『動的ゲーム』とゲームのダイナミクス

結託構造とコミュニケーションの進化

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻

秋山 英三（指導教官 金子 邦彦）

目次

I 序 2

1 ゲームとダイナミクス 3
1.1 ゲーム的状況から発生するダイナミクス 3
1.2 ダイナミクスを持つゲーム 3
1.3 ゲームとダイナミクスの問題の解析へ向けて 4

2 背景と準備 6
2.1 古典的ゲーム理論 6
2.2 社会生物学とゲーム理論 7
2.3 「協力」の発生と繰り返し囚人ジレンマゲーム 8
2.4 ゲームが行なわれる artificial ecology による進化の理解 10

II 動的ゲーム 12

3 導入 13
3.1 「木こりのジレンマモデル」の簡単な説明 14
3.2 基本的な問題意識 15
3.3 静的なゲームと動的なゲーム 15

4 動的ゲームモデルとその定式化 18
4.1 動的ゲームの概念 18
4.2 構成要素 18
4.3 この系の力学法則 19
4.4 意思決定関数 19

5 動的ゲームモデルに関する考察 21
5.1 限定合理性、繰り返し囚人ジレンマ、動的ゲーム 21
5.2 Autonomous optimizer 24

6 興味 28
6.1 ダイナミクスを考慮した「共有地の悲劇」 28
6.2 動的ゲームに特徴的な現象 31

7 木こりのジレンマゲームのモデリング 32
7.1 モデルの概要 32
7.1.1 ゲーム世界：木こりのジレンマ生態系の構成要素 32
7.1.2 丘：「木こりのジレンマゲーム」の場 32

7.1.3 世代 · · · · · · · · · · 32
7.2 ゲーム世界：木こりジレンマ生態系 · · · · · · · · · · 33
7.2.1 木こり種族 · · · · · · · · · · 33
7.2.2 丘 · · · · · · · · · · 33
7.2.3 丘に行き、そこで生活する木こり · · · · · · · · · · 34
7.2.4 適応度と世代交代 · · · · · · · · · · 34
7.3 木こりのジレンマゲーム · · · · · · · · · · 35
7.3.1 プレーヤーと木 · · · · · · · · · · 35
7.3.2 一ラウンドで行われることの概要 · · · · · · · · · · 36
7.3.3 自然法則: 木の成長とプレーヤーの状態の変化 · · · · · · · · · · 36
7.3.4 自然法則: プレーヤーの状態の変動 · · · · · · · · · · 37
7.3.5 プレーヤーの意思決定 · · · · · · · · · · 37
7.3.6 行動の影響: ゲーム環境の変動 · · · · · · · · · · 37
7.3.7 行動の影響: プレーヤーの状態の変動 · · · · · · · · · · 38
7.3.8 一ラウンドの利得 · · · · · · · · · · 38
7.3.9 繰り返しゲーム · · · · · · · · · · 38
7.4 意志決定関数 · · · · · · · · · · 39
7.4.1 プレーヤーへの参照: "y" · · · · · · · · · · 39
7.4.2 行動への動機 · · · · · · · · · · 40
7.4.3 突然変異 · · · · · · · · · · 41
7.5 利得行列 · · · · · · · · · · 42
7.6 初期条件 · · · · · · · · · · 43

8 一人木こりジレンマゲーム: 丘に木が一本だけの場合 44

8.1 一人ゲームと最適化問題 · · · · · · · · · · 44
8.2 計算機シミュレーションの結果と解析 · · · · · · · · · · 45
8.2.1 適応度グラフ · · · · · · · · · · 45
8.2.2 大まかなシミュレーションの流れ · · · · · · · · · · 46
8.2.3 行動図、資源図、状態図 · · · · · · · · · · 46
8.2.4 シミュレーション初期 (意志決定関数) · · · · · · · · · · 46
8.2.5 最適解へ向けた進化 · · · · · · · · · · 47
8.3 丘に木が二本ある場合 · · · · · · · · · · 51
8.3.1 複数の資源 · · · · · · · · · · 51
8.3.2 計算機シミュレーションの結果と解析 · · · · · · · · · · 51

9 議論 I 54

9.1 周期部と遷移部 · · · · · · · · · · 54
9.2 意志決定関数の進化: ゲームを育てる戦略 · · · · · · · · · · 55
9.3 動的ゲームにおける「ゲームのアトラクター」の分布: SPGダイアグラム · · · · · 55
9.4 複数人ゲームに向けて · · · · · · · · · · 57

10 二人ゲーム: 丘に木が一本ある場合 59

10.1 ゲーム · · · · · · · · · · 59
10.2 計算機シミュレーションの結果と解析 · · · · · · · · · · 59
10.2.1 木の切り合いに向かう時代(初期) · · · · · · · · · · 59
10.2.2 ゲームの遷移 · · · · · · · · · · 60

10.2.3 考察: ゲーム環境の遷移とゲームの安定化 63
10.2.4 動的ゲームにおける進化的「準」安定戦略 65
10.2.5 その後の進化 66

11 議論 II **68**
11.1 他のプレーヤーへの参照に係わるSPGダイアグラム 68
11.2 戦略的安定軌道 70
11.3 裏切りに対する強さ: 意思決定関数に残る記憶 73
11.3.1 x、y のダイナミクスによって対応を変える戦略 73
11.3.2 ゲームのダイナミクスのレベルで進化的に安定な戦略 74
11.3.3 裏切り戦略の侵入に対する強さ 76
11.3.4 協調的な社会が長く続いた後: 裏切りに対する記憶の忘却 78
11.4 ゲーム環境を操作することによって間接的に相手に影響を与える戦略 (SPGダイアグラム自体の変化) 79
11.5 滑り台効果: 利己的行動への誘因 82
11.6 SSOが少ないゲーム: 折れ線型ゲーム環境 84

12 GP空間の自由度の増加 **88**
12.1 二人ゲーム: 丘に木が二本ある場合 (P2R1ゲーム) 88
12.2 三人ゲーム: 丘に木が一本ある場合 (P3R1ゲーム) 89
12.3 動的ゲームにおける自由度の増加 92
12.4 共有地の悲劇と木こりのジレンマにおける、ゲームの人数の増加 92

13 三本の木を巡る三人の木こりのゲーム: 意思決定機構の進化と社会の発展 **94**
13.1 興味 94
13.2 進化の大まかな流れ 95
13.3 時代A: 資源だけを参照する木こりたちの時代 95
13.4 時代B: 資源の私有化 98
13.4.1 空間的な役割の分業 98
13.4.2 資源の私有化 (空間的役割分業) を可能にする意志決定関数の構造 98
13.5 時代C: 二人による各資源の共有 102
13.6 時代D: 三人による三つの資源の共有管理 103
13.7 その後 104
13.8 段階的な進化 104

14 三人の位置関係による個体識別を不可能にしたケース **106**
14.1 位置対称性がある意志決定関数 106
14.2 ゲーム環境の変動に対応しきれなくなる戦略 107
14.3 時間的役割分業とゲームのダイナミクス 109

15 議論 III **111**
15.1 人数が増えた動的ゲームにおける、協力の発生とその進化の可能性 111
15.2 意志決定機構の進化と資源管理方法の進化 113

16 まとめ **115**

III 結託構造とコミュニケーションの進化 118

17 導入 119
17.1 2 人ゲームにおける協力とコミュニケーション 119
17.1.1 協力に意味があるゲーム 119
17.1.2 繰り返し囚人ジレンマにおけるコミュニケーション 122
17.1.3 コミュニケーションの複雑化のために 123
17.2 進化する player による 3 人ゲーム 124
17.2.1 n 人ゲーム—解自体の多様化 124
17.2.2 このシミュレーションの目的 124

18 モデルの構成 126
18.1 2 人の結託のみに価値がある 3 人ゲーム 126
18.2 繰り返しゲーム 127
18.3 Player の持つ戦略 128
18.3.1 8 分木による戦略の Genetic Coding 128
18.3.2 突然変異 129
18.4 Population Dynamics 130
18.5 このゲームの特徴 131
18.5.1 noise の無いゲーム 131
18.5.2 役割の分化 131
18.5.3 何が有利な戦略か？ 132

19 シミュレーションの結果と考察 133
19.1 階級的分化、協力の発生 134
19.1.1 簡単な階級的分化の形成 134
19.1.2 攻撃的独占種の安定性 135
19.1.3 協力的なやりとりへの進化 135
19.2 安定で一様な周期的時間分化の社会 138
19.2.1 安定一様な時間的分化社会の出現 138
19.2.2 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 139
19.3 周期的社会の変遷 141
19.3.1 役割の周期的時間分化が起こる社会とその変遷 141
19.4 多様化と複雑化 144
19.4.1 3 周期の時間的分化が基本となる社会 144
19.4.2 多様な社会—3 周期中心社会の終焉 145
19.4.3 「外す」ことが生み出す複雑化 145
19.5 分析 151
19.5.1 その後の進化について 151
19.5.2 過去の記憶 151
19.6 分析 II—枝の分析 152
19.6.1 シミュレーション開始時 (Generation 0) における枝の分布 154
19.6.2 共通の構造—6 周期社会の枝の分散 154
19.6.3 変異種に対する抵抗力 155

20 結論 158

Part I

序

Chapter 1

ゲームとダイナミクス

異なる利害を持つ複数の意思決定主体(プレーヤー)が存在する状況のことをゲームと言う。ゲーム理論は基本的に、全てのプレーヤーに共通の「合理的な」行動規準が何であるかを追求する。ここで主要となっている目的の一つは、ナッシュ均衡解を代表とする「均衡解析」である。ゲームの均衡の解析についてはこれまで、特に、非協力ゲームについては著しい成果が挙がっており、協力ゲームについても非協力ゲームの理論を拡張する方向で研究が進んでおり、非協力ゲームにおける均衡解析を核とした一貫した動きがある。

1.1　ゲーム的状況から発生するダイナミクス

これらの均衡解析が非常に有効であり、基本的な方法論として必要不可欠であることは間違いない。しかし、現実の生物集団や社会現象を考えるとき、別のアプローチを用いた方が有効な場合があることも事実であり、「均衡状態」よりも「動的状態」の方が本質な場合があることも多々ある。例えば、個体間の相互作用やコミュニケーション、および社会構造が常に変動して最終的な均衡状態に落ち着かない、といったことは現実世界ではそれほど珍しいことではない。これらの現象を単に、理論的な均衡状態への遷移過程・学習進化過程であると見なしたり、我々自身の不完全な計算能力、非合理性に帰着したりすることは必ずしも妥当ではない。例えば、単純に言って、いわゆる「開いた進化」について考察する時は均衡解析以外の視点が必要であろう。また、複雑化へ向けた進化の原因がゲーム構造の複雑さに起因するとは限らない。単純なゲーム設定から複雑な現象が起こり、均衡に収束しなくなる可能性もある。どのようなゲーム設定の時にどのような動的現象が現れるのか? 均衡に落ち着かない場合のゲームの設定はどういったものか? それらの(進化的)ダイナミクスにはどういった特徴があるのか? これらの問題には均衡解析とは別のアプローチが必要である。「ダイナミクス」自体を本質と捉えてモデルを構成することで、これまで得られなかった新たな知見が得られる可能性がある。

1.2　ダイナミクスを持つゲーム

以上の問題は、ある「固定されたゲーム設定」から生まれるダイナミクスに関する問題であるが、また、ダイナミクスに関する別の問題も考えられる。それは、「ゲーム自体」のダイナミクスについての問題である。あるゲーム的状況においてプレーヤーが選択した行動は、好むと好まざるに関わらずゲーム環境自体を変えてしまう。逆にその変動したゲーム環境にプレーヤーの意思決定が影響を受けることになる。こういった現象は現実にはごく普通に見られることである。プレーヤーたちの相互作用からどのようなゲームが設定されてくるのか?そのゲームに対してプレーヤーの戦略の進化はどのようになるのか。こういった、プレーヤーとゲームとの間の相互作用を

通じた「ゲーム自体のダイナミクス」といった視点も、集団、社会構造の進化を考える上で重要である可能性がある。

1.3 ゲームとダイナミクスの問題の解析へ向けて

以上のような「ゲームとダイナミクス」の問題を考える際に、計算機シミュレーションによるアプローチは非常に有効である。そこでは、ゲームとプレーヤーの相互作用に関する力学的法則をすべて把握して、それをコンピュータープログラムとして実現し、その結果現れる系の挙動を完全に知ることが可能であるため、今まで解析的に理解することが不可能だった現象をはじめとして、様々なゲーム的状況についての知見を得ることができる。

こういった計算機によるアプローチは、アクセルロッドの繰り返し囚人のジレンマの実験(後述)に始まり、特に社会生物学、動物行動学の分野において今日に至るまで盛んに行われている。そしてその結果、生態系における進化の理論に多くの新しい視点が導入された。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かなり多く見られる。

ただし、そこで主に取り扱われているのは以下の三点である。一つは、進化の結果の収束先としての社会の状態(協調的社会など)とゲームの設定との関係である。当然最終的な収束先があり、それが条件によってどのように変わるのか、ということが興味の対象になる。もう一つは、繰り返し囚人のジレンマを代表とする戦略の進化についての問題であるが、そこでは、戦略自体の進化は理論上永遠に可能ではあるものの、その結果見られるプレーヤーの行動パターンの進化は事実上固定化されてしまう。最後の一つは、均衡解析の確認としての計算機実験である。例えば、プレーヤーの合理性に制限を加えた時に、ナッシュ解などの均衡解が実際に実現されるのか、といった類の実験である。もちろん、これらの計算機実験が、それ自体大きな意味を持つこと間違いない。ただ、確かに計算機実験によるアプローチではあるが、前述のゲームとダイナミクスの問題に関して言うと、そもそも研究の動機から方向が異なる。また、ゲーム自体がダイナミクスを持つ場合に関する問題については、モデルの枠組み自体が存在しない。前述の問題を取り扱うにはモデルの構築の時点から違ったアプローチが必要である。

本研究では、ゲームにおけるダイナミクスについて議論すべく、二つのモデルを構成して考察を行った。その一つは、ある固定されたゲームから生まれるダイナミクスについての研究であり、もう一つは、「ゲーム自身がダイナミクスを持つ場合」についての研究である。前者は、既存のゲーム理論のモデルをベースとしたモデルであり、現象の複雑化・多様化をもたらす設定としてのゲームについて中心に議論する。一方 後者は、この世界のゲームの動的な側面を考慮した、より一般化したゲームのモデルである (ゲームのダイナミクスを固定すれば、既存のゲーム理論のモデルと同等になる)。

1. 『N人結託ゲームモデル』: N人ゲーム($N \geq 3$)の結託構造に注目してモデルを構築し、モデルの分析と実験結果から、ゲームの結託構造がプレーヤーのコミュニケーションの進化に果たす役割について考察を行った。過去の進化ゲーム型のシミュレーションでは見られなかった現象、特にプレーヤーのコミュニケーションの多様化、複雑化に向けた「開いた」進化が見られた。

2. 『動的ゲームモデル』: プレーヤーの行動によってゲーム自体が変動するゲーム。動的なゲームについて、モデルの枠組みを構築し、ゲームのダイナミクスとプレーヤーの進化の関係について考察を行った。モデルの分析とシミュレーションの結果から、ゲームのダイナミクスの中に存在する安定な軌道が協調的社会の発生と維持に大きな役割を果たすことが示

された。また、プレーヤーの行動とゲームのダイナミクスとの相互作用により、プレーヤーの戦略と系の社会構造が段階的に発展をする様子が見られた。

本稿では、後者の研究の紹介から行うことにする。詳細に入る前に、次の章では、両方の研究に共通の背景となっている進化系に関するゲームの理論について、いくつかの事項について簡単に解説を行う。

Chapter 2

背景と準備

(本章の内容は主に参考文献 [12] [24] [25] [26] [27] [28] によるものである。)

2.1 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 Osker Morgenstern と共に「Threory of Games and Economic Behavior」 [20] 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二つ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。

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。

2.2 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様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当である。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、この様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ってくる。

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。そうすることによって、ゲーム理論を合理的な個人の戦略決定ではなく生物の進化に適用できるようになった。具体的には、Maynard Smith 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 [29] 。

戦略 Y と対戦した時に戦略 X が獲得する利得を $E(X,Y)$ と書くことにする。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

$$E(I,I) > E(J,I) \tag{2.1}$$

が成立するか、あるいは

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

が成立することである。

集団中で戦略 I がほとんどの人口を占めている時は、実質上、戦略 I との対戦がほとんどになる。従って、ある戦略 J が集団中に進入するためには、戦略 I が戦略 I どうしで戦った時のパフォーマンスを戦略 I との対戦において上回る必要がある (式 2.1)。戦略 I と全く同じパフォーマンスの時には、戦略 J との数少ない対戦におけるパフォーマンスが重要になる (式 2.2)。

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比較的容易に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。つまり進化ゲームでは、元々のゲーム理論のように個人の完全な合理性を仮定しなくても、不合理な行動をする個体が淘汰されることによって、結果的に、戦略の分布のレベルでナッシュ均衡と同様の状態が得られる (具体的にはナッシュ解の条件に式 2.2の条件を加えたのが ESS である)。

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か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 [12]。

2.3 「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 [2]。

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、なぜ、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であろうか。

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 [30])。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に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考える。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、Table2.1 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 (Cooprate) 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いだろう。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 は繰り返し回数が充分に大きければ、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 [31])。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 を持っていても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存在すれば、広がることができることが分かる。そして、以上の結果は、協調関係

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	2, 2	1, 3
	Defect	3, 1	-5, -5

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。[32])

2.4 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況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。2.2 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 [33]、より拡張すれば、進化の過程一般について統一的な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。(artificail 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 [34]。

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.Lindgren の artifical 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ったり、いくつかの集団が互いに共進化していったりする状況があらわれた。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。外的な原因ではなく Lidgren の単純なシステムが生み出す dynamics のみによってこの様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 [35]。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。）

Part II

動的ゲーム

Chapter 3

導入

動的ゲームの要旨

あるゲーム的状況においてプレーヤーが選択した行動が、好むと好まざるに関わらずゲーム環境自体を変えてしまうことがある。その時逆に、その変動したゲーム環境にプレーヤーの意思決定が影響を受けることになる。また、自分の状態、及び他者の状態によってある行動に関する効用が変化することがある。こういった、ゲーム自身が、プレーヤーの行動とプレーヤーの状態に影響を受けて変動しうるようにしたゲーム = 動的ゲーム を二つの写像 g (力学法則)、f (意思決定) という形で単純に定式化し、静的ゲームとの比較を通じてゲームのダイナミクスが系に与える影響について議論する。本研究では、動的ゲームの一つの例として、社会的ジレンマ状況をモデル化した「木こりのジレンマゲーム」というモデルを定式化して計算機実験による解析を行った。社会的ジレンマ状況下ではゲームの人数の増加が協力の形成を困難にする、という事実が静的ゲームモデルの分析からすでに分かっている。しかし、動的ゲームモデルに関する本研究の実験と考察から、ゲームのダイナミクスに内在する安定な軌道が協調的社会の発生と維持を可能にしうることが示された。ゲームの動的な側面を考慮した このモデルによって、その他、以下のようなことが分かった。

1. 社会的ジレンマ状況でも、完全に「系の内部」の相互作用だけから協調状態が構成され、維持される場合がある。それはゲームの力学的法則に非常に依存し、人数の大小とは別のレベルの効果である。

2. 直接相手に影響と与えるというより、ゲーム環境自体を操作することによって相手に影響を与える戦略が、動的ゲームでは存在しうる。

3. 意思決定の際に他者の状態をどのように参照できるか、という進化のレベルによって、全く異なるゲームのダイナミクス、及び社会現象が見られる。

4. プレーヤーの行動とゲームのダイナミクスとの相互作用により、プレーヤーの戦略と系の社会構造が段階的に発展をする様子が見られる。

5. 静的ゲームとして表現すると論理的に同じになるゲームが、動的プロセスを考慮することによって全く異なる現象を生み出す場合がある。

ゲーム理論ではプレーヤーの効用関数は固定された枠組みとして通常与えられ(利得行列)、それゆえ数学的解析が成功したとも言えよう。しかし、我々が住む現実世界でのゲーム環境は、プレーヤーの行動や状態によって変動してしまうことがあり、そのダイナミクスのもつ意味は通常無視できない。確かに、ゲームの固定性の制限を外すと純数学的な解析は通常困難になる。しか

し近年では、計算機シミュレーションによってこのような系の振る舞いを直接知ることが可能になった。既存の研究でも、戦略の進化のレベルで時間的変動を考慮したものは存在したが、ゲームのダイナミクスを考慮したモデルを提唱して、実際の例を調べた研究はこれまで存在しなかった。動的ゲームモデルにおける上記の結果は、ゲームのダイナミクスをモデルのレベルで導入することの重要性を示し、さらに、プレーヤーの集団と環境との相互作用の中からどのようにゲーム的状況が生まれ、どのように変遷して行くかといった、これまで取り扱うことができなかった問題を、動的ゲームモデルによって取り扱うことができる可能性を示している。

3.1 「木こりのジレンマモデル」の簡単な説明

本稿の主な目的は三つある。まず一つ目はゲーム環境とエージェントの動的な側面を記述できるゲーム:「動的ゲーム」のフレームワークを構築することである。第二に、それを抽象的議論にとどめずに具体的に計算機実験による進化シミュレーションを行い、その一般的性質を追求することである。そして第三に、動的ゲームの立場から、生物集団の進化・コミュニケーション・社会の発展過程について新しい見方を提供することである。動的ゲームの理解の補助のため、本格的な議論に入る前に、ここでその具体的な例を一つ紹介する。(なおこの例は、実際に本稿で用いられているゲームでもある。)次のようなゲームを考えてみよう。

「木こりのジレンマゲーム」

ある丘にn人の木こりがいる。また、この丘にはm本の木が育っていて、ある程度大きくなる毎に木こりたちはそれらの木を切る。切られた木は、切られた長さから成長してまた大きくなる。このゲームは、これらの木々とそれを切る木こり(プレーヤー)たちによって構成されるジレンマゲームである。

まだ木が若いとき、つまり、木の成長率が高い時に、木こりたちが我慢して木が十分成長するのを待ってから皆で木を切れば、皆がそこそこに幸せになれる(「木が育つのを待つことへの動機」)。一方、木こり個々人の利得だけを考えれば、多少短くてもよいので、他の人を少しでも出し抜いて早めに木を切って独占してしまった方がよい(「早めに木をきってしまうことへの動機」)。しかし、皆がそういった利己的な行動に走ると、山はあっという間に丸裸になってしまい、皆にとっても不幸なことになる。ここにジレンマが生じる。

以上のようなゲームのことを「木こりのジレンマゲーム」と呼ぶことにする。このゲームで注意すべき点について簡単に述べておくと、まず一つは木の成長が連続的であるということ、そのためプレーヤーの獲得する利得(切り取った木の長さ)の可能な分布は連続的であるということである。そしてもう一つは、プレーヤーの戦略側から見て「どこまで木の成長を待つか?どこで木を切るか?」を決めるポイントも連続的に分布しうるということ、それゆえ「協力」「裏切り」という言葉の持つ意味も連続的になる。つまり同じ協力(裏切り)でも、白黒ではなく、グレーのゾーンが現れる。

既存のゲームとの比較、という点から言うと、このゲームはいわゆる「共有地の悲劇("the tragedy of the commons")[9]」と呼ばれるゲームの動的ゲームバージョン、と言うこともできる。逆に木こりのジレンマを静的なゲームに射影すると、共有地の悲劇型のゲームとして表現できる、と言ってもよい。しかし、そこで起こる現象が同じであるとは限らない。

3.2 基本的な問題意識

我々は他者との係わりの中、様々な状況で様々な意思決定を行う。我々が選択した行動は他人に影響を与え、逆に我々自身も他人の行動から影響を受ける。こういった状況を数学的言語で表現し、そして「複数の主体の合理的な行動とは何か」を探求するのがゲーム理論である[20]。なお、この状況はゲーム理論の言葉で言い換えると次のような(非常に当たり前の内容の)言明になる。「各プレーヤーが独立に自分の戦略を選ぶと、各プレーヤーが受け取る利得(効用)がそれぞれ定まる。ただし、全員が選んだ戦略の組に対して利得が決まるのであって、自分の戦略だけで決まるのではない」

さて、ここで次の二つのことについて考えてみたい。まず一つ目は、プレーヤーの行動がゲーム環境に与える影響である。我々の選択した行動は確かに他のプレーヤーに影響を与える(=ゲーム)。しかし同時に、我々の行動が 我々のゲーム環境自体に影響を与えることもないだろうか？そして、それによって自分が住むゲーム環境が変化してしまうことはないだろうか？ゲーム環境の変動によって、同じ行動に対する利得が違ったものになる、ということはないだろうか？もう一つは、プレーヤーの「状態」と利得関数の関係についてである(ここで言う「状態」とは、我々自身の生理的状態であるかもしれないし、我々が自分の内側に持っている「外部世界に対するイメージ」の状態かもしれない。ともかく、自分の中に存在して変動するものである。)。例えば、あるプレーヤーが、時間的に変化しないゲーム環境の中で、同じ相手と対戦を続けているとする。この時、同じ行動に対する効用も常に同じでありつづけるだろうか？自分自身の「状態」の変動に伴って同じ行動に対する評価が違ったものになる、といったことはないだろうか？

以上のことについて、ゲーム理論の進化系に関する研究との関連からもう少し詳しく検討してみよう。

3.3 静的なゲームと動的なゲーム

生態系における進化、社会進化などの問題については、過去、「進化的ゲーム理論(evolutionary game theory) [12]」が、様々な検証可能な仮説や説明を提供してきた。ここでは、プレーヤーの「学習」(learning)や、「模倣」(imitation)、そして文化的・遺伝的「継承」(cultual or hereditary inheritance)について、いくつかの重要な理論が提示されて来た。

また近年、コンピューターシミュレーションを使った進化の研究が人工生命などの分野を中心にして盛んに行われている。これらの研究では、進化の過程一般をゲームとして捉え、進化系をコンピュータープログラムのモデルに還元する。さらに、ある種の意思決定プログラムをプレーヤーと見立ててゲームをプレイさせる。そして、その計算機実験を通して進化の過程一般の理解を目指す、という方針を取っている。

さて、以上のような進化系の研究では、設定として用いられているゲームは多くの場合時間的に変動しないゲームである。別の言葉で言うと、プレーヤーの評価関数が時間的に変動しないゲームである。例えばそれは、鷹鳩ゲーム のように一回きりのゲーム(one shot game)であったり、繰り返し囚人ジレンマゲームなどの、同じゲームの繰り返しゲームであったりする。

静的にゲームを記述したからこそ、上記のような研究は今まで数々の成功を収めてきたともいえる。簡便のため本稿ではこういった形式のゲームのことを静的ゲームと呼ぶことにしよう。確かに、現実世界の社会現象を考える時に、こういった静的ゲームの枠組みで考察することは非常に効果的な場合が多い。しかし一方で、現実にはこういった枠組みで解析しきれない現象も存在する。なぜなら、基本的に我々が住む現実世界のゲーム環境は、固定されたものではないからであり、そして、各戦略主体の行動や価値体系の変化に伴い変動する可能性もあるからである。

現実世界のゲームでは、戦略主体とゲーム環境との間の相互作用も大きな問題となりうる。例え

ば現実の生態系型システムでは、ある個体が採用する戦略が外部環境に変化を引き起こしてゲームの利得行列自体が変わってしまうことがある。また、ある二個体間のローカルな利得行列が、無数に存在する第三者達が取る戦略によって変動する場合もあるし、まったくゲーム(競争関係)が無かった所に外的要因からゲームが発生して来る場合もある。

さらに、現実世界のゲームでは、自分自身の「状態」の変化によって同じ戦略に対する効用が異なってくる場合もある。例えば、単純な例では「木に成っているバナナを食べる」という同じ行動に対する効用が、その時その時のおなかの減り具合の「状態」によってまったく違うものになる。もう少し高度な例では、「目の前のバナナの状態と周りのプレーヤーの状態」を自分がどのように見ているのか、という「状態」が変化する場合がある。その「どのように見ているか」という「状態」の違いによって効用が全く違うものになってくる。同じ大きさのバナナだとしても、「このバナナはまだまだ大きくなる。」と思っている場合と、「このバナナはもうこれ以上は大きくならないだろう。」と思っている場合と、「こんなに育ってしまうと、隣にいる人がそろそろお腹を空かせて食べてしまいそうだ。」と思っている場合とでは、自ずと「バナナを食べる」という行動に対する効用が変わってくる。

ここで、戦略とゲーム環境の相互作用という点について、さらにもう少し詳細に言及してみる。静的ゲームモデルを拡張する必要があるとすれば、その理由の一つは、静的ゲームでは「ゲームのダイナミクス」という観点での解析が不可能である、という事実であろう。静的ゲームにおける考察の主な対象は、ある固定されたゲーム設定におけるプレーヤーの戦略や、プレーヤー間の相互作用(協力・裏切り・結託・共進化など)そのものであり、ここでは、「ゲーム」はあくまで所与の設定でしかない。ゲームのダイナミクスが戦略の進化にどのような影響を与えるのか、例えば、ゲーム環境が周期的あるいはカオス的に変動する時に、戦略の進化はどのような影響を受けるのか?などについての考察を行うには、静的ゲームは向いていない。また、逆にプレーヤーの行動がゲームのダイナミクスを生み出すことに関する問題、例えば、生産的な環境のダイナミクスを作るために、また、そのダイナミクスを安定させるために、プレーヤーはどのような戦略を取るべきか?といった問題を取り扱うことも、当然ながら不可能である。

プレーヤーの行動がゲーム自体を変えてしまうことに関する問題で、もっとも単純で明解な例は「遅延効果(delay effect)」[17] である。我々の「合理性(ゲーム理論で前提になっている)」は、現実には完全ではありえない。そうである以上、現在より未来へと展開され続けるゲームについて、

1. その力学的法則を完全に知り、
2. ある時点でプレーヤーが選択できる全ての行動を数え上げ、
3. その次の時点で実現され得るゲームを数え上げ、
4. 現在から未来への完全なゲームの分岐図を構成し、(展開形ゲーム、ゲームの木(図 3.1))
5. さらに、その(普通)巨大なゲームの木全体を見て均衡を計算する。

といったことは、少し大きなゲームになれば事実上不可能である(限定合理性(bounded rarionality)[1] [19]。この点についてはまた後でも少し触れる。)。チェスのように、推論すること自体が主要な目的であるゲームの時でさえ、実際に我々が上記のような方法で意思決定を行うことは不可能である。(また、もしこれが可能なら、対戦前から結果が分かっているという意味で、我々がチェスで遊ぶ意味はない。[21])

我々は、我々が取り扱える範囲のローカルなゲームを見て意思決定を行う。しかし、ゲームが変動しうる場合、目の前のゲームに最適化した行動が長期的視点から見て良いものであるとは限らない。例えば、現時点である程度我慢することが、後々に豊かな「ゲーム環境」を構築することにつながる、といったことがあるかもしれないからである。このように、プレーヤーの行動の

効果が時間的に遅れてゲームに現れて来ることに関する問題を「遅延効果」と呼ぶ。言うまでもなく、これは繰り返しゲームなどの静的なゲームのモデルが取り扱う問題ではない。「前回相手が協力したら、今回自分も協力する。そして高い利得を目指す」といった戦略と、「ゲーム自身を変動させて高い利得を獲得する」といった戦略とは根本的に違う。

ここで、以上のような問題を取り扱うため、「動的ゲーム」と我々が呼んでいるモデルを提示したい。端的に言うと、動的ゲームとは、「ゲーム環境の状態」と「プレーヤーたちの状態」、そして「プレーヤーの行動」の三者がすべて変数として表されて、これら三者の間に動的な相互作用があるゲームである。

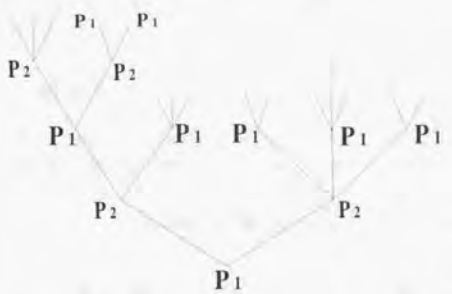


Figure 3.1: 二人のプレーヤーによるゲームの木 (ゲームの展開形表現): P_1 はプレーヤー 1 の手番を表し、 P_2 はプレーヤー 2 の手番を表す。時間の流れに従って下から上へとゲームが分岐して、ゲームの木の枝が広がって行く。

Chapter 4

動的ゲームモデルとその定式化

4.1 動的ゲームの概念

動的ゲームについて詳しい説明を行う前に、動的ゲームモデルについて概念的な説明をしておこう。動的ゲームモデルで我々が念頭に置いている状況は、次のような(ある意味ありふれた)状況である。まず前提として、n 人のプレーヤー(意志決定主体)が、あるゲーム環境の中にいる。そして、それぞれのプレーヤーには、その時その時の状況に応じていくつかの実行可能な行動がある。

1. どの行動を選択するか決断する際、それぞれのプレーヤーは「周りの環境の状態」と「(自分も含めた)プレーヤーたちの状態」を見る。

2. 各々のプレーヤーが選択した行動は環境を変動させる。

3. プレーヤーが選択した行動と環境の変動に応じて、プレーヤー自身の状態も変動する。

以上のプロセスは未来に向かって続いていくことになる。ゲーム環境などが変動して時間発展する様子は、離散的時間、つまり写像の連続で表現されてもよいし、連続時間、つまり微分方程式で表現されてもよい 。連続時間であれば、微分ゲーム(differential game)の一種になる。

離散時間であれば展開形ゲーム(game in extensive form)の亜種になる。ただし、このモデルはプレーヤーの限定合理性が前提になっているので、全ての手番に関する行動計画を立てること(いわゆる戦略)は基本的に不可能であるという立場に立っている。つまり、各時点各時点で古典ゲーム理論の意味の「ゲーム」がある程度成立していると考える。この点は繰り返し囚人ジレンマに関する最近の研究と 繰り返しゲームと限定合理性の節でも議論する。展開形ゲームの言葉でいうと、プレーヤーから見て各手番(move)ごとにある種の利得行列(各選択肢(alternative)に対する効用)が存在するような状況であり、その手番ごとの利得行列が戦略にとってかなり意味をもつ。なお、このモデルでは利得関数が変動するので、普通言われるような繰り返しゲームではない。

4.2 構成要素

動的ゲームの世界を構成するのは、n 人のプレーヤーからなる集合 $N=\{1,2,\cdots,n\}$ と、ゲーム世界の環境成分の集合 $M=\{1,2,\cdots,m\}$ である。ここで環境成分とは、例えば、塩、水、石油、食料、などと考えてもよい。つまり、ある種の力学的法則に従い物理量などが変動するが、意思決定主体("autonomous optimizer" in [15])のクラスには属さないものである。

この動的ゲームの世界に存在する基本的な変数は、環境の状態 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_m)$ と、プレーヤーの状態 $y=(y_1,y_2,\cdots,y_n)$ である。環境の状態の j 成分 x_j と、i 番目のプレーヤーの状態 y_i は

Table 4.1: 動的ゲームの構成要素

資源(環境成分)の集合	$M = \{1, 2, \cdots, m\}$
プレーヤーの集合	$N = \{1, 2, \cdots, n\}$
資源(環境成分)の状態	$x = (x_1, x_2, \cdots, x_m) \in R^m$
プレーヤーの状態	$y = (y_1, y_2, \cdots, y_n) \in R^n$
プレーヤーの行動	$a = (a_1, a_2, \cdots, a_n) \in Z^n$

実数全体をとりうる変数である。そしてこれらとは別の変数として、全プレーヤーが選択した行動の組a=$(a_1, a_2, \cdots, a_n)$である。i番目のプレーヤーの選択した行動a_iはある範囲内の整数値を採る。以上のことをまとめたのが表4.1である。

4.3 この系の力学法則

ここで、動的ゲームを離散時間で定式化してみよう。(もちろん連続時間で表現してもよい。しかし、写像形式にすることによって、繰り返しゲームとの対比が可能になる。)

この動的ゲームでは、この系に定められているある力学的法則に従って、xとy(環境の状態とプレーヤーの状態)が時間発展していく。我々が住む現実世界と同様に、プレーヤーが何もしなくても所与の法則に従って系は変動して行く。これを自然法則と呼ぶことにしよう。一方、プレーヤーが行動をすると、その行動はゲーム環境に影響を与え、結果的に他のプレーヤーにも影響が及ぶ。つまりxとyの変動は、系の自然法則とプレーヤー達の行動の影響を受ける。時刻をtとして、この系の時間発展法則gは次式(4.1)のような簡単な写像として表現される。

$$g: \ (x(t), y(t)) \longmapsto (x(t+1), y(t+1)) \tag{4.1}$$

上記の写像gで表現されるxとy(環境の状態とプレーヤーの状態)の時間発展の法則は、既に述べた通りその要因は二通り考えられる。本稿では単純化して、この系の力学法則gを自然法則u(式(4.2))とプレーヤーの行動による影響v(式(4.3))の合成として表現できると仮定する(式(4.4))[1]。

$$u: \quad (x(t), y(t)) \longmapsto (x(t)', y(t)') \tag{4.2}$$

$$v: \ (x(t)', y(t)', a(t)) \longmapsto (x(t), y(t)) \tag{4.3}$$

$$g = v \circ u \tag{4.4}$$

4.4 意思決定関数

プレーヤーiは、周りのゲーム環境の状態xと他のプレーヤー達の状態y_{-i}[2]、そして自分自身の状態y_iを見てから、自分の価値観、その他に従って行動(activity)a_iを決定する。このプレーヤーが行動を決定する部分を意志決定関数(decision making function)と呼ぶことにする。全プレーヤーNは意思決定関数$f = (f_1, f_2, \cdots, f_n)$を持つ(表4.1参照)。実行できる行動群に対する各プレーヤーの価値観が表現されている部分であり、進化、学習によって変わって行く部分である。

[1] u、vの順番は特に意味がなく、本稿のシミュレーションでは式(4.4)の順番にしたと言うだけである。特に動的ゲームを微分方程式形式で定義する時はこの順番は、それほど意味はなくなる。次のプレーヤーが意志決定するときの入力情報もx、yでもx'、y'でもどちらでもよく、これはgの定義による。$g = v \circ u$ならx'、y'である。ただし、シミュレーションの説明に入るまでは、簡単のため意志決定関数の入力をx、yに統一している。

それぞれのプレーヤーのパーソナリティ そのもの と言っても良い。時刻をtとして、意思決定関数fの働きは次の式(4.5)のようになる。

$$f: \ (x(t), y(t)) \ \longmapsto \ a(t) \tag{4.5}$$

以上ここまで述べたように、動的ゲームは基本的に系の時間発展の写像gと意思決定関数fの二つで記述される。離散時間で記述する場合、動的ゲームは(fが埋め込まれた)gの繰り返しによって構成される一種の繰り返しゲームと言ってもよい。

---

[2] $y_{-i} = (y_1, y_2, ..., y_{i-1}, y_{i+1}, ..., y_n)$

Chapter 5

動的ゲームモデルに関する考察

ここで、前節で定義した動的ゲームモデルについて二つの視点から少し考察してみる。一つ目は、ゲーム理論の分野で近年特に盛んになっている限定合理性の研究、繰り返し囚人ジレンマゲームの研究などの関連から動的ゲームモデルの立場を述べる。もう一つはレスラーの人工脳のモデル(autonomous optimizer)との関係から動的ゲームの定義式の意味について議論する。

5.1 限定合理性、繰り返し囚人ジレンマ、動的ゲーム

導入部(第3節)で、動的ゲームの研究を行う動機について簡単に述べた。本研究の基本的な興味は、動的に変動する環境の中で意思決定主体が様々な条件で相互作用を行うゲーム的状況、つまり我々自身が住んでいるような世界の状況そのものである。そして、そこで見られる様々な社会現象、コミュニケーション、主体の行動について、その変遷、進化のメカニズムについて知見を得ることである。

ゲーム理論の立場から見ると、いくつかのゲーム的状況については理論上は解析が終わっていることになる。例えば、既に触れたチェスの場合は、必勝戦略が存在するか、引き分けにできる戦略が存在することが証明されている。また、有限回繰り返し囚人ジレンマでは常に裏切り続けることが「合理的な」行動であることが示される。しかし問題は、実際我々がそれらのゲームに対峙したときに見せる行動と、理論が示す解との間に、時により明らかな食い違いが存在することである。その原因はゲーム理論の前提にある。

ゲーム理論では、次の二つが根本的な前提となっている。

- ゲームに参加するプレーヤーは「合理的な」意思決定主体。
- ゲームのルールと全プレーヤーの合理性が共通知識。

そしてこれらの前提の下で、合理的行動が何であるかを問題にし、様々な理論が構築されてきた。しかし例えばチェスの場合、解の存在は示せるが計算は不可能であるような典型的なゲームで、必勝戦略があることは分かっても、それが具体的にどんな戦略なのかを求めることが、我々には不可能である。チェスに限らず多くのゲームにおいてこういったことはありうる。これはサイモンが提示した、プレーヤーの「限定合理性[19]」と呼ばれる概念の一つの側面であり、プレーヤーの計算能力の限界が、ゲーム理論の現実への適用を困難にする一つの例である。

限定合理性の問題は、ゲームにおける「計算可能性」の問題だけではない。仮に合理的な解を計算可能なゲームの場合でも、我々が理論通りに行動しないことはそれほど珍しいことでもない。例えば有限回繰り返し囚人ジレンマにおいて、後ろ向き帰納法を使って「裏切りつづける」ことがナッシュ均衡解であることを導き出すのに、それほど大きな計算は必要ではない。しかし、繰

Table 5.1: ドレッシャーとフラッドの囚人のジレンマ

		player 2	
		D	**C**
player 1	**Cooperate**	-1, 2	0.5, 1
	Defect	0, 0.5	1, -1

り返し囚人ジレンマにおけるいくつかの実験が示す通り、必ずしも我々はそのように行動しない。有名な例では、繰り返し囚人ジレンマタイプのゲームに関してドレッシャーとフラッドが行った実験がある(まだ「囚人ジレンマ」という名前がタッカー [1]によって広められる前の実験)。

この実験で用いられたのはTable 5.1の利得行列 [2]である。実験は、ある二人のプレーヤーの間で百回繰り返して行われた。このゲームは一回の囚人ジレンマとしてみても、百回繰り返し囚人ジレンマゲームとしてみても、プレーヤーが選択すべき戦略は(プレーヤー1、プレーヤー2)=(裏切り、裏切り)、もしくはその繰り返し、が唯一のナッシュ均衡解である。この時、百回の平均利得は(0,0.5)となるはずである。しかし、実験結果は平均利得が(0.4,0.65)と、ナッシュ均衡から大きく離れたものであり、かなり協力的な結果であった。(ゲーム途中の様子を見ると、しっぺ返し戦略(Tit-For-Tat)に近いことがかなり行われている。)

繰り返し囚人ジレンマに限らず、現実の人間を対象としたいくつかの実験で[7]、均衡解と違う点に実験の結果が収束することが報告されている。ゲーム理論の前提となっている人間の合理性が完全ではありえない以上、当然の結果とも言えるかもしれない。では、ゲームの理論は限定合理性の問題に対してどのような解釈をすればよいのだろうか?

