

交通インフラ維持補修のための利用料金および燃料税の 効率的水準の経済学的検討

交通インフラ維持補修のための利用料金および
燃料税の効率的水準の経済学的検討に関する研究プロジェクト

2026年7月

公益社団法人日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究
成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印刷
に付して順次刊行するものである。
2. シリーズはAよりEに至る5つの系列に分かれる。

シリーズAは、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。

シリーズBは、シリーズAに対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、
折にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によっ
てとりまとめたものを収める。

シリーズCは、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。

シリーズDは、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査
活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。

シリーズEは、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和2年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事 竹 内 健 蔵
同 中 村 文 彦

令和2年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番
号を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-6

守住ビル 4階

公益社団法人日本交通政策研究会

電 話 (03) 3263-1945 (代表)

F a x (03) 3234-4593

E-Mail: office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-946

令和7年度自主研究プロジェクト

「交通インフラ維持補修のための利用料金および燃料税の効率的水準の経済学的検討」

刊行：2026年7月

交通インフラ維持補修のための利用料金および燃料税の効率的水準の経済学的検討
Optimizing taxes and tolls for transportation facility maintenance considering deadweight losses

主査：河野 達仁（東北大学情報科学研究科）

Tatsuhito Kono

要 旨

本研究では、乗用車および貨物トラックの燃料税と通行料の効率的な水準について、道路修繕のタイミングと規模の最適化を図りつつ財政的制約を明示的に考慮して決定する。本分析では、歪みを伴う労働税、環境悪化、道路渋滞、および交通事故による市場の失敗を考慮した。また、道路管理団体の財政制度として、1) 道路財源を一般道路管理団体と高速道路管理団体が共有できる場合、2) 両管理団体の財源が独立している場合、3) 道路財源を両管理団体が共有しつつ料金のみ変更可能な場合という3つのシナリオを設定した。宮城県と福島県の高速道路および一般道路を対象とした分析の結果、シナリオ1においては、乗用車および貨物トラックの通行料を現行の約30.0円/kmおよび48.8円/kmから、それぞれ22.9円/kmおよび31.1円/kmへ引き下げることが最適であると示された。一方で、燃料税については、現行の58.8円/リットル（乗用車）および32.1円/リットル（貨物トラック）から、それぞれ63.4円/リットルおよび62.7円/リットルへ引き上げることが最適である。他の財政制度シナリオにおいても同様に、燃料税の引き上げが最適解となった。さらに、貨物トラック利用者の便益に関しては、シナリオ1および2では現行より減少するものの、シナリオ3では普通車利用者とともに厚生改善が達成される。道路の維持修繕方法については、いずれのシナリオにおいても現行より予防保全を重視すべきとの結果を得た。厚生改善の程度は、最適な政策導入により、宮城県と福島県両県の県内総生産に対し、シナリオ1では0.28%、シナリオ2では0.23%、シナリオ3では0.19%の総余剰増加が見込まれる。

キーワード： 最適な課税、公的資金の限界費用、通行料、燃料税、道路維持修繕

Keywords: optimal taxation; marginal cost of public funds; tolls; gas tax, road maintenance

目 次

1 章 背景・目的	1
2 章 通行料と税金のモデルと最適化.....	4
(1) モデル	4
(2) 道路劣化と修繕過程.....	8
(3) マルコフ遷移確率行列	10
(4) 一般道路管理団体と高速道路管理団体	10
(5) 我が国の道路財政システム	11
(6) 燃料税率と通行料の最適化.....	12
3 章 データ	13
(1) 交通区間データ	13
(2) 一般道路舗装劣化マルコフ遷移確率行列のパラメータ推定	13
(3) 高速道路舗装劣化マルコフ遷移確率行列のパラメータ推定	15
(4) 貨物トラック交通需要の燃料税弾力性の推定	15
(5) 自動車交通需要の燃料税弾力性の推定	17
4 章 定量分析	19
(1) 間接効用関数の集計.....	19
(2) パラメーターの設定.....	19
(3) 通行料と自動車関連税の最適水準.....	20
5 章 結論	25
参考文献.....	26

研究メンバー（敬称略・順不同）

主査：	河野達仁	東北大学大学院 情報科学研究科 教授
メンバー：	曾道智	中央大学 国際経営学部 教授
メンバー：	日引聡	東北大学大学院 経済学研究科 教授
メンバー：	北川章臣	東北大学大学院 経済学研究科 教授
メンバー：	山浦一保	立命館大学大学院 スポーツ健康科学研究科 教授
メンバー：	若林緑	東北大学大学院 経済学研究科 教授
メンバー：	伊藤亮	東北大学大学院 情報科学研究科 准教授
メンバー：	藤原直哉	東北大学大学院 情報科学研究科 准教授
メンバー：	鈴木通雄	東北大学大学院 経済学研究科 准教授
メンバー：	吉田惇	東北学院大学 経済学部 准教授
メンバー：	羅婉慈	東北大学情報科学研究科 研究員

執筆者

河野達仁	東北大学大学院 情報科学研究科 教授
飯島雄太	東北大学大学院 情報科学研究科 修士学生
水谷大二郎	東北大学大学院 工学研究科 准教授

2026年7月現在

1 章 背景・目的

多くの国において建設から 30 年以上が経過した道路インフラが増加しており、交通量および車両重量の増大が維持修繕費の高騰を招いている¹。その財源調達方法は国により異なるものの、燃料税、通行料、および公的資金を主な財源とする国が大半を占める。今後、電気自動車（EV）の普及が進んだ場合であっても、道路の維持修繕およびその財源確保の必要性は不変である。EV 導入後には、燃料税収に代わる手段として走行距離課税が検討可能である。この課税方式は既存の燃料税と経済的性質が類似しており、代替的な財源として十分機能しうる。

燃料税や通行料の水準は、道路利用者数に影響を与える。一方、道路は車両(特に貨物トラック)によって損傷を受ける。維持修繕費は燃料税や通行料で賄われるため、これらすべてが道路維持修繕の最適なタイミングと規模に影響を与える。燃料税や通行料は家計や企業にとって大きな負担となるため、適切な水準の選択は人々の厚生に大きな影響を与える。

最適税率の決定は、Harberger(1971)が価格歪みの考慮の必要性を示して以来、頻繁に研究されている。比較的新しい論文では、Fullerton and West(2010)による消費者の異質性を考慮や、West and Williams(2007)による余暇の価格効果の考慮がなされた最適税理論の分析がされている。Jacobs and de Mooij(2015)は、所得分配の観点から歪んだ税が存在する場合の次善税率を求めている。自動車関連税については、Parry and Small(2005)および川瀬(2010)が労働税の歪みを考慮し、最適な燃料税を導出している。De Borger and Mayeres(2007)は、自動車関連の税金と通行料を、税の限界費用の観点から考察している。Kono et al.(2019)は、複数の車両関連税の歪みと労働税の歪みが自動車関連税の最適水準を決定する上で大きな影響を持つことを示している。

道路維持修繕の最適化に関して、多くの工学分野の論文はマルチステージの意思決定にマルコフ決定過程を適用し、道路劣化の最適なタイミングと維持修繕の最適規模を求めている（例: Madanat and Ben-Akiva、1994; Smilotz and Madanat、2000 年; 小林ら 2012 年; Neduli and

¹インフラ老朽化に起因する落橋事故が世界的に散見される。第二次世界大戦後にインフラ整備が進んだ米国では、1980 年代以降、死傷者を伴う大規模な崩壊事故が頻発している。具体的には、1983 年のコネチカット州マイアナス橋、2005 年のペンシルベニア州 I-70 橋、2007 年のミネアポリス I-35W 橋、2022 年の同州ファーンホロー橋の崩壊などが挙げられる。また米国のみならず、2011 年のイタリア・ジェノヴァにおけるモランディ橋や、2019 年の台湾・南方澳大橋の崩壊など、世界各地で人的被害を伴う事象が発生している。

Madanat、2013 年；小林ら、2014 年；水谷ら、2020 年）。これらの維持修繕研究は、現在価値化されたライフサイクルコストの最小化のみを目的としている。しかし、維持修繕には資金が必要であるため、財政制約のシャドウプライス、すなわち最適税理論という公的資金の限界費用 (MCPF) の考慮が必要である²。言い換えれば、MCPF が一般に 1 に等しくないため、ライフサイクルコストの最小化は社会的に最適とは言えない。

