

# 群集の衝突回避行動モデルを用いた心の理論の進化シミュレーション

高野 雅典, 有田 隆也

名古屋大学 大学院情報科学研究科

## Collision Avoidance Behavior and the Recursion in the Theory of Mind

Masanori Takano and Takaya Arita

Graduate School of Information Science, Nagoya University

**Abstract:** An individual having a Theory of Mind (ToM) can read the minds of others. If we assume further that the individual considers each of them also to have a ToM, then there should be recursive structure here. We believe that the emergence and evolution of this structure are deeply linked to the evolution of intelligence. We constructed a computational model of collision avoidance behavior and conducted evolutionary simulations in order to investigate the dynamics inherent in the mechanism of recursion. We have found several interesting properties of recursion including the one that there is a significant difference in fitness between odd levels and even levels of recursion because of the difference between level 0 and 1 (without and with ToM).

### 1 はじめに

我々は他者と相互作用し合う環境の中で他者の行動を予測し自分の行動を決めている。さらに、自分の行動が他者に与える影響がどのようなものであるかということも考えることができる。例えば、人混みの中を移動するとき、意図する方向に一直線に向かうのではなく、向かってくる他者を避けることや他者が自分を避けることを考えて行動をしている。これらは他者の心の状態を推測することで可能になったと言える。このような他者の心の状態を推測することのできる個体は「心の理論」を持っていると言われる。

心の理論とは、ある個体が自己または他者の心の状態、目的、意図、知識、信念、思考、疑念、推測などを推測する心の機能のことである [7]。そして、心の理論により他者が心の理論を持つと推測するとき、他者も他個体に対して、心の推測を行っていると言え推測できる。このとき、心の推測の入れ子構造が発生し、他者がどのような状態なのか、自分が他者にどのような影響を与えるのか、を推測することができる。

他者の行動に合わせて自分の行動を変えることや、他者を操作することは霊長類を含む多くの動物で見られる [5]。また、サル類や類人猿は、ヒトに比べ部分的ではあるが心の理論を持つという主張もある [8] が、定かな証拠は今のところない [9]。ただし、心の理論が動物における他者の行動予測を起源とし、サル類、類人猿を経てヒトのもつような心の理論へと進化してきたというシナリオを検討することは有益であろう。ヒトの心の進化的基盤を検討する進化心理学では、“人間の心理メカニズムには文化を越えた普遍性があり、それは自然淘汰の産物である [4]” とす

る。このような立場からは、心の理論が進化によって得られたならば、それは適応的な形質であったはずである。

集団で生活する生物は、複雑な社会的環境で生ずる他者との駆け引きの中で、他者よりも優位に立つことが重要であった。そのような社会的環境で発揮される知能のことをマキャベリ的知能という [1], [2]。とすると、心を読む機能は、動物において他の個体が次に何をするか予測していたことにその源があり、ヒトに至って、他の個体が次に何をするかを予測する一番よい方法はその個体の心の状態を読むこととなった [9] というのは自然なシナリオであろう。つまり、社会的相互作用の中で他者の行動を予測する能力、さらに他者の予測を予測する能力などが適応進化によって創発してきたというものである。

心の理論による他者の心の推測では、他者の心の推測の推測といった再帰表現が可能である。Dennett は他者の行動を解釈するための方法論として「志向姿勢」に基づく他者の内的状態の再帰表現を提案している [3]。

本研究は、心の理論における再帰のレベルの進化に焦点を絞った計算論的モデルを構築し、シミュレーション実験により、そのメカニズムに内在するダイナミクスに関する知見を得るのが目的である。本論文では、再帰の深さに関する基本的な表現方法について述べた後、冒頭に挙げた人混みの中での移動という、物理的に着地した群集の衝突回避のモデルにおいて進化に関するシミュレーション実験について論ずる。社会的な相互作用を象徴的に表す最小モデルを狙ったものであり、群集の群れ行動をリアルに再現することは目的ではない。最後に、行った実験の意味することや示唆するところに関して議論する。

