

TR-H-239

ボランティア集団活動変化の数理モデルと
その妥当性に関する考察

野村竜也, 杉万俊夫 (京都大),
ハツ塚一郎 (奈良大), 飯田信介 (京都大),
吉川 徹 (CSK), 下原勝憲

1998.3.16

ATR人間情報通信研究所

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2 TEL: 0774-95-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories
2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan

Telephone: +81-774-95-1011

Fax : +81-774-95-1008

ボランティア集団活動変化の数理モデルとその妥当性に関する考察

野村竜也^{1*} 杉万俊夫² 八ッ塚一郎³ 飯田信介² 吉川徹⁴ 下原勝憲¹

¹ATR 人間情報通信研究所, ²京都大学総合人間学部, ³奈良大学社会学部, ⁴CSK

要旨

本稿では、社会心理学的集団現象に対する数理モデルによる説明・理解の研究の一環として、災害前後でのボランティア集団の活動変化の現象を取り扱う。本研究は未だ途中段階であるが、これまで行ってきた幾つか(確率微分方程式による半定量社会学および Cellular Automata)のアプローチの現状を紹介し、さらに数理モデルアプローチ自体の妥当性に関する議論を行う。

1 はじめに

近年、グループ・ダイナミクスの観点からマイクロ・マクロ・ダイナミクスを再認識する動きがある [11]。元々社会心理学は個人と社会の動的相互規定関係を問題とする学問であり、個人の認知研究に傾斜した現在の社会心理学の現状に危機感を唱える動きが着実に根付いているのである。我々は、以前からこのマイクロ・マクロ・ダイナミクスの観点が人工生命の「創発」の観点と同一であることに着目しており、この動きに沿う形で、人工生命的手法と社会心理学の相互交流による発展の可能性を論じている [14]。

図1は、頻繁に引用される人工生命における創発の模式図であると同時に、社会心理学におけるマイクロ・マクロ・ダイナミクスの観点を表したものである。現在の人工生命における集団行動研究においては、図1の局所ユニット

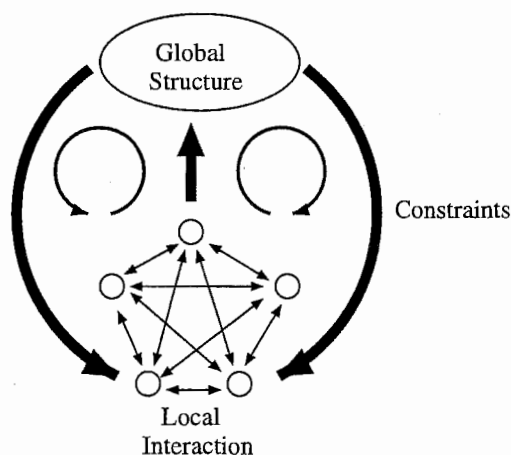


図1: 人工生命と社会心理学の共通フレームワーク

は分子、細胞、あるいは単純な行動規則を持つ虫などであるが、社会心理学においては、特定の社会場面における比

* 〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2, E-mail: nomura@hip.atr.co.jp, URL: <http://www.hip.atr.co.jp/~nomura>

1998/4/1 よりシャープ(株)技術本部ソフトウェア研究所 (〒 632 奈良県天理市樺本町 2613-1, E-mail: nomura@slab.tnr.sharp.co.jp)

動的単純な行動規則を持つ人間として表現される。この図式に基づいて、人工生命と社会心理学の相互交流が可能となる。つまり、人工生命の合成的手法を社会心理学に持ち込むことにより、マイクロ・マクロ・ダイナミクスを表現する数理モデルを構築し、直接人間を用いた統制条件下実験の限界を超えたシミュレーションを可能とする。また、社会心理学が明らかにしている人間の特定場面での特徴を人工生命に持ち込むことにより、新たな集団行動モデルの可能性が広がる。社会心理学において既にこの種の研究は行われており、マルチエージェントの概念を用いた人間の集団・組織行動のモデルが多い [2, 3, 9, 12, 15]。

本稿ではその研究の一環として、災害前後でのボランティア集団の活動変化の現象に対する 2 つの数理モデル、確率微分方程式による半定量社会学によるアプローチと Cellular Automata によるアプローチについて、未だ途中段階ながらもその研究現状について紹介する。

また、自然科学や計算科学において培われた数理モデルの手法をそのまま人間の集団に当てはめることは原理的に可能なかどうかについて、社会心理学における一つの主張 [1] を基に、その妥当性に関して議論を行う。

2 瀬戸内海モデルによるボランティア活動変化の解釈

本稿で対象としているのは、阪神大震災において、震災前後でのボランティア活動状況に差が存在するという事象である。具体的には、震災後に、震災前には目立たなかった小規模ボランティアグループの活動が活発化しているということである。この現象に対して、我々のグループの一人は、これらのグループは震災後に勃興したのではなく、以前から存在していたとの調査結果を表しており [13]、一つの仮説として、「震災をきっかけに、何らかの理由でその活動が目立つようになったのではないか」というものを提唱している。さらに、この仮説から、「震災が社会のボランティア集団の注目態度に圧力を与え」、「震災によってボランティア集団間の相互作用に変化が起こり、その活動度が変化した」という仮説を立てており、各ボランティア組織を島に例え、島の存在が外部圧力により水面が下がることで目立つようになったとの類推から、この仮説を「瀬戸内海モデル」と名付けている。

我々は、この瀬戸内海モデルを表現する数理モデルを構成することにより、ボランティア集団の震災前後の活動変化を再現することを目標として、Haken の協同現象論 [7] の流れを組む Weidlich & Haag の「半定量社会学」 [6] と、Cellular Automata による 2 種類の数理モデルを考案し、それに基づくシミュレーションを行っている。

以下、3.1 において半定量社会学に基づくモデルの詳細を、4 において Cellular Automaton に基づくモデルの詳細を記述する。

3 半定量社会学によるアプローチ

本章では、瀬戸内海モデルに対して、ボランティア活動自体の変化よりも、ボランティア活動に対する社会の注目態度が変化したと解釈し、半定量社会学の基本モデルであるマスター方程式により、社会のボランティア集団に対する注目の割合およびその変化を記述する。

3.1 マスター方程式による社会の注目度の記述

半定量社会学における基本的記述は、以下のものである：

- 複数の局面 (A 個) のそれぞれにおいて社会構成員が採りうる態度 ($i_i \in \{A_{i1}, \dots, A_{id_i}\}$) が存在
- 各構成員が採りうる態度の空間 $\hat{A} = \{i = (i_1, \dots, i_A)\}$ を想定 (\hat{A} の全要素数 $= L = \prod_{i=1}^A d_i$)
- N 人から成る社会における各態度を採る人数の配分 $\hat{n} = \{n_i\}_{i \in \hat{A}}$ ($\sum_{i \in \hat{A}} n_i = N$) を社会の状態変数 (社会配位) として設定

- 時間 t において社会が状態 \hat{n} をとる確率 $p(\hat{n}, t)$ を想定

この確率 $p(\hat{n}, t)$ の変化は以下の $L+N-1$ 次元のマスター方程式によって決定される：

$$\frac{dp(\hat{n}, t)}{dt} = \sum_{\hat{m} \neq \hat{n}} (w_t(\hat{n}, \hat{m})p(\hat{m}, t) - w_t(\hat{m}, \hat{n})p(\hat{n}, t))$$

$w_t(\hat{n}, \hat{m})$: 時間 t における単位時間当たりの状態 \hat{n} から \hat{m} への変化確率

このマスター方程式による記述を、社会のボランティア集団に対する注目態度に適用する。

3.1.1 平均値方程式の定常解としての社会状態記述

B をボランティア集団の数、 J を業務内容の種類の数とする。各集団および業務内容に対する局面において、それに対する注目の有無を、社会構成員の局面に対する態度と定義すると、態度空間は $L = B + J$ 次元の 0-1 の 2 値を成分とするベクトル全体

$$\{(b, j) = (b_1, \dots, b_B, j_1, \dots, j_J); b_p, j_q \in \{0, 1\}\} = \{0, 1\}^L \quad (1)$$

で表現される (つまり、 $M = 2^L$ 個の態度が存在)。ここで、各態度に 2 進展開の対応から得られる (1 から M までの) 整数値の番号付けを行っておく。

さらに、社会構成員の数を N とすると、ボランティア集団に対する社会のマクロな状態を示す社会配位は、 N 人の人間の各態度に対する人数の割り振り

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, \dots, n_M), \quad \sum_{i=1}^M n_i = N \quad (2)$$

で表現される。このような社会配位は

$$R = \begin{pmatrix} N + M - 1 \\ N \end{pmatrix} \quad (3)$$

個存在する。

この社会配位に対する確率分布、つまり、時間 t において社会配位 \mathbf{n} をとる確率 $p(\mathbf{n}, t)$ の時間発展方程式として、上記のマスター方程式を考えると以下ようになる：

$$\frac{dp(\mathbf{n}, t)}{dt} = \sum_{\mathbf{m} \neq \mathbf{n}} (w_t(\mathbf{n}, \mathbf{m})p(\mathbf{m}, t) - w_t(\mathbf{m}, \mathbf{n})p(\mathbf{n}, t)) \quad (4)$$

ここで、右辺の和は \mathbf{n} と異なるすべての社会配位についての総和である。 $p(\mathbf{n}, t)$ は確率分布であるので、以下の条件を満たしている：

$$p(\mathbf{n}, t) \geq 0, \quad \sum_{\mathbf{n}} p(\mathbf{n}, t) = 1 \quad \text{for } \forall \mathbf{n}, t \quad (5)$$

係数 $w_t(\mathbf{n}, \mathbf{m})$ は社会配位 \mathbf{m} から \mathbf{n} への単位時間当たりの遷移確率であり、インデックス t はこれが時間によって変化する場合を考慮している。この係数は以下の条件を満たしている：

$$0 \leq w_t(\mathbf{n}, \mathbf{m}) \leq 1, \quad \sum_{\mathbf{n} \neq \mathbf{m}} w_t(\mathbf{n}, \mathbf{m}) \leq 1 \quad \text{for } \forall \mathbf{m} \neq \mathbf{n}, t \quad (6)$$

係数 $w_t(\mathbf{n}, \mathbf{m})$ は一般的に、社会構成員個人の単位時間当たりの態度変化確率および出生・死亡確率から得られる。本研究では、出生・死亡の過程は無いものと仮定し、さらに、単位時間内では二人以上の人間が一斉に態度を変える

