

意思決定主体間の関係性に基づくモデル統合による 社会システムにおけるマルチスケールモデリングの提案

○清水岳 貝原俊也 國領大介 藤井信忠 渡邊るりこ (神戸大学)

A proposal for multi-scale modeling in social systems
by integrating models based on relationships among decision-makers

*G. Shimizu, T. Kaihara, D. Kokuryo, N. Fujii and R. Watanabe (Kobe University)

概要— 多様な意思決定主体から階層的に構成される社会システムにおいて、合意形成の複雑化が問題であり多様なステークホルダの意思を反映可能なモデルが求められている。それに対して我々は、社会システムの構成要素に対し時空間スケールに適したモデル化が可能なマルチスケールモデリングに関する研究を行ってきた。本稿では、適切な時空間スケールで意思決定モデルを構築した後に行動規範と社会意識という意思決定主体間の関係性に基づきそれらを統合する手法を提案する。ケーススタディとして COVID-19 施策に対して提案手法を適用し、計算機実験によりその有効性を検証する。

キーワード: 社会シミュレーション, マルチスケールモデリング, System of Systems (SoS), 社会意識

1 はじめに

第6期科学技術・イノベーション基本計画では、システム間連携に基づく Society 5.0 (超スマート社会)の具体化が目標の一つとしてうたわれている。Society 5.0の特徴として、多様な意思決定主体を含む複数の社会システムより構成され、それらは社会共通のマクロレベルを媒介とし、メゾ・ミクロレベルにおいて様々な異種システムが混在するという System of Systems (SoS)の階層構造を有していることが挙げられる^{1,2)}。一方で、このような構造的な特徴による施策の影響範囲の拡大やステークホルダの価値観の多様化・対立から、複雑化する合意形成に対する意思決定支援技術が求められる³⁾。本稿で着目する社会システムモデリング・シミュレーションにおいては多様なステークホルダの意思を反映可能なモデルが必要となる。

我々は、社会システムの構成要素に対し時空間スケールに適したモデル化が可能なマルチスケールモデリングに関する研究を行ってきた⁴⁾。本稿では、社会システムに混在する意思決定主体を整理し適切な時空間スケールで構築した意思決定モデルに対して、2種類の関係性に基づく意思決定モデル統合手法を提案する。ケーススタディとして COVID-19 施策に対して提案手法を適用し、計算機実験によりその有効性を検証する。

2 意思決定主体間の関係性に基づくマルチスケールモデリングの提案

本章では多様なステークホルダの意思反映を目指したマルチスケールモデリングの提案を行う。

2.1 マルチスケールモデリングの概念

現実の多くの現象は広範囲の時空間スケールを包含している。一方で、従来のモデリング手法はあるスケールに焦点を当てたものである。つまりシステムのマクロな挙動に着目する場合はミクロな影響を境界条件としてモデル化し、ミクロな挙動に着目する場合はマクロレベルでの変化を均一なものとして仮定する。このような従来のモデリング手法は、マクロモデルにおいては精度、ミクロモデルにおいては効率性の観点から、広範囲の時空間スケールを包含する複雑なシステムに

対しては適用が困難である。そこで重要となるのが異なるスケールのモデルを同時に扱うモデリング手法であるマルチスケールモデリングの概念である。異なるスケールのモデルを組み合わせて用いることにより、分析対象の各レベルで求められる精度のモデルを効率良く実装できる。マルチスケールモデリングにより各レベルに合わせた分析に加えてシステム全体の包括的な分析が可能となるため、化学や材料科学などの理工系のあらゆる分野で有用であるとされている⁵⁾。

多様な意思決定主体から構成される社会システムにおいてもミクロレベルの個人行動に対しメゾ・マクロレベルで企業や行政が階層的に活動するマルチスケール性を持つ⁶⁾。社会シミュレーションの実施には、個人行動などのミクロモデルや産業構造などのメゾモデル、社会・経済政策などのマクロモデルをシームレスに接続したマルチスケールモデリングが必要となる²⁾。

2.2 提案手法の流れ

そこで本稿では、マルチスケールモデリングの概念に基づく異なるスケールの意思決定モデル統合手法を提案する。概要を Fig. 1 に示し流れを以下に述べる。

Step 1: 意思決定主体の整理と抽出

Fig. 1 の右部に示すように社会システムには多様な意思決定主体 (図中の政府, 企業, 個人など) が混在している。そこで SoS 分析フレームワーク⁷⁾によりシステムの構成要素を整理し、対象問題に存在する意思決定主体を抽出する。

Step 2: 意思決定主体のモデル化

Step 1 で抽出した意思決定主体を SoS の要素システムとみなし、各主体に適したスケール (図中の意思決定の影響範囲や時間間隔など) の意思決定モデルを持つエージェントとしてモデル化する。

Step 3: 意思決定モデルの統合

Step 2 で構築した意思決定モデルを行動規範と社会意識という意思決定主体間の2種類の関係性に基づき統合する。ここで全ての意思決定主体間に共有される社会意識をシステムダイナミクス (SD: System Dynamics) によりモデル化する。

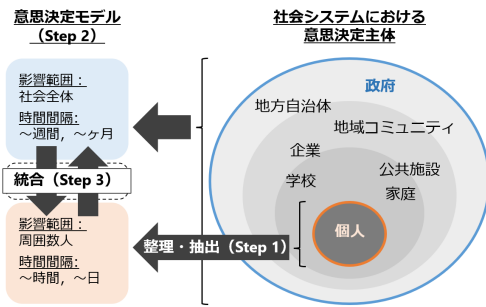


Fig. 1: 提案手法の概要

2.3 意思決定主体の整理と抽出

Step 1 では SoS 分析フレームワークによりシステム構成要素の整理を行う⁷⁾。以下にその手順を述べる。

Step 1-1: システムの構成要素を以下の 4 種類のカテゴリに分類する。

- Resources: システムの物理的な要素
- Operations: 物理的な要素の活動指針・手順
- Economics: 市場経済における非物理的な要素
- Policy: 物理的・非物理的な要素に影響を与える政策