## 2 モデル

### 2.1 基本設計

Dennett の「志向姿勢」とは、振る舞いを予測しようとするシステムを信念や欲求などの心的状態を持つ合理的な行為者として扱う、他者の行動を解釈するための方法論である [3]。信念や欲求を持つ個体を「志向システム」と言う。他者に対し志向姿勢を適用し、志向システムとして扱うことで他者の欲求や意図が推測できる。志向システムは再帰的な表現が可能である。レベル 0 のシステムは信念や欲求を持たず、単に外界の物理的世界について理解しているのみである。レベル 1 は信念や欲求を持ち、レベル 0 に対し信念や欲求を持つことができるが、信念や欲求に関する信念や欲求を持たない。レベル 2 は他者および自分自身の信念や欲求についての信念や欲求を持つ。つまり、レベル 1 に対し信念や欲求を持つことができる。このように、再帰的表現により、理論的には無限のレベルを考えることができる。

本研究では、志向姿勢に準じて、内部状態だけでなく行動も含むように再帰的表現を拡張し、他者の行動予測に基づく自分の行動の決定を表現する。なお、Dennett による表現では、“know”, “believe”, “expect” 等の「心理主義的」用語の使用が可能であるが、以下のモデルでは “know” だけに限定している。さらに、簡単のため全ての個体は同じ知識を持つ場合に同様の行動を取ることを仮定している。

X, Y, Z の 3 者が存在し (X はレベル  $n$  志向システム), 得た情報に応じてそれぞれ行動 A, B, C を取る例を次に示す。ここで, \* は外部から得た情報を表す。他者の行動予測は, 予測する他者の行動予測を内部で呼び出すことで再帰的に無限の深さまで記述可能である。この再帰表現に基づき実体モデルを実現した。

#### a) レベル 0

```
X knows * and takes action A based on it.
```

#### b) レベル 1

```
X knows
{
  Y knows * and takes action B based on it.
  Z knows * and takes action C based on it.
  *
} and takes action A based on it.
```

#### c) レベル 2

```
X knows
{
  Y knows
  {
```

```
    X knows * and takes action A based on it.
    Z knows * and takes action C based on it.
  } and takes action B based on it.
  *
} and takes action A based on it.
```

### 2.2 衝突回避行動モデル

集団の中で、他者の移動を再帰的な心の処理により推測し、その上で自分の移動を決定する行動を対象とした、物理的に状況付けられたモデルである。環境内の複数のエージェントは、個々に設定されたスタート地点からゴール地点まで移動する。エージェント同士が衝突すると、移動速度が低下するため、他者の行動予測に基づいた効率よい他者との衝突回避が必要になる。

#### 2.2.1 フィールド

エージェントのスタート地点とゴール地点は指定したフィールド内にランダムに割り当てられる。ただし、エージェント同士の相互作用によりフィールドの外へ移動することもありうる。今回の実験ではフィールドの大きさを  $256.0 \times 256.0$  とし、エージェントの数は 24 体、エージェントは円筒形とし直径を 8.0 とする。

#### 2.2.2 エージェントの設定

1) エージェントの行動 まず、エージェントが 1 ステップの間に行う大まかな処理内容について述べる。エージェントの以下の 3 つの行動を 1 歩とする。

1. 他者の行動を予測。
2. 予測に基づき移動する方向、速度を計算。
3. 移動。

2) 視界 エージェントは視界として扇形状の  $R_1, R_2$  の 2 つの範囲を持つ (Fig. 1)。  $R_1$  は相手の行動予測をする時に、  $R_2$  は進行方向を決める時に使用する。  $R_1$  は半径  $r_1$  と角度  $a_1$ ,  $R_2$  は半径  $r_2$  と角度  $a_2$  によって決まる。今回の実験では  $a_1 = 240.0^\circ$ ;  $a_2 = 170.0^\circ$  に固定した。  $r_1, r_2$  は  $r = r_1 = 2r_2$  を満たすとし、  $r$  によって  $R_1, R_2$  の大きさを設定する。環境内に存在する全てのエージェントの  $R_1, R_2$  の大きさは共通とする。

