社会的相互作用の進化ダイナミクスに関する構成論的アプローチ

高野　雅典

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1 背景 1
1.2 心の理論 2
1.3 本研究の目的 3
1.3.1 心の推測における再帰レベルの進化 4
1.3.2 心の推測と他個体操作の共進化に基づくコミュニケーションの成立 5
1.4 本論文の構成 6

第 2 章　心の推測における再帰レベルの進化 **7**
2.1 はじめに 7
2.2 モデル 9
2.2.1 基本設計 9
2.2.2 衝突回避行動モデル 11
2.2.2.1 フィールド 11
2.2.2.2 エージェント 11
2.3 シミュレーション実験 14
2.3.1 基本的な発見 14
2.3.2 基礎実験 15
2.3.2.1 同一レベル集団 16
2.3.2.1.1 設定 16
2.3.2.1.2 結果 16
2.3.2.2 2 種レベル混在集団 17
2.3.2.2.1 設定 17
2.3.2.2.2 結果 17
2.3.3 進化実験 19
2.3.3.1 設定 19
2.3.3.2 結果 19
2.4 議論 22
2.4.1 「視界の広さ」の意味付け 22
2.4.2 再帰レベルの非連続性 23
2.4.3 再帰レベルの進化 24

2.5 まとめ 24

第 3 章 心の推測と他個体操作の共進化に基づくコミュニケーションの成立 26

3.1 はじめに 26
3.2 モデル 27
3.2.1 個体間の関係 27
3.2.2 エージェント 28
3.3 シミュレーション実験 30
3.3.1 設定 30
3.3.2 連続更新モデル 31
3.3.2.1 基本的傾向 31
3.3.2.2 情報量を用いた分析 33
3.3.2.3 ゲーム成功状態の安定性 35
3.3.3 不連続更新モデル 36
3.3.3.1 基本的傾向 36
3.3.3.2 情報量を用いた分析 38
3.3.3.3 ゲーム成功状態の安定性 39
3.4 コミュニケーションの進化的安定性の解析 40
3.4.1 コミュニケーション戦略のみの集団 41
3.4.2 コミュニケーション戦略と ESS の混在集団 42
3.4.3 コミュニケーション戦略と純粋戦略の混在集団 44
3.4.4 解析結果のまとめ 48
3.5 ゲーム構造の一般化 48
3.5.1 設定 48
3.5.2 結果 50
3.6 まとめ 52

第 4 章 結論 54

付 録 A 用語・記号の定義 56

謝辞 58

参考文献 59

関連発表文献 65

図 目 次

2.1.1 心の理論の再帰性. 8
2.2.1 エージェントの視界. 12
2.2.2 移動ベクトルの決定方法. 13
2.3.1 予測のレベルと回避行動の強さの基本的関係. 14
2.3.2 対面での衝突回避における予測と行動のイメージ．各セルの左側は右のエージェントが予測した左のエージェントの行動，右側はその予測に基づくエージェントの行動を表す. 14
2.3.3 レベル 1 と 2 の衝突回避の様子．両個体は直線でつながれた自分のゴールへ向かう．エージェントの番号はレベル，各図の左上の番号は時間発展の順番を表す．レベル 1 がレベル 2 よりも強い回避行動をする傾向があることが分かる. 15
2.3.4 同一レベル集団の典型的な r におけるレベル別適応度. 16
2.3.5 同一レベル集団のレベル別適応度と r の関係．及び各レベルの集団の適応度が最も高くなった点. 16
2.3.6 r による高いレベルの有利さの変化. 18
2.3.7 進化シミュレーションによる各 r 別の個体数の推移. 20
2.3.8 $r = 39.0$，42.0 の全世代通しての各レベルの平均適応度と総出現個体数. 21
2.4.1 再帰レベルの進化における社会的相互作用の強さ影響の概念図. . . 25

3.2.1 エージェント間の 2 段階の相互作用. 29
3.2.2 交渉期間におけるエージェントの相互作用の概念図. 29
3.3.1 ゲームの成功率（ESS 集団との比較）. 31
3.3.2 交渉期間におけるコミュニケーションの典型例. 32
3.3.3 $\bar{k}(t)$ の時間変化. 33
3.3.4 各 α における Q_l，Q_e，Q_g. 34
3.3.5 ゲームの成功率に関する D の影響. 35
3.3.6 コミュニケーションの典型例（収束型）. 36
3.3.7 コミュニケーションの典型例（振動型）. 36
3.3.8 収束型と振動型の出現頻度. 37
3.3.9 収束型と振動型のゲームの成功率. 37
3.3.10 $\bar{k}(t)$ の時間変化（収束型）. 38

3.3.11 $\bar{k}(t)$ の時間変化（振動型）. 38
3.3.12 各 α における Q_l，Q_e，Q_g（収束型）. 39
3.3.13 各 α における Q_l，Q_e，Q_g（振動型）. 39
3.3.14 ゲームの成功率に関する D の影響（収束型）. 40
3.3.15 ゲームの成功率に関する D の影響（振動型）. 40
3.4.1 平衡点と ESS 集団の成功率の比較. 43
3.4.2 α，p に関してコミュニケーションが進化する領域（Communication）と進化せず種 E のみになる領域（ESS）. 44
3.4.3 $p = 0.5$ における安定な平衡点の成功率. 45
3.4.4 α，p に関してコミュニケーション戦略のみになる領域（左上，式 3.4.25 の平衡点），コミュニケーション戦略と種 A が共存する領域（右上，式 3.4.27 の平衡点），種 A と B が共存する領域（下，式 3.4.33 の平衡点）．白色部分が各平衡点の安定な領域を表す. 46
3.4.5 $p = 0.5$ における安定な平衡点の成功率. 47
3.5.1 2×2 ゲームの領域（[52] より一部改変して引用）．PD は囚人のジレンマゲーム，Chicken はチキンゲーム，Hero は Hero ゲーム，Leader は Leader ゲーム，Stag Hunt（SH）は鹿狩りゲーム，Avatamsaka は華厳ゲームを表す．Anti-Hero，Anti-Leader はそれぞれ Hero，Leader ゲームの T を $-S$，S を $-T$ に置き換えたものであり，広義の鹿狩りゲームに分類される. 49
3.5.2 コミュニケーションありとなしの場合の適応度差 f_d. 50
3.5.3 コミュニケーションありとなしの場合の適応度差 f_d. 51
3.5.4 利得の変化. 51
3.5.5 各ゲーム結果の頻度. 52

表 目 次

3.2.1 本研究で考える個体間の関係 28
3.5.1 2×2 ゲームの利得行列 48

第1章　序論

1.1　背景

我々は社会を構成し生活している．その社会における様々な場面で，同盟を組む，交渉する，出し抜くなどの複雑な社会的相互作用をしている．

そのような社会的な場面で発揮される知能（社会的知能）は，複雑な社会環境への適応として進化してきたと考えられる．ある種が（捕食者から身を守るためなどの理由から）集団を構成すると，構成メンバーは互いに協力者であると同時に，食料などに関する資源獲得に関しては競合相手でもある [62, 70] ため，それは複雑な社会集団になりうる．そのような複雑な社会環境では，駆け引き・欺き・同盟など集団内でうまく立ち回ることが重要になり，社会的知能の進化要因になるであろう [27, 23]．さらに，社会的相互作用は同種他個体との相互作用であるため，各個体の社会的知能は相互に強化し合って進化すると考えられる [23]．

ヒトを含む霊長類の大きな脳に進化した理由を説明する主な仮説には，果実の場所や縄張りなどの生態学的環境を記憶する必要性が脳の体積を増大させたとする生態仮説や，上記のような社会的環境に対する進化圧が，脳の体積を増大させたとする社会脳仮説 [5, 53, 13, 64] などがある．近年，社会脳仮説を裏付けようと，霊長類に関する，個体の社会性・集団の社会的複雑性と，脳の新皮質の（脳の他の部位に対する）割合との関連が調べられており，社会的グループのサイズ [13]，欺きの頻度 [4] などの指標と新皮質の割合に正の相関が存在することが示されている．一方，生態仮説に関しては，生態学的環境（果実食であるかどうかや行動圏の広さ）と新皮質の割合の間に相関は今のところ示されていない [13]（ただし，一般に体重に対する脳の重さの比率は果実食種の方が菜食種よりも大きい [1]）．以上から，社会的環境の複雑さが脳に強い進化圧を与えていたことが示唆される [11]．

社会的知能の進化と社会的相互作用の進化は相互に影響を与え合うはずである．社会的知能が高度になれば，欺き合いやコミュニケーション，協力行動などはより複雑なものになりうる．このような複雑な社会的相互作用において，他個体の心・行動を推測する心の機能（心の理論）が重要な役割を果たすと考えられ注目されている [5, 53]．

1.2 心の理論

心の理論とは，ある個体が自己または他個体の心の状態，目的，意図，知識，信念，思考，疑念，推測などを推測する心の機能のことである [43]．そして，他個体も心の理論を持つと考えるとき，他個体が自分についてどのように推測しているかを推測でき，そのため，自分が他個体にどのような影響を与えるのかを推測することができる．後述するように，このような心の機能によって，巧妙で適応的な社会的振る舞いが可能になると考えられる．そのため，心の理論は社会的知能や社会的相互作用の進化を考える際に重要な機能であると言える．

ヒトの心の進化的基盤を検討する進化心理学では，ヒトの心理メカニズムには文化を越えた普遍性があり，それは自然選択の産物である [69, 3] とする．このような考えや社会脳仮説から，心の理論が進化によって得られたとすると，それは適応的な形質であったと考えることができる [12]．

他個体の行動に合わせて自分の行動を変えることや，他個体を操作することを示唆する証拠が霊長類を含む多くの動物で見られる [21]．特にサル類や類人猿は，ヒトに比べ部分的ではあるが心の理論を持つと言われており [43, 42]，近年の研究によって少なくともチンパンジに関しては部分的な心の理論を持つことが明らかになっている [44, 6]．そこで，心の理論が動物における他個体の行動予測を起源とし，サル類，類人猿を経てヒトの持つような心の理論へと進化してきたというシナリオを検討することは有益であろう．例えば，最近の実験 [16] において，アカゲザルに対して目を隠した人間と口を隠した人間の両方が餌を見せたところ，そのアカゲザルは目を隠した人間が持つ餌を取ろうとするという行動を示した．この実験から，アカゲザルは対面する人間がどのように見えるか（とそれに伴う行動）を考慮しているのではないかということが考えられる．

以下では，心の理論とそれに基づく社会的相互作用の進化について考えるために，他個体の心や行動を推測することが，どのような適応的な社会的振る舞いにつながるか考えることにする．

第一に，他個体の知識，行動や欲求を推測することができれば，それに基づいて他個体の行動に合わせたり，出し抜いたりすることができ，社会集団の中で他個体より優位に立てるように振る舞うことができるであろう．例えば，他個体が見ていない間に，食べ物を独り占めするなどである．

また，自分や他の他個体が他個体に与える影響を推測することができれば，他個体を自分の都合の良くなるように操作することが可能になる．このような推測はヒトの社会的知能に大きく関わるとして，様々な認知能力の関連性が検討されている [71]．自分が行動した結果，それを見ていた他個体が自分についてどのように考えるかを考えれば，自分の行動によってその他個体に情報を伝達することが想定できる [32]．これによって，受信者の利益になるような情報が伝達されるような教示や，送信者が嘘の情報を伝達して利益を得るような欺きを考えることができる [62]．また,「うそと冗談・皮肉」の区別，責任性の理解，道徳判断の理解に

も，このような推測が内在しうると指摘されている [71].

さらに，相互に内部状態を推測し合うことを考えると，それは相互に行動を調整し合って共同で作業するような協力的な行動に役立つと思われる．行動を調整する必要があるということは，複数の解決方法の中からひとつを選択すること [31] であるため，相互に相手が何を意図しているかを推測して「理解し合っている状態」になることが迅速な調整のために有益であろう [45, 75]．このような相互の心の推測がヒトのような複雑なコミュケーションを実現する鍵になる可能性が理論的な考察 [35, 59, 61] によって指摘されている．

このような心の推測に基づいた社会的振る舞いの有効性や心の推測をする個体同士の相互作用のダイナミクスについて，他個体の内部状態や行動を予測する機構を持ったエージェントを設計してそれらの相互作用させて観察するという構成論的研究が盛んに行われている．そのような研究の結果，2 者が相互作用する状況において，相互作用を通して自分の内部に他個体をモデル化することの有効性が，様々な社会的な状況でうまく立ち回るために有効であることが示された（繰り返し囚人のジレンマゲームにおける協調行動の維持 [36, 58, 66]，繰り返し非ゼロ和ジャンケンゲームにおける安定した互恵関係の維持 [60]，シグナリングゲームにおけるコミュニケーションの効率的な学習 [34]，協調タスクにおける役割分担 [75] など）．

このように，他個体の心・意図を推測することやそれを相互にすることで，巧妙で適応的な社会的振る舞いが生じ，複雑な社会的相互作用になりうる．

一方，脳科学の研究において，近年，小脳内に内部モデルが存在することが明らかになった．ここで言う内部モデルとは自分自身の運動装置の入出力特性をシミュレーション，またはその逆ができる脳のメカニズムである [28]．さらに，小脳が自分自身の運動の内部モデルだけでなく，道具の入出力特性をシミュレーションする内部モデルが獲得されることが明らかになった [26]．外界の対象物を脳内に内部モデル化していることを示すこの知見は，道具と同様に他個体の脳の内部モデル化の機能が存在する可能性を示唆している．脳科学の研究の進展によって，道具の内部モデル化と同様に他個体の脳のモデル化のメカニズムも徐々に解明されていくことが予測される [67].

1.3 本研究の目的

本研究は構成論的手法 [55] に基づき，他個体の心の推測に基づいた社会的相互作用の進化ダイナミクスについて知見を得ることが目的である．

特に，次の理由から，社会的環境が社会的相互作用の進化に与える影響に着目する．社会的知能・相互作用の進化は，個体間の相互作用における適応性に基いた巨視的な現象である．そのため，その系は複雑系であると言える．一般に，複雑系は何らかの条件の変化によってシステムの巨視的な振る舞いが質的に変化しうるという特徴を持つ [20]（それは生物の進化においても広く見られる [22, 39]）．

社会脳仮説に基づくならば，本研究において脳を進化させた環境条件とは（集団サイズや個体間の関係性のような）社会的環境に関するものであろう．このように進化における系の巨視的な振る舞いをそれが質的に変化する部分で区切ることで，進化のありうる状態に関して分類でき，進化ダイナミクスに関して定性的な知見が得られると思われる．

このようにアプローチする際に，構成論的手法が有効であると考えられる．構成論的手法とは，理解したい対象を計算機上などで構成し，それを実際に動かすことによって知見を得ようとする方法論である [55, 56]．この手法によって，様々なパラメータによる試行によって，その対象のありうる状態を作り出すことができる．

本研究では，社会的相互作用が生じる社会的環境として，各個体が互いの行動を調整しなければ各個体は高い利得を得られないが，相互作用の結果として得られる利得に個体間で差が存在するといった状況を考える．このような状況では，どのように他個体の心・行動を推測するかが，うまく立ち回るために大きく影響するからである [62, 2]．例えば，人がすれ違うときの衝突回避行動もそのような状況と言え，その場合では，相互に進行方向を調整しなければ衝突してしまうが，大きく回避する方は相手より効率の悪い行動をすることになる．そこでは，他個体が自分を回避しようとしなければ，自分がその他個体を回避しなければ衝突を避けることができず，他個体が自分を回避しようとするならば，自分は回避しない方が効率よく移動できため，他個体の心・行動の推測が重要である．このような状況は，例えば，資源が競合する場合の駆け引きなどのように，様々な社会場面に存在している．

以上のようにして，他個体の心の推測をすることはどのような社会的な環境の条件によって進化できるか?，あるいは，それが進化した集団ではどのような社会的相互作用になりうるか?，という未解明な問題に焦点を当てる．そのために，本研究では，心・行動の推測に関して，次のふたつの側面から研究する．

1.3.1 心の推測における再帰レベルの進化

他個体の心・行動を推測することについて考える．ここで，他個体に関して推測するときに，他個体も自分の心や次の行動を推測すると考えると,「「他個体の自分に対する推測」を推測する」,「「他個体の「自分の他個体に対する推測」に対する推測」を推測する」といったように，心の推測に再帰構造が発生する [8, 9]．このような再帰的な処理能力は言語（特に文法）や物事の認識，道具を作るための道具の使用などの観点からもヒトの知能に深く関わっていると思われる [7, 72, 74]．社会脳仮説に基づくのならば，心の再帰的な推測能力も社会環境に対する適応進化によって獲得されてきたと考えられる．

本研究では再帰的推測の深さ（再帰レベル）の進化ダイナミクスに着目する．特に，再帰的推測に基づいた振る舞いは再帰レベルによってどのように異なった性

質を持ちうるか?，再帰レベルの進化は社会的環境からどのような影響を受けるか?，という点に焦点を当てる．そのために，各個体に他個体の行動の再帰的な予測という内部の処理とそれに基づいた行動を仮定し，衝突回避行動タスク（社会的集団における競合的な関係を物理的に状況付けして表し，かつ最小の抽象タスク）を対象として進化シミュレーションを行う．そして，再帰レベルの観点から心の理論の進化について議論する．

1.3.2 心の推測と他個体操作の共進化に基づくコミュニケーションの成立

次に，心・行動の推測（mindreading）と，それを前提とした他個体の操作（manipulation）について考える．一方が，他個体が自分の心・行動について推測していると考えて，自分の行動や状態を象徴する振る舞いをしたときに，他方がそれを見て相手の行動や状態を予測（mindreading）し自分の行動を変えるのならば，前者による後者の行動の操作（manipulation）と言える [32]．ここで，相手を推測すること・操作することが双方にとって有益である場合を考えると，一方がなんらかの振る舞いによって意図を示し，他方がそれを理解するというコミュニケーションが想定可能である [49]．このとき，その振る舞いが固定化して記号として機能することや，それの送信者・受信者に分かれることを想定することもできるであろう．本研究の目的は，相互の行動調整が必要な環境において，それらの共進化による非記号的・同時双方向の相互作用から言語・コミュニケーションの進化的基盤を検討することである．特に，どのようなコミュニケーションが進化しうるか?，コミュニケーションの進化は社会的環境にどのように影響を受けるか?，また，上で想定したような記号化・役割分担化が進化したとき，どのように実現されるか?，という 3 点に焦点を当てる．そのために，非記号的・同時双方向のシグナリングとゲーム戦略決定という 2 段階から構成される枠組みを用いたエージェントベースモデルを設計し，ゲームの利得に基づいた進化シミュレーションを行う．

この研究では前述のモデルのような予測などの個体内部の処理をできるだけ仮定せず，他個体の振る舞いに対して適応的に振る舞えるようにそれを進化させる．そして，個体の他個体から観測可能な振る舞いから，実際的な行動に関して得られる情報理論的な情報量を用い，その個体が意図を表出したかどうかを判断する．このように内部の処理を仮定しないのは，相互の推測と操作によるコミュニケーションには，様々なものがありうるため，そこに高い自由度を持たせるためである．

次にこの研究で用いる用語を整理する（付録 A 参照）．ここでは，コミュニケーションとは一方の行動が他方の内部状態または行動に影響を与えることとする．コミュニケーションの成立に関わる境界に焦点を合わせているので，厳密で狭い定義によらずに，広義に使っている．シグナルはコミュニケーションの媒体になりうるもの，記号は離散的に表現されるシグナルのこととする．シグナルと記号の区別については，例えば個体の身体性などを考える場合にはその個体の現在の状

況と関連を持つ表現（シグナル）か持たない抽象的表現（記号）か [18] など，想定するレベルによって複数あり得るが，本研究では，単に離散的であることを明示するか（記号），そうでないか（シグナル）とする．シグナリングとはシグナルを送信する行為のこととする．そのため，シグナリングによって受信者の行動が変化したならば，コミュニケーションが進化したと表現する．

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，再帰レベルの進化について議論する．3 章では，心の推測とそれを前提とした操作の共進化によるコミュニケーションの成立基盤について議論する．4 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　心の推測における再帰レベルの進化

2.1　はじめに

我々は他者と相互作用し合う環境の中で他者の行動を予測し自分の行動を決めている．さらに，自分の行動が他者に与える影響がどのようなものであるかということも考えることができる．例えば，対戦競技では，味方や敵の心を推測したり欺いたりすることが重要な要素であることは明らかである．また，人混みの中を移動するとき，意図する方向に一直線に向かうのではなく，向かってくる他者を避けることや他者が自分を避けることなどを考えて行動している場合もある．このような例にとどまらず，他者の心の状態を推測することは，社会に適応した生活を送るための条件であると考えられる．

第1章で述べたように，心の理論による他個体の心の推測には再帰性が存在する．それによって他個体がどのような状態なのか，自分が他個体にどのような影響を与えるのかを推測することができる（図2.1.1）．Dennett [8, 9] は他個体の行動を解釈するための方法論として,「志向姿勢」に基づいて，上記のような他個体の内的状態の再帰的表現を提案している．本研究では，この再帰の深さを再帰レベルと呼ぶ[1]．

ただし，各個体が再帰的に考えているかどうかは，外部から観察して判断することは難しく，実際，社会的場面における個体の振る舞いを心的状態を考えない行動主義的説明も可能である [4, 8, 9]．しかし，個体の行動を上記のような再帰的表現に基づいて説明する方が，そうしないよりも自然な説明が可能な場合もあり，それは再帰的な思考をしていると解釈してもよいと思われる [4, 8, 9]．

Byrne はこのような他個体に関する推測を基準として，霊長類の欺き行動に関する報告を分析した [4]．その結果，サル類と類人猿の両者に欺き行動が見られるものの，他個体の心的状態の推測を考慮していると見なせる欺きは，ほとんど類人猿でしか見られなかった．これは，類人猿は他個体の意図を理解でき（再帰レベルが1），サル類にはそれが困難であり，再帰レベルの進化に関して両者の間に差が存在していることを示していると思われる．また，類人猿であってもレベル2

[1] Dennett [8, 9] は個体が何の心的状態も抱かない状態をレベル0と定義しているが，本研究では何かについて信念を持っている（例えば，私はXが欲しい）状態をレベル0とする．この定義は Perner & Wimmer [40] によるものと同様で，この定義のレベル0は Dennett のレベル1に相当する [72]．

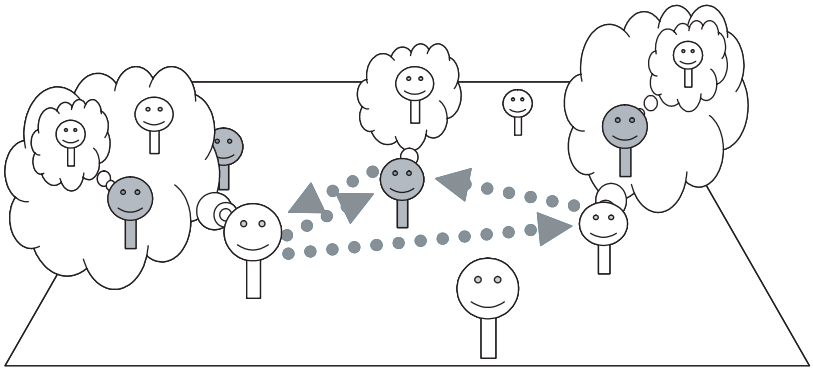

図 2.1.1: 心の理論の再帰性.

