

広域幹線道路の持続的な維持管理・更新 のための適正料金水準の導出

有働 友哉¹・武藤 慎一²

¹学生会員 山梨大学 大学院医工農学総合教育部工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: g18tc003@yamanashi.ac.jp

²正会員 山梨大学准教授 大学院総合研究部工学域 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: smutoh@yamanashi.co.jp

高度経済成長期に道路建設が集中し、それらの道路は今後急速に老朽化することから、適切に維持管理・更新を行うことが必要になってくる。維持管理・更新費用は、高速道路では利用者から徴収した高速道路料金を用いて実施され、一般道路の維持補修は基本的には税金を原資として実施されている。今後、増加する維持管理・更新費用の財源を持続的かつ公正に調達するには、適正な費用負担を確立させる必要がある。本研究では、維持管理費用の財源を持続的かつ公正に調達するために、燃料税の代わりに一般道路においても料金徴収できると仮定する。そして、維持管理費用を考慮した適正料金水準を導出し、維持管理費用を考慮した料金体系のあり方について検討する。

Key Words : road maintenance costs, optimal road pricing, fair cost sharing

1. はじめに

かつて日本の道路事情は欧米諸国と比べ著しく遅れていた。そのため、高度経済成長期に急速に道路整備が進められ、多くの道路がその時期に集中的に建設された。その結果、近年は道路の新設よりも維持管理や大規模更新に注目が集まっている。

2014年以降、高速道路各社でリニューアルプロジェクトが実施されており、道路整備は新規建設から維持管理の時代に移行し始めた。そのため、それまでの建設債務償還を目的とした料金体系の見直しに関する議論がなされ始めており、公益社団法人高速道路調査会による2018年7月の「高速道路の料金制度に関する研究最終報告書」¹⁾では、債務償還後は高いサービスの提供と今後増加する維持管理費用を賄うために走行距離に応じた通行料金を徴収すべきとの結論を出している。そのため、高速道路においては、維持管理・更新費用は利用者から徴収した高速道路料金を用いて実施されることになると考えられる。

一方、一般道路は2009年に廃止された道路特定財源制度により、建設の財源が賄われていた。それは、道路整備に必要な財源を安定的に確保することを目的に、受

益者である道路利用者が燃料税等の税を負担する受益者負担を原則としていたものである。受益者負担は受益を得た利用者がその分を負担するという公平性、合理性等の長所を備えている。そして、維持管理や大規模更新費用が増加している現状において、道路特定財源が2009年に一般財源化された後も、燃料税等によって、一定の負担を続ける形になっている。

しかし、近年、電気自動車へのシフトの加速やカーシェアリングの拡大で自動車を持つ人が減少しており、道路利用者の負担する税収が落ち込むことが予想されている。また、受益者負担に基づく財源調達には、資源配分の非効率や、財政の硬直化を招くとの問題が指摘されている²⁾。

これに対し、欧米諸国では、従来の自動車の保有や燃料に対する課税ではなく、走行距離に応じた税、すなわち「走行税」が導入され、日本でも議論がなされ始めている³⁾。その場合の一般道路への課金は、GPSなどにより走行経路、走行距離を特定し、その走行距離に対して課金するという新情報技術に基づく課金であり、情報技術の進展によって、そのような課金システムの導入も十分に可能であるとされている。

以上のように、一般道路においても走行距離に応じた

課金が可能となれば、高速道路と同様の料金体系が導入できる。そのような料金体系を前提に、高速道路と一般道路において、今後増加する維持管理や大規模更新費用を、持続的かつ効率的に負担するための方法を検討することが重要であると考えられる。

本研究は、高速道路と一般道路の一体的な道路ネットワークにおける持続的に維持管理費用を賄うための料金水準と課税水準の望ましい組み合わせや費用負担について検討する。具体的には、負担の明確化のため、道路利用者が当該道路の維持管理費用を負担したときの影響について分析する。すなわち、燃料税に代わって一般道路でも料金として徴収することとし、現況の料金体系および租税体系と比較検討する。そして、総余剰を最大化させるという意味での適正料金水準の導出を行う。これは、瀬木ら⁴⁾の行った補修費用の推計とその負担のための最適料金水準の導出に関する研究を参考に、これを山梨県において一般道路にまで料金徴収を拡張したときの適正料金水準に関わる知見を得ることを目的とする。

さらに、山梨県の道路ネットワーク対象に適正料金水準の解を導くための数値シミュレーションを実施することで、一般道路の料金徴収の実施可能性や具体的な費用負担に関する施策提言を行うことが本研究の特徴である。

2. 既存研究の整理

(1) 維持管理費用を考慮した高速道路料金

道路利用に伴う外部性の問題を軽減するための料金設定については、膨大な既存研究が蓄積している。それらの研究の多くは、混雑費用の問題を軽減するための料金施策を分析しているが、それらの分析枠組は道路の維持管理費用の外部性の問題を軽減するための料金水準の分析にも応用することが可能である。このような分析を行っている既存研究は、数本のリンクから構成される簡易なネットワークを分析対象にする研究と、多数のリンクから構成される現実的なネットワークを分析対象とする研究に分けられる。道路の維持管理費用を明示的に考慮して料金水準の設定を行った研究には Newbery(1988)⁵⁾がある。そこでは、1リンクの道路の維持管理費用の外部性を内部化するための効率的な限界費用料金を導いている。2リンクの平行道路が存在し、片方のリンクのみ課金可能な Second Best の料金設定は Verhoef et al.(1996)⁶⁾によってはじめて詳細な分析がなされた。

松原・小林(2012)⁷⁾は、1リンク2車種の場合について、高速道路の維持補修費用の固定費用の負担方法を考慮した社会的に最適な料金制度について分析を行っている。瀬木・小林・田上(2014)⁸⁾は一般道路と高速道路が並列する2リンク及び、2車種の場合において、維持補修費用と利用者の時間価値の異質性を考慮した高速道路料金につ

