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

平成24年2月22日

京都大学工学部地球工学科土木コース
松原　朋弘

要　旨

日本のように高速道路の整備が進み一定期間が経過した国々においては，老朽化が進む高速道路の維持補修費用の財源確保が大きな課題となっている．もし高速道路の維持補修費用の全額をを利用料金によって捻出しようとするとき，異なる車種にどのような配分で利用料金を課せば効率性や公平性の観点から妥当であると言えるだろうか．

本研究では、複数のルールに基づいて、異なる車両重量を持つ複数の車種間での利用料金の配分モデルを提案し、利用料金が高速道路の維持補修費用を完全にカバーする条件の下での両車種の交通需要や利用者の便益、さらには社会的総余剰などを比較することで最適な高速道路料金について検討する。

目 次

第1章 はじめに **1**

第2章 研究概要 **3**

2.1 従来の研究概要 3

2.2 分析手法 4

第3章 料金設定分析モデル **5**

3.1 モデルの背景と前提条件 5

3.2 FirstBest の料金 9

3.3 SecondBest の料金 10

3.4 環境負荷を考慮したSecondBest の料金 13

第4章 その他の料金設定 **15**

4.1 SecondBest 料金の問題点 15

4.2 EU 型環境負荷重課料金 15

4.2.1 背景 15

4.2.2 定式化 16

4.3 維持補修費用平均分配料金 17

4.3.1 背景 17

4.3.2 定式化 18

第5章 数値シミュレーションによる分析 **19**

5.1 各モデルの具体化 19

5.2 各モデルの計算結果 20

5.2.1 $(Q_1, Q_2) = (2500, 500)$ の場合 20

5.2.2 $(Q_1, Q_2) = (1500, 1500)$ の場合 21

5.2.3 $(Q_1, Q_2) = (500, 2500)$ の場合 21

5.3 計算結果の比較 21

5.4 公平性について 22
5.5 政策的示唆 23

第6章 おわりに **25**

参考文献 **27**

付録A 付図 **付–1**

第1章　はじめに

日本やその他多くの先進国においては高速道路の社会資本ストックがある一定の水準に達し、現在では建設から一定期間が経過した高速道路の維持補修費用の財源捻出が国土計画の重要な課題の一つとして認識されるに至った。特に我が国においては、近年に至るまで高速道路の利用料金徴収は高速道路の資本コスト回収や混雑抑制を主目的として実施されてきた上、その経営がコスト意識の希薄な公営企業に委ねられてきた経緯も相まって、2005年の高速道路事業民営化以降は特に、その安定した経営のために資本コストのみならず維持補修費用の回収により一層焦点が置かれることとなった。

高速道路の維持補修費用の内、劣化した道路舗装の上塗り費用の割合は大きい。この舗装劣化の原因は大まかには通行車両から受けるダメージと自然条件による風化・老朽化の二つに分けられる。このうち、舗装が通行車両から受けるダメージは通行車両の車体総重量に依存する。そして、上塗り以外の道路補修や高速道路の運営上必要な保守点検費用・清掃費用・緑地帯管理費用・水光熱費・人件費・安全対策費なども維持補修費用に含まれる。

また、日本では国土の特質上高速道路の構造物比率（=(橋梁延長+トンネル延長)/総道路延長）が高い(日本:36.0%、米国:6.6%)、交通インフラが密集する平野部のほとんどが軟弱地盤の沖積平野である、地震発生件数が多い、地価・物価が高い、気候変動が大きいため土木構造物の自然劣化が早く冬季には除雪作業が必要である、等の理由のため高速道路の建設コストは勿論のこと、維持補修費用も諸外国と比べて非常に高い水準にある。米国との比較となると、1kmあたりの高速道路建設費用は日本が約50.1億円、米国が約19.1億円と2.6倍も高くなっている[16)]。

この諸外国より割高な維持補修費用と資本コストを効率的に回収し、なおかつ高速道路利用者の厚生をできるだけ損ねない料金政策の実施が求められている。そうすると異なる車両重量を持ついくつかの車種にどのように通行料金を配分することが適切であろうか。

この問題の定式化に際してはCHIH PENG CHU & JYH-FA TSAI(2004)[1)]による通行料金モデルを参考にし、需要関数を新たな形に書き直した。そして、高速道路事業者

が赤字にならない範囲でシステムの総便益を最大にする通行料金の他、いくつかのルールに従った料金モデルを提案し、計算ソフトウェアである「GAMS」を用いて、適当なパラメータ設定の下で各料金モデルでの均衡分析を行う。計算結果のうち、各料金体系化でのシステム総便益や各車種の交通需要や通行料金、消費者余剰などを比較することで、料金政策上の示唆を得ることを最終目的とする。

第2章　研究概要

2.1　従来の研究概要

一般的に高速道路の料金収入は、道路の建設債務返済、メンテナンスコスト（維持補修費用）、道路延長事業などに利用されるが、維持補修費用はその中でも大きな割合を占める。これは道路総延長約650万km、高速道路総延長75500kmといずれにおいても世界一を誇る米国においても例外ではない。Small（1989）らの指摘によれば、米連邦道路管理局（FHWA）のレポートでは高速道路のメンテナンスコストは１９７５年から１９８５年にかけて総道路財源支出の２５％以上を占め、しかもその割合は上昇傾向にあるという。しかし未だ、高速道路料金の車種別配分にあたってメンテナンスコストはあまり考慮されていないのが現状である。Johnsson & Mattson（1994）によれば、メンテナンスコストは固定部分と可変部分の二つに分けられる。固定部分とは、自然条件による劣化、保守点検、清掃費用、水光熱費等であり、道路運営上毎年ほぼ一定の金額となる。一方、可変部分とは高速道路を走る車による舗装へのダメージによるものであり、交通量に依存する。さらに言えば、個々の車両が舗装へ与えるダメージはひとつの車軸の両輪に加わる鉛直荷重である等価単軸荷重（ESAL:Equivarent Single Axle Load）の約4乗に比例している（4乗ルール）[3)]。これはアメリカ合衆国の高速道路の規格に関する基準設定機関である米国全州道路交通運輸行政官協会（AASHTO）の道路試験(1962)にて導き出されたものである[5)]。この道路試験では等価単軸荷重が80kN（=18kip=18000pounds=8.125t=8125kg）のトラックが何回通過すれば路面がある特定の閾値まで劣化するのかを基準としてその他の軸数、車両重量の車種の通過によってもどの程度路面が劣化するのかが調査された。この結果、車両の通行による路面の劣化は等価単軸荷重のおよそ3.75乗に比例することが明らかとなったが、日本を始め世界の多くの国々では信頼性の担保のため4乗ルールとしてこの結果が用いられることとなった。日本の場合、等価単軸荷重の代わりに車両の通過による道路劣化の基準として1967年以降は49kN(5t)換算輪荷重が用いられている。これは、アスファルト舗装の設計において49kNの輪荷重（一つの車輪に加わる荷重）を持つトラックが何回通過すれば道路が一定のレベ

ルまで劣化するかを基準とするもので、他の異なる輪荷重を持つ車種については4乗ルールによってトラック何台分の交通量に匹敵するか換算している。このため、メンテナンスコストの可変部分の負担割合は各車種の等価単軸荷重に応じて適切に設定されることが求められる。

CHIH PENG CHU & JYH-FA TSAI(2004)はこの等価単軸荷重を用いて車体重量の異なる二車種間の高速道路通行料金配分を定式化した。ここではシステムの総便益が最大化されるような通行料金が計算され、この料金が維持補修費用をカバーする条件について議論がなされている[1)]。

2.2 分析手法

本研究では、CHIH PENG CHU & JYH-FA TSAIによる論文「Road pricing models with maintenance cost」の通行料金モデルを参考に、需要関数を価格弾力性一定の形に直し、かつ車種の数がnの場合を考えて再度定式化を行った。そして、交通需要者が赤字にならない条件で各利用者の総消費者余剰を最大にするような通行料金（SecondBestの料金）を数値シミュレーションによって実際に計算し、その料金の下での各車種の交通需要や総消費者余剰等についても明らかにする。また、SecondBestな料金は総消費者余剰を最大化する半面、公平性が考慮されているわけではない点に注意せねばなるまい。すなわち、SecondBestの料金によって各車種間で経済的な不公平が生ずる恐れがある。そのため本研究ではSecondBestの料金以外にも、いくつかのルールに従って料金設定を定式化し、同様に数値シミュレーションによって、それらのルールの下での通行料金とその通行料金の下での各車種交通需要や総消費者余剰を計算する。そして、SecondBestの料金も含めたいくつかの通行料金制度について、各車種間の支払う通行料金やトリップ費用、総消費者余剰を比較することで、維持補修費用を考慮したときの最適な通行料金配分について効率性や公平性の観点から考察する。

第3章　料金設定分析モデル

3.1　モデルの背景と前提条件

本章では、前述の通りCHIH PENG CHU & JYH-FA TSAI,「Road pricing models with maintenance cost」(2004)を基にして、各車種の交通需要関数を価格弾力性一定のモデルで表し、高速道路事業者が赤字にならない条件で高速道路の通行料金の次善の解について検討する。

