ネットワーク外部性を考慮した鉄道輸送サービス事業に関する研究

37-146860 邑上裕介
指導教員 影山和郎 教授

1. 背景と目的

本研究の目的は、鉄道事業者の鉄道輸送サービスと沿線開発のバランスに応じた利潤の変化を分析することである。鉄道輸送サービスと沿線開発とは相互依存関係にあり、それぞれ単体での収益分析では不十分である。このような問題意識のもとで、ネットワーク外部性の概念を取り入れ、複雑な都市モデルを再現する手法としてマルチエージェント・シミュレーションを用い、鉄道輸送サービスと沿線開発の投資バランスを変化させることによる利潤の変化を明らかにする。

鉄道事業者による沿線開発

環境面への配慮からモーダルシフト推進の対象として期待される鉄道であるが、事業として成立させることを考えると、その将来は明るいとは言えず、沿線人口の減少による収益性の低下が懸念されている。首都圏の人口は2015年頃を、首都圏以外の人口は2005年頃をピークに、減少を始めると予想されている[1]。そこで鉄道事業者は、様々な沿線開発を行い、沿線開発からの収益や、開発による沿線人口増加による収益から、新たな収益源の確保を図ろうとしている。

ネットワーク外部性

ネットワーク外部性とは、製品利用者の需要や便益が、その製品の現在や将来の利用者数に依存する性質である。ネットワーク外部性は、電話やソフトウエア、ハードウェアのようなネットワーク産業において特に顕著に見られる。この性質を持つ製品では、多くの場合、利用者の増加に伴い利用者の効用を増加させる[2]。

ネットワーク外部性の分類として、利用者同士が直接作用するかどうかで、直接効果と間接的効果に分けることができる。直接効果とは、利用者間の直接的なコミュニケーションの増加によって、ユーザーの享受する効用が増すものである。間接効果とは、補完財の供給が増えることによってネットワーク外部性が働くものである。

ネットワーク外部性を鉄道事業に適用して分析した事例としては、軌間の幅の選択過程を研究した Puffert, D.J. (1992)がある。Puffert(1992)は、歴史上のマクロレベルでの軌間選択は経路依存的であり、初期の軌間の幅の多様性の程度と、潜在的ネットワークの統合による恩恵と費用の関係に依存することを明らかにした。

2. モデルの概要

本研究で仮定する都市モデルは、1つの商業エリアとその近郊の 2 つの住宅エリア $j \in \{A, B\}$ からなる。それぞれのエリアは2つの鉄道事業者（以下、企業） $j \in \{A, B\}$ が結んでいる。2つの住宅エリアの位置関係により、2つの構造的違いを持った都市モデルを想定する。1つは商業エリアと2つの住宅エリアが直結する乗換なしモデル(図1）であり、1 つは直結しない住宅エリアが存在する乗換ありモデル（図 2）である。いずれのモデルにおいても、住宅エリア A と B の面積は同じとし、住宅エリア内外での転居費用は無視できるとする。

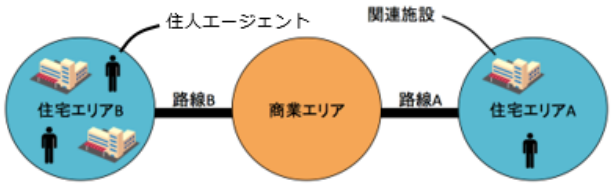

図１　都市モデル：乗換なしモデル

図２　都市モデル：乗換ありモデル

2.1 住人エージェント

住宅エリアには住人エージェントがおり、全員が鉄道を利用して商業エリアに通勤している。自動車や徒歩などによる通勤は想定しない。住宅エリア j に住む住人の数を n_j とし、$n_A + n_B = N$ (一定)とする。住人は住宅エリア j の相対的な好みの強さを表す属性 θを持つ。 θ は $[0,1]$ にランダムに分布しており、0 に近いほど住宅エリア A が好きであることを、1 に近いほど住宅エリア B が好きであることを表す。

住人エージェント i は住宅エリア j に住み路線 j を利用することで、効用 U_j を得る。効用 U_j は、運輸サービスとその関連サービスそれら自体から得られる固有の効用 V_j とネットワーク外部性による効用 $W_j(n_j, n'_j)$ の和から、地代 $r_j(n_j)$ を引いたものである。ここで、n'_j は路線 j の乗客数である。このとき、効用関数は次式で表される。住人は自身の効用が最大となるように、居住する住宅エリアを選択する。

$$U_j = V_j + W_j(n_j, n'_j) - r_j(n_j) \tag{1}$$

サービス固有の効用

住人が地域 j に住むことで得られる、運輸サービスやその関連サービス固有の効用 V_j を、以下のように定義する。

$$V_j = \begin{cases} (1-\theta)(V + gS_A)(j = A) \\ \theta(V + gS_B)(j = B) \end{cases} \tag{2}$$

