

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おける複数の意思決定主体間の影響解析

○清水岳 貝原俊也 國領大介 藤井信忠 (神戸大学)

Influence analysis among multiple decision-makers in social simulation with multi-scale modeling

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

概要— 複数の意思決定主体が存在する SoS 構造を持った社会システムを適切に設計・解析する社会シミュレーションの実現に向け、我々は各システム構成要素の時空間レベルに適したモデル化を可能とするマルチスケールモデリングに関する研究を進めている。本稿では、新興感染症蔓延下の都市の社会生活を対象に、提案手法を適用し複数意思決定主体間の相互作用がシステムに与える影響に着目し解析を行う。

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), 意思決定主体, 新興感染症

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) の具現化が目標の一つとして謳われている。そしてシステムの連携協調により持続的な価値やサービスを創出する社会の実現には、System of Systems (SoS) の概念が重要となる¹⁾。SoSとは、各々がシステムと見なせる要素の集まりであり、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有するものである²⁾。SoSの特徴として時空間レベルの異なる様々なサブシステムを包含していることが挙げられる。それらのシステム群は社会共通のマクロレベルを媒介とし、メゾ・マイクロレベルにおいて細かな時空間粒度をもつ様々な異種システムが混在しながら展開されるという一般的な階層構造を有している³⁾。

一方で、従来のモデリング手法はそれぞれのレベルで独立して適用されており、SoS構造を持つシステムを適切に設計・解析できる一貫性のあるモデリング手法が求められている。そこで我々は、それぞれの要素をその時空間レベルに適したモデリング手法を用いてモデル化し統合するマルチスケールモデリングに着目し、その概念を取り入れた複数の意思決定モデルを統合するためのモデリング手法を提案した⁴⁾。本稿では、新興感染症蔓延下の都市の社会生活を対象に提案手法を適用するとともに、複数の意思決定主体間の相互作用が対象システムに与える影響に着目し解析を行う。

2 マルチスケールモデリングによる社会システムの統合モデル化

社会システムにおける複数の意思決定主体の相互作用を捉えるため、我々はマルチスケールモデリングの概念に基づき複数の意思決定モデルを統合するためのモデリング手法を提案している。本章ではマルチスケールモデリングの概念と統合モデル化に必要な意思決定主体の体系化について述べた後、提案している統合モデル化について説明する。

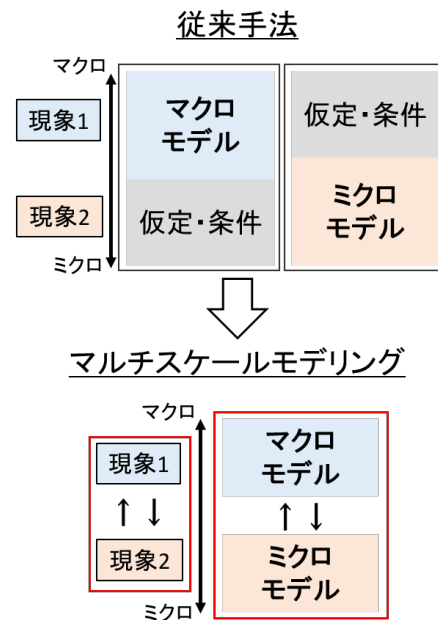


Fig. 1: 従来手法とマルチスケールモデリングの概要

2.1 マルチスケールモデリング

現実の多くの現象は広範囲の時間的・空間的スケールを包含しているため、従来のモデリング手法では対象外のスケールの現象を仮定や条件でしか取り込むことができず、スケールの境界付近の現象を捉えることは困難であった (Fig. 1: Upper)。そこで我々は、異なるスケールのモデルを同時に検討できるマルチスケールモデリング (Fig. 1: Bottom) に注目した。この概念は、異なるスケールを含む多様なシステムをシームレスに接続することで異なる時空間レベルの変化を同時に捉えることができると考えられ、化学や材料科学などのあらゆる分野で有用であるとされている⁵⁾。

本稿で対象とする多様なサブシステムを含む社会システムにおいても、個人行動モデルなどのマイクロモデルから政策・経済評価などのマクロモデル、その間の産業構造などのメゾモデルをマルチスケールモデリングの概念に基づきシームレスに接続することにより、異

なる時空間レベルの意思決定主体の相互作用を考慮し、各スケール別に加え社会システム全体の挙動の解析が可能となる。一方、社会システムにマルチスケールモデリングを適用するためには、システムに混在する異なる時空間レベルの意思決定主体を体系化し、複数の意思決定モデルを統合する仕組みが必要となる。

