

分配的正義に関する規範への 進化的アプローチ

小島 和晃

目次

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 分配的正義への記述的 / 進化的アプローチ | 2 |
| 1.3 本研究の目的 | 4 |
| 1.3.1 分配的規範に関わる進化ダイナミクス | 4 |
| 1.3.2 社会ネットワーク構造の導入 | 5 |
| 1.4 本論文の構成 | 6 |
| 第2章 D-I ゲーム | 7 |
| 2.1 D-I ゲーム | 7 |
| 第3章 分配的規範に関わる進化ダイナミクス | 12 |
| 3.1 はじめに | 12 |
| 3.2 ゲーム論的分析 | 12 |
| 3.3 進化シミュレーション | 16 |
| 3.3.1 出現した規範 | 17 |
| 3.3.2 進化ダイナミクス | 19 |
| 3.4 リプリケーターダイナミクス | 20 |
| 3.4.1 リプリケーターダイナミクスのベクトル図 | 21 |
| 3.4.2 進化シミュレーションとの比較 | 22 |
| 3.5 まとめ | 23 |
| 第4章 社会ネットワーク構造の導入 | 27 |
| 4.1 はじめに | 27 |
| 4.2 エージェントベースの社会ネットワークモデル | 29 |
| 4.3 進化シミュレーション | 31 |
| 4.3.1 出現した規範 | 31 |

| | | |
|---------|----------------------------|----|
| 4.3.2 | 進化ダイナミクス | 34 |
| 4.3.2.1 | $w = 1$ でみられた進化 | 35 |
| 4.3.2.2 | $w = 10$ でみられた進化 | 39 |
| 4.3.2.3 | $w = 50$ でみられた進化 | 41 |
| 4.4 | 議論 | 41 |
| 4.5 | まとめ | 44 |
| 第 5 章 | 結論 | 46 |
| | 謝辞 | 48 |
| | 参考文献 | 49 |
| | 関連発表文献 | 52 |

目 次

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1.1 | D-I ゲームの報酬．要求量の衝突がなければ，両者とも要求量分の報酬が得られる．衝突した場合，衝突した部分を要求の強さに応じて分け合い，衝突しなかった部分と分けた部分の合計が暫定的な報酬となる．そこに，両者の要求の強さの和に応じた衝突の損失がある． | 8 |
| 2.1.2 | $r = 1$ での D-I ゲームの対戦例．矢印の上下の戦略の対戦で，それぞれの得られる報酬をそれぞれの戦略の下に記す．ここでは，6つの例を示した． | 9 |
| 2.1.3 | 要求量，要求の強さのそれぞれの値の呼称．D-I ゲームは要求量と要求の強さの 2 次元の戦略をもつ．要求量 d が 0.5 より小さいとき“寡欲: generous”と呼び，0.5 より大きいとき“貪欲: greedy”と呼ぶ．特に， d が 0, 0.5, 1 のとき，それぞれ“無欲: unselfish,” “均等: even,” “独占: selfish,” と定義する．もし要求の強さが $i < 0.5$ なら“弱気: timid” , $i > 0.5$ なら“強気: bold”と呼ぶ．特に，要求の強さ i が 0, 0.5, 1 であるとき，それぞれ“軟弱: wimpy,” “穏健: moderate,” “強硬: belligerent,” と定義する． | 10 |
| 2.1.4 | 両プレイヤーが同じ貪欲な戦略のとき ($d_0 = d_1 > 0.5$ and $i_0 = i_1$) の i_0 に関する報酬 $((1 - i_0^r)/2)$. | 11 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.1 | 戦略空間上の 3 種の規範 (Norm A: 平等主義 (Egalitarianism), Norm B: 自由主義 (Libertarianism), Norm C: 軟弱な自由主義 (Wimpy libertarianism)) . (a)-(c) の図は $r = 0, 0 < r \leq 1, r = 1$ の場合にそれぞれ対応している . (b) の図中では, 1 重の丸で norm B: 自由主義 ($r \geq 0.5$ で出現) , 2 重の丸で norm C: 軟弱な自由主義 ($0 < r < 0.773$ で出現) をそれぞれ示した . (b) の図に示すように, norm B: 自由主義は $r = 0.5$ で 2 つに分かれ, 片方は要求の強さが高くなり, もう一方は低くなる | 14 |
| 3.2.2 | $r = 0, r = 0.25, r = 0.5$ のときの 3 種の規範間の対戦による報酬 . | 15 |
| 3.3.1 | (a) 戦略が集団で最も多かった試行数 . 上図 (a) は最終世代の集団中で最も多かった戦略を調べ, 100 試行中で何試行でその戦略が大勢を占めることができたのかを数えたものである . 横軸は r であり, 大きくなればなるほど衝突の損失が弱いことを意味する . (b) 集団中の平均報酬 . 下図 (b) のグラフは 集団中の平均報酬であり, 100 試行中で平均報酬が最も高かった試行, 平均的な試行, 最も低かった試行の場合を示す | 18 |
| 3.3.2 | 要求量, 要求の強さ, 報酬の集団中の平均の推移 . (a) は $r = 0.2$ のときの試行, (b), (c) は $r = 0.6$ のときの試行, (d) は $r = 1$ のときの試行での結果を示す | 25 |
| 3.3.3 | 得られた 3 種の進化シナリオ . (a)-(c) は各進化の遷移を示す . (a) 平等主義集団 : Egalitarian population への進化 . (b) 平等主義集団 : Egalitarian population に一旦収束し, その後に 自由主義集団 : Libertarian population への進化 . (c) 自由主義集団 : Libertarian population への進化 | 26 |
| 3.4.1 | 典型的な 3 種の戦略間のリプリケーターダイナミクス . (a) $r = 0.2$ のとき, 集団が $S(0.3, 0.5), S(0.7, 0.5), S(0.5, 0.5)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 . (b) $r = 0.2$ のとき集団が $S(0.5, 0.1), S(1, 0), S(1, 0.1)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 . (c) $r = 0.6$ のとき, 集団が $S(0.5, 0.5), S(1, 0), S(1, 0.4)$ を用いる場合のベクトル図 . (d) $r = 1$ のとき, 集団が $S(0.5, 0.5), S(1, 0), S(1, 0.5)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1.1 | $r = 1$ での D-I ゲームの代表的な戦略間の報酬 | 28 |
| 4.2.1 | 平面格子におけるムーア近傍のネットワークのリンクの張替え . . . | 30 |
| 4.3.1 | $w = 0.01, w = 0.1$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の 集団構成と平均報酬 . 図は 100 試行で平均したものをプロットし た . 縦に並んだ図の 3 つでひとそろいの結果である . 1 段目 , 2 段目の図の各領域は各戦略 ($d, i = 0, 0.1, \dots, 1$) に対応し , 図の下 からそれぞれ $d, i = 0$ (赤の領域), $d, i = 0.1$ (緑の領域), $d, i = 0.2$ (青の領域), $d, i = 0.3$ (ピンクの領域), $d, i = 0.4$ (水色の領域), $d, i = 0.5$ (黄色の領域), $d, i = 0.6$ (黒の領域), $d, i = 0.7$ (橙の領 域), $d, i = 0.8$ (灰色の領域), $d, i = 0.9$ (2 番目の赤の領域), $d, i = 1$ (2 番目の緑の領域) を示す . 3 段目の図は集団中の平均報酬を示す . | 32 |
| 4.3.2 | $w = 1, w = 5$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の集団構 成と平均報酬 . 図 4.3.1 と同様のグラフである | 33 |
| 4.3.3 | $w = 10, w = 50$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の集 団構成と平均報酬 . 図 4.3.1 と同様のグラフである | 34 |
| 4.3.4 | $w = 1, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 上 図は平等主義戦略 $d = 0.5$ と自由主義戦略 $d = 1$ の集団中の割合 を示す . 下図は軟弱戦略 $i = 0$, 穏健戦略 $i = 0.5$, 弱気戦略 (軟弱 含む) $i = 0 - 0.4$, 強気戦略 (強硬含む) $i = 0.6 - 1$ の集団中の 割合を示す . 集団の平均報酬は上下両図共にプロットした | 35 |
| 4.3.5 | $w = 1, p = 0.02$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す | 36 |
| 4.3.6 | $w = 1, p = 0.06$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す | 37 |
| 4.3.7 | 平等主義集団と自由主義集団の循環のダイナミクス . 図 4.3.6 の 結果における要求量 , 要求の強さの集団中の平均値の軌跡である . 横軸は要求の強さの集団中の平均であり , 縦軸は要求量の集団中 の平均値である . ランダムな状態の平均値 (0.5, 0.5) から出発し , 時計回りに循環している | 38 |
| 4.3.8 | $w = 1, p = 0.1$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図 のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す | 39 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.3.9 | $w = 10, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図 のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す | 40 |
| 4.3.10 | $w = 10, p = 0.02$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す | 41 |
| 4.3.11 | $w = 10, p = 0.1$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す | 42 |
| 4.3.12 | $w = 50, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移 . 図 のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す | 43 |

第1章 序論

1.1 研究背景

分配的正義 (*Distributive justice*) は社会的に価値のある財や資源の配分や個人が受け取る報酬が見合っているかどうかなどに関する正義である。また、正義は、人の行動について正しいかどうかを判断するための基準である。分配的正義がうまく機能するために、社会は利害関係などを調整する社会規範を必要とする。規範は人がとるべき行動の指針を指し示し、価値判断の基準を提示するものである。社会規範は社会全体の利益に沿うものとなる。狩猟採集社会でさえ、成功したハンターは自分の部族と希少な肉の正確な分配の交渉を行う。純粋な狩猟採集で長く続いた社会では配分を決める支配者は認められず、彼らは平等主義の原則に則って分け合う。分配的正義は進化の初期において人類が集団行動で獲得した獲物の公正な分配を求めたことに起源を持つ根源的な正義の形であると考えられる。現代に生きる我々は所得格差や税率調整などにおいて、どのように富や負担を分配すべきか議論が必要とされている。そこで、分配的正義について理論的に十分に検討する必要がある。そのため、分配的正義を目指した意思決定がどのようなメカニズムに基づいているのか、そして、どのような社会的要件が満たされれば分配的正義が成立するのかを知ることが重要となる。

ゲーム理論は分配的正義を議論する上で有効な道具となる。我々は、社会や経済において、個人や企業、組織、政府など、多くの意思決定者が社会のルールを守りながら、それぞれの目的を実現するために競い合ったり、協力したりする。そのような社会や経済の本質を考え、意思決定や行動の分析を通じてより根本的な問いとしての人間のあり方や社会や経済の成り立ちを知ることができる。それゆえ、分配的正義に関してゲームという枠組みで財や資源の配分に関する意思決定や行動を戦略として記述し、そのメカニズムを分析し、どのような要件で分配的正義が成り立つのかを説明することができる。

本研究では分配的正義に関する規範がどのように進化してきたのかを示すために、進化的アプローチで研究を行う。本研究では進化ゲーム理論や進化シミュレーション、リプリケータダイナミクスなどの進化的アプローチの手法を使う。次節では分配的正義への記述的／進化的アプローチについて述べる。また、本研究では構成論的アプローチに基づき進化シミュレーションを行っている。そこでは、実際の妥当な値を示すなどの定量的なことを探るよりも、求める現象／機能を実現できる定性的な条件を探ることを目的としている。現実の渋滞のシミュレーションのようなものと違い、現実を再現することを第一義的な目的とはしていない。つまり、構成論的アプローチでは、現実の現象／機能を実現するための仮説を提唱することに重きを置いている。例えば、進化によってありうる進化ダイナミクスの可能性を示したりする。

1.2 分配的正義への記述的／進化的アプローチ

ナッシュ要求ゲーム (Nash Demand Game, NDG) [15] は社会規範の起源を説明するために多く用いられてきた。特に、分配的正義の進化的基盤を説明することに用いられる [3, 31, 26, 25, 32, 24, 1]。NDG は最も簡素な方法で社会的協力の結果で得られた資源や財を関係者間で分ける状況を表現している。NDG は資源や財をどのように分けるべきかについて皆が期待するものを社会規範がどのように調整するのかを探る [2]。NDG は 2 人での 1 回限りの交渉ゲームである。NDG では以下のようなゲームの規則で行われる。2 人のプレイヤーが 1 つの資源を取り合う。両者は同時にその資源の要求する割合を提示する。例えば、“資源の 70% 欲しい”とか“資源の 50% 欲しい”などである。もし 2 人の要求量の和が資源の量以下であれば、両者は要求した分だけ資源を得ることができる。一方で、両者の要求量の和が資源量を上回った場合、両者は何も得られない。

古典的なゲーム理論は合理的な選択の規範的な理論に基づき、人々が何を合理的に選択すべきかを指し示す。このようなアプローチを規範的アプローチと呼ぶ。ナッシュ均衡分析は規範的アプローチである。近年、様々な分野で異なるアプローチが試されてきており、その 1 つは合理性における強い仮定を必要としない進化ゲーム理論に基づくアプローチである [12]。社会規範が何をすべきかというより、実際にどのように人々が選択すべきかということや存在する規範がどのように進

化することができるかということを記述することをこれは目的としている．このようなアプローチを記述的 / 進化的アプローチと呼ぶ．

ナッシュ均衡は特に規範的アプローチの中心的な概念である．NDG において，2 人のプレイヤーの要求する量の和が資源量の 100% であるすべての組み合わせは強いナッシュ均衡である．しかしながら，人々は直感的に 50% の要求をする [5, 7]．“Evolution and the Social Contract” [25] という本の中で，Skyrms は NDG を用いて公正な規範の進化における先駆的な研究を提案した．記述的 / 説明的アプローチとしてリプリケーターダイナミクスを使い，公正な分け方の規範や分配的正義がどのように進化していったかについて彼はゲーム論的説明を行った．生物学的な複製は文化的な模倣として解釈できるため，リプリケーターダイナミクスの進化の過程は生物学的でも，文化的でもあると考えることができる．プレイヤーの要求量を 0.1 刻みとすると，62% の試行のダイナミクスで資源の半分を主張する戦略が集団中で支配的となることが示された．さらに，より細かい刻み幅で似た戦略同士でゲームを高い確率で行うようにすると，等分する戦略の均衡へと集団は常に進化したと報告されている．この研究における戦略に 관련된 相互作用という仮定は非現実的であると批判されている [4]．代わりに，相互作用を近くの人に限った空間モデルや 2 集団の構成のモデルによって等分する分け方が実現された [1, 20]．2 集団の構成のモデルでは，2 人のプレイヤーが相互作用するときに 1 人は一つの集団からもう 1 人はもう一つの集団から相互作用する [20]．

Skyrms のアプローチは心理的なメカニズムが含まれていない進化ゼネラリストのアプローチであり，ゲーム理論の概念や方法を使うことで公正な規範の進化をモデルから抽象的に説明している．一方で，進化心理学では人間行動の特定の心理的な側面に着目している [7, 4]．そして，NDG では単純化が極まっており，要求量の和が少しでも超えてしまうと得られる資源が 0 となる非現実的な設定であり，要求量以外の要因を全く考慮していない戦略の定義である．そのため，NDG を拡張することによって，記述的 / 進化的アプローチを行うことで，様々な進化シナリオが得られたりするなどの有意義な知見が得られる．したがって，本研究では分配的正義に関する規範の様々な進化における有意義な知見を得るために，NDG に心理的な側面（例えば，強気，弱気）に関する“要求の強さ：intensity”を加え，ゲーム理論の概念や方法で解析できるほどの単純性を保持している“デマンドインテンシティゲーム：Demand-Intensity game”（D-I ゲーム）を提案する [9]．

1.3 本研究の目的

本研究は構成論的手法に基づき、分配的正義に関する規範の進化ダイナミクスについて新たな知見を得ることが目的である。そのため、NDG を拡張した D-I ゲームを提案し、分配的正義に関する規範がどのように進化するのかを調べる。そこで、要求が衝突したときの損失の厳しさの影響を調べる。また、社会ネットワークを考え、そこでの局所性や選択の強さが分配的正義に関する規範の進化にどのように影響を与えるのかについて調べる。

1.3.1 分配的規範に関わる進化ダイナミクス

本研究では分配的正義に関する規範の進化における様々な進化シナリオを議論することを目的とする。そのために、D-I ゲームのゲーム論的分析や進化シミュレーション、リプリケーターダイナミクスを示す。

NDG では、2 人のプレイヤーの要求量の和が資源を超えたら、何も得られない¹。この衝突のコストの評価の厳しさはプレイヤーの要求の強さによって D-I ゲームでは弱まっている。本研究では D-I ゲームの基本的な性質を調べると共に、その評価の厳しさが出現する規範や進化ダイナミクスにどのように影響を与えるのかを調べることを目的とする。そのため、衝突のコストの評価を調節できるパラメータを導入する。このパラメータにより D-I ゲームの枠組みの中で NDG を表現することができ、D-I ゲームにおいて NDG を含めて分配的正義に関する規範の進化を議論することができる。また、D-I ゲームに基づくモデルでは以下のような様々な社会を表現できる。例えば、“人々が等分を求める。もし資源の等分より多く要求する者がいれば、たとえ高いコストを払ってでも等分を求める”。例えば、裁判などでの状況である。一方で、“無欲な者に対して等分より多く要求する。しかしながら、衝突が生じるなら諦める”。つまり、D-I ゲームは分配的正義に関する規範の進化をより表現力高く議論できる。

¹Nash 自身はスムージング（得られる報酬をいきなり 0 にせずに確率的に 0 にする）で滑らかにすることを提案している [16]。

1.3.2 社会ネットワーク構造の導入

生命，特に社会における人の繋がりネットワークを構成している．例えば，隣人同士は頻繁に交流する一方で，遠くの人とは疎遠である．現実の社会において個々の相互作用には疎密が存在する．よって，ネットワーク構造や局所性を考えることで，より自然なモデルとなると考えられる．また，空間構造の導入を行うと，協力の進化 [18, 17, 8] や公平性の進化 [21, 1] が促進されると多くの研究で報告されている．平面上で相互作用するといったネットワーク構造や局所性の効果により，出現する戦略に影響がある．本研究における D-I ゲームにおいてもネットワーク構造や局所性によりどのような規範が出現し，どのように進化するのかを調べることは重要である．

