

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560636

研究課題名(和文)都市高速道路の料金政策に着目した交通運用に関する研究

研究課題名(英文)Traffic operation of urban expressway considering toll system

研究代表者

秋山 孝正(AKIYAMA, TAKAMASA)

関西大学・環境都市工学部・教授

研究者番号：70159341

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、都市高速道路の料金政策を都市道路網の交通運用として位置づけ、都市道路網の交通調整機能を考えた有効な課金方式を導出する。具体的には、都市道路網の交通流変化を分析するための交通均衡分析と知的情報処理を用いた最適化手法を提案した。これより、現実の時間的・空間的な交通流動変化を考慮した弾力的な交通運用を可能とする都市高速道路料金の対距離料金の決定が可能となった。さらに、複数の課金形式を統合した社会的最適料金に関する実用的な料金決定方法を提案した。最終的に、都市道路網の効率的な交通運用に加えて、環境負荷への影響を考慮した、総合的な都市高速道路の課金方法の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：In the study, pricing policy of urban expressway is regarded as traffic management of urban road network. The effective pricing approach is proposed to promote the traffic adjustment function. In particular, the optimizing method with traffic assignment and soft computing to analyze the traffic flow on the network is mentioned. The practical pricing is formulated to maximize the social surplus and the second best pricing is mentioned as well. The elastic distance based toll on urban expressway can be proposed to realize the traffic management considering the time and space traffic. Furthermore, the integrated social optimizing pricing method with different objectives is proposed practically as well. Finally, the comprehensive pricing method on urban expressway has been proposed to provide the effective traffic management as well as to reduce the environmental effects.

研究分野：都市交通計画

キーワード：都市高速道路 対距離料金 利用者均衡配分 知的情報処理 需要変動型交通量配分 乗継交通量 社会的余剰 弾力的料金

### 1. 研究開始当初の背景

わが国の都市高速道路は、都市間の長距離移動のための高速自動車国道（都市間高速道路）と機能的に相違し、都市の骨格として円滑な都市内交通を確保する機能をもつ。このとき、都市高速道路料金は都市道路網の次善的課金として位置づけることができる。研究開始当初は、道路建設に関する償還主義と公正妥当主義から「均一料金制」が適用されていた。このため都市道路網の交通運用としての都市高速道路料金政策の検討は積極的に行われていなかった。これに対して、近年のETCの普及から技術的問題が減少し、都市高速道路網の拡大を踏まえて、平成24年1月より対距離料金が適用されている。すなわち、都市高速道路の料金政策を都市道路網全体の交通運用として再構成するものである。このような背景から、研究代表者・研究分担者は関連分野において、「都市高速道路の対距離料金制の導入に関する定量分析」、「組み合わせ最適化による混雑課金政策の検討」、「都市高速道路の流入調整型の交通制御の検討」、「都市高速道路乗り継ぎ制の導入効果に関する検討」、「ETC対応型の対距離料金の現実的設定方法」「知的情報処理を用いた交通行動分析」などの研究報告を行ってきた。これらの研究成果を踏まえ、都市高速道路全体の交通運用を意図した都市高速道路の料金設定方法の提示が可能となり、地球環境負荷を考慮した最適交通運用が具体化される。

### 2. 研究の目的

わが国の都市高速道路では、ETC技術の普及から、多様な料金設定が可能となり、特に先進的な課金方式として、平成24年より「対距離料金制」が導入されている（図-1）。



図-1 京阪神都市道路網

本研究では、自律的交通調整のための対距離料金の基本的な料金設定形式を整理するとともに、弾力的な料金政策の適用方法を導出する。すなわち、都市交通運用の視点から、強制的な交通調整である「交通制御」に加えて、「対距離料金に基づく自律的交通調整機能を包含した交通運用」を提案する。すなわち、①ETC技術の進展を踏まえた料金徴収制度として対距離料金制を基本とした弾力的料金を提案し、②各種形式の料金形式での需