限定合理性についての研究が実際に軌道に乗り始めたのは近年になってからと言ってよく[1]、現在でも依然ゲーム理論の中心課題の一つである。繰り返し囚人ジレンマについて言えば、いくつかのアプローチが存在する。その一つはプレーヤーの計算能力の有限性という視点に立った、計算機実験によるアプローチである。計算機実験では、プレーヤーはコンピュータープログラムとして実装されるため、実験する側がプレーヤーの内部構造を完全に把握できる。そのため、プレーヤーの能力を様々に設定して、その実際の振る舞いを調べる、といったことが可能である。しかも、非常に大規模な実験が可能であり、プログラム的に突然変異を導入することで進化の実験も可能である。過去の研究の例としては、プレーヤーを有限オートマトンとして設計してコンピュータープログラムで表現し、実際に計算機実験を行ったものなどがある[13, 18]。これらの研究では、有限回繰り返し囚人ジレンマゲームでは、プレーヤーの記憶が十分でない場合、協調状態が「均衡点」として実現することが示されている。これは、現実の繰り返しジレンマ的状況で、しばしば協力的な行動が見られることを考えるとある意味納得できる結果である。

限定合理性に対するもう一つのアプローチは、「有限回」繰り返しを、事実上「無限回」である、と解釈して、近似として無限回繰り返しゲームとしての均衡を求めることである。これが具体的にどういうことか、ということについては、上述のドレッシャーとフラッドの実験に対するナッシュのコメントが分かりやすい。

ナッシュが指摘したいくつかの内容のうち、二つについて要約すると次の通りである。まず一つ目は、囚人ジレンマも、もし百回ゲームを繰り返すなら個々の独立したゲームの繰り返しではなく、多段階の大きな一つのゲームだとみなすべきである、ということ。そしてもう一つは、百回という回数が通常の人間にとって、後ろ向き帰納法を適用するには大きすぎるということ、そ

[1]この実験で用いられた利得行列に、タッカーがストーリーをつけて脚色して広めたのが、現在の囚人ジレンマ

[2]同じ利得を取り合うことが「均衡」である、というある意味反射的な行動を防ぐために、利得行列はわざと非対称にしてある。しかし、本質的には囚人ジレンマの利得行列であることには変わりない。

してそれ故、無限回繰り返し囚人ジレンマの均衡として結果を近似すべきである、ということである。

この指摘が正しいとすれば、百回繰り返し囚人ジレンマにおける協調状態の実現は合理化が可能である。ここで協調状態の合理化に対する理論的背景となるのは、無限回繰り返しゲームの基本定理の一つ、フォーク定理である。フォーク定理によると、あるゲームGの無限回繰り返しゲームG^{∞}[3]では、次の条件を満たす利得の組がNASH均衡で実現できる。

1. Gでプレーヤー達が実現できる利得の組であること。(実現可能集合)
2. Gで保証されている最低利得(囚人ジレンマの場合、裏切れば、少なくとも最悪の状態は防ぐことが出来る。)より大きい利得であること。(個人合理性)

繰り返し囚人ジレンマにおけるTIT FOR TATなどによる協調状態は明らかに上記の条件を満たす。従ってTIT FOR TATなどによる協調状態が均衡であることを合理化することができる。もし我々が、様々な繰り返し囚人ジレンマ的状況に出会った時に、(i) 実際にそれを無限回繰り返しゲームとして「認識」し、(ii)そして無限回繰り返しゲームとしての均衡を計算をして行動していると認めるならば、この「プレーヤーの限定合理性とフォーク定理」という組み合わせは非常に説得力がある。(しかし、三段階の「最後通牒ゲーム」のような、わずか三段階の帰納的推論をすれば均衡が見つかるゲームにおいてでさえ、実際に実験をすると、推論による均衡が実現されないことなどを考えると、我々が常に(ii)のような計算をして行動しているとも言い難い面がある。本当のところは、我々は場合によって推論をするときもある、と言うほうが妥当だと思われる)。

さて、ここで対象を「動的なゲーム」に戻そう。例えば、第3節で紹介した「木こりのジレンマゲームモデル」について考えてみる。木こりのジレンマのゲームの繰り返しの各時点各時点で言えることは次の二つである。

- 木を切る木こりの「人数」が多いと、木が一気に短くなる
- 誰にも切られなかった木は大きくなる

つまり、ゲームの各自点各時点で、木を切った人数によってゲームを分岐させることができる。各時点の分岐をすべてつなげれば展開形ゲームとして表現することが可能である。もし、プレーヤーが「合理的」であれば、このゲームのナッシュ均衡は計算するまでもなく「全てのプレーヤーによる木の切り合い状態」に陥る。その結果、山はほとんど丸裸になるだろう。しかし、実際に「木こりのジレンマ的状況」に対峙したとき、我々はこのような破壊的な行動を常に行うのだろうか?一緒に木が育つのを待ったり、交代で木を育てて交代で木を切ったりすることはないだろうか?これは、繰り返し囚人ジレンマで、プレーヤーに合理性を仮定する理論が導き出す結果が、現実で実際に見られる振る舞いと明らかに異なる時がある、という前出の話と、ほぼ同じ話である。

では、やはりプレーヤーの能力に限界があると仮定しよう。限定合理性の条件の下で、木こりのジレンマゲームに対してはどのようなアプローチが可能であろうか?

木こりのジレンマは一種の繰り返しゲームであるともいえる。しかし、有限回繰り返し囚人ジレンマのケースのように「限定合理性 → 無限回繰り返しゲームの近似 → フォーク定理」という組み合わせを解析のツールとして用いることは(有限繰り返しゲーム一般に対してこのような適用が妥当であることを認めたにしても)、動的ゲームの場合、そもそも不可能である。なぜなら、フォーク定理は「同じゲーム」の繰り返しの場合に対する定理であり、一方、動的ゲームは繰り返しの度に変動するゲームだからである。

では、(これも囚人のジレンマを中心として広く行われている方法だが)プレーヤーとして限定合理性を仮定したコンピュータープログラムを用いて、モデルを作って計算機実験を行う、とい

[3]厳密には割引率が1のとき

うアプローチはどうだろう?これは、動的ゲームの世界とプレーヤーの実装を実際にすべて自分で把握してから研究ができる、という点で、有効な手段ではある。

しかし、囚人ジレンマ、繰り返し囚人ジレンマなどの静的なゲームでは、もともと利得行列によるゲームの表現方法が存在していたのに対して、動的なゲームではゲームを表現するための妥当な「枠組み」がもともと存在しなかった。つまり、ゲーム環境自体がプレーヤーの状態・プレーヤーの行動と影響しあいながら発生・進化していくようなゲームを表現する方法がなかったのである。これは計算機実験を行う以前の問題である。

本稿では、既に第 4 章 (p. 18) でその枠組みに相当する部分を定式化したが、基本となるのは「系の時間発展」と「プレーヤーの意志決定」だけであり、その方法としては系の時間発展の中にプレーヤーの意思決定関数を導入するいったものであり、発想としてはかなりシンプルなものである。(なおこの次の節でも触れるが、この枠組みの構築にはレスラーの autonomous optimizer のモデルが大きく係わっている。) しかし、そのようにシンプルな枠組みを基にしてゲームを表現することで、様々な動的ゲーム状況を具体的にモデル化することが初めて可能になる。またそうすることによって、動的ゲーム下における「限定合理的なプレーヤー」の振る舞いと、その時のゲーム自体の振る舞いを、実験とモデルの分析を通して知ることが出来るようになる。

5.2 Autonomous optimizer

第 4 章 (p. 18) で動的ゲームモデルを定義したが、まずこれを簡単に振り返ってみよう。動的ゲームモデルは以下の二つによって特徴づけられる。

- 系の時間発展の写像: g
- 意志決定関数: f

また、動的ゲームで使用される変数は以下の三つである。

- 環境の状態: x
- プレーヤーの状態: y
- プレーヤーが選択した行動: a

変数 x、y、a は g、f に従ってゲームの流れの中で変動し、f は進化・学習のオーダーで変化する。

上記のモデルは 1974 年にレスラーによって定義された脳の機能の抽象モデル「autonomous optimizer」[15] の考え方を様々な形で採り入れている。ここで、レスラーのモデルとの関連から、特に「プレーヤーの状態」に関する議論を中心に、動的ゲームモデルを考察する。

動的ゲームモデルは、世界を力学法則 g と意志決定関数 f で記述しているが、これは autonomous optimizer の前提でもある。つまり、世界が二つのクラス...力学系と optimizer で構成されているという視点に立っている。autonomous optimizer というのは、ある所与の関数 (optimality functional) を最大化 (最小化) しようとするような系の総称である。この関数の入力は周りの環境からの情報である。平たく言うと「周りを見て、それによって行動を決める」といってもよいだろう。言うまでもなく我々自身も optimizer のクラスに所属する。もちろん optimizer も力学系であることは間違いないので、世界の全てを力学系として記述する、という立場に立ってもよい。しかし、optimizer の振る舞い自体に興味がある時に、そのようにモデルを構築することはあまり意味がない [16]。系全体の力学的法則を知っても optimizer について理解できたことにはならない。というのも、系の力学的法則が単純な時でも、optimizer の振る舞いを系のダイナミクスから抽出することは、一般に非常に困難を伴うからである。全てを力学系で記述すると optimizer の発生や定義 (どこから

optimizerと呼ぶべきか)の問題から取り扱う必要が生じてくるが、これは別の問題として取り組むべきである。なお、optimizerの一つの特徴として、その振る舞いがかなり複雑でもoptimizerの記述自体には(力学系で全部記述することを考えると)非常に少ない数の変数で十分である、ということがある。これはoptimizerのクラスを定義することの利点の一つであり、また、動的ゲームのようなゲームのダイナミクスに主眼が置かれているモデルで、gとfに分割してモデルを構成したことの理由でもある(図 5.1はプレーヤーの概念図)。

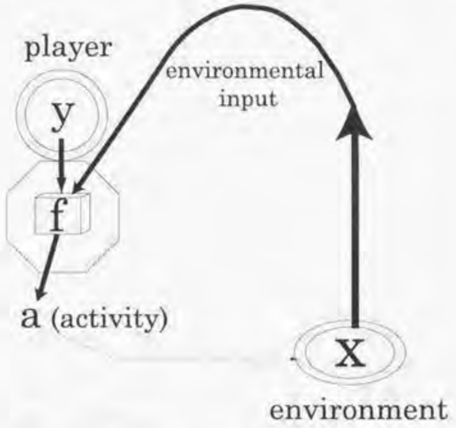


Figure 5.1: プレーヤーの概念図: 意志決定関数fを持ち、環境の状態 (変数 x) と自分の状態(変数 y)を入力として行動 (変数 a)を決める。fを変化(進化・学習) させてある種の評価関数を最大化(最小化)する。

複数のoptimizerが環境を通じて結合すると新たな問題が現れる [17]。つまり、あるoptimizerの行動の影響が、他のoptimizerにとって環境入力として働くようになる、ということである。いわゆる「ゲーム」と呼ばれる状態である。ここに動的ゲームモデルとの接点がある。動的ゲームにおけるoptimizerは、もちろん「意思決定主体(プレーヤー)」である (autonomous optimizerでは、optimizerの行動が実空間の座標での動きとして表現されている、という点など、動的ゲームとの相違点も存在するが、これは、autonomous optimizerが(おそらく)力学系から出発したモデルであるのに対して、動的ゲームはゲーム理論のゲームから出発しているということによる)。

optimizerが他のoptimizerと結合すると、周りの環境(動的な媒介変数として実装される)の他に、他のoptimizerの「状態」の影響を受ける。つまり、optimizerの状態がシグナルとして働くようになる。それらを入力としてoptimizerはまた次の行動を決定し、環境に影響を与える。optimizerと動的ゲームの関連については他にもあるが、ここでは動的ゲームでも使われる「状態」変数の役割に重点をおいて議論する。

動的ゲームモデルに戻ろう。ゲーム論のモデルを使った繰り返しゲームの実験においてプレーヤーが行動決定の際に参照するのは、多くの場合プレーヤーたちの過去の行動である。(その他には、各成分ゲームの利得が情報として与えられる場合もある。)一方、動的ゲームでは行動決定の際に直接参照されるのは、環境、および、プレーヤーたちの状態である。プレーヤーiの意志決定関数f_iは、環境の情報xのほかに(自分も含めた)プレーヤーたちの状態yを参照して、行動a_iを

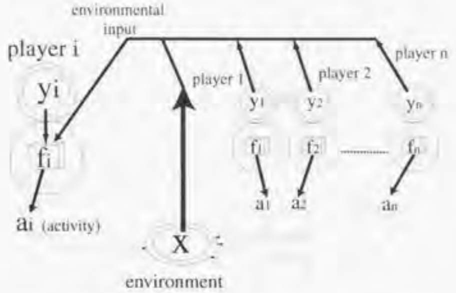


Figure 5.2: 動的ゲームの概念図: 意志決定関数 f の入力として、他のプレーヤーの状態も参照される。プレーヤーの行動はゲーム環境に影響を与える。

決定する(図 5.2は動的ゲームの概念図。なお、レスラーのモデルでは「他のプレーヤーの状態が最適化関数の環境入力として働く」と表現されている)。ここではプレーヤーの状態とゲームにおける行動は完全に分離されている。ところで、ゲームの力学法則 g はモデルにおいて所与のものなので、その力学法則で構成される環境にプレーヤーが適応進化学習するとすれば、変数 x、y には過去の記憶が埋め込まれているといって良い。つまり、その時の x と y を知ることで、変数の精度の範囲内で過去の行動についての情報を、ある程度知ることが理論上は可能である(シミュレーションでは x、y には倍精度の実数を使っている)。これを生かせるかどうかは x、y を入力として使う f にかかっている。f は経験によって洗練されて行く。f には過去の経験が埋め込まれ得る、といえる。

単純化した例で説明すると、例えば、自分が少し目を離した隙に目の前の皿からリンゴがなくなっていて(x)、現在自分が空腹で(y_i)、さらに隣に座っている人々が満たされた顔をしていたら(y_{-i})、その人たちがリンゴを食べたであろうことが分かる。その部屋が閉じられた系であるとしたらこの予想は一層妥当なものになる。f_i が洗練されたものになっていれば、リンゴが食べられたことを感知して報復に出るだろうし、f_i がそれほど洗練されていなければなにもしないだろう。実際、後で示されるシミュレーションの結果では、f が x、y(特に y)を参照するようになるに従い、時間的な役割分業などの協力形態が見られ、高度な行動が見られるようになる。

ところで、我々が「プレーヤーの状態」と言明する時、「状態」という言葉の意味は幾分あいまいなものになりがちである。特に「他の人の状態」について表現する時、それが意味するところには、言う人の価値判断が否応なく入ってくる。「ある人の表情」を見て、それを「考え込んでいる状態」と見るか、あるいは「怒っている状態」と見るかは、見る側の過去の経験や現在の心理状態によって変化することもある。

ここで、動的ゲームについてもう一度考えてみる。動的ゲームモデルにおいてプレーヤー k に属しているのは f_k と y_k である。

- y_k はプレーヤーの外側から観測可能な「状態」で、他のプレーヤーにとってはシグナルになる。(autonomous optimizer の状態(state))

- f_k は外側から見えないプレーヤーの内的構造で、外側の物(あるいは自分自身)をどのように認識しているか、価値判断の機構。(autonomous optimizer の最適化関数(optimality function))

例えば上記の例で、プレーヤーiが、ある人kを観ていたとすると、上記でいう「ある人の状態」はy_kに相当する。実は、「考え込んでいる状態」や「怒っている状態」は、y_kに加えてy_iとさらにf_iが一体になったもの$(f_i(y_i, y_k))$である。そして意思決定f_iの結果、プレーヤーiは、「(考え込んでいる)kさんをそっとしておく」とか「(怒っている)kさんをなだめに行く」といった意思決定を行うことになる。つまり、上記で、前者の「状態(y_k)」は見たままの「相手の状態」であり、fが係わってくる後者は「自分が思っている相手の状態」である。(レスラーは、autonomous optimizerが言語の発達のモデル、特に「私」という一人称代名詞に対する認識の発達モデルになりうる可能性について指摘している。[17])

次に木こりのジレンマゲームとの関連について少し考える。純粋に「利得」という観点で言えば、「大きくなった木を見たら、すぐに切り倒す」という意思決定は、木こりにとって常に最高の意思決定法である。というのは、木こりにとって、利得はあくまで切り取った木の長さであり、プレーヤーの状態は関係ないからである。ところが、動的ゲームの形式でゲームを記述して、状態が意思決定に係わってくると必ずしもそうは言えなくなる。つまり、自分が満たされていて隣の人が満たされていない時と、その逆ケースでは、自ずと「木を切る」という行動に対する評価が変わってくる。にもかかわらず、木こりの適応度に係わるのはあくまでも切り取った木の長さである。実は、既に触れた「遅延効果」では、この「状態の評価」が係わってくる。

Chapter 6

興味

ここまで考察を行った「動的ゲーム」の一つの例として、この研究では「木こりのジレンマゲーム」を定式化し、計算機実験による解析とその考察を行った。実際にここで研究の詳細に入る前に、この研究が目指すところ、この研究の興味について少し詳しく触れておきたい。

この研究の興味は主に次の二つの点にある。一つは、ここまで考察してきた動的ゲーム一般について、その性質を知るための「木こりのジレンマ」であり、もう一つは、「共有地の悲劇」の動的ゲーム表現としての「木こりのジレンマ」である。

6.1 ダイナミクスを考慮した「共有地の悲劇」

比較的大きな集団中で個体間の協調を維持する際に、ある種のジレンマ性が生じる時がある。例えばごみの問題などがその一種である。つまり、個人的な立場から見ると、利己的な行動を選択する方が常に利得が大きい。しかし、集団中の全ての個体が利己的な行動を行うと社会全体に悪影響が生じ、それが結局は自分に帰ってくる、という状況である。こういった社会集団中での協調状態維持の問題は「社会的ジレンマ(social dilemma)」と総称されている。囚人のジレンマもこの一部に含めて考えることがある。社会的ジレンマは、現在も社会生物学などを中心に主な議論の対象の一つである。木こりのジレンマゲームは、この「社会的ジレンマにおける協力」の研究に新しい視点を導入することが可能であると思われる。まず、このトピックに関する過去の研究の状況を簡単に述べておこう[23]。

社会生物学の分野では、社会における協力性は、主に「血縁淘汰」の効果、または「互恵性」によって維持されると考えられてきた。「互恵性」による協力的社会の生成及びその維持に関するする研究は、事実上アクセルロッドの繰り返し囚人ジレンマの計算機実験[2]による研究から始まる。つまりTIT FOR TAT(しっぺ返し)戦略がAll-D(常に裏切る)戦略に対して進化的に安定となるということから導かれている。

このアクセルロッドの繰り返し囚人のジレンマの結果は、今でも多くの社会的現象を説明するために用いられる。しかし現在では、このアクセルロッドの繰り返し囚人のジレンマの結果を、集団における協力性の維持の問題一般に適用することは、多くの研究者が不可能であると考えている。というのは、社会における相互作用は、通常、二個体以上の個体を含むものであり、したがって(二個体ではなく)三個体以上のプレイヤーを想定したゲームによってモデル化を行う必要があるという認識されているからである。既に触れたように比較的大きな社会集団中における協力性維持の問題は、社会のジレンマと総称されているが、例えば、社会ジレンマをN人の囚人のジレンマ($N > 2$)として定式化する必要があるということである[3]。

ボイド&リチャーソン[4]、ジョシ[10]は、N囚人のジレンマを進化ゲームを用いて解析した。彼らの研究では、TIT FOR TATが進化的に安定になる条件がNの増加とともに急激に厳しくな

ることが示された。つまり、この研究が示す重要な点は、N 人ジレンマ状況で協力が維持されることの説明として単なる「互恵性」による説明は不適当、つまり互恵性だけでは協調状態の維持は不可能である、ということである。そこで近年では

1. 互恵性による説明が不適当だとすれば、それ以外のどのような要因によって社会集団中の協力性維持の問題を説明できるのか?

2. そもそも社会ジレンマは、本当に N 囚人のジレンマによって、適切に表現されるのだろうか

といった点が注視されている。

前者(1)の研究の例としては、例えば、ボイド&リチャーソンは、協力/裏切りといった戦略に加えて、非協力者に制裁(sanction)を加える/加えないといった戦略を考え、その同時進化に関する研究を行った([6], etc.)。制裁の発達は社会科学の分野でも注目されている話題でもあり、そこから更に、社会規範や法制度の発達・進化といった問題にまで目が向けられている。その他、文化的な効果による協力性の維持の可能性を追求するモデルが、やはりボイド&リチャーソンによって研究されている[5]。これらの研究は、協力的社会がエージェント間の単なる互恵性ではないもの、つまり，ある種の規範、制度に従って系の外側から与えられる制裁などによって維持されるのではないかという立場であり、また、これらの制度、規範は、どのようなかたちで設立され、発達したのかといった点まで扱おうとしている。

後者(2.)についていうと、例えば、社会ジレンマの古典的な例として「共有地の悲劇」がある[9]。「共有地の悲劇」は、生物学者のガレット=ハーディンによって1968年に発表されたものである。その構造が、さまざまな環境問題に適用できるため、社会学や政治学の分野でもとりあげられるようになった。共有地の悲劇とは次のような状況のことを言う。「誰にでも開かれた牧場(共有地)がある。村人達が共有の牧草地で自由に家畜を放牧できる場合、何の制約も加えられなければ村民は自己の利益を考えて放牧する家畜数を増やしていく。しかし、家畜数が増えるほど牧草地は次第に荒廃し、遂には放牧不可能になってしまう。一人一人が放牧数を一匹増やすことによる損失はそれほど大きくない。しかし、このプロセスが続くと共有地が家畜を養える能力がついに完全に尽きてしまうことになる」

共有地の悲劇的状況の現実の例として、北アメリカにおける放牧地の荒廃の経緯について簡単に紹介する。[22]北米の放牧地の面積は米国全土の 1/3 にあたる 3 億1200 万ha であり、このうちほとんどで家畜の放牧が行われている。北アメリカの家畜には羊、山羊、馬、トナカイが含まれるが、牛の数は群をぬいており米国の家畜全体が 1 年間に消費する牧草の 95% を消費している。1800 年代後期、西部の乾燥地帯において牧場主たちは家畜の数をどんどん増やした。その数は放牧地の許容量を優にこえるものであった。家畜たちを、まったく規制のない状態で 1 年中放置した結果高原は丸裸になり、めったに降らない雨を吸収する土壌の力が低下し植物の生育面積が減少したので、多年草が根絶し、牛の食べる草がますますなくなるという悪循環が発生した。(このような状況下で、1930年に環境保全主義者らによって、土壌保全運動がおこり科学的な放牧と家畜管理を模索しはじめた。)

共有地の悲劇はこれまで、N 囚人のジレンマとして定式化されることが多かったが、最近になって、二つのことが指摘されている。一つは「悲劇」の記述に囚人のジレンマが適切ではない、という可能性である。つまり、両方が裏切ることが双方にとって最悪となる「チキンゲーム[1]」の方が悲劇の記述として妥当ではないか、ということである。もう一つは、現実の社会における「悲劇」は、外的な制度によって回避されているのではないか、という指摘である[8]。

---

[1]チキンゲームは次のような状況を表している。直線上を左端、右端の両端から車を運転している二人が接近して行く。自分は真っ直ぐに進み、相手が避けてくれれば、その勇気によって自分の自尊心を高めることが出来る。逆に避けるとチキン(弱虫)呼わばりをされることになる。しかし、お互いがよけずに衝突するよりは自分がよけてチキンよば

いずれにせよ、社会的ジレンマ状況下での協力状態維持には、繰り返し囚人ジレンマ以来言われていた「互恵性」だけでは不十分で、何らかの制度、社会規範に基づく制裁などを、系の「外側」から何らかの形で設定しなければならない、というのが社会的ジレンマに対する近年のコンセンサスといえる。

ここで一つの問題は、社会規範を外側から与えるとして、その社会規範をどのレベルに設定すべきなのか、ということである。例えば、協力的な社会規範を掲げるにしても、どの程度自己犠牲をプレーヤーに強いるのか、によっても状況が違ってくる。個人的利得を余りにも無視した規範はなかなか守られないことであろう。なぜなら裏切られた時の被害も余りに大きいからである。一方、あまりにもナイーブなレベルに社会規範を設定しても、その規範は協力的な社会を生み出さないので意味がない。戦略にとって恩恵があり、しかも現実的な規範でないと合意には至らないであろう。

もう一つの問題は、罰則を与えるにしても、どういった罰則を与えるかである。社会規範から外れることに対する罰則を非常に厳しくしたら協力的な社会になるのは、ある意味当然である。しかし、それは別のゲームではないだろうか? つまり、裏切り行為に対して罰則を与えうるのなら、普通言われるような社会的ジレンマではないのでではなかろうか?

もう一つの根本的な問題は、上記の社会規範や罰則を「誰が」与えるのか? という問題である。モデルを作る我々自身はあくまでモデルの系の外側に住んでいる。「共有地の悲劇」的状況で、悲劇を防ぐための社会規範が必要な時、我々は常に外側に政府を必要とするのであろうか? 確かに、広大な農村でお互いのコミュニケーションがほとんど不可能な状態であれば悲劇は避けられないであろう。しかし我々は、コミュニケーションや相互作用の中から、我々自身で社会規範に相当するものを明示的、あるいは、暗黙的に作りだすことができないだろうか? また、仮に系の外部から社会規範や罰則を与えることが必要であるとしても、できうる限り系の内部のプレーヤーたちによって容易に維持される(つまりコストがかからない)ような社会構造を作ることができないだろうか? また、そのような社会構造とはどのような社会構造なのだろうか?

木こりのジレンマゲームは、静的ゲームとして表現すると「共有地の悲劇」タイプのゲームに分類されることになる。一つの興味は、社会的ジレンマ状況に関して、ゲームのダイナミクスに注目してモデルを作ることで、静的に表現していた時に隠れていた性質が見えるようになるのではないか、ということである。グローバルな視点に立って、ゲームの全体的な論理構造に注目し、そしてゲームを静的に表現することで得られることが非常に多いことは確かである。しかし逆に、ゲームの途中の動的側面を「圧縮」して、ゲームを静的に表現することで失われたものがあるかもしれない。例えば社会規範が必要な時、系が閉じていて、系の外側に誰もいなかったとすると、プレーヤーは目の前のゲームから妥当な(皆が守りやすい)行動規範を作り出す必要がある。その行動規範はゲームのダイナミクスの中にある可能性もある。

わりされた方がよい。この状況を示す利得行列は最後の表のようになる。(チキンゲームは1955年の映画「理由なき反抗」によって広く知られるようになった。) ここで相手がよけるなら自分の利得はよける=2、まっすぐ=3なのでまっすぐいくことを選択し、相手がまっすぐくるなら自分はよける=0、まっすぐ=-5 なのでよけるを選択する。相手にとっても同様なので、ナッシュ均衡解は(3, 1) と(1, 3) の二つである。チキンゲームの特徴は、双方のプレーヤーが相手と正反対の選択をしたいと思っていることであり、もう一つはナッシュ均衡解が2つあることである。

		player 2	
		C	D
player 1	Cooperate (coward)	2, 2	1, 3
	Defect (courageous)	3, 1	-5, -5

6.2 動的ゲームに特徴的な現象

ここで、動的ゲーム一般としての「木こりのジレンマモデル」への興味について述べておきたい。特に、現実の生物集団や、社会現象には普く見られながらモデル化されることのなかった、ダイナミカルな現象に注目して、実験・解析を行う。その興味は主に以下の四つの現象である。

1. ある個体が採用する行動が外部環境に変化を引き起こす。それに加えてプレーヤーの状態も変動し、プレーヤーにとっての利得行列自体が変動する。つまり、時間的変化があるゲーム。このとき、ゲーム環境を自分に有利に変化させる戦略が重要になって来る。ここで問題は、各時点各自点の一つ一つの行動決定だけではなく、いかに生産的な環境を構築する行動の「系列(パス)」を見つけることが出来るかである。ある程度良いゲーム環境を築くことができるような進化を行ったプレーヤーは、さらにそのゲーム環境を保ちつつ、さらに良いゲーム環境を築くべく進化することが可能かもしれない。

2. 変動したゲーム環境が逆に個体の採りうる行動に影響を与えるといった、「ゲームのダイナミクス」が戦略に与える影響。プレーヤーが選択する行動の意味は、同じ行動であっても、その時その時のゲームの状態によって全く違うものになる。(戦略の文脈依存性。一方、囚人ジレンマでは、「協力」は常に「協力」であり、「裏切り」は常に「裏切り」である。)変化した環境にあわせて戦略自体も新しい環境に対して進化(学習)適応する。

3. 状態の変化によって、同じ行動を選択しても、その行動に対する効用が変化する場合がある。(同じ行動に飽きてしまって喜びが少なくなる場合など。)

4. ゲーム環境とプレーヤーの相互作用に基く現象。

    - ゲーム環境の変動に伴う、グローバルなレベルから見た社会の変遷。
    - 直接相手に影響を与えるのではなく、ゲーム環境を変動させることによって間接的に相手に影響をあたえる戦略。

Chapter 7

木こりのジレンマゲームのモデリング

本稿の目的は動的ゲームの一般的性質を探ることであり、ここまでその一例としての「木こりのジレンマゲーム」について考察してきた。この節では木こりのジレンマゲームについて、その具体的なモデリングの実装方法・計算機実験を行うための具体的な手順を説明する。

7.1 モデルの概要

まずここで、木こりのジレンマゲームモデルの概要と、実験の手順の大まかな流れを見てみよう。

7.1.1 ゲーム世界：木こりのジレンマ生態系の構成要素

このゲーム世界に存在するのは、qの「丘」と、p種類の「木こり種族」である。同じ種族に属する木こりは、同じ戦略を持つ。それぞれの種族に何人の木こりたちがいるのかは分からない。木こりは随意にある丘を選んでそこに住み、他の木こりたちとのやり取りを通してそこで生活する。その丘の木を切って生計を立て、その丘で一生を終える。それぞれの丘では、木こりたちによるジレンマゲームが他の丘とは独立に行われる。つまり、他の丘で行われているゲームの内容について、木こりたちは何も知らない。

7.1.2 丘：「木こりのジレンマゲーム」の場

各々の丘には、m本の木が生育している。また、一つの丘について、木こりの定員はn人であるとする。それぞれの丘では、そのn人の木こりがm本の木を巡って繰り返しゲームを行う（「木こりのジレンマゲーム」）。一つの丘に集まるn人の中には、同じ種族の木こりが何人重複していてもかまわない。なお、繰り返しゲームの繰り返し回数はTラウンドであるとする。木こり毎に全Tラウンドの平均利得が記録される。

7.1.3 世代

このゲーム世界にはq個の丘が存在するが、そのそれぞれにおいて、「Tラウンドの繰り返しゲーム」つまり木こりのジレンマゲームが一回行われる。世界に存在する全ての丘についての平均利得が、各「種族」ごとに記録される。これがその種族の適応度となる。適応度の高い種族は、次の世代に子孫を残すことができる。つまり、全ての丘で平均的に上手く振る舞える種族が次の世代まで生き残ることができる。逆に、適応度が低い種族は淘汰され、子孫を残すことができない。その淘汰された種族の代わりに、適応度が高い種族の突然変異種が次の世代のゲームに参加する。

次の世代のゲームでもここまで述べたのと同様に木こりのジレンマゲームが行われるが、新しい世代の木こりたちは前の世代で行われたゲームの内容について明示的に知ることはない。

ゲーム全体の手続きの概要は以上の通りである。この次の節から、モデルについて詳細な説明を行う。

7.2 ゲーム世界：木こりジレンマ生態系

「木こりのジレンマ生態系」とは木こりのジレンマゲームを行う木こりたちが生活し、子孫を残す「ゲーム世界」のことである。この世界には木こりたちが一生を過ごすいくつかの丘がある。各々の丘で、木こりたちが木々を巡って「木こりのジレンマゲーム」を行う。

まずここで、ゲーム世界において使われる構成要素、変数などを定義する。木こりのジレンマ生態系の構成要素は下に示される通りである。(ここで「木こり種族」というのは「同じ戦略を持つ木こりの集合」のことである。)

- 木こり種族の集合：$P = \{1, 2, \cdots, p\}$
- 丘の集合：$Q = \{1, 2, \cdots, q\}$
- 世代：$generation$ (1 から始まる)
- 各世代で淘汰される種族数：k

全ての実験に共通して $p = 10$、$q = 60$ に設定した。

7.2.1 木こり種族

木こり種族 i の属性は次の二つである。

- 意思決定関数：f_i
- 適応度：$fitness_i$

7.2.2 丘

丘は木こりのジレンマゲームの舞台である。丘の構成要素は次の通りである。

- プレーヤーの集合：$N = \{1, 2, \cdots, n\}$
- 資源の集合：$M = \{1, 2, \cdots, m\}$
- ラウンド (時刻)：$t \quad (t = 1, 2, \cdots, T)$

もちろんプレーヤーのことを「木こり」と呼んでもよいし、また、資源は「木」と呼んでもよい。丘が木こりのジレンマゲームの場であることをはっきりさせたいときは、丘の木こりを「プレーヤー」と呼び、木こり種族の木こりを単に「木こり」と呼んで区別することがある。なお、全ての実験に共通して $T = 400$ とした。この T の値は木こりのライフタイムでもある。

7.2.3 丘に行き、そこで生活する木こり

木こりは、適当に好きな丘を選んでそこに行き、生涯をその丘で暮らす(木こりのジレンマゲームを行う)。実際の実験の手続きとしては、次のように行う。

1. 丘iを選ぶ
2. ランダムに種族を一つ選び、その種族の木こりを丘iのプレーヤーの一人として登録する。
3. プレーヤー数が丘の定員($=n$)になるまで、2. の操作をを繰り返す。同じ丘に、同じ種族から複数のプレーヤーが登録されてもよい。

以上の手続きを、丘1から丘qの全てについて行う。この結果、すべての丘に定員:n人の木こりが住むことになる。そして、各々の丘で独立に木こりのジレンマゲームが行われる。

ここで「丘βのi番目プレーヤーは、種族αの木こりである」ということを次のように表現することにする。

$$species_\beta(i)=\alpha \quad (\beta\in Q;\alpha\in P;i\in N)$$

丘に登録された木こりの総数は、ゲーム世界に存在する丘の数:qと、一つの丘のプレーヤーの定員:nとの積:nq人となる。このうち、種族α出身の木こりの総数を次のように定義する。

$$number_\alpha$$

また、丘βで木こりのジレンマゲームを行った結果、i番目のプレーヤーが獲得した(全ラウンドに関する)平均利得を、

$$average_\beta(i) \quad (\beta\in Q;i\in N)$$

と表現することにする。

7.2.4 適応度と世代交代

全ての丘における木こりのジレンマゲームが終了すると一つの世代が終わったことになる。これを「一世代のゲーム(one generation of the game)」と呼ぶ。一世代のゲームが終わると、次の世代に移る前に適応度に応じた自然淘汰と突然変異による新しい種族の誕生が起こることにする。

ここで、種族αの適応度($fitness_\alpha$)は、この世代に生きた種族α出身のプレーヤー全員の平均利得として算出できる。具体的には次のように計算する。

$$fitness_\alpha=\left(\sum_{\beta\in Q}\sum_{species_\beta(i)=\alpha,i\in N}average_\beta(i)\right)/number_\alpha$$

種族1からpまで全てについて、同様に適応度を計算する。次の世代に移る前に、全p種族のうち、適応度が低いk種の種族は淘汰される。淘汰されなかった$(p-k)$種族は同じ意思決定関数を持った子孫を残し、そのまま次の世代のゲームに参加する。また、淘汰されなかった種族から任意にk種族が選ばれ、それぞれの突然変異種(少し違う戦略)が次の世代のゲームに参加する。次の世代では、前の世代からの生き残り$(p-k)$種族と、新しいk種族、合計q種族によってゲームが行われる。突然変異の方法については後述する。(全ての実験に共通して$k=3$とした。)

次の世代も、ここまで述べた手順に従って同様に進められる。なお、新しい世代に移る時に、前の世代で生き残った種族のプレーヤーは前の世代と同じ丘でゲームを行うようにする、といった設定も考えられる。つまり、丘と木こりの空間的な位置関係を考慮した実験を行うということである。しかし、今回行った研究ではこの方法は採っていない。その主な理由は、空間構造がモデ

ルに入ると実験結果にその影響が出てくる可能性があり、特に協調行動の発生などに関して、それが木こりのジレンマゲームモデルの効果なのか、空間の効果なのかがはっきりしないからである。一方で、空間が入ったモデルを、入ってないモデルの結果を踏まえた後で行うのは、意味のあることと思われる。

7.3 木こりのジレンマゲーム

前節で述べてきたのは、木こりのジレンマ生態系、つまり木こりのジレンマゲームが行われる背景、そして進化ゲームを行うための設定である。ゲーム世界に存在する各々の「丘」では、Tラウンドの繰り返しゲームが行われる。ある丘を舞台にして、n人の木こりたちがm本の木を巡って行うこの繰り返しゲームのことを、「木こりのジレンマゲーム」と呼ぶ。ここでは、この研究の中心でもある「木こりのジレンマゲーム」と、ゲームの場としての「丘」について詳細な説明を行う。

7.3.1 プレーヤーと木

それぞれの丘には木(資源)と木こり(プレーヤー)が存在する。ゲームの各時点tにおいて、木は高さ$x(t)$であり、プレーヤーは一次元の状態変数$y(t)$を持つ。$x(t)$、$y(t)$はゼロ以上の全ての実数値をとりうる。

プレーヤーは、木の高さ$x(t)$と木こりの状態$y(t)$を見て、行動$a(t)$を一つ選択する。(正確には$x(t)$、$y(t)$ではなく、後述する$x(t)'$、$y(t)'$から行動を決定する。) プレーヤーが選択しうる行動は、「何もしない」、「木1を切る」、「木2を切る」、$\cdots$、「木 mを切る」の $m+1$通りである。これらの行動を、行動0、行動1、行動2、$\cdot$、行動mと書くことにし、この集合をAと表現する(下記参照)。

以上をまとめよう。まず、木こりのジレンマゲームが行われる「丘」の構成要素は以下の通りである。(前節の木こりジレンマ生態系の説明と重複する部分もある。)

- ラウンド(時刻): $t \quad (t = 1, 2, \cdots, T)$
- プレーヤー(木こり)の集合: $N = \{1, 2, \cdots, n\}$
- 木(資源)の集合: $M = \{1, 2, \cdots, m\}$
- プレーヤーがとりうる行動の集合: $A = \{0, 1, 2, \cdot, m\}$

次に、プレーヤーと木の属性は以下の通りである。

- 木の高さ: $x = (x_1, x_2, \cdots, x_m) \in R_+^m$
- プレーヤーの状態: $y = (y_1, y_2, \cdots, y_n) \in R_+^n$
- プレーヤーの行動: $a = (a_1, a_2, \cdots, a_n) \in A^n$
- プレーヤーの戦略: $f = (f_{species(1)}, f_{species(2)}, \cdots, f_{species(n)})$

木の高さxは、何もしなければある程度まで増加する。また、各プレーヤーの状態も、最も単純に一次元の実数で実装している。このゲームにおいて、プレーヤーの状態の基本的な性質は次の二つだけである。

1. 木を切って木材を手に入れると、手に入れた木材の大きさに応じて増加する。

2. 何もしなければ減っていく。

つまり、プレーヤーの状態は現状の栄養状態、金銭状態などと考えてもよい。後述するように「状態」は適応度に影響する。

7.3.2 一ラウンドで行われることの概要

木こりのジレンマゲームは、ゲーム環境が変動しうる繰り返しゲームである。繰り返しの単位は「一ラウンド」と呼ばれる。一ラウンドで行われることの流れは、大きく分けて次の三段階で表現できる。

1. 自然法則: 木の高さとプレーヤーの状態が変化する。
2. プレーヤーの意思決定: 木の高さと全プレーヤーの状態を見て、すべてのプレーヤーが「行動」を決める。
3. 行動の影響: プレーヤーの行動によって木の高さが変動する。また、木から切り取られた木材は、切った木こり全員で山分けされる。木材の取り分によってプレーヤーの状態が変動する。

7.3.3 自然法則: 木の成長とプレーヤーの状態の変化

ゲーム環境とプレーヤーの状態はある力学的法則に従って変動する。系の力学的法則のうち、プレーヤーの行動の影響に寄らない部分を「自然法則」と呼ぶことにする。自然法則の一つは木の成長の法則である。ここで、木の成長の法則を写像 u_M で表すことにする。つまり、木 i が木こりに切られなかった場合、木の高さ x_i が u_M が示す法則に従って x_i' になる。

$$x_i(t)' = u_M(x_i(t))$$

木こりによって切られなければ、木の高さは次のラウンドでもそのままの高さである。つまり、$x_i(t+1) = x_i(t)'$ となる。なお、この研究で用いた u_M は、次のような三次の多項式関数として表現できる。

$$u_M(z) = \alpha_3 z^3 + \alpha_2 z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0$$

