

LRT の土地利用・規模の経済を考慮した 通勤手段選択モデル

増田 颯¹・高山 雄貴²

¹学生非会員 金沢大学 自然科学研究科 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: hayate.m@stu.kanazawa-u.ac.jp

²正会員 金沢大学 理工研究域 (〒 920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: ytakayama@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では、居住地と CBD を結ぶ線形空間を道路と LRT で分け合うモデルの構築を行う。自動車利用者と LRT 利用者両方にとって望ましい配分について調べるため、自動車と LRT の通勤費用関数を設定する。2つの通勤費用関数を用いて、均衡状態の定式化を行い、解析を進める。解析を進めた結果、通勤費用関数のパラメータ設定により、線形空間における道路と LRT との配分次第で、LRT 利用者が全く存在しなくなってしまう場合があると明らかになった。

Key Words : LRT, economies of scale

1. はじめに

(1) 研究背景と目的

近年、公共交通機関の土地利用問題が取り上げられている。栃木県宇都宮市では新たに LRT の整備が進められ、2023 年 8 月に開業を控えている。金沢市でも LRT の導入が検討されている。新たに公共交通を導入すると、既存の道路空間を無くすことになってしまう。では、道路空間を自動車と軌道系の公共交通機関で、どのように配分することが望ましいのだろうか。

LRT を導入することのメリットは、時刻通りの運行が可能である点や自動車交通と比べ輸送容量が大きい点が挙げられる。さらに、利用者の増加に伴い運行頻度が増加したり、運賃の値下げが起こったりと規模の経済がはたらくこともある。しかしながら、LRT の導入によるデメリットも存在する。LRT の導入により既存の道路容量が低下するため、自動車交通量が以前と同等であれば、渋滞問題がより深刻化してしまう点である。また、新たに LRT が開業しても利用者が少なければ、運賃設定が高価なままであったり、運行頻度の低下が起こったりと公共交通の利便性低下につながる恐れもある。このように、道路と軌道系の公共交通機関の土地利用配分についてよく考えなければならない。

そこで本研究では、自動車と LRT の通勤手段選択モデルの構築を目指す。居住地と CBD を結ぶ線形空間を道路（自動車）と LRT で分け合うモデルを考え、線形空間をどのように配分すれば、利用者にとって望ましい状態を実現することができるのかを検討していく。

(2) 本稿の構成

本稿の構成は以下の通りである。まず、第 2 章では自動車と LRT の土地利用について考えるためのモデルの設定を行う。都市空間と自動車利用者・LRT 利用者の通勤費用関数をそれぞれ設定する。第 3 章では、通勤費用関数を用いて均衡状態の定式化を行い、起こり得る状態の均衡条件を導出する。第 4 章では 1 つの状態に着目し、パラメータの検討を行う。最後に第 5 章でまとめを行い、今後の課題について述べる。

2. モデルの設定

(1) 都市空間の設定

道路（自動車）と LRT の土地利用配分を考えていくためのモデルの設定を行う。居住地から CBD へ向かう通勤者を N 、自動車利用者数を n_c 、LRT 利用者数を n_L とする。また、線形空間の土地全体の容量を μ 、道路のシェアを ϕ 、LRT のシェアを $1 - \phi$ とする。

自動車の通勤費用は、自動車利用者数 n_c 、道路シェア ϕ 、土地全体の容量 μ の関数として与える。LRT の通勤費用は、LRT 利用者数 n_L 、LRT のシェア $1 - \phi$ 、土地全体の容量 μ 、LRT の輸送容量を考慮したパラメータ s の関数として与える。

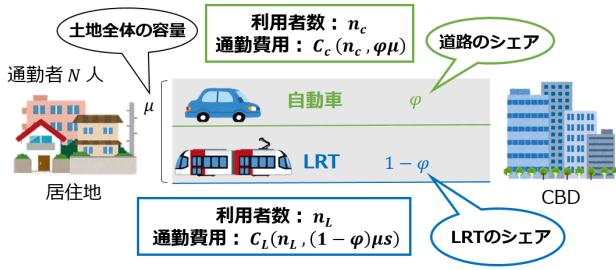


図-1 通勤手段選択モデル

(2) 通勤費用関数の設定

2つの手段の通勤費用関数を設定する。自動車の通勤費用関数 C_c は以下の式で表される。

$$C_c = \left(\frac{n_c}{\mu\phi} \right)^\beta + C_F \quad (1)$$

第1項は、所要時間に対する費用を表す。この項では、自動車利用者数 n_c が増加するほど、道路に配分される土地が減少するほど道路空間が混雑し、所要時間が増加することを表現している。 β はパラメータとして設定する。第2項は、燃料費やメンテナンス費など自動車の保有費用を表す項である。これは定数で与える。