枝別れがなく渋滞のない高速道路を、n種類の異なる車両重量・単軸荷重を持つ車種が走行していると仮定する。本モデルで議論するのは高速道路ネットワーク上のある特定のリンクにおける交通であり、各車種の交通需要はこの区間でのトリップの一般化費用に依存して決まるものとする。

車種$i(1 \leq i \leq n)$の利用者の交通需要関数・時間費用関数・トリップの一般化費用関数を次のように表す。

交通需要関数:

$$V_i = Q_i P_i^{-\epsilon_i} \tag{3.1}$$

時間費用関数:

$$C_{t_i} = r_i C_i(V_1, \cdots, V_n) \tag{3.2}$$

トリップ一般化費用関数:

$$P_i = \tau_i + C_{t_i} \tag{3.3}$$

ちなみに、

$$\begin{aligned}
&(\text{車種i交通需要の価格弾力性}) \\
&= -\frac{\frac{dV_i}{V_i}}{\frac{dP_i}{P_i}} = -\frac{dV_i}{dP_i} \times \frac{P_i}{V_i} \\
&= -\left\{ Q_i(-\epsilon_i) P_i^{-\epsilon_i - 1} \times \frac{P_i}{Q_i P_i^{-\epsilon_i}} \right\} = \epsilon_i(\text{一定})
\end{aligned}$$

である。

各記号の意味は次の通りである。

V_i:車種iの交通需要（台/hour)、

P_i:車種iのトリップの一般化費用（$)、

C_{t_i}:車種iの時間費用（$)、

C_t:当該区間の通行時間（$\{V_i|1 \leq i \leq n\}$の関数）(hour)、

Q_i:当該区間の交通需要ポテンシャル（台/hour)、

ϵ_i:各車種の交通需要の価格弾力性（パラメータ)、

r_i:車種iの利用者の時間価値（$/hour)（パラメータ)、

τ_i:車種iの通行料金（$)（パラメータ）

ここで、交通需要は単位時間（hour）あたりのものとする。

各車種の移動時間はリンクコストパフォーマンス関数の一種であるBPR関数を用いて次のように算出している。なお、同一システム内で各車種の移動時間は同じになるものとする。

$$C_t = t_0[1 + \alpha(\frac{\sum_{i=1}^{n} V_i}{K})^{\beta}] \tag{3.4}$$

ここで、

C_t:移動時間（hour)、

t_0:自由交通流での移動時間（hour)、

K:当該区間の交通容量（基本交通容量)（台/hour)、

α, β:パラメータ

である。

さて、τ_iについて何か特定のルールに基づく条件式を与えてやれば、これらの式と式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)を$\{P_i|1 \leq i \leq n\}$、$\{V_i|1 \leq i \leq n\}$、$\{C_{t_i}|1 \leq i \leq n\}$について解くことで均衡が計算できる。その解を$\{\hat{P}_i|1 \leq i \leq n\}, \{\hat{V}_i|1 \leq i \leq n\}, \{\hat{C}_{t_i}|1 \leq i \leq n\}$とする。このとき、各主体に生じる便益は次のように計算できる。

車種iの利用者の総便益:

$$NB_i = \int_{\hat{P}_i}^{\overline{P_i}} Q_i P_i^{-\epsilon_i} dP_i \tag{3.5}$$

or

$$NB_i = \overline{V_i} \times (\frac{\overline{V_i}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} + \int_{\overline{V_i}}^{\hat{V_i}} (\frac{V_i}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} dV_i - \hat{V_i} \times (\frac{\hat{V_i}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} \tag{3.6}$$

この総便益は、交通需要関数のグラフを表した**図–3.1**の網掛部の面積と同じとなる。V_iはある適当な小さな値である。この値の取り方は消費者余剰の値を変化させる。しかし、消費者余剰はその絶対値そのものに意味があるわけではなく、異なる均衡における値の間の差にのみ意味があるため、どのようにこの値を設定しても結論に影響はない。

式(3.6)の積分を計算すると、

$$\begin{aligned} NB_i &= Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}} \times \overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \left[\frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{1-\frac{1}{\epsilon_i}} V_i^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \right]_{\overline{V_i}}^{\hat{V_i}} - Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}} \times \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \\ &= Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}} \left(\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} + \frac{1}{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \frac{1}{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} \right) \\ &= \frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{-\epsilon_i+1} (\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}}) \end{aligned} \tag{3.7}$$

高速道路事業者の利潤:

$$B_c = \sum_{i=1}^{n} \tau_i \hat{V_i} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(\hat{V_i}) - \overline{C_m} \tag{3.8}$$

ここで、

$C_{m_i}(V_i)$:(車種iの交通需要に依存する)可変メンテナンスコスト($)、

$\overline{C_m}$:固定メンテナンスコスト($)

さらに、これらの結果より、システム全体の純便益（SNB:System's Net Benefit）は、

$$\begin{aligned} SNB &= \sum_{i=1}^{n} NB_i + B_c \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{-\epsilon_i+1} (\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}}) + \sum_{i=1}^{n} \tau_i \hat{V_i} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(\hat{V_i}) - \overline{C_m} \end{aligned} \tag{3.9}$$

ここで、$\tau_i = \hat{P_i} - C_{t_i}(\hat{V_1}, \cdots, \hat{V_n}) = (\frac{\hat{V_i}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(\hat{V_1}, \cdots, \hat{V_n})$を用いると、

$$\begin{aligned} SNB &= \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{-\epsilon_i+1} (\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}}) \\ &+ \sum_{i=1}^{n} \left\{ \left((\frac{\hat{V_i}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(\hat{V_1}, \cdots, \hat{V_n}) \right) \hat{V_i} \right\} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(\hat{V_i}) - \overline{C_m} \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{-\epsilon_i+1} (\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \epsilon_i \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}}) - \sum_{i=1}^{n} \left\{ \hat{V_i} r_i \right\} C_t(\hat{V_1}, \cdots, \hat{V_n}) - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(\hat{V_i}) - \overline{C_m} \end{aligned} \tag{3.10}$$

この結果より、SNBは均衡における交通需要$\{\hat{V}_i|1 \leq i \leq n\}$のみの関数として表せるといえる。

さて、メンテナンスコストについての議論に移ろう。

各車種の交通需要に依存する可変部分は次のように表わせる。

$$C_{m_i} = M \times L \times N_i \times V_i \quad (i = 1, 2) \tag{3.11}$$

ここでは、劣化等価係数としてN_i:等価単軸荷重（ESAL:Equivalent Single Axle Load）を用いている。

$$N_i = (\frac{\omega_i}{80kN})^4 \tag{3.12}$$

各記号の意味は次の通りである。

ω_i:車種iの単軸荷重(kN)、

M:大型トラック（単軸荷重80kN）1台1km走行時の道路舗装劣化に対する再舗装費用(限界メンテナンスコスト)($/台・km)、

L:当該区間の道路延長(km)

である。

ここでは、各車種共に各車軸にかかる荷重のうち最大のものを単軸荷重として定義する。道路舗装の劣化は単軸荷重の4乗に比例するものとする。

そして、メンテナンスコストの固定部分は次のように表す。

$$\overline{C_m} = k_m \times L \tag{3.13}$$

k_m:交通量に関係なく必要な当該区間の道路1km、1時間あたりの資本コストと維持補修費用の合計(パラメータ) ($/km)

ここで、資本コストは当該区間あたりの高速道路のライフサイクルコストからランニングコストを差し引いたものを構造物寿命（hour）と当該区間延長（km）で割り、災害リスクや借入金の金利などを加味することで概算できる。固定的な維持補修費用は当該区間あたりの高速道路のランニングコストから可変メンテナンスコストを差し引き、単位時間（hour)、単位距離（km）あたりに換算することで概算できる。実際の計算では前年度までの年間ランニングコストの統計データを用いるなどして当該年度のランニングコストを予測できるものとする。

以上の設定を用いて、次節からはそれぞれのルールに従い通行料金を数式で表現していく。

3.2 FirstBestの料金

社会全体を一つの塊としてその中にいる各主体間の格差などを考慮に入れない場合、最適な料金政策としては社会的総余剰が最大になるような料金政策が考えられる。社会的総余剰は本来、消費者の総余剰、生産者の総余剰、政府の税収の合計で表現される。本研究で取り扱うシステム内（当該区間の高速道路）で考えると、社会的総余剰は前述のシステム全体の純便益（SNB）であるからこれが最大になる条件で通行料金を設定すればよい。この通行料金をFirstBestの通行料金と呼称する。

前節の結果を用いると、SNBが最大になるときのV_i^*は

$$\begin{aligned} &\frac{\partial SNB}{\partial V_i}(V_1^*, \cdots, V_n^*) = 0 \\ &\Leftrightarrow \ (\frac{V_i^*}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1^*, \cdots, V_n^*) - \sum_{i=1}^{n} \{V_i^* r_i\} \frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^*, \cdots, V_n^*) - \frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^*) = 0 \end{aligned} \tag{3.14}$$

