

外生的資源制約を課した環境ジレンマゲームに関する研究

脇山 宗也[†], 谷本 潤[‡], 相良 博喜[†]

[†]九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻・修士課程
[‡]九州大学大学院総合理工学府環境エネルギー工学専攻・教授・工博

〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1 九州大学総合理工学府環境エネルギー工学専攻 都市建築環境工学研究室

プレイヤー間の相互作用を 2x2 ジレンマゲームとし、これに外生的資源制約を課することで一般的な環境ジレンマゲームのモデルを構築した。Chicken 及び PD のジレンマが弱いゲーム領域では、環境の状態に応じて行動を切り替えるサステナブルな戦略が進化するが、その他のゲーム領域では、常に環境から資源を収奪しようとする戦略が優勢となる。局所性を導入すると、サステナブル社会が創発するゲーム領域に変化をもたらす。

A research on Environmental Dilemma Game with exogenous resource restriction based on 2x2 game.
 MOTOYA WAKIYAMA[†], JUN TANIMOTO[‡] and HIROKI SAGARA[†]

A universal model for the Environmental Dilemma Game is established. The model has two features. The first point is that the influence of the environment is treated as an exogenous resource restriction that has own dynamics, which is different from 2-players Chicken game or Tragedy of Commons (*N*-players Chicken game). The second point is that the game playing among agents is based on various 2x2 games, not a particular game specifically aiming at a certain environmental problem. A series of simulations reveals that a sustainable strategy allowing behavior-shifting to adjust environmental capability has been evolved in several game structures. However, in most game structures, dangerous strategies always trying to obtain resources has been prevailed. Social locality affects to support emerging a sustainable society in some game structure, but in another game structure it devastates existing sustainable society.

[†] Graduate Student, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University
[‡] Prof., Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Dr. Eng

1. 緒言

本研究では、資源制約が環境ストックに関して、静的な Tragedy of Commons[1]と異なり、これを外生化することで動的制約条件とした（以下、外生的資源制約）普遍的な環境ジレンマの進化ゲームモデルを提示する。本モデルは、エージェント間で行われるゲームに 2x2 ゲームを適用することで、既往のジレンマゲーム研究とのジレンマ強さに関するゲーム構造上の比較考察[2]が行い得る点で、先行の外生的資源制約型の環境ジレンマゲームである Akiyama ら[3], Tanimoto[4]にはない特徴を有する。

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、自己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、

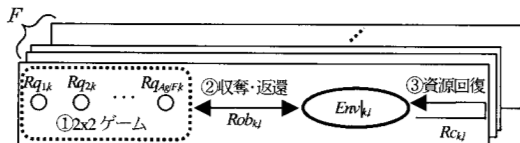


図1 フィールド *l* の *k* ステップにおける資源の移動

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

力を持つ。

2-1 環境との資源のやり取り エージェントは 2x2 ゲームを行う。ゲーム構造は

$$M = \begin{bmatrix} R & S \\ T & P \end{bmatrix} = [R, S, T, P]$$

なるマトリクスで、エージェント

i の *C* か *D* かの手を $s_i = {}^T(1, 0)$ あるいは $s_i = {}^T(0, 1)$ なる縦ベクトルで表す (*T* は転置を表す)。ゲーム構造 *M* は、文献[2]によると PD, Chicken などあらゆる 2x2 ゲーム空間は利得行列要素 *P, R, S, T* の 4 パラメータに代わって 2 パラメータ r, θ [deg] で表すことが出来る。本研究でもこのゲーム記法を適用する。

社会全体のエージェント数を *Ag* とする。環境には独立した同一フィールドが *F* 箇所存在し、各フィールドには Ag/F (但し偶数) 人のエージェントが同居している。 *k* タイムステップにおけるフィールド *l* の資源 Env_k は $[0, Env_{max}]$ なる連続量を取り、エピソード開始時 ($k=0$) には Env_{max} とする。図 1 に 1 ステップ内のフィールド *l* における資源の移動を示す。各ステップにおける流れは; ① エージェント *i* は 2x2 ゲームの帰結に応じて環境へ資源 Rq_{ik} を要求し、② フィールド *l* に属するエージェントの資源要求量の総和分 $Rob_k (= \sum Rq_{ik})$ を環境とやり取りする。但し、フィールド *l* の環境が危機的状態になると、資源収奪は強制的に停止され、資源返還のみ許される ($Rq_{ik}=0$ if $Env_k - Rob_k < 0$ & $Rq_{ik} > 0$; このイベントを以下、資源制約とする)。③ フィールド *l* の環境は自らの回復能力 Rc_k により保持する資源量を回復させる。資源回復量 Rc_k