選択における確率的要素が協力の進化や公平性の進化に関する他の重要な要素であることが報告されている．比較的不利にも関わらず利得の低い戦略が集団中に広まったり，高い利得の戦略が絶滅したりする．このような確率的効果が進化の結果に潜在的に重要な影響を与えることができる [11, 19, 22]．選択における確率的要素を考えることでより現実在即した自然なモデルとなる．最後通牒ゲームにおいて，選択圧が弱いとき公正な行動が促進されることが示されている [23]．この研究において，選択の強さを導入することで，最後通牒ゲームの実際の人の行動実験に対応した環境を考慮することが可能となっている．また，最後通牒ゲームにおいて局所性と選択の強さを合わせた効果に関する研究がなされている [28]．そこでは，選択の強さが低いとき一般的に公正な行動が促進されるが，局所性による重大な違いはない．一方で，高い選択の強さでは局所性がより公平性の進化に向かわせると報告されている．このように選択における確率的効果によって進化の中で現れる戦略に影響を与える．よって，本研究では局所性の効果に加えて D-I ゲームにおいて選択の強さが公平性の進化にどのように影響を与えるのかを確認することは重要である．

したがって，分配的正義に関する様々な規範の進化において，ネットワーク構造や局所性，選択の強さを考えることでより自然な状況を扱うことができ，それらがどのように規範の進化に影響を与えるのか調査する．

1.4 本論文の構成

本論文の次章以降の構成は次の通りである．2 章では，D-I ゲームのモデルの詳細を述べる．3 章では，D-I ゲームを使い，分配的正義における様々な規範の進化ダイナミクスについて議論する．4 章では，分配的正義に関する規範の進化における，ネットワーク構造や局所性，選択の強さによる影響について議論する．5 章で本研究を総括するとともに，今後の展望を述べる．

第2章 D-I ゲーム

本研究では分配的正義に関する規範の進化の様々な進化を議論するために、ナッシュ要求ゲームに心理的な側面（例えば、強気、弱気）に関する“要求の強さ：intensity”を加えるが、同時にゲーム理論の概念や方法で解析できるほどの単純性を保持している“デマンドインテンシティゲーム：Demand-Intensity game”（D-I ゲーム）を提案する [9]。本章では D-I ゲームの定義を記述する。

2.1 D-I ゲーム

NDG のように、D-I ゲームは 2 人 1 回限りのゲームであり、図 2.1.1 に示すように 2 人のプレイヤー間で限られた資源を配分する問題を扱う。図の d_0, i_0, d_1, i_1 はそれぞれ自分（プレイヤー 0）の要求量、自分の要求の強さ、相手（プレイヤー 1）の要求量、相手の要求の強さを表す。

それぞれのプレイヤーは d と i ($0 \leq d, i \leq 1$) の組である戦略 $S(d, i)$ を持つ。要求量 d は、資源の総量を 1 としたときの要求する資源量を表す。もし 2 人のプレイヤーの要求量の和が 1（資源の総量）を越えなければ、それぞれのプレイヤーは NDG のように報酬として要求量 d だけ資源を得られる。

一方で、要求が衝突したとき ($d_0 + d_1 > 1$)、まず、新しく導入した戦略値である要求の強さ i によって資源の要求が重なる部分 ($d_0 + d_1 - 1$) は自分：相手で $1/2 + (i_0 - i_1)/2 : 1/2 + (i_1 - i_0)/2$ のように分ける。例えば、 $(i_0, i_1) = (0, 0), (0.5, 0.5), (1, 0.5), (1, 0)$ のとき、要求が重なる部分はそれぞれ $1 : 1, 1 : 1, 0.75 : 0.25, 1 : 0$ のように分ける。そして、その要求が重なる部分を分けたもの $(d_0 + d_1 - 1)(1/2 + (i_0 - i_1)/2)$ と重ならない部分 $1 - d_1$ の和が暫定的な報酬となる。その暫定的な報酬から自分の要求の強さ i_0 と相手の要求の強さ i_1 の平均に基づくコストにより減った報酬をプレイヤーは得る。2 人のプレイヤーの要求の強さの和が大きければ大きいほど、両者はより少ない報酬となる。もし要求が衝

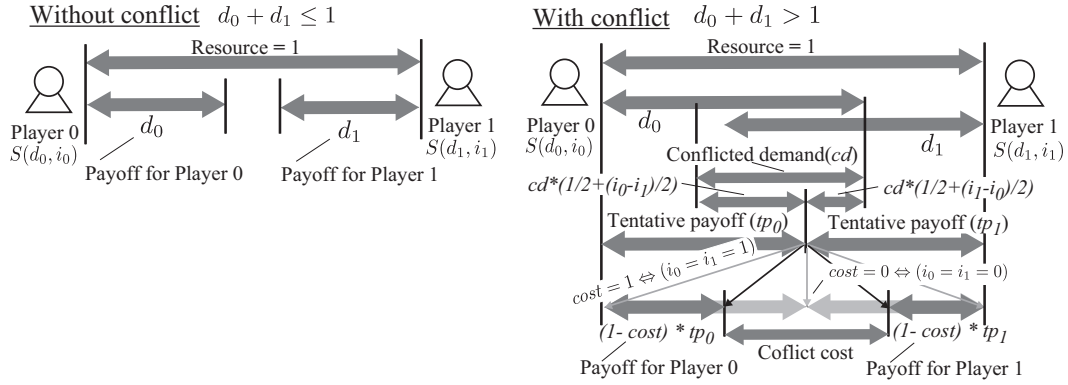


図 2.1.1: D-I ゲームの報酬．要求量の衝突がなければ，両者とも要求量分の報酬が得られる．衝突した場合，衝突した部分を要求の強さに応じて分け合い，衝突しなかった部分と分けた部分の合計が暫定的な報酬となる．そこに，両者の要求の強さの和に応じた衝突の損失がある．

突し ($d_0 + d_1 > 1$) 要求の強さの和が最大 ($i_0 = i_1 = 1$) なら，NDG と同じように両者は報酬を得られない．一方で，要求の強さの和が最小 ($i_0 = i_1 = 0$) なら，たとえ要求が衝突しても両プレイヤーは衝突の損失なく資源を分け合う．したがって，D-I ゲームは要求量と要求の強さの両方でジレンマを持っている．つまり，要求量と要求の強さの両方で，それぞれのプレイヤーは相手より多く報酬を得たいが，同時に衝突のコストを避けたいというジレンマである．

D-I ゲームにおけるプレイヤー 0 の報酬は以下のように定義される (図 2.1.1) ．

$$Reward = \begin{cases} d_0 & (if\ d_0 + d_1 \leq 1), \\ tr \cdot (1 - cost) & (otherwise), \end{cases} \quad (2.1.1)$$

$$tr = (1 - d_1) + (d_0 + d_1 - 1) \left(\frac{1}{2} + \frac{i_0 - i_1}{2} \right), \quad (2.1.2)$$

$$cost = \frac{i_0 + i_1}{2}. \quad (2.1.3)$$

tr は衝突のコストによって減る前の暫定的な報酬である．衝突した場合 ($d_0 + d_1 > 1$) に衝突のコストによって報酬は tr から減る．

図 2.1.2 で D-I ゲームにおける対戦報酬の例を示す．6 つの矢印は D-I ゲームにおける各対戦を示している．矢印の上下にプレイヤー 0 とプレイヤー 1 の戦略をそれぞれ記しており，各戦略の下にその対戦でそれぞれが得られる報酬を記している．一番左の対戦例ではプレイヤー 0 の戦略が $S(0.7, 0.9)$ であり，プレイヤー

| | | | | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Player 0 | | | | | | |
| $S(d_0, i_0)$ | $S(0.7, 0.9)$ | $S(0.7, 1)$ | $S(0.7, 1)$ | $S(0.7, 0.5)$ | $S(0.7, 0.2)$ | $S(0.7, 0)$ |
| Payoff | 0.7 | 0 | 0.122 | 0.275 | 0.258 | 0.55 |
| Player 1 | | | | | | |
| $S(d_1, i_1)$ | $S(0.3, 0.7)$ | $S(0.6, 1)$ | $S(0.6, 0.6)$ | $S(0.6, 0.5)$ | $S(0.6, 1)$ | $S(0.6, 0)$ |
| Payoff | 0.3 | 0 | 0.078 | 0.225 | 0.342 | 0.45 |
| Without conflict | | With conflict | | | | |

図 2.1.2: $r = 1$ での D-I ゲームの対戦例．矢印の上下の戦略の対戦で，それぞれの得られる報酬をそれぞれの戦略の下に記す．ここでは，6 つの例を示した．

の戦略 1 が $S(0.3, 0.7)$ である．このとき要求が重ならずそれぞれ要求した分の報酬が得られる．この対戦でプレイヤー 0 は 0.7 の報酬を得て，プレイヤー 1 は 0.3 の報酬を得ている．2 番目の対戦例ではプレイヤー 0 の戦略は $S(0.7, 1)$ であり，プレイヤー 1 の戦略は $S(0.6, 1)$ である．両者の要求の強さは 1 であり，要求量が 1 を超えている．したがって，NDG と同様に両者は報酬を全く得ることができない．3 番目の対戦例はプレイヤー 1 の要求の強さが 0.6 となっており，衝突のコストが掛かるが両者ともに少ない報酬を得ている．4 番目の対戦例はプレイヤー 0，プレイヤー 1 共に要求の強さが 0.5 である．プレイヤー 0 は 0.275 の報酬を得て，プレイヤー 1 は 0.225 の報酬を得ている．要求の強さが同じとき要求量が大きいとき得られる報酬も大きくなる．一方で，要求量が小さくても要求の強さが十分に大きければ，相手より多く報酬を得ることがある．5 番目の例はプレイヤー 1 は相手より要求量が小さいが要求の強さが十分に大きいので，相手より多く報酬を得ている．一方で，2 番目の例のように相手も要求の強さが大きいと，報酬が低くなってしまふ．したがって，要求量，要求の強さに共に，相手より大きくすればするほど相手より多く報酬を得ることができる一方で，両者が大きい値をとればとるほど両者はより小さい報酬となる．つまり，D-I ゲームは要求量，要求の強さで 2 重のジレンマをもっている．最後の例は両プレイヤーの要求の強さが 0 のときを示している．このとき要求量が大きいほうが多く報酬を得ているが，それぞれ 0.55, 0.45 と資源を無駄なく分配することができる．

さらに，パラメーター r を導入し，式 (2.1.3) の代わりに様々なコスト環境を考

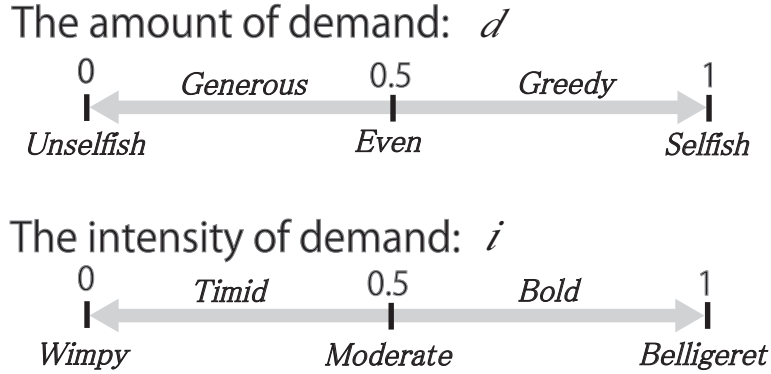


図 2.1.3: 要求量, 要求の強さのそれぞれの値の呼称. D-I ゲームは要求量と要求の強さの 2 次元の戦略をもつ. 要求量 d が 0.5 より小さいとき “寡欲: generous” と呼び, 0.5 より大きいとき “貪欲: greedy” と呼ぶ. 特に, d が 0, 0.5, 1 のとき, それぞれ “無欲: unselfish,” “均等: even,” “独占: selfish,” と定義する. もし要求の強さが $i < 0.5$ なら “弱気: timid”, $i > 0.5$ なら “強気: bold” と呼ぶ. 特に, 要求の強さ i が 0, 0.5, 1 であるとき, それぞれ “軟弱: wimpy,” “穏健: moderate,” “強硬: belligerent,” と定義する.

慮した以下の式を使用する.

$$cost = \left(\frac{i_0 + i_1}{2} \right)^r. \quad (2.1.4)$$

式 (2.1.4) の r は 0 から無限大までの実数値であり, 衝突のコストという点でゲーム構造を決める. $r = 0$ のとき衝突のコストは最大であり, ゲームは NDG と同値である. より大きな r はより小さい衝突のコストに対応する. また, 衝突のコストは心理的なコストと考えることができる. 例えば, 家族とお菓子を分け合うとき, 衝突のコストとして心理的な圧迫は感じないかもしれない. しかし, 分け合う人が友達となれば, より心理的な圧迫を感じるだろう. さらに, 分け合う資源がお金となれば, さらに心理的な圧迫を感じるだろう.

ここで, 要求量や要求の強さの各値の状態を図 2.1.3 に示すように呼ぶ. 要求量 d が 0.5 より小さいとき “寡欲: generous” と呼び, 0.5 より大きいとき “貪欲: greedy” と呼ぶ. 特に, d が 0, 0.5, 1 のとき, それぞれ “無欲: unselfish,” “均等: even,” “独占: selfish,” と定義する. 要求の強さ i は要求が衝突したときに人々が自分の要求をどのくらい強く主張するかを表現している. もし要求の強さが $i < 0.5$ なら “弱気: timid”, $i > 0.5$ なら “強気: bold” と呼ぶ. 特に, 要求の強さ i が 0, 0.5, 1 であるとき, それぞれ “軟弱: wimpy,” “穏健: moderate,” “強

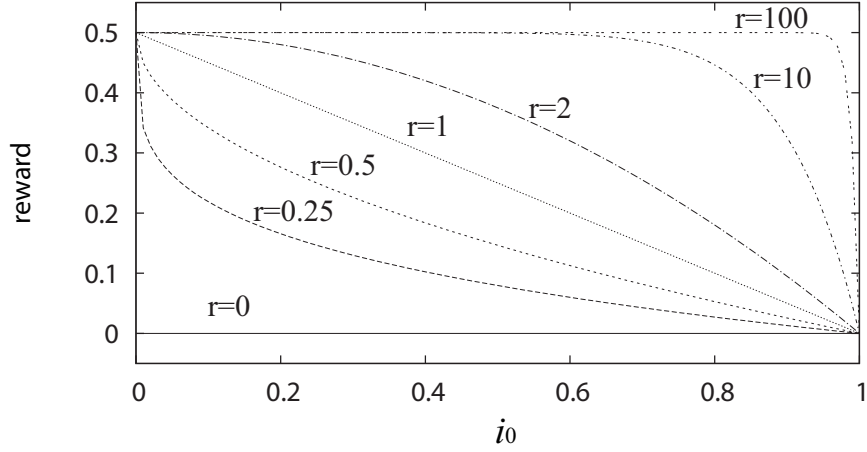


図 2.1.4: 両プレイヤーが同じ貪欲な戦略のとき ($d_0 = d_1 > 0.5$ and $i_0 = i_1$) の i_0 に関する報酬 $((1 - i_0^r)/2)$.

硬: belligerent,” と定義する .

要求量 d に関して $d = 0.5$ と $d = 1$ のとき , 戦略は特徴的である . ここでは , 前者を平等主義 , 後者を自由主義と名付けることにする . $r = 0$ のとき , どんな i でも $d = 0.5$ の戦略は ESS (Evolutionary Stable Strategy) である . 記述的 / 進化的アプローチの先行研究はどのように平等主義へと進化したのかを記述することを目的としている [25, 4, 1, 20] . しかしながら , $r = 0$ でなければ $d = 0.5$ の戦略は ESS ではなく , r が増加すると平等主義は弱くなる . これは衝突のコストが減少することで “貪欲な: greedy” 戦略に引き付けられるためである .

両プレイヤーが同じ貪欲な戦略のとき ($d_0 = d_1 > 0.5, i_0 = i_1$) , 報酬は $((1 - i_0^r)/2)$ である . $r = 0$ 以外では $i_0 = 0$ のとき報酬が 0.5 であり , $0 < r < \infty$ の範囲において i_0 の増加とともに報酬は単調減少する (図 2.1.4) . r が大きいとその減少は弱くなる . したがって , 貪欲だけど要求の強さが低い戦略は自分たち同士で多くの報酬が得られる . それに関連して , D-I ゲームでは純粋な平等主義 ($S(0.5, *)$) だけでなく , 後で示す自由主義に基づく自分たち同士で等分の報酬を得ることができる規範 ($S(1, 0)$) によって等分と効率の意味で理想的な社会が達成されることも考えられる .