LRT の通勤費用関数 C_L は以下の式で表される。

$$C_L = \left\{ \frac{n_L}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A \quad (2)$$

第1項は、車内混雑に対する費用を表す項である。LRT は軌道系の公共交通であるため線形関数に近い性質もっていることが予想されるが、鉄道のように de Palmae ら¹⁾により実証的知見が得られているわけではない。そこで、パラメータ γ を設定し、解析を通して γ の値の検討を行っていく。第2項は、運賃や運行スケジュールに対する費用を表す項である。この項は、LRT 利用者数 n_L が増加するほど、LRT の利便性が向上するという規模の経済による影響を考慮している。 F_L は LRT の建設費や車両の整備費など LRT の固定費用である。第3項は、LRT へのアクセス性を表す固定費用である。第3項は定数で与えられ、LRT へのアクセスが不便であるほど、大きな値をとる。

3. 均衡状態

自動車と LRT の通勤手段選択モデルにおいて実現し得る均衡状態について示す。均衡状態とは、どの通勤者も通勤手段を変更する動機を持たない状態である。野田²⁾のモデルを参考に、自動車と LRT の通勤費用 C_c^* , C_L^* を既知として、手段別利用者数 n_c , n_L を求め

る。均衡条件は以下の式で表される。

$$C_c^* = C_L^* \quad \text{if} \quad n_c > 0, \quad n_L > 0 \quad (3)$$

$$C_c^* \geq C_L^* \quad \text{if} \quad n_c = 0 \quad (4)$$

$$C_c^* \leq C_L^* \quad \text{if} \quad n_L = 0 \quad (5)$$

$$n_c + n_L = N \quad (6)$$

道路シェア ϕ の水準に応じた均衡状態は複数存在し、次の3つの状態がある。(A) 自動車通勤と LRT 通勤が共存する場合、(B) 全員が LRT 通勤をする場合、(C) 全員が自動車通勤をする場合である。上記の条件を用いて、各均衡状態の解析を行っていく。ただし、式(6)の人口保存則が常に成り立つものとする。

(A), (B), (C) が均衡状態となる条件式を、以下で整理していく。

(1) 自動車通勤と LRT 通勤が共存する場合

式(1)(2)(3)より、

$$\left(\frac{n_c}{\mu\phi} \right)^\beta + C_F = \left\{ \frac{n_L}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A \quad (7)$$

これを解くと、式(8)を得る。

$$n_c = \mu\phi \left(\left\{ \frac{n_L}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A - C_F \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

ここで、自動車利用者数 $n_c > 0$ 、土地全体の容量 $\mu > 0$ 、道路シェア $0 < \phi < 1$ であるから、この均衡状態が起こる条件式は以下のように整理できる。

$$(A) \quad \left\{ \frac{n_L}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A > C_F \quad (9)$$

したがって、自動車通勤と LRT 通勤が共存するという均衡状態が起こるときには、LRT の通勤費用が自動車の保有費用を上回っていればよいことが分かる。

(2) 全員が LRT 通勤をする場合

式(1)(2)(4)より、

$$\left(\frac{n_c}{\mu\phi} \right)^\beta + C_F \geq \left\{ \frac{n_L}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A \quad (10)$$

ここで $n_c = 0$ より、式(10)を整理することで以下の式(11)を得る。

$$(B) \quad C_F \geq \left\{ \frac{N}{s\mu(1-\phi)} \right\}^\gamma + \frac{F_L}{N} + C_A \quad (11)$$

したがって、全員が LRT 通勤をするという均衡状態が起こるときには、居住地の全通勤者 N が LRT を利用した場合の通勤費用が、自動車の保有費用を下回っていればよいことが分かる。

(3) 全員が自動車通勤をする場合

式 (1)(2)(5) より,

$$\left(\frac{n_c}{\mu\phi}\right)^\beta + C_F \leq \left\{\frac{n_L}{s\mu(1-\phi)}\right\}^\gamma + \frac{F_L}{n_L} + C_A \quad (12)$$

ここで $n_L = 0$ より, 式 (12) の右辺第 2 項が無限大に発散してしまう. 式 (12) の大小関係が成り立つので, この均衡状態は常に存在するといえる.