Step 1-2: 各カテゴリ内における構成要素を時空間スケールの相対的な位置で数種類の階層に分類する。

ここで各カテゴリ内において下位の要素の集合が上位の要素を構成するという関係性を持つ。以上の手順によりカテゴリと時空間スケールという 2 種類の軸によりシステムの構成要素を整理することが可能となる。

上記のフレームワークにより対象システムの構成要素を整理した後、Resources の要素に着目することで様々なスケールの意思決定主体を抽出する。また同レベルの他カテゴリから当該主体の意思決定要因を特定する。具体的に Operations は意思決定主体の選択可能な行動や代替案を示し、Economics は行動や代替案を実行する際の経済的な評価指標となる。また Policy は意思決定主体が影響を受ける政策を示す。

2.4 意思決定主体のモデル化

Step 2 では Step 1 で抽出された各意思決定主体のモデル化を行う。本稿では多様なステークホルダの意思反映を目的としているため、エージェントの意思決定モデルを構築することで各主体の意思を直接反映可能なエージェントベースモデル (ABM: Agent Based Model) によりモデル化を行う。ただし Step 1 のフレームワークにおいて下位階層の要素の集合が上位階層の要素を構成するように、SoS 構造を持つ社会システムのモデル化には個々の主体とその集団における意思決定の関係性を定義する必要がある。個々の意思決定の相互作用として集団の意思決定を取り扱う研究としては、マルチエージェント強化学習や組織学習モデルなどが挙げられる。ただしこれらは集団の意思決定を個々の意思決定から創発させるため複雑な意思決定モデルが必要となり、また集団の意思決定をモデルに直接反映することができないことが課題である。

そこで本稿では、Step 1 で抽出された意思決定主体を、個々の要素システムが独立に動作できるという運用的独立性と、システムの管理権限を個々の要素システムが持つという管理的独立性を持った SoS におけるシステムと見なしてモデル化する。つまり個人のみならず会社や行政など集団としての組織も 1 体のエー

ジェントと見なしてモデル化を行う。これにより多様なステークホルダの意思をそれぞれに適切なスケールで反映することが可能となる。ただし各エージェントは、前節のフレームワークにおける階層によって入力や出力、意思決定のタイムスパンや影響範囲などのスケールが異なる意思決定モデルを持つ。

2.5 意思決定モデルの統合

Step 3 では Step 2 で構築した意思決定モデルの統合を行う。従来より、SD や ABM など複数のモデリング手法を統合して用いるハイブリッドシミュレーションにおけるモデル統合手法として、一方のモデルの出力を他方のモデルの入力とする Sequential 型や、モデル間で相互に入出力をやり取りする Interaction 型などが提案されてきた⁸⁾。しかし前節で述べたように意思決定モデルの時空間スケールが異なる場合、意思決定の影響範囲や時間間隔が異なることや、一個人の意思が行政の意思決定を直接変化させないといった主体同士の関係性から、一方のモデルの出力を直接他方のモデルの入力とすることはできない。したがって意思決定主体間の相互作用をモデルで表現するためには、モデル間の単純な入出力の接続ではなく、時空間スケールと意思決定主体間の関係性を考慮したモデルの統合が必要となる。そこで本稿では、Fig. 2 に示す社会システムにおける意思決定主体間の 2 種類の関係性を定義し、それらに基づきモデルを統合する手法を提案する。

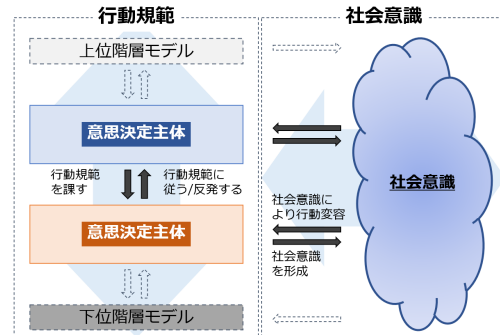


Fig. 2: モデル統合の概要

2.5.1 行動規範に基づくモデル統合

一般的にシステム-サブシステム間の関係性としてそれらの動作に対する制約が挙げられる。社会システムにおいてこの制約を「行動規範」と捉え、この意思決定主体間の関係性に基づきモデルを統合する (Fig. 2: 左)。上位階層の主体の意思決定結果が下位階層の主体の行動に関する規範となる。ここで規範とは社会で従うことが求められる行動の基準である。そのため意思決定主体はこれに必ず従うとは限らず、以降で述べる社会意識に基づき規範に従うかの意思決定を行う。

2.5.2 社会意識に基づくモデル統合

各主体は異なる時空間スケールで意思決定を行うため、この差を解消するため全ての意思決定モデルが参照可能な変数が必要となる。社会システムにおいてこれが「社会意識」と捉え、この意思決定主体間の関係性に基づきモデルを統合する (Fig. 2: 右)。ここで社会意識とは全ての意思決定主体に共有される社会全体の意識を表すものである。社会意識は環境問題や少子高齢化への意識など対象問題によって様々であり、同一対象においても複数存在することが考えられる。

これらは全ての主体の意思決定や活動の結果として形成され、また全ての意思決定主体の活動に影響を与えるというフィードバック構造を持ち、ABMにおけるミクロ・マクロリンクの一種であると捉えられる。ただし同一スケールのエージェント集合を扱う通常のABMとは異なり、本稿では異なるスケールのエージェントを扱うため、社会意識をモデル化するにはエージェントの時空間スケールによって社会意識の変動に与える影響の違いを考慮する必要がある。

2.5.3 社会意識のモデル化

本項では前項で定義した社会意識のモデル化を行う。本稿で提案する社会意識モデル化の流れを以下に示す。

Step 3-1: 社会意識の特定

対象とする社会課題において意思決定主体の活動に影響を与えると考えられる社会意識を特定する。前述したように対象問題により社会意識は1種類とは限らず複数特定されることもある。

Step 3-2: 意識の変化要因の列挙

Step 3-1で特定した社会意識が向上する、または低下する要因を列挙する。ここで要因となるものにはStep 2で構築した意思決定モデルの出力や、複数の社会意識同士の関係性、時間経過による影響などが考えられる。