本研究は、こういった背景を踏まえ、Kono et al.(2019)を拡張し、道路利用が道路劣化に与える影響を考慮したうえでの道路維持修繕方法と、燃料税と通行料の最適な水準、道路維持修繕の時期と規模を決定する。貨物トラックと乗用車の高速道路料金と燃料税は別々に考慮している。AASHO(1962 年)が示すように、舗装の破壊度は車両の車軸の 4 乗に比例する。したがって、貨物トラックの運行回数が道路の劣化速度を決定する。ただし、貨物トラックが道路劣化に影響を及ぼすとしても、道路は貨物トラックと乗用車によって利用されているため、特に渋滞が発生する際にはトラックと自動車の相互依存性を考慮しなければならない。

道路資本と通行料金については、広く研究されている。本研究のテーマに関連する理論的命題の一つは、交通渋滞料金と道路容量への投資が、一括税で道路投資資金を賄える場合、交通量と道路容量の両方に効率的であるという自己資金調達理論(Mohring and Harwitz, 1962)である。しかし、一括税は政治的に不可能であり、導入可能な税金や通行料はすべて歪みを帯びる。そのため、資金徴収による超過コストを考慮しなければならないため、自己資金調達の定理は成立しえない³。言い換えれば、歪んだ税金や通行料のために MCPF は 1 と等しくならず、自己資金調達定理は現実には適用できない。

そこで、本研究では燃料税と通行料を取り入れた乗用車や貨物トラックの利用モデルを構築する。そして通行料は高速道路の使用にのみ課され、燃料税は道路の種類に関係なく車両使用に課される。このモデルを用いて一般道路管理団体と高速道路管理団体の財政制度として、

²詳細は Auerbach and Hines(2002)の 1385 ページを参照。

³森杉と河野(2012)によれば、MCF > 1 は最適な通行料収入を大きくし、2) 燃料税は最適な通行料を低くし、3) 並行する地方道路の混雑により、最適な通行料は低くなる。直感的な理由としては、最適な通行料値は 1) MCF > 1 の存在により高くなり、一方で 2) 燃料税の存在と 3) 並行する地域道路の渋滞により小さくなるためである。これらの歪みを同時に考慮すると、その影響は正負いずれも取りうる。

3 つのシナリオ 1)道路財源を二つの道路管理団体が共有できる場合、2)それぞれの管理団体の財源が独立している場合、3)道路財源を二つの道路管理団体が共有しているもとで料金のみ変更できる場合を設定する。燃料税と通行料は、これらの社会的限界費用が均等化されたときに効率的水準といえる。

Kono et al. (2019)は通行料と燃料税の最適化を日本全国を対象に行っている。一方、本研究は宮城・福島地域に焦点を当て、道路の修繕費用と対象地域の需要関数を設定している。国全体ではなく特定のエリアをターゲットにする利点は、混雑は地域的な現象であるため、適切に考慮できることである。そして燃料税や通行料を決定するには、渋滞や MCPF に加えて、環境被害や事故の外部影響も考慮する必要がある⁴。

分析の結果、財政シナリオ1では乗用車と貨物トラックの通行料を現在の約30.0円/kmおよび48.8円/kmから22.9円/kmおよび31.1円/kmに引き下げることが最適であることを示される。乗用車と貨物トラックの燃料税は、現行の58.8円/リットルと32.1円/リットルから63.4円/リットルおよび62.7円/リットルに引き上げることが最適となる。また、他の財政シナリオでも燃料税が現行より高い傾向にあった。そして、シナリオ1と2では貨物トラック利用者の便益が現行より減少してしまうものの、シナリオ3では普通車利用者に合わせて貨物トラック利用者も厚生改善する結果となった。道路の維持修繕方法は、現行より予防保全とすべきという結果となった。厚生改善の程度としては、最適な政策によりシナリオ1では宮城県および福島県両県の県内総生産に対して0.28%、シナリオ2で0.23%、シナリオ3で0.19%の総余剰増加が得られる。

⁴ 多くの論文(その一部は Parry et al. (2007)によってレビューされており、混雑、事故、CO₂ など様々な外部性を考慮したり、所得分配の影響を考慮したりして最適な燃料税を推定している。さらに、いくつかの論文(例:上田ら(1998)1998; 藤原ら, 2002, 武藤ら, 2024)は、計算可能な一般均衡モデルを用いて、自動車関連税の水準が CO₂ 濃度や自動車所有率にどのように影響するかを分析している。しかし、これらの研究は最適な税率よりも CO₂ の総量に焦点を当てている。

2 章 通行料と税金のモデルと最適化

(1) モデル

本モデルは静的な状況を仮定し、消費者および企業の 1 年間の行動をモデル化する。消費者は選好や所得の観点から異質であるものの、準線形効用関数を持つと仮定する。企業も異質であると仮定するものの、すべての企業は完全競争状況にあるとして単純化のために一つの企業と見なす。世帯はガソリン車（以下、乗用車）を使用し、企業はディーゼルトラック（以下、貨物トラック）を使用する。

消費者は高速道路や一般道路(すなわち非高速道路)を利用する⁵。高速道路での交通量は x_H (移動回数)で表され、一般道路での交通量は x (移動回数)で表される。燃費は高速道路では $x_H \cdot \bar{l}_H$ (liter)、一般道路では $x \cdot \bar{l}$ (liter)で表され、 $\bar{l}_H$ (liter/km)と $\bar{l}$ (liter/km)はそれぞれ高速道路と一般道路での燃料消費率を表している⁶。燃料価格は燃料税 f (円/リットル)と税引き前のガソリン価格 $\bar{f}$ (円/リットル)で構成されている。高速道路の通行には料金 p (円/往復)を支払わなければならない⁷。分析で固定している変数は変数の上にバーを付けて示した⁸。

消費者 j の予算制約は次の通りである。

$$z^j + \{(p + (f + \bar{f}) \cdot \bar{l}_H)x_H^j + (f + \bar{f}) \cdot \bar{l} \cdot x^j\} = (\bar{w}^l - \tau)L_s^j + \pi^j \quad (1)$$

⁵ 「一般道路」とは高速道路以外の道路と定義している。例えば、イギリスの場合、「高速道路」は高速道路、「A 道路」と「B 道路」は一般的な道路である。

⁶ 本研究の設定と違い、燃費は交通量や走行速度によって異なる。しかし、速度に応じた燃費は、車間の変動が大きく安定した関数を設定できないため、燃費は一定であると仮定した。近年では、最新技術により渋滞時のガス効率が向上しており、走行速度の低下による交通量による燃費への影響は比較的緩やかと考えられる。

⁷ 燃料税は交通渋滞を減らすには不十分であり、渋滞がどこでいつ発生してもすべての移動コストを上げるだけである。一方で、通行料は時間や空間で大きく変動するため、混雑したルートやラッシュアワーのピークを避けることができる。

⁸ 本論文では、旅行の目的に関わらず同じ通行料と税金を想定しており、旅行の目的の観点から旅行を区別していない。通勤や他の通勤料金を異なるものに課す場合は、対応する消費者余剰を別々に推定すべきである。

ここで、所得 $(\bar{w}^l - \tau)L_s^j$ は、税引前賃金 $\bar{w}^l$ (円/時間)から労働税 τ を引いたものに労働時間 L_s^j を乗じたもので定義される。 z^j は合成財を表し、価格は 1 とする。 π^j は企業の利益が消費者 j に再分配されたものである。消費者は余暇 y^j を楽しみ、利用可能な時間 $\bar{M}$ の中で L_s^j 時間働いている。したがって、消費者 j の時間制約は次のように表される。

$$\bar{M} = L_s^j + y^j + x_H^j \bar{T}_H + x^j T(X + X_d) \quad (2)$$

ここで、 $\bar{T}_H$ (時間/km)は高速道路の移動時間を表す。都市間の高速道路には大きな渋滞がないため、高速道路の渋滞は無視する。 $T(\cdot)$ (時間/km)は一般道路の需要の移動時間関数を表す。需要は乗用車および貨物トラックで構成され、 $X(= \sum_{j=1}^N x^j)$ は一般道路での乗用車の総交通量を表し、 X_d は一般道路での貨物トラックの総交通量を表す。移動時間関数については、日本土木学会(JSCE,2003)によって提案されたパラメータを持つ BPR 関数を使用する。