ここで V, g は定数であり、S_j は企業 j が自身の運営する路線沿線に提供する関連サービスの数である。住人には住宅エリア j のどちらを好むかで多様な個人が存在しており、そこから得られるサービス固有の効用が変化すると仮定し、属性 θ によってその差異を表現している。

ネットワーク外部性による効用

本研究では、鉄道事業に関する外部性として、沿線発展による正のネットワーク外部性と、混雑による負のネットワーク外部性に着目する。前者はネットワーク外部性の間接的効果の一種であり、鉄道利用者の増加にともない、その沿線の商業が発展し、利用者の効用を増加させる。この効用を en_j で表す。 e は定数である。これは、路線の利用者が増えれば沿線が発展し、効用が増加することを意味している。後者はネットワーク外部性の直接的効果の一種であり、鉄道利用者の増加にともない、車内や駅構内の混雑により利便性が低下し、利用者の効用を減少させる。この不効用の大きさを $F(n'_j)$ で表す。$F(n'_j)$ については、次項で定式化する。これらにより、ネットワーク外部性による効用 $W_j(n_j, n'_j)$ を以下のように定義する。

$$W_j(n_j, n'_j) = en_j - F(n'_j) \tag{3}$$

混雑による不効用

鉄道サービスにおいて利用者が増加した場合、ネットワーク外部性の直接的効果は、混雑により負の方向に働くと考えられる。国土交通省(2012)をもとに、混雑による不効用の大きさ $F(n'_j)$ は混雑率の 2 乗に比例すると仮定し、以下のように定式化する[3]。

$$F(n'_j) = f\left(\frac{n'_j}{m_j}\right)^2 \tag{4}$$

ここで、f は定数であり、m_jは路線 j の輸送容量を、n'_j/m_jは混雑率を表す。

地代

住宅エリアの土地市場では、住人数の増加に伴って地代が上昇すると仮定する。地代の決定要因は複雑でありモデル化の方法も多く存在する。しかし、単純なモデルとして、地代は面積あたりの住人数に比例すると仮定できる。本研究では、住宅エリアの面積は同じであるため、住人数によってのみ決まると仮定する。このとき、地代 $r_j(n_j)$ は定数 r を用いて下式で表される。

$$r_j(n_j) = rn_j \tag{5}$$

住人エージェントの効用関数：乗換なしモデル

乗換なしモデルの場合、住人エージェントは住宅エリアから商業エリアへと１つの路線のみを用いて通勤しているため、効用関数を表１の通りに具体化できる。

表１　住民エージェントの効用関数：乗換なしモデル

地域 A に住む場合
$U_A = V_A + W_A(n_A, n'_A) - r_A(n_A)$ $= (1-\theta)(V + gS_A) + en_A - f\left(\frac{n_A}{m_A}\right)^2 - rn_A$
地域 B に住む場合
$U_B = V_B + W_B(n_B, n'_B) - r_B(n_B)$ $= \theta(V + gS_B) \ + en_B - f\left(\frac{n_B}{m_B}\right)^2 - rn_B$

住人エージェントの効用関数：乗換ありモデル

乗換ありモデルの場合、乗換なしモデルの場合と比べて、混雑不効用、地代、交通費に関して効用関数の形が異なる。

混雑不効用の違い

乗換ありモデルでは、住宅エリア B の住人が路線 A と路線 B の両方を使用するため、路線 A の利用で被る混雑不効用の大きさは $f\left(\frac{N}{m_A}\right)^2$ となる。よって、住宅エリア A の住人が被る混雑不効用の大きさは $f\left(\frac{N}{m_A}\right)^2$ 、住宅エリア B の住人が被る混雑不効用の大きさは $f\left(\frac{N}{m_A}\right)^2 + f\left(\frac{n_B}{m_B}\right)^2$ である。

地代の違い

乗換ありモデルでは、住宅エリア B は住宅エリア A に比べて、商業エリアからの 2 倍程度離れているため、それに応じて地代は低下すると考えられる。JR 東京駅からの直線距離と地価の関係を分析した唐渡(2007)は、都心からの距離が 2 倍になると地価は約 47%下落すると推定した[4]。この結果を援用し、本研究では、住宅エリア B の地代は住宅エリア A の地代の半分であると仮定する。

