

応用都市経済モデルによる 道路整備事業の便益評価に関する研究

大澤 脩司¹・中山 晶一郎²・高山 純一³・藤生 慎⁴

¹学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:s.osawa.ku.sed@gmail.com

²正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

³フェロー 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:takayama@staff.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:fujiu@se.kanazawa-u.ac.jp

都市・地域における施策・政策評価を行う手法として、交通と立地の両面から分析可能な応用都市経済モデルが開発されている。一方で、わが国では、道路整備事業の評価は、主として費用便益分析により、直接効果に重点を置いて行われてきた。しかし、道路整備事業には個人や企業の立地を促すなどの間接的な効果も、無視できない規模で存在する。一方、応用都市経済モデルによる道路整備事業を対象とした実証は少ない。本研究では、道路整備事業が地域に与える影響を、交通・立地の両面から分析可能なモデルを開発するとともに、実際の事業を対象に実証検討を行い、道路整備による影響をどこまで把握可能か分析した上で、応用都市経済モデルによる道路整備事業評価の可能性について議論する。

Key Words : *computable urban economic model, road investment, optimization problem, unique solution*

1. はじめに

わが国では、これまで費用便益分析を用いて直接効果を中心に道路整備事業の効果が分析・評価されてきた。

しかし、道路やその他の交通施設が及ぼす影響は、渋滞改善や旅行時間の短縮といった直接効果だけでなく、都市の土地利用や個人・企業の立地などの間接効果も非常に大きい。したがって、交通と立地を同時に一つの理論フレームワークの中で取扱うことが望ましい。

交通ネットワーク均衡と立地均衡を同時に一つの理論フレームの中で取扱う試みはAnas¹⁾にはじまり、わが国では上田・堤²⁾によってその体系化が試みられ、Anas¹⁾に影響を受けた経済均衡型の土地利用モデル(例えば、宮城・澤田³⁾)が開発され、上田⁴⁾ではマイクロ経済的行動原理及び経済均衡概念を用いることで、それまでの土地利用・交通モデルの理論フレームを再構築し、加えて建物市場も取り入れたモデルを開発している。一方で、交通整備評価の観点で見た場合には、上田⁴⁾では交通均衡までは考慮されていない。宮城ら⁵⁾は交通均衡を考慮したモデルを提案しているが、ここでは立地モデルが立地経済理論に基づいていないために、立地均衡面において

十分な整合性が検討されていない。こうした点を踏まえ、これまでに交通と立地双方を考慮したモデルとして武藤ら⁶⁾や赤松・半田⁷⁾が提案されている。しかし、武藤ら⁶⁾は数値シミュレーションによる解法を提案していることから、計算の収束性や一意性などは検討されていない。また、赤松・半田⁷⁾は最適化問題を解くことで一意な解を与える手法を提案しているが、企業立地まで考慮した形とはなっていない。

本研究では、交通均衡と個人及び企業立地を考慮し、かつ一意な解を与える交通・立地統合均衡モデルを用いて、道路整備事業の便益評価分析を行う。例えば上田⁸⁾で示されているように、空間経済では複数の便益を定義することができ、こうした便益定義が可能な点が都市経済モデルに理論的基礎を置くモデルの利点の一つでもある。このため、便益評価をテーマとする既往研究の多くで便益定義が行われている。本研究は既往研究に見られる便益定義による数値的な観点からの便益評価は行わず、道路整備事業により生じる交通変化・立地変化及び地価変化といった効果・影響面からの便益評価を試み、その有用性について検討するものである。

2. モデル化に際する仮定・設定条件

交通・立地統合均衡モデルの最も基本的なモデルを開発するにあたり、以下のような仮定を設ける。

- 1) 一日のうち、通勤交通が卓越しており、通勤交通のみを考慮する
- 2) 単純化のため、各世帯の従業者は1名とする
- 3) 従業者の行動は、勤務地・居住地・通勤の経路の3選択のみを考える
- 4) 単純化のため、企業は1種類のみを考える
- 5) 企業行動は立地のみとし、必要とする従業者数・資本・土地は一定とする
- 6) 土地は居住用・企業用・その他の3区分とする
- 7) 従業者の行動はネスティッドロジット、企業立地と土地所有者の行動は多項ロジットで定式化する
- 8) 対象地域の規模が小さいため、合成材の価格は一定であり、生産力もゾーンごとに一定とする

