

行動ルールの進化・適応を考慮した社会システムのモデル化と分析

著者	小松 秀徳
学位授与年月日	2017-04-13
URL	http://doi.org/10.15083/00077325

博士論文

行動ルールの進化・適応を考慮した
社会システムのモデル化と分析

小松 秀徳

目次

第1章 序論	5
1.1 複雑適応系	5
1.2 複雑適応系としての人工システムと社会システム	6
1.3 複雑適応系のモデル化	7
1.4 本研究の目的	11
第2章 進化的アルゴリズムによるネットワーク構造生成	14
2.1 進化的観点から見た設計手法	14
2.1.1 ルール集合の進化によるスケーラビリティの向上	14
2.1.2 既存AEアルゴリズムが対象としてきた問題構造	16
2.1.3 ネットワーク構造生成を可能にする提案AEの特長	18
2.2 ネットワーク構造生成のためのAEモデル	18
2.3 不均一突然変異の導入	22
2.4 二次元グリッドパターンの進化	23
2.4.1 計算条件	23
2.4.2 結果	24
2.5 ネットワーク構造を持つロボットの進化	27
2.5.1 計算条件	27
2.5.2 結果	31
2.6 考察	36
2.7 小括	37
第3章 動的最適化問題に対する進化的アルゴリズム	38
3.1 AEモデルの動的最適化問題への適用	38
3.2 AEによる巡回路の生成	39
3.3 転写因子に基づく細胞種の決定	42
3.4 細胞接着	44
3.5 不均一突然変異	45
3.6 数値実験	45
3.6.1 計算条件	45
3.6.2 結果	47
3.7 考察	48

3.8	小括	48
第4章	家電制御問題への適用	50
4.1	給湯機制御の課題	50
4.2	ヒートポンプ式給湯機の運転制御	51
4.2.1	現行機器の運転ルール	51
4.2.2	現行機器の運転ルールに関するパラメータ最適化	53
4.3	季節や時間帯を考慮した運転ルール	53
4.3.1	条件部	53
4.3.2	アクション部	55
4.4	遺伝的アルゴリズムを用いた運転ルールの進化	56
4.4.1	GAに関するパラメータ設定	56
4.4.2	不均一突然変異	58
4.5	数値実験	58
4.5.1	計算条件	58
4.5.2	結果	59
4.6	考察	65
4.7	小括	66
第5章	進化・適応の視点に立った人間行動の分析	67
5.1	マルチエージェントモデルによる分析	67
5.1.1	社会性の進化が意思決定に与える影響	67
5.1.2	進化的マルチエージェントモデル	68
5.1.2.1	モデル	68
5.1.2.2	パラメータ設定	75
5.1.2.3	結果	76
5.1.2.4	考察	88
5.1.3	小括	89
5.2	人間の意思決定構造	90
5.3	現実の人間における意識変化の属性分析	95
5.3.1	適応的なパーソナリティ特性が意思決定に与える影響	95
5.3.2	手法	97
5.3.2.1	事前調査	99
5.3.2.2	介入	100
5.3.2.3	分析A：自己認識の変化	102
5.3.2.4	分析B：節電意欲の変化	102
5.3.3	結果	102
5.3.3.1	分析A：自己認識の変化	102

5.3.3.2	分析B：節電意欲の変化	104
5.3.3.3	パーソナリティ特性を含む回答者属性の効果	105
5.3.4	考察	108
5.3.5	小括	110
5.4	分析を踏まえた行動変容方策の実装	115
5.4.1	省エネルギー促進を狙った情報提供の現状	115
5.4.2	提案手法	116
5.4.2.1	概要	116
5.4.2.2	ストーリー設計	121
5.4.2.3	ストーリー選択	123
5.4.3	レポート送付条件	127
5.4.3.1	送付スケジュール	127
5.4.3.2	システムに自動選択された情報	128
5.4.4	レポートに対する評価	130
5.4.4.1	インタビュー調査結果	130
5.4.4.2	アンケート調査結果	132
5.4.5	小括	138
第6章	結論	140
	参考文献	142
	謝辞	152

第1章 序論

1.1 複雑適応系

複雑系とは、多数の要素が相互作用を繰り返し、その集積から要素の特性からは予測できない新たな全体特性を発現することを特徴とする系である。このような系は特殊なものではなく、物理系や人工システムなど、様々な形で身の回りの至る所に存在している。

例えば物理系では、微視的な相互作用則は単純だが、巨視的には予測困難で非常に不規則な挙動を示すものとして、乱流、火炎、地震、雪崩、気象、さらにペロウソフ・ジャボチンスキー反応といった非平衡反応などの各種現象を挙げるができる。また、現代の人工システムも、その多くを複雑系として捉えることができる。インターネット、携帯電話などの高度な通信制御網や、電力グリッド、交通ネットワーク等、ネットワーク構造を持つ人工システムの多くは、局所的な挙動特性と全体の挙動特性に大きな乖離が見られる。自動車や航空機、コンピュータ等は、膨大な数のサブシステムから構成されるが、仮に何の予備知識も無かったとすれば、これらをサブシステムに分解して個別の機能について理解しただけでは、全てが組み合わさって動作した際の機能についての理解を得ることは極めて困難である。

このように、系全体の特性が要素の相互作用の結果として発現するため、個々の要素の性質や特徴を還元主義的に明らかにしたとしても、そこから系全体の挙動を予測するのが困難であることが、複雑系の顕著な特徴である。

複雑系の概念に、さらに外部環境への適応の枠組みを導入したものが複雑適応系である。多様な要素がそれぞれ行動ルールに基づいて並列に相互作用しており、かつ全体が何らかの外部環境に対して適した構造へと適応する機能を有する [1]。

このような系は、生物システム、社会システム等において、多様なレベルで観察される。例えば、多数の臓器から成る循環系、多数のニューロンから成る脳、多数の細胞や組織等から成る免疫系、それらすべての構成要素から成る生命体、さらに多数の生命体から成る生態系等が挙げられる。社会システムでは、人間の意思決定や活動の結果として生じる多くの現象が該当し、多数のステークホルダーが関わる場合の合意形成、影響を与える者と影響を受ける者が多数関わっ

て生じる流行現象、多数のプレーヤーが参加する金融マーケット、それらの総体としての経済活動等が含まれる。

複雑適応系は、生命から社会的現象まで含めた、適応するあらゆる系をモデル化し、本質を捉えようとする概念である。その大きな特徴として、経験に基づいて系全体が調節されることが挙げられ、不確実性、ノイズ、不正確さといった不確定要素を取り込んで活用でき[2]、設計者が不在であるにもかかわらず摂動的な変化への耐性を示す。例えば生物は、膨大な時間をかけて進化を繰り返し、現在に至るまで存在し続けてきており、その過程では、時々刻々と変化する環境に適応し、生存できた個体のみが繁殖に成功し、子孫を残すことができた。つまり、一時的な定常の環境に対して所与の条件の下に最適な状態になるように設計されているのではなく、ある程度の失敗は許容しつつも、絶え間ない環境変化から致命的な影響だけは受けないように、柔軟性、ロバスト性を持つように進化してきたものと解釈できる。

1.2 複雑適応系としての人工システムと社会システム

従来の人工システムは、簡単な要素の組み合わせで設計され、決められた条件の下で求められる機能を達成するよう設計された。外乱に対しては安全率を用い、不明確ではあるが十分な余裕を持つような設計が行われてきた。

一方で、現代における人工システムの複雑さは極めて高くなっている。自動車や航空機には、走行や飛行という当初必要とされた最も基本的な機能に加え、空調、オーディオ、照明をはじめとした、その他の機能を持つ膨大なサブシステムが順次追加されていった。しかし、多様なサブシステムが相互作用し、全体としての挙動特性が時に予測困難となる系に対しては、単一のサブシステムに関する知識を踏まえ、安全率に基づいて設計余裕を持たせる知識リッチな設計アプローチだけでは限界がある。想定外の外乱によって、時に全体としての機能が致命的に損なわれてしまう場合があるためである。このような観点に立つと、想定外の外乱があったとしても、全体としての機能を維持あるいは回復できることが、今後の人工システムに求められる新たな機能となる。すなわち、基本的な単一の機能に、追加的にその他の多様な機能を組み合わせて設計される傾向にある人工システムに対して、生命体を持つような柔軟性、ロバスト性を如何にして内在させるかが、今後の設計における新たな課題となるだろう。

その具体例としては、エラーに対して自己を修復する機能を持ったシステム、その都度の環境に対して適応的な行動をとることが可能なロボットなどが考えられる。既にある人工システムで、そのような機能を持ったものとしては、WWWや交通ネットワークなど、ネットワーク構造を持ったものが参考になるだろう。

このような人工システムの設計において、人間の様々な行動が介在することや、社会との相互作用が関わることは、無視することができない重要な前提である。一例として、2006年8月14日に我が国の首都圏で発生した大規模停電[3]を取り上げる。本停電では、クレーン船が河川を曳航中に、本来は展開を禁止されているアームを誤って展開してしまったため、旧江戸川上の基幹的な送電線を切断してしまい、東京都23区東部とその周辺139万世帯の住宅や鉄道などに電力が供給されなくなる事態が発生した。この停電の背景には、大きく分けて二種類の事前想定があったと解釈できる。一点目は、送電線下をクレーン船がアームを上げて通過することはないとする想定である。二点目は、曳航中にアーム展開を禁止する法令は既に施行されており、クレーン船が誤ってアームを上げて曳航することはないとする想定である。送電網などの人工物や、関連する法令などが、それぞれの想定に基づいて個別に最適化・設計された一方で、想定範囲を超えた事象が発生したことにより、系全体の脆弱性が発現した。

一方、社会システムは、本質的に複雑適応系の性格を有しており、人間の意思決定や人工物等の多様な要素が相互作用する系として捉えることができる。人間各人の意思決定過程は、勿論多くの場合それ自体が非常に複雑ではあるが、一方で日常的な意思決定は、比較的単純な行動ルールに基づいて無意識に行われる場合も多い。例えば、同じ金額でも収入より損失を大きく感じる、あるいはコストと便益のバランスとは無関係に、多数の人がどのように行動しているかを知った場合その行動に追従してしまう、またはあるリスクが他人へ影響する場合に、そうでない場合よりも脅威の大きさを大きく感じる、といった現象が知られている。

上記の例に見られるように、高度に複雑化した現代の社会システムにおいては、想定外の外乱が多様かつ複合的に重なることにより、リスクが顕在化した場合の影響が甚大になるという問題がある。のみならず、複雑適応系の進化において、複雑性の増大は避けることができない一般的な傾向であることが示唆されており[4, 5]、このことを鑑みると、社会システムの複雑性も、今後一層の増大を免れることはできない。したがって、想定外の外乱による甚大な影響のリスクをどのように低減すべきか、どのように柔軟性やロバスト性を持たせるかという課題は、今後ますます重要性を増していくことが予想される。

1.3 複雑適応系のモデル化

これまでの科学技術では、偏微分方程式をはじめとする数学モデルにより、系全体の挙動に着目してトップダウンで現象をモデル化するアプローチが用いられてきた。偏微分方程式に基づくモデルは、時空間構造を抽象化し、系全体を比

較的少数の方程式に還元して、これを数学的に解く。そのため高い普遍性をもち、連続性、一様性を仮定することが適している物理現象等に対して、幅広く適用されてきた。

しかし、現代の社会システムの種々の問題はすでに高度に複雑化しており、非連続性、多様性がより顕著となっている。このような問題に対して、偏微分方程式のように連続性、一様性を仮定するアプローチは適しておらず、問題を定式化することさえ困難な場合も多い。また、偏微分方程式は、一般にマクロな変数間の関係性の表現に適しているが、複雑系や複雑適応系で見られるような、要素間の相互作用から新たな全体特性を発現する枠組みの分析には適していない[6]。現代の複雑な社会システムの問題を解くためには、偏微分方程式のようなトップダウン式のものとは異なる、新たなアプローチを確立する必要がある。

複雑系、複雑適応系のモデルとしては、複雑さが発現する機構に合わせて、多数の要素を用意し、それらが局所的な相互作用を繰り返し、ボトムアップで系全体の新たな挙動を発現する構成的モデルを用いることが考えられる。構成的モデルとは、コンピュータの中に多数の要素を用意し、要素の特性と要素間の相互作用を規定して全体のダイナミクスを見ることにより、系全体の特性を把握しようとするものである。

構成的モデルの代表的なものとして、セルオートマトン、ネットワークモデル、マルチエージェントモデルがある。

セルオートマトン

空間を格子状に分割してセルを作成し、それらセル同士が近傍と相互作用を繰り返すダイナミクスを持ったモデル化の手法である[7]。一般に物理現象のモデル化に適している。社会システムをモデル化するためには、相互作用のトポロジーを近傍のみに限定するのではなくより多様にする、あるいはセルの持ち得る特性自体をより多様にする、といった可能性を考える必要がある[6]。

ネットワークモデル

セルオートマトンが近傍セル間のみでの相互作用を考えたのに対して、ネットワークモデルは、この相互作用の範囲を近傍に限定せず、リンクが張られた要素同士に拡張したものと捉えることができる。すなわち、要素をノード、相互作用の関係をリンクとして表現することで、トポロジーをより一般的な形式で表現し、相互作用の不均一性を導入することが可能となる。

マルチエージェントモデル

セルオートマトンではセルの特性が一様だったのに対し、マルチエージェントモデルでは、構成要素が持つ特性がより多様になり、一般化されたものと捉えることができる。すなわち、個体はそれぞれ多様な行動ルールを持ち、各々の行動ルールに基づいて相互作用を繰り返す。相互作用のトポロジーはセルオートマトンのように正方格子状の近傍同士でも、あるいはネットワークモデルのような、より一般性の高い形式でもかまわない。典型的には、人間行動のモデル化などに適しており、この場合は行動ルールの多様性が人間自体の多様性を表すことになる。

セルオートマトンを用いた複雑系のシミュレーションの例としてシェリングの分居モデルがある。正方格子を用意し、各格子内に2種類の属性のうちいずれかの住人が居住することを仮定する。各住人は、上下左右4近傍の格子のうち、同じ属性の住人の数が半分までであれば同じ格子内に居住し続けるが、半分以上を超えた場合はその格子から立ち去って別の格子に移動する。この相互作用を繰り返すと、同じ属性の住人同士が集まって居住し、全体として居住する地域が2種類の住人で分断されるという結果となる[8]。住人個人としては同じ属性の隣人が半分居ても良いという寛容さをもつが、全体としては互いに排斥的となり、個人の特性と全体の挙動の関係が直感とは反する結果となる。

複雑適応系を適切にモデル化するためには、構成的モデルに進化と適応のメカニズムを組み込む必要がある。具体的には、系を構成する要素の環境への適応、要素同士が互いの利益を高める協調的な行動、これらを統合した系全体の進化、といった発展的な枠組みを新たに取り入れることが考えられる。その際、環境からのフィードバックが、系全体や個々の要素等、どの部分へどのようになされるか、その際適応に有効な行動ルールを如何に効率的に探索、特定、保存、再利用するかといった視点から、進化と適応の枠組みをモデル化し、導入する必要がある。

一方、生物進化の過程に着想を得た既存のモデルとして、遺伝的アルゴリズム[9]が存在する。遺伝的アルゴリズムは、解を疑似的に遺伝子と見立て、変化させてより良い解を求める発見的な手法である(図 1-1)。交叉では、複数の親個体(一般には二つ)から遺伝子を受け継ぐ新しい子個体を作る。突然変異では、遺伝子の一部が低い確率で変化する。交叉の目的は、両方の親個体から別々の良い形質を受け継ぐことでより良い遺伝子を作り出すことであり、突然変異の目的は遺伝子が局所解に陥ることを防ぎ、より広い範囲で解を探すことにある。さらに、選択において目的関数を用いて各個体の適応度を算出し、適応度の低い個体

を順次淘汰することで、結果的により高い適応度を持つ個体が生き残る。目的関数は、生物進化における環境に相当する。

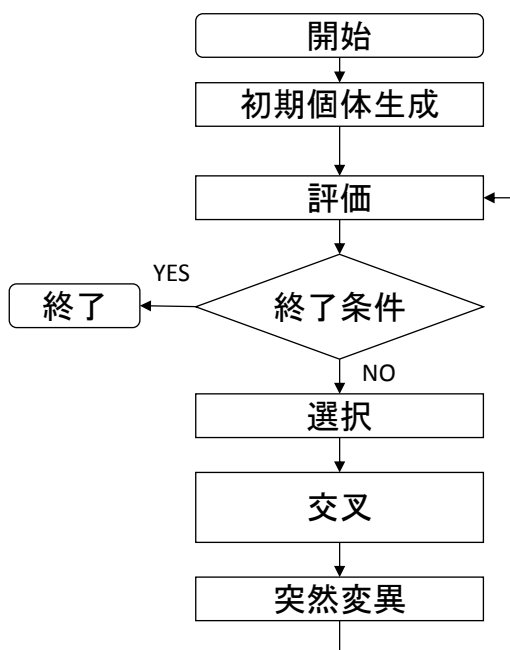


図 1-1 遺伝的アルゴリズムの流れ

解は問題の特徴を踏まえて遺伝子として記述する必要があり、この手順をコーディングと呼ぶ。例えばネットワーク構造を表現するための単純な方法としては、図 1-2 のように、隣接行列をビット列に変換し、遺伝子として表現する方法がある。このような、対象となる構造物を直接的に遺伝子としてコーディングする方法（直接エンコード法）では、目的関数の評価対象である表現型と遺伝子型が一对一に対応するため、環境からのフィードバックが遺伝子型へと直接的に成されることとなる。このことに起因するいくつかの課題があり、一点は、複雑な問題を解決しようとする場合、遺伝子サイズが増加し、局所解に収束しやすくなるという、スケーラビリティに関する課題である。図 1-2 に示すようなネットワーク構造を生成する場合は、ノード数の増加に応じて、遺伝子サイズは容易に組み合わせ爆発を生じるため、この傾向はより顕著になる。もう一点は、効率の良い進化を進めるためには、設計者が解く問題の特性を踏まえて注意深くコーディングしなければならないという課題である。このため、環境が変化する度に、設計者が都度その環境に適した知識を埋め込む必要が生じ、個体と環境との相互作用は硬直的になってしまう。

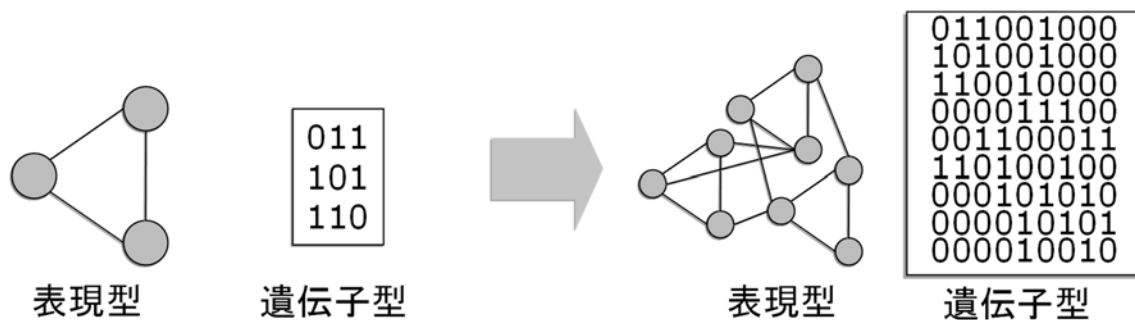


図 1-2 直接エンコード法における遺伝子型のスケーラビリティの限界

このような既存の進化的アルゴリズムがもつ課題に対して、複雑適応系としての生命体の構造は重要な示唆を与える。顕著な例は、生物の発生過程である。個体は細胞同士が相互作用することによって形成され、各細胞は母個体由来の母性因子や、隣接した細胞が生成する転写因子などに反応して、自身がどのように分裂・分化・接着などを行うかを決定する。この発生過程によって、遺伝子はコンパクトであるにも関わらず、複雑な表現型（成体）の形成を実現しており、また個体群としては多様な環境変化に適応しながら現在に至るまで生き残り、進化を続けてきた。このような生物システムが、どのような進化・適応を経て現在の状態に至ったかの原理を解明し、その知見を活用することで、事前にあらゆる条件やシナリオを想定することなく、多様な外乱に対してロバストで柔軟な社会システムを設計するための、新たな設計規範を確立することが期待される。

1.4 本研究の目的

そこで本論文では、前節で整理した各種の構成的モデルに、進化・適応の枠組みを導入することにより、社会システムを複雑適応系として捉えた場合の適切なモデルを新たに開発し、その有効性を示すことを目的とする。その際、本論文では一貫して、要素同士がある行動ルールに従って相互作用をした結果として全体特性を発現する系を、進化・適応を考慮したアルゴリズムによって調節するモデルを構築し、これに基づき社会システムを構成する様々な要素を設計・分析する。

まず、設計対象となる構造物を生成するための、行動ルールを遺伝子型とする進化的アルゴリズムにより、既存の進化的アルゴリズムでは効率的に進化させることが困難であった、より複雑で大規模なネットワーク構造が進化可能となり、高いスケーラビリティが実現できることを示す（2章）。また、環境変化に

対するロバスト性が必要となる問題として、リアルタイムに問題構造が変化する動的な組み合わせ最適化問題を取り上げ、既存の進化的アルゴリズムでは達成困難な環境変化へのロバスト性が獲得されることを示す（3章）。より現実的な問題として、家電の制御ルールの生成問題を取り上げ、既存の方法では実現できなかった、より柔軟性の高い制御ルールを獲得できることも示す（4章）。また、人間を進化・適応の観点から分析することにより、人間の「一見非合理的な振る舞い」の特性を、生物システムの観点に基づく合理性として解釈することが可能となることを示す（5章）。その一例として、血縁者まで含めた利益を最大化する行動を進化させた場合、全体として個人利益の最大化とは異なる行動が進化することを、マルチエージェントモデルに行動ルールの進化・適応の枠組みを導入したモデルで定量的に分析できることを示す（5.1節）。このようなことを踏まえ、個人の行動を変容させることで集団特性の変化へとつなげる、近年注目されている新たな介入の考え方を説明する（5.2節）。続いて、現実世界において、進化的な起源を持つ心理的特性に働きかけて人間の意思決定に影響を及ぼすことが可能であることを示したうえで（5.3節）、この原理を踏まえた、より実効性の高い行動変容方策の具体的な設計についても可能性を検討する（5.4節）。最後に本論文全体の結論を述べる（6章）。

なお、前述の通り各章で扱うモデルは、進化・適応を考慮したアルゴリズムで行動ルールを調節するという点で一貫しているが、行動ルールの役割や、進化に用いるアルゴリズムは、適用する問題毎に実装が異なる。これらを整理し、既存研究と各章の手法を比べた場合の新規性の概要を示したのが表 1-1 である。

2章、3章、4章では、行動ルールを進化させるために、一般的な進化的アルゴリズムである遺伝的アルゴリズムに加えて、使用されなかった行動ルールを高い確率で変化させることで進化速度を向上させる新たな突然変異モデル「不均一突然変異」（詳細は後述）を組み合わせて用いる。ただし、これらの章において新規性がより顕著なのは、行動ルールを進化させる方法よりも、むしろ目的を達成するために利用する行動ルールの枠組みである。すなわち、既存研究と比べると、2章では行動ルールをより複雑なネットワーク構造を生成できるように適用体系を拡張したこと、3章では行動ルールを実時間で変化する最適化問題に対してロバストに解を生成できるように適用体系を拡張したこと、4章では既存手法では検討されてこなかった、より柔軟性の高い運転ルールを家電制御に適用する手法を提案したことが挙げられる。

これに対して 5.1 節で扱うモデルでは、マルチエージェントモデルのエージェントの行動ルールを実数遺伝的アルゴリズムによって進化させるが、ここでは行動ルールの枠組み自体よりも、むしろ行動ルールを進化させる方法に顕著な新規性がある。すなわち、血縁選択説と呼ばれる、血縁者の利益までを含めた

進化の考え方を導入することで、社会性の進化を考慮し、経済合理性や自己利益最大化の観点とは異なる一見不合理な意思決定・行動が分析可能となる点が挙げられる。

表 1-1 各章・節で扱うモデルの特徴と既存研究からの新規性

章・節	適用する問題	行動ルールの用いられ方	行動ルールを進化させる方法	既存研究からの新規性
2	複雑なネットワーク構造（ロボット）の生成	近傍ノードへのリンク生成と切断（細胞が成長のための行動ルールとして遺伝子を利用し、細胞同士が相互作用を繰り返して生体を形成する、生物の発生過程を模擬。ノードを細胞と見立てる。）	遺伝的アルゴリズム + 不均一突然変異	<ul style="list-style-type: none"> ・発生過程を模擬した進化的アルゴリズム(AE)を、単純なパターン生成問題から、より大規模で複雑な問題にも適用できるように適用体系を拡張した。 ・進化速度を向上させる汎用性の高い枠組みとして、不均一突然変異を提案し、有効性を示した。
3	時間変化する最適化問題（動的巡回セールスマン問題）	近接ノード間の仮想的なたんぱく質の伝達+リンクの生成（生物の細胞間相互作用と細胞接着の過程を模擬。ノードを細胞と見立てる。）		<ul style="list-style-type: none"> ・発生過程を模擬した進化的アルゴリズム(AE)を、実時間で変化する最適化問題に対してロバストに優れた解を生成できるように適用体系を拡張した。
4	家電（給湯器）の制御	家電の運転ルール		<ul style="list-style-type: none"> ・低コストに多様な世帯の需要を満たす、より柔軟な運転ルールを生成する手法を提案した。 ・同一の運転ルールで多様な世帯に対応可能であることを示した。
5 ・ 1	人間のリスクへの態度が形成される過程の分析	マルチエージェントモデルにおける各エージェントのリスクへの態度、および血縁者に対してどのように利他的に振る舞うかの戦略	実数遺伝的アルゴリズム + 血縁選択説	<ul style="list-style-type: none"> ・経済合理性や自己利益最大化ではなく、血縁選択（血縁者の利益も含めた進化・適応）の観点に立つことで、一見不合理な人間の意思決定が分析可能となることを示した。

第2章 進化的アルゴリズムによるネットワーク構造生成

2.1 進化的観点から見た設計手法

2.1.1 ルール集合の進化によるスケーラビリティの向上

人間の脳内では、神経細胞の結合数が 100 兆もあるにも関わらず、実際に活性化しているゲノム数は高々3万程度であることが知られている。このような複雑な表現型は、発生の様々な段階で、同じ遺伝子が効率的に再利用されることで実現されている[10]。また、生物システムは絶え間なく変化し続ける環境での生存と繁殖、進化と適応を繰り返した結果であり、そこには明確な設計基準を与えた設計者は存在しない。

このような問題意識に立ち、直接エンコード法の一連の課題を克服するべく考案されたのが、Artificial Embryogeny と呼ばれる、発生過程を考慮した進化的アルゴリズムである [10]。代表的なものとして、ルール集合として遺伝子型を表現し、これを繰り返し適用することで表現型を生成し、前者を進化の対象、後者を目的関数による評価の対象とする Implicit Embryogeny[11](IE)等がある。ルール集合を繰り返し利用することで構造物を生成し、このルール集合を進化させる進化的アルゴリズムは、複雑適応系の具体的な実装形態の一つであり、これによってスケーラビリティやロバスト性の低さといった問題が解消されることが期待されている。

Artificial Embryogeny (AE)の大きな特長は、実際の生物が成長を通して表現型を形成し、その過程で遺伝子型が繰り返し利用されているというメカニズムを、計算機上で抽象化して実装する点である。この遺伝子の再利用によって、複雑な表現型を短い遺伝子型にマッピングして表現することが可能となり、その結果効率的な進化を行うことができる[10]。

AEモデルは、近年様々なものが提案されてきた。例えば、Eggenberger は転写因子を考慮した胚発生モデルを提案し、生物学的な胚発生のシミュレーションを試みた[12]。Bentley らは、胚発生の仕組みをグリッドで抽象化したシンプルなモデル Implicit Embryogeny (IE)を提案し、パターン生成問題に適用した[11]。

Miller らは、Cartesian Genetic Programming (CGP) と呼ばれる手法を用いて、グリッド上に仮想の細胞集合体を実装した[13, 14]。

各 AE モデルの個別の実装方法は多様だが、基本的な枠組みは概ね以下のようになっている、各モデルで共通している。

1. 評価対象は細胞集団によって構成される系（表現型）である。
2. 各細胞は同一の遺伝子（多くの場合はルール集合として実装される）を持つ。
3. ただし、転写因子と呼ばれるたんぱく質を介した細胞間相互作用により、遺伝子の発現状況は細胞毎に異なるものとなる。
4. 遺伝子の発現状況が異なることで、細胞の振る舞いに多様性が生まれる。

Bentley らの提案した Implicit Embryogeny (IE) は、元々は二次元グリッド上のパターンを生成するためのモデルであった[11]。IE は生物の発生過程を抽象化したシンプルなモデルであり、AE の枠組みを理解するのに適している。そこで、まず IE の枠組みと、直接エンコード法と比較した場合、スケーラビリティがどのように向上するかについて、その概要を説明する（図 2-1）。

IE において、パターンはグリッド上の各セルの生・死の 2 状態（それぞれ 1, 0 で表す）によって表現される。パターンの生成は、条件部とアクション部から成るルールの集合を、全ての生きているセルに同時に適用する、という手順を繰り返して行う。これは生物の細胞分裂の過程を模擬した計算手順である。簡単のため、以降この計算手順を単に「成長」と呼ぶ。また、全ての生きているセルに対するルール集合の一回の同時適用を、成長の「1 ステップ」として数える。

ルールの条件部では、近傍セル（グリッド上の上下左右の隣接セル）の生・死の状態と自セルの座標を参照する。これらの条件が満たされた場合、アクションを適用する。アクション部には、自セルを上下左右のいずれかの方向にコピーせよ、または自セルを生から死へ状態更新せよ（細胞死、アポトーシスに相当する）、という命令が記述される。

IE では、ルールを直列に並べたものを染色体とし、目的とするパターンとの一致度（生・死の状態が一致しているセルの数）を適応度として、選択・交叉・突然変異を適用することによって、パターンを生成できるルール集合を求める。

このような枠組みを用いて、例えば 8×8 のサイズの二次元グリッド上にアルファベットの T 型の形状を目的のパターンとして進化させる場合を考える。直接エンコード法では 64 ビットのビット列を遺伝子型とするのに対して、IE では形状を生成するためのルール集合を遺伝子型とするため、遺伝子サイズを小さくすることができる（図 2-2）。これによって、直接エンコード法よりも効率的な進化を行うことができるようになる。

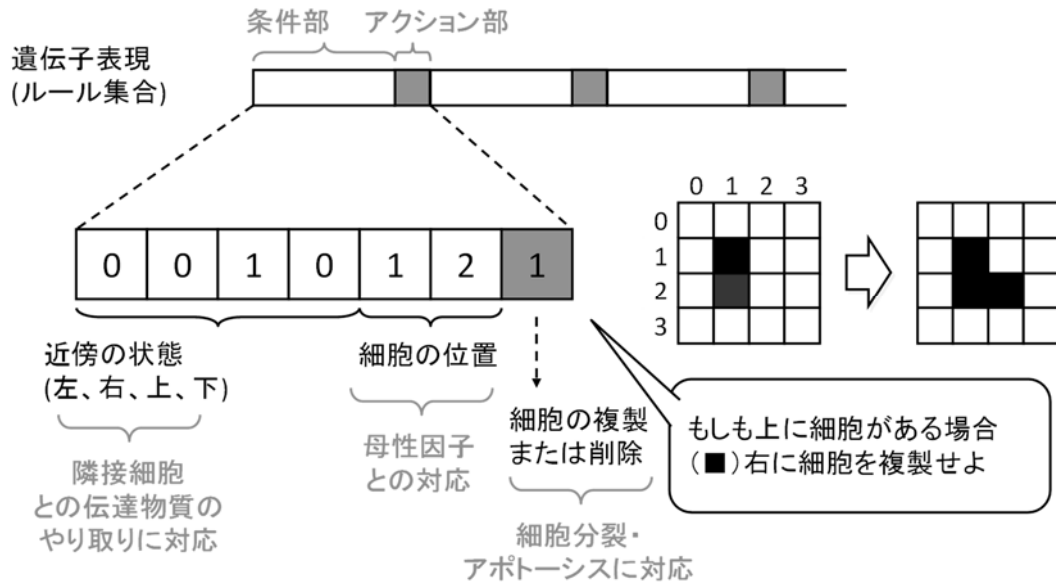


図 2-1 IE における遺伝子表現と成長過程の概念図

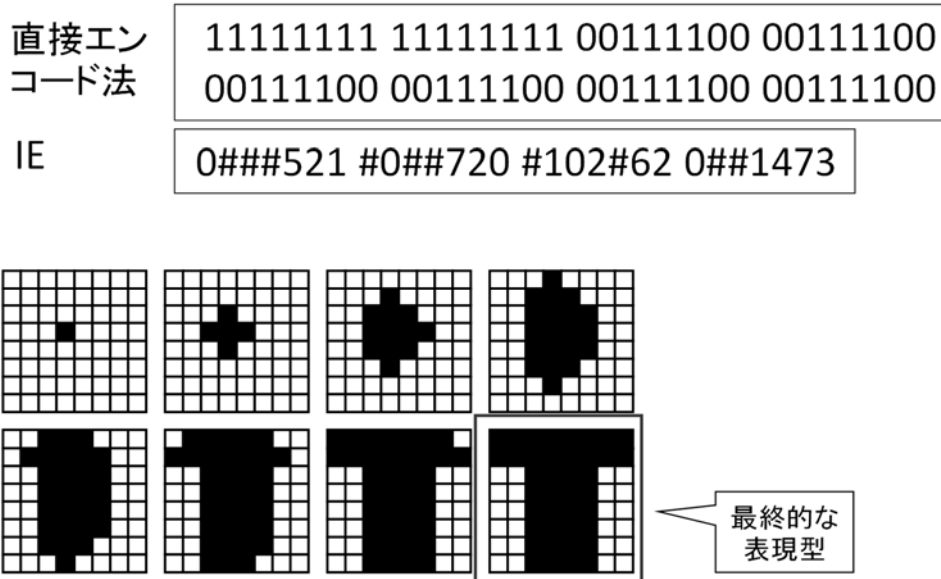


図 2-2 直接エンコード法と比較して圧縮された IE の遺伝子サイズ

2.1.2 既存 AE アルゴリズムが対象としてきた問題構造

近年、AE 研究の分野では、モデルの基礎的な特性に関する研究だけでなく、応用に関する研究も行われるようになってきている。ただし、ほとんどの既存のモデルが対象としてきた問題は、IE の例に見るようなグリッドパターン生成な

どの、比較的単純な問題に限られてきた。要素間相互作用のトポロジーについてより高い一般性を持つ、ネットワーク構造などのより複雑な構造を生成可能とするためには、枠組みを拡張・改良する必要がある。

ここで、グリッドパターンを生成する場合は、パターン全て（探索空間）がセル状態の組合せ 2^N 個であるのに対して、ネットワーク構造を生成する場合は、考慮するネットワーク構造全て（探索空間）は、ノード数 N の時 N^2 個のリンクの組み合わせ 2^{N^2} 個となり、より容易に組み合わせ爆発が生じる。したがって、ネットワーク構造の生成は、より厳しくスケラビリティが求められる問題例として適しているが、ネットワーク構造の生成問題を取り上げた先行研究は僅少であった。以下では、これらのネットワーク構造を生成する際に考慮すべき、既存の AE モデルの現状と問題点について述べる。

Kicinger らはセルオートマトンの成長ルールと初期状態を遺伝子として進化させることによって、高くて頑強なビルの生成を行った[15]。この手法では、筋交いの入り方を内部状態とする正方格子（セル）の集合として構造物を表す。このため、整合性のあるネットワーク構造を生成できるが、正方格子とその内部の筋交いのみを用いる特殊な構造しか生成できない。

Lucas らは平面グラフエンコードを用いて、本論文で扱うものと類似した、ネットワーク構造を持つロボットを生成した[16]。この手法も整合性のあるネットワーク構造を生成できるが、三つのノードと三本のリンクから成る三角形構造を組み合わせて構造を生成するため、**Kicinger** らの手法と同様、局所的なリンクのみを用いた特殊な構造しか生成できない。

Kowaliw らは、**Bentley** らの提案した IE を拡張し、トラス構造を生成できる **Deva 1.N** という AE モデルを提案した[17, 18]。**Deva 1.N** は、グリッド上に上、左、右、左上、右上の 5 方向のトラスに対応した 25 色のセルを配置し、近傍の各色の頻度分布に応じてセルのコピー、削除、色の変更、一方向へのトラス延長などのアクションを繰り返し行うことでトラス構造を生成するアルゴリズムである。**Deva 1.N** は、**Kicinger** らや **Lucas** の手法とは異なり、トラス延長によって近傍に含まれないノード間にリンクを張ることができるが、一つのノードが持ちうるリンクの最大数が限定されている、交差するリンクを表現することができない、等の制限が存在する。さらに、上記の表現では、相手ノードの無いリンクなどを含む整合性のないネットワーク構造が生成されるため、最後に整合的なネットワーク構造になるよう加工する処理が別途必要であった。

このように、既存の AE モデルには、生成可能な構造の整合性や表現力に問題が存在しており、ネットワーク構造の生成に適した AE モデルは存在しなかった。これらの問題を解決するため、ネットワーク構造生成に適した新しい枠組みが必要である。

また、ネットワーク構造の生成問題という、より広い解空間を探索するためには、効率的な探索方法が一層重要になるが、一般に AE 研究において、収束性能の不十分さについての議論はほとんどなされてきていない[19]。AE 特有の構造を活かして収束性能を向上させた数少ない例として、濃度勾配の分布に注目した段階的な進化法がある[20]。一方、Bentley らの提案する IE 等の既存の AE モデルでは、最高の適応度に達した個体であっても、成長に寄与しないルールが多数含まれる[11]ことが指摘されているが、これを改善する試みはなされてこなかった。個体の成長に寄与していない使用されなかったルールについて、より積極的に解空間を探索させることができれば、進化を効率的にできる可能性がある。

2.1.3 ネットワーク構造生成を可能にする提案 AE の特長

上記のような既存 AE モデルの課題を踏まえ、本章ではネットワーク構造の生成に適した新たな AE モデルを提案する。提案手法では、二つのリンクを切断し、切断されたリンクの接続先だったノード間に新たなリンクを生成することで、予め規定されていないノード間のリンクを生成する「再接続」の仕組みと、収束性能を向上させる「不均一突然変異」の仕組みを導入する。前者には、既存 AE モデルでは実現されていない、交差するリンクも生成することができるという特長と、一つのノードが持つことが出来るリンクの数に上限がないという特長がある。

2.2 ネットワーク構造生成のための AE モデル

ネットワーク構造はグリッド構造よりも多様な構造を表現することができる、より一般性が高い構造である。そこで、提案 AE モデルを、AE モデルのテストベッドとしてこれまで度々取り上げられてきた、グリッドパターンの生成問題にだけでなく、ネットワーク構造で表現されるロボットの生成問題に提案手法を適用することで、そのスケーラビリティの高さを示す。

IE がネットワーク構造を生成できるように、ネットワークでのノードとグリッドでのセルとの対応を考え、以下に示す拡張を行う。各ノードの生死は、他のノードへのリンクの有無により定める。各ノードの近傍ノードは、自ノードからユークリッド距離で最も近い k 個のノードとする。ユークリッド距離が同じ場合は、ノードの配置時に各ノードに割り当てる固有の番号が小さいものほど近いノードとして扱う。成長には IE と同様条件部とアクション部から成るルールを用いる (図 2-3)。ルールの条件部では、近傍ノードの生・死状態と自ノードの座標を参照する (表 2-1)。ここで、“#”は”どの値でも良い”状態を示すワイルドカードを意味する。

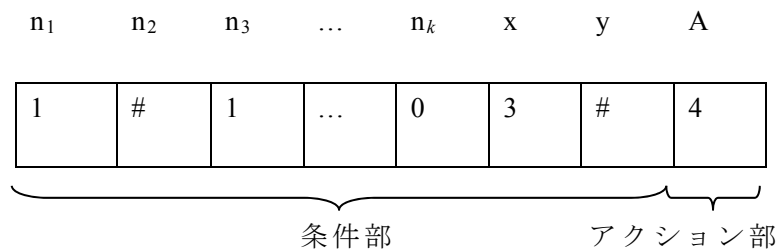


図 2-3 ネットワーク構造生成に用いる提案 AE モデルの遺伝子表現

表 2-1 条件部の各遺伝子座と内容

	定義	取りうる値
n_1	1 番目に近い*ノードの状態	0, 1, #
n_2	2 番目に近い*ノードの状態	0, 1, #
n_3	3 番目に近い*ノードの状態	0, 1, #
...
n_k	k 番目に近い*ノードの状態	0, 1, #
x	エリアのインデックス (x 方向)	0, 1, 2, ..., #
y	エリアのインデックス (y 方向)	0, 1, 2, ..., #

k : 各ノードについて近傍とみなすノードの数

*トポロジカルな距離ではなく、ユークリッド距離に基づく

ノードの座標は、元の座標を離散化したものを用いる (図 2-4)。ルールのアクション部については、セルのコピーや細胞死に相当するリンクの「生成」・「削除」に加え、「再接続」というアクションを導入する (表 2-2, 図 2-5)。再接続はノードに二本以上リンクが接続されている時のみ適用され、そのノードに接続されているリンクのうち最も短い二本を切断し、切断されたリンクの接続先だったノード間に新たにリンクを生成する。これにより、近傍ノード以外のノードに対してもリンクを生成させることができる。

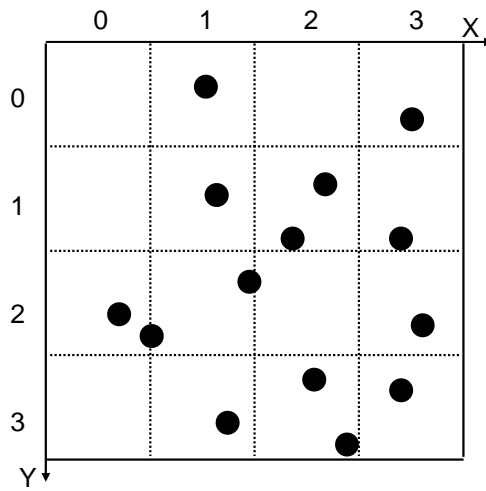


図 2-4 二次元の表現型空間

表 2-2 アクション部の取りうる値と内容

値	アクション
0	1番目に近い*ノードにリンクを生成せよ
...	...
$k-1$	k 番目に近い*ノードにリンクを生成せよ
k	1番目に短い*リンクを切断せよ
...	...
$2*k-1$	k 番目に短い*リンクを切断せよ
$2*k$	1番目と2番目に短い*リンクを再接続せよ

*トポロジカルな距離ではなく、ユークリッド距離に基づく

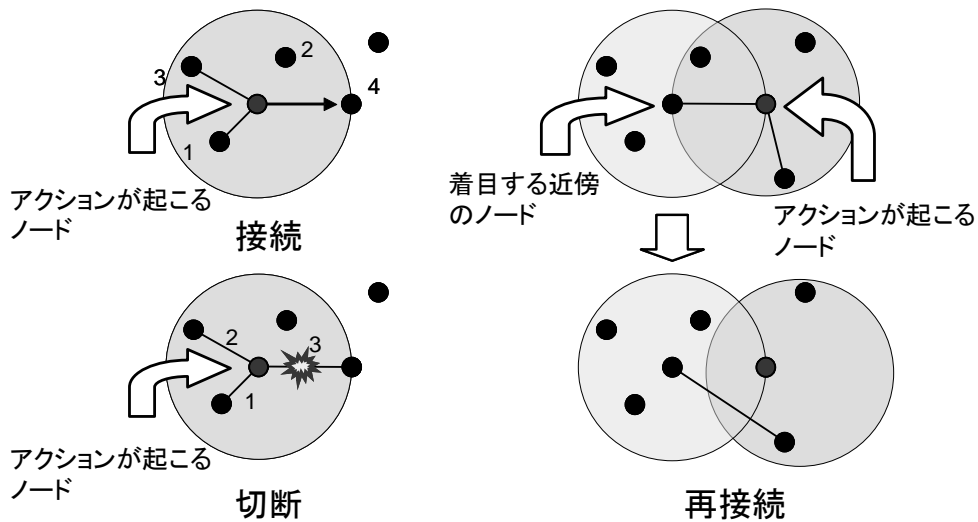


図 2-5 アクションの概念図

ここで、ある箇所に対してリンクを生成するアクションと切断するアクションが同時に実行される場合等、矛盾するアクションが実行される場合は、染色体上で右に位置するアクションを優先的に適用することとする。

提案手法全体の流れは、以下のようになる。

- (1) 任意の数のノード（各ノードは固有の番号を持つ）を二次元平面上にランダムに、もしくは任意に配置し、ノードが二次元の表現型空間上のどのエリアに属するかを判別する(図 2-4)。ここで、エリアは二次元空間を x 軸方向と y 軸方向に均等に分割することによって得る。各エリアのインデックス番号は、(0,0)や(1,3)のように、 x と y に関する整数値の組で表現する。
- (2) 表現型となる二次元平面に配置されたノードの中から「胚」となるノードを一つ選択し、ネットワーク成長の開始地点とする。成長の最初のステップでのみ、この胚ノードを生きている状態とする。
- (3) 条件が満たされたルールのアクションを適用する。アクションはリンクの接続、切断、二本のリンクの再接続から成る（図 2-5）。ルールが発火するには、条件の一致数が任意に与えたある数を越えていれば十分であり、全ての条件を満たす必要はない。
- (4) 各個体はルールを直列に並べたルール集合を染色体として持つ。この染色体を生きているノードにのみ一定回数繰り返し適用して、表現型であるネットワーク構造を生成する。成長が完了した個体群に対して、さらに選択、不均一突然変異、交叉を適用して進化を進める。遺伝子型は、発生過程と不均一