全ての実験を通じて、$\alpha_0 = 0.0$、$\alpha_1 = 2.7$、$\alpha_2 = -2.4$、$\alpha_3 = 0.7$ と設定した。もし、プレーヤー

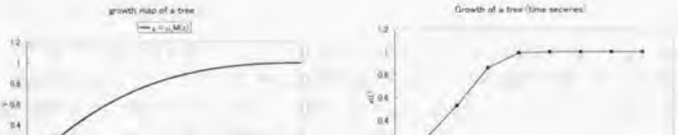


Figure 7.1: 木の成長

によって切られなければ、木はこの式に従って成長する。木の高さの初期条件を $x(0) = 0.10$ とし

て、その木の成長の様子はFigure 7.1の右側に示されている。この図を見るとわかるように、木は3ラウンドくらいまで勢いよく成長する。しかし、4ラウンド以降は木の高さがほぼ飽和してしまっている。つまり、木こりたちにとってこれ以上待つことはあまり意味がない。なお、左の図は$y = u_M(z)$のグラフである。

7.3.4 自然法則: プレーヤーの状態の変動

木こりのジレンマゲームにおける自然法則のもう一つは、プレーヤーの状態の変動の法則である。この法則を次のように、写像u_Nで表現することにする。

$$y_i(t)' = u_N(y_i(t))$$

もし、プレーヤーiが木を切らなければ、プレーヤーiの状態は次の時点もこのままである。つまり、$y_i(t+1) = y_i(t)'$となる。既に述べたように、何もしなければプレーヤーiの状態y_iは減少する。実験で使ったu_Nは次のような形式で表現される。

$$u_N(z) = \kappa z \quad (\kappa < 1)$$

なお、全ての実験を通じて$\kappa = 0.8$と設定した。すなわち、プレーヤーの状態は2割ずつ減少して行く。この様子はFigrue 7.2の右側に示されている。なお、左の図は$y = u_N(z)$のグラフである。

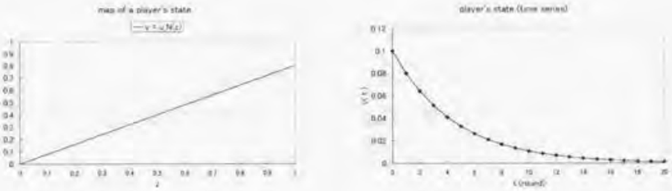


Figure 7.2: 木の成長

7.3.5 プレーヤーの意思決定

プレーヤーは周りの状況を見て、どの木を切るか(あるいはどの木も切らないか)を決定する。その際に使用されるのはプレーヤーの意志決定関数fである。この実験で使われたfの詳細については後で説明する。動的ゲームの定式化(第4章(p. 18))のところで述べたように、基本的にプレーヤーiは$x(t)'$、$y(t)'$を見て行動$a_i(t)$を決定する。

7.3.6 行動の影響: ゲーム環境の変動

プレーヤーの行動$a(t)$はゲーム環境を変動させる。木こりのジレンマモデルでは、切られた木の高さ$x(t)'$が短くなる。実験では、木iがl_i人のプレーヤーに切られると、木iの高さはγ^{l_i} $(\gamma < 1)$倍になることにした。つまり、次式のようになる。

$$x_i(t+1) = \gamma^{l_i} x_i(t)'$$

ただし、

$$l_i = \sum_{j\in N} \delta_{i,a_j(t)}$$

また、必ずしも全てのプレーヤーが木を切るわけではないので、

$$\sum_{i\in M} l_i \le n$$

である。なお、全ての実験を通して$\gamma = 1/3$とした。つまり、一人に切られると木の高さは1/3になり、二人に切られると1/9になる。(γを1/2にしても実験の結果はさほど変わらなかった。)

7.3.7 行動の影響: プレーヤーの状態の変動

プレーヤーは木を切って木材を獲得する(生活の糧を手に入れる)と、そのプレーヤーの「状態」が変動する。このモデルでは、単純にプレーヤーiが獲得した木材の大きさ分だけプレーヤーiの状態y_iが大きくなるようにした。(このモデルではx、yのスケールはほぼ同じにしてある。)プレーヤーiが獲得した木材の大きさΔ_iは、プレーヤーiが行動0(「待つ」)を選択した時は当然ゼロで、それ以外の時は、

$$\begin{aligned}
\Delta_i &= \frac{x_{a_i(t)}(t)' - x_{a_i(t)}(t+1)}{l_{a_i(t)}} \\
&= \frac{(1-\gamma^{l_{a_i(t)}})}{l_{a_i(t)}} x_{a_i(t)}(t)' \\
&= \frac{(1-\gamma^{l_{a_i(t)}})}{l_{a_i(t)}} u_M(x_{a_i(t)}(t)) \\
&\quad (u_M(z) = \alpha_3 z^3 + \alpha_2 z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0)
\end{aligned}$$

である。そしてΔ_iの大きさの分だけプレーヤーiの状態が増加する。

$$y_i(t+1) = y_i(t)' + \Delta_i$$

7.3.8 一ラウンドの利得

「プレーヤーと木」の節(第7.3.1節)で述べたように、プレーヤーの状態は現状の栄養状態、金銭状態などと考えてよい。一ラウンドでのプレーヤーiの効用は、簡単にy_iであるとした。どのラウンドにおいても、プレーヤーiにとって最も効用が高い方法はできる限り大きなΔ_iを獲得する事である。つまり、できるだけ少ない人数で木材を分割したほうが良いし、さらにできるだけ大きな木を切ったほうが良い。また、小さいΔ_iでもないよりはましである。

7.3.9 繰り返しゲーム

ここまで述べた一ラウンドの手順が、木こりのジレンマゲームではTラウンド繰り返される。その後に各々のプレーヤーの平均利得が計算される。この平均利得は、プレーヤーが所属する種族の適応度を増減させる(第7.2.4節)。丘$\beta(\in Q)$におけるプレーヤー$i(\in N)$の平均利得は次のように計算できる。

$$average_\beta(i) = \frac{\sum_{t=1}^{T} y_i(t)}{T}$$

この式の右辺は、プレーヤーiが丘βでの生活で、平均的にどのくらいの栄養状態や金銭状態であったかを示す、と考えても良いだろう。

以上Tラウンドの手続きを持って、一つの丘における木こりのジレンマゲームが終了する。

7.4 意志決定関数

プレーヤーは自分の周りの状態から、自分が行う行動を決定する。つまり、プレーヤーiは、環境の状態xとプレーヤーの状態yから行動a_iを決定する。プレーヤーiの意思決定の部分を意志決定関数$f_{species(i)}$で定義する。(このモデルでは厳密にはx'、y'であるが簡単のためこの節ではx、yと書くことにする。)

$$a_i(t) = f_{species(i)}(x(t), y(t))$$

実際に、fの実装は複雑であるかもしれないし、単純かもしれない。また、fは様々なプレーヤーの状態を参照するかもしれないし、ごく近傍のプレーヤーの状態しか参照できないかもしれない。fの実装方法しては様々な可能性が考えられるが、基本的にx、yを入力としてaを決定する写像であれば何であっても良い。本稿の木こりのジレンマゲームモデルでは、fを出来る限りシンプルな方法で実装した。以下その詳細について説明する。

7.4.1 プレーヤーへの参照: "y"

木こりのジレンマゲームのモデルの説明 (p. 35) では、ある丘におけるプレーヤーの集合Nとプレーヤーの状態yを次のように定義した。

$$N = \{1, 2, \cdots, n\} \tag{7.1}$$
$$y = (y_1, y_2, \cdots, y_n) \tag{7.2}$$

しかしこれはある意味、モデルの系の外側で実験を観察する、「我々」の視点からの説明である。例えば、丘の上のプレーヤー1、プレーヤー2というのは「我々の立場」から見た名前である。しかし、プレーヤー側から見ると、このプレーヤーの名前の順番はあまり意味がない。各プレーヤーにとって意味がある順番があるとしたら、それはプレーヤー自身から見た順番である。もう少し言うと、例えば、自分自身の「状態」への参照は、y_2やy_5などのように単にyの一つの成分ではない。意志決定関数の中で特別な位置を占めるはずである。

ここで、「プレーヤー側から見た」丘のプレーヤーたちを次のように書くことにする。

$$\text{プレーヤーの集合:}\quad \tilde{N} = \{1, 2, \cdots, n\}$$
$$\text{プレーヤーの状態:}\quad z = \{z_1, z_2, \cdots, z_n\}$$

(N, y)から$(\tilde{N}, z)$への対応の形式は、そのプレーヤーが自分の外側のプレーヤーをどのように識別しているかによって変わる。例えば、場所によってプレーヤーを識別する方法の例を一つ考えてみる。(これは本稿の実験で用いた方法でもある。)今、自分も含めたn人のプレーヤーが輪になって向かい合っているとする。自分の左隣の人を「プレーヤー1」と呼ぶことにし、自分の二つ左の人を「プレーヤー2」、...、自分の右隣の人を「プレーヤー$(n-1)$」、そして自分を「プレーヤーn」、と呼ぶことにする。この時点でNから$\tilde{N}$への対応づけが可能になる。yからzへの対応も同様である。つまり、左隣はz_1であり、自分はz_nである。実際は、特にプレーヤーが輪になっている必要はなく、縦一列でもジグザグに並んでいてもよい。とにかく、自分の中で他のプレーヤーを番号付け(識別)出来ればそれで問題がない。

位置以外による他人の識別方法としては、例えば、前回のラウンドのゲームで状態が良かったプレーヤーを「プレーヤー1」、二番目に良かったプレーヤーを「プレーヤー2」、...、といった方法も考えられる。(この場合も自分は「プレーヤーn」など、固定した位置に置くことにする。)

自分の状態は、確かに「入力変数の位置」としては$z = (z_1, \cdots, z_n)$の中でn番目という特別な位置を常に占めるが、意志決定の機構として明示的にz_nを特別な方式でつかう、といったことはない。つまり、他のプレーヤーの状態と自分の状態とは扱いが同等である。このことは次の節で

具体的に示す。後の節の実験結果からも分かるように、意志決定関数の中で自分を特別扱いする構造は、ゲーム環境と他のプレーヤーとの相互作用を通じて、進化の結果として構成される。

なお、以上のような方法で他のプレーヤーを参照する場合、当然ながら、「丘」において自分が何番目のプレーヤーと呼ばれているか、ということは特に意味を持たない。

7.4.2 行動への動機

本稿では、プレーヤーの意志決定関数$f:(x,z)\mapsto a$を実装するに当たって、まず「採りうる各々の行動への動機」について定義した。これは具体的には、環境とプレーヤーの状態(x,z)から「動機」への写像mtvとして定義される。(後々の簡単のため、これを「動機写像」と呼ぶことにする)

$$mtv=(mtv_0,mtv_1,mtv_2,\cdots,mtv_m)$$

$$mtv_r : R_+^m \times R_+^n \ni (x,z) \mapsto mtv_i(x,z) \in R$$

ここで、第7.3.1節で定義した「プレーヤーがとりうる行動」の集合、

$$A=\{0,1,2,\cdot,m\}$$

をもう一度思い出そう。行動0は「何もしない」、行動1は「木1を切る」、行動2は「木 2を切る」, ⋯ を表す。$\{mtv_r\}(r\in A)$の要素は、集合Aの要素とそれぞれ対応する。例えば、mtv_rはプレーヤーの行動rへの動機を表す。

プレーヤーは動機の大小で行動を決定する。すなわち、

$$\{mtv_r|r\in A\}=\{mtv_0,mtv_1,mtv_2,\cdots,mtv_m\}$$

の中で最も値が大きいものに対応する行動を選択する。その意味で、mtv_rは行動rの「効用関数」とも言える。動機$\{mtv_r\}$によってプレーヤー$i\ (i\in N)$の意志決定関数$f_{species(i)}$は次のように書ける[1]。

$$f_{species(i)}(x,z)=a_i \quad if \quad mtv_{a_i}(x,z)\ge \max_{r\in A} mtv_r(x,z)$$

動機$\{mtv_r\}$で重要なのは、それらの値の絶対的な大きさではない。他のプレーヤーとの比較も全く意味がない。大切なのは$\{mtv_r\}$内での大きさの「順序」である(大きさで順序を比べるとしたら)。このことは、ゲーム理論において効用が選好順序を意味することに対応している。mtvの構造はプレーヤーの進化を通して変化する。ここで重要なのは$\{mtv_r\}$の要素一つ一つの構造ではなく、$\{mtv_r\}$の要素間の「関係」である。

$\{mtv_r|r\in A\}$の実装は(x, z)から実数への写像であれば何でも良いが、本稿の実験では、簡単に(x, z)の一次式として実装した。

$$mtv_r:(x,z)\mapsto \sum_{k\in M}\eta_{kr}x_k+\sum_{l\in \hat{N}}\theta_{lr}z_l+\xi_r \tag{7.3}$$

[1]少しでも世代進めば起こる可能性はかなり減ることであるが、複数の行動に対して動機が最大になる可能性がある。例えば行動i、行動jに関して、

$$mtv_i(x,z)=mtv_j(x,z)\ge \max_{r\in A} mtv_r(x,z)$$

となる可能性が存在しないとは言えない。人間なら「行動iと行動jへの動機が寸分違わず完璧に同じで、全く結論が出ない」という状態に対応するだろう。しかし実験では、i、jのうち小さい方の行動が選ばれることにした。(理由は、単にプログラムの都合上、番号が小さい行動から意思決定のループをまわしている、というだけである。)

ここで、$\{\eta_{kr}\}$、$\{\theta_{lr}\}$は実数値の行列で、$\{\xi_r\}$は実数値のベクトルである$(k \in M, l \in \bar{N}, r \in A)$。これらの係数$\eta$、$\theta$、$\xi$がプレーヤーの戦略であり、意志決定関数の働きを一意に決める。そして、プレーヤー間におけるこれらのパラメーターの微妙なずれが、プレーヤーの意志決定関数の優劣を決定する。

前節との関連で注意すべきは、z_nの係数$\{\theta_{nr}|r \in A\}$である。これは、意思決定の中で自分自身の状態(z_n)をどのように捉えているか、いうことに係わる部分である。しかし、式(7.3)に表れているように、意志決定関数の中でz_nを他のプレーヤーの状態z_{-n}に比して特別な使い方をする、といったことは、モデリングの段階で明示的に行うことは一切ない。z_nの係数もz_{-n}の係数も対等である。このことは後述の突然変異の機構についても言える。

以上が本稿の実験における意志決定関数詳細だが、おそらく、この一次式によるmtvの実装方法は動的ゲームに対応できる意思決定の機構として最もシンプルな部類に入る。実際、$R_+^n \times R_+^m$からRへの写像で、これよりもかなり高度な意志決定が可能なものは無数に存在する。例えば、二次多項式の写像や、ある点で微分不可能な写像をmtvとして使っても良いだろう。このことは、条件を単純化してR_+からR_+への写像で考えると分かりやすい。(テント写像やロジスティック写像など。)これらの写像が単独で生み出すことが出来るダイナミクス[2]はパラメーターによって定常的なもの、周期的なものからカオスまである。パラメーターを変化させることによってカオスを実現できる写像は、パラメーターがカオスの入り口差し掛かる時にかなり高度な(パラメータの精度で)情報処理能力を持ち得る。このことは、進化二人零和ゲームとしての「真似ゲーム[11]」の研究において、ロジスティック写像の係数パラメーターを戦略として持つプレーヤーたちの進化が、ロジスティック写像のカオス領域と窓の領域の境目に向かうこと、そして、その領域に属するエージェントの真似ゲーム戦略としての強さから分かる。(プレーヤー間の行動の時系列を見る限り、どちらかというと「真似されないゲーム」とも言える。しかしこのゲームで強いのは、カオス領域にパラメータを持つ戦略ではない。カオスと窓の境目に強い戦略がある。このことは直感とは相容れないことである。)

以上のように、もう少し高度な(計算能力が高い)写像を実装して実験することも確かに可能である。にもかかわらず一次式で実験を行った理由は主に二つある。一つは、実験結果の解析の容易さである。意志決定関数の持つ意味は、他のプレーヤーの意志決定関数と環境のダイナミクスに依存するので、一次式で実装していても解析が常に簡単であるとは言い難いが、例えば二次式にするとパラメーターの値を見ただけではほとんど意味が分からなくなり、実際の振る舞いを調べてみないと分からない部分が多くなる。もう一つの理由は、この研究の主眼が、個々の意志決定主体の構造にあるのではなく、意思決定主体とゲーム環境、あるいは意志決定関数どうしの相互作用・関係性にあるからである。それ故、意志決定関数は相互関係をある程度解析しやすいことが重要である。もっと高度な意思決定が可能なエージェントで実験をすることは、それ自体それほど難しくことでもないし、今後の課題として意味がないことではない。しかし、今回の研究目的のためには、上記の意志決定関数の実装方法で必要十分であると思われる。

7.4.3 突然変異

木こりのジレンマ生態系では、世代が代わる時に適応度が高い種族の変異種が低い種族に取って代わる。本稿の実験では、親種族の意志決定関数の実パラメーター(実行列η、θ、実ベクトルξ)を少し変化させることで突然変異種を生成した。具体的には、親種族のパラメーターη、θ、ξの各成分に対して、

$$
\begin{aligned}
\text{期待値} &= \text{親種族のパラメーター} \\
\text{分散} &= \sigma
\end{aligned}
$$

[2]出力($\in R_+$)をそのまま入力につなげることによって得ることができる出力値の系列

となる正規分布乱数の値を突然変異種の意志決定関数のパラメーターとした。(各パラメーターについて、親種族の値$\pm\sigma$の範囲に68%位の確率で収まる。なお、この実験ではσを0.10に設定した。)

7.5 利得行列

ここまで、利得行列については特に触れてこなかったが、木こりのジレンマゲームにも利得行列は存在する。動的ゲームでは、力学法則gが具体的に与られた時点で各ラウンド毎の「ゲーム論の利得行列」が分かる。なお利得行列というのは、全プレーヤーの行動の全ての可能な「組みあわせ」に対する各プレーヤーの効用を、表にまとめたものである。

木こりのジレンマゲームでは、「効用」=「プレーヤーの状態」とした(第7.3.8節)。プレーヤーiの状態$y(t)$は

1. 自然法則による減少: $y_i(t)' = \beta y_i(t) \quad (\beta < 1)$
2. 木材を得ることによる増加 : $y_i(t+1) = y_i(t)' + \Delta_i$
   ただし、

$$\Delta_i = \begin{cases} 0 & a_i(t) = 0 \\ \frac{(1-\gamma^{l_{a_i(t)}})}{l_{a_i(t)}} x_{a_i(t)}(t)' & \text{otherwize} \end{cases}$$

$$(x_{a_i(t)}(t)' = u_M(x_{a_i(t)}(t)),\quad u_M(z) = \alpha_3 z^3 + \alpha_2 z^2 + \alpha_1 z + \alpha_0)$$

の二つの要因で変化する。

今、丘にはプレーヤーが三人いて、木が一本(高さx_1)あるだけだとしよう。各プレーヤーが選択可能な行動は、行動0(何もしない)、行動1(木1を切る)の二通りだけである。$\gamma = 1/3$だとすると、もし一人で木を切った場合、木の高さは1/3になる。その木を切ったプレーヤーは$x_1(t)'$の大きさの木の$(1-1/3)$倍、すなわち$2/3x_1(t)'$の大きさの木片を手に入れることが出来る。二人で切れば木の高さは1/9になるので、$(1-(1/3)^2))x_1(t)'$を二人で分けることになる。つまり、二人とも$4/9x_1(t)'$の木片を手に入れる。このようにして、このラウンドにおけるプレーヤー3に関する利得行列は表7.5 のように書ける。

Table 7.1: プレーヤー3の利得行列 : 左の三列は各プレーヤーの行動を表す。

player 1	player 2	player 3	player 3の利得
0	0	0	$y_3(t)'$
0	0	1	$y_3(t)' + 2/3x_1(t)'$
0	1	0	$y_3(t)'$
0	1	1	$y_3(t)' + 4/9x_1(t)'$
1	0	0	$y_3(t)'$
1	0	1	$y_3(t)' + 4/9x_1(t)'$
1	1	0	$y_3(t)'$
1	1	1	$y_3(t)' + 26/81x_1(t)'$

利得行列はプレーヤー1、プレーヤー2についても同様に書くことができる。この表でプレーヤー3の利得行列はx、yによって変動する。つまり、利得構造は環境とプレーヤーの状態に依存

する。また、静的ゲーム、例えば繰り返し囚人ジレンマでは、各時点各時点で現れる利得行列は、言うまでもなく未来永劫『囚人ジレンマ』の利得行列のままであるが、一方、動的ゲームでは利得行列が変動する方が普通である。ただし、表7.5 を見ると分かるように、個人の利得は、どのようなx、yでも必ず一人で木を切った時が最も高く、二人で切った時がそれに続いて高い。

このように、動的ゲームの「ゲーム理論の利得行列」は動的ゲームの定義式が具体的に決まった時点で一意に決定することができる。しかし注意すべき点は、プレーヤーiの利得行列を求めるのに必要なのはxとy_iだけである、ということである。このことは動的ゲームの定義から明らかなことである。例としては、やはり表7.5 を見ると分かりやすい。各時点各時点でプレーヤー3 の利得行列を構成するために必要なのはゲーム環境(木1) と自分の状態だけである (もし、獲得した木片の大きさだけで効用を決定すると定義していたら、さらに自分の状態さえ必要なくなる)。プレーヤーiは、他のプレーヤーの状態y_{-i}や他のプレーヤーの意志決定関数$f_{species(-i)}$を全く知らなくても「ゲーム理論の利得行列」を構成することが可能なのだ。ここに、動的ゲームモデルで用いた意志決定関数との決定的な違いがある。意志決定関数は、周りの環境と、自分の状態、そして他人の状態を参照して、自分が行うべき行動を評価する。その参照方法(f) が高度なものであろうと原始的なものであろうと、自分の周りを取り巻く環境と同時に「他の意思決定主体の状態」も同様に見る。

確かに適応度などの観点から言うと、自分の栄養状態や周りの資源の様子が第一に重要なことで、自分が他者の状態をどう見ているか、というのは直接関係のないことかもしれない。しかし、特に動的なゲームでは行動決定の際に無視の出来ない部分であると思われる。というのは、動的ゲームの定義が示すように、動的ゲームでは「プレーヤーの状態のダイナミクス」と「ゲーム環境のダイナミクス」が様々な形で絡み合うからである。

7.6 初期条件

ここまで説明した木こりのジレンマモデルについて、人数・木の本数などを具体的に設定して何種類かの計算機実験を行った。次の節からそれらの各々について、モデルの分析と実験結果の解析・考察を行う。そして、動的ゲームの一般的知見を得ることを目標とする。

計算機実験で使われたパラーメーターの多くについては、モデルの説明の中で既に述べた。ここでは、モデルの説明では触れてこなかった全ての実験に共通の初期設定についてまとめておく。

それぞれの丘におけるゲームの一ラウンド目の設定。

- 木の高さx：全て0.10
- プレーヤーの状態z：期待値が0.10、分散が0.01の正規分布乱数の値。つまり、0.10を中心にして少し揺らいだ値。

木こりのジレンマ世界の「木こり種族」はパラメーターη、θ、ξを意志決定関数の中に持つが、最初の世代の十種族は、それらのパラメーターの各成分を期待値0.0、分散0.10の正規分布乱数で生成した。0.0が中心になるということは、つまり、プレーヤーは最初は何も(木の高さ: x、自分と他者の状態: y) 参照しないことが基本であり、進化によって何をどのくらい参照するかが変わって行く。

Chapter 8

一人木こりジレンマゲーム: 丘に木が一本だけの場合

8.1 一人ゲームと最適化問題

本稿でモデル化されているゲーム世界 = 木こりのジレンマ生態系には q 個の丘が存在する(第 7.2 節 (p. 33)。本稿の全ての実験で $q = 60$ に設定されている)。この節から後では、それぞれの丘に住む木こりの人数と木の数を具体的に設定して話を進める。まずこの節では、「一人の木こりと一本の木」のゲームについて考えてみる。つまり丘には一人の木こりが住んでおり、また、そこでは木が一本だけ生育する。各丘には一人の木こりしか住んでいないので、効率的に木を育てることだけが木こりにとって重要である。「他のプレーヤー」に木を搾取されないためにどうすれば良いか、といった類のことは問題にならない。このゲームを「一人ゲーム」と呼んでも良い。しかし一人ゲームでは他者との相互作用が存在しないので、「ゲーム」の定義から言って、厳密には一人ゲームはゲームではない。一人ゲームは遺伝的アルゴリズムその他でよく取り扱われる最大化(最小化)問題の範疇に入り、「合理的な解」は常に存在する。ここで興味の対象となるのはプレーヤーがその解を実現できるかどうかであり、また出来るとしたら、どのようにその解を実現するかである。

ではここで、一人の木こりのジレンマゲームの場合を考えてみる。木こりのジレンマゲームで木こりが一人だけの場合他に木こりがいないため、プレーヤーにとって最適な行動は単に「木が十分に育つまで待ってから木が切る」ということであり、とにかく自分の平均利得が高くなるように環境(丘)に働きかけることである。「他の木こりに木を切られるかもしれない」といった心配は全く不要である。それゆえ、「ゲームの解を求める」という立場から言うとこのゲームは計算機実験を行うまでもない。木こりのジレンマの一人ゲームは、最大化問題としては非常に単純な部類に入るであろう。

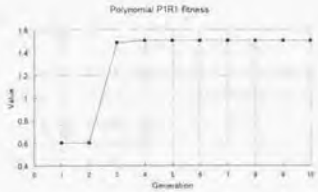
ただし、複数人ゲームの解析の前段階として、プレーヤーの人数以外の設定は全く同じ状態の一人ゲームのシミュレーションを行い、その特徴をつかんでおくことは意味のあることである。それによって、意志決定関数が「他者」を考慮しなければならない場合(複数人ゲーム)とその必要がない場合(一人ゲーム)とでどのような違いが生ずるか、を知るために、一人木こりジレンマゲームにおける意志決定関数の進化の特徴をつかんでおく必要はある。また、「動的なゲーム」におけるゲームの進化の概要を知るという意味では、一番簡単な形式を持つ一人木こりジレンマゲームは分かりやすい。

以下では、実際に行った計算機シミュレーションの結果の一例[1]を示すが、それと共に、木こりのジレンマゲームの実験データの表示形式についても、実際の例に沿って具体的な説明を行う。

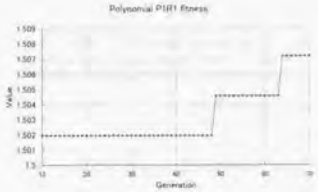
また、ゲームを動的に表現する時に重要になるいくつかの視点についても簡単に考察する。

8.2 計算機シミュレーションの結果と解析

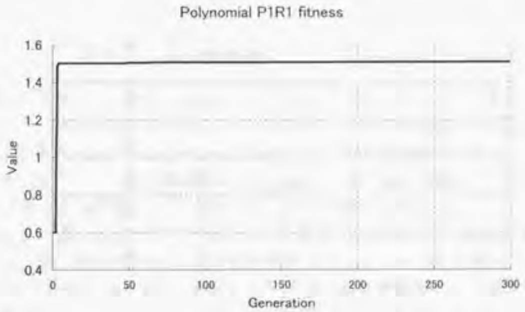
8.2.1 適応度グラフ



(a)



(b)



(c)

Figure 8.1: 適応度グラフ ... 一人木こりジレンマゲーム(木一本)のシミュレーションの場合: (a) は10世代まで、(b) は10世代から70世代まで、(c) は0世代から300世代までの適応度グラフ。横軸は世代(generation)を表し、縦軸は各世代の最適種族の適応度を表す。

まず図8.1を見てみよう。この図はこのシミュレーションにおける木こりの適応度の変化を世代の進行に沿って表現したものである。こういった図のことを「適応度グラフ」と呼ぶことにする。横軸は世代を表し、縦軸は各世代で最も適応度が高かった種族の適応度(各世代の最高適応度)を表す。

[1]この後の計算機実験では、一部の実験を除いて三回ずつ追試を行なっている。

8.2.2 大まかなシミュレーションの流れ

シミュレーションの結果の大まかな流れをこのグラフから見てみよう。当然のことながら、世代の進行に対して最高適応度は単調増加する。そして、最高適応度は非常に早い世代に最適状態の近くまで上昇する。前者は、一人木こりジレンマゲームが最大化問題であることに対応し、後者は、一人木こりジレンマゲームが最大化問題としては非常に単純な部類に入るということに対応している。

確かに後の世代においても適応度は少しずつ上昇する。その一例は図 8.1-(b) に示されている。(適応度の上昇の様子はほぼ階段状である。) しかし、これらの適応度の上昇の「幅」は非常に微細なレベルである。このことは、図 8.1-(c) の中で図 8.1-(b) に対応している部分を見ると分かりやすい。また、さらに後の世代へ進むと適応度の上昇の「頻度」も極端に少なくなる。

8.2.3 行動図、資源図、状態図

ここで、シミュレーションの初期の例を見てみよう。図 8.2は第 4 世代においてある丘で行われた一つのゲーム (一人ゲームなので木こりは一人) の様子である。これらの図では、木こり (プレーヤー) の行動、木 (資源) の高さ、木こりの状態について、ラウンドの進行に沿ったダイナミクスがそれぞれ示されている。これらの図を「行動図」「資源図」「状態図」とそれぞれ呼ぶことにする。

8.2.4 シミュレーション初期 (意志決定関数)

図 8.3は第 4 世代に存在した、ある一人のプレーヤーと一本の木によって構成されるダイナミクスの例である。全ての図に共通していることであるが、4 ラウンド目から後は 12 周期の周期状態に入っている。行動図から分かるように、このプレーヤーは「1 回木を切って 11 回待つ」という行動パターンで振る舞う。しかし、資源図を見ると分かるように木の高さ = 1/3 (最大値 1.0 から 1 回だけ切った状態) を初期値として 3 回何もしないで待っているので、木の高さはほぼ 1.0 まで成長し、木の高さが飽和してしまっている。つまり、このプレーヤーは木の成長を待ちすぎていることが分かる。同じ第 4 世代における最適種族のプレーヤー (種族ID 0000E) が住む丘の様子は図 8.3に示されている。図 8.3から分かるように木の高さが飽和してしまう前に木が切られている。図 8.4は図 8.3と同じプレーヤーの意志決定関数 (第 7.4 節 (p. 39)) をレーダーチャートで表現したものである。

本稿では、意志決定関数を

$$mtv_r(x,y) = \sum_{k\in M} \eta_{kr}x_k + \sum_{l\in N} \theta_{lr}y_l + \xi_r (r \in A)$$

という形で実装している (p. 40)。丘での戦いの場合、厳密には y を z と書くべきであるが、簡単のためここでは y と書くことにする。本節の実験に関して言うと、一人ゲームなので $N = \{1\}$ である。また、木の本数が各丘に一本だけなので $M = \{1\}$ であり、可能な行動 $A = \{0, 1\}$(「待つ」、「木 1 を切る」) である。図 8.4の "Environment 軸" は x_1 の係数 η_{1r}、"Me 軸" y_1 の係数 θ_{1r}、そして "Const 軸" は定数項 ξ_r に対応する。また、実線部は行動 1 への動機 mtv_1、破線部は行動 0 への動機 mtv_0 に対応する。つまり、実線部は $\eta_{11}, \theta_{11}, \xi_1$ の値を三本の線分で結んだものであり、破線部は $\eta_{01}, \theta_{01}, \xi_0$ の値を三本の線分で結んだものである。

図 8.4から分かるように、木の高さ (Environment 軸) が大きくなったら行動 0(Wait) への動機が小さくなり、自分の状態 (Me 軸) が大きくなると行動 0(待つ) への動機が大きくなり、行動 1(木 1 を切る) への動機が大きくなる。要するにこの意志決定関数は、木が高くなったら木を切って自分の状態が満たされていたら待つ、というそれなりに妥当な意思決定を実現する。意思決定に効い

てくるのは、mtv_1 の係数と mtv_0 の係数の絶対的な値ではなく、両者の間のバランスである。意志決定関数では、プレーヤーがあるパラメーター(ここでは x_1 または y_1)を参照していないということは、そのパラメーターへの係数がゼロに近い、ということで表現できる。例えばこのプレーヤーは、行動 1 (木 1 を切る) への動機に木 1 の高さを参照していない (η_{11} が 0 に近い)。別の言い方をすると「自分が満たされているかどうかによって木を切ることに関する欲求の大小が変わる。木の高さは関係ない。」ということである。(木の成長を「待つ」という行動に関しては、自分の状態も木の高さも参照している。)

8.2.5 最適解へ向けた進化

適応度グラフ(図 8.1 p. 45)で分かるように、この実験では第50世代くらいで適応度の値としてはほぼ飽和してしまい、ほとんど進化が起こらなくなる。図 8.5は、第49世代のある丘で見られるゲームの様子である。ここでプレーヤーが実行している行動は単純で、ある程度木が育ったら後は一回置きに木を切る、というものである。資源図(b)では、木の高さが約0.3と約0.6の間を往復しているが、これを正確に書くと次のような過程になる。

1. 自然法則による木の成長: 0.3 → 0.6
2. プレーヤーの意思決定「待つ」: 0.6 → 0.6 (そのまま)
3. 自然法則による木の成長: 0.6 → 0.9
4. プレーヤーの意思決定「切る」: 0.9 → 0.3 (高さは1/3になる。獲得する木片は約 0.6)

この方法だと一回あたりに獲得できる木片の大きさは最大ではない。しかし、プレーヤーの状態の全ラウンド平均としては大きくなる。

このあと、第277世代でも進化が起こるが、図 8.6 のように基本的な構造は変わらない。初期のラウンドでなるべく木を切らないようにして木が高くなるのを多少早くしただけの、微細なレベルの進化である。

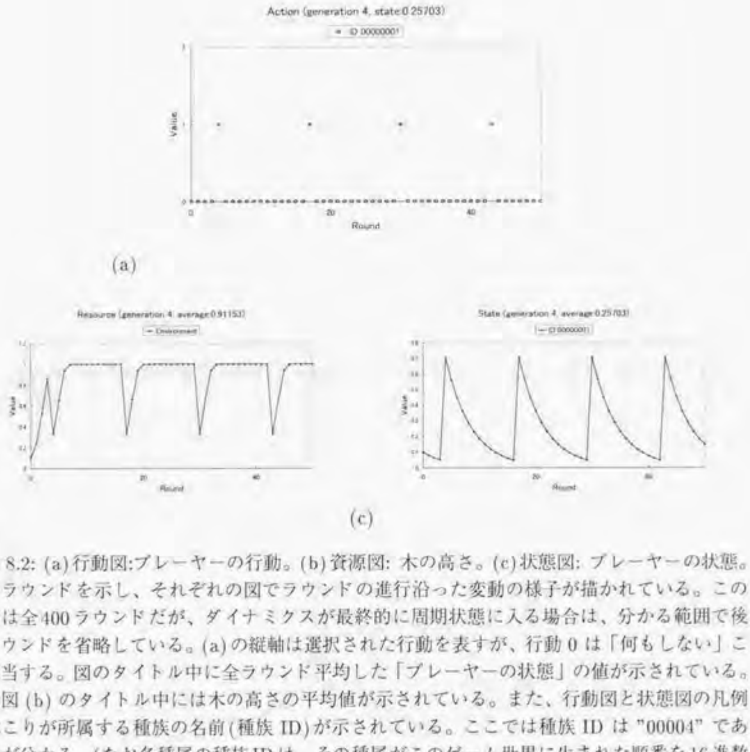
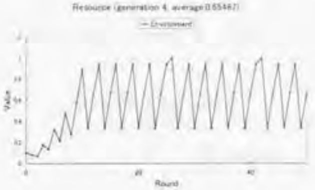
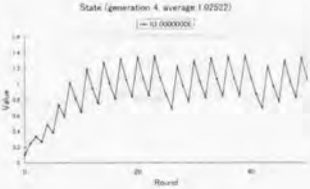


Figure 8.2: (a)行動図:プレーヤーの行動。(b)資源図: 木の高さ。(c)状態図: プレーヤーの状態。横軸はラウンドを示し、それぞれの図でラウンドの進行沿った変動の様子が描かれている。この実験では全400ラウンドだが、ダイナミクスが最終的に周期状態に入る場合は、分かる範囲で後ろのラウンドを省略している。(a)の縦軸は選択された行動を表すが、行動0は「何もしない」ことに相当する。図のタイトル中に全ラウンド平均した「プレーヤーの状態」の値が示されている。同様に図(b)のタイトル中には木の高さの平均値が示されている。また、行動図と状態図の凡例には木こりが所属する種族の名前(種族ID)が示されている。ここでは種族IDは"00004"であることが分かる。(なお各種属の種族IDは、その種属がこのゲーム世界に生まれた順番を16進数で表現したものである。)資源図の凡例も資源(木)の名前を示すが、この実験では木が一本しかないのであまり意味はない。

(a)



(b)



(c)

Figure 8.3: 第 4 世代の最適種族(種族ID 0000E): (a)(b)(c) はそれぞれ行動図、資源図、プレーヤーの状態図。

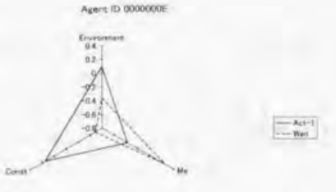
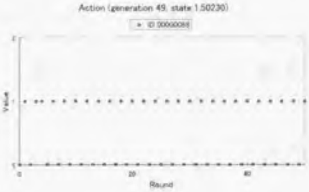
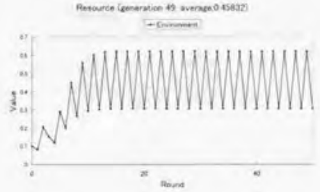


Figure 8.4: 第 4 世代の最適種族の意思決定関数: 図はプレーヤーの意志決定関数のパラメーターをレーダーチャートとして表現したものである。実線部は行動 1 (木を切ること) に関する動機写像 = mtv_1 の各係数の値である。例えば"Environment 軸"との交点は η_{11} の値を示し、"Me"軸との交点は θ_{11} を表す。破線部は同様に行動 0 (どの木も切らない) に関する動機写像: mtv_0 の各係数の値である。

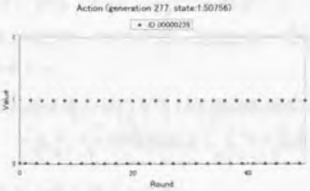


(a)

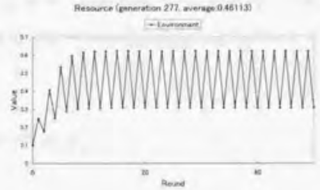


(b)

Figure 8.5: 最適解へ向けた進化



(a)



(b)

Figure 8.6: 微細なレベルの進化

8.3 丘に木が二本ある場合

8.3.1 複数の資源

この節では、同じ一人木こりのジレンマゲームでも木が二つ複数する場合についての考察を簡単に行う。ここでプレーヤーにとっての問題は、複数ある動的な資源をどのように管理するのか、ということである。しかし、このゲームも一人ゲームなので本質的に最適化問題であることには変わりない。以下、計算機実験で見られた進化の過程について簡単に見てみる。

8.3.2 計算機シミュレーションの結果と解析

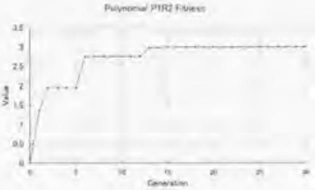


Figure 8.7: 二本の木が存在する一人木こりのジレンマゲーム: 適応度図

適応度図

図 8.7はこの実験に関する適応度グラフである。木が一本の時と同様に、最高適応度は単調かつ階段状に増加する。ただ、一人ゲームなので最高適応度が単調に増加するのは当然のことであり、階段状に増加するのも単に進化が起こらない(最適種族が入れ替わらない)世代が続く部分が存在するからである。後の節で紹介する「複数人木こりのジレンマゲーム」でも適応度図が階段状になる部分がかなりある。しかし、複数人ゲームの場合は次の二つの意味での「階段状」である

- ある程度長い世代の間、最適種族が頻繁に入れ替わりながらも最高適応度自体はあまり変化しない。
- 最高適応度が変化する時は急激に変化する。

従って、一人ゲームの階段状というのとはかなり意味が異なる。

初期: 片方の木を育てる行動

図 8.8は、第一世代の最適種族の行動図である。とりあえず最適種族になっているのは、片方の木を育てることで利得を得る種族である。具体的には、木 2 が大きくなるまで待って切る、ということを繰り返している。図 8.8を見ると分かるように、このプレーヤーは木 2 が育つのを待つ間、木 1 を切り続ける。その間、木 1 の高さは低くなって行く (図 8.9-(a))。そのため、次第に木 1 から獲得できる木片の大きさは小さくなり、プレーヤーの状態の値も減少して行く。そして、次に木 2 を切った時にプレーヤーの状態は回復する (図 8.9-(b))。行動図から分かるように、どの木も切らずに待つ、という行動はまったく見られない。一人木こりジレンマゲームで木が二本ある時は、基本的に待つ必要がないからである。

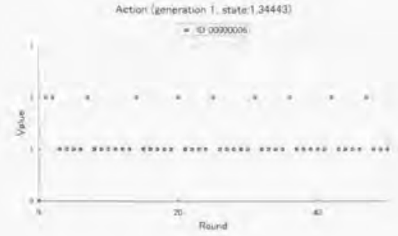
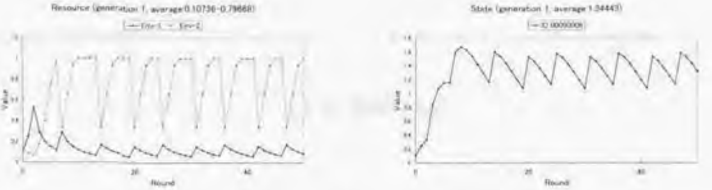