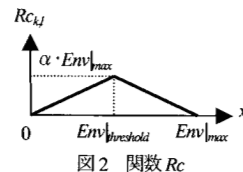


図2 関数 Rc

は Env_{kj} に依存し、(1)式で与える。但し、 α はモデル定数である。図2に R_c の関数を示す。

$$R_{c,k,j} = \alpha \times Env_{max} \times \left(\frac{Env_{kj}}{Env_{threshold}} \right) \text{ if } Env_{kj} < Env_{threshold}$$

$$= \alpha \times Env_{max} \times \left(1 - \frac{Env_{kj} - Env_{threshold}}{Env_{threshold}} \right) \text{ else} \quad \dots(1)$$

2-2 エージェントの学習 各エージェントは戦略を有する。戦略は状況に応じて 2x2 ゲームにおける協調 (Cooperation, 以下 C) か、裏切り (Defection, 以下 D) かの手を規定する行動ルールであり、前回の自分と相手の組手および環境の状態量を入力に、CかDかの行動を出力する状態遷移機械 (Finite State Machine, 以下 FSM) で表される。図3に例示するように FSM は 9bit の遺伝子で表現される。

全エージェント (A_g 人) 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 ターンから成る。1ターンでは、対戦手を代えずに M 回繰り返し 2x2 ゲームを行う。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。

2-3 社会構造

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恵的な社会の創発が促されることが知られている。そこで本研究では、環境ジレンマの緩解・解消プロトコルとしてネットワークに着目し、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ケースの局所性の影響を調べた。

case1 : 社会適応 社会全体を1つの遺伝子プールとした適応メカニズム。エージェントのフィールド (先述した資源の遣り取りを行う場) への割り振りはランダムとし、フィールド



図3 FSM の表記例

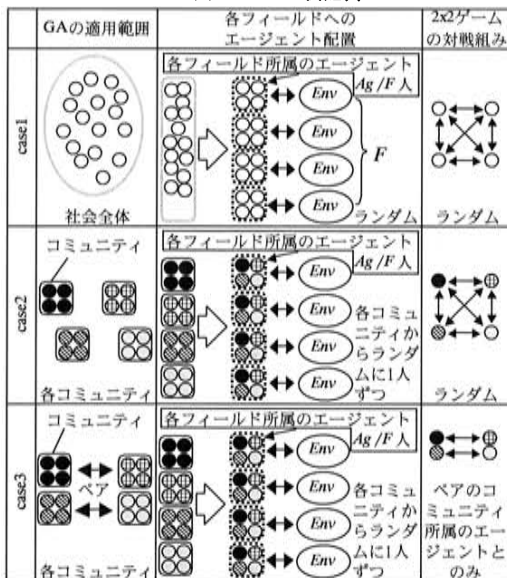


図4 局所性の導入方法

内で繰り返られる 2x2 ゲームの対戦組みもランダム。

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 G 個のコミュニティに分割され、エピソード中は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 (島 GA あるいは群淘汰の概念と同様)。フィールドへの割り振りは、世代ごとに各コミュニティからランダムに1人ずつ選択し、所属するフィールドを決定。フィールド内のゲーム対戦組みはターンごとにランダムに決定する。

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 G 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、世代ごとに各コミュニティからランダムに1人ずつ選択し、所属するフィールドを決定。フィールド内のゲーム対戦組みはターンごとに変わらず特定ペアに固定。すなわち、case3 では1世代中、各遺伝子は特定の遺伝子としか 2x2 ゲームを行わない。

以上を図4に模式的に示した。これら3ケースの局所性は、現実社会への比喩上、以下のような意味を持つ。即ち、GA による適応範囲の局所性は環境問題に対する望ましい (あるいは悪しき) 行動に関する知識がローカルにしか伝播しない状況を意味し、対戦組みの局所性とは産業活動の分野や社会活動の相互作用範囲がセクターごとに区切られていることに当たる。よって、case1 は両方の局所性が存在しないグローバル社会、case2 は知識の伝播に局所性が課せられたある種の情報統制社会、case3 は知識伝播と資源移動の両方に局所性が存在する閉鎖的な社会を意味している。