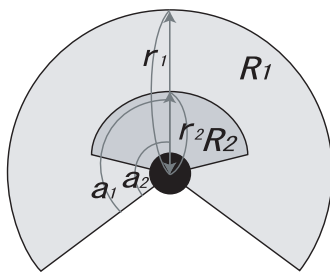


Fig. 1: エージェントの視界

3) 予測 エージェントは他者の内部モデル化によって他者の行動予測を行う。  $R_1$  内に存在する他者を内部モデル化し、その内部モデルを行動させることで他者の行動予測とする。このとき、予測するエージェントの予測のレベルを  $n$  とすると、内部モデルはレベル  $n-1$  の予測をして行動する。そして、レベル  $n-1$  の内部モデルも同じく予測をするため、同様にして  $n=0$  になるまで同様の処理を再帰的に内部モデルに対して適用する。

また、本モデルではレベル0の行動は相手の行動予測をしない、つまり相手を避けずゴールへ直進するとする。今回の実験では全ての予測において、他者の2歩分先を読むとする。

4) 移動 エージェントは Fig. 2 に示すように他者の行動予測し、その予測に基づき行動を決める。行動は以下の3つのベクトルを加算することで、決定される。

- ゴールへ向かうベクトル: エージェントの現在地からゴール方向へのベクトル。大きさは常にエージェントの最大移動速度の値を設定する。
- 現在の移動ベクトル: 前回移動した時に使用したベクトル。初期状態では0とする。
- 衝突回避ベクトル: 他エージェントから離れるベクトル。離れる対象は現在の他者ではなく、自分が予測した他者の位置とする。このベクトルの大きさは  $R_2$  内の相手との距離に応じて与える(式1)。このベクトルの大きさの最大値は  $c$  によって与えられ、今回の実験では  $c = 5.0$  を使用した。

$$|\vec{a}| = \left( -\frac{cd}{r_2} + c \right) \times v \quad (1)$$

ここで、 $\vec{a}$  は相手を避けるベクトル、 $d$  は相手との距離、 $v$  は最大移動速度、 $c$  は避けるベクトルの最大値とする。また、 $d$  は  $R_2$  の半径  $r_2$  に対し、 $d \leq r_2$  を満たすとする。

エージェントの通常の最高速度は4.0、衝突を起こしたときは0.01とした。この値で3つのベクトルの加算によって得られたベクトルにスカラー倍し、進行方向と速度を決める。ただし、このベクトルの大きさが最高速度を超えた場合は、大きさを最高速度値に設定し直す。

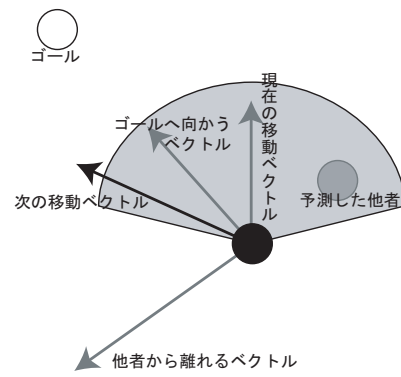


Fig. 2: 移動ベクトルの決定方法

5) 適応度 ゴールにたどり着いた時に、エージェントは(式2)によって適応度を得る。エージェントは早くゴールに到達すれば、高い適応度を得ることができる。また、2000ステップ経過してもゴールにつかなかった場合、与える適応度は0とする。

$$f = \begin{cases} \frac{l}{t} & (t < 2000) \\ 0 & (t \geq 2000) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $f$  は適応度とし、 $t$  をゴールにたどり着くまでの時間、 $l$  をスタート・ゴール間の距離とする。