いて社会的総余剰を最大にする高速道路の次善料金設定問題を定式化して、理論的な分析を行っている。これらの研究は、高速道路における道路費用の負担配分に関する研究であり、一般道路における費用負担については議論がなされていない。

(2) 財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金水準

財源調達に伴う厚生損失は、公的資金の限界費用(marginal cost of public funds, 以下MCF)として計測される。もともと、公的なプロジェクトの費用は、税か借入によって調達される。つまり、増税によって資金調達する場合には、その税収入によってその費用を確保している。このとき、納税額が1単位増加することによって、納税者の福利である厚生が減少が引き起こされることが分かっている。課税によって資金が調達される場合は、本来の費用となる納税者の実質的な負担は、実際の納税額以上となるため、追加的の税金1円あたりの社会的費用が発生することになる。したがって、道路整備財源をそのような課税によって調達する限り、名目的な調達額に加えて厚生損失に相当する費用の国民負担が生じる。仮に道路料金のみで財源調達を行うと、料金水準が高くなりすぎ大きな死荷重損失を発生させる。そこで、道路料金収入を補完する別収入(例えば燃料税収入)を財源として追加すると道路料金収入のみで調達するよりも全体の死荷重損失が減少する。このとき、複数の整備財源調達方法全ての限界費用が等しくなるように利用料金や税率を設定することが効率的であり、いわゆる最適課税理論の考え方である(Auerbach and Hines Jr⁹⁾)。森杉、河野⁹⁾は高速道路を対象として財源調達による厚生損失及び混雑外部性を考慮した効率的な高速道路料金の推計を行っている。その、推計結果では現行の高速道路料金よりも引き下げ、整備費用の不足分を税金で補うことが、社会的純便益を最大にし、最も効率的であるとしている。しかしながら、費用負担の公平性については議論がなされていない。

(3) 本研究の位置づけと分析の枠組み

混雑費用の問題の分析枠組みは維持補修費用の外部性にも応用することができる。既に述べたように瀬木らの研究では道路ネットワークにおける維持補修費用を明示的に考慮した効率的な道路料金水準について分析をし、維持補修費用の軽減を目的とした高速道路の車種別料金設定による経路誘導効果の有用性について指摘している。本研究では、負担の明確化のため一般道路でも料金徴収したときの影響について分析する。混雑料金のような一般道における課金ではその使い道に問題があったが、本研究では料金収入を維持管理費用に充てるという明確な調達目的を持ち、適正な費用負担と社会的に最適な交通

フローを実現するための知見を得ることが本研究の目的である。

本研究の基本的な分析枠組みとして、山梨県的高速道路と並行する一般道路から構成される単一ODの道路ネットワークを想定する。高速道路は有料道路であり、高速道路事業者によって運営されている。一般道路は公共主体によって運営されており、そのために必要な維持補修費は家計が燃料税などの税による負担と料金徴収による負担の場合を考える。高道路の運営に関わる費用（維持補修費用や償還費用等）は高速道路料金によって賄われる。3.で定式化する最適料金水準モデルは道路事業者のゼロ利潤規制を仮定している。自動車の走行は高速道路、一般道路に関わらず。道路構造物に損傷をもたらすが、道路構造物のサービス水準を確保するために自動車1台当たり一定の維持補修費用（以下、限界維持補修費用）が発生する。道路構造物は自動車が走行しなくても自然劣化が進展するため、通行台数に関わらず固定的な維持補修費用が発生する。固定的な維持補修費用は外生パラメータと考える。このような設定条件の下で、社会全体の余剰を最大化する最適料金水準と道路利用者の消費者余剰について分析する。

3. 最適料金水準モデル

(1) ネットワーク均衡モデル

高速道路をリンク1、一般道路をリンク2と呼ぶ。リンク k ($k \in \{1,2\}$)の走行時間 t_k は、当該リンクの総交通量 x_k ($k \in \{1,2\}$)に依存する。利用者の時間価値には異質性を導入し、Verhoef and Rouwendal¹⁰と同様に、利用者の時間価値が連続的に分布している状況を想定する。走行時間関数 t_k ($k \in \{1,2\}$)を、

$$t_k = t_k(x_k) \quad (1)$$

と表す。

道路利用者の時間価値は区間 $[\underline{B}, \bar{B}]$ の範囲で連続的かつ一様に分布すると仮定する。微小区間 $[\beta, \beta + d\beta]$ の範囲に含まれる時間価値を持つ利用者は β に依存せず一定であり、 $qd\beta$ と表せる。ここで、 q は潜在的な交通需要密度を表す外生的な定数である。時間価値が一様に分布しているため、潜在的な利用者総数 R は、

$$R = q(\bar{B} - \underline{B}) \quad (2)$$

と表せる。高速道路（リンク1）を通行するのに料金 p_1 が課され、利用者がリンク k を利用する場合の一般化費用 c_k は、

$$c_1(\beta) = p_1 + \beta t_1 \quad (3a)$$

$$c_2(\beta) = p_2 + \beta t_2 \quad (3b)$$

$$(\beta \in [\underline{B}, \bar{B}])$$

と表せる。道路の利用者がトリップによって得る直接的な効用の金銭評価額は、すべての利用者について等しいとし、その金額を定数 v で表す。時間価値 β を持つ利用者は、トリップの一般化費用 $c(\beta)$ が v 以下である場合にトリップを行い、そうでない場合にはトリップを行わない。このとき時間価値 β を持つ利用者の総交通需要密度 $d(\beta)$ は、

$$d(\beta) = \begin{cases} q, (v \geq c(\beta)) \\ 0, (v < c(\beta)) \end{cases} \quad (4)$$

$$(\beta \in [\underline{B}, \bar{B}])$$

と表せる。 $v \geq c(\beta)$ の場合には、潜在的な交通需要密度 q がそのまま総交通需要密度として表現できるのに対し、そうでない場合には、総交通需要密度は0となる。