Figure 8.8: 初期(generation=1)の最適種族の行動図: 横軸は round、縦軸はプレーヤーに選択された行動である。行動 0 (待つ)のほか、行動 1 と 行動 2 (木 1 を切る、木 2 を切る) が選択可能である。



(a) (b)

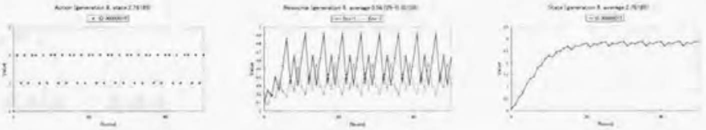
Figure 8.9: 初期(generation=1)の最適種族に関する資源図と状態図

進化の流れ

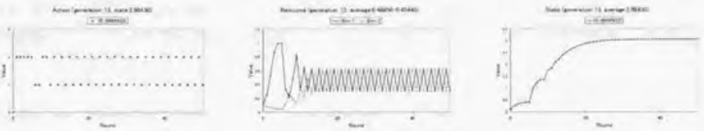
この後の進化の流れは、以下の通りである。

1. 二本の木の扱いが次第に平等になる。(図 8.10-(a))
2. 二本の木を育てることが可能になる。二本の木を育てる単純な 2 周期のサイクルが形成される。(図 8.10-(b))
3. 基本的に 2. と同様であるが、サイクルに入る時間が短縮される。(図 8.10-(c))

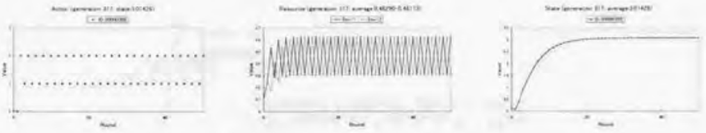
進化は次第に2本の木を平等に取り扱う方向へと向かう。ここで図 8.10-(c) を見てみよう。一つ一つの木の高さのダイナミクスは、木が一本の時の実験の最終状態(図 8.6-(b), p.50)と全く同じである。それが 2 本の木について交互に行われている。これは木が一本の時の結果から考えるとごく自然な結果である。しかしこれは、木が一本の時の最適周期が 2 で木の本数が 2 であったからであり、同じ複数資源のゲームでもこれらの条件が少し変われば見られる現象自体もかなり異なるものになる可能性はある。



(a)



(b)



(c)

Figure 8.10: 進化の流れ: (a)(b)(c)とも左から行動図、資源図、状態図を表す

Chapter 9

議論 I

実際の例に即した動的ゲームの説明も兼ねて、この節では一人木こりジレンマゲームの実験結果を紹介した。ここで、一人木こりのジレンマゲームの範囲で触れておくべきいくつかの点について議論する。

9.1 周期部と遷移部

図 9.1を見てみよう。ゲームのダイナミクスが最終的に周期的状態に入る場合、ダイナミクスは大まかに見ると周期部 (periodic part) と遷移部 (transient part) とに分けて考えることができる。(力学法則によっては周期状態に入れないゲームも存在する。) 一般に、周期部は繰り返しゲー

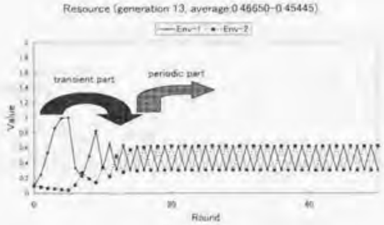


Figure 9.1: 周期部と遷移部: ダイナミクスは 13 round あたりから周期的状態に入っている。

ム全体に占める割合が大きいので、周期部で高い利得を獲得できるかどうかは適応度に大きな影響を与える。遷移部のダイナミクスは、一人ゲームの場合はプレーヤーが完全に制御できる。しかし、複数人ゲームではゲームがどういった状態(例えば周期状態)に入るかは遷移部でのプレーヤー間相互作用によって決まる。その意味で複数人ゲームでは遷移部でのどのように振る舞うかがプレーヤーにとって非常に重要である。後の節で例を示すが、例えば複数人ゲームでは、一旦ゲームが周期状態に入ると、自分の得点を落とさずにその状態を抜け出すことが困難になる場合がある(いわゆる均衡状態)。つまり、たとえゲームの状態が自分にとって不利なものであっても、一旦その周期状態に入ってしまうとその周期状態を維持することがプレーヤーにとっての均衡に

なってしまい、プレーヤーはその状態で我慢をせざるを得ないのである。

さて、本節の一人ゲームの実験の場合、進化の一般的な順序として、まず周期部の進化が進み、その次に遷移部の進化という順番であった。ゲームのダイナミクスという観点から言うと、進化の順序は次のようになっている。

1. より生産的な周期的アトラクターが選択される。

2. いくつかある周期的アトラクターへのパスの中から、少しでも生産的な遷移部が選択される。

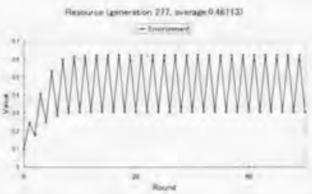
基本的に、適応度に一番効く部分の進化が起こり、その後に微細な進化が起こるという順番である。

9.2 意志決定関数の進化: ゲームを育てる戦略

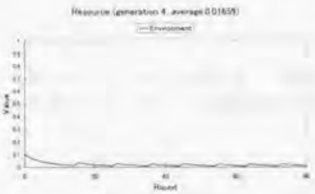
この一人ゲームの実験で見られるような適応度の最大化へ向けたアルゴリズムの進化は、動的ゲームという観点から言うと、プレーヤーがゲーム環境を自分にとって生産的なものへと構築する過程である (図 9.2)。二人以上の場合は、ゲーム環境を生産的なものにするためには、共同作業が必要である。また、複数人ゲームで「適応度を上げる」ということは「他のプレーヤーを上回る」ということであり、それが意味することの中には他のプレーヤーの状態を下げることも含まれる。しかし一人ゲームの場合、生産性の高いゲーム環境を構築することはそのまま適応度の上昇へとつながる。

意志決定関数は単純な形式だが、各時点のゲームに最適化した行動を選択するのでもなく、遅延効果(p. 16)を実現するような行動選択が行われている。方向としては予想できる妥当な方向へ戦略が進化しているといえる。

では、この一人ゲームにおいて、各時点のゲームの状態の変動と意志決定関数内部の動機写像 mtv との関係は具体的にどうなっているのだろうか。



(a)



(b)

Figure 9.2: (a)生産的なゲーム環境(再掲) (b)失敗例

9.3 動的ゲームにおける「ゲームのアトラクター」の分布: SPGダイアグラム

動的ゲームの位相のダイナミクスは、n 次元の y と m 次元の x の時間発展によって表現される (x = 木の高さ、y = プレーヤーの状態)。この x、y の $m+n$ 次元の直積空間のことを簡単のため「ゲーム環境=プレーヤー空間」(GP 空間) と呼ぶことにしよう。

一般に意志決定関数内の動機写像が一次元写像の場合、GP空間は、

$$mtv_r(x,y) = \sum_{k \in M} \eta_{kr} x_k + \sum_{l \in \tilde{N}} \theta_{lr} y_l + \xi_r (r \in A)$$

の等号関係によって作られる$m+n$次元超平面によって部分空間に分割される。そのどの部分空間に現時点の位相(x,y)が存在するかによってその時点のプレーヤーの行動が決定する。当然ながら、これらの超平面はプレーヤーごとに異なる。

例えば、一人ゲームで木が一本の場合はGP空間は二次元であり、$mtv_1(x,y) = mtv_0(x,y)$が示す直線(二次元超平面)で分割される。この直線によって分割された二つの領域のどちら側に現時点の位相が存在するかによって、プレーヤーが行動0を選ぶか行動1を選ぶかが決まり、次の時点の位相が一意に決まる。(例えば動機写像を二次元以上で実装すれば超曲面で相空間を切ることが出来る。これによって飛び地の部分空間などが可能になる。)

全プレーヤーの行動が決まると、行動の影響の写像vが一意に決まり、自然法則uとの合成写像によってGP空間上の次の時点の位相が決定される。動的ゲームでは、このプロセスの繰り返しによってGP空間内の位相(x,y)のダイナミクスが得られる。

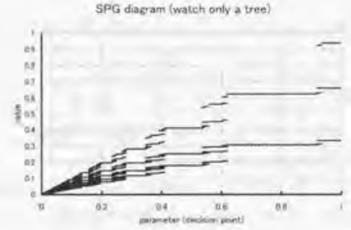


Figure 9.3: SPGダイアグラム: 横軸はdecision pointで、各 decision point に対するxの時系列の集合が縦軸方向にプロットされている。ただし各時系列の最初方のラウンドは遷移部の可能性があるのでプロットしていない。

ここで少しプレーヤーの意志決定機構を単純化して、プレーヤーが自分の状態yを全く見ないとしよう。すると、木が一本の一人木こりジレンマゲームでは、プレーヤーは木の高さxだけを見て意思決定を行うことになる。さらに、プレーヤーはxがある値を超えると木を切り、その値を超えない限りは切らずに待つ、とする。この値をdecision pointと呼ぶことにすると、decision pointが決まると木の高さxとプレーヤーの状態yの時系列が一意に決まることになる。時系列は周期的状態に収束するかもしれないし、固定点に収束するかもしれないし、カオスになるかもしれない。それは系の力学法則に依存する。今回のモデルの場合、各decision pointに対するxの時系列の値の集合をプロットすると図 9.3のようになる。このようにプレーヤーの戦略の一部のパラメーターを変動させた時、GP空間上のアトラクターも変動するが、その様子を描いた図 9.3のような図を「戦略パラメーターとプレーヤー状態とゲームのダイアグラム (SPGダイアグラム)」と呼ぶことにしよう。SPGダイアグラムは、ある方向へ戦略が変位した時、ゲームのダイナミクスのアトラクターがどのように変化するのかを示す。ここから分かるのは「ゲームの性質」(定常

的ゲーム、周期的ゲーム、カオス的ゲーム、生産的ゲーム、非生産的ゲーム、etc.)の変化であり、また、その変化の起こりやすさである。

さて、図 9.3を見て分かるのは、以下の三点である。

1. このゲームでは全ての値(decision point)に対してアトラクターが周期軌道である。

2. パラメータの微少な増加(減少)に対してアトラクターが変動しない部分が数多く見られる。図 9.3で言うと(水平方向に)平らな「台」にあたる部分である。

3. decision point が大きいところほど台が大きくなっている。

SPGダイアグラムは、通常の力学系の理論における分岐図などとと同様、特定のパラメータの変動に対する「系のアトラクター(系の時間発展方程式の解)」の特徴を表現する。第 5.2 節(p. 24)で述べた通り、動的ゲームで記述される系は究極的には力学系として表現できるため、こういった視点からゲームを見ることで系の特徴を捉えやすい。しかしここで重要なのは、SPGダイアグラムのパラメーターを決めるのが意思決定主体である、ということである。単にあるパラメーターを変化させた時の系の特徴を示しているというだけではなく、SPGダイアグラムにおけるパラーメーターを進化・学習のオーダーで実際に変動させるのはプレーヤーであり、また、変動させるパラメータの選択自体もプレーヤーによって決定されるのである。これらに失敗したプレーヤーは淘汰されることになる。

なお、計算機実験で現れた最終状態ではxのダイナミクスは二周期であるが、これは図 9.3でパラメータが0.8周辺にある台に相当する。もしパラメータが1.0に近いところにある三周期の台まで戦略が変位したら、木こりによって切り取られる木片の大きさはさらに大きくなる。それにもかかわらず二周期の台で進化が止まっている。これは、三周期になると一回「待機行動」が多くなるので時間平均としては二周期の方が利得が高くなるからである。

本節の一人ゲームの場合、プレーヤーは単に自分の平均利得が高くなるような方向へ意志決定関数のパラメーターを変動させれば良い。直感的には、SPGダイアグラムにおいて平均値が高い方(図 9.3では右側の方)のゲームを選べば良い。実際、今回の一人ゲームの実験でもそうなっている。また、SPGダイアグラムにおいて平均利得が高い部分を単純に目指せば良いので、ここではSPGダイアグラムの地形の形態は問題にならない。意志決定関数のパラメーターが、SPGダイアグラムにおいて複雑な形態を持つ部分であったとしても、平均利得が高い部分であれば問題ない。これは既に述べたように、一人ゲームが最大化問題であるということに対応する。

しかし、二人以上のゲームでは利得が高くなるゲーム(利得が高いゲームのアトラクター)を目指すことが必ずしも重要なわけではない。一時的に利得が高くなっても、相手の戦略の変更に対して簡単に壊れてしまうのであれば意味がない。二人以上のゲームでは「協力」の有無が一つの大きな問題になる。ゲーム構築のレベルで協力状態を実現・維持する時、SPGダイアグラムにおける地形の「形態」は、それ自体が非常に大きな意味を持つようになる。

9.4 複数人ゲームに向けて

ここまで一人木こりのジレンマゲームにおける進化の流れを(資源が二つの場合も含めて)見てきたが、以上の結果は、動的な資源を一人で管理する場合に、管理方法の効率化を目指す試行錯誤の過程として見ても良い。ただし一人ゲームなので、最適種族に関して言うと、進化の過程で環境が悪化するような進化はありえない。シミュレーションの最初にプレーヤーを作る乱数がたまたま都合が良いものであれば、シミュレーションの始めから最適状態に到達してしまい、事実上シミュレーションが終わってしまう。(木が一本の木こりジレンマゲームの計算機実験のうちの一つは、実際ほぼその通りの結果になった。)これが複数人ゲームになると事情が変わってくる。

プレーヤーの適応度の上昇は必ずしも生産的なゲーム環境の構築によるものではない。また、生産的なゲーム環境を構築するためには、ゲーム環境との相互作用と共に、他のプレーヤーとの相互作用が重要になってくる。こういった複数のプレーヤーによる動的ゲームについて次節以降で分析する。

Chapter 10

二人ゲーム: 丘に木が一本ある場合

10.1 ゲーム

木こりの意思決定が「木の成長」と「自分自身の状態」だけに影響を与える時に見られる現象については、一人ゲームの節で既にいくつか触れている。一方、プレーヤーの人数が複数になると、プレーヤーの意思決定が他のプレーヤーの意思決定に影響を与える。他者の情報も環境からの入力となる。つまりここから「ゲーム」になる。「ゲーム」と呼べる木こりのジレンマの中で、二人のプレーヤーと一本の木による木こりのジレンマゲームは一番シンプルな構成であり、動的ゲームの性質を調べる第一段階として一番適していると言えよう。(ただし、複雑な構成のゲームが複雑な社会現象を生み出すとは必ずしも言えない。)

この節では、プレーヤーが二人いる場合について考える。そして主に次の二点について議論する。一つは、ゲームのダイナミクスが持つ性質がプレーヤーの意思決定にどのような影響を与えるのか、ということについてであり、もう一つは、ゲームを動的に表現するときに、静的に表現した場合とどのような違いが現れるか、ということである。後者については特に「共有地の悲劇」の動的表現という視点から考察を行う。

木こりのジレンマゲームモデルの動機の一部で既に触れた通り、このゲームは静的に表現すると「共有地の悲劇」タイプのゲームとして表現できる。逆に、木こりのジレンマは共有地の悲劇の動的ゲーム表現の一つである。共有地の悲劇という観点から言うと、エージェントの進化は「木の切り合い」に向かうはずである。実際木こりのジレンマモデルのシミュレーションでも初期の進化は「木の切り合い」の方向である。しかし、時間の経過と共に協力的な方向への社会の発展が見られる。なぜそれが可能になるのか? 動的ゲームにおける、その進化の機構について議論する。

10.2 計算機シミュレーションの結果と解析

10.2.1 木の切り合いに向かう時代(初期)

図 10.1はシミュレーションの初期の適応度グラフである。ある程度進化が進んだところ(100世代くらい)から急激に適応度が下がり、「木の切り合い」状態が支配的になる。この様子は図 10.2に示されている。ところどころ「待つ」行動(=行動 0)も見られるが、プレーヤーの状態、木の高さは図 10.3のように常に低い状態で維持されている。

このゲームではゲームの各時点 (round) において、「木を切る」という行動が「切らない」という行動を常に支配(dominate)している。初期の世代で見られる上記の結果は、共有地の悲劇タイプのゲームとして当然の成り行きとも言える。さらに困難なことに、本稿の木こりのジレンマゲームでは木の高さは連続値をとり、木を切るタイミングにも多くの可能性がある。当然のことな

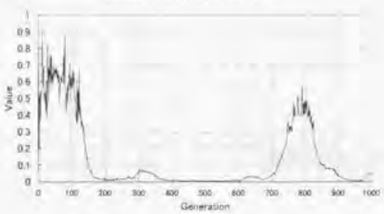


Figure 10.1: 木が一本の二人木こりゲーム: 初期の適応度グラフ

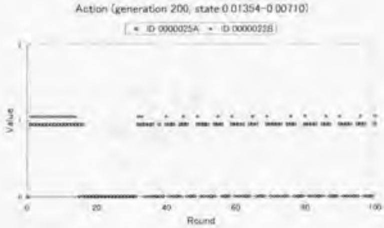


Figure 10.2: 木の切り合い状態: 行動図(第200世代)

がら、協調的行動が広がるためには「協調とは何か」ということに関する何らかの合意がプレーヤー間に前提として必要である。しかし、本稿の木こりのジレンマゲームでは、協調、もしくは、裏切りといった二値的な記号は採用していない。また、どの時点で木を切るかによって協力・裏切りに程度がある。そのため、どの程度の高さまで木を切らなければ裏切りにならないのか、どの程度の頻度で木の切れば協調的と捉えて良いのかなど、協調に関する社会的基準がモデリングの段階では与えられていない。

なお、800世代あたりで一度適応度が上がるが、しばらくするとまた切り合いの社会に引き戻されている。

10.2.2 ゲームの遷移

図10.4に見られるように、1000世代目くらいから適応度がほぼ階段状に上がり始めて、段階的に協力的社会が形成されていく。この階段の「段板(tread)」(踏み面、平坦な部分)に相当するところではそれぞれに固有のゲームが形成されている。そして階段の「蹴り込み板(riser)」に相当する部分では社会の状態が急激に遷移する。ここでは図10.4に示される3つの段板部A、B、C

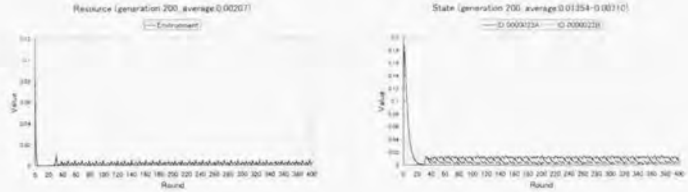


Figure 10.3: 木の切り合い状態: 資源図と状態図(第200世代)

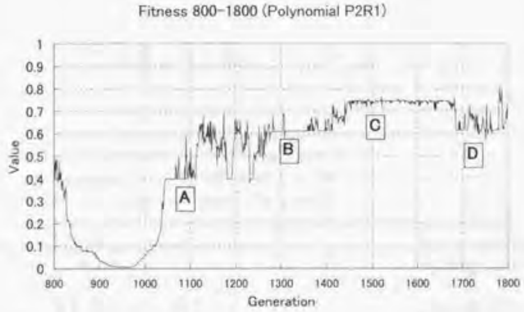
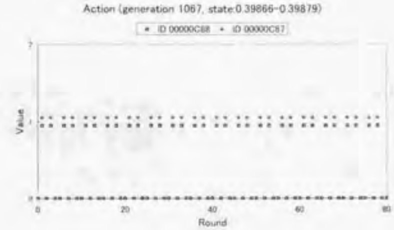


Figure 10.4: 木が一本の二人木こりゲーム: 適応度グラフ

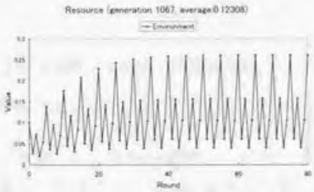
に注目してみよう。

時代A (第 1100 - 1200 世代の付近)

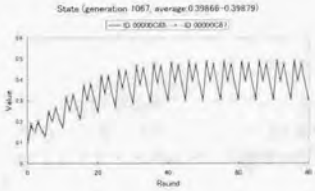
この時代では、木の高さが平均=1.2付近になるようなゲームが設定されている。このゲームを構成するプレーヤーたちの行動は図 10.5に示されるように「休む、切る、休む、切る、休む」のような5周期の行動で、木を育てつつ木片を獲得している。二人のプレーヤーは基本的に同じ行動をする。



(a)

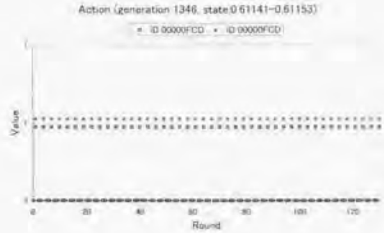


(b)

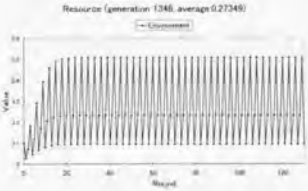


(c)

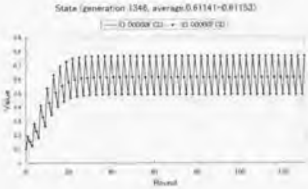
Figure 10.5: 時代 A



(a)



(b)



(c)

Figure 10.6: 時代B

時代B (第 1300 - 1400 世代の付近)

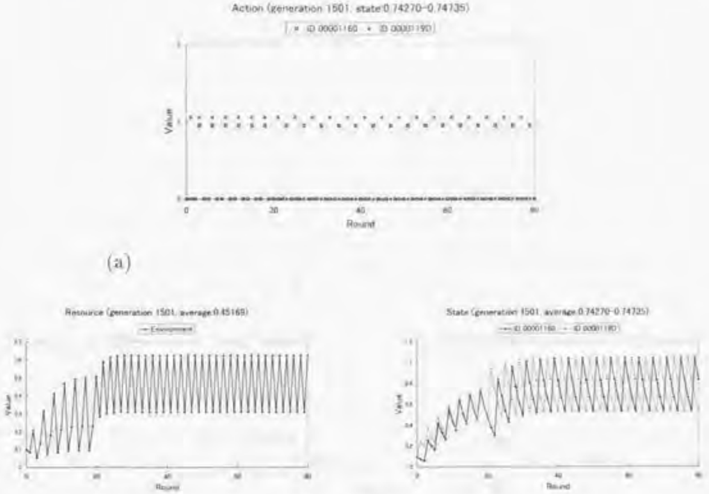
この時代には、木の高さが平均0.27付近になるようなゲームが設定される。このゲームを構成するプレーヤーたちの行動は図 10.6に示されるように「休む、切る、休む」のような3周期の行動で、木を育てつつ木片を獲得している。これにより、時代Aより生産的なゲーム環境が構築されている。二人のプレーヤーは基本的に同じ行動をする。

時代C (第 1500 - 1600 世代を中心とした付近)

この時代では、木の高さが平均0.45付近になるようなゲームが設定される。このゲームを構成するプレーヤーたちの行動は図 10.7に示されるように「休む、休む、休む、切る」のような4周期の行動である。特徴的なのは、プレーヤーどうしが時間的に役割を分業している点である。二人のプレーヤーは交代で木を育て、交代で木片を獲得している。その結果、時代A、Bよりもさらに生産的なゲーム環境が構築されている。

10.2.3 考察: ゲーム環境の遷移とゲームの安定化

以上のように時代A、B、C の間では異なるダイナミクスが見られ、それぞれがある期間の世代では安定に維持されている。また、時代A、B、C と移り変わるにしたがって徐々に生産的なゲーム環境が構築されて行く。それらの間の遷移の起こり方は(少なくとも行動のレベルでは)かなり急激である。これらの段板部の間を遷移する時にどのようなことがおこっているのだろうか?



(a)

(b) (c)

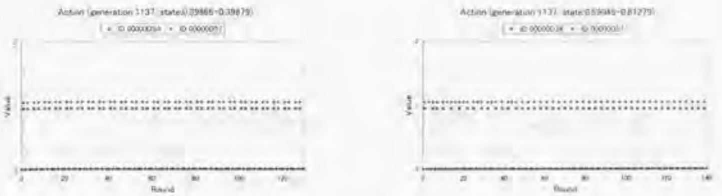
Figure 10.7: 時代C: この図では第 20 ラウンドあたりで一方のプレーヤーが木を切るのを待っている。そこから時間的役割分化が可能になり、この時代特有の周期的ダイナミクスが見られるようになっている。

適応度グラフ(図 10.4)を見る限り、それぞれの段板は完全に平坦ではない。段板の上でパルス状になっている期間がところどころある。(特に時代A ではそういう部分が多いく、パルスと言うには太すぎる部分もある。)ここで、適応度がパルス上に変動するこれらの世代で起こっていることに注目してみよう。

一つの世代には 60 の丘が存在するが、全ての丘で同じようなゲームダイナミクスが構築されているわけではない。もちろん、ほとんど全ての丘で同じタイプのゲームダイナミクスが見られるような世代もあるが、二つのタイプのゲームダイナミクスが 60 の丘に半々くらいで分布しているような世代もある。例えば、同じ世代に見られるゲームダイナミクスを分類すると、時代A とほぼ同じタイプと時代B とほぼ同じタイプがそれぞれほぼ 50 %近くを占めているとか、世代によっては B タイプと C タイプで同様なことがあるとか、その割合が世代の進行と共に増減するとかいうことがある。いわば、ある二つのゲームダイナミクスのパターンの間で引き合いが行われれるような状況が見られる。

図 10.4を見ると第 1150 世代付近は時代A の中に存在するが、この期間の最高適応度はある程度A 型より高い(太いパルス上になっている)。この世代では、A 型のゲームダイナミクスが構成されている丘と B 型のゲームダイナミクスが構成されている丘はおよそ半々ずつである(図 10.8)。しかし、社会は B 型に完全には移行せずに、また A 型に戻ったりする。この世代で行われていることについてもう少し詳しく見てみよう。

10.2.4 動的ゲームにおける進化的「準」安定戦略



(A) (B)

Figure 10.8: 2つのゲームダイナミクスの間の変遷(第1137世代): (A)は時代A のタイプの行動図、(B)は時代B のタイプの行動図であるが、いずれも同じ種族 ID-00000D57 のプレーヤーによるものである。この種族のプレーヤーは相手によって A タイプの行動と B タイプの行動を使い分ける。

この世代(第1137世代)で一番適応度が高い木こり種族(ID-00000D57)は相手によってAタイプ、Bタイプと違うゲームダイナミクスを実現できる。つまり、「木を切る」頻度が比較的多いプレーヤーに対しては A 型のゲームを行い、「待つ」頻度が多い協力的なプレーヤーに対しては (利得が高い) B 型のゲームを行う。この種族のプレーヤーはゲームのダイナミクス構築のレベルで繰り返し囚人のジレンマゲームにおける TFT 的な行動を行っている。もしダイナミクスのレベルで同様な行動を実行できる種族が同世代に一定数以上存在すれば、そして、A型、B型の二つ以外のパターンがほとんど見られなかったとすれば、社会は一気にB型に遷移する。遷移する理由は繰り返し囚人ジレンマで ある程度の人口を持った TFT が裏切り的社会に広がるのと同じ理由である。そしてやはり、TFT による協力的社会の維持(進化的安定戦略[12])と同じ理由で、一度広がった B 型の社会はある程度安定化される。つまりこれは、ゲームのダイナミクス構築のレベルでの進化的「準」安定戦略といえる。そしてこれが、時代A、時代B、時代C の間の遷移を可能にしているメカニズムである。ただし、この ESS 的メカニズムが働くための前提として、存在するほとんどのゲームダイナミクスが、A 型及びB型の二つだけである必要がある (動的ゲームでは、その前提を完全に実現するのは不可能であるので、あくまで「準」安定である。なぜならこれらA型、B型というのはこのゲームに所与のものではなくて、プレーヤーの相互作用から構成されるものであり、プレーヤーの行動の変動に伴って変動しうるものだからである)。実際シミュレーションでも、例えば時代A から 時代B にかけて見られるのは、やはり多くの場合タイプ A かタイプ B のダイナミクスである。連続関数を力学的法則とする木こりのジレンマゲーム(動的ゲーム)は、戦略のパラメーター領域が実数全てであり、資源のパラメーターも [0, 1] 区間で連続値をとる。事実上無限のゲームダイナミクスが可能である。そういった動的ゲームにおいて、全ての丘で見られるダイナミクスのパターンが、少数の典型的なパターンに収束して安定化することがあるのはなぜなのだろうか? その理由は後の第 11.2 節 (p. 70) で説明する「戦略的安定軌道」によって分かる。

なお、以上では「TFT 的」という言葉を使用しているが、繰り返し囚人のジレンマにおける協力の発生と、ここで見られる協調的社会の段階的発展は以下の点でかなり意味合いが異なる。一つは、これらの協力は「協力戦略」「裏切り戦略」という離散的な記号の一つとして元々あったわけではなくて、プレーヤーたちによって事後的に構成されるものであること。もう一つは、これら「TFT的」というのはゲームダイナミクスの構築のレベルでの話である、ということである。そ

してそれ故、構成された協調的ゲームダイナミクスは、プレーヤーの意志決定機構の変化に伴って新たな環境に移行する可能性が常にあり、TFT のように絶対的な拘束力はない。事実、これらの社会はある程度安定に続いているが永続はしていない。

例えば図 10.4で、「時代C」が適応度の低い「時代D」に取って代わられているが、これは繰り返し囚人ジレンマの TFT ではありえないことである。時代C が崩壊した理由は、木こりのジレンマゲームにおけるこの「協力の意味」の連続性・無限性にあるといってよい。「時代B 型の相手には時代B 型の行動を、時代C型の相手には時代C 型の行動を」という行動は理論上100% 完全ではありえない。そもそも時代C 型の行動とは言ってもダイナミクスのレベルの話なので、どのラウンドから「時代C 型社会のダイナミクス」を始めるのか(どのラウンドまで様子を見るのか)に関する違いによって、協力の程度に微小な差異が生じるのは避けられない。TFT の「協力には協力」のように、ほぼ完璧に相手と利得を一致させるといったことは木こりのジレンマゲームでは困難である(少なくとも相手がこちらに合わせようとしない限り)。

時代C の初期にはいくらかの割合で時代B の 3 周期行動を試そうとする木こりが存在する。しかし時代C も後半になると、ほぼ全ての木こりは時代C の 4 周期行動を示す。また、ラウンドの始めから積極的に 4 周期行動に入るようになる。すなわち、自分から積極的に「待つ (譲る)」行動を示して、相手との 4 周期の時間的役割分業状態に突入しようとする。要するに世代の進行と共に同じ時代C でも協調の度合いが次第に増加する。(エラー付き囚人ジレンマにおいて、協調性の高い GTFT が優位になることとある意味似ている (PQ 戦略の範囲) 。[14]。) それによりほぼ全ての丘で時代C 型のダイナミクスが見られるようになる。しかしこの協調性の増加は一方で「裏切り (待たないで木を切る)」的戦略に対する侵入を招きやすくする。戦略の変位によってある程度以上の集団に協調性が失われた時点でこの社会は崩壊する。特に (後の第 11.2 節 (p. 70) で示すように) 時代C 型のゲームダイナミクスは、比較的少しの戦略的変位によって違うダイナミクスへと移り易い。

10.2.5 その後の進化

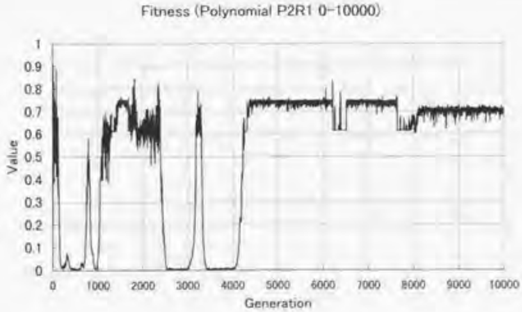
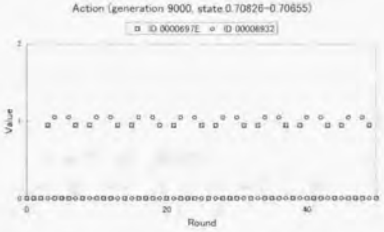


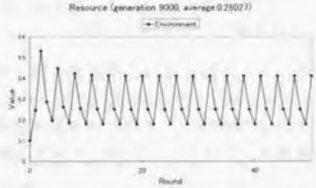
Figure 10.9: 適応度グラフ: 0 世代から 10000 世代まで

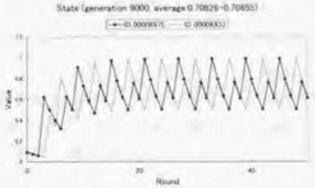
0 世代から 10000 世代までの適応度グラフを図 10.9に示す。2000 世代以降も基本的に断続的な

適応度の動きが見られ、プレーヤーによって構成されるゲームの性質はいくつかの安定状態を経ながら変動していく。木の切り合いよって適応度がゼロに近づく社会もそのうちの一つである(3000, 4000世代付近など)。10000世代になると二人の木こりが図10.10のような時間的分業を行う木の管理方法が支配的になる。



(a)





(b) (c)

Figure 10.10: 9000世代

Chapter 11

議論 II

2人木こりのジレンマゲームにおける進化的現象についてここまで紹介してきた。ここまで紹介したゲームダイナミクスはあくまで各世代における典型的な例である。しかし進化の過程で、ほぼ全ての丘で似たようなダイナミクスが見られる世代もあれば、丘によってかなり異なるダイナミクスが見られる世代もある。ゲームダイナミクスの多様性については、一般に次のような特徴がある。

- 木の切り合いが支配的な世代では、ゲームのダイナミクスの多様性はかなり大きい。つまり、ゲームのダイナミクスは同じ世代でも丘によって様々ある。
- ある種の協調的な社会が構成されつつある世代では、一つ 、あるいは少数の典型的なゲームダイナミクス (3周期ダイナミクス、4周期時間的役割文化、...) が存在する。ほぼ全ての丘で見られるのはその典型的なダイナミクス、あるいは、その亜種である。この時、全ての丘で見られるゲームのダイナミクスの多様性は著しく減少する。

木こりのジレンマゲームでは、プレーヤーの意思決定が少し変動することが全く異なるゲームダイナミクスを生み出す可能性がある。また、木こりの意志決定関数、木の高さ、木こりの状態は連続実数値の範囲全てをとりうる。木こりが選択する行動について言うと、同じ「木1を切る」という行動でも、どのタイミングで木を切るかによって全く異なるゲームダイナミクスが現れる可能性がある。このような、プレーヤーの意志決定関数やゲーム環境の自由度が一見大きく見える動的ゲームにおいて、ダイナミクスのパターンが極端に少なくなることがあるのはなぜなのだろうか?

次にゲーム環境の変遷について考えてみたい。シミュレーションで見られたようなゲーム環境の遷移、安定化といった現象は動的ゲームモデルに非常に特徴的なものである。つまり、動的にゲームを表現することによって初めて見ることができる現象である。そして前節でも「戦略の進化に伴うゲームの移り変わり、または安定化」という言葉を使い、その実際の例についてもいくつか示してきた。例えば、同じ4周期のゲームがある程度の世代の間続られる例 (戦略の進化自体は常に起こっている) や、少しの世代を隔てて全く異なるゲームが主流になる例などである。しかし、ここで言う「違うゲームが構成される」とか「ゲームが維持される」というのは具体的にどういうことなのだろうか? また、ゲームのダイナミクスと戦略の進化との間にはどのような関係があるのだろうか?

11.1 他のプレーヤーへの参照に係わるSPGダイアグラム

戦略の変異とゲームの関係を直接見るにはSPGダイアグラムが有効である。ここでは、今回の計算機実験で実際に現れた木こりの意志決定関数を基にしてSPGダイアグラムを構成し、その考

Figure 11.1: 木が一本の二人木こりゲーム: 適応度グラフ (再掲)

察を行う。ここではまず、時代C と D で見られる現象と、時代C から時代D への遷移について考察する。(適応度グラフは図 11.1に示されている。また、時代C と時代D に見られるゲームダイナミクスの代表的な例は図 11.2 に示されている。)

図 11.1から分かるように、時代D と時代B の適応度はほぼ同じである。実は、両方の時代で見られるダイナミクスもほぼ同じである。つまり、いずれの時代でも時代B 型の 3 周期パターンが中心になる。両者の時代で異なる点は、時代B よりも時代D の方が、このパターンがより支配的になっているということである。つまり、B の時代には必ずしも全ての丘でこのパターンが見られるわけではないのに対して、D の時代ではほぼ全ての丘でこのパターンが見られる。

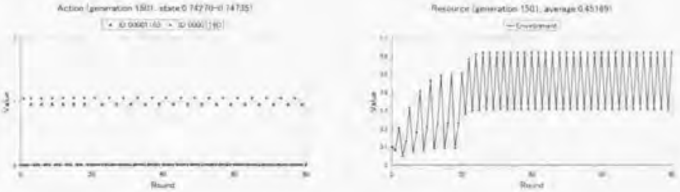
ここで、それぞれの時代に代表的な意志決定関数を見てみよう (図 11.3)。C、D で見られるゲームは全く異なる。にもかかわらず、それぞれの時代の最適種族の意志決定関数は非常に良く似ている。わずかに違うように見えるのは次の二つであろう。

- 意志決定関数の θ_{20} の値。図では、破線部 (Wait) と "Me 軸"の交点。つまり、待つ行動 (行動 0) への動機 (mtv_0) で自分 (プレーヤー 2 [1]) に係わる部分である。
- 意志決定関数の θ_{11} の値。図では実線部 (Act-1) と "Player 1 軸" との交点、つまり、木を切る行動 (行動 1) に対する動機で他のプレーヤー (player 1) に係わる部分。

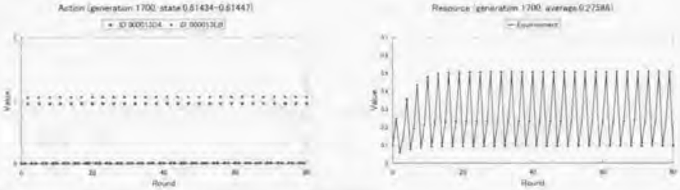
ここでは意志決定関数の他者に関する参照 θ_{11} に焦点を当てて考えてみることにする。図から分かるように θ_{11} の値は、第1501 世代 (C) では約-0.65、第1700 世代 (D) では約-0.15 となり、他の係数に比べると時代C と時代D の間で比較的差異が大きい係数である。(ただし、ゲームの状態は他の係数の値にも依存するので、本来、一つの係数だけでは単純に比較できない。)

上記の時代C のプレーヤーをサンプルとして実際に θ_{11} に関する木の高さのSPG ダイアグラムを作成したのが図 11.4である。図を見ると、パラメーターの値 = -0.5 の付近に三周期のアトラクターの集合があり、三枚の平板のようになっている。この三枚の平板が時代 C のダイナミクスに対応する。また、-0.4 付近から +1.0 付近 までの広い範囲に存在する 2 周期のアトラクター (二枚の平板) が時代D に対応する。

[1] 意志決定関数の中で「自分」は常にプレーヤー n、つまり最後のプレーヤーであることに注意。二人ゲームならプレーヤー 2。



C



D

Figure 11.2: 時代C と時代D の例として、世代 1500 (再掲) と世代1700における行動図と資源図を示す。

11.2　戦略的安定軌道

動的ゲームでは、

(1). 「プレーヤーの意思決定」は、

(2). 「ゲームのダイナミクス (GP空間内のアトラクター)」を決定し、それによって

(3). 「プレーヤーの適応度」も決まる。

(1)と(2)の関係の一断面を示したのがSPGダイアグラムである。また、(1)と(3) の関係を示したのがいわゆる適応度の地形である。一人ゲームの節では、SPGダイアグラムに平坦な部分(台)が存在することを指摘したが、それについて特に分析は行わなかった。一人ゲームの場合、基本的にプレーヤーにとって重要なのは適応度を高くすることだけである。他のプレーヤーが存在しない以上、その適応度を維持するためにはどうすべきか、といったことは問題にならない。プレーヤーは適応度が高くなるようなゲーム環境をSPGダイアグラムの中から選択できさえすれば良い。この時、SPGダイアグラムの「形態」はほとんど問題にならない。つまり、ある値 (意思決定パラメータ) の周りの地形が平坦である、複雑な形をしている、斜面になっているといったことは問題にならない。その値の意思決定が「高い適応度」につながるのか、ということだけが重要になる。しかし、二人以上のゲームになると、適応度の高さだけでなくSPGダイアグラムの「形態」自体が非常に大きな意味を持つようになる。特に協力成立の問題が係わってくると形の持つ意味の重要性は顕著になる。

なお、一人ゲームの適応度最大化問題としての側面を重視すればSPGダイアグラムの「形態」が一人ゲームの場合でも重要であると言えなくもない。ここで興味の対象となるのは「最大化へ

(1) (2)

Figure 11.3: 世代 1501(再掲) と世代 1700 の意志決定関数の比較: 二つの世代で見られる現象は異なるが、意志決定関数は非常に良く似ている。

向けたアルゴリズムの進化」であるが、例えば、複雑な地形の極大点に進化が引っかかって(適応度)最大点に到達できない、といったことが SPG ダイアグラムの形態によっては起こりうる。(正確に言うと、適応度最大化問題として考察する限り一人木こりジレンマゲームに SPG ダイアグラムは不要であり、適応度の地形に類するもので直接考察すべきである。SPG ダイアグラムは二人以上[2]の「ゲーム」において初めて意味をもつ。) しかし、本稿の興味の中心はゲーム、つまり意思決定主体の「関係性」から生じる諸現象である。ある最大化問題の解を導出するためにどのようにアルゴリズムを進化させたら良いのか、などを問題にしているわけではない。実際、最大化問題としての一人木こりのジレンマゲームは非常に単純な問題であり、計算機実験でもかなり短時間で最大化が実現される。つまり、ここで問題にしたい「形態」は、最大化問題で議論の対象となるような「形態 (主に適応度地形における地形の複雑さなど)」ではない。意思決定主体間の関係性の問題 (協調、結託、裏切り、社会の形成、崩壊など) に係わる「形態 (主にSPG ダイアグラム)」である。