## 3 シミュレーション実験

### 3.1 基本的な発見

3.2 と 3.3 に示す基礎実験と進化実験の結果、予測レベルと回避行動の間に興味深い関係があることが示された。各実験の結果の記述はこの関係が前提となる場合が多いので、まずここでそれに関して論ずることにする。

基本的に予測レベルと回避行動の強さの間に Fig. 3 に示すような関係が存在することが示された。その関係とは奇数レベルの予測をする個体は回避行動が強く、偶数レベルの予測をする個体は回避行動が弱い傾向があり、さらにその傾向はレベルが低い時のほうがより強く出るというものである。それらの傾向を、簡単のために2者間での衝突回避行動における各レベルの予測と行動を用いて説明する。レベル0は他者を全く考慮しないので予測を行わずに直進する。レベル1は相手が全く避けない(レベル0行動)と予測するので、極端に相手を避ける。レベル2は相手が自分を避けてくれる(レベル1行動)と予測するので、レベル1よりは小さい回避行動を取って前進する。このように考えていくと、奇数レベルは回避行動を取りやすい、偶数レベルは前進行動をとりやすいことがわかる。しかも、この傾向はレベルが低い時の方がより強く出るため、Fig. 3のような傾向が各実験で示された。

また、レベルが高くなるにつれ行動の傾向が徐々に弱まるため、高レベル同士の衝突回避では予測と実際の行動の誤差が小さくなる。

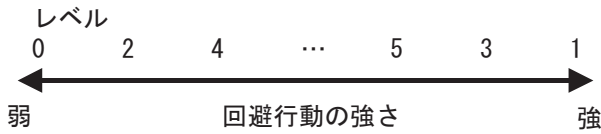


Fig. 3: 予測のレベルと回避行動の強さの基本的関係

## 3.2 基礎実験

### 3.2.1 設定

まず基礎的な実験として集団内における予測のレベルと行動の性質の差を観察するために、集団内のエージェントのレベルを同一に設定する同一レベル集団と、2種類のレベルが混在する2種レベルの混在集団で実験を行った。2種レベルの混在集団ではレベル、エージェント数比の全ての組み合わせで実験を行い、適応度を比較する。エージェントは各々ランダムにスタート地点とゴール地点を設定される。設定ごとに200試行を行い、適応度の平均を求める。以上を全エージェント共通のパラメータ  $r$  を様々に変え行った。

### 3.2.2 結果

1) 同一レベル集団  $r$  の変化により、徐々に有利なレベルが推移していった。適応度の推移を Fig. 4 に示す。 $r$  が小さいときは回避行動の強い個体の集団が高い適応度を得ることができ、 $r$  が大きくなるにしたがって高い適応度を得ることのできる集団は回避行動の弱いレベルへと変化していく。それは  $r$  が小さいと、エージェント同士がかなり近寄るまで衝突回避行動を取らないため、回避行動の強いレベルでないと衝突回避が行えない、 $r$  の値が大きいと、エージェント同士が離れていても回避行動を始めるため、回避行動の弱いレベルの方が必要以上に相手を避けず、効率のよい衝突回避を行える。よって  $r$  によって適応度の高いレベルが変わると考えられる。

両者の境界の領域  $r = 48.0$  では高いレベルの集団が高い適応度を得ることができた。このとき、他者の行動を予測する全てのレベル(レベル1以上)の集団も高い適応度を得ることができ、 $r$  が理想的な値だと言える。よって  $r$  が理想的な値である時、互いに深く読みあうことでより適度な回避行動を取ることができると言える。

