

維持管理費用を考慮した  
最適高速道路料金政策に関する研究

田 上 貴 士

2015年



# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景	1
1.2	既往研究の概要	2
1.2.1	研究の必要性に関する実務的要請	2
1.2.2	既往研究の概要	4
1.3	研究の目的	6
1.4	本論文の構成	7
<b>第2章</b>	<b>道路の維持管理費用と料金設定に関する既存研究の体系的整理</b>	<b>11</b>
2.1	緒言	11
2.2	本章の基本的な考え方	12
2.2.1	既存研究の体系的整理の視点	12
2.2.2	本章の位置づけ	13
2.3	既存研究の体系的整理	13
2.3.1	道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究	13
2.3.2	維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存 研究	25
2.4	結言	29
<b>第3章</b>	<b>維持補修費用を考慮した次善高速道路料金に関する研究</b>	<b>39</b>

---

3.1	緒言	39
3.2	本章の基本的な考え方	41
3.2.1	既存研究の概要	41
3.2.2	道路の限界維持補修費用	43
3.2.3	分析の基本的枠組み	44
3.3	ネットワーク均衡モデル	45
3.3.1	前提条件	45
3.3.2	定式化	46
3.3.3	便益指標の定式化	50
3.4	固定需要型最適料金設定の分析	52
3.4.1	分析目的	52
3.4.2	固定需要型ネットワーク均衡モデルの定式化	53
3.4.3	固定需要型最適料金設定問題	55
3.4.4	車種別料金設定による大型車の経路誘導効果	58
3.5	変動需要環境下の次善料金設定の分析	64
3.5.1	分析方針	64
3.5.2	変動需要型次善料金設定問題	64
3.5.3	ラムゼイ型次善料金設定問題	68
3.5.4	ラムゼイ型次善料金設定の性質	71
3.5.5	車種別料金設定による大型車の経路誘導効果	73
3.5.6	政策的示唆	75
3.6	結言	77
3.7	付録Ⅰ 変動需要型次善料金設定に関する比較静学分析	79
3.8	付録Ⅱ ラムゼイ型次善料金設定に関する比較静学分析	80

---

第4章	道路舗装の限界維持補修費用に関する研究	87
4.1	緒言	87
4.2	本章の基本的な考え方	88
4.2.1	既存研究の概要	88
4.2.2	限界維持補修費用の定義	92
4.2.3	平均費用法	94
4.3	限界維持修繕費用のモデル化	95
4.3.1	限界維持修繕費用の算出方法	95
4.3.2	維持修繕費用の最小化	98
4.3.3	平均費用最小化法	99
4.3.4	割引現在価値最小化法	100
4.4	舗装の劣化過程のモデル化	100
4.4.1	前提条件	100
4.4.2	耐荷力の低下過程	101
4.4.3	路面の劣化過程	103
4.4.4	舗装全体の劣化過程	105
4.4.5	オーバーレイのみを考慮する場合の劣化モデル	107
4.5	ライフサイクルコストの定式化	108
4.5.1	平均費用最小化法によるLCC	108
4.5.2	割引現在価値最小化法によるLCC	110
4.6	適用事例	111
4.6.1	推計方法	111
4.6.2	分析結果	113
4.7	結言	119

---

<b>第5章</b>	<b>高速道路の維持修繕費用を考慮した効率的交通流配分に関する研究</b>	<b>125</b>
5.1	緒言	125
5.2	本章の基本的な考え方	126
5.2.1	従来の研究概要	126
5.2.2	本章の位置づけ	129
5.3	最適維持補修料金モデルの構築	130
5.4	適用事例	134
5.4.1	推計方法	134
5.4.2	大規模ネットワークデータの設定	136
5.4.3	推計結果	137
5.4.4	経路誘導の効果	139
5.4.5	維持修繕費用考慮の必要性	140
5.4.6	料金変化率を拡大した場合の次善解	141
5.4.7	実行可能な料金条件	142
5.4.8	高速道路の耐荷力向上投資の条件	142
5.4.9	高速道路の機能役割分担	144
5.5	道路の維持管理施策に関する考察	147
5.5.1	料金変更により維持修繕費用を低減・収支改善可能	147
5.5.2	高速道路の段階的機能役割分担の可能性	148
5.6	結言	149
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>155</b>
	謝辞	163

## 目 次

1.1	本論文の構成 . . . . .	7
3.1	普通車料金 $p_1^s$ の性質 . . . . .	71
3.2	大型車料金 $p_1^l$ の性質 . . . . .	72
5.1	数値シミュレーションの手順 . . . . .	136





## 表目次

2.1	道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究 . . . . .	13
2.2	維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究 . . . . .	25
3.1	固定需要型最適料金設定の効果 . . . . .	62
3.2	ラムゼイ型次善料金設定の効果 . . . . .	74
4.1	パラメータの推定結果（高速道路：舗装路面） . . . . .	114
4.2	パラメータの推定結果（一般道路：舗装路面） [13] . . . . .	114
4.3	パラメータの推定結果（高速道路：舗装全体：舗装耐荷力） [17] . . . . .	114
4.4	パラメータの推定結果（高速道路：舗装全体：路面健全度） [17] . . . . .	114
4.5	スケールパラメータの推定結果（高速道路：舗装全体） [17] . . . . .	115
4.6	高速道路（舗装路面）における大型車の限界維持補修費用の推計 結果 . . . . .	117
4.7	一般道路（舗装路面）における大型車の限界維持補修費用の推計 結果 . . . . .	117
4.8	高速道路（舗装全体）における大型車の限界維持補修費用の推計 結果 . . . . .	117
5.1	ルートサーチに用いる車種別代表時間評価値 . . . . .	135
5.2	事業者収支（高速道路事業者：億円/日） . . . . .	138
5.3	トータルコスト（システム全体：億円/日） . . . . .	138

---

5.4	維持修繕費用（システム全体：億円/日）	139
5.5	維持修繕費用（高速道路事業者：億円/日）	139
5.6	旅行時間コスト（システム全体：億円/日）	140
5.7	事業者収支（高速道路事業者：億円/日）	141
5.8	トータルコスト（システム全体：億円/日）	142
5.9	事業者収支：基幹幹線（高速道路事業者：億円/日）	143
5.10	トータルコスト：基幹幹線（システム全体：億円/日）	144
5.11	維持修繕費用：基幹幹線（システム全体：億円/日）	144
5.12	維持修繕費用：基幹幹線（高速道路事業者：億円/日）	145
5.13	高速道路の機能役割分担の効果（単位：億円/日）	146

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

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]と評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、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は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思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実証的に示した。ただし、道路の劣化要因として自然劣化が与える影響は大型車のそれよりも影響が大きい可能性があるものの、維持管理費用を誰がど

のように負担すべきかについて明確にはなっていない。

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速くなり、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、社会全体が負担する維持管理費用を最小化するという観点からは、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乘せすることは得策ではない可能性がある。

## 1.2 既往研究の概要

本論文の研究の必要性を踏まえた上で、関連する既往研究の概要を以下の通り整理した。

### 1.2.1 研究の必要性に関する実務的要請

日本の道路整備は建設から維持管理の時代に移行し始めたが、当然のことながら、日本の物流や産業を支える高速道路においても維持管理や大規模更新が必要となってきた。わが国では、基本的に税金を原資として一般道路の維持補修が実施されているが、高速道路を含む有料道路は利用者から徴収した料金を用いて維持補修が行われている。しかしながら、料金を徴収する有料道路の料金体系は主として有料道路の建設債務償還を目的として設定されており、維持管理費用を積極的に考慮したものとはなっていない。昨今の有料道路の無料開放に見られる通り、有料道路は債務償還後に無料開放され、債務償還後は税金を用いて維持補修が行われるようになる。しかしながら、今日では道路特定財源は一般財源化

され、また国及び多くの地方自治体の財政は基本的に赤字であり、有料道路の維持管理費用を税金から捻出することは困難な状況である。そこで、債務償還後も高速道路の料金を徴収しつつ、維持管理が可能となる制度設計が必要だと考えられる。

また、高速道路と一般道路では道路施設の頑丈さが異なり、大型車は一般的には高速道路よりも一般道路に対してより大きなダメージを与える傾向にある。そこで大型車を高速道路に誘導するような施策があれば、社会全体で発生する道路の維持管理費用を低減することも可能となる。例えば、大型車の高速道路料金を安くすれば、大型車の高速道路利用台数は増加し、社会全体で発生する道路の維持管理費用は減少すると考えられる。それに合わせて高速道路をより頑丈に整備すれば、高速道路で発生する維持管理費用を減少させるだけでなく、社会全体で発生する道路の維持管理費用を減少させることができると考えられる。大型車を高速道路に誘導するには、料金施策以外にも方法があると考えられる。例えば、法的な規制をかけること、大型車の走行ルートを予め設定する等も考えられる。しかしながら、自由な経済活動を過度に規制するのは困難であり、各経済主体がより経済合理的な判断を行えるような施策の方が望ましい。そのように考えると、高速道路の料金を変更することにより、各経済主体が合理的に判断することによって社会的に最適な状況に導くことが現実的である。そのため、高速道路の料金体系と維持管理費用の関係を交通モデルを用いて研究し、実務的に有効な施策を導くことが必要であると考えられる。

さらに、道路施設の劣化や維持管理費用に着目すると、道路の劣化過程は時間軸に関して確定的ではなく確率的に推移することが知られているが、オーバーレイ等の維持修繕工事は十数年以上で1回行われる等、頻度が少ないため、道路の維持補修費用を正確に算出するためには、実際の維持補修費用の支出だけではな

く、道路の劣化過程を考慮した上で将来の維持補修も見据えたトータルな維持補修費用を算出する必要がある。特に社会的に効率的な料金設定問題を分析するに当たっては、車両1台当たりの道路の限界維持補修費用が必要となる。欧米諸国では Cost Allocation Study と呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究により道路の限界維持補修費用を計算しているものの、日本においては道路の限界維持補修費用の公表値は筆者の知る限り存在しない。維持補修費用を考慮した日本の高速道路の料金設定問題を分析するにあたっては、日本における車両1台当たりの道路の限界維持補修費用の値が必須である。

以上を整理すると、現在、道路施設の劣化・老朽化の問題が顕在化してきており、高速道路の維持補修財源を確保することを目的とした高速道路料金に関する研究が重要な課題になっていると言える。また、以上の議論を踏まえ、本論文の研究分野は大きく2つに分けられる。1つ目は道路施設の劣化に起因して発生する維持管理費用の発生メカニズムに関する「道路舗装の維持管理費用の計算に関する研究」である。道路が利用されることにより道路施設がどの程度劣化し、維持管理費用がどの程度発生するのか、特に交通量と維持管理費用の関係を明確にする必要がある。2つ目は道路利用者が道路施設に与えるダメージを考慮した交通行動及び高速道路の料金体系検討に関する「道路の維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する研究」である。道路の維持管理のために料金収入を得つつも、高速道路の一部で料金変更をすることで社会全体の維持管理費用を低減することが可能かどうか、高速道路の料金体系と維持管理費用の発生メカニズムを明確にする必要がある。以上の2つの研究分野の概要を次節で紹介する。

### 1.2.2 既往研究の概要

本論文の研究分野における既往研究の概要を以下の通り整理した。既往研究の詳細については第2章を参照されたい。

### 道路舗装の維持管理費用の計算に関する研究

道路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 (2002,2006) [4]・[5]や Haraldson (2007) [6]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つの問題点があるため、本論文では採用しない。

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Newbery (1988) [7], Small and Winston (1988) [8], Small et al. (1989) [9]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。

Small et al.[9]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 Madanat (2010) [10]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、Anani (2008) [11]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。

### 道路の維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する研究

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。Mohring and Harwitz (1962) [12] 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) [13] 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) [7] 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、維持管理費用を考慮しない（混雑費用だけを考慮した）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。Chu and Tsai (2004) [14] 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。

### 1.3 研究の目的

本論文は、維持管理費用を考慮した高速道路料金体系のあり方に関する知見を得ることを目的とするものである。具体的には、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することにより、有料道路の管理体制や機能的役割分担の可能性に言及する。筆者の知る限り、このような研究事例は他に見当たらない。大規模ネットワークにおいて最適料金解を導く



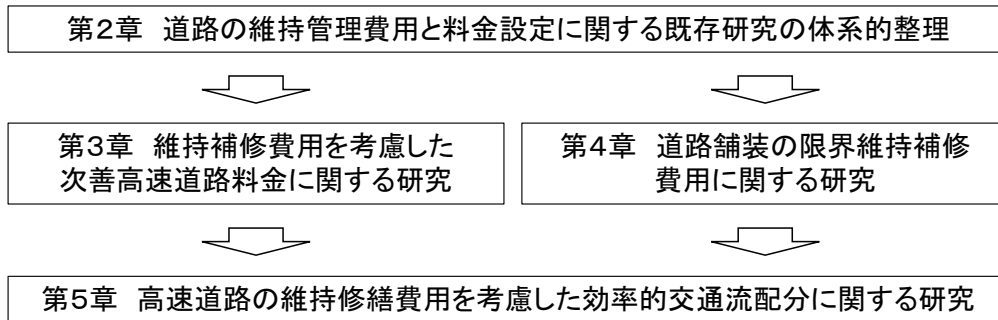


図 1.1: 本論文の構成

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の実施には莫大な時間を要するが、実際の道路ネットワークと同じ特性を持つと考えられる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。これが本論文の大きな特徴である。

また、本論文では道路舗装の劣化過程を表現した劣化モデルの推定結果および舗装補修・更新費用（オーバーレイ及び打換え）を用いて、道路舗装の限界維持補修費用を計算する方法を提案する。道路の頑丈さの違いを考慮するため、高速道路と一般道路の劣化予測モデルに関する既存研究の推定結果を活用し、車種別の限界維持管理費用を試算する。さらに、道路舗装の維持修繕に関する適用事例を通じて、維持管理費用推計モデルの有効性について考察する。筆者の知る限り、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は他に見当たらない。

## 1.4 本論文の構成

本論文は、第1章序論及び第6章結論を含め全6章で構成されている。第2章では維持修道路の繕費用と料金設定に関する既存研究レビューを行い、第3章で維持修繕費用を考慮した交通均衡基本モデルを構築した。第4章では道路の車種別限界維持修繕費用の試算を行い、第5章において維持修繕費用を考慮した高速道

路料金体系について検討した。

なお、第 2 章以降の概要は以下の通りである。

第 2 章では、道路の維持修繕費用及び料金設定に関する既存研究レビューを行い、既存研究の体系的整理を行う。具体的には維持修繕費用を考慮した交通モデルに関する研究と舗装の維持修繕費用を計算する研究を網羅的にレビューし、体系的に整理する。既存研究レビューの体系的整理により、維持修繕費用に関する研究の現状と課題を明確にし、他章における研究の一助とする。

第 3 章では、高速道路と代替的な一般道路が存在する環境における、維持修繕費用の外部性を考慮した second best の料金設定の効果を分析する。具体的には高速道路 1 リンクおよび一般道路 1 リンクの計 2 リンクのモデルを構築し、second best 下における効率的な料金設定に関する知見を得る。

第 4 章では、道路舗装の劣化過程を表現した劣化モデルの推定結果および舗装補修・更新費用（オーバーレイ及び打換え）を用いて、道路舗装の限界維持補修費用を試算する。具体的には、道路の頑丈さに着目し、高速道路と一般道路の車種別限界維持管理費用を試算し、考察を行う。

第 5 章では、大規模ネットワークを用いた維持修繕費用を考慮した高速道路の料金設定モデルを構築し、トータルコスト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および有料道路の維持管理運営制度等に関する知見を得る。

最後に第 6 章では、本論文で得られた知見をとりまとめるとともに、維持管理費用を考慮した高速道路の料金体系に関する研究のさらなる発展の道筋に触れ、本論文を結ぶ。

## 参考文献

- [1] ワトキンス・レポート 45 周年記念委員会編集：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，No.705, pp.99-118, 2009.
- [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] Link, H.: An econometric analysis of motorway renewal costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Newbery, D.M.: Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.

- [8] Small, K.A. and Winston, C.: Optimal highway durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.
- [9] Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A.: *Road Work: A New Highway Pricing and Investment Policy*, The Brookings Institution, Washington, D. C., 1989.
- [10] 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.
- [11] Anani, S. B. : Revisiting the estimation of highway maintenance marginal cost, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley 2008.
- [12] Mohring, H. and Harwitz, M. : *Highway Benefit : An Analytical Framework*, Northwestern University Press, 1962.
- [13] Mohring, H : *Transportation Economics*, Cambridge, Mass.,Ballinger Publishing, 1976.
- [14] Chu, C.P. and Tsai, J.F. : Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, No.4, pp.457-477, 2004.

## 第2章 道路の維持管理費用と料金設定に関する既存研究の体系的整理

### 2.1 緒言

道路の維持管理費用に関する問題は、高速道路等の整備が早く進んだ米国において顕著である。米国では1950年代には高速道路ネットワークが概ね完成したものの、1980年代初頭には「荒廃するアメリカ」と呼ばれるほど多くの道路施設が老朽化した。例えば、Small et al. (1989) [1] 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、維持管理費用の増大が深刻な課題となっている。

一方、日本においては、米国よりも高速道路ネットワーク整備が相当遅れており、一番最初の高速道路が整備されたのは1960年代であった。その後、高度経済成長を契機に高速道路ネットワークの整備が急速に進展したものの、日本全国の高速道路ネットワークは現時点においても完成していない。しかしながら、最も古い高速道路は建設後50年以上が経過し、一部においては老朽化が顕著となってきたこともあり、高速道路の大規模更新について検討され始めたところである。道路の新規整備から維持管理の時代へと移行し始めたと言える。

道路の維持管理に関して米国と日本では大きな違いがある。一般道路は米国も日本も税金によって維持管理されているが、米国の高速道路は無料であり税金で維持管理され、日本の高速道路は基本的に有料であり、徴収した料金を用いて維持管理がなされている。日本の有料道路は料金を徴収するが故に維持管理をしや

すい環境にあると思われがちだが、その料金体系は高速道路建設の債務償還を第一に考えられ設定されており、維持管理を積極的に考慮したものにはなっていない。有料道路の債務償還後は無料開放する前提であり、無料開放後の維持管理方法についての議論はまだなされていない。日本においても道路施設の劣化が今後大きく表面化してくると予想されることから、道路の維持管理費用と料金体系、維持管理体制等に関する研究が待たれている状況にある。

本章では、道路の維持管理費用を考慮した既存研究を体系的に整理し、研究課題を明確化、道路の維持管理に関する今後の研究への一助とする。以下、**2.2.**では本章の基本的な考え方を整理した。**2.3.**では既存研究のレビューおよび体系的整理を行い、**2.4.**では道路の維持管理費用に関する研究課題を整理した。

## 2.2 本章の基本的な考え方

### 2.2.1 既存研究の体系的整理の視点

本章では、第1章で記述したように、既存研究を道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究及び維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究の大きく2つに分けレビューを行い、体系的に整理する。

道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究については、維持管理費用の計算方法（計量経済学的アプローチ、工学的アプローチ）、舗装の劣化過程の扱い（確定的、確率的）、等の視点に基づき整理し、各論文についてレビューを行う。

維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究については、ネットワークの規模（簡易、大規模）、課金方法（First Best, Second Best）、等の視点に基づき整理し、各論文についてレビューを行う。

表 2.1: 道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究

計算手法	舗装の劣化過程 確定的	舗装の劣化過程 確率的
計量経済学的アプローチ	Link(2002,2006) Haraldson(2007)	—
工学的アプローチ	Newbery(1988) Small and Winston(1988) Small et al(1989) Lindberg(2002) Anani and Madanat(2010)	Liu(2003, 一部確率的) Haraldson(2007, 一部確率的) Anani(2008)

### 2.2.2 本章の位置づけ

本章では、道路の維持管理費用を考慮した既存研究を体系的に整理し、研究課題を明確化することを目的とする。筆者の知る限り、道路の維持管理費用に関する研究を体系的に整理し、課題を明確化した研究事例は他に見当たらない。

## 2.3 既存研究の体系的整理

### 2.3.1 道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究

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。なお、道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究を表 2.1 に整理した。

計量経済学的アプローチ

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。具体的には、クロスセクションのデータを基に、次の形の費用関数の推定が行われる。

$$E = f_o(x, Z_o) \quad (2.1)$$

ここで、 $E$  は舗装の維持管理費用を、 $x=(x_1, x_2, \dots, x_N)^T$  は  $N$  種類の全車種の交通量のベクトルを、 $Z_o$  はその他の説明変数のベクトルを表し、 $f_o$  は推定される関数である。 $E$  と  $x$  の単位の組み合わせは二つ存在する [2]。一つは、「セクション 1km あたりの費用」と「セクションの平均交通量」である。もう一つは、「セクションの総費用」と「セクションの総交通量× km」である。 $Z_o$  に含まれる説明変数としては、インフラの特性を表す変数（車線数、舗装の素材や構造に関する変数など）、地域を表すダミー変数、天候に係る変数などが使われる [3]・[4]・[5]。

具体的な費用関数の関数形としては、例えば、次のようなものが使用される。

$$\begin{aligned} \ln E_v = & \zeta_0 + [\ln x]_v^T \zeta_1 + [(\ln x)^2]_v^T \zeta_2 \\ & + Z_{ov}^T \eta + \epsilon_{ov} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここで、 $\ln x$  は、 $\ln x_1, \ln x_2, \dots, \ln x_N$  を要素とするベクトルを表す。 $(\ln x)^2$  は、 $(\ln x_1)^2, \ln x_1 \ln x_2, (\ln x_2)^2$  など、 $\ln x_v \ln x_v (v, v = 1, 2, \dots, N)$  と表せる項を要素とするベクトルを表す。 $\zeta_0, \zeta_1, \zeta_2, \eta$  は推定されるパラメータ、 $v$  はセクションを表す番号、 $\epsilon_o$  は誤差項である。この形式の費用関数は、Link[3]・[4] や Haraldson[5] 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り大きく変動し、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。そのため、各年度の維持管理費用は、修繕工法の実施の有無により大きく異なったものとなるため、 $E$ には単年度の維持管理費用ではなく、観測期間にわたる1年あたりの維持管理費用の平均値を用いる必要がある。

### 工学的アプローチ

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Newbery[6]、Small and Winston[7]、Small et al.[1]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 [8]・[9]・[10]。

Small et al.[1]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 Madanat[9]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、Anani[10]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。

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)[11]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、三重県の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。小林他(2008)[12]は、M県の国道のわだち掘れのデータを用いて、

測定誤差を考慮した劣化予測モデルの推計を行った。貝戸他（2005）[13]、青木他（2006）[14]は、橋梁部材の劣化モデル及び補修戦略を設定した上でライフサイクルコストを最小化する評価方法について検討し、割引現在価値評価法よりも平均費用評価法の方がトータルコストを最小化することを示した。

以下、工学的アプローチによる維持管理費用の計算方法を紹介する。

### 基本的な計算手法

Small et al.[1]等が用いた計算手法では、次の6つの仮定の下に費用関数の計算が行われる。

1. 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（他の工法は考慮しない）。
2. 舗装の健全度が一定の管理限界に達するとオーバーレイが行われる。
3. 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に回復する。
4.  $N$ 種類の全車種の交通量  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  は通時的に一定である。
5. 道路は永久に供用され続ける。
6. 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。

以上の6つの仮定の下では、一定の時間間隔  $T_o$ （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  $T_o$  は交通量  $x$  の関数として表すことができる。この関数を  $T_o(x)$  と表す。この関数  $T_o(x)$  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  $x$  の関数として表すことが可能になる。

推定された関数  $T_o(x)$  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回実施するのに必要な費用（金額は基準年度の物価に合わせているとする）を  $U_o$  (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、

$$\begin{aligned} V &= U_o e^{-rT_o(x)} + U_o e^{-r \cdot 2T_o(x)} + U_o e^{-r \cdot 3T_o(x)} + \dots \\ &= \frac{e^{-rT_o(x)}}{1 - e^{-rT_o(x)}} U_o = \frac{1}{e^{rT_o(x)} - 1} U_o \end{aligned} \quad (2.3)$$

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  $E$  (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、

$$V = \int_0^{\infty} E e^{-rt} dt = \frac{E}{r} \quad (2.4)$$

が成立する必要がある。この式を  $e$  について解くと  $E = rV$  が得られる。この  $E$  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  $E$  円の収入を得る必要があることになる。式 (2.3) と式 (2.4) 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、

$$rV = \frac{r}{e^{rT_o(x)} - 1} U_o \quad (2.5)$$

と求められる。式 (2.5) の右辺が費用関数となる。式 (2.5) の右辺は、 $r \rightarrow 0$  とするとき、 $U_o/T_o(x)$  に収束することに注意しよう。 $U_o/T_o(x)$  は、1年当たりのオー

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(2.5)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  $T_o(x)$  を推計する必要がある。この推計には、**a)** で解説した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、Newbery[8] 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  $T_o(x)$  を計算している。

以上が Small et al.[1] 等が用いた計算手法の概要である。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。よって、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(2.5)の右辺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  $T_o$  は、厳密には、 $x$  の関数ではなく、最外側車線を利用する交通量  $\lambda_o x$  の関数として表されるべきものである。ここで、 $\lambda_o$  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。

## 舗装の最適設計問題

Small and Winston[7], Small et al.[1] は、式 (2.3) で表されるオーバーレイの費用の割引現在価値を用いて、道路の供用に必要な費用を最小化する舗装厚を求める最適化問題を定式化している。この最適化問題は以下のように定式化されている。

オーバーレイが行われる時間間隔  $T_o$  が、交通量  $x$  と舗装厚  $D_p$  の関数  $T_o(x, D_p)$  として推定されているものとする。舗装厚が厚いほど舗装の劣化速度は遅くなるので、 $\partial T_o / \partial D_p > 0$  が成立するものとする。道路の建設費用  $F_A$  を、舗装厚  $D_p$  の関数として  $F_A(D_p)$  と表す。舗装厚を厚くするほど建設費用は増加するので、 $dF_A/dD_p > 0$  が成立する。オーバーレイを 1 回行うのに要する費用  $U_o$  は、舗装厚に依存しないものとする。

建設直後の道路の舗装は、最も健全な状態にあるため、道路の建設完了時点を基準にしたときの、将来に生じるオーバーレイの費用の割引現在価値は、式 (2.3) で表される。道路の供用に必要な費用は、建設費用とオーバーレイの費用の和で表されるものとする。道路の供用に必要な費用を最小化する、最適な舗装厚  $D_p$  を求める問題は、

$$\min_{\{D_p\}} F_A(D_p) + \frac{1}{e^{rT_o(x, D_p)} - 1} U_o \quad (2.6)$$

と定式化することができる。

この最適化問題の解を、 $x$  の関数として  $D_p(x)$  と表そう。このとき、交通量が舗装の設計に影響を及ぼすことも考慮した、1 年当たりのオーバーレイの費用の費用関数は、

$$\frac{r}{e^{rT_o(x, D_p(x))} - 1} U_o \quad (2.7)$$

と表すことができる。

### 維持工法を考慮した計算手法

Small et al.[1] 等が用いた基本的な計算手法は、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。この手法は、オーバーレイの費用を除いた維持管理費用が、交通量にあまり依存しないという前提に立っていると見える。しかし、交通量の多寡は、オーバーレイだけではなく、パッチング、シーリング等の維持工法の実施頻度や、オーバーレイ以外の修繕工法（打換え等）の実施頻度にも影響を及ぼす。よって、オーバーレイ以外の維持工法・修繕工法を無視して費用関数を計算すると、交通量と舗装の維持管理費用の関係を正確に捉えきれない可能性がある。Anani and Madanat[9] は、基本的な計算手法のこうした問題点を指摘し、維持工法・修繕工法として、オーバーレイの他にパッチングを考慮した計算手法を提案している。以下では、この計算手法を解説する。

交通量  $x$  が通時的に一定であること、道路が永久に供用され続けることは、基本的な計算手法の場合と同様に成立するものとする。最外側車線とそれ以外の車線の舗装の劣化状態を区別して扱う手間を省くため、道路は1車線であるものとする。オーバーレイは、舗装のわだち掘れが管理限界に達すると行われるものとし、パッチングは、舗装のひび割れが管理限界に達すると行われるものとする。オーバーレイを行うと、わだち掘れとひび割れの双方が解消されるものとする。パッチングを行うと、ひび割れは解消するが、わだち掘れは解消しないものとする。わだち掘れが解消されてから、わだち掘れが再び管理限界に達するまでに要する時間は、交通量  $x$  の関数として  $T_R(x)$  (年) と表されるものとする。ひび割れが解消されてから、ひび割れが再び管理限界に達するまでに要する時間は、交通量  $x$  の関数として  $T_C(x)$  (年) と表されるものとする。ひび割れの方が、わだち掘れよりも管理限界に達しやすく、 $T_C(x) < T_R(x)$  が成立するものとする。

以上の仮定の下では、わだち掘れが管理限界に達する度にオーバーレイが行わ

れるため、オーバーレイは常に  $T_R(x)$  (年) の間隔を置いて行われる。パッチングは、わだち掘れが管理限界に達する度に行われるが、常に  $T_C(x)$  (年) の間隔を置いて行われるわけではない。オーバーレイが行われると、わだち掘れとともにひび割れも解消するため、パッチングを行う時刻が延期されるからである。

オーバーレイが実施されてから、次のオーバーレイが行われるまでの間に、パッチングが行われる回数を  $n_p$  とすると、

$$n_p = \left\lfloor \frac{T_R(x)}{T_C(x)} \right\rfloor \quad (2.8)$$

が成立する。

以上の前提を用いると、オーバーレイとパッチングの費用の割引現在価値を計算することができる。オーバーレイを1回行うのに要する費用を  $U_R$ 、パッチングを1回行うのに要する費用を  $U_C$  とする。費用の割引現在価値を計算する基準時点は、オーバーレイが行われた直後であるものとする。オーバーレイとパッチングの費用の割引現在価値  $V$  は、

$$\begin{aligned} V &= \sum_{v=1}^{n_p} U_C e^{-rvT_C(x)} \\ &\quad + \sum_{v=1}^{\infty} \left[ U_R + \sum_{v=1}^{n_p} U_C e^{-rvT_C(x)} \right] e^{-rvT_R(x)} \\ &= U_C \sum_{v=1}^{n_p} e^{-rvT_C(x)} \\ &\quad + \frac{U_R + U_C \sum_{i=1}^{n_p} e^{-rvT_C(x)}}{e^{rT_R(x)} - 1} \end{aligned} \quad (2.9)$$

と計算できる。1年当たりのオーバーレイとパッチングの費用と交通量の関係を表す費用関数は、式(2.9)の右辺に  $r$  を掛けることで求めることができる。

Anani and Madanat は、以上の手法を用いて限界維持管理費用を計算し、以下の二つの結論を導いている。まず、パッチング等の維持工法の実施に要する費用は、限界維持管理費用の適切な計算のためには無視できない。次に、オーバーレ

イとパッチングのように、ある工法の実施が、他の工法の実施時刻を遅らせるといふ効果を持つ場合、限界維持管理費用の適切な計算のためには、そのような効果を考慮に入れた計算を行う必要がある。

### 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、Liu[15]、Haraldsson[16]、Anani[10]を挙げることができる。

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、筆者の知る限りAnani[10]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6つの仮定のうち、(a)-(e)の5つ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 $T_o$ 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 $f_p(T_o)$ に従うものとする。確率密度関数 $f_p(T_o)$ の形状は交通量 $x$ に依存するものとし、この関係を明示的に $f_p(T_o|x)$ 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。

$$V = E \left[ \sum_{v=1}^{\infty} U_o \exp \left( -r \sum_{v=1}^v T_{ov} \right) \right] \quad (2.10)$$