共有地の悲劇的に関してよく言われるのは、外部からの強制、社会的規範が協調的社会の成立に必要だ、ということである。一方、動的ゲームとして表現される木こりのジレンマゲームでは様々なレベルの社会的現象が見られるが、それらの社会的現象を生み出す構造は木こりのジレンマの力学法則自体に内在する。その構造とは、例えば協調的社会を生み出す構造や、協調的社会の段階的進化を生み出す構造、また協調的社会の崩壊を導く構造などである。実際、二人木こりジレンマゲームの全ての準安定的社会は対応する準安定なアトラクターをSPG ダイアグラムの中に持つ。

木こりのジレンマにおける協調的社会について言うと、協調的社会の成立およびその維持を可能にする構造は SPG ダイアグラム(図 11.4)の「平坦な部分(平板)」に存在する。協力の成立のためには、プレーヤーの間に「どの状態が協力的状態か?」ということに関する合意がなければならない。また、ある程度適応度が高くなっても、戦略的ゆらぎに対して不安定であれば有効な合意とはなり得ない。前出の例では、時代 B 型(=時代 D 型) 社会の安定性が特徴的であるが、時代 C 型社会もある程度安定である。C 型のダイナミクスを実行できるプレーヤーの適応度は高いので、次の条件を満たされれば進化的安定戦略(ESS) とほぼ同じ理由で C 型のゲームダイナミクスが中心となる社会はある程度安定化される (準安定。第 10.2.4 項 (p. 65))。

1. B 型、C 型の二つ以外のパターンが同じ時代にほとんど見られない。

[2]二人ゼロ和ゲームを除く。(二人ゼロ和ゲームでは適応度地形の鞍点を求めることが目的になるというだけで、本質的に一人ゲームと変わらない。)

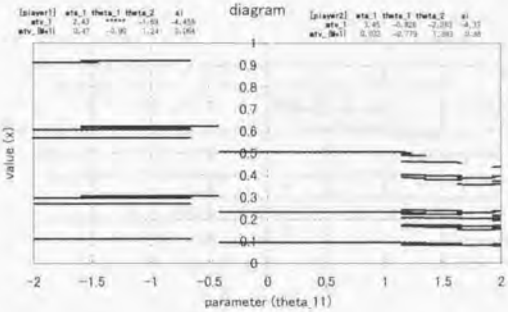


Figure 11.4: θ_{11} に関する SPG ダイアグラム (時代C)

2. B 型の相手には B 型のダイナミクスを実現できて、かつ C 型の相手には C 型のダイナミクスを実現できる木こりが一定数以上存在する。(B 型のダイナミクスでは木を切る頻度が C 型より少し高い。)

第 10.2.4 項 (p. 65) でも触れたように、動的ゲームでは、プレーヤーの意思決定の微小な変異が全く異なるダイナミクスを生み出す可能性が常にある。行動、資源、状態のダイナミクスの潜在的なバラエティはほぼ無限に有ると言って良い。しかし、この「木こりのジレンマ」のゲーム世界では、少数の種類 (一個から三個くらい) にダイナミクスが限定される時代がかなりある。例えば時代 B の中期では、ほとんどの丘で見られるのは B 型のダイナミクスとその亜種であり、また、時代 B の終期から時代 C の初期にかけて見られるのは、B 型のダイナミクスと C 型のダイナミクスの二種類 (とその亜種) がほとんどである。実際に観測される行動パターンがこのように少数の種類に限定される時、SPG ダイアグラム (図 11.4) には必ず平板が存在する。平板上では、戦略が多少変動しても「観測されるダイナミクス」は変わらない。平板が存在するかどうかはゲームの力学的法則に依存するが、平板が存在するようなゲームでは上記の二つの条件が満たされる場合がある。

しかし、動的ゲームで上記の二つの条件が「完全に」満たされることは (ゲームが動的であるが故に) ありえない。なぜなら B 型のパターン、C 型のパターンというのはダイナミクスのレベルの話だからである。囚人ジレンマのように、Cooperate、Defect といった完全に固定化された記号が与えられているゲームとは異なり、動的ゲームでは、完全な B 型のパターン、完全な C 型のパターン以外のパターンを必ず構成できる (亜種)。さらに、SPG ダイアグラムを見ても分かるように C 型ダイナミクスに対応するパラメーター領域 (平板) は多少狭くなっている。そのため、ある程度の数の集団に、ある程度以上の戦略的変位が起こると一気に安定性が崩れ、時代 B 型 (および時代 D 型) 社会に戻ってしまう。第 10.2.4 項で「時代 C 型のゲームダイナミクスは、比較的少しの戦略的変位によって違うダイナミクスへと移り易い。」と述べたが、この SPG ダイアグラムを見る限り、特に、時代 B 型 (時代 D 型) 社会のダイナミクスへ構造的に遷移しやすい。一方、SPG ダイアグラム—図 11.4 で時代 B 型ダイナミクスに対応する領域はかなり広い平板となってい

る。この平板の上のダイナミクスは多少の戦略的変異に対しては安定である。このように、戦略のパラメーターを変位させる時、ゲームのダイナミクスの中に内在する「戦略的揺らぎに対して安定なアトラクター」を戦略的安定軌道(Strategic Stable Orbit=SSO)と呼ぶことにする。SSOは、動的ゲームとしての木こりのジレンマゲームにおける協力的社会の構成、及びその維持に非常に大きな役割を果たす。正確に言うと、SSOが存在することは協力的社会が安定化するための必要条件である(上記の二つの条件の一つ目)。このことに付いては次の節でも詳しく述べる。

先に触れた、時代Aと時代Bの間の遷移、及び時代Bと時代Cの間の遷移などは、それぞれ二つのSSOの間の遷移であるといえる。SSO上では、多少戦略が変動しても実際に位相空間で見られる挙動はほとんど変化しない。SSOが存在するかどうかは系の力学的法則に依存する。力学的法則によってはSSOが存在しないことも珍しいことではない(カオス的ゲーム環境など)。しかし、SSOが存在するかどうかを系の力学的法則から直感で判断することは往々にして困難である。例えば、一見似たような二つの自然法則が全く異質なSPGダイアグラムを生み出すことがある(第11.6節(p. 84))。片方のモデルには多数のSSOがあるが、もう一方にはほとんどSSOが存在しない。いずれにせよ、少なくともこの実験で見られた安定な社会には必ず対応するSSOが存在する。そして社会はSSOからSSOへと遷移する。この時、ジレンマ的状況の中で協調的社会を構築することが可能になり、社会は様々な状態を遷移する。SPGダイアグラムを見る限り、意志決定関数の連続的な変動に関して、ゲーム(アトラクター)の変動は連続的な部分と断続的な部分が存在する。しかし実験結果を見る限り、実際のゲーム世界の変動の様子は概して断続的である。木こりの行動と意志決定関数について言うと、遺伝型としての木こりたち(木こりたちの意思決定関数)は世代と共に少しずつ変異するが、表現形としての木こりたち(木こりたちの行動)はある時点で一気に変化する。こういった断続性が見られるのは、この系に数多く存在するSSOの効果に他ならない。

11.3 裏切りに対する強さ: 意思決定関数に残る記憶

ここまで、協調的社会の成立と安定化のためにSSOの存在が必要条件であることを述べた。この節では、その十分条件について考えてみる。つまり、SSO上の協調的な行動のダイナミクスを安定化する戦略の条件、について考察する。安定化のためには、様々な種類の行動に対して妥当な行動で応じることが必要であり、そのため、木の状態のダイナミクス、及び相手の状態のダイナミクスを意志決定関数の中でどのように評価するかが問題になる。

11.3.1 x、yのダイナミクスによって対応を変える戦略

図11.5は第4000世代から第4500世代までの適応度図である。この期間には、木の切り合いの状態から協調的な社会が段階的に形成されて行く。その途中の二段階が、図では時代X、時代Yとして示されている。ここではまず、時代Yの初期(第4229世代)に現れた木こり種族(種族ID-3190)について詳しく調べる。そして、時代Xから時代Yに移行するメカニズムと、時代Yが安定化されるメカニズム、について調べる。また、この木こり種族がどの程度裏切りに対する免疫があるのかについて、また、その免疫を作り出す戦略の構造についても詳細に調べる。

種族ID-3190の木こりによる二つの行動図が図11.6-(x)(y)に示されている。この木こり種族は時代Yの初期に現れた種族であるが、(y)は時代Yの木こりと対戦した時の行動図、(x)は時代Xの木こりと対戦した時の行動図である。この二つの図によってこの木こりが相手によって異なる行動ダイナミクスを実行できる様子が分かる。こういった戦略を採ることができる種族が現れると、時代Xの社会から、より平均利得が高い「時代 Y 型」へと一気に遷移する。こういった種族の出現による時代遷移のメカニズムは、繰り返し囚人のジレンマにおいて、裏切り戦略が支配

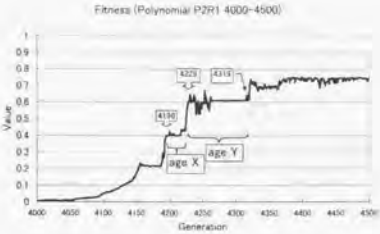


Figure 11.5: 第4000世代から第4500世代までの適応度図: 時代 X では五周期の行動パターンが支配的になる。また、時代Y では三周期の行動パターンが支配的になる。図中に示されている第4196世代は、時代Xの初期に位置する。また、第4229世代および第4319世代はそれぞれ時代Yの初期と末期に位置する。

的な社会にTFTによる協調が一気に広がるのと似たようなメカニズムであるが、この点に付いては既に第 10.2.4 項 (p. 65) でも触れた。

次に、この種族ID-3190の木こり(または亜種)による時代Y型社会の「安定性」に付いて考えてみよう。この種族はダイナミクスのレベルでTFT的なことを行なっているが、「協力」「裏切り」などの記号で構成されるゲームなどとは異なり、木こりのジレンマゲームでは「裏切り」と言っても様々なレベルがアナログ的に分布する(そもそも時代Xのダイナミクスは「裏切り的」というより、むしろ「協力的」である)。種族ID-3190の木こりは、時代Xの戦略に対しては時代X型の行動パターンで対応できるし、一方、自分と似たような戦略に対しては、より利得が高い時代Y型の行動パターンを実行できるので、とりあえず時代X型の種族に侵入されることはない。しかしこの戦略は、ほぼ無限に存在する様々なレベルの戦略に対しても、侵入を防ぐことができるのだろうか?

11.3.2 ゲームのダイナミクスのレベルで進化的に安定な戦略

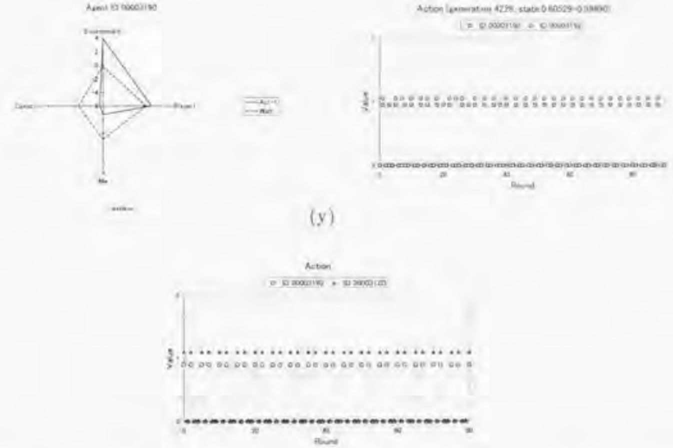
一般的な進化的安定性の条件についてもう一度確認しておこう (第 2.2 節 (p. 7))。つまり、戦略Y と対戦した時に戦略 X が獲得する利得を $E(X,Y)$ とすると、ここで「戦略 I が進化的に安定な戦略(ESS)である条件」とは、全ての戦略$J(\neq I)$ に対して

$$E(I,I) > E(J,I) \tag{11.1}$$

が成立するか、あるいは

$$E(I,I) = E(J,I) \text{かつ} E(I,J) > E(J,J) \tag{11.2}$$

が成立することである。戦略 I が集団中に充分広がっているとすると、戦略 I のほとんどの対戦相手は、戦略 I であり、従って戦略Iの平均利得はほぼ $E(I,I)$ になる。侵入者Jにとってもほとんどの対戦相手は戦略 I なのだが、単純に言って、侵入者 J は $E(I,I)$ より高い平均利得を獲得しなければ侵入はできない。例えば $E(J,I) > E(I,J)$ でも $E(I,I) > E(J,I)$ なら侵入できない。つまり、I,J 間の対戦の「勝敗」だけでは集団的安定性は決まらない。



(u) (y)

(x)

Figure 11.6: 時代 Y の初期に現れた木こり (種族ID-3190) に関する図。(u) はこの木こり種族の意志決定関数。この木こりは相手によって異なる行動を行なう。(y) は時代 Y の木こりを相手にした時の様子で、時代 Y に特有の三周期のダイナミクスが見られる (これはシミュレーションでも実際に見られた対戦である)。この時、平均利得は約 0.6 である。(x) は時代 X の木こりと対戦させた時の図で、時代 X に特有の五周期のダイナミクスが見られる。この時、平均利得は約 0.4 である。

上記の種族ID-3190の木こり (時代Y初期の木こり種族) を戦略 I と呼ぶことにしよう。この時 $E(I,I)$ は約0.6である。一方、侵入する種族 J が時代 X の種族の場合、$E(J,I)$ $(=E(I,J))$ は約0.4である。従って時代Y型の種族は時代X型の種族の侵入を許さない。この木こりのジレンマゲームの構造から、時代Xから時代Yへの遷移期の前後では、ほとんどの戦略は時代X型、もしくは時代Y型の戦略になりやすい (第 11.2 節 (p. 70))。実際のシミュレーションで、時代Yに移行してからしばらくの期間、時代Yが安定性を持っていたのはこのためである。しかし一方で、これら二種類の戦略以外と対戦したと時の戦略 I の振る舞いも興味の対象となりうる。この戦略 I は、これら二種類以外の戦略の侵入に対しても強さを持ち得るのだろうか?

戦略 I (時代Y型の木こり種族) の 対戦相手 J として、時代X型の木こり (種族ID-312D) をいくらか変異させたプレーヤーを考えてみる。つまりここで問題にしたいのは、時代X型の木こりよりも対戦相手の木を切る頻度が高い場合、あるいは、木を切る頻度が低い場合に、戦略Iは妥当な行動を行なうことができるのか (相手の侵入に対する強さを持ち得るのか)、ということである。

具体的には、時代X型の種族の意志決定関数を少しずつ変異させて (意志決定関数のξ_0の値を変異させる) 「戦略 J 」とし、戦略 I と対戦させる。戦略 J の変異と共に、両者の利得 E(I, J) と E(J, I) がどのように変遷するかを調べた。この様子は図 11.7に示されている。ξ_0 が小さい領域に J が変異すると、J は個々の対戦では I に勝つことがある ($-9 < \xi_0 < -3$ あたりでは

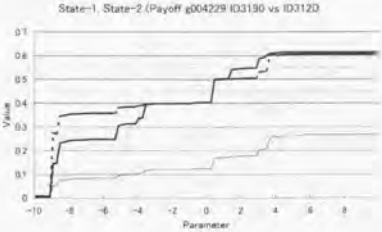


Figure 11.7: 戦略 I (時代 Y の種族 ID-3190) と戦略 J が対戦した時に、両者の平均利得 $E(I,J)$ と $E(J,I)$ が戦略 J の変異と共に変わって行く様子 (I) — 戦略 J は、時代 X 型の木こり (種族 ID-312D) をベースにした戦略。その意志決定関数の「待機行動への動機 (mtv_0)」の定数項 ($=\xi_0$) の値を -10 から +10 の範囲で変異させた場合に、I と J の利得がどのように変遷するかが示されている。実線部が戦略 I の平均利得 $E(I,J)$、破線部が戦略 J の平均利得 $E(J,I)$ である。また、細い実線で示されているのは、木の高さの平均値である。ξ_0 が大きくなると、木の成長を待つようになるので、木の高さは単調に増加する。なお、実際の種族 ID-312D の ξ_0 の値は 約-2.3 である。図を見ると、そこでは確かに $E(I,J) = E(J,I) =$ 約0.4 となっていることが確認される。つまり、その時には時代 X 型のゲームが行われる。

$E(I,J) < E(J,I)$ になっている。なお一般に、ξ_0 の値 が小さくなると木を切る頻度が高くなる)。しかし、$E(J,I) < E(I,I)(=$ 約0.6) なので、J は I の社会に侵入できない。従って戦略 I の社会は安定である。

11.3.3 裏切り戦略の侵入に対する強さ

次に、裏切り戦略の侵入に対する強さがあるかどうかについて調べてみる。ここでは、対戦相手($=J$)として、完全な裏切りタイプの戦略 = 第200世代の種族ID-25A の意志決定関数をいくらか変異させたプレーヤーを考えてみる。両者の利得 E(I, J) と E(J, I) が、変異と共にどのように変わって行くかを示したのが図 11.8である。図から分かるように、相手が木を切る頻度が高い領域 ($\xi_0 < 10$) でもある程度の利得 E(I, J) を戦略 I は獲得している。一方的に搾取されてはいない。つまり、戦略 I は基本的に協力的な時代の戦略ではあるが、相手の木を切る頻度にあわせて自分の木を切る頻度を連続的に変えることができる。その意味で、裏切り時代の記憶が戦略 I の意志決定関数の中に残っている (裏切りにある程度対応できる) と言うことができる。図 11.8 から分かることを簡単にまとめると次のようになる。

1. ξ_0 が小さい領域に J が変異すると、J は個々の対戦では I に勝つことがある ($E(I,J) < E(J,I)$。図 11.8で $\xi_0 < 17$ の領域)。しかし、$E(J,I) < E(I,I)(=$ 約0.6) なので、J は I の社会に侵入できない。

2. ξ_0 が大きい領域に J が変異すると、I は個々の対戦でも I に勝つことができない ($E(I,J) > E(J,I)$)。いずれにせよ、$E(J,I) < E(I,I)(=$ 約0.6) なので、J は I の社会に侵入できない。

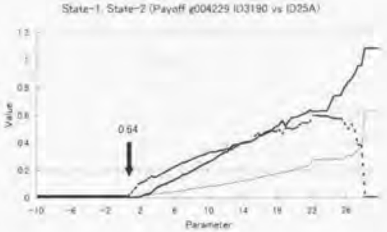


Figure 11.8: 戦略 I (時代 Y の種族 ID-3190) と戦略 J が対戦した時に、両者の平均利得 $E(I,J)$ と $E(J,I)$ が戦略 J の変異と共に変わって行く様子 (II) — 今回は、第200世代の木こり (種族 ID-25A) をベースにして戦略 J を構成した。第200世代は木の切り合いが支配的になっている世代であり、この戦略も裏切り型である。その意志決定関数の「待機行動への動機(mtv_0)」の定数項 ($=\xi_0$) の値を -10 から +30 の範囲で変異させた場合に、I と J の利得がどのように変遷するかが示されている。実線部が戦略 I の平均利得 $E(I,J)$、破線部が戦略 J の平均利得 $E(J,I)$ である。また、細い実線で示されているのは、木の高さの平均値である。なお、種族ID-25A の実際の ξ_0 の値は 約0.64 である (矢印で示されている部分)。

以上より、戦略 I (時代 Y の戦略) による社会は、時代 X 型および時代 Y 型へ対応できるだけでなく、完全な裏切り型の侵入も防御できる。つまり、過去に存在した、比較的多くのゲームのダイナミクスに戦略 I は対応できると言える。では、戦略 I の意志決定関数のどのような構造によってこのようなことが可能になっているのだろうか? 次に、I (種族ID-3190) の意志決定関数の構造を見てみよう (図 11.9)。

まず、図 11.9の"Environment 軸" に注目してみよう。この軸は木の高さ (x) への参照を表している。図から分かるのは、"木" が大きくなると「木を切ることへの動機 (行動1への動機 $= mtv_1$)」が大きくなる、ということである。このこと自体は妥当な意思決定だと言えよう。

次に"Const 軸" に注目してみる。この軸は定数項を表している。木の高さとプレーヤーの状態 (x,y) がゼロに近くなると、他の項の効果が薄れてくるので相対的にこの項が効いてくるようになる。例えば、木の切り合いの社会になると木の高さ (x) が低くなる。木が低いと利得も低いのでプレーヤーの状態 (y) も小さくなる。"Const 軸" が示しているのは、そのときに、「待つことへの動機(mtv_0)」が相対的に大きくなる、ということである。木の切り過ぎをある程度防ぐ構造がここに表れている。

次に"Me 軸"に注目してみる。この軸は自分の状態 (y_2) への参照を表している。図から分かるのは、自分の状態が大きくなると、「待つことへの動機(mtv_0)」が相対的に大きくなる、ということである。ある程度自分が満たされたら木を切るのを止める、という構造がここに表れている。

最後に"Player 1 軸"を見てみよう。この軸は相手の状態 (y_1) への参照を表している。図から分かるのは、相手の状態が大きくなると、「木を切ることへの動機(mtv_1)」が相対的に大きくなる、ということである。つまり、相手の一人勝ちを許容しない構造がここにある。

以上のような、戦略 I の意志決定関数の構造が、様々なレベルの協調型、裏切り型の相手への対応を可能にしている。

ここまで示したように、時代 Y 初期の木こり (種族ID-3190) は過去の戦略に対する強さを持

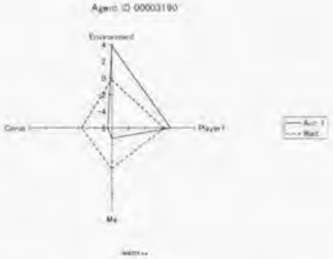


Figure 11.9: 時代 Y に現れた木こり (種族ID-3190) の意志決定関数(再掲): 実線部は木を切ることへの動機 $= mtv_1$ の係数。点線部は待つことへの動機 $= mtv_0$ の係数。

ち、このことが協調的な時代 Y の安定性をもたらしている。しかし同じ時代 Y でも、協調性を確立したばかりの初期と、協調的な社会が長く続いた後の終期では、かなり裏切りに対する強さが変わってくる。

11.3.4 協調的な社会が長く続いた後: 裏切りに対する記憶の忘却

今度は、時代 Y の末期 (第4319世代。図 11.5) の種族 (ID-32A3) を戦略 I として、他の戦略の侵入に対する強さを見てみる。対戦相手 J としては、前記の解析と同じように、完全な裏切りタイプの戦略(第200世代の種族ID-25A)をいくらか変異させたプレーヤーを考えてみる。両者の利得 E(I, J) と E(J, I) が、変異と共にどのように変わって行くかを示したのが図 11.10である。この図で矢印で示されている二つの部分に注目してみよう。ここでは $E(J, I) > E(I, I)(=$ 約$0.6)$ となっている。つまり、この領域に相当する戦略 J の進入を戦略 I の社会は許してしまう。もし、種族ID-25A と同様な意志決定関数を持ち、ξ_0 の値だけが矢印で示されている値であるような木こりが時代 Y の末期に表れたとしたら、社会は一気に「木の切り合いの世界」に移行することになる。

戦略 I の意志決定関数は図 11.11に示されている。時代 Y の「初期」の木こりの意志決定関数(図 11.9) との明白な違いは他者への参照("Player 1 軸") にある。時代 Y の初期では、他者の一人勝ちを防ぐ構造が "Player 1 軸" に表れていた。しかし、時代 Y の末期になるとその構造がなくなっている。なぜ、進化と共にこのようなことが起こるのだろうか? それは次のような進化の方向性による。

1. 社会が変化する時期、例えば時代 X から 時代 Y への移行期の前後などでは、複数の行動形式に対応できることが重要になる。

2. 協調的な社会が安定に続いてしばらくすると、例えば時代 Y の中・後期になると、周りの戦略はほとんど時代 Y 型の協力行動を行なうようになる。「寛大さ」が大きければ大きいほど確実に協力状態を相手と築き上げることができるので総合利得が高くなる。その結果、同じ時代 Y でも、寛大さが大きくなる方へと進化が次第に向かうことになる (ただし、極端に寛大すぎる戦略は木を切れないので淘汰される)。

Figure 11.10: 戦略 I (時代 Y 終期の種族 ID-32A3) と戦略 J が対戦した時に、両者の平均利得 $E(I,J)$ と $E(J,I)$ が戦略 J の変異と共に変わって行く様子: 第200世代の木こり (種族ID-25A) をベースにして戦略 J を構成した。第200世代は木の切り合いが支配的になっている世代であり、この戦略も裏切り型である。その意志決定関数の「待機行動への動機(mtv_0)」の定数項 ($= \xi_0$) の値を -10 から +30 の範囲で変異させた場合に、I と J の利得がどのように変遷するかが示されている。実線部が戦略 I の平均利得 $E(I,J)$、破線部が戦略 J の平均利得 $E(J,I)$ である。また、細い実線で示されているのは、木の高さの平均値である。

他のプレーヤーがすべて協力的であれば、プレーヤーにとって一番大切なのは「協力状態」を確実に構築することであり、その結果、協力を確実に行なうための構造が進化する。しかし、それと引き換えに、裏切り行動に対する記憶が次第に失われることがある。このように、同じ協力状態でも「戦略の寛大さ」が次第に大きくなる可能性があったり、裏切りのダイナミクスへの対応ができなくなって行く可能性があることの背景の一つには、この動的ゲームにおける「協力」「裏切り」の意味や、ゲームの構造自体のアナログ性が係わっていると言える。

実際のシミュレーションでは、時代 Y の次には、もう一段階協力的な社会へと移行する様子がみられた。時代 Y では時代 Y に特有の行動を行なう戦略が多いので、上記のような裏切り戦略が変異によっていきなり表れる可能性は非常に低い。しかし、確率的にゼロではない。ある程度の期間続いた協調的な社会が崩壊して木の切り合いの社会へと移行することがあるのは(図 11.12)、以上のような進化の方向性によるものであろう。

11.4 ゲーム環境を操作することによって間接的に相手に影響を与える戦略 (SPGダイアグラム自体の変化)

既に一人ゲームの章(第 8 章 (p. 44))で、力学系の理論で用いられる分岐図とSPGダイアグラムの類似性について触れた。それとともに両者の異なる点として、SPGダイアグラムの場合コントロールパラメーターを選択するのは意思決定主体自身である、ということについても言及した。二人以上のゲームを考えると、もう一つの大きな違いがある。それはSPGダイアグラムは他のプレーヤーのパラメーターの変化によって全く異なるものになる可能性がある、ということである(もちろん、パラメーターが変化してもほとんどダイアグラムが変わらない時もある。相手がSSO内で変位している時などがそうである)。当然のことながら、自分の選んだパラメータが相手にとってのSPGダイアグラムを著しく異なったものへと変化させることもある。異なる、というのは単に「七周期の領域が広くなり、三周期のSSOが狭くなり、...」といったレベルの変化から、

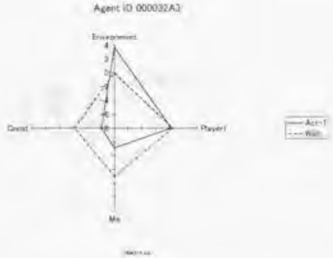


Figure 11.11: 時代 Y 末期に現れた木こり (種族ID-32A3) の意志決定関数: 実線部は木を切ることへの動機 $= mtv_1$ の係数。点線部は待つことへの動機 $= mtv_0$ の係数。

「七周期の領域と五周期の領域の間にあった、三周期の領域が消えてしまう」といったトポロジーのレベルの違いまで含まれる。

例えば図 11.13 を見てみよう。図 11.13-(a) は時代 A の或る二人の木こりの意志決定関数を基に作成したSPG ダイアグラムである(横軸はθ_{11})。図で$\theta_{11} = -1$ の付近に 5 枚の平板が存在するが、ここに、時代 A の 5 周期のダイナミクス(図 10.5 (p. 62)) が含まれている。一方、図 11.13-(b) は時代 C のSPG ダイアグラム (図 11.4の再掲)であるが、ここには図 11.13-(a) の5 枚の平板に対応するものが存在しない。(b) に見られるアトラクターの集合を横軸方向に平行移動または引き延ばしを行っても、(a) の5 枚の平板と同じ値を持つ 5 周期アトラクターは現れない。(a) と (b) は全体的な傾向として似ているように見える部分もあるが、それぞれが持つアトラクターはかなり異なる。この例から言えることは、各時代の協調的社会を支えるSSO がその時代に特有のものである、という可能性である。

ここまで掲示してきたSPG ダイアグラムは、二人の意志決定関数の係数パラメータ $2(m+1)(n+m+1)$ 個から一つを選択し、その他のパラメーター $2(m+1)(n+m+1)-1$ 個をすべて固定した状態で描かれている。そのSPG ダイアグラムはその他のパラメーター、特に他のプレーヤーのパラメーターが違うものになれば全く異なるものになるかもしれない。SPG ダイアグラムの持つこういった性質はSSO の分布に直接影響を与える。つまり相手の戦略によっては安定な社会が実現できなくなる可能性がある。二人以上の「ゲーム」では、あるプレーヤーの戦略の変動は全てのプレーヤーのSPG ダイアグラムに影響を与える。あくまでSSO は、現時点の相手との間で構成されるSPG ダイアグラムにおけるSSO である。相手が変われば、そして時代が変われば、SSO はSSO でなくなる(安定でなくなる)かもしれないし、そもそも対応するアトラクターが存在すらしなくなる可能性もある。

時代 A で重要な役割を果たした五枚の平板(SSO)は、時代 B の初期 (第1300 世代付近) になるとSPG ダイアグラムの中に存在しなくなる。プレーヤーはこの時、戦略のパラメーターをどのように変異しても、時代 A 型のゲームダイナミクスを構成することは出来ない。別の言い方をすると、時代 A 型のゲーム環境を構成して、そこから利得を稼ぐことに過剰適応したプレーヤー、つまり時代 A 型のゲームダイナミクスしか構成できないプレーヤーは、この時点で淘汰されてしまう。逆の立場から言えば、ゲーム環境自体を変動させることによって、間接的に他のプレーヤーに影響を与える戦略が、動的ゲームでは大きな役割を果たし得る。

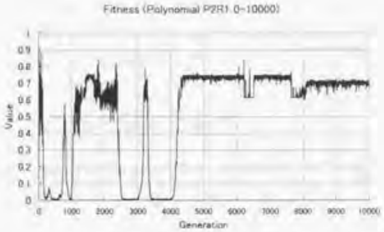
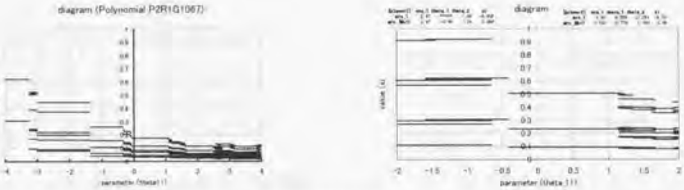


Figure 11.12: 適応度グラフ 0 世代から 10000 世代まで (再掲): 第 2400 世代、第 3300 世代付近などで協力的社会の崩壊が見られる。



(a) (b)

Figure 11.13: (a) は時代 A のある二人の木こりの意志決定関数を基に作成した SPG ダイアグラムである。横軸は θ_{11} (第 1067 世代) である。(b) は時代 C のプレーヤーをサンプルとして作成した θ_{11} に関する SPG ダイアグラム (再掲)。

SPG ダイアグラムの形態が戦略の変異に従って変化する様子は、いわゆる「適応度の地形」という考え方の中で説明される現象と一見似ているように思われる。適応度の地形の考え方には次の特徴がある。各々の個体は固有の適応度の地形を持ち、適応度の地形で最も高い (低い) 地点を目指す。また、ある個体の戦略の変異 (進化) は、他の個体の適応度の地形を変化させる。

しかし、SPG ダイアグラムと適応度の地形は以下の点で根本的に異なる。

- SPG ダイアグラムで表現されているのはゲームのダイナミクスのアトラクターである (適応度ではない)。他者との係わりの中で、自分が戦略を変動させたときに、どのようにゲームが移り変わって行くかを表現したものである。
- 従って、値が大きい地点を目指してパラメーターを変化することが必ずしも重要なわけではない。
- 協調状態の形成および維持、裏切り行動の誘発などのゲーム的相互作用に関して言うと、その地点の値の絶対的な大きさよりも、むしろその地点の「形態」自体の方が重要になる。

一人ゲーム(最適化問題)では適応度地形の最大点を求めることが重要である。一般にゲーム世界ではあくまで適応度が生き残りの条件なので、二人以上のゲームでも適応度地形は重要であることには変わりない。しかし、複数の意思決定主体によるゲーム(意思決定主体間の関係性)では、SPGダイアグラムのレベルで分かることの方が遥かに重要になってくる。特に「協力の成立」の有無が適応度に影響を与える時にはその傾向が著しい。

11.5 滑り台効果: 利己的行動への誘因

すでに見たように、初期の進化は木の切り合いの状態へ向かい、利己的な行動が多く見られるようになる(第130世代くらいから)。共有地の悲劇型のゲームとしては或る意味納得しやすい結果であるが、ここではどのようなことが行われているのだろうか? どのような機構によって、社会は木の切り合いの状態へと向かって行くのだろうか?

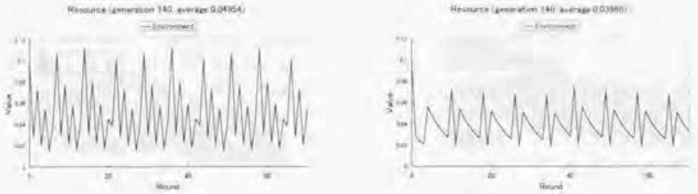
(B) Base pattern　　(T) Treachery pattern

Figure 11.14: 初期の時代(第140世代)の行動図: (B)はこの世代で基本となっている行動パターンを示している。(T)では、片方のプレーヤー(種族ID 000001A5)が利己的行動に走って、木を切る頻度を大きくしている。各図のタイトルには二人の木こりの平均利得(木こりの状態)が記されている。

ここで図11.14を見てみよう。この図は、利己的な行動が次第に支配的になりつつある時代(第140世代)に、ある二つの丘で見られる木こりたちの行動である。図11.14-(B)はこの世代の最大公約数的な行動パターンである(二つの丘で見られるダイナミクスが完全に同じになることはこの世代ではほとんどない)。大体一回置きくらいのタイミングで、二人同時に木を切る。わずかに不公平ではあるが、二人ともある程度の平均利得(タイトルの "state" の値を参照.)を獲得してる。図11.14-(T)は片方の木こりが利己的に行動した例である。この木こりには、木の成長を待つ行動がほとんど見られない。二人木こりの平均利得の間にはかなりの開きがある。

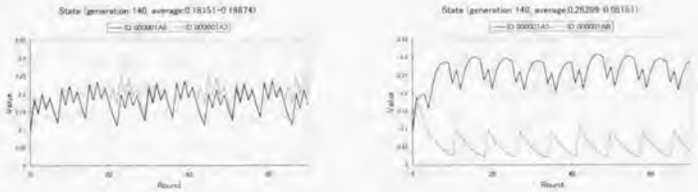
次に図11.15を見てみる。この図には、図11.14に対応する木の高さのダイナミクス(資源図)が示されている。この図から分かるように、利己的な行動が見られる(T)の方が平均的な木の高さは低くなっている。しかし、状態図(図11.16)に示されているように、利己的なプレーヤーの状態値は(図11.16-(T))、ベースパターン(図11.16-(B))に類する行動を行った場合よりも、かえって高い状態値を維持できる。まとめると、利己的に行動すると全員の利得の合計は下がるが、利己的なプレーヤー自体は高い利得を獲得できる。言うまでもなくこれは、「ジレンマゲーム」と一般に呼ばれているゲームの性質そのものである。

さてここで、このシミュレーションの初期に木を切り合う方向へ進化が進んで行く理由につい



(B) Base pattern　　　　(T) Treachery pattern

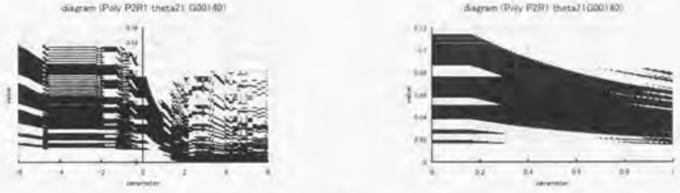
Figure 11.15: 初期の時代(第140世代)の資源図: 全てのラウンドに関する木の高さの平均値がタイトルに示されている。(T)の方が 0.1 くらい木の高さの平均値が低い。



(B) Base pattern　　　　(T) Treachery pattern

Figure 11.16: 初期の時代(第140世代)の状態図: (B)の二人の木こりの状態と比べて、(T)の片方の木こりは高い状態値を維持している。(T)のもう一人の木こりはかなり低い状態値になる。

て考えてみよう。図 11.17はこの世代の木こりをサンプルとして構成したSPGダイアグラムである。この図に見られるのは、パラメーターの変異に対してアトラクターが斜面状に連なっている領域(b)と、かなり複雑な形態をしている領域である。前者について考えてみよう。このSPGダイアグラムでサンプルになっている二人の木こりのうち、パラメーターを変動した方の木こりは、ちょうど図 11.17-(b)で見られる斜面上にパラメーターの値を持つ($\theta_{21} = 0.3$)。図のように斜面状になっているところでは、ある木こりが相手を出し抜いて木を切る頻度を高めると、平均的な木の高さは単純に低くなる。しかし一方で自分の適応度は高くなる。従って木こりたちは次第に木を切る頻度が少し大きくなるような方向へ進化する。これにより、少し後の世代になると、木の高さの平均が少し低くなる地点にゲームが設定される(進化が進むに従って、系のダイナミクスがSPGダイアグラムの斜面を下って行く)。以上のプロセスがSPGダイアグラムに斜面が続く限り続いて行く。その結果、木こりたちによって設定されるゲームは次第に非生産的なものへと変動して行く。このように、動的ゲームの構造によってプレーヤーに利己的行動への誘因が働きつづけて、ゲームが非生産的な方向へと引きずり込まれ続ける効果を「滑り台効果」と呼ぶことにする。木こりが住む丘が進化と共に次第に荒廃して行くこの様子はシミュレーションの初期に現



(a)　　　　　　　　　　　　　　　　(b)

Figure 11.17: 初期の時代(第140世代)の木こりをサンプルとしたSPGダイアグラム: 横軸はθ_{21}を示す(行動1への動機で自分を参照する部分の係数)。この木こりの場合、実際には$\theta_{21} = 0.3$位である。(b)は拡大図。

れた現象であるが、共有地の悲劇において「時の流れ(進化、学習)」に伴い共有地の資源が次第に枯渇して行く様子をよく表している。

一度木の切り合い状態に入ると、かなり長い世代の間低い適応度の状態から社会が脱却できなくなる。その一つの理由は滑り台効果にあるが、もう一つの理由は、SPGダイアグラムのところどころに見られる複雑な形態にある。図 11.17-(a) は、パラメータの変域をかなり広い範囲に設定した場合のSPGダイアグラムであるが、これでもSSOに成り得る領域がほとんど見られない。木こりのジレンマゲーム自体はかなり単純な構成のゲームである。しかし、他のプレーヤーのパラメーターが係わるゲーム(複数人ゲーム)になると、SPGダイアグラムの形態がかなり複雑な形態を持つことがある。特に、適応度が低くなっている時に、この傾向は顕著になる。木こりたちの戦略がある程度大きな変異して、木こりたちのSPGダイアグラムの中にSSOが構成されるようになるまではこの状態が続くことになる。

11.6 SSOが少ないゲーム: 折れ線型ゲーム環境

ここまで、「共有地の悲劇」の動的ゲームバージョン—「木こりのジレンマゲーム」においてSSOが協調的な社会の構築、発展に大きな役割を果たすことなどを中心に議論をしてきた。また、プレーヤーのSPGダイアグラムにSSOに相当するものが現れていない時代には「悲劇」が起こる、ということについても見てきた。こういった視点は、ゲームのダイナミクスを考慮したモデリング、解析と切り離せない。

上記で、木こりのジレンマゲームは共有地の悲劇の動的ゲームバージョンである、と述べた。つまり、ダイナミクスを論理的なレベルで考え直すことによって静的ゲームに「射影」すると、木こりのジレンマゲーム(動的ゲーム)は共有地の悲劇として表現できる、ということである。逆に言うと、共有地の悲劇に射影できる動的ゲームは数多くあるはずである。では、同じ「共有地の悲劇」型の動的ゲームでも、そもそもSSOがほとんどない場合、そこで見られる現象は、やはり、「悲劇」が中心になるのだろうか?

