

外生的資源制約を課した環境ジレンマゲームの普遍モデルに関する研究

脇山, 宗也

<https://doi.org/10.15017/1441289>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



平成 25 年 度

博 士 論 文

外生的資源制約を課した
環境ジレンマゲームの普遍モデルに関する研究

脇 山 宗 也

平成 25 年 10 月 21 日

—目次—

第1章 序論	- 1 -
1.1 社会的ジレンマと環境問題	- 1 -
1.2 環境問題に関する既往研究と研究概要	- 2 -
1.3 本論文の構成	- 3 -
第2章 環境問題の社会的ジレンマゲームのモデル化に関する文献研究	- 6 -
2.1 社会的ジレンマの定義	- 6 -
2.2 社会的ジレンマを構成する共有物	- 8 -
2.3 環境問題の定式化	- 10 -
2.4 本研究で取り扱う環境ジレンマの定式化	- 15 -
第3章 環境ジレンマゲームの応用（資源割り当て問題としてみた避難路 bottleneck 問題のゲーム論的アプローチ）	- 19 -
3.1 はじめに	- 19 -
3.2 モデル	- 20 -
3.2.1 フロアフィールド	- 20 -
3.2.2 衝突の効果	- 21 -
3.2.3 モデルのチューニング	- 22 -
3.3 平均場近似による避難口近傍の密度特性	- 24 -
3.4 障害物が流動係数に与える影響	- 29 -
3.5 結論	- 32 -
第4章 進化ゲームにおける適応プロトコルのローカリティに関する基本的検討	- 34 -
4.1 はじめに	- 34 -
4.2 モデルの概要	- 34 -
4.2.1 ゲーム構造の表記	- 34 -
4.2.2 エージェントの戦略	- 35 -
4.2.3 ゲーム対戦相手，戦略更新時の参照範囲の制限	- 35 -
4.2.4 数値実験	- 36 -
4.3 シミュレーション結果及び考察	- 37 -
4.3.1 ローカリティが存在しない場合 ($G=1, F=1$)	- 37 -
4.3.2 相関の無いローカリティが存在する場合	- 40 -
4.3.3 相関が有るローカリティが存在する場合	- 47 -
4.4 結論	- 48 -
第5章 外生的資源制約を課した環境ジレンマゲーム検証モデルの解析	- 50 -
5.1 はじめに	- 50 -
5.2 シミュレーションモデルの説明	- 50 -
5.2.1 ゲーム構造	- 50 -
5.2.2 エージェント	- 51 -

5.2.3 環境.....	- 52 -
5.2.4 エージェントの学習.....	- 53 -
5.2.5 均衡の条件.....	- 54 -
5.2.6 情報量.....	- 55 -
5.2.7 戦略の分類.....	- 56 -
5.3 数値計算概要.....	- 58 -
5.4 数値計算結果.....	- 58 -
5.4.1 $M=[-2.0,2.0,-8.0,8.0]$ ($r=2.0, \theta=90[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 58 -
5.4.2 $M=[-2.0,2.0,-2.4,2.4]$ ($r=0.6, \theta=90[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 62 -
5.4.3 $M=[-2.0,2.0,4.8,10.2]$ ($r=2.0, \theta=20[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 67 -
5.4.4 $M=[-2.0,2.0,-0.6,3.4]$ ($r=0.6, \theta=54[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 71 -
5.4.5 $M=[-2.0,2.0,-20.6,-9.6]$ ($r=2.0, \theta=160[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 75 -
5.4.6 $M=[-2.0,2.0,11.0,-3.0]$ ($r=2.0, \theta=-60[\text{deg}]$) における結果・考察.....	- 78 -
5.4.7 小括.....	- 82 -
5.4.8 M を連続的に変化させた場合の結果.....	- 84 -
5.4.9 資源の回復能力のパラメータに関する結果.....	- 88 -
5.4.10 サステナブル社会の創発要因に関する考察.....	- 93 -
5.4.11 2×2 ゲーム本体のジレンマ強度の影響.....	- 94 -
5.4.12 リスク回避性ジレンマ及びギャンブル性ジレンマの影響.....	- 96 -
5.5 結論.....	- 98 -
第6章 総括結論.....	- 108 -
6.1 総括.....	- 108 -
6.2 今後の展望.....	- 110 -

第1章 序論

1.1 社会的ジレンマと環境問題

日常生活における人々のささやかな欲求充足は、例えそれが小さなものであったとしても、多くの人々の行動が集積されることによって大きな社会問題にまで発展することがある。熱帯林の減少や砂漠化、あるいはオゾン層の破壊や地球の温暖化、酸性雨など、いわゆる「地球環境問題」と呼ばれる諸問題は、こうした社会問題の事例である。例えば、多くの人々にとって自動車の利用は何気ない日常的な行為に過ぎない。しかし、自動車から排出される二酸化炭素や硫黄分、窒素酸化物によって大気汚染はもとより、地球の温暖化や酸性雨の発生にも影響を与えている。近年は有害物質の除去技術の向上やハイブリット車や電気自動車の普及によってその影響は抑えられつつあるが、その影響はゼロになったわけではなく小さな影響の集積によって環境はダメージを受けているのである。また、途上国における貧困や急激な人口増加は、休耕地の短縮や無理な輪作、更には、焼畑による耕地の拡大を促進し、人口と共に増加した家畜たちによる貴重な植物資源の食べ荒らし、耕作機器の普及による必要燃料の増加などが重畳され森林の過度の伐採が加速している。

これらは、工業製品の製造・利用時において排出される有害物質の蓄積によって発生するハード的な問題でもあるが、一方でそれらを利用する人側の問題、即ちソフト側の問題と捉えることもできる。自身の利益・安全をより良いものになりたいという個人にとっての合理的な選択が、環境を保全するという行動と一致しているのであれば環境問題が発生しないが、その様なケースは非常に稀である。そのため、環境問題を解決するためには、個々人が多少の不利益を被ってでも社会的な利益を優先する行動が必要となる。しかし、社会的な利益を損なうべきではないと理解していたとしても、社会的な利益よりも自身の利益を優先させる抜け駆け行為は高確率で発生する。特に、その抜け駆け行為が社会や環境へもたらす影響が小さいほど、この抜け駆け行為は頻発する可能性が高い。また、この様な抜け駆けによって自分自身が不利益を被ってまでも社会的な利益を維持することに不平等を感じたりすることで、非協力的な行動を取る個人（所謂、フリーライダー）も出てきてしまい、最終的に環境問題が引き起こされる。この様な1人1人の行動の集積によって引き起こされる問題は、これまで社会的ジレンマという形で取り上げられ、多くの研究者によってその構造が研究されてきた。

こうした環境問題における社会的ジレンマは、Hardin が提唱した「共有地の悲劇」というエピソードで広く知られている^[1]。産業革命以前のイギリスの農村にはコモンズと呼ばれる共有地が存在しており、そこでは複数の農民が家畜を放牧することで糧を得ていた。Hardin はこの共有地で発生する社会的ジレンマを提唱している。

この共有地は、共有地を勝手に売り払うこと以外には何ら制約がなく、牛飼いたちは誰でも自由に牛を放牧することができたとする。この場合、より多くの利益を求める牛飼いたちは、当然できるだけ多くの牛を共有地に放牧しようとするだろう。Hardin によれば、牛飼いたちが共有地を自由に利用できる限り共有地の荒廃を防ぐことはできないという。なぜなら、自身の利益を最大化しようとする牛飼いは、次のように考えて合理的な選択を行うと考えられるからである。

①牛を1頭増やすことによって得られる収益は、すべて自分のものとして行うことができる。

②牛を1頭増やすことによって共有地が過放牧になったとしても、その被害は全ての牛飼いに分散される。従って、例え被害を受けるとしても損失は僅かなものにすぎない。

牛飼いは牛を 1 頭増やすことによる収益と損失とを比較し、合理的な判断をするならば、牛を増やしたことによる利益は全て自身のもとなるが、牛を育てるために必要な共有地の資源は全員で分担されるため、1 頭増やすことが唯一利益にかなった選択であると判断する。合理的な牛飼いたちは全て牛を増やすことを選択する。こうした牛を増やす行為は共有地が豊穡であり、放牧された牛の数よりも自然の回復能力が高い場合には許容される。しかし、合理的な判断の元で牛が際限なく増加すれば、共有地は利用不能なまでに荒廃し、悲劇的な結末を迎えることになる。

地球は我々にとって有限の共有地であり、我々自身はその共有地で欲求を充足しようとする存在である。先の共有地の悲劇の例の様に、個々人が自らの利益のみを追求すれば、地球という共有地も荒廃を免れることができない。個々人の行動にも着目し、環境と共生できる行動を創発させる方法を解明していくことで、持続可能な社会を構築するための施策を検討するために重要になっていくであろう。

1.2 環境問題に関する既往研究と研究概要

Hardin が提唱した共有地の悲劇以降、社会的ジレンマの解決方法を知るためにその構造の分析が行われてきた。流れとしては大きく 3 つに分けられる。1 つめは Dawes を初めとした N 人ゲームを用いてジレンマ構造を定式化する方法である^{[2][3][4][5][6][7]}。定式化による分析では、個人が自身の利益を優先してしまう誘引やジレンマの発生メカニズムなどの構造的な理解が行われている。しかし、ジレンマ構造に注目するあまり、環境の容量や回復能力が無視されているものが多い。また、ジレンマの解決方法に関しては殆ど触れられていない。2 つめは実験社会心理学的研究の観点からジレンマ構造を取り扱っている^{[8][9][10][11]}。佐藤らは一連の「きこりゲーム」と呼ばれる実験的研究において「資源再生パラダイム」を取り上げている^[12]。また、Messick らは体系的に資源の再生可能性を視野に取り入れている^[11]。しかし、これらの研究で取り扱われている資源再生のメカニズムは極めて特殊なものであり、天然資源を取り扱ったモデルとは言い難いものであった。3 つめは繰り返しゲームを用いたシミュレーションによる分析である^{[13][14][15]}。シミュレーションでは N 人ゲーム同様にジレンマ構造を取り入れた上で、繰り返しゲームを行うことでその帰結を分析している。シミュレーションでは、環境の回復能力を組み込んだ上でモデル構築を行っており、更には価値観の変化などジレンマを乗り越えて環境保全が達成される方法の検討が行われている。これらのシミュレーションベースの分析では、モデルが問題に合わせて作りこまれているが、その特殊さ故に一般化を行うことが困難である。

環境問題に関する社会的ジレンマの知見は蓄積されつつあるが、現段階ではこれらの成果同士や、一般的な繰り返しゲームの知見を適用することが困難な部分が多い。そこで本研究では、抽象化・汎用化された環境ジレンマゲームを構築する。即ち、前述の方法の内、3 つ目の方法の課題である特殊性を解決しつつ、汎用化を進めることを目的としている。

なお、本論では数理モデルの解法としてマルチエージェントシミュレーションを用いる。一般的な環境問題は、非常に時空的スケール分散が大きく、対象とする現象が人間、環境、社会システムといった複数のセクターに跨る複雑な問題であるが、この問題に対する一般的求解法は未だ知られていない。対象が数理モデルであるので、微分方程式を用いて時間スケールの変化に対しても演繹的にその帰結を求めることも可能である。しかし、演繹的アプローチが適用可能なのは、微分方程式が得られる程度には数理モデルが単純であり、且つ、特殊な初期条件と境界条件でないと解が得られないことが多い。当然、演繹的に帰結を求めることができるということは、問題の因果式が得られるということなので、そのメカニズムを詳らかにできるという利点はある。しかし、環境問題の様な非常に複雑な問題に対しては、その適用は非常

に困難である。演繹的なアプローチが困難な場合、数値シミュレーションを用いて帰納的にその帰結を検討することとなる。本論で用いるマルチエージェントシミュレーションも数値シミュレーションの1種である。マルチエージェントシミュレーションは、複数のエージェントを生成することで人工社会を構築し、エージェント同士の相互作用をシミュレーションするシステムである。エージェントは、行動規則と、その特性を表すパラメータを持つ。そのため、エージェントは交通を制御する信号の様な機械であることもあれば、ドライバーが乗車した自動車であったり、動物であったり、人間であったりする。本論で扱うエージェントは人間（あるいは複数の人間の集まりであるグループとも言える）である。また、この人工社会にはエージェントの行動に環境などの系からの制約を与えたり、相互作用に社会システムのルールを適用したりすることも可能である。そのため、進化ゲーム理論とその解法としてのマルチエージェントシミュレーションは相性がよく、強力な解法であると言える。この大きな枠組みを谷本は人間—環境—社会システムと呼んでいる^[16]。本論は、人間—環境—社会システムのモデル化に向けた大きな営みの一歩を為すものである。

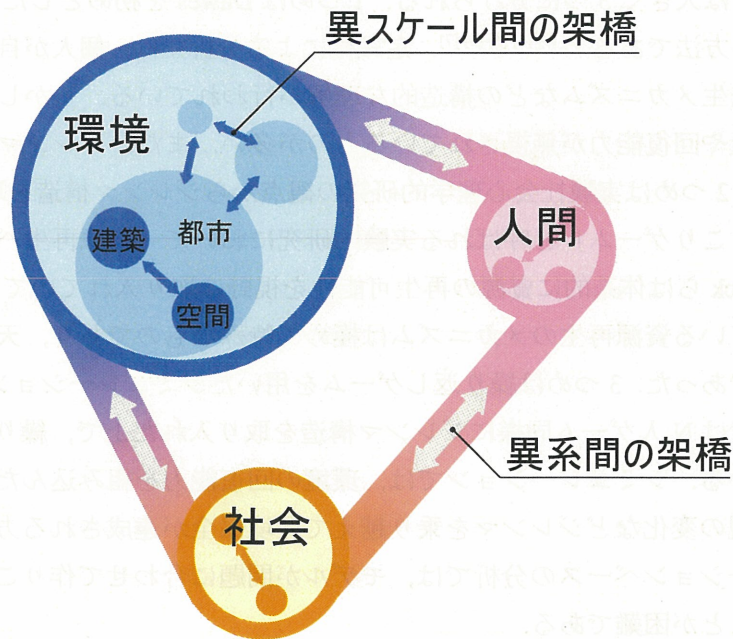


図 1-1 広範な空間スケールにまたがる環境システムと人間—環境—社会システムの発想^[16]

1.3 本論文の構成

本論文は、6章から構成される。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、序論として、研究の背景及び本研究の目的、概要について述べた。

第2章では、社会的ジレンマのモデル化に関する既往研究の解説と整理を行い、本研究の位置付けを明らかにする。環境ジレンマの元祖である共有地の悲劇 (Tragedy of Commons) を軸に、抽象化・汎用化された環境ジレンマゲームの数理モデルの要件を検討する。

第3章では、環境ジレンマゲームの解法に用いるマルチエージェントシミュレーションを用いて、具体的な現実社会の事例への適用事例を報告する。ここでは、災害避難における避難路のボトルネック問題を資源割り当て問題と見立て、進化ゲーム理論のフレームに則ってその特性を検討する。

第 4 章では，進化ゲーム理論とマルチエージェントを組み合わせた解法の実践として，協調プロトコルとしてのローカリティの影響分析を行う．第 4 章で取り扱うゲーム構造は一般的な 2x2 ゲームであるが，第 5 章で取り扱う環境ジレンマゲームは 2x2 ゲームをベースとしているため，事前にその特性をおさえることも兼ねて検討を行う．

第 5 章では，第 2 章での検討を元に一般化した環境ジレンマゲームのモデル化を行う．更に，構築したモデルを用いてシミュレーションを行い，その基本特性や第 4 章で分析を行ったローカリティを導入することによる環境ジレンマの解決効果を報告する．

第 6 章は総括である．

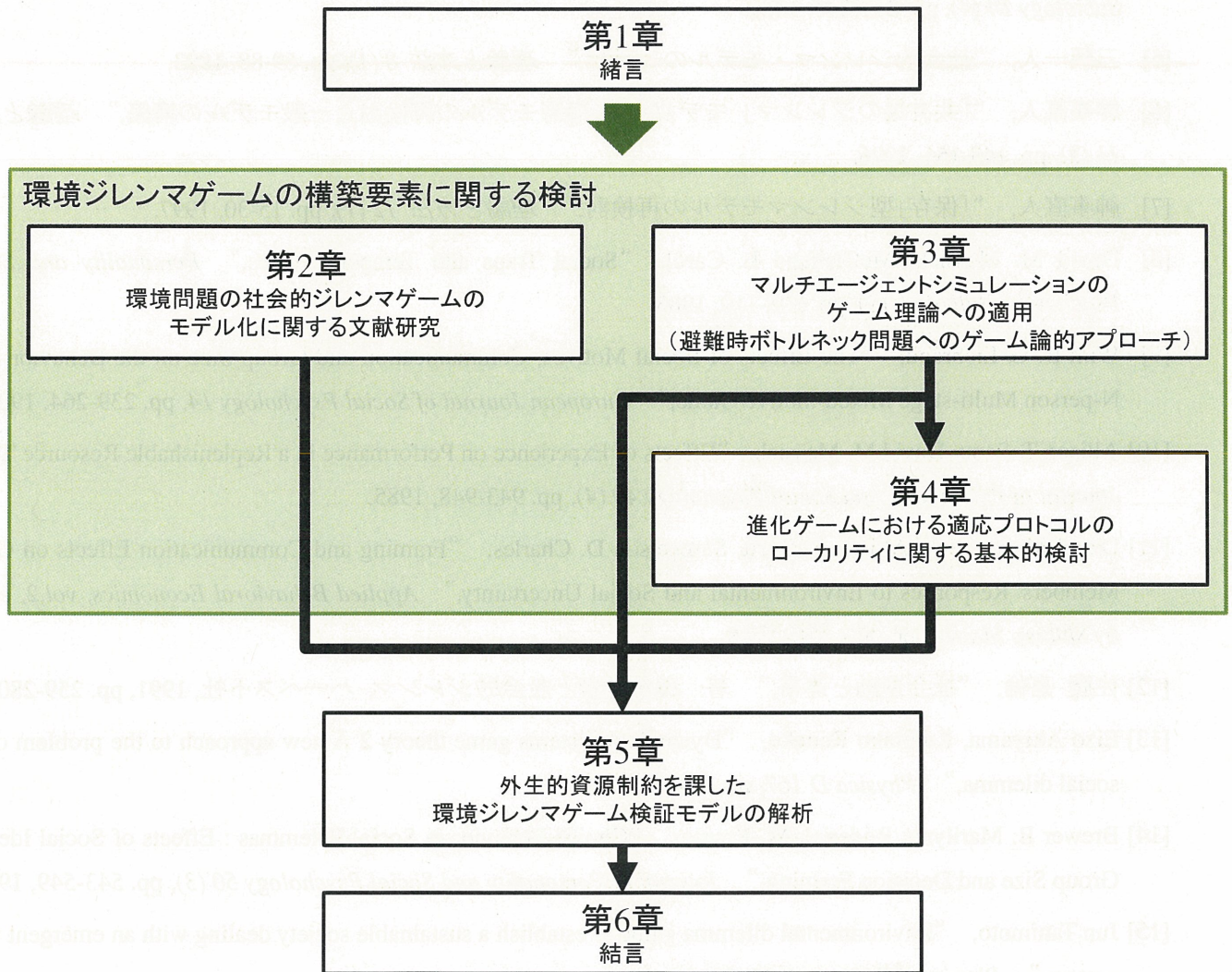


図 1-2 本論文の構成

【第1章 引用文献】

- [1] Garrett Hardin, “The Tragedy of the Commons,” *Science* 162, pp. 1243-1248, 1968.
- [2] Dawes, Robyn M., “Formal Models of dilemma in social decision-making,” 著: *Human Judgment and Social Processes*, S. S. Martin F. Kaplan, 編, Academic Press, 1975, pp. 87-107.
- [3] 海野道郎, “社会的ジレンマの数理モデルー共有物の性質とモデルの対応関係ー,” *社会学研究* (東北社会学研究会) 52, pp. 21-45, 1988.
- [4] M. Umino, “Formulation of Commons Dilemma : Dawes Model Reconsidered,” *Journal of Mathematical Sociology* 14 (4), pp. 237-246, 1989.
- [5] 三隅一人, “社会的ジレンマ・モデルの一般化,” *理論と方法* 8 (1), pp. 69-88, 1993.
- [6] 神事直人, “「共有地のジレンマ」モデル再考-海野モデルの再検討と一般モデルの構築,” *理論と方法* 11 (2), pp. 145-156, 1996.
- [7] 神事直人, “「保存」型ジレンマモデルの再検討,” *理論と方法* 12 (1), pp. 15-30, 1997.
- [8] David M. Messick, McClelland L. Carol, “Social Traps and Temporal Traps,” *Personality and Social Psychology Bulletin* 9 (1), pp. 105-110, 1983.
- [9] Wim B. G. Liebrand, “The Effects of Social Motives, Communication and Group Size on the Behavior in an N-person Multi-stage Mixed-motive Game,” *European Journal of Social Psychology* 14, pp. 239-264, 1984.
- [10] Allison T. Scott, David M. Messick, “Effects of Experience on Performance in a Replenishable Resource Trap,” *Journal of Personality and Social Psychology* 49 (4), pp. 943-948, 1985.
- [11] David M. Messick, Allison T. Scott, Samuelson D. Charles, “Framing and Communication Effects on Group Members' Responses to Environmental and Social Uncertainty,” *Applied Behavioral Economics*, vol.2, edited by Shlomo Maital., pp. 677-700, 1988.
- [12] 佐藤 嘉倫, “社会運動と連帯,” 著: *秩序問題と社会的ジレンマ*, ハーベスト社, 1991, pp. 259-280.
- [13] Eizo Akiyama, Kunihiko Kaneko, “Dynamical systems game theory 2 A new approach to the problem of the social dilemma,” *Physica D* 167, pp. 36-71, 2002.
- [14] Brewer B. Marilynn, Roderick M. Kramer, “Choice Behavior in Social Dilemmas : Effects of Social Identity, Group Size and Decision Framing,” *Journal of Personality and Social Psychology* 50 (3), pp. 543-549, 1986.
- [15] Jun Tanimoto, “Environmental dilemma game to establish a sustainable society dealing with an emergent value system,” *Physica D* 200, pp. 1-24, 2005.
- [16] 谷本潤, *環境システムの数理解析基礎*, 九州大学出版会, 2012.

第2章 環境問題の社会的ジレンマゲームのモデル化に関する文献研究

本章では、既存の社会的ジレンマを取り扱ったモデルの文献を整理すると共に、本論文の位置付けをあきらかにするものである。

2.1 社会的ジレンマの定義

環境問題は、第1章でも述べた通り、個人が経済的に合理的な選択を取ることが社会全体の最適性、即ち環境との共存と一致しないために発生する。環境汚染や資源の枯渇の多くは、個人もしくは企業が環境よりも自らの利益を優先したために引き起こされており、環境との共存が個人に対する合理性とイコールであるならば個人が余程の天邪鬼で無い限り環境問題は発生しないはずである。しかし、過去に数多くの環境問題の事例が存在することから分かるように、個人の合理的選択と環境の維持が背反することは少なくない。

社会的ジレンマの研究の初期において、社会的ジレンマは Dawes によって定義されている^[17]。それによると、プレーヤが取りうる行動が「協力」「非協力」の何れかである場合に、次の2項目を満たすかどうかというものであった。

- プレーヤの各々にとって、他者の選択にかかわらず、「非協力」行動を取った方が「協力」行動を取った時よりも利得が大きい
- 全員が「非協力」を選択した場合、全員が「協力」を選択した場合よりも、全てのプレーヤにとって利得が小さい

上記の条件はプレーヤの総数を N 、「協力」を選択している行為者の数を $m(0 \leq m \leq N)$ とし、 m 人が「協力」を選択している時に、「協力」・「非協力」を選択したプレーヤが得る1人あたり利得をそれぞれ $C(m)$ 、 $D(m)$ とした場合、以下のように表すことができる。

$$D(m) > C(m+1) \quad \dots(2-1) \quad \text{かつ} \quad D(0) < C(N) \quad \dots(2-2)$$

式(2-1)は、常に協力行動を選択するよりも非協力行動を選択する方が利得は高いため、協力行動を選択しているプレーヤには非協力行動を取ろうとする誘引が存在する。他のプレーヤの選択に関係なく、自身が発得る利得がどの戦略よりも大きくなる戦略は優越戦略（あるいは支配戦略）と呼ばれている。従って、この場合の優越戦略は「非協力」行動ということになる。また、他のプレーヤの選択を所与とした場合に、互いに最適反応になっている状態をナッシュ均衡と呼ぶ。今回は優越戦略が非協力行動であるため、他プレーヤの行動が協力であっても非協力行動であっても最適反応は非協力行動である。そのため、全てのプレーヤが合理的な選択を行った場合、プレーヤが選択する行動は全て非協力行動となり、この状態がナッシュ均衡になるというわけである。しかし、式(2-2)から分かる通り、全員が非協力行動を取るよりも協力行動を取った方が、1人1人が得る利得は高くなり、社会全体で得られる利得も最も高くなるはずである。プレーヤの選択行動が変化した際に、利得が下がってしまうプレーヤが1人でも存在する場合、もとの選択行動の状態はパレート効率的であるという。この場合は、全てのプレーヤが協力行動を取っている場合の利得が最も高く、1人でも非協力行動を選択してしまうと、利得が低下するプレーヤが発生してしまうため、全員が協力行動を選択している状態をパレート効率的であると呼ぶ。この様に、個人にとっての合理的選択は非協力行動が、社会全体での最適解となっていないため、社会的ジレンマが発生していないと

言える。式(2-1), 式(2-2)を満たすゲームは, 一般的に N 人囚人のジレンマゲームと呼ばれており社会的ジレンマの定式化として用いられることになった。

しかし, N 人囚人のジレンマはジレンマの強度が強いため, 公共財の供給をめぐる状況を表すには「 N 人チキンゲーム」の方が適切であるという議論もある^{[18][19][20][21]}。囚人のジレンマの場合は常に非協力行動が優越戦略となるため, 協調のためのプロトコルが無ければ公共財は崩壊してしまうこととなる。だが, 誰もが非協力行動を取ると公共財から利益を得ることができなくなってしまうため, 自分だけでも協力行動をとって公共財を維持した方が利益を得られる場合もある(例えばゴミ捨て場の管理問題など)。このような場合を想定し, N 人チキンゲームの方が適切であるといわれている^{[22][23]}。また, 公共財以外の社会的ジレンマにおいてしばしば他人の協調行動によってシステムが維持されている中で, 自らはコストを負担しない裏切り行動を取ってシステムにタダ乗りするフリーライダーの存在が問題に挙げられるが, フリーライダーが生じるには協力的な行動を取る他者が存在する期待や予期が存在することが必要となる。 N 人囚人のジレンマでは非協力行動が優越戦略であるため, フリーライダーは発生し得ない。従って, 他者の行為にただ乗りする行為とはみなせなくなってしまう。

N 人チキンゲームとは, 以下の条件を満たす N 人ゲームのことを一般的に指す。ただし, m は協調を選択した人数とし, $0 \leq m < N$ である。 n は内部均衡点であり, 詳細は後述する。

$$\begin{aligned} D(m) > C(m+1) & \text{ if } (m > n) & \dots(2-3) & \quad \text{かつ} & \quad D(0) < C(N) & \dots(2-4) \\ D(m) < C(m+1) & \text{ otherwise} \end{aligned}$$

N 人チキンゲームでは, N 人囚人のジレンマとは異なり優越戦略が存在しない。協力行動選択者が n 人より多い場合は非協力行動を選択する誘引が存在するが, そうでない場合は協力行動を選択する誘引が存在する。協調者数が n 人を境にプレーヤが誘引される行動が変化するため, n は内部均衡点と呼ばれる。 N 人囚人のジレンマが N 人チキンゲームの限定的な状況というのは, $n = 0$ の場合に N 人囚人のジレンマの条件と等しくなるためである。なお, N 人チキンゲームは協調者数が内部均衡点以上の場合のみ裏切りへの誘引が存在するため, 囚人のジレンマよりも弱ジレンマである。

社会学・経済学・社会心理学の分野で公共財供給に関して行われてきた実験でも, N 人チキンゲームに似たステップ関数の利得構造が用いられている。また, 環境問題として取り上げられる資源管理問題を念頭において行われてきた社会心理学的実験でも, N 人囚人のジレンマそのものではなく, それを変形した利得構造が使用されてきた。そこでは, 選択肢を協力か非協力かの離散的な選択行動ではなく収奪資源量という連続量で表す, ゲームの繰り返しを導入する, 資源の再生能力を考慮するといった変形が行われている。この様に, 社会的ジレンマの定式化に関しては, 変形が行われることもあるが基本となるのは N 人囚人のジレンマ, もしくは N 人チキンゲームの2種類であるのが現状である。

社会的ジレンマの構造を定義するにも, 問題とする状況によつての差異も当然存在するため画一的な方法で行うのは困難であるといえる。そこで, 社会的ジレンマの類型を行うとともに, その構造を定義するものとする。社会的ジレンマは, まず大きくは「環境問題」に代表される「保存型」ジレンマと, いわゆる「オルソン問題」に代表される「供給型」に分けられる。

保存型のジレンマは共有の資源を複数のプレーヤが取り合う状況でのジレンマ構造を表したものである。具体的には森林の伐採, 水産資源の収集などといった資源管理問題が挙げられる。複数のプレーヤが環境から資源を収奪するが, この資源は共有のものであり誰もが収奪を行うことができる。プレーヤが得られる利得は収奪した資源量に比例するので, より多くの資源を収奪するインセンティブがある。しかし, 大量の資源を収奪するプレーヤが増えることで環境の回復能力を超える過剰な収奪が行われると, 資源が枯

渴し、全てのプレーヤが利得を得ることができなくなる。そのため、資源が枯渇しないようにするために各プレーヤが協力して収奪する量を制限する必要がある。ここで、多数のプレーヤが協力関係を結んで収奪する資源量を制限している中、制限量を超える資源を収奪する非協力行動を取ったプレーヤは収奪制限を行なっているプレーヤより多くの利得を得ることができる。しかし、非協力行動をとることで多くの利益を得られるからといって全てのプレーヤが非協力行動を取るようになると、前述したとおり資源が枯渇してしまい、それならば自身だけでも収奪量を制限して資源が枯渇することを食い止めた方がプレーヤにとって望ましくなる。保存型のジレンマ状況では、全プレーヤの行動が一致しているよりも、プレーヤの行動に違いが存在する場合の方が全体的な利益が大きく、他のプレーヤによって最適な行動が変化する。そのため、一般的にはチキン型のゲーム構造であると言われている。

一方、供給型のジレンマは、社会の構成員の誰もが享受することができる、非排除性を持つ公共財を維持するためのコストを負担する際のジレンマ構造を表したものである。例えば、道路や街灯といった公共物の建設、法律制定のためのデモ、補助金獲得のためのロビー活動などが挙げられる。公共財はコストを支払った額に関係なく使用することができるが、自身が支払うコストを減らす、若しくは支払わずに公共財を使用するフリーライダーが発生する誘引が存在する。ただし、支払われるコストが減っていくと公共財の質が低下し、最終的には公共財がなくなってしまう。公共財が無くなってしまうと、全てのプレーヤが公共財を使用することができなくなるため得られる利益は0になる。その際、公共財を維持するためのコストを支払っても利益を得ることができないため、コスト支払いを断念してしまう誘引が発生してしまう。本来であれば、構成員がコストを支払うことによって公共財が維持され、全てのプレーヤが公共財を使用できる方が全体の利益が高いはずである。しかし、コスト支払いを行わない誘引が常に発生するため、コストを支払わないプレーヤが増え続ける。そのため、供給型のジレンマは一般的に囚人のジレンマ型のゲーム構造であると言われている。

このような社会的ジレンマのタイプ分けは、問題の構造を理解するという点で意義深く、多くの研究者によって社会的ジレンマの下位類型を明らかにしようという試みが行われてきた。分類軸としては上述した「保存」と「供給」を軸としたものが多いが、利得関数の形式に着目してタイプ分けを行うといった「取り合いゲーム」と「与え合いゲーム」の分類も存在する^{[18][24]}。その他にも、ゲーム理論ではなく心理学的強化理論に基づいた「社会的トラップ」と「社会的フェンス」との区分も行われている^{[25][26]}。また、社会的ジレンマを類型化すると共に類型毎に一般的な定式化を行い、社会的ジレンマを汎用的に取り扱う試みも行われている^{[3][5]}。

本研究で取り扱う社会的ジレンマも、当初述べた通り、個人的合理性と社会的最適性が乖離した状況を指す。その中でも、共有資源上において発生する環境問題を想定するため、上述した供給型・保存型の分類の内、保存型を対象とする。従って、本研究で取り扱う社会的ジレンマは、N人チキンゲームの構造を持つジレンマゲームとなる。

2.2 社会的ジレンマを構成する共有物

社会的ジレンマは単純な多人数ゲームとは異なり、共有物と呼ばれるプレーヤ間で共有の資源が存在することとなる。しかし、共有物と一口にいっても、全てのケースにおいてその性質が等しいわけではない。想定するケースによって共有物の内容も異なってくる。共有物の性質に関しては、海野^[27]によって整理が行われている。本節では、海野の分類に基づき共有物の性質について明らかにする。

◆ 環境容量

環境容量は文字通り、環境の保全を扱う時に問題となる。これが小さいほど、「単位行為」の影響が大きくなる。例えば、狭い放牧地では、少数の牛でも草を食い尽くしてしまう。環境容量が小さい時には資源が危機に瀕しやすいので、協力の必要性が認知されて協力が生じやすいと考えられるが、他方、他の成員が消費し尽くしてしまうという恐れから、抜け駆け的に残存資源を獲得したいという誘引が働く可能性もあり得る。

◆ 共有物の再生可能性（回復能）

再生可能性とは、共有物が破壊された時にそれが元の状態にどのくらい戻りやすいか、を意味する。再生可能性が特に大きいものの一つとして、「交通騒音」によって失われる静寂が挙げられる。失われた静寂は、騒音の発生が止んだ瞬間に元に戻る。これの対極の例として生物種が挙げられる。これは、一度失われたら再生が不可能である。水の汚染や過放牧による放牧地の荒廃はこの間にある。破壊された環境は、一般に「共有物」に固有の回復速度で、安定均衡状態に向かって変化し、回復する。しかし、モノとして供給される公共財の中には、放置しておく（つまり、維持のためにコストをかけないと）「自然崩壊」してしまうものもある。例えば、道路などがその例である。共有物の中には「環境」の回復速度を促進したり「公共財」の崩壊を防止したりすることが可能なものもある。しかし、そのためには、物や労力などのコストを投入しなければならない。

基本的に 1shot のゲームを取り扱う研究では、共有物の再生可能性は取り扱うことができない。

◆ 共有物の拡散性

共有物の中には、その状態がもたらす影響が及ぶ範囲には広狭がある。例えば、各家庭が静かに暮らして静かな住宅街を作るといような申し合わせをした場合、各家庭の非協力行動（騒音を出す）がもたらす影響は局地的である。しかし、大気を汚染した場合には、その影響は希釈されるとはいえ、地球全体に及ぶであろう。大気は拡散性の大きい共有物であり、騒音は拡散性の小さい共有物である。

◆ 競合性・非競合性

共有物が公共財である場合、その性質が競合的な場合と非競合的な場合がある。これは、公共財が分割可能か否かによって異なる。ある人が公共財から得られる利益を享受しても、他の人がその公共財から得られる利益が減少しない場合、その公共財には「消費における非競合性」という性質があるという。これに対して、公共財が完全に分割されて各成員に分配されるような場合、ある人の取り分が増えれば他の人の取り分が必ず減少することになる。この様な場合、公共財は「競合的」なものであるという。

◆ 受益・被害の認知可能性

共有物が人々にもたらす影響には認知しやすいものもあれば、しにくいものもある。我々の行為によって発生する環境破壊の例をこの認知可能性の連続体上に位置づけると次のようになる。すなわち、自動車の走行による騒音は認知可能性が大きく、フロンガス排出によるオゾン層破壊は認知可能性が小さい。

認知可能性について考えると、二種類の認知の仕方があることに気づく。一方は、一般の人間が生活の中で発見するものである。河川の汚染や森林破壊など多くの地域的環境破壊に気づくのは、その土地に住む人々である。他方、オゾン層の破壊や地球の温暖化などは、一般の人間には知覚できない。科学的仮設

と精密な測定の中から、初めて発見できるのである。

いずれにせよ、認知可能性が大きいほど制御可能性は大きくなる。なぜなら認知可能性が大きいほど環境の破壊が初期に認知されるので、早めに行動が取れるからである。

◆ 共有物に関与する人数

対象とする共有物に関与する人数もまた、社会的ジレンマの克服に影響を及ぼす要因の1つである。社会的ジレンマが存在する場合に、集団規模が大きくなるほど集団の目標が実現されにくくなる現象は「オルソン問題」と呼ばれている。厳密に言うと、広義のオルソン問題は「集団規模と集合行為の成否の関連」、「集団成員間の異質性と集合行為の成功/失敗の関連性」、「選択的誘引や強制の効果」の3つを表すものであり、集団規模の影響は前述した中の1つ目である。オルソン^[28]は数理モデルをもとに検討を行うことで、集団規模が大きいほど集団の目標が達成されにくくなる理由を説明している。そこでは、集団規模が大きくなると集団全体のうちの一人あたりの行為者の得る「分け前の割合」が小さくなり、他方で組織化のための費用が大きくなるために目標達成が困難になることを明らかにした。また、集団規模が大きくなると、ある一人の行為者の選択が、集団の他の成員の利益や負担に与える影響が認知されにくくなることも、目標の達成を困難にさせると述べている。しかし、1点目に関しては常に成り立つとは言えないものであり、また、集合財から得られる利益が分割可能であることを前提としており、非競合的な集合財の場合には適用することができない。2点目に関しては、オルソンのモデルからは導き出すことのできないものになっている。

木村^[18]はこれに対し、集合財の競合性と非競合性、そして集合財の供給に伴う費用負担の仕方に着目して類型化を行い、それぞれに対してオルソン問題が成立するか否かを検討している。木村はN人ゲームの形で定式化を行った結果、集合財が非競合的で、かつ、貢献者数(=協力者数)に関わらず集団成員1人1人の利益・コストは一定である場合(例えば、法律制定のデモやリコール署名が挙げられている)はN人チキンゲームに、それ以外の場合はN人囚人のジレンマになるとしている。これらを用いた検討の結果、N人チキンゲームの場合は集団規模の効果は見られず、N人囚人のジレンマの場合は集団規模の効果が表れることを明らかにした。木村によると、集団規模の効果には2種類あり、集団規模が大きくなるとパレート効率な状態が移動する場合と、ナッシュ均衡が移動する場合があると説明している。前者の場合は集団規模によらず誰も貢献しない状態が唯一のナッシュ均衡であり、集団規模が小さい場合はナッシュ均衡がパレート効率な状態と一致する。しかし、集団規模が大きくなるとパレート効率な状態が移動し、ナッシュ均衡はパレート効率な状態ではなくなってしまふ。後者の場合は、集団規模が小さいと全員貢献が唯一のナッシュ均衡で、かつパレート効率な状態である。しかし、集団規模が大きくなると誰も貢献しない状態がナッシュ均衡となり、パレート効率な状態ではなくなる。先ほどのオルソン問題と対比させると、後者の集団規模効果がオルソン問題での所謂「集団規模が大きくなることで、集団の目標達成が困難になる」ことを表していると木村は説明している。

2.3 環境問題の定式化

環境問題の事例として Hardin^[1]が提唱した共有地の悲劇(共有地のジレンマ)は非常に有名である。環境問題の定式は多くの研究者によって行われているが、共有地の悲劇のエピソードをベースとしているものが殆どである。本節では共有地の悲劇の定式化に対する議論を整理した後、その発展型となるモデルを通して本研究で取り扱うモデルの位置付けを明らかにする。

Hardin が共有地の悲劇として以下のエピソードを提示している。

[共有地の悲劇]

10人の農夫が、牛10頭を養える共有地に従量1000ポンドの牛を1頭ずつ放牧している。ところがそのうちの1人が2頭の牛を放牧し、牧草が十分に供給されなくなったため、牛1頭の従量は900ポンドに下落した。これによって2頭放牧した農夫は牛の従量にして1800ポンドの利得を獲得するが、他の9人は900ポンドに利得が減少する。また共有地全体としての利得も10000ポンドから9900ポンドに減少する。

Hardin が提示したエピソードでは、農夫が合理的な意思決定者であったならば牛を2頭放牧し、より多くの利得を得るようになるだろう。しかし、農夫が放牧する牛の頭数を増やす度に共有地全体の利得は減少してしまう。

Dawes^[2]は社会的ジレンマをN人ゲームという形で共有地の悲劇のエピソードを定式化し、その問題構造を明らかにしようとした。しかし、Dawes が提唱した定式は共有地の悲劇のエピソードとの矛盾から海野^{[3][4][29]}、三隅^[5]、神事^{[6][7]}によって修正が施されてきた。まずは共有地の悲劇の定式化を通して、環境問題の定式化がどの様に行われてきたのかを述べることにする。

まずは、DawesによるN人ゲームの定式化を紹介する^[2]。N人の集団で、各人がC（協力）とD（非協力）の2選択肢のみを持つとする。ここでCは協力（牛を1頭放牧すること）を表し、Dは非協力（牛を2頭放牧すること）を表す。D(m)はC選択者がm人の時のD選択者の利得で、C(m)は同じ時のC選択者の利得である。利得は牛の重量（ポンド）で考える。D選択者はC選択者より牛を1頭多く放牧するため、1頭分より多い利得を得ることになる。牛1頭の利得をdとすると、D選択者はC選択者よりもdだけ利得が多い。全ての放牧者は放牧した牛の頭数に応じて利得を得ることができるが、共有地の悲劇のエピソードの通り資源は有限であるため、D選択者が存在すると資源（ここでは牧草）が過剰に収奪されることになってしまう。その際に発生する損失は、共有の牧草地を使用している放牧者全員に振りかかる。従って、全放牧者が被る損失は過放牧された牛の頭数（即ちD選択者の人数と等しい）に比例する。牛1頭の価値は費やされる資源が全て利得として得られるわけではないものとし、重量dと利得として回収することのできない損失eの総和(d+e)が牛1頭を生育するために必要な資源量としている。その時の全体の損失を行為者の数で等分したものが、全行為者の損失として発生する。

$$D(m) = C(N) + d - \frac{(N-m)(d+e)}{N} \quad \dots(2-5)$$

$$C(m) = C(N) - \frac{(N-m)(d+e)}{N} \quad \dots(2-6)$$

海野、三隅、神事はこのDawesのN人ゲームに対して、特殊なケースを取り扱っているに過ぎないと指摘しており、修正を行うと共に一般化を試みている。3者の一般化は違いがあるものの、「資源単位条件」を満たしているかという点は共通である。資源単位条件とは、各行為者の利得を算出する共通の尺度で、単位あたりの便益や損失はCとDのどちらを選ぼうと均一であることを表す。三隅のみ資源単位条件を派生させた単位作用条件を提唱しているが、これは行為者が扱う資源量は協力行動、裏切り行動に関係なく一定であり、その資源量から得られる便益、もしくは損失が単位作用に依存するというものである。ただし、資源単位と単位作用は行為者が得る便益、損失を資源量で表すか、資源単位あたりの効果（作用）で表すかの違いであり、解釈が異なる程度で根本的には同じ概念である。そのため、ここでは資源単位条件

を用いることとする。

C 選択者と D 選択者が保有する資源をそれぞれ n_C , n_D とすると、資源単位条件を数式で表すと以下の様になる。

$$\frac{D(m)}{n_D} = \frac{C(m)}{n_C} \dots(2-7)$$

先の Dawes モデルの例では、 $n_C=1$ (牛を 1 頭放牧)、 $n_D=2$ (牛を 2 頭放牧) である。従って、資源単位条件が満たされるのであれば上記の資源単位条件は牛 1 頭あたり (即ち、資源単位あたり) から得られる利得は常に等しいことを表している。

しかし、海野^{[3][4][29]}は Dawes のモデルでは牛 1 頭の価値が C 選択者と D 選択者で異なり、資源単位条件を満たしていないと指摘している。海野は Dawes の定式に資源単位条件を満たす形で修正・一般化を行っている。その際、海野は得られる利得は資源単位に応じて決定するような形で定式化を行なっている。

$$D(m) = \left(\frac{n_D}{n_D - n_C} \right) d = n_D \left(\frac{N \cdot C(N) - (N - m)e}{n_D N - (n_D - n_C)m} \right) \dots(2-8)$$

$$C(m) = \left(\frac{n_C}{n_D - n_C} \right) d = n_C \left(\frac{N \cdot C(N) - (N - m)e}{n_D N - (n_D - n_C)m} \right) \dots(2-9)$$

海野モデルでは、C 選択者と D 選択者がそれぞれ所有する資源単位 n_C , n_D に応じて利得 d が得られる様に定義されている。この時に得られる利得は、D 選択者の数に応じて減少するようになっており、括弧内の分子の第 1 項で示されている全行為者が C 選択者だった場合の利得から、第 2 項目に表されている D 選択者の数だけ追加で発生するコスト e (共有地の悲劇の例で言うと、D 行為者によって過放牧された牛を生育させるためのコスト) を減算したものが共有地から得られる利得となる。これを分母に表されている全行為者の資源総量で除算したものが、単位資源量あたりの利得 d である。そのため、全行為者が C を選択した場合に共有地から得られる利得は最大となり、D 行為者が増える度に減少していくのみである。従って、全行為者が C 行為者の状態で共有地は臨界点になっており、行為者が C 選択を行なっている状態ですら環境が再生可能な資源量と同量を収奪していることになっている。

次に三隅^[5]だが、共有地の悲劇を一般的に定式化したモデルとして「保存=共通モデル I」を提唱している。保存=共通モデル I は以下の通りである。

$$D(m) = n_D - n_D \cdot \frac{\{mn_C + (N - m)n_D - X\}e}{N} \dots(2-10)$$

$$C(m) = n_C - n_C \cdot \frac{\{mn_C + (N - m)n_D - X\}e}{N} \dots(2-11)$$

新たに登場した X は総資源量の臨界点を表しており、この値を超える収奪が発生する場合に損失が発生することになる。共有地の悲劇の場合は、 $X = N \cdot n_C$ である。三隅は利得と損失の項を分けている。行為者が得る利得は第 1 項で表されており、行為者は資源単位 n_D , n_C の数だけ利得を得る。資源単位あたりの利得は 1 である。第 2 項は放牧による損失を表しており、臨界点 X を越える資源の収奪が行われた場合に、臨界点を超えた資源量に応じて共有地全体にコストがかかり、それを行為者で等分した量が資源単位に比例して各行為者に損失として発生する。三隅によれば、Dawes モデルは各人が被る損失が、保有している資源単位数に関係なく一律に決まる「損失均一」という性質を持っている。そして、海野モデルは純益が

資源単位の数に比例するように調整しただけで、損失が均一に設定されている点では Dawes モデルと同様と三隅は解釈した。三隅は、共有地の悲劇は利得・損失の両方が資源単位に依存するべきであると考え、損失均一である海野モデルは共有地の悲劇を表現していないと指摘している。

神事は、三隅の海野に対する論証を受けて海野モデルを検証し、海野モデルは共有地の悲劇を表しており、逆に三隅モデルこそ表現上適切ではないと指摘している^{[6][7]}。Dawes モデルに関しては、三隅の指摘の通り損失を表す項は行為者数 N で等分されているため、損失均一であるという理解は正しい。しかし、海野モデルは過放牧によって生じた社会的損失は資源単位あたりの利益に組み込まれており、放牧されている牛に均等に分配されている。従って、海野モデルは利得だけでなく損失も資源単位依存になっており、共有地の悲劇を表していると神事は主張している。また、三隅のモデルでは社会的な損失を行為者数 N で等分しているが、神事は行為者数ではなく、共有地に放牧されている牛の頭数で等分するべきであると指摘している。社会的損失は、牛が過放牧された場合に、放牧された全ての牛が十分に生育するだけの牧草（資源）が共有地に存在しないために、牛 1 頭の価値が下がってしまうことで発生する。そのため、損失は牛 1 頭ずつにかかってくると考えるほうが妥当であると述べている。こうして海野モデルが共有地の悲劇を表していることが神事によって示されたのだが、神事は海野モデルを共有地の悲劇を一般化するまでには至っていないとしている。海野モデルの臨界点は $X = N \cdot n_c$ であるため、1 人でも D 選択者となった場合に過放牧になってしまうという場面に限定されている。神事は三隅が導入した臨界点 X を用いて、一般的な共有地の悲劇を以下のように定式化している。

$$D(m) = n_D \cdot \min \left\{ A, \max \left\{ 0, \frac{AX - e[\max\{0, mn_C + (N - m)n_D - X\}]}{mn_C + (N - m)n_D} \right\} \right\} \quad \dots(2-12)$$

$$C(m) = n_C \cdot \min \left\{ A, \max \left\{ 0, \frac{AX - e[\max\{0, mn_C + (N - m)n_D - X\}]}{mn_C + (N - m)n_D} \right\} \right\} \quad \dots(2-13)$$

牛の価値は牛が食べた牧草の量によって決まるが、放牧されている牛全部では食べ切れないほどの牧草がある時に、共有地が供給する牧草を牛が全て利用することはできないと神事は考え、牛が 1 期間に食べることが可能な最大量が存在し、食べた牧草の量で決定される牛の価値（重量）を A とした。また、牛の価値がマイナスになることはなく、過放牧によって牧草が荒廃してしまった場合は牛が死んでしまい、価値 A は 0 になるとした。意味合い的には上記の d に近い。このモデルでは、D 行為者と C 行為者の利得は、同質な牛 1 頭あたりの価値と、保有する牛の頭数によって決定される。牛 1 頭あたりの価値は、共有地が放牧されている牛の数に比べて十分大きければ、牛 1 頭が 1 期間に食べられる牧草の最大量となる（牛 1 頭の価値は A を超えない）。過放牧の状態では、共有地から 1 期間に供給される牧草の総量から、過放牧によって荒廃してしまった牧草の量を引いた分を、放牧されている牛の総数で割った牧草の量に依存し、あまりにも過放牧になると牛は牧草を食べることができずに死んでしまい、牛 1 頭あたりの価値は 0 になる。式の中で最大値や最小値を取るのには、牛が食べることのできる牧草量や臨界点を定義したために、値の正負が逆転しないようにするためである。

また、海野から始まったモデル以外の共有地の悲劇のモデルとして、長谷川^{[30][31]}のモデルを挙げることができる。長谷川の定式化は次のようなものである。いま、 N 人の行為者がそれぞれ n_H 頭の牛を共有地に放牧しているとする。このとき各行為者は、牛を n_H 頭のままとするという協力行動（C 行動）と $n_H + 1$ 頭に増やすという裏切り行動（D 行動）の何れかを選択する。もとの状態の牛 1 頭の価値を 1 とすると、こ

の状態から牛の数が1頭増えることにより、その牛も含めてすべての牛の価値が a だけ低下してしまう ($0 \leq a < 1$)。C行為者が m 人いた時のD行為者、C行為者の利得はそれぞれ次のようになる。

$$D(m) = (n_H + 1)\{1 - a(N - m)\} \quad \dots(2-14)$$

$$C(m) = n_H \{1 - a(N - m)\} \quad \dots(2-15)$$

長谷川のモデルでは n_H を用いて資源単位条件が組み込まれている。過放牧時の牛1頭あたりの価値減少は一般モデルでは牛の数で割っているが、長谷川モデルでは a というパラメータで表しており、より一般的であるといえる。

この様に複数の研究者によって共有地の悲劇の定式化が行われてきた。しかし、上記の様な一般モデルでは資源の再生といった要素が組み込まれていないと神事は指摘する。一般モデルでは過放牧状態の牧草の荒廃の仕方について、1頭増える毎に一定量ずつ荒廃することを仮定している。この仮定に必然性はない。過放牧の状態が強まるにつれて荒廃の進行度がどんどん加速するような、非線形の関数を想定することも可能であるし、臨界点が閾値となって、それを1頭でも超えたら一気に牧草が荒廃してしまうというケースもあり得る。そのためには共有地にストックされている牧草が、行為者が放牧した牛によって牧草が消費される一方で、環境の再生能力によって1期間毎に一定量のフローとして牧草が共有地に供給されることで変動し、共有地に存在する牧草量に応じて臨界点が動的に変化する方法をとることを提唱している。

これらを受けて高坂ら^[32]は漁業を対象に動的モデルを用いて、数理的な観点から社会的ジレンマを陥るケースについて分析している。行為者は環境中の資源量に応じて利得を得ることができるが、行為者はその時に環境から資源を収奪する比率を現状のままにするか、より多くの利得を得るために大きくすることができる。また、実際の水産資源の変動を参考に水産資源の回復量は環境中の資源に比例し、凸型の関数で定義されている。そのため、環境が枯渇、若しくは許容限界に近づくに連れて再生能力は遞減し、水産資源が許容限界の約半数の時に回復能力は最大となる。高坂らは行為者が環境から資源を収奪する比率と、再生能力の最大値を変えて分析を行い、パラメータによって社会的ジレンマが発生する場合とそうでない場合が存在することが示されている。

また、Akiyamaら^[13]は持続可能な資源開発を比喻するマルチエージェントゲームを定義している。伐採により得られる森林資源を増進させる学習機構を付与されたエージェントが群内での淘汰、突然変異を経る過程で、社会に適応した或る特定の生得固有の資源開発戦略（木をどう云う頻度で伐採するか）を有するエージェントが社会のマジョリティを得ていく。かくなるゲームの中でAkiyamaは環境側のパラメータ、具体的には伐採された森林資源の回復能が線形か凸型かで、系のダイナミズムは異なり、前者では認められない協調的（サステナブルな森林資源開発）戦略が後者では創発することを見出した。

また、Tanimotoら^[15]は環境の回復能力を組み込んだ Environmental Dilemma Model の中で持続可能社会を達成する過程で如何なる価値観が創発され、その為の社会的要件は如何なるものであるかについて考量するために、エージェント個々の利得を規定するルールをメタに変容させる仕組みを社会で共有するフレームを価値観創発過程として組み込んだマルチエージェントシミュレーションモデルを構築している。原初にエゴ的価値観が支配的な世界がやがては持続可能型社会へと至るためには、盲目的に公益増進を説くが如き価値観が潜在しているだけでは不十分であり、結果的には公益にも適っているがあくまで私益に還元され得る価値観が社会的に潜在していなければならないと述べている。

2.4 本研究で取り扱う環境ジレンマの定式化

環境問題が様々な形でモデル化が行われてきたことは前節で明らかにした。しかし、それぞれのモデルは具体的適用対象の比喻が強く意識されているため、エージェント間で繰り広げられる本体のゲーム構造の抽象化が不徹底である。Dawes や海野, 三角, 神事の提示した定式化も、共有地の悲劇への整合性を意識した結果、Prisoner's Dilemma (PD) やチキンなど主として2x2ジレンマゲームで蓄積されてきた既往知見（ジレンマ解消のための様々なゲームオプションに関する知見）が適用し難いとの問題点がある。そこで、本研究では環境ジレンマのモデル化に関する研究と、2x2ジレンマゲームを中心としたジレンマゲーム実行時の協調プロトコルに関する研究の接合を行うために、2x2ジレンマゲームをベースとした一般化した環境ジレンマゲームを提唱することとした。

本論では資源管理問題を対象とした環境問題を取り扱うため、社会的ジレンマの内の保存型のジレンマを対象とする。前節で述べた通り、保存型のジレンマでは、例えば「共有地の悲劇」のように、競争性がありオープンアクセスな（つまり排除不可能な）「共有地」において実現される社会的均衡が、望ましい均衡をはるかに超過し、共有資源の持続可能性は損なわれる状況を指す。そして、保存型のジレンマは一般的にはチキン型のゲーム構造を持つと言われている。

チキンゲームをN人で行うN人チキンゲームは、図2-1のようなゲーム構造で表される。皆が協調(Cooperation, C)を取る場合、Cから裏切り(Defect, D)へ行動を変える方が高利得であるが(図2-1中(A))、Dを取る者が多数となるとDからCへ行動を切り替える方がより高い利得を獲得できるようになる(図2-1中(B))ので、最終的にCの利得関数とDの利得関数が交叉する内部均衡点に協調率は収束する。一方、環境問題においても、皆が高負担を強いる環境擁護的な行動を取る場合、自分だけが負担を拒んだとすると、コスト負担を回避することが出来るため、便益は高くなるが、誰もがコスト負担を免れようとすると、環境は崩壊し、基本的な便益すら得ることが不可能となる。それならば、自分だけでも環境擁護的行動を取り、環境崩壊を避ける方がより高い便益を得られることとなる。これはN人チキンゲームの構造そのものであると云える。従って環境問題に関するジレンマゲームは、N人チキンゲームでモデル化できると考えられている。

また、2x2ゲームを複数のペアで行なった結果はN人ゲームの帰結と一致すると言われている。ジレンマゲームの研究としては、協調プロトコルの導入のしやすさもあって2x2ゲームに関する研究が盛んに行われている^[33]。従って、N人ゲームを用いて定式化を行うよりも、2x2ゲームをベースとした定式化を行うほうがより汎化が容易で、既往研究との接合点が多いと考えられる。これらの内容を受け、本研究では2x2ゲームをベースとしたモデルを提唱する。2N人からなる集団に属するプレーヤは、集団の中でペアを作成して2x2ゲームを行う。

2x2ゲームを行なった場合、その帰結に応じて利得を獲得することが可能であるが、この時得られる利得は無尽蔵に存在するものではなく、環境に存在する資源を獲得することで得られているものとする。そ

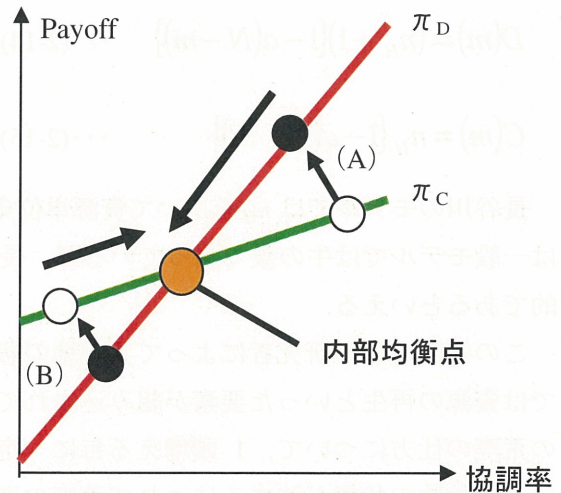


図 2-1 N人チキンゲームの利得

のため、これらの集団はある一定量の資源のストックを持つ環境（共有地と言っても良い）の中に存在しており、 2×2 ゲームの帰結に応じて環境から収奪した資源を、自らの利得とするのである。そのため、環境中の資源のストックが豊潤に存在する場合は資源を収奪することが可能であるが、プレーヤが収奪することが可能な資源が環境にストックされていない場合、プレーヤは資源を収奪することができないために利得を得ることができず 0 になるという資源制約が課されることとなる。環境から再び利得獲得のための資源の収奪を行うためには、資源の収奪を減らすか、若しくは環境が持つ回復能力に期待して収奪可能な資源量が再びストックされるのを待たなければならない。ここで、環境ジレンマが N 人チキンゲームで表現することができるということに立ち戻る。 N 人チキンゲームを表現するためには、本来であればプレーヤが行う 2×2 ゲームの構造も Chicken 型のジレンマ構造を持つ必要があるが、本研究では 2×2 ゲームのジレンマ構造は Chicken 型に限定しない。これは Chicken 型のジレンマ構造が 2×2 ゲームに頼らずとも、外生的に課した環境の資源制約によって発生するためである。前述した本モデルの構造からすると、資源が豊潤に存在し、プレーヤが可能なかぎり多くの資源を収奪しようとする場合、プレーヤが合理的であれば可能な限り資源の収奪を行うような行動を取るはずである。しかし、プレーヤが再生可能な資源量を超えた収奪を繰り返した場合、資源は徐々に枯渇に近づき、やがては資源制約を受けて利得を得ることができなくなる。資源が収奪することができない状態になると、自身の利得が低下したとしても、利得が 0 の状態よりも僅かではあるが資源を得ることができの方が望ましいため、プレーヤは自身の利得を犠牲にしても収奪する資源の量を抑えるような行動を取るようになる。この様に、環境から課せられる資源制約によってプレーヤにとっての合理的な行為が切り替わり、内部均衡点を持つこととなり、所謂 N 人チキンゲームの構造を表していると言えるのである。こうして、 2×2 ゲーム側ではなく、外生的な環境から課した資源制約によって N 人チキンゲームを表現することにより、一般的な 2×2 ジレンマゲームで蓄積された知見を適用していくことが可能となる。環境ジレンマの具体的な定式化は第 5 章で行うこととする。

【第2章 引用文献】

- [1] Garrett Hardin, "The Tragedy of the Commons," *Science* 162, pp. 1243-1248, 1968.
- [2] Dawes, Robyn M., "Formal Models of dilemma in social decision-making," 著: *Human Judgment and Social Processes*, S. S. Martin F. Kaplan, 編, Academic Press, 1975, pp. 87-107.
- [3] 海野道郎, "社会的ジレンマの数理モデルー共有物の性質とモデルの対応関係ー," *社会学研究 (東北社会学研究会)* 52, pp. 21-45, 1988.
- [4] M. Umino, "Formulation of Commons Dilemma : Dawes Model Reconsidered," *Journal of Mathematical Sociology* 14 (4), pp. 237-246, 1989.
- [5] 三隅一人, "社会的ジレンマ・モデルの一般化," *理論と方法* 8 (1), pp. 69-88, 1993.
- [6] 神事直人, "「共有地のジレンマ」モデル再考-海野モデルの再検討と一般モデルの構築," *理論と方法* 11 (2), pp. 145-156, 1996.
- [7] 神事直人, "「保存」型ジレンマモデルの再検討," *理論と方法* 12 (1), pp. 15-30, 1997.
- [13] Eizo Akiyama, Kunihiko Kaneko, "Dynamical systems game theory 2 A new approach to the problem of the social dilemma," *Physica D* 167, pp. 36-71, 2002.
- [15] Jun Tanimoto, "Environmental dilemma game to establish a sustainable society dealing with an emergent value system," *Physica D* 200, pp. 1-24, 2005.
- [17] Dawes, Robyn M., "Social Dilemmas," *Annual Review of Psychology* 31, pp. 169-193, 1980.
- [18] 木村邦博, 大集団のジレンマ, ミネルヴァ書房, 2002.
- [19] Hampton, Jean, "Free-rider Problems in the Production of Collective Goods," *Economics and Philosophy* 3, pp. 245-273, 1987.
- [20] Lipnowski, Irwin, and Shlomo Maital, "Voluntary Provision of a Pure Public Good as the Game of 'Chicken'," *Journal of Public Economics* 20, pp. 381-386, 1983.
- [21] Taylor, Michael, and Hugh Ward, "Chickens, Whales and Lumpy Goods : Alternative Models of Public Goods Provision," *Political Studies* 30 (3), pp. 350-370, 1982.
- [22] Michael Taylor, Ward Hugh, "Chickens, Whales and Lumpy Goods : Alternative Models of Public Goods Provision," *Political Studies* 30 (3), pp. 350-370, 1982.
- [23] Irwin Lipnowski, Maital Shlomo, "Voluntary Provision of a Pure Public Good as the Game of 'Chicken.'," *Journal of Public Economics* 20, pp. 381-386, 1983.
- [24] Hamburger, Henry, "N-person Prisoner's Dilemma," *Journal of Mathematical Sociology* 3, pp. 27-48, 1973.
- [25] Cross, John G., and Melvin J. Guyer, *Social Traps*, A. Arbor, 編, University of Michigan Press, 1980.
- [26] Platt, John, "Social Traps," *American Psychologist* 28 (8), pp. 641-651, 1973.
- [27] 海野道郎, "社会的ジレンマの射程," 著: *秩序問題と社会的ジレンマ*, 海. 盛山和夫, 編, ハーベスト社, 1991, pp. 137-166.
- [28] M. Olson, *The Logic of Collective Action : Public Goods and the Theory of Groups*, Cambridge, Massachusetts :

Harvard University Press, 1965.

