

高速道路の維持修繕費用を考慮した 効率的交通流配分 ～大規模ネットワークにおける検証～

田上貴士¹・瀬木俊輔²・小林潔司³

¹正会員 (株)オリエンタルコンサルタンツ SC 事業本部 関東支店 都市地域創生事業部門 社会政策部
(〒 151-0071 東京都渋谷区本町 3-12-1 住友不動産西新宿ビル 6 号館)

E-mail: tagami-tk@oriconsul.com

²学生会員 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 博士後期課程 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: segi.shunsuke.33m@st.kyoto-u.ac.jp

³フェロー会員 京都大学大学院教授 経営管理研究部 (〒 606-8317 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

本研究は、大型車の走行により高速道路および一般道路に損傷が生じ、維持修繕費用が発生するという一般的な環境における効率的な交通流配分と料金設定の問題に着目しモデル化を試みた。本モデルを用いて、維持修繕費用を考慮した効率的な交通流配分による社会的総余剰や高速道路事業者の収益等の改善度について分析し、道路の維持管理に関する施策について検討する。

Key Words : *maintenance cost, toll fee, expressway, different car type, stochastic user assignment model, system optimization, road maintenance policy*

1. はじめに

かつてワトキンスレポートにおいて「日本の道路は信じがたい程に悪い。工業国にして、これ程完全にその道路網を無視してきた国は、日本の他にない。」¹⁾と称された道路事情であった日本においても、都市高速道路や高速自動車国道等の整備が相当程度進み、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り始め、道路整備は建設から維持管理の時代に移行し始めた。

一方、現在の高速道路料金は債務返済を第一に考え設定されたものであり、道路の維持管理費用を積極的に考慮したものとなっていないのが現状である。また、経済状況や財政状況を鑑みても、大規模に蓄積された社会資本ストックである道路を今後誰がどのように維持管理していくのか、その根拠を明示した上での意志決定が必要とされている。

高速道路の劣化は自然劣化と車両による劣化に大別されるが、特に大型車による劣化が主たる要因と考えられており、高速道路料金が無料であったドイツでは1995年1月より大型車のみ高速道路を有料とした経緯がある²⁾。しかしながら、近年は地球環境問題の表出とともに自然劣化の影響の大きさについてクローズアップされてきている。例えば青木他(2010)³⁾は、大型車の交通量が多いほど、また道路建設後の経過年が大き

いほど、わだち掘れ量が大きくなる傾向にあることを理論的に示した。

大型車が道路の劣化に大きな影響を与えているがゆえに大型車に維持管理費用をより多く負担させることも考えられるが、大型車の料金弾性値は一般的に乗用車のそれよりも大きいことから⁴⁾実施は容易ではない。高速道路における大型車の料金負担を増やした場合、大型車は高速道路の利用を減らし一般道を利用することとなる。そうなれば、一般道は高速道路よりも舗装が頑丈ではないため、増加した大型車により一般道の劣化は非常に大きくなり、また、高速道路の維持管理費用における固定部分の乗用車負担割合が増加するため、当初の目論見と逆の結果に到達する怖れがある。したがって、大型車の維持管理費用の負担分を高速道路料金に単純に上乗せすることは得策ではない。

本論文では、これまでの混雑料金に関する議論で無視されてきた維持管理費用を明示的に考慮した高速道路の最適料金に関する理論分析を試みるとともに、最適維持補修料金モデルの数値計算を通じて、道路の維持管理時代における高速道路の料金政策の効率的評価を試みた。以下、2. では既存研究および本研究の基本的な考え方を整理した。3. では維持管理費用を明示的に考慮した最適維持補修料金モデルの理論的構築を行い、4. では最適維持補修料金モデルの推計方法を整理

した。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 既存研究の整理

a) 維持管理費用を考慮した料金体系に関する既存研究

道路の維持管理費用に関する研究は、高速道路の整備が一早く進んだ米国において顕著である。Small et al. (1989)⁵⁾は、米国連邦高速道路局 (FHWA) の維持管理の支出割合が 25.4 % (1975) から 28.9 % (1985) に増加したと指摘した。Mohring and Harwitz (1962)⁶⁾は、ある条件下 (道路の容量最適、メンテナンスコストの固定部分が道路のその他の固定コストに含まれる等) では、混雑料金収入が長期的に道路コストをカバーすることを示した。Mohring (1976)⁷⁾は、幹線道路は乗用車のみのために建設されていれば、その舗装は重量トラックにも供給される場合ほどに厚くする必要はない、と指摘し、また、規模の経済性を示す費用の固定部分の負担方法について、土地価格等の要因も含め検討を試みた。Newbery (1987)⁸⁾は道路ダメージの外部性、すなわち混雑や気候と道路課金およびメンテナンスコストの関係についてモデルの構築および数値シミュレーションを行い、道路ダメージの外部性はゼロではないことを指摘し、通常の道路課金ではメンテナンスコストを賄うことはできないことを示した。

また、米国全州道路交通運輸行政官協会 (AASHTO) の道路試験 (1962) は、個々の車両が道路舗装へ与えるダメージは等価単軸荷重 (ESAL:Equivalent Single Axle Load) の約 4 乗に比例している (4 乗ルール) ことを導き出した⁸⁾。そのため、日本および世界の多くの国々でこの 4 乗ルールが用いられることとなった。この 4 乗ルールは Peng 他 (2004)⁹⁾においても採用されている。

道路の維持管理費用は一般的には利用者が認識しないコストであるため、外部不経済として扱われる。この維持管理費用の外部性を軽減する効率的料金設定を分析した研究は、数が少ないもののいくつか存在している。Newbery^{8),10)}、Small and Winston¹¹⁾、Small et al.⁵⁾は 1 リンクの道路を考え、こ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.¹²⁾によって初めて詳細な分析がなされた。

Peng 他 (2004)⁹⁾は、メンテナンスに要する車種別費用を車種別料金に反映することによって、社会的厚生およびメンテナンスコストカバー率 (料金収入/メンテナンスコスト) が向上することを示した。ただし、Peng 他 (2004) の研究では小型車と大型車が同一の道路を通行する

にも関わらず、各車種の需要関数が独立という現実的には考えにくい仮定を置いており、またメンテナンスコストの固定部分の車種別の公平な負担方法についての検討は行っていない。なお、Peng 他はメンテナンスコストの定義を Tellis and Khisty に倣い、以下の 4 項目で構成されるとした⁹⁾。

- Capital Outlays (資本的支出): 機器等固定資産の補修 等
- Maintenance: 補修, 修繕 等
- Highway Service: 清掃, 光熱水費 等
- Administration: 料金收受, 交通管理 等

なお、日本においては建設コストの一部と管理コストが維持管理費用に該当する¹³⁾。具体的には以下の 4 項目から構成される。

- 修繕工事: 道路の修繕に必要な工事で、新たに資産形成をする工事 (機構の債務引受, 建設コストの一部であり資本的支出に相当)
- 維持修繕費: 高速道路の保守に係る費用で、主に清掃作業, 点検, 雪氷作業等の維持作業と舗装補修, 橋梁補修などの修繕作業に係る費用 (修繕作業は、新たな資産形成に係らない部分)
- 管理業務費: 高速道路の管理に係る費用で、主に料金收受業務, 交通管理業務等に係る費用
- 一般管理費等: 高速道路の運営全般に関する費用で、人件費や経費等に係る費用 (ETC マイレージ割引費用を含む)

