

# 地域間移動を考慮した Sugarscape モデルによる社会現象の創発

Emergence of social phenomena in Sugarscape model designed for interregional migration

西田理朗

山田隆志

吉川厚

寺野隆雄

Rio Nishida

Takashi Yamada

Atsushi Yoshikawa

Takao Terano

東京工業大学大学院 総合理工学研究科 知能システム科学専攻

Dept. Computational Intelligence and Systems Science, Tokyo Institute of Technology

## Abstract:

Agent-based modeling is a new tool to analyze social phenomena from the bottom up manner. This study proposes an agent-based simulation model to analyze Regional Migration Systems. The proposed model is focus on the relationship of Agent's local, global action rule and Multiple-Area. The intensive simulation studies have revealed the emergence of decision groups and how the emergent structure have been made.

キーワード: マルチエージェント・シミュレーション, 自己組織化, Sugarscape, 分配, 地域間移動

Keywords: Multi-agent simulation, Self-organization, Sugarscape, Sharing, Interregional migration

## 1. 序論

人口移動の研究は,人口学,地理学,社会学,経済学,人類学などの諸分野で行われている.中でも,近年,地方分権への要請の高まりにともない地方の財政活動と人口移動に関する問題についての議論が活発化している[西川 06], [林 06].

米国の研究においては,これらの議論は,Tieboutを契機とする「足による投票」[Tiebout 56]の延長線上でとらえられてきた.そこでは,税率,公共料金,現金給付,その他の公共サービスの地域間差異が地域間人口移動に与える影響が数多く検証されてきた[Borjas 99], [Conway 01].連邦国家である米国では各州とも比較的独立した政策を取れる事もあり,その関心度は高かった.欧州においても EU 域内で,どの程度の政策上の権限と役割を与えるべきか,また,それにより域内での人口移動がどのように起きるかなど,議論は進んでいる[Feld 01].

これらの研究は,全て実証データを用いた統計的分析手法であり,この分析方法では,ミクロ的接近とマクロ的接近の両者を結びつけた説明が困難である.そこで,本研究では,ABS を用いて自治体の税率,公共サービスの地域間差異が地域間の人口移動に与える影響を,個人の行動ルールからボトムアップ的に検討する事を目的に,人工社会を構築し,検討を行った.

本論文の構成は以下の通りである. 2 章で関連

研究の紹介をし,3 章では,研究経緯について触れ,提案モデルの意義づけをおこなう. 4 章で提案モデルの説明をし,5 章でシミュレーション結果を提示し,考察をする.最後に 6 章で本研究についてまとめを行い,今後の展望を述べる.

## 2. 関連研究

本章では,関連研究として, エージェント・ベース・シミュレーション, Sugarscape モデル,そして, 財政変数の地域格差による人口移動に関する経済学からの既存研究について述べる.

### 2.1. エージェント・ベース・シミュレーション

エージェント・ベース・シミュレーション (Agent-Based Simulation; ABS)は,エージェントと呼ばれる内部状態と意思決定能力を備えた複数の主体を用いたシミュレーション手法である[Axelrod 00]. 本研究では,このエージェントの立場から,創発的な現象をボトムアップ的にモデル化し,シミュレートしようとするアプローチをとる.これによって,地域間人口移動のような,人間を主体として含むような複雑系の分析を行おうとするものである.

近年,この ABS を用いて人工社会を生成し,社会・経済・政治的な組織や現象を解明しようという試みが多くなされている[Gilbert 99], [Gilbert 08].

ABS を最初に社会科学へ適用した Schelling による分居モデル[Schelling 71]に始まり, 規範形成[Axelrod 86],[倉橋 01]から企業組織の検討[見城 06],[鳥山 09]や,防災・避難シミュレーション[中西 03],[佐藤 08]といった,人々の行動をモデル化したもの. 情報の伝播[松山 07],貨幣の創発[國上 08]など社会ネットワークを考慮しモデル化したもの. また,立地主体をエージェントとして都市の成長・衰退をシミュレートしたもの[奥 06],[池谷 07]など,当該手法の適用分野は非常に幅広い.

一方で,人口移動の研究に対してはその適用事例はほとんど見られないが,移住に関しての個人の多様な選好に基づく意思決定と,それによって生じるマクロ的な人口変動を検討するには ABS が有効である.

## 2.2. Sugarscape モデル

Sugarscape とはエージェントが生き延びるために搾取しなければならない一般化された食料資源の空間分布のことである. この空間は格子状の 2 次元座標となっており,格子状の全ての  $(x, y)$  ポイントについて,食料の現在量と最大容量という 2 つの要素がある. エージェントに収集された食料は最大容量に達するまで一定期間を経て再生する.

モデルでは,自律したエージェントがこの Sugarscape で食料の収集と消費を続けながら生きていく様子を再現している. [Epstein 96].

それぞれのエージェントは格子上に視野を持ち食料を求めて移動する. 代謝ルールによって蓄積された資源エネルギーは減少し,ゼロになると死亡する. それぞれのエージェントには先天的な寿命が与えられ,それまでの間に食料を求めて移動し,必要であれば,闘争や交配を行う.

このような社会において,文化の伝承,友人とのネットワーク形成,集団での戦闘と防御,富の分配と遺産相続,人口のダイナミクス等がシミュレーションされている.

Sugarscape モデルの従来の拡張としては,モデル自体の拡張や適用対象の変更が行われている. 具体的には,前者は,エージェントの行動ルールを

時間的に進化させた研究[鳥 03]. 所有規範の創発などの事象にモデルを適用した研究などが挙げられる[Flentge 01].

本研究では,地域内での住民の活動を Sugarscape モデルを応用して構築している. Sugarscape モデルを応用した理由は,モデルの特性上,主体のそれぞれの活動の結果生じる所得格差など,地域内での異質性を再現出来る利点がある点. さらに,主体数が増加した場合などの環境の変化を新たな変数などを用いずに明示的に扱えるためである.

## 2.3. 財政変数の地域格差による人口移動

### 2.3.1 足による投票(Voting with Feet)

税率と公共サービスの地域間差異による人口移動を考える上で重要な「足による投票 (Voting with Feet)」仮説が,経済学の分野で提案されている [Tiebout 56].

この仮説では,地域的に便益が閉じられている地方公共財を供給する複数の地方政府を考え,その地方公共財の便益は当該地域に居住する住民からの地方税のみによって供給されると仮定される. 各地域における公共財(便益)と税(負担)の組み合わせは地方政府によって異なっている. そして,個人の選好の多様性に対応できるほどの多様で多くの地方政府が存在する世界を想定する. この環境では,人々が自由に移住地を選択し,それぞれの個人が自己の選好に適した公共財と税の組み合わせを有した地域に居住することになる(地方公共財が最適に供給される)と,主張している.

さらに,選好や所得において差のある異質な住民は集団化されて,それぞれ同質的な選好を有する住民が同一の地域に居住するといった,Tiebout sorting と呼ばれる現象についても議論されている.

### 2.3.2 足による投票に関する既存研究

#### i) 人口移動

「足による投票(人口移動)」に関する研究は多岐にわたる. わが国においてはこれを対象とした本格的な実証分析はほぼ存在しないが,Sharp は,米

国カンザス市の人口の 2.4%が Tiebout 的な移動による居住であると推計している[Sharp 86]. また, 課税と公共サービスへの不満が認知されて人口移動につながるか否かについては, 相反する結果が報告されている[Lowery 89], [Percy 92].