- [29] 海野道郎, “『社会的ジレンマ』研究のフロント,” 著: *数理社会学の現在*, 海. 原純輔, 編, 数理社会学研究会, 1985, pp. 3-50.
- [30] 長谷川計二, “『共有地の悲劇』—資源管理と環境問題—,” 著: *秩序問題と社会的ジレンマ*, 海. 盛山和夫, 編, 1991, pp. 199-226.
- [31] Keiji Hasegawa, “Commons dilemma and the “Tragedy of the Commons” ,” *Journal of Mathematical Sociology*, 1989.
- [32] 高坂健次, 吹野卓, “漁業における乱獲の数理モデル-再生産を伴う資源と社会ジレンマ-,” *理論と方法*, Vol.4, No.1, pp. 93-116, 1989.
- [33] Samuel S. Komorita, James Sweeney, David A. Kravitz, “Cooperative choice in N-person dilemma situation,” 著: *Journal of Personality and Social Psychology* 38 (3), 1980, pp. 504-516.

第3章 環境ジレンマゲームの応用 (資源割り当て問題としてみた避難路 bottleneck 問題のゲーム論的アプローチ)

3.1 はじめに

環境ジレンマゲームは、環境中の共有資源を複数のプレーヤーで取り合うゲームである。ここで謂う資源とは、牧草、木材、食料、燃料など物質的なものをイメージしやすいが、実際はこの限りではない。場所もまた1つの資源であり、場所を複数プレーヤーの中の誰が獲得、占有するかも環境ジレンマゲームと呼べる。そのため、場所を資源とした現実問題として、渋滞学で云う bottleneck 問題が挙げられるのである。bottleneck 問題とは、部屋の出口や道路の狭窄部などにおいて人や車が集中することで詰まってしまい、整流された状態、例えば規則正しく列に並んで順々に進む状態よりも流量が減ってしまう問題である。

前章までで取り扱ったゲーム理論と同様の枠組みで bottleneck 問題を考えようとした場合、衝突が発生しそうな際に他人に場所を譲る戦略を協調戦略、他人には場所を譲らず自身が進もうとする戦略を裏切り戦略に当てはめる事ができる。この時、全プレーヤーが協調戦略を取ろうとすると譲り合いばかりで衝突は発生しないが進む人が少なく、全体の流量は整流された状態で人が移動するよりも低下してしまう。そのため、全員が譲り合う、即ち協調戦略を取るよりも、少しは我先に進もうとする裏切り戦略を取る人が混在するほうが、全体的な流量は高くなるのである。しかし、全員が我先に進もうとする裏切り戦略を取ると衝突が頻発し、進む事自体が困難になってしまう。このような場合も場所を譲る協調戦略を取るプレーヤーが存在する方が衝突頻度は減少し、全体の流量は全員が裏切り戦略を取る場合よりも向上する。従って、bottleneck 問題では固定的な優越戦略は存在せず、内部均衡点を持つことになり、N人チキンゲームということになる。環境ジレンマゲームも同様のN人チキンゲームであり、bottleneck 問題と同質であると謂えるのである。

ゲーム理論の視点からの bottleneck 問題としては、その構造がゲーム理論で云う *ST* 互惠（これは自身が協調戦略で対戦相手が裏切り戦略の場合の結果を *S*、自身が裏切り戦略で相手が協調戦略の場合の結果を *T* と呼ぶことから、プレーヤーが協調戦略と裏切り戦略を互いに出すことで、全体的に高い利得獲得するための互惠関係を指す）^[34]やマイノリティゲーム、情報学で云う資源割り当て問題と同様の数理構造である点に注目し、車線狭窄部の流れ場を解析し、数理的ジレンマが存在することが明らかにされている^[35]。また、災害時における屋内からの退避を考えると、避難路前に群衆が殺到し、所謂、人のアーチが形成されて流動効率が低下することはよく知られており、この現象は2次元の bottleneck 問題である。このようなアーチ形成による bottleneck に対して、避難口前に障害物を設置すると流動効率が向上することが実験データによっても裏付けられている^[36]。ゲーム理論との相似性の観点に立つと、この現象は人間エージェントの流動を障害物と云う機械的機構によりコントロールすることで、*ST* 互惠に誘導していると思ふことができる。パニックとなって殺到する人間には正常時の意志決定は期待できないから、このような建築的、設備的な機構により、*ST* 互惠を創発させ、避難の効率を向上させるアイデアは有効であろう。

ところで、建築基準法施行令が規定する「階避難安全検証法に関する算出方法」によれば、幅 60cm 以上の扉の有効流動係数は、扉幅に依存せず一律 $1.5[\text{person}/(\text{ms})]$ とされている。この値の根拠の一つとしては戸川の観測^[37]が上げられる。この一律 $1.5[\text{person}/(\text{ms})]$ は、勿論、設計上の安全側の最低基準を示すとの法規の基本精神に照らせば十分首肯出来るものだが、現実の流動係数はこの値よりも大きく、かつ、bottleneck 効果の特性上、扉幅への依存性が存在することが疑われる。実際、車椅子使用者を含む群衆の避

難流動特性への興味から嶋田らが行った実験^[38]で、健常者 88 人に対して群衆密度をコントロールしながら避難口幅を変えて退避行動をとらせたところ、中程度の群衆密度域では大略、避難口幅が小さいほど大きな流動係数が得られている。近年の計算機資源の充実に従い、高層建物など大規模建築における避難評定にマルチエージェントシミュレーション技法を適用しようとの試みが報告されている。このようなシミュレーションモデルの多くでは、人間エージェントのダイナミクスには観察等に基づく経験則をベースにしたモデル化がなされているもの。如上の流路狭窄による bottleneck 効果が明示的には組み込まれていないため、避難口における流動効率が現実に対してどの程度トレースされていたかを吟味した上で、最終的な結果の信頼性を評価すべきだと考える。このような背景から、現実に対応した避難口扉の流動係数の特性を把握しておくことは、応用的観点からも重要であると考えられる。

本章では以上のような背景の元、災害避難時における bottleneck 問題を環境ジレンマゲームの現実的な比喩として取り扱い、ST 互惠の創発による避難効率向上の施策検討を行う。そのために、まず 2 次元のセルオートマタをベースにする避難口周りの人間エージェント流動シミュレーションモデルを構築する。そして、流動係数を向上させる避難口周りの有効な流動コントロール法を工学的に究明することを目的とする。

3.2 モデル

本論モデルは floor field セルオートマタモデル^{[39][40][41][42]}を基礎とし、これに衝突の効果^[36]を考慮し、モデル全体を避難口周りのアーチを再現した実験データ^[36]をトレースするようにチューニングした枠組みにより構成される。

3.2.1 フロアフィールド

本モデルでは、空間を 0.5m×0.5m のセルに分割する。歩行者エージェントは 1 時間ステップごとに障害物や他エージェントに占有されていない隣接セルへの移動が可能である。

座標 (i, j) で表記される各セルには避難口からの距離に応じた Static Floor Field (以下、SFF)の値 S_{ij} が付されている。エージェントには Moor 近傍(周囲に隣接する上下左右斜め方向の 8 セル)への移動を許容し、図 3-1 に示すようにセル (i, j) から見た上下左右方向の S_{ij} 増減は ± 1 、斜め方向のそれは $\pm\sqrt{2}$ とした。この SFF の算出方法は、複数の SFF のパターンを作成し、数値シミュレーションを行った際に形成された群衆形状を確認した上で採用している。数値シミュレーションは、21 セル×21 セルの部屋に 1 セルのみ出口を設け、室内の出口と反対側の空間に歩行者エージェント 200 人を長方形に整列させた状態から一斉に避難させるというものである。図 3-2 は、(a)エージェント移動を von Neumann 近傍、上下左右方向 S_{ij} 増減を ± 1 とした場合、(b)エージェント移動を Moor 近傍、上下左右および斜め方向 S_{ij} 増減を ± 1 とした場合、(c)上記した本研究の場合における S_{ij} の値と各場合に基づくシミュレーションによって得られる避難口前に形成される群衆の形状を併示したものである。(c)が最も現実との対応上、妥当であることが確認できる。

歩行者エージェントの隣接セルへの移動は確率的に決定される。いま座標 (i, j) にいるエージェントが隣接セル (x, y) へ移動する確率 P_{xy} は、

$$P_{xy} = \beta \cdot \gamma_{kl} \cdot \frac{\exp(-k_s S_{xy})}{\sum_{i-1 \leq m \leq i+1, j-1 \leq n \leq j+1} \exp(-k_s S_{mn})} \quad \dots(3-1)$$

		E	E: Evacuation Exit	
			2	3
3	2	1	2	3
$2+\sqrt{2}$	$1+\sqrt{2}$	2	$1+\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$
$1+2\sqrt{2}$	$2+\sqrt{2}$	3	$2+\sqrt{2}$	$1+2\sqrt{2}$

図 3-1 SFF の計算例

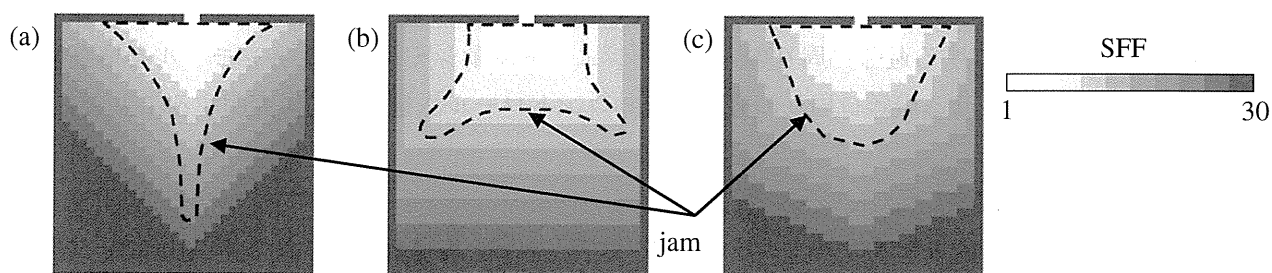


図 3-2 SFF の計算結果と避難口前の群衆形状

ここで、 k_s は SFF のモデルパラメータ、 β は避難口に近いセルでの移動確率を小さくする効果を意味し、 $[0,1]$ にて設定する。また γ_{ij} はそのセルが壁や障害物であれば 0、それ以外は 1 を返す。エージェントの移動はシンクロ更新とする。

3.2.2 衝突の効果

同一セルに二人以上が移動しようとする時、確率 μ で衝突が生じる。衝突が発生した場合、当該セルへの移動は行われない。 μ は先行研究^[36]を踏まえ、当該セルへ移動試みようとするエージェント人数 k の増加関数として、以下で付与する。

$$\mu(k) = 1 - (1 - \xi)^k - k\xi(1 - \xi)^{k-1} \quad \dots(3-2)$$

ここで ξ は衝突に関するモデルパラメータである。各 ξ に対する衝突確率 μ の変化を図 3-3 に示す。 ξ の設定値は次節のチューニングにおいて決定する。

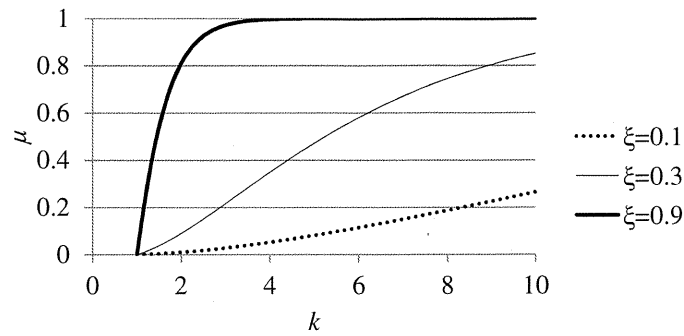


図 3-3 衝突確率 μ の特性

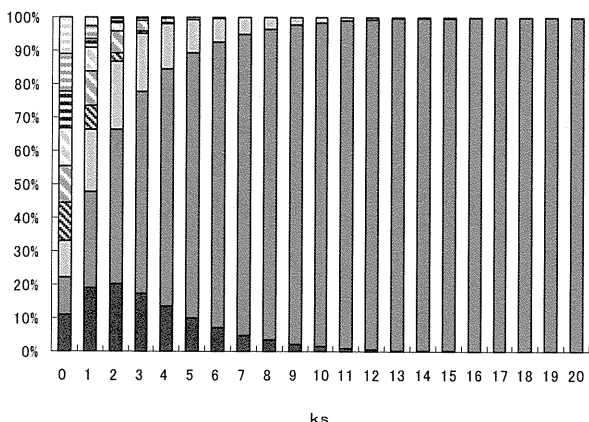
3.2.3 モデルのチューニング

既往文献^[36]では50人の被験者が室内から幅0.5mの避難口を通して退避する時間を計測することで流動係数 q [person/(m·s)] を実験的に求めている。その際、①被験者に1列に並んで貰い、秩序だてて退避するケース、②思い思いに退避して貰う（避難口前には人アーチが形成される一般的退避プロセス）の2モードを実験し、前者の結果は3.2 [person/(m·s)]、後者のそれは2.75 [person/(m·s)]であると報告している。

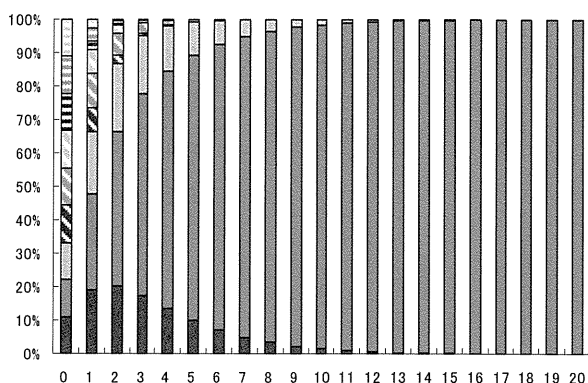
本モデルにおいて、1列に並んだエージェント群が幅1セルの避難口から退避する際の最大流出フラックスは0.5 [person/(cell·step)]である。この値と $q=3.2$ [person/(m·s)] が一致する条件として、実時間とシミュレーションの1時間ステップとの比 $1/3.2$ [s/step] を得る（但し、セル長は0.5m）。

(3-1)式中のモデルパラメータ ks は、歩行者エージェントがSFFのより小さいセルに進むかを決定している。そのため、値を設定する場合は次のことに注意する必要がある。1つは、目的セルまでのユークリッド距離が小さくならない方向（目的セルから遠ざかる後方、斜め後方、側方）のセルに移動する確率は十分ゼロに近い値を取るように設定するべきであるということ。もう1つは、SFFが最小の隣接セルへ確定的に移動するようになると、他者が存在する場合にも回避することをせずにSFF最小の隣接セルが空くまでは待つようになってしまうので、進むセルが確率的に選択される様に値を設定するということである。設定値の検討のために ks を変化させ、エージェントが移動可能な方向(図3-4の1~9)別に移動確率を図3-4に示した。図3-4(a), (b)から、目的地から遠ざかる図3-4のセル4, 6, 7, 8, 9「以外」へ移動する場合、 ks は5付近以上の値を示している。また(c), (d)から、目的地までの距離が遠ざかる図3-4のセル4, 7, 8「以外」へのみ移動する場合も、 ks は5付近以上の値を示している。 ks の設定値大き過ぎると、モデルが確定的に動いてしまい、列を作って避難するといった不自然な挙動が生じてしまうため、本研究のモデルの ks 設定値は5付近が適切であるとした。

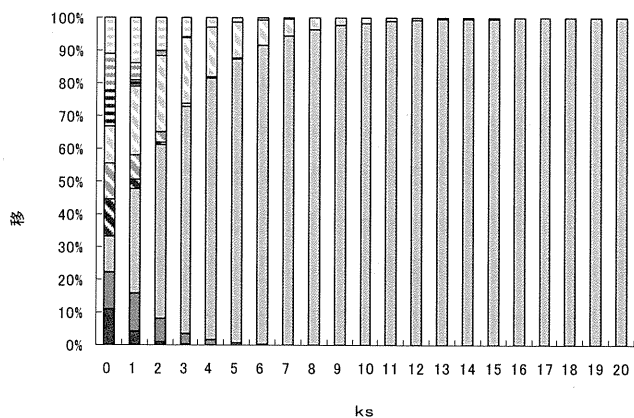
上記に基づき、 ks のより詳細な値、及び ξ の値については次の方法を用いて定めた。以上のモデルにより、 ks と ξ を適当に仮定して15m×15mの室から300人が避難口0.5mを通して退避するシミュレーションエピソードを実行し、求めた流動係数と上記の実験値2.75 [person/(m·s)] との誤差が最小になるような ks と ξ を同定する。パラメータ設定による流動係数の誤差特性を図3-5に示す。誤差が小さい領域では、 ks による感度を持たない。図3-5より、最適パラメータとして、 $\xi=0.383$ 、 $ks=5.5$ の組み合わせを得た。



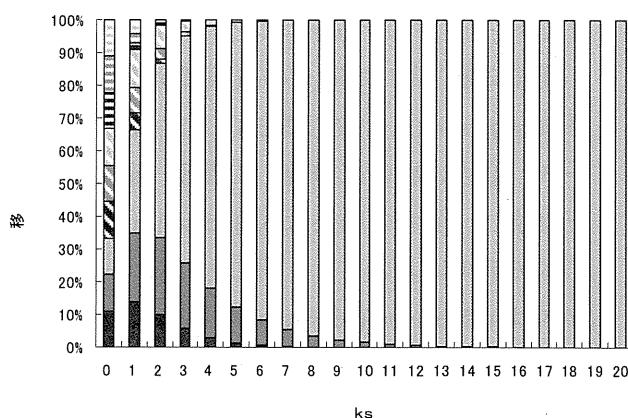
(a) 下図の a おいて、周辺の各セルに移動する確率



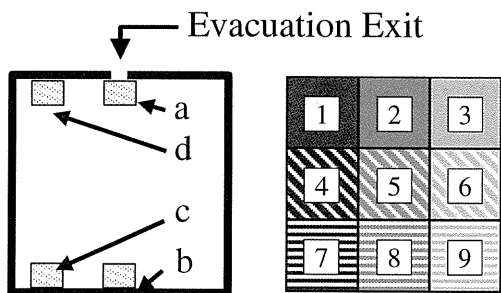
(b) 下図の b おいて、周辺の各セルに移動する確率



(c) 下図の c おいて、周辺の各セルに移動する確率



(d) 下図の d おいて、周辺の各セルに移動する確率



a,b,c,d の各場所と、周辺セルに
該当する9セルの凡例

図 3-4 k_s の値別、移動確率の比較

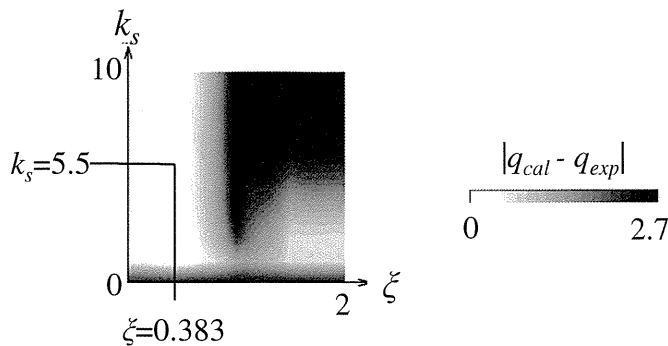


図 3-5 k_s 及び ξ に対する流動係数の誤差特性

3.3 平均場近似による避難口近傍の密度特性

障害物の設置により避難口の流動係数が増加する可能性としては、避難口に至る手前の空間で流動を制御することで、避難口における衝突を減殺して効率を上げる効果が考えられる。これは現実世界に照らして云うと、障害物を設置することで、避難口の手前で事前に衝突を起こしておき、避難口前には人のアーチを形成させないことを意味する。この可能性を検討するために避難口の密度を最大化する避難口直前セルの密度を平均場近似により演繹した。平均場近似は、本論の場合で云えば、特定セル内の歩行者エージェントの存在確率の平均値を仮定することで、避難口での平均存在確率が陽に導出可能となって、理論的な検討が可能になるとのアプローチである。その際、勿論、仮定による現象の丸め誤差が包含されており実態との乖離は生じ得るが、表式による顕わな議論が可能となるとの大きな利点がある。

図 3-6(I)~(VI)に示す避難口幅 1 セル(0.5m)の避難口と隣接 Moor 近傍 3 セルを考える。避難口の流動係数は、避難口へ歩行者エージェントが進む確率を隣接 3 セルに歩行者エージェントが存在するパターン別に算出し、合算することで表すことができる。

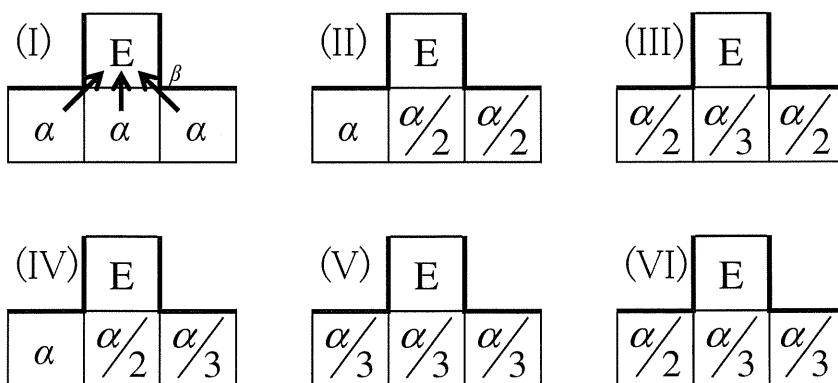


図 3-6 演繹のための各ケースにおける避難口直前セル密度

まず、図 3-6(I)における流動係数を算出する。避難口セルに歩行者エージェントが 1 人だけ進むケースは以下の 3 パターンである。

- ① 隣接セルに 3 人の歩行者エージェントが存在し、そのうちの 1 人だけ移動する
- ② 隣接セルに 2 人の歩行者エージェントが存在し、そのうちの 1 人だけ移動する
- ③ 隣接セルに 1 人の歩行者エージェントが存在し、その 1 人が移動する

各隣接セルに歩行者エージェントが存在する確率は、図 3-6(I)の場合は全て α である。隣接セルに存在する歩行者エージェントが 2 人ないし 1 人の場合、隣接セルに複数の歩行者エージェントが存在する場合に 1 人だけ確率 β で進む場合、組み合わせを考慮する必要がある。これらを考慮すると、先の①②③夫々の流動係数は(3-3)～(3-5)式で表すことができる。

$$\alpha \times 3C_1 \beta (1-\beta)^2 = 3\alpha^3 \beta (1-\beta)^2 \quad \dots (3-3)$$

$${}_3C_2 \alpha^2 (1-\alpha) \times \beta (1-\beta) = 6\alpha^2 (1-\alpha) \beta (1-\beta) \quad \dots (3-4)$$

$${}_3C_1 \alpha (1-\alpha)^2 \times \beta = 3\alpha (1-\alpha)^2 \beta \quad \dots (3-5)$$

上記は 1 人だけ進むケースだが、2 人以上が避難口へ進む場合は確率 μ (但し、ここでの μ は k および μ に依存しない一定値とする) で衝突が発生する。

④ 隣接セルに 3 人の歩行者エージェントが存在し、3 人が移動するが衝突が発生しない

⑤ 隣接セルに 3 人の歩行者エージェントが存在し、そのうちの 2 人だけ移動するが衝突が発生しない

⑥ 隣接セルに 2 人の歩行者エージェントが存在し、2 人が移動するが衝突が発生しない

先ほどと同様に、組み合わせを考慮すると④⑤⑥夫々の流動係数は(3-6)～(3-8)式で表すことができる。

$$(1-\mu) \times \alpha^3 \times \beta^3 = (1-\mu) \alpha^3 \beta^3 \quad \dots (3-6)$$

$$(1-\mu) \times \alpha^3 \times {}_3C_2 \beta^2 (1-\beta) = (1-\mu) 3\alpha^3 \beta^2 (1-\beta) \quad \dots (3-7)$$

$$(1-\mu) \times {}_3C_2 \alpha^2 (1-\alpha) \times \beta^2 = (1-\mu) 3\alpha^2 (1-\alpha) \beta^2 \quad \dots (3-8)$$

(3-3)～(3-8)を合算することで、図 3-6(I)の流動係数を求めることができ、(3-9)式となる。

$$f_I(\alpha) = (1-\mu)[\alpha^3 \beta^3 + 3\alpha^3 \beta^2 (1-\beta) + 3\alpha^2 (1-\alpha) \beta^2] + 3\alpha^3 \beta (1-\beta)^2 + 6\alpha^2 (1-\alpha) \beta (1-\beta) + 3\alpha (1-\alpha)^2 \beta \quad \dots (3-9)$$

図 3-6(II)～図 3-6(IV)の歩行者エージェントが存在する確率は $\alpha/2$, $\alpha/3$ となっている隣接セルが存在する。これを考慮し、上記同様に流動係数を算出すると、各ケースの流動係数は(3-10)～(3-14)式で表記される。

$$f_{II}(\alpha) = (1-\mu)[\alpha(\alpha/2)^2 \beta^3 + 3\alpha(\alpha/2)^2 \beta^2 (1-\beta) + \{2\alpha(\alpha/2)(1-\alpha/2) + (\alpha/2)^2 (1-\alpha/2)\} \beta^2] + 3\alpha(\alpha/2)^2 \beta (1-\beta)^2 + 2\{2\alpha(\alpha/2)(1-\alpha/2)^2 + (\alpha/2)^2 (1-\alpha)\} \beta (1-\beta) + \{\alpha(1-\alpha/2)^2 + 2(\alpha/2)(1-\alpha)(1-\alpha/2)\} \beta \quad \dots (3-10)$$

$$f_{III}(\alpha) = (1-\mu)[(\alpha/3)(\alpha/2)^2 \beta^3 + 3(\alpha/3)(\alpha/2)^2 \beta^2 (1-\beta) + \{2(\alpha/3)(\alpha/2)(1-\alpha/2) + (\alpha/2)^2 (1-\alpha/3)\} \beta^2] + 3(\alpha/3)(\alpha/2)^2 \beta (1-\beta)^2 + 2\{2(\alpha/3)(\alpha/2)(1-\alpha/2)^2 + (\alpha/2)^2 (1-\alpha/3)\} \beta (1-\beta) + \{(\alpha/3)(1-\alpha/2)^2 + 2(\alpha/2)(1-\alpha/3)(1-\alpha/2)\} \beta \quad \dots (3-11)$$

$$\begin{aligned}
 f_{IV}(a) &= (1-\mu)[\alpha(\alpha/3)(\alpha/2)\beta^3 + 3\alpha(\alpha/3)(\alpha/2)\beta^2(1-\beta) \\
 &\quad + \{\alpha(\alpha/2)(1-\alpha/3) + (\alpha/3)(\alpha/2)(1-\alpha) + \alpha(\alpha/3)(1-\alpha/2)\}\beta^2] \\
 &\quad + 3\alpha(\alpha/3)(\alpha/2)\beta(1-\beta)^2 \quad \cdots(3-12) \\
 &\quad + 2\{\alpha(\alpha/2)(1-\alpha/3) + (\alpha/3)(\alpha/2)(1-\alpha) + \alpha(\alpha/3)(1-\alpha/2)\}\beta(1-\beta) \\
 &\quad + \{\alpha(1-\alpha/3)(1-\alpha/2) + (\alpha/2)(1-\alpha/3)(1-\alpha) + (\alpha/3)(1-\alpha)(1-\alpha/2)\}\beta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_V(a) &= (1-\mu)[(\alpha/3)^3\beta^3 + 3(\alpha/3)^3\beta^2(1-\beta) \\
 &\quad + 3(\alpha/3)^2(1-\alpha/3)\beta^2] + 3(\alpha/3)^3\beta(1-\beta)^2 \quad \cdots(3-13) \\
 &\quad + 6(\alpha/3)^2(1-\alpha/3)\beta(1-\beta) + 3(\alpha/3)(1-\alpha/3)^2\beta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{VI}(a) &= (1-\mu)[(\alpha/2)(\alpha/3)^2\beta^3 + 3(\alpha/2)(\alpha/3)^2\beta^2(1-\beta) \\
 &\quad + \{2(\alpha/2)(\alpha/3)(1-\alpha/3) + (\alpha/3)^2(1-\alpha/2)\}\beta^2] \\
 &\quad + 3(\alpha/3)^2(\alpha/2)\beta(1-\beta)^2 \quad \cdots(3-14) \\
 &\quad + 2\{2(\alpha/2)(\alpha/3)(1-\alpha/3) + (\alpha/3)^2(1-\alpha/2)\}\beta(1-\beta) \\
 &\quad + \{(1-\alpha/3)^2(\alpha/2) + 2(\alpha/3)(1-\alpha/2)(1-\alpha/3)\}\beta
 \end{aligned}$$

幅 1 セル避難口における流動係数 $F_I(\beta)$ から 5 セルの避難口の流動係数 $F_5(\beta)$ は、(3-9)～(3-14)式の重畳により(3-15)～(3-19)式で与えられる。これらは、避難口直前セルにおいて 1 セルあたりの歩行者エージェントの存在確率が α になるように重畳したものである。

$$F_1(\alpha) = f_I(\alpha) \quad \cdots(3-15)$$

$$F_2(\alpha) = 2f_{II}(\alpha) \quad \cdots(3-16)$$

$$F_3(\alpha) = f_{III}(\alpha) + 2f_{IV}(\alpha) \quad \cdots(3-17)$$

$$F_4(\alpha) = 2f_{IV}(\alpha) + 2f_{VI}(\alpha) \quad \cdots(3-18)$$

$$F_5(\alpha) = 2f_{IV}(\alpha) + f_V(\alpha) + 2f_{VI}(\alpha) \quad \cdots(3-19)$$

μ と β を変化させたとき、 $F_i(\beta)$ を最大化させる β を求めコンターで表現した結果が図 3-7 である。図 3-7(a) の避難口 1 セルのケースで、 $\beta=1$ のラインに着目すると、衝突が低い確率でしか生起しない ($\mu \rightarrow 0$) 場合は、直前セルの密度は高密である ($\beta \rightarrow 1$) 方が避難口密度は高くなる (流出フラックス or 流動係数は大きくなる) が、衝突の効果が無視できない場合は、直前セルの密度は却って低い方が避難口密度は高くなる事が分かる。衝突確率が 1 であれば、直前セル密度 β は 1/3 に漸近する。避難口幅 2 セル, 3 セル, 4 セル, 5 セルの結果が、夫々 図 3-7(b), (c), (d), (e) である。

以上の結果を総観するに、避難口周りの衝突の影響が無視できない場合、避難口直前の密度を低密にすること、すなわち障害物の設置により避難口に至る手前で整流することは流動効率向上に寄与することがわかる。その効果は避難口幅が小さいほど顕著で、幅が実寸で 2.5m を超えるような場合は、あまり意味がなくなることが推量される。

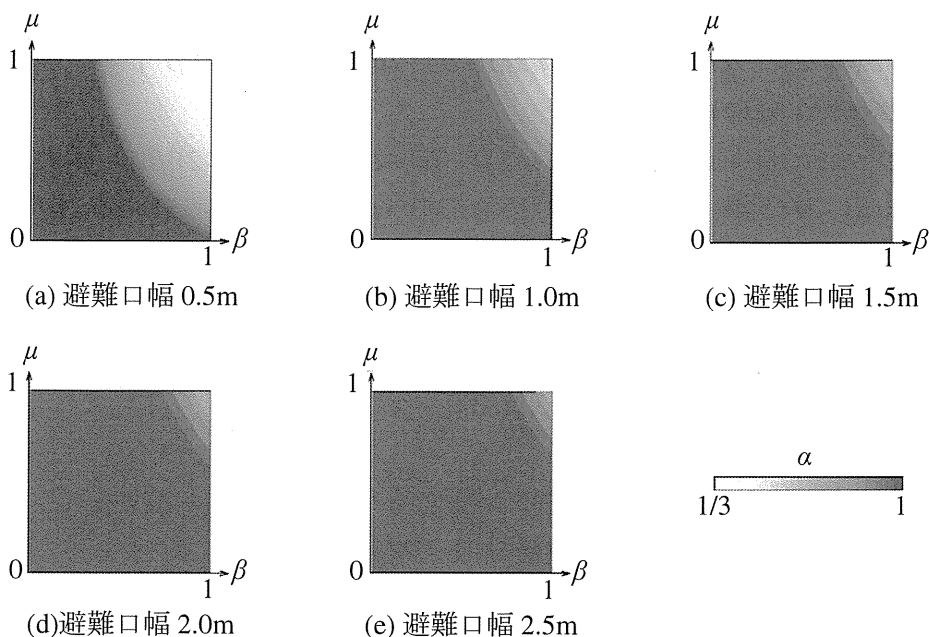


図 3-7 避難口の幅別に示した演繹結果；避難口密度を最大化する α の値

μ と β を変化させ、流動係数 $F(\alpha)$ の最大値を求め、コンターで表現した結果が、図 3-8 である。 $\beta=0$ では、誰も避難出口に移動できないため、流動係数が $0[\text{person}/(\text{cell}\cdot\text{step})]$ を示している。また $\mu=1$ に近づくとつれて衝突により退避しにくくなるため流動係数が小さくなる傾向にあることが分かる。

$\beta=1, \mu=0$ の状態では、衝突しても必ず誰かが避難できる状況であるため流動係数は最大になると考えられる。しかし、図 3-8 の $\beta=1, \mu=0$ の状態に着目すると、避難出口幅 1.0m まではモデルの最大流量 ($0.5[\text{person}/\text{cell}\cdot\text{step}]$) を取っているが、避難出口幅が 1.5m 以上に広がると流量が低下している。避難出口幅が広がるにつれてこの傾向が現れていることから、壁の存在する出口の端の影響ではなく、出口中央部の影響であると推測できる。避難出口中央部では、前方のどの方向に移動しても避難者は避難出来る為、前方の何れかのセルに確率的に移動する。その際、隣接セルに存在する他の避難者と衝突が生じてしまい流動係数が低下したと考えられる。これは現実に照らしていうと、避難者は常に出口に対して一列に並んで（垂直に）避難するわけではないため、出口幅が広い場合には、それが衝突を引き起こす原因となっていることに相当する。

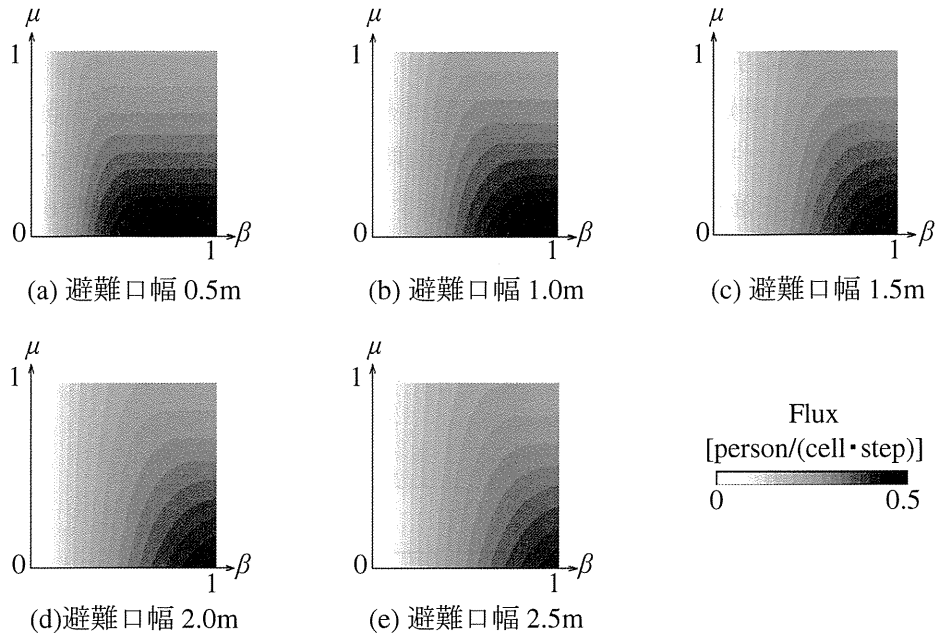


図 3-8 避難口の幅別に示した演繹結果；避難口密度を最大化する流動係数の値

これらのことから避難口周りの衝突の影響が無視できない場合、避難出口直前の密度を低密にすること、すなわち障害物の設置により避難口に至る手前で整流することは、流動効率に影響することが分かる。その効果は避難口幅が小さいほど顕著であり、幅が実寸で 2.5m(=5cell)を超えるような場合は、障害物の設置の整流による流動係数の向上に対して、あまり意味が無くなることが推量できる。

3.4 障害物が流動係数に与える影響

障害物の設置により、避難口に至る手前で人の流れを整流することが流動効率向上に寄与することがわかった。本章では構築したモデルを適用して、その効果を数値計算により明らかにする。15m×15mの室から300人が避難口0.5mを通して退避する状況を想定する。本稿では避難口直前の6セルに障害物を設置する状況を考える。図3-9は避難出口の位置と、障害物を設置するセルの位置関係を表す。

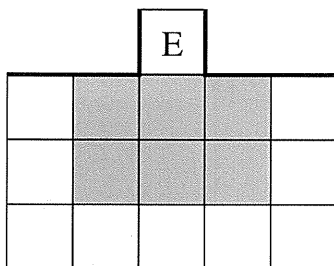


図 3-9 障害物配置セル

全パターン²⁶通りのうち、完全に避難口を塞いでしまうケースを除き、さらに対称条件を適用すると、検討ケースは図3-10の23パターンとなる。流動係数は最初の人間エージェントが退避してから、290人目が通過するまでの時間を計量することで求めた。表3-1には各パターンにおける流動係数の計算結果と、障害物を設置していないパターンaに対する比率を併示している。障害物の設置により、流動係数が12%向上するケース(パターンf)もあれば、約18%減少するケース(パターンj)もあることが分かった。

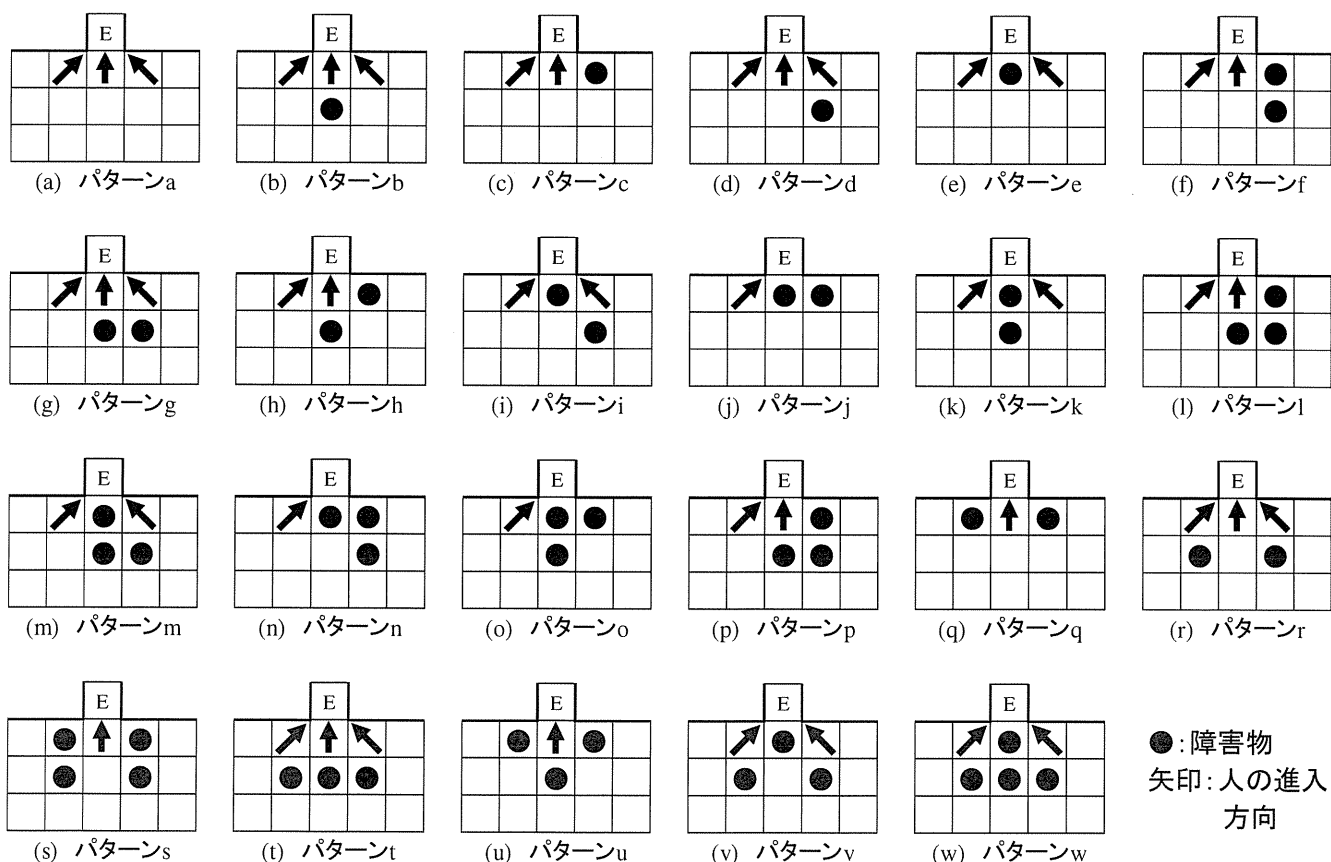


図 3-10 避難口幅 1セルにおける 23 通りの障害物配置形状

表 3-1 障害物設置時の流動係数

	流動係数 [person/ms]	(a)に対する 流動係数比		流動係数 [person/ms]	(a)に対する 流動係数比		流動係数 [person/ms]	(a)に対する 流動係数比
a	2.72	1.000	i	3.02	1.109	q	2.77	1.016
b	2.71	0.996	j	2.24	0.822	r	2.74	1.007
c	3.03	1.114	k	2.98	1.095	s	2.74	1.007
d	2.72	0.999	l	3.02	1.111	t	2.77	1.019
e	3.01	1.107	m	3.03	1.114	u	2.88	1.057
f	3.04	1.118	n	2.26	0.832	v	3.03	1.113
g	2.76	1.015	o	2.71	0.996	w	3.00	1.104
h	2.96	1.088	p	2.77	1.019			

図 3-11 は障害物のない 図 3-10(a)のパターン a (以下、標準パターン) における(a)密度分布と(b)衝突発生率分布である。これらは、流動係数の定義同様、最初の人間エージェントが退避してから、290 人目が通過するまでの時間で計量している。密度は計測時間中にエージェントが存在していた時間比率を計測し、衝突発生率は計測時間中に衝突が発生した時間比率を計測したものである。衝突イベントに関しては、複数エージェントが 1 つのセルに同時侵入する際に発生するため、2 エージェントによる 2 重衝突から、隣接する全セルからエージェントが 1 つのセルに進入する際に発生する 8 重衝突まであり得る。

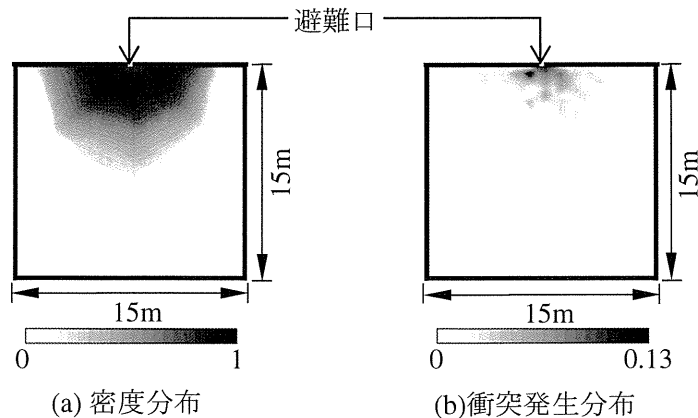


図 3-11 標準パターンにおける避難口まわりの密度と衝突発生率の分布

図 3-12 は、標準パターン含む 16 パターンを流動係数の大きい順に左からソートし、夫々、(a)標準パターンに対する流動係数の増減割合、(b)避難口における全衝突発生率と n 重衝突発生率、(c)避難口から見て 1 次近傍セル平均の全衝突発生率と n 重衝突発生率を示している。流動係数の大小は、大略、避難口における衝突の大小順に一致する。例えば、(m), (l), (g)のパターンの 1 次近傍セル平均衝突発生率はほぼ同値

であり、この場合は、流動係数の大小は避難口における衝突発生率の大小順に厳密に一致する。

(c)と(i)は避難口における衝突発生率がほぼ同等である。この場合は、流動係数は1次近傍セル平均の全衝突発生率が大きい方が大きい。同様のことが、(a), (d), (b)の比較においても成り立つ。

(u), (q), (s), (o), (n), (j)の各パターンは避難口への侵入方向が1つしかないので避難口における衝突発生率はゼロであり、その場合は、流動係数は1次近傍セル平均の全衝突発生率が小さい方が大きくなる。

以上のことから、避難口における衝突を軽減させる、そのためにはその直前セルで衝突を多く引き起こすことが、結果的に流動係数を改善することに繋がっていることが分かる。

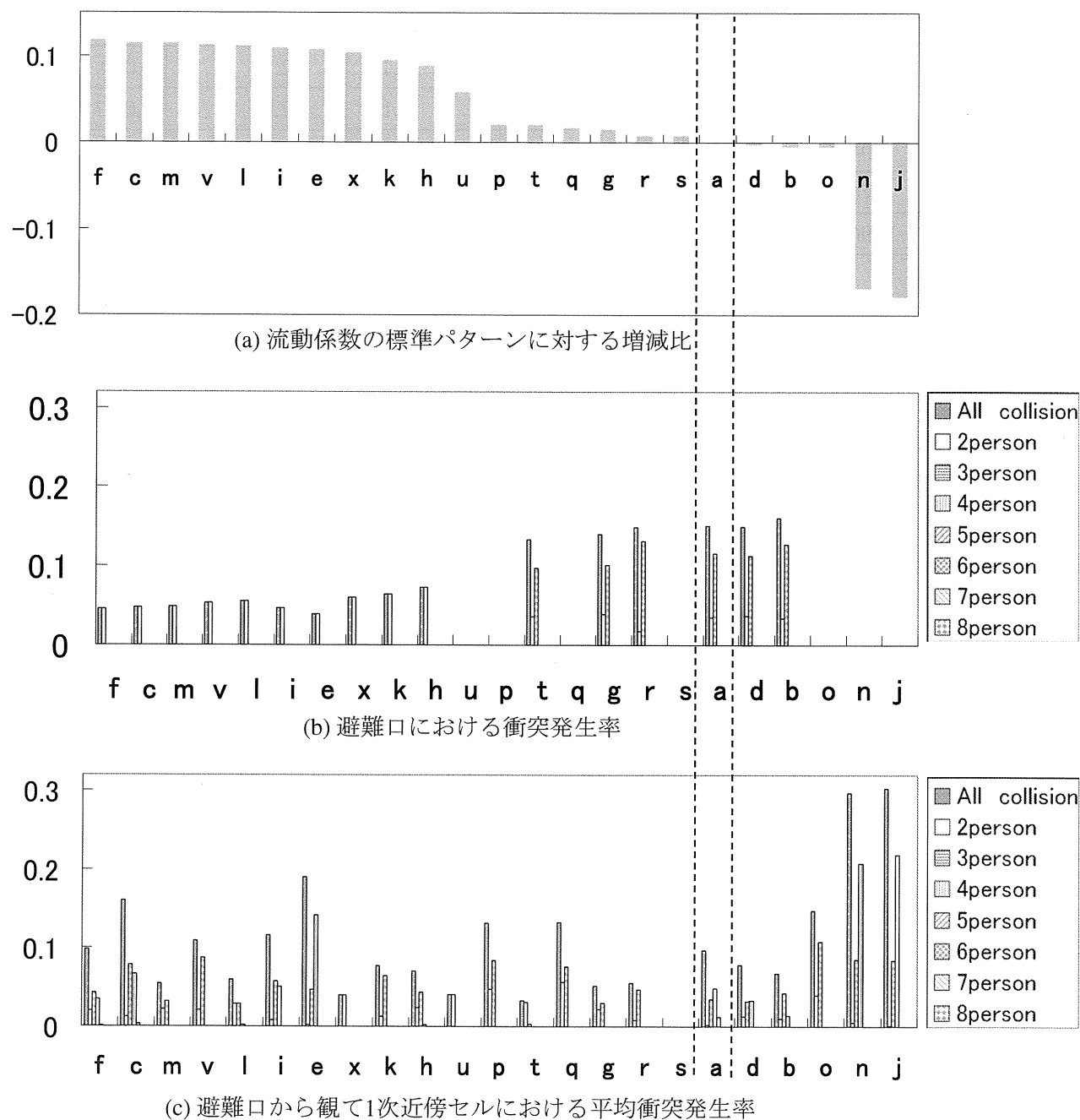


図 3-12 各パターンの結果 ; (a)流動係数の標準パターンに対する増減比, (b)避難口における衝突発生率, (c)避難口から観て1次近傍セルにおける平均衝突発生率

3.5 結論

本章では、避難路における bottleneck 問題とゲーム論で言う *ST* 互惠との相似性への興味から、floor field を基礎とし、これに衝突の効果を加味して、さらに先行研究による実験結果によりモデルパラメータをチューニングしたセルオートマタ型人間エージェント流動シミュレーションモデルを構築した。

避難口直前セルに平均場近似を適用した検討により、衝突により人のアーチが形成される現実的状況下では、避難口前の空間に障害物を設置することにより人の流れを整流することで、避難口の流動効率を改善できることを示唆した。数値計算により、障害物設置のパターンを変えながら、流動係数を求めた。その結果、障害物のない状況より上記した流動の効率が改善する場合と障害物が抵抗として作用し効率が悪化する場合、双方があり得、その良悪は、障害物設置により避難口に生起する衝突を如何に低減出来るかにより説明出来ることを述べた。障害物を配置することは、社会システムによって全体の効率を向上させることと対応させてみることができる。流動係数を向上させたのは、障害物の設置によって前進する人数が減少することに起因するが、場所を譲る行為に等しいと考えると、*ST* 互惠関係が創発していると言える。

上記の内容から、マルチエージェントシミュレーションを用いてゲーム論的アプローチが可能であることが示された。

【第3章 引用文献】

- [34] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, “A study on emergence of Coordinated Alternating Reciprocity in a 2x2 game with 2-memory length strategy,” *BioSystems* 90 (3), pp. 728-737, 2007.
- [35] Atsuo Yamauchi, Jun Tanimoto, Aya Hagishima, Hiroki Sagara, “Dilemma Game Structure Observed in Traffic Flow at a 2-to-1 Lane Junction,” *Physical Review E* 79, 2009.
- [36] 柳澤大地, 友枝明保, 西成活裕, “拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析,” *応用力学研究所研究集会報告 No.19ME-S2 Article 7*, 2007.
- [37] 戸川喜久二, “群衆流の観測に基く避難施設の研究,” *建築研究報告* 14, 1995.
- [38] 嶋田拓, 金井昌昭, 矢島規雄, 直井英雄, “車いす使用者を含む群衆の避難流動特性に関する実験研究,” *日本建築学会計画系論文集 No.569*, pp. 71-75, 2003.
- [39] Carsten Burstedde, Kai Klauck, Andreas Schadschneider, Johannes Zittartz, “Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton,” *Physica A* 295 507, 2001.
- [40] Ansgar Kirchner, Andreas Schadschneider, “Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics,” *Physica A* 312 260, 2002.
- [41] Ansgar Kirchner, Katsuhiro Nishinari, Andreas Schadschneider, “Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics,” *Phys. Rev. E* 67 056122, 2003.
- [42] Ansgar Kirchner, Hubert Klupfel, Katsuhiro Nishinari, Andreas Schadschneider, Michael Schreckenberg, “Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics,” *J. Stat. Mech.: Theor. Exp.* P10011, 2004.

