

財市場を内包した Agent-based Computational Economics の構 に関する一提案

a proposal for building Agent-Based Economic Model that includes the goods market

高島 幸成¹ 八木 勲²

Kosei Takashima¹, Isao Yagi²

¹長岡大学

¹NAGAOKA UNIVERSITY

²工学院大学

²KOUGAKUIN UNIVERSITY

Abstract: Agent-Based Modeling(ABM)アプローチを用い、経済現象を分析する研究手法に Agent-based Computational Economics(ACE)がある。ACE の中でも、財市場を内包するマクロ経済モデルは経済活動を模倣するため、モデル上でエージェントや財などの実体を伴う意思決定の系と、金銭上の取引の系の2つを必要とする。そのため、モデルの構造が複雑となり、シミュレーションプログラムの実装が困難になる。本発表は ACE 研究における、モデル構築からシミュレーション実験までの困難性を排除することを目的にして、会計簿記の考え方を拡張した会計関連モデリング提案について述べる。また、会計関連のモデリングを実際に適用して、主要な取引環境として財市場を内包する家計、企業、政府からなるマクロ経済のベースモデルについて紹介する。

1. はじめに

Agent Based Modeling (ABM) の手法を用いて、経済現象の再現やメカニズム、シナリオの分析に用いる手法に Agent-based Computational Economics (ACE) がある。ACE は 2000 年代から研究が活発化するとともに、2010 年以降は急速に研究が行われている分野である。しかし、ACE はモデルが複雑なため、モデリングおよび、シミュレーションのためのプログラミングに困難が伴う。また、その研究成果を公表する段階にあっても複雑さゆえにモデルの記述や説明に困難が伴う。そこで本稿はこれらの問題点を解消する手段として、会計簿記の記述を取り入れたモデリング手法を提案する。

本稿は 2 章で ACE についての概要を述べるとともに、3 章で ACE 研究に取り組む際の困難性・問題点を挙げる。また、4 章でその解決手段の一つとして会計概念を拡張したモデリング手法について述べる。最後に 5 章でモデリング手法を用いたマクロ経済モデルの事例について紹介する。

2. ACE についての概要

ACE は ABM アプローチの浸透に合わせて、徐々に取り込まれるようになった研究領域である。

Chen[1]によれば少なくとも3名のノーベル経済学賞受賞者が ACE 分野に関わる、もしくは直接的に取り組んでいるとしている。また、Stiglitz[2]も直接的に ACE 研究に携わるなど著名な研究者が取り組む事例も見られる。

経済分野における ABM アプローチの適用は Fagiolo[3]によれば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。ABM アプローチを経済分野に適用し、計算機を用いて実験を行う手法に対して、ACE の名称をつけた Tesfation[3]によると 2000 年以降に特集号が組まれるなど研究が活発化していることが伺える。一方、Gatti[5]によれば実質的に経済学者が本格的に ABM を適用し始めたのは 2007 年の金融危機以降のことであるとしている。この Gatti の主張は金融危機に際し、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つたため[6, 7]、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。

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[8]。そのため、ACE に携わる研究者は、この 3 つの領域から ACE に着目した研究者、及び社会科学に対する ABM アプローチから着目した研究者など多方面にわたる。

結果、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[3]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。

また, Tesfason[9]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.エージェントの自立性, 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。

これらの定義以外にもいくつかの先行研究で ACE の特徴が挙げられている[5, 7, 10]。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. 個々の意思決定主体をモデル化するボトムアップ型のモデルであること
2. エージェントが異質であること
3. エージェントが適応的であること
4. エージェントの行動規範に自由性があり、進化する性質を持っていること
5. エージェント間が相互作用すること
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

3.ACE 研究の困難性と問題点

ACE は既存のアプローチに対して、平衡モデルよりも広い範囲の非線型動作を処理でき[10]、ミクロからマクロまでの幅広い経済システムに適用することが可能な[11]、新しい可能性をもたらすアプローチであるといえる。しかし、ACE に取り組もうとする研究者にとって、いくつかの障害が存在している。この障害は 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生じる。特に個々のエージェントからマクロ経済現象を対象にしようとする、マクロ経済モデルではこの傾向が顕著になる。

