

1. 分析対象と本論文の意図

鉄道や道路などの交通ネットワーク産業では、そのネットワーク内で各交通利用者がそれぞれに意思決定を行い、また、それらのインフラ所有者の意思決定によって各交通利用者の行動も変化する、という点に注意が必要である。ネットワーク内の交通利用者の意思決定の多様性は、そのネットワークに内在する問題を惹起せしめる。それぞれの交通利用者がそれ自体の思惑によって行動するために、単純なネットワークを想定するだけでも、いくつかのパラドックスをはじめとするさまざまな問題が発生する。これらの問題は現実の交通問題として生起している問題であり、こうした交通ネットワークの持つ多様な側面を、特に経済学的な観点から解明し、その分析からある一定の政策的含意を見出すことは重要である。

交通ネットワークは複雑であり、都市間交通、都市内交通においてさまざまなネットワークが形成される。本論文においては混雑問題に焦点を当て、都市内交通ネットワークを分析対象とする。異種交通機関がネットワークを形成する場合の最大の焦点は、それぞれのインフラの所有者が異なり、それぞれの規制の形態や目的関数が異なることが多いということと、それぞれのインフラの物理的な特性から、それぞれの交通機関の利用者行動について同一交通機関とは異なる分析をしなければならない、ということである。一方、同一交通機関内でのネットワークに関する焦点は、そのネットワークのインフラ所有者はネットワーク内の交通利用者に政策あるいは戦略をもって積極的に関与し、その意思決定を誘導することが直接的に可能であるために、そうした政策あるいは戦略が望ましいものであるかどうかを論じなければならないということである。

以上のような認識の下に本論文は展開される。本論文の分析において一貫して強調されること、言い換えれば、いわば本論文を通じたメッセージとでも言うべきものは以下の通りである。第1のメッセージは、単純なネットワークの分析においても、逆にむしろ単純なネットワークであればこそできる有益な研究成果がある、ということである。第2のメッセージは、交通ネットワークの問題を経済学の切り口から眺めたときに、これまでの分析の主流である工学的観点とは異なった知見が現れ、それにより有益な政策提言が可能となる、ということである。

2. 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。

はじめに

第Ⅰ部 基礎的理論の展開

第1章 序論

- 第1節 開題
- 第2節 問題の所在と本論の分析の意義
- 第3節 本論の構成

第2章 過去の研究の概観

- 第1節 Pigou vs. Knight論争
- 第2節 ADLモデルの応用
- 第3節 Bi-programmingモデル
- 第4節 Verhoefのアプローチ
- 第5節 その他の研究

第3章 Wardropの原理

- 第1節 本章の目的と構成
 - 第2節 Wardropの原理とその数理最適化問題としての解釈
 - 第3節 確率的利用者均衡モデル
 - 第4節 利用者均衡モデルの展開に関する批判的検討
 - 第5節 小括—本論におけるWardropの原理の応用
- 付録

第Ⅱ部 ネットワークに関するパラドックス

第4章 Wardropの原理から派生する3つのパラドックス

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 Pigou-Knight-Downsのパラドックスの性質
- 第3節 Downs-Thomsonのパラドックスの性質
- 第4節 Braessのパラドックスの性質
- 第5節 小括

第5章 パラドックスの理論的説明

- 第1節 本章の目的と構成

- 第2節 Pigou-Knight-Downsのパラドックスのメカニズム
- 第3節 Downs-Thomsonのパラドックスのメカニズム
- 第4節 道路の最適料金形成下でのPigou-Knight-Downsのパラドックス
- 第5節 道路の最適料金形成下でのDowns-Thomsonのパラドックス
- 第6節 小括
- 付録

第6章 Downs-Thomsonパラドックスの実証分析

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 Downs-Thomson のパラドックスの実証の必要性
- 第3節 アンケート調査の概要
- 第4節 質問項目
- 第5節 実証分析の結果
- 第6節 小括

第Ⅲ部 異種交通機関間ネットワークの分析

第7章 限界費用価格形成に基づく道路料金が代替公共交通機関へ及ぼす影響

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 道路にとって最適な混雑料金賦課の影響
- 第3節 代替公共交通機関への対策
- 第4節 小括

