都市圏郊外部における公共交通網の最適構成

Optimal Configuration of Public Transportation Network in Suburbs

須ヶ間 淳*
Atsushi SUGAMA

*地域計画学・被災地支援分野研究室（指導教員：奥村 誠 教授）

Mobility needs to be maintained in a variety of modes, including private cars. However, if public transportation is in sufficient demand, it is possible to provide inexpensive and convenient transportation services, so it is important to build an appropriate public transportation network on an appropriate scale. This study focuses on changing configurations of transportation network as a means of maintaining mobility. Next, we analyzed the optimal network configuration using a mathematical model that considered the complex relationship between network configuration and traffic volume and other factors. As a result, for example, it became clear that in a harsh environment such as a small demand scale and a small maximum payment intention, reduction of transit resistance such as MaaS has almost no effect, and spatial reduction of routes has a large effect.

Key Words : feeder transportation network system, network design, multi-modal, optimization model

1. はじめに

モビリティ維持に関する従来の議論では，公共交通網の存廃が注目される．我が国ではモータリゼーションの進展や人口減少・オンライン化等に伴う外出減少により公共交通網の経営環境が厳しくなっていることから，その維持を図るため様々な検討がなされてきた[例えば1)]．しかし，そもそもモビリティを，自家用車を含む多様なモードの分担・連携により確保できるのであれば，公共交通網の維持自体に拘泥すべきではない．例えば地方部など公共交通の存続が極めて困難な地域においては自家用車を含む非固定路線型のモードの積極的な活用を検討すべきである． ただしその一方で，適切な需要条件下において公共交通網が大きな規模の経済性を発揮し，低廉で便利なモビリティの提供に貢献することも事実である．やみくもに非固定路線型モードに転換すべきでもないだろう．すなわち，モビリティを維持するためには，適切な空間的範囲に適切な公共交通網を構築することが必要である．

本研究では，公共交通サービスの空間的な提供範囲，設定する公共交通モードの種類とその空間的取り合わせ，公共交通モード間の乗り継ぎ抵抗，の組み合わせを公共交通網構成（以下，NW 構成）と定義する．その上で，サービスの利用者だけで運営費用を捻出できない場合には別の利用者が負担しなければならないという社会的コストに注目し，地域の社会的総余剰を最大化するような NW 構成を求める数理モデルを開発する．そしてモデルを様々な条件下に適用し，採るべき適切な NW 構成の特徴を明らかにする．

NW 構成に関する既往研究には，モードに着目した研究 [2)]や路線形状に着目した研究 [3)]，路線の空間的・時間的密度に着目した研究 [4)]などが存在するが，それらは全て運営費用の予算や需要を固定的な外生パラメータとして与え，運営費用の最小化や利用者が支払う一般化費用の最小化を考えていた．本研究のように，適切なサービス提供という観点から社会的総余剰の最大化を考えた研究は見当たらない．また，1 つの地域内における複数モードの分担・連携を考慮した研究も都市内交通分野では見当たらず，本研究の特徴である．

第 1 章では本研究の背景と特徴を述べた．第 2 章では本研究で用いるモデルの説明を行う．第 3 章から第 7 章では第 2 章で説明したモデルを様々な状況下に適用し分析を行う．第 8 章にはまとめと今後の課題を記す．

2. 本研究で用いるモデル

都市間交通分野でNW構成の分析に用いられた細・奥村[5)]のMNPモデルを参考にモデルを構築し，第3 -5 章では**図-1** の仮想地域に，第6 -7 章では**図-2** の仮想地域に適用して分析を行う．地域内の各居住地から鉄道駅までのフィーダー交通に着目し，第1 章から第6章までは駅への需要が卓越しているとの仮定から居住地から鉄道駅までの交通需要のみ考慮する．第7 章では，昨今の急激な社会情勢の変化を受け，居住地から鉄道駅までの需要に