ことは無いと仮定する。この場合、社会配位が m の時に個人の態度が j 番目のものから i 番目のものに変化する確率を $\omega_{ij}(m)$ (条件 $\sum_{i=1}^M \omega_{ij}(m) = 1$ を満たす) とすると、

$$i > j \text{ かつ } \mathbf{n} = (m_1, \dots, m_{j-1}, m_j - 1, m_{j+1}, \dots, m_{i-1}, m_i + 1, m_{i+1}, \dots, m_M)$$

または

$$j > i \text{ かつ } \mathbf{n} = (m_1, \dots, m_{i-1}, m_i + 1, m_{i+1}, \dots, m_{j-1}, m_j - 1, m_{j+1}, \dots, m_M)$$

の時、 $w_t(\mathbf{n}, m) = N\omega_{ij}(m)$ 、それ以外の場合は $w_t(\mathbf{n}, m) = 0$ となる。つまり、この場合では係数は時間に対して不変であるが、その時点での社会配位には依存する。

係数 $w_t(\mathbf{n}, m)$ が時間に依存しない場合は、マスター方程式 (4) は有限状態マルコフ過程の前進方程式であるので、その無限時間後の分布は係数と初期分布から原理的に計算出来る [10]。しかし、その次元が大きいため実際に解を解析的に計算するのは効率が悪い。そのため、本稿では方程式 (4) を直接取り扱わず、それから導かれる平均値の方程式に注目する。今、 i 番目の態度を採っている社会構成員の時間 t における平均人数 $\bar{n}_i(t) = \sum_{\mathbf{n}} n_i p(\mathbf{n}, t)$ の時間発展は、分布 $p(\mathbf{n}, t)$ が単一の峰、つまり極大点を唯一持つという仮定の下で、以下の式で表される：

$$\frac{d\bar{n}_i}{dt} = \sum_{j \neq i}^M (\omega_{ij}(\bar{\mathbf{n}})\bar{n}_j - \omega_{ji}(\bar{\mathbf{n}})\bar{n}_i) \quad (\bar{\mathbf{n}} = (\bar{n}_1, \dots, \bar{n}_M)) \quad (7)$$

この方程式の次元は (4) よりも遥かに少ない M であり、しかもその係数は直接 $\omega_{ij}(m)$ により指定されるので、計算効率が改善される。この方程式は、各ボランティアおよび業務内容に対する社会の注目の度合の時間発展を示しているので、以降、方程式 (7) を注目度方程式と呼ぶ。

今、 $N = 1$ として正規化した場合の注目度方程式を考える。係数 $\omega_{ij} = \omega_{ij}(\mathbf{n})$ が \mathbf{n} に依存せず定数であるとする、注目度方程式も有限状態マルコフ過程の前進方程式であり、その無限時間後の状態 $\bar{\mathbf{n}}(\infty)$ は係数と初期状態から原理的に計算可能である。特に、以下の式が有用である [8]：

$$W = (\omega_{ij}) - I, \quad \bar{W} = (\bar{W}_{ij}) \quad : W \text{ の余因子行列} \\ \left(\sum_{i=1}^M \bar{W}_{ii} \right) \bar{\mathbf{n}}(\infty) = \bar{W} \bar{\mathbf{n}}(0) \quad (8)$$

3.1.2 特徴パラメータ

3.1.1における注目度方程式 (7) を構成するのに必要な外部パラメータを、以下に改めて列挙する：

- B : ボランティア集団数
- J : 業務内容種類数
- $\omega_{ij}(\mathbf{n})$: 社会配位 \mathbf{n} における個人の態度変化確率

今、上記の数値が更なる外部パラメータ γ によって決定されているとする。このような γ を特徴パラメータと呼ぶ。つまり、 γ はボランティア集団数、業務内容種類数、業界地図を表す集団間の強弱、各集団における各業務内容に対する重みなどを示す数値ベクトルもしくはその集合である。ここでは、 γ を以下の2つの行列の組として与える：

$$\gamma = (\Gamma_1, \Gamma_2), \quad \Gamma_1 = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1\gamma_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{\gamma_1 1} & \cdots & \alpha_{\gamma_1 \gamma_1} \end{pmatrix}, \quad \Gamma_2 = \begin{pmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1\gamma_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{\gamma_2 1} & \cdots & \beta_{\gamma_2 \gamma_1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

この γ は以下のことを表現している：

- ボランティア集団数 = γ_1 、業務内容種類数 = γ_2
- j 番目のボランティア集団の i 番目のボランティア集団との強度 = α_{ij}
- j 番目のボランティア集団における i 番目の業務内容に対する重み = β_{ij}

従って、 $B = \gamma_1$ 、 $J = \gamma_2$ ($M = 2^{\gamma_1 + \gamma_2}$) とすることにより γ から方程式 (7) の次元が決まる。また、以下の手順で γ から係数 ω_{kl} を決定する。

今、 k および l に対応する bit 列をそれぞれ

$$s_k = (b_1^k, \dots, b_B^k, j_1^k, \dots, j_J^k), \quad s_l = (b_1^l, \dots, b_B^l, j_1^l, \dots, j_J^l) \quad (10)$$

とし、各 (k, l) に対して以下の手順で遷移強度 f_{kl} を決定する：

1. s_l と s_k のハミング距離が 2 以上の場合は、 $f_{kl} = C_1$ とする。
2. $b_p^l = 0$ かつ $b_p^k = 1$ の場合は、

$$f_{kl} = \alpha_{pp} + \sum_{q \neq p} b_q^l \alpha_{qp} + \sum_{q=1}^J j_q^l \beta_{qp} \quad (11)$$

つまり、 p 番目のボランティア集団自体の強度と、現在注目している他のボランティア集団との結合強度および現在注目している業務内容のボランティア集団における重みの和とする。

3. $j_p^l = 0$ かつ $j_p^k = 1$ の場合は、

$$f_{kl} = C_2 + \sum_{q=1}^B b_q^l \beta_{pq} \quad (12)$$

つまり、一定の注目圧力および現在注目しているボランティア集団における p 番目の業務内容の重みの和とする。

4. それ以外の場合は、 $f_{kl} = C_3$ とする。

最終的に、

$$\omega_{ij} = \frac{f_{ij}}{c_j} \quad (c_j = \sum_{k=1}^M f_{kj}, \quad i, j = 1, \dots, M) \quad (13)$$

とする。ここで、 C_i ($i = 1, \dots, 3$) は遷移強度を調節する外部パラメータであり、ボランティア集団現象が起きている時点での社会構成員に対する外部環境因子と捉えられる。特に、 $D = C_2 - C_3$ が大きいほど、業務への注目に対する強度と注目から離れる強度との差が大きいため、 D を注目圧力と呼ぶ。

この係数決定方式では ω_{kl} は定数であるので、注目度方程式の解が原理的に計算でき、各ボランティア集団および業務内容への社会の注目態度の平均人数割合が理論的に計算出来る。また、同じ γ に対して異なる C_i を適用し、解を比較することにより、同じボランティア集団と業務内容の構成でありながら社会環境が変わることによって注目の割合がどのように変化するかを評価することが可能となる。

3.1.3 遷移強度からの平均値方程式の定常解の導出

3.1.1 および 3.1.2 の方式では、一旦遷移強度 f_{ij} を求めた後、改めて係数 W のすべての余因子行列を求める必要があり、計算効率が悪い。しかし、 ω_{ij} を求めることなく直接 f_{ij} から定常解 $\bar{n}(\infty)$ を求めることが出来る。

まず、

$$W = (\omega_{ij}) - I = (a_{ij}), \quad a_{ij} = \begin{cases} \omega_{ij} = \frac{f_{ij}}{c_j} & (i \neq j) \\ \omega_{ii} - 1 = \frac{f_{ii} - c_i}{c_i} = \frac{-\sum_{k \neq i} f_{ki}}{c_i} & (i = j) \end{cases} \quad (14)$$

つまり

$$W = \begin{pmatrix} \frac{-\sum_{k \neq 1} f_{k1}}{c_1} & \frac{f_{12}}{c_2} & \cdots & \frac{f_{1M}}{c_M} \\ \frac{f_{21}}{c_1} & \frac{-\sum_{k \neq 2} f_{k2}}{c_2} & \cdots & \frac{f_{2M}}{c_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_{M1}}{c_1} & \frac{f_{M2}}{c_2} & \cdots & \frac{-\sum_{k \neq M} f_{kM}}{c_M} \end{pmatrix} \quad (15)$$

となる。今、

$$F = \begin{pmatrix} -\sum_{k \neq 1} f_{k1} & f_{12} & \cdots & f_{1M} \\ f_{21} & -\sum_{k \neq 2} f_{k2} & \cdots & f_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \cdots & -\sum_{k \neq M} f_{kM} \end{pmatrix} \quad (16)$$

とすると W の (i, j) 余因子 \bar{W}_{ij} と F の (i, j) 余因子 \bar{F}_{ij} との関係は

$$\bar{W}_{ij} = \frac{c_i \bar{F}_{ij}}{c_1 c_2 \cdots c_M} \quad (i, j = 1, \dots, M) \quad (17)$$

従って、 W の余因子行列 \bar{W} と F の余因子行列 \bar{F} との関係は

$$\bar{W} = \frac{1}{c_1 c_2 \cdots c_M} \begin{pmatrix} c_1 \bar{F}_{11} & c_1 \bar{F}_{12} & \cdots & c_1 \bar{F}_{1M} \\ c_2 \bar{F}_{21} & c_2 \bar{F}_{22} & \cdots & c_2 \bar{F}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_M \bar{F}_{M1} & c_M \bar{F}_{M2} & \cdots & c_M \bar{F}_{MM} \end{pmatrix} \quad (18)$$

となり、最終的に

$$\left(\sum_{k=1}^M c_k \bar{F}_{kk} \right) \begin{pmatrix} \bar{n}(\infty)_1 \\ \bar{n}(\infty)_2 \\ \vdots \\ \bar{n}(\infty)_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \bar{F}_{11} & c_1 \bar{F}_{12} & \cdots & c_1 \bar{F}_{1M} \\ c_2 \bar{F}_{21} & c_2 \bar{F}_{22} & \cdots & c_2 \bar{F}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_M \bar{F}_{M1} & c_M \bar{F}_{M2} & \cdots & c_M \bar{F}_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{n}(0)_1 \\ \bar{n}(0)_2 \\ \vdots \\ \bar{n}(0)_M \end{pmatrix} \quad (19)$$

となる。

また、もとの平均値方程式 (7) が示すマルコフ過程が規約 (遷移確率がすべて正) の場合は、 $\left(\sum_{i=1}^M \bar{W}_{ii} \right)^{-1} \bar{W}$ の各列ベクトルがすべて定常解のベクトル $\bar{n}(\infty)$ に一致することがわかっているので、定常解は初期値に依存せず

$$\bar{n}(\infty)_i = \left(\sum_{k=1}^M c_k \bar{F}_{kk} \right)^{-1} c_i \bar{F}_{ii} \quad (i = 1, \dots, M) \quad (20)$$