の条件式を満たす。

これらn個の式からからなる連立方程式を解くことで、このルールにおける各車種の交通需要$\{V_i^* | 1 \leq i \leq n\}$が導かれる。この結果を用いると、FirstBestの料金設定τ_i^*は、

$$\begin{aligned} \tau_i^* &= P_i^* - C_{t_i}(V_1^*, \cdots, V_n^*) \\ &= (\frac{V_i^*}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1^*, \cdots, V_n^*) \\ &= \sum_{i=1}^{n} \{V_i^* r_i\} \frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^*, \cdots, V_n^*) + \frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^*) \end{aligned} \tag{3.15}$$

と表される。

上式において、第一項は車種iの交通需要変化による全車両の移動遅延コスト、第二項は車種iの需要変化による追加メンテナンスコストを表している。これらは、各車種の交通需要が変化することで引き起こされる社会的コストの変化量（社会的限界費用）を表している。

3.3 SecondBestの料金

さて、前節の料金設定では社会全体の便益は（社会的総余剰）は最大化されるが、高速道路事業者の利潤が負になる、すなわち赤字になる可能性がある（cf.$\overline{C_m}$が非常に大きいとき）。この場合、高速道路事業者が早晩破産し、長期的に見れば社会全体の厚生が著しく損なわれる危険性がある。そのため、そうならない条件の下でSNBを最大化するような料金設定を考える必要があるであろう。

本研究では各料金設定における各車種利用者の便益の比較を用意にするため、高速道路事業者がちょうど赤字にならないような、言い換えると利潤がちょうどゼロになるような料金設定を考える。このとき事業者の収入と支出は一致しているため次の条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{n}\tau_i V_i = \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(V_i) + \overline{C_m}\\ &\Leftrightarrow \quad \sum_{i=1}^{n}\left\{\left((\frac{V_i}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1,\cdots,V_n)\right)V_i\right\} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(V_i) - \overline{C_m} = 0\end{aligned} \tag{3.16}$$

ただし、$\tau_i = P_i - C_{t_i}(V_1,\cdots,V_n) = (\frac{V_i}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1,\cdots,V_n)$を用いた。これを制約式とし、SNBを最大化する非線形計画問題を解けばよい。この問題のラグランジアンを次のように定義する。

$$\begin{aligned}&L(V_1,\cdots,V_n,\lambda) = SNB(V_1,\cdots,V_n)\\ &\quad + \quad \lambda\left\{\sum_{i=1}^{n}\left\{\left((\frac{V_i}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1,\cdots,V_n)\right)V_i\right\} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(V_i) - \overline{C_m}\right\}\end{aligned} \tag{3.17}$$

ここで、事業者が赤字にならない範囲内でSNBを最大にする交通需要を$\{V_i^{**}|1 \leq i \leq n\}$とおくと、次の条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned}&\frac{\partial L}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**},\lambda) = 0\\ &\Leftrightarrow \quad (\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**} r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})\\ &+ \quad \lambda\left\{(1-\frac{1}{\epsilon_i})(\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}} - r_i C_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**} r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})\right\}\\ &= \quad 0\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**},\lambda)=0$$
$$\Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n}\left\{\left((\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}}-r_iC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})\right)V_i^{**}\right\}-\sum_{i=1}^{n}C_{m_i}(V_i^{**})-\overline{C_m}=0 \tag{3.19}$$

これら$(n+1)$個の式からなる連立方程式を解くことで、このルールにおける各車種の交通需要$\{V_i^{**}|1\leq i\leq n\}$とラグランジュ定数$\lambda$が導かれる。すると、SecondBestの料金は次のように表される。

$$\tau_i^{**}=(\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}}-r_iC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) \tag{3.20}$$

ここで式(3.18)に式(3.20)を代入した式のうち、車種$i,j(1\leq i\leq n,1\leq j\leq n,i\neq j)$に関する二式から$\lambda$を消去すると次式が導かれる。

$$\frac{-\tau_i^{**}+\sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**}r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})+\frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})}{\tau_i^{**}-\sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**}r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})-\frac{1}{\epsilon_i}(\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}}}$$
$$=\frac{-\tau_j^{**}+\sum_{j=1}^{n}\left\{V_j^{**}r_j\right\}\frac{\partial C_t}{\partial V_j}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})+\frac{\partial C_{m_j}}{\partial V_j}(V_j^{**})}{\tau_j^{**}-\sum_{j=1}^{n}\left\{V_j^{**}r_j\right\}\frac{\partial C_t}{\partial V_j}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_j}}{\partial V_j}(V_j^{**})-\frac{1}{\epsilon_j}(\frac{V_j^{**}}{Q_j})^{-\frac{1}{\epsilon_j}}} \tag{3.21}$$

両辺に-1を掛けて逆数を取ると、

$$1-\frac{\frac{1}{\epsilon_i}(\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}}}{\tau_i^{**}-\sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**}r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})}$$
$$=1-\frac{\frac{1}{\epsilon_j}(\frac{V_j^{**}}{Q_j})^{-\frac{1}{\epsilon_j}}}{\tau_j^{**}-\sum_{j=1}^{n}\left\{V_j^{**}r_j\right\}\frac{\partial C_t}{\partial V_j}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_j}}{\partial V_j}(V_j^{**})} \tag{3.22}$$

両辺から1を引いたものに-1を掛けて、もう一度逆数を取り、$(\frac{V_i^{**}}{Q_i})^{-\frac{1}{\epsilon_i}}=\tau_i^{**}+r_iC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})$、$(\frac{V_j^{**}}{Q_j})^{-\frac{1}{\epsilon_j}}=\tau_j^{**}+r_jC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})$、を用いると

$$\frac{\tau_i^{**}-\sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**}r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**})}{\tau_i^{**}+r_iC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})}\epsilon_i$$
$$=\frac{\tau_j^{**}-\sum_{j=1}^{n}\left\{V_j^{**}r_j\right\}\frac{\partial C_t}{\partial V_j}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})-\frac{\partial C_{m_j}}{\partial V_j}(V_j^{**})}{\tau_j^{**}+r_jC_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})}\epsilon_j \tag{3.23}$$

これは書き換えると、次のように表現できる。

$$\frac{(SecondBest\,\text{車種}i\,\text{料金}) - (\text{車種}i\,\text{社会的限界費用})}{\text{車種}i\,\text{一般化費用}} \times (\text{車種}i\,\text{需要価格弾力性})$$
$$= \frac{(SecondBest\,\text{車種}j\,\text{料金}) - (\text{車種}j\,\text{社会的限界費用})}{\text{車種}j\,\text{一般化費用}} \times (\text{車種}j\,\text{需要価格弾力性}) \tag{3.24}$$

FirstBest の料金設定は、各車種の利用料金を各車種の社会的限界費用に等しく設定するものである。しかし、赤字が出た場合は、事業者の赤字を相殺するために通行料金を社会的限界費用よりも高く設定する必要がある。この値上げされた料金が SecondBest の料金となる。

さてこのとき、(料金値上げ幅) = ($SecondBest$ 料金) − (社会的限界費用) であるから、これを用いて式 (3.24) を書き換えると、

$$\frac{\text{車種}i\,\text{料金値上げ幅}}{\text{車種}i\,\text{一般化費用}} \times \text{車種}i\,\text{需要価格弾力性}$$
$$= \frac{\text{車種}j\,\text{料金値上げ幅}}{\text{車種}j\,\text{一般化費用}} \times \text{車種}j\,\text{需要価格弾力性} \tag{3.25}$$

すなわち、

$$\text{車種}i\,\text{料金値上げ率} \times \text{車種}i\,\text{需要価格弾力性}$$
$$= \text{車種}j\,\text{料金値上げ率} \times \text{車種}j\,\text{需要価格弾力性} \tag{3.26}$$

が成り立っている。

式 (3.26) はラムゼイルールを表している。すなわち、SecondBest の料金設定においては、高速道路事業者が赤字にならないように通行料金を値上げする場合、交通需要の価格弾力性の低い車種ほど値上げ率が高くなるように設定しなければならない。そうでなければ制約条件下においての SNB 最大化が達成されないのである。

この解釈としては次のことが考えられる。つまり、交通需要の価格弾力性が低い車種は料金の値上げが大きくなっても交通需要があまり変化しない。よって、SecondBest

の料金設定における$SNB(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})$がFirstBestの料金設定における$SNB(V_1^{*},\cdots,V_2^{*})$からあまり乖離しないということになるのである。

一般的には、大型車より普通車の方が需要の価格弾力性が低いとされている[11)]ため、このSecondBestの料金設定（ラムゼイルールによる料金設定）では、普通車の料金負担が比較的大きくなることが予想される。