第3章 分配的規範に関わる進化ダイナミクス

3.1 はじめに

前章では分配的正義に関する規範の進化について様々な進化シナリオを議論するために、ナッシュ要求ゲームに強気や弱気といった心理的な側面を加えた D-I ゲームを提案した [9]。本章ではゲーム論的分析や進化シミュレーション、リプリケータダイナミクスのベクトル図によって、D-I ゲームにおける基礎的な進化ダイナミクスについて示す。また、要求が衝突したときのコストの厳しさがどのように出現する規範や進化ダイナミクスに影響を与えるのかを示す。また、本研究では ESS 分析、進化シミュレーション、リプリケータダイナミクスにより、相補的に研究している。ESS 分析では数学的な解析によって起こりうる規範の進化を示す。進化シミュレーションでは構成論的アプローチに基づき、計算機プログラムで構成し、ESS 分析によって得られた進化を実際に確認する。例えば、平等主義から自由主義へ切り替わる進化を確認することができた。リプリケータダイナミクスのベクトル図により、進化シミュレーションで得られた進化について数学的な検証し、妥当性を補強する。

3.2 ゲーム論的分析

$d_0 + d_1 = 1$ である $S(d_0, *)$ と $S(d_1, *)$ の組み合わせを含めて D-I ゲームにおいてもナッシュ均衡は無数に存在することは明らかである。それらの合理的な戦略のうち 3 種の規範を ESS 分析により発見した¹。3 種の規範 (ESS) は平等主義：

¹進化的に安定な戦略 (Evolutionary stable strategy, ESS) [13] は他の戦略に進化的に侵略されない戦略である。集団の全ての個体がある既存戦略をとっているときに、突然変異などによって生じた別の戦略をとる個体が集団に侵入することができずに淘汰される。このようなとき、既存戦略は他の戦略を進化的に侵入させず、進化的に安定である。規範は人々が従う人がとるべき行動を指し示すものであり、ESS のように進化的に根付いた戦略は人々が進化の中で得られたとるべき

Egalitarianism (norm A: $S(0.5, *)$, when $r = 0$), 自由主義 : *Libertarianism* (norm B: $S(1, i^*)$, i^* は図 3.2.1 に示された r に関する値 , when $r \geq 0.5$), 軟弱な自由主義 : *Wimpy libertarianism* (norm C: $S(1, 0)$, when $0 < r < 0.773$) である . 式 (3.2.1) , または , 式 (3.2.2) の条件を満たす戦略 S は集団の他の戦略 T に侵入されない , 進化的に安定な戦略と呼ばれている .

$$E(S, S) > E(T, S). \quad (3.2.1)$$

$$E(S, S) = E(T, S), E(S, T) > E(T, T) \text{ for all } T. \quad (3.2.2)$$

S は 自戦略 , T は 他戦略であり , $E(A, B)$ はプレイヤー B と対戦したときのプレイヤー A の報酬である . 図 3.2.1 はこれを満たす戦略 $S(d, i)$ を r について調べた結果である . 図では r に関して要求量と要求の強さの 2 次元上で存在する規範を確認することができる . 図 3.2.2 は $r = 0, r = 0.25, r = 0.5$ のときのその規範間の報酬を示す . 以下に ESS 分析により得られた 3 種の規範を列挙する .

1. 平等主義 : *Egalitarianism*

平等主義は均等 (even) の特徴をもつ ($d = 0.5$) . 平等主義は $r = 0$ (NDG setting) のときのみ存在し , 図 3.2.1 (a) に示すように , 要求の強さの値に関わらず均等戦略の ESS グループとして出現する . 平等主義は同じ規範をもつ者同士で報酬 0.5 を得ることができる .

2. 自由主義 : *Libertarianism*

自由主義は独占 (selfish) の特徴をもつ ($d = 1$) . 自由主義は低いコスト環境で存在する ($r \geq 0.5$) . 図 3.2.1(b) に示すように , 自由主義の ESS は $r = 0.5, i = 0.25$ で 2 つの ESS に分岐する . 分岐した ESS のうち 1 つは r の増加に伴いより弱気になり ($0.5 \leq r < 0.571$) , もう一方はより強気になる ($r \geq 0.5$) .

3. 軟弱な自由主義 : *Wimpy libertarianism*

軟弱な自由主義も独占 (selfish) の特徴をもち ($d = 1$) , 軟弱 (wimpy) の特徴をもつ . 自由主義の中でも軟弱な自由主義の ESS は高いコスト環境で ($0 < r < 0.773$) 存在する . 軟弱な自由主義は同じ規範をもつ者同士で報酬 0.5 を得ることができる .

行動を指し示すものと考えられる . よって , 進化的に得られた規範を ESS で表現する .

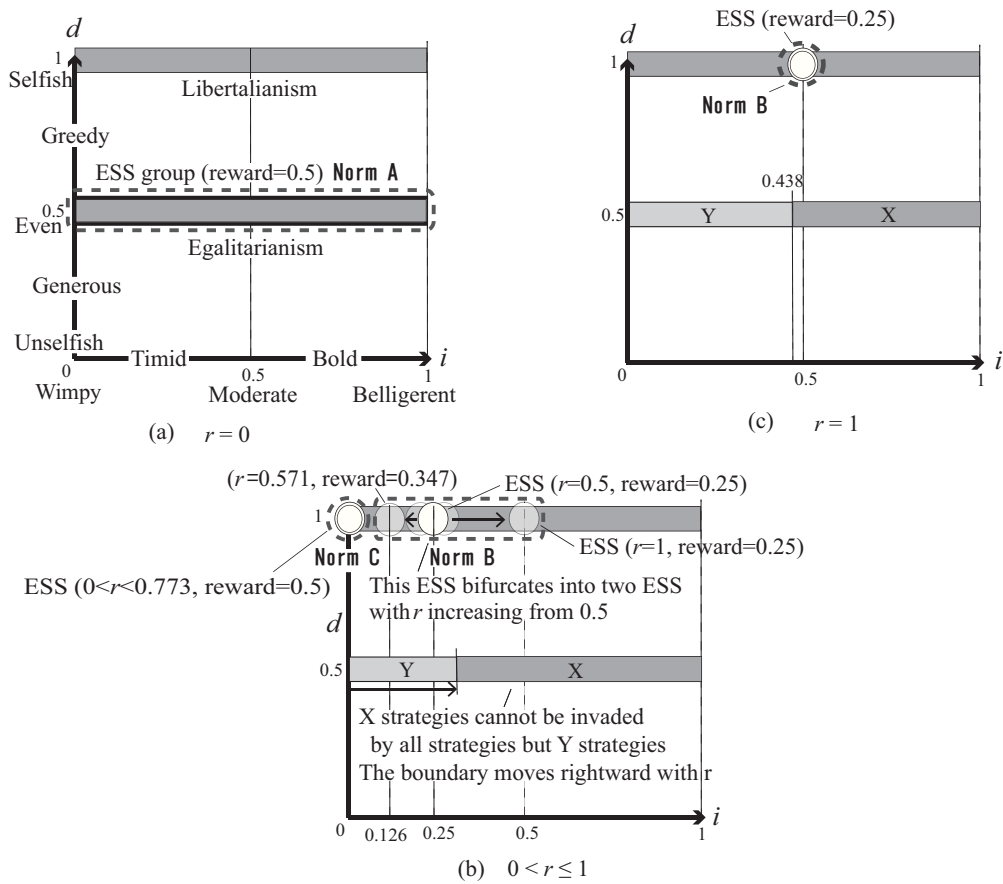


図 3.2.1: 戦略空間上の 3 種の規範 (Norm A: 平等主義 (Egalitarianism), Norm B: 自由主義 (Libertarianism), Norm C: 軟弱な自由主義 (Wimpy libertarianism)) . (a)-(c) の図は $r = 0$, $0 < r \leq 1$, $r = 1$ の場合にそれぞれ対応している . (b) の図中では , 1 重の丸で norm B: 自由主義 ($r \geq 0.5$ で出現) , 2 重の丸で norm C: 軟弱な自由主義 ($0 < r < 0.773$ で出現) をそれぞれ示した . (b) の図に示すように , norm B: 自由主義は $r = 0.5$ で 2 つに分かれ , 片方は要求の強さが高くなり , もう一方は低くなる .

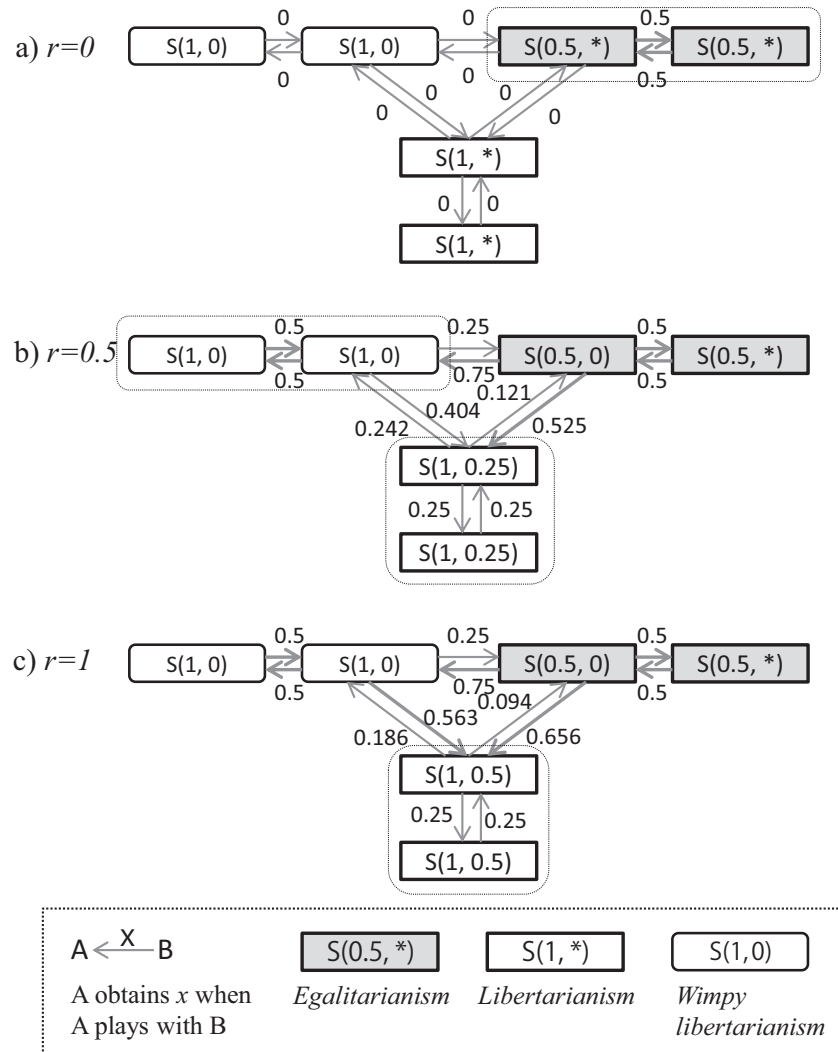


図 3.2.2: $r = 0, r = 0.25, r = 0.5$ のときの 3 種の規範間の対戦による報酬 .

軟弱な自由主義の集団中で各人は最大の報酬 0.5 を得るという意味で , 平等主義と同様に平等と効率という点で軟弱な自由主義の社会は理想的であることに注目したい . 一方で , 自由主義の集団中で 0.5 より少ない報酬を得るという意味で自由主義の社会は非効率である . しかしながら , r が無限大に近づくにつれて自由主義の集団中での報酬は 0.5 に近づくのは , 衝突のコストが 0 に近づくためである .

$r > 0$ では要求の強さの値によって平等主義の戦略は 2 つのグループに分かれる (図 3.2.1 (b), (c) の X と Y) . 強気な平等主義戦略 X は全ての平等主義戦略 $X+Y$ からのみ侵入されるが , 弱気な平等主義戦略 Y は全ての平等主義戦略 $X+Y$

だけでなく他の戦略からも侵入される．したがって，強気な平等主義戦略は準安定性を持っている． r を 0 から 1 へと増加させると，他の戦略から侵入されない強気な平等主義戦略は要求の強さが $0 \leq i \leq 1$ であるものから $0.438 < i \leq 1$ であるものに限られる²．さらに $r = 4.67$ を超えると他の戦略から侵入されない平等主義戦略は存在しなくなる²．

3.3 進化シミュレーション

分配的正義に関する進化的なシナリオを理解するために単純な遺伝的アルゴリズムに基づく進化シミュレーションを行う．特に，ESS 分析で確認された 3 種の規範に進化するのか，そしてどのように進化するのかに着目して進化シミュレーションを行う．要求量 d と要求の強さ i の戦略をもつ N 個体で集団は構成される．要求量 d と要求の強さ i はそれぞれ S_d と S_i の刻み幅の 0 から 1 までの値である．初期集団はランダムに選ばれた d と i をもつ N 個体の集団である．それぞれの個体の適応度は集団中の他の全ての個体との D-I ゲームを行った報酬の平均値として定義する．新しい個体は適応度比例の選択，交叉，突然変異の 3 つの遺伝的操作によって作られる．交叉は確率 R_c で親個体の要求の強さの値を単純に交換するだけである．突然変異は d と i のそれぞれに対して確率 R_m で他の値に変える．各パラメータを $N = 100$, $S_d = S_i = 0.1$, $R_c = 0.5$, $R_m = 0.05$ として実験を行った³． r について 0 から 10000 の値で 100 試行の実験を行う．

²自戦略の要求量を $d = 0.5$ とし，他戦略（ESS の式の T ）を $d = 0.5$ 以外の全ての戦略として，これらの値は ESS の式から計算できる．

³各パラメータを変えると以下のようになることが分かっている．

刻み幅は単純化のために 0.1 刻みとしている．これは先行研究などでは専ら取られている刻み幅である．もちろん，刻み幅を細かくすればするほど，取りうる戦略が滑らかになり，滑らかに進化していくと考えられる．

集団サイズは並列で探索する解候補の数であるため，集団サイズが大きいほどより正確な探索が可能となる．例えば，本進化シミュレーションでは 11×11 の 121 戦略から探索するが，集団サイズが 50 程度では中々探索がうまくいかない．さらに，進化実験では個体数が有限であるが，リプリケーターダイナミクスは個体数を無限大として進化ダイナミクスを記述している．そのため，本節の進化シミュレーションと次節のリプリケーターダイナミクスにより，相補的に研究を行っている．

本モデルの交叉は操作が 2 個体の要求の強さを交換するだけなので，進化に突然変異ほどの影響を与えないことが分かっている．しかしながら，この確率が高いほど頻繁に交換するので，同じような戦略になりやすく，進化が若干収束しやすくなる．

突然変異は d, i の値を他の値に変えることで行う．この値が小さいほど進化は固定化されやすい一方で，大きいほど様々な値に発散し，ランダムな挙動に近づく．経験的にも，試行錯誤してみても，このくらいの値がよいと判断した．

また，本進化シミュレーションの結果は前節の ESS 分析の結果から逸脱しておらず，パラメー

よって、以下のアルゴリズムにてシミュレーションを行う。

- ランダムな d, i を持つ N 個体の集団を作る。
- 以下を 1500 世代繰り返す。
 - 各個体（各プレイヤー）は集団の全ての個体と D-I ゲームを行い、その全個体との対戦の報酬を平均する。
 - 次世代の集団が N 個体になるまで以下を繰り返す
 - * [選択] 各個体がもつ平均報酬を適応度とした適応度比例の選択で 2 個体を選ぶ。
 - * [交叉] 確率 R_c でその 2 個体の要求の強さ i を交換する。
 - * [突然変異] その 2 個体の d, i のそれぞれを確率 R_m でランダムな他の値に変える。

3.3.1 出現した規範

どのような戦略が集団中に残ったかを調べる。そこで、最終世代（1500 世代）で集団中で最も多かった戦略を考え、図 3.3.1 (a) は各 r について 100 試行中でその戦略が支配的になったのは何試行あったのかを数えたものである。例えば、 $r = 0.2$ のとき最終世代で $S(0.5, *)$ の戦略が集団中で最も多かった試行が 50 試行ほどで、残りの 50 試行ほどは $S(1, 0)$ の戦略が集団中で最も多かったことを表している。図 3.3.1 (b) は最終世代での集団中の平均報酬について 100 試行中の最大、平均、最小の場合を示す。

図 3.3.1 において、各 r の値に応じて以下のような結果となっている。

1) $r \leq 0.6$

r が小さいとき、平等主義戦略 ($S(0.5, *)$) が最もありふれた戦略として集団中を占めるようになる。 $r = 0$ では 100% の試行で平等主義戦略は広まる。 r の増加とともに平等主義戦略が広まった試行は減少していき、軟弱な自由主義 $S(1, 0)$ がより多くの試行で最もありふれた戦略となる。図 3.3.1 (a) に見られるように軟弱な自由主義戦略は $0 < r < 0.6$ の範囲の環境で広
タ設定等の誤りによる想定外の結果となっていないことが分かる。

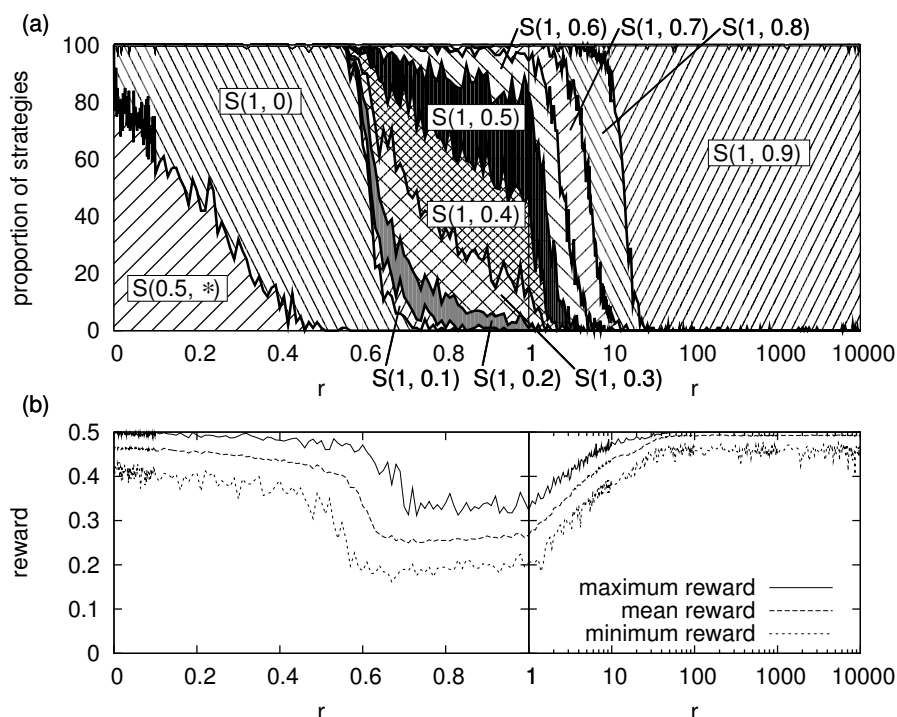


図 3.3.1: (a) 戦略が集団で最も多かった試行数．上図 (a) は最終世代の集団中で最も多かった戦略を調べ，100 試行中で何試行でその戦略が大勢を占めることができたのかを数えたものである．横軸は r であり，大きくなればなるほど衝突の損失が弱いことを意味する．(b) 集団中の平均報酬．下図 (b) のグラフは 集団中の平均報酬であり，100 試行中で平均報酬が最も高かった試行，平均的な試行，最も低かった試行の場合を示す．