3.1 モデリング段階の障害

モデリングの段階については、前述の通り経済構造を模倣するモデルであるため、モデルの内容が複雑になりやすい点が障害となる。この障害が生じる

理由として、購買や生産などのイベント時に財などの実体の移動を伴うエージェントの意思決定に関する系と、実際に財を取引した際に行われる金銭上の取引の系の 2 種類の系が併存するためである。

行動に関する意思決定には限定合理性を伴うファジィさが含まれる。一方、その意思決定によって行われた取引には厳密な金銭管理が求められる。つまり、エージェントの 1 つの行動というイベントの中でこれら二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。

さらに、これらの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。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複雑性が高い。

特に、家計の所得が企業の給与から得られ、企業の売り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煩雑なものになる。

さらにマクロ経済モデルは、個々のエージェントのモデリングの複雑性に加えて、マクロ観点でのモデル構造としても複雑さを抱えている。Caiani[2]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によって無視できない影響を及ぼしているとしている。

3.2 プログラミング段階の障害

プログラミングの段階では 3.1 節で示した複雑なモデル構造をシミュレーション可能な状態にプログ

ラミングする必要があり、困難性を伴う。特に変数の数は膨大になりやすく、これらを管理しながらモデルを構築するには困難が伴う。

例えば、ある家計の状態変数を考慮すると、資産を表す変数だけでも、現金、預金、製品、債券、株式などの多岐にわたる。さらに、これらの変数はその数値が生成された時期と、その数値が必要とされる時期がモデル内で大きく異なることが多々ある。例えば、現金のような資産は意思決定時の指標として利用されやすいが、財を購入する際はその時点の残高を必要とする。一方、期首などに投資の意思決定などを判断させる際には、前期首と前期末の残高の差異などを指標にすることがある。そのため、ある程度の期間、状態変数を保有しておかなければならない。

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ため[12]、研究者の間口を広くすることができない。この問題点に対処するために、Netlogo[13]、EURACE[14]、ASPEN[15]、Jamel[16]、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、これらは構造が定まっており、研究者の着想を思い通りに具現化できないことや、データ取得に独特の手順を要するなどの制約が存在する。この制約に対して、拡張余地が設けられているが、高いプログラミング能力を要するため参入障壁を取り除き切っていない。

3.3 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。この際、個々のエージェントが保有している変数が個別に定義されている場合、情報を収集する機構自体が複雑になる問題点がある。実験段階で出現した現象の詳細を分析するために、別の指標を集計しようとする場合などが顕著である。前述したようにモデル、およびそれを実現するプログラムが複雑なため、新しく情報収集のサブシステムを追加することが困難になり、研究の作業進捗を遅らせることになる。また、マクロ経済モデルでは多くのエージェントから関連する変数を集計して経済指標を計算するため、計算ミスも生じやすい。

3.4 結果公表段階の障害

研究結果の公表を行う際もモデルの複雑性が障害として現れる。上述したように、複数のエージェントがそれぞれ行動ルールと、状態変数を保有する。そのため、モデルのすべてを文章、数式、図で説明すると非常に長大な文章になる。近年、Web ジャー

ナル等で誌面の制約は取り除かれつつあるが、通常の学会誌などでは誌面制約は取り除かれていない。そのため、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がある。これはDosi[7]が ACE の問題点として挙げる再現性の指摘にもつながる。

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の記述方法についても、著者によって書き方が異なることも問題点となる。記述方法や記述の順番が研究によって異なるため、著者の意図した内容が読者に伝わらないことがある。

この問題点に対して、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[17]が提唱されている。ODD プロトコルはモデルの説明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小さくすることができている。しかし、ODD は ACE だけではなく、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ている。そのため、記述規則に余裕を持たせており、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相互影響が多岐にわたるため、それぞれの関係を認識しづらいという問題点もある。