以上から, 3つの各均衡状態において満たすべき条件式を導出することができた. 起こり得る均衡状態について, ① $n_L^* = 0$ のみが均衡となる状態 (2つの通勤費用関数が共有点をもたない状態), ② $n_L^* = 0$ と, $n_{L2}^* > n_{L1}^* > 0$ となる計 3種類が均衡となる状態 (2つの通勤費用関数が共有点をもつ状態) の 2つがある. さらに, ②の状態は $n_L^* = 0$ と n_{L2}^* が安定均衡となり, n_{L1}^* は不安定均衡であることが分かっている. n_{L1}^* が不安定均衡となるのは, 1) 点 n_{L1}^* の左側では LRT の通勤費用に比べて自動車の通勤費用が小さく, LRT 利用者が自動車へと手段変更を行い, $n_L^* = 0$ の状態へ向かうため, 2) 点 n_{L1}^* の右側では自動車の通勤費用に比べて LRT の通勤費用が小さく, 自動車利用者が LRT へと手段変更を行い, n_{L2}^* の状態へ向かうためである.

4. 均衡状態の解析

本章では, 均衡状態 (A) 自動車通勤と LRT 通勤が共存する場合に着目して解析を進め, 得られた結果をまとめる.

(1) 2つの通勤費用関数が共有点をもつための条件

自動車と LRT の 2つの通勤費用関数が共有点をもつための条件について考えていく. 式 (2) より, LRT 利用者数 n_L が非常に小さい場合, 右辺第 2 項が無限大へ発散するため, (C) 全員が自動車通勤をする場合が起こることは明らかである. しかしながら, (A) 自動車通勤と LRT 通勤が共存する場合は常に存在するといえない. そこで, (A) の均衡状態が起こるための条件の導出を行った. その結果, LRT の輸送容量を考慮したパラメータが $s > 1$ という条件では, 2つの通勤費用関数が共有点を持つための ϕ の値の範囲が以下で表されることが分かった.

$$0 < \phi < \phi_1 \quad (13)$$

$$\phi_1 = \frac{-s^2N^2 - 4s^2\mu F_L}{2(4s\mu F_L - 4s^2\mu F_L)} - \frac{s\sqrt{s^2N^4 - 8s^2N^2\mu F_L + 16s^2\mu^2 F_L^2 + 16sN^2\mu F_L}}{2(4s\mu F_L - 4s^2\mu F_L)} \quad (14)$$

(2) 通勤費用と道路シェア ϕ の関係

通勤費用と道路シェア ϕ の関係について考察を行う. 均衡点における LRT 利用者数 n_L^* は以下のように表せる.

$$n_L^* = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (15)$$

ただし, 以下に示す値, 条件である.

$$A = s + \phi - s\phi \quad (16)$$

$$B = -sN(1 - \phi) \quad (17)$$

$$C = s\mu\phi(1 - \phi)F_L \quad (18)$$

$$C_F = C_A \quad (19)$$

$$\beta = \gamma = 1 \quad (20)$$

今回は, 2つの通勤費用関数の共有点のうち右側のについて扱っていく.

$$n_L^* = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (21)$$

均衡点における LRT 利用者数 n_L^* を式 (2) に代入することで, 均衡点における通勤費用 C^* が求まる. ただし, 簡単のため $\gamma = 1$ として設定している.

$$C^* = \frac{n_L^*}{s\mu(1 - \phi)} + \frac{F_L}{n_L^*} + C_A \quad (22)$$

また, 均衡点における LRT 利用者数 n_L^* を式 (1) に代入しても, 均衡点における通勤費用 C^* が求まる. ただし, 簡単のため $\beta = 1$ として設定している.