3. 数値実験

パラメータの仮定値を表1に示す。社会適応時の $\alpha=0.15$ を標準ケースとし、case1 に関しては α を 0.11, 0.13, 0.17, 0.19 と変化させ、資源回復能力の影響を調べた。case2, case3 では $\alpha=0.15$ とし、局所性の影響を調べた。2x2 ゲーム構造については、 r, θ を連続的に変化させて実験を行う。具体的には、 r は [0,2,2,0]、 θ は [-60,180] の間で変化させ (r は 0.2 刻み、 θ は 2deg 刻み)、5 試行アンサンブル平均を解析対象とした。図5に計算領域内のゲーム構造を示す。case2, case3 の各コミュニティをそれぞれ g_i (但し、 $i=\{0,1,\dots,9\}$) とし、case3 において対戦するコミュニティのペアは g_i-g_{i+1} (但し、 $i=\{0,2,\dots,8\}$) とする。

4. 結果及び考察

4-1 case1 : 社会適応

4-1-1 ゲーム構造による創発相の違い 図6は社会適応時の結果で、各図は均衡を表す。社会平均利得の高低によって2相に分類できる (図6(b))。図5に以下の議論で用いる創発相の分類上のラベルを示す。図中の□◇△マークのあるポイントに関しては、以下で詳細を述べる。社会平均利得の低い領域では、殆どが貧少な場合の協調率が 0.9 以上と高いが (A-1 領域)、Hero と Leader の領域では協調率が豊穡・貧少の双方で 0.5 程度となる (A-2 領域)。一方、社会平均利得が高い領域 (B 領域) では、豊穡時の協調率が高いのに対し、貧少時の協調率が低いことが特徴的である。また、環境の平均保持資源量も高い。この B 領域では、後に詳述するようにサステナブル社会が創発している。

4-1-2 $r=2.0, \theta=90$ [deg] ($M=[2.0,2.0,-8.0,8.0]$) A-1 領域のマーク□で示されるポイントのゲーム構造 ($r=2.0, \theta=90$ [deg]) である。図7に (a) 平均保持資源量 (保持資源量の平均を Env_{max} で割り、無次元化したもの)、社会平均利得 (エージェ

表1 計算パラメータ

Env_{max}	$= 5 * R * Ag / F (=100)$	$Ag = 20000$	$N = 10$	$M = 100$
$Env_{threshold}$	$= Env_{max} / 2 (=50)$	$p_{cross} = 0.5$	$G = 10$	$F = 2000$
T_B	$= 0.25 / M / N (=0.00025)$	$p_{mut} = 0.01$	$x_0 = 0$	$r_1 = 2 / \sqrt{2}$

ント全員の獲得利得の平均を R で割り、無次元化したもの、
 (b) 協調率の世代推移と (c) 均衡時の戦略分布を示す。このゲーム領域では少量の保持資源量しか達成されず、豊穡・貧少の両状況で協調率が低く、社会平均利得は低い(後述、図 11(a), (b)と比較)。図 8 は特徴的な保持資源量の時間ステップ推移を示す。プロットする資源量は均衡と判定した最終世代の、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 ゲームを行う直前の値 (1 時間ステップの切れ目に当たり資源回復直後の値) である。エージェントらは R 互恵 (互いに C を出すことで高利得を得る互恵メカニズム) を創発させ (協調率高)、全員で資源を取りに行こうとするが、資源制約に抵触して、環境が壊れ、保持資源量が R 互恵による資源要求量の総和 (図 8 では $0.2 (=Ag/F^*R/Em)_{max}$) を超えるまで環境が回復しないと資源収奪が出来ない。 R 互恵による資源収奪後は環境に対するインパクトが大きく、環境の資源平均保持量が大きく低下するため、資源回復能力も 0 に (I) 式および図 2) 近くなる。このため資源制約に抵触して、収奪停止となる期間は長期にわたり、社会平均利得は低位にとどまる。