となる。3.1.2で与えられた f_{ij} の定め方ではかならず $f_{ij} > 0$ 、従って、平均値方程式が示すマルコフ過程が規約となるので、定常解は上記の形で与えられる。この方式では、 W を求める手間が省かれ、必要な余因子計算の数も従来の M^2 から M に縮減される。

3.1.4 簡易実験

(20) が示すボランティア集団に対する社会の注目態度平均人比は、(9) が示すボランティア集団構成パラメータおよび外部パラメータ C_1, C_2, C_3 に関して、除算を含む非線形関数であり、解析的に特徴を調べるのは難しい。ここでは、特定の集団構成パラメータと複数の外部パラメータ群に対して、数値計算により注目態度平均人数比を求め、比較を行う。

ここでのボランティア集団構成は、以下の通りである：

- ボランティア集団数 = 3、業務数 = 2

- 特徴パラメータ：

$$\gamma = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.1 \\ 0.1 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

また、外部パラメータは以下の2通りを用意した：

1: $(C_1, C_2, C_3) = (0.5, 0.5, 0.1)$ (注目圧力 $D = 0.4$) : 災害前の状態を想定

2: $(C_1, C_2, C_3) = (0.5, 5.0, 0.1)$ (注目圧力 $D = 4.9$) : 災害後に注目圧力が増加した状態を想定

図2に数値計算の結果を示す。横軸の各態度は、最初の3bit が3つのボランティア集団に対する注目の有無を、残りの2bit が2種類の業務に対する注目の有無を示している。

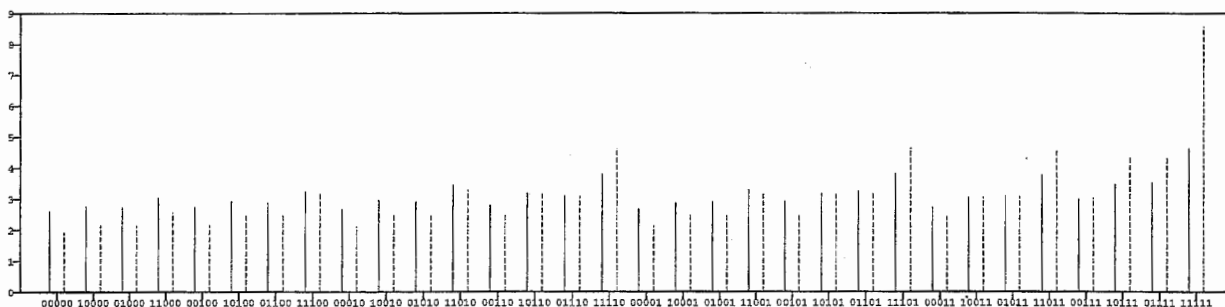


図2: マスター方程式の解 (横軸: 態度, 縦軸: 各態度に対する社会の平均人数比 (%), 実線: 1の外部パラメータに対する結果, 破線: 2の外部パラメータに対する結果)

図2において見られるように、態度 (111**), (** *11) において人数比の増加が起こった。特に、全てのボランティア集団と業務に対して注目する態度 (11111) の人数比は、倍近くに増加している。つまり、より注目の度合いの強い態度に社会が移行したことを示しており、注目度平均値方程式がボランティア活動に対する社会の注目の変化を定性的に表していることを示している。

3.2 進化戦略との組合せ

3.1章で示した定式化では、与えられた社会環境におけるボランティア構成の注目状態記述と評価、および環境変化に対する与えられた構成での注目状態の変化を表現することは出来るが、微分方程式を基礎としているため、与え

られた環境でのボランティア構成自体の最適性、および環境変化に対する (新たなボランティア集団や業務内容の発生などの) ボランティア構成の変化のダイナミクスは表現出来ない。本章では、進化戦略 (Evolutionary Strategy: ES) を用いた上記特性のモデリング手法について記述する。

3.2.1 進化戦略によるボランティア構成の進化

3.1.2で与えられた社会環境におけるボランティア構成 γ に対して、3.1.1の注目度方程式 (7) により1つの平均的
社会配位としての注目度 $\bar{n}_\gamma(\infty) = (\bar{n}_{\gamma_1}, \dots, \bar{n}_{\gamma_{M(\gamma)}})$ ($M(\gamma) = 2^{\gamma_1 + \gamma_2}$) が決定する。この時、 γ に対する社会の満足度評価として以下のものを考える：

$$Ev(\gamma) = \sum_{i=1}^{M(\gamma)} \bar{n}_{\gamma_i}(\infty) \left(\sum_{p,q=1}^{\gamma_1} b_p^i b_q^i \alpha_{pq} + \sum_{p=1}^{\gamma_1} \sum_{q=1}^{\gamma_2} b_p^i j_q^i \beta_{qp} \right) \quad (21)$$

この式は以下のことを意味している。各態度において、まず、注目していないボランティア集団および業務内容は評価されない。次に、注目しているボランティア集団に対して、注目している業務内容のその集団における重さが評価値の一部となる。さらに、注目している2つのボランティア集団間の強度が評価値の一部となり、各態度を採る平均人数との荷重和が満足度評価値となる。この式 (21) により、異なるボランティア構成間の評価が可能となる。

本稿ではこの評価方程式 (21) に基づいて、3.1.2章で提示した特徴パラメータ γ に対する ES を以下のように構成する：

1. 染色体表現された特徴パラメータの初期集団 $Pop(0) = \{\gamma_1, \dots, \gamma_G\}$ を用意する。($t=0$ とする。)
2. 3.1.2の手順に基づき、各 γ_i に対して注目度方程式 (7) を構成し、注目状態を (解析的に、もしくは数値計算により) 求めて評価方程式 (21) に基づき評価値 $Ev(\gamma_1), \dots, Ev(\gamma_G)$ を計算する。
3. 各 γ_i の適応度を

$$fitness_i = \frac{Ev(\gamma_i)}{\sum_{j=1}^G Ev(\gamma_j)} \quad (22)$$

として、ルーレット選択方式により新たな G 個の染色体から成る中間集団 $Pop'(t)$ を作る。

4. $Pop'(t)$ の染色体に対して交叉、突然変異の操作を行い、新たに G 個の染色体を作り、次世代の集団 $Pop(t+1)$ とする。
5. 2-4 を繰り返す。

これらの操作のうち、選択により現在与えられている社会環境において満足度の高いボランティア構成に対応する特徴パラメータが生成される。また、染色体に対する遺伝子操作を通して新たなボランティアや業務を追加したり、余分なものを削除したりすることによって、自然選択に基づいたボランティア集団の生成・消滅のダイナミクスを導入することが出来る。

ここで問題となるのが、(1) γ の染色体表現、(2) 突然変異の定義である。1つの問題に対するこれらの定義は複数考え得るが、現在は以下のものを考えている。

3.2.2 染色体表現

式 (9) において示されるように、各 γ_i は2つの行列の組合せで表現される。また、最初の行列は正方行列であり、後の行列は最初の行列と同じ列数を持つ (正方とは限らない) 行列である。また、各成分は0以上の実数値である。

従って、各 γ_i は以下の形式の非負実数値成分を持つ1つの行列で表現出来る：

$$\gamma_i = \begin{pmatrix} \Gamma_1^i \\ \Gamma_2^i \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\Gamma_1^i = \begin{pmatrix} \gamma_{11}^i & \cdots & \gamma_{1G_{i1}}^i \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{G_{i1}1}^i & \cdots & \gamma_{G_{i1}G_{i1}}^i \end{pmatrix}, \Gamma_2^i = \begin{pmatrix} \gamma_{(G_{i1}+1)1}^i & \cdots & \gamma_{(G_{i1}+1)G_{i1}}^i \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{G_{i2}1}^i & \cdots & \gamma_{G_{i2}G_{i1}}^i \end{pmatrix} \quad (G_{i1} \leq G_{i2})$$

逆に言えば、(列数) \leq (行数) となる任意の非負実数値成分を持つ行列は、それを染色体として持つボランティア構成に対応する。つまり、全染色体の空間は $\cup_{m \geq n} M(\mathbf{R}_+, m, n)$ (\mathbf{R}_+ : 非負実数値全体の集合) となり、ES はこの空間上の確率多点探索となる。

3.2.3 突然変異

実数値を用いる染色体に対する突然変異も幾つか提案されているが、本稿で扱う染色体はボランティア構成を表現しているので、それを意識した突然変異の手法が考えられる。ここでは、以下の5種類の突然変異を考える：

一般の実数値染色体における突然変異：(23)で示される染色体行列の成分の1つをランダムに選び、任意の数値と置き換える。この場合、置き換えるための乱数の範囲をあらかじめ設定しておく必要がある。

ボランティア集団追加変異：与えられた染色体行列に対して、新たなボランティア集団に対応する行と列を追加する。つまり、 $\gamma_k = (\gamma_{ij}^k)$ に対して

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11}^i & \cdots & \gamma_{1G_{k1}}^k & \gamma_{1(G_{k1}+1)}^{new} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma_{G_{k1}1}^k & \cdots & \gamma_{G_{k1}G_{k1}}^k & \gamma_{G_{k1}(G_{k1}+1)}^{new} \\ \gamma_{(G_{k1}+1)1}^{new} & \cdots & \gamma_{(G_{k1}+1)G_{k1}}^{new} & \gamma_{(G_{k1}+1)(G_{k1}+1)}^{new} \\ \gamma_{(G_{k1}+1)1}^k & \cdots & \gamma_{(G_{k1}+1)G_{k1}}^k & \gamma_{(G_{k1}+2)(G_{k1}+1)}^{new} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ \gamma_{G_{k2}1}^k & \cdots & \gamma_{G_{k2}G_{k1}}^k & \gamma_{(G_{k2}+1)(G_{k1}+1)}^{new} \end{pmatrix} \quad (24)$$

を新たな染色体とする。ここで、 γ^{new} は乱数で設定する。

業務内容追加変異：与えられた染色体行列に対して、新たな業務内容に対応する行と列を追加する。つまり、 $\gamma_k = (\gamma_{ij}^k)$ に対して

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11}^k & \cdots & \gamma_{1G_{k1}}^k \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{G_{k2}1}^k & \cdots & \gamma_{G_{k2}G_{k1}}^k \\ \gamma_1^{new} & \cdots & \gamma_{G_{k1}}^{new} \end{pmatrix} \quad (25)$$