ここで、 $U_o$  はオーバーレイを 1 回行うのに要する費用を表す。 $T_{ov}$  は、 $v-1$  回目のオーバーレイが行われてから、 $v$  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）。 $T_{ov}$  ( $v = 1, 2, \dots$ ) は i.i.d. であり、確率密度関数  $f_p(T_o|x)$  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。 $v$  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  $\sum_{v=1}^v T_{ov}$  となることに注意すれば、式 (2.10) は式 (2.3) と同様の考え方に基づいたものであることがわかる。

式 (2.10) 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。

$$\begin{aligned} V &= E[(U_o + V)e^{-rT_o}] \\ &= \int_0^{\infty} (U_o + V)e^{-rT_o} f(T_o|x) dT_o \\ &= (U_o + V)E[e^{-rT_o}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

この方程式を  $V$  について解くと、

$$V = \frac{E[e^{-rT_o}]}{1 - E[e^{-rT_o}]} U_o = \frac{1}{(E[e^{-rT_o}])^{-1} - 1} U_o \quad (2.12)$$

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 (2.12) 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。

### 限界維持管理費用

上記で整理した維持管理費用を計算する既存研究では、費用関数を計算するよりもむしろ、交通量に関する限界維持管理費用を計算することを目的としている。欧米諸国を中心として実施されてきた、Cost Allocation Study と呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究は、受益者負担の原則に立つとともに、「各車種の利用者は、その車種が道路を利用することにより生じる費用を負担すべきである」という考え方に基づいて、各利用者が負担すべき費用の割合を計算している[17][18]。そこでは、維持管理費用のうち交通量に依存する可変部分、および道路の建設費用のうち道路の耐久性を高めるのに要する費用については、重量の重い車両ほどその発生に対する寄与が大きいため、GVM-km などに応じた費用配分が行われている。そして、それ以外の費用については、台-km などに応じて、全車種に対して中立的に費用配分が行われている。

Cost Allocation Study と同様の考え方にに基づき、舗装の維持管理費用を利用者に配分するためには、維持管理費用のうち可変費用は何割であり、各車種は可変費用の何割に寄与しているのかを計算する必要がある。Cost Allocation Study においても、そのような計算は行われているが、その具体的な計算過程は明らかにされていないことが多い。よって、これらの研究のみを参考にして、各車種が負担すべき舗装の維持管理費用の割合を求めることはできない。

米国州間高速道路の Cost Allocation Study[19]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

表 2.2: 維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究

ネットワーク規模	First Best	Second Best
1リンク	Newbery(1988,1989) Small and Winston(1988) Small et al(1989) Chu and Tsai(2004) 松原・小林 (2012)	Chu and Tsai(2004) 松原・小林 (2012)
2リンク	田上・瀬木・小林 (2012)	Verhoef et al.(1996) Arnott and Yan(2000) Small and Yan(2001) Rouwendal and Verhoef(2004) Verhoef and Rowendal(2004) Chu and Tsai(2004) 田上・瀬木・小林 (2013)
大規模ネットワーク	—	田上・瀬木・小林 (2013)

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。乗用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（ESAL）について非線形に増加することが確認できる。なお、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当たらない。

### 2.3.2 維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究

道路利用に伴う外部性の問題を軽減するための料金施策については、膨大な既存研究が蓄積している [20]。それらの研究の多くは、混雑費用の外部性の問題を軽減するための料金施策を分析しているが、それらの分析枠組み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施策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とする研究と、多数のリンクから構成される実際的なネットワークを分析対象とする研究に大きく分けられるが、筆者の知る限り、実際的なネットワークにおける研究事例は見当たらない。

なお、維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究を表 2.2 に整理した。以下、維持管理費用を考慮した交通基本モデル及び簡易ネットワークに関する研究事例を紹介する。

### 維持管理費用を考慮した交通基本モデルに関する研究事例

Mohring and Harwitz (1962) [21] 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（Self-Financing の定理）。その後、この定理は舗装の効率的な耐久性設計や維持管理費用の変動部分を考慮しても成立すること [22]、複数のリンクから構成される高速道路についても成立すること [23]、交通需要が通時的に変動する環境においても成立すること [24]、が示されている。

Mohring (1976) [25] 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が走行す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 (1988) [6] 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ず、一定の条件が満たされた場合に得られる限界費用料金設定により、道路の建設費用と維持管理費用を賄うことが可能であると示した。

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 [6]。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 Chu and Tsai (2004) [26] においても採用し、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。

- 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 [27]。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 (E T C 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、舗装修繕、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。

### 簡易ネットワークによる研究事例

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[6][21]、Small and Winston[7]、Small et al.[1]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.[28]によって初めて詳細な分析がなされた。その後、このように簡易なネットワークを想定した場合のsecond bestの料金設定については、リンク間の代替性が不完全である状況[29][30]や、利用者の時間価値に異質性が存在する状況[31][32]について分析が行われている。

Chu and Tsai (2004) [26]は、高速道路の効率的な料金設定を分析し、維持管理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、社会的厚生および維持管理費用カバー率（料金収入/維持管理費用）が向上することを示した。その際、高速道路の管理者が費用を全て料金収入により賄わなければいけない状況や、高速道路と代替的な一般道路が存在する状況におけるsecond bestの料金設定の分析も行っている。ただし、Chu and Tsaiの研究では高速道路の限界維持管理費用が一般道路の限界維持管理費用よりも高い状況が想定されており、数値的な

分析は一通りのパラメータ設定の下でしか行われておらず、異なる車種の利用者の余剰に料金設定が及ぼす影響についても分析がなされていない。また、維持管理費用の固定部分の公平な車種別負担方法についての検討は行っていない。

松原・小林（2012）[33]は、Chu and Tsai（2004）[26]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）[34]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すると、より頑丈な高速道路の方へ大型車を多く通行させることにより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。

## 2.4 結言

本章では、高速道路の料金体系と維持管理費用に関する既存研究のレビューを行い、ネットワークの特徴や課金方法、計算方法等の視点に基づき既存研究を体系的にし整理し、研究の進捗状況を明確化した。具体的には、既存研究は大きくは道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究および道路の維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究の2分野に分類し、整理を行った。

道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究については、舗装の劣化過程の表現方法が確定的か確率的かどうか、維持管理費用の計算方法は計量経済学的

アプローチか、もしくは工学的アプローチかどうかで既存研究を分類し、各研究の特徴と課題を整理した。道路の維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究については、導かれる解が最適解（First Best）か次善解（Second Best）かどうか、ネットワーク規模は1リンクか2リンク、もしくは大規模ネットワークかどうかで既存研究を分類し、各研究の特徴と課題を整理した。

高速道路の料金体系と維持管理費用に関する研究課題として大きくは以下の2つが挙げられる。

1つ目の研究課題として、道路舗装の維持管理費用及び限界維持管理費用の基本的な計算手法の構築が挙げられる。道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究はいくつかあるものの、道路舗装の詳細な劣化過程を考慮した工学的なアプローチによる維持管理費用の研究事例は、筆者の知る限り見当たらない。また、道路舗装のオーバーレイのみではなく打換えも含めた維持管理費用や、路面の健全度と舗装耐荷力の相互関係の劣化過程を考慮した維持管理費用の研究事例は見当たらない。日本においても道路インフラの劣化が今後より進展すると想定されており、道路舗装の劣化過程を考慮した工学的に精度の高い維持管理費用の計算方法の提案が必要とされている。また、車種別の限界維持管理費用については、海外では検討されているものの、日本においては研究事例が見あたらず、社会的に最適な維持管理費用の負担方法を考慮するための基礎資料として、車種別限界維持管理費用の研究報告が待たれるところである。

2つ目の研究課題として、維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルの構築が挙げられる。1リンクや2リンクの単純なネットワークであれば、限界費用料金が社会的に最適な料金になり、最適料金を解析的に導くことはそれほど難しくはない。しかしながら、大規模ネットワークは一般道路と有料道路が複雑に入り組んでおり、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。筆者の知る限り、維持管理費用を考慮した大規模ネットワークにおける料金体系に関する研究事例は見当たらないが、実際の交通ネットワークを表現したモデルを用いることで、より具体的な施策提言が可能となるため、大規模ネットワークを用いた維持管理費用を考慮した有料道路の料金体系の研究報告が待たれるところである。

道路の維持管理の時代において上記2つの研究課題の重要性は言うまでもなく、道路の維持管理を考慮した実務的な研究の進展と実社会への貢献を祈願し本章を終わりとしたい。



## 参考文献

- [1] Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A.: *Road Work: A New Highway Pricing and Investment Policy*, The Brookings Institution, Washington, D. C., 1989.
- [2] Herry, M. and Sedlacek, N.: Road econometrics - case study motorways Austria, *Annex A1 c of Deliverable 10 of Unite*, Funded by the European Commission 5th Framework - Transport RTD, ITS, University of Leeds, 2002.
- [3] Link, H.: An econometric analysis of motorway renewal costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Newbery, D.M.: Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- [7] Small, K.A. and Winston, C.: Optimal highway durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Anani, S.B.: Revisiting the estimation of highway maintenance marginal cost, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley 2008.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 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, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- [14] 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, No.23, pp.39-50, 2006.
- [15] Liu, P.: Optimal pavement design under uncertainty, *Working Paper*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley 2003.
- [16] 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.

- [17] Bruzelius, N.: Measuring the marginal cost of road use - An international survey, *VTI Meddelande 963A*, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Sweden, 2004.
- [18] Link, H., Dodgson, J.S., Maibach, M. and Herry, M.: *The Costs of Road Infrastructure and Congestion in Europe*, Physica Verlag, Heidelberg, 1999.
- [19] Federal Highway Administration: *Addendum to the 1997 Federal Highway Cost Allocation Study Final Report*, United States Department of Transportation, 2000.
- [20] Tsekeris, T. and Vos, S.: Design and evaluation of road pricing: State-of-the-art and methodological advances, *Netnomics*, Vol.10, pp.5-52, 2009.
- [21] Mohring, H. and Harwitz, M. : *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.
- [22] Newbery, D.M.: Cost recovery from optimally designed roads, *Economica*, Vol.56, No.222, pp.165-185, 1989.
- [23] Yang, H. and Meng, Q.: A note on "Highway pricing and capacity choice in a road network under a Build-Operate-Transfer scheme", *Transportation Research Part A*, Vol.36, No.7, pp.659-663, 2002.
- [24] Tan, Z., Yang H. and Guo, X.: Build-Operate-Transfer schemes for road franchising with road deterioration and maintenance effects, In: *Transportation and Traffic Theory* Edited by Lam, W. H. K., Wong, S. C. and Lo, H. K., 2009.

- [25] Mohring, H.: *Transportation Economics*, Cambridge, Mass., Ballinger Publishing, 1976, H. モーリング：交通経済学，勁草書房，1987.
- [26] Chu, C.P. and Tsai, J.F.: Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, No.4, pp.457-477, 2004.
- [27] 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.
- [28] Verhoef, E.T., Nijkamp, P. and Rietveld, P.: Second-best congestion pricing the case of an untolled alternative road pricing models with maintenance cost, *Journal of Urban Economics*, Vol.40, pp.279-302, 1996.
- [29] Arnott, R. and Yan, A.: The two-mode problem: second-best pricing and capacity, *Boston College Working Papers in Economics 474*, Boston College Department of Economics, 2000.
- [30] Rouwendal, J. and Verhoef, E. T.: Second-best pricing for imperfect substitutes in urban networks, *Research in Transportation Economics*, Vol.9, No.1, pp.27-60, 2004.
- [31] Small, K.A. and Yan, J.: The value of "Value Pricing" of roads: Second-best pricing and product differentiation, *Journal of Urban Economics*, Vol.49, pp.310-336, 2001.
- [32] 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, pp.127-156, 2004.

- [33] 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学科土木コース学士論文, 2012.
- [34] 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.





## 第3章 維持補修費用を考慮した次善高速道路料金に関する研究

### 3.1 緒言

自動車の道路利用は、道路混雑や構造物の劣化・損傷の発生という外部不経済性をもたらす。道路混雑の外部不経済性と同様に、この外部性の存在の下では、ドライバーの自由な経路選択が資源配分の非効率性をもたらす。従来より、道路混雑の外部不経済性を内部化し、経路配分の効率化を図ることを目的とした混雑料金に関する理論的研究が蓄積されてきた [1]。しかし、道路利用者の変化が道路の維持補修費用に及ぼす影響に関してはほとんど考慮されてこなかった。現在、道路施設の劣化・老朽化の問題が顕在化してきており、高速道路の維持補修財源を確保することを目的とした高速道路料金に関する研究が重要な課題になっている。

本章では、道路混雑と構造物劣化という2種類の外部不経済性を同時に考慮した高速道路料金に着目する。主として大型車の利用が構造物劣化をもたらすことを考えれば、普通車（乗用車等）、大型車（貨物トラック等）という多種類の車両タイプを考慮した料金設定問題に着目する必要がある。このような道路構造物の維持補修費用を考慮にいたした高速道路料金に関しても、すでに研究の蓄積がある。これら既往研究 [2]–[6] は、1OD、1リンクを対象として、維持補修費用の効率的な負担問題を分析したものであり、そこでは限界費用料金設定を用いることが提案されている。しかし、道路ネットワークが一般道路と高速道路という複数リンクで構成されており、かつ、一部のリンクにしか料金を賦課できない状況に

においては、限界費用料金は効率的な料金設定とはならない。

一般道路と高速道路が混在するような状況における効率的な高速道路料金に関しては、混雑費用の内部化という観点から多くの研究が行われている [7]。しかしながら、混雑費用と維持補修費用の双方の内部化を目的とした次善 (second best) 料金に関する研究は、**3.2.1** で言及するように、非常に限られているのが実情である。本章では、高速道路と一般道路では道路構造物の規格が異なっており、結果として道路タイプにより大型車に対する道路構造物の耐荷力が異なっている点に着目する。この場合、高速道路における車種別の料金設定は、大型車の経路誘導効果を通じて、道路ネットワーク全体の維持補修費用を軽減するための重要な手段となりうる。しかしながら、大型車の経路誘導による維持補修費用の軽減を念頭において、高速道路の次善料金を分析した研究事例は非常に限られている。特に、高速道路事業者がその運営費用の全てを料金収入により賄わなければならないという規制（以下、ゼロ利潤規制と呼ぶ）が存在する際の料金設定に関する研究は、筆者の知る限り見当たらない。

以上の問題意識に基づいて、本章では一般道路と高速道路という2本のリンクで構成される並行ネットワークを対象として、道路混雑、構造物の劣化という外部不経済性を明示的に考慮にいった、高速道路の次善の車種別料金について理論的に分析する。さらに、高速道路の車種別料金設定による大型車の経路誘導効果を通じた、一般道路、高速道路の維持補修費用の軽減効果について分析する。以下、**3.2** では、本章の基本的な考え方を述べる。**3.3** では、複数車種を用いたネットワーク均衡モデルを定式化する。**3.4** では、非弾力的交通需要のもとで社会的総余剰最大化を達成する固定需要型最適料金について分析する。**3.5** では、弾力的交通需要のもとで社会的総余剰最大化を達成する変動需要型次善料金、および、高速道路事業者のゼロ利潤規制を考慮したラムゼイ型次善料金について分析する。

## 3.2 本章の基本的な考え方

### 3.2.1 既存研究の概要

自動車の道路利用に伴う外部不経済性を軽減するための料金政策に関しては膨大な研究が蓄積している [7]。これら既存研究の多くは、混雑費用の外部性の問題を軽減するための混雑料金について分析しているが、それらの分析枠組みは、維持補修費用の外部性の問題を軽減するための料金政策にも応用することができる。本章は、道路ネットワーク上の一部のリンクにしか料金を賦課できない環境における次善高速道路料金について分析する。次善高速道路料金に関する既存研究は、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とする理論的研究と、多数のリンクから構成される実際的なネットワークを分析対象とする実証的研究に分けられる。本章では、前者の理論的研究の立場を採用する。2つのリンクが並行する道路網において、片方のリンクにのみ料金を課すことができる場合を想定した次善料金に関しては、Verhoef et al.[8] によって詳細な分析がなされた。その後、2リンク並行道路における次善料金に関して、リンク間の代替性が不完全である場合 [9]・[10] や、利用者の時間価値に異質性が存在する場合 [11]・[12] 等に拡張されている。しかし、これらの研究は維持補修費用を明示的に考慮したものではない。

維持補修費用を明示的に考慮した効率的な高速道路料金に関しては、研究事例の数は少ないもののいくつかの研究が存在する。Newbery[2]・[3] や Small and Winston[4]、Small et al.[5] は、1リンクの道路を考え、この道路の維持補修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について考察している。また、Newbery[3] は、一定の条件が満たされれば、限界費用料金設定の下で得られる料金収入により、道路の建設費用と維持補修費用を全て賄うことができることを示している。Newbery や Small らの研究においては、道路の建設費用や維持補修

費用の一部を lump-sum 税により調達できる状況を想定している。一方, Chu and Tsai[6] は, 高速道路の効率的な料金設定を分析しているが, その際, 高速道路と代替的な一般道路が存在する環境における料金設定を分析する際に, 高速道路事業者のゼロ利潤規制を考慮していない(ただし, 1リンクの環境に限り, ゼロ利潤規制を考慮した料金設定を分析している)。また, そこでは, 数値計算事例を示すにとどまっており, 解析的な分析はなされていない。

道路構造物への損傷は主として大型車に起因することを考えれば, 維持補修費用を考慮した次善料金について分析する際には, 複数車種を対象とした車種別料金設定を扱うことが必要である。実際, 上述の既存研究は, すべて車種別料金設定を扱っている。本章では, 高速道路と代替的な一般道路が存在する環境においては, 大型車の経路誘導を通じて社会的費用を可能な限り低減できるような車種別料金を設定できることを指摘する。例えば, 一般道路の舗装の耐荷力が高速道路に比べて低く, 一般道路の大型車交通流を高速道路に誘導することが望ましい状況を考えよう。このとき, 高速道路の大型車の料金を値下げすれば, 一般道路の大型車交通流の一部を高速道路に誘導できるのはほぼ自明である。本章では, 大型車の料金設定だけでなく, 普通車の料金設定も, 大型車の経路誘導に利用できることを指摘する。具体的には, 高速道路の普通車の料金を値上げし, 高速道路の普通車交通流の一部を一般道路に誘導すれば, その分だけ一般道路の大型車交通流を高速道路に誘導することができる。したがって, 大型車の料金を値下げすると同時に普通車の料金を値上げすれば, 料金設定による大型車の経路誘導効果を高められると考えられる。また, こうした車種別料金設定による大型車の経路誘導は, 高速道路事業者にゼロ利潤規制が存在する状況においても有効だと考えられる。大型車の料金を値下げする一方で普通車の料金を値上げすれば, 事業者の利潤を減らすことなく, 大型車交通流の高速道路への誘導を実現できると考

えられる。このように、高速道路と代替的な一般道路が存在する環境における、道路ネットワークの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大型車の経路誘導効果の有効性について指摘した研究は、筆者が知る限り見当たらない。

### 3.2.2 道路の限界維持補修費用

特定の車種が道路を利用する際の限界維持補修費用の計算手法については、既にいくつかの理論が確立しており、実際のデータを基に計算を行った研究 [13] も存在する。ただし、日本の道路の限界維持補修費用については、実際に計算を行った研究は見当たらない。限界維持補修費用の計算を行う研究においては、AASHO Road Test [14] の試験結果を基に定義された ESAL (equivalent single axel load : 等価単軸荷重) という概念がよく使われる。これは、車種が舗装に与える損傷を集計化するための単位であり、18 キロポンドの単軸が舗装に与える損傷を 1 に基準化している。特定の軸荷重の車軸の ESAL を求める計算式は、AASHO Road Test の試験結果に基づき推定されている。この計算式は、舗装の構造や軸数 (単軸・タンデム軸) を引数として含む複雑なものである。この計算式によると、単軸の ESAL は概ね軸荷重の 4 乗に比例するとされる。この「4」乗という数値の妥当性に関しては異論もあり、AASHO Road Test 以降の試験研究では、「2」～「9」にわたる数値が推定されている [13]。しかし、いずれの研究成果においても、軸荷重が舗装に与える損傷が、軸荷重について非線形に (凸関数の形で) 増加する点では共通しており、普通車の ESAL は大型車の ESAL よりも、はるかに小さくなることを指摘している。換言すれば、普通車の限界維持補修費用と比較して、大型車の限界維持補修費用は相当程度大きい値となる。したがって、維持補修費用の外部性の問題を軽減する手段を検討する場合には、普通車や大型車等の車種の区別を明示的に行う必要がある。本章では、普通車と大型車の 2 種類の車種を区別する。

普通車としては一般的な乗用車を想定し、大型車としては一般的な貨物トラックを想定する。ただし、普通車と大型車の各車種については、同質的な車両を仮定して分析を進める。

道路の限界維持補修費用は、道路構造物（舗装）の規格や確保されるサービス水準に依存する。Small et al.[5] は、1982年のFederal Highway Administration (FHWA)による米国の道路の限界維持補修費用の推計結果を掲載している。それによると、1マイル1ESAL当たりの限界維持補修費用（1981年の物価を基準とする）は、地方の州間高速道路で9セント、都市の動脈道路では66セント、地方のローカル道路では88セントである。これは米国の推計結果であるが、日本においても、一般に高速道路の舗装の耐荷力は一般道路よりも高く設定されていることから、高速道路の限界維持補修費用は一般道路に比べて低いと考えられる。以上を踏まえ、本章は数値計算による分析を行う際に、高速道路の限界維持補修費用が一般道路に比べて低いという前提を採用する。そして、仮に道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていないのであれば、大型車を優遇するように料金を改定することにより、道路ネットワークの維持補修費用を軽減できることを示す。ただし、本章の分析結果は、高速道路の限界維持補修費用が一般道路よりも高い場合においても適用可能である。その場合には、逆に普通車を優遇するように料金を改定すれば良い。

#### 3.2.3 分析の基本的枠組み

本章では、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考える。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り運営されており、そのために必要な維持補修費は家計がlump sum税を通じて負担する。高速道路の運営に関わる費用（維持補修費用や債務の償還費用等）は高速道路の料金収入によって賄われる。3.4

で定式化する固定需要型最適料金設定問題、および、3.5で定式化する変動需要型次善料金設定問題では、高速道路事業者は利潤を獲得することが許容されている。負の利潤の場合には政府による補助金が支給される。さらに、ラムゼイ型次善料金設定問題では、事業者にゼロ利潤規制が課されている場合をとりあげる。事業者は、普通車と大型車に異なる料金を課徴する。高速道路、一般道路はすでに建設されており、道路事業者は高速道路債務の償還費用を負担しなければならない。償還費用は外生パラメータと考える。大型車の走行は高速道路、一般道路に関わらず、道路構造物（舗装）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大型車1台当たり一定の維持補修費用（限界維持補修費用と呼ぶ）が発生する。道路構造物は大型車が通行しなくても自然劣化が進展するため、大型車の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も外生パラメータと考える。本章では、このような制度的条件の下で、道路利用者が獲得する消費者余剰と道路管理者の余剰から構成される社会的総余剰を最大にする次善高速道路料金について分析する。

## 3.3 ネットワーク均衡モデル

### 3.3.1 前提条件

道路ネットワークの利用者は、普通車を利用する利用者(タイプ  $s$ )と大型車を利用する利用者(タイプ  $l$ )という2つのタイプに分類される。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。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する。高速道路、一般道路の走行時間は、当該リンクの pcu 換算の総交通量にのみ依存する。利用者の時間価値には異質性を導入し、Verhoef and Rouwendal[12]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。その際、時間価値の分布関数の形状がモデルの分析結果に本質的な影響を及ぼさないことから、議論の見通しを

容易にするため、利用者の時間価値がそれぞれの車種  $y$  について一様分布に従う状況を想定する。

### 3.3.2 定式化

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に依存する。走行時間関数を

$$t_k = t_k(x_k^s + x_k^l) \quad (k \in \{1, 2\}) \quad (3.1)$$

と表す。ここで、走行時間関数  $t_k$  は

$$t_k > 0, t_k' > 0, t_k'' > 0 \quad (k \in \{1, 2\}) \quad (3.2)$$

を満足する。また、 $x_k^y$  ( $k \in \{1, 2\}, y \in \{s, l\}$ ) はリンク  $k$  における車種  $y$  の pcu 単位の総交通量を表す。高速道路（リンク 1）を通行する車両には料金が課される。車種  $y \in \{s, l\}$  に課される 1(pcu) 当たりの料金を  $p_1^y$  で表す。

車種  $y$  ( $y \in \{s, l\}$ ) の利用者の 1(pcu) 当たりの時間価値は、区間  $[\underline{B}^y, \bar{B}^y]$  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  $[\beta^y, \beta^y + d\beta^y]$  ( $\underline{B}^y < \beta^y < \bar{B}^y$ ) の範囲に含まれる時間価値を持つ車種  $y$  の潜在的交通需要は、 $\beta^y$  に依存せず一定であり、 $q^y d\beta^y$  と表せる。ここで、 $q^y$  は車種  $y$  の潜在的交通需要密度を表す外生的な定数である。各車種  $y$  ごとに時間価値分布が一様分布に従うため、車種  $y$  の潜在的な利用者総数  $R^y$  は

$$R^y = q^y(\bar{B}^y - \underline{B}^y) \quad (3.3)$$

と表せる。時間価値  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者がリンク  $k$  を利用する場合の一般化



費用  $c_k^y(\beta^y)$  は,

$$c_1^y(\beta^y) = p_1^y + \beta^y t_1 \quad (3.4a)$$

$$c_2^y(\beta^y) = \beta^y t_2 \quad (3.4b)$$

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

と表せる。時間価値  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者は、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、 $c_1^y(\beta^y) \geq c_2^y(\beta^y)$  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。また、時間価値  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者によるトリップの一般化費用  $c^y(\beta^y)$  は,

$$c^y(\beta^y) = \min\{c_1^y(\beta^y), c_2^y(\beta^y)\} \quad (3.5)$$

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

と表せる。車種  $y$  (1pcu) 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、全ての車種  $y$  の利用者について等しいとし、その金額を定数  $v^y$  で表す。時間価値  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者は、トリップの一般化費用  $c^y(\beta^y)$  が  $v^y$  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  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者の総交通需要密度  $d^y(\beta^y)$  は,

$$d^y(\beta^y) = \begin{cases} q^y, & (v^y \geq c^y(\beta^y)) \\ 0, & (v^y < c^y(\beta^y)) \end{cases} \quad (3.6)$$

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

と表せる。 $v^y \geq c^y(\beta^y)$  の場合には、潜在的な交通需要密度  $q^y$  がそのまま総交通需要密度として表現できるのに対して、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  $\beta^y$  を持つ車種  $y$  の利用者のリンク  $k$  の交通量を

$f_k^y(\beta^y)$  とすると,  $(f_1^y(\beta^y), f_2^y(\beta^y))$  の組について,

$$\begin{aligned} & (f_1^y(\beta^y), f_2^y(\beta^y)) \\ &= \begin{cases} (0, d^y(\beta^y)), & (c_1^y(\beta^y) \geq c_2^y(\beta^y)) \\ (d^y(\beta^y), 0), & (c_1^y(\beta^y) < c_2^y(\beta^y)) \end{cases} \quad (3.7) \\ & (\beta^y \in [\underline{B}^y, \bar{B}^y], y \in \{s, l\}) \end{aligned}$$

が成立する. この時, 車種  $y$  のリンク  $k$  の交通量  $x_k^y$  は

$$x_k^y = \int_{\underline{B}^y}^{\bar{B}^y} f_k^y(\beta^y) d\beta^y \quad (y \in \{s, l\}, k \in \{1, 2\}) \quad (3.8)$$

と表される.

以下では, ネットワーク均衡に関する分析を容易にするために, 次の仮定を設ける.

- 仮定 1: 均衡においては  $t_1 < t_2$  が成立する. すなわち, 高速道路の走行時間は一般道路の走行時間よりも短い.
- 仮定 2: 均衡においては  $x_1^s > 0, x_1^l > 0, x_2^s > 0, x_2^l > 0$  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.
- 仮定 3: 均衡においては普通車と大型車の利用者の双方に, トリップを行わない利用者が存在する.

