

交通の適応型モーダルシフトに対するシステム評価

矢野 浩仁^{1,2,a)} 橋本 博文¹ 福本 恭^{1,3} 寺野 隆雄²

受付日 2014年3月31日, 採録日 2014年10月8日

概要: 交通渋滞緩和の交通施策の1つとして、自動車から公共交通の利用を促進させるための交通施策（モーダルシフト）が注目されている。従来モーダルシフトは公共交通の利便性向上を中心に議論されてきた。具体的には鉄道の相互乗り入れや、LRT（Light Rail Transit）等の補完的な交通機関の導入等が検討されていた。近年 ICT（Information and Communication Technology）の発達により、公共交通や移動者の現状を把握し、それに応じて公共交通や移動者に働きかける新しいモーダルシフトが登場しつつある。本研究ではこれを従来のモーダルシフトと区別するため、本研究では適応型モーダルシフトと呼ぶ。適応型モーダルシフトが従来の交通施策と比較して、どの程度効果の違いが現れるのかはこれまで議論されていなかった。そこで本研究では、従来の交通施策のうち道路建設、ロードプライシングをとりあげ、適応型モーダルシフトとの定量比較を行った。定量評価を行うためにこれらの便益を算出可能な評価モデルを開発した。本評価モデルは数十年後までの投資対効果について、車利用者、自治体、付近住民、公共交通事業者のそれぞれの視点で評価できるようにし、そのために道路交通流のモデル、各交通施策に対する反応モデルを組み込み、いくつかの実データからモデルのパラメータ推定を実施している。本評価モデルを用い、豊田市の統計データを使ってシミュレーション評価を実施した。その結果、豊田市をケーススタディとした場合には、適応型モーダルシフトは費用対効果で有望な交通施策であることを確認した。また、適応型モーダルシフトと道路建設を同時に実施することで、持続的な渋滞緩和効果を得られることも確認した。

キーワード: モーダルシフト, ロードプライシング, 費用便益分析, システムダイナミクス

System Evaluation of the Adaptive Modal Shift

KOJIN YANO^{1,2,a)} HIROFUMI HASHIMOTO¹ TAKASHI FUKUMOTO^{1,3} TAKAO TERANO²

Received: March 31, 2014, Accepted: October 8, 2014

Abstract: One of the measures for decreasing traffic congestion, modal shift (promoting shifts from private vehicle use to that of public transportation) is getting attention. Modal shift was mainly discussed for improving accessibility of public transportation, such as shared station of railway or LRT (Light Rail Transit). In recent years the development of ICT (Information and Communication Technology) is leading to the appearance of new types of modal shift which control public transportations and people according to the status of them. The above new modal shift is called “the Adaptive Modal Shift” in this study to distinguish from conventional one. The difference between the effects of the Adaptive Modal Shift and that of conventional traffic measures has not been examined yet. Therefore, we have quantitatively compared the Adaptive Modal Shift with conventional traffic measures e.g., road construction and road pricing. We have developed the evaluation model which allows the calculation of these effects for quantitative comparison. This evaluation model enables to evaluate return on investment for several decades to come in some perspectives e.g., car users, local government, residents and public transportation operators respectively. That is why we have incorporated the model of road traffic flow and the model of response against traffic measures and have fitted parameters based on actual data. We have used the statistics of Toyota-City to simulate this evaluation model. The result shows the Adaptive Modal Shift is effective traffic measures in terms of return on investment in the case of Toyota-City. Also the result shows the combination of the Adaptive Modal Shift and road construction enables to keep on alleviating traffic congestion.

Keywords: Modal shift, road pricing, cost-benefit analysis, system dynamics

1. はじめに

近年、世界各地で都市化が進んでおり、2050年には世界人口の60%以上が都市に住むといわれている。これにより都市の交通渋滞は世界各国共通の問題になっている。交通渋滞解消に対しては、道路建設といった容量を整備・拡張する交通施策、走行する自動車を減らす交通施策、自動車から別の交通手段に移す交通施策の3つがあげられる。特に3番目の交通施策のうち、自動車から公共交通への利用促進を図る交通施策をモーダルシフトと呼んでいる。従来モーダルシフトでは公共交通のアクセスを向上させることを重点に議論されており、たとえば鉄道の相互乗り入れや、LRT (Light Rail Transit) 等の補完的な交通機関の導入等が検討されてきた。近年 ICT (Information and Communication Technology) の発達により、公共交通や移動者の状況をつねに把握し、それぞれに働きかけることでより公共交通の利用を促進させる新しいモーダルシフトが議論されている。たとえば Kuwahara ら [1] は、CO₂ 排出量を下げるために公共交通を勧める案内をスマートフォンで提供する一方で、利用者が公共交通に多く集まる場合に臨時便を出す交通施策を述べている。こうした新しいモーダルシフトを、本研究では適応型モーダルシフトと呼ぶ。

交通渋滞に対し、ある特定の交通施策がどの程度効果を発揮するかは、多くの研究がある。たとえばロードプライシングについては、Tsubota ら [2] が東京都内にロードプライシングを導入したときの効果シミュレーションについて報告している。日本高速道路保有・債務返済機構 [3] では、ロンドン等実際にロードプライシングを導入した都市を調査し、投資額と交通渋滞緩和効果について報告している。しかし従来研究では、本研究対象の適応型モーダルシフトと他の交通施策についてどの程度効果が異なるのか、比較研究はされてはいなかった。

そこで本研究では、適応型モーダルシフトの定量評価モデルを構築し、各交通施策に対するシミュレーション検証を行った。検証の際には移動者や交通機関利用状況、道路交通量等の実データの公開情報が豊富に揃った豊田市を選択し、評価を行った。比較対象として道路容量を増やす交通施策である道路建設、および交通量を減らす交通施策としてロードプライシングを選び、それらの交通施策との比較検証を行った。以下2章では、モーダルシフトの従来研究について紹介し、3章では適応型モーダルシフトのリファレンスモデルを説明する。4章では適応型モーダルシ

フト定量評価モデルの内容を解説し、5章では豊田市の統計情報を用いて、設定したシミュレーション条件について説明し、6章では定量評価モデルに対するシミュレーション結果について報告する。

2. モーダルシフト研究のこれまでの取り組み

モーダルシフト研究については大きく旅客の輸送に関するものと貨物輸送に関するものがある。このうち本研究では旅客の輸送に関するものについて述べる。松橋ら [4] は交通分野で2050年までにCO₂ 排出量70%削減を達成するための施策の1つとして、公共交通の利用促進（本報告の定義ではモーダルシフト）を取り上げている。松橋らは対象地域を都市圏・都市部、都市圏・郊外、地方・都市部、地方・郊外の4つに分類し、それぞれに好適な公共交通の利用促進策を述べている。それによると都心圏・都心部はロードプライシング、都市圏・郊外はP&R (Park and Ride)、地方・都心部はLRT、地方・郊外は乗合タクシーが好適な交通施策であり、特にLRTの交通施策が交通ネットワークのサービス水準を向上させ、CO₂ 排出量削減に貢献すると予測している。また大野ら [5] は公共交通利用の際の移動ステージを、自宅から公共交通乗り場までの末端交通、地域公共交通、地方公共交通、幹線公共交通に分け、それぞれのステージの間に段差（乗換抵抗）があり、モーダルシフトはこれら段差をいかに小さくするかが課題であると述べている。段差を小さくする手段として、道路と線路の両方を移動可能なデュアルモードビークル、乗継施設の改良、IC乗車券導入による心理的な段差の緩和等をあげている。