このとき、時間価値 β を持つ利用者のリンク k の経路交通量を $f_k(\beta)$ とし、リンク k の交通量 x_k は、

$$x_k = \int_{\underline{B}}^{\bar{B}} f_k(\beta) d\beta \quad (5)$$

と表せる。

ここで、時間価値 β を持つ利用者は、トリップを行う場合には、一般化費用が最小のリンクを利用してトリップを行う。具体的には $c_1(\beta) \geq c_2(\beta)$ ならば一般道路を利用し、そうでない場合には高速道路を利用する。高速道路と一般道路の経路選択が無差別となる臨界的時間価値を、

$$p_1 + \tilde{\beta} t_1 = p_2 + \tilde{\beta} t_2 \quad (6)$$

を満足するような $\tilde{\beta}$ を用いて定義する。 \underline{B} 以上 $\tilde{\beta}$ 以下の時間価値を持つ利用者は一般道路を利用する。したがって、

$$c(\beta) = p_2 + \beta t_2 \quad (7a)$$

$$f_1(\beta) = 0 \quad (7b)$$

$$f_2(\beta) = q \quad (7c)$$

$$(\beta \in [\underline{B}, \tilde{\beta}])$$

が成立する。次に、 $\tilde{\beta}$ より高く \bar{B} 以下の時間価値を持つ利用者は高速道路を利用する。したがって、

$$c(\beta) = p_1 + \beta t_1 \quad (8a)$$

$$f_1(\beta) = q \quad (8b)$$

$$f_2(\beta) = 0 \quad (8c)$$

$$(\beta \in [\tilde{\beta}, \bar{B}])$$

が成立する。したがってリンク k の交通量 x_k は、

$$x_1(\tilde{\beta}) = q(\bar{B} - \tilde{\beta}) \quad (9a)$$

$$x_2(\tilde{\beta}) = q(\tilde{\beta} - \underline{B}) \quad (9b)$$

と表せる。式(1)、式(6)、式(9a)、式(9b)より、ネットワ

一ク均衡条件は,

$$p_1 + \tilde{\beta} t_1(x_1(\tilde{\beta})) = p_2 + \tilde{\beta} t_2(x_2(\tilde{\beta})) \quad (10)$$

と定式化できる.

(2) 便益指標の定式化

時間価値 β を持つ利用者一人がトリップにより得る消費者余剰 $cs(\beta)$ を,

$$cs(\beta) = v - c(\beta) \quad (11)$$

と定義する. このときトリップによって得る消費者余剰の総和 CS は,

$$\begin{aligned} CS &= \int_B^{\bar{\beta}} qcs(\beta) d\beta \\ &= \int_B^{\tilde{\beta}} qcs(\beta) d\beta + \int_{\tilde{\beta}}^{\bar{\beta}} qcs(\beta) d\beta \\ &= vR - t_2 \int_B^{\tilde{\beta}} \beta q d\beta - t_1 \int_{\tilde{\beta}}^{\bar{\beta}} \beta q d\beta \\ &\quad - p_1 x_1 - p_2 x_2 \end{aligned} \quad (12)$$

と表せる.

高速道路会社の余剰(利潤) Π_1 は, 事業者の料金収入から高速道路の運営に関わる費用を差し引いた金額となる. 事業者の利潤 Π_1 は,

$$\Pi_1 = p_1 x_1 - m_1 x_1 - F_1 \quad (13)$$

と表す. 式(12)の右辺第一項は事業者の料金収入を表し, それ以外の項は事業者の費用を表し, m_1 は高速道路における車1台あたりの限界維持補修費用を表す定数である. 限界維持補修費用の値自体は今回交通量に依存せず一定であると仮定する. $m_1 x_1$ は可変費用であり, F_1 は自然劣化に起因する維持補修費用や債務償還等から構成される固定費用である. 一般道路管理者に生じる余剰 Π_2 を

$$\Pi_2 = p_2 x_2 - m_2 x_2 - F_2 \quad (14)$$

と表す. m_2 は一般道路における限界維持補修費用, F_2 は一般道路の供用に関わる固定費用を表す.

社会的総余剰 SB を利用者, 高速道路事業者, 一般道路管理者の余剰の総和として,

$$\begin{aligned} SB &= CS + \Pi_1 + \Pi_2 \\ &= vR - \sum_{k \in \{1,2\}} \Psi_k(\tilde{\beta}) \cdot t_k(x_k(\tilde{\beta})) \\ &\quad - \sum_{k \in \{1,2\}} \{m_k x_k(\tilde{\beta}) + F_k\} \end{aligned} \quad (15)$$

と定義する. $\Psi_k(\tilde{\beta})$ ($k \in \{1,2\}$)は, それぞれ,

$$\Psi_1(\tilde{\beta}) = q \int_{\tilde{\beta}}^{\bar{\beta}} \beta d\beta \quad (16a)$$

$$\Psi_2(\tilde{\beta}) = q \int_B^{\tilde{\beta}} \beta d\beta \quad (16b)$$

と定義される変数であり, 高速道路と一般道路を利用する利用者全体の総時間価値を表す. 社会的総余剰は臨界的時間価値 $\tilde{\beta}$ を変数とする関数として表現できる. このことを明示的に表現するために, 社会的総余剰関数を $SB(\tilde{\beta})$ と表記する.