第8章 鉄道運賃規制下における道路料金形成

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 次善の道路料金形成(1):代替的鉄道サービスが平均費用価格形成を行う場合
- 第3節 需要曲線を変化させた時の道路料金への影響
- 第4節 次善の道路料金形成(2):代替的鉄道サービスが限界費用価格形成を行う場合
- 第5節 地方鉄道の場合
- 第6節 小括
- 付録

第9章 仮想的シミュレーション分析

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 逆需要曲線の傾きの変化による諸数値の変化
- 第3節 各運賃規制下における道路料金の違いによる純便益の変化
- 第4節 道路規模の変化に伴う諸数値の変化
- 第5節 政策的含意
- 第6節 小括
- 付録

第Ⅳ部 同一交通機関内ネットワークの分析

第10章 都市高速道路の最適料金格差とそのネットワークへの影響

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 一般道路へのロード・プライシングの導入とその都市高速道路への影響
- 第3節 都市高速道路の最適料金格差モデル
- 第4節 環境費用の導入
- 第5節 モデルの拡張
- 第6節 小括
- 付録

第11章 実証的シミュレーション分析

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 ルート間均衡:Wardropの原理の実証
- 第3節 最適料金格差シミュレーション
- 第4節 さまざまな料金設定シナリオ
- 第5節 環境制約シミュレーション
- 第6節 小括

第Ⅴ部 ネットワーク・モデルの応用

第12章 ロード・プライシング収入による鉄道補助

- 第1節 本章の目的と構成
- 第2節 道路利用者による鉄道への一括固定額補助
- 第3節 道路利用者に対する従量課税による鉄道への補助
- 第4節 小括

第13章 都市高速道路の独占企業としての行動分析

第1節 本章の目的と構成

第2節 都市高速道路会社の料金戦略(1):代替無料道路のない場合

第3節 都市高速道路会社の料金戦略(2):代替無料道路のある場合

第4節 シミュレーション分析

第5節 小括

付録

第VI部 結論と政策的含意

第14章 結論

第1節 各章のまとめ

第2節 政策的含意

第3節 今後の展望と残された課題

巻末資料 第6章アンケート調査分析結果

参考文献

第1章では、本論文への導入を行うとともに、問題意識の明確化を行う。第2章においては、これまでの交通ネットワークに関する過去の研究をサーヴェイする。過去の研究においては圧倒的に工学における分析が多く、経済学における過去の研究は著しく少ない。そのため、ここでは工学に関する過去の研究についてもかなり取り入れて、いくつかの方法論的分析を試みる。第3章では、本論を通じてつねに言及されるWardropの原理について解説する。この原理は極めて単純なものであるが、また奥の深いものでもある。この原理をここで明確に解明しておくことで、今後の論旨の展開が容易になる。

第4章では、Wardropの原理に関連して、従来から指摘されている3つのパラドックスを紹介する。このいずれもが現実の交通問題と深く関連するといわれており、ネットワークに内在する問題として指摘しておくことは重要である。第5章では、なぜこうしたパラドックスが起きるのかについて、経済学からの解明を試みる。ただし、3つのパラドックスのうちBraessのパラドックスはそのネットワークの性格からここでは言及されず、残りの2つのパラドックスについて経済学的な分析がなされる。第5章においては、2つのパラドックスの表面的、定性的な分析を行ったに過ぎなかったため、第6章では、このうちDowns-Thomsonのパラドックスについて、アンケートに基づくデータを活用して実証分析を行う。

第7章から第9章までは、交通ネットワークの中でも異種交通機関間ネットワークに焦点を当てる。第7章では、鉄道と道路が代替的な関係にあるとして、道路部門に最善の料金形成(ロード・プライシング)がなされたときの鉄道への影響が分析され、鉄道政策への政策的含意が与えられる。第8章では、逆に、代替的な鉄道サービスがある一定の運賃規制の下にあるときに、道路サービスは次善の料金形成としてどのような料金を設定すべきかについて分析が行われる。鉄道運賃規制が平均費用に基づく場合と限界費用に基づく場合で、そして需要の価格弾力性の相違で、どのように道路料金が変化するか、が定性的に明確にされる。第9章では、第8章の定性的な分析を裏付けるために、仮想的な数値例を用いることで定量的な分析を試みる。さらに道路の規模が変化したときのシミュレーション分析も行い、分析対象は長期の場合にも拡大される。