第4章 進化ゲームにおける適応プロトコルのローカリティに関する基本的検討

4.1 はじめに

2x2 ジレンマゲームがネットワーク上で行われる、所謂、ローカリティ（局所性）が存在する状況下では、対戦相手が少数に限定されるために裏切り（Defeat, D）が優越戦略の場合においても互いに協調（Cooperation, C）を出す R 互恵が創発し、その効果は対戦相手決定時と、協調と裏切りのどちらを出すかを決定する戦略適応（学習）時の 2 段階に及ぶことが知られている^[43]。既往研究^{[44][45]}では、対戦を行う範囲と戦略を適応させる際に参照対象とする範囲を変えることで創発相が異なることを明らかにしており、両範囲が一致する場合、最も R 互恵が効果的になるとされている。これらの研究ではローカリティをネットワーク上で定義しており、対戦や戦略の母集団をサブクラスに分割する意味でのローカリティは想定されていない。また、ネットワークゲームと云う前提からプレーヤの戦略は 1bit（C か D か）で表現されているが、戦略表記を自他の過去の手を記憶して次の手を決定する多記憶長としたときのローカリティの特性については検討されていない。戦略が 2 記憶長となると、R 互恵だけでなく、Chicken 型ジレンマの Leader や Hero で効率的に高利得を上げる ST 互恵^[34]が創発することが解っているが、ST 互恵に及ぼすローカリティの影響は興味あるところだろう。

本論では、一連の数値実験により、2 記憶長戦略をもつエージェントが様々なクラスの 2x2 ゲームを繰り返す際、対戦及び戦略適応時のローカリティを独立に変化させることで、創発相にどのような影響が顕れるのかを明らかにする。

4.2 モデルの概要

エージェントが互いに 2x2 ゲームを繰り返しながら、ゲームによる獲得利得がより大きな戦略が適応的に進化するエピソードをモデル化する。総エージェント数 A_g 人の系において、ローカリティを導入することで R 互恵や ST 互恵（互いに協調と裏切りを交互に出すことで互いに協調を出し合う R 互恵よりも高い利得を得る、より高度な互恵関係^[46]）が創発するか否かを検討する。

4.2.1 ゲーム構造の表記

エージェントは 2x2 ゲームを行う。協調（C）もしくは裏切り（D）を離散手として出す 2x2 ゲームの構造は、自他の組手（D,D）、（C,D）、（D,C）、（C,C）に対する利得をそれぞれ P（Punishment）、S（Saint）、T

（Temptation）、R（Reward）とするなら、マトリクス $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R & S \\ T & P \end{bmatrix} \equiv [R, S, T, P]$ で表現される。ゲーム構造 \mathbf{M} が表

現する PD, Chicken などあらゆる 2x2 ゲーム空間は、ギャンブル性のジレンマ強度を表す D_g , リスク回避性のジレンマ強度を表す D_r を用いて、式(3-1)で表される。なお、式(4-1)において $p_0 \geq 0$ である^[46]。

$$\begin{aligned} P &= -p_0 \\ S &= -p_0 - D_r \\ T &= p_0 + D_g \\ R &= p_0 \end{aligned} \quad \cdots(4-1)$$

4.2.2 エージェントの戦略

各エージェントは戦略を有する。戦略は状況に応じてCかDかの手を規定する行動ルールであり、本論では前回の自他の組手(P, R, S, T)を入力に、CかDかの行動を出力する状態遷移機械 (Finite State Machine, FSM) で表現する。FSM は前回の自他手組の4通りに加えて、さらに一連の2x2ゲームの初手に、CかDのどちらを出すかを規定する4+1=5bitの情報で表現される (図 4-1)。TFT (tit for tat, しっぺ返し戦略の略。対戦相手に出された手を、次の自分の手とする) は C|DDCC, PAVLOV (初手は協調を行い、以後、得点が高ければ同じ手、低ければ手を変える) は C|CDDC で表される。全エージェントは各々1つの戦略を持ち、戦略の更新は1エージェントを1つの遺伝子と見なして、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) によって行う。GA では、Gene Pool に存在する全遺伝子を親遺伝子とし、淘汰・交差・突然変異のメカニズムを用いて親遺伝子と同数の次世代の小遺伝子を作成する。遺伝子の適合度は、1世代中に獲得した総利得をゲーム回数で除した値とする。GA の遺伝子操作は Boltzmann 選択 (温度係数 T_B とする) による自然淘汰、1点交叉 (交叉確率 p_{cross})、突然変異 (各遺伝子に対して突然変異確率 p_{mut}) とする。

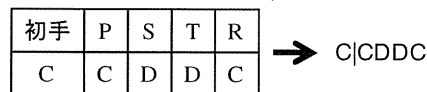


図 4-1 FSM の表記例

4.2.3 ゲーム対戦相手、戦略更新時の参照範囲の制限

エージェントがゲームを行う対戦する相手、および GA を適用する Gene Pool に制限を加えることで、系に2x2ゲーム対戦時に作用するローカリティ (以下、対戦ローカリティ) と戦略更新時に作用するローカリティ (以下、戦略更新ローカリティ) を導入する。

エージェントはシミュレーション開始時に F 個の対戦フィールドの内、いずれか1つにランダムで割り振られる。この時、対戦フィールド内の人数はいずれも同一とする。すなわち、1対戦フィールドのエージェント数は A_g/F である。エージェントは L 回の繰り返しゲームを同一対戦フィールド内の全エージェントと同数回行い、既述のように適合度は1世代中に獲得した総利得の1ゲーム当たり平均値とする。

同様に、 G 個の Gene Pool 内の人数が等しくなるように、全エージェントをエピソード開始時にランダムで割り振る。すなわち、1対戦フィールドのエージェント数は A_g/G である。1世代終了時に Gene Pool 単位で GA が適用され、戦略は更新される。Gene Pool への割り振り、および対戦フィールドへの割り振りは、無相関に行われる場合と、相関がある場合の2つの方法を想定する。無相関の場合、Gene Pool と対戦フィールドへの割り振りは完全に独立して行う。相関を持たせる場合は Gene Pool を作成後、ある Gene Pool に属する全エージェントは特定の他 Gene Pool に存在するエージェントと総当たりで対戦を行う。そのため、相関がある場合、 G と F の値は等しい (図 4-2)。

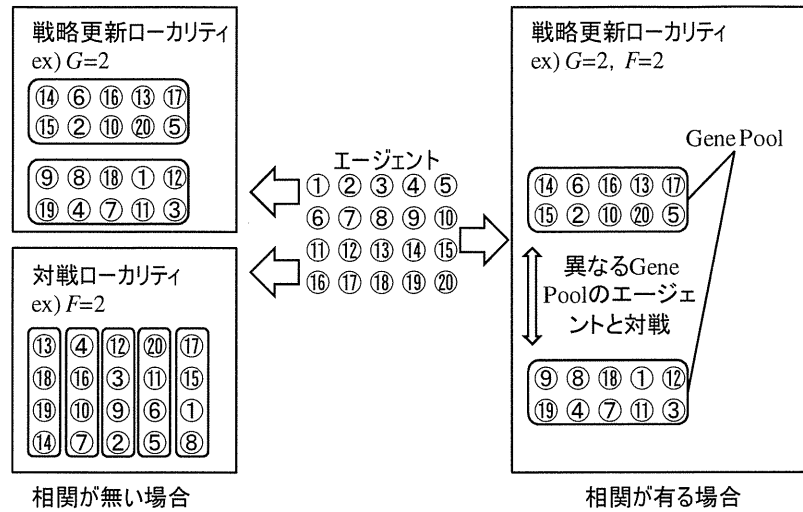


図 4-2 ローカリティの作成方法の例

4.2.4 数値実験

パラメータの設定値を表 4-1 に示す。 F および G は $\{1,2,5,10\}$ と 4 段階で変化させ、ローカリティの影響を検討した。シミュレーションは予備実験により系が疑似均均衡に達することを確認した上で 1000 世代を繰り返し上限とし、951 世代から 1000 世代までの 50 世代の平均を 1 エピソードの結果とする。解析はエピソード 5 回のアンサンブル平均とする。

本稿では $D_g = [-2, 5]$, $D_r = [-5, 2]$ の間で共に 0.1 刻みで変化させながらシミュレーションを行った。この範囲に含まれるゲームクラスは、図 4-3 に示すように、主として Chicken 型のジレンマ ($D_g > 0, D_r < 0$) であり、加えて Prisoner's Dilemma (PD. $D_g > 0, D_r > 0$), Stag Hunt (SH. $D_g < 0, D_r > 0$), Trivial ($D_g < 0, D_r < 0$) である。特に Chicken 型ジレンマゲームのクラスは、 $S+T > 2R$ の条件を満たす、すなわち、ST 互惠のインセンティブがある Leader ($T > S$) と Hero ($S > T$)、その条件を満たさない pure-Chicken に 3 分される。

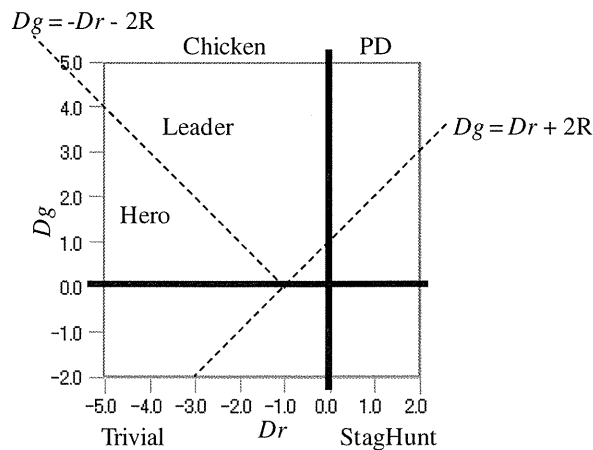


図 4-3 ゲーム領域

表 4-1 計算パラメータ

$A_g=10000$	$L=100$	$T_B=0.01$
$p_0 = 0.5$	$p_{cross} = 0.5$	$p_{mut} = 0.01$

4.3 シミュレーション結果及び考察

4.3.1 ローカリティが存在しない場合($G=1, F=1$)

Well-mixed な状況下でのゲームであり、戦略が C か D かの 1bit 表記であれば Replicator Dynamics による解析解と一致する。Replicator Dynamics は系全体の戦略更新メカニズムを微分方程式で表し、全戦略が均等に存在する状態を初期状態として均衡点を求める方法である。

図 4-4 に均衡時の 1 エージェント 1 ゲーム当たりの平均利得 (社会平均利得), P の生起率, R の生起率, ST の生起率を表す。これらをもと図 4-5 に 3 つの創発相にクラス分けした相図を示す。

領域 A は、ジレンマのない Trivial ゲームに加え、Chicken 型ジレンマがないという意味で微弱なジレンマしかない SH, そしてジレンマの弱い Chicken と PD の一部で構成されている。この領域の平均利得は約 0.5 (=R) となっている^[46]。これは、5bit と云う記憶長戦略の効果により、ジレンマが弱いゲーム領域では、公平なパレートである R 互恵が達成されていることを意味する^[34]。

領域 B, B' は、効率的に S と T を取る ST 互恵により、公平なパレートである R を取るよりも高い利得を獲得している領域である。Tanimoto & Sagara^[34]によれば、ST 互恵には 2 タイプがあると云う。すなわち、①戦略ペアで L 回繰り返すゲームの中で互いに S と T を交互に取り合う効率的な ST 互恵 (交互 ST 互恵) と、②ある戦略ペアの対戦では一方的に S (或いは T) を取り、他戦略との対戦時に R (或いは P) を取って一人負けを取り返す (一人勝ちを吐き出す) ことで帳尻を合わせる ST 互恵 (確率 ST 互恵) である。このうち Trivial にある領域 B' では、均衡時の戦略分布を確認したところ、*|DC* (*は wild card で C か D の何れかであることを意味する。以下、交互 ST 互恵戦略) の戦略が 9 割以上を占めており、効率的な交互 ST 互恵を創発していた。*|DC* はゲームの帰結が S の時の次手は D, 帰結が T の時の次手は C を出す戦略である。そのため、この戦略同士が対戦を行うと互いに S と T を取り合うこととなる。対して領域 B では、均衡時の戦略分布は*|CD* (以下、確率 ST 互恵戦略) が 5 割を超え、高利得を上げ得ると云う意味では交互 ST 互恵には劣る確率 ST 互恵が創発していることが確認された。確率 ST 互恵戦略の存在比が 0.5 と小さいのは、ある確率 ST 互恵戦略から T を取り続けることで高利得を獲得し、フリーライダーとして存在する戦略が併存するためである (但し、他戦略との対戦では低利得しか上げられず、適合度は確率 ST 互恵戦略と同等となる)。なお、ST 互恵のインセンティブが有る領域は、 $D_g = D_r + 2R$ より左側にあるエリア ($S+T > 2R$)、すなわち R 互恵より獲得利得が大きくなる領域のみである。

Chicken 型ジレンマ D_g の大きいエリアに顕れる領域 C は、PD 領域内と、PD と Chicken の境界部の 2 カ所に創発する。前者の D_r が 1.2 以上の領域では 5bit 記憶長戦略でも R 互恵は達成し得ず Nash 均衡にトラップされてしまう。PD と Chicken の境界部では、ST 互恵を創発させる領域 B (領域 C の左側) と R 互恵する領域 A (領域 C の右側) との狭間で、確率 ST 互恵から R 互恵に転相する境界で P の生起頻度が大きくなることで利得が 0.5 を下回ることにより生じる。

図 4-6 に最終世代における戦略分布を示す。図 4-6 の $D_g=5.0, D_r=2.0$ は、領域 C の PD 領域内に該当する。この領域の最終世代では、D|DCDC, D|DCDD, D|DDDC, D|DDDD の 4 戦略、即ち D|D*D* に寡占さ

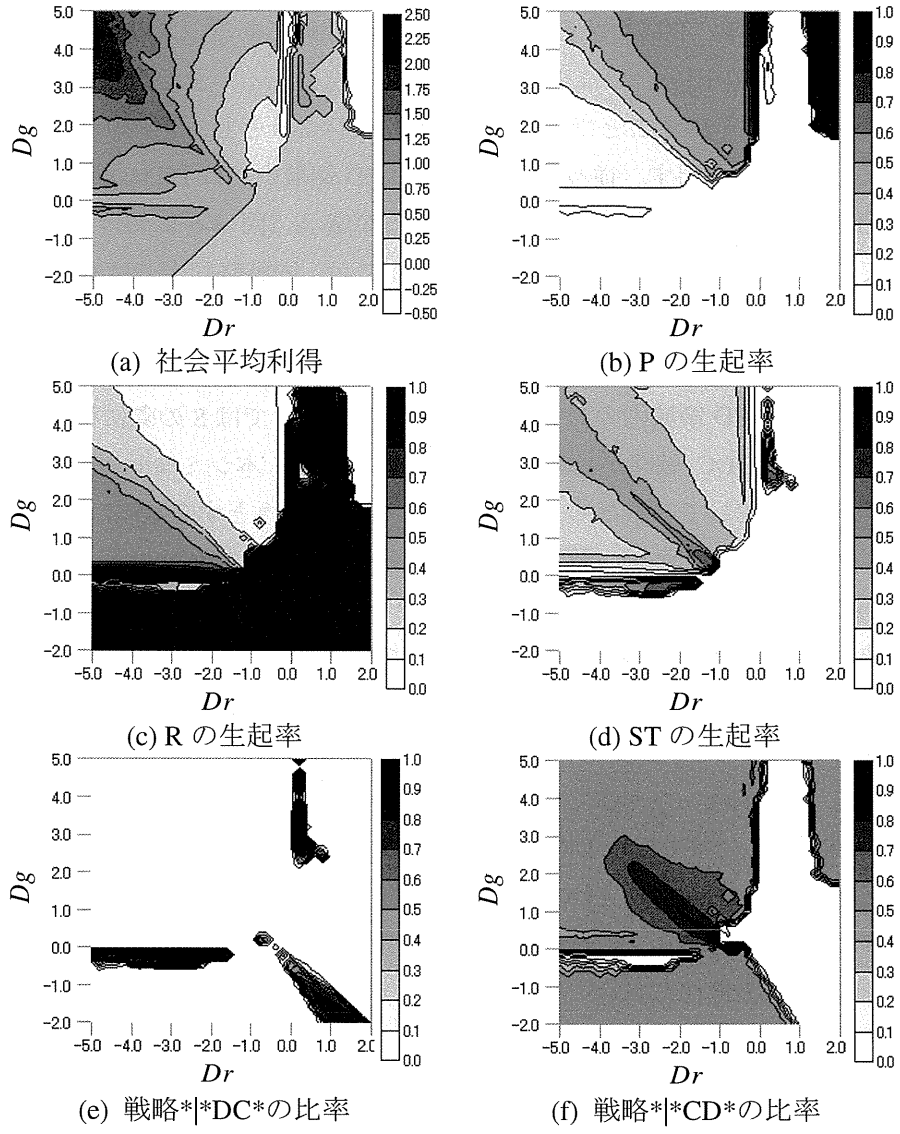


図 4-4 $G=1, F=1$ でのシミュレーション結果

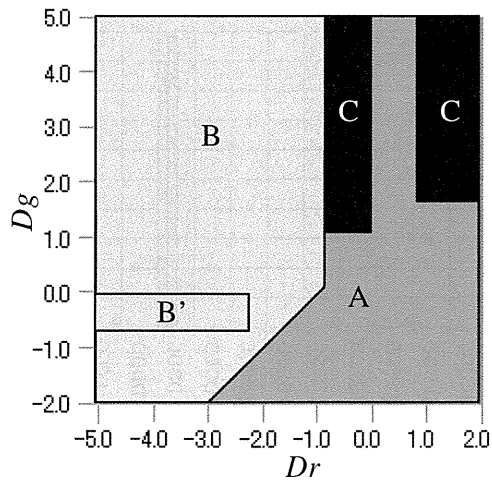


図 4-5 創発相パターン

れている。D|D*D*は初手，P，Tにおける次手がDである戦略である。この戦略同士が対戦した場合，初回はPとなり，その後はDの出し合いによってPが続くことになる。また，D|D*D*戦略がその他の戦略と対戦した場合は，初手にDを出すことで，TかPを取りに行こうとし，Tを取れた場合はDを出すことで続けてTが取れるようにDを出す。従って，領域CのPD領域内ではD|D*D*戦略によって裏切り合いに陥り，全体の平均利得は低位に留まる。これに隣接する領域A（図4-6における $D_g=5.0, D_r=0.6$ ）では，最終世代においてほぼC|DDDC戦略のみとなる。C|DDDCは，同戦略同士ではCを出し合ってRを取り合うが，一度でも対戦相手にDを出されるとその相手には常にDを出し続けることで相手を排除しようとする。領域Aでは，C|DDDC戦略同士でR互恵を構築することで，D|D*D*戦略よりも高い利得を得て寡占状態を築いていく。しかし，PD領域内のC領域（ $D_g=5.0, D_r=2.0$ ）ではSの際に得られる利得が領域Aの時と比べて小さいため，C|DDDC戦略が拡散することができない。本シミュレーションでは，開始時点では32戦略が均等な比率で存在しているため，開始直後にCを出そうとする戦略はD|D*D*戦略などによってSを取らされることで低利得になり，開始初期にCを出そうとする戦略は殆ど存在しなくなる。一方，D|D*D*戦略は初期に多量のTを得ることで高利得となり，寡占状態を敷くことでR互恵を構築する戦略の増加を防いでしまうため，C|DDDC戦略が最終世代まで残らないのである。

PDとChickenの境界部の領域Cの最終世代では，僅かなD|CCDD戦略と多数のD|D*D*戦略が併存することとなる（図4-6における $D_g=5.0, D_r=0$ ）。これに対し， $D_g=5.0$ の領域Bにおいては，C|DDDC戦略は存在せず，C|CCCC，C|CCCD，C|CCDC，C|CCDD，C|DCCC，C|DCCD，C|DCDC，C|DCDDの8戦略，即ちC|*C**戦略と，D|CCCC，D|CCCD，D|CCDC，D|CCDDの4戦略，即ちD|CC**戦略が存在するようになる（図4-6における $D_g=5.0, D_r=-0.6$ ）。C|*C**戦略とD|CC**戦略の共通点は，Sの次手がCであるということである。領域Bに当たる $D_g=5.0, D_r=-0.6$ では $P < S$ ，且つSによって得られる利得が比較的大きいため，Sを取り続ける戦略も最終世代において生き残ることができ，ST互恵が創発している。しかし，PDとChickenの境界部の領域C（ $D_r=0$ 付近）ではSへのインセンティブが小さいため，Sの次手がCである戦略はD|CCDD戦略が僅かに存在するだけであるため，ST互恵を創発するには至らない。だが，この領域では領域Aの様にC|DDDCが多数を取ることも無い。これは僅かなD|CCDD戦略が残るためにD|D*D*戦略がTを得ることで高利得を入手し，C|DDDC戦略が拡大することができる程の利得を得ることができないためである。

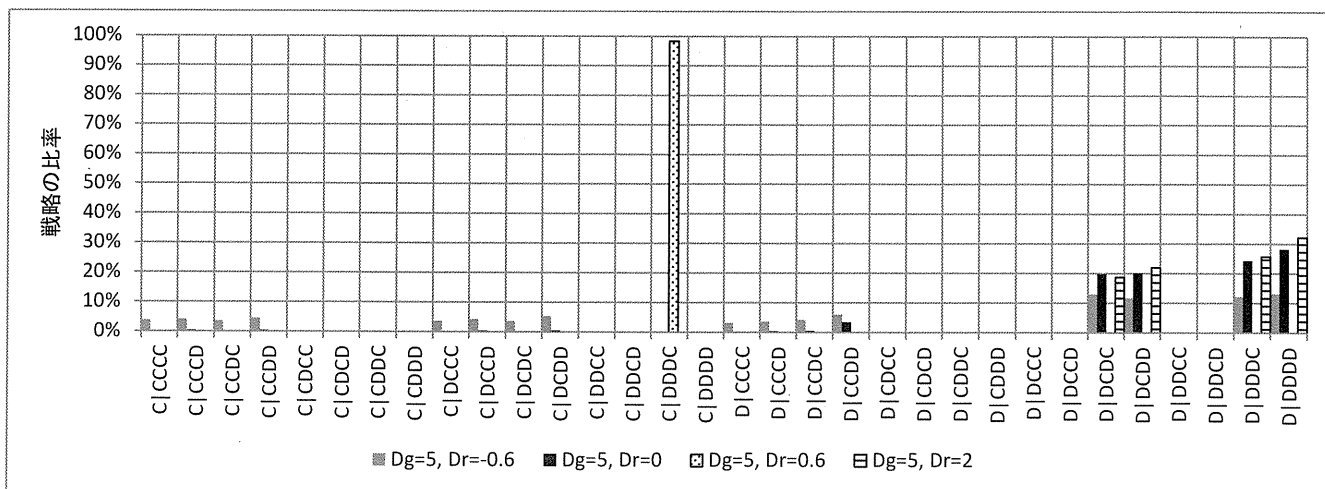


図 4-6 最終世代における戦略分布

4.3.2 相関の無いローカリティが存在する場合

図 4-7～図 4-12 は、それぞれが戦略更新ローカリティ、対戦ローカリティを変えた場合の均衡時の社会平均利得、P の生起率、R の生起率、ST の生起率、戦略*|*DC* (交互 ST 互惠戦略) の比率、戦略*|*CD* (確率 ST 互惠戦略) の比率を表す。ローカリティの強さはグラフ下に示した G と F の値で表され、値が大きいほどグループの分割数が多くなり、ローカリティが強くなる。従って、図中の下側のパネルほど戦略更新ローカリティが強く、右側のパネルほど対戦ローカリティが強いことを意味する。

戦略更新ローカリティの強さによって、前述した領域 A, B, C の様相は異なる。対戦ローカリティが比較的弱い場合 (図中左側, $F=1$ or 2, a, b, e, f, i, j, m, n) では、戦略更新ローカリティが強いほど (図の下パネルほど)、領域 B, B' において獲得利得が大きくなり、ST 互惠がより強く顕れる。また、領域 C の間にも ST 互惠によって高利得を獲得する領域が顕れ、領域 B が拡大しており、中でも対戦ローカリティが無い場合 ($F=1$, 図中最左列パネル) でより明らかである。ローカリティが変化した際の戦略分布の違いを図 4-10, 図 4-11 から確認すると、戦略更新ローカリティが強くなるほど、Chicken の領域で確率 ST 互惠戦略の比率が増加しており、PD の領域では交互 ST 互惠戦略の比率が増加していることが分かる。また、Chicken の領域で ST の生起率だけでなく、R の生起確率も増加している。以上のことから、戦略更新時のローカリティは、互惠関係を崩壊に導く裏切り戦略が社会全体に一気に拡散することを防ぐことで、互惠関係の容易にさせていると推測される。そのため、強い戦略更新ローカリティが導入されることで ST 互惠関係を築いているエージェント群に対して裏切りを出し続けて利益のみを貪るフリーライダーは駆逐され、より広範な領域で ST 互惠が構築されるようになったものと考えられる。一方、対戦ローカリティが強い場合 (図中右側, $F=5$ or 10, c, d, g, h, k, l, o, p), 戦略更新ローカリティが強まるほど領域 B の獲得利得、及び ST の生起率が低下し、ST 互惠が形成されにくくなっている。その代わりに PD 領域において顕れていた領域 C は、Nash 均衡から脱し、R 互惠を達成できるようになる。

即ち、対戦ローカリティが弱い状況では戦略更新ローカリティが強いほど ST 互惠は強化され、対戦ローカリティが強い状況では ST 互惠は創発しにくくなるが、R 互惠に達し得ない領域は圧縮される。

効率的な ST 互惠には Tanimoto & Sagara^[34]が言うように交互 ST 互惠が望ましいが、それが不可能であれば次善の策としては確率的 ST 互惠が進化する。この相では S を取り続ける戦略と T を取り続ける戦略が対戦し、別の対戦相手とゲームするときには前者は R を、後者は P を取って互いの平均利得の帳尻を合わせる。これはある意味で戦略による role-play が成立していることを意味する (これに対し交互 ST 互惠では 1 戦略内で貪り役と貪られ役を交互に交代する)。定性的には、このような戦略が適応的になるためには、戦略適応をグループに分けることは有効であろうと推量される。その際、ゲーム対戦がそのグループと無相関な別グループ内で行われることは、この role-play 戦略群の進化には却ってバイアスとして作用するだろう。従って、ゲーム対戦にローカリティがあるよりもグローバルに行われる ($F=1$) 方が ST 互惠の創発には好適な結果となったと思われる。図 4-10, 図 4-11 から、ST 互惠を行うインセンティブのある Leader と Hero のエリアについて均衡時の戦略分布を確認すると、戦略更新ローカリティと対戦ローカリティが共に強い場合 (右下パネル) は、確率 ST 互惠戦略の比率が減少する代わりに交互 ST 互惠戦略が増加している。これは、無相関な強い 2 つのローカリティが導入されると戦略更新ローカリティによってフリーライダーとなる戦略が駆逐されるが、対戦ローカリティによって複雑になった対戦状況に対応することができないために確率 ST 互惠を行うことが困難になり、僅かでも高い利得を得ようと交互 ST 互惠戦略を採用するエージェントが増加したためと考えられる。確率 ST 互惠戦略と交互 ST 互惠戦略が混在する状況でも、互い

に ST を取り合うことは出来るが、この両戦略同士が対戦を行うと確率 ST 互恵戦略が S, 交互 ST 互恵戦略が T を取った次のステップは共に C を出して R を, 確率 ST 互恵戦略が T, 交互 ST 互恵戦略が S を取った次のステップは共に D を出して P を取り, S と T を取り合う間に必ず R もしくは P を取るステップが入るために連続して S と T を取ることはできず, 効率が低下してしまう。そのため, 両ローカリティが強い状況下では ST 互恵がそれほど強く顕れなくなったのだろう。

以上を要括すると, R 互恵を enhance して領域 C を縮退させるには, 戦略更新ローカリティが強いことを前提にして, 対戦ローカリティを強くすることが有効である (結局, 戦略更新ローカリティも対戦ローカリティも強くする)。ST 互恵を enhance して領域 B を拡張させるには, 対戦ローカリティが弱いことを前提にして, 戦略更新ローカリティを強くすることが有効である (結局, 戦略更新ローカリティだけを強くする)。

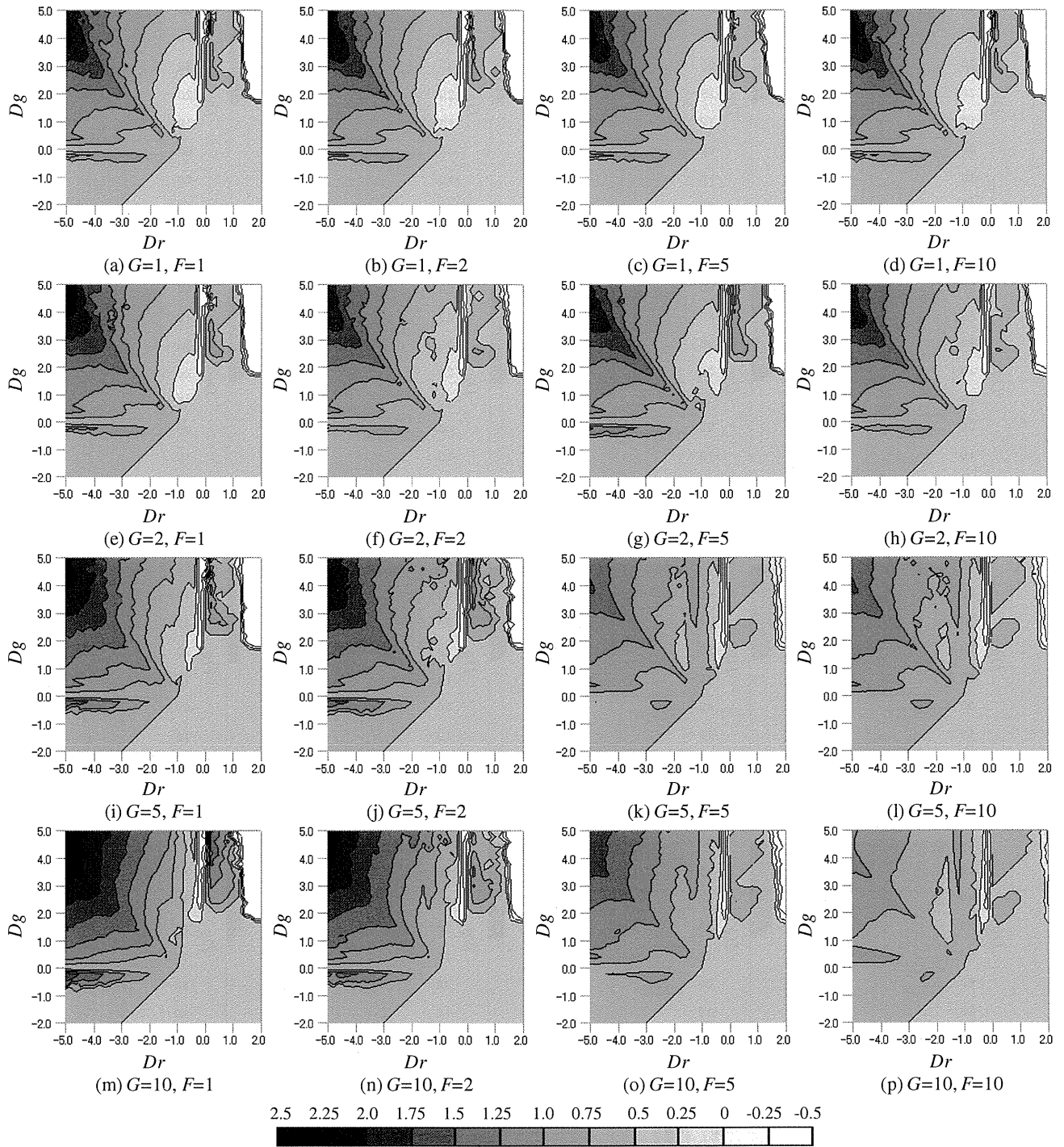


図 4-7 各ローカリティにおける社会平均利得

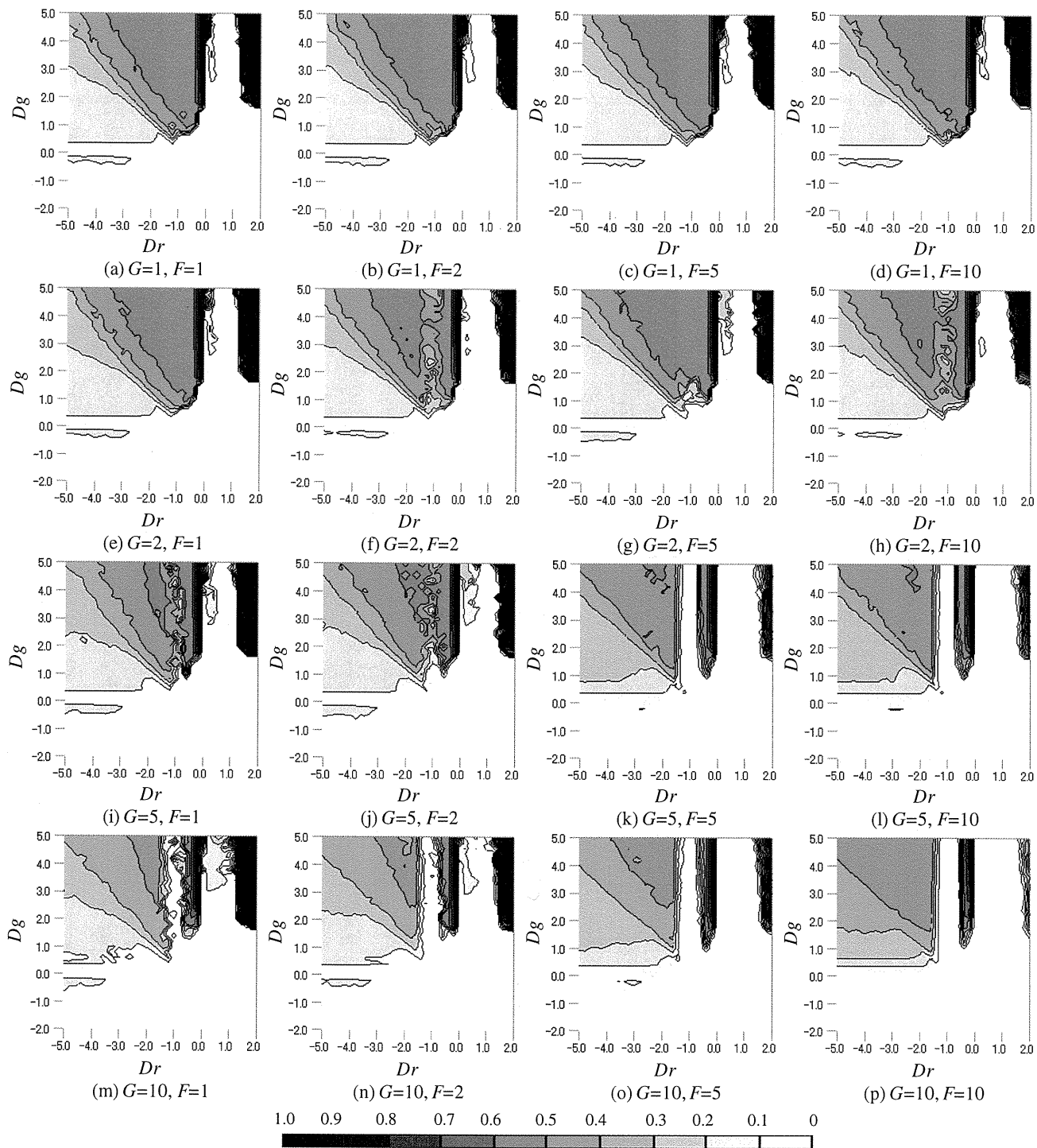


図 4-8 各ローカリティにおける P の生起率

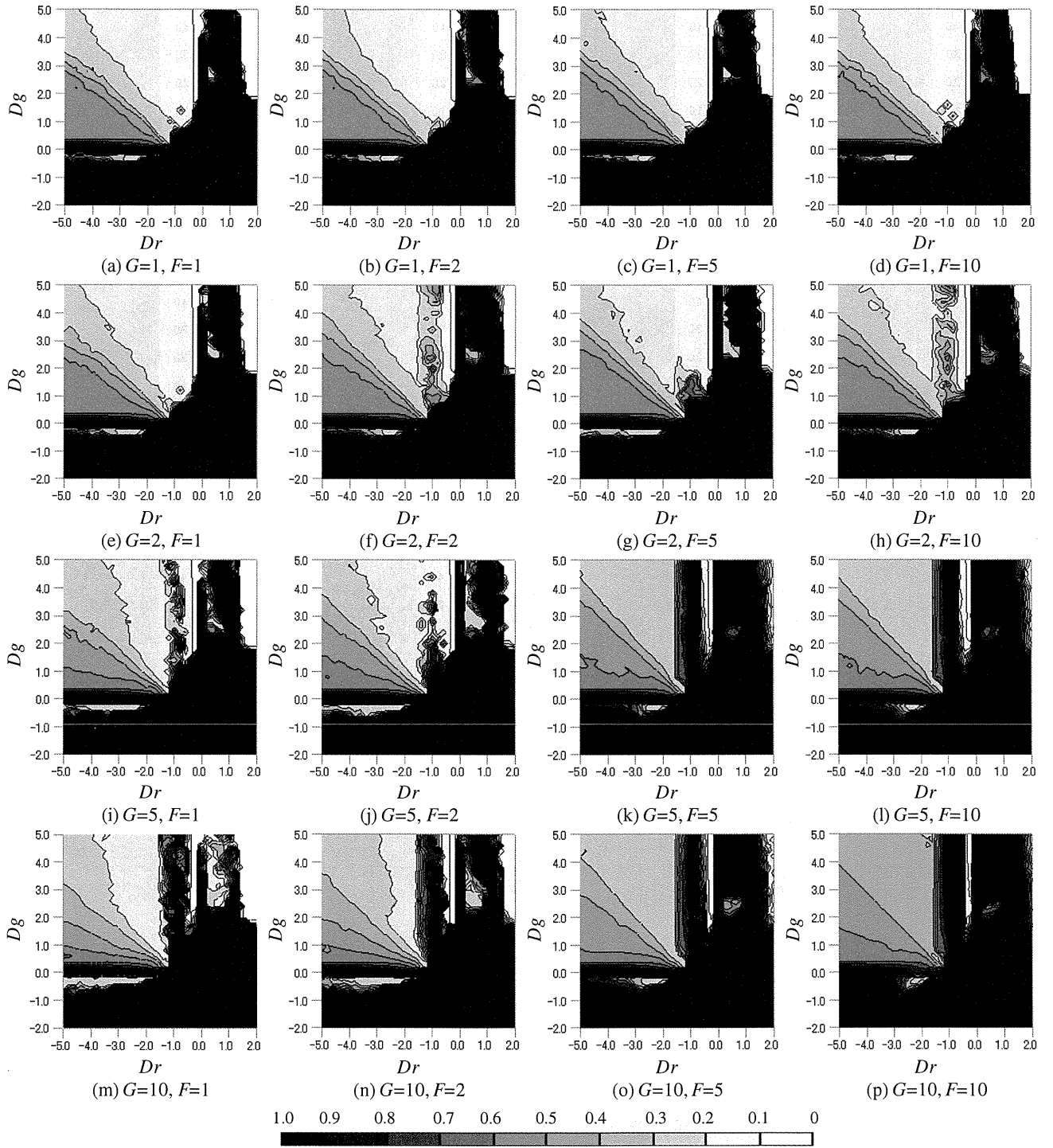


図 4-9 各ローカリティにおける R の生起率

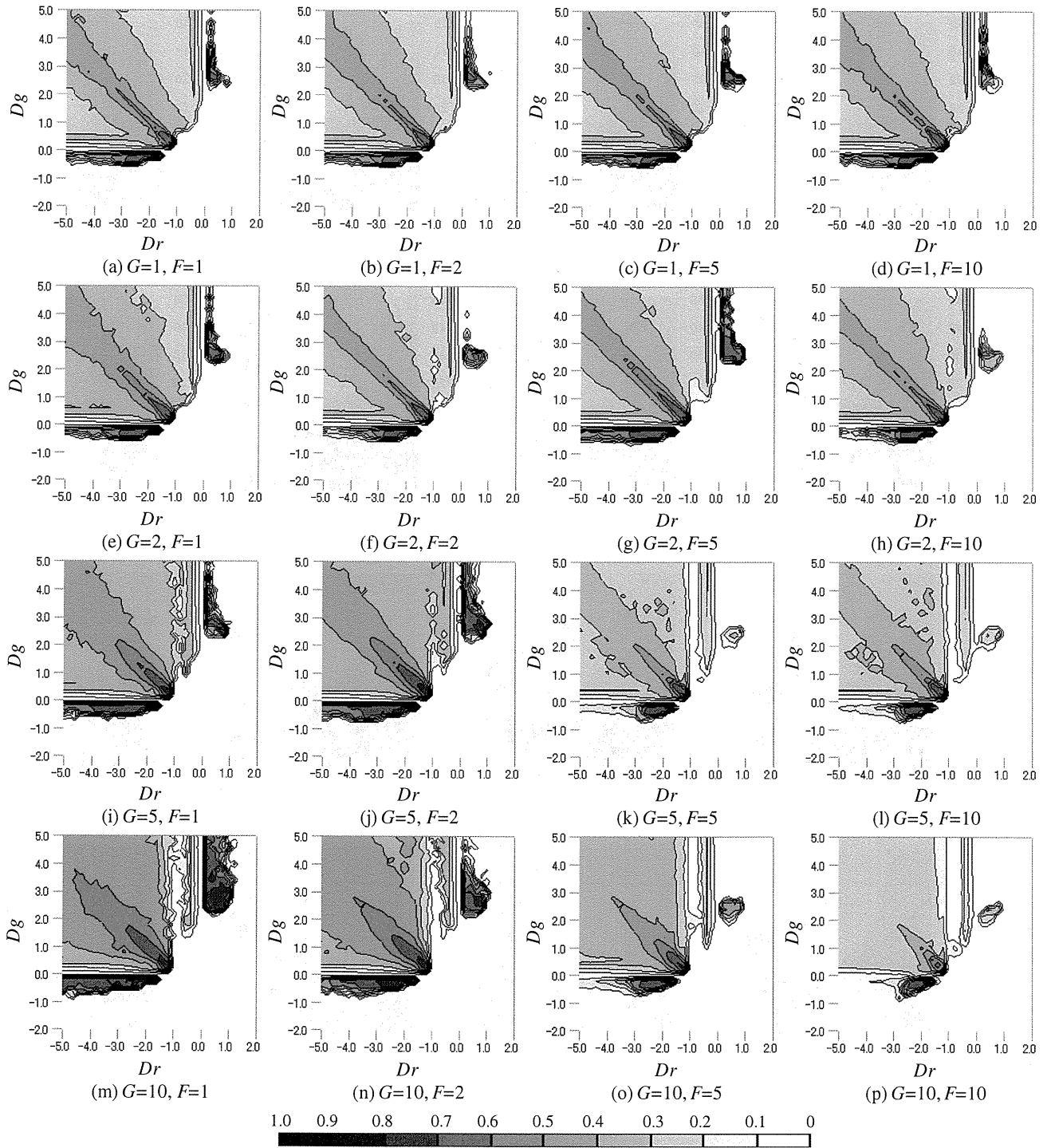


図 4-10 各ローカリティにおける ST の生起率

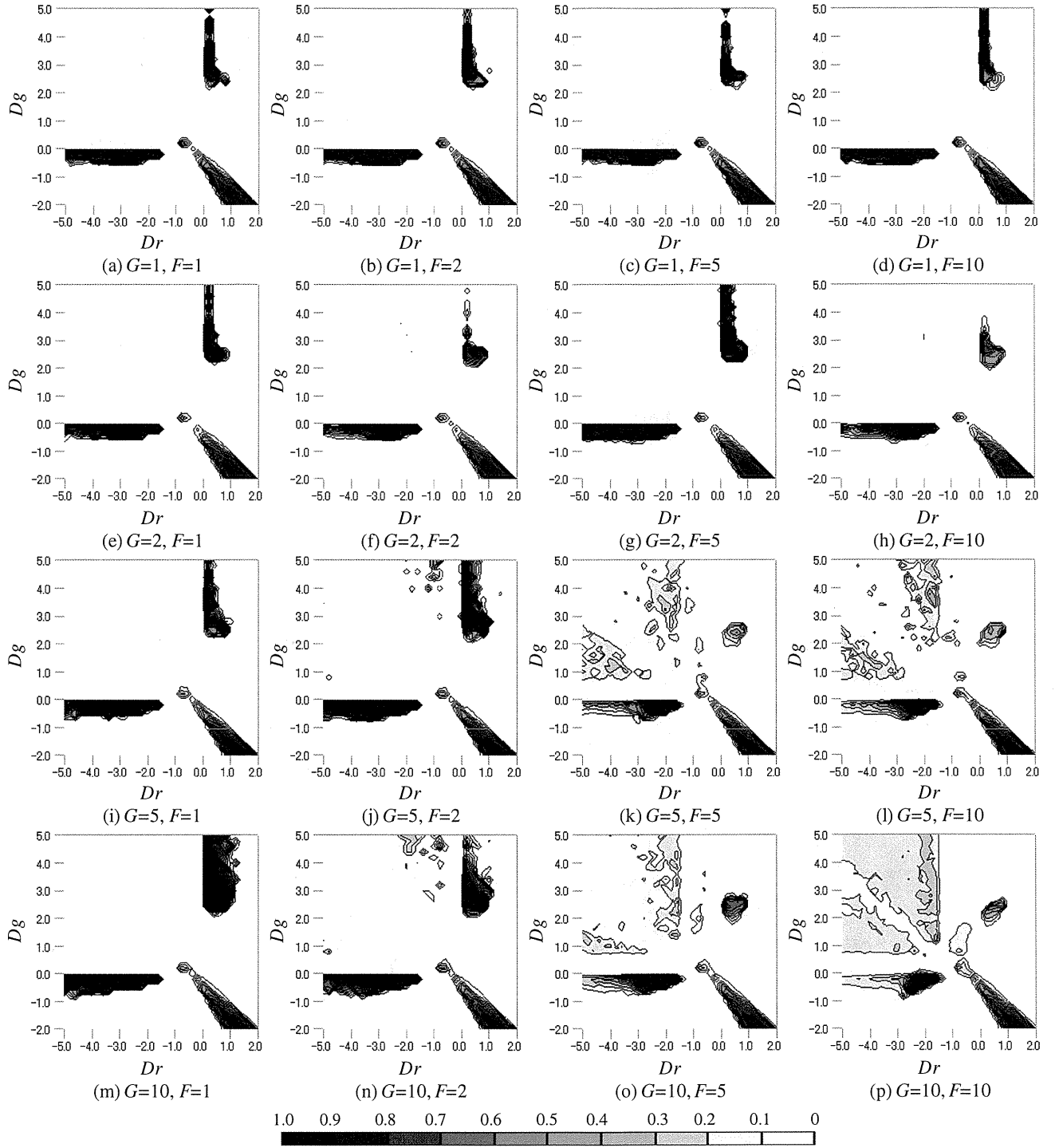


図 4-11 各ローカリティにおける戦略*DC*の比率

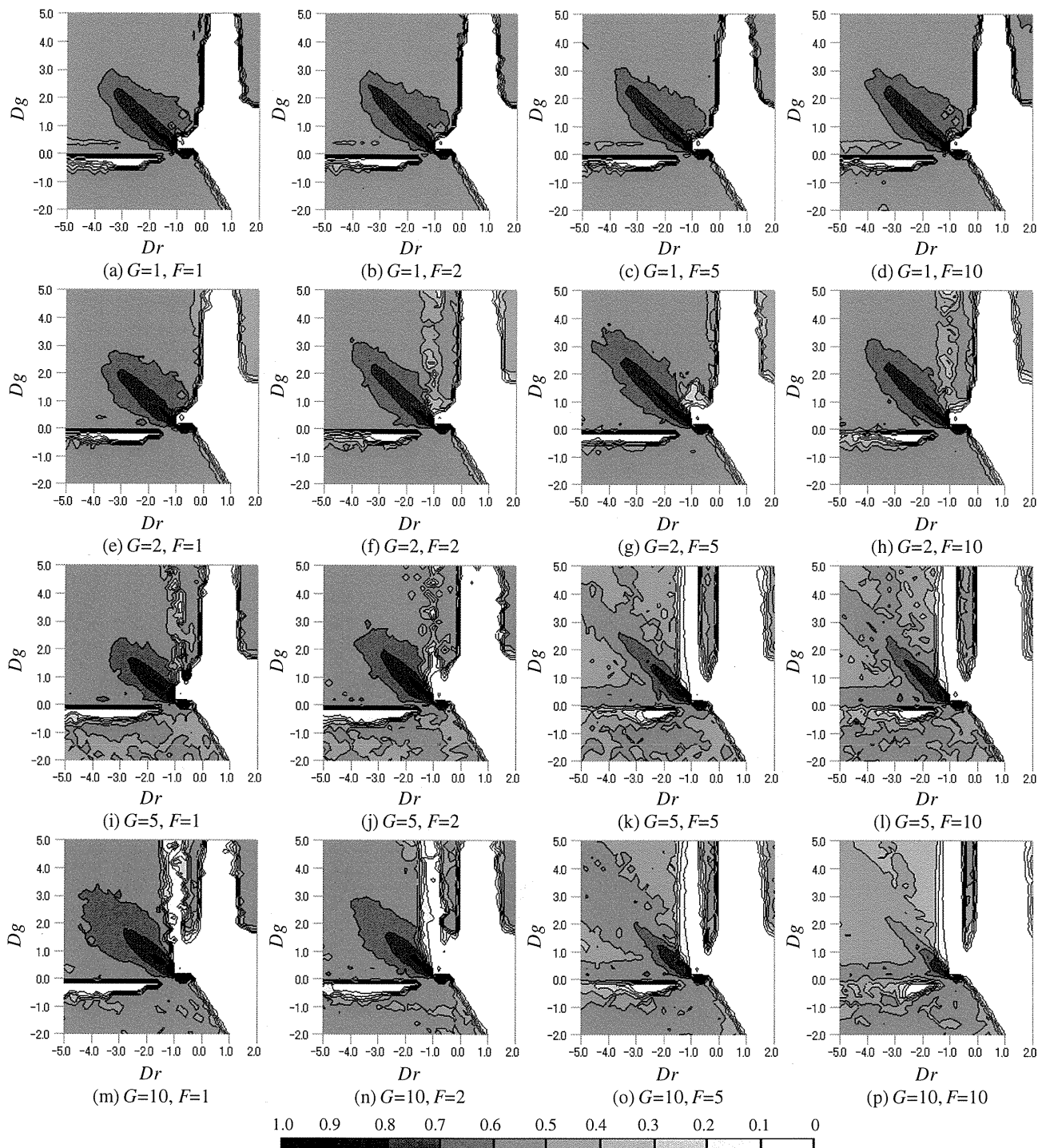


図 4-12 各ローカリティにおける戦略*|*CD*の比率

4.3.3 相関が有るローカリティが存在する場合

図 4-13 に $G=10, F=10$ の相関があるローカリティのシミュレーションの均衡時の結果を示す。

社会平均利得を確認すると、ST 互恵を行うインセンティブが有る $D_g \geq D_r + 2R$ の広範な領域で ST 互恵が創発するようになり、領域 B が拡大している。ローカリティが無い ($F=1, G=1$) では Nash 均衡に陥っていた領域 C も ST 互恵が構築される領域 B となり、全体的に高利得が得られるようになっている。

これは戦略更新ローカリティと対戦ローカリティが完全に相関しているため、Chicken の領域では確率

ST 互恵を行う際に S と T のどちらを取るかを Gene Pool 単位で役割を切り替えることができるようになるため、確率 ST 互恵戦略である $*|*CD*$ の比率が増加し、role-play が容易に達成され ST 互恵が容易に達成されるものと推測される。また、両ローカリティに相関がある場合、戦略更新の拡散範囲はローカリティが無相関な場合よりも限定的となるため、社会全体を Nash 均衡に陥れる裏切り戦略の拡散が抑えられ、互恵関係が構築されるようになる。

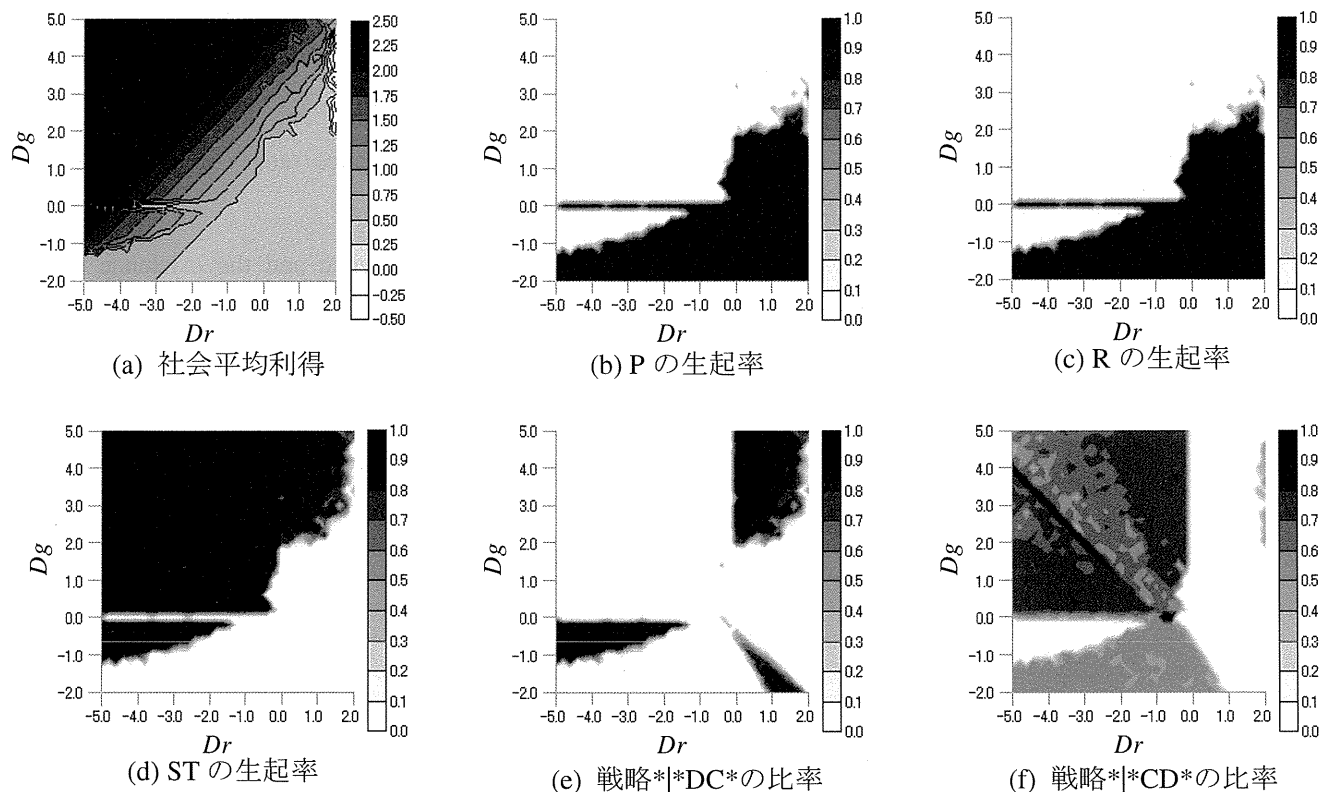


図 4-13 $G=10, F=10$ のシミュレーション結果

4.4 結論

対戦、及び戦略更新時のローカリティを独立に変化させて 2 記憶長戦略付きの 2×2 ゲームを行い、以下の結果を得た。

- ローカリティが無い状況下では、Chicken 及び Trivial のゲーム構造を持つ領域で ST 互恵が創発し、PD のジレンマが強い領域では Nash 均衡にトラップされ、裏切り合いになる。その他のゲーム領域では R 互恵が構築される。この結果は Tanimoto & Sagara^[34]の結果と一致する。
- 対戦ローカリティが弱い状況下で戦略更新ローカリティが強くなると ST 互恵が創発する領域が拡張する。一方、対戦ローカリティが強い状況下では戦略更新ローカリティが強くなるとともに ST 互恵が行われるゲーム領域は縮小するが、PD 内の Nash 均衡に陥っていた領域では R 互恵が構築される。
- 対戦ローカリティと適応更新ローカリティが無相関で共に強い場合、ST 互恵が構築されにくくなるが、両ローカリティに相関がある場合は ST 互恵が広範な領域で構築されるようになる。

【第 4 章 引用文献】

- [34] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, “A study on emergence of Coordinated Alternating Reciprocity in a 2x2 game with 2-memory length strategy,” *BioSystems* 90 (3), pp. 728-737, 2007.
- [43] Atsuo Yamauchi, Jun Tanimoto, “An analysis of network reciprocity in Prisoner's Dilemma games using Full Factorial Designs of Experiment,” *Biosystems* 103 (1), pp. 85-92, 2011.
- [44] Hisashi Ohtsuki, Jorge M. Pacheco, Martin A. Nowak, “Evolutionary graph theory: Breaking the symmetry between interaction and replacement,” *Journal of Theoretical Biology* 246, pp. 681-694, 2007.
- [45] Xiaojie Chen, Long Wang, “Cooperation enhanced by moderate tolerance ranges in myopically selective interactions,” *Physical Review E* 80, 2009.
- [46] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, “Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game,” *BioSystems* 90 (1), pp. 105-114, 2007.