まる．図 3.3.1 (b) によると， $0 \leq r < 0.6$ で最も成功した試行では 0.5 近くの報酬を達成している（図 3.3.1 (b) の “maximum reward”）．したがって， $0 \leq r < 0.6$ では平等主義戦略や軟弱な自由主義戦略の集団中で成功した報酬 0.5 近くを得ることができるという意味で理想的な社会が達成される．

2) $0.6 < r < 10$

他の自由主義戦略 ($d = 1$) が最も普遍的な戦略となる．それぞれの試行で様々な戦略が出現し，集団中で 0.5 より低い報酬を得ている． r が増加するにつれて，出現した自由主義戦略の要求の強さは強気なものとなる．それらの多様な戦略は自由主義の ESS だけでなく，他の自由主義戦略も含まれた．進化の中で自由主義戦略は似た他の自由主義戦略と共存し，集団はそれらの戦略の中で揺らいだ（図 3.3.2 (d)）．これは似た自由主義戦略の得られる報

酬の差が少ないためだと考えられる。

3) $r > 1$

より要求の強さが強気な自由主義戦略 ($S(1, 0.5) \sim S(1, 0.9)$) が集団中で支配的となり, r が増加するにつれて集団中で得られる報酬は大きくなる。これは衝突のコストの減少が単純に得られる報酬に影響しているためである。 r が無限大に近づくと報酬は 0.5 に近づき, その意味でこの場合も理想的な社会が達成されている。

3.3.2 進化ダイナミクス

進化シミュレーションにより, 図 3.3.3 に示す 3 種の進化シナリオが生じている。平等主義の集団へ真っ直ぐに収束していく進化, 平等主義の集団に一旦収束して途中から自由主義の集団へ収束する進化, 自由主義の集団へ真っ直ぐに収束する進化の 3 種である。1 番目と 3 番目のシナリオは, 図 3.3.3 (a) と図 3.3.3 (c) のように, 集団は平等主義や自由主義の集団へ素早く収束する。 r が増加すると (衝突のコストが減少すると), 1 番目のシナリオを示す進化が起こりづらくなり, 3 番目のシナリオの進化がより出現した。

少ない試行回数 (例えば, $r = 0.2$ のとき 9% の試行) で, 図 3.3.3 (b) にある 2 番目のシナリオが観測されている。図 3.3.2 (a) は $r = 0.2$ のときの要求量, 要求の強さ, 報酬に関する集団中の平均の推移を表している。要求量の平均が途中まで $d = 0.5$ を推移し, その後 $d = 1$ に推移し, 2 番目のシナリオの典型的な進化を示した。平等主義戦略が素早く広まり維持され, 600 世代程の世代から自由主義戦略が侵入したことがわかる。この進化において, 強気な平等主義戦略 (図 3.2.1 中の X) が数世代の内に支配的になったと考えられる。前節で議論したようにこの戦略は準安定性をもっており, 自由主義戦略による侵入に対して進化的に安定である。しかしながら, より弱気な平等主義戦略 (図 3.2.1 中の Y) が集団に簡単に侵入できる。強気な平等主義戦略の集団では侵入できなかったが, 弱気な平等主義戦略によって自由主義戦略は集団に侵入しやすくなり, 自由主義戦略が集団に広まったと考えられる。

一方で, 自由主義戦略が占めた集団から平等主義戦略の集団への進化遷移は観測されていない。さらに, 平等主義戦略と自由主義戦略の共存も観測されてい

い．ここでその理由を考える．要求の強さが同じ場合に自由主義戦略は平等主義戦略とのゲームで 3 倍の報酬を得る．その差は i が小さいときにより大きくなる．自由主義戦略，特に軟弱な自由主義戦略が平等主義戦略の集団へ一旦侵入してしまうと，平等主義戦略は低い報酬しか得られずに集団中に残ることができなくなってしまうと考えられる．そして，広まった自由主義戦略は安定であり，平等主義戦略が集団中に広まりやすくするような戦略も存在しないためだと考えられる．

さらに，3 番目のシナリオにおいて，2 種の要求の強さに関する進化を発見した．一つは軟弱と穏健な戦略間を移動するものであり，もう一つは似た戦略間を振動する進化である．図 3.3.2 (b) は前者の場合に対応している． $r = 0.6$ のとき，要求量は自由主義戦略 ($d = 1$) へと素早く収束し，要求の強さが軟弱から弱気な戦略 ($S(1, 0) \sim S(1, 0.4)$) を行ったり来たりした．図 3.3.2 (d) は後者の場合に対応している．似たような自由主義戦略間 ($S(1, 0.4) \sim S(1, 0.6)$) で振動した．これは同じような自由主義戦略間のゲームでは同じような報酬を得るためだと考えられる．図 3.3.2 (c) は 2 番目のシナリオに相当するが，自由主義戦略が広まった後に同じようなメカニズムで軟弱から弱気な自由主義戦略間 ($S(1, 0) \sim S(1, 0.2)$) を振動している．

3.4 リプリケーターダイナミクス

ここで 2 種の興味深い進化シナリオに着目する．一つは平等主義集団から自由主義集団への進化であり，もう一つは自由主義集団と軟弱な自由主義集団間の振動である．これらの進化のダイナミクスをより理解するために，ベクトル図でそのダイナミクスを示す．ベクトル図でのリプリケーターダイナミクスを描写するために以下の差分方程式を用いる．

$$x_s(t+1) - x_s(t) = x_s(t) \cdot \{f_s(t) - \bar{f}(t)\}. \quad (3.4.1)$$

x_s は集団中の戦略 s の割合であり， $f_s(t)$ は t ステップ後の戦略 s の適応度である． $\bar{f}(t)$ は集団全体の適応度の平均である．適応度は D-I ゲームの集団中の他のプレイヤーとの平均報酬である．

図 3.4.1 は 3 つの典型的な戦略を対象としてリプリケーターダイナミクスをベクトル図として可視化している．図の三角形のそれぞれの座標はその 3 つの戦略

をとる集団の構成を意味している．各点の間隔は集団構成の 5% の差に対応する．三角形のそれぞれの頂点は集団の全てのプレイヤーが対応する戦略をとる集団構成を意味している．それぞれのベクトルの先はリプリケーターダイナミクスにおける次の状態の集団構成を表している．したがって，それぞれのベクトルは選択の強さや方向を表し，ベクトル図はどのような集団の構成がどのような均衡状態に向かうのかを示している．そして，それぞれの均衡状態の復元力はそれぞれの引き込み流域（進化ダイナミクスにより集団が向かう領域）の大きさによって測ることができる．

3.4.1 リプリケーターダイナミクスのベクトル図

まず，先行研究である Skyrms の NDG での結果と本研究である D-I ゲームでの結果を比較する．Skyrms は NDG において $S(1/3, *)$ と $S(2/3, *)$ ，平等主義戦略 $S(1/2, *)$ をとる集団のリプリケーターダイナミクスをベクトル図で表し，平等主義や多型（ $S(1/3, *)$ と $S(2/3, *)$ の組）の均衡を図示した [25]．まず，このような均衡が D-I ゲームでどのようなになるのかを調べた． $r > 0$ の D-I ゲームにおいて， $S(0.3, 0.5)$ と $S(0.7, 0.5)$ ，平等主義戦略 $S(0.5, 0.5)$ のいずれかをとる戦略の集団におけるリプリケーターダイナミクスを示す．図 3.4.1 (a) はそれらの戦略をとる集団のベクトル図であり，Skyrms の示したダイナミクスと同様のダイナミクスを確認した．2 つの引き込み領域があり， $S(0.3, 0.5)$ と $S(0.7, 0.5)$ の戦略に分かれた集団へと収束する流れと全ての戦略が $S(0.5, 0.5)$ である集団へと収束する流れがある． r を増加すると，多型の均衡は全ての戦略が $S(0.7, 0.5)$ をとる集団へと近づいた．

次に，図 3.4.1 (b), (c), (d) に ESS の規範である平等主義，自由主義，軟弱な自由主義の戦略をとる集団のリプリケーターダイナミクスを示す．図 3.4.1 (b) は $r = 0.2$ のときの $S(0.5, 0.1)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.1)$ の戦略をとる集団のリプリケーターダイナミクスを示している．平等主義の均衡（ $S(0.5, 0.1)$ ）と軟弱な自由主義の均衡（ $S(1, 0)$ ）の 2 つの引き込み領域を観測した．前者はいくらかの集団を引き付けたが，多くの集団構成は後者の均衡へと進化した．図 3.4.1 (c) は $r = 0.6$ のときの $S(0.5, 0.5)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.4)$ の戦略をとる集団の場合を示している．平等主義の均衡，自由主義の均衡，軟弱な自由主義の均衡の 3 つの適度なバランスの引き込み領域が生じた．図 3.4.1 (d) は $r = 1$ のときの $S(0.5, 0.5)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.5)$ の

戦略をとる集団の場合を示している．この場合，平等主義の均衡と自由主義の均衡の引き込み領域が確認できる．平等主義の均衡は小さく，ほとんどの集団構成は全てのプレイヤーが自由主義の戦略をとる集団構成へと進化した．

3.4.2 進化シミュレーションとの比較

この節の残りは上記の結果と前節で示した進化シミュレーションの結果を比較する．シミュレーションのほとんどで多型の均衡ではなく，平等主義の均衡と自由主義の均衡へと素早く進化した．これは他の戦略との関係もあるが，図 3.4.1 (a) にあるように平等主義か自由主義を全ての戦略がとる集団への引き込み領域に比べて，多型の均衡をとる集団の引き込み領域は比較的小さいためであると考えられる．

$r > 0$ のとき平等主義戦略は ESS ではないが，進化シミュレーションでは $r = 0$ のときだけでなく $r > 0$ のときにおいても，平等主義戦略が占める集団へと進化することもあった． $r = 0.2$ において $S(0.5, 0.1)$ の戦略は準安定性をもつ平等主義戦略の中でも比較的弱い戦略であるが，図 3.4.1 (b) にあるように $r = 0.2$ では軟弱な自由主義の戦略 $S(1, 0)$ だけでなく $S(0.5, 0.1)$ の戦略でさえ十分に大きな引き込み領域がある．多型の均衡への小さい引き込み領域の場合と異なり，これは平等主義戦略や自由主義戦略へと進化することの要因となると考えられる．

前節で示したように，衝突のコストが適度なとき，例えば， $r = 0.2$ のとき，進化シミュレーションで平等主義戦略の集団へと進化し，自由主義戦略へと収束していくことがあった．一方で，自由主義戦略が占める集団から平等主義戦略が占める集団へと進化することは観測されなかった．図 3.4.1 (b) に見られるように，平等主義戦略の引き込み領域よりも自由主義戦略の引き込み領域が大きいためだと考えられる．

$r = 0.6$ での進化シミュレーションでは，自由主義戦略と軟弱な自由主義の戦略間で集団が揺れ動くことが観察された．これは図 3.4.1 (c) にあるように自由主義戦略 $S(1, 0.4)$ の引き込み領域も軟弱な自由主義の戦略 $(1, 0)$ の引き込み領域も両方とも等しく十分に大きいためではないかと考えられる．

図 3.4.1 (c) は上記の引き込み領域と共に十分に考慮すべき大きさの平等主義戦略の引き込み領域もある．図 3.3.2 (c) で集団がまず平等主義戦略をもつように進

化して自由主義戦略と軟弱な自由主義の戦略間を揺れ動く進化を示したが、3 つの十分に考慮すべき大きさの引き込み領域によるものだと考えられる。

最後に、衝突のコストが小さい場合（例えば、 $r = 1$ ）、進化シミュレーションで軟弱な自由主義の戦略へ行くこともなく、自由主義戦略へのみ進化した。これも図 3.4.1 (d) に理由が見て取れるだろう。軟弱な自由主義の戦略の引き込み領域は存在せず、平等主義戦略の引き込み領域は小さく存在している。そのため、進化シミュレーションでは $r = 1$ のとき平等主義戦略や軟弱な自由主義の戦略が集団中に広まらなかったと考えられる。

3.5 まとめ

本章ではナッシュ要求ゲームに“要求の強さ”という要素を加えた D-I ゲームについて、ゲーム理論的解析や進化シミュレーション、リプリケーターダイナミクスの分析を行い、分配的正義に関する規範の進化における可能な進化シナリオについて議論した。

ESS 分析や進化シミュレーションでは「平等主義」、「自由主義」、そして、自由主義の特別な場合としての「軟弱な自由主義」の 3 種の規範の進化を示した。軟弱な自由主義は全ての資源を要求するという点で自由主義として分類されるが、同じ規範をもつ者同士では衝突のコストなしに結果として等分な分け方を達成できる。衝突のコストの程度がどの規範が生じるかに大きく影響することを示した。平等主義は大きな衝突のコストで生じ、自由主義は小さなコストで生じた。軟弱な自由主義は自由主義の中でも比較的大きい衝突のコストで生じた。

進化シミュレーションでは概して 3 種の進化シナリオを示した。ほとんどの試行では集団は直接に平等主義か自由主義へと収束した。衝突のコストがある程度で、平等主義へ収束したあとで自由主義に収束する進化も見られた。この進化は平等主義の準安定性によるものだと示した。

平等主義の準安定性は進化において重要な役割を果たすことを示した。ESS 分析によると、強気な平等主義の戦略は全ての平等主義戦略のみに侵入される。一方で、弱気な平等主義戦略は平等主義戦略だけでなく、他の戦略からも侵入される。平等主義戦略の準安定性はこの強気な平等主義戦略の性質から来ている。リプリケーターダイナミクスの分析では考慮すべき大きさの引き込み領域の存在を

示し、その性質を補強した。

また、衝突のコストは心理的なコストと考えることができ、上記の結果は以下のような状況を表現している。例えば、家族とお菓子を分け合うとき、衝突のコストとして心理的な圧迫は感じないかもしれない。自由主義のように全てのお菓子を要求するかもしれない。しかし、分け合う人が友達となれば、より心理的な圧迫を感じて軟弱な自由主義のように振舞うかもしれない。さらに、分け合う資源がお金となれば、さらに心理的な圧迫を感じるだろう。このとき、平等を強く望み、平等主義のように振舞うかもしれない。

以上の結果から、等分を要求する戦略が集団を支配することができるかどうかという従来の議論を超えて、創発という観点から分配的正義のダイナミクスを研究するための有益な枠組みを D-I ゲームは提供できることが示された。

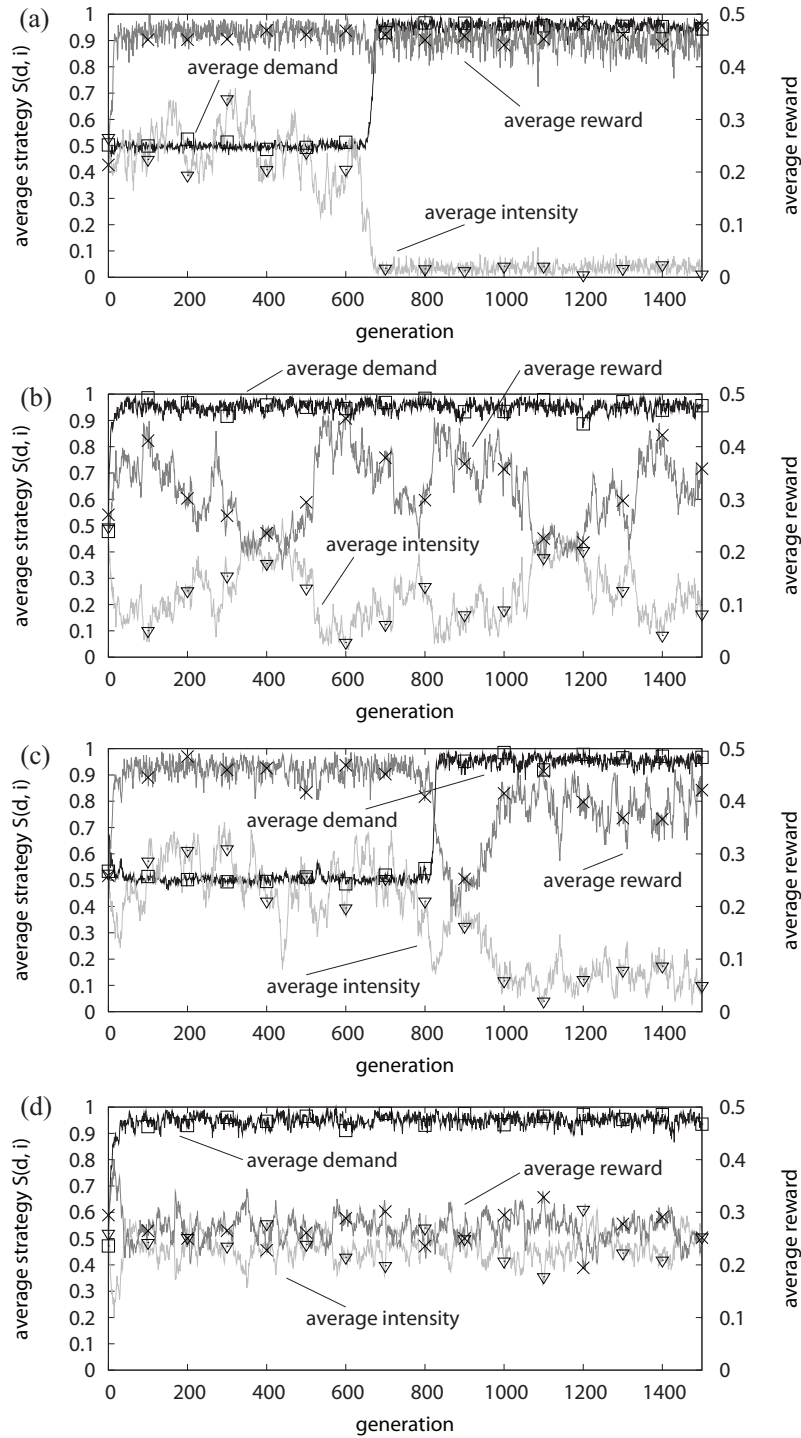


図 3.3.2: 要求量, 要求の強さ, 報酬の集団中の平均の推移. (a) は $r = 0.2$ のときの試行, (b), (c) は $r = 0.6$ のときの試行, (d) は $r = 1$ のときの試行での結果を示す.