突然変異のステップを適用する点以外、一般的な遺伝的アルゴリズムと同様の操作を用いることで進化させる（図 2-6）。すなわち、AE モデルと遺伝的アルゴリズムは互いに排反ではなく、AE モデルの要素として遺伝的アルゴリズムが活用される点に留意されたい。

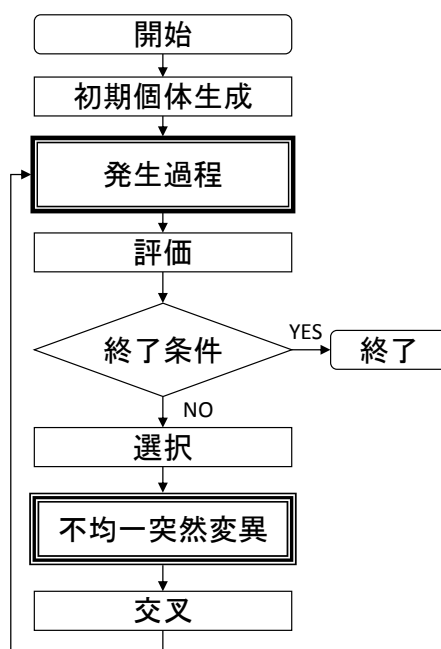


図 2-6 提案 AE モデルのフローチャート

表現型の空間分割数は、各ノードが表現型空間のどこにいるかを十分に細かく識別できるだけの分割数であることが望ましい。成長のステップ数は、ノードの全てにリンクが接続される可能性を与えるだけの十分に大きな値が望ましい。

2.3 不均一突然変異の導入

Bentley らの提案した IE では、どの遺伝子座についても同じ突然変異率を適用した場合、最高適応度に達した個体であっても、成長に全く寄与しないルールが多数含まれる[11]。

こういった使用されていないルールの数を削減し、より効率的な進化を行うために、成長の過程で使用されなかったルールに対する突然変異率を、使用されたルールに対する突然変異率よりも高くする仕組みを導入する。この不均一突然変異を実装するために、成長の過程で使用されたかどうかを全てのルールについて記録しておく。続いて、使用されたものに対しては低い突然変異率（ここでは 0.01）、使用されなかったものに対しては高い突然変異率（ここでは 1.0）を

割り当てる。ただし、使用されなかったルールに対して 1.0 の確率で突然変異を適用したとしても、必ず使用されるルールに変化するとは限らない。同様に、使用されたルールが突然変異によって使用されないルールに変化する確率は、0.01 よりも小さくなる。

2.4 二次元グリッドパターンの進化

2.4.1 計算条件

ネットワーク構造生成問題の部分問題である二次元グリッドパターン生成に対して、提案手法の有効性を調べると共に、不均一突然変異の有効性を検証した。比較のため、以下の三種類の AE モデルについても計算を行った。

- (1) 不均一突然変異を用いないネットワーク構造生成 AE
- (2) 不均一突然変異を用いた二次元グリッド生成 AE
- (3) 不均一突然変異を用いない二次元グリッド生成 AE (すなわち従来の IE)

ターゲットパターンは、Kumar らの IE における実験で用いられたアルファベット C,E,G,L,O,R[19]を対象とした。ここでは図 2-7 に示したターゲットパターン E についての結果を中心に説明する。また、2.2 節では説明のためノードをランダムに配置した図を用いたが、本実験では各セルの中央に相当する位置にノードを配置し、胚となるノードは表現型空間の中央に位置するものを選択した。各ノードが持つ固有の番号は、左上のノードほど小さく、右下のノードほど大きい。また、パラメータは表 2-3 に示したものを用いた。近傍数は Kumar らの IE に合わせて 4 とした。その他、予備実験より十分な収束性能が得られたパラメータとして、ルール数を 20、ルールの発火に必要な条件の一致数を 6 とした。

表 2-3 二次元グリッドパターン生成に用いたパラメータ設定

個体数	50
エリート数	2
ルール数	20
成長のステップ数	8
k (近傍ノード数を規定する)	4
ルールの発火に必要な条件の一致数	6
選択	ルーレット選択
交叉	一点交叉
交叉確率	1.0
使用されたルールに対する突然変異率	0.01
使用されなかったルールに対する突然変異率	1.0
表現型空間の分割数	8*8

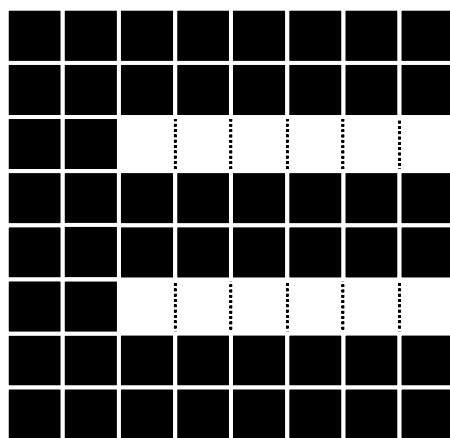


図 2-7 ターゲットパターン “E”

適応度はターゲットパターンと一致したセルの数とした。つまり、最高適応度は 64 である。

2.4.2 結果

図 2-8 は、四種類のモデルそれぞれについて、ターゲットパターン E として 20 回計算を行った結果を平均してプロットした収束性能の比較結果である。不均一突然変異を用いた二次元グリッド生成 AE が最も優れているが、提案手法と

比べて収束性能の差はほとんど見られない。図 2-9 に、提案手法によって得られた個体の成長過程を示す。その他のアルファベット C,G,L,O,R についても同じ設定で計算を行った結果、最良個体の適応度の平均値は表 2-4 のようになった。提案手法によって、二次元グリッドパターンの生成が可能であることがわかる。また、20 回の試行で得られた最良個体のルール 20 個には、再接続のアクションが合計で 26 個含まれていた。

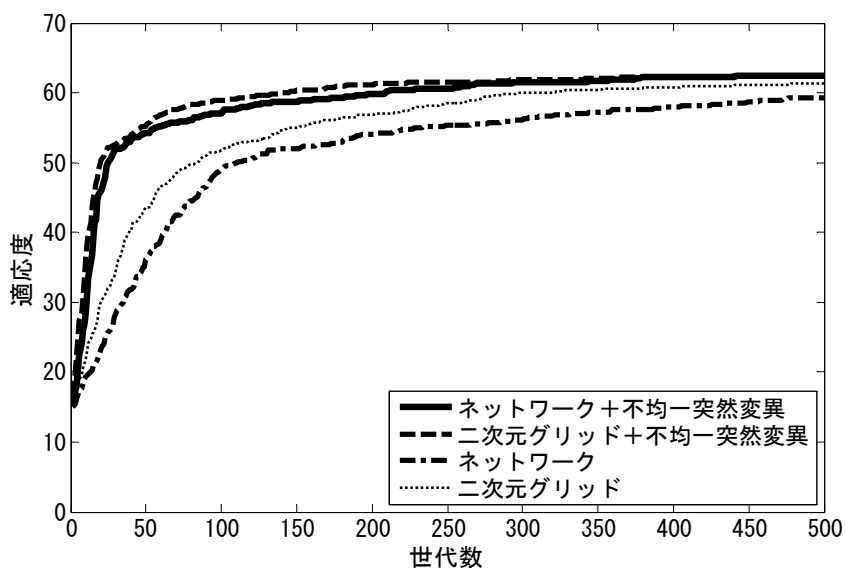


図 2-8 ターゲットパターン E における収束性能

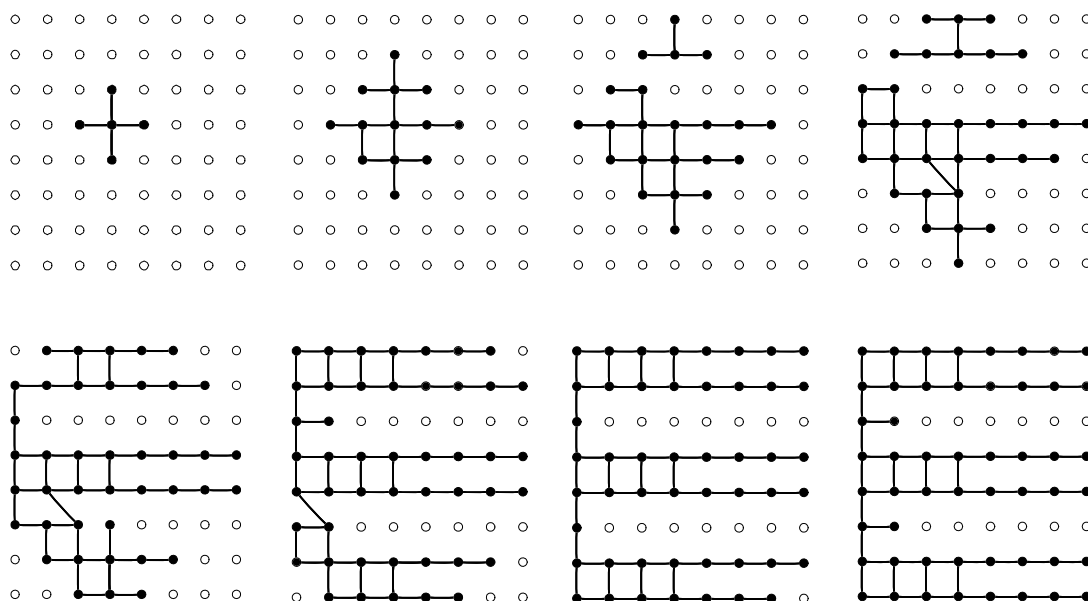


図 2-9 提案手法によるターゲットパターン”E”の成長過程

表 2-4 最良個体の適応度の平均値（括弧内は標準偏差、いずれのターゲットパターンについても最高適応度は64）

ターゲットパターン	ネットワーク +不均一 突然変異	ネットワーク	二次元グリッド +不均一 突然変異	二次元グリッド
C	57.9(3.3)	44.6(11.1)	59.2(3.5)	56.6(2.8)
E	62.5(1.4)	59.2(3.7)	62.5(1.5)	61.4(2.2)
G	56.6(3.3)	39.5(14.0)	57.9(2.1)	53.8(3.9)
L	63.5(1.0)	43.3(9.2)	63.4(1.2)	62.6(1.7)
O	59.1(3.1)	43.6(13.4)	59.7(2.8)	56.1(4.2)
R	56.9(1.7)	47.8(11.5)	58.5(1.6)	55.4(2.2)

二次元グリッドパターン生成 AE では一回のアクション適用がセル一つの追加または削除に直接対応しており、結果として適応度 1 の変化が生じる。これに対して、ネットワーク構造生成 AE ではリンクに対して操作を行うため、一回のアクション適用が二つのノードに効果をもたらす。さらにネットワーク構造生成 AE では、「再接続」という二次元グリッドパターン生成 AE には無いアクションを実装している。このような違いによって、提案手法のネットワーク構造生成 AE の方が、僅かではあるが探索空間がより大きくなっている。それにも関わらず、提案手法は不均一突然変異を用いた二次元グリッドパターン生成 AE と同等の収束性能を示している。

不均一突然変異は、二次元グリッドパターン生成 AE とネットワーク構造生成 AE のどちらについても、収束性能を向上する効果があることがわかる。不均一突然変異は、成長の際に使用されたルールを 99%の確率で保存し、使用されなかったルールを 100%の確率でランダム化する。これは、各ルールに対して、使用されるように変化させる選択圧をかける、つまり適応度に寄与の無かったルールの数を減らす効果があることを意味する。

図 2-10 は、ターゲットパターン E について、実験に用いた四種類のモデルにおけるルールの使用率の変化を示したものである。ここで、 n_u は使用されたルールの数であり、 n_e は個体群全体に存在するルールの総数である。ルールの使用率 u_r は次式で与えられる。

$$u_r = n_a / n_e \quad (2.1)$$

収束性能と同様に、不均一突然変異によって個体群内でのルールの使用率が増加していることがわかる。

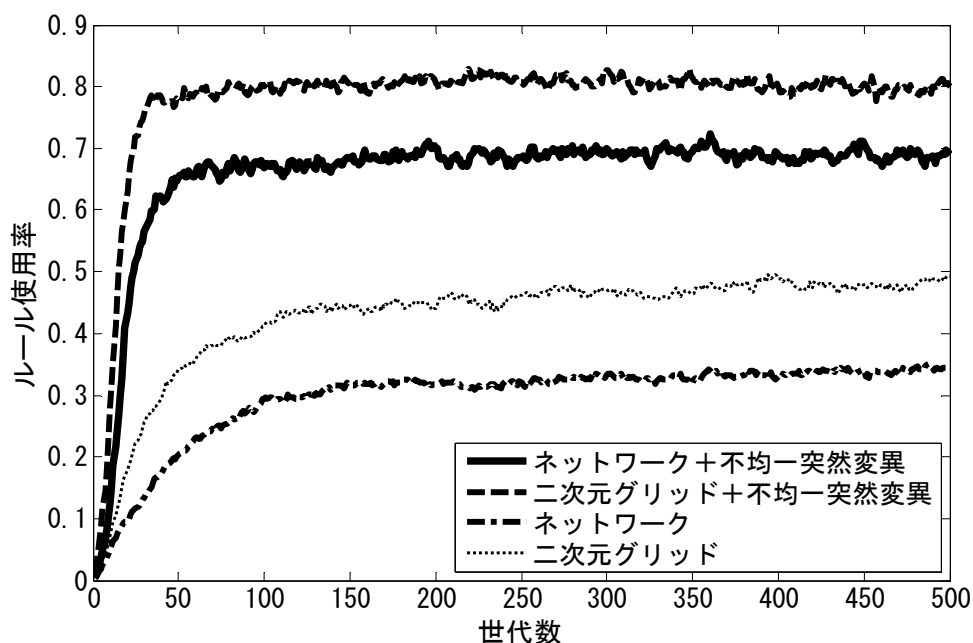


図 2-10 ターゲットパターン E におけるルールの使用率の変化

2.5 ネットワーク構造を持つロボットの進化

2.5.1 計算条件

Minsracer は、Mins project によって開発された二次元物理空間上のロボットをシミュレートするソフトウェアである[21]。ユーザーは、自身が作成したロボットを Minsracer 内の仮想の物理空間で走らせ、ゴールにたどり着くまでの時間を競う。この Minsracer は”Sodaplay”[22]と呼ばれるロボットシミュレータの改良版である。Minsracer は、二次元空間上に物理的な環境、すなわち重力、表面の摩擦、空気の抵抗、表面でのはねかえりといった物理現象をシミュレートする。

ユーザーは、複数の質点を任意の長さのばねや筋肉（周期的な伸縮を行うばね）で接続することによって、ロボットの形状と動作を決定する。

本実験では、この Minsracer に提案手法を適用することによって、与えられた地形を乗り越えてゴールにできるだけ速くたどり着くロボットを生成する（図 2-11）。各個体の適応度を評価するために AE プログラムが Minsracer ソフトウェアから直接受信する値 e_v は、以下のように定義される。

$$e_v = \begin{cases} t_e \times d_{sg} / d_a & (d_a > 0) \\ C & (d_a \leq 0) \end{cases} \quad (2.2)$$

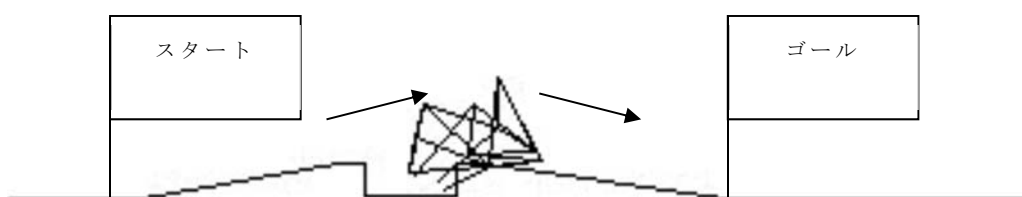


図 2-11 質点、ばね、筋肉から成るネットワーク構造を持つロボット

t_e は、ロボットがスタートしてからの経過時間である ($t_e < t_{\max}$: t_{\max} はタイムアウト時間)。 d_{sg} はスタートとゴール間の距離であり、 d_a はそのロボットがゴールに向かってスタートから進んだ距離である。また、 C は任意に与える大きな値であり、ペナルティに相当する（ここでは Minsracer が初期値として採用している $C=1000000$ とする）。

ゴールにたどり着けるロボットほど e_v の値が小さくなるので、 e_v の逆数を取って各個体の適応度とし、速くゴールにたどり着けるほど適応度が高くなるようにした。従って、ゴールに達したロボット ($d_a = d_{sg}$) の適応度は $1/t_e$ となり、少なくとも $1/t_{\max}$ より大きな値を持つ。また、ゴールとは反対方向に進んだロボットの適応度は、 C の逆数で、 0 に近い値となる。これは、ゴール方向（右方向）に向かって障害物を越えながら、より素早く進むロボットを生成することを目

的とするので、ゴールとは反対方向（左方向）に進むロボットは親個体として極力選択しないようにするためである。

ロボットはばねと筋肉という二種類のリンクを持つので、ここではアクション部に三つの遺伝子座を新たに付加した（表 2-5）。遺伝子座“t”は、ばねと筋肉という二種類のリンクのどちらを使用するかを指定する。遺伝子座“l”は、ばねまたは筋肉の自然長を指定する。遺伝子座“p”は、生成するリンクが筋肉である場合、伸縮の周期の位相を指定する。再接続は元あった二つのリンクの種類が一致している時のみ適用され、このとき新しく生成されるリンクの種類は元あった二つのリンクと同一のものとする。これらの新たに付加した三つの遺伝子座は、ばねや筋肉を用いるロボットに特徴的なもので、単にネットワーク構造を生成する場合は必要ではない。

表 2-5 ロボット生成に用いたアクション部の各要素

	定義	取りうる値
a	リンクの接続、切断、再接続	0, 1, ..., 2*k
t	リンクの種類	0, 1
l	ばね、筋肉の自然長	1, 2, ..., 10
p	筋肉の振動の位相	1, 2, ..., 10

上記の設定の下で、不均一突然変異を用いたネットワーク構造生成 AE を用いて、ロボットを進化させた。このときのパラメータは表 2-6 に示す通りである。ノードの配置は、様々なノードの配置でロボットを生成できることを示すため、ランダムに生成したものを用いた。その他、予備実験より十分な収束性能が得られたパラメータとして、ノード数を 16、近傍数を 6、ルール数を 20、ルールの発火に必要な条件の一致数を 6 とした。親個体の染色体同士で遺伝子座が一致している割合が指定した値を超えた場合に、ルーレット選択によって再度親個体を選択しなおす、という近親交配の回避を行う手法を取った。これによって、初期収束を回避する効果が期待できる。ここでは、予備実験により十分な収束性が得られた値として類似度の閾値を 80% とした。また、収束性能比較の基準として、図 2-11 に示す地形において直接エンコード法によるロボット生成も行った。直接エンコード法によるロボット生成では、リンクの有無、自然長、種類、筋肉の伸縮周期の位相を記述した隣接行列を進化させた。直接エンコード法に

においても類似度の閾値を 80%として近親交配を回避させた。さらに、様々な地形においても提案手法によってロボットが生成できることを示すため、図 2-11 に示した地形以外の四種類の地形においてもロボットを進化させた。

表 2-6 ロボット生成に用いたパラメータ

個体数	32
エリート数	2
ルール数	20
成長のステップ数	16
k (近傍ノード数を規定する)	6
ルールの発火に必要な条件の一致数	6
選択	ルーレット選択
交叉	一点交叉
交叉確率	1.0
使用されたルールに対する突然変異率	0.01
使用されなかったルールに対する突然変異率	1.0
表現型空間の分割数	10*10
質点の数 (ノード数)	16
近親交配回避に用いる類似度の閾値	80%

2.5.2 結果

(1) 適応度の変化

図 2-12 は不均一突然変異を用いたネットワーク構造生成 AE の適応度の変化を、不均一突然変異を用いなかったものと直接エンコード法と比較して示したものである。ここで示した結果は、500 世代までの計算を 20 回行って平均したものである。図 2-12 内の「ゴール」と記された直線は、ゴールするのに最低限必要な適応度 $1/t_{\max}$ を示す。この結果から、不均一突然変異によって適応度の上昇速度が大きく向上し、ゴールに到達する時間 t_e がより短くなっていることが分かる。直接エンコード法は、単にゴールに到達するロボットさえも生成できなかった。不均一突然変異を用いたネットワーク構造生成 AE、不均一突然変異を用いなかったネットワーク構造生成 AE、直接エンコード法のそれぞれについて、最良個体の適応度の標準偏差は順に 34.5, 28.3, 0.4 であった。

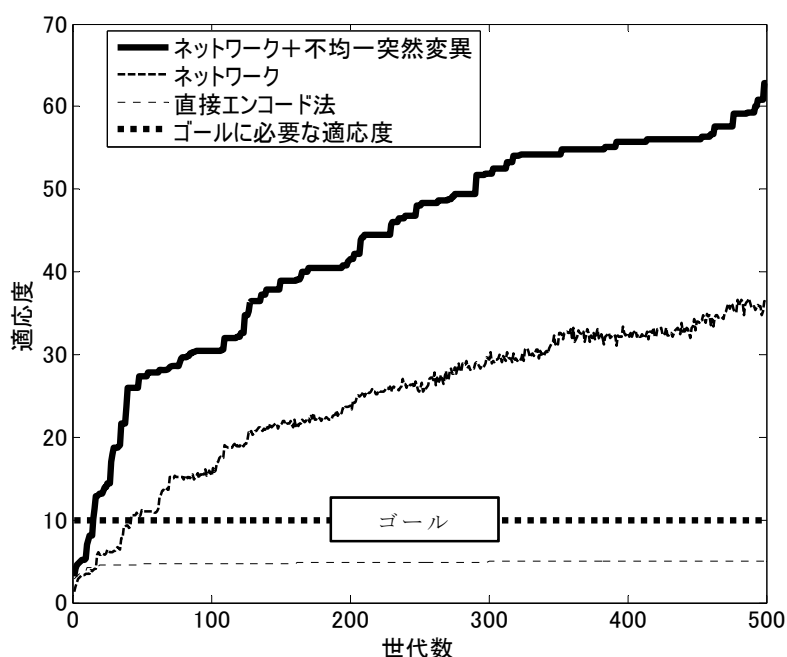


図 2-12 提案 AE モデルにおいて、不均一突然変異を用いなかった場合と用いた場合と、直接エンコード法の適応度の変化

図 2-13 は、ネットワーク構造生成 AE において不均一突然変異を用いた場合と用いなかった場合の、ルールの使用率の変化を示したものである。不均一突然変異を用いなかった場合は使用率が約 56%に収束しているが、不均一突然変異を用いた場合は約 97%にまで高まっている。不均一突然変異は、個体の適応

度の上昇速度を向上させると共に、ロボットを進化させる際にルールの使用率も向上させていることがわかる。

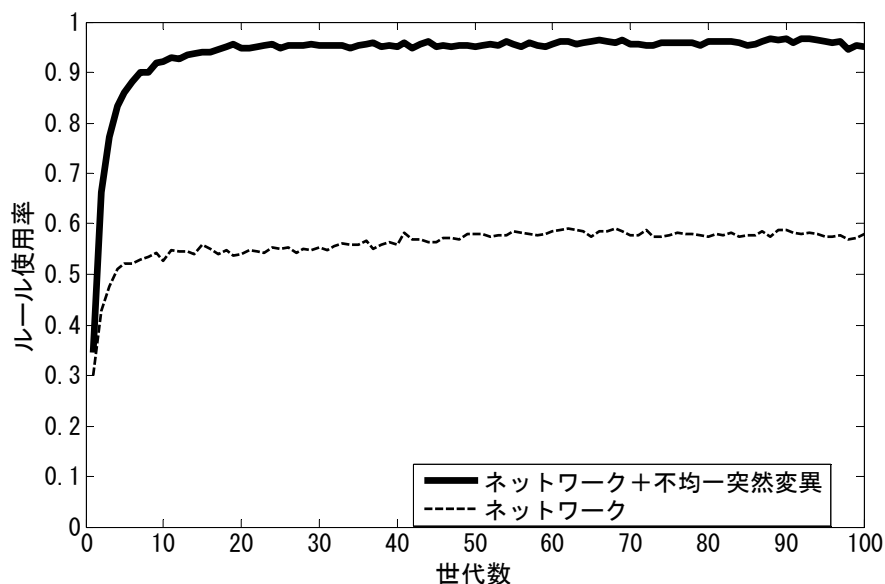


図 2-13 ネットワーク生成 AE モデルにおいて、不均一突然変異を用いた場合と用いなかった場合のルールの使用率変化

(2) 生成されたロボットの特性

図 2-14 は進化の過程で現れたロボットのうち、各世代において最高適応度であった(最もゴールに早く達した、またはゴールしたロボットが現れなかった場合は最もゴールに近づいた)ものを示したものである。図 2-14 内(e), (f)のロボットは、後ろ足のような構造を用いて、体全体を屈伸させて飛び跳ねるような動きで前進し、落とし穴を飛び越える。後ろ足のような構造で跳躍しながら前進するロボットは、第 76 世代に初めて出現したが、落とし穴を超えることはできなかった(図 2-14 (a))。しかし、この構造は進化の過程で引き継がれ、図 2-14 (e), (f)で落とし穴を飛び越える原動力となっている。

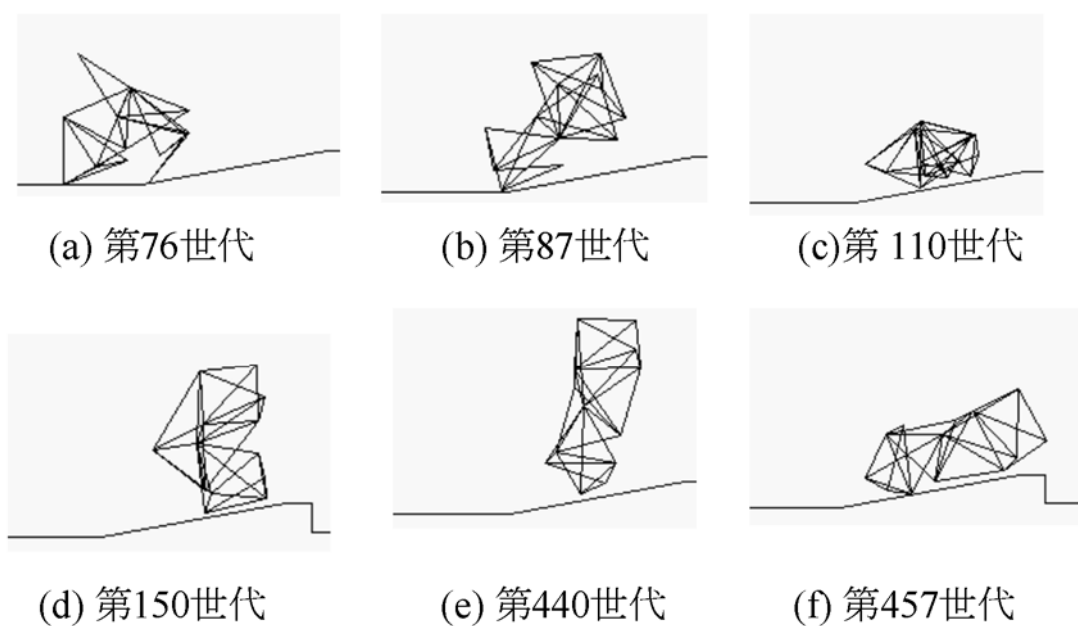


図 2-14 各世代における最良個体

図 2-15 は、図 2-14 (f)の第 457 世代目のロボットの成長過程を示す。図 12 内の破線はばねを、直線は筋肉を表す。図 2-15 (e)と図 2-14 (f)でロボットの形状が異なるが、これは図 2-15 (e)が Minsracer でシミュレートを開始する前のロボットの初期状態を表したものであり、重力やばねの伸長などの物理的な力により図 2-14 (f)の状態に変形・安定した後、坂を上り始めるためである。このロボットは、与えられた 16 回の成長ステップのうち 5 回で収束した。その際、16 個のノードのうち 13 個のみを使って生成するサイズ調整の特性が現れた。

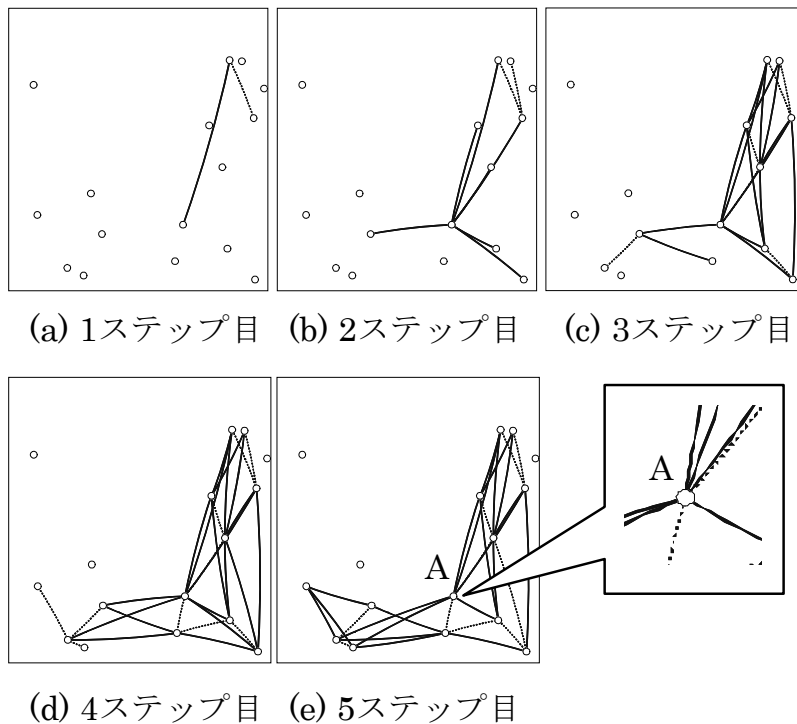


図 2-15 第457世代目の最良個体の成長過程

本実験において、近傍ノードは6個としたが、図 2-15 (e)内のノード”A”は、近傍ノード以外とのリンクを2本含む、計8本のリンクを持つ。これらの近傍に含まれないノードとのリンクの生成は、再接続によって実現されている。ノード”A”は体の中心の役割を担っており、飛び跳ねて前進するための屈伸運動を支持している。また、20回の試行で得られた最良個体のルール20個には、再接続のアクションが合計で19個含まれていた。

図 2-16, 図 2-17, 図 2-18, 図 2-19 は様々な地形で進化させて得られたロボットの例である。図 2-16 のロボットは後方に生えた二本のばねで体を支えながら、二本の足状の構造物を交互に動かすことによって前進する。図 2-17, 図 2-18 のロボットは、図 2-11 の地形で進化させたロボットと同様に屈伸運動によって飛び跳ねて前進し、障害物を乗り越える。図 2-19 の地形で進化させたロボットは、他のロボットに比べて複雑な挙動を示す。まず坂道を、四本のばねで体を支えながら這うようにして上る。続いて溪谷状の地形を「頭部」を使って橋渡しをしながら渡る。さらに溪谷を渡る過程で体の構造を変形させ、最後の平地を元々「背中」であった部分を使いながら前進する。このように、提案手法は様々な地形に適応するロボットを生成することが可能である。

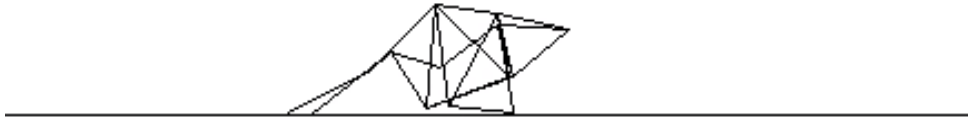


図 2-16 平地で進化させて得られたロボットの例

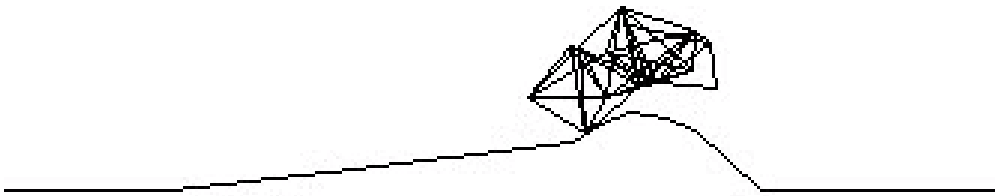


図 2-17 坂道と障害物の地形で進化させて得られたロボットの例

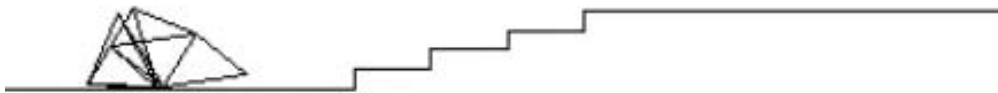


図 2-18 階段で進化させて得られたロボットの例

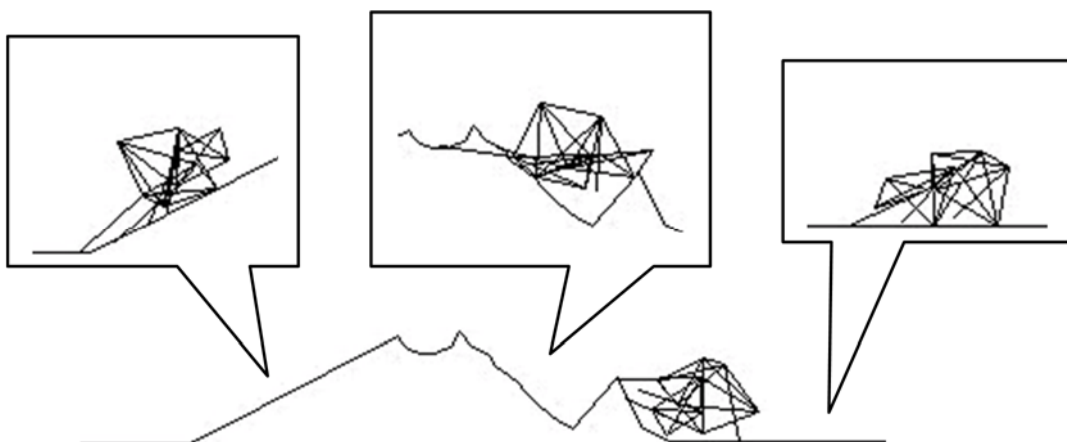


図 2-19 溪谷状の地形で進化させて得られたロボットの例

2.6 考察

これまでの AE 研究は、グリッドパターンの生成を対象とした、モデルの基礎的な特性の検証が中心であった。これに対して提案 AE モデルでは、既存の AE モデルの一つである IE の枠組みを拡張することによって、ネットワーク構造の効率的な進化が可能となることを示した。

従来の正方格子を基にしたネットワーク構造生成 AE には、あらかじめ規定された近傍間にしかリンクを持つことができない、一つのノードが持つことができるリンク数に上限がある等の問題点が存在し、特殊な構造物しか生成出来なかった。これに対して提案 AE モデルでは、あらかじめ規定した近傍に含まれないリンクを含む構造物を生成することができ、一つのノードが持つことができるリンク数にも上限はない。

ネットワーク構造を持つロボット生成の実験では、直接エンコード法が単にゴールするロボットさえも生成できなかったのに対し、提案 AE モデルは障害物を速く乗り越えてゴールするロボットを生成した。これは、直接エンコード法では進化させることが出来ない複雑で大規模な構造物の生成が、AE を用いることによって達成可能となることを示す、一つの例だと言える。

上記のような結果となった理由を考えると、まず一般的に、直接エンコード法に基づいた進化的アルゴリズムは、表現型空間上において、望ましい要素同士を組み合わせるとより望ましい解が得られる性質を持った問題において、効率的に進化を進めることができる。一方、複数のリンクの属性が連動して一つの機能を成すネットワーク構造物を生成する問題では、このような性質を持たない場合が多い。例えば本章で取り上げたロボット生成問題では、一つの足に相当する最小のパーツは、振幅の位相が異なる二本のばねで構成することができるが、実際にロボットが前進するためには、同一の足二本があるだけでは不十分である。これら二本の足同士でもまた、適切な分だけ異なる位相になっていなければならない。位相のずれの程度によっては、全く前進できない構造になる場合もある。望ましいと思われた要素同士を組み合わせると望ましくない解が得られる場合が多い、すなわち局所解が多い解空間において、直接エンコード法では多点同時的な探索が行われるため、進化が効率的に進まなくなるものと考えられる。これに対して、提案 AE モデルでは、ルールの再利用によって、同様の構造の繰り返しや、元の構造に変更を加えた構造を容易に生成することができ、かつ考慮するリンクの候補を再接続によって順次増やして探索空間を拡張することができるため、進化が容易になったと考えられる。また、生成された構造物(ロボット)は、再接続の効果によって、予め規定された近傍数を超えた数のリンクを持つノー

ドを含み、このノードが中心となって体全体を支え、障害物を乗り越える上で有効な機能を持っていることが分かった。

さらに、不均一突然変異を用いることで、AEモデルの収束性能が大きく向上した。使用されるルールが必ず適応度に寄与するのではないが、不必要なルールを削減することによって結果的に探索空間の探索能力が向上し、適応度の上昇速度の向上をもたらしたと考えられる。このように、成長に寄与しなかったルールに対する変異率を高く与えるという方法は、AEに特有の遺伝子が再利用されるという枠組みに適しており、提案手法のみならず他のAEモデルにも有効であると考えられる。

提案手法の比較対象として、本論文で扱った直接エンコード法以外に、同じく直接エンコード法である Stanley らの NEAT[23]を用いる方法等も考えられるが、他のアルゴリズムとの比較は今後の課題である。

2.7 小括

スケーラビリティが求められる問題である、ネットワーク構造の生成に適した新しい AE モデルを提案した。例題として、質点・ばね・筋肉から成るネットワーク構造を持つロボットの生成問題に適用した。構造物同士が行動ルールに基づいて相互作用を繰り返して全体構造を生成することにより、遺伝子型と表現型の関係性が硬直的な直接エンコード法を用いて進化させた場合よりも、効率的な進化が可能となることを示した。また、不均一突然変異によって適応度の上昇速度を大きく向上させることができ、より広い空間を探索することが可能となることを示した。

なお、本章では説明を平易にするために、提案 AE モデルを二次元の表現型空間を用いて説明したが、二次元に限らず、より高次の空間においてもネットワーク構造を生成するように拡張することは容易である。

第3章 動的最適化問題に対する進化的 アルゴリズム

3.1 AE モデルの動的最適化問題への適用

表現型生成のためのルール集合として遺伝子型を扱う AE では、ある環境で進化させた個体を別の環境に直接再利用することが可能である。この時、変化前の環境と変化後の環境の間に、共通の構造が多く存在する場合、変化前の環境で進化させて得られた個体は、遺伝子型を大きく変化させること無く、新たな環境に適応可能である。別の新たな環境に適応する際、過去の進化の過程で得られた何らかのモジュールを個体レベルで再利用することは、遺伝子型と表現型が一対一に対応した直接エンコード法では原理的に実現ができなかった。

このような観点から、ある環境で進化させて得られた個体を、直接新たな環境に再利用し、適応できるか評価を行った既存研究として、文献[17]が存在する。また、表現型を破壊した場合の再生に着目したものも存在する[13]。この例では、目的関数は不変だが、進化の際に用いたものとは異なる初期値から、ロバストに同等の解を得られるか否かを評価している。

上記のように、AEモデルのロバスト性を検証した例はいくつか存在する一方、実時間で連続的に環境変化を与えた際の追従性を検証した例はない。本章では、実時間での環境変化に対する追従性が重要になる問題の一例として、動的巡回セールスマン問題(Dynamic Travelling Salesman Problem: DTSP)[24]を取り上げる。DTSP は、巡回セールスマン問題(Travelling Salesman Problem: TSP)に、都市の追加・削除・移動等の要素を取り入れたものである。ここで TSP とは、与えられた都市の集合と各 2 都市間の移動コスト（例えば距離等）に対して、全都市を一度ずつ巡り出発地に戻る巡回路のうち、総移動コストが最小となるものを求める問題である。DTSP の元となる通常の TSP 自体、代表的な NP 困難（要素数の増加に伴って解空間が爆発的に増加し、多項式時間アルゴリズムが見つかりそうにない計算量的に困難）な組み合わせ最適化問題であるため、DTSP に適用する AE モデルには、スケーラビリティとロバスト性の両方が求められることとなる。

3.2 AE による巡回路の生成

本節では、動的に時間変化する都市配置に対して、ロバストに経路長の短い巡回路を生成する AE モデルを提案する。巡回路生成の際、各都市を細胞とみなし、細胞同士は擬似的な転写因子の授受によって自身の細胞種を決定する。続いて、細胞接着に着想を得た仕組みにより、種類が近い細胞の間にエッジを生成する。このようにして生成された巡回路を、さらに局所改善法の 2-opt によって改良し、最終的な巡回路とする。

評価実験では、提案 AE モデルを、既存の DTSP のベンチマーク問題と評価指標を用いて評価を行う。また、環境変化後に改めて進化を行う必要がある既存手法に対し、提案 AE モデルでは、環境変化前に得られた遺伝子を、変化後の環境に直接再利用することができ、この場合でも既存手法より良い性能となることを示す。

なお、DTSP について、近年 Kang らによって、ベンチマーク問題と、アルゴリズムのパフォーマンスを表す指標が提案されている [24]。同時に Kang らにより、このベンチマーク問題を用いて、DIOEA [25] と呼ばれる手法（遺伝的アルゴリズムとヒューリスティクスに基づく改善法の組み合わせ）の性能が評価されている。この Kang らの提案したベンチマーク問題とパフォーマンス指標に基づき、提案 AE の性能を評価し、DIOEA との性能比較も行う。

提案する AE のフローチャートを図 3-1 に示す。提案 AE では、既存の多くの AE と同様に、遺伝子型を表現型（すなわち巡回路）生成のためのルールの集合として表す。この巡回路生成の手続きは、図 3-1 内の「発生過程」の部分に相当する。遺伝子型は、生成された巡回路の評価結果に従って、不均一突然変異 [26] を用いた遺伝的アルゴリズムにより進化する。提案 AE で用いる遺伝子表現は図 3-2 に示す通りであり、また遺伝子内の各要素の解釈は表 3-1 に示す通りである。

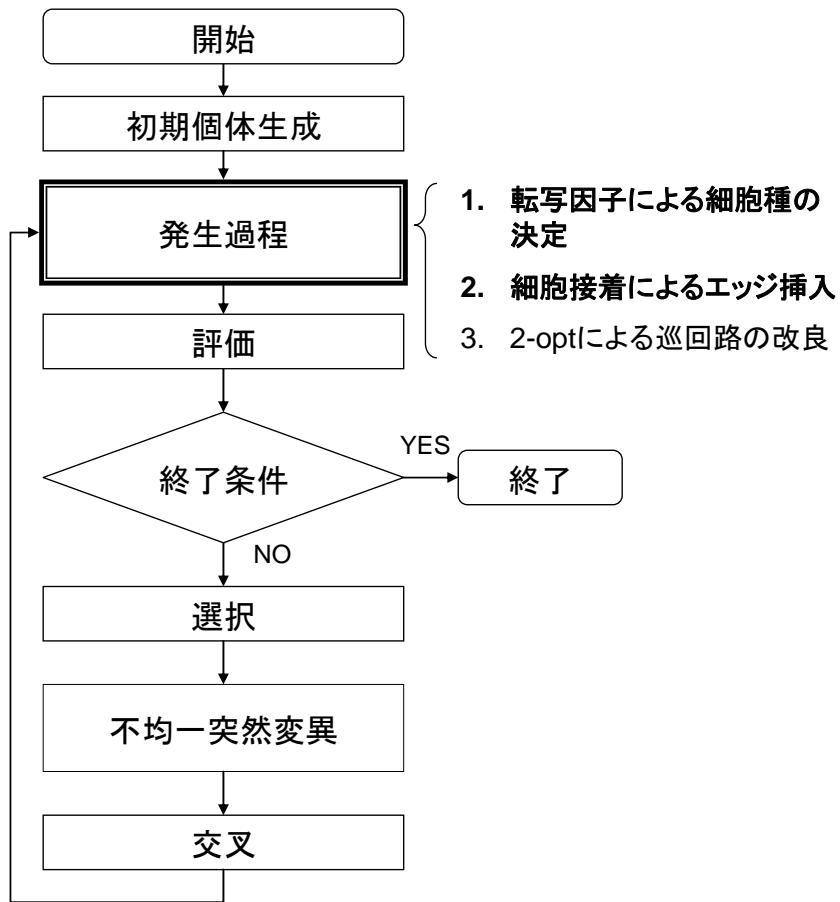


図 3-1 DTSP に適用する提案 AE モデルのフローチャート

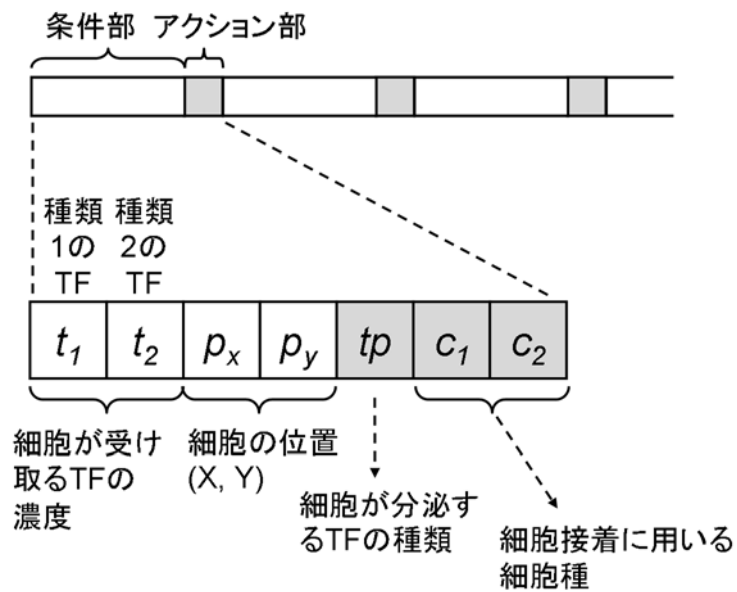


図 3-2 DTSP に適用する提案 AE モデルの遺伝子表現

表 3-1 遺伝子の各要素

	定義	取りうる値
t_1	種類 1 の TF の濃度	0, 1, 2, ..., max_t , #
t_2	種類 2 の TF の濃度	0, 1, 2, ..., max_t , #
...
t_{n_t}	種類 n_t の TF の濃度	0, 1, 2, ..., max_t , #
p_x	エリアのインデックス (x 軸方向)	0, 1, 2, ..., #
p_y	エリアのインデックス (y 軸方向)	0, 1, 2, ..., #
tp	分泌する TF の種類	1, 2, ..., n_t
c_1	細胞接着に用いる細胞種	0, 1, 2, ..., max_c , #
c_2	細胞接着に用いる細胞種	0, 1, 2, ..., max_c , #
...
c_{n_c}	細胞接着に用いる細胞種	0, 1, 2, ..., max_c , #