Step 3-3: 諸要素に関する因果ループ図の作成

Step 3-1で特定した社会意識やStep 3-2で列挙した諸要素の関係性を把握するため、それらに関する因果ループ図を作成する。因果ループ図とは要素同士の因果関係を有向グラフとして表現し、システムのフィードバック構造を定性的に分析する方法である⁹⁾。

Step 3-4: 因果ループ図からSDへの変換

Step 3-3で作成した因果ループ図はシステムの構造を定性的に分析する方法であるためシミュレーションで用いることができない。そこで因果ループ図を定量分析の方法であるSDへ変換する⁹⁾。ここでSDにおけるストックにはStep 3-1で特定した社会意識を設定し、社会意識の向上及び低下がフローとなる。

社会意識の変化要因となる指標は離散的に変化するのに対して、社会意識は連続的に変化するものであると捉えることができる。そこでSDのストックを用いることで社会意識を連続的に変化するものとしてモデル化することが可能である。またそれらの指標は異なるスケールの意思決定モデルから出力されるものを複数含む場合があるが、ストックは積分値を取るため、SDにより社会意識をモデル化することでそれらの時空間スケールの差を吸収することが可能である。

また社会意識は抽象的な概念であるため、これらのプロセスにはモデル作成者のみではなく対象とする社会課題に関するステークホルダー間で認識を共有しつつモデル化を進める参加型アプローチが必要である¹⁰⁾。

3 COVID-19 施策への適用

本章ではCOVID-19施策をケーススタディとして前章の提案手法を適用し意思決定主体のモデル化とそれらの統合を行う。

3.1 対象問題

本稿では、COVID-19の感染拡大及びそれに伴う外出型消費の減少という課題に対する社会全体での合意形成を行う状況を想定する。日本の小規模都市を対象とし、都市内には会社や学校といった人々の生活に関する施設が存在する。対象都市で生活する多様な属性を持つ人々を、世帯構成復元手法を使って全国の市町村人口を推定した合成人口データ¹¹⁾によりモデル化する。ただし対象都市からの人口流出と他都市からの人口流入はないものと仮定する。

3.2 意思決定主体の整理と抽出

対象問題に対して2.3節で述べたSoS分析フレームワークを適用した結果をTable 1に示す。Resourcesの列に着目することで α レベルの市民、 β レベルの会社、店舗、学校、病院、ワクチン接種会場、 γ レベルの自治体という様々なレベルの意思決定主体を抽出できる。ここで β レベルの各主体をまとめて組織と呼ぶ。また各主体の意思決定要因として、Operationsに着目することで選択可能な行動や代替案を、Economicsに着目することで経済的な評価指標を、Policyに着目することで活動に影響を与える政策を把握することができる。

Table 1: SoS 分析フレームワーク適用結果

	Resources	Operations	Economics	Policy
γ	自治体	感染抑制策 医療提供体制 ワクチン接種事業	予算 政策費用	—
β	会社 店舗 学校 病院 接種会場	組織運営 医療サービス提供	予算 利益 運営費	在宅勤務 時短営業 休校措置 病床確保 ワクチン分配
α	市民	外出 ワクチン接種	消費金額 医療費	外出制限 ワクチン接種推奨

3.3 意思決定主体のモデル化

本節では前節で抽出した意思決定主体をエージェントとしたABMを構築する。 α レベルの市民は社会システムにおいてミクロな主体であり、相互作用によりボトムアップ的に創発現象を発生させるためミクロモデルとしてモデル化する。 β レベルの組織は市民の活動環境となり数人から数百人の集団となるためメゾモデルとしてモデル化する。 γ レベルの自治体はマクロな変数を基に意思決定を行い、社会システムに対してトップダウン的に影響を与えるためマクロモデルとしてモデル化する。以降で各モデルについて述べる。

3.3.1 ミクロモデル

市民の意思決定及びその相互作用をミクロモデルとしてモデル化する。世帯や組織が存在する小学校区を想定した複数のエリアからなる仮想都市で市民が生活しているものとする。市民集合を $Citizen = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_{CN}\}$ とし、市民 c_i はCOVID-19への危機感を表すパラメータ cs_i^{cit} に従い意思決定を行う。

市民の種類と行動

市民を合成人口データの属性により4種類（正規雇用者、非正規雇用者、学生、その他）に分類し、それぞれ異なる行動をとる。市民は後述するCOVID-19の症状がない場合、複数の目的地を持つ。市民はその種

類により行くことができる場所が定められており、その場所ごとに外出率 $or_i(t)$ と場所別の確率 r_i の積により目的地とするかを判定する。1つ以上の目的地を持つ市民は外出し、店舗では1回あたり $money$ 円消費する。そして全ての目的地を訪れ、滞在した後帰宅する。

病態遷移と感染伝播

COVID-19を対象にエージェントシミュレーションを行った文献¹²⁾を参考にし、市民はFig. 3に示す7状態を持つ。他エージェントへの感染力は軽症または無症状に遷移する2日前から回復するまで持ち、自宅及び外出先で定められた確率 (= 接触率 cr * 伝播率 tr) により感染伝播する。ただし症状がある市民は外出せず、自宅療養率 hr に従って同居人に対して感染伝播を起こす自宅療養または病床に空きがある場合は入院する。また市民はワクチン接種により発症率 p_i^{sym} 及び重症化率 p_i^{sev} を低下させることができる。本稿では、ワクチンが高い発症・重症化予防効果を持ち p_i^{sym} , p_i^{sev} ともに90%低下させることができると仮定する。

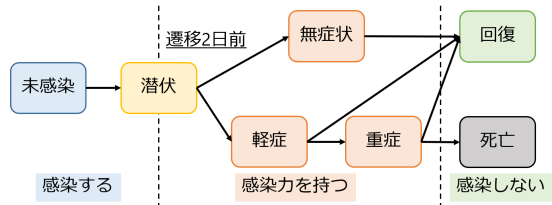


Fig. 3: 市民の病態遷移

3.3.2 メゾモデル

市民の活動環境となる組織をメゾモデルとしてモデル化する。組織集合を $Organization = \{o_1, o_2, \dots, o_j, \dots, o_{ON}\}$ とし、組織 o_j は市民と同様に COVID-19 への危機感を表すパラメータ cs_j^{org} に従い意思決定を行う。ここで cs_j^{org} には当該組織内でランダムに選択された従業員 c_i の cs_i^{cit} を適用する。