車種  $y$  について, 高速道路と一般道路の経路選択が無差別となるような臨界的時間価値を,

$$p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 = \tilde{\beta}^y t_2 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.9)$$

を満足するような  $\tilde{\beta}^y$  を用いて定義する. 同様に, 車種  $y$  について, 高速道路を利用してトリップを行うという選択と, トリップを取りやめるという選択が無差別となるような臨界的時間価値を,

$$p_1^y + \bar{\beta}^y t_1 = v^y \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.10)$$

を満足するような  $\bar{\beta}^y$  を用いて定義する。仮定 1 より、車種  $y$  の利用者のうち、 $\underline{B}^y$  以上  $\tilde{\beta}^y$  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、

$$c^y(\beta^y) = \beta^y t_2 \quad (3.11a)$$

$$f_1^y(\beta^y) = 0 \quad (3.11b)$$

$$f_2^y(\beta^y) = q^y \quad (3.11c)$$

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

が成立する。次に、車種  $y$  の利用者のうち、 $\tilde{\beta}^y$  より高く  $\bar{\beta}^y$  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、

$$c^y(\beta^y) = p_1^y + \beta^y t_1 \quad (3.12a)$$

$$f_1^y(\beta^y) = q^y \quad (3.12b)$$

$$f_2^y(\beta^y) = 0 \quad (3.12c)$$

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

が成立する。最後に、 $\bar{\beta}^y$  より高い時間価値を持つ利用者はトリップを行わない。また、仮定 2 より  $\tilde{\beta}^y < \bar{\beta}^y$  が成立し、仮定 3 より  $\bar{\beta}^y < \bar{B}^y$  が成立する。式 (3.8),(3.11a)–(3.12c) より、

$$x_1^y(\bar{\beta}^y, \tilde{\beta}^y) = q^y(\bar{\beta}^y - \tilde{\beta}^y) \quad (3.13a)$$

$$x_2^y(\tilde{\beta}^y) = q^y(\tilde{\beta}^y - \underline{B}^y) \quad (3.13b)$$

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

を得る。ネットワーク均衡は式 (3.1),(3.9),(3.10),(3.13a),(3.13b) を用いて定義され

る。これらの式を統合化すれば、ネットワーク均衡条件は

$$p_1^y + \bar{\beta}^y t_1 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} x_1^y(\bar{\beta}^y, \tilde{\beta}^y) \right) = v^y \quad (3.14a)$$

$$\begin{aligned} p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} x_1^y(\bar{\beta}^y, \tilde{\beta}^y) \right) \\ = \tilde{\beta}^y t_2 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} x_2^y(\tilde{\beta}^y) \right) \end{aligned} \quad (3.14b)$$

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

と定式化できる。

### 3.3.3 便益指標の定式化

時間価値  $\beta^y$  を有する車種  $y$  (1pcu) の利用者がトリップにより得る消費者余剰  $cs^y(\beta^y)$  を,

$$\begin{aligned} cs^y(\beta^y) \\ = \begin{cases} v^y - c^y(\beta^y), & (v^y \geq c^y(\beta^y)) \\ 0, & (v^y < c^y(\beta^y)) \end{cases} \end{aligned} \quad (3.15)$$

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

と定義する。このとき、車種  $y$  の利用者がトリップにより得る消費者余剰の総和  $CS^y$  は,

$$\begin{aligned} CS^y \\ = \int_{\underline{B}^y}^{\bar{B}^y} q^y cs^y(\beta^y) d\beta^y \\ = \int_{\underline{B}^y}^{\tilde{\beta}^y} q^y cs^y(\beta^y) d\beta^y + \int_{\tilde{\beta}^y}^{\bar{B}^y} q^y cs^y(\beta^y) d\beta^y \\ = v^y q^y (\bar{B}^y - \underline{B}^y) - t_2 \int_{\underline{B}^y}^{\tilde{\beta}^y} \beta^y q^y d\beta^y \\ - t_1 \int_{\tilde{\beta}^y}^{\bar{B}^y} \beta^y q^y d\beta^y - p_1^y x_1^y \end{aligned} \quad (3.16)$$

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

と表せる。

高速道路事業者の余剰（利潤） $\Pi_1$  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  $\Pi_1$  は

$$\Pi_1 = p_1^s x_1^s + p_1^l x_1^l - n_1 x_1^s - m_1 x_1^l - F_1 \quad (3.17)$$

と表される。式 (3.17) の右辺第 1 項と第 2 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す。ただし、 $n_1, m_1$  は、それぞれ高速道路における普通車、大型車 1(pcu) 当たりの限界維持補修費用を表す定数である。限界維持補修費用は交通量に依存せず一定と仮定する。 $n_1 x_1^s + m_1 x_1^l$  は高速道路の可変維持補修費用である。 $F_1$  は高速道路の運営に関わる固定費用であり、自然劣化に起因する維持補修費用や債務の償還費用等から構成される。一般道路管理者に生じる余剰  $\Pi_2$  を

$$\Pi_2 = -n_2 x_2^s - m_2 x_2^l - F_2 \quad (3.18)$$

と表す。ここで、 $n_2, m_2$  は、一般道路における普通車、大型車 1(pcu) 当たりの限界維持補修費用を、 $F_2$  は一般道路の供用に関わる固定費用を表す。一般道路管理者に生じる費用は、lump sum 税を通じて国民が全額負担する。一般に、普通車の走行が道路構造物の劣化に及ぼす影響は無視しえるため、不必要な議論の複雑化を避けるため  $n_k = 0$  ( $k = 1, 2$ ) を仮定し、以下の議論では  $m_k$  のみを用いて議論を進める。

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,

$$\begin{aligned}
 SB &= CS^s + CS^l + \Pi_1 + \Pi_2 \\
 &= v^s q^s (\bar{\beta}^s - \underline{B}^s) + v^l q^l (\bar{\beta}^l - \underline{B}^l) \\
 &\quad - B_1(\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) t_1 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} x_1^y(\bar{\beta}^y, \tilde{\beta}^y) \right) \\
 &\quad - B_2(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) t_2 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} x_2^y(\tilde{\beta}^y) \right) \\
 &\quad - m_1 x_1^l(\bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^l) - m_2 x_2^l(\tilde{\beta}^l) - F_1 - F_2
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

と定義する。ここで、 $B_1(\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l)$  と  $B_2(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l)$  は,

$$\begin{aligned}
 &B_1(\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \\
 &= q^s \int_{\tilde{\beta}^s}^{\bar{\beta}^s} \beta^s d\beta^s + q^l \int_{\tilde{\beta}^l}^{\bar{\beta}^l} \beta^l d\beta^l
 \end{aligned} \tag{3.20a}$$

$$\begin{aligned}
 &B_2(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \\
 &= q^s \int_{\underline{B}^s}^{\tilde{\beta}^s} \beta^s d\beta^s + q^l \int_{\underline{B}^l}^{\tilde{\beta}^l} \beta^l d\beta^l
 \end{aligned} \tag{3.20b}$$

と定義される変数であり、それぞれ、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  $\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  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  $SB(\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l)$  と表記する。

### 3.4 固定需要型最適料金設定の分析

#### 3.4.1 分析目的

本章の目的の1つは、高速道路と代替的な一般道路が存在する環境における、高速道路の車種別料金設定による、道路ネットワークの維持補修費用の軽減を目的とした、大型車の経路誘導効果の有効性について分析することにある。特に、

わが国の制度的枠組みの下で現実的な政策的知見を得るためには、交通需要が弾力的であり、高速道路事業者にゼロ利潤規制が課されている状況における車種別料金設定について分析することが重要な課題となる。しかし、交通需要の変動と事業者のゼロ利潤規制を考慮したモデルの構造は複雑になり、解析的な分析では明確な結論を得ることが困難となる。そこで、本章では、1つのベンチマーキングとして、3.3で定式化したネットワーク均衡モデルの弾力的な交通需要という仮定を修正し、非弾力的な交通需要を想定する。さらに、事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況を想定する。これらの想定の下では、車種別料金の差別化による大型車の経路誘導効果について焦点を絞った分析が可能となるほか、解析的な分析により明確な知見を導出することが可能となる。

#### 3.4.2 固定需要型ネットワーク均衡モデルの定式化

3.3で定式化したネットワーク均衡モデルを、交通需要が固定的であるモデルに修正する。3.3と同様に、車種 $y$  ( $y \in \{s, l\}$ )の利用者の時間価値は、区間 $[\underline{B}^y, \bar{B}^y]$ の範囲で連続的かつ一様に分布すると仮定する。また、基本モデルと同様に、仮定1、仮定2が成立すると考える。ただし、車種 $y$ の利用者がトリップによって得られる直接的な効用の金銭評価額 $\psi$ は十分に大きく、すべての利用者が走行時間の如何に関わらず、必ずトリップを生成すると仮定する。すなわち、基本モデルの仮定3は成立しない。車種 $y$ について、高速道路と一般道路の経路選択が無差別となるような臨界的時間価値を、式(3.9)を満足するような $\tilde{\beta}^y$ を用いて定義する。車種 $y$ の利用者のうち、 $\underline{B}^y$ 以上 $\tilde{\beta}^y$ 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、

$$c^y(\beta^y) = \beta^y t_2 \quad (3.21a)$$

$$f_1^y(\beta^y) = 0 \quad (3.21b)$$

$$f_2^y(\beta^y) = q^y \quad (3.21c)$$

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

が成立する。次に、車種  $y$  の利用者のうち、 $\tilde{\beta}^y$  より高く  $\overline{B}^y$  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、

$$c^y(\beta^y) = p_1^y + \beta^y t_1 \quad (3.22a)$$

$$f_1^y(\beta^y) = q^y \quad (3.22b)$$

$$f_2^y(\beta^y) = 0 \quad (3.22c)$$

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

が成立する。したがって、車種別経路交通量は、

$$\bar{x}_1^y(\tilde{\beta}^y) = q^y(\overline{B}^y - \tilde{\beta}^y) \quad (3.23a)$$

$$\bar{x}_2^y(\tilde{\beta}^y) = q^y(\tilde{\beta}^y - \underline{B}^y) \quad (3.23b)$$

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

と表される。ネットワーク均衡条件式は、

$$\begin{aligned} & p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} \bar{x}_1^y(\tilde{\beta}^y) \right) \\ &= \tilde{\beta}^y t_2 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} \bar{x}_2^y(\tilde{\beta}^y) \right) \end{aligned} \quad (3.24)$$

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



と定式化できる．ここで，社会的総余剰  $SB$  (式 (3.19) 参照) は変動需要を想定しているため，固定需要型の社会的総余剰  $\overline{SB}(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l)$  を，

$$\begin{aligned} & \overline{SB}(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \\ &= \sum_{y \in \{s, l\}} v^y R^y \\ & \quad - \sum_{k \in \{1, 2\}} \Psi_k(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \cdot t_k \left( \sum_{y \in \{s, l\}} \bar{x}_k^y(\tilde{\beta}^y) \right) \\ & \quad - \sum_{k \in \{1, 2\}} \{m_k \bar{x}_k^l(\tilde{\beta}^l) + F_k\} \end{aligned} \quad (3.25)$$

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

$$\Psi_1(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) = \sum_{y \in \{s, l\}} q^y \int_{\tilde{\beta}^y}^{\bar{B}^y} \beta^y d\beta^y \quad (3.26a)$$

$$\Psi_2(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) = \sum_{y \in \{s, l\}} q^y \int_{\underline{B}^y}^{\tilde{\beta}^y} \beta^y d\beta^y \quad (3.26b)$$

と定義される変数であり，それぞれ，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． $\Psi_k$  は，3.3 のモデルの  $B_k$  に対応する変数である． $R^y$  は，車種  $y$  の潜在的な利用者総数であり，式 (3.3) で定義される．

### 3.4.3 固定需要型最適料金設定問題

交通需要が固定的であり，事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況において，社会的総余剰  $\overline{SB}$  を最大化する効率的な車種別料金設定を求める問題を定式化する．仮に，高速道路事業者に赤字が発生した場合，その赤字は lump sum 税を通じて国民が全額負担するとする．このとき，最適な料金設定を求める問題は，ネットワーク均衡条件 (3.24) を制約条件として，社会的総余剰  $\overline{SB}(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l)$  を最大化する料金  $p_1^s, p_1^l$ ，および，その料金の下でのネットワーク均衡  $\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  を求める問

題（固定需要型最適料金設定問題と呼ぶ）として，以下のように定式化できる．

$$\max_{p_1^s, p_1^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l} \overline{SB}(\tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \quad (3.27a)$$

subject to

$$\begin{aligned} p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} \bar{x}_1^y(\tilde{\beta}^y) \right) \\ = \tilde{\beta}^y t_2 \left( \sum_{y \in \{s, l\}} \bar{x}_2^y(\tilde{\beta}^y) \right) \\ (y \in \{s, l\}) \end{aligned} \quad (3.27b)$$

固定需要型最適料金設定問題 (3.27a),(3.27b) の1階の最適化条件は，

$$p_1^s - \tilde{\beta}^s T^{(0)} = 0 \quad (3.28a)$$

$$p_1^l - \tilde{\beta}^l T^{(0)} = 0 \quad (3.28b)$$

$$\lambda^s = 0 \quad (3.28c)$$

$$\lambda^l = 0 \quad (3.28d)$$

$$\begin{aligned} q^s \{ \tilde{\beta}^s T^{(0)} - \Psi_1 t'_1 + \Psi_2 t'_2 \} \\ - \lambda^s \{ T^{(0)} + q^s \tilde{\beta}^s T^{(1)} \} - \lambda^l q^s \tilde{\beta}^l T^{(1)} = 0 \end{aligned} \quad (3.28e)$$

$$\begin{aligned} q^l \{ \tilde{\beta}^l T^{(0)} - \Psi_1 t'_1 + \Psi_2 t'_2 - m_1 + m_2 \} \\ - \lambda^s q^l \tilde{\beta}^s T^{(1)} - \lambda^l \{ T^{(0)} + q^l \tilde{\beta}^l T^{(1)} \} = 0 \end{aligned} \quad (3.28f)$$

と表される．ただし， $\lambda^s, \lambda^l$  は制約条件 (3.27b) 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引数は省略している． $T^{(0)}, T^{(1)}$  は，それぞれ

$$T^{(0)} = t_2 - t_1 > 0 \quad (3.29a)$$

$$T^{(1)} = t'_1 + t'_2 > 0 \quad (3.29b)$$

と定義される変数である．仮定1より， $T^{(0)}$  は正の値を取る．また，走行時間関数  $t_k$  が条件 (3.2) を満足するため， $T^{(1)}$  は正の値を取る．仮定2より，最適解におい

では、ラグランジュ乗数  $\lambda^s, \lambda^l$  の値は 0 となる。このことは、最適化問題 (3.27a) の解が、制約条件 (3.27b) が無い場合の最適化問題の解に一致することを意味する。すなわち、交通需要が固定的であり、事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況においては、一般道路利用者に対して料金を課徴しなくても、高速道路料金を適切に設計することにより、社会的に最適なネットワーク均衡を実現することが可能となる。

ここで、 $\lambda^s = \lambda^l = 0$  を式 (3.28e), (3.28f) に代入すると、

$$\tilde{\beta}^s T^{(0)} = \Psi_1 t'_1 - \Psi_2 t'_2 \quad (3.30a)$$

$$\tilde{\beta}^l T^{(0)} = \Psi_1 t'_1 - \Psi_2 t'_2 + m_1 - m_2 \quad (3.30b)$$

を得る。式 (3.30a), (3.30b) を式 (3.28a), (3.28b) に代入して整理すれば、最適高速道路料金  $p_1^{y**}$  ( $y \in \{s, l\}$ ) は、

$$p_1^{s**} = \Psi_1 t'_1 - \Psi_2 t'_2 \quad (3.31a)$$

$$p_1^{l**} = \Psi_1 t'_1 - \Psi_2 t'_2 + (m_1 - m_2) \quad (3.31b)$$

と表せる。式 (3.31a), (3.31b) の右辺第 1 項と第 2 項は、高速道路と一般道路の限界混雑費用の差を表している。さらに、式 (3.31b) の第 3 項は高速道路と一般道路の限界維持補修費用の差である。式 (3.31a) に示すように、普通車の限界維持補修費用を無視しうる場合には、普通車の最適料金には限界維持補修費用に関する補正項が加算されない。すなわち、次善高速道路料金は、各車種について、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」の差により定義できる。これは、Verhoef et al.[8] が示した結果を、限界維持補修費用を含めた形で拡張した内容になっている。3.2.2 で述べたように、一般に、高速道路の限界維持補修費用は一般道路に比べて低いと考えられる。この前提の下では、 $m_1 - m_2 < 0$  が成立するため、1(pcu) 単位で定義される大型車の高速道路料金  $p_1^{l**}$  は、普通車の

料金  $p_1^{s**}$  より低く設定されることになる。ただし、大型車1台当たりの乗用車換算台数 (pcu) は1より大きいため、式(3.31b)は、大型車1台当たりの高速道路料金が普通車より常に小さく設定されることを意味していないことを断っておく。

### 3.4.4 車種別料金設定による大型車の経路誘導効果

本節では、車種別料金の差別的な設定による大型車の経路誘導効果について分析を行う。まずは、限界維持補修費用  $m_1, m_2$  に関する解析的な比較静学分析を実施する。比較静学分析においては、 $m_1, m_2$  が微小に変化した際、固定需要型最適料金設定問題の解がどのように変化するのかを分析する。料金設定問題の1階の最適化条件(3.28a)–(3.28f)のうち、式(3.28f)のみに  $m_1, m_2$  が含まれている。また、同式では、 $-m_1 + m_2$  という項を除いては  $m_1, m_2$  が現れない。そこで、 $m = (m_2 - m_1)$  の値に関する比較静学分析を行う。 $m$  は大型車に関する一般道路と高速道路の限界維持補修費用の差を表す。さらに、固定需要型最適料金設定問題(3.27a),(3.27b)に対して定義されるラグランジュ関数を  $L_f$  と表し、このラグランジュ関数のヘッセ行列を  $H(L_f)$ 、ヘッセ行列の行列式を  $|H(L_f)|$  と表す。この時、

比較静学の基本方程式は,

$$d\tilde{\beta}^s = |H(L_f)|^{-1} [q^s q^l q^l \{(\tilde{\beta}^s + \tilde{\beta}^l) T^{(1)} + T^{(2)}\}] dm \quad (3.32a)$$

$$d\tilde{\beta}^l = |H(L_f)|^{-1} [-q^s q^l \{T^{(0)} + q^s (2\tilde{\beta}^s T^{(1)} + T^{(2)})\}] dm \quad (3.32b)$$

$$dp_1^s = |H(L_f)|^{-1} [q^s q^l \{q^s q^l \tilde{\beta}^s (\tilde{\beta}^l - \tilde{\beta}^s) \cdot (T^{(1)})^2 + q^l T^{(0)} (\tilde{\beta}^l T^{(1)} + T^{(2)})\}] dm \quad (3.32c)$$

$$dp_1^l = |H(L_f)|^{-1} [-q^s q^l \{q^s q^l \tilde{\beta}^l (\tilde{\beta}^s - \tilde{\beta}^l) \cdot (T^{(1)})^2 + q^s T^{(0)} (2\tilde{\beta}^s T^{(1)} + T^{(2)}) + q^l T^{(0)} \tilde{\beta}^l T^{(1)} + (T^{(0)})^2\}] dm \quad (3.32d)$$

と表される。ただし、 $T^{(2)}$  は,

$$T^{(2)} = \Psi_1 t_1'' + \Psi_2 t_2'' > 0 \quad (3.33)$$

と定義される変数である。走行時間関数  $t_k$  が条件 (3.2) を満足するため、 $T^{(2)}$  は正の値を取る。陰関数定理を用いた比較静学分析において一般的に仮定されるように、料金設定問題の最適解において2階の十分条件が成立していると仮定する。このとき、 $|H(L_f)| > 0$  が成立する。式 (3.32a), (3.32b) より、限界維持補修費用差  $m$  の限界的な増加は、 $\tilde{\beta}^s$  を増加させ  $\tilde{\beta}^l$  を減少させる。換言すれば、高速道路の普通車交通量の一部が一般道路にシフトし、一般道路の大型車交通量の一部が高速道路にシフトする。一方、式 (3.32c), (3.32d) は、高速道路における普通車料金  $p_1^s$ 、大型車料金  $p_1^l$  の変化を評価した結果であるが、符号を一意的に確定することができない。

比較静学分析の結果より以下の知見が導かれる。いま、高速道路事業者が高速道路と一般道路の限界維持補修費用の差を考慮せず、(実際には  $m > 0$  であるに

も関わらず)  $m = 0$  であると考えたうえで, 式 (3.31a), (3.31b) に従い料金設定を行っているとしよう. このとき, 普通車と大型車の 1pcu 当たりの料金は等しくなっている. この状況において, 実際には  $m > 0$  であることを事業者が認識し, あらためて式 (3.31a), (3.31b) に従い料金設定を改定するとする. このとき, 改定後の 1pcu 当たりの料金は, 普通車の方が大型車よりも高くなる. そして改定の結果, 高速道路の普通車交通量の一部が一般道路に誘導され, 一般道路の大型車交通量の一部が高速道路に誘導される. このような車種別料金の差別的な設定による大型車の経路誘導効果を通じて, ネットワーク全体の維持補修費用が軽減される.

しかし, 車種別料金の差別的な設定による大型車の経路誘導効果に関しては, 解析的に一般的な知見を導出できない. そこで, 数値的な計算事例を用いた分析結果を示すこととする. 数値計算を行うために, 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. 走行時間関数  $t_k$  ( $k \in \{1, 2\}$ ) を BPR 関数を用いて,

$$t_k(x) = t_{k0} \left[ 1 + \alpha_k \left( \frac{x_k}{C_k} \right)^{\gamma_k} \right] \quad (k \in \{1, 2\}) \quad (3.34)$$

と定式化する. ここで,  $t_{k0}$  はリンク  $k$  の自由走行時間を表す定数であり,  $C_k$  はリンク  $k$  の交通容量を表す定数である.  $\alpha_k, \gamma_k$  はパラメータである. 都市部における並行した 1km の高速道路と一般道路を考える. 一般道路の自由走行時間は高速道路の 2 倍とし,  $t_{10} = 0.015, t_{20} = 0.030$  (単位は時間) と設定する. 一般道路と高速道路はともに片側 3 車線とし,  $C_1 = C_2 = 6000.0$  (単位は pcu) と設定する. 走行時間関数に関するその他のパラメータは, 一般道路と高速道路の間で等しいとし, 土木学会 [15] が推定した  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.48, \gamma_1 = \gamma_2 = 2.82$  を用いる. Link[16] は既往の限界維持補修費用の推計結果をまとめている. 結果は推計対象の道路や推計の方法により異なり, 1.48 セント/ESAL・マイルから 2.58 ドル/ESAL・km まで幅広い推計結果が得られている. 本節の数値計算では, 高速道路の (大型車

1pcu 当たりの) 限界維持補修費用は  $m_1 = 1.0$  (円) とし、また、一般道路の限界維持補修費用は高速道路より高いと考え、 $m_2 = 3.0$  (円) と設定する。道路の運営にかかる固定費用  $F_1, F_2$  は、固定需要型最適料金設定には影響を与えないので  $F_1 = F_2 = 0$  と設定する。各車種 (1pcu) の利用者がトリップにより得る効用の金銭評価額は、普通車・大型車ともに  $v^s = v^l = 200$  (単位は円) と設定する。

各車種の総交通量は普通車・大型車ともに 6000(pcu) とする。ただし、利用者の時間価値の分散が、車種別料金設定による大型車の経路誘導効果に与える影響を見るために、各車種の潜在的交通需要密度と時間価値の下限と上限  $q^s, \underline{B}^s, \bar{B}^s, q^l, \underline{B}^l, \bar{B}^l$  の設定には3通りのケース (ケース1, ケース2, ケース3) を考える。ケース1では、 $q^s = q^l = 2.5, \underline{B}^s = \underline{B}^l = 1200, \bar{B}^s = \bar{B}^l = 3600$  と設定する。ケース2では、大型車の時間価値の分散がケース1より小さいとし、 $q^s = 2.5, q^l = 5.0, \underline{B}^s = 1200, \underline{B}^l = 1800, \bar{B}^s = 3600, \bar{B}^l = 3000$  と設定する。ケース3では、普通車・大型車ともに時間価値の分散がケース1より小さいとし、 $q^s = q^l = 5.0, \underline{B}^s = \underline{B}^l = 1800, \bar{B}^s = \bar{B}^l = 3000$  と設定する。全てのケースにおいて、各車種 (1pcu) の利用者の時間価値の平均値は 2400 (円/時間) である。国土交通省の費用便益分析マニュアル [17] によれば、乗用車と普通貨物車の時間価値原単位はそれぞれ 40.10, 64.18 (円/分・台) である。普通貨物車の pcu を 1.7 とすれば、1pcu 当たりの普通貨物車の時間価値は 37.75 (円/分・pcu) となるので、時間価値の平均値に関しては概ね現実的な設定と考えられる。

表 3.1 は、ケース 1-3 の各ケースについて、2通りの料金設定 (料金設定 A, 料金設定 B) を考え、各料金設定下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。料金設定 A は、高速道路と一般道路の間に限界維持補修費用の差が存在しないときの (すなわち、 $m_1 - m_2 = 0$  のときの) 固定需要型最適料金設定であり、道路間の限界維持補修費用の差を考慮しない非効率的な料金設定であ

表 3.1: 固定需要型最適料金設定の効果

ケース 料金設定	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
	A	B	A	B	A	B
$p_1^s$	33.8	34.5	32.0	32.9	30.0	30.6
$p_1^l$	33.8	32.5	32.0	30.9	30.0	28.6
$\bar{x}_1^s$	3367	3206	3281	3045	3473	3091
$\bar{x}_1^l$	3367	3542	3561	3814	3473	3869
$\bar{x}_2^s$	2633	2794	2719	2955	2527	2909
$\bar{x}_2^l$	2633	2458	2439	2186	2527	2131
$CS^s$	658514	656075	662698	659533	655821	653514
$CS^l$	658514	662823	650340	654017	655821	660474
$\Pi_1$	224123	221903	215184	214165	204711	201569
$\Pi_2$	-7898	-7374	-7316	-6557	-7582	-6393
$SNB$	1533253	1533427	1520906	1521158	1508770	1509164

る。一方、料金設定 B は、 $m_1 = 1.0, m_2 = 3.0$  のときの固定需要型最適料金設定であり、道路間の限界維持補修費用の差を考慮した効率的な料金設定である。全てのケースにおいて、料金設定を A から B に変更することにより、高速道路の普通車交通量の一部が一般道路に誘導され、一般道路の大型車交通量の一部が高速道路に誘導されている。すなわち、上記の解析的な比較静学分析の結果が成立している。また、これらのケースにおいては、料金設定を A から B に変更する際に、普通車の料金が値上げされ、大型車の料金が値下げされている。このような大型車を優遇する料金改定の結果、普通車の利用者の消費者余剰は減少し、大型車の利用者の消費者余剰は増加する。

料金設定を A から B に変更した際に経路変更を行う普通車と大型車の交通量 (pcu) はそれぞれ、ケース 1 では 162, 175, ケース 2 では 235, 253, ケース 3 では 381, 396 となっている。普通車が一般道路に誘導されると、その分だけ高速道路に誘導される大型車交通量が増加することを確認できる。料金改定に伴い経路変更を行う車種別の交通量は、利用者の時間価値の分散が小さいほど多くなる。したがって、車種別料金の差別的な設定による道路ネットワークの維持補修費用の



軽減効果も、利用者の時間価値の分散が小さいほど高くなる。これは、時間価値の分散が小さいほど、一般道路と高速道路の経路選択について無差別な利用者の数が増えるためである。ここで、本章と Chu and Tsai[6] の相違点を明らかにするために、Chu and Tsai が想定したように各車種の利用者の時間価値が同一であるような特殊なケースを考える。このようなケースにおいては、普通車と大型車の利用者の（単一の）時間価値をそれぞれ  $vor^s, vor^l$  とするとき、 $p_1^s/vor^s$  と  $p_1^l/vor^l$  の大小関係が変化する前後で、各道路の車種別交通量が不連続にジャンプする。したがって、僅かな料金変化でも高い大型車の経路誘導効果を得ることができる。Chu and Tsai[6] は  $p_1^s/vor^s$  と  $p_1^l/vor^l$  の大小関係が変化するような料金改定を分析していないため、普通車の経路誘導を通じた大型車の経路誘導効果の有効性向上の効果を示せていない。

本章では、固定的需要を仮定して、車種別料金の差別的な設定による大型車の経路誘導効果について解析的・数値的な分析を行った。既に Verhoef et al.[8] が示した結果より明らかなことではあるが、本章の分析により、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には、その差額を料金設定に反映する(式(3.31a), (3.31b))ことが、効率性の観点から望ましいことが確認された。また、本章の分析により、普通車の経路誘導を通じた大型車の経路誘導効果の有効性向上に関して、新しい知見が獲得された。限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない状況においては、この差を料金設定に反映することによりネットワーク全体の維持補修費用が軽減されるが、その過程において、大型車交通流が誘導される道路とは別の道路に普通車交通流が誘導される。これにより、大型車交通流を誘導したい道路から普通車交通流が追い出されることを通じて、大型車の経路誘導効果が高められる。ただし、以上の分析結果は、交通需要が固定的であり、事業者にゼロ利潤規制が課されていない限定的な状況

を想定して行われたものであり、これらの前提が成立しない状況において同様の分析結果が得られるかは不明である。そこで、3.5においては、交通需要が弾力的である状況、および、事業者に利潤制約がある一般的な状況を想定し、高速道路の車種別料金設定による大型車の経路誘導効果の有効性について分析を行う。

### 3.5 変動需要環境下の次善料金設定の分析

#### 3.5.1 分析方針

本章では、交通需要が弾力的である一般的な状況を想定し、この状況における高速道路の次善の車種別料金設定の性質と、車種別料金設定による大型車の経路誘導効果の有効性について分析を行う。まず、3.5.2では、事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況における次善の料金設定を求める最適化問題を定式化し、解析的な議論を行う。3.5.3では、事業者にゼロ利潤規制が課されている状況における次善の料金設定を求める最適化問題を定式化し、解析的な議論を行う。3.5.4では、ゼロ利潤規制存在下の次善料金の性質を数値的に分析する。3.5.5では、ゼロ利潤規制存在下における、車種別料金設定による大型車の経路誘導効果を通じた道路ネットワークの維持補修費用の軽減効果について数値的に分析する。3.5.6では、3.4, 3.5の分析結果を踏まえ、政策的示唆を述べる。

#### 3.5.2 変動需要型次善料金設定問題

交通需要が弾力的であり、高速道路事業者にゼロ利潤規制が課されていない状況における次善高速道路料金を求める問題(変動需要型次善料金設定問題と呼ぶ)を定式化する。仮に、高速道路事業者に赤字が発生した場合、その赤字は lump sum 税を通じて国民が全額負担するとする。この時、高速道路の効率的な料金設定を求める問題は、ネットワーク均衡条件式(3.14a), (3.14b)を制約条件として、社会的総余剰  $SB$  を最大化する料金  $p_1^s, p_1^l$ 、および、その料金の下でのネットワー

### 3.5 変動需要環境下の次善料金設定の分析

ク均衡  $\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  を求める問題として定式化できる。ただし、後に比較静学分析を行う際には、ネットワーク均衡を表す変数として  $\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l$  を用いると、分析結果の見通しが悪くなる。これは、変数  $\bar{\beta}^s, \bar{\beta}^l$  が、高速道路の車種別交通量と 1 対 1 に対応していないためである。そこで、新しい変数  $b^s, b^l$  を

$$b^y = \bar{\beta}^y - \tilde{\beta}^y \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.35)$$

と定義する。  $q^y$  を変数  $b^y$  に乗じることにより高速道路の車種別交通量  $x_1^y$  を得る。また、  $\tilde{\beta}^y$  は一般道路の車種別交通量  $x_2^y$  と 1 対 1 に対応している。変数  $b^s, b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  を用いてネットワーク均衡を表現することにより、比較静学の分析結果の見通しを良くすることができる。以上の準備の下に、変動需要型次善料金設定問題を、

$$\max_{p_1^s, p_1^l, b^s, b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l} SB(\tilde{\beta}^s + b^s, \tilde{\beta}^l + b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \quad (3.36a)$$

subject to

$$p_1^y + (\tilde{\beta}^y + b^y)t_1(q^s b^s + q^l b^l) = v^y \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.36b)$$

$$\begin{aligned} p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1(q^s b^s + q^l b^l) \\ = \tilde{\beta}^y t_2(q^s(\tilde{\beta}^s - \underline{B}^s) + q^l(\tilde{\beta}^l - \underline{B}^l)) \end{aligned} \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.36c)$$

と定式化する。この時、変動需要型次善料金設定問題 (3.36a)–(3.36c) の1階の最適化条件は、次式で表される。

$$p_1^y - (\tilde{\beta}^y + b^y)t_1 - v^y = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.37a)$$

$$p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 - \tilde{\beta}^y t_2 = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.37b)$$

$$\bar{\lambda}_1^y + \bar{\lambda}_2^y = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.37c)$$

$$v^s q^s - q^s(\tilde{\beta}^s + b^s)t_1 - q^s B_1 t_1' + \Lambda_1^s = 0 \quad (3.37d)$$

$$v^l q^l - q^l(\tilde{\beta}^l + b^l)t_1 - q^l B_1 t_1' - m_1 q^l + \Lambda_1^l = 0 \quad (3.37e)$$

$$v^s q^s - q^s b^s t_1 - q^s \tilde{\beta}^s t_2 - q^s B_2 t_2' + \Lambda_2^s = 0 \quad (3.37f)$$

$$v^l q^l - q^l b^l t_1 - q^l \tilde{\beta}^l t_2 - q^l B_2 t_2' - m_2 q^l + \Lambda_2^l = 0 \quad (3.37g)$$

ただし、 $\bar{\lambda}_k^y$  ( $k = 1, 2; y = s, l$ ) は、制約条件 (3.36b), (3.36c) に対応するラグランジュ乗数である。また、 $\Lambda_k^y$  は以下のように定義される変数である。

$$\begin{aligned} \Lambda_1^s &= \bar{\lambda}_1^s \{t_1 + q^s(\tilde{\beta}^s + b^s)t_1'\} + \bar{\lambda}_1^l q^s(\tilde{\beta}^l + b^l)t_1' \\ &\quad + \bar{\lambda}_2^s q^s \tilde{\beta}^s t_1' + \bar{\lambda}_2^l q^s \tilde{\beta}^l t_1' \end{aligned} \quad (3.38a)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_1^l &= \bar{\lambda}_1^s q^l(\tilde{\beta}^s + b^s)t_1' + \bar{\lambda}_1^l \{t_1 + q^l(\tilde{\beta}^l + b^l)t_1'\} \\ &\quad + \bar{\lambda}_2^s q^l \tilde{\beta}^s t_1' + \bar{\lambda}_2^l q^l \tilde{\beta}^l t_1' \end{aligned} \quad (3.38b)$$

$$\Lambda_2^s = \bar{\lambda}_1^s t_1 + \bar{\lambda}_2^s \{t_1 - t_2 - q^s \tilde{\beta}^s t_2'\} - \bar{\lambda}_2^l q^s \tilde{\beta}^l t_2' \quad (3.38c)$$

$$\Lambda_2^l = \bar{\lambda}_1^l t_1 - \bar{\lambda}_2^l q^l \tilde{\beta}^s t_2' + \bar{\lambda}_2^l \{t_1 - t_2 - q^l \tilde{\beta}^l t_2'\} \quad (3.38d)$$