戦略分布を見ると、“******C*****C” (以下、戦略①。*はwildcard) が優勢である。この戦略の特徴は豊穡・貧少の両状況で R の次手は C を出す点である (第 5bit, 第 9bit が C)。戦略①同士の対戦では、一度 R を取る事が出来ると、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。資源の収奪は環境の状態に依らず継続的に行われるため、環境は崩壊する。戦略①は R 互恵によって資源を収奪し、やがては環境崩壊を引き起こす、環境に対する“貪り派”の戦略 (以下、 R 型貪り派戦略) である。彼らが環境の資源を貪り続けた結果、頻繁に資源制約を受け、結果的に低利得しか得られない環境崩壊型の社会が創発した。

4-1-3 $r=2.0, \theta=20[deg]$ ($M=-2.0, 2.0, 4.8, 10.2$) A-2 領域のマークで示されるポイントのゲーム構造 ($r=2.0, \theta=20[deg]$) である。図 7 同様に結果を図 9 に示す。このゲーム領域では環境は少量の平均保持資源量しか持たず、豊穡・貧少の両状況で協調率は 0.5 前後、社会平均利得は低いとの特徴がある。

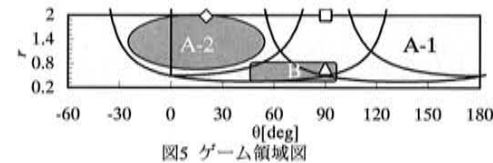


図5 ゲーム領域図

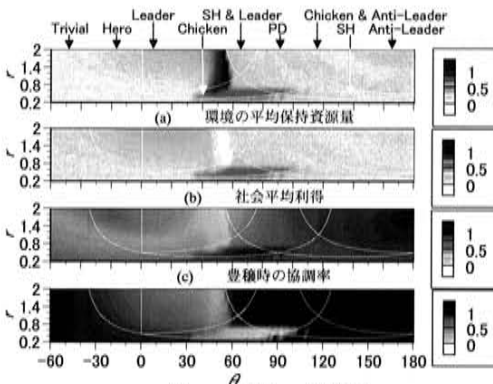
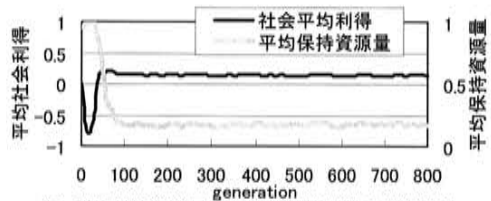


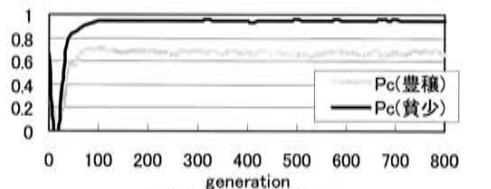
図6 case1: 社会適応の結果

ゲーム構造上、この領域では $S+T > 2R$ となるので、 S と T を対戦相手と交互に取することで R 互恵より高利得 (以下、 ST 互恵) が得られる。従って、協調率は 0.5 前後となるのは、エージェントが ST 互恵を創発させて R 互恵よりも多量の資源収奪要求を行うためである。

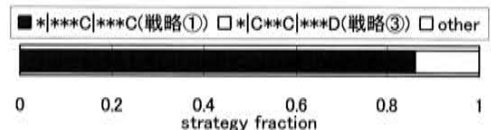
戦略分布を見ると、優勢となる戦略は “******CD*****CD” (以下戦略②) であり、豊穡・貧少の両状況で S の次手には C (第 4bit と第 8bit), T の次手には D をとる (第 5bit と第 9bit)。従って、戦略②同士の対戦では、 S を一度取る通常に C を出して S を、もう一方は D を出し常に T を取り続けるといった役割分担を行う。どちらのエージェントが T を取るかは初手 (第 1bit) で決まるため、対戦相手によって役割を変え、結果的に戦略②は高利得を上げ、マジョリティであり続ける。これは、Browningら[5]の交互互恵 (Alternating Reciprocity) に関する検討の中で、DorC タイプと呼ばれる ST 互恵である。しかし、戦略②は環境の状態に依らず資源収奪を繰り返す点については戦略①と変わりはなく、環境を崩壊へ至らしめる貪り派の戦略 (以下、 ST 型貪り派戦略) と言うことができる。前節同様、このゲーム領域でも、エージェントは環境から資源を貪り続け、頻繁に資源制約を受けるため、低利得しか得られない環境崩壊型の社会が創発した。



