

三人ゲームにおける協力の発生とその進化

東京大学総合文化研究科広域科学専攻修士論文

秋山 英三 (指導教官 金子 邦彦)

Chapter 1

序

ゲームの理論はもともと社会科学の領域で生まれた数学的理論である。それはやがて時代とともに社会生物学、動物行動学においても応用されるようになり、生態系における進化の理論に新しい視点を導入した。近年では生態系や社会システムなど、進化する系一般について進化の過程をゲームとして捉えてその理解の一助にしようという動きが見られる。

ゲームを人数と利得によって分類すると、まず1人ゲームは単なる最大化問題に相当する。2人ゼロ和(2人のplayerの利得の和が0)ゲームでは確率戦略の範囲でミニマックス値と呼ばれる解が存在する。このゲームはゼロ和なので両方のplayerの利害は常に対立しており、完全に競争的なゲームである。

2人非ゼロ和ゲームから「協力」によって利得を増すことが可能なゲームが現れ、「競争的であると同時に協力的である」といった状況が生じる。この場合、2人非ゼロ和ゲームでは有効だった単なる確率戦略など相手の情報を全く考慮しない戦略はほとんどの場合良い戦略とはなり得ない。相手と協力して適応度を高めるための戦略、相手との情報のやりとり—コミュニケーション—を考慮した戦略が必要になってくる。

3人以上のゲーム(n 人ゲーム)では2人ゲームが持つそれらの性質は基本的にそのまま継承されるが、それに加えて人数が $n(\geq 3)$ になったということで2人以下のゲームと比べて質的に顕著な違いが生じてくる。それは複数の結託(coalition)の構成が可能である、という点から来る。そこでは、結託構成をめぐる争い自体がゲームの中で重要な役割を果たすようになる。

本論文ではその結託について、2つの分割できない資源をめぐる3人のプレイヤーの争いをモデルとしたシミュレーションを行なった。3人ゲームがもつ複数の結託構造と、それに伴う解の複雑さが、2人ゲームのモデルで見ることのできない協力の発生とその進化を生み出す可能性をみる。そして、このモデルが戦略やコミュニケーションの多様化、複雑化のモデルとなる可能性を探る。

Chapter 2

背景

(本章の内容は主に参考文献 [1] [2] [3] [4] [5] [6] によるものである。)

2.1 ゲームの理論

序論でも述べたように、ゲームの理論はもともと、社会科学の領域で生まれた数学的理論である。古典的ゲーム論から、現在のように進化一般について取り扱うようになるまでの経由、及び本論文のシミュレーションが行なわれた背景について、本章では見ていく。

2.1.1 古典的ゲーム理論

ゲームの理論は、1928 年にゲーム理論の基本定理である「ミニマックス定理」を証明した John von Neumann によって創始された。von Neumann はその後もゲーム理論の研究を続けて一連の論文を発表し、1944 年には Oskar Morgenstern と共に「Theory of Games and Economic Behavior」[7] を著してそれらの成果を収録した。そして、この著作によりゲームの理論は広く知られるようになる。

von Neumann は経済、政治、軍事におけるある種の社会事象における意志決定の状況が、ある種の戦略ゲームと数学的に等価であることを示した。社会事象を適切な数学的戦略ゲームのモデルで表現することによって、これらの問題に徹底的な数学的分析を施すことが可能になる。その際、社会科学においてそれまで定義が曖昧だった、効用 (utility)、情報 (information)、戦略 (strategy)、利得 (payoff)、均衡 (equilibrium)、交渉 (negotiation)、等の用語の意味を、数学的に厳密に定義することがはじめて可能になった。これらのことにより、人間の意志が絡む複雑な社会現象を、まったく新しい見地から解析できるようになった。(世の中の物理的事象に数学的基礎を与える試みは、物理学においては、大きな成功を納められて来たが、人間の意志によって左右される社会事象に数学的基礎を与えるのは、人間の意志決定状況の気まぐれさ、複雑さ、あいまいさなどが絡んでくるので難しいとされていた。) ゲームを分析することから得た教訓は、実生活における意思決定の状況に直接応用できるようになっている。

ここでは、以降の章でも使われることになる幾つかの言葉について簡単に説明しておく。

ゲーム player 数、手番の数、可能な手の数などの rule の集合をゲームとよぶ。この条件を満たしていれば良いので、一般に言われている「ゲーム」より意味が広い。

プレーヤー 一般的な player の意味とは違う。プレーヤーは一人である必要はなく、チームであっても、会社であっても良いし、機械であっても良い。あるゲームに関して同じ利害をもつ任意のグループ、そのゲームに加わる意志決定の単位である。

手番 (move) ゲームを構成する個々の段階を手番という。

戦術 (tactics) 手番ごとに選択される一つの「手 (hand)」。

例えば、チェスでいえば駒を一つ動かすことがこれにあたる。「戦略」との違いに注意。この論文では単に「手」と呼ぶことが多い。

選択 (choice) 一つの手番で実際に選択された結果としての特定の一手 (戦略のことではない) を、その手番における選択と呼ぶ。

戦略 (strategy) あらゆる可能な環境の下で、player がいかに行動するかを完全に記述したものを戦略と呼ぶ。戦略にはいささかの曖昧さも許されない。

ある主体が、ある戦略をとった時の将来におこる結果は不確実であると同時に多かれ少なかれ競走相手の戦略に影響される。von Neumann は競合が絡む問題を、ゲームをモデルとして考えねばならないことを初めて指摘した。ゲームの理論では、ある主体が採択する戦略を数学的に厳密に定義することによって競争関係を明示的に戦略ゲームの形に表現して解析し主体の行動法則を追求する。von Neumann がこの理論を適用したのは主に社会科学の分野であるが、この理論は、その数学的普遍性によって様々な分野に応用されうる。外見の違いがどうあれ表現されたゲームの形が同じものであれば、数学的に同じように取り扱うことが可能で、そこに潜む共通の性質を見ることができるのである。

2.1.2 社会生物学とゲーム理論

生態系では、餌、縄張りなどの限られた資源を巡る個体どうしの争いがしばしば起こる。この場合、闘争における戦略の進化がどのような方向へ進んで行くかを検討するときに例えば、「闘争による利得とコストから適応度を個体ごとに割り出し、それを最大にする戦略を考える」といった単純な最大化問題としての考察を行なうのは不適當である。なぜなら、各個体にとって何が最適な戦略かは集団中の他の個体のとる戦略にそれぞれ依存するからである。従って、このような状況の下での社会行動進化の解析は、好むと好まざるに拘らずゲーム理論的側面を持つてくる。

J. Maynard Smith は生態系における個体間の抗争をゲーム理論的な視点から解析し、ゲーム理論の考え方を生物の進化のモデルに表現型のレベルで採り入れた。(生態系のゲーム理論における戦略は、「遺伝的にプログラムされた方向」を意味する) 具体的には「進化的に安定な戦略 (Evolutionary Stable Strategy)」であるための条件についての考察を行なった [8]。

ここで、戦略 I が ESS であるとは、全ての戦略 J ($\neq I$) に対して

$$E(I, I) > E(J, I) \quad (2.1)$$

が成立するか、あるいは

$$E(I, I) = E(J, I) \text{ かつ } E(I, J) > E(J, J) \quad (2.2)$$

が成立することである。

つまり、ESS とは、もし集団中のほとんどの個体が採用すれば、ゲームの中の他の如何なる戦略にも負けない戦略のことである。社会科学におけるゲーム理論の「解」は「rational な人間であれば採るはずの行動」という意味で、実際人間がそのような行動を採るかどうかは全く別問題であった。一方、進化のゲーム理論における ESS について考えてみると、もし実際ある生物の集団が安定して繁栄していたとしたら、それはその集団が ESS に進化した結果である考えられる。この意味で、ゲーム理論はそれがもともと目指していた社会科学の分野よりもずっとうまく適用できるといえる。

また、社会科学にゲーム理論を適用する時、様々な結果の価値の尺度に効用という幾分人工的で曖昧な概念を用いることになるが、生態系においてはダーウィンの適応度のみが正真正銘の一元的な尺度になっている。

ゲーム理論によるモデルは、自然界で実際に生じている現象に比べてひどく単純である。現実の生態系について知るために用いるには以下のことに気を付けなければならない。

1. ある個体にとって最もよい戦略は、他の個体の戦略の分布に依存する。問題は、ある時点で、戦略が「良い」戦略で有るかどうかではなく、安定した戦略かどうかである (ESS)。

2. ESS は、実際は時々刻々と変わっていく生態系における戦略の種類や数によって変わっていく。ゲームの理論のモデルが複雑な自然界において実際に観察されたり、検証されたりすることは期待できない。しかし、モデルは「どのように」闘争行動が進化してくるかについての洞察を得るためには有効である。また、ESS モデルは、「どんな戦略」が進化してくるかを教えるものではなく、可能な戦略セットが与えられた時、どれが安定かを示すだけである。
3. ESS はまた、ゲームの利得行列の微妙な変化によっても変わって来る。したがって、ゲームの理論で実際の生態系における闘争の正確な予想を立てようとするならば、利得行列に現れる正確なコストと利益を厳密に測らなければならないが、容易なことではない。しかし、闘争の戦略が自然界で資源の価値に応じてどのように変化するのはゲームのモデルによって正確に理解することができる。

また、ESS モデルは社会科学におけるゲーム理論と同じく、ある主体がある設定が与えられた時にどうあれば安定か(どうあるべきか)を見つけるのが主目的であり、実際どのような dynamics でどう行った戦略が生まれて進化して来るのかを見る理論ではないし、まして、どのように複雑化が起こってきたのかを見るための理論でもない。しかし、個体どうしの interaction が適応度に大きな影響を与える生物進化の過程をゲームとして捉える視点は、それ自体が非常に重要であり、また、ESS モデルによって現れる個体群動態や平衡点に関する考察は以前からの集団遺伝学の提供してきたモデルとは違った、新しい示唆的なモデルを多く提供している [1]。

2.1.3 「協力」の発生と繰り返し囚人ジレンマゲーム

R. Axelrod はジレンマゲームを通して相互作用行なう個体どうしの間に協力行動が進化し得ることを、繰り返し囚人ジレンマモデルを用いて示した [9]。

生態系における協力行動

自然界を観察すれば、生物が常に利己的に行動するわけではないことは明らかで、他個体と協力するようにみえることがしばしばある。例えば、鳥類の雛鳥にたいする防衛、兵蟻の自己犠牲、チスイコウモリの餌の吐き戻し、自分が危険になるにもかかわらず群れに注意を促すアラームコール、ほ乳類の肉食動物に見られる共同の狩りなどの、相互利他行動、一方的利他行動による協力行動がある。ダーウィンの適応度を増やす方向に進化が向かうとしたら、自分自身の子孫の数を減らすような利他行動が進化したのだろうか。

これについては、次のような 3 つの仮説がある。

血縁淘汰 表現型としての 利他的行動が、遺伝子レベルでは利己的になっている可能性がある。例えば、2 倍体の生物では精子や卵は減数分裂によって作られるので、親の遺伝子が自分の子供に伝わることになる。すると、親とその子供が同じ祖先から由来する遺伝子を共有する確率は 0.5 である。もし、利他主義者が自分が犠牲になることで 2 人以上の自分の子供の命を救えるのなら、その遺伝子の集団中での頻度はむしろ増加する。この時、こういった利他的行動は広がっていく可能性がある。(ハミルトン 1964 [10])。女王蟻に対するワーカーの自己犠牲などもこの説によって説明が可能である。

相互協力行動 個体どうしが協力することによって、全員の利得が単純に上がる場合。例えば、先の肉食動物の共同の狩りの場合、協力しない場合よりも狩りの成功確率は大いにあがる。あとで獲物をわかち合うにしても、それに見合うだけの利益がある。このような行動も広がっていくだろう。

操作 与え手の個体が自分が利他行動をとっていることに気付かず利他行動を行なっている可能性がある。これを、相手の個体の操作によるものとする。例えば、カッコウの托卵などがこれにあたる。

では、上の 3 つの仮説に該当しない協力行動の場合、つまり、血縁関係もなく、個体が自分の行動によって自分の利得が下がることを知っていて、それでも行なわれる協力行動の場合、その行動が広がってきたことは、どのように説明がつくのだろうか。

繰り返し囚人ジレンマ

囚人ジレンマゲームは、Table 2.1 で示されるゲームである。もし、一回しか戦わない条件ならば、裏切り行動 (Defect) のみが広がっていく。しかし、個体どうしが繰り返しゲームを行なうとすると事情が変わり、協力行動 (Cooperate) が広がっていく可能性が出てくる。

R. Axelrod は、同じ相手と繰り返し囚人ジレンマゲームを行なうコンピューターのプログラムを何人かのゲーム理論に詳しい様々な分野の研究者に呼びかけて作ってもらってリーグ戦を行なった。それぞれの戦いでは 200 回ずつ繰り返し囚人ジレンマゲームを行ない、プログラムを総得点順に並べた。その結果、優勝したプログラムは Tit-For-Tat (しっぺ返し) と呼ばれる非常にシンプルなプログラムだった。このプログラムの戦略は、前回相手が裏切ったら裏切り、前回相手が協力すれば協力する、というプログラムである。このプログラムを提出した Anatol Rapoport は社会心理学者である。この戦略はこのリーグ戦の行なわれる前に、特に心理学の方面で既に知られていて、人を実験台にした繰り返し囚人ジレンマによる多くの研究から Tit-For-Tat を用いると利己的な関係から協調を引き出せそうだという議論がすでになされていた。このリーグ戦によってその重要性が再認識されたといっているだろう。Axelrod は繰り返し回数を完全には設定せず、回数の中央値を 200 にして、あとは同じルールで 2 回目のリーグ戦を行なったが、やはり、Tit-For-Tat が優勝し、多様な戦略の混ざった環境での Tit-For-Tat の強さが示された。

更に R. Axelrod は、コンピューターの中で囚人ジレンマのシミュレーションを行なった。各戦略は頻度を持ち、リーグ戦を一巡り行なうと得点に応じて頻度を上下させる。そして、またリーグ戦を行なうといったことを繰り返すのである。適応度が高いものが多くの子孫を残す、生態系をモデルとしたシミュレーションだが、やはり、結果は Tit-For-Tat が他の全ての戦略を凌駕して集団全部を占めるようになった。では、Tit-For-Tat は ESS といえるだろうか。Axelrod は繰り返し回数が十分に大きければ、Tit-For-Tat が ESS になり得ることを示した。(Maynard Smith の ESS の定義では一つの突然変異種に対する強さのみを考慮しているが、3 つ以上の種族が混在する状態での ESS を考えると事情が変わって厳密には ESS は存在しなくなる [11]。) 一度、Tit-For-Tat がほとんどを占めると、他の戦略は侵入できない。初手 C の TFT によるコミュニケーション方法は、TFT どうしの間で隙の無い協力状態を生み出す。しかしまた、全部裏切り (ALL-D) 戦略も ESS である。ALL-D は一度 population のほとんどを占めると侵入できなくなる。この場合、繰り返し回数は安定性に関係ない。さて、では変異種がある程度の population をもって現れた時はどうなるだろうか。まず、Tit-For-Tat のなかで ALL-D がある程度の population を持っていて侵入することはできない。しかし、ALL-D のなかで、Tit-For-Tat がある程度の population を獲得できれば Tit-For-Tat は広がっていくことができる。このことから、戦略を空間的に分布させた時に、Tit-For-Tat のような互恵主義に基づいた協力行動をとる戦略が少しでもかたまっていれば、広がるということが分かる。そして、以上の結果は、協調関係が支配者の命令や強制によるものではなく、両者が互いに働きかけることで芽生え得ること、そして、広がり安定になり得ることを示している。

(進化するプレーヤーによる n 人ジレンマゲームを空間上で行なったシミュレーションも K. Matsuo によって行なわれている、ここでも Tit-For-Tat に準ずる戦略が優勢となった。[12])

2.1.4 ゲームが行なわれる artificial ecology による進化の理解

ゲーム論のモデルは抽象的な数学モデルである。それ故に一般性があり、現象の本質を捉えやすい。

例えば、繰り返し囚人ジレンマモデルにおいて Tit-For-Tat による協力行動が ESS になることを前節でみたが、この事実によって、生態系における互恵的協力行動のみならず、人間社会の国家間の外交、企業間、その他の利己的な主体間におけるジレンマ的状况に発生する協力行動をも理解することができる。そして、生物科学、社会科学、その他どのような分野でも、ミクロなレベルでもマクロなレベルでも、囚人ジレンマの幾つかの条件を満たしてさえいれば、同じような協力行動が発現しうることを主張することができる。

もっとゲーム一般を考慮に入れて、個体(集団) どうしが相互作用を行ないながら適応進化していく系全般についてゲーム論的手法を適用することを考えてみる。2.1.2 節から述べてきたように、進化の過程をゲームして捉える試みは、社会生物学の分野では既にいくつかなされている。一方、その視点から生態系

Table 2.1: 囚人ジレンマゲームの利得行列：各行列要素について、左が player 1 の利得、右が player 2 の利得である。2 人の player は、それぞれ戦略「Cooperate」「Defect」をもつ。相手とのコミュニケーションが不可能な場合、どちらの player も相手の出方に拘らず「Defect」を出したほうが高い利得を挙げることができるが、両方とも戦略「Defect」を選択すると両方とも利得が 1 点になる。もし、両 player が協力することができれば両方が「Cooperate」戦略をとることにより両方ともより高い利得、3 点を得ることが可能である。そして、ここにジレンマが生じる。

		player 2	
		C	D
player 1	Cooperate	3, 3	0, 5
	Defect	5, 0	1, 1

における進化を捉えるならば、例えば、チェスや戦争ゲームを行ないながら進化(学習)する機械と進化していく生物は共通した性質をもっているといえるし [13]、より拡張すれば、進化の過程一般について統一的自然像を描くことができるだろう。また逆に、計算機の中でゲームを行なう player 達による artificial ecology が生態系における進化の理解を助けるものとしての意味を持ち得るだろう。(artificial ecology による進化のシミュレーションはデータが簡単に変更できる点、自由に ecosystem を変更することができる点からも進化の理解に有用な道具となり得る。)

noise 入り繰り返し囚人ジレンマゲームによる artificial ecology

囚人ジレンマゲームを元にしたルールで協力をモデル化して、戦略をもった生物種どうしを戦わせる、非常にシンプル(かつ高度に抽象的)な進化のシミュレーションが K.Lidgren によって行われた [14]。

採用されたルールは以下に示すようにごく単純なものである。

- player 間で囚人ジレンマゲームを繰り返し行なう。全プレイヤーで総当たり戦を行ない、平均利得がそのまま適応度になる。
- 各 player はお互いに出した過去数手から次の手を決めるアルゴリズムをもつが、一定の割合で間違えた手を出す (noise)。
- 適応度に応じた数の子孫を残すことにより population が増減するが、そのとき、mutation によりアルゴリズムが違った種族が現れるようにした。

前節で、R.Axelrod の繰り返し囚人ジレンマのシミュレーションを見たが、このモデルは次の点が大きく違う。

1. noise によってアルゴリズムで意図した手と逆の手が出るようにした。

- Tit-For-Tat がその厳しさがかえって原因となって、ESS ではなくなる。システム全体の複雑化に何らかの効果が期待できる。

2. mutation によって戦略が違う種族が現れ得るようにしている。

- 特に、過去の手を記憶できる容量が増大する mutation に (genetic duplication) によって、戦略がより複雑になり得るようにした。

この K.Lidgren の artificial ecology では、進化する生物種の集団どうしの間で競争を通じて戦略が複雑化していき、いくつかの集団が互いに共進化していき、状況があらわれた。囚人ジレンマゲームのまさに「ジレンマ性」を利用して、新しい種族が古い種族を凌駕しつつ登場したり、また、そのよう

