すがまあつし
氏　　名　須ヶ間　淳
授　与　学　位　博士（工学）
学位授与年月日　令和６年３月２６日
学位授与の根拠法規　学位規則第４条第１項
研究科，専攻の名称　東北大学大学院工学研究科（博士課程）土木工学専攻
学位論文題目　都市圏郊外部における公共交通システムの最適化
−ネットワーク構造・交通量・運賃同時決定モデルの構築と適用−
指　導　教　員　東北大学教授　奥村　誠
論文審査委員　主査　東北大学教授　奥村　誠　東北大学教授　京谷　孝史
東北大学教授　河野　達仁

論文内容要旨

我が国の乗合バス交通は，自家用車の普及やライフスタイルの変化，人口減少等によって長期的な需要減少傾向が続いており，かねて厳しい経営状況にある．また 2020 年度以降は COVID-19 の流行（コロナ禍）に伴ってさらに利用者数を減らした．テレワークなどオンラインでの活動が急速に普及したこともあり，バスを含む公共交通の需要はいまだコロナ禍以前の水準に戻らない．そのため近年は大都市圏であってもバスの減便・縮小が相次いでいる．一方でこれまでの地域公共交通に関する研究の多くはより状況の深刻な地方圏に注目してきた．そのため大都市圏を対象とした地域のモビリティ維持の方策や戦略については未解明の部分が大きい．大都市圏の公共交通システムは概して大規模であり，また求められるサービス水準も高い．地方圏とは異なり，巨額な運営費用を自治体等がすべて賄うことは非現実的である．一定の公的負担を許容したとしても，原則的には運営費用を利用者が賄う独立採算制を保ったままにモビリティ水準を良好に維持する戦略が必要である．このとき独立採算制公共交通システムではネットワーク構造や交通量，運賃等の各要素が密接に関係しあっている．そのためこれら各要素の同時最適化を図ることが重要であると考えられる．

ところが，従来，運賃の設計問題は公共経済学の一環である最適運賃理論として，ネットワークの設計問題は交通工学における公共交通網計画として，それぞれ独立的に研究されてきた．そのためネットワークと運賃の同時最適化に着目した研究は極めて少ない．また数少ない同時最適化に関する既往研究では，ネットワークを路線密度で表現しているため考慮できるネットワーク構造の多様性に限界があった．加えて，運賃設定を均一制もしくは対距離制に限定しており，最適ネットワーク構造と OD 別最適運賃の関係を議論することはできなかった．

そこで本論文では，都市圏郊外部の独立採算制公共交通システムのうち主に乗合バスで構成されるシステムに焦点を当て，モビリティ維持のための戦略策定に必要な方針を明らかにする嚆矢として，ネットワーク構造・運賃を同時最適化する必要性を示す．そのためにまず，特定の形状（グリッドやハブ・アンド・スポークなど）に依らない多様なネットワーク構造，均一制や対距離制に限らない OD 別に価格差別できる運賃を考慮し，収支

制約の下で社会的余剰を最大化するようにネットワーク構造・交通量・運賃を同時決定する枠組みとして，数理最適化モデルを開発する．そして同モデルの理論解析を通して最適な運賃の基本的性質を明らかにする．またいくつかの仮定を加えた下で数値解析を行い，同時最適化によって得られる最適ネットワーク 構造・交通量・運賃の具体的な関係性や特徴を分析するとともに，同時最適化の有用性を確かめる．第１章および第２章では，上述の研究背景と目的を示し，さらに既往研究を整理した上で本論文の新規性を明示した．

第３章では，ネットワーク構造・交通量・運賃同時決定モデルを混合整数非線形計画問題として定式化できることを示した．その上で，逆需要関数の線形性を仮定し，さらに二次制約を線形制約と二次錐制約に置き換えると，凸性が保障され容易に大域的最適解を求められる混合整数二次錐計画問題に帰着できることを示した．

第４章では，第３章で定式化したネットワーク構造・交通量・運賃同時決定モデルが，整数変数を含む上位問題（ネットワーク構造を決定する問題）と連続変数のみで構成される下位問題（交通量と運賃を決定する問題）で構成された２段階モデルに変換できることを示した．そして下位問題に着目して一般化支払額に関する理論解析を行った．解析解は３種類存在するが，一部の例外を除くと常にラムゼイ価格が最適一般化支払額として採用される．一般化支払額がラムゼイルールに従う場合，金銭的な運賃は限界運営費用の配賦額と OD 別追加配賦額により構成される．その際，限界運営費用の配賦額はネットワーク構造に依存しており，乗客数が定員に達しているリンク（充足リンク）の利用距離が長い OD ほど大きくなる．一方で OD 別追加配賦額の大きさは限界一般化費用（限界運営費用配賦額・所要時間価値・乗継抵抗の和）に基づく．ただしその挙動は需要の価格弾力性を介して需要関数の関数形に依存する．例えば第５章以降の数値解析で採用する線形需要関数を仮定した場合，限界一般化費用が大きいほど OD 別追加配賦額は小さくなる．他方，両対数型需要関数を仮定した場合には反対に限界一般化費用が大きいほど OD 別追加配賦額は大きくなる．片対数型需要関数を仮定した場合，限界一般化費用の大きさはは OD 別追加配賦額に影響を与えない．なお運賃額は限界一般化費用を介してネットワーク構造の影響を大きく受けるが，ネットワーク構造はモデル内に置いて 0-1 変数で表されるため，最適ネットワーク構造・交通量・運賃の具体的性質や相互の関係を理論解析アプローチに基づき分析することには限界があり，具体的パラメータ設定に基づく数値解析アプローチが有用である．そこで第５章から第８章では需要関数の線形性などいくつかの仮定の下でそれぞれ具体的なケースを設定し，数値解析アプローチに基づいて最適ネットワーク構造・交通量・運賃の具体的性質を分析した．なおいずれの章においても混合整数二次錐計画問題に帰着させた上で，商用数理最適化ソルバーである Gurobi Optimizer を用いて求解した．