2.2 フレームワークを用いた意思決定主体の体系化

SoS 構造を持ち、時空間レベルの異なる様々なサブシステムを包含している社会システムのモデル化に必要な意思決定主体の体系化に対し、我々は DeLaurentis らによって提案されたフレームワーク⁶⁾を用いたシステム構成要素の整理を行う。以下にその手順を述べる。

Step1 システムの構成要素を以下の4種類に分類する。

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

Step2 各カテゴリ内における構成要素を時空間レベルの相対的な位置で数種類の階層に分類する。

以上の手順によりシステム構成要素の整理を行うことで様々なレベルの意思決定主体の存在を把握できる。

2.3 異なるレベルの意思決定主体の統合的モデル化

2.2節で述べた意思決定主体の体系化により、対象システムに異なる時空間レベルの意思決定主体が複数含まれることが判明した場合、それぞれの主体に適したモデリング手法を適用する。社会システムのモデル化で主に用いられる手法とその特徴を以下に述べる。

- **システムダイナミクス (SD : System Dynamics)**
ストックとフローという概念を用いて変数の変化のモデル化を行う。システム構成要素のマクロ的な因果関係を記述することができる。
- **離散事象モデル (DEM : Discrete Event Model)**
システムを構成する要素の一連の振舞いをプロセスとしてモデル化を行う。時間軸上の離散的な時点で事象が生起するシステムを扱う。
- **エージェントベースモデル (ABM : Agent Based Model)**
「エージェント」と呼ぶ複数の主体を用いてモデル化を行う。ミクロなエージェントの相互作用による創発現象とミクロ-マクロリンクが観察できる。

次に適切なモデリング手法を用いてモデル化した各意思決定主体に対し、各意思決定主体の関係性と時空間レベルを考慮し各モデルの入力と出力を決定する。最後に、各意思決定主体のモデルの出力を異なるモデルの入力とすることにより、複数のモデルをシームレスに接続でき、統合モデル化によるマルチスケールモデリングが完成する。

3 新興感染症問題への適用

前章で述べた複数の意思決定主体の統合モデル化によるマルチスケールモデリングを、喫緊の社会課題である COVID-19 をはじめとした新興感染症が蔓延している都市を想定した社会システムに適用し、様々な意思決定主体間の相互作用がシステムに与える影響に着目して解析を行う。感染症流行の長期化により感染症の抑制と経済活動をいかに両立させるかが重要であり、証拠に基づく政策立案 (EBPM : Evidence Based Policy Making) が求められる。新興感染症に関連する問題にはレベルの異なる様々な意思決定主体が関わっており、マルチスケールモデリングにより各意思決定主体をモデル化することでシステムの挙動を包括的に分析する。

3.1 対象都市

日本における小規模の都市を対象とし、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と仮定する。対象都市では多様な属性を持つ人々が社会生活を営んでおり、新興感染症が流行すると仮定する。世帯構成還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⁷⁾を用いて対象都市の詳細なモデル化を行う。

3.2 意思決定主体の体系化

対象システムに対し2.2節で説明したフレームワークを用いてシステム構成要素の整理を行った結果を Table 1 に示す。表中において α , β , γ の順にシステム構成要素の時間的・空間的な影響範囲が大きくなる。Table 1 の Resources に着目し、 α レベルのヒト、 β レベルの各施設、 γ レベルの自治体という様々なレベルの意思決定主体の存在を抽出した。

3.3 異なる時空間レベルの意思決定主体のモデル化とその統合

本稿では3.2節で体系化された意思決定主体のうち、ヒトと自治体についてモデル化を行うこととする。

ヒト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ことが特徴であることからエージェントベースモデリングによりモデル化を行う。

Table 1: フレームワークを用いたシステム構成要素の整理

	Resources	Operations	Economics	Policy
γ	自治体	自治体の運用	予算 政策に係る費用	経済政策 感染抑制政策
β	会社, 学校 店舗, 病院	施設の運営 施設の管理	予算 利益 運営費	時短営業 休校措置
α	ヒト, 病床 ワクチン 特効薬	人々の行動 医療物資の管理	消費金額 人件費 医療費	外出自粛 テレワーク ワクチン接種