木こりのジレンマゲームのモデルの説明の節で、木の成長の時間発展について具体的な式を示した(p. 36)。まずこのことについて簡単に振り返ってみよう。木iの高さx_iは木の成長を示す写像u_Mに従ってx_i'になる。

$$x_i(t)' = u_M(x_i(t))$$

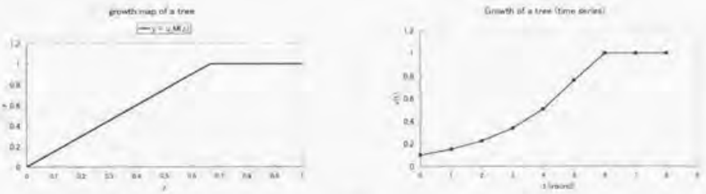
木こりによって切られなければ木の高さは次のラウンドでもそのままの高さになる。つまり、$x_i(t+1) = x_i(t)'$ となる。シミュレーションで用いられた u_M は、次のような三次の多項式関数である。区別のため、このタイプの多項式関数で構成される木こりのジレンマゲームのことを、「山腹型」と呼ぶことにする (図 7.1 (p. 36))。

$$u_M(z) = 0.7z^3 + 2.4z^2 + 2.7z \tag{11.3}$$

さてここで、$u_M(z)$ を違う関数で実装することを考える。具体的には次のような関数である。

$$u_M(z) = \min(1.5z, 1.0) \tag{11.4}$$

この場合、木の高さは 1.5 倍の成長率で大きくなるが、高さが 1.0 以上にはならない。この様子



(a) (b)

Figure 11.18: 折れ線型の木の成長: (a) は木の成長の法則を示す写像である。(b) は木の成長の時系列。

は次の図 11.18に示されている。このタイプの木こりのジレンマゲームのことを「折れ線型」と呼ぶことにする。山腹型の場合でも折れ線型の場合でも、木こりたちは木が成長するのを待ったほうが全体としての利得が大きい。また一方で、早めに木を切ると木こりは利得を独占できる。つまり両方のタイプのゲームとも、社会的ジレンマの性質を持ち合わせていることは間違いない。しかし、ダイナミクスのレベルで根本的に異なる性質が両者の間には存在する。

図 11.19を見てみよう。この図は一人木こりのジレンマゲームのSPGダイアグラムである。一人ゲームの節でも既に見たように、山腹型のゲームの場合(図 11.19-(m))、アトラクターは至る所で周期軌道である。一方、折れ線型のゲームの場合(図 11.19-(l))、decision point $\leq 2/3$ となる(木の高さが低い)領域ではアトラクターが準周期軌道になっている。つまり、折れ線型のゲームでは decision point $\geq 2/3$ になるまではSSOが存在しないのはもちろん、周期軌道がそもそも存在しない。

折れ線型の二人木こりのジレンマゲーム(木が一本)のシミュレーションを実際に行ったところ、適応度グラフは図 11.20のようになった。シミュレーションの始めから長い世代の間、木の切り合いの状態が支配的である。

山腹型のゲームの場合は、他のプレーヤーがいなければ(一人ゲーム)、SPGダイアグラムのいたる所を周期軌道が占めていた(図 11.19-(m))。そして、他のプレーヤーがゲームに加わった場合(二人ゲーム)は木が低いとSSOが消えてしまう。そして、ゲームのダイナミクスが木の切り合い状態にトラップされる。

しかし折れ線型のゲームの場合は更に状況が厳しい。一人ゲームの時でさえ、かなり広い領域で周期軌道自体が存在しない(言うまでもなくSSOは存在しない)。つまり、少なくとも木の高さ

(l) (m)

Figure 11.19: 一人木こりのジレンマゲームのSPGダイアグラム: (l) は折れ線型の時の、(m) は山腹型(再掲)の時のSPGダイアグラム。横軸はdecision pointで、各 decision point に対する x の時系列の集合が縦軸方向にプロットされている。(l) で decision point $\leq 2/3$ となる領域ではアトラクターが準周期軌道になる。

が低い領域でゲームが構成されている間は、協力の足がかりとすべきSSOを木こりは見ることができない。そして、既に述べた滑り台効果によって、木こりたちはますます切り合いの方向へと進化し、ゲーム世界はますます非生産的な方向へと向かう。

社会がこの状態を抜け出せるとしたら、SSOが視野に入るくらいの変異が木こりたちの戦略に発生したときである。つまり、図 11.19-(l) の「decision point $\geq 2/3$」の領域に相当する部分が、木こりたちのSPGダイアグラムの中に見えなければならない。滑り台効果で decision point が下がっている木こりたちにとって、これはかなり困難な変異である。しかし、本稿の実験では正規分布乱数によって突然変異を実装しているので(p. 41)、長い時間が経てばそのような大きな変異が起こる可能性も確率的に言って無いとは言えない。実際、シミュレーションではそれが第7500世代くらいになってからようやく起こり、その後協調的な社会が安定化する。図 11.21はその時の行動図と資源図を示している。この図に見られるパターンは、第20000世代になっても崩れていない。

このシミュレーションの結果と山腹型の木こりのジレンマの結果から分かることを簡単にまとめると次のようになる。

- SSOが少ない木こりのジレンマゲーム(動的ゲームモデル)では、共有地の悲劇(静的ゲームモデル)に関する分析がほぼそのまま該当する。すなわち、資源の枯渇が起こりやすい。この状態を抜け出すためにはSSOが見える領域へのジャンプが必要である。
- SSOが多い木こりのジレンマゲームでは比較的協力的社会が形成されやすい。

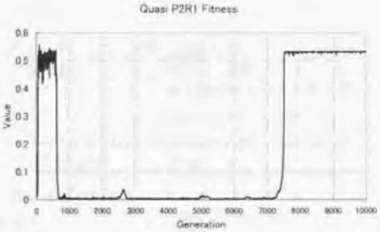
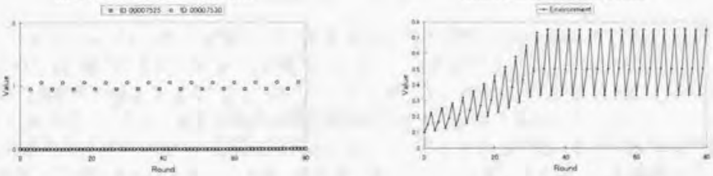


Figure 11.20: 二人木こりのジレンマゲーム (折れ線型) の適応度グラフ: 木の切り合い状態が長い世代の間続く。7500 世代辺りから適応度が一気に上昇し、そのまま完全に安定化する。



(a) (b)

Figure 11.21: 二人木こりのジレンマゲーム (折れ線型) — 第 10000 世代の (a) 行動図と (b) 資源図

Chapter 12

GP 空間の自由度の増加

前章では二人の木こりと一つの資源によって構成される木こりのジレンマゲームについて考察を行った。それと共に「戦略的安定軌道」というゲームのダイナミクスに関する概念を提示し、そしてそれが進化に与える影響についてを中心に考察した。2プレーヤー1資源で構成される木こりのジレンマゲームは、ゲームと呼べる木こりのジレンマとしては一番簡単な構造を持つ。しかしそこで見られる進化的現象は (繰り返し囚人のジレンマなどに関する数々の計算機実験の結果と比べても) 必ずしも単純なものではなかった。

本節では、さらに木の数・人数増やした場合についての考察を行う。具体的には以下の二つ設定の下で計算機実験を行った。

- 2 プレーヤー、2 資源 (木の本数の増加)
- 3 プレーヤー、1 資源 (プレーヤーの数の増加)

なお、n 人のプレーヤーと m 個の分割不可能な資源によって行われる木こりのジレンマゲームのことを簡単のために「PnRm ゲーム」という形式で書くことにする。例えば上記の二種類のゲームは、それぞれ「P2R2 ゲーム」「P3R1 ゲーム」と書く。当然のことながら、ゲームの人数、資源の数が増加すると GP 空間の自由度が増える。GP 空間の自由度増加はどのような効果を生み出すのだろうか?以下、シミュレーションの概要について簡単に示す。

12.1 二人ゲーム: 丘に木が二本ある場合 (P2R1 ゲーム)

木が二本になるとプレーヤーが選択しうる行動も増えて 3 種類になる。つまり「待つ (行動 0)」「木 1 を切る (行動 1)」「木 2 を切る (行動 2)」である。適応度グラフは図 12.1に示されている。進化の流れ全般から言えることだが、「木こり二人、木一本」の木こりのジレンマゲーム (P2R1 ゲーム) に比べて、このゲームで見られる進化的現象はかなり単純である。

第1000 世代を過ぎたあたりから図 12.2のようなダイナミクスが支配的になり、第3000 世代を過ぎた辺りで完全に安定化する。この後、進化は実質上完全に止まってしまう。(14000 世代でもう一段階だけ木こりたちが進化するが、始めの方のラウンドにおいて待機行動が一つ増えるだけであり、実質ほとんど変わらない。)

図 12.2の行動図から分かることは、二人の木こりの間で空間的役割分業が行われているということである。つまり、片方のプレーヤーは木1を専門に切り、もう片方のプレーヤーは木2を専門に切る。それぞれの木について言うと、そのダイナミクスは一人木こりジレンマゲームの最終状態と同じになっている (図 8.5 (p. 50))。また、この状態は一人ゲームの SPG ダイアグラムの二周期 SSO に対応している (図 9.3 (p. 56)。decision point = 0.8 の付近の SSO)。このような結果

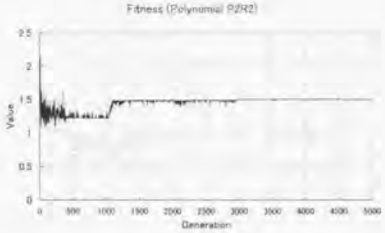


Figure 12.1: 二人の木こりと二本の木による木こりのジレンマゲーム (P2R2ゲーム): 適応度図

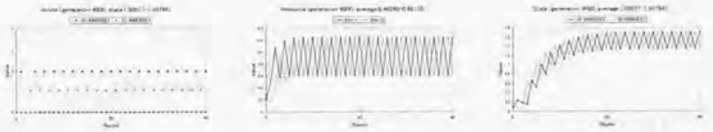


Figure 12.2: P2R2ゲーム: 第4000世代のある丘の様子。左から行動図、資源図、及び状態図

が見られる一つの理由は、木こりと木が一対一に対応することが可能であるという、P2R2ゲームの性質にある。

木こりたちの空間的役割分業に関して上記で触れた。一方、分業している状態を破って相手の木を切ろうとする種族は適応度が低くなってしまう。なぜなら、相手が木1 を切っている間は概して木1の高さは低いので、木2を切る方が簡単に利得を獲得できるからである。自分の木も切って、さらに相手の木も切る、という行動もありうるが、この場合、相手がその利己的行動を許してくれなければ木の切り合い状態に陥り、丘が荒廃してしまう。その結果、全ての丘に関する総合利得を考えると、SSO上の行動を実行している他の種族に比べて劣ってしまうことになる。)

12.2　三人ゲーム: 丘に木が一本ある場合 (P3R1ゲーム)

ここでは、三人の木こりが一本の木を巡って行うゲームについて考えてみよう。複数のプレーヤーが一本の木を切る、という設定自体は先のP2R1ゲームと同じである。ここでは、ゲームの人数が単純に増えた場合に人数の増加が結果にどのような効果を与えるのか、について見てみたい。なお、このゲームで各木こりは、自分以外の二人のプレーヤーと戦うことになる。その際、他の二人のプレーヤーを位置の情報によって木こりは区別する。つまり、左にいるプレーヤー、右にいるプレーヤーという形式で他の二人を区別する(一番目のプレーヤー、二番目のプレーヤーと言っても良い。戦略の中では "player 1"、"player 2" と呼んで区別する。ただし、「右のプレーヤー(player 2)から見ると、自分は左のプレーヤー(player 1)になる」という整合性は取られている。また、系の外側にいるわれわれの立場で丘のプレーヤーを区別するために言う"player 1"、"player

y^n のことではないことに注意。モデルでは、前者の状態は z_1, z_2、後者は y_1, y_2 と区別することがある。第 7.4 節 (p. 39) 参照)。

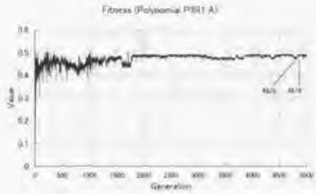
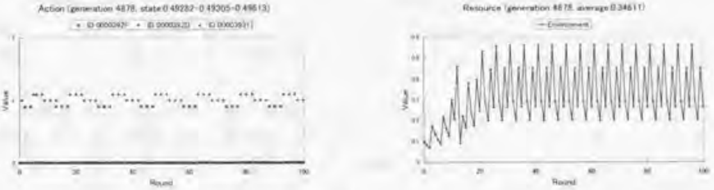


Figure 12.3: P3R1 ゲーム: 適応度グラフ



(a) (b)

Figure 12.4: P3R1 ゲームで見られるベースダイナミクス: 第 4878 世代における行動図(a)、資源図(b)

適応度グラフ (図 12.3) を見ると、第 2000 世代くらいには 0.5 付近で収束している。この時、ほぼ全ての丘で図 12.4のようなダイナミクスが見られるようになり、進化的にもこのダイナミクスではほ安定化する。

木こりの側から見ると、このダイナミクスは基本的に十五周期のダイナミクスである (図 12.4-(a))。すなわち、「切る、待つ、切る、待つ、切る」という行動を三人で交代に行う。また、自分の順番以外の 10 ラウンドの間は大人しく待っている。この行動をほとんど全ての木こりが行なう。(我々自身が実際にこの丘に住んだ時のことを考え合わせても、かなり我慢強い行動だと言えよう。) このダイナミクスを可能にしているのは図 12.5に見られる意志決定関数の構造である。単純に言って、この木こり種族は「木が高ければ切る」、「自分の状態が高ければ切らない」、「左のプレーヤー (player 1) の状態が高いときは待たない」。そして「右のプレーヤー (player 2) の状態が高いときは切らないで待つ」といった傾向の意思決定を行なう。いずれにせよ、こういった協力形態を実現するためには「状態変数」への参照を調節することが必要不可欠である。特に「待つ」行動に関する部分で状態変数への参照が重要になる。

「木」の側から見ると このダイナミクスは五周期のダイナミクスである (図 12.4-(b))。 ここで一人ゲームの SPG ダイアグラムをもう一度見てみよう (図 9.3 (p. 56))。decision point = 0.58 の

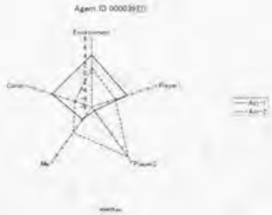
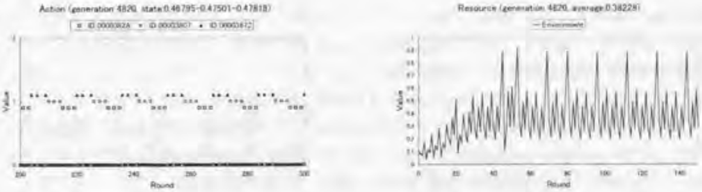


Figure 12.5: P3R1ゲームにおける意思決定関数: 図はある木こり種族(第4878世代)の意思決定関数。

付近に五周期のSSOが僅かに広がっている。このSSOが、図12.4-(b)の五周期のダイナミクスに対応する部分である。次に少し右側を見てみると、かなり広い領域に二周期のSSOが広がっている(decision point の値がもう少し大きい領域)。この二周期のSSOは一人木こりジレンマゲームにおける最適解の集合でもあった。しかし同じSPGダイアグラム上で見る限り、ゲームに参加する人数が三人になって競争が厳しくなっても、進化の到達地点は一人ゲームの到達地点からそれほど離れていない。到達地点は二周期SSOのすぐ左隣の領域である。木の高さの平均もそれほど変わっていない。

なお、この三人ゲームのダイナミクスを一人ゲームのSPGダイアグラムの中に見ることができた理由は、この三人がほぼ同じ意思決定方式に従っていて、同じパターンの行動しているからである。「木」の側から見ると、一人のプレーヤーが同じ行動を繰り返しているのと変わらない。逆に言うと、三人ゲームのアトラクターの中には、一人ゲームのSPGダイアグラム中で見ることができないものも数多く存在する。例えば、図12.6にみられるダイナミクスなどはその一例である。これは、上記の五周期ダイナミクス(木こりから見ると十五周期)の亜種とも言える。この図では、木こりから見ても木の側から見てもダイナミクスは16周期であるが、このアトラクターは一人ゲームのSPGダイアグラムには存在しない。



(a) (b)

Figure 12.6: ベースパターンの亜種: 第4820世代における行動図(a)と資源図(b)。種族ID-3872は一ラウンド余分に木の成長を待つことで、他の木こりより多少高い利得を獲得する。

また、図12.4で見られる十五周期のダイナミクスは基本的にこのP3R1ゲームの進化の収束点

であるが、図 12.6のように十五周期の亜種のダイナミクスも時折見られて、最高適応度が多少揺らぐことがある。適応度グラフ(図 12.3 (p. 90))で言うと、"4820"というラベルが指している部分がこれに相当する。

12.3 動的ゲームにおける自由度の増加

P2R1ゲームの結果を受けて、プレーヤーの数の増加(P3R1)や資源の数の増加(P2R2)による影響を見るために、本節では二つのシミュレーションの結果を紹介した。結論から言えば、ここで見られた進化的現象は、P2R1ゲームの諸現象と比べてかなり単純であった。最終的にある一つの状態に系は収束し安定化する。その収束の経過も比較的単調であった。

GP空間の自由度が増加するとSPGダイアグラム自体は複雑になる可能性は高い。少なくとも単純化する可能性は低い。例えばP3R1ゲームで、二人のプレーヤーの意志決定関数をあるパラメーター値[1]で固定すると、SPGダイアグラムがP1R1ゲームのものと同一のものになる。つまり、P3R1のSPGダイアグラムはP1R1のケースを含むことができる。しかし、実験結果から言えるのは、資源の数などが単純に多くなっても、そこで見られる進化的現象が複雑になるとは限らないということである。つまり、GP空間の自由度の増加が社会の不安定性などを生み出すとは限らない。

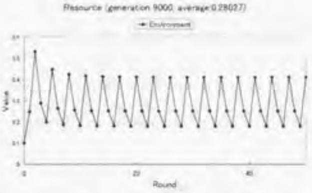
動的ゲームにおいてむしろ重要なのは、どのようなSSOが存在するかということである。一般的な感覚として、人数が増えたり行動のオプションが増加したりすれば、それだけ状況は複雑化するものと考えがちである。しかし、ゲームのダイナミクスが絡んでくると全く状況は異なってくる。例えばP2R2ゲームの場合、資源の数がプレーヤーの数と同じになることで戦略的揺らぎに対して安定度が大きいSSOが現れる。また、P3R1ゲームの場合、人数が三人に増加することによって、五周期のSSOの安定度がかえって増大する(何周期のアトラクターが安定化するか、あるいは安定化しないかは、系のダイナミクスに関する法則に依存する)。GP空間の自由度が増大すると、SPGダイアグラム中の軌道の数などは単純に増加する場合が多いが、自由度が増加することによって、より安定度が強いSSOが現れることもある。その結果として、そこで進化が止まることになる。

12.4 共有地の悲劇と木こりのジレンマにおける、ゲームの人数の増加

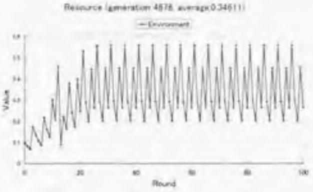
P2R1ゲームとP3R1ゲームの実験結果をもう一度見てみよう。図 12.7は木こりのジレンマゲームの資源図である。(b)はP3R1ゲームの収束先のダイナミクスで、(a)はP2R1ゲームの最終状態である。これらの図を見る限り、二人の時よりも三人の時の方がかえって木の高さの平均値は高くなっている(木の高さのラウンド平均は、P2R1では0.28くらい、P3R1では0.34くらいである)。既に触れたように、社会的ジレンマ状況では、人数の増加と共に協調状態の維持が急激に困難になることが分かっている。具体的には、Boyd & Richerson (1988) [4]で定式化されており、ここでは、集団中に協調が広がる条件として協力的個体の初期頻度pが$p > Q^{1/n}$を満たさなければならないことが示されている(nは人数、Qは$0 < Q < 1$の定数)。しかし一方で、上記の二つの木こりのジレンマゲームを比較すると、人数の増加が資源の枯渇を必ずしも招いていないことが分かる。

静的ゲームの視点から、戦略の種類、人数、そしてそれらに対応する利得構造がどのようになっているかを分析することは重要である。しかし場合によっては、動的ゲームの視点から見て初めて分かること—SSOの存在とその安定性、の方が重要になってくる場合もある。上記の、二人木こりジレンマゲームと三人木こりジレンマゲームの結果はその一例を示していると言える。

[1]例えば、常に待ち続ける戦略。他のプレーヤーも資源も参照しない(パラメーター値=0)。



(a) P2R1ゲーム (第9000世代)



(b) P3R1ゲーム (第4878世代)

Figure 12.7: 木こりのジレンマゲームが行われる丘の木の様子—人数の違いによる効果: (a)は二人ゲームの資源図。(b)は三人ゲーム資源図。(a)(b)共に再掲図。

つまり、動的ゲームにおける協力成立の条件が人数の効果を上回ることもある。安定度の高いSSOが存在すれば、また、そのようなSSOが存在するようなダイナミクスをゲームが持っていれば資源は枯渇しない。そしてSSOの安定性は行動のオプションの数、人数などでは単純に測れない。同じ社会的ジレンマ状況でも、系の持つダイナミクスに拠ってSPGダイアグラム自体の性質が著しく異なることがある。

N人社会的ジレンマと動的ゲームの関係については次の節以降でも述べる。

Chapter 13

三本の木を巡る三人の木こりのゲーム: 意思決定機構の進化と社会の発展

13.1 興味

本節では、三本の木を巡る三人の木こりのゲーム(P3R3ゲーム)についての計算機シミュレーション、そしてその考察を行なう。このゲームに関する興味は主に以下に述べる三点である。

木こりの数と木の数が等しいゲーム P2R2ゲームでは資源の数とプレーヤーの数が一緒になることで、見られる進化的現象はプレーヤーの人数が少ないP2R1ゲームよりもかえって単純になり、比較的早い世代に進化が収束してしまった。

木こりの数と木の数が同じである時は、木こりと木が一対一に対応できる、という特徴がある。実際、P2R2のケースで進化が収束したが、それにはこの特徴が影響していた。しかし、木こりと木が一対一に対応するゲームでも人数が増えると、問題はそれほど単純ではなくなってくる。例えば、誰がどの木を管理するのか、一人で何本の木を管理するのか、といった組み合わせの数が人数の増加と共に一気に増える。また、協力を行なうにしても、どういった形態で協力するのか、といった「協力のルールの形成」に関しても数多くの可能性が存在する。こういった状況の下でゲームのダイナミクスはどのように変遷して行くのだろうか?

意志決定関数の進化と資源管理方法の発展 さらにこのゲームでは、複数の木こりたちと複数の木の状態を意思決定の際にどのように捉えるのか、といった意志決定機構の持つ役割が非常に重要になる。特に、他者と複数の木をどのように関連付けるのかといったことが大きな問題になる。資源への参照以外に、自己への参照、他者への参照はどのような役割を果たすのか? 意志決定関数の進化に伴う社会的ゲームの構造の変遷。そして、資源の管理方法の進化について述べる。

社会的ジレンマとしての問題 もう一つの興味は、「人数が増えることによって協力の形成が難しくなる」という、静的ゲームモデルから導かれる事実に関する問題である。このことについてはP3R1ゲームの節でも触れた。社会的ジレンマ状況における人数の増加の影響(静的ゲームの視点から分かる)に対して、ゲームのダイナミクスの効果(静的ゲームでは記述できない)がどのように現れてくるのだろうか?

以下、実際に行なったシミュレーションの結果を見てみよう。木こりの意思決定の方法はP3R1と同様、位置による他者二人の識別を行なっている。

13.2 進化の大まかな流れ

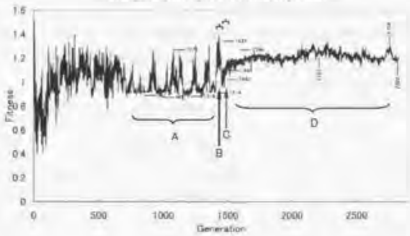


Figure 13.1: P3R3ゲームの適応度図: 初期の適応度図を示す(第3000世代まで)。

木こりが三人、木が三本になると、選択可能な行動数の増加もさる事ながら、誰がどの木を切るか、といった組み合わせのレベルにもかなりの多様性が現れる。さらに時間的な役割の組み替えなどを考えると、ダイナミクスのレベルでの潜在的多様性は非常に大きなものにならざるを得ない。このP3R3の実験では結論から言うと、あるいくつかの協調的な社会が生まれ、遷移して行く。協調的な社会において木こりたちは基本的に一つ、或いは少数の形式に従って行動する。ここで問題は、かなりの時間的空間的自由度を持った動的ゲームの中で、木こりたちとゲーム環境の相互作用の中から一定の協力のルールがどのように構成されてくるか、ということである(言うまでもなくこのゲームでは、系の外からの強制、に類するものは存在しない)。

このP3R3の計算機シミュレーションでは、どのようにプレーヤーの意思決定が変わって行くのか、どのようなルールがプレーヤーの間から構成されてくるのか、どのようにゲーム環境が変遷するか、について、特に進化の初期の段階を中心に見てゆくことにする。

進化の初期の段階の適応度図を図13.1に示す。本節では、図に示されている4つの時代に特に注目して考察を行なう。

時代A 資源だけを参照する木こりたちの時代。木こりは基本的に全員同じ行動を行なう。この時代に見られる行動パターンはかなり拘束力が強く、この時代はしばらくの間安定に続く。

時代B 資源の私有化が行われる時代。各木こりがそれぞれ一本の木を管理する。この行動パターンが広がることによって、時代Aは終わりを告げる。しかし、時代B、そして次の時代Cは余り長く続かない。しかし、それで見られる現象にはかなり際立った特徴がある。この時代から、意志決定関数の中で他者への参照が明確に行われるようになる。

時代C 二人による各資源の共有が行われる時代。一本の木が二人で管理されるようになる。

時代D 三人による三つの資源の共同管理が行われる時代。時間的・空間的役割分業が行われ、かなり微妙なレベルで他者への参照が行われる。

この後の時代に見られる現象についても簡単に触れる。

13.3 時代A: 資源だけを参照する木こりたちの時代

図 13.2は時代Aに見られる典型的なダイナミクスである。三人同時に「行動3」→「行動2」→「行動1」→「行動0」(木3を切る、木2を切る、木1を切る、待つ) という行動を繰り返す。

このダイナミクスはかなり安定で、他の全ての木こりがこの行動パターンに従っている限り、自分もこの行動パターンから外れることができない。外れると利得が少なくなってしまう。例えば他の二人の木こりが「行動3」の時に自分だけ「行動2」や「行動1」を実行すればその木を独占して利得を高くできるように、一見、思われる。しかし、実はこの時も「行動3」を行なうことが、結局、木こりにとって利得が一番高くなる。というのも、この時他の二本の木 (木1、木2) は小さくなりすぎているからである。以前のラウンドでは、三人の木こりが一つの木を切っている。三人が同時に同じ木を切るので、木の高さは $(1/3)^3 = 1/27$ 倍になり、かなり小さくなる。つまり、この時点で他の二本の木はまだ十分に育っていないのである。

三人の木こりによるこの四周期ダイナミクス拘束力が強く、他の二人がこの行動形式に従っている間は同じ行動形式に従わざるを得ない。逸脱するとしたら、自分と相応して協力行動をとる木こりが他に必要である。この四周期ダイナミクスは、この丘における繰り返しゲームの均衡に近い。この丘ローカルのゲームで「均衡」に近いので、先の二人ゲームのところで述べたSSOよりも拘束力が強い。SSOの場合、一つの丘ローカルのゲームだけを考えれば、SSOから外れた行動が有利になる可能性が常にある(木こりのジレンマ生態系全てのゲームの総計として安定である)。

なお、均衡に「近い」と述べたのは、厳密には均衡ではないからである。それは、この4周期のダイナミクスの中に「待つ」行動が入っていることからも分かる。丘ローカルの戦いだけに関して言えば、単純に言って、「待つ」べきところで待たなければ他の木こりに勝つことが出来る。

戦略の変異によってこのダイナミクスを逃れるためには、進化のレベルで他の変異種との協力が必要である。つまり、複数の種族で同時に有効な変異が起こらない限りこの状態からは逃れられない。これは確率的に言ってかなり困難であるといえる。それゆえ、時代Aから社会が何度か遷移しかかっている部分があるが(適応度図: 図 13.1の時代A でパルス状になっている何個所かの部分) すぐに引き戻される。このタイプの社会の崩壊は、「木の個人所有」がゲーム世界に広がることによって可能になる(次節)。

この時代の木こりの特徴として、意思決定の際に他の木こりの状態をほとんど参照していない、ということがある。ここで行われている意思決定は簡単に言って、一番高い木を切るという方法である。図 13.2-(d) の木に関する軸 (Env-1 軸、Env-2 軸、Env-3 軸) を見ると、例えば、Env-1 軸 (木1への参照) では「行動1への動機」の係数が +4付近にあり、行動2、行動3 と著しい差がある。Env-2 軸では「行動2 への動機」だけが +1以上の正の値である。Env-3 軸では行動3への動機の係数と他の行動への動機の係数が、正の値と負の値で別れている。一方で、他のプレーヤーへの参照 (Player-1 軸、Player-2 軸) では、三つの行動への動機は扱いに余り差がない。特にプレーヤー1に関する参照はほとんど0付近にあり、プレーヤーの状態を参照していないことが分かる。なお、ある木こりの意志決定関数の中で使われる「プレーヤー1」「プレーヤー2」という言葉は、木こりの立場から見たプレーヤー1(左の木こり)、プレーヤー2(右の木こり)である。木こりを区別するために、系の外側(モデルを構成し観察する立場)から丘での設定として言う「プレーヤー1」、「プレーヤー2」のことではない(木こりたちの立場から見れば後者の呼び名は意味がない)。また、木こりの側から見れば、常に自分は特別な立場(プレーヤー3)である (これらのは、系の外から見た木こりの状態を y_1, y_2, y_3 と呼んだのに対し、木こりの側から見た木こりたちの状態を z_1, z_2, z_3 と呼んだことと対応する。第 7.4 節 (p. 39))。

図 13.2-(d)は各プレーヤーの行動の分布である。当然のことながら、行動0 から 行動3 までの4つの行動の分布は、全プレーヤーともそれぞれ25%ずつになっている。

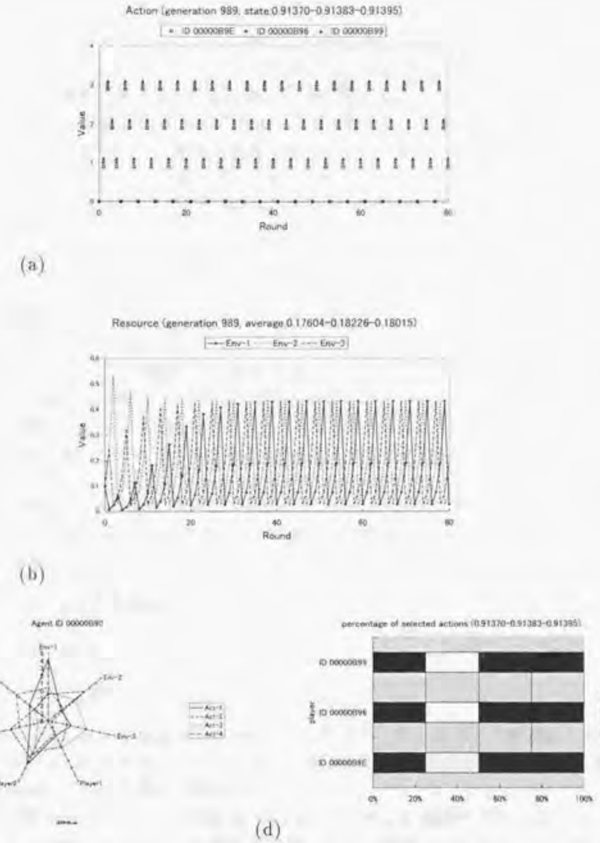


Figure 13.2: 時代A「木だけを見る木こりたち」: 時代Aに、ある丘で実際に行なわれたゲームの様子(第989世代)。全ての木こりが全ての時刻においてほぼ同じ行動をしている様子が見られる。(a)行動図。(b)資源図。(a)では、四角のマーカーで示されるのがプレーヤー1の、丸のマーカーで示されるのがプレーヤー2の、三角のマーカーで示されるのがプレーヤー3の行動である。(c)はそのゲームの全ラウンドで各プレーヤーが選択した行動について、その構成比を示す(構成比率棒グラフ)。(d)は、この世代のある木こり種族の意志決定関数である(種族ID-00000B90)。

13.4 時代B: 資源の私有化

13.4.1 空間的な役割の分業

時代Aでは、同じ丘に住む木こり全員が、どのラウンドでもほぼ同じ行動を採っていた。つまり木こり全員が、同時に同一の木を切り、そうでなければ同時に休む、といった状態が見られる。一方、次の時代Bになるとそれぞれの木こりが単独の行動を採るようになる。三人の木こりの一人一人がそれぞれ別の木を切るようになり、「資源の私有化」状態が見られるようになる。別の言葉で言うと、空間的に役割を分業するような行動が社会に広がる。(ただし、1/3くらいの丘では時代A型のダイナミクスが見られる。) 各木こりがそれぞれ固有の木を決めることによってより効率的に木を育て、生産性の高いゲーム環境を構築することができるようになる。実際この世代の最高適応度はかなり高い。時代Aより高いだけでなく、後に現れる時代C、時代Dよりもかえって高くなっている(図 13.1 (p. 95))。この、時代B型の行動が広がることによって、時代A型の社会はようやく崩壊する。ただし、この時代は短い世代の間しか続かない。また、次の時代Cもあまり長い期間続かず、すぐに時代Dへ遷移する。時代Bと時代Cは、その意味では時代Aと時代Dの間の遷移期間に過ぎないとも言える。しかしながら時代Bも時代Cも、その前後の時代とは明らかに異なる特徴を持つ。

もう少し具体的に見てみよう。時代Bのダイナミクスは図 13.3に示されている。例えば、図 13.3-(a)で四角のマークはプレーヤー1(種族ID-1094)の行動の様子を示している。四角のマークは、最初の30ラウンドくらいまでは行動0、行動1、行動2、行動3 (待つ、木1を切る、木2を切る、木3を切る) の全てに分散している。しかしラウンドが進むに連れて、行動0と行動3以外の場所には四角のマークが次第に見られなくなっている。つまり、この木こりはほぼ木3だけを切って、そうでなければ何も切らずに木の成長を待つようになっている、ということが分かる。また同様に、丸のマークは行動0や行動2を中心に分布し、三角のマークは行動0及び行動1を中心に分布するようになって行く。(丸のマークはプレーヤー2の行動、三角のマークはプレーヤー3の行動を示す。) 70-80ラウンド位になると、

- 木1 — プレーヤー3 (三角のマーク)
- 木2 — プレーヤー2 (丸のマーク)
- 木3 — プレーヤー1 (四角のマーク)

という対応関係がほぼはっきりと分かる。全400ラウンドについて、各木こりが選択した行動の構成比を示したのが図 13.3-(c)である。プレーヤー2(種族ID-00001095)は行動3も少し多いが、各木こりとも概ね特定の一つの木を切る割合が大きい。

上記のことをもう少しはっきりと示すのが図 13.3-(b)である。この図はプレーヤー1の行動選択の傾向がどのように変化して行くのかを構成比率面グラフで表現したものである。各ラウンドにおいて、そのラウンドから過去10ラウンドに選択された行動の構成比 (行動0、行動1、行動2、行動3が何

13.4.2 資源の私有化 (空間的役割分業) を可能にする意志決定関数の構造

上記のことは、以下のような状況を示していると言える。つまり、最初は「自分の木」が決まってないので、各木こりはとりあえず三本の木をいろいろ切ってみる。この時点では余り「待つ」行動は見られない。しかし、木こり間の相互作用を通して各木こりが自分の切る木を次第に固定化して行く。各木こりが特定の木を私有する状態になると、他の木こりに邪魔されることなく木の成長を「待つ」ことができるようになる(待つ行動の頻度が上昇する)。逆に言うと、空間的な役割

分業が一旦確立された時点で他の木こりの木には手を出さなくなる。こういった構造が、この時代の木こりたちの戦略の中で確立されているといえる。そして、各木こりが自分の木を育て、切る、というリズムが三本の木の成長をダイナミクスを確立する。一度そのダイナミクスが確立された後に、ある木こりが利己的になって他者の木を切るとその木の成長のダイナミクスは変わってしまう。するとその木の所有者は、別の木を切らざるを得なくなるだろう。このように、利己的な行動が最終的にゲーム環境の荒廃を引き起こす結果を招きかねない。自分も同じ丘に住む以上、そのダイナミクスの変化が、かえって自分の首を絞める結果になる可能性がある。つまり、この空間的役割分業のダイナミクスは、進化のレベルである程度の安定性を持った協調形態である。

なお、同じ種族の木こりでも状況によって私有する木が変わる。つまり、全く同じ意志決定関数を持っていても、ある二人とゲームをすると木1を私有するのに、他の二人とゲームをすると木2を私有するようになったりする。そもそもこの時代になると、ほとんどの木こり種族はかなり類似した意志決定関数を持つ (時代Aが始まる頃にはこの傾向が既に強くなっている)。だとすれば、なぜ前述のような役割分業が可能になるのだろうか? 意志決定関数の中で他の木こりと同じように木1、木2、木3を見ているとしたら、なぜ、違う木を選ぶことができるのだろうか?

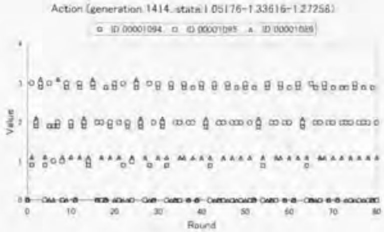
これが可能になったのは、「木こりの状態」と「三本の木」の間に意思決定関数の中で独特の関連付けが行われるようになったことによる。時代Aにはほとんど参照されていなかった他の木こりの状態が、この時代Bになると完全に参照され、非常に重要な意味を持つようになる。この時代の代表的な意志決定関数は図 13.4-(e) に示されているが、ここから多くの性質を読み取ることが出来る。そのうち目立った 3つの性質について簡単に触れておく (時代Aで述べた資源参照に関する性質は、時代Bでも、だいたい受け継いでいる)。

"木1への動機" 「右のプレーヤーの状態 (z_2)」と正の相関があり、「左のプレーヤーの状態 (z_1)」と負の相関がある。端的に言って、右のプレーヤーの状態が大きいと木1を切りやすい。図 13.3-(a) で丸のマークの木こりが行動2を選択する、三角のマークの木こりが一ラウンド後れて行動1を選択する様子が所々見られるが、その理由の一つがここにある。

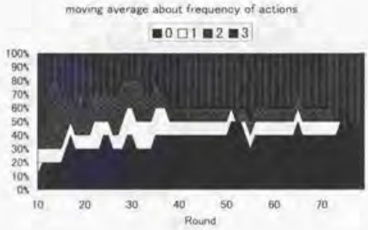
"木2への動機" 上記の「木1への動機」と似ているが、「右の木こりの状態 (z_2)」との相関が少し弱い。しかしそれとは別に「木2への動機」は「自分の状態 (z_0)」との間に非常に特徴的な正の相関がある。つまり、自分の状態が大きいとかえって木2を切りやすくなる。丸のマークの木こりが一度行動2を選択した後に続けて行動2を選択していることが多いのはこのためである。実は、これが三人の役割の分業のきっかけに大きな役割を果たしている。つまり、まだ役割分業が進んでいない時期に、たまたま木2が成長しすぎた状態になっていて、一人で木2を切ることになったとする (図 13.3-(a) で35ラウンド)。この時、自分の状態が一気に大きくなので、行動2への動機がまた大きくなり、次のラウンドも木2を切ることになる。この時、左の木こりは自分の右の木こりの状態が大きくなっているのを見て、行動1への動機が大きくなり、次のランドで木1を切る。残りの木こりは自分の右の木こりの状態はそれほど大きくなってないので、次の木3への動機によって、時折木3を切る。

"木3への動機" 他の木こりの状態と木の高さに関して、ほぼ均等に正の相関をもつ。ただし、特に大きな相関ではない。自分の状態と大きな負の相関があるので、自分の状態が低くなって他の木こりの状態が大きくなると木3を切る動機が高くなる。

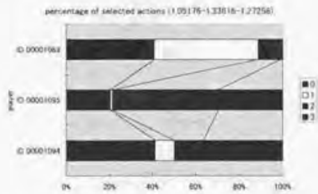
次に木の高さのダイナミクスに注目してみる。3つの資源のダイナミクスは不均等なレベルで維持され、木1、木3、木2の順序で木の高さの平均値が低くなる。図 13.4-(d))。なお、ここでは示されていないが、木こりの状態の平均値は、丸、三角、四角の木こりの順である (図 13.3-(a) のタイトル)。木こりたちは意志決定関数だけで比べるとそれほど差異がない。しかし、資源のダイナミクス (とここで示されていない木こりたちの状態のダイナミクス) の不均等性が木こりたちの役割を異なるものへ固定する。



(a)

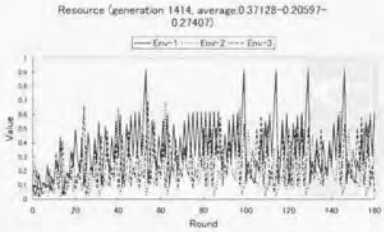


(b)

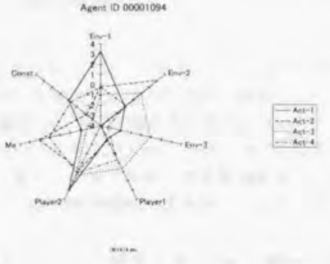


(c)

Figure 13.3: 時代B「資源の私有化」: 時代Bに、ある丘で実際に行なわれたゲームの様子 (第1414世代)。各資源が特定の木こりによって私有化される様子が見られる。(a) 行動図。(c) 各木こりの行動の構成比。 (b) はプレーヤー 1 (種族ID-00001094) について、行動の構成比の移動平均を示す (移動平均に含まれる区間数は10ラウンドとした)。下から行動0、行動1、行動2、行動3の構成比が分かる。この図から、この木こりの行動が、次第に行動0と行動3の二つに収束して行く様子が分かる。つまり、この木こりは殆ど木3以外の木を切らなくなって行く。それと同時に、待つ行動も増えてくる。



(d)



(e)

Figure 13.4: 時代 B: (d) 資源図 (第 1414 世代)。(e) 同世代のある種族の状態図 (種族 ID-00001123)。

13.5 時代C: 二人による各資源の共有

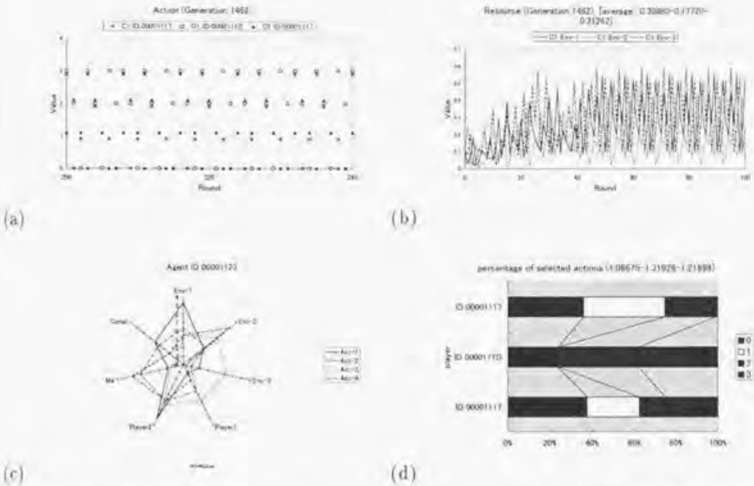


Figure 13.5: 時代C「資源の共有」: (a) 行動図 (b) 資源図 (c) 意志決定関数 (d) 各木こりの行動の構成比。(d) を見るとプレーヤー 1(種族ID-00001117) は木1と木2を多く切っている。

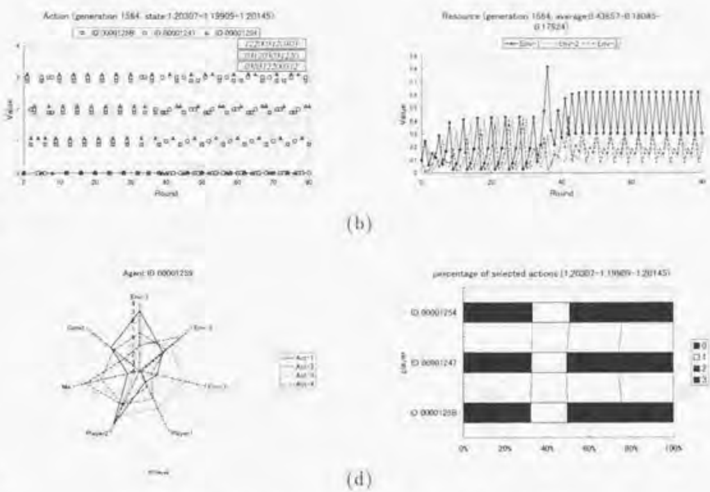
時代Cは、各々の木が二人の木こりによって育てられる、という特徴を持つ。つまり、隣の木こりと共同作業が可能になる。後に現れる時代Dと比べると時代Bも時代Cも非常に短い期間である。しかし時代Aから時代Dへの橋渡しとして、時代B、時代Cはかなりはっきりとした特徴を持つ。前節で見たように、時代Aでは木こり全員が同じ行動しかできなかったが、時代Bになるとそれぞれ単独に行動できるようになり、それぞれ特定の木を切るようになった。そこでは、他者の資源には余り手出しない、という形で相恵利他行動を行い、お互いかなり高い利得を獲得できるようになった。

さて、時代Cになると、二人の木こりによる資源の共有が広く見られるようになる。つまり、一本の木を、二人の木こりで育てて、そして切る。たとえば、木1はプレーヤー1とプレーヤー3によって管理され、木2はプレーヤー1とプレーヤー2によって管理される。逆に言うと、プレーヤー1は、木1、木2を切る機会が多い。この様子は図 13.5-(d) に分かりやすい。この図を見ると、例えばプレーヤー1は木1と木2を多く切っていることがわかる。各木こりは主に二本の木を切る。

時代Bでは、木こりの意思決定関数の大きな特徴として、「他者の状態」を参照する、ということがあった。他者の状態を参照するようになったことで、「誰がどの木を私有するのか」ということを決定することができた。時代Cになると、今度は、他のプレーヤーと木を共同管理するために他のプレーヤーへの参照が必要になる。しかし、この時代の意志決定関数は総じて前の時代(時代B)と非常に類似したものである (図 13.5-(d))。目で見るかぎり、時代Bの意志決定関数(図 13.4-(e)) と基本的な形態としてはほとんど違いがないと言ってよい。値の違いも非常に微妙なレベルのものである。しかし見られる現象自体は、上記で述べたように、時代Bと時代Cの間

には明らかな相違がある。

13.6 時代D: 三人による三つの資源の共有管理



(a) (b) (c) (d)

Figure 13.6: 時代D: 三人による三つの資源の共有管理

時代Cでは、「もう一人の木こり」と木の成長を共同管理する行動が見られた。時代Dになると三人の木こりが三本の木全てを管理するルールが確立される。行動0を"0"、行動1を"1" などと表現すると、そのルールは次のようにかなり複雑な行動列として表現できる。

player-1　122003120303122003120303...
player-2　031203031220031203031220...
player-3　030312200312030312200312...

