

# ABM マクロ人工経済モデルの研究のための 会計関連フレームワークの開発

高島 幸成

八木 勲

(工学院大学 教授)

## 1. はじめに

本研究は Agent-Based Modeling の手法を経済分野に適用した Agent-based Computational Economics (ACE) のマクロ経済研究におけるモデリングから成果の公表に至るまでの研究手法について、会計関連フレームワークを用いた研究手法の提案を行う。

ACE は 1990 年代に ABM が登場して以来、一部の研究者の間で試みられていた。しかしながら、数式を用いて経済主体の意思決定や行動をモデル化し、種々の意思決定主体が相互に作用する関連を構築して全体のモデルを設計し、さらにそれらを計算機上でシミュレーション可能なプログラムとしてコーディングをする一連の研究プロセスは大きな作業負荷を伴う。そこで本研究は会計簿記の記述方法の機能性に着目し、ACE モデルにおける金銭上の関係を会計簿記の概念を拡張した会計関連で表す方法を考案した。また、この会計関連を用いることで、ACE 研究の各過程の作業負荷軽減を目的とした、会計関連フレームワークについて提案を行う。

本稿は以下、2章から6章で構成される。2章では ABM および ACE についての概要を述べ、3章で ACE 研究を行う上で生じる困難性と問題点について整理する。また、4章でこの問題点を解消するための会計関連フレームワークについて提案する。さらに、5章で会計関連フレームワークを用いたマクロ人工経済モデルの事例を紹介し、最後に6章で結論を述べる。

## 2. ACE について

### 2.1 Agent-Based Modeling (ABM) の概要

ABM は Agent-Based Modeling の他にエージェントベースアプローチ、エージェントベースシミュレーション、マルチエージェントシミュレーションなどのいくつかの名称で呼ばれることがある。細部において違いはあるが、これらの大きな特徴はエージェントと呼ばれる意思決定主体を中心としたボトムアップなモデル構造を持つ点にある。

エージェントとは現実システムにおける人間や動物などの、年齢や保有資産などの数値、選好や認識などの数値など、自身の内部状態を保有し自律的に意思決定をする個体のことを指す。この時、エージェントは設計者の視点や切り口によって、個々の生命体レベルだけでなく、企業や政府などの組織を一つの人格を持った意思決定主体として扱うこともある。そのため、研究者ごとにエージェントの定義が微妙に異なる箇所がある。例えば、寺野はエージェントを内部状態と意思決定・問題解決能力を持ち、通信機能を備えた主体である必要があるとしている [1]。また、Gilbert はエージェントが持つ典型的な特徴として、自律性、社会性、反応性、自発性を保有していることを挙げている [2]。あるいは Bookstaber はエージェントについて、異質で、全体的な集中管理をされておらずある程度自主的に行動すること、自分の置かれた環境を観察したうえで、ヒューリスティクスに従って行動する主体であるとしている [3]。

ABM はこれらのエージェントを計算機上に構築した環境に配置し、モデル設計者がシステムに起動

の指示を与えて以降は各エージェントが自律的に行動することによって対象とするモデルを形成する。その結果、エージェントは自身の状態に従って、自身の能力の及ぶ範囲における合理性を持って意思決定し、行動する。その行動の結果が、他のエージェントに影響を及ぼし、意思決定や行動に変化を生じさせる相互作用を生む。また、それらの行動と相互作用の蓄積が環境やマクロな集計情報としてエージェントに知覚され、フィードバックされる。つまり、エージェントは環境とも相互作用し合いながら学習を行い行動し続ける。これらの相互作用の結果、エージェント内部のミクロな意思決定モデルでは想定しえず、マクロな仮定としてモデルに設けていない現象が生じる。複雑系の研究アプローチの流れを受ける ABM 研究ではこの現象の発生を創発と呼んでいる。

これらのエージェントの集合によって現象を創発させるシミュレーションの手段としては一般的に計算機を用いるが、ABM 研究者から最初期の研究として扱われる Schelling の分居モデルは盤面とサイコロを用いて行うシミュレーション実験であった [4]。この実験では自身に近い文化を持つ隣人が多ければ居住を続け、少なければ転居するというシンプルなルールのみで、差別意識を組み込まなくても人種の住み分けが生じる現象を再現している。1980年代には、Axelrod が繰り返し囚人のジレンマゲームにおいてエージェントの意思決定進化の戦略コンテストを行うことで、有名なしっぺ返し戦略が優位になることを発表し、相互作用を伴う計算機実験に対して注目を集めた [5]。また、計算機の発達によって Epstein らは蟻を模したエージェントが、特定の範囲内を移動しながら食糧である砂糖を収穫、消費するシュガースケープモデルと呼ばれる社会を構築した。これらの初期の ABM モデルは非常にシンプルで、単純なモデル構造や意思決定ルーチンの組み合わせから複雑な現象の再現に成功している [6]。

このような成功事例を元に 1990年代から ABM を社会科学のシミュレーションに用いようとする試みが行われるようになってきた [1;2;7]。ABM 手法が注目されるようになった要因として、Farmer は ABM が平衡状態へと向かおうとする仮定に依存する従来の平衡モデルよりもはるかに広い範囲の非線形の動きを処理することができる場所にあるとしている [8]。Klein は古典的な手段で扱いづらい社会システムの数学的記述の数値解法を可能にすること、ミクロマクロギャップを埋めることが可能なこと、非決定論プロセスの個々の実行を研究可能なことなどを挙げている [9]。また、寺野は理論と実験に加えて第三の科学研究法であるとする塩沢や、演繹法と帰納法に加わる第三の手法であるとするアクセルロッドのシミュレーションに対する意見を踏まえつつ、数学的に記述された法則と言葉で記述した事例・ケースの中間に位置する手法であることが利点であるとしている [1]。

これらの特徴をまとめると、ABM は計算機によるシミュレーション技法に頼ることで、個々の意思決定主体の自律的な行動の相互作用によるボトムアップな構造であること、その構造ゆえに限定合理性を伴う意思決定を内包可能であること、結果的にそのモデルが非線形の創発現象を観察することが可能であるという点にモデルとしての強みがあるといえる。そして、このモデルを用いて、ミクロな数理モデルからマクロな創発現象を観察する実験としてのシミュレーション過程で、理論と実験、演繹と帰納の間を往復するアプローチであるといえる。また、モデルを表現するという観点から考えると、このようなアプローチによって迫ることの可能な社会システムは、数式のみで記述するには捨象することが多すぎ、図や文章のみで表現するには煩雑すぎる内容である。ABM はモデルの表現として数式で意思決定や行動を示し、図や文章でエージェント間の関係を表し、シミュレーションによってそれらを時系列変化でつなぐことで明瞭に描くことのできる、複雑に相互作用するシステムを表現することが可能な自然言語、形式言語に代わる第三の言語であるといえる。

## 2.2 Agent-based Computational Economics (ACE) の概要

経済学分野に ABM を用いようとする試みは、ABM の社会科学への適用の試みと同時期に模索され始めた。しかし、Agent-Based Economics という表現は標準的な経済モデルにおいても相互作用を取り込むモデルであれば該当すると考えた Tesfason らの研究者は、コンピュータシミュレーションを強調する意味で、ABM に基づく経済学研究分野として Agent-based Computational Economics と表現した [10]。経済分野における ABM アプローチは 1990 年代に社会科学分野への適用の頃から試みられていたが、この動きを Fagiolo は既存の経済学モデルに不満を持つ人々が着目し始めたことがきっかけであるとしている [11]。2000 年以降に Journal of Economic Dynamics and Control や Computational Economics など特集号が組まれるなど、経済分野に ABM を適用しようとする試みが一部の研究者の間で注目されるようになったが、それは ABM や進化経済学分野に携わる一部の研究者の間によるものであった。経済学者が本格的に ABM の適用を模索し始めたのは、実質的に 2007 年の金融危機以降のことであると Gatti は指摘する [12]。この Gatti の指摘は金融危機に際し、主流派経済学の主要な分析ツールとなっている DSGE モデルが十分に効果を発揮することができなかったと考える研究者らにより [13;14;15]、その代替先として着目が集まったことが要因であると考えられる。

## 2.3 ACE の特徴

ACE は進化経済、認知科学、計算機科学の 3 つのコンセプトを統合した研究領域である [16]。そのため ACE に携わる研究者はこの 3 つの領域から ACE にシフトした者、あるいは社会科学に対する ABM アプローチから着目した研究者など多方面にわたる。そのため、それらの研究者が ACE の特徴を挙げる際、その内容は研究者によって異なっている。そこで、先行研究で挙げられている ACE の特徴を参考のためにいくつか提示する。

Fagiolo は ACE の特徴的な点として 1. ボトムアップ視点、2. 不均一性、3. 進化する複雑なシステムアプローチ、4. 非線形性、5. 直接的な内因性の相互作用、6. 限定合理性、7. エージェントの学習、8. 「真の」ダイナミクス、9. 内因的で永続的な新規性、10. 選択ベースの市場メカニズムの 10 の要素を挙げている [11]。

また、Tefason は ACE アプローチを特徴付ける 7 つの原則として、1. エージェントの定義、2. エージェントの範囲、3. エージェントの行動に関する性質、4. エージェントの自律性、5. システムの構造的性、6. システムの歴史性、7. 実験者の制約を挙げている [17]。

これらの定義以外にも多くの先行研究で ACE の特徴が挙げられている [8; 12; 14]。これらは重複する箇所と、独自の主張をする箇所が研究者によって分かれている。そこで改めて ACE の特徴をまとめると、以下の 6 つは際立った特徴であるといえる。

