

多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づく 状況分類手法の検討

○後藤裕介（芝浦工業大学） 森田裕之（大阪府立大学）
白井康之（大東文化大学） 市川尚（岩手県立大学）

On Situation Classification Method Based on Solution Set in Multi-Objective Optimization Social Simulation

*Y. Goto (Shibaura Institute of Technology) H. Morita (Osaka Prefecture University)
Y. Shirai (Daito Bunka University) H. Ichikawa (Iwate Prefectural University)

概要— 多目的最適化社会シミュレーションにおいて入力する状況間の類似度を明らかにすることは、例えば自治体の政策立案過程で類似している自治体を把握することの有効な支援となる。本研究では、社会シミュレーションの入力となる状況を得られた解集合に基づいて分類する手法を提案する。本手法は施策の期待効果に基づいて状況の類似性を評価することを可能にするとともに、状況や施策の効果に関する理解を深めることを可能にすると考えられる。

キーワード: 社会シミュレーション, シナリオ分析, 多目的最適化, 政策立案過程

1 はじめに

社会シミュレーションは、状況と施策をモデルの入力とし、分析者の関心がある指標値を出力する。多くの社会シミュレーションのモデルでは不確実性が組み込まれており、実行時に状況、施策、使用する乱数列を定めると、シミュレーション結果（パスと呼ぶ）が一意に求められる構造を持つ。社会シミュレーションの基本的な分析手法であるシナリオ分析では、分析者は状況と施策との関係を考察し、対象システムの理解を深める。

本研究での状況とは、対象とするシステムの（初期）状態を特徴づけるものであり、一般に関与者が制御することができない所与の時間、空間、およびそこの事象を意味する。状況は通常いくつかの状況変数と呼ばれるパラメータにより定義される。社会シミュレーションでエージェントベース・モデルを用いる際には、状況変数に基づいて、モデル内のエージェント数や各エージェントの持つ属性値などが割り当てられる。例えば、都市を状況変数とすれば、沖縄県那覇市と沖縄県石垣市のように異なる2つの状況に関してシミュレーションが行われる。このとき、沖縄県那覇市と沖縄県石垣市とでは、人口、世帯構成、産業構造などが異なることから、対応するパラメータは異なる値が割り当てられることになる。

他方、施策とは対象とするシステムの状態に作用するものであり、情報の提示やインセンティブの付与などモデル内のパラメータに直接的・間接的に影響をもたらすものを指し、一般に関与者が制御可能な性質をもつ。施策は通常いくつかの施策変数と呼ばれるパラメータにより定義される。施策変数に基づいて、モデル内のエージェントが持つ属性値などに変化が現れる。例えば、給付金制度の設計を考えたとき、給付金の対象と金額を施策変数とすれば、その対象と金額に応じて、住民の経済状況へ作用する。

近年、社会シミュレーションの実利用にむけて、意思決定支援に関わる分析手法に関する研究が盛んに行

われている。従来、シナリオ分析手法に関しては、主に施策効果の分析方法や状況の探索方法の研究が主に行われてきた。施策効果の分析手法は、特定の状況において、どの施策が有効であるかを明らかにすることに関心がある。Goto & Takahashi¹⁾は様々な施策に関して、不確実性の影響を受けてばらつきがあるパスを比較するための可視化手法を提案している。Ohori & Takahashi²⁾はこの可視化において、特定のパスが現れる原因を分析する手法を提案している。一方、状況の探索方法では、意図するパスがどのような状況で実現するかを明らかにすることに関心がある。倉橋³⁾は意図するパスを実現する状況を進化計算を用いた逆シミュレーションにより探索する手法を提案している。和泉ら⁴⁾は順シミュレーションの部分パスの選択・継ぎ足しを繰り返すことで意図するパスを生成していく手法を提案している。

本研究では、これらの従来研究をふまえ、状況の分類に着目する。社会シミュレーションの有力な適用領域である自治体の政策立案過程では、しばしば不確実性への対処のために他の自治体の動向を参考にすることが知られている⁵⁾。このとき自治体の担当者は自分の自治体と類似している自治体の存在に関心がある。このため、総務省⁶⁾は自治体を人口及び産業構造から分類した財政指数表を公表している。また、山本ら⁷⁾は人口構成、人口の流動性、産業構造などの集計された統計指標に基づいて自治体を分類している。自治体を社会シミュレーションにおけるモデルの入力である状況とすれば、状況の分類は、自治体の政策立案過程において参考にすべき他自治体を明らかにするという貢献ができる。

加えて、自治体の政策には多様な問題関与者が存在することから多目的を考慮した政策最適化が必要となる。目的変数間に二律背反の関係がある場合には、すべての目的に最適な唯一の最適解は存在せず、目的間の最適なトレードオフである非劣解フロントを形成する非劣解集合が存在する⁸⁾。最適解が唯一定まるのであれば、社会シミュレーションの結果に基づいて政策

意思決定を行えばよいが、同様に望ましい複数の最適解が存在する状況では、類似した対応方法を比較すべき他の自治体を明らかにすることの意義は大きい。しかしながら、一般に社会システムは複雑であることから、必然的に社会シミュレーションのモデルも複雑な相互作用が組入れられている。このため、その問題の特性から、シミュレーションの実行前に(シミュレーション結果を知らずに)状況に関して明らかな統計情報(人口構成や産業構造など)に基づいて妥当な分類を行うことは困難である。例えば、比較する2都市において、世帯構成、就労者の数、産業構造が同じだったとしても、各世帯における就労者の分布が異なれば、各世帯の経済状況は大きく異なりうる。また、当初の各世帯の経済状況が等しくても、シミュレーション中に発生する経済ショックの影響を受ける産業に従事している就労者がどの世帯に属しているかどうかで、経済的に問題を抱える世帯数には変化が現れうる。このように統計情報のみから事前にシミュレーション結果を予測することは難しいといえる。