(3) 最適料金水準モデル

固定需要のもと最適料金設定を求める問題はネットワーク均衡条件(10)を制約条件として, 社会的総余剰 $SB(\tilde{\beta})$ を最大化する料金 p_1 および, その料金の下でのネットワーク均衡 $\tilde{\beta}$ を求める問題として, 以下のように定式化できる.

$$\max_{p_1, p_2, \tilde{\beta}} SB(\tilde{\beta}) \quad (17a)$$

subject to

$$p_1 + \tilde{\beta} t_1(x_1(\tilde{\beta})) = p_2 + \tilde{\beta} t_2(x_2(\tilde{\beta})) \quad (17b)$$

ここで, 一般道路では料金は課されず, 高速道路事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況下では最適高速道路料金 p_1^{**} は,

$$p_1^{**} = \Psi_1 t_1' - \Psi_2 t_2' + m_1 - m_2 \quad (18)$$

であることが, 瀬木ら⁴⁾の研究で明らかにされている. すなわち, 次善の高速道路料金は, 高速道路と一般道路の間の「社会的限界費用と私的限界費用の差」により定義できることが結果として得られている. 本研究では, 公正な負担を検討するために道路料金を維持管理費用に充てることとする. すなわち, 事業者はゼロ利潤が課されることを想定する. さらに, 一般道路の維持管理費用を賄うために一般道路利用者にも道路料金を徴収することとし, それらを踏まえ3つのケースに分けて分析する. ケース1では, 現状におけるシミュレーションである. すなわち, 高速道路のみ料金徴収され, 一般道路は, 燃料税により賄われている状況である. このとき, (17a)の最適化問題に対し, 以下の制約条件式が追加される.

$$p_1 x_1 - m_1 x_1 - F_1 = 0 \quad (19a)$$

$$p_2 (x_1 + x_2) - m_2 x_2 - F_2 = 0 \quad (19b)$$

このときの p_2 は燃料税等の税収を表している. ケース2は高速道路, 一般道路それぞれにおいて独立した料金徴収を行ったケースであり, このときは, 燃料税は考慮しない. このとき, (17a)の最適化問題に対し, 以下の制約

条件式が追加される。

$$p_1x_1 - m_1x_1 - F_1 = 0 \quad (20)$$

$$p_2x_2 - m_2x_2 - F_2 = 0 \quad (20)$$

ケース 2 では、高速道路事業者と一般道路事業者がそれぞれの料金収入でそれぞれの道路の維持管理を行っている。そこで、ケース 3 では、高速道路事業者と一般道路事業者の料金収入で維持管理費用を賄うという制約をなくし、全体の料金収入で高速道路と一般道路の維持管理を行うことができると仮定する。すなわち、高速道路料金で一般道路の維持管理費用を負担することが可能であり、逆もまた同様である。このとき、(17a)の最適化問題に対し、以下の制約条件式が追加される。

$$p_1x_1 + p_2x_2 - m_1x_1 - m_2x_2 - F_1 - F_2 = 0 \quad (21)$$

ケース 1 とケース 2 はゼロ利潤制約が追加されることによって、制約条件式のみで料金が決定される。ケース 3 においては最適化問題(17a)と制約条件(17b)(21)を解くための一階の最適化条件は、

$$q \left\{ \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_1} T^{(0)} + \tilde{\beta} T^{(1)} + \bar{B}t'_1 - \underline{B}t'_2 + \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_1} (m_2 - m_1) \right\} - \lambda \left\{ -1 + \tilde{\beta} T^{(1)} + \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_1} T^{(0)} \right\} = 0 \quad (22a)$$

$$q \left\{ \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_2} T^{(0)} + \tilde{\beta} T^{(1)} + \bar{B}t'_1 - \underline{B}t'_2 + \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_2} (m_2 - m_1) \right\} - \lambda \left\{ 1 + \tilde{\beta} T^{(1)} + \frac{\partial \tilde{\beta}}{\partial p_2} T^{(0)} \right\} = 0 \quad (22b)$$

$$p_1 - p_2 - \tilde{\beta} T^{(0)} = 0 \quad (22c)$$

と表せる。ただし、 λ は制約条件(17b)に対応するラグランジュ乗数である。表記の簡略化のために関数の因数は省略している。 $T^{(0)}, T^{(1)}$ はそれぞれ、

$$T^{(0)} = t_2 - t_1 \quad (23a)$$

$$T^{(1)} = t'_2 - t'_1 \quad (23b)$$

と定義される変数である。

(4) 数値計算の適用条件

数値的な計算事例を用いた分析を行うために、走行時間関数の関数形とモデルのパラメータの設定を行う。走

表-1 モデルの適用条件

パラメータ	リンク1	リンク2
距離(km)	5	5
自由走行速度(km/h)	80	50
自由走行時間(分)	3.75	6
日交通容量(台/1車線)	12000	11000
α		0.48
β		2.89
トリップの金銭的価値(円)		100
潜在的交通需要密度q		2000
時間価値下限(円/分)		20
時間価値上限(円/分)		60
固定費用(円/km)	625979	42385
限界費用(円/km/台)	1	3

行時間関数 $t_k(k \in \{1,2\})$ を BPR 関数を用いて、

$$t_k(x_k) = t_{k0} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_k}{C_k} \right)^\gamma \right] \quad (24)$$

と定式化する。 t_{k0} は自由走行時間を表し、 C_k はリンク k の交通容量を示す定数であり、 α, γ はパラメータである。パラメータの設定条件としては山梨県における高速道路の甲府昭和 IC と双葉スマート IC 間と並列する国道 20号をもとに設定している。表-1はモデルの適用条件である。高速道路と一般道路は 5km とし、 $t_{10} = 3.75$ 、 $t_{10} = 6.0$ (単位：分) と設定する。一般道路と高速道路は片側 2 車線であり 1 車線あたり日交通容量を、 $C_1 = 12000$ 、 $C_1 = 11000$ と設定する。走行時間関数に関する他のパラメータは一般道路と高速道路で等しいとし、土木学会¹⁾が推定した $\alpha = 0.48, \gamma = 2.82$ を用いている。限界維持補修費用は田上ら²⁾の知見をもとに高速道路は $m_1 = 1$ 、一般道路は $m_1 = 3$ と高速道路より一般道路の限界維持補修費用の値を大きく設定している。高速道路の固定費用に関しては、1kmあたりの建設費用は 50 億円であり、災害リスク等を考慮した資本コストは 1kmあたり 100 億円、構造寿命は 100 年間であるとして、当該区間の一日当たりの資本コストを概算した。計画管理費用は当該区間 1km あたり年間 7330 万円程度³⁾、維持補修費用は、舗装と橋梁の費用以外に関する費用で当該区間 1km あたり年間 6390 万円程度⁴⁾であると仮定する。一般道路については山梨県の過去 5 年間の舗装と橋梁以外の自然劣化に起因する維持管理費用の平均値を固定費用としている。

