

マルチエージェント都市シミュレータRAUMの都市経済理論との整合性について*

On the consistency between results of multi-agent urban simulator RAUM and urban economic theory*

大森良太**・小出智士***

By Ryota OMORI**・Satoshi KOIDE***

1. はじめに

都市通勤者のQOLを分析の準拠としたマルチエージェント都市・モビリティ・環境システムシミュレータRAUMを開発している。RAUMはエージェントの意思決定、地代市場、交通流・渋滞、CO₂排出などについての内部モデルを有しており、都市人口、就業地分布、公共交通網、エージェントの属性、モビリティの特性やコストなど約60の計算パラメータが入力される。このような社会シミュレータでは、結果の妥当性、ロバスト性、普遍性がしばしば問題とされる。本発表では、RAUMの概要を紹介するとともに、その無矛盾性の検証、都市経済理論—最適都市規模、所得と居住地の関係—とRAUMの結果の整合性についての分析結果を報告し、マイクロシミュレーション研究についての討議の一助に供したい。

2. RAUMの概要

RAUMは各個人のQOLを分析の準拠点としたマルチエージェントシミュレータである。都市の人口、就業地分布、公共交通網、モビリティ手段を所与とした時に、都市内の通勤エージェントが、所得制約及び時間制約の下で、財消費、居住スペース、余暇時間の3要素からなる自身の効用関数を最大化するとき、居住地、居住スペース、通勤モード（徒歩、自転車、車、鉄道などの手段およびその経路）をどのように選択するか、さらには、このような個人のミクロ的選択行動の集積として自己組織的に形成される都市・モビリティシステムの構造、および、その特性（人口密度や地代の空間分布、自動車保有率、交通機関分担率、CO₂排出量など）を分析する（図1）。

*キーワード：土地利用・交通モデル、マルチエージェントモデル、QOL

正員、博士（工学） *正員、理学修士

株式会社豊田中央研究所 社会環境システム領域

愛知県愛知郡長久手町横道41-1

TEL0561-71-7007、FAX0561-63-6507

各エージェントは自らのQOL最大化を原理として自律的、利己的に行動する。ただし、これらのミクロ的選択行動の集積結果であるフロア地代市場、交通渋滞の2つのメカニズムを通して他のエージェントと間接的に影響を及ぼしあっている。

RAUMが分析の対象とする空間スケールは、半径数km～数十km程度の単一の都市圏である。対象領域を正方形の計算セル（標準では500m×500m）に分割し、セルごととに離散的な計算を行う。同一計算セル内での人口密度、フロア需要、交通流は集計的に扱われる。

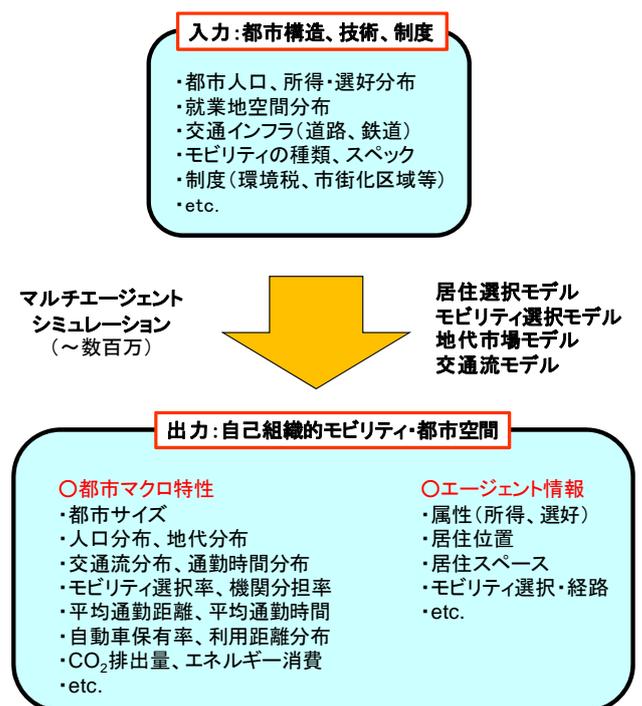


図1 RAUMの入力と出力

3. RAUMで得られる均衡状態の意味と性質

図2にRAUMの全体構成を示す。RAUMでは、適当な初期状態から逐次的なエージェントの移動をエージェント数の5-7倍程度繰り返すと、全てのエージェントにとって、他の選択行動（居住位置、広さ、通勤行動）をとっても自身の目的関数の値が向上しない状態、すなわち、

Nash均衡的な状態が得られる。

この平衡状態は各エージェントの初期状態（居住分布やスペース広さなど）に依存しない。つまり、入力条件と自己組織化した平衡状態の間には1対1の対応関係がある。従って、（入力、出力）のセットを比較分析することで、各種条件の影響を分析することができる。

