

エージェントベースシミュレーションによる教員配置施策に関する研究
How many teachers are necessary in education systems?
– An Agent-Based Simulation Analysis –

神澤 篤啓[†] 山田 隆志[†] 山本 学[†] 吉川 厚[†] 寺野 隆雄[†]
Atsuhiko Kanzawa[†] Takashi Yamada[†] Gaku Yamamoto[†] Atsushi Yoshikawa[†] Takao Terano[†]

[†]東京工業大学 大学院総合理工学研究科
[†]Dept. Computational Intelligence and Systems Science,
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Tokyo Institute of Technology

Abstract: Recently, it became an attractive topic to make a prior assessment for the education policies. We propose an agent-based modeling in order to evaluate an educational policy, which is to determine the number of teachers necessary in educational system. The proposed model focuses on improvements in the academic achievements of each individual as well as an age-group as a whole. As a result of this study, major findings are, 1) the effective strategy for the below-average students is to raise the ratio of teachers placed in the compulsory education; and 2) the effective strategy for excellent students is to reduce the ratio of teachers placed in the primary education.

1. 序論

近年、学力低下論争から、教育施策に関する議論が盛んに行われている[市川 02][荻谷 03]. 一言に教育施策といっても、教員の資質の向上を目指した教員免許更新制や教員養成制度の充実、学生に注目した奨学金制度など様々である。

教育予算の内訳をみると、初等中等教育(小学校から高等学校)への教育予算は、8割以上が教員への人件費に利用されていることが明らかにされている[OECD 09]. それにもかかわらず、教員には子ども一人ひとりに応じた指導の充実が望まれている[文科省 05]. さらに、教育現場では教員数が不足しているとの調査報告もされている[Benesse 09]. それゆえに、教員増員に教育予算をさらに投入することが必要とされている。

従来研究では、世界各地域における初等教育への教員の増員が社会的に有益であるとされている[Psacharopoulos 85]. しかしながら、実証研究では、生徒の個人情報を取り扱うため、少数の事例しか集められないというデータ面の制約があり、教員配置が生徒個々人の学力に与える影響や、その過程を把握することが困難とされている。

このような手法に対して、対象モデルを数理的・統計的に捉えた評価研究がある[荒井 95][矢野 01][小塩 03][小塩 04]. これらのモデル記述では、現実と整合的な結果が得られている[川崎 06][小塩 08]. しかし、これらのモデル記述では学校教育を受ける個々人の意思決定と行動に関して合理性を仮定してつくられているため、限定的な意味において、かなり強い前提条件がない限り、そのような仮定が崩れる

場合がある[寺野 03b][山本 08]. そのため、モデル記述能力に不足があると指摘されている。

これら実証研究と数理的・統計的に捉えた評価研究の中間に位置するものとして、エージェント・ベース・シミュレーション(Agent Based Simulation; ABS)を用いた評価研究がある。すなわち、仮説に基づいて論証するといった演繹的な方法と、実験による帰納的な方法を組み合わせた、理論と実験にならぶ第三の科学研究法である[寺野 03a]. この方法では、実証研究や統計などで報告されたデータを基に、主体の行動ルールをモデリングして、それらの相互作用によって実現されるミクロレベル・マクロレベルの社会現象を観測する。つまり、ABSを採用することによって、社会現象として表れるプロセスについて理解を深めることが可能となる。このような手法を用い教育政策を評価した研究があるが、そこではゆとり政策の問題点について指摘されている[Arai 03].

本研究では、前に述べたように教員の配置問題を取り扱う。そこで、制度設計の視座からABSを用い、小学校から高等学校までの学校種別ごとに教員配置比を変化させ、大学入学年齢に達した同年代の学力にどのような影響を与えるか分析を行う。

本モデルでは、小学校から大学入学までの教育課程を対象とする。それぞれ小学校から高校には、教員と生徒が存在する。また、教育課程において各生徒は様々な学習活動を行うが、本モデルでは、1)教員から教わる、2)友人との学習、3)自分ひとりで学ぶ、の3つの学び方があるとした。つまり、主体となる学生と他者生徒、教師の相互作用により、全体として学力向上を図る。このような概念を基にエージェントベース手法でモデリングし、教育課程の教員配分比を変

動させ、1)全体として生徒の学力への効果、2)個々人の学習過程に与える影響、について分析することを主題に置く。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章では関連研究について取り上げる。次に 3 章で各種定義について示す。さらに 4 章では提案するモデルについて述べる。次の 5 章ではこのモデルについてシミュレーションを行い、その実験結果について考察する。最後に 6 章でこれらをまとめる。

2. 関連研究

2.1. 教育社会学

教育学における学力とは、学問を身につけた能力とされる。つまり、ある教育目標に対して、生徒が形成した能力である[田中 03]。

従来の日本型教育システムでは、入学時点でほぼ卒業が保証されており、深く学歴と社会との関連性があると指摘されている[矢野 01]。その意味において、明治以降の日本企業では、新入社員に対して特定の知識や技能を身につけていることを期待しているのではなく、仕事の範囲や量に適応できる人材、つまり最終学歴の入学までに総合的に成績が高い学生が社会的に求められていた。そのため、社会的な評価として入学年齢における学力指標が用いられてきた経緯がある。

2.2. 教育経済学

教育経済学では、教育を受けるという人間行動の特徴を経済学の発想で捉える。そこでの基本的な考えとして、教育には、それを受けた本人だけでなく、社会全体に利益をもたらすという特徴を持つ。そして、個人が受けた教育の結果、社会全体の生産性が高まり、他人の効用を高める外部経済性を持つとされている。

生徒の学力と親の学歴や職業には相関があるが、学校外での教育投資は相関がみられないとの調査結果がある[盛山 84]。さらに、近年では大半の学生は塾に通っていることもあり、分析自体に意味を持たないことが指摘されている[小塩 03]

2.3. ABS

ABS の特徴としては、個々の合理性の仮定を緩めることによって、解明したいメカニズムを明確にすることが挙げられる。その際、現実の本質的な部分だけを捉えたモデリングが求められており、従来から KISS 原理を忠実に守る必要とされている[Axelrod 97]。これにより、現象として何が起きているのかを、他者にも理解可能な形で伝達することができ、それによって既存研究を前進させる潜在的な能力があると主張されている[Axelrod 00]。

ABS を社会科学へ適応した古典的な研究として、Schelling の分居モデルがある[Schelling 78]。ここで

は、個人の選好によってもたらせる社会の分居関係を分析することを目的として、自身のまわりにいるエージェントとの選好から、住み分け現象が起こることがわかった。このようなモデリングでは、個人の限定合理的な相互作用がさほど大きくない場合でも住み分け現象が表されている。つまり、個人のわずかな選好の差によって、アメリカにおける白人と黒人の居住区が発生する現実世界を示唆している。

その一方で、単純なモデルでは不十分であるという見方もされている[和泉 03]。実際に Axelrod[寺野 03a]や Epstein [Epstein 96]のモデルでは極端な説明がされている場合もあり、シミュレーションのもとになった理論、エージェントに実装した機能の根拠、および結果の感度分析など厳密に行わなければ説得力に欠けると指摘されている[寺野 04b]。