管理コストである維持修繕費, 管理業務費, 一般管理費等は毎年比較的一定額が計上されているが、修繕工事については実施された年と実施されていない年によって金額に大きな変動が生じる。そのため、維持管理費用の設定にあたっては、ある一定期間の平均値を用いることが望ましいと考えられる。なお、修繕工事の内容は幅広く、橋梁修繕から機械施設修繕、渋滞対策まで及んでいる。具体的には、橋梁修繕, トンネル修繕, のり面修繕, 土工修繕, 舗裝修繕, 交通安全施設修繕, 交通管理施設修繕, 渋滞対策, 休憩施設修繕, 雪氷対策施設修繕, 震災対策, 環境対策, トンネル防災, のり面防災, 雪害対策, のり面付属物設置, 橋梁付属物設置, トンネル施設修繕, 電気施設修繕, 通信施設修繕, 建築施設修繕, 機械施設修繕の 22 項目である。

松原・小林 (2012)¹⁴⁾は、Peng 他 (2004)⁹⁾の研究を発展させる形で、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複数のルールを設定し、1 リンク 2 車種の場合について数値シミュレーションを行った。具体的には、高速道路事業者の負担ゼロ料金 (Second Best 料金), EU 型環境負荷重課料金および維持補修費用平均分配料金の 3 種類の料金制度を設定した。その結果、各費用負担

ルール間の社会的厚生はそれほど大きく変わらず、また、費用負担方法も比較的公平となることがわかった。

瀬木・田上・小林 (2012)¹⁵⁾は、平行する2本の高速道路に関するモデル化(両リンクに料金を課する First Best)を行い、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した。高速道路料金は維持管理費用を考慮した方が社会的総余剰を改善し、社会全体の効率化に寄与することを指摘した。

b) 舗装の維持管理費用に関する既存研究

舗装の維持管理費用および限界維持管理費用の推計方法には2つのアプローチが存在する。1つ目のアプローチは舗装の維持管理費用と交通量に関するクロスセクションのデータを用いて、維持管理費用の費用関数を直接推計する計量経済学的アプローチである。もう1つのアプローチは舗装の劣化過程を交通量を含む形式でモデル化し、このモデルの推定結果と舗装の維持管理戦略を基にして、費用関数を計算する工学的アプローチである。

計量経済学的アプローチは、舗装の維持管理費用と交通量に関するクロスセクションデータさえあれば推定できる簡便な手法であるが研究事例は多くない。Link^{16),17)}や Haraldson¹⁸⁾が OLS 等を用いて研究している。ただし、計量経済学的アプローチには2つの問題点がある。1つ目は舗装技術や舗装の維持管理戦略の変化を考慮した費用関数の推計ができないことである。もう1つはデータの観測期間が短い場合、維持管理費用が舗装のオーバーレイ等の実施時期によって大きく変動し、維持管理費用を正確に把握できない可能性があることである。

工学的アプローチは、舗装の劣化過程を表すモデルを推定する必要があるため、要求されるデータの量は計量経済学的アプローチよりも多くなるものの、舗装技術や舗装の維持管理戦略の変化を考慮した費用関数の推計が可能である。具体的には、交通量を考慮した舗装の劣化過程のモデル化および推定結果を基に維持管理費用の費用関数の計算を行う。この推計方法は Newbery⁸⁾、Small and Winston¹¹⁾、Small et al.⁵⁾等が最初に用いたものであり、その後の多くの研究でも同様の手法が用いられている^{19),20),21)}。

Small et al.⁵⁾等が用いた計算手法は、舗装の劣化過程が確定的であるものとし、舗装の維持管理費用としてオーバーレイに要する費用のみを考慮するものである。これに対して、Anani and Madanat²⁰⁾は、オーバーレイの費用の他に、維持工法の実施に要する費用を考慮した計算手法を提案している。また、Anani²¹⁾は、舗装の劣化過程が確率的であることを考慮した計算手法を提案している。

また、舗装のライフサイクルコストを考慮した研究

として田村・慈道・小林 (2002)²²⁾は、予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルールについて研究を行い、三重県を対象とした実証分析を行っている。具体的には、MCI 値による劣化推定システムを通じて、利用者費用と修繕費用で構成される期待ライフサイクル費用を最小にするような状況依存的修繕ルールおよび修繕順位を決める費用便益ルール等を提案している。

限界維持管理費用については日本における研究事例は見あたらない。米国州間高速道路の cost allocation study²³⁾によると、乗用車1台の舗装の限界維持管理費用は、地方部で0セント/マイル、都市部で0.1セント/マイルである。一方、40キロポンドの4軸トラック1台の舗装の限界維持管理費用は、地方部で1.0セント/マイル、都市部で3.1セント/マイルである。また、60キロポンドの4軸トラックの舗装の限界維持管理費用は、地方部で5.6セント/マイル、都市部で18.1セント/マイルである。普通車の限界維持管理費用は大型車と比較してかなり小さく、限界維持管理費用は軸荷重について非線形に増加することが確認できる。

c) 車種別均衡配分に関する既存研究

多車種(例えば小型車と大型車に分類)の均衡配分では、均衡条件だけでは車種別交通量の一意性が保証されないため一意性を確保する条件を加える必要がある。この点については、土木学会 (2006)²⁴⁾が既に解説しているように、Rossi et al. (1989)²⁵⁾によって提案されたエントロピー最大化条件(式(1))を付加すれば、車種別均衡配分でも経路交通量の一意性が確保されることがわかっている。

$$H(f) = \sum_{b \in B} \sum_{rs \in \Omega} q_{rs}^b \cdot \sum_{k \in \bar{K}_{rs}^b} - \frac{f_{rs,k}^b}{q_{rs}^b} \cdot \ln \frac{f_{rs,k}^b}{q_{rs}^b} \quad (1)$$

ここで、 \bar{K}_{rs}^b は車種 b について OD ペア rs 間で均衡時に使われ得る経路の集合(均衡時に $C_{rs,k}^b = C_{rs}^b$ を満たしている経路の集合。経路交通量ゼロの経路も含む)、 $f_{rs,k}^b$ は OD ペア rs 間の経路 k の車種 b の交通量、 Ω は OD ペアの集合、 B は車種の集合、 q_{rs}^b は OD ペア rs 間の車種 b の交通量である。

モデルの解法としては、Akamatsu(1997)²⁶⁾は均衡配分とエントロピー最大化の二段階で解く方法を提案しているが、第一段階で入力条件が変化するたびに厳密解を得る必要があるため、これは現実的な解法とは言い難い。一方、確率的利用者均衡配分で分散パラメータ $\theta \rightarrow \infty$ とする解法は、確定的利用者均衡状態かつ経路交通量エントロピーを最大化した時の解に漸近することが知られており、経路交通量が一意である車種別の解を求めることが可能である。