上記はいずれも公共交通側に働きかける研究に対し、利用者に働きかける研究も存在する。倉内ら [6] は都心の渋滞解消に公共交通の利用促進をあげ、その手段として「交通エコポイント」（本論文の移動ポイントと同じもの）付与によるモーダルシフトについて述べている。また実証例として名古屋市での社会実験結果を紹介し、実証後のアンケートから、ポイント制度により環境配慮行動を促進させる可能性があることを示している。

さらに近年では公共交通側と移動者側両方に適宜働きかけを行う適応型モーダルシフトの検討も始められている。Kuwahara ら [1] は、CO₂ 排出量を下げるために公共交通を勧める案内をスマートフォンで提供する一方で、利用者が公共交通に多く集まる場合に臨時便を出す適応型モーダルシフトについて述べている。

以上述べたモーダルシフトのこれまでの研究をまとめると、従来は公共交通の利便性向上を中心に議論が行われてきた。次第に利用者側の効用を変える交通施策が検討され始め、近年になり公共交通と移動者に対し適宜働きかけを行う適応型モーダルシフトも議論されるようになっていく。

¹ 株式会社日立製作所
Hitachi Ltd., Yokohama, Kanagawa 244-0817, Japan

² 東京工業大学
Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa 226-8503, Japan

³ 京都大学
Kyoto University, Kyoto 606-8501, Japan

^{a)} kojino.yano.xs@hitachi.com

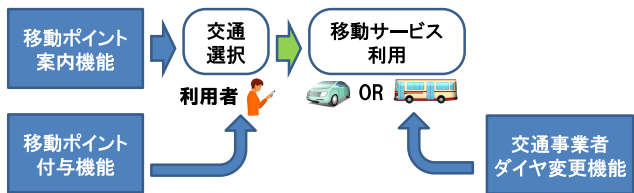


図 1 適応型モーダルシフトのリファレンスモデル
Fig. 1 Reference model of the Adaptive Modal Shift.

3. 適応型モーダルシフトのリファレンスモデル

本論文では近年登場しつつある適応型モーダルシフトについて取り上げる．最初に適応型モーダルシフトのリファレンスモデルを図 1 のとおりに規定する．本モデルでは移動ポイント案内，移動ポイント付与，および交通事業者ダイヤ変更の 3 つの機能を配置する．移動ポイント案内機能では，これから移動しようとする利用者に対し，公共交通を利用した場合に移動ポイントがもらえると案内を送信する．利用者は案内を参照し交通機関選択（自動車もしくは公共交通）を行い，移動する．移動ポイント付与機能では，利用者が実際に公共交通を利用したことを確認した後，移動ポイントを利用者に提供する．また交通事業者ダイヤ変更機能では，移動ポイント案内での参照履歴等を参照し，公共交通の利用が多くなると見込まれた場合には，その時間帯に対し臨時便を出すことが可能か判断し，増便可能であれば臨時便を出す．これにより，利用者が公共交通を利用したときに，待ち時間が少なく混雑も少なく感じさせ，公共交通の利用を定着させることを狙っている．

以下，本適応型モーダルシフトのリファレンスモデルに基づき，説明を行う．

4. 適応型モーダルシフト定量評価モデル

本章では適応型モーダルシフトの優位性を議論するため，他の代表的な交通施策である，道路建設，ロードプライシングとの比較を行うための定量評価モデルについて説明する．

4.1 定量評価の前提条件

本研究では，主に交通施策に対する投資対効果を明らかにするために比較評価を行う．道路建設の効果は建設着手から何年も経てから現れることが多い，そのため本研究では，まず定量評価は数十年の期間で行うものとした．こうした長期間での評価の場合，渋滞に関する影響が大きく変わるものもあると考えられる．しかし本研究では，交通施策に対する効果の定量比較を行うため，交通施策以外で渋滞に変化を与える要因については，変わらないという前提において評価を行った．表 1 に変わらないとした主な前提を示す．

また本研究で取り扱う道路建設，ロードプライシング，

表 1 定量評価の中で変化しないとした主な前提

Table 1 Assumptions defined invariant in our evaluation.

分類	項目
環境	人口，交通量
自治体	交通施策に対する投資額 ・道路建設：建設費 ・ロードプライシング：維持費
自動車	自律走行車，自動車の大きさ
道路	信号制御方式変化
公共交通	鉄道，バスの路線網

表 2 各交通施策導入時の影響

Table 2 Main influences applied in each of the traffic measure.

交通施策	渋滞に対する主な影響事項
道路建設	道路容量の拡張，道路走行時間減少（ただし，渋滞緩和による新規交通量の誘発は想定しない）
ロードプライシング	・自動車交通量の減少（主に交通量そのものの減少，一部公共交通へのモーダルシフト） ・自治体の税收増（通行料収入）
適応型モーダルシフト	・公共交通利用者への移動ポイント提供 ・公共交通の増便 ・自動車交通量の減少（自動車から公共交通への移動） ・維持費（主に移動ポイント，増便コスト）

適応型モーダルシフトについては，表 2 の影響を与えるものと仮定した．

4.2 モデルの概要

上記前提条件を受けて開発した適応型モーダルシフト定量評価モデルの概要を図 2 に示す．本モデルは入力層，利用者行動層，交通層，出力層の 4 つの層で構成される．特に本モデルでは，利用者行動層と交通層を明確に分けている．これは交通利用者の選択（自動車か，公共交通か）があり，その後行動選択に従って各交通機関を利用することを示している．本研究では，この評価モデルを使い毎年の交通施策（投資）により，年ごとの便益変化を算出している．また年ごとの交通施策に基づき，たとえば道路容量といったインフラや公共交通の変化についても模擬して便益変化に反映している．

以下，各入出力，および各モデルについて説明する．

4.3 交通流モデル

最初に交通流モデルについて説明する．交通流モデルは，道路整備費用，および道路の通行料に基づいて，交通

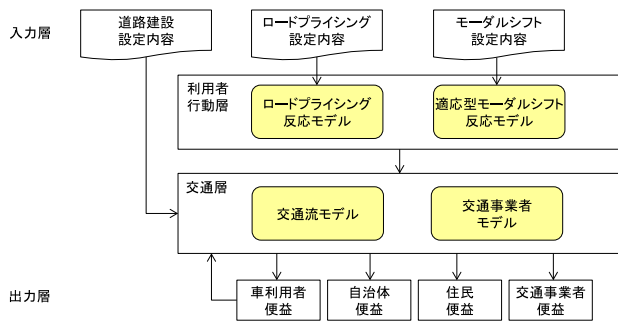


図 2 適応型モーダルシフト定量評価モデル全体像

Fig. 2 Overview of the evaluation model of the adaptive modal shift.

