財源調達に伴う厚生損失を考慮した
道路ネットワークにおける
最適料金水準に関する研究

平成 26 年 1 月

日本大学大学院理工学研究科博士後期課程
社会交通工学専攻

池　下　英　典

目　　次

第１章 序論 1
　１－１ 研究の背景 1
　１－２ 研究の目的 7
　１－３ 論文の構成 8
第２章 既存研究の整理と本研究の位置付け 12
　２－１ 概説 12
　２－２ 料金制度に関する整理 14
　２－３ 財源調達に伴う厚生損失 17
　２－４ 財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合の料金水準 20
　　２－４－１　全ての道路の料金水準 21
　　２－４－２　特定の道路の料金水準 24
　２－５ 財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合の料金水準 30
　２－６ 本研究の位置付け 32
第３章 料金水準設定基準の提案 40
　３－１ 概説 40
　３－２ 代表的家計の厚生水準の定式化 42
　３－３ 高速道路料金と公的資金の限界費用 44
　　３－３－１　高速道路料金の限界費用 45
　　３－３－２　燃料税の限界費用 48
　３－４ 最適料金水準と厚生水準 51
　　３－４－１　高速道路料金と燃料税の限界費用と代表的家計の厚生水準との関係 52
　　３－４－２　償還主義料金と無料化における代表的家計の厚生水準 55
　　３－４－３　燃料税の限界費用が一定の場合の代表的家計の厚生水準 57
第４章 道路ネットワークにおける最適料金水準の導出 59
　４－１ 概説 59
　４－２ 道路ネットワークにおける利用者行動モデルの定式化 61
　　４－２－１　利用者均衡その1ー不完全代替モデル 61
　　４－２－２　利用者均衡その２ー完全代替モデル 63
　　４－２－３　利用者均衡その３ーロジット型代替モデル 65
　４－３ 社会的厚生関数 67
　４－４ 最適料金水準の導出 69
　　４－４－１　MCF＝－１の場合の全ての道路の料金水準 69
　　４－４－２　MCF＝－１の場合の特定の道路の料金水準 70
　　４－４－３　MCF≠－１の場合の全ての道路の料金水準 71
　　４－４－４　MCF≠－１の場合の特定の道路の料金水準 73
　４－５ 二段階最適化モデル 75
　　４－５－１　上位問題 75
　　４－５－２　下位問題 76

４－６ 数値計算例 ·· 78
４－６－１ 計算対象の道路ネットワーク ·· 80
４－６－２ 利用者均衡配分に基づく料金変化に伴う最適料金水準··················· 85
４－６－３ MCFを考慮した社会的厚生関数に基づく最適料金水準 ················· 95
第５章 結論 ·· 109

図一覧

図１－１　費用負担率のイメージ･･ 2
図１－２　本研究で対象とする料金設定の位置づけ･･････････････････････････ 3
図１－３　論文の構成 ･･･ 10
図２－１　道路利用者課金と道路整備財源との関係･･････････････････････････ 15
図２－２　限界費用価格形成原理に基づく混雑料金･･････････････････････････ 22
図３－１　高速道路料金と燃料税の限界費用････････････････････････････････ 45
図３－２　高速道路料金の限界費用･･ 46
図３－３　燃料税の限界費用･･ 49
図３－４　MCP，mcf，V(P,f)の関係図･･････････････････････････････････････ 53
図３－５　最適料金水準点Ａにおける厚生水準･･････････････････････････････ 54
図３－６　償還主義料金の代表的家計の厚生水準････････････････････････････ 56
図３－７　無料化施策の代表的家計の厚生水準･･････････････････････････････ 56
図４－１　シンプルな道路ネットワークの想定･･････････････････････････････ 80
図４－２　Sioux Fallsテストネットワーク ････････････････････････････････ 82
図４－３　シンプルな道路ネットワークにおける料金と交通量の関係 ････････ 85
図４－４　シンプルな道路ネットワークにおける混雑率（交通量／道路容量） ･････ 86
図４－５　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入 ･･････ 88
図４－６　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から400円） ･･ 89
図４－７　Sioux Fallsテストネットワークでの総走行時間費用と料金収入････････ 91
図４－８　Sioux Fallsテストネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から400円） ･･ 93
図４－９　シンプルな道路ネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数Z･･････ 96
図４－１０　シンプルな道路ネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数Z(０円から400円） ･･･ 99
図４－１１　Sioux Fallsテストネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数Z･ 102
図４－１２　Sioux Fallsテストネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数Z（０円から400円）･･ 105
図４－１３　Sioux Fallsテストネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数Z（０円から400円）の拡大図･･ 105

表一覧

表１－１　各国の高速道路料金水準と主な整備財源 ･････････････････････････････ 5
表２－１　有料道路の原則 ･･･ 14
表２－２　課金モデル ･･･ 29
表３－１　車種別の時間価値原単位 ･････････････････････････････････････ 48
表３－２　高速道路・高規格道路における車種別の走行経費原単位 ･･･････････････ 48
表４－１　道路ネットワークの条件 ･････････････････････････････････････ 81
表４－２　Sioux Falls テストネットワークの容量と区間距離 ･････････････････････ 83
表４－３　Sioux Falls テストネットワークの OD 間交通量 ･･････････････････････ 84
表４－４　シンプルな道路ネットワークにおける料金と交通量の関係 ･･･････････････ 86
表４－５　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入 ････････････ 88
表４－６　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から 400 円） ･･･ 90
表４－７　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入 ･････････ 92
表４－８　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から 400 円） ･･ 94
表４－９　シンプルな道路ネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z* ･･････ 97
表４－１０　シンプルな道路ネットワークでの目的関数 *Z* の最小値とその料金水準 ･ 98
表４－１１　シンプルな道路ネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z*(０円から 400 円) ･･･ 100
表４－１２　シンプルな道路ネットワークでの目的関数 *Z* の最小値とその料金水準（０円から 400 円） ･･･ 101
表４－１３　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z* ･ 103
表４－１４　Sioux Falls テストネットワークでの目的関数 *Z* の最小値とその料金水準 ･･･ 104
表４－１５　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z*（０円から 400 円） ･･･ 106
表４－１６　Sioux Falls テストネットワークでの目的関数 *Z* の最小値とその料金水準（０円から 400 円） ･･ 107

第１章 序論

１－１ 研究の背景

交通サービスを維持するためには，そのインフラ整備や維持費用を調達することが必須である．特に道路は誰もが利用できるため，誰が利益を得て，誰がその費用を負担するかを，説明できる根拠が重要である．まずはわが国の道路整備について，高速道路と一般道路とに分けて考える．前者は，建設費のほとんど全てを料金収入で賄うように料金を設定し，道路利用者がその通行料金を支払うことで財源調達を行っている．しかし後者は，公共インフラとして不特定多数の道路利用者が存在するため，その通行は無料という原則に立ち，税金による負担でその整備費用を賄っている．このようにこれまでの議論では，全額受益者負担あるは全額納税者負担という両極端な意見であった．そのため，一般的な道路ネットワークとして考えたときの財源調達や混雑が及ぼす影響を合わせて考慮された料金水準と課税水準の望ましい組み合わせに関する議論がなされていない．高速道路の料金制度に関しては，これまで様々な議論がなされてきた．例えば，道路関係四公団の民営化や民主党の高速道路無料化などを巡って議論されている．道路の料金水準は，現状からの引き下げは主張されているが，無料は最適ではなく適切な料金水準を設定するべきと主張されている．しかし，それは全てを料金で賄うことではないと述べられており，高速道路料金と税金によって賄うことが念頭に置かれている（例えば，森杉（2003）[1)]，宮川（2011）[2)]）．近年でも，公益財団法人高速道路調査会による 2011 年８月の「高速道路の料金制度に関する研究委員会　中間報告書」が提出されるなど，政府審議会等で道路料金に関する利用者の受益と負担の関係を整理し，今後の料金設定について検討している．しかし，一体的な道路ネットワークを考えたとき，その費用は，受益者である道路利用者による負担と燃料税などの税金による負担を合わせて考慮して，道路料金水準を決定する基準は示されていない．そこで，料金水準の設定について，高速道路と一般道路について整理する．

現在の高速道路などの有料道路の料金水準は，料金収入によって道路整備の借入金を返済するように設定されている．この考え方は「償還主義」と呼ばれ，道路の整備や維持の財源を確保する観点から，その道路利用者が費用を負担する受益者負担の原則に基づいている．しかし，これは道路法の無料公開原則の例外措置として，一定の料金徴収期間は道路利用者

が料金を支払う有料道路が存在している．ここでの料金水準は，前述の「償還主義」に加え，「公正妥当主義」及び「便益主義」に基づいて定められている．したがって，償還を終えた有料道路は，無料開放することが原則となっているが，実際に償還を終えた複数の有料道路は，無料開放または維持管理分の料金を徴収している．

つまり，これまでの償還主義では，図１－１中の左に示すように，道路の費用をその利用者が賄うよう，受益者負担の原則に基づいて道路料金が決められている．しかし，適正な料金水準を維持するために，有料道路への公的助成（税金の投入）も行われてきた（例えば，道路関係四公団民営化推進委員会（2002）[3)]）ため，現実には図１－１に示すような道路料金に補助としての税金を含めた収入によってその費用を負担している．

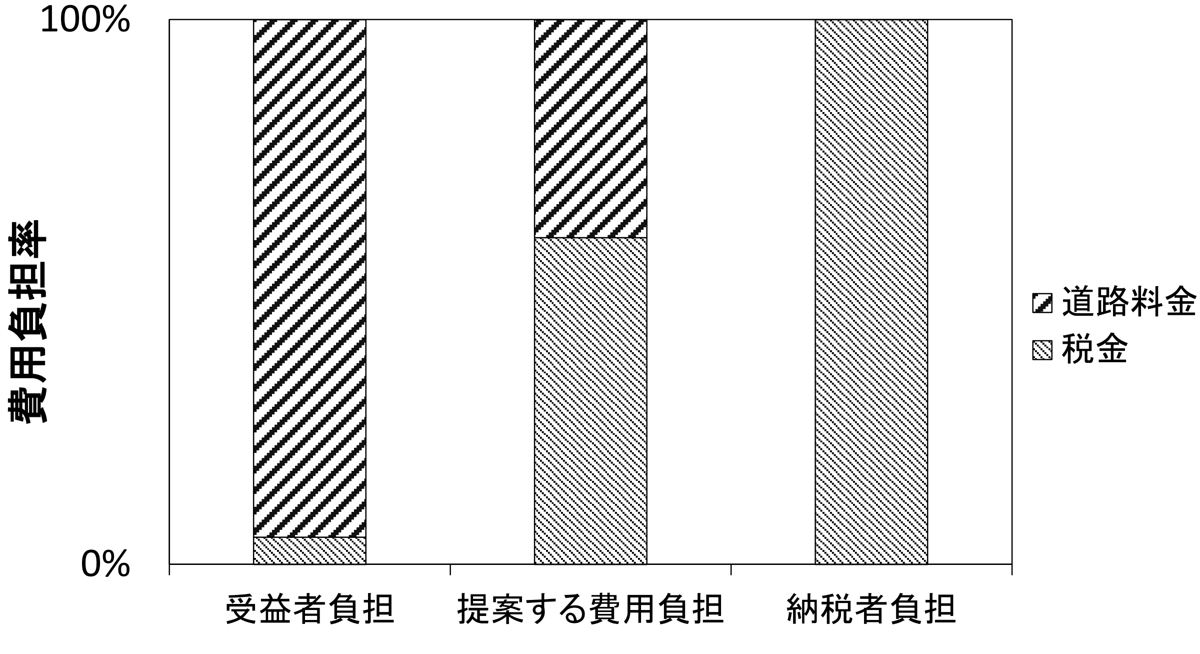

図１－１　費用負担率のイメージ

一方で，一般道路については，さきに述べたように不特定多数の受益者が存在する公共財である．そのため料金を設定し，徴収することは利用者の特定が困難であり，実施した場合も費用がかかるため，その道路建設や維持管理の費用は納税者負担による国民の税金で賄っている．特に混雑がない場合の一般道路は，図１－１中の右に示す通り，税金で全ての費用を賄うように考えられている．八田 (2013) [4)] は，さきに示した償還主義の考えとは異なり，道路は税金で建設費を賄い，無料で公開することが，最も効率的であることを示している．

つまり，全ての道路料金は，その混雑の度合いを基準に決める混雑料金として取り扱うということである．税金で全てを賄うように考え，混雑があれば混雑（料金）税を徴収するべきであると述べている．現実に高速道路や一般道路における混雑の影響は大きく，高速道路の料金水準の決定には，混雑の考慮が欠かせない．

以上の通り，料金に関する様々な議論は，上述の２つの視点を中心に行われている．料金水準設定基準に最低限求められるものを考えてみると，その基準に基づいて料金水準を計算できることである．償還主義はこれを実際満たしており，建設費用が高くなってくると，それに基づいて料金を改定するということがなされてきた．また一般道路における混雑課金も，混雑の度合いによって料金水準を計算できるため，要件は満たしている．しかし，これまでの議論では，図１－２に示すように受益者負担と納税者負担を分けて考えられてきた．受益者負担は，償還主義に基づく料金を受益者である道路利用者が負担している．一方で納税者負担として，社会的費用の増加を抑える目的税と考えられる混雑料金や 2009 年４月に廃止された道路の維持・整備費用を賄うための道路特定財源制度などがあげられる．しかし，前者の償還主義に基づく道路整備は，主に有料道路として設定されている道路での料金徴収によって行われてきた．一般道路の整備は，後者の道路特定財源などを用いることで行われてきた．ここで分けたように，これらの費用負担方法は，必ずしも合わせて考えられていなかった．そのため，料金水準の設定について，一体的なネットワークとして考えたとき，財源調達と混雑が及ぼす影響とを合わせて考慮されていない．したがって，現在の料金設定の考え方では，道路を社会的に有効活用することは難しい．

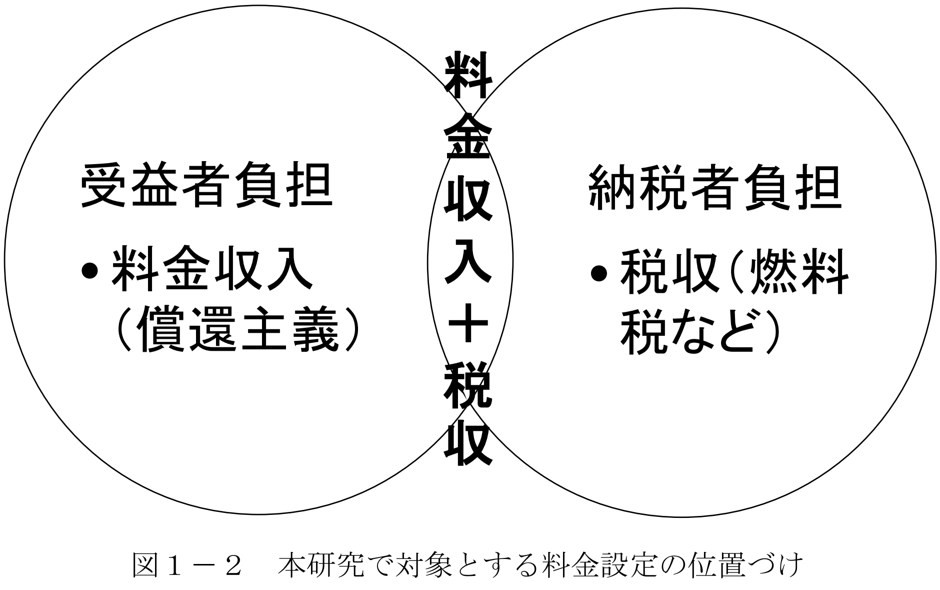

図１－２　本研究で対象とする料金設定の位置づけ

そこで，図１－２のように，これまでの受益者負担と納税者負担を合わせて考える料金設定を行うことが必要である．味水（2013）[5] が指摘するように，一般道路と高速道路を包括した料金制度が必要で，道路の料金水準は道路の整備水準を考慮して議論することが必要である．償還主義は，あくまで会計学的な費用の概念であり，その道路整備のみを考えている．一方で，経済学的な視点からは，道路の需要面に着目したものが料金制度，供給面に着目したものが整備制度であるため，この需要と供給を考慮した道路混雑を踏まえた議論が必要である．

これまでの道路整備や維持管理の財源調達について整理する．道路整備の財源調達は，その公共財としての性格から税金の問題に関連しているが，道路整備の財源調達の手段について議論した研究はほとんどない．

その一方で，世界の有料道路の実情に関する様々な調査が行われている．特に今後の道路整備を進める際の参考として，日本高速道路保有・債務返済機構（2010）[6] が，高速道路整備の基本思想を，欧米の４カ国（英国，米国，フランス，スペイン）における歴史的変遷を辿り，EU の交通政策について財源調達の方法を含めて整理している．その中で，道路財源に関する問題は，欧米各国に共通して直面している課題であることが述べられている．多くの国で，高速道路を含む道路の新設，改良，維持，補修に必要な費用は，自動車走行に必要な燃料価格に含まれる燃料税などの税収を財源としていた．しかし，どの国でも税収では不足が生じているため，道路での走行に対して料金を課す有料道路が整備されている．しかし，欧米の４カ国のいずれにおいても，基本人権としての移動の自由を考慮した交通権の確保が常に意識されてきた．そのため，英国，米国のいずれも高速道路を無料で自由に通行できるとされ，フランス，スペインにおいては，有料の高速道路には必ず並行する無料道路が存在するという原則があった．

これまでの高速道路整備が有料か無料かの決定要因は，主として次の５つの要因が関係しているとしている．まず１つ目は，財政的な要因，つまり高速道路整備時期の公共財源の余力が，大きく影響している．２つ目は，利用者の料金負担力である．これは，公共財源の多寡や経済発展の程度によって考慮されてきた．３つ目は，政権政党の政治思想である．政権が自由主義か社会主義かにより大きく影響し，整備手法が大きく変化してきた．４つ目は，過去の政策の成功と失敗である．過去において政策が，成功していたか，失敗していたかも影響を与えており，世論の影響も大きい．そして５つ目は，類似制度の存在である．過去に財源調達に関する類似制度が存在していたかどうかも影響を与えていると述べられている．

道路整備の財源調達は，歴史的変遷に基づいて整理すると，交通権という移動する権利を担保するための政策の一環であることが示唆されている．道路整備をその利用料金または道路利用に関連する税金で賄うという財源調達先の設定は，公共財源の多寡などの経済的な問題が大きく関係している．これまでの財源調達の手段は，交通権を考慮した国民に受け入れられやすい“政策”として決められてきており，どのように決定すべきかまでは整理されていない．

そこで，現在の財源調達の方法について整理すると，わが国では償還主義に基づく高速道路料金で賄うように考えている．一方海外においては，古川（2009）[7]によると，米国，ドイツ，イタリア南部は燃料税，英国，フランスは原則として，一般財源により高速道路を整備している（表１－１）．したがって，過去から現在まで世界的な財源調達方法に関する基準は存在しない．

表１－１　各国の高速道路料金水準と主な整備財源

	日本（‘09）	米国（‘05）	英国（‘06）	フランス（‘05）	ドイツ（‘05）	イタリア（‘05）
高速道路延長（km）	7,461	91,983	3,600	10,843	12,363	6,844
有料道路比率（%）	99.5	6.6	−	76.0	−	82.4
料金水準（円換算）	24.6円/km +150円	4.2円/km	12.9円/km (M6 Toll)	10.8～13.5円/km	12.8～19.9円/km（トラック）	7.0円/km
高速道路の主な整備財源	借入金償還方式（料金収入）	公共事業方式（燃料税等の税収）	公共事業方式（一般財源）	公共事業方式（一般財源）	公共事業方式（燃料税等の税収）	公共事業方式（燃料税等の税収）

（古川（2009）[7]の表２を基に作成）

ここで，財源調達について考える．一般に，道路整備のための財源を調達する際に税金や料金を課すことは，前者の税金に関しては納税者の行動に歪みをもたらし，納税者不便益をもたらす．また，後者の料金に関しては高速道路利用者の行動に歪みをもたらし，高速道路利用者不便益をもたらす．したがって，両者の合計である社会的不便益をもたらすことが分かっている．そして，それぞれの不便益は，税金や料金が行動に歪みを発生させるために，調達金額よりも大きい値となる．したがって，道路整備財源をそのような税金や料金を課すことによって調達する限り，名目的な調達額に加えて厚生損失に相当する国民負担が発生する．そこで国民負担を最小にするためには，課税による追加の税収１単位あたりの納税者不便益すなわち調達財源の限界費用と，料金賦課による追加の料金収入１単位を得るのに必要

な高速道路利用者不便益すなわち料金の限界費用が，等しくなるような料金や税率を設定することで，社会全体の不便益を最小にすることが必要である．これは，最適課税論の考え方で，複数の課税標準に対する限界費用をすべて等しくするべきということである（Auerbach and Hines (2002)[8]）．そのためには，財源調達に伴う厚生損失を考慮した料金水準の設定を，一般道路と高速道路を包括した一般的な道路ネットワークで行うことが必要である．しかし，財源調達に伴う厚生損失を考慮した道路料金水準に関する研究は，森杉，河野 (2008)[9]や森杉，河野，大村（2009）[10]，そして森杉，河野（2012）[11]などを除いてほとんど存在しない．

森杉，河野（2008）[9]や森杉，河野，大村（2009）[10]は，高速道路整備財源として高速道路料金収入に加えて燃料税収をはじめとする料金以外の収入源を想定し，財源調達による厚生損失を考慮した社会的純便益が最大になる高速道路料金水準の公式を導出した．そのうえで、わが国の高速道路料金の効率的水準を国内のいくつかの路線を対象として推計し，その多くの高速道路では旧道路公団設定水準より引き下げるべきであることを示している．ただし，これらの研究は，混雑等の外部性を全く考慮していない．

一方，森杉，河野（2012）[11]は，現実の高速道路および一般道路では大都市内あるいは大都市間を結ぶ道路を中心に混雑の影響は大きく，高速道路料金水準の決定には同要因の考慮が欠かせないとして，わが国の高速道路を対象にして財源調達による厚生損失および混雑外部性を考慮した効率的料金水準の推計を行った．その結果，混雑を考慮した高速道路の料金収入と税収による財源を，道路建設費の償還に充てることが効率的であることを示している．しかし，単純な並行道路を考えており，一般的な道路ネットワークにおける財源調達に伴う厚生損失を考慮した料金水準は導出されていない．

１－２ 研究の目的

本研究は，料金収入と税収で道路整備費用を負担するとき，一般的な道路ネットワークを対象として，理論的に社会的余剰が最大，すなわち社会的不便益が最小になるような料金水準を求めることを目的とする．

森杉，河野（2012）[11]は，一般的な道路ネットワークを対象としていないため，高速道路と一般道路からなる道路ネットワークとして考えたときの，混雑が及ぼす影響はほとんど考慮されていない．混雑を考慮するためには，交通ネットワーク均衡分析を必要とする．しかし，現実に行っている交通ネットワーク均衡分析による交通量配分では，効用を最大化するような効用関数では記述しておらず，需要固定のもとで私的費用最小，または需要変動のもとで消費者余剰最大化として記述している．このため，これらを目的関数として道路料金の設定を行っているときには，効用水準が明示的に分からない．しかし，混雑現象を経済理論の立場から解釈すると，私的限界費用と社会的限界費用が乖離した状態を指し，その差に等しい額を混雑している道路の利用者に課すことで，社会的に最適な交通フローが実現されることは知られている（山内，竹内（1992）[12]）．そこで，混雑によって発生する費用の差分を混雑課金や最適な道路料金水準として課す限界費用価格形成原理に基づく課金に関する研究が行われている．その結果，全ての道路への最適料金水準の定式化は，道路交通の均衡問題を明示し，限界費用価格形成原理が最適混雑料金となることを示されている．交通ネットワーク均衡分析で考えた場合においても，全ての道路への限界費用価格形成原理に基づく料金が，社会的に最適な料金水準であることが示されている．しかし，一般的な道路ネットワークにおける特定の道路に対する最適料金水準の定式は，単純な単一ＯＤの並行道路における例を除いて，未だ明確に導出されていない．交通ネットワーク均衡分析で考えた場合においても，試行錯誤的に料金水準を変更したり，感度分析的に料金水準を求めたりされているが，その最適な料金水準を求める式は提示されていない．財源を料金と税によって調達する場合の料金式を示した研究は，森杉，河野（2012）[11]などあるが，ほとんど存在しない．そこで，一般的な道路ネットワークにおいて高速道路の整備費用を，高速道路料金と税によって負担するときに，社会全体の余剰を最大化する高速道路の料金水準を決定する定式化を行う．

１－３ 論文の構成

本論文の構成と概要は，以下の通りである．

「第１章　序論」では，本研究の背景と目的，本論文の構成を述べた．研究の背景として，現在実施されている高速道路の料金制度では，道路を社会的に有効活用することができるような適切な料金水準が設定できていないことを指摘した．その上で研究の目的が，一般的な道路ネットワークを対象として，社会的不便益が最小になるような料金水準を設定する定式化を行うことであると述べた．

「第２章　既存研究の整理と本研究の位置付け」では，これまでの料金水準設定に関する既存研究の整理を行う．その上でまず，財源調達に伴う厚生損失すなわち調達財源の限界費用を考慮しない場合と，調達財源の限界費用を考慮する場合に分けて，料金水準の導出に関する研究を整理する．いずれの場合でも，全ての道路の最適料金水準と特定の道路の最適料金水準とを分けて整理する．これらを踏まえ，研究の位置付けを行う．

「第３章　料金水準設定基準の提案」では，高速道路の最適な料金を決定するための基準について提案を行う．ある１本の高速道路の建設を行い，その高速道路の料金水準を決定する場合を想定する．このとき，建設および維持費用のために，料金収入と燃料税の値上げによる増税収入を財源として調達せねばならないものとする．建設および維持費用は，メンテナンスコストやこれからの大規模な道路改修の費用としても考えられる．以上の条件のもとで，以上の条件のもとで，代表的家計が厚生水準を最大にするように高速道路利用の選択を行うものと想定する．その結果，達成できた厚生水準が，最大になるような料金水準を求める式を提案する．

「第４章　道路ネットワークにおける最適料金水準の導出」では，一般的な道路ネットワークを対象として，さきの第３章で示した代表的家計の行動をより一般化して，その道路利用者の行動を仮定してモデル化する．ここでの高速道路整備の財源は，料金収入に加えて他の燃料税などの税金からの補助を想定する．税金の限界費用を考慮した上で，社会的余剰を最大にするような料金水準を求める定式化を行う．

このとき，一般的な道路ネットワークにおける全ての道路区間に料金を課す場合と，高速道路のような特定の道路区間に料金を課す場合に分け，財源調達に伴う厚生損失を考慮の有無に分けて整理を行った．

以上の内容を踏まえ，社会的厚生が最大になる料金水準を求める問題を考える．本研究では，利用者均衡配分の考え方を用いて，下位問題としての既存の利用者均衡条件の制約のもとで，上位問題としての社会的厚生が最大になるような，二段階の最適化問題として，最適料金水準を求めることとする．計算例として，一般的な道路ネットワークの中で高速道路のみを料金設定の対象と考え，特定の道路に料金を課す場合を想定する．このとき，最適な料金水準を求めた計算結果を示し，本研究の定式化に関する内容について述べる．

「第５章　結論」では，本研究の成果を総括して結論を述べる．

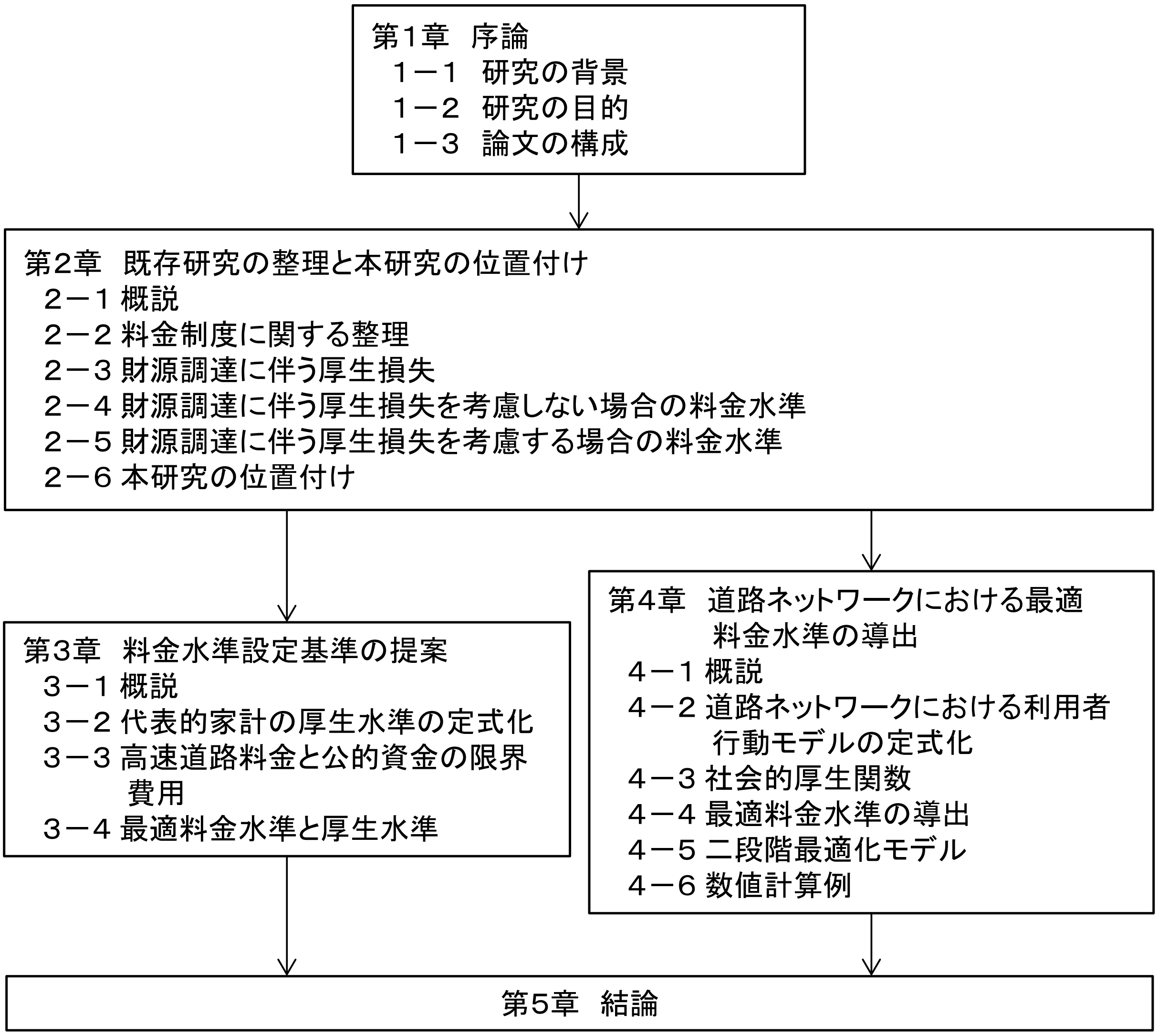
第1章　序論
１－１　研究の背景
１－２　研究の目的
１－３　論文の構成
第2章　既存研究の整理と本研究の位置付け
２－１ 概説
２－２ 料金制度に関する整理
２－３ 財源調達に伴う厚生損失
２－４ 財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合の料金水準
２－５ 財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合の料金水準
２－６ 本研究の位置付け
第3章　料金水準設定基準の提案
３－１ 概説
３－２ 代表的家計の厚生水準の定式化
３－３ 高速道路料金と公的資金の限界費用
３－４ 最適料金水準と厚生水準
第4章　道路ネットワークにおける最適料金水準の導出
４－１ 概説
４－２ 道路ネットワークにおける利用者行動モデルの定式化
４－３ 社会的厚生関数
４－４ 最適料金水準の導出
４－５ 二段階最適化モデル
４－６ 数値計算例
第5章　結論

図１－３　論文の構成

参考文献

１）森杉壽芳（2003）道路関係四公団改革について，高速道路と自動車，46(4)，7-9.

２）宮川公男（2011）高速道路　なぜ料金を払うのか，東洋経済新報社.

３）道路関係四公団民営化推進委員会（2002）高速道路の公的助成，道路関係四公団民営化推進委員会（第２０回）配布資料，
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/road/dai20/20siryou2-5.pdf

４）八田達夫（2013）ミクロ経済学 Expressway，東洋経済新報社.

５）味水佑毅（2013）幹線道路における料金制度の考え方，運輸と経済，73(9)，33-42.

６）日本高速道路保有・債務返済機構（2010）欧米の高速道路整備の基本思想－歴史的検証－，高速道路機構海外調査シリーズ NO.11，141-149，
http://www.jehdra.go.jp/pdf/research/r081.pdf

７）古川浩太郎(2009)高速道路の通行料金制度－歴史と現状－，レファレンス，705，99-118.

８）Auerbach, A.J. and J.R. Hines Jr.（2002）Ch.21 “Taxation and Economic Efficiency,” in A.J. Auerbach and M. Feldstein eds. Handbook of Public Economic, 3, 1347-1421, North-Holland.