のテストを通過した例は限定的にしか見られないことから，レベル 1 程度が限界であると言われている [73, 72].

一方，ヒトは日常的にどの程度の再帰的推測をしている可能性があり，どの程度のレベルまで推測が可能なのだろうか．ヒトが高い再帰レベルの推測をする場合として，例えば，コミュニケーションの場面が考えられる．特に，話し手の「○○」ということを伝達する意図に気づくことで聞き手が相手の意図を理解するような場合では，話し手を A，聞き手を B と表記したとき,「話し手 B は「B が「A は「B が○○ということを知る」ことを望んでいる」ことを知る」と考える」（レベル 3）ことになり,「聞き手 B は「A は「B が「A は「B が○○ということ知る」ことを望んでいる」ことを知る」ことを望んでいる」と考える」（レベル 4）ことになる [9, 72]．これは高い再帰レベルと考えることのできる一例であるが，我々がこのように考えていることも少なくないであろう．また，Kinderman らはヒトの心に関する再帰的推測能力を調べるために，再帰的な思考がストーリの理解に必要なテストを，ヒトを対象に行った [29]．その結果，レベル 4 以下の再帰的推測を必要とするテストでは正答率は高く，レベル 5 以上の思考が必要な場合の正答率が著しく低くなることが示された．ここから，サル類・類人猿と比較してヒトは際立って高いレベルの再帰的推測が可能であること，そのヒトにもレベル 4，5 が上限であることが示唆される．

前述のように，Dennett は「志向姿勢」に基づく他個体の内的状態の再帰的表現を提案している．計算論的には，他個体の心を推測することは，自分の頭の中でモデル化した他個体をシミュレーションすることであり [66, 58, 35]，再帰性を扱うことは比較的容易である．ところが，従来の心の理論に関する様々なアプローチでは，我々が経験的に 3 次以上の他個体の心の推測も可能であると感じているのにもかかわらず，ほとんどが 2 次までを対象としていた [12, 72].

本研究は，心の理論における再帰のレベルの進化に焦点を絞り，再帰的な推測という機能を仮定した上で，計算論的モデルを構築する．そして，シミュレーション実験により，そのメカニズムに内在するダイナミクスに関する知見を得ることを

目的とする．本章では，再帰の深さに関する基本的な表現方法について述べた後，冒頭に挙げた人混みの中での移動という具体的な場面を想定し，物理的に接地させた群集の衝突回避行動モデルにおける再帰のレベルの適応進化に焦点を絞ったシミュレーション実験について論ずる．これは，社会的な相互作用を象徴的に表す最小モデルを狙ったものであり，群集の群れ行動をリアルに再現することが目的ではない．最後に，行った実験の意味することや示唆することに関して議論する．

2.2 モデル

2.2.1 基本設計

Dennett [8] の「志向姿勢」とは，振る舞いを予測しようとするシステムを信念や欲求などの心的状態を持つ合理的行為者として扱う，他個体の行動を解釈するための方法論である．信念や欲求を持つとみなす個体（非生物も含む）を「志向システム」と言う．他個体に対し志向姿勢を適用し，志向システムとして扱うことで他個体の欲求や意図が推測できる．志向システムは再帰的な表現が可能であり，その再帰の深さを志向性のレベルと言う（ただし，脚注 1 のようにレベルの値に関しては Dennett のレベル 1 をレベル 0 としている）．レベル 0 のシステムは信念や欲求を持つが，他個体について信念や欲求を持つことができず，単に外界の物理的世界について理解しているのみである．レベル 1 は信念や欲求を持ち，レベル 0 に対し信念や欲求を持つことができるが，他個体および自分自身の信念や欲求に関する信念や欲求を持たない．レベル 2 は他個体および自分自身の信念や欲求についての信念や欲求を持つ．つまり，レベル 1 に対し信念や欲求を持つことができる．このような，再帰的表現により，理論的には無限のレベルを考えることができる．

本研究では，[8] の志向姿勢の議論に準じて，内部状態だけでなく行動も含むように再帰的表現を拡張し，他個体の行動予測に基づく自分の行動の決定を表現する．行動を組み入れることにより，適応度を設定した上で，適応進化を検討することが可能となるためである．なお，[8] による表現では，“know”, “believe”, “expect” 等の「心理主義的」用語の使用が可能であるが，以下のモデルでは “know” だけに限定している．さらに，簡単のため全ての個体は同じ知識を持つ場合に同様の行動を取ることを仮定している．X, Y, Z の 3 者が存在し（X_n, Y_n, Z_n はレベル n の志向システム），得た情報 E に応じて行動 B を取る例を次に示す．ここで，E_{in} はレベル n の個体 i が得る環境情報，B_{in} はレベル n の個体 i が行う行動を表すとする．この他個体の行動予測は，予測する他個体の行動予測を内部で呼び出すことで再帰的に無限の深さまで記述可能である．

- レベル 0
  X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
  based on it.

- レベル 1

  X_1 knows
  {
  Y_0 knows E_{y0} and takes action B_{y0}
  based on it.
  Z_0 knows E_{z0} and takes action B_{z0}
  based on it.
  E_{x1}
  } and takes action B_{x1} based on it.

- レベル 2

  X_2 knows
  {
  Y_1 knows
  {
  X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
  based on it.
  Z_0 knows E_{z0} and takes action B_{z0}
  based on it.
  E_{y1}
  } and takes action B_{y1} based on it.
  Z_1 knows
  {
  X_0 knows E_{x0} and takes action B_{x0}
  based on it.
  Y_0 knows E_{y0} and takes action B_{y0}
  based on it.
  E_{z1}
  } and takes action B_{z1} based on it.
  E_{x2}
  } and takes action B_{x2} based on it.

この再帰的表現に基づき,「衝突回避行動モデル」を設計する．これらのモデルは各個体の適応度が他個体の取る行動（の分布）に依存するような頻度依存の適応度を前提としている．そのような環境下で，基本設計に基づき構築された本モデルは再帰的に他個体の心と行動を推測し，その上で自分の行動を決定する．よって，本モデルは自分の適応度を上げるために他個体の行動を正確に読むことが重要になる．

2.2.2 衝突回避行動モデル

衝突回避行動モデルは，集団の中で，他個体の移動を再帰的な心の処理により推測し，その上で自分の移動を決定する行動を対象とした，物理的に状況付けられたモデルである．本モデルは物理的接地を求める場合の最小モデルを目指している．これは，競合型のタスクとして群集の衝突回避を想定したものである．このタスクでは，他個体を避けなければ衝突するが，避けすぎると遠回りになってしまう．そのため，各個体が他個体に配慮せず自分の欲求どおりに振る舞うと衝突してしまう．しかし，他個体の行動について配慮しすぎると，相手が欲求どおりに振る舞うことができ，自分が不利になってしまうといった社会的なジレンマを表現する．

環境内の複数のエージェントは，個々に設定されたスタート地点からゴール地点まで移動する．エージェント同士が衝突すると，移動速度が大きく低下する．逆に，他個体を避けすぎても，必要以上の距離を移動しなければならなくなる．そのため，他個体の行動予測に基づいた効率よい他個体との衝突回避が必要である．

2.2.2.1 フィールド

エージェントのスタート地点とゴール地点は指定した 2 次元平面のフィールド内にランダムに割り当てられる．ただし，エージェント同士の相互作用によりフィールドの外へ移動することもありうる．本論文ではフィールドの大きさを 256.0×256.0 とし，エージェントの数は 24 体，エージェントは円形とし直径を 8.0 とした．

2.2.2.2 エージェント

エージェントは，1）他個体の行動を予測し，2）その予測に基づき，移動する方向，速度を計算し移動する．エージェントは 1 ステップにこのふたつの行動をし，それを 1 歩とする．

エージェントは視界として扇形状の R_1，R_2 のふたつの範囲を持つ（図 2.2.1）．R_1 は相手の行動予測をするときに，R_2 は移動方向・速度を決めるときに使用する．R_1 は半径 r_1 と角度 a_1，R_2 は半径 r_2 と角度 a_2 によって決まる．本実験では $a_1 = 240.0°, a_2 = 170.0°$ に固定した．r_1, r_2 は $r = r_1 = 2r_2$ を満たすとする．実験中でこの半径 r を変え，視界 R_1, R_2 を変化させる．環境内に存在する全てのエージェントの R_1, R_2 の大きさは共通とする．

エージェントは他個体の内部モデル化によって他個体の行動予測を行う．R_1 内に存在する全ての他個体を内部モデル化し，その内部モデルを行動させることで他個体の行動予測とする．このとき，予測するエージェントの予測のレベルを n とすると，内部モデルはレベル $n-1$ の予測をし，行動する．レベル $n-1$ の内部モデルも同じく予測をするため，同様に $n = 0$ になるまで内部モデルを再帰的に

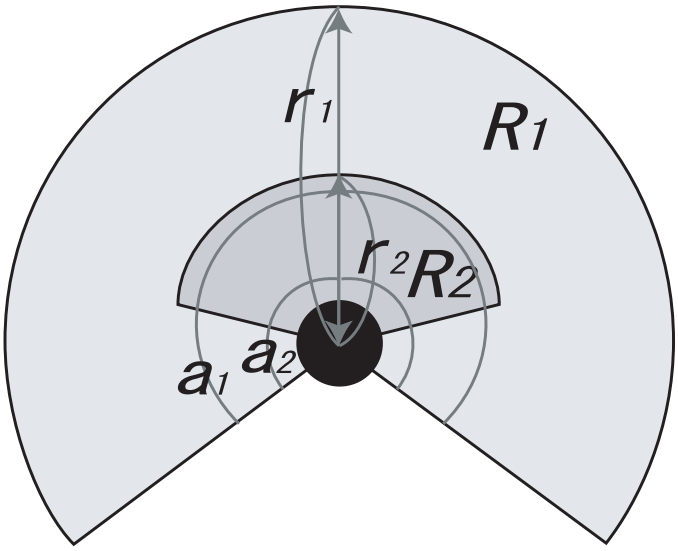

図 2.2.1: エージェントの視界.

生成し，その内部モデルの行動予測を行う．このとき，レベル $n-1$ の内部モデルはレベル n の視界 R_1 に存在する他個体についてのみ予測を行う．また，本モデルではレベル 0 の行動は相手の行動予測をしない，つまり相手を避けずゴールへ直進するものとする．なお，本実験では，全ての予測において他個体の 2 歩分先を読むものと設定している．

エージェントは図 2.2.2 に示すように他個体の行動を予測し，その予測に基づき行動を決める．以下のみっつのベクトルを加算し，移動に用いるベクトルを生成する．

- ゴールへ向かうベクトル:　エージェントの現在地からゴール方向へのベクトル．大きさは常に 1.0 とする．
- 現在の移動ベクトル:　前回移動したときに使用したベクトル．初期状態の大きさは 0.0 とし，大きさの最大値は 1.0 とする．
- 衝突回避ベクトル:　他エージェントから離れるベクトル．離れる対象は現在の他個体の位置ではなく，自分が予測した他個体の位置とする．この予測した他個体の位置の逆方向へ衝突回避ベクトルの方向を設定する．また，このベクトルの大きさ $|\vec{a}|$ は R_2 内の相手との距離 d に応じて与える（式 2.2.1）．他エージェント 1 体に対する衝突回避ベクトルの大きさの最大値は c によって与えられ，本実験では $c = 5.0$ を使用した．

$$|\vec{a}| = -cd/r_2 + c \tag{2.2.1}$$

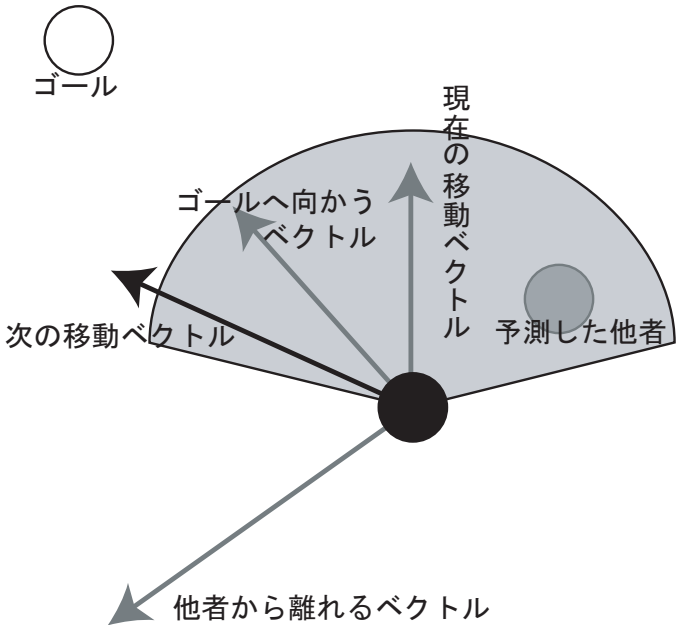

図 2.2.2: 移動ベクトルの決定方法.

ここで，d は R_2 の半径 r_2 に対し，$0 \leq d < r_2$ を満たすとする．なお，R_2 内に予測した他個体が複数存在するとき，それぞれから離れるベクトルをまず計算し，それらのベクトルを加算することにより，衝突回避ベクトルを生成する．

加算により求めた移動ベクトルの大きさが 1.0 より大きいとき，ベクトルの大きさを 1.0 に再設定する．さらに，このベクトルをそのときのエージェントの状態における最高速度（通常時は 4.0，衝突時は 0.01）でスカラ倍し，進行方向と速度を決める．

ゴールにたどり着いたときに,（式 2.2.2）によってエージェントの適応度 f を評価する．エージェントは早くゴールに到達すれば，高い適応度を得ることができる．また，2000 ステップ経過してもゴールにつかなかった場合，与える適応度は 0.0 とする．

$$f = \begin{cases} l/t & (t < 2000) \\ 0 & (t \geq 2000) \end{cases} \tag{2.2.2}$$

ここで，t をゴールにたどり着くまでの時間，l をスタート・ゴール間の距離とする．試行の終了は全エージェントがゴールにたどり着いたとき，または，$t = 2000$ になったときとする．

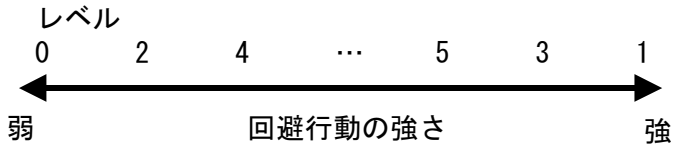

図 2.3.1: 予測のレベルと回避行動の強さの基本的関係.

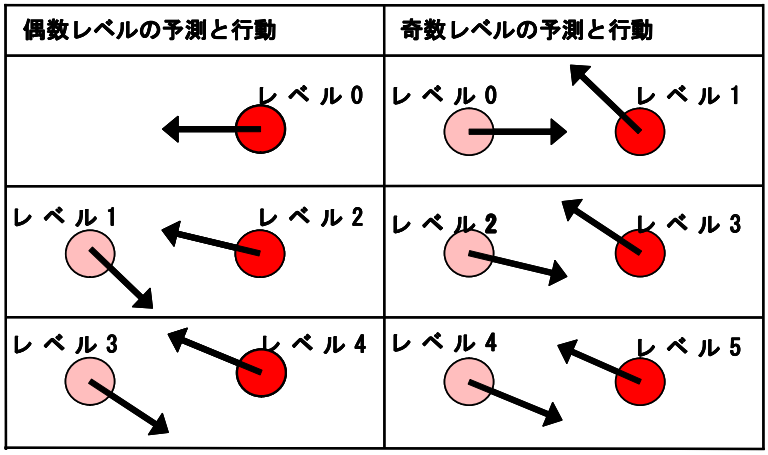

図 2.3.2: 対面での衝突回避における予測と行動のイメージ．各セルの左側は右のエージェントが予測した左のエージェントの行動，右側はその予測に基づくエージェントの行動を表す.

2.3 シミュレーション実験

2.3.1 基本的な発見

2.3.2 節と 2.3.3 節に示す基礎実験と進化実験の結果，予測レベルと回避行動の間に興味深い関係があることが示された．各実験の結果の記述はこの関係が前提となる場合が多いので，まずここではそれらを論ずることにする．

基本的に予測レベルと回避行動の強さの間に図 2.3.1 に示すような関係が存在することが示された．その関係とは奇数レベルの予測をする個体は回避行動が強く，偶数レベルの予測をする個体は回避行動が弱い傾向があり，さらにその傾向はレベルが低いときのほうがより強く出るというものである．それらの傾向を，簡単のために 2 者間での衝突回避行動における各レベルの予測と行動を用いて説明する．レベル 0 は他個体を全く考慮しないので予測を行わずに直進する（図 2.3.2 左上）．レベル 1 は相手が全く避けない（レベル 0 行動）と予測するので，極端に相手を避ける（図 2.3.2 右上）．レベル 2 は相手が自分を避ける（レベル 1 行動）と予測するので，レベル 1 よりは小さい回避行動を取って前進する（図 2.3.2 左中）．図 2.3.3 にレベル 1 と 2 の 2 個体での衝突回避行動の例を示す．同図より，レベル

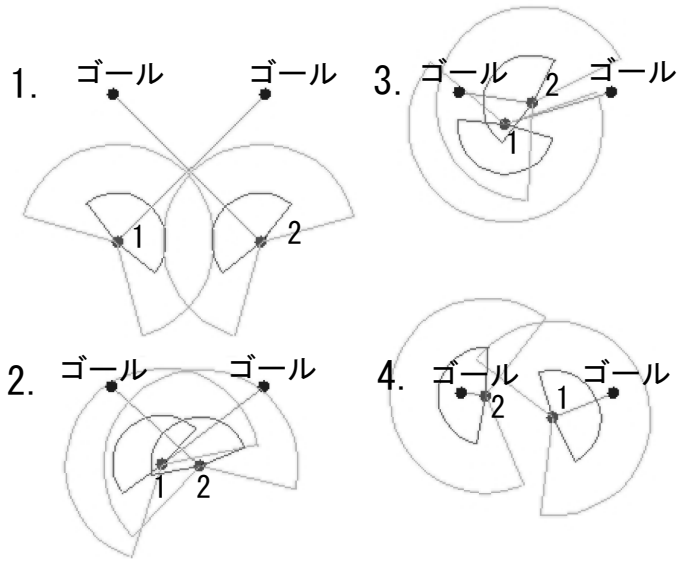

図 2.3.3: レベル 1 と 2 の衝突回避の様子．両個体は直線でつながれた自分のゴールへ向かう．エージェントの番号はレベル，各図の左上の番号は時間発展の順番を表す．レベル 1 がレベル 2 よりも強い回避行動をする傾向があることが分かる．

1 がレベル 2 よりも強く回避行動を取り，レベル 2 に道を譲るような行動をとっていることがわかる．このように考えていくと，奇数レベルは回避行動を取りやすい，偶数レベルは前進行動をとりやすいことがわかる．しかも，この傾向はレベルが低いときの方がより強く出る（図 2.3.2 下）ため，図 2.3.1 のような傾向が各実験で示された．また，レベルが高くなるにつれ行動の傾向が徐々に弱まるため，高レベル同士の衝突回避では予測と実際の行動の誤差が小さくなる．

以上のように，予測が 2 者間で行われる場合には，他個体から受ける影響と回避行動の大きさを直接対応させることができる．しかし，予測対象が増えれば増えるほど，他個体から受ける影響の大きさと回避行動の強さが，直接対応しないという可能性が大きくなることが予想される．ただし，このような場合においても，他個体の影響を受けやすい（奇数レベル），影響を受けづらい（偶数レベル）という，奇数，偶数の違いは存在すると考えられる．

2.3.2 基礎実験

予測のレベルと行動の関係を明らかにするために，レベルが同一のエージェントの集団と 2 種類のレベルが混在する集団で基礎的な実験をまず行った．

2.3.2.1 同一レベル集団

2.3.2.1.1 設定 エージェントの予測レベルが同一であるときの集団の適応度（全個体の適応度の平均）を調べる．全エージェント共通のパラメータ r を $24.0 \leq r \leq 64.0$ の範囲で r を 1.0 ずつ変化させて行った．実験は各設定ごとに 200 試行行い，平均を取った．

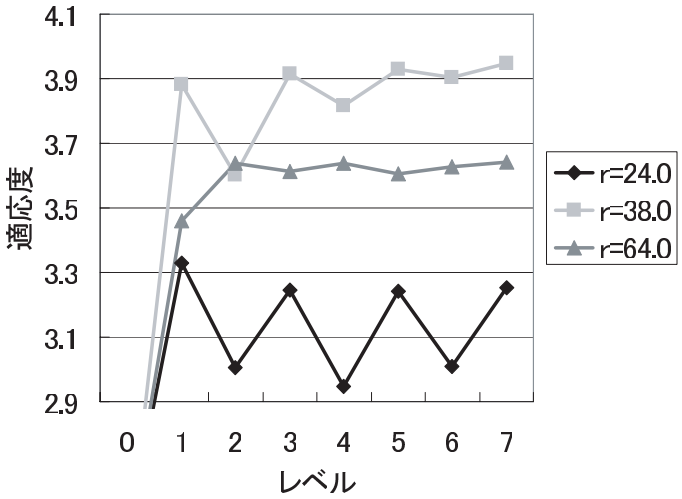

図 2.3.4: 同一レベル集団の典型的な r におけるレベル別適応度.