基本的に "122003120303" を繰り返す12周期の行動列が見られる。プレーヤー2、プレーヤー3はそれぞれ4ラウンドずつ位相がずれているものの、同じ行動パターンである。同じ世代の約半数の丘でこのやり取りが行われる。残りの約半数の丘ではこの行動列が少し変形したものが見られる。つまり、この行動パターンはこの時代のベースパターンと言って良い。図 13.6 は時代Dのある丘(1564世代)の様子である。図 13.6-(a)を見ると、40ラウンドくらいから周期部に入り(遷移部には時代A型を少し変形した4周期パターンも見られる)、後は上記の12周期の行動列が最後のラウンドまで続く。なお、木の側から見ると、このゲームのダイナミクスは4周期である(図 13.6)。

この時代のゲームのダイナミクスには以下のような特徴がある。

時間的・空間的役割分業　三人同時に同じ木を切ることがなくなった。その結果、木が極端に小さくなることはなくなり、成長率がある程度高い状態から木は再び成長する。木を切るタイミングを三人のプレーヤーで時間的に分散させる、あるいは他の木を切ることで分業を実現している。そのためのルールが上記の12周期の行動パターンである。

周期の長さ　12周期という非常に長い周期の行動規範が確立されている。これだけ長い周期だと、ルールからの逸脱行動に対して不安定な要素をかなり持っているように一見思われるが、実はこの社会はかなり安定であり、この行動規範が世界に広がり安定化する。実際、時代Dは時代Aの倍近くの世代の間続く(図13.1 (p. 95))。一度、このようなゲーム環境のダイナミクスが確立されると、プレーヤーはそのゲームのダイナミクスに採り得る行動を制限される状態になる(ゲームのダイナミクスが戦略主体に与える影響)

資源の扱いの非対称性　木1の扱いが他の木と比べて特別になる(図13.6-(b)(d))。木1のダイナミクスは、木2と木3より高いレベルで維持される。木1だけは、三人の木こりによって一回置きに切られる(図13.6-(a))。この時代には、このベースパターン以外のダイナミクスも見られるが、木1の切り方だけは完全にすべて同じである。

この時代のあと、別の12周期パターンの時代や24周期パターンの時代が現れ、それぞれ比較的安定に続く。長い周期の行動規範であるが、ここでは、一旦確立されたゲームのダイナミクスが、進化的に対する安定性を実現している。

13.7　その後

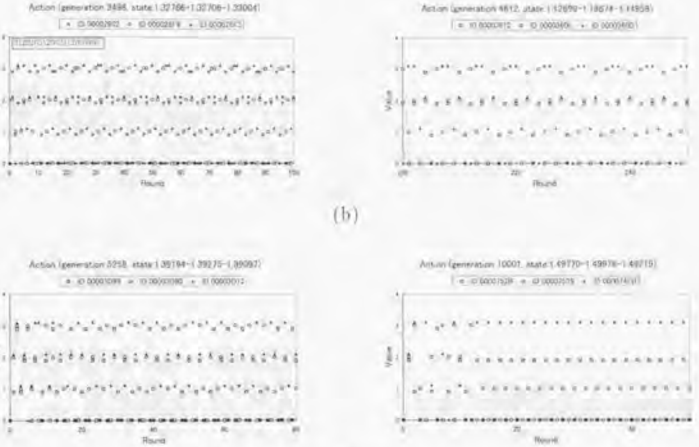
P3R3ゲームにおける意志決定関数の進化と資源管理方法の進化について、ここまでそのメカニズムを見てきた。本節では、上記の時代の後の進化について簡単に見てみる。

Figure 13.7: P3R3ゲームの適応度図: 最高適応度を第10000世代まで示す。

第3000世代以降、最高適応度は段階的に上下する(図13.7)。その過程でいくつかの安定な時代を遷移して行くことになる。やはり、各時代にはそれぞれ特有の安定なダイナミクスが存在する。図13.7-(d)は非常に強いSSOとなっており、各木は一回置きに切られる。

13.8　段階的な進化

本稿において、意志決定関数の係数は、0を中心とした正規分布乱数によって初期条件を与えられた。その後、正規分布乱数による進化で徐々に意思決定関数が変化して行く。係数が0、ということは、何も参照していないということに相当する。つまり、進化のスタートの地点でプレーヤーは何も見ていないことが基本である(第7.6節(p. 43))。そこから、何をどのくらい参照するか、が進化と共に徐々に変わってくる。



(a) (b) (c) (d)

Figure 13.8: P3R3ゲームにおける段階的な進化: (a) 第3498世代。(b) 第4612世代。(c) 第5258世代。(d) 第10001世代。

正規分布乱数による突然変異なので、始めに (d) のSSOにたどり着いてしまう可能性は理論上は存在する。しかし、ゲームは他者との関係によって成立するものである以上、木こり種族の数が増えれば増えるほど確率的にそういうことが起こる可能性はほとんどなくなる。少なくとも10種族で行なったこの実験では、GP空間内の存在する階段状のパスを段階的に上らなければここまで来れなかった。

このP3R3の実験では、まず混沌な時代がしばらく続いた後、三人が一致して四周期の行動列を実践するようになった(時代A)。四回に一回木を育てることができるので、ゲーム環境はある程度の生産性を持つ。このゲーム環境をベースとして、木こりたちは徐々に「他者の状態」を監視するようになり、相手に搾取されることなく木を育てる頻度を高めることができるようになった(時代B)。つぎに、木を他者と共同管理するようになる(時代C, D)。各時代において、ゲーム環境のダイナミクスはプレーヤーの行動に直接影響を与える。ある種のゲームのダイナミクスはゲーム環境の安定化をもたらし、多くのプレーヤーの行動が類似したものになる。

徐々に他者への参照を精微化することにより、最終的には各木を一回置きに切るようになる (ここでもまた木の私有化が行われている)。この最終状態は、一本の木の立場から見ると実は一人ゲームの最終状態と同じであり、三人ゲームにおいても他者に搾取されずにこの状態を維持できるようになっている。(つまり、自分が切っていない時に隣の木を切る、ということができない。) プレーヤーの行動がある種のゲーム環境を構成し、そのゲーム環境に適応したところでまた新たなゲームを構成する、といった社会発展と、そのゲームの変遷のプロセスがGP空間内の階段を上るプレーヤーたちの意志決定関数の進化を通して現れる。

Chapter 14

三人の位置関係による個体識別を不可能にしたケース

14.1 位置対称性がある意志決定関数

前章では、木こり三人 (他者が二人) のシミュレーションについて考察した。意志決定関数について言うと、木こりは他の個体を「位置」によって識別することが可能であった (左の木こりを「プレーヤー1」、右の木こりを「プレーヤー2」として参照している)。ここでは、例えば「左の木こりが木を切ったら次に自分も切る」、といった意思決定が可能になる。しかしこの場合、同じ木こりが右側に来た時に違った行動を行なうことになる。つまり、位置の情報がゲームの中で非常に大きな意味を持っている。こういった意思決定関数を「位置対称性がない」と呼ぶことにする。

では、位置による識別を不可能にするとどうなるだろうか? つまり、同じ木こりが右にいる場合と左にいる場合を区別できないようにするということであり、従って他者が右にいると左にいる時で対応を変えることができない、ということである。

この章では、他者への参照の機構を意志決定関数の中に違った形で実装した場合について、計算機シミュレーションとその考察を行なう。具体的には、他者二人のうち最も状態値が高い木こりを「プレーヤー1」、もう一人の木こりを「プレーヤー2」として参照する (あくまで自分は「プレーヤー3」である)。各ラウンド毎に、他の二人の木こりを個体識別している (二人の状態の平均値などを使っていない) が、それらの木こりが右にいるのか左にいるのかは知らない。こういった意志決定関数を「位置対称性がある」と呼ぶことにする。

位置対称性がある場合、例えば「位相を時計周りに4周期ずつずらして、12周期の時間的役割分業を行なう」といった協力形態は現れにくい。仮に現れても安定化しないと思われる。「時計周り」で役割を交代するために位置の情報を使われているからである。位置対称性がない場合と比較して位置対称性がある場合、単純に言って、他者を識別するのが困難になる。また、他者のとの情報のやり取りが協力の形成に基本的なことである以上、協力の形成及びその維持が難しくなる可能性がある。特に、前章で見たような、時間的役割分業に基づく協力形態を実現するのは非常に困難であると思われる。

実験はP3R3ゲームとして行なわれた。位置対称性があること以外は前章のP3R3ゲームの実験と同じ条件の下で行われた。この実験で得られる適応度グラフを図14.1に示す。

結論から言うと、位置を識別できなくてもある程度の協力は可能である。つまり、完全な木の切り合いにはならない。また、この「位置対称性がある」ゲームでも、非常に単純な形ではあるが時間的役割分業による協力形態が見られる(木こりたちの役割の分業は一人対二人で分かれる)。一つ言えるのは次のことである。つまり、他のプレーヤーへの参照が多少困難になるため、その分、「資源」のダイナミクスがプレーヤーにとってより大きな意味をもつようになる。

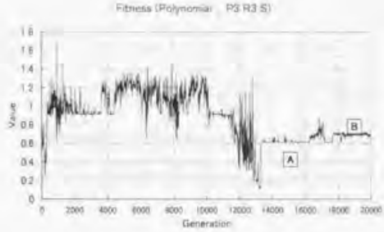


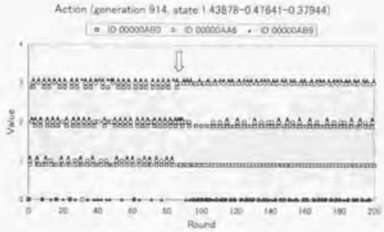
Figure 14.1: 位置対称性があるゲーム (P3R3): 第 20000 世代までの適応度グラフ

14.2 ゲーム環境の変動に対応しきれなくなる戦略

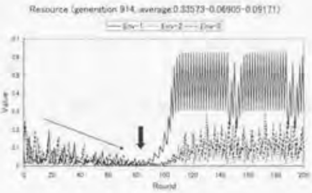
位置対称性のあるゲームでは、初期の段階では利己的行動へと進化が向かう傾向が多少見られる。例えば、図 14.1の第 1000 世代付近では、最高適応度が所々かなり高くなっているところがある。これは、ある種族が他の種族の木こりから利得を搾取することに成功した結果だと言える。

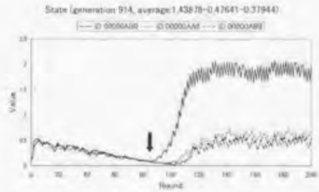
図 14.2 を見てみよう。行動図を見ると、3 人の木こりは 第 90 ラウンド位までは かなりの割合で木を切りつづける (図 14.2-(a))。その結果木の高さは総じて低くなり、丘は次第に荒涼とした状態になる (図 14.2-(b))。このゲーム環境の変化はプレーヤーの状態にも影響を与え、プレーヤーの状態の値も次第に低くなる。しかし逆に、ある程度木が高い間は「木を切る」という意思決定を木こりたちはできた、とも言える。ところが、ゲーム環境が次第に非生産的なレベルへと変動して行くにつれて、アルゴリズムのレベルでゲーム環境の変動についていけなくなる木こりたちが出る。その瞬間は図 14.2の各図に矢印で示されている。例えば行動図から分かるように、矢印の前後を比べると、木こりたちの行動形式が明らかに異質なものへ変化している (図 14.2-(a))。状態図を見るとプレーヤー 1 だけ利得の面で得をしていることが分かる (図 14.2-(c))。矢印より後では、プレーヤー 1 の状態のダイナミクスが 1.8 前後を平均としているのに対し、他のプレーヤーの状態は 0.5 前後を中心に振動している。一見して不公平な状態であり、プレーヤー 1 と他の二人の間に階級構造が作られたままダイナミクスが安定化してしまっている (このダイナミクスは第 400 ラウンドまで続く)。

しかし、もしこのプレーヤー 1 の行動を他のプレーヤーが受け入れないと、さらに木の切り合いが続く。その結果環境はますます貧弱なものになる。この様子は図 14.3に示されている。図 14.3の状態になるよりも、階級構造を受け入れたほうが木こりたちにとっては利得がかえって高い (図 14.2-(b))。



(a)





(b) (c)

Figure 14.2: ゲーム環境の変動に対応しきれなくなる戦略 (第914世代): (a)行動図、(b)資源図、(c)状態図。プレーヤー1 (種族ID-00000AB0) は他の二人のプレーヤーを利得の面で凌駕している。

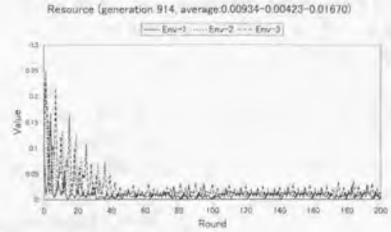
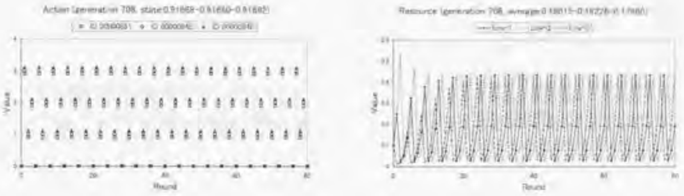
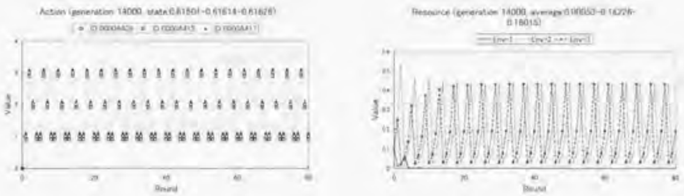


Figure 14.3: 階級構造を受け入れなかった場合の資源図 (第914世代)

14.3 時間的役割分業とゲームのダイナミクス



(a)



(b)

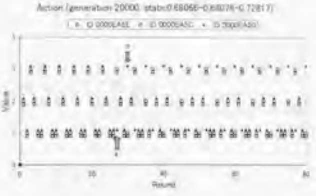
Figure 14.4: 長い間支配的だった行動様式: (a) 第 708 世代 (b) 第 14000 世代。それぞれ行動図と資源図が示されている。

既に述べた通り、位置対称性があるゲームで時間的に役割を分業する協力形態を形成するのは、困難であると思われる。実際、このゲームで長い間支配的だった行動形式は、図 14.4に示されているように全員が同じ行動を行なうことによる、ある程度の協力である。図 14.4-(a) は初期の世代の様子である。各木は、4 ラウンド毎に切られ、残りの3 ラウンドは成長する。図 14.4-(b) の時代になると「どの木も切らずに完全に待つ」といった行動は既に見られない。「待つ」代わりに木1が切られている。資源図を見ると、割と早いラウンドで木 1 は高さ 0 近くに収束する。木 1 を切りながら木 2 及び木 3 の成長を待つ、という行動形式である。いずれにせよ これらの行動形式は、「待つ」行動が存在するという点である程度の協力性は有していると言える。しかし、三人が同時に同じ木を切るので、木は一気に低くなってしまう。そのため、それほど生産性の高いゲーム環境を構築することができない。

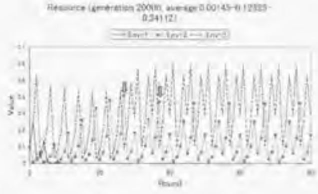
位置対称性があるため、対称性がない場合に比べて他のプレーヤーとの通信に制限がある。それゆえ、木を効率的に育てることにも限界があり、進化が進むにつれ、かえって社会全体の適応度は低くなる傾向も見られる。適応度図で、第16000 世代くらいまでがそのことを示している (図 14.1)。

位置対称性があるゲームでは、他のプレーヤーとの通信に制限があるため、もし位置対称性のあるゲームで時間的が役割分業が安定して見ることが可能であるとしたら、位置対称性のないゲームの場合よりも「ゲーム環境自体のダイナミクス」がより一層重要な役割を果たすはずである。

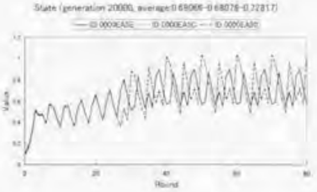
適応度図 (図 14.1) を見ると、第18000 世代辺りでわずかに適応度が上がり、そのまま安定化している様子が見られる。適応度としてはそれほど違いはなく、高い値でもないが、この期間で見られる現象は、それ以前 (第 18000 世代まで) に見られる現象と異なる特徴を一つ有する。それは、ある種の時間的役割分業が行われているという点である。



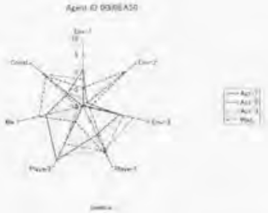
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 14.5: 一人対二人の時間的役割分業 (図は第20000世代): (a) 行動図。(b) 資源図。(c) 状態図。(d) 意志決定関数

図14.5-(a) を見てみよう。例えば行動3に関して言うと、三人で木3を切るのではなく、三角のマークの木こりが単独で木3を切って、2ラウンド後に残りの二人の木こりが木3を切る、という行動形式が繰り返されている。つまり、一人対二人で時間的に役割分業が行われている。三人で同時に木3を切るのが回避されているので、木3の高さのダイナミクスは比較的高い平均値を持つ(図14.5-(b))。同様のことは木1についても言える。以上の結果、全木こりの利得が図14.4-(b) の時代(第14000世代)に比して向上する。しかもこの社会は、第18000世代くらいからかなり長く安定に続く (第25000世代まで安定に続いていることは確認されている)。

こういった、時間的かつ空間的な役割分業に基づく協力形態が、「他者への参照に関する位置対称性があるゲーム」において発生し、維持される様子を見ることができたのには、木こりたちの戦略の「ゲーム環境のダイナミクスへの参照」が進化したことによる。

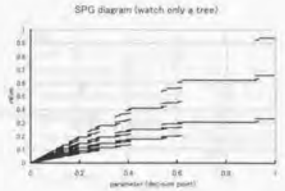
この時間的役割分業の発生について言うと、具体的には、木2のダイナミクスが役割分化のためのシグナルとなっている。図14.5-(a)(b) を見てみよう。ある程度木2が育つと、三角のマークの木こり (プレーヤー 3) が、行動3を行なうべき所で行動3をスキップする (行動1を行う。意志決定関数より分かる; 図14.5-(d))。そして結果的に他の木こりに利得を譲る (行動図で 矢印 a の部分)。どの程度木2が成長したところで行動3をスキップするかはそれぞれの戦略による。スキップすることによってプレーヤー 3 は状態が一時的に下がる。しかし、他の木こりは木3を切ったことによって少し状態値が上がっているので、三ラウンド後にプレーヤー 3 は木3を独占することができる (行動図で矢印 b の部分)。また2ラウンド後に木2が成長してくると、また同様のことが繰り返される。一人対二人に一度分かれると、その一人の側の木こりは他の二人にとって「一番目」という特別の位置を占めるので、今度は意志決定関数の「プレーヤーへの参照」を通して同様のゲームダイナミクスが維持される。

Chapter 15

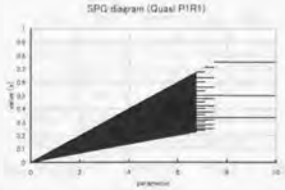
議論 III

15.1　人数が増えた動的ゲームにおける、協力の発生とその進化の可能性

ここまで P3R3ゲームについて、計算機シミュレーションの結果とそれに関するいくつかの考察を示した。ここでは、ゲームの人数 n の増加について考えてみたい。既に述べたように、静的ゲームモデルの分析の結果として社会的ジレンマ状況において、協調が社会に広がる条件は人数 n の増加と共に厳しくなる(第 12.4 節 (p. 92))。ここで、二人ゲームから三人ゲームまでのいくつかのシュミレーションの結果を踏まえて、この問題についてもう一度考えてみたい。議論に入る前に、まず二人ゲームの章でも行なったように (第 11.6 節 (p. 84)) SSO が少ないゲーム (折れ線型) との比較を行なう。



(a)



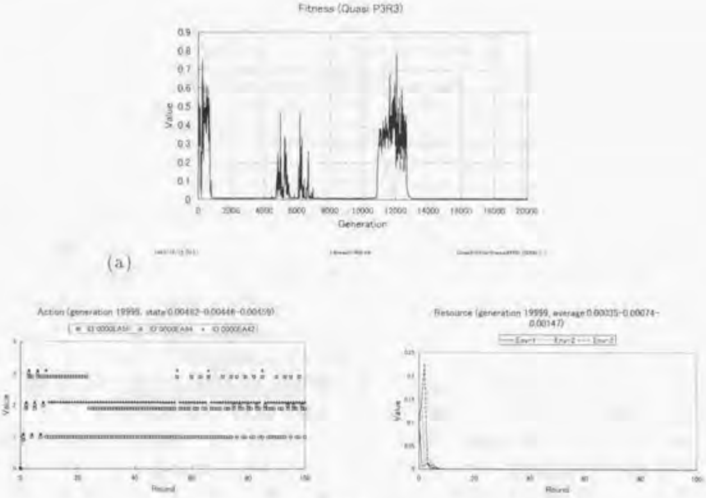
(b)

Figure 15.1: 丘に木こり一人、木が一本の時のSPGダイアグラム (再掲): (a) は山腹型ゲーム, (b) は折れ線型ゲーム

図 15.1は木の成長が (a)山腹型の時と (b)折れ線型の時のSPGダイアグラムである。ただし条件を単純化して、(i)P1R1ゲームで、(ii)木こりは木の高さしか見ていない(自分の状態は参照しない)、と仮定した場合のSPGダイアグラムである。既に述べたように、これらのSPGダイアグラムについては基本的に次の二つの特徴がある。

1. 山腹型ゲームのSPGダイアグラムは至るところ周期軌道になっている。ただし、複数人ゲームで自分の状態や他者の状態への参照が意志決定関数に含まれるようになると、必ずしも単純な周期軌道になるとは限らない。

2. 折れ線型ゲームのSPGダイアグラムには、そもそもプレーヤーの状態が関係しなくても周期軌道が少ない。かなり広い領域に準周期的軌道が存在する。



(a)

(b) (c)

Figure 15.2: 折れ線型ゲーム環境における進化的現象: (a)適応度グラフ (b)行動図(第19999世代) (c)資源図(第19999世代)

さてここで、折れ線型 P3R3ゲームのケースについて考えてみる (意志決定関数に位置対称性は有るものとした。純粋に、ゲーム環境の力学法則の違いだけで比較するためである)。つまり、準周期軌道がかなり広い範囲に見られるゲームである。結論から言うと、折れ線型のゲームの計算機シミュレーションではゲーム世界は「木の切り合い」社会へと収束する。協力的社会は一時期見ることができるが、結局崩壊してしまう。

図 15.2を見てみよう。この図は折れ線型ゲームのシミュレーションの結果について簡単に示している。適応度図を見ると、第12000世代を中心とした部分で一度適応度が上がっているが、結局進化と共に適応度は下がる。最終的には木の切り合い状態に収束して行く(図 15.2-(b)(c)。このシミュレーションに関しては第35000世代まで確認したが適応度は下がったままである。)

ここまでの(関連する)シミュレーションの結果について簡単にまとめると次のようになる。

1. 山腹型ゲームの場合(SSOを多く含む)
   (a) 二人ゲーム(P2R1ゲーム)...協力的社会が構築される。
   (b) 三人ゲーム(P3R1, P3R3)...やはり協力的社会が構築される(P3R1では、木の高さの平均がP2R1よりかえって高くなる)。
2. 折れ線型ゲームの場合(SSOが少ない)
   (a) 二人ゲーム(P2R1ゲーム)...最初、長い期間の間木の切り合いの社会になるが、最終的に協力的社会が構築される。
   (b) 三人ゲーム(P3R1, P3R3)...ほぼ完全に木の切り合いの社会に収束する。

静的ゲームとしてモデル化すると、社会的ジレンマ状況では人数nの増加と共に協調的社会の成立が難しくなることが分かる。上記のシミュレーションでも、折れ線型ゲーム環境では確かにその傾向が見られた。つまり、動的ゲームとして社会ジレンマを表現した場合でも、SSOが少ない動的ゲームの場合は、nの増加と共に協力の成立は困難になる。このことは第11.5節(p. 82)で述べた滑り台効果と関係が有る。SPGダイアグラムに斜面が多く存在する場合、木を切る頻度を高めると、平均的な木の高さは低くなるが、自分の適応度は高くなる。従って木こりたちは、次第に木を切る頻度が少し大きくなるような方向へ進化する。このことが原因で、少し後の世代になると木の高さの平均が少し低くなる地点にゲームが設定される(進化が進むに従って、系のダイナミクスがSPGダイアグラムの斜面を下って行く)。以上のプロセスがSPGダイアグラムに斜面が続く限り続いて行く。

しかし、山腹型の動的ゲームではnの増加にも関わらず協調的社会が構築され、ゲーム環境は生産的なものになる。ゲーム環境の肥沃さはゲームの力学的法則に非常に依存する。例えば、P2R1のときよりP3R1の方がかえって肥沃なゲーム環境になる。単純にnの大きさだけに依存するわけではない。SSOの存在とその安定度に依存する。

以上の結果は、社会的ジレンマという観点から言うと、協力を構築・維持するための社会規範が系のダイナミクスの中に存在しうる可能性を示す。山腹型のゲームにおける協調的社会は、系の外部からの強制などに構成されたものではなく、完全に系の内部で構成されたものである。社会規範は木こりとゲーム環境の相互作用の中から構成されてくる。社会規範から外れることに対する罰則は、系のダイナミクスのから構成される。つまり、社会規範・罰則をモデリングの段階で「罰則戦略」などとして系の外側から明示的に与えるのでなくて、系の内側のゲーム力学から、社会規範に相当するものがどのように自生してくるのか、という形で問題を取り扱える。

次に「動的ゲームと静的ゲーム」という観点から言うと、静的ゲームとして表現すると論理的に同じ利得行列をもつゲームが、動的ゲームとして表現すると異質のものになる可能性がある、ということを上記の結果は示している。本稿では共有地の悲劇的状況を動的ゲームとして表現したが、そこで用いられる力学的法則によっては、GP空間上の位相のダイナミクスが、周期軌道になったり、準周期軌道になったりした。これ意外にもカオス軌道を描く木こりのジレンマゲームなど、さまざまな社会的ジレンマの動的ゲームバージョンが構成できる。そして、それらのダイナミクスレベルの相違が全く異なる結果を生み出す可能性がある。また、静的ゲームでは見えない部分が動的ゲームとして表現した時に重要な役割を果たすこともある(SSOなど)。

15.2 意志決定機構の進化と資源管理方法の進化

P3R3での社会の発展については既に詳しく触れた。流れとしては、

1. 全員の行動を一致させる形での協調行動。...資源しか見ない

2. 資源の私有化。他人の資源に手を出さない、と言う形での協調行動。...他者への参照が始まる

3. 資源の共有管理。...他者への参照の精微化

4. 全資源の共有管理。

5. 全資源の私有管理。...他者の侵入を許さない、と言う意味での他者への参照の精微化。

もちろん初期条件によっては、全種族が最終状態(5.)の意志決定関数を持っている可能性がないとは言えない。他者の意志決定関数と微妙なバランスをもった状態で全種族が現れないとも限らない。しかし、種族の数が多ければ多いほど、そういった可能性はゼロに近づく(本稿では10種族で固定していた)。木こりたちは、意志決定関数の進化に従って、対応するSSOを経由しながら、資源管理の方法を発展させて、段階的に生産的なゲーム環境を構築する。

途中12周期のダイナミクスが長期安定化したが、このことは、SSOの「軌道」の複雑さが必ずしもSSOの安定度の低さにつながらないことを示している。おそらくSSOの台地が広さと関係しているものと思われる。

Chapter 16

まとめ

現実の社会的ジレンマについて少し考えてみよう。本稿で用いた木こりのジレンマモデルはある意味かなり抽象的なものであり、現実の例に安直に議論を拡張することは危険である。したがって概念的なレベルの指摘にとどめておくが、基本的な見地として動的ゲームの立場から現実のモデルを考え直すことは意味があることと思われる。

たとえば社会ジレンマの例としてあげられる、ゴミの問題、牧草地の問題、その他さまざまな資源に関する資源枯渇の問題などは、それらに共通するジレンマ的性質を抽出することで、N人囚人ジレンマなどの静的ゲームの利得行列として表現され、定式化されている。たしかに、いくつかの事象に共通した性質に着目して、そこから本質を抽出すること自体は重要である。しかし、上記の問題は常に同じものとして取り扱うべきものなのだろうか? 単純な例で言うと、資源の絶対量が限られていて事実上減少する一方である化石燃料のような場合と、時間発展法則に減少の項だけでなく増加の項も存在する動植物資源のような場合は、ダイナミクスのレベルで考えると明らかに異なる。つまり少なくとも「動的ゲーム」として表現すると時間発展方程式のレベルから かなり異なるモデルである。動的ゲームの「木こりのジレンマゲーム」の場合、山腹型ゲーム環境の時と多項式ゲーム環境の時では、プレーヤーと社会の進化について根本的に異なる性質がいくつか存在したが、このように静的ゲームとしては同じゲームが、動的ゲームとして表現したとき異なるゲームとして記述され、そしてダイナミクスのレベルで異なる性質をもつ可能性は常にある。我々が現実に見られるゲーム的相互作用を静的なゲーム利得行列として表現する時、抽象的な論理のレベルでモデル化するが、この時、ダイナミクスのレベルではじめて記述されうるはずのものもいくつか切り落としてしまうことがある。しかし、そのように静的なゲームとして表現する際に切り落とされた部分に重要な性質が存在する可能性がある。既に触れたチキンゲーム(p. 29)などは、まさにその逸話をそのまま動的ゲームとしてモデル化することが可能であり、そうすることで静的ゲームとして表現したときと異なる新たな知見が得られるかもしれない。

ゲーム環境の動的な側面に関する一つの単純な例として、資源の連続的な成長・減衰を考慮した協力形態があげられる。つまり連続的に変動する資源の「時間的な」側面を考慮した解である。本稿で見られた例で言うと、いくつかのSSO上で見られる時間的的役割分業もそれに相当するであろう。現実の例では、前出の北米における放牧地の荒廃 (p. 29) を解決するために実際に採択された科学的な放牧・家畜管理法がある。その方法のうちの一つは適切に家畜頭数を決定することであり、もう一つは家畜の放牧の時間と食べさせ方を工夫したシステムを採用することである。後者の方法で最も単純かつ成功しているといわれるシステムは、循環式放牧（サボイ式）である。このシステムは、放牧地を区分けし、一定の期間ずつそれぞれの区間を巡回させ一周したら土地を休ませる方法である。その他、単純な例として、中世ヨーロッパなどで広く行われた三圃式農業なども複数の資源を巡る動的な資源の利用の問題に関する一つの解決法である。いずれも歴史の流れの中で生まれた解決方法であるが、割合思いつきやすい、ある意味で単純な方法である。

しかしこういった方法が考案される前提として、資源の「動的な」側面を考慮することが必要不可欠である。これらは、牧草の成長、土地の回復、牛の栄養状態、穀物の成長といったダイナミクスに関連することを(意識的にしろ無意識的にしろ)考慮した時に初めて考えることの出来る(準安定)解である。これらの方法は、複数の資源またはプレーヤーを「時間的に」分散させることによって生産的なゲーム環境を築くことを目指した解決法である。つまり環境資源などのダイナミクスを考慮した方法であり、それらは対応する動的ゲームの解の一つでもある。解の安定性の問題は別にしても、少なくとも、モデルの時間的な面が必要になる解に対して、静的ゲームの立場からの考察は不向きであるといえよう。例えば戦略に関して言うと、単に「放牧しない(協力)」「放牧する(裏切り)」という静的な記号で表現するのではなく、牧草の状態、牛の栄養状態のダイナミクスを考慮して、どういう「タイミング」で放牧するか、といったことをモデルとして表現することが重要になる。(もちろん上記の解決法は最適な解決方法であるとは必ずしも言えない。牛の成長、土地の回復力を厳密に考えた時、もう少し複雑な(周期の)協力形態の方が生産的な環境を築くことができるという可能性はある。それは、実際モデルを構築してみなければ分からないことである。)

さてここで、動的一般について、ゲームの解について考えてみよう。プレーヤーが協力的かつ生産的なゲーム環境を構築し維持する際には、次の3つのレベルの困難さが存在する。

1. プレーヤーたちがSSOの存在を知ること。

2. プレーヤーたちがSSOへ辿り着くこと。(SSOが存在しても、それに行き着くことが出来るとは限らない。)

3. プレーヤーたちがSSOの状態を維持すること。

ただし、外部からの強制、社会規範の掲示などが許されるなら、2番目の項はあまり問題にならない。問題はSSOの存在とその維持である。本稿の実験のように、プレーヤーの学習・進化によって系の内部から協力的社会規範が構成され、ある程度プレーヤーの維持されうるとすれば理想的である。しかし仮に外部強制を伴う必要があったとしても、出来得る限り限り「安定な」社会規範(ルール)を設定することが肝要である。社会規範はそれ自体がある程度の内部的安定性を持っていないと、協調状態の維持にコストがかかりすぎる。一度設定したら、プレーヤー間の相互作用によって維持され易いような規範を設定することが理想的である。極端な話、外部から掲示される社会規範がSSO(戦略の揺らぎに対する安定性があるもの)でなければ、その社会規範は完全な強制となる。このように、系の内部で安定な解を知るために、また、SSOの存在を知るために、系の特徴をつかんでおく必要がある。つまり、現実の系から様々な動的な側面に関する特徴的な性質を抽出してモデルを構築し、様々なパラメーターに関するSPGダイアグラムを描くことで、系のSSOの性質を知ることができるかもしれない。さらに、今まで直感では気づき得なかったようなSSOの存在が分かるかもしれない。社会的ジレンマの問題について言うと、この問題でゲームの人数の大小が大切なのは言うまでもない。しかし、動的ゲームの立場から見て同様に重要なのは、プレーヤーの意志決定機構と系の力学法則とで構成されうるダイナミクスの定性的性質であり、ダイナミクス自体に内在する構造である。

我々が住む世界は力学的法則に支配されている。それ故、我々自身を含む意思決定主体も理論上は力学系として全て記述できるはずである。しかし、意思決定主体そのものについて知りたい時に、意思決定主体も含めた全てを力学系としてモデル化することは、必ずしも有効な方法ではない。なぜなら、既に述べたように、系の振る舞いから意思決定主体(レスラーのモデルではoptimizer)の振る舞いを抽出するのは一般に大きな困難を伴うからであり、また系の自由度があまりにも大きいものになるからである。(もちろん「抽出する」研究自体は重要である。そうすることによって意思決定主体の発生の問題を取り扱い得るようになる。)「意思決定主体(プレーヤー)」を定義

することの有用性は、まず何よりも、ゲーム理論における数々のモデルの成功によって分かる。ゲーム理論のモデルによって得られる数々の結果は、社会科学や生態学などにおける数多くの問題に有用な視点を与えることになった。しかし成功を収めたことの裏返しとして、ゲーム理論では「ダイナミクス自体を問題にする」という視点はほぼ完全になくなっている。その主な理由の一つは、プレーヤーの完全な合理性に関する仮定である。すなわち、時の流れに沿って過去から未来へと続く全ての事象を把握し、計算してからプレーヤーは意思決定を行う。(こうすることによって、時間の流れを一つのものとして取り扱うことができる。そしてこうすることによって、強力な理論の構築が可能になった訳であるが、既に述べたように我々自身の意思決定方法とあまりにもかけ離れている場合が多いし、理論上それが不可能な場合も少なくない。)

さて、本稿で紹介した動的ゲームは力学系のモデルとゲーム理論のモデルの間に位置するモデルである。動的ゲームでは、意思決定のプロセスと共にゲームの動的な側面も記述される。つまり、意思決定がゲームに影響を与え、ゲームが変動して行くプロセスも考慮される。また、自己と他者の状態が意思決定に与える影響をモデルの中で明示的に考慮する。

動的ゲームではこのようなゲームのダイナミクスについても考えなければならないので、静的ゲームで簡単に取り扱うことが出来る問題を敢えて動的ゲームとしてモデル化することには意味がないこともある。しかし本稿で見てきた通り、動的ゲームとしてモデル化することによって、静的に表現した時には見えない部分が初めて見えるようになる場合があるのも事実である。「意思決定主体に関する問題」の中には、ダイナミクスのレベルのことも動的ゲームとして素直にモデル化するほうが適当な問題や、さらに動的ゲームとして取り扱わざるを得ない問題もあることであろう。なぜなら、我々の住むこの世界は基本的に動的なものであり、ダイナミクスのレベルで考えるべき問題は数多くあるからである。動的ゲームでは、系の力学的法則を主体の意思決定に係わる部分: f、およびそれ以外の部分: g の二つに分けて簡単に表現される。意思決定主体の相互作用(=ゲーム)の問題を取り扱うために、ある意味自然なモデルであると言える。もちろん(意味があるかどうかは別にして)、時間発展の法則で変数の変化を固定することによって静的な繰り返しゲームを記述することも出来る。その意味で一般性の高いモデルであると言える。だが、その一般性の裏返しとして、静的ゲームでは数学的解析がある程度可能だったのに対し(均衡解など:解析が可能なレベルまで抽象化し、利得行列として表現する)、動的ゲームでは数学的解析は困難を伴う場合が多い。しかし本稿で行なったように、系の力学的法則を計算機プログラムとして実装し、実際に計算機実験を行なうことでその動的ゲームの性質を知ることは可能であり、それは、このような系について調べる上で非常に有効な手段である(SPGダイアグラムの作成、その他)。

本稿で見られたいくつかの実験結果は、これまで考慮されることのなかった「ゲームのダイナミクス」の視点の重要性を示唆するとともに、その解析の可能性も示している。動的ゲームに関する解析はまだ始まったばかりであるが、例えば戦略的安定軌道など、動的ゲームとして分析することによって初めて分かる事実は、現実の動的な生態系型システムの現象を考える上で、一つの有用な視点を与えることができるかもしれない。

Part III

結託構造とコミュニケーションの進化

Chapter 17

導入

要旨

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。

本稿では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。

17.1　2 人ゲームにおける協力とコミュニケーション

まず、二人ゲームにおける「協力」と「コミュニケーション」の問題について考えてみたい。アクセルロッドによる有名な計算機実験で、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るという有名な事実がある。しかし、「協力」のためには当然のことながら何らかの形のコミュニケーションが必要である。

17.1.1　協力に意味があるゲーム

協調状態が広がり維持されるためにはどのようなコミュニケーションが必要なのだろうか? またゲームによって、どのような協力形態が可能で、どのようなコミュニケーションが必要なのだろうか?ここでは協力とコミュニケーションをゲームの分類という立場から考えてみる。

ゲームは一般に、その性質から以下のように分類することができる。そして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 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2.3 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、同時に出さ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 [36] は連続ゲームである。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 [37])。

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

Table 17.1: 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

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。例えは、battle of sexes (夫婦の諍い、恋人の語らい) と呼ばれる、Table17.1 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 [20]。) 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。

17.1.2 繰り返し囚人ジレンマにおけるコミュニケーション

前節で述べたように、2 人非ゼロ和ゲームでは協力に意味がでてくる。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2.3 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 [38])。

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、この様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 個しか産まないので、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、Ficsher 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、協力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 [39]、トゲウオ [40]、グッピー [41] 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、この様な協力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。協力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

でも 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力(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。(多様さの欠如)
2. その協力行動の内容自体も単調なものである。(複雑さの欠如)
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。

17.1.3 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況のほかに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(Zermero 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2.4 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、協力的な戦略に、裏切り的な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 人のプレーヤーが「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。

17.2　進化する player による 3 人ゲーム

17.2.1　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(≥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で、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、なにもすることができない。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 artifical 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。

17.2.2　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と自然を相手にした 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も分かる。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 artifical 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 artificail 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 18

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って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。

18.1 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 つの資源をめぐって、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 は得点をもらえない)。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17.2.1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」[20] 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 18.1 に利得行列を示す。)

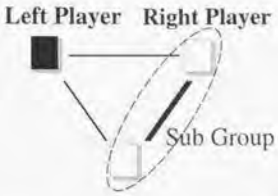


Figure 18.1: 右のプレイヤーと「白のカード」でサブグループを形成した状態

Table 18.1: 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。

4. 以上をもって 1 round のゲームとする。

18.2 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 人の間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 18.3.1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 は初手に何を出すかのについて情報を持つ。

Figure18.2 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。Figure18.2 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 Figure18.2 の右の図のように表現する。

round	0	1	2	3	4	5	...
player1 のカード	白	白	白	白	黒	黒	...
player2 のカード	黒	白	白	白	白	白	...
player3 のカード	黒	白	白	白	白	黒	...
player1 の state	1	7	7	7	6	4	...
player2 の state	2	7	7	7	5	1	...
player3 の state	4	7	7	7	3	2	...
player3 の得点	3	0	0	0	3	3	...