９）森杉壽芳，河野達仁（2008）第 11 章 課税コストを考慮した高速道路網整備の効率的財源調達（森地茂・金本良嗣編：道路投資の便益評価－理論と実際－），東洋経済新報社，281-304.

１０）森杉壽芳，河野達仁，大村洋平（2009）道路特定財源調達の限界費用を考慮した効率的な高速道料金水準と財源調達，高速道路と自動車，52(2)，20-29.

１１）森杉壽芳，河野達仁（2012）道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究，67，1-20.

１２）山内弘隆，竹内健蔵（1992）混雑税理論の展望─経済学の視点，土木学会論文集，第 449 号/IV-17， 17-26.

第２章 既存研究の整理と本研究の位置付け

２－１ 概説

第２章では，料金水準設定に関する既存研究の整理を行い，本研究の位置付けを行う．

本研究は，道路料金と財源調達について着目する．すなわち道路に関して，その利用に関する料金水準設定と建設や維持管理のための資金調達の２つの観点について取り組む．これまでの最適料金水準の導出に関する研究は，道路混雑の解消のための料金に関して理論と実務の視点から行われてきた．Small and Verhoef (2007) [1)] が示しているように，数多くの研究者によって，道路料金の理論から実務の視点にかけて研究されてきた．例えば，混雑している道路に直接料金を課すことで，その利用を最適化するロードプライシングという考え方がある．それは，混雑の発生による追加的な費用負担分について，料金として道路利用者に課すことで，発生する混雑を解消するひとつの手法である．これまでロードプライシングに関して，交通経済学を中心に混雑料金としての理論的な研究が多数行われてきた．また，土木計画学の分野でも実務的な視点から混雑料金に関して理論を整理し，実際にその混雑料金が及ぼす様々な影響を推計するための手法が開発されてきた．

そこでこれまでの道路料金の設定に関する議論について整理すると，主に５つの視点で分類することができる．具体的には，道路ネットワークの設定，経路選択行動の設定，交通ネットワーク均衡の手法，通行料金設定の対象，財源調達に伴う厚生損失の有無である．まず，道路ネットワークの設定は，多くの理論的研究では単一 OD の並行道路，工学的研究では一般的な道路ネットワークを対象としている．経路選択行動の設定については，ルート間の選択が，完全代替，ロジット型代替，そして不完全代替，となるような３種類が想定されている．交通ネットワーク均衡の手法は，便益関数と効用関数による方法が存在している．通行料金設定の対象は，全ての道路もしくは，特定の道路に分けて考えられる．前者の全ての道路とは，我々が普段利用する道路全てに料金が課されている場合を想定している．一方後者の特定の道路とは，一般道路と有料道路が混在している中の有料道路についてのみ料金が課されている場合が想定している．そして，財源調達に伴う厚生損失の有無である．

以上を踏まえ，本研究は，次に述べる手順と条件に従って最適道路料金水準を定式化する．このとき，複数の結節点と複数の道路区間からなる交通ネットワークにおいて社会的厚生を最大化するように考える．

(1)　利用者均衡状態は，予算制約と時間制約のもとで利用者の効用を最大化するように定式化する．利用者の効用は，間接効用関数によって計測される．

(2)　社会的厚生関数は，間接効用関数から不足する建設費用を調達するのに必要な補助に財源調達に伴う厚生損失を掛け合わせてものを差し引いた合計からなる．

(3)　最適道路料金水準は，社会的厚生関数を交通量ではなくて価格に関して最大化するように求める．

(4)　財源調達に伴う厚生損失（MCF）について，２つに分類した場合；まず，財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合（MCF＝-1），次に，財源調達に伴う厚生損失を考慮した場合（MCF≠-1）．

(5)　料金を２つに分類した場合;まず，全ての道路に料金を課す場合，次に，特定の道路に料金を課す場合．

既存研究について，上述の(4)と(5)の内容に従って整理を行う．まず，財源調達に伴う厚生損失が－１の財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合について，既存研究を整理する．次に，財源調達に伴う厚生損失が－１でない場合の道路建設費用の財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合について，既存研究を整理する．いずれの場合でも，全ての道路の最適料金水準と特定の道路の最適料金水準とを分けて整理する．最後に，これら既存研究の整理に基づき，本研究の位置づけについて述べる．

２－２ 料金制度に関する整理

これまでの道路料金に関する研究では，料金水準の設定に関して様々な検討が行われている．そこで，ロードプライシングを含む料金制度に関して整理を行う．

これまでのわが国における高速道路などの有料道路の料金水準は，料金収入によって道路整備の借入金を返済するように設定されている．この考え方は「償還主義」と呼ばれ，総費用を料金徴収期間内に償うことである．道路法の無料公開原則の例外措置として，一定の料金徴収期間は道路利用者が料金を支払う有料道路が存在している．したがって，償還を終えた有料道路は，無料開放することが原則となっている．実際，償還を終えた複数の有料道路は，無料開放または維持管理分の料金を徴収している．ここでの料金水準は，前述の「償還主義」に加え，「公正妥当主義」及び「便益主義」と呼ばれる料金の決定原則に基づいて定められている．これらの原則は，高速道路の料金制度に関する研究委員会（2011）[2)] によると，道路関係四公団の民営化の前後で表２－１に示すように適用されている．

表２－１　有料道路の原則

<table>
<tr><td rowspan="2">道路種別
時点</td><td rowspan="2">高速自動車
国道</td><td rowspan="2">首都高速道路
阪神高速道路
指定都市高速道路</td><td rowspan="2">本州四国連絡
高速道路</td><td colspan="2">一般有料道路</td></tr>
<tr><td>ネットワーク
型</td><td>バイパス型</td></tr>
<tr><td>民営化以前</td><td colspan="2">償還主義
＋
公正妥当主義</td><td colspan="3">償還主義
＋
便益主義</td></tr>
<tr><td>民営化以後</td><td colspan="4">償還主義
＋
公正妥当主義</td><td>償還主義
＋
便益主義</td></tr>
</table>

（高速道路の料金制度に関する研究委員会（2011）[2)] より引用）

この料金の決定に関して，これらの基準が道路特別措置法の第２３条に料金の額等の基準として定められている．ここでの原則はそれぞれの主義について説明すると次の通りである．まず「償還主義」は，料金の額は，当該有料道路の新設，改築，維持，修繕等に要する費用を，料金の徴収期間内に償うものであること，とされている．次に「公正妥当主義」は，他の公共料金，他の交通機関の料金（運賃），他の近隣の有料道路料金，物価水準等と比較して

も社会的，経済的に認められるもの，つまり公正妥当なものであること，とされる．そして，「便益主義」は，料金の額は，当該有料道路の通行又は利用により通常受ける利益の限度を超えないものでなければならないこと，とされている．実際には，迂回道路を通過する場合に比べた時間短縮に伴う便益としての「時間便益」とそれ以外の便益としての「走行便益」を合計して算定されるものを指す．現在も以上の料金決定原則に基づき料金水準が定められているが，高速道路の料金制度に関する研究委員会（2011）[2]で議論されているように，高速道路整備がある程度進み，休日 1,000 円高速などの料金割引や無料化社会実験が政策として打ち出されている現状には，償還主義に基づく料金が，道路の適正な利用を妨げているという考えを暗示している．したがって，誰がどのように費用を負担するべきか議論する必要があると考えられる．

そこで，庭田，坪井（2007）[3]に基づき，収入と支出そして期待される効果について，その関係を道路利用者課金と道路整備財源という視点から図２－１に示すように整理する．

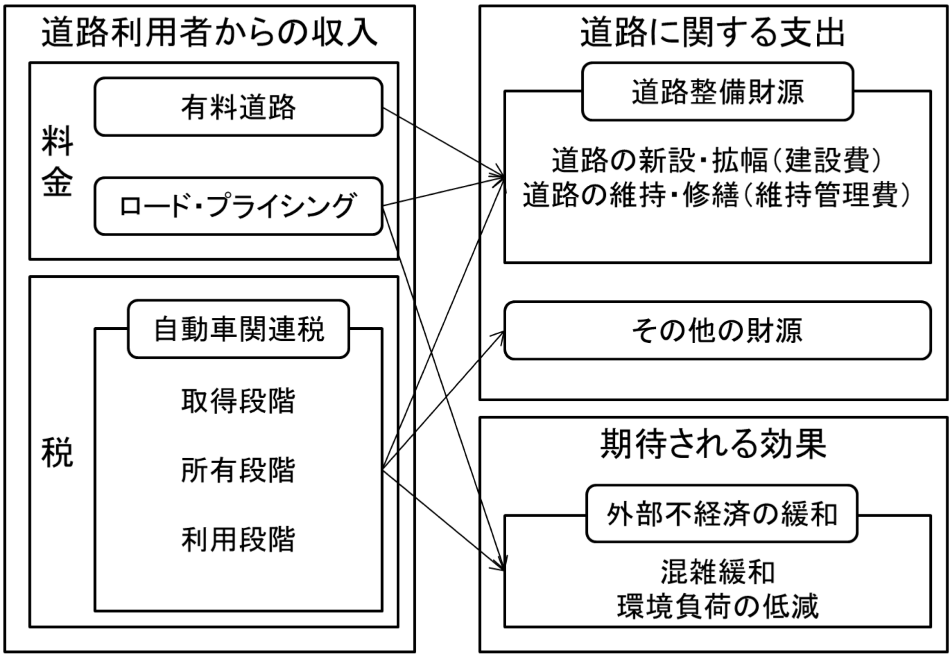

図２－１　道路利用者課金と道路整備財源との関係

（庭田，坪井（2007）[3]の表８．２を基に作成）

まず道路整備財源の確保に資するための収入は，直接課金（料金）と間接課金（税）にわけて整理できる．道路の自動車利用による道路混雑や環境負荷の増大などの外部不経済が顕

在化する昨今では，料金や税の設定がこれらの問題を内部化する１つの手段として有効であることが認識されている．特に，ロードプライシングと呼ばれる道路混雑の緩和を目的とした料金として，アメリカ，シンガポール，韓国で導入されている．そしてわが国でも，首都高速道路や阪神高速道路で大型車を対象として，環境負荷の低減を目的とした料金を設定している．支出の面では，主として道路整備財源の確保を目的として料金や税の設定が行われてきた．しかし，適正な道路利用を考えると，道路整備財源の確保のためだけではなく，混雑緩和に代表される外部不経済の緩和のために，料金や税は徴収されるべきである．つまり，財源調達と混雑緩和の２つの目的を達成できるような料金や税の水準を設定するべきである．

そこで，宮川（2011）[4)] の料金制度に関する以下のような議論を参照する．

> *民営道路会社として公共インフラを維持管理する立場から，経営採算性と公平性のような公共的視点とをどう両立させるかは大きな問題であり，合併施行のようなかたちでの公的補助の必要性が認められる場合もあるであろう．ただしその場合の料金負担分の割合（有料比率）の決定は透明で合理的なルールに基づくべきである．しかし，その具体的なあり方は今後十分検討されるべき課題である．*（宮川（2011）[4)]，p.103）

これは，道路ネットワーク全体で道路事業を考え，それを維持するものとして，公的補助と料金負担分の割合について言及しているものだが，その具体的なあり方については今後の課題とされている．

このように，料金水準設定に関連して，現実の道路ネットワークを対象に効率的に財源を調達する方策について研究はほとんどない．ましてや，料金水準について財源調達に伴う厚生損失を考慮した研究はほとんどない．そこで本研究では，混雑料金に関する研究について，財源調達に伴う厚生損失の有無の比較を行うこととする．しかし，ここでは料金の最適な水準のみを対象としているため，道路投資水準の最適性（例えば，Toll-capital 理論（Mohring and Harwitz(1962)[5)][1]））については検討の対象外とする．

２－３ 財源調達に伴う厚生損失

財源調達に伴う厚生損失は，公的資金の限界費用(the marginal cost of public funds，以下 MCF)として計測される．Browning (1976) [6] によると，MCF は「税収を得る際に発生する限界的な厚生費用に直接的な税負担を加えたもの」(“the direct tax burden plus the marginal welfare cost produced in acquiring the tax revenue”)(p. 283) とされている．もともと，公的なプロジェクトは，費用は税か借入（将来の税）によって調達される．つまり,増税によって資金調達を行う場合は,その税収入によってその費用を確保している．このとき，納税額が１単位増加することよって，納税者の福利である厚生の減少が引き起こされることが分かっている．具体的には，労働所得や消費財に課税すると，課税がないときよりも労働供給や需要が落ち込むという損失が発生する．この損失は，徴税額を全て適切に分配したとしても,全体としての厚生水準は上がらない.この損失こそが,厚生損失である．つまり,課税によって資金が調達される場合は,本来の費用となる納税者の実質的な負担は,実際の納税額以上となるため，追加的税収１円あたりの社会的費用が発生するのである．これを考慮したものが，MCF となる．例として，MCF が 1.5 であれば，新規プロジェクトの便益はその費用よりも５割以上大きくなければならないことを意味している．したがって，道路整備財源をそのような課税や料金賦課によって調達する限り，名目的な調達額に加えて厚生損失に相当する国民負担が発生する．そこで社会全体の余剰を最大化するためには，課税などによる財源調達に伴う１円あたりの税金投入のコストと料金賦課による追加の料金収入１単位を得るのに必要な厚生損失が等しくなるような料金水準や税率を設定することが必要であるとされる．これは，最適課税論の考え方で，複数の課税標準に対する限界費用をすべて等しくするべきということである (Auerbach and Hines Jr. (2002) [7])．

通常,特定のプロジェクトに必要とされる資金は税収総額と比べ微小である.したがって,資金調達は税収総額の微小な増加とみなされるため，実質的な納税者の費用負担は財源とする税額に MCF を乗じることによって近似できることが示されている(例えば,林,別所(2004) [8])．そのため，公的資金による財源調達額に MCF を単純に乗じてもなんら問題はない．

これまでの公的資金の厚生損失を考慮した研究を整理する．Parry and Small (2005) [9] が，効率的燃料税を，公害，混雑，事故を考慮した場合について試算している．その後，川瀬 (2010) [10] は，この Parry and Small (2005) [9] の方法を適用することで，日本における

効率的な燃料税水準を求めている．このように MCF を考慮した税率の水準を求めているものの，最適な道路料金水準の分析は行っていない．

この MCF という考え方は，費用便益分析において重要視されている．

最近の費用便益分析の教科書である「費用便益分析」（ボードマン・グリーバーグ・ヴァイニング・ワイマー (2004) [11]) や “The welfare economics of public policy” (Just, Hueth, Schmitz (2004)[12]) において，MCF の絶対値としてそれぞれ 1.4 および 1.15～1.3 が提唱されている．

まず林 (2005) [13] が，一般的な費用便益分析の「費用」を推計する必要性を，MCF に関連する次に述べる考えに基づき，議論している．

費用便益分析の実際では（粗）便益の推定方法にのみ関心が集中し，費用に関しては単にプロジェクトや政策にかかる支出額が「費用」として何の疑問もなく用いられているようである．しかし，そのような「支出額」は必ずしも費用便益分析における「費用」と一致しない．さらに，費用便益分析における費用の算定は，政策を実行するための資金調達の方法に依存する．（林 (2005) [13]，p.58）

つまり，調達する財源についての実質的な費用負担は，MCF の値を通じて十分に検討する必要がある．この流れの中で，Proost, De Borger, and Koskenoja (2007) [14] が混雑と MCF を含む道路の費用便益分析公式の提示を行い，de Palma, Lindsey, Proost, and Var der Loo (2007) [15] が，そのシミュレーションの開発を行っている．しかし，道路投資プロジェクトの評価においてのみ MCF の取り扱いを議論しており，道路料金の設定については行っていない．

また，桐越，青木，森杉(2009a,b)[16) 17)] でも道路投資の費用便益分析における費用に関して議論している．その中では，費用便益分析で用いるべき経済理論と整合的な費用は，単なる名目的では費用ではなく，その名目的な費用に，資金の調達方法に起因して発生する厚生損失を考慮した MCF を乗じて求める値を計上するべきであるとしている．MCF を考慮した料金水準を求めることは，社会全体の余剰を最大化するように料金水準を求めることであると考えられる．

MCF の考え方について，森杉 (2007) [18]，森杉 (2008) [19] による海外の事例について参照する．ここでは，公的資金を道路建設に投入する際に，既存の財源からは使うことができないという想定のもとで，新たに投入額に等しい税収を確保するための増税が必要と仮定す

る．その上で，その１円の税収当たりの消費者余剰の減少分を MCF としている．これは，これまでの MCF の考え方と同様であり，１円あたりの税金投入のコストを表す数値である．この MCF の値について，実際の海外の道路事業評価においては，スウェーデン，フランスでは 1.3，ノルウェーでは 1.2 の値を採用しており，これらの意味するところは，１円の税収増加の便益は 1.2 または 1.3 とし，１円の税金投入のコストは 1.2 または 1.3 円ということである．

これらの定義から分かるように，公的資金の限界費用は所得税，消費税，固定資産税，燃料税などの税の種類によって異なる．わが国の所得税の MCF の値は,-1.0 から-1.2 の範囲(別所，赤井，林（2003）[20]）と推計され，現行の燃料税の MCF の値は，-1.2 から-1.5 程度（森杉，河野（2013）[21]）と推計されている．このような現状の税を公的な資金として財源を調達する場合の最適な税率は，全ての税項目において MCF の値が等しくなることが古典的経済学において示されている（例えば，Auerbach and Hines Jr.（2002）[7]）．道路料金も一種の税として考えると，この最適な税率の考え方に基づいて財源調達に伴う厚生損失，すなわち公的資金の限界費用を考慮した料金水準を求めることは，社会全体の余剰を最大化し，国民負担を最小にする最適な料金水準となることを示している．

これまでの伝統的な限界費用価格形成理論は，明示的もしくは暗示的に MCF は-1 であると仮定している．なぜならば，一括固定税と同様に，料金収入を一括して分配することを仮定しているからである．

しかし，先に示した MCF の値の通り，一括固定税の MCF は現実には存在せず，厚生損失が発生するため，実際は社会的余剰を最大化することはできないのである．そのため，社会全体の余剰を最大化するように料金水準を求めるためには，財源調達に伴う厚生損失を考慮することに意義があることを示している．

２－４ 財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合の料金水準

財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合の料金水準は，道路料金水準の導出を財源の調達について考慮しない場合について求めたものである．ロードプライシングなどの交通混雑の解消等を目的として，最適な道路料金水準を求める研究が，これに該当すると考えられる．実際，ロードプライシングに関する研究は，理論と実務の視点から様々な研究者によって数多く行われてきた（例えば，Button (1986)[22)]，Small (1992)[23)]，Johansson and Mattsson (1994)[24)]，Button and Verhoef (1999)[25)]，Lindsey and Verhoef (2001)[26)]，山田 (2001)[27)]，Paulley (2002)[28)]，山田 (2004)[29)]，Small and Verhoef (2007)[1)]）．特に近年のロードプライシングは，交通混雑の解消等を目的とした需要の管理という視点が強いが，収入の創出という視点からの歴史は長く，活用されてきた方策である．

円山 (2004)[30)] は以下のようにレビューしている．

> *ロードプライシングは，近年都市交通政策の現実的な代替案となりつつある．ノルウェーのトールリング，ロンドン中心部でのエリアプライシング，フランスの一部の高速道路でのピーク時課金，カリフォルニア SR-91 での Value Pricing，トロント近郊高速道路での適用，シンガポール中心部での実施，日本での環境ロードプライシング，首都高の夜間割引実験など，定義によっては，すべてロードプライシングに含まれるものである．太田(2003)[31)] などを参考にされたい．ロードプライシングに関する研究は，経済学，交通計画，交通工学，地域科学，OR，土木計画学など多分野にわたる．*（円山 (2004)[30)]，p.49）

円山 (2004)[30)] が示すように，ロードプライシングは多くの分野で注目され，政策として実施されたり，研究されたりしている．これまでの一般的な最適な道路料金水準は，Pigou(1920)[32)]，Walter(1961)[33)] 以来の限界費用価格形成原理に基づいており，社会的限界費用に応じて設定するべきとされている．この社会的限界費用について上田(2009)[34)]は，既に他の利用者が道路を走行している状況において，道路利用者が１単位だけ追加的に増したことによって社会的費用がどれだけ増加するかというその増分であるとしている．つまり，需要の管理という混雑を考慮した視点で料金水準が求められている．実際，混雑現象を経済理論の立場から解釈すると，私的限界費用と社会的限界費用が乖離した状態を指し，その差に等しい額を混雑している道路の利用者に課すことで，社会的に最適な交通フローが実現さ

れることは知られている（山内，竹内（1992）[35]）．既存の交通ネットワーク均衡分析モデルの均衡問題の目的関数に経済学的意味を与えるのは難しいとされているが，対象とする道路区間に限界費用価格形成原理に従う料金が課せられている場合，経済学的意味を持つということが明らかになっている．すなわち限界費用価格形成原理に従う料金こそが，最適な道路料金水準であることを意味している．そこで限界費用価格形成原理に基づき，混雑料金や最適な道路料金水準についての研究が行われているが，未だその設定方法に関して多くの問題が残されているとされ，さまざまな研究が行われている(例えば，円山，原田，太田（2003）[36]，文，秋山，奥嶋（2007）[37]）．

以下に，全ての道路を課金の対象とした，いわゆるファースト・ベストの料金水準と，特定の道路を課金の対象とした，いわゆるセカンド・ベストの料金水準について，それぞれ既存研究を整理する．

２－４－１　全ての道路の料金水準

まず，財源調達に伴う厚生損失を考慮しない，すなわち MCF が－１であるときの研究を示す．ここでは，全ての道路に料金を課す場合，便益関数アプローチが用いられている．便益関数は，消費者余剰として定義される．道路ネットワーク均衡は，料金を考慮した経路交通量に関して便益関数を最大化することで得られる．

これまで，便益関数アプローチによる全ての道路への最適料金の定式化は，既に成し遂げられている．Sheffi（1985）[38]，Akamatsu and Kuwahara（1989）[39]， Yang and Huang（1998）[40]， Dial（1999a，1999b）[41] [42]，Yang，Meng and Hau（2004）[43]，Yang and Huang（2005）[44]，Ying and Yang（2005）[45]，円山，原田，太田（2003）[36]は，ルート間の選択が完全代替（ワードロープ均衡）とロジット型代替（確率均衡）の条件下で，便益関数アプローチによる最適料金水準の式の導出に成功している．このアプローチは，もともと Beckmann，McGuire and Winston（1956）[46]によって考案されたことでよく知られている．Yang and Huang（1998）[40]は，古典的な限界費用価格形成原理が，一般的な混雑ネットワークにおいてどのように作用するか，理論的研究を行った．彼らは，料金はその道路利用者がもたらす外部性を示しているとして，システム最適下の最適道路区間料金水準が限界混雑外部性と等しくなることを導出した．また Ying and Yang（2005）[45]は，利用者が１単位増えることによる費用の増分を考慮できるように限界費用を料金水準として設定している．そのため料金は，

限界的な時間の増分に交通量を掛け合わせたものを用いている．また料金水準の導出については，Yang（1999）[47] が，消費者行動理論に基づく経済的便益を最大化する目的関数を示した上で，ロジット型確率的均衡配分下での限界費用価格形成原理が，最適混雑料金となることを示している．また Yang，Meng，and Lee（2004）[48] は，需要関数が未知のときの交通ネットワークにおける限界費用料金について，試行錯誤する手法により求めている．

八田（2009）[49] によると，この料金水準は図２－２に示す水準であり，この混雑料金は社会的な余剰を最大にすることが分かっている．そこで，０料金下での均衡交通量における総余剰と，最大化された総余剰とを図２－２を用いて比較する．まず０料金下での均衡交通量 x_Fにおける総余剰は，赤の右斜線の面積から青の左斜線の面積を差し引いたものとなる．一方で，図２－２の E 点（交通量 x_E）は，限界便益曲線と社会的限界費用曲線の交点である．このときの総余剰は，赤の右斜線の面積である．したがって，交通量が x_Eより大きくなると社会的限界費用のほうが高くなり，０料金下での均衡交通量 x_Fにおける総余剰は，最大化された総余剰と比べて青の左斜線の面積分だけ小さくなることが分かる．したがって，社会的な余剰を最大にするためには，社会的限界費用曲線が限界便益曲線と等しくなるときの，社会的限界費用曲線と平均可変費用曲線とのかい離分を混雑料金として課すことが最適であることを述べている．

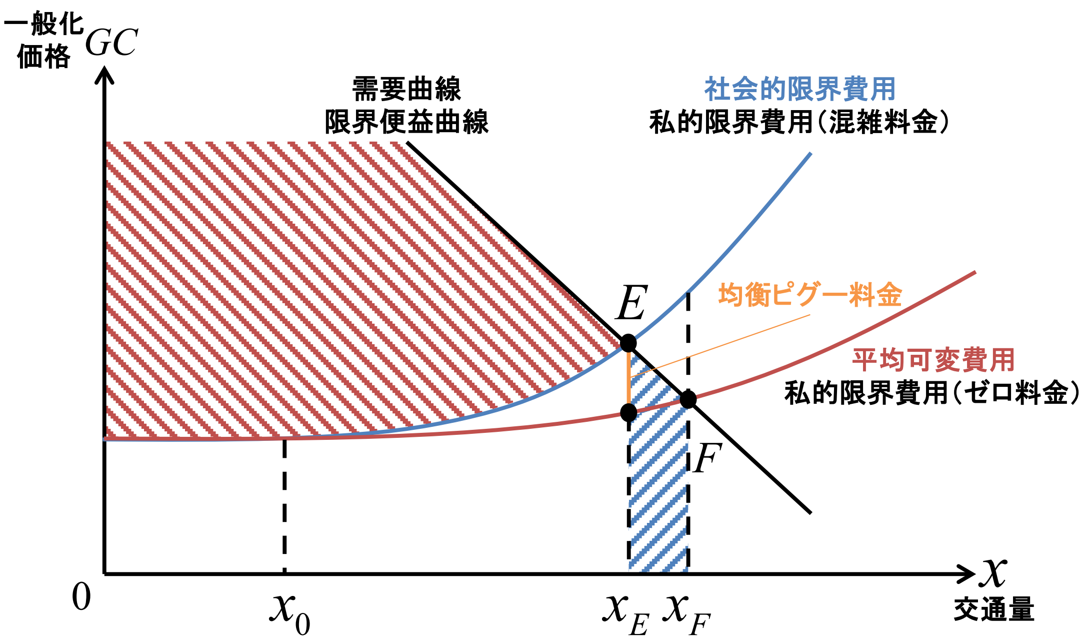

図２－２　限界費用価格形成原理に基づく混雑料金

（八田（2009）[49] の図 16-9 を基に作成）

そこで，Yang and Huang (2005) [44]に基づき，基本的な全ての道路の料金水準の導出に関して整理を行う．ここでは，図２－２に基づいて整理する．

まず走行時間 $t(v)$のときの平均可変費用曲線 ACである総費用 TCは,

$$TC\left(v\right)=vt(v) \tag{2.1}$$

と表現できる．次に社会的限界費用曲線 MCは,

$$MC(v)=\frac{dTC(v)}{dv}=t\left(v\right)+v\frac{dt\left(v\right)}{dv} \tag{2.2}$$

と表現される．このとき最適な料金水準 uは，式(2.2)の社会的限界費用曲線 MCの右辺第２項より，

$$u\left(v\right)=v\frac{dt\left(v\right)}{dv} \tag{2.3}$$

の通り課すべきである．つまり最適な料金水準 uは，社会的限界費用曲線 MCと平均可変費用曲線 ACの差分と等しいことを意味している．これは，混雑外部性とも呼ばれている．

以上の条件のもとで, Yang and Huang (2005) [44]は, 逆需要関数である Bに関して, 式(2.4)の便益関数 EBを最大化するような最適な料金水準を求めている．

$$EB\left(v\right)=\int_{0}^{v}B\left(w\right)dw-vt\left(v\right) \tag{2.4}$$

したがって，便益関数 EBを最大化するのは,

$$B\left(v\right)=MC(v)=t\left(v\right)+v\frac{dt\left(v\right)}{dv} \tag{2.5}$$

のときであることが明白となる．これこそが，便益関数アプローチによる全ての道路の料金水準の導出である．これは，一般的な交通ネットワークにおける混雑料金理論として実証されたものである．

一方, 効用関数アプローチは, 間接効用関数を最大化する考え方をとっているが, Oppenheim (1995) [50]を除いてほとんどない．これまで示してきた便益関数とこの効用関数の両者の違いは，最適料金水準の導出にある．Oppenheim (1995) [50]によると，システム最適における目的関数の定式化が，効用関数に基づくものと等しいとすると,

$$\sum_{a}v_a t_a\left(v_a\right)=\sum_{a}\int_{0}^{v_a}B_a\left(v_a\right)dv_a \tag{2.6}$$

と表現でき，最終的に式(2.5)と同様に定義できる．しかし，効用関数アプローチによる間接効用関数を最大化するような料金水準に関する研究は，これ以外ほとんど見当たらない．

２－４－２　特定の道路の料金水準

次に，一般的な道路ネットワークにおける特定の道路に対する最適料金水準の定式は，単純な単一ＯＤの並行道路における例を除いて，未だ明確に導出されていない．便益関数アプローチは Yang and Zhang (2003) [51] と Yang and Huang (2005) [44] によって研究されている．一方，効用関数アプローチは，Lévy-Lambert (1968) [52], Marchand (1968) [53], McDonald (1995) [54], Verhoef, Nijkamp and Rietveld (1996) [55], Liu and McDonald (1999) [56], Arnott and Yan (2000) [57], Verhoef (2002a, 2002b) [58] [59], Rouwendal and Verhoef (2004) [60], 文 (2005) [61], そして，竹内 (2006) [62] によって行われている．古くは Lévy-Lambert (1968) [52] や Marchand (1968) [53] によって，有料道路と無料道路が存在するネットワークの場合に，有料道路の最適な料金水準を求める研究が行われてきた．以上の様々な研究の中でも，竹内 (2006) [62] は特にフェルフーフ (E.T.Verhoef) のアプローチに着目しており，その理由を以下のように述べている．

> *1990 年代後半より，フェルフーフ(E.T. Verhoef)を中心として，新たに経済学の分野において，ネットワーク内における混雑についての研究が急速に進展した．前に述べたように，1950 年代以降，ネットワークに関する問題の多くは，土木工学関係の研究者，あるいは OR の研究者達の独壇場であったが，フェルフーフによる一連の研究により，新たに経済学の分野において，ネットワーク内での混雑の問題を分析する機運が高まりつつある．もちろん，経済学の分野において独自にネットワークに関するモデル構築がなされたのではなく，そこには 1950 年代以来のさまざまな分野での研究成果が生かされている．* (竹内 (2006) [62], p.25)

そこで竹内 (2006) [62] と同様に，Verhoef, Nijkamp and Rietveld (1996) [55] について，料金水準導出に関する基本的なモデルの展開を整理する．

彼らは，単一 OD 間において，完全に代替的な有料道路（添え字 T）と無料道路（添え字 U）の２つのルートが存在するものとして，有料道路の混雑料金水準を求めている．両方のルートに対して，両方のルートに対して完全に代替的かつ完全に価格弾力的であるとしており，そこから需要関数 $D(N)$を考えている．このとき，需要関数の Nは，道路利用者の総数で，有

料道路利用者数 N_T と無料道路利用者 N_U との総和，すなわち $N=N_T+N_U$ となる．この関係は，ルート間の選択が完全代替を示している．道路利用者は，自己の限界便益 $D(N)$ と自己のトリップ費用が等しくなるように行動する．ここでトリップ費用は，有料道路は $c_T(N_T)+f$ であり，無料道路は $c_U(N_U)$ である．

この状況において道路料金を決定する政策担当者は，総便益が最大になるように，式(2.7)に示すとおり，需要関数から総費用を引くことで，料金 f を決定するように解く．

$$\begin{aligned} &\max \int_0^N D(n)\,dn - N_T \cdot c_T(N_T) - N_U \cdot c_U(N_U) \\ &s.t.\quad D(N) = c_T(N_T) + f \\ &\qquad\quad D(N) = c_U(N_U) \end{aligned} \tag{2.7}$$

その結果，最適な有料道路の料金水準

$$f = N_T \cdot c_T'(N_T) - N_U \cdot c_U'(N_U) \cdot \left(\frac{-D'(N)}{c_U'(N_U) - D'(N)} \right) \tag{2.8}$$

が課される．この料金水準は，式(2.8)の右辺第１項は，混雑の限界外部費用である．第１項の水準から，式(2.8)の右辺第２項で示されている非負である無料道路の混雑の限界外部費用の一部を差し引くことによって，無料道路の混雑の影響を考えなくてはならないと論じている．この料金水準の式は，並行２道路区間の状況におけるルート間の選択が完全代替を示している．竹内（2006）[62] が述べているとおり，式(2.7)の制約条件が重要となる．この２つの制約条件において $D(N)$ を消去すると，両ルートにおいて道路利用者のトリップ費用は等しいということが分かる．これは，“利用される経路の旅行時間は皆等しく，利用されない経路の旅行時間よりも小さいか，せいぜい等しい”（土木学会（1998）[63]，p.2）というワードロープの第１原則である．この状況こそが，本研究で述べるルート間の完全代替である．