なことを防ぐために、多くの population を占めている種族も自分達の成功に安住することなく新しい進歩へと向かう。(ある種、host-parasite モデルにおける進化に似ている。) その他、現実の生態系で見られるような振舞が見られた。population dynamics を見ると、例えば、まずいくつかの種族の population がある期間均衡状態にあり、それから突如として激しく変化して乱れる状態が続き、かと思うとまた、均衡状態にもどって安定したりなど、複雑多様な状態が見られる。(大量絶滅さえ見られる。当然、隕石が落ちた訳でも氷河期が訪れた訳でもなく、Lidgren の単純なシステムが生み出す dynamics のみによってこのようなことが起こり得ることが示されている。) このシミュレーションでは、noise 入り繰り返し囚人ジレンマゲームを通して個体どうしが相互作用して、進化適応していった結果、現実の生態系に類似した複雑な進化の dynamics を生み出すことが示された。

(この他に、binary tree を戦略の coding として持つ player どうしで行なわれる noise 入り囚人ジレンマのシミュレーションが、T.Ikegami によって行なわれている [15]。tree を使うことによって、K.Lindgren のモデルよりも記憶の長い player で、シミュレーションを行なうことが可能になっている。また、tree coding の特性を生かした、genetic fusion process の効果などについても論じられている。(本論文のモデルの説明で後述))

2.2 2 人ゲームにおける協力とコミュニケーション

第 2.1.3 節では、繰り返し囚人ジレンマゲームを行なう個体間に協力行動が広がり得ることを見てきた。しかし、協力行動が起こるためには何らかのコミュニケーションが必要である。本節では、ゲームにおける協力とコミュニケーションについて詳しく見る。

2.2.1 協力に意味があるゲーム

第 2.1.1 節でゲームというものを一般的に定義したが、ゲームにも様々なものがあり、その性質から以下のように分類することができる。一般に、分類ごとに性質はかなり異なる。

人数による分類 ゲームを行なう player の数によって、1 人ゲーム (one-person game)、2 人ゲーム (two-person game) と分類する。ゲーム理論の立場では 2 人以下のゲームと 3 人以上のゲームは本質的に異なるので 3 人以上のゲームを n 人ゲーム (n -person game) と呼ぶ。ここでいう player は第 2.1.1 節で述べた通り、意志決定の単位であり、利害関係が同じ任意のグループも 1 人の player である。例えば、野球やサッカーは 2 人ゲームである。player の戦略が最終結果を制御する力は、普通、人数が少ない方が強い。

支払いによる分類 ゲーム終了時における利得の受渡しで、全 player の利得の合計がゼロの場合は、ゼロ和ゲーム (zero-sum game)、そうでない場合は非ゼロ和ゲーム (non-zero-sum game) と呼ばれる。ふつう、ポーカーなどの室内ゲームはゼロ和である。第 2.1.3 節の囚人ジレンマは利得行列を見れば分かるように非ゼロ和ゲームである。player の戦略が最終結果を制御する力は、普通、ゼロ和ゲームの方が強い。

情報による分類 全ての player が全ての手番において、それ以前の手番で行なわれた戦術 (手) を全て知っている時、完全情報ゲーム (perfect information game) という。そうではないときは、不完全情報ゲーム (imperfect information game) という。例えば、チェスとか将棋は完全情報ゲームである。囚人ジレンマは、同時に与えられる相手の手については自分の手番の時には分からないので、不完全情報ゲームである。player の戦略が最終結果を制御する力は、普通、完全情報ゲームの方が強い。

手の数 それぞれの手番で選ぶことができる手の数が有限の時、有限ゲーム (finite game) と呼ばれる。手の数が無限の時、無限ゲーム (infinite game) と呼ばれる。手が連続無限個ある場合、連続ゲーム (continuous game) と呼ばれる。例えば囚人ジレンマゲームは有限ゲームである。マネゲーム [16] は

Table 2.2: battle of sexes の利得行列：ある夫婦が休日にどこかに行くことになったのだが、夫は山で休暇を過ごすことを好み、妻は海で休暇を過ごすことを好む。しかし、2 人が別々に過ごすよりは、自分が行きたくないところでも 2 人で行く方がましである。この利得行列は以上のようなケースを考えれば良いだろう。

		妻	
		海	山
夫	海	1, 2	-1, -1
	山	-1, -1	2, 1

連続ゲームである。有限ゲームでなくなると、例えば、後述する minmax 定理の成立条件が少し厳しくなる。(一般の minmax 定理は有限ゲームに対するものである。)

ここで、人数と利得の関係だけによってゲームを考察する。

まず一番簡単なのは 1 人ゼロ和ゲームで、これはどの戦略を選んでも得も損もしないというゲームで解析する価値は全く無い。

次に(ゲーム論として)簡単なのは 1 人非ゼロ和ゲームである。これは、相手が存在せず、自分の選ぶ戦略だけによって利得が上下する、いわばロビンソンクルーソーエコノミーの立場である。ゲームの解を求める段階は、最大化、最小化問題に相当し、最適化については数々の手法が(ゲーム論以外のところで)既に論じられている。

ゲーム論が取り扱うべき状況は、他の player の戦略と自分の戦略が影響しあう状況であり、それ故、ゲーム論として興味があるのは 2 人ゲームからである。2 人ゼロ和ゲームは双方の利得の和がゼロなので両方の player の利害は常に対立しており、完全に競争的なゲームである。片方が得をすれば、もう片方は必ず損をする。このゲームについては確率戦略の範囲で minmax value と呼ばれる解が存在する(ミニマックス定理 [17])。

2 人非ゼロ和ゲームから、その非ゼロ和性により「協力」によって利得を増すことが可能なゲームが現れ、「競争的であると同時に協力的である」といった状況が生まれる。2 人ゼロ和ゲームは解が見つかる、更にいえば、広く容認される解が見つかるという点で異常といってよい。一般に、現実の問題はすぐに解答が得られないことを考えると、ゼロ和ゲームは現実のモデルとして適用する時は近似として考えた時しかほとんど意味を持たないといえる。一方、2 人非ゼロ和ゲームでは、少しでも複雑なゲームになると広く容認される解は存在しなくなる。つまり、ある戦略が他の戦略より必ず優先されて選択されるということがなくなるのだ。具体的には、囚人ジレンマゲームで利己的に考えた時と協力的に考えた時とで選ぶべき戦略が変わってくることや(自分の中でのジレンマ)、相手の戦略によっても全く選択すべき戦略が変わってくることがいい例である。翻って、2 人ゼロ和の場合は、相手の戦略にかかわらず選ぶべき戦略は一つである。(実際、選べるかどうかは別問題である。チェスは有限 2 人ゼロ和ゲームで、3 目並べと同様に解は確実に存在するが、その解を人間が知っている訳ではない。)

2 人非ゼロ和ゲームと協力

以上の述べてきたように 2 人非ゼロ和ゲームから解が複雑になると同時に、ゲームは現実のモデルとしてより適用範囲が広いものになる。

さて、2 人非ゼロ和ゲームでは協力的行動に意味がでてくるのだが、ここで、2 人非ゼロ和ゲームにおける協力についてももう少し一般的にみてみることにする。囚人ジレンマにおける「協力状態」は、たまたま、両 player が文字通り「Cooperate」を選択している状態だが、一般的には、1 人の player が選択する手で分かるものではない。例えば、battle of sexes (夫婦の諍い、恋人の語らい) と呼ばれる、Table 2.2 で示されるゲームを考えてみよう。このゲームにおける協力が成功している状態とは、例えば、2 人で相談して、

(夫、妻)の戦略を休日が来るごとに(海、海)、(山、山)、(海、海)、(山、山)、…のように譲る役割を交替して行く状態でもよいし、2回ずつで交替して行く状態でもよい。経済学におけるパレート最適を、協力が成功した状態、と定義するなら、例えば、(海、海)、(海、海)、(海、海)、…がずっと続いて行く状態も片方の player が終始譲り続けて、協力している状態である。(2人ゲームは結託構造が1つだけなので、手が2つだけなら協力の形態にあまりバリエーションはない) 以上のように、2人が協力することによって双方の利得を上げるには、大概の場合、手を決める時に相手との間に何らかのコミュニケーションが必要である。例えば、双方とも相手の情報を無視して独自に、海、山、海、山、…という手を選んでも、(海、山)、(山、海)、(海、山)、(山、海)、…となる可能性もあり、これでは利得を上げることはできない。いずれにせよ、1人1人がバラバラに動いた時に実現可能な戦略空間の中だけで考えるのではなく、2人の戦略の作るベクトルが動き得る範囲で戦略空間を考えた時に、その戦略空間におけるある状態が同じ戦略空間内の任意の状態と比べて、2人同時に損をすることがないのなら、その状態を協力状態とする。(もう少し条件を厳しくすると N-M 交渉解と呼ばれるものになる [7]。) 多くの非ゼロ和 2人ゲームでは、2人がお互いの情報を全く考慮しない戦略をとっている場合、この協力状態は実現できない。また、囚人ジレンマにおいて、1人の player が「手」として持っている「Cooperate」とここで言う「協力状態」とはかなり意味が違う。

2.2.2 繰り返し囚人ジレンマで行なわれるやりとり

前節で述べたように、2人非ゼロ和ゲームでは協力が意味がでてくる。協力して適応度を高めるためには、相手との間に何らかの形のコミュニケーションが必要であり、(二人ゼロ和ゲームでは有効だった) 単なるサイコロを振った確率戦略など、相手の情報を全く考慮しない戦略は良い戦略とはなり得ない。)

さて、第 2.1.3 節でみてきた、繰り返し囚人ジレンマゲームで行なわれるコミュニケーションは、過去の手番におけるお互いの手と、それに対する player の reaction(次の手)のみである。この状況では、つまり、コミュニケーションの手段として事前の明示的な脅し、取り引きなどができない状況では、Tit-For-Tat の「基本的には紳士的で、相手が裏切ったらすぐさま裏切り返し、協力してきたらすぐ協力する」という単純な情報処理の方法は非常に強力なコミュニケーションの手段であるといえた。お互いの過去の示した行動のみが情報となる暗黙のコミュニケーションとでもいうべきものだが、このコミュニケーションの中から協力行動が生まれてきた。ここでは、お互いに示した行動しかコミュニケーションに使える情報がないので、繰り返しゲームを行なう、ということが協力の形成に非常に大きな役割を果たすことになる。実際、一度しか囚人ジレンマを行なわない場合、ただ一度の Defect が ESS である。

実際の生態系の中で、過去のお互いの行動のみを情報とした暗黙のコミュニケーションから互恵的利他行動が生まれる一つの例として、雌雄同体魚ハムレットの産卵行動を紹介する (Fischer [18])。

この魚は全ての個体が雄と雌の生殖線をもつ。この魚は、日没直前に番いを作る。そして産卵場所に集まって産卵を行なうのだが、産卵は多数の段階に分けられ、1段階ごとに雄と雌の役割を交替していく様子がみられる。例えば、個体 A が卵 2、3 個産むと B が精子をかける。次には B が卵を産み A が精子をかける。そしてこれを繰り返していくのである。一見、A が卵を全部産んで B が精子をかけ、次に B が卵を全部産んで A に精子をかけた方が効率が良さそうである。なぜ、このような面倒な行動を行なうのか。Fischer はその理由として、この役割交替行動が、裏切りに対して安定であることを挙げた。精子を生産するにはそれほどコストはかからないが、卵を生産するのはかなりコストがかかる。最初に精子をかけた方はそのあと自分は卵を産む役割をさぼってしまうことも可能である。しかし、実際には卵はほんの 2、3 個しか産まないで、もし相手が卵を産む役割をさぼった場合は、すぐに交尾をやめることができる。その結果、裏切りばかりおこなう(雄の役割だけしかしない)ハムレットは、自分の遺伝子をもった卵を total ではあまり残すことができなくなる。事実、Fischer はペアの相手が裏切った場合はそれ以上卵を産まずに去ることを見出した。この辺は、Tit-For-Tat の反応に似ている。

繰り返し囚人ジレンマに向かない問題

R.Axelrod の繰り返し囚人ジレンマのシミュレーションでみられるやりとりは、最終的には全てが「Cooperate」一辺倒、(特殊な場合には「Defect」一辺倒)になってしまう。従って、協利行動を全ての個体がおこなう訳ではない場合、例えば、カダヤシ [19]、トゲウオ [20]、グッピー [21] などの魚は、集団の中なかから更に一部の集団が飛び出して捕食者に対する偵察行動を行なうが、このような協利行動の説明には繰り返し囚人ジレンマモデルは適さない。

また、現実にもみられるコミュニケーションは、一見単純なものも当然多くみられるが、その一方で、複雑なコミュニケーションも存在する。協利していたかと思えば、裏切ってみたり、など様々である。(ここでは「コミュニケーション」を、何らかの情報処理に基づいて行なわれているやりとり、といった程度の意味で使っている。例えば、人間の言葉によるやりとりから、囚人ジレンマの Tit-For-Tat のやりとりまでも広くコミュニケーションと呼ぶ。)

もう一つ、Axelrod の繰り返し囚人ジレンマモデルは、仮に mutation の概念を導入したにしても Tit-For-Tat 的戦略が現れたところで最終的に進化が止まってしまう。

1. 最終的には全員が協利(または裏切り)一辺倒になり、分布がない単調な社会になる。(多様性の欠如)
2. その協利行動の内容自体も単調なものである。(複雑性の欠如)
3. 最終的には戦略の進化が止まってしまう。

戦略、コミュニケーションの進化による複雑化、多様化を取り扱うには、Axelrod の繰り返し囚人ジレンマモデルとは別のモデルによるアプローチが必要であろう。

2.2.3 コミュニケーションの複雑化のために

戦略、コミュニケーションが多様化、複雑化するためには、非ゼロサム性によるジレンマ的状况のほかには何か必要なのだろうか。以下に考えられる要素を述べる。

player が一つの turn で選べる「手」の数(囚人ジレンマでは「C」,「D」の2つ。将棋なら「7六歩」,「4八王」、その他多数)自体を増やす。

例えば、チェスは二人ゼロ和完全情報ゲームで解の存在自体は証明できる(Zermelo の定理)。人間の能力が無限であればゲームをやる前から先手、後手のどちらが勝つか、あるいは引き分けるかが分かっている非常につまらないゲームである。しかし、チェスにおける戦略は今だに進化し続けていて、そこで見られるやりとりも複雑である。これは、チェスがもつ戦略空間の大きさと人間の計算能力の限界によるものであり、ジレンマ性が無く、最終的な固定点が存在する状況でさえこういうことが起こり得ることを示している。

しかし、最終的に進化が止まる点が存在する点が存在する事実には変わりはない。

noise による揺らぎが入るようにする

既に、第 2.1.4 節で紹介した K.Lindgren の繰り返し囚人ジレンマモデルでは、noise によって出すべき手を時々間違えるようにしていた。K.Lindgren のシミュレーションでは、囚人ジレンマがもともと持っている利得行列のジレンマ性に noise が加わることによって、協利的な戦略に、裏切りの戦略が付け込む隙が生じ、互いに石磋琢磨して進化して行く状況が生まれている。

このモデルでは、戦略の複雑さへの進化は確かに見られる。しかし、進化が進んで行った結果として見られたのは、ほとんどすべて「Cooperate」一辺倒のやりとりが行なわれる社会である。K.Lindgren のシミュレーションでは generation 90000 までの data が示されているが、それを見るとシステム全体の average は generation 30000 あたりから一部を除いて、ほぼ、3.0 点に近い。因みに 3.0 点は、2 人のプレイヤーが「Cooperate」を出しつづけている時のみに実現可能な average である (Fig 2.1 参照)。つまり、noise

によって 2 人のプレーヤーによる「C、C」状態が一瞬崩れても、また「C、C」状態に戻るようなやりとりが行なわれているのである。noise なし囚人ジレンマにおいては「初手 C TFT」が ESS であったが、noise がある状態でも「初手 C TFT」に近い状態を実現できるように、戦略の進化が進んでいるのであろう。(具体的には、noise によって相手が裏切ってしまう可能性を考慮した分だけ通常の TFT より寛大な戦略)

では、noise なしの状態 (ゲームのルール自体は完全に deterministic な状況) で、コミュニティー内でゲームをする個体どうしの相互作用のみで、各集団の algorithm は進化して複雑、多様化して行かないだろうか。そして社会全体としても多様になって行かないだろうか。

2.3 進化する player による 3 人ゲーム

2.3.1 n 人ゲーム—解自体の多様化

3 人以上のゲーム (n 人ゲーム) は、2 人非ゼロ和ゲームの解の複雑さをそのまま引き継いでいる。しかしそれ以上に、n 人ゲームになると人数が $n(\geq 3)$ になったということで、質的に顕著な違いが生じてくる。それは、複数の結託 (coalition) を構成できるという点からくる。2 人ゲームの場合も両 player が協力状態にあるときは結託がつくられていることになるが、2 人ゲームの場合はつくられる結託は一つしかないの、ある player が別の結託に引き入れられるとか、ある結託を裏切って別の結託に入るとか、また、ある結託を拡張して更に大きな結託をつくるとかいった、結託相互のやりとりで生じてくる問題は出てこない。結託構成自体がゲームの中で重要な役割を果たすといった側面がないのである。この点が 2 人から 3 人になった場合の決定的な違いで、この違いは 3 人以上のゲームで非常に重要な意味を持つのである。一方、非ゼロ和 2 人ゲームで問題となった協力の形成は、そのまま n 人ゲームでも問題となる。例えば、player が独自の力で得られる最小利得は常に存在する (Table 2.1 に示される囚人ジレンマでは 100% 「Defect」にすることで最低 1 点の利得を獲得できる) が、それ以上獲得するには非ゼロ和 2 人ゲームで行なったように他の player と協力を行なわなければならない。しかし協力してくれる player がいない場合、つまり結託に入れない場合、なにもしることができない。協力の前に結託に入らなければならないのだ。したがって、n 人ゲームでは、一見無力な player でも、誰と結託を形成するかについての決定権を持っているため、大きな力を持ち得る。

odd man out(外れ負けゲーム)

結託構成という面だけを強調するゲームとして odd man out(外れ負けゲーム) がある。参加者 A、B、C がそれぞれ 1 枚の貨幣を持っており、同時に表か裏のどちらかを出す。3 人とも表か 3 人とも裏であれば引き分けとする。1 人だけが表で他の 2 人が裏とか、1 人だけ裏で他の 2 人が表のときには、外れた 1 人が他の 2 人に 1 点ずつ支払うとする。このゲームは 3 人ゼロ和ゲームで n 人ゲームの中では一番単純な部類に入る。証明の詳細は省略するが、ある 2 人の間に結託が形成されたとすると、結託側と外された側の 2 人ゼロ和ゲームに帰着され、このゲームは確率戦略の範囲で厳密に解を特定できるようになる。その結果は、結託側が +1 点で、外された側が -1 点である。結託を組んだ 2 人が利得を折半するとすれば、A、B、C の 3 人が獲得する得点の組は、 $(-1, +\frac{1}{2}, +\frac{1}{2})$ 、 $(+\frac{1}{2}, -1, +\frac{1}{2})$ 、 $(+\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, -1)$ の 3 つが考えられる。さらに、3 人の結託が行なわれたときは $(0, 0, 0)$ である。この 4 つはある意味でゲームの解といってよいだろう。これに、side-payment による勧誘や、利得の配分の問題などがからむと、解はさらに複雑になる。