を新たな染色体とする。ここで、 γ^{new} は乱数で設定する。

ボランティア集団削除変異：与えられた染色体行列に対して、ボランティア集団をランダムに選択し、対応する行と列を削除した行列を新たな染色体とする。つまり、 k 番目のボランティア集団が削除対象として選択された場合、第 k 行第 k 列 ($1 \leq k \leq G_{k1}$) を削除する。

業務内容削除変異：与えられた染色体行列に対して、業務内容をランダムに選択し、対応する列を削除した行列を新たな染色体とする。つまり、 l 番目の業務内容が削除対象として選択された場合、第 $(l + G_{k1})$ 行 ($1 \leq l \leq G_{k2} - G_{k1}$) を削除する。

3.2.4 実験

上述の ES に基づいて、どのようなボランティア構成が進化戦略の過程において生き残るかを調べるシミュレーション*を行った。シミュレーションにおける具体的な条件は、以下の通りである：

- 最大ボランティア数 = 6、ボランティア数と業務数の和の最大値 = 7
- 外部パラメータ $(C_1, C_2, C_3) = (0.5, 0.5, 0.5)$
- 特徴パラメータの上限 = 10.0、下限 = 0.01 (初期化、突然変移もこの範囲でランダムに行う)
- 染色体集団サイズ = 1000、突然変移率 = 0.2

図 3 に (21) で示される評価値の世代を通じての変化を、図 4 に 500 世代目におけるボランティア構成ごとの個体の分布を、図 5 に 500 世代目におけるボランティア構成ごとの個体の評価値分布を示す。図 4,5 の横軸は、ボランティア構成の特徴パラメータ行列の縦・横の次元を表している。

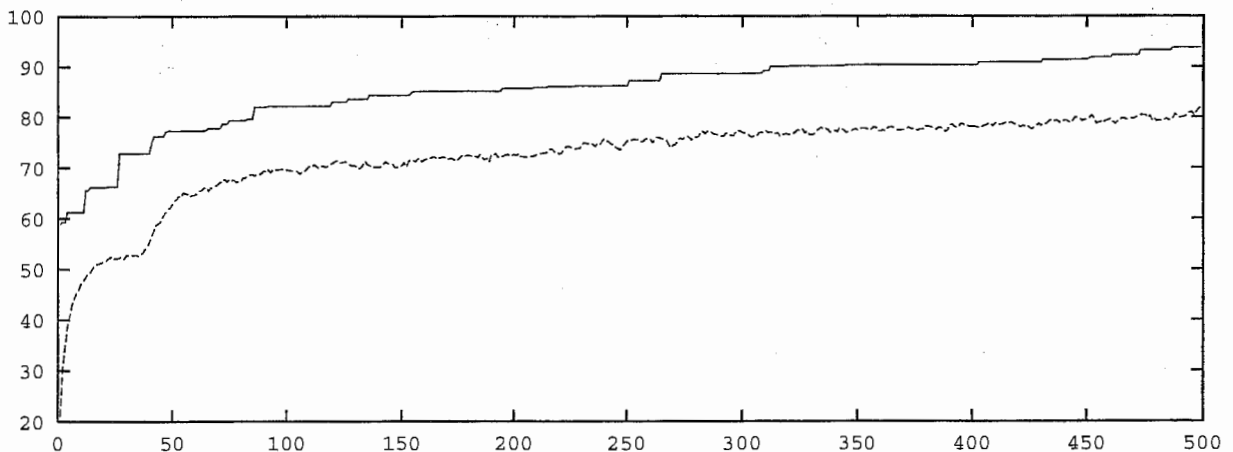


図 3: 評価値の変化 (横軸: 世代数, 縦軸: 適応度, 実線: 集団最大評価値, 破線: 集団平均評価値)

図 3 が示すように、本 ES の過程において評価値は世代を通して確実に上昇していく。また、図 5 が示すように、個体を示す行列が縦横比 2:1 の状態に集中している。特に、上記の行列の次元の制限の中で、この比のうちで最も大きい 7×3 の状態に約 8 割の行列個体が集中している。さらに、図 5 が示すように、この比の行列に対応する個体の評価値は他に比べて高く、(21) の評価値による選択圧においては、ボランティア構成はボランティア集団と業務種類数の比が 2:1 の場合が有利である傾向を伺わせる。

3.3 半定量社会学アプローチの問題点

これまで、半定量社会学に基づく数理モデルに関して述べてきたが、本アプローチには現時点で幾つかの問題点がある。以下にそれを示す。

*実験プログラムの作成は吉川徹によるものである。

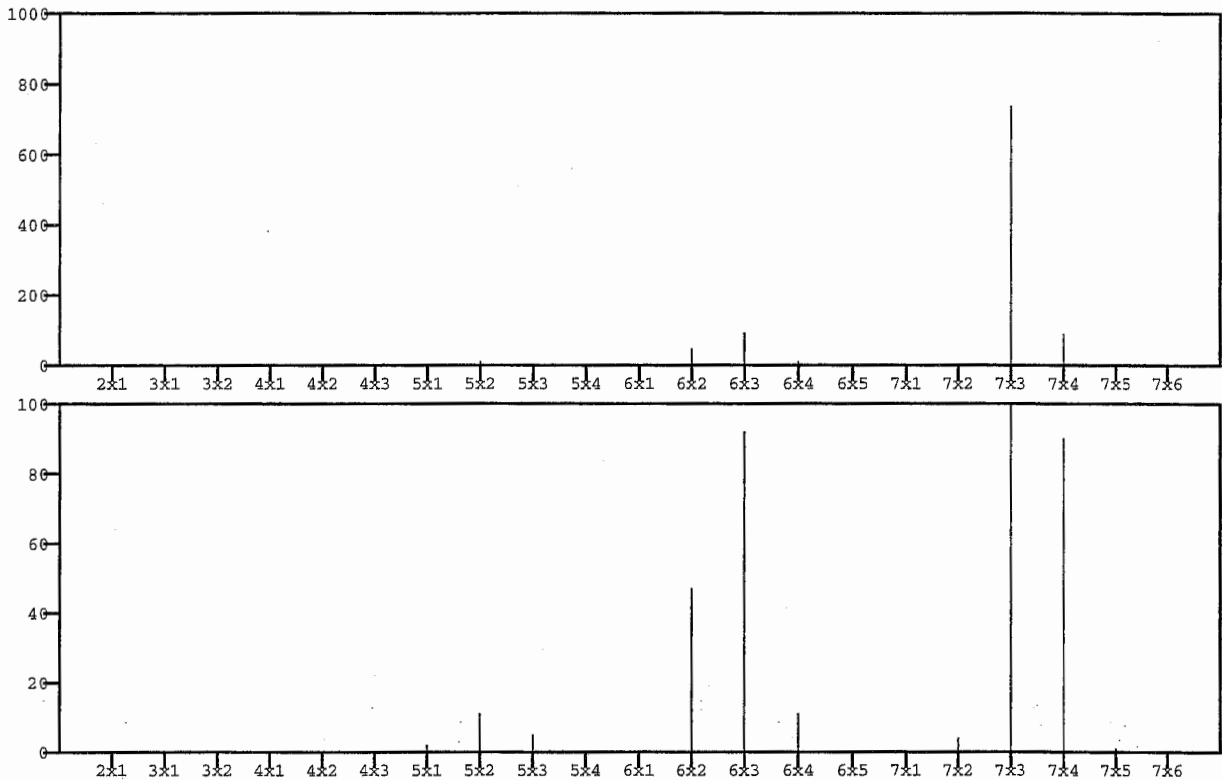


図 4: 500 世代目におけるボランティア構成ごとの個体の分布 (下図: 縦軸 0-100 の範囲での上図の拡大)

3.3.1 マスター方程式における問題点

3.1.1で示したマスター方程式およびその近似による平均値方程式において、我々は社会構成員個人の態度変化確率 ω が、その時点での社会状態 \hat{n} に依存しないと仮定していた。しかし、経験的には、人間は社会状態と独立にその態度を決めるとは考えにくい。従って、より現実に近い数理モデルとしては、係数が状態に依存するマスター方程式を考慮しなければならない。

3.3.2 進化過程によるモデルの問題点

3.2において、マスター方程式では表現できないボランティア構成自体の変化のダイナミクスを表現するために、マスター方程式のパラメータを染色体とする進化戦略の過程を導入した。しかし、実際の社会現象において、複数のボランティア構成候補が仮想的に存在して、自然選択を通してその中の一つが現実化するという考え方は、非現実的であると思われる。社会現象として現れるボランティア構成はどの時点においても一つであり、その一つの構成から次の時点での構成が生成されるとすれば、進化過程によるモデルは妥当性が低い。

3.3.3 シミュレーションにおける問題点

仮に、進化過程によるモデルに何らかの意義を認めたとしても、3.2で示したシミュレーション手順は実行に際し使用メモリが膨大であることが問題となっている。

例えば、ボランティア集団が10、業務内容が5の場合、

- 特徴パラメータ数: $10 \times (10 + 5) = 150$

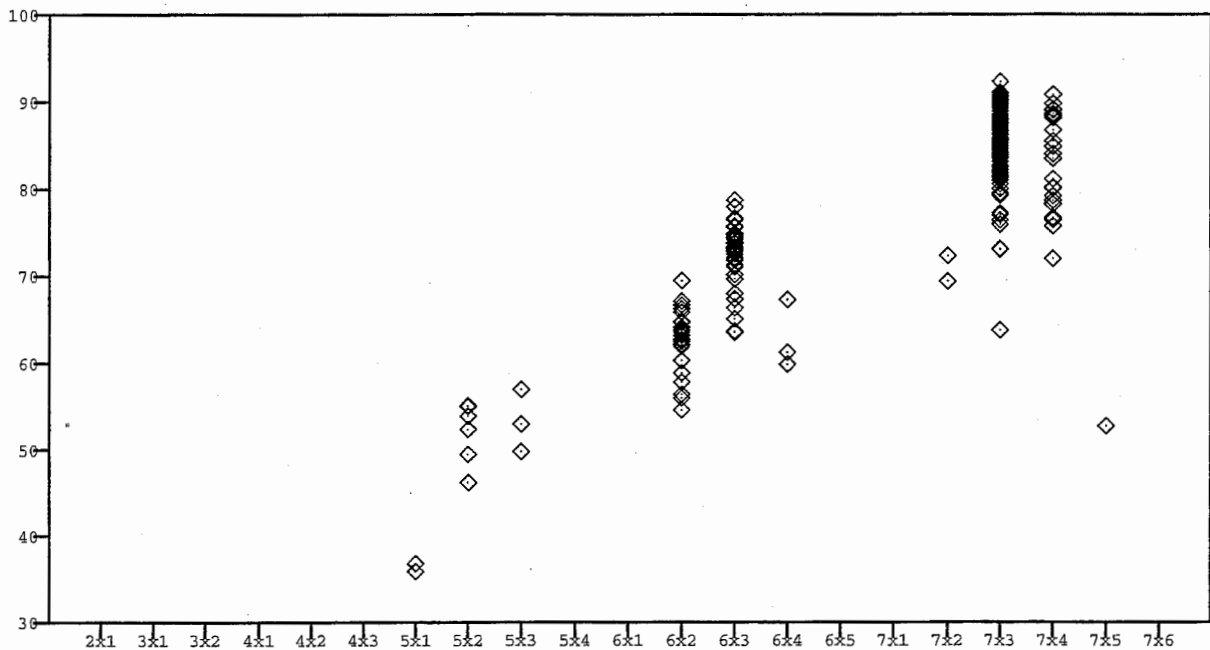


図 5: 500 世代目におけるボランティア構成ごとの個体の評価値分布

- 全態度数 (平均値方程式の次元) : $2^{10+5} = 32768$
- 全態度間遷移強度 : $2^{10+5} \times 2^{10+5} > 10^9$