また，矢澤（2007）[64] も，次善の混雑価格形成，つまり本研究で特定の道路へ料金を課す場合の料金水準を Verhoef，Nijkamp and Rietveld（1996）[55] に基づき整理し，その後，一般的な道路ネットワークにおける料金水準の解について，Verhoef(2000)[65] に基づいた分析を行っている一般的な道路ネットワークの場合にまで拡張した Verhoef(2000)[65]の示した次善の混雑料金の式は，式(2.9)のとおりである．

$$f_j = \frac{\displaystyle\sum_{p=1}^{P}\delta_{mp}\cdot\frac{\displaystyle\sum_{m=1}^{J}\delta_{mp}\left(\sum_{q=1}^{P}\delta_{mp}\cdot N_q\cdot c'_m\right)-\sum_{q=1,q\neq p}^{P}\lambda_q\cdot\left(\sum_{m=1}^{J}\delta_{mp}\cdot\delta_{mp}\cdot c'_m\right)-\sum_{m=1,m\neq j}^{J}\delta_{mp}\cdot\delta_m\cdot f_m}{\displaystyle\sum_{m=1}^{J}\delta_{mp}\cdot c'_m-\sum_{i=1}^{I}\delta_{ip}\cdot D'_i}}{\displaystyle\sum_{p=1}^{P}\frac{\delta_{jp}}{\displaystyle\sum_{m=1}^{J}\delta_{mp}\cdot c'_m-\sum_{i=1}^{I}\delta_{ip}\cdot D'_i}} \quad (2.9)$$

ここで，

N　：ネットワーク中の全結節点の集合

I　：始発点－終着点のペア（OD ペア）の集合（i=1, …, I ；k=I, …, I）

N_i　：OD ペア i で連続的に利用する道路利用者の数

$D_i(N_i)$：OD ペア i のトリップの逆需要関数（$D'_i \leqq 0$）

$c_j(N_j)$：道路区間 j における平均費用関数（$c'_j \geqq 0$）

ρ　：ネットワーク中の非循環的ルートの集合（p=1, …, P ；q=1, …, P）

ρ_i　：OD ペア i における非循環的ルートの集合（p_i=1, …, P_i）

δ_{jp}：ダミー変数，道路区間 j がルート p に属している場合：１，他の場合：０

δ_j　：ダミー変数，道路区間 j において課金がなされる場合：１，他の場合：０

f_j　：δ_j=1 の場合の課金の額

δ_{ip}：ダミー変数，$p \in \rho_i$ かつ $\sum\delta_{jp}\cdot(c_j(N_j)+\delta_j\cdot f_j)-D_i(N_i)\leq 0$ の場合：１，他の場合：０

である．

この式は，P 個の多数道路区間で，OD 間は不完全代替，ルート間では完全代替を仮定している定式である．この式を拡張することで，Verhoef(2002a)[58)]，および Verhoef(2002b)[59)] において，一般的なネットワークへの適用を行っている．しかし，本研究ではこのルート間での完全代替を，不完全代替として定式化することでより一般化する．

また矢澤（2007）[64)] は，次善の混雑料金，すなわち特定の道路へ料金を課す場合の料金水準の決定は，需要関数の弾力性が大きな影響を持つことを明らかにした．その上で，以下のように述べている．

さらなる研究課題としては，例えば公共政策の視点からながめれば，課金によって収集された資金をどのように利用することによりフィードバックさせることが社会シス

テム全体の最適化をもたらすのか，または社会全体の厚生を最大化させるのかに関して考察を深めることが重要であろう．（矢澤（2007）[64]，p.110）

本研究では，矢澤（2007）[64]の示したこれらの研究と同様に，静学的均衡のアプローチに基づき，社会全体の厚生を最大化させるような最適料金水準の導出を行う．その際，ここで示されている次善の混雑料金，すなわち特定の道路へ料金を課す場合だけではなく，最善の混雑料金，すなわち全ての道路へ料金を課す場合についても導出することで，一般的なネットワークにおける，全ての道路および特定の道路に対する，一貫した効率的な料金水準を明示する．

これらの研究ののち，Ubbels and Verhoef（2008）[66]は，単純な２道路区間の連続するネットワークモデルを展開した．彼らは，道路料金とネットワーク相互作用に関する経済文献をレビューした．その中で，Verhoef（2002a）[58]を除いて，ほとんどの研究が並行もしくは連続する単純なネットワークを対象としていたと述べている．そこで，本研究で対象としている単純なネットワークではない場合に関して，Verhoef（2002a）[58]は，特定の道路に対する最適料金水準を，決まった大きさと形状の一般的なネットワークにおいて，弾力的なＯＤ需要を伴う場合について，一般解析解として導出していた．さらに Verhoef（2002a）[58]が提案した解析方法に基づき，Verhoef（2002b）[59]が，この一般解析解を大規模な道路ネットワークに適用する実用面に着目して研究を行い，Verhoef（2002a）[58]の提案した解析方法が妥当であることを確認した．しかし，さきに述べたように，彼は一般的なネットワークへの適用を行っているが，ルート間の選択は完全代替を仮定している．また，文（2005）[61]は，等時間（費用）原則による利用者均衡を達成するような次善の混雑料金を，２地点を結ぶ道路が複数存在する状況で，一部の道路でのみ徴収するときのモデルを構築している．その一方で，Verhoef，Koh and Shepherd（2010）[67]は，一般的なネットワークにおいて，完全代替下での特定の道路の料金水準の探索法の導出に成功しているが，直接的な料金水準の導出は行っていない．そこで本研究では，ルート間の選択を不完全代替として定式化することでより一般化する．

表２－２の奇数列は，便益関数アプローチの代わりに効用関数アプローチを用いた研究を示している．Kidokoro（2005，2006，2010）[68][69][70]と Parry and Bento（1999）[71]は，単純なネットワークにおいて効用関数アプローチによる料金水準の導出に成功している．特筆すべきは，完全代替およびロジット型代替は，効用関数の特殊型である点である．具体的

には，Kidokoro (2006) [69] が，準線形の効用関数で説明される均質な消費者のモデルを取り扱っている．しかしながら，Kidokoro (2005, 2006, 2010) [68) 69) 70)] は，一般的なネットワークを取り扱っていない．

本研究では，複数の結節点と道路区間から成る一般的な道路ネットワークを対象とした料金水準を設定する式を提案する．この式は，一般的な道路ネットワークにおける，不完全代替での特定の料金水準の導出にも成功している．特筆すべきは，全ての道路での料金水準の式は，便益関数，効用関数いずれのアプローチでのネットワーク均衡について導出できている点である．しかしながら，特定の道路での料金水準については，効用関数アプローチのみがその料金式を導出できる．

表２－２　課金モデル

		MCF ＝ -1						MCF ≠ -1					
		全道路課金		特定道路課金		投資		全道路課金		特定道路課金		投資	
		1. 便益関数 アプローチ	2. 効用関数 アプローチ	3. 便益関数 アプローチ	4. 効用関数 アプローチ	5. 便益関数 アプローチ	6. 効用関数 アプローチ	7. 便益関数 アプローチ	8. 効用関数 アプローチ	9. 便益関数 アプローチ	10. 効用関数 アプローチ	11. 便益関数 アプローチ	12. 効用関数 アプローチ
単純なネットワークにおけるルート間選択	完全代替	Sheffi(1985) Yang, and Huang (1998) Dial(1999a) Dial(1999b)		Yang, and Zhang (2003) Yang, and Huang (2005)	McDonald (1995) Verhoef, Nijkamp, and Rietveld (1996) Verhoef (2002a) Verhoef (2002b) 文 (2005) 竹内 (2006)		Kidokoro(2006)		Verhoef, and Rouwendal(2004)		Verhoef, and Rouwendal(2004)		Verhoef, and Rouwendal(2004)
	ロジット型確率代替	Sheffi(1985) Akamatsu, and Kuwahara (1989) Dial(1999a) Dial(1999b) Ying, and Yang (2000) Ying, and Miyagi (2000) Yang, Meng, and Hau (2004)		Yang, and Huang (2005)			Kidokoro(2006)						
	不完全代替				Levy-Lambert (1968) Marchand (1968) Arnott, and Yan (2000) Verhoef (2000) Rouwendal, and Verhoef (2004)		Parry, and Bento (1999) Kidokoro (2005) Kidokoro (2006) Kidokoro (2010)		De Borger, Mayeres, Proost, and Wouters (1996) Mayeres, and Proost (1997)		Mayeres, and Proost (1997) 森杉，河野 (2012)		Mayeres, and Proost (1997) Kidokoro (2005) Kidokoro (2010) Calthrop, Borger and Proost (2010)
フルネットワークにおけるルート間選択	完全代替	Yang, and Huang (2005)	Oppenheim (1995) Verhoef, Koh, and Shepherd (2010) 本研究		Verhoef, Koh, and Shepherd (2010) 本研究		Verhoef, Koh, and Shepherd (2010)		本研究		本研究		
	ロジット型確率代替	円山，原田，太田 (2003) Yang, and Huang (2005)	Oppenheim (1995) 本研究		本研究				本研究		Palma, and Lindsey(2006) Palma, Lindsey, Proost, and Loo (2007) 本研究		
	不完全代替		本研究		本研究				本研究		本研究		

２－５ 財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合の料金水準

これまでの公的資金の厚生損失を考慮した研究を整理すると，Parry and Small（2005）[9)]が，効率的燃料税を，公害，混雑，事故を考慮した場合について試算している．その後，川瀬（2010）[10)]は，この Parry and Small（2005）[9)]の方法を適用することで，日本における効率的な燃料税水準を求めている．このように MCF を考慮した税率の水準を求めているものの，これらの研究では道路料金の最適な水準の分析は行っていない．

以上の研究においては,MCF がー１でないときの効用関数に基づく研究が行われているが，工学的なモデルで用いられている便益関数に基づく研究は存在しない．そこで，これまでの最適な道路の料金水準を求める研究として，ルート間の選択が完全代替と不完全代替における並行道路のネットワークにおける次のような研究が存在している．Rouwendal and Verhoef（2004）[60)]は，完全代替を仮定しており，Mayeres and Proost（1997）[72)]と森杉，河野（2012）[73)]は，不完全代替を仮定している．しかし，最適な料金水準を求める際に，財源調達に伴う厚生損失について考慮した研究は，森杉，河野（2012）[73)]による一連の研究以外見当たらない．

そこで，財源調達に伴う厚生損失を考慮した上で，最適な道路の料金水準を求めたものを整理すると，Palma and Lindsey（2006）[74)]がある．彼らは，既存の静的な利用者均衡配分を発展させた METROPOLIS モデルという，交通機関，出発時間，経路選択を内生的に決定するモデルに基づき，パリ地域を対象に特定の道路へ料金を課した場合の影響について評価するモデルを作成し，効率的な料金水準を計算している．このモデルでは，消費者余剰の変化と公的資金の限界費用 MCF を考慮した道路の料金収入の変化に基づき，社会的余剰の変化を求めている．しかし，最適な料金水準の式は提示されていない．そのため，この考え方を適用することはできない．一方で，近年，森杉，河野（2012）[73)]が，並行する道路について，財源調達に伴う厚生損失を考慮して，最適な高速道路料金水準を導出している．しかし，彼らの研究では，多数の結節点と道路区間から成る一般的な道路ネットワークを対象に，効率的な料金水準を導出することが出来ていない．

また投資問題に関して，Calthrop，De Borger and Proost（2010）[75)]は，歪んだ経済下での，交通インフラストラクチャー投資の影響を把握するため，MCF を内生的に決定する一

般均衡モデルを開発した．しかし，料金水準の式は明示されていないため，この考え方を適用することはできない．

２－６ 本研究の位置付け

本章では，料金水準の導出と財源調達についてあわせて整理を行った．まず道路ネットワーク均衡は，料金を考慮した経路交通量に関して消費者余剰として定義される関数を最大化することで得られる．このとき消費者余剰として定義される関数には，便益関数と効用関数による２つのアプローチが存在することを示した．前者は，システム最適状態と呼ばれる状況が，消費者余剰を最大にする．一方後者は，料金に関して間接効用関数（財源調達に伴う厚生損失を考慮したもの）を最大化する．両者の違いは，最適料金水準の導出にあることを示した．その上で，便益関数と効用関数による料金水準の導出に関して，財源調達に伴う厚生損失の考慮の有無を踏まえて既存の研究を整理した．すると，財源調達に伴う厚生損失を踏まえ，一般的な道路ネットワークで最適な料金水準の導出を行ったものはほとんど存在しないことが分かった．これまで導出されていない一般的な道路ネットワークにおける財源調達に伴う厚生損失を考慮した場合の，特定の道路と全ての道路を対象とした最適な料金水準の定式を導出することは，有料道路における料金水準の決定方法を考える上で必要である．そこで本研究では，一般的な道路ネットワークにおいて，特定の道路と全ての道路における最適な料金水準を定式化する．

補注

[1] Toll-capital 理論（Mohring and Harwitz, 1962）により，道路所要時間関数が交通量と資本量に対してゼロ次同次であれば、混雑料金収入に等しい投資規模が最適となるといえる．さらに、道路管理者の収支（混雑料金収入ー資本投資額）が正（負）のときは道路投資水準が最適よりも低い（高い）．しかし，人口密度の低い都市では，混雑が存在せずゼロ次同次の所要時間関数を想定できないため，この理論は使えない．そのため，効率的料金を設定すると一般的には固定費用分を含めると赤字が発生して，固定費用の財源調達が問題になる．しかしながら，本論文で示すように，財源調達の限界費用を考慮した効率的料金を設定すると,その料金収入でインフラ整備費用の一部を賄える.(森杉,河野(2013)[76])

参考文献

１）Small, K.A. and Verhoef, E. T. (2007) The Economics of Urban Transportation, Routledge.

２）高速道路の料金制度に関する研究委員会（2011）高速道路の料金制度に関する研究委員会中間報告書，高速道路調査会　経済・経営研究部会　高速道路の料金制度に関する研究委員会，５-16.

３）庭田文近，坪井貴彦（2007）第８章　道路利用者課金の手段と効果：ロード・プライシング，有料道路，自動車関連税の整理（鬬哲雄，庭田文近（2007）ロード・プライシング―理論と政策），勁草書房，174-192.

４）宮川公男（2011）高速道路　なぜ料金を払うのか，東洋経済新報社.

５）Mohring, H. and M. Harwitz (1962) Highway Benefits: An Analytical Framework. Evanston, Illinois: Northwestern University Press.

６）Browning, E.K. (1976). The Marginal Cost of Public Funds, Journal of Political Economy, 84(2), 283-298.

７）Auerbach, A.J. and J.R. Hines Jr. (2002) Ch.21 "Taxation and Economic Efficiency," in A.J. Auerbach and M. Feldstein eds. Handbook of Public Economic, 3, 1347-1421, North-Holland.

８）林正義，別所俊一郎（2004）累進所得税と厚生変化―公的資金の社会的限界費用の試算―，経済分析，内閣府経済社会総合研究所，172，3-34.

９）Parry, Ian W. H. and Small, K. A. (2005). Does Britain or the United States Have the Right Gasoline Tax?, American Economic Review, American Economic Association, 95(4), 1276-1289.

１０）川瀬晃弘(2010)最適課税論からみたガソリン税率―日米英比較，日本経済研究，62, 85-104.

１１）アンソニー・E・ボードマン/デヴィッド・H・グリーンバーグ/アイダン・R・ヴァイニング/デヴィッド･L･ワイマー著､岸本光永監訳　出口亨/小滝日出彦/阿部俊彦　訳(2004)費用・便益分析―公共プロジェクトの評価手法の理論と実践―，125-126，524-525，ピアソンエデュケーション.

１２）Just, R.E., D.L. Hueth, and A. Schmitz (2004) The Welfare Economics of Public Policy -A Practical Approach to Project and Policy Evaluation-, Edward Elgar.

１３）林正義 (2005) 費用便益分析における再配分と課税，フィナンシャル・レビュー，77，42-65.

１４）Proost, S., B. De Borger, and P.Koskenoja (2007) "Chapter 3 Public Finance aspects of Transport charging and investments," in A.Palma, R.Lindsey S.Proost eds. Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport sector: Research in Transportation Economics, 19, pp.59-80, Elsevier.

１５）de Palma A., R. Lindsey, S. Proost, and S.Var der Loo (2007) "Chapter 5 Comparing alternative pricing and revenue use strategies with MOLINO model" in A.Palma, R.Lindsey S.Proost eds. Investment and the Use of Tax and Toll Revenues in the Transport sector: Research in Transportation Economics, pp.111-131, Elsevier.

１６）桐越信，青木優，森杉壽芳 (2009a) 道路投資の費用便益分析における公的資金の限界費用(1)，交通工学，44(2)，93-100.

１７）桐越信，青木優，森杉壽芳 (2009b) 道路投資の費用便益分析における公的資金の限界費用(2)，交通工学，44(3)，118-124.

１８）森杉壽芳 (2007) 諸外国における道路投資の事業評価の最新動向と国際比較，道路，796，35-38.

１９）森杉壽芳 (2008) 海外の道路事業評価と費用便益分析，交通工学，43(1)，26-32.

２０）別所俊一郎，赤井伸郎，林正義 (2003) 公的資金の限界費用，日本経済研究，47，1-19.

２１）森杉壽芳,河野達仁(2013)高速料金水準を設定する基準のあり方,運輸と経済,73(9),24-32.

２２）Button, K.J. (Ed.) (1986) Road Pricing, Transportation Research Part A, 20(2) (special issue).

２３）Small, K.A. (Ed.) (1992) Congestion Pricing, Transportation, 19(4) (special issue).

２４）Johansson, B. and Mattsson L.G. (eds.) (1994) Road Pricing: Theory, Empirical Assessment and Policy, Kluwer Academic Publishers.

２５）Button, K.J. and Verhoef, E. T.（eds.）（1999） Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment, Edward Elgar

２６）Lindsey, R. and Verhoef, E.（2001） Traffic congestion and congestion pricing, in Button, K.J. and Hensher, D.A.（eds.）Handbook of Transport Systems and Traffic Control, Chapter 7, 77-105, Elsevier Science.

２７）山田浩之(編)（2001） 交通混雑の経済分析，勁草書房.

２８）Paulley, N.（eds.）(2002) Recent studies on key issues in road pricing, Transport Policy, 9(3).

２９）山田浩之（2004）ロードプライシングの現実性，高速道路と自動車，47(2),7-10.

３０）円山琢也（2004）ネットワーク均衡モデルを応用した都市圏レベルの交通政策分析，東京大学博士論文，49-59.

３１）太田勝敏（2003）ロードプライシングの展開-ロンドンでの導入を中心として，運輸と経済，63(7)，14-20.

３２）Pigou, A. C.（1920）The Economics of Welfare, London, Macmillan.

３３）Walters, A. A.（1961）The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, Econometrica, 29, 676-699.

３４）上田孝行(2009)高速道路料金変更政策の費用便益分析，運輸政策研究 12(3)，30-36.

３５）山内弘隆，竹内健蔵(1992)混雑税理論の展望―経済学の視点，土木学会論文集，449，IV-17，17-26.

３６）円山琢也，原田昇，太田勝敏(2003) Nested Logit 型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金，土木計画学研究・論文集，20(3)，555-562.

３７）文世一，秋山孝正，奥嶋政嗣（2007）道路ネットワークにおける次善の混雑料金―都市高速道路の役割に着目して―，応用地域学研究，12，15-25.

３８）Sheffi, Y.（1985）. Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods, Prentice-Hall.

３９）Akamatsu, T. and Kuwahara, M.（1989）Optimal Toll Pattern on a Road Network under Stochastic User Equilibrium with Elastic Demand, Proceeding of the 5th WCTR, Volume 1, 259-273.

４０）Yang, H. and Huang, Hai-Jun. (1998). Principle of marginal-cost pricing: how does it work in a general road network?, Transportation Research Part A, 32(1), 45-54.

４１）Dial, R. B. (1999a). Network-Optimized Road Pricing: Part I: A Parable and a Model, Operations Research, 47(1), 54-64.

４２）Dial, R. B. (1999b). Network-Optimized Road Pricing: Part II: Algorithms and Examples, 47(2), 327-336.

４３）Yang, H., Meng, Q. and Hau, T. D. (2004). Optimal integrated pricing in a bi-modal transportation network, in Lee, D.-H (ed.), Urban and Regional Transportation Modeling: Essays in Honor of David Boyce, Chapter 8, 134-156, Edward Elgar Publishing.

４４）Yang, H. and Huang, Hai-Jun. (2005). Mathematical and Economic Theory of Road Pricing, Elsevier Science.

４５）Ying, J. Q. and Yang, H. (2005). Sensitivity analysis of stochastic user equilibrium flows in a bi-modal network with application to optimal pricing, Transportation Research Part B, 39(9), 769-795.

４６）Beckmann, M., McGuire, C. and Winston, C. (1956). Studies in the Economics of Transportation. Yale University Press, New Haven, CT.

４７）Yang, H. (1999) System Optimum, Stochastic User Equilibrium, and Optimal Link Tolls, Transportation Science, 33(4), 354-360.

４８）Yang, H., Meng, Q., and Lee, Der-Horng (2004) Trial-and-error implementation of marginal-cost pricing on networks in the absence of demand functions, Transportation Research Part B., 38(6), 477-493.

４９）八田達夫 (2009) 第 16 章　混雑（ミクロ経済学Ⅱ－効率化と格差是正), 東洋経済新報社, 165-217.

５０）Oppenheim, N. (1995). Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium, John Wiley & Sons.

５１）Yang, H. and Zhang, X. (2003). Optimal Toll Design in Second-Best Link-Based Congestion Pricing, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1857, 85-92.

５２）Lévy-Lambert, H. (1968) . Pricing of Variable-Quality Services Application to Road Tolls, Econometrica, 36(3-4), 564-574.

５３）Marchand, M. (1968). A note on optimal tolls in an imperfect environment, Econometrica, 36, 575-581.

５４）McDonald, J. F. (1995). Urban highway congestion: an analysis of second-best tolls, Transportation, 22(4), 353-369.

５５）Verhoef, E. T., Nijkamp, P., and Rietveld, P. (1996). Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative. Journal of Urban Economics, 40 (3), 279-302.

５６）Liu, L. N. and McDonald, J. F. (1999). Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems, Transportation Research Part B, 33(3), 157-188.

５７）Arnott, R. and Yan, A. (2000). The Two-Mode Problem: Second-Best Pricing and Capacity, Review of Urban and Regional Development Studies, 12(3), 170-199.

５８）Verhoef, E. T. (2002a). Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands, Regional Science and Urban Economics, 32(3), 281-301.

５９）Verhoef, E. T. (2002b). Second-best congestion pricing in general networks: Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points, Transportation Research Part B, 36(8), 707-729.

６０）Rouwendal, J. and Verhoef, E. T. (2004). Second-Best Pricing for Imperfect Substitutes in Urban Networks, Road Pricing: Theory and Evidence, Research in Transportation Economics, 9, 27-60.

６１）文世一（2005） 交通混雑の理論と政策，東洋経済新報社

６２）竹内健蔵（2006）都市交通ネットワークの経済分析，有斐閣.

６３）土木学会（1998）交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-，丸善.

６４）矢澤信雄（2007）第４章 次善の混雑価格形成（闕哲雄，庭田文近（2007）ロード・プライシング―理論と政策），勁草書房，104-109.

６５）Verhoef , E. T. (2000). Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands, Tinbergen Institute Discussion Paper, 1-24.

６６）Ubbels, B. and Verhoef, E. T. (2008). Governmental competition in road charging and capacity choice, Regional Science and Urban Economics, 38(2), 174-190.

６７）Verhoef, E. T., Koh, A., and Shepherd, S. (2010) Pricing, capacity and long-run cost functions for first-best and second-best network problems, Transportation Research Part B, 44(7), 870-885.

６８）Kidokoro, Y. (2005). London-type congestion tax with revenue-recycling, Economics Bulletin, 18(1), 1-6.

６９）Kidokoro, Y. (2006). Benefit estimation of transport projects—a representative consumer approach, Transportation Research Part B, 40(7), 521-542.

７０）Kidokoro, Y. (2010). Revenue recycling within transport networks, Journal of Urban Economics, 68, 46-55.

７１）Parry, Ian W.H. and Bento, Antonio Miguel R.(1999) Revenue recycling and the welfare effects of road pricing, Policy, Research working paper, WPS 2253, The World Bank.

７２）Mayeres, I. and Proost, S. (1997) Optimal Tax and Public Investment Rules for Congestion Type of Externalities, The Scandinavian Journal of Economics, 99(2), 261-279.

７３）森杉壽芳，河野達仁（2012）道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究，67，1-20.

７４）Palma, A. de. and Lindsey, R. (2006). Modelling and evaluation of road pricing in Paris, Transport Policy, 13(2), 115-126.

７５）Calthrop, E., De Borger, B. and Proost, S. (2010). Cost-benefit analysis of transport investments in distorted economies, Transportation Research Part B, 44(7), 850-869.

７６）森杉壽芳，河野達仁（2013）高速料金水準を設定する基準のあり方，運輸と経済，73（9），24-32.

第３章 料金水準設定基準の提案

３－１ 概説

第３章では，高速道路の最適な料金を決定するための基準について提案を行う．ある１本の高速道路の建設を行い，その高速道路の料金水準を決定する場合を想定する．このとき，建設および維持費用のために，料金収入と燃料税の値上げによる増税収入を財源として調達を行うものとする．建設および維持費用は，メンテナンスコストやこれからの大規模な道路改修の費用としても考えられる．これまでのわが国の道路行政においては，道路の建設や維持のために道路特定財源と料金収入による財源調達が行われてきたが，道路特定財源が廃止され，一般財源化された現在の状況では，他の税金による財源調達も考えられる．しかし，ここで燃料税による資金調達を行う理由は，森杉，河野（2008）[1)] に示されている以下の考え方に基づいている．

> *道路の公的資金の調達方法には、燃料税収以外もあり得る．所得税や消費税の増税によって確保することも考えられるし，現在支出している所得移転，公共投資，福祉支出，教育支出削減によって確保することも考えられる．しかしながら，福祉・医療を始め，他の公的分野での資金需要は著しく逼迫している．わが国の道路行政においては現在まで，道路特定財源と利用料金収入を用いて道路整備財源調達を行っている．そのため，社会的合意を得る点からみても，高速道路への公的資金としては，特定財源を主とせざるを得ないものと考えられる．*
>
> *以上のような理由で，ここでは，財源調達先を料金収入のほかには燃料税のみであるものとする．ただし道路整備財源として燃料税以外の税等（例；所得税や消費税といった一般財源）を用いる場合についても，燃料税の限界費用の代わりに一般財源等の限界費用を用いれば，全く同じ方法論で議論できる．*（森杉，河野（2008）[1)]，pp. 289-290）

以上の議論より，ここでは社会的合意が得られやすいシナリオとして，財源調達先を燃料税として，高速道路の最適な料金を決定するための基準について提案を行う．

「３－２　代表的家計の厚生水準の定式化」では，本研究で想定する道路利用者の行動を定義する．ここでは，代表的な家計が厚生水準を最大化するように道路利用の選択行動をとるものと想定する．

「３－３　高速道路料金と公的資金の限界費用」では，最適料金水準の導出の前提となる高速道路料金の限界費用と公的資金としての燃料税の限界費用について述べる．

「３－４　最適料金水準と厚生水準」では，代表的家計の厚生水準を最大にする最適料金水準の式を導出する．また，代表的な家計の厚生水準に加えて，不足財源を燃料税で調達することによる厚生損失を考慮した代表的家計の厚生関数，すなわち社会的厚生関数として導出する．この社会的厚生関数を道路ネットワークの料金問題における代表的家計の厚生関数として応用することを述べる．

３－２ 代表的家計の厚生水準の定式化

本研究では，代表的な家計が道路利用の選択を行うものと想定する．本研究では，その結果達成できた厚生水準（＝効用水準）が最大になるように料金水準を求めることを目的とする．

最適料金水準を決める前に，まずは財源の調達方法を整理する．まず，高速道路の建設費および維持費用は，高速道路の料金収入と燃料税の増税による収入で調達せねばならないものとする．このとき，高速道路の料金収入と燃料税の増税による収入は年収入とし，高速道路の建設費および維持費用は年費用とする．

具体的には，高速道路料金収入 $PX(P, f)$と燃料税 fの値上げによる税収増によって，対象とする高速道路の建設費用と維持費用とを合わせた Iの財源調達を行うものとする．つまり，高速道路建設にかかる財政制約を考える．

すなわち，

$$PX\left(P,f\right)+\left(fX_f\left(P,f\right)-fX_f\left(P,\overline{f}\right)\right)=I \tag{3.1}$$

ここで，

P：高速道路料金水準

$\overline{f}$ ：既存の燃料税水準（fが既存の場合から変化した燃料税水準）

を表す．このとき，式(3.1)の左辺は，年収入を示す．この高速道路料金と燃料税からなる年収入が，高速道路建設及び維持の年費用 Iと等しくなるという制約を与える．

したがって，年の高速道路料金収入と燃料税収入増加の合計である $R(P, f)$は，式(3.2)の通り定義できる．

$$R\left(P,f\right)\equiv PX\left(P,f\right)+\left(fX_f\left(P,f\right)-fX_f\left(P,\overline{f}\right)\right) \tag{3.2}$$

ここで，

fX_f ：年の燃料税収

を示している．

以上の財源調達方法のもとで，高速道路料金水準が P，燃料税水準が fであるとき，代表的家計の厚生水準（＝効用水準）Vを，$V(P, f)$で表現することを考える．つまり，最適な高速道路料金水準 Pと燃料税率 fは，財政制約式(3.1)のもとで，代表的家計の厚生水準 $V(P, f)$を最大にする値であると仮定する．

すなわち，

$$\max_{P,f} V = V\left(P, f\right) \tag{3.3}$$

$$R\left(P, f\right) = I \tag{3.4}$$

では，なぜ厚生水準を最大にする値が望ましいかというと，厚生水準の最大化が豊かさの最大化であるためである．これが，効率性基準と呼ばれるものである．このほかにも公平性基準がある．しかし，後者については，ここでは取り上げないこととする．

以上の定式化に基づき，ある高速道路料金水準 P とある燃料税水準 f のときの代表的家計の厚生水準を表現する．

３－３ 高速道路料金と公的資金の限界費用

本研究では，料金を設定する高速道路の建設及び維持費用 I は，高速道路の料金収入と公的資金，ここでは燃料税の増税収入で調達せねばならないものとして考える．したがって，厚生水準 $V(P, f)$を最大にするような高速道路料金と燃料税の関係を，高速道路料金と燃料税の収入の合計からなる $R(P, f)$を考慮して整理する．つまり，家計の厚生水準を最大にするような高速道路料金水準を求める．そのために，式(3.3)，式(3.4)の解を得るために，式(3.3)を全微分する．

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P}dP + \frac{\partial V}{\partial f}df = \left(\frac{\frac{\partial V}{\partial P}}{\frac{\partial R}{\partial P}} \right)\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)dP + \left(\frac{\frac{\partial V}{\partial f}}{\frac{\partial R}{\partial f}} \right)\left(\frac{\partial R}{\partial f} \right)df$$

$$dV = MCP\left(P, f\right)\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)dP + mcf\left(P, f\right)\left(\frac{\partial R}{\partial f} \right)df \tag{3.5}$$

ここに，

$$MCP\left(P, f\right) \equiv \frac{\frac{\partial V}{\partial P}}{\frac{\partial R}{\partial P}} \tag{3.6}$$

$$mcf\left(P, f\right) \equiv \frac{\frac{\partial V}{\partial f}}{\frac{\partial R}{\partial f}} \tag{3.7}$$

式(3.6)に示す高速道路料金の限界費用と，式(3.7)に示す燃料税の限界費用がそれぞれ定義できる．これらの限界費用は，ある高速道路料金 P の水準またはある燃料税 f の水準にあるときに，追加的な（微小な）値上げをしたときの，追加的な（微小な）収入増に対する，追加的な（微小な）厚生水準の低下分の比率を示している．したがって，高速道路料金および燃料税の限界費用の性質を整理すると，これらの限界費用は，高速道路料金Ｐの水準および，燃料税 f の水準の減少関数となる．つまり，図３－１に示すような，右下がりの曲線となる．また，高速道路料金および燃料税の限界費用は，混雑がないときは，実線で示したよ