第5章 外生的資源制約を課した環境ジレンマゲーム検証モデルの解析

5.1 はじめに

Player エージェントが互いに 2x2 ゲームを繰り返しながら、自身の利得最大化を目指して、有限の資源を環境から奪い合う、或いはサステナブルな範囲で資源を獲得する（環境が危機に瀕すると環境擁護的行動をとる）と云った、エージェントの行動（それを発現させる戦略）を進化させるエピソードをモデル化する。環境は有限なストックとフローの概念を有し、環境の状態量（環境の資源保持量）の関数で表される回復能力をもつ。

5.2 シミュレーションモデルの説明

5.2.1 ゲーム構造

エージェントは対称 2x2 ゲームを行う。2x2 ゲーム構造は協調（Cooperation, 以下 C）もしくは裏切り（Defection, D）を離散手として出し、自他の手組み（自手 D, 相手 D）、（自手 C, 相手 C）、（自手 C, 相手 D）、（自手 D, 相手 C）に対する利得をそれぞれ P (Punishment), R (Reward), S (Saint), T (Temptation) で表す。ここで、ゲーム構造は $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R & S \\ T & P \end{bmatrix} \equiv [R, S, T, P]$ なるマトリクスで、エージェント i の C か D かの手を $\mathbf{s}_i^T = (1, 0)$ あるいは $\mathbf{s}_i^T = (0, 1)$ なる縦ベクトルで表す（ T は転置を表す）。ゲーム構造 \mathbf{M} は、Tanimoto & Sagara^[34]に基づき、解可能領域（図 5-1）に示す 2 つのパラメータ $r = r_2 / r_1$, θ [deg] にて (5-1) ~ (5-5) 式で表せ、 r 及び θ によってそのジレンマ構造を分類することが可能となる（図 5-2）。

$$P = x_0 - 0.5 \cdot r_1 \cdot \cos(45) \quad \dots(5-1)$$

$$R = x_0 + 0.5 \cdot r_1 \cdot \cos(45) \quad \dots(5-2)$$

$$S = x_0 + r_2 \cdot \cos(45 + \theta) \quad \dots(5-3)$$

$$T = x_0 + r_2 \cdot \sin(45 + \theta) \quad \dots(5-4)$$

$$x_0 = (P + R) / 2 \quad \dots(5-5)$$

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く、 $r = r_2 / r_1$ なる正規化でも解可能域の相似関係は保存されるので、実質的には 2 パラメータとなる。

図 5-2 上の太線で囲われた領域には 2 種類のジレンマが存在する。1 つはパレート最適性から生じる利得上側のジレンマであるギャンブル性ジレンマ ($Dg = T - R > 0$) であり、もう 1 つはパレート最悪性から生じるリスク回避性ジレンマである ($Dr = P - S > 0$)。ギャンブル性ジレンマは青線で囲われた領域に存在し、リスク回避性ジレンマは緑線で囲われた領域に存在する。従って、Hero, Leader, Chicken の領域ではギャンブル性のジレンマしか存在せず、一方、Anti-Hero, Anti-Leader, Stag Hunt の領域ではリスク回避性のジレンマしか存在しない。Leader & Stag Hunt, Anti-Leader & Chicken, PD の領域は 2 種のジレンマが存在する領域となる。それ以外の領域はジレンマが存在しない Trivial ゲームである。また、赤線で囲われた領域は、 $S + T > 2R$ となるので、 R を取りに行くよりも、交互に S と T を取りに行く方が高利得を得られる領域である。図中のマーク（■, ◆, ●, +, ▲, ×）は後段詳細を述べるゲーム領域である。

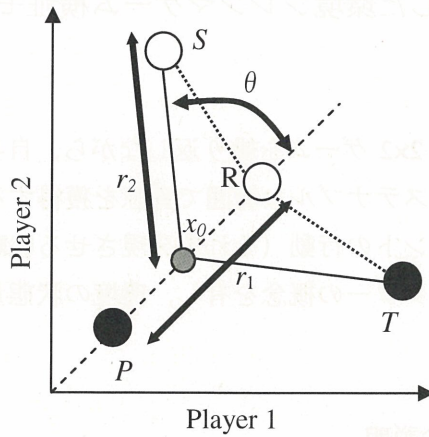


図 5-1 2x2 ゲームの解可能域

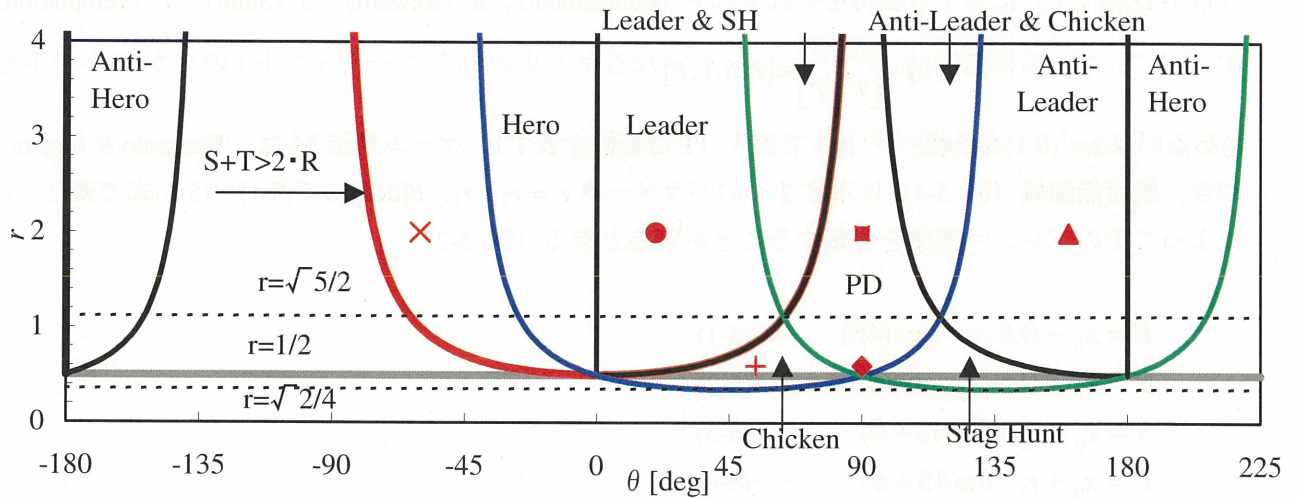


図 5-2 ゲーム領域図

5.2.2 エージェント

エージェントは複数のフィールドの何れかに必ず所属し、同フィールドのエージェントと 2x2 ゲームを行うことによって、フィールドに紐づく環境と資源のやり取りを行う。この時、フィールド k に属するエージェント j と対戦するエージェント i の資源要求量 $Rq_{i,k}$ は(5-6)で与えられる。 M はゲーム構造を表す利得行列。 s はエージェントの戦略を表すベクトルであり、C 選択者は $[0, 1]$ 、D 選択者は $[1, 0]$ で表されるので、 $s_j \cdot M \cdot s_i^T$ はエージェント i がエージェント j と対戦した場合の $[P, S, T, R]$ の帰結である。また、 $\Sigma(s_j \cdot M \cdot s_i^T)$ は、フィールド k における全帰結の総和である。

$$Rq_{i,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } Env_k - \sum (s_j \cdot M \cdot s_i^T) < 0 \ \& \ Rq_{i,k} > 0 \\ s_j \cdot M \cdot s_i^T & \text{else} \end{cases} \dots (5-6)$$

(5-6)式の意味するところは以下の通りである。当初、環境が豊穡な状態では、エージェントは 2x2 ゲームの帰結に応じて環境との間に資源をやりとりすることが出来る。しかし、環境が危機的状況に窮すると、

資源を収奪することを強制的に停止され、資源の返還のみ許される（以下、資源制約）。 $Rq_{i,k}$ は正值，負値いずれもとり得る。各エージェントにとって正の利得を“環境からの(資源)収奪”，負の利得を“環境への(資源)返還”と云う。

5.2.3 環境

環境には独立した同一フィールドが F 箇所存在する。各フィールドはフィールド上に存在するエージェントからの収奪 $Rob_{k,l}$ を受ける一方，自らの回復能力 Rc により保持する資源量を回復させ，エピソード中連続的に変化する。

$Rob_{k,l}$ はフィールド l におけるエージェントの収奪（あるいは返還）する資源の総量であり，(5-7)式で与えられる。

$$Rob_{k,l} = \sum_i Rq_{i,k} \quad \dots (5-7)$$

資源回復量 Rc は資源量に依存し，(5-8)式で与える。但し， α はモデル定数である。

$$Rc(x) = \alpha \times Env|_{max} \times \left(\frac{x}{Env|_{threshold}} \right) \quad \text{if } x < Env|_{threshold}$$

$$= \alpha \times Env|_{max} \times \left(1 - \frac{x - Env|_{threshold}}{Env|_{threshold}} \right) \quad \text{else} \quad \dots (5-8)$$

$Env|_{threshold}$: 資源回復能力が最大となる資源量

この資源回復関数は， $Env = Env|_{threshold}$ で最大となり，その点から環境が豊穡になる程，若しくは枯渇するほど資源の回復は緩やかになることを示す。図 5-3 に Rc の関数を示す。

k タイムステップにおけるフィールド l の資源 $Env_{k,l}$ は $[0, Env|_{max}]$ なる連続量を取り，(5-9)式で更新される。

$$Env_{k+1,l} = Env_{k,l} - Rob_{k,l} + Rc(Env_{k,l} - Rob_{k,l}) \quad \dots (5-9)$$

if $Env_{k+1,l} > Env_{max}$ then $Env_{k+1,l} = Env_{max}$

(5-9)式の意味する 1 タイムステップ中の資源フローを図 5-4 に示す。①エージェント i は 2×2 ゲームの帰結に応じて環境へ資源 $Rq_{i,k}$ を要求し，②資源要求量の総和分 $Rob_{k,l}$ ($= \sum Rq_{i,k}$) 環境と資源のやり取りを行う。但し，資源制約により，収奪によって資源が完全に枯渇する場合は収奪が強制的に停止される。③環境は自らの回復能力 $Rc_{k,l}$ により保持する資源量を回復させる。

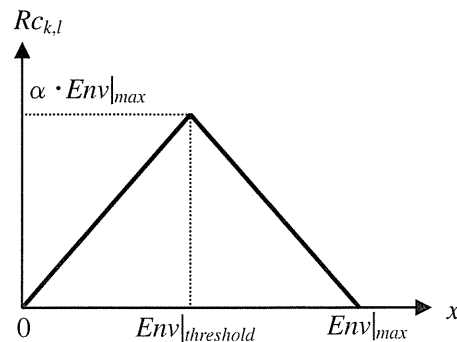


図 5-3 関数 Rc

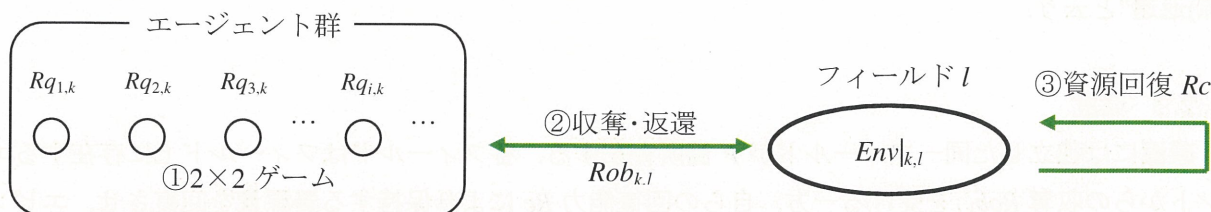


図 5-4 フィールド l の k ステップにおける資源の移動

5.2.4 エージェントの学習

各エージェントは戦略を有する。戦略は前時間ステップの自他の手組み (P, R, S, T の何れか) と環境の状態 (環境の資源保持量 $Env_{k,l}$ が閾値 $Env|_{threshold}$ より大きいか小さいか) により, C か D かの手を規定する行動ルールである。また, これとは別に対戦相手との初手を規定しておく。従って, エージェントの振る舞いは, 前回対戦結果 (前組手) と環境の状態量を入力に, C か D かの行動を出力とする状態遷移機械 (Finite State Machine, 以下 FSM) で決定され, $1+2^2*2=9\text{bit}$ の文字列で表される。図 5-5 に FSM の表記例を示す。

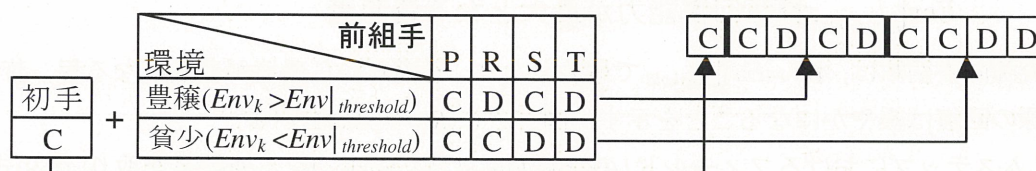


図 5-5 FSM の表記例

A_g 人のエージェントは各々 1 つの戦略を持つ。戦略の進化にはエージェントを 1 つの遺伝子と見なし, 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を適用する。遺伝子の適合度は, 1 世代中に獲得した総利得を用いる。1 世代は N タームから成り, 1 タームは 2×2 ゲームの対戦組みを決定し, M 回繰り返しゲームを行うまでとする。GA の遺伝子操作は Boltzmann 選択 (温度係数 T_B とする) による自然淘汰, 1 点交叉 (交叉確率 p_{cross}), 突然変異 (各遺伝子に対して突然変異確率 p_{mut}) とする。

エージェントは世代開始時に $C(=A_g/F)$ 人 1 組で各フィールドに割り振られる。この時エージェントは重複して選択されず, 対戦はフィールド内のエージェント間でのみ行われる。本研究では, 環境ジレンマの緩和・解消プロトコルとしてネットワークに着目し (一般にジレンマゲームに対戦相手を制限する機構である空間構造やネットワークを付加すると互惠社会の創発が促されることが知られている), GA の適用方法と対戦組み決定法に分離して, 以下に述べる 3 ケースのローカリティの影響を調べた。

case1 : 社会適応

GA は全エージェントを 1 遺伝子プールとして適用する。各フィールドへの割り振りは, 全エージェントからランダム選択され, フィールド内の対戦組みもランダムに決定される。4 章のモデルで謂うと, $G=1, F=1$ でローカリティが存在しない場合に相当する。

case2 : コミュニティ適応

エピソード開始時にエージェントは C 個のコミュニティに分割され、エピソード中コミュニティ間を行き来しない。GA はコミュニティ毎に適用する。フィールドへの割り振りは、各コミュニティからランダムに 1 人ずつ選択し、対戦組みはランダムに決定する。4 章のモデルで謂うと、 G と F の数は等しく、相関がないローカリティが存在する場合に相当する。

case3 : 特定コミュニティ適応

エピソード開始時にエージェントは C 個のコミュニティに分割され、エピソード中コミュニティ間を行き来しない。GA はコミュニティ毎に適用する。コミュニティはペアを作り、フィールドへの割り振りは、各コミュニティからランダムに 1 人ずつ選択し、対戦組みはペアのコミュニティのエージェントとのみである。4 章のモデルで謂うと、 G と F の数は等しく、相関があるローカリティが存在する場合に相当する。

各ローカリティの特徴を図 5-6 に示す。以上の 3 手法で示されたローカリティは、現実では次のような状況を想定している。GA レベルのローカリティは知識伝播を制限することを意味し、対戦組みの制限は資源移動を制限することに当たる。即ち、case1 ではローカリティが存在しないグローバルな社会であり、case2 では知識の伝播にローカリティが課せられる。そして、case3 では知識伝播と資源移動の両方にローカリティが存在し、閉鎖的な社会である。


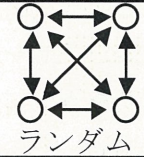
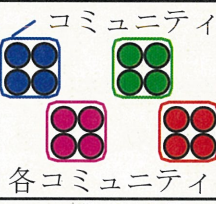
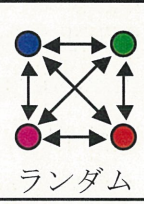
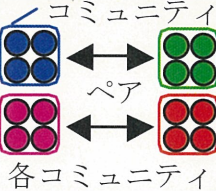
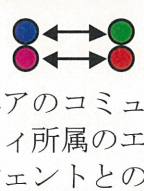
	GAの適用範囲	各フィールドへのエージェント配置	2x2ゲームの対戦組み
case1	 社会全体	各フィールド所属のエージェント A_g / F 人 ランダム	 ランダム
case2	 各コミュニティ	各フィールド所属のエージェント A_g / F 人 各コミュニティから1人	 ランダム
case3	 各コミュニティ ペア	各フィールド所属のエージェント A_g / F 人 各コミュニティから1人	 ペアのコミュニティ所属のエージェントとのみ

図 5-6 ローカリティの導入方法

5.2.5 均衡の条件

過去 500 世代の社会平均利得（1 世代中における 1 ゲーム・1 エージェントあたりの獲得利得の平均を R で割ったもの）の標準偏差が 0.01 以下である場合、シミュレーションは均衡に達したものとする。均衡の判定は 500 世代以降に 100 世代毎に行い、条件を満たさない場合は 2300 世代まで計算を行う。均衡時の結果は均衡の条件を満たした後に計算を 150 世代行い、その後の 50 世代の結果を平均したものとする。均衡の条件を満たしていない場合は、摂動の影響を考え、2301 世代から 2500 世代までの結果を平均したものをを用いる。

5.2.6 情報量

シミュレーションでは情報入力の有意性を評価するために、以下より情報エントロピー及び情報量を求める。確率事象であるセンサー入力信号 y_m のもとで x_j なる行動が生起する情報エントロピー $H_{act|sense}[\text{bit}]$ は (5-10) 式で定義される。

$$H_{act|sense} = - \sum_j \sum_m p(x_j, y_m) \cdot \log_2 p(x_j | y_m) \quad \cdots(5-10)$$

ここで $p(x_j, y_m)$ は複合事象生起確率、 $p(x_j | y_m)$ は y_m のもとで x_j が生起する条件付き確率を表す。また情報量 $I_{sense}[\text{bit}]$ とは、情報入力なしに計測された情報エントロピー H_{act} と情報を付与された状況下で行動に歪みが生じている情報エントロピー $H_{act|sense}$ との差により、(5-11) 式で与えられる。

$$I_{sense} = H_{act} - H_{act|sense} \quad \cdots(5-11)$$

エージェントの行動出力と状態入力が一切の関係が存在しない場合は、 $I_{sense} = 0$ となる。

情報量の評価は環境の状態入力（豊穡 or 貧少）と前時間ステップの自他手組みの状態入力（P, R, S, T）の 2 つに対して行う。環境の状態入力による情報量 I_{Env} の場合、センサー入力信号 y_m は環境が豊穡、貧少の 2 種、行動 x_j は C 若しくは D の 2 種となり、 $I_{Env} = [0,1]$ である。一方、前時間ステップの自他手組みの状態入力による情報量 I_{PRST} の場合、センサー入力信号 y_m は P, R, S, T の 4 種であるが、行動 x_j は C 若しくは D の 2 種であるので $I_{PRST} = [0,1]$ である。

また、情報量は遺伝子プール毎に算出するものとする。すなわち、case1：社会適応ではエージェント全員の行動から情報量を算出し、case2：コミュニティ適応、case3：特定コミュニティ適応ではコミュニティ単位で情報量を算出し、その平均を取ることでとなる。これは、コミュニティによって環境の情報入力に対する行動の切り替え方法が大幅に異なる場合（例えばあるコミュニティでは豊穡な場合 C を出し、貧少な場合 D を出す戦略が多いが、別のコミュニティでは豊穡な場合 D を出し、貧少な場合 C を出す戦略が多い）、それぞれのコミュニティにおける情報量は高いものの、全体で一括りにすると行動の切り替えが認識されにくくなってしまいうためである。

5.2.7 戦略の分類

戦略の影響を見るために、9bit 計 512 種の戦略を以下の 3 つの方法に従い分類を行った。

手法 i : 8 クラス分類

9bit 戦略のうち以下の 3bit に注目して、全戦略を 8 クラスにカテゴリ化した (図 5-7 (a)). 分類の軸となる 3bit は (1) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが P であるときの次手 (第 2bit), (2) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが R であるときの次手 (第 3bit), (3) $Env_k < Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが R であるときの次手 (第 7bit) である. *はワイルドカード(C or D)とする.

手法 ii : 16 クラス分類

9bit 戦略のうち以下の 4bit に注目して、全戦略を 16 クラスにカテゴリ化した (図 5-7 (b)). 分類の軸となる 4bit は (1) $Env_k < Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが P であるときの次手 (第 6bit), (2) $Env_k < Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが R であるときの次手 (第 7bit) (4) $Env_k < Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが S であるときの次手 (第 8bit), (2) $Env_k < Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが T であるときの次手 (第 9bit) である. *はワイルドカード(C or D)とする.

手法 iii : 32 クラス分類

9bit 戦略のうち以下の 5bit に注目して、全戦略を 32 クラスにカテゴリ化した (図 5-7 (c)). 分類の軸となる 5bit は (1)初手 (第 1bit), (2) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが P であるときの次手 (第 2bit), (3) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが R であるときの次手 (第 3bit) (4) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが S であるときの次手 (第 4bit), (2) $Env_k > Env|_{threshold}$ で前ステップのゲームが T であるときの次手 (第 5bit) である. *はワイルドカード(C or D)とする.

初手	豊穣	貧少	初手	豊穣	貧少	クラス番号	初手	豊穣	貧少	初手	豊穣	貧少	クラス番号																
P	S	T	R	P	S	T	R	P	S	T	R	P	S	T	R														
*	C	*	*	C	*	*	*	C	*	*	*	*	C	...	i	-①	C	C	C	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-①
*	C	*	*	C	*	*	*	D	*	*	*	*	D	...	i	-②	C	C	C	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-②
*	C	*	*	D	*	*	*	C	*	*	*	*	C	...	i	-③	C	C	C	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-③
*	C	*	*	D	*	*	*	D	*	*	*	*	D	...	i	-④	C	C	C	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-④
*	D	*	*	C	*	*	*	C	*	*	*	*	C	...	i	-⑤	C	C	D	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑤
*	D	*	*	C	*	*	*	D	*	*	*	*	D	...	i	-⑥	C	C	D	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑥
*	D	*	*	D	*	*	*	C	*	*	*	*	C	...	i	-⑦	C	C	D	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑦
*	D	*	*	D	*	*	*	D	*	*	*	*	D	...	i	-⑧	C	C	D	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑧

(a) 手法 i による8クラス分類

初手	豊穣	貧少	初手	豊穣	貧少	クラス番号					
P	S	T	R	P	S	T	R				
*	*	C	C	*	*	C	C	*	...	ii	-①
*	*	C	C	*	*	C	D	*	...	ii	-②
*	*	C	C	*	*	D	C	*	...	ii	-③
*	*	C	C	*	*	D	D	*	...	ii	-④
*	*	C	D	*	*	C	C	*	...	ii	-⑤
*	*	C	D	*	*	C	D	*	...	ii	-⑥
*	*	C	D	*	*	D	C	*	...	ii	-⑦
*	*	C	D	*	*	D	D	*	...	ii	-⑧
*	*	D	C	*	*	C	C	*	...	ii	-⑨
*	*	D	C	*	*	C	D	*	...	ii	-⑩
*	*	D	C	*	*	D	C	*	...	ii	-⑪
*	*	D	C	*	*	D	D	*	...	ii	-⑫
*	*	D	D	*	*	C	C	*	...	ii	-⑬
*	*	D	D	*	*	C	D	*	...	ii	-⑭
*	*	D	D	*	*	D	C	*	...	ii	-⑮
*	*	D	D	*	*	D	D	*	...	ii	-⑯

(b) 手法 ii による16クラス分類

初手	豊穣	貧少	初手	豊穣	貧少	クラス番号						
P	S	T	R	P	S	T	R					
C	C	C	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-①
C	C	C	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-②
C	C	C	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-③
C	C	C	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-④
C	C	D	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑤
C	C	D	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑥
C	C	D	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑦
C	C	D	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑧
C	D	C	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑨
C	D	C	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑩
C	D	C	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑪
C	D	C	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑫
C	D	D	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑬
C	D	D	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑭
C	D	D	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑮
C	D	D	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑯
D	C	C	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑰
D	C	C	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑱
D	C	C	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-⑲
D	C	C	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-⑳
D	C	D	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉑
D	C	D	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉒
D	C	D	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉓
D	C	D	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉔
D	D	C	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉕
D	D	C	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉖
D	D	C	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉗
D	D	C	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉘
D	D	D	C	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉙
D	D	D	C	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉚
D	D	D	D	C	*	*	*	*	C	...	iii	-㉛
D	D	D	D	D	*	*	*	*	D	...	iii	-㉜

(c) 手法 iii による32クラス分類

図 5-7 エージェントの戦略分類

5.3 数値計算概要

仮定したパラメータを表 5-1 に示す. また, case2, case3 の各コミュニティをそれぞれ $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$ と呼ぶことにする. case3 において対戦するコミュニティのペアは $C_0-C_1, C_2-C_3, C_4-C_5, C_6-C_7, C_8-C_9$ とする.

表 5-1 計算パラメータ

$Env _{max} = 5 * R * Ag / F (=100)$	$Ag = 20000$	$\alpha = 0.15$	$M = 100$	$N = 10$
$Env _{threshold} = Env _{max} / 2 (=50)$	$p_{cross} = 0.5$	$x_0 = 0$	$F = 200$	$C = 10$
$T_B = 0.25 / M / N (=0.00025)$	$p_{mut} = 0.01$	$r_1 = 4\sqrt{2}$		

5.4 数値計算結果

特定の条件の M について言及した後, M をジレンマ領域内で連続的に変化させながら行った結果について述べる.

5.4.1 $M=[-2.0, 2.0, -8.0, 8.0]$ ($r=2.0, \theta=90[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0, 2.0, -8.0, 8.0]$ (以下条件 1) として数値計算を行った. 尚条件 1 は Prisoner's Dilemma (PD) の構造を持つ (図 5-2 中で■マークしたゲーム構造). 図 5-8 は条件 1, case1 : 社会適用時の特徴的な保持資源量の時間推移を示す. プロットする資源量は最終世代, あるフィールドにおける 1 ターム内のもので, 各ステップの 2×2 ゲーム直前のものである. 図 5-9 は case 1 : 社会適応, 図 5-10 は case2 : コミュニティ適応, 図 5-11 は case3 : 特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す. case1, case2, case3 の全ての結果において, 協調率 (P_c) は環境が豊穡な場合 ($Env_k > Env|_{threshold}$), 環境が貧少な場合 ($Env_k < Env|_{threshold}$) の両状況で高くなるように推移する (図 5-9 (a), 図 5-10 (a), 図 5-11 (a)). シミュレーション終了時の資源制約生起率 (1 世代中の全ゲームにおいて資源制約が生起した比率) は約 0.7 と高く, 環境の平均保持資源量 (平均保持資源量の $Env|_{max}$ に対する比率) は 0.2 前後で (図 5-9 (b), 図 5-10 (b), 図 5-11 (b)), 社会平均利得は 0.3 以下である (図 5-9 (c), 図 5-10 (c), 図 5-11 (c)).

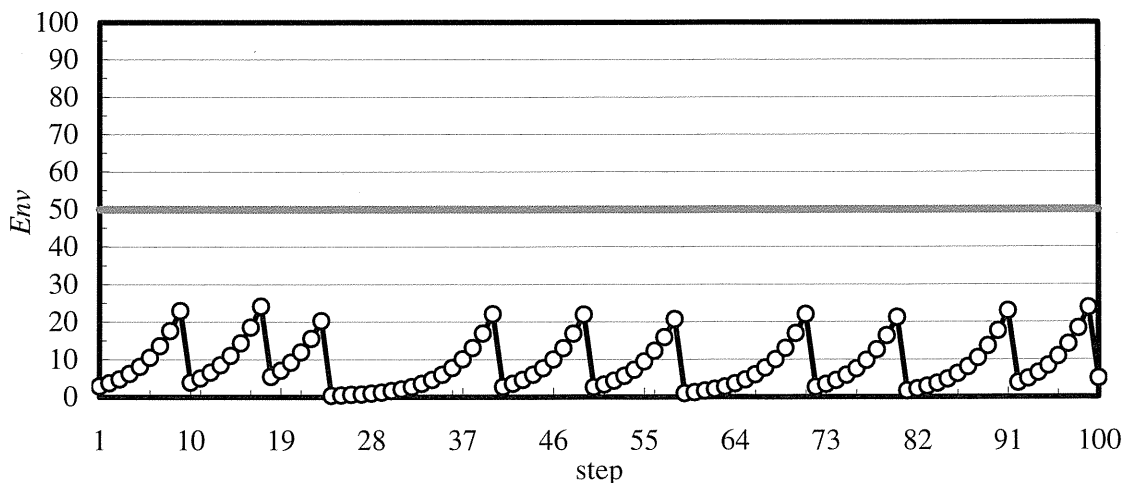


図 5-8 最終世代における 1 ターム内の保持資源量の時間推移

全 case において C を出し合う互恵的關係が創発し(以下, R 互恵), R を取りに行っているにも拘わらず, 獲得利得が公平なパレート解である R に比べ低いのは, 資源制約が利いて ((5-6)式), 環境破壊が生じている状況下ではそれ以上の資源収奪が行い得ないことに起因する. 図 5-8 において, 資源が減少しているステップは, エージェントらが環境から資源を収奪していることを意味する. それ以外は, エージェントと環境の間で資源移動が発生せず, 回復能力により資源が徐々に回復している過程を表している. 全エージェントは R を取りに行っているため, 各ステップの総資源要求量は $20 (=Ag/F^*R)$ である. 従って, 環境の保持資源量が 20 以上の場合は要求量通り資源を収奪することが出来るが, それ以下の場合には資源制約が生じ, 収奪は停止させられることとなる. 保持資源量の増加は環境の回復能力によってのみ行われるが, 資源の回復量は保持資源量が 0 に近づくほど少なくなるので (図 5-3), 再びエージェントらが資源収奪を行うには長期的な資源回復が必要となる.

つまり, 通常の 2 記憶長メモリ FSM で PD を行った場合, エージェントたちは互いに C を出して R の利得を得るように学習が推移するわけだが, この様な状況が長く続くと環境破壊は不可避免的に生じ, 環境の回復能力がそれに耐え得なければ環境破壊は常態化する. 条件 1 では $S+T=0$ となるので, エージェント間で優勝劣敗が生じている限りにおいては, 環境へのインパクトはない. むしろ, エージェント内に協調 (R なるゲームの結果) が創発し, それが継続されることが問題なのであり, 条件 1 ではまさにそのような状況が生じている.

また, 環境破壊が常態化すると, 貧少な場合ばかりでゲームが行われることとなり, 豊穡な場合の戦略 4bit (豊穡時の P の次手, 豊穡時の R の次手, 豊穡時の S の次手, 豊穡時の T の次手) は使用頻度が減少し, ゲームの帰結への影響は小さくなる. ゲーム帰結への影響の減少は, その bit が如何様なものであるかは重要ではなくなることを意味するので, 該当 bit の学習能率は低下し, 早々に定常を迎えることとなる. 環境の平均保持資源量が低資源のまま定常に達した後は, 貧少な場合のジレンマゲームが主となることは明らかであるから, 豊穡な場合のジレンマゲームは殆ど行われず, R 互恵はそれ以上強化されることはなく, 豊穡な場合の協調率も定常を迎える. 対して, 貧少な場合では資源制約が課せられているものの, ジレンマゲームが盛んに行われるため, 学習が進み, 協調率は 0.9 を超える.

条件 1 における優勢な戦略を見てみる. 図 5-12 は case1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡時の戦略比を表す. case1 では “*|D**C|***C” (以下戦略 i - ⑤) 及び “*|C**C|***C” (以下戦略 i - ①) に属する戦略がマジョリティを占めている. これらの両クラスは環境が豊穡な場合, 貧少な場合の両状況で, R の次手に C を出す (第 4bit, 第 8bit). これらの戦略同士の対戦では, 一度 R を取ることが出来ると, その後も互いに C を出すので, R を取り続け, 資源の収奪を繰り返す. しかし, 環境の状態に依らず C を出すことにならないため, 環境が危機的状況になろうと, 資源収奪を止めようとしなない. 戦略 i - ①, 戦略 i - ⑤は互いに C を出し R を取り続けることで資源の収奪を繰り返す, 環境に対する“貪り派”の戦略 (以下, R 型貪り派戦略) であり, 彼らが環境の資源を貪り続けるため, 条件 1 では頻繁に資源制約を受け, 低利得となった.

図 5-13, 図 5-14 はそれぞれ case2 : コミュニティ適応, case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す. case2 では知識の伝播にローカリティが存在するため, コミュニティ単位で学習が行われるものの, 各コミュニティの均衡時の戦略比はどれも似通っていて多様性は認められない. また, case3 には知識の伝播に加え, 資源移動にもローカリティが課せられているが, case2 同様にコミュニティ内の戦略比は一様になる. 結局, case1 同様に貪り派の戦略が優勢となり, 環境崩壊が引き起こされる.

条件 1 のゲーム構造においては、エージェントは環境の状態を認知し、環境の崩壊を避けることは出来なかった。そのため、エージェントは資源を枯渇させ、継続的な資源収奪を行うことが出来なくなる。

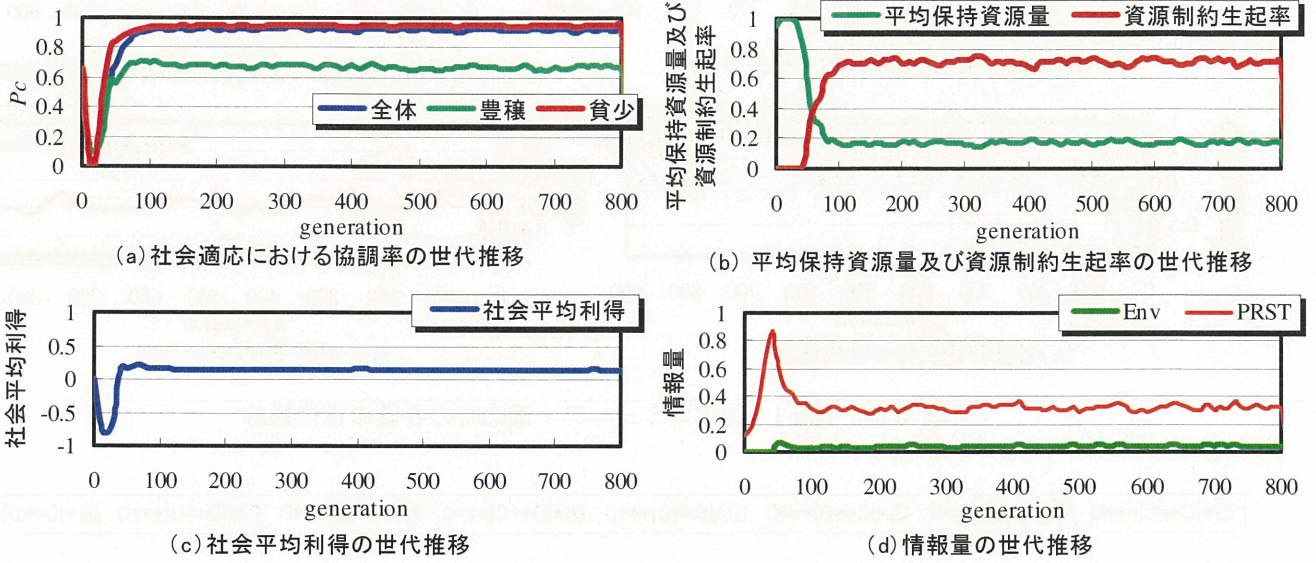


図 5-9 case1 : 社会適応時の各値の世代推移

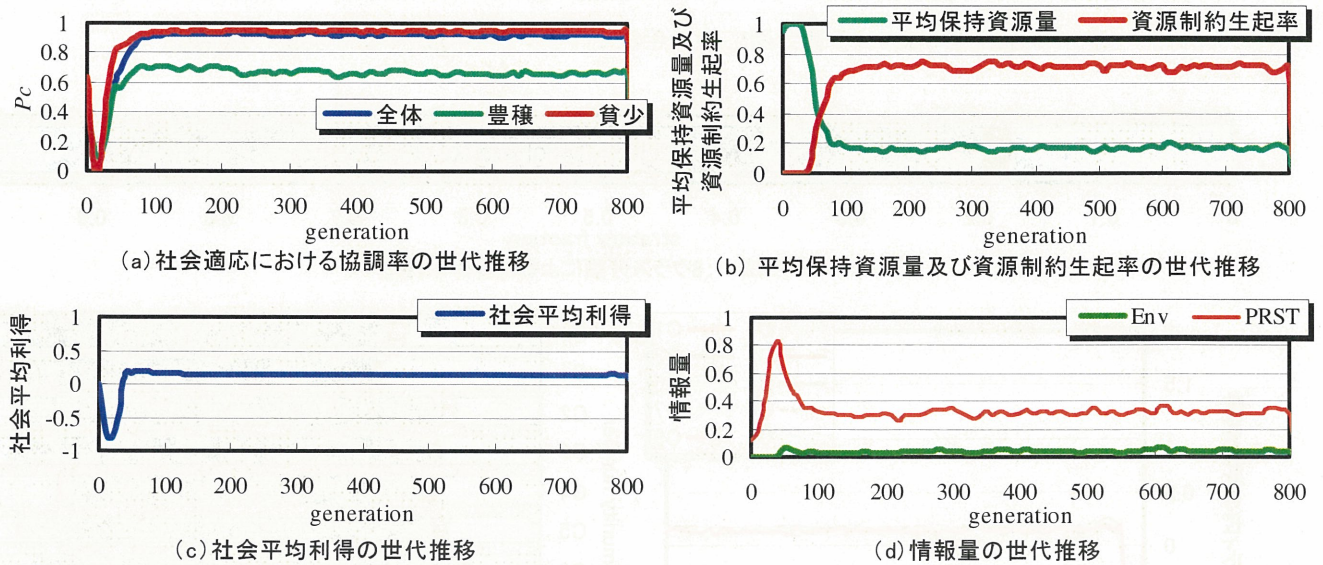


図 5-10 case2 : コミュニティ適応時の各値の世代推移

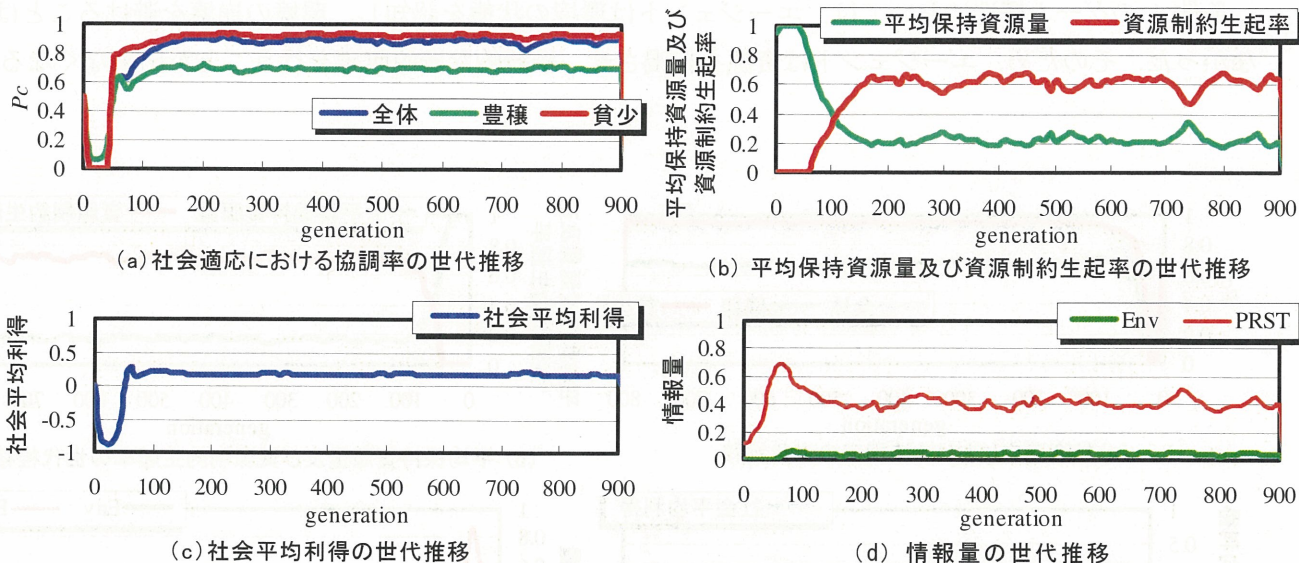


図 5-11 case3 : 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

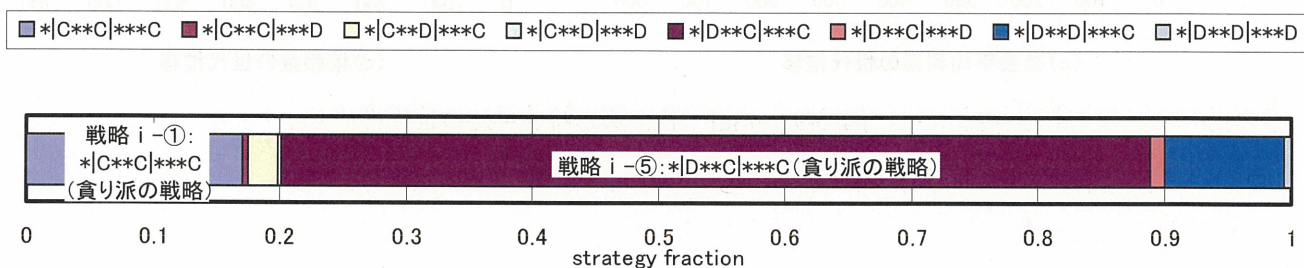
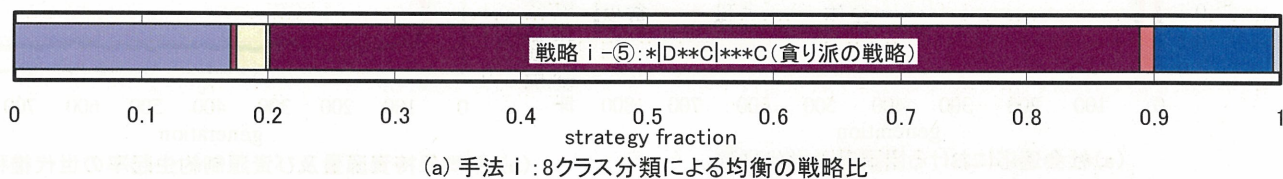


図 5-12 case1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比



(a) 手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比

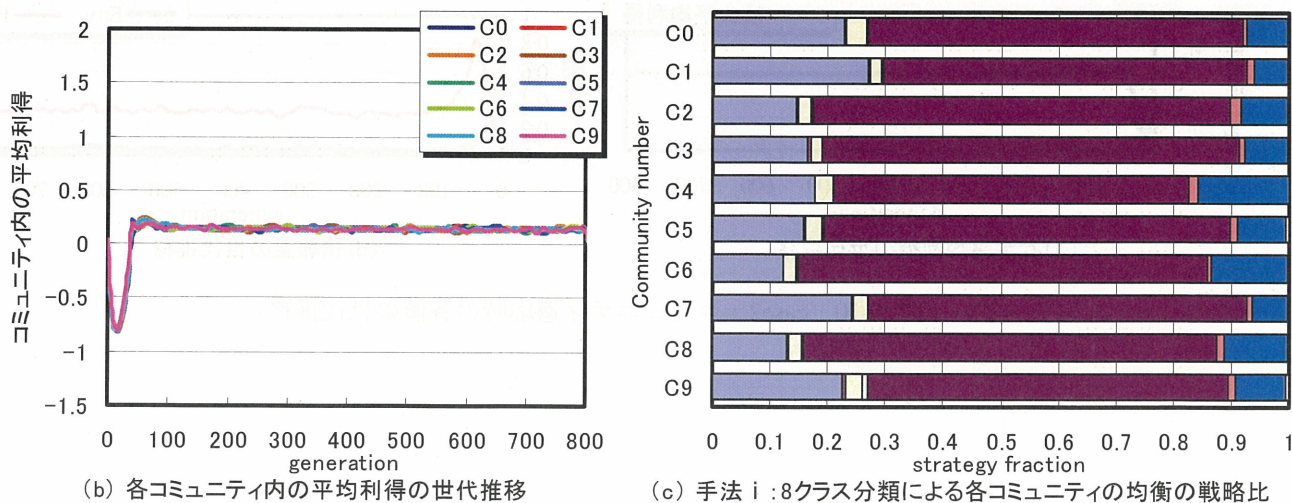


図 5-13 case2 : コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

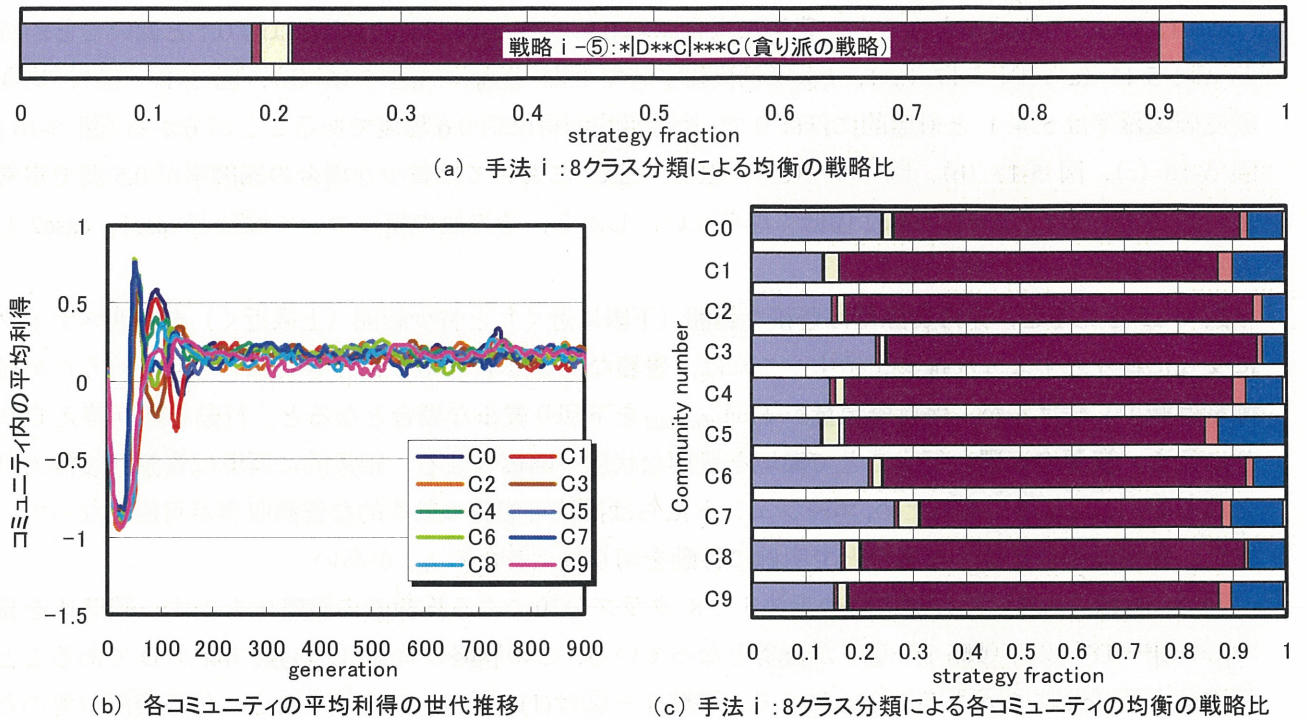


図 5-14 case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5. 4. 2 $M=[-2.0,2.0,-2.4,2.4]$ ($r=0.6, \theta=90[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0,2.0,-2.4,2.4]$ (以下条件 2) として数値計算を行った. 尚, 条件 2 の M も条件 1 同様 PD である (図 5-2 中で◆マークしたゲーム構造) が, 条件 1 より r が小さな, よりジレンマが弱いゲーム構造である. 図 5-15 は条件 2, case1 : 社会適用時の特徴的な保持資源量の時間推移を示す. プロットする資源量は最終世代, あるフィールドにおける 1 ターム内のもので, 各ステップの 2×2 ゲーム直前のものである. 図 5-16 は case 1 : 社会適応, 図 5-17 は case2 : コミュニティ適応, 図 5-18 は case3 : 特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す.

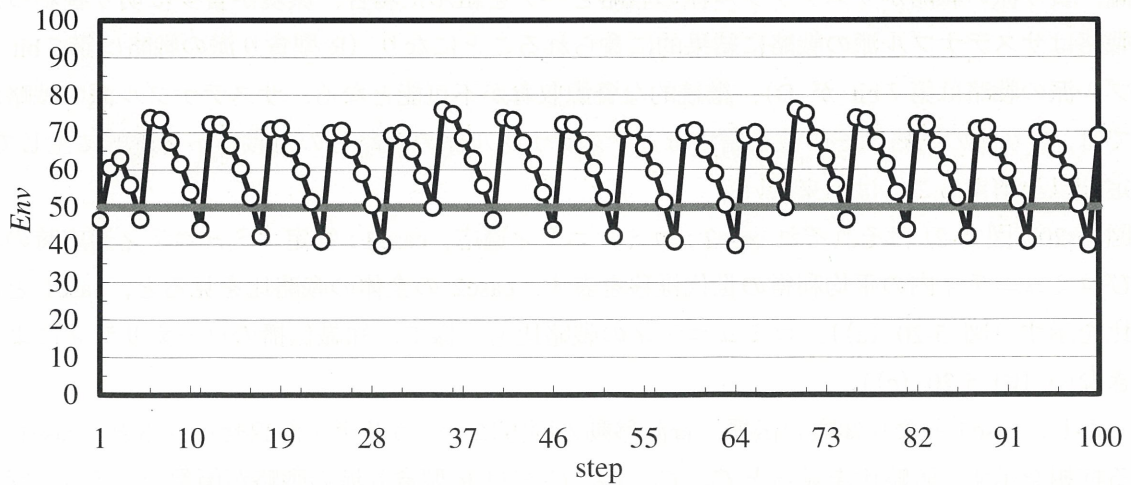


図 5-15 最終世代における 1 ターム内の保持資源量の時間推移

case1, case2 の協調率をみると、豊穡な場合は約 0.9 と高いが、貧少な場合は約 0.1 と低いことが特徴的で (図 5-16 (a), 図 5-17 (a)), I_{Env} は世代終了時で 0.25 と高い (図 5-16 (b), 図 5-17 (b)). 均衡時の環境破壊確率は 5.4.1 と対照的にはほぼ 0 で, 社会平均利得は約 0.6 程度であることが分かる (図 5-16 (b), 図 5-16 (c), 図 5-17 (b), 図 5-17 (c)). 但し, case3 においては貧少な場合の協調率が 0.5 弱で定常を迎え (図 5-18 (a)), case1, case2 程低くならない. しかし, その他の値については殆ど case1, case2 と同様の挙動を見せる.

図 5-15 を見ると, 保持資源量は豊穡な範囲 (下限に近く) と貧少な範囲 (上限近く) を時間ステップごとに交互に繰り返すような推移を示す. これは, 豊穡な場合は R を取りに行き資源の収奪を行うため保持資源量は減少し続けるが, 保持資源量が $Env|_{threshold}$ を下回り貧少な場合となると, 行動を切り替えて P を取りに行き, 資源の返還を行うことで環境を豊穡な状態へ回復させる. 結果的に環境は資源回復能力が最大となる $Env|_{threshold}$ 近くあるため, エージェントたちは持続可能且つ効率的な資源収奪が可能となっている. また, 豊穡な場合と貧少な場合とで明確に行動を切り替えるため I_{Env} が高い.

図 5-19 は case1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡時の戦略比を表す. 戦略比を見ると “*|C**C|***D” (以下戦略 i - ②) が優勢となっている. この戦略の特徴は, (1)第 7bit が D であること, (2)第 2bit と第 3bit に C があること, にある. 戦略 i - ②は(1)により, R を取ることに依る資源収奪のために環境が豊穡から貧少なエリアに切り替わると, 即座にそれまでの協調関係を破棄して, 一転, D を出し合い, 互いに環境に資源を返還することで, 環境を豊穡な範囲に復さしめる行動をとる. 更に(2)により, 環境が貧少なから豊穡に復旧した直後, それまでの D の出し合いから転じ, 協調関係を再構築 (第 2bit の C), 環境に余剰があつて暫く R を続け得る状況にあるときにはやはり C を出し続ける (第 3bit の C) 行動をとる. 以上述べたように, 戦略 i - ②は環境が悪化した場合は資源の収奪を止め資源を保護しようとし, 結果的に, 環境との共生を達成して, 自らも公平なパレート解に近い高い利得を維持している. すなわち “サステナブル派” の戦略である.

図 5-19 を再び見ると, 5.4.1 で述べた貪り派の戦略はマイノリティではあるが, 全体の 1 割程度を占める. R 型貪り派の戦略は, 貧少な状況に切り替わっても C を出す (第 7bit が C). 従って, 対戦ペアの組み合わせが貪り派の戦略であれば, ほかの多数ペア (例えばサステナブル派の戦略同士) は環境危機の際に資源を返還するのに, その狭間をついて資源収奪を続けることが可能になる. すなわち free rider である. 無論, 貪り派の戦略がサステナブル派の戦略とペアを組んだ場合, 環境が貧少なに切り替わった際に貪り派の戦略はサステナブル派の戦略に結果的に貪られることになり (R 型貪り派の戦略は第 7 bit が C, サステナブル派の戦略は第 7 bit が D), 継続的な資源収奪が不可能となる. サステナブル派の戦略が優勢な状況下では, 貪り派の戦略はその数を増すほどサステナブル派の戦略との対戦が不可避免的に生じてしまうので, 一定数以上増えることは出来ない.

図 5-20, 図 5-21 はそれぞれ case2 : コミュニティ適応, case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す. case2 の全体の戦略比を見ると, case1 とほぼ同様の戦略比を示す (図 5-20 (a)). コミュニティの戦略比も一様で, 知識伝播のローカリティによる変化は確認できない (図 5-20 (c)).