となり、各数値を浮動小数点で保持する場合、1つの構成に対して1.2KB、1つの構成における平均値方程式の解の導出およびそれによる評価値の導出において8GB以上のメモリが必要となる。これは通常のパソコン・ワークステーションの処理限界を超えるものである。ボランティア集団が7、業務内容が3の場合でも、

- 特徴パラメータ数 : $7 \times (7 + 3) = 70$
- 全態度数 (平均値方程式の次元) : $2^{7+3} = 1024$
- 全態度間遷移強度 : $2^{7+3} \times 2^{7+3} > 10^6$

となり、1つの構成に対して560 Bytes、1つの構成における評価値の導出において8MB以上のメモリが必要となる。このため、3.2.4における実験では、ボランティア集団数の上限を6、ボランティア数と業務数の和の上限を7に制限している。それでも、1000個体・500世代交替の実験にワークステーションで数週間必要であり、特徴パラメータ間の相関などの詳細データを解析するには至っていないのが現状である。

4 Cellular Automata によるアプローチ

本章では、瀬戸内海モデルに対して、ボランティア活動自体の変化を空間的構造を含めて表現することを目的として、Cellular Automata(CA)を用いてボランティア活動の空間的分布や時間的遷移のグループダイナミクスを記述する。なお、本モデルに基づいた実験は未だ実行中であり、研究としては未発展の段階である。

4.1 2次元 CA による記述

ここで用いるのは、6に示される2次元のセル配置構造を持ち、状態遷移規則がセル間で一様でない CA である。つまり、社会集団の各個人を CA の各格子点に見立て、回りの状況に影響されながら各人のボランティア活動への参入状態を決定するものとする。各セルの状態は、その時点で何らかのボランティア活動に参入しているかどうかを示しており、各セルの状態遷移規則において、対応する個人のボランティア参加に対する嗜好が反映される。一般的には、以下の形式で記述される：

$$\begin{array}{cccccccc}
 s_{11}(t) & \cdots & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & s_{1J}(t) \\
 \vdots & & & & & & & & \vdots \\
 \vdots & & s_{i-N j-N}(t) & \cdots & s_{i-N j}(t) & \cdots & s_{i-N j+N}(t) & & \vdots \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & \cdots & s_{i j-N}(t) & \cdots & s_{ij}(t) & \cdots & s_{i j+N}(t) & \cdots & \vdots \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \vdots & & s_{i+N j-N}(t) & \cdots & s_{i+N j}(t) & \cdots & s_{i+N j+N}(t) & & \vdots \\
 \vdots & & & & & & & & \vdots \\
 s_{I1}(t) & \cdots & & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & s_{IJ}(t)
 \end{array}$$

図 6: 2次元セル構造の CA

S : 状態空間

$$S = \{0, 1, \dots, M-1\} \quad (26)$$

$$s_{ij}(t) : t \text{ 時間における } i \text{ 行 } j \text{ 列のセルの状態} (\in S) \quad (i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J) \quad (27)$$

$$r_{ij} : M_{N+1}(S) \rightarrow S : i \text{ 行 } j \text{ 列のセルの状態遷移規則} \quad (28)$$

$$s_{ij}(t+1) = r_{ij} \begin{pmatrix} s_{i-N j-N}(t) & \cdots & s_{i-N j}(t) & \cdots & s_{i-N j+N}(t) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s_{i j-N}(t) & \cdots & s_{ij}(t) & \cdots & s_{i j+N}(t) \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ s_{i+N j-N}(t) & \cdots & s_{i+N j}(t) & \cdots & s_{i+N j+N}(t) \end{pmatrix} \quad (N : \text{近傍数}^*) \quad (29)$$

各 r_{ij} は個人特性に対応する外部パラメータなどによって、セルごとに異なる。外部パラメータは、いわば性別・年代による特性の違いを表現するものであり、各セルごとに異なる外部パラメータを2次元セル空間上に割り当てる。それと同時に、各セル共通の外部パラメータを設けて、その値によって遷移規則が変化するように設定することにより、その時点での社会的な外圧(参入圧力)を表現する。

具体的なモデルとしては、現時点では以下のものを取り扱う：

2値モデルの場合：

$$S = \{0, 1\}$$

*セル空間をトーラスなどの境界のない空間としない場合は、境界近辺のセルの遷移規則の入力数は $< (2N+1)^2$ となる。

$$s_{ij}(t) = \begin{cases} 0 & (\text{ボランティア不参加}) \\ 1 & (\text{ボランティア参加}) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i\text{行}j\text{列の} \\ \text{セルの} \\ \text{個人特性} \\ \text{パラメータ} \end{array} \right\} = (D_0[i, j], D_1[i, j])$$

$D_1[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける参加圧力

$D_0[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける不参加圧力 ($D_0[i, j] + D_1[i, j] = 10$)

$n_1[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア参加人数

$n_0[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア不参加人数

$$s_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1 & (s_{ij}(t) = 0 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) > D_0[i, j] \times n_0[i, j](t)) \\ 0 & (s_{ij}(t) = 1 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) < D_0[i, j] \times n_0[i, j](t)) \\ s_{ij}(t) & (\text{そうでない場合}) \end{cases}$$

つまり、近隣で同じ状態にいる人の重み付け人数比がそうでない人のそれを下回った場合、それまでの状態（もしくは態度）を変更する。

3 値モデルの場合：

$$S = \{0, 1, 2\}$$

$$s_{ij}(t) = \begin{cases} 0 & (\text{ボランティア不参加}) \\ 1 & (\text{小規模ボランティア参加}) \\ 2 & (\text{大規模ボランティア参加}) \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i\text{行}j\text{列の} \\ \text{セルの} \\ \text{個人特性} \\ \text{パラメータ} \end{array} \right\} = (D_0[i, j], D_1[i, j], V_1[i, j], V_2[i, j])$$

$D_1[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける参加圧力

$D_0[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける不参加圧力 ($D_0[i, j] + D_1[i, j] = 10$)

$V_2[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける地域外活動参加圧力

$V_1[i, j]$: i 行 j 列のセルにおける地域外活動不参加圧力 ($V_1[i, j] + V_2[i, j] = 10$)

$n_1[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア参加人数 (大手・小規模を問わず)

$n_0[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア不参加人数

$m_2[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア参加メンバー中の大手ボランティア参加人数

$m_1[i, j](t)$: i 行 j 列のセルの近傍におけるボランティア参加メンバー中の小規模ボランティア参加人数

$$(m_1[i, j](t) + m_2[i, j](t) = n_1[i, j](t))$$

$$s_{ij}(t+1) = \begin{cases} 0 & (s_{ij}(t) \neq 0 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) < D_0[i, j] \times n_0[i, j](t)) \\ 1 & (s_{ij}(t) = 0 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) > D_0[i, j] \times n_0[i, j](t)) \\ 2 & (s_{ij}(t) = 1 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) \geq D_0[i, j] \times n_0[i, j](t) \\ & \text{かつ } V_2[i, j] \times m_2[i, j](t) > V_1[i, j] \times m_1[i, j](t)) \\ 1 & (s_{ij}(t) = 2 \text{ かつ } D_1[i, j] \times n_1[i, j](t) \geq D_0[i, j] \times n_0[i, j](t) \\ & \text{かつ } V_2[i, j] \times m_2[i, j](t) < V_1[i, j] \times m_1[i, j](t)) \\ s_{ij}(t) & (\text{そうでない場合}) \end{cases}$$

近隣で同じ状態にいる人の重み付け人数比がそうでない人のそれを下回った場合にそれまでの状態（もしくは態度）を変更する点では、基本的に2値モデルと同じ。ただし、ボランティア参加・不参加での態度変更と、ボランティアに参加している状態での大規模・小規模ボランティア参加の態度変更で、影響する個人パラメータを別に用意する（これらのパラメータは独立ではない）。

上記のモデルにおける個人特性パラメータ ($D_1[i, j], V_2[i, j]$) は、5以上の値では対応する個人のボランティア参加傾向が強くなり、5以下では弱くなる。

これらのモデルに基づいてセルの状態更新を繰り返すことにより、2次元空間に配置された集団におけるボランティア参加状態の分布を観察することが出来る。また、特定の個人特性分布で平衡状態に落ち着いた後、各セルに一定の参加圧力を加え、 $D_1[i, j]$ (および $V_2[i, j]$) を増加させて再び状態更新を繰り返すことにより、災害前と災害後のボランティア参加状態の変化をシミュレートすることが可能である。

4.2 簡易実験

上記の CA モデルに対して、大まかな挙動を把握するためのシミュレーションを行った。本シミュレーションでは、境界の存在する 10×10 のセル空間を想定している。2状態モデルにおいては、その個人特性パラメータ $D_1[i, j]$ の分布は図7に示される3種類のものを想定した。また、3状態モデルでは、 $D_1[i, j]$ の値の分布は2状態モデルと同じ

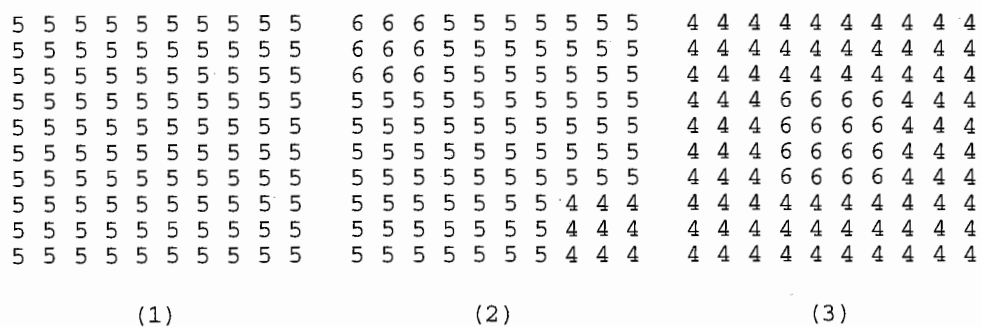


図7: 2状態 CA の個人特性パラメータ $D_1[i, j]$ の値の分布

ものを想定し、もう一つの個人特性パラメータ $V_2[i, j]$ は全ての場合において5と設定した。セル状態の初期値は、ランダムに設定された10種類のものを用意した。