要変化に対応する交通流動変化に関して交通量推計技術を開発する。③多種パラメータの膨大な調整過程を知的情報処理により実用的に解決する。④現実の都市高速道路で運用可能な料金形式を実証的に検証する、⑤将来的動向を踏まえた料金徴収と交通制御の統合的な都市交通運用システムを提案する。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、都市道路網の課金制度を混雑料金理論から再構成する。具体的な料金形式として、都市高速道路の対距離料金を想定して、次善料金の有効性を検討する。このため、まず都市圏全体の「社会的余剰」（利用者便益）に基づく料金政策の理論的背景を整理し、次善料金として都市高速道路の有料制の妥当性を検証した。特に現実的な都市高速道路の料金政策として、利用距離に応じた課金である「対距離料金」を取り上げた。

(2) つぎに需要変動型モデルを都市道路網の実態に関して、京阪神都市圏を対象地域として、道路交通センサス、起終点調査などの基本データを収集した。都市高速道路の実績データは、阪神高速道路株式会社および関連機関の協力を得た。また、京阪神都市圏の都市高速道路の幹線道路網に対して交通需要関数の設定により、交通需要変動が明確化された。

(3) つぎに都市道路網の基本的な交通均衡解析を実行した。この際2種類の交通量算定技術を提案した。すなわち、①都市高速道路上の課金を表現するため、交通量推計モデル上でも任意のランプ間料金を設定可能とする。このため、経路別料金算定と多層型ネットワーク経路探を包含したモデルを定式化した。②複数回の高速道路利用（乗り継ぎ）は対距離料金下で利用者の経路選択から発生する交通現象である。この交通現象の解析では、乗り継ぎ経路選択過程を表現する交通量推計法が必要である。特に最短経路探索では、都市高速道路利用経路を仮想リンクで表現する「代替的仮想リンク設定法」を提案した。これらの検討を踏まえた「料金設定を考慮した利用者均衡配分モデル」は以下のように定式化できる。

$$\min Z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \sum_{ij \in \Omega_h} \sum_{l \in K_{ij}} \frac{P_{ij}}{\gamma} f_l^{rs} \quad (1)$$

上記の、①都市高速道路の任意の課金額設定と②複数回利用（乗り継ぎ）交通の算定方法を包含した都市道路網の交通均衡分析法を開発した。この結果、任意の料金設定に対応して、現実的な利用者行動変化の表現に基づいて、都市高速道路の料金政策の影響評価を実施できることがわかった。

(4) 都市高速道路の対距離料金設定に関する社会的便益の算定を実行する。現行の「均一料金」設定時の都市道路網の交通状態との比較により便益を算定する。すなわち、走行時間短縮と料金収入変化分から社会的便益を算定する。具体的には、①線形関数型（ターミナルチャージ・料率）、②ステップ関数型（区間別料金）、③非線形関数型（曲線型逓増料金）などの料金設定の有効性を比較検討した（図-2）。

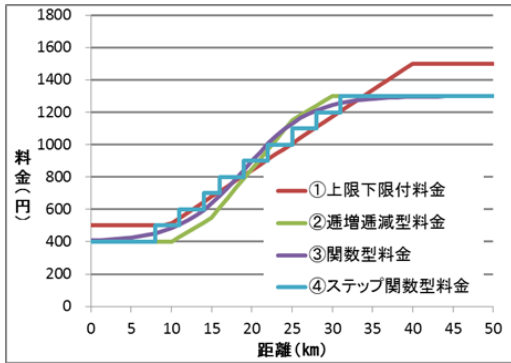


図-2 都市高速道路対距離料金設定

これらの検討結果を踏まえて、初年度は都市高速道路の対距離料金の基本的形状に着目した設定方法の有効性を整理する。対距離料金の運用時に期待される交通混雑緩和および社会的便益の影響範囲について議論した。