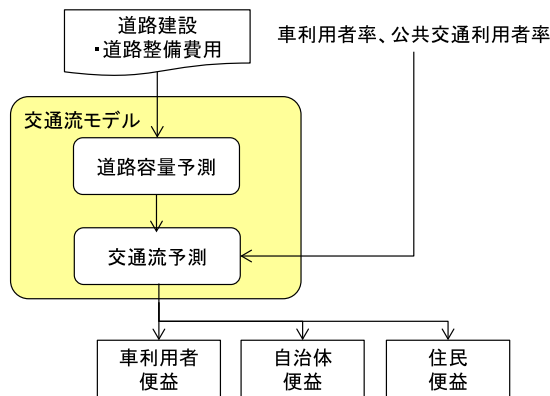


図 3 交通流モデル

Fig. 3 Traffic flow model.

流（車の台数，速度）を予測するモデルである．交通流モデルの概要を図 3 に示す．

交通流モデルでは，最初に道路整備費用に基づいて道路容量の変化予測を行う．道路容量の変化式は次のとおりである．

$$C = C_0 \cdot (1 + \gamma \cdot ARI)$$

C ：道路容量 C_0 ：道路容量初期値

γ ：パラメータ ARI ：道路整備累積費用

パラメータ γ は，道路整備費用に対し容量改善する比率を表している．本研究では豊田市内の幹線道路の 1 つである国道 301 号線豊田東拡幅工事の事例 [7] を基にパラメータを決定した．同工事では 1996 年から 2006 年の 11 年間に 52 億円を投入し，混雑度は 1.38 から 1.11 に改善された．このときの交通量は約 14,300 台/日から約 17,100 台/日に増加している．混雑度 = 交通量/道路容量で与えられるため，これらを基に道路容量を求め，パラメータ γ の推定を行った．結果 $\gamma = 0.00936$ とした．

次に変化した道路容量，交通量に基づいて，交通流予測を行う．交通流予測式は BPR 関数 [8] を用いており，これにより単位距離あたりの旅行時間を算出している．

$$t = t_0 \cdot \left\{ 1 + \alpha \cdot \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right\}$$

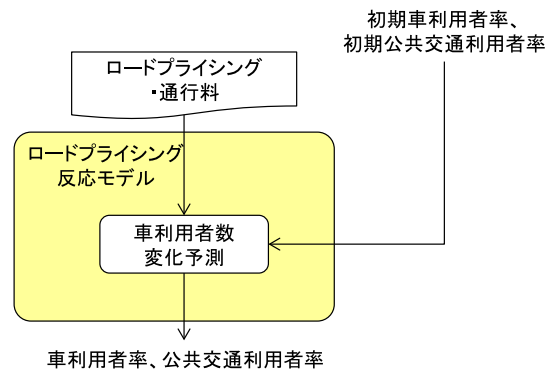


図 4 ロードプライシング反応モデル

Fig. 4 Response model of road pricing.

t ：単位距離あたりの旅行時間 t_0 ：自由旅行時間

x ：交通量 C ：道路容量

α, β ：パラメータ

α, β, t_0 は愛知県の多車線幹線道路の値 [9] であり， $\alpha = 0.54$ ， $\beta = 2.4$ ， $t_0 = 1.86$ とした．

また豊田市内の平均旅行距離については，国土交通省道路局 [10] に記された中京圏の自動車の 1 日平均トリップ数 1.41 [トリップ/日]，および日本交通計画協会 [11] に記された豊田市内の自動車の平均トリップ長 9 [km/トリップ] を利用し，豊田市内の平均旅行距離を 12.69 km とした．この平均旅行距離を用い，平均旅行時間を算出する．平均旅行時間は以下の式で算出している．

$$TTA = 12.69 \cdot t$$

TTA ：平均旅行時間

t ：単位距離あたりの旅行時間

車利用者数変化については，車利用者便益の増減に基づいて計算するが，本研究では車利用者便益が変化しても新たに車利用者数は増えないものと仮定した．

4.4 ロードプライシング反応モデル

ロードプライシング反応モデルは，道路に対する通行料を設けたときに，車の利用者数の増減を予測し，車利用率，公共交通利用率を推定するモデルである．

本研究ではロンドンの事例 [12]，[13] を参考に，通行料と車利用者数変化のモデルを構築した．ロンドンの事例では，ロードプライシングをあるエリアに 1 日 5 ポンドの課金をしたときに，エリア内交通量が 15% 減，エリア内外への出入りが 18% 減となった．またエリア内交通量 15% 減の半分の 7.5% が公共交通へ移行していた．本研究ではロンドンと同等の課金を行った場合，同じ効果が得られるものと仮定した．具体的には課金額を 750 円（当時の円換算 1 ポンド = 約 150 円と仮定）とし，そのときの車利用者変化は 15% 減少し，さらにその 15% 減少分のうち 7.5% を公共交通の利用者増につながるとモデル化した．

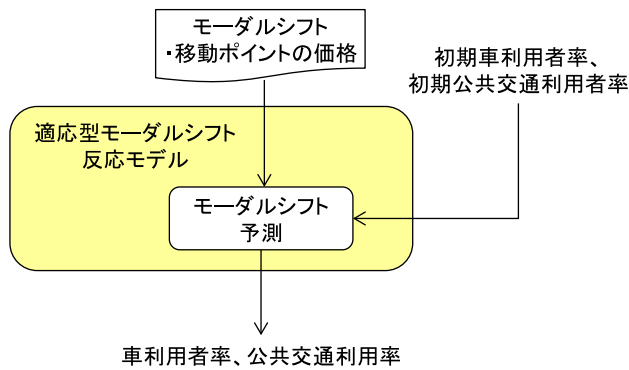


図 5 適応型モーダルシフト反応モデル

Fig. 5 Response model of the Adaptive Modal Shift.

4.5 適応型モーダルシフト反応モデル

適応型モーダルシフト反応モデルは、公共交通を利用したときに移動ポイントを付与することで、車での移動から、公共交通に乗り換えて移動する利用者の人数を推定するモデルである。本モデルでは移動ポイントの価格から、モーダルシフト予測の処理を実施する。

本研究では、モーダルシフトの際に用いる交通手段の選択には、多項ロジットモデルを用いた。すなわち、各交通手段を選択する確率 P_i は、

$$P_i = \exp(U_i) / \sum_k (\exp(U_k))$$

i : 交通手段 U_i : 交通手段 i の効用関数

であり、交通手段 i の効用関数は、以下のとおりとした。

$$U_i = \alpha C_i + \beta T_i + \gamma$$

C_i : 交通手段 i の走行経費 T_i : 交通手段 i の所要時間

α, β, γ : 定数

ただし、本研究ではモデルを簡素化するために、 C_i と T_i を独立項とせず、所要時間 T_i を自動車の時間価値原単位 40.1 [円/分] [14] を基に時間費用 CT_i に変換し、費用 C_i と時間費用 CT_i の合計である一般化費用 C'_i を用いて、効用関数 U_i を定義した。