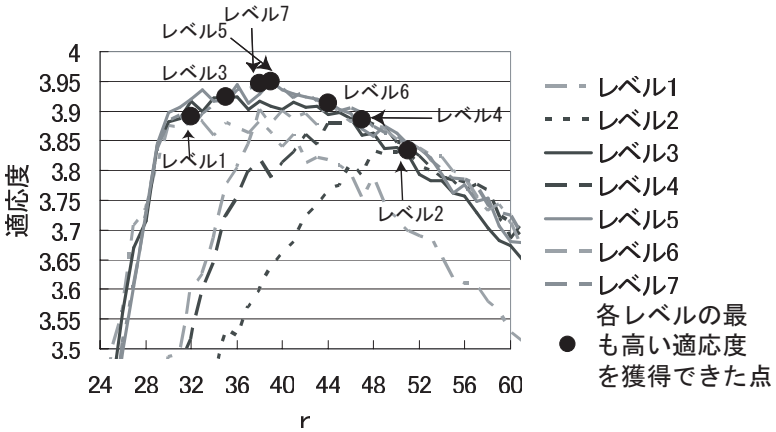

図 2.3.5: 同一レベル集団のレベル別適応度と r の関係．及び各レベルの集団の適応度が最も高くなった点.

2.3.2.1.2 結果 r の変化により，高い適応度を獲得できるレベルが徐々に変化した．図 2.3.4 は変化させた r のうちみっつの典型的なものについて各レベルの集団の適応度を，図 2.3.5 は各レベルの集団の適応度の変化を r に対して示したもの

である．図 2.3.5 の黒丸は各レベルの集団において最も高い適応度を獲得できたときの r を表している．また，レベル 0 の集団は予測，回避行動をしないので，r に関係なく適応度は約 2.41 となった．図 2.3.4 より，r が小さいときは回避行動の強い個体（奇数レベル）の集団が高い適応度を得ていることがわかる．さらに，r が大きくなるにしたがって高い適応度を得ることのできる集団は，回避行動の弱いレベル（偶数レベル）の集団へと変化する．r が小さいと，エージェント同士がかなり近寄るまで衝突回避行動を取らないため，回避行動の強いレベルでないと衝突回避が行えない．逆に r の値が大きいと，エージェント同士が離れていても回避行動を始めるため，回避行動の弱いレベルの方が必要以上に相手を避けず，効率のよい衝突回避を行える．そのため r により各レベルの適応度が変化すると考えられる．

また，r によって集団全体の適応度が変化するが，適応度が最も高くなるときの r はレベルによって異なった．図 2.3.5 の黒丸を見ると，回避行動が強いレベルの集団ほど，適応度がもっとも高くなる r（以降，この値を理想値と呼ぶ）は小さい値になり，回避行動の弱いレベルの集団ほど，理想値は大きくなるということがわかる．また，図 2.3.5 より，r が理想値であるときの適応度は，同程度の高さのレベルを比較すると，奇数レベル集団の方が偶数レベル集団より高い適応度を得ることがわかる．このことから，個々のエージェントがゴール地点へ向かおうとするよりも，互いに避け合う方が集団全体としては適応的であるということが考えられる．

さらに，高いレベルの集団ほどより高い適応度を得ることができている．これは，2.3.1 節で述べたように，高いレベル同士になるほど予測の誤差が小さくなるためと思われる．また，高いレベルの予測をするほど行動の傾向が似てくるため，各レベルの理想値は高いレベルになるほど，図 2.3.1 における行動の傾向と同様に，互いに近づく．よって，レベル n が十分に高いとき，理想値はある値に収束することが考えられる．そして，レベルが十分に高いとき，その収束した r で得られる適応度は，全てのレベルと r の組み合わせの中で最も高くなると思われる．

2.3.2.2　2 種レベル混在集団

2.3.2.2.1　設定　レベル n とレベル m の 2 種類のエージェント（合計 24）をフィールド内に配置し，有利なレベルを調べる．この実験では 2 種類のレベル n, m は $0 \leq n, m \leq 5, n \neq m$ を満たす全ての組み合わせで実験を行った．2 種類のエージェント数比を $1:23, 3:19, 5:17, \ldots, 23:1$ まで 12 段階で変化させ，それらの適応度をレベルごとに平均する．全エージェント共通のパラメータ r は $24.0 \leq r \leq 60.0$ の範囲で変化させる．実験は各設定ごとに 100 試行行った．

2.3.2.2.2　結果　実験結果を図 2.3.6 に示す．同図は，高いレベルの適応度 f_h を低いレベルの適応度 f_l で割った値 $p = f_h/f_l$ を，各レベルの組み合わせにおける

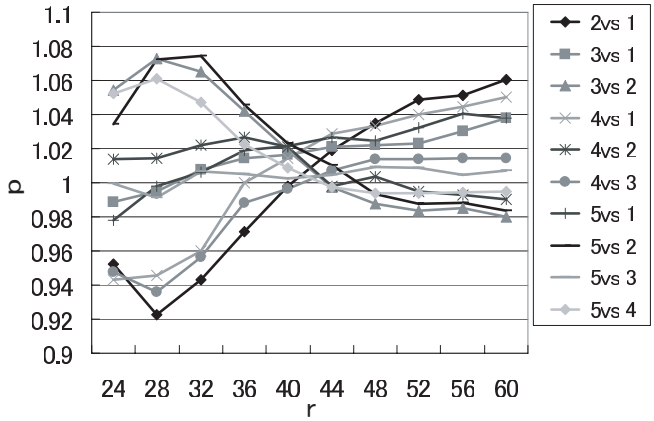

図 2.3.6: r による高いレベルの有利さの変化.

高いレベルの有利さを表す値として示している．したがって，この値が 1 の場合は両レベルの適応度が等しいことを表す．なお，レベル 0 の含まれる組み合わせの場合，値がやや大きくなるので，結果は以下の文中で述べることに留めており，レベル 1 から 5 の組み合わせについてのみ同図に示している．

同図より，r が小さいと回避行動の強いレベル（奇数レベル）の方が有利であり，r が大きくなるに従い回避行動の弱いレベル（偶数レベル）が有利になることがわかる．また，レベル 0 との組み合わせでは，他のレベルの方が常に有利であった（r の増加につれて約 1.25 から約 1.15 まで p は減少）．

このような傾向は以下のような理由に基づくと考えられる．回避行動の弱い方のレベルと強い方のレベルの衝突回避では回避行動の強いレベルの方が相手より大きく避けるため，回避行動の弱いレベルの方が効率よくゴールに向かうことができる．ただし，r が小さい場合，回避行動の弱い方のレベル同士では衝突回避をうまく行うことができず，全体として回避行動が強いレベルの方が有利となる．一方，r が大きいとき，例えば，弱い方のレベルに関する同一レベル集団実験において高い適応度を得ることができた r の値を用いる場合，弱い方のレベルは同レベル同士の衝突回避を効率よく行うことができ衝突も少なくなる．また，回避行動の強い方のレベルとの衝突回避も，相手の方が回避行動を強く取る傾向にあるため，結局，より有利に行うことができると考えられる．

r が中間的な値（$41.0 \leq r \leq 43.0$）では，回避行動の強弱によらず，全ての組み合わせで高いレベルの方が有利となった．これは，回避行動の傾向がより中間的であるレベルが有利な状態，つまり，図 2.3.1 における中間の領域をこの領域が表しているためであると考えられる．

次に，集団中のエージェント数比による有利さの変化について述べる．r が小さい場合や大きい場合においてはエージェント数比を変えることによる影響は少なく，前述したことと同様のことが言える．r が中間的な値の場合では，エージェ

ント数比が結果に少なからぬ影響を及ぼした．特に，高いレベルが有利であった $41.0 \leq r \leq 43.0$ では，以下のようになった．2 種類のレベルの差が 2 以上のときは，全体的に中間的な性質を持つレベル（高いレベル）が有利であった．レベル差が 1 であるときは，少数派のレベルの方が有利になるという傾向にあった．ここで，個々の衝突回避行動について考えると，衝突回避を行うエージェントのレベル差が 1 の衝突回避では，高いレベルが低いレベルを正確に予測することができるため，衝突は起こりにくい．レベル差が 0，つまり同じレベルのエージェント同士での衝突回避では互いに行動予測がはずれるので衝突が起こりやすい．そのため，衝突を起こしにくい相手が多い（少数派である）方が有利であったと考えられる．ただし，レベル差 1 の場合でも高いレベルの方がやや中間的な性質を持つことになるため，平均すると高いレベルがやや有利という結果になった．

2.3.3 進化実験

2.3.3.1 設定

エージェントの適応度に応じて，レベルをエージェントごとに進化させる実験を行う．進化は選択と突然変異により行い，各個体の適応度は各世代 20 試行の平均を与える．選択は全個体の合計適応度に対する個々の適応度の割合を求め，その割合を元に次世代の個体を生成する．このとき，生じた端数分はルーレット選択によって選択する．突然変異は一定の確率で個体のレベルの値を ± 1 する．

本実験では個体数を 24，世代数は 2000 世代，突然変異率を 0.02 とし，レベル l は $0 \leq l \leq 5$ を満たす（初期集団は 0）ものとする．r の値については，同一レベル環境において，レベル 5 集団の適応度が最も高くなった $r = 39.0$ と，2 種レベル混在環境において，全てのレベルの組み合わせで高いレベルの方が有利であった $r = 42.0$，加えて，大小各々代表的な値として $r = 32.0$，64.0 を使用した．

2.3.3.2 結果

図 2.3.7 に各 r について世代ごとのレベルの分布の推移を示す．同図は複数回行った実験のうちの典型的な試行であり，全試行において以下と同様な結果が得られた．

同図より $r = 32.0$ のとき，回避行動の強いレベル 1, 3 の個体が多く出現した（図 8（A））．$r = 39.0$ ではレベル 3, 5 が多く出現した（図 8（B））．$r = 42.0$ では高いレベルへ進化していった（図 8（C））．$r = 64.0$ のとき，回避行動が弱いレベル 2 の個体が集団中の多くを占めた（図 8（D））．また，r が極端に大きい場合，レベル 0 が有利になり，多く出現した．基礎実験においては，r が小さいと回避行動が強い個体（レベル 1, 3）が，大きいと回避行動が弱い個体（レベル 2, 4）が，両者の境界では高いレベルの個体が有利であったが，進化実験においても，各々に

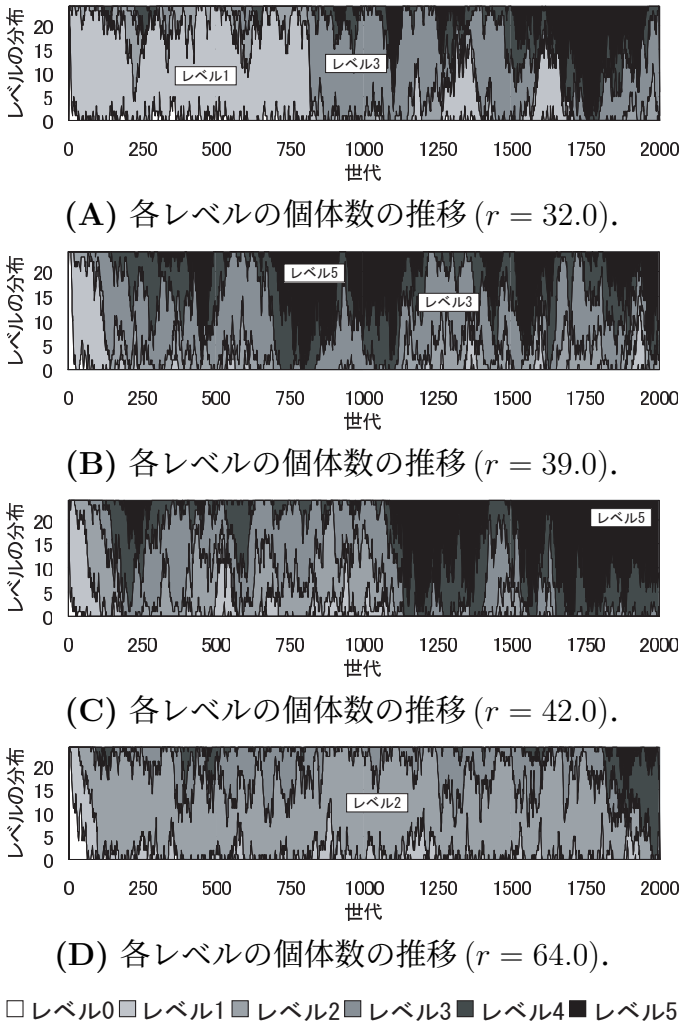

図 2.3.7: 進化シミュレーションによる各 r 別の個体数の推移.

おいて有利なレベルへ進化していっている．このとき，回避行動が強い個体が有利な値 r と弱い個体の有利な値 r の境界は，高いレベルへ進化していった $r = 42.0$ であると考えられる．

図 2.3.8 に $r = 39.0$，42.0 の全世代通しての各レベルの適応度と総出現個体数を示す．ここでの両状態のレベル 0 の適応度は約 2.45 となった．同図より，レベル 5 は他のレベルと比較して，どちらの r でも最も高い適応度を獲得していることがわかる．レベル 5 にとって $r = 39.0$ は同一レベル集団において適応度が最も高くなった理想的な値であった．しかし，$r = 39.0$ では高いレベルへ進化していかず，$r = 42.0$ のときに高いレベルへ進化していった．

そこでまず，同一レベル集団において最も高い適応度を得ることができる r がどのようにして求まったかについて考える．同一レベル集団では個体の行動は一切多様性がない集団である．レベルが同一で行動の多様性がない場合，そのレベル

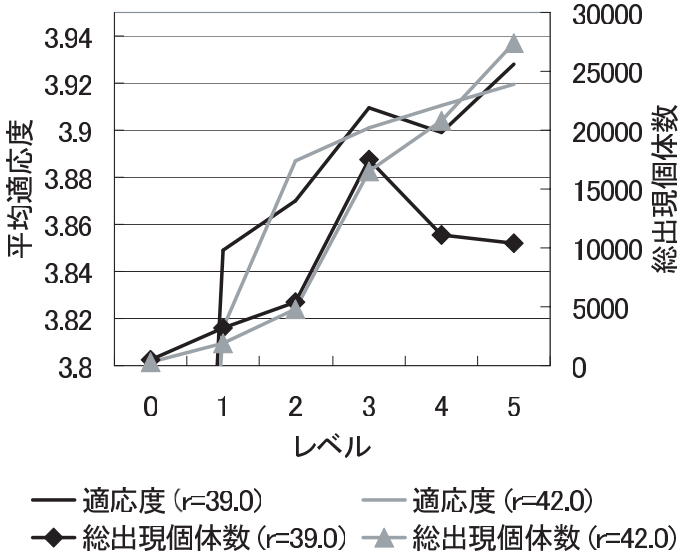

図 2.3.8: $r = 39.0$，42.0 の全世代通しての各レベルの平均適応度と総出現個体数.

の行動の傾向において衝突回避のできる r をできる限り小さくしたとき，他個体をぎりぎりで避けることができ，最も効率の良い衝突回避ができる．しかし，複数のレベルが混在する集団では，個体の行動に多様性があるため，同一レベル集団で得られた r 値では，避け切れなかったり，必要以上に避けてしまうということがある．そのため，レベルが混在する集団において各レベルの最も高い適応度を得ることができる r は，同一レベル集団で得られた各レベルの理想値から変化することになる．他個体が自分よりも回避行動が弱いレベルの場合は，他個体は同一レベル環境の他個体と比べて，回避行動を取らない傾向にある．そのため，同一レベル集団で得られた理想値では衝突回避に余裕が無いため，衝突してしまう．よって，自分よりも回避行動が弱い他個体を避けるためには，同一レベル集団での理想値よりも r が大きい必要があると言える．逆に，他個体が自分よりも回避行動が強いレベル場合は，他個体は同一レベル集団の他個体と比べて，回避行動を大きく取る傾向がある．そのため，自分は同一レベル集団ほど回避行動を取らなくてもよい．よって，自分よりも回避行動が強い他個体との衝突回避をより効率よく行うためには，同一レベル集団での理想値より小さいほうがよいと考えられる．

レベルが混在する場合，図 2.3.1 により，回避行動がやや強いレベル 5 は他個体が自分より回避行動が弱いことの方が多い．そのため，自分より回避行動が弱い他個体を避けることができ，高い適応度を獲得する r は同一レベル集団における理想値よりも大きい値になる．ゆえに，レベル 5 の高い適応度を獲得する r は同一レベル集団では $r = 39.0$ であり，混在環境において $r = 42.0$ になったと考えられる．同様に，回避行動の強いレベル 3 も，高い適応度を獲得する r は，同一レベル集団における理想値 $r = 34.0$ が，混在集団において自分より回避行動が弱い他

個体を避けることができる $r = 39.0$ 付近の値になったと思われる．また，$r = 39.0$ においても，レベル 5 の全世代通しての平均適応度が最も高いのは，レベル 5 が一時的に支配的になったときに，レベル 5 の集団が高い適応度を得ることができたためと思われる．

以上の理由から，高いレベルへ進化していった r の値は，同一レベル集団でレベル 5 が最も高い適応度を得た理想値 $r = 39.0$ ではなく，レベルが混在している場合において高いレベルが高い適応度を獲得できる $r = 42.0$ になったと考えられる．

また，突然変異をレベル n が $0 \leq n \leq 5$ の範囲の値に等確率で突然変異するという設定を用いた場合について実験を行ったところ，進化の過程は若干異なるものになるが，全世代通しての総出現個体数，平均適応度についてみると，上記で行った実験と同様の傾向を示しため，急激な予測レベルの突然変異が起こる場合においても以上のことが概して言えると考えられる．

また，再帰レベルを動的に変更できる場合の基礎的な検討として，レベル n の個体が他個体をレベル $n-1$ とみなすのではなく，n 以下ならば正しいレベルとして予測し，そうでないならば，レベル $n-1$ とみなして予測するとする実験を行った．その結果，基本的な傾向としては奇数偶数の差は存在した．そのため，大まかには同様のことが言えると思われる．ただし，奇数レベル同士の場合は，高いレベルは低いレベルに対し，低いレベルの強い回避行動を考慮するのであまり回避行動を取らず，また高いレベル同士では比較的強い回避行動を取るため，高いレベルが有利になった．偶数レベル同士の場合は，高いレベルが低いレベルに対し，逆に強い回避行動．高いレベル同士ではあまり回避行動を取らないため r が小さいと衝突するため，逆に低いレベルが有利になった．

2.4 議論

ここでは，本モデルが群集行動のモデル化によって表している社会的相互作用がいかなるものか，パラメータの意味付けを通して明らかにした後，心の理論における再帰レベルの基本的性質やヒトの有する心の理論の進化過程に関して，本実験の結果が意味することや示唆することを議論する．

2.4.1 「視界の広さ」の意味付け

本モデルにおける「視界の広さ」は，他個体の行動が自分に影響を及ぼすような環境において，自分の行動を決定する際に，どの程度，相手の行動を想定するかという，予測における相互作用の影響の大きさを決めるパラメータである．