そこで、本研究では、従来アプローチのように状況自体の明らかになっている事前の統計情報から分類を試みるのではなく、多目的最適化社会シミュレーションの結果として得られた決定変数空間および目的関数空間における解集合に基づいて、同様の施策が最適であることや同様の施策効果が見込めるという観点で状況の分類を行う手法を検討する。本稿の構成は次のとおりである。第2節では提案手法の概要と手順を紹介する。第3節では、提案手法の適用事例として、経済ショックに対する給付金制度の設計シミュレーションを取り上げる。第4節では提案手法の事例への適用結果を示し、分析を行う。第5節では本手法の意義や限界に関して考察を行う。第6節はまとめである。

2 提案手法

2.1 手法の概要

Fig. 1は提案手法の概要を整理したものである。提案手法は「多目的最適化社会シミュレーションによる解集合の獲得」と「解集合に基づく類似性評価」の2つのフェーズから構成される。多目的最適化社会シミュレーションによる解集合の獲得のフェーズでは、対象とする状況群について、各状況における施策の多目的最適化を行う。いま CN 個の状況と XN 個の施策があるとすると、シミュレーションモデル M は状況 $c_i | i \in \{1, \dots, CN\}$ と施策 $x_j | j \in \{1, \dots, XN\}$ を入力として出力 $z = M(c_i, x_j)$ を得る。出力 z に対して3.5で後述する目的関数値 $F_1(z), F_2(z)$ を求め、進化計算(遺伝的アルゴリズム)により施策 x_j を最適化していく。最適化の結果から、決定変数空間における解集合(望ましい施策集合) X_i と目的関数空間における解集合(望ましい施策により実現する効果の集合) S_i を得る。これを CN 個の状況について実行し、 $X = \{X_1, \dots, X_{CN}\}$ と $S = \{S_1, \dots, S_{CN}\}$ を準備する。

次に得られた X, S に基づいて、状況間の類似性評価を行う。決定変数空間における解集合と目的関数空間における解集合のそれぞれの特徴をふまえた距離の定義を行う。定義した距離に基づいて対象とする状況群を階層的な手法によりクラスタリングする。描画したデンドログラムを用いて、状況間の関係性分析、各クラ

スタの特徴分析、2つの距離計算方法による結果の比較を行い、状況の特性に関する理解を深める。次項より、提案手法の各フェーズの詳細を述べる。

2.2 多目的最適化社会シミュレーションによる解集合の獲得

提案手法では、はじめに多目的最適化社会シミュレーション実験を行い、解集合を獲得する。予備実験から、真の非劣解フロントを十分に近似した目的関数空間における解集合を獲得できると考えられる進化計算のアルゴリズムやパラメータ(個体数、世代数)で対象とする状況群のシミュレーションを実行し、決定変数空間および目的関数空間上における解集合を獲得する。

2.3 解集合に基づく類似性評価

本研究では、決定変数空間における解集合と目的関数空間における解集合のそれぞれの特徴をふまえた2通りの距離計算法を考案し、定義した距離に基づいてクラスタ分析を行う。このように、2観点で類似性を評価することは、問題に対する状況の類似性を深く理解することにつながる。例えば、状況間で決定変数空間における解集合が類似しているということは、対象とする問題に関する最適施策の共通性が高いことを意味する。自治体の政策立案においては、この類似性が認められる他自治体ととるべき施策内容の候補が同様であることから、例えばそれらの自治体間で政策内容の違いがでないように協調することができるようになる。一方、目的関数空間上における解集合が類似しているということは、対象とする問題に関し、最適な施策を実行したときの効果が類似していることを意味する。自治体の政策立案においては、この類似性が認められる他自治体と実現できる政策の効果が同様であることから、複数の目的の中からどちらの目的を重んじた政策とするのかどうかを、自治体間で意見交換することができるようになる。

2.3.1 決定変数空間における解集合に基づく距離計算法

決定変数(通常は複数の決定変数から施策が定義されることから決定変数ベクトルとなる)は進化計算において、ダミー変数を用いるなどしてコーディングされる。ここではコーディングされた決定変数(ベクトル)を「コード」と呼ぶことにする。すると、対応する解集合の要素数が状況ごとに異なることから、決定変数空間における解集合の要素数も状況ごとに異なる一方で、各コードの長さは一定であるという特徴を持っている。この特徴に着目することで、コードを文章、コード集合を複数の文章からなる文書として捉えることで、自然言語処理技術を応用して距離(dst_1)を定義する方法を考案した。

準備として、 i 番目の状況 c_i を入力としたシミュレーションにおいて、多目的最適化により得られた決定変数空間における解集合 X_i に基づくコード集合を $X'_i = \{x'_{i1}, \dots, x'_{ik}, \dots, x'_{iL(c_i)}\}$ とする。なお、 $L(c_i) \in \mathbb{N}$ は状況 c_i において得られた非劣解の数を表す。 $GN \in \mathbb{N}$ をコード長としたとき、コードの位置 l の値は $x'_{ikl} \in \{0, 1\} | l \in \{1, \dots, GN\}$ のように0,1いずれかの値をとるようにコーディングされているとする。

上の準備に基づいて、コードを構成する x'_{ikl} を単語、

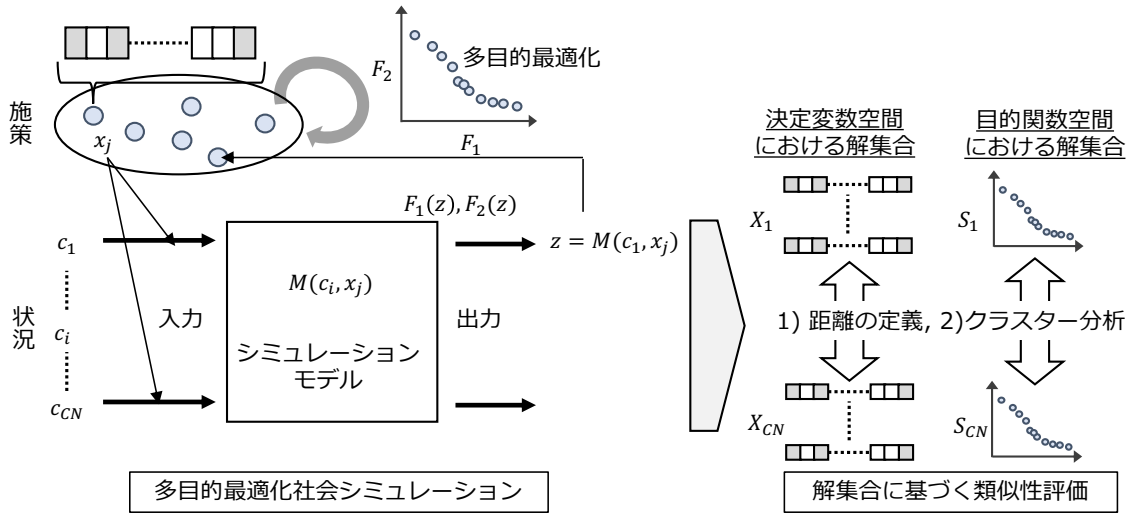


Fig. 1: 提案手法の概要.