消費者 j の効用関数は式 (3) のように示され、高速道路利用と一般道路利用によって損なわれる環境変数 E_H と E が含まれる。さらに、交通事故費用は道路の交通需要の増加に伴い増加する。そこで、事故費用も E_H と E を変数とする関数に加える。そして限界効用は、高速道路や一般道路の総交通量の増加とともに低下する⁹。

$$U^j = Z^j + u^j(x_H^j, x^j) + \theta(y^j) + v^j(E_H, E) \quad (3)$$

$$\partial U^j / \partial \zeta > 0, \partial U^j / \partial^2 \zeta < 0, \zeta \in \{x_H^j, X, E_H, E\},$$

$$E_H = E_H(X_H + X_{Hd}), E = E(X + X_d)$$

$$dE_H / d(X_H + X_{Hd}) < 0 \text{ and } dE / d(X + X_d) < 0$$

ここで、 X_H は高速道路上の乗用車の総交通回数である。 X_{Hd} は高速道路上での貨物トラックの総交通量である。環境外部性の部分効用関数 E_H と E は分離可能であると仮定する。 $\theta(y^j)$ は余暇時間から消費者の効用を表す。現実世界でも、労働時間が交通回数に影響される状況は少ないと考えられる。

⁹ 本分析で採用した準線形効用関数の仮定は必須ではない。効用関数として一般形を用いても、等価変分、補償変分、アレー余剰など適切な厚生指数を最大化すれば(Tsuneki, 1987; Kono & Kishi, 2018)、基本的に同じ結果が得られる。

企業は生産関数のもとで利益を最大化する。企業は異質性を持つものの、生産関数が1次同次であり、完全競争的市場で財を供給していると仮定する。この仮定により、これらの企業は一つの企業とみなすことができる。企業は貨物トラックを所有し、高速道路や一般道路を利用している。高速道路の交通移動距離は (X_{Hd}) で表され、一般道路の交通移動距離は X_d で表される。燃料消費量は、高速道路では $X_{Hd} \cdot \bar{l}_{Hd}$ (liter)で、一般道路では $X \cdot \bar{l}_d$ (liter)で表され、 $\bar{l}_{Hd}$ (liter/km)と $\bar{l}_d$ (liter/km)はそれぞれ高速道路上の貨物トラックの燃料消費率と一般道路での燃料消費率を表している。ディーゼル燃料価格は、ディーゼル燃料税(f_d 円/liter)と税引き前のディーゼル価格($\bar{f}_d$ 円/liter)で構成されている。高速道路を走る場合、通行料 p_d (円/移動)を支払う。生産に費やす労働時間は L_1 であり、貨物トラックを運転する労働時間は L_2 である。 $L_1 + L_2 = L$ である。したがって、賃金は次のように表される $\bar{w}^l L_d (= \bar{w}^l L_1 + \bar{w}^l L_2)$ 。上記から、企業の利益関数は次の式で表される。

$$\Pi = Z - \{p_d + (f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_{Hd} + \bar{w}^l T_H\} X_{Hd} + \{(f_d + \bar{f}_d) \bar{l}_d + \bar{w}^l T (X + X_d)\} X_d + \bar{w}^l L_d \quad (4)$$

各消費者は車を持っている場合、余暇時間 y^j や高速道路や一般道路の利用を選択し、所得制約(1)と時間制約(2)を条件に効用(3)を最大化するために余暇時間を選択する。消費者は自分の移動が総交通量に与える影響を意識しないと仮定する。式(1)、(2)、(3)を統合すると次のようになる。

$$U^i = u^i(x_H^i, x^i) + \Theta^i(y^i) + v^j(E_H, E) - \left\{ \begin{aligned} &[(p_d + (f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_H) + (\bar{w}^l - \tau) T_H] x_H^i \\ &+ [(f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_d + (\bar{w}^l - \tau) T (\bar{X}^i + \bar{X}_d^i)] x^i \end{aligned} \right\} + (\bar{w}^l - \tau)(\bar{M} - y^i) + \pi^i \quad (5)$$

そして生産関数は次のようになる。

$$\Pi = z(X_{Hd}, X_d, L_1) - \left(\frac{\{p_d + (f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_{Hd}\} + \bar{w}^l T_H}{\bar{w}^l L_1} \right) X_{Hd} + \left(\frac{\{(f_d + \bar{f}_d) \bar{l}_d + \bar{w}^l T (\bar{X} + \bar{X}_d)\}}{\bar{w}^l L_1} \right) X_d \quad (6)$$

(5)の最大化の一階条件から交通量が p 、 f 、 τ の関数として決定される¹⁰。同様に、式(6)から

¹⁰ 需要関数は説明変数として w^i もあるものの、固定されているため説明変数から除く。

も交通量が p_d 、 f_d 、 τ として決定される。労働供給は出張や環境的要因に依存しないと考えられる。この仮定は、旅行や環境的特性が労働供給に与える影響が非常に限定的であるという点で現実的である。その結果、 $x_H^{j*} = x_H^{j*}(g_h, g)$ 、 $x^j = x^j((g_h, g))$ 、 $L_d = \sum_{i=1}^N (L_s^{i*} + x_H^j \bar{T}_H + x^j T(X + X_d)) = L_s^{i*}(\bar{w}^l - \tau)$ 、 $X_{Hd}^* = X_{Hd}^*(g_{hd}, g_d, \bar{w}^l)$ 、 $X_d^* = X_d^*(g_{hd}, g_d, \bar{w}^l)$ を得る。ここで g_h 、 g 、 g_{hd} 、and g_d は乗用車の高速道路旅行、一般乗用車の道路旅行、貨物トラックの高速道路旅行、貨物トラックの一般車両の一般費用である。これらの一般化費用は次のように定義される。

$$g_h \equiv (p + (f + \bar{f}) \cdot \bar{l}_H) + (\bar{w}^l - \tau) T_H \quad (7)$$

$$g \equiv ((f + \bar{f}) \cdot \bar{l}) + (\bar{w}^l - \tau) T (\bar{X}^i + \bar{X}_d^i) \quad (8)$$

$$g_{hd} \equiv \{p_d + (f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_{Hd}\} + \bar{w}^l T_H \quad (9)$$

$$g_d \equiv \{(f_d + \bar{f}_d) \cdot \bar{l}_d\} + \bar{w}^l T (\bar{X} + \bar{X}_d) \quad (10)$$

一般化費用は通行料、燃料税、燃料価格、そして時間費で構成されている。時間コストは、時間の価値に移動時間を掛けたものである。乗用車の場合、賃金率から賃金税を差し引いたもの $(\bar{w}^l - \tau)$ が時間の価値となる。貨物トラックの場合、賃金率 $\bar{w}^l$ が時間価値である。高速道路と一般道路間の道路利用者の配分を検討するために、高速道路と一般道路の一般化費用が等しい均衡を用いる(詳細な説明は 4.1 節を参照)。

需要関数を効用関数に代入すると、個人 j の間接効用関数が得られる。

$$V^j = v^j(p, f, \tau, \bar{T}_H, T, p_d, f_d) \quad (11)$$

準線形効用関数を設定したため、一般化所得の限界効用は消費者全体で同一であり、消費者の選択変数(交通需要と余暇時間)は異なる効用関数に関して異質である。つまり、間接効用関数 V^j がゴーマン関数のとき、すべての消費者の異種の間接効用関数を集約できる。需要関数を効用関数に代入し、間接効用関数を集計すると、

$$\sum_{j=1}^N V^j = \sum_{j=1}^N v^j(p, f, \tau, \bar{T}_H, T, p_d, f_d) \quad (12)$$

ここで N は総人口である。

(2) 道路劣化と修繕過程

道路の舗装は重い車両が走行するにつれて劣化する。道路の維持修繕には品質を回復するための資金が必要である。第1章が示すように、工学分野でマルコフモデルを用いた多くの保守研究がある。その中でも、津田ら(2005)、貝戸ら(2012)、小林ら(2012)のモデルに従い、マルコフ遷移確率モデルを集計レベルで推定する方法を用いている。

一般道路の健全度は、日本の舗装検査ガイドライン(2016年)に基づきI、II、III、IVの4つのレベルに分類され、高速道路の健全度は高速道路会社(NEXCO)によれば6つのレベルに分類されている。一般道路の理想的な状態は 健全度Iとして表される。健全度IIは質の悪化が見られるものの深刻な問題はない状況である。健全度IIIは早期修繕が必要で、健全度IVは緊急修繕が必要である。予防保全は健全度IIで修繕措置を取ることと定義され、事後保全は健全度IIIおよびIVで対策を講じる修繕方法である。同様に、高速道路においては、健全度Iが理想的なレベルであり、健全度VIが最も低いレベルである。