固定需要型最適料金設定と同様に、変動需要型次善料金設定も式 (3.31a), (3.31b) の形式を用いて表現することができる。式 (3.37b), (3.37d)–(3.37g) より、変動需

要型次善料金設定  $p_1^{y*}$  ( $y \in \{s, l\}$ ) は,

$$p_1^{s*} = B_1 t'_1 - B_2 t'_2 - \left( \frac{\Lambda_1^s}{q^s} - \frac{\Lambda_2^s}{q^s} \right) \quad (3.39a)$$

$$p_1^{l*} = B_1 t'_1 - B_2 t'_2 + (m_1 - m_2) - \left( \frac{\Lambda_1^l}{q^l} - \frac{\Lambda_2^l}{q^l} \right) \quad (3.39b)$$

と表せる。固定需要型最適料金設定と同様に、道路間の限界維持補修費用の差  $m_1 - m_2$  が大型車料金に反映されていることを確認できる。ただし、変動需要型次善料金設定を表す式 (3.39a), (3.39b) にはラグランジュ乗数を含む項が含まれており、これらの項の値は、その正負を含めて、ネットワーク環境に依存する。したがって、変動需要型次善料金設定の水準について解析的に分析を行うことは不可能である。

一方、変動需要型次善料金設定を通じた大型車の経路誘導効果については、比較静学分析を用いて、ある程度は解析的な分析を行うことができる。一般道路の限界維持補修費用  $m_2$  に関する比較静学分析を行うと、変動需要型次善料金設定の下で、 $\partial \tilde{\beta}^l / \partial m_2 < 0$  が成立することが示される (3.7 付録 I 参照)。この結果より以下の知見が導かれる。いま、高速道路事業者が高速道路と一般道路の限界維持補修費用の差を考慮せず、(実際には  $m_2 > m_1$  であるにも関わらず)  $m_2 = m_1$  であると考えたうえで、式 (3.39a), (3.39b) に従い料金設定を行っているとしよう。この状況において、実際には  $m_2 > m_1$  であることを事業者が認識し、あらためて式 (3.39a), (3.39b) に従い料金設定を改定するとする。このとき、一般道路の大型車交通量の一部が高速道路に誘導される。これにより、ネットワーク全体の維持補修費用が軽減される。また、高速道路の限界維持補修費用  $m_1$  に関する比較静学分析を行うと、変動需要型次善料金設定の下で、 $\partial \tilde{\beta}^l / \partial m_1 > 0$  が成立することを示すこともできる (3.7 付録 I 参照)。この結果より、事業者に利潤制約が課されていない状況においては、更新投資により高速道路構造物の耐荷力が向上して

$m_1$  が低下した際に、一般道路の大型車交通量の一部を高速道路に誘導するように料金改定を行うことが効率的であると言える。以上の知見は、固定需要型最適料金設定の下での比較静学分析から得られた結果と同じである。ただし、変動需要型次善料金設定の場合には、料金改定による普通車の経路誘導効果を解析的に分析できない。次善の料金設定が普通車を含めた交通流に与える影響に関しては、のちに 3.5.5 において、事業者に利潤制約が存在するような一般的な状況を想定して、数値分析を実施することとする。

### 3.5.3 ラムゼイ型次善料金設定問題

高速道路事業者にゼロ利潤規制が課されている状況における次善高速道路料金を求める問題（ラムゼイ型次善料金設定問題と呼ぶ）を定式化する。

$$\max_{p_1^s, p_1^l, b^s, b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l} SB(\tilde{\beta}^s + b^s, \tilde{\beta}^l + b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l) \quad (3.40a)$$

subject to

$$p_1^y + (\tilde{\beta}^y + b^y)t_1(q^s b^s + q^l b^l) = v^y \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.40b)$$

$$\begin{aligned} p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1(q^s b^s + q^l b^l) \\ = \tilde{\beta}^y t_2(q^s(\tilde{\beta}^s - \underline{B}^s) + q^l(\tilde{\beta}^l - \underline{B}^l)) \end{aligned} \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.40c)$$

$$p_1^s q^s b^s + (p_1^l - m_1) q^l b^l - F_1 = 0 \quad (3.40d)$$

ここで、式 (3.40b), (3.40c) に対応するラグランジュ乗数を  $\tilde{\lambda}_1^y, \tilde{\lambda}_2^y$  と表し、事業者のゼロ利潤条件 (3.40d) に対応するラグランジュ乗数を  $\hat{\lambda}$  と表す。ラムゼイ型次

善料金設定問題 (3.40a)–(3.40d) の 1 階の最適化条件は、

$$p_1^y - (\tilde{\beta}^y + b^y)t_1 - v^y = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.41a)$$

$$p_1^y + \tilde{\beta}^y t_1 - \tilde{\beta}^y t_2 = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.41b)$$

$$p_1^s q^s b^s + (p_1^l - m_1) q^l b^l - F_1 = 0 \quad (3.41c)$$

$$\tilde{\lambda}_1^y + \tilde{\lambda}_2^y + \hat{\lambda} q^y b^y = 0 \quad (y \in \{s, l\}) \quad (3.41d)$$

$$\begin{aligned} v^s q^s - q^s (\tilde{\beta}^s + b^s) t_1 - q^s B_1 t_1' + \Lambda_1^s \\ + \hat{\lambda} p_1^s q^s = 0 \end{aligned} \quad (3.41e)$$

$$\begin{aligned} v^l q^l - q^l (\tilde{\beta}^l + b^l) t_1 - q^l B_1 t_1' - m_1 q^l + \Lambda_1^l \\ + \hat{\lambda} (p_1^l - m_1) q^l = 0 \end{aligned} \quad (3.41f)$$

$$\begin{aligned} v^s q^s - q^s b^s t_1 - q^s \tilde{\beta}^s t_2 - q^s B_2 t_2' \\ + \Lambda_2^s = 0 \end{aligned} \quad (3.41g)$$

$$\begin{aligned} v^l q^l - q^l b^l t_1 - q^l \tilde{\beta}^l t_2 - q^l B_2 t_2' - m_2 q^l \\ + \Lambda_2^l = 0 \end{aligned} \quad (3.41h)$$

と表される。ここで、 $\Lambda_k^y$  は、式 (3.38a)–(3.38d) により定義される変数である。ただし、式 (3.38a)–(3.38d) で用いられているラグランジュ乗数  $\tilde{\lambda}_k^y$  を  $\tilde{\lambda}_k^y$  に置き換える必要がある。

固定需要型最適料金設定と同様に、ラムゼイ型次善料金設定も式 (3.31a), (3.31b) の形式を用いて表現することができる。式 (3.41b), (3.41e)–(3.41h) より、ラムゼイ型次善料金設定  $p_1^{y\circ}$  ( $y \in \{s, l\}$ ) は、

$$(1 + \hat{\lambda}) p_1^{s\circ} = B_1 t_1' - B_2 t_2' - \left( \frac{\Lambda_1^s}{q^s} - \frac{\Lambda_2^s}{q^s} \right) \quad (3.42a)$$

$$\begin{aligned} (1 + \hat{\lambda}) p_1^{l\circ} = B_1 t_1' - B_2 t_2' + (m_1 - m_2) \\ - \left( \frac{\Lambda_1^l}{q^l} - \frac{\Lambda_2^l}{q^l} \right) + \hat{\lambda} m_1 \end{aligned} \quad (3.42b)$$

と表せる。固定需要型最適料金設定と同様に、道路間の限界維持補修費用の差  $m_1 - m_2$  が大型車料金に反映されていることを確認できる。ただし、ラムゼイ型次善料金設定を表す式 (3.42a), (3.42b) にはラグランジュ乗数を含む項が含まれており、これらの項の値は、その正負を含めて、高速道路の固定費用の水準やネットワーク環境に依存する。したがって、ラムゼイ型次善料金設定の水準について解析的に分析を行うことは不可能である。ラムゼイ型次善料金設定の水準については、**3.5.4** において数値的に分析を行う。

一方、ラムゼイ型次善料金設定を通じた大型車の経路誘導効果については、比較静学分析を用いて、ある程度は解析的な分析を行うことができる。一般道路の限界維持補修費用  $m_2$  に関する比較静学分析を行うと、ラムゼイ型次善料金設定問題の解の下で、 $\partial \beta^l / \partial m_2 \leq 0$  が成立することを示せる (**3.8 付録 II** 参照)。この結果より以下の知見が導かれる。いま、高速道路事業者が高速道路と一般道路の限界維持補修費用の差を考慮せず、 $m_2 = m_1$  であると考えたうえで、式 (3.42a), (3.42b) に従い料金設定を行っているとしよう。この状況において、実際には  $m_2 > m_1$  であることを事業者が認識し、あらためて式 (3.42a), (3.42b) に従い料金設定を改定するとする。このとき、一般道路の大型車交通量の一部が高速道路に誘導される。これにより、ネットワーク全体の維持補修費用が軽減される。以上の知見は、固定需要型最適料金設定、および、変動需要型次善料金設定の下での比較静学分析からも得られるものである。ただし、ラムゼイ型次善料金設定の場合には、高速道路の限界維持補修費用  $m_1$  の変化が交通流に与える影響を解析的に確認することはできない。また、変動需要型次善料金設定の場合と同様に、料金改定による普通車の経路誘導効果を解析的に確認することもできない。そこで、**3.5.5** では、ラムゼイ型次善料金設定が普通車を含めた交通流に与える影響について、数値的な分析を行う。



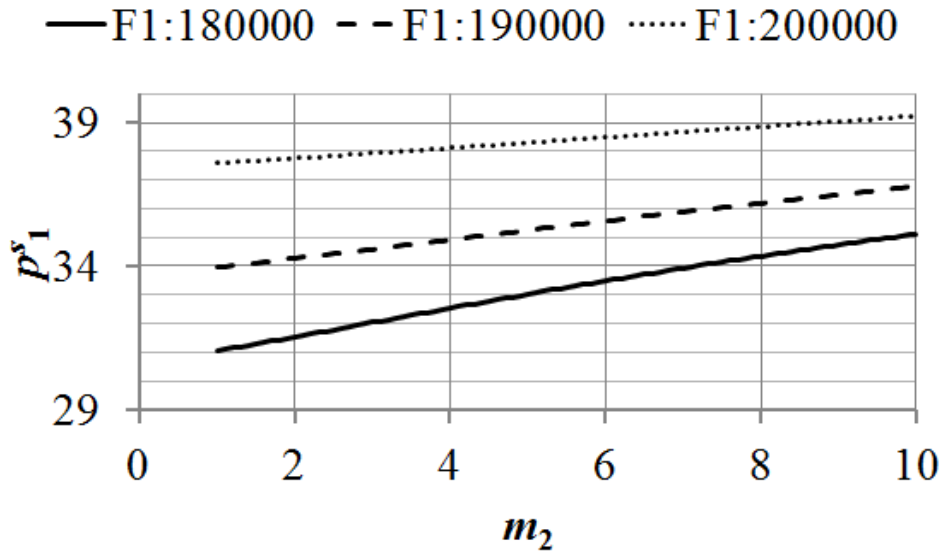


図 3.1: 普通車料金  $p_1^s$  の性質

### 3.5.4 ラムゼイ型次善料金設定の性質

本節では、一般道路の限界維持補修費用  $m_2$ 、および、高速道路の運営の固定費用  $F_1$  がラムゼイ型次善料金設定に与える影響を分析する。数値計算を行うために、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。3.4と同様に、走行時間関数には式(3.34)のBPR関数を用いる。走行時間関数のパラメータも、3.4と同様に、 $t_{10} = 0.015$ ,  $t_{20} = 0.030$ ,  $C_1 = C_2 = 6000.0$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.48$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = 2.82$ と設定する。各車種の潜在的交通需要密度は  $q^s = q^l = 2.1$ 、時間価値の下限は  $\underline{B}^s = \underline{B}^l = 1200$ 、利用者がトリップにより得る効用の金銭評価額は  $v^s = v^l = 110$ と設定する。一般道路の運営にかかる固定費用  $F_2$  は、ラムゼイ型次善料金設定には影響を与えないので  $F_2 = 0$ と設定する。高速道路の限界維持補修費用は  $m_1 = 1.0$ と設定する。以上のパラメータ設定は、次節の数値計算を含む全ての数値計算において採用される。

本章の数値計算では、高速道路の運営の固定費用  $F_1$  として  $F_1 = 180000$ ,  $F_1 =$

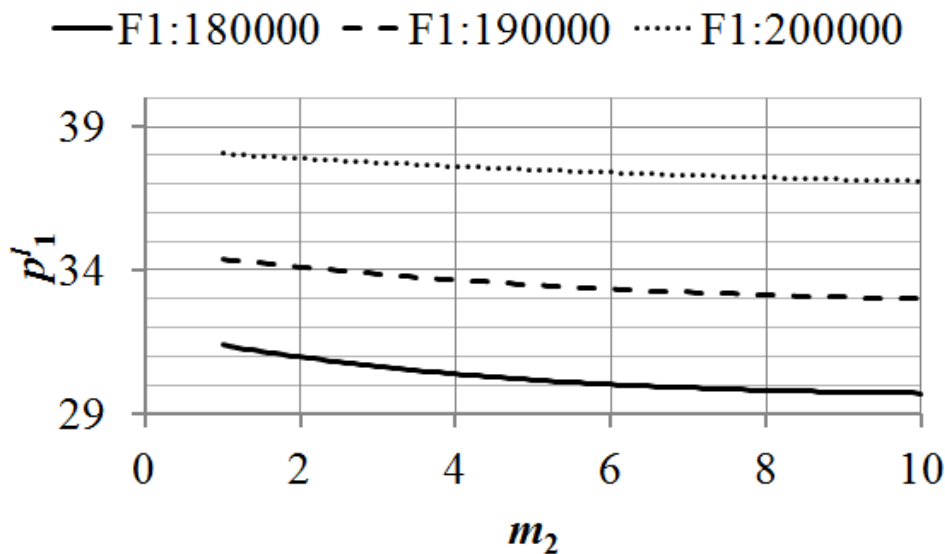


図 3.2: 大型車料金  $p_1^l$  の性質

190000,  $F_1 = 200000$  (円) の 3 通りのケースを想定する。高速道路の片側 1km の建設費用が 100 億円の場合、この費用を 3% の金利の下で 50 年かけて返済する場合の 1 日当たりの償還費用は 1,057,987 円となるため、この固定費用の設定は非現実的なものではないと考えられる ( $F_1$  には償還費用以外にも、高速道路の運営・維持管理に必要な固定的人件費等が含まれる)。事業者にゼロ利潤規制が課されていない場合、 $F_1 = 190000$  のケースでは、効率的な料金設定を行うと事業者の利潤  $\Pi_1$  が概ね 0 になる。よって、 $F_1 = 190000$  のケースは利潤規制の効果があまり現れないケース、 $F_1 = 180000$  のケースは料金を効率的な水準よりも低く設定しなければいけないケース、 $F_1 = 200000$  のケースは料金を効率的な水準よりも高く設定しなければいけないケースとすることができる。図 3.1, 図 3.2 は、3 つの各ケースについて、一般道路の維持補修費用  $m_2$  を 1.0 から 10.0 まで変化させた際のラムゼイ型次善料金の変化を示したものである。図 3.1 は普通車料金  $p_1^s$  の変化を、図 3.2 は大型車料金  $p_1^l$  の変化を示している。固定需要型最適料金設定においては  $p_1^l - p_1^s = m_2 - m_1$  が成立したが、ラムゼイ型次善料金設定におい

てはこの関係は成立しない。実際、図 3.1, 図 3.2 に示されている全ての事例において、 $p_1^l - p_1^s < m_2 - m_1$  が成立することを確認している。また、 $m_2 > m_1$  であるが  $p_1^l > p_1^s$  である事例も確認することができる。ただし、一般道路の限界維持補修費用が高いほど、普通車の料金が高く、大型車の料金が低くなっていることに注意する必要がある。すなわち、交通需要が弾力的な状況や、事業者にゼロ利潤規制が課されている状況においては、道路間の限界維持補修費用の差をそのまま料金設定に反映することは効率的ではないが、部分的に反映することは効率性の観点から望ましい。

高速道路の固定費用  $F_1$  が高いほど、 $m_2$  の増加に伴う料金の変化額が減少している。これは、高速道路の固定費用が高いほど、ゼロ利潤を実現する料金設定の集合が減るためである。例えば、極端なケースとして、事業者の利潤を最大化する料金設定の下で、事業者の利潤がゼロになるような固定費用を考える。この固定費用の下では、ゼロ利潤規制を満たす料金設定は一通りしかないため、道路間の限界維持補修費用の差を料金設定に反映することは不可能である。このように、高速道路の固定費用が高いほど料金改定の余地は小さくなるため、道路間の限界維持補修費用の差を料金設定に反映することは難しくなる。

### 3.5.5 車種別料金設定による大型車の経路誘導効果

本節では、高速道路事業者にゼロ利潤規制が課されている状況を想定し、車種別料金の差別的な設定による大型車の経路誘導効果について数値的な分析を行う。 $m_2, F_1$  を除くパラメータ設定には前節と同じものを用いる。一般道路の限界維持補修費用は  $m_2 = 3.0$  と設定する。前節と同様に、高速道路の固定費用には  $F_1 = 180000, F_1 = 190000, F_1 = 200000$  の 3 通りのケースを想定する。

表 3.2 は、 $F_1 = 180000, 190000, 200000$  の各ケースについて、2 通りの料金設定（料金設定 A, 料金設定 B）を考え、各料金設定下のネットワーク均衡における

表 3.2: ラムゼイ型次善料金設定の効果

ケース 料金設定	$F_1:180000$		$F_1:190000$		$F_1:200000$	
	A	B	A	B	A	B
$p_1^s$	31.1	32.0	34.0	34.6	37.6	37.9
$p_1^l$	31.4	30.6	34.4	33.9	38.1	37.7
$x_1^s$	2971	2754	2871	2732	2734	2657
$x_1^l$	2888	3096	2771	2905	2625	2700
$x_2^s$	2138	2270	2194	2274	2262	2304
$x_2^l$	2189	2062	2252	2174	2322	2280
$CS^s$	150303	147650	145913	144224	140340	139423
$CS^l$	149317	151720	144738	146273	139083	139919
$\Pi_1$	0	0	0	0	0	0
$\Pi_2$	-6567	-6186	-6755	-6521	-6965	-6841
$SNB$	293053	293183	283896	283976	272458	272500

変数の値を比較したものである。料金設定 A は、高速道路と一般道路の間に限界維持補修費用の差が存在しないときの（すなわち、 $m_1 = 1.0, m_2 = 1.0$  のときの）ラムゼイ型次善料金設定であり、道路間の限界維持補修費用の差を考慮しない非効率な料金設定である。一方、料金設定 B は、 $m_1 = 1.0, m_2 = 3.0$  のときのラムゼイ型次善料金設定であり、道路間の限界維持補修費用の差を考慮した効率的な料金設定である。全てのケースにおいて、料金設定を A から B に変更することにより、高速道路の普通車交通量の一部が一般道路に誘導され、一般道路の大型車交通量の一部が高速道路に誘導されている。また、大型車を優遇する料金改定の結果、普通車の利用者の消費者余剰は減少し、大型車の利用者の消費者余剰は増加している。料金設定を A から B に変更した際に、高速道路から一般道路へと経路変更を行う普通車の交通量と、一般道路から高速道路へと経路変更を行う大型車の交通量はそれぞれ、 $F_1 = 180000$  のケースでは 132, 127,  $F_1 = 190000$  のケースでは 80, 78,  $F_1 = 200000$  のケースでは 42, 41 となっている。普通車が一般道路に誘導されると、その分だけ高速道路に誘導される大型車交通量が増加することを確認できる。以上の定性的な結果は、3.4 で見た固定需要型料金設定による大型車の経路誘導効果と同じものである。したがって、車種別料金の差別

的な設定による大型車の経路誘導効果を通じた道路ネットワークの維持補修費用の軽減は、交通需要が弾力的である状況や事業者にゼロ利潤規制が課されている状況においても有効である。ただし、高速道路の運営の固定費用  $F_1$  が高いほど、料金改定の余地は小さくなるため、道路ネットワークの維持補修費用の軽減の余地も小さくなることに注意する必要がある。

#### 3.5.6 政策的示唆

本章では、3.4, 3.5 における理論的分析、ならびに数値計算事例を通じて、高速道路の料金改定が持つ、大型車の経路誘導を通じた道路ネットワークの維持補修費用の軽減効果の特性について、いくつかの知見を獲得することができた。まず、本章における理論分析を通じて、高速道路と代替的な一般道路が存在する環境において、道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない状況においては、この差を大型車料金に反映することが効率性の観点から望ましいことが確認された。例えば、高速道路の舗装耐荷力が一般道路よりも高く、一般道路の限界維持補修費用が高速道路よりも高い場合には、限界維持補修費用の差を大型車料金に反映することにより、一般道路の大型車交通流の一部が高速道路に誘導されて道路ネットワークの維持補修費用が軽減され、社会的総余剰が改善される。以上の定性的な結果自体は、既に Verhoef et al.[8] が示した結果より明らかである。本章の分析により獲得された新たな知見は、以上の結果が、需要の弾力性や高速道路事業者のゼロ利潤規制の有無に依存せず、頑健に成立することである。以上の分析結果は、単純化された環境における限定的なものではあるが、今後の高速道路料金に関する議論に関して1つの重要な示唆を提供するものとする。

さらに、パラメータを特定化して行われる数値的な分析を通じて、差別的な車種別料金設定の重要性を例示することができた。当然のことながら、数値分析に

より得られた知見は、対象とした数値分析事例にのみ成立する事項であるが、このような分析を通じて、高速道路と代替的な一般道路が存在する環境において、車種別料金を差別的に設定することにより、料金設定による大型車の経路誘導効果の有効性を高めることが可能であることを示したと考える。例えば、数値計算事例では、一般道路の限界維持補修費用が高速道路よりも高く、かつ、道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない場合には、現状の料金水準よりも普通車の料金を値上げし、大型車の料金を値下げすることが効率的であるという結果が得られた。この際、大型車交通流が誘導される道路とは別の道路に普通車交通流が誘導される。その結果、大型車交通流を誘導したい道路から普通車交通流が追い出されることを通じて、大型車の経路誘導効果が高められ、効率性の改善に寄与する。また、こうした車種別料金設定による大型車の経路誘導は、高速道路事業者にゼロ利潤規制が存在する状況においても有効であり、事業者の利潤を減らすことなく、道路ネットワークの維持補修費用を軽減できるという結果が得られた。

ただし、本章の数値的な分析結果は、差別的な車種別料金設定が、車種別の利用者の消費者余剰に非対称な影響をもたらすことを示している点に注意する必要がある。本章が数値計算において想定したように、一般道路の限界維持補修費用が高速道路よりも高く、かつ、道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない場合には、大型車を優遇した料金改定が行われるため、大型車の利用者の消費者余剰は増加し、普通車の利用者の消費者余剰は減少する（高速道路の限界維持補修費用の方が高い場合は逆）。この結果は、料金改定の社会的受容性を低下させる可能性がある。このような車種別の利用者の厚生に対する非対称な影響を緩和するためには、税制の変更などを通じた車種別の利用者間の所得移転が必要となる。例えば、大型車の料金を値下げし、普通車の料金を値上げする

場合には、同時に大型車の自動車税を増税し、普通車の自動車税を減税すれば、車種別の利用者の厚生に対する非対称な影響を緩和できると考えられる。このような税制と料金の同時設計問題は本章の範囲を超えており、今後の課題である。

### 3.6 結言

本章は、道路混雑と道路構造物劣化という2種類の外部不経済性を同時に考慮にいたした高速道路の次善料金に関して理論的分析を行った。その際、普通車と大型車では道路構造物の損傷・劣化に及ぼす影響が異なること、高速道路と一般道路では大型車に対する道路構造物の耐荷力が異なっている点に着目し、大型車、普通車という複数の車種を同時に考慮したネットワーク均衡モデルを定式化した。さらに、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分析を行い、高速道路料金設計問題に対していくつかの政策的示唆を得ることができた。その成果は、3.5.6でとりまとめたとおりである。当然のことながら、本章で獲得した理論的知見は2リンク1OD、2車種という高度に単純化されたネットワークにおいて成立する事項である。今後、維持補修費用を考慮した高速道路料金に関する政策的知見を蓄積するために、多くの研究課題が残されている。第1に、実ネットワークを用いた実証分析を通じて知見を蓄積することが必要である。第2に、ネットワーク均衡を求めるためのインプットデータの作成方法に関しては、これまで多くの実証研究の成果が蓄積されている。しかしながら、限界維持補修費用に関しては、研究成果の蓄積が極めて少ないのが実情である。限界維持補修費用に関するデータは、次善料金を算定するために不可欠な情報であり、今後、限界維持補修費用に関する研究成果を蓄積することが必要である。また、本章では固定的に取り扱い、議論を行わなかったが、大型車の乗用車換算係数に関しても精査が必要である。この数値は、大型車の限界維持補修費用と限界混雑

費用の比を決めるため、車種別の料金設定を分析する上で重要なものである。高速道路と一般道路の間で乗用車換算係数に差異がある場合には、その差異を分析に反映することも必要である。第3に、大型車の高速道路への経路誘導と付随して、高速道路の耐荷力に関するサービス水準に関する研究も興味ある研究課題である。道路構造物の耐久性に関しては、規模の経済性が働く [2] ことから、特定の道路構造物の耐久性を高め、その道路に大型車交通流を集中的に誘導することは、効率性の観点から望ましいと考えられる。例えば、高速道路の大型車に対する耐久性に関して複数のランクを設定するとともに、高速道路の耐久性の階層化と大型車の戦略的経路誘導を同時に考慮に入れて、高速道路の耐久性を最適設計する方法論を開発することも重要な課題であろう。第4に、民間高速道路事業者が社会的に最適な料金設定を実施するように誘導する政策手段を分析することが必要である。例えば、高速道路の大型車交通量に応じて、事業者に補助金を支出したり、高速道路の構造物の耐荷力が社会的に最適に設計されるように誘導するための施策が該当する。こうした動機付けの設計に関する研究は、PPPによる高速道路整備を検討する際に有用な示唆を提供しうると考える。最後に、道路構造物の限界維持補修費用は構造物の劣化水準に依存する。また、構造物の劣化水準は道路の区間ごとに異なっているため、時間を通じて各区間の限界維持補修費用は変化することになる。こうした点を考慮すると、より効率的な料金設定のためには、区間ごとの道路構造物の劣化水準に応じた動的な料金調整を行う必要がある。このような料金調整の分析を行うための動的な枠組みの構築が必要である。



### 3.7 付録I 変動需要型次善料金設定に関する比較静学分析

変動需要型次善料金設定問題 (3.36a)–(3.36c) の最適解に対して  $m_1, m_2$  に関する比較静学分析を行う。2 階の十分条件が成立すると仮定する。まず、 $m_2$  に関する比較静学の基本方程式は、

$$H(L_o) \begin{bmatrix} d\bar{\lambda}_1^s \\ \vdots \\ d\tilde{\beta}^s \\ d\tilde{\beta}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q^l \end{bmatrix} dm_2 \quad (3.43)$$

と表せる。ここで、 $H(L_o)$  はラングランジュ関数  $L_o$  のヘッセ行列（縁付きヘッセ行列）であり、1 行目（1 列目）から順に、 $\bar{\lambda}_1^s, \bar{\lambda}_1^l, \bar{\lambda}_2^s, \bar{\lambda}_2^l, p_1^s, p_1^l, b^s, b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  に対応している。式 (3.43) の左辺のベクトルは、 $m_2$  が微小に増加した際のラグランジュ乗数と内生変数の変化量を並べたベクトルである。式 (3.43) の右辺のベクトルは、10 番目の要素が  $q^l$  であり、その他の要素が 0 のベクトルである。2 階の十分条件より  $H(L_o)$  は正則行列であり線形連立方程式 (3.43) は一意な解を持つ。クラメル公式を用いると、 $d\tilde{\beta}^l$  を、

$$\begin{aligned} d\tilde{\beta}^l &= \frac{\begin{vmatrix} 0 & \cdots & \frac{\partial^2 L_o}{\partial \bar{\lambda}_1^s \partial \tilde{\beta}^s} & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^s \partial \bar{\lambda}_1^s} & \cdots & \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^s \partial \tilde{\beta}^s} & 0 \\ \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^l \partial \bar{\lambda}_1^s} & \cdots & \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^l \partial \tilde{\beta}^s} & q^l \end{vmatrix}}{|H(L_o)|} dm_2 \\ &= q^l \frac{\begin{vmatrix} 0 & \cdots & \frac{\partial^2 L_o}{\partial \bar{\lambda}_1^s \partial \tilde{\beta}^s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^s \partial \bar{\lambda}_1^s} & \cdots & \frac{\partial^2 L_o}{\partial \tilde{\beta}^s \partial \tilde{\beta}^s} \end{vmatrix}}{|H(L_o)|} dm_2 \end{aligned} \quad (3.44)$$

と表すことができる。ここで、 $|A|$  は行列  $A$  の行列式を表す。2 階の十分条件より  $|H(L_o)|$  の符号は正となる。また、式 (3.44) の右辺の分数の分子は、 $H(L_o)$  の縁を保存した 9 次の主小行列の行列式である。ここで、「縁を保存した主小行列」とは、

縁付きヘッセ行列の行と列のうち、ラグランジュ乗数に対応する行と列（本節の例では1行目・1列目から4行目・4列目）を除去せずに作られる主小行列である。2階の十分条件より、 $H(L_o)$ の縁を保存した9次の主小行列の行列式の符号は負となる。したがって、 $m_2$ の増加は $\tilde{\beta}^l$ を減少させる。

次に、 $m_1$ に関する比較静学の基本方程式は、

$$H(L_o) \begin{bmatrix} d\tilde{\lambda}_1^s \\ \vdots \\ db^s \\ db^l \\ d\tilde{\beta}^s \\ d\tilde{\beta}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q^l \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} dm_1 \quad (3.45)$$

と表される。式(3.45)の右辺のベクトルは、8番目の要素が $q^l$ であり、その他の要素が0のベクトルである。式(3.45)に対してクラメルの公式を用いると、 $db^l$ を、

$$db^l = q^l \frac{|H_{-b^l}(L_o)|}{|H(L_o)|} dm_1 \quad (3.46)$$

と表すことができる。ここで、 $H_{-b^l}(L_o)$ は、 $H(L_o)$ の行と列のうち $b^l$ に対応する行と列（すなわち、8行目と8列目）を除去して得られる、縁を保存した9次の主小行列である。2階の十分条件より、 $|H(L_o)|$ の符号は正となり、 $|H_{-b^l}(L_o)|$ の符号は負となる。したがって、 $m_1$ の増加は $b^l$ を減少させることが示される。

### 3.8 付録II ラムゼイ型次善料金設定に関する比較静学分析

ラムゼイ型次善料金設定問題(3.40a)–(3.40d)の最適解に対して $m_2$ に関する比較静学分析を行う。2階の十分条件が成立すると仮定する。比較静学の基本方程式は、

$$H(L_w) \begin{bmatrix} d\tilde{\lambda}_1^s \\ \vdots \\ d\tilde{\beta}^s \\ d\tilde{\beta}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ q^l \end{bmatrix} dm_2 \quad (3.47)$$

と表される。ここで、 $H(L_w)$  はラグランジュ関数  $L_w$  のヘッセ行列であり、1 行目 (1 列目) から順に、 $\tilde{\lambda}_1^s, \tilde{\lambda}_1^l, \tilde{\lambda}_2^s, \tilde{\lambda}_2^l, \hat{\lambda}, p_1^s, p_1^l, b^s, b^l, \tilde{\beta}^s, \tilde{\beta}^l$  に対応している。式 (3.47) の右辺のベクトルは、11 番目の要素が  $q^l$  であり、その他の要素が 0 のベクトルである。2 階の十分条件より  $H(L_w)$  は正則行列であり、線形連立方程式 (3.47) は一意な解を持つ。クラメルの公式により  $d\tilde{\beta}^l$  は、

$$d\tilde{\beta}^l = q^l \frac{|H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w)|}{|H(L_w)|} dm_2 \quad (3.48)$$

と表せる。ここで、 $H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w)$  は、 $L_w$  の行と列のうち  $\tilde{\beta}^l$  に対応する行と列 (すなわち、11 行目と 11 列目) を除去して得られる、縁を保存した 10 次の主小行列である。2 階の十分条件より、 $|H(L_w)|$  の符号は正となる。 $H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w)$  は、

$$H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w) = \begin{bmatrix} O & A \\ A^T & B \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

という形式の対称行列である。ここで、 $O$  は要素が全て 0 の 5 次の正方行列、 $A$  は 5 次の正方行列、 $A^T$  は  $A$  の転置行列、 $B$  は 5 次の対称行列である。2 階の十分条件とは関係なく、この形式の行列の行列式は、

$$|H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w)| = -|A|^2 \quad (3.50)$$

となる (行列  $O, A, B$  の次数が奇数なら  $-|A|^2$  となり、偶数なら  $|A|^2$  となる)。よって、 $|H_{-\tilde{\beta}^l}(L_w)|$  の符号は非正となる。この結果より、 $m_2$  の増加は  $\tilde{\beta}^l$  を減少させるか、もしくは、変化させないことが示される。



## 参考文献

- [1] 文世一：交通混雑の理論と政策，東洋経済新報社，2005.
- [2] Newbery, D.M.: Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- [3] Newbery, D.M.: Cost recovery from optimally designed roads, *Economica*, Vol.56, No.222, pp.165-185, 1989.
- [4] Small, K.A. and Winston, C.: Optimal highway durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.
- [5] Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A.: *Road Work: A New Highway Pricing and Investment Policy*, The Brookings Institution, Washington, D. C., 1989.
- [6] Chu, C.P. and Tsai, J.F. : Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, No.4, pp.457-477, 2004.
- [7] Tsekeris, T. and Vos, S.: Design and evaluation of road pricing: State-of-the-art and methodological advances, *Netnomics*, Vol.10, pp.5-52, 2009.
- [8] 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.