3.4 環境負荷を考慮したSecondBestの料金

前節では、システム全体の純便益(SNB)を計算するにあたり、主体を各車種利用者と高速道路事業者に限定していた。ここで、自動車交通が外部にもたらす環境負荷を考慮に入れるとSNBは環境負荷の分だけ差し引いて考えるべきであろう。

各車種が外部に与える環境負荷を次のように定義する。

$$E_i(V_i) = e_i \times L \times V_i \tag{3.27}$$

ここで、

E_i:車種i全体が外部に与える環境負荷（$）、

e_i:車種i一台が単位距離（km）走行あたり外部に与える環境負荷（$/台/km）（パラメータ）

である。

この項を導入すると、SNBは次のように表現される。

$$\begin{aligned} SNB &= \text{車種1利用者の総便益} + \cdots + \text{車種}n\text{利用者の総便益} \\ &+ \text{高速道路事業者の利潤} - \text{環境負荷} \\ &= \sum_{i=1}^{n} \frac{Q_i^{\frac{1}{\epsilon_i}}}{-\epsilon_i+1}(\overline{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}} - \hat{V_i}^{1-\frac{1}{\epsilon_i}}) + \sum_{i=1}^{n}\tau_i\hat{V_i} - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(\hat{V_i}) - \overline{C_m} - \sum_{i=1}^{n} e_i L\hat{V_i} \end{aligned} \tag{3.28}$$

これを基に順次計算していくと、式(3.23)は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} &\frac{\tau_i^{**} - \sum_{i=1}^{n}\{V_i^{**}r_i\}\frac{\partial C_t}{\partial V_i}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \frac{\partial C_{m_i}}{\partial V_i}(V_i^{**}) - e_i L}{\tau_i^{**} + r_i C_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})}\epsilon_i \\ &= \frac{\tau_j^{**} - \sum_{j=1}^{n}\left\{V_j^{**}r_j\right\}\frac{\partial C_t}{\partial V_j}(V_1^{**},\cdots,V_n^{**}) - \frac{\partial C_{m_j}}{\partial V_j}(V_j^{**}) - e_j L}{\tau_j^{**} + r_j C_t(V_1^{**},\cdots,V_n^{**})}\epsilon_j \end{aligned} \tag{3.29}$$

式(3.23)と比較すると、車種i, jが高速道路を通行するときに発生する社会的コストが社会的限界費用からそれぞれe_iL、e_jLだけ増加していると言える。すなわち、SecondBestの料金制度ではこの社会的コスト増加分を補填するため、各車両が外部に与える環境負荷の分だけ通行料金が割り増しされる。

なお、この環境負荷を考慮したSeconBestの料金制度は参考に留めておき、後の比較検討には用いない。

第4章　その他の料金設定

4.1　SecondBest料金の問題点

前節ではSNBの最大化を最適な料金設定の条件であるとの観点から、事業者が赤字にならないSecondBestの料金という一つの妥当な料金制度を定式化した。しかし、この料金制度は必ずしも最適であるとは言えないのではないか。例えば、この料金制度では価格弾力性の小さな車種ほど通行料金が割増されるが、それはすなわち普通車利用者の負担が大きくなってしまうということである。普通車の場合、平日であれば通勤のために高速道路を利用している利用者が多いはずである。もしも代替的な交通手段がない場合、彼らのトリップは利用料金が上がったとしても避け難く、日々の通勤手段として高速道路を利用しているならばなおさら彼らへの負担が大きくなってしまうことが予想される。

このことから、本節ではSecondBest料金以外の妥当な料金設定を考える。特に、普通車利用者の便益が損なわれないような料金設定として二つの料金設定案の定式化を行い、次節以降での比較検討に繋げたいと思う。

4.2　EU型環境負荷重課料金

4.2.1　背景

1999年に欧州委員会が制定した高速道路の利用料金に関する法的枠組みでは、利用料金は車種ごとにインフラの平均コストをベンチマークとすることが決められている。また、外部費用を含めることは禁止されており、利用者料金はインフラ関連のコストのみに基づき設定することとされている。これは、混雑費用や環境費用等の外部コストを利用者料金の制度から分離することを意味している。すなわち、この枠組みは利用者料金と混雑税や環境税等の税金を明確に区別しているのである。一方でこの枠組みの特徴として、利用者料金が車種ごとのインフラの平均コストをベンチマークとしながらも、それからの乖離を許容している点が挙げられる。平均コストからの乖離が許されるのは、第一にピークとオフピークの時

差料金（最大料金差100％）、第二に環境負荷の高い自動車への重課(最大料金差50％)である。これらの乖離はそれぞれの車両が実際に引き起こす混雑コストや環境コストに応じて決定されるわけではないことに注意したい。すなわち、高速道路利用者の交通需要を抑制しようという意図はない。これらの乖離はあくまで、新たなテクノロジー（鉄道におけるロジスティック改善による交通需要の鉄道分担率増加、環境負荷の小さい車両の開発、等）の導入へのインセンティブを社会へ与えることによって混雑や環境負荷の根本的解消を期待するものである。また、インフラ平均コストのうち、メンテナンスコストの固定部分の費用配分に関して車種ごとに細分化が試みられている。例えば、より大きな車両重量を支えるために必要な分厚い路盤のコストに関しては大型車両が、比較的早いスピード（時速130km程度）で走るために必要な幅広で曲線長の長い道路設計のコストに関しては小型車両が負担するべきであるとされている。[17)]

4.2.2 定式化

前小節で述べたような特徴を持つ利用者料金を「EU型環境負荷重課料金」と呼称し以下で定式化する。

まず、この環境負荷重課料金では交通需要の価格弾力性による料金区別はしていない。車種ごとの料金水準のベースとなっているのは、当該区間の道路インフラにかかるコストである。この車種ごとのインフラ平均コスト$+\alpha$（ピークとオフピークの時差料金、環境負荷の高い車両への重課）が利用者料金となる。そして、この$+\alpha$は、各車両の交通需要に関する社会的限界費用に関係なく決定される。大型車は普通車に比べ環境負荷が高い上に、利用料金以外でも実際に外部に与える環境コストによって環境税が課されることもあるため、このEU型環境負荷重課料金は大型車の利用料金が比較的高くなることが予想される。

なお本料金の定式化にあたっては、SecondBestの料金制度との比較を容易にするためにピーク・オフピークの時差料金は考慮に入れないことにする。

モデルで使用する記号はFirstBest・SecondBestの料金とほぼ同じであるが、新たな数値、

e_i:車種iのもたらす環境負荷に対する重課（$）（パラメータ）、

C_{c_i}:車種iに関する単位道路延長（km）単位時間（hour）あたりの高速道路構造コスト

($/km/hour)（パラメータ）、
D:料金割引率、
を加えて、車種iの通行料金を

$$\tau_i = \left(\frac{C_{m_i}(V_i) + C_{c_i} L}{V_i} + \frac{\overline{C_m}}{\sum_{i=1}^{n} V_i} + e_i \right) \times D \tag{4.1}$$

のように表す。

e_iは車種iが実際にもたらす厳密な環境負荷ではなく、各車種が外部に与える環境負荷の大小に応じた罰金のようなものである。C_{c_i}は当該区間の高速道路の資本コストを道路延長（km）と構造物寿命（hour）で割ったもののうち一部を、高速道路の構造（道路の幅、舗装の分厚さ、カーブの曲率、等）を考慮して各車種ごとに再配分したものである。Dはこの通行料金収入によって、高速道路事業者の利潤がちょうどゼロになるように調整するための料金割引率である。

この料金制度では、高速道路の維持補修費用の固定部分を各車両に平均的に分配した上で、各車種の通行によって生じる環境コストを料金に加えている。

このとき、通行料金収入が高速道路の維持補修費用をちょうどカバーする条件を

$$\sum_{i=1}^{n} \tau_i V_i = \sum_{i=1}^{n} \{C_{m_i}(V_i) + C_{c_i} L\} + \overline{C_m} \tag{4.2}$$

のように与えると、これらの式(4.1)、式(4.2)と式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)より、このルールでの均衡解が求められる。

4.3 維持補修費用平均分配料金

4.3.1 背景

普通車の利用料金が比較的高くなることが予想される「SecondBestの料金」と大型車の通行料金が比較的高くなることが予想される「EU型環境負荷重課料金」との間の中間的モデルとして「維持補修費用平均分配料金」を提案する。

この料金モデルでは、需要の価格弾力性による差別化も、環境負荷による差別化も行わない。そのため、普通車・大型車双方の利用料金の増加割合に差が出にくいと考えられる。よって、これを中間的なモデルと表現した。次小節でこの料金設定案を定式化する。なお、各記号の意味するところは記号が同一なものに関してはSecondBestの料金と同じである。

4.3.2 定式化

車種iの高速道路利用料金をそれぞれ次のように表す。

$$\tau_i = \frac{C_{m_i}(V_i)}{V_i} + \frac{\overline{C_m}}{\sum_{i=1}^{n} V_i} \tag{4.3}$$