### 1. 個々の意思決定をモデル化するボトムアップ型のモデルであること

ACE は ABM 同様、エージェントの相互作用によってマクロ現象を創発させることのできるモデル構造である。このエージェントによるボトムアップなモデル構造は、マクロ仮定を置くことなく、ミクロな行動ルールからマクロ経済現象を人工的に創発させ、その現象の生成過程の観察や、外生的にショックを与えることで生じる反応を確認できる。また、このボトムアップ型の構造は後述するエージェントの特徴を持たせることが可能となり、これまでの経済モデルでは捨象してきた現実システムの人間の行動を内包することが可能となる。

2. エージェントが適応的で進化する性質を持っていること

個々のエージェントが独自に活動するモデル構造であるためには、エージェントが周囲の状況に合わせて自身の行動を決定していく適応的な意思決定主体であることが必要となる。適応的な反応はボトムアップ型のモデル構造を構成するための不可欠の要件であるとともに、その適応性自体がモデルの重要な特徴となる。適応性の内包はエージェントが周囲の変化に対して自身の目的のための達成方法を変化させていくことを意味する。これはエージェントが現実システムに存在する意思決定主体と同様に周囲の状況に応じて学習し、行動を進化させる仕組みをモデルが内包していることを意味する。

3. エージェントが異質であること

エージェントが適応的な特性を持つことによって、個々のエージェントの内部状態と行動に異質性を持たせることが可能となる。これまでのトップダウン型のモデル構造では家計や企業などの各意思決定主体をさらに複数に分割し異質性を持たせることは不可能ではないが困難であった。ACEではコンピュータの計算能力と、オブジェクト指向言語を用いて適応的なエージェントを定義することができるため、エージェントに種々の異質性を持たせることが可能となった。エージェントに異質性を持たせることによる影響は近年のトップダウンモデルへの批判から着目されており、ACEの異質性の内包可能性は重要な特徴であると言える。

4. エージェントの行動規範に自由性があること

異質性と同様、適応的なエージェントによるモデル構造のために、意思決定主体の行動規範に自由性を持たせることが可能である。現実的な意思決定主体として限定合理性を持ったエージェントを内包することで、数理モデルやトップダウン型のシミュレーションモデルでは内包しきれなかった行動原理とそれによって生じるシステム全体への影響を観察することが可能となる。

5. エージェントが相互作用すること

これらの特徴を持ったエージェントが適応的で、限定合理的で、自律的に行動することにより、エージェント同士の行動が互いに影響し合う相互作用を生じる。また、それらの行動の結果、意思決定主体であるエージェント間だけでなく、エージェントの行動によって蓄積された環境、社会、マクロ指標などの意思決定主体の外部の情報もエージェントに影響を与え、またその行動で影響を受ける。これらの相互作用の結果、株価の暴落のような非線形の雪崩現象をモデルの中で内生的に生み出すことが可能となり、それを観察することができる。また、それにとどまらず、複雑な相互作用によって生じる現象を超えて、個々のエージェントだけでなくモデルの社会自体が進化し、実験者の意図を超えた現象を創発させることが可能となる。

6. 時系列を織り込んだボトムアップ型のモデルであること

ACEは計算機上でシミュレーションを行うため、1～5の要素を含んだうで時系列の変化を観察可能なモデルである。そのため価格の形成を例にとると毎期の取引によって価格が徐々に形成される一方、その価格形成によって影響を受けたエージェントの行動の変化によって一意に均衡に定まることがない。このようなモデルに対して、時間変化や、条件の変更、外生的なショックを人為的に与える等によって、創発現象の要因となる相互作用とその要因を個々に発見する実験室実験が可能となる。

### 3. ACE 研究の困難性と問題点

#### 3.1 ACE 研究の困難性要因

前章で述べたように ACE 研究は経済分析や経済現象に対するメカニズムの分析に対して新しい知見を得られる可能性を持ったアプローチである。しかし、ACE に取り組もうとする研究者にとってモデルの複雑さが研究に取り組むうえでの障害となる。これらの障害は、1.ABM に由来するモデル構造の複雑さ、2. システム内に2つの系が存在することによる複雑さ、3. 膨大な変数の管理に伴う複雑さの3つによって生じる。以下にそれぞれの複雑さについて述べる。

##### 3.1.1 ABM に由来するモデル構造の複雑さ

ACE のモデルは経済システムを ABM アプローチによってモデル化しようとするところにモデル構造の複雑さがある。ABM は前述したように個々の意思決定主体をエージェントとしてモデル化する。ACE は ABM 同様にエージェントをモデル化するが、ACE のエージェントは目標や性質が異なる多数のエージェントで構成されるところに違いがある。避難経路シミュレーション [18] の避難者エージェントのように、ABM はエージェントの目標や行動が同質の傾向を持つエージェントで構成されることが多い。このような同質傾向のエージェントで構成されているモデルはエージェント間の差異が少なく、オブジェクト指向プログラミングでいうところの共通要素を持つ親クラスの定義と、差異が生じる部分での子クラスの定義と同様、機能やモデルの大きな範囲を共通化することができる。一方、ACE は簡単な財の取引を行う市場モデルであっても、家計（需要）と企業（供給）のように本質的な目的や機能が全く異なるエージェントで構成される。そのため、エージェント毎に差別化された要素が大多数を占め、共通化できる部分が少なく、一つ一つのエージェントをモデル化していく必要がある。

この傾向はマクロ経済を対象とした ACE モデルではさらに顕著になる。マクロ経済を対象とした ACE モデルでは、経済全体の構成要素のそれぞれで生じた値が他の要素の行動を決定づける。そのため、経済の三主体である家計、企業、政府に加えて、銀行や NPO 法人などの経済を構成する要素をエージェントとして内包する必要がある。各エージェントの内包は個々の研究で目的とする経済現象によって異なるが、取引の一部を対象とした比較的ミクロレベルの経済モデルよりも、経済全体の動きを模倣しようとするマクロレベルのモデルの方が複雑になる傾向にある。

さらにこれらのエージェントはそれぞれの主体が1種類ではなく、複数のエージェントとして細分化される。主流派経済学で用いられるモデルでは、家計や企業などが代表的な1つの主体としてモデルを構成している [13;15]。一方、ACE モデルでは、これらの経済主体は役割に応じて、異なるエージェントとしてモデル化される。企業であれば、原料生産、製造、小売り等の役割別で分けられる。また、家計も労働者として紐づけされている企業や政府などのエージェントに応じて関連する要素や行動が異なる。これらのエージェントは役割別に最小単位にまで区分した上で、保有する内部状態、消費性向やリスク選好などの行動性向の違いにより、同種でもさらに複数のエージェントとしてモデル内に存在する。例えば同じ製造企業エージェントであっても、資金や技術等の状態が初期値の乱数や時間経過による行動の結果によって違いが生じる。また、新規の設備投資などに対してリスクを重視するのか、利益を重視するのかの意思決定を定義する行動ルールや、行動決定の数式の係数などで違いを持たせることがある。

このような多種多数の要素の一つ一つをモデル化することに加えて、自律的な意思決定主体の相互作用によって成り立つモデル構造が ACE モデルを非常に複雑にしている。この多種多数の要素の自律的な意思決定は、設計者の制御を離れて意図しない要素間の相互作用を生じる可能性がある。相互作用

用によってもたらされる創発は ABM 研究における最も重要な利点であると言える。しかし、意図しない創発が正しい形で行われていれば新しい発見となるが、意図しない創発が設計ミスによって生じる誤った形で行われたものであればそれは誤謬となる。現実的にはあり得ない相手との取引や、想定を超えるフローによる誤った数値の算出などのエラーは、ACE が最終的に計算機上のプログラムでモデルの挙動を観察するものであるため常に生じうる危険である。そのため、ACE のマクロ経済モデルでは最終的なアウトプットであるマクロ経済指標とそれを生じさせるミクロ変数とは別に、多種多数のエージェントの相互作用について常に細かく観察する必要がある。この作業は新しいエージェントやエージェント間の関係を追加する毎にリンクが増えるネットワーク構造であり、数の増加に従って急激に作業負荷が増大する。

### 3.1.2 システム内に2つの系が存在することによる複雑さ

エージェントベースモデルではエージェントが意思決定と行動により、環境と他のエージェントに影響を及ぼし、その影響によって別のエージェントが意思決定を行う。この時、エージェント間、及び環境に対して、自身の行動に基づく情報のやり取りによって自身の状態変数を変化させる。例えば、ABM の代表的なモデルの一つである Sugar Scape モデルでは [6]、エージェント A は自身が存在する格子状空間のセルの周囲を見渡し、既に別のエージェントが存在するセルを避け、砂糖（資源）が多く存在するセル C1 へと移動し、収穫を行う。その結果、A 以外のエージェントは行動選択の際にセル C1 を選択肢から除外するように、相互に影響を及ぼす。

この意思決定と行動で生じる相互作用によって創発を生じさせる一連のやり取りは、前項でも記した通り ABM における重要な特徴となる。この相互作用と創発を生じさせる一連のやり取りを含めた機構を本研究では意思決定の系と呼ぶことにする。意思決定の系は ABM アプローチにおける最大の着目点であり、その構築と観察結果こそが研究の成果と言える。これは ACE 研究においても同様で、限定合理性を持ったエージェントの相互作用の結果、ミクロな行動モデルからは想定しえない現象の創発がもたらされることによって、これまで説明ができなかった経済現象の説明を試みている。本研究では ACE における意思決定の系の範疇を、金銭上の数値の取引を除いた、エージェントの認知、学習、意思決定、行動と行動によって生じる情報や実体の移動であると定義する。実質的に、現実の世界をモデルとして落とし込んだ時の思考や取引などは全てこれに該当する。ただし、取引に関して、金銭の授受や受け取った金銭に関する情報はこの範疇には組み入れない。この意思決定の系は経済現象にとっては相互作用に加えて、限定合理性や多様性が重視される。そのため、ACE における意思決定の系にはファジィな内容を含むとともに、主として認知や効用などの状態変化の処理と変数の管理が必要になる。