このように，本モデルではそれをエージェントの属性としているが，想定する関係性自体によっても，このパラメータは左右される．例えば，資源の取り合いの

状況において，個体の密度が小さいならば，他個体の行動が自分の適応度にあまり影響しないという意味で，本モデルにおける視界が狭いことと等価と考えうる．

本モデルにおける実験では r が小さい場合，レベル 0 は他個体と衝突しがちなので適応度が低くなるが，r を極端に大きくすると，0 より大きい全てのレベルがレベル 0 に対して十分な回避行動を取ることになるため，2 種レベル混在集団実験と進化実験でレベル 0 の適応度が最も高くなった．このような，本モデルは基本的に自分の行動だけを考える（本モデルで言えば直進するような）他個体の存在が，自分の適応度を下げるような状況を想定しており，N 人版のジレンマゲームに本質的に近い性質が内在していると言える．

また，本モデルでは視界が狭いと，至近距離で他個体との衝突回避行動を始めるため，衝突の可能性が高く，強い回避行動を取ることが適応的になる．そして，視界が広くなると，強い回避行動は他個体を必要以上に避けすぎるため，移動の効率が悪く，適応的でなくなる．このことを集団サイズ・密度と対応させると以下のようなことを意味する．密度が大きくなると，考慮する対象の他個体が多くなり，それに従い，自分にとって相対的にあまり影響が無いような他個体まで考慮対象となることが多くなる．そのような状態では，他個体に対して配慮をするような行動をすると自らの欲求に沿った行動ができず，適応的でなくなる．

2.4.2 再帰レベルの非連続性

シミュレーション実験において，奇数レベルと偶数レベルの適応性に明確な差が存在することが示された．このような奇数，偶数レベルの差はレベル 0 とレベル 1 の質的なギャップに起因するということができる．他個体の心の状態の推測が起点となっている奇数レベルと，自分の心の状態を他個体が推測することが起点である偶数レベルではその結果に本質的な違いが生ずるのであろう．特に，奇数レベルの予測は,「他個体が『他個体を意識しない自身の欲求だけを考えて行動をする』」という予測に基づいている．そのため，相手の欲求に沿った行動に自分自身の行動を合わせがちである．それは，自分自身の欲求に沿った行動を取りづらくなることを意味する．

前述のように，本モデルにおける視界の広さを他個体との相互作用の強さとして考えると，視界が狭いとき，つまり，利害関係がぶつかりやすいとき，あるいは，他個体のことに対する配慮の小さい集団における社会的関係においては，奇数の志向性のレベルの推測が他個体との衝突をうまく避けることができ，適応的であると考えられる．逆に，社会的相互作用が強いとき，偶数の志向性のレベルの推測をすると自分自身の目的に近い行動を取りやすくなり，適応的であると言える．

このように，レベルの適応性が連続的でなく，奇数，偶数によって非連続的に変化するのならば，レベルが徐々に高くなるという漸進的進化は現れにくいと推測される．なお，実際の生物においては，チンパンジーがレベル 1 程度と考えら

れる [73] 一方で，ヒトにおける他個体の心の再帰的な推測は，レベル 5 程度まで可能と言われており [8, 12]，ヒトのみが際立って高いレベルへ進化している．また，そのヒトにおいても他個体の心の推測行う実験において，レベル 4 とレベル 5 の推測において難易度に大きな差が存在することが示されている [29]．これらのことは，漸進的進化の難しさを示唆しているとも考えられ，奇数，偶数のレベルのギャップに一部起因している可能性がある．

2.4.3 再帰レベルの進化

以上より，再帰のレベルの進化について，次のようなことを考えることができる．

- 小さな集団を作っている段階では，相互作用が弱く，レベル 1 が適応的（図 2.3.6 左）となり高いレベルへは進化しない（図 2.4.1 右）．
- 大きな集団を作り，相互作用が強い場合でも，適応的なレベルは 0, 2（図 2.3.6 右）であり，高いレベルへは進化していかない（図 2.4.1 左）．
- ヒトのみが際立って高いレベルへ進化した要因として，集団のサイズが大きすぎず，小さすぎない中間の特定の領域に達したときに，1）レベルの奇数，偶数の差が最も小さくなる，さらには，2）高いレベルへの選択圧が生じることが考えられる（図 2.3.6 中）．高いレベルへの進化は，このような特定の中間領域にあるときに，レベルの奇数，偶数の適応度差が小さくなり，同時に高いレベルへの選択圧が生じるときに可能となる（図 2.4.1 中）．
- ヒトの歴史において，個体間の相互作用の強さは徐々に強くなり，それが知能の進化を駆動してきた [12] と考えると，有利なレベルは，図 2.3.1 において，右から左へと変わってきたと考えられる．ヒトと他種との差は，この特定の領域に達したかどうかの差（図 2.4.1 の中央付近か右寄りかの差）である可能性がある．
- 高いレベルへ進化していくと考えられるその特定の中間領域とは，集団の適応度が最も高くなる「理想的」な状態である．

2.5 まとめ

構成論的手法に基づいて，動物からヒトへの心の進化における再帰の構造の進化に関する計算論的モデルを構築し，シミュレーション実験を行った．他個体の内部モデルを持つことと持たないことのギャップが再帰レベルの奇数と偶数の適応度差をもたらしうること，他個体との関係性の大きさが再帰レベルの適応性の支

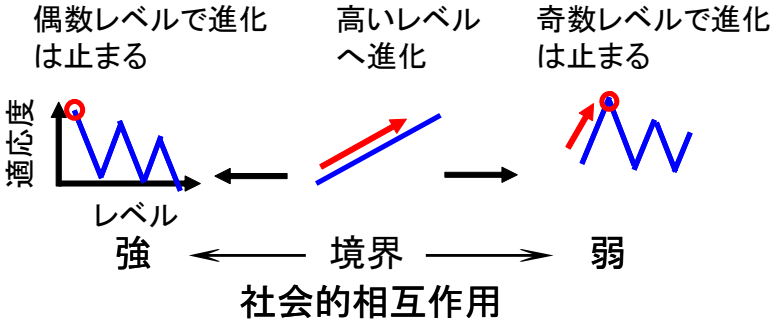

図 2.4.1: 再帰レベルの進化における社会的相互作用の強さ影響の概念図.

配要因となっている可能性があること，個体レベルに働く進化圧が集団全体としての進化方向にバイアスをかけうることなどが示された．このような心の理論における再帰性の進化は基本的なヒトの特徴に関して重要な関連があると考えており，特に，本研究で示したような再帰のメカニズムの進化は言語の起源，特に文法構造の起源と関連があるのではないかと考えている．得られた知見をヒトや生物の脳，生態，進化に関する見解や知見，例えば，集団サイズの増大が他個体との複雑な社会的相互作用の増加を招き，結局，ヒトの脳を大きくさせたという説 [12] と比較検討することが今後の課題である．

第3章　心の推測と他個体操作の共進化に基づくコミュニケーションの成立

3.1　はじめに

我々は他者の振る舞いや状態から，その他者の意図や欲求を汲むことができる．また，他者もそのようにしていることを見越して，自分の行動を決めることもある．

一方が，他者が自分の心・行動について推測していると考えて，自分の行動や状態を象徴する振る舞いをしたときに，他方がそれを見て相手の行動や状態を予測（mindreading）し自分の行動を変えるのならば，前者による後者の行動の操作（manipulation）と言える．Krebs & Dawkins はこのような考えに基づいて，mindreading と manipulation の共進化に基づいたコミュニケーションの進化の捉え方を提案している [32]．卑近な例で言えば，人がすれ違うときの衝突回避行動をそのように考えることができるであろう（A はわざと視線や体の向きを右へ向け，それを見て B は A は右へ行こうとしていると予測する．そして B は逆方向へ避ける）．ただし，このようなコミュニケーションが進化するためには，mindreading と manipulation の両方が進化しなければならないため，両方の側に利益がある場合でしか進化しないと思われる [49]．相手の振る舞いから相手の行動を予測することが不利であるならば，mindreading は進化せず，mindreading が進化しなければ，それを前提としている manipulation は進化しないからである．このような形でコミュニケーションが進化可能な最も単純な状況として，2 個体が行動を調整することによって両者が利得を得られる場合が考えられる [49]．効率よく行動の調整をするためには，他個体の行動を予測することと（相手に正しく予測させるような）表現の共有が重要だからである [45]．

このような行動調整を必要とする状況を解決するための手段としてのコミュニケーションの進化は，動物のコミュニケーションの進化としても研究されている [49, 46]．そこで想定されているコミュニケーションは形態が非可塑的・役割が固定的であり，個体間で共有されている表現に基づくシグナル（研究者が予め意味づけする）を，一方が送信し，他方がそれを受信して行動を決めるものである．このようなコミュニケーションの場合には，個体間の対立度が非常に小さいときのみ進化可能であることが示されている．

一方，表現を共有する過程・条件について検討するために，上記のようなコミュニケーションの形態や役割に関する仮定を弱め，事前の研究者による意味づけのない数種類の記号（離散的表現のシグナル）のやり取りから，コミュニケーションを創発させるという研究がされている（ヒトを用いた実験 [17] や構成論的モデルによるシミュレーション実験 [65, 34, 38]）．それらでは，個体学習や進化などの適応によって各記号の意味が共有され，コミュニケーションが成立する過程が示されている．ただし，そこで前提とされている離散的表現のシグナルは，本来は連続的に表現されるべき音や仕草が離散的に区切られ記号化されたもの（例えば指さしや言葉など）であり，本来はこの離散化の過程でシグナルの表現の意味が共有されていくと思われる．

また，前述の研究のうち [34] は，シグナルは一方が送信し，他方が受信するといった話し手・聞き手の役割分担を仮定している．しかし，このような役割分担はあらかじめ規定されているわけではなく，同時双方向の相互作用から自律的に発現するはずである [24, 63]．

このような記号のやり取り，それの話し手・聞き手の役割分担は，ほとんどの計算論的モデルを用いた言語の起源・進化の構成論的研究 [68, 30] において，あらかじめ前提とされるヒトの言語の特徴である．

行動調整をするためのコミュニケーションには，様々なタイプのものが存在する可能性がある．それには，mindreading と manipulation に基づいたものもあれば，そうでないものもあるであろう．本研究では，mindreading と manipulation の共進化に基づいた言語・コミュニケーション成立の進化的基盤を検討することが目的である．特に，どのようなタイプのコミュニケーションが進化的に成立しうるか，その進化は両者間の対立度にいかに依存するか，そして，上で考えたような記号化・役割分担化が進化するならばどのように実現されるかという点に焦点を合わせる．そして，前述のような前提をできるだけ無くした連続的表現のシグナルによる同時双方向のエージェントの相互作用において検討する．そのために連続的表現のシグナルによる同時双方向のシグナル交換とゲーム戦略決定という 2 段階から構成される枠組みを用いたエージェントベースモデルを設計し，ゲームの利得に基づいた進化シミュレーションを行う．

3.2 モデル

3.2.1 個体間の関係

本研究では個体間の関係を表 3.2.1 の利得行列を用いて表す（$0 \leq \alpha \leq 1$）[1]．この利得行列を用いたゲームでは両者が異なった戦略を選択したとき（(A, B) または (B, A)）のみ利得が得られる（これらはナッシュ均衡解である）．なお，この

[1] この利得行列は「男女の争い」ゲームの利得を対称にしたものであり，チキンゲームとよく似た性質を持つ [57]．

表 3.2.1: 本研究で考える個体間の関係

	A	B
A	$0, 0$	$1,\ \alpha$
B	$\alpha,\ 1$	$0, 0$

ゲームは動物の資源争いの状況を表していると考えられる．両者が譲らなければ闘争コストにより共に利得は 0 であり，一方が譲れば闘争コストはなく，譲らなかった側は利得 1 で譲った側は利得 α である．

このゲームでは，両プレイヤが協力してどちらかの均衡を選択すれば利得を得ることができる（ゲームの成功と呼ぶ）．ただし，ゲームが成功した場合でも，戦略 B を選択したプレイヤは戦略 A のプレイヤより $1-\alpha$ だけ利得が小さいという意味で，個体間には α に応じた対立が存在する．この対立は α が大きいほど小さくなり，1 になるとなくなるので，α はゲームの公平度を表すと考えられる．

ゲーム前に両者が交渉する場合，交渉はゲームの成功を促すが，α が小さいほどその効果は小さくなると考えられる [15]．このゲームにおける交渉なしの場合の進化的に安定な戦略（ESS）[50] は戦略 A を選択する確率が $1/(1+\alpha)$，B を選択する確率が $\alpha/(1+\alpha)$ の混合戦略であり [47]，ESS だけから構成される集団（ESS 集団）のゲームの成功率は $2\alpha/(1+\alpha)^2$ である．したがって，交渉する集団におけるコミュニケーションの有効性はこの成功率を上回るかどうかで判断できる．また，このゲームは基本的には両者が戦略の棲み分けを行ったとき利得を得られる調整ゲームに近い形であり，相手をだます利益はないため，正直な自分の情報を相手に伝えるようなコミュニケーションが進化すると考えられる [49]．

3.2.2 エージェント

集団を構成する各エージェントは，状態として，交渉期間後に戦略を表す a,（戦略とは直接関係無いが）相手に観測されるシグナル ϕ，内部状態 I のみっつを持ち，それらはエージェントが持つ 3 層の階層型ニューラルネットワーク（NN）によって更新される．各状態は連続値で表される．そして，総当たりで対戦を行い，その際の平均利得を適応度として，NN の重みを進化させる．

一回の対戦は，連続値のシグナルの送受信を同時双方向に繰り返し行う交渉期間とその結果に基づいたゲームプレイ（戦略の決定と利得獲得）によって構成されており，2 個体間で行われる（図 3.2.1）．いくつかの研究 [38, 65] も同時双方向の動的コミュニケーションの獲得について検討している．しかし，それらは対立が無い場面での離散的なシグナル送受信によるコミュニケーションを扱っており，本モデルとは基本的に異なる．本モデルにおけるこの相互作用は，人がすれ違うときの衝突回避行動と解釈することが可能である．人は離れている間（交渉期間）

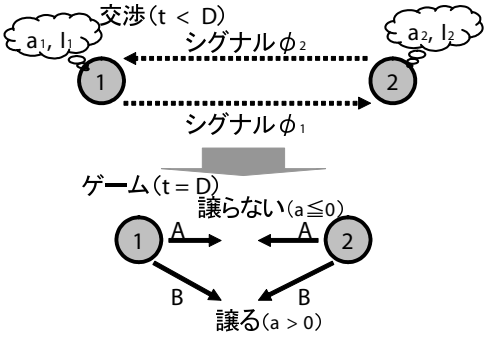

図 3.2.1: エージェント間の 2 段階の相互作用.

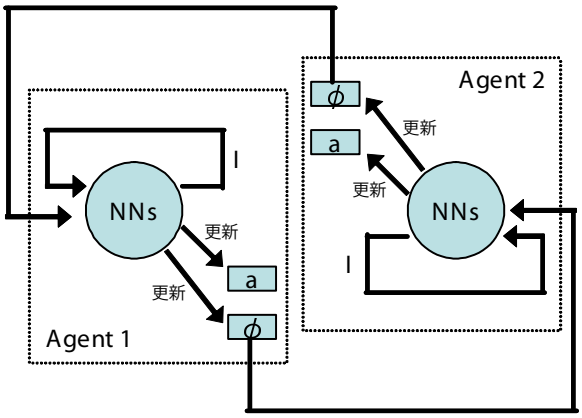

図 3.2.2: 交渉期間におけるエージェントの相互作用の概念図.

は互いに相手の視線や仕草（連続的なシグナル）を観察し合い，近づくと（交渉期間後に）譲らない（A）または譲る（B）という行動をとる（戦略を決定する）．この場合，外から観察されるふたつのパラメータに関して，たとえば，ϕ が視線方向，a が交渉後の体の方向に相当すると言える．

交渉期間（時刻 $t = 0$ から $D - 1$ まで）では，エージェントは，自分のシグナル ϕ の送信と相手のシグナル ϕ の受信（両者は並列実行），及び，受信した ϕ と自分の内部状態 I を用いた自分の状態 a，ϕ，I の更新，の両者を繰り返す（3.2.2）．このような動的交渉における文脈保持のためにエージェントには内部状態 I を持たせている．そして，交渉期間後（$t = D$）の a の値が $a \leq 0$ の場合は戦略 A，$a > 0$ の場合には戦略 B を選択するものとする．

交渉期間中のエージェント 1 の状態 a_1，ϕ_1，I_1 とエージェント 2 の状態 a_2，ϕ_2，I_2 の更新は以下に挙げる「連続更新」と「不連続更新」の 2 方法で行った．NN の入力は自分の内部状態 I と相手のシグナル ϕ とし，出力は自分の状態 a，ϕ，I を更新するために用いる．以下では，入力が I，ϕ のときの状態 $*$ に関するエージェント 1 の NN の出力を表す関数を $f_*(I, \phi)$，同様にエージェント 2 の状態 $*$ に関す

る関数を $g_*(I,\phi)$ と書く．なお，f_*，g_* の値の範囲はすべて $(-0.5, 0.5)$ とする．

まず，エージェント 1 と 2 の内部状態 I_1，I_2（$\in (-0.5, 0.5)$）は，2 方法で共通であり，次のように不連続に更新される．

$$I_1(t+1) = f_I(I_1(t), \phi_2(t)) \tag{3.2.1}$$
$$I_2(t+1) = g_I(I_2(t), \phi_1(t)) \tag{3.2.2}$$

連続更新モデルでは，状態 a，ϕ に関する更新は増分を与えることによって連続的に行う（$\delta \ll 1$，$a \in \mathcal{R}$，$\phi \in \mathcal{R}$）．

$$a_1(t+1) = a_1(t) + f_a(I_1(t), \phi_2(t))\delta \tag{3.2.3}$$
$$\phi_1(t+1) = \phi_1(t) + f_\phi(I_1(t), \phi_2(t))\delta \tag{3.2.4}$$
$$a_2(t+1) = a_2(t) + g_a(I_2(t), \phi_1(t))\delta \tag{3.2.5}$$
$$\phi_2(t+1) = \phi_2(t) + g_\phi(I_2(t), \phi_1(t))\delta \tag{3.2.6}$$

一方，不連続更新モデルでは，状態 a，ϕ に関する更新も不連続的に行うので，一度に大きく変更することができる（a，$\phi \in (-0.5, 0.5)$）[2]．

$$a_1(t+1) = f_a(I_1(t), \phi_2(t)) \tag{3.2.7}$$
$$\phi_1(t+1) = f_\phi(I_1(t), \phi_2(t)) \tag{3.2.8}$$
$$a_2(t+1) = g_a(I_2(t), \phi_1(t)) \tag{3.2.9}$$
$$\phi_2(t+1) = g_\phi(I_2(t), \phi_1(t)) \tag{3.2.10}$$

3.3 シミュレーション実験

3.3.1 設定

3.2 節で示したモデルに基づいて，NN の重みを実数値遺伝的アルゴリズムによって進化させた．NN のニューロンの出力関数にはシグモイド関数（$f(x) = 1/(1+e^{-x}) - 0.5$）を用いた．NN の各層のニューロン数は，入力層 2，中間層 4，出力層 3 で，さらに，入力層と中間層にはバイアスニューロンが 1 個ずつあるので重みの数は 27 である．これが遺伝子長に相当する．遺伝的操作として，突然変異は平均 0，標準偏差 0.5 の正規分布に従って変異率 0.05 で与え，交叉は交叉率 0.8 の二点交叉，選択はルーレット選択を用いた．

エージェントの個体数は 100，初期状態 $a(0)$，$\phi(0)$，$I(0)$ は 0 とし，交渉期間 D は 200，連続更新モデルのパラメータ δ は 0.05 とした．そして，利得行列（表 3.2.1）の α を 0 から 1 まで 0.1 刻みで変えて，それぞれ 8000 世代進化させる．各 α について連続更新，不連続更新モデルの進化を 50 試行ずつ行った．

[2] したがって，伝達媒体 ϕ の変化に関する制約の大小を考えると，連続更新モデルでは視線方向，不連続更新モデルでは音声に相当すると考えられるかもしれない．

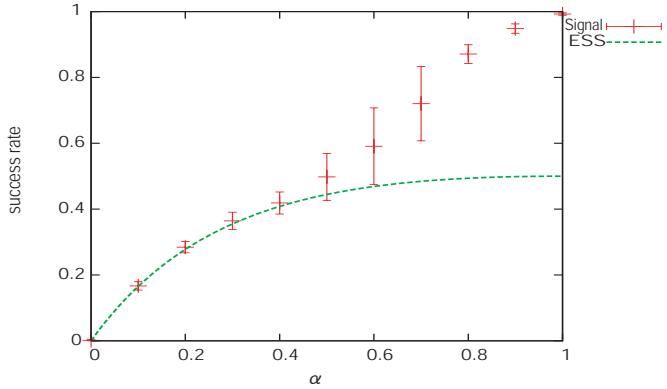

図 3.3.1: ゲームの成功率（ESS 集団との比較）.