提案 AE モデルでは、転写因子 (Transcription Factor: TF) による細胞間の相互作用と、細胞接着の要素を取り入れている。TF とは、ある遺伝子が別の遺伝子の発現を制御するために分泌するたんぱく質である。また、細胞接着とは、細胞が自身に隣接する細胞の種類を認識し、同種である場合のみ互いに接着する現象である。

TF に基づく細胞同士の相互作用を AE に取り入れた既存モデルには様々なものがある[27, 28]。これらの既存モデルでは、TF の濃度勾配を、細胞を中心に線形減少する分布や、ガウス分布等を用いて決定している。提案 AE では、分泌する側の細胞は TF の到達範囲のみを指定し、受け取る側の細胞はその到達範囲内に位置するか否かの 2 状態のみを参照する、という単純なモデルを採用する。

また、細胞接着を応用した既存の AE の例としては、軽量で頑強な材質を設計するものが存在する[29]。この手法では、空細胞と材質細胞の 2 種類のみを細胞分裂させ、成長によって得られた細胞の集合体のうち、空細胞は人為的に除去され、残った材質細胞同士のみが接着される。提案 AE では、細胞の種類が多種類

存在し、細胞の種類が近いもの同士が接着されるため、より柔軟な接着を行うことが出来る。

提案 AE モデルにおける発生過程は、三つのステップで構成される。第一ステップでは、各都市が擬似的な TF の分泌を行い、その結果得られた TF の濃度分布に基づき、各都市の細胞種を決定する。第二ステップでは、第一ステップで決定された細胞種に基づき、各都市間にエッジを生成する。最後に第三ステップでは、第二ステップで生成された巡回路を、シンプルな局所改善法である 2-opt[30] によって改良する。

3.3 転写因子に基づく細胞種の決定

発生過程の第一ステップでは、各都市はまず擬似的な転写因子(TF)を分泌する。続いて、この TF を用いた細胞同士の相互作用を通して得られた、最終的な TF の濃度分布に基づき、各都市の細胞種を決定する。

まず、種類 n ($=1, 2, \dots, n_t$) の TF が形成する、濃度勾配の半径を以下の通りとする。

$$r_n = \frac{n}{k} \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad (3.1)$$

d_{ij} は都市 i から j 番目に近い都市までの距離を表す。このとき、 k は TF の濃度勾配の半径を調節するパラメータである。各都市は、半径 r_n 以内に種類 n の TF を分泌している都市がいくつあるかを数え上げる (図 3-3)。この数え上げによって得られた数が、その都市が近傍の都市から受け取る種類 n の TF の濃度を意味する。つまり、各都市は近傍の都市から TF を受け取っているか否かの 2 状態のみを検知している。ここで、 max_t を t_n の取りうる値の最大値とし、ある都市が近傍都市から受け取る種類 n の TF の濃度が max_t を超えた場合、その濃度は強制的に max_t に置き換えることとする。対象都市が受け取る種類 n の TF の濃度が、遺伝子座 t_n で指定された値と一致する (または差の絶対値が thr_t 以下となるか、ワイルドカードである) 場合、条件は満たされたとみなす。

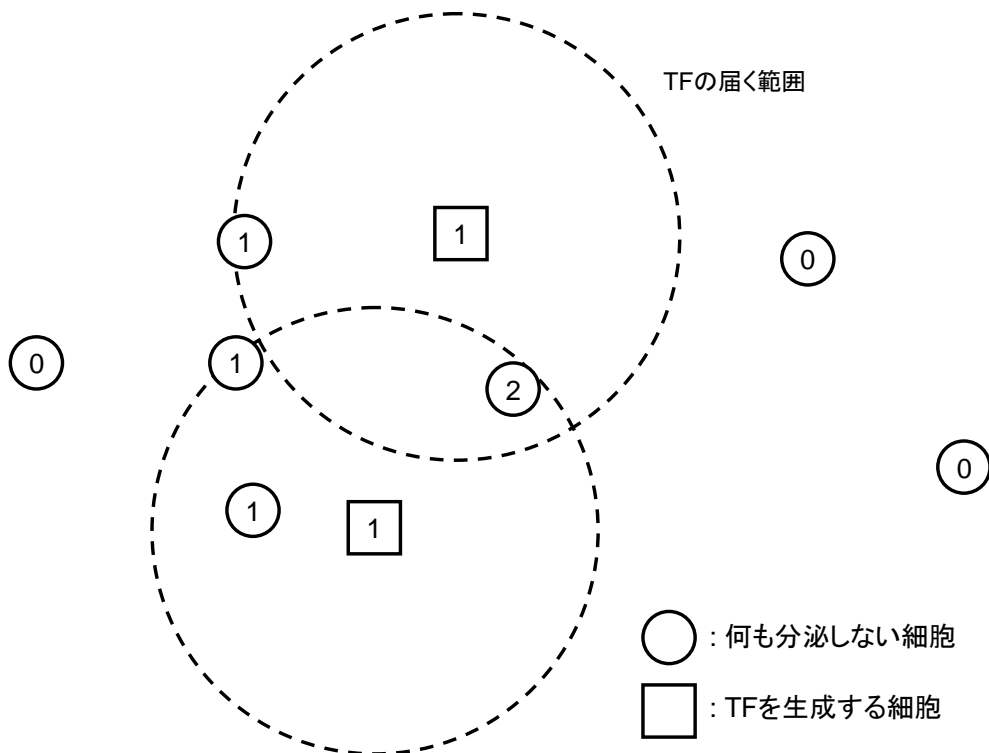


図 3-3 TF 濃度の計算方法の概念図

続いて、対象都市が二次元表現型空間のどのエリアに位置するかを調べる。エリアは、2次元の表現型空間を x 軸、y 軸方向それぞれに均等に分割することで得る (図 2-4)。これにより、各エリアのインデックスが x 軸、y 軸方向を表す整数値の組み合わせによって、(0,0)や(1,3)のように表される。この仕組みは、前章で説明したネットワーク構造生成を目的とした AE と同様である。もし対象都市のエリアのインデックスが、遺伝子座 p_x (または p_y) の値と一致する (またはワイルドカードである) 場合、条件は満たされたとみなす。

上記の通り条件部に関する判定を行い、満たされた条件の数が閾値 thr_p を超えた場合、対象都市は遺伝子座 tp で指定された種類の TF を分泌する。

これらの条件部の判断と TF の分泌状態の更新を、全ての都市について同時に行い、TF の濃度分布に変化が無くなるまで繰り返す。

続いて、定常状態となった TF の濃度分布に基づき、各都市の細胞種を決定する。この細胞種決定の手順は、TF 分泌の手順と同様に行われる。つまり、対象都市が近傍都市から受け取る TF の濃度と、エリアのインデックスに関する条件を判定し、条件の一致数が thr_p を超えた場合、対象都市の細胞種を、遺伝子座 c_m ($m=1, 2, \dots, n_c$) の値によって決定する。具体的には、全ての m について対象都

市の細胞種を $Celltype_m = c_m$ とする。この時、条件部を満たしたルールが複数存在する場合、満たした条件数が最も多いルールの適用結果を採用する。

3.4 細胞接着

生体の細胞では、互いに同種のたんぱく質を表面に持っているときのみ、互いに同種であることを認識し、隣接した細胞同士の接着が行われる。隣接する細胞間の種類の認識や接着に関するたんぱく質はカドヘリンと呼ばれる。ここでは、このような生体の細胞接着に着想を得たエッジ生成の手順について説明する。

発生過程の第二ステップでは、前節で決定された都市の細胞種に基づき、以下の手続きによってエッジを挿入し、巡回路を生成する。

- (1) エッジ挿入の始点となる都市を選択し、この都市を対象都市とする。
- (2) エッジ挿入の終点となる候補都市（以下候補都市と表記）を、対象都市から近い順に調べていく。このとき、エッジを持たない都市のみを候補都市とする。
- (3) 候補都市の中で、対象都市と細胞種が近いものが見つかった場合、対象都市と候補都市の間にエッジを挿入し、候補都市を次の対象都市とする。
- (4) 対象都市以外の全都市の細胞種を調べ、対象都市と細胞種が近いものが見つからなかった場合、対象都市と最も近いエッジを持たない都市の間にエッジを挿入し、候補都市を次の対象都市とする。
- (5) 巡回路が生成されるまで、手順(2)に戻る。

ここで、手順(3)において対象都市と候補都市の細胞種が近いかどうかの判定は以下のように行う。

- ・ 全ての m について $diff_m$ を対象都市の細胞種 $Celltype_m$ と候補都市の細胞種 $Celltype_m$ の差の絶対値とする。
- ・ $diff_m \leq thr_c$ となる m の数を $n_matched$ とする。
- ・ $n_matched \geq thr_a$ であれば、対象都市と候補都市の細胞種は同じであるとみなす。

図 3-4 は、上記の手順を示した概念図である。このような手順により生成された巡回路に対して、局所改善法である 2-opt[30]を適用し、最終的な表現型とする。

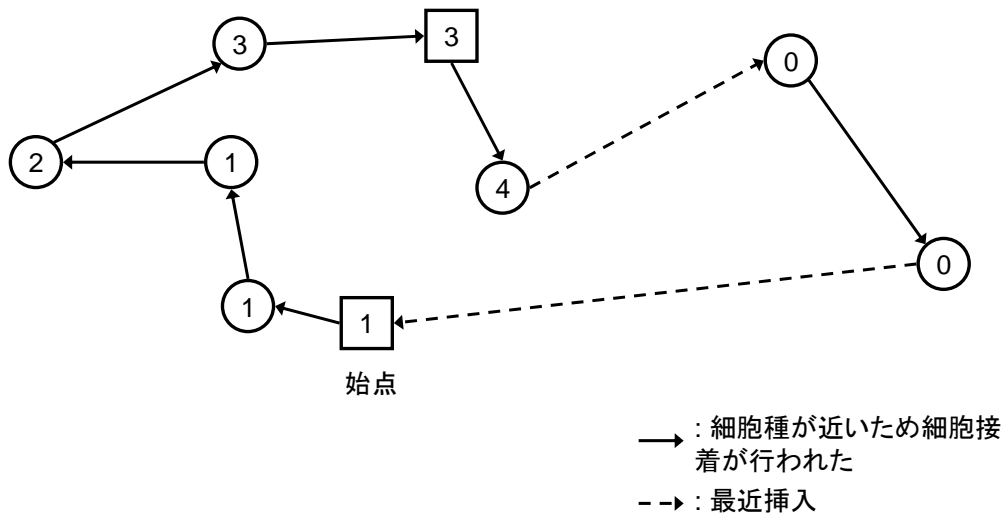


図 3-4 細胞接着の概念図。数字は各都市の細胞種を表す。

3.5 不均一突然変異

適応度の上昇速度を改善するため、提案 AE では不均一突然変異[26]を採用した。突然変異率がどの遺伝子座に対しても同じである場合、最高適応度であった個体であっても、多くの遺伝子が成長に寄与しない[11]。不均一突然変異では、このような成長に寄与しなかった遺伝子に対して、より高い確率で突然変異を適用する。その結果、発火しなかった遺伝子が進化の初期段階で削除され、発火する遺伝子がより多く生き残り、適応度の上昇速度が向上する[26]。

3.6 数値実験

3.6.1 計算条件

本数値実験では Kang らの提案した DTSP のベンチマーク問題である”chn144+1”と、オフラインパフォーマンスの指標に基づいて、提案 AE の有効性を検証する。”chn144+1”問題は、144 の固定された都市と、円周軌道を描いて時々刻々と動き続ける衛星を結ぶ最短の巡回路を求める問題である。オフラインパフォーマンスは、各アルゴリズムを時間制約無しで適用して得られる最適解からの残差を、計算実行中に得られた全サンプルについて平均したものである[24]。

Kang らの実験に従い、ここでは 3 種類の実験を行う。すなわち、衛星の周回軌道をそれぞれ 10, 20, 40 等分するサンプルポイントを用いる。この時、衛星が軌道を一周するのにかかる時間を T と表す。

また各実験では、衛星の周回を行う前に、事前に静的な TSP”chn144” (すなわち衛星の無い状態) で 200 世代の進化を行わせ、得られた個体群を”chn144+1”に適用する。それぞれ 10 回の計算を行い、最も良かった結果について示す。各計算は実時間で 200 秒間行う。表 3-2 は、提案 AE の用いたパラメータ設定を表す。比較のため、Kang らの DIOEA による結果と、最近挿入法と 2-opt を組み合わせた手法 (以下 NI+2-opt と表記) の結果も併記する。提案 AE の実行に用いた計算環境は Intel Core2 CPU 2.93GHz, 3.12GB RAM である。

表 3-2 パラメータ設定

個体数	30
エリート数	2
遺伝子数	5
n_t (TF の種類の数)	2
n_c (細胞種を決定する遺伝子座の数)	2
k (TF の影響範囲を決定する)	4
thr_t (TF 濃度の差の許容量)	2
thr_c (細胞種の差の許容量)	1
thr_p (ルール発火に必要な条件の一致数)	2
thr_a (細胞接着に必要な細胞種の一致数)	1
max_t (遺伝子座 t_n の取りうる最大値)	11
max_c (遺伝子座 c_n の取りうる最大値)	4
選択	ルーレット
交叉	二点交叉
交叉確率	0.9
発火した遺伝子の突然変異率	0.03
発火しなかった遺伝子の突然変異率	1.0
表現型空間の分割数	8*8

3.6.2 結果

表 3-3, 表 3-4, 表 3-5 は、衛星の軌道のサンプルポイント数をそれぞれ 10, 20, 40 とし、 T の値を様々に変化させた場合の結果を示したものである。各表で示した値は、10 回の試行中で最良であった結果を表す。

また表 3-3, 表 3-4, 表 3-5 内の「追加進化無し」の段は、「chn144」において 200 世代の進化を行わせて得られた個体群を、直接「chn144+1」に適用した（環境変化後の進化を行わなかった）結果を示している。

いずれのサンプルポイント数、 T の値においても、提案 AE によるオフラインパフォーマンスは、DIOEA、NI+2-opt と比べて良い結果となった。また、いずれの実験でも、 T が長いほど良い結果が得られた。

表 3-3 平均残差 (サンプルポイント数10)

T	AE	DIOEA	NI+2-opt
追加進化無し	4.68×10^2	XXXXXXXXXX	1.35×10^3
2.0s	4.29×10^2	6.33×10^2	
4.0s	3.67×10^2	5.89×10^2	
6.0s	3.37×10^2	6.83×10^2	
8.0s	2.93×10^2	5.48×10^2	
10.0s	2.82×10^2	6.02×10^2	

表 3-4 平均残差 (サンプルポイント数20)

T	AE	DIOEA	NI+2-opt
追加進化無し	5.27×10^2	XXXXXXXXXX	8.60×10^2
4.0s	4.17×10^2	5.07×10^2	
8.0s	3.15×10^2	5.80×10^2	
12.0s	2.91×10^2	6.39×10^2	
16.0s	3.00×10^2	5.75×10^2	
20.0s	2.68×10^2	5.88×10^2	

表 3-5 平均残差 (サンプルポイント数40)

T	AE	DIOEA	NI+2-opt
追加進化無し	4.04×10^2	X	8.90×10^2
8.0s	4.01×10^2	6.10×10^2	
16.0s	3.37×10^2	5.20×10^2	
24.0s	3.22×10^2	5.75×10^2	
32.0s	2.88×10^2	6.77×10^2	
40.0s	2.63×10^2	7.08×10^2	

3.7 考察

本数値実験における計算機の計算速度は、Kang らの DIOEA を用いた数値実験が行われた計算機よりも良いものである。しかし Kang らは、DIOEA の性能が T に依存せず、常に一定であることを指摘している[24]。

つまり、DIOEA では、計算環境が良くなってもパフォーマンスの改善はないと考えられる。そのため、計算環境が同じであったとしても、提案 AE モデルのほうが DIOEA よりも良い性能であると言える。

提案 AE モデルは、”chn144”で事前に進化させて得られた個体群を直接”chn144+1”に適用することが可能である。このように、環境変化後に改めて追加進化を行わなかったとしても、追加進化を行った場合から大きく悪化しない結果となった。

また提案 AE モデルでは、遺伝子型に基づく細胞種の決定がいずれの都市でも行われなかった場合、細胞接着の手順により、最近挿入が適用される。そのため、NI+2-opt は、提案 AE モデルにおいていずれの遺伝子も条件を満たさなかった場合と等価である。NI+2-opt よりも提案 AE モデルが良い性能を示していることから、提案 AE モデルの TF による細胞種決定と細胞接着の仕組みが有効に機能していることが分かる。

3.8 小括

細胞接着を考慮した AE モデルを提案し、環境変化に対するロバスト性を検証するため、DTSP のベンチマーク問題に適用した。提案 AE モデルでは、転写因子の分泌を調節する行動ルールを進化の対象とし、その濃度の違いに応じてエッジを生成するノードを決定する。行動ルールおよび転写因子の濃度分布の効率的な継承が可能となるため、既存の進化計算に基づく手法よりも、環境変化に

対して良い性能を示した。また、表現型を生成するための行動ルールの集合を遺伝子として扱うため、静的な環境下で進化させて得られた個体を、直接別の環境に適用することも可能である。この特性を利用して、環境変化後に改めて個体群の進化を行わずに、新たな環境に対して直接再利用した場合であっても、既存の進化計算に基づく DTSP 解法よりも良い性能を示した。

第4章 家電制御問題への適用

4.1 給湯機制御の課題

家電の自動制御は年々高度化が進んでおり、社会システムを構成する重要な要素の一つとして、その影響の大きさは無視することができない。本章では、より現実的な問題として家電の自動制御問題に着目する。その一例として、ヒートポンプ式給湯機の運転制御を行うルール集合を進化的アルゴリズムで進化させることで、より柔軟・経済的に多様な世帯の需要を満たすことができることを示す。

近年、給湯機の一般家庭への普及が進んでおり[31]、システム効率を向上させる運転方式に対する取り組みがメーカーで行われるようになってきている[32]。このような運転方式の中で既に広く普及しているのは、

- (1) 7時にある量まで湯を貯める
- (2) ある湯量を下回っていたら 17時の時点でタンクに湯をある量まで貯める
- (3) タンク内の湯量がある量を下回ったら一定量まで湯を貯める

という三つの固定的かつ比較的単純なルールに基づく運転方式である[32]。これらのルールにおいて、湯量を決定する計算式で用いられるパラメータは固定されており、各家庭の給湯需要パターンに適した制御ができないため、コスト高となる。

所らは、この三つのルール内の 7 時や 17 時の時点でタンクに貯める湯量や、常にタンクに維持する湯量等の、湯量に関するパラメータを運転コストが少なくなるように調整する手法（以下、パラメータ最適化と表記）を開発した[33]。このパラメータ最適化の手法は、湯量に関するパラメータにおいて柔軟性を持つが、運転方式の枠組み自体は固定的である。

4.2 ヒートポンプ式給湯機の運転制御

本節では、現行のヒートポンプ式給湯機で一般的に用いられている運転ルールと、この運転ルールのパラメータを調整する所らの手法（以下、パラメータ最適化と表記する）について説明する。

4.2.1 現行機器の運転ルール

一般的に電気料金は、図 4-1 に示すような 7 時、10 時、17 時、23 時を区切りとした三段階の料金制度になっている。この電気料金が切り替わる時刻に着目し、現行のヒートポンプ式給湯機では、以下の三つのルールを基本に湯を沸かすのが典型的である[32]。

ルール 1: 料金の安い深夜電力を用いて、朝 7 時までに過去 1 週間の需要実績を基に計算された必要熱量を貯湯槽に貯める（図 4-2）。

ルール 2: 電気料金単価が安くなる 17 時の時点で、貯湯槽内の蓄熱量が過去 1 週間の実績を基に計算される必要熱量を下回っていた場合には、必要量まで熱を追加する（図 4-3）。

ルール 3: 湯切れ防止のため、貯湯槽内の蓄熱量があらかじめ決めた一定熱量を下回ったら、あらかじめ決めた熱量に達するまで熱を追加する（図 4-4）。

一般的に、上記運転ルール中の下線部の熱量を計算するための式で用いられるパラメータは固定されている。

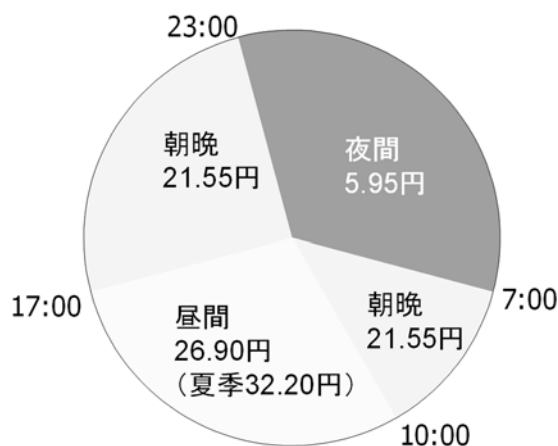


図 4-1 電力料金 (kWh 単価)

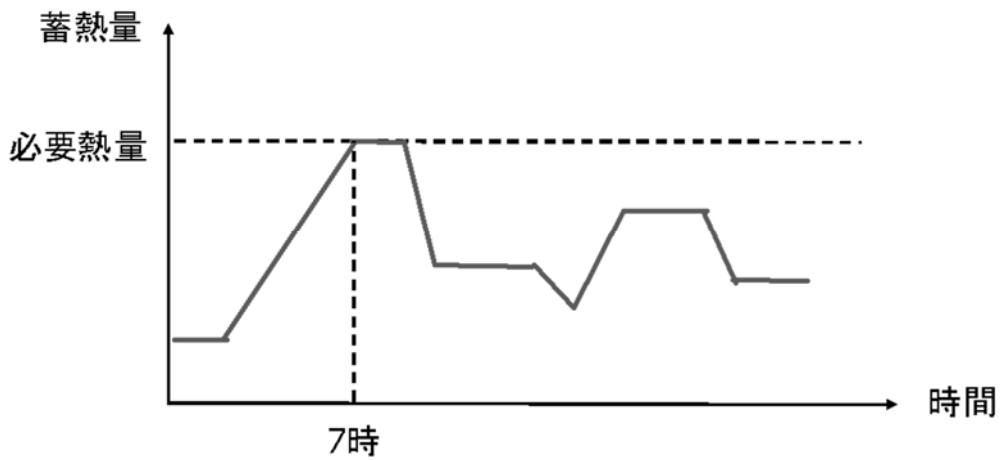


図 4 -2 ルール1

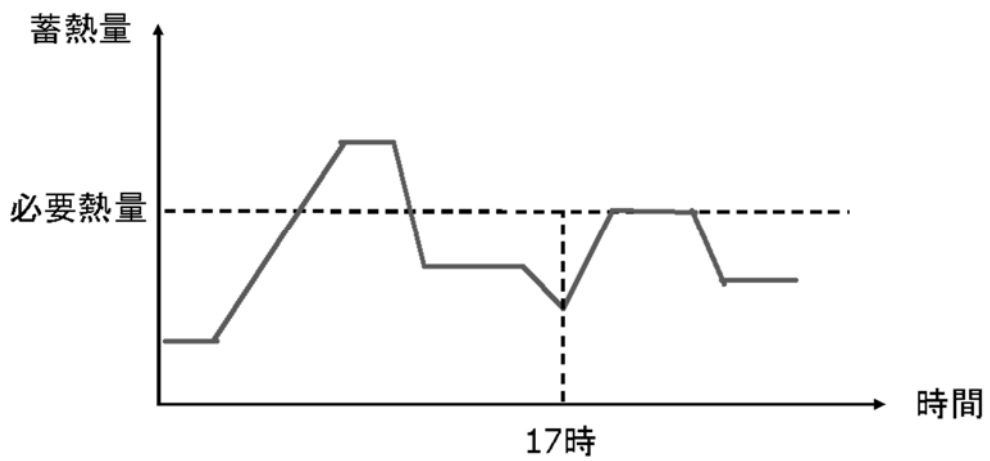


図 4 -3 ルール2

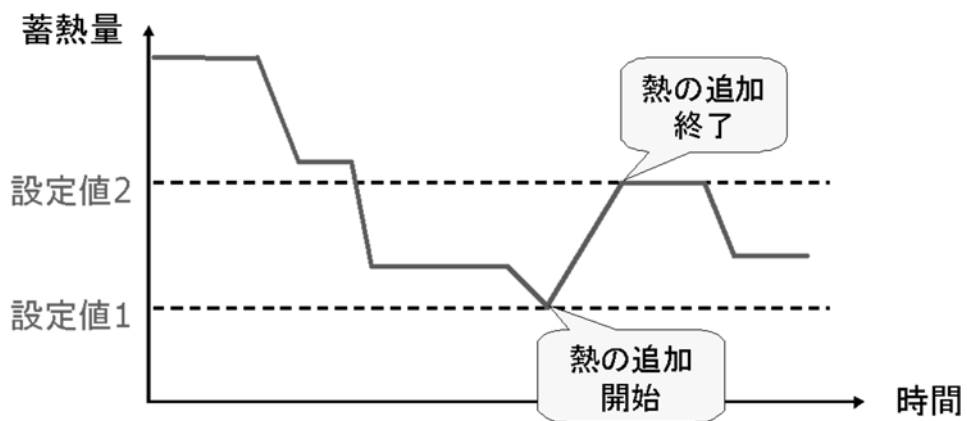


図 4 -4 ルール3

4.2.2 現行機器の運転ルールに関するパラメータ最適化

現行のヒートポンプ式給湯機では、前述の三つのルールに用いられるパラメータは出荷時に固定されているものが一般的である。所らは、利用者の設置条件に合わせて、運転コストが最小となるように、運転ルールのうち下線で示した部分のパラメータを調整する手法（パラメータ最適化）を開発した。

しかし、この手法には、湯沸かしを行う時間や、タンクに常に維持する湯量が固定的であるという問題がある。例えばルール 3 によって、日付や時刻を問わず、一定量の湯量を下回ったら一定量まで湯を追加するという動作を常に行うため、電気料金の高い昼間時間帯にも湯を沸かしてしまうことがあり、コスト高となりやすい。より低コストの運転を行うには、家庭毎の需要パターンの違いに対応可能な、より自由度の高い運転ルールが必要である。

4.3 季節や時間帯を考慮した運転ルール

本節では、提案手法における運転ルールの実装の詳細について述べる。

提案手法では、ヒートポンプ式給湯機の運転ルールを、時刻や直前の給湯需要などがどのような条件の時に、貯湯量がどれくらいになるようにヒートポンプを起動させるかを決定するルールの集合として表現する。以降、ルールの if 部分を「条件部」、then 部分を「アクション部」と呼ぶこととし、この条件部とアクション部について説明する。

4.3.1 条件部

条件部では、現在日付、現在時刻、直前の給湯需要量、累積給湯需要（当日その時刻までに消費した湯の総量）という四つの条件を考慮する。これらを条件に選んだ理由は以下のとおりである。

- 夏場は全体的に給湯需要が少なくなるなど（図 4-5）、給湯需要に季節による増減の偏りが見られるため、現在日付の参照が有効であると考えられる。
- 年間を通して 18 時以降の給湯需要が他の時間帯より大きくなるなど（図 4-5）、給湯需要に時間帯による増減の偏りが明らかに見られるため、現在時刻の参照が有効であると考えられる。
- 風呂による湯の消費は給湯需要の大部分を占め、また一定時間継続する傾向があるため、直前給湯需要の参照が有効と考えられる。
- 風呂を使用済みかどうかの識別に、累積給湯需要の参照が有効であると考えられる。

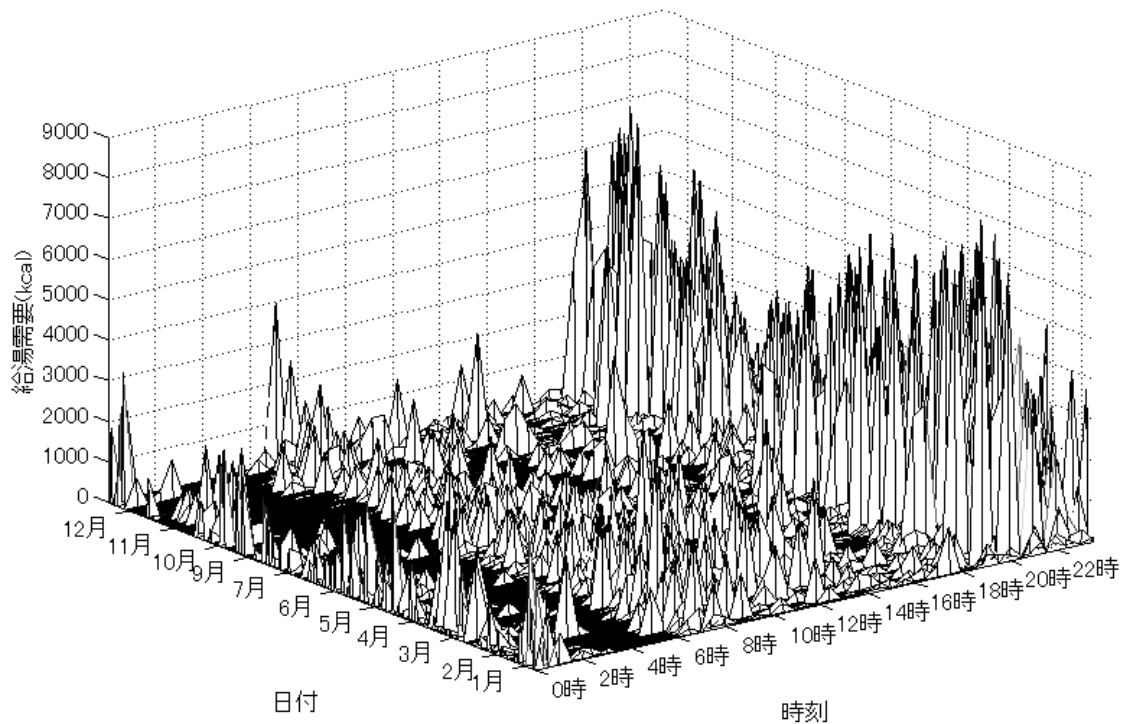


図 4-5 世帯1における給湯需要

条件部は、8個の整数の列で表す。これらの数字を順に a, b, c, d, e, f, g, h で表現したとき、それぞれの数字が表す意味は次の通りである。

- a: 現在日付が a よりも後である
- b: 現在日付が b よりも前である
- c: 現在時刻が c よりも後である
- d: 現在時刻が d よりも前である
- e: 直前給湯需要が e よりも多い
- f: 直前給湯需要が f よりも少ない
- g: 現在の累積給湯需要が g よりも多い
- h: 現在の累積給湯需要が h よりも少ない

ここで、条件部のうち現在日付に関する条件は、a と b の値が同じ場合、全ての日付を許す条件として扱う。同じく、現在時刻に関する条件は、c と d の値が同じ場合、全ての時刻を許す条件として扱う。さらに、直前給湯需要と累積給湯需要に関する条件にはワイルドカード(任意の値を許す条件)を用意しておく。これにより、現在日付、現在時刻、直前給湯需要、累積給湯需要の4条件全てを

満たさなくてもアクションを適用することが可能となる。これは、例えば直前給湯需要のみに注目するルール、累積給湯需要のみに注目するルール等の存在を許すということを意味する

4.3.2 アクション部

ワイルドカードを除く全ての条件が一致した場合、各ルールで定められたアクションを適用する。このアクションは、どれだけ湯を貯めるか(目標生成湯量)を指定する。

また、運転ルールは複数のルールから成っているため、互いに矛盾するルールが適用可能となる。そこで、条件部が満たされたルールのうち、最も目標生成湯量大きいものを採用することとする。

さらにアクションには、「目標時刻までに目標量まで湯を生成せよ(ただし、目標とした量まで湯の生成ができない場合は、目標時刻に湯の生成を停止する)」という目標時刻型の動作を行うアクションと、「直ちに起動し、目標量に達するまで湯を沸かせ」というオンデマンド型の動作を行うアクションの二種類を用意する。

(1) オンデマンド型 :

オンデマンド型のアクションは、突発的な需要に対応するためのアクションである。このオンデマンド型のアクションは、条件部に含まれる全ての条件を満たした時点で直ちに湯を生成し始め、湯が目標生成湯量に達した時点で湯の生成を停止する。

(2) 目標時刻型 :

目標時刻型のアクションは、料金に変化する時刻や日常的に湯を使う時間帯に備えて、前もって湯を生成しておくことで対応するためのアクションである。

この目標時刻型のアクションでは、前項で示した条件に対して特殊な読み替えを行う。まず、条件部のチェックを行う際に、時刻の条件を除いた、日付、直前給湯需要、累積給湯需要の三条件のみをチェックする。これら三つの条件が満たされた場合、条件部の d で指定した時刻までに、指定した目標生成湯量になるように湯を生成する。また、目標貯湯量から残湯量を引いたものを単位時間当たりに生成可能な湯量で割ると、貯湯量が目標値に達するためにかかる時間が算出できる。この時間だけ目標時刻から遡った時刻に起動を開始する。

次節で説明するとおり、提案手法ではこのルールの集合を遺伝的アルゴリズムによって探索するが、現在時刻に関する条件によって、指定された時刻付近に需要があり、事前に湯量を確保する必要がある、という情報が進化の過程で継承

される。ここで、多くの場合、電気料金が安い時間帯が終了する 7 時に目標貯湯量となるよう湯を沸かし、不足分を適宜補うという戦略が、コストの低い運転を行うために有効となる。しかし、ヒートポンプのシミュレータでは、タンクに貯めた湯の熱が外部に逃げる「放熱ロス」が計算されているため、夜の給湯需要ピークの時間帯が 23 時以降にある家庭などでは、朝 7 時を目標時刻とした戦略では無駄が生じる場合がある。このような場合、電気料金が安くなり始める 23 時に目標貯湯量になるよう沸かし始めるオンデマンド型戦略が有効となる場合がある。上記の問題特性と合わせて考えると、条件部の時間指定部の開始時刻からオンデマンド型で沸かすか、終了時刻に湧き上がる目標時刻型で沸かすか、という選択が有効となると考えられる。

4.4 遺伝的アルゴリズムを用いた運転ルールの進化

4.4.1 GA に関するパラメータ設定

前節で説明した運転ルールを、需要が異なる家庭毎に柔軟に調整できる手法として、提案手法では GA を採用する[9]。GA は、以下の評価値を小さくするように運転ルールを探索して出力する。

$$\text{評価値} = \text{運転コスト} + \text{湯切れ回数} \times 10000 \text{ 円}$$

遺伝的アルゴリズムは確率的手法であり、計算毎に解のばらつきがあるので、いずれの場合も複数回の計算を行い、その中で最も評価値の小さい運転ルールを出力する。

GA を用いて運転ルールを探索するため、図 4-6 のように複数個のルールを一行に並べたものを交叉、突然変異の対象として扱う。一世代に含まれる個体数は、50 から順次増やしていき、収束のばらつきが十分に小さくなったと判断した 200 とし、また十分に収束したと判断できる世代数として、5000 回の世代交代を終えた時点で終了とする。また、ランダムに生成した初期個体集団では、湯切れを起こす個体が大量に生成される。この時、湯切れを起こさない個体が存在した場合、その個体は適応度が他よりも高くなる。この状況で単純 GA とエリート戦略を組み合わせると、最初に湯を沸かすルールを持った個体の遺伝子が個体群内に急速に蔓延し、初期収束を起こしやすくなる。そこで提案手法では、生成された子孫個体を既存の個体群内に存在する適応度の低い個体と入れ替える「定常状態 GA[34]」を世代交代モデルに用いる。また、個体選択の方法について考えると、上述の通り湯を沸かす個体と沸かさない個体では適応度に大きな差がつく。そのため、ルーレット選択ではスケージングの工夫が必要

となり、ランキング選択では適応度の差の大きさが選択に反映されないという問題が生じる。そこで、これらの問題が生じないように、ランダムに選択した複数の個体の中から最良の個体を選ぶトーナメント選択を用いる。本実験では、トーナメントサイズを6とする。

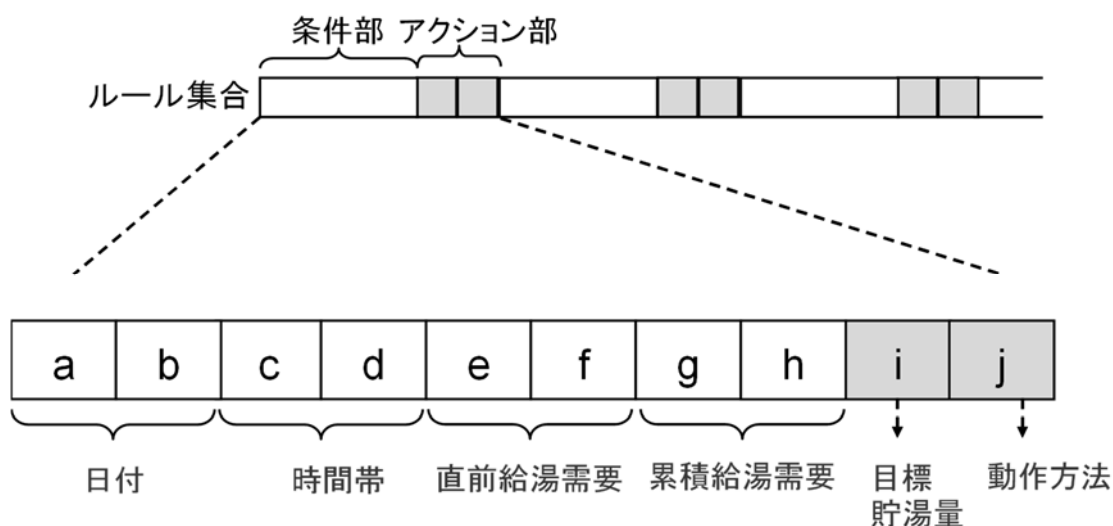


図 4-6 家電制御に用いる提案手法の遺伝子表現

運転ルールを構成するルールの数は任意に設定可能であるが、少なすぎると様々な局面に対応できる柔軟性の高い運転が実現できず、コスト高となる。反対にルールの数が多くなるほど、染色体長が長くなるため進化の効率は低下し、また条件部が満たされたルールのうち、最も目標生成湯量が大きいものを採用するため、冗長なルールが出てくる可能性も高くなる。ここでは事前の基礎実験で家庭 1, 2, 3 全てについて運転コストが十分低くなった、運転ルールが 5 種類のルールから構成されるとして計算を行う。

また、複数のルールを一行に並べたものを染色体として扱っているので、進化の際に単一のルールを切り出して次世代に継承することが出来る交叉として、二点交叉を採用した。さらに、ルールの複合的な動作が最終的な運転コストに影響するので、適応度が高かったルールの組み合わせが保存される可能性を残すように、交叉確率は 100%から順次減らしていき、適当であると判断した 90%とする。また、条件部内の数値 a, c, e, g それぞれが取りうる値は 0-23, 0-23, 0-15, 0-13 とした。ここで e, g において、それぞれ、15, 13 はワイルドカードである。この設定により、日付情報については、季節の変化に十分対応可能と考えられる、

1 年を 24 期とした分割を行う。また時刻情報については、電気料金の変わり目に合わせて 1 時間単位の分割を行う。

4.4.2 不均一突然変異

2 章で示したネットワーク構造生成の AE モデル、および 3 章で示した DTSP の AE モデルと同様、ルール集合のうち、条件部内の全ての条件を満たすことが一度も無かったルールに対して突然変異率 $p_{inactive}$ を割り当てる。逆に、少なくとも一回は条件部内の全ての条件を満たしたルールに対しては突然変異率 p_{active} を割り当てる。このとき、

$$p_{inactive} > p_{active} \quad (4.1)$$

となる、二種類の異なる突然変異率を割り当てる不均一な突然変異モデルを導入する。これによって、起動・停止に直接寄与していない無用なルールが早期に排除され、個体群の収束速度が高まる。

4.5 数値実験

提案手法の有効性を評価するため、実際の家庭で計測された給湯需要データと、ヒートポンプ式給湯機シミュレータを用いて、二種類の機器構成について運転ルールを探索する数値実験を行った。

4.5.1 計算条件

実際の家庭三軒において、2 分間隔で計測された 1 年分の給湯需要を用いた [35]。このうち家庭 1 における給湯需要の年間推移は図 4-5 に示した通りである。ヒートポンプ式給湯機シミュレータは、パラメータ最適化[33]で用いられているものと同じものを使用した。

電気料金単価には、最も広く用いられている三段階の料金を設定した（図 4-1）。また、ヒートポンプの性能は気温や入水温度によって変化するため、出力される運転ルールも、気温・水温の影響を受ける。本実験では、気象庁によって記録された気温と、給湯需要計測時に併せて記録された入水温を入力データとして用いた。

ヒートポンプ式給湯機の定格加熱能力は一般的な 4.5kW とした。タンクについては、一般的な容量の 300 リットルのもの（T300）と、より小容量の 200 リ

ットルのもの（T200）の、二種類を対象とした。本実験では、これらの組み合わせで構成されるヒートポンプ式給湯機の運転ルールを探索した。

4.5.2 結果

(1) T300 を用いた家庭 1 における運転ルール

開発手法の特長がよく現れたケースである、家庭 1 で 300 リットルタンクを用いた場合の結果を示す。提案手法を用いて計算を行ったところ表 4-1 に示すルールの集合が得られた。この運転ルールを用いた場合の運転コストは年間 8,535 円となり、湯切れは一度も起こらなかった。この機器構成に対して、パラメータ最適化を適用した場合の運転コスト 10,434 円と比べ、約 18%運転コストが削減された。

表 4-1 生成されたルール集合 (HP4.5+T300, 世帯1)

ルール番号	条件部								アクション部	
	日付		時間帯		直前給湯需要		累積給湯需要		目標貯湯量	動作方法
1	2月後半以降	12月後半以前	3時以降	5時以前	0 kcal 以上	1,200 kcal 未満		24,000 kcal 未満	タンクの 80%	直ちに
2	1月後半以降	6月以前	23時以降	7時以前		100 kcal 未満	14,000 kcal 以上	20,000 kcal 未満	タンクの 100%	直ちに
3			3時以降	23時以前	0 kcal 以上		0 kcal 以上	18,000 kcal 未満	タンクの 20%	直ちに
4	4月後半以降	9月後半以前			500 kcal 以上	800 kcal 未満	8,000 kcal 以上		タンクの 20%	18時まで
5					0 kcal 以上	900 kcal 未満		6,000 kcal 未満	タンクの 80%	3時まで

続いて、探索によって得られた運転ルールの特性について検証する。

ルール 5 は、年間を通して 3 時までタンク内に 80%の湯を貯めようとする動作を行うルールである。このルール 5 が、家庭 1 の給湯需要を満たすためのベースとなる湯の生成ルールである。

ルール 1 は、2 月後半から 12 月後半の期間のみ、ルール 5 によって 3 時にタンクに 80%まで貯められた湯を、5 時まで保存する役割を持つ。ここで、2 月後

半から 12 月後半の 3 時から 5 時の間に給湯需要が 1,200kcal を超えることはなく、さらに累積給湯需要が 24,000kcal を超えることもない。そのため、直前給湯需要と累積給湯需要の条件は実質的にワイルドカードと同じ役割を持つ。

ルール 2 は、冬場の給湯需要が多い時期に、普段よりも需要が多い日であれば電気料金の安い 23 時以降に起動してタンクに 100%の湯量を確保し、深夜の給湯需要に備える動作をするルールである。また、累積給湯需要が 20,000kcal を超えた場合にはすぐには沸かさない、という動作を行うのがこのルールの大きな特徴である。

ルール 3 は、年間を通した深夜以外の時間帯に、少しでも給湯需要があれば起動してタンクに 20%の湯量を確保する動作を行う「フェイルセーフの役割を果たすルール」である。

ルール 4 は、条件を満たすことがあってもルール 2 の適用が優先されるため、今回実験に用いた給湯需要データでは、年間を通して実際に適用されることはなかった。

図 4-7 は 1 年分の時間帯毎の起動・停止の状況を示した図である。パラメータ最適化には、残湯量がある値を下回っていたらある値まで湯を沸かすというルールが含まれており、これが適用されることで夕方以降も一定の頻度で起動していた（図 4-8）。これに対して、提案手法によって得られたルールでは、夕方以降はほとんどの場合湯を確保しなくても、湯切れ無しに給湯需要を満たすことができた。運転コストの削減には、この夕方以降の起動の低頻度化が大きく貢献していると考えられる。また、パラメータ最適化では朝の炊き上げ時間が 7 時に固定されていたが、提案手法では深夜の大きな給湯需要に対応するために炊き上げ時間が 7 時よりも早い 3 時となっており、さらにそれだけではまかないきれない給湯需要を、電気料金の安い 23 時から 7 時の時間帯を利用して逐次追加することによって、低コストで湯切れのない運転を実現している。