一方、ACE モデルを成り立たせるためには意思決定の系の管理と同時に厳密な数値管理が必要となる。厳密な数値管理とは取引を行った際に生じる金銭上の数値を表す変数の管理のことを指す。金銭上の変数は売買行動、設備投資、投資資金の調達など、それぞれの行動で金銭の移動や、取引を行った際のエージェントの内部処理で変化する。例えば、家計エージェントによる財の購入は単純に家計の金銭を減少させて、企業の金銭を増加させるだけではない。販売を行った企業エージェントは金銭を表す変数の増加の他に、売上を表す変数を記録しておかなければならない。金銭を表す変数は金銭の残余を示すストックの変数であり、販売以外に支払いや金利の受け取りなどの多数の行動の影響によって変化する。一方、売上を表す変数は特定の期間にどれだけ財を販売したかを表すフローの変数であり、利益の計算や、配当などのその後の行動に関わる意思決定の指標の算出に利用されることになる。各エージェントが保有しているこれらの変数は集計されることで、最終的にシステム内のマネー

サプライやGDPなどのマクロ経済指標として算出される。これらのマクロ経済指標は環境が保有する数値として企業や銀行の生産計画や金利の決定に影響を及ぼして相互作用するとともに、最終的なモデル全体の創発やメカニズムの分析をするうえで重要な指標となる。本研究ではこのような金銭上の数値の取引を処理する一連の機構を金銭上の系と呼ぶ。

ACEの中でも特にマクロ経済モデルでは意思決定上の系と金銭上の系が複雑に交差する。図1はACEモデルをシミュレーションする際のシステム上における意思決定の系と金銭上の系の概念図である。図に示すようにエージェントが何らかの行動を起こす場合、1.周囲の状況と自身の内部状態から認知を行う<sup>1</sup>、2.資金の過不足などの条件的な意味での自身の内部状態を基にした意思決定を行う、3.意思決定に基づき行動を行い自身の内部状態や他のエージェントや環境に影響を与える、という一連の処理を必要とする。

1～3は概念上の一例として提示しているため、意思決定や行動で外部の状況や内部状態への確認を行うモデルもある。しかしいずれにしても、図1に示すようにエージェントが行動する際は内部と外部の情報に基づいて行われる。そして最終的な行動は、自身の金銭上の系の変数を変化させ、次の意思決定や行動の要因となる。また、金銭上の系はエージェント自身だけではなく、集計結果として外部に影響を与え、給与の支払いや購買行動などの外部の他エージェントの行動結果の影響によっても変化する。

この2つの系の中でも意思決定の系はACEにおける特徴である創発現象を生じさせるモデル構造の主要な要素となる。したがって、本来、ある経済システムをモデル化する場合、金銭上の系はACE研究にとって主要な要素群ではなく、あくまで主要な要素を実働させるための舞台装置的な役割であるといえる。しかし、シミュレーション可能なレベルでプログラムを実装する段階になると、金銭上の系の作業負担は意思決定の系の作業負担と同程度となる。これは図1で示すようにそれぞれの系が相互に影響するとともに、それぞれが外部のサブシステムに対して影響を及ぼすためである。結果的に、ACEモデルではあるエージェントの能動的な行動及びそれに影響を受けるエージェントや、環境までの処理を含めた1つのイベントに対して、意思決定の系と金銭上の系の2つの処理が必要となりモデル構造が複雑になる。

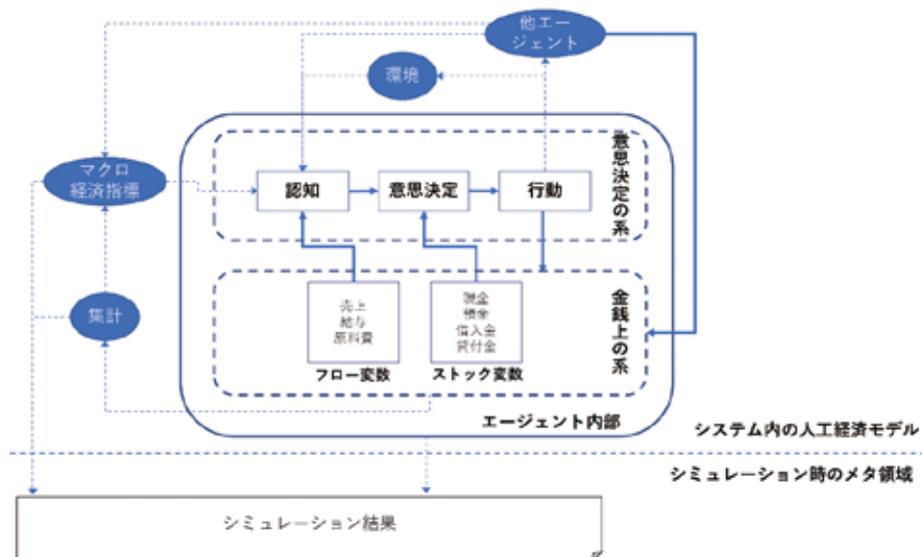


図1 ACEシステム内での意思決定と金銭上の系の関係

<sup>1</sup> 尚、本研究では金銭上の系に焦点を当てているため、意思決定の系については変数を含めて簡略化している。認知の中に効用や閾値、他者からの情報などの変数項目があり、図1ではそれらを参照しているものとして考えてもらいたい。

### 3.1.3 膨大な変数の管理に伴う複雑さ

ACEのマクロ経済モデルは前項までに示したように、ABMに由来するモデル構造、2つの系の存在による複雑さがあることを指摘した。これらの系はそれぞれが目的とする機能を果たすために多くの変数を必要とする。研究目的によってエージェントの意思決定上の着目点は異なるが、意思決定の系には自己の状態を認識するための変数や、選好を構成するためのパラメータとしての状態変数を必要とする。また、金銭上の系については前項で示したように厳密な管理を必要とする状態変数が存在する。

これらの変数はモデル上の定義段階でも、多くの種類が存在する。特に金銭上の系の変数はエージェントベースモデル、ACEモデル、マクロACEモデルと取り扱うモデル構造が複雑になるにつれて、数が膨大になる傾向にある。

例えば、主として意思決定の系のみで構成されているエージェントベースモデルであると言える前述のシュガースケープモデルでは、資産を表す変数は砂糖の量のみである。モデルを拡張して取引の概念を加えたモデルでも、資産の概念に相当する変数は砂糖とスパイスの2種類である。これはシュガースケープモデルが単純な行動ルールから淘汰や環境変化、社会性や取引の発生などの多岐にわたる社会現象の創発そのものを目的としているためである。

一方、経済的な取引に焦点を当てたモデルは、比較的ミクロな現象を対象としたモデルでもエージェントベースモデルと比べて変数の数が増加する傾向にある。例えば、消費者と企業の2つのセクターにエージェントが存在する市場の例では[19]、企業が生産し消費者との取引に行うハッシュと豆の2財、生産のための設備、及び取引のための資金が資産となる。シュガースケープモデルに比べて市場取引の創発に焦点を当てているため、資産が取引する財と交換媒体としての資金に細分化している<sup>2</sup>。また、金融取引に焦点を当てた人工市場モデルでは[20]、投資のための資金と、投資銘柄として複数の銘柄が財として存在するが、これらも資産の変数としては資金と数種類の投資資産財となる。

マクロ経済を対象としたACEモデルではこれらの変数がさらに細分化されることになる。資産の変数の中でキャッシュを示すものだけでも、現金、当座預金、長期預金などの複数の変数を保有することになる。資産そのものであれば、現金以外に債券や株式などの金融資産に加えて、原料や完成製品などの財も資産として値を管理する必要がある。

さらにこれらの変数はシミュレーションを実施するためのプログラムとして構築する段階で、1つの変数がある時間単位で区切り、複数の変数として保持する必要がある。これはモデルが複雑化し、エージェント間の行動が交差する結果、ある一連の経済活動の一巡を一単位として期に区切った際に、 $t$ 期のある時点 $t_i$ で生成された、あるいは変化した変数の値を、時間的に離れたタイミング $t_{i+x}$ で使用するようになるためである。この変数の値の利用までの間に、当該変数は別のエージェントの行動や自身の行動で変化する可能性があるため、 $t_i$ 時点の値を保管しておかなければならない。あるいは $t_i$ 時点の値を保管しない場合、 $t_{i+x}$ までのあらゆる行動で当該変数が受ける影響について、考慮した計算を行わなければならない。ただし、 $t_{i+x}$ の時点であらゆる行動の影響を加味した計算式を用いたモデルは、自身の行動や他者からの影響が一つ増える、あるいは行動の順番を変えるなどのモデルの変更のたびに全ての数式を変更しなければならない。

以上のことから、マクロ経済のACEモデルでは、モデル構築段階において2つの系の変数の多さ、プログラミング段階においてそれらの変数を任意の時間別に保管しなければならない煩雑さが作業負

<sup>2</sup> モデルでは貯蓄の概念が出てくるが、あくまである期に消費のために使用する資金の残余额を翌期に回すものであるため、預金のように変数として分割する意義のないものであり、扱う種類の多さについて言及する本稿の中では変数の数に数えていない。

荷を増大させる。

### 3.2 マクロ経済の ACE 研究の問題点

前節では ACE 研究を行う上での阻害要因となるモデルの複雑さに起因する困難性について取り上げた。これらの困難性はマクロ経済の ACE 研究過程の、1. モデリング、2. プログラミング、3. シミュレーション、4. 結果公表の各段階で研究作業の障害として現れる。以下にそれぞれの4つの障害について示していく。