(2) 2リンク (Second Best) の場合の最適料金

1リンクの高速道路と1リンクの一般道路が共通のODを結んでいるネットワークを想定する。高速道路と一般道路は完全代替である。ネットワークの利用者は、普通車を利用する利用者と大型車を利用する利用者に分類される。全ての普通車の車両は同質的であり、同様に、全ての大型車の車両も同質的である。料金は高速道路のみに課金される (second best)。

second best の料金設定に関する一般的な性質を解析的に分析するのは困難である。ただし、高速道路事業者の利潤制約が無く、利用者の旅行需要が非弾力的である場合に限っては、効率的料金設定に関する一つの特性を導くことができる。

a) 利用者均衡の定式化

普通車を s 、大型車を l という記号でそれぞれ表す。普通車の乗用車換算係数は1とする。また、大型車の乗用車換算係数は、高速道路と一般道路の双方において等しいと仮定し、その値を e^l で表す。ここで、乗用車換算係数とは、大型車1台が乗用車何台分に相当するかを表す換算値である。本研究では、普通車・大型車ともに、交通量を乗用車換算台数 (pcu) の単位で表現する。また、高速道路・一般道路の旅行時間は、当該リンクの pcu 換算の総交通量にのみ依存すると仮定する。

車種 y ($y \in \{s, l\}$) の利用者の時間価値 (円/時) は、区間 $[\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y]$ の範囲で連続的に分布しているとする。車種 y の時間価値が β^y (円/時) の利用者の総交通需要 d^y (pcu) は、この利用者の旅行の一般化費用 $c^y(\beta^y)$ (円) にのみ依存すると仮定し、この関係を需要関数 $d^y(\beta^y, c^y(\beta^y))$ で表す (正確には、時間価値が β^y 以上 $\beta^y + d\beta^y$ 以下の利用者の需要を $d^y d\beta^y$ と表している)。ただし、時間価値と一般化費用には、車両1pcu当たりの利用者の値を用いる。例えば、「1台」当たりの利用者の時間価値が4,000円/時の大型車を考える場合、この利用者の時間価値は $\beta^l = 4,000/e^l$ と表される。同様に、「1台」当たりの利用者の旅行の一般化費用が50円の大型車を考える場合、この利用者の旅行の一般化費用は $c^y = 50/e^l$ と表される。

高速道路をリンク1、一般道路をリンク2と呼称する。各リンクの旅行時間 T_a ($a \in \{1, 2\}$) (時) は、当該リンクの総交通量 (pcu) に依存する。この関係を次の式で表す。

$$T_a = t_a(V_a^s + V_a^l) \quad (a \in \{1, 2\}) \quad (2)$$

ここで、 t_a は正の値を返す微分可能な単調増加関数である。また、 V_a^y は車種 y のリンク a の交通量 (pcu) を表す。高速道路を通行する車種 y に課される料金 (円) を p^y で表す。ただし、この料金は車両1pcu当たりに課される料金とする。例えば、大型車「1台」に課され

る料金が80円とすると、 $p^l = 80/e^l$ となる。

全ての利用者について Wardrop 均衡の条件が成立すると仮定する。車種 y の時間価値が β^y の利用者の Wardrop 均衡の条件は以下の式 (3a)-式 (3c) により記述される。

$$\begin{aligned} [p^y + \beta^y T_1 - c^y(\beta^y)] v_1^y(\beta^y) &= 0, \\ p^y + \beta^y T_1 &\geq c^y(\beta^y), v_1^y(\beta^y) \geq 0 \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} [\beta^y T_2 - c^y(\beta^y)] v_2^y(\beta^y) &= 0, \\ \beta^y T_2 &\geq c^y(\beta^y), v_2^y(\beta^y) \geq 0 \end{aligned} \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} v_1^y(\beta^y) + v_2^y(\beta^y) &= d^y(\beta^y, c^y(\beta^y)) \\ (\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\}) \end{aligned} \quad (3c)$$

ここで、 $v_a^y(\beta^y)$ は車種 y の時間価値が β^y リンク a の交通量 (pcu) を表す。式 (3a)-式 (3c) は全ての車種と時間価値の利用者について成立する。式 (3a) は、高速道路の一般化費用 $p^y + \beta^y T_1$ が最小の一般化費用 $c^y(\beta^y)$ よりも大きければ、利用者は高速道路を利用しないこと、および、利用者が高速道路を利用するためには、高速道路の一般化費用が最小の一般化費用に一致しなければいけないことを意味している。式 (3b) の意味も同様である。式 (3c) は交通量の保存則を表している。車種 y のリンク a の交通量 V_a^y は、 $v_a^y(\beta^y)$ を全ての β^y について合計することにより求められるので、

$$V_a^y = \int_{\underline{\beta}^y}^{\bar{\beta}^y} v_a^y(\beta^y) d\beta^y \quad (y \in \{s, l\}, a \in \{1, 2\}) \quad (4)$$

が成立する。

式 (2)-式 (4) により利用者均衡が記述されるが、式 (3a)-式 (3c) は無限個の式から構成されるため、解析が困難である。そこで、以下の2つの仮定を置く。

- 仮定1: 均衡においては $T_1 < T_2$ が成立する。すなわち、高速道路の旅行時間は一般道路よりも短い。
- 仮定2: 均衡においては $V_1^s > 0, V_1^l > 0, V_2^s > 0, V_2^l > 0$ が成立する。すなわち、高速道路と一般道路の双方に普通車と大型車の利用者が存在する。車種 y について、変数 $\tilde{\beta}^y$ を以下の式で定義する。

$$p^y + \tilde{\beta}^y T_1 = \tilde{\beta}^y T_2 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (5)$$

すなわち、車種 y の利用者のうち、一般道路と高速道路が無差別となる利用者の時間価値を $\tilde{\beta}^y$ と定義する。仮定1より $T_1 < T_2$ が成立するので、車種 y の利用者のうち $\tilde{\beta}^y$ よりも高い時間価値を持つ全ての利用者は高速道路を利用する。よって、次の式が成立する。

$$c^y(\beta^y) = p^y + \beta^y T_1 \quad (6a)$$

$$v_1^y(\beta^y) = d^y(\beta^y, c^y(\beta^y)) \quad (6b)$$

$$v_2^y(\beta^y) = 0 \quad (6c)$$

$$(\beta^y \in (\tilde{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\})$$

逆に，車種 y の利用者のうち $\tilde{\beta}^y$ よりも低い時間価値 β^y を持つ全ての利用者は一般道路を利用する．よって，次の式が成立する．

$$c^y(\beta^y) = \beta^y T_2 \quad (7a)$$

$$v_1^y(\beta^y) = 0 \quad (7b)$$

$$v_2^y(\beta^y) = d^y(\beta^y, c^y(\beta^y)) \quad (7c)$$

$$(\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \tilde{\beta}^y], y \in \{s, l\})$$