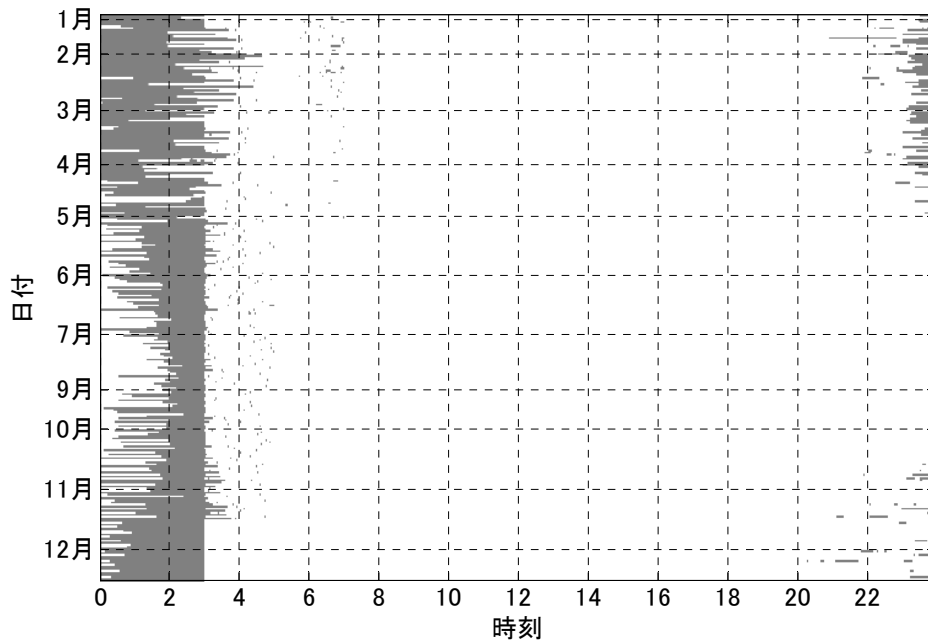


図 4-7 提案手法における起動停止の様子 (灰色:起動、白色:停止、HP4.5+T300、世帯1)

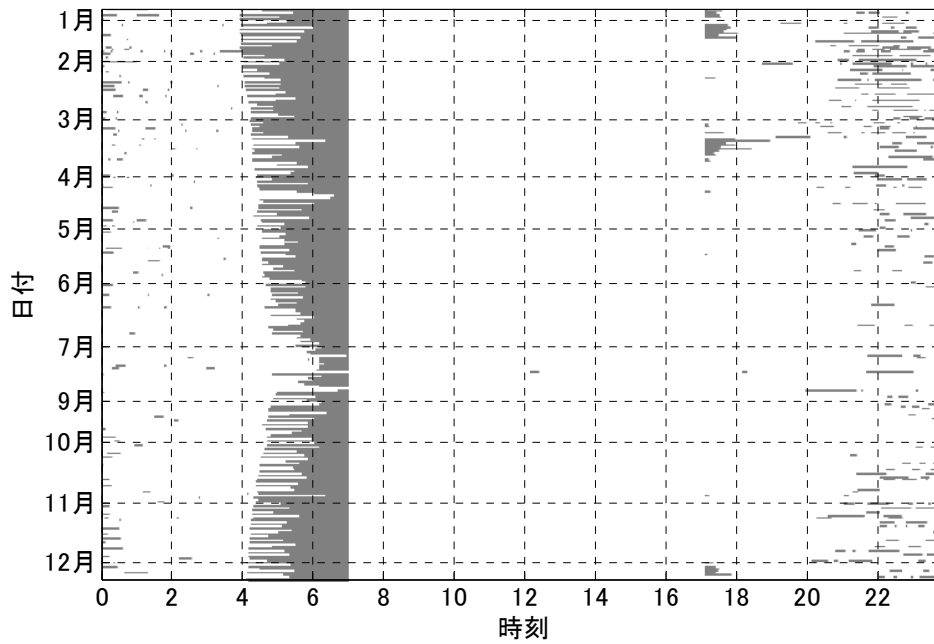


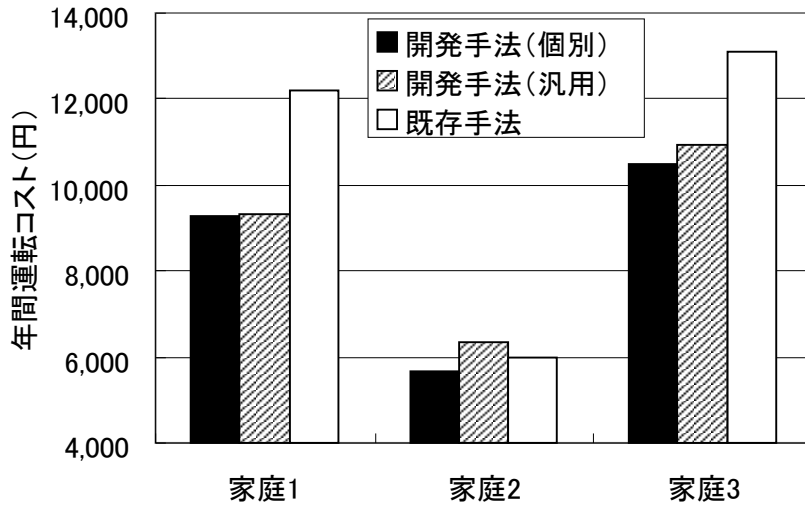
図 4-8 パラメータ最適化における起動停止の様子 (灰色:起動、白色:停止、HP4.5+T300、世帯1)

(2) 様々な設定での計算結果

提案手法が、小容量で湯切れリスクの大きい T200 や、その他の給湯需要データに対しても有効であることを示す。そこで、家庭 1 の給湯需要データ(図 4-5)と、その他 2 軒分(家庭 2, 3)の給湯需要データについて、それぞれタンクを T300 と T200 を用いて、個別に運転ルールを探索した。

各設定における結果を図 4-9 に示す。いずれの家庭・タンク容量についても、開発手法により得られた運転ルールを用いることによって、パラメータ最適化を用いた場合と比べて年間運転コストが削減された。また、パラメータ最適化による運転ルールを用いた場合と比較した年間運転コストの削減率は、200 リットルタンクのケースの方が高く、容量の小さいタンクが設置されたケースほど、柔軟な運転ルールの有効性が高くなった。中でも、パラメータ最適化と比べて運転コストの削減率が最も大きかったのは、家庭 1 において T200 を使用した場合であった。この時、提案手法による運転コストは年間 9,411 円(湯切れなし)となり、パラメータ最適化の運転コスト 12,178 円(湯切れなし)と比べ、約 22% 運転コストが削減された。また、タンクの容量低下に伴い、深夜の給湯需要による湯切れを防ぐ必要が出てきており、そのため年間を通して電気料金が安くなる 23 時から湯を沸かし始める動作をした(図 4-10)。

200リットルタンク



300リットルタンク

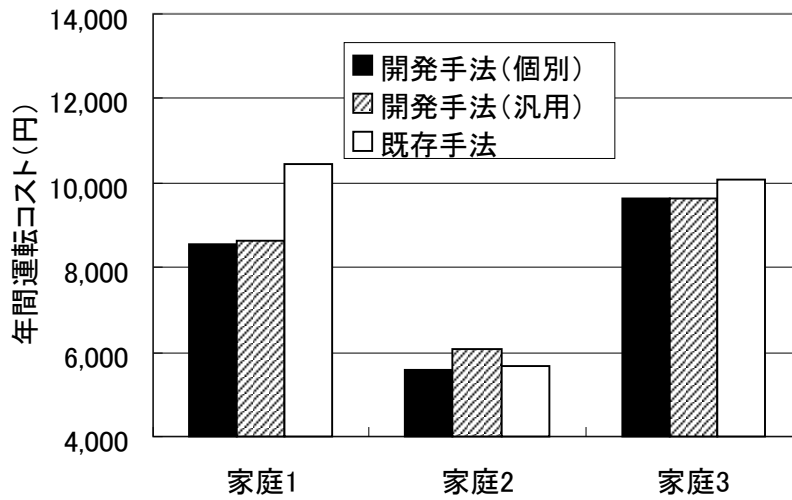


図 4-9 各世帯における年間の運転コスト (HP4.5)

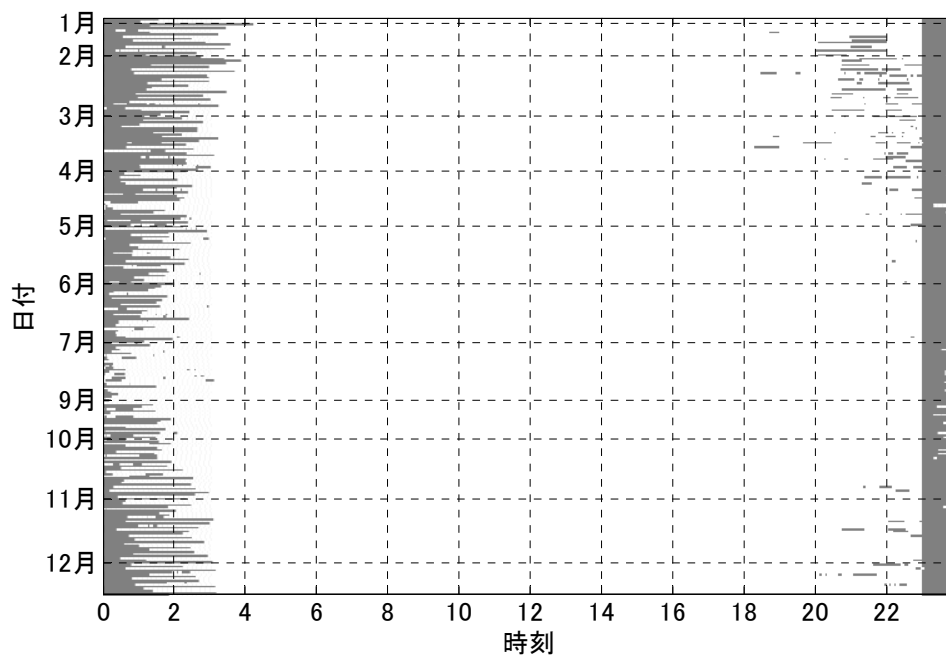


図 4 -10 提案手法における起動停止の様子 (灰色:起動、 白色:停止、HP4.5+T200、 世帯1)

(3) 様々な需要パターンに対応可能な汎用運転ルール

開発手法が高いスケラビリティ・ロバスト性を持つことを示すには、生成した同一の運転ルールによって、多様な世帯の需要を満たすことができるかを検証する必要がある。そこで、様々な給湯需要パターンに対応できる汎用的な運転ルールを運用した場合、個別の家庭毎に探索した運転ルールを運用した場合と比べてどれだけ運転コストの削減率が異なるかを調べた。

T200 と T300 の組み合わせそれぞれについて、家庭 1, 2, 3 全ての給湯需要パターンに対して対応可能な運転ルールを探索し、家庭毎に運転ルールを進化させた場合の運転コストと比較した。その結果、図 4 -9 に示すとおり、家庭 1, 3 については個別に運転ルールを探索した場合とほぼ同程度の年間運転コスト（湯切れなし）となった。しかし、家庭 2 についてはパラメータ最適化よりも劣る年間運転コスト（湯切れなし）となった。これは、家庭 1, 3 の給湯需要の総量が家庭 2 よりも大きく、家庭 1, 3 で湯切れが起こらないように多目の湯量を確保するようなルールが得られるため、家庭 2 にとっては必要な湯量よりも余分に湯を生成してしまうためであると考えられる。

以上から、年間の湯の消費量が少ない家庭2では運転コストが高くなったが、家庭1と家庭3においては個別に運転ルールを探索した場合とほぼ同等のコスト削減率となるような、汎用的な運転ルールの探索が可能であることがわかった。

(4) 不均一突然変異の有効性

図4-11は、遺伝的アルゴリズムの世代数に対する年間運転コストの変化を、家庭1,2,3について10回の計算結果の平均を取って示したものである。経験的に用いられることが多い遺伝子長の逆数[36]として $p_{active} = 0.02$ を固定し、 $p_{inactive}$ を変化させることによって、遺伝子全体に均一な突然変異率を割り当てた場合に比べて、より速い収束速度で解を得ることが出来た。

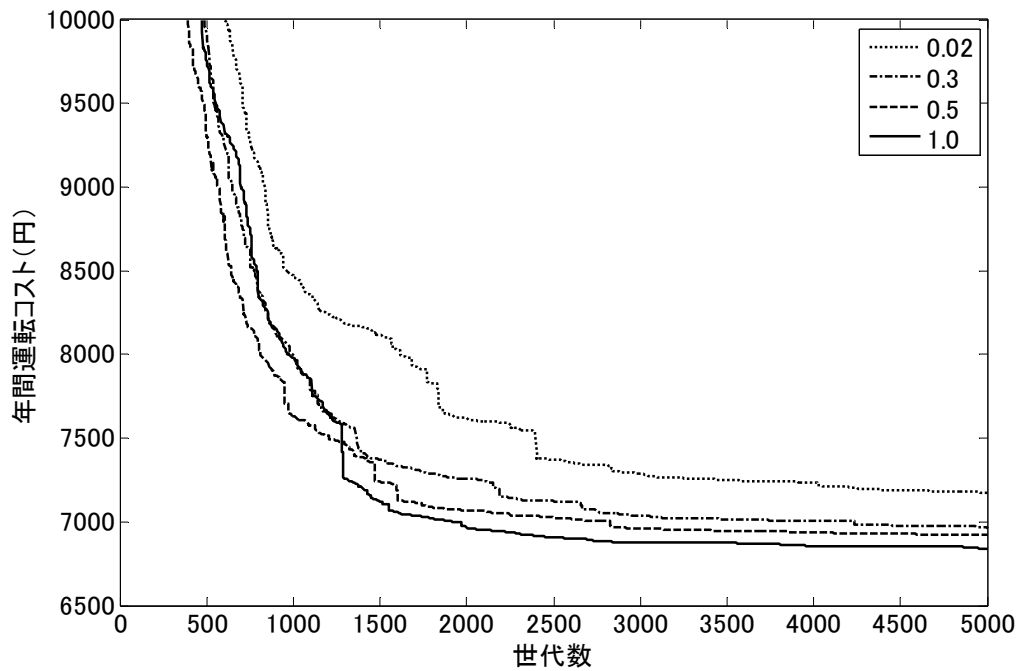


図 4 -11 $p_{inactive}$ 毎の収束速度の違い ($p_{active} = 0.02$ は固定)

4.6 考察

本章では、比較的小規模な数の世帯に対する家電の運転ルールの進化を検討した。こういった行動ルールと進化・適応を組み合わせた枠組みで運転・制御を

行う多様な家電が、今後社会に大量導入された場合、これらの家電同士が協調的に動作して自身の動作特性を動的に変化させられるようになる可能性がある。例えば一世帯内で考えると、新たな暖房器具が導入された場合、既に所有していた暖房器具が以前と同じだけのエネルギーを消費する必要は無くなり、その分エネルギー消費を抑えた運転を行うように自身の行動ルールを変更する、といったことが考えられる。こういった柔軟性を持たせることによって、複数の世帯が互いに連携し、エネルギー供給設備の容量に関する制約だけでなく、世帯単位でのエネルギー売買などの新たなニーズをも含めて、社会全体としてエネルギーの需要と供給のバランスをより柔軟に満たし、パフォーマンスを向上させられる可能性がある。

4.7 小括

より現実的な問題として家電制御の問題に注目し、エネルギー機器の効率的な運転ルールを進化させる方法を提案した。本手法は、時刻、給湯需要などの使用状況に関する情報を条件とし、これらの条件を満たしたときに目標生成湯量を指定するようなルール集合を進化的アルゴリズムによって生成する。このようにして得られた運転ルールは、需要の大きさや発生時季・時間帯の世帯ごとのパターンに対して、複数のルールが協調して需要を満たすように進化・適応することによって、柔軟性の高い起動・停止パターンを示し、既存手法よりも運転コストを大きく削減することができた。

第5章 進化・適応の視点に立った人間行動の分析

5.1 マルチエージェントモデルによる分析

5.1.1 社会性の進化が意思決定に与える影響

社会システムを分析するに際しては、人間がどのように意思決定をするかについての理解も必要不可欠である。人間は意思決定や判断の際、一見合理的ではないと思われるような振る舞いをする場合もある。勿論、人間の意思決定は利己的な場合もあるが、一方で自己の利益とは無関係に、また時には自らの利益を犠牲にしてさえも、他人の意思決定や行動にも影響を受ける等、社会性を持った意思決定を行う場合がある。こういった社会性を持った個人の意思決定や行動は、個人間の相互作用を繰り返すことで、新たな集団特性の発現に繋がる場合がある。本節では、そのような一例としてリスクへの反応に着目し、人間の行動ルールがどのように進化・適応し得るかを分析する。

リスクへの反応は、他人へ影響すると認知されるかどうかによっても左右されることが知られている [37, 38, 39]。リスク忌避的・選好的な態度は、世論、ひいては政策決定にも影響を及ぼし得る。例えば、我が国では 1997 年にダイオキシン排出を規制する法案が可決されたが、その背景としては、合理的な費用対効果分析よりも、むしろ世論の影響が強かったことが指摘されている [40, 41]。その他、政治的指導者の意思決定が、損失回避性や、それまで自身が築き上げてきた有形無形の財産に対してかけてきたコストに影響を受ける、といったことも知られている [42]。リスクに対する人間の態度がどのような要因に影響されるのかを理解することは、政治的にも重要な課題である [43, 44]。

これまで、リスク忌避・選好の原因を、進化・適応の観点から解釈しようとする試みは、定量的・定性的な分析の両方がなされてきた [45, 46, 47, 48, 49] が、社会行動の進化・適応の観点から解釈することも可能である。

ただし、もしこのような社会行動の進化・適応が、繁殖と死亡リスクとのトレードオフに由来するものであるとしても、その過程を実験的に検証することはできない。適応過程を理解するためには、数理モデルやエージェントベースのシミュレーションモデルなどのツールが有用となる。

このように数理モデルを用いた分析は、既往研究においても行われてきているが、複数ある社会行動の進化メカニズム[50]の中でも血縁選択に着目し、分析手法に数理モデルを採用し、かつこれらをリスクに対する態度の進化へと適用した分析例は、これまでのところ見られない。例えば、数理モデルとリスクへの態度を組み合わせた既存研究には、進化ゲーム理論[51]に基づく分析 [52, 53]、あるいは血縁選択以外のメカニズムに着目した分析[46, 47, 49]があるが、血縁選択に着目したものは見られない。また、リスクへの態度と血縁選択を結びつけた例に、アンケート解析や概念的な議論を行ったもの[54, 55]、リスクコミュニケーションへの活用を試みたもの[56]などがあるが、数理モデルによる分析を行った例は見られない。さらに、血縁選択と数理モデルを組み合わせ、自殺の適応性を論じた分析例[57]があるが、これは外的なリスクに対する各人の反応をモデル化したものではない。

そこで本節では、社会性の進化を説明する進化の枠組みとして血縁選択に着目し、利他性がリスクへの態度に影響を与え得るとの仮説に立ち、この仮説を検証するための進化的マルチエージェントモデルを構築する。このようなモデル化によって、進化・適応の観点に基づく合理性から分析することにより、人間が自己利益最大化とは異なるリスク忌避的な意思決定・行動を取り得ることをシミュレーションによって示し、人間の社会性を持った意思決定の発生機構を説明する。

5.1.2 進化的マルチエージェントモデル

5.1.2.1 モデル

(1) 概要

以下では、利他性がリスクへの態度に影響を与え得ることを検証する、進化的マルチエージェントモデルについて説明する。

利他性の進化はハミルトンによって初めて説明がなされ、以下の不等式（ハミルトン則）が成り立つ時に利他性が進化すると提唱された[58]。

$$rB - C > 0. \tag{5.1}$$

ここで、 r は血縁度、 B は利他行動によって受益者が得る便益、 C は利他行動によって失われる自身の繁殖成功（コスト）である。この不等式は、生物は自らの遺伝子のコピー数が最大化されるように進化してきたということを示唆している[59, 60]。

この考え方に基づき、提案モデルでは、各エージェントの遺伝子のコピー数を最大化する選択圧を取り入れた。このモデルを用いて、利他的なエージェントが

進化を通して、どのようにリスク忌避的な態度を持つに至るかを、利他的でないエージェントとの比較によって分析する。

各エージェントは、生存を脅かすリスクを有限回経験する。エージェントは、(1)初期化され、(2)リスクを生き延びた後便益を得て、(3)得られた便益を血縁関係にあるエージェントに配分し（利他行動を取り）、(4)遺伝子のコピー数が多いエージェントが親として選択され、(5)手元に残った便益を消費して子孫を繁殖する。エージェントは、リスクと便益のトレードオフ環境下で進化する。

図 5-1 にモデルの概要を示す。生存フェーズでは、エージェントはリスクと便益がトレードオフ関係にある「ゲーム」に参加する。利他行動フェーズでは、エージェントはリスクを生き延びて得た便益を、生存中の血縁個体に配分する。選択フェーズでは、個体群中から遺伝子コピー数が多いエージェントを親個体として選択する。繁殖フェーズでは、選択フェーズで選択された親個体が、その時点で保有する便益の量に応じた数だけ子孫を繁殖する。これらの 4 つのフェーズが繰り返し実行される。進化の対象は二種類あり、一つはエージェントのリスクへの態度（リスク源からの距離で表される）と、もう一つは血縁者に便益をどのように配分するか戦略である。

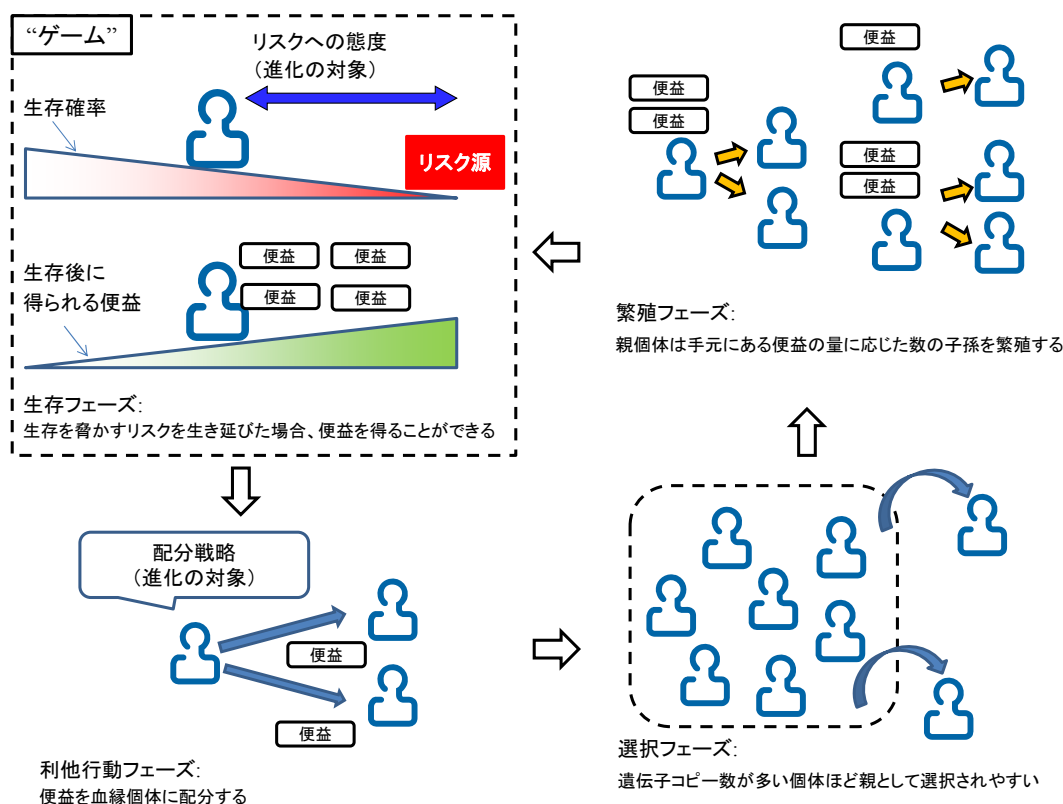


図 5-1 4つのフェーズから成る進化的マルチエージェントモデルの概要

なお、比較対象として、利他的なエージェントの進化とは別に、非利他的なエージェントを独立に進化させた場合についてもシミュレーションを行う。非利他的なエージェントは、図 5-1 の利他行動フェーズを省略して進化させて得る。本稿で「リスク忌避」あるいは「リスク忌避的」と表記した場合、利他的なエージェントが非利他的なエージェントよりも、リスク源から遠い位置に進化したことを指すこととする。反対に「リスク選好」あるいは「リスク選好的」と表記した場合は、利他的なエージェントが非利他的なエージェントよりも、リスク源に近い位置に進化したことを指すこととする。

(2) 環境

我々人間の祖先が適応してきた環境では、リスクと便益のトレードオフ構造は様々な状況に存在していたと考えられる。端的な例は、食物を得るための狩猟行動である。食物は生存と繁殖のために必要不可欠だが、狩猟はしばしば生命の危険を伴うものであった[61]。リスクと便益がトレードオフ関係にある環境は、次のように抽象化することができる。つまり、生存を脅かす危険に近づけば近づくほど死亡確率は高まるが、その危険を生き延びることができた場合、同時に繁殖の機会も増加する。このような環境を仮定し、勝てば便益を得て負ければ死亡する「ゲーム」にエージェントが複数回参加する、という単純なモデルを構築した。

本モデルにおける「ゲーム」は次のように定義する。1回ゲームに参加した場合の生存確率を

$$A(x) = 1 - x, \tag{5.2}$$

とし、生き延びた場合に得られる便益を

$$R(x) = x. \tag{5.3}$$

とし、 $x=1$ の位置にリスク源が存在するものとする。式(5.2)、(5.3)は、 x が大きくなるにつれて、死亡確率も大きくなり、リスクを生き延びた際に得られる便益も大きくなる、という構造を表現している。便益とは、繁殖に直結する何らかの資源の量を抽象化して表現したものであり、利他的なエージェントは便益を血縁関係にあるエージェントに配分する。こういった身内びいきは、現実世界においても観察される[62]。便益の配分は、自身の繁殖機会を犠牲にする利他行動を表現したものであり、例としては食物の分配などが考えられる[63]。

(3) エージェントの定義

エージェント（個体）は、年齢、遺伝子型、血縁関係を表した木（以降、簡単のため血縁木と表記）を持つ。年齢は、各個体がゲームに参加した回数とする。また、事前に定義した正の整数 j と同じ回数ゲームに参加した後、ゲームへの参加を強制的に中止する。すなわち、 j は個体の寿命を表す。勿論、各個体はゲームのリスクによって死亡する場合もあるが、もしパラメータ j がなければ、最も極端な場合、 $x = 0$ に位置する個体は死亡することが全くない不自然な状態になってしまう。こういった事態を避けるため、パラメータ j によって個体の寿命に上限を与えている。

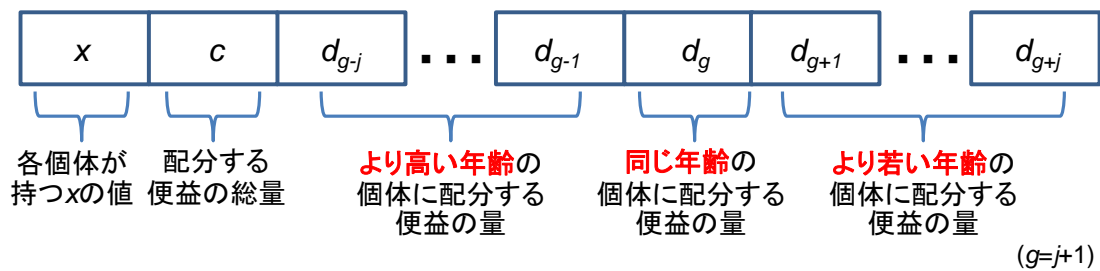


図 5-2 実数遺伝的アルゴリズムの対象となる遺伝子型の構造

図 5-2 は、本モデルで進化の対象とする遺伝子型を示したものである。各値の意味は次の通りである。 x ($0 \leq x \leq 1$)はリスクへの態度を表す。各個体は生まれた時点で x に位置を取り、生涯その位置を変えることはない。 c ($0 \leq c \leq 1$)は配分する便益（コスト）の割合を決める値であり、血縁個体に対して $cR(x)$ の便益を配分する。 d ($0 \leq d \leq 1$)は、受益者との年齢差に応じて、配分する便益の量を変化させるために用いる値である。 $g-j$ から $g+j$ は利他行動を取る個体自身と利他行動の受益者の年齢差を表す。詳細は、本稿の利他行動フェーズに関する説明および式(5.4), (5.5)において後述する。血縁木は、各個体の祖先がどの個体であるかを記録した二分木として実装する。この木は、血縁度を計算する際と、現存の個体群内に存在する遺伝子のコピー数を計算する際、および近親交配を避ける際に用いられる。進化の手順は次の通りである。

- (1) 初期化フェーズ：全個体の遺伝子型の各遺伝子座に対して、 $[0, 1]$ の一様分布に基づく乱数を初期値として与える。このフェーズで生成された個体は互いに血縁関係を持たない。
- (2) 生存フェーズ：生存中の全個体がゲームに参加する。各個体は $1-A(x)$ の確率でゲームへの参加を中止する。また、リスクを生き延び

た個体のみが $R(x)$ の便益を得る。個体の年齢はこの時点でインクリメントされる。年齢が j に達した個体もゲームへの参加を中止する。ゲームへの参加中止は、個体の死亡を表す。

- (3) 利他行動フェーズ: 本モデルでは、各個体が血縁関係にある生存中の他個体に対して便益を配分することを、利他行動として実装する。血縁認識は一つの独立した研究分野であるが、本モデルでは、各個体は自身の血縁個体を完全に識別することができ、それら血縁個体の年齢と血縁度も正確に識別できるものとする。続いて、各個体は自身との年齢差毎に、生存中の血縁個体が何人存在するかを数え上げる。生存中の血縁個体数を m 、自身とその血縁個体の年齢差を k ($0 \leq k \leq j$)として、各個体が一人の血縁個体に対して分け与える毎に失う便益の量を次の式で与える。

$$(R(x)c d_{g-k}) / (m_{g-k} \sum_{l=-j}^j d_{g-l}). \quad (5.4)$$

利他性が進化するためには、全受益者の繁殖機会の増加によって生じる自身の遺伝子コピー数の増加が、利他行動によって失う便益よりも多くならなければならない。このことを考慮して、 k 歳上の血縁個体が利他的な個体から受け取る便益の量を以下で与える。

$$(hR(x)c d_{g-k}) / (m_{g-k} \sum_{l=-j}^j d_{g-l}), \quad (5.5)$$

ここで、 h は利他行動の効率性を指定する外生パラメータである。上記の枠組みによって、各個体は血縁個体との年齢差に応じて配分する便益の量を柔軟に変化させることができる。なお、便益配分の枠組みには他にも様々な実装方法が考えられる。最も単純なのは、入手した便益を生存中の全血縁個体に対して均等に配分する方法であり、この場合は自身と血縁個体との年齢差を考慮する必要がなくなり、遺伝子型には x と c のみ含めれば十分となるため、遺伝子座 d_{g-j} から d_{g+j} は不要になる。ただしこの方法では、個体数が増加している際は若い世代の血縁個体への利他行動が増え、個体数が減少している際は老齢の個体への利他行動が増えることに

なる。つまり、利他行動の取り方は、個体群の年齢構成にのみ依存し、個体毎の便益配分の戦略には自由度がなくなり、この実装方法は単純すぎる。反対に、より複雑な実装方法としては、受益者との血縁度に応じて、配分する便益の量を変化させる方法も考えられる。しかし、血縁度の取り得る値のパターンは無限に存在するため、この実装方法は必要以上に複雑である。これらのことを踏まえて、本モデルでは、比較的単純ではあるが、受益者に応じて配分する便益の量を変化させる柔軟性を各個体に持たせられる方法として、上記のような年齢差に着目した実装を行うこととした。

利他行動フェーズでは、各個体は生存中の血縁個体一人につき一回、便益の配分を実行することができる。ただし、初期化フェーズ直後は、全個体は互いに血縁関係にないため、利他行動フェーズを実行することができないことに注意されたい。

- (4) 選択フェーズ：生存中の各個体について、血縁木を用いて、個体群中に存在する遺伝子コピー数を計算する。例えば、ある個体に二人の子個体が存在する場合、自身の遺伝子が 1.0 存在し、二人の子個体とは 0.5 の遺伝子コピーをそれぞれ共有しているので、その個体の遺伝子コピー数は 2.0 となる。ここで、二個体間の血縁度 r は、遺伝子型の類似度ではなく、血縁木を用いて次のように計算する。

$$r = \sum 0.5^n, \quad (5.6)$$

ここで n は、血縁関係にある二個体を、生存中の共通祖先を經由して結ぶ最短経路のステップ数であり、総和は、これらの経路を仲介する生存中の全共通祖先について取る。親となる二個体の選択には、GA (Genetic Algorithm, 遺伝的アルゴリズム) では一般的なルーレット選択を用いる。これは関数最大化問題に適し、かつ目的関数の値の個体間格差が小さい場合に有効と考えられるからである。各個体の選択のされやすさ (GA における目的関数の値) は、個体群中に存在するその個体の遺伝子コピー数とする。各個体が持つ便益の数や、子孫の数といった指標は、選択の際用いられないことに注意されたい。遺伝子コピー数を GA における目的関数の値として定義することで、利他性がある場合とそうでない場合について、平均的な遺伝子コピー数の差を比較することができる。これは、「生物体 I の絶対的適応度ではなく、行為 X (ここでは利他行動)

をしたときの I の包括適応度への効果を、行為 Y（ここでは利他的でない行動）をしたときとの比較で測定することが望まれる」[59]、という考え方に基づくものである。

もし選択された二個体が同祖であると判明した場合、子個体を繁殖させることはせずに、親個体の選択を実行し直す。この近親交配の回避は、選択された二個体について生存中の共通祖先が存在することが、血縁木の探索によって判明した場合に実行されるものであり、遺伝子型の類似度は同祖の判定には用いられないことに注意されたい。また、性別は区別せず種類を単一とする。なお、GA で用いられることが多いエリート戦略は、個体の寿命について例外を与えることで問題構造自体を変えてしまう。より具体的な例としては、例えば本来はリスクによって死亡するはずだった個体が、エリート戦略によって選ばれて便益を得た場合、結果的には生存確率を与える関数（式(5.2)）を、一時的に $A(x) = 1$ へ強制的に変化させたことになる。また、寿命を迎えていた個体をエリート戦略で次世代へ強制的に残した場合も、結果的にその個体のみ寿命を延ばし、より多く便益を得る機会を与えることになる。したがって、本モデルではエリート戦略は採用しないこととする。

- (5) 繁殖フェーズ：選択フェーズでは、遺伝子コピー数を多くできる遺伝子型を持つ個体を選択したが、選択された親個体は、自身が持っている便益の量に応じた数（後述の式(5.7)で与えられる）の子孫を繁殖する。これは、個体自身が自分の遺伝子コピー数を自主的に最大化するのではなく、選択圧によって遺伝子コピー数を最大化するような駆動力が働く¹、との仮定[59]に基づく。正確には、繁殖フェーズは次のように実装した。

- 各個体に対して、繁殖可能な子孫数の最大値を与える。この値は

$$\text{round}(bS), \quad (5.7)$$

¹ 参考文献[59]p.188の記述「生殖系列の自己複製子は、そこでは現実に生き残るかそれとも生き残り損なう単位であり、その差異が自然淘汰そのものである。」、および p. 353の記述「個体は意識的に何かを最大化しようと努力しているわけではなく、あたかも何かを最大化している『かのように』ふるまっているにすぎない。」に基づく。

とする。ここで b は、単位あたりの便益が繁殖数に寄与する程度を規定する、便益の効率性を表す外生パラメータである。 S は各個体がその時点で持つ便益の量であり、 $round$ は bS を最も近い整数値に丸める演算子である。ここで、 b は環境の厳しさを制御するパラメータであるのに対して、 h は環境の厳しさとは独立した、一度の利他行動の効率性を表すパラメータであることに注意されたい。

- 各遺伝子座は、実数遺伝的アルゴリズムの実装方法の一つである BLX- α [64] によって進化させる。BLX- α では、子孫の各遺伝子座の値に対して「 $[v_{min} - (v_{max} - v_{min}) \cdot \alpha, v_{max} + (v_{max} - v_{min}) \cdot \alpha]$ 」の範囲の一様分布によって生成された乱数が与えられる。ここで、各遺伝子座について、 v_{max} は親個体のうち大きな方の値で、 v_{min} は小さな方の値である。なお、この操作によって、各遺伝子座の値が、事前に与えた取り得る値の範囲を超えた場合は、最も近い境界の値に読み替えることとする。
- 血縁木を更新する。
- 各個体が繁殖した子孫数が $round(bS)$ に達するまで、選択フェーズに戻って繁殖を繰り返す。

5.1.2.2 パラメータ設定

外生パラメータは表 5-1 に示す通りに設定した。 α は BLX- α (実数遺伝的アルゴリズム) のパラメータで、突然変異率に相当する。 α の値については、予備実験の結果から GA の収束結果が良いものを採用した。なお、各遺伝子座について、 $1/(1+2\alpha)$ という高い確率で、親となる二個体の値の間に入る値を持つ子個体が生成され、これを繰り返すことで GA の収束が進んでいく。 h は利他行動によって便益がどれだけ拡大するかを表す、利他行動の効率性のパラメータである。 h を小さく設定すると利他性の影響が小さくなり、利他的な個体群と非利他的な個体群の差異が小さくなってしまいが、大きく設定すると利他的な個体群の個体数が急増し、計算量が爆発してしまう。これらのバランスを考慮して、ここでは $h = 3.0$ と設定した。初期個体数、進化の試行回数、および GA の最大世代数については、個体数が増加する際に計算量が爆発せず、かつリスクへの態度を表す x の個体群平均値等の各種指標が、利他的な個体群とそうでない個体群との間で極力有意差を持つように設定した。

また、パラメータ j (エージェントがゲームに参加できる最大の回数、寿命に相当) と b (単位あたりの便益から繁殖できる子孫の数を決定する、便益の効率性) は表 5-2 に示す 8 通りの組み合わせについて計算を行った。ケース A では寿命を $j = 3$ に、ケース B では寿命を $j = 4$ に固定した。

ケース A ($j = 3$)では、各個体は年齢が 3 に達したと同時にゲームへの参加を中止し、かつ繁殖によって生まれたばかりの年齢 0 の個体は、初めて生存フェーズを経験した直後に年齢がインクリメントされる。そのため、年齢が 1 と 2 の個体のみが利他行動フェーズを実行することができる。つまり、異なる年齢の個体同士が利他行動を行うためには、寿命は少なくとも 3 以上である必要がある。ケース A ($j = 3$)から寿命 j がインクリメントされたケース B ($j = 4$)では、年齢が 1, 2, 3 の個体が利他行動フェーズを実行することができるため、異なる年齢の個体間の利他行動はより複雑なものとなる。

表 5-2 の 8 通りのパラメータの組み合わせは、個体数の増加に起因する計算コストの爆発を起こさずに現実的な時間内で計算可能であり、かつ進化後の個体群の平均的な態度に、リスク忌避的とリスク選好的なものの両方が含まれるように、予備実験に基づいて設定したものである。

表 5-1 進化に必要な外生パラメータの設定

初期個体数	100
進化の試行回数	10,000
GA の最大世代数	15
α	0.01
h	3.0

表 5-2 パラメータ j と b の 8 通りの設定

$\{j, b\}$	ケース A: {3, 2.0}, {3, 2.5}, {3, 3.0}, {3, 3.5} ケース B: {4, 3.0}, {4, 3.1}, {4, 3.2}, {4, 3.3}
------------	--

5.1.2.3 結果

(1) ケース A: 寿命が短い場合 ($j = 3$)

図 5-3 から図 5-7 は、ケース A において 10,000 回試行した結果を、生存中の全個体について平均した計算結果を表している。

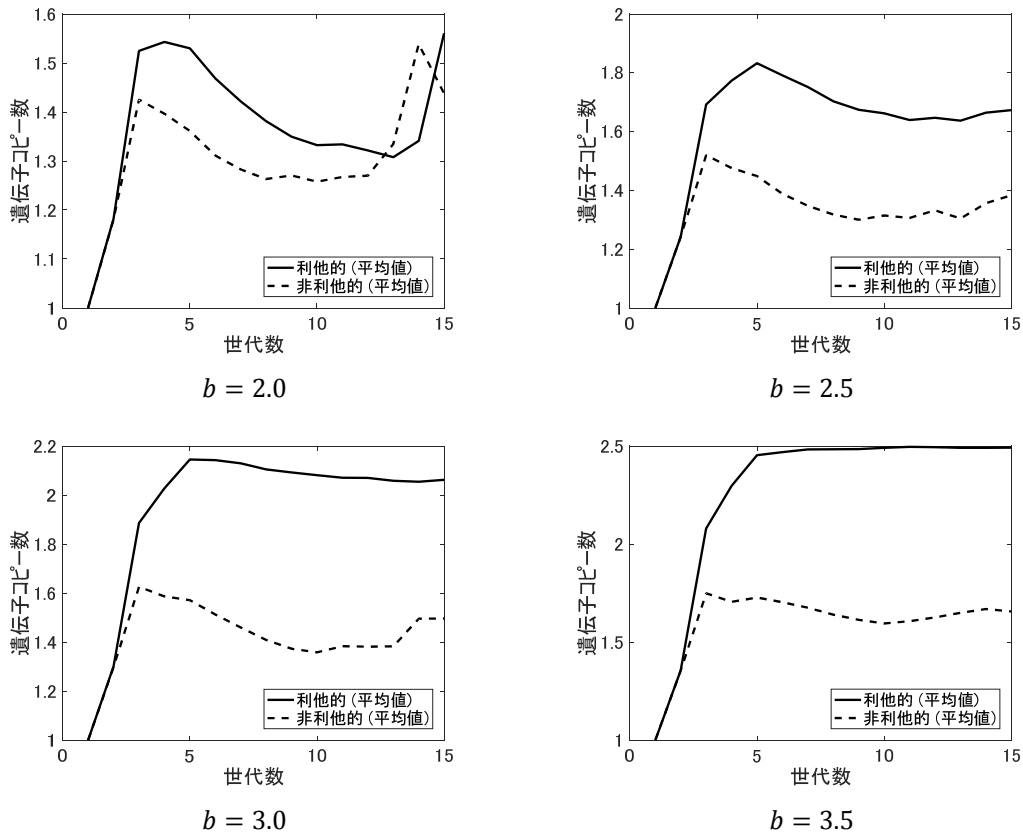


図 5-3 ケース A (寿命が短い場合 : $j = 3$) の結果 : 遺伝子コピー数 (GA の目的関数の値) の変化

図 5-3 は遺伝子コピー数である。利他行動がない場合と比べると、 $b = 2.5$ ($p < 0.005$, ウィルコクソンの符号順位検定)、 $b = 3.0, 3.5$ ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定)において有意に上昇しており、利他性によって遺伝子コピー数が増加したことが分かる。また、 b が大きいほど遺伝子コピー数は大きくなった。 $b = 2.0$ では、進化の過程の終盤で遺伝子コピー数が乱高下しているが、これは厳しい環境下で生存個体のサンプルが少なくなったことに起因する。

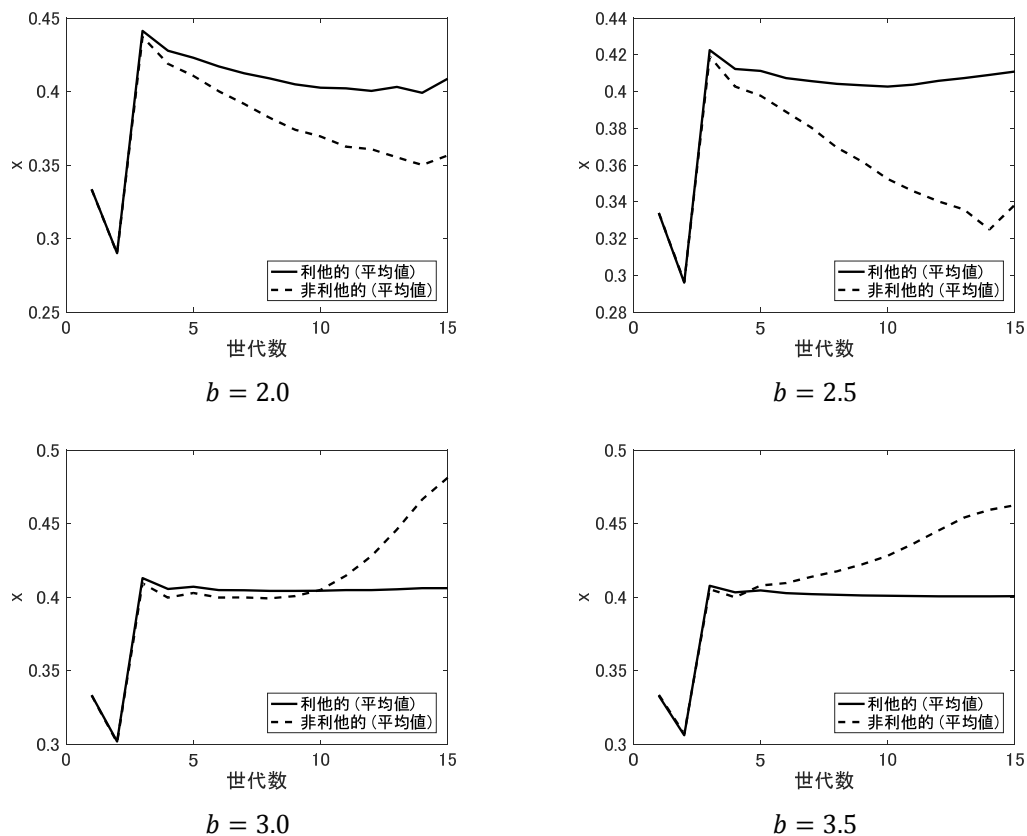


図 5-4 ケース A (寿命が短い場合: $j=3$) の結果: x (リスクへの態度) の進化を、生存中の全個体で平均したもの

図 5-4 は x の進化過程を示したものである。進化後の x は、利他行動がない場合と比べると、 b が小さい $b=2.0$ ($p < 0.05$, ウィルコクソンの符号順位検定) と $b=2.5$ ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定) の場合に、有意に大きくなった。すなわち、 b が小さいとき、個体群は利他行動がない場合よりもリスク源に近づく結果となり、リスク選好的な態度が進化した。反対に、 b が大きい $b=3.0, 3.5$ ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定) の場合、進化後の x は利他行動がない場合と比較して有意に小さくなった。すなわち、 b が大きいとき、個体群は利他行動がない場合よりもリスク源から離れる結果となり、リスク忌避的な態度が進化した。