$$C^* = \frac{N - n_L^*}{\mu\phi} + C_F \quad (23)$$

式 (22) の両辺を ϕ で偏微分すると, 以下の式 (24) を得る.

$$\frac{\partial C^*}{\partial \phi} = \frac{1}{s\mu(1 - \phi)} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} - \frac{F_L}{n_L^{*2}} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} + \frac{n_L^*}{s\mu(1 - \phi)^2} \quad (24)$$

式 (24) の右辺の各項の意味について考える. 右辺第 1 項は, 道路シェア ϕ の変化に伴う LRT 利用者数の変化, すなわち LRT の需要を表す項である. この項は, 道路シェア ϕ の変化に伴う LRT 利用者数の変化により, 通勤費用を下げる働きをすることもあれば, 逆に通勤費用を上げる働きもありそうだ. 右辺第 2 項は, 規模の経済を表す項である. この項は, 道路シェア ϕ の増加に伴い LRT 利用者数が増加すれば, 通勤費用を減少させる働きをする. 一方で, 道路シェア ϕ の増加に伴い LRT 利用者数が減少すれば, 通勤費用を増加させる働きをする. 右辺第 3 項は, 車内混雑に対する費用についての項である. この項は, 常に通勤費用を増加させる働きを示している.

式 (23) の両辺を ϕ で偏微分すると, 以下の式 (25) を

得る。

$$\frac{\partial C^*}{\partial \phi} = -\frac{N - n_L^*}{\mu \phi^2} - \frac{1}{\mu \phi} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} \quad (25)$$

式 (25) の各項の意味について考える。右辺第 1 項は、所要時間に対する費用を表す項である。この項は、分母・分子ともに正の値をとるため、全体として常に負の値をとり、通勤費用を減少させる働きをするといえる。また、道路シェア ϕ の増加に伴って、通勤費用を減少させる度合いが小さくなっていくことも分かる。右辺第 2 項は、道路シェア ϕ の変化に伴う LRT 利用者数の変化に関する項である。この項は、道路シェア ϕ の増加に伴い LRT 利用者数が増加すれば、通勤費用を減少させる働きをする。一方で、道路シェア ϕ の増加に伴い LRT 利用者数が減少すれば、通勤費用を増加させる働きをする。

式 (24)(25) より、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{1}{s\mu(1-\phi)} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} - \frac{F_L}{n_L^{*2}} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} + \frac{n_L^*}{s\mu(1-\phi)^2} \\ = -\frac{N - n_L^*}{\mu \phi^2} - \frac{1}{\mu \phi} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、式 (1) より、式 (27) が成り立つ。

$$\frac{F_L}{n_L^*} = \frac{N - n_L^*}{\mu \phi} - \frac{n_L^*}{s\mu(1-\phi)} \quad (27)$$

式 (27) を式 (26) に代入すると、式 (28) を得る。

$$\left\{ \frac{2}{s\mu(1-\phi)} - \frac{n_L^* - 2}{\mu \phi} \right\} \frac{\partial n_L^*}{\partial \phi} = -\frac{N - n_L^*}{\mu \phi^2} - \frac{n_L^*}{s\mu(1-\phi)^2} \quad (28)$$

式 (28) の意味について考える。まず初めに、右辺に注目する。右辺第 1 項について、分母の値は常に正であり、分子も同様に全人口が LRT 利用者数を下回ることはないので、右辺第 1 項の値は負となる。右辺第 2 項について、こちらも分母の値は常に正であり、分子も LRT 利用者数なので正の値をとる。その結果、右辺第 2 項の値は負となる。したがって、右辺全体の値は負となる。

次に、左辺に注目する。まず、中括弧内の値について考えていく。中括弧内第 1 項の値は常に正となる。一方で、括弧内第 2 項の値は全人口の値、すなわち都市の人口規模によって変化しそうである。分母は常に正の値をとるが、全人口が LRT 利用者数の 2 倍以上となっている場合には、第 2 項全体で負の値をとる。しかしながら、全人口が LRT 利用者数の 2 倍未満となる場合には、第 2 項全体で正の値をとる。中括弧内の値の正負により、道路シェア ϕ と LRT 利用者数 n_L の関係を表すグラフの傾きが決まる。以上のように、都市の全人口、すなわち都市の人口規模に対する LRT 利用者の