結託の価値まで考えねばならない n 人ゲームは、多くの異なった解の概念が可能で、また、解の定義自体がそれぞれ多様である。n 人ゲームによる artificial ecology を構成することにより、この解の多様性自体が、多様化、複雑化への進化を生み出す可能性がないだろうか。

2.3.2 このシミュレーションの目的

3 人ゲーム

一般に、人数が増えるに従ってゲームの解自体が多様化し、はっきりとした解を定義することが困難になる。ここでいう解も、2 人ゼロ和ゲームにおけるそれのようなはっきりとしたものではなく、「他よりも可能性がある安定した結果の集合」という意味での解である。しかし逆に、ゲームの人数が増えるに従って、ある player の持つ戦略が最終結果を制御する力は無くなっていく。極端な話、1000 人ゲームでは、ある 1 人の player がどのような戦略をとろうがほとんど大勢に影響はない。(こうなるとどちらかという自然を相手にした 1 人非ゼロ和ゲームに近くなる。)

3 人ゲームは、解が適度な複雑さを持ち、戦略のもつ意味を解析する上での困難も n 人ゲームの中では比較的少ない。それは、 n 人ゲームの理論のほとんどが 3 人ゲームに関するものであることから分かる。より複雑なゲームでは曖昧になってしまう関係も 3 人ゲームでは明瞭になりやすい。

主な目的

今回 3 人非ゼロ和ゲームによるシミュレーションを行なったがそれは以上のような理由による。以下の章では、3 人ゲームによる artificial ecology を構成することにより、3 人ゲームの持つ複数の結託構造、そしてそれに伴う解の多様性が、多様化、複雑化への進化を生み出す可能性を探っていく。シミュレーションは、特に結託構造に焦点を絞った 3 人ゲームのモデルによって行なわれた。シミュレーションの主な目的は次の通りである。

戦術決定時における noise がない deterministic な状況の中で、手の数は囚人ジレンマと同じく 2 つだけの、単純な 3 人結託ゲームを巡る artificial ecology において、

- どのような形態の協力が形成されていくのか。
- アルゴリズムとコミュニケーションはどのようにして進化していくのか、複雑化、多様化は起こり得るのか
- どのような社会が実現されるのか

以上のことを中心にみていく。

Chapter 3

モデルの構成

今回の研究は、3 人ゲームを行う個体どうしが結託形成をめぐるいかにコミュニケーションを行なって協力するか、その協力の発生と進化、そして、結託形成のためのアルゴリズムの進化について見ることを目標としている。調べるべきこと、結果に効いてくる要因をはっきりさせるために、結託の形成のみに視点を絞った、出来るだけシンプルな 3 人ゲームのモデルを仮定してシミュレーションを行なう。

3.1 2 人の結託のみに価値がある 3 人ゲーム

このシミュレーションで行なわれる 3 人ゲームは基本的に次のようなルールに則っている。「分割できない 2 つの資源をめぐる、3 人の player の中である 2 人の player の間にサブグループが形成された時、サブグループに入った 2 人の player が資源をもらう (サブグループに入れなかった player は得点を得られない)。ただし、3 人の player が同じ行動をとってサブグループを形成できない時は 3 人がかち合って、全員何も得ることができない。」

このゲームが第 2.3.1 節で考察したゲーム odd man out と大きく違うのは、3 人が同じ行動をとった時も最低得点しか獲得できない点である。また、odd man out の場合は 3 人ゼロ和ゲームだが、このゲームは非ゼロ和ゲームである。このことによって、次に見るように 3 人の「結託の価値」[7] が違ってくる。

このゲームにおける意味のある結託として、次の 2 つが考えられる。

2 人の結託 ある 2 人の player が残りの 1 人を仲間外れにしてサブグループを形成する。

3 人の結託 誰かが他の 2 人に譲って (利他的行動) 協力する。この場合、将来は違う player が譲る、という保証が必要だろう。でなければ、譲った player の適応度は下る一方である。

いずれの場合も、結託の形成のために player の間に何らかのコミュニケーションが必要である。ゲーム論的解釈では、odd man out における 3 人の結託の価値はないが、このゲームでは 2 人の結託と 3 人の結託の価値は同じである。

具体的には以下のような設定で 3 人ゲームを行なう。

1. 3 個体間で対戦する。3 人の player はそれぞれが、左の player、右の player を持つように player の位置が配置される。
2. 各 player は「黒のカード」、「白のカード」のうちのどちらかを出す。
3. 同じカードを出した 2 人の player はサブグループに入れたことになり、得点 (3 点) をもらえる。サブグループから洩れた player は得点を得ることができない。全員同じカードなら全員 0 点である。(表 3.1 に利得行列を示す。)
4. 以上をもって 1 round のゲームとする。

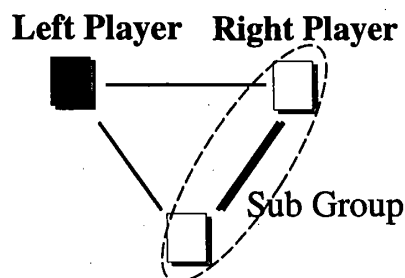


Figure 3.1: 右のプレイヤーと「白のカード」でサブグループを形成した状態

Table 3.1: 分割不可能な 2 つの資源を巡る 3 人結託ゲームの利得行列

state	左	右	自分	得点
0	黒	黒	黒	0
1	黒	黒	白	0
2	黒	白	黒	3
3	黒	白	白	3
4	白	黒	黒	3
5	白	黒	白	3
6	白	白	黒	0
7	白	白	白	0

(1) 表中の 2、3、4 列の「黒」、「白」は左右の player もしくは自分が選んだカードを表す。

(2) 同じカードを出した 2 人の player はサブグループに入ったことになり、得点 3 を得ることができる。例えば、左の player が「黒のカード」、右の player が「白のカード」、自分が「白のカード」の時 (state 3 に相当する) は自分は右のプレイヤーとサブグループを組んだことになり、右のプレイヤーと自分は得点 3 を得ることができる。

(3) 3 人の player がそれぞれ「黒のカード」または「白のカード」を出し、かつ他の player の位置が右であるか左であるかが区別されるため、表のような 8 つの状態がありうる。自分にとって得点になる (「自分」がサブグループに入っている) のは、state 2 から state 5 の間である。

3.2 繰り返しゲーム

前節で説明した 3 人結託ゲームを、決められた最大 round 数 (max-round) まで繰り返し行なう。これが一度終了したら、3 人の player のうち、2 人の player の位置を入れ換える。つまり、A, B, C の順序で 3 人の player が時計廻りに位置していたのを、例えば、B と C の位置を入れ換えて、時計廻りに A, C, B の順になるように位置をかえる。そして、もう一度 max-round 回ゲームを繰り返す。

3 人で行なわれるやりとりの例とその表現

各 player は次の手を決めるアルゴリズムとして memory の長さ (memory-length) が有限の戦略を持っている (第 3.3.1 節参照)。例えば、memory-length = 1 の戦略なら“前回 state 6 だったら、次回は「白のカード」を、前回 state 1 だったら、次回は「黒のカード」を、…”といった具合である。従って、有限な長さの state の history によって次の手が決まる。また、各 player は初手に何を出すのかのについて情報を持つ。

Figure 3.2 は、逆時計まわりに player1、player2、player3 が位置しているときのゲームの一例である。Figure 3.2 の右の図は左の表で示されるやりとりの様子を 3 人のカードに着目して表現している。以降、この繰り返し 3 人ゲームのやりとりは Figure 3.2 の右の図のように表現する。

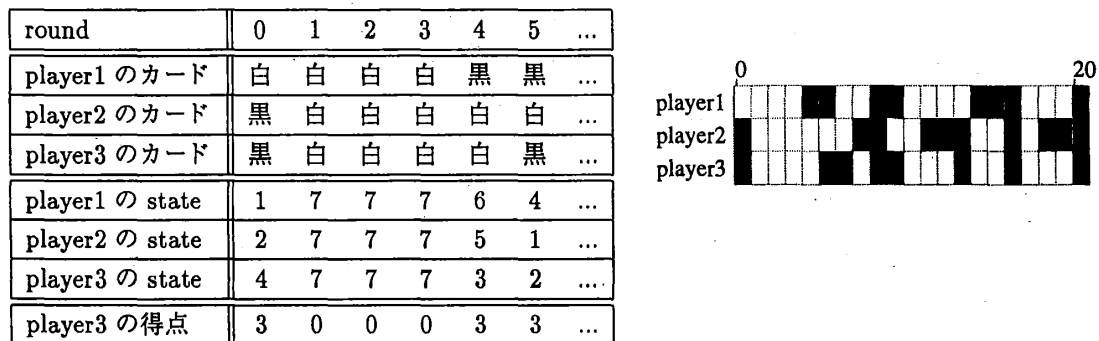


Figure 3.2: やりとりの例 : player3 の左に player1、右に player2 がいる位置関係で行なわれたやりとりの例。各 player は過去の round の state から各個体の持つアルゴリズムに従って、一意に次にだす手を決める。左のやりとりで出されたカードの遷移を、右の図のように表現する。横軸は round である。

3.3 Player の持つ戦略

3.3.1 8 分木による戦略の Genetic Coding

各 player は次の手をきめるアルゴリズムとして、最初の round に出す手の情報と有限の memory-length の戦略を持つことは既に述べた。このシミュレーションで各 player が持つアルゴリズムは、8 分木構造による coding で表現される。これは、T.Ikegami の 2 分木による genetic coding[15] を参考にして、3 人ゲーム用に 8 分木に変更したものである。この tree による coding は次のような長所がある。

- history の長さが memory-length より短い時に、次の手を決めるアルゴリズムを定義できる。したがって、Lindgren のモデルのように round 数が無限回であることを仮定しなくてもシミュレーションを行なえる。また、周期状態に入る前の transient の部分に関する問題を取り扱うことができる。
- Lindgren のモデルに比べて、計算機のメモリーをあまり消費しない。従って、比較的大きな memory-length まで進化させることが出来る
- genetic fusion process の果たす役割について、考察できる。

gene と tree

3 人のカードの状態を表す state は 0 から 7 までの数で表現できた。その state の列を一つの gene と呼ぶことにする。ゲームを行なう各個体は gene をいくつか持っており、それらを合体させることで一つの 8 分木をつくる事が出来る。この tree はちょうど染色体にあたるものである (Figure 3.3.1 参照)。

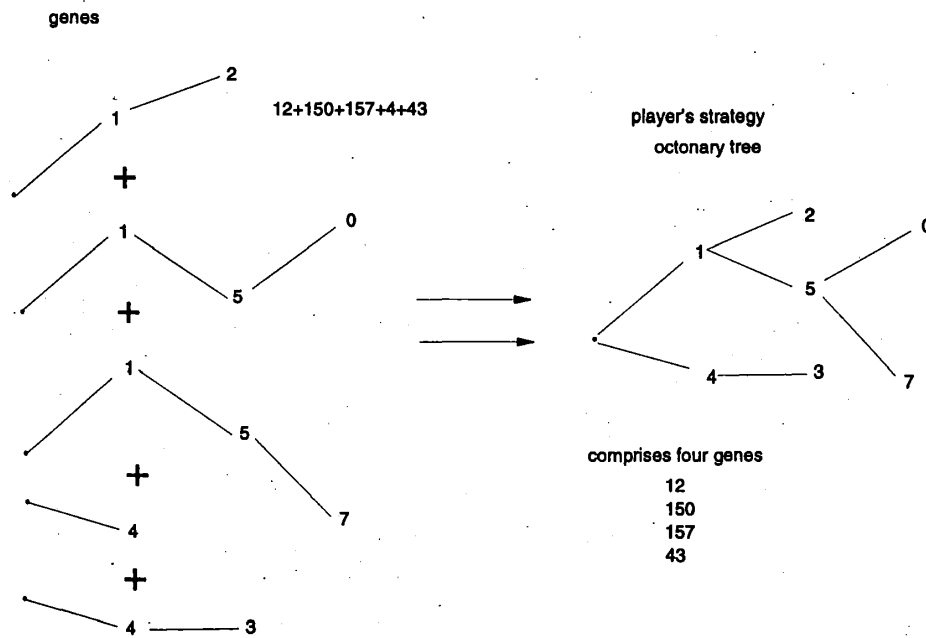


Figure 3.3: 8 分木による coding: gene を合体させて 8 分木を構成する。gene どうしがオーバーラップした時は短い gene が長い gene にとって代られる。

次の行動の決定

ある player が、次に出すカードは以下のように決める。

1. まず、player の 1 回前、2 回前、3 回前… の state の列を B とする。(例: state が 1 回前 = 5、2 回前 = 5、3 回前 = 4 なら $B = 554$)
2. 次に、tree から gene を全て取り出して $A_1, A_2, \dots, A_n$ とする。ただし、完全にオーバーラップしてはいけいない。(例: Figure 3.3.1 の右の tree なら、 $A_1 = 12, A_2 = 150, A_3 = 157, A_4 = 43$)
3. B を $A_1, A_2, \dots, A_n$ 全てと、数列の最初から一つずつ比較する。もし一つでも、どちらかが、どちらかを完全に含んでいたら、次の手は「白のカード」になる。(例えば、 $B = 3546, A_2 = 35$ の時など。) それ以外の場合は「黒のカード」を出すことになる。

なお、シミュレーションの都合上、tree の最大の枝の長さ MaxMemoryLength を設定している。

3.3.2 突然変異

tree の mutation としては、以下の 4 つのタイプのものが起こるようにした。(Figure 3.3.2)

1. 枝がついていない場所に枝を付ける。(各枝ごとに mutation rate = PointAdd で node に付く)
2. tree の端についている枝を切り落とす。(端の枝それぞれについて、mutation rate = PointRemove で切り落とす)

3. 端の枝に一度に 8 本の枝を付ける。この mutation では戦略自体に変化は起こらない。(端の枝それぞれについて、mutation rate = Dupli で付ける)
4. ある 枝を、先に付いている枝も含めて再帰的に落とす。(各 node ごとに mutation rate = RemoveRecursively で切り落とす。)

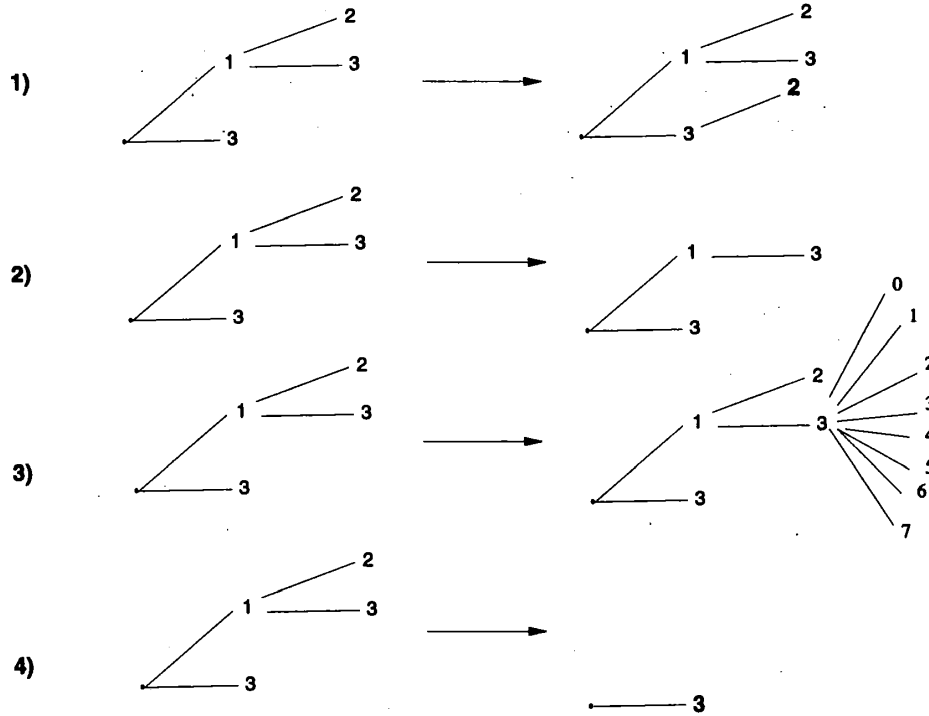


Figure 3.4: 4 つのタイプの mutation

3.4 Population Dynamics

Population Dynamics に関するルールを述べる。まず、同じ戦略を持つ個体は同じ種族に属すると考える。種族 i の個体数は、1 を全体にした割合 x_i で表される。個体は同族集団も含めたすべての個体と戦う。種族 i, j, k に属する個体どうしが、第 3.2 節のルールに従って、繰り返しゲームを行なった結果、1 round あたりで種族 i の個体が獲得した平均利得を g_{ijk} とする。すると、種族 i の個体が全ての個体とゲームを行なって獲得する利得 s_i は

$$s_i = \sum_{j,k} g_{ijk} x_j x_k$$

である。従って、システム全体の平均利得 s は

$$s = \sum_i s_i x_i$$

となる。平均利得がシステム全体の平均を上回るかどうかで各種族の適応度を測る。種族 i の適応度は次の w_i で現される。

$$w_i = s_i - s$$

そして、generation t から $t+1$ にかわるにあたって、適応度に応じて次の世代の population がきまる。

$$x_i(t+1) - x_i(t) = dw_i x_i(t)$$

(ここで、 d は growth constant である。) なお、平均利得がシステム全体の平均 s より低い種族は次の世代で population を減らすことになるが、その時、population が 閾値 KillLimit より少ない種族は絶滅する。また、世代が変わる時、決まった mutation rate で mutation が起こり、mutant はその母体となった種族の 10% の population を得る。逆に、mutant を生み出した種族の population は 10% 減少する。これらが一通り済んだら、全 population の和が 1 となるように各種族の population を正規化して、また、次の generation のゲームへと進んでいく。

3.5 このゲームの特徴

3.5.1 noise の無いゲーム

既に述べたように、このシミュレーションではゲームに noiseが入っていない。次の手が完全に deterministic に決まる訳だが、そのことに起因する、注意すべき特徴が 2 つある。

1. 同じ種族の player が 3 人集まったときは、全員が全く同じアルゴリズムを持っているので毎 round 必ず全員が同じ手を出ことになる。従って全員 0 点しかとれない。
2. 各 player の持つ tree の枝の最大長が設定されていて (memory-length に制限がある)、しかも、次の手が完全に deterministic に決まるので、3 人のやりとりは最終的に必ず周期状態に陥る。

- 周期部に入る前を transient 部と呼ぶ

3.5.2 役割の分化

適応度を上げるためには、誰かが譲って (二人で残りの一人をはめて) 役割を分担して、2 対 1 に分化しなければ得点を得られない。(三人が同じカードを出す状態は誰も得点を得られないのでシステム全体にとっても不毛である) 後の結果で分かるように、大きく分けて 2 通りの分化の仕方が考えられる。

階級的分化 役割を固定したままで誰か 1 人が損をする偏った分化。

Table 3.5 のように完全に一方的な階級的分化の場合、に入っている 2 人は最高 3 点までの平均得点を得ることができる。

時間的分化 役割を時間軸に沿って交替していく分化。

Table 3.6 のように完全に公平な時間的分化の場合、3 人のプレイヤーは最高 2 点までの平均得点を得ることができる。(3, 3, 0 点を同じ割合で得るため)

これらはそれぞれ 2 人の結託、3 人の結託に相当するものである。階級的分化の状態を作り出すなどして、基本的に相手を凌駕することで適応度を上げようとするやりとりを「攻撃的なやりとり」と呼び、時間的分化のように、お互い譲り合うことによって安定してある程度高い適応度を上げるやりとりを「協力的なやりとり」と呼ぶことにする。