しかし, case3 となり知識の伝播, 資源移動の両方にローカリティが課せられると, case1, case2 とは異なる様相を示す. 戦略比を見ると C_0, C_1, C_6, C_7 では R 型貪り派の戦略が優勢なコミュニティ (以下, 貪り派コミュニティ) に, $C_2, C_3, C_4, C_5, C_8, C_9$ ではサステナブル派の戦略が優勢なコミュニティ (以下, サステナブル派コミュニティ) となる (図 5-21 (c)). コミュニティ間の対戦は, $C_0-C_1, C_2-C_3, C_4-C_5,$

C_6-C_7 , C_8-C_9 であるから、同種のコミュニティ同士で対戦するように学習は推移している。即ち、 C_0-C_1 , C_6-C_7 では R 型貪り派の戦略同士の対戦が、 C_2-C_3 , C_4-C_5 , C_8-C_9 ではサステナブル派の戦略同士の対戦が頻繁に行われる。そうすると、R 型貪り派の戦略は free rider として振る舞うことが容易になり、資源制約を受けることなく資源を収奪し続けることが可能になる。一方、サステナブル派の戦略は、資源を返還することで再び資源収奪に転じることは出来るものの、R 型貪り派の戦略が収奪した資源量分も返還しなければならないため、高利得を得ることは出来ない。こうして貪り派の戦略は常に資源収奪を行うため、貪り派コミュニティの平均利得は約 0.85 とサステナブルな社会の社会平均利得以上であり、サステナブル派の戦略は余分に資源返還を行う必要があるため、コミュニティ内の平均利得は低下して 0.45 程度となり、2 種のコミュニティ間には利得格差が生じることとなる (図 5-21 (b)). case2 においても、case3 のようにコミュニティ毎に優勢な戦略が異なる状況を作り出すことは可能だが、case2 のローカリティは知識伝播のローカリティにのみ設けられているので、R 型貪り派戦略はサステナブル派の戦略との対戦を回避することが出来ない。従って、全コミュニティにおいてサステナブル派の戦略が優勢となり、R 型貪り派の戦略が free rider として振る舞うことは低確率でしか生起しない。case3 では対戦するコミュニティは限定されているため、対戦ペアである両コミュニティで貪り派の戦略が優勢になると、サステナブル派の戦略に食われることは無くなり、常に free rider として振る舞うことが可能になったわけである。

条件 2 のゲーム構造では、資源返還という行為は短期的には損失を被る行動に他ならないが、エージェントは長期的な視座を獲得し、サステナブル派の戦略を創発させた。サステナブル派の戦略はマジョリティである時、環境を崩壊へ追い込む R 型貪り派の戦略を駆逐することが可能となる。この作用は対戦によって生じるため、case2 のように知識伝播のローカリティによりサステナブル派の戦略の拡散が制限されることになったとしても、R 型貪り派の戦略はサステナブル派の戦略の対戦は不可避的に発生するので、知識伝播のローカリティのみでは意味を成さない。だが、ローカリティが知識伝播だけでなく資源移動にまで及ぶと、サステナブル派の戦略は R 型貪り派の戦略を貶めることが出来ず、環境の危機的状況下においては、free rider に資源を奪われるにも拘わらず、律儀に資源返還行動を取り続けるのである。

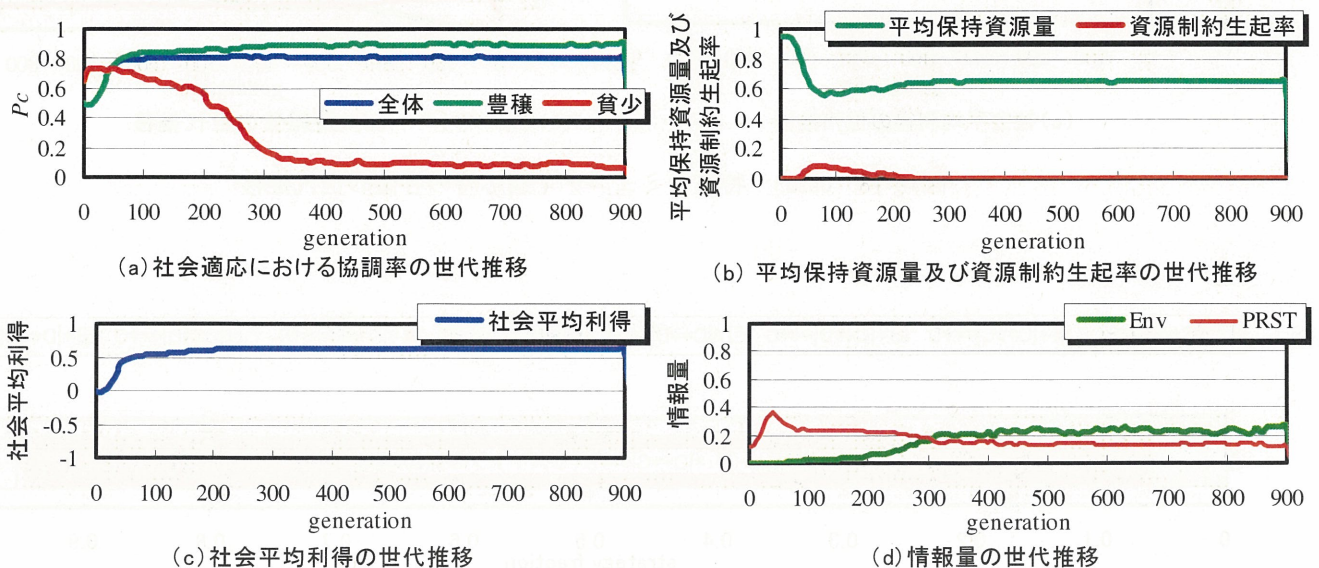


図 5-16 case1 : 社会適応時の各値の世代推移

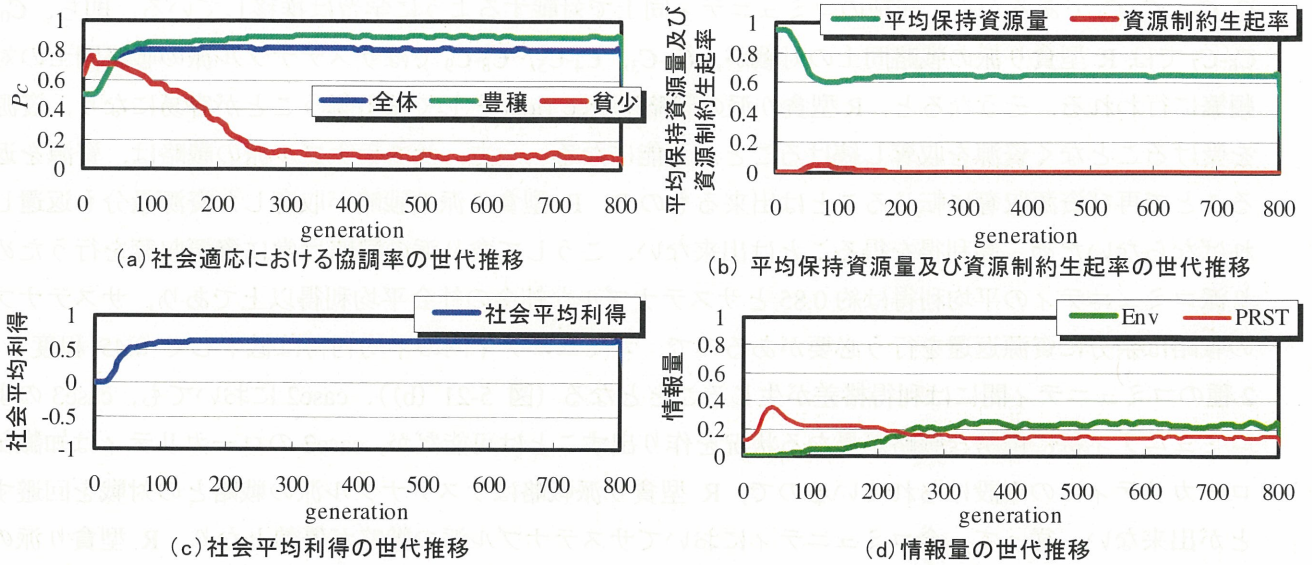


図 5-17 case2 : コミュニティ適応時の各値の世代推移

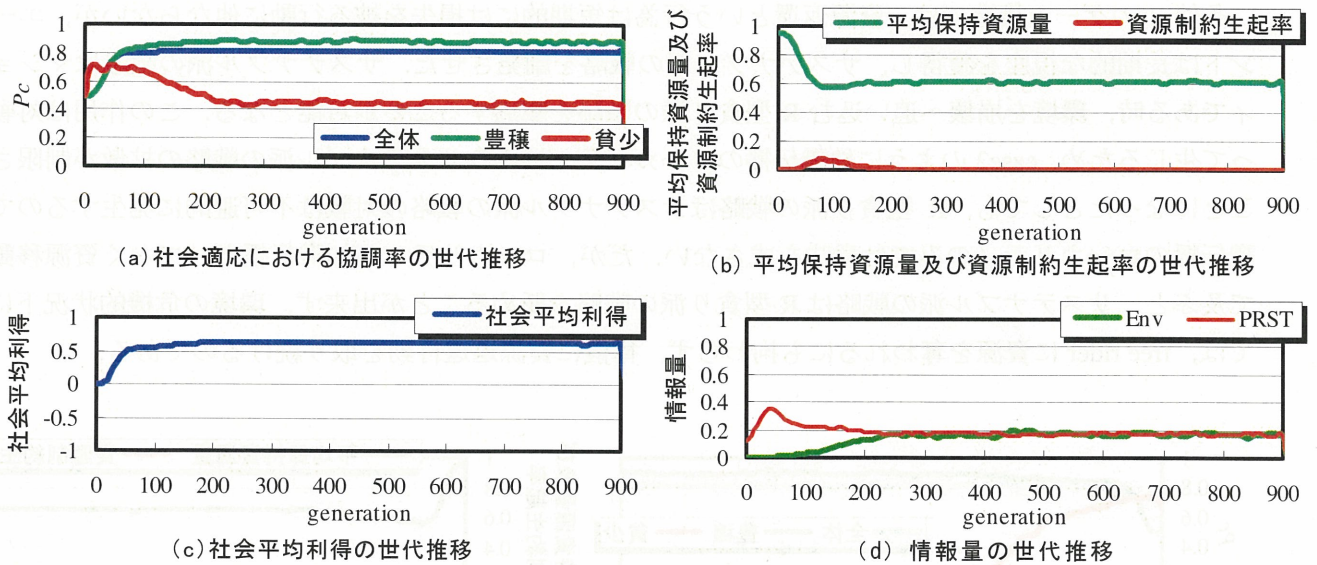


図 5-18 case3 : 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

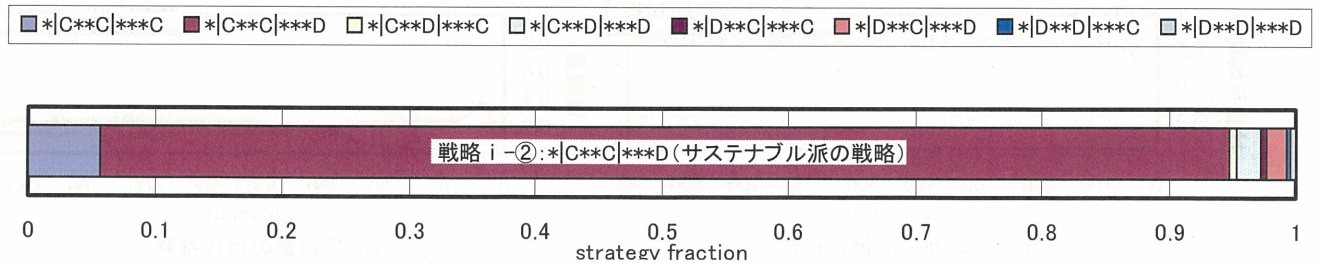


図 5-19 case1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比

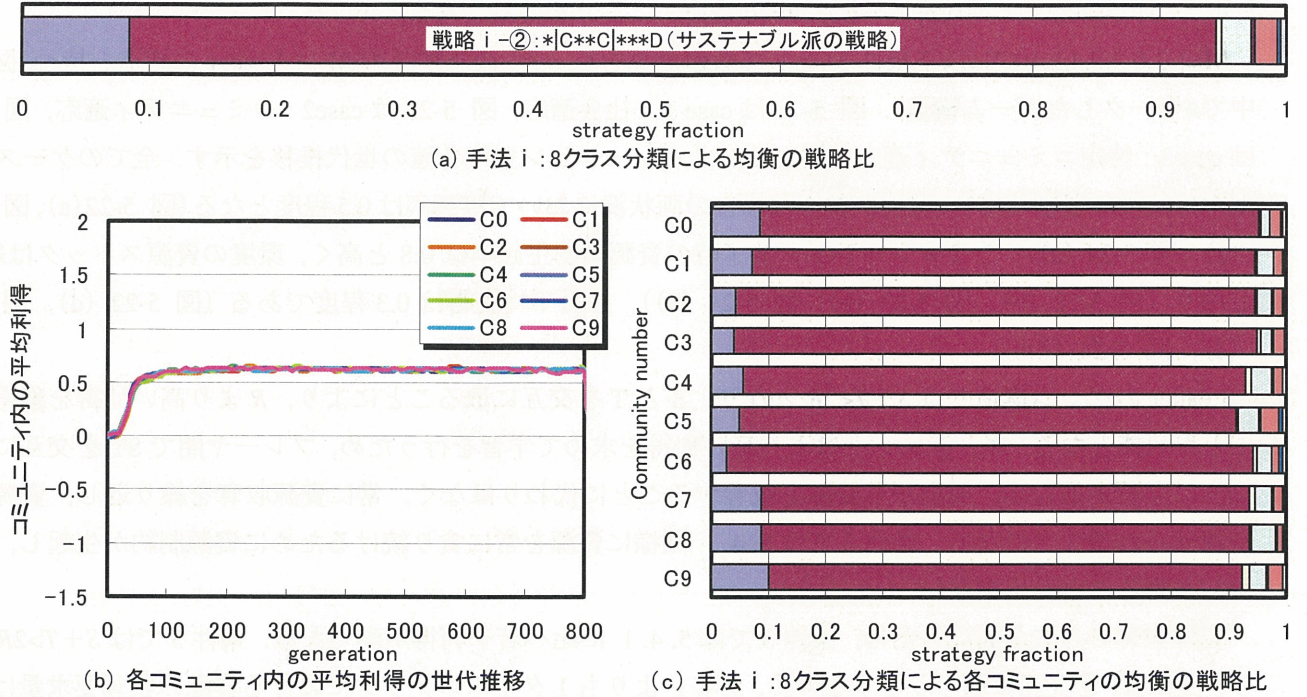


図 5-20 case2 : コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

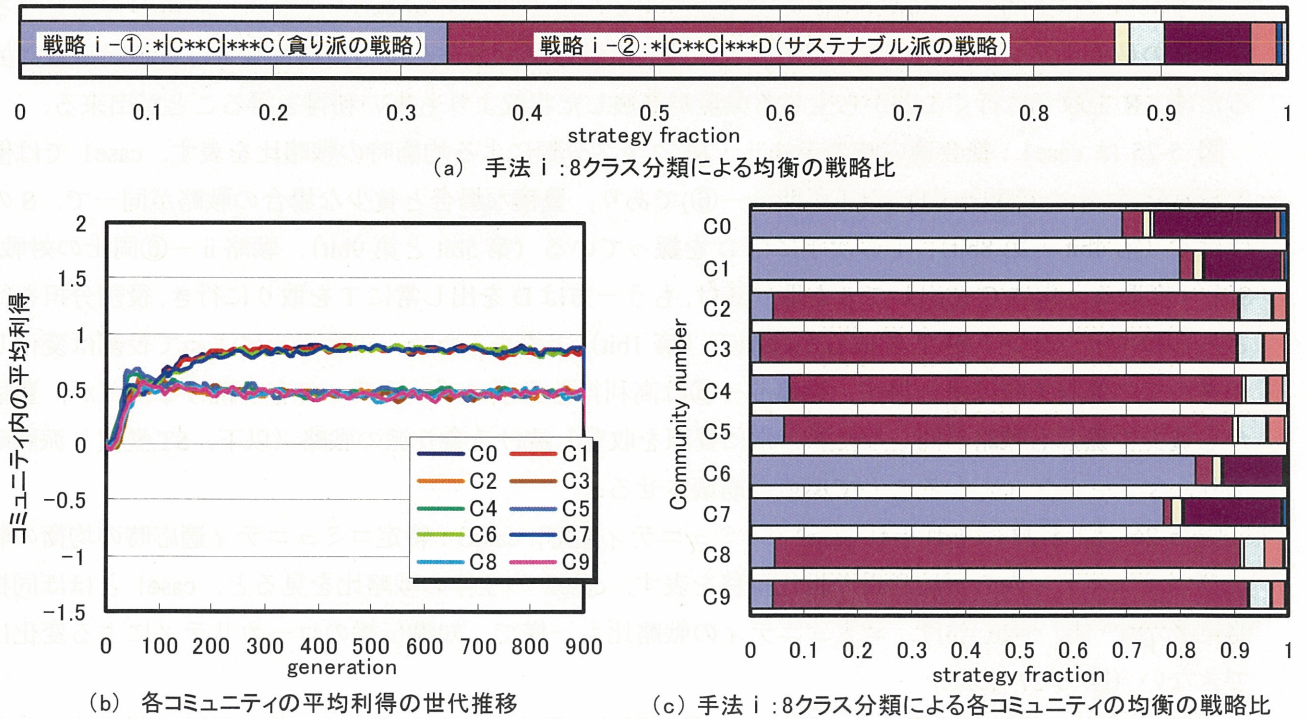


図 5-21 case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5.4.3 $M=[-2.0,2.0,4.8,10.2]$ ($r=2.0$, $\theta=20[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0,2.0,4.8,10.2]$ (以下条件3)として数値計算を行った。尚条件3の M はLeaderの構造を持つ(図5-2中で●マークしたゲーム構造)。図5-22はcase1:社会適応, 図5-23はcase2:コミュニティ適応, 図5-24はcase3:特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す。全てのケースで協調率は環境が豊穡な場合, 環境が貧少な場合の両状況において協調率は0.5程度となる(図5-22(a), 図5-23(a), 図5-24(a))。シミュレーション終了時の資源制約生起率は0.8と高く, 環境の資源ストックは約0.3となり(図5-22(b), 図5-23(b), 図5-24(b)), 社会平均利得は0.3程度である(図5-22(d), 図5-23(d), 図5-24(d))。

Leaderのゲーム構造では $S+T<2R$ となり, S と T を交互に取ることにより, R より高い利得を獲得することが可能となる。エージェントはより高い利得を求めて学習を行うため, プレーヤ間で ST を交互に取るように学習が進むが, 環境から資源を収奪することに代わりはなく, 常に資源収奪を繰り返し, 資源制約を課せられることになる。条件3では5.4.1同様に資源を常に貪り続けるために資源制約が生起し, 低利得しか得ることが出来ない。

資源収奪の方法が異なるため, 条件3では5.4.1に比べ若干利得が高くなる。条件3では $S+T>2R$ であり, 更に ST を交互に取ろうとするので, 5.4.1よりも1タイムステップにおける資源の収奪要求量は大きくなる。環境崩壊が常態化した状況下でエージェントが環境に資源収奪を要求する場合, 収奪を行っても資源が枯渇しなくなるまで資源制約は課せられる。従って, 総収奪要求量が大きい程, 収奪が可能となる保持資源量の最低ラインは高くなる。資源回復能力は, $Env_k < Env|_{threshold}$ では資源量が多いほど回復量が増大するため, 結果的により高い資源回復能力のポイントで回復を行うこととなる。収奪が可能となる保持資源量の最低ラインが高いので, 資源収奪の機会は減るが, トータルの獲得資源量は資源回復量に依存するため, R を取りに行くことから生じる環境が崩壊した状況よりも高い利得を得ることが出来る。

図5-25はcase1:社会適応時の手法ii:16クラス分類による均衡時の戦略比を表す。case1では優勢となる戦略は“*|**CD|**CD”(以下戦略ii-⑥)であり, 豊穡な場合と貧少な場合の戦略が同一で, S の次手には C (第4bitと第8bit), T の次手には D を採っている(第5bitと第9bit)。戦略ii-⑥同士の対戦では, S を一度取ると常に C を出して S を取り続け, もう一方は D を出し常に T を取りに行き, 役割分担を行う。どちらのエージェントが T を取るかは初手(第1bit)で決まるため, 対戦相手によって役割は変化し, トータルでの優勝劣敗は決し得ず, 戦略ii-⑥は高利得を上げマジョリティで有り続ける。だが, 豊穡の場合も貧少の場合も戦略が同一なため, 常に資源を収奪し続ける貪り派の戦略(以下, ST 型貪り派戦略)であり, マジョリティとなることで環境を崩壊させる。

図5-26, 図5-27はそれぞれcase2:コミュニティ適応, case3:特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す。case2の全体の戦略比を見ると, case1とほぼ同様の戦略比を示す(図5-26(a))。コミュニティの戦略比も一様で, 知識伝播のローカリティによる変化は確認できない(図5-27(c))。

case3の全体の戦略比を見ると, 戦略ii-⑥は優勢な戦略にはならず, その他の戦略と併存する状態になる。均衡時におけるコミュニティ内の戦略比は, 豊穡・貧少両状況の S の次手が C (第4bitと第8bitが C , 戦略ii-⑥, ii-⑧, ii-⑭, ii-⑯が該当)の戦略が優勢なコミュニティ(以下, S 担当コミュニティ)と, 豊穡・貧少両状況の T の次手が D (第5bitと第9bitが D , 戦略ii-①, ii-②, ii-⑤, ii-⑥が該当)の戦略が優勢なコミュニティ(以下, T 担当コミュニティ)に2分される。また, この2種のコミュニティは, コミュニティの対戦組みで一方が S 担当コミュニティであると, もう一方は T 担当コミュニテ

いと、異なるタイプのコミュニティが対戦組みを作っている。こうなると、S 担当コミュニティでは、対戦で常に S を取り続けることとなり、T 担当コミュニティでは T を取り続けることとなる。Leader のゲーム構造では $S+T>2R$ となることに加え、 $S>P$ であるため、相手が D を出してくる状況では、D で応じ P なる帰結となるよりも、C を出し、S なる帰結を採る方が高利得となる。case1, case2 では戦略 ii - ⑥が優勢となり、S と T のどちらを採るかは常に替わり回することは既に述べたが、当然、常に T を取り続ける役である方が高利得を得ることができる。しかし、T を取るということは、一方に S を取る者が居ることである。case1 では知識の伝播がグローバルに行われ、且つ対戦相手もランダムであるため、T の役割のみを取る戦略だけでは S を取る者が学習の過程で消滅し、S と T によって資源収奪を行うことが出来なくなる。それどころか、裏切り合いに墜ち、P なる帰結を以て、資源返還を行うこととなる。従って、S と T の両方の役割をこなすことが出来る戦略 ii - ⑥が優勢となっていた。また、case2 においても、知識の伝播がコミュニティコミュニティ毎に区切られているので、case3 同様に T を取るコミュニティと S を取るコミュニティに分かれることは可能であるが、対戦するエージェントの所属するコミュニティはランダムであるため、T を取る者同士が対戦し P なる帰結に墜ちることが頻繁に生じるので、効率的に S と T を取りに行くことは出来ない。しかし、case3 では対戦にもローカリティが加えられているため、どのコミュニティのエージェントと対戦するかは既に確定している。従って、対戦組の一方のコミュニティで T を常に取りに行く戦略が増えると、もう一方のコミュニティでは最低利得である P を避けるために C を出し、S を取りに行くようになる。こうしてコミュニティの全対戦組で役割の固定化が起り、低利得である S のコミュニティと高利得である T のコミュニティに分かれ、T を取るコミュニティの平均利得は 0.5 程度だが、S を得コミュニティの平均利得は 0.2 程度である。

条件 3 のゲーム構造では、資源収奪が繰り返し行われることによって環境が崩壊するが、資源の収奪方法は R を取りに行くことによるものではなく、より高利得が得られる S と T を交互に取りに行くことによるものである。

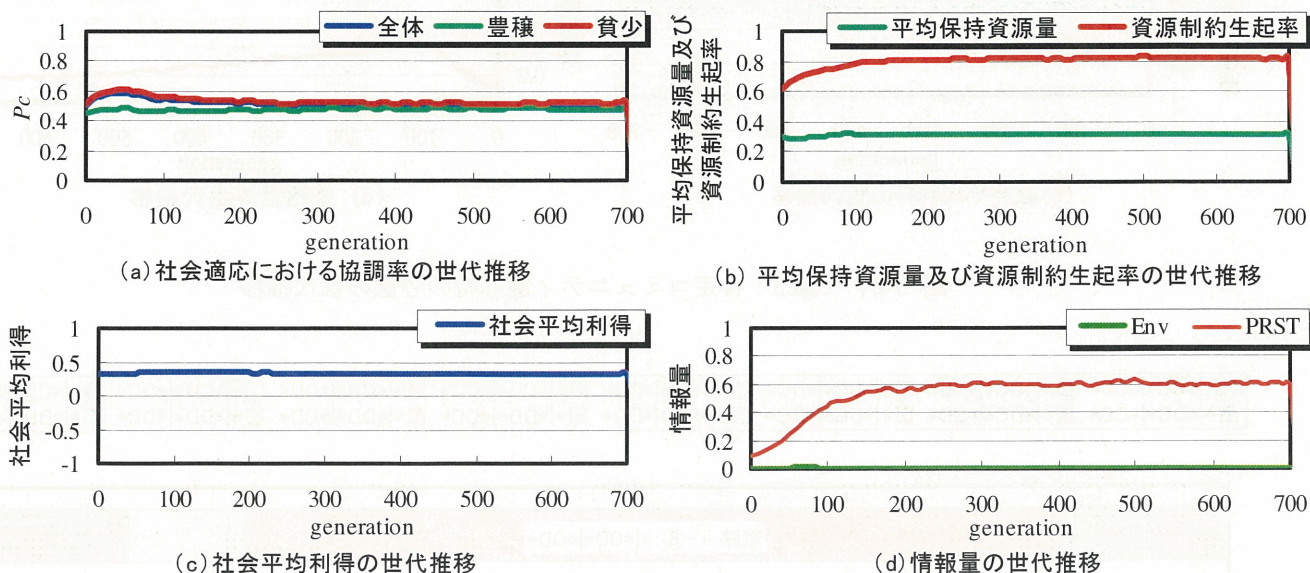


図 5-22 case1 : 社会適応時の各値の世代推移

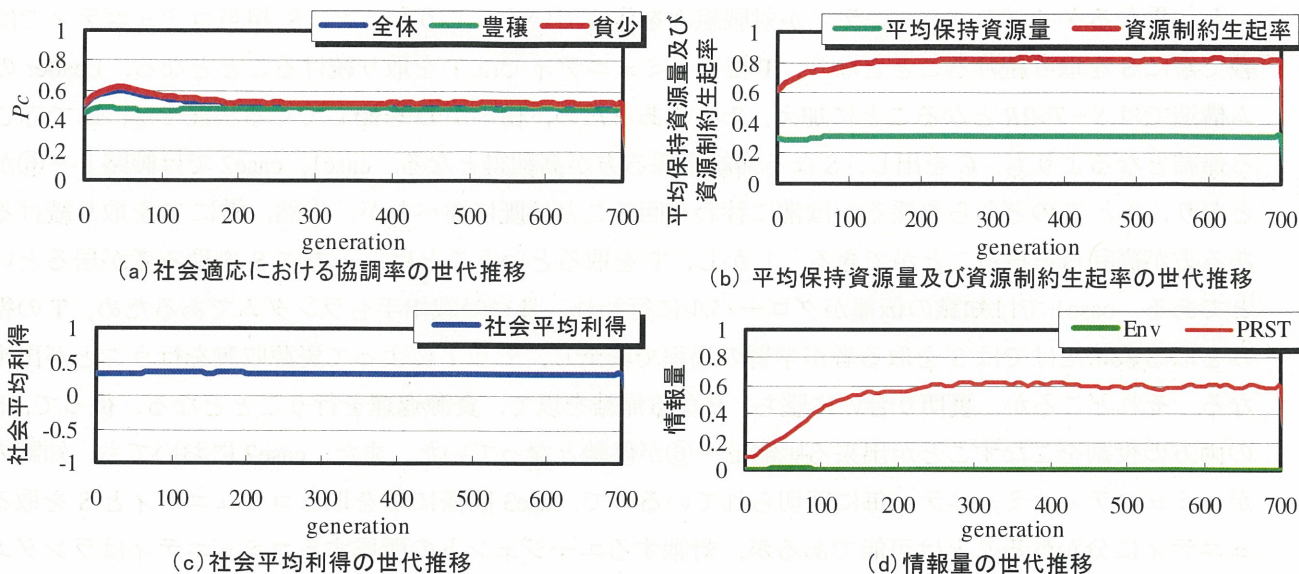


図 5-23 case2 : コミュニティ適応時の各値の世代推移

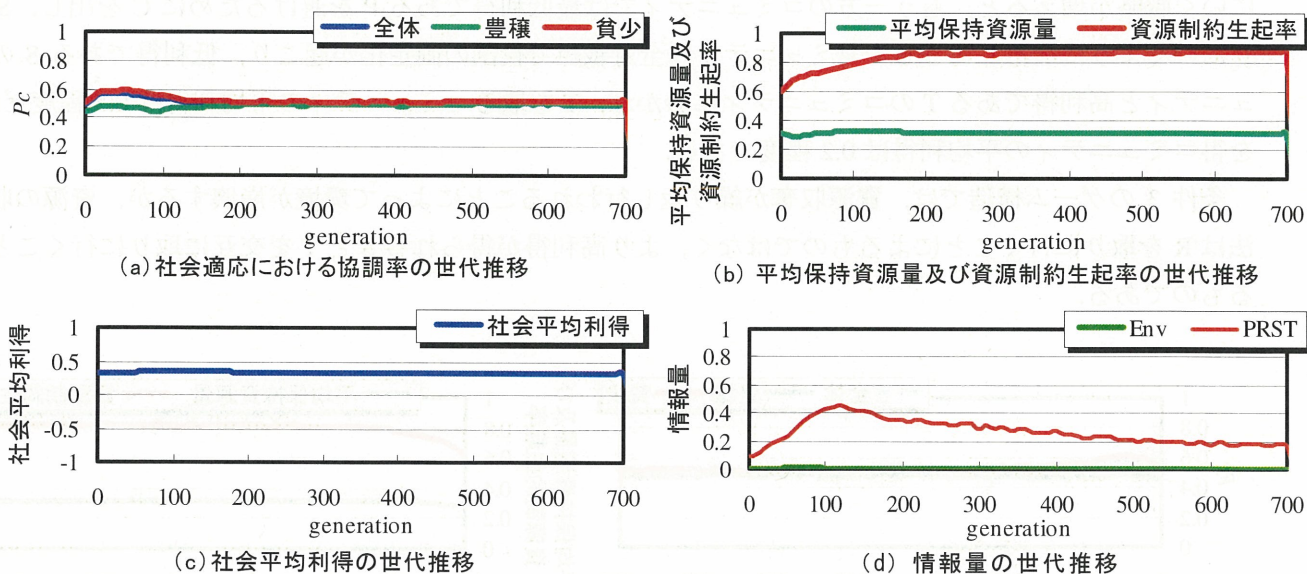


図 5-24 case3 : 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

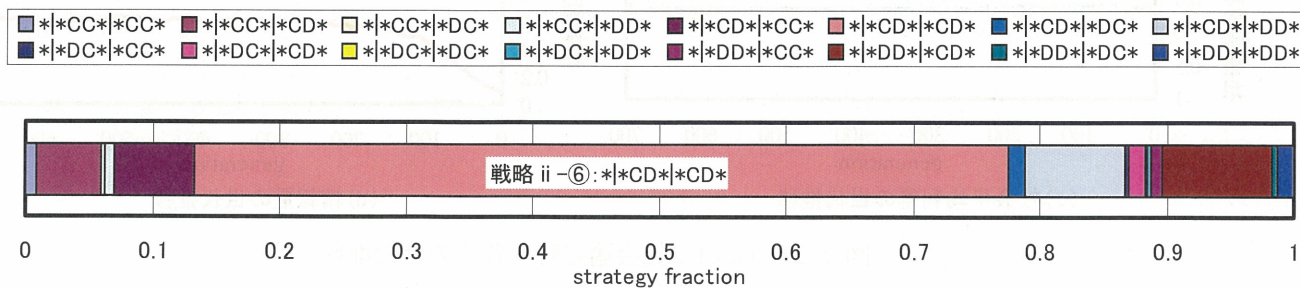


図 5-25 case1 : 社会適応時の手法 ii : 16 クラス分類による均衡の戦略比

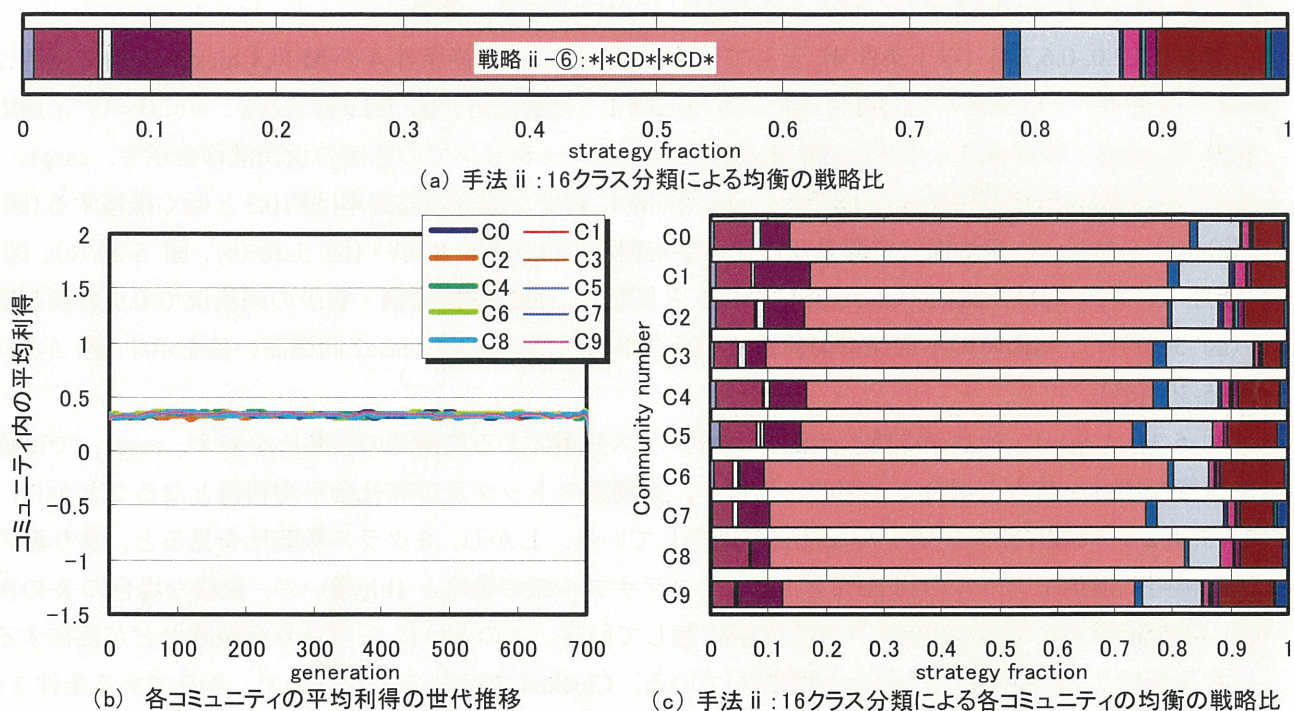


図 5-26 case2: コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

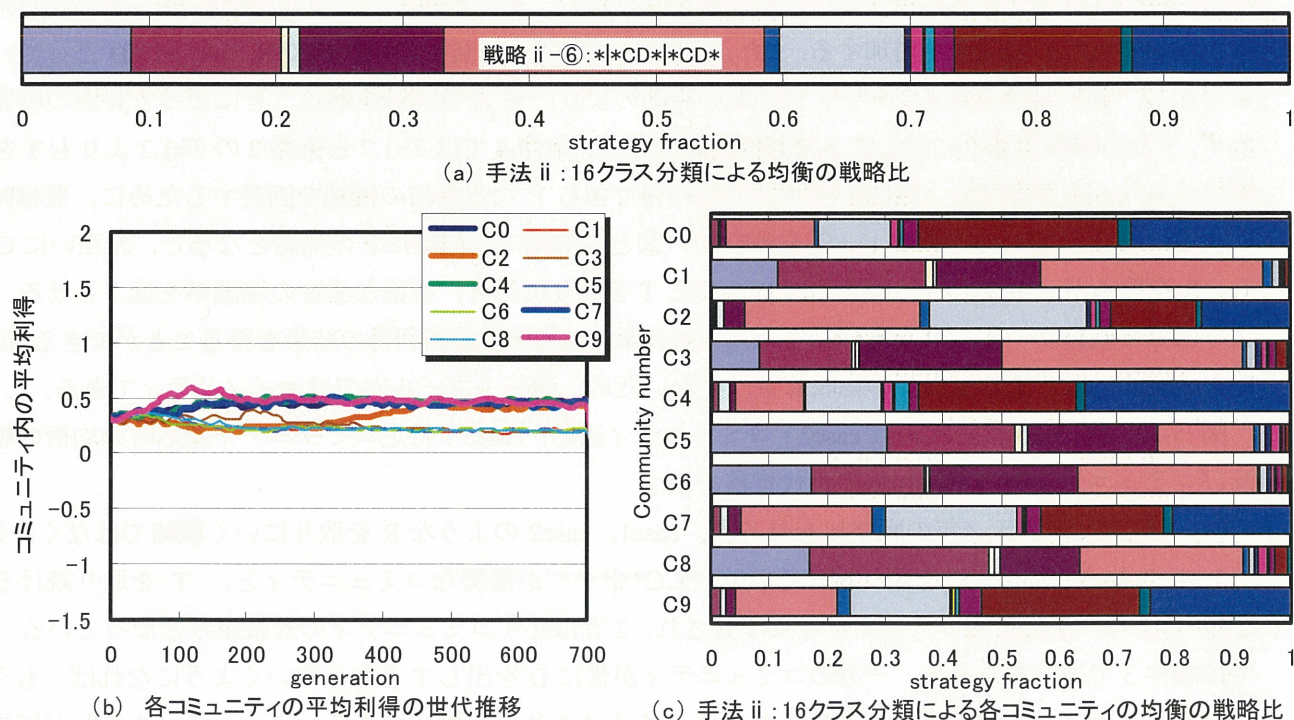


図 5-27 case3: 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5.4.4 $M=[-2.0,2.0,-0.6,3.4]$ ($r=0.6$, $\theta=54[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0,2.0,-0.6,3.4]$ (以下条件 4) として数値計算を行った. 尚条件 4 の M は Chicken の構造を持つ (図 5-2 中で+マークしたゲーム構造). 図 5-28 は case 1 : 社会適応, 図 5-29 は case 2 : コミュニティ適応, 図 5-30 は case 3 : 特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す. case 1, case 2 では豊穡な場合の協調率は 0.7~0.8 と高いが, 対照的に貧少な場合の協調率は約 0.3 と低く推移する (図 5-28 (a), 図 5-29 (a)). 平均保持資源量及び社会平均利得はほぼ 0.6 と高い (図 5-28 (b), 図 5-28 (c), 図 5-29 (b), 図 5-29 (c)). case 3 では case 1, case 2 と異なり, 協調率は豊穡・貧少の両状況で 0.5 前後を推移し (図 5-30 (a)), 均衡時の平均保持資源量及び社会平均利得は case 1, case 2 同様高い値を示す (図 5-30 (b), 図 5-30 (c)).

図 5-31 は case 1 : 社会適応時の手法 ii : 16 クラス分類による均衡時の戦略比を表す. case 1, では協調率が豊穡な場合と貧少な場合で対照的に推移し, 高資源ストック及び高社会平均利得となることから, 条件 2 (5.4.2) 同様にサステナブルな社会が創発している. しかし, 8 クラス戦略比を見ると, 貪り派の戦略は均衡時に遺伝子プールの約 20% を占め, サステナブル派の戦略と 1bit 違いの, 豊穡な場合の R の次手が D (第 5bit が D) である戦略 i-④も 1 割に達している. このように R 型貪り派戦略などが混在するようになるのはリスク回避性ジレンマが関係している. Chicken では $S>P$ となるので, $S<P$ である条件 2 の PD よりも S なる帰結での利得が大きい. 条件 2 ではサステナブル派の戦略 (戦略 i-②) が優勢となると, 貪り派の戦略 (戦略 i-①, i-⑤) はサステナブル派の戦略により食られるために 1 割程度に留まっていた. しかし, 条件 4 では S なる帰結によって得られる利得が上昇したため, 貪り派の戦略はサステナブル派の戦略に食られても, 条件 2 程には被害を受けない. そうすると, 貧少な場合に C を出す貪り派の戦略が増加するため協調率が増加する. また, 戦略 i-④は豊穡・貧少の両状況で R の次手は D としている. すなわち, 貪り派の戦略やサステナブル派の戦略のように R なる帰結を取ることによって資源の収奪を行わず, T なる帰結を取りに行くことで資源を獲得する. 条件 4 では $T=1.7$ と条件 2 の $T=1.2$ よりも T を取りに行くメリットが大きい. 戦略 i-④は最低利得である P なる帰結の継続を回避するために, 豊穡時の P の次手は C としている. 戦略 i-①や戦略 i-②との対戦で豊穡時に P の帰結となると, お互いに C を出し, R を取るが, 戦略 i-④は直ぐに D へ転じ T を取りに行き, 豊穡な場合の協調率を低下させる. このようにして戦略 i-④は P なる帰結を取った後は $R \rightarrow T$ と比較的高利得の結果を得ることができる. 但し, R を継続的に取るよりも資源の総収奪量は少ないため, 遺伝子プール内ではマイノリティである.

図 5-32, 図 5-33 はそれぞれ case 2 : コミュニティ適応, case 3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す.

case 3 のコミュニティ毎の戦略比を見ると, case 1, case 2 のような R を取りにくい戦略ではなく, 条件 3 (5.4.3) と同様に S を取り続ける戦略“*|CC**|*****”が優勢なコミュニティと, T を取り続ける戦略“D|D*D*|*****”が優勢なコミュニティに 2 分され, 2 者は必ずコミュニティの対戦組みとなっている. case 3 では条件 3 で述べたように, 一方のコミュニティが常に D を出し T を取りにくいようになれば, もう一方のコミュニティは最低利得 P を避けるために C を出すため, 対戦組であるコミュニティの役割が固定化する. Chicken では $S+T<2R$ なので, 本来 R を取るほうが効率的ではあるが, case 3 ではローカリティにより S と T に別れ, 資源収奪を行う. だが, 条件 4 では資源ストックは 0.7 程度に保たれ, 環境は崩壊しない. 条件 4 ではフィールド上のエージェントが R により資源収奪を行う場合, 1 タイムステップにおける総資源収奪量は $20 (=Ag/F * R)$ だが, S と T に分化して資源収奪を行う場合, 総収奪量は $14 (=Ag/F *(S+T)/2)$ である. これに対し, 環境の資源回復能力は $Env|_{threshold}$ で最大の 15 となる. 従って, case 3 では資源の総収

奪量が資源回復能力の最大値を上回らないので、常に資源を収奪することが可能となる。よって資源制約も全く生起せず、意図せずしてサステナブルな社会が形成されている。但し、資源制約が発生しないため、2x2 ゲームは変容せずに優勝劣敗が決し、大きな利得差が生じる。

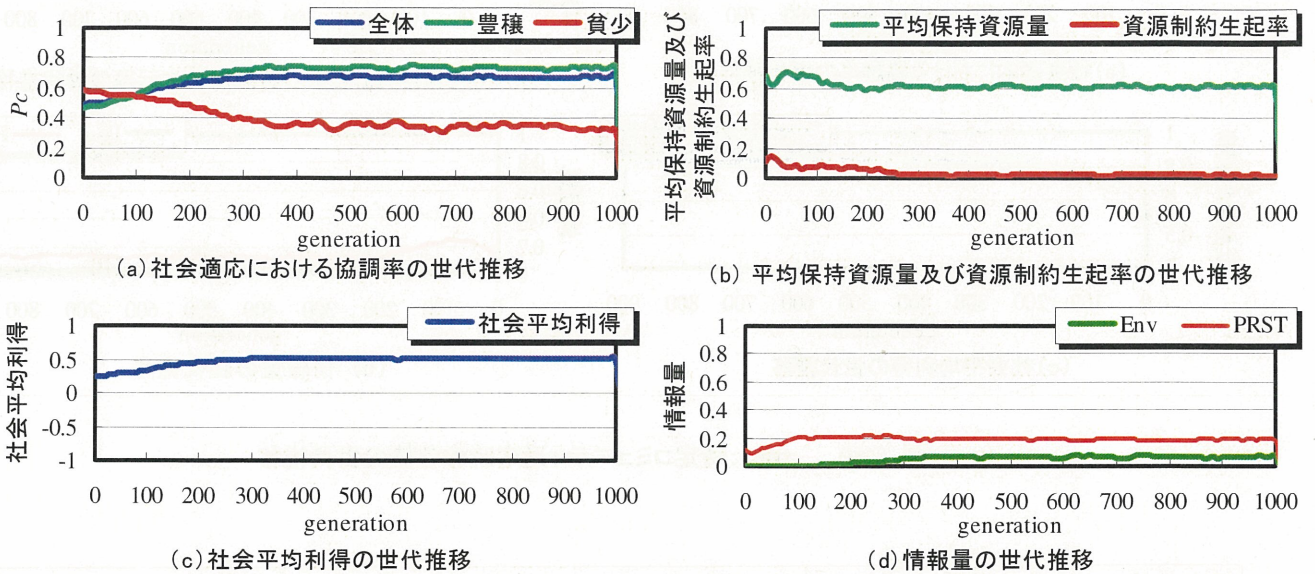


図 5-28 case1:社会適応時の各値の世代推移

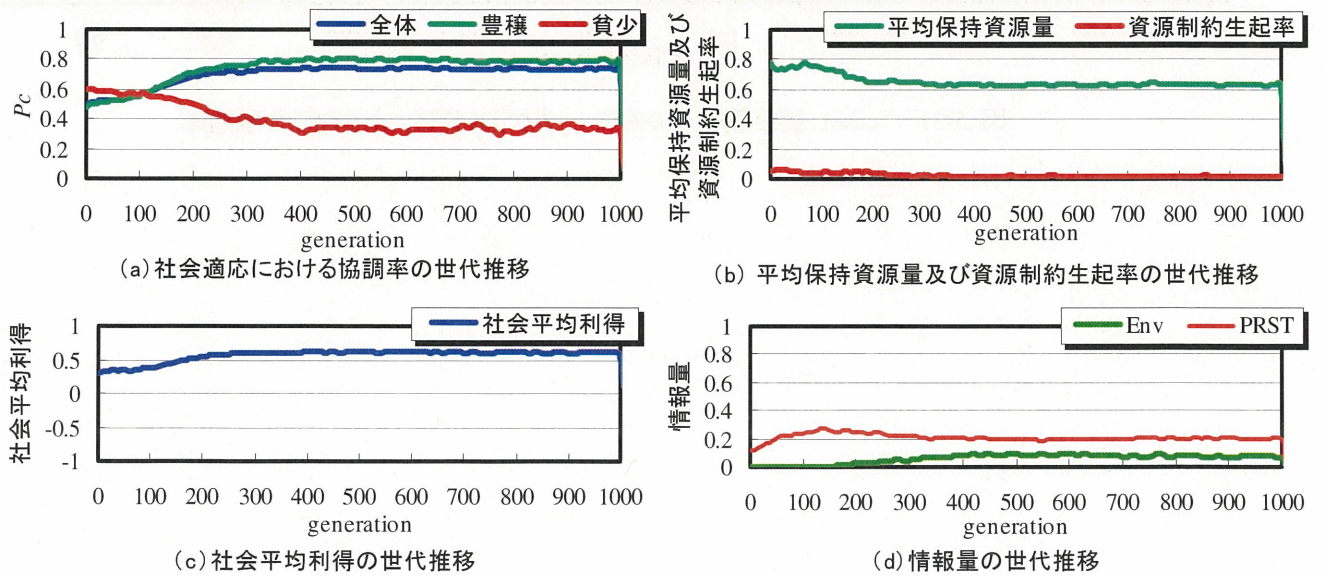


図 5-29 case2:コミュニティ適応時の各値の世代推移

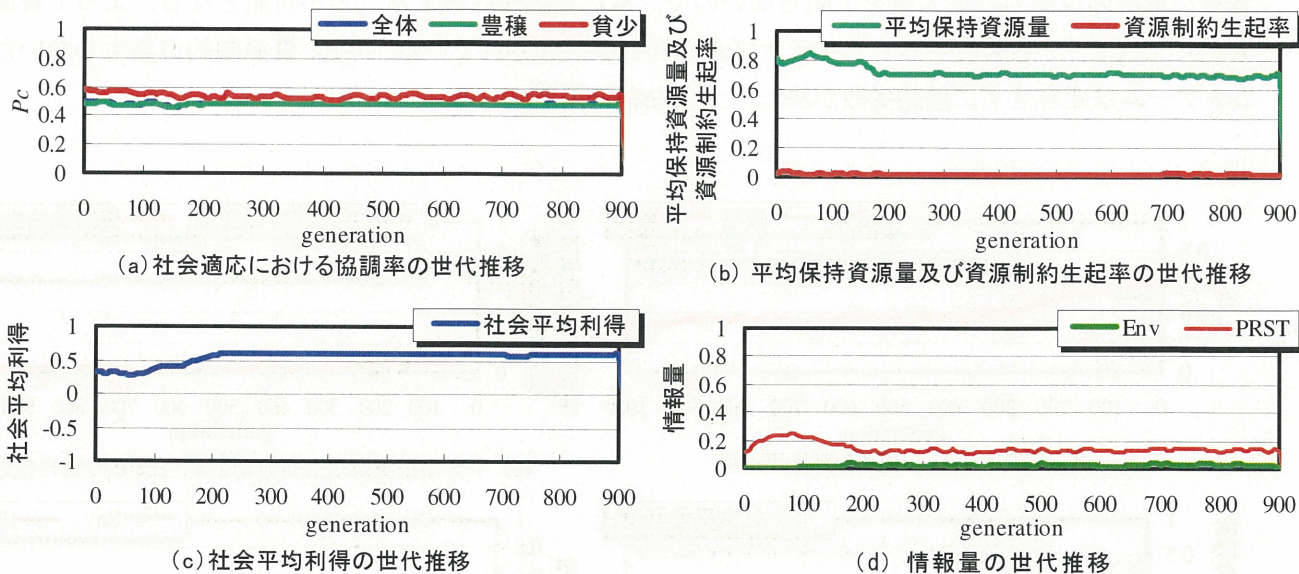


図 5-30 case3: 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

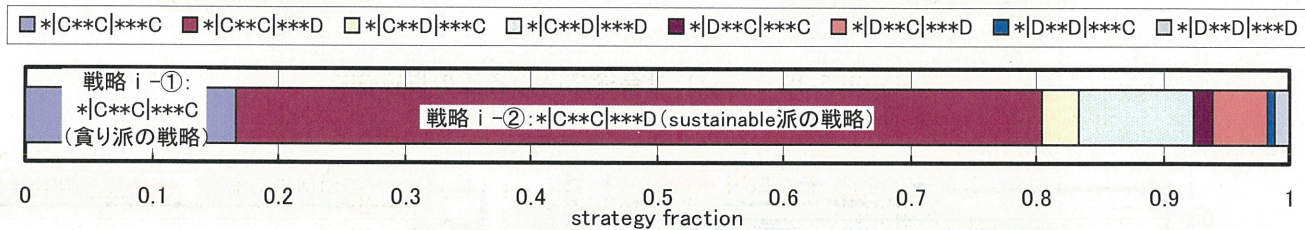


図 5-31 case1: 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比

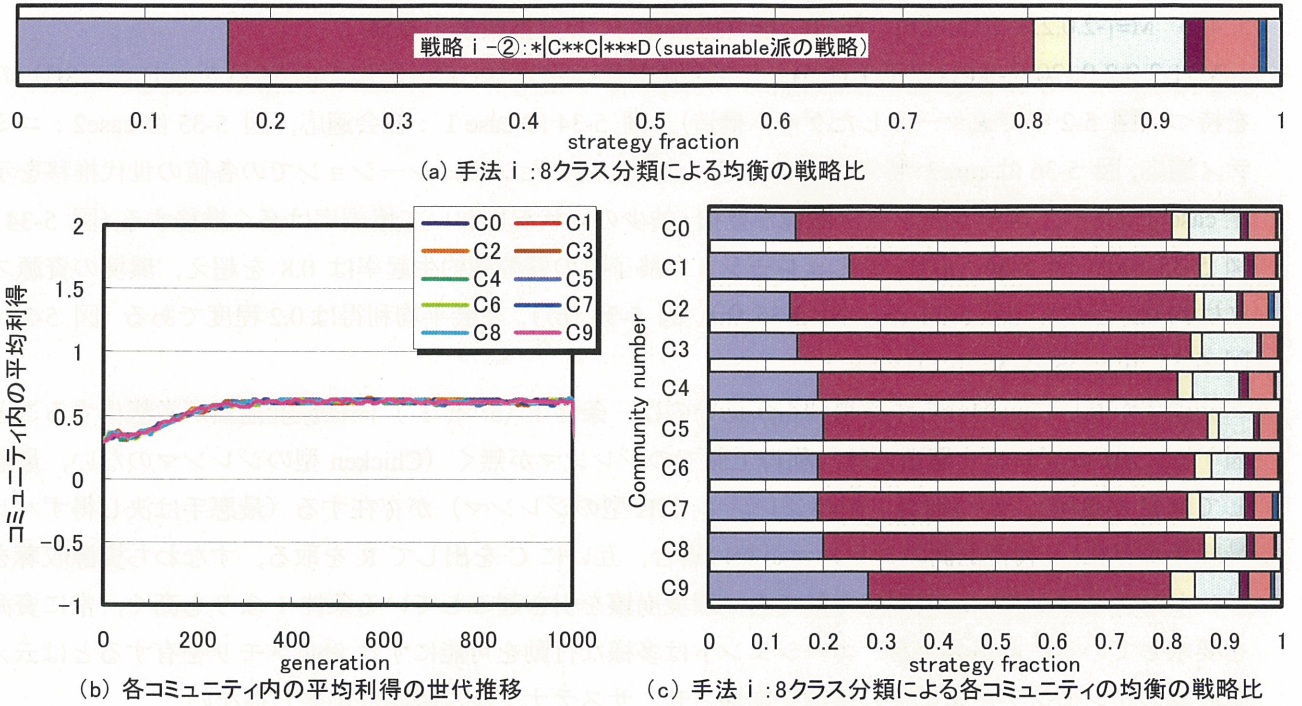


図 5-32 case2: コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

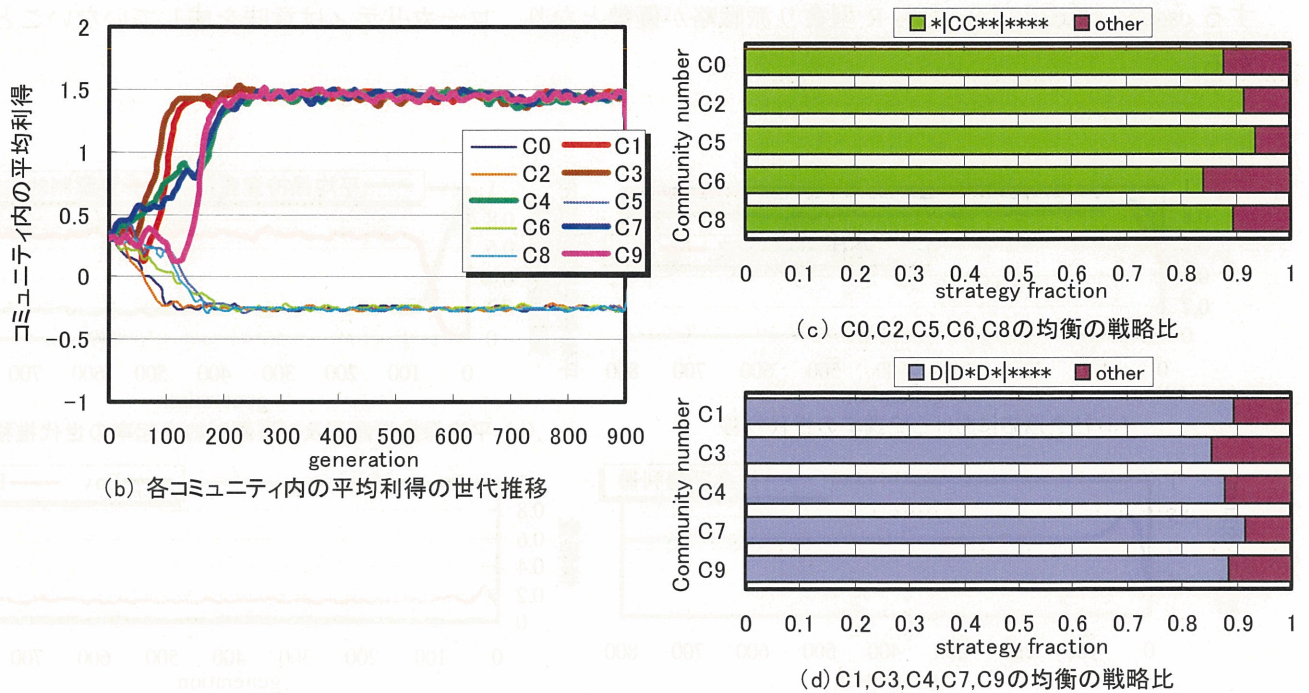


図 5-33 case3: 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5.4.5 $M=[-2.0,2.0,-20.6,-9.6]$ ($r=2.0, \theta=160[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0,2.0,-20.6,-9.6]$ (以下条件 5)として数値計算を行った。尚, 条件 5 の M は Stag Hunt (SH) の構造を持つ (図 5-2 中で▲マークしたゲーム構造)。図 5-34 は case 1 : 社会適応, 図 5-35 は case 2 : コミュニティ適応, 図 5-36 は case 3 : 特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す。全 case において, エージェントは環境が豊穡・貧少の両状況において協調率は高く推移する (図 5-34 (a), 図 5-35 (a), 図 5-36 (a))。シミュレーション終了時の資源制約生起率は 0.8 を超え, 環境の資源ストックは約 0.2 となり (図 5-34 (b), 図 5-35 (b), 図 5-36 (b)), 社会平均利得は 0.2 程度である (図 5-34 (c), 図 5-35 (c), 図 5-36 (c))。