4.6 交通事業者モデル

交通事業者モデルは、鉄道、バス等の事業収入、支出を模擬するモデルである。

最初に公共交通利用者率から、対象地域の公共交通利用者数を計算する。次に交通事業者の運賃収入計算と増便計算を実施する。運賃収入計算は、乗降地点によって運賃が変わりうるが、本研究では都市内での近距離を対象としているため、運賃は一定額 (200 円) とし、公共交通利用者数に比例して運賃収入を計算した。増便計算は、公共交通の利用者数が大幅に変化したときに、バスや鉄道の臨時便を出し、そのときの増便コストを算出する機能である。豊田市公共交通会議 [15] の豊田市内の基幹バスの実績による

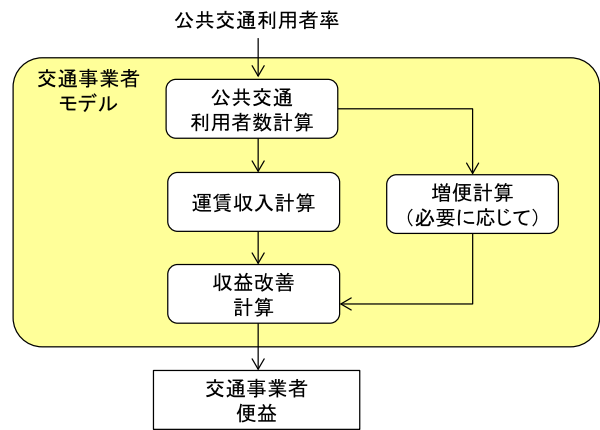


図 6 交通事業者モデル

Fig. 6 Public transportation management model.

表 3 各交通手段の時間価値原単位 [14]

Table 3 Value of time per unit of each of the transportation.

交通手段	時間価値原単位 [円/分/台]
自動車	40.10
バス	374.27
鉄道	47.91

と、平均乗車率は約 28.7%である。これをふまえ本研究では、現状の公共交通利用者数による乗車率を 25%と仮定し、4 倍を超えた割合に応じて増便数を決定し、コストを算出している。最後に運賃収入の変化、増便計算によるコストの変化をふまえ、収益改善計算を実施している。

4.7 便益計算

道路建設、ロードプライシング、適応型モーダルシフトの効果検証を行うため、本研究は、車利用者、自治体、住民、交通事業者のそれぞれの便益を計算している。以下、便益計算の詳細について説明する。

4.7.1 車利用者便益

車利用者便益は、車を利用する人が受ける便益を表したものである。車利用者便益は、各自動車による便益の和、および各公共交通のうち、バス利用者による便益の和で算出している。各自動車による便益は走行時間短縮便益、走行経費減少便益、交通事故減少便益の和で計算しており、各バス利用者による便益は公共交通混雑不効用、走行時間短縮便益、走行経費減少便益、交通事故減少便益の和となっている。これらの便益の計算は、国土交通省の費用便益分析マニュアル [14] に基づいた。また公共交通混雑不効用については、国土交通省の鉄道プロジェクト評価手法マニュアル [16] に基づき計算した。

これら便益計算では、各交通機関の時間価値原単位が必要となる。本研究では時間価値原単位を表 3 ののとおりに設定した。特にバスの時間価値原単位は、バスの乗車人数に

よって変化するため、変化率も定義した。下記は平均乗車人数 9.17 人/台の時間価値原単位であるため、1 人あたりはおおむね $374.27/9.17 = 40.8$ 円/分/台/人である。そのため本研究では、1 人の増減で 40.8 円変化するものと仮定した。

4.7.2 自治体便益

自治体便益は、交通施策によって受ける自治体の便益を表したものである。本研究では、適応型モーダルシフトの場合は移動ポイントの費用負担コスト、ロードプライシングの場合は道路収入便益およびコスト、道路建設の場合は、道路建設費を自治体便益とした。

4.7.3 住民便益

住民便益は、自動車を利用しない付近住民の便益を表したものである。住民便益は CO₂ 排出量削減量に基づき計算した。

4.7.4 交通事業者便益

交通事業者便益は、公共交通事業者の便益を表したものである。交通事業者便益は、交通事故減少便益と、運賃収入増加便益の和で計算した。

5. シミュレーション条件

道路建設、ロードプライシング、適応型モーダルシフトの定量比較を行うため、本研究ではシステムダイナミクスのシミュレータ (PowerSim 社の PowerSim[®]) を用い、シミュレーション実験を行った。以下、実験の際に設定した各種シミュレーション条件を示す。

5.1 シミュレーション検証期間、検証時間帯

シミュレーション検証期間は、2013～2062 年の 50 年間とし、シミュレーション開始年に交通施策を開始するものとした。1 年ごとに、交通量・走行時間等の道路動態や、交通施策実施に必要な費用、走行時間短縮便益・CO₂ 排出量削減便益等の個別便益と、個別便益を車両利用者、交通事業者等のステークホルダに分配したステークホルダ便益等を算出した。またシミュレーションの対象時間帯は 7～19 時の 12 時間と設定した。本研究では、自動車から公共交通への適応型モーダルシフトを検討対象としているため、適応型モーダルシフトが必要で、かつ公共交通が運行中の時間帯を当該時間帯とした。

5.2 道路・交通量

本研究では、豊田市内の主要国道 (153, 155, 248, 257, 301, 419, 420 号線) の交通量データを参考に、BPR 関数を用いて仮想的な 1 本の道路および交通量を想定した。具体的には豊田市統計書 [17] より、これら 7 本の道路の延長・交通量を平均し、延長は 14.7km, 12 時間交通量 (公共交通の運行時間帯と仮定) は 18,179 台/日、通勤時間帯の速度は 17.9km/h と求めた。これらをもとに BPR 関数

表 4 ロードプライシングのコスト

Table 4 Cost estimations of road pricing.

対象エリア	建設費 [億円]	維持費 [億円/年]	道路延長 [km]
ロンドン	300	196.5	不明
東京(環状 7 号・荒川)(机上検討)	405	175	7,255

により、交通容量を 15,420 台/日と設定した。また、豊田市の平均トリップ長 [11] は 9km/トリップ、中京圏の自動車平均トリップ数 [18] は 1.14 トリップ/日であるので、平均走行距離は 10.26 km/日と仮定した。

5.3 公共交通

本研究では、豊田市の主要鉄道、バスの運賃を参考に、運賃、所要時間、走行距離を設定した。鉄道は豊田市駅-若林駅間を参考に、運賃 290 円、所要時間 14 分、走行距離 10.6 km, 運行間隔 15 分を基準とした。またバスは市内走行を想定し、運賃 200 円、所要時間 42 分、走行距離 12.69 km とした。