第10章と第11章では、同一交通機関内のネットワークに焦点を当てる。第10章では、都市高速道路と、それと代替的な関係にある一般道路がネットワークを構成しているときに、最適な都市高速道路の料金問題について考察する。一般道路にロード・プライシングが導入されたときの都市高速道路ネットワークの対応や、環境負荷軽減を目指した需要誘導のための最適料金格差問題など、きわめて今日的な問題が取り上げられ、それらが定性的に分析される。第11章では、第10章の定性的な分析を受けて、現実の都市高速道路や一般道路のデータを入手し、それらを活用することで最適な都市高速道路料金を定量的に導出する。また環境制約が課されたときの料金の変化についても分析を行う。

第12章と第13章では、さらに進んだネットワーク問題を対象とする。第12章では異種交通機関間ネットワークのモデルを活用して、しばしば指摘される道路利用料金収入の鉄道への補助の問題について分析を行う。補助の形態の相違による最適な道路利用料金の変化などが分析される。第13章では、同一交通機関内ネットワークのモデルを活用して、都市高速道路の運営主体の運営形態が変化した場合、より具体的には、社会的余剰を最大にする公団方式から、利潤を最大にする民間企業に転換する場合に、どのように料金水準を導出するかについて考察する。あわせて、第11章で用いたデータを使って定量的に料金水準を導出する。

第14章では、これまでの分析結果をまとめると同時に政策的な含意を整理し、本論の分析手法の今後の展開の可能性と、残された課題について論じる。

3. 本論文の内容

第1章においては、電力や情報通信ネットワークと道路や鉄道のネットワークとの違いが、そのネットワークの内部を移動する主体が自ら意思決定をする主体であるかどうかという点にあることを述べた。これを明確にすることにより、本論文におけるネットワークの分析が、前者のネットワーク分析と基本的に異なることが示された。そして本論文において一貫して主張されるメッセージが2つ指摘された。第1は、単純なネットワークであっても、むしろ、そうであればこそ、それによって有意義な政策提言をすることが可能になるのであり、導出された最適解の持つ政策的な意味を解明することができる、ということである。第2は、交通ネットワークの問題を経済学の切り口から眺めたときに、これまでとは異なる知見を得ることができ、それにより有益な政策提言ができる、ということである。

第2章では、交通ネットワークに関するさまざまな研究のうち、特に注目すべきアプローチを3つ取り上げ

て既存研究を概観した。ADLモデルは、出発時刻の選択によるボトルネック混雑の分析が中心であるが、モデルの汎用性が高く、これがルート選択問題にも拡張されている。しかし、モデル設定がユニークであるだけにかえて交通混雑に関する諸現象が主役になることがなく、それらの重要な諸現象が脇役としてこのモデルに引きずられてしまう傾向がある。Bi-level programmingモデルは上位問題と下位問題に分かれ、さまざまな目的関数の設定によって、興味深い結論を導き出すことのできる解法である。これにより、複雑なネットワーク解析も可能となるが、アルゴリズムによる解法が中心となるため、政策的な含意を得るにはあまり向かない手法である。Verhoefによるアプローチは、Bi-level programmingモデルにおける下位問題を限界条件として直接モデルに組み込むことによってモデルを簡略化した、といえる。それにより、政策的に有意義な点を指摘することが可能になった。本論文におけるアプローチはVerhoefによるアプローチに近く、Verhoefによるアプローチが十分に活用されている。

第3章では、Wardropの原理を紹介し、それを等価である数理最適化問題としてとらえ直すことで、理論の精緻化をはかった。Wardropの原理は、所要時間の最小化を目指す目的関数を設定することで導出でき、また、混雑に関する限界外部費用を混雑料金によって内部化することで、利用者最適とシステム最適という第1原理と第2原理が一致することを見た。さらに、Wardropの原理から派生して、利用者が不確実なルート選択を行う確率的利用者均衡モデルも紹介した。最後に需要変動型の利用者均衡モデルを提示することを通じて、土木工学的なアプローチと経済学的なアプローチの違いを明確にし、本論文における、未開拓の部分が多くの経済学的なアプローチの重要性を強調した。そして、Wardropの原理は本論文の根幹をなす原理であることを指摘した。