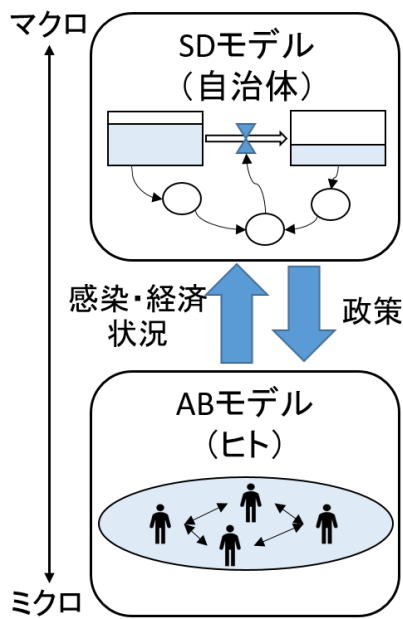


Fig. 2: 新興感染症問題における統合モデル

一方、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及ぼすことが特徴であることからシステムダイナミクスによりモデル化を行う。なお、 β レベルの各施設については、ヒトが利用する場所であるためエージェントベースモデルの環境としてモデルに導入する。

それぞれモデル化を行った後、Fig. 2に示すように、エージェントベースモデルの出力である感染・経済状況をシステムダイナミクスモデルの入力とし、システムダイナミクスモデルの出力である政策をエージェントベースモデルの入力とすることで2つのモデルを統合する。以降で各モデルとその統合について具体的に述べる。

3.3.1 エージェントベースモデリングによるヒトの意思決定と環境のモデル化

ヒトの意思決定及び周囲の環境をエージェントベースモデリングによりモデル化する。

仮想都市内の施設

仮想都市には小学校区を想定したエリアが複数あり、エリア内に世帯、学校、事業所が存在し、事業所のうちヒトエージェントがお金を消費する場所を店舗とする。

ヒトエージェントの種類

合成人口データが持つ属性のうち雇用形態と年齢によりヒトエージェントを以下の4種類に分類する。

- 正規雇用者：雇用形態が一般労働者である者
- 非正規雇用者：雇用形態が短時間労働者または臨時労働者であり年齢が19歳以上である者
- 学生：一般労働者でなく年齢が7歳から18歳である者
- その他：正規雇用者、非正規雇用者、学生でない者

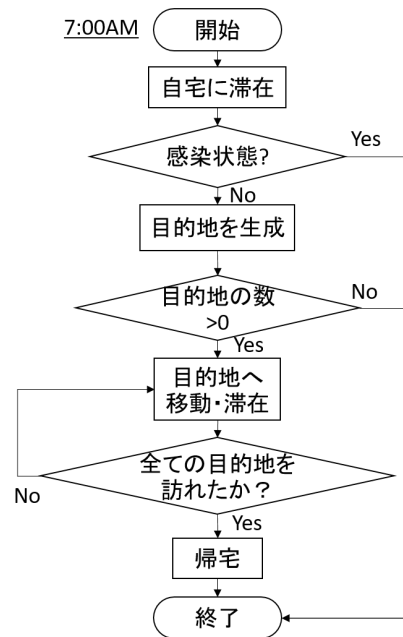


Fig. 3: ヒトエージェントの行動フロー

ヒトエージェントの行動

ヒトエージェントの1日の行動フローをFig. 3に示す。ヒトエージェントは起床し自宅に滞在した後、感染状態でない場合、複数の目的地に出かけるものとする。ここでヒトエージェントは、その属性によりあらかじめ行くことができる場所が定められており、正規雇用者・非正規雇用者は職場である事業所と店舗、学生は学校、その他は店舗である。行くことができる場所ごとに外出率 or と場所別の確率 r の積により目的地とすることがどうかを判定する。1つ以上の目的地を持つヒトエージェントは外出し、全ての目的地を訪れ、滞在した後帰宅する。正規雇用者・非正規雇用者・その他のうち19歳以上の者は店舗において消費活動を行い1回あたり c 円消費する。

感染伝播

ヒトエージェントは、感染症流行の数理モデルであるSEIRモデル⁸⁾に従い未感染、潜伏、感染、回復の4つの状態を持つ。他のヒトエージェントへの感染力は感染状態になる3日前から回復状態に遷移するまで持ち、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。Fig. 3に示すように感染状態のヒトエージェントは外出せず、感染伝播を起こさない隔離状態か同居するヒトエージェントに対して感染伝播を起こす自宅療養となる。