#### 3.2.1 モデリング段階の障害

モデリングの段階では、前節で示した ABM の構造と2つの系が存在するシステムであることが影響して障害となる。前述の通り、モデリングの段階でエージェントの行動は適応的に行動するように構築する必要がある。さらに、1つのイベントの中で2つの系を同時に管理する必要があるため複雑性が増加する。例えば、何かの支払いを要求される際に、資金の不足が生じないか確認し、ショートするような場合は借入や倒産処理を行う等の例外処理を用意する必要がある。つまり、どのエージェントから行動を起こされても、自身の内部状態がどのような状態になっていても、システムに破綻が起きないように振る舞わせることが必要となる。そのため、各イベントに対し、相手の反応、例外処理に配慮しながら、意思決定と金銭の2つの系を破綻なく管理する必要があり、モデルの構築が難しくなる。

家計の所得が企業の給与から得られ、企業の売上げが家計の購入から得られるような、資金循環型のマクロ経済モデルを構築する場合は特に困難になる。これは個々のエージェントの行動を決定するための内部状態が、別のエージェントの行動に準拠し、その行動を決定する要因も他のエージェントの影響を受けるように、行動を決定づける要因が入れ子状になるためである。このため、何かの要素や行動を付け加えるためには、その行動の根拠を、その根拠を作るためにはそれを動機づける別のエージェントの行動を用意しなければならない。そして、これらの行動に破綻回避の例外処理を設けなければならないとともに、多くの場合は金銭上の処理が伴うため、1つの要素の追加でモデルの拡張に対する作業が膨大なものになる。

さらにマクロ経済モデルでは、個々のエージェントのモデリングの複雑性に加えて、マクロ視点でのモデル構造としても複雑さを抱えている。Caiani [21] は、企業エージェントが倒産して市場から退出した場合に代わりに生成される企業の資本について、裏付けのない状態で参入させているマクロ経済モデルが多いとしている。Caianiはこのモデル構造によって裏付けのない資金が市場全体に流れることは、モデル内の経済システムに対して無視できない影響を及ぼしているとしている。そのため、設計段階で倒産などの例外処理に応じた不自然な資金の流出や流入にも配慮しなければならない。

#### 3.2.2 プログラミング段階の障害

プログラミングの段階では前節で示した3つの複雑さが複合的な要素として障害となる。プログラミングの段階になると、ABMの特徴である性質の異なるエージェントをそれぞれモデル化し、実働するようにプログラミングする必要がある。そのため、エージェントの種類毎でサブシステムの共通化ができないことが多くなり、複数のサブモデルを内包する結果、プログラムが複雑化する。さらに、個々のエージェントが意思決定の系と金銭上の系を持つ構造であるため、それぞれの要素の内容についても複雑な処理を行わせなければならない。加えて、これらの処理を行うためには大量の変数を保持し、管理する必要がある。

これらの3つの複雑さが相互に影響し合うため、ACEモデルを実際にシミュレーション可能な状態にするためには困難が伴う。このようなシミュレーションシステムを実装するためには高度なプログラミング能力を必要とする [12]。そのため、経済学者や社会学者にとってはACEに取り組みづらく、研究者の間口が広がりづらくなる。一方、高度なプログラミング能力を有する情報科学者は経済や社会のモデル化・シミュレーションに対する関心が高いわけではないため参入者が少ない。この問題点に対処するために、Netlogo [22], EURACE [23], ASPEN [24], Jamel [25], などのシミュレーターやフレームワークが用意されている。しかし、これらについても研究者の着想を思い通りに具現化するためには、高いプログラミング能力を要するため障害を取り除き切っているとは言えない状況である。

### 3.2.3 シミュレーション段階の障害

シミュレーション段階ではマクロ現象を観測するために、各エージェントが保有する状態変数を収集する必要がある。しかし前述したように、ACEモデルでは変数の数が非常に多くなる傾向にある。また、一般的にシミュレーション実行時にはシステム内に100や1000、中には1万を超えるエージェントが存在し、それらのエージェントが個々にこれらの変数を保有した状態で活動する。そのため、すべてのエージェントの変数を出力すると出力結果が膨大な量になるとともに、これらの変数を個別に取り出すためにはサブシステムを構築する必要があり、ともに研究時の大きな作業負担となる。また、シミュレーション実験では、得られた結果の内容から新たに別の統計データを取得する必要が生じることが想定される。この際に、多量な変数と複雑なシステムから特定の情報を取り出すためには専用のサブシステムをさらに構築する必要が生じるため、研究の進捗を遅らせることになる。

### 3.2.4 成果公表段階の障害

ACE研究の複雑性は最終的に研究を完遂した後の研究成果の公表を行う段階でも障害として現れる。これまで記したように、ACEモデルは複数のエージェントがそれぞれ行動ルールと多量の状態変数を保有する複雑なモデル構造をしている。そのため、前述したように、ACEモデルの構造の全てを文章、数式、図で説明した場合、非常に長大になる。近年、Webジャーナル等で誌面の制約は大きく緩和される傾向にあるが、通常の学会誌などでは誌面制約は取り除かれていない状況である。そのため、ACE研究の成果公表ではモデル記述を簡潔に表記せざるを得ず、読者に対して誤認を与える可能性のある記述になっていることがある。これはDosi [14] がACEの問題点として指摘する研究結果の再現性の脆弱性にも関連する問題である。

また、個々の状態、個々の行動、それらの相互作用の結果生じる因果関係は著者によって記述方法や記述の順番が異なり、意図した内容が読者に伝わらないことも問題点として存在している。このような研究者毎に表記が異なる問題に対し、モデル記述の規約を定めるべきであるとして、ODDプロトコルが提唱されている [26]。ODDプロトコルはモデルの記述順序や説明されるべき事項をカテゴリ別に定めている。そのため、研究者毎の記述方法の違いを減少させることができている。しかし、ODDプロトコルはABMや複雑適応系モデル全般に対して広く適用できるように考案されたモデル記述規約である。そのため、記述規則に余裕が設けられており、個別のカテゴリ内での記述には、著者による違いが生じている。さらにマクロ経済を対象としたACEでは、モデル内のエージェントの種類とエージェント間の関係が多岐にわたるため、モデル全体の関係性を認識させづらいという問題点もある。

#### 4. ACE モデリングに対する会計簿記の有効性

前章で述べたように ACE 研究は遂行にあたってモデルの複雑性に起因して、モデル設計、プログラミング、シミュレーション、成果公表の各段階で障害が存在している。これらの障害は会計簿記の記法と情報管理の機能性を応用することで大きく軽減することができる。

複式簿記の記法は、資産や負債、資本などのストック変数と、収益、費用などのフロー変数の変化を同時に記録することができる。そのため、ACE モデルにおける金銭上の系の状態変数の記録や管理を容易にする。また、これらの変数の管理にあたって、変数を資産、負債、資本、収益、費用の 5 つの類型に分類し、同一の型の変数であれば変数の変化に対する処理の方法が統一されている。そのため、5 つの類型に応じた処理機構を構築することで変数の種類を増加させても、そのたびに処理機構を変更する必要がなくなる。さらに、各変数を表形式で表し、借方貸方の配置場所によって変数の変化に規則を設ける記法であるため、何らかの取引が生じた場合に、表の位置でその変数がどのように変化するかを理解することのできる視認性の高さを持っている。加えて、簿記の記法は 500 年にわたって利用されている普遍的な記法であり [27]、金銭上の変数の変化の記録に対する信頼性が高いとともに、一般的に利用される技術であるため原理的な仕組みを理解するだけであれば、習得コストも高くない。

経済を対象とした ABM 研究や、ACE 研究において、会計簿記の概念を用いる研究はこれまでもいくつか行われている。出口は複式簿記で用いられる記法をさらに発展させ、エージェント間の取引を交換代数として表し、モデリングを行う方法を提示している [28]。また、Ciani は経済を構成する各セクター間のストックとフローを会計記述で正確に表現することで、モデル内に生じる誤差を減らすようにモデリングすることができることを示している [21]。これらの先行研究はモデルの構築にあたって、会計簿記の考え方をモデルの正確性を確保するために用いている。一方、本研究では ACE 研究の過程全体に対して会計簿記の概念を導入することで、研究全般の作業効率に効果的な役割を果たすことを目的としている。

ACE 研究過程全般に会計簿記の概念を導入する段階として、1. 複式簿記の導入による金銭上の系の自動化、2. 会計簿記の記法をモデル全般に拡張することによるフレームワーク化の 2 段階を本研究では提案する。前者については会計簿記の概念を導入することで、主として研究過程上のプログラミングにおける作業負荷の軽減ができる。また、後者についてはプログラミングの自動化のステップを経て、研究全般で会計簿記の概念を発展させた会計関連の考え方をを用いることでモデル設計から成果公表までの各段階で ACE 研究の障害を軽減することを可能にする。

##### 4.1 複式簿記の概念を用いた金銭上の系の処理の自動化

シミュレーションプログラムに対する複式簿記の記法の導入はプログラミング上で金銭上の系を自動化し、作業負担を軽減することができる。具体的には金銭上の状態変数を複式簿記の記録方法で処理する構造を会計オブジェクト群として定義し、各エージェントに保有させることで金銭上の系の変数管理を自動化する。

図 2 に会計管理オブジェクト群の事例を示す。会計エージェントは個々の種類のエージェントクラスが継承する根本のクラスとして定義する。個々のエージェントは会計管理オブジェクト群を有する会計エージェントを継承することで、あらゆるエージェントタイプで共通して金銭上の系の処理を共通化することができる。会計エージェントは個別のエージェントクラスが実体として活動した際に発生する取引のメッセージを受け取り、保有する会計管理クラスに取引金額と仕訳情報を送る。会計管理クラスは受け取った仕訳情報に該当する科目を 5 つの科目集合から検索し、該当する科目を取り出