第4章では、簡単な数値例を用いることによって、Pigou-Knight-Downsのパラドックス、Downs-Thomsonのパラドックス、Braessのパラドックスの3つの表面的な現象や性質について検討した。いずれのパラドックスも、交通利用者の合理的な行動を説明するWardropの第1原理をその背景に持っており、Wardropの第1原理が成立するゆえのパラドックスであった。Pigou-Knight-Downsのパラドックスは、混雑緩和のための道路投資が現状を一向に改善しないことを示したパラドックスであった。また、Downs-Thomsonのパラドックスは同一交通機関内ではなく、異種交通機関間の交通量配分に関するパラドックスであり、道路混雑緩和のための道路投資が異種交通機関におけるサービス水準の変化を引き起こし、結果としてより一層の道路混雑を招く、という現象であった。Braessのパラドックスは、ある一定のネットワークの構造における新たな経路の追加が、全体としてのOD間の所要時間を増大させる、というパラドックスであった。Braessのパラドックスは前の2つのパラドックスとは違って、既存ルートの交通容量の拡大ではなく、新たなルートの追加が問題となっている。つまり、これはネットワークの構造自体を変えることによって生じるパラドックスである。

第5章では、第4章で取り上げられた3つのパラドックスのうち、特に前二者を取り上げて詳細に分析した。そして、道路において最適料金形成がなされるときに、この両者のパラドックスが依然成立しえるかどうかを数学モデルの展開によって検証した。それにより、両パラドックスは最適料金形成時でも発生しうることが示された。さらに、この場合に、Pigou-Knight-DownsのパラドックスはDowns-Thomsonのパラドックスの特殊形であることが明らかにされた。両者のパラドックスを図によって表現することで、そのメカニズムが視覚的に解明され、それに基づいて、それぞれのパラドックスを解消するための政策が提案された。Pigou-Knight-Downsのパラドックスにおいては、道路投資をする場合にはかなり大規模な投資でなくては無意味である。また、Downs-Thomsonのパラドックスにおいては、道路投資は公共交通機関(鉄道)への補助と併行して行うことがひとつの方法として有効である。

第6章では、第5章で理論的に解明したDowns-Thomsonのパラドックスに関する問題を、実証面から検証することを試みた。Downs-Thomsonのパラドックスの存在は、鉄道利用客の一般化費用に関する社会的平均費用曲線が逓減するか否か、という問題に帰着する。そこで本章では、上田交通を例にとり、鉄道利用客の一般化費用に関する社会的平均費用曲線の形状を探ろうとして、上田交通の利用客へのアンケートを行い、それに基づいてデータの分析を行った。その結論として、鉄道利用客の一般化費用に関する社会的平均費用曲線は線形ではないが逓減することがわかった。このことにより、Downs-Thomsonのパラドックスの存在が否定できないことが明らかになった。

第7章では、ロード・プライシングが実施されたときの、同じネットワークを構成する鉄道サービスへの影響を考えた。つまり、Downs-Thomsonのパラドックスが道路投資という外的な要因によって発生したことに対して、ここではロード・プライシングの導入という外的な要因が、局所的(モード内)には望ましくても大域的(ネットワーク全体)には好ましくない状態を発生させるかどうか、が定性的に分析された。その結果わかったことは、費用逓減状態にある代替的な鉄道サービスが存在する場合、最適なロード・プライシングを行っても「局所的な交通政策が全体としては逆効果をもたらす」ことはないが、費用逓増状態にある代替的な鉄道サービスが存在する場合には、ロード・プライシングは「局所的な交通政策が全体としては逆効果をもたらす」ことが示された。また、費用逓増状態にある鉄道サービスを代替公共交通機関として持つ場合には、その公共交通機関への補助を行えば、こうした逆説的な状況を解消させることが可能であることも示された。