4. 会計関連を用いたモデリング

ACE 研究を実行する上で、複式簿記の概念導入はこれらの障害を取り除くことができる。複式簿記はストックとフローの値の変化を、5 つの科目グループと、借方貸方という記述位置の規則によって、同時に記録する構造を持っている。そのため、金銭上の系における状態変数の記録や管理において優れた効果を発揮する。

この複式簿記的なストックとフローの表現方法の導入は、出口[18]が会計記法をさらに発展させ交換代数によるモデリングを提示している。また、Caiani[2]は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なくすことができるとしている。

これらはモデルの正確性について、会計の技術を用いた研究である。本研究では、これに加えて ACE モデルへの会計概念の導入が、研究作業の効率化にも効果的な役割を果たすことができると考える。具体的には 1.複式簿記の導入による金銭上の系の自動化と、2.会計簿記の記法をモデル全体に拡張することによるフレームワーク化の 2 段階が挙げられる。

4.1 複式簿記の自動化

複式簿記の導入による金銭上の系の自動化は、シ

ミュレーションプログラムの効率化を図ることができる。これは複式簿記の記録方法を保有する会計オブジェクトを各エージェントに保有させることで実現できる。会計オブジェクトはエージェントの行動に応じて、金銭上の取引にかかわる処理を記録、管理する。例えば、家計エージェントが消費のために製品の購入を行った際には、現金（資産）を減じ、消費（費用）を増やす。

複式簿記は金銭上の変化を記録する上で、厳密で強力な状態記述の方法である。この記述方法は金銭的な変化において、どのエージェントにも適用できる。そのため、仕訳、総勘定元帳への転記、決算までの一連の処理を自動化することで、すべてのエージェントで共通で利用できる。また、計算機シミュレーションであるため、仕訳から総勘定元帳への転記までについては取引の発生時に同時に行うことができる。総勘定元帳は期首、現在、期末の残高を保有するため、金銭上の状態変数として参照ができる。つまり、複式簿記の記法を利用して、システムに落とし込むことで、金銭上の系に関して、厳密で正確な変数管理と、それを実現するための機構を利用した状態変数の保管、各エージェントでの機能の共通化を果たすことができる。

さらに、この機構を利用すると安全に変数を分割することが可能になる。例えば、企業エージェントの法人税の支払いについて、期末の決算で金額が確定した後、支払いが翌期に行われる場合を考える。法人税の支払いが他のエージェントとの行動の兼ね合いから、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したとき、保有している資金がプログラム内でショートしないようにするためには、常に法人税の支払いを考慮させる必要が生じてくる。モデルが複雑になると、意思決定時と実際に金銭上の取引が発生する時期がずれ、その間に現金のようなストック変数は変質する。この対処法としては金銭の変数を分割する、意思決定時の計算で法人税額を差し引く処理を行う等があるが、構造が煩雑になってしまう。このような、時間差のある変数の利用についても、会計簿記を利用したデータ管理が有効になる。後の支払い義務が生じた場合は、その時点で法人税支払予算金等の現金を一時保管する資産科目を作成し、現金科目から振り替えておくことで、安全に変数の分割を行うことができる。

このため、金銭上の系の管理については会計オブジェクトの導入によってほぼ自動化ができ、3.2節で挙げたプログラミング上の困難性を排除することができる。

4.2 フレームワークへの拡張

会計簿記をプログラミングの自動化にとどめず、モデル全体に拡張することで、さらなる作業効率を図ることが可能になる。

ここである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を考える。仕訳は表1のような処理になる。尚、ここではモデル内の状態変数変化の記述を目的とするために、実際の簿記の記述とは異なり、日付と金額を記載していない。また、資産、負債、資本、売上、費用の勘定科目の5つのグループを科目種として表示している。さらに、摘要を中央に位置させている。

表1.企業エージェントの給与支払いの仕訳

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

表1の2行目は給与（費用）が増加し、現金（資産）が減少していること、及び摘要欄でどのような行動によってこの増減が生じたかを1行で示している。尚、仕訳の際の勘定科目5つのグループと借方貸方の配置による値の増減については簿記の基礎知識であるため説明を省略する。