交通費の違い

乗換なしモデルでは、どちらの住宅エリアから通勤しても、商業エリアまでの距離と運賃が同じであるから、交通費に差はなかった。しかし、乗換ありモデルでは、どちらの住宅エリアから通勤するかによって交通費も異なる。その交通費の差額を P_T とおく。

以上の違いを考慮することにより、乗換ありモデルでの住人エージェントの効用関数は表 2 の通りである。

表２　住人エージェントの効用関数：乗換ありモデル

地域 A に住む場合
$U_A = V_A + W_A(n_A, n'_A) - r_A(n_A)$ $= (1-\theta)(V + gS_A) + en_A - f\left(\frac{N}{m_A}\right)^2 - rn_A$
地域 B に住む場合
$U_B = V_B + W_B(n_B, n'_B) - r_B(n_B)$ $= \theta(V + gS_B) \ + en_B - f\left(\frac{n_B}{m_B}\right)^2 - f\left(\frac{N}{m_A}\right)^2 - \frac{rn_B}{2} - P_T$

住人エージェントのライフサイクル

住人エージェントは 18～25 歳で生成され、2 回の住宅エリア選択を経て、78～88 歳で消滅する。生成される年齢は、シミュレーション開始時のみ 18～88 歳で設定される。1 回目の住宅エリア選択は 25～35 歳の時に、2 回目の住宅エリア選択は 35～45 歳の時に行われる。

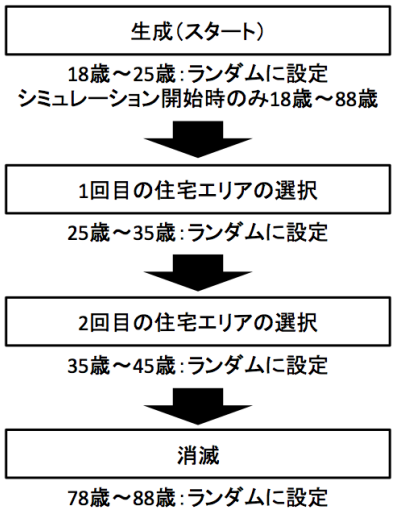

図３　住人エージェントのライフサイクル

2.2 企業エージェント

t 期における住宅エリア j の住人数を $n_{j,t}$ とおくと、企業エージェント j が 2 つの事業によって t 期に獲得する利潤 $\pi_{j,t}$ は次式で表される。

$$\pi_{j,t}(m_j, S_j) = P_H n'_{j,t} + P_S n_{j,t} S_j - c_T m_j^2 - c_S(n_{j,t} S_j)^2 \quad (6)$$

ここで、$P_H n'_{j,t}$ は鉄道輸送サービスから得られる収入である。P_H は住宅エリアから商業エリアへ通勤通学のためにかかる年間の往復運賃を表す定数である。また、$P_S n_{j,t} S_j$ は関連施設の提供から得られる収入である。ここで、P_S は 1 箇所の関連施設で 1 人が使う金額であり、沿線の他施設との完全競争の結果として定数であると仮定する。$c_T m_j^2$, $c_S(n_{j,t} S_j)^2$ はそれぞれ鉄道輸送サービスにかかる費用と関連施設の運営にかかる費用である。

以上の仮定により、最終的な $\pi_j(m_j, S_j)$ を次の通りに定式化する。ここで、γ は割引率、T はシミュレーション期間である。

$$\pi_j(m_j, S_j) = \sum_{t=1}^{T} \gamma^t \pi_{j,t} = \sum_{t=1}^{T} \gamma^t \left\{ P_H n'_{j,t} + P_S n_{j,t} S_j - c_T m_j^2 - c_S(n_{j,t} S_j)^2 \right\} \quad (7)$$

2.3 シミュレーションの流れ

シミュレーションでは、まず企業エージェント j が輸送容量 m_j と関連施設数 S_j を決定する。各ステップでは、まず各住宅エリアに存在する住人エージェントを数え、それにもとづいて地代を算出する。住人エージェントは効用関数を計算し、年齢に応じて転居を行う。各ステップの最後に全ての住人エージェントが加齢し、一部が死亡する。死亡した数と同数の住人エージェントが同時に誕生する。