協調率が高いにも拘わらず獲得利得が低いのは, 条件 1 (5.4.1) 同様環境崩壊が常態化すること起因する。SH のジレンマ構造では, 利得上側でのジレンマが無く (Chicken 型のジレンマのない, 最適手としては C が自明), かつ利得下側のジレンマ (SH 型のジレンマ) が存在する (最悪手は決し得ずパレート最悪手が存在)。利得上側のジレンマがない場合, 互いに C を出して R を取る, すなわち資源収奪を行うインセンティブが強い。協調率を見ても, 環境崩壊を引き起こしている条件 1 よりも高く, 常に資源収奪を要求していることが分かる。エージェントは多様な行動を可能にする 9bit メモリを有するとは云え, 資源収奪のインセンティブに従い環境を崩壊させ, サステナブルな戦略は創発し得ない。

図 5-37 は case 1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡時の戦略比を, 図 5-38, 図 5-39 はそれぞれ case 2 : コミュニティ適応, case 3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す。均衡時の戦略比は全 case で R 型貪り派の戦略が優勢となる。ローカリティが存在する case 2, case 3 においても R 型貪り派戦略が優勢となり, ローカリティは意味を成していないことが分かる。

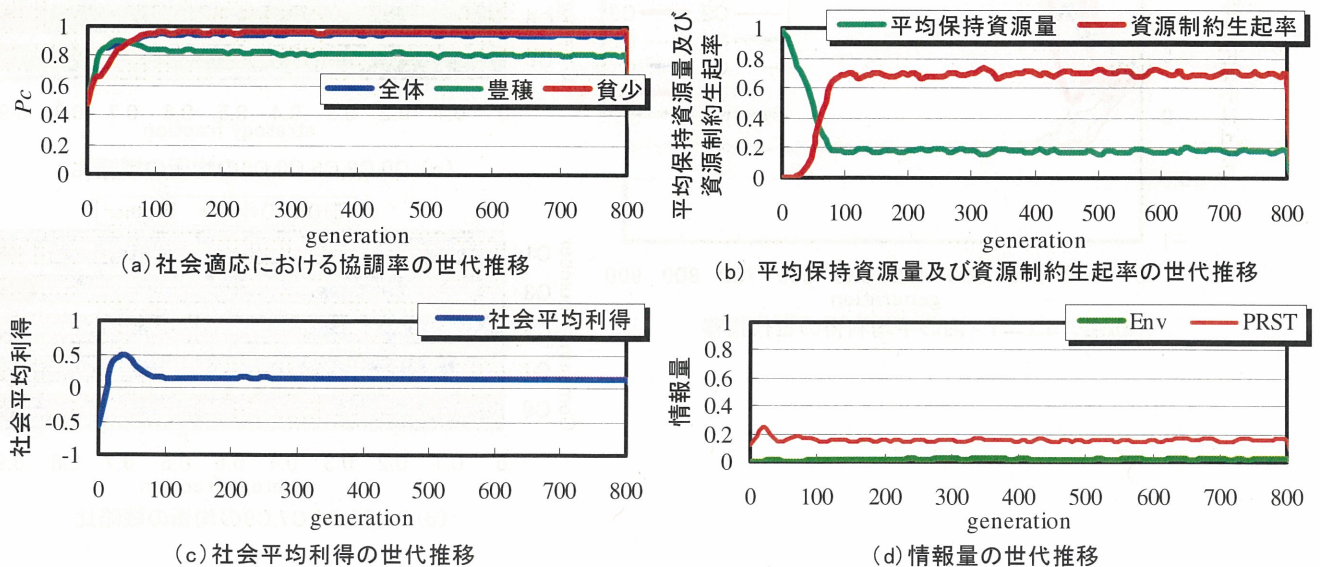


図 5-34 case 1: 社会適応時の各値の世代推移

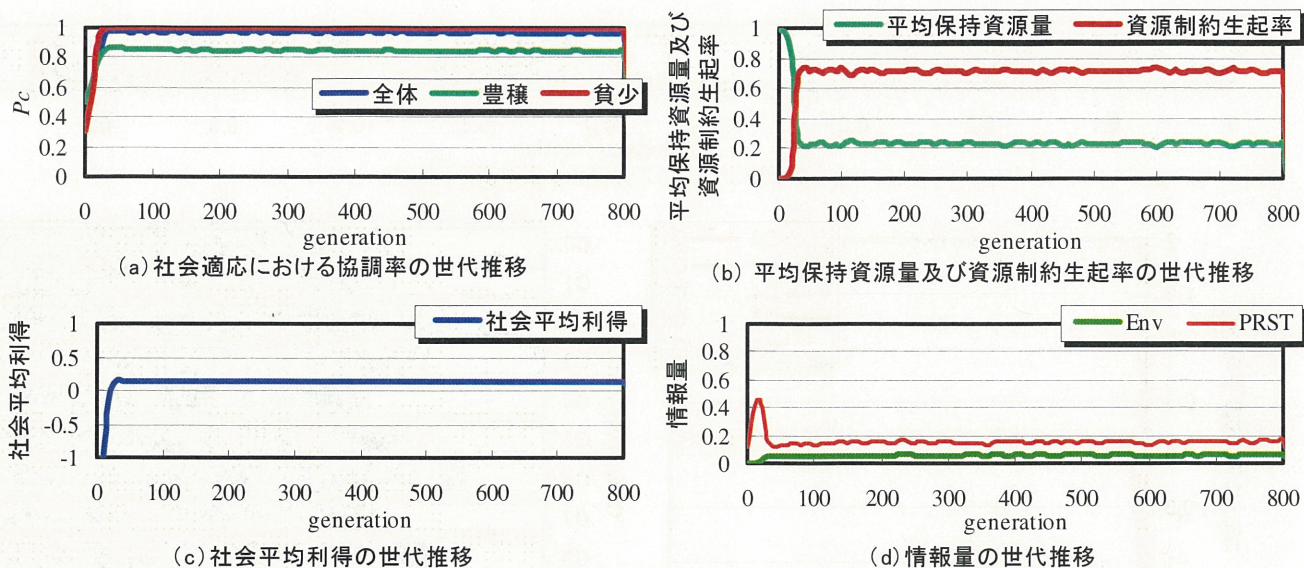


図 5-35 case2: コミュニティ適応時の各値の世代推移

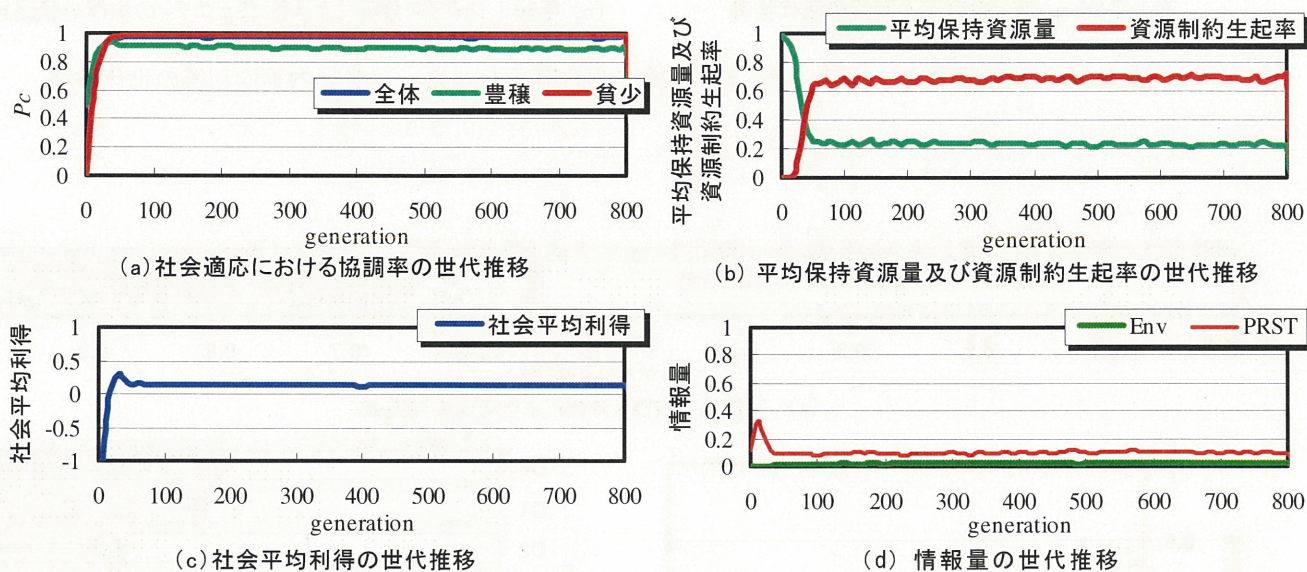


図 5-36 case3: 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

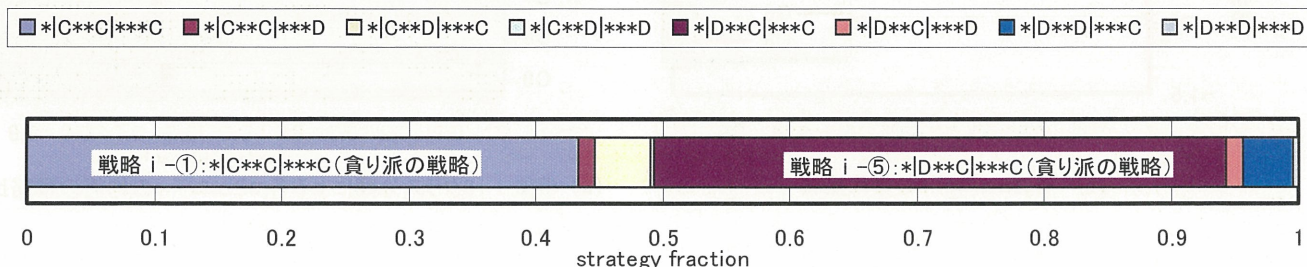
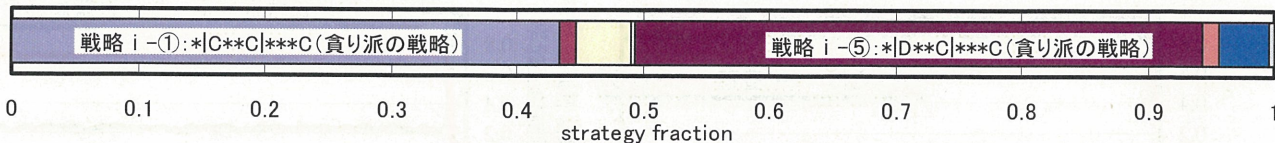
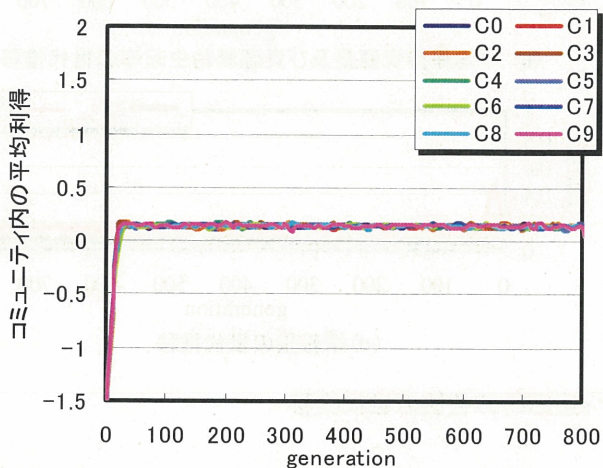


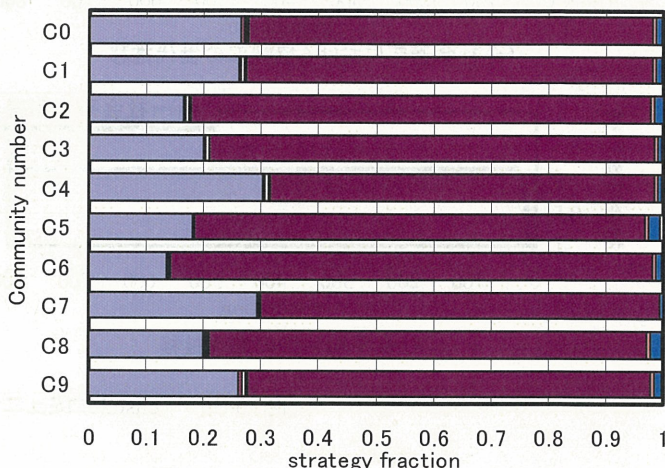
図 5-37 case1: 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比



(a) 手法 i : 8クラス分類による均衡の戦略比

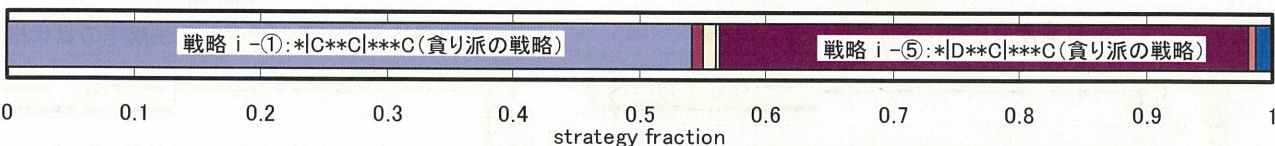


(b) 各コミュニティ内の平均利得の世代推移

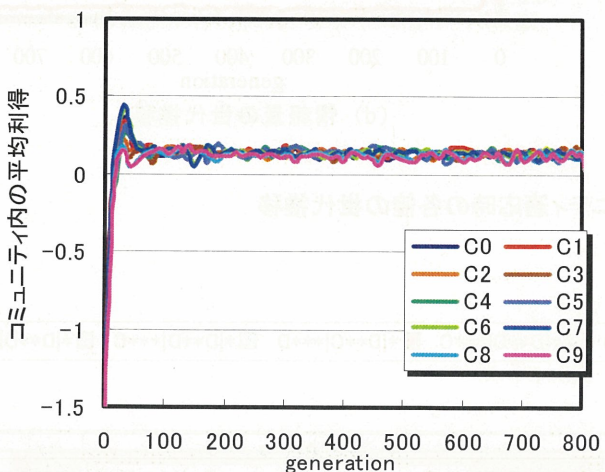


(c) 手法 i : 8クラス分類による各コミュニティの均衡の戦略比

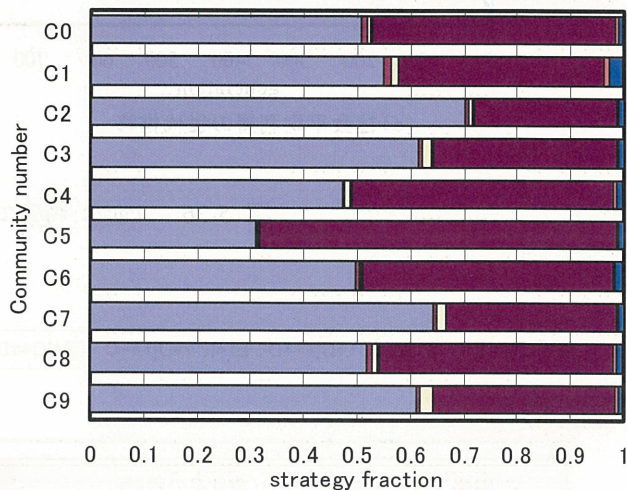
図 5-38 case2 : コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移



(a) 手法 i : 8クラス分類による均衡の戦略比



(b) 各コミュニティの世代推移



(c) 手法 i : 8クラス分類による各コミュニティの均衡の戦略比

図 5-39 case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5.4.6 $M=[-2.0,2.0,11.0,-3.0]$ ($r=2.0$, $\theta=-60[\text{deg}]$) における結果・考察

$M=[-2.0,2.0,11.0,-3.0]$ (以下条件 6)として数値計算を行った。尚、条件 6 の M は Trivial の構造を持つ (図 5-2 中で×マークしたゲーム構造)。図 5-40 は case 1 : 社会適応, 図 5-41 は case 2 : コミュニティ適応, 図 5-42 は case 3 : 特定コミュニティ適応を用いたシミュレーションでの各値の世代推移を示す。環境が貧少な場合の協調率は高く推移するが, 豊穡な場合の協調率は 0.3 から 0.5 の間で終始摂動する (図 5-40 (a), 図 5-41 (a), 図 5-42 (a))。シミュレーション終了時の資源制約生起率は 0.8 を超え, 環境の資源ストックは約 0.2 となり (図 5-40 (b), 図 5-41 (b), 図 5-42 (b)), 社会平均利得は 0.2 程度である (図 5-40 (c), 図 5-41 (c), 図 5-42 (c))。

エージェントの獲得利得が低位に留まっているのは, これまで同様に環境崩壊の常態化に起因するのは明らかである。これまでの条件下での結果と唯一異なる豊穡な場合の協調率についても, 条件 1 (5.4.1) と同じく豊穡な場合の学習能率の低下で説明することが出来る。Trivial のゲーム構造では, 利得上側のジレンマに加え, 利得下側のジレンマも存在しないため, Nash 均衡は C となる。そのため, エピソード開始直後に環境崩壊が常態化するので, 豊穡な場合の学習が殆ど行われなままシミュレーションは定常を迎える。従って, 豊穡な場合の協調率は収束せず, 情報量も増加しない。

図 5-43 は case 1 : 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡時の戦略比を表す。条件 6 では R 互恵の創発によって環境が崩壊しているので, 当然 R 型貪り派戦略は遺伝子プールの大半を占めるが, その他にも “*|C**D|***C” (以下, 戦略 $i-③$) と, “*|D**D|***C” 戦略 $i-⑦$ も遺伝子プールの約半数を占める。R 型貪り派戦略である戦略 $i-①$, 戦略 $i-⑤$ も含めた 4 戦略に共通の特徴は, 貧少時の R の次手が C (第 9bit) という点である。Trivial ではジレンマが存在しないため, C を出す方が期待利得は高い, C 優越のゲーム構造である。つまり, D を出すことで相手を出し抜いたとしても, 高い利得は得られないため, エージェントらは C を出し, 容易に R 互恵が達成される。条件 6 は $S+T>2R$ の条件を満たすゲーム構造であるため, 初期段階にエージェントらの戦略が多様であったとしても, 資源収奪が行われ, すぐに環境は崩壊する。その後は貧少な場合でのゲームが継続されるため, 戦略は貧少な場合の 4bit のみが進化し, 貧少な場合の R の次手には C を出すという互恵関係のみが創発し, 資源収奪が行われている。

図 5-44, 図 5-45 はそれぞれ case 2 : コミュニティ適応, case 3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内の平均利得の世代推移を表す。均衡時の全体の戦略比をみると case 1 同様の戦略比を示し, コミュニティ間の多様性も存在しない。従って, 内部で行われるゲームも case 1 と同様になるため, ローカーティは意味を成していないことが分かる。

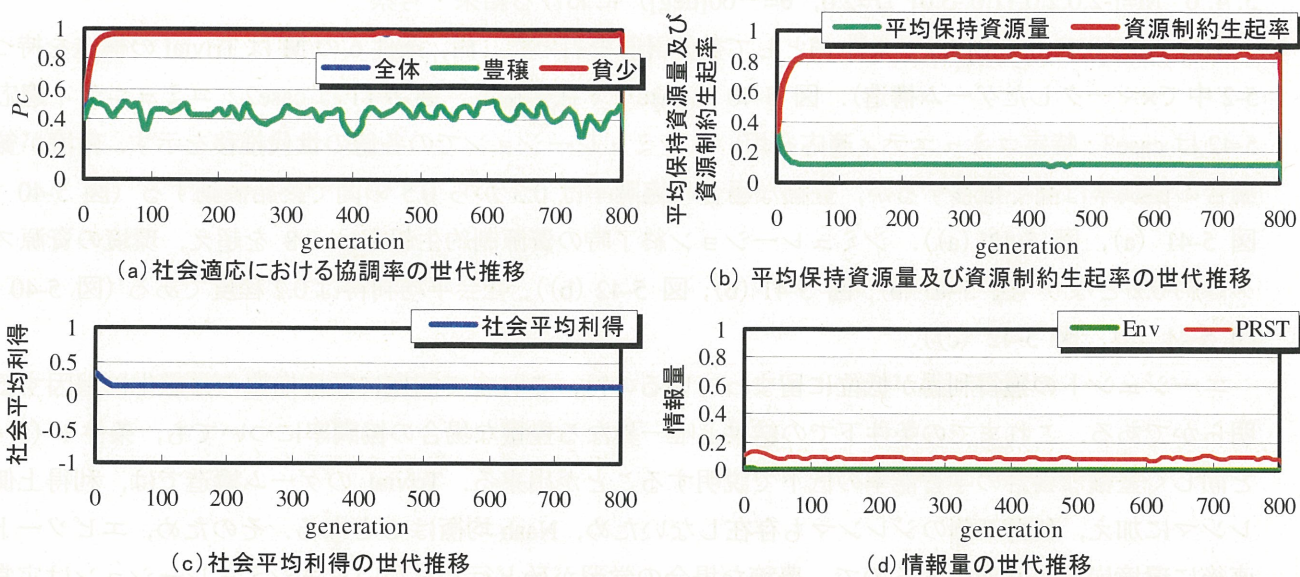


図 5-40 case1: 社会適応時の各値の世代推移

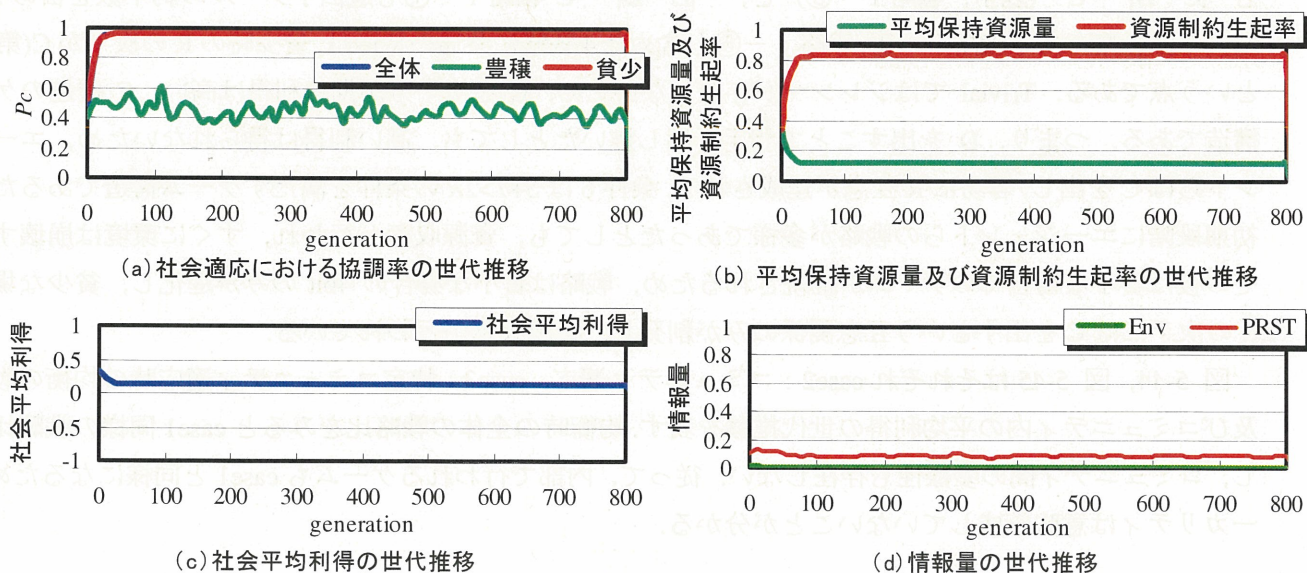


図 5-41 case2: コミュニティ適応時の各値の世代推移

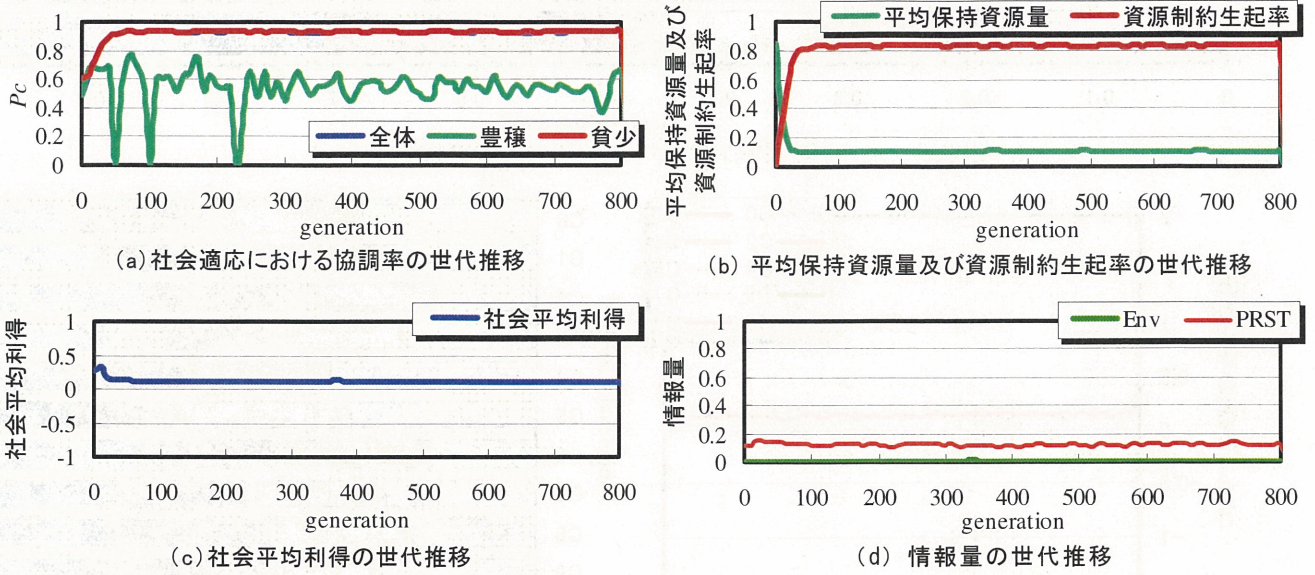


図 5-42 case3: 特定コミュニティ適応時の各値の世代推移

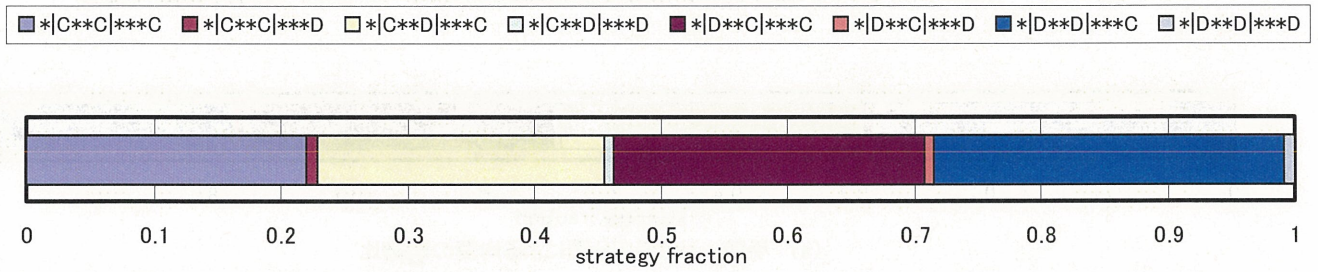
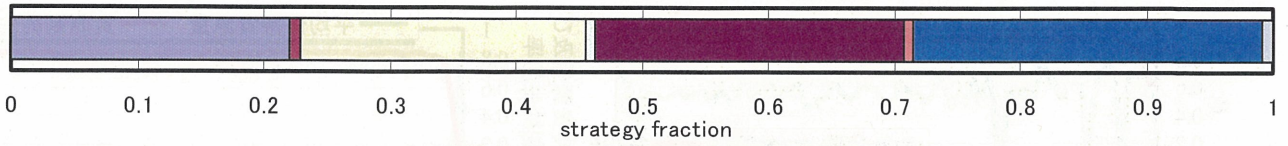
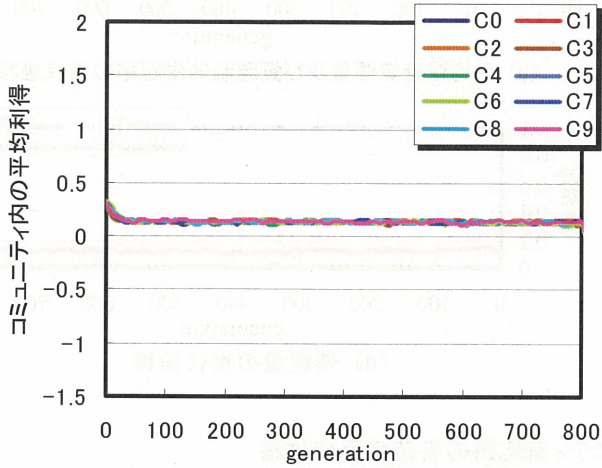


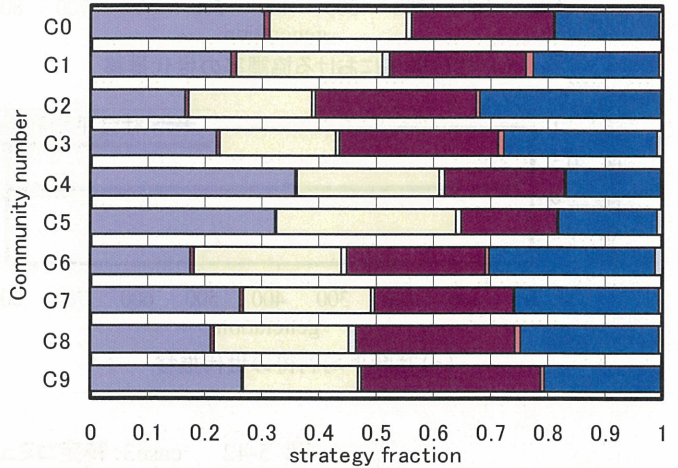
図 5-43 case1: 社会適応時の手法 i : 8 クラス分類による均衡の戦略比



(a) 手法 i : 8クラス分類による均衡の戦略比

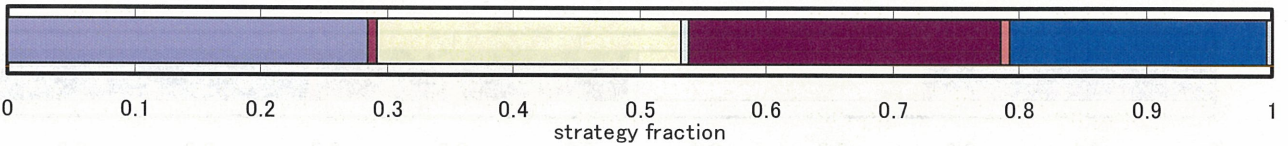


(b) 各コミュニティ内の平均利得の世代推移

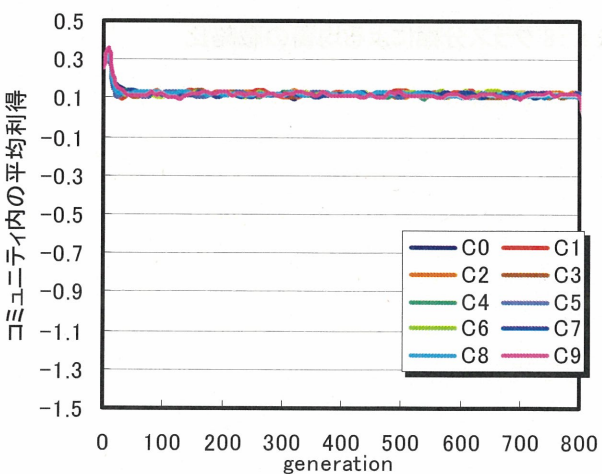


(c) 手法 i : 8クラス分類による各コミュニティの均衡の戦略比

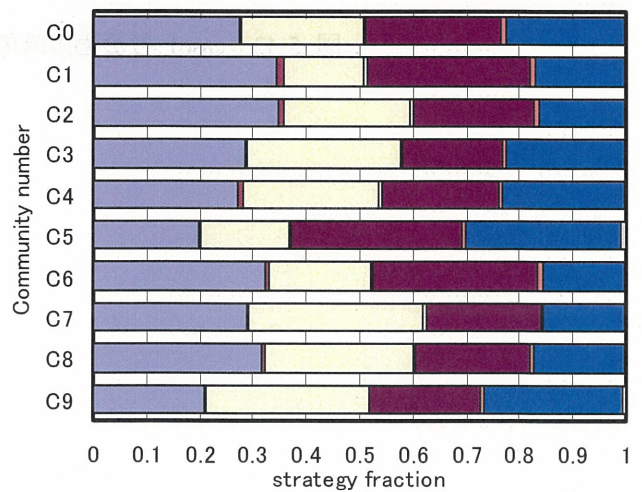
図 5-44 case2 : コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移



(a) 手法 i : 8クラス分類による均衡の戦略比



(b) 各コミュニティの世代推移



(c) 手法 i : 8クラス分類による各コミュニティの均衡の戦略比

図 5-45 case3 : 特定コミュニティ適応時の均衡の戦略比及びコミュニティ内平均利得の世代推移

5.4.7 小括

case1：社会適応時はゲーム構造により，2種類の社会が創発する。

1つは，環境が危機的状況（貧少）になると R 互惠を放棄して資源返還を行い（貧少時に協調率低），豊穰な状態まで回復すると R 互惠を再構築（豊穰時に協調率高）し，危機的状況が訪れるまで資源を収奪し続ける“サステナブル派”の戦略が優勢となる社会である。この時，行動の切り替えによって資源は回復能力が最大となる $Env|_{threshold}$ 前後に保たれるので，資源収奪を効率的に行うことが可能となり，平均保持資源量及び社会平均利得が高いサステナブルな社会を創発させる。この時，環境の状態入力に応じて行動を明確に切り替えるため， I_{Env} は比較的高い。

もう1つの社会では，環境の状態に依らず，常に資源収奪を繰り返す“貪り派”の戦略によって，環境が崩壊する，環境崩壊型の社会である。この時，資源収奪は環境の状態に依らず繰り返し行われるため，資源制約が頻繁に生起することとなり，資源収奪は著しく制限される。従って，資源制約生起率は高く，平均保持資源量及び社会平均利得は低位に留まる。貪り派の戦略の資源収奪方法は2種類存在する。R 互惠（協調率高）によって収奪を行う“R 型貪り派戦略”と，ST 互惠（協調率 0.5 前後）による“ST 型貪り派戦略”である。R 型貪り派戦略，ST 型貪り派戦略は共に環境の状態に関係なく資源収奪を行い，行動を切り替えることはないので I_{Env} は低い。一方， I_{PRST} においては，R 型貪り派戦略よりも ST 型貪り派戦略優勢の社会の方が高い値を示す。これは，ST 互惠では互いに S と T を取るために，単に R を取る R 互惠よりも高度な行動切り替えを必要とするためである。

Browning^[47]らによると，S と T を繰り返すことで互いに高利得を得る互惠関係を Coordinated Alternating Reciprocity（以下，CAR）としている。CAR において S と T を取る手法には2種類ある。1つは，一度 C と D に割れた以降は交互に C と D の手を入れ替えることで S と T を繰り返す CAD 型である。もう1つは，自他で C と D とに手が割れるまではランダムに手を決め，一度 C と D に割れた以降は C 若しくは D を出し続ける DorC 型である。Tanimoto ら^[46]によると，図 5-2 中で示される $S+T>2R$ である赤線内の領域の内ジレンマが存在する Hero, Leader の領域では DorC 型の CAR が創発し，Trivial の領域では CAD 型の CAR が創発するとされている。

本研究では 5.4.3 で示したように，Leader のゲーム領域では DorC 型の CAR が創発し，Tanimoto らの言説に一致するが，5.4.6 の Trivial の領域では，R 互惠は創発するものの，CAR は創発しない。これは，CAR が創発するのは S と T を交互に取ることで，R を取るよりも高い利得を得られることに起因する。資源制約が存在する場合，資源収奪は環境崩壊と共に頭打ちとなるため，R であろうと，S と T であろうと得られる利得は変わらなくなる。その際 Trivial のゲーム領域では C 優越であるため，CAR によって獲得利得の向上が望めない以上，互いに C を出し R 互惠を構築した方が，確実に資源収奪を行うことが出来るためである。Leader の領域で CAR が創発したのは，Nash 均衡が S と T にあるため，S と T を取ることへの行動の吸引と相まって，CAR の創発が容易になったと考えられる。

ローカリティに関しては，導入方法によって形成される社会が大きく異なることが分かった。

グローバルな状況を想定している case1 に対し，case2 では知識の伝播にローカリティが課せられる。しかし，特に取り上げた6つのゲーム構造において創発する社会は，case1 と一致しており，サステナブルな社会と環境崩壊型社会以外は創発せず，環境崩壊型社会における資源収奪方法に，R 型貪り派戦略によるものと ST 型貪り派戦略によるものの2種類があることも一致している。

case2 より更にローカリティが増し，知識の伝播と資源移動の両方にローカリティが存在する case3 においても創発する社会は貪り派の社会若しくはサステナブルな社会の何れかである。しかし，case3 では case1，

case2 に比べ、PD 及び Chicken の一部のゲーム構造で創発する社会の構造が若干異なる。PD の中でもジレンマが非常に弱いゲーム領域では、資源移動のローカリティによってエージェント間の対戦カードが限定されるため、サステナブル派の戦略が優勢な状況下に R 型貪り派戦略が侵入可能となった。此により、R 型貪り派戦略は free rider として振る舞い、サステナブル派の戦略が返還する資源を貪り続けることが可能となり、R 型貪り派戦略とサステナブル派の戦略の間で利得格差が生じるようになった。次に 5.4.3 では、コミュニティ毎に S と T を取る役割が分化し、一方のコミュニティに所属する戦略が T を取り続け、もう一方に所属する戦略が S を取り続けることとなり、コミュニティ間で利得格差が発生した。これは所謂 DorC 型の CAR ではあるが、コミュニティ単位で C 若しくは D を取るだけで良いので、高度な行動切り替えは必要なく、case1 や case2 で CAR が創発した場合に比べ、 I_{PRST} は低い。また、この時の資源収奪量は環境の資源回復量の最大値を超えないため、環境は崩壊を免れ、エージェントらは意図せずしてサステナブルな社会を形成することとなった。

このようにローカリティに関しては、知識伝播レベルのみに課すだけでは社会に与える影響はほとんど認められなかったが、知識伝播レベルと共に資源移動にもローカリティを課すと一部の社会構造に変化が見られる。その変化は、資源移動の制限から利得格差を発生させ、エージェントらに多様性を持たせるものであった。

Ifiti らは空間型 PD でゲーム対戦相手の範囲と戦略適応の範囲を分離し、これらがゲームの協調創発に及ぼす影響を調べている^[48]。一般的に、空間構造などのローカリティを導入すると、ジレンマは緩解し、互恵の構築が容易になるとされている。しかし、彼らはラチス構造で実験すると、両者の範囲が乖離しすぎると、互恵構築の促進効果は確認されないと報告している。本実験で得られた、case2（戦略適応にだけ社会構造あり）では、サステナブル社会の創発範囲はネットワーク的社会構造がない場合（case1）と差異なく、case3（戦略適応とゲーム対戦双方に社会構造あり）では、創発範囲が広がる可能性がある、との知見は、Ifiti らの言説と整合的であると云える。

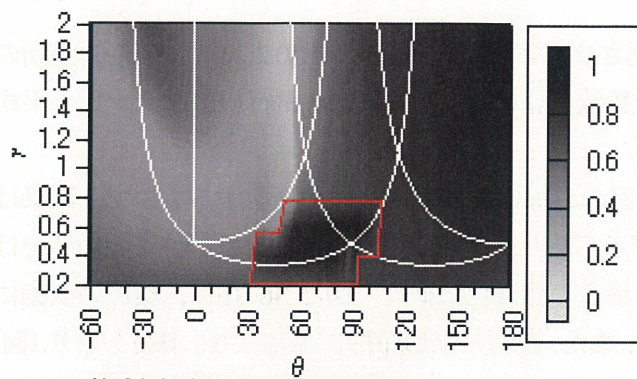
5.4.8 M を連続的に変化させた場合の結果

r 及び θ により, 2×2 ゲーム構造を連続的に変化させて実験を行った. r を $[0.2, 2.0]$, θ を $[-60, 180]$ の間で変化させ, r の値を 0.2 刻み, θ の値を 2deg 刻みで数値計算を行い, 結果は 5 試行のアンサンブル平均である.

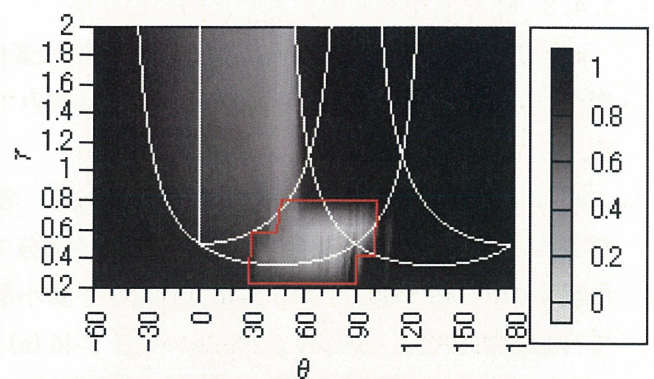
図 5-46 は case1 : 社会適応時の結果である. 各図の白線はゲーム構造の分類をするもので, 結果は均衡を表す. サステナブル社会は図 5-46 の赤枠部分で示したゲーム領域でしか創発しない. この領域では豊穡な場合の協調率は高い (図 5-46 (a)) が, 貧少な場合の協調率は低く (図 5-46 (b)), 環境の状態に応じて行動を切り替えるため, I_{Env} は高い (図 5-46 (e)). また, 環境の平均保持資源量は 0.6 前後となり (図 5-46 (c)), 資源制約は全く生起していない (図 5-46 (d)). そして, 社会平均利得は約 0.6 と, 他のゲーム領域に比べ, 高い値を示している. これらはまさしくサステナブルな社会の特徴である. 条件 2, 条件 4 のゲーム構造はこの領域に含まれる. その他の領域では低資源ストック (図 5-46 (c)), 低社会利得 (図 5-46 (e)) の環境崩壊型の社会が創発する. その中でも豊穡, 貧少の両状況で協調率が高くなる (図 5-46 (a), 図 5-46 (b)), R 型貪り派戦略による環境崩壊型社会は, リスク回避性のジレンマを持つ領域 (Leader & SH, PD, Anti-Leader & Chicken, SH, Anti-Leader, Anti-Hero) とジレンマを持たない Trivial の領域で創発する. 一方, 豊穡, 貧少の両状況で協調率は 0.5 前後で (図 5-46 (a), 図 5-46 (b)), I_{PRST} が他のゲーム領域よりも高い (図 5-46 (f)) ST 型貪り派戦略による環境崩壊型社会は Hero, Leader の領域でのみ創発する. また, R 型貪り派戦略による環境崩壊型社会では, 平均社会利得は 0.2 弱で一律であるが, ST 型貪り派戦略による社会では, $S+T$ が大きくなるほど資源要求量が増大するため, 5.4.3 で述べたメカニズムにより獲得利得も上昇している. また, $\theta=50[\text{deg}]$ 付近に社会平均利得が負になっている領域が存在するが, このゲーム領域では 2×2 ゲームのジレンマを克服できない社会が形成されている (詳細は付録に記載).

図 5-47 は case2 : コミュニティ適応の結果である. 各図の白線はゲーム構造の分類をするもので, 結果は均衡を表す. サステナブルな社会が創発する領域は, 社会適応での結果と大差なく, 知識伝播のローカリティだけでは, 短期的なジレンマ (資源獲得のために相手と協調すべきこと) の先にある中長期的ジレンマ (資源制約に抵触しないように資源獲得と環境護持を両立すべきこと) を克服する上で, 有意な影響はないことが分かる. これは, 知識伝播のローカリティがあろうと, ゲーム対戦を通じて戦略の良否 (資源獲得の多寡 (i.e. 個体の適合度への影響) と云う意味での) がフィードバックされるからだと思われる.

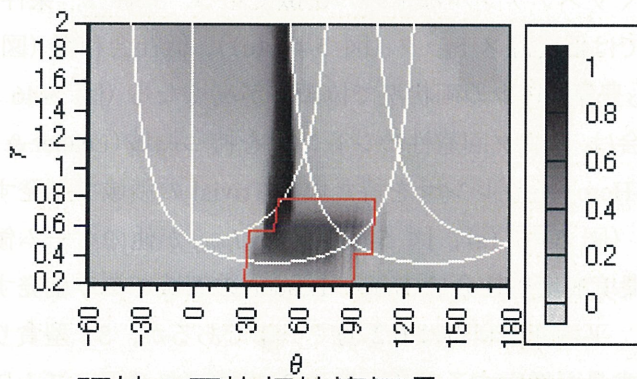
図 5-48 は case3 : 特定コミュニティ適応の結果である. 各図の白線はゲーム構造の分類をするもので, 結果は均衡を表す. サステナブルな社会が創発する領域を赤線枠で示すが, 前 2case に比して SH 方向へ拡大していることが分かる. しかし, 創発エリア下方の Trivial との境界では環境崩壊型となる箇所が出現し, サステナブル領域は楕状となる. 環境崩壊型社会においては R 型貪り派戦略による社会には変化は見られないが, ST 型貪り派戦略の社会では, I_{PRST} が極端に低下している. 5.4.3 で述べたように, case3 の Leader のゲーム構造ではコミュニティ単位で C と D を出す戦略を分けるため, 高度な行動切り替えを必要とせず, 情報量は低下する. 従って, Hero, Leader のゲーム領域では, コミュニティ間で利得格差を伴う DorC 型の CAR が創発していると考えられる.



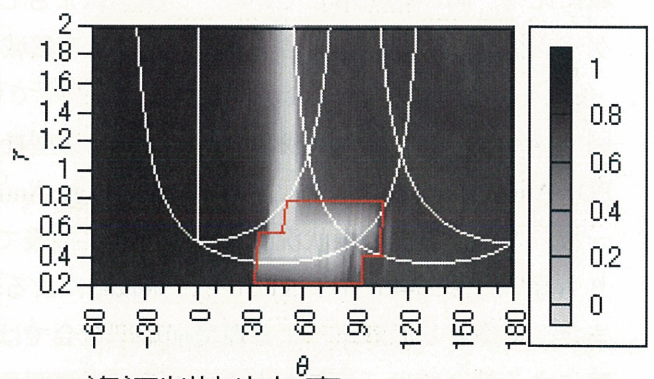
(a) 豊穡な場合の協調率



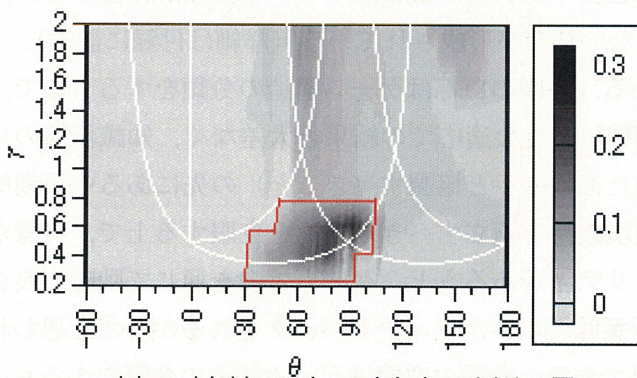
(b) 貧少な場合の協調率



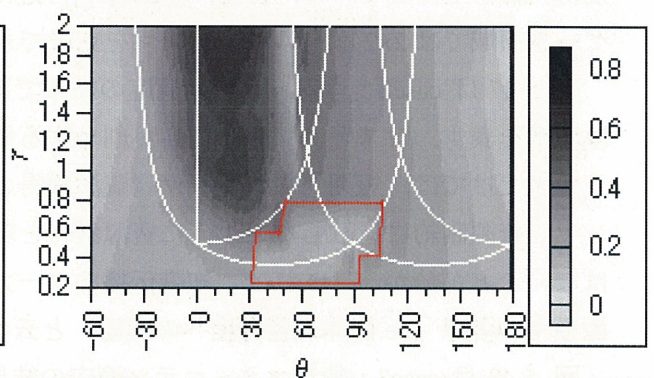
(c) 環境の平均保持資源量



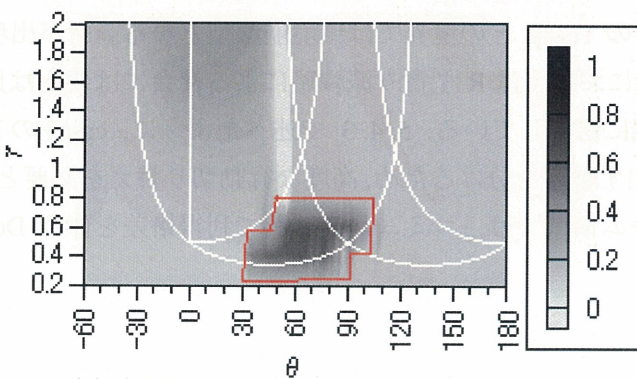
(d) 資源制約生起率



(e) 環境の状態入力に対する情報量



(f) 前回の対戦結果入力に対する情報量



(g) 社会平均利得

図 5-46 社会適応の結果

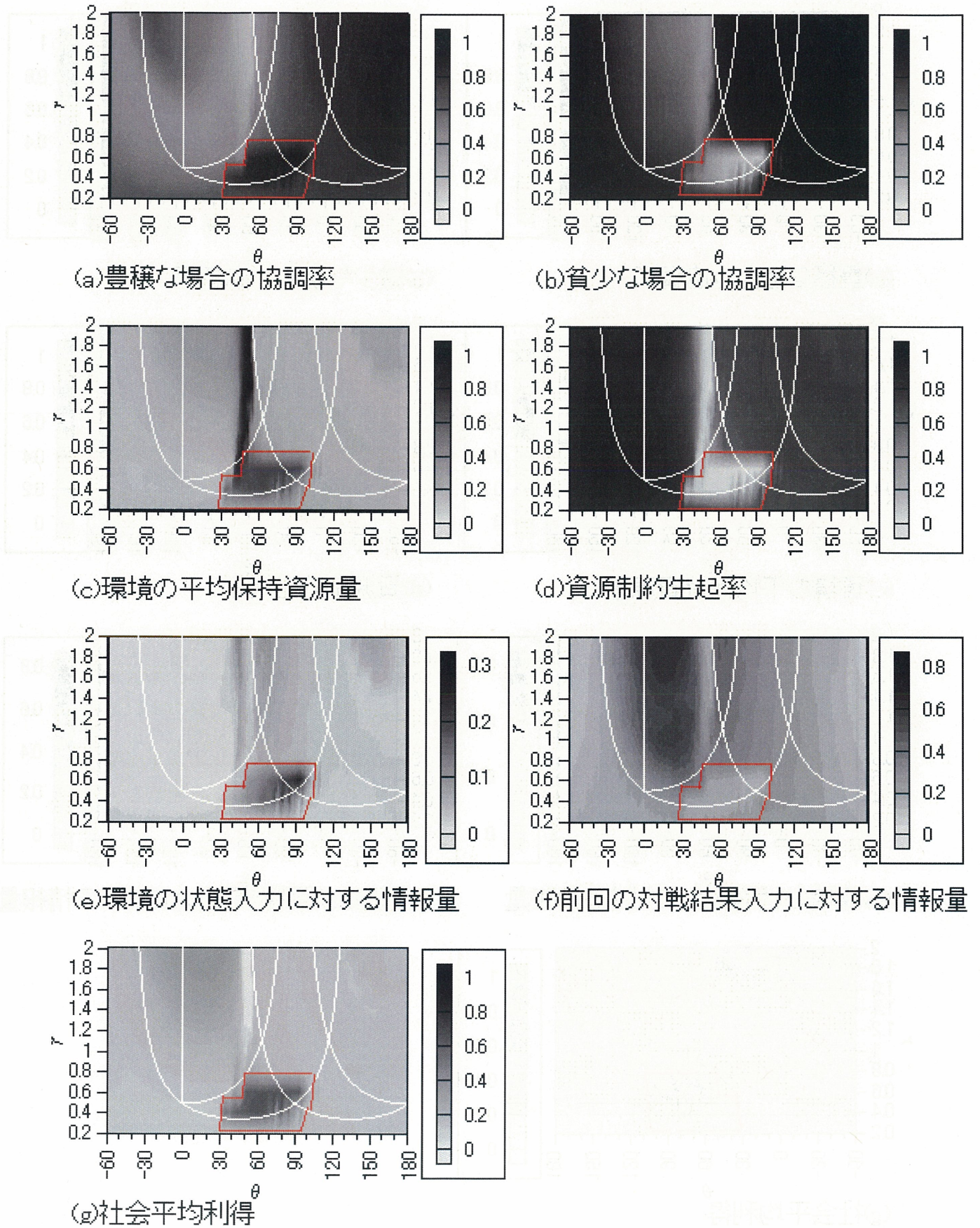


図 5-47 コミュニティ適応の結果

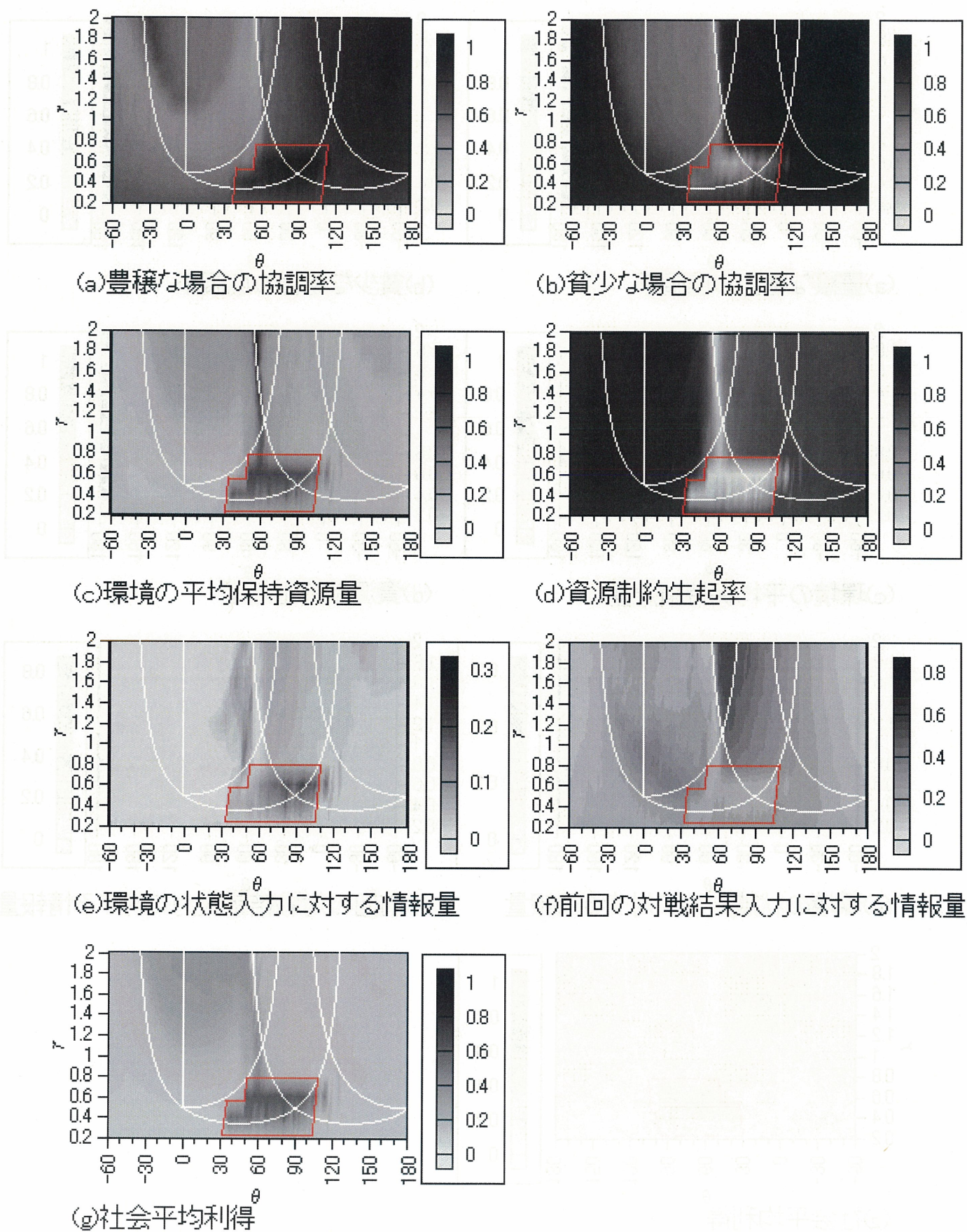


図 5-48 特定コミュニティの結果

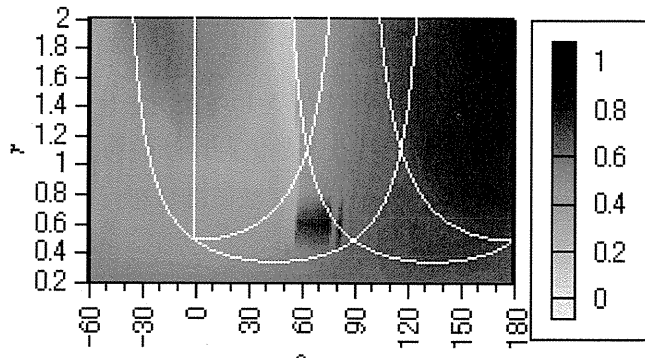
5.4.9 資源の回復能力のパラメータに関する結果

資源回復能力の与える影響を見る．資源回復能力のモデル定数 α 以外は表 5-1 のパラメータを用い， α を 0.11, 0.13, 0.17, 0.19（これまでは $\alpha=0.15$ ）の 4 パターンの実験を行う．数値計算は前節と同様に r を $[0.2, 2.0]$ ， θ を $[-60, 180]$ の間で変化させ， r の値を 0.2 刻み， θ の値を 2deg 刻みで数値計算を行い，結果は 5 試行のアンサンブル平均である．結果は均衡を表す．