第8章では、交通ネットワークを構成する異種交通機関として、道路交通と鉄道交通が取り上げられ、鉄道に運賃規制が課される場合の、最適な道路料金について検討した。その結果、次のようなことがわかった。第1に、鉄道サービスの運賃規制が平均費用価格形成であれ、限界費用価格形成であれ、次善の道路料金は最善の(しかしネットワークが存在すれば最適ではない)道路料金よりも低く、道路費用を賅わずに赤字が発生する。第2に、鉄道サービスが平均費用価格形成による運賃規制を受けている場合の道路料金水準は、限界費用価格形成による運賃規制を鉄道サービスが受けている場合のそれよりも低い。そして、最善の道路料金と次善の道路料金との乖離部分は、鉄道事業者の事業運営上の混雑費用だけでなく、鉄道の利用者が負担する混雑費用も含めた鉄道の混雑費用によって表され、その値は、需要の価格弾力性に応じて混雑費用全体の0%から100%の間に存在する。一方、鉄道が限界費用価格形成の運賃規制下にある場合は、最善の道路料金と次善の道路料金との乖離部分は、需要の価格弾力性に応じて鉄道の利用者が負担する混雑費用全体の0%から100%の間に存在する。どちらの運賃規制が実行されても、その割合はネットワーク全体の逆需要曲線の形状(需要の価格弾力性)によって決定される。

第9章では、第8章で展開された定性的な分析の結果が、仮想的な数値例によるシミュレーションによって検証された。次善の道路料金は逆需要曲線の傾きによって大きな影響を受ける。少なくとも本章における数値例に関するかぎり、全体的に鉄道が収支均衡制約下にあるのときの方が、限界費用価格形成下にあるとき

よりも逆需要曲線の傾き(需要の価格弾力性)による道路料金の変動が大きい。また、これらの2つの鉄道運賃規制下において、現状の放置(課金なし)、道路のみの最適化を考える道路料金、交通ネットワーク全体を考える料金、の3つにおける余剰の変化を分析した。全体としては、限界費用に基づく運賃規制の方が收支均衡に基づく運賃規制よりも余剰の変化が緩慢であり、各料金設定における余剰は、道路規模の変化によっても、その大小関係を逆転させることがありえることが示された。

第10章では、同一交通機関内(ルート間)ネットワークの場合の最適料金を定性的に分析した。まず都市高速道路と代替的な無料の一般道路がそれぞれ1ルートある場合に、一般道路にロード・プライシングが導入されることにより、相互にどのような料金水準にすることが社会的に最適かを考察した。仮想的数値例によるシミュレーションにより、社会的純便益の増加のためには、現在の都市高速道路の料金は低く設定されるべきことが示された。次に、無料の代替的な一般道路と複数の都市高速道路が存在するときの、社会的に最適な料金格差の問題を定性的に取り扱った。均衡交通量において、最適な料金格差は各ルートの混雑の限界外部費用の格差に等しい。また、各ルートの最適な料金は、混雑の限界外部費用の格差を、他方の高速道路利用者数で加重したものに平均収入を加えたものに等しい。言い換えれば、各ルートの最適な料金は、そのルートの混雑の限界外部費用と、各ルートの利用者数によるそれぞれの混雑の限界外部費用の加重平均との偏差に料金収入を加えたものに等しい。そして、環境負荷の軽減の観点から、ルート間で需要を誘導するための最適料金格差を求めた。そこではモデルに環境費用が導入される。その結果、最適料金格差の式は、環境費用を考慮しない場合の式と同様の形態をとる。また、特定のルートに環境制約が課されている場合には、最適化問題の解が端点解の場合、制約式の数から政策的に純便益の最大化は不可能になり、内点解の場合、既に導出された最適料金格差の式に一致する。