2.4. 本研究の位置付け

本研究では、制度設計の視座から、小学校・中学校・高等学校と学校種別ごとに教員配置比を変化させ、大学入学年齢に達した同年代の学力に与える影響を分析する。

教育施策を考える上で、政策立案の前に、その効果を確認する手段が必要とされている[総務省 00]。このような問題に対して、ABS が適している。理由として前節でも述べたように、特定の実験的な応用例を正確に描くのではなく、そのプロセスについて理解を深めることが可能とされているからである[寺野 03a]。また、教育施策を分析することは、ABS が対象とする応用領域でもあると指摘されている[寺野 04a][出口 04]。

教育施策を対象とした最初の研究としては、ゆとり政策の評価を行ったものがあり、そこでは施策の問題点について指摘している[Arai 03]。

本研究では、このような考えに沿いながら ABS を用い、小学校・中学校・高等学校の教員配分比が生徒の学力にどのような影響を与えるか分析する。

本モデルでは、前節で取り上げた Schelling の分居モデルを参考に人工社会を構築する。このような概念を基に、エージェントベース手法でモデリングした。そして、教育課程の教員配分比を変動させ、1)全体として生徒の学力への効果、2)個々人の学習過程に与える影響について分析することを主題に置く。

3. 各種定義

本研究では、教育施策が生徒の学力に与える影響を検討する上で、図 1 に示す問題を取り扱うことにする。教育システムを制御系とみなして、入力に学校要因と学校外要因、出力を大学入学年齢に達した学生全体の学力とする。

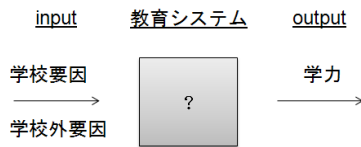


図 1. 本研究が対象とする問題領域

表 1. 学校要因と学校外要因

	説明変数
学校要因	教員
学校外要因	生徒

3.1. モデル概要

本研究では、教育施策が生徒の学力に与える影響を分析することを目的としたモデルを構築する。本研究を進めるにあたり、学力の定義、学習の解釈を行い、モデル化する。そして、関連する諸概念について定義を行う。

3.1.1. 学力の定義

学力とは、学校で勉強する各科目の総合点を表す変数である。

3.1.2. 学習方略の定義

学習方略とは、学力の向上を図る勉強方法である。

3.1.3. エージェントの定義

エージェントには、学生と教員がある。学生は教員や友人たちを通して勉強したり、あるいは自身で勉強したりすることで学力の向上を図る。一方で教員は、学生に勉強を教える。

3.1.4. 場の定義

本モデルでは、物理的距離ではなくエージェントの心理的な距離として選好距離を定義する。つまり、ある二人のエージェントの選好距離が近いということは、心理的に近いということであり、友人関係であると考えられる。

選好距離の近さによって、エージェントのインタラクションの相手を決定する。例えば、ある友人と親しい仲であれば選好距離が近くインタラクションしやすいという事になる。この選好距離によって考えられる距離空間を選好空間とする。これを学校とする。

3.1.5. ステップの定義

ステップとは、エージェントが意思決定を行う機会である。つまり、1ステップに1回、エージェントは学習方略を選択すると考える。本モデルでは、1 ステップ

を、1 週間程度のエージェントの行動と定義する。

3.1.6. 評価指標

前節までに提示した定義を基にし、学生全体の学力をマクロの問題、学生の学力向上の過程をミクロの問題として捉えた。

4. 提案モデルの詳細

本研究では小学校から大学入学までの期間を対象とし、この期間を教育課程として扱う。それぞれの学校には学生と教員が在籍しており、本モデルでは、学生エージェントと教員エージェントとして取り扱う(図 2)。

学生エージェントは学校の勉強に従事しており、学力を向上させる。学び方としては、前章の学習の定義より、学生が在学する学校の 1) 教員から教わる、2) 生徒と共に学ぶ、3) 自分ひとりで勉強する、という 3 つの学び方がある。また、学生はそれぞれの学校を卒業すると、小学校から中学校へ、中学校から高等学校へ、高等学校から大学へ進学するものとする。中学校、高等学校卒業時に試験があるとする。ここでは入学定員を設け、学力が高い学生から順に振り分けられる。その際、高校受験と大学受験と 2 回試験がある。2 回の試験では、予め決められた合格基準の学力を超えたものだけがそれぞれ進学できるものとしている。これは現状を考えると希望校には行けなくても何らかの学校に行けるということ、また奨学金の充実などで資金的に進学できない家庭は少数であるということ仮定して単純化したものである。一方、どの学校にも入れなかった学生は高校へ進学できないとし、その学生はそれ以上学ぶことができない。そして、その時点での学力を最終学力とし教育課程を終える。

また、教員エージェントは小学校、中学校、高等学校のいずれかに属し、学生エージェントの求めに応じて指導をする。さらに、それぞれ教員エージェントが属す学校に合わせた指導を行う。ただし、教員が教える人数には限界があるとした。詳細は学生エージェントのモデル化、教員エージェントのモデル化にて説明をする。

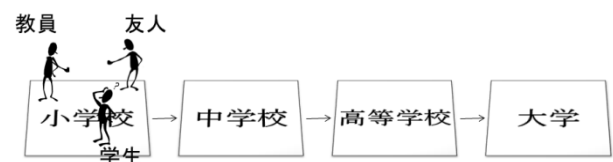


図 2. 本研究における概念モデル

4.1. 時間の流れ

まず始めに、本モデルが考慮する時間の流れについて説明する。本モデルが考慮する期間は学生エ

エージェントが小学校に入学してから大学入学するまでの 12 年間である。浪人や留年、中退は考えない。この 12 年間のうち、1 年間を 100 ステップと考える。そのため、小学校に入学してから大学入学するまでに 1200 ステップあることになる。

(i) 小学校入学時(初期化)

学生エージェント i は以下の 6 つ初期化を行う:

- N 人の学生エージェントをランダムに配置する。
- M 人の教員エージェントをそれぞれの持つカテゴリに準じて、小学校・中学校・高等学校の選好空間にランダムに配置する。
- 学生エージェントは全て同じ年齢とする。
- 学生エージェントの学力初期値を $a_i=a_0$ とする。
- 学生エージェントの学習量初期値を $aw_i=aw_0$ とする。
- 学生エージェントの学習方略決定の選好をそれぞれ、 $w_{i,teacher}=wt_0$, $w_{i,friends}=wf_0$, $w_{i,self}=ws_0$ とする。

(ii) 中学校卒業時, 高等学校卒業時

それぞれ学生エージェントは、小学校・中学校・高等学校の学校教育を通して、学力を身につけていく。小学校から中学校へ進学では義務教育期間とし全員進学する。その際、小学校より在学生徒数が多くなる。中学校から高等学校、また高等学校から大学の進学率は、文部科学省[文科省 09]の公表データに基づき、それぞれ 95%, 60%とした。その際、順位が高い学生エージェントから進学を行う。中学卒業時に進学できなかった学生エージェントは、これ以降その学生エージェントの学力は卒業時のままとする。今回は大学入学年齢の時点での学力を考慮しているのでこのような設定にしている。