3.3.2 システムダイナミクスによる自治体の意思決定のモデル化

自治体の意思決定をシステムダイナミクスによりモデル化する。

自治体の基本方針

対象システムにおける自治体は、新興感染症の拡大抑制と経済活動の促進という相反する政策に対するバランスの取れた施策の実施を目指すものとする。感染・経済状況により感染抑制・経済促進に対する重要度が蓄積し、この重要度に対応して各政策の強さが決まる。また都市内の感染・経済状況が各重要度に反映される

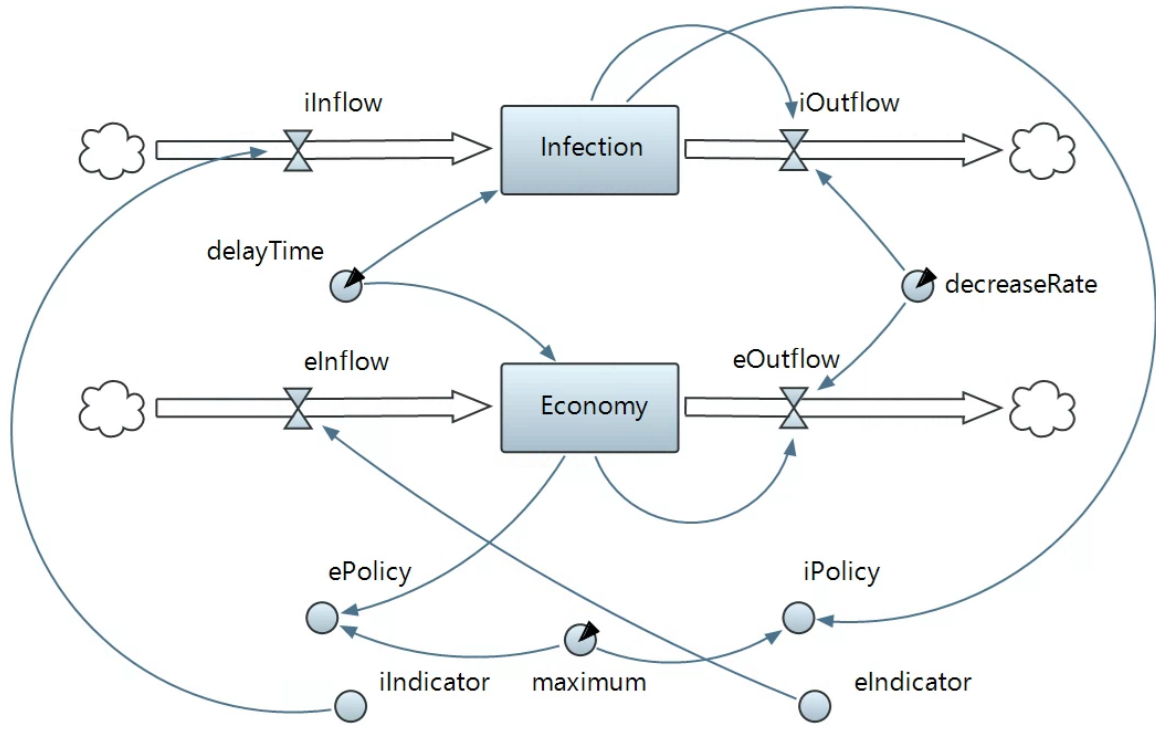


Fig. 4: ストック・フロー図

時間は遅延時間により変化し、重要度は時間経過により減少するものとする。

定式化

感染抑制・経済促進に対する重要度をシステムダイナミクス stocks として Fig. 4 に示すモデルを構築し、以下のように定式化する。

$$\frac{dInfection(t)}{dt} = iInflow(t - delayTime) - iOutflow(t) \quad (1)$$

$$iInflow(t) = iIndicator(t) \quad (2)$$

$$iOutflow(t) = Infection(t) * decreaseRate \quad (3)$$

$$\frac{dEconomy(t)}{dt} = eInflow(t - delayTime) - eOutflow(t) \quad (4)$$

$$eInflow(t) = eIndicator(t) \quad (5)$$

$$eOutflow(t) = Economy(t) * decreaseRate \quad (6)$$

$$iPolicy(t) = \frac{Infection(t)}{maximum} \quad (7)$$

$$ePolicy(t) = \frac{Economy(t)}{maximum} \quad (8)$$

$$Infection(0) = 0 \quad (9)$$

$$Economy(0) = 0 \quad (10)$$

- *Infection* : 感染抑制の重要度
- *Economy* : 経済促進の重要度
- *iInflow* : *Infection* のインフロー
- *iOutflow* : *Infection* のアウトフロー
- *eInflow* : *Economy* のインフロー
- *eOutflow* : *Economy* のアウトフロー