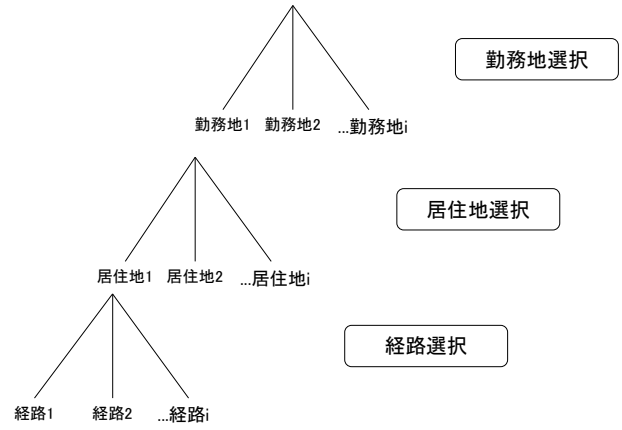


図-1 従業者の選択行動

ここで、 f_{ij}^k : ゾーン*ij*間の経路*k*の交通量、 q_{ij} : ゾーン*ij*の交通量、 y_i : ゾーン*i*の従業者数、 σ_i, σ_{ij} : 期待最小コスト、 r_i : 居住地の地代、 W_i : 賃金率、 c_k^{ij} : ゾーン*ij*間の経路*k*の旅行時間、 n : 全世帯数、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: ロジットパラメータである。

3. 交通・立地統合均衡モデルの定式化

(1) 従業者行動

従業者の行動は、勤務地選択、居住地選択、経路選択の3つの選択行動で構成され、図-1に示すようなNested Logit型モデルによって表現されるとする。

経路選択は、経路の所要時間によって式(1)で表す。これは、従業者は経路の所要時間が小さい経路ほど選択するというを表している。

$$f_k^{ij} = q_{ij} \frac{e^{-\theta_1 c_k^{ij}}}{\sum_{k \in K} e^{-\theta_1 c_k^{ij}}} \quad (1)$$

居住地の選択は、居住地と勤務地とのゾーン間の期待最小コストによって決まるとして、式(2)で表す。これは、地代と期待最小コストが小さい居住地ほど選択するというを表している。

$$q_{ij} = y_i \frac{e^{-\theta_2 (r_i + \sigma_{ij})}}{\sum_{j \in J} e^{-\theta_2 (r_i + \sigma_{ij})}} \quad (2)$$

勤務地の選択は、賃金率とゾーン内の期待最小コストから決まるとして式(3)で表す。これは、賃金率が高く期待最小コストが小さい勤務地ほど選択することを表す。

$$y_i = n \frac{e^{-\theta_3 (\sigma_i - w_i)}}{\sum_{i \in I} e^{-\theta_3 (\sigma_i - w_i)}} \quad (3)$$

(2) 企業行動

企業の立地行動として、立地のみを考慮するとし、対象圏内の居住者のみが労働力になるとする。そして、企業の利潤最大化行動のもと、式(4)のように定式化する。

$$Y_i = N \frac{e^{\kappa \Pi_i}}{\sum_{i \in I} e^{\kappa \Pi_i}} = N \frac{e^{\kappa (pz_i - \beta W_i - \gamma R_i)}}{\sum_{i \in I} e^{\kappa (pz_i - \beta W_i - \gamma R_i)}} \quad (4)$$

ここで、 Y_i : ゾーン*i*の企業数、 N : 全企業数、

$\Pi_i = pz_i - \beta W_i - \gamma R_i$: ゾーン*i*の企業利潤、 R_i : 業務地の地代、 κ : ロジットパラメータ、 β : 1企業が必要な従業者数、 γ : 1企業が必要な土地面積、 z_i : ゾーン*i*内企業の生産量である。