連続更新モデルの結果 3.3.2 節はこの 50 試行に関する平均である．不連続更新モデルの結果 3.3.3 節は後述する収束型，振動型に分けて平均値を示している．また，ゲームの成功率を除き，全て最終世代のエージェントを用いて計算している．各図中の誤差棒はそれら平均値を計算した試行に関する標準偏差である．

3.3.2 連続更新モデル

3.3.2.1 基本的傾向

進化結果の基本的傾向を知るために，図 3.3.1 に 7000 から 8000 世代におけるゲーム成功率を各 α ついて示す．同図には ESS 集団の場合についても示している．$\alpha \geq 0.5$ では成功率は ESS 集団より高くなり，シグナリングはゲームの成功に関して有効に働くように進化していることがわかる．また，α が大きいほど成功率は高い．これは，α が大きいほどゲーム成功時の利得差が小さいため，交渉によりどちらかが譲る（B を選択）ように進化したためであろう．逆に，α が小さいとゲーム成功時の利得差が大きくなり，B を選択したときの適応度が小さくなるため，譲らない個体が増加し，シグナリングが有効に働かなくなり，特に，$\alpha < 0.5$ では ESS 集団とほぼ同じ成功率になったと考えられる．シグナリングが有効に働く状態と働かない状態が α が 0.4 と 0.5 の間のある点で明確に分かれているように見えるところは興味深い．

次に，エージェントがシグナル ϕ と戦略を決める a をどのように変化させて戦略の選択を調整しているか具体例を用いて考える．図 3.3.2 に $\alpha = 0.9$ におけるゲーム成功時の両エージェントの $\phi(t)$ と $a(t)$ の軌道の典型例をふたつ示す．同図で用いているエージェントはひとつの最終世代の集団から抜き出したもので，それぞれエージェント 1，エージェント 2，エージェント 3 と呼ぶ．同図において，縦軸は各状態の値，ϕ_1 と a_1 はエージェント 1，ϕ_2 と a_2 はエージェント 2，ϕ_3 と a_3 は

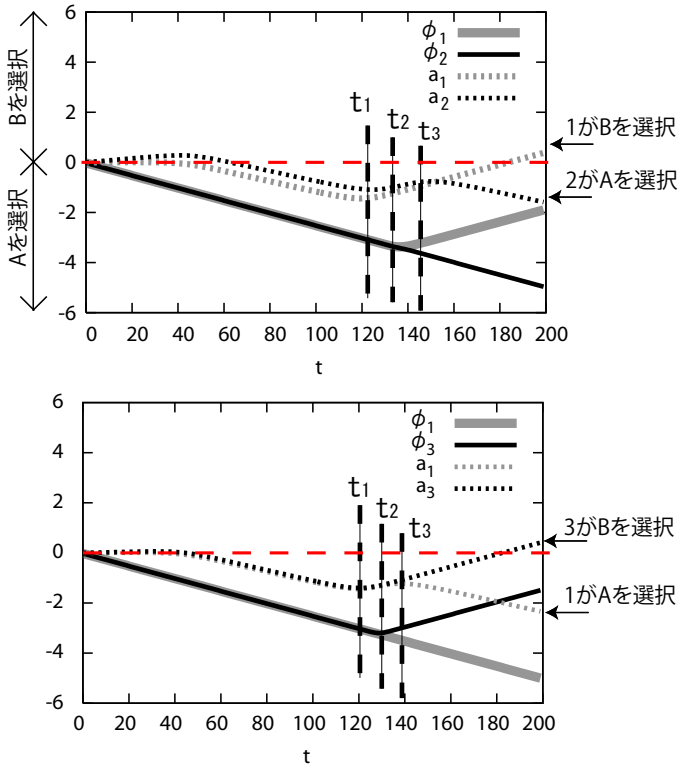

図 3.3.2: 交渉期間におけるコミュニケーションの典型例.

エージェント 3 の状態をそれぞれあらわす．交渉期間終了時の $t = D$ において，a_1 と a_2，あるいは，a_1 と a_3 の符号が異なることがゲームの成功を表す．

この例では，まず，初期状態 $\phi(0) = 0$，$a(0) = 0$，つまり原点から軌道は始まる．エージェントは $a(t)$ を利得の高い A を選択する方向へ動かす（減少させる）．しかし，両者が A を選択するとゲームが失敗するため，相手に応じて譲る（B を選択する）選択もできるように，t_1 において $a(t)$ を B 方向へ動かし始める（増加させる）．t_2 で，一方のエージェントがその変更を $\phi(t)$ を逆方向へ動かす（増加させる）ことで相手に示し始める．t_3 では，もう一方のエージェントがそれに反応し，t_1 で変えた $a(t)$ を再び A 方向へ動かす（減少させる）．

このコミュニケーションにおいては，エージェントが t_2 において $\phi(t)$ の動きを大きく変えることが,「自分は B を選択する」という合図となっているという仮説が考えられる．合図を送るタイミングがエージェントによって異なるので，A を選択するか，B を選択するかは相手に依存するはずである．この例でも，t_2 において $\phi(t)$ の動かす方向を変えたのは，上図ではエージェント 1 であるが，下図ではエージェント 1 ではなくエージェント 3 である．

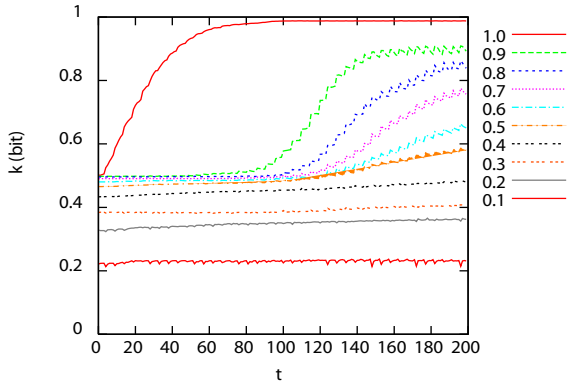

図 3.3.3: $\bar{k}(t)$ の時間変化.

3.3.2.2 情報量を用いた分析

3.3.2.1 節で示した仮説を検証するために，情報量を用いて分析する．各エージェントは，集団における選択される戦略の確率分布 $P(X)$ と時刻 t にシグナル $u(t)$ を送信したエージェントによって選択される戦略の確率分布 $P(X|Y(t)=u(t))$ を知っていると仮定する．それらの情報エントロピーを $H(X)$，$H(X|u(t))$ とする．ただし，$u(t)$ は実数値のシグナル $\phi(t)$ を離散化した値とする（ここでは -6.0 から 6.0 の範囲で 100 等分している）．このようにすると，時刻 t にエージェント j がエージェント i の送信したシグナル $u_{ij}(t)$ を受信したときに得る情報量（bit）は，シグナル $u_{ij}(t)$ の受信前と受信後の送信者の戦略に関する情報エントロピーの差

$$k_{ij}(t) = H(X) - H(X|u_{ij}(t)) \tag{3.3.1}$$

で表すことができる．時刻 t におけるエージェント i のシグナルの平均的な情報量を，i が他の 99 個体のエージェントに対して送信したシグナルの平均値 $k_i(t) = (1/99)\sum_{j\neq i} k_{ij}(t)$ として計算する．

図 3.3.3 に各 α の $k_i(t)$ の平均 $\bar{k}(t)$（$(1/100)\sum_{i=1}^{100} k_i(t)$）の時間変化を示す（$\alpha=0$ では全エージェントが A を選択し，$k_{ij}(t)$ を計算できないので示していない）．$\bar{k}(t)$ が細かく振動しているのは実数値である $\phi(t)$ を離散化したためであると考えられる．まず，シグナリングが有効に働いている $\alpha \geq 0.5$ では，ある時刻で増加し始めることがわかった．α が大きいほど立ち上がりは鋭く，またその時刻は早くなる．各エージェントの $k_i(t)$ がある時刻で急に増加する時刻とは，シグナルを用いて自分の $a(t)$ に関する合図を相手に示し始める時刻と考えられ，そのエージェントの t_2（図 3.3.2）に近い値であると考えられる．シグナリングが有効に働いていない $\alpha < 0.5$ では，$\bar{k}(t)$ は変化しない．α によって $\bar{k}(t)$ の値が異なるのは，α が大きいと B を選択するエージェントが A に比べて増加し，戦略の選択のエントロピー $H(X)$ が大きくなるためであると考えられる．また，$\alpha = 1.0$ と $0.5 \leq \alpha < 1.0$ では，$\bar{k}(t)$ が増加し始める時刻が大きく異なっている．これは，対立のある場合

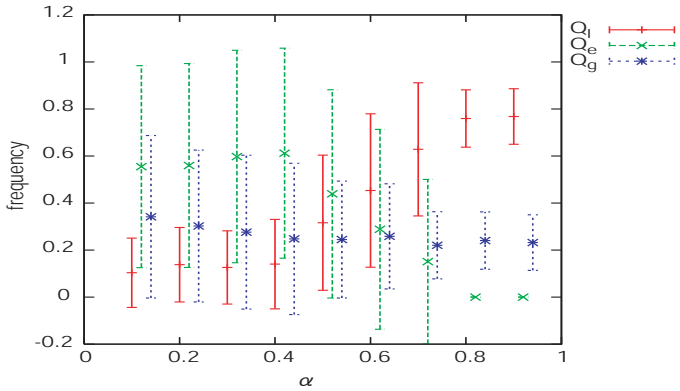

図 3.3.4: 各 α における Q_l，Q_e，Q_g.

($0.5 \leq \alpha < 1.0$) には B よりも A を選択しようとするインセンティブがあるが，$\alpha = 1.0$ では個体間に対立が無く，行動を調整できれば両者の利得は変わらないため，合図を相手に示し始める時刻が早くなったからと思われる．

次に，シグナリングが機能している場合には $k_i(t)$ がある時刻で急に増加すると考えられることから，エージェント i が相手に合図するタイミングを表す指標として $K_i = \sum_{t=0}^{D-1} k_i(t)$ を考える．K_i が大きいということは $k_i(t)$ が早い段階で増加する（合図を早く示す）傾向にあることを意味する．これを用いて，相手に合図を送るタイミングが異なることで調整が行われるという先述の仮説を検討する．

ゲーム成功時に，A を選択したエージェントの K を K_A，B を選択したエージェントの K を K_B とする．$K_A < K_B$ ならば，合図を相手に示すタイミングが遅いエージェントが A，そうでない方が B を選択してゲームが成功したということであり，$K_A > K_B$ ならばその逆である．$K_A = K_B$ の場合は，合図のタイミングが同時か，共に合図をしなかったか（合図を示さないエージェントの K は集団中で最小であり両者の K は等しいと考えられる）のいずれかで成功した場合である．しかし，前者は，非常にまれであると考えられるので，このケースではシグナリングは有効ではないと考えられる．

ゲームが成功した場合の，$K_A < K_B$ であった割合 Q_l，$K_A = K_B$ であった割合 Q_e，$K_A > K_B$ であった割合 Q_g を総当り対戦において求めた結果を図 3.3.4 に α ごとに示す．なお，$\alpha = 1$ では戦略 A，B の利得は対称で，Q_l と Q_g の区別が無いため，また，$\alpha = 0$ ではゲームは全く成功せず Q が計算できないため，同図には示していない．また，図を見やすくするために，Q_e と Q_g の表示位置を少し右に移動している．同図より，シグナリングが有効な場合（$\alpha \geq 0.5$），α が大きいほど Q_l が大きく Q_e は小さくなり，先に合図を示した方が B を選択した頻度が大きくなった．シグナリングが有効でない場合（$\alpha < 0.5$）は，Q_l は非常に小さい．

以上から，合図は「自分が B を選択する」ことを伝える役割を持っており，それを示すタイミングの違いによって戦略選択の調整を行っていることがわかった．

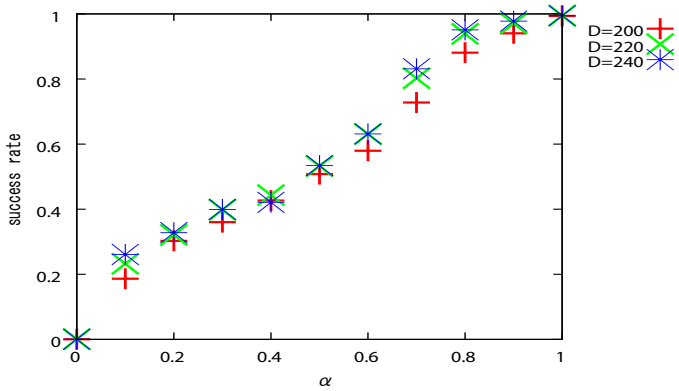

図 3.3.5: ゲームの成功率に関する D の影響.

このタイミングが遅いエージェントは相手より大きい利得を得られる場合が多いが，相手によっては，合図を出したり，相手の合図を受けての戦略変更が間に合わなくなる（ゲーム失敗）の可能性が大きい．このトレードオフにより多様性が生じたと思われる．

また，図 3.3.3 からわかるように，α が小さいほど合図を示すタイミングは遅くなった．これは，α が小さいほど B を選択する不利益が拡大するためであると考えられる．そして，タイミングが遅いほど，合図や戦略変更が間に合わなくなり，ゲーム失敗の頻度が大きくなる．したがって，α が 0.5 未満のある値以下になると，シグナリングが有効に働かなくなったと考えられる．

3.3.2.3 ゲーム成功状態の安定性

交渉期間における戦略が調整されている（ゲームが成功する）状態の安定性を調べるため，D を長くした場合のゲームの成功率の変化を調べた．図 3.3.5 にその結果を示す．$\alpha \geq 0.5$ では D が大きいほど成功率は高くなった．これは，合図や戦略の変更が間に合わずゲームが失敗していた場合が，成功になったためと考えられる．

$\alpha \geq 0.5$ では，ゲームの成功率が D に関して単調に増加していることから，コミュニケーションにより形成されたゲーム成功状態は安定であると言える．これは，この状態がゲームのナッシュ均衡点であり，エージェントに戦略変更の利益がないためと考えられる．

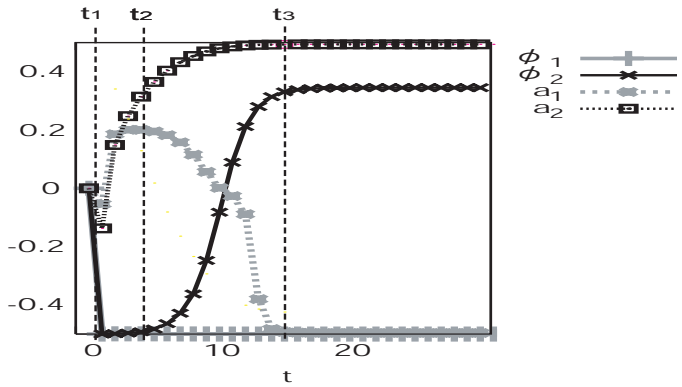

図 3.3.6: コミュニケーションの典型例（収束型）.

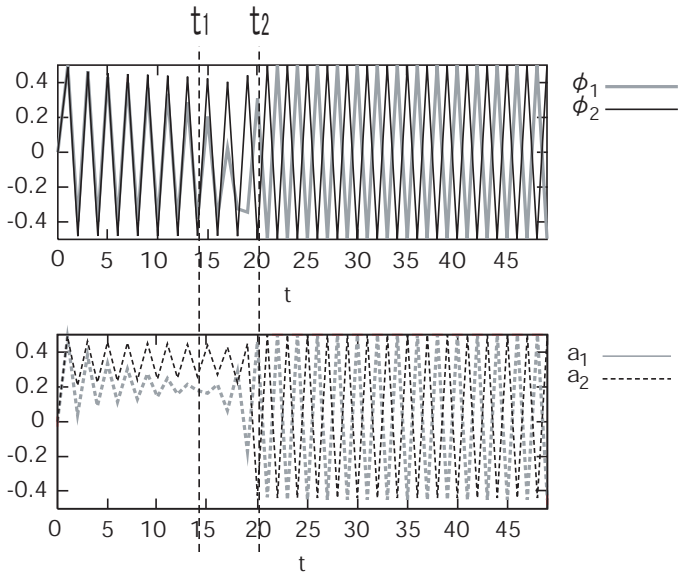

図 3.3.7: コミュニケーションの典型例（振動型）.

3.3.3 不連続更新モデル

3.3.3.1 基本的傾向

進化の結果，交渉期間での振る舞いがふたつに分かれることがわかった．図3.3.6，図 3.3.7 に $\alpha = 0.7$ におけるゲームが成功したエージェントの組（それぞれの構成エージェントをエージェント 1，2 と呼ぶ）のシグナル $\phi(t)$，戦略を決める $a(t)$ に関して，両者の典型的な軌道を示す．ϕ_1，a_1 はエージェント 1，ϕ_2，a_2 はエージェント 2 の状態を，縦軸は各状態の値をそれぞれ表す．図 3.3.6 では各状態は収束しており，このようなコミュニケーションを収束型と呼ぶ（A を選択したのはエージェント 1 である）．これは連続更新モデルで現れたコミュニケーションと同様であるので説明を省く．

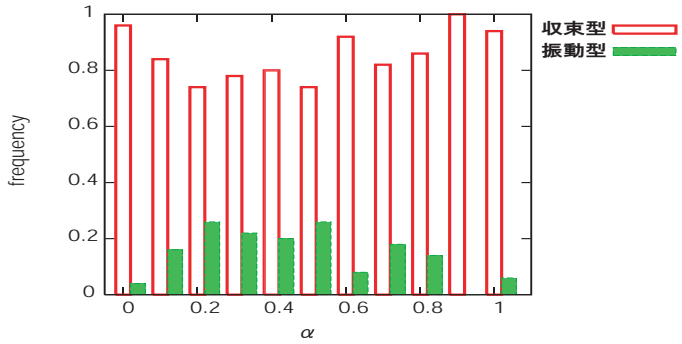

図 3.3.8: 収束型と振動型の出現頻度.

図 3.3.7 では収束型とまったく異なった振る舞いを見せており，各状態は（$t \geq 50$ においても）振動し続ける．このようなコミュニケーションを振動型と呼ぶ．$0 \leq t < t_1$ では，両者の状態 ϕ，a は同位相で振動した．ここは不安定な過渡状態であり，各状態の振動の振幅は少しずつ変化した．$t_1 \leq t < t_2$ ではエージェント 1 の振る舞いが大きく変わって，振動の位相がずれていき，$t_2 \leq t$ において位相が 1 ずれた周期 2 の安定した振動になった．a_1 と a_2 の符号が異なって振動するので，ゲームは成功する．A を選択したのはエージェント 2 である．この場合，$t_1 \leq t < t_2$ において振動の位相を 1 ずらしたことが B の選択を相手に示す合図になったと考えられる．

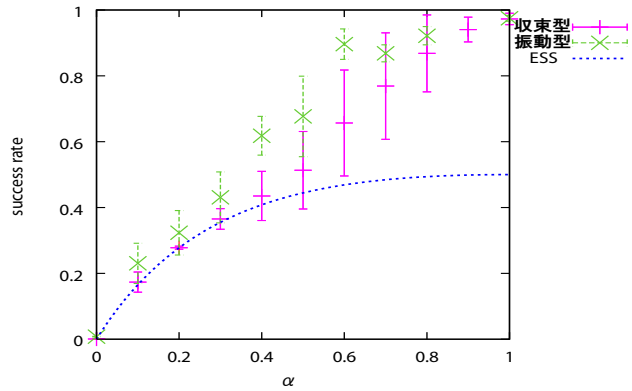

図 3.3.9: 収束型と振動型のゲームの成功率.

図 3.3.8 に収束型，振動型の出現頻度を示す．常に収束型に進化する頻度が大きいが，$0.1 \leq \alpha \leq 0.8$ のとき，約 2 割が振動型へ進化することがわかる．また，収束型と振動型のゲームの成功率を図 3.3.9 に示す．同図には ESS 集団の場合も示している．収束型は連続更新モデルの場合とほぼ等しい．同図より，収束型の成功率は $\alpha < 0.5$ において ESS 集団とほぼ変わらないが，振動型は $0 < \alpha < 1$ において収束型より成功率が高いことがわかる．

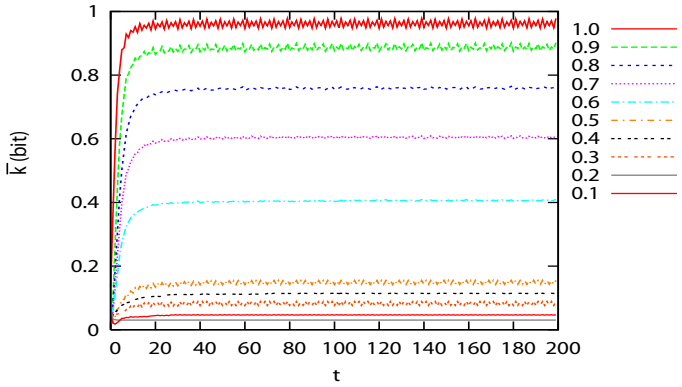

図 3.3.10: $\bar{k}(t)$ の時間変化（収束型）.

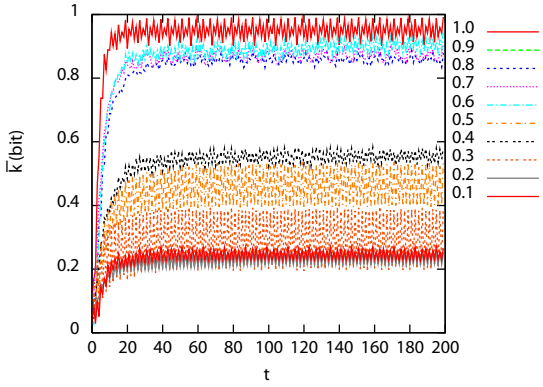

図 3.3.11: $\bar{k}(t)$ の時間変化（振動型）.