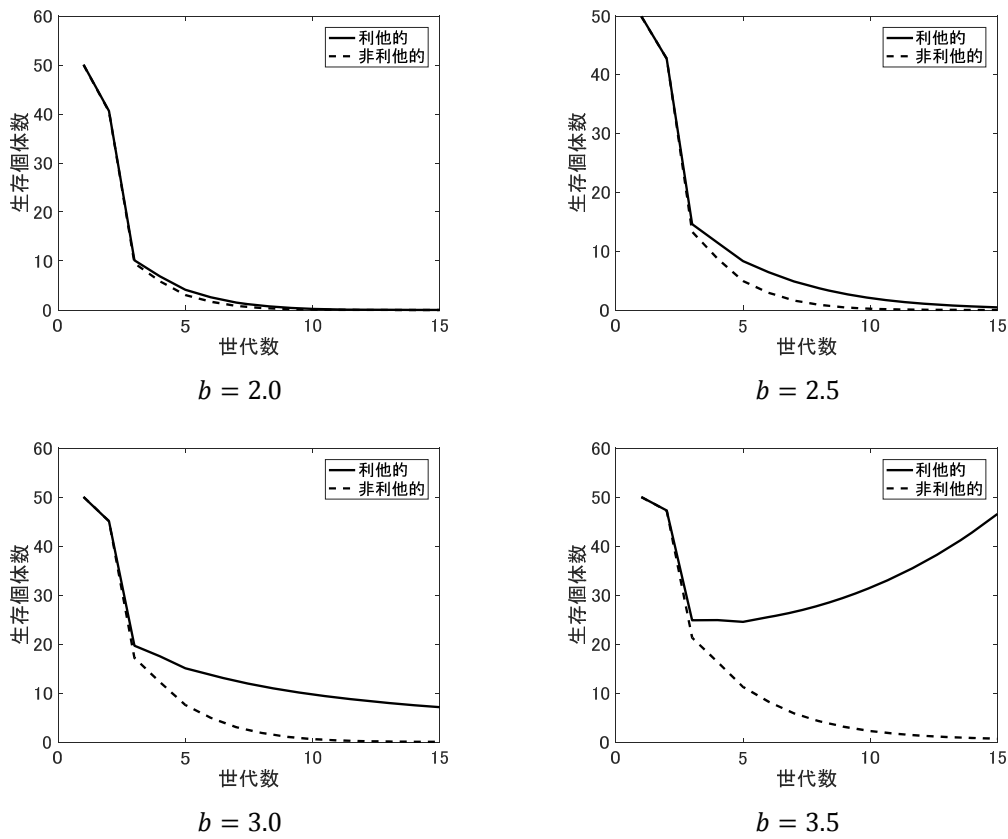


図 5-5 ケース A (寿命が短い場合 : $j = 3$) の結果 : 生存個体数の変化

図 5-5 は生存個体数の変化を示したものである。 b が大きくなるにつれて個体数も大きくなった。また、全ての b の設定で、利他行動がある場合の方が、ない場合よりも常に個体数が大きくなっており、15 世代目においては有意に大きくなっている($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定)。また、 $b = 3.5$ で利他行動がある場合のみ、3 世代目以降は進化が進むにつれて個体数が増加している。

図 5-6, 図 5-7 はそれぞれ年齢 1, 2 の個体が、1 個体あたりどれだけの量のコストを利他行動に費やしたかを示したものである。エラーバーは 95%信頼区間を表す。横軸は受益者の年齢を表す。 b が大きい場合($b = 3.0, 3.5$)、利他的な個体は自身の年齢に関わらず、若い年齢(年齢 1)の個体に対してより多くのコストを費やした。一方で b が小さい場合($b = 2.0, 2.5$)、受け渡される便益は、年齢 2 の個体から年齢 1 の個体へ、および年齢 1 の個体から年齢 2 の個体へと偏る結果となった。 b が小さい極めて厳しい環境下では、同じ親個体から 2 人以上の個体(つまり同じ年齢の兄弟や姉妹)が生成されることは稀であるため、親にとっては子孫に投資することが適応的であり、兄弟姉妹や自身の子孫をまだ持たない若い個体は、生存中の自分の親個体に投資するのが適応的となる。その結果、年

齢の異なる個体同士が便益を交換するように進化したものと考えられる。なお、 b が小さくなるにつれ、エラーバーは大きくなっており、これは厳しい環境によって生存個体数が少なくなることによる。

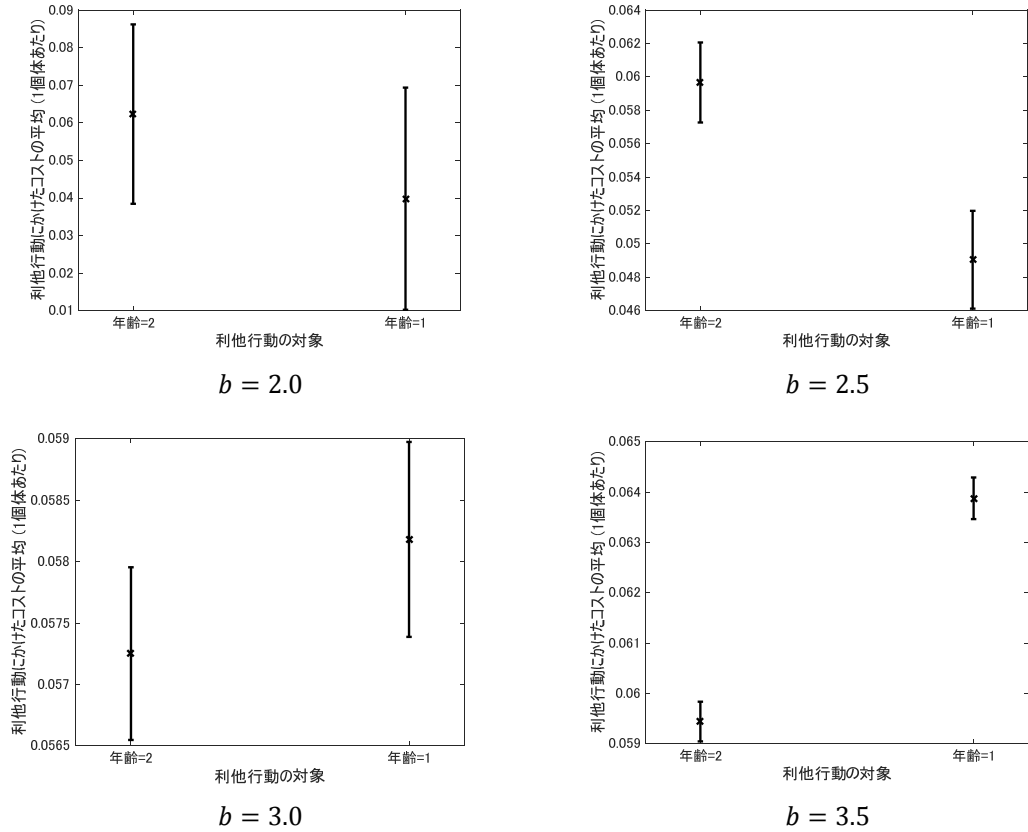


図 5-6 ケース A (寿命が短い場合 : $j = 3$) の結果 : 年齢 1 の個体が消費した一個体あたりのコストの量

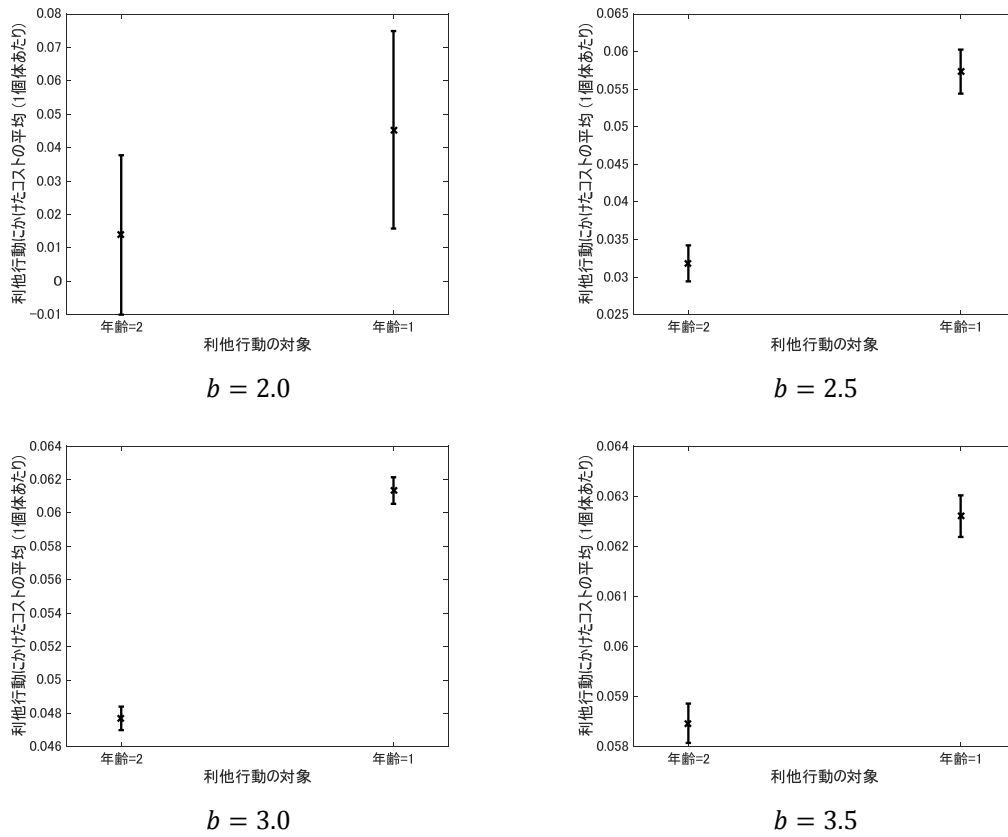


図 5-7 ケース A (寿命が短い場合 : $j = 3$) の結果 : 年齢2の個体が消費した一単位あたりのコストの量

個体群全体の平均がリスク忌避的・選好的であるかどうかに関わらず、各個体のリスクへの態度は、個体群内でばらつきがある。このばらつきのバイアスは、遺伝子コピー数や、血縁個体からの支援の程度など、何らかの指標で説明が付く可能性がある。

そこで、以下の線形回帰モデルを構築し、利他行動がある場合にどの要因がリスクへの態度に影響を与えるかを明らかにする。

$$x^* = a_1 \cdot F + a_2 \tag{5.8}$$

$$x^* = a_1 \cdot RB + a_2 \tag{5.9}$$

ここで F は遺伝子コピー数、 RB は血縁個体から受け取った便益の量、 a_1 は各項の係数、 a_2 は切片、 x^* は利他行動がある場合の進化後のリスクへの態度である。式(5.8), (5.9)では、それぞれ遺伝子コピー数および血縁個体から受け取った便益

という 2 種類を説明変数とし、どちらが進化後のリスクへの態度に大きな影響を与えるかを検証する。また、パラメータ設定は、次に示す特徴的な 2 種類を用意した。一つは $\{j, b\} = \{3, 2.0\}$ の厳しい環境で、個体数は進化が進むにつれて減少し、個体群の全体平均はリスク選好的となるものである。もう一つは $\{j, b\} = \{3, 3.5\}$ の穏やかな環境で、個体数は進化が進むにつれて増加し、個体群の全体平均はリスク忌避的となるものである。

回帰分析によって、 a_1 と a_2 を決定した結果を示したのが表 5-3 である。

表 5-3 利他行動がある場合について、各ケースで回帰分析を行った結果

項		ケース: $\{j, b\}$			
		$\{3, 2.0\}$		$\{3, 3.5\}$	
切片		0.393***	0.385***	0.397***	0.399***
説明変数	遺伝子コピー数		0.01		0.001***
	受け取った便益の量	0.193***		0.030***	
調整済み R2 乗値		0.107	0.020	0.008	0.000
サンプル数 (生存個体数)		130		470852	

*** 99.9%の信頼度で 0 と異なる。

分析の結果、血縁個体から受け取った便益の量が、 x と正の相関関係にあることが分かった。すなわち、血縁個体からの援助を多く受けている個体ほど、リスクに近づきやすい傾向があった。この傾向は、進化後のリスクへの態度がリスク忌避的・選好的のいずれであるか、あるいは個体数が減少しつつあるか増加しつつあるかに関わらず、穏やかな環境($\{j, b\} = \{3, 3.5\}$)と厳しい環境($\{j, b\} = \{3, 2.0\}$)の両方で見られ、厳しい環境ではより顕著な傾向となった。

一方で、遺伝子コピー数は x にほとんど寄与していなかった。厳しい環境($\{j, b\} = \{3, 2.0\}$)では、 F の係数は有意ではなく、穏やかな環境($\{j, b\} = \{3, 3.5\}$)では有意だったものの、係数は非常に小さくなった。調整済み R2 乗値は、いずれの環境の厳しさにおいても、説明変数を遺伝子コピー数とするより、受け取った便益の量とする場合の方が大きくなった。

なお、環境が厳しい場合、 x^* の個体群平均値と大きく異なる x の値を持つ個体は残りにくくなる一方、環境が穏やかな場合は、より広範囲に x の値を持つ個体が残りやすくなる。そのため、調整済み R2 乗値は、いずれの説明変数についても環境が厳しい時の方が大きくなった。

(2) ケース B: 寿命が長い場合 ($j = 4$)

図 5-8 から図 5-13 は、ケース B において 10,000 回試行した結果を、生存中の全個体について平均した計算結果を表している。

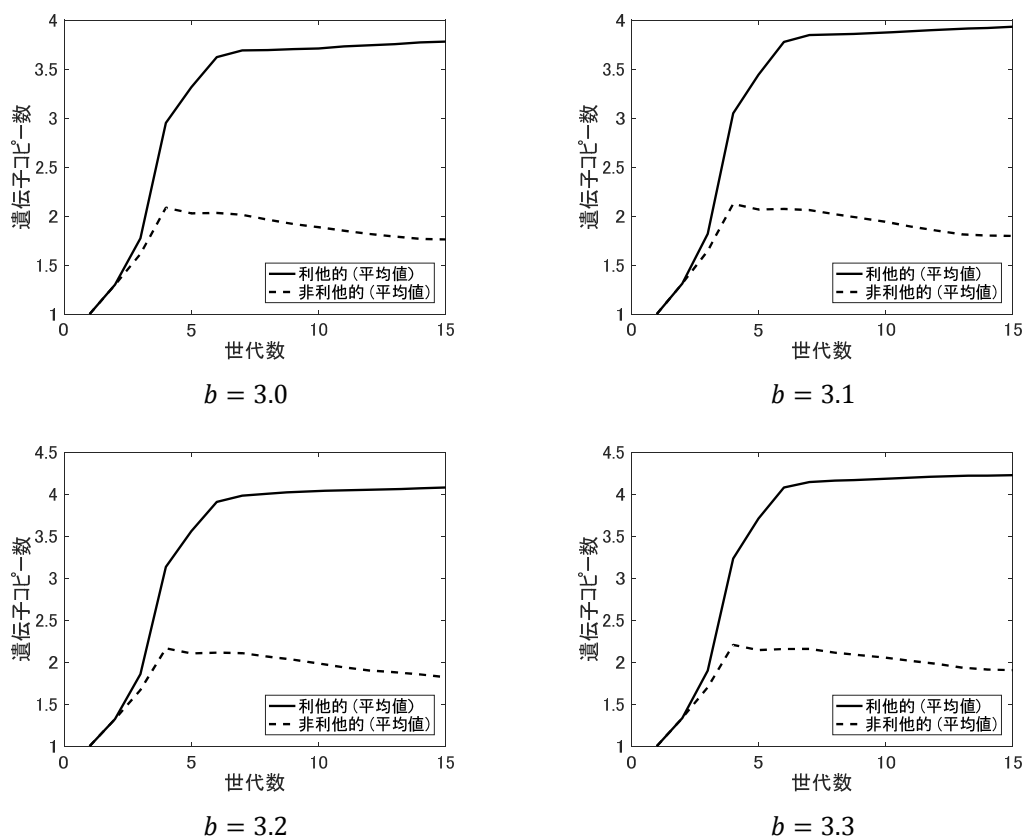


図 5-8 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : 遺伝子コピー数 (GA の目的関数の値) の変化

図 5-8 では、全ての b の設定について、利他性がある場合は、そうでない場合と比べて遺伝子コピー数が大きくなり、また b が大きくなるにつれて遺伝子コピー数も大きくなっていることが分かる。

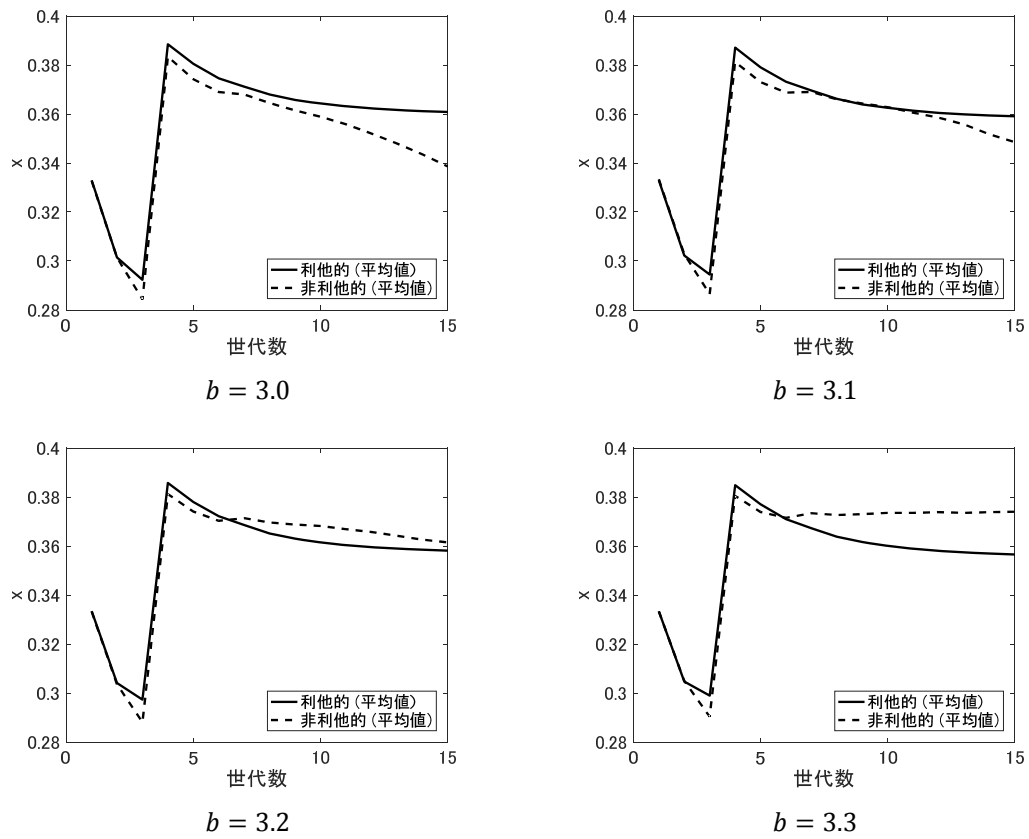


図 5-9 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : x (リスクへの態度) の進化を、生存中の全個体で平均したもの

図 5-9 は、利他行動がない場合と比べた x の進化を示したものである。ケース A と同様、 b が小さい $b = 3.0, 3.1$ の場合、 x は利他行動がない場合よりも大きくなり、個体群は平均的にリスク選好的となった ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定)。また、 b が大きい $b = 3.2, 3.3$ の場合、ケース A と同様、 x は利他行動がない場合よりも小さくなり、個体群は平均的にリスク忌避的となった ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定)。

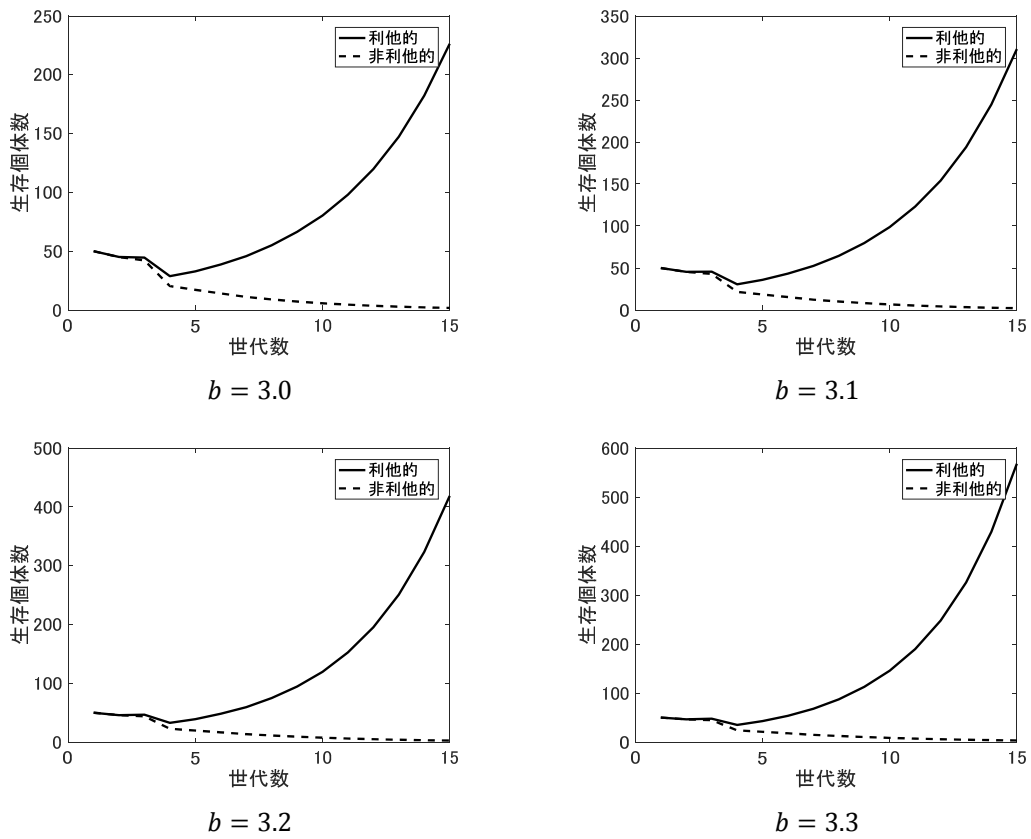


図 5-10 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : 生存個体数の変化

図 5-10 は生存個体数の変化を示したものである。 b が大きくなるにつれて個体数も大きくなり、また利他行動がある場合の方がそうでない場合と比べて個体数は常に多くなった。この傾向はケース A ($j = 3$)と同様である。一方、寿命の最大値が大きくなると、ゲームへ参加できる回数が増えるため、その他のパラメータ設定が同一であれば、各個体はケース B ($j = 4$)においてケース A ($j = 3$)よりも多くの便益を得やすくなる。そのため、利他的な個体群は、利他行動がない個体群よりも個体数が多くなっているだけでなく、全ての b の設定において、進化が進むにつれて個体数が増加する結果となっている。また、15 世代目の個体数は、全ての b の設定において利他的な個体群のほうが有意に大きくなった ($p < 0.001$, ウィルコクソンの符号順位検定)。

図 5-11 から図 5-13 は、年齢 1 から年齢 3 の利他的な個体が、1 個体あたりどれだけの量のコストを利他行動に費やしたかを示したものである。エラーバーは 95%信頼区間を表す。横軸は受益者の年齢を表す。全ての b の設定において、年齢 1 の利他的な個体が年齢 1, 2 の個体に与える便益の量の差は有意でなく、同様に年齢 2 の利他的な個体が年齢 1, 2 の個体に与える便益の量の差も有意でなかったが、利他的な個体は、自身の年齢に関わらず、常に最も若い（年齢 1）個体へコストを最も多く費やす傾向が見られた。これは、個体数が常に増加しているため、個体群中には最も若い個体が常に最も多く存在しており、これらの若い個体に投資することが適応的となったためと考えられる。

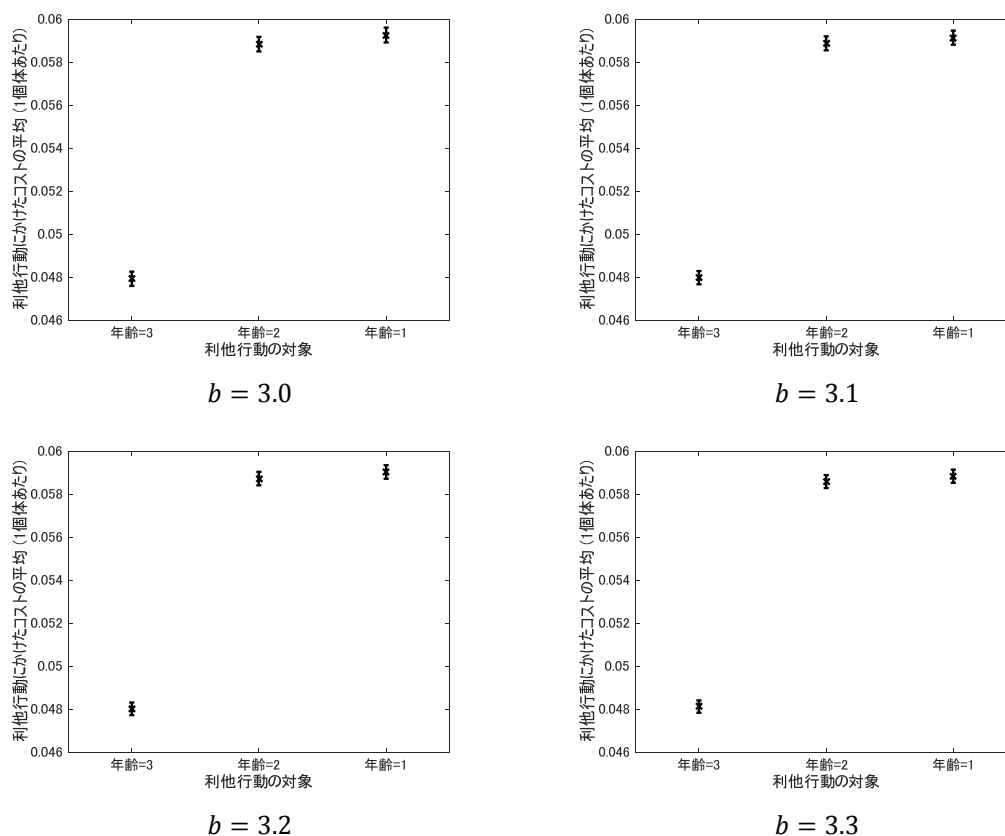
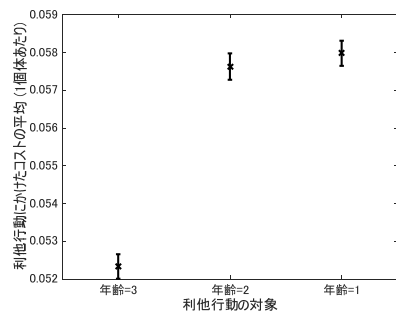
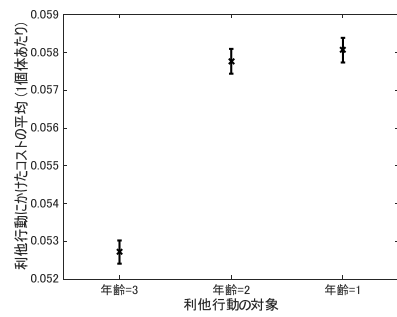


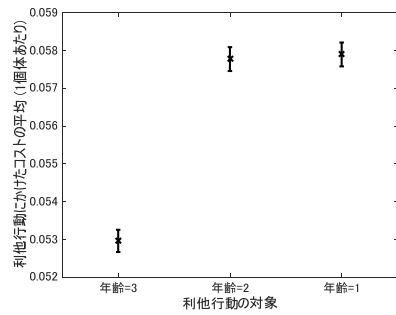
図 5-11 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : 年齢 1 の個体が消費した 1 個体あたりのコストの量



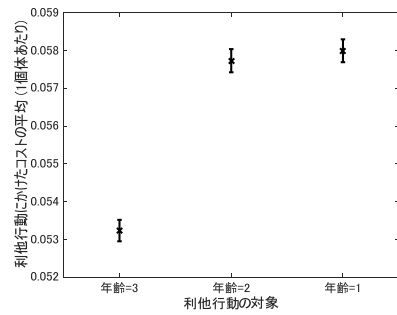
$b = 3.0$



$b = 3.1$

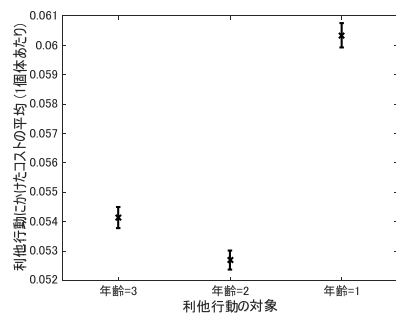


$b = 3.2$

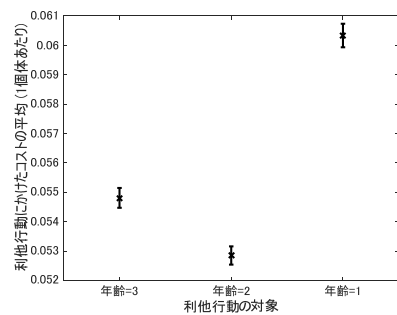


$b = 3.3$

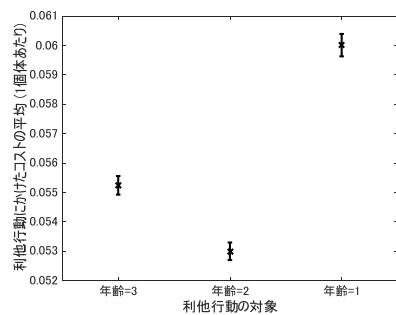
図 5-12 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : 年齢2の個体が消費した一個体あたりのコストの量



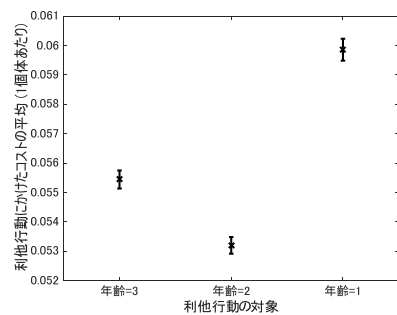
$b = 3.0$



$b = 3.1$



$b = 3.2$



$b = 3.3$

図 5-13 ケース B (寿命が長い場合 : $j = 4$) の結果 : 年齢3の個体が消費した一個体あたりのコストの量

5.1.2.4 考察

本モデルによる分析から、血縁選択に基づく協力行動の進化が、リスクへの態度に影響を与え得ることが示唆された。すなわち、利他的な個体群と非利他的な個体群を別々に進化させた結果、それぞれの個体群が異なるリスクへの態度を獲得した。このとき、利他的な個体群が、非利他的な個体群と比較してリスク忌避的・選好的のいずれに進化するかは、環境の厳しさの程度に応じて変化した。

環境が穏やかな、大きい b の場合(ケース A における $b = 3.0, 3.5$ 、ケース B における $b = 3.2, 3.3$)は、進化後のリスクへの態度の個体群平均値は、利他行動がない場合と比べてリスク忌避的になった。自身の遺伝子コピー数を最大化するには、安全な場所に位置取りをして長生きをしつつ、最も若い世代に投資をするという戦略が、自身の繁殖数を最大化して早期に死亡する戦略よりも適応的であった。この利他的でリスク忌避的な戦略は、結果的には利他行動がない場合よりも個体数を増やすことに繋がっていた。

反対に、環境が厳しい、小さい b の場合(ケース A における $b = 2.0, 2.5$ 、ケース B における $b = 3.0, 3.1$)には、リスク選好的な態度を取る方が、遺伝子コピー数を増加させるためには効率的な戦略となっていた。特に、ケース A における $b = 2.0, 2.5$ においては、異なる年齢の個体同士で交換をする戦略が適応的となった。これは、その他全てのケースにおいて最も若い個体への投資が最も多くなったことと対照的である。

現実世界との対応の観点からパラメータ設定を考えると、人口はこれまで着実に増加してきたことから、ケース A における $b = 2.0, 2.5$ といった設定は、極めて厳しいものと言えよう。また、一連の心理学的な研究から、人間は未来の世代を脅かすと認知されるリスクを大きく評価する傾向があることが知られている [38,39]。この心理的な傾向は、リスクと便益がトレードオフ関係にある環境下では、リスクを大きく評価して未来の世代への援助を行う戦略が適応的である、という構造から解釈することも可能である。これらの観察から、より現実に近い設定は、リスク忌避的な態度が進化する b が大きい場合 (ケース A における $b = 3.0, 3.5$ およびケース B における $b = 3.2, 3.3$) であると言えるだろう。

また、家族や親からの投資とリスク選好傾向との関連性に関する定性的な議論が存在する [55]。この点に関連する分析として、本モデルでは、個体群全体がリスク忌避的かリスク選好的かとは無関係に、血縁個体からの援助の量に応じてリスクに近づく傾向が強まり、かつ、この傾向は個体群内に存在する自身の遺伝子コピー数には影響されない、という結果が得られた。この結果を今一度現実の人間に対応させて考えると、血縁者からより多く支援されている人ほど自信を持つようになってリスクに近づくようになり、支援が少ない人ほど自信を持わずリスクから離れるようになる、といった傾向が観察される可能性がある。

5.1.3 小括

血縁選択に基づく利他性を考慮した、進化的マルチエージェントモデルを構築し、エージェントのリスクへの態度と、リスクを生き延びて得た便益を血縁者へどのように配分するか戦略を、リスクと便益のトレードオフ環境下で進化させた。遺伝子コピー数最大化という、自己利益最大化とは異なる選択圧を導入したことによって、便益が十分ある場合、個体群はリスク忌避的な態度を取りつつ若い世代に投資するように進化し、反対に便益が少ない場合はリスク選好的に進化した。

本モデルは様々な形で拡張が可能である。例えば本稿では、リスクへの態度とリスク・便益の関係を単純な線形関数で表現したが、これら関数をより複雑な形状の関数にする、あるいは進化の過程で環境の厳しさを動的に変化させるなどの要素の導入が、エージェントの振る舞いに与える影響を検証することも、今後の課題である。また、リスクへの態度に大きく影響を与える要因の一つである、性差の概念[65]の導入も重要な検討課題である。定性的には、親からの投資は、父個体由来のものの方が母個体由来のものよりも少ないことが知られている[66]。これを本モデル上で表現するには、エージェントが持つ変数 c (利他行動のコスト、配分する便益の量) を、男性エージェントには低い値を割り当て、女性エージェントには高い値を割り当てる、といった方法が考えられる。このような分析により、多くの場合女性の方が男性よりもリスク忌避的になる理由を解釈する助けとなるだろう。

さらに、実際の複数人での狩猟においては、資源が欠乏していると血縁個体間での協力が予想以上に強化される、という人類学的な分析も存在する[67]。こういった現象が本モデルにおいても再現されるかどうかを検証することも、今後の課題の一つである。

本モデルでは、リスクに対して遺伝的に備わった態度にのみ着目したモデル化を行ったが、現実的には、リスクへの態度は非遺伝的な要因にも強く影響される。例えば、他のエージェントのリスクに関する意思決定を模倣する、あるいはリスクに関する情報をエージェント間で交換するといった、ミームの概念[68]で示唆される要素をモデル化し、その影響を分析することも重要な課題の一つである。

5.2 人間の意思決定構造

現実的な振る舞いを考慮した介入方策

前節では、マルチエージェントシミュレーションモデルを用いた分析により、個人の意思決定という行動ルールが進化・適応することにより、個人利益を最大化する場合とは異なる全体特性が発現することを明らかにした。一方これに対して、近年では全体特性の変化を狙って、公共目的のために個人の行動変容を促進する、直感に訴えかける行動変容方策が注目されている。本節では、このような行動変容方策の考え方について説明する。

人間の意思決定システムには、システム 1、システム 2 と呼ばれる 2 種類のモードがあることが指摘されている [69]。システム 1 (自動システム) は、素早く、多くの場合に正しい判断を下すが、常に正確とは限らない直感的な思考システムである。一方のシステム 2 (熟慮システム) は、論理的な思考をつかさどるシステムである。「ファスト&スロー」とも例えられる二つのシステム [69] は、一方が働いているときはもう片方は働かないといった性格のものではなく、実際には、相互に依存しながら並行して作動している [70]。したがって、人間や組織の意思決定は、完全合理的なものにはなりえない。Simon は人間の知識や計算能力の限界のために、実際の意思決定の合理性は限定されるという性質を明らかにした [71]。この「限定合理性」と呼ばれる性質は、表 5-4 のように整理される。

さらに、より広い視点から人間の振る舞いに関する仮定を分類し、社会制度を含めた各種介入を捉えると、論理に訴えかけるものと直感に訴えるものの 2 種類に大別できると考えられる [72]。論理に訴えかけるアプローチが有効となるのは、主に表 5-5 の左列に示す 3 つの特徴を持つ、きわめて合理的な人間観を前提とする場合である [72]。つまり、人間は自分の利益になるあらゆることを確実に実行できる、という仮定に立つものである。

これに対して、人間をより現実的に捉えようとする立場からは、表 5-5 の右列に示す特徴が強調される。こういった意思決定の特徴を踏まえて、本来人々が望んでいるにも関わらず、何らかの理由で達成しづらい目的を達成する手助けとして、さりげなく直感に訴えかけて行動変容を促進する介入手法が、近年注目されている。

表 5-4 限定合理性の各種性質

	客観的合理性(理想)	主観的合理性(現実)
(1) 何が できるか	行動の代替選択肢の全体像を概観する	実行可能な行動のうち幾つかの行動しか思いつかない ＝行動範囲の限界性
(2) 何が 起こるか	各選択肢による諸結果の全てを考慮する	結果の知識は断片的で、わずかな洞察しかできない ＝知識の不完全性
(3) 何を すべきか	全選択肢の中から選出するための価値体系を用いる	経験前に予測する価値と現実化した価値はよく異なる ＝予測の不完全性

表 5-5 人間の振る舞いに関する仮定

論理への訴えかけが有効となる人間観	直感への訴えかけが有効となる人間観
完全合理的 自身の利益を最大にするための最良な行動を常にとることができ、そのために利用可能な全ての情報を利用できる。	限定合理的 人間の認知能力や判断能力の限界から、合理性は限られる。
利己的 自己利益を極限まで追求する。一見利他的に見える振る舞いも、実は自己利益を狙う打算的なもの。	社会的 自分の利益にならなくても社会のためになることを進んで行う。
自制的 一度決めたことは、誘惑に負けず必ず実行する。	非自制的 目先の誘惑に負けて、問題を先送りしがちである。

このように、人間は様々な局面において限定合理的、社会的、非自制的である。特に、システム 1 に含まれるような、ルールベースの反射的な判断を日常的に行っており、社会全体の挙動は、これら比較的単純なルールベースの個人の意思決定が相互作用した結果が包含されることになる。

直感へ訴えかける行動変容方策の現状

従来、多くの社会制度や介入方策は、人間が完全合理、利己的、自制的であることを暗に仮定した設計がなされてきた。しかし、複雑適応系の一部として現実的な人間の意思決定を捉えるならば、人間が限定合理的、社会的、非自制的であることを踏まえた設計を行う必要がある。

このような人間観に立った介入方策として、近年注目されている「ナッジ」と呼ばれる行動変容方策の概念がある。「ナッジ (nudge)」とは元来、「ひじでそつと突く、軽く押す」「(人の) 注意を引く」といった意味の単語である。ここから転じて、行動変容方策としての定義は、「選択を禁じることも、経済的なインセンティブを大きく変えることもなく、人々の行動を予測可能な形で変える選択アーキテクチャのあらゆる要素」とされている[73]。「選択アーキテクチャ」は選択を促す制度や仕掛けであり、「予測可能」な変化を創り出そうとするものである。

ナッジは、システム 1 と関係が深いことが指摘されており[73]、システム 1 に関わる行動原理に基づく設計が重要となる。そのような行動原理の代表例として、以下では社会規範、損失回避性、探索コストの 3 つの概念を説明する。

社会規範： 社会規範 (social norms) は、社会的選好 (social preferences) といった概念で語られることも多い。そのニュアンスは、社会的に望ましいと思われる行動を取るという意味のみならず、多数の人の行動に倣う、あるいは多数の人と同じであることに喜びを感じる、といった意味も併せ持って用いられる場合が多い。

社会規範を活用したメッセージの有効性を検討した例として、Cialdini らの研究グループが行った実験が挙げられる[74]。この実験は、カリフォルニアの一般世帯を対象として、夏季に玄関扉に様々な種類のメッセージカードを掲げてもらい、メッセージ毎の省エネ効果を見たものである。メッセージの内容は①情報のみ、②環境保護、③社会的責任、④個人利益、⑤社会規範の 5 種類が用意された。

省エネの効果は、メッセージカードを掲げる前後の検針によって測定された。カードを掲げてから 1 カ月後の電力消費量と比較すると、「この地域の 77% の住民はエアコンのかわりにファンをよく使っています」といった、社会規範によるメッセージの効果が際立つことが確かめられた[74]。

損失回避性： 標準的な経済学では、人は効用関数と呼ばれる判断基準に従って合理的な判断をするものと仮定するのに対し、プロスペクト理論では、置かれた状況によって価値の感じ方が異なるという現実について理論的解釈を与えた。このプロスペクト理論に含まれる概念の一つである損失回避性は、利益よりも損失を大きく意識するという性質を指す。具体的には、同じ金

額でも、もらう時の喜びより失う時のショックのほうが大きく、一般に損失を利益よりも 1.5 倍から 2.5 倍程度大きく評価することが、Kahneman らのグループによって確かめられている[75]。

探索コスト： 人間の知識や計算能力等の限界の結果として、情報を探索するコストは想像以上にかかることが知られている。情報は集めること自体に手間がかかるし、集めた情報同士を比較分析するなど吟味し、最後に意思決定を行うことまで含め、様々な手間がかかる。こういった手間にかかるコストは探索コストと呼ばれる。探索コストでは、探索や情報の整理などにかかる、いわば面倒くささが考慮される。つまり、実際の人間は探索コストが高い比較を行わないので、選択肢を絞り込むことも時には重要となる。

このことを検証したものとして、ジャム等の食品を購入する際に、24-30 種類といった大量の品数を提示するよりも、6 種類程度の少ない品数を提示するほうが満足度を高められることが確かめられている[76]。

公共性の高さはナッジの重要な特徴であり、上記の社会規範の適用例に見られるように、省エネルギー・節電分野でのナッジの適用は好例となっていた。以下では、その公共性の高さを示す傍証として、様々な分野における公共目的での活用例を紹介する。

交通安全： 自動車のスピードの出し過ぎによる事故が多い場所で、道路上に横向きの白線を描き、白線同士の間隔を段々短くする方法が米国で実用化されている。自動車が等速度で走っていても、白線が過ぎ去る頻度が段々高くなり、運転者は自動車が加速しているように錯覚し、思わず減速するため、事故率の減少が期待できる²。

医療： 臓器移植の意思表示について、チェックを入れなければ同意とみなし、チェックを入れた場合のみ不同意とみなす方式にする（デフォルトを「同意」にする）ことで、逆の場合（デフォルトを「不同意」にする場合）と比較して、同意率が劇的に向上することが知られている[77]（図 5-14）。

² このように特殊な白線を用いたり、道幅を狭くしたりする等の工夫により、自動車の運転速度低下を促して事故率の低下を狙うアプローチは「交通静穏化」と呼ばれる。

福祉： 米国では労働者の貯蓄率の低さに対処するために、貯蓄分を賃金の上昇分からのみ差し引き、従業員の貯蓄率を昇級に合わせて自動的に引き上げる方式が検討され、その有効性が確認されている[78]。

健康増進： 例えば、サラダバーで高カロリー食品を、手の届きやすいケースの端から、少し手の届きにくいケースの中ほどに陳列順序を変更する、といった単純な方法³が有効であることが示された⁴[79]。