(3) 土地所有者の行動

土地所有者の配分行動は、以下の式(5)から式(7)で定式化する。これは、ゾーンの中で地代の高い用途の土地ほど配分されることを表す。

$$l_i = D_i \frac{e^{\mu R_i}}{e^{\mu R_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (5)$$

$$L_i = D_i \frac{e^{\mu R_i}}{e^{\mu R_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (6)$$

$$m_i = D_i \frac{e^{\mu \rho_i}}{e^{\mu R_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (7)$$

ここで、 D_i : ゾーン*i*の全面積、 l_i : ゾーン*i*の居住地面積、 L_i : ゾーン*i*の業務地面積、 m_i : ゾーン*i*のその他の土地面積である。ただし、面積の単位として、1世帯が必要とする土地面積を1単位として考える。

(4) 等価な最適化問題

前項までに示した定式化は非線形な連立方程式であるため、直接的に解を求めることは困難である。そこで、等価な数理最適化問題へ置換えることを考える。ここまでに定式化したモデルは、以下のような最適化問題として定式化が可能である。

$$\begin{aligned} \min S = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{k \in K} f_k^{ij} \ln \frac{f_k^{ij}}{q_{ij}} \\ & + \frac{1}{\theta_2} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} \ln \frac{q_{ij}}{y_i} + \frac{1}{\theta_3} \sum_{i \in I} y_i \ln \frac{y_i}{n} \\ & + \frac{1}{\kappa} \sum_{i \in I} Y_i \ln \frac{Y_i}{N} - p \sum_{i \in I} Y_i z_i \\ & + \frac{1}{\mu} \sum_{i \in I} \left(l_i \ln \frac{l_i}{D_i} + L_i \ln \frac{L_i}{D_i} + m_i \ln \frac{m_i}{D_i} \right) - \rho_i m_i \quad (8) \end{aligned}$$

subject to

$$q_{ij} = \sum_{k \in K} f_k^{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (9)$$

$$y_i = \sum_{j \in J} q_{ij} \quad \forall i \quad (10)$$

$$n = \sum_{i \in I} y_i \quad (11)$$

$$N = \sum_{i \in I} Y_i \quad (12)$$

$$\beta Y_i = y_i \quad \forall i \quad (13)$$

$$\gamma Y_i = L_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} q_{ij} = l_j \quad \forall j \quad (15)$$

$$D_i = l_i + L_i + m_i \quad \forall i \quad (16)$$

OD交通量は、OD間に存在する複数経路の交通量の和であるため、式(9)の制約が必要となる。本研究では勤務地から居住地への交通を考えているため、勤務地*i*から居住地*j*への交通量の和は、ゾーン*i*内の企業で働く従業者の和にほかならない。この制約が式(10)である。また、2章2)に示したように、1世帯には1人の従業者がいることから、世帯数と従業者数の和に関して記述した制約が式(11)である。式(12)は全企業数は一定であることを表す制約である。2章5)に示したように、企業が必要とする従業者数・土地面積は一定であるため、式(13)で企業数と従業者数について、式(14)で企業数と業務地面積との関係を制約する。また、式(13)は労働市場の均衡条件、式(14)と式(15)は土地市場に関する均衡条件となっている。式(16)は、ゾーン内の土地は居住地・業務地・その他の土地のいずれかの土地で利用されることを意味する制約である。

4. モデル特性

コストや地価、賃金に関する変数（これらをまとめてプライス変数と呼称することにする）が内生的に与えられることを確認する。式(8)の目的関数*S*を用いて、以下のようなラグランジェ関数を定義する：

$$\begin{aligned} L = S + & \sigma_{ij} \left(q_{ij} - \sum_k f_k^{ij} \right) + \sum_i \sigma_i \left(y_i - \sum_j q_{ij} \right) \\ & + \sigma \left(n - \sum_j y_j \right) + W \left(N - \sum_j Y_j \right) \\ & + \sum_i \mu_i (D_i - l_i - L_i - m_i) + \sum_j W_j \left(\beta Y_j - \sum_i q_{ij} \right) \\ & + \sum_i \{ r_i (y_i - l_i) + R_i (\gamma Y_i - L_i) \} \quad (17) \end{aligned}$$