(iii) 大学入学時

大学入学を迎えた時点でシミュレーションは終わる。

4.2. 教育課程のモデル化

本モデルが対象とする教育課程には、初等教育(Ep)、前期中等教育(Els)、後期中等教育(Eus)、高等教育(Sh)と教育段階がある。そして、それぞれ順に小学校(Se)、中学校(Sj)、高等学校(Sh)、大学(Su)と学校が存在する。学生エージェント i は年齢と学力によって在学する教育段階と学校が変わり、教員エージェント k はいずれかの学校に配属されるとする。

次に、それぞれの教育段階における進学について説明をする。 Els へ進学する場合は、地域別に進学するとし、他の小学校の学生と一緒に中学校になる。さらに Eus 以降に進学する場合は、能力別に進学するとし、その年齢に達した学生エージェントの学力の高いものから順に振り分けられ入学する高等学校が決定する(図 3)。

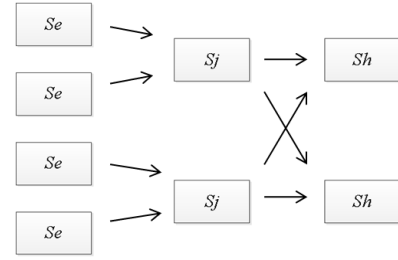


図 3. 本モデルにおける進学の説明

4.3. 学校のモデル化

前節で述べた教育課程において、それぞれ複数学校がある。本モデルでは、 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ からなる二次元空間で表した選好空間が存在する(図 4)。そこには学生エージェントと教員エージェントが存在する。また、同一セル上においてエージェントの重なりを認める。

マクロレベルの学力に影響を与える要因には学校教育における集団形成があるが、教員から教える請う学生グループ、生徒同士で教えあう学生グループ形成が考えられる。このような学習過程を表現する上で、前章で取り上げた Schelling の分居モデルを参考にする。このような概念を基に、エージェントベース手法でモデリングする。

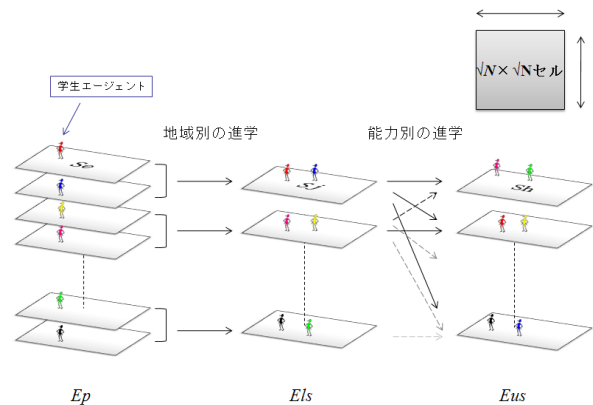


図 4. 本モデルにおける学校(場)の概念モデル

4.3.1. 学校のパラメタ

以下、学校で使用するパラメタを説明する。

● 従属項

(i) 小学校数 NSe

小学校の総数を表す。

(ii) 中学校数 NSj

中学校の総数を表す。

(iii) 高等学校数 NSh

高等学校の総数を表す。

● 内部状態

(i) 在学する学生数 n

それぞれの学校に在学する学生エージェントの総数を表す。

(ii) 所属する教員数 m

それぞれの学校を担当する教員エージェントの総数を表す。

4.4. 学生エージェントのモデル化

学生エージェント i は、小学校に入学した時点では全ての学生は同じ学力を持っていると仮定する。それが在学期間に、学校で学ぶことによって徐々に学力を向上させる。

在学期間中、学生エージェントは各ステップにおいて、他者との相互作用を含む。1) 教員エージェントから教育を受ける、2) 友人と学習をする、または相互作用のない、3) 自分ひとりで学びのいずれかを選択し実行する。これら3つ学び方には選好があり、採用した学び方が成功したか失敗したかによって、選好を変える。具体的には、学生が在学する学校での順位変動に応じて、そのステップで採用された学びの選好に影響を与える。学内順位が上がった学生エージェントは、採用された学び方を好む。一方、学内順位が下がった学生エージェントは、採用した学び方の選好を下げる。また、学生エージェントは在学する教員や他者生徒としか学べない設定とし、もし該当するエージェントが存在しなければ探索する。このようなサイクルを通して、学力の向上を図る。

4.4.1. 学生エージェントのパラメタ

以下、学生エージェントモデルで使用するパラメタを説明する。

- 従属項

- (i) 全学生数 N

学生数は、学生エージェントの総数を表す。

- 内部状態

- (i) 年齢 age_i

学生エージェント i の年齢を表す。

- (ii) 学校 $school_i$

学生エージェント i が所属する学校を表す。

- (iii) 学力 $a_i(t)$

学力は自然数として表す。これは、 t ステップにおける学生エージェント i が到達した学力とする絶対指標である。本研究での学力とは、学校教育を通じて得た学習量が毎ステップ加算される。

- (iv) 学習量 $aw_i(t)$

1 ステップにおける学生エージェント i の学力の増分である。つまり、単位ステップあたりの学習量を表す。これは、 $t-1$ ステップにおける学生エージェントの学内順位 $sr_i(t-1)$ によって決まる。

- (v) 順位 $r_i(t)$

順位は、 N 人の学生エージェントを学力順に並べたときに、自身の学力がどの程度であるかを1から N

までの自然数として表す相対指標である。

- (vi) 学内順位 $sr_i(t)$

学内順位は、学内に存在する学生エージェントを学力順に並べたときに、自身の学力がどの程度であるかを自然数として表す相対指標である。

- (vii) 学力階層 $ac_i(t)$

学内順位 $sr_i(t-1)$ の上位 20% から順にラベルづけされ、学校での学力階層を表現するためにある。

- (viii) 選好空間 (x_i, y_i)

学生エージェントは一辺が $\sqrt{N}$ の選好空間にいる。これは、学生が友人と学ぶときは親密な友達と学ぶこと、また教師から教わるときも親密な教師から教わることを表現する。その際、選好距離が近ければインタラクションが可能となる。

- (ix) 学習方略 s_i

学生エージェントは、3つの学習方略を持ち、毎ステップいずれかの意思決定を行う。教員への師事、友人との学習、自習のいずれかの値をとる。

- (x) 学習方略決定の選好 w_{ij}

学生エージェント i は学習方略 j に対して持っている学習方略選択の選好を持つ。この選好によってそのステップの学習が決定され、さらに学内順位 $sr_i(t)$ に変動があれば、該当する選好に影響があるとする。

4.5. 教員エージェントのモデル化

本節では、学校における教員エージェントのモデルについて示す。教員エージェントは、所属する学校に合わせた指導を行う。ただし、教員が教える人数には限界があるとした。

4.5.1. 教員エージェントのパラメタ

以下、本モデルで使用するパラメタを説明する。

- 従属項

- (i) 教員数 M

教員数は、小学校から大学までに存在する教員エージェントの総数を表す。これは、どの教員も小学校でも高等学校でも教えられるということではなく、社会をみれば必要な人材はいつでも補充できるという考えから、総人数だけを問題にした。