うなマイナスの値となる．一方，混雑があるときは，高速道路料金の限界費用のみ図３－１の点線で示すような，図の原点に近い部分がプラスの値となる曲線となる．

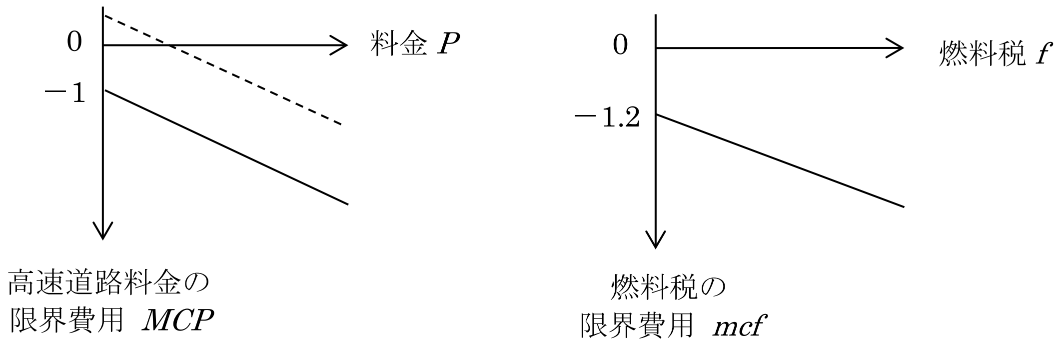

図３－１　高速道路料金と燃料税の限界費用

３－３－１　高速道路料金の限界費用

高速道路の利用についての料金の限界費用を，高速道路料金の値上げを想定することで求める．ここでは簡単化のため，森杉，河野（2012）[2)] を参考に混雑がない場合について図３－２を用いた高速道路料金の限界費用について整理する．図３－２は，ある高速道路区間 1km 当たりの交通状況を示している．縦軸は１台･km あたりの一般化費用 C であり，料金 P(円)，燃料税 f/l（f は燃料税率（円/リッター)，l は高速道利用時の燃費（km/リッター)），時間費用 $wt(X)$（円）（w は時間価値（円/分)，$t(X)$は所要時間関数(分)，X は交通量(台・km)），そして車体摩耗費や燃料原価などのその他の利用者負担費用 cc（円）の総和からなる．すなわち，$C=P+(f/l)+wt(X)+cc$ である．図３－２の横軸は交通量（台）である．通常の時間関数 $t(X)$は，所要時間が交通量 X とともに増加する関数であり，混雑現象を表現する．しかし，ここでは，簡単化のために混雑がない状態を示しているため，一定の値を示している．いわゆる（社会的）平均費用曲線は一般化費用曲線のうちの $wt(X)+cc$ であり，これに燃料税 f/l および料金 P を加えたものが一般化費用関数 C である．ある高速道路料金 P の時の均衡点を E_1 で示している．ここでは，わずかな高速道路料金の値上げを想定するので，dP 分だけ料金が増加して，均衡点は E_2 に移動する．このとき，高速道路料金の限界費用は，「総余剰の限界損失／限界料金収入」である．「総余剰の限界損失」は，図３－２の B の面積である．高速道路料金収入としては B だけ増加するが，それに伴い，高速道路利用者は料金を支払うため，本来得られたはずの便益が B の面積だけ減少するということを意味する．一方，料金の値上

げによって交通量が減少するため，「限界料金収入」は，直接の料金収入増加（図３－２の B の面積）から，交通量減少による高速道路料金収入と燃料税収入の減少（図３－２の A の面積）を引いた値となる．

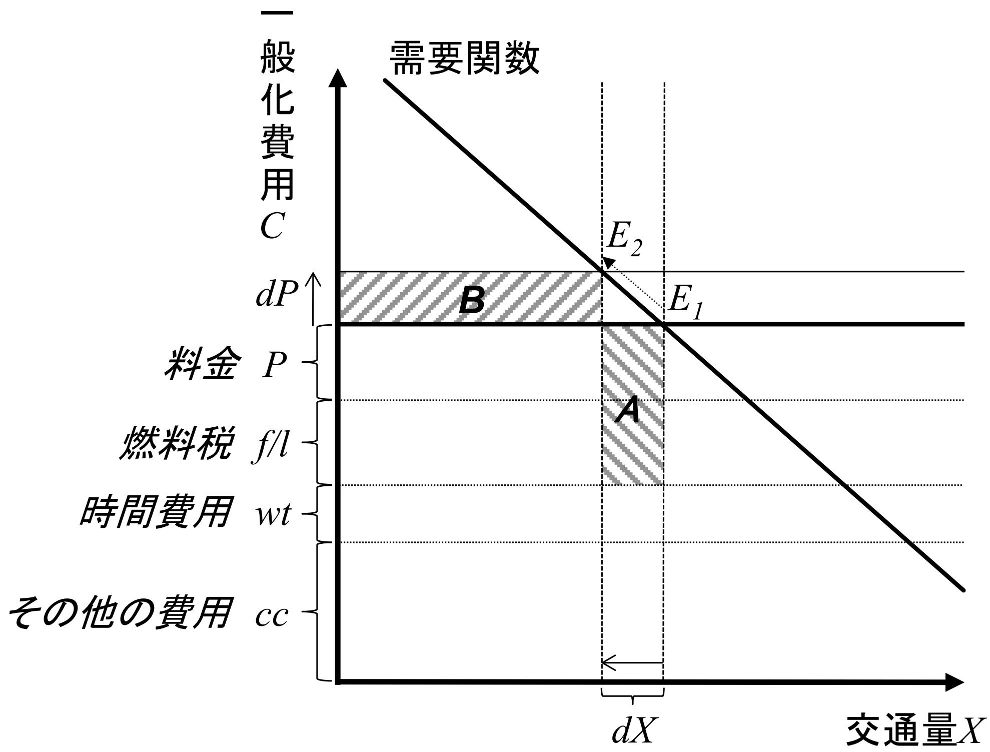

図３－２　高速道路料金の限界費用

（森杉，河野（2012）[2] を参考に作成）

つまり，この図３－２で示した関係を式で整理すると，式(3.8)の通りとなる．

$$
\begin{aligned}
MCP &= \frac{\left[\text{料金増による厚生損失分}\right]}{\left[\text{料金増による収入の純増分}\right]} \\
&= \frac{-B}{B-A} = \frac{-X}{X+(p+(f/l))(dX/dp)}
\end{aligned}
\tag{3.8}
$$

高速道路料金の限界費用とは，料金収入の限界的な１円の増収によって，交通の需要量が変化することによるその１円の増収を含めた余剰の減少をどれだけもたらすのかを示すものである．つまり，料金の値上げに対する厚生水準の低下分を求めていることがわかる．

森杉，河野（2012）[2] によると，混雑がない場合の高速道路料金の限界費用は，-1.3～-2.5 とされている．

ここで，さきで示したと高速道路料金の限界費用の式(3.8)を用いて，実際の混雑がない場合の高速道路料金の限界費用 MCP を下記の式に従い算出する．

$$MCP = \frac{-1}{1-\left(\frac{P+f}{C}\right)\times\varepsilon} \tag{3.9}$$

ここで,

P：料金

f：燃料税

C：一般化費用

ε：価格弾性値

である.

このとき，限界費用は，走行１km あたりで考える．まず料金Ｐは，現行の償還主義で示されている乗用車の料金水準 150 円＋24.6 円／km を用いて，平均 10km の走行距離として，１km あたりの 40 円／km の料金水準とする．次に，時間価値，燃料税，一般化費用は，費用便益分析マニュアル（国土交通省 道路局 都市・地域整備局（2008）[3)]）に示されている表３－１と表３－２の乗用車について参照することで設定する．それぞれの値は，近似的に求めるため，時間価値は，表３－１より 40 円／分・台とする．燃料税は，表３－２に示すとおり，90km/h のときの走行経費原単位の値の約半分と考え，５円／台ｋｍとする．そして走行費用は，燃料費を走行経費原単位から差し引いた，５円／台ｋｍとする．ここでの走行経費原単位は，燃料費，油脂（オイル）費，タイヤ・チューブ費，車両整備（維持・修繕）費，車両償却費等を含んでいる．したがって，一般化費用は，下記の式(3.10)で示す通り求めると，75 円／km となる．

$$C = (\text{料金}+\text{燃料税})+\text{走行費用}+\text{時間価値}\times\text{走行時間} \tag{3.10}$$

以上より，これらの値を式(3.9)に代入すると，式(3.11)の通りとなった．

$$MCP = \frac{-1}{1-\left(\frac{P+f}{C}\right)\varepsilon} = \frac{-1}{1-\left(\frac{40+5}{75}\right)\times 0.8} = \frac{-1}{1-0.48} = -1.92 \tag{3.11}$$

つまり，現行の償還主義料金の限界費用は，約-2.0 である．さきに森杉，河野（2012）[2)]が示した混雑がない場合の高速道路料金の限界費用は，-1.3～-2.5 の間とされており，同様の結果となった．このようにして，実際の高速道路料金の限界費用を求めることができる．

表３－１　車種別の時間価値原単位

単位：円/分・台

車種(j)	時間価値原単位
乗用車	40.10
バス	374.27
乗用車類	45.78
小型貨物車	47.91
普通貨物車	64.18

注）平成 20 年価格

国土交通省道路局都市・地域整備局（2008）[3)]

p. 7の表－1車種別の時間価値原単位（αj）より引用

表３－２　高速道路・高規格道路における車種別の走行経費原単位

単位：円/台・km

速度(km/h)	乗用車	バス	乗用車類	小型貨物車	普通貨物車
30	11.00	41.19	11.51	15.04	35.25
35	10.51	39.88	11.01	14.55	33.22
40	10.15	38.85	10.64	14.14	31.50
45	9.87	38.05	10.35	13.82	30.11
50	9.67	37.46	10.14	13.58	29.04
55	9.54	37.08	10.00	13.41	28.28
60	9.46	36.90	9.93	13.32	27.85
65	9.44	36.91	9.90	13.30	27.75
70	9.47	37.10	9.94	13.35	27.97
75	9.55	37.49	10.03	13.48	28.52
80	9.69	38.08	10.17	13.69	29.41
85	9.89	38.86	10.38	13.97	30.65
90	10.15	39.84	10.65	14.34	32.25

注 1）平成 20 年価格

注 2）設定速度間の原単位は直線補完により設定する.

注 3）90km/h あるいは 60km/h を超える速度については,
90km/h あるいは 60km/h の値を用いる.

国土交通省道路局都市・地域整備局（2008）[3)]

pp.10-11 の表－２ 車種別の走行経費原単位（βj）より引用

３－３－２　燃料税の限界費用

高速道路の建設および維持費用を納税者負担とする場合は，課税によって税収が得られる．この税収を公的資金として調達するとき，すでに歪みの存在する経済から追加的に税収を課

すことによって社会全体の利益が減少することが分かっている．具体的には，課税がないときに比べ課税されたものの需要が減る．つまり買い手の支払い価格と売り手の受け取り価格は，その税の大きさだけかい離し，それぞれ取引から利益を得ることが妨げられる．また，本来得られる税収よりも少なくなる．したがって，社会全体の損失が，税収を上回る．この状態を考慮するためには，限界費用という考え方が重要となる．公的資金は，燃料税として議論を進める．他の税金による財源調達を考える場合も，燃料税をその税金に置き換えて考えることと同じである．

燃料税の限界費用は，燃料税の増税を想定することで求める．具体的に図３－３を用いて限界費用について整理する．まずここでは，わずかな燃料税の増税を想定するので，dP分だけ税額が増加する．この燃料税の増加に伴い，高速道路利用者は燃料税を支払うため，本来得られたはずの便益がその分だけ減少するが，高速道路料金収入としてはβだけ増加する．しかし，燃料税の値上げによって燃料消費量が減少するため，燃料税収入がαの分だけわずかに減少する．

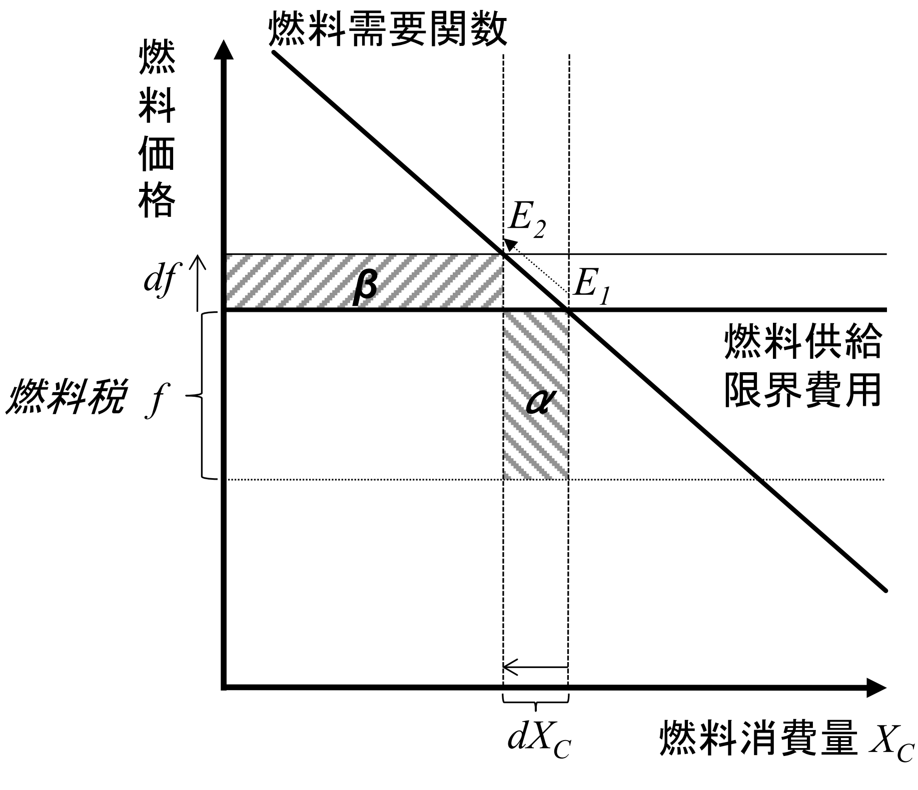

図３－３　燃料税の限界費用

（森杉，河野（2012）[2]を参考に作成）

この図３－３で示した関係を式で整理すると，式(3.12)の通りとなる．

$$
\begin{aligned}
mcf &= \frac{\left[\text{税増による厚生損失分}\right]}{\left[\text{税増による収入の純増分}\right]} \\
&= \frac{-\beta}{\beta-\alpha} = \frac{-X_C dp}{X_C dp - (P + f / l) dX_C}
\end{aligned}
\tag{3.12}
$$

燃料税の限界費用は，燃料税値上げに対する厚生水準の低下分を求めていることがわかる．森杉，河野（2013）[4)] によると，現行の燃料税の水準における燃料税の限界費用は，-1.2～-1.5 程度と推計できるとされている．これは，例えば 1,000 億円の燃料税収入があるときは，1,200 億円から 1,500 億円に相当する燃料税納税者の不便益として考える必要があることを意味している．所得税（労働税）は消費者余剰のかわりに生産者余剰を用いて限界費用を計算できる．別所，赤井，林（2003）[5)] によると，所得税（労働税）の限界費用は，-1.0～-1.2 の範囲であるとされている．一括固定税の限界費用は-1.0 とされているが，いずれの値も一括固定税の限界費用よりも大きくなっている．

３－４ 最適料金水準と厚生水準

最適料金水準を求めるため，まずは達成される厚生水準を式(3.6)，式(3.7)の高速道路料金および燃料税の限界費用と限界収入とで表現する．まず高速道路料金および燃料税の限界費用を考えるために，式(3.5)に対して高速道路料金 P と燃料税 f について線積分を行う．式(3.5)は，全微分形であるため，積分経路に依存しない．故に，積分経路を以下の式(3.13)のように定める．

$$\begin{pmatrix} P=0 \\ f=\bar{f} \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} P=P \\ f=\bar{f} \end{pmatrix} \to \begin{pmatrix} P=P \\ f=f \end{pmatrix} \tag{3.13}$$

この積分経路は，高速道路料金 P が，０から P まで，燃料税 f が初期値の燃料税水準 $\bar{f}$ からある水準 f まで，それぞれ変化した場合を設定している．したがって，式(3.5)に対して式(3.13)の積分経路の線積分を適用すると，

$$\begin{aligned} &V(P,f)-V(0,\bar{f}) \\ &= \oint_{(0,\bar{f})\to(P,\bar{f})} MCP\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)dP + mcf\left(\frac{\partial R}{\partial f}\right)df \\ &\quad + \oint_{(P,\bar{f})\to(P,f)} MCP\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)dP + mcf\left(\frac{\partial R}{\partial f}\right)df \end{aligned} \tag{3.14}$$

となる．式(3.14)の右辺第１項の積分は，f を固定しているので $df=0$ となる．さらに式(3.14)の右辺第２項の積分では，P を固定しているので，$dP=0$ となる．

ゆえに，式(3.14)は，

$$V(P,f)-V(0,\bar{f}) = \int_{(0,\bar{f})}^{(P,\bar{f})} MCP\left(\frac{\partial R}{\partial P}\right)dP + \int_{(P,\bar{f})}^{(P,f)} mcf\left(\frac{\partial R}{\partial f}\right)df \tag{3.15}$$

さらに，積分経路を料金収入(PX)で表すために，

$$R(0,\bar{f})(=0) \to R(P,\bar{f})(=PX) \to R(P,f)(=I) \tag{3.16}$$

という経路を設定する．このとき，

$$V(P,f)-V(0,\bar{f}) = \left[V(P,f)-V(0,\bar{f})\right] + \left[V(P,f)-V(P,\bar{f})\right] \tag{3.17}$$

式(3.17)の第１項の経路では，$\bar{f}$ が固定されているので，

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial f} df = \frac{\partial R}{\partial P} dP \tag{3.18}$$

同様に式(3.17)の第２項の経路では，Pが固定されているので，$dP=0$なので，

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial f} df = \frac{\partial R}{\partial f} df \tag{3.19}$$

以上を式に代入すると，線積分を収入の積分形に表現できる．

$$\begin{aligned} & V(P,f) - V(0,\overline{f}) \\ & = \left[V(P,f) - V(0,\overline{f})\right] + \left[V(P,f) - V(P,\overline{f})\right] \\ & = \int_{R(0,\overline{f})=0}^{R(P,\overline{f})=PX} MCP(P,\overline{f})dR + \int_{R(P,\overline{f})=PX}^{R(P,f)=I} mcf(P,f)dR \end{aligned} \tag{3.20}$$

式(3.20)を図３－４に示すグラフで表現する．このため，Xは f が $\overline{f}$ から f に微小に変化しても変化しないとする．

すなわち，

$$X(P,f) \approx X(P,\overline{f}) \tag{3.21}$$

となる．

３－４－１　高速道路料金と燃料税の限界費用と代表的家計の厚生水準との関係

式(3.20)で求めた，高速道路料金の限界費用と燃料税の限界費用との関係から，図３－４に示すグラフを用いて，代表的家計の厚生水準を表現する．

図３－４の左端の$R(0,\overline{f})=0$を原点にとった右方向への横軸は，料金収入$R(P,\overline{f})=PX$（$\overline{f}$を固定している）を示し，この横軸座標の収入のときの料金の限界費用が右下がりの曲線$MCP(P,\overline{f})$である．ある料金水準 P を決定したときの料金値上げによる厚生水準の低下，すなわち厚生損失は，式(3.20)右辺第１項の積分値であるので，図３－４の□０abe の面積で示すことができる．

図３－４の右端の Iを原点にとった左方向への横軸は，燃料税収入 $I-PX(P, f)$（Pを固定している）を示し，この収入のときの燃料税の限界費用が，右端から左下がりの曲線$mcf(P,f)$である．ある料金水準 Pを決定したときに必要となる燃料税の値上げによる厚生損失は，式(3.20)右辺第２項の積分値であるので，図３－４の□ICce の面積で与えられる．

総厚生水準 $V(P, f)$は，式(3.20)より，料金値上げによる厚生損失である□Ｏabe の面積と燃料税値上げによる厚生損失である□ICce の面積との和で与えられる．

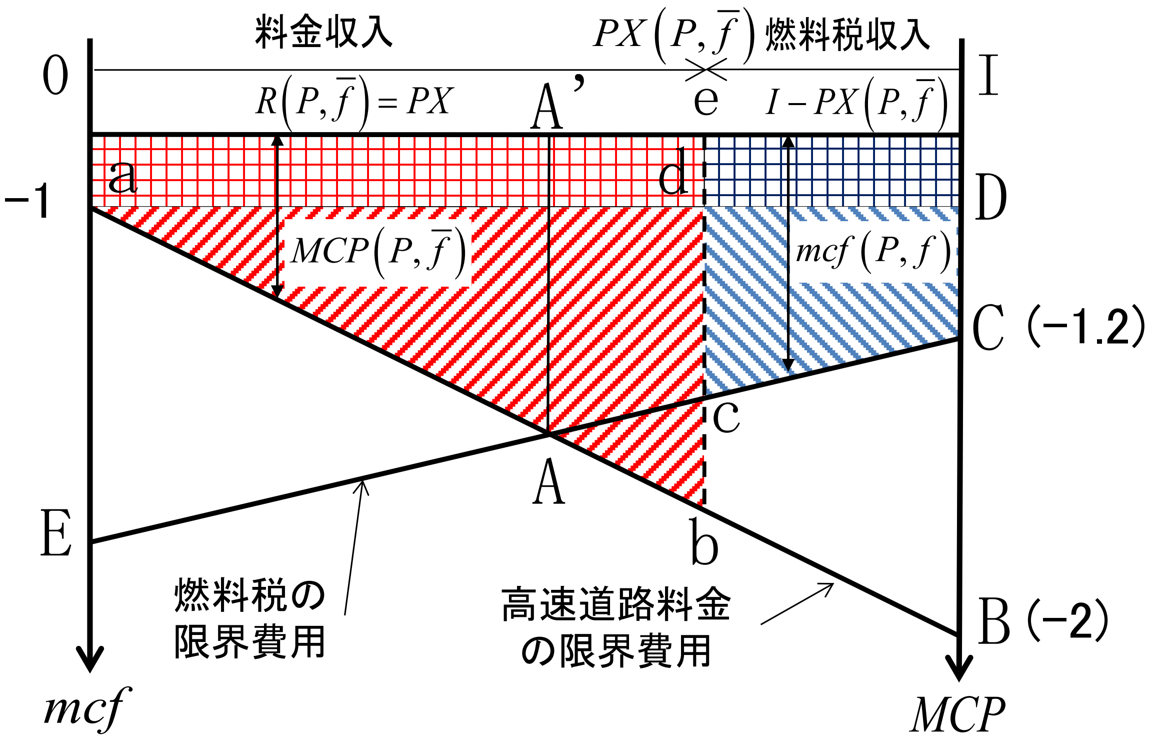

図３－４　MCP，mcf，V(P,f)の関係図

（森杉，河野（2013）[4)]，桐越，森杉，青木（2010）[6)] を参考に作成）

図３－４の考察より，厚生水準を最大にする，すなわち厚生損失を最小にする料金水準は，図３－５の点Ａを実現する水準であり，そのときの厚生損失は，点ＯaACI で囲まれた面積である．

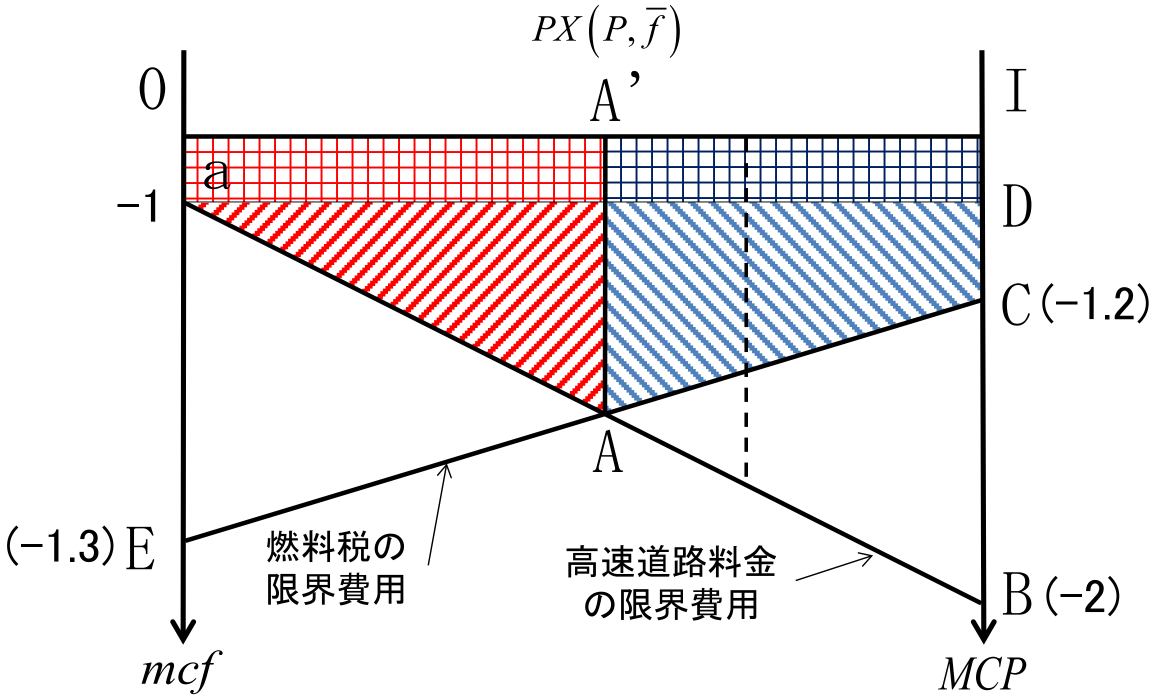

図３－５　最適料金水準点 A における厚生水準
（森杉，河野（2013）[4]，桐越，森杉，青木（2010）[6] を参考に作成）

そこで，最適料金水準を代表的家計の厚生関数から求める．最適料金は，厚生関数を最大にする水準であるものとする．そのために式(3.3)の代表的家計の効用関数 V を料金 P で全微分してゼロとおくと，式(3.22)となる．

$$\frac{dV}{dP}=\frac{\partial V}{\partial P}+\frac{\partial V}{\partial f}\frac{\partial f}{\partial P} \tag{3.22}$$

このとき式(3.22)は，左辺は燃料税 f を料金 P の関数 $f(P)$ とみなした時の微分である．しかし，右辺第１項は，燃料税 f は料金 P の関数 $f(P)$ でないとみなした時の偏微分であり，右辺第２項は，料金 P は燃料税 f の関数 $f(P)$ でないとみなした時の偏微分である．

ここで，式(3.4)より高速道路料金 P と燃料税 f を全微分してゼロとおくと，

$$\frac{\partial R}{\partial P}dP+\frac{\partial R}{\partial f}df=0 \tag{3.23}$$

これより，式(3.24)が得られる．

$$\frac{df}{dP}=-\frac{\dfrac{\partial R}{\partial P}}{\dfrac{\partial R}{\partial f}} \tag{3.24}$$

式(3.24)を式(3.22)に代入して，式(3.25)，式(3.26)が得られる．

$$\frac{dV}{dP}=\frac{\partial V}{\partial P}+\frac{\partial V}{\partial f}\left(-\frac{\frac{\partial R}{\partial P}}{\frac{\partial R}{\partial f}}\right)=\left[\left(\frac{\frac{\partial V}{\partial P}}{\frac{\partial R}{\partial P}}\right)-\left(\frac{\frac{\partial V}{\partial f}}{\frac{\partial R}{\partial f}}\right)\right]\frac{\partial R}{\partial P}=0 \qquad (3.25)$$

$$\therefore \quad \frac{\frac{\partial V}{\partial P}}{\frac{\partial R}{\partial P}}=\frac{\frac{\partial V}{\partial f}}{\frac{\partial R}{\partial f}} \qquad (3.26)$$

式(3.26)の左辺は料金の限界費用といわれている．右辺は調達財源の限界費用といわれている．分子は料金（または，税）の（限界的な）値上げによる厚生損失を示し，分母はその値上げによる（限界的な）収入である．つまり式(3.26)は，１円の追加的な公的収入を獲得するために発生する厚生損失（＝費用）を示している．

したがって最適料金水準は，料金の限界費用が，（望ましい料金水準を達成するのに必要な燃料税水準時の）燃料税の限界費用に等しい水準である．このときの料金水準と燃料税水準は，代表的な家計の厚生水準すなわち効用水準を最大にしている．これは，高速道路料金収入の変化率が，税収の変化率と同じになるように設定することで，社会的な余剰を最大化することができることを意味している．つまり料金水準は，高速道路料金の限界費用を，燃料税の限界費用に等しくなるように設定しなくてはならない．

３－４－２　償還主義料金と無料化における代表的家計の厚生水準

では実際の償還主義料金と無料化施策，それぞれのときの代表的家計の厚生水準を図３－６の償還主義料金と図３－７の無料化施策に示すように求める．

完全受益者負担すなわち償還主義料金水準による料金設定は，図３－６に示すような点Ｂを実現する水準であり，そのときの厚生水準の低下，すなわち厚生損失は，□０aBI の面積である．ここでは，燃料税の投入が０なので，納税者の不便益は発生しない．このとき，さきの図３－５で示した最適な料金水準における厚生水準よりも，△ABC の面積分だけ余分に厚生損失（厚生水準の低下）が発生している．この△ABC の面積分が，追加の損失すなわち死荷重損失である．

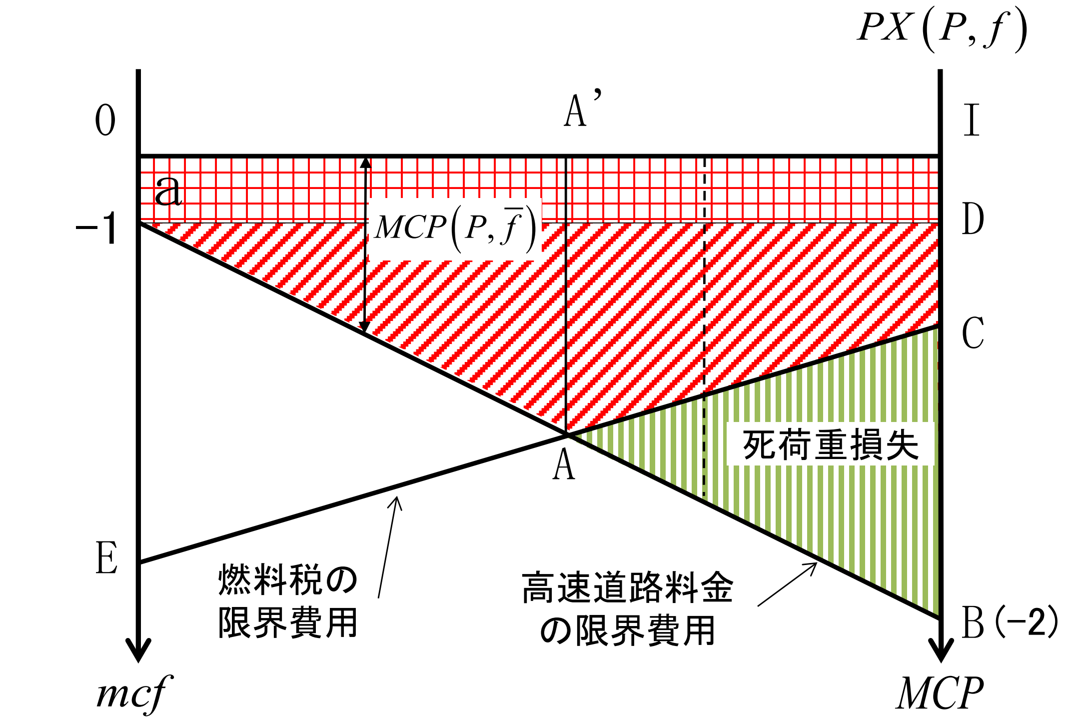

図３－６　償還主義料金の代表的家計の厚生水準
（森杉，河野（2013）[4]，桐越，森杉，青木（2010）[6] を参考に作成）

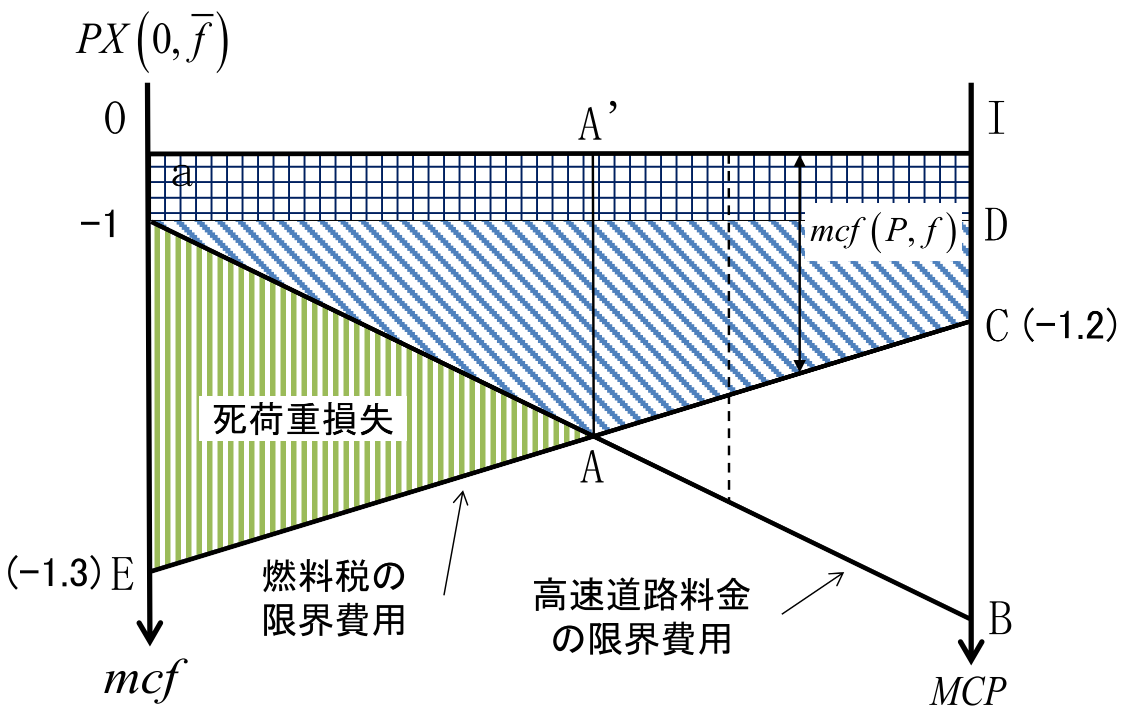

図３－７　無料化施策の代表的家計の厚生水準
（森杉，河野（2013）[4]，桐越，森杉，青木（2010）[6] を参考に作成）

もう１つの料金の代替案は，無料化施策がある．無料化施策は，料金水準は０なので，図３－７の点 E が実現する．このときの厚生損失は，□OECI であり，最小の厚生損失から追加の損失すなわち死荷重損失は，△aEA の面積で表すことができる．ここでは，料金の徴収が無いので，料金負担者の不便益は発生しない．

３－４－３　燃料税の限界費用が一定の場合の代表的家計の厚生水準

最後に燃料税 f に関する限界費用は，一定であると仮定する．これは，調達財源が公共支出総額のとても小さな割合を占めているからである．

式(3.20)において，$mcf(P,f)$が一定で，$mcf\left(P,f\right)=mcf\left(P,\bar{f}\right)=mcf\left(0,\bar{f}\right)$＝一定とおくと，式(3.17)より式(3.20)の第１項は，$V\left(P,\bar{f}\right)-V\left(0,\bar{f}\right)$を示し，第２項は$V\left(P,f\right)-V\left(P,\bar{f}\right)$を示し，それは $mcf(P,f)[I-PX]$となる．したがって，

$$V\left(P,f\right)-V\left(0,\bar{f}\right)=V\left(P,\bar{f}\right)-V\left(0,\bar{f}\right)+V\left(P,f\right)-V\left(P,\bar{f}\right)$$

ここで式(3.17)より，

$$V\left(P,f\right)-V\left(P,\bar{f}\right)=mcf\left(P,f\right)\left[I-PX\right]$$

となるので，

$$V\left(P,f\right)=V\left(P,\bar{f}\right)+mcf\left(P,f\right)\left[I-PX\right]+V\left(0,\bar{f}\right) \tag{3.27}$$

式(3.27)のように，厚生水準の$\bar{f}$を固定したときの代表的な家計の厚生水準に加えて，不足財源を燃料税で調達することによる厚生損失を考慮した代表的家計の厚生関数，つまり燃料税納税者の厚生水準から，社会的厚生関数を導出することができる．式(3.27)は，道路ネットワークの料金問題における代表的家計の厚生関数として応用する．

参考文献

1）森杉壽芳・河野達仁（2008）第 11 章　課税コストを考慮した高速道路網整備の効率的財源調達法（森地茂・金本良嗣　編（2008）道路投資の便益評価－理論と実践－），東洋経済新報社，281-304.