組織の種類

組織は3.2節で抽出した以下の5種類に分類される。

- 会社：正規雇用者と非正規雇用者の職場となる。
- 店舗：会社のうち市民が消費を行う場所となる。
- 学校：住所と年齢により割り当てられた学生が通う場所となる。
- 病院：軽症・重症状態のうち入院を希望する市民が入院する場所となる。
- ワクチン接種会場：自治体からワクチンを配分され、市民がワクチン接種を行う場所となる。

組織の意思決定事項

上記の組織のうち会社、店舗、病院は後述する自治体の事業を受けて意思決定を行う。それぞれの意思決定事項を以下に示す。

- 会社（店舗以外）：在宅勤務の導入
- 店舗：時短営業の実施
- 病院：COVID-19用病床の開放数

3.3.3 マクロモデル

自治体の意思決定をマクロモデルとしてモデル化する。対象問題における自治体はCOVID-19の感染抑制及び経済活性化を基本方針とする。自治体は基本方針の実現に向けて、政策体系¹³⁾に基づき政策（狭義）と事業を持つ。ここで政策（狭義）とは抽象的なものであり、特定の課題に対する基本方針の実現を目的とする行政活動の大きなまとまりである。一方で事業は具体的なものであり、基本方針を具現化するための個々の行政手段であり行政活動の基礎的な単位である。これらは目的と手段の関係であり紐づいているものとする。以降でそれぞれについて述べる。

政策

自治体は、新型コロナウイルス感染症対策分科会のレベル分類¹⁴⁾を参考にし、政策としてステージという概念を対象システムに提示する。このステージは自治体のCOVID-19対策強化度合いを表すものであり、定められた基準によって4段階に区分される。各ステージで想定される状況は以下の通りであり、それぞれで実施すべき事業がセットとして用意される。

- ステージ1：通常の段階
- ステージ2：警戒を強化すべき段階
- ステージ3：対策を強化すべき段階
- ステージ4：最大限の対策が必要な段階

事業

自治体は事業として組織に対して具体的な対策を打ち出す。事業の種類及びステージにより変化するパラメータを以下に示す。

- 在宅勤務の推奨（推奨の有無）
- 時短営業の要請（閉店時間 ct , 応じた店舗に対する売上補助率 sr ）
- ワクチン接種事業（接種開始時期, 供給量 v ）
- COVID-19用病床の確保（病床数 bn ）
- 休校措置（休校の有無）

3.4 意思決定モデルの統合

前節までで構築した意思決定モデルを2.5節で述べた方法により統合する。

3.4.1 行動規範に基づくモデル統合

マクロモデルの出力である自治体の事業パラメータが変化し組織に指示される内容が変化すると、それがメゾモデルの規範となり組織運営に関するパラメータが変化する。これによりマイクロモデルの規範となる活動環境が変化することにより市民の行動が変化する。具体的には以下のような変化する。

- 在宅勤務の推奨によりこれを導入した会社の従業員は出勤しなくなる。
- 時短営業要請により店舗の閉店時間が早くなり市民が店舗へ行ける時間が短くなる。
- ワクチン接種事業により市民は対象年齢かつワクチン在庫が存在する場合に接種を行う。
- COVID-19用病床の確保により病床開放数が変化し市民は病床に空きがある場合入院する。
- 休校措置により学生は登校しなくなる。

ただし、休校措置以外の事業に強制力はないものとし、組織及び市民が従うか否か、またそのタイミングは次項で述べる社会意識に基づき決定される。

3.4.2 社会意識に基づくモデル統合

本項では 2.5.2, 2.5.3 項で述べた方法に従い社会意識に基づくモデル統合を行う。

社会意識の特定及び変化要因の列挙

本稿では COVID-19 の感染拡大及びそれに伴う外出型消費の減少という課題に着目しているため、社会意識として、どの程度感染抑制を重視するかを表す感染に対する意識と、どの程度経済促進を重視するかを表す経済に対する意識が存在するものとする。これらの向上・低下要因として挙げられる要素を Table 2 に示す。表中における感染抑制政策及び経済促進政策は 3.3.3 項で述べた狭義の政策であり、ステージを提示することによる社会への訴えかけを表す抽象的なものである。

Table 2: 社会意識の向上・低下要因

	感染	経済
向上	感染者数 (マイクロ)	消費金額 (マイクロ)
	病床使用率 (メゾ)	事業収入 (メゾ)
	感染抑制政策 (マクロ)	経済促進政策 (マクロ)
感染と経済のバランス		
低下	感染抑制政策 (マクロ)	経済促進政策 (マクロ)
時間経過による忘却		

諸要素に関する因果ループ図の作成

Table 2 で列挙した諸要素に関して作成した因果ループ図を Fig. 4 に示す。図中で青色矢印は正の因果を、赤色矢印は負の因果を表し、網掛けされた要素はマイクロ・メゾ・マクロモデルの出力である。基本構造として社会意識に対して意識の向上は正の因果を持ち、意識の低下は負の因果を持つ。更に Table 2 で列挙した要素から意識の向上及び低下への因果が存在し、また社会意識から諸要素への因果が存在しループ構造を持つ。