2020年に実施された健全度調査(2020年)によると、検査で健全度IVと判断された道路の数はごくわずか(0%)である。実際、管理当局は道路の品質を管理し、健全度IVに陥らないようにしている。したがって、現在の解析から最低の健全度(すなわち一般道路ではIV、高速道路ではVI)を除外した。劣化修繕モデルは一般的な道路や高速道路で共通である。ただし、パラメータは異なる。以下では、主に一般道路のケースの4つの健全度レベルを用いてモデルを説明する。

本研究では、道路劣化過程を表すマルコフ遷移確率を統計的に推定する。 t 期における修繕されていない道路の健全度確率ベクトルは $\mathbf{W}_t^- (= [w_{i,t}^-])$ $i \in \{I, II, III, \}$ と表され、修繕後の健全度の確率ベクトルは $\mathbf{W}_t^+ (= [w_{i,t}^+])$ $i \in \{I, II, III\}$ と表される。各要素は0以上であり、それらの要素の和は1である。これらの要素は、各健全度レベルの発生確率を示す。修繕すべき道路の割合 $\delta_{i,t}$ が決定される。道路修繕行列は式(13)のように表される。 π_t^+ と π_{Ht}^+ により一般道路と高速道路向けの道路修繕の行列を示す。高速道路用 π_{Ht}^+ は5行5列である。

$$\pi_t^+ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \delta_{II, t} & (1 - \delta_{II, t}) & 0 \\ \delta_{III, t} & 0 & (1 - \delta_{III, t}) \end{pmatrix} \quad (13)$$

修繕期間中の迂回費用は、簡単化のために無視している。迂回路の費用を考えることはそれほど難しくない。また、ほとんどの場合、修繕費用に比べれば費用は小さいと考えられる。

t 期から次期 $t+1$ への劣化を表す劣化行列(マルコフ遷移確率行列)は、貨物トラックの交通量に依存すると仮定される。劣化行列は式(14)のように表される。

$$\pi(X_d)^- = \begin{pmatrix} \pi_{11}(X_d) & \pi_{12}(X_d) & \pi_{13}(X_d) \\ 0 & \pi_{22}(X_d) & \pi_{23}(X_d) \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ここで $\pi(X_d)^-$ は貨物トラックの交通量に依存するマルコフ遷移確率 X_d である。各要素は0以上、各行の合計は1となる。

修繕戦略を決定するために、まず t 期の開始時に修繕前の健全度を観察し、修繕すべき道路の割合を算出する。次に、修繕費用は修繕前の健全度と期間中の修繕率に基づいて計算される。修繕行列および $\delta_{i, t}$ 、 $\delta_{i, t}$ 劣化行列から、式(15)および(16)は、 $t+1$ 期の修繕前の健全度を得るために用いられる。

$$W_t^+ = W_t^- \pi_t^+ \quad (15)$$

$$W_{t+1}^+ = W_t^+ \pi_t^- \quad (16)$$

修繕費用は修繕前の健全度の分布を用いて表される。一般道路 G の修繕総費用は、修繕比率、 $\delta_{Gj, t}$ 現在の健全度分布 $W_{Gj, t}^-$ 、修繕の単位費用 $c_G(j)$ 、および一般道路の総数 N_G の掛け合わせであり、式(17)で表される。同様に、高速道路の修繕総費用 H は(18)として表される。

$$G \equiv N_G \sum_{j=II}^{III} \delta_{Gj, t} c_G(j) W_{Gj, t}^-, \quad t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (17)$$

$$H \equiv N_H \sum_{j=II}^V \delta_{Hj, t} c_H(j) W_{Hj, t}^-, \quad t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (18)$$

ここで、 $c_G(j)$ と $c_H(j)$ は道路の健全度を回復するためのコストである。

修繕による健全度の向上について、2つの仮定を設定した。仮定1では、修繕前の健全度に関

ならず、道路が修繕されると道路の健全度Iに戻る。仮定2では、道路の健全度レベルが1段階上昇する。本報告では仮定1の結果のみを示す。仮定2を用いても結果に本質的な違いはなかった。

(3) マルコフ遷移確率行列

行列(13)の各成分は(19)–(22)によって決定される。健全度 i を保つ確率($i = \text{I, II, III}$)は、ハザード関数である。

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i) \quad (19)$$

式(19)に基づき、1つの健全度レベル(i から $i+1$)が劣化する確率は次の通りである。

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i) + \exp(-\theta_{i+1})\} \quad (20)$$

さらに、健全度 i から j に落ちる確率は同時確率として導出される。

$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k) \quad (j = i+2, \dots, K-1) \quad (21)$$

最後に、健全度 i から最低健全度レベルに劣化する確率は次の通りである。

$$\pi_{iK} = 1 - \sum_{j=i}^{K-1} \pi_{ij} \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (22)$$

劣化関数 θ_i は次のように表される。

$$\theta_i = a_i X_k^* + b_i \quad (23)$$

ここで、 $X_k^* = X_k / \text{道路容量}$ (X_k の最大値)、 $k = d \text{ or } Hd$ である。

(4) 一般道路管理団体と高速道路管理団体

交通政策を管理する機関は二つあると考える。税収機関(または政府)と高速道路料金徴収機関である。この設定は現在の日本のシステムを反映している。政府収入(すなわち総税収)は K 燃料税 f と f_d 労働税 τ で構成され、 $\bar{k}$ 燃料税 f および労働所得税 τ 以外の収入である。

$$K \equiv \sum_{j=1}^N [f(\bar{l}_H \cdot x_H^{j*} + \bar{l} \cdot x^{j*})] + f_d(\bar{l}_{Hd} \cdot X_{Hd}^* + \bar{l}_d \cdot X_d^*) + \sum_{j=1}^N \tau L^{j*} + \bar{k} \quad (24)$$

この収入は、道路料金の合計で賄われている。

$$R \equiv \sum_{j=1}^N p x_H^{j*} + p_d X_{Hd}^* \quad (25)$$

（５）我が国の道路財政システム

日本では通行料と燃料税は別々に決定されており、交通機関ごとに独立して設定されている。通行料は国土交通省の監督下にある高速道路会社が、建設・維持修繕の平均費用として設定し、燃料税は財務省が決定する。現在の通行料は乗用車が約30円/km、貨物トラックが48.84円/kmである。また、通行料収入は政府収入と分離されている¹¹。

政府が効率性の観点から通行料や自動車関連税の水準を自由に選択できるのであれば、総余剰の損失を最小化するように税率を設定すべきである。しかし実際には、これらは別々に決定されることが多い。さらに、通行料収入が税務当局に帰属しない場合もある。したがって、最適な税金と通行料は交通財政システムに依存する。本研究では、以下の3つのシナリオを設定した。

3つのシナリオの定義

シナリオ1は、一般道路管理団体と高速道路管理団体の財政統合を前提に、高速道路料金と燃料税を同時に最適化する。数学的には、これは次のように表される。Maxの下に示した Δ は、補修過程を示す。

$$\max_{p, f, p_d, f_d, \Delta} \sum_{j=1}^N V^j \quad s. t. \quad G + H = K + R \quad (26)$$

シナリオ2は、一般道路管理団体と高速道路管理団体の財政分割を前提に、高速道路料金と燃料税を同時に最適化する。数学的には、これは次のように表される。

$$\max_{p, f, p_d, f_d, \Delta} \sum_{j=1}^N V^j \quad s. t. \quad G = K, \quad H = R \quad (27)$$

シナリオ3は、一般道路管理団体と高速道路管理団体の財政統合を前提に、高速道路料金のみを最適化する。数学的には、次のように表される。

¹¹ しかし実際には、通行料収入は日本の政府の一般予算に影響を与えている。例えば、高速道路建設部門の赤字は政府が負担している。

$$\max_{p, p_d, \Delta} \sum_{j=1}^N V^j \quad \text{s.t.} \quad G + H = K + R \quad (28)$$

(6) 燃料税率と通行料の最適化

本節では、燃料税率と通行料の最適化について述べる。本モデルは混雑、交通事故、環境外部性を含むため、間接効用関数は必ずしも定常的（well-behaved）とは言えない。しかし、本分析では内点解が存在するものとして扱う。

