン型やエリア型といった通常の課金システムよりも受容性（賛成率）が高くなることを確認している^{8),9)}。図-1の通り、PDSは通常の課金システムに、課金対象エリア

に仕事や買い物等で来訪したドライバーには駐車場や店舗で利用可能なデポジットが与えられ、実質の負担額は課金額からデポジットとして返金される分が減少し、直接的かつ即時的に再分配効果（お得感）を認識できる。そのため、自動車来訪者の負担感や買い物客など課金対象エリアへの来訪者数減少の不安感が軽減され、受容性が向上するのである。また、PDS導入時の交通状況を個々人の活動・交通行動変化を考慮できる時間帯別統合均衡モデルにて計算した結果、名古屋市都心部を課金対象エリアと設定した場合、PDSは対象エリアの来訪者数減少の傾向を緩和し、通過するのみのドライバーにはデポジットが与えられないために通常の課金システムと同程度の通過交通排除効力を有し、環境改善効果が得られることが示された¹⁰⁾。さらに、朝ピーク時間帯の固定OD表を用いているが、個々人の時間価値の違いを考慮可能なマルチクラス統合均衡モデルにてPDSの導入評価を行ったところ、PDS [コードン型] は通常の課金システムと比べて効率性は下がるが、一種の課金収入再分配であるデポジット（返金）によって所得逆進性が改善されることを確認した¹¹⁾。

これまでの研究成果から、PDSの特性として受容性や

図-1 駐車デポジットシステム (PDS) の概念図

交通状況（自動車利用状況、課金対象エリアの来訪者数、環境改善、他）、効率性や公平性の各視点から議論することはできるが、比較対象である通常の課金システム（コードン型など）は課金収入再分配の効果を全く加味していないことに注意が必要である。つまり、通常の課金システムにて課金収入再分配を行った場合の交通状況等について分析できていない。加えて、PDSでも異なる課金スキーム（課金－返金（デポジット）の設定額）では課金収入の利用割合が異なる。

そこで、本研究では課金収入再分配による追加的な施策実施の影響を考慮し、課金収入中立¹¹⁾の同一条件下にて通常の課金システムとPDSの交通状況、効率性、公平性について比較分析し、PDSの特性を把握することを目的とする。

2. 既存研究のレビューと本研究の位置づけ

ここでは主に課金収入再分配に関連する既存研究を対象にレビューし、本研究の位置づけを明らかにする。本稿で取り上げた以外の道路課金政策に関する既存研究は円山¹²⁾、Tsekeris and Voß¹³⁾、Levinson⁴⁾のレビュー論文を参考して頂きたい。

実都市に導入されている道路課金政策は次善（セカンドベスト）の課金システムであり、対象エリアに流入する毎に課金されるコードン型課金（シンガポールで導入）、対象エリア内での走行に対して1日1回課金されるエリア型課金（ロンドンで導入）が有名である。ここで、ロンドンのエリア型課金システムでは対象エリア内の居住者も課金対象となるため、エリア内居住者の課金額は90%割引とし、課金収入の大部分をバスのサービスレベル向上に充てるなど、受容性や公平性に配慮している¹⁴⁾。

ジニ係数は格差の代表的な判断指標であるが、道路課金政策評価にも援用されている^{15), 16)}。しかし、同一の交通施策を対象としてもマイル尺度やアトキンソン指標など他の指標とは改善判断が異なる事例もあるため、単一ではなく複数の指標にて判断した方が良い¹⁷⁾。また、格

差など公平性の評価は指標に加えて、各個人の時間価値の差異や地域特性、交通状況の変化の視点からも行う必要があり、そのためには、評価モデルとして個人属性などを考慮できるマルチクラス均衡モデル^{18), 19), 11)}を適用することが望ましいといえる。

一方、通常のコードン型課金やエリア型課金の他に、May and Milne²⁰⁾が評価した走行距離型課金、走行時間型課金、混雑応答型課金、著者ら^{10), 11)}が評価したコードン型PDS、Maruyama *et al.*²¹⁾が評価した双方向コードン型課金、上限付きコードン型課金、エリア型PDS、さらに赤松²²⁾が提案する需要関数の把握を前提としないボトルネック通行権取引制度など、新たな課金システムの実都市への導入可能性がICT/ITSの進展に応じて高まっており、これらの効率性、公平性や受容性に関する複数都市の評価結果の蓄積²³⁾が望まれる。