また, 財政変数の地域格差と地域間人口移動に関しては, 税率格差と高額所得者の移動と, 公的扶助の格差と低所得者の移動が主要な実証分析の対象となってきた. 前者においては, 例えばロンドンへ転入してきた人々で, 転入の重要な理由を税率としている人が 20% に及ぶ事を指摘したもの[Dowding 95] や, スイスにおける州税が高額所得者の移動に与えた影響を推定したもの[Feld and Kirchgassener 01]. などが, 挙げられる.

後者においては, AFDC(Aid to Family with Dependent Children)と呼ばれる米国における現金給付の効果を対象とした分析では, ほとんどの分析で受給金額の差は人口移動に影響を与えることを示している[Gramlich 84], [Borjas 99].

## ii) Tiebout sorting

また, Tiebout sorting 自体に着目した研究も多い. Hamilton, Eberts らなどは, Tiebout sorting の存在を支持する分析結果を提供している[Hamilton 75], [Eberts 81]. その一方で Stein は, 都市圏内にある地方政府間では政策が異なっているのにもかかわらず, そこに居住する人々の社会経済的な特性には期待されるほどの異質性がみられなと指摘し, Tiebout sorting に疑問を呈している[Stein 87]. これに関連して, Rhode は, 地域間の異質性が低下傾向にあることを示し, 人々の移動が地域内と地域間の異質性にあたえる時間軸を通じた影響は複雑であり, データ分析においては, それが難しい点を指摘している[Rhode 03]. また, 対象とするデータが Tiebout sorting の途中経過のものなのか, それともある程度終了したものなのか, その判断基準が難しい.

上記のように, 「足による投票」や Tiebout sorting の存在を検証する実証分析は必ずしも統一的な結果を示していない.

そこで, 本研究では, 住民の立場からボトムアップ

的に, 地方政府の税率と, 提供する公共サービスの差異による人口移動を検討する. 特に, 税率格差と高額所得者の移動と, 公的扶助(公共サービス)の格差と低所得者の移動を同時に分析し, 移動のコストや人々が移住の意思決定を行うタイミングが, このような移動にどのように影響を及ぼすかについての考察を行う.

## 3. 研究経緯

### 3.1. Voting with Feet モデル

著者は本研究に先立って, 足による投票(Voting with Feet)仮説に基づき, まず地方政府の政策志向と住民の各公共サービスへの選好に基づいた移住のみに焦点を絞った Voting with Feet モデル(VWF モデル)を ABS を用いて構築した. 本研究はこの過程で課題として残った部分についてより深く掘り下げたものである. 本節ではまず, この VWF モデルについて紹介する.

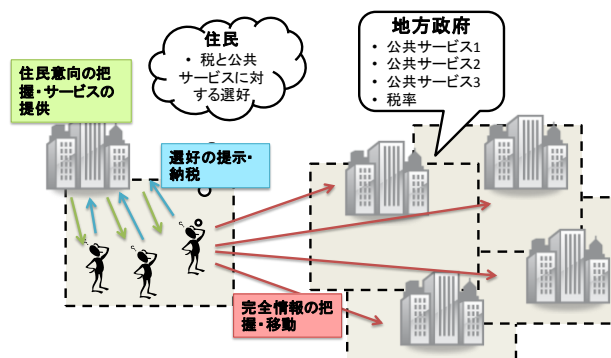


図 1 VWF モデルの全体図

VWF モデルでは, 図 1 に記されるように, 複数の地域と, 地域毎に存在する意思決定主体である地方政府, さらに, 地域内に存在し, 各自の選好に基づき地域間を移動する意思決定主体である複数の住民から構成される. 地域ごとに存在する地方政府は自地域内の住民から徴収した税<sup>1</sup>をもとに, 各公共サービスに対して予算配分を行う. この予算

<sup>1</sup> ここでは, Tiebout の仮定をもとに, 一定固定税を想定し, 全ての住民がこれを支払う. つまり,  $t$  期の地方政府の税収は,  $\text{税収}(t) = \text{税率}(t) \times \text{自地域内の住民数}(t)$  となる.

配分に関して、それぞれの地方政府は、自地域内の住民の意向だけを忠実に汲み取り予算配分を決定している。また、提供する各サービスは地域的に便益が閉じられた公共財としている。

また、住民の移動に関しては各自治体のサービス・税水準を完全に把握し、移住の際のコストもゼロと仮定している(Tiebout の仮説に基づく)。このような状態のもと、住民は最も魅力的な地域に確率的に移動する。

この VWF モデルの成果としては以下の点が挙げられる。

- i. Tiebout 仮説で仮定されている、『個人の選好の多様性に対応できるほどの多様で多くの地方政府が存在する世界』に関して、地域数と公共財の種類数が、いわゆる sorting の完了期間に及ぼす影響が考察可能であること。
- ii. 同時に、住民の移動確率と sorting の関係が考察可能である事(例えば、住民の移動確率が大きければ、系の状態が不安定で、sorting 自体が起きないといった現象が観測される。)

一方で、問題点としては、

- I. 住民の所得を考慮していないので、税率格差と高額所得者の移動や、公的扶助の格差と低所得者の移動などについては、議論不可能である点。
- II. 本来存在する、人口流入による環境の悪化などの、ネガティブフィードバックが存在していない点。
- III. 住民が不完全な地域情報を持つ場合(現実におけるよりリアルな設定)などの考察が不可能である点。また、移動に関する意思決定として、理論的根拠が乏しいこと。

などが、挙げられる。

このような経緯を踏まえ、本研究では、改良の方向性を1)住民の所得の考慮と、2)移住の意思決定に限定合理性を与え、移住の意思決定に関しても理論的背景を組込む事とした。

### 3.2. VWF モデルの改良に対する解釈

本節では、先程の改良の方向性を踏まえて、モデル

ルへの組み込みについて述べる。

#### 3.2.1 地域内での住民の生産活動のモデル化

まず、1)住民の所得を考慮するにあたって、地域内での住民の活動をモデル化する必要がある。そこで、地域内での住民活動を以下の理由から Sugarscape モデルを応用して用いる。

- i. 本研究では、地域間移住に着目し、地域内での住民の活動を、簡易的にとらえたため。
- ii. 地域内での人口流入による環境の悪化や、税收、公共サービスの変化を、新たな変数などを用いずに明示的に扱える点。つまり、地域内の異質性を住民起点で再現可能である点。

i)に関しては、二次元平面(セル型環境)で構成される空間を一地域とし、住民がそれぞれセル上を移動しながら、各セルに存在する資源をもとに財を生産し、それを所有財産に加えるという行為を各ステップ毎に繰り返している。これを地域内で生活する住民の活動と解釈する。これにより、個人のそれぞれの活動の結果生じる所得格差など地域内での異質性を再現出来る。

#### 3.2.2 地域間移動のモデル化

前述の地域が複数存在する環境を想定し、地域内での生産活動を局所的行動、地域間での移動を大域的行動と呼ぶ。この概念図を図2に示す。

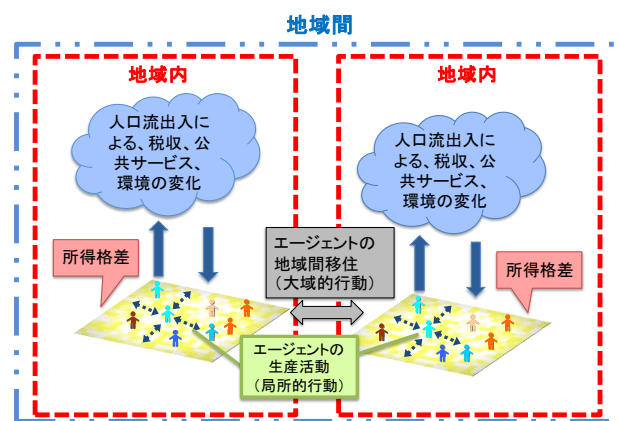


図2 局所的・大域的行動の概念図

地域間移住の意思決定については、限定合理性と理論的背景を踏まえて、経済学で用いられる人的資本モデルを採用した。この詳細については、次章で述べる。

### 3.3. Multi-Area Model (MAM)の一般的解

## 積・意義

先述の通り,新たな提案モデルは,地域内での局所的行動と,地域間での大域的行動ルールを併せ持っていた. 一般的にこのようなシミュレーションモデルは他ではあまり見られない. 本節では,このようなモデルを **Multi-Area Model; MAM** と呼び, MAM の一般的解釈と意義について述べる.