シナリオ1を例に取り、最適条件を導出する。他のシナリオはシナリオ1の最適条件を修正することで説明できる。式(26)を表すラグランジュ定式化は次のように表される。

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_{i=1}^N \delta^i v_1^i(p, f, \tau, \bar{T}_H, T, p_d, f_d) \\ & + \varphi [\sum_{j=1}^N \{p x_H^{j*} + f(\bar{l}_H \cdot x_H^{j*} + \bar{l} \cdot x^{j*})\} \\ & + \sum_{j=1}^N \tau L^{j*} + p_d x_{Hd}^{j*} + f_d(\bar{l}_{Hd} \cdot x_{Hd}^{j*} + \bar{l}_d \cdot x_d^{j*}) - G - H] \end{aligned} \quad (29)$$

ここで φ は政府予算制約のラグランジュ乗数である。一括税がないという前提のもと、財政の限界社会的費用（以下、MCPFと略す）が1を超えるものとなる。

個人需要の総和は、十分に大きいため連続であると仮定する。政策手段の厚生効果は、それぞれの政策変数に対するラグランジアン関数の微分を取ることで与えられる。一階条件は以下のように示される。

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dQ} &= \sum_{j=1}^N \frac{dV^j}{dQ} + \varphi \frac{d(K + R - G - H)}{dQ} = 0 \\ \Rightarrow -\varphi &= \sum_{j=1}^N \frac{dV^j}{dQ} \Big/ \frac{d(K + R - G - H)}{dQ}, \quad \text{ここで } Q = \{p, f, p_d, f_d\} \end{aligned} \quad (30a)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi}{dQ} &= \sum_{j=1}^N \frac{dV^j}{d\tau} + \varphi \frac{d(K - G)}{d\tau} = 0 \\ \Rightarrow -\varphi &= \sum_{j=1}^N \frac{dV^j}{d\tau} \Big/ \frac{d(K - G)}{d\tau} = \sum_{j=1}^N L^{j*} \Big/ \left(\sum_{i=1}^N L^{j*} + \sum_{j=1}^N \tau(\bar{w}^j) \frac{\partial L^{j*}}{\partial \tau} \right) \end{aligned} \quad (30b)$$

連立方程式(30)は最適な通行料と燃料税 p, p_d を決定する。さらに、これらの方程式は消費者の余剰、環境・渋滞の外部性、税収が最適時にMCPFを通じてどのように関連しているかを示

している。これらの方程式の左辺は労働税のMCPFに等しい。式(30a)および(30b)の右側は通行料および燃料税の増加に関するMCPFを表している。最適条件では、これらの限界費用が等しくなるべきことを示している（例. AuerbachとHines、2002、p.1385を参照）。

3章 データ

（１） 交通区間データ

本研究では図1に示す道路を分析対象とする。東北自動車道（福島JCT～仙台港IC）と常磐自動車道（相馬IC～仙台港IC）の2ルート、および一般道路の国道4号線と6号線を対象とした。Googleが提供する実際の道路速度と、各ルートの貨物トラック交通量の距離加重平均（日）を用いた（出典：道路交通センサス）。

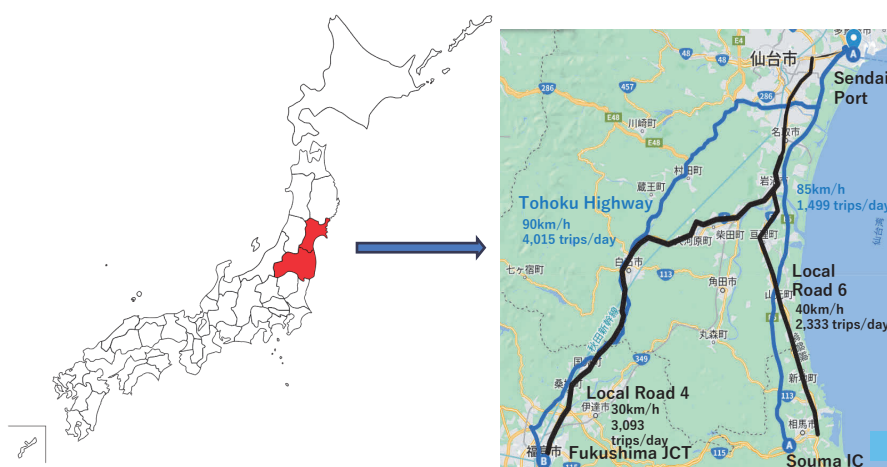


図1 対象道路と現在の交通量

（２） 一般道路舗装劣化マルコフ遷移確率行列のパラメータ推定

舗装劣化行列は、津田ら(2005)の手法に基づき推定する。一般道路舗装については、国土交通省が提供する対象一般道路の6年間の健全度データ（2017～2022年）における8,736サンプル（46区間）を用いてパラメータを推定した。データの内訳を表1に示す。

表 1. 健全度レベル別の貨物トラックの平均運行回数

健全度	道路区間数 (シェア)	貨物トラックの平均トリップ 数 (1 日あたり)
I	4,943 (56.6 %)	2,103
II	3,054 (35.9 %)	7,020
III	739 (8.5%)	10,019

一般道路では、表面処理、オーバーレイ、打ち替えの 3 種類の修繕方法が主に用いられる。舗装劣化確率行列は津田ら(2005) の手法により推定する。劣化関数のパラメータ推定式は (23) の通りである。表 2 に示すパラメータ推定結果を得た。

表 2. 一般道路劣化パラメータ推定

パラメータ	a_i	b_i
健全度 I	1.08*** (0.001)	0.037*** (0.002)
健全度 II	0.00*** (0.000)	0.029*** (0.001)

注: () は P 値である。対数尤度 は -4.8543E+03 である。

表2に示すように、一般道路の劣化過程の推定が有意なパラメータを得た。推定パラメータによると、健全度Iからの劣化速度 a_i は健全度IIおよびIIIからの劣化速度よりもかなり大きいことがわかる。実際、参考までに、一般道路の劣化過程の平均マルコフ遷移確率行列は、推定されたパラメータに基づいて次のように計算される。

$$\pi(X_d)^- = \begin{pmatrix} 0.9685 & 0.0311 & 0.0004 \\ 0 & 0.9723 & 0.0277 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{pmatrix} \quad (31)$$

式(32)の最初の行を例にすると、健全度Iを維持修繕する確率は0.9685である。IIへの劣化確率は0.0311である。 $\pi_{12}(X_d)$ IからIIIへ劣化確率は0.0004である。

（３）高速道路舗装劣化マルコフ遷移確率行列のパラメータ推定

高速道路舗装については、高速道路会社（NEXCO）が提供する対象高速道路の7年間の健全度データ2、219サンプルを用いてパラメータを推定した。一般的な道路のケースと同様に、津田ら(2005)を劣化データに適用し、劣化関数（23）を推定した。表3に示す通り、高速道路についても有意な推定結果が得られた。健全度1～5の高速道路の場合、健全度1～4のパラメータを推定する。

表 3. 高速道路劣化パラメータ推定

パラメータ	a_i	b_i
健全度 1	0.93*** (0.002)	2.110*** (0.004)
健全度 2	0.00*** (0.000)	0.404*** (0.005)
健全度 3	0.00*** (0.000)	5.200*** (0.002)
健全度 4	0.00*** (0.000)	0.123*** (0.009)

注: ()は P 値である。対数尤度 は -5.2564E+03 である。

参考までに、仮定に基づいて計算された高速道路の平均マルコフ遷移確率行列を示す。

$$\pi_H(X_d)^- = \begin{pmatrix} 0.0003 & 0.7024 & 0.0016 & 0.2793 & 0.0164 \\ 0 & 0.6680 & 0.0015 & 0.3099 & 0.0206 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0.8852 & 0.1148 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8846 & 0.1154 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{pmatrix} \quad (33)$$

（４）貨物トラック交通需要の燃料税弾力性の推定

貨物トラックの需要関数を構築するために¹²、2011～2023会計年度のデータ（表4参照）を用い、燃料税弾力性を推定した。

¹² Mori ら(2010)は0.09と同じ弾力性を推定している。しかし、四半期データを用いており、短期弾力性として解釈できる。本研究は長期弾力性を利用するため、独自に推定を行った。

表 4. データソース

データ	出典（発行元）	
貨物トラックの運行	月次自動車輸送統計	（国土交通省）
ディーゼル油の小売価格	石油製品卸売価格調査	（石油情報センター）
世界石油価格	OPEC バスケット	
実質 GDP(2015 年)	国民経済計算	（内閣府）