2）森杉壽芳，河野達仁（2012）道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究，67，1-20.

3）国土交通省道路局都市・地域整備局（2008）費用便益分析マニュアル

4）森杉壽芳,河野達仁(2013)高速料金水準を設定する基準のあり方,運輸と経済,73(9),24-32.

5）別所俊一郎，赤井伸郎，林正義（2003）公的資金の限界費用，日本経済研究，47，1-19.

6）桐越信，森杉壽芳，青木優（2010）有料道路事業における投資限度額方式の評価―道路投資の効率的な負担，高速道路と自動車，53(3)，18-26.

第４章 道路ネットワークにおける最適料金水準の導出

４－１ 概説

第４章では，さきの第３章で示したモデルをより一般化して，一般的なネットワークにおける道路利用者の行動を仮定してモデル化する．ここでの有料道路整備の財源は，料金収入に加えて他の燃料税などの税金からの補助を想定する．税金の限界費用を考慮した上で，社会的余剰を最大にするような料金水準を求める定式化を行う．

そこで「４－２　道路ネットワークにおける利用者行動モデルの定式化」では，道路の利用者行動，すなわち道路利用者のルート選択が，不完全代替，完全代替，ロジット型代替の３つに分けて，道路の利用者均衡配分に関する厚生（効用）関数を設定する．利用者行動のモデルについては，城所（2003）[1)] が交通プロジェクトの便益評価に関して，不完全代替，完全代替，ロジット型代替の３つを基本的モデルとして解説している．城所（2003）[1)] によると，不完全代替モデルは，最も汎用的なモデルであり，各ルートの代替・補完関係も自由であることにその特徴があるとしている．完全代替モデルは，交通需要はある点からある点への移動の需要から生じる派生需要であり，どのようなルートを通るかは効用に影響を与えないと考える見方をモデル化したものであるとしており，各ルートの選択が完全に代替的になるとしている．ロジット型代替モデルは，離散的選択モデルを交通需要予測・便益評価に応用されており，交通需要を各消費者の確率的な行動の結果として捉えて，その確率分布にガンベル分布を用いて導出されるものとしている．すなわち，道路利用者の確率的な行動の結果として，各ルートの選択が行われるものと想定したものが，ロジット型代替モデルである．これら３つのモデルは，城所（2003）[1)] の議論と同様に，不完全代替モデルが，完全代替やロジット型モデルの特殊形に過ぎないことを明示した．

「４－３　社会的厚生関数」では，道路利用者の総消費者余剰である厚生関数（準線形の効用関数）と道路建設費から道路料金収入を引いた収入に関する納税者の厚生損失からなる式を示す．ここでの定式化は，対象とする道路区間における料金収入と対象道路の建設費を税金から投入することによって，対象とする道路整備の財源を確保するという，財源調達の制度を考える．

「４－４　最適料金水準の導出」では，４－３に示した社会的厚生関数に基づいて，財源調達に伴う厚生損失である MCF が－１とそれ以外の場合について，全ての道路と特定の道路のそれぞれを対象として，最適な料金水準を導出する．

「４－５　二段階最適化モデル」では，社会的厚生が最大になる料金水準を求める問題を考える．実際の利用者の均衡配分の計算を用いて，下位問題としての既存の利用者均衡条件の制約のもとで，上位問題としての社会的厚生が最大になるように，二段階の最適化問題として，最適料金水準を求めることとする．

「４－６　数値計算例」では，４－５で示した二段階最適化モデルに基づいて，一般的な道路ネットワークの中で，特定の道路区間に料金を課す場合を想定する．まず議論を簡単化するために，１本の高速道路と，２本の一般道路からなる道路ネットワークを想定した．その上で，一般的なネットワークとして数値計算によく用いられる Sioux Falls のネットワークにおいて，特定の道路区間にのみ料金を課す場合を想定する．このときの最適な料金水準を求める計算例を示し，その結果に関して整理する．

４－２ 道路ネットワークにおける利用者行動モデルの定式化

道路の利用者均衡配分に関する厚生（効用）関数は，社会経済状況を考慮して，道路利用者のルート選択が，不完全代替，完全代替，ロジット型代替の３つに分けて考える．

① 計画者は，道路利用者に対して各道路区間に“料金”を課すことができる．

② 道路利用者は，予算と時間の制約のもとで，自己の厚生（効用）を最大にするよう交通量配分を行う．

③ 道路利用者は，自己の行動が交通混雑に影響しないと認識する．

④ 道路区間の所要時間は，単調増加な凸関数である区間交通量として表現する．

⑤ 計画者は，短期間の建設費用に関して MCF を考慮する．

以上の条件の下で，ネットワーク均衡状態での最適な料金水準の設定の方法について，定式化を行う．まず，利用者均衡の定式化を行う．次に厚生（効用）水準を最大にする，すなわち社会的余剰を最大にする効率的な道路区間混雑料金を求める定式化を行う．

４－２－１　利用者均衡その１－不完全代替モデル

道路利用者行動の定式化に関する上述の条件の下で，均一な道路利用者を想定し，道路利用者である消費者が厚生（効用）を最大にする関数 U を式(4.1)で表す．このとき，予算制約の式(4.2)と時間制約の式(4.3)をそれぞれ表す．

$$\max_{l, f_k^{rs}, x_a} U = z + u\left(\ldots f_k^{rs} \ldots, l\right) \tag{4.1}$$

s. t.

$$z + \sum_a P_a x_a = wL + y, \quad a \in A, \tag{4.2}$$

$$l + \sum_a t_a\left(\overline{x}_a\right) x_a + L = T, \quad a \in A, \tag{4.3}$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad a \in A, k \in K, \tag{4.4}$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad k \in K, rs \in R. \tag{4.5}$$

ここで，

z：合成財の消費

l：余暇時間

f_k^{rs} ：rs 間における経路 k の交通量

P_k^{rs} ：rs 間における経路 k の料金 P

w ：賃金率

L ：労働時間

y ：資産所得

t_k^{rs} ：rs 間における経路 k の所要時間（それは, 経路交通量ベクトル f の関数としている）

t_a ：道路区間 a の所要時間 t

x_a ：道路区間 a の交通量 x

$\delta_{a',k}^{rs}$ ：OD ペア rs 間の第 k 経路が道路区間 a を含むとき：１，そうでないとき：０

T ：総利用可能時間

である．

$t_a(\overline{x}_a)$ の $\overline{x}_a$ は，均衡時の交通量であり，個人の視点から所与である．このことが自分の交通が他人の交通状況に影響を与えること無視していると仮定する．この取り扱いが外部性としての混雑を表現している．

このとき，式(4.2)に式(4.3)を代入することで，式(4.6)を得られる．

$$\begin{aligned} z &= wL + y - \sum_a P_a x_a \\ &= w\left(T - l - \sum_a t_a\left(\overline{x_a}\right)x_a\right) + y - \sum_a P_a x_a \\ &= wT + y - wl - \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x_a}\right)\right)x_a \end{aligned} \tag{4.6}$$

ここで，式(4.1)，式(4.4)，式(4.5)について，ラグランジェ関数をとると，式(4.7)が得られる．

$$\begin{aligned} U = wT + y - wl - \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)x_a + u\left(.......f_k^{rs}......, l\right) \\ + \sum_a \lambda_a (x_a - \sum_{rs}\sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}) + \sum_{rs,k} \mu_k^{rs} f_k^{rs} \end{aligned} \tag{4.7}$$

その解の一階条件は,

$$\frac{\partial U}{\partial l} = -w + \frac{\partial u}{\partial l} = 0 \tag{4.8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_a} = -P_a - wt_a\left(\overline{x}_a\right) + \lambda_a = 0 \tag{4.9}$$

$$\frac{\partial U}{\partial f_k^{rs}} = \frac{\partial u}{\partial f_k^{rs}} + \lambda_a \delta_{a,k}^{rs} + \mu_k^{rs} = 0 \tag{4.10}$$

$$If \quad f_k^{rs} > 0, \quad \mu_k^{rs} = 0,$$

$$If \quad f_k^{rs} = 0, \quad \mu_k^{rs} > 0$$

ルート間の選択は，不完全代替を仮定しているので，式(4.7)は，正の内点解を持つ．ゆえに，以上のラグランジェ関数とその解の一階条件より，余暇需要と経路交通需要の関数は，

$$l = l\left(w, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=1}^{rs=1}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k}^{rs}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=n}^{rs=m}\right) \tag{4.11}$$

$$f_k^{rs} = f_k^{rs}\left(w, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=1}^{rs=1}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k}^{rs}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=n}^{rs=m}\right) \tag{4.12}$$

式(4.11)に式(4.4)を代入すると，道路区間交通需要関数は，

$$X_a = X_a\left(w, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=1}^{rs=1}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k}^{rs}, \cdots, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k=n}^{rs=m}\right) \tag{4.13}$$

そして，間接効用関数 V の式(4.14)を得る．

$$V = wT + y + v\left(w, \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\overline{x}_a\right)\right)\delta_{a,k}^{rs}\right) \tag{4.14}$$

このとき，包絡線定理を式に適用し，均衡時の道路区間交通量について表すと式の通りとなる．

$$\frac{\partial V}{\partial P_a} = -x_a - w\sum_{a'} x_{a'} \frac{\partial t_{a'}\left(x_{a'}\right)}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_{a'}} \tag{4.15}$$

道路利用者の厚生の変化，つまり料金の変化による消費者余剰は，区間交通量のみで表現できるため，経路交通量で厚生変化を計算する必要がないことが分かる．

４－２－２　利用者均衡その２－完全代替モデル

ルート間選択が完全代替であるモデルについて不完全代替モデルと同様に，道路利用者が厚生（効用）を最大にするような式(4.16)で表す．このとき，予算と時間の制約式は，さきの不完全代替モデルと同様に設定し，経路間交通量の関係は式(4.17)から式(4.19)で表す．

$$\max_{l,f_k^{rs},x_a,d^{rs}} U = wT + y - wl - \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\bar{x}_a\right)\right)x_a + u\left(\ldots d^{rs}\ldots, l\right) \tag{4.16}$$

s. t.

$$x_a = \sum_{rs}\sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad a \in A, k \in K, \tag{4.17}$$

$$d^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad k \in K, rs \in R, \tag{4.18}$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad k \in K, rs \in R. \tag{4.19}$$

このとき，

d^{rs} ：OD ペア rs 間の総経路交通量（経路交通量の合計）

である．部分効用関数の変数は経路交通量ではなく配分交通量である．これは不完全代替とは区別され，この仮定こそが完全代替である．

ここで，ラグランジェ関数をとると，

$$\begin{aligned} U = {} & wT + y - wl - \sum_a \left(P_a + wt_a\left(\bar{x}_a\right)\right)x_a + u\left(\ldots\ldots d^{rs}\ldots\ldots, l\right) \\ & + \sum_a \lambda_a \left(x_a - \sum_{rs}\sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} \right) \\ & + \sum_{rs} \eta^{rs} \left(d^{rs} - \sum_k f_k^{rs} \right) \\ & + \sum_{rs}\sum_k \mu_k^{rs} f_k^{rs} \end{aligned} \tag{4.20}$$

その解の一階条件は，

$$\frac{\partial U}{\partial l} = -w + \frac{\partial u}{\partial l} = 0 \tag{4.21}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_a} = -\left(P_a + wt_a\left(\bar{x}_a\right)\right) + \lambda_a = 0 \tag{4.22}$$

$$\frac{\partial U}{\partial d^{rs}} = \frac{\partial u}{\partial d^{rs}} + \eta^{rs} = 0 \tag{4.23}$$

$$\frac{\partial U}{\partial f_k^{rs}} = -\sum_a \lambda_a \delta_{a,k}^{rs} - \eta^{rs} + \mu_k^{rs} = 0 \tag{4.24}$$

このとき，式(4.24)の η^{rs} と λ_a について，まとめると，式(4.25)と式(4.26)が得られる．

$$\frac{\partial U}{\partial f_k^{rs}} = -\sum_a \left(P_a + wt_a\left(\bar{x}_a\right)\right)\delta_{a,k}^{rs} - \frac{\partial u}{\partial d^{rs}} + \mu_k^{rs} = 0 \tag{4.25}$$

$$\mu_k^{rs} f_k^{rs} = 0, \mu_k^{rs} \geq 0 \tag{4.26}$$

式(4.25)と式(4.26)の関係から，まとめると，式(4.27)に示すように表現できる．

$$-\min_k \left(\sum_a \left(P_a + wt_a \left(\bar{x}_a \right) \right) \right) \delta_{a,k}^{rs} + \frac{\partial u}{\partial d^{rs}} = 0 \tag{4.27}$$

ゆえに，余暇需要関数 l と交通需要関数 d は，

$$l = l\left(w, \cdots, \min_k \left(\sum_a \left(P_a + wt_a \left(\bar{x}_a \right) \right) \right) \delta_{a,k}^{rs}, \cdots \right) \tag{4.28}$$

$$d^{rs} = d^{rs}\left(1, w, \cdots, \min_k \left(\sum_a \left(P_a + wt_a \left(\bar{x}_a \right) \right) \right) \delta_{a,k}^{rs}, \cdots \right) \tag{4.29}$$

ここで，f_k^{rs} は一意に解けない．ゆえに，x_a についても，一意に解けない．しかし，均衡条件 $\bar{x}_a = x_a$ を与えることによって決まる．したがって，間接効用関数は，式(4.30)の通り表現することが出来る．

$$V = wT + y + v\left(w, \cdots, \min_k \left(\sum_a \left(P_a + wt_a \left(x_a \right) \right) \right) \delta_{a,k}^{rs}, \cdots \right) \tag{4.30}$$

式(4.30)は，一般的な不完全代替モデルの式(4.14)の特殊形である．右辺第３項における一般化した費用である料金 P_a と走行時間費用 $wt_a(x_a)$ に関して，ある経路 k について費用を最小化するようにルート選択を行う完全代替の形になっており，この項こそが不完全代替モデルと大きく異なる点である．

４－２－３　利用者均衡その３－ロジット型代替モデル

ルート間選択がロジット型代替モデルでは，道路利用者の厚生（効用）関数を最大化するような式(4.31)で表す．このとき，予算と時間の制約式は，さきの不完全代替モデルと同様に設定する．

$$\max_{l, f_k^{rs}, x_a} U = wT + y - wl - \sum_a \left(P_a + wt_a \left(\bar{x}_a \right) \right) x_a + u_1 \left(l \right) - \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \bar{d}^{rs} \sum_k \frac{f_k^{rs}}{\bar{d}^{rs}} \ln \frac{f_k^{rs}}{\bar{d}^{rs}} \tag{4.31}$$

s. t.

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k f_k^{rs}, \quad k \in K_0 = \left(0, K \right), rs \in R, \tag{4.32}$$

$$\bar{d}^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad k \in K_0 = \left(0, K \right), rs \in R, \tag{4.33}$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad a \in A, k \in K_0 = (0, K). \tag{4.34}$$

このとき，実際の交通状態を表現するため，内生化した OD 交通量$\sum_{k \neq 0} f_k^{rs}$（Kidokoro (2006) [2]）を得るため，料金が 0 で，時間費用も 0 である経路 $k = 0$ が rs 間の OD ペアで存在して経路交通量 f_0 を含むときの合計 OD 交通量 $\bar{d}^{rs}$ を設定している．

結果として，よく知られている下記のロジットモデルを得る．

$$l = l(w) \tag{4.35}$$

$$f_0^{rs} = \frac{\bar{d}^{rs}}{1 + \sum_{k' \neq 0} \exp\left[-\theta \sum_a \left(P_a + wt_a(\bar{x}_a) \right) \delta_{a,k'}^{rs} \right]} \tag{4.36}$$

$$f_k^{rs} = \frac{\bar{d}^{rs} \sum_{k'} \exp\left[-\theta \sum_a \left(P_a + wt_a(\bar{x}_a) \right) \delta_{a,k'}^{rs} \right]}{1 + \sum_{k'} \exp\left[-\theta \sum_a \left(P_a + wt_a(\bar{x}_a) \right) \delta_{a,k'}^{rs} \right]} \tag{4.37}$$

各 OD に関する効用関数 V のログサムは，

$$V^{rs} = -\frac{\bar{d}^{rs}}{\theta} \ln\left[1 + \sum_{k'} \exp\left[-\theta \sum_a \left(P_a + wt_a(\bar{x}_a) \right) \delta_{a,k'}^{rs} \right] \right] \tag{4.38}$$

となり，間接効用関数は，

$$V = wT + y + l(w) + \sum_{rs} V^{rs} \tag{4.39}$$

となる．これは，一般的な不完全代替モデルの式(4.14)の特殊形である．右辺第 4 項における一般化した費用である料金 P_a と走行時間費用 $wt_a(x_a)$ に関して，ある経路 k について費用をロジット型のルート選択を行うロジット型代替の形になっており，この項こそが不完全代替モデルと大きく異なる点である．

４－３ 社会的厚生関数

社会的厚生関数は，道路利用者の総消費者余剰である準線形の効用関数と道路建設費から道路料金収入を引いた収入に関する納税者の厚生損失からなる式(4.40)で表す．

$$W = V + MCF\left[\sum_{a'}\left(I_{a'} - P_{a'}x_{a'}\right)\right] \tag{4.40}$$

このとき，

V：間接効用関数

MCF：財源調達の限界費用

I_a：対象道路の建設費

である．建設費以外の維持管理費用については，I_a に含めることで考慮することができる．また，ここで MCF は一定であると仮定する．なぜならば，調達財源は税収総額の微小な増加とみなされるため，実質的な納税者の費用負担は財源とする税額に MCF を乗じることによって近似できることが示されているからである（例えば，林，別所（2004）[3]）．

一般的に高速道路建設費用の財源は，高速道路料金収入と燃料税などの税金からなるが，このことを式(4.40)で明示している．つまり，対象とする道路区間における料金収入と対象道路の建設費への補助によって，対象とする道路整備の財源を確保するという，道路区間別の独立した財源調達の制度を考えている．この応用として，これまで実施されてきたプール制も考えられる．

また，最適料金水準は社会的厚生関数を最大にするような式(4.41)を満たす必要がある．

$$\begin{aligned}\frac{\partial W}{\partial P_a} &= \frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF\left(x_a + \sum_{a'} P_{a'}\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right)\\ &= \left(\frac{\dfrac{\partial V}{\partial P_a}}{x_a + \sum_{a'} P_{a'}\dfrac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}} - MCF\right)\left(x_a + \sum_{a'} P_{a'}\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right) = 0\end{aligned} \tag{4.41}$$

この式が示しているのは，最適料金は限界費用料金が財源調達に伴う公的資金の限界費用による料金と等しいことを述べている．この式(4.41)にロアの定理を適用し，式(4.15)を代入することで，一般的な式(4.42)を得る．

$$\begin{aligned}\frac{\partial W}{\partial P_a} &= \frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF\left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right) \\ &= -x_a - w\sum_{a'} x_{a'} \frac{\partial t_{a'}\left(x_{a'}\right)}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} - MCF\left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right) \\ &= -\left(1 + MCF\right)x_a - MCF\sum_{a'}\left(P_{a'} + \frac{w}{MCF} \frac{\partial t_{a'}\left(x_{a'}\right)}{\partial x_{a'}} x_{a'}\right)\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} = 0\end{aligned} \tag{4.42}$$

４－４ 最適料金水準の導出

最適料金水準は，代表的家計の厚生関数，すなわち社会的厚生関数を最大化することで求めるものとする．そもそも料金は，２つの役割を持っていると考えられる．それは，その道路の建設費や維持費用などの調達財源としての役割と料金を課すことによる規制の役割の２つである．前者は，さきの社会的厚生関数によって考慮し，ここで求められる料金水準については，後者の料金を課すことによる規制，つまり混雑などの外部性に対する役割を中心に整理を行う．

具体的な最適な料金水準の導出は，財源調達に伴う厚生損失である MCF がー１とそれ以外の場合について，全ての道路と特定の道路の場合に分けて行う．最初に，MCF がー１の場合に，全ての道路と特定の道路のそれぞれに料金を課す場合の料金水準式を導出する．次に，MCF がー１でない場合に，全ての道路と特定の道路それぞれに料金を課す場合の料金水準の式を導出する．

４－４－１　MCF＝－１の場合の全ての道路の料金水準

社会的厚生関数 W を最大にするような，ある道路区間の料金水準の解を式(4.43)に示す．

$$dW = \sum_a \frac{\partial W}{\partial P_a} dP_a = 0 \tag{4.43}$$

ここで，式(4.42)を適用し，MCF=－１とする．このとき，$\sum_a \left(\partial x_{a'}/\partial P_a\right) dP_a = dx_{a'}$ を考慮することで式(4.44)を得る．

$$dW = \sum_{a'} \left(P_{a'} - w \frac{\partial t_{a'}\left(x_{a'}\right)}{\partial x_{a'}} x_{a'} \right) dx_{a'} = 0 \tag{4.44}$$

つまり，最適な道路料金水準は，式(4.45)の通りである．

$$P_{a'} = w \frac{\partial t_{a'}\left(x_{a'}\right)}{\partial x_{a'}} x_{a'} \tag{4.45}$$

この最適な道路料金水準は，これまでよく知られている限界費用価格形成原理に基づく料金水準の式と同様な結果となった．式(4.45)は，各道路区間の最適料金水準が，観測される交通量とその所要時間の変化から求められることを意味している．この最適料金水準は，既存の単一道路区間での場合と一致している．本研究は，多数の道路区間と結節点から成る道

路網を仮定している．しかし既存研究では，便益関数アプローチによる全ての道路に料金を課した場合を適用している（例えば，Yang and Huang (2005)[4]）．便益関数は，消費者余剰として定義される．道路ネットワーク均衡は，料金を考慮した経路交通量に関して便益関数を最大化することで得られる．つまり，効用関数アプローチでも同様の定式化となる．しかし相違点は，最適料金水準の導出にある．便益関数アプローチの場合，全ての道路に対する最適料金は，料金を外生的に与えるのではなく，料金を内生化して区間交通量について便益関数を最大化する．これは，システム最適と呼ばれる．一方，効用関数アプローチは，料金に関して間接効用関数を最大化（財源調達に伴う厚生損失を最小化）する．便益関数アプローチでは，特定の道路に料金を課す場合は，最適な料金水準が内生的に決まるため，技術的な問題からとても適用することができない．しかし，最適な区間交通量を直接計算できるという長所がある．

４－４－２　MCF＝－１の場合の特定の道路の料金水準

この場合は，対象とする道路以外の料金は，何れかの水準に同定されており，対象とする道路の料金水準のみを最適化することを意味している．ここでは，建設対象の道路区間以外はすでに建設は完了しており，必ずしも最適に設定されているわけではないが，何れかの料金水準が設定されている状況を考えている．

社会的厚生関数 W を最大にする特定の道路の最適料金水準についての解は，特定の道路区間 a とそれ以外の道路区間 a' に分けて整理することで導出する．まず，式(4.41)について整理すると，社会的厚生関数を最大にするような式(4.46)を得る．

$$\frac{\partial W}{\partial P_a} = \frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF\left(x_a + P_a \frac{\partial x_a}{\partial P_a} + \sum_{a' \neq a} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) \tag{4.46}$$

続いて，式(4.15)に示した $\partial V / \partial P_a$ について整理すると，式(4.47)に示す通りとなる．

$$\frac{\partial V}{\partial P_a} = -x_a \left(1 + w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \frac{\partial x_a}{\partial P_a} \right) - \sum_{a' \neq a} x_{a'} \left(w \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) \tag{4.47}$$

求められた式(4.47)を，式(4.42)と同様に，社会的厚生関数 W を料金 P について偏微分した式(4.46)に代入することで，式(4.48)を導出する．

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial W}{\partial P_a} &= -x_a\left(1 + w\frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a}\frac{\partial x_a}{\partial P_a}\right) - \sum_{a'\neq a} x_{a'}\left(w\frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}}\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right) \\
&\quad - MCF\left(x_a + P_a\frac{\partial x_a}{\partial P_a} + \sum_{a'\neq a} P_{a'}\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}\right) = 0
\end{aligned}
\tag{4.48}
$$

この式(4.48)を，料金 P_a について整理して，MCF＝－１とおくと，式(4.49)に示す料金水準の式が求められる．

$$
P_a = w\frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a}x_a - \sum_{a'\neq a}\left(P_{a'} - w\frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}}x_{a'}\right)\frac{\dfrac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}}{\dfrac{\partial x_a}{\partial P_a}}
\tag{4.49}
$$

式(4.49)の右辺第１項は，４－４－１の場合と同じ限界混雑外部性である社会的限界費用を考慮した式である．右辺第２項は，料金の社会的限界費用からかい離していることによって発生している歪みを，少なくするように道路区間 a の料金を高く（あるいは低く）していることが分かる．ここで示した料金水準は，既存の高速道路ネットワークにおいて設定されている料金水準を考慮して，新規に建設される道路区間についてのみ，最適な料金水準が求められることを意味している．

４－４－３　MCF≠－１の場合の全ての道路の料金水準

社会的厚生関数 W を最大にするような全ての道路に料金を課す場合の水準は，式(4.42)を解くことで得られる．

具体的には，$a = 1,\cdots,A$ と仮定することで次に示す連立方程式(4.50)で表現される．

$$
\begin{aligned}
&\left(\frac{\partial x_1}{\partial P_1}\right)\left(P_1 + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_1}{\partial x_1}x_1\right) + \cdots + \left(\frac{\partial x_A}{\partial P_1}\right)\left(P_A + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_A}{\partial x_A}x_A\right) = -\left(1 + \frac{1}{MCF}\right)x_1 \\
&\left(\frac{\partial x_1}{\partial P_2}\right)\left(P_1 + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_1}{\partial x_1}x_1\right) + \cdots + \left(\frac{\partial x_A}{\partial P_2}\right)\left(P_A + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_A}{\partial x_A}x_A\right) = -\left(1 + \frac{1}{MCF}\right)x_2 \\
&\quad\vdots \\
&\left(\frac{\partial x_1}{\partial P_A}\right)\left(P_1 + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_1}{\partial x_1}x_1\right) + \cdots + \left(\frac{\partial x_A}{\partial P_A}\right)\left(P_A + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_A}{\partial x_A}x_A\right) = -\left(1 + \frac{1}{MCF}\right)x_A
\end{aligned}
\tag{4.50}
$$

行列形式で表すと，

$$
\begin{pmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial x_A}{\partial P_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_1}{\partial P_A} & \cdots & \frac{\partial x_A}{\partial P_A} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_1}{\partial x_1} x_1 \\ \vdots \\ P_A + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_A}{\partial x_A} x_A \end{pmatrix} = -\left(1+\frac{1}{MCF}\right)\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_A \end{pmatrix} \tag{4.51}
$$

式(4.51)の左辺の行列は，代替効果行列である．これは，本研究では式(4.1)に示す準線形の効用関数を仮定しているためである．ゆえに，所得効果は存在しない．ここで，逆行列が存在すると仮定する．その上で，クラメールの公式を適用して式(4.52)を得る．

$$
P_{a'} = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} - \frac{\left(1+\frac{1}{MCF}\right)\begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial P_1}, & \cdots & \frac{\partial x_{a-1}}{\partial P_1}, & x_1, & \frac{\partial x_{a+1}}{\partial P_1}, & \cdots & ,\frac{\partial x_A}{\partial P_1} \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial x_1}{\partial P_A}, & \cdots & \frac{\partial x_{a-1}}{\partial P_A}, & x_A, & \frac{\partial x_{a+1}}{\partial P_A}, & \cdots & ,\frac{\partial x_A}{\partial P_A} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial P_1} & \cdots & \frac{\partial x_A}{\partial P_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_1}{\partial P_A} & \cdots & \frac{\partial x_A}{\partial P_A} \end{vmatrix}} \tag{4.52}
$$

このとき，MCF が－１であったならば，式(4.52)の右辺第２項が消える．料金水準は，まさに右辺第１項の限界混雑外部性であり，式(4.45)と変わらない．MCF が－１でないとき，右辺第１項は，混雑外部性が MCF によって修正される．この修正は，一般税からの財源調達の歪みを最適料金水準に反映するために必要である．

式(4.52)の右辺第２項は，最適料金水準は混雑がない場合でも０ではないことを述べている．これは限界費用価格形成原理に基づく料金水準とは異なり，一般税収から調達する建設費の公的資金を削減するためである．

完全を期すために，単一道路区間および２道路区間の場合を示す．

まず，単一道路区間の料金水準は，式(4.53)となり，森杉，河野(2012) [5] が導出と計算に成功している通りである．

$$
P = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t(x)}{\partial x} x - \left(1+\frac{1}{MCF}\right)\frac{x}{\frac{\partial x}{\partial P}} \tag{4.53}
$$

また，２道路区間の a＝１，２の場合，分母は，

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial P_1} & \frac{\partial x_2}{\partial P_1} \\ \frac{\partial x_1}{\partial P_2} & \frac{\partial x_2}{\partial P_2} \end{vmatrix} = \frac{\partial x_1}{\partial P_1}\frac{\partial x_2}{\partial P_2} - \frac{\partial x_2}{\partial P_1}\frac{\partial x_1}{\partial P_2} \tag{4.54}$$

P_1 の分子は，

$$\begin{vmatrix} x_1 & \frac{\partial x_2}{\partial P_1} \\ x_2 & \frac{\partial x_2}{\partial P_2} \end{vmatrix} = \frac{\partial x_2}{\partial P_2} x_1 - \frac{\partial x_2}{\partial P_1} x_2 \tag{4.55}$$