**MAM** 環境ではエージェントが存在する異質な空間(以下これをエリアと呼ぶ)が複数存在する. それぞれのエリアはセル型環境で構成され,エージェントはエリア内での局所的行動ルールと,エリア間での大域的行動ルールを併せ持つ. 図 3 に MAM の概念図を示す.

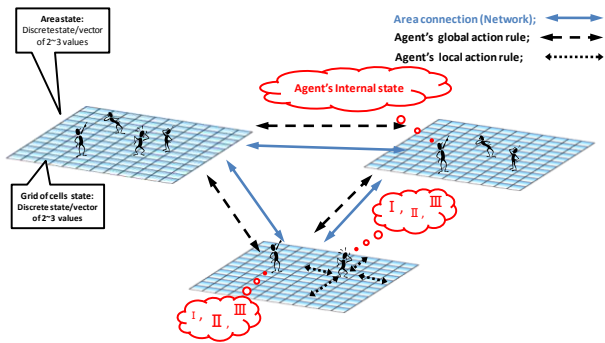


図 3 MAM の概念図

次に **MAM** の解釈,利点について述べる. エリア内での局所的なエージェント行動ルールの集合により,個別エリアの情報・構造が創発する. そして,この個別エリア情報がエージェントの局所的・大域的行動ルールに影響を与える. さらに,各個別情報と,全てのエリアをあわせた全体の大域的情報・構造は相互に影響を及ぼす. このように,個別エリアとエリア全体での 2 階層間における相互作用を記述することが出来る. 図 4 に **MAM** における解釈を示す.

これにより,例えば,個別エリアの成長と衰退,全エリアの大域的情報を同時に観測・議論することが出来る.

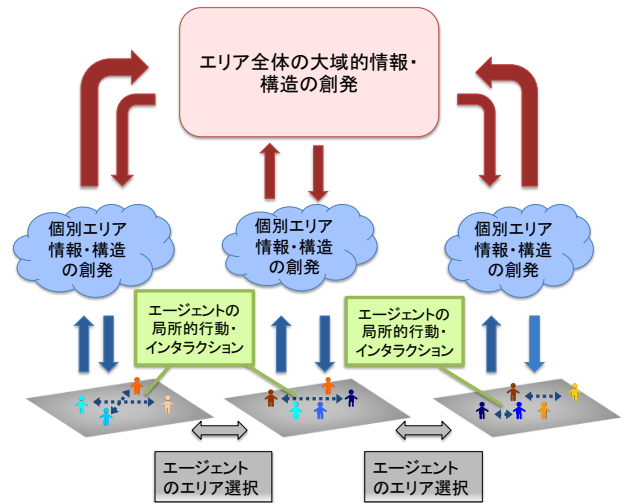


図 4 MAM の解釈

## 4. 人工社会モデル

VWF モデルを改良し, Sugarscape の要素を加えた人工社会モデルの詳細について述べる.

### 4.1. 地域内環境の詳細

地域内の環境は格子状の二次元座標で表現され,すべての座標( $x, y$ )は資源の現在量と最大容量という二つの要素をもつ. ただし,最大容量とは現在量が取り得る最大値のことを示す. 資源は,以下の再生ルールにより再生する.

[資源再生ルール  $G_a$ ]

資源の現在量  $g_t$ , 最大容量を  $c$ , 資源の再生量を  $\alpha$  とすると,次の期間 ( $t+1$ )での資源量  $g_{t+1}$ は,以下の式によって再生される.

$$g_{t+1} = \min(g_t + \alpha, c) \quad \dots(1)$$

[再分配ルール  $D$ ]

各地域では地域固有の税率に基づき課税が行われる. 地方政府は,エージェントが資源から生産した財の増加分である所得に対して課税を行う. これによりエージェントは税徴収後の財を財産として蓄える. 徴収された税は当該地域の財源となり,公共サービスとして,当該地域に存在している各エージェントに均等に再分配される(以下,これを分配量と呼ぶ). そして,エージェントはそれを財産に加える. なお,次期への繰越はしない.

課税の対象となる所得は,各期の期首と期末間の保有財産の変化量とし,最低生活費の免税と累進課税を取り入れる. 各エージェントは,所得が消費量下限値未満の

場合この所得だけではどのエージェントも生存することはできない。そこで、この消費量下限値を 1 期間の最低生活費とし、これ以下の所得を非課税とする。課税は 1 期ごとに行い、1 期間の所得から消費量下限値を差し引いた所得に対して課税する。以後のシミュレーションで用いる税率を表 1 に示す。

表 1 所得税率表

	低 税 率 (%)	中 税 率 (%)	高 税 率 (%)
$\text{Income} \leq L$	0	0	0
$L < \text{Income} \leq 2L$	5	10	15
$2L < \text{Income} \leq 3L$	10	20	30
$3L < \text{Income} \leq 6L$	15	30	45
$6L < \text{Income}$	20	40	60

$L$  = 最低消費量

(The lower limit of consumption)

改良モデルで地域の税率を固定したのは、問題の複雑化をさけるためであり、今後の課題として、VWF モデルのように、地方政府の意思決定を考慮し、税率を変動させるモデルなども考えられる。

## 4.2. 住民エージェントの詳細

初期時に各地域のセルにランダムに配置されたエージェントはそれぞれ異なった視野、消費量、財産、地域効用の内部状態を持つ。本モデルにおける視野とは住民エージェントの認識できる地域内の環境の範囲と、さらに、見つけた資源を財として生産するための生産能力を意味している。すなわち、視野の広いエージェントほど資源が豊富な環境を認識し、その資源からより多くの財を生産できる可能性が高くなる。エージェントは全て同種類の財を生産し、生存するために、この財を消費し、財産として蓄える。その際、保有する財産が消費量より少ない場合、生存するための必要量がまかなえなかったことになり、エージェントはその時点で死亡する。各エージェントの局所的・大域的行動ルールの詳細を以下に示す。

### [地域内活動ルール **M**]

- 格子上的直交する 4 方向を視野の届く限り遠くまで見渡し、最も資源が豊富で、他のエージェ

ントがいない場所を認識する。

- そのような場所が複数あるときは、最も近い場所を選択し、その場所に移動する。
- 新しい場所にある全ての資源を元に財を生産し財産として蓄積する。(獲得財産 = 資源量 × 視野)