道路利用者がトリップにより得る効用の金銭的評価額は、 $v = 100$ (単位：円/km) と設定する。潜在的交通需要密度 $q = 2000$ とし時間価値の分散である下限と上限は $\underline{B} = 20$ 、 $\bar{B} = 60$ であり、高速道路と一般道路の総交通量は 80000 台になるように設定している。

(5) 数値計算結果

表-2 はケース 1-3 の各ケースについて、各料金水準下

表-2 最適料金水準の効果

	記号	ケース1	ケース2	ケース3
道路料金 (円/km)	p_1	21.4	20.4	15.0
	p_2	2.3	3.7	7.1
交通量 (台)	x_1	30705	32264	34476
	x_2	49295	47736	45524
総コスト (万円/km)	TC_1	119.5	125.5	134.4
	TC_2	455.0	418.3	371.0
総コスト(合計) (万円/km)	TC	574.4	543.8	505.4
総消費者余剰 (万円/km)	CS_1	125.0	134.5	162.2
	CS_2	41.6	55.8	65.6
総消費者余剰 (万円/km)(合計)	CS	166.6	190.3	227.7
総余剰 (万円/km)	SB_1	187.6	197.1	210.3
	SB_2	38.0	59.1	84.3
総余剰(合計) (万円/km)	SB	225.6	256.2	294.6
事業者の利潤 (万円/km)	Π_1	0	0	-14.4
	Π_2	0	0	14.4

表-3 維持管理費用 (万円/km/日)

	ケース1	ケース2	ケース3
維持管理費用(高速)	20.6	20.7	20.9
維持管理費用(一般)	18.1	17.6	17.0
維持管理費用(全体)	38.7	38.4	37.9

でのネットワーク均衡における変数の値を比較したものである。ケース1では、現状の料金徴収方法であり、 p_2 は燃料税等の税収である。今回の計算ではゼロ利潤規制を仮定しており、一般道路の維持管理費用を賄うためには、2.3円/kmを徴収する必要がある。また、高速道路の対象区間の維持管理費用や建設費用を賄うためには21.4円/kmを徴収する必要がある。現状では、24.5円/kmであり、計算結果は若干安くなっているが、料金プール制を考慮していないことなどが原因と考えられる。また、高速道路利用者は高速道路料金に加え、燃料税も支払っていることに注意が必要である。

ケース2は燃料税に代わって、一般道路でも料金徴収を仮定している。一般道路の維持管理費用を賄うためにその道路利用者が料金を支払うため、一般道路の料金はケース1の2.3円/kmよりも高くなっている。そのため、一般道路の交通量は減少し、高速道路の交通量が増加することでケース1よりも料金が安くなっている。一般道路は交通量が減少したことで総費用は減少し、社会全体としても総費用は減少している。また、高速道路の料金は値下げされた結果、高速道路利用者の消費者余剰は増加している。一般道路は、値上げされたにもかかわらず、

消費者余剰は増加している。これは、一般道路の交通量が減少したことで混雑が緩和され、走行費用(私的費用)が減少し、その減少分が料金の値上げ分を上回ったためである。すなわち、利用者の便益は社会全体として増加する。同様に、一般道路と高速道路の限界維持補修費用に差がある場合、一般道路の交通量を高速道路に誘導することで一般道路の混雑緩和に加え、維持管理費用の外部費用である可変費用を減少させることによって、社会的総余剰は増加する。表-3は可変費用と固定費用からなる維持管理費用の結果である。道路間の限界維持補修費用に差がある場合、料金設定によって高速道路に誘導することで全体の維持管理費用は減少する。

ケース3も一般道路で料金徴収を想定しており、ケース1、ケース2に比べ一般道路料金は高く、高速道路料金は安い結果となっている。すなわち、一般道路が混雑し、一般道路より高速道路の限界維持補修費用が安い状況下では、高速道路料金を安く、一般道路料金を高めにすることで、高速道路に誘導し、社会全体の総費用を抑えられることが可能である。また、ケース2と同様の理由で、高速・一般ともに消費者余剰は増加し、総余剰に関しても増加している。しかしながら、高速道路の料金を安くすることで、高速道路事業者の利潤はマイナスとなっており、一般道路の利潤と足し合わせてゼロ利潤となることに注意が必要である。このように、高速道路と一般道路の一体的な料金体系によって総費用を抑え、総余剰が大きくなることを確認したが、一般道路利用者が高速道路の費用を負担しており、公正な費用負担の観点では課題が残る。

5. 道路の維持補修を考慮した効率的交通流配分

(1) モデルの定式化

4.では、高速道路と一般道路の2リンクを対象に維持補修費用を考慮した料金水準および調達方法を検討した。1リンク2リンクの単純なネットワークであれば限定的な条件下で解析的に解を導くことが可能である。しかしながら、複雑な大規模ネットワークでは、最適料金を導くモデルが定式化できたとしても、最適料金解はネットワーク構造に依存したものとなり、解析的に解を導くことは困難である。そのため、大規模ネットワークにおいて最適料金解を導くには、数値シミュレーションを実施する以外に方法はなく、実際の道路ネットワークをモデル化することで具体的な施策提言が可能となる。大規模ネットワークにおける維持補修費用を明示的に考慮した効率的な道路料金水準に関する研究は少ないのが現状である。本章では、高速道路と一般道路の一体的な道路ネットワークにおける財源の調達方法を検討するために一般道路においても料金徴収を仮定したときの料金水準につ