- [9] Arnott, R. and Yan, A.: The Two-Mode Problem: Second-Best Pricing and Capacity, *Boston College Working Papers in Economics* 474, Boston College Department of Economics, 2000.
- [10] Rouwendal, J. and Verhoef, E.T.: Second-best pricing for imperfect substitutes in urban networks, *Research in Transportation Economics*, Vol.9, No.1, pp.27-60, 2004.
- [11] Small, K.A. and Yan, J.: The value of "value pricing" of roads: second-best pricing and product differentiation, *Journal of Urban Economics*, Vol.49, pp.310-336, 2001.
- [12] 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, pp.127-156, 2004.
- [13] Bruzelius, N.: Measuring the marginal cost of road use - an international survey, *VTI Meddelande 963A*, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Sweden, 2004.
- [14] Highway Research Board : *The AASHO Road Test, Report 5: Pavement Research*, HRB Special Report No. 61E, Washington, D.C., 1962.
- [15] 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I編 利用者均衡配分の適用に向けて，社団法人土木学会，2003.
- [16] Link, H.: An econometric analysis of motorway renewal costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.

### 3.8 付録Ⅱ ラムゼイ型次善料金設定に関する比較静学分析

---

[17] 国土交通省 道路局 都市・地方整備局：費用便益分析マニュアル, 2008.





## 第4章 道路舗装の限界維持補修費用に関する研究

### 4.1 緒言

道路舗装の劣化要因は自然劣化と車両による劣化に大別される。その中でも大型車の走行は特に道路舗装における損傷の発生に大きな影響を及ぼす。たとえば、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[1]。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。また、青木他[2]は、わが国の高速道路を対象として、大型車の交通量が道路舗装の劣化速度に及ぼす影響を実証的に分析し、大型車走行の影響を無視できないことを明らかにしている。

わが国では、基本的に税金を原資として一般道路の維持補修が実施されている。その一方で、高速道路を含む有料道路は利用者から徴収した料金を用いて維持補修が行われている。しかしながら、料金を徴収する有料道路の料金体系は主として有料道路の建設債務償還を目的として設定されており、維持補修費用を積極的に考慮したものとはなっていない。昨今の有料道路の無料開放に見られる通り、有料道路は債務償還後に無料開放され、債務償還後は税金を用いて維持補修が行われるようになる。また、高速道路と一般道路では道路施設の頑丈さが異なり、大型車は一般的には高速道路よりも一般道路に対してより大きなダメージを与える傾向にある。高速道路の大規模更新等に象徴されるように、道路は新設から維持補修の時代に移行しつつあり、道路の劣化要因に着目した維持補修は避けられ

ない。

さらに、道路の劣化過程は時間軸に関して確定的ではなく確率的に推移することが知られているが、オーバーレイ等の維持修繕工事は十数年以上で1回行われる等、頻度が少ないため、道路の維持補修費用を正確に求めるためには、実際の維持補修費用の支出だけではなく、道路の劣化過程を考慮した上で将来の維持補修も見据えたトータルな維持補修費用を算出する必要がある。特に社会的に効率的な料金設定問題を分析するに当たっては、車両1台当たりの道路の限界維持補修費用が必要となる。欧米諸国では Cost Allocation Study と呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究により道路の限界維持補修費用を計算しているものの、日本においては道路の限界維持補修費用の公表値は筆者の知る限り見当たらない。維持補修費用を考慮した日本の高速道路の料金設定問題を分析するにあたっては、日本における車両1台当たりの道路の限界維持補修費用の値が必須である。

本章では、道路舗装の劣化過程を表現した劣化モデルの推定結果および舗装補修・更新費用（オーバーレイ及び打換え）を用いて、道路舗装の限界維持補修費用を計算する方法を提案する。以下、**4.2**では既存研究の概要及び本章の基本的な考え方を整理した。**4.3**では維持修繕費用のモデル化を行い、**4.4**では舗装の劣化過程のモデル化を行った。**4.5**でライフサイクルコストの定式化を行い、**4.6**では適用事例を通じて、割引現在価値法及び平均費用法による限界維持補修費用を試算し、その妥当性について考察した。

## 4.2 本章の基本的な考え方

### 4.2.1 既存研究の概要

舗装の維持補修費用および限界維持補修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補修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、維持補修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補修戦略を基にして、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、舗装の維持補修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[3][4]やHaraldson[5]がOLS（最小二乗法）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補修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、維持補修費用が舗装のオーバーレイ等の実施時期により大きく変動し、維持補修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補修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補修費用の費用関数の計算を行う。この推計方法はNewbery[6]、Small and Winston[7]、Small et al.[8]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 [9][10][11]。

Small et al.[8]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、舗装の維持補修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 Madanat[10]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、Anani[11]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) [12] 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、三重県の国道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。小林他(2008)[13] は、M 県の国道のわだち掘れのデータを用いて、測定誤差を考慮した劣化予測モデルの推計を行った。

貝戸他(2005) [14]、青木他(2006) [15] は、橋梁部材の劣化モデル及び補修戦略を設定した上でライフサイクルコストを最小化する評価方法について検討し、割引現在価値評価法よりも平均費用評価法の方がトータルコストを最小化することを示した。

限界維持補修費用については筆者の知る限り日本における研究事例は見当たらないが、米国の Cost Allocation Study (1982) [8] によると、米国の地方部の州間高速道路における限界維持補修費用は9セント/マイル・ESAL であるのに対して、都市部の幹線道路では66セント/マイル・ESAL、都市部の一般道路では80セント/マイル・ESAL という結果が報告されている。高速道路よりも一般道路の方が限界維持補修費用が大きく、高速道路よりも一般道路の方が約7~9倍の限界維持補修費用を要する。

また、米国州間高速道路の Cost Allocation Study (1997) [16] によると、乗用車1台の舗装の限界維持補修費用は、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補修費用は、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補修費用は、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。乗用車の限界維持補修費用は大型

車と比較してかなり小さく、限界維持補修費用は軸荷重 (ESAL) について非線形に増加することが確認できる。

ただし、欧米諸国を中心として実施されてきた Cost Allocation Study と呼ばれる道路費用の負担配分に関する一連の研究は、受益者負担の原則に立つとともに、道路利用により発生する費用の負担割合を計算しているが、具体的な計算過程は明らかにされていないことが多い。

土工部の道路舗装は表層、基層、路盤より構成される。道路の路面健全度と舗装耐荷力の推移過程は相互に影響を及ぼし合うため、舗装の維持修繕費用を計算するためには、オーバーレイだけではなく打換えによる舗装更新も考える必要がある。小林他 (2012) [17] は、路面耐荷力の低下が舗装健全度に与える影響を考慮した劣化モデルにより LCC を最小化する最適なサービス水準を導いた。しかしながら、舗装の打換えの事例はそれほど多くないため、更なる研究の蓄積が求められるところである。特に一般道路における舗装の打換え事例は非常に少ない状況である。

本章では、道路の主たる維持補修である舗装の維持補修について、道路の劣化要因が自然劣化と車両による劣化に大別されることに着目し、劣化過程を考慮した道路舗装の限界維持補修費用を試算する。高速道路及び一般道路の舗装劣化予測モデルの推定結果を活用し、車両 1 台当たりの限界維持補修費用および自然劣化に起因する維持補修固定費用を計算する維持補修費用推計モデルを提案する。さらに、道路の舗装路面及び舗装全体を対象とした適用事例を通じて、維持補修費用推計モデルの有効性について考察する。ただし、一般道路における舗装打換えの事例は非常に少ないため、一般道路については舗装路面の補修に関する限界維持補修費用を算出する。筆者の知る限り、日本の道路舗装における車種別限界維持補修費用を推計した研究事例は他に見当たらない。また、海外ではオーバー

レイを考慮した研究事例は存在するが、舗装の打換えを考慮し、道路舗装全体の維持補修費用を計算した研究事例は筆者が知る限り見当たらない。なお、限界維持補修費用を求めることにより、社会的に最適な高速道路料金体系等の研究に活用可能であることも本章の有用性の一つである。

### 4.2.2 限界維持補修費用の定義

限界費用は経済学的に重要な概念であり、社会的に効率的な最適解を導く際のファクターである。Mohring and Harwitz[18]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が(Self-Financingの定理)、この混雑料金は社会的限界費用と私的限界費用の差分として表現され、交通量に関する限界費用を用いている。

高速道路の持続可能な運営を可能とする料金設定問題を分析する際には、高速道路事業者が生じる全費用を考慮することが必要である。高速道路事業者が生じる費用としては、債務償還費用、日常的維持補修費用(施設の清掃・点検・補修など)、施設の修繕・更新費用、事務的な費用等が挙げられる。高速道路事業者が生じない費用(混雑費用、環境費用、施設の修繕・更新時の交通規制がもたらす費用、一般道路の維持補修費用など)は、効率的な料金設定を議論する際に必要となる。料金設定の効率性が問題とならない場合には、必ずしもこれらの費用を考慮する必要はないが、効率的な料金設定を議論する際には、各費用について車種別の限界費用を求める必要がある。

完全に効率的な料金設定を議論する場合には、全ての限界費用を考慮する必要があるものの、ある種の限界費用の大きさが無視できるほど小さい場合は必ずしも考慮する必要はない。本章は環境問題をテーマとしていないため、環境費用は対象外とする。修繕・更新時の交通規制費用は、通常の旅行時間コストとの重複

に留意して扱う必要がある。この重複を解消するためには交通量配分を通常時と規制時で分けて行う必要があり、また、高速道路事業者が直接負担する費用(調査費、補修費等)と比較しても交通規制費用の推計精度に課題が残されていると言わざるを得ないため、本章の限界維持補修費用には反映しないこととする。

また、交通量に着目すると、交通量が増加するほど清掃や点検、巡回等の回数が増加し日常的維持補修費用は増大する傾向にあるが、大型車交通量のみが影響を与えるのは舗装や橋梁等の土木構造物修繕費用であり、車種別の限界維持補修費用を考えるには土木構造物の修繕に着目することが妥当である。

さらに、道路は大きくは土工部、橋梁部、トンネル部に分かれるが、都市間高速道路では土工部が約7割、都市高速道路では橋梁部が約8割を占めている[19]–[23]。トンネル部はどちらにおいても約1割程度であり、土木構造物修繕に占める割合は小さい。トンネル部では交通規制の伴う舗装工事を避ける意味もあって、頑丈なコンクリート舗装が採用されており、舗裝修繕工事はほとんど実施されないため、限界維持修繕費用は0円と見なすことが可能である。

なお、大型車は舗装だけではなく橋梁部へも大きなダメージを与えていると想定されるが、大型車交通量を考慮して橋梁部の劣化過程を研究した事例として坂井[24]が挙げられる。坂井は小濱他[25]の相対評価モデルを参考に大型車交通量を考慮して橋梁の維持補修のトータルコストを算出しているものの、橋梁の劣化予測モデルの研究事例が非常に少ないことから、橋梁の劣化予測モデルの更なる精度向上が待たれるところである。

以上の整理を踏まえ、本章では、橋梁部及びトンネル部は対象とせず、土工部の道路舗装を対象とした限界維持補修費用を試算することとする。なお、交通量に着目すると、限界維持補修費用は「交通量が1台増加した時の道路舗装の維持補修費用の増分」と定義できる。維持修繕費用としてはオーバーレイを基本に、

必要に応じて打換えを考慮する。

なお、当然のことながら、道路舗装の限界維持補修費用はサービス水準によって変動する。舗装を良い状態に保てば限界維持補修費用は増加する。本章では道路舗装のサービス水準を考慮し、最適な限界維持補修費用を求めることが可能なスキームを提案する。

### 4.2.3 平均費用法

道路舗装を半永久的構造物と考え、ライフサイクル費用評価を行うことには一定の理由がある。道路舗装が供用されることにより便益が発生する。特に、将来時点で道路舗装の拡幅や機能向上、あるいは破棄が実施される計画がある場合、ライフサイクル費用のみに基づいて道路舗装補修戦略を検討することには問題がある。この場合、道路舗装の拡幅や機能向上がもたらす経済便益とライフサイクル費用を同時に考慮に入れながら、道路舗装の補修戦略を検討することが必要となる。一方、現在の道路舗装の機能が適切な維持補修や更新により半永久的に維持される場合には、道路舗装がもたらす便益に変化が生じるわけではないため、ライフサイクル費用のみに着目して道路舗装（あるいは、その部材）の補修戦略を検討することが正当化されうる。

本章では、道路舗装の機能が補修、更新を通じて半永久的に持続される場合には、ある補修戦略の下で発生する補修費用を単位期間（たとえば1年）当たりの平均費用に変換することによって、ライフサイクル費用を評価することが可能であることに着目する。道路舗装部材の劣化過程が確定的であれば、道路舗装部材の新設・更新時点から次の更新時点までの期間を当該部材の寿命期間と定義し、その期間中に発生する補修費用の総和を寿命期間長で割ることにより平均費用を算定することができる。平均費用を用いたライフサイクル費用評価は単純な方法ではあるが、前述したような目標計画期間の任意性の問題を克服することが可能



である。さらに、小林 [26] は、多くの建設時期や寿命が異なる道路舗装を半永久的にマネジメントする場合、平均費用法を用いて個別の道路舗装部材の補修戦略を決定することにより、結果的に管理道路舗装群全体（以下、道路舗装システム全体と呼ぶこととする）のマネジメントに要する総ライフサイクル費用の割引現在価値の最小化を達成することが可能であることを示している。

道路舗装部材の劣化過程を確定的にモデル化できる場合には、上述の方法で平均費用を容易に定義できる。しかし、劣化過程に不確実性が存在する場合、時間を通じた健全度の変化を一意的に定義することができなくなる。さらに、ライフサイクル費用の評価時点において、道路舗装部材の劣化がある程度進展している場合、つぎの更新時点までの余寿命を考慮することが必要となる。本章では半永久的供用が予定されている道路舗装の各部材の不確実な劣化過程をマルコフ連鎖モデルを用いて表現するとともに、無限期間の将来にわたって生じるライフサイクル費用を毎年等価な年平均費用の流列として評価する方法を提案する。なお、ここでいう年平均費用とは会計的費用概念であり、無限期間の中で発生するライフサイクル費用を毎年等価な会計的費用として再配分した平均費用を表す。このような会計的費用概念としての平均費用を「年平均費用」と呼ぶこととし、ライフサイクル費用評価において慣習的に用いられている「平均費用」という用語と区別する。

## 4.3 限界維持修繕費用のモデル化

### 4.3.1 限界維持修繕費用の算出方法

4.2.2 で言及した通り、限界維持補修費用は「交通量が1台増加した時の道路舗装の維持補修費用の増分」と定義できる。限界維持補修費用を計算するためには、まずは維持修繕費用を定義し計算する必要がある。道路舗装を考えたとき、オーバーレイや打換え等の修繕費用は毎年発生せず、数年もしくは十数年、長ければ

数十年に一度の修繕となる。大型車の通行の累積や自然劣化により道路舗装の劣化が進み、ある管理水準を超えた際に道路舗装の修繕が実施される。道路舗装の維持修繕費用についてはこのような費用の経年変化があるため、維持修繕費用を算出するには、道路舗装の劣化及び修繕を長期的視点でモデル化し、推定を実施する必要がある。

4 乗ルールからわかるとおり、普通車が舗装へ与えるダメージよりも大型車が舗装へ与えるダメージの方がはるかに大きい。そのため、本章においては、普通車が舗装に与えるダメージをほぼ皆無と見なし、普通車の限界維持補修費用はゼロ円とする。そこで本章では大型車の限界維持補修費用を算出するモデルを定式化する。

舗装劣化モデルを定式化すれば、最適補修政策  $\omega^*$  を用いてライフサイクルコスト  $LCC$  を導くことが可能となる。ここではライフサイクルコストを維持修繕費用の割引現在価値  $V$ 、大型車交通量は  $x^l$  と定義する。毎年  $E(x^l)$  の維持修繕費用が発生し、実質金利は  $r\%$  ( $r \neq 0$ ) とすると、現在時刻を基準にして、将来に生じる維持修繕費用の割引現在価値  $V$  (円) は、

$$LCC = V(x^l) = \int_0^{\infty} E(x^l)e^{-rt} dt = \frac{E(x^l)}{r} \quad (4.1)$$

となる。式 (4.1) を  $E(x^l)$  について解くと

$$E(x^l) = rV(x^l) \quad (4.2)$$

が得られ、1 年当たりの維持修繕費用は割引現在価値  $V$  と実質金利  $r\%$  ( $r \neq 0$ ) の積となる。ただし、 $V(x^l)$  は調査・補修更新政策により変化することに注意する必要がある。つまり、大型車 1 台あたりの限界維持修繕費用  $m^l$  及び維持修繕費用の固定費用  $M$  も同様に調査・補修更新政策により変化する変数となるが、表現を簡易なものとするため調査・補修更新政策に関する変数の記載を省略した。なお、舗装劣化モデル及び調査・補修更新政策の詳細は 4.4 で説明する。

次に、大型車 1 台当たりの限界維持修繕費用を算出するには、大型車交通量  $x^l$  と維持修繕費用  $E$  の関係関数  $E(x^l)$  の形式で求め、 $\frac{dE(x^l)}{dx^l}$  を計算することとなる。ここで、大型車交通量  $x^l$  と維持修繕費用  $E$  は本来、任意の期間で算出することが可能であるが、本章では議論を簡単化するため、1 年当たりの大型車交通量及び維持修繕費用を用いるものとする。すなわち、大型車交通量  $x^l$  の単位は台／年（台／日× 365 日）、維持修繕費用  $E$  の単位は円／年とする。次に、維持修繕費用は固定費用と変動費用に分けられるが、大きくは自然劣化に起因する維持修繕費用は固定費用、大型車の通行に起因する維持修繕費用は変動費用と定義する。すなわち、

$$E(x^l) = m^l x^l + M \quad (4.3)$$

と表現すれば、

$$\frac{dE(x^l)}{dx^l} = m^l \quad (4.4)$$

となる。ここで、 $m^l$  は大型車 1 台あたりの限界維持修繕費用、 $M$  は維持修繕費用の固定費用（主に自然劣化に起因）である。なお、限界費用の定義式は一般的なものではないため、本論文では式 (4.4) のように定義する。

また、式 (4.2) 及び式 (4.3) から

$$\begin{aligned} rV(x^l) &= m^l x^l + M \\ V(x^l) &= \frac{m^l x^l + M}{r} \end{aligned} \quad (4.5)$$

と表現できる。ここで  $x^l = 0$  と置くと

$$rV(0) = M \quad (4.6)$$

を導くことができ、式 (4.5) は

$$V(x^l) = \frac{m^l}{r} x^l + V(0) \quad (4.7)$$

となる。すなわち、維持修繕費用の割引現在価値  $V(x^l)$  は、大型車交通量がゼロ台のときの割引現在価値  $V(0)$  に、限界維持修繕費用  $m^l$  を実質金利  $r$  で除し大型車交通量  $x^l$  を乗じた値を加算したものとなる。

以上の議論から、大型車の限界維持修繕費用  $m^l$  は

$$m^l = r \frac{V(x^l) - V(0)}{x^l} \quad (4.8)$$

$$= \frac{E(x^l) - E(0)}{x^l} \quad (4.9)$$

となる。式(4.9)によれば大型車交通量  $x^l$  の値によって大型車の限界維持修繕費用  $m^l$  は変化することになるが、本章では限界維持修繕費用は線形に変化すると仮定する（大型車交通量に依存せず一定）。つまり、大型車交通量  $x^l$  が最大の場合の割引現在価値を用いて限界維持修繕費用を算出するものとする。

### 4.3.2 維持修繕費用の最小化

戦略的に最適な1年当たりの維持修繕費用  $E(x^l)$  を求めるには、道路舗装の劣化モデルを推定し、維持修繕戦略を設定した上で、ライフサイクルコスト (LCC) を最小化する必要がある。ライフサイクルコストを最小化する方法として「平均費用最小化法」及び「割引現在価値最小化法」の2通りが存在することが知られている [31]。すなわち、維持修繕費用の割引現在価値  $V(x^l)$  を最小化すること、及び1年当たりの維持修繕費用  $E(x^l)$  を最小化すること、の2通りの考え方によりライフサイクルコストを最小化することとなる。

貝戸他 (2005) [14] は、橋梁部材の劣化・補修過程をマルコフ連鎖モデルで表現し、平均費用最小化原則及び割引現在価値最小化原則に基づいた最適補修政策を求めるマルコフ決定モデルを提案している。本章では、貝戸他 (2005) [14] による平均費用最小化モデル、及び割引現在価値最小化モデルを参考にして、道路舗装に関する限界維持修繕費用を求めることとする。

## 4.3.3 平均費用最小化法

平均費用最小化法のモデルの詳細に関しては参考文献 [14] に譲るが、ここでは読者の便宜を図るために、道路舗装の場合における平均費用最小化モデルを簡単に紹介する。

平均費用最小化法は、補修政策  $\omega \in \Omega$  を用いた場合のライフサイクル費用を毎年等価な費用として再配分した平均費用  $e^\omega$  を最小化する方法である。ライフサイクル費用を平均費用に変換し最小化することで、対象施設を半永久的に維持するために支出される補修費を、毎年等価な平均費用の流列  $(e^\omega, \dots, e^\omega, \dots)$  に置き換えることができる。

補修政策  $\omega$  を用いた場合、時点  $T_{im}$  までの期待累積ライフサイクル  $u^\omega(d_{fs}, T_{im})$  を用いて、時点  $T_{im}$  までの平均費用を  $u^\omega(d_{fs}, T_{im})/T_{im}$  と表せる。ここで、マネジメント期間  $T_{im}$  を無限大に延長した平均費用  $E^\omega(d_{fs}, x^l)$  を

$$E^\omega(d_{fs}, x^l) = \lim_{T_{im} \rightarrow \infty} \frac{u^\omega(d_{fs}, T_{im})}{T_{im}} \quad (d_{fs} = 1, \dots, K-1) \quad (4.10)$$

と定義しよう。ここで  $d_{fs}$  は施設の健全度、 $K$  はただちに補修・更新が行われる臨界健全度である。この時、平均費用  $E^\omega(d_{fs}, x^l)$  の最小化を目的とする平均費用最小化モデルは

$$C^{\omega^*}(d_{fs}, x^l) = \min_{\omega \in \Omega} \left\{ \lim_{T_{im} \rightarrow \infty} \frac{u^\omega(d_{fs}, T_{im})}{T_{im}} \right\} \quad (d_{fs} = 1, \dots, K-1) \quad (4.11)$$

と定式化できる。平均費用最小化モデル (4.11) の最適補修政策  $\omega^*$  を平均費用最小化政策と呼ぶこととする。

平均費用最小化モデル (4.11) の解法 (Howard の政策改良法を用いた解法) に関しては参考文献 [14] を参照して欲しい。なお、平均費用最小化モデルは、割引

現在価値最小化モデルにおいて割引率（実質金利）をゼロとした特殊ケースに相当することが理論的に証明されている [31]。平均費用法は割引率がゼロの場合である計算方法であるため、割引率の影響を大きく受ける事後補修的な戦略が採用されにくく、予防保全的な補修戦略の方が平均費用を小さくする傾向にある。

### 4.3.4 割引現在価値最小化法

割引現在価値最小化法は、初期時点以後、割引現在価値法を用いて最適に道路舗装を管理することにより達成可能な期待ライフサイクル費用の割引現在価値の最小値を実現する最適補修戦略を導く方法である。具体的には、式 (4.1) を最小化する最適補修政策  $\omega^*$  を求める方法であるが、割引率が大きいと事後補修的な補修戦略の方が割引現在価値が小さくなる傾向にある。割引現在価値最小化モデルの解法は参考文献 [32] が詳しい。

## 4.4 舗装の劣化過程のモデル化

### 4.4.1 前提条件

ここでは、小林等が提案した混合マルコフ連鎖モデル [27] を用いて舗装全体の劣化過程をモデル化する。本モデルの詳細に関しては参考文献 [17] に譲るが、ここでは読者の便宜を図るために階層的隠れマルコフハザードモデルを紹介しておく。なお、本モデルは維持修繕戦略としてオーバーレイ及び打換えを考慮したモデルであるが、維持修繕戦略としてオーバーレイのみを考慮する場合は、舗装耐荷力を考慮せず路面健全度のみを用いるモデルとなる。路面健全度のみを考慮した舗装劣化モデルは最後に簡略化して掲載する。

道路管理者がカレンダー時刻  $\tau_0$  に道路施設を建設し、それ以降の時刻にわたって道路舗装を管理する問題を考える。一般に、舗装は、表層、基層、路盤、路床という複数の層で構成される多層構造を有している。階層的隠れマルコフ劣化モ

デルでは舗装の劣化状態を路面健全度と舗装全体の力学的特性を表す耐荷力という2つの評価指標を用いて表現する。このうち、路面は自動車利用による摩耗や繰り返し荷重、天候・気象等の影響により劣化が進展し、表層のひび割れ、わだち掘れ、平坦性の低下等の現象が顕在化する。路面性状調査を通じて、路面健全度を測定することが可能である。これと同時に、舗装を構成する各層も雨水や地下水の浸透、繰り返し荷重の作用等により構造的劣化が進展し、耐荷力が低下する。階層的隠れマルコフ劣化モデルでは、舗装の耐荷力が低下すれば、路面の劣化速度に影響を及ぼし路面の劣化が加速されると考える。耐荷力の低下過程をマルコフ過程として表現するとともに、路面の劣化過程を劣化速度が耐荷力の状態に依存するような非斉次マルコフ過程として表現する。さらに、耐荷力、路面健全度の複合的な劣化過程を、路面の劣化過程を上位システム、耐荷力の低下過程を下位システムとし、上位システムの変化過程が下位システムの変化過程の影響を受けるような階層的マルコフ過程モデルとして表現するところに特徴がある。

#### 4.4.2 耐荷力の低下過程

道路舗装を建設・更新した初期時点  $\tau_0$  を起点とする離散時間軸  $\tau = 0, 1, \dots$  を考える。舗装構造の耐荷力を  $S$  個のレーティング指標  $\sigma$  ( $\sigma = 1, \dots, S$ ) で表現する。 $\sigma$  の値が大きくなるほど、耐荷力が低下した状況を表す。離散時間軸上の期間  $[\tau, \tau + 1]$  における耐荷力の低下過程を表すマルコフ推移確率は、時点  $\tau$  で評価された耐荷力  $g(\tau) = \sigma$  を与件とし、次の  $\tau + 1$  期において耐荷力  $g(\tau + 1) = \iota$  が生起する条件付確率

$$\text{Prob}[g(\tau + 1) = \iota | g(\tau) = \sigma] = P^{\sigma\iota} \quad (4.12)$$

として定義できる。期間長を1に基準化する。マルコフ推移確率は、津田等 [28] が開発したマルコフ劣化ハザードモデルを用いて表現できる。そのために、時点

$\tau$  における耐荷力  $\sigma$  ( $\sigma = 1, \dots, S-1$ ) のハザード率 (以下, 耐荷力ハザード率と呼ぶ) [29]:[30] $\kappa^\sigma$  を

$$\kappa^\sigma(x^l) = \mathbf{X}\zeta^\sigma \quad (4.13)$$

と表す. ただし,  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_N)$  は, 説明変数ベクトルである. 説明変数ベクトルの中に, 大型車交通量  $x^l$  に関する説明変数が含まれる.  $\zeta^\sigma = (\zeta_1^\sigma, \dots, \zeta_N^\sigma)'$  は未知パラメータベクトルである. 記号  $'$  は転置を,  $N$  は説明変数の数を表す. 耐荷力ハザード率  $\kappa^\sigma$  は, 期間  $[\tau, \tau+1]$  に対して定義されている. 耐荷力ハザード率  $\kappa^\sigma$  が, 大型車交通量に依存していることを明示的に表すために  $\kappa^\sigma(x^l)$  と表記する. 時点  $\tau$  において耐荷力  $\sigma$  の状態から, 時点  $\tau+1$  においても耐荷力  $\sigma$  が継続する確率は,

$$\begin{aligned} P^{\sigma\sigma}(x^l) &= \text{Prob}[g(\tau+1) = \sigma | g(\tau) = \sigma, x^l] \\ &= \exp\{-\kappa^\sigma(x^l)\} \end{aligned} \quad (4.14)$$