コード x'_{ik} を文章，コード集合 X'_i を文書として捉え，Bag-of-Words によりコード集合 X'_i に対応するベクトル \mathbf{a}_i を定義する。

続いて，tf-idf (term frequency-inverse document frequency) を用いて重みづけを行う． \mathbf{a}_i に重みづけを行ったベクトル \mathbf{a}'_i を使って 2 つのコード集合間の Cosine 類似度を求め，求めた類似度を 1 から減じ，状況 $c_\alpha, c_\beta | \alpha, \beta \in \{1, \dots, CN\}$ 間の決定変数空間における解集合に基づく距離 $\text{dst}_1(X_\alpha, X_\beta)$ として定義する (式 (1))。

$$\text{dst}_1(X_\alpha, X_\beta) = 1 - \frac{\mathbf{a}'_\alpha \cdot \mathbf{a}'_\beta}{\|\mathbf{a}'_\alpha\| \|\mathbf{a}'_\beta\|} \quad (1)$$

2.3.2 目的関数空間における解集合に基づく距離計算法

多目的最適化の結果得られた解集合は状況により要素数が異なるという特徴を持つ．目的関数空間に関して，状況 c_α と c_β と対応する目的関数空間における解集合 S_α, S_β の距離を定義する直感的な方法は， S_α の点 (解) ごとに S_β の対応する点 (解) との距離を計算することである．しかしながら，このときには対応する点をどう定めるか検討が必要になる．また，何らかの対応方法を定めたときに，対応づける方向により距離が最小となる点が異なることから， S_α から S_β へ対応させて計算した距離と S_β から S_α へ対応させて計算した距離が等しくなる保証はなく，クラスタリングの際に用いる距離行列が対称にならないという問題が生じる可能性がある．考案した手法では，対応する点は点間の距離が最も短くなるものとし， S_α から S_β および S_β から S_α への双方向から対応させた計算の平均をとることで距離行列が対称となるようにした。

考案した手法では，状況 c_α, c_β 間の目的関数空間における解集合に基づく距離 $\text{dst}_2(S_\alpha, S_\beta)$ として定義する (式 (2))．ただし $|\cdot|$ は集合の要素数， $d(p, q)$ は 2 点間のユークリッド距離を表す。

$$\text{dst}_2(S_\alpha, S_\beta) = \frac{\sum_{p \in S_\alpha} \min_{q \in S_\beta} d(p, q) + \sum_{q \in S_\beta} \min_{p \in S_\alpha} d(p, q)}{|S_\alpha| + |S_\beta|} \quad (2)$$

2.4 クラスタ分析

前述の 2.3.1, 2.3.2 にて考案した距離計算法により求めた距離を用いて，2 観点でクラスタ分析を行う．はじめに，階層的な手法により状況シナリオをクラスタに分割する．次に，デンドログラムを描画して，1) 状況間の関係性分析，2) 各クラスタの特徴分析，3) 2 つの距離計算方法による結果の比較を行う。

1) 状況間の関係性分析では，関心のある状況を取りあげて，デンドログラム中から類似している状況を探す．一般に，関心のある状況から近い位置にいるものは類似しており，遠い位置にいるものはあまり似ていないといえる．後述する適用事例では自治体を状況とするが，この分析により政策立案過程において参考すべき自治体が明らかになる。

2) 各クラスタの特徴分析では，しきい値を設定して分割したクラスタに注目して，各クラスタの特徴の分析を行う．目的関数空間上における解集合が形成するフロントについて考えれば，クラスタは施策効果の現れ方のパターンと対応するといえる．関心のある状況がどのクラスタ (パターン) に当てはまるのか，また，そのパターンは全体の中でどのような位置にあるのかを把握することができる．後述する適用事例では，この分析により施策の効果が他の自治体と比較してどの程度期待できるのかを知ることができる。

3) 2 つの距離計算方法による結果の比較では，関心のある状況について，両結果で共通して類似している状況を探す．もしそのような状況が存在すれば，問題に対してとるべき施策群とそれらを実施した際に期待される効果の傾向の両面で共通性が高いことを意味している．後述する適用事例では，この分析により両観点で類似しているという意味で政策立案過程において参考すべき自治体を明らかにすることができる。

3 適用事例：給付金制度の多目的最適化社会シミュレーション

3.1 概要

適用事例として，沖縄県内の市町村自治体における新型コロナウイルス感染症による経済ショックに対する給付金施策設計の最適化問題を考える．新型コロナウイルス感染症の感染拡大は，緊急事態宣言や自粛に

より様々な産業に大きな経済的被害を生じさせ、その影響は均一ではなく、いわゆる非正規雇用者など一部の方に集中していることも報じられている。自治体はこれらへの対応として、様々な経済支援施策を実施しており、これらの施策は (a) 給付の対象と (b) 支給金額により特徴づけられる。これらの施策は広い意味で家計の支援を目的としているが、税金を原資として配分することから、i) 困窮状態の解消と ii) 適当な支給水準の両立が社会的な合意・受容のために必要であると言え、多目的最適化問題としての側面を持つ。

また、施策の設計に際しては内容の十分な検討が必要となる。仮に施策が有効であったとしても、非就業者をさしおいて一般労働者のみが支給対象となることは、社会的に受け入れられることは難しいことから、支給対象の優先関係が存在する。