(5) つぎに、対距離料金を拡張した現実的な課金政策に関する分析を行った。特に「時間的・空間的」な運用視点から、弾力的な料金設定の有効性を検証した。具体的には「時間帯別料金」「区間別料金」等の時間的・空間的な料金設定を検討した。これらは多様な料金政策に基づく交通需要調整に対応する。この際、交通需要変動を前提とした定量分析が必要であり「需要変動型交通均衡分析モデル」を開発した。

$$\min Z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) dw + \sum_{ij \in \Omega_h} \sum_{l \in K_{ij}} \frac{p_{ij}}{\gamma} f_l^{rs} - \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(u_{rs}) du \quad (2)$$

このモデルを用いることで、①都市交通の需要変動を考慮した交通均衡分析が可能となる。また、②都市高速道路料金をランプ間料金として設定できることから、各種の対距離料金設定の比較検討が可能となる。さらに、③対距離料金設定時の交通現象の特徴である「乗り継ぎ交通量」を算定することが可能となる。すなわち、都市高速道路料金の設定変更に対応した都市道路網全体の交通流動変化を定量的に評価できる方法であるといえる。

(6) 時間的・空間的に複数料金形式の同時設定法を提案する。異なる多数の関数形状を設定し、交通量推計を内包した組み合わせ最適化

を実行する場合、演算の実行可能性に問題がある。このため、実用性に配慮した「知的情報処理」による算定法を提案した。ここで知的情報処理過程として、①事前に料金形式の複数ケースの定量的評価値を算定する。②設定形式と社会的便益(算定結果)の非線形関係をNN型推計モデルで表現した（図-3）。この方法は、膨大な推計計算を簡略化し近似的な最適解を導出する技術的提案である。これより任意の料金形式の有効性の比較検討が可能となった。

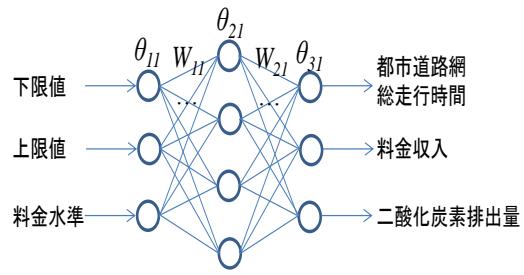


図-3 知的情報処理モデル

(7) この結果、各要素パラメータを最適設定した時間的・空間的な料金形式として、時間帯別・区間別（ゾーン別）の一般的な対距離料金を提案する。これより都市高速道路の適切な料金設定が、都市道路網の交通調整面で効果的で、次善料金として有効に機能することを示した。さらに、社会的余剰の概念に環境負荷を導入する。道路効率性に加えて、持続可能性を考慮した交通運用を検討した。特に環境税の概念を導入した課金形式について、開発された解析方法が適用した。これより、道路効率性と持続可能性は必ずしも同時に達成されない。このため都市道路網全体の多目的な交通運用を目指した料金政策について実証的に検討した。

(8) 都市圏全域に対して、道路効率性と持続可能性を考慮した体系的な交通運用方法が提案される。都市高速道路課金による社会的便益について実証的な整理を行うとともに、交通制御と料金政策の有機的な関係性について整理した。最終的な研究整理を行うとともに、都市高速道路課金における現実的な問題点を検討する。統合的な交通運用の構成を示し、今後の研究課題を整理した。

#### 4. 研究成果

本研究では、都市高速道路の情報通信技術の進展を踏まえて、将来的に実現可能な「料金政策の交通運用への活用」の具体的な方法を提案した。すなわち、都市高速道路料金に関して都市道路網全体の現実制約下での社会的最適料金（次善課金）の決定問題として定式化し、弾力的な料金政策に基づく交通運用を規定した。ここでは、都市高速道路の対距離料金設定の検討を踏まえて、社会的便益の増大化の議論を行った。また料金政策の一般形として時間的・空間的な交通需要変化適応