道路課金政策に関する公平性や受容性は各個人の効用が低下しなければ良く、最近ではパレート改善を目指した課金システムに関する研究が多い。Daganzo²⁴⁾は課金と割当を組み合わせることで、課金収入再分配を行うことなくパレート最適が達成できる可能性について分析し、Nakamura and Kockelman²⁵⁾は現実的には困難であることを示した。また、一般性は低いですが、再分配を行わずにパレート改善を達成する課金システムも検討されている²⁶⁾。単純なIODネットワークではあるが、課金収入を代替交通手段への補助金として、時間価値分布の設定条件についてパレート改善されるかを検証され^{27), 28)}、その後、一般的なネットワークや個人の時間価値の特定を必要としない場合に拡張されている²⁹⁾。さらに、Wu *et al.*³⁰⁾は、自動車交通と公共交通の相互依存関係を考慮するなど一般化を図っている。また、自動車交通のみを対象として、システム最適化を実現するため、交通量が少ない経路利用を促すインセンティブ（割引）として課金収入を利用することも検討されている³¹⁾。

課金収入再分配の施策メニューとしては、代替交通手段のサービスレベル向上策への補助だけではなく、道路整備/改良、通勤費補助や税金控除などがあり、パッケージ化が有効とされる³²⁾。Small³³⁾やEliasson and Mattsson³⁴⁾は、個々の再分配施策導入によって所得階層、性別や世帯構成などで影響がどう異なるかを分析しているが、例えば、公共交通のサービスレベルが向上しても、利用者数の増加など需要変動は考慮できていない。また、先月分の課金収入相当額を対象都市内の全自動車保有者に対して補助金として均等に分配し、各ドライバーはそこから課金額を支払うクレジット型混雑課金システムが提案され、受容性や導入評価が行われている^{35), 36), 37)}。しかし、再分配の施策メニューとしてはクレジット分配のみであり、他の施策とのパッケージ化は分析されていない。

以上より、多くの課金システムが新たに提案されてい

図-2 交通行動の選択ツリー構造

るが、課金収入再分配による追加的・事後的な施策の実施の影響まで適切に考慮した導入評価はこれまで行われていない。本研究では、著者らが提案するPDSの特性把握の一環として、即時的に課金徴収の対象となったドライバーが利用するデポジットを差し引いた後の課金収入を、課金徴収の対象外の人々も享受できる鉄道運賃割引と高速道路通行料金割引などに再分配し、それに伴う交通手段分担率の変化（鉄道利用者数の増加）などの交通状況変化や効率性、公平性について実都市への導入評価結果を基に考察していく。デポジット制と運賃・料金割引の効果が各利用者に認識される時間推移は異なると思われるが、本研究では再分配メカニズムとして同時に実施され、認識されるものとする。

3. 評価モデル（二段階最適化問題）の概要

課金収入再分配メカニズムを適切に反映するため、本研究の評価モデルは、社会的余剰最大化モデルを上位問題、マルチクラス統合均衡モデルを下位問題とする二段階最適化問題となる。

(1) 時間価値別マルチクラス統合均衡モデル

道路課金政策の導入評価を交通状況変化、効率性、公平性の視点から行うため、本研究では既存研究¹⁾と同じく、ODパターンや所得に応じて異なる時間価値にて利用者を区分するマルチクラス統合均衡モデルにて交通状況を推計する。各個人の交通行動は図-2の通り、交通手段—経路選択からなるNested Logitモデルにて記述できると仮定する。

等価最適化問題は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \min Z_0 = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ & + \sum_{i,a} (p_a + \text{charge}_a^i) x_a^i / \tau_i \\ & + \sum_{i,rs,m,k} \frac{1}{\theta_1^m} f_{m,k}^{i,rs} \ln(f_{m,k}^{i,rs} / q_m^{i,rs}) + \sum_{i,rs,m',k} f_{m',k}^{i,rs} C_{m',k}^{i,rs} \\ & + \sum_{i,rs,m} \frac{1}{\theta_2} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / Q_{rs}^i) + \sum_{i,rs,m} q_m^{i,rs} V_m^{i,rs} \end{aligned} \quad (1a)$$

subject to

$$\sum_i x_a^i = x_a \quad \forall a \quad (1b)$$

$$x_a^i = \sum_{rs,k} f_{m,k}^{i,rs} \cdot \delta_{a,k}^{i,rs} \quad \forall i, a \quad (1c)$$

$$\sum_k f_{m,k}^{i,rs} = q_m^{i,rs} \quad \forall i, rs, m \quad (1d)$$

$$\sum_m q_m^{i,rs} = Q_{rs}^i \quad \forall i, rs \quad (1e)$$

$$f_{m,k}^{i,rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, Q_{rs}^i \geq 0 \quad \forall i, rs, m, k \quad (1f)$$