Fig. 2 はシミュレーションの概要を整理したものである。入力、自治体の住民のデータである「仮想合成人口個票データ」、新型コロナウイルス感染症による住民の就業状況・収入への影響を表した「経済ショック」、給付金の対象と支給金額からなる「経済支援施策」の3つである。これらのうち、「仮想合成人口個票データ」と「経済ショック」は所与であり、「経済支援施策」のみを設計対象とする。

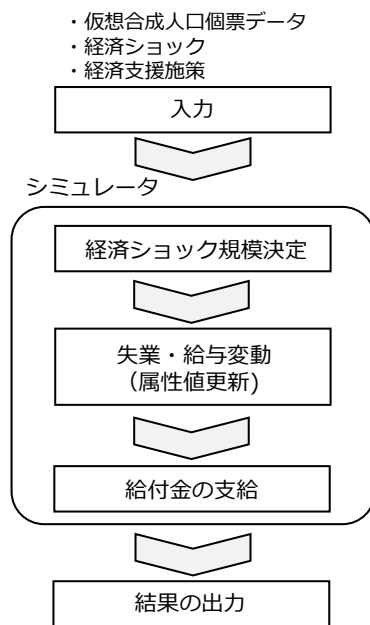


Fig. 2: シミュレーションの概要.

これらの入力を受けて、シミュレータは次の計算を行う。経済ショックに基づいて、対象ごとに生じる失業と給与変動の人数が定まる。人数が決まった後、具体的に誰が失業・給与変動するかをランダムに選択して、失業や給与変動を発生させ、対象となる住民の属性値を更新する。最後に、経済支援施策に基づいて、対象となる住民に給付金を支払い、属性値を更新する。なお、シミュレーションの出力は、給付金の支給後の住民の経済状況に関するデータであり、このデータを用いて目的関数値を計算する。

3.2 仮想合成人口個票

モデルの入力である住民の属性値を仮想合成人口個票データ^{9, 10)}を利用して設定する。仮想合成人口個

票とは、日本の国勢調査等の公的統計から統計との誤差を最小化するようにして生成した仮想的な個票 (住民一人ひとりのデータ) を指す。なお、仮想合成人口個票データは仮想的に合成されたものであり、その合成過程では確率的な振る舞いが組込まれている。このことから、同程度の (十分に小さい) 誤差を実現する仮想合成人口個票データのセットは複数存在し、ある特定のセットが「正しい」ものではないことから、本シミュレーションではこのことを不確実性として捉え、準備した3セットに対する平均値で評価を行っている。シミュレーションでは2015年時点の統計情報から合成されたデータから、沖縄県内の41市町村の住民に関する、世帯ID、家族類型ID、世帯人数、住民ID、年齢、世帯内役割ID、収入、産業分類ID、雇用形態ID、企業規模IDを利用した。

3.3 シミュレーション

Q を給付の対象、 m を支給金額としたとき、シミュレーションの出力は、施策 (決定変数) である経済支援施策 $x_j = (Q, m)$ 、状況である市町村 $c_i \in \{ \text{那覇市}, \dots \}$ と経済ショック $y \in \{ \text{opt}, \text{mid}, \text{psm} \}$ を与えることで、一意に定まる。すなわち、シミュレーションモデル M の実行結果 z は (3) 式にて定まり、 z を用いて、(8) 式にて後述する目的関数 F_1, F_2 を計算する。

$$z = M(c_i, y, x_j) \quad (3)$$

このとき、経済ショック y の具体的な設定値は紙幅の制約から省略するが、観光業や飲食業を中心とした影響を受ける産業、短時間労働者や臨時労働者など雇用形態に応じた失業確率を $\text{opt} < \text{mid} < \text{psm}$ の順で高くなるように設定している。経済ショック y はすべての市町村で共通の設定であり、所与である。

3.4 経済支援施策

経済支援施策 $x_j = (Q, m)$ は給付の対象 Q と支給金額 m で構成される。給付の対象を家族類型、世帯内役割、産業分類、雇用形態、企業規模の5つの条件で決定するものとし、各条件に対して合致する住民 A の部分集合をそれぞれ A_1, A_2, \dots, A_5 とすると、給付対象の住民の集合 Q は各条件に合致する住民の積集合として以下のように定義できる。

$$x_j = (Q, m), \quad Q = \bigcap_{k=1}^5 A_k \quad (4)$$

このとき、一律の金額 m ($m > 0$) が Q に対して給付される。

給付対象の集合は、全体から A_k の観点で AND 条件を設定したクエリ結果として理解できる。Table 1 は各属性の集合の説明である。例えば、ある産業に従事している全員を対象とする場合には、 A_3 以外の各属性集合における全条件が含まれるようにして、産業に関わる A_3 についてのみ指定産業の条件で限定すればよい。また、単独世帯 (男性) で短時間労働者を対象とする場合には、 A_2 と A_4 のみ、それぞれ単独世帯 (男性)、短時間労働者に限定すれば良い。なお、詳細は紙幅の都合から省略するが、経済支援施策には対象の制約条件が存在し、関係性を満たすもののみが実行可能とする。

Table 1: 給付対象の属性.

対応集合	属性	種類	詳細説明
A_1	家族類型	9	単独世帯, 男親と子供, 女親と子供, 夫婦のみ, 夫婦と子供, 夫婦と両親 (夫の親), 夫婦とひとり親 (夫の親), 夫婦・子供と両親 (夫の親), 夫婦・子供とひとり親 (夫の親)
A_2	世帯内役割	8	単独世帯 (男性), 単独世帯 (女性), 夫・男親, 妻・女親, 子供 (女性), 子供 (男性), 親 (男性), 親 (女性)
A_3	産業分類	20	日本標準産業分類による
A_4	雇用形態	4	非就業者, 一般労働者, 短時間労働者, 臨時労働者
A_5	企業規模	4	5~9人, 10人~99人, 100人~999人, 1000人以上

なお, A_4 の雇用形態が非就業者である場合, A_3, A_5 には「無し」という属性を割り当てている.