型の「体系的な交通運用方法」の導出を行った。特に交通工学・交通経済学の各視点から個別議論の多い「料金政策」と「交通制御」を統合的な交通運用システムとして再構成する視点は、当該分野の学術的進展に大きく貢献するものである。これらの研究内容に関連して、以下に示すような研究成果が得られた。

(1) 従来の高速道路建設に係わる償還主義・受益者負担原則に基づく都市高速道路の料金決定に対して、ここでは、料金政策を都市道路網全体の交通調整を意図した次善課金として位置づける。これより、都市高速道路の料金を交通経済学の面から統合的に理解するとともに、具体的な料金水準決定の議論を定式化できた<sup>①</sup>。

(2) いわゆる「混雑理論」に基づく最適料金決定問題では、都市道路網全体に対するリンク別課金が前提となる。このような一般道路リンクを包含する全リンクの課金は実行可能性が少ない。これに対して、本研究では都市道路網全体の次善料金として、都市高速道路の課金政策を提案した。現行有料道路制の有効利用という視点から極めて現実的な課金が提案できた。

(3) 現実規模の都市道路網に関して交通流解析を実行する。このため主要な技術開発を行う。すなわち、①都市高速道路ランプ間の任意の料金を設定可能とする。②特徴的な交通流動変化である「乗り継ぎ」交通を明示的に算定する。これより、任意の料金設定に対応して、現実的利用者行動変化を考慮した「利用者均衡配分アルゴリズム」を開発した。これより、各種料金政策の効果を現実的交通現象変化に基づいて検証できた<sup>②</sup>。

また、交通需要変化を前提として、現実的制約下での時間的・空間的な最適料金決定問題を拡張し、「社会的便益の最大化問題」を構成した。これらは、料金決定を利用者均衡制約付き数理最適化問題 (MPEC) に基づく定式化となっている。これより次善料金決定のモデル構造が明確となった。

(4) 時間的・空間的に多様な料金形式の同時決定では、交通量推計プロセスを内包した「組み合わせ最適化」は実用性に問題がある。このため、知的情報処理技術の統合利用による、効率的な求解アルゴリズムを提案した<sup>③</sup>。既存のソフトコンピューティング応用の成果を統合し、演算効率の飛躍的な向上から複雑な料金形式の形状を規定することができた<sup>④</sup>。ここでは、現実的的道路網に関して算定された料金設定パラメータと社会的費用としての都市道路網総走行時間の関係を示したものである (図-4)。

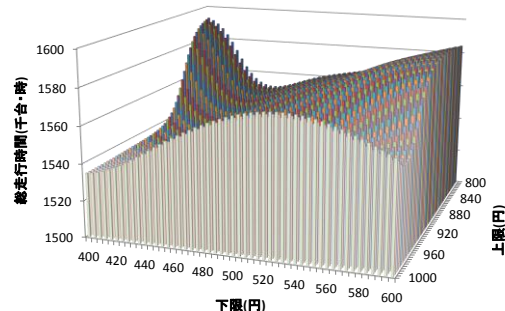


図-4 下限・上限料金と総走行時間との関係

(5) 持続可能性を考慮して環境負荷量の削減を前提とした交通運用として料金政策の展開を検討した<sup>⑤</sup>。環境負荷に対する環境課金に関しても、上記の適正課金額の決定プロセスを用いて、議論が可能となった。すでに、これより具体的な環境影響評価が可能となり、車種別料金設定などの課金形式決定への導入方法を提示できた。最終的に、現実規模の都市高速道路の適正な対距離料金設定を示したものが図-5である。