いて分析を行う。

維持補修費用を考慮した最適料金モデルを以下に示す、交通需要は固定、料金は高速道路に加え、一般道路にも課金する総コスト最小化問題である。

$$\min_{\{x_{a_1}, x_{a_2}, x_{a_3}\}} TC \quad (23)$$

$$\begin{aligned} TC = & \sum_{a_1 \in J} \left\{ \beta x_{a_1} t_{a_1}(x_{a_1}) + m_{a_1} x_{a_1} + F_{a_1} \right\} \\ & + \sum_{a_2 \in G} \left\{ \beta x_{a_2} t_{a_2}(x_{a_2}) + m_{a_2} x_{a_2} + F_{a_2} \right\} \\ & + \sum_{a_3 \in L} \left\{ \beta x_{a_3} t_{a_3}(x_{a_3}) + m_{a_3} x_{a_3} + F_{a_3} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

subject to

$$\min_{\{x, f\}} Z \quad (25)$$

$$\begin{aligned} Z = & \sum_{a_1 \in J} \int_0^{x_{a_1}} t_{a_1}(w) \cdot dw + \sum_{a_2 \in G} \int_0^{x_{a_2}} t_{a_2}(w) \cdot dw \\ & + \sum_{a_3 \in L} \int_0^{x_{a_3}} t_{a_3}(w) \cdot dw + \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} \frac{p_{\phi, a_1}^{rs}}{\beta} \cdot f_{\phi}^{rs} + \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} \frac{p_{\phi, a_2}^{rs}}{\beta} \cdot f_{\phi}^{rs} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\sum_{\phi \in \Phi_{rs}} f_{\phi}^{rs} - Q_{rs} = 0 \quad (27)$$

$$x_{a_1} = \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} \sum_{rs \in \Xi} \delta_{a_1}^{rs} f_{\phi}^{rs} \quad (28)$$

$$x_{a_2} = \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} \sum_{rs \in \Xi} \delta_{a_2}^{rs} f_{\phi}^{rs} \quad (29)$$

$$x_{a_3} = \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} \sum_{rs \in \Xi} \delta_{a_3}^{rs} f_{\phi}^{rs} \quad (30)$$

$$f_{\phi}^{rs} \geq 0, \quad x_{a_1}, x_{a_2}, x_{a_3} \geq 0 \quad (31)$$

ここで、

$a_1 \in J$: 高速道路の集合 J におけるリンク a_1

$a_2 \in G$: 一般道路の料金区間の集合 G におけるリンク a_2

$a_3 \in L$: 一般道路の料金区間外の集合 L におけるリンク a_3

$rs \in \Xi$: ODペア集合

$\phi \in \Phi_{rs}$: ODペア rs の経路集合 ϕ

$x_{a_1}, x_{a_2}, x_{a_3}$: リンク a_1, a_2, a_3 の交通量

$p_{1, \phi}^{rs}, p_{2, \phi}^{rs}$: ODペア rs 間第 ϕ 経路の高速道路料金と一般道路料金

$t_{a_1}(x_{a_1}), t_{a_2}(x_{a_2}), t_{a_3}(x_{a_3})$: リンク a_1, a_2, a_3 の所要時間

f_{ϕ}^{rs} : ODペア rs 間第 ϕ 経路の経路交通量

Q_{rs} : ODペア rs 間第 ϕ 経路の分布交通量

$\delta_{a_1, \phi}^{rs}$: ODペア rs 間第 ϕ 経路がリンク a_1 を含むとき 1, そうでないとき 0 をとる変数

β : 時間価値

$m_{a_1}, m_{a_2}, m_{a_3}$: リンク a_1, a_2, a_3 の限界維持修繕費用

$F_{a_1}, F_{a_2}, F_{a_3}$: 道路事業者の固定費用 (維持修繕費用の固定費用, 債務償還費用等)

である。

本モデルは最適化問題 (式(23)) の制約条件として均衡問題 (式(25)-式(31)) を内包している MPEC (均衡制約付き数理最適化問題: Mathematical Problem with Equilibrium Constraints)¹⁵⁾ の形式となっている。

式(24)の第1項は高速道路における旅行時間コストおよび維持修繕費用であり、第2項は一般道路の料金徴収対象区間における旅行時間コストおよび維持修繕費用を意味する。道路利用者が支払う料金は道路事業者の収入となり、社会全体では差し引きゼロとなるため式(24)では、 p_{a_1}, p_{a_2} は現れないが、均衡問題では料金はリンクコストに加算されるため、重要なファクターである。式(25)-式(31)は利用者均衡配分における数理最適化問題における定式化である。式(26)の第4項は料金に関する項で対距離料金を反映可能とした経路料金での表現である。また、最適料金を導出するにあたっては、高速道路は現況の料金体系で計算した際の高速道路事業者収支と一般道路の料金区間の収支を基本とし、高速道路事業者と一般道路の料金区間のトータルが赤字にならない料金水準を基本とする (式(32))。

$$\begin{aligned} \Pi = & \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} p_{\phi, a_1}^{rs} \cdot f_{\phi}^{rs} - \sum_{\phi \in \Phi_{rs}} p_{\phi, a_2}^{rs} \cdot f_{\phi}^{rs} \\ & - \sum_{a_1 \in J} \left\{ m_{a_1} x_{a_1} + F_{a_1} \right\} - \sum_{a_2 \in G} \left\{ m_{a_2} x_{a_2} + F_{a_2} \right\} \end{aligned} \quad (32)$$

式(32)の第1項、第2項は高速道路及び一般道路の料金収入、第3項、第4項は高速道路、一般道路の料金区間の交通量に依存する維持修繕費用の可変費用および固定費用である。