式 (4)，式 (6a)-式 (7c) より，次の式が成立する．

$$V_1^y = \int_{\underline{\beta}^y}^{\tilde{\beta}^y} d^y(\beta^y, p^y + \beta^y T_1) d\beta^y \quad (8a)$$

$$V_2^y = \int_{\underline{\beta}^y}^{\tilde{\beta}^y} d^y(\beta^y, \beta^y T_2) d\beta^y \quad (8b)$$

$$(y \in \{s, l\})$$

仮定 2 より， $\tilde{\beta}^y$ は $\underline{\beta}^y < \tilde{\beta}^y < \bar{\beta}^y$ を満たさなければいけない．式 (2)，式 (5)，式 (8a)，式 (8b) により利用者均衡が記述される．

b) 便益指標の定式化

車種 y の時間価値 β^y の利用者の消費者余剰を $cs^y(\beta^y)$ と表し，これを次のように定義する．

$$cs^y(\beta^y) = \int_{c^y(\beta^y)}^{const} d^y(\beta^y, \omega) d\omega \quad (9)$$

$$(\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\})$$

ここで， $const$ は任意の定数である．車種 y の利用者の消費者余剰の総和を CS^y と表す． CS^y は次の式により求められる．

$$CS^y = \int_{\underline{\beta}^y}^{\bar{\beta}^y} cs^y(\beta^y) d\beta^y \quad (y \in \{s, l\}) \quad (10)$$

高速道路事業者の余剰を Π_1 と表し，これを次のように定義する．

$$\Pi_1 = p^s V_1^s + p^l V_1^l - m_1^s V_1^s - m_1^l V_1^l - F_1 \quad (11)$$

右辺第 1 項と第 2 項は高速道路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す．ここで， m_1^y は，高速道路における車種 y の車両の 1pcu 当たりの限界維持管理費用を表す定数である（例えば，大型車「1 台」の限界維持管理費用を 2 円とすると， $m_1^l = 2/e^l$ となる）．限界維持管理費用は交通量に依存せず一定と仮定していることになる． $m_1^s V_1^s + m_1^l V_1^l$ は高速道路の維持管理費用の可変部分を表している．また， F_1 は事業者の固定費用を表す定数であり，維持管理費用の固定部分や債務の償還費用等から構成される．同様に，一般道路管理者（政府）の余剰を Π_2 と表し，これを次のように定義する．

$$\Pi_2 = -m_2^s V_2^s - m_2^l V_2^l \quad (12)$$

ここで， m_2^y は，一般道路における車種 y の車両の 1pcu 当たりの限界維持管理費用を表す定数である． Π_2 は必

ず非正の値を取る．この負の余剰は，lump sum tax を通じて国民が全額負担する．なお，本研究では，一般道路の管理や債務償還にかかる固定費用は無視している．この理由は，本研究の分析枠組みにおいては，国民が一般道路の固定費用を lump sum tax を通じて全額負担する限りは，一般道路の固定費用の水準は効率的な料金設定や利用者均衡の状態に一切影響を及ぼさないためである．

利用者の消費者余剰，高速道路事業者の利潤，一般道路管理者の余剰の総和として，社会的総余剰 NB を次のように定義する．

$$NB = CS^s + CS^l + \Pi_1 + \Pi_2 \quad (13)$$

維持管理費用の外部性を考慮した Second Best の料金設定は，高速道路事業者の利潤制約 $\Pi_1 = 0$ と利用者均衡の条件式を制約条件として，社会的総余剰 NB を最大化する料金設定となる．一方，Second Best の料金設定の比較対象となる 2 倍ルールの料金設定は，「大型車 1 台の料金は普通車 1 台の料金の 2 倍」という条件を表す式 $e^l p^l = 2p^s$ と，利潤制約 $\Pi_1 = 0$ および利用者均衡の条件式の全てを満たす料金設定となる（大型車「1 台」の料金は $e^l p^l$ である）．

c) 利潤制約無し・固定需要環境下の効率的料金設定

利用者の旅行需要が非弾力的である場合には， $d^y(\beta^y, c^y(\beta^y)) = d^y(\beta^y)$ と表せる．よって，式 (3a)-式 (3c)，式 (9) より， $cs^y(\beta^y)$ は，

$$cs^y(\beta^y) = const - c^y(\beta^y) d^y(\beta^y) \\ = const - (p^y + \beta^y T_1) v_1^y(\beta^y) - \beta^y T_2 v_2^y(\beta^y) \\ (\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\}) \quad (14)$$

と表される．ここで， $const$ は利用者均衡に依存しない定数項である．この結果と式 (10) を用いると， CS^y は，

$$CS^y = const - p^y V_1^y - T_1 B_1^y - T_2 B_2^y \\ (y \in \{s, l\}) \quad (15)$$

と表される．また， B_a^y は次のように定義される変数である．

$$B_a^y = \int_{\underline{\beta}^y}^{\bar{\beta}^y} \beta^y v_a^y(\beta^y) d\beta^y \\ (y \in \{s, l\}, a \in \{1, 2\}) \quad (16)$$

式 (2)，式 (11)-式 (13)，式 (15) を用いると，社会的総余剰 NB は，

$$NB = const - (B_1^s + B_1^l) t_1 (V_1^s + V_1^l) \\ - (B_2^s + B_2^l) t_2 (V_2^s + V_2^l) \\ - m_1^s V_1^s - m_1^l V_1^l - m_2^s V_2^s - m_2^l V_2^l \quad (17)$$

と表される．式 (17) の右辺は，変数 $v_a^y(\beta^y)$ ($\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\}$) の関数として表されている．ここで， $v_a^y(\beta^y) \geq 0$ および $v_1^y(\beta^y) + v_2^y(\beta^y) = d^y(\beta^y)$ を制

約条件として NB を最大化する $v_a^y(\beta^y)$ の必要条件を KKT 条件から求めると、以下の条件式が得られる。

$$\begin{aligned} [\beta^y t_1 + (B_1^s + B_1^l) t_1' + m_1^y - \lambda^y(\beta^y)] v_1^y(\beta^y) &= 0, \\ \beta^y t_1 + (B_1^s + B_1^l) t_1' + m_1^y &\geq \lambda^y(\beta^y), \\ v_1^y(\beta^y) &\geq 0 \end{aligned} \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} [\beta^y t_2 + (B_2^s + B_2^l) t_2' + m_2^y - \lambda^y(\beta^y)] v_2^y(\beta^y) &= 0, \\ \beta^y t_2 + (B_2^s + B_2^l) t_2' + m_2^y &\geq \lambda^y(\beta^y), \\ v_2^y(\beta^y) &\geq 0 \end{aligned} \quad (18b)$$

$$v_1^y(\beta^y) + v_2^y(\beta^y) = d^y(\beta^y, c^y(\beta^y)) \quad (18c)$$

$$(\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\})$$

ここで、 $\lambda^y(\beta^y)$ はラグランジュ乗数である。また、 t_a, t_a' はそれぞれ、 $t_a(B_a^s + B_a^l), t_a'(B_a^s + B_a^l)$ の略記である。ここで、新しい変数 $\Lambda(\beta^y)$ を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \Lambda(\beta^y) &= \lambda^y(\beta^y) - (B_2^s + B_2^l) t_2' - m_2^y \\ (\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\}) \end{aligned} \quad (19)$$