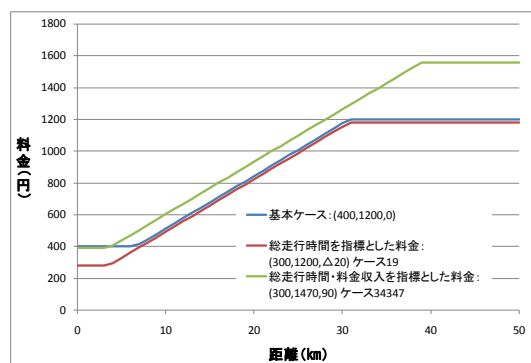


図-5 最適料金設定結果

(6) 最終的に「社会的便益の最大化問題」としての対距離料金設定問題を効率的な組み合わせ最適化問題として定式化するとともに、実用的な解法を導出することができた。特に各種料金設定について、とくに需要変動型の交通需要推計に拡張するため、解析的な分析が可能で小規模ネットワークを構成して、表-1のような評価結果を得ている。

表-1 最適ケースに関する交通量配分結果

ケース	都市高速道路		都市道路網		
	利用台数 (台)	料金収入 (万円)	総走行時間 (千台・時)	相対的改善度 (%)	CO <sub>2</sub> 排出量 (t-CO <sub>2</sub> )
階段型料金	611,825	32,157	1,574.6	24.3	7,928
最大便益	614,063	31,984	1,537.1	62.6	7,889
均一料金	593,174	41,522	1,577.4	21.4	7,949

これより、都市高速道路の料金政策に関して、理論的な検討結果と現実規模の道路網に対する

る検証結果が得られた。

以上のように、本研究においては都市高速道路の料金政策を勘案した交通運用に関して、利用者均衡と社会的余剰の観点から「理論的モデル」を構成して、対距離料金の有効な設定を考察するとともに、現実規模の都市道路網を想定した「実用的モデル」により、現実的な都市高速道路料金政策の妥当性を検証したものである。

なお、本研究では上記の研究成果に加えて、対距離料金形式、料金徴収方法（混雑料金、車種別料金、時間帯料金、路線別料金、区間別料金）についても研究成果が得られている。これらは、個別研究報告として、土木学会・日本交通学会・交通工学研究会・WCTRなどの内外の学術研究報告が行われている。

さらに研究成果を踏まえた今後の検討課題を整理した。すなわち、①都市高速道路の実効的な交通制御と料金政策を統合化した交通運用を具体化すること、②長期的な交通需要変化を考慮した料金政策の検討を行うこと、③料金設定変更に対応した都市道路網交通現象に基づく定量評価に対して、多様な知的情報処理モデルの適用を検討することが挙げられる。

#### <引用文献>

- ① 秋山孝正、井ノ口弘昭、奥嶋政嗣、交通調整を意図した都市高速道路の対距離料金設定に関する検討、交通学研究、査読有、Vol.57、2014、97-104
- ② 秋山孝正、井ノ口弘昭、奥嶋政嗣、乗り継ぎ交通を考慮した都市高速道路の料金設定に関する研究、土木学会論文集 D3、査読有、Vol.67、No.5、2011、1225-1232
- ③ 浅原麗、秋山孝正、井ノ口弘昭、都市高速道路の実証的料金設定についての方法的な研究、第31回交通工学研究発表会論文集、査読有、2011、285-290
- ④ T. Akiyama, M. Okushima, H. Inokuchi, Empirical Implementation of Distance based Toll for Urban Expressway, Proceedings of the 1st Conference of Transportation Research Group of India, 査読有、2011、1-12
- ⑤ 井ノ口弘昭、秋山孝正、需要変動型確率的利用者均衡配分モデルによる都市高速道路の対距離料金設定の検討、土木学会論文集 D3、査読有、Vol.70、No.5、2014、1119-1125

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 13 件）

- ① 井ノ口弘昭、秋山孝正、需要変動型確率的利用者均衡配分モデルによる都市高速道路の対距離料金設定の検討、土木学会論文集 D3、査読有、Vol.70、No.5、2014、1119-1125  
DOI:10.2208/jscejipm.70.I\_1119
- ② H. Inokuchi, T. Akiyama, Distance-based toll

for urban expressways in a stochastic equilibrium with elastic demand, Proceedings of the 19th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (HKSTS)、査読無、2014、111-116