### [地域選択ルール(地域間移動ルール) **SS**]

エージェントの地域選択ルールには、経済学分野で用いられる人的資本モデルの概念を用いた[Todaro 69]。これは、現住地における効用と移住先における期待効用の割引後の差が移住費用よりも大きい場合に、移住する要因が発生するというものである。自地域  $i$  の他地域  $j$  に対する純便益の現在価値の合計  $fitness_{ij}$  (地域効用) は、以下の効用関数で決定される。

$$fitness_{ij} = \int_{t=0}^T [R_j(t) - R_i(t)] e^{-rt} dt - C(0) \quad \dots(2)$$

$fitness_{ij} \leq 0$  なら定住、 $fitness_{ij} > 0$  なら、最も現在価値の高い地域  $j$  に移動する。

$R_j(t), R_i(t)$  は  $j$  地域における効用水準と  $i$  地域(自地域)に対する効用水準を示している。 $C(0)$  は移動コスト、 $T$  は便益予測期間、 $r$  は時間割引率のパラメータである。ここで、今回のシミュレーションにおける、 $R_j(t), R_i(t)$  は、

$R_j(t)$  = 分配量  $j(t)$  + 自分の視野と等しいエージェントの平均獲得財産  $j(t)$  ,

$R_i(t)$  = 分配量  $i(t)$  + 自分の獲得財産  $(t)$  としている。自分の視野と等しいエージェントの平均獲得財産とは、例えば、自分の視野が 1 ならば  $j$  地域の視野 1 を有するエージェントが  $t$  期に各得した財産の平均の事を指す。

これは、直感的には、自分と同じ能力のエージェントが、他地域でより多くの財産を獲得しているならば、そちらの方が魅力的に映るということの意味している。

限定合理性を考慮して、他地域効用の評価対象に視野別の平均獲得財産を取り入れた。他地域に存在している資源の量や、能力毎のエージェントの比率など、完全に他地域の情報を把握しているわけではない。

エージェントがどのタイミングで便益の予測を開始するかは難しい問題であるが、本モデルでは移住を行ってから便益予測期間経過後、再び便益の予測を開始するものとしている。

なお、地域間移動の地域内の移動先(格子上の位置)はランダムに決定されるとした。

## 5. シミュレーションの実行と結果の考察

### 5.1. モデルの基本的特徴の実験

ここでは、モデルの基本的特徴を考察するための実験を行う。まず、2 地域間での相互依存状態を想定する。そして、2 地域間の税率格差とエージェントの能力毎により引き起こされる、人口変動メカニズムの基本的な解釈について述べる。

次に、地域間移住に重要な影響を及ぼすパラメータをそれぞれ変化させた際についての考察を行う。基本設定として、表 2 に示すパラメータを採用する。初期エージェント数はそれぞれの地域毎に 1000 ずつ配置し(内訳は視野 1, 視野 10 を有するエージェントを各 500, 以下視野 1, 視野 10 のエージェントをそれぞれ、低能力, 高能力エージェントと表記する), 地域を表す二次元空間の大きさは  $50 \times 50$  セルの環境を与え、2 地域の大きさは等しいものとする。また、各セルの資源最大容量 0~3 で一様ランダムに設定し、初期時点の資源はこの最大容量に等しい。

なお、今回のシミュレーションでは環境収容力のようなものは、興味の対象としていない。そこで、エージェントの死亡を防ぐため、消費量や財産分布を表 2 のように設定した。

この基本設定において、その他のパラメータを固定し、1) 便益予測期間、2) 移住コスト、3) 税率のみを変化させた時の振る舞いを観測する事で、モデル特性の考察を行う。

表 2 基本パラメータ

地域数	2
エージェント数	各 1000
2 次元空間の大きさ	各 $50 \times 50$
資源最大容量	0 ~ 3
資源再生ルール{G}	$\alpha = 1$
視野	1(低能力) or 10(高能力)
消費量	1
初期財産	10~20
便益予測期間	1 ~ 36
時間割引率	0.01 ~ 0.5
移住コスト	2.5
再分配ルール{D}	地域 1: 低税率, 地域 2: 高税率

#### 5.1.1 税率・所得格差がもたらす人口変動の創発

本節では、地域間の税率格差とエージェントの能力の違いによって引き起こされる、人口変動メカニ

ズムの基本的な解釈について考察する。

表 2 の基本パラメータ設定で 300 ステップまでシミュレーションを実行した結果を図 5 から図 9 に示す。図 5, 6 はそれぞれ、地域毎のエージェント数の時間推移と、それをさらに細かく能力別に分けてプロットした地域・能力毎のエージェント数推移。図 7 は地域毎の再分配政策によって得られる一人当たりの分配量の時間推移。また、図 8 は、地域・エージェント能力毎の平均税引後所得の時間推移、図 9 は図 7, 8 を合わせてプロットした地域・能力毎の実質の平均獲得財産(分配量 + 税引後所得) 時間推移を示している。

図 5 から各地域のエージェント数が、複雑性を伴った周期的変動をしていることが分かる。以下では、この全体的な挙動の結果を順を追って説明する。

① 地域内の各エージェントの生産活動の結果、能力の高低により所得に格差が生じ、高所得者と低所得者が誕生する(図 8)。

同時に、各地域で定められた税率の違いにより、地域間の分配量にも格差が生じる(図 7)。

② 高所得者は、税率の高い地域を嫌って、地域間移動を開始する(図 6)。高税率地域から低税率地域へと高所得者が流れることで、高税率地域の税収は低下する。結果、分配量は急激に低下し、逆に低税率地域の分配量が増加する(図 7)。

③ 実質獲得財産(税引後所得 + 分配量) 最大化にあたって、自分の所得に比べ、分配量の寄与が大きい低能力のエージェントにとっては、分配量の増減が移住を考える大きな要因となるので、分配量につられるかたちで、地域間移動が起きる(図 6, 7, 9)。

④ 高能力エージェントが多く流入した低税率地域では資源の奪い合いが激化することで、税引後所得が減少すると共に、低能力エージェントの流入により、分配量までもが減少する(図 7, 8)。それを嫌って、高能力エージェントが再び、地域間移住を起こす。