- 内部状態

- (i) カテゴリ c_k

教員エージェント k は、小学校・中学校・高等教育のいずれかの学校に配置される。

- (ii) 限界人数 l_k

学校に在学する $n/2$ 人の生徒に対して教えることができる。

4.6. エージェントの意思決定ルール

ここで、エージェントの意思決定ルールについて取り上げる。

● 教員の意味決定ルール

教員エージェント k の意思決定ルールを示す. 教員エージェントのまわりに存在する学生エージェントにのみ教えることができる. 図 5 に示す教員エージェントを例に説明をする. たとえば, 該当教員エージェントは, 近傍の学生エージェント(図 5 における白丸)に対して教えることができる. しかしながら, 教員には指導できる範囲があるものとし, 図 5 における赤点線よりも選好距離が遠い学生エージェント(図 5 における黒丸)には教えることが不可能とした.

このステップにおいて当該教員エージェントから教わろうとしている学生エージェントがいれば教えようとするが, カテゴリが異なる学校の生徒には教えることができない. また, 限界人数に達すれば, それ以上教えることができない.

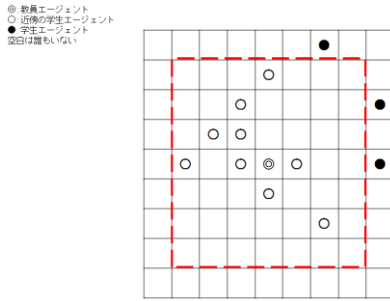


図 5. 教員エージェントが指導範囲の説明

● 学生の意味決定ルール

t ステップにおける学生エージェント i の学習方略の選択 s_i 並びに選択する際の選好 $w_{i,j}$ の更新について説明する. それにあたり, 教員への師事, 友人との学習, 自習の学習方略を $teacher=s_i$, $friends=s_i$, $self=s_i$ とし, それぞれの意思決定の選好を $w_{i,teacher}$, $w_{i,friends}$, $w_{i,self}$ とする.

まず, 学生エージェント i は $t-1$ ステップにおける学内順位に基づき学力階層のラベルづけがされる(表 2). そして, 学習方略決定の選好 $w_{i,j}(t-1)$ を用いてルーレット選択を行い, 学習方略 $s_i(t)$ を選択する. そして, 学習量を現在の学力に加えていくものとする. そして学内順位変動に応じて学習方略決定の選好 $w_{i,j}(t)$ の更新が行われる. 図 6 は要素関係を示す. 以下, (i)~(v)を学校を卒業するまで限り繰り返す.

表 2. 学内順位に基づく学力階層

$sr_i(t-1)$	$ac_i(t)$
上位 0~20%	5
上位 20%~40%	4
上位 40%~60%	3
上位 60%~80%	2
上位 80%~100%	1

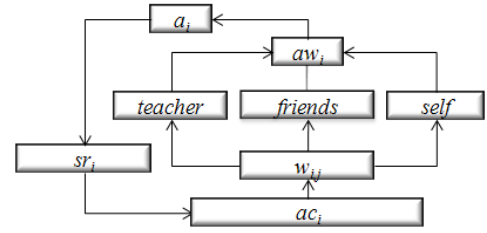


図 6. 学生エージェントの要素関係

(i) ルーレット選択

まず, 学生エージェント i がどのような学習をおこなうのか確率 P_{ij} により意思決定される. t ステップで選択された学習方略を $d=s_i$ とし, その意思決定の選好を $w_{i,d}$ とすると,

$$P_{ij} = \frac{w_{i,d}(t-1)}{\sum w_{i,j}(t-1)} \quad (1)$$

(ii) 学習

学生エージェント i の学内順位 $sr_i(t-1)$ に基づき学習量 $aw_i(t)$ が決まり, その増加量だけ学力を向上させる. ただし, 教師への師事, または友人との学習を選択した学生エージェント i の 8 近傍に該当するエージェントが存在しなければ, 異なる学び方をする.

たとえば, S_1 座標に存在する学生エージェントは, 8 近傍(図 7 における S_1 座標から等距離にある赤点線)に教員エージェント, 他者の学生エージェントが存在するので, $teacher$, $friends$, $self$ のいずれも可能である. 次に, S_2 座標に存在する学生エージェントについて, もし教員から教わろうとしても, 該当する教員エージェントがないため, $friends$ または $self$ が可能である. 最後に, S_3 座標に存在する学生エージェントについては, 近傍に教員や友人が存在しないため, $self$ を選択することになる(表 3, 図 7).

表 3. 学び方の制約条件

	$teacher$	$friends$	$Self$
S_1	$\bigcirc_1$	$\bigcirc_2$	$\bigcirc_3$
S_2	$\times$	$\bigcirc_2$	$\bigcirc_3$
S_3	$\times$	$\times$	$\bigcirc_3$

○ 該当座標に存在する学生エージェント
 ● 該当座標に存在する学生エージェント
 ⊙ 該当座標に存在する学生エージェント
 ⊖ 教員エージェント
 ○ 学生エージェント
 空白は誰もいない

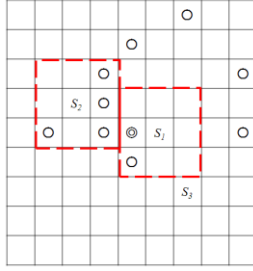


図 7. 学習エージェントの学び方の説明

さらに、これらの学び方にも制約条件がある。*teacher* を採用した場合、学生と同じ学校の教員であること、かつ該当教員の定員に入ることが条件となる。もしこの条件に満たなければ、他者エージェントとのインタラクションである *friends* に切り替わる。*friends* を採用した場合、学生と同じ学校の学生エージェントであることが条件となる。もしこの条件に満たなければ、*self* に切り替わる。

(a) *teacher*

teacher を選択した学生エージェント i は、教員への師事を行う。学習量 aw_i は以下で表わされる(表 4)。ただし、学生エージェント i の 8 近傍に教員エージェントがいなかった場合、または教員エージェントが限界人数に達して学べない場合は、他者とのインタラクションとして友人との学習を選択する。

表 4. *teacher* で得られる学習量

	aw_i
$ac_i=5$	1
$ac_i=4$	2
$ac_i=3$	3
$ac_i=2$	4
$ac_i=1$	5

(b) *friends*

friends を選択した学生エージェント i は、友人との学習を行う。具体的には、学生エージェント i の 8 近傍にいる学生エージェント f と共に学習する。その際、 $t-1$ ステップにおける学生エージェント i の学力階層 ac_i と学生エージェント f の学力階層ラベル ac_f によって以下の学習量 aw_i が決定する(表 5)。ただし、まわりに学生エージェント i が在学している学校の学生がいなかった場合は、自習を行うとする。

この解釈としては、1) 自身の学力よりも少し上の学生がいれば目標が提示され学習量が上がる、2) 自身の学力よりも少し下の学生に教えることによって学ぶ (leaning by doing)、ことを考慮した。