この料金は、単純に可変メンテナンスコストを各車種の交通需要で、固定メンテナンスコストを全車両の交通需要で割ったものであり、価格弾力性にも環境負荷にも依存していない。さらには、社会的限界費用にも依存していない。前節のEU型環境負荷重課料金との一番の相違点は、各車種に対する環境付加への重課をなくしていることである。

このとき、以下が成り立っている。

$$\sum_{i=1}^{n} \tau_i V_i = \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(V_i) + \overline{C_m} \tag{4.4}$$

よって、

$$\begin{aligned} &(\text{高速道路事業者の利潤}) \\ &= \sum_{i=1}^{n} \tau_i V_i - \sum_{i=1}^{n} C_{m_i}(V_i) - \overline{C_m} = 0 \end{aligned} \tag{4.5}$$

すなわち、この場合高速道路事業者の利潤はちょうどゼロとなり赤字にはならない。式(4.3)、式(4.5)、そして式(3.1)、式(3.2)、式(3.3)による連立方程式を解けば、この利用料金についても均衡解が得られる。

第5章　数値シミュレーションによる分析

5.1　各モデルの具体化

本章では、これまでに示した料金制度案のうち、FirstBestの料金、SecondBestの料金、EU型環境負荷重課料金、維持補修費用平均分配料金に関して適当なパラメータ設定の下で数値シミュレーションを行う。

各モデルの具体的なパラメータ設定については一部をCHIH PENG CHU & JYH-FA TSAI,「Road pricing models with maintenance cost」(2004)から流用し、その他の数値は日本の首都高速道路株式会社が毎年発表している首都高速道路の維持修繕管理報告書を参考にする。首都高速道路では車種区分は普通車と大型車の二車種に分けられているのに加え、分析もし易いことから、本章でもこの二車種区分を採用する。なお日本の高速道路事業者のうち、首都高速道路株式会社・阪神高速道路株式会社では二車種、NEXCO東日本・NEXCO中日本・NEXCO西日本・本州四国連絡道路株式会社では五車種（二輪・軽自動車、普通車、中型車、大型車、特大車）に分かれた料金設定を採用している。

システム内の車両は首都高速道路の用いている車種区分によって普通車と大型車に分けられるが、このとき両車種の単軸荷重は**図–5.1**に示すように代表的に$8kN$、$80kN$と与えることにする。

そして、交通需要については、普通車の割合が高い場合、両車種の割合が同等の場合、大型車の割合が高い場合の計三通りのシミュレーションを行う。

以下で計算上のパラメータを示す。添え字$1,2$はそれぞれ1:普通車、2:大型車を表すものとする。

- 交通需要ポテンシャル（台）：$(Q_1, Q_2) = (2500, 500), (1500, 1500), (500, 2500)$
- 交通需要の価格弾力性（-）：$(\epsilon_1, \epsilon_2) = (0.65, 0, 85)$
- 時間価値（$/hour）：$(r_1, r_2) = (20, 20)$
- 交通需要基準値（台）：$(\overline{V_1}, \overline{V_2}) = (1, 1)$

- 等価単軸荷重（kN）:$(\omega_1, \omega_2) = (8, 80)$
- 自由交通流での移動時間（hour）：$t_0 = 0.1$
- BPR関数内のパラメータ（-）：$(\alpha, \beta) = (0.15, 4)$
- 基本交通容量（台）：$K = 3000$
- 固定部分のメンテナンスコスト係数（$/hour/km）：$k_m = 207$
- 可変部分の限界メンテナンスコスト（$/km/台）：$M = 0.1$
- 当該区間の道路延長（km）：$L = 6$

なお、EU型環境負荷重課料金については次に示すようにk_mを再定義し、数値をいくつか加える。

- 環境負荷に対する重課（$）:$(e_1, e_2) = (10, 100)$
- 高速道路構造コスト（$/km/hour）:$(C_{c_1}, C_{c_2}) = (10, 10)$
- 固定部分のメンテナンスコスト係数（$/hour/km）：$k_m = 187$

補足までに、対象区間は枝分かれのない1リンクからなる高速道路とする。延長は6(km)、制限速度は60$(km/hour)$であり、自由交通流における移動時間は0.1$(hour)$である。高速道路1kmあたりの建設費用は50億円であり、解体コストや災害リスクを考慮した資本コストは1kmあたり100億円、構造物寿命は100年であるとして、当該区間の単位時間（hour）あたりの資本コストを概算した。[16] 維持補修費用のうち、固定部分は舗装の上塗り以外に関する費用で当該区間1kmあたり年間8140万円程度であると仮定する。[14] なお、金額は100円＝1$と換算して計算している。

数値シミュレーションにあたっては、計算ソフトウェアである「GAMS」(General Algebraic Modeling System)を使用した。

5.2 各モデルの計算結果

5.2.1 $(Q_1, Q_2) = (2500, 500)$ の場合

表–5.1 参照

5.2.2 $(Q_1, Q_2) = (1500, 1500)$ の場合

表–5.2 参照

5.2.3 $(Q_1, Q_2) = (500, 2500)$ の場合

表–5.3 参照

5.3 計算結果の比較

まず、この数値シミュレーションでは、交通需要が少なく維持補修費用が高い道路を仮定している。なぜならば、交通需要が多く（=通行料金収入が多く）固定維持補修費用の安い道路であれば、FirstBestの料金（以下FB料金）において既に事業者が黒字を達成している可能性が高い。

このような状況の高速道路においては、通行料金は最早FB料金に設定すればよく、その他の料金設定について分析する必要性はあまりないであろう。

よって、以上の仮定の下での数値シミュレーションを行い、その結果を前節に示した。なお、比較のために各交通需要下での通行料金をグラフ化し、**図–5.2**、**図–5.3**、**図–5.4**に示す。

まず、FB料金において、SNBは最大化されているが事業者の利潤は負の値つまり赤字になっている。もしも、当該区間やその他の赤字区間での赤字分が小さく、黒字区間による黒字分がその赤字分を補填して余りあるならば、事業者の経営についてなんら問題は無いように思われる。しかし、もしも、事業者の有する道路区間の多くがこのような赤字区間であり、それでもなお公共の福祉のためそれらの道路区間の運営を継続すべきであるとすれば、事業者が赤字にならない程度の最低限の通行料金値上げは止むを得ないであろう。そして、そのような値上げは当該区間ごとに別々に行う、すなわち当該区間の値上げ分は当該区間の維持補修費用をカバーするためだけに利用する、というのが受益者負担の原則から考える一つの方策であろう。

さて、FB料金では事業者が赤字を出してしまう場合、赤字にならないような他の3つの料金制度、SecondBestの料金（以下SB料金）、EU型環境負荷重課料金（以下EU料金）、維持補修費用平均分配料金（以下ED料金）について考えねばなるまい。

まず、SB料金であるが、FB料金と比べると明らかに普通車の通行料金の値上げ率が高くなっている。その他料金設定との比較においても、FB料金からの普通車の値上げ率は最大であり、これは通行料金の絶対値そのものも最大となっていることを意味している。ちなみにこれは、FB料金からSB料金への料金値上げ率は交通需要の価格弾力性に反比例するという第三章における式展開から得られた示唆に合致している。以上のことから、確かにSB料金は普通車の利用者にとって最も負担の大きい通行料金であると言える。

次に、EU料金であるが、こちらは他の料金設定に比べて大型車の通行料金がかなり割高になっている。そのため、大型車の交通需要も減少し、維持補修費用総額も最も低い。SNBはわずかながらではあるがすべての料金設定中最小となる。

そして次に特筆すべきは、ED料金のSB料金からの乖離が非常に小さいことであろう。ほぼすべての変数がSB料金に近い値を示しており、SNBもSB料金に限りなく近い。そして推測どおり、交通需要やトリップ費用、通行料金などすべての数値がSB料金とEU料金の間にあり、これが中間的な料金制度であると分かる。このED料金のもう一つの特徴として、交通需要が大型車に偏るほどSB料金からの乖離が大きくなり、普通車の料金負担がSB料金に比べて軽くなるということが挙げられる。

また全体として言えることであるが、ちょうど赤字が出ない条件では各料金設定においてSNBに目立った差が現れていないことである。このことから、常識的な範囲内であれば多少の料金設定変更はその高速道路が社会に与える便益をそれほど損ねないということが言えるのではないか。

5.4 公平性について

公平な配分とはそもそもどういったものであろう。本研究では公平な配分の条件として、「ある配分がパレート効率性と羨望のない状態での衡平性の二つの基準を満たしている」というものを採用したい。[8)]

パレート効率的配分とは、「どんな別の配分を考えても全ての個人の状態を同時に出来る可能性がもはや存在しない」ような配分である。本研究においては、所得再分配や補助金・税金による事業者の赤字補填が許されず、よって事業者が赤字にならない分だけ通行料金を徴収するという状況を仮定している。この条件下での料金設定はどれもがすでにパレート効率性を満たしている。[7)]

しかし、家計と企業の間の支払い能力に大きな差があり、各家計間・各企業間での所得格差を高速道路の通行料金のみでは調整し得ない以上、「羨望のない状態での衡平」(equity of no-envy) は実現が難しい。