ここで、

$t_a(x_a)$: 自動車リンク a のリンクコスト関数

x_a : 自動車リンク a の交通量

x_a^i : 利用者クラス i の自動車リンク a の交通量

τ_i : 利用者クラス i の時間価値

p_a : 自動車リンク a の通行料金

charge_a^i : 課金額（実質課金額）

$f_{m,k}^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m の経路 k の交通量

$q_m^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m の交通量

Q_{rs}^i : 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通量

$C_{m',k}^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m' （鉄道）の経路 k の交通一般化費用（乗車/乗車外時間、アクセス距離など）

$\delta_{a,k}^{i,rs}$: 自動車リンク経路の接続行列

$V_m^{i,rs}$: 利用者クラス i の OD ペア rs 間の交通手段 m を利用する際の確定効用項

θ_1^m, θ_2 : スケールパラメータ

利用者クラスは、所得分布が対数正規分布に従うと仮定して算出した時間価値分布（平均：45.7円/分）を用いて、生起確率1%以上、10円/分区間を基本として離散化した結果、最終的には時間価値クラスは0~20, 20~30, 30~40, ..., 100~110, 110~140, 140~ (円/分) の12区分とした。名古屋都市圏内の各個人の時間価値は、時間価値分布（対数正規分布）に対応した乱数にて1つの時間価値を割り当て、クラス分けを行った²⁾。また、交通行動モデルのパラメータは、第4回中京都市圏パーソントリップ（PT）調査データから推定し、各交通手段の一般化時間（費用を各個人の割り当てられた時間価値にて時間換算したもの）に加えて、鉄道・バスのアクセス/イグレス距離、個人属性が説明変数として採用された。なお、パラメータ推定方法、詳細な推定結果、現況再現性

などは既往研究¹¹⁾を参照して頂きたい。

以上より、本モデルにて限定的ではあるが、道路交通政策が導入された場合の交通行動変化、利用者便益などの効率性、利用者クラス間の格差（公平性）などについて定量的な指標を算出することができる。

(2) 課金収入再分配メカニズムを組み込んだ社会的余剰最大化モデル

道路課金政策導入の目標に即して、効率性指標である社会的余剰最大化や公平性指標であるジニ係数などの格差最小化を目的関数とすることができるが、本研究では社会的余剰最大化を目指す。ここで、課金収入再分配メカニズムを再分配比率で表現すると、目的関数は以下の社会的余剰最大化モデルとして定式化できる。なお、社会的余剰は利用者便益^[3]と各交通事業者の収益差分^[4]からなる。

$$\max Z_1 = \sum_{i,rs} Q_{rs}^i \cdot (-S_{rs}^{i,without} - (-S_{rs}^{i,with})) \cdot \tau_i \quad (2a)$$

subject to

$$G = \sum_{i,a} \text{charge}_a^i \cdot x_{a,i}^{car} \quad (2b)$$

$$\sum_r \alpha_r = 1 \text{ and } 0 \leq \alpha_r \leq 1 \quad (2c)$$

$$\alpha_r (G - G_0) = M_r^{without} - M_r^{with} \quad (2d)$$

$$S_{rs}^i = -\frac{1}{\theta_2} \ln \sum_m \exp(-\theta_2 (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs})) \quad (2e)$$

ここで、

- G : 課金収入
- G_0 : 課金システムの運営費（一定、与件）
- α_r : 再分配施策メニュー r への分配比率
- M_r : 再分配施策メニュー r に関する収益
- $S_{rs}^i, S_m^{i,rs}$: 期待最大効用（ログサム変数）

(3) 二段階最適化問題

先述したように、本研究の評価モデルは、社会的余剰最大化モデル（式(2)）を上位問題、マルチクラス統合均衡モデル（式(1)）を下位問題とする二段階最適化問題となる。

解法アルゴリズムとしては、分配比率の組み合わせをヒュリスティックスに求めていくGA（Genetic Algorithm：遺伝的アルゴリズム）やSA（Simulated Annealing：焼きなまし法）などの組み合わせ最適化アルゴリズムの適用が挙げられる¹⁸⁾。さらに、分配比率にて各交通事業者への補償金額が決まった後、どの程度の割引が可能であるか、割引による利用者数の変化はどの程度であるかなど、均

衡状態を算出する必要がある。このため、非常に複雑な手順と計算コストがかかることが判明したため、本研究では離散化した分配比率の組み合わせを予め用意する、簡単な解法アルゴリズムにて近似計算を行った。