くわえて, 支給金額の総額にも制約を設ける. 全人口に対して, 20,000円ずつ支払う規模の総支給額に抑える必要があるとする. すなわち, $|\cdot|$ を集合の要素数としたときに, (5) 式を満たせば実行可能とする.

$$|Q| \times m \leq |A| \times 20,000 \quad (5)$$

3.5 経済指標

経済ショックと経済支援施策の影響を評価するために2つの経済指標を考える. 相対的貧困に該当する世帯を減らすことを目的とする f_1 は, (6) 式のように世帯人数 N に応じた相対的貧困の減少について対象人数による重み付き和として定義する. このとき, $H_{N=n}$ は経済ショック前の相対的貧困である世帯人数 N の世帯数, $H_{N=n}^*$ は経済ショック後に経済支援施策による給付を実施した後の相対的貧困である世帯人数 n の世帯数, B_n は世帯人数 n である世帯の住人の集合を表す ($|\cdot|$ は集合の要素数).

$$f_1(z) = \sum_{n=1}^4 \left(\frac{|B_n|}{|A|} \times \frac{H_{N=n}^*}{H_{N=n}} \right) \quad (6)$$

なお, 世帯人数ごとの相対的貧困の基準は, 世帯人数が1人では120,000円, 2人では170,000円, 3人では210,000円, 4人では240,000円とする. 世帯人数 n は5人以上の世帯が少ないことをふまえ, 最大4までを考慮することとする.

失業や収入減少があった世帯の収入を減少分だけ補償することを目的とする f_2 は, (7) 式のように当初の世帯収入に占める支給による前後変動率として定義する. このとき, H をすべての世帯の集合として, I_h は経済ショック前の世帯 h の世帯収入, I_h^* は経済支援施策による給付後の世帯 h の世帯収入, $|I_h - I_h^*|$ は世帯収入の変化の絶対値を表す. なお, $|H|$ は世帯数である.

$$f_2(z) = \frac{\sum_{h \in H} |I_h - I_h^*|}{\sum_{h \in H} I_h} \quad (7)$$

これらの2つの経済指標 f_1, f_2 について, 3つの経済ショック $y \in \{opt, mid, psm\}$ について平均をとったものをそれぞれの目的関数 F_1, F_2 とする (式 (8)).

$$F_m(c_i, x_j) = \frac{1}{3} \sum_s f_m(M(c_i, y, x_j)), \quad (m = 1, 2) \quad (8)$$

4 適用結果

4.1 シミュレーションによる解集合の獲得

本研究では, 多目的最適化にあたり, 対象とする2目的最適化に高い性能を示し, 代表的手法であるNSGA-II⁽¹¹⁾を採用した. 施策を表す決定変数は給付金の支給条件と金額の2進数をバイナリ表現した52bitの長さでコード化を行った. 予備実験を通じた確認をふまえ, シミュレーションではすべての状況について共通した設定を用い, 個体数100, 世代数100, 一様交叉 (交叉確率0.9), 突然変異確率0.05とした.

Fig. 3は沖縄県内の41市町村を状況群として多目的最適化社会シミュレーションを行い, 得られた目的関数空間における解集合を一覧できるように可視化したものである. 図中の市町村名のあとのかっこ内は得られた解の数を示している. 図から解集合の形状はいくつかのパターンに分類可能であると思われる. また, 一般に類似していると思われる同郡内の町村間でも必ずしも形状が類似しているわけではないこともわかる.

4.2 解集合に基づく類似性評価

Fig. 4とFig. 5はそれぞれ決定変数空間における解集合に基づくデンドログラムと目的関数空間における解集合に基づくデンドログラムである. なお, 階層的的手法によるクラスタリングでは完全連結法を用いている.

4.2.1 状況間の関係性分析

分析例として, 県庁所在地である那覇市をとりあげて, 類似する状況を明らかにする. Fig. 4において, 図中(1)からわかるように, 那覇市は浦添市, 島尻郡与那原町, 中頭郡北谷町と類似性が高く, 状況を最も改善する経済支援施策群の内容の観点で似ているといえる. Fig. 5においては, 図中(a)からわかるように, 国頭郡本部町, 島尻郡与那原町, 八重山郡竹富町と類似性が高いことが読み取れ, 状況を最も改善する経済支援施策群により改善される程度の観点で似ているといえる.

このとき, 浦添市や島尻郡与那原町は那覇市と地理的に近接しているが, 中頭郡北谷町や国頭郡本部町, 八重山郡竹富町は離れた場所に位置している. また, 人口規模はいずれも那覇市に比べて小さく, 大きく異なっている. このように那覇市と外形的な特徴は異なるが, 本問題においては類似性が明らかになった.