割合が、道路シェア ϕ と LRT 利用者数の関係に影響を与えそうということがわかった。

(3) 道路シェア ϕ の値の検討

LRT 利用者数と通勤費用との関係について考える。まず初めに、道路シェア ϕ を $\phi = 0.2$, $\phi = 0.5$, $\phi = 0.8$ の 3 つで設定し、LRT 利用者数と LRT の通勤費用の関係についてみていく。LRT の車内混雑に対する費用を表す項のパラメータ γ の値について、 $\gamma = 2$ の場合に LRT の性質を適切に表現できそうなので、今回の解析ではこの値を用いることにする。その他の各パラメータについては、土地全体の容量 $\mu = 100$, LRT の輸送容量を考慮したパラメータ $s = 5$, LRT の固定費用 $F_L = 50000$, LRT へのアクセス性を表す固定費用 $C_A = 1000$ として設定する。道路シェア $\phi = 0.2$, $\phi = 0.5$, $\phi = 0.8$ の 3 つの場合の関係をグラフに表すと、以下のようになる。

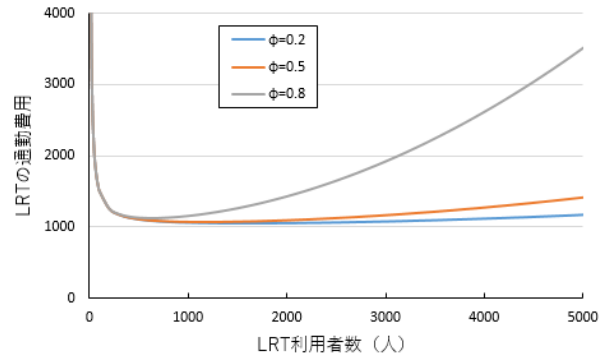


図-2 パラメータ ϕ の検討

図 2 から読み取れることをまとめる。道路のシェア $\phi = 0.2$ すなわち LRT のシェアが 0.8 の場合、他のパラメータ設定 $\phi = 0.5$ や $\phi = 0.8$ の場合に比べ、通勤費用の増加の度合いが緩やかである。これは、LRT のシェアを多くとっているため、LRT 利用者数が 5000 人ほどでは、LRT の輸送容量にあまり影響を与えないことを示している。道路のシェア $\phi = 0.5$ すなわち LRT のシェアが 0.5 の場合、LRT の利用人数が 5000 人に近づくとつれて、通勤費用の増加がみられる。道路のシェア $\phi = 0.8$ すなわち LRT のシェアが 0.2 の場合、LRT の利用人数が 2000 人を超えるところから、通勤費用の急激な増加がみられる。LRT のシェアが小さいだけに、 $\phi = 0.2$ や $\phi = 0.5$ の場合に比べ、利用者数が少ない状態から通勤費用の増加がみられる。

LRT 利用者数が少ない場合、あるいは人口規模の小さな都市では、道路のシェアが $\phi = 0.8$ すなわち LRT のシェアが $1 - \phi = 0.2$ ほどでも対応できそうであるが、人口規模が大きくなるにつれて LRT の輸送効率を上げるために、LRT のシェアを大きく保っていく必要

があるようだ。

実際に宇都宮市の LRT 工事現場を見ると、道路の片側 1 車線ずつを潰していくので、道路のシェア ϕ と LRT のシェア $1 - \phi$ がそれぞれ 0.5 ずつと考えることがよさそうであるが、より人口規模の大きな都市を考えていく上では、 $\phi = 0.5$ の場合のみではなく、LRT のシェアが 0.5 以上となる場合についてさらに考えていく必要があると思われる。

(4) LRT 導入における道路シェアと LRT 利用者数の考察

共有点をもつための境界値 ϕ_1 に関するパラメータは、土地全体の容量 μ 、LRT の輸送容量を考慮したパラメータ s 、LRT の固定費用 F_L 、通勤者 N であることがわかっている。本項では、これらのパラメータを変更し、それに伴う道路シェアと通勤費用の関係の変化をみていく。

まず初めに、各パラメータを $\mu = 100$ 、 $s = 5$ 、 $F_L = 50000$ 、 $C_A = C_F = 1000$ 、 $N = 20000$ 、 $\beta = \gamma = 1$ と設定した場合について考える。