推定方法は以下の通りである。長期的な傾向を検討するため、2 年の移動平均を用いた。また、操作変数法を用い、ディーゼル燃料の小売価格における内生バイアスを除去した。原油価格を操作変数とし、説明変数はディーゼル小売価格、実質 GDP、ダミー変数とした。被説明変数は貨物トラックの運行回数である。推定回帰方程式は以下の通りで、推定すべきパラメータは a 、 b 、 c 、 d である。

$$\ln(Q_{dt}) = a + b \cdot \ln(\text{price}_t) + c \cdot \ln(\text{GDP}_t) + d \cdot D_t + e_t \quad (35)$$

ここで、 Q_{dt} は周期 t における貨物トラックの運行回数である。 price_t は期間 t におけるディーゼル燃料の小売価格である。 GDP_t は実質 GDP である。 D_t はダミー変数を示す。 e_t は誤差項を示す。

パラメータ推定結果は以下の通りである（表 5.1 および 5.2 参照）。

COVID-19 の影響を考慮し、2 つのダミー変数を使用する。まず、「緊急事態宣言ダミー」として、非常事態宣言が発令された期間を 1、それ以外を 0 とした。次に、「COVID-19 ダミー」として、2020 年 3 月から 2022 年 12 月までを 1、それ以外を 0 とした。推定結果において燃料税弾力性はほぼゼロに近く、P 値に基づき統計的な棄却はできないため、本分析では燃料税弾力性を 0.00 と設定した。また、移動平均なしのトラック燃料税弾力性も分析し、表 5.2 に結果を示した。

表 5.1 推定結果（2 年移動平均のケース）

a	b (トラック燃料・税の弾力性)	c (GDP 弾力性)	ダミー変数	ダービン-ワトソン統計量
24.1819 (0.0117)	-0.0156 (0.2578)	0.7957 (0.0184)	緊急事態宣言	2.847
26.8939 (0.0342)	-0.0234 (0.0967)	0.8254 (0.0193)	COVID-19	2.592
24.1815 (0.0256)	-0.0269 (0.3368)	0.7458 (0.0146)	緊急事態宣言と COVID-19	2.832

注： () は P 値である。決定係数は 0.71 である。

表 5.1 と 5.2 の比較では、両値はほぼ同じであることがわかる。そこで、トラック燃料税の弾力性については、本分析では 2 年移動平均の表 5.1 を用いる。

表 5.2 推定結果（移動平均なしのケース）

a	b (トラック燃料・税の弾力性)	c (GDP 弾力性)	ダミー変数	ダービン-ワトソン統計量
26.7343 (0.017)	-0.0342 (0.5825)	0.7843 (0.0852)	緊急事態宣言	2.948
26.6438 (0.0841)	-0.0224 (0.9821)	0.8421 (0.0243)	COVID-19	2.3343
28.2482 (0.0432)	-0.1063 (0.1365)	0.8141 (0.0244)	緊急事態宣言と COVID-19	2.0682

注: () は P 値である。決定係数は 0.78 である。

（５） 自動車交通需要の燃料税弾力性の推定

私たちは、2011-2023会計年度のデータ(出典は表6に記載)を用い、乗用車の燃料税弾力性を推定した。貨物トラックの分析と同様に、操作変数法を用いている。原油価格が操作変数である。説明変数としては、ガソリンの小売価格、実質GDP、そしてダミー変数を設定した。推定方程式は式(35)と同様である。推定結果は以下の通りである(表6.1および6.2参照)。

表 6.1 推定結果（2 年移動平均のケース）

a	b (燃料税弾力性)	c (GDP 弾力性)	ダミー変数	ダービン-ワトソン統計量
44.72 (0.0134)	-0.151 (0.0080)	0.8345 (0.0324)	緊急事態宣言	1.305
49.83 (0.0743)	-0.147 (0.0010)	0.8311 (0.0821)	COVID-19	2.127
59.44 (0.0234)	-0.182 (0.0042)	0.9473 (0.0941)	緊急事態宣言と COVID-19	1.719

注:() は P 値である。決定係数は 0.91 である。

表 6.2 推定結果（移動平均なしのケース）

a	b (自動車・燃料・税の弾力性)	c (GDP 弾力性)	ダミー変数	ダービン-ワトソン統計量
43.8545 (0.0823)	-0.1565 (0.0915)	0.8294 (0.0324)	緊急事態宣言	1.258
44.9585 (0.0932)	-0.12055 (0.0008)	0.7434 (0.0743)	COVID-19	2.451
49.8244 (0.0234)	-0.1051 (0.2545)	0.9435 (0.0432)	緊急事態宣言と COVID-19	1.228

注: ()は P 値である。決定係数は 0.89 である。

表6.1および表6.2の結果を比較すると、両値はほぼ同等である。本研究では、長期的な乗用車の燃料需要の弾力性として、表6.1の推定結果を用いる。

4 章 定量分析

日本のデータを用い、燃料税と高速道路料金の効率的水準を数値的に推定する。本分析の目的は、現在の税率が3つのシナリオにおける効率的水準とどの程度異なるかを示すことである。さらに、これら3つのシナリオでどれだけの厚生向上が期待できるかを定量的に探る。第2章で導出された式を実データに適用することで、通行料と税金の最適水準を算出する。4.2～4.5節では、パラメータ設定に用いたデータの出典を説明する。

(1) 間接効用関数の集計

定量分析には、交通、余暇、および環境外部性に関して加法的に分離可能な効用関数を用いる。加法分離性は、旅行やレジャーから生じる効用に環境要因が影響しないとの仮定に基づいている。同様に、移動から生じる効用は、観光目的でない限り、余暇時間の影響をほぼ受けないと考えられる。交通全体に占める観光旅行の割合は限定的であるため、この設定は現実的といえる。

高速道路と一般道路の配分を検討するため、高速道路のエネルギーコストと一般道路の一般化コストが均衡する状態を前提とする。これらの一般化費用には、高速道路と一般道路の品質差を固定効果として加味した。厚生レベルを計算するため、モデルから導出される間接効用関数を使用する。特に、一般道路と高速道路の一般的な輸送コストは一致するため、間接効用関数には一般道路の一般化コストのみを用いる。

$$\sum_{i=1}^N V^i = A - [\alpha g + \beta/2 \cdot (g)^2 + \alpha_d g_d + \beta_d/2 \cdot (g_d)^2] - e_h X_h - e_X X - e_{hd} X_{hd} - e_d X_d. \quad (36)$$

(2) パラメーターの設定

日本の労働税の限界費用 (MCPF) は、別所ら (2003) により0.96～1.23と推定されている。したがって、労働供給関数のパラメータを設定し、労働税の限界費用であるMCPFを、現状の日本のMCPFと一致させる。本分析では、感度解析としてMCPF=1.1を設定する。そこで、労働供給関数は $\sum_i L^i = 12609.7 \times 10^7 - 96290.7 \times 10^4 \tau$ と設定する。この関数はKono et al.(2019)で同じ目的で設定されている。

労働税のMCPFが内生的に決定されるという仮定のもと、労働供給関数のパラメータを決定する。このような取り扱いとしたのは、適切な労働供給曲線を直接設定することが困難であるためである。なお、労働税の所得MCPFが別所ら(2003)の推定値に一致するという点で正当化可能である。

交通移動時間関数を広く使われているBPR関数を設定した。 $T(\cdot) = v\{1 + \gamma(X/K_H)^\eta\}$ ¹³BPR関数のパラメータは $\gamma=0.48$ および $\eta=2.89$ に設定されており、これは日本土木学会(2003)によって標準値として提案されている。自由速度(v)は速度制限で設定される。宮城と福島的一般道路4号および6号にBPR関数を適用すると、渋滞遅延の大きさが得られる。

環境外部性に関するパラメータを表7にまとめる。

(3) 通行料と自動車関連税の最適水準

本節では、乗用車の最適通行料、乗用車燃料税、貨物トラック通行料、およびディーゼル燃料税を算出する。労働税の限界社会的費用(MCPF)は1から1.2の範囲であるため(別所ら、2003)、本分析ではMCPFを1.1として計算を行った。