4. 課金収入再分配を考慮したPDSの導入評価

(1) 分析ケースの設定と現況再現性

課金対象エリアは名古屋市都心部（名古屋駅地区や栄地区を含む 25.5km²）である。分析対象とする課金システムは、通常のコードン型、コードン型 PDS であり、ケース名と課金スキーム（課金－返金の設定額）は表-1の通りである。課金額は、名古屋市内の鉄道利用時の平均支払運賃額を参考に設定している。また、case_0 は 2005 年時の交通ネットワークにおける交通状況であり、cordon_50 が通常の課金システム、それ以外が PDS に該当する。

評価対象時間帯は朝ピーク時（7～10時）であり、名古屋市中心40km圏域である名古屋都市圏内のPT調査データから該当時間帯のOD交通量を集計した。なお、各個人の時間価値クラスは先述した通り、対数正規分布に従う乱数にて割り当てている。また、各交通手段のLOSデータの設定は既存研究¹¹⁾と同じである。ここで、cordon_53とcordon_55は、通常のコードン型のように課金対象エリアへの流入リンクに課金額を付加するだけでは課金システムの特徴を反映できない。そのため、PDSを評価する際には、出発地と目的地が課金対象エリアであるか否かで4区分（内々OD・内外OD・外内OD・外々OD）し、課金対象エリアを目的地とする自動車利用者（外内OD）は実質課金額、それ以外の自動車利用者は課金額を課金対象エリアの流入リンクに付加した。

評価モデルにて推計した現況再現性（case_0）を確認すると、都市圏全体（約300万トリップ）の交通手段分担率は精度良く再現され、OD距離帯別の自動車/鉄道利用状況も相関係数が自動車：0.99、鉄道：0.92と非常に良いことを確認した¹¹⁾。時間価値クラス別の交通手段分担率をみると（図-3）、全てのクラスで自動車分担率は6割以上であり、若干ではあるが、時間価値（所得）が高くなる程、自動車分担率が高くなる傾向が確認できる。ここで、時間価値クラス別の交通手段分担率に関する真値（観測値）は把握していないため再現性検証は不可能

表-1 分析ケース

	case 0	cordon 50	cordon 53	cordon 55
課金額	0円	500円		
返金額	0円	0円	300円	500円
実質課金額	0円	500円	200円	0円

図-3 時間価値クラス別交通手段分担率 (case_0)

であり、加えて時間価値別の設定には個人属性や地域特性は反映されていないなど改良の余地があると考えている。時間価値別の分析について精度保証はできないものの、本研究では現況 (case_0) からの変化を中心に考察はできるものとして進めていく。

(2) 課金収入再分配による施策メニューと解法手順

道路課金政策が導入されると、本研究で想定する各個人の対応としては、交通手段変更と自動車経路変更を行う。また、PDSのデポジットによる返金システムは直接的かつ即時的な再分配効果を有し、主に通勤交通を対象とする朝ピーク時間帯では、自動車通勤者への通勤費補助（駐車場利用代金割引）と解釈することができる。そのため、課金収入再分配による施策メニューは、即時性と通常の課金システムとPDSの差別化を図るため、1) 自動車からの手段変更に対する公共交通サービスレベル向上（鉄道運賃割引）、2) 自動車利用者の経路変更（迂回行動）に対する高速道路通行料金割引、による補償を行うこととした。

従って、社会的余剰最大化モデル（式(2)）における分配比率は1つ決めれば良いが、さらに離散化することで計算負荷の軽減を図った。すなわち、課金収入の分配比率を事前に離散値の組み合わせとして複数ケース設定し、各ケースにおいて式(1)のマルチクラス均衡モデルにて社会的余剰を算出し、社会的余剰が最大値となる分配比率を最適分配比率とみなすものである。表-2は各施策への分配比率の組み合わせを示したものである。今回は各施策25%刻みの組み合わせを設定しているが、より詳細な組み合わせの設定や分配比率を連続変数として取り扱う効率的な解法アルゴリズムの適用は今後の課題である。

本研究における具体的な計算手順は次の通りである。

<Step0>

ある分析ケースにおいて、再分配を考慮しない状態での課金収入を算出する。

<Step1>

算出された課金収入から課金システムの運営費（一

表-2 各施策への再分配比率パターン

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
鉄道運賃割引	100%	75%	50%	25%	0%
高速道路通行料金割引	0%	25%	50%	75%	100%

図-4 再分配比率パターン別の社会的余剰

定、与件）を差し引き、再分配比率ケースの設定に応じて、各再分配施策（鉄道運賃割引と高速道路通行料金割引）に利用できる金額を決定する。

<Step2>

各再分配施策への利用可能金額から、割引額の上限值を設定する。

【Step2-1】 前回の最良の結果であった均衡状態の交通状況（LOS）を再現し、鉄道運賃割引への利用可能金額を超過しない最大割引額を、数え上げ法にて仮設定する（5円単位の調整）