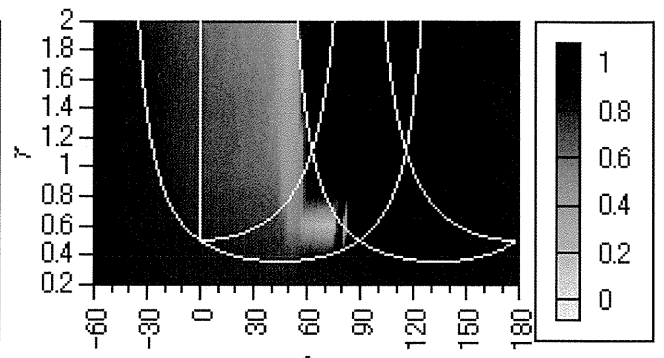
図 5-49 は $\alpha=0.11$ での結果，図 5-50 は $\alpha=0.13$ での結果，図 5-51 は $\alpha=0.17$ での結果，図 5-52 は $\alpha=0.19$ の結果である．各図の白線はゲーム構造の分類を表す．前節より資源回復能力を減少させた $\alpha=0.13$ では，高利得を得ることが可能となるサステナブル派優勢の社会が創発する領域は $\alpha=0.15$ よりも減少する． $r=0.6$ では殆ど PD のゲーム領域ではサステナブルな社会は創発しなくなり， $r=0.4$ の Trivial との領域部分では大部分が環境崩壊型の社会となり，Chicken 側のゲーム領域に若干残っている程度である．また， I_{Env} が高い領域は，サステナブルな社会が創発する領域と一致している．更に回復能力の減少する $\alpha=0.11$ のサステナブルな社会を見ると， $r=0.6$ の Chicken のゲーム領域のみにしか現れない．また， I_{Env} が高い領域は， $\alpha=0.13$ の場合と同じくサステナブルな社会が創発する領域と一致している．

一方，資源回復能力を増加させた $\alpha=0.17$ では，サステナブルな社会の創発領域は拡大し，Trivial である $r=0.2$ においても現れるようになる．但し，サステナブルな社会が創発する領域であっても， I_{Env} は， $r=0.2$ を主としたと Trivial の領域では高くない． $\alpha=0.19$ ではサステナブルな社会が創発する領域は更に拡大し，PD との境界近くの SH においても現れるようになる． I_{Env} は， $\alpha=0.17$ 同様，Trivial の領域では高くない．

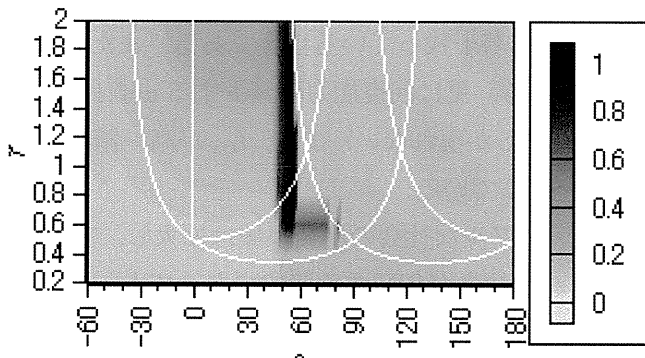
資源回復能力が増減すると，社会平均利得はそれに比例し，サステナブルな社会だけでなく環境崩壊型の社会でも上昇する．サステナブルな社会では環境の回復能力が高いほど，危機的状況から脱するまでの期間が短く済み，長期間資源を収奪することが出来るようになる．環境崩壊型の社会では，エージェントは低率の資源回復の中で資源を収奪できるまで待たなければならないのだが，資源回復能力が増加すると当然その周期は短くなるので，獲得利得は上昇することになる．一方，環境の情報入力に対する情報量は資源の回復能力に比例し，減少する．これは社会平均利得の場合と同様に，危機的状況から脱するまでの期間が関係している．環境が回復するまでの期間が短くなり，資源収奪の期間が長期化すると，全体の行動のうち，環境が危機的状況となり行動を切り替える回数は減少する．情報量は行動の切り替えを基に計算されているため，資源回復能力の増加と伴って減少するわけである．



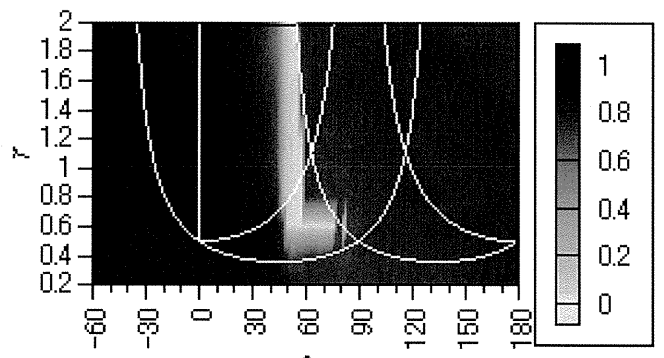
(a) 豊穡な場合の協調率



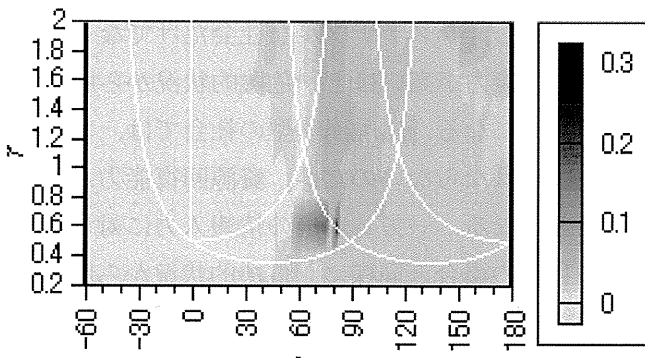
(b) 貧少な場合の協調率



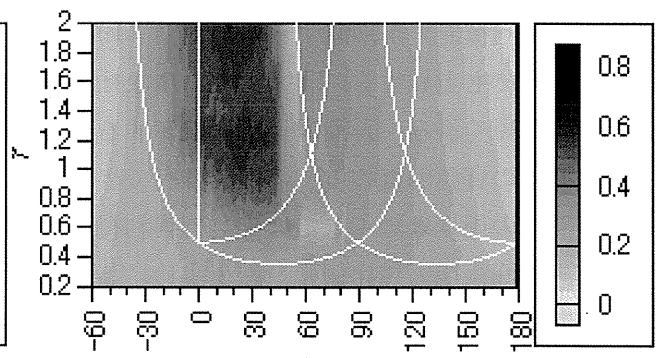
(c) 環境の平均保持資源量



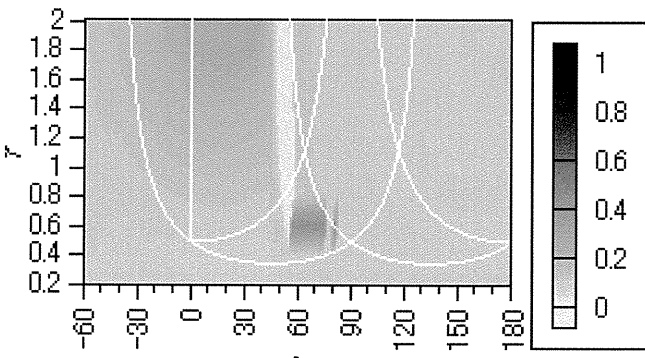
(d) 資源制約生起率



(e) 環境の状態入力に対する情報量



(f) 前回の対戦結果入力に対する情報量



(g) 社会平均利得

図 5-49 社会適応 ($\alpha=0.11$) の結果

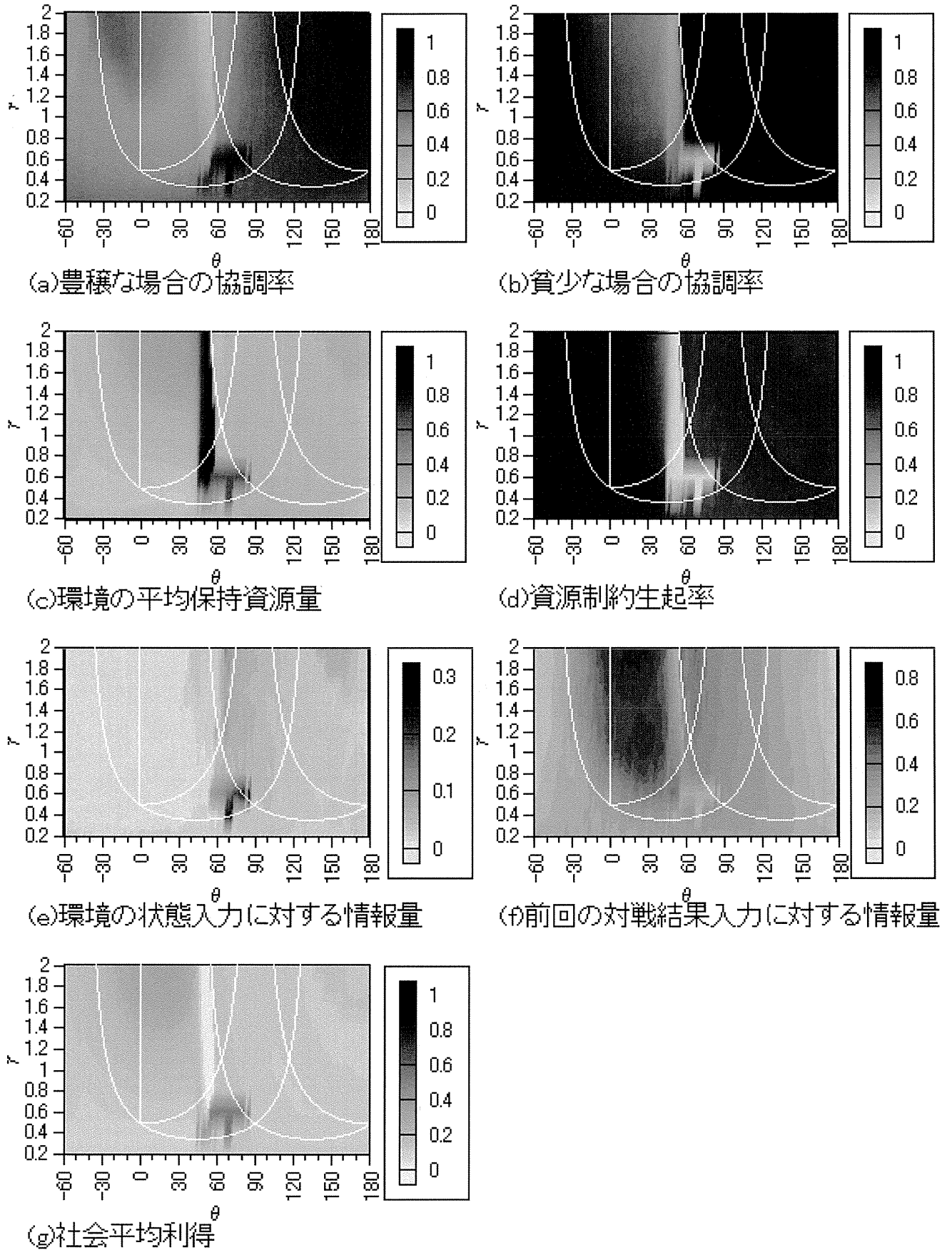


図 5-50 社会適応 ($\alpha=0.13$) の結果

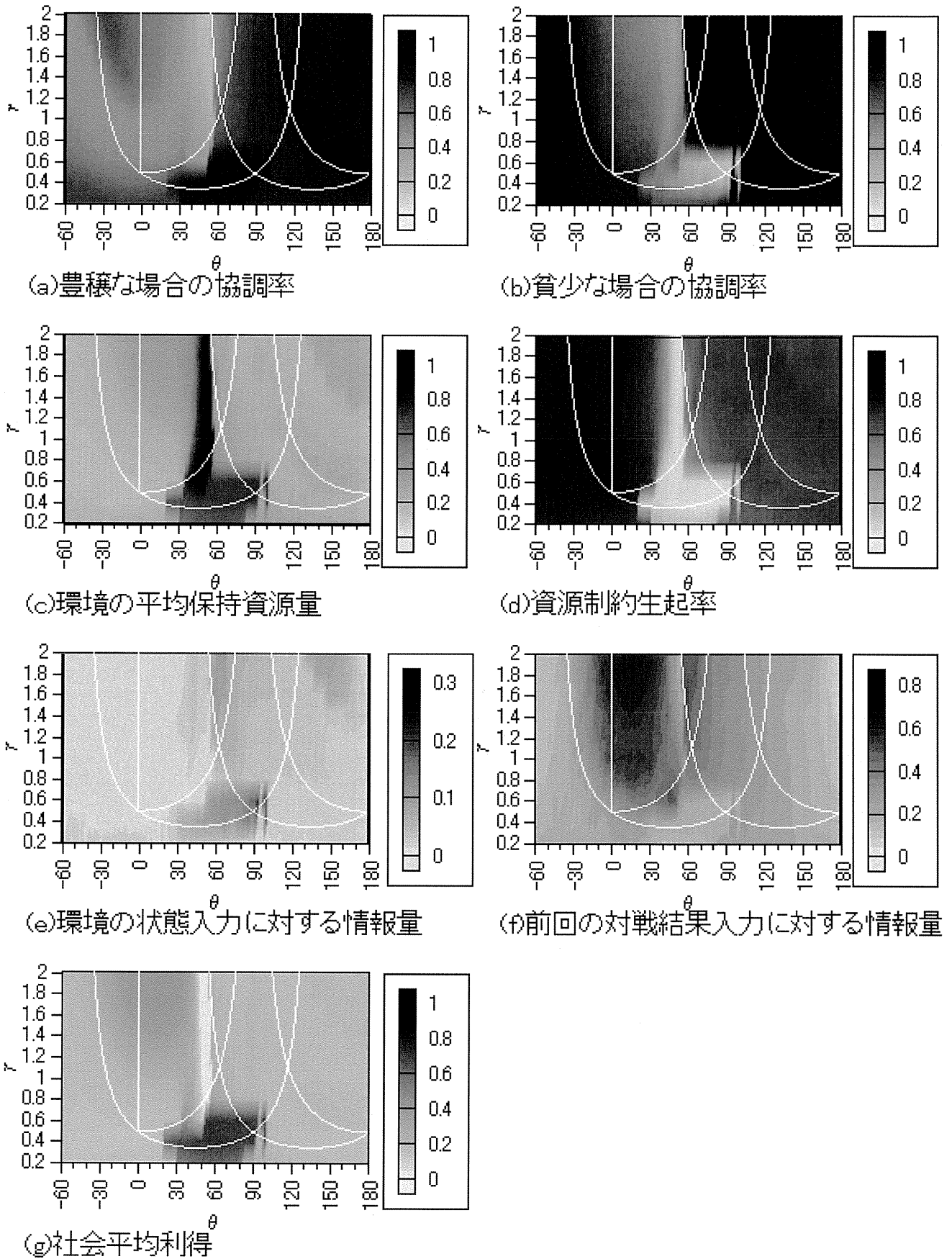
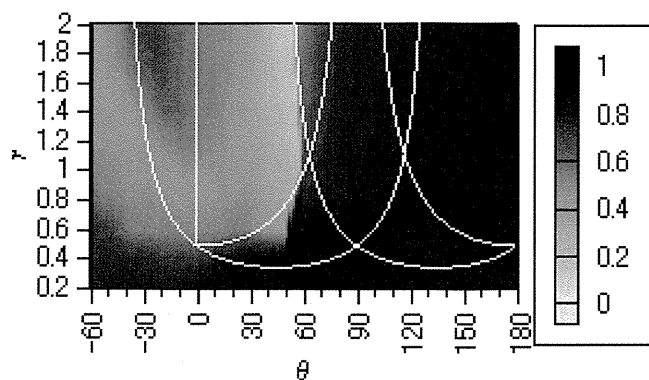
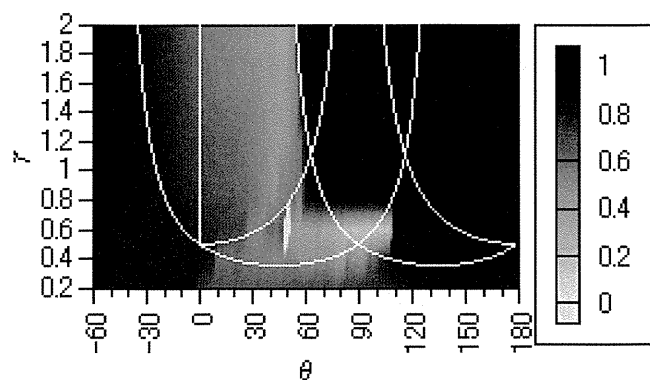


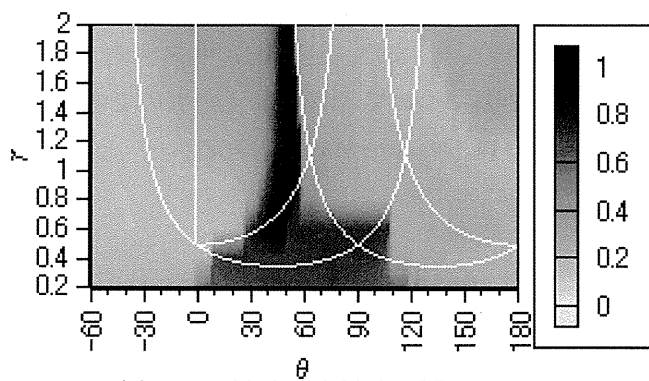
図 5-51 社会適応 ($\alpha=0.17$) の結果



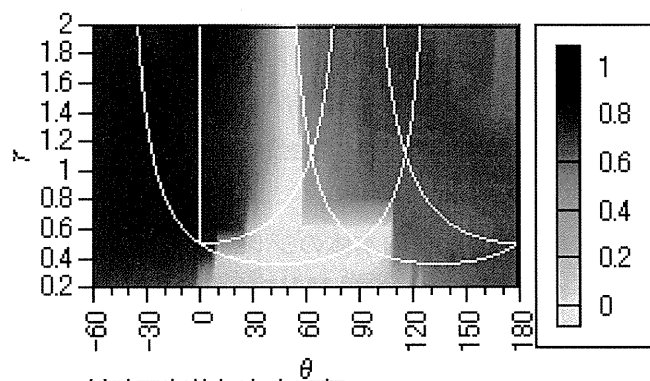
(a) 豊穡な場合の協調率



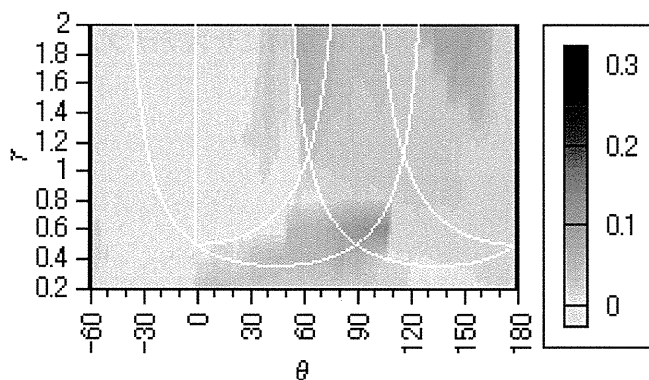
(b) 貧少な場合の協調率



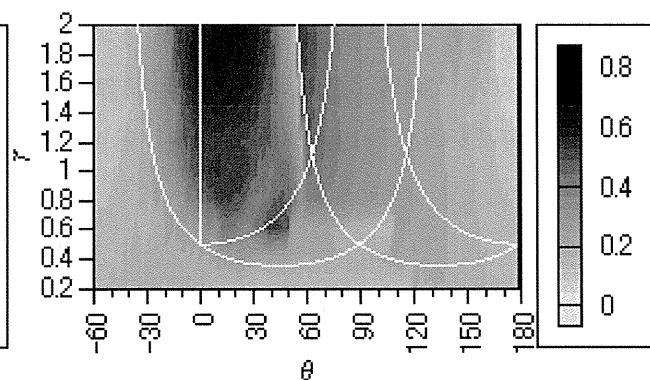
(c) 環境の平均保持資源量



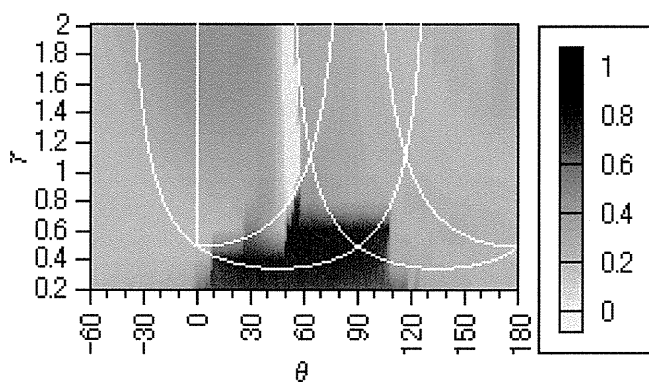
(d) 資源制約生起率



(e) 環境の状態入力に対する情報量



(f) 前回の対戦結果入力に対する情報量



(g) 社会平均利得

図 5-52 社会適応 ($\alpha=0.19$) の結果

5.4.10 サステナブル社会の創発要因に関する考察

サステナブルな社会を簡単に説明すると、豊穡な場合は R を取り資源収奪を行うが、保持資源量が減少し、貧小な場合になると P を取り資源返還を行うことで、資源ストックを高位に保ちながら継続的に資源収奪が行える社会である。この社会を創発させるのに重要なポイントは、R を取った際に資源収奪を行い、P を取った際に資源返還を行えることにある。環境の状態に応じてどちらの帰結を取るかを切り替えることで、保持資源量を高位に保つことが出来るわけである。表 5-1 に示した実験パラメータでは、R 及び P の値はゲーム構造に依らず、それぞれ 2.0, -2.0 である。従って、あらゆるゲーム構造においても豊穡な場合に R を取って資源収奪を行い、貧小な場合に P を取って資源返還を行えば、高資源ストック、高利得のサステナブルな社会が構築できるわけである。しかし、実際にサステナブルな社会が創発するのは Chicken 及び PD のジレンマが弱い領域を中心とした箇所のみで、その他のゲーム領域では環境崩壊型社会となる。そこには当然、サステナブルな社会を創発し得ない要因が存在し、また、逆説的にサステナブルな社会が創発する要因の解明に繋がるはずである。本節では、その要因について考察を加えたものである。

先にサステナブルな社会の創発に関わる要素を挙げると、以下の 3 つが考えられる。

- 2x2 ゲーム本体のジレンマ強度 (r の大小)
- リスク回避性ジレンマ
- ギャンブル性ジレンマ

この内、2x2 ゲーム本体のジレンマ強度は $r=0.6$ 以上ではサステナブルな社会が創発しないことに関係している。残り 2 つのリスク回避性ジレンマ及びギャンブル性ジレンマは、 θ 方向にサステナブルな社会が創発するゲーム領域が増減することに影響を及ぼす。

以下の項ではこれら影響の詳細について述べる。

5.4.11 2x2 ゲーム本体のジレンマ強度の影響

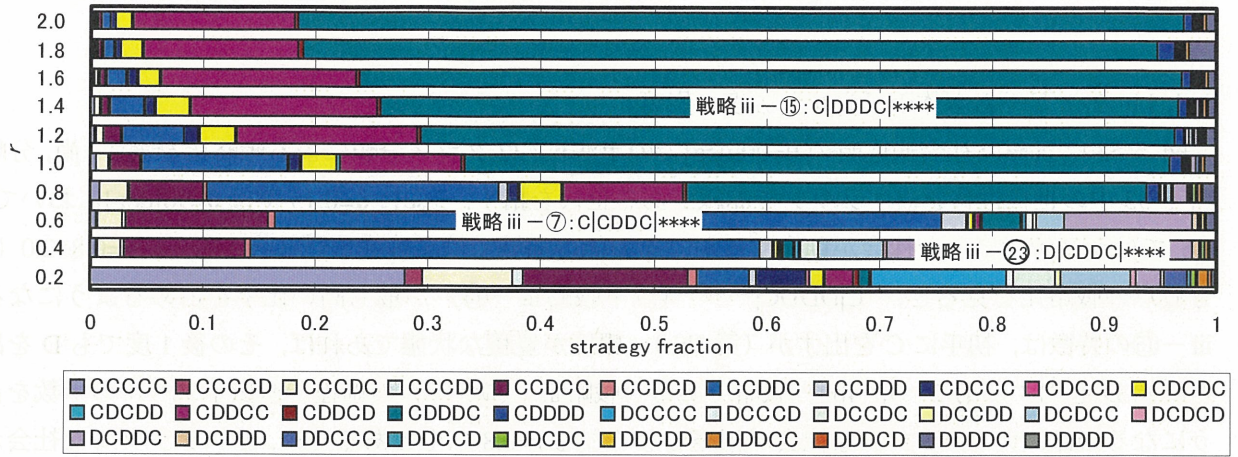
図 5-53 は case1: 社会適応時の $\theta=90[\text{deg}]$ での手法 iii: 32 クラス分類による戦略比を表す。尚、分岐点は、図 5-53 中の世代推移を表すグラフで赤線がある世代を指す。case1, $\alpha=0.15$ では $\theta=90[\text{deg}]$ において $r=0.4$, 0.6 ではサステナブルな社会が創発するが、その他の領域では環境崩壊型社会となる。 $r=0.8\sim 2.0$ における分岐点の戦略比を見ると、“C|DDDC|*****” (以下戦略 iii-⑮) が最も高い比率を占めるようになる。戦略 iii-⑮の特徴は、初手に C を出すが (第 1bit)、環境が豊穡な状態であれば、その後 1 度でも D を出されると終始 D を出す (第 2, 3, 4bit) 戦略である。戦略 iii-⑮が学習の過程で遺伝子プールの半数を占めるようになるのは、サステナブルな社会が創発しなくなる $r=0.8$ 以上であるため、サステナブルな社会が創発するか否かに大きな影響を与えているのは確かである。

ここで、今一度、サステナブルな社会を形成する、サステナブル派の戦略の特徴を確認する。サステナブル派の戦略は環境が危機に瀕すると、一旦協調関係を放棄し、資源が豊穡な状態へと回復するまで資源を返還し、再び資源が危機的状況になるまで資源収奪を繰り返す戦略である。サステナブル派の戦略が資源返還の際に一度協調関係を放棄しても、豊穡な場合となると協調関係を再構築できるのは、豊穡な場合の P の次手 (第 2bit) を C とし、協調関係を構築する機会を設けているためである。

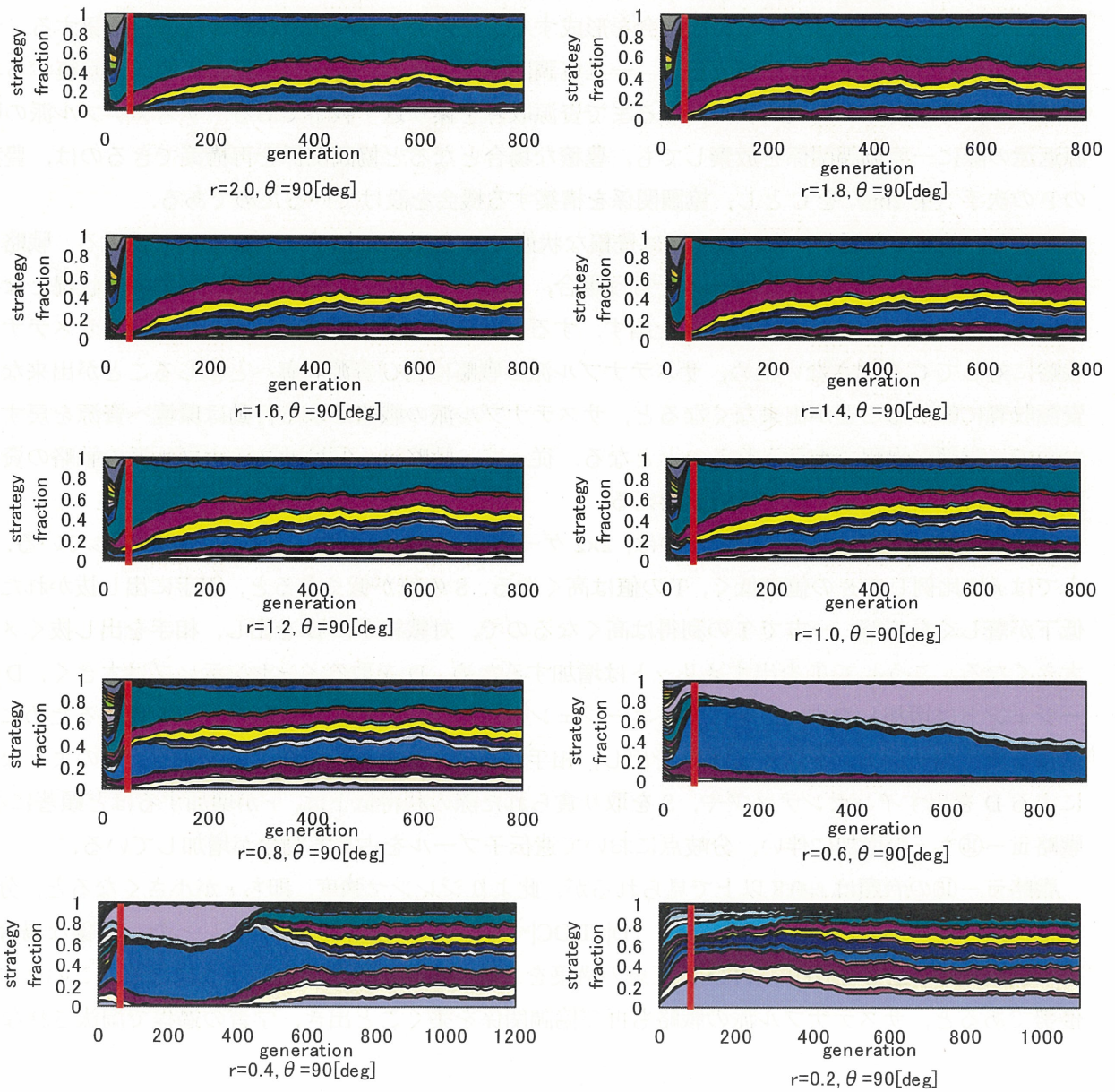
しかし、前述した通り、戦略 iii-⑮は豊穡な状態で D を出した相手には D を出し続ける。戦略 iii-⑮とサステナブル派の戦略が 2x2 ゲームを行う場合、サステナブル派の戦略は環境が危機的状況となると資源を返還のため戦略 iii-⑮に対して D を出す。すると戦略 iii-⑮は環境が回復した際にはサステナブル派の戦略に対して C を出さないため、サステナブル派の戦略は再び資源収奪へと転じることが出来なくなる。資源収奪に転じることが出来なくなると、サステナブル派の戦略が取る行動は環境へ資源を戻すことのみなので、学習の過程で淘汰されることとなる。従って、戦略 iii-⑮はサステナブル派の戦略の資源収奪を阻害し、排斥する作用を持つ戦略と謂える。

戦略 iii-⑮がマジョリティとなるのは、2x2 ゲームのジレンマが強くなることが影響している。2x2 ゲームでは r に比例して S の値は低く、T の値は高くなる。S の値が低くなると、相手に出し抜かれた際の利得低下が著しくなるが、一方で T の利得は高くなるので、対戦相手に D を出し、相手を出し抜くメリットは大きくなる。こうして T を出すメリットは増加するため、D を取るインセンティブは大きく、D を出すエージェントは増加しやすい。そこで、エージェントは相手に出し抜かれ利得低下を免れるために、協調的に振る舞うエージェント以外には D を出し、相手から食られる状況を防ぐのである。このような T の増加による D を出すインセンティブや、S を取り食られた際の利得低下は、 r が増加するほど顕著になるので、戦略 iii-⑮も r の増加に伴い、分岐点において遺伝子プールを占める割合が増加している。

戦略 iii-⑮の台頭は $r=0.8$ 以上で見られるが、此よりジレンマ強度、即ち r が小さくなると、分岐点では “C|CDDC|*****” (以下戦略 iii-⑦) や、“D|CDDC|*****” (以下戦略 iii-③) といった、豊穡な場合に帰結が P になると、一旦 C を出し、再び R 互惠の構築を目論む戦略が優勢となるようになる。この 2 つの戦略が優勢であると、サステナブル派の戦略も再び協調関係を築くこと出き、学習の過程で淘汰されなくなる。



(a) $\theta=90[\text{deg}]$ での分岐点における手法 iii : 32クラス分類による戦略比



(b) $\theta=90[\text{deg}]$ での各における手法 iii : 32クラス分類戦略比の世代推移

図 5-53 $\theta=90[\text{deg}]$ での手法 iii : 32 クラス分類による戦略比

5.4.12 リスク回避性ジレンマ及びギャンブル性ジレンマの影響

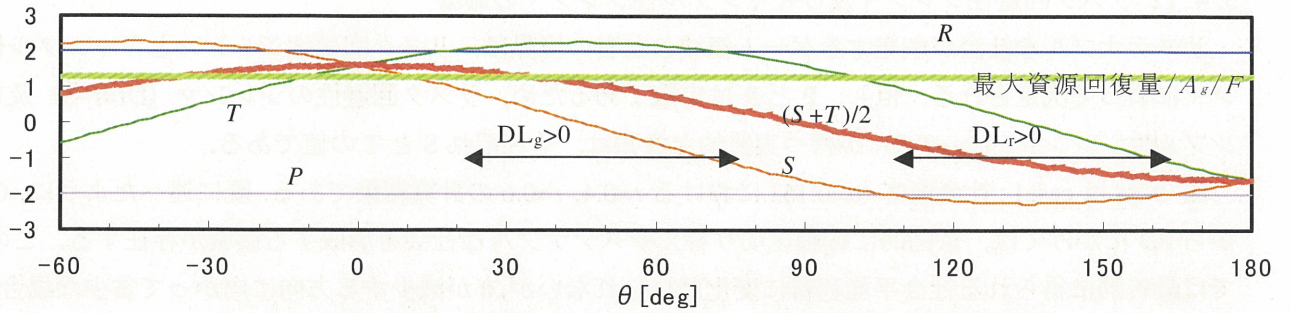
サステナブルな社会が創発するゲーム領域の左右の境界は、リスク回避性ジレンマとギャンブル性ジレンマによって決定される。但し、 P と R は定数であるため、リスク回避性のジレンマ ($D_r=P-S$) 及びギャンブル性ジレンマ ($D_g=T-R$) が持つ実質的な意味は、それぞれ S と T の値である。

図 5-54 は case1 : 社会適応 ($\alpha=0.15$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果である。既に述べたように、Chicken から PD にかけては、意図的に行動を切り替えサステナブルな社会を形成する領域が存在する。この領域では最終的に得られる社会平均利得に変化は見られないが、 θ が減少する方向に向かって貧少な場合の協調率は上昇する。 $\theta=[-45,135]$ の範囲では、 S が θ の減少と共に増加することは (5-3) 式から諒解される。 S が大きくなると、5.4.4 で述べた様に均衡時における R 型貪り派の戦略が増加し、協調率は R 型貪り派戦略の比率に応じて増加する。この時、資源返還は徐々に P なる帰結によって意図的に行うだけでなく、R 型貪り派の戦略とサステナブル派の戦略の対戦によって、互いに S と T を取ることで、R による収奪よりも環境の資源減少が抑えられた結果、環境は豊穡な状態まで回復するという状況に移行する。ここから更に θ が減少すると、遂には貧少な場合の資源収奪量が回復能力を上回り、環境崩壊型社会となる。 $r=0.4$ では徐々に貧少な場合の協調率が増加し、協調率が 0.6 を超えた辺りで急激に社会層が変化している様子が見て取れる。 $r=0.6$ においては、途中で豊穡な場合の協調率が低く、保持資源量が極端に高い領域が出現する。これは丁度、このゲーム領域が 2×2 ゲームのジレンマを克服できない領域であるため、資源収奪を殆ど行っていないためである。従って、 $r=0.6$ では、サステナブルな社会から環境崩壊型社会へ相転換する境界を見ることは出来ない。このように、サステナブルな社会が創発するゲーム領域の左端は、 S の値の上昇、即ちリスク回避性ジレンマが減少することによって、R 型貪り派戦略が遺伝子プール内で占める割合が増加し、環境崩壊を引き起こすものである。

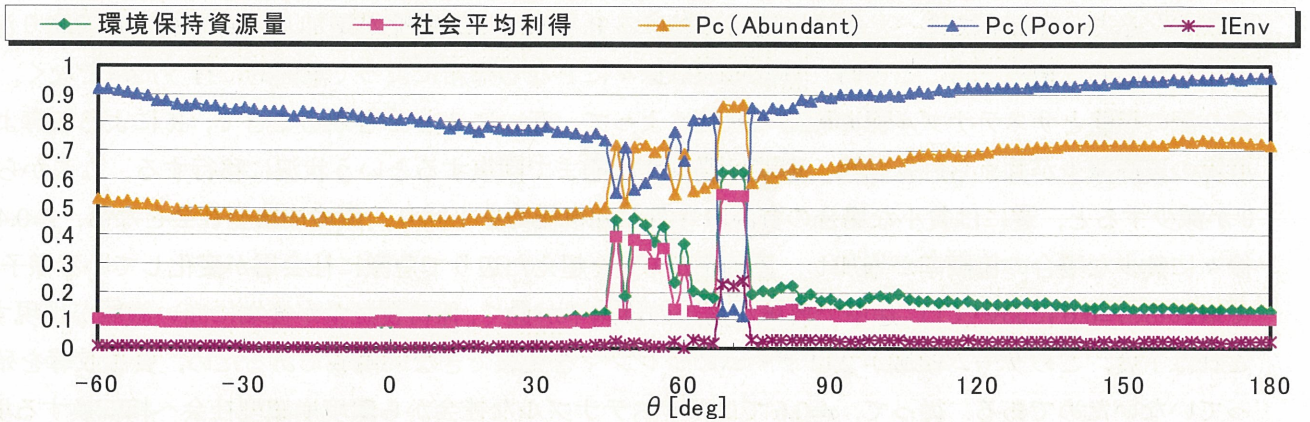
また、サステナブルな社会はゲーム領域が SH や Trivial となっても創発しなくなる。これはギャンブル性ジレンマ D_g がサステナブルな社会の創発要因になっていることを表す。ギャンブル性ジレンマは $T > R$ となる領域に存在し、利得上側のジレンマ構造をもたらす。 $(S+T)/2 * A_g / F$ が資源の最大回復量を超えない場合、環境崩壊が引き起こされるのは、R による資源収奪が行われる場合のみである。この時 PD や Chicken といったギャンブル性ジレンマを持つ場合、R を継続的に取る状況下であっても、 $T > R$ であるため、D を出すインセンティブが存在する。しかし、SH においては一度協調関係を築いて R による資源収奪を始めると、ギャンブル性のジレンマ、すなわち D に行動を切り替えるインセンティブが存在しない。従って、環境が危機的状況下におかれようと、既に協調関係を築いて資源を収奪し続けるように学習しているので、行動を切り替え、資源を返還することは無く、環境は崩壊する。Trivial や SH との境界付近では random drift によってサステナブルな社会が創発する試行も存在するが、それよりも遠ざかるとサステナブルな社会は全く創発しない。

資源回復能力が変化すると、環境を高位に維持するために貧少な場合に返還する資源量もそれに従って変化する。従って、資源回復能力に応じて、サステナブルな社会が創発するゲーム領域も変化する。

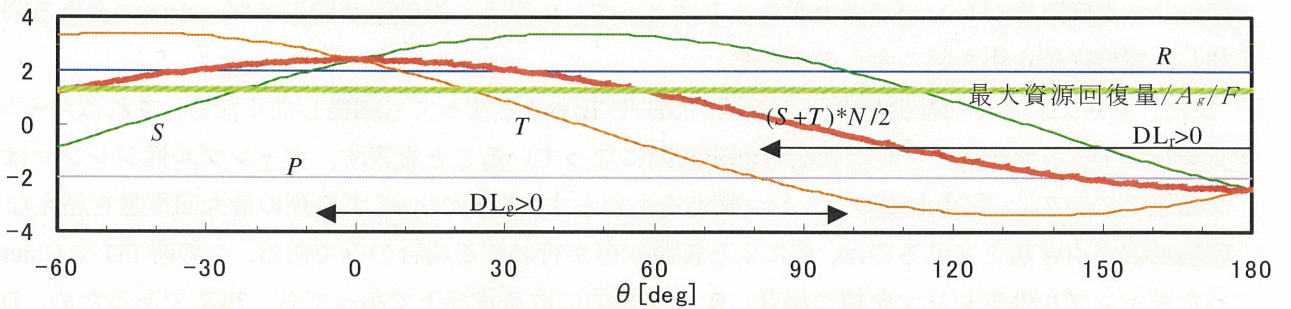
図 5-55 図 5-55 は case1 : 社会適応 ($\alpha=0.11$) における計算結果、



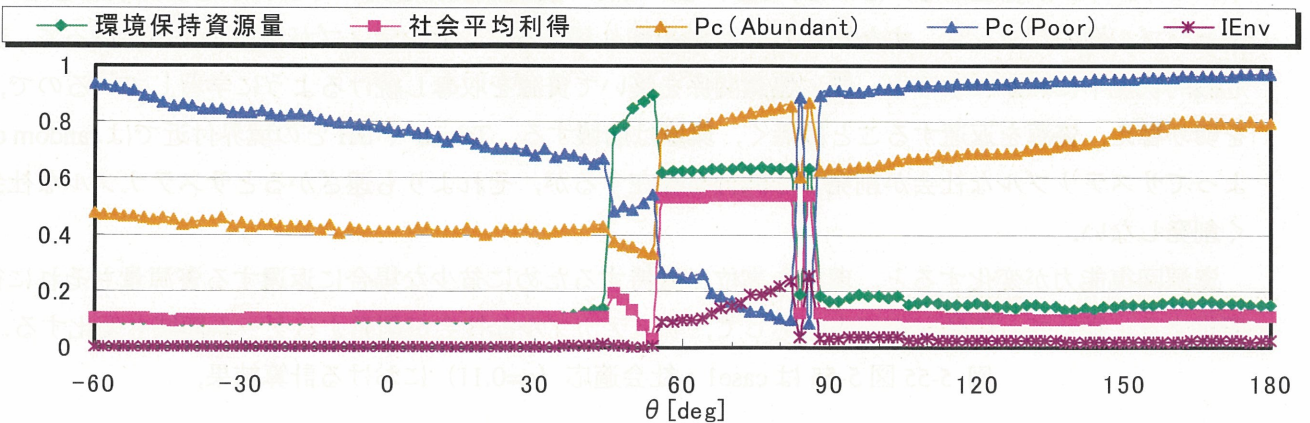
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値



(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

図 5-56 図 5-56 は case1 : 社会適応 ($\alpha=0.13$) における計算結果, 図 5-57 は case1 : 社会適応 ($\alpha=0.17$) における計算結果, 図 5-58 は case1 : 社会適応 ($\alpha=0.19$) における計算結果を表している. $(S+T)/2 \cdot A_g/F$ と資

源の最大回復量の均衡点は回復能力の増加と共に θ が減少する方向へ移動する。これに伴い、サステナブルな社会が創発する領域も拡大している。しかし、回復能力が減少して $(S+T)/2 * A_g / F$ と資源の最大回復量の均衡点は θ が増加する方向に移動しても、サステナブルな社会は均衡点を越えたポイントでも創発するようになる。このポイントでは従来明示的に行動を切り替えることによってサステナブルな社会を創発させる領域である。資源回復能力の均衡点によってサステナブルな社会が増減するのは ST によって資源収奪を行っている場合に限られる。よって、明示的な行動切り替えによってサステナブルな社会が創発する領域では、均衡に従ってサステナブルな社会創発領域が増減することはない。SH 方向に関してはランダムドリフトの影響を受け、サステナブルな社会が創発するか否かは初期値に依存している。

図 5-59, 図 5-60 はそれぞれ case2 : コミュニティ適応での $r=0.4, r=0.6$ の計算結果, case3 : コミュニティ適応での $r=0.4, r=0.6$ の計算結果である。サステナブルな社会の協調率を見ると、豊穡な場合は 0.8 とこれまで同様に高いが、貧少な場合の協調率はそれほど低くならない。5.4.2 の case3 : 特定コミュニティ適応で示したように、case3 ではローカリティにより、サステナブル派の戦略が優勢な社会の中に free rider として振る舞う貪り派の戦略が併存することが可能となる。通常、サステナブル派の戦略は貧少な場合に D を出すことで資源返還を行おうとするので、協調率は低くなる傾向にあるが、貪り派の戦略は貧少な場合も継続して資源を収奪しようとするため、協調率は case1, 2 のサステナブルな社会よりも高い。また、環境の最大回復能力と $(S+T) * N / 2$ が交叉する直前では、環境の情報入力に対する情報量は減少する。これはエージェントが環境によって行動を切り替えていないことを意味し、5.4.4 のように常に ST によって資源収奪を行うが、エージェントの総収奪量が環境の回復能力を超えないため、環境が崩壊していないだけである。

5.5 結論

一般的且つ汎用的な環境ジレンマゲームのモデルを構築する為に、環境を回復関数と共に外生化すると共に、ジレンマゲームに 2×2 ゲームを用い、モデル化を行った。ジレンマゲームを行うエージェントは学習機構を有し、2 記憶長と環境の状態認知機構によって自らの行動を決定する。

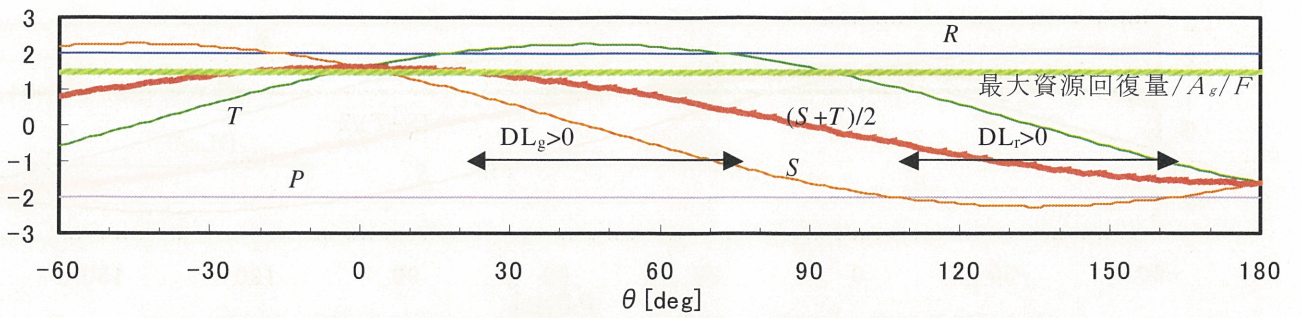
ゲーム構造を連続的に変化させて実験を行った結果、Chicken 及び PD のジレンマが弱い領域では、環境擁護的な戦略が創発することでサステナブル社会が形成される。しかし、その他のほとんどの領域では、環境を無視した資源収奪を繰り返して資源を貪る戦略により、環境は崩壊する。これは、殆どのゲーム構造において短期的なジレンマ（資源獲得のために相手と協調すべきこと）は克服されるが、その先にある中長期的ジレンマ（資源制約に抵触しないように資源獲得と環境護持を両立すべきこと）は Chicken や PD のジレンマが弱い領域でしか克服されないことを意味する。

また、環境の回復能力を変化させて実験を行った結果、環境の回復能力の増大と共にサステナブル社会が創発する領域も拡大し、2 つは比例関係にあることが分かった。

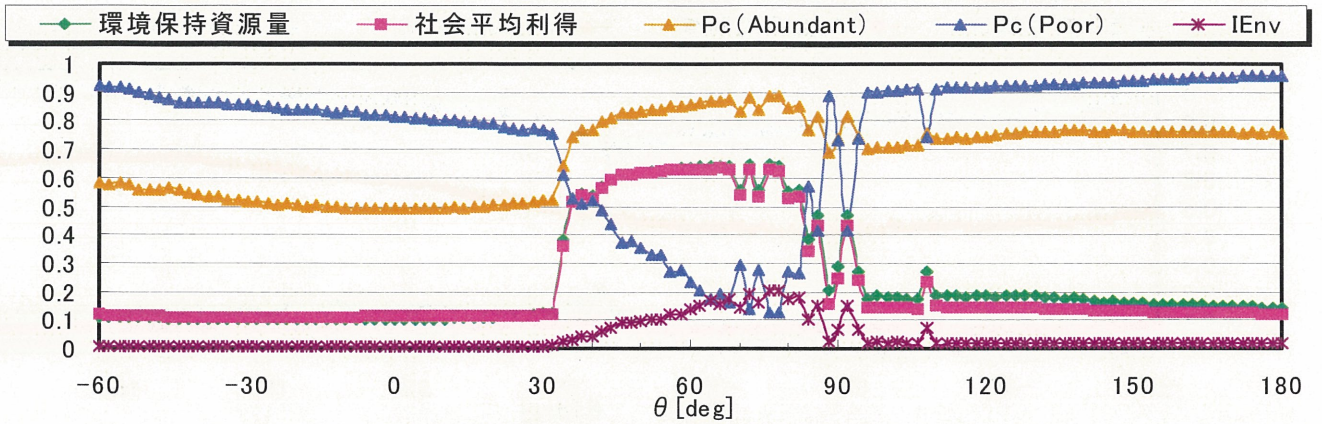
更に本研究では、環境ジレンマの緩解・解消プロトコルとしてローカリティに着目し（一般にジレンマゲームに対戦相手を制限する機構である空間構造やネットワークといったローカリティを付加すると、互惠社会の創発が促されることが知られている）、サステナブル社会の創発領域拡大が起り得るか、ローカリティを 2 段階に分けて導入し、実験を試みた。始めに、知識伝播レベルにローカリティを導入したが、中長期的なジレンマを克服し、サステナブルな社会の創発する領域拡大は確認できなかった。しかし、知識伝播、資源移動の両レベルにローカリティを課すと、環境を崩壊させる種の資源を貪る戦略と、環境擁護的な戦略が併存することが可能となり、SH 方向では環境擁護的な戦略が増えたことで、サステナブル社会

が創発する領域が拡大する一方、Trivial との境界部分では free rider である資源を食う戦略が入り込む余地を与えてしまうこととなった。

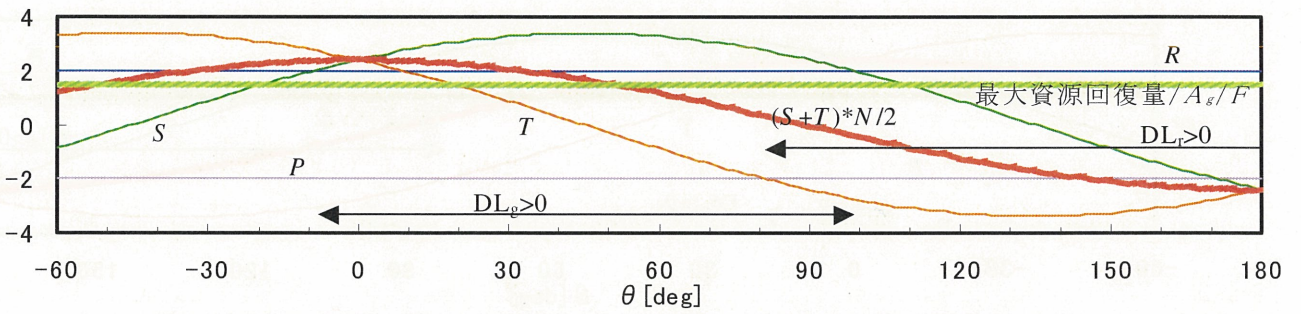
Ifiti らは空間型 PD でゲーム対戦相手の範囲と戦略適応の範囲を分離し、これらがゲームの協調創発に及ぼす影響を調べている^[48]。彼らはラチス構造で実験すると、両者の範囲が乖離しすぎると協調は創発しなくなると報告している。本実験で得られた、case2（戦略適応にだけ社会構造あり）では、サステナブル社会の創発範囲はネットワーク的社会構造がない場合（case1）と差異なく、case3（戦略適応とゲーム対戦双方に社会構造あり）では、創発範囲が広がる可能性がある、との知見は、Ifiti らの言説と整合的であると云える。



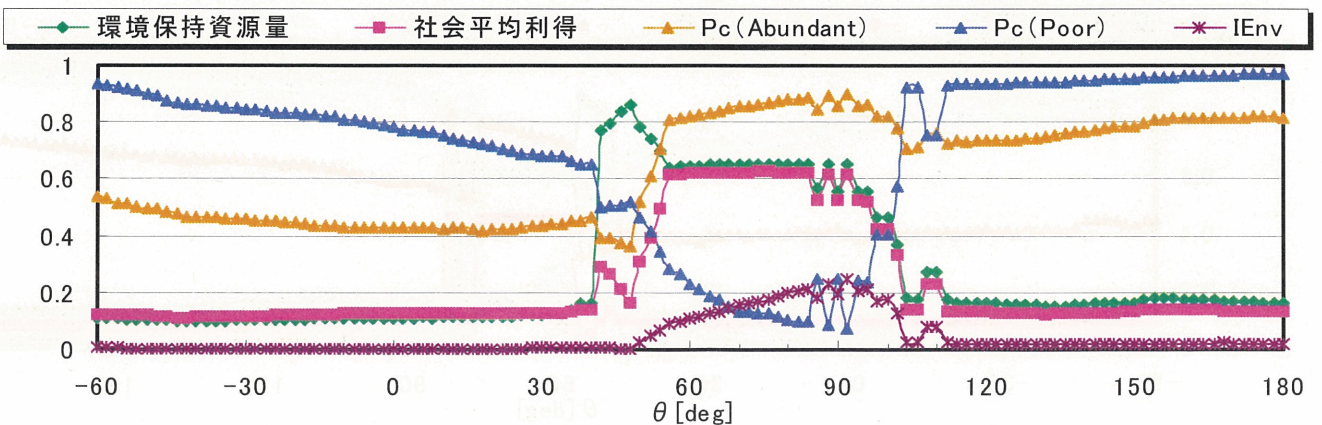
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