第５章では，第３章で定式化したモデルの簡易版モデルを用い，ネットワーク形状固定下における最適モード構成を分析した．また乗継抵抗の削減が最適モード構成や社会的総余剰に与える影響を分析した．乗継抵抗削減が直接的に社会的総余剰を拡大する効果はあまり大きくなく，乗継抵抗削減と同時にモード構成を修正することで社会的総余剰が拡大することを示した．このことはモード構成の柔軟な変更が重要であることを示唆している．

第6章では，ネットワーク形状を自由に変更できる状況下で，第3章で定式化したモデルの数値解析を行い，ネットワーク構造・交通量・運賃の基本的な性質の確認を行った．第6章では設置可能な交通モードとして，いわゆる乗合路線バス等を想定した大型交通と，いわゆるコミュニティバス等を想定した小型交通の2種類を考えた．需要規模が大きい場合には大型交通1系統のみで構成された乗継不要なネットワークが，中程度の場合には小型交通路線系統の設定や乗継を含む非効率だが安価なネットワークが，需要規模がさらに小さいときには小型交通路線系統のみに依るネットワークが最適となった．また限界一般化費用に異質性がある場合には，第4章の理論解析アプローチで示したように，ラムゼイルールから導出される性質（ただし線形需要関数を仮定した場合）に基づいて限界一般化費用がより大きいODほどOD別追加配賦額が小さくなった．すなわち所要時間や乗継抵抗の大きなODほど最適運賃が小さいことが確認された．また充足リンクを経由するODには限界運営費用が配賦され，大きな運賃が課される．そのため所要時間が伸びても充足リンクを迂回するほうが限界一般化費用を小さくできる場合，充足リンクの迂回が発生する．またこのとき充足リンクを経由する利用者が支払う高額な運賃が，地域全体の運営費用の大部分を清算する可能性があり，その場合には迂回ODを含む他ODの運賃は極めて小さくなる．以上を要するに，最適ネットワーク構造・最適交通量・最適運賃について，限界一般化費用の大きなODほど運賃を小さくすべきこと，容量充足箇所の通行には高額な運賃を課すべきこと，所要時間を増やしてでも容量充足箇所を迂回すべき場合があること等の基本的性質が示された．

第7章では，第3章で定式化したモデルの修正モデルに基づく数値解析を行い，運賃体系を既存運賃制度に準拠させることが公共交通システムの効率性と公平性に与える影響，および既存運賃制度の範囲内での望ましい運賃体系を分析した．効率性の観点では，運賃水準が低すぎて適切なネットワーク を維持できない場合を除くと，どのような運賃制度を適用しても最適運賃体系適用時と大差ない社会的総余剰が得られる可能性が示唆された．一方で公平性の観点では，既存運賃制度への準拠が居住地ごとの消費者余剰の差異を大きくする可能性が示された．既存運賃制度の範囲内では均一制運賃制度が望ましく，対距離制運賃制度は公平性を損ねる傾向が示された．

第8章では，第3章で定式化したモデルの修正モデルに基づく数値解析を行い，個別型交通と大型交通の会計一体化がネットワーク 形状や起点別消費者余剰に与える影響を分析した．会計一体化した場合には個別型交通が大型交通に運賃収入の一部を移転（運営資金の補助）することでより多くの区間に大型交通を導入でき，地域全体の消費者余剰の総和を拡大できる可能性が示された．また大型交通が地域内の全ノードを経由し，かつ駅への交通需要が他交通需要に卓越する場合，個別型交通の会計一体化は地域全体の消費者余剰を増大させるだけでなく，起点別消費者余剰を平準化する効果も期待できることが示された．

第9章では結論と今後の課題を示した．第5章から第8章の数値解析の結果はいずれも最適ネットワーク構造，最適交通量，最適運賃の設定が密接に関係しあっていることを示しており，同時最適化の重要性が示唆された．以上を要するに，本論文は従来あまり顧みられることが無かったネットワーク構造・交通量・運賃の同時最適化

の有用性を検証するとともに，具体的性質を分析する方法やその分析例を示したものであり，大都市圏における今後の公共交通システム設計のあり方及び方針に有用な示唆を与えるものである．

他方，需要構造（需要関数の関数形やパラメータの設定など）や費用構造（交通サービスの運営費用関数の関数形やパラメータなど）に応じて，最適ネットワーク構造・最適交通量・最適運賃の具体的性質は異なると考えられる．そのため，今後も様々な仮定の下で最適化計算および分析を行い，理論の精緻化を図っていくこと望まれる．またその際，本論文で示したネットワーク 構造・交通量・運賃同時決定モデルは多数の 0-1 変数を含む NP 困難な問題であり，大規模なネットワークへの適用は難易度が高い．さらに本論文の数値解析では数値求解性を重視して線形需要関数を仮定したが，異なる需要関数を仮定した場合には凸問題とならず大域的最適解を求められない可能性もある．上記課題を克服する求解方法やアルゴリズムの開発が望まれる．そのほか，本モデルの拡張やネットワーク構造の差異に着目した理論解析等も今後の課題である．