¹³ BPR 関数は 1964 年に米国の公共道路局によって構築された。この機能は研究や実践で広く利用されている。

表 7. モデルで設定されたパラメータ

パラメータ	価値	出典
高速道路需要の通行料弾力性		
乗用車	0.32	塚田・福田(2013 年)
貨物トラック	1.63	
燃料税の燃料消費の弾力性		
乗用車	0.10	著者による推定
貨物トラック	0.00	
大気環境の外部性	6,101 円/tCO ₂	Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2021)
事故	高速道路	
	乗用車	2.0 円/km 金本(2007)
	貨物トラック	2.24 円/km
	一般道路	
	乗用車	2.5 円/km 金本(2007)、Parry(2004)
	貨物トラック	2.8 円/km
燃費	高速道路	
	乗用車	14.4 km/リットル 2005 年の平均燃料費×1.5
	貨物トラック	5.25 km/リットル 日本トラック協会(2008 年)× 1.5
	一般道路	
	乗用車	9.6 km/リットル 2005 年平均燃料費
	貨物トラック	3.5 km/リットル 日本トラック協会(2008 年)
平均通行料率	乗用車 30 円/km 貨物トラック 48.84 円/km	通行料は乗用車 150 円と 24.6 円/km の合計に乗用車 1.0、貨物トラック 1.65 を乗じて計算される。平均走行距離が 30km と仮定すると左記の値になる。
平均労働税率	109 円/時間	日本の労働税収は 1,260 億ドル、総労働人口は 6,600 万人、総労働時間は 1 人あたり 1,754 時間である(日本財務省(2010 年)より)
政府歳入(労働税収入+自動車関連税収入)	年 20,900 億円	日本財務省(2010 年)

表 8. 3 つのシナリオにおける最適な通行料と課税 (MCPF=1.1)

シナリオ		現行	1	2	3
乗用車	通行料(円/km)	30.0	22.9	22.7	21.3
	燃料税(円/リットル)	58.8	63.4	65.1	-
	社会厚生(円/トリップ)の改善	-	5	5	3
貨物トラック	通行料(円/km)	48.8	31.1	37.6	30.5
	燃料税(円/リットル)	32.1	62.7	70.7	-
	社会厚生(円/トリップ)の改善	-	-3	-4	2
修繕費 (百万円)		1,240	1,160	1,080	1,180
社会厚生総額改善 (10 億円)			52.1	42.1	34.9
社会厚生改善/宮城+福島県民総生産*			0.28%	0.23%	0.19%

*(基準値)宮城・福島の地域総額:17,4943 億円

宮城県・福島県会計(FY2021)

表 8 のシナリオ 1 において、乗用車および貨物トラックの通行料はそれぞれ 22.9 円/km および 31.1 円/km へと引き下げることが最適である（現行はそれぞれ 30.0 円/km、48.84 円/km）。また、燃料税については、乗用車は 63.4 円/リットル、貨物トラックは 62.7 円/リットルへ引き上げることが最適である。

シナリオ2は、税務当局と料金徴収機関の財政分離を前提とした場合であり、乗用車および貨物トラックの通行料は現行水準よりわずかに低くなる。これは、乗用車通行料の引き下げによる収入減を、貨物トラックから徴収される収入で補填する構造を示唆している。シナリオ3は通行料のみを最適化するケースであり、乗用車および貨物トラックの通行料はそれぞれ21.3 円/km、30.5円/kmが最適となる。

政策的含意として、財政シナリオ1における社会厚生の総改善額は521億円に達し、これは宮

城県および福島県のGRPの約0.28%に相当する。¹⁴ シナリオ1とシナリオ2を比較すると、交通機関間の財政統合を図り、複数の自動車関連税の歪みの相互依存性を考慮することにより社会厚生向上に寄与していることがわかる。

表 9 維持修繕費用内訳 (MCPF=1.1)

シナリオ		現在	1	2	3
一般道路	II	0.35	0.54	0.53	0.52
	III	0.08	0.10	0.17	0.25
	修繕費(100 万円)	870	810	760	820
高速道路	II	0.10	0.41	0.34	0.36
	III	0.00	0.35	0.36	0.21
	IV	0.58	0.12	0.13	0.16
	V	0.31	0.00	0.00	0.00
	修繕費(100 万円)	370	350	370	360
修繕費計(100 万円)		1,240	1,160	1,080	1,180

維持修繕費については、シナリオ1では最適化によって修繕コストを7%削減できる。シナリオ2では貨物トラックの通行料と燃料税が比較的高いため、維持修繕費は10億8千万円と低く、13%削減が見込まれている。シナリオ3では貨物トラックの通行料と燃料税が比較的低いため、維持修繕費は11.8億円と高額である。これはいずれのシナリオにおいても、現行の反応的なメンテナンスから、比較的健全な段階で補修を行う「予防保全」へ移行することで、5～13%のコスト削減が可能であることが示された。

維持修繕費の内訳は表9に示されている。この二つの仮定の比率は類似している。そこで、表9で示される一般的な道路に焦点を当てる。いかなる財政シナリオにおいても、健全度IIの比率は約0.2(例:シナリオ1では0.35→0.54)上げるべきであり、シナリオ2および3では健全度IIIの比率を上げるべきである(例:シナリオ2では0.08→0.17)。その結果、すべてのシナリオで保守コスト

¹⁴ シナリオ1はすべての税制手段を同時に最適化し、シナリオ2は複数の税制手段を最適化し、シナリオ3は他の税制が現在の水準のまま通行料のみを最適化する。シナリオ3ではシナリオ1と2に制約が加えられるため、シナリオ1と2の厚生はシナリオ3よりも必然的に高いことを意味する。

が削減される(例:870万円→シナリオ1では810万円)。これは、比較的健全な段階での予防保全(比較的高い健全度の段階での維持修繕)が、社会的観点でも維持修繕コストの観点でも、事後保全よりも優れていることを意味している。次に高速道路に焦点を当てると、予防保全が反応的な保守よりもはるかに優れていることが示されている。

表10はシナリオごとの旅行需要を示している。シナリオ1では、通行料が現在の水準より低くなったため、高速道路での乗用車需要が2,111回増加する。一般の道路における乗用車の移動需要は、燃料税のわずかな引き上げと低い通行料のため減少している。シナリオ1では、通行料が現在の水準より低いため、高速道路の貨物トラック需要が827回増加する。燃料税が大幅に引き上げられ、通行料が引き下げられたため、一般的な道路での貨物トラック輸送需要は減少している。燃料税の大幅な引き上げは、一般道路での需要を大幅に減少させる。

表 10. シナリオが旅行需要に与える影響 (MCPF=1.1)

(単位:トリップ数)

シナリオ		現在	1	2	3
乗用車	高速道路	6,939	+2,111	+2,198	+2,042
	一般道路	14,263	−3,857	−2,996	−2,060
貨物トラック	高速道路	2,757	+827	+651	+1,001
	一般道路	2,713	−877	−781	−1,071

5 章 結論

本研究では、宮城・福島地域を対象とし、道路インフラの維持修繕に必要な財源としての燃料税および通行料の効率的水準を、労働税の歪みや外部性を考慮した理論モデルを用いて定量的に分析した。道路管理団体の財政制度について3つのシナリオを設定し、それぞれの状況下での最適税率および最適通行料を算出した。分析の結果、以下の知見が得られている。

第一に、財政シナリオ1（道路財源の統合と全政策変数の最適化）において、乗用車および貨物トラックの通行料を現行より引き下げ、燃料税を引き上げることが、社会厚生を最大化する最適解であることが示された。これは、現行の通行料水準が社会的に高すぎる一方で、燃料税は低すぎることを示唆している。

第二に、道路維持修繕については、いずれの財政シナリオにおいても、現行の「事後保全」に近い維持修繕方法から、健全度が高い段階での修繕を行う「予防保全」へ移行することが、コスト削減および社会厚生の観点から優位であることが確認された。シミュレーションでは、予防保全への移行により、維持修繕コストを5～13%削減できる可能性が示されている。

第三に、シナリオ分析を通じて、異なる交通機関の財政を統合し、複数の自動車関連税の相互依存性を考慮することが、高い厚生向上に寄与することが明らかになった。たとえ制度的制約によりすべての税制を同時に最適化することが困難な場合であっても、税率の歪みの相互依存を考慮して政策を立案することの重要性は極めて高い。

本研究が示した厚生改善効果は、地域総生産（GRP）に対して0.19%～0.28%に相当し、最適な通行料と燃料税の設定が地域の経済的厚生に与える影響は看過できない。今後は、本モデルをより広域的なデータに適用し、全国規模での最適化や、電気自動車普及に伴う走行距離課税の導入を想定したシミュレーションを行うことが課題である。