3.3.3.2 情報量を用いた分析

3.3.2.2 節と同様な分析を行った (ここでは -0.5 から 0.5 の範囲で 100 等分して ϕ を離散化している). 収束型と振動型の各 α の $\bar{k}(t)$ の時間変化を図 3.3.10, 図 3.3.11 に示す. どちらの場合でも, シグナリングがゲームの成功に関して有効に進化したとき（収束型では $\alpha \geq 0.5$, 振動型では $\alpha > 0$）, $\bar{k}(t)$ は振動しながらも基本的には t に関して増加し, また, 連続更新モデルの場合より早い段階で戦略選択に関する合図を送るように進化した. 本モデルは, 連続更新モデルに比べて ϕ, a を一気に大きく変更することができ, また, ϕ, a の範囲が $(-0.5, 0.5)$ に限定されているので, 短時間で両者の戦略が決定した安定状態に至ったのであろう.

図 3.3.4 と同様に, 収束型, 振動型の各 α についてゲームが成功した場合の $K_A < K_B$ であった割合 Q_l, $K_A = K_B$ であった割合 Q_e, $K_A > K_B$ であった割合 Q_g を図 3.3.12, 図 3.3.13 に示す. 収束型は, 連続更新モデルと同様に, 合図を示すのが遅い方が A , 早い方が B を選択するように進化している傾向が見られる. 振動型の場合はそのような傾向は見られない. 微妙な振動の位相のずれが, どちらが譲

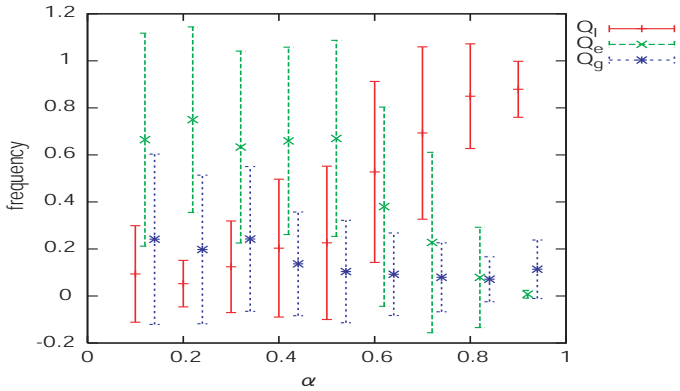

図 3.3.12: 各 α における Q_l，Q_e，Q_g（収束型）.

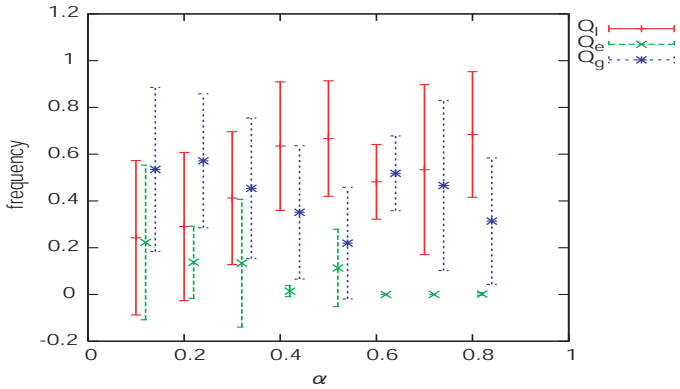

図 3.3.13: 各 α における Q_l，Q_e，Q_g（振動型）.

るかを決定していると考えられる.

3.3.3.3 ゲーム成功状態の安定性

3.3.2.3 節と同様な分析を行った．図 3.3.14，図 3.3.15 に D を長くした場合のゲームの成功率を示す．収束型・振動型共に変化せず，ゲーム成功状態は安定であると言える.

収束型は連続更新モデルの場合と同様に戦略の組み合わせがナッシュ均衡へ収束しているためであると考えられる.

振動型は次の理由から安定していると考えられる．エージェント 1 が A，エージェント 2 が B を選択してゲーム成功状態になっているとき，エージェント 2 が戦略を A に変更すると，ゲーム成功のためにはエージェント 1 が戦略を B に変更しなければならない．次に，同様にエージェント 1 が自分の戦略を A に変更するならば，エージェント 2 は戦略を B に変更しなければならない．ゲーム成功状態おい

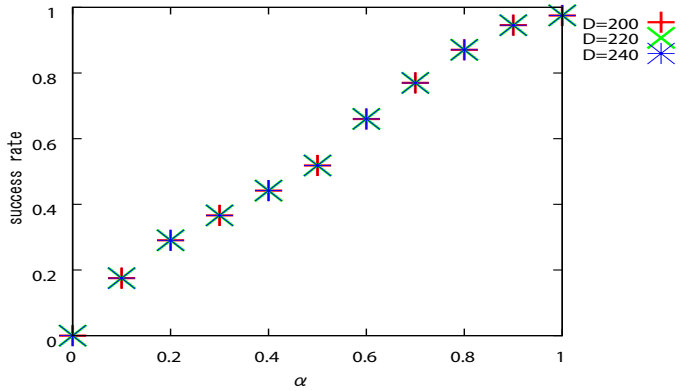

図 3.3.14: ゲームの成功率に関する D の影響（収束型）.

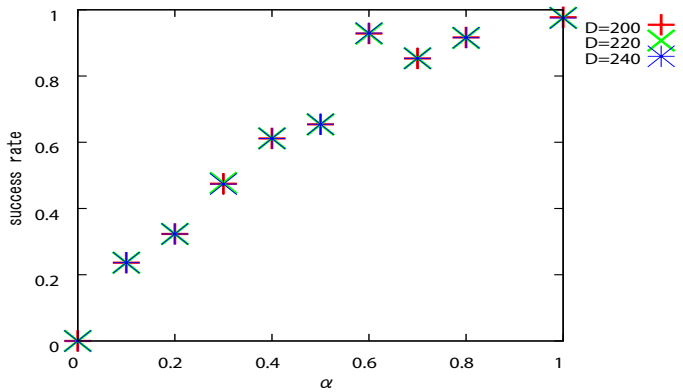

図 3.3.15: ゲームの成功率に関する D の影響（振動型）.

て，このように戦略が B のエージェントが常に戦略を A に変えるとすると，ゲーム成功のためには戦略の振動が繰り返される必要があり，そのため振動状態は安定していると思われる．そして，交渉期間初期の振動は不安定であるが，やがてこの安定した振動状態へ収束していくと思われる．この方式は，一方の振る舞いではなく，両者のダイナミックな相互作用によりゲーム結果が決まるため，前節の分析では明確な傾向が見られなかったと考えられる．

3.4 コミュニケーションの進化的安定性の解析

連続更新モデルで進化したコミュニケーションや不連続更新モデルで進化した収束型のコミュニケーションの進化は公平度 α によって大きく影響を受けた．特に，シグナリングが有効に働くように進化する α と働かないように進化する α には 0.4 と 0.5 の間に明確な境界が存在するように見えた．本節は，そのようなコミュニケーションシステムの進化の結果を分岐させる境界が α に存在するかどうか，存

在するならばその要因について調べることを目的とする．そのために連続更新モデルと不連続更新モデルの収束型で獲得されたコミュニケーションシステムを各個体が持っていると仮定して，そのコミュニケーションシステムの進化的な安定性を解析する．利得行列にはこれまでと同様のもの（表3.2.1）を用いるが，$0 < \alpha < 1$ とする．

3.4.1 コミュニケーション戦略のみの集団

前節までのエージェントベースモデルにおいて進化したコミュニケーションシステムでは，エージェントが相手に合図を示すタイミングの違いを利用して両者は戦略の選択を調整していた．しかし，そのタイミングの違いが小さく，特に遅い場合では，ゲームは失敗しやすい．

数理解析を簡単にするためタイミングが異なれば成功，同じならば失敗するとして，次のようにモデル化した（ゲーム成功の際の戦略 A，B の利得差によって，タイミングが遅くなる進化圧は常に存在し，タイミングが遅い個体同士のゲームの失敗の頻度が増加するため，結果的によく似た進化の傾向を示すと考えられる）．ここでモデル化される個体の戦略をコミュニケーション戦略と呼ぶ．交渉期間において個体はシグナルにより「自分が B を選択する（譲る）」という合図を送ることができ，早く合図を示した方が B，遅い方が A を選択してゲームが成功すると仮定する．つまり，合図を相手に示すタイミングの早さを i（正整数）の大きさ，その値を持った種を種 i として，種 i と種 j（$i < j$）の個体がゲームをしたとき，i が A，j が B を選択してゲームが成功，同じ種同士のゲームが失敗とする．

集団内には N 種類の種が存在する（シグナルが N 種類ある）として，x_i を集団内の種 i の割合（$\sum_{i=1}^{N} x_i = 1$）とすると，種 i の個体の期待利得 f_i は

$$f_i = \sum_{j=1}^{i-1} \alpha x_j + \sum_{j=i+1}^{N} x_j \tag{3.4.1}$$

である．右辺第 1 項は自分が B を選択してゲームが成功する種との期待利得，第 2 項は自分が A を選択してゲームが成功する種との期待利得である．

以上に基づき次のレプリケータダイナミクス [22] により進化を考える．期待利得 f_i を種 i の適応度とする．

$$\dot{x_i} = x_i(f_i - \bar{f}) \tag{3.4.2}$$

$\bar{f}$ は平均適応度 $\sum_{i=1}^{N} f_i x_i$ である．この方程式は種 i の適応度 f_i が平均 $\bar{f}$ より大きければ種 i の割合 x_i は増加し，小さければ減少するという進化のダイナミクスを記述する．

このシステムの安定な平衡点 x_i^* は

$$x_i^* = \frac{1-\alpha}{1-\alpha^N}\alpha^{i-1} \tag{3.4.3}$$

である[3]．このときの適応度 f_i^* は，

$$f_i^* = \frac{\alpha - \alpha^N}{1 - \alpha^N} \tag{3.4.6}$$

であり，平均適応度 $\bar{f}^*$ は，

$$\bar{f}^* = \sum_{i=1}^{N} f_i^* x_i^* = \frac{\alpha - \alpha^N}{1 - \alpha^N} \tag{3.4.7}$$

である．

N が十分に大きい場合，つまりシグナルの種類が非常に多い場合，について考えると $\alpha < 1$ なので上記は，

$$x_i^* = (1-\alpha)\alpha^{i-1} \tag{3.4.8}$$

$$f_i^* = \bar{f}^* = \alpha \tag{3.4.9}$$

となり，このときのゲームの成功率 r^* は

$$r^* = \frac{2\alpha}{1+\alpha} \tag{3.4.10}$$

である．α が大きいと，種 i は一様に近い分布になり，成功率 r^* が高くなる．α が 0 に近づくほどあまり譲らない（i が小さい）種の頻度が多くなり，r^* は低くなる．α が小さいと，譲りがちな（大きい i の）種が不利になるからである．

図 3.4.1 に平衡点 x_i^* における成功率 r^* と ESS 集団の成功率を示す．基本的な図の見方は図 3.3.1 と同様である．図のように $\alpha > 0$ ならば，ESS 集団より高い成功率を示し，シグナリングが有効に働く状態は α に関係なく常に安定である．よって，コミュニケーション戦略のみならば，コミュニケーションは有効に働くように進化すると考えられる．

3.4.2 コミュニケーション戦略と ESS の混在集団

コミュニケーション戦略を持つ種以外にシグナルに関する能力を持たない戦略（ESS や純粋戦略など）の種が存在する場合を考える．コミュニケーション戦略が他戦略に排除されなければ，コミュニケーションは進化すると言える．

[3] $\dot{x_i} = x_i(f_i - \bar{f})$（$f_i = \sum_{j=1}^{N} a_{ij} x_j$，$\bar{f} = \sum_{i=1}^{N} f_i x_i$）において，$\vec{x^*} = (x_1^*, x_2^*, \ldots, x_N^*)$，$\vec{x} = (x_1, x_2, \ldots, x_N)$ とし，種間相互作用を表す行列を A（行列の要素は a_{ij}）としたとき，任意の $\vec{x}$ について

$$\vec{x} \cdot A\vec{x^*} \leq \vec{x^*} \cdot A\vec{x^*} \tag{3.4.4}$$

$$\vec{x^*} \cdot A\vec{x} > \vec{x} \cdot A\vec{x} \tag{3.4.5}$$

を満たせば $\vec{x^*}$ は安定な平衡点である [22]．本文の場合，$a_{ij} = 1 (i < j)$，$a_{ij} = \alpha (i > j)$，$a_{ii} = 0$ である．式 3.4.3 の x_i^* は常にこれを満たす．

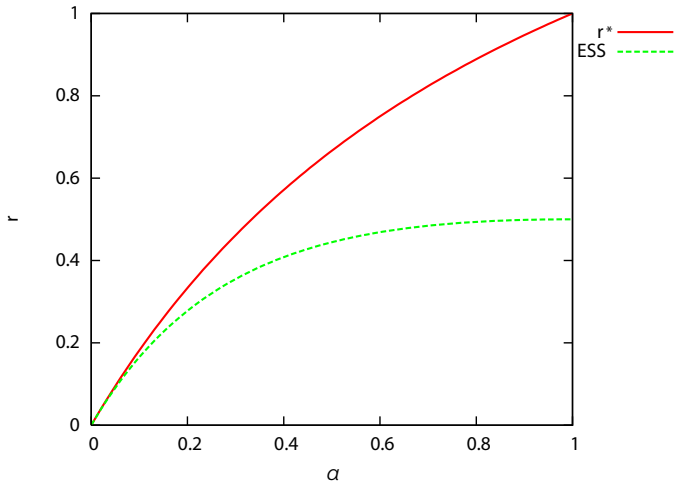

図 3.4.1: 平衡点と ESS 集団の成功率の比較.

本節ではコミュニケーション戦略の種のほかに表3.2.1のゲームにおける ESS である種（以下，種 E）が存在することを考える．種 E の集団中の割合を x_E とする．$\sum_{i=1}^{N} x_i + x_E = 1$ である．ここで，種 E はシグナルに関する能力を持っていないために，種 i の個体は種 E に対して戦略を確率的にしか選択できないとし，簡単のため，種 $1, 2, \ldots, i, \ldots, N$ が種 E に対して一様な反応をすると仮定する．つまり，コミュニケーション戦略は i に関係なく，種 E との相互作用において確率 p で A，確率 $1-p$ で B を選択するとする（$p \in (0,1)$）．

種 E と種 i の相互作用は i に関係無く，また，ここでは平衡点についてのみ考察するので，種 $1, 2, \ldots, i, \ldots, N$ をひとつの種 S として扱うことができる．種 S の集団中の割合を x_S と書く（$x_S = \sum_{i=1}^{N} x_i$）．$x_S + x_E = 1$ である．すると種 S と種 E の期待利得 f_S，f_E は，

$$f_S = \alpha x_S + \frac{\alpha}{1+\alpha} x_E \tag{3.4.11}$$

$$f_E = \frac{p(-1+\alpha^2)+1}{1+\alpha} x_S + \frac{\alpha}{1+\alpha} x_E \tag{3.4.12}$$

である．これのレプリケータダイナミクスを考えると，

$$\dot{x_S} = x_S(f_S - \bar{f}) \tag{3.4.13}$$

$$\dot{x_E} = x_E(f_E - \bar{f}) \tag{3.4.14}$$

である．$\bar{f}$ は平均適応度 $f_S x_S + f_E x_E$ である．

これの平衡点 x_S^* は $x_S^* = 1, 0$ である．$x_S^* = 1$ は

$$\frac{\alpha^2 + \alpha - 1}{\alpha^2 - 1} < p \tag{3.4.15}$$

のとき安定である．つまり，種 S が支配的になる．このときの成功率 r_1^* は

$$r_1^* = \frac{2\alpha}{1+\alpha} \tag{3.4.16}$$

である．

$x_S^* = 0$ は

$$\frac{\alpha^2+\alpha-1}{\alpha^2-1} > p \tag{3.4.17}$$

のとき安定である．つまり，種 E が支配的になる．このときの成功率 r_2^* は

$$r_2^* = \frac{2\alpha}{(1+\alpha)^2} \tag{3.4.18}$$

である．

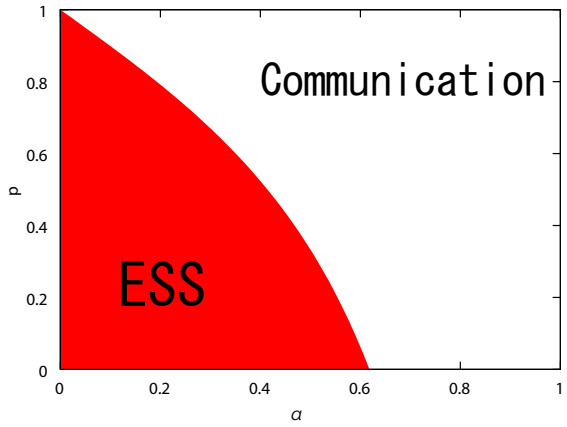

図 3.4.2: α，p に関してコミュニケーションが進化する領域（Communication）と進化せず種 E のみになる領域（ESS）．

図 3.4.2 に α，p に関して平衡点が安定な領域を，図 3.4.3 に $p = 0.5$ のときの安定な平衡点の成功率を示す．α，p が大きいと，種 S が支配的になり，コミュニケーションは進化する．α，p が小さいと，種 E が支配的になり，コミュニケーションは進化しない．p に関しては，p が大きいと種 E とのゲームにおいて有利になるため，種 E の侵入を防ぎやすくなるためである．α に関してはそれが大きいと，種 S 内で高い利得を得ることができ，種 E の侵入を防ぐことができるが，α が小さいと譲りがちな（大きい i の）種が少なくなるため，種 S 内の利得が低くなり，種 E が侵入しやすくなるためであると考えられる．

3.4.3 コミュニケーション戦略と純粋戦略の混在集団

コミュニケーション戦略のほかに純粋戦略 A と B の種（以下，種 A，種 B）が存在することを考える．種 A，B の割合を x_A，x_B とする．$\sum_{i=1}^{N} x_i + x_A + x_B = 1$

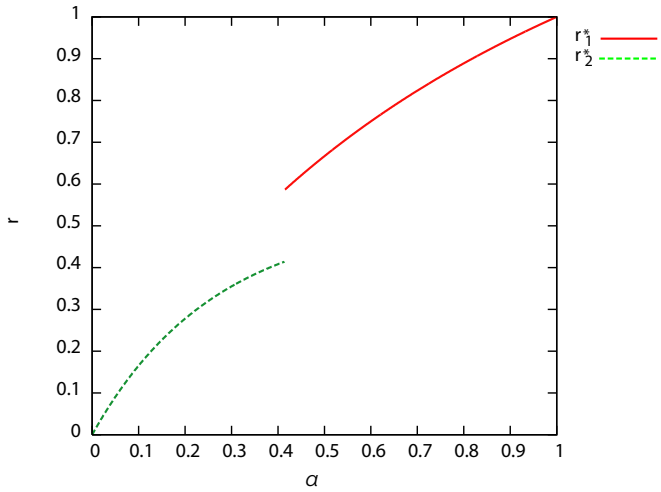

図 3.4.3: $p = 0.5$ における安定な平衡点の成功率.