し、取引の情報を科目クラスにメッセージとして送付する。科目クラスは受け取った仕訳情報に応じて、自身の取引構造体に情報を記載し、新しい取引情報として取引集合に追加する。この処理は簿記の総勘定元帳への転記に該当する処理となる。取引集合は総勘定元帳そのものであり、取引の発生順に金額の増減の時系列変化が記録される。また、取引集合の最後尾の要素を参照することで現在の残高を参照することが可能になる。さらに、取引構造体には取引相手やID、摘要名、取引の際の相手方科目なども併せてレコードに記録することで、シミュレーションで生じた変化を追う際、特にバグが生じた場合などの情報追跡に有効に働く。

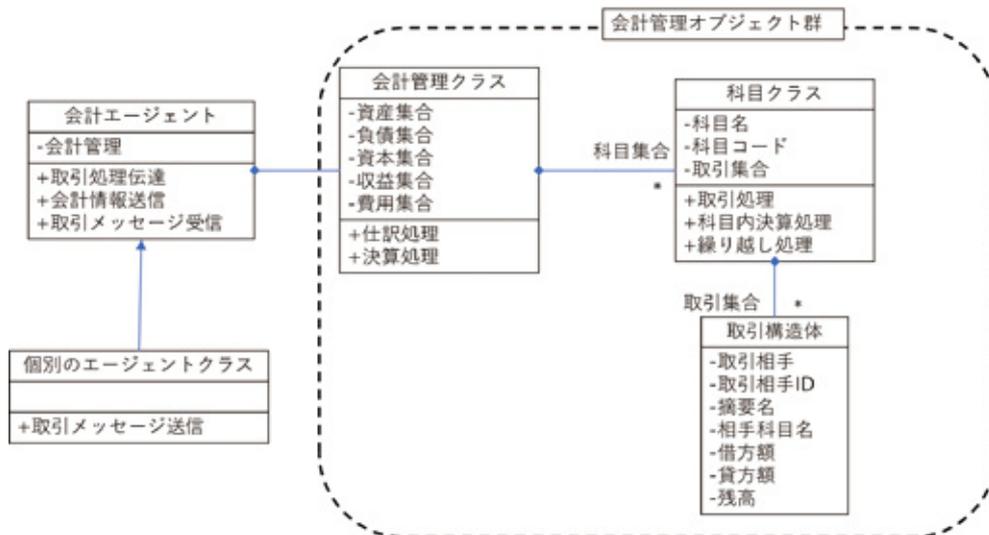


図2 会計管理オブジェクト群のクラス図

このような会計管理オブジェクト群を ACE モデルに内包すると以下の三つの利点を得ることができ、プログラミング上の作業負担を大きく解消することができる。

- 金銭上の系の変数管理の自動化：金銭上の変数の変化に対して、取引ごとの変化を正確に効率よく記録できる。
- エージェント毎の機能の共通化：金銭上の系に属するエージェントである限り、処理は共通の処理として行うことができる。
- 新規要素の追加の容易化：変数の5つの類型に対する処理は本質的に違いがなく、新しい要素の追加に伴うプログラムの改修を必要としない。

特に三つ目については、新しい変数（科目）が登場する場合は、科目オブジェクトを生成している構文に、新しい変数名と5つの類型のどれに属するかを追加するのみで、以降の処理は会計管理オブジェクト群が自動で処理をすることになるため、新しい要素の追加が容易になる。さらに各エージェントが使用する科目については、CSVなどのシミュレーションプログラム本体と独立したファイルでパラメータとして定義する構造を持たせると、プログラムに対する変更は完全に不要となる。

これらの利点は変数の管理や追加に対する、プログラミングの負担の軽減に関するものである。これに加えて、会計管理オブジェクト群の機能を使用すると、金銭上の系に関連する変数を安全に分割する新しい機能としても利用することが可能になる。3.1.3で記した変数の管理の複雑さの中で、変数によっては意思決定時に数値が確定した時期と、実際にその値を使用する時期が異なることが予想されることを示した。例として、企業エージェントの法人税支払いについて、 $t$  期末の決算で金額が確定

した後、支払いが翌期  $t+1$  に行われるモデルである場合を考える。法人税の支払いが、他のエージェントの行動との制約から、給与や原料購入などの支払いを行った後に行われると仮定する。この時、3.1.3で示したように、給与や原料購入の意思決定の際に  $t+1$  期の資金から  $t$  期の法人税支払い予定額を差し引いて計算を行う必要がある。しかし、このような処理は、モデルが複雑になるにつれて、考慮に入れて計算を行う必要のある要素が増え、計算式が複雑になり管理しきれなくなる恐れがある。また、法人税支払い予定用の変数を設ける方法もあるが、変数の数が増えると複数の一時保管用の変数を管理することになり煩雑になる。

会計管理オブジェクト群の使用は、このような変数の分割に対して、取り置き用の科目を生成することで安全に行うことができるようになる。上記の例では、支払い等に使う資金の勘定科目が現金であるモデルと仮定する。このとき、現金を分割した値を保有しておく性質の資産科目の一つとして、法人税支払予算金等の名称で科目を新たに作る。エージェントは法人税額が確定した時点で、自身の会計管理クラスに対して、借方に法人税支払予算金、貸方に現金で処理するメッセージを送る。この処理によって、現金科目の残高を減少させ、法人税支払予算金の残高が増加し、変数が分割されたことになる。この振替処理は現実の会計処理では行われたい処理であるといえる。しかし、プログラム上の変数管理として考えた場合、ある科目の数値を異なる勘定科目に振替える処理は、安定した複式簿記の記録や管理法を用いたシステムを利用した変数の分割となるため、新しいサブシステムなどを用意する必要がなく有効に機能する。この法人税支払予算金は実際の法人税支払い行動が生じた際の仕訳メッセージで、現金の代わりに貸方に指名することで現金として使用することができる。また、この予算金科目は期末の決算タイミングで現金等の分割元の科目に振替直すことで残余を元の変数に戻すこともできる。この際は借方に現金、貸方に予算金の科目を予算金の残余額だけ振り分ける仕訳メッセージを送ることで可能となる。そのため、科目を用いた変数の分割は、家計の購入原資の予算金などのように消費関数などで定義されるが、実際の市場の数量と価格次第では計画通りに購入できない行動にも適用することが可能となる。

以上のように、複式簿記の変数管理法を ACE モデルのシミュレーションプログラムに導入することで、3.2.2で示したプログラミング段階の障害を大きく軽減することが可能となる。

#### 4.2 会計関連のフレームワーク

前節で示したように複式簿記の変数管理はプログラミング段階の障害を軽減するが、この複式簿記の適用をプログラミングの自動化でとどめず、モデル全体に拡張することで、前記した各段階の障害を軽減することが可能になる。

会計の目的とするところは友岡によれば経営者が説明責任を果たすための説明機能、利害関係者への利害調整が果たされるようにする機能、利害関係者の意思決定を支援するための機能などがある [29]。これらの説明の違いは情報を開示する相手や目的の違いと考えられるが、対象となる情報は一つの主体の内部状態の記録であるとみなすことができる。例として企業エージェントが家計に対して、現金で給与を支払った場合の仕訳を考える。モデル内の状態変数の変化のみを記述するため、変化する科目の種類とその科目名、及び取引としての名称を摘要として記述し、金額や日付を記述しないで表すと、表1のa)のように示すことができる。

表1 企業エージェントの給与支払いの仕訳

a) 企業エージェントAの仕訳					b) 家計エージェントBの仕訳				
科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種	科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種
費用	給与	固定給与支払	現金	資産	資産	現金	固定給与受取	受取給与	収益

表1のa)は給与(費用)が発生し、現金(資産)が減少していること、及び摘要欄で給与支払いという取引(行動の概要)によってこの増減が生じたことを1行で示している。この仕訳は簿記の仕訳帳の1行としてみれば、ある主体の内部状態の記録である。しかし、この内部状態の記録を主体同士が相互作用する経済現象で生じた結果として考えると、一つの主体の内部状態の変化にとどまらないことがわかる。経済システム全体から俯瞰すると、ある企業Aの能動的な行動によって生じた表1のa)の仕訳の発生は、その給与支払いを受ける家計Bの受動的な行動によって表1のb)の仕訳を生じさせる。つまり、経済モデルの観点において一つの仕訳の発生は、その取引によって影響を受けた対になる主体の仕訳の発生を意味することになる。この二つの異なる主体の仕訳を対にすることで、経済モデルにおける主体間の関係と状態変数の変化を端的に表すことができる。本研究ではこの対となった仕訳をエージェント同士の会計簿記上の関連であるとして会計関連と名付ける。

会計関連でエージェント間の関係を表現することは、モデルにおける金銭上の系の表現として有効な方法の一つとなる。これは複式簿記における仕訳の記法を用いるためであり、金銭上の系の変数の変化について、変化する変数がストック変数とフロー変数のどちらであるか、借方貸方の場所の配置によって変数が増加するのか減少するのかを一意に示すことができるためである。この会計関連について、モデル内で生じうるすべての取引について表し、一つの表にすることで、モデル内で生じる金銭上の系に関わる取引を伴う一連のイベントと状態変数の変化を網羅したモデル記述を行うことが可能となる。さらに表として記載する際に、複式簿記の借方貸方の配置場所による変数変化の規則を模倣し、仕訳の位置に意味を持たせることで詳細なモデルの記述を行うことが可能となる。具体的にはイベントにおける能動的なエージェントの行動によって生じる仕訳を左に、その行動に影響を受ける受動的なエージェントの仕訳を右に配置する。本研究ではこの会計関連をまとめた表を会計関連表と称する。