表 5. *friends* で得られる学習量の対応表

	$ac_j=5$	$ac_j=4$	$ac_j=3$	$ac_j=2$	$ac_j=1$
$ac_i=5$	5	4	3	2	1
$ac_i=4$	4	5	4	3	2
$ac_i=3$	3	4	5	4	3
$ac_i=2$	2	3	4	5	4
$ac_i=1$	1	2	3	4	5

(c) *self*

self を選択した学生エージェント i は自習を行う。学習量 aw_i は自身の学力階層 ac_i の値とする。つまり、学内順位 $sr_i(t)$ が高い場合は自習を行えば学習量が高まる。

$$aw_i = ac_i \quad (2)$$

(iii) 学力更新

学生エージェント i は、(ii) で得た学習量に基づき、学力更新を行う。

$$a_i \leftarrow a_i + aw_i \quad (3)$$

(iv) 学内順位及び学習方略決定の選好の更新

N 人の学生エージェントが (iii) まで終わると、学生エージェントと同じ学校の学生を学力順に並べる。学生エージェント i の $t-1$ ステップにおける学内順位 $sr_i(t-1)$ と t ステップにおける学内順位 $sr_i(t)$ を比較し、順位変動に応じて意思決定の選好 $w_{i,j}(t)$ の更新が行われる。学内順位が上がった学生エージェントは、選択した学習方略が良いと認識し、意思決定の選好を上げ、選択されていない学習方略の意味決定の選好を下げる。一方、学内順位が下がった学生エージェントは、選択した学習方略が自分にはあっていないと認識し近傍移動をし、意思決定の選好を下げる、選択しなかった学習方略の意思決定の選好を上げる。変動幅 δ として、更新式を以下に示す。

(a) d が *teacher* の場合

$$w_{i,teacher}(t) \leftarrow \begin{cases} w_{i,teacher}(t-1) + \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) > 0 \\ w_{i,teacher}(t-1) - \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$w_{i,friends}(t) \leftarrow w_{i,friends}(t-1) + \frac{\delta}{2w_{i,teacher}(t)} (w_{i,friends}(t-1) + w_{i,self}(t-1)) \quad (5)$$

$$w_{i,self}(t) \leftarrow w_{i,self}(t-1) + \frac{\delta}{2w_{i,teacher}(t)} (w_{i,friends}(t-1) + w_{i,self}(t-1)) \quad (6)$$

(b) d が *friends* の場合

$$w_{i,friends}(t) \leftarrow \begin{cases} w_{i,friends}(t-1) + \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) > 0 \\ w_{i,friends}(t-1) - \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$w_{i,self}(t) \leftarrow \begin{cases} w_{i,self}(t-1) - \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) > 0 \\ w_{i,self}(t-1) + \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

(c) d が $self$ の場合

$$w_{i,friends}(t) \leftarrow \begin{cases} w_{i,friends}(t-1) - \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) > 0 \\ w_{i,friends}(t-1) + \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$w_{i,self}(t) \leftarrow \begin{cases} w_{i,self}(t-1) + \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) > 0 \\ w_{i,self}(t-1) - \delta & \text{if } rs_i(t) - rs_i(t-1) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

また、選好の更新において学習方略決定の選好は一定の範囲にあるものとしている。このことより、学習エージェントが存在する環境に適切な学習方略をとるようになる。

$$w_{i,j}(t) = 0.2 \quad \text{if } w_{i,j}(t) \leq 0.2 \quad (11)$$

(v) 選好空間の移動または進学

学生エージェント i は、在学する教員や学生と学びたいと選好を持つ。そのため、まわりに半数以上自身が在学しているエージェントでなければ 8 近傍をランダムに移動する。

また、学生エージェントは中学校と高等学校の教育課程終了期に、次の学校教育へ進学をする。ただし、進学には入学定員数が決められているとしている。

5. 教員配置の施策評価

5.1. 実験 1

本実験では、小学校・中学校・高等学校において教員エージェントが M 人いる社会に対して、 M^+ 人の教員エージェントを小学校から高等学校それぞれ配置を行う場合の学生エージェントの学力を測定する。教員配置の仕方として、
 施策 1: 小学校から高等学校まで均等に配置を行う。
 施策 2: 小学校のみに教員配置を行う。
 施策 3: 義務教育である小学校、中学校に均等に教員配置を行う。
 施策 4: 中学校のみに教員配置を行う。
 施策 5: 中学校、高等学校に均等に教員配置を行う。
 施策 6: 高等学校に教員配置を行う。
 の 6 のシナリオについて教員を配置させた。表 6 は、それぞれの施策における小学校・中学校・高等学校の教員の配置カテゴリ、そのカテゴリにおける教員エージェント数を示す。

表 6. 実験1の施策一覧

シナリオ	Se	Sj	Sh
施策なし	$3k$	$3k$	$3k$
施策 1	$5k$	$5k$	$5k$
施策 2	$9k$	$3k$	$3k$
施策 3	$6k$	$6k$	$3k$
施策 4	$3k$	$9k$	$3k$
施策 5	$3k$	$6k$	$6k$
施策 6	$3k$	$3k$	$9k$

5.1.1. 実験に用いたパラメタ

本モデルに従い小学校数を Se 、中学校数を Sj 、高等学校数を Sh 、学生エージェント数を N 人、教員エージェントを M 人、各学校に配置されている教員数を m とした。学生エージェントの初期パラメタ設定を、どの学生エージェントも表 6 とした。

施策として増員する教員を M^+ 人(ある学校で増員できる上限数を m^+)とし、前節で述べた施策に合わせ教員配置を行う。シミュレーションは、施策がないとき施策があるときそれぞれについて 10 回行い分析した。表 7 は、実験に用いたパラメタを示す。

表 7. 教員配置の施策評価におけるパラメタ一覧

パラメタ	説明	値
N	学生エージェント数	400
M	教員エージェント数	60
m	各学校にいる教員数	3
M^+	教員エージェント増員数	40
m^+	各学校での増員上限数	6
NSe	小学校数	10
NSj	中学校数	5
NSh	高等学校数	5
a_0	初期学力	0
aw_0	初期学習量	0
wt_0	教員への師事の初期選好	1.0
wf_0	友人との学習の初期選好	0.5
ws_0	自習の初期選好	0.5
δ	更新幅	0.01

5.1.2. 評価指標

本実験の評価指標としては、施策を施さないデータを基にして、施策シナリオごとに大学入学年齢に達した全学生の学力が高い順に、最大学力、第一四分

位(上位 25%の学力), 中央値(全体 50%の学力), 第三四分位(下位 25%の学力), 最低学力の 5 つの項目の結果について比較を行う。この実験より, どのような配分比で教員配置すれば, その世代の落ちこぼれをつくらないよう施策か, またエリートを育てることを目的とした施策としては何かを探ることを主題に置いている。