第11章では、実際のデータとして首都高速神奈川線の2路線(1号横羽線、高速湾岸線)と、それと併行する一般国道を1路線あるいは2路線取り上げ、第10章で行った定性的なモデル分析を実際のデータに当てはめて、最適な料金格差の導出とそれに伴う諸数値の観察を試みた。その結果、ネットワークの一部において、Wardropの第1原理が実際に当てはまっているとの確認を得た。このことに基づき料金水準を導出したが、この結果は一見、常識に反するようであった。第1に、料金水準は現行の首都高速神奈川線の基本的な均一料金である600円を下回るものであり、第2に、現在行われている環境ロード・プライシングとは逆に高速湾岸線の料金を高くする方が社会的に最適であるということが明らかになった。しかし、それらは合理的な理由でそうなることが明らかにされた。また、環境費用をシミュレーションに組み込むことによって、更なる知見を得ることができた。環境規制を30%程度厳しくすることによって1号横羽線の交通量を削減する場合には、現行の首都高速道路の「環境ロード・プライシング」の料金格差は理論的に正当化される。

第12章では、異種交通機関間におけるネットワーク・モデルを基本として、道路利用者から鉄道利用者へ補助を行う制度が実施された場合、最適な道路利用料金はどのように変化するか、ということ进行分析した。2つの補助金制度が想定された。ひとつは外生的な一括固定額による補助制度、もうひとつは道路への従量課金による場合の補助制度である。一括固定額による補助制度のもとでは、最適な道路利用料金はつねに混雑に関する限界外部費用よりも少ない額が課金される。それに比べて、従量課金による場合の補助制度の下での最適な道路利用料金は、限界外部費用の額に対してその大小が確定しない。それは当該交通ネットワークに対する限界評価額の変化率に依存する。

第13章では、これまで行ってきた同一交通機関内(ルート間)ネットワーク分析を応用し、都市高速道路が公的部門からの束縛を離れて純粋に私的部門として行動する、つまり、都市高速道路公団が都市高速道路会社になった場合の料金問題を、モデルを用いて定性的に分析した。さらに、第11章において用いたデータを活用して、当該区間において民間企業としての首都高速道路会社がどのような料金設定を行い、それが交通量配分や社会的純便益にどのように影響を与えるか、について実証的なシミュレーション分析を行った。定性的な分析において明らかになったことは、純粋な民間企業としての首都高速道路会社において、利潤最大化のための料金格差は、均衡交通量において社会的純便益を最大化する場合の最適料金格差とまったく同様の式の形となる、ということである。実証分析においては、独占的な民間企業である首都高速道路会社の場合、最適料金格差よりも75円程度の料金値上げが行われることが示された。そして、料金収入の増加を上回る社会的純便益の減少が観測され、実現されない余剰が発生することが明らかになった。そして、利潤最大化を目的とする民間企業は、均一料金よりも路線ごとに料金格差をつけた料金戦略を選択することも実証的に明らかになった。

4. 本論文の示唆

本論文で展開された多くの有意義な政策的含意は、単純な同一OD間のネットワークを分析するだけで得られている。単純なネットワーク構成は現実を説明するには不十分であり、その普遍性に欠ける。しかし逆に単純であればこそ、複雑なネットワークでは成し遂げることのできない多くの政策的な示唆を得ることができる。逆に、複雑なネットワークは現実の世界を忠実に映し出すことができ、その結果、それは現実性を持つことになる。しかしその複雑さゆえに、多くの政策的な示唆を得ることに失敗せざるを得ない。同時に、これらの政策的な提言は経済学的に交通ネットワークを解釈したことによって導出されたものであることも強調されるべきである。コンピュータの解析能力を活用し、アルゴリズムを工夫して用いることによって導出された数値は、そのモデルにおける最適値として雄弁であっても、その数値の背後に潜む政策的なメッセージの解釈については寡黙である。政策的な含意の導出は、経済学的な解釈によって可能であることが本論文の分析によって確認することができた。もちろん、このことは、アルゴリズム等を用いた従来の工学的なアプローチが非力であるということを決して意味しない。ここで指摘しておきたいことは、これまでの分析が工学的なアプローチが主体であったことから、それを経済学的に解釈することで、さらなる有意義な結論を得ることができた、ということである。換言すれば、工学的アプローチと経済学的アプローチの両立によってこそ、分析の一般化や現実性も、そして政策的な含意の導出も、ともに可能になり、意義深い交通ネットワーク分析を実行することができるのである。