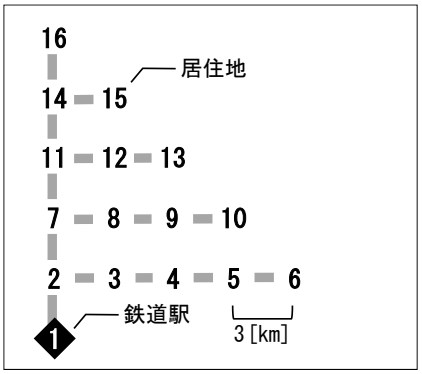

図-1　仮想地域とノード番号（第 3-5 章）

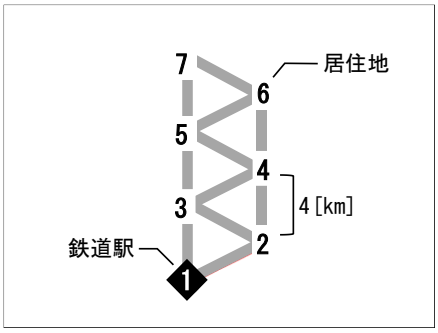

図-2　仮想地域とノード番号（第 6-7 章）

加え，地域内発着の交通需要を考慮する．

需要は弾力的であり，交通量は最大支払い意思額，最大需要規模，及び一般化費用に基づき内生的に決定される．利用者はまず，公共交通網と自家用車のどちらを利用するか選択する．公共交通網は定員や運営費用の水準が異なる2つのモード（大型交通と小型交通）で構成される．公共交通網を利用する場合には2 つのモード間を自由に乗り継ぐことができる（なお，その際，乗り継ぎ抵抗を考慮する）．利用者が公共交通網と自家用車のいずれを利用するのか，また公共交通網内でいずれのモードを利用するのか，は個々人の便益等に関わらず，地域全体の社会的総余剰を最大化するように決定される．ただし社会的総余剰の大部分が個々人の便益の総和で占められるため，個々人が完全情報下で一般化費用（本研究では，移動に必要な費用＋移動時間＋乗継抵抗）を最小化する場合とほぼ同様の交通手段が選択されると考えられる．

公共交通網の構成要素である大型交通は一般的な路線バスを，小型交通は定員 10 人程度のコミュニティバスを想定している．公共交通網の運営費用は車両の走行距離に比例して発生するものとし，公共交通網全体の運営費用を，利用者が支払う運賃の総和で一括して賄う．すなわち，必ずしも路線ごとに収支が合うとは限らず，内部補助を許容している．一方で自家用車の一般化費用は，時間的な費用に様々な金銭費用を加えたものであり，利用区間の走行距離に比例すると仮定する．なおパラメータ設定の際には，大型交通より小型交通のほうが，また小型交通より自家用車のほうがより小さな需要規模に適しているということを念頭に置いた．

第 3 章では路線の縮小を許容しない（公共交通網の全廃のみ許容される）場合を，第 4 章では同じく路線の縮小を許容しない条件下で乗継抵抗を削減した場合を，第 5 章では路線の一部縮小を許容する場合を，第 6 章では路線形状の抜本的改変を許容する場合を，第 7 章では路線形状の抜本的改変を許容した上で，地域内を発着する交通需要も考慮した場合を考える（第 6 章以前は居住地から鉄道駅までの需要のみを考えている）．なお，モデルやパラメータの詳細の説明は，紙面の都合上割愛する．

3.　需要規模に応じた最適NW構成

まずは路線形状を固定し，モード構成のみを内生変数に最大需要規模・最大支払い意思額に応じた最適NW構成を計算した（**図-3** 上段）．最大需要規模の小さいケースは交通需要が減少した状況を，最大支払い意思額の小さいケースは外出の重要性が低下した状況を表現している．凡例は図中に示した．

図-3 上段からは，最大支払い意思額が小さい場合や需要規模が小さい場合に公共交通網の維持が困難となることが読み取れる．モビリティを維持するためにはモード構成の変更を許容するだけでは不十分であり，より抜本的なNW構成の改変が必要であることが示された．また，別の利用者からの運賃収入を用いて無理やり地域全体に交通サービスを供給しても，誰にも利用されないリンク（**図-3** 中の黒色リンク）が存在する場合があり，それにより社会的総余剰が押し下げられることも判明した．やみくもに地域全体を公共交通網でカバーしてもモビリティ維持にはつながらないことが確かめられた．