5.1.3. 結果・考察

● 全体結果

全学生エージェントの学力統計結果を示す(図 8)。縦軸を学力, 横軸を実験 1 で用いたシナリオを表す。結果より, 本モデルでは, 小学校へ集中的に教員配置を行う施策では, その世代で学力が最も低いとされていた学生にとって効果があった。

また, 初等教育へ教員する施策では, 施策がない場合でみられていた二極化していた学力階層を是正した。さらに, 小学校と中学校へ均等に教員配置を行った施策 2 では, 学力平均に達していない学生にとって効果がある施策であることが確認できた。

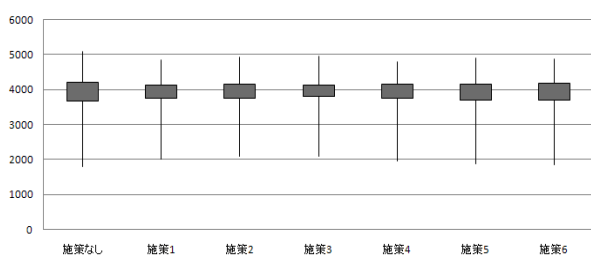


図 8. 実験 1 での統計結果

● 個人結果

施策なしの場合において, 上位学力階層の学生エージェントについて, 1)エリートとして育つ学生, 2)途中で学力が落ちた学生, 3)学力の巻き返しがみられた学生, の 3 つのパターンが確認できた。このことについて, 図 9 にそれぞれのパターンにおける学力推移図を示す。縦軸を学力, 横軸をステップ数として表す。

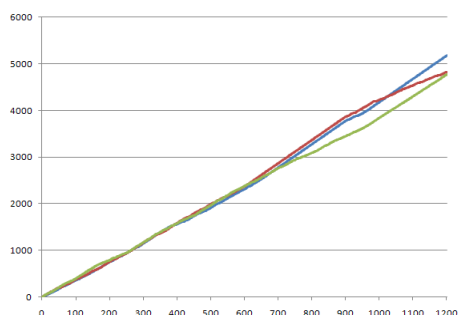


図 9. 3 パターンの学力推移図

また, それぞれのパターンにおける学習方略決定の選好推移について図 10～図 12 までに示す。縦軸を学習方略決定の選好率, 横軸をステップ数として表す。これらより, それぞれのパターンには,

(i) パターン 1

教員の選好率と自習の選好, 共に高めている

(ii) パターン 2

教員との選好よりも自習の選好を高めている

(iii) パターン 3

自習の選好は, 教員の選好よりも高めないとの特徴があることがわかった。これらより本モデルでは, 教員から教わる選好について, 他どの選好よりも高めておくことが学力を向上する上で有利であることがわかった。

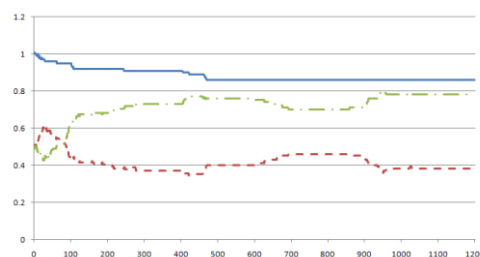


図 10. パターン 1 の選好遷移図

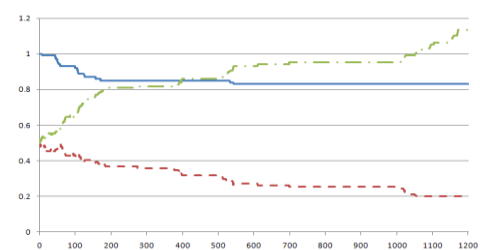


図 11. パターン 2 の選好遷移図

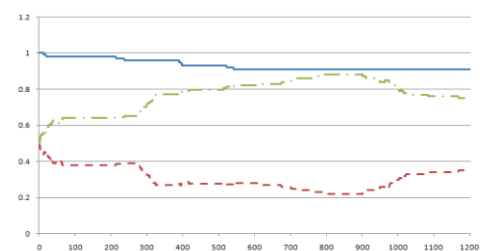


図 12. パターン 3 の選好遷移図

次に, 学力順位を大きく変動させたエージェントについて分析を行った。学力順位の変動が大きく, かつ順位を上げた学生エージェントの全体順位の推移図を 13 に示す。縦軸を全学生における順位, 横軸をステップ数と表している。また, 学習方略決定の選好の推移図を図 14 に示す。縦軸を学習方略決定の選好, 横軸をステップ数と表している。

この結果より、該当エージェントは高校進学と同時に成績を上げていることがわかった。これについて、図 14 に注目すると、教員から教わることや、友人との学びが学力向上に有利であることが考えられる。

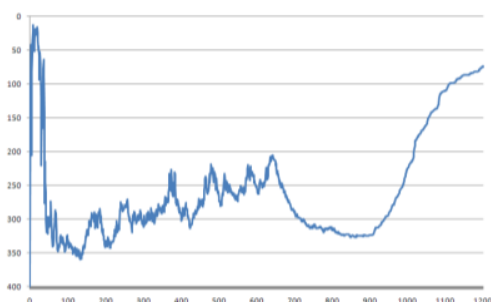


図 13. 学力順位が大きく変動させ、
順位を上げた学生エージェントの全体順位推移図

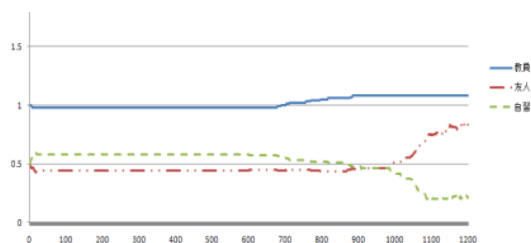


図 14. 学力順位を大きく変動させ、
順位を上げた学生エージェントの選好推移図

一方、学力順位の変動が大きく、かつ順位を下げた学生エージェントの全体順位推移図と価値推移図を図 15、図 16 に示す。縦軸、横軸については図 13、図 14 と同様である。

この結果より、学力順位を大幅に上げたエージェントとは異なり、高校進学と同時に成績を下げていることがわかる。これについて、図 16 に注目すると、友人との学習に失敗していることがわかる。

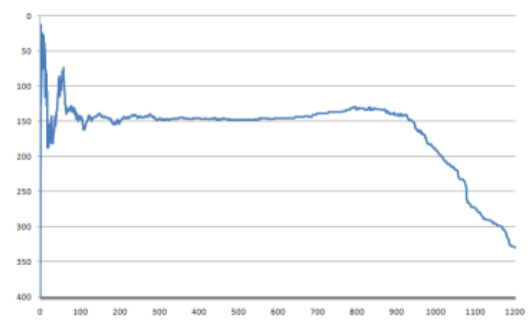


図 15. 学力順位を大きく変動させ、
順位を下げた学生エージェントの全体順位推移図

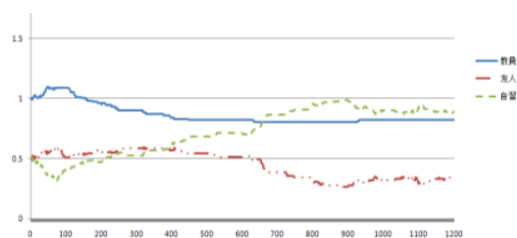


図 16. 学力順位を大きく変動させ、
順位を下げた学生エージェントの選好推移図

このことより、本モデルでは、教員から教わる選好が他の選好よりも高くすることは、学力向上にとって有利である傾向がみられる。また、学生が在学する他者学生との学習は順位変動に強い影響を与えることがわかった。