図8,9,10に、2状態モデルでの平衡状態および周期状態を示す。また、図11,12,13に、3状態モデルでの平衡状態および周期状態を示す。2状態、3状態モデルのどちらにおいても、20回以内の状態更新により、これらの状態に収束した。また、3以上の周期状態や非周期状態は発生しなかった。

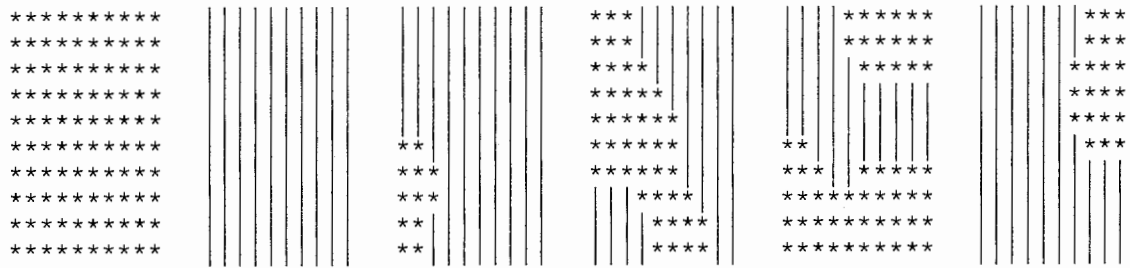


図 8: 個人特性分布 (1) の 2 状態 CA における平衡状態 ($'l' = 0, 's' = 1$)

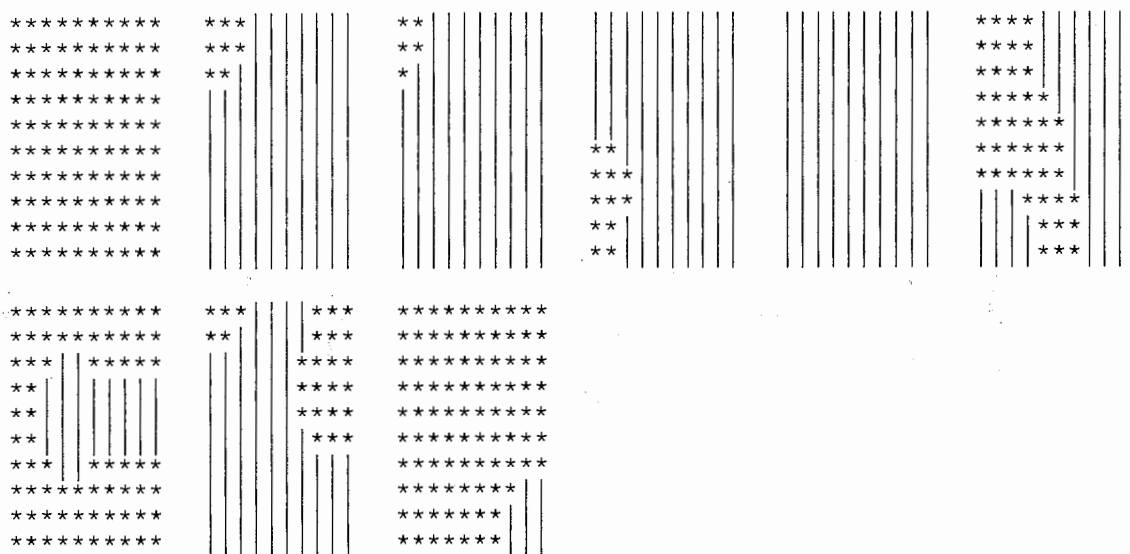


図 9: 個人特性分布 (2) の 2 状態 CA における平衡状態

2 状態、3 状態モデルのどちらにおいても、ボランティア参加・不参加状態のセルが散在することはなく、複数のクラスタを形成する。また、初期値に対する依存性が高く、ボランティア参加傾向の強いセルと弱いセルが混在する(2), (3) の個人特性分布においても、参加(不参加)状態のクラスタに必ずしも参加傾向の強い(弱い)セルが含まれるわけではない。しかし、このようなクラスタが、対応する傾向を持つセルの近辺で発生する傾向は見られる。また、2 周期状態の場合、クラスタの境界近辺のセルでの状態の周期が起こっている。これは、参加・不参加の各々の集団および境界の他のセルからの影響によるものである。

上記の実験では単純な場合しか扱っていないが、今後は更に集団数を増やし、平衡・周期状態の分布および初期状態におけるボランティア参加・不参加割合、個人特性分布などとの相関関係を明確化していく予定である。

4.3 CA モデルの拡張

CA に類似した集団の合意形成のモデルとして、社会心理学において既に提案されているものがある。個人の説得性に関する Social Impact の理論から集団現象をシミュレーションする Nowak-Szamrej-Latané のモデル [4](以降、NSL モデルと略称) では、CA と同様に個人が 2 次元セル空間上に配置され、周りの他者からの影響を受けながら、各個人がある意見に対して同調と反対の状態を採る。このモデルにおいても、各個人に対応するセルに個人特性を表

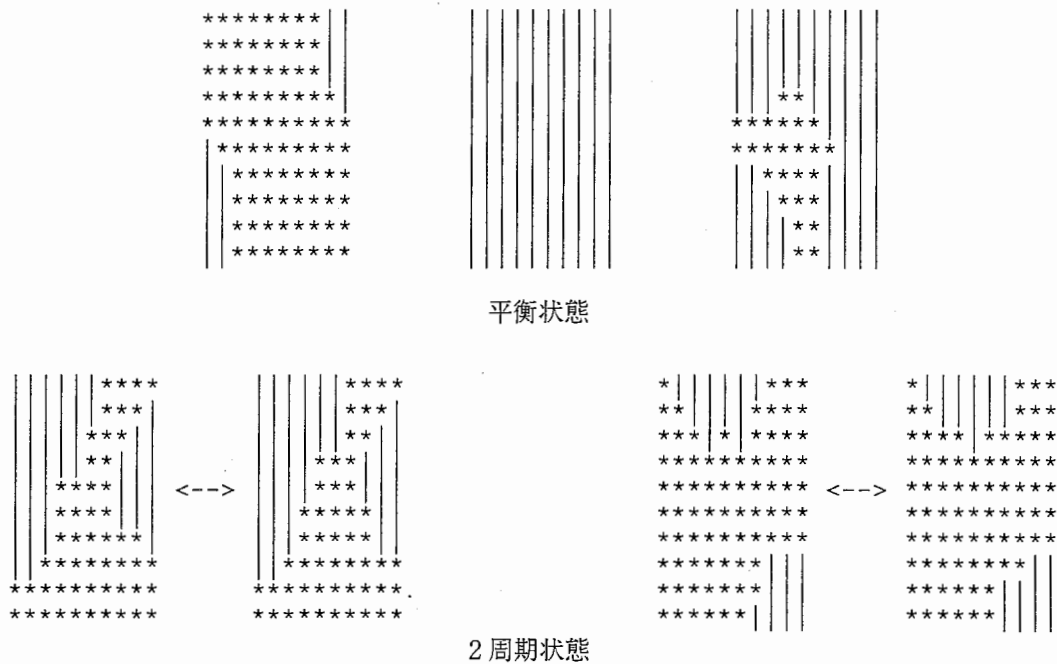


図 10: 個人特性分布 (3) の 2 状態 CA における平衡状態および 2 周期状態

す数値が割り振られており、各個人の態度決定の際にこの数値が影響する。この数値は、自分と異なる意見を持つ他者に対する態度変更影響 (説得性) と、自分と同じ意見を持つ他者に対する態度維持影響 (支援性) からなる。1つのセルにおける態度変更規則は、セル空間上の全ての他者からの説得性数値と支援性数値、および他者との距離 (即時性) から決まる。具体的には、以下のように記述される：

$$\hat{i}_p = (\text{異なる意見の他者の総数})^{1/2} \times \sum \frac{(\text{各他者の説得性数値}) / (\text{異なる意見の他者の総数})}{(\text{各他者と自分との距離})^2}$$

(上記の和は異なる意見の他者に関するもの)

$$\hat{i}_s = (\text{同じ意見の他者の総数})^{1/2} \times \sum \frac{(\text{各他者の支援性数値}) / (\text{同じ意見の他者の総数})}{(\text{各他者と自分との距離})^2}$$

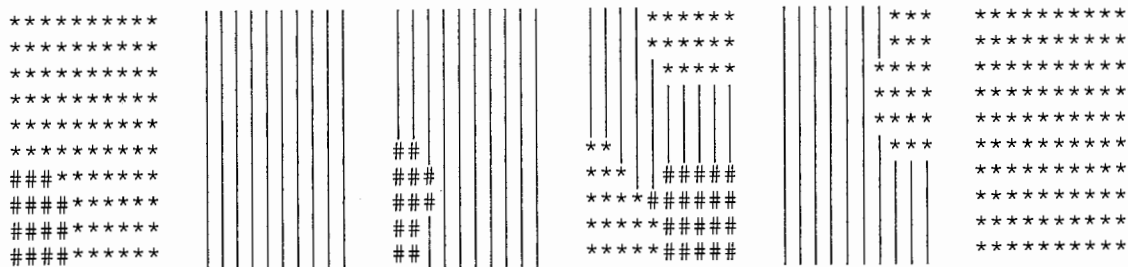
(上記の和は同じ意見の他者に関するもの)

$$\text{次の態度} = \begin{cases} \text{前と異なる態度} & (\hat{i}_p > \hat{i}_s) \\ \text{前と同じ態度} & (\text{そうでない場合}) \end{cases}$$

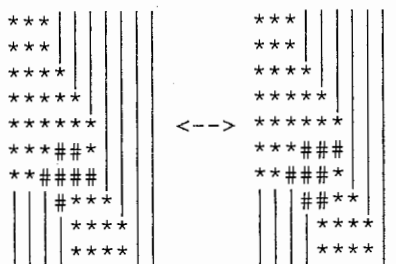
この態度決定規則は、周りで同じ態度を採る人数と異なる態度を採る人数に、何らかの重み付けを行って態度変更・非変更圧力を算定し、その大小によって次の態度を決めるという点で、我々のモデルと共通している。