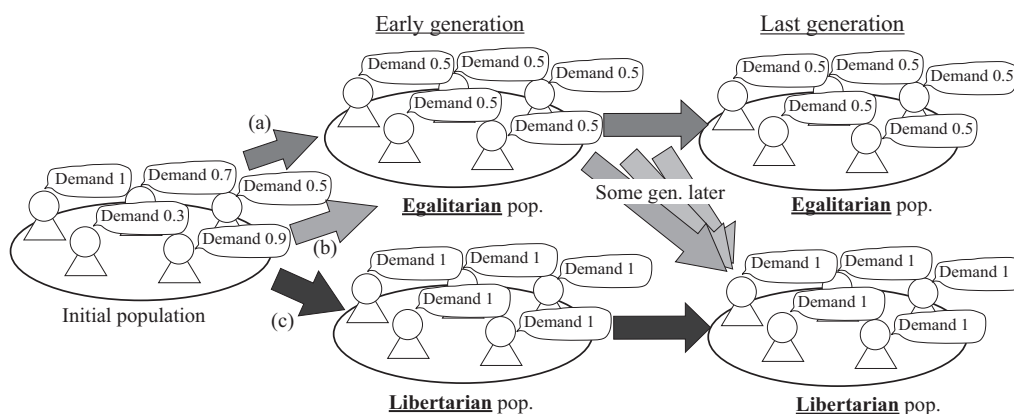


図 3.3.3: 得られた 3 種の進化シナリオ . (a)-(c) は各進化の遷移を示す . (a) 平等主義集団 : Egalitarian population への進化 . (b) 平等主義集団 : Egalitarian population に一旦収束し , その後に 自由主義集団 : Libertarian population への進化 . (c) 自由主義集団 : Libertarian population への進化 .

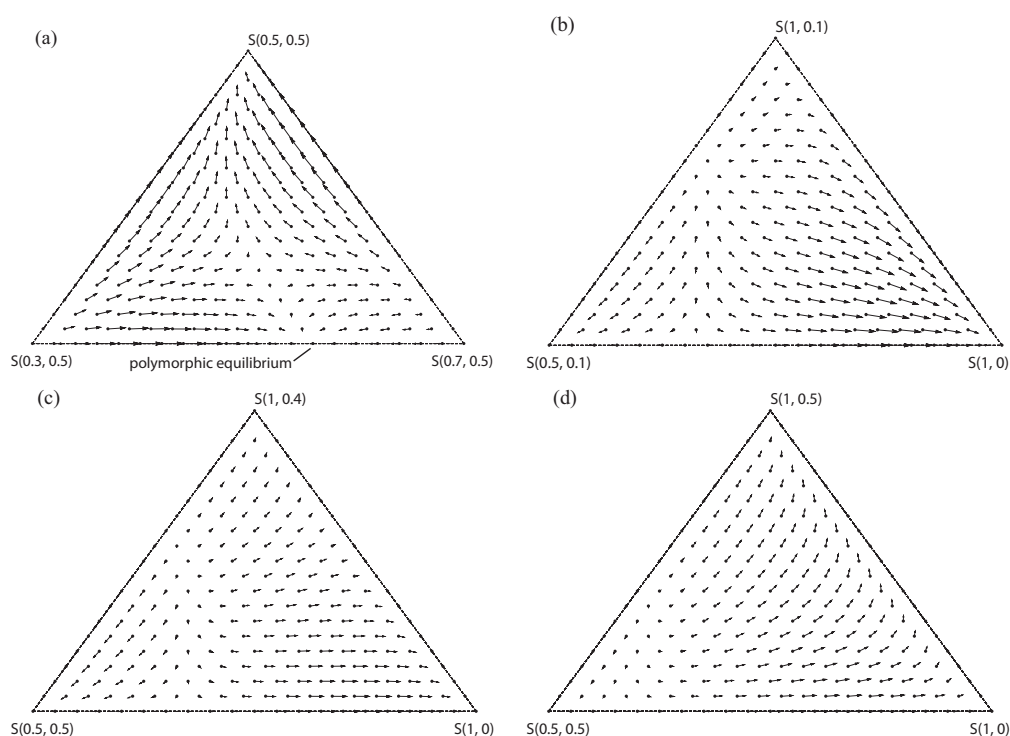


図 3.4.1: 典型的な 3 種の戦略間のリプリケーターダイナミクス . (a) $r = 0.2$ のとき , 集団が $S(0.3, 0.5)$, $S(0.7, 0.5)$, $S(0.5, 0.5)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 . (b) $r = 0.2$ のとき集団が $S(0.5, 0.1)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.1)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 . (c) $r = 0.6$ のとき , 集団が $S(0.5, 0.5)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.4)$ を用いる場合のベクトル図 . (d) $r = 1$ のとき , 集団が $S(0.5, 0.5)$, $S(1, 0)$, $S(1, 0.5)$ の戦略を用いる場合のベクトル図 .

第4章 社会ネットワーク構造の導入

4.1 はじめに

生物同士の相互作用には疎密が存在する．例えば，近隣のもの同士でよく相互作用する一方で，遠くのものとは相互作用しない場合や，ある特定の個体とは頻繁に相互作用する場合などがある．人の社会においても同様である．このような相互作用のネットワーク構造や局所性の効果により，協力の進化や公平性の進化において，出現する規範や進化ダイナミクスが変わることが報告されている [18, 17, 8, 21, 1]．さらに，選択における確率的要素が協力の進化や公平性の進化に影響を与えることも報告されている [11, 19, 22, 23]．比較的不利な戦略が集団中に広まったり有利な戦略が絶滅したりすることがあり，出現する規範や進化ダイナミクスが変化するのである．本章ではネットワーク構造や局所性，選択の強さにより，D-I ゲームにおいてどのような規範が創発し，それがどのように進化するかを調べるのが目的である．

さらに，ネットワーク構造や局所性，選択の強さの導入の影響に関して，前章の基本モデルの結果から期待される点がある．前章において，D-I ゲームでは 2 つの典型的な規範があることを示した．資源の等分を要求する規範（平等主義：*Egalitarianism*）と全ての資源を要求する規範（自由主義：*Libertarianism*）である．自由主義の特別な場合として，全ての資源を要求するが衝突時には資源を譲り渡す規範がある（軟弱な自由主義：*Wimpy libertarianism*）．軟弱な自由主義以外の自由主義は衝突のコストにより減った報酬を得る一方で，軟弱な自由主義は平等主義のように同じ規範をもつ者同士で衝突のコストなく等分の報酬を得ることができる．したがって，0.5 の報酬をお互いに得るという，均等で効率的な意味での理想的な社会は，平等主義だけでなく，軟弱な自由主義によっても達成されることに着目したい．前章の ESS 分析や進化シミュレーションにより，平等主義や軟弱な自由主義は D-I ゲームにおける通常の場合では創発せず，NDG に近い

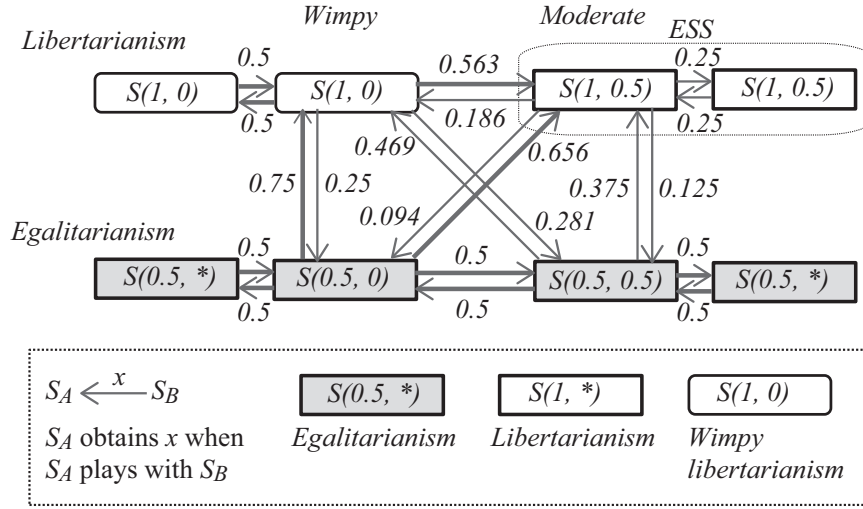


図 4.1.1: $r = 1$ での D-I ゲームの代表的な戦略間の報酬 .

高い衝突のコストの環境のときに創発する [9] . 進化ダイナミクスにおいて , D-I ゲームにおいて低い衝突のコストでは軟弱な自由主義ではない自由主義の集団へと進化することが見られただけであった . 一方 , 高い衝突のコストにおいて , 平等主義への進化や平等主義から自由主義への進化などがみられた [10] . また , 衝突のコストの調整を行っても , 自由主義から平等主義への進化はみられなかった . そこで , 空間構造の導入による協力の進化 [18, 17, 8] や公平性の進化 [21, 1] の促進 , 選択の強さの導入による公平性の進化 [23] , そのような先行研究の知見から , 空間構造や選択の強さの導入の効果により高い衝突のコストの環境なしに理想的な社会が達成されるのではないかと期待する . また , 協力の進化や公平性の進化に関するそれらの先行研究は局所性が複雑なダイナミクスを促進させることも報告している . したがって , 局所性の効果を考慮した D-I ゲームにおいてもより複雑なダイナミクスが生じることも考えられる .

D-I ゲームにおいて以下のような進化的な安定性や戦略間の得られる報酬の関係があることを考慮しつつ , ネットワーク構造 , 局所性 , 選択の強さによって進化ダイナミクスにどのような影響があるのかを調べる . D-I ゲームでは要求量 d に関して平等主義 $d = 0.5$ と自由主義 $d = 1$ の 2 つの典型的な戦略がある . $r = 0$ のとき , i の値によらず $d = 0.5$ の全ての戦略は ESS である . $r = 0$ 以外では平等主義戦略はもはや ESS でなくなり , 代わりに自由主義戦略が ESS となり , そのときの要求の強さ i は r の値によって変化する . 次の理由から $r = 1$ のときの進化ダイナミクスを調べる . $r = 1$ のとき D-I ゲームは最も単純なモデルである

ことに加え、衝突のコストが低いときでも理想的な社会が達成されるのかを調べるためである。図 4.1.1 は $r = 1$ での 2 つの典型的な戦略における代表的な戦略間の報酬を示す。 $r = 1$ では穏健な自由主義戦略が ESS であるが、自分たち同士で得られる報酬は 0.25 と低い。一方で、平等主義戦略 $S(0.5, *)$ や軟弱な自由主義戦略 $S(1, 0)$ は自分たち同士で 0.5 の高い報酬を得ることができる。強気な平等主義戦略（図では、 $S(0.5, 0.5)$ ）は他の平等主義戦略からは侵入されるが、他の戦略からは侵入されない。 $S(1, 0)$, $S(1, 0.5)$ は $S(0.5, 0.5)$ との対戦でそれぞれ 0.469, 0.375 と 0.5 より低い。逆に、弱気な平等主義戦略（図では $S(0.5, 0)$ ）は他の戦略から侵入される。軟弱な自由主義 $S(1, 0)$ も自分たち同士で 0.5 の報酬を得たり、平等主義戦略からは $S(0.5, 0)$, $S(0.5, 0.5)$ それぞれから 0.75, 0.469 と比較的高い報酬を得ることができるが、穏健な自由主義戦略に侵入される。

4.2 エージェントベースの社会ネットワークモデル

社会は人と人とのネットワークを構成しており、そのようなネットワーク上で規範がどのように進化するかを知るために、エージェントベースの社会ネットワークモデル上での D-I ゲームを本研究では扱う。そこで、平等主義や軟弱な自由主義が創発することを期待し、低い衝突のコスト（例えば、 $r = 1$ ）でも、集団中で成功した報酬（0.5 の報酬）を得るという点で理想的な社会が達成されるかどうかを確認する。そのため、単純化という点も考慮して衝突のコストは $r = 1$ の設定である $(i_0 + i_1)/2$ とする。モデルは前章の進化シミュレーションと同様に単純化のために、資源は 10 分割を想定してプレイヤーの要求量は 11 段階（0～10）に制限する。同様に、要求の強さも 11 段階に制限する。これらは、 $d, i = 0, 0.1, \dots, 1$ として記述する。プレイヤー数が無限であるリプリケーターダイナミクスの仮定の代わりに、有限のプレイヤー集団を考える。実験では 10000 プレイヤーの集団とした。それぞれのプレイヤーはゲームの利害における振舞いを決める個別の戦略をもつ。さらに、個人は適切な社会関係にある人々のみと相互作用すると仮定する。一般に、集団中の個人であるノードが繋がったグラフでその関係が記述される。本研究ではそれぞれのプレイヤーが幾らかのプレイヤーと繋がる社会ネットワークを考える。社会関係の変化より個人の信条（プレイヤーの戦略）はずっと早く変わると考え、社会関係は固定であるとする。

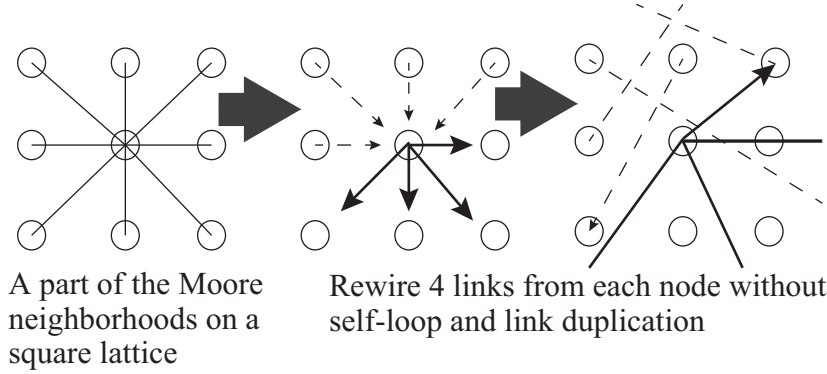


図 4.2.1: 平面格子におけるムーア近傍のネットワークのリンクの張替え．

本研究で扱う社会ネットワークはトーラスの格子状にムーア近傍で繋がるネットワークを基本とする．実験では 100×100 のノードが格子状に繋がり，各ノードに各プレイヤーが存在する．格子状のネットワークに対してワッツ・ストロガッツモデル [30] の方法に基づき確率 p で社会ネットワーク上のそれぞれのリンクを張り替える． p はワッツ・ストロガッツモデルのパラメータであり， $p = 0$ であればネットワークは本研究では平面格子になり， $p = 1$ であればランダムネットワークになる．本研究ではそれぞれのノードが他のノードと繋がる 4 つの基本リンクをもつ．図 4.2.1 のように自己ループやリンクの重複なしに確率 p でリンクを張り替える．

本モデルにおける進化は前章と同様の適応度比例の選択に選択の強さの調整を可能にしたもので行う．進化は各世代で次のことを行い，それを繰り返す．ネットワークに繋がれた全ての近隣プレイヤーと D-I ゲームを行う．近隣プレイヤーからゲームの平均報酬に応じて確率的に戦略を選択し，各プレイヤーは d と i のそれぞれに対して確率 μ で他の値に変える．選択の強さの調整のために，成功したプレイヤーを確率的に選択する際に，近隣プレイヤーとの平均報酬に“選択の強さ” [23] を導入した値を評価値とする．つまり，選択のための評価値としてプレイヤー i の実質的な報酬は $\exp[w\pi_i]$ と定義する．したがって，プレイヤー j の次の戦略として近隣のプレイヤー i が選ばれる確率 $S_{i,j}$ は以下ようになる．

$$S_{i,j} = \frac{\exp[w\pi_i]}{\sum_{k \in N_j} \exp[w\pi_k]} \quad (4.2.1)$$

N_j はプレイヤー j のネットワーク構造から決まる近傍のプレイヤーの集合である． w は“選択の強さ”と呼ばれ， π_i は近隣プレイヤーとの報酬の平均値である． w が

高ければ、より高い報酬のプレイヤーがよりいっそう選ばれやすくなる。 $w \rightarrow \infty$ では最も報酬の高いものだけが選ばれる。一方で、 $w \rightarrow 0$ では全ての戦略が等しく選ばれる。

よって、以下のアルゴリズムにてシミュレーションを行う。

- 100 x 100 のノードについて、トーラスの格子状にムーア近傍で繋がるネットワークを作る。
- 各ノードにランダムな d, i を持つ個体を配置する。
- ネットワークに対して、図 4.2.1 のようにワッツ・ストロガッツモデルの方法に基づき確率 p でリンクを張り替える。
- 以下を 1500 世代繰り返す。
 - 各個体（各プレイヤー）はネットワークで繋がる全ての個体と D-I ゲームを行い、各個体の全対戦の報酬を平均する。
 - 各個体の平均した報酬を選択の強さ w に関する式 (4.2.1) で選択の掛かり具合を調整する。
 - 各個体で調整した報酬を適応度とした適応度比例の選択で、ネットワークで繋がる個体と自分の中から次世代の個体を選択する。
 - 各個体は d と i のそれぞれに対して確率 μ で他の値に変える。