ここで、 σ , σ_{ij} , σ_i , r_i , R_i , W_j , W , μ_i はラグランジェ係数である。式(1)～式(7)から、プライス変数である通勤の期待最小コスト σ_{ij} 、居住地の地価 r_i 、業務地の地価 R_i 、賃金 W_i はラグランジェ係数として内生的に与えられることが確認できる。

次に、最適化問題の解の性質について考える。式(8)の目的関数は以下のように変形できる：

$$\begin{aligned} S = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f_k^{ij} \ln f_k^{ij} \\ & + \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} \ln q_{ij} + \left(\frac{1}{\theta_3} - \frac{1}{\theta_2} \right) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} y_i \ln y_i \\ & - \frac{n}{\theta_3} \ln n - p \sum_{i \in I} Y_i z_i + \frac{1}{\kappa} \sum_{i \in I} Y_i \ln \frac{Y_i}{N} \\ & + \frac{1}{\mu} \sum_{i \in I} \left(l_i \ln \frac{l_i}{D_i} + L_i \ln \frac{L_i}{D_i} + m_i \ln \frac{m_i}{D_i} \right) - \rho_i m_i \quad (18) \end{aligned}$$

式(18)としての目的関数*S*は、 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ であるならば、それぞれ線形あるいは凸関数の項で構成されることから、凸関数である。また、式(9)～式(16)の制約はいずれも線形である。よって、目的関数は凸関数となり、定式化した最適化問題の解は一意的である。なお、 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ という関係は、図-1に示したネステッド構造が成立するために必要な条件となっている。

この最適化問題は、通常最適化アルゴリズムにより計算可能である。交通均衡モデルの観点からは、ネステッド・ロジットによる統合均衡モデルとほぼ同形式であるため、統合交通均衡モデルの計算アルゴリズムを利用することができる。

5. 実際規模のネットワークへの適用

3章で示したモデルから出力される結果の客観性を検討するため、実際規模のネットワークへモデルの適用を行った。今回適用を行ったネットワークは金沢市道路ネットワークの一部であり、同市の山側環状道路整備事業を対象に、事業による影響を分析する。

(1) 計算条件

2章6)では、土地の区分は居住地・業務地・その他の土地の3区分とすると述べたが、簡単のため、その他の土地面積を0として扱った。また、計算負荷軽減のため、各ODの経路は1経路に限定して分析を行った。各種パラメータについては表-1に示した任意の設定値を用いた。分析に用いたゾーン及び道路ネットワークの概要は、図-2、図-3、図-4に示すとおりである。なお、道路ネットワークは事業前は140Nodes, 467links, 事業後は149nodes, 494linksのものを用いた。

(1) 適用結果

図-5に従業者数の変化、図-6に企業数の変化、図-7に居住地面積の変化、図-8に業務地面積の変化を示す。また、プライス変数として、図-9に居住地の地代の変化、図-10に業務地の地代の変化、図-11に賃金の変化を示す。図-12には、各ゾーンの生産力の大小関係、図-13にはOD間の旅行時間の変化、図-14にはOD交通量の変化を示す。なお、OD旅行時間及び交通量は紙面の都合上全てを示すことはできないため、一部を抜粋して示している。

表-1 各種パラメータ 設定値

| 合成材 価格 p | パラメータ (企業) κ | パラメータ (土地) μ | ロジットパラメータ | | |
|------------------|---------------------------|------------------------|------------|------------|------------|
| | | | θ_1 | θ_2 | θ_3 |
| 10.0 | 0.03 | 0.1 | 1.0 | 0.1 | 0.08 |