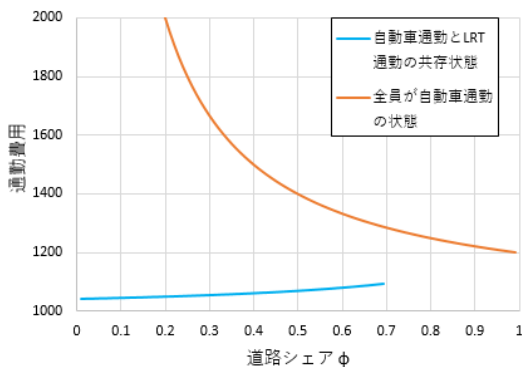


図-3 道路シェアと通勤費用の関係

この場合、2つの通勤費用関数が共有点をもつための ϕ の範囲は、 $0 < \phi < 0.6941$ である。理想の状態としては、全員が LRT 通勤をする ($\phi = 0$) 状態、または全員が自動車通勤をする ($\phi = 1$) 状態である。つまり、LRT を導入せずに道路を残す既存の状態、または道路空間を全てなくして LRT を導入する状態が理想である。

続いて、実際に道路シェアを設定して、利用者の動向にどのような影響を与えるのかを考えていく。LRT 導入前の初期状態は、道路シェア ϕ の値が $\phi = 1$ であり、全員が自動車通勤をする。その状態から、片側 2 車線の道路の 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.5$ となるように線形空間を分け合うと、誰も LRT を利用せず、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。現在のところ、実際に $\phi = 0.5$ という道路シェ

アを導入したとき、どちらの場合に利用者が動くのかわかっていない。交通渋滞が深刻化することを防ぐためには、LRT 利用を促進するための政策を考えなければならない。一方で、片側 4 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.75$ となるように線形空間を分け合うと、全員が自動車通勤をするという場合しか存在せず、誰も LRT を利用しなくなってしまう。

a) LRT の固定費用 F_L を変更した場合

LRT の固定費用 F_L の変更は、3つの場合を考える。まず初めに、LRT の固定費用 F_L を 1/10 倍にした場合について考える。各パラメータを $\mu = 100$ 、 $s = 5$ 、 $F_L = 5000$ 、 $C_A = C_F = 1000$ 、 $N = 20000$ 、 $\beta = \gamma = 1$ とし設定する。

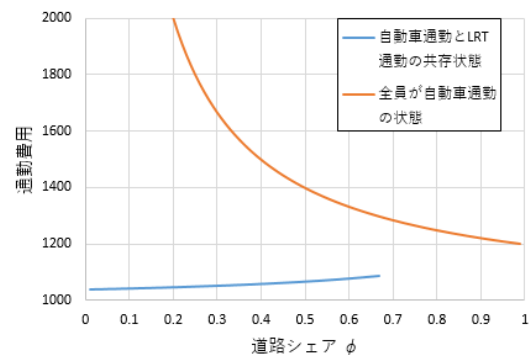


図-4 道路シェアと通勤費用の関係 (LRT の固定費用の変更その 1)

この場合、2つの通勤費用関数が共有点をもつための ϕ の範囲は、 $0 < \phi < 0.6693$ である。続いて、実際に道路シェアを設定して、利用者の動向にどのような影響を与えるのかを考えていく。LRT 導入前の初期状態は、道路シェア ϕ の値が $\phi = 1$ であり、全員が自動車通勤をする。その状態から、片側 2 車線の道路の 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.5$ となるように線形空間を分け合うと、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。現在のところ、実際に $\phi = 0.5$ という道路シェアを導入したとき、どちらの場合に利用者が動くのかわかっていない。交通渋滞が深刻化することを防ぐためには、LRT 利用を促進するための政策を考えなければならない。また、片側 3 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 2/3$ となるように線形空間を分け合う場合でも、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。道路シェア $\phi = 2/3$ という状態にも、LRT 利用を促進する何らか

の政策が必要である。しかしながら、片側 4 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.75$ となるように線形空間を分け合うと、全員が自動車通勤をするという場合しか存在せず、誰も LRT を利用しなくなってしまう。