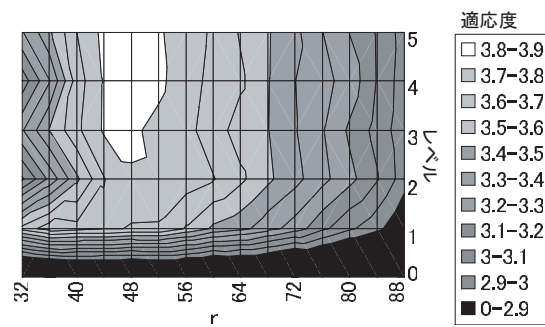


Fig. 4: 同一レベル集団のレベル別適応度と  $r$  の関係

2) 2種レベルの混在集団 2種類のレベルが混在する環境においても、同一の場合と同様に  $r$  が小さいと回避行動の強い個体が、大きいと回避行動の弱い個体が高い適応度を得た。さらに両者の境界ではレベル差が1の時、エージェント数の少ないレベルが高い適応度を得た。レベル差1だと予測が正確に行われるため衝突が起こりにくく、同じレベル同士だと予測が正確でなく、衝突が起こりやすいため、少数派が有利であると考えられる。また、レベル差2以上の時、高いレベルが高い適応度を得た。 $r$  が回避行動の強い個体と弱い個体、両者の有利な値の境界のため、回避行動がより中間的な性質を持つレベル、高いレベルが有利であったと考えられる。

ただし、この実験で得られた境界は同一の場合の  $r = 48.0$  よりもやや小さい  $r = 41.5$  になった。混在環境において、個人レベルの適応度としては回避行動を取らないほうが適応度が高くなり、 $r$  が小さくなったと考えられる。

## 3.3 進化実験

### 3.3.1 設定

環境内でエージェントを行動させ、そのときの適応度を元にエージェントのレベルの進化を行う。エージェントは試行ごとにスタート地点とゴール地点がランダムに与えられる。進化は選択と突然変異により行い、各個体の適応度は各世代20試行行った平均を与える。選択は全エージェントの合計適応度に対する個々の適応度の割合を求め、その割合を元に次世代の個体を生成する。この時、端数ができてしまうので、その端数分はルーレット選択によって選択する。突然変異は一定の確率で個体のレベルの値を  $\pm 1$  する。

今回の実験では突然変異率を0.02、個体数を24とし、世代数は1500世代、初期集団は全個体レベル0とする。 $r = 41.5$  の時のみ2200世代まで進化を行った。 $r$  の値については基礎実験で特徴的な振る舞いが観察できた  $r = 41.5, 48.0$  と、大小各々代表的な値として  $r = 32.0, 64.0$  を使用する。

Table 1: 全世代通しての平均適応度

$r$	32.0	41.5	48.0	64.0
適応度	3.56	3.74	3.81	3.58

Table 2:  $r = 41.5, 48.0$  の平均レベルの低い世代 (左) と高い世代 (右) の適応度比較

$r$	41.5		48.0	
主なレベル	2, 3	4, 5	1, 2, 3	4, 5
世代	150	700	50	1000
	-330	-2200	-1000	-1100
適応度	3.73	3.75	3.82	3.84

### 3.3.2 結果

Fig. 6, 7, 8, 9 に各  $r$  の世代ごとのレベルの分布 (上) と適応度とレベルの平均 (下) の推移を, Fig. 5 にそれらの凡例を示す.  $r = 32.0$  の時, 回避行動の強い個体が支配的になった (Fig. 6).  $r = 41.5$  では, 高いレベルへ進化していった (Fig. 7).  $r = 48.0$  の時には他のレベルに比べ, ややレベル 2 が多く出現する傾向が見られた (Fig. 8).  $r = 64.0$  の時, 回避行動が弱い個体が集団中の多くを占めた (Fig. 9). 進化シミュレーションにおいても基礎実験の結果と同様に,  $r$  が小さいと回避行動が強い個体が, 大きいと回避行動が弱い個体が, 両者の境界では高いレベルが有利であった. そして各々そのレベルへ進化していった. 回避行動の強いレベルと弱いレベルの有利な  $r$  の境界は 2 種レベルの混在環境で得られた  $r = 41.5$  であった.

Table 1 に各  $r$  の全世代通しての平均適応度を示す. 同一レベル集団の実験と同様に  $r = 48.0$  の時, 最も高い適応度になり, 次に  $r = 41.5$  が高い適応度を得た. Table 2 に  $r = 41.5, 48.0$  における集団の平均レベルが低い世代と高い世代を抜き出して, 各々の平均適応度を示す. どちらの  $r$  でも高いレベルの世代の方が高い適応度を得ている.