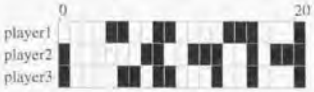


Figure 18.2: やりとりの例：player3 の左に player1、右に player2 がいる位置関係で行なわれたやりとりの例。各 player は過去の round の state から各個体の持つアルゴリズムに従って、一意に次にだす手を決める。左のやりとりで出されたカードの遷移を、右の図のように表現する。横軸は round である。

18.3 Player の持つ戦略

18.3.1 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[35] 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、比較的大きい 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 分木をつくることが出来る。この tree はちょうど染色体にあたるものである (Figure 18.3.1 参照)。

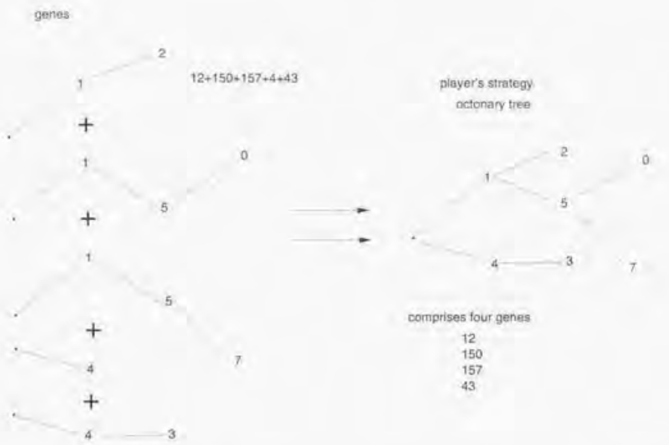


Figure 18.3: 8 分木による coding : gene を合体させて 8 分木を構成する。gene どうしがオーバーラップした時は短い gene が長い gene にとって代られる。

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、…、A_n とする。ただし、完全にオーバーラップしていてはいけない。(例：Figure 18.3.1 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、…、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。

18.3.2 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。(Figure18.3.2)

1. 枝がついていない場所に枝を付ける。(各枝ごとに matation 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。)

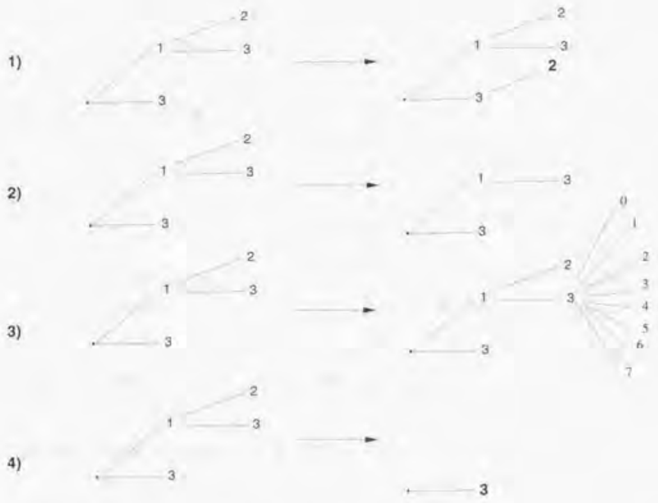


Figure 18.4: 4 つのタイプの mutation

18.4 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 18.2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。平均利得がを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。

$$x_i(t+1) - x_i(t) = d w_i x_i(t)$$

(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、世代がかわる時、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。

18.5 このゲームの特徴

18.5.1 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**

18.5.2 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 18.5 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 18.6 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。

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、$\frac{3.0\times4+0.0\times4}{8} = 1.5$ 点になる。また、Table 18.6 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。

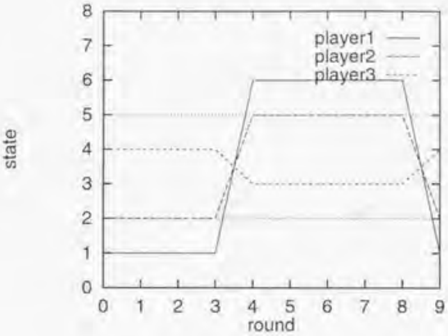


Figure 18.5: 階級的分化の例

Figure 18.6: 時間的分化の例

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らないだろう。

18.5.3 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大きい。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 19

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. 安定で完全に一様な 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て持つ6 つの種族でシミュレーションを開始した。

19.1 階級的分化、協力の発生

19.1.1 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 19.1 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 19.1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 19.2 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、それに従って 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、plyaer 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 18.5.2 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 19.2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(18.5.1節参照)。

19.1.2 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 19.1(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[2]。

19.1.3 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19.1.2 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。

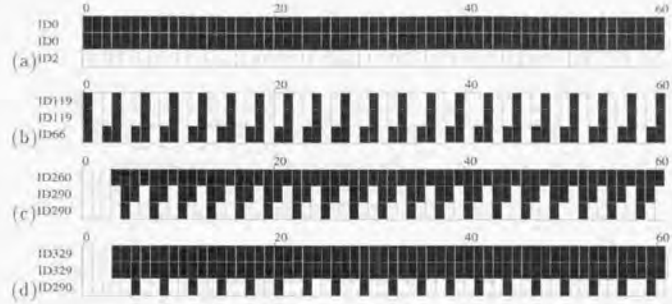


Figure 19.1: 初期のやりとりの例 (Generation 0–450)：(a) は generation 0 、(b) は generation 200、(c) は generation 400、(d) は generation 410 で行なわれたやりとりの代表例である。(a) でのやりとりを見ると、2 人の ID0 は「黒のカード」出し、ID1 は「白のカード」を出し続けていて、ID1 が 2 人の ID0 に仲間外れにされ続けている。ID0 は他の 2 人の内のどちらか 1 人の行動が変われば得をするので、「白のカード」のままで何回か待つことは必ずしも意味がない訳ではない。しかし 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。genaration 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。

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 19.1.2 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 19.4 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 19.3-(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

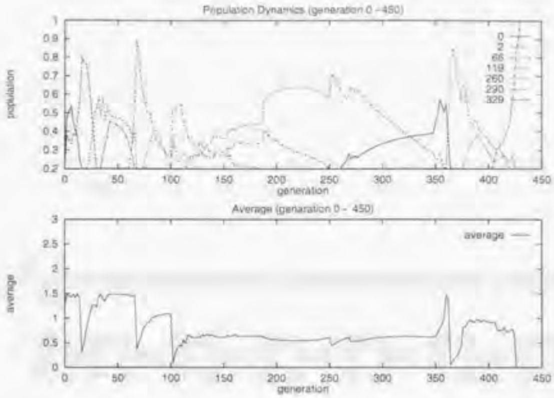


Figure 19.2: 初期の population dynamics とシステム全体の average : population dynamics では、population が 0.2 を超えている種族のみ表示されている。average は全体として次第にさがり、1.0 を割るようになる。最後に現れた ID329 はこのあと generation 4300 くらいまでほとんどの population を独占し続ける。この種族は完全に攻撃的なやりとりで新しい種族の台頭を防ぎ続ける。

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 19.3–(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 19.1–(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な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 19.1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 19.4 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 18.5.2節)。

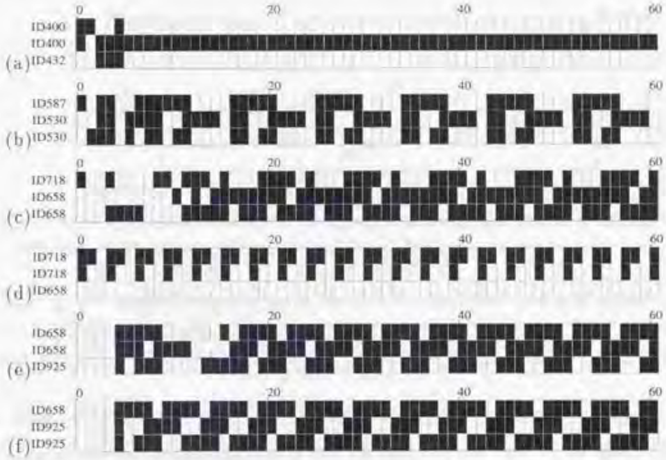


Figure 19.3: 協力的な要素の入ったやりとり(Generation 4350–4750) : (a)は generation 4400 、(b)は generation 4500、(c)は generation 4600、(d)は generation 4600、(e)は generation 4700、(f)は generation 4700 で行なわれたやりとりの代表例である。やりとりの中で次第に時間的分化が見られるようになってくる。

19.2 安定で一様な周期的時間分化の社会

19.2.1 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)。

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 19.5 に示す。全種族の中から 3 人のplayer を任意

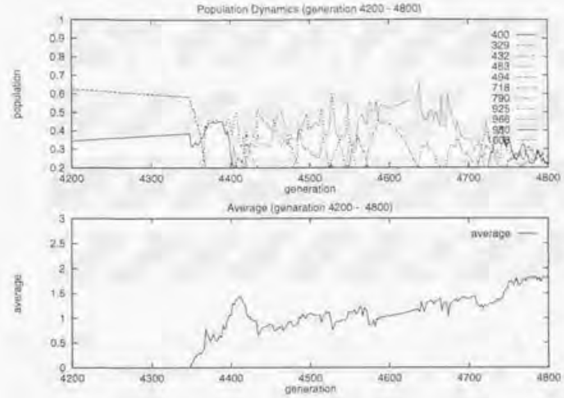


Figure 19.4: Genaration 4200 から 4800 までの population dynamics とシステム全体の average : ID329 が滅びた後、徐々に average が上がって 2.0 点に近付いていく

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 点近くの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。

19.2.2 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。

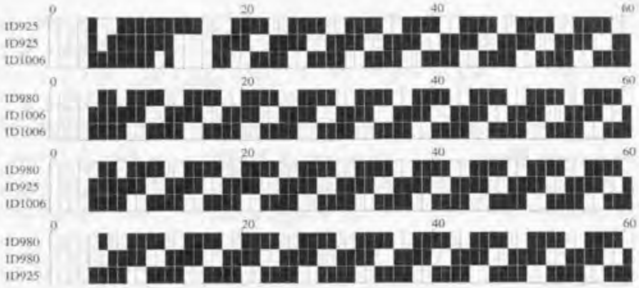


Figure 19.5: 平等な 6 周期の時間的分化 (Generation 4750–7700) : 上のやりとりは全て generation 4800 に行なわれたやりとりの代表例である。「白のカード」を出す player が 2 人、「黒のカード」を出す player が 1 人の状態。「黒のカード」を出す (結託から外れる) 役割を 3 人の player の間で平等に 2 回ずつで交替する。3 人の平均利得の合計が 6 点で、システム全体にとっても最も効率がいいやりとりの一つ。

(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り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き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 (一時的にしろ) 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 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 19.6 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がらない)。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。

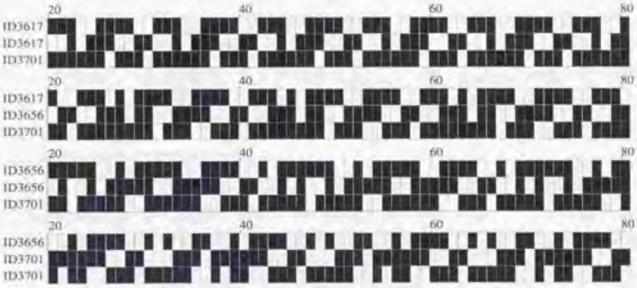


Figure 19.6: 6 周期社会の終焉 (Generation 7740 前後) : 上のやりとりは全て generation 7740 に行なわれたやりとりの代表例である。新種-ID3701 が 6 周期型の種族-ID3617 と ID3656 から搾取しているやりとりの様子。ID3701 が増えるに従って全体の average が下がり、新しい やりとりの社会が生まれる下地が出来上がる。

19.3 周期的社会の変遷

19.3.1 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, Figure19.7)
- 18 周期の時間的分化社会
  (Generation 8240–8380, Figure19.9)

- 5 周期が中心の社会
  (Generation 8550–8650, Figure19.8)

- 一時的に現れた多様な周期的社会の例
  (Generation 8700, Figure19.10)

- 3 周期社会の始まり
  (Generation 9000, Figure19.11)

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暫くして、Figure19.7 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、Figure19.7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、このシュミ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 18.5.3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 19.2.2 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 Figure19.8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。

他の社会に移行しやすい長い周期の社会—18 周期の社会

Figure19.9 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。

(a)
(b)
(c)
(d)

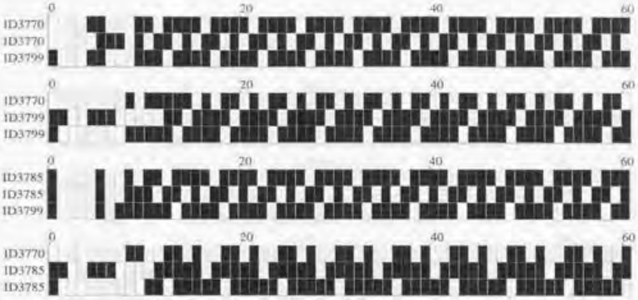


Figure 19.7: 不平等な 5 周期の時間的分化 (Generation 7800) : 上のやりとりは全て generation 7800 に行なわれたやりとりの代表例である。ここに紹介していないやりとりも含めて (d) 以外のやりとりでは、全ての (a) と類似の 5 周期の時間的分化が見られる。

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。

多様な周期的やりとり

Figure19.10 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、Figure19.10-(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 点であるといことは全く内容が違う。

こういった社会では、Figure19.10 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

Figure19.11 に見られるように、3 周期が中心的な社会が始まる。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。

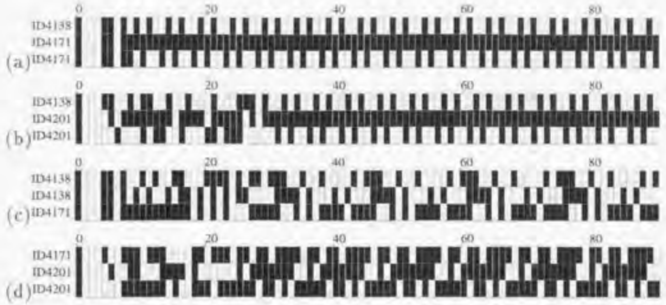


Figure 19.8: 効率的な 5 周期のやりとりが中心の社会 (Generation 8550–8650) : 上のやりとりは全て generation 8600 に行なわれたやりとりの代表例である。

19.4 多様化と複雑化

19.4.1 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 Figure19.12 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 Figure19.12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19.3.1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 Figure19.14 に示す。

(第2.3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。

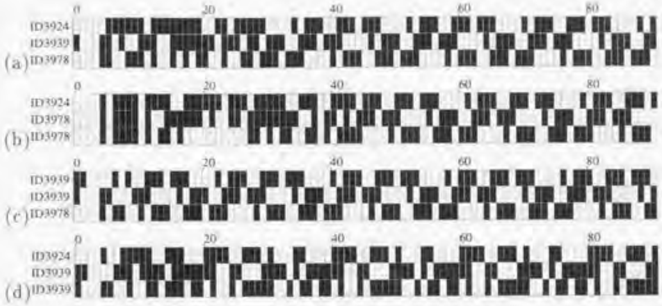


Figure 19.9: 18 周期の時間的分化 (Generation 8240–8380)：上のやりとりは全て generation 8300 に行なわれたやりとりの代表例である。ここに載せていないものも含めて (d) 以外は全て 18 周期で役割交替をするやりとりを行なっている。

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。

19.4.2 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 Figure19.15)、次第にシステム内のやりとりが多様になり(Figure19.16)、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。

19.4.3 「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、Figure19.17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 Figure19.6、Figure19.10 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 Figure19.17 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。

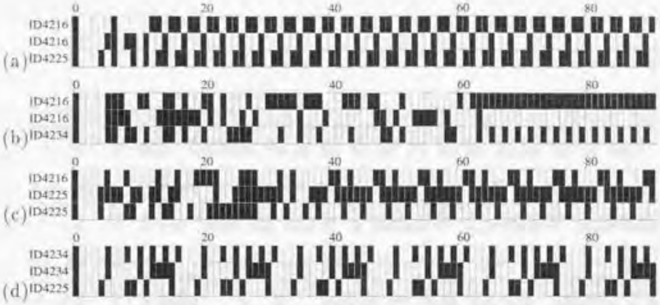


Figure 19.10: 多様な周期的社会の例 (Generation 8700) : 上のやりとりは全て generation 8700 に行われたやりとりの代表例である。様々なやりとりが行なわれているが、かなり効率的なものが多い。ただし、(d) では望ましくない状態が(全員が同じカードを出す状態)かなり入っている。周期部で旧種族を凌駕しようとするとこの様なやりとりに陥る可能性もある。

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。

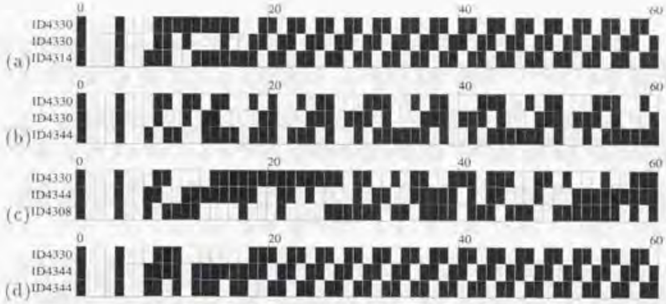


Figure 19.11: 3 周期中心社会の始まり (Generation 9000) : 上のやりとりは全て generation 9000 に行われたやりとりの代表例である。3 周期中心とはいえ、様々なやりとりが実際は混在して、3 周期が絶対的に優勢な訳ではない。

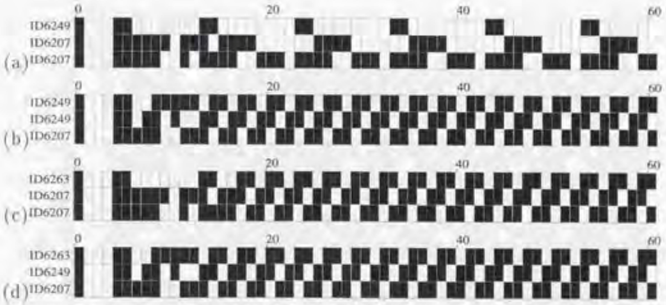


Figure 19.12: 3 周期の時間的分化が基本となる社会 (Generation 9000—15300) : 上のやりとりは全て generation 12500 (とくに 3 周期型のやりとりが最も盛んであった時期) に行なわれたやりとりの代表例である。

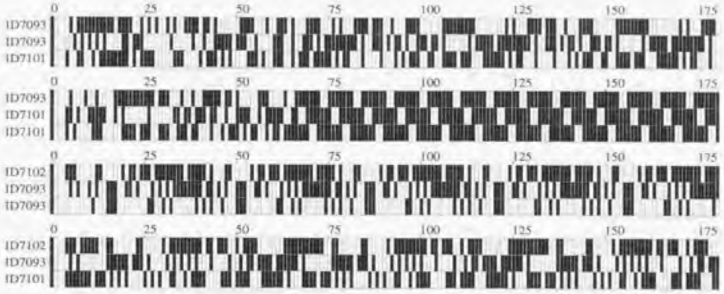


Figure 19.13: 3 周期社会の一時的崩壊 (Generation 14300) : 上のやりとりは全て generation 14300 に行なわれたやりとりの代表例である。この generation では、一時的に 3 周期のやりとりが全く見られなくなる。

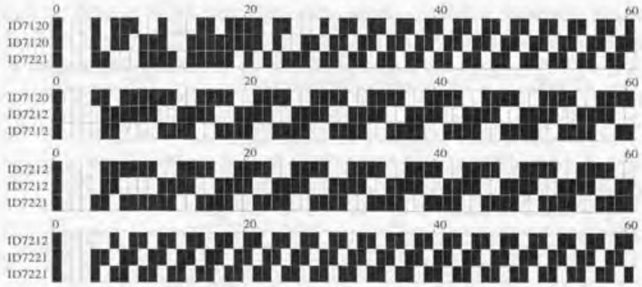


Figure 19.14: 3 周期の時間的分化 と 6 周期の時間的分化の共存 (Generation 14550–14850)

Figure 19.15: 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。

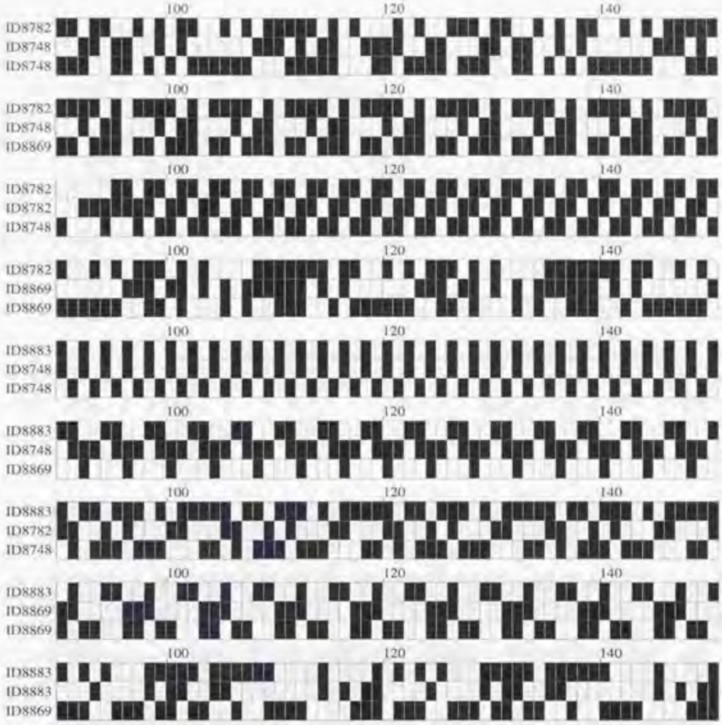


Figure 19.16: 一つの社会で見られる多様なパターン (Generation 16700)

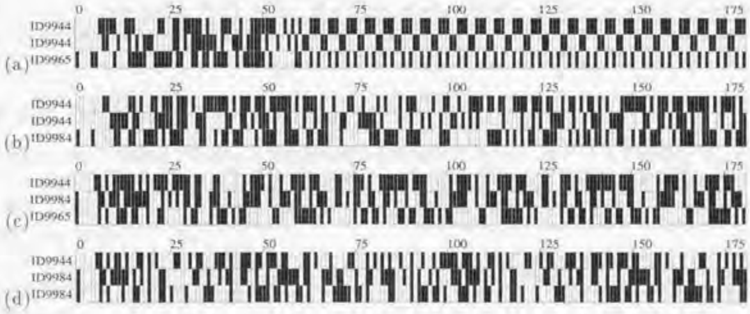


Figure 19.17: 複雑化と多様化 (Generation 19600) : 単純なコミュニケーションと複雑なコミュニケーションが混在する状況が生まれる。

19.5 分析

19.5.1 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 19.4.2 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 19.4.3 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 (Figure19.18 は後者にあたる)。しかし時おり、Figure19.19 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。

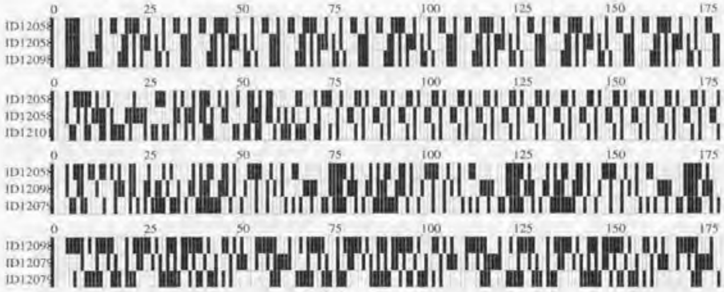


Figure 19.18: generation 20000 以降の様子 (Generation 25900) : 上のやりとりは全て generation 25900 に行なわれたやりとりの代表例である。

19.5.2 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 19.4.2 節 (Figure19.16) 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。

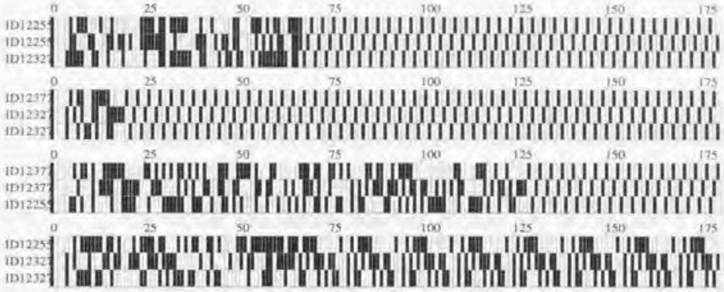


Figure 19.19: 3 周期の社会(Generation 26450–26650) : 上のやりとりは全て generation 26600 に行なわれたやりとりの代表例である。200 generation くらい安定して存続する。(generation 9000 以降に見られた 3 周期社会とは「黒のカード」「白のカード」が逆になっている。)

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 Figure19.20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、Figure19.20-(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、Figure19.20-(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。

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 Figure19.21 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。

19.6 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ので、アルゴリズム的に旧種族と違う部分がいくらかなければならない。

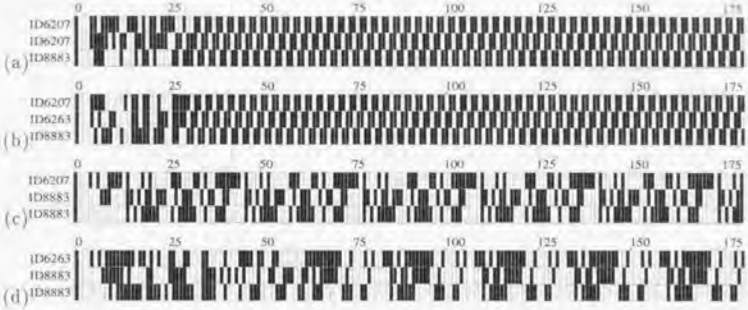


Figure 19.20: ID8883 (generation 16700 出身) の 3 周期社会(generation 12500) におけるやりとりの様子

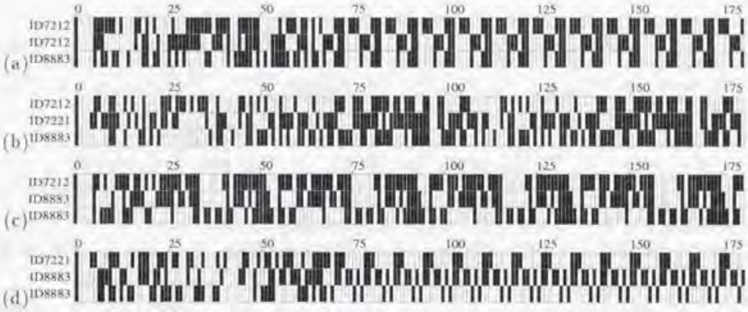


Figure 19.21: ID8883 (generation 16700 出身) の 3、6 周期共存社会(generation 14550–14850) におけるやりとりの様子

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ーの解像度なら 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 Figure19.6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。

Figure 19.22: 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。

19.6.1 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。(Table19.1) 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。

Table19.1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。

まず、

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

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。

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

19.6.2 共通の構造—6 周期社会の枝の分散

Table19.2に6 周期社会の種族のにおける枝の分散 (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 mutantation 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、

Table 19.1: Genaration 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と(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(uesd) 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(uesd)(= 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

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。

19.6.3 変異種に対する抵抗力

generation 18000 の種族の枝の分散を Table19.3 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、そのうち全種に使われている枝は 11 本しかない。全く使ってないにも関わらず 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。

Table 19.2: Genaration 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 19.3: Genaration 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

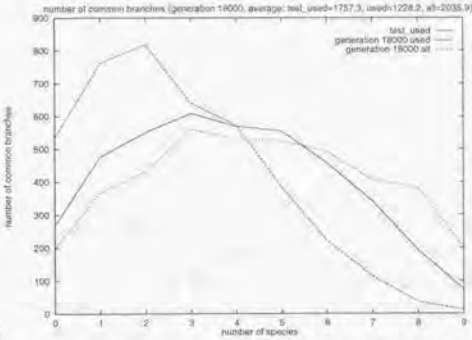
少し前の社会の種族に対する記憶

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。

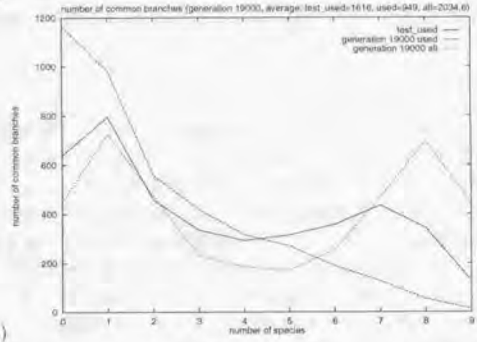
そこで、generation 18000 の社会の全 9 種族に 300 generation から 500 generation 前の社会に現れた 5 種族を加えてゲームを行ない、使われている枝を調べてみた。さらに、generation 19000 に社会(全 9 種族)についても同様のことを行なった。その結果を Figure19.23に示す。

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) にかなり近付く。



(a)



(b)

Figure 19.23: 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 20

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 当たりに選択できる「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、人数は少なくても 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[36]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るようになる(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

資源の絶対量が足らない時、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. 栄養が足ら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[42]。

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が、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行く「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 やりとりの方法となってしまう。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。周期的時間的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「Coopration」、「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 で譲ったら次には自分が譲る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

まず、指導教官の金子邦彦教授には修士課程から今にいたるまで、研究の方法、切り口、考え方、その他あらゆる面で貴重なご指導、ご助言をいただきました。また、その一研究者としての普段からの言動は自分自身いろいろ考えさせられる面もあり、その他数え切れないくらい多くの有意義な影響をこれまで頂いてきたと思います。

池上高志助教授には、直接お目にかかる前から、研究のもともとの動機・方向性のレベルから決定的な影響を受けています。また現在に至るまで、様々な有益なご助言を頂きました。また、佐々研究室の皆さん、池上研究室の皆さん、そして金子研究室の皆さんには、研究の面でもそれ以外の面でもお世話になりました。特に、計算機の管理など、研究環境の整備に尽力して下さった山本 知幸さん、古澤 力君にはいろいろとお世話になっています。そして、京都産業大学経済学部の小田宗兵衛助教授には経済学的な視点からの様々なご助言を頂くとともに、ゲーム理論その他に関して多くの貴重な情報を教えていただきました。また、様々なお話を聞かしていただき、折に触れ励ましてくださり元気づけていただきました。

この場を借りて皆様に感謝の意を表します。

また友人たち、特に長谷裕史君、中村能久君、勝呂隆之君、梶永泰正君、村瀬友英君、山崎太夏子さん、秋葉政江さんには、直接的・間接的なコミュニケーションを通じて多くのエネルギーをもらいました。また、上井隆之君には諸々のことに関して非常に多くのことを教えてもらいました。彼がいなければ現在の自分の研究生活はなかったと思います。そして、勝見春世さんには、陰に日に様々な面で支えてもらい、特に精神面では言い尽くせないほどお世話になったと思います。皆様に感謝の意を表します。

最後に、長年私を見守ってくれた私の兄たちと、私をこの世に送り出し、私を育て、今までいつも私を温かく見守ってくれた私の両親に感謝したいと思います。

Bibliography

[1] Aumann, R. J. "Rationality and bounded rationality", Nancy L. Schwartz Lecture, J. L. Kellogg School of Management, Northwestern University, 1986.

[2] Axelrod, R. "The evolution of cooperation", Basic Books, New York, 1984.

[3] Axelrod, R. and D. Dion., "The further evolution of cooperation", Science (Washington, D. C.), 242:1385-1390, 1988.

[4] R. Boyd and P. J. Richerson, "The evolution of reciprocity in sizable groups", Journal of Theoretical Biology, 132:37-356, 1988

[5] R. Boyd and P. J. Richerson, "Culture and cooperation", pp111-132 in J. J. Mansbridge, ed. Beyond self-interst, Univresity of Chicago Press, Chicago.

[6] R. Boyd and P. J. Richerson, " Punishment allows the evolution of cooperation (or anything else) in sizable groups", Ethology and Sociobiology, 13:171-195, 1992

[7] Davis, D. D. and C. A. Holt, "Experimental Economics", Princeton University Press, Princeton.

[8] Feeny, Berkes, McCay and Acheson 1990. "The tragedy of the Commons: Twenty-Two Years Later", Human Ecology, 18, 1: 1-19

[9] Hardin, G. 1968. "The tragedy of the commons." Science (Washington, D. C.) 162:1243-1248.

[10] N.V.Joshi, "Evolution of cooperation by reciprocation within structured demes", Journal of Genetics, 66:69-84, 1987

[11] Kaneko K. and J. Suzuki, "Imitation games", Artificial Life III, 43-54, 1994, Addison-Wesley Publishing Conpany, Langton, C.

[12] Maynard Smith, J. "Evolution and the Theory of Games" Cambridge University Press, Cambridge, 1982

[13] A. Neymann, "Bounded complexity justifies cooperation in the finitely repeated prisoner's dilemma", Economic Letters 19, 227-230, 1985

[14] M.A. Nowak and K. Sigmund, "Tit for tat in heterogenous populations", Nature, Vol. 35, No. 16, 250-253, 1992.

[15] Rössler,O.E. 1974. Adequate locomotion strategies for an abstract organism in an abstract environment: a relational approach to brain function in Physics and Mathematics of the Nervous System, 4: 342-369, Springer Lecture Notes in Biomathematics, Conrad, M. and Guttinger, W. and Dalcin, M.

[16] Rössler,O.E. "Chaos in Coupled Optimizers", Annals of New York Academy of Sciences

[17] Rössler, O. E. 1994. "Fraiberg-Lenneberg Speech", Chaos, Solitons & Fractals, 4-1, 125-131, Elsevier Science Ltd

[18] Rubinstein, A. 1986. "Finite automata play the repeated prisoner's dilemma", Journal of Economic Theory 39, 83-96, 1986

[19] Simon, H. 1957, "Models of Man", Johon Wiley and Sons, New York

[20] von Neumann, J. and O. Morgenstern, 1944, "Theory of Games and Economic Behavior", Princeton University Press, Princeton

[21] E. Zermelo, "Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels" Proceedings of the Fifth International Congress of Mathematicians, 2, 501-504, Cambridge University Press, E. W. Hobson and A. E. H. Love, 1913

[22] 世界資源研究所(編). "世界の資源と環境 1994-1995". 中央法規出版, 1994

[23] 高橋 亮. 1997. "文化淘汰と協力の進化" 日本動物行動学会 NEWSLETTER 30:27-30.

[24] Krebs J.R. and Davies N.B., "行動生態学" 蒼樹書房 1980

[25] Aumann R.J., "Lectures On Game Theory", Westview Press 1989

[26] 西田 俊夫, "ゲームの理論" 日科技連, 1973

[27] 日本動物学会 編 "進化学—新しい統合" 学会出版センター 1985

[28] 小山 明男 "ゲームの理論入門" 日本経済新聞社 1980

"Theory of Games and Economic Behavior" Princeton University Press 1944

[29] Maynard Smith, J. and Price, G.R. "The logic of animal conflict" Nature 246:15-18 1973

[30] Hamilton, W.D. "The genetical evolution of social behaviour, I, II." Journal of theoretical biology 7:1-52 1964

[31] Boyd, R. "Mistakes Allow Evolutionary Stability in the Repeated Prisoner's Dilemma Game" Journal of Theoretical Biology 136:47-56 1989

[32] K.Matsuo, "Ecological characteristics of strategic groupa in dilemmatic world" in: Proc. IEEE Int. Conference on Systems and Cybernetics pp.1071-1075 1985

[33] Wiener, N. "Cybernetics 2nd edition" Massachusetts 1961

[34] K. Lindgren. "Evolutionary Phenomena in Simple Dynamics" Artificial Life II pp. 295-312 edt. Langton, C. Addison-Wesley Publishing Conpany 1991

[35] Ikegami, T. "From genetic evolution to emergence of game strategies" Physica D 75:310-327 1994

[36] Kaneko, K. and Suzuki, J. "Imitation games" Artificial Life III 43-54 edt. Langton, C. Addison-Wesley Publishing Conpany 1994

[37] Neumann, J. von. "Zur Theorie der Gesellschaftsspiesle," Mathematische Annalen 100:295-320 1928

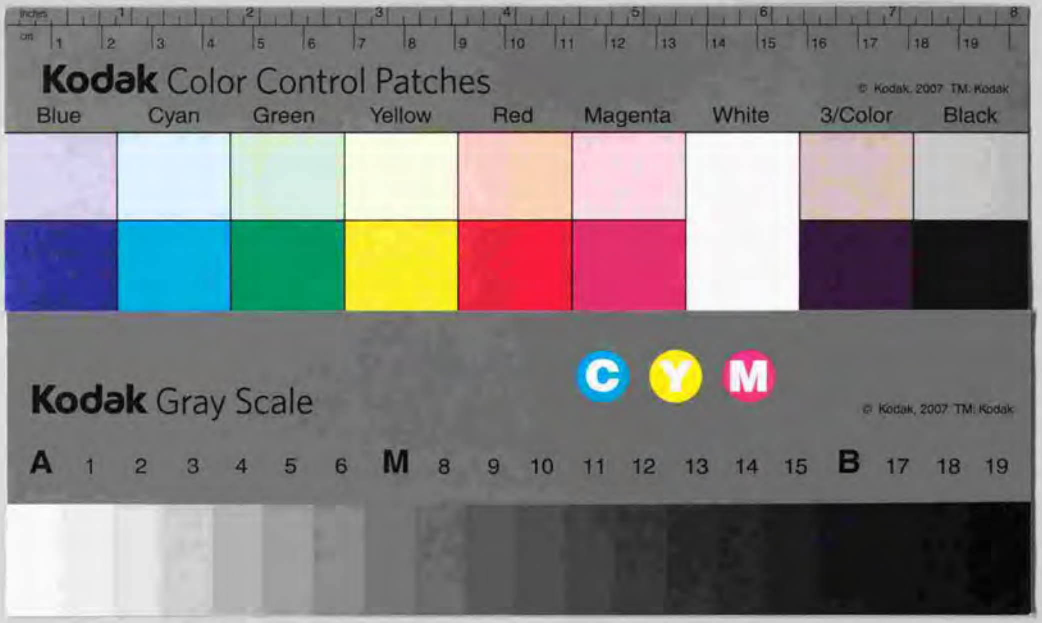
[38] Fischer, E.A. "The relationship between mating system and simultaneous hermaphroditism in the coral reef fish, Hypoplectrus nigricans.", 28:620-633 1980 Anim Behav

[39] George, C. "Behavioral interactions in the pickerel the mosquitofish", Garvard University 1961

[40] Milinski, M. "TIT FOR TAT and the evolution of co-operation." Nature 325:433-435 1987

[41] Seghers, B. "An analysis of geographical variation in the anti-predator in the guppy.", University of British Columbia 1973

[42] Kneko,K. and Yomo,T. "Cell division, differentiation and dynamic clustering", Physica D 75:89-102 1994


Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black
Kodak Gray Scale
C Y M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19