【Step2-2】 仮設定した鉄道運賃割引額に基づく新たな鉄道LOSを作成し、さらに高速道路通行料金割引への利用可能金額を超過しないであろう割引額を数パターン（5円単位）設定する（参考として、case_0の感度分析の結果を用いた）

【Step2-3】 設定された高速道路通行料金の割引額と新たな鉄道LOSにて、マルチクラス統合均衡モデルを解く（設定した全パターン数）

【Step2-4】 高速道路通行料金割引パターンの中から、最良の割引額を1つ決定する

【Step2-5】 各分配施策の割引額が前回設定と同じであれば<Step3>へ、そうでなければ<Step1>へ戻る

<Step3>

課金収入再分配を行った際の社会的余剰を算出する

本計算手順で割引額は5～6回の繰り返しのて確定することができた。また、割引額の変化を5円単位としたため、厳密には課金収入中立の同一条件下での比較ではないが、再分配比率パターン別の社会的余剰の比較の影響はないことを確認している。

表-3 分析ケース別の各便益指標と割引額

	鉄道 割引額	高速道路 割引額	利用者便益		課金収入	高速道路通行料金 公共交通運賃収入	運営費	社会的余剰
			一般市民	貨物車				
cordon_50	115円	275円	64.01	28.37	52.45	-46.68	-2.50	95.64
(再分配前)	--	--	(-59.1)	(-8.0)	(56.4)	(26.8)	(-2.5)	(13.6)
cordon_53	80円	185円	52.68	26.23	32.36	-29.58	-2.50	79.19
(再分配前)	--	--	(-36.0)	(-5.7)	(36.0)	(18.9)	(-2.5)	(10.7)
cordon_55	15円	190円	23.80	22.73	7.06	-2.50	-2.50	48.59
(再分配前)	--	--	(-18.1)	(-4.8)	(11.2)	(13.0)	(-2.5)	(-1.2)

図-5 課金対象エリア（都心部）の交通手段別集中量

表-4 ODパターン別交通量の変化 (case_0比)

		cordon 50		cordon 53		cordon 55	
		車	鉄道	車	鉄道	車	鉄道
対象	⇒[1]	0.95	1.22	0.97	1.15	1.00	1.02
エリア[1]	⇒[2]	0.95	1.18	0.97	1.12	1.00	1.01
	⇒[3]	0.97	1.06	0.99	1.03	1.02	0.96
名古屋	⇒[1]	0.55	1.59	0.79	1.29	1.01	1.00
市内[2]	⇒[2]	0.94	1.26	0.95	1.20	0.97	1.08
	⇒[3]	0.96	1.18	0.97	1.14	0.99	1.06
名古屋	⇒[1]	0.56	1.21	0.79	1.10	1.06	0.97
市外[3]	⇒[2]	0.92	1.08	0.94	1.07	0.97	1.03
	⇒[3]	0.99	1.21	0.99	1.14	1.00	1.01

表-5 自動車交通関連指標の変化 (case_0比)

	走行距離台キロ			平均速度		CO ₂ 排出量	
	名古屋市	都心部	高速道路	名古屋市	都心部	名古屋市	都心部
cordon_50	-12%	-56%	43%	13%	56%	-7%	-31%
cordon_53	-7%	-47%	41%	9%	49%	-3%	-22%
cordon_55	-2%	-38%	51%	4%	33%	-3%	-12%

(3) 課金収入再分配を考慮した場合の導入評価

各分析ケースにおける再分配比率パターン別の社会的余剰を図-4に示す。cordon_50とcordon_53は分配比率が鉄道75%：高速25%（case_2），cordon_55は分配比率が鉄道50%：高速50%（case_3）の際に最も社会的余剰が大きくなり、通常の課金システムとPDSでは分配比率が異なる結果となった。これは、再分配施策メニューに補填可能な金額（課金収入－運営費）の大小によってパッケージ施策としての相互作用が異なるためと考えられる。つまり、必ずしも一方面への利用金額が多ければ多いほど効率性は向上するのではなく、多方面への補償が有効であり、導入都市の特徴を踏まえた課金収入の再分配比率に関する独自の検討が重要であることが分かる。

以後、各分析ケースの推計結果は最も効率的であった分配比率で課金収入再分配を行った状態である。表-3は各分析ケースの便益評価を整理したものである。本研究では、便益として走行時間短縮効果などからなる利用者便益（消費者余剰）に加え、道路事業者の課金収入と高速道路利用者増減による通行料金収入変化、公共交通事業者の利用者数増減による運賃収入変化から算出した。また課金システム運用に関する費用はシンガポールの事例（ETC方式）を参考にし、建設費と運営費を併せ1,250百万円/年（8百万ユーロ/年）程度とし、対象時間帯分に換算している。