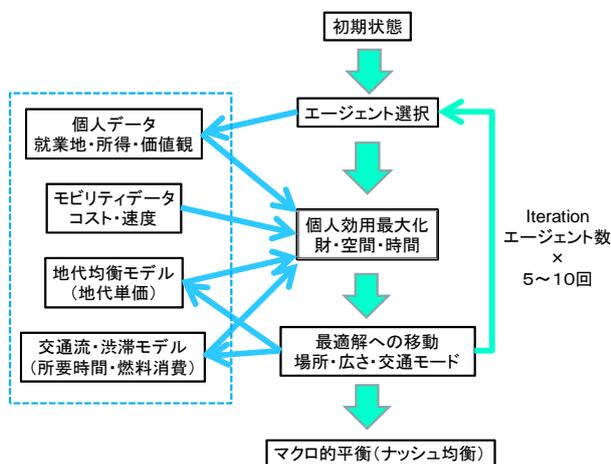


図2 RAUMのフローチャート

4. 解のロバスト性と無矛盾性の検討

RAUMは複数の内部モデル——エージェント意思決定、地代市場、交通流・渋滞など——を有しており、また、人口、都市のレイアウト、公共交通網、エージェントの属性、モビリティ技術・コストなどをはじめ約60の入力パラメータが設定される。

本研究では、広範なパラメータスタディを実施し、各計算条件におけるマクロ均衡状態（自己組織的なNash均衡解である）を比較・分析し、RAUMの結果の無矛盾性と有効性について、以下の2項目の検討を実施した。

(1) 各入力パラメータの感度の考察

結果は自然であり、特段、問題となる影響力を持つパラメータがないことを確認した。重要な出力指標に対して感度の高いパラメータもいくつか見られたが、それらのすべては重要なパラメータ（車両価格など）であり、むしろ当然である。これらのパラメータの影響に留意し、解析を実施していく。

(2) 「平均QOL」値の無矛盾性およびア prioriに考慮される必要条件の充足性の検証

全エージェントの均衡状態における目的関数(QOL)の値の平均値に着目し、それが満たすべき原則をア priori

りに導出し検証した。このように個人の効用を足し合わせることは個人間効用の比較不能の性原則に反するので、実用上注意を要するが、モデル出力の論理的無矛盾性の検討の指標としては有用である。

今回実施した全ての感度解析において、「平均QOL」は以下の3つの原則を満たしていた。

原則1 人々の選択肢が無条件に広がれば（狭まれば）平均QOLが向上（低下）する。

社会に新しい選択肢（技術やインフラなど）が導入され、人々の選択肢が広がった場合、その新しい選択肢を選ぶか選ばないかは各個人の自由であり、選択肢の範囲が広がったことで生じる新たな均衡状態の平均QOLが元の均衡状態よりも下がることはない。

原則2 何らかのコストが無条件に低下（増加）すれば平均QOLが向上（低下）する。

鉄道運賃、ガソリン代、車の固定費など各種コストが低下する場合である。原則1の場合と同様に、コストが低下したオプションを選択するかどうかは個々のエージェントの判断であるが、この変化により生じる新しい自己組織的なマクロ的均衡状態の平均QOLが原始状態より低下することはない。

原則3 何らかの手段の利便性が無条件に向上（低下）すれば平均QOLが向上（低下）する。

車の移動速度が上がる、あるいは、電車の待ち時間が短くなるといった場合である。原則2と同様に、この変化により生じる新しい自己組織的なマクロ的均衡状態の平均QOLが原始状態より低下することはない。

5. 都市経済理論の知見との比較

(1) 最適都市規模問題

理論的には、都市の人口規模は人口集中による生産性の向上、すなわち、「集積の経済」と、地価上昇、渋滞、環境悪化といった「外部不経済」のバランスによって決まる⁽¹⁾⁽²⁾。

図3に示すように、人口が一単位当たりの増加に対する「集積の経済」効果と「外部不経済」効果の変化（限界値）を比較してみると、人口が小さい領域では、前者が後者を上回り、人口増加とともに都市住民の効用は上昇していく。しかし、「外部不経済」が徐々に相対的に大きくなり、ある人口規模 P^* で、両者の値が等しくなる。このとき、都市住民の効用は最大となる。