参考文献

- 1) Auerbach, A.J., Hines, J.R. Jr. (2002), Taxation and Economic Efficiency, Ch. 21, in: Auerbach, A.J., Feldstein, M. (eds.) Handbook of Public Economics, Vol. 3, North-Holland, pp. 1347–1421.
- 2) 別所俊一郎・赤井伸郎・林正義 (2003)、公的資金の限界費用、日本経済研究47号、pp. 1–19
- 3) De Borger, B., and Mayeres, I. (2007). Optimal taxation of car ownership, car use and public transport: Insights derived from a discrete choice numerical optimization model. *European Economic Review*, 51(5), 1177-1204.
- 4) Dockery, D.W., Arden Pope, C., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr., Speizer, F.E. (1993), An association between air pollution and mortality in six US cities, *New England Journal of Medicine* 329, pp. 1753–1759.
- 5) 藤原徹・金本良嗣・蓮池勝人(2002)、自動車税制を活用した地球温暖化防止政策の評価、独立法人経済産業研究所ディスカッションペーパー02-J-004
- 6) Fukushima Prefecture Tohoku Highway Social Experiment Council materials (2004). <http://www.thr.mlit.go.jp/fukushima/kousokudoro/jikken/> (last accessed on 28 July 2017).
- 7) Harberger, A. C. (1971). Three basic postulates for applied welfare economics: an interpretive essay. *Journal of Economic literature*, 9(3), 785-797.
- 8) Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government (2021). Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990 (Tech. Rep.). United States Government. Retrieved from <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocumentSocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf>
- 9) 土木学会（編）(2003)、「道路交通需要予測の理論と適用」、丸善
- 10) 貝戸清之・保田敬一・小林潔司・大和田慶（2005），平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略、土木学会論文集 2005 (801), 801_83-801_96
- 11) 金本良嗣(2007)「道路特定財源制度の経済分析」『道路特定財源制度の経済分析』日本交通政策研究会、pp1-32
- 12) 川瀬晃弘(2010)、最適課税論からみたガソリン税率：日米英比較、日本経済研究 62 号、pp.85-104
- 13) Kobayashi, K., Eguchi, M., Oi, A., Kaito, K., Matsumura Y.(2012), Optimal repair and renewal model for pavement structures
- 14) Kobayashi, K., Kaito, K., and Lethanh, N. (2012). A statistical deterioration forecasting method using hidden Markov model for infrastructure management. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(4), 544-561. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.11.008>
- 15) Kobayashi, K., Kaito, K., and Lethanh, N. (2014). A competing Markov model for cracking

- prediction on civil structures. *Transportation research part B: methodological*, 68, 345-362. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.06.012>
- 16) 国土交通省 (2016). 舗装点検要領 (2016)
https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo28_10.pdf
 - 17) 国土交通省 (2020). 舗装の点検・修繕等措置の実施状況,
https://www.kkr.mlit.go.jp/nara/jigyoku/kanri/mainte/bval4b0000003e1c-att/siryou3-2_Part2.pdf
 - 18) 国土交通省(2016). <http://www.mlit.go.jp/k-toukei/22/annual/22a0excel.html> (in Japanese). (last accessed on 30 June 2017).
 - 19) 国土交通省 (2010). <https://www.stat.go.jp/data/roudou/rireki/nen/ft/pdf/2010.pdf>
 - 20) Kono, T., and Kishi, A. (2018). What is an appropriate welfare measure for efficiency of local public policies inducing migration?. *Mathematical Social Sciences*, 91, 25-35.
 - 21) Kono, T., Mitsuhiro, Y. and Yoshida, J. (2019). Simultaneous optimization of multiple taxes on car use and tolls considering the marginal cost of public funds in Japan. *The Japanese Economic Review*, vol 72(2), 261-297
 - 22) Koyama, S., Kishimoto, A. (2001), External costs of road transport in Japan, *Transport Policy Studies* 4(2), pp. 19–30 (in Japanese).
 - 23) Madanat, S., and Ben-Akiva, M. (1994). Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities. *Transportation science*, 28(1), 55-62. <https://doi.org/10.1287/trsc.28.1.55>
 - 24) Mayeres, I., Ochelen, S., Proost, S. (1996), The marginal external costs of urban transport, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 1, pp. 111–130.
 - 25) Mayeres, I., Proost, S. (1997). Optimal tax and public investment rules for congestion type of externalities. *The Scandinavian Journal of Economics*, 99(2), 261-279.
 - 26) Medury, A., and Madanat, S. (2013). Incorporating network considerations into pavement management systems: A case for approximate dynamic programming. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 33, 134-150. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.03.003>
 - 27) Mizutani, D., Nakazato, Y., and Lee, J. (2020). Network-level synchronized pavement repair and work zone policies: Optimal solution and rule-based approximation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102797. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102797>
 - 28) Mori, M., Ishida, H., Okamoto, N., Mohri, Y. (2010), Analysis of Fuel Price Influence on Traffic Demand, *Civil Engineering Planning Research collected papers* 27, 561-567
 - 29) 森杉壽芳・河野達仁(2012)、道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準、*日本経済研究* 67 号
 - 30) Mohring, H., and Harwitz, M. (1962). *Highway benefits: An analytical framework*. Evanston, Illinois: Northwestern University Press.
 - 31) 武藤慎一・河野達仁・福田敦、青木優、上泉俊雄 (2022). 交通政策の空間的応用一般均衡分析 ―インフラ・料金・環境政策評価―、*勁草書房*
 - 32) 内閣府(2013). 労働時間等の実態について <http://www8.cao.go.jp/kisei->

kaikaku/kaigi/meeting/2013/discussion/140325/gidai2/gidai2-3_2.pdf (last accessed on 30 June 2017).

- 33) Nordhaus, W.D., Boyer, J. (1999), Roll the DICE again: economic models of global warming, working paper, <http://aida.wss.yale.edu/~nordhaus/homepage/rice98%20pap%20121898.PDF> (last accessed 27 November 2013).
- 34) Oates, W. E. (1972). Fiscal federalism. NY: Harcourt Brace Jovanovich.
- 35) Ottaviano, G., Tabuchi, T., Thisse, J. F. (2002). Agglomeration and trade revisited. *International Economic Review*, 409-435.
- 36) Parry, I.W.H. (2004), Comparing alternative policies to reduce traffic accidents, *Journal of Urban Economics* 56, pp. 346–68.
- 37) Parry, I. W., Heine, M. D., Lis, E., Li, S. (2014). Getting energy prices right: From principle to practice. *International Monetary Fund*.
- 38) Parry, I. and Small, K. (2005), Does Britain or the United States have the right gasoline tax? *American Economic Review* 95, pp. 1276–1289.
- 39) Parry, I. W., Walls, M., Harrington, W. (2007). Automobile externalities and policies. *Journal of Economic Literature*, 373-399.
- 40) 日本道路交通情報センター (2004) , 高速道路の料金所における社会的体験
- 41) 瀬木俊輔・小林潔司・田上貴士(2014), 維持補修費用を考慮した次善高速道路料金、土木学会論文集 D3、. Vol.70、No.3、pp.145-160
- 42) Small, K.A., Kazimi, C. (1995), On the costs of air pollution from motor vehicles, *Journal of Transport Economics and Policy* 29, pp. 7–32.
- 43) Smilowitz, K., and Madanat, S. (2000). Optimal inspection and maintenance policies for infrastructure networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15(1), 5-13. <https://doi.org/10.1111/0885-9507.00166>
- 44) 谷下雅義・鹿島茂(2002)、自動車関連税制が乗用車の保有・使用に及ぼす影響の分析、土木計画学会論文集 No.709/IV-56、pp.39-49.
- 45) Tol, R.S.J. (2005), The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties, *Energy Policy* 33, pp. 2064–2074.
- 46) 津田尚胤・貝戸清之・青木一也・小林潔司(2005), 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 2005 (801), 801_69-801_82
- 47) 塚田幸広・福田大輔 (2013) 「有料道路社会実験データを用いた料金弾性値規定要因の分析」『土木計画学研究・講演集』Vol. 47, No. 112.
- 48) Tsuneki, A. (1987). The measurement of waste in a public goods economy. *Journal of Public Economics*, 33(1), 73-94.
- 49) 上田孝行・武藤慎一・森杉壽芳(1998)、自動車交通による外部不経済抑制政策の国民経済的評価－静的応用一般均衡(CGE)と動的応用一般均衡(DCGE)の比較分析－、運輸政策研究Vol.1 No.1、pp.39-53

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ
http://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください。

A-946 「交通インフラ維持補修のための利用料金および燃料税の
効率的水準の経済学的検討」

交通インフラ維持補修のための利用料金および
燃料税の効率的水準の経済学的検討に関する研究プロジェクト

2026年7月 発行

公益社団法人日本交通政策研究会