以上より,  $r = 48.0$  のとき高いレベルの集団の方が高い適応度を得ることができる. しかし, レベルが混在すると, 2 種レベルの混在集団の実験と同様に, 全体の適応度は下がるが個人レベルでは他個体よりも高い適応度を得ることができるレベル 2 が多く出現した. そして, 境界である  $r = 41.5$  の時には, レベル 2 は他個体と衝突しやすく, 高いレベルが高い適応度を獲得できたため, 高いレベルへ進化して行った.

## 4 議論

ここでは, 本実験の解釈結果として想定されるシナリオを提示しながら議論する. まず, 奇数レベルと偶数レベルのこのような差はレベル 0 とレベル 1 の質的なギャップに

起因するということができる. 他者の心の状態の推測が起点となって, その推測から自分の行動を決めることが起点になっている奇数レベルと, 自分の心の状態を他者が推測することが起点である偶数のレベルではその結果に本質的な違いが生ずるのであろう. 特に, 奇数レベルの予測は, 他者が「他者を意識せず自身の欲求だけを考えて行動をする」という予測に基づいているため, 相手の欲求に沿った行動に自分自身の行動を合わせがちである. それは, 自分自身の欲求に沿った行動を取りづらくなることを意味する.

本稿では, 視界の広さはエージェント固有の物理的 (肉体的) 性質のようでもあるが, これは, 各個体の社会性 (どれほど相手を気にするか?), あるいは, 個体間の相互作用の性質 (当事者間の利害関係がどの程度ぶつかるか?) などを象徴するパラメータと考えることができる. 視界が狭いとき, つまり, 利害関係がぶつかりやすいとき, あるいは, 他個体のことに対する配慮の小さい集団における社会的関係においては, 奇数の志向性のレベルの推測が他者との衝突をうまく避けることができ, 適応的であると考えられる. 逆に, 社会的相互作用が強い時, 偶数の志向性のレベルの推測をすると自分自身の目的に近い行動を取りやすくなり, 適応的であると言える. 適応度の高い「理想的」な社会関係が保たれる領域においては, 奇数偶数いずれにせよレベルは深まる方向に圧が働く. しかし, ここでは,  $N$  人版の囚人のジレンマゲームにおけるフリーライダーのように, 自己の利益のために全体の適応度を下げる力がいつも働くことになる.

## 5 おわりに

構成論的手法に基づいて, 動物から人間への心の進化における再帰の構造の進化に関する計算論的モデルを構築し, シミュレーション実験を行った. 他者の内部モデルを持つことと持たないことのギャップが再帰のレベルの適応性に影響しうること, 他者との関係性の大きさが予測レベルの適応性の支配要因となっている可能性があること, 個体レベルに働く進化圧が集団全体としての進化方向にバイアスをかけうることなどが示された. 人間の独自性を際立たせているもののひとつである心の理論における再帰の深さの進化は, 記憶や処理コストに関わる制約だけでなく, 処理内容そのものに関わる制約を少なからず受けていることが示唆される.

## 参考文献

- [1] Byrne, R. & Whiten, A.: The Machiavellian Intelligence Hypothesis: Editorial. In R. Byrne & A. Whiten (Eds.), *Machiavellian Intelligence: Social expertise and the evolution of intellect in monkeys, apes, and humans*. Oxford: Clarendon Press, 1/9 (1988).