因果ループ図から SD への変換

Fig. 4 の因果ループ図を SD のストック・フロー図へ変換した結果を Fig. 5 に示す。図中で感染・経済に対する意識がストックとなり、意識の向上及び低下がフローとなる。連立微分方程式を以下に示す。

$$\frac{dC_{inf}(t)}{dt} = IN_{inf}(t - lag) - OUT_{inf}(t) \quad (1)$$

$$IN_{inf}(t) = \frac{NI(t)}{ni_0} * (1 + OR(t)) * (1 + PV_{inf}(t)) * (0.5 + R(t)) * \frac{1}{1 + k * t} \quad (2)$$

$$OUT_{inf}(t) = F_{inf}(t) * (1 + (1 - PV_{inf}(t))) \quad (3)$$

$$F_{inf}(t) = C_{inf}(t) * dr \quad (4)$$

$$\frac{dC_{eco}(t)}{dt} = IN_{eco}(t - lag) - OUT_{eco}(t) \quad (5)$$

$$IN_{eco}(t) = \frac{ca_0 - CA(t)}{ca_0} * (1 + IDR(t)) * (1 + PV_{eco}(t)) * (0.5 + (1 - R(t))) \quad (6)$$

$$OUT_{eco}(t) = F_{eco}(t) * (1 + (1 - PV_{eco}(t))) \quad (7)$$

$$F_{eco}(t) = C_{eco}(t) * dr \quad (8)$$

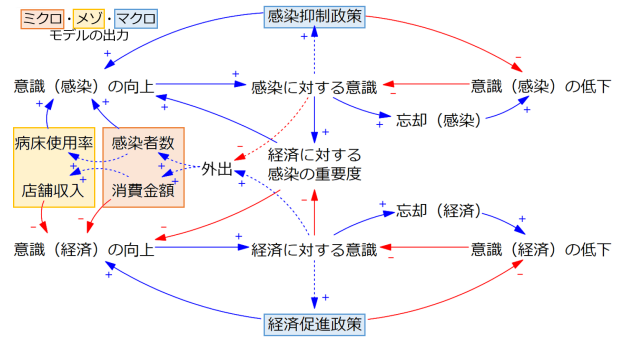


Fig. 4: 因果ループ図

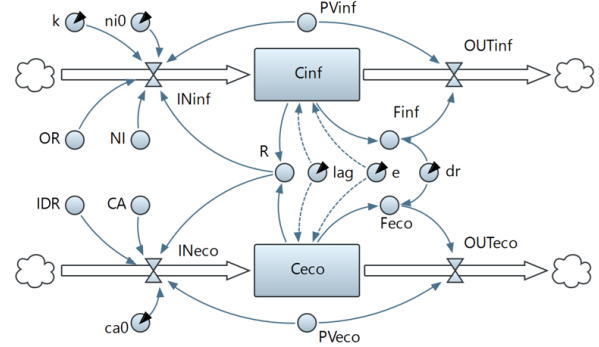


Fig. 5: スtock・Flow図

$$R(t) = \frac{C_{inf}(t)}{C_{inf}(t) + C_{eco}(t)} \quad (9)$$

$$C_{inf}(0) = \varepsilon \quad (10)$$

$$C_{eco}(0) = \varepsilon \quad (11)$$

- $C_{inf}(t)$: t 日目における感染に対する意識
- $C_{eco}(t)$: t 日目における経済に対する意識
- $IN_{inf}(t)$: t 日目における $C_{inf}(t)$ のインフロー
- $OUT_{inf}(t)$: t 日目における $C_{inf}(t)$ のアウトフロー
- $IN_{eco}(t)$: t 日目における $C_{eco}(t)$ のインフロー
- $OUT_{eco}(t)$: t 日目における $C_{eco}(t)$ のアウトフロー
- $NI(t)$: t 日目における新規感染者数 (マイクロモデルからの入力)
- $CA(t)$: t 日目における総消費金額 (マイクロモデルからの入力)
- $OR(t)$: t 日目における病床使用率 (メゾモデルからの入力)
- $IDR(t)$: t 日目における平均事業収入減少率 (メゾモデルからの入力)
- $PV_{inf}(t)$: t 日目における政策変数 (感染) (マクロモデルからの入力)
- $PV_{eco}(t)$: t 日目における政策変数 (経済) (マクロモデルからの入力)
- $F_{inf}(t)$: t 日目における $C_{inf}(t)$ の忘却量
- $F_{eco}(t)$: t 日目における $C_{eco}(t)$ の忘却量
- $R(t)$: t 日目における経済に対する感染の重要度
- lag : 社会意識形成のラグ
- k : 双曲割引率
- dr : 社会意識の忘却率
- ni_0 : 新規感染者数の基準値
- ca_0 : 消費金額の基準値
- ε : 十分小さい値

(1) 式は $C_{inf}(t)$ の単位時間当たり変化量を表し、社会意識に影響を与える指標の取得には数日間要することを想定し $IN_{inf}(t)$ は lag 日前の値を用いる。(2) 式においては $IN_{inf}(t)$ は新規感染者数、病床使用率、感染抑制政策、経済に対する感染の重要度に影響を受け、また時間経過に従い小さくなることを表す。(3) 式においては $OUT_{inf}(t)$ は時間経過による忘却と感染抑制政策に影響を受けることを表し、(4) 式では社会意識の忘却量が $C_{inf}(t)$ の定数倍であることを表す。(5) 式から(8) 式は $C_{eco}(t)$ に関するものであり、(1) 式から(4) 式と同様である。(9) 式は経済に対する感染の重要度を表す。(10)、(11) 式は社会意識の初期値は十分小さい値であることを表す。

社会意識と意思決定の関係

上記の社会意識に基づき各主体は意思決定を行う。まずマイクロモデルの市民とメゾモデルの組織のうち、会社・店舗・病院は以下の(12) 式で定義される意思決定変数 $d_i(t)$ (組織は $d_j(t)$) に基づき意思決定を行う。

$$d_i(t) = w * f_i(x_i(t)) + (1 - w) * g_i(C_{inf}(t), C_{eco}(t)) \quad (12)$$

第一項の関数 f_i は市民 c_i または組織 o_j ごとの個別指標 $x_i(t)$ からなるエージェント個々の指標を表す式であり、第二項の関数 g_i は社会意識 $C_{inf}(t), C_{eco}(t)$ からなるエージェントの意識的な側面を表す式である。従って各エージェントの意思決定変数は重み w が1に近いほど個別指標を重視した値を取り、 w が0に近いほど社会意識を重視した値を取る。エージェントの種類ごとの意思決定事項及び f_i, g_i を Table 3 に示す。表中 ND_i^{avg} は週間外出日数期待値、 BS_j は月間基本収入、 BN_j^{max} は病床開放上限である。 $x_i(t)$ が各主体にとって良い値であり、また $C_{inf}(t)$ が大きく $C_{eco}(t)$ が小さいほど $d_i(t)$ が大きくなるよう f_i, g_i を設定した。各主体は $d_i(t)$ が大きいほど感染抑制への行動を取り、具体的に次の様に意思決定を行う。まず市民は $or_i(t)$ を(13) 式で決定する。ここで or_0 は外出率の基準値である。