- *iIndicator* : 感染状況指標
- *eIndicator* : 経済状況指標
- *iPolicy* : 感染抑制政策の強さ
- *ePolicy* : 経済促進政策の強さ
- *delayTime* : 遅延時間
- *decreaseRate* : 重要度の減少率
- *maximum* : 重要度の最大値
- *t* : 時間

(1) 式は *Infection* の単位時間あたりの変化量を表し、*iInflow* は現時刻から *delayTime* 前の値を用いる。(2) 式と (3) 式は、*Infection* のインフローは感染状況指標により決まり、アウトフローは *Infection* の定数倍であることを表す。(4) 式は *Economy* の単位時間あたりの変化量を表し、*eInflow* は現時刻から *delayTime* 前の値を用いる。(5) 式と (6) 式は、*Economy* のインフローは経済状況指標により決まり、アウトフローは *Economy* の定数倍であることを表す。(7) 式と (8) 式は政策の強さが重要度の最大値に対する現在の重要度の大きさに決まることを表す。(9) 式と (10) 式は各重要度の初期値は 0 であることを表す。

3.3.3 2つのモデルの統合

前項までに構築したエージェントベースモデルによるヒトの意思決定モデルとシステムダイナミクスによる自治体の意思決定モデルを統合するために、ヒトと自治体の関係性を考慮し 2つのモデルの入出力を決定する必要がある。各モデルの入出力を Table 2 に示す。全ヒトエージェントの行動の結果であり都市全体に関する変数である感染者数や消費金額が AB モデルの出力であり SD モデルの入力となる。一方、自治体の意思決定の結果であり個々のヒトエージェントの行動に影響を与える政策が SD モデルの出力であり AB モデルの入力となる。

Table 2: 各モデルの入力と出力

	AB モデル	SD モデル
入力	政策によって 変化するパラメータ (or, r_{st}, c)	感染・経済状況 ($iIndicator, eIndicator$)
出力	感染者数 (NI) 消費金額 (CA)	政策の強さ ($iPolicy, ePolicy$)

2つのモデルは同時に動作し動的に入出力データをやり取りできるものとし、一方のモデルの出力を他方のモデルの入力とすることで2つのモデルが統合できる。以降でABモデルからSDモデルとSDモデルからABモデルの両方向の入出力データのやり取りについて具体的に述べる。

ABモデルからSDモデル

ABモデルの出力である感染・経済状況がSDモデルの入力となり自治体の意思決定に影響を与える。自治体が想定する最悪な状況での感染者数に対する新規感染者数の大きさを感染状況を表す指標として定義した(11)式を用いる。また自治体が許容できる消費金額の減少額に対する通常時と現在の消費金額の差の大きさを経済状況を表す指標として定義した(12)式を用いる。

$$iIndicator(t) = \frac{NI(t)}{iStandard} \quad (11)$$

$$eIndicator(t) = \max \left\{ \frac{eStandard - CA(t)}{eStandard * lossRate}, 0 \right\} \quad (12)$$

- NI : 日ごとの新規感染者数
- CA : 日ごとの全ヒトエージェントの消費金額
- $iStandard$: 新規感染者数の基準値
- $eStandard$: 消費金額の基準値 (通常時の消費金額)
- $lossRate$: 許容できる消費金額の減少率

SDモデルからABモデル

SDモデルの出力である政策がABモデルの入力となり人々の意思決定に影響を与える。

感染抑制政策はヒトエージェントの外出率に影響を与え、政策が強くなると(13)式で定義したヒトエージェントの外出率が小さくなる。

$$or(t) = (1 - iPolicy(t)) * or_0 \quad (13)$$

- or_0 : 外出率の基準値

経済促進政策はヒトエージェントが店舗へ行く確率とそこで消費する金額に影響を与え、政策が強くなると(14)式、(15)式で定義したヒトエージェントの店舗へ行く確率と消費金額が大きくなる。

$$r_{st}(t) = (1 + ePolicy(t)) * r_{st0} \quad (14)$$

$$c(t) = (1 + ePolicy(t)) * c_0 \quad (15)$$

- r_{st} : ヒトエージェントが店舗へ行く確率
- r_{st0} : 店舗へ行く確率の基準値
- c : ヒトエージェントが1回に消費する金額
- c_0 : 1回に消費する金額の基準値