上記の①から④のプロセスにより、この周期的な人口変動が引き起こされている。

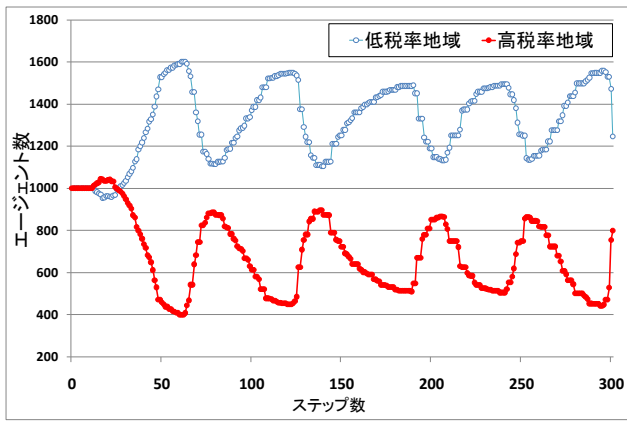


図 5 地域毎のエージェント数推移

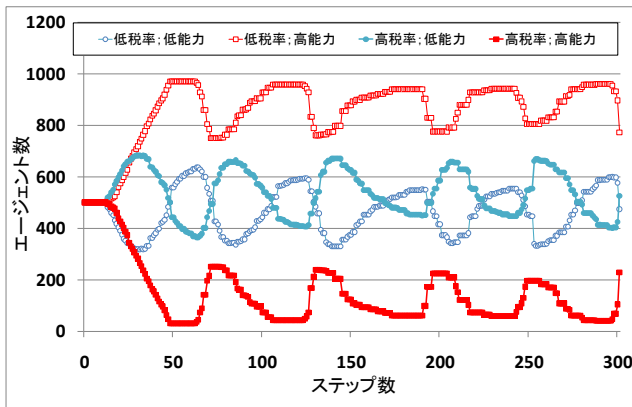


図 6 地域・能力毎のエージェント数推移

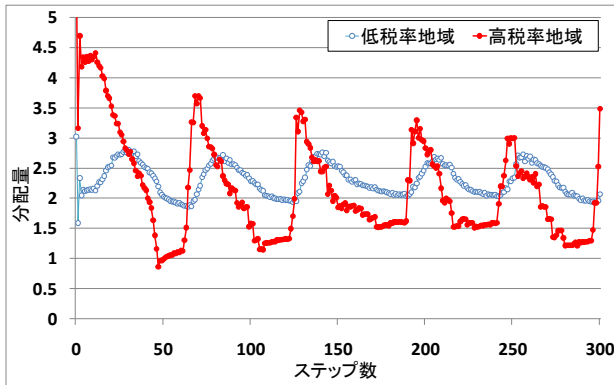


図 7 地域毎の分配量の推移

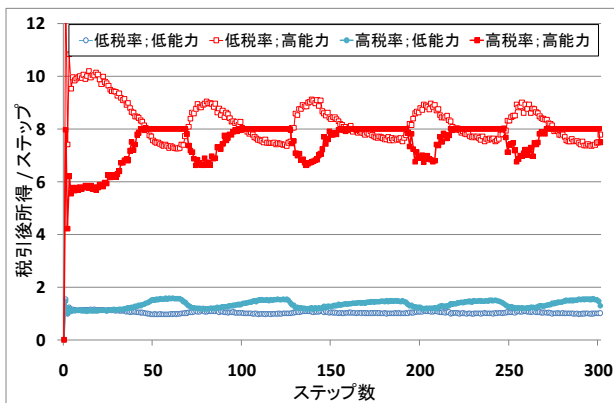


図 8 地域・能力毎の税引後所得推移

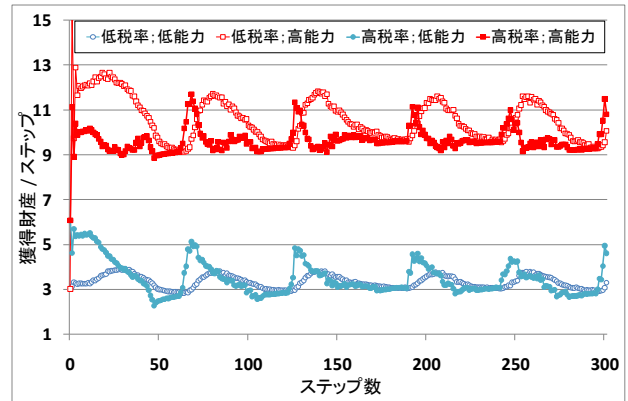


図 9 地域・能力毎の獲得財産推移

図 10 は、移住先・能力毎の移住者数の時間推移を 50 ステップから 130 ステップ間で抜き出したものだが、この図からも 1) 高能力者の低税率から高税率地域移動、2) 低能力者の低税率から高税率地域移動、3) 高能力者の高税率から低税率地域移動、4) 低能力者の高税率から低税率移動の順番で時系列に移動しているのが分かる。

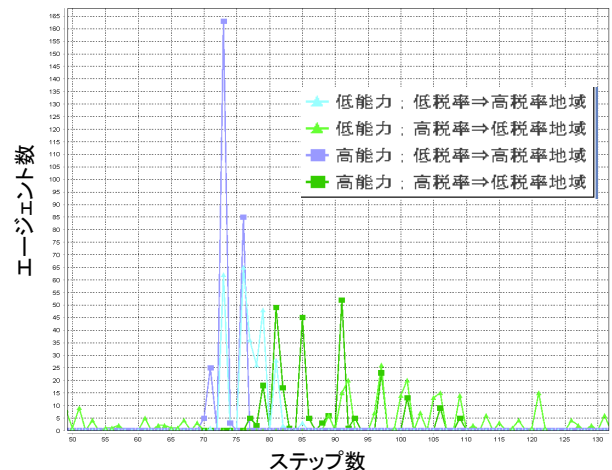


図 10 移住先・能力毎の移住者数推移

ただし、上記のメカニズムで起きている人口変動は、単純な周期的変動では無いという事である。図 5 を見ると、大きな変動が起きる間隔は一定では無い。エージェント毎に異なる移住の意思決定を行うタイミングの重なりがこのような現象を引き起こす。また、図 11 は、挙動の複雑性を示すために、横軸に低税率地域での分配量、縦軸に高税率地域での分配量をプロットし、2 地域の分配量の 300 ステップ間の関係を記したもののだが、この図からも分かる通り、分配量をみても、カオス的な振る舞いをしていることが分かる。

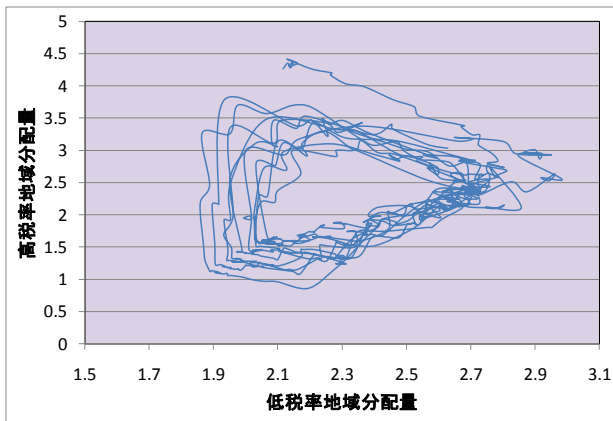


図 11 2 地域での分配量の関係性

2 地域間での税率格差と、高能力・低能力エージェントの関係によって引き起こされる、複雑性を伴う周期的な人口変動は、本モデルで見られる特徴的な創発現象である。このシミュレーション結果が示唆しているものは、2 地域での税率格差が大きい場合、住民の意思決定を行うタイミングの重なりを予想することは困難だが、意思決定のタイミングが重なった場合には、このように不安定な状態が続き、Sorting が起こらない可能性があるということである。

### 5.1.2 便益予測期間と移住タイミングの関係性

本節では、大規模な人口移動が起きるタイミングについての考察を行う。便益予測期間が、移住に与える影響を考察するために、表 2 の基本パラメータから便益予測期間のみをそれぞれ、1~36, 48, 60, 72, と変化させて、3000 ステップまでシミュレーションを実行した。図 12 はその結果として、便益予測期間と累積移住者数の関係についてまとめたものである。

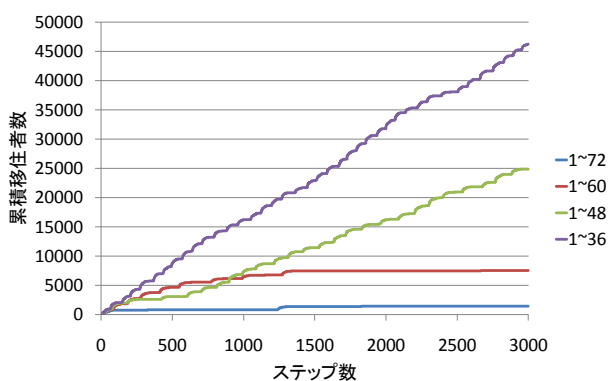


図 12 便益予測期間と累積移住者数の関係 (3000step)