4.3 進化シミュレーション

4.3.1 出現した規範

社会ネットワークモデルでの進化の結果、どのような戦略が残ったかを考える。まず、要求量と要求の強さでそれぞれ集団中に各戦略 ($d, i = 0, 0.1, \dots, 1$) が何個体いるか数え、それを 1000 世代から 1500 世代（最終世代）で平均する。さらに、その計算した集団構成を 100 試行で平均し、平均的な集団構成を考える。図 4.3.1-4.3.3 は要求量と要求の強さに関する平均的な集団構成とそのときの平均報酬を示し、縦に並んだ図の 3 つでひとそろいの結果である。1 段目、2 段目の図の各領域は各戦略 ($d, i = 0, 0.1, \dots, 1$) に対応し、図の下からそれぞれ $d, i = 0$ (赤

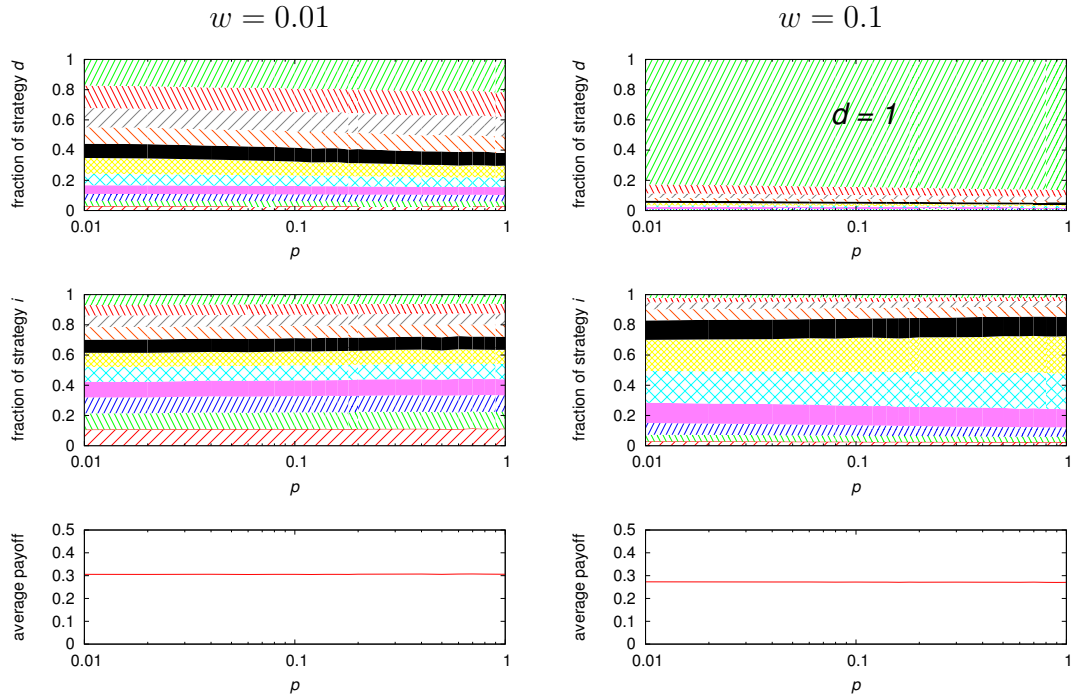


図 4.3.1: $w = 0.01, w = 0.1$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の集団構成と平均報酬．図は 100 試行で平均したものをプロットした．縦に並んだ図の 3 つでひとそろいの結果である．1 段目, 2 段目の図の各領域は各戦略 ($d, i = 0, 0.1, \dots, 1$) に対応し, 図の下からそれぞれ $d, i = 0$ (赤の領域), $d, i = 0.1$ (緑の領域), $d, i = 0.2$ (青の領域), $d, i = 0.3$ (ピンクの領域), $d, i = 0.4$ (水色の領域), $d, i = 0.5$ (黄色の領域), $d, i = 0.6$ (黒の領域), $d, i = 0.7$ (橙の領域), $d, i = 0.8$ (灰色の領域), $d, i = 0.9$ (2 番目の赤の領域), $d, i = 1$ (2 番目の緑の領域) を示す．3 段目の図は集団中の平均報酬を示す．

の領域), $d, i = 0.1$ (緑の領域), $d, i = 0.2$ (青の領域), $d, i = 0.3$ (ピンクの領域), $d, i = 0.4$ (水色の領域), $d, i = 0.5$ (黄色の領域), $d, i = 0.6$ (黒の領域), $d, i = 0.7$ (橙の領域), $d, i = 0.8$ (灰色の領域), $d, i = 0.9$ (2 番目の赤の領域), $d, i = 1$ (2 番目の緑の領域) を示す．3 段目の図は集団中の平均報酬を示す．各図の横軸は p であり, 0 から 1 の値をとり, ネットワークの構造を平面格子からランダムネットワークでの結果を示す．3 つひとそろいの結果を左から順に $w = 0.01, w = 0.1$ (図 4.3.1), $w = 1, w = 5$ (図 4.3.2), $w = 10, w = 50$ (図 4.3.3) の結果を示し, w が大きいほど報酬が高いものが選ばれやすい状況での結果を示す．

図 4.3.1-4.3.3 によると, 概して選択の強さが強くなるほど (w が大きくなるほど), 要求量大きい戦略が残しやすいことがわかる．特に, $w = 1$ に向かって選

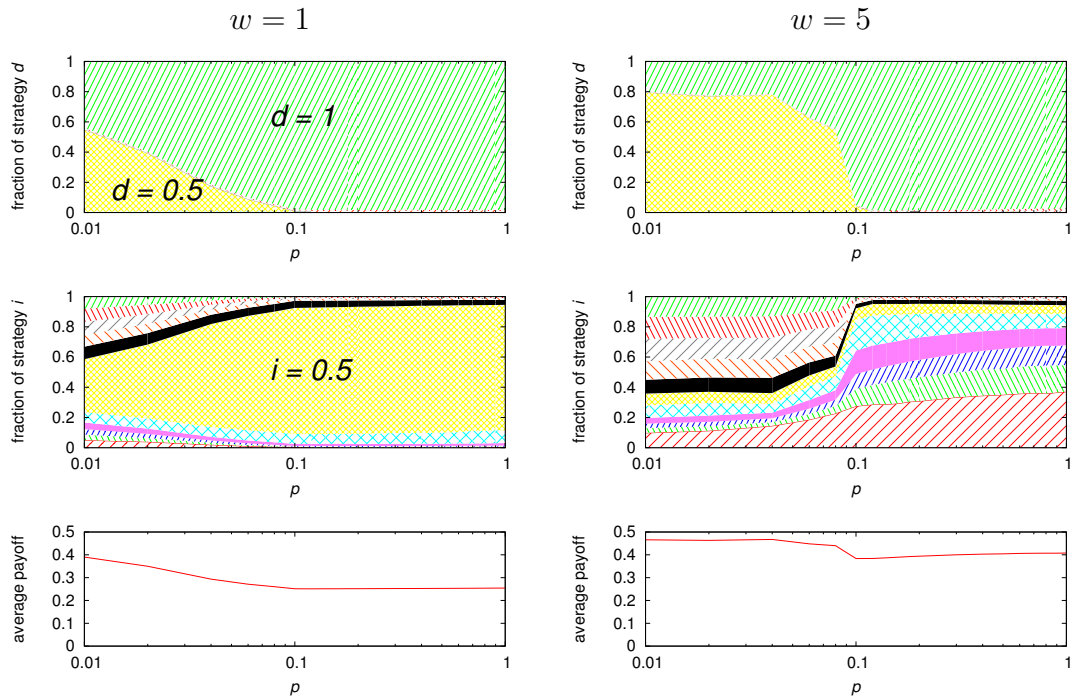


図 4.3.2: $w = 1, w = 5$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の集団構成と平均報酬．図 4.3.1 と同様のグラフである．

択の強さが強くなるにつれて ESS である穏健な自由主義 $S(1, 0.5)$ が増える傾向にある．そのときの報酬も $w = 1$ に向かって選択の強さが強くなるにつれて 0.25 へ減少している．前章の基礎モデルの設定は $w = 1, p = 1$ が最も近い条件であり，前章での $r = 1$ のときの進化シミュレーションで $S(1, 0.5)$ の集団へ進化することと一致している．

$w = 1$ 以上では，平等主義戦略か自由主義戦略が残るようになる．小さい p である局所性が高いほど平等主義戦略 $S(0.5, *)$ が集団中に残り， $w = 1$ で平面格子のとき 88% の試行で平等主義戦略が集団中を占めた．逆に，局所性が低くなると，自由主義戦略が集団中に残りやすくなる．これは局所性があると，自分たち同士でかたまることができるので自分たち同士で高い報酬 0.5 を得ることができるためであると考えられる． $w = 10$ からは ESS である $S(1, 0.5)$ の代わりに，弱気な自由主義 $S(1, 0 - 0.4)$ ，特に，軟弱な自由主義 $S(1, 0)$ がありふれた戦略となった．これは $w = 1$ まではランダム選択から選択が掛かるようになり，ESS の $S(1, 0.5)$ や安定性をもつ $S(0.5, *)$ へと進化することに対して， $w = 1$ を超えるとよりいっそう報酬を多く獲得しやすい戦略が有利であるためだと考えられる． d と i に関

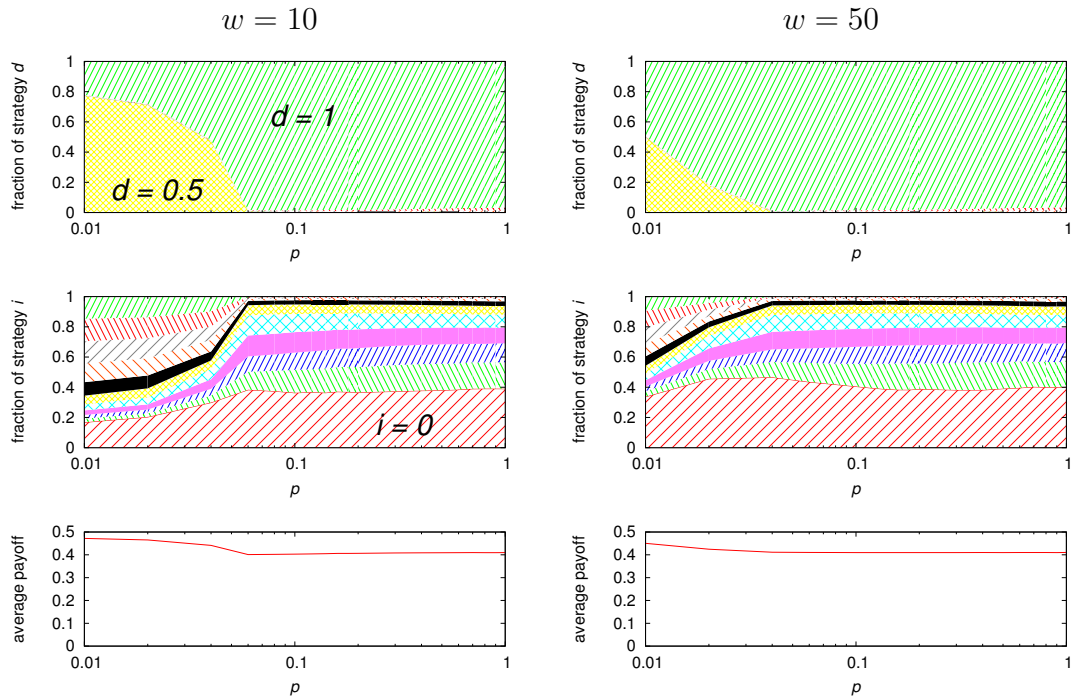


図 4.3.3: $w = 10, w = 50$ のときの 1000 世代から 1500 世代中の戦略の集団構成と平均報酬．図 4.3.1 と同様のグラフである．

して 0.1 刻みの全 121 種類の戦略との対戦の平均値は $S(1, 0)$ では 0.504 であり， $S(1, 0.5)$ では 0.433 である．したがって， $S(1, 0)$ のほうが対戦相手がランダムであれば，より高い報酬を得る可能性が高い． $w = 1$ を超える条件ではそういった戦略が進化の初期で選ばれ，それが集団中に残っていったと考えられる．

強い選択の強さと高い局所性では平等主義戦略が集団中に広まり，平等主義の社会では高い報酬 0.5 を得ることができる．その意味で強い選択の強さと高い局所性で理想的な社会が達成されることが分かる．さらに，選択の強さが十分に強いと，軟弱な自由主義が広まることがある．このときも軟弱な自由主義で形成される社会では各人が高い報酬 0.5 を得ることができ，理想的な社会が達成される．

4.3.2 進化ダイナミクス

どのように進化したのかをみるために進化の推移を示す． $w < 1$ のときは w が大きくなるにつれてランダムな推移から $w = 1$ でみられる進化に近づいていった．そのため取り上げるような進化は見られず，そこでの進化は省略し， $w = 1, 10, 50$

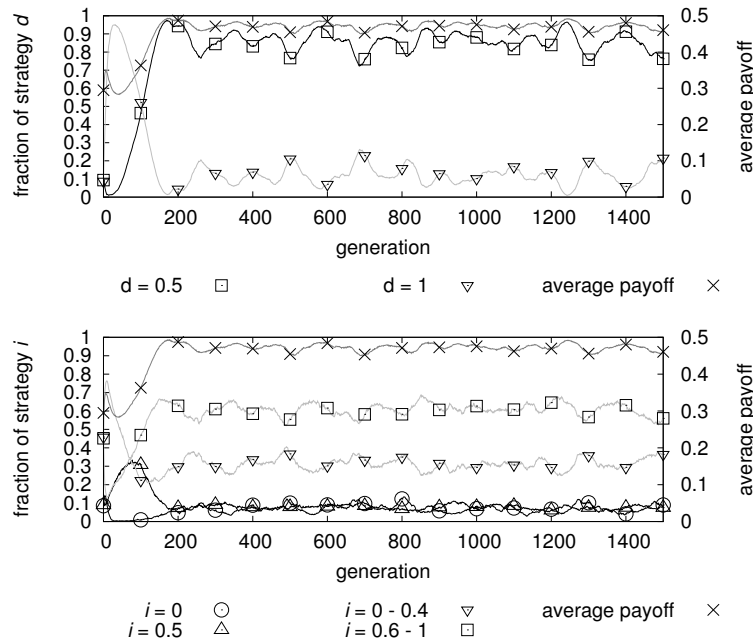


図 4.3.4: $w = 1, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．上図は平等主義戦略 $d = 0.5$ と自由主義戦略 $d = 1$ の集団中の割合を示す．下図は軟弱戦略 $i = 0$, 穏健戦略 $i = 0.5$, 弱気戦略（軟弱含む） $i = 0 - 0.4$, 強気戦略（強硬含む） $i = 0.6 - 1$ の集団中の割合を示す．集団の平均報酬は上下両図共にプロットした．

のときの代表的な進化を以降示す．

4.3.2.1 $w = 1$ でみられた進化

図 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6, 4.3.8 はそれぞれ $p = 0, p = 0.02, p = 0.06, p = 0.1$ のときの $w = 1$ での各戦略の集団中の割合の推移とそのときの平均報酬を示している．上のグラフは要求量に関する戦略の推移で，下のグラフは要求の強さに関する戦略の推移を示している．集団中の平均報酬はどちらのグラフにもプロットした．要求量に関して進化の中でほとんどの期間で集団中に存在するのは平等主義戦略 $d = 0.5$ か自由主義戦略 $d = 1$ なので，それらの集団中での割合の推移を示した．要求の強さに関しては特徴的な戦略である軟弱な戦略 $i = 0$ と穏健な戦略 $i = 0.5$ と， $i = 0 - 0.4$ を一纏めにして弱気な戦略（軟弱な戦略も含む）と $i = 0.6 - 1$ の強気な戦略の推移を示す． $w = 1$ では上述のように平等主義か自由主義のどちらかへと進化した． p の大きさに応じて平等主義と自由主義のどちらが優勢になる

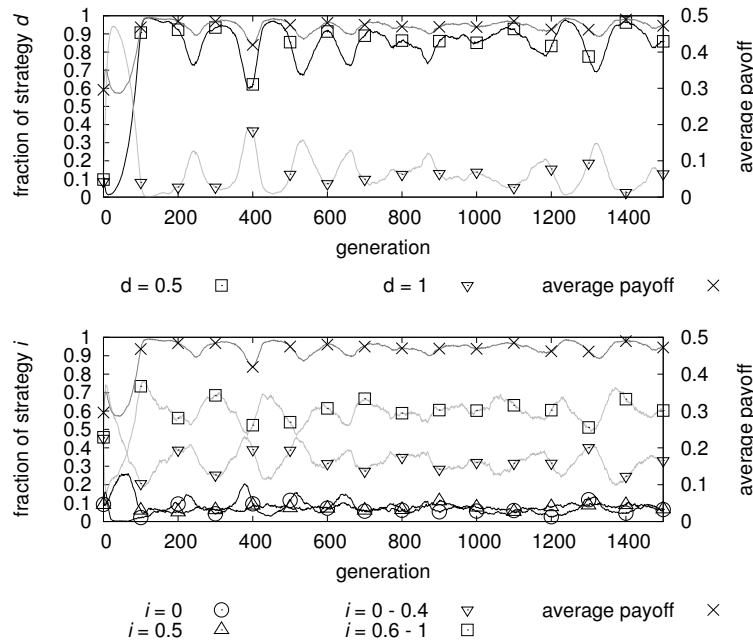


図 4.3.5: $w = 1, p = 0.02$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す．