- ③ 秋山孝正、井ノ口弘昭、奥嶋政嗣、交通調整を意図した都市高速道路の対距離料金設定に関する検討、交通学研究、査読有、Vol.57、2014、97-104
- ④ 堀広毅、奥嶋政嗣、高速道路料金政策の地方都市圏への影響分析のための統合型交通均衡配分モデルの適用、土木学会論文集 D3、査読有、Vol. 68、No. 5、2012、1087-1094  
DOI:10.2208/jscejipm.68.I\_1087
- ⑤ 鈴木崇児、わが国の高速道路料金制度とそのあり方—高速道路はいつまで有料か—、運輸と経済、査読無、第72巻、4号、2012、32-42
- ⑥ 秋山孝正、都市交通計画のためのファジィ交通行動モデル、システム/制御/情報、査読無、Vol.56、No.8、2012、442-447
- ⑦ 秋山孝正、井ノ口弘昭、奥嶋政嗣、乗り継ぎ交通を考慮した都市高速道路の料金設定に関する研究、土木学会論文集 D3、査読有、Vol.67、No.5、2011、1225-1232  
DOI : 10.2208/jscejipm.67.67\_I\_1225
- ⑧ 井ノ口弘昭、秋山孝正、都市高速道路の車種別料金体系に関する検討、土木学会論文集 D3、査読有、Vol.67、No.5、2011、1173-1180  
DOI : 10.2208/jscejipm.67.67\_I\_1173
- ⑨ 浅原麗、秋山孝正、井ノ口弘昭、都市高速道路の実証的料金設定についての方法的な研究、第31回交通工学研究発表会論文集、査読有、2011、285-290
- ⑩ T. Akiyama, M. Okushima, H. Inokuchi, Empirical Implementation of Distance based Toll for Urban Expressway, Proceedings of the 1st Conference of Transportation Research Group of India, 査読有、2011、1-12
- ⑪ 奥嶋政嗣、秋山孝正、都市高速道路の知識利用型ファジィ流入制御に関する適用性の検証、知能と情報、査読有、Vol.23、No.4、2011、117-126
- ⑫ 堀広毅、奥嶋政嗣、高速道路料金政策による地方都市圏の交通流動への影響分析方法の提案、交通工学研究発表会論文集、査読有、Vol.31、2011、291-294
- ⑬ 鈴木崇児、ETC割引制度を活用した高速道路緩和、中京大学経済学論叢、査読無、No.23、2011、45-61

〔学会発表〕（計 17 件）

- ① 秋山孝正、井ノ口弘昭、ニューラルネットワークによる都市高速道路の対距離料金評価モデル、第58回システム制御情報学会研究発表講演会、136B-5、2014年5月21日、京都テルサ（京都市）
- ② 秋山孝正、井ノ口弘昭、藤井勇樹、浅原麗、都市高速道路の弾力的な対距離料金設