(a) 平均保持資源量及び社会平均利得の世代推移



(b) 協調率の世代推移



(c) 均衡時の戦略分布

図7 case1, $r=2.0, \theta=90[deg]$ での計算結果

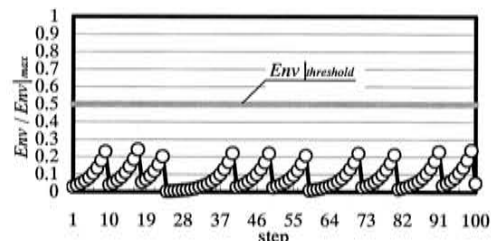


図8 1ターム内の保持資源量の時間ステップ推移

4-1-4 $r=0.6$, $\theta=90[\text{deg}]$ ($M=[-2.0, 2.0, -2.4, 2.4]$) B領域のマークムで示されるポイントのゲーム構造 ($r=0.6$, $\theta=20[\text{deg}]$) である。図7同様に結果を図10に示す。このゲーム領域では豊穡時の協調率は高いが、貧少時の協調率は低い。また、社会平均利得、保持資源量が高い。図8同様に保持資源量の時間ステップ推移を図11に示す。図11から環境平均保持資源量は $Env|_{threshold}$ の近くを推移している。これは、豊穡時にはR互恵により資源を収奪して保持資源量を低下させるが、保持資源量が $Env|_{threshold}$ を下回ると、行動を切り替えて(R互恵を放棄して)Pを取りに行き、資源返還を行うことで環境を豊穡な状態へ回復させるからである。結果的に環境は資源回復能力が最大となる $Env|_{threshold}$ (1式, 図2) 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。

戦略分布を見ると「*|C**C|***D」(以下、戦略③)が優勢となっている。この戦略の特徴は、(i)第9bitがDであること、(ii)第2bitと第5bitにCがあること、にある。戦略③は(ii)によって豊穡時にR互恵を創発させるが、環境が貧少となると、行動を切り替え、(i)によってDを出し合い、環境に資源を返還する。ここで、環境が貧少から豊穡に復旧した直後は、それまでのDの出し合いから転じてR互恵を再構築し(ii)で述べた第2bitのC、資源収奪を繰り返す。以上述べたように、戦略③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、環境との共生を達成する「サステナブル派」の戦略である。

以上によりこのゲーム構造の領域では、環境の状態に応じて資源収奪、返還を切り替える戦略③によるサステナブル社会が創発された。

図10(c)を再び見ると、マイノリティではあるが、戦略①が全体の1割程度を占めることに気がつく。戦略①は、環境が貧少に切り替わってもCを出す(第9bitがC)ため、対戦ペアの組み合わせが戦略①同士であれば、ほかの多数ペア(サステナブル派の戦略③同士)は資源を返還するのに、その狭間について資源収奪を続けることが可能になる。すなわち free

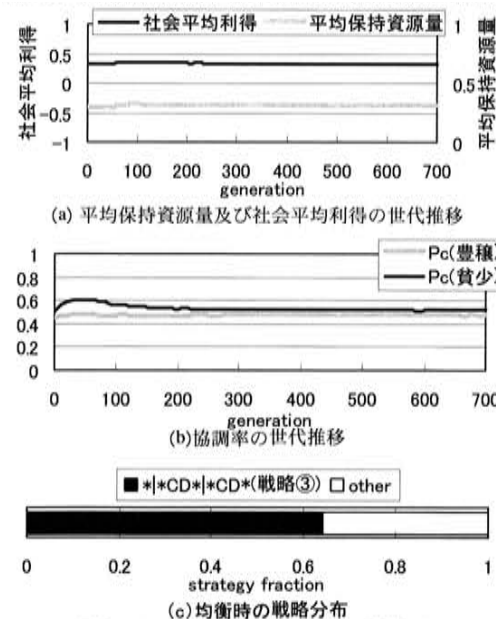


図9 case1, $r=2.0$, $\theta=20[\text{deg}]$ での計算結果

riderである。ただし、戦略①がサステナブル派の戦略③と対戦組みになった場合、環境が貧少に切り替わった際に食られることになり(戦略①は第9bitがC、戦略③は第9bitがD)、継続的な資源収奪は出来ない。サステナブル派の戦略③が優勢な状況下では、食り派の戦略①は戦略③との対戦が不可避的に生じるので、free riderは一定数以上には増えない。