Figure 3.5: 階級的分化の例



Figure 3.6: 時間的分化の例

平均得点

平均得点は、協力的なやりとりが行なわれているか、攻撃的なが行なわれているかの一つの目安になる。まず、全くランダムな戦略をもつ、何も考えないプレイヤーが3人集まったときは、8つのstateがほぼ同じ割合になると考えられるので、 $\frac{3.0 \times 4 + 0.0 \times 4}{8} = 1.5$ 点になる。また、Table 3.6で表されるような完全に協力的な3周期のやりとりでは、 $\frac{3.0 + 3.0 + 0.0}{3} = 2.0$ 点に近付くだろう。攻撃的なやりとりが行なわれると、搾取する方のaverageは一時期上がる可能性があるが、いずれ搾取される方のpopulationは少なくなるので、そのうちaverageが下がっていく。従って、それほど平均点は高くないだろう。

3.5.3 何が有利な戦略か？

囚人ジレンマではPlayerは「Cooperate」「Defect」という2つの手を選べる。これらの手は非対称で、Cooperate、Defectを入れ換えたら、各playerの戦略が持つ意味は全く違うものになる。ある時点で、どういうやりとりをすべきかは、かなり、「Cooperate」「Defect」という手に依存する部分が多い。しかし、このシミュレーションの3人結託ゲームでは「黒のカード」、「白のカード」という「手」自体に意味はなく、この2つの手を入れ換えても同じゲームである。ある時点でどういうコミュニケーションの方法が有利かはsystem全体の傾向に大いに左右される。例えば、「3周期のやりとりが有利な社会である」とか、「5周期のやりとりが有利な社会である」とか。いわば、社会のルール自体が個体どうしの相互作用によって決っていく状況が生まれる。

Chapter 4

シミュレーションの結果と考察

シミュレーションの概要

シミュレーション全体の流れ

前章で説明したモデルによって、いくつかシミュレーションを行なったが、最も特徴的な一例を本章で紹介する。以下に、シミュレーションの一般的な流れを示すが、周期の長さなど細かい点に違いはあれ、大体どのシミュレーションでも、以下のような傾向を持っている。

1. 初期の進化は階級的分化による攻撃的なやりとりの方向へ進んでいき、その結果、ある攻撃的種族による、1種独占状態に陥り、かなり長い期間続く。その後、階級的分化による1種独占状態が、不完全ながらも協力的なやりとりの発生によって破れる。その後次第にシステム内で行なわれるやりとりの中に時間的役割分化の要素が増えてくる。
2. 安定で完全に一樣な $3n$ 周期の時間的分化の社会が現れる。この社会はかなり長い間つづき、transient部の多様化のみが起こる。
3. 周期部自体の mutation が成功するようになり、様々な周期の社会を変遷していく。
4. 周期部の多様化がはじまり、複数の周期のやりとりが共存する様子が見られるようになる。そのうち、やりとりの複雑化もみられるようになる。

初期条件

このシミュレーションで使われる各種パラメータは、max-round = 1000、d(growth constant)=0.2、KillLimit=0.2、MaxMemoryLength=4、mutation 関連では、PointAdd=0.1、PointRemove=0.1、Dupli=0.001、RemoveRecursively=0.001、最大の種族数 = 9 種に設定している。

mutation の具合によっては local な peak に捕らわれて、進化が止まってしまう場合があるので、戦略の variation を増やす意味で最大種族数は大きくとるべきだし、kill limit もなるべく小さくすべきである。しかし、最大種族数を増やすと、3人ゲームなので2人ゲームに比べて計算に時間が一気に増加する。ところが、「適応度が高い種族は kill limit より population が多いかどうかにかかわらず生き残る」というルールを導入した関係で、小さいシステムサイズでも、また、幾分 kill limit が高くても、適応した種族が新種が生き残り進化が続いて行くようになった。(当然、他のパラメーター、例えば mutation rate などの値によっては、進化が止まってしまうことが多々ある。)

最初に memory-length = 1 の範囲でランダムにつくった tree をアルゴリズムとした持つ、6つの種族でシミュレーションを開始した。

4.1 階級的分化、協力の発生

4.1.1 簡単な階級的分化の形成

ランダムに造られた tree coding をもつ 6 つの種族に、それぞれ同じ population (1.0 / 6) を与えてシミュレーションを始めた。このシミュレーションを例に、初期の進化の特徴について述べて行く。

システム内で行なわれるやりとりの様子

generation が始まったばかりの時はランダムに作られたアルゴリズムどうしの戦いなので、その generation に存在する他の player のアルゴリズムとの関係で、結果的にたまたま有利なやりとりをおこなっている種族が生き残る。

例えば、Figure 4.1 の (a) のやりとりでは階級的分化が起こっているが、そのためのアルゴリズムは当然進化、適応した結果できた訳ではない。

generation が進んでいくに従って新しい種族が現れ、少し巧妙に階級的分化を形成して前世代の種族を凌駕する種族が次々と生まれて来る。

例えば、Figure 4.1 の (a) のような階級的分化の状態は、「2 回同じカードで連続仲間外れになったらその状態を拒否する」という memory-length = 2 の単純な戦略があれば防ぐことが出来るが、(b)、(c)、(d) では様々な状態を遷移しながらの階級的分化が行なわれているので、搾取されないためのアルゴリズムも工夫が必要である。(d) では「2 回外されたら、違うカードへ」変えているにもかかわらず搾取されている。この状態を抜けるには 4 の memory-length が必要である。

全体として、初期のコミュニケーションは transient 部がほとんど無く周期も非常に短いものがほとんどである。

下降していくシステム全体の average

システム全体の average は population dynamics と共に Figure 4.2 に示されている通り、最初、ランダムに作られた戦略からシミュレーションを始めているのでシステム全体の average は、やはり、1.5 点くらいからスタートする。generation が進むにつれ、新しい種族が次々と旧種族を凌駕しながら登場してくるのだが、それによって average は徐々に下がり、1.0 点を割るようになる。

このことは、この時代の進化が、「他の種族の得点を下げることによって相対的に自分の適応度を上げる」方向に向かっていることを示している。この場合、自分の得点は必ずしも高くなくてもよく、全体の average を上回ってさえいればよい。つまり、このシステム内でゲームを行なう player の適応度は local なゲームにおける得点の高さによって決まるのではなく、全体の平均にたいする相対的な得点によって決まるのである。

初期のアルゴリズムの進化

既に述べたように、memory-length = 1 の範囲でランダムな tree-coding を持つ 6 種族からシミュレーションは始まった。generation が進んでいくにつれ、memory がより長い新種が次々とあらわれ、その中には以前の種族を凌駕していくものが現れる。一方、この時代に見られるほとんどのやりとりでは、階級的分化が形成されており、しかも新しい種族が次々に現れて、さらに分化の形式が複雑になっていく。この際、memory が長くなったことは、新たな階級的分化の形成にどのような意味を持っているのだろうか。

実際にゲーム中のやりとりの中で、memory-length が長くなった部分が実際どのように使われているのかを、player の枝を見ながらやりとりの様子を解析してみると、memory が長くなることによるメリットは一般に「memory がより短い種族をはめて高い得点を得ることができる」という点よりむしろ「memory が長くなることで自分がはめられることを防げる」という点にあることが分かる。

攻撃的なやりとりを行なう 1 種の独占状態

進化が階級的分化の方へ進んでいく結果として、最終的に、攻撃的やりとり (第 3.5.2 節参照) を行なう 1 種族が population を全て占める状況が生まれてくる。そして、average がほとんど 0.0 になって、その後、かなり長い間その状態が続く。シミュレーションが始まってから、典型的な攻撃型やりとりを行なうある種族の、長い期間にわたる 1 種独占状態にまでくる道程は、このシミュレーションに限らず、ほとんど全てに共通にみられた現象である。

このシミュレーションでは、その一種独占が、generation 426 に始まっている。Figure 4.2 で分かるように average もほとんど 0.0 になっている。この例では、独占を行なうのは ID329 である。population をほぼ 100% を占めつづけて新しい種族の台頭を許さない。

システム全体の average が 0.0 になっているのは、次の 2 つによる。

- 1 種が population を 100% 近く占めている。
- 同種の player 3 人の間でゲームが行なわれるときには得点をとることが出来ない (3.5.1 節参照)。

4.1.2 攻撃的独占種の安定性

攻撃的独占種は、このシミュレーションにおける ID329 の Figure 4.1(d) に示されるやりとりのように、2 対 1 の階級的分化状態を形成して、多種を仲間外れの状態にして相手の得点を下げさせる戦略をとる。また、2 対 1 の状態を拒否する新種に対しても、自分から時々譲って協力したり、ということはない。この場合、全員が同じ手を出し続けることになるので、transient の部分を除けば得点は全員 0 点である。よって、独占種は少なくともこの新種とのやりとりだけで凌駕される可能性はないが、この新種が他の種族とのやりとりでいくらか得点を獲得する可能性があるので population 分布まで計算にいたれた得点 (適応度) で凌駕される可能性はある。攻撃的種族は自分か損をする役割をすることを徹底的に拒否できる戦略 (memory が長くなることによって実現した) なので、一つ一つのやりとりで負けることはない (transient 部の優劣は除いて) が、適応度として考えた時に負ける可能性はあるのだ。

ただし、一旦 population のほぼ全てを独占してしまうと、新種にとって、攻撃的独占種との間で行なわれるやりとりで得た得点が適応度のほとんどの重みを占めてしまうので、独占種はほぼ安定になる。この理屈は、繰り返し囚人ジレンマゲームで、戦略 All-D が ESS になる理由とほぼ変わらない [9]。

4.1.3 協力的なやりとりへの進化

攻撃的独占種の滅亡 — transient 部の果たす役割

第 4.1.2 節でみたように、攻撃的独占種を凌駕するには、新種は、ある程度の population を持つ必要がある。ある程度の population を持てば、あとは、以下の条件が揃えば新種は独占種を凌駕できる。

1. 独占種とのゲームで搾取されないこと。そのゲームで自分が 0 点であっても、独占種が 0 点であれば問題ない。
2. 独占種以外を相手にしたゲームのうちのどれかで、ある程度の得点を獲得すること。

具体的には、独占種とのゲームでは、独占種と全く同じやりとりを行なって (そうしないと独占種は譲らないので搾取される可能性が高い)、独占種以外とのゲームでは協力的やりとりを行なうことである。協力的やりとりについては後に詳しく述べる。

さて、新種はある程度の population を獲得すればいいのだが、攻撃的独占種の社会の中でどのように population を増やせばいいのだろうか。第 4.1.2 節では、繰り返し囚人ジレンマゲームにおける戦略 All-D と、ここで問題になっている攻撃的独占種の安定性の類似について述べたが、この 2 つは次の点で大きく違う。つまり、All-D はゲームの初めから「D」を出し続けるが、このシミュレーションでは周期部に入る前に、ある程度の transient 部がある。独占種が population のほとんどを占めている状態では、周期部で

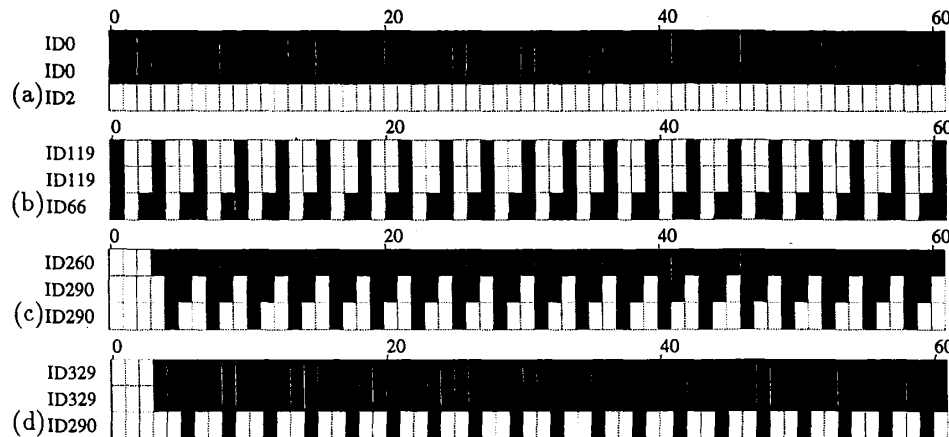


Figure 4.1: 初期のやりとりの例 (Generation 0-450) : (a) は generation 0、(b) は generation 200、(c) は generation 400、(d) は generation 410 で行なわれたやりとりの代表例である。(a) でのやりとりを見ると、2 人の ID0 は「黒のカード」出し、ID1 は「白のカード」を出し続けていて、ID1 が 2 人の ID0 に仲間外れにされ続けている。ID0 は他の 2 人の内のどちらか 1 人の行動が変われば得をするので、「白のカード」のままで何回か待つことは必ずしも意味がない訳ではない。しかし memory の長さが短いうちは危険である。例えば ID0 のように memory-length が 1 であれば、「何回か続けて仲間外れにされたままなら行動を変える」といった予防策を戦略のなかに入れることができない。generation が進むにつれて memory がより長い種が次々に現れて、memory が短い種を相手に、より巧妙に階級的役割分化を形成して、次々と population を凌駕していく様子がみられた。

は独占種と同じやりとりを行なうしかないが、その状態に入る前の transient 部で独占種を上回ることは可能である。ただし、transient 部がやりとり全体の中で占める割合は非常に小さいので、ほんの少しずつしか適応度を高めることはできない。したがって、これだけでは population も少しずつしか増加しない。

このシミュレーションでは Figure 4.4 の population dynamics における ID400 の population の微増がそれに当たる。ここでは、長い間 population を独占してきた ID329 が、generation 4350 にかけて、ID400 に少しずつ population を減らされている様子が示されている。ID400 は基本的に ID329 と同じやりとりを行うが、一方 transient 部での階級分化によって ID329 を凌駕する。しかし、transient 部は全体のやりとりからみると非常に短いので population の増え方もほんの少しずつである。その後、ID432 の誕生によって ID400 と ID432 のとの間に協力的なやりとり (Figure 4.3-(a)) が成立し、この 2 種に対して 0.0 点しかとれない ID329 は滅亡する。transient 部のやりとりによる 変異種の population の微増が、攻撃的な独占種の社会を切り崩す前段階としての役割を果たしているのである。

協力の発生

階級的分化による 1 種独占状態が、協力的なやりとりの発生によって破れたことはすでに述べた。この場合、もともとの 1 種独占社会の average が 0.0 なので、協力の形態はかなり不完全なものでもある程度の得点を獲得できれば適応度は高くなり得る。

例えば、このシミュレーションでは Figure 4.3-(a) に示されるやりとりがそれにあたる。ID432 の誕生によって ID400 と ID432 のとの間に協力的なやりとり成立した。このやりとりは、Figure 4.1-(a) で見られる典型的な階級的分化と一見パターンが似ているが、じつは内容も効果も全く違う。前者の場合、3 人の player ID0、ID0、ID2 の中でサブグループが形成されているのは ID0 どうしの間であり、ID2 は全く点をとれないが、後者の場合、ID400、ID400、ID432 の中でサブグループが形成されているのは、異種 ID400 と ID432 の間であり、このやりとりではサブグループに入る ID400 とサブグループに入れない ID400 が存在する。従って種族全体としてみると、ID432 はもちろん、ID400 もこのやりとりによってある程度の

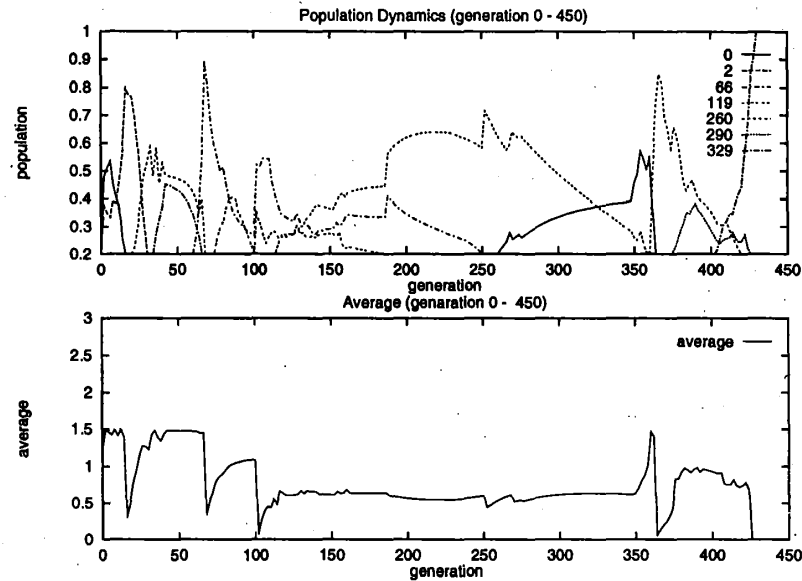


Figure 4.2: 初期の population dynamics とシステム全体の average : population dynamics では、population が 0.2 を超えている種族のみ表示されている。average は全体として次第にさがり、1.0 を割るようになる。最後に現れた ID329 はこのあと generation 4300 くらいまでほとんどの population を独占し続ける。この種族は完全に攻撃的なやりとりで新しい種族の台頭を防ぎ続ける。

得点をとれる。(得点は不公平だが。) 一方、攻撃的独占種の社会では、先も述べたように average はほとんど 0.0 であった。これは、独占種の社会では、周期部において独占種と同じやりとりを行わないと搾取されてしまうからである。ある程度の利得を獲得できる ID400 と ID432 は population を増やし、ID329 は長い間 population を独占してきたが、ここで一気に滅亡する。

協力の進化

一度、不完全ながらも協力的なやりとりが発生すると、時間的分化による協力を行なう方向の進化が次第に進んでいく。(3 人の利得が完全に平等ではない階級的分化の要素があるにしろ、やりとりの中で協力的な部分が増えて行く)。

そういった様子は、例えば Figure 4.1 の (b)–(f) に示される。(b) から (f) へと generation が進むにつれて、時間的分化による協力で効率的に得点をとれるようになってきている。(効率的とは、誰も譲らずに全員が同じカードを出して、誰も得点を取れない無駄な状態は避けるようなやりとりを行なうことを指す。進化もその方向に向かっている)

Figure 4.4 でみられるように、時間的分化による協力が進化していくにつれ、average が徐々に上がって行き、そのうち 1.5 点も越えていく。時間的分化のルールがある程度成立すれば、2.0 点はともかく 1.5 点は容易に越えることが出来る (第 3.5.2 節)。

4.2 安定で一様な周期的時間分化の社会

4.2.1 安定一様な時間的分化社会の出現

時間的分化による協力状態が徐々にやりとりの中に現れるようになってしばらくすると、やりとりの中で $3n$ 周期の時間的役割分化、つまり 3 人のなかでサブグループから外れる役目を平等に交替する行動を行なう社会が現れる。しかも、この社会でやりとりを行なう種族が全て、同じルールに従う (3 周期なら全員 3 周期)。