次に、LRT の固定費用 F_L を 2 倍にした場合について考える。各パラメータを $\mu = 100$, $s = 5$, $F_L = 100000$, $C_A = C_F = 1000$, $N = 20000$, $\beta = \gamma = 1$ として設定する。

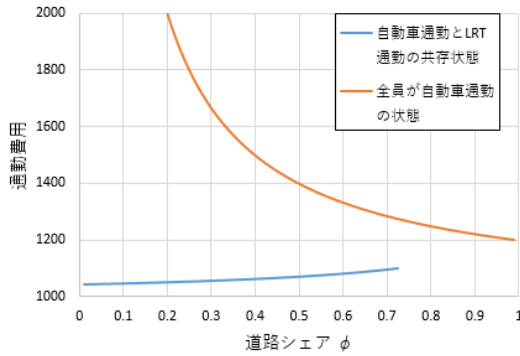


図-5 道路シェアと通勤費用の関係 (LRT の固定費用の変更その 2)

この場合、2つの通勤費用関数が共有点をもつための ϕ の範囲は、 $0 < \phi < 0.7233$ である。実際に道路シェアを設定して、利用者の動向にどのような影響を与えるのかを考えていく。LRT 導入前の初期状態は、道路シェア ϕ の値が $\phi = 1$ であり、全員が自動車通勤をする。その状態から、片側 2 車線の道路の 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.5$ となるように線形空間を分け合うと、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。現在のところ、実際に $\phi = 0.5$ という道路シェアを導入したとき、どちらの場合に利用者が動くのかわかっていない。交通渋滞が深刻化することを防ぐためには、LRT 利用を促進する政策を考えなければならない。また、片側 3 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 2/3$ となるように分け合う場合でも、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。道路シェア $\phi = 2/3$ という状態でも、LRT 利用を促進する何らかの政策が必要である。

片側 4 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.75$ となるように線形空間を分け合うと、全員が自動車通勤をするという場合しか存在せず、誰も LRT を利用しなくなってしまう。ただし、LRT の固定費用の増加とともに、2つの通勤費用関数

が共有点を持つための道路シェア ϕ の範囲が、 $\phi = 0.75$ に近づいてきている。もう少し LRT の固定費用を大きくしていけば、最終的に片側 4 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する場合でも、自動車通勤と LRT 通勤が共存する場合が存在する可能性が出てきた。

最後に、LRT の固定費用 F_L を 6 倍にした場合について考える。各パラメータを $\mu = 100$, $s = 5$, $F_L = 300000$, $C_A = C_F = 1000$, $N = 20000$, $\beta = \gamma = 1$ として設定する。

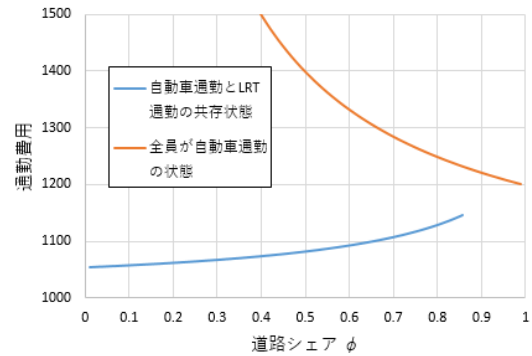


図-6 道路シェアと通勤費用の関係 (LRT の固定費用の変更その 3)

この場合、2つの通勤費用関数が共有点をもつための ϕ の範囲は $0 < \phi < 0.8577$ である。実際に道路シェアを設定して、利用者の動向にどのような影響を与えるのかを考えていく。LRT 導入前の初期状態は、道路シェア ϕ の値が $\phi = 1$ であり、全員が自動車通勤をする。その状態から、片側 2 車線の道路の 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.5$ となるように線形空間を分け合うと、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。現在のところ、実際に $\phi = 0.5$ という道路シェアを導入したとき、どちらの場合に利用者が動くのかわかっていない。交通渋滞が深刻化してしまうことを防ぐためには、LRT 利用を促進する政策を考えなければならない。また、片側 3 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 2/3$ となるように線形空間を分け合う場合でも、通勤者全員が自動車を利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。道路シェア $\phi = 2/3$ という状態でも、LRT 利用を促進する何らかの政策が必要である。