(2) 適用方法

式(23)は解析的に解くことができないため、数値シミュレーション実施することで最適解を求める。具体的には、最適料金を探索しつつ交通量配分を行う直接探索法により解を求める。

本章は、高速道路と一般道路の限界維持補修費用の差に着目し、一般道路にも料金を課せる状況を想定している。利用者均衡配分の解法としてはFrank-Wolfe法を用いており、利用者均衡配分に対距離料金制を反映するため



図-1 甲府都市圏道路ネットワーク

に、料金抵抗法に基づいて実施し、BPR 関数に道路料金を時間換算することで表現している (式(33)) .

$$t_k(x_k) = t_{k0} \left[1 + \alpha \left(\frac{x_k}{C_k} \right)^\gamma \right] + \frac{p_k}{\beta} \quad (33)$$

BPR 関数のパラメータは高速道路と一般道路で等しいとし、土木学会¹¹⁾が推定した $\alpha = 0.48, \gamma = 2.82$ を用いる。 t_{k0} はリンク $k(k \in \{a_1, a_2, a_3\})$ の自由走行時間を表す定数であり、 C_k は、リンク $k(k \in \{a_1, a_2, a_3\})$ の交通容量(台/日)を表す定数である。

(3) 適用条件

本章で用いるネットワークデータとして甲府都市圏を対象に道路ネットワークを作成した(図-1)。図-1の赤線が高速道路であり、黒の太線が国道である。高速道路の延長は約 86.9km、一般道路の延長は約 526.0km、全体で 612.9km であり、セントロイド数は 66、ノード数は 247、リンク数は 525 のネットワークを作成した。発生・集中交通量の地点であるセントロイドは、平成 17 年に行われた甲府都市圏パーソントリップ調査のから作成した 66 ゾーンの普通車の OD 表を基にしている。また、OD の内々交通量はトリップがゼロになってしまうため、内々のトリップ数を按分する形で他のゾーンへ移動する用再配分している。また、第五回旅客流動調査の

データをもとに東京 - 山梨間、山梨 - 長野間、東京 - 長野間の交通量を加えることで、現状の交通量の再現性を図っている。検証対象とする一般道路は国道 20 号を想定し、延長約 12.4km の区間で、道路料金は第 4 章から得られた結果をもとに、3.4 円/km を基本とし、料金変化を単位とし、 $\times 1.5$ から $\times 3$ を許容範囲として、料金を変化させている。高速道路に関しては、一般道路の料金徴収にともない、高速道路は料金を値下げすることを想定して、現状の料金体系と同様 27.5 円/km を基本とし、料金変化率を $\times 0.75$ 、 $\times 0.5$ の許容範囲で料金を変化させている。限界維持補修費用の設定は、4 と同様田上ら¹²⁾の限界費用の推計をもとに、高速道路を 1 円/km、一般道路を 3 円/km としている。固定費用についても 4. の設定と同様である。

(4) 数値シミュレーションの結果

現況料金体系下でのシミュレーション結果が表-4である。事業者収支について料金の影響をシミュレーションした結果が表-5-表-7である。表-5に示すように高速道路事業者は20.6円/kmを下回ると収支はマイナスになる。また、表-6に示すように一般道路の事業者は8.4円/kmを下回るとマイナスになる。そして、表-7は高速道路と一般道路料金区間の事業者を足し合わせた全体の収支を示しており、ハッチがかかったセルは全体の事業者収支がマイナスとならない料金条件である。全体の事業者収支がマイナスとならず、総コストが最小となる料金水準は、高速道路料金を20.6円/km、一般道路の料金を5.0円/kmのときとなった。そして、その時の総コストは、現況の料金体系よりも減少している。これは、最適料金と現況料金体系における交通量の変化を示す図-2から分かるように、高速道路の交通量は増加し、料金区間である20号の交通量は減少している。すなわち、高速道路に誘導することで、総コスト減少し、社会全体として最適な交通流を実現可能であることが示唆された。しかしながら、一般道路料金区間の収支はマイナスであり、高速道路料金によって補われている。このとき、高速道路利用者は一般道路の費用も負担していることになり、燃料税と同じように公平性の問題が残る。

表-4 現状の料金体系 (百万円/km/日)

総費用TC	674.39
高速道路料金収入	20.32
維持管理費用 + 固定費用 (高速道路)	15.43
高速道路収支	4.89
維持管理費用 (一般道路料金区間)	1.17

表-5 高速道路の事業者収支（百万円/km/日）

高速道路 事業者収支 (百万円/km)		一般道路料金変化率				
		3.4 (円/km)	5.0 (円/km)	6.7 (円/km)	8.4 (円/km)	10.1 (円/km)
高速道路 料金 変化率	27.5 (円/km)	4.92	4.94	4.95	4.96	4.98
	20.6 (円/km)	0.48	0.49	0.50	0.51	0.52
	13.4 (円/km)	-4.43	-4.43	-4.42	-4.41	-4.40

表-6 一般道路の事業者収支（百万円/km/日）

一般道路 事業者収支 (百万円/km)		一般道路料金変化率				
		3.4 (円/km)	5.0 (円/km)	6.7 (円/km)	8.4 (円/km)	10.1 (円/km)
高速道路 料金 変化率	27.5 (円/km)	-0.58	-0.30	-0.01	0.27	0.55
	20.6 (円/km)	-0.57	-0.30	-0.02	0.26	0.54
	13.4 (円/km)	-0.57	-0.30	-0.02	0.25	0.53

表-7 全体の収支（百万円/km/日）

全体の 事業者収支 (百万円/km)		一般道路料金変化率				
		3.4 (円/km)	5.0 (円/km)	6.7 (円/km)	8.4 (円/km)	10.1 (円/km)
高速道路 料金 変化率	27.5 (円/km)	4.35	4.63	4.94	5.23	5.53
	20.6 (円/km)	-0.09	0.19	0.49	0.78	1.06
	13.4 (円/km)	-5.00	-4.73	-4.44	-4.16	-3.88