● まとめ

全体結果より、教員配置によって学力向上に影響していることがわかった。さらに、義務教育段階の教員数を増やす施策では、実証分析を示唆する結果が得られた。また、学生エージェント個人結果より、以下の 3 つのことがわかった。1) 教員から教わる選好は、どの学び方よりも選好を高めにしていくと学力向上に有利である、2) 友人との学習は、順位変動に強い影響を与える、3) 自習は、教員より選好を高めることは学力向上にとって不利である。

5.2. 実験 2

実験 1 の結果より、教員の増員が学生エージェントの学力向上に影響を与えていることがわかった。また近年においては、大学教員が削られている現状がある。小学校・中学校・高等学校において教員エージェントが M 人いる社会に対して、教員を $M - n$ 人教員を減らした場合、学生全体の学力にどのような影響を与えるかについて分析を行う。それぞれ教員数を減らす仕方として、

施策 7: 小学校から高等学校まで均等に教員数を減らす。

施策 8: 小学校の教員数を減らす。

施策 9: 義務教育である小学校、中学校に均等に教員数を減らす。

施策 10: 中学校の教員数のみ減らす。

施策 11: 中学校、高等学校に均等に教員数を減らす。

施策 12: 高等学校の教員数のみ減らす。

の 6 つのシナリオについて教員を配置させた。表 8 は、それぞれの施策における小学校・中学校・高等学校の教員の配置カテゴリ、そのカテゴリにおける教員エージェント数を示す。

表 8. 実験 2 の施策一覧

シナリオ	Se	Sj	Sh
施策なし	$3k$	$3k$	$3k$
施策 7	$2k$	$2k$	$2k$
施策 8	k	$3k$	$3k$
施策 9	$2k$	$2k$	$3k$
施策 10	$3k$	k	$3k$
施策 11	$3k$	$2k$	$2k$
施策 12	$3k$	$3k$	k

5.2.1. 実験に用いたパラメタ

本モデルに従い小学校数を Se , 中学校数を Sj , 高等学校数を Sh , 学生エージェント数を N 人, 教員エージェントを M 人, 各学校に配置されている教員数を m とした. 学生エージェントの初期パラメタ設定を, どの学生エージェントも表 9 とした.

施策として減員する教員を M^- 人(ある学校で減員できる上限数を m^-)とし, 前節で述べた施策に合わせ教員配置を行う. シミュレーションは, 施策がないとき施策があるときそれぞれについて 10 回行い分析した. 表 8 は, 実験に用いたパラメタを示す.

表 9. 教員配置の施策評価におけるパラメタ一覧

パラメタ	説明	値
N	学生エージェント数	400
M	教員エージェント数	60
m	各学校にいる教員数	3
M^-	教員エージェント減員数	10
m^-	各学校での減員上限数	2
NSe	小学校数	10
NSj	中学校数	5
NSh	高等学校数	5
a_0	初期学力	0
aw_0	初期学習率	0
wl_0	教員への師事の初期選好	1
wf_0	友人との学習の初期選好	0.5
ws_0	自習の初期選好	0.5

5.2.2. 評価指標

本実験の評価指標としては, 施策を施さないデータを基にして, 施策シナリオごとに大学入学年齢に達した全学生の学力が高い順に, 最大学力, 第一四分位(上位 25%の学力), 中央値(全体 50%の学力), 第三四分位(下位 25%の学力), 最低学力の 5 つの項目の結果について比較を行う. この実験より, どのような配分比で教員配置すれば, その世代の落ちこぼ

れをつくらないよう施策か, またエリートを育てることを目的とした施策としては何かを探ることを主題に置いている.

5.2.3. 結果・考察

全学生エージェントの学力統計結果を示す(図 17). 縦軸を学力, 横軸を実験 2 で用いたシナリオを表す. 結果より, 本モデルでは, 義務教育期間の教員を減らすことによって, 全体の学力平均に満たない学生の学力を低下させることがみられた. その顕著な傾向としては, 小学校の教員数を極力減らす施策でみられた. 一方でこの施策は, その世代で優秀な学生を育てることに施策として有利に働いていたことが確認できた.

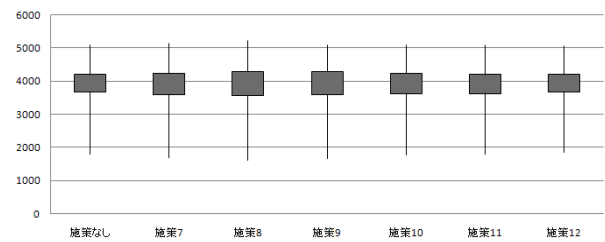


図 17. 実験 2 での統計結果

6. 結語

本研究では, 小学校・中学校・高等学校の教員配分比を変えたときの大学入学年齢達成に達した同年代の学力に与える影響に関して施策評価を行った. 本モデルでは, 教員配置によって学力向上に影響していることが確認できた. シミュレーション結果より, 以下 2 点の特徴がみられた. 1) 小学校の教員数を増員する施策では, 学力の底上げが見られた. 一方, 小学校の教員を減らす施策では, 公教育通じてエリートを育てる施策として効果がみられた. これらより, 本モデルでは小学校を対象とした教員配置には学生全体の学力へ与える影響が強いことがわかった. 2) 義務教育期間の教員数を増やす施策では, 実証分析と同等の結果が得られた. つまり, 全体の学力平均に満たない学生によっては, 義務教育期間の教員が必要であるとの結果が得られた.

学生エージェントの学び方についてであるが, 本モデルでは以下の 3 つの特徴がみられた. 1) その世代でエリートとして育つ学生は教員と自習の選好を高めていた, 2) 友人との学習は順位変動に大きな影響を与える, 3) 教員の選好はどの学び方よりも高めにしておくと学力向上にとって有利である.

今後の課題としては以下に示す 2 項目に関して調査する予定である.

- ・ 本研究で扱った初等中等教育法では, 毎年一

斉試験を行っている。そこで、そのシナリオを取り入れた場合、学生全体の学力に与える影響を分析する。

- 学生エージェントに、1)あるとき引籠もりなり、自習選好を高めるエージェント、2)先生から教えてもらいたく、教員の選好を高めるエージェント、3)先生の選好を低め、教師を相手にしないエージェント、が存在するとき、学生全体の学力に及ぼす影響を分析する。

[寺野 04a] 寺野隆雄:エージェント・ベース・モデリングへの招待. オペレーションズリサーチ, Vol.49, No.3, pp.131-136 (2004).

[寺野 04b] 寺野 隆雄: エージェント・ベース・モデリング:その楽しさと難しさ. 計測自動制御学会, 計測と制御, Vol.43, No.12, pp.927-931 (2004).