利用者便益に着目すると、全てのケースで再分配前は

マイナスであったが、鉄道運賃や高速道路通行料金の割引によって大きく改善していることが分かる。一方、再分配後においても通常の課金システムとPDSとの効率性の優劣はかわらず、通常のcordon_50の方が効率性の観点では優れている。

交通状況の変化として、課金対象エリアの交通手段別集中量をみると（図-5），cordon_50では自動車利用が大きく減少し、鉄道やバスへ手段転換していることが分かる。また表-4よりその多くが課金対象エリア外から対象エリア内へのトリップ（外内OD）であることが分かる。PDSに注目すると、返金額が大きくなると自動車利用の削減量は小さくなり、全額返金するcordon_55では施策導入前よりも増加する結果となった。この理由としては、実質課金額が0円であっても通過交通が排除されるため、課金対象エリア内の自動車サービスレベルが向上したためと考えられる。また、cordon_55を除けば、再分配を行うことで自動車利用がより減少すると推計された。

自動車交通に関する各種問題改善効果として、走行距離台キロ、平均速度、CO₂排出量を取り上げ、case_0からの増減率を課金対象エリア内、名古屋市全体にて整理したものが表-5である。課金対象エリア内の自動車利用が増加したcordon_55も含め、全てのケースで自動車の走行距離台キロが減少している。特に通常の課金システムであるcordon_50では、都心部（課金対象エリア内）で50%以上もの削減がみられ、混雑改善に非常に大

きな効果が得られることが分かる。また CO₂排出量も名古屋市全体、都心部ともに道路課金政策導入後に減少しており、環境改善効果もあることが確認できた。

次に公平性に関する考察を行う。利用者クラス別に効用水準の変化を示した図-6 より、再分配後の状態は低所得者層の効用水準が大きく向上し、道路課金政策が抱えている所得逆進性の問題が改善されたことがわかる。また、再分配に補填できる課金収入が最も大きい通常の課金システム (cordon_50) は鉄道運賃の割引額可能額が大きく、元から自動車を使用していない人、つまり道路課金政策の影響を受けない人の効用を高めることから、再分配後に最も期待最大効用が高い結果となっている。

ここで、主に所得逆進性が生じていた外内 OD に着目すると(図-7)，通常の課金システム(cordon_50)では鉄道分担率が相対的に高かった低所得者層の人は鉄道運賃割引により大幅に効用が高まっているが，まだ中間層の人たちの効用は高所得者層と比べ低く，格差(公平性)の点で改善の余地がある。一方，PDS(cordon_53)では外内 OD も含め時間価値(所得)に応じたクラス間での格差が縮小し，導入後の効用の低下も小さくなり，公平性の観点からより望ましい結果が得られる可能性が高いことが分かった。また，再分配後の各個人の政策前後の効用差レベル別に該当者数を集計した図-8 をみると，通常の課金システム(cordon_50)に比べて PDS は効用差の少ない人が多く，利用者クラス間に加えて，個

人の享受する効用差の観点からもより施策実施による歪みが小さい課金システムであるといえよう。

以上より、道路課金政策が持つ効用水準の低下は、課金収入再分配としての鉄道運賃と高速道路通行料金の割引パッケージ施策により大きく改善できることが定量的に示された。また、通常のコードン型課金システムでは再分配を実施しても外内ODの利用者に対しての補償は十分ではなく、PDSのように課金対象エリアの真の来訪者を差別化し、直接的に補償できる課金システムは効用水準の低下を軽減し、所得階層間の格差も縮小するなど、公平性の観点から望ましいことが示された。

5. まとめと今後の課題

近年注目されつつある道路課金政策について、本研究では、課金収入を原資とした再分配施策が複数実施された場合の自動車利用削減量などの交通状況変化、効率性、公平性の視点から考察を行った。評価モデルは交通手段一経路選択に所得階層（時間価値）の影響を組み込むことができるマルチクラス統合均衡モデルと、課金収入再分配メカニズムの善し悪しを判断するための社会的余剰最大化モデルからなる二段階最適化問題として定式化される。ただし、実都市圏への適用の際には一般的な組み合わせ最適化アルゴリズムを援用することは困難であっ

たため、課金収入を原資とする施策への分配比率を事前に複数設定し、それらの社会的余剰を事後的に比較する近似的な手順にて二段階最適化問題を解いた。そのため、厳密な解法手順の適用は今後の課題である。