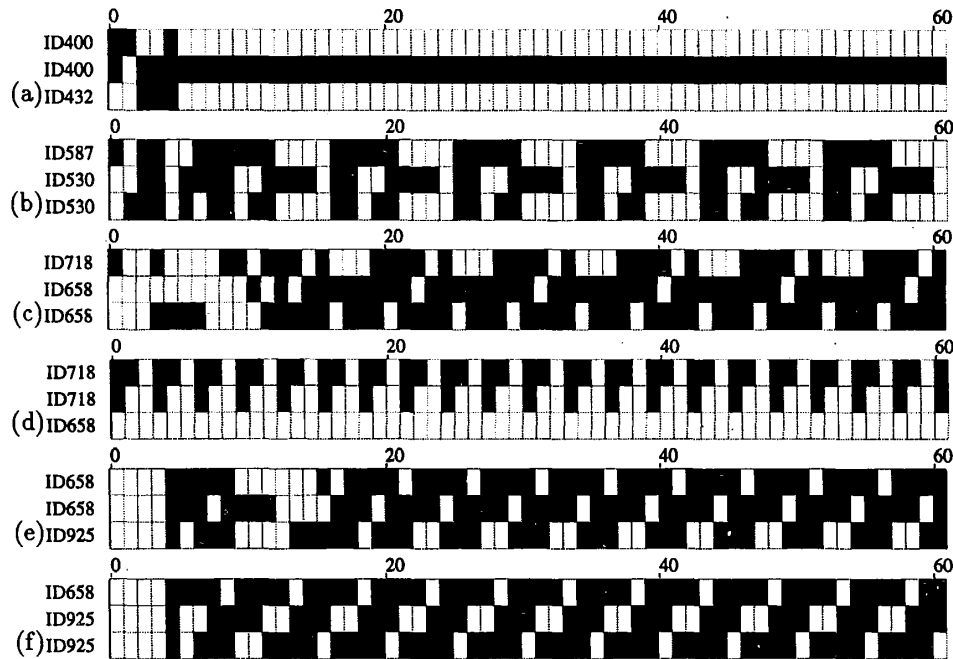


Figure 4.3: 協力的な要素の入ったやりとり (Generation 4350–4750) : (a) は generation 4400、(b) は generation 4500、(c) は generation 4600、(d) は generation 4600、(e) は generation 4700、(f) は generation 4700 で行なわれたやりとりの代表例である。やりとりの中で次第に時間的分化が見られるようになってくる。

3n 周期のやりとりは 3 人の player が完全に平等な利得を獲得できて、しかも、システム全体からみて最も効率的に得点を獲得することができる。

このシミュレーションでは generation 4750 前後に 6 周期の時間的分化が見られるやりとりが現れ、やがて社会全体に広がり、全種族が完全に協力的な社会がはじめて現れた。この時代にシステム内で行なわれたやりとりの代表例を Figure 4.5 に示す。全種族の中から 3 人の player を任意に選んでも、必ず 6 周期の時間的分化が見られるやりとりを行なう (全員が 6 周期型の player)。今後、様々な社会が生まれて来るが、社会の中で行なわれるやりとりが全て 同じタイプのやりとりであることはこの 6 周期社会を最後にほとんどない。必ず一部に違ったやりとりが見られる。

transient 部の多様化

3 人の player が平等に得点を獲得することができるやりとりの中でも、3n 周期タイプのやりとりは 2.0 点近く得点を獲得することができるので一番得点効率がよい。従って 3n 周期の社会の中に新しく生まれてきた mutant が、既に高い得点を獲得している以前の種族を凌駕して生き残っていくのは難しい。

新種族が生き残るための方法のうち、ある程度実現しやすいのは次の方法である。

1. 基本的に 3n 周期のやりとりを行なって、協力状態を崩さない。
2. transient 部で旧種族より高い適応度を獲得する。

この方法で必要なのは、様々な player を相手にして周期状態に入るためのアルゴリズム、つまり transient 部で phase を外すためのアルゴリズムである。

実際、シミュレーションでは generation 7700 までの長い間新しい種族が次々に台頭してくるが、全て基本的に 3n 周期のやりとりを行なう種族である。そして mutation によって変化しているのは transient 部のやりとりのみで、transient 部は相手によって違うやりとりが行なわれる。

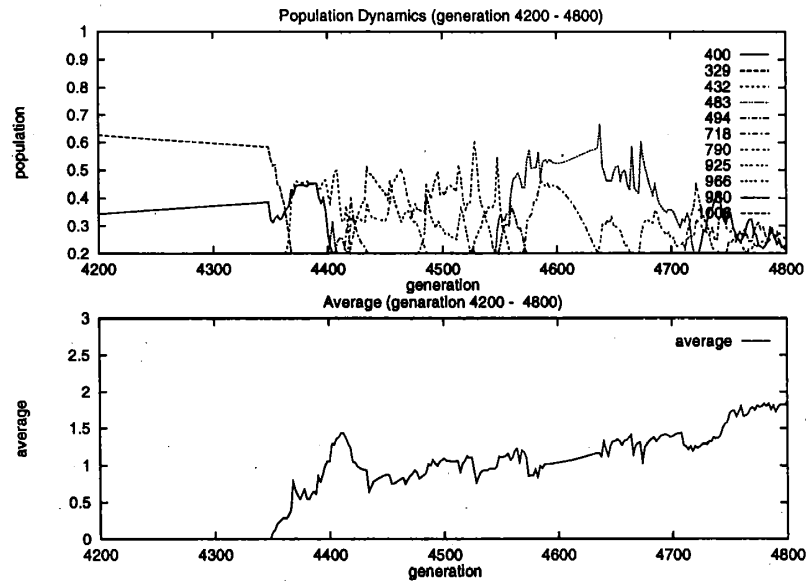


Figure 4.4: Generation 4200 から 4800 までの population dynamics とシステム全体の average : ID329 が滅びた後、徐々に average が上がって 2.0 点に近付いていく

4.2.2 旧種族が読み取れないやりとりを行なう新種族 — 一様 $3n$ 周期社会の終焉

$3n$ 周期の社会で新種族が台頭する方法として、transient 部の進化の他に、もっと根本的に周期部のやりとりで旧種族を凌駕する方法も当然考えられる。その方法と問題点を以下にあげる。

1. 旧種族の得点を落して、できれば自分が 2.0 点以上獲得するような (階級的分化が一部に含まれる) 攻撃的やりとりを行なう。
 - (a) このくらいの時期になると、大部分の種族は、一方的に損をし続ける状態を拒否する構造をアルゴリズムのなかに持っている。サブグループから外すつものの相手に仲間はずれの状態を拒否されると、その round は全員同じ手を出すことになるので誰も得点を獲得できない。旧種族をはめようとする行動に出た結果、local なやりとりでは旧種族に勝りながら、適応度で負けてしまう可能性がある。
 - (b) 新種が旧種の得点を落す方針で生き残って行くためには、大部分の旧種族とのやりとりにおいてある程度高い得点を獲得する必要がある。(旧種族どうしのやりとりでは、安定した高い得点を獲得している。また、新種族が現れた時に population の大部分は旧種族である。但し、旧種族どうしのやりとりの中でも同種どうしのやりとりは 0 点しか獲得できないのでその分いくらか低くなっている。) しかし、アルゴリズムがいくらか違う旧種族が何種か存在する状況で、それぞれに対して攻撃的なやりとりを成功させるのは難しい。仮に成功しても、このやりとりに耐性のある mutant が旧種族から生まれると元の社会に戻ってしまう可能性もある。(逆に旧種族の中で大量絶滅があった時など、新種族とのやりとりが占める割合が相対的に大きくなると旧種族は凌駕されやすくなる。)
2. 旧種族が実現できないような、新しいパターンのやりとりを行う社会を築く。
 - この場合、新しいパターンのやりとりを共に行なう協力者 (種族) が同じ時期に存在していることが必要である。
 - 1 のように旧種族の得点を (一時的にしる) 下げることに成功すれば全体の average もある程度下がる。新しいパターンのやりとりによって獲得できる得点が、少しでもその下がった average

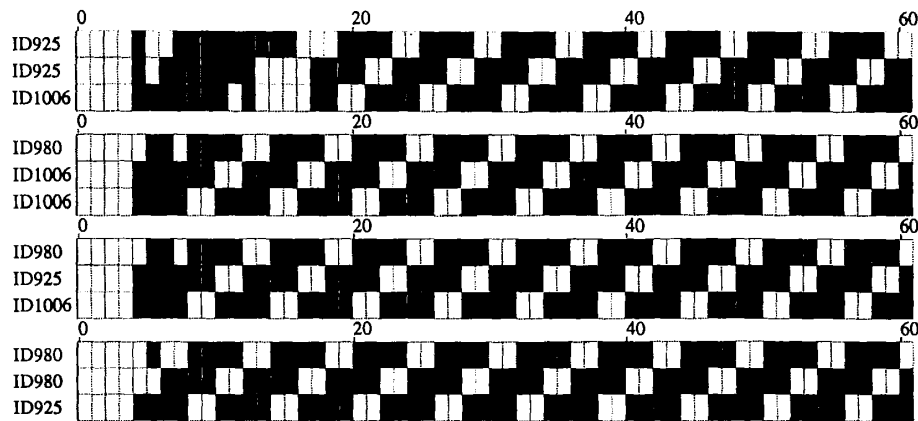


Figure 4.5: 平等な 6 周期の時間的分化 (Generation 4750–7700) : 上のやりとりは全て generation 4800 に行なわれたやりとりの代表例である。「白のカード」を出す player が 2 人、「黒のカード」を出す player が 1 人の状態。「黒のカード」を出す (結託から外れる) 役割を 3 人の player の間で平等に 2 回ずつで交替する。3 人の平均利得の合計が 6 点で、システム全体にとっても最も効率がいいやりとりの一つ。

を上回っていたら、新しいパターンは社会全体に広がることができる。

上の 2 つを満たすような mutation が一度に起こるのは困難であろう。すでに述べたように、時間と共に transient 部を変化させていく進化へと続いていく。しかし、進化が進むにつれて、次第に根本的に周期部から旧種族を切り崩していく動きが見られるようになる。それは、基本的にもとの $3n$ 周期の社会のやりとりを行ないながら、旧種族が読みとれない程度に、時々周期を外すやりとりからはじまる。

シミュレーションでは generation 7740 になってようやく 6 周期社会から新しい社会への移行が始まる。その様子を Figure 4.6 に示す。

ここで新しい種族 ID3701 は 6 周期型のやりとりの中で、基本的に 6 周期的なやりとりを保ちながら時おり協力から外れる、6 周期もどきのやりとりによって、旧種族の得点を下げている (自分の得点はそれほど下らない)。6 周期型の種族は部分的に損をしても防ぐことができない。この新種の台頭によってシステム全体の average が 1.5 くらいに急落していったところで次の 5 周期の社会へと続く。そして、様々な周期の社会を変遷していくことになる。

4.3 周期的社会の変遷

4.3.1 役割の周期的時間分化が起こる社会とその変遷

$3n$ 周期の社会が終わった後も、ある特定の周期の時間的分化が頻繁に見られる社会がいくつか現れる。様々なパターンの社会を変遷していくことになるが、 $3n$ 周期の時のように全員が必ず同じやりとりを行なう、ということとはなくなる。ほとんどの場合、異なるやりとりがいくつか見られる。これらの特徴は、他のシミュレーションでも共通である。しかし、一般的にどの順番でどの周期になるかはいえない。

ここでは、このシミュレーションで現れた社会に特定して、6 周期社会のしばらく後に現れた幾つかの代表的と思われる社会を例にあげて考察する。(説明のために順番は少し前後する)

- 5 周期の時間的分化社会
(Generation 7800, Figure4.7)
- 18 周期の時間的分化社会
(Generation 8240–8380, Figure4.9)

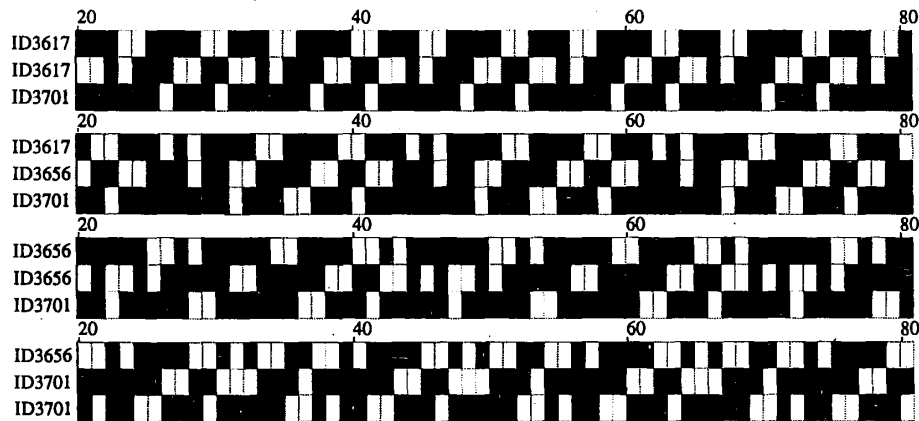


Figure 4.6: 6 周期社会の終焉 (Generation 7740 前後): 上のやりとりは全て generation 7740 に行なわれたやりとりの代表例である。新種-ID3701 が 6 周期型の種族-ID3617 と ID3656 から搾取しているやりとりの様子。ID3701 が増えるに従って全体の average が下がり、新しいやりとりの社会が生まれる下地が出来上がる。

- 5 周期が中心の社会
(Generation 8550-8650, Figure4.8)
- 一時的に現れた多様な周期的社会の例
(Generation 8700, Figure4.10)
- 3 周期社会の始まり
(Generation 9000, Figure4.11)

不公平な時間的分化が行なわれる社会の成立—5 周期の社会

このシミュレーションでは、6 周期の社会が崩壊したあとと暫くして、Figure4.7 に示される 5 周期社会が現れて 6 周期型の要素が入ったやりとりは完全に見られなくなる。

5 周期では 3 人の player が完全に平等な得点を獲得することができない。損をする方の種族の population が減ると、得をする方の種族の得点も落ちてくる。全ての player との対戦を total で考えてバランスが取れていれば公平になる可能性もあるのだが、mutant が現われた時にそのバランスが保たれる可能性の低さを考えてみても分かるように、公平な関係を保つのは難しい。従って、average の上下の激しい、あまり安定な社会とはいえない。実際、Figure4.7で示されるように、この 5 周期社会はすぐに崩壊する。

しかし、このシミュレーションのように「何が有利なやりとりか」を player 達自身が決めていく社会では(第 3.5.3 節参照)、得点をどのくらい獲得できるかよりも、まずその社会でどのようなやりとりが行なわれているかが重要である。例えばこの社会では、ほぼ全てのやりとりが 5 周期であるが、この社会で効率的な 6 周期のやりとりを行なおうという種族が侵入して来ても賛同者がいない限り生き残っていくのは難しい。この社会で生き残っていくには、ある程度 5 周期に近いやりとりを基本的に行って、所々で旧種族を凌駕するやりとりを行う必要がある。(第 4.2.2 節で見たように、6 周期の社会を崩壊させたのは、6 周期もどきのやりとりを行なう種族だった。) mutant が旧種族に対して行なうべきやりとりは、旧種族と同じやりとり (transient 部以外) か、似たようなやりとりである。

この 5 周期のやりとりは、5 周期のうち全員が 0 点になる状態 (全員が同じカードを出す状態) が 1 回入るので、もともと平均利得がそれほど高くなく、すぐに崩壊した。一方、同じ 5 周期でも Figure4.8 の (a)(b) でみられる 5 周期のやりとりはここで見られたのより効率的なやりとりである。この社会では、半分のくらいのやりとりが (a)(b) のような効率的 (3 人とも同じカードを出すことがない、システム全体として効率が良い) 5 周期型である。この社会は幾らかのあいだ安定に存続した。

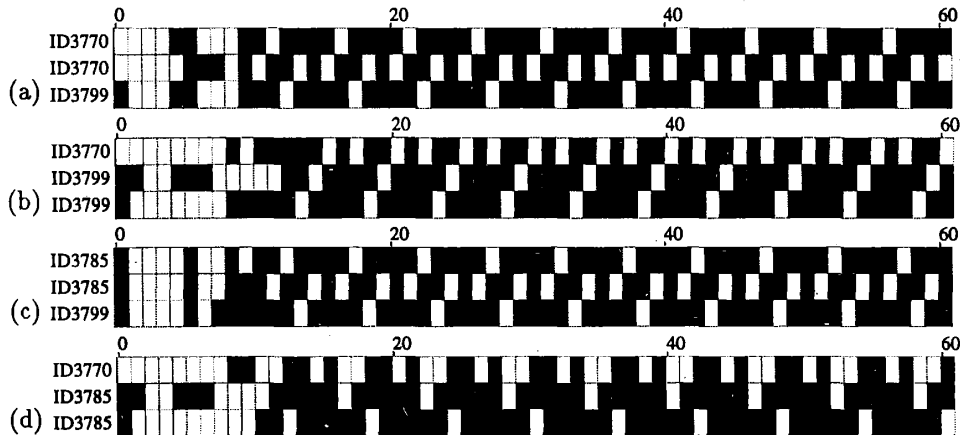


Figure 4.7: 不平等な 5 周期の時間的分化 (Generation 7800) : 上のやりとりは全て generation 7800 に行なわれたやりとりの代表例である。ここに紹介していないやりとりも含めて (d) 以外のやりとりでは、全ての (a) と類似の 5 周期の時間的分化が見られる。

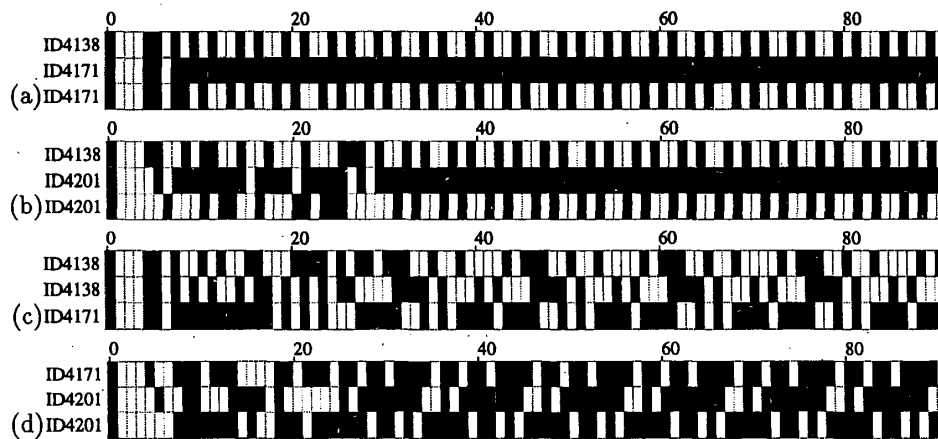


Figure 4.8: 効率的な 5 周期のやりとりが中心の社会 (Generation 8550-8650) : 上のやりとりは全て generation 8600 に行なわれたやりとりの代表例である。

他の社会に移行しやすい長い周期の社会—18 周期の社会

Figure 4.9 に見られるような、18 周期の時間的分化を行なう社会が現れ、少しの間その状態が続く。

既に述べてきたように、一般に、3 人の player が平等に、かつ最も効率的に利得を挙げるには $3n$ 周期で「譲る」役割を交替しなければならない。また社会全体から見ても、これが、全ての資源が有効利用されるもっとも無駄のない状態の一つである。しかし、18 周期社会は $3n$ 周期の社会であるにもかかわらず、あまり長続きしない。それは、次の理由によるものと思われる。

1. 6 周期の社会では、新種族が旧種族を凌駕するにあたって、「周期部では旧種族に同調しておいて transient 部で微妙に凌駕する」という簡単な解決方法とっていたが、6 周期の後の社会ではその方向のみに進化が向かうことがなくなった。必ず何らかの形で、社会のルールから少し外れることで良い得点を獲得しようという動きが一部に見られる。
2. 周期が長いので、18 周期もどきのやりとりを作りやすい。つまり、基本的にある程度 18 周期に近いやりとりを行って、所々で旧種族を凌駕するやりとりを行うのがかなり容易である。