か変わる．大きく分けて，平等主義への進化，平等主義と自由主義間の振動，自由主義への進化の 3 種類見られ，以下でそれぞれの進化を示す．

1) 平等主義への進化

図 4.3.4 は $p = 0$ のときの平等主義が集団中に残った試行の進化を示している．進化の初期で弱気な自由主義が台頭するが，穏健な自由主義の増加をきっかけとして強気な戦略が増えている．強気な戦略が増えることで，平等主義戦略でも安定性をもつことができ強気な平等主義戦略が台頭している． $p = 0$ なので局所性があり平等主義戦略の塊が形成されやすく，強気な戦略が弱気な戦略より多く維持され，平等主義戦略が安定して存在している．平等主義戦略が維持されるので，平均報酬も 0.5 付近を維持している．図 4.3.5 は $p = 0.02$ のときの平等主義戦略が集団中に残った試行の結果を示す． $p = 0$ のときとほぼ同じような進化ダイナミクスであるが，局所性が弱いので自由主義戦略が度々増加するが，まだ局所性が強く効いて平等主義戦略に戻っている．

2) 平等主義と自由主義間の振動

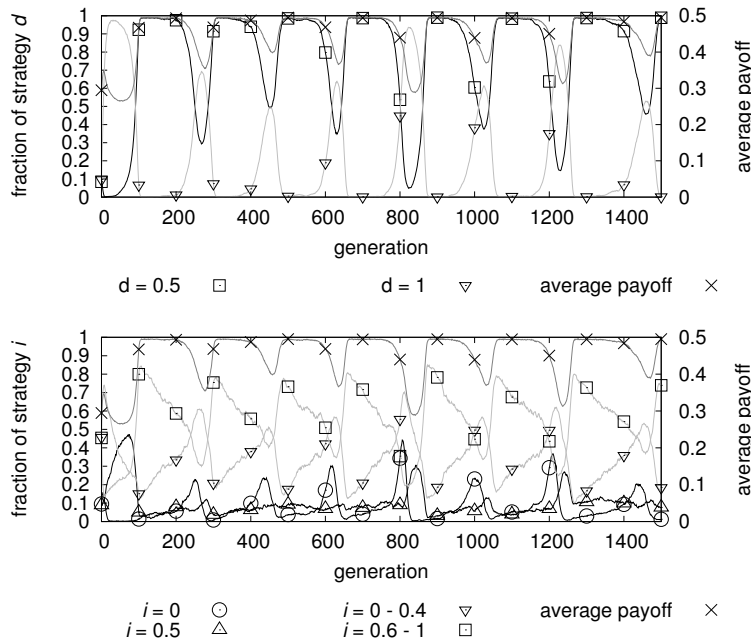


図 4.3.6: $w = 1, p = 0.06$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す．

$p = 0.06$ では $p = 0$ などと比べて自由主義戦略がより増えやすくなり，図 4.3.6 のように平等主義戦略と自由主義戦略が交互に態勢を占めるようになる進化が観察された．集団中の平均報酬は平等主義戦略の割合と連動しており，平等主義戦略が多ければ 0.5 の高い平均報酬であり，少なくなれば平均報酬は減少する．図 4.3.7 はこの試行の進化での要求量の集団中の平均と要求の強さの平均に関する軌跡を描いたものである．初期世代では集団中の戦略はランダムであり，要求量と要求の強さの平均はともに 0.5 である．要求量は増加して $d = 1$ に向かい，要求の強さは減少して $i = 0.3$ 程になる．したがって，まず弱気な自由主義戦略に向かう．これは弱気な自由主義戦略が上述のようにランダムな戦略に対してより高い報酬を得ることが得ることができるためであると考えられる．そこから要求の強さが増加し ESS $S(1, 0.5)$ に向かう．図 4.1.1 にあるように弱気な自由主義戦略（図では $S(1, 0)$ ）同士の対戦報酬より ESS $S(1, 0.5)$ に戦略を変えたほうがよく，弱気な自由主義戦略は ESS $S(1, 0.5)$ に侵入されると考えられる．図では軟弱な自由主義戦略 $S(1, 0)$ 同士で 0.5 の報酬を得ているが，ESS $S(1, 0.5)$ に戦略を変えると軟弱な自由主義戦略に対して 0.563 の報酬を得ることができる．さらに，要

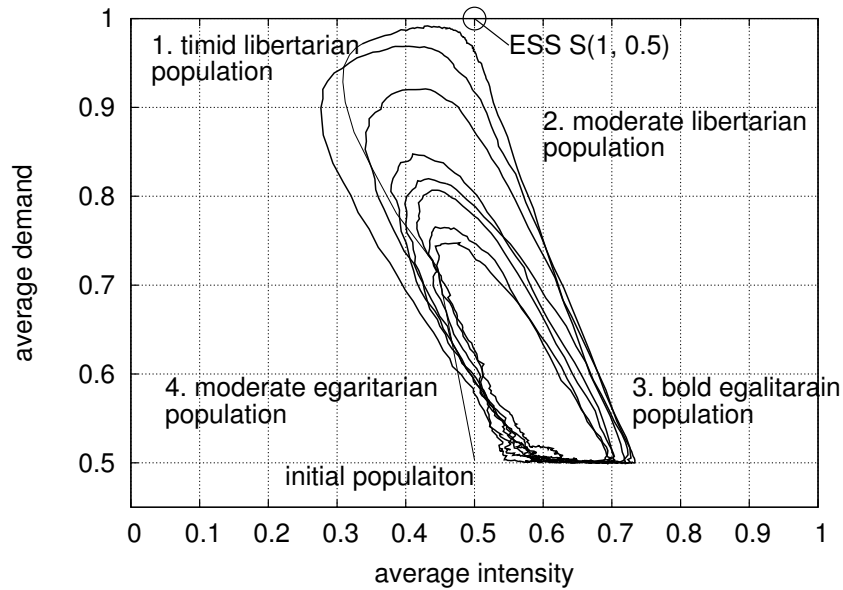


図 4.3.7: 平等主義集団と自由主義集団の循環のダイナミクス．図 4.3.6 の結果における要求量，要求の強さの集団中の平均値の軌跡である．横軸は要求の強さの集団中の平均であり，縦軸は要求量の集団中の平均値である．ランダムな状態の平均値 $(0.5, 0.5)$ から出発し，時計回りに循環している．

求の強さが上昇するのに伴って要求量が減少して強気な平等主義戦略に向かう．これも上述のように局所性がまだ存在し，平等主義戦略同士の塊を形成して安定性をもつためである．強気な平等主義戦略には弱気な平等主義戦略が侵入できるので，徐々に要求の強さが減少していく．弱気な平等主義戦略には自由主義戦略が侵入でき，特に，弱気な自由主義戦略が大きく報酬を得ることができるので，弱気な自由主義戦略が台頭する．局所性がなければ，ESS である $S(1, 0.5)$ の戦略へ向かうだけで進化は収束するが，適度に局所性があるためこのように循環するダイナミクスが現れた．

3) 自由主義への進化

図 4.3.8 は $w = 1$ のときの最も一般的な挙動で，ESS $S(1, 0.5)$ の戦略が集団中に広まって収束する進化である．つまり，平等主義戦略の塊ができなかったときの挙動である．上図から要求量について自由主義戦略 $d = 1$ がすぐに広まっていることが分かり，このときの要求の強さは下図から弱気な自由主義戦略 $i = 0 - 0.4$ から穏健な自由主義戦略 $i = 0.5$ に集団の構成が変わっていることが分かる．このとき穏健な自由主義戦略が集団中を占め，平

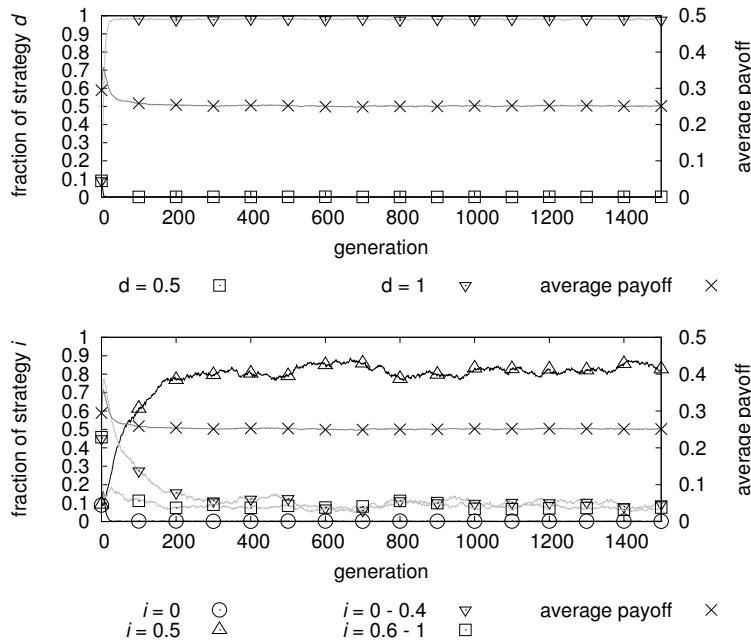


図 4.3.8: $w = 1, p = 0.1$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ方法で示した結果を示す．

等主義戦略や軟弱な自由主義戦略が集団中を占めているときに比べて，低い平均報酬 0.25 を推移している．

4.3.2.2 $w = 10$ でみられた進化

$w = 10$ では平等主義が弱気な自由主義へと進化した．図 4.3.9, 4.3.10, 4.3.11 は $w = 1$ の図と同様に $w = 10$ のときの各戦略の集団中の割合の推移とそのときの平均報酬を示しており，それぞれ $p = 0, p = 0.02, p = 0.1$ のときの結果である．図 4.3.9 において $d = 0.5$ と $i = 0.6 - 1$ ，そして， $d = 1$ と $i = 0 - 0.4$ がそれぞれ連動しており，それぞれ強気な平等主義戦略と弱気な自由主義戦略が出現して進化していることがわかる．進化初期で弱気な自由主義戦略が台頭し，100 世代ほどから強気な平等主義戦略に切り替わることが分かる．ランダムな初期集団において有利な弱気な自由主義戦略が増え， $p = 0$ であり局所性があるので強気な平等主義戦略が広まったと考えられる．このとき ESS である穏健な自由主義戦略 $S(1, 0.5)$ は台頭しない．これは選択の強さが強いので高い報酬を得ることで次世代に選ばれやすくなるためである．穏健な自由主義戦略は自戦略同士で 0.25 しか

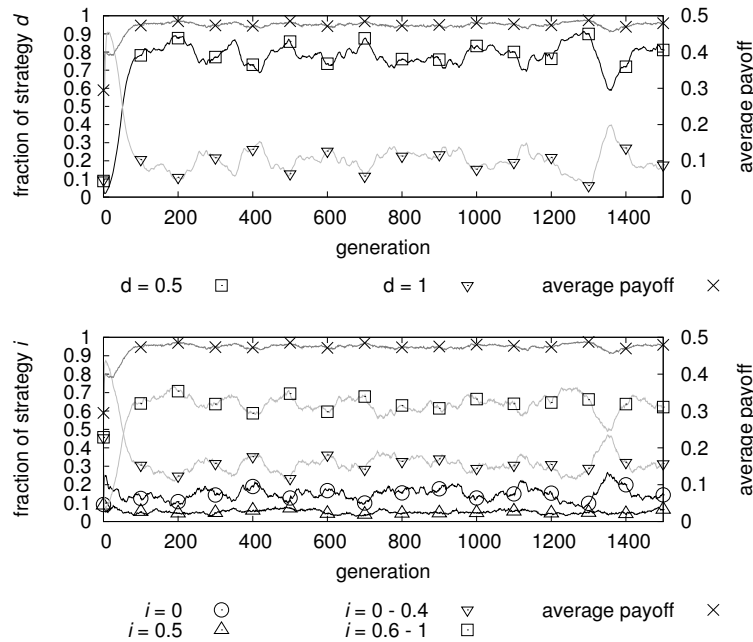


図 4.3.9: $w = 10, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す．

報酬を得ることができないので自戦略同士でより高い報酬を得る弱気な自由主義戦略や平等主義戦略に比べて集団中に広まりにくいと考えられる．そのため，平均報酬は 0.5 付近を推移している． $w = 10, p = 0$ であるこの設定のときに全ての試行でこのように進化した．図 4.3.10 は $w = 10, p = 0.02$ の場合の進化を示している． $w = 1, p = 0$ と同様に弱気な自由主義戦略が集団中に広まり，その後強気な平等主義戦略が広まっている．91% の試行でこの進化が現れた．残りの試行では図 4.3.11 にみられるように弱気な自由主義戦略が集団中を占め，そのまま収束するように進化した．図 4.3.11 は $w = 10, p = 0.1$ のときの進化である． p が増加するにつれて，つまり，局所性が弱くなるにつれてこの進化になる可能性が高くなり， $p = 0.06$ を超えると全ての試行で弱気な自由主義戦略に収束する進化が観測された．このとき平均報酬は 0.4 を推移している．軟弱な自由主義戦略が完全に集団中に広まっていれば平均報酬は 0.5 となるが，弱気な自由主義戦略が半分ほど共存しているためである．

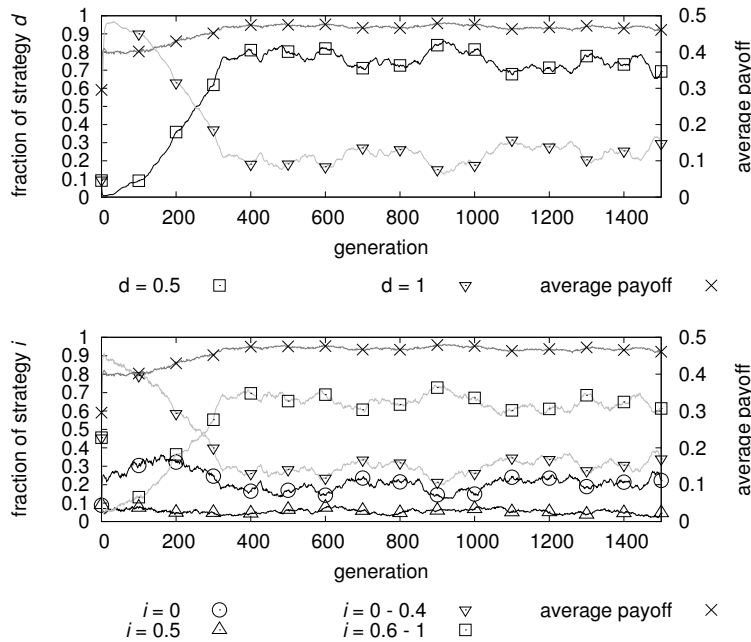


図 4.3.10: $w = 10, p = 0.02$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す．

4.3.2.3 $w = 50$ でみられた進化

図 4.3.12 に示すように， $w = 50, p = 0$ において弱気な自由主義戦略の支配から強気な平等主義戦略と弱気な自由主義戦略の共存に移る進化がみられる． $w = 50, p = 0$ の全ての試行でこのような進化となった． $w = 1, 10$ では $p = 0$ のとき強気な平等主義戦略へと進化したが，局所性があるところでも $w = 50$ まで高い選択の強さでは弱気な自由主義戦略に有利になったため共存したと考えられる．そして，局所性が弱くなると，図 4.3.11 の進化のように弱気な自由主義戦略が支配的となる． $w = 50$ では $p = 0.4$ で全ての試行で弱気な自由主義戦略が集団中に広まって収束する進化が観測された．

4.4 議論

以上の実験結果から以下のことがわかった．

1. まず，ネットワーク構造をもつことに関する影響を考える．本モデルと前モデルにおける大きな違いはネットワーク構造をもつことである．本モデルで

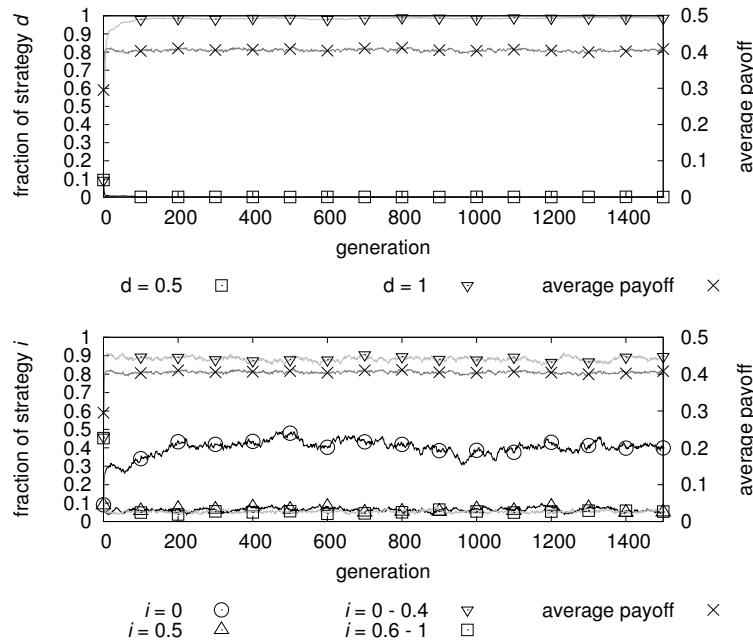


図 4.3.11: $w = 10, p = 0.1$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す．

は集団中の近隣プレイヤー（ランダムネットワークならランダムな数プレイヤー）のみとの対戦であることと，次世代に残る戦略は近隣プレイヤーから選択することに前モデルとの違いがある．局所性 p や選択の強さ w における様々な条件下において，多くの試行で弱気な自由主義戦略が進化初期に台頭することが分かった．これは，対戦相手が数プレイヤーなので対戦相手の戦略がばらつく可能性があり，弱気な自由主義戦略がランダムな相手に対して報酬が高いためだと考えられる．

2. つぎに，選択の強さに関する影響を考える．選択圧がなければ，当然さまざまな戦略が共存する．選択の強さを強くすると，基本的に戦略の 2 極化が進む．つまり，自由主義戦略か平等主義戦略が出現する．前章の設定に近い最も基本的な条件下での進化は前章で行った ESS 分析や進化シミュレーションの結果と一致しており，穏健な自由主義戦略 $S(1, 0.5)$ が集団中に広まって収束する進化となる．さらに，選択の強さを高めると，ランダムな相手に対して有利な弱気な自由主義戦略 $S(1, 0) - S(1, 0.4)$ が集団中に広まって収束する進化となる．このときこれらの弱気な自由主義戦略は共存することが