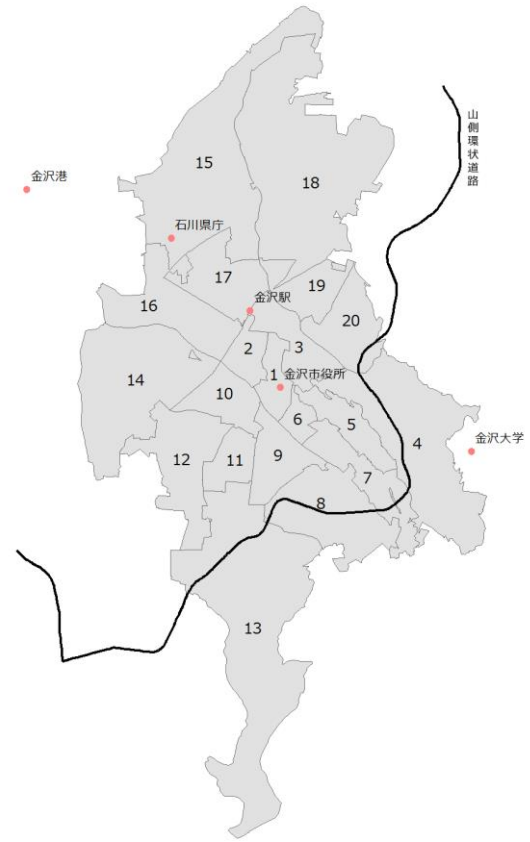


図-2 金沢市ゾーン図

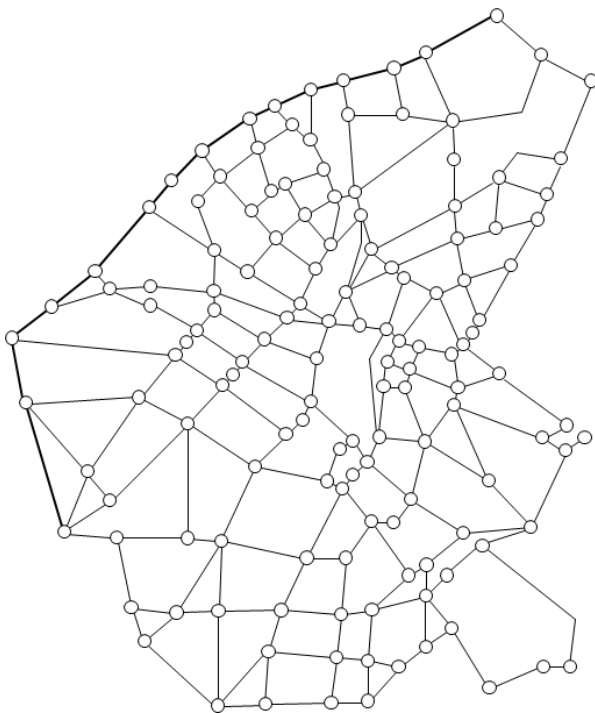


図-3 金沢山側環状道路開通前の道路ネットワーク



図-4 金沢山側環状道路開通後の道路ネットワーク

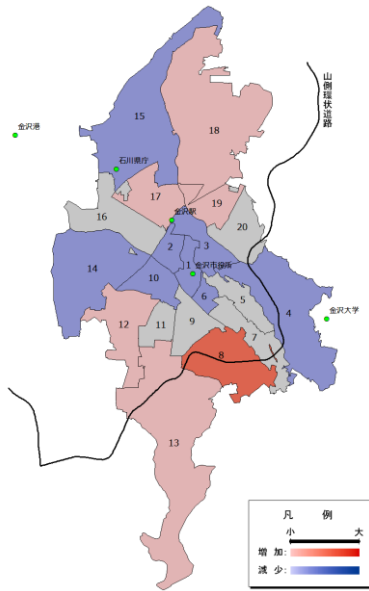


図-5 従業者数の増減

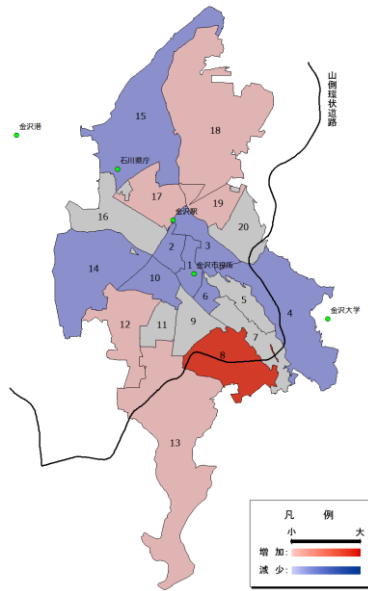


図-6 企業数の増減

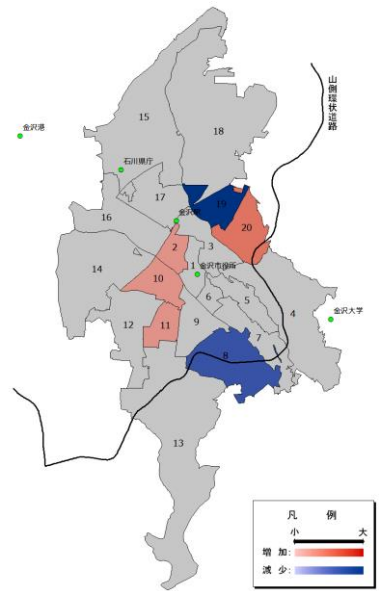


図-7 居住地面積の増減

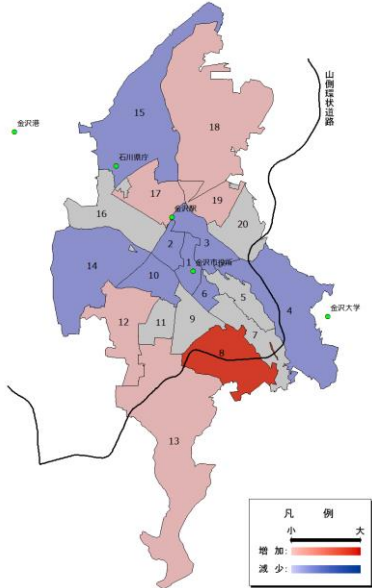


図-8 業務地面積の増減

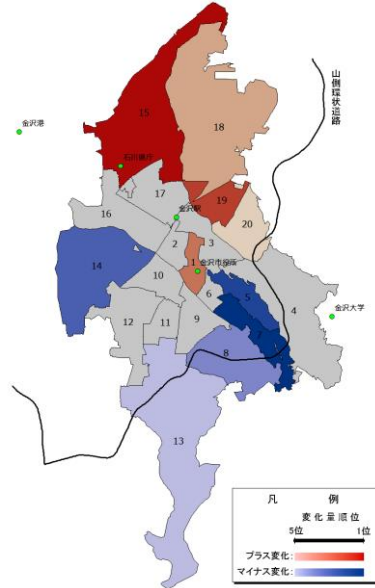


図-9 居住地の地代の増減

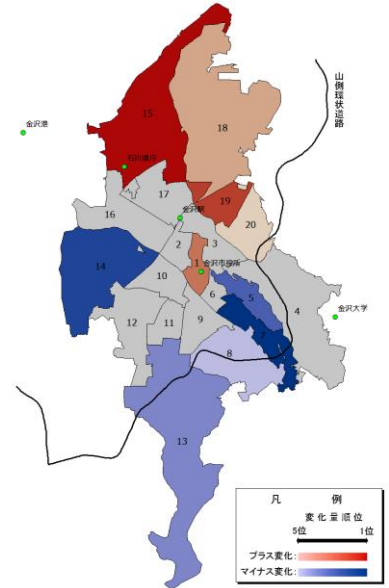


図-10 業務地の地代の増減