以上の定式化によりエージェントベースモデルとシステムダイナミクスモデルの統合モデルが実現できる。

シミュレーションの評価指標として、感染者数、消費金額だけでなくヒトと自治体の相互作用に着目して解析を行うため、自治体の重要度 ($Infection, Economy$) 及びヒトエージェントの場所別訪問回数も用いる。

4 計算機実験

前章で述べたモデルを3つのモデリング手法 (SD, DEM, ABM) を1つのモデル内で自由に組合せシミュレーションを行うことが可能なモデリングツール AnyLogic⁹⁾ を用いて、ヒトと自治体という異なるレベルの主体の意思決定の変化がシステム並びに先に定義した評価指標にどのような影響を与えるかについて解析する。対象都市は兵庫県芦屋市とした。

4.1 ABモデルに関する条件

芦屋市に関する条件は芦屋市統計書 (平成27年度版)¹⁰⁾ および合成人口データ⁷⁾ から以下のように設定した。

- エリア数 Q : 8
- 世帯数 R : 40102
- 人口 P : 90244 人
- 事業所数 W : 3111
- 店舗数 S : 1530
- 小学校数 E : 8
- 中学校数 J : 3
- 高校数 H : 3

仮想都市内で流行する新興感染症に関する条件は以下のように設定した。

- 平均潜伏期間 ET : 5 日
- 平均感染期間 IT : 10 日
- 伝播率 tr : 0.1
- 家庭内接触率 cr_{hh} : 0.4
- 学校内接触率 cr_{sc} : 0.01
- 職場内接触率 cr_{wp} : 0.07
- 店舗内接触率 cr_{st} : 0.09
- 初期潜伏状態者数: 10 人

ET, IT, tr は COVID-19 を対象としたシミュレーション研究¹¹⁾ を参考に、その他の条件については予備実験を行い各場所で一定程度感染者数が発生するように設定した。

ヒトエージェントの外出率の基準値 or_0 は 1, 1回に消費する金額の基準値 c_0 は $U[1000, 10000]$ とし、種類・場所別の訪問確率は全国都市交通特性調査¹²⁾ を参考に Table 3 のように設定した。

Table 3: 種類・場所別の訪問確率

	職場 (r_{wp})	店舗 (r_{st0})	学校 (r_{sc})
正規雇用者	0.77	0.18	0
非正規雇用者	0.62	0.29	0
学生	0	0	1
その他	0	0.52	0

4.2 SD モデルに関する条件

SD モデルのパラメータは以下のように設定した。

- 遅延時間 $delayTime$: 3 日
- 重要度の減少率 $decreaseRate$: 0.05
- 重要度の最大値 $maximum$: 50
- 新規感染者数の基準値 $iStandard$: 50 人
- 消費金額の基準値 $eStandard$: 150000000 円
- 消費金額の減少率 $lossRate$: 0.2

ここで $delayTime$ は自治体が現在の情報を取得するまでの時間を想定している。

4.3 実験結果

シミュレーション日数を 500 日としシミュレーションの試行回数は 100 回とした。Table 4 に総感染者数と総消費金額の平均と標準偏差を、Fig. 5 に各試行の結果（総感染者数, 総消費金額）の散布図を示す。

Table 4: 総感染者数と総消費金額（100 試行平均）

	Avg.	S.D.
総感染者数 (人)	6315.7	3426.3
総消費金額 (円)	7.22×10^{10}	0.20×10^{10}

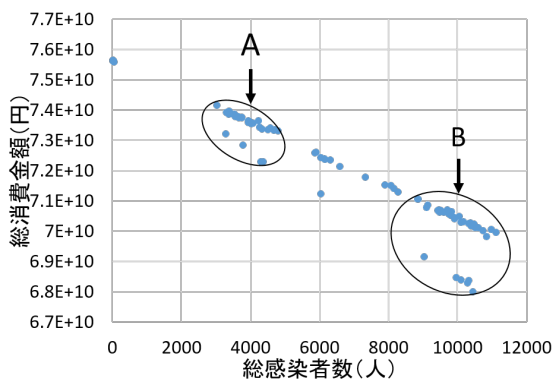


Fig. 5: 各試行の結果

Table 4 及び Fig. 5 から結果にばらつきがあり、総感染者数が大きい試行において総消費金額が小さいことが分かる。また Fig. 5 の A ($4000, 7.3 \times 10^{10}$) 及び B ($10000, 7.0 \times 10^{10}$) 付近に結果が集中していることが分かる。