3. 6 周期とは違って 18 周期を形成するのはそれほど容易ではないので、一度崩れかかると復帰する方向に進化が向かうのは難しい。

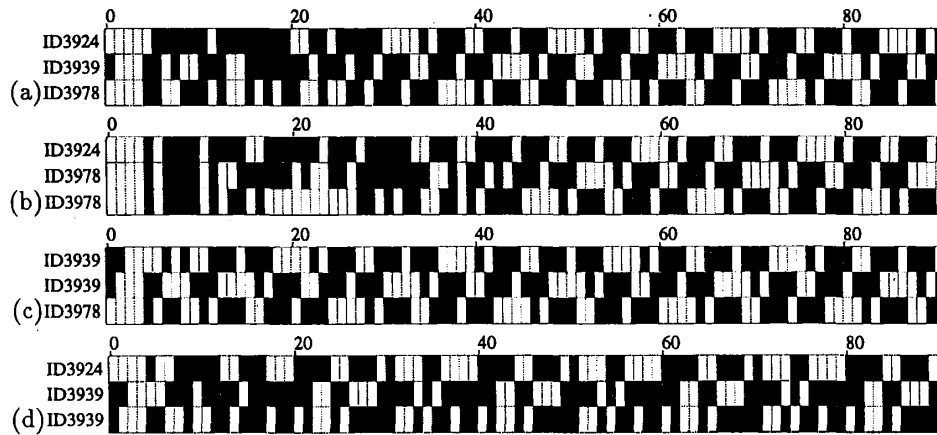


Figure 4.9: 18 周期の時間的分化 (Generation 8240-8380): 上のやりとりは全て generation 8300 に行なわれたやりとりの代表例である。ここに載せていないものも含めて (d) 以外は全て 18 周期で役割交替をするやりとりを行なっている。

多様な周期的やりとり

Figure4.10 に見られるように、一つの社会に幾つかのやりとりが共存する状況もしばしば現れる。「全員が同じカードを出す状態」が少ない、それなりに効率が良いやりとりが多い。やりとりの中で様々な試みが行なわれているにもかかわらず average も 1.4 から 1.7 くらいで割合高い。一般に、ある player が単調な周期状態を「外す」ことによってより高い得点をあげよう試みると、他の player の行動と衝突して、「全員が同じカードを出す状態」に陥る可能性が高くなる。しかし、この時代にはかなり各種族のアルゴリズムが進化しているので、「全員が同じカードを出す状態」に陥るのをできるだけ避けながら、しかも、協力状態を外すことに成功しているやりとりも見出される。

もちろん、Figure4.10-(d) のように失敗するやりとりも存在し、average を下げることもある。ただし、同じ average が 1.5 点でも、この時期のシステムの average が 1.5 点であるということ、ランダムにやりとりを行なう社会で average が 1.5 点であるということは全く内容が違う。

こういった社会では、Figure4.10 のように非効率的な状態を避けるのに成功したやりとりと失敗したやりとりがかなりはっきり分かれている。失敗したやりとりの割合が増えると average は当然下がっていく。

3 周期中心社会の始まり

Figure4.11 に見られるように、3 周期が中心的社会が始まる。後期にも詳しく述べるように、この社会は長く続くがそれほど安定な社会でもない。この時期のやりとりも半分以上は 3 周期ではない。

4.4 多様化と複雑化

4.4.1 3 周期の時間的分化が基本となる社会

ある程度の安定性をもつ 3 周期社会

3 周期は平等な周期的時間的分化の形態の中でも一番単純な形だけにかなり長い間続く。ただし、6 周期の社会の時のように、3 周期のやりとりの割合が 100% を占めるということはほとんどない。3 周期型の

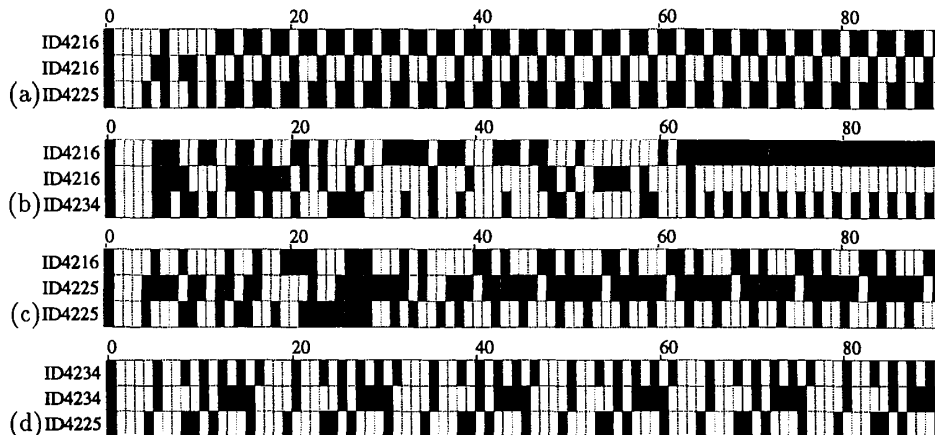


Figure 4.10: 多様な周期的社会の例 (Generation 8700) : 上のやりとりは全て generation 8700 に行われたやりとりの代表例である。様々なやりとりが行なわれているが、かなり効率的なものが多い。ただし、(d)では望ましくない状態が(全員が同じカードを出す状態)かなり入っている。周期部で旧種族を凌駕しようとするこの様なやりとりに陥る可能性もある。

新種、つまり、3 周期のまま transient 部のやりとりを進化させて現われる種族もあるが、それほど圧倒的に多いわけではない。別の社会を作ることによって 3 周期を凌駕しようという動きは常に一部にみられ、そのうちいくつかはかなり成功して 3 周期の社会の中に浸透していく。3 周期のやりとりの割合が 50% くらいになったり、場合によっては Figure4.12 のように、一時的に 0% になったりする。

ただし、3 周期の社会は 18 周期などに比べて再現しやすいので一度崩壊しかかっても復帰しやすい。この社会が長く続く理由はここにあるものと思われる。

このシミュレーションでは、3 周期の時間的分化が中心の社会が generation 9000 くらいに現れる。3 周期型が最も盛んであった時期 (generation 12500) のやりとりの代表例を Figure4.12 に示す。

2 つの協力的なやりとりが安定して共存する社会

様々なやりとりが一つの社会に共存する例は、既に第 4.3.1 節などでも見てきたが、いずれも不安定で、すぐに違う社会に移っていく。しかし 3 周期社会の中から、複数の協力的なやりとりが同時に、そして安定に存在する社会が現れる。

ここでは、3 周期と 6 周期のやりとりが共存して、ある期間安定して存続する社会の様子を Figure4.14 に示す。

(第 2.1.3 節で見たように、繰り返し囚人ジレンマゲームによるシミュレーションでは最終的に TFT 型の種族が population を凌駕して、協力的な社会が実現する (ことが多い) が、そこで行なわれているやりとりは、全て「Cooperate」の応酬だけである。) この社会は、協力的な状態が多数存在するこのゲームの特性によって可能な社会である。そして、このことは 3 人結託ゲームの解の広さと直接関連している。

このあと、3 周期の社会に他の周期のやりとりが入ることが多くなり、次第に 3 周期だけが安定という社会から脱却する方向へ進化が進んでいく。

4.4.2 多様な社会—3 周期中心社会の終焉

様々な周期 (15 周期など) のやりとりと 3 周期の共存があった後 (例えば Figure4.15)、次第にシステム内のやりとりが多様になり (Figure4.16)、3 周期中心の社会に戻らなくなる。3 周期のやりとりは今後も時々現れるが (カードが逆の 3 周期もある)、少なくとも 3 周期だけが中心の社会は一旦終わる。

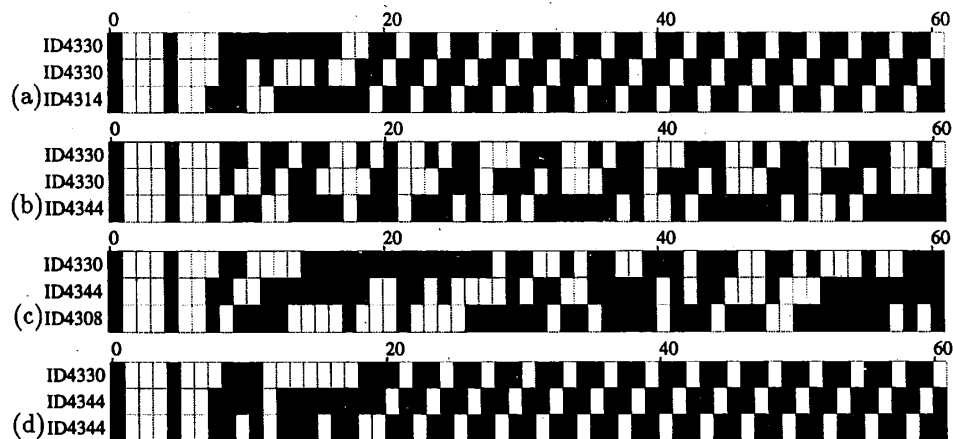


Figure 4.11: 3 周期中心社会の始まり (Generation 9000) : 上のやりとりは全て generation 9000 に行われたやりとりの代表例である。3 周期中心とはいえ、様々なやりとりが実際は混在して、3 周期が絶対的に優勢な訳ではない。

4.4.3 「外す」ことが生み出す複雑化

長い進化の過程を振り返ると、これまでの間に次のようなことがあった。

1. まず、自分と相手の間に役割の階級構造 (周期的階級分化) を形成することで適応度をあげる方向に進化が進み、
2. 次に、役割の周期的時間分化による協力関係で適応度を上げる方向に進化が進んだ。
3. 様々な周期で安定な社会を作れるようになり、様々なパターンの社会を変遷していく。そのうち、一つの社会で多様なやりとりが見られるようになり、安定して多様な社会も生れてくる。

generation 20000 に近付いてくると、Figure4.17に見られるような、やりとり自体の複雑さが現れるようになってきた。ある周期状態を外すことで適応度を上げる、という方向の進化は今までも見られてきたが (例えば Figure4.6、Figure4.10 など)、その外した結果も単周期のものがほとんどだった。この時代になると、外す行動を頻繁に行った結果、かなり複雑化する (してしまった) やりとりが見られるようになる。例えば Figure4.17 の (b)、(d) では100 周期くらいで役割交替を行なうやりとりが見られる。その役割交替も一見予想がつかない動きを示している。一方、(a) のような単純なやりとりも見られ、様々なやりとりが混在する。社会全体として多様さも存在する。

このように進化の方向が周期状態を外す方向に向かっている時は、システム全体の average はそれほど高くなく (1.5 点前後)、すぐに違う社会に移っていく。

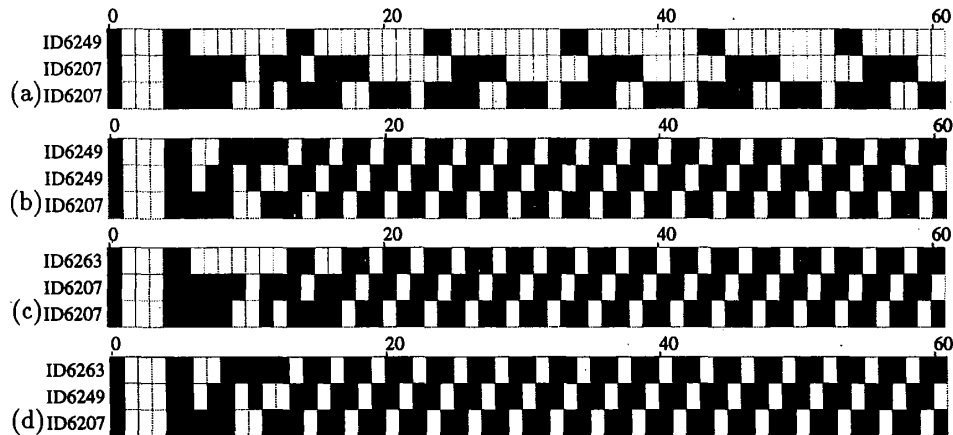


Figure 4.12: 3 周期の時間的分化が基本となる社会 (Generation 9000—15300) : 上のやりとりは全て generation 12500 (とくに 3 周期型のやりとりが最も盛んであった時期) に行なわれたやりとりの代表例である。

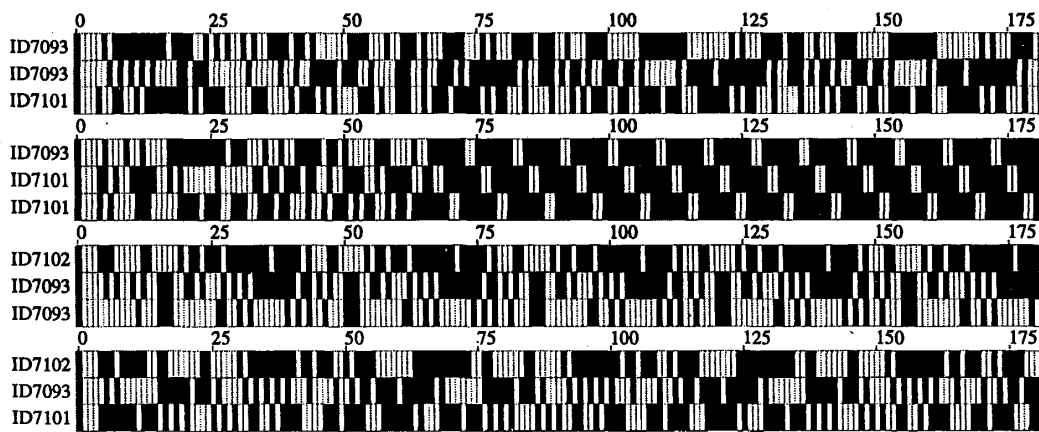


Figure 4.13: 3 周期社会の一時的崩壊 (Generation 14300) : 上のやりとりは全て generation 14300 に行なわれたやりとりの代表例である。この generation では、一時的に 3 周期のやりとりが全く見られなくなる。

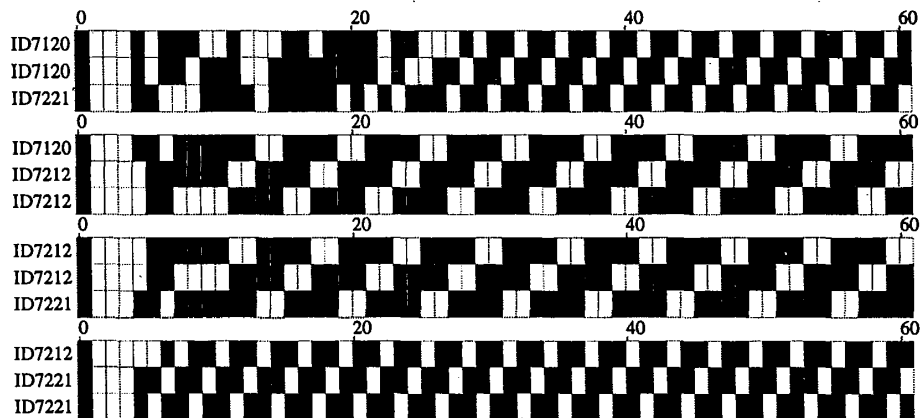


Figure 4.14: 3 周期の時間的分化 と 6 周期の時間的分化の共存 (Generation 14550—14850)

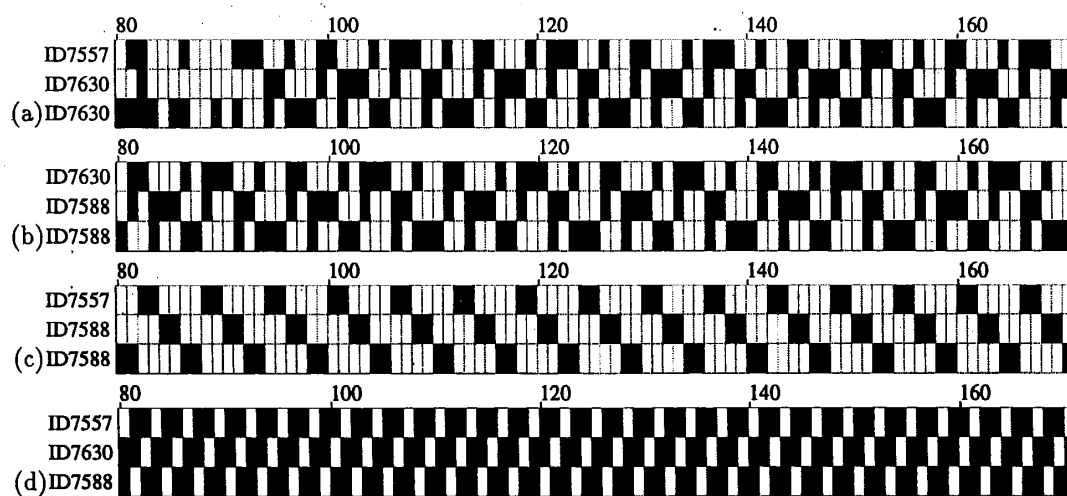


Figure 4.15: 15 周期と 3 周期の共存 (Generation 15300) : 上のやりとりは全て generation 15300 に行なわれたやりとりの代表例である。15 周期型のやりとりが半分以上を占める。generation 6000 あたりの 6 周期と結託に使われるカードがちがう、もう一つの 6 周期型やりとりが見られる。

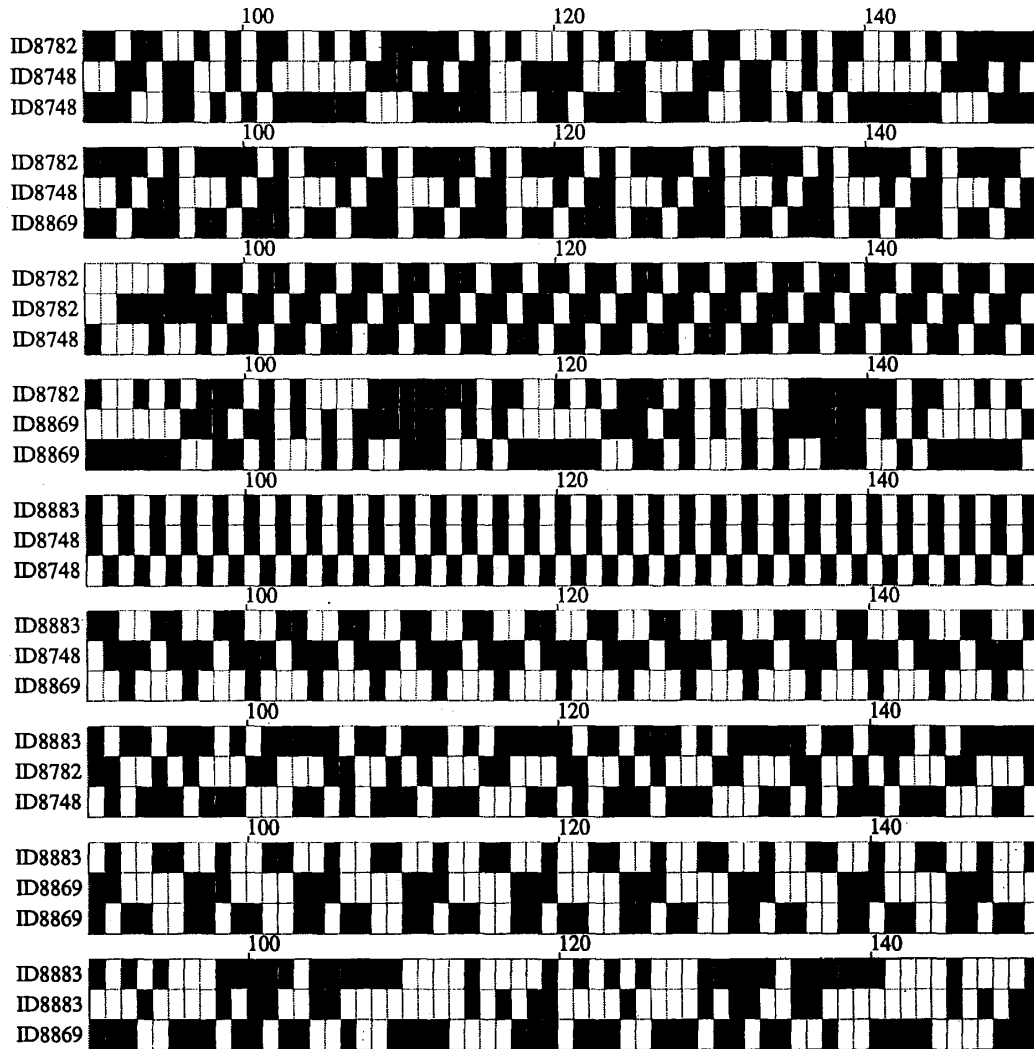


Figure 4.16: 一つの社会で見られる多様なパターン (Generation 16700)