表-8 総コスト（百万円/km/日）

TC(百万円/km)		一般道路料金変化率				
		3.4 (円/km)	5.0 (円/km)	6.7 (円/km)	8.4 (円/km)	10.1 (円/km)
高速道路 料金 変化率	27.5 (円/km)	677.00	677.33	677.77	678.09	678.54
	20.6 (円/km)	669.53	669.86	670.23	670.60	670.98
	13.4 (円/km)	660.35	660.70	661.07	661.40	661.81

6. おわりに

本研究は維持管理における費用負担に着目し、公平性を考えたときに燃料税に代わって走行税や料金徴収を想定した利用者による負担について分析を行った。

4.では、高速道路と一般道路が並列する道路ネットワークを対象に道路利用がもたらす混雑と構造物の劣化という外部不経済を内部化することを目的とした高速道路と、一般道路の最適料金について分析した。高速

道路と代替的な一般道路が存在し、道路間の限界維持補修費用に差がある場合を考慮した場合、料金設定によって高速道路に誘導することで、一般道路の混雑が緩和され社会全体の総余剰は増加し、維持管理費用は減少することが確認された。また、高速道路料金を値下げすることで、よりその効果が高まるという結果が得られた。ただし、以上の分析は交通需要が固定的であり、一般道路に混雑が発生している場合を想定している。混雑が発生していない場合、一般道路の料金分

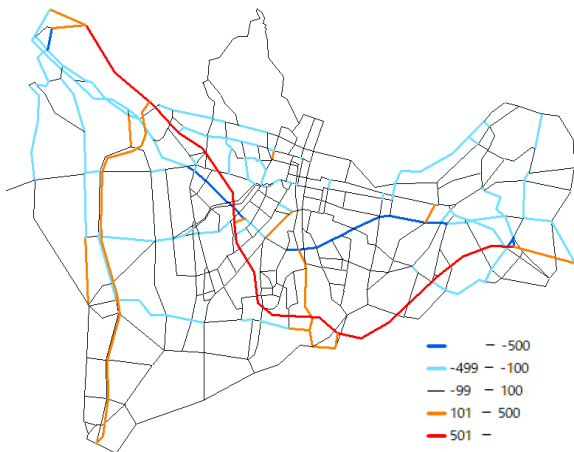


図-2 最適料金と現況料金体系における交通量の変化 (台)

を負担しなければならず、消費者余剰は減少することが考えられる。また、実際の複雑な道路ネットワークでは、一般道路に課金をしても高速道路に誘導されないことが問題点としてあげられる。

5.では、維持管理費用を持続的かつ公正に調達するために一般道路においても料金徴収を想定し山梨県の道路ネットワークを対象に、分析を行った。一般道路でも料金徴収を行うことで、高速道路へ誘導され、一般道の走行費用は減少し、道路間の限界費用の差によって維持管理費用も減少する。すなわち、総コストを減少させることが確認された。

以上から、老朽化が進んだ道路を、持続的かつ公正に財源を調達するには、高速道路と一般道路で一体的な道路ネットワークにおける財源の調達を考慮する必要がある。一般道路における料金の徴収によって社会的総余剰の増加や総コストを減少させることを示した。その場合には、高速道路の料金を値下げするなど一体的な施策によって社会的に最適な交通フローが実現できるが公平性には課題が残る。課題点としては、迂回などの他の道路への影響は評価できていない。また、本研究では一般道路の課金区間は国道レベルの交通量が多い道路を対象に利用者による負担を検討しているが、県道など他の道路の費用負担など、社会全体として税や料金体系について議論できていない。

参考文献

- 1) 高速道路の料金制度に関する委員会：高速道路の料金制度に関する報告書最終報告書，高速道路調査会，2018.
- 2) 加藤寛：非効率な行政を排除するために必要な道路特定財源見直し 論争・道路特定財源，
- 3) 石村耕治：EVシフトと道路税源 自動車燃料税から自動車マイレージ税/課金への転換と人権，国民税制研究，第4号，2018.
- 4) 瀬木俊輔，小林潔司，田上貴士，：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，pp145-160，2014.
- 5) Newbery, D. M. : Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp295-316, 1988.
- 6) Verhoef, E.T., Nijkamp, P. and Walters, A.A. : The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Journal of Urban Economics*, Vol.40, pp.279-302, 1996.
- 7) 松原朋弘，小林潔司：高速道路の維持補修費用を考慮した最適料金に関する，京都大学工学部地球工学科土木コース学士論文，2012.
- 8) A. a. J. H. J. Auerbach : Taxation and Economic Efficiency in A.J. Auerbach and M. Feldstein eds, *Handbook of Public Economic*, Vol.3, pp1347-1421, North-Holland., 2002.
- 9) 森杉壽芳，河野達仁：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，No.67，2012.
- 10) Verhoef, E.T. and Rouwendal, J. : Product differentiation on roads constrained congestion pricing with heterogeneous users, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.38, No.1, pp127-156, North-Holland., 2004.
- 11) 土木学会 土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討委員会：道路交通需要予測の理論と適用 第1編 利用者均衡配分の適用に向けて，社団法人土木学会，2003.
- 12) 田上貴士，瀬木俊輔，貝戸清之，小林潔司：道路舗装の限界維持補修費用，土木計画学研究・講演集，Vol.48，2013.
- 13) 独立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構：高速道路機構ファクトブック，2018.
- 14) 中日本高速道路株式会社：高速自動車国道中央自動車道富士吉田線等（他1路線）に関する維持，修繕その他の管理の報告書，2018.
- 15) MPEC研究会編：MPECにもとづく交通・地域政策分析，中京大学経済学部附属経済研究所，2003.

(?????)

Derivation of Appropriate Toll Level for Sustainable Maintenance and Renewal of Roads

Tomoya UDO and Shinichi MUTO