この $\Lambda(\beta^y)$ を用いると、式 (18a)、式 (18b) は以下のよう書き換えられる。

$$\begin{aligned} [\beta^y t_1 + (B_1^s + B_1^l) t_1' + m_1^y \\ - (B_2^s + B_2^l) t_2' - m_2^y - \Lambda^y(\beta^y)] v_1^y(\beta^y) &= 0, \\ \beta^y t_1 + (B_1^s + B_1^l) t_1' + m_1^y \\ - (B_2^s + B_2^l) t_2' - m_2^y &\geq \Lambda^y(\beta^y), \\ v_1^y(\beta^y) &\geq 0 \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\begin{aligned} [\beta^y t_2 - \Lambda^y(\beta^y)] v_2^y(\beta^y) &= 0, \\ \beta^y t_2 &\geq \Lambda^y(\beta^y), v_2^y(\beta^y) \geq 0 \\ (\beta^y \in [\underline{\beta}^y, \bar{\beta}^y], y \in \{s, l\}) \end{aligned} \quad (20b)$$

式 (20a)、式 (20b)、式 (18c) と式 (3a)、式 (3b)、式 (3c) を比較すると、高速道路の料金を以下のように設定すれば、社会的総余剰を最大化する利用者均衡を分権的に実現できることがわかる。

$$\begin{aligned} p^y &= (B_1^s + B_1^l) t_1' + m_1^y - (B_2^s + B_2^l) t_2' - m_2^y \\ (y \in \{s, l\}) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $(B_a^s + B_a^l) t_a'$ はリンク a における車両 1pcu 当たりの混雑の限界費用を表している。また、 m_a^y はリンク a における車種 y の車両 1pcu 当たりの限界維持管理費用を表している。すなわち、式 (21) は、各車種について、リンク間の「社会的限界費用と私的限界費用の差」の差を料金として設定すれば、社会的総余剰を最大化するネットワークの利用状態を導けることを意味している。これは Verhoef et al.¹²⁾ によって示されている結果と同じものである。

式 (21) より、普通車・大型車の限界維持管理費用が 0 である場合には、効率的料金は $p^s = p^l$ を満たすことがわかる。すなわち、大型車「1台」の料金を普通車 1

台の料金の e^l 倍にするのが効率的となる。また、普通車の限界維持管理費用は、一般的に無視できるほど小さいことを考慮して $m_1^s = m_2^s = 0$ が成立するものとし、舗装の耐久性は一般的に高速道路の方が一般道路よりも高いことを考慮して $0 < m_1^l < m_2^l$ が成立するものとしよう。このとき、効率的料金は $p^s > p^l$ を満たすことがわかる。すなわち、大型車「1台」の料金を普通車 1 台の料金の e^l 倍未満にするのが効率的となる。効率的料金設定が、このように大型車を優遇したものとなる理由は、大型車交通流を舗装の耐久性の高い高速道路に導くことにより、ネットワーク全体の維持管理費用を削減できることである。

式 (21) の料金設定は、限定的な状況においてのみ効率的な料金設定であり、高速道路事業者の利潤制約がある場合や、利用者の旅行需要が弾力的である場合の Second Best の料金設定とは一般的に異なったものとなる。ただし、数値シミュレーションを用いた、より一般的な多くのケースにおいても、式 (21) の料金設定と同様の理由により、大型車を優遇する料金設定が効率的となることを筆者らは確認している。

(3) 本研究の位置づけ

本研究では、日本の道路における車種別限界維持管理費用の試算を行うとともに、大規模ネットワークを用いた維持管理費用を考慮した高速道路の料金設定モデルを構築し、社会的総余剰および高速道路事業者の事業収支改善、道路の維持管理施策に関する知見を得ることを目的とする。筆者等の知る限り、日本の道路における車種別限界維持管理費用を推計した研究事例および大規模ネットワークを用いて維持管理費用を考慮した高速道路の料金設定に関する研究事例は他に見あたらない。

1 リンクや 2 リンクの単純なネットワークであれば維持管理費用を考慮した高速道路の最適料金を解析的に導くことはそれほど難しくはない。全リンク (1 リンク or 2 リンク) に料金を課せる (First Best) のであれば、限界費用料金設定が最適解となる。高速道路 1 リンクと一般道 1 リンクによる 2 リンクの場合 (Second Best) においては、限定的な条件下では解析に解を導くことが可能であり、数値シミュレーションを実施したとしても単純なモデルであるため時間はかからない。しかしながら、高速道路と一般道が複雑に入り組んだ大規模ネットワーク (Second Best) では、最適料金を導くモデルを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、どのような条件を設定したとしても解析的に解を導くことは非常に困難である。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、その数値シミュレーションも莫大な時間を要するが、実際の道路ネットワークをモデル化しているため具体的な施策提言が可能となる。これが本研究の大きな特徴である。

3. 最適維持補修料金モデルの構築

(1) 維持管理費用推計モデル

本研究では、土木施設の劣化過程を表現するために用いられることが多い多段階ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を活用できる一般的な手法を提示する。

a) 基本的な計算手法

以下の6つの仮定の下に維持管理費用推計モデルを定式化する。

- (a) 舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイのみを考える（維持工法や打換えは考慮しない）
- (b) 舗装の健全度が管理限界に達するとオーバーレイが行われる
- (c) オーバーレイが行われると、舗装の健全度は最も健全な水準1に回復する
- (d) 交通量（ESALs等）は通時的に一定の値 Q とする
- (e) 道路は永久に供用され続ける
- (f) 舗装の劣化過程は確定的であり、交通量が通時的に一定である限りは、舗装が最も健全な水準から管理限界に到達するまでに要する時間は、唯一に定まる。

この仮定は Small et al.⁵⁾等が用いた計算手法と同じものであり、この仮定の下では、一定の時間間隔 T （年）においてオーバーレイが繰り返し行われることになる。舗装の健全度の管理限界を所与とすれば、この T は交通量 Q の関数として表すことができる。この関数を $T(Q)$ と表す。この関数 $T(Q)$ を統計データから推定すれば、現在から無限の将来にわたり、オーバーレイに必要な費用の割引現在価値 V （円）を、交通量 Q の関数として表すことが可能になる。