名古屋都市圏の朝ピーク時間帯のOD交通に対して、課金対象エリアを名古屋市都心部に設定し、通常のコードン型ロードプライシングと即時的かつ直接的なデポジット（返金）によって相対的に受容性が高い駐車デポジットシステム（PDS）について、課金収入再分配のパッケージ施策メニューとして高速道路通行料金と鉄道運賃の割引を実施した場合の比較を行った。その結果、課金システムにより施策への再分配比率は異なり、全ての課金システムで再分配施策を複合的に実施することで効率性と公平性が導入前よりも改善され、効率性では通常の課金システム（コードン型）、公平性ではPDSがより望ましい結果となった。また、再分配比率は課金収入の規模により異なり、例えば2つの施策を実施する場合は50%と一様に比率を事前決定することは社会的余剰を低下させる恐れがあり、導入都市の交通状況に応じて検討する必要があることを示した。一方、課金対象となる対象エリアの外内ODでは、通常のロードプライシングでは鉄道運賃割引などを行っても効用の低下は免れないが、PDSは直接的にデポジットを与える（返金する）ことで効用の低下は大きく軽減でき、所得階層間の格差も小さくなることを確認できた。一方、PDSは道路課金政策導入による課金対象エリアへの来訪者数減少を軽減する効果¹⁰⁾も確認されており、本研究の知見も踏まえると、従来の道路課金政策と比較して大きく受容性を改善できる課金システムであるといえる。

今後は、PDS導入時の商業売上や物流への影響、課金対象エリアや課金一返金の課金スキームの最適な決定方法、課金収入の再分配施策メニューの選定の検討手法の改良、中長期的な運営方法（課金一返金の動的更新、再分配施策メニューの更新）、など取り組んでいく必要があると考えている。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、熊本大学の円山琢也准教授より貴重なコメントを頂きました。また、本研究は科学研究費補助金21360244、環境省の環境研究総合推進費（E-1003）の助成を受けた研究成果の一部である。ここに記して、感謝の意を表します。

注

[1] 道路課金政策のシステム運営費以外は再分配の施策メニューの原資として課金収入を利用することを意味する。

[2] 所得（時間価値）分布は個人/世帯属性や居住地域

によって偏りがあると考えられるが、本研究では都市圏内の空間分布は様として乱数による割り当てを行っている。交通行動モデルのパラメータ推定時には潜在モデルとして個人属性別の分布特性を考慮しているものの、各個人への適切な時間価値の割り当ては今後の課題である。

[3] 利用者便益は、各個人の交通手段選択における期待最大効用（ログサム変数）を自動車の一般化所要時間のパラメータ-1.0（分）で除し、所属する利用者クラスの時間価値にて貨幣換算して算出している。

[4] 事業者の収益差分は課金収入にて補填されるため基本的に0円となる（式(2d)）。なお、本研究では道路課金政策導入による自動車利用の減少に伴うガソリン消費量と駐車場利用の変化は無視し、事業者は高速道路と公共交通の運営者のみを対象としている。

参考文献

- 1) Langmyhr, T. : Managing equity: The case of road pricing, *Transport Policy*, Vol.4, No.1, pp.25-39, 1997.
- 2) Viegas, J. M. : Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility, *Transport Policy*, Vol.8, No.4, pp.289-294, 2001.
- 3) Litman, T. : Using road pricing revenue: Economic efficiency and equity considerations, *Transportation Research Record*, No.1558, pp.24-28, 1996.
- 4) Levinson, D. : Equity effects of road pricing: A review, *Transport Reviews*, Vol.30, No.1, pp.33-57, 2010.
- 5) 森川高行：ITSで街をみがくー愛知・名古屋での取り組みー, *交通工学*, Vol.38, No.4, pp.5-10, 2003.
- 6) Morikawa, T. : Eco-transport cities utilizing ITS, *IATSS Research*, Vol.32, No.1, pp.26-31, 2008.
- 7) 森川高行：道路は、だれのものか, *ダイヤモンド社*, 2010.
- 8) 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.
- 9) 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, *都市計画学会論文集*, No.43-3, pp.859-864, 2008.
- 10) 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場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, No.4, pp.915-926, 2007.
- 11) 金森亮, 山本俊行, 森川高行：駐車デポジットシステム(PDS)の効率性と公平性に関する分析, *都市計画学会論文集*, No.44-3, pp.115-120, 2009.
- 12) 円山琢也：都市域における混雑課金の政策分析：レビューと展望, *土木計画学研究・論文集*, Vol.26, No.1, pp.15-32, 2009.
- 13) Tsekeris, T. and Voß, S. : Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances, *Networks*, Vol.10, No.1, pp.5-52, 2009.
- 14) Transport for London : Central London Congestion: Im-