この記述は、単体で見ると企業エージェントのストックとフローの状態変数の変化を記録したものである。しかし、モデル全体の観点から見ると、この仕訳の発生は、2者間の取引を伴うイベントが発生している可能性を意味する。つまり、ある仕訳はモデル内では、別のエージェントの仕訳による状態変数の変化を発生させていることになる。本研究では会計上の仕訳同士の関係を、モデル内のエージェント間の関連として定義することを会計関連とする。

会計関連は1つの取引で生じる2者の仕訳をつないだものである。そこで、会計関連を簿記と同様に左右に以下の1~4の規則を設けて設置する。すると、モデル内で金銭上の変化が生じるイベントの関係を一意に表形式で表す会計関連表としてまとめることができる。

1. 各仕訳の内容は摘要名と変化する科目、科目の種類とする（左から借方科目種類、借方科目名、摘要、貸方科目名、貸方科目種類、）
2. このイベントで能動的に行動するエージェントの名称と仕訳を左側に設置する
3. このイベントで受動的に行動するエージェントの名称と仕訳を右側に設置する
4. このイベントの名称（エージェント間の関連名）を中央に配置する

現在、作成しているマクロ経済のベースモデルで使用している会計関連表の一部を表2に示す。

表 2.会計関連表のサンプル

a												
エージェント	科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種	会計関連	科目種	借方科目	摘要	貸方科目	科目種	エージェント
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	費用	消耗品	消耗品購買	現金	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	企業

b1
b2

例として①では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（売上）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」と名付けている。

会計関連表では、表 2 の a を見ると能動的な主体と受動的な主体のエージェント種類と、その関係を示す定義を見ることができる。b1, b2 にはそれぞれのエージェントの仕訳を組み込んでいる。このため、エージェント間の関係と、その関係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。これはモデルの設計図として利用でき、モデル構築に先駆け会計関連表を定義することで、3.1 節で示したモデル構築の困難性を軽減することが可能となる。

また、会計関連表はプログラムと連動させることで、3.2 節で挙げたプログラミング時の作業負荷をさらに減らすことができる。会計関連表を読み込み、プログラム内に会計関連と、関連で用いられる仕訳をリストで保有させ、関連名から仕訳を読み込むことで金銭上の処理を自動化させることができる。金銭上の処理を複式簿記の方式で行うため、新しい行動を追加しても、会計関連表で関係を定義するだけで金銭上の系については新しいコーディングを必要としなくなる。

さらに、個々のエージェントが保有している会計オブジェクトは 4.1 節で述べた通り、科目ごとの総勘定元帳を保有している。この科目の属性と、エージェントの属性を組み合わせることで、当該科目が産業連関表などの経済指標を集計する際にどの値を構成しているかを識別することができる。そのため、シミュレーション実験中に新たに必要になったデータの収集が容易になり、3.3 節で挙げた障害を軽減することができる。

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。会計関連表は、誰が何をを行い、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になっている。これは複式簿記で利用される科目の概念と、借方貸方の配置による変数変化の規則を利用するためである。そのため、ACE 関連のモデル記述の規約に会計関連表を用いることで、金銭上の系に関して、エージェント間の関係についての誤認や齟齬はなくなるといってよい。

さらに会計関連はこれらの効果に加え、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機構となる。また、Netlogo などの既存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 研究については拡張的に記載することができる。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。

5. 会計関連を用いたモデル構築事例

現在、会計関連を用いて ACE 人工経済モデルのベースモデルを構築している。ベースモデルの概要を図 1 に示す。ベースモデルは必要なモデルに対して拡張を想定しているため、図 1 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。

これらのエージェント間では意思決定と行動に伴って金銭上の取引が行われる。図 2 に例示するように購買イベントの際、イベントに関係するエージェントが保有する会計オブジェクトにメッセージが送られる。会計オブジェクトは会計関連表にメッセー