5.4 利用者数

豊田市交通まちづくり推進協議会 [19] によると、2009 年度の鉄道各利用者数は 54,944 人/日、バスは 9,048 人/日である。また同推進協議会 [20] によると、豊田市の鉄道利用率は 6.5%, 自動車は 71.2% である。ここから自動車の利用者数は 601,848 人/日と推定した。また増岡ら [21] によると、豊田市の全移動者数の 82.4% が 7～19 時の昼間 12 時間に集中している。本研究では、バス、鉄道の利用者数は、上記 12 時間内の利用者がほとんどとし、鉄道は 54,944 人/日、バスは 9,048 人/日とした。同様に自動車の昼間 12 時間の利用者数を $601,848 \times 0.824 = 495,923$ 人/日とし、道路の利用者数を $495,923 + 9,084 = 505,007$ 人/日とした。

5.5 道路建設

道路建設で用いる道路整備費は、豊田市の予算説明資料 [22] の道路関連事業費 (2013 年, 69 億円/年) を参考に道路整備費とした。

5.6 ロードプライシング

ロードプライシングに対する建設費、維持費は、ロンドンの事例 [13] および東京の検討結果 [23] を参考に、豊田市に適用した場合として規模換算を行い推定した。これらの施策の費用を表 4 に示す。

ロンドンでは課金はエリア方式、認証はカメラ方式を採用している。街中にカメラを設置する必要がある、建設および維持費が高いことが問題となっている。一方東京では課金にコードン方式 (域内流入車に課金)、認証方式にカメ

表 5 豊田市のロードプライシングのコスト推定

Table 5 Cost estimation of the road pricing in Toyota-city.

対象エリア	建設費 [億円]	維持費 [億円/年]	道路延長 [km]
豊田市(上記 2 都市 より推定)	188	81	3,374

ラ方式を採用している．入口にカメラを設置するだけでよい
ため，コストが抑えられるといわれている．本研究では
ロードプライシングの中では比較的安価といわれる東京の
事例をもとに，道路延長の規模に比例して，豊田市のロード
プライシングの建設費，維持費の推定を行った．その結果
を表 5 に示す．

5.7 適応型モーダルシフト

適応型モーダルシフトの建設費は，移動ポイント案内機能，
移動ポイント付与機能，およびダイヤ変更を実現させる
ダイヤ変更機能を持つシステムの建設費であり，維持費
は移動ポイントの付与，および公共交通の増便コストであ
る．これらの詳細についての仮定を以下に示す．

5.7.1 建設費

移動ポイント案内機能は Web 上の案内システムとし，移
動ポイント付与機能は，公共交通と連携したポイント管理
から構成されるシステムとする．利用者はスマートフォン
または PC を使いアクセスすると仮定すると，本システム
を構築するためにはサーバ上のソフトウェアのみ構築が必要
である．

公共交通のダイヤ変更機能は，交通事業者の運行管理部
門におかれた計画立案システムの 1 機能となるものでは
ある．既存の計画立案システムと連動すれば，計画変更が運
行管理や，鉄道，バス等のそれぞれの車両に伝わるため，
ダイヤ変更機能以外には，特別なソフトウェアや端末を用
意する必要はない．

これらを勘案すると，適応型モーダルシフトを実現する
場合に必要なのはいずれもソフトウェアであるため，建
設費はそれほど高額にならないものと考ええる．本研究では
5 億円と仮定した．

5.7.2 維持費

維持費は移動ポイントの付与と，公共交通部門の増便コ
ストになるが，本研究では増便コストはすでにモデルに組
み込まれているため，移動ポイントの付与について述べる．
移動ポイントの付与のコストは，公共交通の利用者数
× 移動ポイントの価格であり，移動ポイントの価格の大小
により，交通事業者の収益性が大きく変わる．本研究での
交通施策は数十年にわたって持続することを想定している
ため，交通事業者にとってコスト高とならない範囲で，移
動ポイントの額を定めておく必要がある．そこで予備実験
として交通事業者の過度な負担にならない移動ポイントを

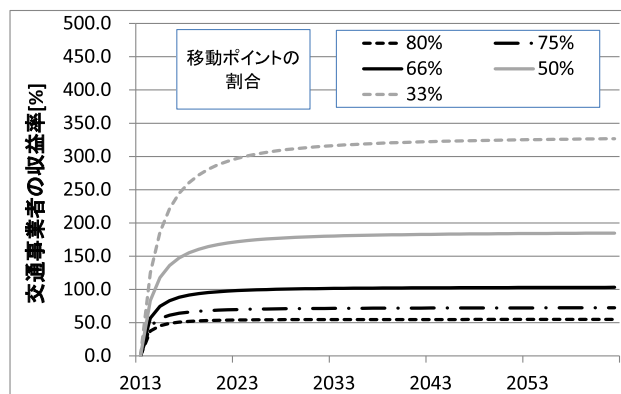


図 7 移動ポイント変化による交通事業者の収益率変化

Fig. 7 Difference of public transportation's profitability by the change of the rate of travel point.

探索した．その結果を示す．本予備実験では，移動ポイン
トの価格を運賃の 33%，50%，66%，75%，80% の 5 つの
ケースで交通事業者の収益率を評価した．なお，本予備実
験では輸送に関する収入（運賃収入）および支出（人件費，
燃料代）で収益率の評価を行った．

このグラフにより適応型モーダルシフトの損益分岐点は，
移動ポイントを運賃の 66% 近傍であり，適応型モーダルシ
フトが破綻しないためには，少なくとも移動ポイントを運
賃総額の 66% 以下に設定する必要があることが分かる．以
下，本研究では適応型モーダルシフトで使う移動ポイントは
運賃の 50% にして検証を行った．

6. シミュレーション結果

以上述べた条件に基づき行ったシミュレーション結果を
説明する．結果は車利用者便益，交通事業者便益，自治体
便益，住民便益について説明し，その後全ステークホルダ
の便益について説明する．なお特に説明がない限り，説明
のグラフは適応型モーダルシフト，ロードプライシング，
道路建設についての便益比較となっており，それぞれの便
益の金額は [億円] で，単年度での便益収支を表している．

6.1 車利用者便益

車利用者便益の比較結果を図 8 に示す．適応型モーダル
シフト，およびロードプライシングのグラフは短期的に上
昇しているのに対し，道路建設のグラフは便益の上昇が遅
く，ロードプライシングを超えるのは 7 年，適応型モーダ
ルシフトを超えるのは 9 年かかることが分かる．また，適
応型モーダルシフト，およびロードプライシングの便益は
頭打ちになる一方で，道路建設のグラフは持続的に伸びて
いく．

この結果について，交通施策の違いが出た主要因を調査
したところ，道路の走行時間変化が大きいと判明した．そ
の結果を図 9 に示す．適応型モーダルシフト，ロードプ
ライシングは短期的に走行時間を減少させているが，途中で

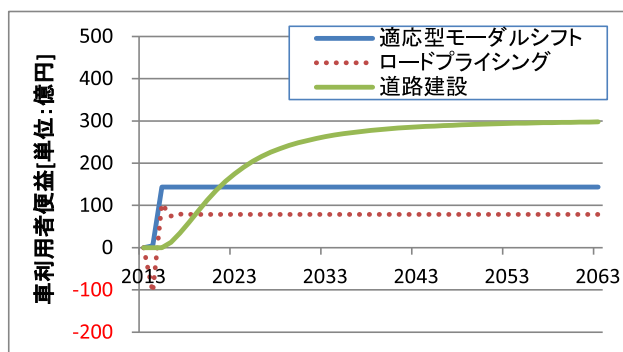


図 8 車利用者便益結果

Fig. 8 Result of cost benefit of car users.