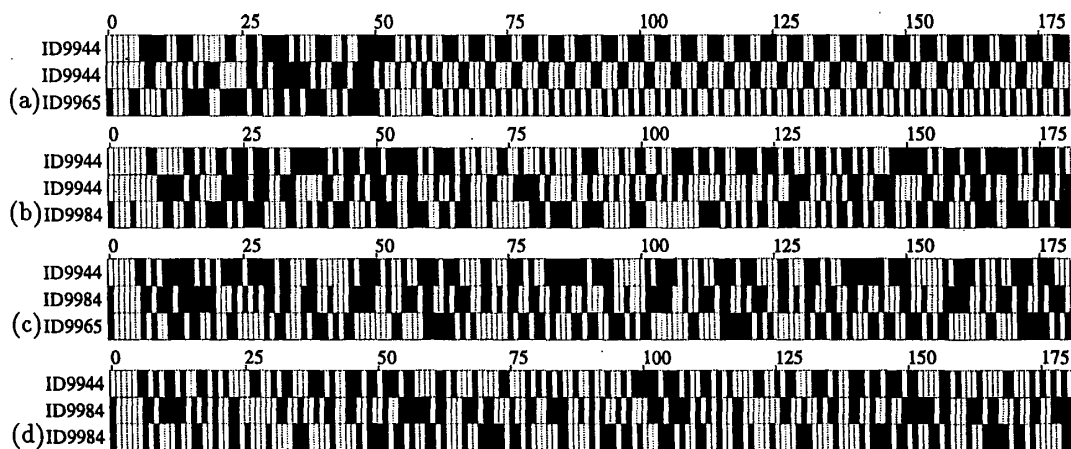


Figure 4.17: 複雑化と多様化 (Generation 19600): 単純なコミュニケーションと複雑なコミュニケーションが混在する状況が生まれる。

4.5 分析

4.5.1 その後の進化について

前節までは、generation 20000 までの社会について詳しく見てきた。最終的には、複雑なやりとりを含んだ多様な社会が見られたが、その複雑さが単に、本シミュレーションにおける変異率の高さによって収拾がつかなくなったために引き起こされたものである可能性もある。そこで、generation 20000 のあとのシミュレーションを再開して generation 30000 までの様子をみた。

全体的な傾向として、

- 第 4.4.2 節で見たような、比較的単純な周期のやりとりが多様にある社会 (比較的 average は高い)
- 第 4.4.3 節で見たような、複雑なやりとりが多い、多様な社会 (average は低い)

以上の 2 つがよく見られる (Figure 4.18 は後者にあたる)。しかし時おり、Figure 4.19 にあるように、周期的時間分化による協力が回復する。ただし、「周期社会を崩して自分の適応度を上げる」方向の進化もかなり進んでいて、そういったやりとりも頻繁に行われるので、以前のようにこの社会が何千 generation も続くことはない。

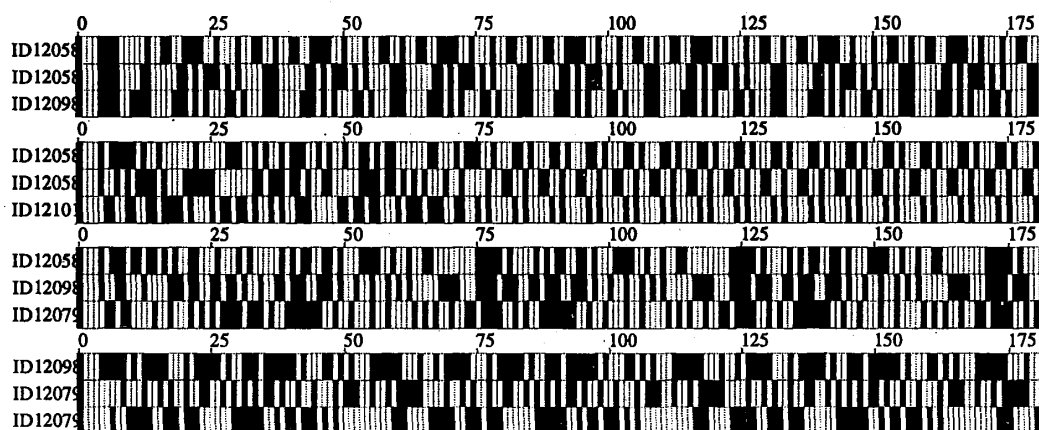


Figure 4.18: generation 20000 以降の様子 (Generation 25900) : 上のやりとりは全て generation 25900 に行なわれたやりとりの代表例である。

4.5.2 過去の記憶

進化によって旧種族を凌駕してきた新種族を少し前の社会へ戻してゲームを行なうと、うまくやりとりを行なえるのは当然である。それでは、もっと前の社会に戻った時に旧種族と効率のよいやりとりを行なうことが出来るだろうか？ アルゴリズム (tree coding) に過去の記憶はどの程度残っているのだろうか。

ここでは、第 4.4.2 節 (Figure 4.16) で既に見た、generation 16700 の多様なやりとりの行なわれる社会の中から代表として ID8883 を取り出して、過去の社会に持っていった時のやりとりを見てみた。

ID8883 の 3 周期社会におけるやりとり

このシミュレーションで特徴的なやりとりの一つ、3 周期のやりとりが中心の社会 (generation 12500) における ID8883 のやりとりを見てみた。その様子を Figure 4.20 に示す。

この ID8883 は、もともと generation 16700 の社会では全く 3 周期のやりとりを行なっていない。ところが、Figure 4.20-(a)(b) のように 3 周期社会の種族 2 人を相手にしてゲームを行なうと 3 周期型のやりとりを行なう。これは、アルゴリズム (tree) の中に、3 周期型のやりとりを行なう部分 (枝の構造) が残って

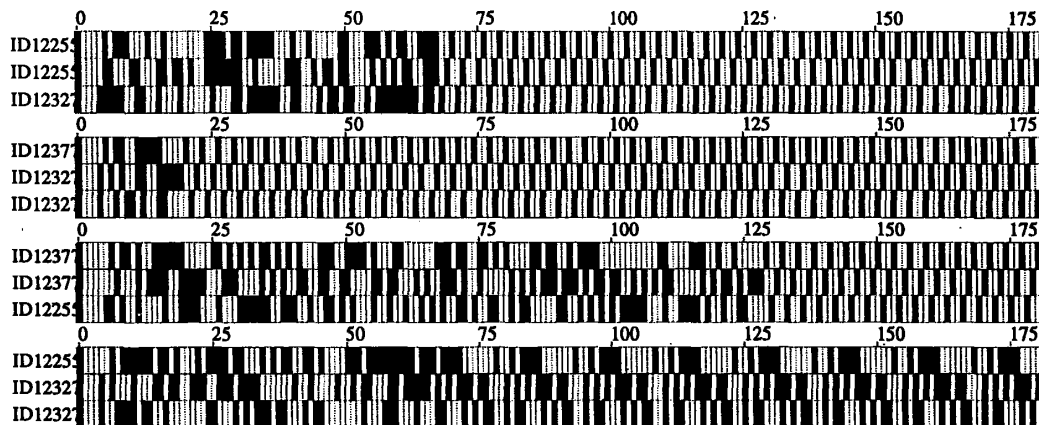


Figure 4.19: 3 周期の社会 (Generation 26450-26650) : 上のやりとりは全て generation 26600 に行なわれたやりとりの代表例である。200 generation くらい安定して存続する。(generation 9000 以降に見られた 3 周期社会とは「黒のカード」「白のカード」が逆になっている。)

いるからである。その意味で、このシミュレーションにおいて 5000 generation 以上続いた 3 周期中心社会についての記憶を持っていた、といえる。

一方、ID8883 が 2 人で 3 周期型の player 1 人を相手にゲームを行なうと、Figure 4.20-(c)(d) のように違ったやりとりを行なう (ただし、3 周期型種族に勝てたわけではない)。同種が 2 人そろった時に、3 周期のやりとりを拒否して崩そうとするのは、ID8883 が 3 周期社会を崩した種族 (または、その崩した種族をまた崩壊させた、または…) の子孫であることと関係あるものと思われる。

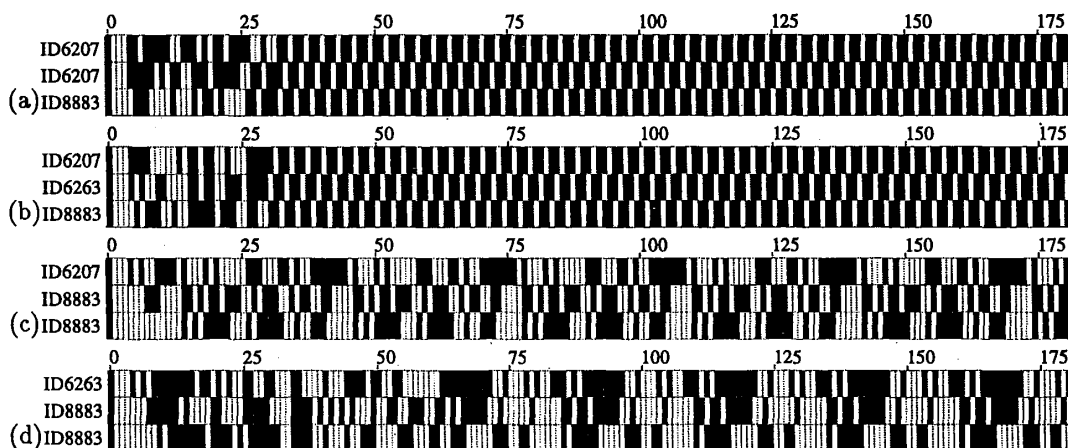


Figure 4.20: ID8883 (generation 16700 出身) の 3 周期社会 (generation 12500) におけるやりとりの様子

ID8883 の 3、6 周期共存社会におけるやりとり

次に、前節の ID8883 が 3、6 周期共存社会に入った時のやりとりを Figure 4.21 に示す。

この場合、ID8883 は全く 3、6 周期のやりとりを行なわない。そうかといって、必ずしも過去の player たちに勝っている訳ではなく、むしろ負けている。3、6 周期社会の種族を相手にする時に必要だった枝の構造が完全には残っていなかったことを、このことは示している (3、6 周期の社会を拒否する構造は残っているが)。そして、少なくともこのシミュレーションでは、進化することによって universal に「強く」

なっていく訳ではないことも示している。

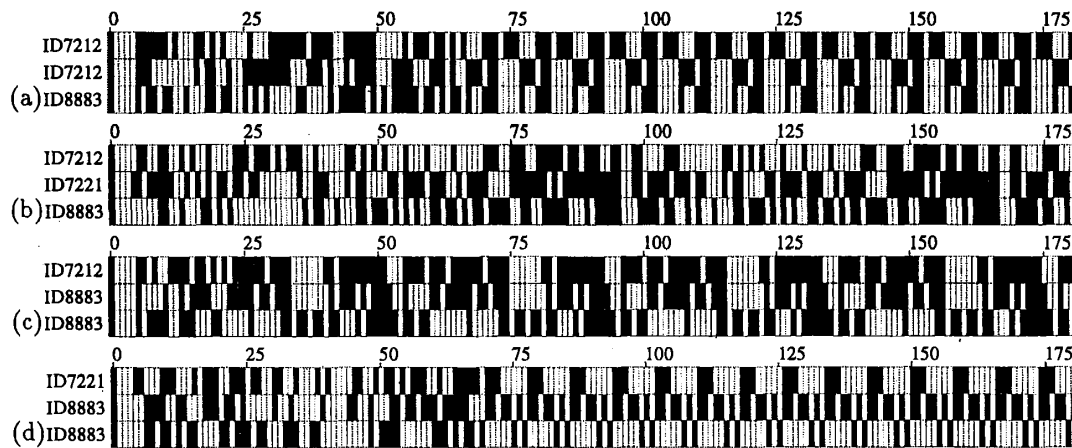


Figure 4.21: ID8883 (generation 16700 出身) の 3、6 周期共存社会 (generation 14550–14850) におけるやりとりの様子

4.6 分析 II—枝の分析

mutation によって生まれた新種族は、mutation が起こった時点の population 分布を考慮した適応度において旧種族たちを超えていなければ生き残っていくことは出来ない、アルゴリズム的に旧種族と違う部分がいかなければならない。

一方、このシミュレーションでは、その時代その時代の社会のルール、社会で行なわれているやりとりの全体的な傾向が各 player たちにとって大きな意味を持つ。従って、戦略が社会全体の傾向から極端に違うものになってしまうような mutation では、出来た mutant も生きて行くことができない可能性が高い(旧社会が協力的なときは特にそうである)。従って、各種族は tree (アルゴリズム) の中に共通な部分をいくらか持っている、と考えられる。例えば 3 周期社会においては、3 周期のやりとりを継続するための枝の構造については共通に持っているものと思われる。

ここでは、ある generation において、複数の種族が共通に持っている枝に着目しながら、tree を解析した。なお、各種族の tree が持つ最大の memory-length が 4 なので、最大 $8^4 = 4096$ 本の枝を一本一本解析することも、図に描いてみるのも困難である(普通のパソコンのディスプレイの解像度なら 8 分木で memory-length = 2 くらいまでが現実的)。よって、以下では枝の数についての統計的な分析を行なっている。また、例えば Figure 4.6 では、左の memory-length = 1 の tree をアルゴリズム的に全く同じにしたまま memory-length = 2 に「展開」すると右の tree になる。比較のため、tree は全て memory-length = 4 まで展開した状態を考える。

4.6.1 シミュレーション開始時 (Generation 0) における枝の分布

まず、generation 0 の時、つまり初期状態の枝の茂り方の分布をみると同時に表の説明を行なう。(Table 4.1) 既に述べたことだが、初期状態では、memory-length = 1 の範囲でランダムに枝を茂らせた tree を 6 つ作り、それらを 6 種族の code とした。ランダムに作った tree ということもあり、可能な枝の数 4096 本のうち、各種族のもつ枝の数の平均は 2048 本で丁度半分になっている。

Table 4.1 の「random」の列は、Table Caption に詳しく書いてあるように、各種族に average の本数の枝が random に茂った時の共通に持っている枝の期待値である。実際には、期待値 E は次のように求める。

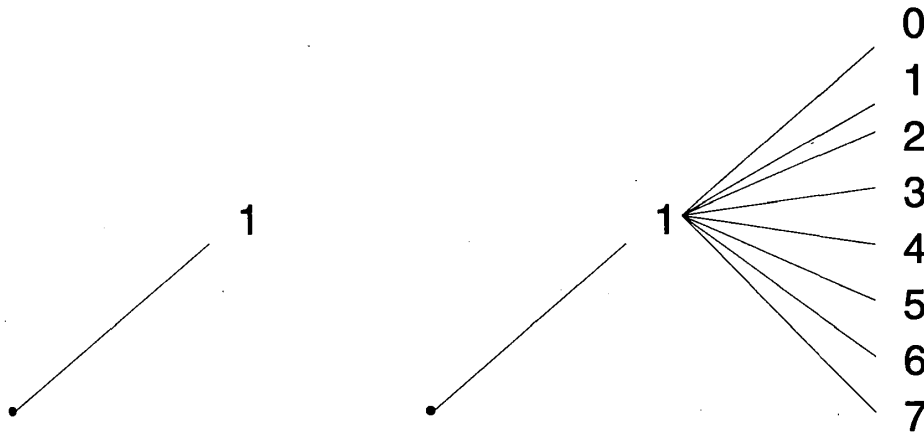


Figure 4.22: アルゴリズム的には全く同じ、2つの tree : 左の tree (memory-length = 1) を同じアルゴリズムのまま memory-length = 2 まで展開すると右の tree になる。genotype としては違うが phenotype としては同じ。

まず、

$$p = \frac{\text{average}}{4096}$$

とする。次に、 N : 全種族の数、 i : 共通に枝をもつ種族の数として期待値 E は次のように求めることができる。

$$E = 4096 \times \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i}$$

4.6.2 共通の構造—6 周期社会の枝の分散

Table 4.2 に 6 周期社会の種族における枝の分散 (Generation 5000) について示す。

慎重に増える枝

全種族がそれぞれ持つ枝の数の平均は、初期状態 (2048 本) から一気に減って 700 本程度になる。かなり高い mutation rate で枝を付けたり減らしたりしているので、もし、社会が mutation に関して寛容ならば、枝の数の average は、すぐにでも $\frac{4096}{2} = 2048$ 本くらいになって、あとはその前後あたりを揺らぐ筈である。枝の分散については 1000 generation ごとに状態を調べていったが、実際 average は少しずつしか増えず、初めて 2000 本を越えたのは generation 18000 で、さらに、2048 本を越えたのは 26000 generation である (1000 generation ごとに調べているので、その間に越えている可能性は当然ある)。

社会全体の傾向がかなりものを言うゲームなので、無意味に枝を増減させてあまりにも社会の傾向を無視した進化を行なうと不利になる。このことを以上の事実は示しているものと思われる。

共通の枝の数

全種族が共通に持つ枝の数は期待値から考えると 0 に近いのだが、実際には 99 本もある。変異率の高さから言って偶然 99 本の枝を 9 種族が同時に持つことはまずあり得ない。この時代において、この全種族が共通にもつ 99 本の枝は何らかの役に立っている筈である。しかし、この全種族がもつ 99 本のうち、実際、全種族に使われているのは 10 本である。これらのことについては、次の節で考察する。

Table 4.1: Generation 0 における枝の分布：全種族 (6 種) の持っている枝の数の平均は 2048 本、そのうち「白のカード」を出すのに実際使われた枝は 1962.7 本である。—(1) 表の「common branches」の列は共通に持たれている枝の数を示す。例えば「number of species」が「4」の行は common branches は「1024.0」だが、これは、総数 4096 本の枝のうち、4 種族が共通に持っている枝が 1024.0 本であることを意味する。この見方によると、6 種族 (全種族) が共通に持っている枝の数は 0 本ということになる。—(2) 次に「random」の列は、全ての種族が average の本数の枝をそれぞれ持っている (簡単のために) 仮定して、茂る枝が任意に選ばれていたときに共通に持っている枝の数の期待値である。この generation では全種族がそれぞれ average (= 2048) の本数の枝を持っていて、その時に例えば number of species が 6 の行は 6 種族 (全種族) が共通に持っている枝の数の期待値が 64.0 本であることを示す。—(3) common and used は「白のカード」を出すために共通に使われた枝の数を表している。例えば number of species が 6 の行は 6 種族 (全種族) に使われた枝の数が 0.0 本であることを示す。—(4) used random は全ての種族が average(used) の本数の枝をそれぞれ「白のカード」を出すのに使ったと (簡単のために) 仮定して、使われた枝が任意に選ばれていたときに共通に使われている枝の数の期待値である。この generation では全種族がそれぞれ average(used)(= 1962.7) の本数の枝が使われていて、その時に例えば number of species が 6 の行は 6 種族 (全種族) が「白のカード」を出すのに使う枝の数の期待値が 49.6 本であることを示す。

average = 2048 : average(used) = 1962.7

number of species	common branches	(random)	common and used	(used random)
0	0.0	64.0	0.0	81.8
1	0.0	384.0	0.0	451.3
2	1024.0	960.0	1536.0	1038.0
3	2047.0	1280.0	1535.0	1273.3
4	1024.0	960.0	1024.0	878.6
5	0.0	384.0	0.0	323.3
6	0.0	64.0	0.0	49.6