結果が集中している部分の特徴を解析するために、A 及び B のピーク時感染者数と 100 日目までの感染者数（総数及び学校発生数）の平均を Table 5 に示す。また、A 及び B のある試行の新規感染者数と消費金額の推移を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より A ではピーク時感染者数が 229 人である大きな波が 1 回、B ではピーク時感染者数が 100 人前後である小さい波が複数回発生していることが分かる。また、Table 5 から A ではピーク時感染者数が大きく、総感染者数の大半が第一波に発生していることが分かる。これは Table 5 の学校での感染者数から分かるように、学校にて感染爆発が発生し、その結果自治体の感染抑制政策が極端に強くなることで感染者数の波が 1 回で収束しているからである。一方、B では学校での感染が比較的小規模であり、ピーク時感染者数が小さいため感染抑制政策が強くなり過ぎず、再度感染が拡大したと考えられる。よって A と比較して B では、小さい波ではあるが感染者数が増減

Table 5: ピーク時新規感染者数と 100 日目までの感染者数（総数及び学校発生数）

	A	B
ピーク時感染者数	215.6	161.4
総感染者数	3899.3	3649.6
学校	1074.8(28%)	764.7(21%)

を繰り返すことで、シミュレーション期間全体で感染者数が大きくなりそれに従い消費金額が小さくなったと考えられる。

次に B の状況において、ヒトと自治体の意思決定の関係性について解析を行うために、重要度 ($Infection, Economy$) とヒトエージェントの場所別訪問回数（人口 P の 1% である 902 体のヒトエージェントをランダムに抽出し、それらが訪問した回数を合計した値）を Fig. 7 に示す。Fig. 6 で示した新規感染者数が増加するタイミングに同期して、Fig. 7 に示した感染抑制の重要度 $Infection$ の値が大きくなっていることから、自治体が感染状況に応じて感染抑制の重要度を上げていることが分かる。さらに、感染抑制政策が強くなることに合わせて、Fig. 7 に示した職場・店舗・学校への訪問回数が低下したことから、ヒトエージェントの行動が抑制されたことが示唆された。またヒトエージェントの行動、特にお金を消費する場である店舗への訪問回数が抑制されることで消費金額が減少し、それに伴い経済促進の重要度 $Economy$ の値が大きくなったことから、自治体が現在の経済状況に応じて経済促進の重要度を上げていることが分かる。それにより Fig. 7 の 90 日前後から分かるように、職場や学校と比較して店舗の訪問回数の増加率が高く、経済促進政策がヒトエージェントの行動に影響を与えている。そしてヒトエージェントの行動が活発になることで再び感染者数が増加する、というようにヒトと自治体の相互作用により新規感染者数の増減が繰り返されるといえる。

このようにマルチスケールモデリングを用いたシミュレーションにより、新興感染症問題に対して感染者数などの指標だけでなくヒトと自治体の意思決定基準に着目した包括的な解析を行うことができる。

5 おわりに

本稿では、複数の意思決定主体を含む社会システムを適切に設計・解析する社会シミュレーション実現に向け、複数の意思決定モデルの統合モデル化によるマルチスケールモデリングを新興感染症蔓延下の都市を対象に適用した。その結果、自治体の政策と人々の行動を同時に検討できる結果を得ることができ、複数の異なる意思決定基準に着目した解析を行うことができた。

今後も引き続き COVID-19 問題を対象に、マルチスケールモデリングの追求として産業構造や組織レベルの意思決定モデルの導入を試みるとともに、ワクチン政策など対象問題の深堀を進めることで、社会システムの制度設計についてより具体的な提案を行うことを目指す。