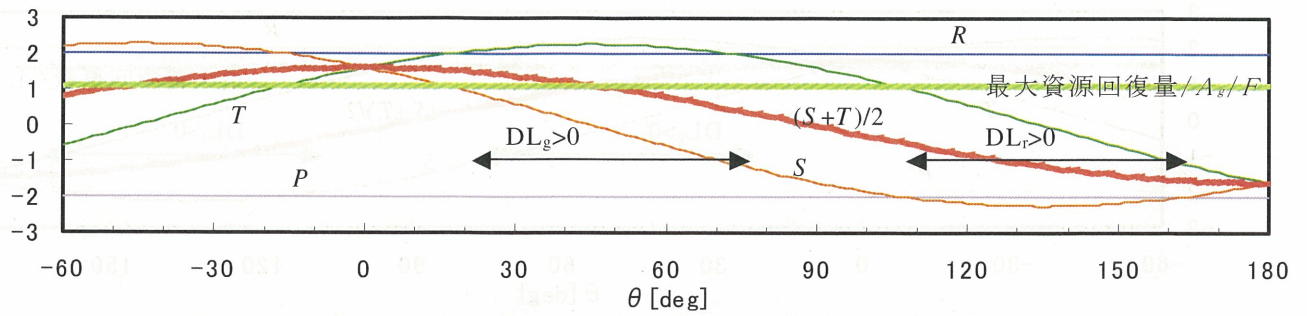


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

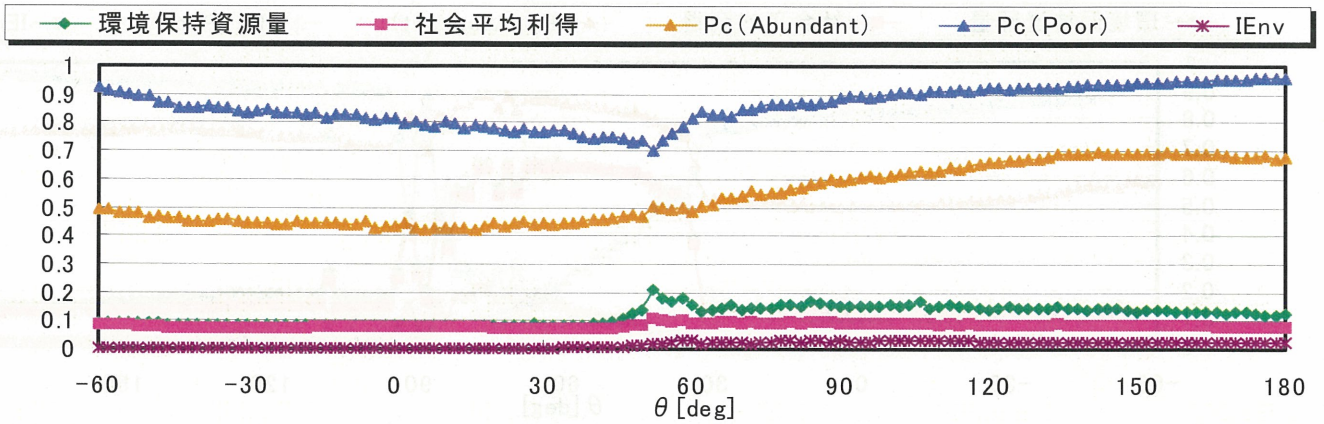


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

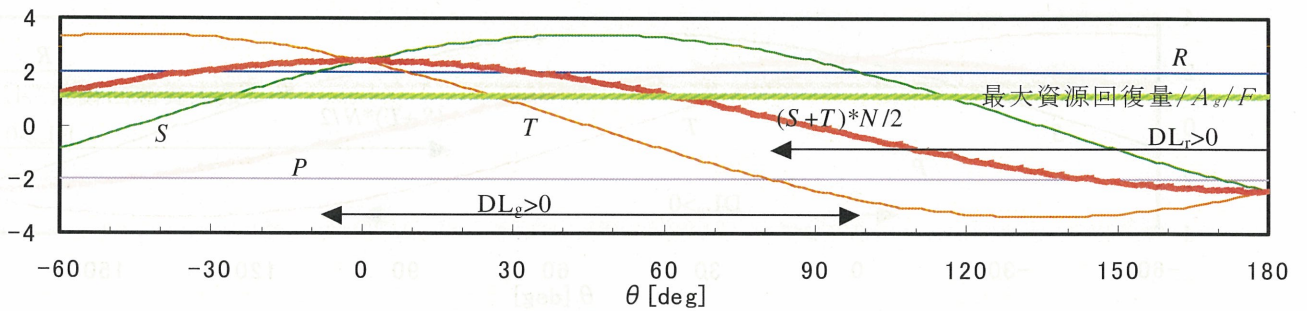
図 5-54 case1 : 社会適応 ($\alpha=0.15$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



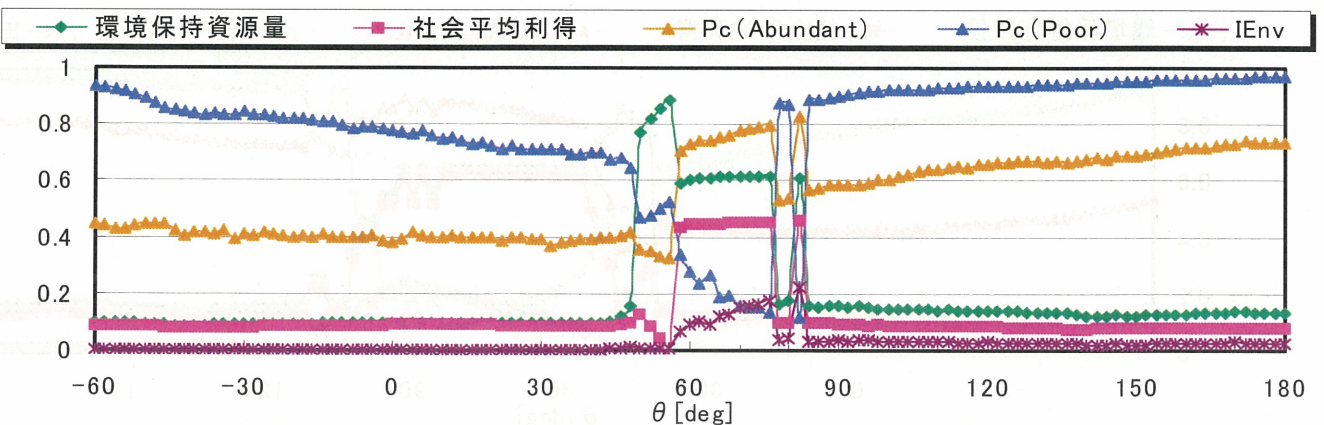
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

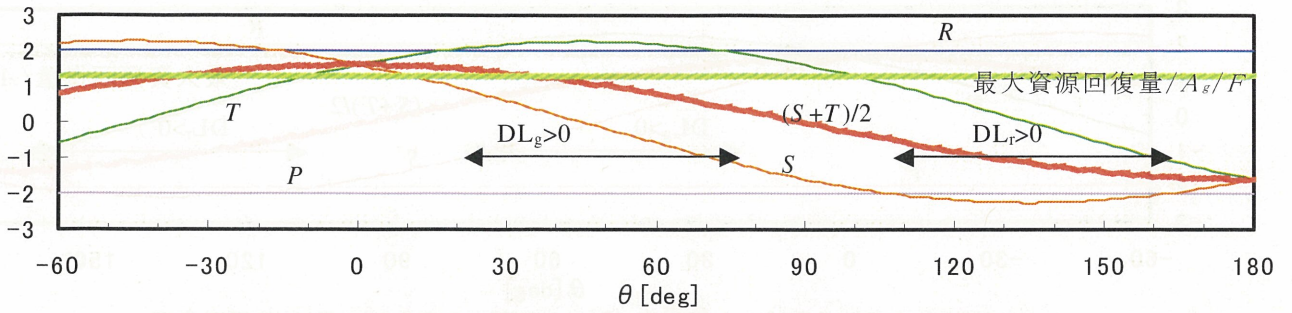


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

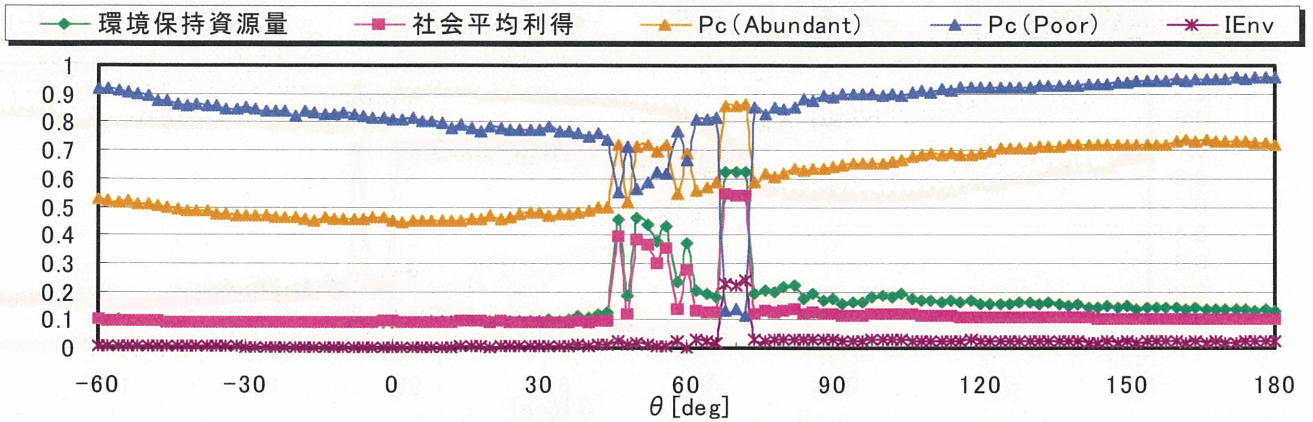


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

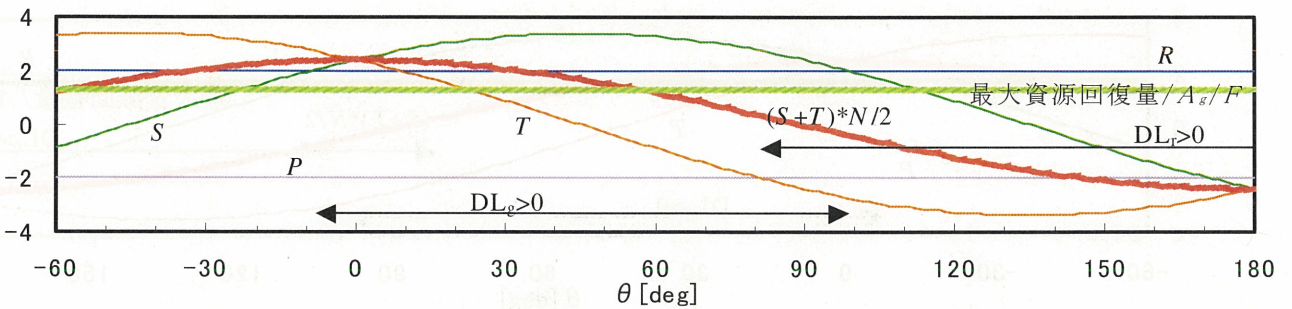
図 5-55 case1 : 社会適応 ($\alpha=0.11$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



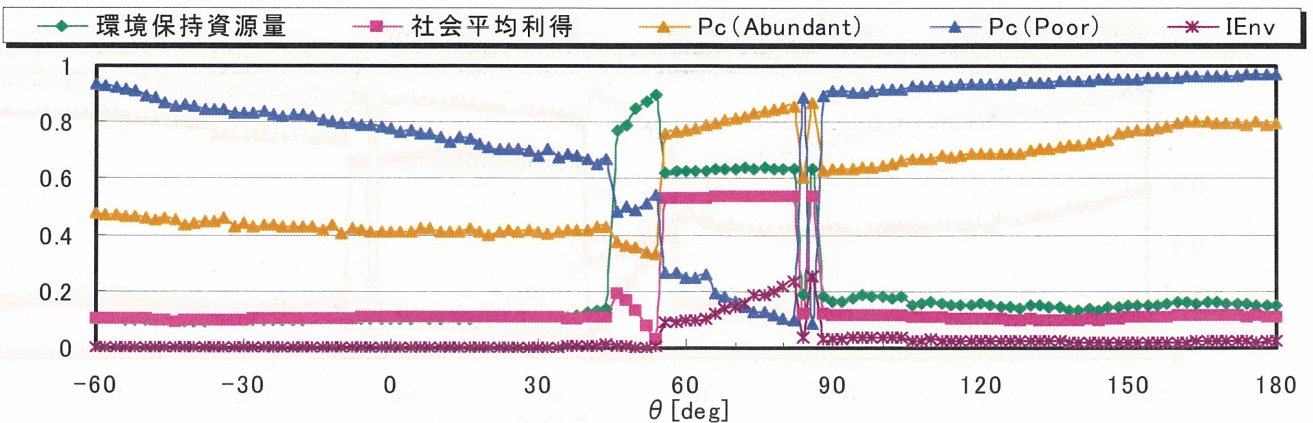
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

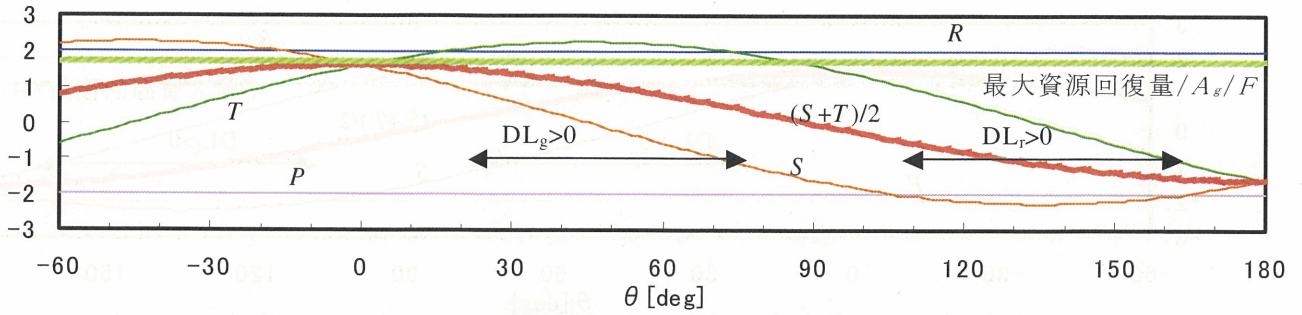


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

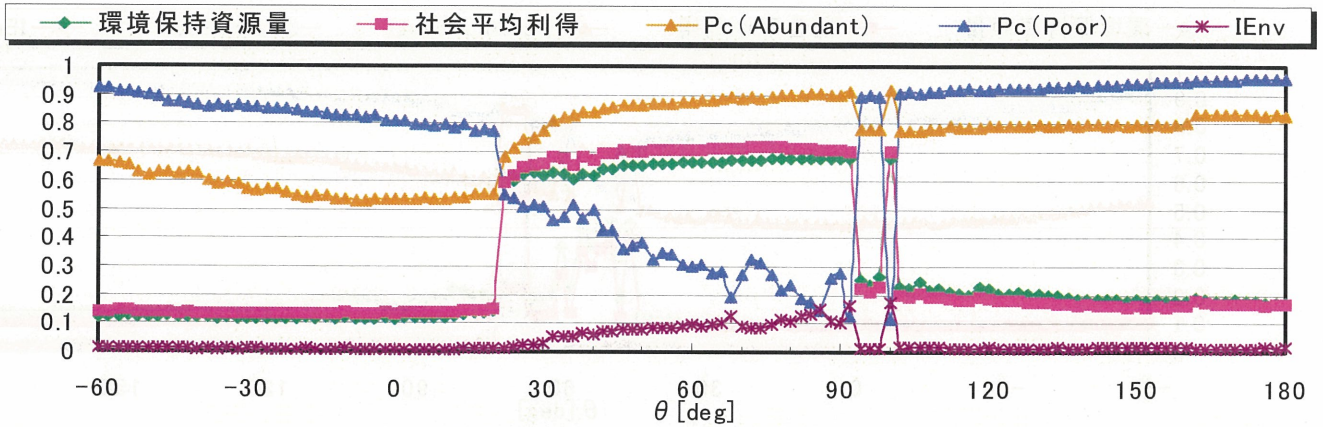


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

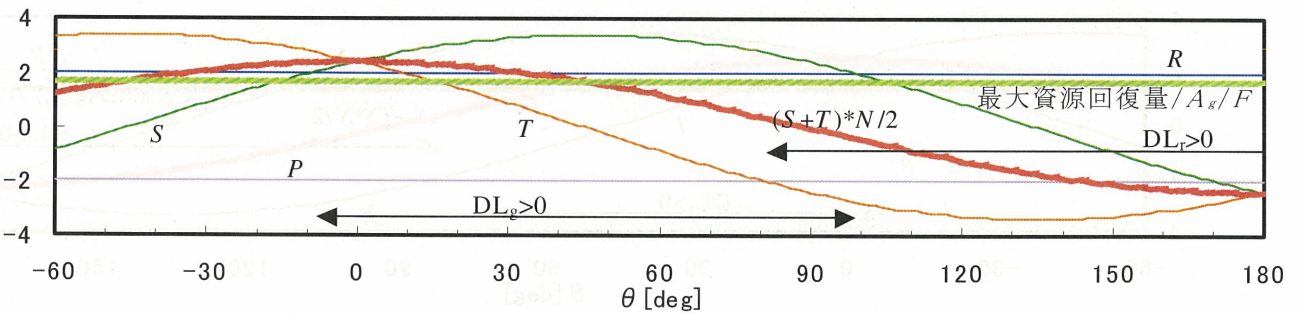
図 5-56 case1 : 社会適応 ($\alpha=0.13$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



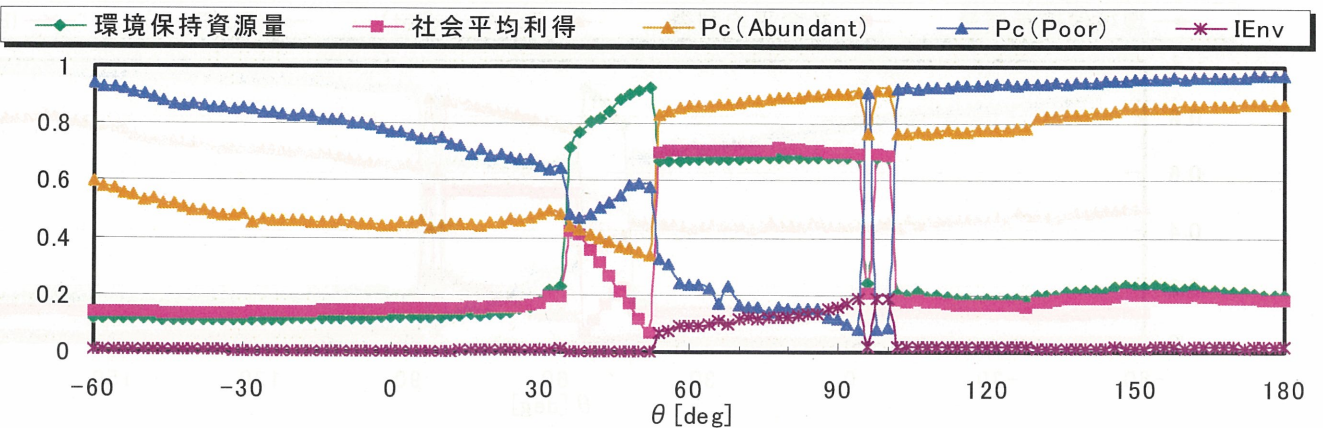
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

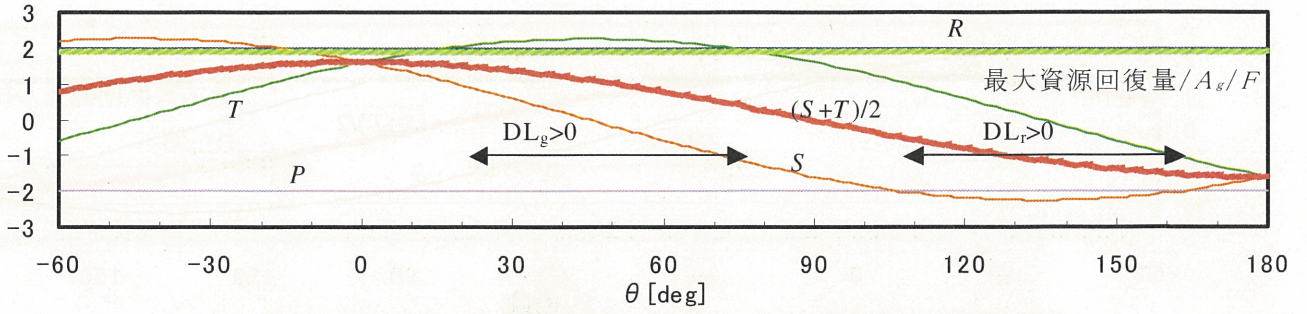


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

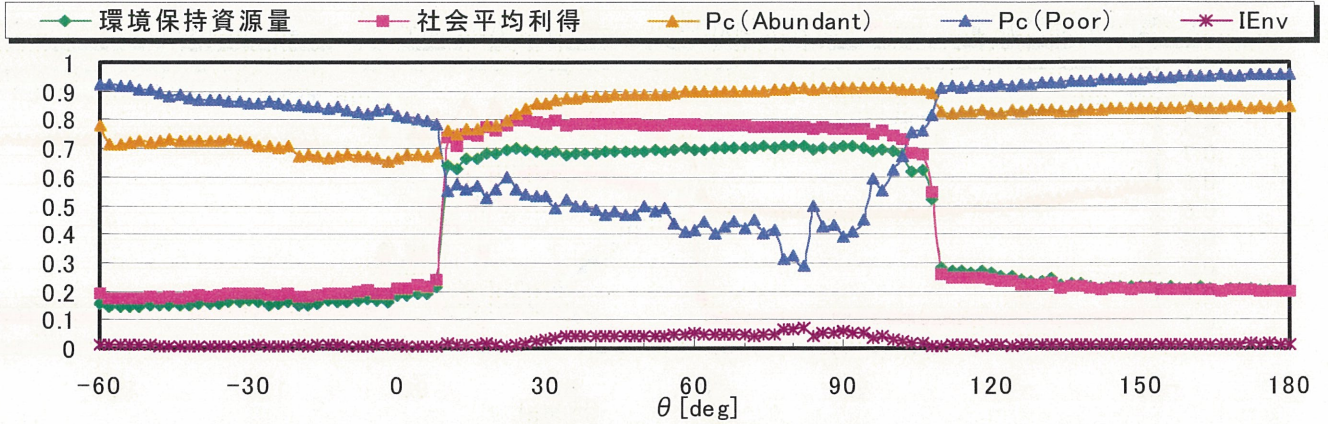


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

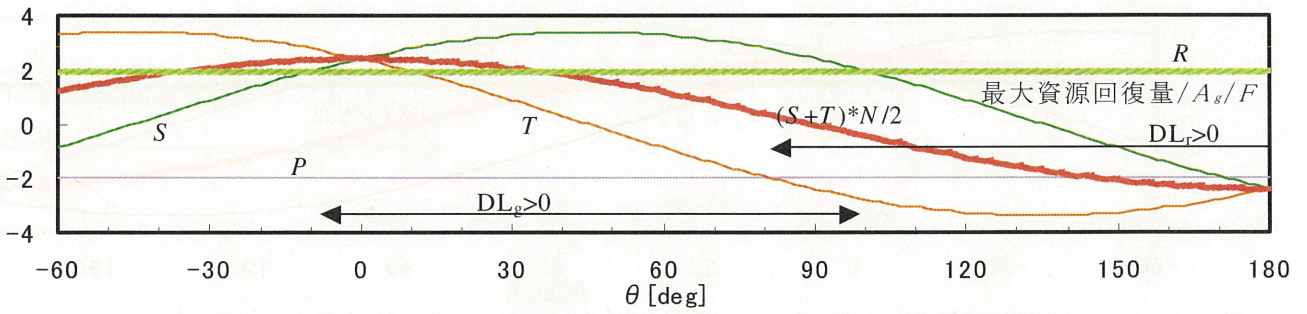
図 5-57 case1 : 社会適応 ($\alpha=0.17$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



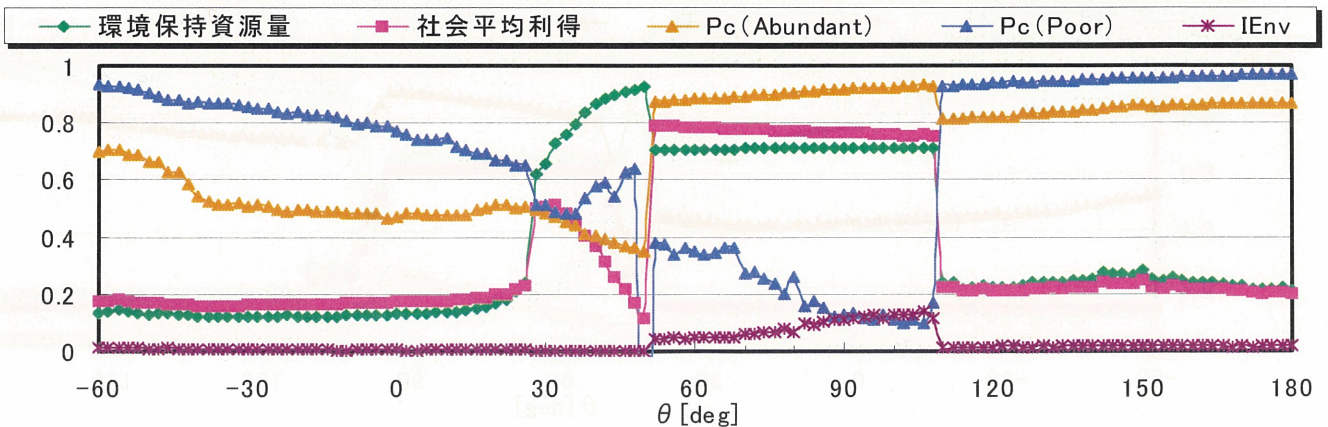
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

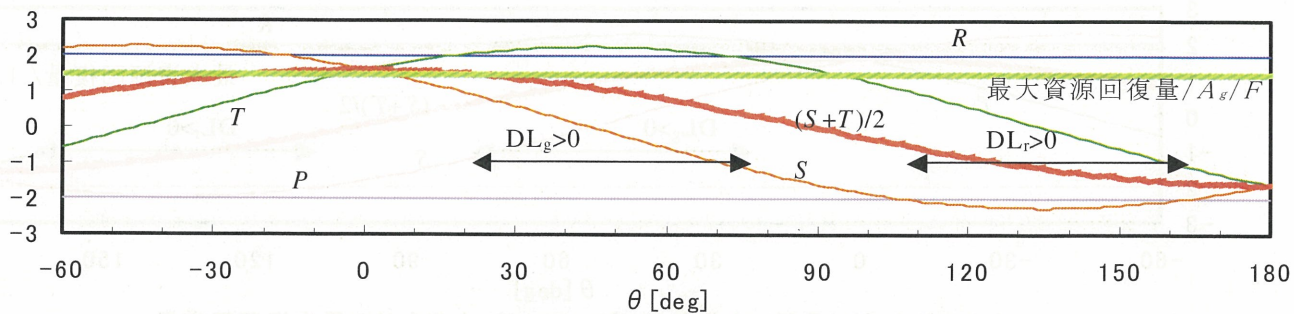


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

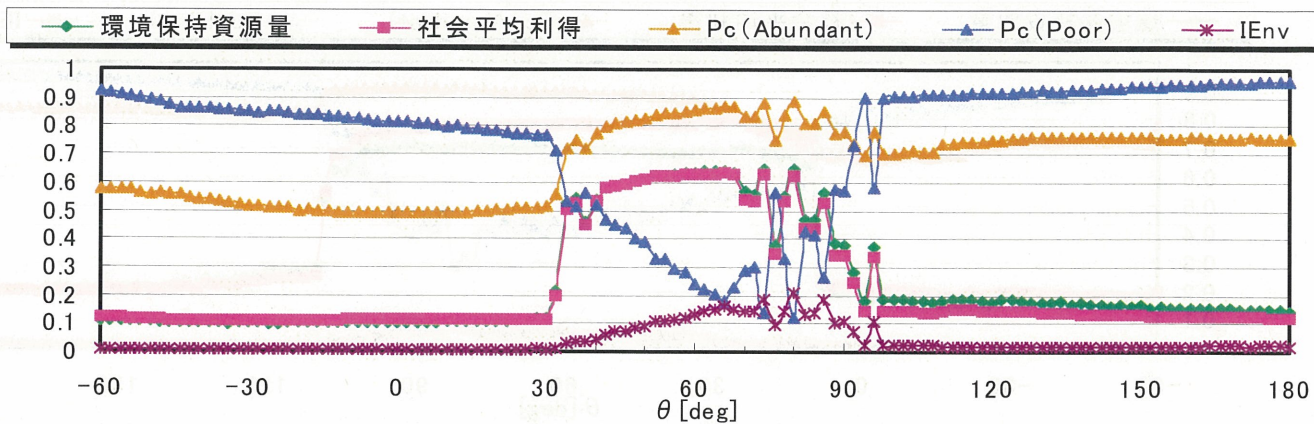


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

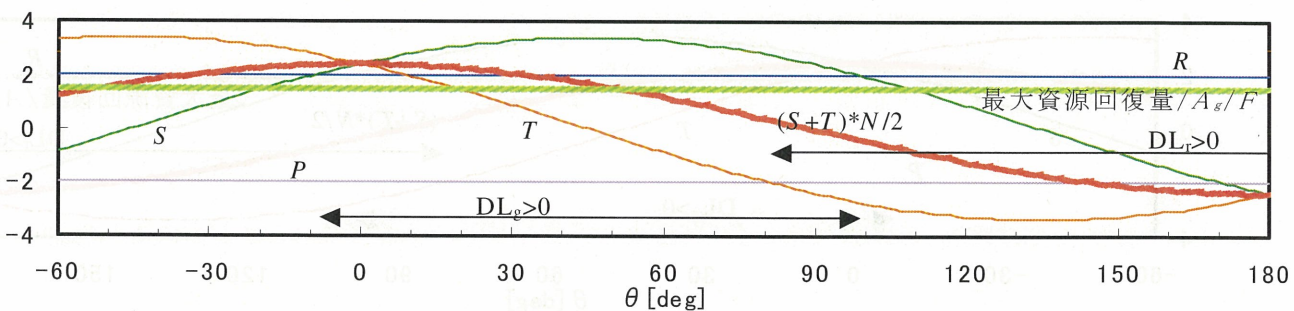
図 5-58 case1 : 社会適応 ($\alpha=0.19$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



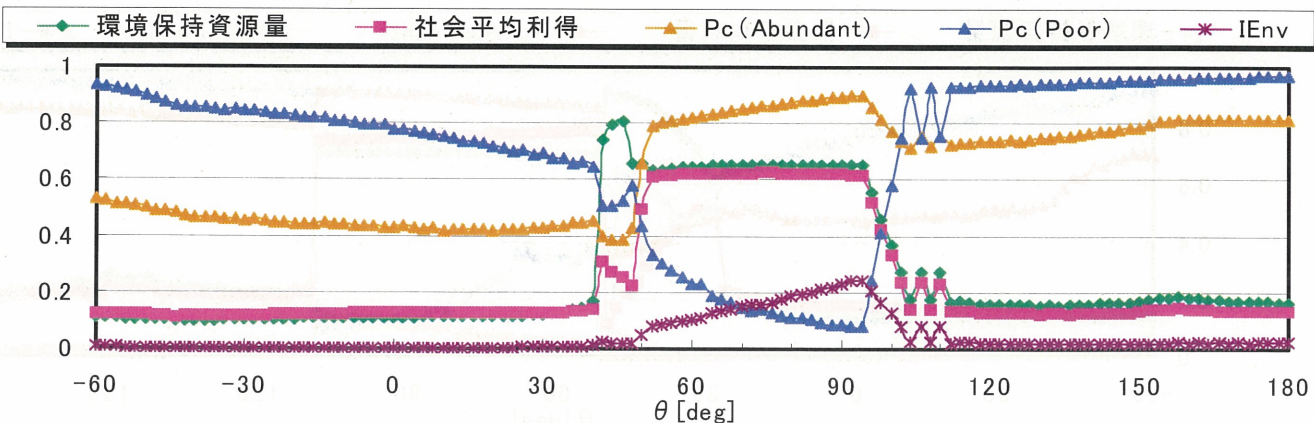
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値

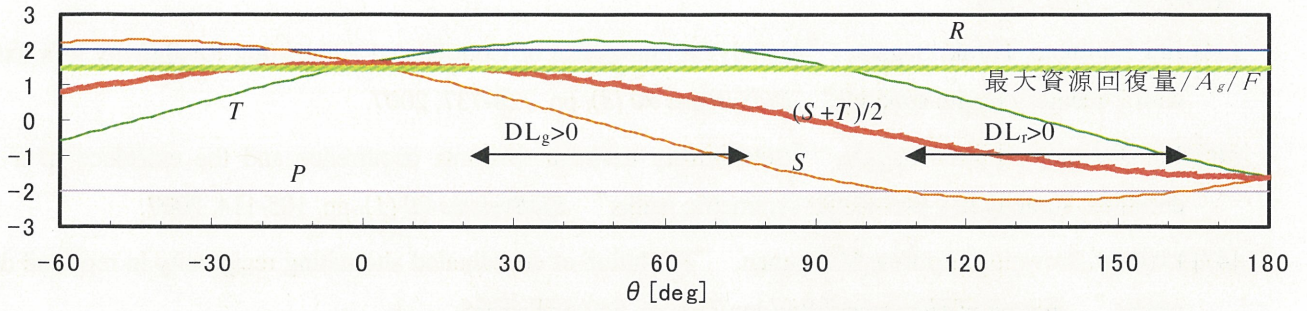


(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量

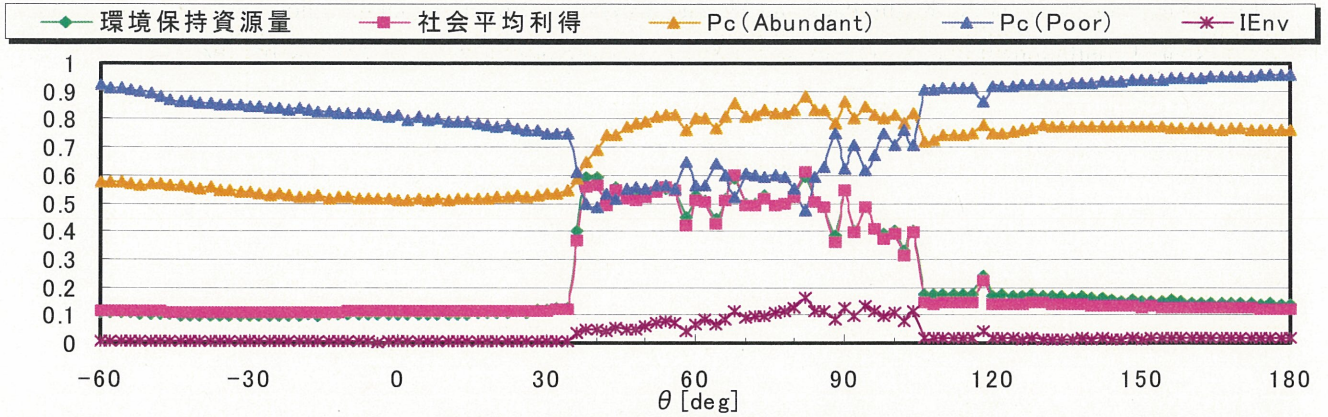


(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

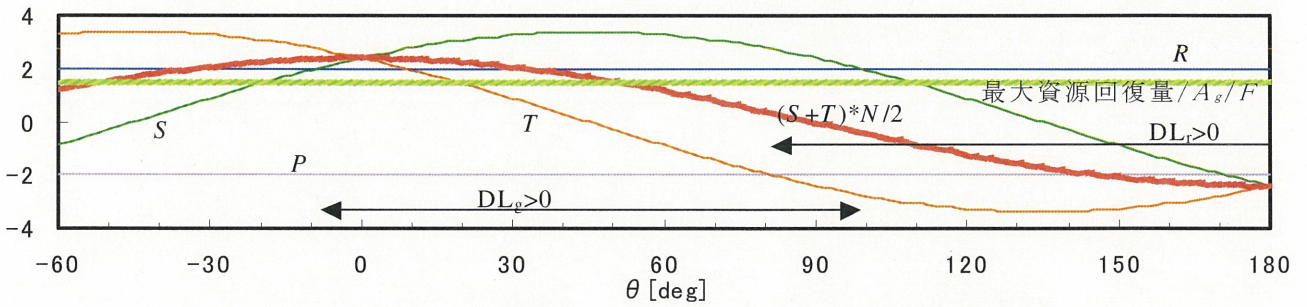
図 5-59 case2 : コミュニティ適応 ($\alpha=0.15$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果



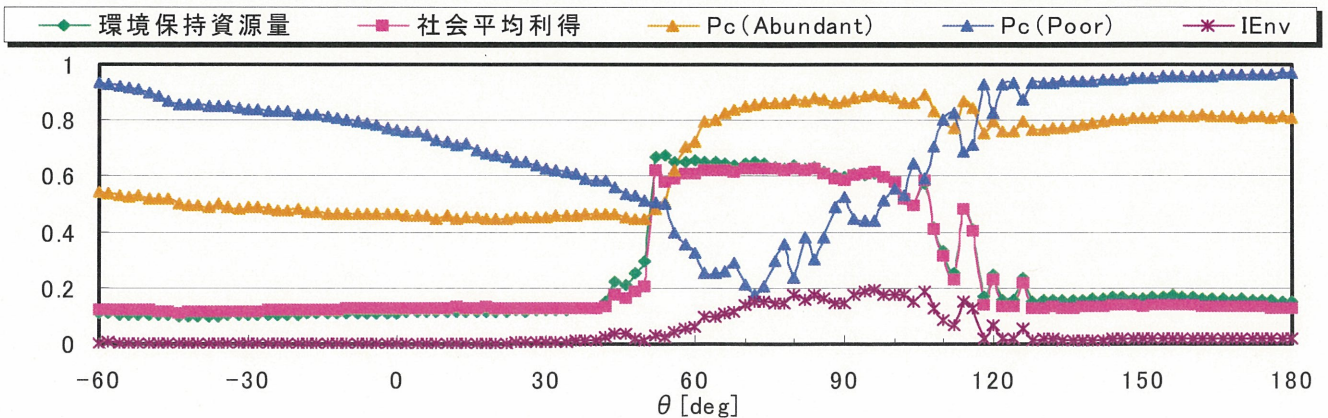
(a) $r=0.4$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(b) $r=0.4$ における均衡時の各値



(c) $r=0.6$ におけるゲーム構造及びフィールド1人当たりの最大資源回復量



(d) $r=0.6$ における均衡時の各値

図 5-60 case3 : 特定コミュニティ適応 ($\alpha=0.15$) における $r=0.4$, $r=0.6$ の計算結果

【第 5 章 引用文献】

- [34] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, "A study on emergence of Coordinated Alternating Reciprocity in a 2x2 game with 2-memory length strategy," *BioSystems* 90 (3), pp. 728-737, 2007.
- [46] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, "Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game," *BioSystems* 90 (1), pp. 105-114, 2007.
- [47] Lindsay Browning, Andrew M. Colman, "Evolution of coordinated alternating reciprocity in repeated dynamic games," *Journal of Theoretical Biology* 229, pp. 549-557, 2004.
- [48] Margarita Ifti, Timothy Killingback and Michael Doebeli, "Effects of neighborhood size and connectivity on the spatial continuous Prisoner's Dilemma," *Journal of Theoretical Biology* 231, pp. 97-106, 2004.

第6章 総括結論

6.1 総括

本研究では、マルチエージェントシミュレーションを用いて、一般的かつ汎用的な環境ジレンマゲームのモデル化を行った。また、環境ジレンマゲームの現実への応用例として、bottleneck問題を対象とした検討を行った。

第1章では、序論として、研究の背景及び本研究の目的・位置付けについて述べた。

第2章では、既存研究についてのレビューを行い、本研究で対象とする社会的ジレンマゲームの位置づけを明らかにした。社会的ジレンマはその構造が複雑であるため、問題を具体化するために多くの研究者によって類型化が行われてきた。大別する為の軸としては様々あるが、利得となる資源が供給型か保存型かが1つの軸であり、環境問題の例として著名なHardinの「共有地の悲劇」は保存型のジレンマにあたる。この保存型のジレンマはChicken型のジレンマ構造を持つと言われ、Dawes, Umino, 三隅, 神事などによって定式化が行われている。しかし、これらの定式化はN人ゲームで構成されており、既往の2x2ゲームにおける協調プロトコルの適用が難しいという問題があった。一方、2x2ゲームを用いた環境ジレンマゲームとしてAkiyamaやTanimotoのモデルがあるが、具体的な比喻が意識されているが抽象化が不徹底であり、環境ジレンマゲーム全般に適用することは難しい。そこで、本研究では2x2ゲームをベースとして外生化した環境からの制約を設けることでChicken型のジレンマを発生させ、一般的かつ抽象的なモデルを対象とすることとした。

第3章では、環境ジレンマゲームの応用として、資源管理問題としてbottleneck問題を対象とした。資源管理問題は資源が競争的であり、オープンアクセスであるので、プレーヤが資源を取ることに固執することで枯渇することが問題となる。bottleneck問題では資源は空間であり、これを解決するための空間の譲り合いが必要となるが、これはゲーム理論で謂うST互惠との相似性がある。しかし、避難時に人の互惠関係を促すことは困難であるため、障害物を設置することによって強制的に互惠関係を創発させることが可能かを確認した。

まずは、floor fieldを基礎とし、これに衝突の効果を加味して、さらに先行研究による実験結果によりモデルパラメータをチューニングしたセルオートマタ型人間エージェント流動シミュレーションモデルを構築した。

避難口直前セルに平均場近似を適用した検討により、衝突により人のアーチが形成される現実的状況下では、避難口前の空間に障害物を設置することにより人の流れを整流することで、避難口の流動効率を改善できることを示唆した。

数値計算により、障害物設置のパターンを変えながら、流動係数を求めた。その結果、障害物のない状況より上記した流動の効率が改善する場合と障害物が抵抗として作用し効率が悪化する場合、双方があり得、その良悪は、障害物設置により避難口に生起する衝突を如何に低減出来るかにより説明出来ることを述べた。

第4章では、環境ジレンマゲームにおける協調プロトコルの効果を確認するために、2x2 ゲームのみの状態で協調プロトコルがどのような作用を果たすかを確認することとした。本研究では協調プロトコルの中のローカリティを対象としている。対戦、及び戦略更新時のローカリティを独立に変化させて2記憶長戦略付きの2x2 ゲームを行い、以下の結果を得た。

- ローカリティが無い状況下では、Chicken 及び Trivial のゲーム構造を持つ領域で ST 互恵が創発し、PD のジレンマが強い領域では Nash 均衡にトラップされ、裏切り合いになる。その他のゲーム領域では R 互恵が構築される。この結果は Tanimoto & Sagara^[34]の結果と一致する。
- 対戦ローカリティが弱い状況下で戦略更新ローカリティが強くなると ST 互恵が創発する領域が拡張する。一方、対戦ローカリティが強い状況下では戦略更新ローカリティが強くなるとともに ST 互恵が行われるゲーム領域は縮小するが、PD 内の Nash 均衡に陥っていた領域では R 互恵が構築される。
- 対戦ローカリティと適応更新ローカリティが無相関で共に強い場合、ST 互恵が構築されにくくなるが、両ローカリティに相関がある場合は ST 互恵が広範な領域で構築されるようになる。

従って、ローカリティが協調プロトコルの効果を持つことが確認された。特にローカリティの導入方法によって ST 互恵の創発範囲が変化することが確認された。

第5章では、第2章で提示したモデルの定式化を行った。ジレンマゲームに 2x2 ゲームで表すと共に、環境を回復関数と共に外生化し、環境が保有する資源量に応じて制約をかけること Chicken 型のジレンマが発生するモデル構築を行った。ジレンマゲームを行うエージェントは学習機構を有し、2記憶長と環境の状態認知機構によって自らの行動を決定する。

ゲーム構造を連続的に変化させて実験を行った結果、Chicken 及び PD のジレンマが弱い領域では、環境擁護的な戦略が創発することでサステナブル社会が形成される。しかし、その他のほとんどの領域では、環境を無視した資源収奪を繰り返して資源を貪る戦略により、環境は崩壊する。これは、殆どのゲーム構造において短期的なジレンマ（資源獲得のために相手と協調すべきこと）は克服されるが、その先にある中長期的ジレンマ（資源制約に抵触しないように資源獲得と環境護持を両立すべきこと）は Chicken や PD のジレンマが弱い領域でしか克服されないことを意味する。

また、環境の回復能力を変化させて実験を行った結果、環境の回復能力の増大と共にサステナブル社会が創発する領域も拡大し、2つは比例関係にあることが分かった。

更に本研究では、環境ジレンマの緩解・解消プロトコルとしてローカリティに着目し（一般にジレンマゲームに対戦相手を制限する機構である空間構造やネットワークといったローカリティを付加すると、互恵社会の創発が促されることが知られている）、サステナブル社会の創発領域拡大が起こり得るか、ローカリティを2段階に分けて導入し、実験を試みた。始めに、知識伝播レベルにローカリティを導入したが、中長期的なジレンマを克服し、サステナブルな社会の創発する領域拡大は確認できなかった。しかし、知識伝播、資源移動の両レベルにローカリティを課すと、環境を崩壊させる種の資源を貪る戦略と、環境擁護的な戦略が併存することが可能となり、SH 方向では環境擁護的な戦略が増えたことで、サステナブル社会が創発する領域が拡大する一方、Trivial との境界部分では free rider である資源を貪る戦略が入り込む余地を与えてしまうこととなった。

Ifi らは空間型 PD でゲーム対戦相手の範囲と戦略適応の範囲を分離し、これらがゲームの協調創発に及ぼす影響を調べている^[48]。彼らはラチス構造で実験すると、両者の範囲が乖離しすぎると協調は創発しなくなると報告している。本実験で得られた、case2（戦略適応にだけ社会構造あり）では、サステナブル社

会の創発範囲はネットワーク的社会構造がない場合 (case1) と差異なく, case3 (戦略適応とゲーム対戦双方に社会構造あり) では, 創発範囲が広がる可能性がある, との知見は, Ifti らの言説と整合的であると云える.

6.2 今後の展望

これまでの総括を元に, 今後の展望を記す. 本論では, 環境問題に対するソフトウェア的アプローチを行うための基礎検討のために, 抽象化・汎用化を行った環境ジレンマゲームを構築し, その特性検討を行った. また, 協調関係創発プロトコルとしてローカリティを導入することで, 環境ジレンマに関しても一部のゲーム領域で改善されることが確認された. しかし, 本論で行うことができなかった課題として次の2点が挙げられる.

1 点目は, ローカリティ以外の協調プロトコルが環境ジレンマゲームに及ぼす効果の基礎分析である. 協調プロトコルにはローカリティ以外にも, ネットワーク構造や罰則などの社会システムの導入, 個人の評判などの情報流通など様々な知見が報告されている. 特にネットワークは近年 Twitter や Facebook などに代表されるソーシャルメディアの発展が著しく, 現実的な社会システムとの比喻を意識する上で重要となるとみられる. 本論で取り扱ったローカリティも, ネットワークがもたらす対戦や情報の流れの構造化ということで同じ作用を示すが, 今後情報伝播がさらに複雑化していくことを考えると, その影響をより深く把握しておく必要性は非常に高いと考えられる. これらの協調プロトコルは, 本論で検討したローカリティと同様に, 2×2 ゲームに作用する社会システムとして導入することが可能である. 提案した数理モデルでは環境の資源制約を外生化させているため, 既存の知見をもとに社会システムの効果を検討することは比較的容易であるが, 最終的に環境ジレンマが克服されるか否かを網羅的に把握しておくことは, 様々な実問題への解を提示する上では重要であると言える.

2 点目は, 具体的な環境問題と接合させるための応用的研究である. 本論では環境ジレンマゲームを抽象化させることで, 様々な種類の環境ジレンマを本数理モデルで表現可能にし得ることを意識している. ただし, 最終的に本論で得られた知見を現実への問題へ還元するためには, 現実問題への適用までの道筋を示す必要があると考えられる. そのために必要なことは, 現実の環境問題が本論で示す環境ジレンマゲームでいうとどの様なパラメータセットであるかということと, その状態でどの様な協調プロトコルを導入することで持続可能な社会が実現し得るかということである. 前者については, 具体的案件がどの様なゲーム構造 (ジレンマの強度も含めて), 人数規模, そして環境資源の回復関数を明らかにするのが必要とされる. また, 得られたゲーム構造・人数規模・回復関数をシミュレーションで実行することにより, 現実の現象とシミュレーションの挙動が類似しているかのバリデーションも必要であろう. ただし, 本数理モデルは抽象化・汎用化されたモデルであるため, 本数理モデルで現実を定性的・定量的に完全に再現することは困難であるため, 定性的な特性の再現に留まることになる. しかし, 現実社会を正確に数量化することも困難であることを考えると, 持続可能な社会を構築するメカニズムを定性的にでも把握することは, 環境問題解決のための施策を検討するには十分であるとも言える. また, 後者の解決のための協調プロトコルについては, 1 目目に挙げた他の協調プロトコルに対する検討を通して, 網羅的に各プロトコルの効果を把握することで状況ごとに有効なプロトコルの発見は達成し得るものと考えられる.

【引用文献】

- [1] Garrett Hardin, "The Tragedy of the Commons," *Science* 162, pp. 1243-1248, 1968.
- [2] Dawes, Robyn M., "Formal Models of dilemma in social decision-making," 著: *Human Judgment and Social Processes*, S. S. Martin F. Kaplan, 編, Academic Press, 1975, pp. 87-107.
- [3] 海野道郎, "社会的ジレンマの数理モデルー共有物の性質とモデルの対応関係ー," *社会学研究* (東北社会学研究会) 52, pp. 21-45, 1988.
- [4] M. Umino, "Formulation of Commons Dilemma : Dawes Model Reconsidered," *Journal of Mathematical Sociology* 14 (4), pp. 237-246, 1989.
- [5] 三隅一人, "社会的ジレンマ・モデルの一般化," *理論と方法* 8 (1), pp. 69-88, 1993.
- [6] 神事直人, "「共有地のジレンマ」モデル再考-海野モデルの再検討と一般モデルの構築," *理論と方法* 11 (2), pp. 145-156, 1996.
- [7] 神事直人, "「保存」型ジレンマモデルの再検討," *理論と方法* 12 (1), pp. 15-30, 1997.
- [8] David M. Messick, McClelland L. Carol, "Social Traps and Temporal Traps," *Personality and Social Psychology Bulletin* 9 (1), pp. 105-110, 1983.
- [9] Wim B. G. Liebrand, "The Effects of Social Motives, Communication and Group Size on the Behavior in an N-person Multi-stage Mixed-motive Game," *European Journal of Social Psychology* 14, pp. 239-264, 1984.
- [10] Allison T. Scott, David M. Messick, "Effects of Experience on Performance in a Replenishable Resource Trap," *Journal of Personality and Social Psychology* 49 (4), pp. 943-948, 1985.
- [11] David M. Messick, Allison T. Scott, Samuelson D. Charles, "Framing and Communication Effects on Group Members' Responses to Environmental and Social Uncertainty," *Applied Behavioral Economics, vol.2, edited by Shlomo Maital.*, pp. 677-700, 1988.
- [12] 佐藤 嘉倫, "社会運動と連帯," 著: *秩序問題と社会的ジレンマ*, ハーベスト社, 1991, pp. 259-280.
- [13] Eizo Akiyama, Kunihiko Kaneko, "Dynamical systems game theory 2 A new approach to the problem of the social dilemma," *Physica D* 167, pp. 36-71, 2002.
- [14] Brewer B. Marilyn, Roderick M. Kramer, "Choice Behavior in Social Dilemmas : Effects of Social Identity, Group Size and Decision Framing," *Journal of Personality and Social Psychology* 50 (3), pp. 543-549, 1986.
- [15] Jun Tanimoto, "Environmental dilemma game to establish a sustainable society dealing with an emergent value system," *Physica D* 200, pp. 1-24, 2005.
- [16] 谷本潤, *環境システムの数理解析基礎*, 九州大学出版会, 2012.
- [17] Dawes, Robyn M., "Social Dilemmas," *Annual Review of Psychology* 31, pp. 169-193, 1980.
- [18] 木村邦博, *大集団のジレンマ*, ミネルヴァ書房, 2002.
- [19] Hampton, Jean, "Free-rider Problems in the Production of Collective Goods," *Economics and Philosophy* 3, pp. 245-273, 1987.
- [20] Linpnowski, Irwin, and Shlomo Maital, "Voluntary Provision of a Pure Public Good as the Game of 'Chicken',"

- Journal of Public Economics* 20, pp. 381-386, 1983.
- [21] Taylor, Michael, and Hugh Ward, “Chickens, Whales and Lumpy Goods : Alternative Models of Public Goods Provision,” *Political Studies* 30 (3), pp. 350-370, 1982.
- [22] Michael Taylor, Ward Hugh, “Chickens, Whales and Lumpy Goods : Alternative Models of Public Goods Provision,” *Political Studies* 30 (3), pp. 350-370, 1982.
- [23] Irwin Lipnowski, Maital Shlomo, “Voluntary Provision of a Pure Public Good as the Game of 'Chicken.',” *Journal of Public Economics* 20, pp. 381-386, 1983.
- [24] Hamburger, Henry, “N-person Prisoner's Dilemma,” *Journal of Mathematical Sociology* 3, pp. 27-48, 1973.
- [25] Cross, John G., and Melvin J. Guyer, *Social Traps*, A. Arbor, 編, University of Michigan Press, 1980.
- [26] Platt, John, “Social Traps,” *American Psychologist* 28 (8), pp. 641-651, 1973.
- [27] 海野道郎, “社会的ジレンマの射程,” 著: 秩序問題と社会的ジレンマ, 海. 盛山和夫, 編, ハーベスト社, 1991, pp. 137-166.
- [28] M. Olson, *The Logic of Collective Action : Public Goods and the Theory of Groups*, Cambridge, Massachusetts : Harvard University Press, 1965.
- [29] 海野道郎, “『社会的ジレンマ』研究のフロント,” 著: 数理社会学の現在, 海. 原純輔, 編, 数理社会学研究会, 1985, pp. 3-50.
- [30] 長谷川計二, “『共有地の悲劇』－資源管理と環境問題－,” 著: 秩序問題と社会的ジレンマ, 海. 盛山和夫, 編, 1991, pp. 199-226.
- [31] Keiji Hasegawa, “Commons dilemma and the “Tragedy of the Commons” ,” *Journal of Mathematical Sociology*, 1989.
- [32] 高坂健次, 吹野卓, “漁業における乱獲の数理モデル-再生産を伴う資源と社会ジレンマ-,” *理論と方法*, Vol.4, No.1, pp. 93-116, 1989.
- [33] Samuel S. Komorita, James Sweeney, David A. Kravitz, “Cooperative choice in N-person dilemma situation,” 著: *Journal of Personality and Social Psychology* 38 (3), 1980, pp. 504-516.
- [34] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, “A study on emergence of Coordinated Alternating Reciprocity in a 2x2 game with 2-memory length strategy,” *BioSystems* 90 (3), pp. 728-737, 2007.
- [35] Atsuo Yamauchi, Jun Tanimoto, Aya Hagishima, Hiroki Sagara, “Dilemma Game Structure Observed in Traffic Flow at a 2-to-1 Lane Junction,” *Physical Review E* 79, 2009.
- [36] 柳澤大地, 友枝明保, 西成活裕, “拡張フロアフィールドモデルによるボトルネック周りの群集運動の解析,” *応用力学研究所研究集会報告 No.19ME-S2 Article 7*, 2007.
- [37] 戸川喜久二, “群衆流の観測に基づく避難施設の研究,” *建築研究報告* 14, 1995.
- [38] 嶋田拓, 金井昌昭, 矢島規雄, 直井英雄, “車いす使用者を含む群衆の避難流動特性に関する実験研究,” *日本建築学会計画系論文集 No.569*, pp. 71-75, 2003.
- [39] Carsten Burstedde., Kai Klauck., Andreas Schadschneider., Johannes Zittartz, “Simulation of pedestrian dynamics using a 2-dimensional cellular automaton,” *Physica A* 295 507, 2001.

- [40] Ansgar Kirchner., Andreas Schadschneider, “Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics,” *Physica A* 312 260, 2002.
- [41] Ansgar Kirchner., Katsuhiro Nishinari., Andreas Schadschneider, “Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics,” *Phys. Rev. E* 67 056122, 2003.
- [42] Ansgar Kirchner., Hubert Klupfel., Katsuhiro Nishinari., Andreas Schadschneider., Michael Schreckenberg, “Discretization effects and the influence of walking speed in cellular automata models for pedestrian dynamics,” *J. Stat. Mech.: Theor. Exp.* P10011, 2004.
- [43] Atsuo Yamauchi, Jun Tanimoto, “An analysis of network reciprocity in Prisoner's Dilemma games using Full Factorial Designs of Experiment,” *Biosystems* 103 (1), pp. 85-92, 2011.
- [44] Hisashi Ohtsuki, Jorge M. Pacheco, Martin A. Nowak, “Evolutionary graph theory: Breaking the symmetry between interaction and replacement,” *Journal of Theoretical Biology* 246, pp. 681-694, 2007.
- [45] Xiaojie Chen, Long Wang, “Cooperation enhanced by moderate tolerance ranges in myopically selective interactions,” *Physical Review E* 80, 2009.
- [46] Jun Tanimoto, Hiroki Sagara, “Relationship between dilemma occurrence and the existence of a weakly dominant strategy in a two-player symmetric game,” *BioSystems* 90 (1), pp. 105-114, 2007.
- [47] Lindsay Browning, Andrew M. Colman, “Evolution of coordinated alternating reciprocity in repeated dynamic games,” *Journal of Theoretical Biology* 229, pp. 549-557, 2004.
- [48] Margarita Ifti, Timothy Killingback and Michael Doebeli, “Effects of neighborhood size and connectivity on the spatial continuous Prisoner's Dilemma,” *Journal of Theoretical Biology* 231, pp. 97-106, 2004.

謝辞

筆者が卒業研究で本研究室に配属されて以来、約九年間、多岐に渡りご指導、ご鞭撻を賜りました、九州大学 谷本潤教授に心から御礼申し上げます。

また、九州大学 萩島理助教授には、本研究を遂行するに当たって、多大なるご指導をいただきました。厚く御礼申し上げます。

研究室秘書の有馬さんには、日常生活の中で様々なお気遣いを頂いたこと、大変感謝しております。

また、本論文を纏めることが出来たのは、ここに記すことが出来なかった多くの方々を含む皆様のご支援、ご協力の賜であります。ここに深く感謝の意を表します。