以上のことから本研究において、完全な「公平性」(fairness) を満たす料金設定の実現は困難であると考えられる。

これらを踏まえた上で、可能な限り各車種間の公平性の実現を考えるならば、通行料金設定にどのような配慮が必要であろう。

ここでは次の二つの仮定を置いている。第一に、普通車の多くは家計が所有しその主な用途は通勤トリップであるということ。第二に、大型車利用者の多くは企業でありその主な用途は物資の輸送であるということである。この二つの仮定より、通行料金の支払い能力は企業たる大型車利用者において高く、家計たる普通車利用者において低いということが言えるであろう。すなわち、支払い能力に応じた公平性（垂直的公平性）の課税原則に基づけば、普通車の料金よりも大型車の料金の方が割高になることが望ましいと考えられる。

5.5 政策的示唆

以上の計算結果と議論より、高速道路の維持補修費用をカバーしつつ、効率性や公平性の観点から望ましい通行料金の設定について次のような示唆が得られる。

まず、交通量が多く十分な料金収入が見込めるような区間においてはFB料金による料金収入で維持補修費用を賄うことができるため、FB料金が最適な料金設定であるといえる。この料金設定は、SNBを最大化するという意味において効率的であり、また垂直的公平性を満たし、外部性（維持補修費用固定部分、混雑コスト）も反映されている点で望ましい料金設定である。

次に、交通量が少なく十分な料金収入が見込めない場合、SNB最大化を重視するならSB料金が最適な料金設定となる。ただし、この料金設定では普通車の通行料金が最も高くなるため、普通車利用者が通勤などのために毎日使わざるを得ず、それでいて他の代替交通手段の無いような区間においてはこの料金設定は普通車利用者にとって少々負担の重い料金となるかもしれない。これは、垂直的公平性の観点からは必ずしも望ましいとはいえない。しかし、事業者に赤字が出ないようなその他の料金設定における普通車料金との比較において、料金にそれほどの差は

見られなかったことから、普通車利用者におけるこの程度の負担増はSNB最大化のために受容されるべきであるという考え方もあろう。

一方、EU料金では、他の料金制度と比べて大型車の通行料金がかなり大きくなっている。そもそも、EU料金は大型車に環境負荷への重課を課すことで、普通車の負担が小さくなるような料金制度として提案したものであるから当然といえば当然である。垂直的公平性や外部性の料金への反映を考えると、大型車の負担が大きいこの料金制度はそれなりの妥当性を持つ料金制度であろう。ただし、大型車通行の外部性を大きく評価しすぎるとあまりにも大型車にとって不利な料金となりかねない。しかも、大型車利用者の多くは企業であると仮定しているため、大型車利用者の負担増による企業所得低下や物流効率性悪化が廻り廻って普通車利用者すなわち家計の負担増に結びつくという可能性についても注意せねばなるまい。

また、他の観点からこの料金制度の利用価値を評価できるかもしれない。すなわち、この料金制度を普通車の負担を減少させるという目的のために利用するのではなく、ただ単に当該区間から環境負荷の高い大型車を排除するという目的のために利用するのである。この場合、この料金が設定されるべき区間というのは、交通量の少ない場所であれば自然や景観の保護区域や住宅地の近くや地盤の弱い区間、交通量の多い場所であれば道路としての能力が弱い区間（道路幅が狭い、斜線が少ない、構造が弱い、舗装が弱い）などであろう。

そして、SB料金では普通車利用者すなわち家計の負担が大きすぎるということであれば、SB料金の代わりにSB料金よりわずかに普通車の負担が小さいED料金を用いるのも手である。特に、SB料金では交通需要が大型車に偏るにつれて普通車の料金負担割合はさらに増加していく傾向にあるが、ED料金はそれに伴いSB料金から乖離していく。つまり、普通車の料金負担割合があまり増加しないのである。このため、この料金制度は、SNBがSB料金に近いという点で効率性が比較的高く、ある程度垂直的公平性と外部性（維持補修費用可変部分）の料金への反映も実現している点でバランスのとれた料金設定であると言えるのではないか。

第6章　おわりに

本研究では高速道路の資本コストを含む維持補修費用が通行料金収入のみによって完全に賄われる条件について論じ、条件を満たす料金制度を複数のルールに基づいて定式化した。さらに、数値シミュレーションによりそれぞれの料金制度に関して具体的な均衡分析を行い、その計算結果に示された料金配分の妥当性を公平性、外部性の料金への反映などの観点から評価した。維持補修費用は舗装の上塗りに関する可変部分とそれ以外の費用に関する固定部分に分割した。ここで、可変部分はそれぞれの車両の単軸荷重と交通需要に依存する費用となっている。

数値シミュレーションにおいて、交通量が多く通行料金収入が十分な区間においてはFirstBestの料金（FB料金）収入が維持補修費用を上回るため、SNBを最大化するという点でこの料金を最適な料金としてもよいであろう。

FB料金では事業者に赤字が出てしまう場合に関して三つの料金制度を提案した。これらの料金制度のうちSNBが最も大きくなるのはSecondBestの料金（SB料金）設定であるが、その他の料金設定においてもSNBはそれほど変わらない。このため、事業者にぎりぎり赤字が出ないような料金制度においては、そのSNBの大きさよりも各車種間の公平性の方が問題としては大きいように考えられる。それでもなお、SNB最大化を重視するのであればSB料金が効率的で最適な料金設定である。しかし、普通車の利用者はそのほとんどが家計であり、そのトリップは曜日や時間帯によっては通勤などの差し控えることのできないトリップであることが多い。そのため、垂直的公平性の観点からはSB料金は必ずしも望ましい料金制度とは言えない。SB料金では普通車利用者の負担が大きすぎるということであれば、それよりもいくらか普通車の負担が小さい維持管理費用平均分配料金（ED料金）が推奨される。この料金のメリットは、SNBがSB料金とあまり変わらないこと、そして交通需要がどちらかの車種に偏ったとしても各車種の料金の負担割合がほとんど変わらないことである。この料金制度はSB料金に近いという点で比較的効率的であり、公平性も若干考慮されている。また、EU型環境負荷重課料金は、垂直的公平性と外部性の料金への反映が実現できている点で望ましい。しかし大型車利用者の負担が過度にならないよう環境負荷の評価に対しては慎重になるべきである。

本研究では、交通量が比較的少なくFB料金では赤字になってしまうような道路区間で維持補修費用を完全に回収するような料金制度を、しかも比較のため事業者の便益がゼロになるような料金制度を議論した。しかし、実際の高速道路ではFB料金による通行料金収入で黒字が出るような区間もあり、しかも、全区間のFB料金収入が全区間の維持補修費用を上回るような事業者も存在するであろう。そのような事業者はその利潤をどのように取り扱うべきであろう。また、公共財たる高速道路を借り受けて運営している高速道路事業者が利益追求のために通行料金を値上げすることは妥当であろうか。

もしも、高速道路事業におけるサービス水準の向上や新規事業展開による高速道路利用者への利益還元が見込まれ、なおかつその還元による利用者便益の向上分が値上げによる利用者便益の低下分を上回るのであれば、事業者にある程度の利益追求を許すことは妥当であるといえるのではないか。このような点についての分析も課題として残っているであろう。

参考文献

1) CHIH-PENG CHU & JYH-FA TSAI.:Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, pp.457-477, 2004

2) Xiaolei Guo, Hai Yang.: Pareto-improving congestion pricing and revenue refunding with multiple user classes, *Transportation Reseach Part B*, Vol.44, pp.972-982, 2010

3) David M. Newbery.: Road Damage Externalities and Road User Charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, Mar.1988

4) Virginia Transportation Research Council.: Development of Truck Equivalent Single-Axle Load (ESAL) Factors Based on Weigh-in-Motion Data for Pavement Design in Virginia, *Final Report VTRC*, 09-R18, 2009

5) Shabi B. Anani, Samer M. Madanat.: Highway Maintenance Marginal Cost. What if the fourth power assumption is not valid?, *Transport Policy*, Vol.17, pp.486-495, 2010

6) Martin S. Feldstein.: Equity and Efficiency in Public Sector Pricing: the Optimal Two-Part Tariff, *the QUARTERLY JOURNAL OF ECONOMICS*, Vol.LXXXVI, No.2, pp.175-187, May.1972

7) 奥野正寛、鈴村興太郎.: ミクロ経済学I, 岩波書店, モダンエコノミックス.1, 1985

8) 奥野正寛、鈴村興太郎.: ミクロ経済学II, 岩波書店, モダンエコノミックス.2, 1988

9) 文世一.: 交通混雑の理論と政策 [時間・都市空間・ネットワーク], 東洋経済新報社, 313567

10) 土木学会.: 交通ネットワークの均衡分析 -最新の理論と解法-

11) 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 〜「地域における問題解決型社会実験」のとりまとめ〜, pp.51-54, 2005.11.10