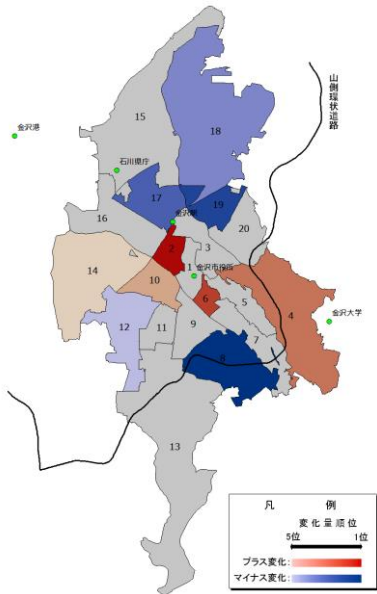


図-11 賃金の増減

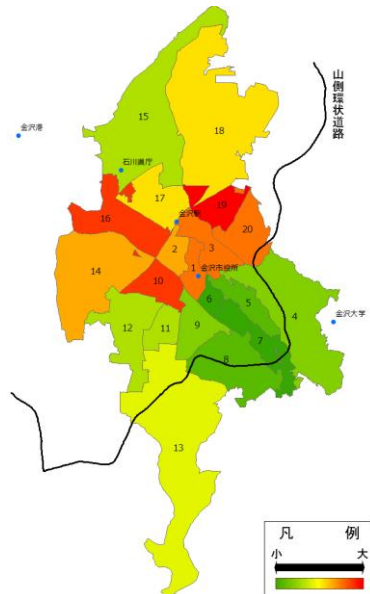


図-12 各ゾーンの生産力

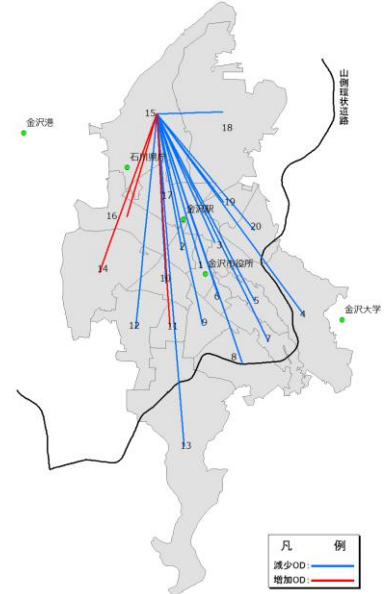


図-13 ゾーン15への旅行時間の増減

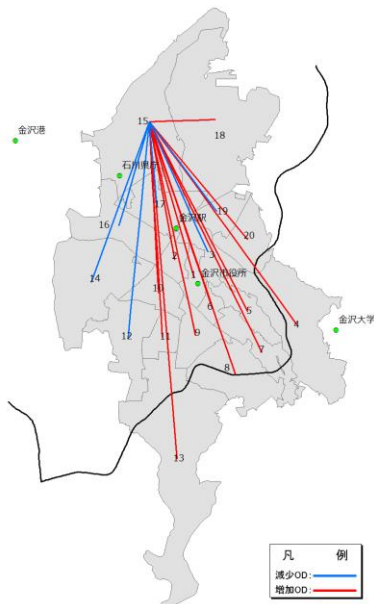


図-14 ゾーン15へのOD交通量の増減

まず、各変数の相互関係について考える。図-5と図-6から明らかのように、従業員数と企業数の増減の様子は一致している。これは、企業が雇う従業員数は一定であるため、企業が増加すればその分従業員数も増加するためである。居住地面積と業務地面積の増減については、図-7及び図-8から分かるように、その様子は正反対となっている。これは、その他の土地面積を0として計算したことで、ゾーンの面積は居住地か業務地のいずれかに分類されるため、一方が増加/減少すればもう一方は減少/増加するためである。プライス変数に関しては、各変数間の差が一定となるように決定する。すなわち、変数1と変数2の差が10と決定した場合には、10と20の組合せでも、100と110の組合せでも、差の条件さえ満たしていれば解となり得る。このため、解の持つ性質としては同様であっても、変化率を算出しようとした場合には、解の組合せによって異なる結果となる。一方、一定の差のもとに決定することから、変数間の大小関係は解の組合せに関係なく一意である。このため、図-9から図-11には変化量順に結果を示している。次に、それぞれのゾーンにおける各変数の増減が妥当な結果となっているかを考える。示した結果によると、企業数については、地代が増加しているゾーンでは減少傾向にあるものの、ゾーン18など、一部、地代が増加しているにも関わらず、企業数が増加しているゾーンが見られる。これは、地代が増加したことで生じる損失よりも、賃金が減少したことによる余剰、生産力による余剰が上回っているためであると考えられる。居住地については、地代の増減はもちろん影響を与えていると考えられるが、図-7と図-9から分かるように、その関係性は薄い。一方、図-7と居住地への旅行時間の増減を示した図-13と、OD交通量の増減を示した図-14を比較すると、各出発地（勤務地）か