以下に具体的な会計関連表の表記規則について記す。

- 表の項目は大きく分けてエージェント、仕訳、会計関連の3つで構成される。
- エージェントはモデル内に存在するエージェントの種類ごとの名称を用いる。この時、エージェントの区分はモデルによって異なるが、モデル内での目的や役割についての明確な違いによって区分する<sup>3</sup>。
- 仕訳の内容は借方科目種類、借方科目名、摘要、貸方科目名、貸方科目種類の5つで構成される。
- 会計関連名は配置される二つの仕訳の関連を表す端的なイベント名によって定義される
- 表は会計関連名を中央に配置し、左側にこのイベントで能動的に行動するエージェントとその仕訳、右側に能動的なエージェントの行動によって影響を受ける受動的なエージェントの仕訳とエージェント名を配置する。

以上の規則の下に作成した、会計関連表の一例を表2に示す。

<sup>3</sup> 例えば、家計と企業では大きく目的が異なるため区分するほうが良い。一方で、モデル内の家計の行動が賃金を得て、貯蓄と支出を行う内容であれば、労働者として民間企業所属の家計と公共機関所属の家計を区分することに大きな意味はない。企業一家計と行政一家計の給与支払いの定義を行うことで表現が可能になる。一方、製造業と小売業ではモデル内で果たす役割が異なるために区分するほうが良い。これは最終的にシミュレーション結果を取得する際に区分されていると有意義な情報が得られるためである。一つの目安として、産業連関表の部門別の区分などが利用しやすい。

表 2 会計関連表のサンプル

エージェント	仕訳					会計関連	仕訳					エージェント
	科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種		科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種	
① 企業	費用	給与	固定給与支払	現金	資産	給与支払い	資産	現金	給与受取	受取固定給	収益	家計
② 家計	資産	預金	預金預入	現金	資産	預金預け入れ	資産	現金	預金預かり	預かり預金	負債	銀行
③ 家計	資産	購買予算金	購買予算金振替	現金	資産	購買予算金振替え						
④ 家計	費用	消耗品	消耗品購買	購買予算金	資産	家計消耗品購買	費用	売上原価	製品販売	製品	資産	企業
							資産	現金	製品販売	製品売上	収益	

表 2 に示すように会計関連表では a の部分を見ると、能動的に行動するエージェント、その行動によって影響を受けるエージェント、及びその二者がどのようなイベントで関連しているかの定義を見ることが出来る。加えて、b1、b2 にはそれぞれの行動によって生じる、状態変数の変化が明確に記されている。これらの情報から、エージェント間の関連と、その関連による行動によって変化する各エージェントの金銭上の状態変数を一覧化することができる。

例として①を見ると、企業エージェントが給与を支払うための行動イベントを起こし、給与（費用）が発生し、現金（資産）が減少している。この行動の結果、家計エージェントの現金（資産）が増加し、受取固定給与（収益）が発生している。そしてこれらのエージェント間のイベントの関連を「給与支払い」と定義しており、このような関係を持つエージェントがモデル内に存在していることを示している。

また、④を見ると、企業は製品が購入された際に売上原価（費用）が発生し、製品（資産）が減少するとともに、現金（資産）が増加し、製品売上（収益）が立つように一つのイベントで複数の状態変数の変化が生じていることを表現することもできる。同様に③では前節で述べた一時的な変数の分割のような自己の変数の振り替えについても、相手方のエージェント名と仕訳を空白にすることで表現することができる。

以上のように会計関連表は ACE モデルの金銭上の系について、詳細に明示するとともに、仕訳の記法を用いることで状態変数の変化を誤認しづらい表記で表すことができる。この会計関連表を用いることで、前章で挙げた ACE モデルの各障害を軽減することが可能になる。

### 4.3 各障害に対する会計関連の適用

#### 4.3.1 モデル設計過程での適用

会計関連表を用いることで、モデル設計段階の障害となる 2 つの系に伴うモデル管理の複雑さを軽減することができる。会計関連表は金銭上の系の主体の行動とその結果生じる変数の変化までを表で一覧化するため、モデル設計段階で最初に会計関連表を定義することで、意思決定の系の設計上の漏れやミスを軽減することができる。これは、会計関連表のレコードの存在は金銭上の系のイベントだけではなく、そのイベントを生じさせるための意思決定の系の行動が存在することを意味するためである。また、会計関連表は行動による状態変数の変化を一覧化しているため、主体の行動によってモデル全体で生じる金銭上の変化を参照しながらモデルを構築することができる。当然のことながら、金銭上の系を伴わない意思決定上の系のみ行動も存在するが、それらは単一の系で完結する行動であるため構造が比較的複雑になりにくく会計関連表のような補助を必要とせずに設計できる。

また、資金ショートが生じるような場合の例外処理の作業についても有効に機能する。シミュレーションプログラムにおける複式簿記の導入と併せて、会計関連表を用いることで、個々の変数を一時

金のように分割することができるため、意思決定の時期を特定の箇所に集めやすくなる。そのため、モデル設計段階で意思決定のズレによって生じる資金ショートなどの例外処理の設置が少なくなる。

以上のことから、会計関連表を定義し補助としながらモデルを設計することで作業負荷を軽減することができる。また、この段階で定義した会計関連表は以降の各作業過程で有効に機能する。

#### 4.3.2 プログラミング過程での適用

プログラミング過程では前節で記した会計オブジェクトの導入と組み合わせることで作業負荷を大幅に軽減できる。会計関連表を関連名と、行われる仕訳処理の命令のレコードとしてシミュレーションプログラムに取り込むことで、図3に示すようにプログラミングを効率化できる。会計関連と取引金額で構成されたメッセージを受け取った会計管理オブジェクトは、関連名をキーにして会計関連表に仕訳内容を問合わせる。会計関連表は関連名と問合わせ主体が能動者か受動者かによって異なる仕訳を返す。会計管理オブジェクトは受け取った仕訳と取引金額を用いて科目クラスに処理を行う。この時、仕訳は表2のように科目種類と科目名、及び借方貸方が記載されているため、どの科目にどのような処理を行うかは自動化可能となる。以上の一連の流れで金銭上の系の処理が完了する。

この会計関連表に基づく構造は、会計管理オブジェクト群の作成以降、モデル内の要素や行動、科目が追加された際でも修正不要となる。新しい要素に伴い、新しい関連が生じた場合は、会計関連表に新しいレコードを追加し、実際に意思決定が行われる箇所で関連名に基づいて処理するように会計管理オブジェクト群にメッセージを送るのみで、金銭上の系は動作するようになる。

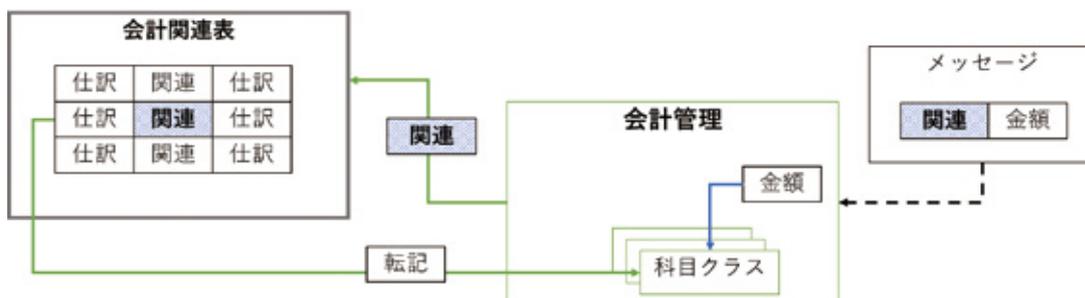


図3 会計管理オブジェクトと会計関連表の関係図

#### 4.3.3 シミュレーション過程での適用

各エージェントに保有されている会計管理オブジェクト群は前述の通り各科目オブジェクトを保有している。そのため、会計管理オブジェクトから一律で特定の科目の残高や増減分を収集する構造を構築すると容易に経済指標を収集することが可能となる。エージェントの種別ごとに経済の中で果たす役割や、所属セクターに応じて保有している科目が、経済指標のどの構成要素であるかを定義することで、シミュレーション中に生じた現象に応じて、必要な経済指標の取り出しを容易に行うことができる。この機能を内包させる場合は勘定科目の種類ごとに科目IDを作成し、エージェントの役割や所属セクターに割り振ったIDと組み合わせて、統計IDとして管理することで実現できる。図4に示すように、データ集計オブジェクトは必要な統計データを構成する統計IDと、残高や増加分などの当該統計IDのデータから取り出すデータの種別を保有している統計用辞書に問い合わせをし、必要なデータを全会計管理オブジェクトから収集する。この構造は科目クラスを用いるため、会計関連表に問い合わせして仕訳と転記を行う前項の構造と同様のものである。そのため、新しい統計情報が必要になった場合は統計用辞書に集める統計データのIDとデータ種別を定義することで、プログラム上の修正を