P_2 の分子は，

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial P_1} & x_1 \\ \frac{\partial x_1}{\partial P_2} & x_2 \end{vmatrix} = \frac{\partial x_1}{\partial P_1} x_2 - \frac{\partial x_1}{\partial P_2} x_1 \tag{4.56}$$

ゆえに，式(4.57)と式(4.58)を得る．

$$P_1 = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t_1(x_1)}{\partial x_1} x_1 - \frac{\left(1+\frac{1}{MCF}\right)\left(\frac{\partial x_2}{\partial P_2} x_1 - \frac{\partial x_2}{\partial x_1} x_2\right)}{\frac{\partial x_1}{\partial P_1}\frac{\partial x_2}{\partial P_2} - \frac{\partial x_2}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial P_2}}, \tag{4.57}$$

$$P_2 = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t_2(x_2)}{\partial x_2} x_2 - \frac{\left(1+\frac{1}{MCF}\right)\left(\frac{\partial x_1}{\partial P_1} x_2 - \frac{\partial x_1}{\partial x_2} x_1\right)}{\frac{\partial x_1}{\partial P_1}\frac{\partial x_2}{\partial P_2} - \frac{\partial x_2}{\partial x_1}\frac{\partial x_1}{\partial P_2}} \tag{4.58}$$

この MCF が－１でないときの一般的な道路ネットワークを対象とした導出は，森杉，河野(2012) [5] の単純な道路区間を対象とした場合を除いて，既存研究では存在していない．

４－４－４　MCF≠－１の場合の特定の道路の料金水準

特定の道路に料金を課す場合は，式(4.42)を解くことで式を得られる．

$$P_a = -\frac{1}{MCF}\left(w\frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a}\right)x_a - \sum_{a'\neq a}\left(P_{a'} + \frac{w}{MCF}\frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'}\right)\frac{\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}}{\frac{\partial x_a}{\partial P_a}} - \left(1+\frac{1}{MCF}\right)\frac{x_a}{\frac{\partial x_a}{\partial P_a}} \tag{4.59}$$

この場合，MCF が－１である場合は，さきに示した式(4.49)と一致し，式(4.59)が一般形であることが分かった．また式(4.59)の内容を解釈すると，右辺第１項に示す交通量が１台増加したことにより増加する利用者全体の費用から，右辺第２項で示した他の道路区間全てで発生する渋滞などの混雑分だけ乖離している状態を表している．この導出は森杉，河野(2012)[5)]の並行道路区間を対象とした研究を除いて，既存研究では存在していない．

４－５ 二段階最適化モデル

ここでは，社会的厚生が最大になる料金水準を求める問題を考える．実際の利用者の均衡配分の計算を用いて，下位問題としての既存の利用者均衡条件の制約のもとで，上位問題としての社会的厚生が最大になるように，二段階の最適化問題として，最適料金水準を求めることとする．

４－５－１　上位問題

本研究では，国民全体の代表的な個人が，その効用を最大にするように，道路利用の選択を行う行動をとるものと想定する．つまり，道路利用者の経路選択行動によって，社会的厚生関数が最大になるような料金水準を求める．実際の計算では，下位問題の利用者均衡条件の制約のもとで，料金水準に応じた社会的厚生関数の値を求める問題を考える．

社会的厚生関数は，さきに示したように道路利用者の総消費者余剰である準線形の効用関数 V と道路建設費 I から道路料金収入 Px を引いた収入に関する納税者の厚生損失からなる式(4.60)で表すことができる．

$$W = V + MCF\left[\sum_{a'}\left(I_{a'} - P_{a'}x_{a'}\right)\right] \tag{4.60}$$

式(4.60)では，料金収入を除いた税による財源調達を考えているが，ここでは社会的費用のみを考慮した料金水準の導出と比較するため，建設費を除いた料金収入のみを考慮した関数として，完全代替の仮定を置いた利用者均衡配分の考え方を用いて，計算する方法を考える．

社会的厚生関数は，準線形の効用関数 V に，対象とする有料道路の道路料金収入 Px に厚生損失を考慮した MCF を掛け合わせた値を合計することで求めている．しかしここでは，既存の利用者均衡で用いられている目的関数と整合性を図るため，式(4.61)に示す最小化問題として，料金による財源調達に伴う厚生損失を目的関数 z から差し引くことで定義した．

$$\min Z = z_c - \left|MCF\right|\frac{P}{\alpha}x \tag{4.61}$$

ここで，

z_c : 利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ の平均費用に交通量を乗じた総費用

P: 高速道路料金

α ：時間価値

である．

ここでは既存の配分手法を用いた最小化問題として最適な料金水準を求めているが，式(4.60)に示した効用最大化の場合と考え方は同じである．

このとき目的関数 Z は，道路利用者の走行時間の総和で考えているので，料金 P は，時間価値 α で割ることで料金の走行時間への換算を行い，整合を図った．ここで，目的関数 z_c は，利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ の平均費用に交通量を乗じた総費用に基づいて表現している点に注意が必要である．詳しくは，４－５－２にて述べる．以上の式(4.61)の目的関数 Z が最小となるような料金水準を最適解として求めた．

４－５－２　下位問題

ここで，利用者の経路間選択の行動は，ルート間の選択が完全代替を仮定した利用者均衡配分法を用いて表現し，道路利用者の総消費者余剰である準線形効用関数 V を求める．そこで，道路利用者の総消費者余剰である準線形効用関数 V を式(4.62)として表現した．

$$z_c = \sum_{a \in A} x_a t_a\left(\overline{x}_a\right) \tag{4.62}$$

ここで，

t_a ：道路区間 a の所要時間 t

x_a ：道路区間 a の交通量 x

$\overline{x}_a$ ：利用者均衡時の道路区間 a の交通量 x

である．この利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ における平均費用に交通量を乗じた式(4.62)となる場合は，総費用を表しており，利用者の効用を表現していることとなる．したがって，理論的な分析では，式(4.62)に示した目的関数 z_c が最小になるような料金Pを求める必要がある．しかし，実際の計算においては，交通量 x_a を内生的に決める必要があるため，既存の利用者均衡で用いられている目的関数 z を用いて，利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ を求める．

既存の利用者均衡で用いられている目的関数 z は，式(4.63)に示す通りである．

$$\min z = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a\left(w\right) dw \tag{4.63}$$

s. t.

$$x_a = \sum_{rs}\sum_k \delta^{rs}_{a,k} f^{rs}_k, \quad a \in A, k \in K, \tag{4.64}$$

$$d^{rs} = \sum_k f^{rs}_k, \quad k \in K, rs \in R, \tag{4.65}$$

$$f^{rs}_k \geq 0, x_a \geq 0 \quad a \in A, k \in K, rs \in R. \tag{4.66}$$

ここで,

t_a ：道路区間 a の所要時間 t

x_a ：道路区間 a の交通量 x

f^{rs}_k ：rs 間における経路 k の交通量

$\delta^{rs}_{a',k}$ ：OD ペア rs 間の第 k 経路が道路区間 a を含むとき：1，そうでないとき：0

d^{rs} ：OD ペア rs 間の経路交通量の合計

である．ここで示すモデルでは，完全代替モデルと同様な式(4.64)から式(4.66)に示すような制約条件を考慮している．ここでは，式(4.65)に示すように需要を固定している．

以上の式(4.63)の目的関数 z の積分で求めた値は，社会的限界費用の総費用ではなく，私的限界費用を合計した私的総費用である．そのため，式(4.62)に示すように，利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ の平均費用に交通量を乗じた総費用 z_c で表現する必要がある．

なぜならば，式(4.63)で示した既存の利用者均衡で用いられている目的関数 z の値は，時間平均費用曲線を積分形によって交通量 x_a を内生的に決めることで利用者均衡の計算している．これは，山内，竹内（1992）[6] や竹内（2006）[7] が示しているように，私的限界費用（社会的平均費用）として解釈することができ，その積分値は道路利用者の時間費用の総額（私的総費用）である．これは，個々の利用者が認識する利用者価格（利用者費用）であるので，利用者は，私的限界費用として認識して，これに基づいて道路利用の意思決定を行う．しかし，この場合は社会的限界費用と私的限界費用の間にかい離が存在し，その分だけ混雑などの外部不経済効果（外部費用）が発生していることになる．

このため，従来の均衡計算に用いられてきた等価な最適化問題の定式化は，理論的な分析において，そのままでは社会的な厚生最大化を表現することができない．ゆえに，式(4.62)に示すように，利用者均衡時の交通量 $\overline{x}_a$ の平均費用に交通量を乗じた総費用 z_c で表現する必要がある．

４－６ 数値計算例

これまで述べてきた一般的な道路ネットワークにおける料金設定は，ある道路区間，すなわち道路区間単位で料金を課す場合について対応している．しかし，高速道路と一般道路からなる全ての道路を対象に料金を課すことは，現在においても技術的な困難がある．実際，わが国の高速道路には料金が課されているが，一般道路には料金が課されていない．そこで，道路ネットワークの中で高速道路のみを料金設定の対象と考え，特定の道路に料金を課す場合を想定した料金水準を求める．

ここでは，まず議論を簡単化するために，１本の高速道路と，２本の一般道路からなる道路ネットワークを想定した．その上で，一般的なネットワークとして数値計算によく用いられる Sioux Falls のネットワークにおいて，特定の道路区間にのみ料金を課す場合を想定した．

わが国において，高速道路を含む配分計算では，高速転換率を用いて計算がなされている．しかし，ここでは，道路の所要時間の推計に用いられる，式(4.67)の米国道路局（US Bureau of Public Roads）が 1964 年の交通配分マニュアルにて示した，BPR 関数を用いた料金抵抗法に基づき，利用者均衡配分を行う．

$$t_i\left(x_i\right)=t_i^0\left\{1.0+a\left(\frac{x_i}{K_i}\right)^b\right\}+\frac{P}{\alpha} \tag{4.67}$$

ここで，

t_i^0 ：道路 i の自由走行時の所要時間

x_i ：道路 i の交通量

K_i ：道路 i の容量

P：高速道路の料金

a，b：パラメータ

である．

BPR 関数を用いる理由は，金森，河上(1999)[8] が，利用者均衡配分モデルにおける高速道路を料金抵抗法と高速転換率法の２つのモデルを用いて，名古屋市内交通の現況再現性などについて比較，検討を行なっており，その結果，いずれのモデルもある程度の現況再現性を持つことが言えるとしているからである．

ここで，二段階最適化モデルの下位問題で示した利用者均衡配分モデルの解法としてFrank-Wolfe法を用いる．具体的な解法は，土木学会（2006）[9)]に示されている，下記の手順に基づき計算を行った．

Step.０：初期実行可能解の設定

初期実行可能解（区間交通量の初期値）$x_a^{(1)}$を設定する．ここでは，全道路区間の交通量がゼロのときのコストパターン$\{t_a(0)\}$におけるAll-or-Nothing配分の結果を用いる．すなわち区間交通量が０のときのリンクコストを算出し，この状態で全OD交通量を最短経路に配分して，得られた区間交通量を$\{x_a^{(1)}\}$とする．ただし，ここでの最短経路探索は，道路区間の料金抵抗P/αを考慮したものであることに注意する．

Step.１：リンクコストの更新

区間交通量$\{x_a^{(n)}\}$に対するリンクコストを計算し，$\{t_a^{(n)}\}$とする．ただし，ここでのリンクコストは料金抵抗P/αを考慮したものである．

Step.２：降下方向ベクトルの探索

リンクコスト$\{t_a^{(n)}\}$の下で全 OD 交通量を最短経路に配分し，得られた区間交通量を$\{y_a^{(n)}\}$とする．ただし，ここでの最短経路探索は，道路区間の料金抵抗P/αを考慮したものであることに注意する．ここで，$\{y_a^{(n)}\}$は補助解と呼ばれ，降下ベクトル$\{d_a^{(n)}\}$を次式により計算する．

$$d_a^{(n)} = y_a^{(n)} - x_a^{(n)} \tag{4.68}$$

Step.３：降下ステップサイズの探索

降下ステップサイズ$\varsigma^{(n)}$を用いて，区間交通量を

$$x_a^{(n+1)} = x_a^{(n)} + \varsigma^{(n)} \cdot d_a^{(n)} \tag{4.69}$$

とおく．この$\{x_a^{(n+1)}\}$を代入した目的関数

$$Z^{(n+1)} = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^{(n+1)}} t_a(w) \cdot dw = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a^{(n)} + \varsigma^{(n)} \cdot d_a^{(n)}} t_a(w) \cdot dw \tag{4.70}$$

の値がなるべく小さくなるような$\varsigma^{(n)}$を求める．ただし，$0 \le \varsigma^{(n)} \le 1$である．このとき，$\{x_a^{(n)}\}$と$\{d_a^{(n)}\}$は定数であるから，$Z^{(n+1)}$は$\varsigma^{(n)}$のみの関数となるので，非線形一次元探索のアルゴリズムを利用して求めることが可能である．

Step.４：解の更新

得られた降下ステップサイズ $\varsigma^{(n)}$ を，Step. ３の式(4.69)に代入して，区間交通量 $\left\{x_a^{(n+1)}\right\}$ を計算する．

Step. ５：収束判定

収束条件式が満たされていなければ，$n=n+1$ として Step. １に戻る．収束条件式が満たされていれば，計算を終了し区間交通量 $\left\{x_a^{(n+1)}\right\}$ を解として出力する．

４－６－１　計算対象の道路ネットワーク

数値計算は，さきに述べたようにシンプルな道路ネットワークと Sioux Falls テストネットワークの２つを対象に行った．前者は，議論を簡単化するために，１本の高速道路と，２本の一般道路からなる道路を想定して，さきの計算方法に基づき，Excel を用いた計算を行った．また後者については，一般的なネットワークとして数値計算によく用いられる Sioux Falls のネットワークにおいて，交通需要予測ソフトウェア VISUM を用いて計算を行った．このときいずれの場合も，特定の道路にのみ料金を課す場合を想定した．

（1）シンプルな道路ネットワーク

これらの道路は，図４－１に示すような道路ネットワークとして構成されており，表４－１に示す距離，容量の道路ネットワークを考えている．ここで道路利用者の走行費用は，道路利用による走行（所要）時間の費用と高速道路における道路利用の料金のみを考えるものとする．このシンプルな道路ネットワークを対象に，OD 間交通量は一定として，固定需要型の利用者均衡配分を行う．

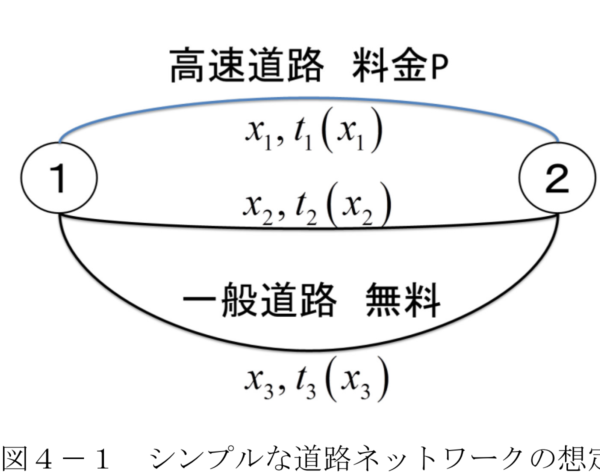

図４－１　シンプルな道路ネットワークの想定

表４－１　道路ネットワークの条件

道　路	長　さ（km）	容　量（台／h）
１（高速道路）	8.0	2,500
２（一般道路）	10.0	1,800
３（一般道路）	15.0	1,800

このときの交通量，時間評価値，自由走行速度は，以下のように設定する．

ゾーン①からゾーン②への総交通量　　：N＝4,000（台／h）

時間評価値　　：α＝2,000（円／h）

自由走行速度　　：v_f＝60（km／h）

また，各道路区間の所要時間は，次の式(4.67)に示す BPR 関数によって計算し，そのパラメータとして，日本の道路と類似しているオランダの道路で計測された a＝2.62，b＝５という数値を用いる．

（２）Sioux Falls テストネットワーク

Sioux Falls テストネットワークは，Hillel Bar-Gera[11)]によって提供されているデータを基に作成した．本研究で作成した道路ネットワークは，図４－２に示すように構成されており，表４－２に示す距離，容量とした．ここで道路利用者の走行費用は，道路利用による走行（所要）時間の費用と道路利用の料金のみを考えるものとする．この Sioux Falls テストネットワークを対象に，OD 間交通量は一定として，固定需要型の利用者均衡配分を行う．

このときの交通量は，表４－３に示す通り設定し，時間評価値，自由走行速度並びに料金を課す道路区間は，以下の通り設定する．

時間評価値　　：α=1,800（円／h）

自由走行速度　　：v_f＝60（km／h）

課金対象区間　　：区間番号 28

また，各道路区間の所要時間は，式(4.67)に示す BPR 関数を用いて計算し，そのパラメータとして，a＝0.15，b＝４という数値を用いる．

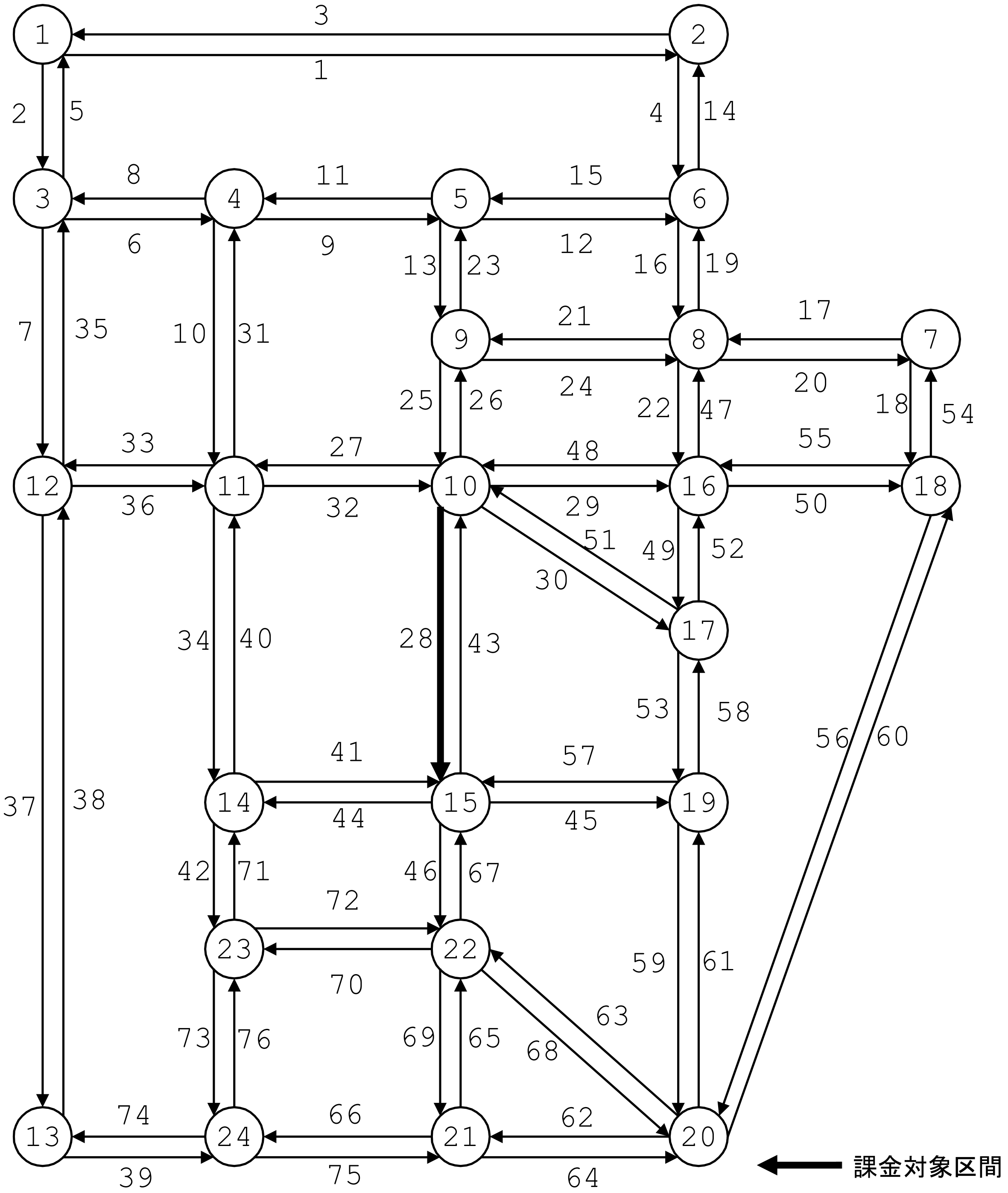

図４－２　Sioux Fallsテストネットワーク

(Hillel Bar-Gera[11]), Hai Yang and Meng Qiang (Hong Kong University of Science and Technology) により作成されたものを基に加筆)

表４－２　Sioux Fallsテストネットワークの容量と区間距離

区間番号	始点	終点	容量(台)	距離(km)
1	1	2	25900	6
2	1	3	23403	4
3	2	1	25900	6
4	2	6	4958	5
5	3	1	23403	4
6	3	4	17111	4
7	3	12	23403	4
8	4	3	17111	4
9	4	5	17783	2
10	4	11	4909	6
11	5	4	17783	2
12	5	6	4948	4
13	5	9	10000	5
14	6	2	4958	5
15	6	5	4948	4
16	6	8	4899	2
17	7	8	7842	3
18	7	18	23403	2
19	8	6	4899	2
20	8	7	7842	3
21	8	9	5050	10
22	8	16	5046	5
23	9	5	10000	5
24	9	8	5050	10
25	9	10	13916	3
26	10	9	13916	3
27	10	11	10000	5
28	10	15	13512	6
29	10	16	4855	4
30	10	17	4994	8
31	11	4	4909	6
32	11	10	10000	5
33	11	12	4909	6
34	11	14	4877	4
35	12	3	23403	4
36	12	11	4909	6
37	12	13	25900	3
38	13	12	25900	3
39	13	24	5091	4
40	14	11	4877	4
41	14	15	5128	5
42	14	23	4925	4
43	15	10	13512	6
44	15	14	5128	5
45	15	19	14565	3
46	15	22	9599	3
47	16	8	5046	5
48	16	10	4855	4
49	16	17	5230	2
50	16	18	19680	3
51	17	10	4994	8
52	17	16	5230	2
53	17	19	4824	2
54	18	7	23403	2
55	18	16	19680	3
56	18	20	23403	4
57	19	15	14565	3
58	19	17	4824	2
59	19	20	5003	4
60	20	18	23403	4
61	20	19	5003	4
62	20	21	5060	6
63	20	22	5076	5
64	21	20	5060	6
65	21	22	5230	2
66	21	24	4885	3
67	22	15	9599	3
68	22	20	5076	5
69	22	21	5230	2
70	22	23	5000	4
71	23	14	4925	4
72	23	22	5000	4
73	23	24	5079	2
74	24	13	5091	4
75	24	21	4885	3
76	24	23	5079	2

表４－３　Sioux Falls テストネットワークの OD 間交通量

O＼D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	100	100	500	200	300	500	800	500	1300	500	200	500	300	500	500	400	100	300	300	100	400	300	100
2	100	0	100	200	100	400	200	400	200	600	200	100	300	100	100	400	200	0	100	100	0	100	0	0
3	100	100	0	200	100	300	100	200	100	300	300	200	100	100	100	200	100	0	0	0	0	100	100	0
4	500	200	200	0	500	400	400	700	700	1200	1400	600	600	500	500	800	500	100	200	300	200	400	500	200
5	200	100	100	500	0	200	200	500	800	1000	500	200	200	100	200	500	200	0	100	100	100	200	100	0
6	300	400	300	400	200	0	400	800	400	800	400	200	200	100	200	900	500	100	200	300	100	200	100	100
7	500	200	100	400	200	400	0	1000	600	1900	500	700	400	200	500	1400	1000	200	400	500	200	500	200	100
8	800	400	200	700	500	800	1000	0	800	1600	800	600	600	400	600	2200	1400	300	700	900	400	500	300	200
9	500	200	100	700	800	400	600	800	0	2800	1400	600	600	600	900	1400	900	200	400	600	300	700	500	200
10	1300	600	300	1200	1000	800	1900	1600	2800	0	4000	2000	1900	2100	4000	4400	3900	700	1800	2500	1200	2600	1800	800
11	500	200	300	1500	500	400	500	800	1400	3900	0	1400	1000	1600	1400	1400	1000	100	400	600	400	1100	1300	600
12	200	100	200	600	200	200	700	600	600	2000	1400	0	1300	700	700	700	600	200	300	400	300	700	700	500
13	500	300	100	600	200	200	400	600	600	1900	1000	1300	0	600	700	600	500	100	300	600	600	1300	800	800
14	300	100	100	500	100	100	200	400	600	2100	1600	700	600	0	1300	700	700	100	300	500	400	1200	1100	400
15	500	100	100	500	200	200	500	600	1000	4000	1400	700	700	1300	0	1200	1500	200	800	1100	800	2600	1000	400
16	500	400	200	800	500	900	1400	2200	1400	4400	1400	700	600	700	1200	0	2800	500	1300	1600	600	1200	500	300
17	400	200	100	500	200	500	1000	1400	900	3900	1000	600	500	700	1500	2800	0	600	1700	1700	600	1700	600	300
18	100	0	0	100	0	100	200	300	200	700	200	200	100	100	200	500	600	0	300	400	100	300	100	0
19	300	100	0	200	100	200	400	700	400	1800	400	300	300	300	800	1300	1700	300	0	1200	400	1200	300	100
20	300	100	0	300	100	300	500	900	600	2500	600	500	600	500	1100	1600	1700	400	1200	0	1200	2400	700	400
21	100	0	0	200	100	100	200	400	300	1200	400	300	600	400	800	600	600	100	400	1200	0	1800	700	500
22	400	100	100	400	200	200	500	500	700	2600	1100	700	1300	1200	2600	1200	1700	300	1200	2400	1800	0	2100	1100
23	300	0	100	500	100	100	200	300	500	1800	1300	700	800	1100	1000	500	600	100	300	700	700	2100	0	700
24	100	0	0	200	0	100	100	200	200	800	600	500	700	400	400	300	300	0	100	400	500	1100	700	0

４－６－２　利用者均衡配分に基づく料金変化に伴う最適料金水準

（1）シンプルな道路ネットワーク

シンプルな道路ネットワークにおいて，既存の利用者均衡配分モデルの解法に基づき交通量の配分を行った結果を整理する．ここでの料金設定は，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，まず，料金水準を 100 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．ここでは，需要を固定しているため，高速道路における料金が増加することで費用が増加し，高速道路から他の一般道路に転換する交通量が発生する．

以上の想定のもとで計算した結果，料金水準に伴う交通量の変化は，図４－３と表４－４に示す通りとなった．一般道路では，道路容量に対する交通量も上昇するため，高速道路は比較的空いているにも関わらず，図４－４に示すように一般道路の混雑率が上昇していることが分かる．これは，道路利用者である代表的な個人が道路利用の選択を行う行動をとるとき，混雑の発生によりかかる費用よりも料金のほうが大きいことを示している．

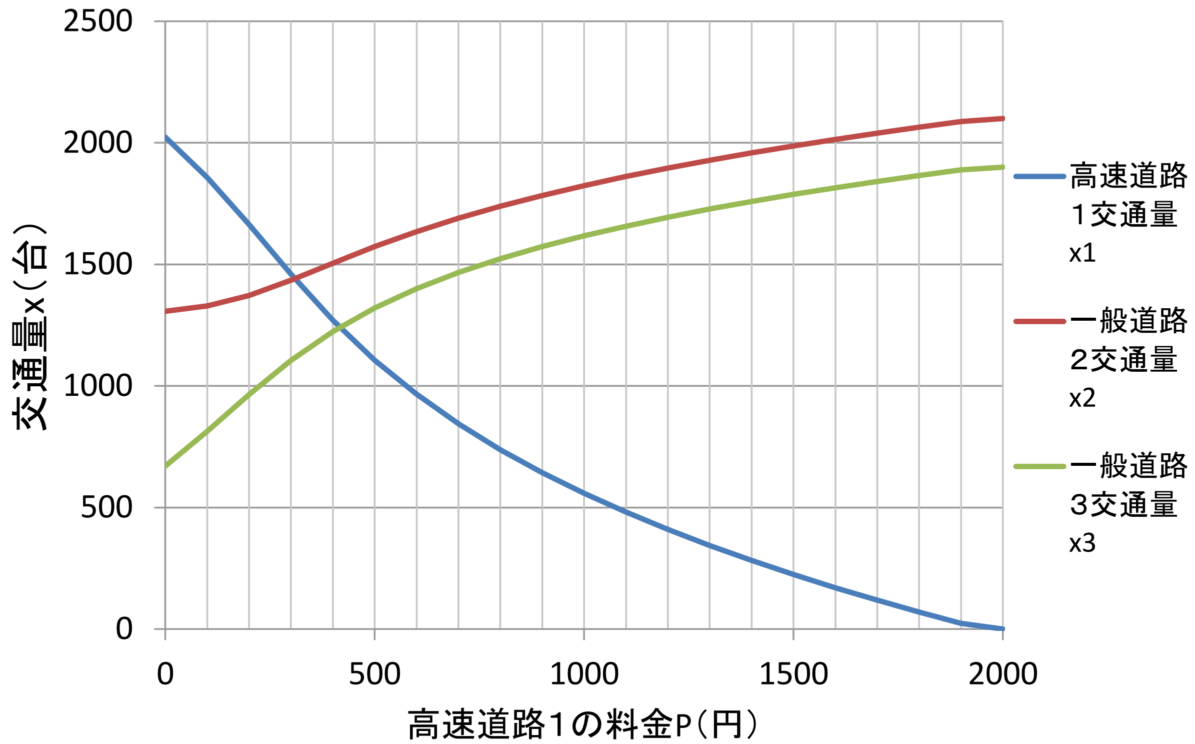

図４－３　シンプルな道路ネットワークにおける料金と交通量の関係

表４－４　シンプルな道路ネットワークにおける料金と交通量の関係

料金Ｐ（１km あたり）（円）	高速道路１交通量 x1（台）	一般道路２交通量 x2（台）	一般道路３交通量 x3（台）
0（0.0）	2023.5	1306.6	669.9
100（12.5）	1857.3	1328.7	814.0
200（25.0）	1663.7	1371.8	964.5
300（37.5）	1460.4	1434.6	1105.0
400（50.0）	1270.9	1505.2	1223.9
500（62.5）	1106.3	1573.1	1320.7
600（75.0）	965.6	1634.6	1399.9
700（87.5）	844.2	1689.6	1466.2
800（100.0）	738.0	1738.9	1523.1
900（112.5）	643.6	1783.5	1572.9
1000（125.0）	558.5	1824.2	1617.3
1100（137.5）	481.0	1861.7	1657.3
1200（150.0）	409.8	1896.3	1693.9
1300（162.5）	343.8	1928.7	1727.5
1400（175.0）	282.3	1959.0	1758.8
1500（187.5）	224.6	1987.5	1787.9
1600（200.0）	170.2	2014.5	1815.3
1700（212.5）	118.8	2040.1	1841.1
1800（225.0）	69.9	2064.5	1865.6
1900（237.5）	23.4	2087.8	1888.8
2000（250.0）	0.0	2099.5	1900.5

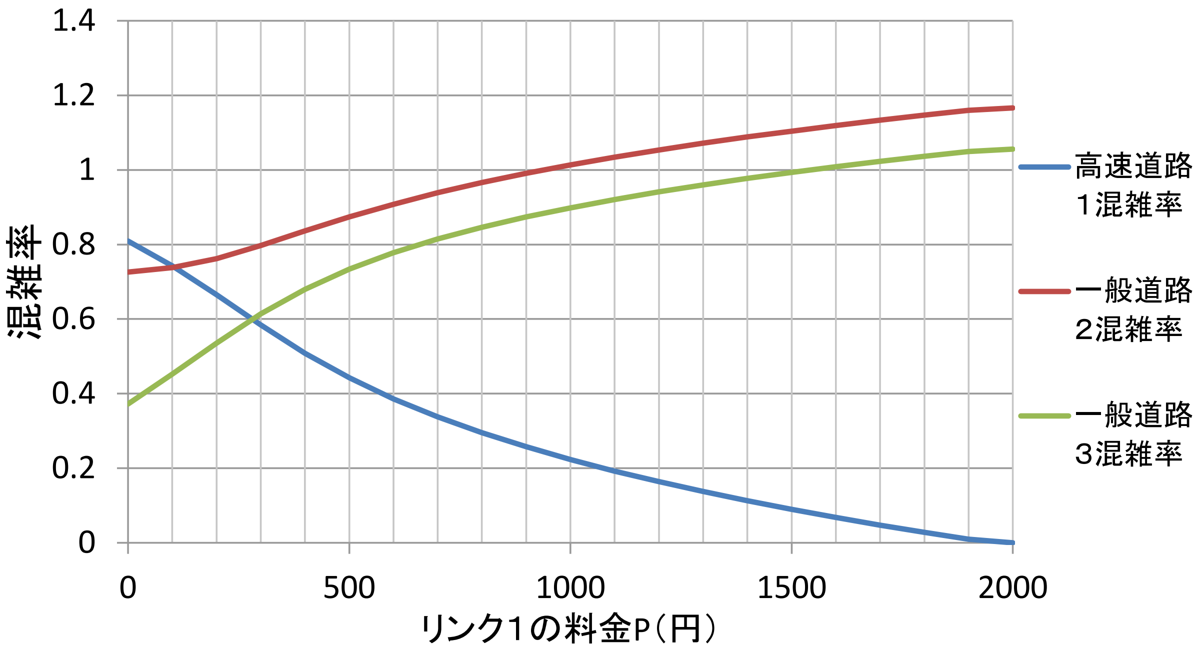

図４－４　シンプルな道路ネットワークにおける混雑率（交通量／道路容量）

ここで，利用者均衡に基づく交通量配分で求められた道路利用者の走行時間を，時間価値に基づき費用として換算し，その総和として総走行時間費用 *TC* を式(4.71)に示すように考える．また道路整備の財源として，高速道路の利用者に料金を課すことで得られる収入の変化を推計した．

$$TC = \sum_a x_a t\left(\overline{x}_a\right) \cdot \alpha \tag{4.71}$$

ここで，

t_a ：道路区間 a の所要時間 t

x_a ：道路区間 a の交通量 x

$\overline{x}_a$ ：利用者均衡時の道路区間 a の交通量 x

α ：時間評価値（2,000（円／h））

である．

これらの指標に関する計算結果は，図４－５と表４－５に示す通り，高速道路の料金水準が P=200（円）の場合に総走行時間が最小値 TC=1,898,700（円）となる．料金水準が０円の時の利用者均衡状態に対して，総走行時間費用が若干であるが減少している．