- [2] Byrne, R.: *Thinking Ape*, Oxford: Oxford University Press (1995).
- [3] Dennett, D.: *The Intentional Stance*, Cambridge: MIT Press (1987).
- [4] 長谷川寿一: 心の進化: 人間性のダーウィンの理解, 科学, 67, 248/256 (1997).
- [5] Hauser, M. D. & Nelson, D.: Intentional Signaling in Animal Communication, *Trends of Ecology & Evolution*, 6, 186/189 (1991).
- [6] Kauffman, S. A.: *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution*, Oxford: Oxford University Press (1993).
- [7] Premack, D. & Woodruff, G.: Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind? *The Behavioral and Brain Sciences*, 1, 515/523 (1978).
- [8] Premack, D.: 'Does the Chimpanzee Have a Theory of Mind?' Revisited. *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*, Oxford: Clarendon Press, 160/179 (1988).
- [9] Zimmer, C.: How the Mind Reads Other Minds, *Science*, 300, 16, 1079/1080 (2003).

□レベル0 □レベル1 □レベル2 □レベル3 □レベル4 ■レベル5  
 —レベルの平均 — 適応度の平均  
 Fig. 5: 凡例

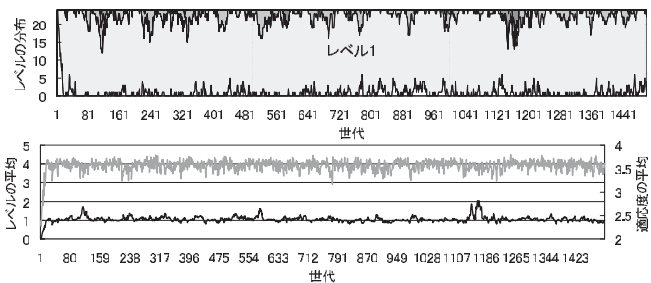


Fig. 6: 各レベルの個体数 (上) と適応度とレベルの平均 (下) の推移 ( $r = 32.0$ )

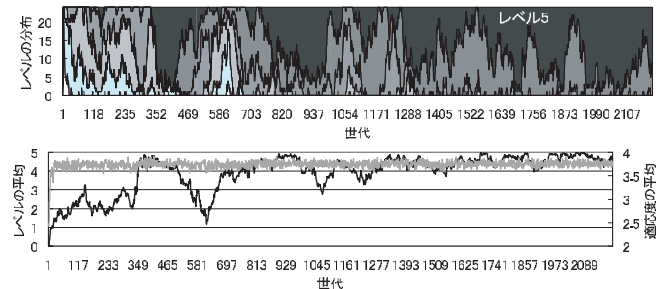


Fig. 7: 各レベルの個体数 (上) と適応度とレベルの平均 (下) の推移 ( $r = 41.5$ )

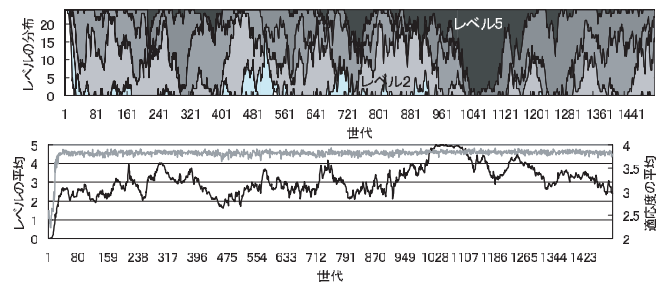


Fig. 8: 各レベルの個体数 (上) と適応度とレベルの平均 (下) の推移 ( $r = 48.0$ )

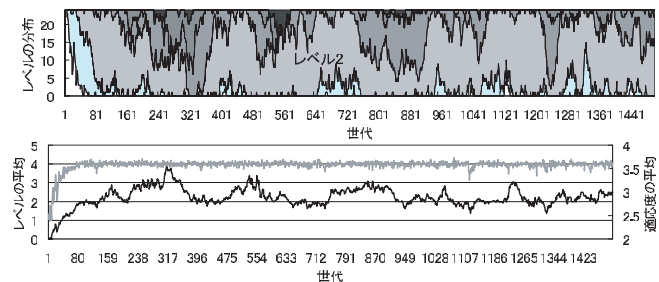


Fig. 9: 各レベルの個体数 (上) と適応度とレベルの平均 (下) の推移 ( $r = 64.0$ )