4.　乗継抵抗の削減について

近年注目されるMaaSを念頭に，乗継抵抗の削減による効果を分析した．**図-3** の上段（乗継抵抗600円相当の場合）と中段（乗継抵抗100円相当の場合）の比較から，乗継抵抗の削減が社会的総余剰を引き上げることが確かめられた．また，サービスを供給しても誰にも利用されないリンク（**図-3** 中の黒色リンク）を削減できることも明らかになった．一方で最大支払い意思額や最大需要規模が小さい場合には，乗継抵抗の大小にかかわらず公共交通網を維持できず，社会的総余剰がほとんど改善され

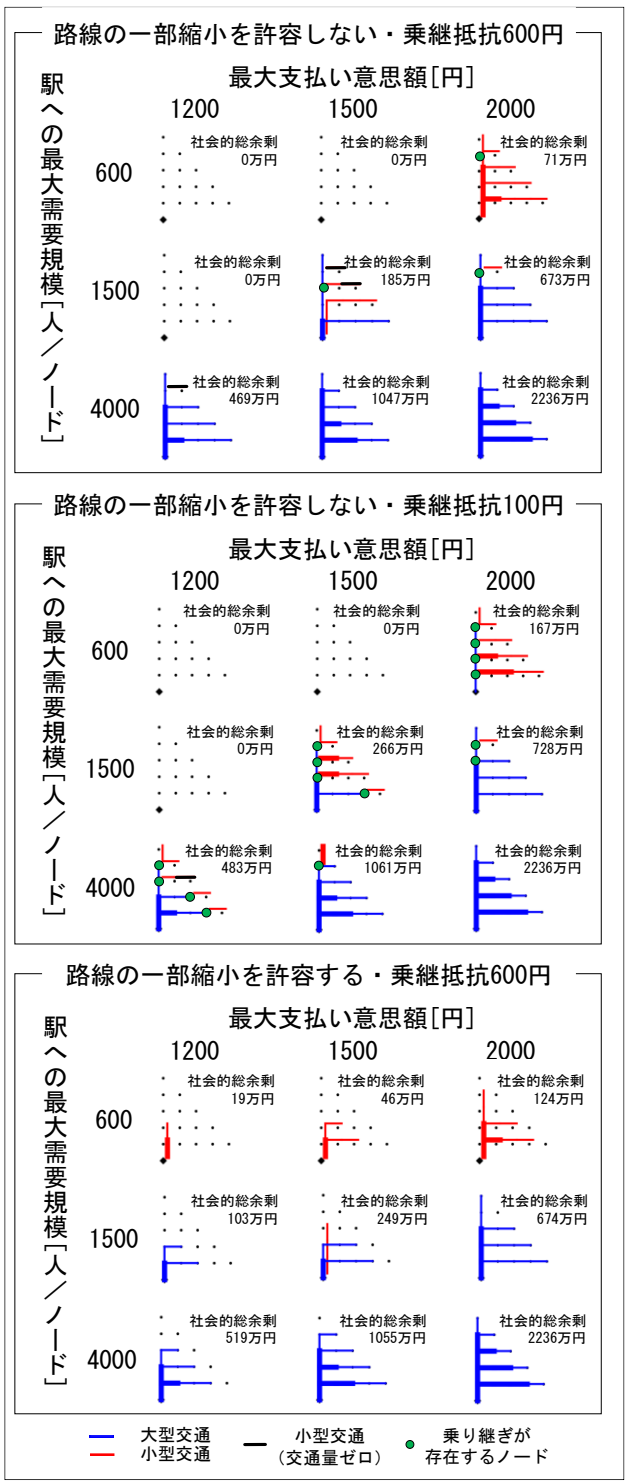

図-3　需要規模に応じた最適NW構成

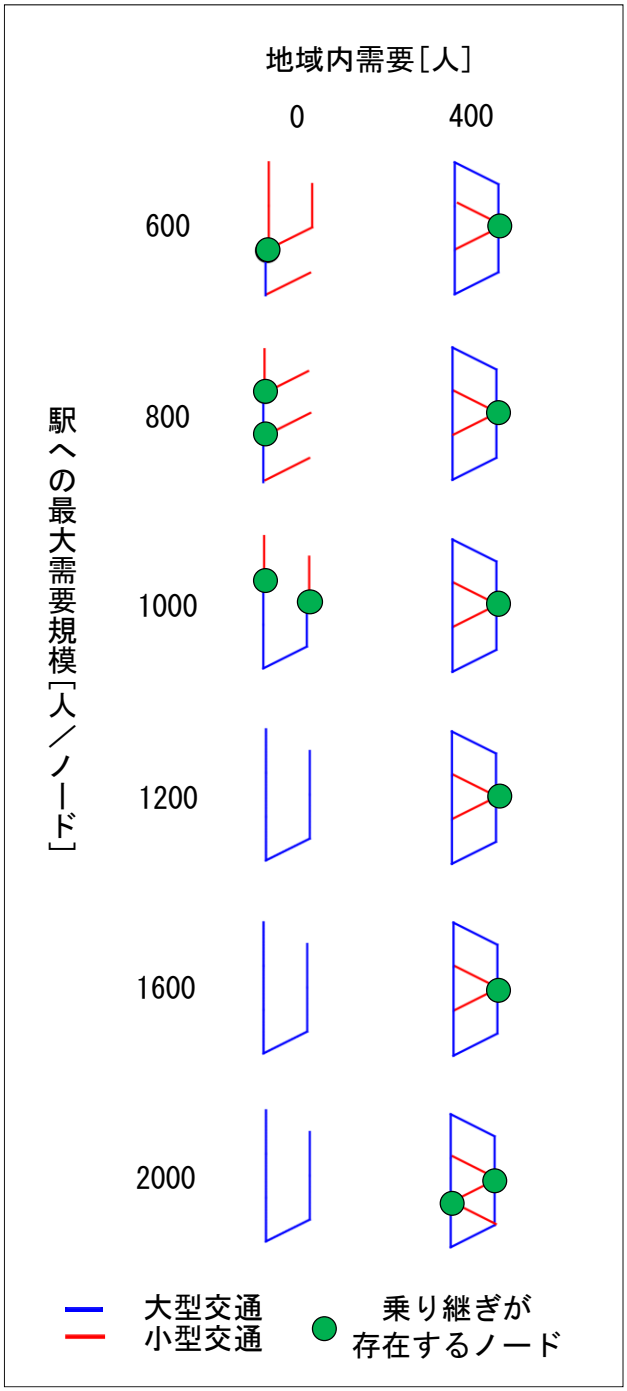

図-4　需要規模に応じた最適 NW 構成

ないことも明らかになった．すなわち，モビリティ維持が困難な場合の解決策としては効果を期待できないことが示唆された．

5.　路線の一部縮小の許容について

図-3 の上段（路線の縮小を許容しない場合）と下段（路線の縮小を許容する場合）を比較することで，路線の一部縮小を許容した場合の効果について分析した．最大支払い意思額が大きい場合や需要規模が大きい場合には路線の縮小を許容してもNW構成がほとんど変わらず，社会的総余剰も変わらなかった．しかし，最大支払い意思額が小さい場合や需要規模が小さい場合には，縮小の許容により，公共交通サービスの提供範囲が縮小するが，より小さな需要規模でも公共交通網を維持できるようになり，社会的総余剰が改善されることがわかった．またサービスを供給しても誰にも利用されないリンク（**図-3** 中の黒色リンク）は見られなかった．このことから路線

の一部縮小の許容は，最大需要規模や最大支払い意思額が小さく，公共交通網の維持が困難な場合に特に有用であることが示された．また，需要規模が小さい場合にはもはや地域の周縁部に公共交通網の存続余地がなく，別途，自家用車など非固定路線型モードによるモビリティ確保が望ましいことも示唆された．