らの旅行時間が全体的に短縮している場合には、地代の増加による損失を上回る余剰が、旅行時間の短縮によって発生していると考えられる。なお、ここでいう旅行時間とは、各ODの旅行時間と出発地Oから各到着地Dへの総旅行時間に対する比で考える必要があることに注意が必要である。

以上のように、制約を満たす範囲で、与えた設定値と不整合が生じない形で最適解を出力できることが確認できた。一方で、各ODの経路を1経路に限定していることや、その他の土地を0とし、実質土地の想定を2区分としていることなどが影響し、現況再現という観点では必ずしも良好な結果とはなっていない。

6. まとめと今後の課題

本研究では、交通と立地を扱う交通立地統合均衡モデルを、交通混雑重視・企業立地まで考慮という観点で構築し、計算の収束性及び解の一意性を検討するため、定式化したモデルと等価な最適化問題への置換えを行った。その結果、4章に示したように、本研究で提案したモデルは、最適化問題の目的関数に関して凸関数であり、解の一意性が保証された。

また、従来、交通・立地統合モデルでは便益評価は、便益定義を行うことで数値的に行われてきたが、道路整備事業による効果の観点から、交通量・立地・地代の変化を把握することで便益分析を行うことを試みた。5章に示したように、モデルの定義式から逸脱しない結果が得られることを確認したが、土地の想定が粗いこと、各ODの経路を1経路としていることなどが影響し、実際の効果を良好な精度で再現するまでには至らなかった。また、プライス変数については、各変数ごとに変化量の大小関係を示すに留まっているが、より具体的にその大小関係を示すことは今後の課題である。しかし、得られた結果について、計算条件との整合性という観点では理論的に説明可能であることから、入力データの精緻化や、各ODの経路を限定せず、複数経路とすることで、より分析精度を向上させることができると考えられるが、この点は今後の課題である。

参考文献

- 1) Anas, A. : The combined equilibrium of travel networks and residential location markets, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 15, pp1-21, 1985.
- 2) 上田孝行, 堤盛人 : わが国における近年の土地利用モデルに関する統合フレームについて, *土木学会論文集*, No.625/IV-44, pp.65-78, 1999.
- 3) 宮城俊彦, 澤田理 : 交通戦略による都市発展過程のシミュレーション分析-土地利用・交通統合モデルの

- 応用-, 岐阜大学地域科学部研究報告大, Vol.11, pp.53-66, 2002.
- 4) 上田孝行: 交通・立地分析モデルによる都市交通プロジェクトの影響分析, 日交研シリーズ A-184, 日本交通政策研究会, 1997.
- 5) 宮城俊彦, 奥田豊, 加藤人士: 数理最適化手法を基礎とした土地利用・交通統合モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.518/IV-28, pp.95-105, 1995.
- 6) 武藤慎一, 上田孝行, 高木朗義, 富田貴弘: 応用都市経済モデルによる立地変化を考慮した便益評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.17, pp.257-266, 2000.
- 7) 赤松隆, 半田正樹: Nested Logit 型交通・住居立地統合均衡モデルとその効率的解法, 土木計画学研究・論文集, Vol.13, pp.279-287, 1996.
- 8) 上田孝行: 防災投資の便益評価-不確実性と不均衡の概念を念頭において-, 土木計画学研究・論文集, Vol.14, pp.17-34, 1997.
- (2015.4.24受付)

A Study on Benefit Evaluation of Road Improvement with Computable Urban Economic Model

Shuji OSAWA, Shoichiro NAKAYAMA, Junichi TAKAYAMA and Makoto FUJIIU