$$or_i(t) = or_0 * (1 - d_i(t)) \quad (13)$$

また $d_i(t) > T_{vaccine}$ でワクチン接種を行う。会社は $d_j(t) > T_{remote}$ で在宅勤務を導入する。店舗は $d_j(t) > T_{close}$ で時短営業を実施する。病院は自治体から事業として要求される病床数の $d_j(t)$ 倍の病床を開放する。ここで $T_{vaccine}, T_{remote}, T_{close}$ は閾値である。

自治体は政策であるステージと各ステージで実施する事業の内容を決定する。まずステージは客観的な指標に基づき自動的に決定されるものであると捉え、ステージの決定には病床使用率を用い、病床使用率が高いほどステージを高く設定する。各ステージで実施される内容は社会意識に基づき変動するものであると捉え、SDにおける $R(t)$ が大きい場合は感染重視の事業を、小さい場合は経済重視の事業を実施する。

4 計算機実験

前章で述べたモデルを AnyLogic¹⁵⁾ を用いてモデル化し、モデル統合において重要となる社会意識を各主体がどれだけ重視するかを表す重み w の感度分析と評価指標の時系列変化の分析により提案手法の有効性を検証する。対象都市は兵庫県芦屋市とした。

Table 3: エージェント種類別の決定事項と f_i, g_i

決定事項		x_i
市民	外出率	週間外出日数
	ワクチン接種	—
会社	在宅勤務	月間運営日数
店舗	時短営業	月間事業収入
病院	病床開放数	現病床開放数
f_i		g_i
市民	$(x_i(t)/ND_i^{avg}) - 1$	$(C_{inf}(t) - C_{eco}(t)) * cs_i^{cit}$
	—	$C_{inf}(t) * cs_i^{cit}$
会社	$(x_j(t)/30) - 1$	$C_{inf}(t) * cs_j^{org}$
店舗	$(x_j(t)/BS_j) - 1$	$(C_{inf}(t) - C_{eco}(t)) * cs_j^{org}$
病院	$1 - (x_j(t)/BN_j^{max})$	$C_{inf}(t) * cs_j^{org}$

Table 4: 基本条件

市民数 CN	90244	時短営業閾値 T_{close}	0.2
会社数 W	3111	病床開放上限 BN_j^{max}	67
店舗数 S	1530	売上補助率 sr	0.3
外出率基準値 or_0	1	社会意識形成ラグ lag	5
接種閾値 $T_{vaccine}$	0.5	双曲割引率 k	0.005
1回消費金額 $money$	[1000,10000]	社会意識忘却率 dr	0.05
自宅療養率 hr	0.7	新規感染者数基準値 ni_0	50
在宅勤務閾値 T_{remote}	0.3	消費金額基準値 ca_0	1.6×10^8

Table 5: 場所・種類別訪問確率と週間外出日数期待値

	職場 r_i^{wp}	店舗 r_i^{st}	学校 r_i^{sc}	期待値 ND_i^{avg}
正規雇用	0.77	0.18	0	5.67
非正規雇用	0.62	0.29	0	5.11
学生	0	0.18	1	7.00
その他	0	0.52	0	3.64

4.1 実験条件・評価指標

基本条件を Table 4 に、場所・種類別の訪問確率とそれらから計算される外出日数期待値を Table 5 に、危機感 cs_i^{cit} の分布を Table 6 にそれぞれ示す。病院数及びワクチン接種会場数は1であり、患者やワクチンの割当は考慮しないものとする。学校数は小中高合わせて14であり、組織数 ON は $3111 + 14 + 1 + 1 = 3127$ となる。病床開放上限 BN_j^{max} は兵庫県の資料¹⁶⁾ を参考に市民数 CN に基づき設定し、その内の10床を重症者用に常に開放し、残りの病床開放数は前項で述べた方法により病院により決定される。市民の行動に関する条件 ($r_i^{wp}, r_i^{st}, r_i^{sc}$) は国土交通省の資料¹⁷⁾ を参考に設定した。危機感 cs_i^{cit} は年齢が上がるにつれ危機感が強くなると仮定し正規分布 (N) を用いて設定した。その他の条件については予備実験を行い各目的で一定程度感染者数が発生するように設定した。紙面の都合上省略するが、これら以外の条件として都市に関する条件は芦屋市の統計情報¹⁸⁾ 及び合成人口データ¹¹⁾ に基づき設定し、COVID-19の症状に関する条件は厚生労働省の資料¹⁹⁾ 及びCOVID-19を対象にエージェントシミュレーションを行った文献¹²⁾ に基づき設定した。詳細は先行研究⁴⁾ を参照されたい。

ステージは病床使用率が30%未満で1、50%未満で2、80%未満で3、それ以上で4にそれぞれ設定される。このステージに従って変化する政策及び事業に関するパラメータを Table 7 に示す。Table 7 に示すように同ステージにおいても実施される事業の内容が異なり、経済に

Table 6: 危機感 cs_i^{cit} の分布

年齢	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	80+
cs_i^{cit}	$N(12, 1)^{-1}$	$N(11.5, 1)^{-1}$	$N(11, 1)^{-1}$	$N(10.5, 1)^{-1}$	$N(10, 1)^{-1}$	$N(9.5, 1)^{-1}$	$N(9, 1)^{-1}$	$N(8.5, 1)^{-1}$	$N(8, 1)^{-1}$