である．ここで前節と同様に，種 $1, 2, \ldots, i, \ldots, N$ が種 A，B に対して確率 p で A，確率 $1-p$ で B を選択すると仮定し，それらをひとつの種 S として扱い，それの集団中の割合を x_S と書く．$x_S + x_A + x_B = 1$ である．

すると種 S と種 A，B の期待利得 f_S，f_A，f_B は，

$$f_S = \alpha x_S + \alpha(1-p)x_A + p x_B \tag{3.4.19}$$

$$f_A = (1-p)x_S + x_B \tag{3.4.20}$$

$$f_B = \alpha(p x_S + x_A) \tag{3.4.21}$$

である．

これのレプリケータダイナミクスを考えると，

$$\dot{x_S} = x_S(f_S - \bar{f}) \tag{3.4.22}$$

$$\dot{x_A} = x_A(f_A - \bar{f}) \tag{3.4.23}$$

$$\dot{x_B} = x_B(f_B - \bar{f}) \tag{3.4.24}$$

である．$\bar{f}$ は平均適応度 $f_S x_S + f_A x_A + f_B x_B$ である．

以下では安定になりうる平衡点 x_S^*，x_A^*，x_B^* とその安定性について述べる．

$$(x_S^*, x_A^*, x_B^*) = (1, 0, 0) \tag{3.4.25}$$

は $1 - \alpha < p$ のとき安定．このときのゲームの成功率 r_1^* は

$$r_1^* = \frac{2\alpha}{1+\alpha} \tag{3.4.26}$$

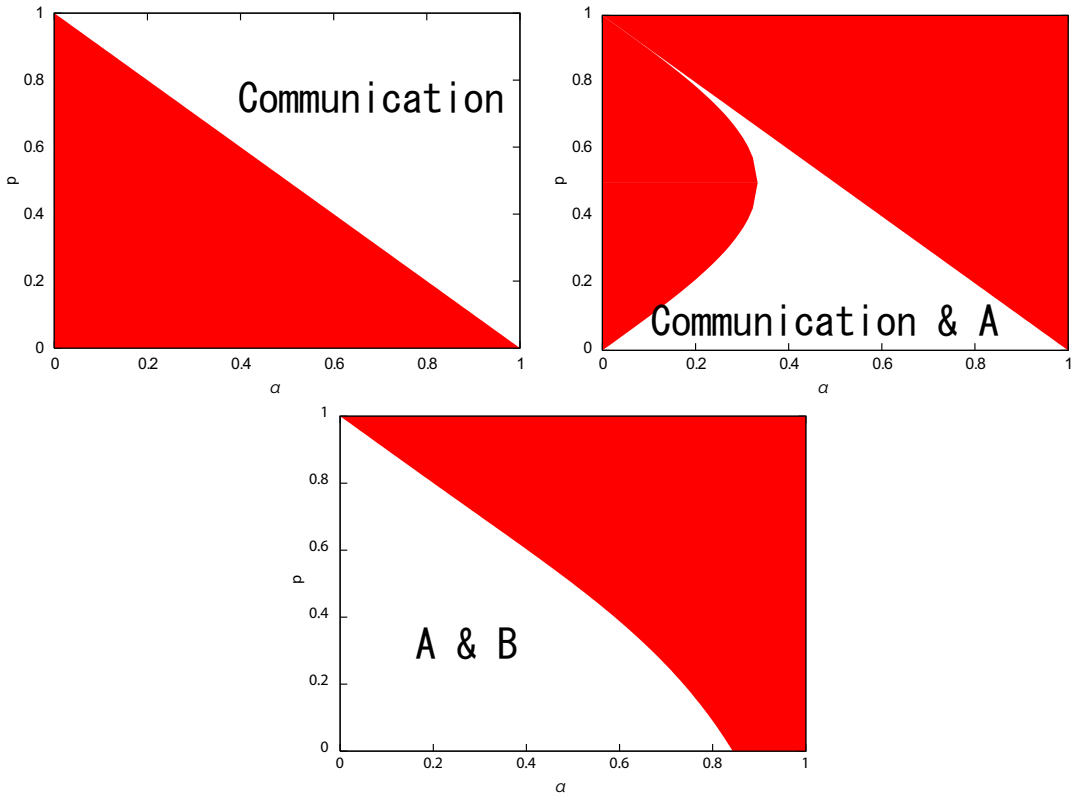

図 3.4.4: α，p に関してコミュニケーション戦略のみになる領域（左上，式 3.4.25 の平衡点），コミュニケーション戦略と種 A が共存する領域（右上，式 3.4.27 の平衡点），種 A と B が共存する領域（下，式 3.4.33 の平衡点）．白色部分が各平衡点の安定な領域を表す．

である．

$$(x_S^*, x_A^*, x_B^*) = (\frac{\alpha(p-1)}{\alpha p + p - 1}, \frac{p+\alpha-1}{\alpha p + p - 1}, 0)$$

これは，

$$1 - 2\alpha - 3\alpha^2 > 0 \tag{3.4.27}$$

$$p < \frac{1+\alpha-\sqrt{1-2\alpha-3\alpha^2}}{2(1+\alpha)}, \frac{1+\alpha+\sqrt{1-2\alpha-3\alpha^2}}{2(1+\alpha)} < p \tag{3.4.28}$$

$$p + \alpha < 1 \tag{3.4.29}$$

または，

$$1 - 2\alpha - 3\alpha^2 \leq 0 \tag{3.4.30}$$

$$p + \alpha < 1 \tag{3.4.31}$$

であればこの平衡点は安定である．このときのゲームの成功率 r_2^* は

$$r_2^* = \frac{2\alpha(p-1)(p(\alpha^2-p+2)-1)}{(1+\alpha)(\alpha p+p-1)^2} \tag{3.4.32}$$

である．

$$(x_S^*, x_A^*, x_B^*) \quad = \quad (0, \frac{1}{1+\alpha}, \frac{\alpha}{1+\alpha}) \tag{3.4.33}$$

は

$$2\alpha^2(p-1)(2+(p-2)p) - 2(p-1)(1+(p-1)p) - \alpha(p(5+(p-3)p)-1) > 0 \tag{3.4.34}$$

のとき安定である．このときのゲームの成功率 r_3^* は

$$r_3^* = \frac{2\alpha}{(1+\alpha)^2} \tag{3.4.35}$$

である．

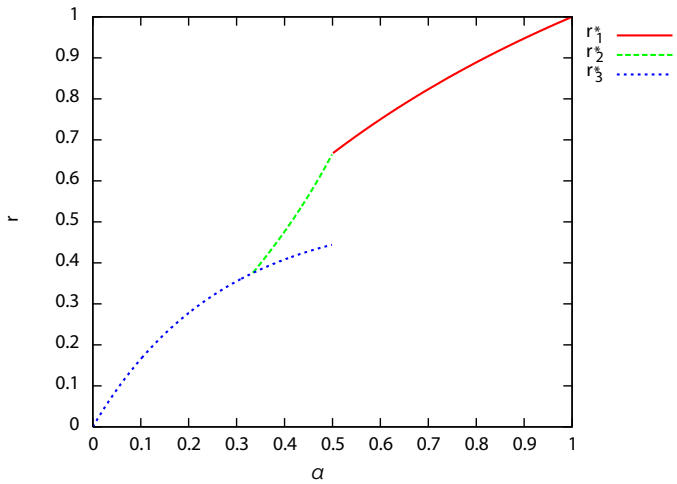

図 3.4.5: $p = 0.5$ における安定な平衡点の成功率．

図 3.4.4 に各平衡点が安定な範囲の α，p を，図 3.4.5 に $p = 0.5$ のときの安定な平衡点の成功率を示す．複数の平衡点が安定な領域ではどちらの平衡点になるかは初期の戦略の分布に依存する．α，p が大きければ，種 S 内で高い利得を得ることができ，種 S はコミュニケーションをしない種 A，B を排除できる（式 3.4.25 の平衡点）．α が小さくても，p が極端な値のときは種 S は種 A と共存できる（式

表 3.5.1: 2×2 ゲームの利得行列

	A	B
A	P	T
B	S	R

3.4.27 の平衡点）．これは，p が大きければ種 A に支配されることを防ぐことができ，p が小さいと種 A とのゲームに成功しやすくなるためと考えられる．α，p が小さく，p が上記のような値でない場合，種 S 内の利得はさらに低くなり，種 S は種 A と共存することができなくなり種 A，B に排除される（式 3.4.33 の平衡点）．

3.4.4 解析結果のまとめ

連続更新モデルと不連続更新モデルの収束型で獲得されたコミュニケーションシステムを各個体が持っていると仮定して，そのコミュニケーションシステムの進化的な安定性を解析した．その結果，コミュニケーションシステムを持たない種（種 E や種 A，B）が存在する場合，α が小さいと，それらの種が支配的になりコミュニケーションは進化しないことがわかった．そして，コミュニケーションが進化する場合としない場合は公平度 α に関して急激に起こる．ここからエージェントベースモデルの進化おいても，α の大小によって進化の結果がコミュニケーションが進化する場合としない場合に明確に分かれる現象が内在しており，それは合図を示すエージェント同士で高い適応度を獲得でき，合図を示さないエージェントを排除できるかできないかによると考えられる．ただし，そのような境界付近では摂動（選択の揺らぎや突然変異など）の影響が大きい [19] ため，本節で示したものほどその境界は明確ではない．

3.5 ゲーム構造の一般化

本節ではコミュニケーションが進化可能なゲームの構造について知るために，あらゆるゲーム構造について，3.3 節の不連続更新モデルを用い進化シミュレーションを行う．

3.5.1 設定

あらゆるゲーム構造におけるシグナリングの効果を可視化するために，利得行列（表 3.5.1）の P，R，S，T を次の式に従って与える．次式の表記により，図 3.5.1

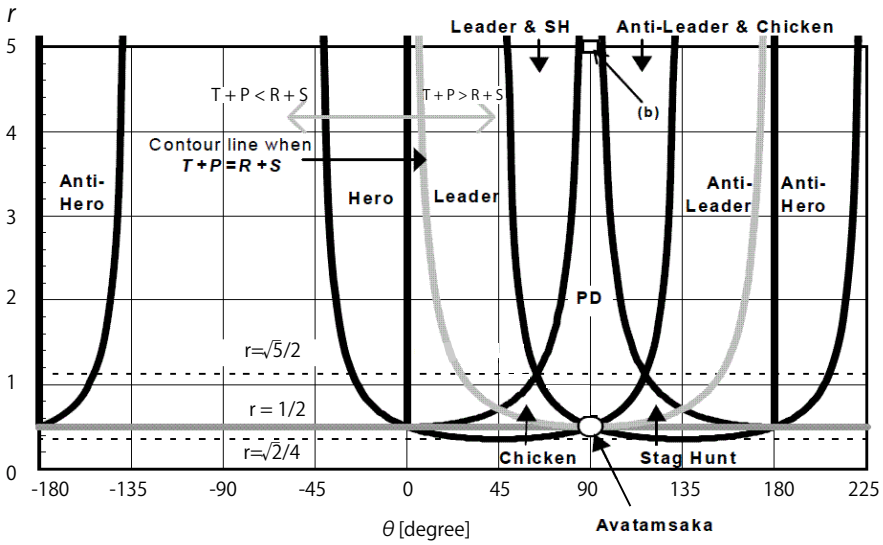

図 3.5.1: 2×2 ゲームの領域（[52] より一部改変して引用）．PD は囚人のジレンマゲーム，Chicken はチキンゲーム，Hero は Hero ゲーム，Leader は Leader ゲーム，Stag Hunt（SH）は鹿狩りゲーム，Avatamsaka は華厳ゲームを表す．Anti-Hero, Anti-Leader はそれぞれ Hero，Leader ゲームの T を $-S$，S を $-T$ に置き換えたものであり，広義の鹿狩りゲームに分類される．

のように $r = r_2/r_1$ と θ（deg）の 2 変数ですべてのゲーム構造を表すことができる（x_0 は解可能域がシフトするだけで P，R，S，T の相対関係上意味が無い）[52].

$$P = x_0 - 0.5r_1cos(45) \tag{3.5.1}$$

$$R = x_0 + 0.5r_1cos(45) \tag{3.5.2}$$

$$S = x_0 + r_2cos(45+\theta) \tag{3.5.3}$$

$$T = x_0 + r_2sin(45+\theta) \tag{3.5.4}$$

これら 2 変数によるゲーム空間は図 3.5.1 のようになる．ゲーム名のついていない領域はジレンマのないトリビアルゲームである．この表記において，$0 << r$（$r_1 << r_2$），$0 \leq \theta \leq 90$（または $-90 \leq \theta \leq 0$），$x_0 = 0$ の領域のとき，3.3 節で用いたゲームとおおまかに対応する．

以上のようにしてあらゆるゲーム構造について 3.3 節と同様に進化実験を行った．設定は基本的に 3.3 節と同様である．ただし，世代数は 5000，交渉期間 D は 100，集団内の対戦は各エージェントが集団中のランダムな相手と 6 回対戦し，それの平均利得を GA の適応度とするとした．そして，r は 0 から 3.4 まで 0.2 刻み（$r_1 = 1$ に固定し，r_2 を変えた）で，θ は -180 から 180 まで 5 刻みで変えて，それぞれ 5000 世代進化させた．x_0 は 0 とした．各 r，θ について進化を 20 試行ずつ行った．

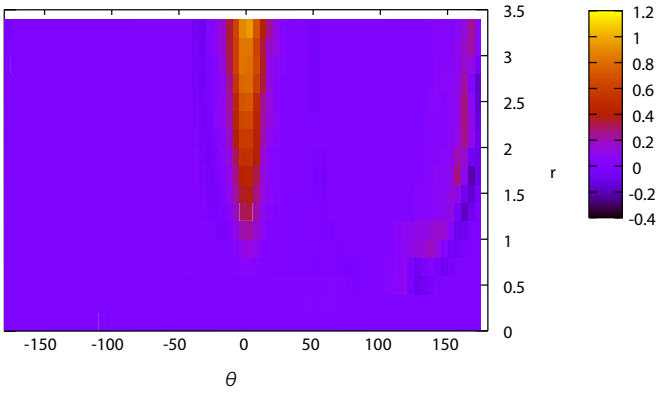

図 3.5.2: コミュニケーションありとなしの場合の適応度差 f_d.

3.5.2 節の結果はこの 20 試行に関する平均である．各図中の誤差棒はそれら平均値を計算した試行に関する標準偏差である．

3.5.2 結果

進化結果の基本的傾向を知るために，図 3.5.2 に 4000 世代から 5000 世代における適応度の平均値から，純粋戦略の進化的な平衡点[4]における適応度を引いた値 f_d を示す．後者はコミュニケーションをしない場合の進化的平衡点であるため，$f_d > 0$ ならばシグナリングが適応度に関して有効に働くように進化したと言える．同図と図 3.5.1 を比較すると，Hero，Leader ゲームの一部の領域でのみ，コミュニケーションが進化したことがわかる．Leader ゲームは $T > R$，$S > P$，$T + S > 2R$，$T > S$（一方が指導者（A），他方が服従者（B）なる役割分担ができればよいが両者とも指導者になろうとするインセンティブがあるため生じるジレンマ），Hero ゲームは $T > R$，$S > P$，$T + S > 2R$，$S > T$（一方がヒーロー（B），他方がそれを受け入れる者なる役割分担ができればよいが両者ともヒーローになろうとするインセンティブがあるため生じるジレンマ）というゲームである [51]．Hero，Leader ゲームは戦略の組み合わせが非対称のときに高い利得 T，S が得られる（これらはナッシュ均衡解である）が，$|\theta|$ に応じた利得差が T と S にあり，対立が存在するという，3.3 節で用いたゲームとよく似た性質を持つ（$0 << r$ とすればほぼ同じになる）．そのため，ゲーム前に両者が交渉することによって，戦略の選択を調整し均衡解の達成を促すようにコミュニケーションが進化したと考えられる．

上記に関して詳細に考察する．そのために，コミュニケーションが進化した領域の一部（$r = 3.2$，$-50 \leq \theta \leq 50$）について，f_d を図 3.5.3，利得 P，R，S，T を図 3.5.4，ゲーム結果の頻度を図 3.5.5 に示す．ゲーム結果の頻度は最終世代の

[4]戦略 A の初期頻度を $0.5 + m$（m は平均 0，標準偏差 0.5×10^{-2} のガウス分布に従う乱数）で与えたレプリケータ方程式 [22] によって求めた．

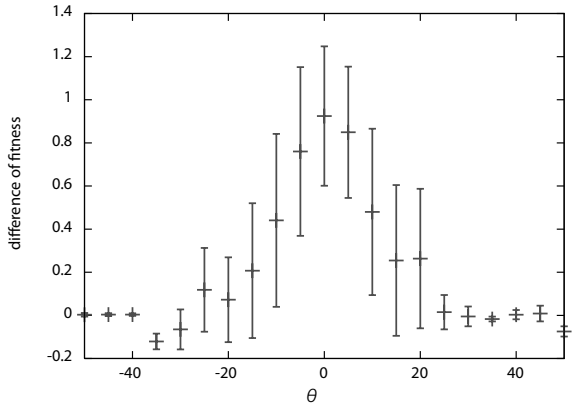

図 3.5.3: コミュニケーションありとなしの場合の適応度差 f_d.

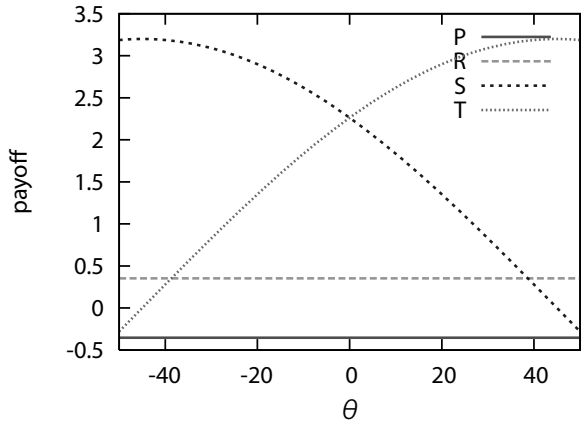

図 3.5.4: 利得の変化.

エージェントを用いて計算した．P，R より T，S の利得が高く，T と S の利得差が小さい場合（$|\theta|$ が小）にコミュニケーションは進化した（図 3.5.3，図 3.5.4）．この場合のゲーム結果は，両者が異なった戦略を選択した頻度が高くなった（図 3.5.5）．そのため，均衡解の達成が促すようなコミュニケーションが進化し，高い適応度を獲得できたと思われる．

一方，T と S の利得差が大きくなる（$|\theta|$ が大）と，P，R より T，S の方が高い利得であるにもかかわらず，コミュニケーションは進化しなかった（図 3.5.3，図 3.5.4）．このとき，両者が同じ戦略を選択した頻度が高くなった（図 3.5.5）．これは，均衡解が達成されても，そのときの利得差が大きいと一方の個体（$\theta > 0$ であればBを選択した個体）が進化的に不利になるので，利得差が大きい領域では，上記のようなコミュニケーションは進化しなかったと思われる．

以上のように，本モデルでは Hero，Leader ゲームの一部の領域のみコミュニケーションが進化することが示された．Hero，Leader ゲームは戦略の組み合わせ

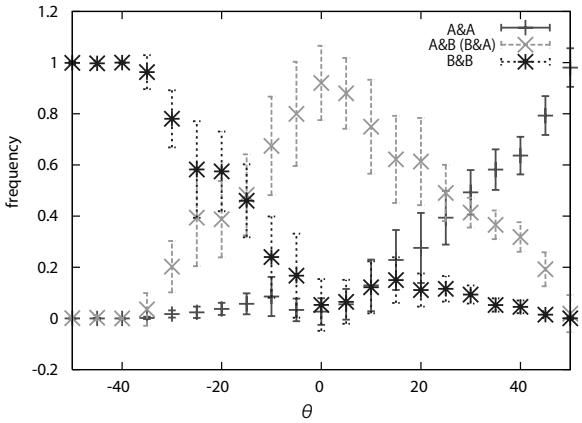

図 3.5.5: 各ゲーム結果の頻度.

が非対称のときに高い利得が得られるが，パラメータに応じた利得差が個体間にあり，対立が存在するという性質を持つ．これは3.3節で用いたゲームとよく似た性質を持つ領域である．そして，3.3節と同様に対立度の低いときはコミュニケーションは進化し，対立度が高くなると進化しなくなった．

以上から，本モデルの場合には戦略の選択を調整するためのみコミュニケーションが進化可能であると考えられる．他の領域でコミュニケーションが進化するためには，例えば，他個体の過去の戦略に関する記憶を持つ [51] など，本モデルで仮定していない認知機能をエージェントが持つ必要があると思われる．

3.6 まとめ

本章では，mindreading と manipulation に基づいた言語・コミュニケーションの進化の成立基盤を検討することを目的として，2 者の衝突回避行動を題材としたエージェントベースモデルを設計し，進化シミュレーションを行った．その結果，次のような 2 種類の動的なコミュニケーションが進化することが示された．

ひとつは，一方がシグナルを途中で変更することにより自分の譲歩の意図を示し（manipulation），他方がそれを理解する（mindreading）と解釈できるものである．これによって両者共に相手がどのような行動をしようとしているかを知ることができ，行動を調整することができた．このタイミングは遅いほど高利得が期待できるが，両者ともぎりぎりまで譲らないとゲームが失敗するリスクがある．このトレードオフのために集団が多様化し，このコミュニケーションが成立する．ただし，両者の対立度が大きいとこのコミュニケーションは進化しない．このコミュニケーションの出現は，連続的な値を取るシグナルから意図を示す合図への記号化，あるいは，同時双方向の相互作用から一方が意図を示すという話し手と聞き手の役割分担化と解釈することも可能である．この意味では，従来の計算論

的言語進化モデルが前提としている言語・コミュニケーションの進化的基盤の一部を創発したといえるであろう．また，このようなコミュニケーションと繰り返しゲームにおいて交互にAとBを出し合って共に高得点を得る互恵関係（CAD型のST互恵[41]）の関連が指摘されており[51]，興味深い．これに関する考察は今後の検討課題としたい．

このコミュニケーションでは，進化する場合としない場合の間に，対立度に関して明確な境界が存在することが示唆された．この境界について検証するために，進化したコミュニケーションシステムを単純化した戦略とコミュニケーションをしない戦略との混在集団を構成し，それのレプリケータダイナミクスの数理解析を行った．その結果，対立度がある値より大きくなると，コミュニケーション戦略同士の利得が低下し，コミュニケーション戦略が非コミュニケーション戦略に支配されてしまうということが示された．この事実は，この境界の存在を間接的に説明するものである．

もうひとつのコミュニケーションは，シグナルや戦略の変更に関する制約が小さい設定において進化するもので，両者の共振という動的な振る舞いを巧妙に利用したものである．これは，記号と意味の対応付けというような静的な言語観とは大きく異なるものであり，また，このコミュニケーションが進化した集団のゲーム成功率が大きい点も注目すべきであろう．これはMarocco らが創発させたロボット協調行動における振動型信号[37]と同様，鳥の一部に見られる鳴き声のデュエット[14]を思わせる．

動物のシグナルの研究においては，対立度が非常に低い場合でしかコミュニケーションは進化しないとされてきた[48, 49]．ただし，それらは威嚇のような単純なシグナルを研究対象としていた．本研究では，シグナリングに関して比較的自由度の高い計算論的モデルを構成した結果，振動型のような巧妙なコミュニケーションが観察可能となり，それらは，対立度が比較的大きい場合でも進化しうることがわかった．本論文で示された収束型と振動型以外にもコミュニケーションのタイプが存在するかどうかは興味深いテーマだと思われる．また，交渉期間，シグナルの表現法などに関して検討し，より一般的で最小のモデルによる検討をすることや，得られた知見を実際の生物のシグナルの進化に関する知見と比較検討することも今後の課題である．