さらに、片側 4 車線の道路の片側 1 車線ずつを潰して LRT を建設する、すなわち $\phi = 0.75$ となるように線形空間を分け合う場合でも、通勤者全員が自動車を

利用して交通渋滞がますます激しくなってしまう場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こり得る。

宇都宮市のように、1 から LRT を建設する場合には、線路を敷設したり架線を張ったりと LRT 建設の固定費用が多くかかってしまう。そのような場合には、道路空間を思い切って潰さなくても、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態が実現し得ることがわかった。このとき、LRT 利用を促進する政策を導入することで、LRT を利用してもらうことができそうだ。一方で、富山のように、元々線路が敷設してある場所を活用したりするなど何らかの形で、LRT 建設による固定費用を小さく抑えることができる場合には、道路シェアを大きく減少させて LRT を導入する空間を広くとる方が、LRT を利用してもらえる可能性がありそうだと明らかになった。

5. おわりに

本研究では、居住地と CBD を結ぶ線形空間を自動車と LRT で分け合う通勤手段選択モデルを構築した。3 つの均衡状態が存在し得ることを示し、各均衡状態の満たすべき条件式を導出した。このモデルにおいて、1) 自動車通勤と LRT 通勤の共存、2) 全員が LRT 通勤、3) 全員が自動車通勤という 3 つの均衡状態が存在する可能性を示し、各均衡状態にの満たすべき条件式の導出を行った。

次に、自動車通勤と LRT 通勤の共存という均衡状態に焦点を当て、解析を行った。まず 1 つ目に、2 つの通勤費用関数が共有点をもつ、すなわち自動車通勤と LRT 通勤の共存状態が起こるための道路シェア ϕ の満たすべき条件を導出した。そこでは、LRT の固定費用や土地全体の容量、LRT の輸送容量を考慮したパラメータなどが、共有点をもつための道路シェア ϕ の値に関係することがわかった。2 つ目に、通勤費用と道路シェアの関係について確認した。均衡状態の通勤費用を道路シェアで偏微分した関数について考察を行うことで、道路シェアの増加に伴い、均衡点における通勤費用が増加するため、この関数は単調増加となることがわかった。これは、LRT の通勤費用関数における車内混雑に対する費用の項が卓越することや、規模の経済の影響を大きく受けるためであると考えられる。

最後に、2 つの通勤費用関数が共有点をもつ場合と共有点をもたない場合の、道路シェアと通勤費用の関係のグラフを描いた。各パラメータを変更したとき、ある水準の道路シェアを導入した場合にみられる、LRT 利用者の動向を考察した。その結果、LRT の固定費用や LRT の輸送容量を考慮したパラメータが、LRT 利用者の動向に大きな影響を与えることがわかった。例

えば、LRT の固定費用が大きい場合、片側 3 車線ずつの道路の 2 車線を潰して LRT を導入すると、全員が自動車通勤をするという状態しか存在せず、誰も LRT を利用しなくなってしまうという結果が得られた。この場合には、中途半端な LRT の導入を行うのではなく、線形空間のほとんどを占めるくらいに LRT を導入すべきである。その結果、誰も LRT を利用せず、全員が自動車通勤をして交通渋滞が深刻化する場合と、自動車通勤と LRT 通勤の共存状態となる場合のどちらかが起こるが、LRT 利用を促進する何らかの政策を導入することで、LRT 利用者の存在する状態を実現することができる。

今後の課題としては、LRT の通勤費用関数における規模の経済を考慮した項の改良が挙げられる。現在は、固定費用を利用者数で割るという非常にシンプルなものとなっている。LRT の利用を促進する政策について、特に列車の運行ダイヤに着目したいと考えており、時間軸を与えていく必要がある。

参考文献

- 1) de Palma, A., Lindsey, R. and Monchambert, G.: The economics of crowding in rail transit, *Journal of Urban Economics*, Vol. 101, pp. 106-122, 2017
- 2) 苗 璐, 野田 幸太, 高山 雄貴: 公共交通における規模の経済を考慮した出発時刻・交通手段選択モデル, *土木学会論文集 D3 (土木計画学)*, Vol.77, No.2, pp.72-82, 2021.

(2023. 3. 6 受付)