Table 7: 政策・事業パラメータ

ステージ	感染政策変数 PV_{inf}			経済政策変数 PV_{eco}			ワクチン供給量 (/1週間) v	軽症用 病床数 bm	閉店時間 ct			在宅勤務			休校		
	経済	バランス	感染	経済	バランス	感染			経済	バランス	感染	経済	バランス	感染	経済	バランス	感染
1	0.0	0.2	0.4	1.0	0.8	0.6	1000	33	24	24	24	無	無	無	無	無	無
2	0.2	0.4	0.6	0.8	0.6	0.4	2000	40	24	24	22	無	無	有	無	無	無
3	0.4	0.6	0.8	0.6	0.4	0.2	3000	46	24	22	20	無	有	有	無	無	有
4	0.6	0.8	1.0	0.4	0.2	0.0	4000	57	22	20	20	有	有	有	無	有	有

対する感染の重要度 $R(t) < 0.3$ で「経済」、 $R(t) < 0.7$ で「バランス」、 $R(t) \geq 0.7$ で「感染」の値を用いる。自治体のステージ移行判断周期は4週間である。ワクチン接種に関して、最初にステージ2に到達した日から26週間後に65歳以上が可能となり、その後8週ごとに18歳以上、12歳以上と順に可能となる。

シミュレーションの開始時にCOVID-19の潜伏状態者が20人発生するとし、シミュレーション日数は730日とした。前項で述べたエージェント個々の指標と社会意識のどちらを重視した意思決定を行うかを表す重み w を0, 0.25, 0.5, 0.75, 1と変化させ実験を行う。それぞれのシミュレーションの試行回数は100回とした。

4.2 実験結果

w を変化させた際の総感染者数、有症状者数、無症状者数及びワクチン接種完了者数をTable 8に、新規感染者数の推移の100試行平均をFig. 6に示す。Table 8から、 $w = 0 \sim 0.75$ で総感染者数と無症状者数が減少傾向にあるが、 $w = 1$ のみ異なる傾向を示すことが分かる。これはまず $w = 1$ では市民と組織は社会意識 $C_{inf}(t)$, $C_{eco}(t)$ を全く考慮せず、個別指標のみで意思決定を行い感染抑制の行動を一切取らないため、Fig. 6に示すように $w = 1$ では感染が拡大し続け200日前後でピークを迎えた後に収束するためである。また $w = 0 \sim 0.75$ において、 w が0に近いと社会意識を重視した意思決定が行われ、感染抑制の行動が取られるにも関わらず、総感染者数と無症状者数が増加傾向にあるのはワクチン接種完了数に起因すると考えられる。Table 8からワクチン接種完了数は w が0に近いほど増加しており、市民はワクチン接種により発症率を低下させることが可能である。このため無症状状態の市民が通常通り行動することで感染を拡大させる要因となっていると言える。ただし有症状者数は w が0に近いほど減少しており、市民の社会意識を重視した接種行動により有症状者数を抑えられていることが分かる。

Table 8: 感染者数（有症状・無症状）と接種完了数

w	総感染者数	有症状者数	無症状者数	接種完了数
0.00	15152.0 (5093.3)	4881.7 (765.7)	10270.3 (5042.9)	61330.8 (25115.7)
0.25	14115.9 (5128.9)	5375.0 (905.4)	8740.9 (5295.4)	48607.1 (27077.9)
0.50	11872.7 (4129.7)	6068.5 (949.9)	5804.2 (3703.8)	31630.4 (24400.9)
0.75	8083.3 (2297.6)	5311.5 (1443.8)	2771.8 (878.2)	3486.0 (6393.5)
1.00	12881.6 (3423.5)	8655.7 (2251.9)	4226.0 (1174.8)	0 (0)

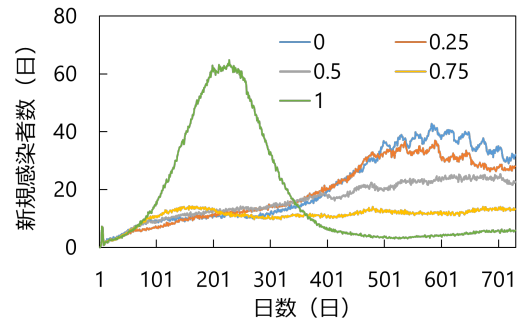


Fig. 6: 新規感染者数（平均）

続いて評価指標の時系列変化の分析を行うため、 $w = 0.25$ のある試行の新規感染者数と消費金額の推移をFig. 7に、 C_{inf} , C_{eco} の推移をFig. 8に、ステージの推移をFig. 9に、在宅勤務及び時短営業導入数をFig. 10に、病床開放数及び使用数をFig. 11に示す。Fig. 7から新規感染者数と消費金額は増減を繰り返すことが分かり、これはFigs. 8-11に示す指標と関連している。Fig. 11から病床の開放数に対して使用数が近づくとFig. 9のステージが上昇していることが分かる（220日付近、380日付近）。このステージの上昇によりFig. 10から分かるように会社や店舗は在宅勤務や時短営業を実施する。ただし全ての会社や店舗が実施するとは限らず、Fig. 8に示す社会意識の値により3.4.2項で述べた方法に従ってエージェントごとに意思決定を行っていることが分かる。このようにして市民の活動環境が変化し、また市民も社会意識の値に基づき外出率の決定やワクチン接種といった意思決定を行うことにより、Fig. 7のような感染者数や消費金額の推移を示す。

これらの結果から自治体、組織、市民といった異なるスケールの意思決定を行う主体に対して、社会意識という概念を導入したモデル化並びに統合により、それらの変化を同時に分析することが可能であると言える。