以上のように、都市の最適規模を決定するのは、第一に人口の増加に対する所得向上の度合いである。RAUMでは、前章で述べた集積の経済の理論を踏まえ、都市の総生産 Y とその都市の就業者人口 P の関係を次式で与えている。

$$Y = A \times P^\alpha \quad (\alpha > 1)$$

α が都市総生産係数であり、 $\alpha > 1$ が集積の経済を表している。就労者一人当たりの平均所得は

$$Y/P = B \times P^{\alpha-1}$$

となる (A, B は比例係数)。

次に、外部不経済がどの程度顕在化してくるかであるが、これには鉄道インフラ、道路インフラ、可住範囲の設定、地代などに関する設定が影響を及ぼす。関連する RAUM の入力パラメータ値を表 1 に示す。

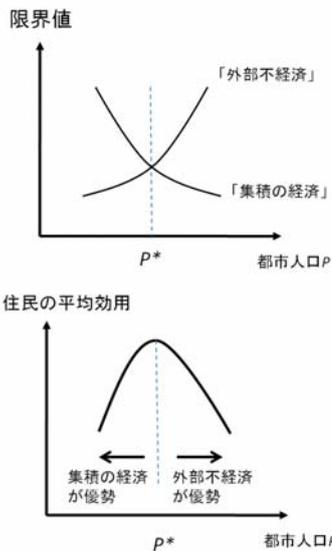


図 3 最適都市規模の概念図

表 1 集積の経済と不経済に関するパラメータ

	影響因子	関連パラメータ
集積の経済	人口集積効果	都市総生産係数
負の外部性 (渋滞、地代上昇)	鉄道インフラ	鉄道路線数、 駅間距離、駅数
	道路インフラ	道路率、BPR 係数、 渋滞発生流量
	可住空間制約	市街化区域設定値
	地代	宅地率、農業地代、 地代弾力係数、 地代総額係数

表 2 に都市人口およびこれに対応した CBD 半径、鉄道路線数・路線距離の設定を示す。以下、この設定について説明する。まず、CBD の面積は人口に比例するとし、都市人口 250 万人の都市に対して半径 5km とした。一方、都市鉄道の設定につい

ては、日本の地方都市の鉄道長データを基に、

$$\text{総路線長 [km]} = \text{都市人口 [万人]} / 4$$

とした。この路線長から、路線数と駅数が決定されるが、路線数は一路線あたりの長さが最大 30km となるように人口の増加とともに追加した。駅間距離はすべて 1.5km とし、1 路線あたりの駅数を決定した。CBD 中心位置に必ず駅を配置し、この位置に関して対称に路線および駅を設定しているため、1 路線当たりの駅数は奇数となっている。

表 2 都市人口と都市基本レイアウト

	CBD 半径 [km]	総路線長 [km]	鉄道路線数	1 路線の駅数
10 万	1	2.5	0	---
20 万	1.4	5	1	5
50 万	2.2	12.5	1	9
100 万	3.2	25	1	17
150 万	3.9	37.5	2	13
200 万	4.5	50	2	17
250 万	5	62.5	2	21
300 万	5.5	75	3	17
400 万	6.3	100	4	17
500 万	7.1	125	4	21

図 4 に都市人口と平均 QOL の関係を都市総生産係数をパラメータとして計算した結果を示す。P=100 万で、所得が等しくなるように平均所得の係数を規格化しているため、この点ですべての QOL 軌道は交わっている。

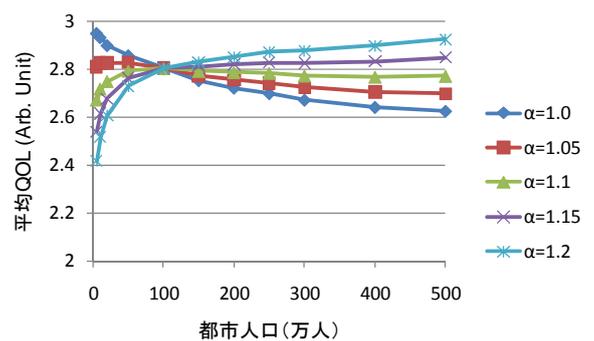


図 4 QOL 軌道の都市総生産係数依存性

興味深いのは、 $\alpha=1.05$ と $\alpha=1.1$ のケースであり、それぞれ $P^*=50$ 万、 $P^*=100$ 万の時に、平均 QOL が極大値をとっている。すなわち、図 3 のような最適都市規模が RAUM によって再現されている。

$\alpha=1.0$ のケースでは、人口増加に伴うメリットである平均所得の増加がなく、地代上昇や渋滞悪化といった外部不経済効果のみ大きくなるから、平均QOLの値は人口の増加に伴い単調に減少する。逆に、 $\alpha=1.15, 1.2$ のケースでは、今回計算を実施した都市人口領域全般において、集積の経済が卓越し極大値は観察されなかった。