となる. さらに, 時点  $\tau$  と時点  $\tau+1$  の間で耐荷力が  $\sigma$  から  $\iota (> \sigma)$  に推移するマルコフ推移確率  $P^{\sigma\iota}(x^l)$  ( $\sigma = 1, \dots, S-1; \iota = \sigma, \dots, S$ ) は,

$$\begin{aligned} P^{\sigma\iota}(x^l) &= \text{Prob}[g(\tau+1) = \iota | g(\tau) = \sigma, x^l] \\ &= \sum_{v=\sigma}^{\iota-1} \prod_{u=\sigma}^{v-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^u(x^l) - \kappa^v(x^l)} \\ &\quad \prod_{u=v}^{\iota-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^{u+1}(x^l) - \kappa^v(x^l)} \exp\{-\kappa^v(x^l)\} \\ &(\sigma = 1, \dots, S-1; \iota = \sigma+1, \dots, S) \end{aligned} \quad (4.15)$$

と表すことができる [28]. ただし, 表記上の規則として,

$$\begin{cases} \prod_{u=\sigma}^{v-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^u(x^l) - \kappa^v(x^l)} = 1 & (v = \sigma \text{ の時}) \\ \prod_{u=v}^{\iota-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^{u+1}(x^l) - \kappa^v(x^l)} = 1 & (v = \iota \text{ の時}) \end{cases}$$



が成立すると考える。さらに、表記の便宜上、

$$\begin{aligned} & \prod_{u=\sigma, \neq v}^{\iota-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^u(x^l) - \kappa^v(x^l)} \exp\{-\kappa^v(x^l)\} \\ &= \prod_{u=\sigma}^{v-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^u(x^l) - \kappa^v(x^l)} \prod_{u=v}^{\iota-1} \frac{\kappa^u(x^l)}{\kappa^{u+1}(x^l) - \kappa^v(x^l)} \\ & \exp\{-\kappa^v(x^l)\} \end{aligned}$$

と簡略化する。また、 $P^{\sigma S}(x^l)$  に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\begin{aligned} P^{\sigma S}(x^l) &= 1 - \sum_{\iota=\sigma}^{S-1} P^{\sigma \iota}(x^l) \\ (\sigma &= 1, \dots, S-1) \end{aligned} \quad (4.16)$$

以上の推移確率を用いれば、期間  $[\tau, \tau+1]$  で定義される条件付確率 (4.14) を要素とするマルコフ推移行列を

$$P(x^l) = \begin{pmatrix} P^{11}(x^l) & \dots & P^{1S}(x^l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & P^{SS}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

と定義することができる。さらに、期間  $[\tau, \tau+n_t]$  における推移確率行列 (以下、 $n_t$  期推移確率行列と呼ぶ) は

$$P^{n_t}(x^l) = \{P(x^l)\}^{n_t} \quad (4.18)$$

と表される。なお、 $n_t$  期推移確率行列を

$$P^{n_t}(x^l) = \begin{pmatrix} P^{11, n_t}(x^l) & \dots & P^{1S, n_t}(x^l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & P^{SS, n_t}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

と表記する。

#### 4.4.3 路面の劣化過程

つぎに、大型車交通量が  $x^l$  の場合に、路面健全度が劣化する過程をマルコフ連鎖モデルで表現する。時点  $\tau_x$  ( $u_x = 0$ ) に路面の補修が実施され、路面の健全

度が  $h(0) = 1$  に改善する。局所時点  $u_\chi$  から  $u_\chi + 1$  の間において生起する路面の劣化状態の推移状態を、マルコフ推移確率で表す。単位期間  $[u_\chi, u_\chi + 1]$  の期間長も 1 に基準化する。局所時点  $u_\chi$  における耐荷力  $\sigma$  が既知であると考え、局所期間  $[u_\chi, u_\chi + 1]$  (離散時間軸上の期間  $[\tau_\chi + u_\chi, \tau_\chi + u_\chi + 1]$ ) における路面の劣化過程を表すマルコフ推移確率は、局所時点  $u_\chi$  (時点  $\tau_\chi + u_\chi$ ) で評価された耐荷力  $g(\tau_\chi + u_\chi) = \sigma$  と路面の健全度  $h(u_\chi) = i$ 、および大型車交通量  $x^l$  を与件とし、次の局所時点  $u_\chi + 1$  において健全度  $h(u_\chi + 1) = j$  が生起する条件付確率

$$\begin{aligned} & \text{Prob}[h(u_\chi + 1) = j | h(u_\chi) = i, g(\tau_\chi + u_\chi) = \sigma, x^l] \\ & = \pi_\sigma^j(x^l) \end{aligned} \quad (4.20)$$

として定義できる。耐荷力  $\sigma$  を与件とした健全度  $i$  ( $i = 1, \dots, I - 1$ ) の路面健全度ハザード率  $\mu_\sigma^i(x^l)$  を

$$\mu_\sigma^i(x^l) = \eta_0^\sigma \mathbf{Y} \boldsymbol{\eta}^i = \eta_0^\sigma \mu^i(x^l) \quad (4.21)$$

と表す。ただし、 $\eta_0^\sigma$  ( $\sigma = 1, \dots, S - 1$ ) は耐荷力  $\sigma$  に依存する路面劣化速度の異質性を表すスケールパラメータ、 $\mathbf{Y} = (Y^1, \dots, Y^b)$  は説明変数ベクトル、 $\boldsymbol{\eta}^i = (\eta_1^i, \dots, \eta_b^i)'$  は未知パラメータベクトル、 $\mu^i = \mathbf{Y} \boldsymbol{\eta}^i$  である。説明変数ベクトル  $\mathbf{Y} = (Y^1, \dots, Y^b)$  の中に、大型車交通量  $x^l$  が説明変数として含まれる。 $\eta_0^1 = 1$  に基準化する。このとき、耐荷力  $\sigma$  の下で局所時点  $u_\chi$  において健全度が  $i$  であり、局所時点  $u_\chi + 1$  においても健全度  $i$  が継続する確率は、

$$\begin{aligned} \pi_\sigma^{ii}(x^l) & = \text{Prob}[h(u_\chi + 1) = i | h(u_\chi) = i, \\ & \quad g(\tau_\chi + u_\chi) = \sigma, x^l] \\ & = \exp\{-\eta_0^\sigma \mu^i(x^l)\} \end{aligned} \quad (4.22)$$

となる。さらに、局所時点  $u_\chi$  と局所時点  $u_\chi + 1$  の間で健全度が  $i$  から  $j (> i)$  に推移するマルコフ推移確率  $\pi_\sigma^{ij}(x^l)$  ( $i = 1, \dots, I-1; j = i, \dots, I$ ) は、

$$\begin{aligned} \pi_\sigma^{ij}(x^l) &= \text{Prob}[h(u_\chi + 1) = j | h(u_\chi) = i, \\ &\quad g(\tau_\chi + u_\chi) = \sigma] \\ &= \sum_{v=i}^j \prod_{v=i, \neq v}^{j-1} \frac{\mu_\sigma^v(x^l)}{\mu_\sigma^v(x^l) - \mu_\sigma^{v-1}(x^l)} \exp\{-\mu_\sigma^v(x^l)\} \\ &\quad (i = 1, \dots, I-1; j = i+1, \dots, I) \end{aligned} \quad (4.23)$$

と表すことができる。また、 $\pi_\sigma^{il}(x^l)$  に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\begin{aligned} \pi_\sigma^{il}(x^l) &= 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_\sigma^{ij}(x^l) \\ &\quad (\sigma = 1, \dots, S-1) \end{aligned} \quad (4.24)$$

以上の推移確率を用いれば、局所期間  $[u_\chi, u_\chi + 1]$  で定義される条件付確率 (4.20) を要素とするマルコフ推移行列を次式のように定義することができる。

$$\Gamma_\sigma(x^l) = \begin{pmatrix} \pi_\sigma^{11}(x^l) & \cdots & \pi_\sigma^{1I}(x^l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_\sigma^{II}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

#### 4.4.4 舗装全体の劣化過程

舗装全体の劣化状態を、路面健全度  $i$  と舗装耐荷力  $\sigma$  という2つの状態変数の組  $(i, \sigma)$  を用いて表現する。いま、隣接する2つの時点  $\tau$  と  $\tau+1$  を考える。時点  $\tau$  における劣化状態を  $(i, \sigma)$ 、時点  $\tau+1$  の劣化状態を  $(j, \iota)$  と表す。期間  $[\tau, \tau+1]$  中における舗装耐荷力は時点  $\tau$  における状態  $\sigma$  が近似的に継続すると仮定する。ただし、劣化過程の単調性条件より  $i \leq j, \sigma \leq \iota$  が成立する。この時、期間  $[\tau, \tau+1]$  において劣化状態が  $(i, \sigma)$  から  $(j, \iota)$  に推移する確率  $\theta_{i,\sigma}^{j,\iota}$  は次式で定義される。

$$\theta_{i,\sigma}^{j,\iota}(x^l) = \begin{cases} P^{\sigma\iota}(x^l) \pi_\sigma^{ij}(x^l) & i \leq j, \sigma \leq \iota \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (4.26)$$

ここで、 $\theta_{i,\sigma}^{j,\iota}(x^l)$  を  $(\sigma, \iota)$  要素とする対角ブロック行列を

$$\theta_i^j(x^l) = \begin{pmatrix} \theta_{i,1}^{j,1}(x^l) & \theta_{i,1}^{j,2}(x^l) & \cdots & \theta_{i,1}^{j,S}(x^l) \\ 0 & \theta_{i,2}^{j,2}(x^l) & \cdots & \theta_{i,2}^{j,S}(x^l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \theta_{i,S}^{j,S}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

とし、舗装全体の劣化過程の推移確率行列を

$$\Theta(x^l) = \begin{pmatrix} \theta_1^1(x^l) & \theta_1^2(x^l) & \cdots & \theta_1^I(x^l) \\ 0 & \theta_2^2(x^l) & \cdots & \theta_2^I(x^l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \theta_I^I(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

と定義する。この時、調査時点  $\tau$  からつぎの調査時点  $\tau + n_t$  までの  $n_t$  期間に生起する劣化状態の推移確率行列はマルコフ推移確率

$$\Theta(n_t, x^l) = \{\Theta(x^l)\}^{n_t} \quad (4.29)$$

を用いて表現できる。マルコフ推移確率  $\Theta(n_t, x^l)$  の  $\{(i, \sigma), (j, \iota)\}$  要素  $\theta_{i,\sigma}^{j,\iota}(n_t, x^l)$  は  $n_t$  期間のうちに劣化状態が  $(i, \sigma)$  から  $(j, \iota)$  に推移する条件付き確率を表している。

初期時点  $\tau = 0$  において舗装全体が更新され、舗装耐荷力が  $g(0) = 1$  に、路面健全度が  $h(0) = 1$  に確定したと考える。初期時点以降、舗装の劣化が進行するが、劣化過程に不確実性が介在する。時点  $\tau$  において舗装状態  $(i, \sigma)$  が生起する確率を  $\psi_{i,\sigma}(\tau, x^l)$  と表し、状態ベクトルを  $\psi(\tau, x^l) = \{\psi_{1,1}(\tau, x^l), \psi_{1,2}(\tau, x^l), \cdots, \psi_{i,\sigma}(\tau, x^l), \cdots, \psi_{I,S}(\tau, x^l)\}$  と表す。 $n_t$  期間に及ぶ劣化状態の推移確率が式 (4.29) で表現される時、調査時点  $\tau$  と  $\tau + n_t$  の状態生起確率  $\psi(\tau, x^l)$  と  $\psi(\tau + n_t, x^l)$  の間に

$$\psi(\tau + n_t, x^l) = \psi(\tau, x^l)\Theta(n_t, x^l) \quad (4.30)$$

が成立する。また、初期時点における舗装状態は  $(i, \sigma) = (1, 1)$  であり、 $\psi(0) = (1, 0, \cdots, 0)'$  と表せることに着目すれば、任意の時点  $\tau$  における舗装状態の生起確率は

$$\psi(\tau, x^l) = \psi(0, x^l)\Theta(\tau, x^l) \quad (4.31)$$

と表せる.

#### 4.4.5 オーバーレイのみを考慮する場合の劣化モデル

前節までは舗装全体の劣化過程をモデル化した<sup>が</sup>, ここではオーバーレイのみを考慮した場合の劣化モデルを記述する. オーバーレイのみを考慮する場合, 劣化モデルの考え方は, 耐荷力の低下過程と同様に記述可能であるため, ここでは劣化モデルの結論のみを記述する.

オーバーレイのみを考慮した場合の劣化モデルは, 時点  $\tau$  で路面健全度  $i$  と評価され, 次の  $\tau+1$  期で路面健全度  $j$  が生起する条件付確率  $w^{ij}(x^l)$  を要素としたマルコフ推移行列

$$W(x^l) = \begin{pmatrix} w^{11}(x^l) & \cdots & w^{1I}(x^l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w^{II}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

と表現できる. ここで, マルコフ推移確率の条件より

$$w^{ii}(x^l) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} w^{ij}(x^l) \\ (i = 1, \dots, I-1) \quad (4.33)$$

である.

さらに, 期間  $[\tau, \tau+n_t]$  における推移確率行列 (以下,  $n_t$  期推移確率行列と呼ぶ) は

$$W^{n_t}(x^l) = \{W(x^l)\}^{n_t} \quad (4.34)$$

と表される. なお,  $n$  期推移確率行列を

$$W^{n_t}(x^l) = \begin{pmatrix} w^{11,n_t}(x^l) & \cdots & w^{1I,n_t}(x^l) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w^{II,n_t}(x^l) \end{pmatrix} \quad (4.35)$$

と表記する.

## 4.5 ライフサイクルコストの定式化

本節では、舗装の劣化モデルを用いて、平均費用最小化法及び割引現在価値最小化法によるライフサイクルコスト算出の定式化を行う。

### 4.5.1 平均費用最小化法による LCC

平均費用最小化法のモデルの詳細に関しては参考文献[14]に譲るが、ここでは読者の便宜を図るために、道路舗装の場合における平均費用最小化モデルを簡単に紹介する。

単純化のため、オーバーレイのみを考慮した場合の LCC をまず考える。いま、時点  $\tau = 0$  において、道路舗装の健全度  $i$  が観測されたとしよう。期待累積ライフサイクル費用  $U^\omega(i, T_{im}, x^I)$  は、補修政策  $\omega \in \Omega$  の下で、時点  $\tau = 0$  において健全度  $i$  の初期状態から時点  $\tau = T_{im}$  に至るまでに発生する道路舗装の補修費の総和に関する期待値を表している。時点  $\tau = 0$  から時点  $\tau = 1$  へ 1 期経過する間に劣化が進展し、時点  $\tau = 1$  の直前に健全度が  $j$  に推移したと考えよう。時点  $\tau = 1$  の直前に補修アクションが実施されると考える。時点  $\tau = 0$  において時点  $\tau = 1$  にどのような補修が実施されるかは不確実である。そこで、 $\tau = 0$  において、健全度が  $i$  である場合、時点  $\tau = 1$  の直前までに補修政策  $\omega$  の下で必要となる道路舗装の期待補修費用  $U^\omega(i)$  は

$$U^\omega(i, x^I) = \sum_{j=i+1}^{K-1} w^{ix}(x^I) z_{\chi j}^\omega \xi^\omega(\chi) \quad (i = 1, \dots, K-1) \quad (4.36)$$

で表される。ここで  $K$  はただちに補修・更新が行われる臨界健全度、 $\xi^\omega(\chi)$  は健全度  $\chi$  で必要となる補修・更新費用、 $z_{\chi j}^\omega$  は補修により健全度が  $\chi$  から  $j$  に変化する場合を 1、そうでない場合は 0 となる補修・更新アクション変数である。

次に、初期時点から 1 期だけ時間が進んだ次の時点  $\tau = 1$  に着目しよう。時点  $\tau = 0$  から時点  $\tau = 1$  へ 1 期経過する間に劣化が進展し、時点  $\tau = 1$  の直前に実

施された補修アクションを経て、時点  $\tau = 1$  に健全度が  $j$  に推移したと考えよう。さらに、時点  $\tau = 1$  から補修政策  $\omega$  を適用し、時点  $\tau = T_{im}$  に至るまでの  $T_{im} - 1$  期間中に発生する期待累積ライフサイクル費用を  $u^\omega(j, T_{im} - 1, x^l)$  と表そう。時点  $\tau = 0$  から時点  $\tau = 1$  までの間に、健全度が  $i$  から  $j$  に推移する確率  $w_{ij}^\omega$  を用いれば、期待累積ライフサイクル費用  $u^\omega(i, T_{im}, x^l)$  と  $u^\omega(j, T_{im} - 1, x^l)$  の間に次式が成立する。

$$u^\omega(i, T_{im}, x^l) = U^\omega(i, x^l) + \sum_{j=1}^{K-1} w_{ij}^\omega(x^l) u^\omega(j, T_{im} - 1, x^l) \quad (i = 1, \dots, K - 1) \quad (4.37)$$

ここで、期待累積ライフサイクル費用  $u^\omega(i, 0, x^l)$  は  $u^\omega(i, 0, x^l) = 0 (i = 1, \dots, K - 1)$  を満足する。十分大きな  $T_{im}$  に対して、再帰方程式 (4.37) の解  $u^\omega(i, T_{im})$  が

$$u^\omega(i, T_{im}, x^l) = T_{im} \cdot e^\omega + \rho^\omega(i, x^l) (i = 1, \dots, K - 1) \quad (4.38)$$

と近似できる。すなわち、期待累積ライフサイクル費用  $u^\omega(i, T_{im}, x^l)$  は期間長  $T_{im}$  に比例する項  $T_{im} \cdot e^\omega$  と初期健全度  $i$  に依存する項  $\rho^\omega(i, x^l)$  に分解できる。式 (4.37) で表される  $e^\omega$  は補修政策  $\omega$  を用いた場合のライフサイクル費用を毎年等価な費用として再配分した平均費用を表す。これにより、橋梁部材性能を半永久的に維持するために支出される補修費を、毎年等価な平均費用の流列  $(e^\omega, \dots, e^\omega, \dots)$  に置き換えることができる。この時、期待累積ライフサイクル費用  $u^\omega(i, T_{im}, x^l)$  は式 (4.37) 及び式 (4.38) を満足する。式 (4.37) に式 (4.38) を代入すれば、

$$\begin{aligned}
 T_{im} \cdot e^\omega + \rho^\omega(i, x^l) \\
 = U^\omega(i, x^l) + \sum_{j=1}^{K-1} w_{ij}^\omega [(T_{im} - 1)e^\omega + \rho^\omega(j, x^l)] \quad (4.39)
 \end{aligned}$$

を得る。  $\sum_{j=1}^{K-1} w_{ij}^\omega = 1$  を考慮すれば、連立方程式

$$e^\omega + \rho^\omega(i, x^l) = U^\omega(i, x^l) + \sum_{j=1}^{K-1} w_{ij}^\omega \rho^\omega(j, x^l) \quad (4.40)$$

を得る。連立方程式(4.40)には、 $K-1$ 本の方程式に対して、 $e^\omega$ と $\rho^\omega(i, x^l)(i = 1, \dots, K-1)$ の合計 $K$ 個の未知変数が含まれている。そこで、 $\rho^\omega(1, x^l) = 0$ と置くことにより、連立方程式(4.40)を $e^\omega$ と $\rho^\omega(i, x^l)$ に関して一意的に解くことができる。この得られた $e^\omega$ 及び $\rho^\omega(i, x^l)$ を用いて、平均費用最小化モデル(4.11)の最適補修政策 $\omega^*$ を導くこととなる。

#### 4.5.2 割引現在価値最小化法によるLCC

つぎに、割引現在価値法を用いた最適補修モデル（以下、割引現在価値最小化モデルと呼ぶ）を定式化しよう。LCC定式化の詳細は参考文献[14]に詳しいが、参考文献[14]は橋梁補修に関して定式化しているため、路面性状調査間隔を考慮した道路舗装に関する定式化に修正する必要がある。

まず、割引率に基づき算出される割引因子を $\epsilon$ と表す。割引率を $r$ と表せば、割引因子 $\epsilon$ は、

$$\epsilon = \frac{1}{1+r} \quad (4.41)$$

と表される。

割引現在価値法を用いて、道路舗装のオーバーレイを最適に実施することにより達成可能な期待ライフサイクル費用の割引現在価値の最小値 $V_w(x^l)$ を再帰的に定義し、行列表示すれば、調査期間 $n_t$ を用いて最適割引現在価値は

$$\mathbf{V}_w^{\tilde{d}^*}(x^l) = [\mathbf{I} - \epsilon^{n_t} \mathbf{W}(n_t, x^l) \tilde{\omega}^*]^{-1} \mathbf{U} \tilde{\omega}^* \quad (4.42)$$

と表され、ライフサイクルコスト $V_w(x^l)$ は舗装の長期定常状態 $\psi$ を用いて

$$V_w(x^l) = \mathbf{V}_w^{\tilde{\omega}^*}(x^l) \psi(n_t, x^l) \quad (4.43)$$

と表される。



また、補修戦略としてオーバーレイ及び打換えを考慮する場合の舗装全体のライフサイクル費用  $V_{\Theta}(x^l)$  は、オーバーレイのみを考慮したときと同様の展開を通じて、

$$V_{\Theta}^{\tilde{\omega}^*}(x^l) = [I - \epsilon^{n_t} \Theta(n_t, x^l) \tilde{\omega}^*]^{-1} U \tilde{\omega}^* \quad (4.44)$$

と表され、ライフサイクルコスト  $V_{\Theta}(x^l)$  は舗装の長期定常状態  $\psi$  を用いて

$$V_{\Theta}(x^l) = V_{\Theta}^{\tilde{\omega}^*}(x^l) \psi(n_t, x^l) \quad (4.45)$$

と表される。

## 4.6 適用事例

### 4.6.1 推計方法

本章では、適用事例について式 (4.42)-(4.45) を用いて大型車交通量を考慮したライフサイクルコストを算出し、式 (4.9) を用いて大型車の限界維持補修費用  $m^l$  (円/km・台) を試算する。具体的には、道路舗装のオーバーレイのみを考慮した高速道路（舗装路面）については、NEXCO 西日本のデータを用いて本章において今回パラメータ推定する。道路舗装のオーバーレイのみを考慮した一般国道（舗装路面）については、小林・貝戸・林（2008）[13] 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を活用する。道路舗装のオーバーレイ及び打換えを考慮した高速道路（舗装全体）については、小林他（2012）[17] における劣化予測モデルの推計結果の最適解を援用する。

高速道路（舗装路面）のハザードモデルの推定にあたっては、NEXCO 西日本の舗装健全度 1,671 サンプルを使用した。大型車交通量の平均値は 21,528 台/日、最大値は 35,153 台/日であった。舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイを採用し、道路は永久に供用され続けるものとした。路面健全度  $i$  が臨界的健

全度に達するとオーバーレイが実施され、オーバーレイが行われると路面健全度  $i$  は最も健全な水準 1 に回復する。大型車交通量は通時的に一定の値  $x^l$  とし、小型車が舗装に与えるダメージは皆無と仮定している。本章では高速道路（舗装路面）の臨界的健全度は 4（ひび割れ率 5%以上）と設定した。

一般道路（舗装路面）は、小林・貝戸・林（2008）[13]において M 県の国道のわだち掘れの 9 年間分の健全度データ 5,261 サンプルを用いてハザードモデルのパラメーター推定を行っている。大型車交通量の平均値は 632 台/日，最大値は 3,509 台/日であった。舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイを採用し、道路は永久に供用され続けるものとした。路面健全度  $i$  が臨界的健全度に達するとオーバーレイが実施され、オーバーレイが行われると路面健全度  $i$  は最も健全な水準 1 に回復する。大型車交通量は通時的に一定の値  $x^l$  とし、小型車が舗装に与えるダメージは皆無と仮定している。小林・貝戸・林（2008）[13]では管理限界をわだち掘れ 15mm 以上（健全度 4 以上）と設定しているため、本章でも同様に一般道路（舗装路面）の臨界的健全度は 4（わだち掘れ 15mm 以上）と設定した。

高速道路（舗装全体）は、小林他（2012）[17]において NEXCO 各社 47 路線 940 箇所のデータを用いてハザードモデルのパラメーター推定を行っている。大型車交通量の平均値は 4,572 台/日，最大値は 19,347 台/日であった。舗装の維持工法・修繕工法としてオーバーレイおよび打換えを採用し、道路は永久に供用され続けるものとした。路面健全度  $i$  が臨界的健全度に達するとオーバーレイが実施され、舗装耐荷力  $s$  が臨界耐荷力に達すると舗装の打換えが実施される。オーバーレイが行われると、路面健全度  $i$  は最も健全な水準 1 に回復し、打換えが行われると、舗装耐荷力  $s$  は最も健全な水準 1，路面健全度  $i$  も最も健全な水準 1 に回復する。大型車交通量は通時的に一定の値  $x^l$  とし、小型車が舗装に与えるダ

メージは皆無と仮定している。小林他（2012）[17]での推計結果では、最適補修更新政策は臨界的健全度が4（ひび割れ5%超）、臨界耐荷力は5（ $D > 1,600$ ）、リスク管理水準は5%、FWD調査間隔は $n_t = 2$ であり、本章ではこの最適補修更新政策における限界維持修繕費用を試算する。ここで、アスファルト層の健全度 $D$ 指標は以下の通り表現される指標である。

$$D = \frac{D_0 - D_{90}}{\Delta} \times 10^6 \quad (4.46)$$

ただし、 $D_0$ 、 $D_{90}$ は、それぞれの重錘の載荷点直下、および載荷点から90cm離れた地点のたわみ量（mm）、 $\Delta$ はアスファルト舗装の設計厚（mm）を表す。

また、限界維持修繕費用算出に当たっての各条件は次の通り設定した。高速道路の舗装対象の幅員は19m（3.5m/車線×4車線+路肩2.5m×2）、一般道路の幅員はM県データの平均である8.5m（概ね2車線道路）、実質金利は $\rho = 4\%$ と仮定した。調査費用は、路面性状調査費用は2千円/区間、FWD調査費用は495千円/区間とした。維持補修費用は高速道路のオーバーレイ費用810千円/区間、高速道路の打換え費用は3,800千円/区間、一般道路のオーバーレイ費用は三重県の一般的な値である3,300円/ $m^2$ [12]と設定した。ただし1区間は3.5m×100mである。

以上の条件により推計・整理した劣化予測モデルのパラメータ推定結果を表4.1～4.5に示す。

#### 4.6.2 分析結果

前節の条件に基づき推計した結果、高速道路及び一般道路における大型車の限界維持補修費用 $m^l$ は表4.6-4.8の通りとなった。高速道路（舗装路面）における大型車の限界維持修繕費用は概ね0.1円/km・台、一般道路（舗装路面）における大型車の限界維持修繕費用は概ね0.8円/km・台、高速道路（舗装全体）における

表 4.1: パラメータの推定結果（高速道路：舗装路面）

健全度	定数項	交通量
	$\zeta_{i1}$	$\zeta_{i2}$
1	-1.397	
2	-3.034	0.881
3	-2.402	1.397
4	-4.408	3.368

表 4.2: パラメータの推定結果（一般道路：舗装路面） [13]

健全度	定数項	交通量
	$\zeta_{i1}$	$\zeta_{i2}$
1	0.280	0.415
2	0.033	0.188
3	0.108	
4	0.112	

表 4.3: パラメータの推定結果（高速道路：舗装全体：舗装耐荷力） [17]

耐荷力	定数項	大型車交通量
	$\zeta_1^i$	$\zeta_2^i$
1	-3.012	—
2	-2.307	0.576
3	-2.090	0.567
4	-2.439	—

表 4.4: パラメータの推定結果（高速道路：舗装全体：路面健全度） [17]

健全度	定数項	大型車交通量
	$\eta_1^i$	$\eta_2^i$
1	-2.271	0.086
2	-2.170	—
3	-1.553	—
4	-1.996	—

表 4.5: スケールパラメータの推定結果（高速道路：舗装全体） [17]

健全度	スケールパラメータ $\eta_0^s$
s=2	1.170
s=3	1.629
s=4	2.348

大型車の限界維持修繕費用は概ね 0.09 円/km・台となった。

ここで、高速道路（舗装路面）における大型車の限界維持修繕費用（概ね 0.1 円/km・台）は小さい値のように見えるが、大型車が 1 日に 1 万台通過すれば、維持修繕費用は 1,000 円/km・日となる。365 日換算すれば 36.5 万円/km・年、延長 1,000km 区間に換算すれば 3 億 6,500 万円/1,000km・年となり、高速道路会社にすれば利益に直結する無視できない数字である。しかも実際の維持修繕費用は自然劣化に対応した補修（固定費用）も含まれるため、維持修繕費用を考慮することの重要性が伺われる。

高速道路及び一般道路の両方において、同じ調査間隔の場合は平均費用法の方が大型車の限界維持修繕費用が小さい結果となった。式 (4.9) より限界維持修繕費用は平均費用から算出するため、平均費用を最小化する平均費用法において大型車の限界維持修繕費用が小さくなったと考えられる。また、4.3.3 で指摘した通り、平均費用法は割引現在価値法において割引率を 0 とした特殊ケースであり、割引率を 0 とすることにより割引現在価値法による限界維持修繕費用が平均費用法による値と一致したことを筆者は確認した。

高速道路も一般道路も、調査間隔を短くするほど限界維持修繕費用が増加する傾向にあり、調査間隔を長くtookの方が維持修繕費用という観点では有利となる。しかしながら、道路舗装の健全度は交通事故等の外部費用にも影響を与えるため、臨界健全度を超える舗装状態が多いことは望ましくない。そこで、臨界健全度を

超える舗装状態の割合をリスク管理水準と設定すれば、許容可能なリスク管理水準内で限界維持修繕費用が小さい調査間隔を決定できる。リスク管理水準を一定とすれば、大型車交通量が少ない路線は調査期間を長くすることが可能であり、大型車交通量が多い路線は調査期間を短くする必要がある。また、当然ながら調査期間が一定でリスク管理水準を問わない方法も政策的には採用可能である。状況によって採用する維持補修戦略を変更することも問題ない。

ただし、一般道路の場合、調査間隔2年のときの限界維持修繕費用が最も大きい結果となった。これは一般道路の健全度別の劣化速度と調査間隔に伴う費用増加のバランスの結果であるが、調査間隔を非常に短くするか、調査間隔を若干長くした方が大型車の限界維持修繕費用が小さくなる。本来、調査間隔2年は経験的に適度な調査間隔であると見なせそうであるが、今回の適用事例においては、舗装の劣化モデルを考慮すると最も限界維持修繕費用が大きい補修政策となったことには注意が必要であろう。今後、更なるデータの蓄積及び研究を通じて、本章の成果の妥当性を検証していく必要がある。

なお、貝戸他（2005）[14]では、平均費用法で検討すると予防補修的な補修政策が採用され、割引現在価値最小化法で検討すると事後補修的な補修政策が採用される結果を導いているが、それは本章の結果と異なる。その理由として、橋梁の補修と舗装の補修は異なり、舗装は同じ補修の繰り返しであるため、調査間隔及び補修タイミングが非常に重要であるためであると考えられる。道路舗装においては維持修繕費用の考え方や検討手法よりも調査間隔の方が限界維持修繕費用に大きな影響を与えていることが本章でわかった。道路舗装に着目した場合、高速道路と一般道路の限界維持修繕費用を比較すると、一般道路の限界維持補修費用は高速道路の約7倍となった。このことから高速道路の方が一般道路よりもより頑丈に建設されている状況が伺われる。裏を返せば、高速道路の固定費用の