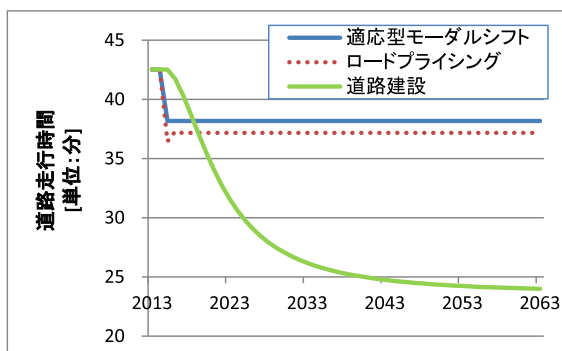


図 9 道路走行時間の改善結果

Fig. 9 Result of improvement of traveling time.

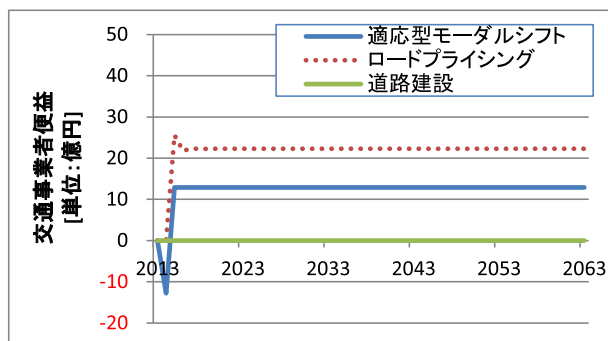


図 10 交通事業者の便益結果

Fig. 10 Result of cost benefit of public transportations.

頭打ちになる。一方、道路建設は走行時間の減少は比較的遅いが、継続して改修を続けるため、最終的に速度制限に近い速度での走行が可能になる。

6.2 交通事業者便益

次に交通事業者便益の結果を図 10 に示す。ロードプライシングの便益が、適応型モーダルシフトよりも高くなっている。これは適応型モーダルシフトでは、交通事業者が増便コストを負担しなければならない一方で、ロードプライシングは、交通事業者のコスト増がゼロにもかかわらず、自動車から公共交通への乗換えが発生していることに起因している。なお、道路建設の便益がゼロになっているのは、

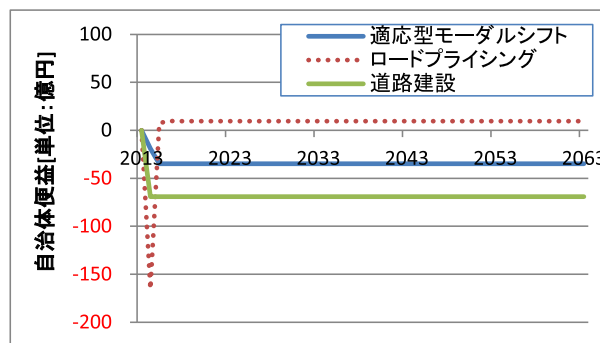


図 11 自治体の便益結果

Fig. 11 Result of cost benefit of local government.

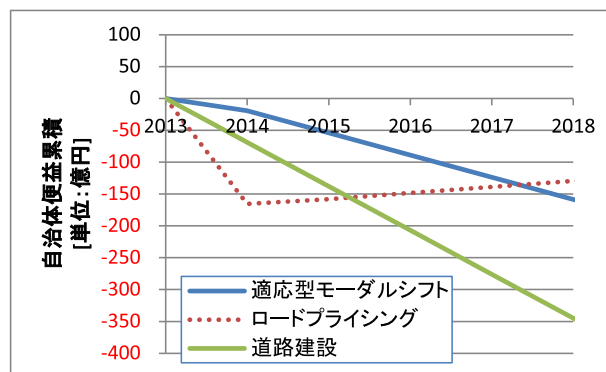


図 12 自治体の便益累積結果

Fig. 12 Result of accumulative cost benefit of local government.

公共交通へのシフト要因がなく、道路整備費用も交通事業者が負担しないことによる。

6.3 自治体便益

自治体便益の結果を図 11 に示す。適応型モーダルシフトは自治体の年間約 35 億円のコストがかかることが判明した。一方、ロードプライシングについては、初期投資で約 170 億円近い損失が発生するが、その後通行料収入により、年間約 9 億円の増加となり、それが便益に結び付いている。道路建設については年間 70 億円の道路整備費用がかかっているため、便益もつねにマイナスとなっている。

この結果を便益の累積で見た場合を図 12 に示す。ロードプライシングは初期投資が高いため最もコストがかかるものの、2016 年に道路建設を抜き、2018 年に適応型モーダルシフトを便益面で超えていることが分かる。

6.4 住民便益

自動車を利用しない付近住民の便益変化を図 13 に示す。他の便益と比較して便益が低くなっている。住民のメリットとして CO₂ 排出量削減、交通事故の危険性減少があるが、CO₂ 排出量については金額換算が比較的小さいこと、交通事故については元々危険性が低かったことから、便益向上が小さかったことによる。

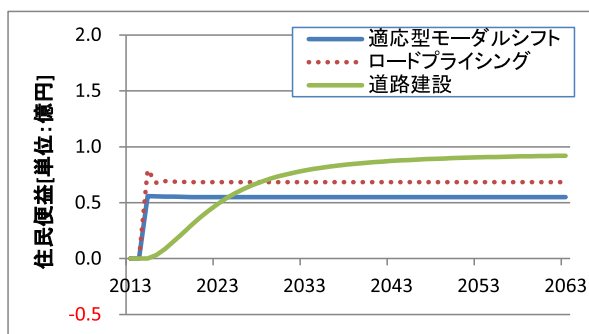


図 13 住民便益結果

Fig. 13 Result of cost benefit of residents.

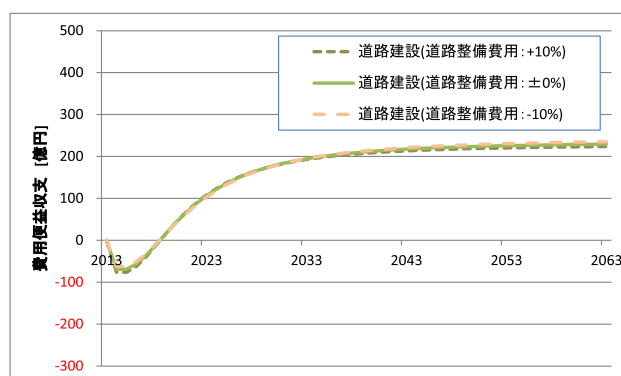


図 15 道路建設の感度分析結果

Fig. 15 Result of sensitivity analysis of road construction.