4-1-5 資源回復能力を変化させた場合 図12は各 α に対する

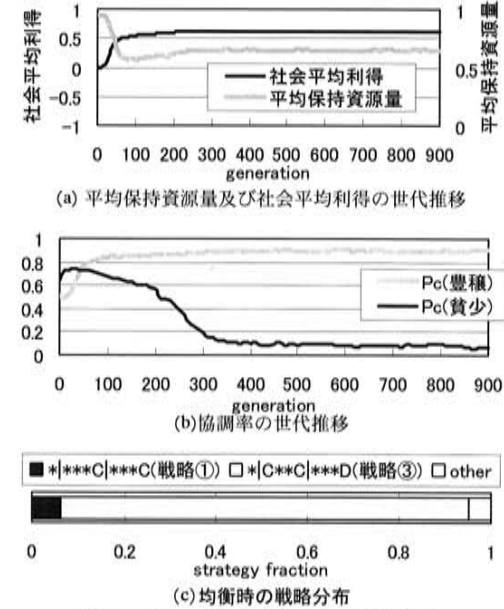


図10 case1, $r=0.6$, $\theta=90[\text{deg}]$ での計算結果

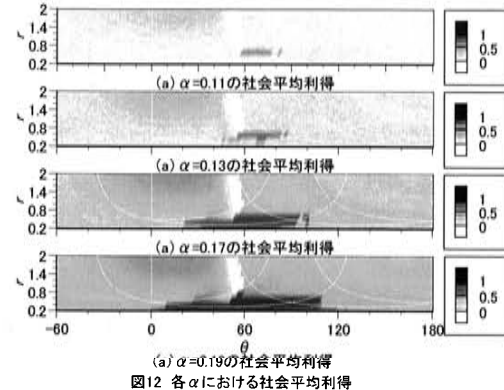
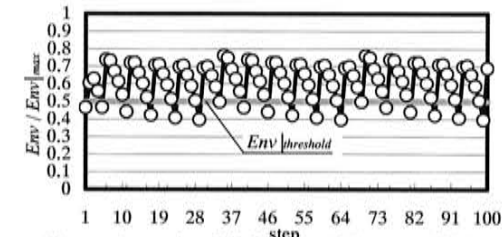


図12 各 α における社会平均利得

社会平均利得を表す。資源回復能力が大きくなると、社会平均利得の高いサステナブル社会が創発する領域が拡大していることが分かる。しかし、この領域は r が増加する方向、即ちジレンマが強くなる方向には拡大せず、 $r=0.8$ 以上ではサステナブル社会は創発しない。

4.1-6 サステナブル社会創発に関する考察 前節で述べた通り、サステナブル社会は $r=0.8$ 以上では創発しない。これは $r=0.8$ 以上では、学習の過程でサステナブル派の戦略③を排斥するダイナミクスが作用するためである。図 13 は各 r における 50 世代目の戦略分布を表す。 $r=0.8$ 以上では“CDDDC****”

(以下、戦略④) が遺伝子プール内で高い比率を占めていることが分かる。戦略④の特徴は、初手に C を出し (第 1bit)、環境が豊富な状態であれば、相手が C を出し続ける限りは C を出す (第 5bit) けれど一度でも D を出されると終始 D を出す (第 2, 3, 4bit) との戦略である。サステナブル派の戦略③の特徴は、“環境が危機に瀕すると、一旦協調関係を放棄して資源返還を行い、環境を豊富な状態へと回復させる”と云う点にあった。戦略④と戦略③が対戦すると、戦略③は環境が危機的状況となると資源を返還のため戦略④に対して D を出す。すると戦略④は環境が回復した際には戦略③に対して C を出さないため、サステナブル派の戦略③は再び資源収奪へと転じることが出来なくなる。この戦略④が多数となる状況では、サステナブル派の戦略③は淘汰される。では、どうして r 大とともに戦略④が多数となったのだろうか？それは、ゲームのジレンマが大きくなる (r 大) と、 $2x2$ ゲームのジレンマを克服することが資源制約の回避より適応上優先され、第 2bit を C とすることが許容されなくなるからである (なぜなら、 $DI_L = I - R > 0$ のジャンプ性ジレンマの領域 [2] で環境豊穣時を考えると、C 出さずに D 出して利得最大の T を取るようにする戦略の出現を阻止できなくなるから、完全に R 互惠する以外は許容しない戦略が優越になる)。