6.　路線形状の変更の許容について

第5 章までで使用した仮想地域（図-1）とは異なる図-2 の仮想地域を用い，路線形状の変更の許容について分析を行った（図-4 左列）．需要規模が大きい場合には各ノードと駅を最短ルートで結ぶ複数本の幹線路線を基本としたNW構成が最適となるが，需要規模が小さい場合には，ある1本の幹線路線に複数のフィーダー路線が接続するNW構成が最適となることが分かった．すなわち，需要規模が大きい場合には，第5 章までで仮定していた路線形状と同様な形状が最適となるが，需要規模が小さくなった際には路線形状の大きな変更が必要であることが示された．また，路線形状が固定されている場合，もしくは縮小のみ許される場合には，需要縮小に伴って駅から遠いリンクから小型交通に切り替わる傾向があったが（図-3），路線形状の変更が許容される場合には，駅に近いリンクであっても小型交通に切り替わったり廃止されたりする可能性があることが示された．

7.　地域内発着の交通需要の考慮について

昨今のCOVID-19 感染対策等に起因する生活様式の変化，またそれに伴うオンライン化進展の影響から今後は都心への通勤需要が減少し，地域内の交通需要が相対的に大きくなる可能性がある．そこで駅に向かう集中的な需要に加えて地域内需要を考慮した場合の最適NW構成を分析した（図-4 右列）．その結果，第6 章で求められたような駅を中心とした路線形状ではなく，地域全体を均質に結ぶような路線形状が最適となることが分かった．

8.　おわりに

モード構成の変更を許容するだけでは，最大支払い意思額や需要規模が小さい場合，すなわち厳しい環境下でモビリティ維持を図ることは困難であり，他の施策を併用する必要がある．乗継抵抗の削減は比較的恵まれた環境下（最大支払い意思額や需要規模が大きい場合）では社会的総余剰を引き上げるが，厳しい環境下ではほとんど効果を期待できないことが分かった．一方で，路線の一部縮小の許容は厳しい環境下でこそ効果を発揮することが示された．

リンクに設定されるモードは，交通量が小さいリンクから優先的に大型交通から小型交通に切り替わる傾向があり，路線形状が固定されている場合や路線の一部縮小のみ許容される場合には概ね駅から遠いリンクから切り替わる．しかし，路線形状の変更を許容する施策を採った場合，駅に近いリンクでも小型交通に切り替わったり交通サービスが廃止されたりする場合があることが明らかになった．さらに，地域内需要が駅への需要と比べて無視できないほど大きく，特に駅への需要が小さい場合には，駅を中心としたNW構成から地域全体を均質にカバーするNW構成へと抜本的に改変することがモビリティを維持する上で重要であることも明らかになった．これらは，今後のモビリティ維持を考える上で有用な示唆であると考える．

なお，路線の一部縮小を許容する場合には，公共交通サービスが提供されない地域が生じうる．その場合，自家用車など非固定路線型モードを活用することで一定水準以上のモビリティを確保できるよう配慮する必要があり，その具体的な実現方法等の検討は今後の課題としたい．またその他，公共交通網でカバーされる地域内における公共交通網と自家用車の棲み分けについてや，施設配置問題と組み合わせての最適都市構造の検討，なども今後の課題として挙げられる．

参考文献

1) 溝上章志，橋本淳也：熊本電鉄の利用促進のための継続的 MM と商店街との協働による交通社会実験の効果，土木計画学研究・論文集，25 巻，pp.731 -739，2008.

2) 長谷川大輔，鈴木勉：需要密度・移動距離に着目した多様な公共交通システムの優位性に関する理論的考察，都市計画論文集，52 巻 3 号 pp.1284 -1289，2017.

3) 鈴木勉：拠点と軸の組合せに着目した都市構造の数理最適化，都市計画論文集，53 巻 3 号，pp.1472 -1477，2018.

4) Daganzo, C. F：Structure of competitive transit networks，Transportation Research Part B Methodological，44 (4)，pp.434 -446，2010.

5) 細正隆，奥村誠：最適な都市間交通ネットワーク形状を分析するための需要内生型モデル，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol.74, No.5，pp.I_779 -I_786，2018.