しかし、NSL モデルは我々の CA モデルとは以下の幾つかの点で異なっている：

1. 各個人の状態決定にセル空間上の全ての他者が影響する。
2. その際に、その個人と他者との距離 (即時性) により、個人間の影響の違いが盛り込まれる。
3. 個人の態度決定において他者の態度と個人特性 (説得性、支援性) が影響するが、その個人の特性は影響しない。我々のモデルでは、個人の態度決定において影響するのは、その個人の特性と他者の態度であり、他者の個人特性は影響しない。



平衡状態



2 周期状態

図 11: 個人特性分布 (1) の 3 状態 CA における平衡状態および 2 周期状態 (' = 0, '* = 1, '# = 2)

4. 態度変更の度に個人特性が確率的に (状態とは独立に) 変化する。

上記の 3、4 は、NSL モデルが Social Impact の理論を基本としているのに対して、我々のモデルは CA という言わば一種の物理モデルを基本としていることに起因している。

しかし、上記の 1、2 は我々のモデルに導入可能である。方法として、セル近傍の概念を従来の正方形から連続化 (ファジィ化) して全体に広げるのである。具体的には、4.1 の CA の定義における近傍での参加・不参加人数 $n_k[i, j](t)$, $m_k[i, j](t)$ を以下のように計算する:

2 値モデルの場合:

$$n_1[i, j](t) = \sum_{\substack{k, l=1, s_{kl}(t)=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{s_{kl}(t)}{d((i, j), (k, l))}$$

$$n_0[i, j](t) = \sum_{\substack{k, l=1, s_{kl}(t)=0 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1 - s_{kl}(t)}{d((i, j), (k, l))}$$

$$\left(n_0[i, j](t) = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} - n_1[i, j](t) \right)$$

$d((i, j), (k, l))$: i 行 j 列のセルと k 行 l 列のセルとの間の距離

3 値モデルの場合:

$$n_1[i, j](t) = \sum_{\substack{k, l=1, s_{ij}(t) \neq 0 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{SG(s_{kl}(t))}{d((i, j), (k, l))}$$

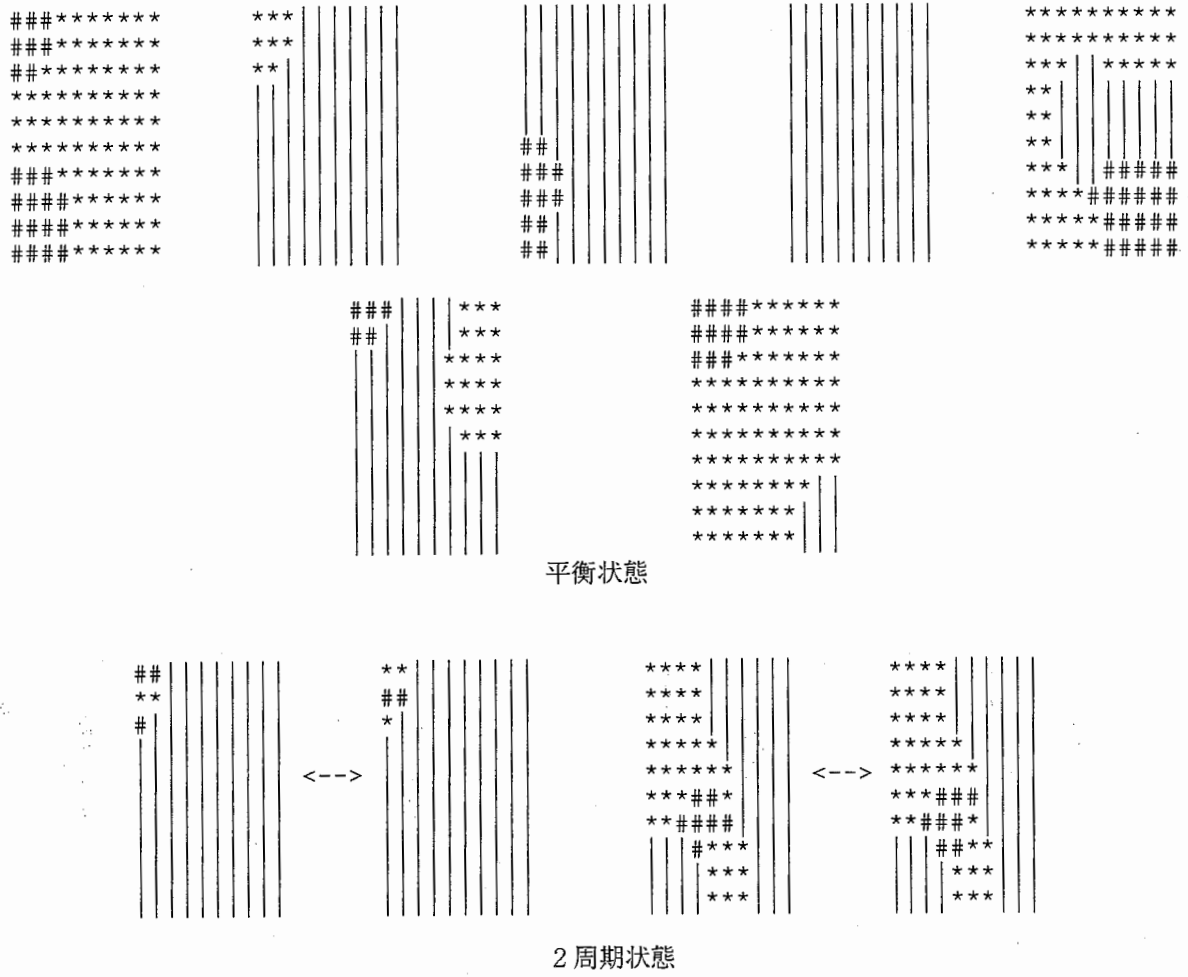
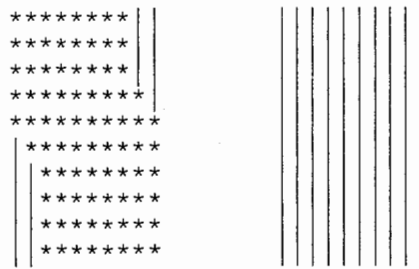
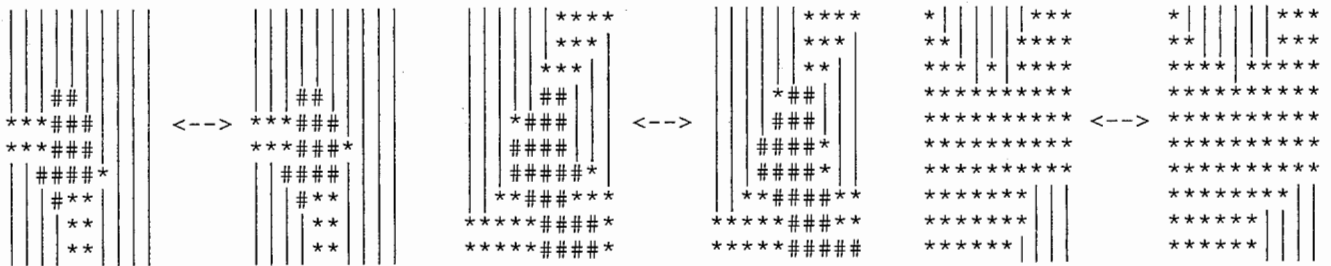


図 12: 個人特性分布 (2) の 3 状態 CA における平衡状態および 2 周期状態

$$\begin{aligned}
 n_0[i, j](t) &= \sum_{\substack{k, l=1, s_{kl}(t)=0 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{SG(1 - s_{kl}(t))}{d((i, j), (k, l))} \\
 &\left(n_0[i, j](t) = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} - n_1[i, j](t) \right) \\
 m_2[i, j](t) &= \sum_{\substack{k, l=1, s_{kl}(t)=2 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{SG(s_{kl}(t) - 1)}{d((i, j), (k, l))} \\
 m_1[i, j](t) &= \sum_{\substack{k, l=1, s_{kl}(t)=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{1}{d((i, j), (k, l))} = \sum_{\substack{k, l=1 \\ (k, l) \neq (i, j)}} \frac{SG(s_{kl}(t))GS(2 - s_{kl}(t))}{d((i, j), (k, l))} \\
 (m_1[i, j](t) &= n_1[i, j](t) - m_2[i, j](t)) \\
 d((i, j), (k, l)) &: \text{2 値モデルの場合と同じ} \\
 SG(n) &= \begin{cases} 1 & (n > 0) \\ 0 & (n \leq 0) \end{cases}
 \end{aligned}$$



平衡状態



2周期状態

図 13: 個人特性分布 (3) の 3 状態 CA における平衡状態および 2 周期状態

セル間の距離関数は色々なものが考えられるが、現在以下のものを考えている：

$$d((i, j), (k, l)) = (i - k)^2 + (j - l)^2 \quad (\text{従来のユークリッド距離の 2 乗 (NSL モデルと同じ)})$$

$$d((i, j), (k, l)) = \begin{cases} 1 & (|i - k| < N \text{ かつ } |j - l| < N) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (\text{従来の } N \times N \text{ 正方形近傍})$$

$$d((i, j), (k, l)) = \begin{cases} (i - k)^2 + (j - l)^2 & (|i - k| < N \text{ かつ } |j - l| < N) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad (\text{上記 2 例の組合せ})$$

3 番目の距離関数は、NSL モデルの実際のシミュレーションにおいて、計算処理を軽減するために Social Impact の影響範囲を限定していることを考慮したものである。

現在、この連続近傍概念を導入した CA モデルによるシミュレーションを行っている。

5 社会心理学における数理モデルの位置付けに関する考察

これまで、社会心理学的集団現象の説明・解釈の一方法論として、数理モデルによる記述の例を示してきた。では、このアプローチが実際に人間科学研究の手法として妥当であるのか。つまり、自然科学や計算科学から生まれた手法が、そのまま人間の集団現象に対して適用可能であるのか。以降、この問題に関して議論する。

5.1 創発概念と人間集団のモデル

この問題が社会心理学の文脈の中で明示的に語られることは少ないように思われる。なぜならば、心理学が一つの科学として成立するために、論理実証主義に基づいて、仮説・検証のサイクルに照らし合わせて人間集団に共通の客

観的・普遍的な特徴を発見することが現在の主流であるからである。そのために、研究者は対象である人間集団との間との関係を切断し、統制された環境の下での刺激-反応の因果関係を抽出することに集中する。