12) 小澤隆「道路維持管理の現状と課題」、国立国会図書館調査及び立法考査局、リファレンス2007.4

13) 古川浩太郎「高速道路の通行料金制度-歴史と現状-」、国立国会図書館調査及び立法考査局、リファレンス2009.10）

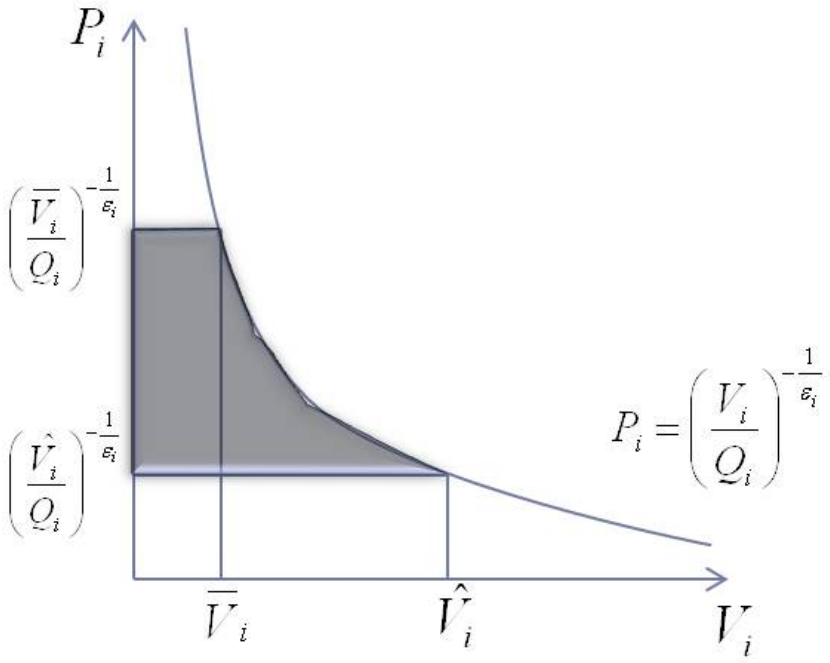
14) 首都高速道路株式会社.: 「都道首都高速１号線等に関する維持、修繕その他の管理の報告書（平成22事業年度）」, 平成23年8月4日公表

15) 首都高速道路株式会社.: 首都高辛口応援団～民営首都高のあり方を考える懇談会～（第１回）資料-3「首都高の現状」, 平成18年4月18日

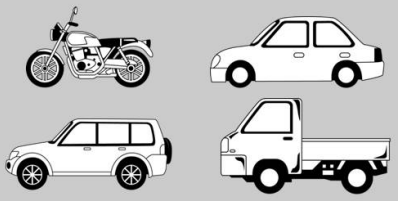
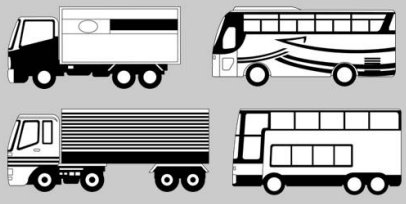
16) 国土交通省.: -記者発表資料-公共工事コスト縮減対策に関する新行動計画の平成12年度の実施状況について, 参考資料「我が国における公共工事コスト構造の特徴」, 平成13年8月21日

17) 運輸政策研究機構.: 季刊「運輸政策研究」, Vol.5, No.4, 2003 Winter, pp.091-094, 第21回運輸政策セミナー「ドイツにおける大型貨物自動車に対する高速道路料金－原理, 重要性, 将来の影響－」

付 録A　付図



図–3.1　利用者の便益

車種分類	1：普通車	2：大型車
車種イメージ		
対象車種	普通・小型乗用車 小型バス 普通・小型トラック 自動2輪車 軽自動車 小型特殊自動車	大型バス 大型トラック 大型特殊自動車 三軸のトラクター
単軸荷重（kN）	8	80

car illustration：「illustpop http://illpop.com/」

図–5.1　車 種 区 分

表–5.1　計 算 結 果：$(Q_1, Q_2) = (2500, 500)$

FistBestの料金

交通需要	V_1	1513.927
	V_2	210.666
トリップ費用	P_1	2.163
	P_2	2.765
通行料金	tau_1	0.131
	tau_2	0.732
利用者総便益	NB_1	4.7318E+5
	NB_2	6098.26
総料金収入	B_r	346.753
総維持補修費用	B_e	1368.486
事業者の利潤	B_c	−1016.61
システム総便益	SNB	4.7826E+5

EU型環境負荷重課料金

交通需要	V_1	1283.19
	V_2	143.485
トリップ費用	P_1	2.79
	P_2	4.344
通行料金	tau_1	0.775
	tau_2	2.328
利用者総便益	NB_1	4.7231E+5
	NB_2	5826.006
総維持補修費用	B_e	1328.168
システム総便益	SNB	4.7814E+5

SecondBestの料金

交通需要	V_1	1252.892
	V_2	176.056
トリップ費用	P_1	2.895
	P_2	3.414
通行料金	tau_1	0.879
	tau_2	1.399
利用者総便益	NB_1	4.7218E+5
	NB_2	5973.324
総維持補修費用	B_e	1347.708
システム総便益	SNB	4.7815E+5

維持補修費用平均分配料金

交通需要	V_1	1255.625
	V_2	173.029
トリップ費用	P_1	2.885
	P_2	3.485
通行料金	tau_1	0.869
	tau_2	1.469
利用者総便益	NB_1	4.7219E+5
	NB_2	5961.044
総維持補修費用	B_e	1345.893
システム総便益	SNB	4.7815E+5

表–5.2 計 算 結 果：$(Q_1, Q_2) = (1500, 1500)$

FistBestの料金

交通需要	V_1	922.876
	V_2	642.693
トリップ費用	P_1	2.111
	P_2	2.71
通行料金	tau_1	0.089
	tau_2	0.688
利用者総便益	NB_1	2.1433E+5
	NB_2	24735.19
総料金収入	B_r	524.432
総維持補修費用	B_e	1627.671
事業者の利潤	B_c	−1103.24
システム総便益	SNB	2.3797E+5

EU型環境負荷重課料金

交通需要	V_1	766.177
	V_2	466.271
トリップ費用	P_1	2.811
	P_2	3.954
通行料金	tau_1	0.802
	tau_2	1.945
利用者総便益	NB_1	2.1375E+5
	NB_2	24058.56
総維持補修費用	B_e	1521.809
システム総便益	SNB	2.3781E+5

SecondBestの料金

交通需要	V_1	724.829
	V_2	511.614
トリップ費用	P_1	3.061
	P_2	3.545
通行料金	tau_1	1.053
	tau_2	1.536
利用者総便益	NB_1	2.1356E+5
	NB_2	24258.19
総維持補修費用	B_e	1549.012
システム総便益	SNB	2.3782E+5

維持補修費用平均分配料金

交通需要	V_1	732.24
	V_2	503.284
トリップ費用	P_1	3.014
	P_2	3.614
通行料金	tau_1	1.005
	tau_2	1.605
利用者総便益	NB_1	2.1359E+5
	NB_2	24223.12
総維持補修費用	B_e	1544.015
システム総便益	SNB	2.3782E+5

表–5.3 計 算 結 果：$(Q_1, Q_2) = (500, 2500)$

FistBestの料金

交通需要	V_1	311.695
	V_2	1088.195
トリップ費用	P_1	2.069
	P_2	2.661
通行料金	tau_1	0.055
	tau_2	0.646
利用者総便益	NB_1	38726.39
	NB_2	46993.97
総料金収入	B_r	720.452
総維持補修費用	B_e	1894.936
事業者の利潤	B_c	−1174.48
システム総便益	SNB	84545.87

EU型環境負荷重課料金

交通需要	V_1	246.384
	V_2	790.698
トリップ費用	P_1	2.971
	P_2	3.874
通行料金	tau_1	0.966
	tau_2	1.87
利用者総便益	NB_1	38477.69
	NB_2	45874.94
総維持補修費用	B_e	1716.434
システム総便益	SNB	84352.63