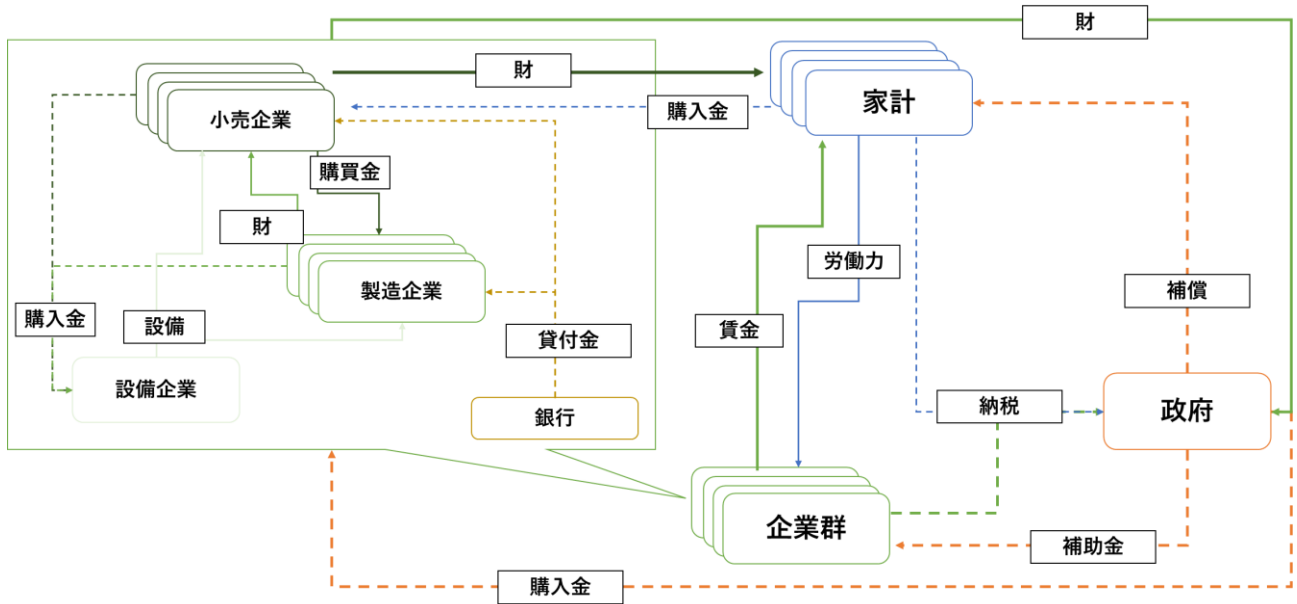


図 1.マクロ経済ベースモデルの概念図

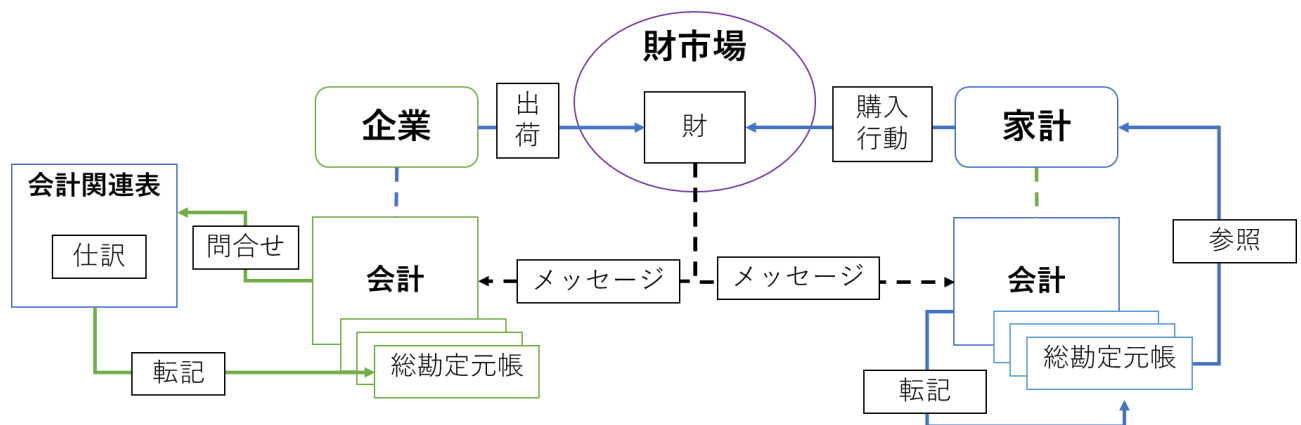


図 2.取引時のエージェントと会計オブジェクト

ジを問い合わせ、仕訳を受け取り、総勘定元帳に転記を行う。

会計関連表に仕訳の内容を保管しておくことで、エージェント間の関係（図 2 の例でいえば「消耗品購買」）をメッセージとして問い合わせると、仕訳と転記の方法を返す仕組みとなっている。また、そのようにして随時情報を更新している総勘定元帳に問い合わせることで、各エージェントは金銭上の状態変数を認識することができる。図 2 では家計が購入行動をした際に、影響を受ける財から各エージェントの会計オブジェクトにメッセージを発している。エージェント間で金銭以外の実体が移動する際は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。

6.今後の課題

本稿では ACE 研究遂行の上での問題点を挙げ、それらを解決するために会計関連手法を提案した。また、会計関連を用いて構築している ACE 人工経済モデルのベースモデルについて紹介を行った。今後の課題として、構築中のベースモデルを構築すること、及びその過程でエージェントの属性と科目の属性からマクロ経済指標への変数の関係を整理することが挙げられる。次に会計関連表を設定するだけで、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っていくことを予定している。

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] Chen, Shu-Heng, and Ying-Fang Kao. "Herbert Simon and agent-based computational economics." *Minds, models and milieux*. Palgrave Macmillan, London, 2016. 113-144.
- [2] Caiani, Alessandro, et al. "Agent based-stock flow consistent macroeconomics: Towards a benchmark model." *Journal of Economic Dynamics and Control* 69 (2016): 375-408.
- [3] Fagiolo, Giorgio, and Andrea Roventini. "Macroeconomic policy in DSGE and agent-based models redux: New developments and challenges ahead." *Available at SSRN 2763735* (2016).
- [4] Tesfatsion, Leigh. "Agent-Based Computational Economics: Overview and Brief History." (2021).
- [5] Gatti, Domenico Delli, and Jakob Grazzini. "Rising to the challenge: Bayesian estimation and forecasting techniques for macroeconomic Agent Based Models." *Journal of Economic Behavior & Organization* 178 (2020): 875-902.
- [6] Stiglitz, Joseph E. "Where modern macroeconomics went wrong." *Oxford Review of Economic Policy* 34.1-2 (2018): 70-106.