推定された関数 $T(Q)$ を用いて V を計算する手法は以下の通りである。オーバーレイを1回実施するのに要する費用（金額は基準年度の物価に合わせられているとする）を U （円）、実質金利を $r\%$ とする。現在時刻はオーバーレイが行われた直後であるとする。このとき、現在時刻を基準にして、将来に生じるオーバーレイの費用の割引現在価値 V （円）を求めると、

$$V = Ue^{-rT(Q)} + Ue^{-r \cdot 2T(Q)} + Ue^{-r \cdot 3T(Q)} + \dots$$

$$= \frac{e^{-rT(Q)}}{1 - e^{-rT(Q)}} U = \frac{1}{e^{rT(Q)} - 1} U \quad (22)$$

となる。

次に、この費用の割引現在価値 V （円）を、1年当たりの費用に直す（annualizeする）ことを考えよう。割

引現在価値が V （円）の総費用を、毎年 v （円）得られる収入により、無限の時間をかけてちょうど賄うためには、

$$V = \int_0^{\infty} ve^{-rt} dt = \frac{v}{r} \quad (23)$$

が成立する必要がある。この式を v について解くと $v = rV$ が得られる。この v 円が、割引現在価値が V 円の総費用を、1年当たりの費用に直したものとなる。道路管理者がオーバーレイの費用を恒常的に賄い続けるためには、管理者は毎年 v 円の収入を得る必要があることになる。式(22)と式(23)より、1年当たりのオーバーレイの費用と交通量の関係を表す費用関数は、

$$rV = \frac{r}{e^{rT(Q)} - 1} U \quad (24)$$

と求められる。式(24)の右边が費用関数となる。式(24)の右边は、 $r \rightarrow 0$ とするとき、 $U/T(Q)$ に収束することに注意しよう。 $U/T(Q)$ は、1年当たりのオーバーレイの費用を、単純な算術平均を用いて求めたものである。式(24)はこのような費用も、特殊なケースとして表している。

上記の計算を行うためには、関数 $T(Q)$ を推計する必要がある。この推計には計量経済学的アプローチと同様の手法を用いることができる。また、Newbery⁸⁾は、舗装の健全度の推移過程を微分方程式で表したモデルを推定し、このモデルの推定結果から $T(Q)$ を計算している。

以上は Small et al.⁵⁾等が用いた計算手法とほぼ同じ内容である。この計算手法は、維持管理費用のうち、オーバーレイに要する費用しか考慮していないため、日常的な点検に要する費用、維持工法の実施に要する費用など、他の維持管理費用については、別途、統計データ等から1年あたりの費用を求め、式(24)の右边と足し合わせる必要がある。これによって初めて、全ての維持管理費用を考慮した費用関数を求めることができる。

上記の解説では明示的に述べなかったが、厳密には、交通量と舗装の健全度は、最外側車線のもの、それ以外の車線のものに分けて考える必要がある。最外側車線は一般的に交通量が最も多い車線であるため、舗装の劣化の進行も他の車線より速くなる。上記の解説における舗装の健全度は、最外側車線の健全度を意味している。また、オーバーレイが行われる時間間隔 T は、厳密には Q の関数ではなく、最外側車線を利用する交通量 λQ の関数として表されるべきものである。ここで、 λ は交通量全体に占める、最外側車線を利用する交通量の割合を表す。

上記の解説で、最外側車線以外の車線の健全度を無視した理由は、オーバーレイが行われる際には、全ての車線に同時にオーバーレイが行われることが一般的であることである。よって、オーバーレイの費用のみ

を考慮する限りは、劣化が最も激しい最外側車線の健全度のみを考慮すれば、一般的には十分となる。

b) 劣化過程の不確実性を考慮した計算手法

基本的な計算手法の考え方は、舗装の劣化過程が確率的である場合にもそのまま適用できる。しかし、舗装の劣化過程の不確実性を考慮して費用関数を計算した研究はほとんど存在しない。そのような研究としては、Liu²⁷⁾、Haraldsson²⁸⁾、Anani²¹⁾を挙げるができる。

ただし、Liu と Haraldsson の研究は、非現実的な仮定を置いており問題がある。Liu の研究では、オーバーレイが行われる時間間隔 T を確率変数として扱っているが、いったん、この確率変数の実現値が定まると、それ以降は、必ずその実現値の時間間隔を置いてオーバーレイが行われると仮定している。また、Haraldsson の研究では、現在時点から 1 回目のオーバーレイが行われるまでの時間間隔を確率変数として扱っているが、2 回目以降のオーバーレイについては、確定的に一定の間隔を置いてオーバーレイが行われると仮定している。

オーバーレイの時間間隔は、オーバーレイが行われるたびに確率的に変動するという適切な仮定の下に、費用関数を計算している研究は、筆者らの知る限り Anani²¹⁾のみである。ただし、Anani の研究は、維持工法・修繕工法としてオーバーレイしか考慮していない。以下では、Anani の計算手法を解説する。

基本的な計算手法で置いた 5 つの仮定はここでも成立するものとする。オーバーレイが行われる時間間隔 T は非負の値を取る確率変数として表すことができ、この確率変数は、確率密度関数 $f(T)$ に従うものとする。確率密度関数 $f(T)$ の形状は交通量 Q に依存するものとし、この関係を明示的に $f(T|Q)$ と表す。

現在時刻は、舗装のオーバーレイが行われた直後であるものとする。この現在時刻を基準として、現在時刻以降に発生するオーバーレイの費用の割引現在価値の期待値を V で表す。この V は以下のように表すことができる。

$$V = E \left[\sum_{i=1}^{\infty} U \exp \left(-r \sum_{j=1}^i T_j \right) \right] \quad (25)$$

ここで、 U はオーバーレイを 1 回行うのに要する費用を表す。 T_i は、 $i-1$ 回目のオーバーレイが行われてから、 i 回目のオーバーレイが行われるまでの時間を表す確率変数である（0 回目のオーバーレイは、現在時刻の直前に行われたオーバーレイとする）。 T_i ($i = 1, 2, \dots$) は i.i.d. であり、確率密度関数 $f(T|Q)$ に従う。 $E[\cdot]$ は $[\cdot]$ 内の全ての確率変数についての期待値を計算する記号である。 i 回目のオーバーレイが行われる時刻は、現在時刻を基準として $\sum_{j=1}^i T_j$ となることに注意すれば、

式 (25) は式 (22) と同様の考え方に基づいたものであることがわかる。

式 (25) の値を計算するうえでは、数式の再帰的な構造を用いるのが有用である。 V は再帰的に、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} V &= E[(U + V)e^{-rT}] \\ &= \int_0^{\infty} (U + V)e^{-rT} f(T|Q) dT \\ &= (U + V)E[e^{-rT}] \end{aligned} \quad (26)$$

この方程式を V について解くと、

$$V = \frac{E[e^{-rT}]}{1 - E[e^{-rT}]} U = \frac{1}{(E[e^{-rT}])^{-1} - 1} U \quad (27)$$

が得られる。1 年当たりのオーバーレイの費用と交通量の関係を表す費用関数は、式 (27) の右辺に r を掛けることで求めることができる。

Anani は、以上の手法を用いて限界維持管理費用を計算し、オーバーレイの行われる時間間隔が長い場合や、実質金利が高い場合には、劣化過程の不確実性を考慮しないと、限界維持管理費用を過少に推計する可能性があることを指摘している。

以上の計算手法を用いてオーバーレイの費用関数を計算する際には、 $E[e^{-rT}]$ を求める必要がある。一般的には、この値を計算するためにはシンプソンの公式などの数値積分を用いる必要がある。ただし、舗装の劣化過程が指数劣化ハザードモデルに従う場合（つまり、 T が指数分布に従う場合）は、この値を解析的に求めることができる。 T が指数分布に従う場合、 $E[e^{-rT}]$ は、

$$\begin{aligned} E[e^{-rT}] &= \int_0^{\infty} e^{-rt} f(t|Q) dt \\ &= \int_0^{\infty} e^{-rt} \theta_i e^{-\theta_i t} dt = \frac{\theta_i}{r + \theta_i} \end{aligned} \quad (28)$$