せずに新しい統計を収集することができる。

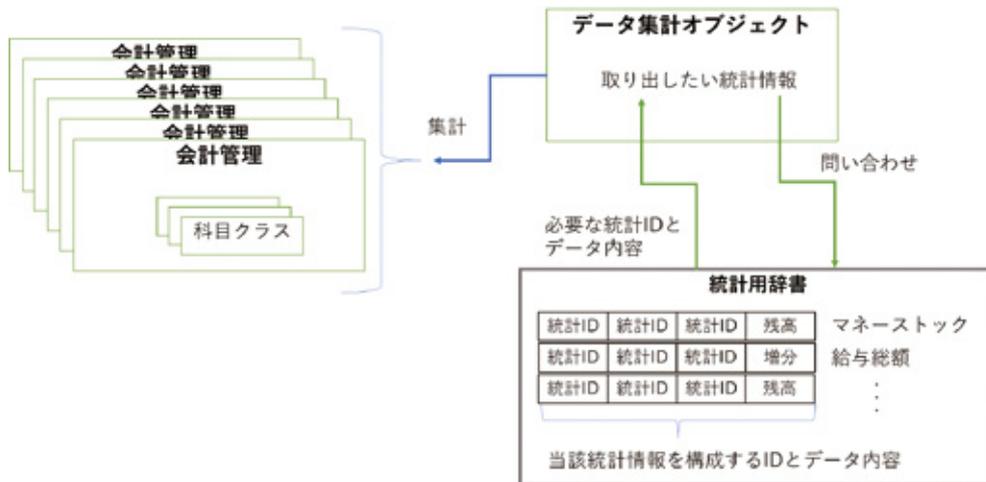


図4 統計データ収集構造の概念図

#### 4.3.4 成果公表過程での適用

最後に会計関連表は成果公表の記述について大きな効果を発揮する。例として後述するサンプルモデルの会計関連表を表3に示す。表3は表2で説明したモデル設計までを目的とした会計関連表と異なり、成果公表用の資料としてエージェント間の関係と内部状態の変化を提示するための例として記している。そのため、予算金の計上のような自エージェント内での科目の振替行動については記載していない。

表3に示すように、会計関連表を一枚用いることで金銭上の系について、誰が何を行い、状態変数がどのように変化するかを誤認しにくいモデル記述となる。この表を参照しながら意思決定の数式等の記述を見ることで、エージェント間にどのような金銭上の変化が起きているかを認識しやすくなり、エージェント間の行動と相互作用について理解が促進される。ただし、会計関連表から情報を取得するためには4.2で記した表の構造の理解が必要となる。これについては前述した通り複式簿記の原理部分を理解するためのコストが低いこと、仕訳を理解していれば仕訳の左右で能動者と受動者の違いを認識できることを理解するだけであることから、表を読み取ることは難しくないと考えられる。

表3 サンプルモデルの会計関連表

能動 Agent	借料 目録	借料目	摘要	貸料目	貸料 目録	会計関連	借料 目録	借料目	摘要	貸料目	貸料 目録	受動 Agent
家計	費用	消耗品_R	消耗品購買_R	消耗品購買予算金	資産	HtR消耗品購買	費用	売上原価	製品販売_H_消耗品	製品	資産	小売企業
家計	負債	未払い所得税	未払い所得税支払	納税予算金	資産	所得税支払い	資産	税金	製品販売_H_消耗品	製品売上_H_消耗品	収益	小売企業
家計	資産	預金	預金預入	現金	資産	預金預け入れ	資産	現金	所得税受取	受取所得税	収益	政府
家計	資産	現金	預金引出	預金	資産	預金引き出し	負債	預かり預金	預金預かり	預かり預金	負債	銀行
企業	負債	未払い法人税	未払い法人税支払	納税予算金	資産	法人税支払い	資産	現金	法人税受取	受取法人税	収益	政府
企業	負債	未払い固定給与	固定給支払	固定給予算金	資産	固定給与支払い	資産	現金	固定給受取	受取固定給与	収益	家計
企業	負債	未払いボーナス	ボーナス支払	ボーナス予算金	資産	ボーナス支払い	資産	現金	ボーナス受取	受取ボーナス	収益	家計
企業	資産	預金	預金預入	現金	資産	預金預け入れ	資産	現金	預金預かり	預かり預金	負債	銀行
企業	資産	現金	預金引出	預金	資産	預金引き出し	負債	預かり預金	預金引出	現金	資産	銀行
企業	資産	現金	長期借入	長期借入金	負債	長期借り入れ	資産	長期貸出債権	長期貸出債権	現金	資産	銀行
企業	資産	現金	短期借入	短期借入金	負債	短期借り入れ	資産	短期貸出債権	短期貸出債権	現金	資産	銀行
企業	負債	未払い利息(設備)	利息支払	未払い利息予算金	資産	利息支払い	資産	現金	貸出利息受取	受取利息	収益	銀行
企業	負債	長期借入金	長期借入返済	借入返済予算金	資産	長期借り入れ返済債	資産	現金	長期返済金受け取り	長期貸出債権	資産	銀行
企業	負債	短期借入金	短期借入返済	借入返済予算金	資産	短期借り入れ返済債	資産	現金	短期返済金受け取り	短期貸出債権	資産	銀行
小売企業	資産	製品	販売製品購入	現金	資産	RtoM販売製品購買	費用	売上原価	製品販売_R_製品	製品	資産	製造企業
小売企業	資産	設備	設備投資	現金	資産	RtoE設備投資	費用	現金	製品販売_R_製品	製品売上_R_製品	収益	製造企業
製造企業	費用	売上原価	製品販売_H_消耗品	製品	資産	製品販売_H_消耗品	費用	売上原価	製品販売_R_製品	製品	資産	製造企業
製造企業	費用	現金	設備売上	収益	設備企業	設備売上	費用	現金	製品販売_R_製品	製品	資産	製造企業
政府	負債	未払い固定給与	固定給支払	固定給予算金	資産	固定給与支払い	資産	現金	固定給受取	受取固定給与	収益	家計
政府	費用	企業補助金	企業補助金支払	企業補助金予算金	資産	企業補助金支払い	資産	現金	補助金受取	受取補助金	収益	企業
政府	費用	失業補償	失業補償支払	失業補償予算金	資産	失業補償支払い	資産	現金	失業補償受取	受取失業補償	収益	家計
政府	費用	国債	国債支払	国債予算金	資産	国債支払い	資産	現金	国債受取	受取国債	収益	家計
政府	費用	消耗品_R	消耗品購買_R	消耗品購買予算金	資産	GtoR消耗品購買	費用	売上原価	製品販売_G_消耗品	製品	資産	小売企業
小売企業	費用	現金(金利)	利息支払	支払利息予算金	資産	金利利息支払い	資産	現金	製品販売_G_消耗品	製品売上_G_消耗品	収益	小売企業
銀行	費用	支払利息(金利)	利息支払	支払利息予算金	資産	金利利息支払い	資産	現金	預金利息受取	受取預金利息	収益	家計
銀行	費用	支払利息(金利)	利息支払	支払利息予算金	資産	金利利息支払い	資産	現金	預金利息受取	受取利息	収益	企業

## 5. 会計関連を用いたモデル構築事例

会計関連を用いた ACE 人工経済のサンプルモデルの概要を図5に示す。サンプルモデルは研究対象によって変化するエージェントや要素の拡張を想定しているため、図5は事例としての構造である。例えば、企業群の中で小売企業と製造企業が財と購買金を取引している。このモデル内に、さらに原材料製造企業を追加し、原料と購買金を取引するような構造に変更することもできる。

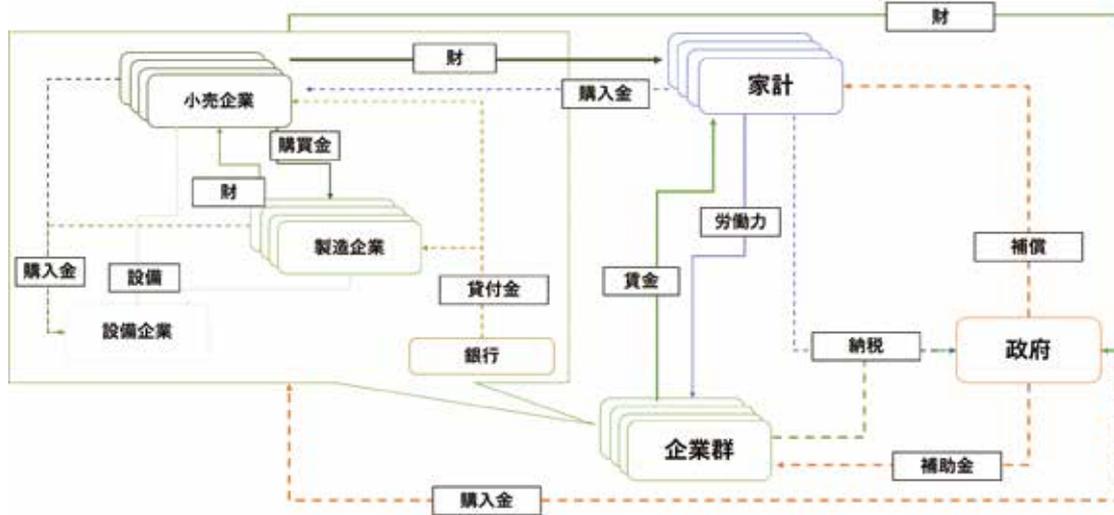


図5 マクロ経済サンプルモデルの概念図

本研究はモデルを用いた実験結果を示す研究ではないため、意思決定に関する数式などの具体的なモデル記述を行っていないが、表3と図5を用いることで金銭上の系における循環構造の全体を把握することができる。実際の実験研究の成果報告などでは、例えば家計が企業から財を購入する際の意思決定についてのモデル記述を確認することで、どのような条件で意思決定し、その結果、誰にどのような影響が起きるのかを把握することができる。