4.2.2 各クラスタの特徴分析

Fig. 5についてしきい値を0.5に設定し, 5つのクラスタに分割した後に, 41市町村の非劣解フロントを1

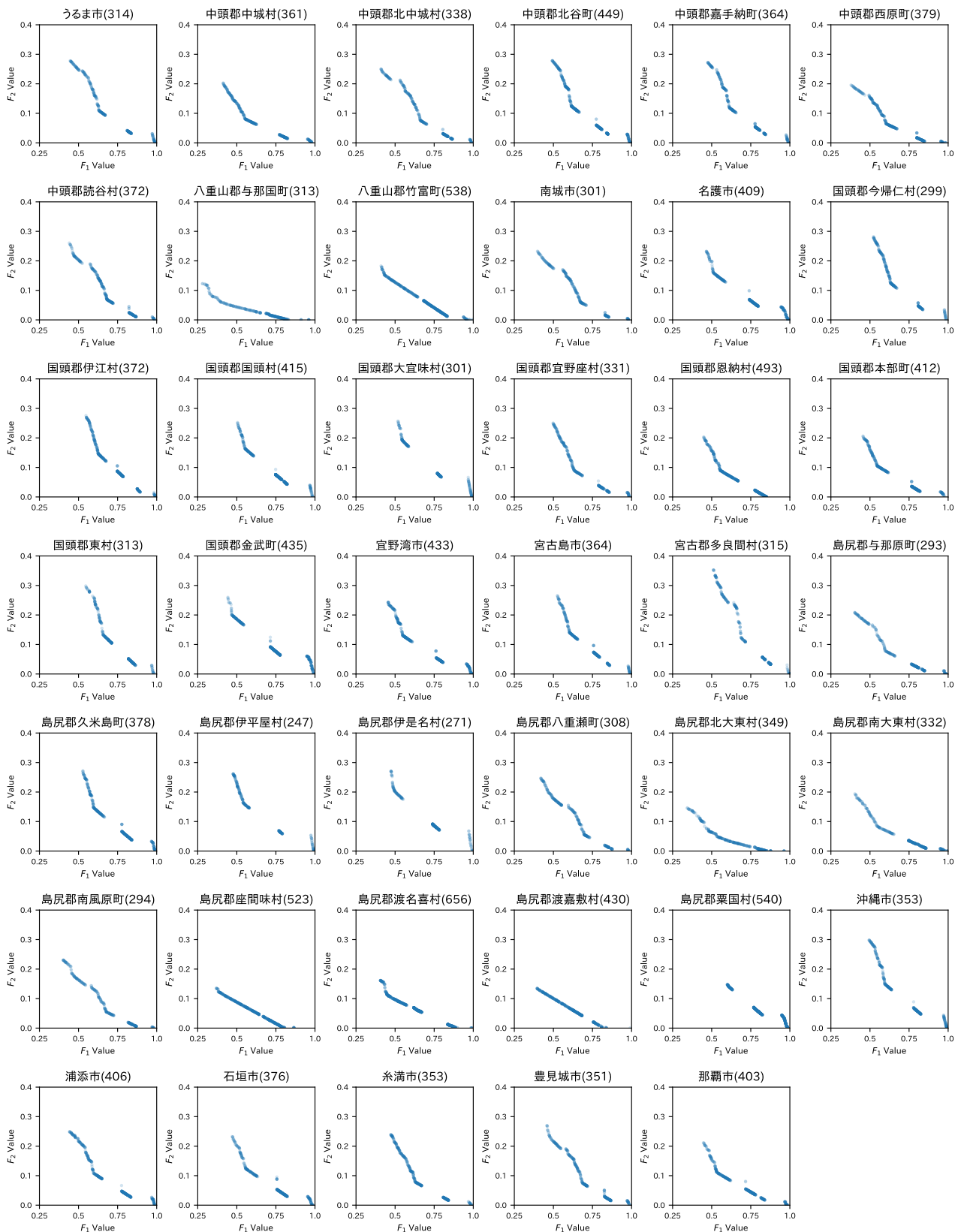


Fig. 3: 各状況における目的関数空間における解集合.

つの目的関数空間に描画し、クラスタ ID ごとに色をつけたものが Fig. 6 である。なお、凡例中のクラスタ ID の後ろのかっこ内はクラスタに属する自治体数を表している。

はじめに、目的関数空間における配置の特徴に応じ

てクラスタに分割がなされていることが確認できた。次に各クラスタの特徴に注目する。たとえば、灰色の cls1 のクラスタ (Fig. 5 では (b) に相当) には島尻郡座間味村、島尻郡北大東村、八重山郡与那国町が含まれるが、 F_1, F_2 ともに最も目的関数値を改善することが

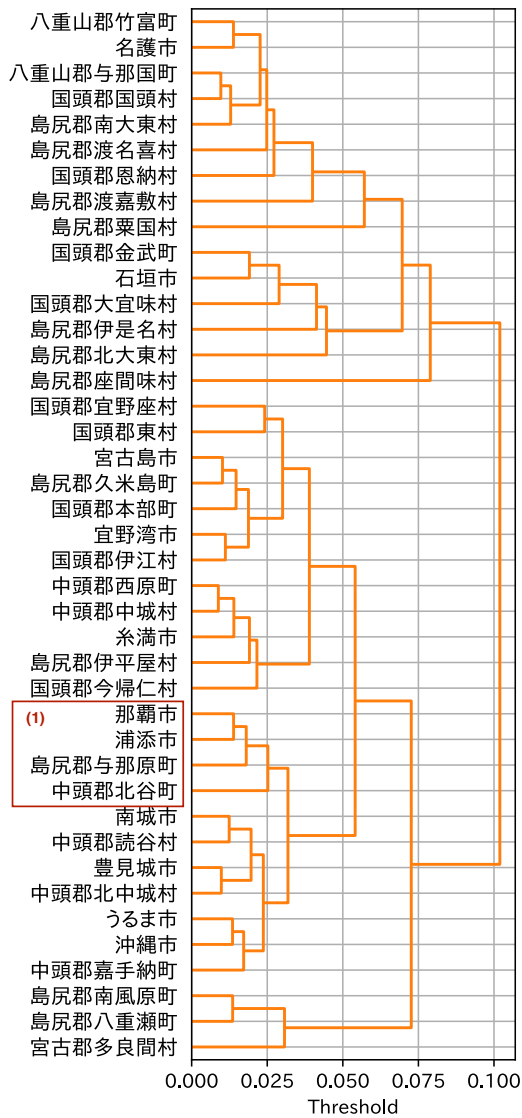


Fig. 4: 決定変数空間における解集合に基づくデンドログラム.

でき、 F_1 と F_2 との間のトレードオフ関係がもっとも弱い自治体群であることがわかる。反対に、青色の cls3 のクラスタ (Fig. 5 では (c) に相当) にはうるま市、沖縄市、宮古島市など 10 市町村が含まれるが、他の 4 つのクラスタに比べて F_1, F_2 ともに最も目的関数値を改善することができず、 F_1 と F_2 との間のトレードオフ関係が最も強い自治体群であることがわかる。

4.2.3 2つの距離計算方法による結果の比較

2つの距離計算法による類似性評価で共通して類似性が認められるならば、その状況群ではとるべき施策の集合とその時の効果の2観点において共通性が高いことを意味する。Fig. 4 および Fig.5 からは、例えば、那覇市と島尻郡与那原町、名護市と国頭郡国頭村、宮古島市と島尻郡久米島町など2観点において共通性が高い自治体のペアを発見することができる。このように、提案手法から政策立案過程において参考にするべき他自治体を明らかにすることができた。