そこで，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，最適料金水準と考えられる 200 円を中心に，0 円から 400 円までの場合について 10 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．この料金水準の変化に伴う均衡交通量を計算した結果，図４－６と表４－６に示す通りとなり，高速道路の料金水準が，P=160（円）の場合に総走行時間が最小値 TC=1,888,927（円）となる．つまり，料金水準が０円の時の利用者均衡状態に対して，総走行時間費用が減少している．このことは，一定の交通需要の場合においても，適切な料金を課すことで，道路ネットワークでの社会的厚生水準を改善できることが示されている．しかし，料金水準が一定値以上に増大すると，社会的な費用すなわち総走行時間費用が増大し，料金が設定されている高速道路の利用者数が減少するため，料金収入も減少することがわかる．つまり，これまでの総走行時間費用で表される社会的費用を最小化するような料金水準の導出では，160 円が最適であることが求められており，これは，財源調達に伴う厚生損失がない状況の，MCF が 1.0 の場合であると考えられる．

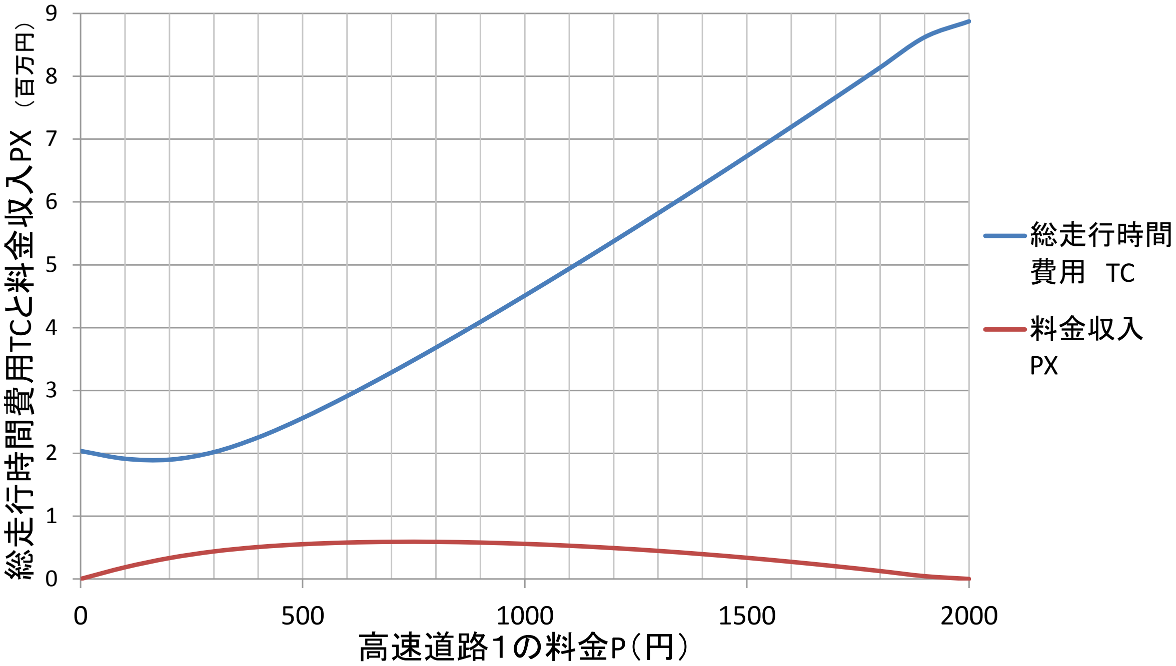

図４－５　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入

表４－５　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入

料金Ｐ（１km あたり）（円）	総走行時間費用 TC（円）	料金収入 PX（円）
0（0.0）	2,037,417	0
100（12.5）	1,913,364	185,727
200（25.0）	1,898,700	332,743
300（37.5）	2,018,657	438,126
400（50.0）	2,253,188	508,373
500（62.5）	2,560,945	553,142
600（75.0）	2,911,351	579,333
700（87.5）	3,287,985	590,954
800（100.0）	3,682,541	590,390
900（112.5）	4,090,626	579,200
1000（125.0）	4,509,705	558,499
1100（137.5）	4,938,284	529,120
1200（150.0）	5,375,244	491,753
1300（162.5）	5,819,849	446,951
1400（175.0）	6,271,535	395,183
1500（187.5）	6,729,823	336,859
1600（200.0）	7,194,342	272,329
1700（212.5）	7,664,760	201,908
1800（225.0）	8,140,793	125,875
1900（237.5）	8,622,183	44,481
2000（250.0）	8,875,189	0

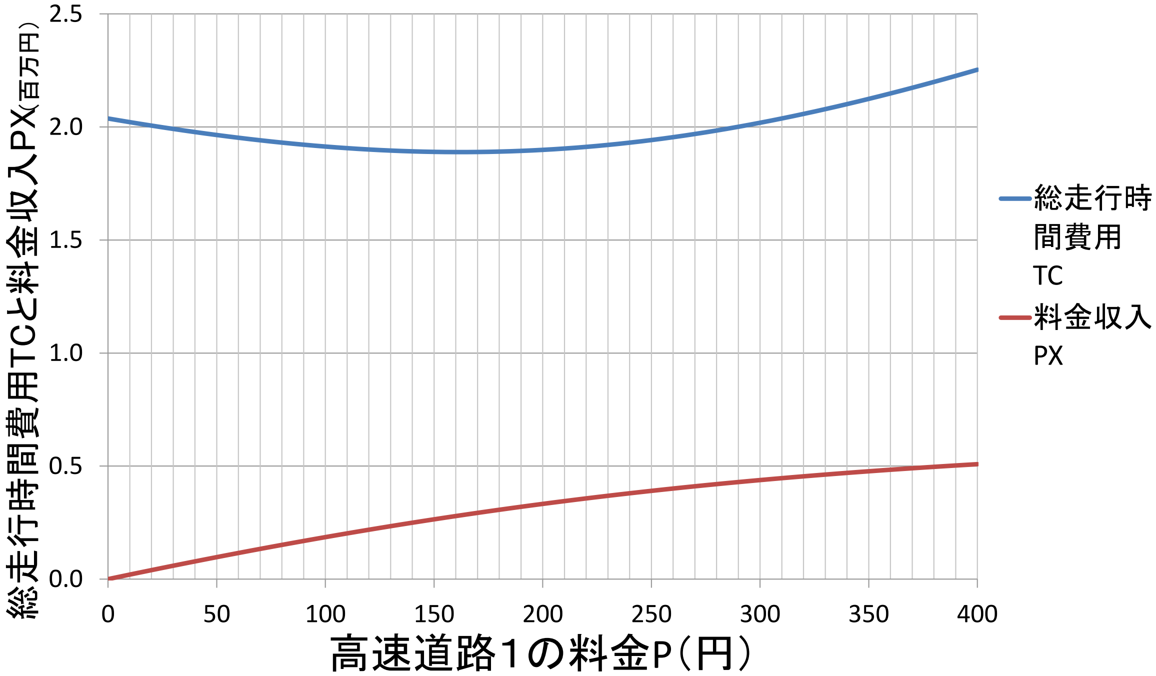

図４－６　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入（0 円から 400 円）

表４－６　シンプルな道路ネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から 400 円）

料金Ｐ（１km あたり）（円）	総走行時間費用 TC（円）	料金収入 PX（円）
0（0.0）	2,037,417	0
10（1.3）	2,021,337	20,082
20（2.5）	2,005,956	39,854
30（3.8）	1,991,319	59,305
40（5.0）	1,977,466	78,428
50（6.3）	1,964,442	97,211
60（7.5）	1,952,293	115,647
70（8.8）	1,941,063	133,725
80（10.0）	1,930,801	151,437
90（11.3）	1,921,552	168,774
100（12.5）	1,913,364	185,727
110（13.8）	1,906,281	202,289
120（15.0）	1,900,349	218,451
130（16.3）	1,895,609	234,208
140（17.5）	1,892,102	249,552
150（18.8）	1,889,863	264,479
160（20.0）	1,888,927	278,985
170（21.3）	1,889,321	293,065
180（22.5）	1,891,070	306,719
190（23.8）	1,894,192	319,945
200（25.0）	1,898,700	332,743
210（26.3）	1,904,601	345,116
220（27.5）	1,911,897	357,065
230（28.8）	1,920,581	368,595
240（30.0）	1,930,643	379,711
250（31.3）	1,942,067	390,420
260（32.5）	1,954,830	400,727
270（33.8）	1,968,904	410,643
280（35.0）	1,984,257	420,175
290（36.3）	2,000,855	429,332
300（37.5）	2,018,657	438,126
310（38.8）	2,037,622	446,567
320（40.0）	2,057,707	454,664
330（41.3）	2,078,865	462,429
340（42.5）	2,101,051	469,873
350（43.8）	2,124,219	477,006
360（45.0）	2,148,321	483,839
370（46.3）	2,173,314	490,383
380（47.5）	2,199,151	496,646
390（48.8）	2,225,790	502,640
400（50.0）	2,253,188	508,373

（2）Sioux Falls テストネットワーク

Sioux Falls テストネットワークにおいて，既存の利用者均衡配分モデルに基づき交通量の配分を行った結果を整理する．さきに示した，シンプルな道路ネットワークでの想定と同様に，ここでの料金設定は，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，まず，料金水準を 100 円単位で設定した場合の交通量の配分を利用者均衡に基づいて行う．交通量配分で求められた道路利用者の走行時間を，時間価値に基づき費用として換算し，その総和として総走行時間費用 TC を式(4.71)に示すように考える．また道路整備の財源として，高速道路の利用者に料金を課すことで得られる収入の変化を推計した．このとき，時間評価値 α は 1,800（円／h）として計算した．

この想定のもとで計算した結果，総走行時間費用と料金収入は，図４－７と表４－７なった．ここでは，対象道路の料金水準が P=０（円）の場合に総走行時間が最小値 TC=224,408,950（円）となる．また，P=1,400（円）までと P=1,500（円）からの総走行時間費用の傾向が変化しているのは，課金対象区間の走行時間費用より，周辺道路区間を通る走行時間費用が低くなり，利用される経路が完全代替の仮定に基づき変化したためである．

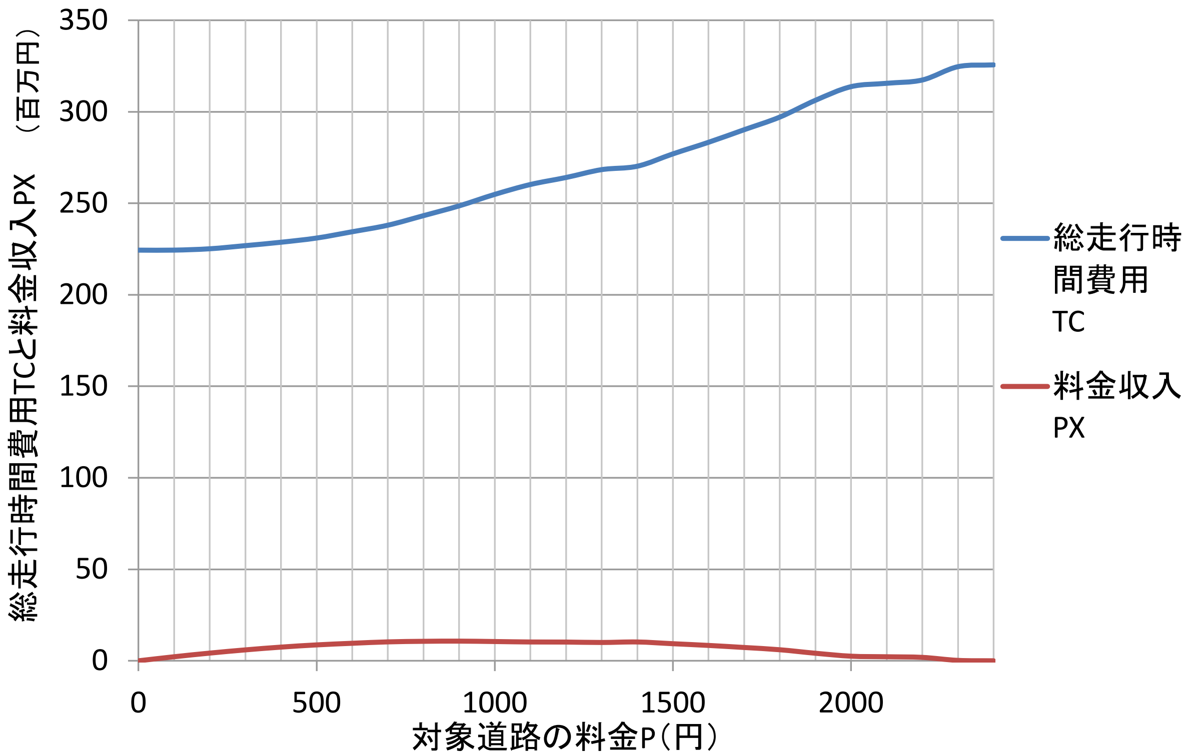

図４－７　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入

表４－７　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入

料金 P（1km あたり）（円）	総走行時間費用 TC（円）	料金収入 PX（円）
0（0.0）	224,408,950	0
100（16.7）	224,423,852	2,210,448
200（33.3）	225,156,885	4,202,565
300（50.0）	226,872,767	5,963,735
400（66.7）	228,727,925	7,475,756
500（83.3）	231,019,682	8,685,112
600（100.0）	234,465,644	9,573,731
700（116.7）	238,041,255	10,334,195
800（133.3）	243,256,717	10,647,783
900（150.0）	248,602,880	10,744,320
1000（166.7）	254,880,464	10,523,694
1100（183.3）	260,281,378	10,279,188
1200（200.0）	264,104,820	10,234,010
1300（216.7）	268,405,719	10,010,000
1400（233.3）	270,266,733	10,282,681
1500（250.0）	277,013,332	9,335,273
1600（266.7）	283,350,775	8,395,524
1700（283.3）	290,219,876	7,270,510
1800（300.0）	297,123,610	6,031,752
1900（316.7）	306,293,556	4,118,266
2000（333.3）	313,751,620	2,514,087
2100（350.0）	315,590,914	2,204,047
2200（366.7）	317,392,280	1,866,460
2300（383.3）	324,663,474	222,599
2400（400.0）	325,646,486	0

そこで，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，0 円から 400 円までの場合について 10 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．

この料金水準の変化に伴う均衡交通量を計算した結果，図４－８と表４－８に示す通りとなった．総走行時間費用が最小となるのは，対象道路の料金水準が P=30（円）の場合で，総走行時間費用が TC=224,362,248（円）となるときである．ここでは，より一般的なネットワークを対象としたが，このことは，一定の交通需要の場合においても，適切な料金を課すことで，道路ネットワークでの社会的厚生水準を改善できることが示されている．しかし，料

金水準が一定値以上に増大すると，社会的な費用すなわち総走行時間費用が増大し，料金が設定されている道路区間の利用者数が減少するため，料金収入も減少することがわかる.

つまり，これまでの総走行時間費用で表される社会的費用を最小化するような料金水準の導出では，30 円が最適であることが求められており，これは，MCF が 1.0 の場合であると考えられる.

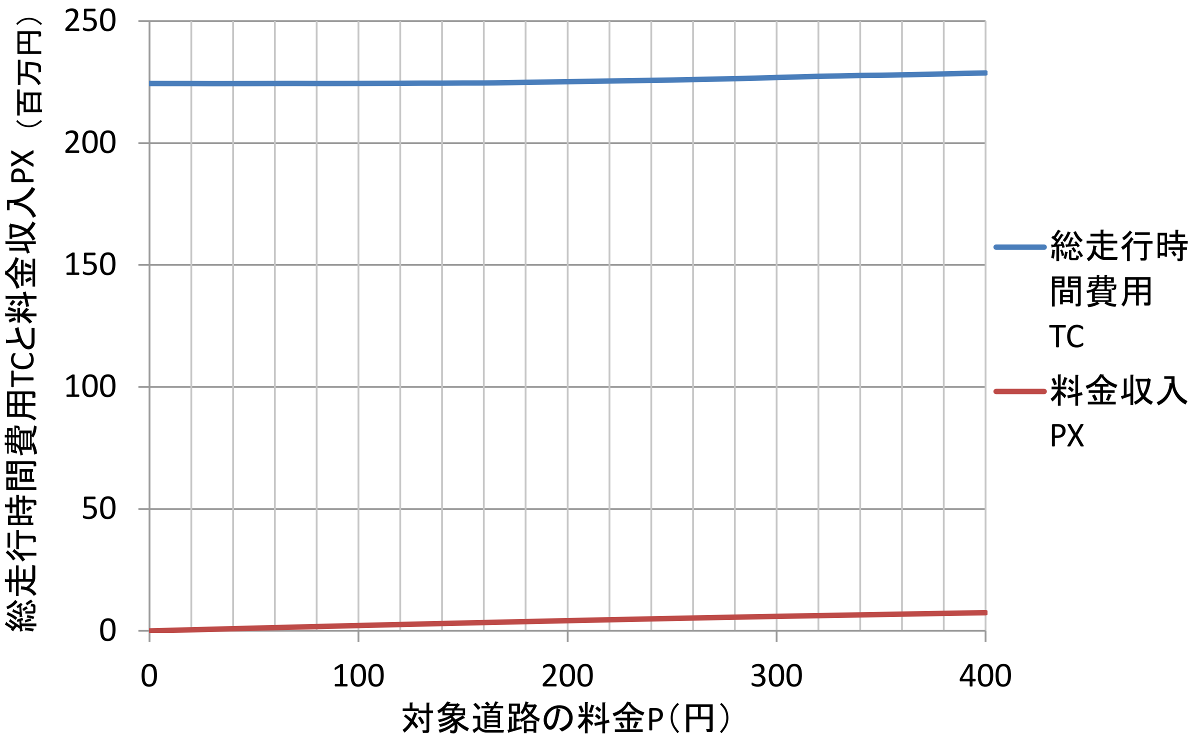

図４－８　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入（０円から 400 円）

表４－８　Sioux Falls テストネットワークでの総走行時間費用と料金収入(０円から 400 円)

料金 P（1km あたり）（円）	総走行時間費用 TC（円）	料金収入 PX（円）
0（0.0）	224,408,950	0
10（1.7）	224,398,060	230,190
20（3.3）	224,395,807	458,393
30（5.0）	224,362,248	684,602
40（6.7）	224,376,836	908,712
50（8.3）	224,387,361	1,130,589
60（10.0）	224,408,835	1,350,965
70（11.7）	224,423,933	1,568,753
80（13.3）	224,403,472	1,785,078
90（15.0）	224,407,646	1,999,254
100（16.7）	224,423,852	2,210,448
110（18.3）	224,450,560	2,419,740
120（20.0）	224,476,807	2,627,043
130（21.7）	224,546,115	2,832,185
140（23.3）	224,547,063	3,034,424
150（25.0）	224,610,804	3,234,046
160（26.7）	224,618,813	3,433,387
170（28.3）	224,729,291	3,629,386
180（30.0）	224,878,859	3,822,591
190（31.7）	225,009,813	4,013,387
200（33.3）	225,156,885	4,202,565
210（35.0）	225,282,726	4,390,028
220（36.7）	225,426,666	4,574,005
230（38.3）	225,560,804	4,756,696
240（40.0）	225,692,070	4,934,988
250（41.7）	225,826,369	5,113,190
260（43.3）	226,023,447	5,289,454
270（45.0）	226,200,980	5,467,820
280（46.7）	226,391,054	5,634,672
290（48.3）	226,598,186	5,801,603
300（50.0）	226,872,767	5,963,735
310（51.7）	227,093,342	6,120,500
320（53.3）	227,351,817	6,268,883
330（55.0）	227,501,981	6,418,975
340（56.7）	227,704,548	6,574,570
350（58.3）	227,783,932	6,731,018
360（60.0）	227,956,783	6,885,245
370（61.7）	228,136,463	7,039,476
380（63.3）	228,334,235	7,188,865
390（65.0）	228,563,045	7,338,181
400（66.7）	228,727,925	7,475,756

４－６－３　MCF を考慮した社会的厚生関数に基づく最適料金水準

続いて，本研究で提示した MCF を考慮した場合の社会的厚生関数に基づく最適料金水準を求める．ここでは，既存の利用者均衡配分モデルの解法に基づき交通量の配分を行い，料金水準の変化に伴って求められる，社会的厚生関数で表される総走行時間（費用）について整理を行う．具体的には，既存の利用者均衡で用いられている目的関数 z に基づいて，均衡時の交通量の配分結果を求め，式(4.62)に示した目的関数 z_c から，財源調達による厚生損失を考慮したMCFの値に料金収入 Px を掛け合わせたものを引いた,式(4.61)を用いる.このとき,交通量の配分結果から社会的費用が最小となる，つまり社会的厚生水準が最大になるような料金水準を算出する．

（１）シンプルな道路ネットワーク

まずシンプルな道路ネットワークにおいて，MCF を考慮した場合の社会的厚生関数に基づく最適料金水準を求める．ここでの料金設定は，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，まずは料金水準を 100 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．

その結果，総走行時間（費用）として表現される目的関数 Z の値の変化は，図４－９と表４－９に示す通りとなった．

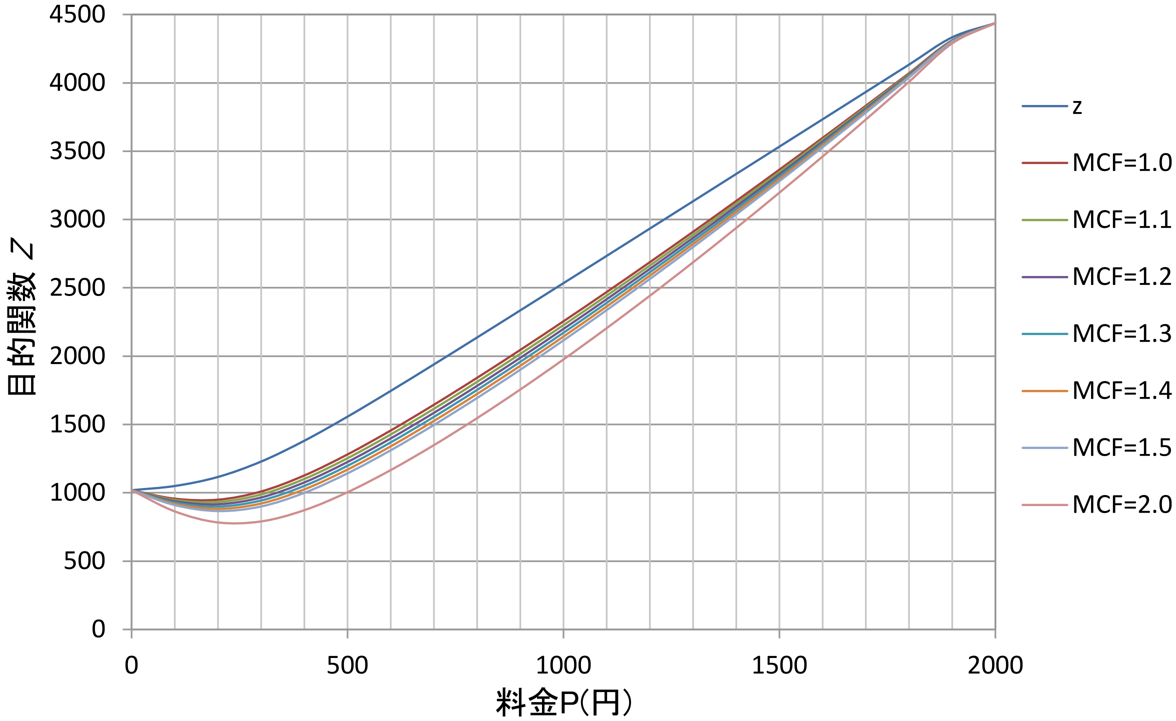

図４－９　シンプルな道路ネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 Z

表４－９　シンプルな道路ネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数 Z

料金Ｐ （１km あたり） （円）	z_c	MCF=1.0	MCF=1.1	MCF=1.2	MCF=1.3	MCF=1.4	MCF=1.5	MCF=2.0
0 (0.0)	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709
100 (12.5)	1049.545	956.682	947.395	938.109	928.823	919.537	910.250	863.818
200 (25.0)	1115.722	949.346	932.712	916.076	899.439	882.801	866.164	782.978
300 (37.5)	1228.392	1009.329	987.422	965.516	943.610	921.703	899.799	790.265
400 (50.0)	1380.781	1126.594	1101.176	1075.757	1050.338	1024.920	999.501	872.408
500 (62.5)	1557.043	1280.473	1252.815	1225.158	1197.501	1169.844	1142.187	1003.902
600 (75.0)	1745.342	1455.675	1426.709	1397.742	1368.775	1339.809	1310.842	1166.009
700 (87.5)	1939.469	1643.992	1614.445	1584.897	1555.349	1525.802	1496.254	1348.515
800 (100.0)	2136.465	1841.270	1811.751	1782.232	1752.712	1723.193	1693.673	1546.076
900 (112.5)	2334.913	2045.346	2016.353	1987.393	1958.433	1929.473	1900.513	1755.713
1000 (125.0)	2534.102	2254.864	2226.939	2199.014	2171.090	2143.164	2115.240	1975.617
1100 (137.5)	2733.702	2469.141	2442.686	2416.230	2389.774	2363.318	2336.862	2204.582
1200 (150.0)	2933.499	2687.622	2663.034	2638.447	2613.859	2589.271	2564.684	2441.745
1300 (162.5)	3133.400	2909.927	2887.579	2865.232	2842.884	2820.537	2798.189	2686.451
1400 (175.0)	3333.359	3135.766	3116.008	3096.249	3076.489	3056.730	3036.971	2938.175
1500 (187.5)	3533.341	3364.912	3348.069	3331.226	3314.383	3297.541	3280.698	3196.479
1600 (200.0)	3733.335	3597.171	3583.554	3569.938	3556.322	3542.705	3529.089	3461.006
1700 (212.5)	3933.334	3832.380	3822.284	3812.189	3802.093	3791.998	3781.902	3731.425
1800 (225.0)	4133.334	4070.396	4064.102	4057.808	4051.514	4045.221	4038.927	4007.458
1900 (237.5)	4333.332	4311.093	4308.869	4306.645	4304.421	4302.197	4299.970	4288.853
2000 (250.0)	4437.594	4437.594	4437.594	4437.594	4437.594	4437.594	4437.594	4437.594

このとき目的関数Zの値が最小になる料金水準は，表４－１０に示す通りである．

表４－１０　シンプルな道路ネットワークでの目的関数Zの最小値とその料金水準

MCF の値	料金 P（円）	目的関数 Z
1.0	200	949.346
1.1	200	932.712
1.2	200	916.076
1.3	200	899.439
1.4	200	882.801
1.5	200	866.164
2.0	200	782.978

課金額が最も小さいときに，目的関数z_cの値は最小となった．しかし，MCF を考慮する場合の目的関数Zの値は，MCF の値が大きくなるにつれて，それぞれ小さくなった．一方最適な料金は，P＝200（円）となり同じであった．

そこで，関数が下に凸となっていて最適料金水準として考えられる 0 円から 400 円までの場合について，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，最適料金水準と考えられる 200 円を中心に,0 円から 400 円までの場合について 10 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．その結果，総走行時間として表現している目的関数Zの値の変化は，図４－１０と表４－１１に示す通りである．

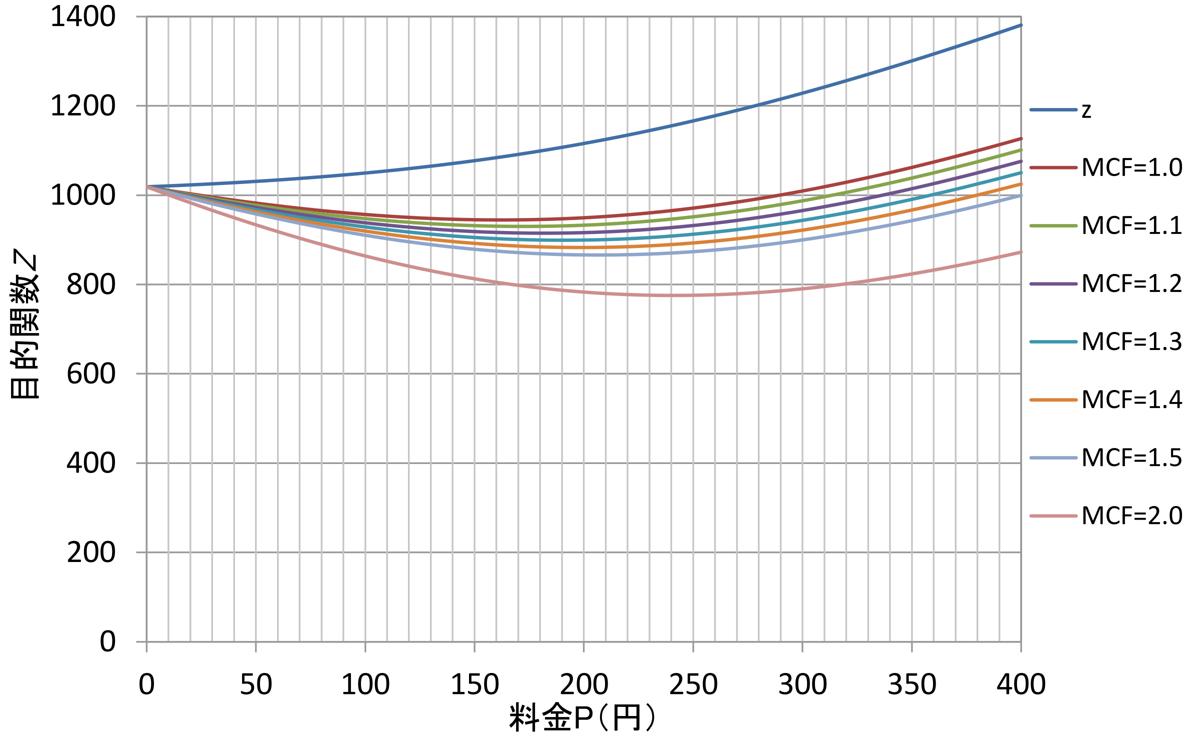

図４－１０　シンプルな道路ネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 Z（０円から 400 円）