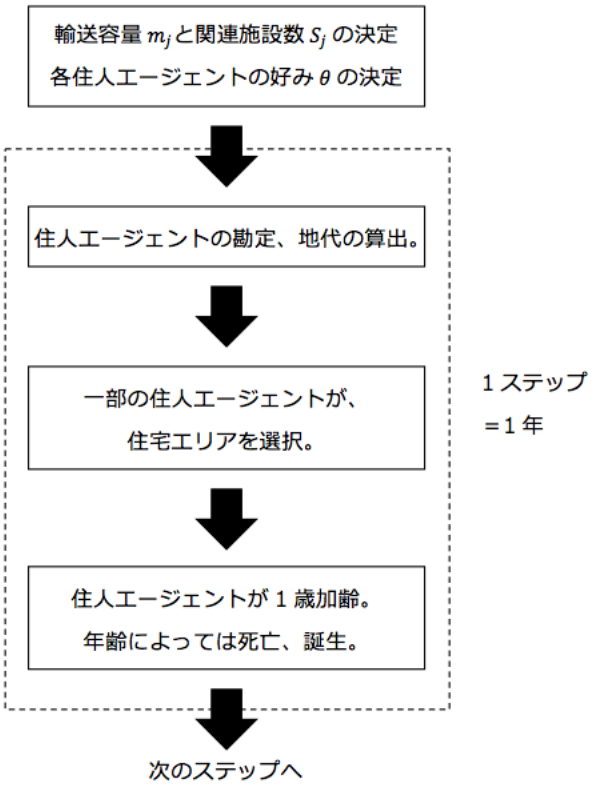

図４　シミュレーションの流れ

3. シミュレーションの結果と考察

本研究で行う全てのシミュレーションにおいて共通に置かれる設定や共通の初期値が与えられるパラメータは、以下の通りである。ただし、パラメータの値自体には意味はなく、その相対的な関係に応じた質的違いを分析する。

シミュレーションは 1 ステップを 1 年とし、期間を $T = 60$ 年に設定する。シミュレーションの開始時には住人に対して選好 θ 、年齢、住宅エリア選択を行う年齢を設定する。分析する各々の設定につき 10 回ずつシミュレーションを実行し、その結果に基づき考察する。パラメータの共通初期値は表 3 の通りである。

表３　共通パラメータ

シミュレーション期間 T	60
住人エージェントの総数 N	1000
初期時点での住宅エリア A の住人数 n_A	500
住宅エリアから得る固有の効用 V	500
関連施設から得る固有の効用に係る係数 g	50
住人エージェントが支払う年間運賃P_H	60000
住人エージェントが支払う関連施設費 P_S	600
運輸サービス提供にかかる費用係数 c_T	100
関連サービス提供にかかる費用係数c_S	1
沿線発展による効用の増加率 e	2.5
混雑不効用に係る係数 f	300
地域エリア A の地価上昇率 r	1
交通費の差額 P_T	100
割引率 γ	0.99

3.1 乗換なしモデルでのシミュレーション結果と考察

シミュレーションの結果は図 5 の通りである。利潤の大きさは色の違いによって表され、赤いほど高利潤であり、青いほど低利潤である。色の基準は本節と 3.2 節、3.3 節で統一しており、各モデル間での比較が可能である。

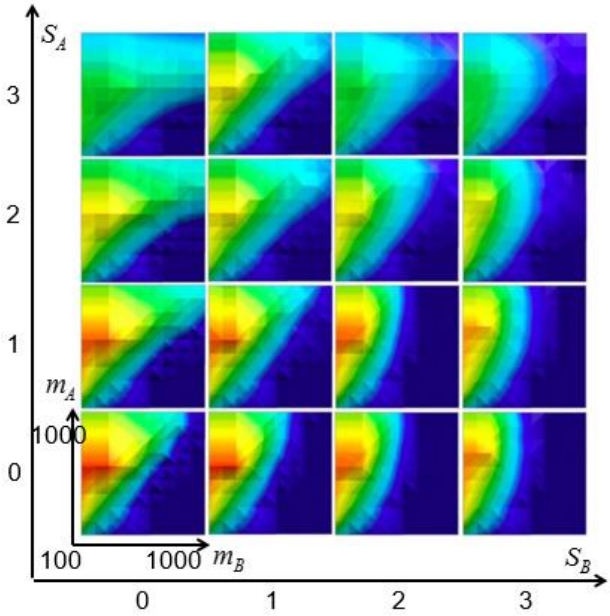

図５　乗換なしモデルでの結果

競合他社の規模拡大により利潤が低下すること、その場合には自身の規模拡大により利潤が増加しうること、競合他社の規模が小さい場合には利潤を最大化する輸送容量が存在し、関連施設については縮小することが利潤増大をもたらすことが示された。