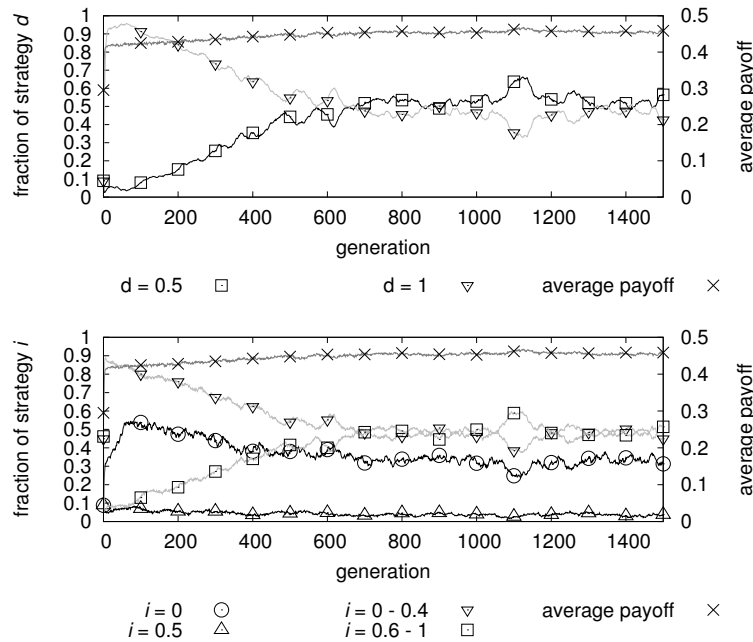


図 4.3.12: $w = 50, p = 0$ における戦略の集団中の割合と平均報酬の推移．図のグラフは図 4.3.4 と同じ戦略の結果を示す．

分かった．

3. そして、局所性に関するネットワーク構造の違いにおける影響を考える．ある程度の強い選択圧がなければ、局所性の違いによる効果は特にみられなかった．選択圧がある状況で、局所性が強いと平等主義戦略へと進化しやすくなることが分かった．これは自戦略同士で高い報酬を得ることができるためである．局所性がほどよいとき、自由主義戦略と平等主義戦略が振動するという非常に興味深い状態になる．これは公共財ゲームや囚人のジレンマにおいて、ゲームへの非参加戦略を加えることで生じる循環性に類似している [6, 29]．また、囚人のジレンマで戦略だけでなくネットワークの構造を振動させても、このような循環性が現れることが報告されている [27]．これは平均次数と協力行動の割合の大小の組み合わせの 4 状態で循環し、本研究で生じる循環性は要求量（自由主義か平等主義か）と要求の強さ（強気が弱気か）における戦略の組み合わせの 4 状態であり、2 次元の増減の組み合わせで 4 状態を循環する点で似ている．また、局所性が強く、選択の強さが非常に強いときには、自由主義戦略と平等主義戦略が共存することが分かった．

4. 最後に、理想的社会が達成されたかを考える。選択の強さや局所性の影響で、高い報酬を得ることができるという意味で理想的な社会が以下のような条件で達成されることが分かった。選択の強さが強いと、軟弱な自由主義戦略が出現しやすくなり、集団中で 0.5 近くの報酬を得ることができる。また、局所性が強いと、平等主義戦略が出現しやすくなり、集団中で 0.5 報酬を得ることができる。

4.5 まとめ

本論文で扱う D-I ゲームは分配的正義に関する規範の進化について様々なシナリオを議論するために、ナッシュ要求ゲームに要求の強さという要素を追加した。前章によると、3 つの規範が出現することが示された。等分を要求する規範である平等主義、全てを要求する規範である自由主義、全てを要求して衝突すると譲る規範である軟弱な自由主義である。平等主義や軟弱な自由主義はそれぞれの社会では無駄のなく等分の報酬を得ることができるため、その意味で理想的な社会を達成することができる。

現実の社会では人と人が繋がりネットワークの構造を有している。前章のモデルは相互作用が全ての個体で行っており、ネットワークの構造を考慮することでより自然なモデルとなる。選択の強さにおいても選択の掛かり具合により出現する規範が異なり、導入により現実を表現するモデルに近づけることができる。したがって、より妥当なモデルで議論することに加えて、上記の理想的な社会が達成されるための条件はどのようなものかを探るために、本研究では D-I ゲームにおける社会ネットワーク上での局所性や選択の強さに関する影響を調べた。

結果として、以下のことを示した。

1. まず、基礎的な点で分かったことを述べる。少数の限られた個体のみと繋がるネットワーク構造によって軟弱な自由主義を含む弱気な自由主義が出現しやすくなることが分かった。概して、選択圧がかかると、平等主義と自由主義が創発した。また、前章と同様の環境下では前章と同様に穏健な自由主義が創発した。
2. つぎに、選択の強さの違いや局所性に関するネットワーク構造の違いによる影響を述べる。強い選択の強さでは弱気な自由主義が出現しやすくなり、局

所性があるネットワーク構造（平面格子）だと平等主義が創発する．そのため，無駄のない等分ができる規範をもつ理想的な社会は局所性によって達成される．強い選択の強さでは出現する規範は他の戦略も混在するが軟弱な自由主義が基本であるため，強い選択の強さで理想的な社会に近づく．

3. そして，得られた進化ダイナミクスについて述べる．進化ダイナミクスは弱気な自由主義が初期で台頭し，そのまま維持する進化や平等主義や穏健な自由主義への進化が見られた．さらに，特定の環境下で平等主義と自由主義が共存する進化や平等主義と自由主義が振動する進化が観察された．

以上の結果から，社会ネットワークの導入において，平等主義と軟弱な自由主義は共に結果として無駄がなく等分の報酬を得る社会を築くことができる一方で，それぞれの出現条件やどのように進化するのかにおいてそれぞれに違いが生じた．平等主義は同じ規範をもつ者同士が集まると有利であり，軟弱な自由主義は様々な相手に対して有利で“したたかな”規範であることが分かる．同じ者の集まりで有利な規範やしたたかな規範がどのように進化するのかを D-I ゲームで議論できる．また，その違いや利点を基に平等主義と自由主義の振動などの複雑な進化が生じた．そして，D-I ゲームはナッシュ要求ゲームに要求の強さという要素を単純に追加して，ゲーム理論で解析が可能なほどシンプルである．そのため，D-I ゲームはシンプルでありながら，様々な規範を考えることができ，様々な複雑な規範の進化を創発することができると思われる．

第5章 結論

本研究では、分配的正義に関する規範の進化に関するさらなる知見を得るために、資源分配への執着の強さをもつ D-I ゲームを提案し、様々な進化シナリオについて議論した。具体的には、D-I ゲームの基礎的な性質による進化ダイナミクスを示し、さらにネットワーク構造や局所性、選択の強さの効果に関する進化ダイナミクスを示した。

まず、D-I ゲームにおける基礎的な性質による進化ダイナミクスについて調べた。進化の結果として出現した規範と得られた進化ダイナミクスの二点について述べる。第一に、出現した規範は資源の等分を要求する平等主義、資源を全て要求する自由主義である。自由主義の中でも衝突したら資源を譲る軟弱な自由主義は他の自由主義と異なり、自分たち同士では譲り合いによって損失なく結果的に等分の資源を得ることができる。平等主義も軟弱な自由主義も、自分たち同士で資源の損失なく等分という高い報酬を得ることができる点で、理想的な社会を達成できる。これら規範は要求の衝突に掛かる損失の大きさに依存して、出現する規範が変化することが分かった。平等主義が損失の大きいときに出現し、損失が小さいときには自由主義が出現しやすくなる。軟弱な自由主義は自由主義の中でも損失の大きいときに出現しやすい。したがって、比較的要求の衝突に掛かる損失の大きいときに理想的な社会が達成されやすいことが分かった。

第二に、得られた進化ダイナミクスは平等主義へすぐに向かいそのままの進化、自由主義へ向かいそのままの進化、一旦平等主義へと向かい途中で自由主義へ切り替わる進化が観察された。逆に、自由主義から平等主義への進化はみられなかった。平等主義から自由主義への進化のみ出現したことは、自由主義戦略が進化的に安定で、平等主義戦略が準安定である状況が衝突に掛かる損失の大きさによって出現するためである。この準安定は、平等主義戦略の集団では平等主義戦略同士で自由に侵入し、弱気な平等主義戦略が広まってしまうと、自由主義戦略が広まってしまうことができるという準安定である。

つぎに、社会ネットワークや局所性、選択の強さの効果に関する進化ダイナミクスについて調べた。進化の結果として出現した規範と得られた進化ダイナミクスの二点について述べる。第一に、出現した規範について述べる。ネットワーク構造によって弱気な自由主義が出現しやすくなることが分かった。選択圧が低ければ様々な戦略が集団中に存在するが、基礎的な性質にあるように選択の強さが高まれば平等主義か自由主義が規範として出現する。全ての資源を要求し、ある程度執着する穏健な自由主義が出現しやすい条件にも関わらず、選択の強さを高めれば弱気な自由主義が出現し、局所性があると平等主義が出現することが分かった。両者の影響が大きいときには平等主義と弱気な自由主義が共存することが分かった。弱気な自由主義の中に軟弱な自由主義は含まれ、選択の強さが高いときに集団中で比較的高い報酬を得ることができるが、他の弱気な自由主義戦略が混在するので報酬が等分から少し低くなってしまう。若干の損失があるが、理想的な分配に近づく。選択の強さが中ほどで局所性が強いと、平等主義が出現し、資源の損失なく均等に分配する理想的な社会が達成される。そのため、平等主義が出現する条件として、局所性や選択の強さに関する数々の先行研究の結果に一致する。他の弱気な自由主義戦略の混在を許してしまうが、軟弱な自由主義は選択圧が強いときにしたたかに生き残り、融通の利く規範であることが浮き彫りとなった。

第二に、得られた進化ダイナミクスについて述べる。平等主義への進化、穏健な自由主義への進化、弱気な自由主義への進化と単純にそれらの規範へと向かう進化に加え、平等主義と弱気な自由主義の共存、平等主義と自由主義間の振動のような進化ダイナミクスもみられた。それぞれ局所性や選択の強さの度合によって出現する進化ダイナミクスが変化した。

最後に、本研究の今後の展開について言及する。社会ネットワークモデルについて、協力の進化や公平性の進化において、様々なネットワーク構造上での研究がなされており、そのようなネットワーク構造の上での進化ダイナミクスについて検討することが挙げられる。また、実際の人の行動の文化進化の実験の結果と得られた理論的な結果を比較することが考えられる。我々が行った予備的な実験では要求の強さに関する心理的な要素を具現化した適切な隠喩の導入が規範の創発に大きく影響を与えたことを示した [14]。第三に、生まれつき持っていて、成長に従って発現してくる不平等を嫌う志向に関する知見との比較などが考えられる。

謝辞

本研究は，名古屋大学大学院情報科学研究科にて行われたものである．

指導教官ならびに主査である有田隆也先生には並々ならぬ熱心な御指導をいただきました．最後の最後まで，長きに渡り多くの有意義な御助言や叱咤激励をいただき，研究活動の助けとなりました．深く感謝の意を表します．副査である北栄輔先生には本論文の執筆において草稿段階で大変貴重な時間を割いて御指導していただき，有意義な御助言をいただきました．深く感謝の意を表します．鈴木麗璽先生には長きに渡り日頃から大変貴重な御助言をいただきました．そして，貴重な時間を割いてご指導していただきました．深く感謝の意を表します．有田研究室，鈴木研究室の皆様とは多くの議論を幅広くさせていただきました．また，研究室の諸先輩方には多くの励ましの言葉をいただきました．深く感謝します．最後に，これまで応援してくれた家族に感謝します．

参考文献

- [1] J. M. Alexander. Evolutionary explanations of distributive justice. *Philosophy of Science*, 67(3):490–516, 2000.
- [2] A. Andreozzi. An evolutionary theory of social justice: Choosing the right game. *European Journal of Political Economy*, 26(3):320–329, 2010.
- [3] K. Binmore. *Game Theory and the Social Contract, Vol. 2: Just Playing*. The MIT Press, Cambridge, 1998.
- [4] J. D’Arms, R. Batterman, and K. Górný. Game theoretic explanations and the evolution of justice. *Philosophy of Science*, 65(1):76–102, 1998.
- [5] C. T. Dawes, J. H. Fowler, T. Johnson, R. McElreath, and O. Smirnov. Egalitarian motives in humans. *Nature*, 446:794–796, 2007.
- [6] C. Hauert, D. M. Monte, J. Hofbauer, and K. Sigmund. Volunteering as red queen mechanism for cooperation in public goods games. *Science*, 296:1129–1132, 2002.
- [7] M. Hsu, C. Anen, and S. R. Quartz. The right and the good: distributive justice and neural encoding of equity and efficiency. *Science*, 320:1092–1095, 2008.
- [8] T. Killingback and M. Doebeli. Spatial evolutionary game theory: Hawks and doves revisited. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 263:1135–1144, 2014.
- [9] K. Kojima and T. Arita. How do equity norms evolve? - an evolutionary game theory approach to distributive justice. *Artificial Life and Robotics*, 17(2):287–292, 2012.

- [10] K. Kojima and T. Arita. Evolution of three norms of distributive justice in an extended nash demand game. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 18(3), 2014.
- [11] M. L. Manapat, D. G. Rand, C Pawlowitsch, and M. A. Nowak. Stochastic evolutionary dynamics resolve the traveler’s dilemma. *Journal of Theoretical Biology*, 303:119–127, 2012.
- [12] G. Mar. Evolutionary game theory, morality, and darwinism. In D. Katz, editor, *Evolutionary Origins of Morality*, pages 322–326. Imprint Academic, 2000.
- [13] J. Maynard Smith. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- [14] S. Nakamura, K. Kojima, R. Suzuki, and T. Arita. Design of experiments on a game focused on distributive justice using human subjects. In *Proceedings of the SICE 39th Intelligent System Symposium*, pages 271–276, 2012 (in Japanese).
- [15] J. F. Nash. The bargaining problem. *Econometrica*, 18:155–162, 1950.
- [16] J. F. Nash. Two-person cooperative games. *Econometrica*, 21:128–140, 1953.
- [17] M. Nowak, S. Bonhoeffer, and R. May. Spatial games and the maintenance of cooperation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91:4877–4881, 1994.
- [18] M. Nowak and R. May. Evolutionary games and spatial chaos. *Nature*, 359:826–829, 1992.
- [19] M. A. Nowak, A. Sasaki, C. Taylor, and D. Fudenberg. Emergence of cooperation and evolutionary stability in finite populations. *Nature*, 428, 2004.
- [20] H. Ohtsuki. Evolutionary dynamics of the nash demand game: A diffusion approach. *Dynamic Games and Applications*, 1:449–461, 2011.
- [21] K. Page, M. Nowak, and K. Sigmund. The spatial ultimatum game. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 267:2177–2182, 2000.

- [22] D. G. Rand and M. A. Nowak. Evolutionary dynamics in finite populations can explain the full range of cooperative behaviors observed in the centipede game. *Journal of Theoretical Biology*, 300:212–221, 2012.
- [23] D. G. Rand, C. E. Tarnita, H. Ohtsuki, and M. A. Nowak. Evolution of fairness in the one-shot anonymous ultimatum game. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110(7):2581–2586, 2012.
- [24] A. Rubinstein. Perfect equilibrium in a bargaining model. *Econometrica*, 50:97–109, 1982.
- [25] B. Skyrms. *Evolution of the Social Contract*. Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [26] R. Sugden. *The Economics of Rights, Co-operation and Welfare*. Basil Blackwell, Oxford, 1986.
- [27] R. Suzuki, M. Kato, and T. Arita. Cyclic coevolution of cooperative behaviors and network structures. *Physical Review E*, 77:021911, 2008.
- [28] R. Suzuki, T. Okamoto, and T. Arita. Emergent dynamics of fairness in the spatial coevolution of proposer and responder species in the ultimatum game. *PLOS ONE*, 10:e0116901, 2015.
- [29] G. Szabó and C. Hauert. Evolutionary prisoner’s dilemma games with voluntary participation. *Physical Review E*, 66:062903, 2002.
- [30] D. J. Watts and S. H. Strogatz. Collective dynamics of small-world networks. *Nature*, 393:440–442, 1998.
- [31] P. H. Young. An evolutionary model of bargaining. *Journal of Economic Theory*, 59(1):145–168, 1993.
- [32] P. H. Young. *Individual Strategy and Social Structure: An Evolutionary Theory*. Princeton University Press, Princeton, 1998.

関連発表文献

論文誌（査読付き）

1. Kazuaki Kojima and Takaya Arita, Evolution of Three Norms of Distributive Justice in an Extended Nash Demand Game, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 18, No. 3, pp. 409-417, 2014.
2. Kazuaki Kojima and Takaya Arita, How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, Artificial Life and Robotics, Vol. 17, No. 2, pp. 287-292, 2012.

国際会議（査読付き）

1. Kazuaki Kojima and Takaya Arita, Evolution of Three Equity Norms of Distributive Justice in an Extended Nash Demand Game, In Proceedings of the 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems 2012 (SCIS-ISIS2012), pp. 669-674, 2012.
2. Kazuaki Kojima and Takaya Arita, How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, In Proceedings of the 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp. 658-661, 2012.

国内学会

1. 中村翔太, 小島和晃, 鈴木麗璽, 有田隆也, 分配的正義に関わるゲームの被験者実験のデザイン, 第39回知能システムシンポジウム資料, pp. 271-276, 2012.

2. 小島和晃, 有田隆也, ナッシュ要求ゲームを拡張した D-I ゲームとその構造の分析, 第 50 回数理社会学会大会研究報告要旨集, pp. 15-18, 2010.