表４－１１　シンプルな道路ネットワークでの料金とMCFに応じた目的関数 Z（０円から400円）

料金 P（１km あたり）（円）	Z	MCF=1.0	MCF=1.1	MCF=1.2	MCF=1.3	MCF=1.4	MCF=1.5	MCF=2.0
0 (0.0)	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709	1018.709
10 (1.3)	1020.709	1010.668	1009.664	1008.660	1007.656	1006.652	1005.648	1000.627
20 (2.5)	1022.905	1002.978	1000.986	998.993	997.000	995.008	993.015	983.051
30 (3.8)	1025.312	995.660	992.694	989.729	986.764	983.799	980.833	966.007
40 (5.0)	1027.947	988.733	984.812	980.890	976.969	973.048	969.126	949.519
50 (6.3)	1030.827	982.221	977.361	972.500	967.640	962.779	957.918	933.616
60 (7.5)	1033.970	976.146	970.364	964.582	958.799	953.017	947.235	918.323
70 (8.8)	1037.394	970.532	963.845	957.159	950.473	943.787	937.100	903.669
80 (10.0)	1041.119	965.400	957.828	950.257	942.685	935.113	927.541	889.682
90 (11.3)	1045.163	960.776	952.337	943.899	935.460	927.021	918.583	876.389
100 (12.5)	1049.545	956.682	947.395	938.109	928.823	919.536	910.250	863.818
110 (13.8)	1054.285	953.141	943.026	932.912	922.797	912.683	902.568	851.996
120 (15.0)	1059.400	950.174	939.252	928.329	917.407	906.484	895.562	840.949
130 (16.3)	1064.908	947.805	936.094	924.384	912.673	900.963	889.253	830.701
140 (17.5)	1070.827	946.051	933.573	921.096	908.618	896.140	883.663	821.275
150 (18.8)	1077.171	944.932	931.708	918.484	905.260	892.036	878.812	812.692
160 (20.0)	1083.956	944.464	930.514	916.565	902.616	888.667	874.717	804.971
170 (21.3)	1091.193	944.661	930.007	915.354	900.701	886.048	871.394	798.128
180 (22.5)	1098.895	945.535	930.199	914.863	899.527	884.191	868.855	792.176
190 (23.8)	1107.068	947.096	931.099	915.101	899.104	883.107	867.110	787.123
200 (25.0)	1115.722	949.350	932.713	916.076	899.438	882.802	866.164	782.978
210 (26.3)	1124.858	952.301	935.045	917.789	900.533	883.277	866.022	779.743
220 (27.5)	1134.481	955.948	938.095	920.242	902.388	884.535	866.682	777.416
230 (28.8)	1144.588	960.290	941.861	923.431	905.001	886.571	868.142	775.993
240 (30.0)	1155.177	965.322	946.336	927.351	908.365	889.380	870.394	775.466
250 (31.3)	1166.243	971.034	951.513	931.992	912.471	892.950	873.429	775.824
260 (32.5)	1177.779	977.415	957.378	937.342	917.306	897.269	877.233	777.051
270 (33.8)	1189.773	984.452	963.920	943.388	922.855	902.323	881.791	779.130
280 (35.0)	1202.216	992.129	971.120	950.111	929.102	908.094	887.085	782.041
290 (36.3)	1215.094	1000.427	978.961	957.494	936.028	914.561	893.094	785.761
300 (37.5)	1228.392	1009.329	987.422	965.516	943.610	921.703	899.797	790.265
310 (38.8)	1242.094	1018.811	996.483	974.154	951.826	929.498	907.169	795.528
320 (40.0)	1256.185	1028.853	1006.120	983.387	960.654	937.921	915.187	801.521
330 (41.3)	1270.647	1039.432	1016.311	993.190	970.068	946.947	923.825	808.218
340 (42.5)	1285.462	1050.526	1027.032	1003.538	980.045	956.551	933.057	815.589
350 (43.8)	1300.612	1062.109	1038.259	1014.409	990.558	966.708	942.858	823.606
360 (45.0)	1316.080	1074.161	1049.969	1025.777	1001.585	977.393	953.201	832.241
370 (46.3)	1331.848	1086.657	1062.138	1037.619	1013.100	988.580	964.061	841.466
380 (47.5)	1347.899	1099.576	1074.743	1049.911	1025.079	1000.246	975.414	851.253
390 (48.8)	1364.215	1112.895	1087.763	1062.631	1037.499	1012.367	987.235	861.575
400 (50.0)	1380.781	1126.594	1101.176	1075.757	1050.338	1024.920	999.501	872.408

このとき目的関数 Z が最小になるのは，表４－１２に示す通りである．

表４－１２　シンプルな道路ネットワークでの目的関数 Z の最小値とその料金水準（０円から 400 円）

MCF の値	料金 P（円）	目的関数 Z
1.0	160	944.464
1.1	170	930.007
1.2	180	914.863
1.3	190	899.104
1.4	200	882.802
1.5	210	866.022
2.0	240	775.466

この道路ネットワークにおいて，MCF が 1.0 のときの料金水準は，P=160（円）の場合に目的関数 Z が最小値となっている．この料金水準は，既存の利用者均衡配分に基づく料金変化に伴う総走行時間費用が最小になる料金水準として求められたものと同じである．また，料金水準が０円の時の利用者均衡状態に対して，総走行時間費用が減少している．つまり，適切な料金を課すことで，道路ネットワークでの社会的厚生水準を改善できることが示されている．ここで求められた料金水準は，交通量の増加に伴い発生する混雑の分だけ，料金を課す必要性を述べている．ここで示したように，これまでの最適料金水準の導出にあたっては，総走行時間費用を算出することによってその最小となる水準を求めていたが，今回提示した目的関数 Z に基づくことで，これまでの考えと同様に最適な料金水準を算出できることを示した．ここで示した目的関数 Z に基づく料金水準の導出が，効用関数に基づいた料金水準の導出であり，これまでの便益関数に基づいて求められてきた料金水準の導出との大きな違いである．

次に，MCF が 2.0 まで変化した場合の最適な料金水準に関しては，課金額が最も小さいときに，目的関数 z_c の値は最小となった．しかし，MCF を考慮する場合の目的関数 Z の値は，MCF の値が大きくなるにつれて，それぞれ小さくなった．また最適な料金水準は，MCF の値に比例して大きくなった．これは，料金を課すことによって発生する，財源調達に伴う厚生損失 MCF の大きさを考慮して，料金水準を決定する必要があることを示している．

しかし，この計算例で示した道路ネットワークにおける財源調達に伴う厚生損失 MCF を考慮した最適な料金水準は，現行の高速道路料金水準の約 347 円（150 円＋24.6 円／km×８km）の半分程度の料金水準であった．高速道路自体には，交通量の増加に伴う混雑は存在しているものの渋滞の程度が低いため，比較的低い料金水準となったと考えられる．

（２）Sioux Falls テストネットワーク

続いて，Sioux Falls テストネットワークにおいて，MCF を考慮した場合の社会的厚生関数に基づく最適料金水準を求める．ここでの料金設定は，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，まずは料金水準を 100 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．その結果，総走行時間（費用）として表現される目的関数 Z の値の変化は，図４－１１と表４－１３に示す通りとなった．このとき，P=1,400（円）までと P=1,500（円）からの目的関数 Z の傾向が大きく変化している．これは走行時間（費用）が，料金水準が P=1,500（円）のときの課金対象区間よりも，課金対象区間の周辺道路のほうが低くなり，利用される経路が完全代替の仮定に基づき変化するためである．

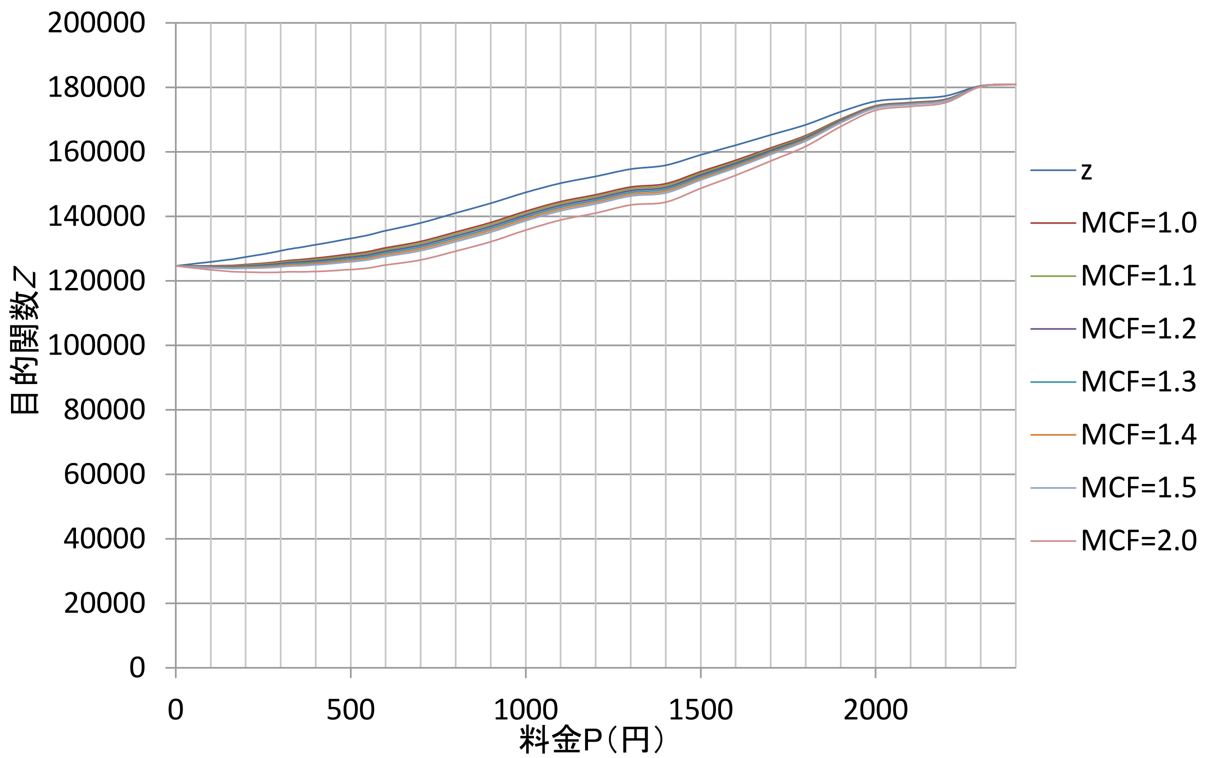

図４－１１　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 Z

表４－１３　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 Z

料金 P（１km あたり）（円）	z	MCF=1.0	MCF=1.1	MCF=1.2	MCF=1.3	MCF=1.4	MCF=1.5	MCF=2.0
0 (0)	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6
100 (16.7)	125907.9	124679.9	124557.1	124434.3	124311.5	124188.7	124065.9	123451.9
200 (33.3)	127421.9	125087.2	124853.7	124620.2	124386.7	124153.3	123919.8	122752.4
300 (50.0)	129353.6	126040.4	125709.1	125377.8	125046.5	124715.2	124383.8	122727.2
400 (66.7)	131224.3	127071.1	126655.7	126240.4	125825.1	125409.8	124994.5	122917.9
500 (83.3)	133169.3	128344.3	127861.8	127379.3	126896.7	126414.2	125931.7	123519.2
600 (100.0)	135577.4	130258.7	129726.8	129194.9	128663.1	128131.2	127599.3	124940.0
700 (116.7)	137986.4	132245.1	131671.0	131096.9	130522.8	129948.7	129374.5	126503.9
800 (133.3)	141058.1	135142.6	134551.1	133959.5	133368.0	132776.4	132184.9	129227.2
900 (150.0)	144081.8	138112.7	137515.8	136918.9	136322.0	135725.1	135128.2	132143.6
1000 (166.7)	147446.8	141600.3	141015.6	140431.0	139846.3	139261.7	138677.0	135753.8
1100 (183.3)	150311.4	144600.8	144029.7	143458.6	142887.6	142316.5	141745.4	138890.1
1200 (200.0)	152410.5	146724.9	146156.3	145587.8	145019.2	144450.7	143882.1	141039.3
1300 (216.7)	154675.4	149114.3	148558.2	148002.1	147446.0	146889.8	146333.7	143553.2
1400 (233.3)	155860.8	150148.2	149576.9	149005.7	148434.4	147863.1	147291.9	144435.6
1500 (250.0)	159082.6	153896.3	153377.7	152859.0	152340.4	151821.8	151303.2	148710.0
1600 (266.7)	162081.3	157417.1	156950.7	156484.3	156017.8	155551.4	155085.0	152752.9
1700 (283.3)	165272.4	161233.3	160829.3	160425.4	160021.5	159617.6	159213.7	157194.1
1800 (300.0)	168419.6	165068.7	164733.6	164398.5	164063.4	163728.3	163393.2	161717.7
1900 (316.7)	172451.0	170163.1	169934.3	169705.5	169476.7	169247.9	169019.1	167875.2
2000 (333.3)	175703.2	174306.5	174166.8	174027.1	173887.4	173747.8	173608.1	172909.7
2100 (350.0)	176552.8	175328.3	175205.8	175083.4	174960.9	174838.5	174716.1	174103.8
2200 (366.7)	177366.0	176329.0	176225.4	176121.7	176018.0	175914.3	175810.6	175292.1
2300 (383.3)	180492.3	180368.6	180356.2	180343.9	180331.5	180319.1	180306.8	180244.9
2400 (400.0)	180914.7	180914.7	180914.7	180914.7	180914.7	180914.7	180914.7	180914.7

このとき目的関数 Z の値が最小になる料金水準は，表４－１４に示す通りである．

表４－１４　Sioux Falls テストネットワークでの目的関数 Z の最小値とその料金水準

MCF の値	料金 P（円）	目的関数 Z
1.0	0	124671.6
1.1	100	124557.1
1.2	100	124434.3
1.3	100	124311.5
1.4	200	124153.3
1.5	200	123919.8
2.0	300	122727.2

課金額が最も小さいときに，目的関数 z_c の値は最小となった．しかし，MCF を考慮する場合の目的関数 Z の値は，MCF の値が大きくなるにつれて，それぞれ小さくなっており，全体の傾向は，シンプルな道路ネットワークと同様であった．

そこで，関数が下に凸となっていて最適料金水準として考えられる 0 円から 400 円までの場合について，現在の高速道路料金の設定が 50 円刻みであることを考慮して，最適料金水準と考えられる 200 円を中心に,0 円から 400 円までの場合について 10 円単位で設定した場合の交通量の配分を行う．その結果，総走行時間として表現している目的関数 Z の値の変化は，図４－１２，図４－１３と表４－１５に示す通りである．

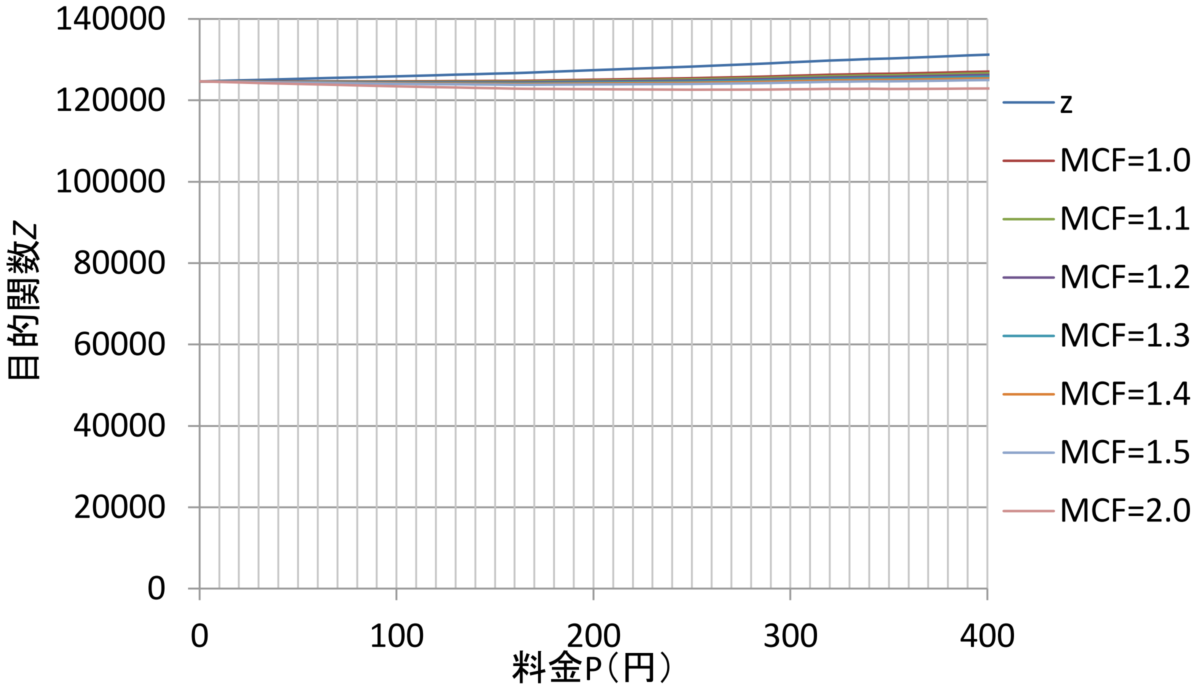

図４－１２　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z*（０円から 400 円）

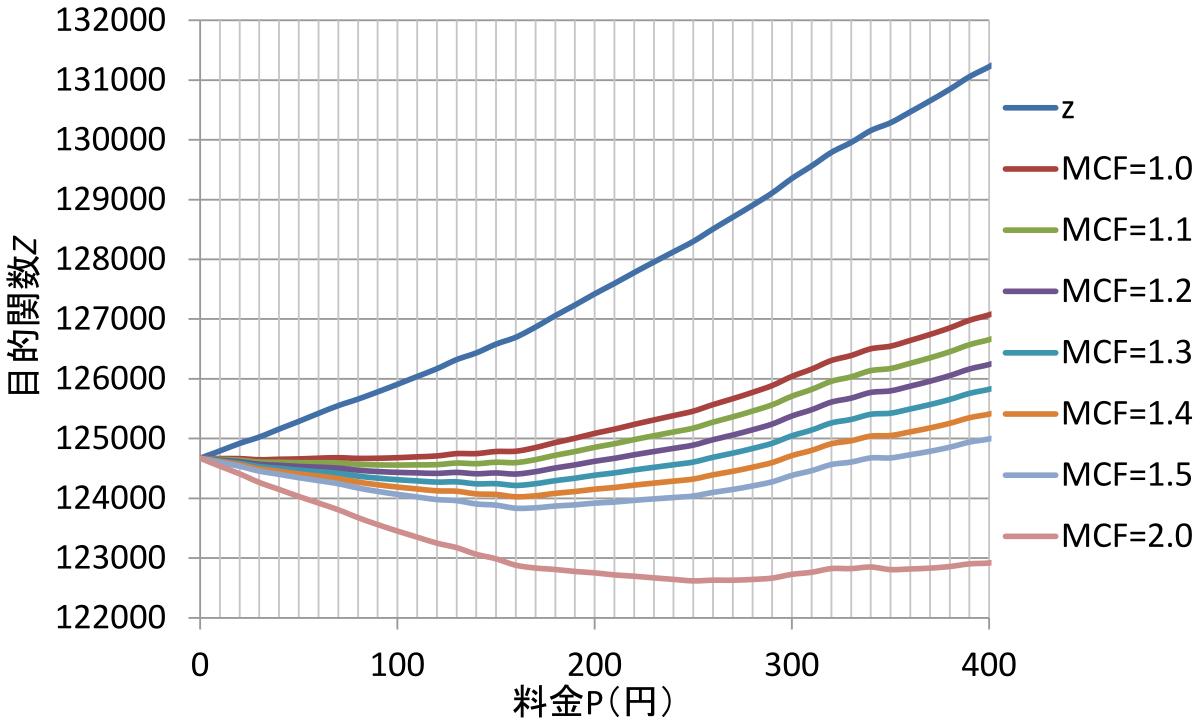

図４－１３　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 *Z*（０円から 400 円）の拡大図

表４－１５　Sioux Falls テストネットワークでの料金と MCF に応じた目的関数 Z（０円から 400 円）

料金 P（１ km あたり）（円）	z	MCF=1.0	MCF=1.1	MCF=1.2	MCF=1.3	MCF=1.4	MCF=1.5	MCF=2.0
0（0.0）	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6	124671.6
10（1.7）	124793.5	124665.6	124652.8	124640.0	124627.2	124614.4	124601.6	124537.7
20（3.3）	124919.0	124664.3	124638.9	124613.4	124587.9	124562.5	124537.0	124409.7
30（5.0）	125026.0	124645.7	124607.7	124569.6	124531.6	124493.6	124455.5	124265.4
40（6.7）	125158.6	124653.8	124603.3	124552.8	124502.3	124451.9	124401.4	124149.0
50（8.3）	125287.8	124659.6	124596.8	124534.0	124471.2	124408.4	124345.6	124031.5
60（10.0）	125422.1	124671.6	124596.5	124521.5	124446.4	124371.4	124296.3	123921.0
70（11.7）	125551.5	124680.0	124592.8	124505.7	124418.5	124331.4	124244.2	123808.4
80（13.3）	125660.3	124668.6	124569.4	124470.3	124371.1	124271.9	124172.7	123676.9
90（15.0）	125781.6	124670.9	124559.8	124448.8	124337.7	124226.6	124115.6	123560.2
100（16.7）	125907.9	124679.9	124557.1	124434.3	124311.5	124188.7	124065.9	123451.9
110（18.3）	126039.1	124694.8	124560.3	124425.9	124291.5	124157.0	124022.6	123350.5
120（20.0）	126168.8	124709.3	124563.4	124417.4	124271.5	124125.5	123979.6	123249.9
130（21.7）	126321.3	124747.8	124590.5	124433.2	124275.8	124118.5	123961.1	123174.4
140（23.3）	126434.2	124748.4	124579.8	124411.2	124242.6	124074.1	123905.5	123062.6
150（25.0）	126580.5	124783.8	124604.1	124424.4	124244.8	124065.1	123885.4	122987.1
160（26.7）	126695.7	124788.2	124597.5	124406.7	124216.0	124025.3	123834.5	122880.8
170（28.3）	126865.9	124849.6	124648.0	124446.3	124244.7	124043.1	123841.4	122833.3
180（30.0）	127056.4	124932.7	124720.3	124508.0	124295.6	124083.2	123870.9	122809.0
190（31.7）	127235.1	125005.5	124782.5	124559.5	124336.6	124113.6	123890.6	122775.8
200（33.3）	127421.9	125087.2	124853.7	124620.2	124386.7	124153.3	123919.8	122752.4
210（35.0）	127596.0	125157.1	124913.2	124669.3	124425.4	124181.5	123937.6	122718.2
220（36.7）	127778.2	125237.0	124982.9	124728.8	124474.7	124220.6	123966.5	122695.9
230（38.3）	127954.2	125311.6	125047.3	124783.0	124518.8	124254.5	123990.3	122668.9
240（40.0）	128126.1	125384.5	125110.3	124836.2	124562.0	124287.8	124013.7	122642.8
250（41.7）	128299.8	125459.1	125175.0	124891.0	124606.9	124322.8	124038.8	122618.4
260（43.3）	128507.2	125568.6	125274.7	124980.9	124687.0	124393.1	124099.3	122630.0
270（45.0）	128704.9	125667.2	125363.4	125059.7	124755.9	124452.1	124148.4	122629.5
280（46.7）	128903.2	125772.8	125459.8	125146.7	124833.7	124520.7	124207.6	122642.4
290（48.3）	129111.0	125887.9	125565.6	125243.3	124920.9	124598.6	124276.3	122664.8
300（50.0）	129353.6	126040.4	125709.1	125377.8	125046.5	124715.2	124383.8	122727.2
310（51.7）	129563.2	126163.0	125822.9	125482.9	125142.9	124802.9	124462.8	122762.7
320（53.3）	129789.3	126306.6	125958.3	125610.0	125261.8	124913.5	124565.2	122823.9
330（55.0）	129956.1	126390.0	126033.4	125676.8	125320.2	124963.6	124606.9	122823.9
340（56.7）	130155.1	126502.5	126137.3	125772.0	125406.8	125041.5	124676.3	122850.0
350（58.3）	130286.1	126546.6	126172.7	125798.7	125424.8	125050.8	124676.9	122807.2
360（60.0）	130467.8	126642.7	126260.1	125877.6	125495.1	125112.6	124730.1	122817.5
370（61.7）	130653.3	126742.5	126351.4	125960.3	125569.2	125178.2	124787.1	122831.7
380（63.3）	130846.2	126852.4	126453.0	126053.6	125654.2	125254.8	124855.4	122858.5
390（65.0）	131056.2	126979.5	126571.8	126164.1	125756.4	125348.8	124941.1	122902.7
400（66.7）	131224.3	127071.1	126655.7	126240.4	125825.1	125409.8	124994.5	122917.9

このとき目的関数 Z の値が最小になる料金水準は，表４－１６に示す通りである．

表４－１６　Sioux Falls テストネットワークでの目的関数 Z の最小値とその料金水準（0円から 400 円）

MCF の値	料金 P（円）	目的関数 Z
1.0	30	124645.7
1.1	100	124557.1
1.2	160	124406.7
1.3	160	124216.0
1.4	160	124025.3
1.5	160	123834.5
2.0	250	122618.4

この道路ネットワークにおいて，MCF が 1.0 のときの料金水準は，P=30（円）の場合に目的関数 Z が最小値となっている．この料金水準は，既存の利用者均衡配分に基づく料金変化に伴う総走行時間費用が最小になる料金水準として求められたものと同じである．

これまでの最適料金水準の導出は，総走行時間費用を算出することによってその最小となる水準を求めていた．しかしここでは，より一般的な道路ネットワークを対象として，さきに示したシンプルな道路ネットワークと同様に，今回提示した目的関数 Z に基づくことで，最適な料金水準を算出できることを示した．

参考文献

１）城所幸弘（2003）交通プロジェクトの便益評価―体系と課題―，運輸政策研究，6(2)，14-27.

２）Kidokoro, Y. (2006) Benefit estimation of transport projects–a representative consumer approach, Transportation Research Part B, 40(7), 521-542.

３）林正義，別所俊一郎（2004）累進所得税と厚生変化―公的資金の社会的限界費用の試算―，経済分析，内閣府経済社会総合研究所，172，3-34.

４）Yang, H. and Huang, Hai-Jun. (2005) Mathematical and Economic Theory of Road Pricing, Elsevier Science.

５）森杉壽芳，河野達仁（2012）道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究，67，1-20.

６）山内弘隆，竹内健蔵（1992）混雑税理論の展望―経済学の視点，土木学会論文集，第449号/IV-17， 17-26.

７）竹内健蔵（2006）都市交通ネットワークの経済分析，有斐閣.

８）金森亮，河上省吾(1999) 高速道路を含む道路網における配分交通量予測法の比較，土木学会第54回年次学術講演会，54(4)，712-713.

９）土木学会(2006)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，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，107-189，167-172.

１０）国土交通省道路局都市・地域整備局（2008）費用便益分析マニュアル.

１１）Hillel Bar-Gera (2001) Transportation Network Test Problems, http://www.bgu.ac.il/~bargera/tntp/

第５章 結論

本研究では，一般的な交通ネットワークで社会的厚生水準を最大にするような最適な料金水準の定式化を行った.

(1) MCF について２つに分類した場合；まず，財源調達を考慮しない場合（MCF＝－１），次に，財源調達を考慮した場合（MCF≠－１），

(2) 料金を２つに分類した場合;まず，全ての道路に料金を課す場合，次に，特定の道路に料金を課す場合.

MCF＝－１のとき，全ての道路の最適課金水準は，各道路区間の最適料金水準が，各道路区間で観測される交通量とその所要時間の変化のみから求められることを暗示している．この最適料金水準は，既存の単一道路区間での場合と一致している．この事実は，既存研究でもよく知られている．これに対して，特定の道路の最適課金水準は，他の道路区間での歪みによって，全ての道路へ課金した場合からかい離している．この場合は，全ての道路区間情報が必要である．多くの既存研究が同様の式を示している．しかし，そのほとんど全てが並行道路区間を対象としたものである．ゆえに，一般道路ネットワークを対象とした料金水準の式は，本研究が最初に導出したものであると考える.

MCF が－１でない場合は，道路建設費用の財源調達を考慮することを意味する.

全ての道路に課金する場合の特徴は次に示す通りである.この場合,限界混雑外部性が MCF によって修正される．この修正は必要である．なぜならば，混雑による歪みは，最適課金額に市場の税を反映させるべきであるからである．そして，最適料金水準は，一般財源からくる建設費用の公的資金を節約するため，混雑が存在しない場合でも０ではなく，限界費用価格形成原理に基づく料金水準でもない.

特定の道路に料金を課す場合の特徴は次に示す通りである．まず，最適な単一道路の料金水準は，全ての道路へ料金を課す場合と同様，混雑がない場合でも０ではない．全ての道路の料金水準は，全ての道路区間に生じている区間交通量自体の租税負担効果よる歪みが反映されている．これとは対照的に，特定の道路へ料金を課す場合は，特定の道路区間における料金水準を修正している．なぜならば，料金水準は他の道路区間で混雑が存在しているときは，その分だけ最適な料金水準からかい離しているからである．それゆえに，特定の道路の料金水準は，他の全ての道路区間での歪みだけ，限界混雑外部性からかい離していることを示している.

したがって，MCF がー１でないときの特定の道路の料金水準は，森杉，河野（2012）が並行する道路での研究において明示的に導出するにとどまっている．そして，MCF がー１であるときは，MCF がー１でないときの特別な状況として表現できることを示した．

以上の成果をまとめる．本研究では，料金収入と税収によって建設費用などを賄う場合の最適な料金水準を導出するために，財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合と財源調達に伴う厚生損失を考慮した場合に分けて，料金水準の導出に関する整理を行い，財源調達に伴う厚生損失を考慮した料金水準を新たに定式化した．代表的家計の厚生関数を用いることで，料金の限界費用と燃料税などの財源の限界費用が等しくなるとき，代表的家計の厚生水準が最大になることを示し，高速道路の最適料金を決定するための基準を定式化した．この定式化をより一般化して，一般的な道路ネットワークを対象として，その道路利用者行動を定式化した．その結果，財源調達に伴う厚生損失を考慮しない場合は，財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合でないときの特別な状況として表現できることを示した．特に，財源調達に伴う厚生損失を考慮する場合の料金水準は，混雑がない場合でも料金水準は０ではなく，財源調達に伴う厚生損失によって修正されることを示した．

以上，これまで一般的な道路ネットワークにおける財源調達に伴う厚生損失を考慮した場合の料金水準の導出はこれまでできていなかったが，本研究でその料金水準の決定を行うための定式化を行ったことで，料金水準決定のあり方を示すことができた．

しかし，本論文では最適料金水準の公式を示したが，その料金水準を示す式の右辺には対象とする道路区間の料金水準が未知数として含まれており，その公式を数値計算に使うことができない．そこで，社会的厚生が最大になる料金水準を求める問題を，二段階の最適化問題として示し，下位問題としての既存の利用者均衡条件の制約のもとで，上位問題としての社会的厚生が最大になるような，最適料金水準を求める方法を示した．計算例として，高速道路のみを料金設定の対象とする道路ネットワークを考え，特定の道路に料金を課す場合を想定した．このとき，最適な料金水準は，財源調達に伴う厚生損失 MCF の大きさに比例し，混雑の度合いに応じて決まることを示した．これまでの研究でも，均衡制約条件付き数理計画問題（MPEC: Mathematical Programming with Equilibrium Constraints）による数値計算が行われているが，本論文で示した数値計算との違いは目的関数にある．本論文の目的関数は，公的資金の厚生損失の考慮のみが異なるため，均衡制約条件付き数理計画問題（MPEC）に基づく数値計算も可能であると考えられるが，今後の研究展開が必要とされ，そのプログラムの開発は残された課題である．

謝　辞

本論文を結ぶにあたり，本研究を遂行する上で多くの方々のご指導とご協力を頂きました．ここに心より感謝の意を表します．

日本大学理工学部福田敦教授には，７年間に渡り終始厳しくも温かいご指導を賜りました．研究の意義や方向性など様々な面において，貴重なご意見やご指導をいただきました．ここに心より感謝申し上げます．日本大学森杉壽芳教授には，本論文のテーマの着想から方向性などの細部に至るまで格別なるご指導を賜りました．また様々な点で至らぬ筆者に対し，研究への姿勢や信念など，本論文を通して今後の人生において必要なことをご教示頂きました．ここに心より感謝申し上げます．日本大学理工学部島崎敏一教授には，研究内容の全般に関して多岐に渡る貴重なご意見とご助言を頂きました．日本大学森田綽久教授には，修士論文から本論文に至るまで，厳しくも温かいご助言やご指導を賜りました．また，天野光一教授をはじめとする社会交通工学専攻の諸先生方には，学内の発表会などにおいて多くの貴重なご意見やご示唆を頂きました．また，国内外の学会での発表や学術論文において，数多くの先生方や匿名の審査員の方から貴重なご助言，ご意見を頂くことができ，本論文を執筆する上でとても意義深いものでした．諸先生方に，深く感謝の意を表します．

日本大学理工学部下川澄雄教授，伊東英幸助教，石坂哲宏助教，ならびに交通システム研究室の元日本大学理工学部の有村幹治助教，長田哲平助教，上席研究員福田トウェンチャイ氏，客員上席研究員のウティクル・ゴジャシ氏には，研究並びに研究活動に対し，多くのご意見と励ましを頂きました．また，博士後期課程の川口芳夫氏，芦野誠氏，池田隆博氏，山中光一氏，朴希眞氏には，同輩として多くの励ましを頂きました．岡村誠氏，金子翔一氏，端野良彦氏，研究室秘書の川口亮子氏，博士前期課程の木下紘輔氏，藤間翔太氏，林偉豪氏，東山洋平氏，菊池浩紀氏をはじめとする交通システム研究室の皆様には，研究面並びに生活面において多大なるご協力を頂きました．ここに，心より感謝申し上げます．

そして，学部から大学院までの９年間の大学生活を精神面，金銭面，健康面などの様々な面で支えて下さった両親に深く感謝を申し上げます．

最後に，ここに記しきれない程の多くの方々のご支援により，本論文が完成したことを記し，改めて深甚なる感謝の意を表します．

平成 26 年１月　池下　英典