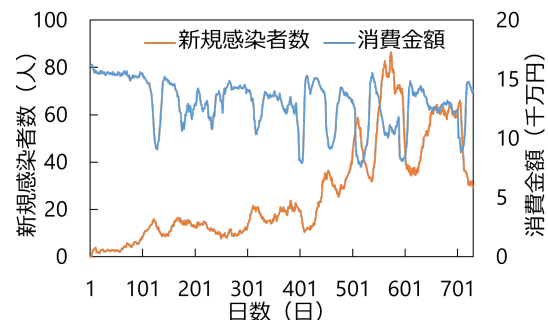


Fig. 7: 新規感染者数と消費金額

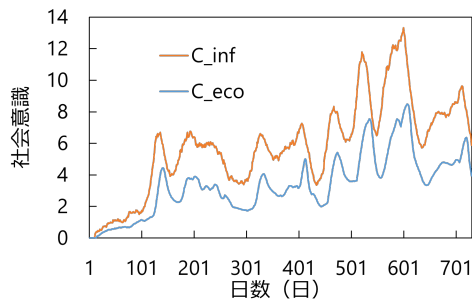
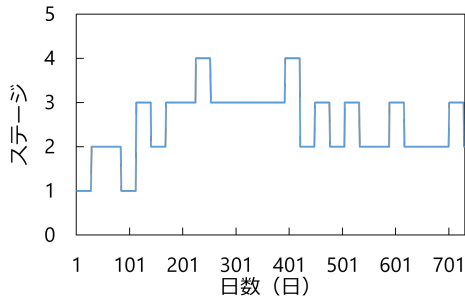
Fig. 8: 社会意識 (C_{inf} , C_{eco})

Fig. 9: ステージ

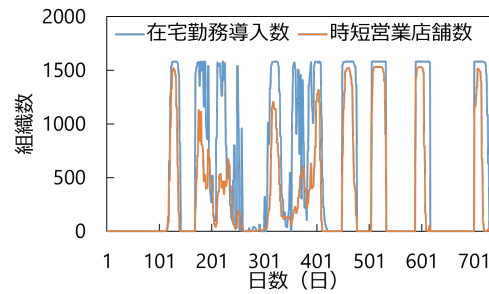


Fig. 10: 在宅勤務導入数と時短営業店舗数

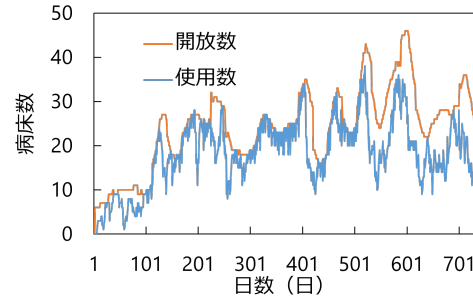


Fig. 11: 病床開放数・使用数

5 おわりに

本稿では、多様な意思決定主体から階層的に構成される社会システムの複雑化する合意形成に対して、多様なステークホルダの意思反映が可能なモデル構築を目指し、社会システムにおけるマルチスケールモデリングを提案した。具体的には、適切な時空間スケールで意思決定モデルを構築した後に行動規範と社会意識という意思決定主体間の関係性に基づきそれらを統合する手法を提案した。また COVID-19 施策に対して提案手法を適用し、計算機実験によりその有効性を検証した。計算機実験により異なるスケールの意思決定を行う主体に対して、社会意識という概念を導入したモデル化により、それらの変化を同時に分析することが可能であることが示された。

今後の課題として、モデリング手法の観点から、社会意識が二極化するような合意が困難な状況に対するモデル化について検討する必要がある、また提案手法の実用化に向けて、実験結果の妥当性向上のためマルチスケールなデータ同化技術が必要である。

謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI20B3 の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) Maier: Architecting principles for systems-of-systems, *Systems Engineering*, 1-4, 267/284 (1999)
- 2) 貝原, 寺野, 喜多, 高橋: 社会政策立案に向けたマルチスケール ABSS 手法, 第 12 回横幹連合コンファレンス予稿集, A-2-4, 1/4 (2021)
- 3) 福島: 複雑社会における意思決定・合意形成支援の技術開発動向, *人工知能*, 34-2, 131/138 (2019)
- 4) 清水, 貝原, 藤井, 渡邊, 國領: マルチスケールモデリングを用いた社会シミュレーションによる意思決定主体間の合意形成支援, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会資料, 241/246 (2022)
- 5) E: Principles of Multiscale Modeling, 1/496, Cambridge University Press (2011)
- 6) 喜多: 社会システムにおけるマルチスケール性, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会資料, 237/240 (2022)
- 7) DeLaurentis, Callaway: A System-of-Systems perspective for Public Policy Decisions, *Review of Policy Research*, 21-6, 829/837 (2004)
- 8) Brailsford, Eldabi, Kunc, Mustafee, Osorio: Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review, *European Journal of Operational Research*, 278-3, 721/737 (2019)
- 9) 山口, 福島: 因果ループ図から SD モデルを構築する方法について—システム思考 8 基本形の考察—, <http://muratopia.net/sd/documents/Archetype.pdf> (2023/01/21 アクセス)
- 10) 高橋: 適応的意思決定プロセスとしての共創的モデリング, *計測と制御*, 59-12, 934/937 (2020)
- 11) 原田, 村田: 基本単位区集計を用いた位置情報属性追加手法の精緻化, 計測自動制御学会システム情報部門学術講演会資料, GS06-03, 1/6 (2018)
- 12) Kerr et al.: Covasim: An agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions, *PLOS Computational Biology*, 17-7, 1/32 (2021)
- 13) 総務省: 政策評価に関する基礎資料集, https://www.soumu.go.jp/main_content/000716072.pdf (2023/01/22 アクセス)
- 14) 新型コロナウイルス感染症対策分科会: 新たなレベル分類の考え方, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/ful/taisakusuisin/bunkakai/dai10/newlevel_bunrui.pdf (2023/01/22 アクセス)
- 15) AnyLogic: AnyLogic: ビジネスモデリングソフトウェアツールとソリューション, <https://www.anylogic.jp/> (2022/01/23 アクセス)
- 16) 兵庫県: 新型コロナウイルスの検査・陽性者の状況, https://web.pref.hyogo.lg.jp/kf16/coronavirus_data.html (2023/01/24 アクセス)
- 17) 国土交通省: 全国都市交通特性調査 集計データ, https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/tosiko_fr_000024.html (2023/01/24 アクセス)
- 18) 芦屋市: 芦屋市の統計資料, <https://www.city.ashiya.lg.jp/bunsho/toukei/index.html> (2023/01/24 アクセス)
- 19) 厚生労働省: 新型コロナウイルス感染症 COVID-19 診療の手引き (第 8.1 版), <https://www.mhlw.go.jp/content/000936655.pdf> (2023/01/24 アクセス)