4.3 提案手法の評価

提案手法について、(1) 手法の正当性の確認 (verification) と (2) 有用性 (既存の分類と異なる分類を提供

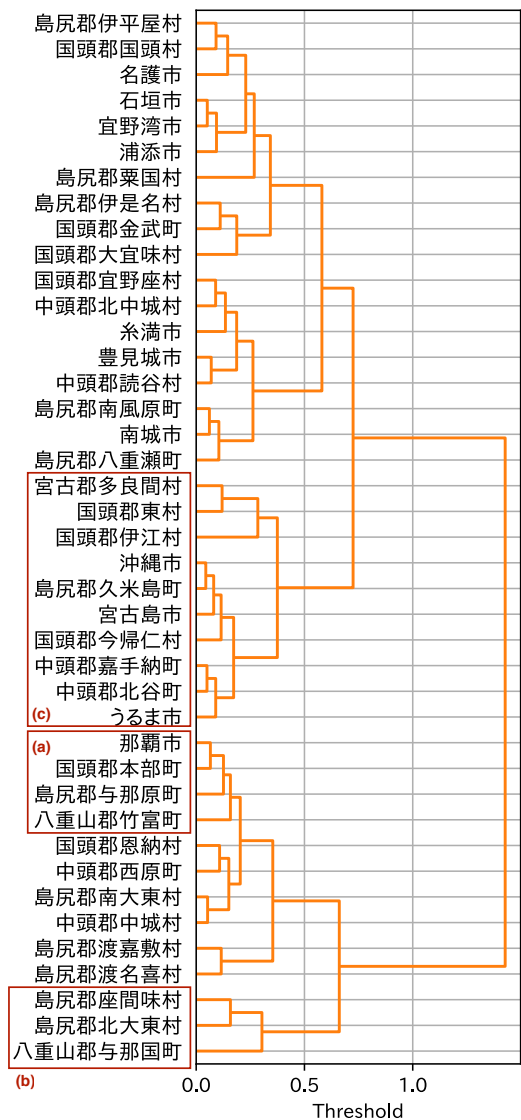


Fig. 5: 目的関数空間における解集合に基づくデンドログラム.

できるのか)の確認を行う。(1)については、影響範囲と影響確率が類似している経済ショック y_A, y_B と本事例で想定している経済ショック (y_C : COVID-19) との類似性を比較する。ここで y_A と y_B を就業者のうち全産業の短時間労働者のそれぞれ 1%, 2%が失業するショックとした。 y_A と y_B は経済ショックとして相互に類似度合いが高いことから、得られる解集合も類似していることが期待される。その一方で、 y_A と y_C, y_B と y_C とではそのような期待は成り立たないことから、 y_A, y_B, y_C での分類結果をそれぞれ A, B, C のように表記するとし、A-B 間に比べて A-C, B-C 間の類似度が低くなると予想し、これが成立することを確認する。

(2)については、既存の分類である山本ら⁷⁾(Y)と本事例での分類結果を比較する。A, B, C はいずれもシミュレーション結果に基づく分類であるが、Y は事前情報に基づくことから、A, B, C と Y とでは類似の程度としては低いことが期待される。また、もし提案手法が事前情報による分類と完全に同じ分類を提供するのであれば、提案手法の有用性は乏しいと言える。このことから、A, B, C と Y との類似度が A-B, A-C,

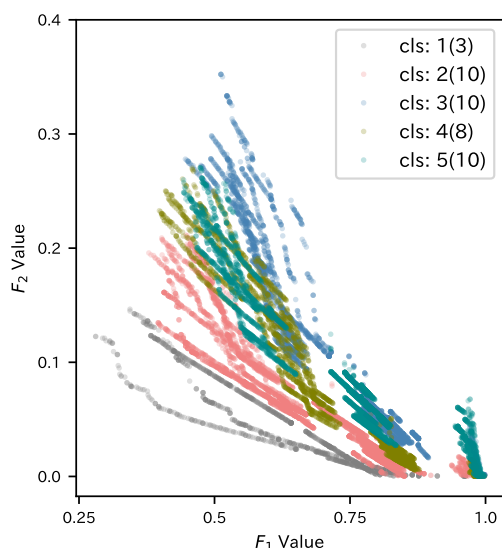


Fig. 6: 目的関数空間における解集合に基づくクラスタリング結果.

B-C 間の類似度と比較して低いことを確認する.

Table 2: クラスタリング結果の類似性比較.

Similarity	TH	A - B	B - C	C - A	A - Y	B - Y	C - Y
Decision Variable Set	0.04	0.56	0.26	0.21	0.22	0.19	0.21
	0.05	0.58	0.28	0.21	0.17	0.18	0.25
	0.06	0.43	0.26	0.23	0.17	0.14	0.22
Front	0.4	0.50	0.84	0.46	0.15	0.17	0.17
	0.5	0.59	0.77	0.47	0.18	0.22	0.17
	0.6	0.64	0.67	0.52	0.11	0.18	0.10

A: 1%, B: 2%, C: COVID-19, Y: Yamamoto, et al. 2018

Table 2 は分類結果 A, B, C, Y について, 決定変数空間における解集合 (Decision Variable Set) および目的関数空間における解集合 (Front) から分割の基準となるしきい値 (TH) を 3 段階ずつ設定した上で, クラスタ分割結果を比較する指標である Adjusted Mutual Information (AMI) ¹²⁾ を用いて, 類似性を比較する. なお, AMI は異なる分割のときほど 0 に近づき, 全く等価のときに 1 をとる.

決定変数空間における解集合に注目すると, どのしきい値でも A-B 間の類似度は 0.43~0.58 の値をとるのに対して, B-C および C-A では 0.21~0.28 の値にとどまっている. また, Y との比較をすると, A-Y, B-Y, C-Y ともに 0.14~0.25 となっていることがわかる. 続いて, 解集合に注目すると, いずれのしきい値でも A-B 間の類似度は 0.50~0.64 と高い水準ではあるが, B-C 間の類似度のほうが 0.67~0.87 とより高かった. このことから, 今回の分析からは効果の傾向の点では経済ショックシナリオとしてより近いと思われる A-B 間より B-C 間のほうが類似していると評価できる. 一方で, A-Y, B-Y, C-Y はともにいずれのしきい値でも 0.10~0.22 と低い水準であった. 以上から, 一部の状況を除き, 概ね提案手法の正当性と有用性が確認できた.