- [7] Dosi, Giovanni, and Andrea Roventini. "More is different... and complex! the case for agent-based macroeconomics." *Journal of Evolutionary Economics* 29.1 (2019): 1-37.
- [8] Tesfatsion, Leigh. "Introduction to the special issue on agent-based computational economics." *Journal of Economic Dynamics and Control* 25.3-4 (2001): 281-293.
- [9] Tesfatsion, Leigh. "Modeling economic systems as locally-constructive sequential games." *Journal of Economic Methodology* 24. 4 (2017): 384-409.
- [10] Farmer, J. Dooyne, and Duncan Foley. "The economy needs agent-based modelling." *Nature* 460.7256 (2009): 685-686.
- [11] Tesfatsion, Leigh. "Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory." *Handbook of computational economics* 2 (2006): 831-880.
- [12] Tesfatsion, Leigh. "Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up." *Artificial life* 8.1 (2002): 55-82.
- [13] Tisue, Seth, and Uri Wilensky. "Netlogo: A simple environment for modeling complexity." International conference on complex systems. Vol. 21. 2004. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml>
- [14] Barton, Dianne C., et al. "Aspen-EE: an agent-based model of infrastructure interdependency." *SAND2000-2925. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories* (2000).
- [15] Dawid, Herbert, et al. "The eurace@ unibi model: An agent-based macroeconomic model for economic policy analysis." (2012).
- [16] Seppecher, Pascal. "Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money." *Macroeconomic Dynamics* 16.S2 (2012): 284-297.
- [17] 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* 23.2 (2020).
- [18] 出口 弘. "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).