- pacts Monitoring -Sixth Annual Report, 2008.
- 15) Sumalee, A., May, A.D. and Shepherd, S.P. : Comparison of judgmental and optimal road pricing cordons, *Transport Policy*, Vol.12, No.5, pp.384-390, 2005.
 - 16) 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 No.7, pp.655-671, 2007.
 - 17) 金森亮, 森川高行, 三輪富生, 左志 : マルチクラス統合均衡モデルを用いたパッケージ施策の導入評価, 第30回交通工学研究発表会論文集, pp.309-312, 2010.
 - 18) Yang, H. and Zhang, X. : Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.128, No.5, pp.420-428, 2002.
 - 19) 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.
 - 20) May, A.D. and Milne, D.S. : Effects of alternative road pricing systems on network performance, *Transportation Research Part A*, Vol.34, No. 6, pp.407-436, 2000.
 - 21) Maruyama, T., Sumalee, A., Mizokami, S. and Kakimoto, R. : A modeling framework for evaluating road pricing schemes with daily price-cap and destination credit, *Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2010.
 - 22) 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.
 - 23) Santos, G. and Rojey, L. : Distributional impacts of road pricing: the truth behind the myth, *Transportation*, Vol.31, No.1, pp.21-42, 2004.
 - 24) Daganzo, C.F. : A Pareto optimum congestion reduction scheme, *Transportation Research Part B*, Vol.29, No.2, pp.139-154, 1995.
 - 25) Nakamura, K. and Kockelman, K. : Congestion pricing and roadspace rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor, *Transportation Research Part A*, Vol.36, No.5, pp.403-417, 2002.
 - 26) Lawphongpanich, S. and Yin, Y. : Solving the Pareto-improving toll problem via manifold suboptimization, *Transportation Research Part C*, Vol.18, No.2, pp.234-246, 2010.
 - 27) Liu, Y., Yang, H. and Guo, X. : Pareto-improving and revenue-neutral congestion pricing schemes in two-mode traffic networks, *Netnomics*, Vol.10, No.1, pp.123-140, 2009.
 - 28) Nie, Y. and Liu, Y. : Existence of self-financing and Pareto-improving congestion pricing: Impact of value of time distribution, *Transportation Research Part A*, Vol.44, No.1, pp.39-51, 2010.
 - 29) Guo, X.L. and Yang, H. : Pareto-improving congestion pricing and revenue refunding with multiple user classes, *Transportation Research Part B*, Vol.44, No.8-9, pp.972-982, 2010.
 - 30) Wu, D., Yin, Y. and Lawphongpanich, S. : Pareto-improving congestion pricing on multimodal transportation networks, *European Journal of Operational Research*, Vol.210, No.3, pp.660-669, 2011.
 - 31) Adler, J.L. and Cetin, M. : A direct redistribution model of congestion pricing, *Transportation Research Part B*, Vol.35, No.5, pp.447-460, 2001.
 - 32) Small, K.A. : Using the revenues from congestion pricing, *Transportation*, Vol.19, No.4, pp.359-381, 1992.
 - 33) Small, K.A. : The incidence of congestion tolls on urban highways, *Journal of Transport Economics*, Vol.13, No.1, pp.90-111, 1983.
 - 34) Eliasson, J. and Mattsson, L. : Equity effects of congestion pricing quantitative methodology and a case study for Stockholm, *Transportation Research Part A*, Vol.40, No.7, pp.602-620, 2006.
 - 35) 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.
 - 36) Kockelman, K.M. and Kalmanje, S. : Credit-based congestion pricing: A policy proposal and the public's response, *Transportation Research Part A*, Vol.39, No.7-9, pp.671-690, 2005.
 - 37) Gulipalli, P.K. and Kockelman, K.M. : Credit-based congestion pricing: A Dallas-Fort Worth application, *Transport Policy*, Vol.15, No.1, pp.23-32, 2008.

(2011.2.25 受付)

A STUDY ON REVENUE REDISTRIBUTION OF ROAD PRICING

Ryo KANAMORI, Hideyuki ARAI,
Toshiyuki YAMAMOTO and Takayuki MORIKAWA

Road pricing has been recognized as the most efficient policy to reduce traffic congestion and pollution. In order to implement this policy in practice, it has been important to allocate the revenue from the view point of equity and acceptability. This study examines the revenue redistribution effects of a normal pricing and parking-deposit-system from the aspects of traffic situation, efficiency and equity. We formulated the bi-level optimization problem which consists of a social surplus maximization model and a multiclass combined equilibrium model that can treat a difference of time of value. According to the application results in Nagoya metropolitan area, efficiency and equity are improved if the expressway toll and the train fare are discounted as the revenue redistribution, and its ratio is different in each pricing scheme.