4.2 case2 : コミュニティ適応

図 6 同様、図 14 に均衡時の結果を示す。case1 と比較してサステナブル社会の創発領域に大きな差異は認められない。

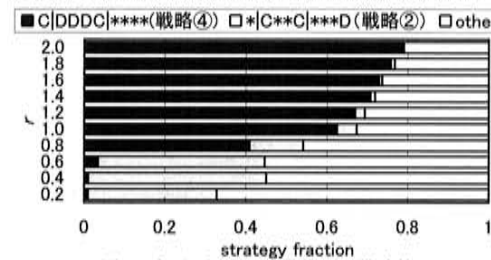


図13 各 r における50世代目の戦略比

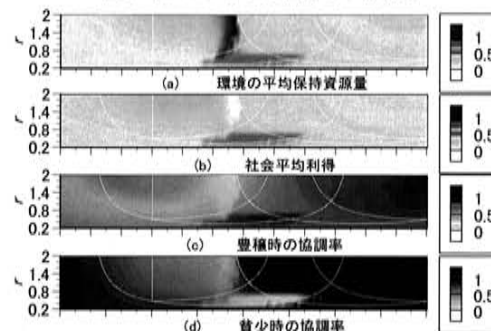


図14 case2: コミュニティ適応の結果

知識伝播の局所性だけでは、短期的なジレンマ ($2x2$ ゲームのジレンマ; 資源獲得のために相手と協調すべきこと) と中長期的ジレンマ (資源制約に抵触しないように資源獲得と環境維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、知識伝播の局所性があること、フィールドごとに繰り返られるゲーム対戦を通じて戦略の有利不利 (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) が各個体にフィードバックされるためと思われる。

4.3 case3 : 特定コミュニティ適応

4.3-1 ゲーム構造による創発相の違い 図 6 同様、図 15 に均衡時の結果を表す。サステナブル社会が創発する領域は前 2 ケースに比して Stag Hunt (以下、SH) 方向へ拡大している。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櫛状となる。この点について以下で考察を加える。

4.3-2 $r=0.6, \theta=90$ [deg] ($M=1-2.0, 2.0, 2.4, 2.4$) B 領域のマーク口で示されるポイントのゲーム構造である。図 16 に (a) 平均保持資源量、社会平均利得、(b) 協調率、(c) 各コミュニティにおける平均利得の世代推移の推移と (d) 均衡時の戦略分布を示す。このゲーム領域では、case1 では R 型食り派戦略が多数を占める環境崩壊型社会となったが、この場合は社会全体としてはサステナブル社会となる。ただし、戦略分布を見ると g_0, g_1, g_6, g_7 では R 型食り派戦略が優勢 (以下、食り派コミュニティ) に、 $g_2, g_3, g_4, g_5, g_8, g_9$ ではサステナブル派戦略が優勢 (以下、サステナブル派コミュニティ) となっている (図 16(d))。そのため、 g_0, g_1, g_6, g_7 では R 型食り派の戦略同士の対戦が、 $g_2, g_3, g_4, g_5, g_8, g_9$ 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。社会全体で見ると R 型食り派の戦略 (食り派コミュニティ) 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、高利得を獲得する。一方、サステナブル派の戦略 (サステナブル派コミュニティ) 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 型食り派の戦略が収奪した資源量分も返還しなければならぬため、高利得を得ることは出来ない。こうして 2 つの局所性を課すことによりコミュニティ間に利得格差が生じ、社会全体としてみると戦略①と③が併存平衡する相となる。

4.3.3 サステナブル社会領域の変化に関する考察 4.3-1 で述べたように、サステナブル社会が創発する領域は SH 方向に拡大する一方、Trivial との境界では櫛状となっていた。前者については、4.3-2 で述べた通り、コミュニティ毎にサステナブル派戦略③と R 型食り戦略①のどちらかが多数を占め、社会全体としては、これら 2 戦略が併存平衡する相になる。これにより、case1 と case2 では R 型食り戦略に対してサステナブル派戦略が侵入出来なかった SH 側のゲーム構造領域で、サステナブル派戦略が侵入可能となってサステナブル社会と