また、サンプルモデルのコードでは、これらのエージェント間の意思決定と金銭上の取引が行われた際は図6に例示する挙動を行っている。まず、家計は自身の総勘定元帳から購入原資にあたる科目に問い合わせを行い、購入予算金額を決定する。この処理は前述したようにシステム内での意思決定のタイミングを集中させるために、本モデルでは期首に前期所得に応じて消費関数で予算額を定め、消耗品購入予算金に振替を行っている。その後、購買を行うタイミングで、消耗品購入予算金の元帳に問い合わせを行い市場で購買可能な製品がある場合に、家計は購入可能な財に購買のメッセージを送る。メッセージは財を経由して当該製品を販売している企業に送られる。企業はメッセージを受信すると会計管理オブジェクト群にメッセージを送付し、会計管理オブジェクト群は会計関連表に該当する会計関連（表3のHtoR消耗品購買）の仕訳を問い合わせる。会計関連表から仕訳を受け取った会計管理オブジェクト群は自身の総勘定元帳に転記を行う。

また、同様の処理を家計側のエージェントでも行うことで、家計が消耗品を購入するというイベントの金銭上の処理は終了する。この処理において、会計管理オブジェクトを構築していた場合、購入の意思決定以降の処理については、財オブジェクトが両エージェントに会計関連名と金額を伝えるだけとなる。したがって、新しく異なるエージェントの売買をモデルに内包した場合も、金銭上の処理は買った側と売った側に関連名のメッセージを送るだけで済む。

尚、図6の例では家計が購入する意思決定を財オブジェクトに送った際に、財が両者に向けてメッセージを送っている。これは財オブジェクトが購入意思を伝えてきた家計と、生産者である企業の両

方のシステム上のアドレスを把握できるオブジェクトであるためである。エージェント間で金銭以外の実体が移動する際などは、両者のアドレスを保有することになる実体を表すオブジェクトにメッセージを送らせると管理が容易になる。

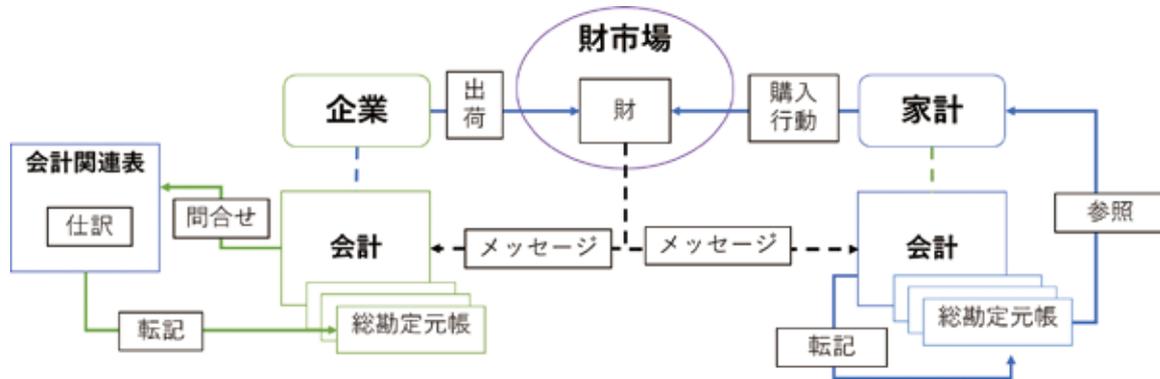


図6 取引時のエージェントと会計オブジェクト

## 6. まとめと今後の課題

本研究では ACE 研究遂行の上での問題点を挙げ、ACE 研究の促進のために、会計簿記の考え方や機能性を拡張してモデルの設計図、プログラム構造、モデル記述に至るまで作業効率を向上させる会計関連を用いたフレームワークを提案した。また、会計関連を用いて構築している ACE 人工経済モデルのサンプルモデルについて紹介を行った。

会計関連を用いたフレームワークは、ACE 研究を行ううえで欠かすことができない一方で、最重要点ではない金銭上の系の作業負担を削減させることができる。さらに、会計関連表は作業負担軽減以外に、エージェント間の金銭の移動を正確に記載する設計図として利用することができるため、Caiani が指摘するようなモデルの正確性を確保するためのセクター間の会計記述を支援するツールとなりえる。また、C++ や Java などのプログラミング言語でモデルを構築する際や、Netlogo などのモデリングツールにも構造上、追加することが可能である。加えて、ODD プロトコルについても ACE 研究については会計関連表を拡張的に記載することで、より正確で誤認のないモデル記述を達成することができると考えられる。これらはすべて先行研究の取り組みを阻害することなく、拡張的にモデリングやプログラミング、シミュレーションの作業効率を向上することが可能となる。

今後の課題として、会計関連表を設計することで、表計算レベルでエージェント間の架空取引を行い設計段階で金銭上の系の問題点を検知するシステム、エージェントのセクター間の資金の流れを一覧化するシステムを構築することで利便性の向上を図っていく。また、最終的に会計関連表を設計することで、C++、JAVA、Netlogo などで ACE のマクロ経済モデルの金銭上の系の部分までを自動的に生成するシステムの構築を行い、会計関連フレームワークの利用を促進していく。

## 謝辞

本研究は、公益財団法人 全国銀行学術研究振興財団の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] 寺野隆雄. “エージェント・ベース・モデリングの楽しさと難しさ.”, 横幹〈知の統合〉シリーズ編集委員会. 社会シミュレーション—世界を「見える化」する. 東京電機大学出版局, 2017, 17-31.
- [2] Gilbert Nigel, Troitzsch G Klaus. “社会シミュレーションの技法 政治・経済・社会をめぐる指向技術のフロンティア.”, 日本評論社, 2003.

- [3] Bookstaber Richard. “経済理論の終焉 金融危機はこうして起こる.” パンローリング株式会社, 2019.
- [4] Schelling Thomas. “Models of Segregation.” *American Economic Review*, 1969, 59, 2, 488-493.
- [5] Axelrod, Robert. “The Evolution of Cooperation.” New York: Basic Books, Inc., Publishers, 1984.
- [6] Epstein M Joshua, Axtell Robert. “人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション.” 共立出版, 1999.
- [7] 岡田勇, 山本仁志. “第8章 社会シミュレーション”. 鳥海不二夫. “計算社会科学入門”. 丸善出版株式会社, 2021.
- [8] Farmer J. Doyne, Foley Duncan. “The economy needs agent-based modelling.” *Nature*, 2009, 460, 7256, 685-686.
- [9] Klein Dominik, Marx Johannes, Fischbach Kai. “Agent-based modeling in social science, history, and philosophy. An introduction.” *Historical Social Research/Historische Sozialforschung*, 2018, 43, 1, 7-27.
- [10] Tesfatsion Leigh. “Agent-Based Computational Economics: Overview and History.” IOWA STATE UNIVERSITY Department of Economics ECONOMICS WORKING PAPERS. 2021. Working Paper.
- [11] Fagiolo Giorgio, Andrea Roventini. “Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models redux: New developments and challenges ahead.” 2016. SSRN 2763735.
- [12] Gatti Delli, Jakob Grazzini. “Rising to the challenge: Bayesian estimation and forecasting techniques for macroeconomic Agent Based Models.” *Journal of Economic Behavior & Organization*, 2020, 178, 875-902.
- [13] Stiglitz E. Joseph. “Where modern macroeconomics went wrong.” *Oxford Review of Economic Policy*, 2018, 34, 1-2, 70-106.
- [14] Dosi Giovanni, Andrea Roventini. “More is different... and complex! the case for agent-based macroeconomics.” *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, 29, 1, 1-37.
- [15] YellenL,Janet. “Macroeconomic research after the crisis.” October 2016. Speech by Chair Janet L. Yellen at “The Elusive ‘Great’Recovery: Causes and Implications for Future Business Cycle Dynamics” 60th annual economic conference sponsored by the Federal Reserve Bank of Boston. Boston, Massachusetts. 2016. <https://www.federalreserve.gov/newsevents/speech/yellen20161014a.htm>
- [16] Tesfatsion Leigh. “Introduction to the special issue on agent-based computational economics.” *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2001, 25, 3-4, 281-293.
- [17] Tesfatsion Leigh. “Modeling economic systems as locally-constructive sequential games.” *Journal of Economic Methodology*, 2017, 24, 4, 384-409.
- [18] 藤岡正樹, ほか. “津波避難対策のマルチエージェントモデルによる評価.” *日本建築学会計画系論文集*, 2002, 67, 562, 231-236.
- [19] Tesfatsion Leigh. “Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory.” *Handbook of computational economics 2*. 2006, 831-880.
- [20] 米納弘渡, 和泉潔. “リスク管理が市場リスクをもたらすか：高頻度・大規模な人工市場シミュレーション.” *研究報告知能システム*, 2017-ICS-186, 4, 1-6.
- [21] Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Gallegati, M., Kinsella, S., & Stiglitz, J. E. “Agent based-stock flow consistent macroeconomics: Towards a benchmark model.” *Journal of Economic Dynamics and Control*, 69, 375-408.
- [22] Tissue Seth, Wilensky Uri. “Netlogo: A simple environment for modeling complexity.” *International conference on complex systems*. 2004, 21.
- [23] DawidH, ほか. “The eurace@ unibi model: An agent-based macroeconomic model for economic policy analysis.” SSRN, 2012.
- [24] Barton C D, ほか. “Aspen-EE: an agent-based model of infrastructure interdependency.” Sandia National Laboratories, 2000. SAND2000-2925.
- [25] Seppecher Pascal. “Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money.” *Macroeconomic Dynamics*, 2012, 16, S2, 284-297.
- [26] GRIMM, Volker, et al. “The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism.” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2020, 23, 2,.
- [27] 大橋慶士, ほか. “基礎から学ぶ簿記原理.” *税務経理協会*, 2004.

- [28] 出口 弘, 高木晴夫, 木嶋恭一. “複雑系としての経済学—自律的エージェント集団の科学としての経済学を目指して.”  
日科技連出版社, 2000.
- [29] 友岡賛. “会計学原理.” 税務経理協会, 2012.