となり、すなわち

$$V = \frac{1}{\left(\frac{\theta_i}{r + \theta_i}\right)^{-1} - 1} U \quad (29)$$

となる。ここで θ_i は交通量 Q の関数である。

(2) 維持管理費用を考慮した交通流配分モデル

維持管理費用を考慮した交通流配分モデルを以下に示す。交通需要は固定、料金は高速道路 B のみに課金する総コスト最小化問題である（Second Best）。

$$\min_{\{x_a^s, x_a^l, y_a^s, x_a^l, p_a^s, p_a^l\}} TC \quad (30)$$

$$\begin{aligned} TC &= \sum_{a \in A} \{(\alpha x_a^s + \beta x_a^l) t_a(x) + x_a^s m_a^s + x_a^l m_a^l\} \\ &+ \sum_{b \in B} \{(\alpha y_b^s + \beta y_b^l) t_b(y) + y_b^s m_b^s + y_b^l m_b^l\} \\ &+ F \end{aligned} \quad (31)$$

制約条件：

$$\min_{\{x,y,f,p\}} Z \quad (32)$$

$$Z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(w) \cdot dw + \sum_{b \in B} \int_0^{y_b} t_b(w) \cdot dw - \sum_{c \in (s,l)} \sum_{rs \in \Omega} \frac{1}{\theta} \cdot Q_{rs} \cdot \sum_{k \in K_{rs}} \left\{ -\frac{f_{rs,k}}{Q_{rs}} \cdot \ln \frac{f_{rs,k}}{Q_{rs}} \right\} \quad (33)$$

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs} - Q_{rs} = 0 \quad (34)$$

$$x_a = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} \quad (35)$$

$$y_b = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{b,k}^{rs} f_k^{rs} \quad (36)$$

$$x_a = x_a^s + x_a^l, \quad y_b = y_b^s + y_b^l \quad (37)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad x_a, x_a^s, x_a^l \geq 0, \quad y_b, y_b^s, y_b^l \geq 0 \quad (38)$$

ここで、

$a \in A$ ：一般道路の集合 A におけるリンク a

$b \in B$ ：高速道路の集合 B におけるリンク b

$c \in (s, l)$ ：小型車 s 、大型車 l の集合における車種 c

x_a^s, y_b^s ：リンク a, b の小型車交通量 (PCU 単位)

x_a^l, y_b^l ：リンク a, b の大型車交通量 (PCU 単位)

p_b^s, p_b^l ：リンク b の高速道路料金

$t_a(x), t_b(y)$ ：リンク a, b の所要時間 (単調増加関数)

f_k^{rs} ：OD ペア間 rs 間第 k 経路の経路交通量

Q_{rs} ：OD ペア間 rs 間の分布交通量

$\delta_{a,k}^{rs}$ ：OD ペア間 rs 間第 k 経路がリンク a を含む

とき 1、そうでないとき 0

α ：小型車の時間価値

β ：大型車の時間価値

m_a^s, m_b^s ：リンク a, b の小型車の限界維持管理費用

m_a^l, m_b^l ：リンク a, b の大型車の限界維持管理費用

F ：構想道路事業者の固定費用 (維持管理費用の

固定費用、債務の償還費用等)

である。

本モデルは最適化問題 (式 (30)) の制約条件として均衡問題 (式 (32) – 式 (38)) が内包している MPEC (均衡制約付き数理最適化問題: Mathematical Problem with Equilibrium Constraints)²⁹⁾ の形式となっている。

式 (31) の第 1 項は一般道路における旅行時間コストおよび維持管理費用 (変動費用) であり、第 2 項は高速道路における旅行時間コストおよび維持管理費用 (変動費用) を意味する。高速道路利用者が支払う料金は高速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 (31) に p_b^s, p_b^l は表現されないが、均

衡問題では料金はリンクコストに加算されるため、重要なファクターとなる。

また、最適解を導出するにあたっては、高速道路事業者の収支 Π が悪化しないよう配慮する必要がある。本モデルでは、現況料金体系で計算した際の高速道路事業者収支を基本とし、高速道路事業者の収支が現況料金体系と同じか、現況料金体系よりも改善する最適料金を求めることとする (式 (40))。

$$\Pi = \sum_{b \in B} (p_b^s y_b^s + p_b^l y_b^l) - \sum_{a \in A, b \in B} (x_a^s m_a^s + x_a^l m_a^l + y_b^s m_b^s + y_b^l m_b^l) - F \quad (39)$$

式 (31) の第 1 項は高速道路事業者の料金収入、第 2 項は交通量に依存する維持管理費用の変動部分である。

4. 推計方法

(1) 維持管理費用の試算方法

式 (29) を用いて車種別道路種別別の annualize された維持管理費用 (円/ $m^2 \cdot$ 年) を算出し、交通量を考慮して道路種別別車種別限界維持管理費用 (円/km \cdot 台) を試算する。具体的には、小林・貝戸・林 (2008)³⁰⁾ による M 県の国道のわだち掘れの劣化予測モデルの推計結果や熊田³¹⁾ による高速道路における劣化予測モデルの推計結果で示された多段階指数ハザードモデル等を活用し、道路種別別に車種別限界維持管理費用を試算する。試算にあたっては、以下の 5 つの仮定を置く。

- 舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイのみを考える (維持工法や打換えは考慮しない)
- 舗装の健全度 i が管理限界 I に達するとオーバーレイが行われる
- オーバーレイが行われると、舗装の健全度 i は最も健全な水準 1 に回復する
- 交通量 (ESALs 等) は通時的に一定の値 Q とする
- 道路は永久に供用され続ける

(2) 交通流配分モデルの推計方法

式 (30) 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を実施することにより最適解を求める。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最適解を求める。手順としては、まず最初に現況料金体系で数値シミュレーションを実施し、現況交通量と推計交通量の比較によりネットワーク条件の妥当性を確認する。その後、同じネットワークを用いて最適料金の探索を行う。

本研究は小型車と大型車の限界維持管理費用の差に着目していることから、車種別の交通流配分に大きな

表-1 ルートサーチに用いる車種別代表時間評価値

No.	代表時間 評価値 (円/分)	乗用車	小型貨物車	普通貨物車
1	0.01	0.01	0.01	0.01
2	10			7.26
3	20			14.5
4	30			21.8
5	45	45.5	48.3	32.7
6	65		69.8	
7	70	70.7		
8	75			54.5
9	140		150.4	
10	160	161.6		
11	165			119.8
12	9,000	9,000	9,000	9,000

意味があるため、式(32)を解くにあたっては車種別の交通流配分が可能な確率的利用者均衡配分を用いる。確率的利用者均衡配分は利用者が認識する最短ルートをより選好する傾向にあるため、より現実に近い配分手法だと言える。また、確率的利用者均衡配分の具体的な配分方法として主に部分線形化法、逐次平均法、SD法(Simplicial Decomposition法)の3手法があるが、本研究では経路交通量を明示的に扱うSD法を採用する。