5 考察

5.1 本手法の意義

社会シミュレーションの研究では所与の状況下でのログ分類に関する研究 ¹³⁾ やシミュレーションへの進化計算の適用 ³⁾ はなされてきたが, 状況自体を分類する方法の提案はなされていなかった. また, 進化計算の領域では多目的最適化に基づく設計を最適化とデータマイニングの両方を用いて, 獲得した最適解群から知識獲得を行う設計情報学 ¹⁴⁾ の研究が注目されてきている. 例えば, 1つの問題において得られた解集合をクラスタリングして多数の解から代表的な解を抽出することで意思決定支援を志向する方法も提案されている ¹⁵⁾ が, 本手法のように解空間の特性から問題自体を分類することはなされていなかった.

本手法は, 意思決定者が直面している状況について, 他の状況と比較したときにどのような位置づけになるのかを最適な決定変数の特性と施策シナリオ効果の観点から明らかにするものである. 多目的最適化では, 最適解は一つではなく集合として得られることから, 現実の意思決定に際しては, 必ず解集合から一つの解を選択する必要が生じる. このとき, 社会的な受容を見据えれば, 類似している状況の別の意思決定者と相談・調整を行い歩調を合わせることも必要になる. 本手法はこの際の相談・調整先として適当である候補をその問題の特徴に即した形で提示できる点が, 既存の事前情報に基づいた分類手法 ^{6, 7)} と決定的に異なるといえる.

5.2 本手法の限界

本手法では, 決定変数空間における解集合に基づく距離計算において, コード集合を文書として捉えて類似度を定義している. この方法は全体としての傾向として類似していることを評価しているが, 2つのコード集合間で個別のコードが実際に類似していることを保証するものではない. 今後の課題として, 個別の類似性を保証するアプローチも必要であると考えられる.

また, 多目的最適化においては, 一般に真の非劣解フロントは明らかでないため, 得られた非劣解フロントの近似が真のものに近いかどうか知ることができない. しかしながら, 本手法の適用の前提として, 得られたフロント (解集合) が十分に真の非劣解フロントを近似できている必要がある. このことから, 何らかの形で収束性を評価して, 十分な水準にあることを確認した上で類似性評価を行う必要があると考えられる.

6 おわりに

本稿では, 多目的最適化社会シミュレーションにおける解集合に基づいた状況シナリオ分類手法を提案した. 提案手法を経済ショックに対する給付金施策の多目的社会シミュレーションに適用し, 沖縄県内の 41 市町村を決定変数空間における解集合と目的関数空間における解集合の 2 観点での類似性に基づいて分類し, 状況間の関係性や各クラスタの特徴の分析を行った. 適用結果に基づいて, 手法の妥当性と有用性の観点から評価も行い, 予備的ではあるが良好な結果を得た. 本手法の意義として, 自治体における政策立案過程における相互参照先の自治体を示しうることや, 限界として決定変数空間における解集合に基づく距離計算において個別のコードの類似を保証しないことやフロント

の収束性評価の必要性について考察を行った。

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。適用事例の定式化にあたり、進化計算学会実世界ベンチマーク問題分科会の皆様から有益なコメントを頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Y. Goto and S. Takahashi: Landscape Analysis of Possible Outcomes, *Agent-Based Social Systems*, **8**, 87/98 (2011)
- 2) K. Ohori and S. Takahashi: Market Design for Standardization Problems with Agent-Based Social Simulation, *Journal of Evolutionary Economics*, **22**-1, 49/77 (2012)
- 3) 倉橋, 南, 寺野: 逆シミュレーション手法による人工社会モデルの分析, 計測自動制御学会論文集, **35**-11, 1454/1461 (1999)
- 4) 和泉, 池田, 山本, 諏訪, 岡田, 磯崎, 服部: 可能世界ブラウザとしてのエージェントシミュレーション—ターゲットマーケティングへの応用, 電子情報通信学会論文誌 D, **J96-D**-12, 2877/2887 (2013)
- 5) 伊藤: 自治体政策過程の動態—政策イノベーションと波及, 慶應義塾大学出版会 (2003)
- 6) 総務省: 類似団体別市町村財政指数表 <https://www.soumu.go.jp/iken/ruiji/index.html>
- 7) 山本, 高見, 高橋: 統計指標に基づく市町村分類の試み, *JILPT Discussion Paper*, **18**-05, 27 pages (2018)
- 8) 佐藤, 石淵: 進化型多数目的最適化の現状と課題, オペレーションズ・リサーチ, **62**-3, 156/163 (2017)
- 9) 杉浦, 村田, 原田: 賃金構造基本統計調査に基づく合成世帯集団の労働者への所得の割当て, システム制御情報学会論文誌, **32**-2, 69/78 (2019)
- 10) T. Murata, S. Date, Y. Goto, T. Hanawa, T. Harada, M. Ichikawa, H. Lee, M. Munetomo and A. Sugiki: Distribution System for Japanese Synthetic Population Data with Protection Level, *The International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2020*, 187/193 (2020)
- 11) K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal and T. Meyarivan: A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, **6**, 182/197 (2002)
- 12) N. Vinh, J. Epps and J. Bailey: Information Theoretic Measures for Clustering Comparison—Variants, Properties, Normalization and Correction for Chance, *Journal of Machine Learning Research*, **11**, 2837/2854 (2010)
- 13) 後藤: 複数の分析関心に基づく社会シミュレーション・ログの階層的分類と可視化手法, 計測自動制御学会論文集, **56**-10, 463/474 (2020)
- 14) K. Chiba, Y. Makino and T. Takatoya: Design-Informatics Approach for Intimate Configuration of Silent Supersonic Technology Demonstrator, *Journal of Aircraft*, **49**-5, 1200/1211 (2012)
- 15) E. Zio and R. Bazzo: A Clustering Procedure for Reducing the Number of Representative Solutions in the Pareto Front of Multiobjective Optimization Problems, *European Journal of Operational Research*, **210**-3, 624/634 (2011)