第4章　結論

本研究では，他者の心・行動を推測する能力・それに基づく振る舞いや，その能力や振る舞い基づいた社会的相互作用の進化ダイナミクスに関して構成論的手法を用いて，以下のふたつの観点から議論してきた．そして，それぞれについて，他者の心の推測をすることが進化する社会的環境の条件と，それが進化した集団における各個体の振る舞いや社会的相互作用について示した．

ひとつは，複雑な社会的相互作用の要因のひとつであろう心の推測における再帰性に焦点を当てた．そして，再帰的推測とそれに基づく振る舞いを仮定し，それの進化に関するエージェントベースモデルを構築し，シミュレーション実験を行った．その結果，再帰的な推測の進化は社会的環境（相互作用の強さ）に以下のように依存することが示された．相互作用が弱ければ再帰的の推測において他者を起点とした推測をするように進化し，強ければ自分を起点とした推測をするように進化した．そして，相互作用の強さが中間的なとき，社会手相互作用の場面において深く推測し合うように進化した．これは，再帰的推測における起点が奇数と偶数で異なり，それによって再帰レベルの適応度が非対称になることに起因すると考えられる．

もうひとつは，他者に関して推測すること（mindreading）と，それを前提として他者を操作しようとする（manipulation）ような相互作用に着目し，それに基づいた言語・コミュニケーション基盤の進化に焦点を当てた．そして，2 者の衝突回避行動を題材としたエージェントベースモデルを設計し，進化シミュレーションを行った．その結果，譲る意図を意味する合図を示すタイミングで調停する「収束型」と両者のシグナルの共振で調停する「振動型」というふたつのコミュニケーションの型が進化した．収束型のコミュニケーションは，一方が自分の譲歩の意図を示し（manipulation），他方がそれを理解する（mindreading）と解釈できるものである．また，収束型の進化は社会的環境（対立度）に次のように依存することが示された．対立度が低い場合にはこのコミュニケーションは進化し，進化する場合としない場合には対立度による明確な境界が存在した．この境界は，対立度がある値より大きくなると，コミュニケーションをする個体同士の利得が低下し，コミュニケーションをしない（相手に関係なく独立に行動を決定する）個体に排除されてしまうからであると思われる．

心の理論を含む社会的知能は社会的環境から受ける選択圧が（それらに必要な）大きな脳に関するコストよりも大きかったため，脳が増大し社会的知能が進化したと考えられる [70]．本研究ではふたつの研究共にそのようなコスト（脳を維持す

るコスト，計算コストなど）を考えず，他者に関する推測する能力の進化を検討した．そのようなコストを考えない場合でも，社会的環境の影響により心・行動の推測能力は進化するとき・しないときの両方があるうることが示された．他者の心・行動を推測し自分の行動を決定するということは，結果的に自分の取り得る戦略の幅を狭める [59]．そのため，うまく立ち回れなくなることもある．本研究で考えたような社会的な状況では，相手が譲らないと考えて効率の悪い譲る行動をする，相手が譲ることを考えてリスクの高い譲らない行動をするなどは，社会的環境の状態によっては進化的に不利になる．そのため，上記のような進化ダイナミクスを示したと思われる．

社会的相互作用やそれの進化に関する興味は大きくふたつに分けることができると思われる．それを実現する個体内部の処理（例えば [75, 35] など）と，社会的相互作用のダイナミクス（例えば [25, 10, 33] など）である．前者に焦点を当てるのならば，内部の処理を明確に観察できるように，内部の処理に関してある程度の仮定をする必要があるだろう．一方，後者に焦点を当てるのならば，内部の処理に関する仮定が強いほど，その自由度は低くなってしまうため，仮定は少ない方がよいと思われる．第 2 章では前者に，第 3 章では後者に焦点を当てて，それぞれ上で述べたようにモデル化し，それぞれの焦点について議論した．ただし，複雑な相互作用がどのような内部の処理によって実現されるかは，社会的相互作用を理解するために重要であろう．そのため，両者の長所をうまく取り込んだモデルの構築が今後の課題である．

付 録A　用語・記号の定義

本論文で頻出する用語・記号の定義を以下にまとめる．まず，主に第2章について示す．

- 志向姿勢: 振る舞いを予測しようとする対象に対して，志向性を示すような信念や欲求などの心的状態を持つ行為者として扱おうとする姿勢のこと．
- 再帰レベル: 心の推測における再帰的な推測の深さ．何かについて信念を持っている（例えば，私はXが欲しい）状態をレベル0とし，他者についてそのように考えている状態をレベル1とするように再帰的に定義する．
- r: エージェントの視界の広さ（扇形の視界の半径）．

以下に主に第3章の用語・記号に関する定義を示す．

- コミュニケーション: 一方の行動が他方の内部状態または行動に影響を与えること．
- シグナル: コミュニケーションの媒体になりうるもの．
- シグナリング: シグナルを送信する行為．
- 記号：離散的表現のシグナル．
- 進化的に安定な戦略（ESS）: 集団をあるひとつの戦略が占めているとき，他の全ての戦略をその戦略が排除できるならば，それはESSである．
- α: 表3.2.1のゲームにおける公平度．
- a: 交渉期間後のエージェントの戦略を表すエージェントの状態．$a \leq 0$ならば戦略A，$a > 0$ならば戦略Bを表す．
- ϕ：交渉期間中にエージェント間で送受信されるシグナル．戦略とは明示的な関連を持たない．
- I：交渉期間中のエージェントの内部状態．
- D：交渉期間の最大ステップ数

- x_i: コミュニケーション戦略 i の頻度．i はコミュニケーションに関するパラメータを表す．
- x_S: 全てのコミュニケーション戦略の頻度（$x_S = \sum_{i=1}^{N} x_i$）．
- x_E: ESS の頻度．
- x_A，x_B: それぞれ純粋戦略 A，B の頻度．
- p: コミュニケーション戦略がコミュニケーションをしない戦略（ESS，純粋戦略）とゲームをするときに A を選択する確率．
- r^*: 進化的な平衡点におけるゲームの成功率．安定な平衡点が複数存在する場合，下付き文字により区別する．
- r，θ: あらゆるゲーム構造を 2 次元に写像する（式 3.5.1-3.5.4）ときに使用するパラメータ．

謝辞

名古屋大学大学院情報科学研究科教授有田隆也先生には絶えず熱心なご教授をいただきました．先生の熱心なご指導のおかげで，自由に研究に打ち込むことができました．深く感謝致します．

名古屋大学エコトピア科学研究機構教授渡辺崇先生，名古屋大学大学院情報科学研究科准教授川合伸幸先生には論文の草稿段階から完成に至るまで有益なご教示を数多くいただきました．深く感謝致します．

名古屋大学大学院情報科学研究科助教鈴木麗璽先生には，日頃から研究の進め方や悩みについて親身になって相談にのっていただきました．深く感謝致します．

本研究は科研費（18・6628）の助成を受けたものです．

また，研究を進めるにあたり，有田研究室の諸氏には日夜議論にお付き合いいただきました．特に，中里研一氏，赤石仁氏，中道義之氏，Artur Matos 氏，一ノ瀬元喜氏，佐藤竜也氏，中井淳一氏，岩瀬雄祐氏，小島和晃氏には，幅広く議論していただいただけでなく，幾度となく励ましの言葉をいただきました．深く感謝致します．

最後に，これまで私をあたたかく応援してくれた家族に心から感謝します．

参考文献

[1] L. Aiello and P. Wheeler. The expensive tissue hypothesis: the brain and the digestive system in human and primate evolution. *Current Anthropology*, Vol. 36, No. 2, pp. 199–221, 1995.

[2] D. Barash. *The Survival Game: How Game Theory Explains the Biology of Cooperation and Competition*. Owl Books, reprint edition, 2004.

[3] J. Barkow. *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture*. Oxford University Press, USA, October 1995.

[4] R. Byrne. *The Thinking Ape: The Evolutionary Origins of Intelligence*. Oxford University Press, USA, March 1995.

[5] R. Byrne and A. Whiten. *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans (Oxford Science Publications)*. Oxford University Press, USA, September 1989.

[6] J. Call and M. Tomasello. Does the chimpanzee have a theory of mind? 30 years later. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 12, No. 5, pp. 187–192, 2008.

[7] M. Corballis. Recursion as the key to the human mind. In K. Sterelny and J. Fitness, editors, *From mating to mentality: Evaluating evolutionary psychology*, pp. 155–171. Psychology Press, New York, 2003.

[8] D. Dennett. *The Intentional Stance*. MIT Press, Cambridge, 1987.

[9] D. Dennett. The intentional stance in theory and practice. In Richard Byrne and Andrew Whiten, editors, *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*. Oxford University Press, New York, 1988.

[10] E. Di Paolo. Behavioral coordination, structural congruence and entrainment in a simulation of acoustically coupled agents. *Adaptive Behavior*, Vol. 8, No. 1, pp. 27–48, January 2000.

[11] R. Dunbar. The social brain: Mind, language, and society in evolutionary perspective. *Annual Review of Anthropology*, Vol. 32, , October 2003.

[12] R. Dunbar. On the origin of the human mind. In P. Carruthers and A. Chamberlain, editors, *The Evolution of Mind*, pp. 238–253. Cambridge University Press, 2000.

[13] R. Dunbar. The social brain hypothesis. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, Vol. 6, No. 5, pp. 178–190, 1998.

[14] S. Farabaugh. The ecological and social significance of duetting. In D. E. Kroodsma and E. H. Miller, editors, *Acoustic Communication in Birds (Vol. 2)*. Academic Press, 1982.

[15] J. Farrell. Cheap talk, coordination, and entry. *The RAND Journal of Economics*, Vol. 18, No. 1, pp. 34–39, 1987.

[16] J. Flombaum and L. Santos. Rhesus monkeys attribute perceptions to others. *Current Biology*, Vol. 15, No. 5, pp. 447–452, 2005.

[17] B. Galantucci. An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cognitive Science*, Vol. 29, No. 5, pp. 737–767, 2005.

[18] P. Gardenfors. Cooperation and the evolution of symbolic communication. In Kimbrough D. Oller and Ulrike Griebel, editors, *Evolution of Communication Systems: A Comparative Approach*, pp. 237–256. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.

[19] H. Haken. *An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology , Chemistry and Biology, 2nd ed.* Springer, 1978.

[20] H. Haken. *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices.* Springer, 1983.

[21] M. Hauser and D. Nelson. Intentional signaling in animal communication. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 6, pp. 186–189, 1991.

[22] J. Hofbauer and K. Sigmund. *Evolutionary Games and Population Dynamics.* Cambridge Univ Press, 1998.

[23] N. Humphrey. The social function of intellect. In P. P. G. Bateson and R. A. Hinde, editors, *Growing Points in Ethology*, pp. 303–317. Cambridge University Press, 1976.

[24] H. Iizuka and T. Ikegami. Adaptive coupling and intersubjectivity in simulated turn-taking behaviour. In *Advances in Artificial Life: 7th European Conference ECAL2003 Proceedings*, pp. 336–345. Springer, 2003.

[25] H. Iizuka and T. Ikegami. Adaptability and diversity in simulated turn-taking behavior. *Artificial Life*, Vol. 10, No. 4, pp. 361–378, 2004.

[26] H. Imamizu, T. Kuroda, S. Miyauchi, T. Yoshioka, and M. Kawato. Modular organization of internal models of tools in the human cerebellum. *PNAS*, Vol. 100, No. 9, pp. 5461–5466, 2003.

[27] A. Jolly. Lemur social behavior and primate intelligence. *Science*, Vol. 153, No. 3735, pp. 501–506, 1996.

[28] M. Kawato. Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 9, pp. 718–727, 1999.

[29] P. Kinderman, R. Dunbar, and R. Bentall. Theory-of-mind deficits and causal attributions. *British Journal of Psychology*, Vol. 89, pp. 191–204, 1998.

[30] S. Kirby. Natural language from artificial life. *Artificial Life*, Vol. 8, No. 2, pp. 185–215, 2002.

[31] G. Knoblich and S. Jordan. Constraints of embodiment on action coordination. In L. R. Gleitman and A. K. Joshi, editors, *Proceedings of the Twenty-Second Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 764–769, 2000.

[32] J. Krebs and R. Dawkins. Animal signals: Mindreading and manipulation. In *Behavioural ecology: An evolutionary approach*, pp. 380–402. Blackwell, Oxford, 1984.

[33] L. Liebovitch, V. Naudot, R. Vallacher, A. Nowak, L. Buiwrzosinska, and P. Coleman. Dynamics of two-actor cooperation - competition conflict models. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 387, No. 25, pp. 6360–6378, November 2008.

[34] A. Lorincz, V. Gyenes, M. Kiszlinger, and I. Szita. Mind model seems necessary for the emergence of communication. *Neural Information Processing - Letters and Reviews*, Vol. 11, No. 4-6, pp. 109–121, 2007.

[35] T. Makino and K. Aihara. Self-observation principle for estimating the other's internal state - a new computational theory of communication. Technical

Report METR 2003-36, Department of Mathematical Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo, October 2003.

[36] T. Makino and K. Aihara. Cooperative behavior of agents that model the other and the self in noisy iterated prisoners' dilemma simulation. In *Proceedings of 2005 4th International Conference on Development and Learning*, pp. 52–57, 2005.

[37] D. Marocco and S. Nolfi. Emergence of communication in teams of embodied and situated agents. In A. Cangelosi, Smith, and K. Smith, editors, *Proceeding of the VI International Conference on the Evolution of Language*, pp. 198–205, 2006.

[38] J. Miller and S. Moser. Communication and coordination. *Complexity*, Vol. 9, No. 5, pp. 31–40, 2004.

[39] M. Nowak. *Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life*. Belknap Press, September 2006.

[40] J. Perner and H. Wimmer. "John thinks that Mary thinks that..." attribution of second-order beliefs by 5- to 10-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology*, Vol. 39, No. 3, pp. 437–471, June 1985.

[41] P. Crowley. Dangerous games and the emergence of social structure: evolving memory-based strategies for the generalized hawk-dove game. *Behavioral Ecology*, Vol. 12, No. 6, pp. 753–760, November 2001.

[42] D. Premack. "Does the chimpanzee have a theory of mind" revisited. In *Machiavellian Intelligence: Social Expertise and the Evolution of Intellect in Monkeys, Apes, and Humans*, pp. 160–179. Oxford University Press, Oxford, 1988.

[43] D. Premack and G. Woodruff. Does the chimpanzee have a theory of mind?. *The Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 1, pp. 515–523, 1978.

[44] D. Premack. Is language the key to human intelligence?. *Science*, Vo.. 303, No. 5656, pp. 318–320, 2004.

[45] N. Sebanz, H. Bekkering, and G. Knoblich. Joint action: bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 10, No. 2, pp. 70–76, February 2006.

[46] J. Silk, E. Kaldor, and R. Boyd. Cheap talk when interests conflict. *Animal Behaviour*, Vol. 59, pp. 423–432, February 2000.

[47] J. Smith. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge University Press, 1982.

[48] J. Smith. Must reliable signals always be costly? *Animal Behaviour*, Vol. 47, No. 5, pp. 1115–1120, May 1994.

[49] J. Smith and D. Harper. *Animal Signals*. Oxfold University Press, 2003.

[50] J. Smith and G. Price. The logic of animal conflict. *Nature*, Vol. 246, No. 5427, pp. 15–18, November 1973.

[51] J. Tanimoto. Emergence of cooperation supported by communication in a one-shot 2 x 2 game. IEEE Congress on Evolutionary Computation 2007, September 2007.

[52] J. Tanimoto and H. Sagara. Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game. *Biosystems*, Vol. 90, No. 1, pp. 105–114, 2007.

[53] A. Whiten and R. Byrne, editors. *Machiavellian Intelligence II: Extensions and Evaluations*. Cambridge University Press, September 1997.

[54] C. Zimmer. How the mind reads other minds. *Science*, Vol. 300, No. 16, pp. 1079–1080, 2003.

[55] 有田隆也. 人工生命. 医学出版, 2002.

[56] 池上高志. 動きが生命をつくる—生命と意識への構成論的アプローチ. 青土社, 2007.

[57] 石原英樹, 金井雅之. 進化的意思決定 (シリーズ意思決定の科学). 朝倉書店, 2002.

[58] 伊藤昭. 心を読む能力—マルチプレイヤー囚人のジレンマゲーム—. 認知科学, Vol. 6, No. 1, pp. 77–81, 1999.

[59] 伊藤昭. コミュニケーションは心—「心の理論」と他者理解のモデル. 岡田美智男, 佐々木正人, 三嶋博之（編）, 身体性とコンピュータ, pp. 269–283. 共立出版, 2000.

[60] 伊藤昭, 大橋資紀, 寺田和憲. 非零和ゲームの強化学習: 相手の行動を読むプログラム. 同エージェントワークショップ & シンポジウム 2005 (JAWS 2005) 特別セッション 「HAI (Human Agent Interaction)」, 2005.

[61] 宇野良子, 池上高志. ジョイント・アテンション／予測と言語—志向性をそろえるメカニズム—. 認知言語学論考, Vol. 2, pp. 231–274, 2003.

[62] 小川秀司. 霊長類における同種間での他者理解の進化. 心理学評論, Vol. 40, No. 1, pp. 22–38, 1997.

[63] 小磯花絵. 会話における話者交替現象のメカニズムに関する一考察 (基研研究会「認知科学の数理的基礎づけに向けて」, 研究会報告). 物性研究, Vol. 77, No. 2, pp. 380–387, 2001.

[64] 澤口俊之. 脳と心の進化論. 日本評論社, 1996.

[65] 柴田克成, 伊藤宏司. 利害の衝突回避のための交渉コミュニケーションの学習と個性の発現—リカレントニューラルネットを用いたダイナミックコミュニケーションの学習—. 計測自動制御学会論文誌, Vol. 35, No. 11, pp. 1346–1354, November 1999.

[66] 泰地真弘人, 池上高志. ゲームにおける学習プレイヤーのダイナミクス. 認知科学, Vol. 6, No. 1, pp. 21–30, 1999.

[67] 銅谷賢治. 計算神経科学への招待 〜 脳の学習機構の理解を目指して 〜. サイエンス社, 2007.

[68] 橋本敬. 言語進化とはどのような問題か? 〜 構成論的な立場から. 第 18 回人工知能学会全国大会論文集, 1CS–2, 2004.

[69] 長谷川寿一. 心の進化: 人間性のダーウィン的理解. 科学, Vol. 67, No. 4, pp. 248–256, 1997.

[70] 長谷川寿一, 長谷川真理子. 進化と人間行動. 東京大学出版会, 2000.

[71] 林創. 「心の理論」の二次的信念に関わる再帰的な心的状態の理解とその機能. 京都大学大学院教育学研究科紀要, Vol. 47, pp. 330–342, 2001.

[72] 林創. 再帰的事象の認識とその発達に関する心理学的研究. 風間書房, 2008.

[73] 松沢哲郎. チンパンジー・マインド. 岩波書店, 1991.

[74] 松沢哲郎. 進化の隣人 ヒトとチンパンジー. 岩波書店, 2002.

[75] 横山絢美, 岡田浩之, 大森隆司, 石川悟, 長田悠吾. 自者と他者の双方向行動調節による社会的インタラクションのモデル化. 第 21 回人工知能学会全国大会論文集, 2C5–7, 2007.

[76] 早稲田大学複雑系高等学術研究所（編）. 身体性・コミュニケーション・こころ. 共立出版, November 2007.

関連発表文献

論文誌（査読付き）

1. 高野雅典，有田隆也. 動的シクナリングの進化に基づく言語の成立基盤の一検討. 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 8, pp. 2890-2899, 2008.

2. 高野雅典, 加藤正浩. 有田隆也. 心の理論における再帰のレベルの進化に関する構成論的手法に基づく検討. 認知科学, Vol. 12, No. 3, pp. 221-233, 2005.

国際会議（査読付き）

1. Masanori Takano and Takaya Arita. Asymmetry between Even and Odd Levels of Recursion in a Theory of Mind. *Proc. of ALIFE X (10th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems)*, pp. 405-411, 2006.

国内学会

1. 高野雅典，有田隆也. 不平等な調整ゲームにおける動的シグナリングの進化. 第 21 回人工知能学会全国大会論文集, 2C4-1, 2007.

2. 高野雅典，有田隆也. 不平等ゲームにおいて進化した動的なシグナリングによる行動の調整. 人工知能学会研究会資料，SIG-KBS-A604, pp. 77-82, 2007.

3. 高野雅典, 有田隆也. 視線の認識と制御の共進化に基づくコミュニケーションの成立に対する構成論的アプローチ. 数理モデル化と問題解決シンポジウム論文集, pp. 203-208, 2006.

4. 高野雅典, 有田隆也. 心の理論における再帰のレベルはいかに進化してきたか？. 人工知能学会第 6 回 AI 若手の集い資料集, pp. 62-65, 2005.

5. 高野雅典, 有田隆也. 群集の衝突回避行動モデルを用いた心の理論の進化シミュレーション. 第 32 回知能システムシンポジウム論文集, pp. 317-322, 2005.

その他

1. 高野雅典, 有田隆也. 心の理論における再帰のレベル・コミュニケーション基盤の進化に関する構成論的アプローチ. 玉川大学研究所若手の会第 29 回談話会, 2007.