なお、高速道路の対距離料金制(ランプ間料金)を反映するためには仮想リンク法が必要となるが、本研究では予め経路集合を設定し、その経路集合間で確率的利用者均衡配分を実施する。経路集合は車種別代表時間評価値(表-1)を用いて複数ルートサーチすることにより作成する。このことにより、時間価値が異なる多様な道路利用者の経路を設定するため、より現実に近い経路を設定可能である。

リンクコスト関数はBPR関数とし、パラメータは土木学会(2003)³²⁾が推定した $\alpha=0.48$ 、 $\beta=2.82$ を用いる。大型車の乗用車換算係数 $PCU=1.7$ とする。

$$t_a(x) = t_{a0} \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C_a} \right)^\gamma + \frac{P}{r_c} \right] \quad (40)$$

ここで、 t_{a0} はリンク a のゼロフロー時の旅行時間を表す定数(自由旅行時間)であり、 C_a はリンク a の交通容量(PCU/日)を表す定数である。 P は料金であり、 r_c は車種別の時間価値である。

OD表はH11ODに走行台キロ伸び率を乗じて作成したH24OD(単位:PCU/日)を用いた。車種は乗用車類(小型車)、小型貨物車(小型車)、普通貨物車(大

型車)の3車種で、時間価値原単位は国土交通省の「費用便益分析マニュアル」³³⁾に従い乗用車類: $r_1=45.78$ 、小型貨物車: $r_2=47.91$ 、普通貨物車: $r_3=64.18$ とする。

5. おわりに

本研究では、維持修繕費用を考慮した効率的な交通流配分および料金設定の枠組みについて定式化し、大規模ネットワークにおける適用条件を整理した。大規模ネットワークにおける数値計算結果および考察、施策検討等の本研究の結論については講演時に発表する。

参考文献

- 1) ワトキンス・レポート 45周年記念委員会編：ワトキンス調査団 名古屋・神戸高速道路調査報告書，勁草書房，2001.
- 2) 古川浩太郎：高速道路の通行料金制度 - 歴史と現状 - ，レファレンス，pp.99-118，2009年10月.
- 3) 青木一也，小田宏一，児玉英二，貝戸清之，小林潔司：ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価，土木技術者実践論文集，Vol.1，No.1，pp.40-52，2010.
- 4) 道路広報センター：有料道路の料金に関する社会実験事例集 2005 ~ 「地域における課題解決型社会実験」のとりまとめ~ ，レファレンス，pp.99-118，2005年11月.
- 5) Small KA., Winston C, Evans CA：Road Work - A New Highway Pricing and Investment Policy, Washington,DC: The Brookings Institution, 1989,
- 6) H.Mohring and M.Harwitz：Highway Benefit：An Analytical Framework，Northwestern University Press, 1962, H. モーリング, M. ハーウィッツ：道路経済学 - 便益の分析 - ，鹿島研究所出版会, 1968.
- 7) H.Mohring：Transportation Economics，Cambridge, Mass.,Ballinger Publishing, 1976, H. モーリング：交通経済学，勁草書房，1987.
- 8) Newbery, David M.: Road Damage Externalities and Road User Charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- 9) Chu, C. and Tsai, J.: Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, pp.457-477, 2004.
- 10) Newbery, David M.: Cost Recovery from Optimally Designed Roads, *Economica*, Vol.56, No.222, pp.165-185, 1989.
- 11) Small, K. A. and Winston, C. : Optimal Highway Durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.
- 12) Verhoef, E., Nijkamp, P. and Rietveld, P. : Second-Best Congestion Pricing The Case of an Untolled AlternativeURoad Pricing Models with Maintenance Cost, *Journal of Urban Economics*, Vol.40, pp.279-302, 1996.
- 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 平成18年度版，2006.
- 14) 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研究，京都大学工学部地球工科学士木コース学士論文，2012.
- 15) 瀬木俊輔，田上貴士，小林潔司：高速道路の維持修繕費用を考慮した効率的交通流配分，土木計画学研究・講演集，Vol.46，2012.
- 16) Link, H. : An Econometric Analysis of Motorway Re-

- newal Costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.
- 17) Link, H. : Road Econometrics - Case Study on Renewal Costs of German Motorways, *Annex A1 a of Deliverable 10 of Unite*, Funded by the European Commission 5th Framework - Transport RTD, ITS, University of Leeds, 2002.
 - 18) Haraldsson, M. : Marginal Costs for Road Maintenance and Operation - a Cost Function Approach, *Working Papers No.2007:7*, Swedish National Road & Transport Research Institute (VTI), 2007.
 - 19) Lindberg, G. : Marginal Cost of Road Maintenance for Heavy Goods Vehicles on Swedish Roads, *Annex A2 of Deliverable 10 of Unite*, Funded by the European Commission 5th Framework - Transport RTD, ITS, University of Leeds, 2002.
 - 20) Anani, S. B. and Madanat, S. M. : Estimation of Highway Maintenance Marginal Cost under Multiple Maintenance Activities, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.136, No.10, pp.863-870, 2010.
 - 21) Anani, S. B. : Revisiting the Estimation of Highway Maintenance Marginal Cost, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley 2008.
 - 22) 田村謙介, 慈道充, 小林潔司: 予算制約を考慮した道路舗装の修繕ルール, 土木計画学研究・論文集, No.19, pp.71-82, 2002年9月.
 - 23) Federal Highway Administration : *Addendum to the 1997 Federal Highway Cost Allocation Study Final Report*, United States Department of Transportation, 2000.
 - 24) 土木学会 土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討小委員会: 道路交通需要予測の理論と適用 第 編利用者均衡配分モデルの展開, 社団法人土木学会, 2006.
 - 25) Rossi, T. F., McNeil, S. and Hendrickson, C: Entropy Model for consistent impact fee assessment, *Journal of Urban Planning and Development*, No.115, pp.51-63, 1989.
 - 26) Akamatsu, T: Decomposition of path choice entropy in general transport networks, *Transportation Science*, Vol.31, No.4, pp.349-362, 1997.
 - 27) Liu, P.-C. B. : Optimal Pavement Design under Uncertainty, *Working Paper*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley 2003.
 - 28) Haraldsson, M. : The Marginal Cost for Pavement Renewal - A Duration Analysis Approach, *Working Papers No.2007:8*, Swedish National Road & Transport Research Institute (VTI), 2007.
 - 29) 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.
 - 30) 小林潔司, 貝戸清之, 林秀和: 測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集D, Vol.64, No.3, pp.493-512, 2008.
 - 31) 熊田一彦: 高速道路舗装マネジメントのための統計的劣化予測モデルに関する研究, 京都大学博士論文, 2011.5.23.
 - 32) 土木学会 土木計画学研究委員会 交通需要予測技術検討小委員会: 道路交通需要予測の理論と適用 第 編利用者均衡配分の適用に向けて, 社団法人土木学会, 2003.
 - 33) 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, 平成 20 年 11 月.

(平成 25 年 5 月 4 日 受付)