図 12 から、エージェントが持つ便益予測期間の平均・分散が大きくなるほど、移住の意思決定が重なる確率が大きくなり、大規模移住が起きる期間が短くなっているのが分かる。図 13 は図 12 の拡大図にあたるが、この図から大規模移住が起きる間隔はそ

れぞれ、ばらつきを伴い固定的ではないことが分かる。

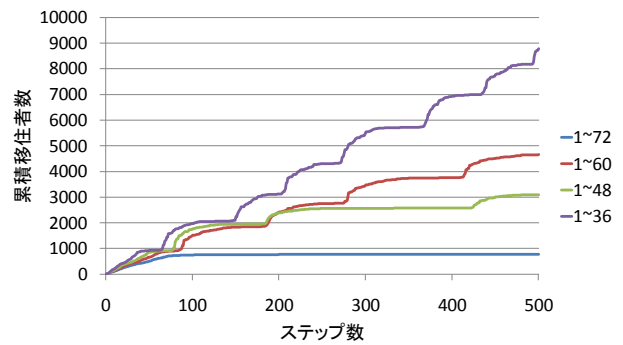


図 13 便益予測期間と累積移住者数の関係 (500step)

### 5.1.3 移住コストが移住に及ぼす影響

次に、移住コストが全体的な挙動に及ぼす影響について考察する。表 2 の基本パラメータから移住コストのみを 1.5 から 5 まで変化させた場合の低税率地域のエージェント数推移の変化を図 14 に記す。

図 14 が示すように、移住コストが大きな場合そもそも、移住自体があまり起こらない。移住コストが小さくなるに従って、2 地域間での人口変動が継続的な周期性を持ち始める。また、移住コストが小さすぎる場合は、高能力エージェントが全て低税率地域に移住してしまい、人口数に大きな偏りを保ったまま、定常的に推移する。

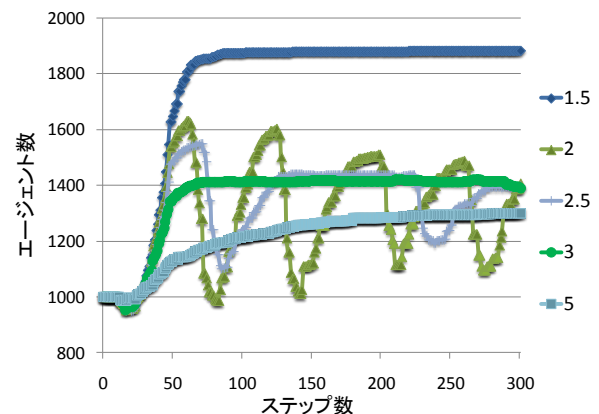


図 14 人口数変動の移住コストによる影響

### 5.1.4 税率格差の程度が移住に及ぼす影響

本節では、2 地域間での税率格差の程度による移住への影響を考察する。表 2 のパラメータセットから各地域の税率のみを変更し、税率低税率・中税率地域、中税率・高税率地域での人口変動の動態を観測した。図 15, 16 はそれぞれ中税率—低税率、中税率—高税率地域の場合の地域・移住先・能力毎のエージェント数の推移を 300 ステップまでプロットしたものである。

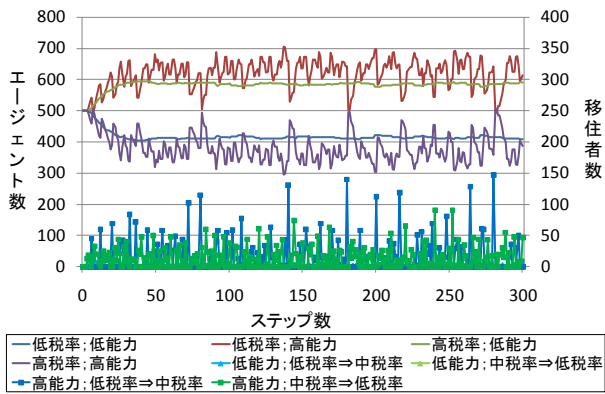


図 15 地域・移住先・能力毎のエージェント数推移  
低税率—中税率地域

図 15 から分かる通り、低—中税率間では、先述の低税率と高税率間での人口変動と比べて、挙動が異なっている。低所得者は、地域毎に棲み分けが起き、ほぼ高所得者のみが、地域間を移住しているのが分かる。

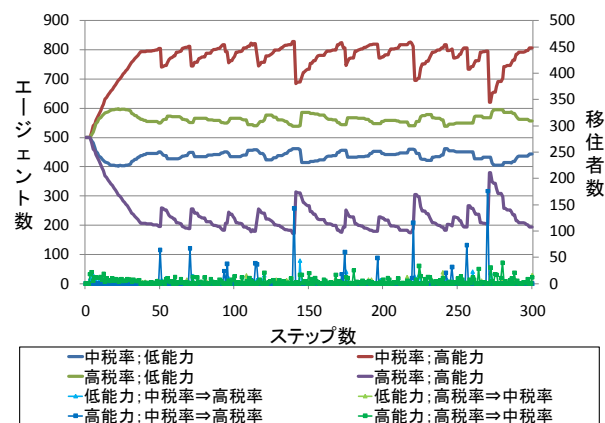


図 16 地域・移住先・能力毎のエージェント数推移  
中税率—高税率地域

また、図 16 の中—高税率地域間の場合は、高低所得者それぞれが移住しているが、低—高税率間の場合のように、低所得者の人口数が、2 地域で入れ替わるような、大きな変動は見られない。

これまで、見てきた通り、高・低所得者の移住は密接に関係し、地域間の税率格差や、移動コストによっても、その振る舞いは全く異なる。つまり、税率格差と高額所得者の移動や公的扶助の格差と低所得者の移動を別々に分けて考えるのではなく、両者を統合して考える事が重要であると言える。本モデルでは両者を同時に観測出来るというのは大きなメリットである。

## 5.2 実験 2-地域数の違いによる考察

これまで、2 地域間での相互依存状態で、各パラメータを変化させながら、挙動の変化を観測してきたが、本節では、2 地域から 3 地域に考慮する事で、人

口変動がどのように変化するかを考察する。

まず、比較対象として、表 3 のパラメータを、地域数 2 に変更しどちらの税率も中税率で等しく設定し、1000 ステップまでシミュレーションを実行した。その際の地域毎のエージェント時間推移と最大変動率を図 17 に示す。ここで言う、最大変動率とはシミュレーション期間内での、エージェント数の最大値を初期時点のエージェント数と比較した変化率である。

図 17 から同税率を採用する 2 地域間での人口変動は、最大変動率でも 5.4%程度にとどまっている事が分かる。

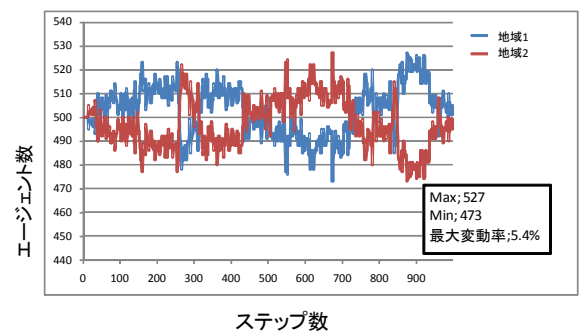


図 17 エージェント数の推移と最大変動率

この比較的人口変動が低い 2 地域モデルに新たな低税率の地域を考慮する設定を考える。新たな地域を考慮することによって、どのように各地域の振る舞いに変化するかを考察する。また、その際のパラメータ設定は以下の表 3 に従って設定した。