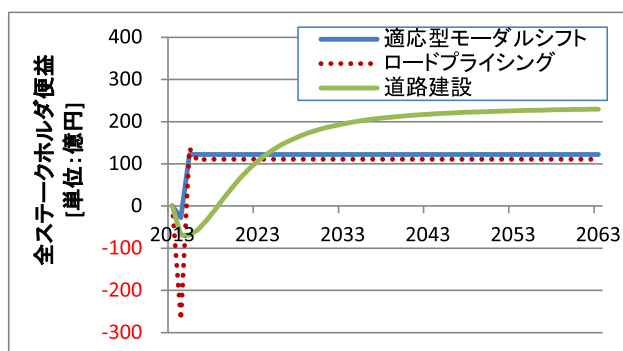


図 14 全ステークホルダ便益結果

Fig. 14 Result of cost benefit of every stakeholder.

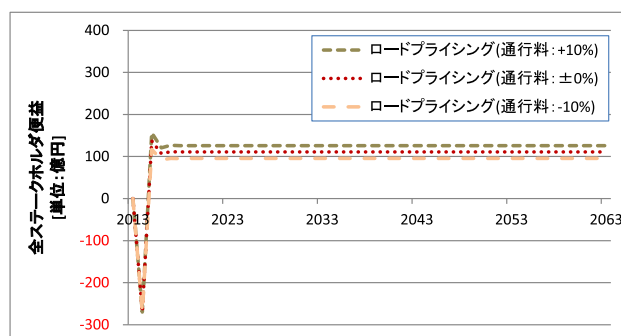


図 16 ロードプライシングの感度分析結果

Fig. 16 Result of sensitivity analysis of road pricing.

6.5 全ステークホルダ便益

これまで説明した便益をすべて合計した、全ステークホルダの便益結果を図 14 に示す。全ステークホルダでの便益としては、適応型モーダルシフト、ロードプライシングはほぼ同等なことが分かった。道路建設は短期的に便益がマイナスになる（道路整備費用だけがかかり効果が現れない）ものの、12 年以上経過すると他の 2 つの交通施策を上回る便益が受けられることが分かる。

6.6 感度分析

本研究ではモデル構築時のパラメータ、およびいくつかのシミュレーション条件について、仮定をおき検証を行っている。それらの仮定のずれがシミュレーション結果に対し影響を及ぼさないか、仮定に対する感度分析を行った。その結果について、図 14 の全ステークホルダ便益結果を使い説明する。

6.6.1 道路建設

道路建設に対する感度分析結果を図 15 に示す。道路建設については道路整備費用を $\pm 10\%$ の範囲で変化させたが、便益はほとんど変わらなかった。このことから道路整備費用の変化は結果に影響を与えないものと判断した。

6.6.2 ロードプライシング

次にロードプライシングに対し、通行料の感度分析結果を図 16 に示す。通行料を $\pm 10\%$ で変化させた場合、便益は $\pm 14\%$ で変化している。これは主に自治体便益が関係し

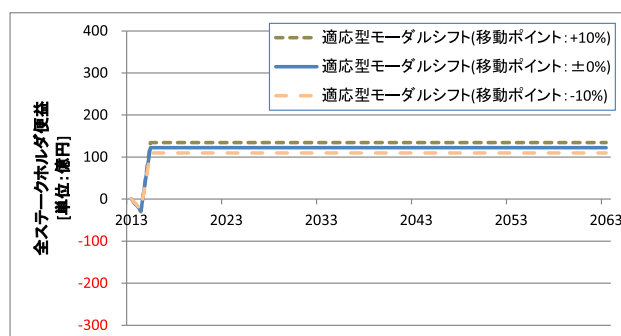


図 17 適応型モーダルシフトの感度分析結果

Fig. 17 Result of sensitivity analysis of the Adaptive Modal Shift.

ており、具体的には通行料 $\times$ 交通量による道路収入変化が影響している。ただし全体としては大きな変化なく、感度分析結果としては、結論を左右するほどの影響はなかったものと判断した。

6.6.3 適応型モーダルシフト

次に適応型モーダルシフトに対し、移動ポイントの感度分析結果を図 17 に示す。運賃に対する移動ポイントの割合を 50% から $\pm 10\%$ 変化させた場合、便益も $\pm 10\%$ 変化した。これは主に車利用者便益の変化が影響している。ただし、ロードプライシングと同様に全体としては大きな変化はなく、感度分析結果としては、結論を左右するほどの影響はなかったものと判断した。

6.7 考察

以上のシミュレーション結果に基づき、適応型モーダルシフトの有効性について述べる。最初に全ステークホルダ便益によると、適応型モーダルシフト、およびロードプライシングは両方とも道路建設と比較して早くから便益が得られる。さらに適応型モーダルシフトとロードプライシングはほぼ同等の便益であったことから、道路建設の代替案としてロードプライシングを導入検討する際には、適応型モーダルシフトも検討候補に乗りうるものと分かる。

また、道路建設の効果が遅いことを補完する交通施策として、適応型モーダルシフトを導入することも考えることができる。具体的にはロードプライシングと道路建設を並行して進め、初年度～12年後位までは適応型モーダルシフトの効果により、交通渋滞の緩和を実現しておく。12年後以降は道路建設効果が現れ、車利用者としては初年度から継続して交通渋滞緩和の恩恵を受けることができる。道路建設もコストをかけて急速に整備するのではなく、適切なコストで順次整備していくことも可能となる。

次に導入のしやすさを、自治体便益の観点で述べる。道路渋滞緩和の交通施策を自治体が運営する場合、自治体の予算規模が問題になると思われる。その点で図 11 の自治体便益結果を振り返るとロードプライシングの初期投資が突出して高く（約 170 億円）、ロードプライシング導入にはよほど大きな自治体でない限り難しい。道路建設は年間あたり 69 億円のコストをかけていても、効果を発揮するまでには長い年月がかかっている。それに対し適応型モーダルシフトは、初期投資が移動ポイント案内機能、移動ポイント付与機能や交通事業者ダイヤ変更機能といった情報システムの投資だけで済むため初期投資は大きくはない。移動ポイント付与分の維持費がかかるものの、道路建設に対するコストの半分程度で抑えられている。このことから、少なくとも豊田市をケーススタディとした場合には、自治体の財政規模の観点で適応型モーダルシフトは有力な交通施策であることが推測できる。

最後に交通事業者として、受入可能な交通施策かを考察する。図 10 は交通事業者の便益変化を示しているが、適応型モーダルシフトのみ初年度費用によりマイナスの便益になり、後はプラスの便益となっている。この便益はほぼ投資額と運賃収益との差になっているため、初年度の初期投資が交通事業者で負担可能かが、判断基準となる。今回の例では約 10 億円と推測され、やや容易ではない、という結果となった。回避策としては、交通事業者の初期投資の一部を自治体が負担することが考えられる。自治体便益の議論にもあったように、比較対象のロードプライシングの初期投資費用は約 170 億円と高いことから、受け入れやすい回避策であると結論する。