(2) 所得と居住地の関係

W. Alonsoは都市経済学における記念碑的著作⁽³⁾において、個人の効用最大化行動に基づく都市内土地利用モデルを提唱している。その後、このモデルは多くの研究者によって拡張されているが、RAUMのモデルもこのモデルに多くを負っている。ところで、Alonsoは(3)において、「高所得者は低所得者に比べて郊外側に住む」という命題を証明している。Alonso自身、日本語版の序文においては、この推論に合致しない多くの社会が存在すると述べているが、多くの議論を喚起したこと自体、この推論が興味深い示唆に富むことの証左であろう。以下、この命題をRAUMで検討する。

RAUMでは、全体の平均所得（都市人口と都市総生産係数で決まる）とジニ係数を与えて、個々の通勤エージェントの所得を計算している。所得の分布は最も広く用いられている対数正規分布を仮定している。本解析では、分析の都合上、所得順に各エージェントを5つの所得階層（低所得者層、低中所得者層、中所得者層、中高所得者層、高所得者層）にグルーピングすることとする。

図5に各階層の平均居住距離の計算結果を示す。公共交通レイアウトは表2の通りである。ジニ係数は0.3としているが、0.1, 0.2, 0.4でも傾向は変わらない。本図を見ると、高所得者は郊外側に住むというAlonsoの命題は $P=20$ 万、50万の低人口領域でのみ成立している。一方、 $P=100$ 万、250万の高人口領域では、高所得階層ほど平均居住距離が小さくなっている。

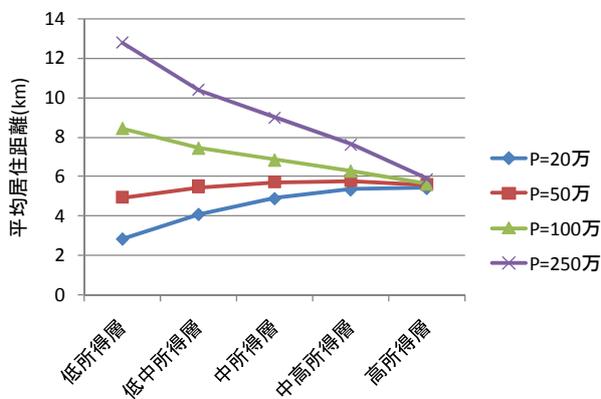


図5 所得階層別の平均居住距離

上記の結果は以下のように解釈される。低人口領域

では人口密度が低く、都心部近郊でもそれほど地代が高くない。この結果、低所得者も都心部に住むことが可能であり、車の保有を避け、中心部に居住する割合が高い。また、通勤費用がそれほど負担にならない高所得者は郊外に広い居住スペースを確保し車通勤する傾向となる。

一方、高人口領域では、人口密度上昇に伴う渋滞の悪化が顕著となり、時間価値の高い高所得者は逆に都心暮らしを志向するようになる。中心部近郊の地代は上昇し、低所得者の多くは郊外の駅まで徒歩や自転車で行き、鉄道通勤するようになる（図6）。

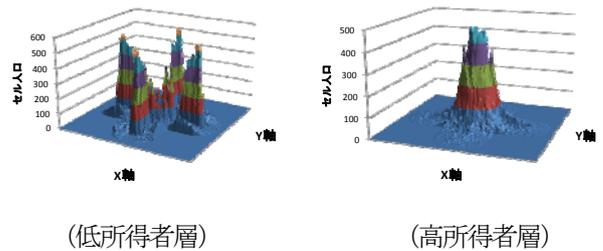


図6 高人口領域における低所得層と高所得層の居住分布(P=250万人、XY軸が平面位置、中心がCBD)

6. おわりに

本研究ではRAUMの結果の妥当性と有用性を検討する目的で、感度解析及び都市経済理論との比較を実施した。主な結果は以下の通りである。

- (1) 各入力パラメータ値の変化に対するシステム変化は良好である。
- (2) 各エージェントの効用の平均値のシステム挙動は、アプリオリに導出される必要条件を満たしていた。
- (3) 最適都市規模が再現できた。
- (4) Alonsoの推論は低人口領域では成立したが高人口領域では成立しなかった。

以上より、RAUMの規範モデルとしての論理的無矛盾性や適用可能性はかなりの程度検証できたと考えているが、社会モデルの限界も考慮し、今後も解析対象に応じて、その都度必要な吟味を実施していきたい。GISデータを活用した実都市シミュレーションも検討中である。

参考文献

- 1) Fujita, M.: Urban Economic Theory, Cambridge University Press, 1989.
- 2) 佐々木公明, 文世一: 都市経済学の基礎, 有斐閣, 2000.
- 3) Alonso, W.: Location and Land Use, Harvard University Press, 1964.