4.6.3 変異種に対する抵抗力

generation 18000 の種族の枝の分散を Table 4.3 に示す。全種族が共通にもつ枝の数が 201 本と、期待値から考えると、これもまた非常に多くの数でこれらが意味のある枝であることを示唆している。しかし、そのうち全種に使用されている枝は 11 本しかない。全く使っていないにも関わらず 190 本もの同じ枝を全種族が共通に持っているのは何故だろう。確率的には 50 本でもまずありえない数値である。

少し前の社会の種族に対する記憶

変異種、特に、自分が凌駕してきた少し前の社会の種族 (以前自分はここから進化してきた。つまり、自分の mutant もこの種族に戻りやすい) と似たような code を持った種族に対してとりあえず抵抗力がない

Table 4.2: Generation 5000 における枝の分布：全種族が共通にもつ枝の数が 99 本で、ランダムな場合の期待値と比較して考えてみると異常に多くの数である。

average = 1010 : average(used) = 407.56

number of species	common branches	(random)	common and used	(used random)
0	1357	320.4	2600	1594.8
1	614	943.7	468	1586.0
2	376	1235.5	234	701.0
3	701	943.5	616	180.7
4	506	463.2	85	30.0
5	155	151.6	61	3.3
6	155	33.1	8	0.2
7	56	4.6	3	0.0
8	76	0.4	10	0.0
9	99	0	10	0.0

Table 4.3: Generation 18000 における枝の分布

average = 2035.9 : average(used) = 1228.2

number of species	common branches	(random)	common and used	(used random)
0	199	8.4	534	165.6
1	368	75	762	638.3
2	431	296.6	819	1093.4
3	560	683.9	640	1092.7
4	532	1013.8	573	702.0
5	525	1001.9	384	300.6
6	492	660.1	222	85.8
7	406	279.6	114	15.8
8	381	69.1	36	1.7
9	201	7.6	11	0.1

と安定して存続できない。

そこで、generation 18000 の社会の全 9 種族に 300 generation から 500 generation 前の社会に現れた 5 種族を加えてゲームを行ない、使われている枝を調べてみた。さらに、generation 19000 に社会 (全 9 種族) についても同様のことを行なった。その結果を Figure4.23 に示す。

generation 18000 について見てみると、全種族が共通に使う枝が 11 本から 74 本に約 7 倍増加している。前の社会の 5 種族も加えて 14 種族のゲームの中で 74 本の枝を 9 種族が共通に使っている。やりとりを行なう相手が増加に伴い対戦数が増えるため使われる枝の数が増えるのは当然である。しかし、全くランダムな戦略とやりとりを行なわせたとしたら、全種族が共通に使う枝についてはほとんど増加しない (期待値は 0.1 本から 2.0 本に変わるだけである)。前の社会の 5 種族も加えて 14 種族のゲームの中で 74 本の枝を 9 種族が共通に使っている。この 9 種族は、ほぼ有り得ない確率で 220 本の枝を共有しているが、おそらくそのほとんどが、たとえその時点で使われていないにしろ、変異種などに対する抵抗力などで重要な役割を果たしているものと思われる。少なくとも、近い過去の種族と似た変異種に対する耐性としての意味があることが分かる。

generation 19000 の図も同様の結果を示している。使われている枝の分布は (generation 19000 used)、使われていないものも含めた時の分布 (generation 19000 all) にかなり近づく。

なお、tree による coding では、持っていない方の枝も重要な役割を果たすが、現段階においては分析が難しいので、そちらの方の分析は、まだ行っていない。

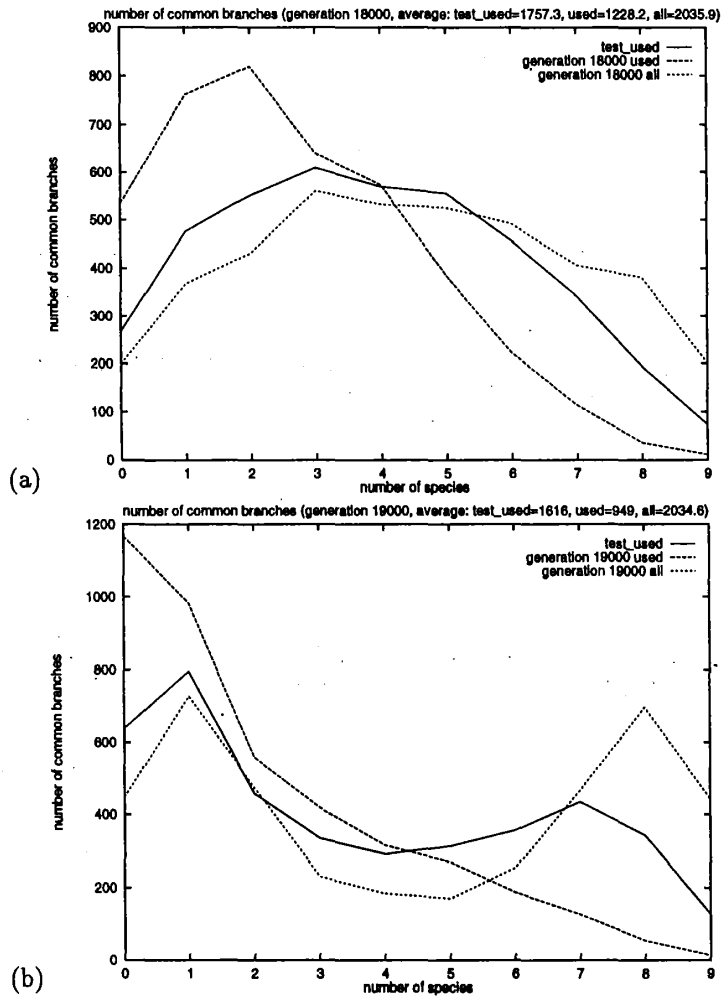


Figure 4.23: 過去の種族を参加させたシミュレーション、枝の使われ方の変化 : (a) は generation 18000 についてのシミュレーションである。横軸は Table で「number of species」にあたる。縦軸は 共通の枝の数を表す。点線「generation 18000 all」は Table では「common branches」を表す。number of species が 0 と 9 のところで約 200 本くらいで、3 のあたりをピークに膨らんでいる。点線「generation 18000 used」は Table では「common and used」にあたり、共通に使われた枝の数を示す。そして「tes_used」が少し前の generation の種族を加えた時に共通に使われた枝の数である。「generation 18000 used」よりも、全種族が共通に使う枝の数が一気に増加する。(タイトルには generation と それぞれの場合について、枝の数の average が示されている。)(b) は同様のことを generation 19000 についてシミュレーションを行なった結果である。

Chapter 5

結論

このシミュレーションではモデルとして、単純な 3 人結託ゲームを仮定した。各 player が 1 round 当たりを選択できる「手」は僅かに 2 つで、ゲームには noise によるゆらぎがなく、完全に決定論的な条件のもとで行なわれた。それらの単純な設定にもかかわらず、役割の階級的分化および時間的分化からはじまり、社会の多様化、やりとりの複雑化へと至る進化のプロセスが見られた。そして、こういった進化のプロセスは、囚人ジレンマなどの 2 人ゲームをモデルとしたシミュレーションにおいて見られていない。ここでは、このシミュレーションで得られた結果について、多様化、複雑化、役割の時間的分化の 3 点に特に注目して考察する。

社会の多様化

あるタイプの周期的時間分化の社会が形成された後も、そこにとどまらず、違うタイプの周期的時間分化の社会へと次々と移り変わっていく様子が見られる。そのうち様々な周期の時間分化が一つの社会に共存するようになり（例えば 3、6、15 周期のやりとりが共存する一つの社会）、安定して多様な社会も現われるようになった。どの解が優位であるかをはっきりと規定できない、準安定な解がたくさんある「3 人ゲームの解の広さ」によって、この多様さは生み出されたものであると言えよう。（当然だが、解が特定できる 3 人ゲームも存在する。）

既に述べたように、繰り返し囚人ジレンマモデルにおいて形成される安定な社会で見られるのはほとんどの場合、全ての個体が協力する協力一辺倒のやりとりである。そして、最終的にある戦略（またはその亜種たち）による独占状態が生まれ、戦略、やりとりの多様化は見られない。

しかし、人間社会をはじめとして現実には様々な形態の協力がみられる。また、同じ社会に裏切りが混在する場合も当然ある。例えば、協力行動の例として挙げた鳥のアラームコールにしても、全ての鳥が出すわけではない。鳥のアラームコールなどは、更に拡張した n 人ゲームのモデルで考察すべきだが、人数は少なくとも 3 人以上のゲームがこの様な多様さを生み出し得ることは一つの示唆となるであろう。

戦略とやりとりの複雑化

ある周期状態を外すことで適応度を上げる、という方向の進化が進んで、かなり複雑なやりとりを生み出した。かなり長い周期で役割交替を行なう様子が見られ、その役割交替も一見予想がつかない動きを示す。memory-length が伸びていく、という意味での戦略の複雑化は、noise 入り囚人ジレンマのモデルでも見ることができた。しかし、そこで見られたやりとり自体は複雑な方向へ向かった訳ではない。（noise の部分以外はほとんど協力一辺倒）

本シミュレーションでも、初期の段階では決められた最大 memory-length 以内の範囲で進化と共に memory-length が伸びていき、特に階級的分化による戦略とやりとりの進化、(ある程度の) 複雑化が memory-length の伸長と相関を持っていることが分かった。しかし、シミュレーションの途中で多くの枝が最大の memory-length に到達した後も、戦略とやりとりの複雑化は続いて行った。特に やりとりの

複雑化がはっきりと表れて来るのはかなりあとの段階である。(そもそも tree による戦略表現では各々の枝は独立して長さが違うので、枝が茂って来れば来るほど memory-length をはっきりと定義すること自体が難しくなる。) このシミュレーションで見られた複雑さは memory-length の伸長よりもむしろ、この 3 人結託ゲームの構造とそこで行なわれる個体間のやりとり自体によって生まれて来ている。特に、次に挙げる 2 つの要因が戦略とやりとりの複雑化に大きな役割を果たしていると言える。

i) 捕食被捕食間の競争 簡単なルールに基づいた協力関係は、より複雑な戦略によって凌駕されやすい。凌駕されないために、より複雑なルールを形成する方向へ進化が向かっていく。これには、やりとり自体は単純でも変異種に凌駕されにくさという意味で戦略が複雑化する場合と、旧種族が読みとれないやりとりを行なうことで旧種族を凌駕する場合、つまりやりとり自体が複雑化する場合がある。こういった複雑さへの進化の機構は真似ゲーム [16] でも見られたものであり、暗号の進化の理解にもつながるものである。(グループ内のものだけが解読できるようにするための暗号は複雑さへの進化によって生み出される。)

ii) 3 人ゲームのもつ結託構造の多様さ—多様さと複雑さの共進化 多様なやりとりが共存する社会では、一つ一つのやりとりが単純でも相手によって違うやりとりを行なう必要があるため、戦略は非常に複雑なものとなる(戦略の複雑化)。裏切って結託を組む相手をかえたり、協力して 3 人の結託を形成したりなど、「3 人ゲームが持つ多様な結託構造」に基づく多様なやりとりが一つのやりとりの中で入れ替わり立ち替わり現れていくとやりとり自体が複雑になる状況が生まれる(コミュニケーションの複雑化)。

逆に、複雑化の実現によって今度はやりとりが更に多様になり得ようになる(複雑化によって周期が長くなることで、更に多様なやりとりが可能になる)。ここで見られた、多様さが複雑化を生み、複雑さが多様さを生み出す状況は「複雑さと多様さの共進化」と言うことができよう。

役割の時間的分化による協力の発生

資源の絶対量が足りない時、または、誰かが危険な役割を担わなければならない時、誰かが利得の上で損を被らねばならない。このような状況を解決する方法は 2 つある。それはこのシミュレーションでも見られたように、役割の階級的分化を行なう方法と時間的分化を行なう方法である。

階級的分化ではある集団が一方的に得をして、ある集団が一方的に損をする状況が生まれる。この場合、下の階級が絶滅したあとに、また、損をする役割が必要になるので永遠に問題が解決しない可能性がある。階級的分化によって適応度を上げる種族は、もし次々と生まれる新しい種族をことごとく潰しつづけることができれば繁栄し続けることができるが、そうでなければこういった種族による社会は不安定で長続きしない。

もう一つの解決方法、つまり役割の時間的分化による方法では、損をする役割を時間軸に沿ってある程度公平に交替して行く。これは、協力的な方法であり、シミュレーションで見たようにこういったやりとりが行なわれる社会は安定に存続することも可能である。時間的分化が起こる実際の例として、次のようなものがある。

1. 栄養が足りない状態の細胞間のモデルにおいて、やはり、時間的役割分化(栄養を採らずに休止する状態を交替していく、time sharing system)と階級的な分化が見られた [22]。
2. イワシとかニシンのような魚は、群れの周辺部のものは食べられる危険が大きい、群れは絶えず移動の方向を変える。(後尾についていたものは、次の瞬間には先頭になったりする。)

この 3 人結託ゲームでは、「白のカード」、「黒のカード」自体にはもともと特別な意味はなく、この 2 つのカードは完全に対称である。また、各 player が時間軸に沿って出していく「白のカード」、「黒のカード」によって構成されるシーケンス自体も元々は特定の意味は持たない。意味は、その時その時の社会で形成されている協力のためのルールによって決まる。既に述べたように、例えば「白のカード」を 4 回、「黒のカード」を 2 回という順番の 6 周期のカードのシーケンスは、18 周期の社会ではむしろ不利なやりとりの方法になってしまう。このシミュレーションでは進化のプロセスの中で、時間的分化による協力のためのルールが形成され、また移り変わって行く様子が見られた。2 つのカードの対称性を破り、カードの

やりとりのシーケンスに意味を与える「論理」が個体間の相互作用の中から自己組織化されてきたのである。(対称性の破れについて：例えば、「白のカード」が2人、「黒のカード」が1人で「黒のカード」を出して損をする役割を3n周期で交替する社会では出されているカードの総数比はほぼ2対1である。)

ところで、このシミュレーションの設定では左右の player の位置関係を区別できるようになっているが(例えば、左の player が「白のカード」を出して、右の player が「黒のカード」を出している状態と、右の player が「白のカード」を出して、左の player が「黒のカード」を出している状態を区別できる)、このことが時間的分化による協力ルールを築くのにある程度の役割を果たしている。左右の位置の区別をできなくしたゲーム(例えばある player が「白のカード」を出しつづけていて、もう1人が「黒のカード」を出しつづけているということは理解できるが、その両者のうちのどちらが左にいてどちらが右にいるかはアルゴリズムレベルで区別しない)を仮定して本シミュレーションと同様なシミュレーションを幾つか行なったが、周期的時間分化は現われず階級的分化だけが見られた。階級的分化の形式はかなり進化するが、さほど複雑化も起こらない。周期的時間分化による協力の形成のために「位置の区別ができる能力」が何らかの役割を果たしていることは間違いない。

本シミュレーションの初期の段階では進化が階級的分化を起こす方向にむかったことを述べた。変異率、乱数の係数などをかえたシミュレーションにおいてもこういった傾向は見られる。囚人ジレンマによるシミュレーションでは「Cooperation」、「Defect」という戦略自体にかなりのルールが含まれており、player はそれを基準にして進化していく。一方、本シミュレーションにおいて、初期の player 達には「協力」がどのような状態であるのかさえわからない。だから、まだ協力ルールが確立されていない社会に生まれた初期の player はまず安直な方向へ進化する。つまり、目の前の player から搾取する方向である(階級的分化の進化)。そのうち「位置の区別」がきっかけとなって時間的分化による協力ルールが形成されていく。(例えば「左」の player が前の round で讀ったら次には自分が讀むというルールに従えば3周期の時間的分化による協力関係が可能である。)本シミュレーションでは「位置の区別」の能力が時間的分化のきっかけとなっていたが、例えば「個体識別」の能力であっても時間的分化による協力関係の形成のきっかけとなりうるだろう。本シミュレーションの「位置」の役割を果たすものが何であるかを考えることは、何が時間的分化による協力の進化に効いてくるのかを理解する手がかりになるだろう。

謝辞

指導教官の金子邦彦教授には、貴重な御指導、御助言を、研究の始まりから数多く頂きました。池上高志助教授には、モデルの構成から今に至るまで直接的にも間接的にも大変お世話になっています。また、佐々研究室の皆さん、池上研究室の皆さん、金子研究室の皆さん、にはセミナーなどを通じて貴重な御助言を頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

Bibliography

- [1] Smith J.M. 進化とゲーム理論 (*Evolution and the Theory of Games*). 産業図書, 1985.
- [2] Krebs J.R. and Davies N.B. 行動生態学. 蒼樹書房, 19.
- [3] Aumann R.J. *Lectures On Game Theory*. Westview Press, 1989.
- [4] 西田 俊夫. ゲームの理論. 日科技連, 1973.
- [5] 日本動物学会 編. 進化学—新しい統合. 学会出版センター, 19.
- [6] 小山 明男. ゲームの理論入門. 日本経済新聞社, 1980.
- [7] von Neumann. J. and O. Morgenstern. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [8] J. Maynard Smith and G.R. Price. The logic of animal conflict. *Nature*, 246:15–18, 1973.
- [9] R. Axelrod. *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books, 1984.
- [10] W.D. Hamilton. The genetical evolution of socieal behaviour. i, ii. *J. thoer. Biol*, 7:1–52, 1964.
- [11] R. Boyd. Mistakes allow evolutionary stability in the repeated prisoner's dilemma game. *Journal of Theoretical Biology*, 136:47–56, 1989.
- [12] K.Matsuo. Ecological characteristics of strategic groupa in dilemmatic world. in: *Proc. IEEE Int. Conference on Systems and Cybernetics*, pages 1071–1075, 1985.
- [13] N. Wiener. *Cybernetics 2nd edition*. Massachusetts, 1961.
- [14] K. Lindgren. Evolutionary phenomena in simple dynamics. *Artificial Life II*, pages 295–312, 1991.
- [15] T. Ikegami. From genetic evolution to emergence of game strategies. *Physica D*, 75:310–327, 1994.
- [16] J. Suzuki and K. Kaneko. Imitation games. *Artificial Life III*, pages 43–54, 1994.
- [17] J. von Neumann. Zur theorie der gesellschaftsspiesle,. *Mathematische Annalen*, 100:295–320, 1928.
- [18] E.A. Fischer. The relationship between mating system and simultaneous hermaphroditism in the coral reef fish, *hypoplectrus nigricans*. *Anim Behav*, 28:620–633, 1980.
- [19] C. George. *Behavioral interactions in the pickerel the mosquitofish*. PhD thesis, Garvard University, 1961.
- [20] M. Milinski. Tit for tat and the evolution of co-cooperation. *Nature, Lond.*, 325:433–435, 1987.
- [21] B. Seghers. *An analysis of geographical variation in the anti-predator in the guppy*. PhD thesis, University of British Columbia, 1973.
- [22] K. Kaneko and T. Yomo. Cell division, differntiation and dynamic clustering. *Physica D*, 75:89–102, 1994.