[盛山 84] 盛山和夫, 野口裕二: 高校進学における学校外教育投資の効果, 教育社会学研究, Vol.39, pp.113-126 (1984).

[文科省 05] 文部科学省:義務教育に関する意識調査 (2005).

[文科省 09] 文部科学省:学校基本調査 (2009).

[矢野 01] 矢野真和: 教育社会の設計. 東京大学出版会 (2001).

[山本 08] 山本和也: ネイションの複雑性—ナショナリズム研究の新天地. 書籍工房早山(2008).

謝辞

本研究を進めるにあたり、artisocを無償貸与していただきました(株)構造計画研究所の皆様方に、この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

[Arai 03] Arai, A, Terano. T.: Agent-Based Simulation for Educational Policy, Proc.34th Conf. Int. Simulation and Gaming, pp.267-274 (2003).

[Axelrod 97] Axelrod, R.: The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration. Princeton University Press (1997).

[Axelrod 00] Axelrod, R., Cohen, M. D.: Harnessing Complexity: Organizational Implications of a Scientific Frontier. Free Press (2000).

[Benesse 09] Benesse 教育研究開発センター: 中学校の学習指導に関する実態調査報告書 2009 (2009).

[Epstein 96] Epstein, J, Axtell, R, Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up, The MIT Press (1996).

[OECD 09] 経済協力開発機構 編著: 図表でみる教育 OECD インディケータ 2009 年版, 明石書店 (2009).

[Psacharopoulos 85] Psacharopoulos, George : Returns to Education: A Further International Upgrade and Implication, Journal of Human Resources, Vol.99, pp. 500-521 (1985).

[Schelling 78] Schelling, Thomas C.: Micromotives and Macrobehavior. W.W.Norton. (1978).

[荒井 95] 荒井一博: 教育の社会学-大学進学行動の分析. 有斐閣 (1995).

[市川 02] 市川伸一: 学力低下論争. ちくま新書 (2002).

[和泉 03] 和泉潔: 人工市場 市場分析の複雑系アプローチ. 森北出版(2003).

[小塩 02] 小塩隆士: 教育の経済分析. 日本評論社 (2002).

[小塩 03] 小塩隆士: 教育を経済学で考える. 日本評論社 (2003).

[小塩 08] 小塩隆士, 佐野晋平, 末富芳: 教育生産関数の推計 中高一貫校の場合, 神戸大学経済学研究科 Discussion Paper, vol. 817 (2008)

[荻谷 03] 荻谷剛彦: なぜ教育論争は不毛なのか. 中公新書ラクレ (2003).

[川崎 06] 川崎一泰: 初等教育における少人数教育の政策評価～仮想市場法(CVM)を使った計量モデルによる検証～, 会計検査研究, No.33, pp.239-258 (2006).

[総務省 00] 総務省:政策評価制度の在り方に関する最終報告 (2000).

[田中 03] 田中耕治: 「学力」という問い: 学力と評価の戦後史からの応答. 教育学研究, Vol.70, No.4, pp. 473-483. (2003).

[出口 04] 出口弘: エージェントベースモデリングによる問題解決-エージェントベース社会システム科学としての ABM-. オペレーションズリサーチ, Vol.49, No.3, pp.161-167 (2004).

[寺野 03a] 寺野隆雄 監訳: 対立と協調の科学-エージェント・ベース・モデリングによる複雑系の解明-. ダイアモンド社 (2003).

[寺野 03b] 寺野隆雄: エージェントベースモデリング: KISS 原理を超えて. 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 6, pp.710-715 (2003).

付録 A

本研究での提案モデルを用いて、学校教育の教員配分比を変動させ、生徒の学力向上にどのような影響を与えるかについてシナリオ分析を行った。

実験 1 では、教員を増員する施策に着眼したシナリオ分析を行った。シナリオとしては以下のものを想定した。本実験では、小学校・中学校・高等学校において教員エージェントが M 人いる社会に対して、 M^+ 人の教員エージェントを小学校から高等学校それぞれ配置を行う場合の学生エージェントの学力を測定する。教員配置の仕方として、

施策 1: 小学校から高等学校まで均等に配置を行う。

施策 2: 小学校のみに教員配置を行う。

施策 3: 義務教育である小学校、中学校に均等に教員配置を行う。

施策 4: 中学校のみに教員配置を行う。

施策 5: 中学校、高等学校に均等に教員配置を行う。

施策 6: 高等学校に教員配置を行う。

の 6 のシナリオについて教員を配置させた。表 5 は、それぞれの施策における小学校・中学校・高等学校の教員の配置カテゴリ、そのカテゴリにおける教員エージェント数を示す。シミュレーション回数はそれぞれ 10 回行い、その結果得られた全学生エージェントの学力統計結果を示す(表 A1)。

表 A1. 実験 1 の統計結果一覧

評価項目	施策なし	施策 1	施策 2	施策 3	施策 4	施策 5	施策 6
最大値	5087.9	4851.8	4933.3	4961.5	4808.4	4910.5	4881.9
第一四分位	4215.6	4129.3	4165.9	4128.5	4149.1	4142.7	4186.6
中央値	4002.0	3959.1	3995.1	3974.6	3960.7	3961.2	4013.9
第三四分位	3661.9	3759.1	3755.3	3809.8	3749.6	3710.9	3701.6
最小値	1792.5	2011.7	2102.7	2094.4	1962.9	1884.4	1843.3

さらに実験 2 では、教員数を減らす施策に着眼したシナリオ分析を行った。シナリオとしては以下のものを想定した。本実験では、小学校・中学校・高等学校において教員エージェントが M 人いる社会に対して、 M^- 人の教員エージェントを小学校から高等学校それぞれ配置を行う場合の学生エージェントの学力を測定する。教員配置の仕方として、

施策 7: 小学校から高等学校まで均等に教員数を減らす。

施策 8: 小学校の教員数を減らす。

施策 9: 義務教育である小学校、中学校に均等に教員数を減らす。

施策 10: 中学校の教員数のみ減らす。

施策 11: 中学校、高等学校に均等に教員数を減らす。

施策 12: 高等学校の教員数のみ減らす。

の 6 のシナリオについて教員を配置させた。表 7 は、それぞれの施策における小学校・中学校・高等学校の教員の配置カテゴリ、そのカテゴリにおける教員エージェント数を示す。シミュレーション回数はそれぞれ 10 回行い、その結果得られた全学生エージェントの学力統計結果を示す(表 A2)。

表 A2. 実験 2 の統計結果一覧

評価項目	施策なし	施策 7	施策 8	施策 9	施策 10	施策 11	施策 12
最大値	5087.9	5143.1	5218.1	5093.7	5092.1	5098.7	5059.3
第一四分位	4215.6	4229.1	4273.9	4274.3	4242.0	4211.2	4211.3
中央値	4002.0	3998.3	4016.4	3998.0	4011.9	3978.6	3994.0
第三四分位	3661.9	3602.6	3566.3	3583.7	3627.6	3621.8	3676.7
最小値	1792.5	1696.2	1613.5	1659.0	1761.1	1795.9	1837.4