表 3. 実験 2 におけるパラメータ

地域数	3
エージェント数	各 500
2 次元空間の大きさ	各 50×50
視野	1 or 10
消費量	1
初期財産	10~20
便益予測期間	1~36
時間割引率	0.01 ~ 0.5
移住コスト	2.5
再分配ルール{D}	地域 1; 中税率 地域 2; 中税率 地域 3; 低税率

結果を図 18 から図 23 に示す。図 18, 19 はそれぞれ、地域毎のエージェント数と分配量の時間推移で

あり,図 20,21 は,それぞれ,地域毎の低能力エージェント数と高能力エージェントの時間推移を表す. また,図 22,23 は,それぞれ,低能力・高能力エージェントの各地域における平均税引き後所得の時間推移を示している.

図 18 から図 17 と比較してみても,低税率の地域 3 を考慮することによって,地域 1,2 がそれぞれ同税率であるにも関わらず,エージェント数に大きな差異が生じている事が分かる.

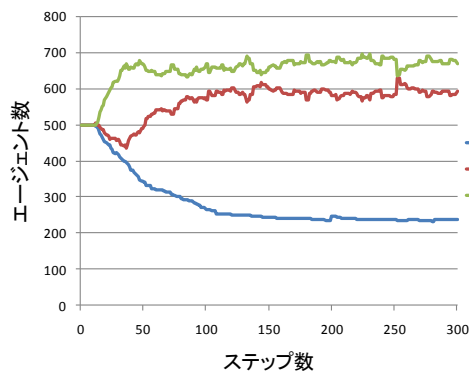


図 18 地域毎のエージェント数推移

図 19 から中税率地域である地域1の分配量だけが,他地域に比べて少ない事が分かる. 図 20,21 を見ると,地域 1 では,高・低能力どちらのエージェントも人口を減らしている事が分かる. 高能力エージェントに関しては,その減少率が激しい. 図 22,23 で見られるように,資源の獲得競争が少ない地域 1 では,他地域に比べて,各能力のエージェントが獲得している平均的な税引き後所得も大きくなっている.

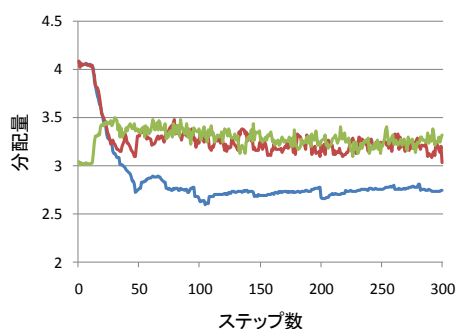


図 19 地域毎の分配量の推移

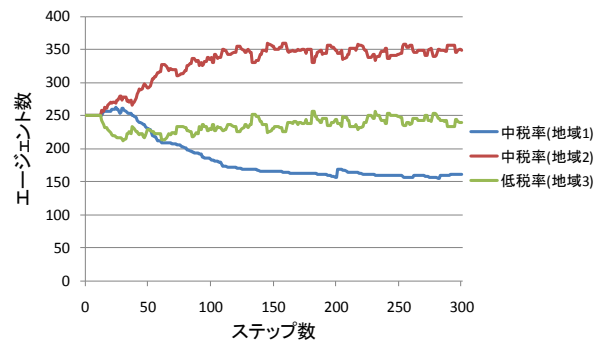


図 20 地域毎の低能力エージェント数の推移

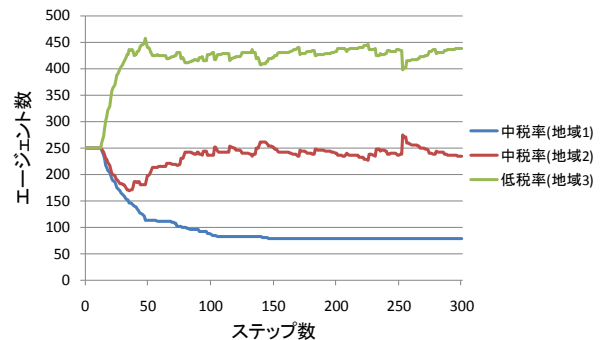


図 21 地域毎の高能力エージェント数の推移

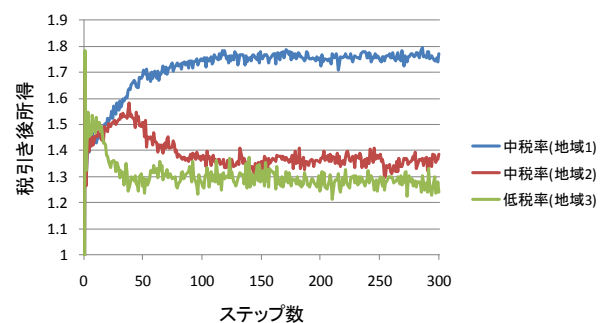


図 22 地域毎の低能力エージェント  
平均税引き後所得の推移

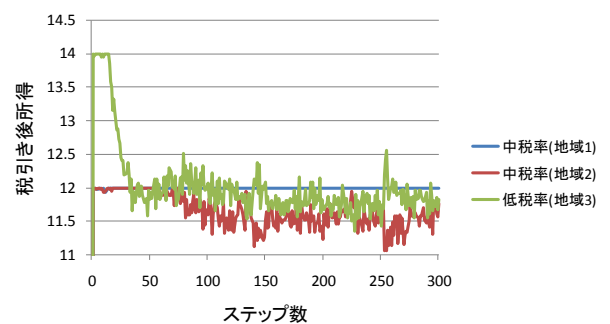


図 23 地域毎の高能力エージェント  
平均税引き後所得の推移

2 地域の場合には、どのシミュレーションにおいても、低能力エージェントが分配量の低い地域で留まる事などは見られず、ちょうど図 19 が示す地域 2 と地域 3 の関係のように、常に分配量は各地域で同じ値になるように作用してきた。このように地域数の違いを考慮することで、観測される振る舞いが異なる。この点について議論出来ることが、提案モデルの利点である。

## 5. 結論

本研究では、住民の立場からボトムアップ的に、財政変数の地域格差による人口移動を検討するための人工社会を構築した。

これにより、①地域間の税率格差と高低能力エージェントとの三者関係により引き起される、人口変動の動的特性を移住コスト、移住の意思決定を行うタイミング、税率格差の程度から分析した。その結果として、高・低所得者の移住は密接に関係し、地域間の税率格差や、移動コストによっても、その振る舞いは全く異なることを示した。

②住民が移住を考慮する地域数の違いにより、地域システム全体としての挙動が異なることを示した。これは、自治体が意思決定を行う上で、重要な視点と言える。

しかし、現実の移住に関する意思決定はさらなる複雑性を伴う。家族構成や、年齢、地域の繋がりや環境等、本モデルでは考慮していないものも移住の大きな要因となっている。本研究では、人口移動に関する意思決定の複雑さゆえ、財政変数と各自の所得のみを移住要因として切り取った環境の中で、高・低所得者の依存関係や、地域数の違いによる挙動の変化などを考察した。本研究のシミュレーション結果で得られた全体的挙動は、地域内で実際にエージェントが行う生産活動を出発点としているところである。地域内のエージェントには保有財産の格差が存在するし、移動に対してそれぞれの判断基準を持っている。その個々人の行動・意思決定の積み重ねにより、地域システムの全体的挙動が観測されている点は興味深いものである。また、高・低所得者の移動を同時に考慮すること、対象地域数の違いによる挙動の変化を考慮する事の必要性などは、本結果から得られた重要な示唆である。