- 定についての研究、土木学会関西支部年次学術講演会、IV-9、2014年5月10日、大阪産業大学（大阪府大東市）
- ③ 鳥居靖弘、奥嶋政嗣、萩原武司、河本一郎、都市高速道路の通行止め規制時における交通行動に関する基礎的分析、第48回土木計画学研究発表会、2013年11月2日、大阪市立大学（大阪市）
- ④ 井ノ口弘昭、秋山孝正、需要変動型確率的利用者均衡配分モデルによる都市高速道路の対距離料金の検討、第48回土木計画学研究発表会、No.272、2013年11月2日、大阪市立大学（大阪市）
- ⑤ 秋山孝正、井ノ口弘昭、都市高速道路の対距離料金設定に関するモデル分析、第33回交通工学研究発表会、No.52、2013年9月17日、日本大学（東京都千代田区）
- ⑥ 井ノ口弘昭、奥嶋政嗣、秋山孝正、ファジィ性を考慮した都市高速道路における料金決定方法の検討、第29回ファジィシステムシンポジウム、WF1-1、2013年9月10日、大阪国際大学（大阪府枚方市）
- ⑦ 井ノ口弘昭、秋山孝正、都市高速道路の料金形式設定に関するモデル分析、日本都市計画学会関西支部第11回研究発表会、No.28、2013年7月27日、大阪市立大学（大阪市）
- ⑧ T. Akiyama、H. Inokuchi、M. Okushima、Practical Management of Distance Based Toll System for Urban Expressway、WCTR 2013、No.3226、2013年7月16日、Rio de Janeiro(Brazil)
- ⑨ 堀広毅、奥嶋政嗣、地方都市圏に関わる交通機関分担を考慮した高速道路料金政策の影響分析、第47回土木計画学研究発表会、2013年6月1日、広島工業大学（広島県）
- ⑩ 井ノ口弘昭、秋山孝正、車種別確率的利用者均衡配分モデルを用いた都市高速道路の車種別料金の検討、第46回土木計画学研究発表会、No.227、2012年11月3日、埼玉大学（埼玉県さいたま市）
- ⑪ R. Asahara、H. Inokuchi、T. Akiyama、Analysis of distance based toll on urban expressway by traffic assignment with variable demand、7<sup>th</sup> international symposium in science and technology、2012年8月30日、Universiti Sains Malaysia (Malaysia)
- ⑫ 奥嶋政嗣、統合型交通均衡配分モデルによる高速道路料金政策の地方都市圏への影響分析、第45回土木計画学研究発表会、2012年6月3日、京都大学（京都市）
- ⑬ 浅原麗、秋山孝正、井ノ口弘昭、都市高速道路の関数型対距離料金に関する実証的分析、第44回土木計画学研究発表会、No.117、2011年11月25日、岐阜大学（岐阜県岐阜市）
- ⑭ 小澤友記子、萩原武司、奥嶋政嗣、宇野伸宏、大藤武彦、都市高速道路における障害時流出制御の効果と影響評価、第44

回土木計画学研究発表会、2011年11月25日、岐阜大学（岐阜県岐阜市）

- ⑮ 堀広毅、奥嶋政嗣、高速道路料金政策の地方都市圏へ影響分析のための統合型交通均衡配分モデルの構築、第44回土木計画学研究発表会、No.58、2011年11月25日、岐阜大学（岐阜県岐阜市）
- ⑯ 浅原麗、秋山孝正、井ノ口弘昭、都市高速道路の対距離料金設定についての交通システム分析、土木学会関西支部年次学術講演会、IV-45、2011年5月23日、関西大学（大阪府吹田市）
- ⑰ 堀広毅、奥嶋政嗣、近藤光男、高速道路料金政策の地方都市交通圏への影響分析、土木学会四国支部技術研究発表会、Vol.17、235-236、2011年5月14日、香川大学（香川県高松市）

〔図書〕（計2件）

- ① 秋山孝正、近畿大学商経学会、都市道路網における料金政策に関する実証的分析、2011、203-217
- ② 秋山孝正他、白桃書房、交通経済ハンドブック、2011、177

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

秋山 孝正 (AKIYAMA, Takamasa)  
 関西大学・環境都市工学部・教授  
 研究者番号：70159341

### (2) 研究分担者

奥嶋 政嗣 (OKUSHIMA, Masashi)  
 徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授  
 研究者番号：20345797

鈴木 崇児 (SUZUKI, Takaji)  
 中京大学・経済学部・教授  
 研究者番号：70262748

井ノ口 弘昭 (INOKUCHI, Hiroaki)  
 関西大学・環境都市工学部・准教授  
 研究者番号：10340655