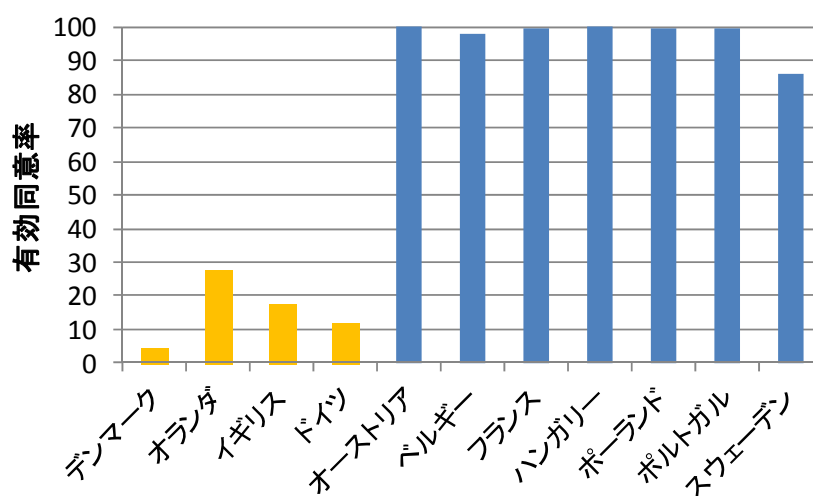


図 5-14 デフォルトの選択肢を変えることによる臓器提供同意率の上昇⁵

こういった介入の実務的な応用は、上述の Cialdini や経済学者の Allcott の他、Schultz、Nolan といった心理学者等、様々な分野の研究者が乗り入れる形で、効果検証を繰り返しながら進められてきた。さらに、ナッジの創案者の一人

³ 手の届きやすいケースの端よりも、手の届きにくい中ほどに入っている食品の方が、探索コストが高い、という解釈も成り立ち得る。

⁴ その他、米国ニューヨーク市では清涼飲料水の特大サイズを規制し、1杯あたりの上限を16オンス（約473ミリリットル）までとする法案が2012年9月に可決された[80]。もし消費者が本当に16オンス以上飲むことを望むのであれば、各自自由に注文を追加して飲み足すことができるので、選択の自由は残されていると言える。同時に、人間はデフォルトの選択肢を選ぶ傾向が強いことから、それまで特大サイズを飲んできた人の清涼飲料水の摂取量は全体として減ることが予想される。つまり、肥満の解消という本来各人が望んでいるはずの目的を達成する手助けになることが期待される。

⁵ デンマーク、オランダ、イギリス、ドイツではデフォルトを「提供しない」とし、オーストリア、ベルギー、フランス、ハンガリー、ポーランド、ポルトガル、スウェーデンではデフォルトを「提供する」としている。いずれも本人が希望すればデフォルトではない選択を取ることが出来る。しかし、デフォルトを同意とみなす国において、臓器提供の同意率は飛躍的に向上する。

アメリカではドナー不足で毎年多くの死者が出ていることが問題となっている一方で、EU 諸国ではドナー不足が問題とならないことの原因は、このデフォルト選択肢の効果が大きいとされている[77]。

Sunstein は米国オバマ政権で登用され、2009 年から 2012 年まで行政管理予算局情報規制室の室長を務め、報告書では損失回避性の活用を強調した[81]。また 2010 年に英国政府は、キャメロンの首相就任直後、内閣府に”Behavioural Insights Team (BIT)”を発足させ、ナッジの共同提唱者 Thaler はその顧問を務めた。BIT は省エネ促進策に着目し、社会規範に訴えかけるメッセージ等、様々な社会実験を検討している[82]。

このように、直感に訴えかける行動変容方策は、近年、学術的な文脈での基礎的検討と実務的応用の両者が、相補的に連携して進められ、さらに国策レベルでも注目されつつある。

直感に訴えかける行動変容方策の課題

人間の現実的な意思決定を踏まえた介入方策は近年注目されるようになってきているが、その設計方策については課題が残されている。すなわち、前述の通り、いくつか知られている人間の現実的な振る舞いを踏まえて設計された介入の効果、公共目的の様々な応用例で検証されているが、意思決定の傾向自体を系統立って解釈する枠組みは確立されていない。

一方、完全合理性や利己性では説明が付かない一部の意思決定構造が、進化・適応の観点から解釈できるのではないかという指摘がなされてきた[83, 84]。しかし、一見不合理な意思決定にどのような適応的な意義があったかについても明らかではない。これを明らかにすることができれば、統一的な枠組みで解釈・設計した、より効果的に介入方策を実装できるようになる可能性がある。

5.3 現実の人間における意識変化の属性分析

5.3.1 適応的なパーソナリティ特性が意思決定に与える影響

5.1 節では社会性の進化が意思決定に影響を与える原理について、シミュレーションモデル上で分析し、続く 5.2 節では、社会規範などを活用した情報設計によって個人の行動変容を促し、全体特性を変化させる介入手法の考え方を整理した。しかし、社会性の進化・適応が意思決定に与える影響が、実際の人間においても観察され、この傾向に基づく行動変容方策が実際に有効となるかについては自明ではないため、検証する必要がある。

社会規範を利用した行動変容に関する既往研究としては、省エネルギー行動の促進が最も著名な応用例である。省エネルギー行動は、自己利益を犠牲にしながら他者へ利他的に振る舞うという、社会的な行動の特徴を持つ。特に、2011 年に東日本大震災を経験した直後の我が国においては、社会貢献をしたいという動機から節電をしようと思った人がいたことや、電力不足が現実的な社会リスクとして認知され、

節電のきっかけとなった人がいたこと等も指摘されている[85]。このような点を鑑みると、省エネルギー行動は、現実世界において人間の社会性を踏まえた行動変容方策の有効性を検証するための具体例として適していると考えられる。

これまで、省エネルギー行動を促進する手法としては、高効率機器の導入のような技術的な対策や、経済的なインセンティブを用いた価格ベースの介入などの手法に加えて、情報提供によって顧客の行動変容を促す手法も、近年の主要な研究対象とされてきた。例えば日々の電力消費量を、過去の月・年などの消費量などと比較した情報提供の事例がある[86]。その他、顧客毎にどの機器をいつ頃使ったという時間帯毎の記録を日記のように取っていき、これらの日記を機器ごとの消費量特性を蓄積したデータベースと照合することによって、ロードカーブを作成し、各顧客に情報提供する手法などもある[87]。

対象が自身の状態を認識できるように行われる情報提供は見える化としても知られており[88]、様々な種類の行動変容に効果的であることが知られている[89, 90]。また、対象も個人からグループレベルまで様々な検証されている[91, 92, 93]。一方で省エネルギー促進を狙った見える化は、効果が限定的になったり、時には逆効果になったりする場合さえある。例えば、顧客に対して特定の機器に関する情報提供を行った場合の効果は限定的であること[94]や、提供された情報に対する理解や関心が小さいときも限定的となること[95]が知られている。見える化は、省エネルギーの意欲が既に高い人にもみ有効であることや、経済的なインセンティブを期待している場合にその見返りが小さいことが分かった場合には逆効果になること等が指摘されている[96]。節電の促進を狙った見える化を設計する際には、適切な動機と結びつけた注意深い設計が重要になる。

有望な手法の一つとして、社会規範に訴えかけるメッセージを活用した情報提供がある。すでに述べた通り、米国カリフォルニア州で行われた介入実験では、消費電力の削減効果は、各種メッセージの中で規範的なメッセージが最も大きかったことが明らかになった[74]。この種の介入方法は、水道水の消費といった他の資源消費についても有効であることが知られている[97]。

社会規範の行動変容効果は省エネルギー分野のみには留まらない。例えば、Goldsteinらは、ホテルの洗面所にあるタオルラックに、「宿泊客の大半がタオルを再度ご利用くださっています」といった規範的なメッセージを記したカードを置いておく実験を行った。規範的なメッセージによるタオルの再利用率を促す効果は、単に環境保護の重要性を訴えかけるメッセージの効果よりも大きかったことが明らかになっている[98, 99]。また、例えば予想投票率が高いことを強調して伝える等の、規範的なメッセージを利用して投票率を上げることもでき、この効果は投票する見込みが小さい人に特に有効であることが知られている[100]。その際だった例の一つに 2012 年の米国大統領選の事例がある。ソーシャルネットワークメディアを

用いて、対象者に既に投票した友人の写真を提示し、その数を集計して伝えることによって、実際に投票行動を促進することができることが明らかになった[101]。

こういった価格効果に依拠せずに精巧に設計された情報提供による介入は、価格効果を利用した介入と比べて、低コストに需要を変化させ、省エネルギーを実現する可能性を秘めている[102]。すなわち、人間の現実的な振る舞いを考慮した情報の表出を設計することは、より高いレベルの省エネルギーを実現するための鍵となる。

規範的なメッセージの重要性は、学术界のみならずビジネスの分野でも注目を集めている。米国の新興企業である Opower 社が行っている情報提供サービスは、規範的なメッセージを利用した省エネルギー促進の適用事例の一つである。Opower 社は、ホームエネルギーレポート(HER; Home Energy Report)と呼ばれる、印刷された紙媒体を顧客に提供している。エネルギー消費量が小さい近隣の多世帯と電力消費量を比較して提示することで、全体として約 2%程度電力消費量を削減することができる[103]。

人間の行動変容過程を細分化すると、“awareness”、“familiarity”といった複数のフェーズを経過したのちに、最終フェーズである“participation”に至ることが指摘されており[104]、また“awareness”の向上はエネルギー消費量の削減につながることも指摘されている[105]。この過程において、規範的なメッセージによってエネルギー消費に関する自己認識や意欲がどのように向上し、メッセージの受け取り手のどのようなパーソナリティ特性が意欲の向上に影響するか、といった点については明らかになっていない。

そこで本節では、規範的なメッセージが自己認識をどのように変化させ、意欲の向上をどのように引き起こすかを、社会性との関連が深く、かつ進化的な起源を持つことが指摘されているパーソナリティ特性に着目して分析する。

5.3.2 手法

本分析は、我が国の一般世帯を対象としたアンケート結果を分析することによって行う。アンケートは分析 A, B の 2 種類に分ける。分析 A では、対象世帯に、実際の電力消費量を他世帯と比較して提示する規範的なメッセージ、すなわち他者の振る舞いについて提示して「社会規範」に訴えかけるメッセージによって、電力消費に関する自己認識がどのように変化するかを検証する。分析 B では、そのような規範的なメッセージによって電力消費を削減しようとする意欲が向上するか否かを検証する。さらに分析 B では、パーソナリティ特性を含め、アンケート回答者のどのような属性が規範的なメッセージに反応しやすいかを検証する。パーソナリティ特性については、心理学の分野で用いられることが多い Big-5 と呼ばれる指標に基づいて分析を行う。Big-5 理論では、各人のパーソナリティが 5 つの独立な特性、すなわち外向性、協調性、勤勉性、神経症傾向、開放性によって説明されるも

のと仮定する [106]。これらのパーソナリティ尺度は、進化の過程で適応的であったために獲得された形質であることが指摘されており、遺伝的な要因により決定される割合が大きいこと、生涯のどの時点で評価しても値がほとんど変化しないことが知られている [107]。

電力消費量に関する消費者の自己認識や、より節電を行おうとする意欲が、規範的なメッセージによって促進されるか否かを確かめるため、それぞれ異なるメッセージを受け取るグループに回答者をランダムに割り当てるランダム化比較実験 (Randomized Controlled Trials, RCTs) を行った。RCTs は、被験者をそれぞれ異なる介入内容のグループにランダムで割り当て、介入を行わないコントロールグループと比較することによって、その介入効果の大きさを計測する、介入実験の方法の一つである。各グループで提示されたメッセージの効果は、介入後の結果をコントロールグループと比較することで評価する。

回答サンプルはインターネット上でアンケートを行って回収した。有効サンプル数は合計で 3033 であった。回答サンプルは、日本国内の気候が大きく異なる地域 (関東地方、中部地方、関西地方、四国地方、中国地方、九州地方) の居住者から得た。ここでは、居住地域の気候が異なると電力消費に関する自己認識も異なる可能性があるため、サンプルの気候に関する条件が極力均一になるように、我が国の省エネルギー法で定められている温暖地域を対象としてサンプルを抽出することにした。表 5-6 は、回答者属性の構成比を示したものである。世帯人数の平均値は 2.35 人であり、国勢調査による平均値とほぼ同等であった。平均年齢は 53.2 歳であり、国勢調査による平均値である 45.0 歳と比べると比較的高めであった。

表 5-6 有効なサンプルの各属性の構成比

属性		比率
性別	男性	55.4%
	女性	44.6%
世帯人数	1	33.4%
	2	26.0%
	3	18.8%
	4	15.1%
	5以上	6.7%
続柄	世帯主	69.6%
	世帯主の配偶者	22.7%
	その他	7.7%
年齢	20代	6.2%
	30代	14.1%
	40代	16.8%
	50代	17.6%
	60歳以上	45.2%

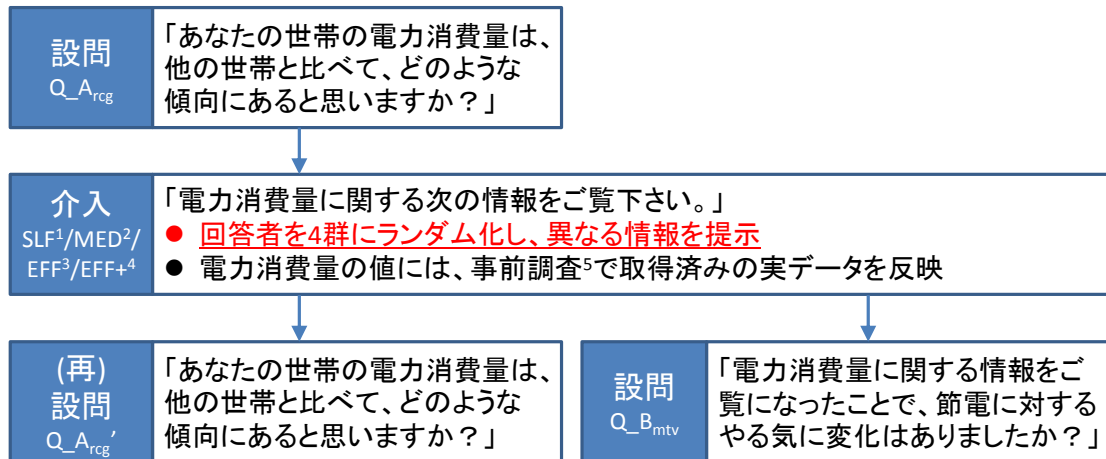
本実験では、図 5-15 に示す通り、大まかに分けて 2 種類のアンケート調査を 2012 年の 11 月と 12 月に実施した。2012 年 11 月に行った一回目のアンケートでは予備調査を行い、続く 12 月のアンケートでは情報提供による介入を行った。

5.3.2.1 事前調査

2012 年 11 月の事前調査では、回答者に当月の電力料金票を確認するようお願いをした。この調査に基づいて、参照点となる 2 種類の電力消費量を定義した。すなわち、全サンプルの 25 パーセンタイル点となる消費量 164kWh を、省エネ世帯の消費量とし、50 パーセンタイル点となる消費量 249kWh を、平均世帯の消費量とした。また、電力消費量に応じたグループ分けも行った。すなわち、C1 を電力消費量が 164kWh 未満のグループ（25 パーセンタイル未満）、C2 を電力消費量が 164kWh 以上 249kWh 未満のグループ（25 パーセンタイル以上 50 パーセンタイル未満）、C3 を電力消費量が 249kWh 以上 356kWh 未満のグループ（50 パーセンタイル以上 75 パーセンタイル未満）、C4 を電力消費量が 356kWh 以上のグループ（75 パーセンタイル以上）とした。

分析A 消費量多寡の**認識**は、
変化するのか？

分析B 節電への**意欲**は、
変化するのか？



1. SLF = 対象世帯の電力消費量のみを提示するコントロールグループ
2. MED = 対象世帯の電力消費量と平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
3. EFF = 対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
4. EFF+ = 対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示し、さらに評価を行うメッセージを併記する規範的なメッセージを受け取るグループ
5. 事前調査は 2012 年 11 月に実施。分析 A と B は 2012 年 12 月に実施。

図 5 -15 実験手順のフローチャート

5.3.2.2 介入

2012 年 12 月は、事前調査に基づいて、それぞれ異なるメッセージを受け取る 4 つのグループのいずれかに、回答者をランダムに割り当てた。すなわち、規範的なメッセージを含まず単に電力消費量を知らせるメッセージ(SLF)を受け取るコントロールグループ、および他世帯の電力消費量と比較した、3 種類の規範的なメッセージ(MED, EFF, EFF+)を受け取るグループの、合計 4 種類のグループである。この介入において、コントロールグループである SLF のメッセージでは回答者の世帯の電力消費量のみが提示される。MED の規範的なメッセージでは、SLF のメッセージに加えて 50 パーセントの電力消費量(249kWh)が提示される。EFF の規範的なメッセージでは、MED のメッセージに加えて 25 パーセントの電力消費量(164kWh)が提示される。EFF+の規範的なメッセージでは、EFF のメッセージに加えて、賞賛したり否定したりすることによって消費量に対して評価を行うメッセージが提示される。このように、SLF から EFF+へと提供される情報の内容が順次豊かになっていくようにメッセージを設計した。

さらに、EFF+グループに割り当てられた回答者は、電力消費量の大きさに応じて 3 つのサブグループのいずれかに割り当てた(C1, C2, C3&C4)。電力消費量

が相対的に小さいサブグループ EFF+(C1) と EFF+(C2)では、社会的に望ましいことを行っていることに対して賞賛をするメッセージ（「とても素晴らしいです」や「素晴らしいです」）が強調表示される。これに対してサブグループ EFF+(C3) と EFF+(C4)では、社会的に望ましくないことを行っていることに対して否定的なメッセージ（「電力消費が多めです」）が強調表示される。このように、EFF+の3つのサブグループでは、情報の強調表示の仕方が互いに異なり、それぞれ伝えたいメッセージの主旨も異なる。しかしながら、3種類のメッセージは同じ情報の要素から構成されており、情報を受け取る人の電力消費量に応じて強調される要素が切り替わる、単一の情報提供のパッケージと見なすことができる。表5-7は各グループが受け取るメッセージの種類を概要を示したものである。また、付録では、各グループおよびサブグループが受け取るメッセージの詳細を説明している。

表 5-7 各グループ (SLF¹, MED², EFF³, EFF+⁴) とサブグループ (C1, C2, C3&C4)における介入内容

インデックス	SLF ¹	MED ²	EFF ³	EFF+ ⁴		
				C1	C2	C3&C4
対象世帯の電力消費量	✓ ⁵	✓	✓	✓	✓	✓
平均世帯の電力消費量 (249 kWh, 50 パーセント 提供される情報の内容 値)		✓	✓	✓	✓	✓
省エネ世帯の電力消費量 (164 kWh25 パーセント 提供される情報の内容 値)			✓	✓	✓	✓
評価を行うメッセージ				✓ (とても素晴らしいです +☆☆☆)	✓ (素晴らしいです +☆☆)	✓ (電力消費が多めです +☆)
サンプル数	755	756	758	192	193	379

1. SLF = 対象世帯の電力消費量のみを提示するコントロールグループ
2. MED =対象世帯の電力消費量と平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
3. EFF =対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
4. EFF+ =対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示し、さらに評価を行うメッセージを併記する規範的なメッセージを受け取るグループ
5. 提示される情報

同じサンプルとアンケート（図 5-15 に示す事前調査と介入）を用いて、2種類の実験（実験 A, B）を行った。本節末尾の付録では、両実験に用いたアンケートの詳細を示す。

5.3.2.3 分析 A：自己認識の変化

全4グループについて、介入の直前と直後に、他世帯の電力消費と比較提示した情報を受け取ったことで、電力消費行動に関する自己認識（他世帯と比較して回答者の世帯における電力消費量がどのような状況にあると思うか）が、変化するか否かを確認するため、質問 Q_{Arcg} と Q_{Arcg}' を尋ねた（図 5-15）。これら2種類の質問は、尋ねるタイミングが異なるのみであり、文章は同一の「あなたの世帯の電力消費量は、他の世帯と比べて、どのような傾向にあると思いますか？」であることに留意されたい。

5.3.2.4 分析 B：節電意欲の変化

介入の後、提供された情報によって節電への意欲が上昇したか否かを尋ねた（図 5-15）。具体的には、質問 Q_{Bmtv} 「電力消費量に関する情報をご覧になったことで、節電に対するやる気に変化はありましたか？」を尋ねた。ここでの目的は、電力消費量自体の削減が起こったかどうかを確認することではなく、その意欲が上昇したかどうかであることに留意されたい。

5.3.3 結果

5.3.3.1 分析 A：自己認識の変化

自身が顕著に大量な電力を消費していることを気づいていなければ、電力消費を変えようという意欲を持つことが難しくなる可能性がある。したがって、情報提供が他世帯と比較して電力消費が多いという認識を強めるきっかけとなり、消費量を削減しようという意欲を上昇させるかどうかを確認することは重要である。

図 5-16, 図 5-17 は全世帯の電力消費に関する自己認識を、情報を受け取った前と後について（つまり Q_{Arcg} および Q_{Arcg}' への反応を）、グループごとに示したものである。

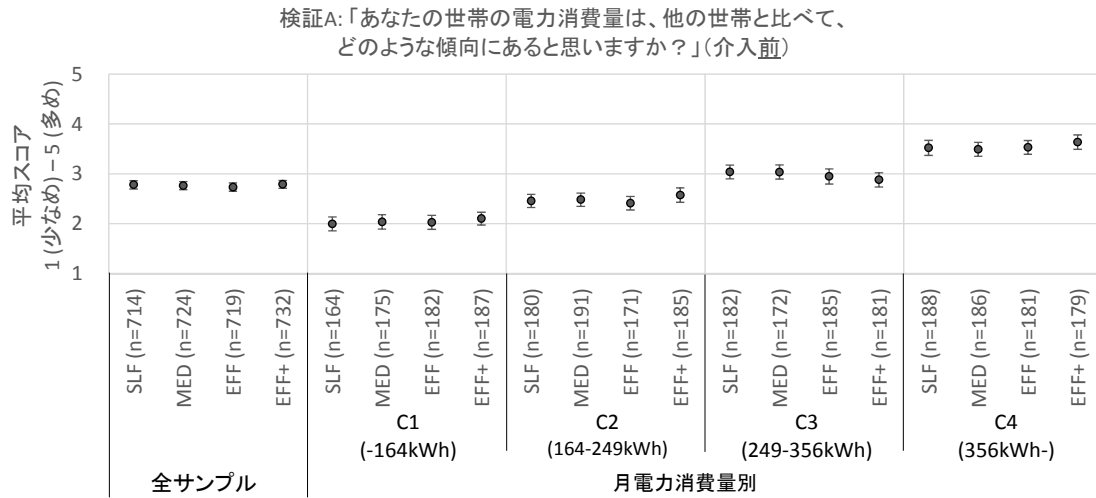
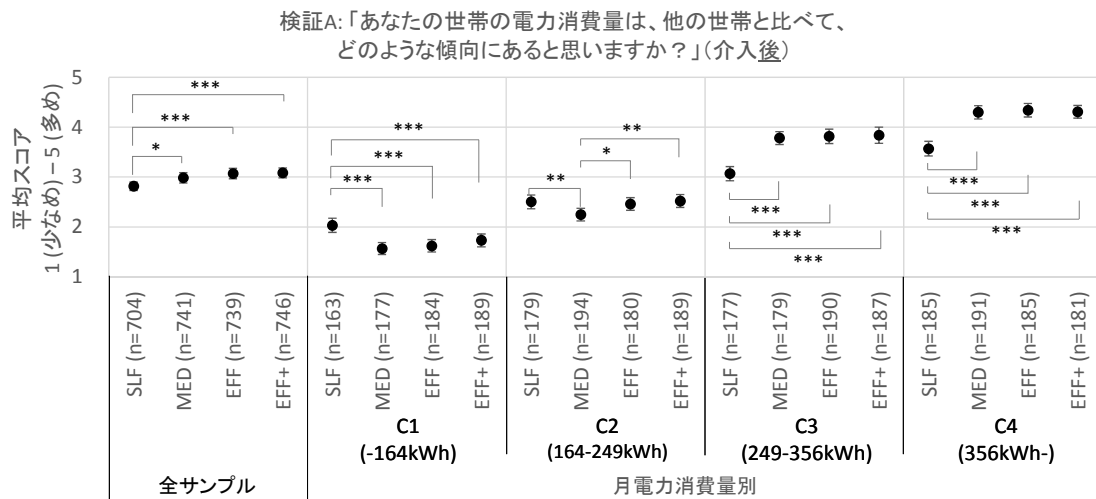


図 5-16 Q_Arcg の平均スコア



*, **, *** それぞれ 95%, 99%, 99.9%の信頼区間を表す

図 5-17 Q_Arcg' の平均スコア

介入前は、4つのメッセージグループ間に統計的に有意な差は認められなかった。このことから、RCTの観点から回答者は十分にランダム化されていることがわかる。一方、平均スコアは、実際の電力消費量の大きさ順、すなわち C1 < C2 < C3 < C4 の順に大きくなる傾向が見られた。

介入後の結果を見ると、3つの規範的なメッセージグループ(MED, EFF, EFF+)は、C1からC4までの全てのグループをまとめる(図5-17の「全サンプル」と、SLFグループと比べて自己認識に有意な差が認められた。これらのことか

ら、対象世帯の消費量を他世帯と比較する情報提供によって、消費量に関する自己認識が有意に上昇することが示唆される。

C1 グループに着目すると、規範的なメッセージを受け取った3つのグループの自己認識は、SLF グループよりも有意に小さくなった。つまり、3つの介入グループでは、併記された参照値（省エネ世帯の 164kWh と平均世帯の 249kWh）を見たことによって、自身の消費量が相対的に少ないということを認識するようになったことを示唆している。続いて C2 グループに着目すると、MED グループにおける消費量の自己認識は、他のグループと比較して優位に小さくなった。これは、C1 グループにおける自己認識の変化と同じ原因に起因するものと考えられる。一方で EFF と EFF+のグループにおける自己認識が SLF と異ならなかった理由は、対象世帯の消費量が省エネ世帯の消費量(164kWh)と平均世帯の消費量(249kWh)の間の大きさであったため、提供された情報が不明瞭となってしまったためと考えられる。SLF の C3 と C4 グループにおいては、消費量の自己認識は、その他3つの規範的なメッセージのグループと比べて有意に小さくなった。この結果から、単に自世帯の消費量だけを提示された多消費世帯は、その他の種類のメッセージを受け取った場合と比べて、自身が相対的にあまり多く電力を消費していないと思いつづけたことが示唆される。言い換えれば、その他の3種類のメッセージのいずれかを受け取った場合、回答者よりも省エネ的な世帯の消費量を示した規範的なメッセージを受け取ることによって、自己認識が是正されたことが示唆される。以上の結果から、対象世帯の消費量に加えて、比較のために他世帯の消費量を示すことの重要性がわかる。

5.3.3.2 分析 B：節電意欲の変化

メッセージの種類によって情報提供の効果がどのように異なるかを検証するため、受け取るメッセージの種類グループ毎に、メッセージを受け取った後の意欲向上の度合いを確認した。

図 5-18 は $Q_{B_{mtv}}$ の平均スコアを示したものである。「全サンプル」で示した、全てのグループのスコアを合わせた結果に着目すると、EFF+における意欲向上の度合いは、他の3つのグループよりも有意に高い結果となった($p < 0.01$; ウィルコクソンの符号順位和検定、両側)。その他の3つのグループ間の差は有意ではなかった。

C1 と C2 グループでは、EFF+のメッセージを受け取った人の意欲向上は、EFF のメッセージを受け取った人よりも大きくなった(C1 グループでは $p < 0.05$; C2 グループでは $p < 0.001$; ウィルコクソンの符号順位和検定、両側)。これらの結果は、「とても素晴らしいです」や「素晴らしいです」といった褒める言葉と星印を示すことで、節電の意欲が向上することを示している。このことは、元々エ

エネルギー消費量が小さい世帯には社会的に望ましいことを行ったことを誉めるメッセージが有効であるという既往知見[108]とも整合的である。

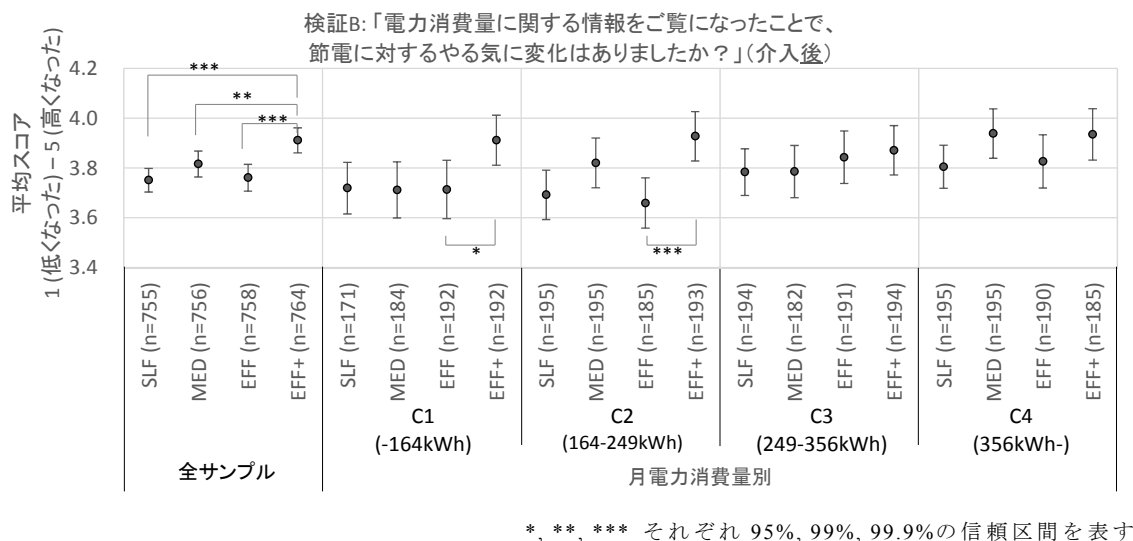


図 5-18 Q_B_{mtv} の平均スコア

C3 と C4 グループに着目すると、提供される情報に関するサブグループ EFF と EFF+での唯一の違いは、「電力消費が多めです」というメッセージと星印 1 つのみである。このことから、その差は有意ではなかったものの、社会的に望ましくないことを行っていることを否定的に表現したメッセージが意欲向上につながったことが示唆される。また、電力消費量とは関係なく、EFF+グループは意欲向上が最も大きくなる結果となった。つまり、EFF+グループの全てのサブグループ(C1, C2, C3, C4)では節電意欲が向上する傾向が見られ、これにより図 5-18 内の左端のグラフに示した、全てのサブグループの結果を合わせた顕著な結果が得られた、と解釈することができる。

さらに、多消費世帯ではどの種類の情報を受け取っても、比較的高い意欲向上を示す傾向が見られた。このことから、節電を促進するための情報を設計する際には、多消費世帯の節電行動を変容させる方法に着目することが重要であることが示唆される。

5.3.3.3 パーソナリティ特性を含む回答者属性の効果

規範的なメッセージを利用した情報提供による節電意欲の向上効果が現象として確認されたとしても、どのような属性の顧客が規範的なメッセージにより

反応しやすいかは明らかではない。これに加えて、他者の行動に追従することはきわめて心理的な過程である一方で、どのようなパーソナリティ特性が他者の行動に対する反応のしやすさを説明する要因となるかについても明らかではない。このような疑問を明らかにすることで、省エネルギー行動を効果的に促進するための情報のパッケージを設計するための、有用な知見が得られるだろう。また、どのような種類の情報を、どの特定の顧客セグメントが受け取ると有益かを検討する際の手がかりとなり得る。そこで、Big-5 と呼ばれるパーソナリティ特性を含めた回答者の各種属性と、節電意欲の向上の度合いがどのような関係にあるかを分析する。

本分析では、回答者の Big-5 特性（外向性、協調性、勤勉性、神経症傾向、開放性）を測定するために、いくつかバリエーションがある中から非常に短いバージョンの日本語版アンケートのテンプレート(TIPI-J)[109]を選択し、これを利用して5つの心理的特性のデータをサンプリングした。

節電意欲向上の要因をパーソナリティ特性 Big-5 で説明するために、以下に示す回帰モデルを構築した。

$$y = a_1 * S + a_2 * A + a_3 * N + a_4 * P_{ex} + a_5 * P_{ag} + a_6 * P_{co} + a_7 * P_{ne} + a_8 * P_{op} + a_9, \quad (5.10)$$

- S: 性別 (0: 女性; 1: 男性)
- A: 年齢 (0: 20 代; 1: 30 代; 2: 40 代; 3: 50 代; 4: 60 歳以上)
- N: 世帯人数 [人] (0: 1; 1: 2; 2: 3; 3: 4; 4: 5 以上)
- P_{ex} : 外向性(1 [低い] to 7 [高い], 整数値)
- P_{ag} : 協調性(1 [低い] to 7 [高い], 整数値)
- P_{co} : 勤勉性(1 [低い] to 7 [高い], 整数値)
- P_{ne} : 神経症傾向(1 [低い] to 7 [高い], 整数値)
- P_{op} : 開放性(1 [低い] to 7 [高い], 整数値)
- a_1 - a_8 : 各項の係数
- a_9 : 切片

ここで、 y は質問 Q_B_{mtv} によって得られた節電意欲向上の程度を表している。なお、元々の質問では、1 を「高くなった」、5 を「低くなった」とする 5 段階の整数値で回答を得ていたが、ここではスケールが直感的に理解しやすくなることを念頭に、1 が「低くなった」、5 が「高くなった」となるように順番を逆にした。

係数 a_1 から a_9 までを決定する際は、強制投入法を適用し、全ての説明変数がモデルに組み込まれるようにした。表 5-8 は、4 グループ(SLF, MED, EFF, EFF+)それぞれの回帰の結果を示したものである。

表 5-8 各モデルの線形回帰分析による係数

グループ	SLF ¹	MED ²	EFF ³	EFF+ ⁴	
項					
切片	2.420***	3.389***	2.551***	3.190***	
属性値の 変数	性別 (男性=1, 女性=0)	-0.077	-0.217***	-0.161**	-0.055
	年齢	0.003	-0.002	0.002	0.001
	世帯人数	0.056**	0.058**	0.064**	0.006
パーソナリティ の変数	外向性	0.040	-0.005	0.023	0.078**
	協調性	0.081**	0.109***	0.093**	0.082**
	勤勉性	0.052	-0.042	0.039	-0.010
	神経症 傾向	0.053*	-0.006	0.077**	0.049
	開放性	0.028	0.052	0.007	-0.036
調整済み R2 乗値	0.039	0.048	0.040	0.015	
サンプル数	755	768	758	764	

1. SLF = 対象世帯の電力消費量のみを提示するコントロールグループ
 2. MED = 対象世帯の電力消費量と平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
 3. EFF = 対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示する規範的なメッセージを受け取るグループ
 4. EFF+ = 対象世帯の電力消費量と省エネ世帯および平均世帯の電力消費量を提示し、さらに評価を行うメッセージを併記する規範的なメッセージを受け取るグループ
- *, **, *** それぞれ 95%, 99%, 99.9%の確率で 0 とは異なる

性別に着目すると、係数は全て負の値になっており、また有意な結果となっていたのは MED と EFF のグループであった。EFF+では性別の係数は有意な結果とはならなかったものの、これらの結果から、女性のほうが男性よりも他者の行

動に反応しやすいことが示唆される。年齢は、いずれのグループにおいても有意な結果にはならなかった。世帯人数は SLF、MED、EFF グループにおいて有意な結果となり、正の相関を示した。EFF+では有意ではなかったものの、このことは世帯人数が多ければ多いほどより多くの電力を使用しやすく、かつ一般には、電力消費量が多い世帯ほど節電の余地が大きいという傾向があることを反映していると考えられる。

協調性は全てのグループにおいてロバストに有意な結果となり、非説明変数への寄与は常に全てのパーソナリティ特性の中で最大の値となった。規範的なメッセージに評価を行うメッセージを加えたもの(すなわち EFF+のメッセージ)では、協調性だけでなく外向性も有意な説明要因となっていた。神経症傾向は SLF と EFF において有意な結果となっていたが、意味のある傾向は見出されなかった。

5.3.4 考察

アンケートによる意向調査の結果から、節電を促進するためには、回答者の電力消費量に関する情報について、規範的なメッセージを使って伝えることが重要であることが示された。他世帯における電力消費量について知らせることは、対象世帯の節電意欲を向上させるために有効であることが分かった。この効果の妥当性を支持するものとして、情報の受け取り手の電力消費量に関する自己認識が、他世帯の消費量を提示することによって是正される結果が得られ、この傾向は特に多消費世帯において顕著であった。一般に省エネ世帯よりも多消費世帯のほうが節電を促進するのが容易であるとするならば、効率的に節電を促進するための重要な課題の一つには、多消費世帯に絞り込んだメッセージをどのように設計すればよいかという点が挙げられるだろう。既に電力消費を抑えるよう行動が変容した世帯が、より高いレベルの意欲上昇を実現するためには、評価を行うメッセージ(省エネ世帯に対しては社会的に望ましいことをしたことを誉めるメッセージ、多消費世帯に対しては望ましくないことをしたことに対して否定的なメッセージ)も重要である。

また、各種情報提供に対して節電意欲向上の程度が特に大きかったのが、パーソナリティ特性も含めてどのような属性を持つ回答者であったかについて検証した。多世帯の消費量を提示した3種類のメッセージのうち2種類において、節電意欲の向上は男性よりも女性の方が高い結果となった。このことから、多世帯との比較によって節電を促進する介入を行う場合、女性に絞り込んで情報提供を行うことの重要性が示唆される。

さらに、Big-5の理論に基づいてパーソナリティ特性を評価した結果、規範的なメッセージと評価を行うメッセージの組み合わせを受け取ることで節電意欲

が向上しやすいのは、外向性と協調性が高い回答者であることが分かった。この結果から、適切に設計された節電に関する情報や規範的なメッセージは、進化上適応的であったパーソナリティ特性の反応を促すことが可能である、ということが示唆される。

また、規範的なメッセージを使わずに、単に電力消費量を知らせるメッセージを含めた全種類のメッセージにおいて、利他性の度合いを示す指標とされている協調性の高さが節電意欲向上に有意に寄与し、かつ一貫して最も大きい値をとっていた。このことから、次のような解釈が成り立つと考えられる。すなわち、人々は節電を社会的に好ましいことと考えており、高い協調性を持った利他的な人は、節電に関する情報を受け取ったことにより、他者の節電の程度とは無関係に節電意欲を向上させた、と考えられる。

規範的なメッセージに、評価を行うメッセージを組み合わせる情報提供を行う場合においては、外向性の反応を促す情報設計も重要となるだろう。どのような形態のメッセージが、外向性と協調性の反応を、同時により高めることができるかを詳細に分析することは、今後の検討課題の一つである。

フィールド実験を行った既往文献では、省エネ効果を定着させるために介入を繰り返すことの重要性が指摘されてきた[110]。しかしながら、本実験では介入は繰り返していないため、効果は介入を繰り返した場合よりも限定的となっている可能性がある。節電意欲をより高いレベルで実現するためには、介入を繰り返す必要があると考えられる。

多世帯の振る舞いを強調して伝える規範的なメッセージは、家電製品のユーザーインターフェースにも組み込んで利用することが可能である。応用の一例として考えられるのは、家電の設定を遠隔操作で変更できるスマートフォン向けのアプリケーションである。利用者の住宅の環境や家電の設定に関する情報を提示したり、あるいは電力消費量だけでなく家電の設定などについても、他者の情報を比較提示する規範的なメッセージを提示したりすることで、より効果的な情報提供が実現できる可能性がある。さらに、購入時点からその後ほとんど変えられない家電の設定を、より効率的な設定に変更することを促すために規範的なメッセージを利用することで、効果の持続性・継続性を高めるという観点もある。これは、近年検討が進められている、いわゆる「設定した後は忘れよう」型の介入の一つとして解釈できる。こういった介入は、たった一度行動するだけで後は何も行動する必要がなく、しかし効果は将来的に永続する、というのが特長である[110]。したがって、こういった行動を促すメッセージを利用することは、より長期的な節電に寄与する一つの方策として考えられる。

本実験の結果は、しばしばエネルギー政策の文脈で用いられる用語「省エネルギーギャップ」の観点から解釈することもできる。省エネルギーギャップとは、

「理想的な」エネルギー消費のレベルと現在の消費レベルのギャップとされ、このギャップ（いわゆる「省エネルギーバリア」）には様々な原因があると指摘されている。人間の意思決定や行動のエラーは、そのような原因の一つである[111]。例えば、人々の省エネルギーに関する情報、興味、投資は限られ、関連する情報を正しく理解できなかつたり、あるいは無視したりすることさえある[112]。その他に、人々は自身のエネルギー消費に関する情報を受け取る際に、情報が正確であることよりも、慣れ親しんだ内容であることや、理解が容易な方法で情報提供されることを好む、といった傾向も指摘されている[113]。

5.3.5 小括

我が国の一般世帯 3,000 件以上を対象としたアンケート分析を実施した。本質的に同じ内容のメッセージであっても、その表現方法を変えることによって、情報の受け取り手の反応を変えることができた。省エネ世帯における節電意欲の向上の度合いは、他世帯との比較情報のみを提示された場合比較的小さくなったが、誉めるメッセージを追加することによって節電意欲を向上させることができた。多消費世帯では、他世帯との比較を行うメッセージであれば、いずれの種類メッセージであっても節電意欲を向上させることができた。

このように社会規範に基づく情報提供が効果的であったのは、世帯人数が多く、性別が女性であり、情報の受け取り手の協調性と外向性が高い場合であった。協調性と外向性は、進化上の適応性と関連が深いとされているパーソナリティ特性であり、これらが意思決定に影響を与える傾向が、実際の人間においても観察されることを示した。

情報提供の設計によって回答者の反応が変わることは、電力消費量に関する自己認識と、節電意欲の向上のいずれについても当てはまり、特に後者については、単に対象世帯の電力消費量を伝えるものよりも、他者の消費量を強調した規範的なメッセージを用いた方が、節電意欲をより高められることが明らかになった。つまり、節電を促進する際には、情報の表現方法が重要となる。

また、介入の前であっても、回答者は自身の電力消費が他世帯と比べて、大きい（あるいは小さい）については、ある程度正しく認識できていたということも注目に値する。一方で、自世帯の電力消費が、他世帯と比較した場合の多さ（あるいは少なさ）の程度に関しては、過小評価する傾向が見られた。しかし、他世帯との比較を提示されることで、回答者は自身の電力消費に関する自己認識を強化する結果となった。すなわち、消費量が少ない世帯の回答者は、自世帯が省エネ世帯であるという認識をより強くし、消費量が多い世帯の回答者は、自世帯が多消費世帯であるという認識をより強くした。

本実験で見られたような、自己認識や意欲といった人間の意思決定に関わる要素でのエラーは、理想的なレベルの省エネルギーを実現する際のバリアーとなり得る。公共政策的な観点からは、省エネルギーギャップを超えて、理想的なエネルギー消費のレベルを達成することが求められる。人間の現実的な行動特性を考慮した情報提供を政策プログラムに活用し、行動変容を促進することによって、省エネルギーギャップを小さくすることが期待される。

このような効果的で実行可能な行動変容方策を実装するためには、情報を受け取ったことによってどのように意欲が向上・低下するかを詳細に特定するだけでなく、実際に行動がどのように変容するのかについても特定することが必要不可欠である。そのため、今後はフィールド実験をさらに実施することによって、意欲と行動の両方の変容を検証することが求められる。

最後に、本実験は一般世帯を対象とした介入に着目して行ったが、電力消費量が多い業務部門の節電促進を狙った情報提供の可能性についても検討する必要がある。特に中小企業においては、エネルギー管理者が不在であったり、電力消費量が正しく計測されていなかったり、さらには電気の利用者に対して適切な情報提供がなされていなかったりする場合も多いものと考えられる。こういった状況は家庭部門と同様であることが予想される。このことを踏まえると、業務部門においてより高いレベルの節電を実現するためには、同じ業種の事業所同士を比較する規範的なメッセージには、活用価値があるだろう。

付録：実験 A, B で用いたアンケート内容

各メッセージに記載されている〇〇kWh の値には、同じ回答者が事前調査において、2012 年 11 月の電力料金票に記載されていた内容を確認して回答した値が表示される。

事前調査：回答者の実際の電力消費量を確認する質問

今年「11月分」の「電気ご使用量のお知らせ」をお手元にご用意いただいた上で、使用量・請求金額・契約種別をご回答下さい。
※ひと月の請求書が複数枚ある方（各種深夜電力など）は、1. と 2. は合算した値、3. は「〇〇と〇〇」といった形式でお答えください。

1. [] kWh
2. [] 円
3. []

Q A_{rcg}: 他世帯と比べた場合の自世帯の電力消費量に関する自己認識を確認する質問

あなたの世帯の電力消費量は、他の世帯と比べて、どのような傾向にあると思いますか？

1. 多め
2. やや多め
3. どちらでもない
4. やや少なめ
5. 少なめ

SLF: 単に回答者の世帯の電力消費量のみを提示するメッセージ（コントロールグループ）

電力消費量に関する次の情報をご覧下さい。

今年11月分の電力消費量
〇〇kWh あなたの世帯（以前の調査におけるご回答内容が表示されています）

MED: 回答者の世帯の電力消費量を、平均世帯の消費量と共に提示する規範的なメッセージ

電力消費量に関する次の情報をご覧下さい。

今年11月分の電力消費量

249kWh 平均的世帯 (実態調査における100世帯中50位の世帯の値より)

〇〇kWh あなたの世帯 (以前の調査におけるご回答内容が表示されていません)

EFF: 回答者の世帯の電力消費量を、省エネ世帯および平均世帯の消費量と共に提示する規範的なメッセージ

電力消費量に関する次の情報をご覧ください。

今年11月分の電力消費量

164kWh 省エネ世帯 (実態調査における100世帯中25位の世帯の値より)

249kWh 平均的世帯 (実態調査における100世帯中50位の世帯の値より)

〇〇kWh あなたの世帯 (以前の調査におけるご回答内容が表示されていません)