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。

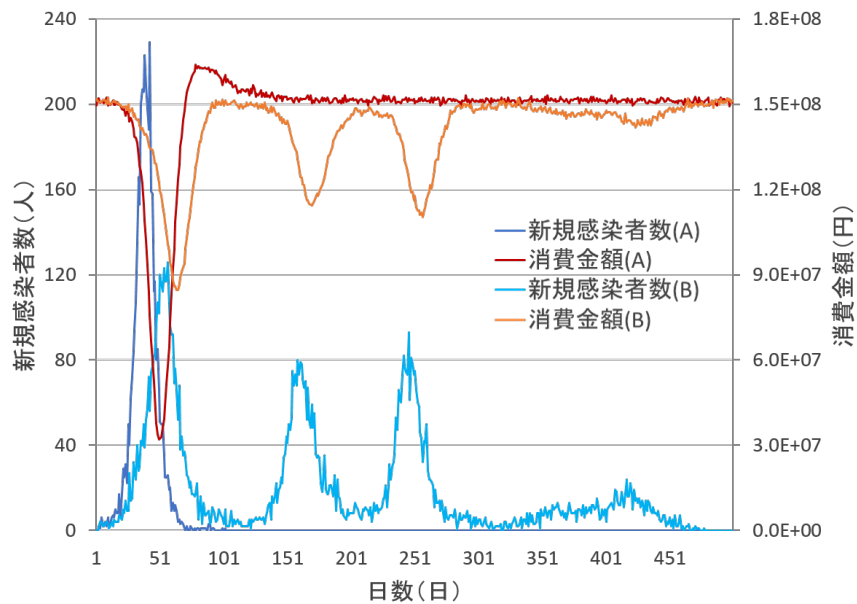


Fig. 6: 新規感染者数と消費金額の推移

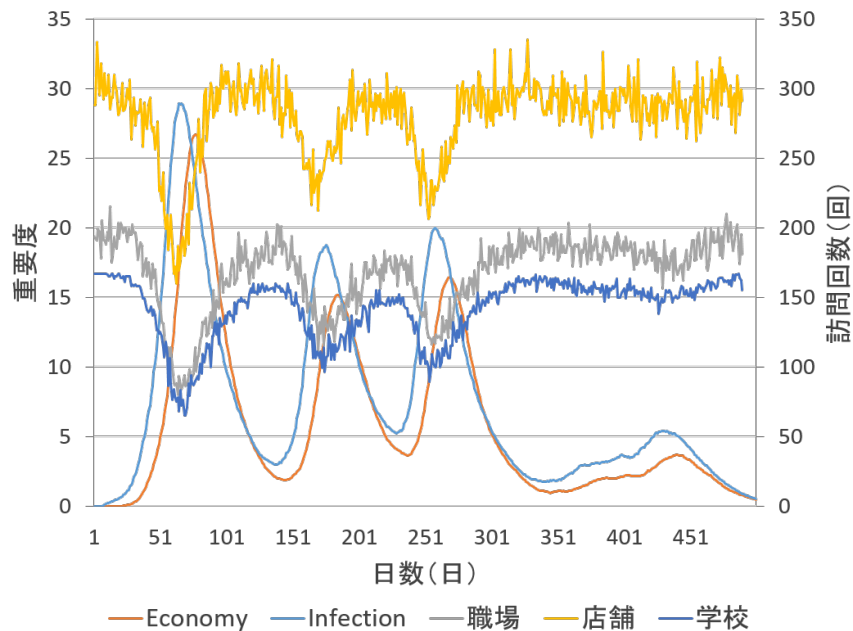


Fig. 7: 重要度と場所別訪問回数の推移 (B)

参考文献

- 1) 貝原俊也: スマートワールド実現に向けたシステムズアプローチの新潮流, 計測と制御, **55-8**, 641/649 (2016)
- 2) M. W. Maier: Architecting principles for systems-of-systems, Systems Engineering, **1-4**, 267/284 (1999)
- 3) 貝原俊也: 社会的課題解決への実展開を目指す新たなシステムズアプローチの実現に向けて, 計測と制御, **59-12**, 891/894 (2020)
- 4) 清水岳, 貝原俊也, 藤井信忠, 國領大介: 複数の意思決定主体を含む社会シミュレーションのためのマルチスケール統合モデリング手法の一提案, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会資料, GS6-2-1 (2021)
- 5) E. Weinan: Principles of Multiscale Modeling, Cambridge University Press (2011)
- 6) D. DeLaurentis, RKCAB. Callaway: A System-of-Systems Perspective for Public Policy Decisions, Review of Policy Research, **21-6**, 829/837 (2004)
- 7) 原田拓弥, 村田忠彦: 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 (2018)
- 8) 西浦博, 稲葉寿: 感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題, 統計数理, **54-2**, 461/480 (2006)
- 9) 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)
- 10) 芦屋市: 芦屋市統計書 (平成 27 年度版), <https://www.city.ashiya.lg.jp/bunsho/toukei/> (2022/01/23 アクセス)
- 11) 倉橋節也: 新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策の推定, 人工知能学会論文誌, **35-3**, 1/8 (2020)
- 12) 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/toshi_tosiko_fr_000024.html (2022/01/23 アクセス)