人工生命や複雑系による合成的アプローチも、基本的には論理実証主義に則るものである。つまり、集団現象の発生の原因と予想される人間の行動規則を、図1の創発図式における局所ユニットにおいて実装し、実際にそれが問題となっている集団現象を再生するかを確認することにより、集団現象の原因となりうる人間の特性を明らかにしていこうとするものである。

その根本には、論理実証主義が科学に求める3つの前提：

1. 観察可能な現象の間の関係に関する一般法則や原理の構築
2. 理論的法則・原理と経験的観察事実との一致
3. 理論的命題の経験的・実証(反証)的評価による科学の累積的進歩

が存在している。そして、その究極の目標は、現象に横断的な普遍的法則を発見し、現象の理解、予測、制御を行うことである。従来の仮説生成-演繹-実験-観察による検証のサイクルに対して、合成的アプローチでは、仮説生成-モデルにおける現象の再現-現実の観察事実との比較による検証というサイクルをとるが、客観的観察事実との照らし合わせという点では同じである。

5.2 人間科学における客観性の限界

従来のアプローチにせよ合成法にせよ、社会心理学における論理実証主義に基づく考えそのものに Gergen は異義を唱えている [1]。その論点について、以下に議論する：

5.2.1 社会現象の不安定性

まず、自然科学と社会科学とでは、対象とする現象に根本的な差異がある。社会現象は不安定・非持続的・非反復的であり、そこに普遍的法則を求めること自体が難しい。

ここでは、創発図式を基に議論を行う。物理学や生物学における創発図式では、局所ユニットの行動は大域的秩序によって制約を受けるものの、挙動規則そのものが変化するわけではない。粒子や分子や虫は自ら挙動規則を変化させるのではなく、あらかじめ決まっている挙動規則の範囲内で大域的秩序から作用を受けながら動いている。一方、人間は自ら挙動規則を変更させる能力を持っており、集団において自律的に発生した大域的秩序から影響を受けながら、新たな行動空間・行動規則を生成していく。つまり、人間集団における創発図式は、従来の図式よりも複雑であると考えられ、そこに普遍的法則を求めるのは困難である。

加えて、社会心理学や経済学が対象とする現象に対して、理論の存在自体が現象そのものに影響を与える可能性がある。自然科学において、理論の存在が対象の挙動そのものに影響を与えることはない[†]。しかし、対象が社会の場合、研究者の営みもまた社会の一部である以上、対象と観察者との間の切断はありえない。心理学的統制実験においてさえも、被験者が観察者の意図に完全に影響されないとは言えないのである。

5.2.2 経験的評価の原理的不可能性

現象を観察し、それを客観的に記述することが、検証のプロセスにおいては必要となる。物理学や生物学などの自然科学では直示的に現象を記述することが可能であり、その記述によって理論が検証される[‡]。これは、自然科学が対象としている現象が安定的・持続的・反復的であることと関係している。

[†]量子論の世界では観察の影響も含めた理論仮説を展開して、観察事実を説明している。

[‡]このこと自体が科学哲学の文脈では一つの議論であるが。

一方、社会心理学においては、現象を客観的に記述すること自体が難しい。絶え間無く変容する人間の態度を直示的に記述するのは難しく、態度を示す者の行為の動機が含まれる記述とならざるを得ない。しかし、行為の動機や意図、目的を外部観察者が判断する基準は存在せず、行為者本人さえも客観的な基準を持ちえない。

5.2.3 仮説的構成体間の疑似的關係

自然科学といえども、観察可能な現象にのみ注目しているわけではない。例えば、物理では重力やエネルギーなどの観察不可能な仮説的概念(仮説的構成体)を理論に用いて発展してきた。社会心理学においても、動機や意図などの目に見えない仮説的概念により現象の説明を行っている。

しかし、自然科学においては、観察出来ない仮説的構成体を仮定する場合、それから演繹される結果に対して、観察可能な現象との照らし合わせにより、その仮説的構成体の存在を検証(半証)出来る。一方、社会心理学における観察結果は、上でも述べたように別の仮説的構成体であり、現象の説明とはその間の疑似的關係を述べているに過ぎない。

このことは、研究者が現象と独立に理論を立てられるという自然科学の前提が、社会心理学においては当てはまらないこととも関係している。観察の仮説的構成体の定義や解釈が研究者によって異なり、理論的命題との関係が客観性を持たない可能性が存在する。ある理論を支えるために提示されたデータが、対立する理論を支持するものとして解釈されることもありうるのである。

社会心理学の領域においては、観察を通して理論が生み出されることはなく、発展させられることも、確証・反証されることもない。

5.3 社会心理学における数理モデルの意義

社会心理学において、普遍的法則の抽出、観察の客観的記述、現象と理論との間の関係の樹立が原理的に不可能であるとすれば、理論の果たすべき役割とはどのようなものであるべきか。少なくとも、それは論理実証主義アプローチが目標とするところの「理解、予測、制御」ではない。これに対しても、Gergen は一つの提案を行っている。

5.3.1 生成的理論

Gergen は理論の優劣の基準として、その「生成的能力」を提案している。これは、社会現象を対象とする理論が、社会の前提・現代の社会生活・常識そのものを疑い、結果として社会の中に新鮮な代替案を提供する能力である。社会を対象とする科学は、対象と分断されることはなく、文化の中で密接に関係している。逆に、その理論が社会に影響を与えることを利用して、理論によって現象に対する1つの理解の方法・解釈を社会に提供する。これによって、社会を変容させることが可能となり、社会秩序そのものを変化させるのである。

ここで、現在の自然科学の理論に関する議論として、Rosen の主張についても触れておく必要がある。Rosen は、形式システムと自然システムとの間のモデル関係を捉え、現代物理の機械のメタファーに基づく形式システムが生物のモデルとしては貧弱であることを主張した[5]。これは、現在の自然科学における仮説的構成体の表現能力を問題とする議論であるが、社会心理学の場合、Rosen が前提としている自然システムと仮説的構成体としての形式システムとの間のモデル関係自体が成立しない。

Rosen の場合、現状の仮説的構成体に不満を抱きながらも、理論物理の発展を期待し、いずれは論理実証主義的な仮説-演繹サイクルに組み込まれる形式システムの提案を目指している。しかし、Gergen の場合は、モデル関係自体を放棄し、形式システムを科学的営みの文化的産物として捉え、社会変革のための解釈を提供することに徹している。

5.3.2 解釈生成ツールとしての数理モデル

論理実証主義に基づいて社会現象を観察・解析し、現象の理解・予測・制御を行うことを放棄し、生成的理論を目指して現象の新たな解釈を与えることに徹するならば、社会心理学における数理モデルの意義も自ずと明確化する。

数学は、その対象自体が抽象的形式システムであり、公理系と推論規則により様々な命題を演繹するだけでなく、新たな形式を自ら創造する能力を持っている。社会現象を数理モデルで記述することにより、数学の演繹能力と形式創造能力を媒介して、様々な現象の解釈を生成することが可能となると考えられる。つまり、数理モデルは現象の理解・予測・制御を行うためのものではなく、社会に様々な現象解釈の選択肢を提供する一つのツールとして、その意義を保証されると考えられる。

さらに、人工生命・複雑系研究の主流である計算機シミュレーションが、数学的形式内での演繹をさらに補間することで、解釈生成ツールとしての意義を与えられると考えられる。

6 おわりに

本稿では、半定量社会学と Cellular Automata による災害前後でのボランティア集団の活動変化のモデルを取扱い、それに基づくシミュレーションの結果を与えた。また、数理モデルによる社会心理学的集団現象の説明・理解の可能性と意義について、Gergen の主張を基に議論した。

Cellular Automata によるボランティア活動現象の研究は、まだ十分な実験結果が上がっておらず、モデルの説明と簡易実験の報告に留まっているが、今後新たな結果が得られた時点で報告を重ねていく予定である。

また、数理モデルの妥当性の議論については、論理実証主義に纏わる科学哲学的議論の知識がまだ十分でなく、深い検討が出来ていないのが現状であり、数学の理論生成に関する議論も、一つの私論でしかない。しかし、社会科学における一つの流れとして、これまで議論してきた流れが存在するのも事実である。数理モデルとそれに基づく研究の方法論に関しては、様々な面から今後まだまだ検討が必要である。

参考文献

- [1] K. J. Gergen. もう一つの社会心理学. ナカニシヤ出版, 1998. (杉万俊夫・矢守克也・渥美公秀 監訳).
- [2] T. Nomura. Generation of Relations between Individuals based on a Stochastic Automaton and an Analogy from Social Psychology. In *Proc. ALIFE V Poster Presentations*, pp. 125–132, May 1996.
- [3] T. Nomura. Generation of Relations between Individuals Using a Stochastic Automaton and the Theory of Change of Attitudes. In E. R. Nakamura, editor, *Complexity and Diversity*, pp. 61–63. Springer, 1997.
- [4] A. Nowak, J. Szamrej, and B. Latané. From Private Attitude to Public Opinion: A Dynamic Theory of Social Impact. *Psychological Review*, Vol. 97, No. 3, pp. 362–376, 1990.
- [5] R. Rosen. *LIFE ITSELF*. Columbia University Press, 1991.
- [6] W. Weidlich and G. Haag. *Concepts and Models of a Quantitative Sociology: The Dynamics of Interacting Populations*. Springer-Verlag, 1983. (邦訳: 寺本英, 中島久男, 重定南奈子 「社会学の数学モデル」, 東海大学出版会, 1986).
- [7] H. ハーケン. 協同現象の数理. 東海大学出版会, 1980.
- [8] 羽鳥裕久, 森俊夫. 有限マルコフ連鎖. 培風館, 1982.

- [9] 岡田勇, 山本匡, 太田敏澄. パーソナリティから創発される組織の硬直化現象について. Technical Report 96-MPS-10-3, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, Nov. 1996.
- [10] 小倉久直. 続 物理・工学のための確率過程論. コロナ社, 1985.
- [11] 杉万俊夫. ミクロ-マクロ・ダイナミクス — 「かや」のイメージに基づく構想—. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 101-105, 1992.
- [12] 大浦宏邦. セルオートマトンによる社会変動のシミュレーション. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 115-128, 1992.
- [13] ハツ塚一郎, 矢守克也. 阪神大震災における既成組織のボランティア活動 — 日本社会とボランティアの変容 —. 実験社会心理学研究, Vol. 37, No. 2, pp. 177-194, 1997.
- [14] 野村竜也. 社会システムと進化. 第13回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp. 331-334, 福井, Jun. 1997. 日本ファジィ学会.
- [15] 矢守克也, 杉万俊夫. 横断歩道における群集流の巨視的行動パターンのシミュレーション. 実験社会心理学研究, Vol. 32, No. 2, pp. 129-144, 1992.