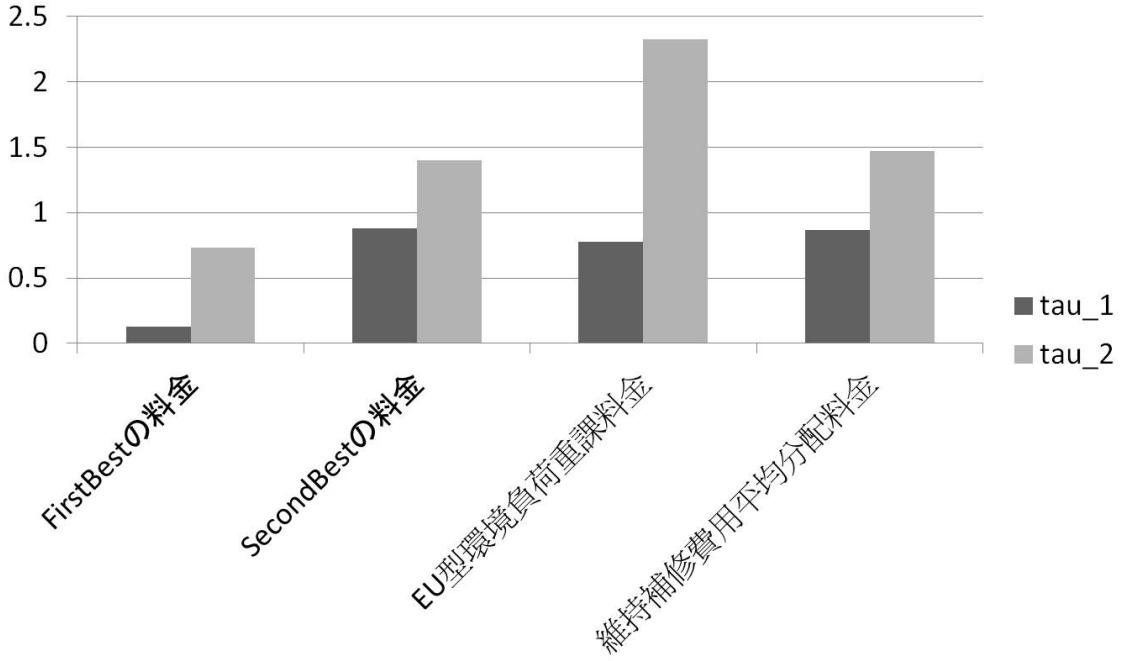
SecondBestの料金

交通需要	V_1	228.115
	V_2	811.317
トリップ費用	P_1	3.345
	P_2	3.758
通行料金	tau_1	1.34
	tau_2	1.754
利用者総便益	NB_1	38389.12
	NB_2	45967.49
総維持補修費用	B_e	1728.804
システム総便益	SNB	84356.61

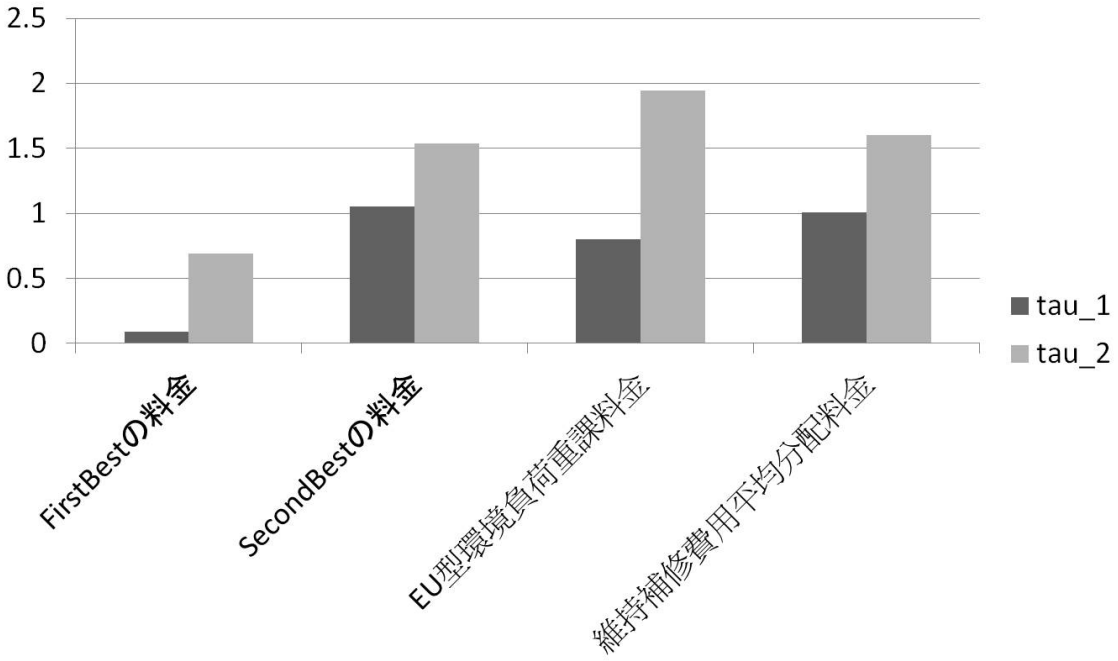
維持補修費用平均分配料金

交通需要	V_1	234.74
	V_2	803.692
トリップ費用	P_1	3.2
	P_2	3.8
通行料金	tau_1	1.196
	tau_2	1.796
利用者総便益	NB_1	38422.46
	NB_2	45933.59
総維持補修費用	B_e	1724.23
システム総便益	SNB	84356.06

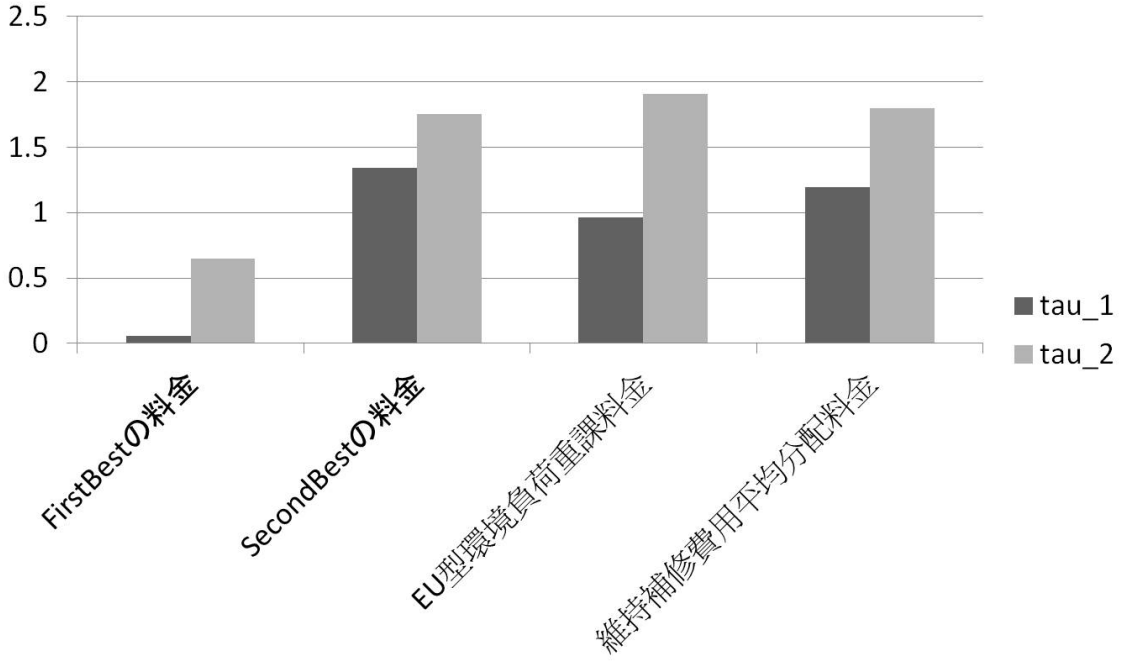
図–5.2 通行料金比較：$(Q_1, Q_2) = (2500, 500)$



図–5.3 通行料金比較：$(Q_1, Q_2) = (1500, 1500)$



図–5.4 通行料金比較：$(Q_1, Q_2) = (500, 2500)$



謝　辞

本論分を結ぶにあたって、本研究の遂行に際し御指導、御協力を頂きました多くの方々に感謝の意を表します。京都大学大学院工学研究科の小林潔司教授からは、研究に対する真摯な姿勢を学ばせて頂き、さらには大変御多忙な中、終始適切な御指導、御助言を賜りました。心から感謝申し上げます。京都大学大学院工学研究科の松島格也准教授には、研究に関する素養を始めとして、多くの有益な御指導と御教授を頂きました。厚く御礼を申し上げます。京都大学大学院工学研究科の大西正光助教には日ごろから公私に関わらず相談に乗って頂き、常に親切に御指導頂きました。厚く感謝の意を表します。京都大学大学院工学研究科の吉田護特定助教には、日ごろから様々な相談に乗って頂き、多くの励ましの言葉を頂きました。心から感謝申し上げます。京都大学大学院工学研究科の鄭蝦榮特定研究員には研究室に入った当初から常に親切に御指導頂きました。ここに、心より御礼申し上げます。京都大学大学院工学研究科の瀬木俊輔氏からは、本研究の遂行に際し終始一貫して懇切丁寧に御指導頂き、多大な御力添えを頂きました。感謝の念に堪えません。京都大学大学院工学研究科の田上貴士氏には本研究を進めるにあたり多くの有益な情報と御助言を賜りました。ここに感謝申し上げます。計画マネジメント論研究室の諸兄には、日頃から親身に相談に乗って頂き、その温かさは初めての研究生活にあたって心の支えとなりました。ここに深く感謝申し上げます。最後になりましたが、秘書の藤本彩氏は、日頃から事務上の手続きやお仕事に関しまして、いつでも非常に親切に対応して下さいました。心より感謝申し上げます。