表 4.6: 高速道路（舗装路面）における大型車の限界維持補修費用の推計結果

調査間隔	リスク管理水準（％）			大型車の限界維持修繕費用 $m^l$ （円/km・台）		固定費用割合
	$x^l=0$	$x^l=平均$	$x^l=最大$	割引現在価値法	平均費用法	
1年	2.7	4.7	6.3	0.1263	0.1215	45.8 %
2年	5.4	9.2	12.2	0.1232	0.1162	45.5 %
3年	8.0	13.4	17.8	0.1203	0.1113	45.9 %
4年	10.6	17.5	23.0	0.1175	0.1066	46.5 %
5年	13.0	21.4	28.0	0.1150	0.1024	47.1 %

表 4.7: 一般道路（舗装路面）における大型車の限界維持補修費用の推計結果

調査間隔	リスク管理水準（％）			大型車の限界維持修繕費用 $m^l$ （円/km・台）		固定費用割合
	$x^l=0$	$x^l=平均$	$x^l=最大$	割引現在価値法	平均費用法	
1年	2.3	3.6	6.4	0.8625	0.8294	39.4 %
2年	4.5	7.1	12.3	0.9053	0.8538	37.6 %
3年	6.7	10.5	17.9	0.8854	0.8191	38.1 %
4年	8.9	13.8	23.2	0.8669	0.7867	38.6 %
5年	11.0	16.9	28.2	0.8496	0.7564	39.2 %

表 4.8: 高速道路（舗装全体）における大型車の限界維持補修費用の推計結果

調査間隔	リスク管理水準（％）			大型車の限界維持修繕費用 $m^l$ （円/km・台）		固定費用割合
	$x^l=0$	$x^l=平均$	$x^l=最大$	割引現在価値法	平均費用法	
2年	5.0			0.0902	0.0850	90.3 %

割合は一般道路よりも大きいということであり、交通経済学の視点では、高速道路の方が社会的に最適な費用負担を考えることがより難しいと言えるが、この問題は本章の範疇を超えるため、ここではこれ以上言及しない。

高速道路に関して、打換えを考慮する場合とオーバーレイのみの場合を比較すると、打換えを考慮した方が大型車の限界維持修繕費用は小さい結果となった（約0.8倍）。これは、打換えを実施した方が舗装の劣化が全体的に遅くなり、トータルでコスト削減に繋がることを意味する。しかしながら、打換えを考慮した場合の固定費用割合は約9割、オーバーレイのみを考慮した場合の固定費用割合は約5割であり、固定費用も含めたトータルコストを最小化する場合は固定費用は無視できないほど大きいと言える。また、本章では打換えの検討に必要なFWD調査の実施に伴う交通規制費用を考慮していないため、打換えを実施した方が有利であるとは単純に言い切れないことに留意する必要がある。FWD調査に伴う交通規制費用を考慮するにはネットワークを用いた検討が必要であり、今後の研究課題である。

アメリカの高速道路における大型車の限界維持修繕費用（FHWA(2000)[16]）は、具体的な計算方法が公表されていないものの、地方部で1セント／マイルであり、日本の限界維持修繕費用の方が約10分の1と非常に小さい結果となっている。この結果だけを見ると、日本の高速道路の方がより頑丈に建設されていると考えられるが、アメリカの高速道路は日本よりも早く建設され、高齢化が30年程度早いことに留意する必要がある。本章ではNEXCOの調査結果から劣化予測モデルを設定したが、健全度の大きい劣化したサンプル数は相対的に少なく、今から30年後に得られるデータで劣化予測モデルを設定すると、大型車の限界維持修繕費用は今回の計算結果と大きく乖離する可能性がある。そのため、将来的に、日本の限界維持修繕費用もアメリカと同レベル（現在の10倍以上）になる恐れ



があり、将来の維持修繕費用の低減は依然とした課題となる。その際、限界維持修繕費用を小さくする平均費用法の考え方は有用であると考えられる。また、今回は道路舗装の直接工事費用を対象としており、工事発注に伴う間接費用を考慮すると、実際の限界維持修繕費用はより大きくなるものと推測される。何ををもって限界維持修繕費用とみなすか、限界維持修繕費用に関する研究の更なる発展が期待される。

## 4.7 結言

本章では、道路舗装の維持補修費用推計モデルの枠組みについて定式化し、適用事例について大型車の限界維持補修費用の試算を行った。日本の高速道路における大型車の限界維持修繕費用は概ね 0.1 円/km・台、一般道路における大型車の限界維持補修費用は概ね 0.8 円/km・台であり、当初の予想通り高速道路の方がより頑丈に建設されていることを今回の適用事例に関する限り実証した。また、アメリカの高速道路における大型車の限界維持修繕費用との比較考察により、維持修繕政策に関して日本が進むべき方向性について言及した。

今後の課題としては、本章で試算した大型車の限界維持修繕費用は日本で初の研究であるため、今後はより多くのデータを収集し限界維持修繕費用に関する研究の蓄積を進め、より妥当な限界維持修繕費用を導く必要がある。打換えを考慮した一般道路（舗装全体）の劣化予測モデル構築及び限界維持修繕費用の試算、FHWA(2000)の調査結果 [16] のように都市部や郊外部等の地域別、大型車のサイズ別等、多様な限界維持修繕費用を算出することが考えられる。また、今回の研究の対象外とした橋梁における限界維持修繕費用算出のため、大型車交通量を考慮した橋梁の劣化予測モデルの構築や、舗装工事発注に伴う間接費用の考慮等も今後の課題として挙げられる。



## 参考文献

- [1] 古川浩太郎:高速道路の通行料金制度 ー歴史と現状ー, レファレンス, pp.99-118, 2009年10月.
- [2] 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.
- [3] Link, H.: An econometric analysis of motorway renewal costs in Germany, *Transportation Research Part A*, Vol.40, pp.19-34, 2006.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Newbery, D.M.: Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- [7] Small, K.A. and Winston, C.: Optimal highway durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.

- [8] Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A.: *Road Work - A New Highway Pricing and Investment Policy*, The Brookings Institution, 1989.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Anani, S.B.: Revisiting the estimation of highway maintenance marginal Cost, *Ph. D. Dissertation*, University of California, Berkeley 2008.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 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, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- [15] 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, No.23, no.1, pp.39-50, 2006.
- [16] Federal Highway Administration: *Addendum to the 1997 Federal Highway Cost Allocation Study Final Report*, United States Department of Transportation, 2000.

- [17] 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之, 松村泰典: 舗装構造の最適補修更新モデル, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.68, No.2, pp.54-58, 2012.
- [18] Mohring, H. and Harwitz, M.: *Highway Benefit: An Analytical Framework*, Northwestern University Press, 1962.
- [19] 西日本高速道路株式会社: 高速自動車国道中央自動車道西宮線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 2012.
- [20] 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に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 2012.
- [21] 東日本高速道路株式会社: 高速自動車国道北海道縦貫自動車道函館名寄線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 営業年度), 2012.
- [22] 阪神高速道路株式会社: 大阪府道高速大阪池田線等及び京都市道高速道路 1 号線等に関する維持, 修繕その他の管理の報告書 (平成 23 事業年度), 2012.
- [23] 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 23 事業年度), 2012.
- [24] 坂井康人: ロジックモデルを用いた都市高速道路の維持管理マネジメントに関する研究, 京都大学博士論文, 2009 年.
- [25] 小濱健吾, 岡田財一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- [26] 小林潔司: ライフサイクル費用評価とアセットマネジメント, サマースクール 2004 「建設マネジメントを考える」, 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻主催, pp.1-14, 京都大学, 2004.8.

- [27] 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集 D3, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- [28] 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 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, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.
- [29] Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- [30] Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- [31] Howard, R.A.: *Dynamic Programming and Markovian Processes*, 関根智明他訳: ダイナミックプログラミングとマルコフ過程, 培風館, 1971.
- [32] 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.

## 第5章 高速道路の維持修繕費用を考慮した効率的交通流配分に関する研究

### 5.1 緒言

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]と評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、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思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]。

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[3]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速くなり、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、社会全体が負担する維持管理費用を最小化するという観点からは、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可能性がある。

本章では、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修繕費用を明示的に考慮した高速道路の次善料金 (Second Best) に関する分析を試みるとともに、最適維持補修料金モデルの数値シミュレーションを通じて、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、5.2では既存研究および本章の基本的な考え方を整理した。5.3では維持修繕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、5.4では適用事例を通じて最適維持補修料金モデルの数値シミュレーションを行い、5.5では5.4の結果を踏まえて道路の維持管理施策に関して考察した。

## 5.2 本章の基本的な考え方

### 5.2.1 従来の研究概要

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) [4] 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) [5] は、ある条件下では、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) [6] 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) [7] は道路ダメージの外部性、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、維持管理費用を考慮しない（混雑費用だけを考慮した）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[7]。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Chu and Tsai（2004）[8]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道路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[7]・[9]、Small and Winston[10]、Small et al.[4]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。

Chu and Tsai（2004）[8]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。なお、Chu and Tsai（2004）[8]はメンテナンスコストの定義をTellis and Khisty[11]に倣い、以下の4項目で構成されるとした。

- 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修繕費用に該当する

[12]. 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，主に料金収受業務，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（E T C 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，維持修繕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，舗装修繕，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）[13] は，Chu and Tsai（2004）[8] 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、高速道路事業者の事業者収入と費用が均衡する料金（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）[14]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 の場合）を行い、維持修繕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修繕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。

また、瀬木・小林・田上（2014）[15]は、並行する一般道路1本および高速道路1本の2リンク、2車種の場合において、維持補修費用を考慮した次善の高速道路料金について理論的な分析を行い、高速道路料金設計問題に対していくつかの政策的示唆を導いた。具体的には、構造物の耐荷力が高い高速道路へ、より多くの大型車を経路誘導することが社会的総余剰の増加に繋がるという結果を導いた。また、高速道路事業者の利潤を減らすことなく、道路ネットワークの維持補修費用を軽減できることも示した。

### 5.2.2 本章の位置づけ

本章では、大規模ネットワークを用いた維持修繕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および有料道路の維持管理運営制度に関する知見を得ることを目的とする。筆者の知る限り、大規模ネットワークを用いて維持修繕費用を考慮した高速道路の料金設定に関する研究事例、特に有料道路の維持管理運営制度に言及した研究事例は他に見当たらない。

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修繕費用を考慮した高

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な解となる。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的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、計算時間はそれほどかからない。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の実施にも莫大な時間を要するが、実際の道路ネットワークと同じ特性を持つと考えられる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。これが本章の大きな特徴である。

### 5.3 最適維持補修料金モデルの構築

維持補修費用を考慮した最適維持補修料金モデルを以下に示す。交通需要は固定、料金は高速道路のみに課金する総コスト最小化問題である。なお、ここでいう最適料金とは下記問題における最適解のことを意味し、本問題は高速道路のみに課金する Second Best の問題であることから、本問題の最適料金は次善料金のことを意味する。以下、本問題の最適解の料金を「次善料金（Second Best）」と示す。

$$\min_{\{x_{a_1}^y, x_{a_2}^y, p_{a_1}^y\}} TC \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}
 TC = & \sum_{a_1 \in J} \{(\beta^s x_{a_1}^s + \beta^l x_{a_1}^l) t_{a_1}(x_{a_1}) + x_{a_1}^s m_{a_1}^s + x_{a_1}^l m_{a_1}^l + F_{a_1}\} \\
 & + \sum_{a_2 \in G} \{(\beta^s x_{a_2}^s + \beta^l x_{a_2}^l) t_{a_2}(x_{a_2}) + x_{a_2}^s m_{a_2}^s + x_{a_2}^l m_{a_2}^l + F_{a_2}\}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

制約条件：

$$\min_{\{x, f\}} Z \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned}
 Z = & \sum_{a_1 \in J} \int_0^{x_{a_1}} t_{a_1}(w) \cdot dw + \sum_{a_2 \in G} \int_0^{x_{a_2}} t_{a_2}(w) \cdot dw \\
 & + \sum_{\phi \in \Phi_{ru}} \sum_{y \in (s, l)} \frac{p_{\phi}^{ru, y}}{\beta^y} \cdot f_{\phi}^{ru, y} - \sum_{y \in (s, l)} \sum_{ru \in \Xi} \frac{1}{\theta} \cdot Q_{ru}^y \\
 & \cdot \sum_{\phi \in \Phi_{ru}} \left\{ -\frac{f_{\phi}^{ru, y}}{Q_{ru}^y} \cdot \ln \frac{f_{\phi}^{ru, y}}{Q_{ru}^y} \right\}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\sum_{\phi \in \Phi_{ru}} f_{\phi}^{ru, y} - Q_{ru}^y = 0 \tag{5.5}$$

$$x_{a_1}^y = \sum_{\phi \in \Phi_{ru}} \sum_{ru \in \Xi} \delta_{a_1, \phi}^{ru, y} f_{\phi}^{ru, y} \tag{5.6}$$

$$x_{a_2}^y = \sum_{\phi \in \Phi_{ru}} \sum_{ru \in \Xi} \delta_{a_2, \phi}^{ru, y} f_{\phi}^{ru, y} \tag{5.7}$$

$$x_{a_1} = x_{a_1}^s + x_{a_1}^l, \quad x_{a_2} = x_{a_2}^s + x_{a_2}^l \tag{5.8}$$

$$f_{\phi}^{ru} \geq 0, \quad x_{a_1}, x_{a_1}^s, x_{a_1}^l \geq 0, \quad x_{a_2}, x_{a_2}^s, x_{a_2}^l \geq 0 \tag{5.9}$$

ここで,

$a_1 \in J$  : 高速道路の集合  $J$  におけるリンク  $a_1$

$a_2 \in G$  : 一般道路の集合  $G$  におけるリンク  $a_2$

$y \in s, l$ : 普通車  $s$ , 大型車  $l$  の集合における車種  $y$

$ru \in \Xi$ : OD ペア集合

$\phi \in \Phi_{ru}$ : OD ペア  $ru$  の経路集合  $\phi$

$x_{a_1}^y, x_{a_2}^y$ : リンク  $a_1, a_2$  の車種  $y$  の交通量 (PCU 単位)

$p_{\phi}^{ru,y}$ : OD ペア  $ru$  間第  $\phi$  経路の車種  $y$  の高速道路料金

$t_{a_1}(x_{a_1}), t_{a_2}(x_{a_2})$ : リンク  $a_1, a_2$  の所要時間 (単調増加関数)

$f_{\phi}^{ru,y}$ : OD ペア  $ru$  間第  $\phi$  経路の車種  $y$  の経路交通量

$Q_{ru}^y$ : OD ペア  $ru$  間の車種  $y$  の分布交通量

$\delta_{a_1,\phi}^{ru,y}$ : 車種  $y$  の OD ペア  $ru$  間第  $\phi$  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

$\beta^y$ : 車種  $y$  の時間価値

$m_{a_1}^y, m_{a_2}^y$ : リンク  $a_1, a_2$  の車種  $y$  の限界維持修繕費用

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

本モデルは最適化問題 (式 (5.1)) の制約条件として均衡問題 (式 (5.3) – 式 (5.9)) 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) [16] の形式となっている.

式 (5.2) 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 (変動費用) であり, 第 2 項は一般道路における旅行時間コストおよび維持修繕費用 (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 (5.2) で  $p_{a_1}^s, p_{a_1}^l$  は現れないが, 均衡問題では料金はリンクコスト (所要時間) に加算されるため, 重要なファクターとなる.

式 (5.3) – 式 (5.9) は車種別均衡配分が可能な確率的利用者均衡配分における定

式化であり、式 (5.4) の第 3 項は料金に関する項でランプ間料金を反映可能とした経路料金での表現、第 4 項がエントロピー項である。確定的利用者均衡配分を行う場合は、この第 4 項を無視することとなる。

また、次善料金を導出するにあたっては、高速道路事業者の収支  $\Pi$  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次善料金 (Second Best) を求めることとする (式 (5.10))。

$$\begin{aligned} \Pi = & \sum_{\phi \in \Phi_{ru}} \sum_{y \in (s,l)} p_{\phi}^{ru,y} \cdot f_{\phi}^{ru,y} \\ & - \sum_{a_1 \in J} (x_{a_1}^s m_{a_1}^s + x_{a_1}^l m_{a_1}^l + F_{a_1}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

式 (5.10) 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修繕費用の変動部分及び固定費用である。

本問題の大きな特徴の一つに、道路利用者は道路の維持修繕費用を認識せずに道路利用を行うという点が挙げられる。すなわち、道路の維持修繕費用がどのような値であろうと、利用者は自身の認識する最短ルートを利用するのである。現実の問題としては、道路舗装があまりに劣悪であれば道路利用者もそのルートは避けるであろうが、日本においては道路利用者が迂回してしまうほど道路舗装が劣悪になる前に、道路管理者が修繕するのが普通である。そのため、道路利用者が維持修繕費用を認識せずに道路を利用するという設定は、道路舗装の実態を鑑みても妥当であると考えられる。

なお、本問題の次善解を導く場合、固定費用  $F_{a_1}$ ,  $F_{a_2}$  は次善解に影響を与えないため無視できるが、固定費用を誰が負担すべきかという問題は解決できない。固定費用の負担方法のあり方については今後の課題となる。

## 5.4 適用事例

### 5.4.1 推計方法

式(5.1)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次善解を求める。具体的には、次善料金(Second Best)を探索しつつ交通量配分を行う直接探索法により次善の解(Second Best)を求める。手順としては、まず最初に比較の基準ケースとなる現況料金体系で数値シミュレーションを実施し、その後、同じネットワークを用いて次善料金(Second Best)の探索を行う。

本章は普通車と大型車の限界維持修繕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意味があるため、式(5.3)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経路を選択するという均衡配分である。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、本章では経路交通量を明示的に扱うSD法を採用する[17]。

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、本章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5.1)を用いて複数ルートサーチすることにより作成する。具体的には、ルートサーチを行うとともに後に紹介するOD表を用いて、OD交通量を1/3ずつOD間のルート(道路)に配分し、道路の通過時間を変更した上で(混雑状況がある程度反映)、繰り返しルートサーチを実施した(すなわち、各車種3回ずつルートサーチを実施)。このことにより、OD間混雑がある程度反映した時間価値が異なる多様な道路利用者の経路を設定することになる。リンクコスト関数は単調増加関数であるBPR



表 5.1: 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

関数とし、パラメーターは高速道路と一般道路で等しいとし、土木学会（2003）[18]が推定した $\alpha_k=0.48$ 、 $\gamma_k=2.82$ を用いる。料金は時間換算し、大型車の乗用車換算係数 $PCU=1.7$ とする。

$$t_k(x_k) = t_{k0} \left[ 1 + \alpha_k \left( \frac{x_k}{C_k} \right)^{\gamma_k} \right] \quad (5.11)$$

ここで、 $t_{k0}$ はリンク $k$ 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、 $C_k$ はリンク $k(k \in (a, b))$ の交通容量（PCU/日）を表す定数である。

OD表は、車種分類は乗用車類（普通車）、小型貨物車（普通車）、普通貨物車（大型車）の3車種として作成した。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」[19]に従い乗用車類： $\beta_1=45.78$ 、小型貨物車： $\beta_2=47.91$ 、普通貨物車： $\beta_3=64.18$ （PCU換算で37.75）とする。ここで、小型貨物のPCUは一般的に1であるため、小型貨物は乗用車に含まれると考えることが可能であり、式(5.1) – 式(5.10)のモデルを用いる。

数値シミュレーションの具体的な手順を図5.1に示した。

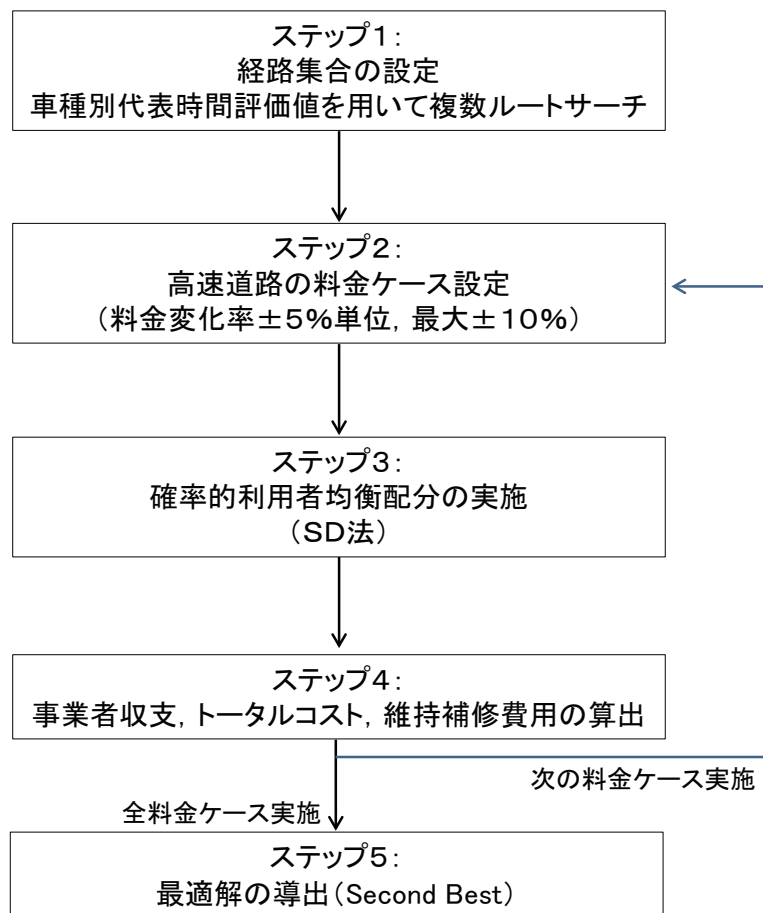


図 5.1: 数値シミュレーションの手順

#### 5.4.2 大規模ネットワークデータの設定

適用事例として、大規模な仮想ネットワークを作成した。システム全体の一般道路の延長は約 11,000km、高速道路の延長は約 1,000km、システム全体で約 12,000km のネットワークを作成した。リンク数は約 40,000、ノード数は約 25,000 である。検討対象とする高速道路は延長約 300km で料金は対距離制、大型車の料金は普通車の料金の 2 倍とした。次善料金 (Second Best) の探索にあたっては、道路利用者の負担が急激に変化することは望ましくないため、現況からの料金が大きく乖離しないことを念頭に置き、料金変化率を ± 5 % 単位とし、最大 ± 10

%を許容範囲とした。すなわち、各車種の料金変化率が± 0%の場合が現況料金体系のケースということになる。

ゾーン数は571ゾーンで設定した。高速道路の料金体系は対距離料金（ランプ間料金）とした。また、確率的利用者均衡配分の分散パラメーターは $\theta = 100$ に設定した（旅行時間コストの認知誤差の標準偏差は約30秒となる）。

限界維持修繕費用の設定は、普通車の荷重による道路舗装への損傷は非常に少ないと考えられるため、普通車の限界維持修繕費用はゼロとした。また、大型車の限界維持修繕費用に関する研究の蓄積は非常に少ないが、田上他（2012）[20, 21]では、高速道路と一般道路の道路舗装における大型車の限界維持修繕費用は概ね10倍程度異なる知見が得られている。また、米国州間高速道路のCost Allocation Study (1997) [22]によると、40キロポンドの4軸トラック1台の舗装の限界維持補修費用は、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補修費用は、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。ただし、橋梁やトンネル等の構造物の修繕コストは道路舗装のそれよりも大きいと考えられ、また道路舗装の工事発注に関係する間接費用も必要となる。そこで今回は、道路舗装の限界維持修繕費用を直接工事費用の場合よりも若干大きく設定し、大型車の高速道路の限界維持修繕費用は3.0円/km・台、一般道路の限界維持修繕費用は10倍の30.0円/km・台と設定した。3.で記述した通り、維持修繕費用の固定費用は計算結果に影響を与えないため、今回は設定せず無視した（ゼロとした）。

### 5.4.3 推計結果

事業者収支について料金の影響をシミュレーションすると、普通車の料金を下げると事業者収支が悪化する結果となった（表5.2）。表中でハッチがかかったセルは事業者収支を悪化させない料金条件である。事業者の収支を改善するために

表 5.2: 事業者収支（高速道路事業者：億円/日）

		大型車料金変化率				
		+10%	+5%	±0%	-5%	-10%
料金 普通 変化 率	-10%	5.85	5.78	5.71	5.64	5.56
	-5%	6.06	5.99	5.91	5.84	5.76
	±0%	6.25	6.18	6.11	6.03	5.96
	+5%	6.46	6.38	6.31	6.23	6.15
	+10%	6.65	6.57	6.50	6.42	6.34

表 5.3: トータルコスト（システム全体：億円/日）

		大型車料金変化率				
		+10%	+5%	±0%	-5%	-10%
料金 普通 変化 率	-10%	349.25	349.16	349.14	349.11	349.10
	-5%	349.33	349.31	349.26	349.26	349.15
	±0%	349.35	349.32	349.33	349.31	349.03
	+5%	349.46	349.43	349.36	349.33	349.31
	+10%	349.66	349.46	349.50	349.41	349.35

は、普通車の料金を上げるか、大型車の料金を上げる場合でも普通車料金は現状維持か上げる必要があると言える。

事業者収支を悪化させずトータルコストが最小となる次善料金（Second Best）は、普通車料金を5%増加させ、大型車料金を10%減少させる場合となった（表5.3）。

また、維持修繕費用については、次善料金（Second Best）時にはシステム全体の維持修繕費用は減少する結果となった（表5.4）。高速道路事業者の維持修繕費用は増加するが、事業者収支は改善しているため問題は少ないと考えられる（表5.5）。ただし、今回は需要固定型ODを用いたが、需要変動型ODを用いたならば、料金を上げた普通車の交通需要は減少し、料金を下げた大型車の交通需要は増加する。その場合、大型車が増えた分、システム全体の維持修繕費用は更に増加する可能性があることに留意する必要がある。

このことは瀬木・小林・田上（2014）[15]が2リンクの場合で示したように、

表 5.4: 維持修繕費用（システム全体：億円/日）

		大型車料金変化率				
		+10%	+5%	±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	-10%	6.46	6.46	6.45	6.44	6.44
	-5%	6.46	6.45	6.45	6.44	6.44
	±0%	6.46	6.45	6.45	6.44	6.43
	+5%	6.46	6.45	6.44	6.44	6.43
	+10%	6.45	6.45	6.44	6.43	6.43

表 5.5: 維持修繕費用（高速道路事業者：億円/日）

		大型車料金変化率				
		+10%	+5%	±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	-10%	0.160	0.161	0.163	0.164	0.165
	-5%	0.161	0.162	0.163	0.164	0.165
	±0%	0.162	0.163	0.164	0.165	0.166
	+5%	0.162	0.163	0.164	0.165	0.167
	+10%	0.163	0.164	0.165	0.166	0.167

普通車を高速道路から一般道路に誘導し、大型車を維持修繕費用の少ない高速道路に誘導することで、社会全体のトータルコスト及び維持修繕費用を減少させることが可能であることと同様の結果である。瀬木らが導いた結果は、今回の適用事例に関する限り、大規模ネットワークという条件下においても当てはまることを本章で示したことになる。

#### 5.4.4 経路誘導の効果

前節では高速道路の料金割引により大型車を高速道路に誘導し、トータルの維持修繕費用を削減可能であることを示した。ここでは大型車が具体的にどのような経路に転換したのかについて考察する。

基本的に、大型車は並行する国道利用から高速道路利用に転換している。これは経路転換の最も典型的な例で、同じ方面に向かうならば時間価値と高速道路費用のバランスで、国道を選ぶか高速道路を選ぶか決定されるためである。高速道

表 5.6: 旅行時間コスト (システム全体 : 億円/日)

		大型車料金変化率				
		+10%	+5%	±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	-10%	342.78	342.70	342.69	342.67	342.66
	-5%	342.87	342.85	342.81	342.82	342.71
	±0%	342.89	342.87	342.89	342.87	342.60
	+5%	343.00	342.98	342.91	342.89	342.88
	+10%	343.20	343.01	343.06	342.97	342.92

路利用車両は基本的に広域利用の交通であるため、一般道を使うならば国道以外の選択肢は少ないと考えられる。高速道路利用車両が県道以下を利用することがあるのは、起終点近くで目的地に発着する場合が主であるためである。

#### 5.4.5 維持修繕費用考慮の必要性

ここで、維持修繕費用を考慮せず、旅行時間コスト最小の場合を確認すると、表 5.6 の通り、普通車料金を変化させず、大型車料金を 5 % 増加させたケースが旅行時間コスト最小となる。全体的な傾向としては、大型車料金を減少させた方が旅行時間コストが低くなる傾向にあるが、事業者収支を悪化させない範囲では大型車料金を 5 % 増加させたケースが旅行時間コスト最小となった。また、その際のシステム全体の維持修繕費用は増加している (6.446 億円/日 → 6.452 億円/日)。

あくまで今回の適用事例に関する限りではあるが、外部費用である維持修繕費用を考慮せず旅行時間コストのみを考慮すると、維持修繕費用を増加させてしまうケースが採用される可能性があることを示した。大規模ネットワークを用いた場合、一般的な結果を示すことが困難であるため、大規模ネットワークを用いて維持修繕費用の必要性を示すには、更なる研究の蓄積が必要である。

表 5.7: 事業者収支（高速道路事業者：億円/日）

		大型車料金変化率					
		-15%	-20%	-25%	-30%	-35%	-40%
料金普通車 変化率	+5%	6.07	5.99	5.90	5.82	5.73	5.64
	+10%	6.26	6.18	6.09	6.00	5.92	5.83
	+15%	6.45	6.37	6.28	6.20	6.11	6.01
	+20%	6.63	6.54	6.46	6.37	6.28	6.19

#### 5.4.6 料金変化率を拡大した場合の次善解

前節までのシミュレーションでは、道路利用者が負担する料金が大きくなりな  
いよう料金変化率は最大± 10%とした。しかしながら、一般的に料金弾性値が  
小さい普通車の料金を+10%を超えて上げ続け、一般的に料金弾性値が大きい  
大型車の料金を-10%を超えて下げ続けられれば、ある程度までは事業者収支を悪  
化させない可能性があり、そのときに前節までに得られた次善解よりも良い次善  
解が得られる可能性がある。

そこで本節では、前節で得られた次善解の妥当性およびその他の次善解につい  
て検証を行う。ただし、社会的良識を鑑みると、大型車の料金が普通車の料金よ  
りも安くなることは妥当ではないと考えられる。そのため、大型車の料金は最大  
で-40%、普通車の料金は最大で+20%が料金変化の限界とした。

以上の条件で数値シミュレーションを行った結果が表 5.7、表 5.8 である。次善  
料金（Second Best）は、普通車料金+20%、大型車料金-30%となった。

表 5.8 からわかるとおり、全体的に大型車の料金を減少させた方がトータル  
コストは低くなる傾向にある。しかしながら、大型車の料金を-40%にするケー  
スが次善料金（Second Best）になってはいない。大型車の料金を過度に下げるこ  
とは、かえって社会的に非効率となることに留意する必要がある。

表 5.8: トータルコスト (システム全体: 億円/日)

		大型車料金変化率					
		-15%	-20%	-25%	-30%	-35%	-40%
料金普通車 変化率	+5%	349.24	349.01	348.93	348.90	348.87	349.15
	+10%	349.30	349.24	349.29	349.16	348.97	348.97
	+15%	349.38	349.31	349.30	349.27	349.26	348.95
	+20%	349.37	349.27	349.27	349.23	349.24	349.26