以上述べた考察に基づき、少なくとも豊田市をケーススタディとした場合、道路建設、ロードプライシング、適応

型モーダルシフトの交通施策を比較すると、適応型モーダルシフトは低コストで効果の高い交通施策であるといえる。また適応型モーダルシフトとへ移行して、順次道路建設も進めておくことで持続的に渋滞緩和効果の高い交通施策をうつことが可能である。

7. おわりに

本研究では、交通渋滞緩和の交通施策の 1 つとして適応型モーダルシフトを対象とし、従来のロードプライシング、道路建設と比較して優位性があるかシミュレーション評価を行った。評価の結果、少なくとも豊田市をケーススタディとした場合には、適応型モーダルシフトはロードプライシングと同等の効果があることが判明した。また、道路建設と並行して適応型モーダルシフトを行うことで、低コストで効果の高い交通施策になることを予想した。今後はさらに他の交通施策についても評価できるよう、モデル拡張を続けていく。

参考文献

- [1] Kuwahara, T., Yoshioka, A., Shimazaki, K., Ikegami, T., Yamazaki, J. and Hashimoto, T.: Simulation for Operating Additional Buses based on Demand in Toyota City Low-Carbon Society Verification, *20th ITS World Congress*, No.3103 (2013).
- [2] Tsubota, Y., Hirao, N. and Kawashima, H.: The Evaluation of Road Pricing for the Tokyo Metropolitan Area with Respect to the Environment, *International Congress on Modelling and Simulation* (2003).
- [3] 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構：ロードプライシングによる渋滞緩和と交通整備財源の確保，独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構海外調査報告書，No.13 (2012).
- [4] 松橋啓介，工藤祐揮：低炭素都市の実現に向けた LRT の役割，国際交通安全学会 IATSS Review, Vol.34, No.2, pp.39-46 (2009).
- [5] 大野寛之，林田守正，工藤 希，水嶋教文：総合的なモーダルシフトへ向けた取り組み，独立行政法人交通安全環境研究所 (2011).
- [6] 倉内慎也，永瀬貴俊，森川高行，山本俊行：公共交通利用に対するポイント制度「交通エコポイント」の導入が意識・行動変化に及ぼす影響の基礎的分析，土木計画学研究・講演集，Vol.31, pp.142-145 (2005).
- [7] 愛知県建設部建設企画課：（事後評価書）道路事業（国道 301 号），愛知県建設部建設企画課（オンライン），平成 22 年度第 5 回愛知県事業評価監視委員会 (2010)，入手先 <<https://www.pref.aichi.jp/kensetsu-kikaku/hyoka/H22/5th/gaiyou05.html>>（参照 2014-07-10）.
- [8] 井上紳一，中村毅一郎，森田純之，松井 浩，森尾 淳：首都圏における BPR 関数の推定，土木計画学研究・講演集，Vol.29, p.2 (2004).
- [9] 松井 寛，藤田素弘：大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化，土木計画学研究・論文集，No.17, pp.15-28 (2001).
- [10] 国土交通省道路局：交通需要等に関する近年の動向，道路の将来交通需要推計に関する検討会第 1 回会議資料 5, p.4 (2008).
- [11] 豊田市都市整備部交通政策課：社団法人日本交通計画協会広報誌都市と交通，Vol.82, p.10 (2010).

- [12] 加藤浩徳, 山内弘隆: ロンドンへのロードプライシング導入に関する関係主体間の議論, 運輸政策研究, Vol.2, No.2, pp.33-41 (1999).
- [13] 東京都環境局: ロンドンの混雑課金制度, 東京都環境局 (オンライン), 入手先 (<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/management/price/country/london.html>) (参照 2014-07-10).
- [14] 国土交通省道路局都市・地域整備局: 費用便益分析マニュアル, pp.7-14 (2008).
- [15] 豊田市都市整備部交通政策課: 豊田市の交通網と公共交通利用状況, 平成 17 年度第 3 回公共交通会議資料, 資料 4(4), 豊田市都市整備部交通政策課 (オンライン), p.26, 入手先 (<http://www.city.toyota.aichi.jp/shingikai/aj/44/1703siryou044.pdf>) (参照 2014-07-10).
- [16] 国土交通省交通局: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル, pp.112-113 (2012).
- [17] 豊田市: 平成 22 年度版豊田市統計書, pp.258-273 (2010).
- [18] 国土交通省道路局: 交通需要等に関する近年の動向, p.4 (2008).
- [19] 豊田市交通まちづくり推進協議会: 豊田市交通まちづくりの目標値設定根拠, 平成 23 年度第 2 回協議会資料 6, p.1 (2011).
- [20] 豊田市交通まちづくり推進協議会: 豊田市交通まちづくり行動計画 (案), p.2 (2012).
- [21] 増岡義弘, 橋本成仁, 山崎基浩, 石川要一: 豊田市における TDM 社会実験実施による自動車から鉄道への転換に関する分析, 第 32 回土木計画学研究発表会・講演集, 12 月 5 日 (月) 9:00-10:30 VIII, 都市交通 I, p.1 (2005/12).
- [22] 豊田市: 平成 25 年度当初予算のまとめ, 豊田市 (オンライン), 予算説明資料, p.3 (2013), 入手先 (<http://www.city.toyota.aichi.jp/division/an00/an02/1251566/h25matome.pdf>) (参照 2014-07-10).
- [23] 東京都: ロードプライシング検討委員会報告書の概要 (全編), 東京都 (オンライン), 東京都ロードプライシング検討委員会報告書, p.6 (2002), 入手先 (<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/attachement/road-pricing-brief.pdf>) (参照 2014-07-10).



福本 恭

1994 年京都大学大学院工学研究科応用システム科学専攻修士課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。横浜研究所勤務。2007 年大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士後期課程修了。上水道システム, 通信システム, 電力システムの研究に従事。博士 (情報科学)。電気学会会員。2012 年より京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻応用数理モデル分野 (産学連携講座) 准教授。



寺野 隆雄 (正会員)

1978 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1978~1989 年 (財) 電力中央研究所勤務。1990~2004 年筑波大学ビジネス科学研究科。2004 年より東京工業大学大学院総合理工学研究科教授。2012 年より科学技術振興機構特任フェロー。工学博士。1996 年イリノイ大学ならびにスタンフォード大学客員研究員。社会シミュレーション, サービス科学, 進化計算, 人工知能等の研究に従事。人工知能学会, 計測自動制御学会, 日本 OR 学会, 電気学会, 経営情報学会等で理事を歴任。IEEE, AAAI, ACM 各会員。



矢野 浩仁 (正会員)

1996 年京都大学大学院工学研究科数理工学専攻修士課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。同社横浜研究所にて交通分野, 電力分野の情報システムを対象とした研究開発に従事。東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士後期課程在学。日本 OR 学会会員。



橋本 博文

1997 年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻修士課程修了。同年 (株) 日立製作所入社。横浜研究所勤務。企業間電子商取引, 交通分野, 都市計画分野を対象とした情報システム研究に従事。