3.2 乗換ありモデル・商業エリア直結企業でのシミュレーション結果と考察

シミュレーションの結果は図 6 の通りである。

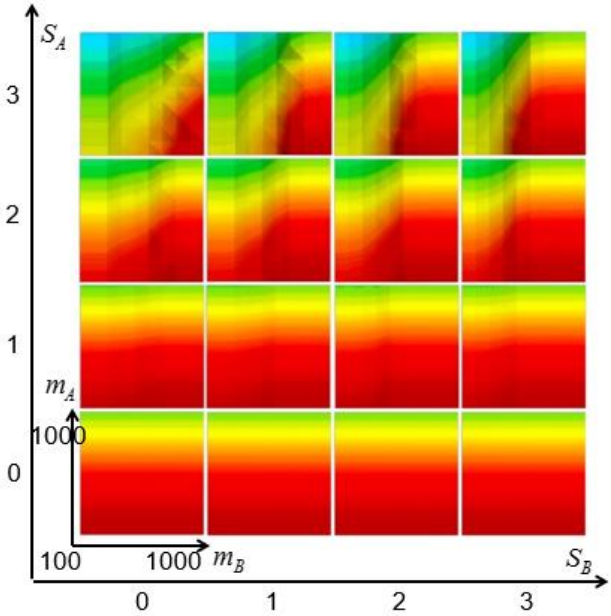

図６　乗換ありモデル・商業エリア直結企業での結果

非直結企業の規模によらず輸送容量を低下させた方が利潤は増加すること、関連施設を増やすと利潤は低下すること、非直結企業が規模を拡大すると利潤が増加することが示された。

3.3 乗換ありモデル・商業エリア非直結企業でのシミュレーション結果と考察

シミュレーションの結果は図 7 の通りである。

輸送容量を大きくすると利潤が増加すること、しかし、輸送容量が十分に大きくなると利潤が低下すること、直結企業が関連施設を増やすと利潤が低下することが示された。

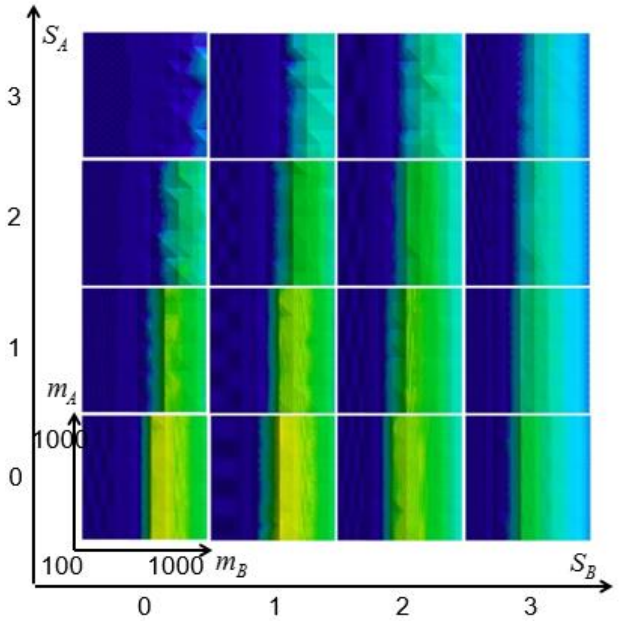

図７　乗換ありモデル・商業エリア非直結企業での結果

4. 結論

本研究では、ネットワーク外部性を考慮した鉄道事業モデルを構築し、マルチエージェント・シミュレーションによる分析を行った。それにより、輸送容量と関連施設数を操作変数としたときの立地条件ごとの企業利潤の変化や、都市構造の違いによる市場構造への影響を考察した。

本研究により、ネットワーク外部性を考慮した鉄道輸送サービス事業の収益メカニズムが明らかになり、鉄道事業を分析する既存モデルを拡張する上でも有用な知見を得ることができたといえる。

謝辞

本研究に際して、株式会社構造計画研究所様より、マルチエージェントシミュレーション・プラットフォームの artisoc3.5 を無償で貸与していただくなど多くのご厚意をいただきました。深く御礼申し上げます。

指導教官である影山和郎教授にも、深く感謝申し上げます。お忙しい中お世話になり、幅広い知見に基づいた貴重なアドバイスをいくつもいただき、精神的な面から技術的な面まで、多くのことを学ばせていただきました。

参考文献

[1] 中央三井トラスト・ホールディングス(2009)「大手民鉄の経営研究」

[2] Katz, M.L. and C. Shapiro (1985) “Network Externalities, Competition, and Compatibility”, The American Economic Review, 75(3)

[3] 国土交通省(2012)「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル」

[4] 唐渡広志(2007)「地価関数の推定と空間的自己相関の検出」,『土地総合研究』15(4), pp.3-13, 土地総合研究所