#### 5.4.7 実行可能な料金条件

前節までの議論で導かれた次善解 (Second Best) は、事業者収支を悪化させてはいけないため、大型車料金を値下げするために普通車料金の値上げを必要とした。しかしながら、実社会においては料金割引は比較的执行可能であるが、特定の車種のみ料金値上げは実行が不可能でないにしても困難である。そのため本節では、事業者収支を無視し (税金で補填すると仮定)、料金割引のみを可能とする場合のトータルコストを最小にする料金解について考察する。

表 5.3 において料金割引のみ許容すれば、普通車料金  $\pm 0\%$ 、大型車料金  $-10\%$  のケースでトータルコストが最小となる。このことが意味するところは、大型車の料金を現況よりも若干安くした方が社会的により良い状態を達成可能だということである。実社会における高速道路の料金割引施策では、深夜割引などの実質的に大型車料金を安くする施策が実施されているが、本章で得られる知見からも、その施策の方向性は妥当である可能性が高いと考えられる。

#### 5.4.8 高速道路の耐荷力向上投資の条件

以上の議論の結果から、高速道路が社会全体の維持修繕費用を減少させる役割を担う可能性があることがわかった。一方で大型車の増加により高速道路自体の維持修繕費用は増加し、劣化しやすくなるものと想定される。そこで本節では、高速道路の耐荷力向上投資により高速道路をより頑丈にし、社会全体の維持修繕



表 5.9: 事業者収支：基幹幹線（高速道路事業者：億円/日）

		大型車料金変化率		
		±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	±0%	6.108	6.09	6.06
	+5%	6.18	6.14	6.109
	+10%	6.22	6.19	6.16

費用及びトータルコストを減少させる可能性について検証する。

高速道路の耐荷力向上投資によって限界維持修繕費用は減少すると仮定する。投資額が限界維持修繕費用の減少分の割引現在価値より小さければ、維持修繕費用及び社会全体のトータルコストを減少させることが可能となる。

本適用事例では高速道路における大型車の限界維持修繕費用を 3.0 円 / km・台としたが、耐荷力向上投資によって検討対象とする高速道路（延長約 300km）の限界維持修繕費用が 1.0 円 / km・台減少し、2.0 円 / km・台となるケースについて検証を行う。ここで、道路利用者は道路の維持修繕費用を認識しないため（外部性）、交通量配分計算と独立した形式で限界維持修繕費用を変化させ、高速道路の耐荷力向上投資による費用削減額を計算することが可能であることに留意する必要がある。

仮に高速道路における大型車の限界維持修繕費用が 1.0 円 / km・台減少したとすると、維持修繕費用は 0.039 億円 / 日減少する結果となった。この維持修繕費用の減少が未来永劫続き、割引率を 4 % と仮定すると、割引現在価値は約 359 億円、1km 当たり約 1 億円となる。すなわち、高速道路の耐荷力向上の投資額がこの割引現在価値以下であれば、投資によって社会全体の維持修繕費用及びトータルコストを減少させることが可能であり、高速道路事業者にとっては利益増加という恩恵を得ることができる。しかしながら、1km 当たり 1 億円投資して大型車の限界維持修繕費用を 1.0 円 / km・台だけ減少させられるかどうかは不明であり、今後の更なる研究が必要である。

表 5.10: トータルコスト：基幹幹線（システム全体：億円/日）

		大型車料金変化率		
		±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	±0%	349.33	349.31	349.30
	+5%	349.30	349.30	349.28
	+10%	349.29	349.30	349.30

表 5.11: 維持修繕費用：基幹幹線（システム全体：億円/日）

		大型車料金変化率		
		±0%	-5%	-10%
料金普通 変化率	±0%	6.45	6.43	6.42
	+5%	6.43	6.43	6.42
	+10%	6.43	6.42	6.42

#### 5.4.9 高速道路の機能役割分担

前節までは対象とする高速道路全体の料金体系を同じように変更し検討した。しかしながら、前述の通り、ODの分布によっては利用が少ない路線もあれば、国道が平行する需要が多い路線も存在する。また、政策的に考えると、一部の路線だけ大型車料金を割安にし、それら路線に大型車を集めるとともに頑丈な舗装構造とすることによって、全体の維持修繕費用を減少させることも考えられる。

そこで本節では、本ネットワークの基幹路線（約80km）を頑丈にし（限界維持修繕費用を減少させ）、それら路線のみ料金を変化させるシミュレーションを実施する。これら基幹路線は高速道路延長の約4分の1を占めており、表5.3の現況ケース（料金変化±0%）におけるトータルコストでは全体の約30%を占めている重要路線である。

高速道路における課金の実務的な考えから、当該路線のICから流入もしくは流出した場合の料金、すなわちIC（ランプ）間料金を増加もしくは減少させるものとした。具体的には、前節までの議論を踏まえ、次善解の候補となり得る普通車料金増加もしくは大型車料金減少のケースについてシミュレーションを実施

表 5.12: 維持修繕費用：基幹幹線（高速道路事業者：億円/日）

		大型車料金変化率		
		±0%	-5%	-10%
料金 普通 変化 率	±0%	0.164	0.147	0.148
	+5%	0.147	0.147	0.148
	+10%	0.147	0.148	0.148

した。

当該路線の限界維持修繕費用は 3.0 円 / km・台 → 2.0 円 / km・台に低減（頑丈に）するものとした（比較のため現況料金ケースは 3.0 円 / km のままとした）。シミュレーションの結果を表 5.9-5.12 に示す。

一部の高速道路のみを頑丈にしかつ料金変化させた結果、事業者収支を悪化させずトータルコストが最小となる次善料金（Second Best）は、普通車料金を 5% 増加させ、大型車料金を 10% 減少させる場合となった（表 5.10）。これは、現況よりも普通車の料金を上げ一般道路走行に導き、大型車料金を下げ高速道路走行に導くことを意味している。また、基幹路線を頑丈にしたことも影響し、システム全体の維持修繕費用は減少し、さらに高速道路事業者の維持修繕費用も現況より減少する結果となった。今回の適用事例では基幹路線を頑丈にしたことにより、維持修繕費用は 0.017 億円 / 日減少する結果となった。この維持修繕費用の減少が未来永劫続き、割引率を 4% と仮定すると、割引現在価値は約 156 億円、1km 当たり約 2 億円となる。基幹路線を頑丈にするために 1km 当たり 2 億円までの投資であれば十分にペイすることを意味する。前節で検討した対象とする高速道路全体を頑丈にする場合は 1km 当たり 1 億円までしか投資できないため、基幹路線のみを頑丈にした方がより多くの資金を投資可能であるとも言える。

また、前節までの議論を踏まえ、現況、料金変化のみ（全路線）、料金変化のみ（基幹路線）、料金変化及び耐荷力向上投資（基幹路線）の 4 ケースについて比較を行った（表 5.13）。料金変化のみ（基幹路線）のシミュレーション結果の詳細

表 5.13: 高速道路の機能役割分担の効果 (単位: 億円/日)

項目	現況	料金変化 (全路線)	料金変化 (基幹路線)	耐荷力向上投資 (基幹路線)	料金変化 +耐荷力向上投資 (基幹路線)
トータルコスト (システム全体)	349.33	349.31	349.31	349.32	349.28
事業者収支 (高速道路事業者)	6.11	6.15	6.21	6.12	6.11
維持修繕費用 (システム全体)	6.45	6.43	6.44	6.43	6.42
維持修繕費用 (高速道路事業者)	0.164	0.167	0.164	0.147	0.148
料金条件	現況料金	小型車料金+5 % 大型車料金-10 %	小型車料金+10 % 大型車料金± 0 %	現況料金	小型車料金+5 % 大型車料金-10 %

は割愛するが、次善料金は小型車料金+10%、大型車料金± 0%の場合となった。

表 5.13 より、料金変化させることによってトータルコスト及び維持修繕費用が減少する状況が伺われるが、一部の路線（基幹路線）のみにおいて料金変化をさせた場合においても、トータルコスト及び維持修繕費用を現況よりも減少させることができる。ただし、全路線の料金変化をさせた場合ほどの削減効果は見込まれない。一方、基幹路線において料金変化のみならず耐荷力向上投資を併せて行うと、トータルコスト及び維持修繕費用は全路線の料金変化を行った場合よりも更に減少することがわかる。全路線の耐荷力向上投資を行えば効果が出るのは自明であるが、それは非常に費用がかかるものであり、全体の約4分の1を占める基幹路線においてのみ料金変化及び耐荷力向上投資を行うことでそれなりの効果を得ることが可能であると言える。すなわち、効果が見込めそうな大型車が多い路線に対して料金変化及び耐荷力向上投資を行うことで、投資対効果を高めることが可能だと考えられる。

今回の適用事例に関する限り、一部の基幹路線を頑丈にし、かつ料金変化により大型車を交通集中させることで、事業者収支を悪化させずトータルコストを減少させ、なおかつ維持修繕費用も減少させる可能性があることがわかった。OD分布や交通面から重要と考えられる路線を選別し、高速道路間で機能的役割分担

をすることは有益である可能性がある。ただし、基幹路線の限界維持修繕費用を1.0円/km・台減らすのに1km当たり2億円の投資で可能かどうかは今後の研究が待たれる。1km当たり2億円の投資で済む場合は高速道路事業者が自主的に投資するインセンティブが働くが、もし1km当たり2億円以上の投資が必要な場合、社会全体が受ける便益を考慮し、政府補助等の公的な支援を行うことも考えられる。

## 5.5 道路の維持管理施策に関する考察

今回の適用事例に関する限り、以下の知見が得られた。

### 5.5.1 料金変更により維持修繕費用を低減・収支改善可能

高速道路の料金変更を通じて経路誘導することにより、社会全体のトータルコストおよび維持修繕費用を低減し、なおかつ収支改善が可能であることがわかった。ただし、事業者収支を確保すると、普通車料金を増加させることになるため、社会的な公平性確保のための方策が必要である。例えば、大型車に対して新たな課税を実施し、普通車の税金を低くする等の所得移転等が考えられる。もしくは、大型車の料金割引率を普通車の料金割引率よりも大きくし、相対的に大型車の料金を低下させる方策も考えられる。政策的な実施しやすさを考慮すれば、料金割引により大型車だけの料金を相対的に低下させる方が実施しやすいと言えるが、その際には事業者収支が悪化してしまうため、政府等からの補てんが必要となり、それは実社会で実施されている高速道路の料金割引のスキームとほぼ同じである。

また、一部の高速道路事業者のみが料金割引を実施すると、他の高速道路事業者の維持修繕費用を減少させるだけでなく、料金収入を減少させる可能性がある。そのため、社会全体のトータルコストを減少させるには、何らかの形で複数の高速道路事業者が連携し、全体的にバランスがとれた施策を実施することが考

えられる。例えば、高速道路事業者同士の連携が難しければ、政府が音頭をとって社会全体として維持修繕費用を考慮した高速道路料金体系を考え、実行していくことが考えられる。

### 5.5.2 高速道路の段階的機能役割分担の可能性

高速道路の中でも耐荷力向上の投資を行い基幹路線となる頑丈な路線の料金体系を割安にすることを通じて大型車を集中させ、システム全体の維持修繕費用を低減することを今回の適用事例に関する限り示した。状況によっては大型車のみが走行可能な路線を設定した方が、社会全体のトータルコスト及び維持修繕費用を低下させる可能性があり、今後の更なる詳細検討が必要とされる。

現在の高速道路のほとんどは高規格幹線道路および都市高速であり、国土開発幹線自動車道は国土の開発を視野に入れた高速道路であるが、地域高規格道路のような交流促進型広域道路や地域形成型広域道路等のきめ細かい役割分担が考慮されているとは言い難い。本章の適用事例で示した通り、大型車を優先して通行させる基幹路線とその他の路線に分ける方法も考えられ、その他の役割分担の方法も当然あるはずである。そのため、高規格幹線道路や都市高速の中においても大型車を優先して走行させる路線等、道路網としての役割分担を明確に規定し、社会全体のトータルコスト及び維持修繕費用の低減を図ることが考えられる。

また、基幹路線を設定し料金変更と合わせて耐荷力向上投資を行うことにより、トータルコストの削減や維持修繕費用の削減により大きな効果を得られると考えられるため、高速道路の役割分担は料金設定と舗装の頑丈さ等を合わせて検討することが考えられる。

## 5.6 結言

本章では、大規模ネットワークを用いて維持修繕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、維持管理施策に関する知見を得た。

高速道路の料金を変更することにより、事業者の収支を悪化させずに社会全体のコストおよび維持補修費用を低減可能であることがわかった。また、料金設定を路線毎に設定することにより高速道路の機能的役割分担の可能性を指摘した。

さらに、本章で提案した維持修繕費用を考慮した高速道路の料金設定モデルの実用性を高めるにあたり、いくつかの課題が残されている。

第1に、実ネットワークを用いた数値計算の実施である。今回は仮想ネットワークを用いて数値計算を行ったが、より実態に即した提言を行うため実ネットワークを用い、検討対象を設定した上で数値計算を行う必要がある。また、大型車の料金を下げ小型車の料金を上げることを実施する場合、普通車への税優遇等の社会的な補償が必要であり、その施策を組み込んだ上で次善解を導く必要がある。

第2に、限界維持修繕費用の詳細な設定である。道路は大きくは土工部、橋梁部、トンネル部に分かれるが、それぞれの対象毎に維持修繕費用を算出し、リンク毎に維持修繕費用を設定することにより詳細な数値計算結果を行い、実態に即した提言に繋げる必要がある。また、劣化予測モデルによる実証的な研究を通じて高速道路の耐荷力向上投資と限界維持修繕費用の関係を明確化することは、今後の維持管理戦略を考える上で有益である。

第3に、道路の維持管理施策に関する詳細検討である。今回得られた知見をベースに、上記課題を反映した研究を踏まえ、実行可能な道路の維持管理施策をより具体化していく必要がある。特に高速道路を無料開放せず、維持管理に必要な料金収入を得続ける「管理有料道路制度」に関する研究は重要事項であり、本

## 第 5 章 高速道路の維持修繕費用を考慮した効率的交通流配分に関する研究

---

章におけるモデルを拡張し，財政的な観点も含め，高速道路の無料開放と管理有料の比較研究をすることが考えられる．

なお，大型車のみ有料料金であったドイツは，平成 26 年 12 月 17 日にアウトバーンの乗用車も含めた有料化を閣議決定した [23]．高速道路の維持管理や新規整備のために料金を徴収する世界的な潮流と言っても過言ではないと筆者は考える．



## 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] 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～，pp.51-54, 2005 年 11 月.
- [4] Small, K.A., Winston, C. and Evans, C.A.: *Road Work: A New Highway Pricing and Investment Policy*, The Brookings Institution, Washington, D. C., 1989.
- [5] Mohring, H. and Harwitz, M. : *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.
- [6] Mohring, H. : *Transportation Economics*, Cambridge, Mass.,Ballinger Publishing, 1976, H. モーリング：交通経済学，勁草書房，1987.
- [7] Newbery, D.M.: Road damage externalities and road user charges, *Econometrica*, Vol.56, No.2, pp.295-316, 1988.
- [8] Chu, C.P. and Tsai, J.F.: Road pricing models with maintenance cost, *Transportation*, Vol.31, pp.457-477, 2004.

- [9] Newbery, D.M.: Cost recovery from optimally designed roads, *Economica*, Vol.56, No.222, pp.165-185, 1989.
- [10] Small, K.A. and Winston, C.: Optimal highway durability, *The American Economic Review*, Vol.78, No.3, pp.560-569, 1988.
- [11] Tellis, R. and Khisty, C.J.: Social cost component of an efficient toll, *Transportation Research Record*, Vol.1576, pp.140-146, 1997.
- [12] 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.
- [13] 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学科土木コース学士論文，2012.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 II 編利用者均衡配分モデルの展開，社団法人土木学会，2006.
- [18] 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 I 編利用者均衡配分の適用に向けて，社団法人土木学会，2003.

- [19] 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.
- [20] 田上貴士，瀬木俊輔，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 ～大規模ネットワークにおける検証～，土木計画学研究・講演集，Vol.47，2013.
- [21] 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.
- [22] Federal Highway Administration: *Addendum to the 1997 Federal Highway Cost Allocation Study Final Report*, United States Department of Transportation, 2000.
- [23] 日本経済新聞社：ドイツ高速道路、有料化へ，日本経済新聞夕刊，平成 26 年 12 月 22 日，2014.



## 第6章 結論

かつては道路事情が貧弱であった日本においても道路整備が相当程度進み、老朽化が進んだ高速道路では大規模更新の検討が始まった。日本においても道路の新設から維持管理の時代へ移行しつつあると言っても過言ではない。しかしながら、日本の有料道路の料金体系は建設債務償還を主たる目的としており、維持管理を積極的に考慮したものではなく、債務償還後は無料開放され、税金により維持管理することとなっている。また、維持管理を考慮した料金体系検討に必要な限界維持管理費用等のデータも整備されているとは言い難く、社会的に最適な有料道路の維持管理制度を検討する準備は十分とは言えない。そこで本論文では、道路の維持管理方法を検討するにあたって有益な既存研究整理や基本モデル構築、維持修繕費用計算モデルや料金政策の効率的な評価を行ってきた。

2章では、道路の維持管理費用を考慮した既存研究を体系的に整理し、研究課題を明確化した。具体的には、道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究および維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究の大きく2つに分けレビューを行い、体系的に整理した。道路舗装の維持管理費用の計算に関する既存研究については、維持管理費用の計算方法（計量経済学的アプローチ、工学的アプローチ）、舗装の劣化過程の扱い（確定的、確率的）、等の視点に基づき整理し、各論文についてレビューを行い、研究課題を整理した。維持管理費用を考慮した料金設定交通モデルに関する既存研究については、ネットワークの規模（簡易、大規模）、課金方法（First Best, Second Best）、等の視点に基づき

整理し、各論文についてレビューを行い、研究課題を整理した。

3章では、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として、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性を内部化することを目的とした高速道路の次善料金について理論的分析を試みた。その際、大型車と普通車によって道路構造物の劣化に及ぼす影響が異なること、および、一般道路と高速道路の間で構造物の耐荷力が異なることに着目し、車種別の高速道路料金設定による大型車の経路誘導を通じて、混雑費用、維持補修費用の双方を考慮した社会的費用を可能な限り抑制する次善高速道路料金について分析した。さらに、車種別料金を差別的に設定することは、料金設定による大型車の経路誘導を通じた道路ネットワークの維持補修費用の軽減効果の有効性を高めるうえで重要な意味を持つことを示した。

その結果、道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない状況においては、この差を大型車料金に反映することが効率性の観点から望ましいことが確認された。例えば、高速道路の舗装耐荷力が一般道路よりも高く、一般道路の限界維持補修費用が高速道路よりも高い場合には、限界維持補修費用の差を大型車料金に反映することにより、一般道路の大型車交通流の一部が高速道路に誘導されて道路ネットワークの維持補修費用が軽減され、社会的総余剰が改善される。このことは本論文により、需要の弾力性や高速道路事業者のゼロ利潤規制の有無に依存せず、頑健に成立することを示した。さらに、パラメータを特定化して行われる数値的な分析を通じて、差別的な車種別料金設定の重要性を例示することができた。例えば、大型車交通流を誘導したい道路から普通車交通流が追い出されることを通じて、大型車の経路誘導効果が高められ、効率性の改善に寄与することを示した。

4章では、道路舗装の劣化要因が自然劣化と車両による劣化に大別されること

---

に着目し、大型車両の走行がもたらす道路舗装の限界維持補修費用を求める方法論を提案した。具体的には、道路の舗装路面及び舗装全体の劣化過程を混合マルコフ過程として記述し、オーバーレイもしくは打換えにより道路舗装の補修が実施される道路舗装の定常的な劣化・補修過程において発生するライフサイクル費用を毎年等価な平均費用により表現する方法を提案した。さらに、具体的な適用事例を通じて、大型車両1台当たりの限界維持補修費用を計算する維持補修費用推計モデルの有効性について考察した。

その結果、日本の高速道路の舗装における大型車の限界維持修繕費用は概ね0.1円/km・台、一般道路における大型車の限界維持補修費用は概ね0.8円/km・台であり、当初の予想通り高速道路の方がより頑丈に建設されていることを今回の適用事例に関する限り実証した。また、高速道路に関して打換えを考慮する場合とオーバーレイのみの場合を比較すると、打換えを考慮した方が大型車の限界維持修繕費用は小さい結果となった（約0.8倍）。これは、打換えを実施した方が舗装の劣化が全体的に遅くなり、トータルでコスト削減に繋がることを意味する。しかしながら、打換えを考慮した場合の固定費用割合は約9割、オーバーレイのみを考慮した場合の固定費用割合は約5割であり、固定費用を考慮すると、必ずしも打換えを行う方が良いとは言い切れず、固定費用の負担方法のあり方も含めた維持補修方策の検討が今後の課題となる。さらに、アメリカの高速道路における大型車の限界維持修繕費用との比較考察により、日本の高速道路が今後さらに老朽化した場合、アメリカ同様に限界維持修繕費用が大きくなる可能性があるため、維持修繕費用を低減するためのコスト評価として割引現在価値法ではなく平均費用法を採用する等、道路の維持修繕方策に関して日本が進むべき方向性について言及した。

5章では、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、維持補修

費用が発生するという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。具体的には、仮想的な大規模ネットワークを設定し、車種別に交通流配分を行うことにより、維持補修費用の増減と料金収入の増減から導出される高速道路事業者の収支を悪化させない効率的な最適料金（Second Best）を解く数値シミュレーションを実施した。さらに、社会的なトータルコストの変化や高速道路事業者の収益の改善度等について分析・考察を行い、道路の維持管理に関する施策の方向性について検討した。

その結果、今回の適用事例に関する限り、高速道路の料金変更を通じて経路誘導することにより、社会全体のトータルコストおよび維持修繕費用を低減し、なおかつ高速道路事業者の収支を改善可能であることがわかった。また、高速道路の中でも耐荷力向上の投資を行い基幹路線となる頑丈な路線の料金体系を割安にすることを通じて大型車を集中させ、システム全体の維持修繕費用を低減することも示した。すなわち、高速道路の路線や重要度によって機能分担を行うことで、社会的により良い状況に導く可能性があることを示した。状況によっては大型車のみが走行可能な路線を設定した方が、社会全体のトータルコスト及び維持修繕費用を低下させる可能性があり、今後の更なる詳細検討が必要とされる。

今後、維持補修費用を考慮した高速道路料金に関する政策的知見を蓄積するために、多くの研究課題が残されている。

第1に、実ネットワークを用いた実証分析を通じて知見を蓄積することが必要である。本論文では単純化した2リンクのモデル及び大規模な仮想ネットワークを用いて数値計算を行ったが、より実態に即した提言を行うため実ネットワークを用い、検討対象を設定した上で数値計算を行う必要がある。

第2に、ネットワーク均衡を求めるためのインプットデータの作成方法に関しては、これまで多くの実証研究の成果が蓄積されている。しかしながら、限界維



---

持補修費用に関しては、研究成果の蓄積が極めて少ないのが実情である。限界維持補修費用に関するデータは、次善料金を算定するために不可欠な情報であり、今後、限界維持補修費用に関する研究成果を蓄積することが必要である。例えば、打換えを考慮した一般道路（舗装全体）の劣化予測モデル構築及び限界維持修繕費用の試算、FHWA(2000)の調査結果のように都市部や郊外部等の地域別、大型車のサイズ別、道路構造別（土工部、橋梁部、トンネル部）等、多様な限界維持修繕費用を算出することが考えられる。そのことによりリンク別に限界維持修繕費用を設定することも可能となってくる。また、今回の研究の対象外とした橋梁における限界維持修繕費用算出のため、大型車交通量を考慮した橋梁の劣化予測モデルの構築や、舗装工事発注に伴う間接費用の考慮等も今後の課題として挙げられる。さらに、本論文では固定的に取り扱い、議論を行わなかったが、大型車の乗用車換算係数に関しても精査が必要である。この数値は、大型車の限界維持補修費用と限界混雑費用の比を決めるため、車種別の料金設定を分析する上で重要なものである。高速道路と一般道路の間で乗用車換算係数に差異がある場合には、その差異を分析に反映することも必要である。

第3に、大型車の高速道路への経路誘導と付随して、高速道路の耐荷力に関するサービス水準に関する研究も興味ある研究課題である。道路構造物の耐久性に関しては、規模の経済性が働くことから、特定の道路構造物の耐久性を高め、その道路に大型車交通流を集中的に誘導することは、効率性の観点から望ましいと考えられる。例えば、高速道路の大型車に対する耐久性能に関して複数のランクを設定するとともに、高速道路の耐久性能の階層化と大型車の戦略的経路誘導を同時に考慮に入れて、高速道路の耐久性能を最適設計する方法論を開発することも重要な課題であろう。また、耐荷力向上投資に伴い限界維持修繕費用がどの程度改善するのか明確化することは、今後の維持補修戦略を考える上で有益である

と考える。

第4に、民間高速道路事業者が社会的に最適な料金設定を実施するように誘導する政策手段を分析することが必要である。例えば、高速道路の大型車交通量に応じて、事業者に補助金を支出したり、高速道路の構造物の耐荷力が社会的に最適に設計されるように誘導するための施策が該当する。こうした動機付けの設計に関する研究は、PPPによる高速道路整備を検討する際に有用な示唆を提供しうると考える。

第5に、道路構造物の限界維持補修費用は構造物の劣化水準に依存する。また、構造物の劣化水準は道路の区間ごとに異なっているため、時間を通じて各区間の限界維持補修費用は変化することになる。こうした点を考慮すると、より効率的な料金設定のためには、区間ごとの道路構造物の劣化水準に応じた動学的な料金調整を行う必要がある。このような料金調整の分析を行うための動学的な枠組みの構築が必要である。

第6に、本論文の数値的な分析結果は、差別的な車種別料金設定が、車種別の利用者の消費者余剰に非対称な影響をもたらすことを示している点に注意する必要がある。本論文が数値計算において想定したように、一般道路の限界維持補修費用が高速道路よりも高く、かつ、道路間の限界維持補修費用の差が料金設定に反映されていない場合には、大型車を優遇した料金改定が行われるため、大型車の利用者の消費者余剰は増加し、普通車の利用者の消費者余剰は減少する（高速道路の限界維持補修費用の方が高い場合は逆）。この結果は、料金改定の社会的受容性を低下させる可能性がある。このような車種別の利用者の厚生に対する非対称な影響を緩和するためには、税制の変更などを通じた車種別の利用者間の所得移転が必要となる。例えば、大型車の料金を値下げし、普通車の料金を値上げする場合には、同時に大型車の自動車税を増税し、普通車の自動車税を減税すれ

---

ば、車種別の利用者の厚生に対する非対称な影響を緩和できると考えられる。このような税制と料金の同時設計問題は本論文の範囲を超えており、今後の課題である。

最後に、道路の維持管理施策に関する詳細検討が挙げられる。今回得られた知見をベースに、上記課題を反映した研究を踏まえ、実行可能な道路の維持管理施策をより具体化していく必要がある。特に高速道路を無料開放せず、維持管理に必要な料金収入を得続ける「管理有料道路制度」に関する研究は我が国にとっても重要事項であり、本論文におけるモデルを拡張し、財政的な観点も含め、高速道路の無料開放と管理有料の比較研究をすることが考えられる。

本論文では、道路の維持管理のあり方の検討に必要な基礎的かつ実務的な研究を行った。道路の維持管理を含めたアセットマネジメントの高度化に関する研究は現在も発展中であり、本論文で整理・分析・提案した道路の維持管理に関する研究成果が、アセットマネジメントの分野をさらに発展させ、より良い社会の構築に貢献すれば幸いである。



## 謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方から様々な御指導と御協力をいただきました。記してここに心より感謝の意を表します。

京都大学 小林潔司教授には、本研究の遂行にあたり、終始適切な御指導、御助言を賜りました。研究が遅れがちな筆者に対して、辛抱強く叱咤激励していただきました。先生の粘り強く温かい御指導がなければ、本研究を取りまとめることはできませんでした。また、研究を進める過程で先生に頂いた、幅広い知見と深い洞察、斬新な発想に基づく数々の御指摘は、本研究に限らず、筆者が今後の社会生活を営む上での大きな財産となりました。さらに、学会発表の機会や、学内外との研究交流の場を積極的に与えて頂いたことも、筆者にとって貴重な経験となりました。心より深く感謝いたします。

京都大学 谷口栄一教授には、本論文の主査として、本研究をとりまとめるに当たって、適切な御助言並びに御指導をいただくとともに、本研究の今後の方向性・発展性について、大変貴重な御意見をいただき、研究内容を更に充実させることができました。心より深く感謝いたします。

大阪大学 貝戸清之准教授には、御多忙の中お時間をいただき、本研究の終盤で御相談に行ったにも関わらず御協力を快く引き受けてくださり、また、舗装の劣化予測モデルのデータ収集や推定方法に関する御指導をいただきました。心より御礼申し上げます。

京都大学 松島格也准教授には、研究の進め方や論文のとりまとめ方等の研究

の基本的なこと，更には実務的な研究方法まで親切丁寧に御指導いただき，筆者の研究生生活を支えていただきました。また，筆者が研究室生活や学会活動等を過ごしやすいよう，きめ細かく御配慮いただきました。厚く御礼申し上げます。

京都大学 山田忠史准教授には，論文のとりまとめから単位取得方法等の学生生活の進め方まで，親切丁寧に御指導いただきました。社会人博士課程の学生として京都大学に足を運ぶ機会が少なかった筆者にとって大きな支えとなりました。心より御礼申し上げます。

京都大学 大西正光助教には，研究内容への助言に加え，研究の事務的手続きやその他学生生活全般に関して多大な御支援をいただきました。特に筆者が小林研究室生活を過ごしやすいよう，ゼミ発表や単位取得等で御支援いただきました。心より御礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり，小林潔司研究室の皆様にも多大な御協力を賜りました。まず，瀬木俊輔氏（現京都大学経営管理大学院特定助教）には数学的なモデル化や既存研究の収集等において多大な御助力をいただきました。特に理論的な論文作成にあたっては多大な御支援をいただき，本研究を発展させることができました。心より感謝申し上げます。松原朋弘氏には基本的な交通モデルの解析や既存資料収集等においてご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。また，元秘書の藤本彩氏，現秘書の井上千佳子氏及び中本理恵氏には，小林先生との打合せ日程調整等，研究活動を進めていく上での多くの事務手続きを手伝って頂ました。ここに厚く御礼申し上げます。

阪神高速道路株式会社の坂井康人チームリーダーには，高速道路における維持管理費用の実態や，限界維持管理費用の考え方や妥当性について御助言いただきました。心より御礼申し上げます。

株式会社 I T 都市研究所の吉田禎雄代表取締役には，本研究で行った交通流配

分プログラムの作成に関して多大なご助力をいただき、また本研究の完成に向けて御応援いただきました。心より御礼申し上げます。

筆者が本研究を始めるきっかけおよび機会を与えていただき、さらには研究内容へ適切な御助言をいただいた、株式会社オリエンタルコンサルタンツ 後藤忠博中国支店副支店長には深く感謝いたします。さらには、研究の進捗が遅かったにも関わらず、忍耐強く本研究の完成をご支援ご協力いただいた株式会社オリエンタルコンサルタンツの関係者一同に深く感謝いたします。株式会社オリエンタルコンサルタンツの皆様の御支援御協力なくして、本研究は完成することはありませんでした。本研究の成果を実務で活用し、新規プロジェクト開発や事業経営手法の構築、業務受注等に繋げられるよう、努力して参りたいと思います。

最後に、筆者の研究活動を陰ながら支えてくれた妻と子供たちに感謝の意を表します。

2015年10月

田上 貴士