EFF+(C1): 回答者の世帯の電力消費量を、省エネ世帯および平均世帯の消費量と共に提示し、評価を行うメッセージを付加した規範的なメッセージ (提示対象が省エネ世帯である場合)

電力消費量に関する次の情報をご覧ください。

今年11月分の電力消費量

〇〇kWh あなたの世帯 (以前の調査におけるご回答内容が表示されていません)

164kWh 省エネ世帯 (実態調査における100世帯中25位の世帯の値より)

249kWh 平均的世帯 (実態調査における100世帯中50位の世帯の値より)

あなたの世帯は

→ ☆☆☆ とてもすばらしいです

☆☆ すばらしいです

☆ 電力消費が多めです

EFF+(C2): 回答者の世帯の電力消費量を、省エネ世帯および平均世帯の消費量と共に提示し、評価を行うメッセージを付加した規範的なメッセージ (提示対象が平均世帯である場合)

電力消費量に関する次の情報をご覧ください。

今年11月分の電力消費量

164kWh 省エネ世帯 (実態調査における100世帯中25位の世帯の値より)

〇〇kWh あなたの世帯 (以前の調査におけるご回答内容が表示されていません)

249kWh 平均的世帯 (実態調査における100世帯中50位の世帯の値より)

あなたの世帯は

- ☆☆☆ とてもすばらしいです
- ☆☆ すばらしいです
- ☆ 電力消費が多めです

EFF+(C3&C4): 回答者の世帯の電力消費量を、省エネ世帯および平均世帯の消費量と共に提示し、評価を行うメッセージを付加した規範的なメッセージ (提示対象が多消費世帯である場合)

電力消費量に関する次の情報をご覧ください。

今年11月分の電力消費量

164kWh 省エネ世帯 (実態調査における100世帯中25位の世帯の値より)

249kWh 平均的世帯 (実態調査における100世帯中50位の世帯の値より)

〇〇kWh あなたの世帯 (以前の調査におけるご回答内容が表示されています)

あなたの世帯は

- ☆☆☆ とてもすばらしいです
- ☆☆ すばらしいです
- ☆ 電力消費が多めです

Q A_{rcg}: 他世帯と比べた場合の自世帯の電力消費量に関する自己認識を確認する質問

その上で、改めてうかがいます。

あなたの世帯の電力消費量は、他の世帯と比べて、どのような傾向にあると思いますか？

1. 多め
2. やや多め
3. どちらでもない
4. やや少なめ
5. 少なめ

Q B_{mtv}: 節電に対する意欲がどれだけ向上したかを確認する質問

電力消費量に関する情報をご覧になったことで、節電に対するやる気に変化はありましたか？もっともあてはまると思うものをお選び下さい。

1. 高くなった
2. やや高くなった
3. どちらともいえない
4. やや低くなった
5. 低くなった

5.4 分析を踏まえた行動変容方策の実装

5.4.1 省エネルギー促進を狙った情報提供の現状

すでに述べた通り、東日本大震災直後の我が国では、電力不足のリスクを回避するため、あるいは自己利益を犠牲にして社会貢献するために、省エネルギー行動を取る人もいた。このような背景を持つ我が国において、社会性に関する進化・適応的なパーソナリティ特性に注目して設計した情報提供を利用することで、省エネルギー行動への意欲向上を促進できることを前節で明らかにした。ただし、現実世界ではそのような行動変容方策を実際に運用する際に、応用面での様々な課題がある。

近年、家庭におけるスマートメータや HEMS (Home Energy Management System) の普及に向けた動きが加速している。それらが普及した際には、電力消費量等のエネルギー需要データが大量に利用可能となるため、データを動的に自動処理し、省エネルギー・節電アドバイスを行うシステムが注目されるようになる。電力会社から提供され始めている Web 等を活用した見える化サービスも、その一例である[114, 115, 116]。

このような既存システムの設計を、行動科学的な視点から考えると、我が国の既存の見える化サービスでは、単一のグラフに様々な情報を同時に表示するなど、一度に多くのメッセージを詰め込み過ぎている場合もある。また、対象世帯の電力消費量や電気料金等が主なメッセージとなっており、結果的に個人利益への訴えかけが強調されている場合もある。すなわち、情報提供の効果を高める余地は残されており、現実的な人間の行動特性を考慮すれば、省エネ・節電行動を促進できる可能性がある[117]。

ナッジの概念に基づく省エネ情報サービスの代表例である、米国 Opower 社の家庭用エネルギーレポートは、一定の成果を挙げつつあると報告されているが、同社のサービスの主眼はエネルギー総量を削減することである。一方、東日本大震災後に電力不足を経験した我が国では、需要ピーク時における節電の重要性も広く認識されている。ピーク需要抑制策としては、時間帯別料金など料金インセンティブ型手法の検討が先行し、時刻別消費量データを用いた情報インセンティブ型手法に関する知見は現時点であまり蓄積されていない

そこで本節では、特に需要ピーク時の負荷抑制に着目して、人間の現実的な振る舞いを考慮して効果的に省エネ・節電行動を促すアドバイスレポートを、各世帯の毎 30 分電力消費量データから自動生成するツールの設計を検討する。

5.4.2 提案手法

5.4.2.1 概要

各世帯の毎 30 分電力消費量データから、省エネ・節電行動を促すアドバイスレポートを自動生成する提案手法では、ユーザーが有益な情報コンテンツに到達するためにかかる手間を、極力廃するようにシステムをデザインする。例えば、ユーザーの気付きのプロセスの一つとして、日別使用量から電気を使い過ぎた日を確認した上で、時刻別使用量を閲覧して原因を考える、というものがあり、既存見える化システムはこのような気付きを支援する[114]。しかし、既往インタビュー調査では、関心が高く詳細データを求めるユーザーもいる一方で、コンピュータなど IT 機器の操作がそこまで得意でないユーザーもいて、そのようなユーザーには簡便な見える化が好ましいと指摘されている[118]。そこで、提案システムでは、関心や IT 機器操作スキルが十分でないユーザーの存在も前提とし、気付きに至るまでの機器操作を自動的に代行することを意図した。

さらに、候補となる情報の中から、各世帯に適した情報を選択し、専門家の判断等を介さず、自動的に省エネ・節電行動を推薦するシステムも含まれる。ここでは、まず各世帯の電力消費の傾向を示す様々な指標のうち、改善の余地が最も大きいと想定される指標を世帯毎に特定する。続いて、その指標を改善することを狙った情報・アドバイスを優先的に選択・提示する。これにより、全体としての省エネ・節電効果の向上を狙う。

本節では、提案手法によって自動生成されたレポートを試験的に配布し、各世帯での意識レベルでの反応について評価した結果についても報告する。

まず、省エネアドバイスに関する情報提供を行うためのレポート（以下単に「レポート」と表記）の自動生成システムについて説明する。

提案手法では、「データ」処理で生成するグラフやアドバイス等、レポートで提示する情報のパーツの最小単位を「モジュール」と定義する。さらに、4 点のモジュールの組み合わせにより「ストーリー」を構成する（図 5-19, 図 5-20）。以上の生成システムは、「ストーリー設計」部と「ストーリー選択」部から構成される。

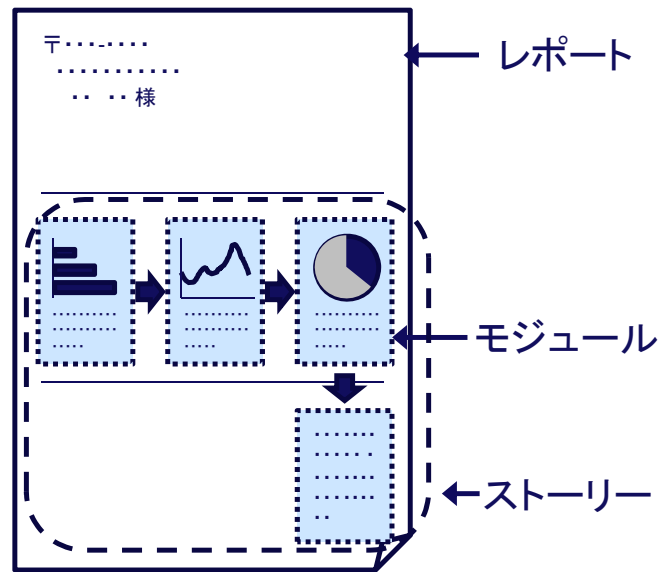


図 5-19 レポート、モジュール、ストーリーの関係

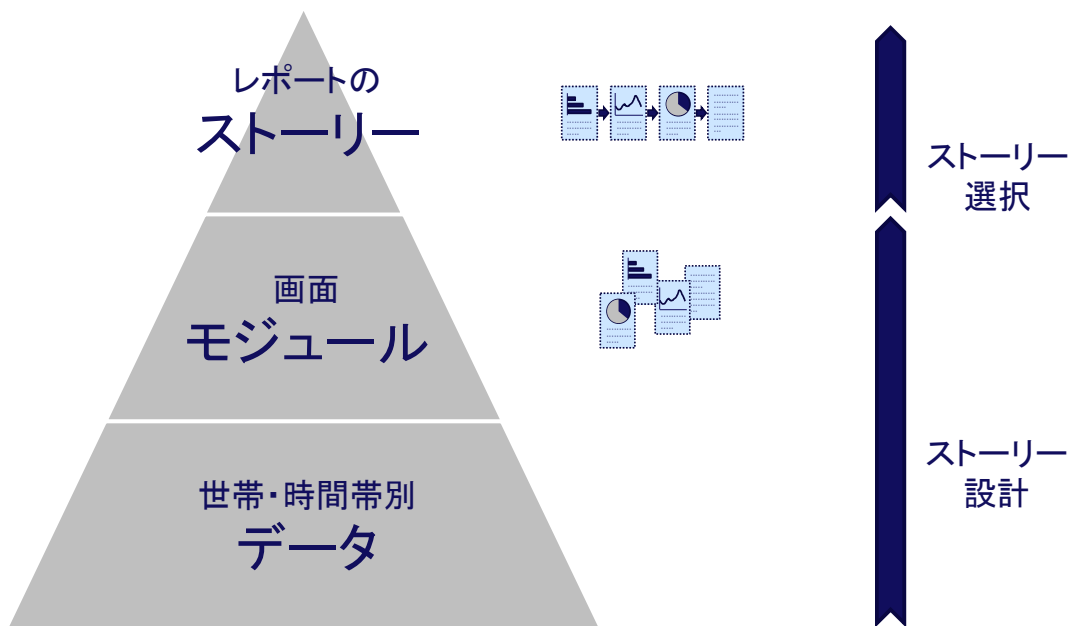


図 5-20 提案手法の設計方針の概念図

「ストーリー設計」部では、レポートに表示するためのグラフや個別のメッセージ等といったモジュール、および、ストーリーのテンプレートを、行動科学的知見を積極的に採用しながらデザインする。レポートに表示する情報の部品である「モジュール」は、細分化すると約 40 種類あるが、大別すると図 5-21 に示す通り 8 種類に整理できる。例えば、時刻別比較（ロードカーブ）のモジュール

ルにも、特定日のカーブを扱うものや、前週の平均的カーブを扱うものなどがある。モジュールはさらに、意味的つながりを考慮した「ストーリー」に加工される(図 5-20)。例えば図 5-22 では、一番目のモジュールで系統ピークが 14 時付近に発生することを伝え、二番目のモジュールで先週一週間の平均ロードカーブを示し、その日の 14 時の点をハイライトする。続いて三番目のモジュールで先週 14 時に限定した場合の電力消費量について他世帯比較を示す。最後に、四番目のモジュールで 14 時付近の時間帯の電力消費量を下げたための工夫として、1 時間だけエアコンを我慢して扇風機を使用するよう促す節電アドバイスを提示する。このようなストーリーは、複数デザインした。

なお、レポート配布対象世帯で適用されている料金体系には 2 種類ある。一つは、月毎の累積電力消費量(kWh)に応じて三段階の単価が決められた、従来型料金である。もう一つは、30 分毎の累積電力消費量(正確には kWh/h だが、簡単のため以降単に W と表示する)に応じて三段階の単価が決められた、30 分逡増型料金⁶である。実証研究全体として、協力世帯を無作為に複数の群に割り当てており、そのうち本稿に関する A-D 群は、A 群：「30 分逡増型料金+見える化⁷」(53 世帯)、B 群：「30 分逡増型料金+見える化+レポート」(55 世帯)、C 群：「従来型料金+見える化+レポート」(60 世帯)、D 群：「従来型料金」(60 世帯)とした。提案手法では、レポート配布対象である B 群および C 群に着目して設計を行った。レポート内容は料金体系によって一部切り替えており、図 5-21 内で「B 群のみ」と書かれているモジュールは、B 群を対象とした場合にしか表示されない。

⁶ より短い時間幅において、電力を多く使用するほど電気代が高くなる料金設計によって、家庭での需要ピーク抑制を狙う料金体系である。

⁷ 入居時から宅内に備え付けられている見える化システムであり、壁に埋め込まれたスマートフォン程度の大きさのディスプレイに、自らの世帯の電力消費量瞬時値等が表示される。

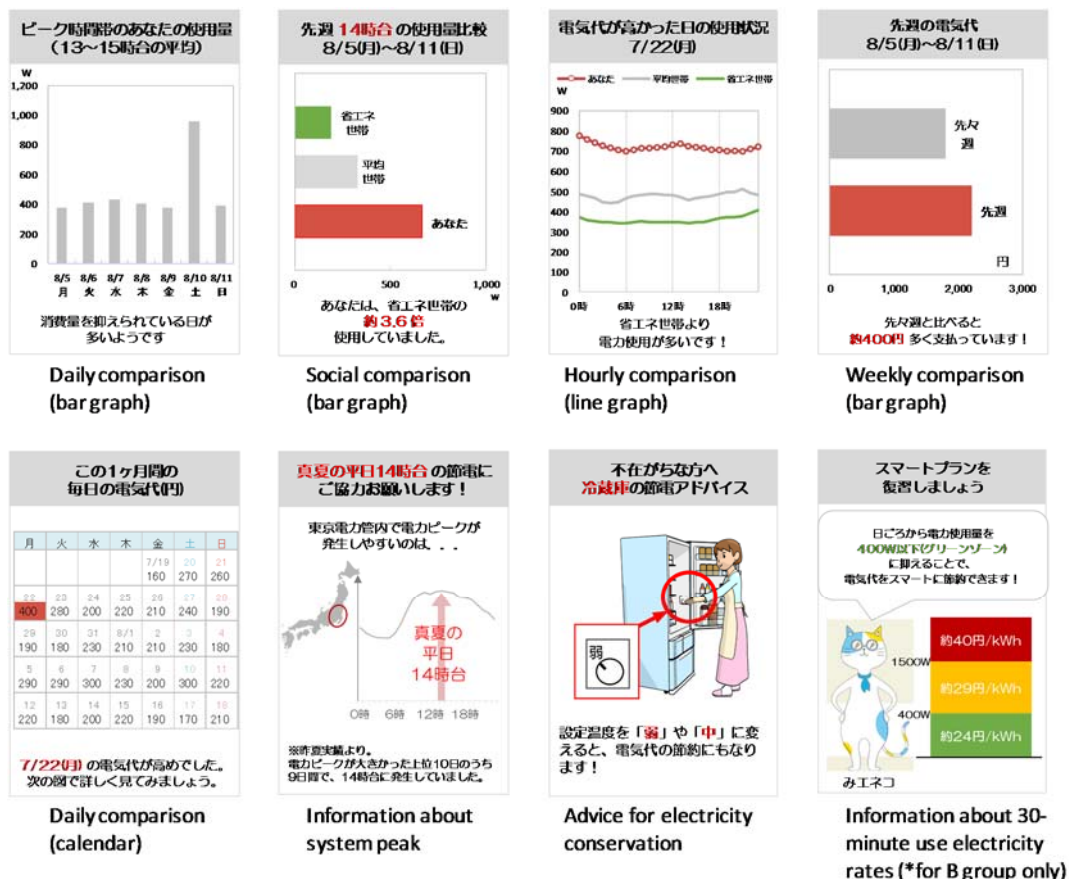


図 5-21 8種類のモジュール

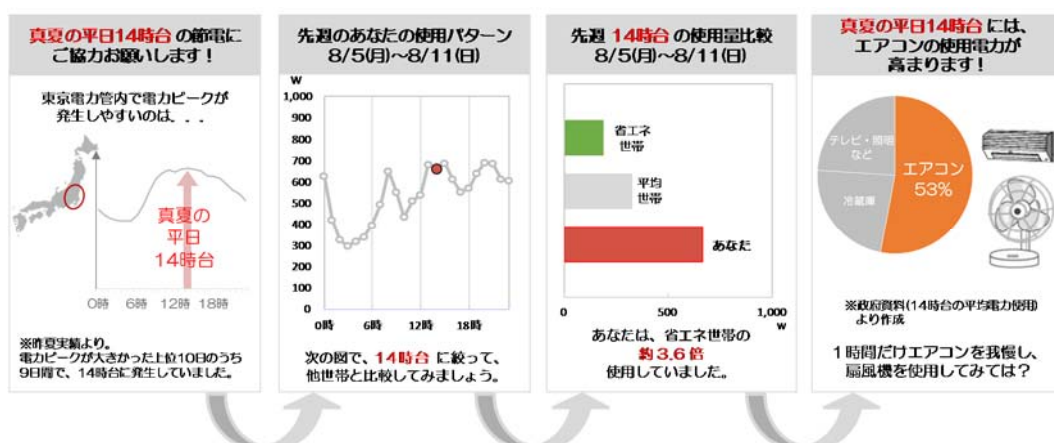


図 5-22 「ストーリー」の例

続いて「ストーリー選択」部では、用意された複数のストーリーの中から、所与のテーマに合致するものを予め抽出し、その上で、アルゴリズムにより世帯毎に適したものを選択する。テーマには、図 5-22 で示した例に該当する「系統ピーク削減」（電力会社各社の管轄地域全体での電力需要ピークを削減することを狙うもの）、および「電気代節約」（個人の経済的メリットに繋がるもの）の二つがあり、実験全体としては「系統ピーク削減」に重きを置いている。家庭での電力消費ピークと系統ピークは一般に一致しないので、いずれの目的にも対応した情報提供を行えるよう工夫を行っている。

以下ではストーリー設計・選択に関わる用語として、表 5-9 に示す用法に従い、説明を行う。

表 5-9 提案手法における用語の定義

用語	内容
ストーリー	レポートに表示する一連のグラフ、節電アドバイスの組み合わせ。各ストーリーは、表示されるための条件を持ち、これらの条件が一致するものについてのみ、レポートとして提示される候補となる。
モジュール	ストーリーを構成するグラフ、節電アドバイスなどの各種パーツ。4モジュールで1ストーリーを構成する。主には、グラフ3つ分のモジュールと、それらを踏まえて具体的な節電アドバイスを提示するためのモジュール1つ、合計4つのモジュールでストーリーを構成する。
監視指標	各世帯において常に評価される、電力消費傾向を表わす項目。各一つのストーリーにつき一つの監視指標が割り当てられる。監視指標には、「先月1ヶ月分の電気料金」や「先週1週間の400Wを超過する割合」といったものがある。これらの値を全世帯について算出し、パフォーマンスが良い（省エネ・節電に寄与する）順に並べ替え、得られた各世帯のランキング値を目的関数の値とする。
目的関数	監視指標の値を、対象世帯内でのランキング値に変換したもの。
ストーリーテンプレート	各世帯の電力消費データを代入する前の鋳型となる、ストーリーのデータフォーマット。省エネ世帯、平均世帯の消費量等、世帯毎に異ならず全世帯に共通して用いられる情報については、このストーリーテンプレートに事前書き込む。
世帯別ストーリー	ストーリーテンプレートに、世帯別のエネルギー消費データの解析結果を書き込んでカスタマイズしたもの。

5.4.2.2 ストーリー設計

情報提供の効果を高めることを狙い、対象世帯の節電行動を促進するためのストーリー設計上の各種特徴について説明する。

(1) 探索コストの低減

一般に人間にとって、知識や計算能力等の限界の結果として、情報を収集したり、集めた情報を吟味し意思決定をしたりすることにかかる手間は想像以上であることが知られている。こういった手間や労力にかかる費用は探索コストと呼ばれる[119]。

電力利用について需要家がかける探索コストの上限を示唆するものとして、19カ国で行われた調査がある。これによれば、一般的に需要家が、電話、Eメール、店頭などを通じて電力会社の担当者とのやりとりにかかる時間は、一年間につき平均9分程度で、そのうち半分以上の人は全くやりとりがない、と言われている[120]。

このことを考慮すると、省エネ・節電行動を促す情報提供を行うためには、需要家が電力利用に関する情報に対してかける労力が限られていることを前提とし、探索コストを極力低減する工夫を施すことが重要だと考えられる。そこで提案手法では、一枚のレポートの様々な面において、探索コストの低減を狙う仕組みを取り入れることにした。一つ目は前節で既に述べた、4つのモジュールを一つのストーリーとして提示する工夫である。複雑な情報を詰め込むことや関連性の低い情報を列挙することは避け、各モジュールに込めるメッセージを単純でわかりやすいものにし、起承転結のストーリーを意識した4点構成とすることで、意味合いの流れが短時間で容易に掴めることを狙う。例えば、需要が特に大きかった日を抽出・指摘した上で、当該日の時刻別グラフを提示することで、その日どのような生活をしていたために電力消費量が多かったのかについて気付きを与える。従来に見える化では、こうした処理工程はユーザーの意識やスキル等に委ねられることが多かったが、提案システムでは処理を自動代行する。

二つ目の工夫として、節電アドバイス用モジュールについては、グラフ用モジュールの中で示した各世帯のピーク発生時間帯に応じて、おすすめの省エネアドバイスを自動選択する仕組みを取り入れた。例えば、当該世帯の需要ピークが18時であれば、帰宅直後蒸し暑い時は一度換気してからエアコンのスイッチを入れるよう促す、21時であれば不要な照明を消すよう促す、といった切り替えを行う。このように、具体的に取るべき行動のアドバイスについて、対象世帯のピーク時間帯や電力消費量の大小、あるいはテーマに応じて切り替えて提示することで、どのような対策を取れば良いかについて各自が悩む苦労を省くことを狙う。

(2) 社会規範の利用

社会規範（social norms）は、社会的選好（social preferences）といった概念で語られることも多い。そのニュアンスは、社会的に望ましいと思われる行動を取るという意味のみならず、多数の人の行動に倣う、あるいは多数の人と同じであることに喜びを感じる、といった意味も併せ持って用いられることが多い。

既に述べたとおり、社会規範を活用したメッセージによって、省エネ行動を促進できることが可能であることを踏まえ、提案手法では他世帯比較を用いたメッセージを採用したモジュールを積極的に使用した。例えば図 5-22 の 3 つ目のモジュールでは、対象世帯の直前一週間の 14 時台の電力消費量が、省エネ世帯や平均世帯と比べて多く、省エネ世帯と比較すると約 3.6 倍であることを伝えている。ここで、「省エネ世帯」とは上位 30 パーセントまでの世帯の平均値、「平均世帯」とは全世帯の平均値を示している。このような他世帯比較を用いたメッセージによって、社会規範に訴えかけて省エネ・節電行動を促進することを狙う。

(3) 顕著性の高い表現利用

現実の人間は、本質的には同じ情報や価格であっても、表現の仕方により反応の大きさが変化することがある。

例えば、省エネ分野では、電力消費量を kWh ではなく「金額に変換して表示する」ことで、情報の受け取り手の注意をより高く喚起できることが知られている[121]。

また、置かれた状況によって価値の感じ方が異なるという、人間の現実的な価値判断の傾向について理論的解釈を与えたプロスペクト理論では、利益よりも損失を大きく意識するという損失回避性の概念が説明されている[122]。具体的には、一般に損失を利益よりも 1.5 倍から 2.5 倍程度大きく評価することが確かめられている[75]。

提案手法では、省エネの度合いを金銭に換算し、さらに損失表現を用いるモジュールを積極的に採用した。

また、省エネを達成している世帯に対して、うまく褒めることで省エネへの意欲の低下を予防する方法[108]が知られており、提案手法では、「すばらしい！」といったメッセージに、メダルマークを併記したモジュールを採用することで、褒めるメッセージの効果を高めることを狙っている。

5.4.2.3 ストーリー選択

「ストーリー選択」は、「ストーリー」の全ての候補の中から、対象世帯に適したものを選択する部分である。ここでは、この自動選択のアルゴリズムについて説明する。

提案アルゴリズムの趣旨は次のようなものである。まず、「ピーク時間帯の電力消費量」や「先月1ヶ月分の電力料金」といった、電力消費傾向を表す様々な値（本稿では「監視指標」と呼ぶ）について、参加世帯の中での順位付けを行う。続いて、各世帯について順位の値が大きい監視指標、すなわち省エネ・節電のパフォーマンスが劣る監視指標を特定し、その監視指標に関連付けられたストーリーを提示する。このように、改善余地が大きそうな情報を世帯ごとに選択提示し、効果の全体的な底上げを効率的に図っていくことを狙う。

ただし、いずれの監視指標を見ても順位の値が小さい世帯、すなわち省エネ・節電が進んでいる世帯もあるだろう。そのような世帯に対しては、省エネ達成を褒めるメッセージを含むストーリーを積極的に提示することで、省エネ意欲低下の防止を狙う。

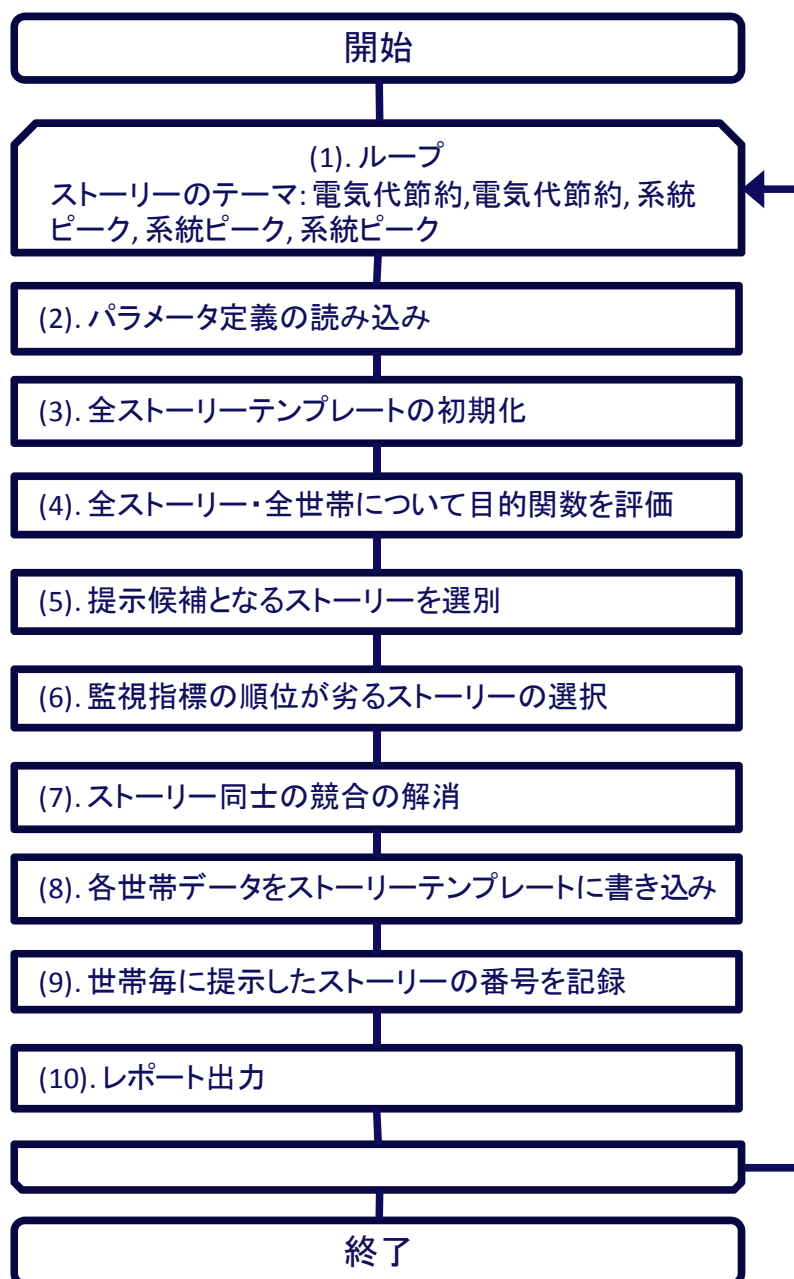


図 5-23 省エネルギーレポートを生成する提案アルゴリズム

このアルゴリズムの具体的な手順は、図 5-23 のようになる。本アルゴリズムには、パフォーマンスの調整に関するようなパラメータは無い。すなわち、対象世帯の反応を見ながら手動でチューニングするといった必要は無く、実行開始から終了までの間、全ての処理は自動的に行われる。以下では、図 5-23 内の項目に従って、具体的な実行内容を説明する。

(1) ループ

ストーリーのテーマを決める。本稿では最初の 2 回配布時は「電気代節約」、その後続く 3 回配布時は「系統ピーク削減」を所与とし、手順(1)から(10)を、1 週間に一度実行する、という手順を 5 回繰り返す。

(2) パラメータ定義の読み込み

用意するストーリーの総数、今回配布するレポートの到着予定日、「1 週間前」や「1 ヶ月前」の定義等の初期設定に関するパラメータを読み込む。ストーリーは全部で 18 種類用意した。

なお、既に述べた通り、レポート配布対象には、従来型料金が適用されている世帯（以下「C 群」）と 30 分逡増型料金が適用されている世帯（同「B 群」）の 2 種類がある。ストーリーの中には、30 分逡増型料金に特化したものがあり、これらは C 群では提示されず、除外される点に留意されたい。アルゴリズムの流れは料金体系によらず共通である。

これらのストーリーで用いられる監視指標は、次のようにまとめられる。

- 前週における時刻別平均消費量の最大値
- 前週・ピーク時間帯⁸における消費量の最大値
- 前週・ピーク時間帯における消費量の平均値
- 前週・ピーク時間帯で消費量 400W 以上となる時間数の比率
- 前週・全時間帯で消費量 400W 以上となる時間数の比率
- 前週の電気料金
- 前週と前々週の電気料金の差
- 前月の電気料金
- 前月の電気料金最大日における時刻別消費量の最大値
- 前月の日別電気料金の最大値
- 前月・平日の電力料金最大日におけるピーク時間帯消費量

監視指標は以下のように表記する。

$$MI_{s,h} \text{ (} s \text{: ストーリー番号, } h \text{: 世帯番号)} \quad (5.11)$$

例えば $s = 1$ のときの監視指標 $MI_{1,h}$ を、前週・ピーク時間帯における消費量の最大値とすると、以下のように記述できる。

⁸ ピーク時間帯は所与（平日 13-15 時台など）。

$$MI_{1,h} = \max_{w \in W} \sum_{t=13}^{15} \frac{Demand_{h,t,w}}{3}, W = \{d-3, \dots, d-9\} \quad (5.12)$$

d はレポートを開封する日（水曜日）、 W は前週一週間の全ての日（ d の3-9日前、月曜日から日曜日）、 w は前週のある一日、 t は時刻、 $Demand_{h,t,w}$ は世帯 h における前週のある一日 w における時刻 t の電力需要を表す。

(3) 全ストーリーテンプレートの初期化

グラフを表示するモジュールでは、省エネ世帯や平均世帯の電力消費量といった、全世帯で共通して使用される情報を、事前にストーリーテンプレートに書き込み、グラフ化しておく。

(4) 全ストーリー・全世帯について監視指標を評価

ストーリー s を固定した時に、ある世帯 h が監視指標 $MI_{s,h}$ について全世帯 H 内で何番目かを表すランキング値を、全ての s について返す関数を $\text{rank}_H(MI_{s,h})$ とする。世帯毎に全てのストーリーについて $MI_{s,h}$ の値を求めた後、この $\text{rank}_H(MI_{s,h})$ の値を求める。

(5) 提示候補となるストーリーを選別

まず $\text{rank}_H(MI_{s,h})$ の値を目的関数 $Obj_{s,h}$ に代入する。

さらに、次の手順（6）では、目的関数 $Obj_{s,h}$ の値が大きいストーリーを世帯 h に対して最終的に提示するものとして選択するのだが、その前段階として、提示候補とならないストーリーに対しては $Obj_{s,h}$ に0を代入することで選択されないように前処理を施す。

具体的には、各ストーリーが持つ条件である「ストーリーのテーマ」および「表示対象」（そのストーリーが提示される世帯が省エネ世帯、平均世帯、多消費世帯のいずれであるか）が合致しないものについて、 $Obj_{s,h}$ に0を代入する。料金体系がその世帯に一致しない場合も、同様に0を代入する。

続いて、最近表示したストーリーから順に $Obj_{s,h}$ に0を代入する。これにより、同じストーリーが繰り返し表示されないようにする。

以上をまとめると、 $Obj_{s,h}$ は以下のように記述できる。

$$Obj_{s,h} = \begin{cases} 0, & \text{(ストーリーのテーマが合致しない or} \\ & \text{表示対象が合致しない or} \\ & \text{料金体系が合致しない or 最近表示した)} \\ \text{rank}_H(MI_{s,h}), & \text{(otherwise)} \end{cases} \quad (5.13)$$

(6) 監視指標の順位が劣るストーリーの選択

世帯毎に、値が 0 でない監視指標のうち最も大きいものに対して、その監視指標の値を下げるための情報提供を行うためのストーリーを選択する。世帯 h に対して提示するストーリー s_h^* は、目的関数 $Obj_{s,h}$ を用いて次のように記述できる。

$$s_h^* = \arg \max Obj_{s,h} \quad (5.14)$$

(7) ストーリー同士の競合の解消

手順 (6) において、同一の世帯で $\max Obj_{s,h}$ の値が同じストーリーが複数存在する場合があります。この競合を解消するため、各ストーリーに事前に割り当てた好ましさの順番に従って、最終的に提示する唯一のストーリーを選択する。

(8) 各世帯データをストーリーテンプレートに書き込み

各世帯について、手順 (7) で選択されたストーリー番号のストーリーテンプレートに対して、その世帯の電力消費量データを代入して世帯別ストーリーを作成する。

さらに、テーマが「電気代節約」である場合は、対象世帯のピーク時間帯に応じた節電アドバイスを 4 つ目のモジュールとして貼りつける。一方、テーマが「系統ピーク削減」である場合は、ストーリー毎に固定された節電アドバイスが貼り付けられる。具体的には、多消費世帯向けのストーリーにはピーク時間帯の節電を促進するためのアドバイス（エアコンの節電またはクールシェアを勧める）、省エネ世帯向けのストーリーでは、さらなる節電を狙って冷蔵庫の温度設定を弱めるアドバイスを用いる。

(9) 提示したストーリー番号を記録

提示したストーリーの番号の履歴を、世帯毎に記録する。この履歴は手順 (5) の、同一ストーリーの繰り返し表示抑制で使用する。

(10) レポート出力

各世帯のレポートを出力・提供する。

5.4.3 レポート送付条件

5.4.3.1 送付スケジュール

千葉県船橋市の集合住宅の居住者を対象とした省エネ調査の一環として、提案手法を用いて、2013 年夏に合計 5 回の省エネアドバイスレポートを発行・郵

送した。具体的には、2013年8月第1週から同9月第1週にかけての毎火曜日に、直近の日曜までの電力消費量データを用いたレポートを生成し、これをA4片面一枚に印刷した上で投函し、翌日に対象世帯に到着するようにした(図5-24)。

なお、前述の通り、レポート配布対象はB, C群合わせて約百世帯だが、実証研究全体ではA, D群、およびその他の世帯を合わせて、合計二百世帯以上の協力を得て、様々な視点から調査を行っている。












月	火	水	木	金	土	日	アドバイスの テーマ 
8/5	6	7	8	9	10	11	①電気代節約
データ処理 ・印刷・投函		 開封					
12	13	14	15	16	17	18	②電気代節約
							
19	20	21	22	23	24	25	③系統ピーク削減
							
26	27	28	29	30	31	9/1	④系統ピーク削減
							
2	3	4	5	6	7	8	⑤系統ピーク削減
							

図 5-24 実験の日程

5.4.3.2 システムに自動選択された情報

実験期間中全世帯に対して提示されたストーリーについて、監視指標の分布を見る。図5-25によると、提案手法によって選択されたストーリーの監視指標を、最小値を0、最大値を1となるように正規化した場合、平均値は0.58と高めであり、0.9を超えるストーリーは16%選択された。単純化して考えると、仮にストーリーを無作為に選択した場合、正規化した監視指標の値は0-1の間で一様分布を取り、平均は0.5となることから、監視指標が高いストーリーを優先的に選択する提案手法のアルゴリズムが、正しく機能していることが確認できる。

(集計対象:B・C群向け全レポート、n=575;115世帯×5回)

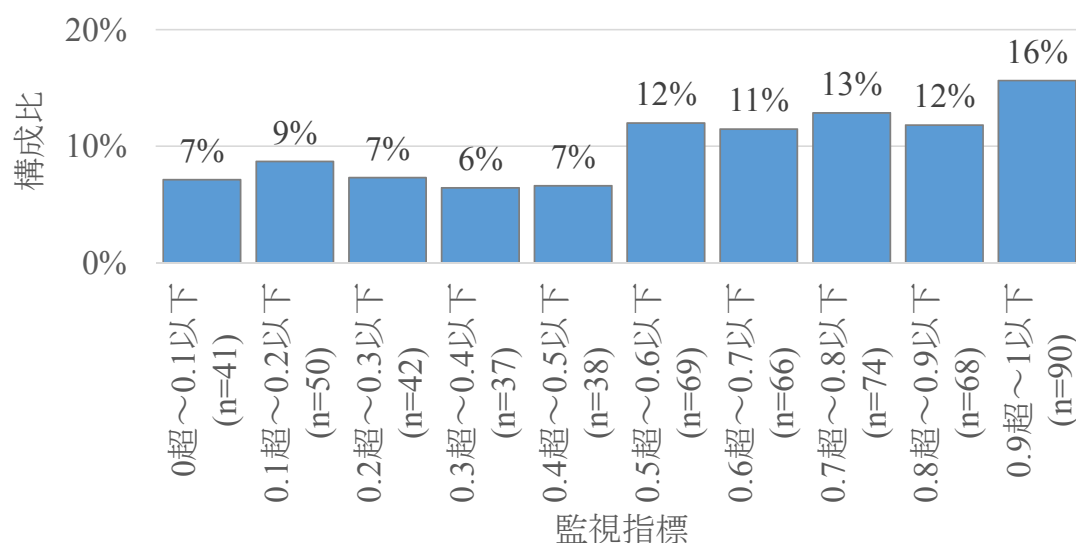


図 5-25 正規化された監視指標の構成比

また図 5-26 は、提案手法における前掲の 8 種類のモジュール(図 5-21)が、実験期間中全世帯に対して、提案手法によってそれぞれどのような割合で提示されたかを示すものである。結果として、いずれのストーリーにも含まれている節電アドバイスの提示頻度が最も高くなっている他、本手法が主眼とする系統ピークに関する情報の提示割合が高いこと、グラフの中では時刻別比較(折れ線グラフ)の提示割合が最も高いこと、等が確認できる。

集計対象:B・C群向けレポートの全モジュール
(n=2300;115世帯×5回×4モジュール)

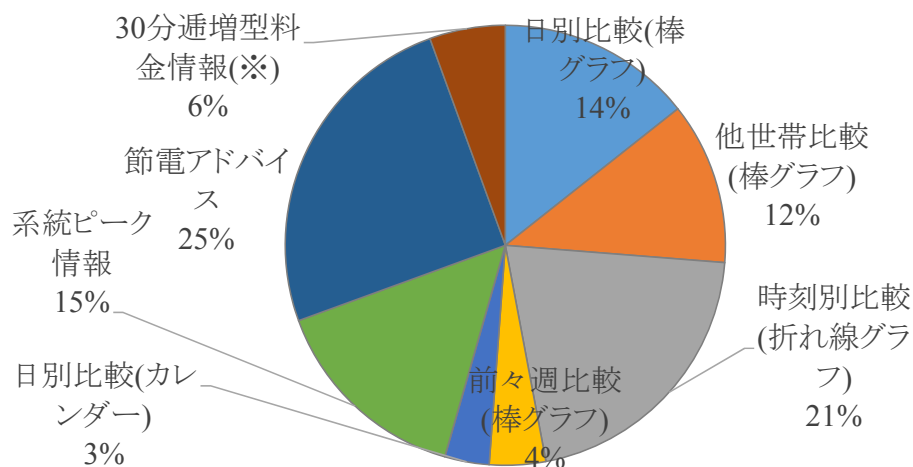


図 5-26 配布された全モジュールの構成比

5.4.4 レポートに対する評価

本項では、配布対象だった合計およそ百世帯（B, C 群）を対象に、生成したレポートがどのように受け止められたかについて分析する。

なお、本稿ではレポートへの反応に焦点をあてるが、筆者らは、レポートだけでなく料金体系の影響も含めて、実験期間中の電力消費量変化を定量的に検証している[123]。サンプル数（227 世帯）に限られることもあって統計的有意ではないものの、系統ピーク時間帯（13～16 時）の消費量データについて、見える化・レポートのいずれもない対照グループの D 群（従来型料金）と比較した場合、A 群（30 分逡増型料金＋見える化）で 6.6%、B 群（30 分逡増型料金＋見える化＋レポート）では 11.1%、C 群（従来型料金＋見える化＋レポート）では 6.0% の削減効果が観察された。また、これら削減効果は、全時間帯（0～24 時）の削減効果を上回っていた。

このように、レポートがピーク削減に貢献する可能性は消費量データ分析から示唆されるが、開発システムで生成したレポートへの反応を理解する上では、意識・行動データに着目した検証が有益と考えた。

5.4.4.1 インタビュー調査結果

夏季実証の終了後、2013 年 9 月 7, 8 日の二日間に、対面式インタビュー調査を実施した。計 8 世帯の協力を得て、日々の電気利用、料金体系や見える化システム、レポートが意識・行動に与える影響などを把握した。このうちレポート配布対象の B・C 群は 6 世帯を占め、一部夫婦参加を含むため、男性 4 名、女性 5 名である。

表 5-10 には、インタビュー調査で聴取した内容から、レポートに関するコメントを抽出した。後述のアンケート調査と同様に、以下では、レポートの認知、意識・行動変化、および参考度について整理する。

表 5-10 提案手法によって生成された省エネルギーアドバイスレポートに関するインタビュー調査の結果概要

ID	属性	認知	意識・行動変化	参考度など
1	女性 30代 B群	夫婦そろって開封するようにしていた。一緒に意識を持たないと、結果を生み出せない。	使用量が多かった・少なかった日の理由を、夫婦で振り返ったりした。省エネ世帯との比較を気にしていた。結構がんばっているのに、我が家は多いなど。クールシェアのアドバイスを見て、外出を心がけた。系統ピークが14時前後という情報は、目についていた。	月の電気代は今までも見たことがあったが、一日の電気代やその差がわかるのが良かった。
2	夫婦 30代 B群	見ていたのは妻。夫は忙しいので、特に見せていない。	自分の消費量は把握できているので、他世帯比較に興味があった。電気を使っていないほうだとは思っているが、省エネ世帯はすごくてびっくりした。	グラフ化されていて、カラーもあって、視覚的にわかりやすい。字もごちゃごちゃしていないし、これくらいであれば目を通す。一ヶ月おきだと行動を思い出せないなので、週一回という頻度はちょうどよい。
3	女性 40代 B群	見ていたのは自分。夫にも見て欲しいが、忙しいので見られない。	他世帯比較は気になった。省エネ世帯と比べると使っているほうだなど。冷蔵庫のアドバイスは助かる。温度設定があるのも知らなくて、買ってからそのままにしていた。「強」になっていたのを「標準」にしている。使用量が特に多い日は、手帳を見て何が良かったか振り返ったりした。外出すると、頑張りましたというメダルがもらったのが嬉しかった。	数字よりもグラフが見やすい。色とか綺麗で見やすい。週一回という頻度はちょうどよい。
4	男性 30代 C群	見ていたのは自分。確認したわけではないが、妻は読んでいなさそう。	レポートも見たりして、平均世帯よりも使用量が結構多いという印象が残っている。	特定の日には使用量が多くなってしまうのはたまたまかもしれないので、平均的にどうなっているかのほうが参考になる。これだけお得ですと言われた方がやるようになる。
5	夫婦 30代 C群	最初に確認するのは妻。夫は、机に置いてあるのを目にする感じ。	20時台の消費量が4倍という情報を見て、衝撃を受けた。色々書いてあるので、エアコン設定温度を上げたりショッピングセンターに涼みに行ったりするようにはなった。時刻別パターンは見やすいとは思いますが、夜中に使用をずらした方が良いのかな、と多少思うぐらい。	日々の電気代がわかるのは良い。電力消費量よりも金額のほうが感覚に直結する。レポートが毎日だと嫌だが、週一回くらいなら、先週はこうだった、来週はこうしようという感じには思う。グラフは目に行くが、淡々と見してしまう。解決策がないと考えが止まってしまう、捨ててしまう。
6	夫婦 50代 C群	最初に確認するのは妻。夫にも見せたが、詳しく見ていたわけではない。	他世帯比較には目が行く。省エネ世帯だと思っていたが、そこまでではないことに気づいた。	文字が小さい。内容が多過ぎると読まないの、コンパクトに収まるのが良い。グラフや内容は、毎回同じで良い。頻度は週一回程度でよい。

(1) レポートの認知

全てのインタビュー協力世帯で、レポートは確認されていた。配偶者ないし世帯主のいずれかが主体的に確認する世帯が中心だが(ID2,3,4,5,6)、レポートを通じて夫婦間で電気利用方法についてのコミュニケーションを深めていた世帯もある(ID1)。