今後の課題は、自治体が行う税の徴収と提供する公共サービスとのタイムラグなどを考慮した分析や、3 地域以上の場合における人口変動の動態をさらに、精緻に分析する必要がある。また、外部環境により地域の状態が変化する場合や、地域内のエ

ージェントの消費量によって、期間内に再生する資源量に変化する場合など様々な検証も必要である。さらに、本研究でのシミュレーションでは、単一の財を効用基準として、エージェントは意思決定を行っていたが、財の種類を増やしていった場合などに影響についての考察を加えていきたいと考えている。

## 参考文献

- [Axelrod 00] Axelrod, R. , Cohen, M. D. : Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier. Free Press (2000).
- [Axelrod 86] Axelrod, R. , 1986, An evolutionary approach to norms. American Political Science Review, 80, 1095-1111.
- [Axelrod 97] Axelrod, R. : The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration. Princeton University Press (1997).
- [Borjas, 99] Borjas, G. J. , Immigration and welfare magnets. Quarterly Journal of Economics 117(4), 607-737.
- [Conway 01] Conway, K. S. , Houtenville, A. J. , 2001. Elderly Migration and state fiscal policy : Evidence from the 1990 census migration flows. National Tax Journal 54(1), 103-23.
- [Dowding 95] Dowding, K. , Peter, J. , Biggs, S. ,1995. Residential mobility in London : A micro-level test of the behavioral assumptions of the Tiebout model. British Journal of Political Science 25,379-3.
- [Eberts 81] Eberts, R. W. , Gronberg, T. J. , 1981. Jurisdictional homogeneity and the Tiebout hypothesis. Journal of Urban Economics 10 ,227-39
- [Epstein 96] Epstein, J. and Axtell, R. : Growing Artificial Societies: social science from the bottom up, Brookings Institution Press, The MIT press, (1996).
- [Feld 01] Feld, L. P. , Kirchgassner, G. , 2001, Income tax competition at the state and local level in Switzerland. Regional Science and Urban Economics 31, 181-213.
- [Flentge 01] Flentge, F. Polani, D. and Uthmann, T. : Modelling the Emergence of Possession Norms Using Memes, Journal of Artificial Societies and social Simulation, Vol. 4, No. 4, (2001).
- [Gilbert 08] Gilbert, N. : AGENT-BASED MODELS, SAGA Publications(2008)
- [Gilbert 99] Gilbert, N. and Troitzsch, K. G. : Simulation for the Social Scientist, Open University Press, Buckingham. Philadelphia, (1999).
- [Gramlich 84] Gramlich, E. M. , Laren, D. S. ,1984. Migration and income redistribution responsibilities. Journal of Human Resources 19(4) ,489-511.
- [Hamilton 75] Hamilton, B. W. , Mills, E. S. , Puryear, D. , 1975. The Tiebout Hypothesis and residential income segregation. in: Mills, E. S. , Oates, W. E. , Fiscal Zoning and Land Use Controls, 101-18
- [Lowery 89] Lowery, D. , Lyons, W. E. ,1989. The impact of jurisdictional boundaries: An individual-level test of the Tiebout model. Journal of Politics 52(1),73-97
- [Percy 92] Percy, S. L. , Hawkins, B. W. ,1992. Future tests of individual-level propositions from the Tiebout model. Journal of Politics 54(4), 1149-57
- [Rhode 03] Rhode, P. W. , Strumpf, K. S. ,2003. Assessing the importance of Tiebout sorting : Local heterogeneity from 1850 to 1990. American Economic Review 93(5) , 1648-77.

- [Schelling 71] Schelling, T. C. , 1971, Dynamic models of segregation. Journal of Mathematical Sociology, 1, pp. 143-186.
- [Sharp 86] Sharp, E. B. , 1989. A capitalization approach to fiscal incidence at the local level. Land Economics 65(4), 259-375
- [Stein 87] Stein, R. M. , 1987. Tiebout's sorting hypothesis. Urban Affairs Quarterly 23, 140-66.
- [Tiebout 56] Tiebout, C. , 1956. A pure theory of local expenditures. Journal of Political Economy 64, 416-24
- [Todaro 69] Todaro, M. : A Model for Labor Migration and Urban Unemployment in Less Developed Countries, American Economic Review, Vol. 59 pp. 138-48
- [奥 06] 奥俊信; 用途地域制度に基づいた土地利用用途間の親和度設定による土地利用形態-マルチエージェントの満足度戦略による土地転移モデルその2-, 日本建築学会環境系論文集 No. 605, 147-154, 2006. 7.
- [池谷 07] 池谷直樹, 谷本潤, 萩島理, 相良博喜, マルチエージェント・シミュレーションに基づく都心部における人口分布の過渡的動態モデルに関する研究- 日本建築学会技術報告集, 2007 - J-STAGE
- [國上 08] 國上真章, 小林正人, 山寺智, 寺野隆雄: 複雑 2 重ネットワークモデルによる貨幣の創発現象の分析, 情報処理学会誌, 数理モデル化と応用 (TOM)(07-Special-15), 2008.
- [倉橋 01] 倉橋節也, 寺野隆雄: エージェントシミュレーションによる共同分配規範モデル, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol. J84-D1, No. 08, pp. 1160-1168, 2001.
- [見城 06] 見城幸直, 山田隆志, 寺野隆雄: 強化学習エージェントによる企業組織の分析モデル, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 585, pp. 35-42, 2006.
- [佐藤 08] 佐藤和希, 高橋徹, 山田隆志, 寺野隆雄: 群集歩行シミュレーションにおける一般化歩行ルールの検討, 合同エージェント&シンポジウム 2008 (JAWS-2008) 予稿集, 2008.
- [鳥 03] 鳥伝, 狩野 均, "行動ルールが変化する人工社会の進化的設計手法" 人工知能誌, vol. 18, no. 6, pp. 325-332, 2003.
- [鳥山 09] 鳥山正博, 菊地剛正, 山田隆志, 寺野隆雄: エージェントシミュレーションを用いた組織構造最適化の研究- スキーマ認識モデル-, 電子情報通信学会論文誌 (D), Vol. J92-D, No. 11, pp. 1919-1926, 2009.
- [中西 03] 中西英之, 小泉智史, 石田亨: 市民参加による避難シミュレーションに向けて, 人工知能学会論文誌, 18(6), pp. 643-648, 2003
- [西川 06] 西川雅史, 林正義: 政府間財政関係の実証分析: 財務省財務総合政策研究所「フィナンシャル・レビュー」, 5 月号, pp. 197-222, 2006
- [林 06] 林正義: 再分配政策と地方財政: 財務省財務総合政策研究所「フィナンシャル・レビュー」, 5 月号, pp. 138-160, 2006
- [松山 07] 松山科子, 國上真章, 寺野隆雄: ABS によるコンテンツ流通メカニズムの解析, 日本ソフトウェア科学会ネットワークが創発する知能研究会, JWEIN2007 予稿集, 2007