(2) レポートによる意識・行動変化

他世帯比較を通じて、自らの世帯の消費傾向について認識を深めた世帯は多い。認識変化がもたらす行動変化の同定は難しいが、意識づけになった様子を伺うことはできる(ID5)。使用量が多かった日を指摘することにより、当該日の使用傾向を振り返るといった行為も促していた(ID1,3)。また、冷蔵庫の設定温度変更やクールシェアに関するアドバイスが、行動のきっかけにつながった可能性も示唆された(ID1,3)。

(3) レポートの参考度

内容を最小限に絞り、グラフや強調色を適宜活用することについては、好意的な反応が多かった(ID2,3,6)。計5回の配布実験により結論づけるべきではないが、直近のエネルギー利用を振り返りやすいといった観点から、週一回という頻度についても評価が高かった。

一方で、使用量が多かった日を指摘されることよりも、平均的な傾向や具体的なアドバイスを知りたいといった声もあった(ID4,5)。また、グラフや内容を切り替えることをそれほど望まない人もいる(ID6)。情報内容の選好は人によって異なることから、参考度を如何にして向上していくかは課題といえる。

5.4.4.2 アンケート調査結果

インタビュー調査実施後に、レポートへの反応などを検証するため、郵送式アンケート調査を実施した。調査票は全協力世帯に配布し、全数を回収した。設問によっては有効回答数が異なる点に留意されたい。

以降では、アンケート調査項目のうち、レポートに関する全7設問の結果を順に述べるとともに、レポートに関する設問ではないものの関連が深い1設問、総計8設問の傾向を分析する。内容は、レポートの認知、レポートによる意識・行動変化、レポートの参考度、および、消費量多寡の認識変化である。

(1) レポートの認知

対象世帯には全 5 回のレポートを配信したが、開封率は全体で 99%に達した(図 5-27)。約一ヶ月の夏季実証期間中の限定配布に過ぎず継続性を保証するものではないが、高い情報閲覧率は紙媒体の特徴の一つと言える。

レポートを意識することが最も多いのは、世帯主の配偶者(84%)で、次に多いのは、世帯主(61%)である(図 5-28)。他方で、世帯主の子や親が意識することは少なかった。レポートのデザインにあたっては女性の意見を参考にすることが重要と指摘できよう。

(2) レポートによる意識・行動変化

レポートをきっかけとした節電意識向上については、「そう思う」「ややそう思う」をあわせた 72%が肯定的な反応を示した(図 5-29)。

最も多かった変化は、「電気の使用量をこまめに確認する」(49%)である。認知や意識の変化という点では、三番目に多い「電気の使用方法について家族間で話題になる」(36%)も挙げられる。残る三項目は行動変化に関するものだが、「電気の使用を減らす」(43%)が多い(図 5-30)。

(3) レポートの参考度

実際に配布した 5 回分のレポートを同封し、各レポートの参考度をたずねた(図 5-31)。全レポートの回答データを集計したところ、「そう思う」「ややそう思う」を合わせた 72%が肯定的な反応を示した。第 1 回が最も高く、第 2 回も次に高め、第 3 回以降は明確な傾向がない。第 3 回以降は系統ピークに関連付けたレポートを重点配信していることもその一要因と考えられる。個人利益に直結する情報提供のほうが好まれるのは十分想定されることであり、系統ピークを促す情報提供には一層の工夫が求められると言える。

レポートの内容で参考になったと思う点を複数回答でたずねた(図 5-32)。最も参考度が高いとされたのは、「平均世帯や省エネ世帯との比較」(69%)である。代表例としては他世帯比較(棒グラフ; 前掲図 5-21)が挙げられる。二番目は、時刻別比較(折れ線グラフ; 前掲図 5-21)に相当する「電気使用量(朝から夜までの変化パターン)」(62%)である。同じ使用量でも、「電気使用量(一ヶ月・一週間・一日の合計)」(44%)よりも評価が高い。

図 5-33 はレポート印象に関する結果を示す。「そう思う」「ややそう思う」の合計比率を見ると、「わかりやすい」で 83%、「参考になる」で 83%、「字や図が読みやすい」で 84%と、総じて肯定的な反応が得られた。

「あなたの世帯で、実際に開封されたレポートをすべてお選び下さい。」
 (集計対象:B・C群の有効回答)

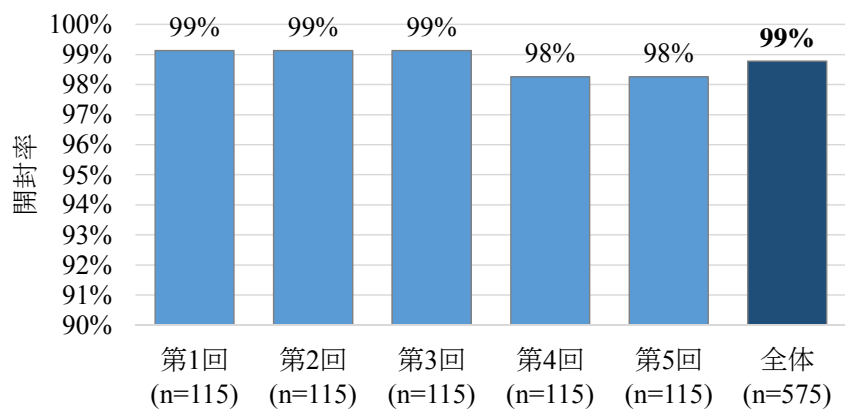


図 5 -27 レポートの認知

「レポートを意識することが多かった方をすべてお選び下さい。」
 (集計対象:B・C群の有効回答;n=114)

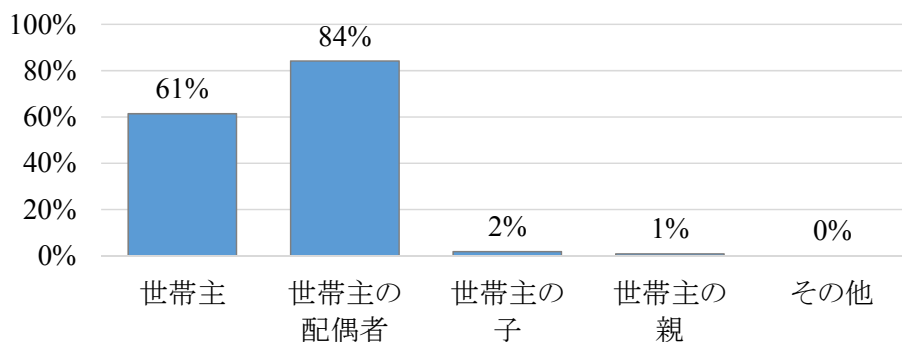


図 5 -28 レポートを受け取った人

「省エネアドバイスレポートをきっかけとして、あなたの世帯の節電意識は高まりましたか。」(集計対象:B・Cの有効回答者;n=114)

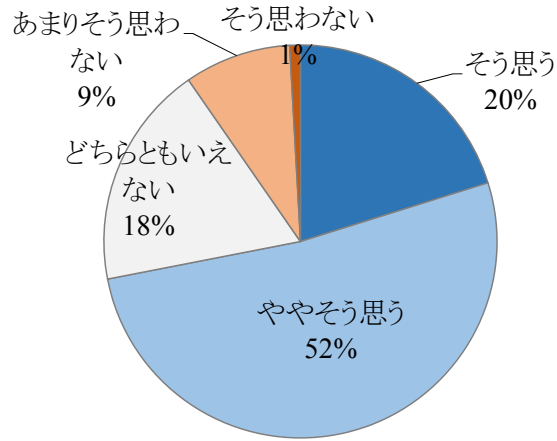


図 5-29 レポートによる節電意識の変化

「レポートをきっかけとした変化がありましたらすべてお選び下さい。」(集計対象:B・C群の有効回答;n=114)

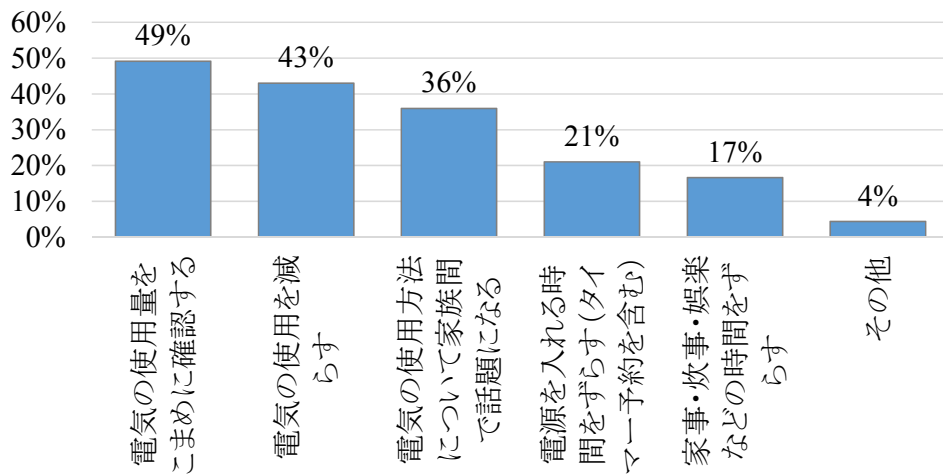


図 5-30 レポートによる行動変容

「各回のレポートは、参考になりましたか。」(集計対象:B・C群の有効回答)

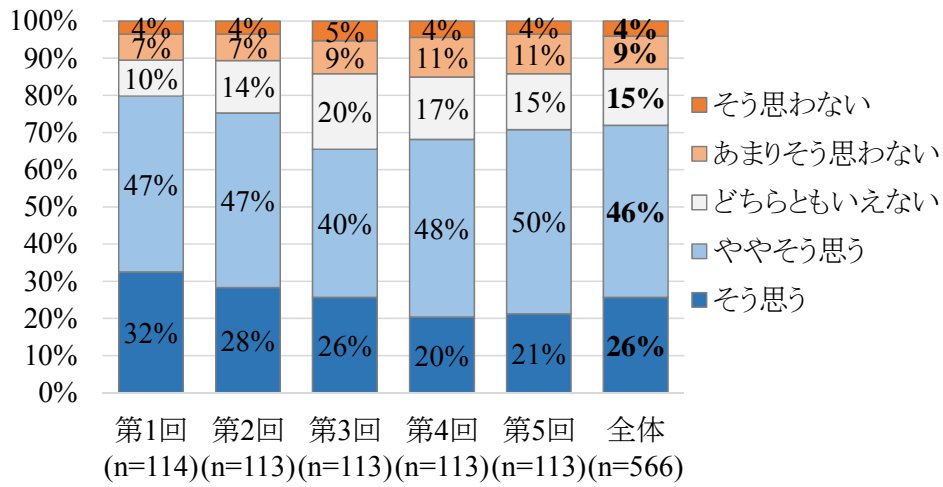


図 5-31 受け取り手によるレポートの評価

「レポートの内容で、参考になったと思う点をすべてお選び下さい。」
(集計対象:B・C群の有効回答、n=113;※の項目はB群のみ、n=58)

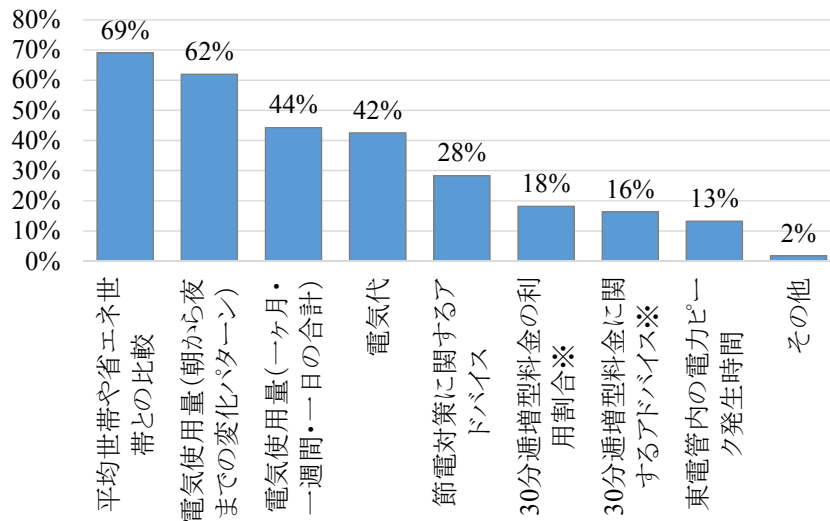


図 5-32 参考になったレポートの構成要素

「レポートの印象について、それぞれ一つずつお選び下さい。」
 (集計対象:B・C群の有効回答)

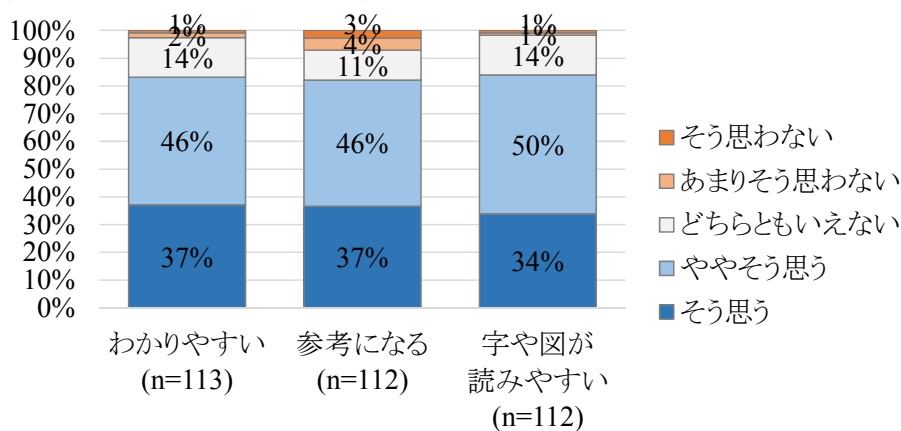


図 5-33 レポートの全体的な印象

(4) 消費量多寡の認識変化

以上はレポートに直接関係する設問の集計結果であるが、最後に、前掲図 5-32 で参考度が最も高いとされた「平均世帯や省エネ世帯との比較」に焦点をあて、間接的に関連する設問の結果を述べる。

アンケートでは、全ての協力世帯に対して夏季実証中の電力使用量の印象をたずねた。実証期間中の率直な印象を取得する意図から、ここまで述べたレポート関連の設問より前にたずねた。図 5-34 の比較によれば、レポート配布対象の B・C 群では、配布対象外の A・D 群と比べて、多消費世帯という印象でいる人の割合が高い。例えば、A・B 群の違いはレポートの有無であるが、配布しなかった A 群で「少なめ」「やや少なめ」だけで 49%に達するのに対して、B 群では「多め」「やや多め」だけで 52%に達する。同様に C・D 群を比較すると、配信しなかった D 群では「多め」という人が 10%に過ぎないが、C 群では 25%に及ぶ。また、全体傾向で指摘を付け加えるならば、A・D 群では「わからない」が多いのも特徴的である。

以上のことから、配布されたレポートを通じて、時刻によっては他世帯よりも消費量が多いことに気付いた様子をうかがうことができる。このことは、提案手法によるレポートが意識向上に寄与している可能性を示唆している。

「あなたの世帯の電力使用量は、マンションの他世帯と比べて、どのような傾向にあると思いますか。」(集計対象:A・B・C・D群の有効回答)

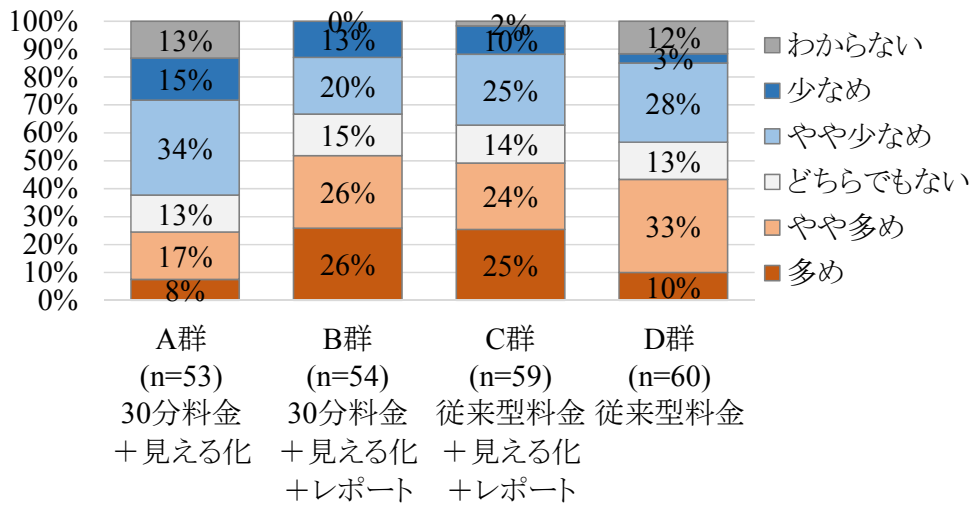


図 5 -34 エネルギー消費に関する自己認識

5.4.5 小括

前節の分析に基づき、規範的なメッセージによって省エネルギー行動を促進する介入方策の具体的実装の一例として、毎 30 分電力消費量データを用いて、世帯毎にカスタマイズされた省エネルギーアドバイスレポートを自動生成する手法を提案した。提案手法では、社会規範の利用以外にも、探索コストの低減、および、顕著性の高い表現利用を意識して、積極的な行動変容の促進を狙った情報設計を行った。また、電力消費量に関する多様な指標を監視しながら、より改善に寄与しそうなストーリーを自動選択するためのアルゴリズムを実装した。さらに、提案手法で自動生成したレポートを、夏季 5 週間にわたる計 5 回、約 100 世帯に配布し、インタビューおよびアンケート調査により、意識レベルでの反応を検証した。レポートの認知度は高く、肯定的な意見も多かった。また、他世帯比較への関心は高く、自らの世帯の消費傾向を再考するきっかけを与えている可能性が示唆された。

実証期間中の消費量データ分析[123]からも提案手法の有用性は示唆されたものの、開発システムの更なる改善に向けては、どのようなモジュールやストーリーが探索コスト低減などに寄与するかといった点について、今後明らかにしていく必要がある。

また、改めてより広い視点に立てば、5.2 節でも整理したように、従来の多くの社会制度や介入は、人間の振る舞いについて完全合理性や個人利益の最大化などを仮定するものが多かった。前節から本節までに検討したように、省エネ

ギー行動の促進などをはじめとする、必ずしも論理への訴えかけが有効とならない人間の意思決定・行動について、進化・適応の観点に立った分析を行い、これに基づいて個人の行動変容を促進する介入を設計することにより、個人の変化が相互作用によって拡大され、最終的に社会全体のパフォーマンスを向上させることも期待される。例えば本稿での検討では、平均的な電力消費量等の他者の振る舞いに関する情報には、詳細な回答者属性等は考慮されていない。一方、人間が身近な人に影響されやすいという傾向は知られているものの、どのような属性の人を身近であると感じる傾向があるかについての進化・適応的な意義については、今後検討の余地がある。こういったことが明らかになり、さらにこれを踏まえて各人により適した規範的な情報を、適時動的に提供できる仕組みが確立されれば、他者の振る舞いに追従して省エネ行動を取るという模倣的な行動が、局所的にはより多様な形で伝播し、結果として社会全体での省エネルギーもさらに推進されることが期待される。

第6章 結論

本論文は、複雑適応系としての社会システムのモデルに関し、要素の行動ルールをモデル化の基礎とし、これに進化・適応を組み込むことを提案したものである。このモデルとその考え方を、ネットワーク構造で表現されるシステム、動的組合せ最適化問題、機器の運転制御、人間行動分析、行動変容のための介入方針に適用して、それぞれに有用ないくつかの知見を得た。

それらの結果より、提案手法は社会システムのモデル化に有用であること、そして複雑で大規模な問題に対してスケーラブルであり、多様な環境と条件に対してロバストであるので、幅広い複雑適応系のモデルとして期待できることと結論できる。

このようなスケーラビリティとロバストさは、従来の進化モデルの硬直した遺伝子表現を用いることなく、生物発生の機構に倣って行動ルールの集合を進化、適応させるモデル化を行っていることに起因しているものと考えられる。

各章ごとの結果は次のとおりである。

第 2 章では、実際の生物が、遺伝子情報を基に細胞同士が相互作用を繰り返して生体を形成し、それらが環境に対して進化・適応することを踏まえ、構造物同士が行動ルールに基づいて相互作用を繰り返すことで全体構造を生成する、新たな **Artificial Embryogeny** モデルを考案した。そしてネットワーク構造で記述されるロボットの生成問題を通じて、より複雑・大規模な問題に対応可能なスケーラビリティが認められることを示した。

第 3 章では、ノードを細胞と見立て、ノード同士が仮想的なたんぱく質を受容することでリンクを張る対象を決定する、生物の細胞接着の過程を模擬した **Artificial Embryogeny** モデルを作成した。スケーラビリティが求められる最適化問題の代表例である巡回セールスマン問題に、都市の追加や移動の枠組みを加えた動的巡回セールスマン問題に対して、この新たな **Artificial Embryogeny** モデルを適用し、リアルタイムで問題構造が変化する環境に対して追従可能なロバスト性が備えられていることを示した。

第 4 章では、エネルギー貯蓄量など世帯毎のエネルギー使用状況と相互作用をしながらエネルギー供給量を制御する、家電機器の制御問題を取り上げ、行動ルールとして機器の運転ルールを進化させた。使用状況が大きく異なる複数世帯に対しても、同一の運転ルールによって、エネルギー供給不足を生じることなく低コストに需要を満たすことができることを示した。

第5章では、一見不合理な人間の意思決定や行動が、社会性の進化・適応の観点に立って捉えることにより分析可能となり、またこの分析を踏まえることで、普遍性が高く効率的な行動変容方策の設計が可能となることを示した。まず、マルチエージェントモデルの行動ルールに対して、血縁者の利益を含めた進化・適応である血縁選択の考え方と実数遺伝的アルゴリズムを適用した。個人の意思決定・行動が相互作用を繰り返し、全体として意思決定が形成される過程の検討を通じ、各人の個別的な属性に依存せず多様な対象へスケーラブルに適用可能な介入方策に資する基礎的な分析を行った。次に、全体特性の変化を狙い、公共目的のために個人の行動変容を促進する介入方策として、人間の社会性等を踏まえて直感に訴えかける行動変容方策の考え方を整理した。一方で、従来この考え方において、進化・適応の観点に基づく分析・設計が十分にはなされてこなかったことを示した。そこで、社会的な行動変容の例として省エネルギー行動を取り上げ、規範的なメッセージを用いることで、社会性の進化・適応と関りが深いパーソナリティ特性に訴えかけ、実際に省エネルギーへの意欲を向上させることが可能であることを明らかにした。さらに、分析をより具体化し、我が国における省エネルギー行動促進に適した介入方策として、規範的なメッセージを埋め込んだ省エネルギー情報を自動的に生成するツールの具体的な実装例を評価した。

参考文献

1. M. M. Waldrop: Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Simon & Schuster (1992)
2. B. MacLennan: Evolutionary Psychology, Complex Systems, and Social Theory, SOUNDINGS: AN INTERDISCIPLINARY JOURNAL, 90-3/4, 169/189 (2007)
3. 東京電力株式会社: クレーン船の接触に伴う当社特別高圧送電線損傷による停電事故について, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/06081401-j.html> (2006)
4. S. B. Carroll: Chance and necessity: the evolution of morphological complexity and diversity, NATURE, 409-6823, 1102/1109 (2001)
5. C. Adami, C. Ofria, T. C. Collier: Evolution of biological complexity, PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA, 97-9, 4463/4468 (2000)
6. 大橋弘忠, 古田一雄: 東京大学工学教程システム工学システム理論 I, 東京大学工学教程編纂委員会 (2015)
7. S. Wolfram: A New Kind of Science, Wolfram Media Inc. (2002)
8. T. Schelling: Dynamic Models of Segregation, THE JOURNAL OF MATHEMATICAL SOCIOLOGY, 1-2, 143/186 (1971)
9. 伊庭斉仁: 遺伝的アルゴリズム, 医学出版 (2002)
10. K. O. Stanley and R. Miikkulainen: A Taxonomy for Artificial Embryogeny, ARTIFICIAL LIFE, 9-2, 93/130 (2003)
11. P. J. Bentley and S. Kumar: Three ways to grow designs: A comparison of embryogenies for an evolutionary design problem, PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 1999), 35/43 (1999)
12. P. Eggenberger: Evolving morphogenesis of simulated 3D organisms based on differential gene expression, PROCEEDINGS OF THE FOURTH EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE, 205/213 (1997)
13. J. F. Miller: Evolving a self-repairing, self-regulating, French flag organism, PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 2004), 129/139 (2004)

14. J. F. Miller and P. Thompson: Beyond the complexity ceiling: Evolution, Emergence and Regeneration, GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 2004), Workshop on Regeneration and Learning in Developmental Systems (2004)
15. R. Kicinger: Generative design in civil engineering using cellular automata, NEW KIND OF SCIENCE 2006 WOLFRAM SCIENCE CONFERENCE (2006)
16. S. Lucas: Evolving spring-mass models: test-bed for graph encoding schemes, PROCEEDINGS OF IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC 2002), 1952/1957 (2002)
17. T. Kowaliw, P. Grogono, and N. Kharma: The evolution of structural design through artificial embryogeny, PROCEEDINGS OF IEEE FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL LIFE, 425/432 (2007)
18. T. Kowaliw, P. Grogono, and N. Kharma: Environment as a spatial constraint on the growth of structural form, PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 2007), 1037/1044 (2007)
19. S. Kumar and P. J. Bentley: The ABCs of evolutionary design: Investigating the evolvability of embryogenies for morphogenesis, PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 1999), 164/170 (1999)
20. K. Igawa and H. Ohashi: A Novel Mechanism of Artificial Embryogeny to Increase Evolvability, PROCEEDINGS OF 1ST INTERNATIONAL WORKSHOP ON MORPHOGENETIC ENGINEERING (2009)
21. Mins project: <http://sourceforge.net/projects/mins>
22. Soda Creative Ltd: <http://sodaplay.com/>
23. K. O. Stanley and R. Miikkulainen: Evolving Neural Networks through Augmenting Topologies, EVOLUTIONARY COMPUTATION, 10-2, 99/127 (2002).
24. L. Kang, A. Zhou, B. McKay, L. Yan, and Z. Kang: Benchmarking algorithms for dynamic travelling salesman problems, IN PROCEEDINGS OF THE 2004 CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC 2004), IEEE, 1286/1292 (2004)

25. A. Zhou, L. Kang, and Z. Yan: Solving dynamic TSP with evolutionary approach in real time, IN PROCEEDINGS OF THE 2003 CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC 2003), IEEE, 951/957 (2003)
26. H. Komatsu, Y. Hashimoto, Y. Chen, and H. Ohashi: An Evolvability-enhanced Artificial Embryogeny for generating Network Structures, IN PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 2008), ACM, 835/842 (2008)
27. S. Kumar and P. J. Bentley: Mechanisms of oriented cell division in computational development, IN PROCEEDINGS OF THE FIRST AUSTRALIAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE (2003)
28. D. Federici: Evolving a neurocontroller through a process of embryogeny, IN PROCEEDINGS OF THE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SIMULATION OF ADAPTIVE BEHAVIOR: FROM ANIMALS TO ANIMATS, MIT Press, 8, 373/382 (2004)
29. T. Steiner, Y. Jin, and B. Sendhoff: A cellular model for the evolutionary development of lightweight material with an inner structure, IN PROCEEDINGS OF THE GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE (GECCO 2008), ACM, 851/858 (2008)
30. D. S. Johnson and L. A. Mcgeoch: The Traveling Salesman Problem: A Case Study in Local Optimization, IN LOCAL SEARCH IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION, John Wiley and Sons, 215/310 (1997)
31. 斎川路之: 家庭用自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯器"エコキュート"の技術と将来展望, 電気学会誌, 128-10, 688/691 (2008)
32. 土屋静男: ヒートポンプ給湯機における貯湯制御, オペレーションズ・リサーチ, 54-6, 319/324 (2009)
33. 所健一, 橋本克巳, 篠原靖志: ヒートポンプ式給湯機最適構成探索ツールの開発, 電力中央研究所研究報告 R06018 (2007)
34. M. Mitchell: An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press (1996)
35. 今村栄一, 池谷知彦: オール電化住宅における電力・給湯需要構造の調査分析 - 短時間間隔計測による最大負荷特性の把握 -, 電力中央研究所研究報告 Y08055 (2009)
36. 伊庭斉仁: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社 (1994)

37. K. Bickerstaff: Risk perception research: Socio-cultural perspectives on the public experience of air pollution, ENVIRONMENT INTERNATIONAL, 30, 827/840 (2004)
38. V. T. Covello, D. B. McCallum, and M. T. Pavlova. Effective risk communication, Springer (doi:10.1007/978-1-4613-1569-8) (2004)
39. P. Slovic: Perception of risk, SCIENCE, 236, 280/285 (1987)
40. A. Kishimoto, T. Oka, K. Yoshida, and J. Nakanishi: Cost effectiveness of reducing dioxin emissions from municipal solid waste incinerators in Japan, ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 35-14, 2861/2866 (2001)
41. A. Kishimoto, T. Oka, and J. Nakanishi: The cost-effectiveness of life-saving interventions in Japan: Do chemical regulations cost too much? CHEMOSPHERE, 53-4, 291/299 (2003)
42. J. S. Levy: Prospect theory, rational choice, and international relations, INTERNATIONAL STUDIES QUATERLY, 41-1, 87/112 (1997)
43. J. Mercer: Prospect theory and political science, ANNUAL REVIEW OF POLITICAL SCIENCE, 8, 1/21 (2005)
44. G. A. Quattrone, and A. Tversky: Contrasting rational and psychological analyses of political choice, AMERICAN POLITICAL SCIENCE REVIEW, 82, 719/736 (1988)
45. M. G. Haselton, G. A. Bryant, A. Wilke, D. A. Frederick, A. Galperin, W. Frankenhuys, and T. Moore: Adaptive rationality: An evolutionary perspective on cognitive bias, SOCIAL COGNITION, 27, 733/763 (2009)
46. A. Hintze, R. S. Olson, C. Adami, and R. Hertwig: Risk aversion as an evolutionary adaptation, ARXIV, 1310.6338 (2013)
47. D. D. P. Johnson, and J. H. Fowler: Evolution of overconfidence, NATURE, 477, 317/320 (2011)
48. D. J. Kruger, X. T. Wang, and A. Wilke: Towards the development of an evolutionarily valid domain-specific risk-taking scale, EVOLUTIONARY PSYCHOLOGY, 5-3, 555/568 (2007)
49. R. McDermott, J. H. Fowler, and O. Smirnov: On the evolutionary origin of prospect theory preferences, THE JOURNAL OF POLITICS, 70, 335/350 (2008)

50. M. A. Nowak: Five rules for the evolution of cooperation, *SCIENCE*, 314-5805, 1560/1563 (2006)
51. R. Axelrod: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984)
52. A. Byde: Applying Evolutionary Game Theory to Auction Mechanism Design, *PROCEEDINGS IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON E-COMMERCE, CEC 2003*, 347/354 (2003)
53. P. Roos and D. Nau: Risk preference and sequential choice in evolutionary games, *ADVANCES ON COMPLEX SYSTEMS*, 13-4, 559/578 (2010)
54. X. T. Wang: Risk communication and risky choice in context: Ambiguity and Ambivalence Hypothesis, *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, 1128, 78/89 (2008)
55. X. T. Wang, D. J. Kruger, and A. Wilke: Life history variables and risk-taking propensity, *EVOLUTION AND HUMAN BEHAVIOR*, 30-2, 77/84 (2009)
56. W. T. Tucker: Strategies for risk communication: Evolution, evidence, experience, *ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES*, 1128, ix/xii (2008)
57. S. Mascaro, K. B. Korb, and A. E. Nicholson: Suicide as an evolutionarily stable strategy, *ADVANCES IN ARTIFICIAL LIFE*, 2159, 120/132 (2001)
58. W. D. Hamilton: The genetical evolution of social behavior, *JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY*, 7, 1/16 (1964)
59. リチャード・ドーキンス: 延長された表現型—自然淘汰の単位としての遺伝子, 紀伊国屋書店 (1987)
60. E. Voland: Evolutionary ecology of human reproduction, *ANNUAL REVIEW OF ANTHROPOLOGY*, 27, 347/374 (1998)
61. H. Kaplan, K. Hill, J. Lancaster, and A. M. Hurtado: Theory of human life history evolution: diet, intelligence, and longevity, *EVOLUTIONARY ANTHROPOLOGY: ISSUES, NEWS, AND REVIEWS*, 9, 156/185 (2000)
62. E. Burnstein, C. Crandall, and S. Kitayama: Some neo-Darwinian decision rules for altruism: weighing cues for inclusive fitness as a function of the biological importance of the decision, *JOURNAL OF PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY*, 67, 773/789 (1994)

63. M. Gurven: To give and to give not: The behavioral ecology of human food transfers, *BEHAVIORAL AND BRAIN SCIENCES*, 27, 543/583 (2004)
64. L. J. Eshleman, and J. D. Schaffer: Real-coded genetic algorithms and interval-schemata, *FOUNDATIONS OF GENETIC ALGORITHMS*, 2, 187/202 (1993)
65. C. R. Harris, M. Jenkins, and D. Glaser: Gender differences in risk assessment: Why do women take fewer risks than men? *JUDGEMENT AND DECISION MAKING*, 1, 48/63 (2006)
66. D. C. Geary: Evolution and proximate expression of human paternal investment, *PSYCHOLOGICAL BULLETIN*, 126, 55/77 (2000)
67. M. S. Alvard and D. A. Nolin: Rousseau's Whale Hunt?: Coordination among Big-Game Hunters, *CURRENT ANTHROPOLOGY*, 43-4, 533/559 (2002)
68. R. Dawkins: *The Selfish Gene*, Second edition, Oxford University Press (1989)
69. ダニエル・カーネマン: *ファスト&スロー: あなたの意思はどのように決まるか?* (上)&(下), 早川書房, (2012)
70. P. Slovic, M. L. Finucane, E. Peters, and D. G. MacGregor: Risk As Analysis and Risk As Feelings; Some Thoughts About Affect, Reason, Risk, and Rationality, *SOCIETY FOR RISK ANALYSIS ANNUAL MEETING 2002* (2002)
71. ハーバート・サイモン: *経営行動: 経営組織における意思決定過程の研究*, ダイヤモンド社 (2009)
72. 多田洋介: *行動経済学入門*. 日本経済新聞社 (2003)
73. リチャード・セイラー, キャス・サンステイーン: *実践 行動経済学: 健康, 富, 幸福への聡明な選択*, 日経 BP 社 (2009)
74. J. M. Nolan, P. W. Schultz, R. B. Cialdini, N. J. Goldstein, and V. Griskevicius: Normative Social Influence is Underdetected, *PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY BULLETIN*, 913/923 (2008)
75. N. Novemsky and D. Kahneman: The Boundaries of Loss Aversion, *JOURNAL OF MARKETING RESEARCH*, 42-2, 119/128 (2005)
76. S. S. Iyengar and M. R. Lepper: When Choice is Demotivating: Can One Desire too Much of a Good Thing?, *JOURNAL OF PERSONALITY AND SOCIAL PSYCHOLOGY*, 79-6, 995/1006 (2000)

77. E. J. Johnson and D. Goldstein: Do Defaults Save Lives?, *SCIENCE*, 302, 1338/1339 (2003)
78. R. H. Thaler and S. Benartzi: Save More Tomorrow: Using Behavioral Economics to Increase Employee Saving, *JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY*, 112-1-2, 164/87 (2004)
79. P. Rozin, S. Scott, M. Dingley, J. K. Urbanek, H. Jiang, M. Kaltenbach: Nudge to Nobesity I: Minor Changes in Accessibility Decrease Food Intake, *JUDGMENT AND DECISION MAKING*, 6-4, 323/332 (2011)
80. G. Lerner: New York Health Board Approves Ban on Large Sodas. CNN. 2012-09-14. <http://edition.cnn.com/2012/09/13/health/new-york-soda-ban/index.html>
81. Office of Management and Budget, Office of Information and Regulatory Affairs: 2010 Report to Congress on the Benefits and Costs of Federal Regulations and Unfunded Mandates on State, Local, and Tribal Entities (2010)
82. Cabinet Office Behavioural Insights Team: Behaviour Change and Energy Use (2011)
83. D. Kahneman: Maps of Bounded Rationality: A Perspective on Intuitive Judgment, *NOBEL PRIZE LECTURE* (2002)
84. P. Slovic: Affect, Reason, Risk and Rationality, *EUROPEAN WORKING GROUP "MULTIPLE CRITERIA DECISION AIDING"* (2006)
85. 西尾健一郎, 大藤建太: 家庭における 2011 年夏の節電の実態, 電力中央研究所研究報告 Y11014 (2012)
86. I. Vassileva, M. Odlare, F. Wallin, and E. Dahlquist: The impact of consumers' feedback preferences on domestic electricity consumption, *APPLIED ENERGY*, 93, 575/582, (2012)
87. K. Ellegård and J. Palm: Visualizing energy consumption activities as a tool for making everyday life more sustainable, *APPLIED ENERGY*, 88, 1920/1926 (2011)
88. A. Bandura: Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change, *PSYCHOLOGICAL REVIEW*, 84, 191/215 (1977)
89. C. J. Fox and B. S. Azaroff: The effectiveness of two different sources of feedback on staff teaching of fire evacuation skills, *JOURNAL OF ORGANIZATIONAL BEHAVIOR MANAGEMENT*, 10, 19/36, (1990)

90. C. S. Brown and B. S. Azaroff: An assessment of the relationship between customer satisfaction and service friendliness. *JOURNAL OF ORGANIZATIONAL BEHAVIOR MANAGEMENT*, 14, 55/76, (1994)
91. A. M. Alvero, B. R. Bucklin, and J. Austin: An objective review of the effectiveness and essential characteristics of performance feedback in organizational settings (1985-1998). *JOURNAL OF ORGANIZATIONAL BEHAVIOR MANAGEMENT*, 21-1, 3/29 (2001)
92. R. D. Pritchard, S. D. Jones, P. L. Roth, K. K. Stuebing, S. E. Ekeberg: Effects of group feedback, goal setting, and incentives on organizational productivity, *JOURNAL OF APPLIED PSYCHOLOGY*, 73, 337/358 (1988)
93. S. M. Goltz, M. Citera, M. Jensen, and J. Favero: Individual feedback: Does it enhance effects of group feedback?, *JOURNAL OF ORGANIZATIONAL BEHAVIOR MANAGEMENT*, 10, 77/92 (1989)
94. T. Krishnamurti, A. L. Davis, G. W. Parodi, J. Wang, and C. Canfield: Creating an in-home display: Experimental evidence and guidelines for design, *APPLIED ENERGY*, 108, 448/458 (2013)
95. A. Nilsson, C. J. Bergstad, L. Thuvander, D. Andersson, K. Andersson, and P. Meiling: Effects of continuous feedback on households' electricity consumption: Potentials and barriers, *APPLIED ENERGY*, 122, 17/23. (2014)
96. K. E. Martinez and J. A. Laitner: People-centered initiatives for increasing energy savings, *AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY EFFICIENT ECONOMY* (2010)
97. P. J. Ferraro and M. K. Price: Using non-pecuniary strategies to influence behavior: evidence from a large-scale field experiment, *NATIONAL BUREAU OF ECONOMIC RESEARCH*, Working Paper No. 17189 (2011)
98. N. J. Goldstein, R. B. Cialdini, and V. Griskevicius: A room with a viewpoint: Using social norms to motivate environmental conservation in hotels, *JOURNAL OF CONSUMER RESEARCH*, 35, 472/482 (2008)
99. V. Griskevicius, R. B. Cialdini, and N. J. Goldstein: Social Norms: An underestimated and underemployed lever for managing climate

- change, INTERNATIONAL JOURNAL OF SUSTAINABILITY COMMUNICATION, 3, 5/13 (2008)
100. A. S. Gerber and T. Rogers: Descriptive social norms and motivation to vote: Everybody's voting and so should you, THE JOURNAL OF POLITICS, 71, 178/191 (2009)
 101. R. M. Bond, C. J. Fariss, J. J. Jones, A. D. I. Kramer, C. Marlow, J. E. Settle, and J. H. Fowler: A 61-million-person experiment in social influence and political mobilization, NATURE, 489, 295/298 (2012)
 102. M. Bertrand, D. Karlan, S. Mullainathan, E. Shafir, and J. Zinman: What's advertising content worth? Evidence from a consumer credit marketing field experiment, THE QUARTERLY JOURNAL OF ECONOMICS 2010, 125-1, 263/306 (2010)
 103. H. Allcott: Social norms and energy conservation. JOURNAL OF PUBLIC ECONOMICS, 95, 1082/1095 (2011)
 104. B. Ceniceros: Evaluation efforts for SMUD's home electricity reports program [webinar], <http://www.emvwebinar.org/Meeting%20Materials/2011/2011-06-30/CenicerosEPAEvalBehaviorPgmsr6-30-11.pdf> (2011)
 105. J. Palm: The public-private divide in household behavior: How far into the home can energy guidance reach?, ENERGY POLICY, 38-6, 2858/2864 (2010)
 106. L. R. Goldberg LR. The structure of phenotypic personality traits, AMERICAN PSYCHOLOGICS, 48, 26/34 (1993)
 107. ダニエル・ネトル, パーソナリティを科学する—特性 5 因子であなたがわかる, 白揚社 (2009)
 108. P. W. Schultz, J. M. Nolan, R. B. Cialdini, N. J. Goldstein, and V. Griskevicius: The constructive, destructive, and reconstructive power of social norms, PSYCHOLOGICAL SCIENCE, 18, 429/434 (2007)
 109. S. D. Gosling, P. J. Rentfrow, and W. B. Swann: A very brief measure of the big-five personality domains. JOURNAL OF RESEARCH IN PERSONALITY, 37, 504/528 (2003)
 110. H. Allcott and T. Rogers: The short-run and long-run effects of behavioral interventions: Experimental evidence from energy conservation, AMERICAN ECONOMIC REVIEW, 104-10, 3003/3037 (2014)

111. J. B. Robinson: The proof of the pudding: Making energy efficiency work, ENERGY POLICY, 19, 631/645 (1991)
112. P. C. Stern ed., Committee on Behavioral and Social Aspects of Energy Consumption and Production, Commission on Behavioral and Social Sciences and Education, National Research Council: Energy efficiency in buildings: Behavioral issues, The National Academies Press (1985)
113. W. Kempton and L. Montgomery: Folk quantification of energy, ENERGY, 7, 817/827 (1982)
114. 鬼頭大介: 分散電源(蓄電池)とスマート化の動向 電気使用状況『見える化』の実証実験について, 生産と電気, 64-9, 8/13 (2012)
115. 関西電力 web サイト: 電気ご使用量のお知らせ照会サービス『はぴ e みる電』, <http://www.kepco.co.jp/service/miruden/> (2013)
116. 東京電力 web サイト: でんき家計簿 (料金・使用量の確認, ライフスタイル診断) , <http://www.tepco.co.jp/kakeibo/index-j.html> (2013)
117. 小松秀徳, 西尾健一郎: 省エネルギー・節電促進策のための情報提供における『ナッジ』, 電力中央研究所調査報告 Y12035 (2013)
118. 八木田克英: 消費者心理からみた見える化の可能性ーパーソナルインタビューからの示唆, 日本エネルギー学会誌, 89-7, 639-648 (2010)
119. G. E. Smith, M. P. Venkatraman, and R. R. Dholakia: Diagnosing the Search Cost: Waiting Time and the Moderating Impact of Prior Category Knowledge, JOURNAL OF ECONOMIC PSYCHOLOGY, 20, 285/314 (1999)
120. Accenture: Actionable Insights for the New Energy Consumer, ACCENTURE END-CONSUMER (2012)
121. Ipsos MORI: Empowering Households: Research on Presenting Energy Consumption Benchmarks on Energy Bills, DEPARTMENT OF ENERGY & CLIMATE CHANGE (2011)
122. D. Kahneman and A. Tversky: Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, ECONOMETRICA, 47-2, 263/291 (1979)
123. 向井登志広, 西尾健一郎, 小松秀徳, 内田鉄平, 石田恭子: 高圧一括受電マンションにおける電力ピーク抑制策の実証研究: 2013年夏の効果試算, 第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2014)

謝辞

本論文の執筆にあたって、学部時代から、大学院時代、就職後まで、常に温かくご指導くださいました、指導教員の大橋弘忠先生には、一言では語りつくせないほど大変なお世話になりました。陳昱先生、橋本康弘先生には、本研究の本質に関するご指摘や、各種モデル実装時のコツなど、研究遂行に不可欠な示唆を幾度となく頂戴しました。ここに心から感謝を申し上げます。

本論文の審査過程において、大変有益なご指摘をくださいました古田一雄先生、白山晋先生、藤井秀樹先生、陳昱先生に感謝いたします。

また、研究過程において有益なご助言を下さった、一般財団法人電力中央研究所の今中健雄様、篠原靖志様、田中伸幸様、所健一様、西尾健一郎様、向井登志広様に感謝いたします。

日々家事や子育てその他で疲弊しているにも関わらず、常に精神的・物理的両面から私を支えてくれた妻の瑠美子、そして一緒に遊んでほしい盛りにも関わらず、家にいる時間を使って執筆を進めることに協力してくれた二人の子供たちに、深く感謝します。家族三人の理解と協力なしには、本論文執筆はありえませんでした。また、日々の生活を要所要所で支えてくださった、私自身の両親と妻の両親に感謝いたします。

最後に、5.4節で示した研究は、野村不動産株式会社および株式会社ファミリーネット・ジャパンが実施した「スマートマンション・エネルギーシステムに関する省エネ調査」の一環で実施しました。対象の高圧一括受電マンションに居住する協力世帯の皆様には、アンケートやインタビューへのご回答など、貴重なご協力を賜りました。ここに深く感謝いたします。