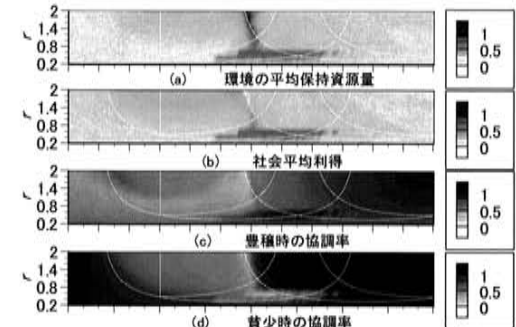
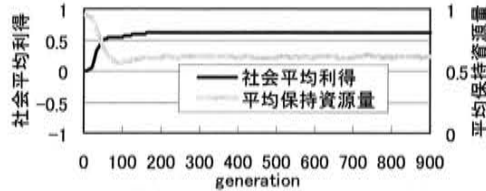


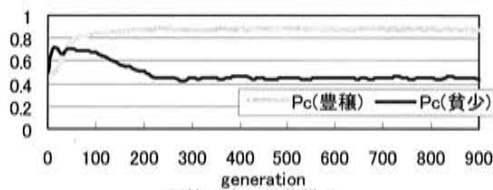
図15 case3: 特定コミュニティ適応の結果

なった。同様に後者については、case1とcase2ではサステナブル派戦略に対してR型貪り戦略が侵入出来なかったサステナブル社会創発エリア下方のTrivial境界で、併存平衡が許容されることでR型貪り戦略が侵入可能となり、結果的に環境崩壊型社会となった。これらの2つのエリアで、前者でサステナブル社会が広がり、後者が縮退した理由としては、①前者ではSH型ジレンマ(DLr=P-S)があり、環境貧少時にDを出す(資源返還)インセンティブが相対的に大きいものに対して、後者はTrivialゆえ元々のゲーム構造としてCばかり出す(資源収奪)インセンティブが大きいこと、②進化計算上のrandom driftの影響が考えられる。

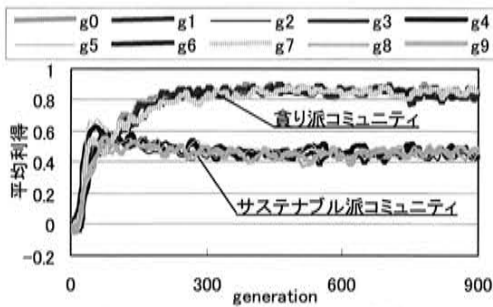
以上のcase3に特徴的な点は、知識伝播と資源移動の双方に局所性を課したことに起因する。詳述したように、ゲーム構造に依存するが、これらの局所性を導入するとサステナブル



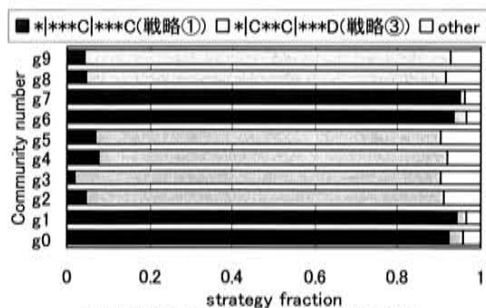
(a) 平均保持資源量及び社会平均利得の世代推移



(b) 協調率の世代推移



(c) 各コミュニティの平均利得の世代推移



(d) 均衡時の各コミュニティの戦略分布

図16 case3, $r=0.6$, $\theta=90$ [deg]での計算結果

社会が創発する可能性が広がることは、環境問題を解決するための社会システムを考える上で示唆的である。

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[6]。彼らはラチス構造で実験し、両者の範囲が分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の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、との見解は、Ifiらの言説と整合的であると云える。

5. 結論

2x2 ゲームを基礎とする外生的資源制約を課した環境ジレンマゲームの数理モデルを構築し、ゲーム構造と社会構造の局所性、環境の再生能力に着目し、サステナブル社会の進化可能性について考察した。社会構造の局所性については、知識伝播と資源移動の2つの局所性に分離して検討した。両者共に局所性を課すと、SHのゲーム領域でサステナブル社会の創発が可能となるが、この相は全社会的にサステナブルな戦略が多数を占めるのではなく、サステナブル派と貪り派がコミュニティ毎に分居して併存平衡する、利得で見ても2層の格差社会を前提にしたサステナブル社会である。

以上の結果より、以下のimplicationを導くことが出来る。

- (1) サステナブル社会の創発可否性は、我々が直接対面するジレンマゲームの構造に依るところが大きい。
- (2) サステナブル社会の達成可能性を上げるためには、環境の資源再生能力を増加させるか、社会構造に局所性を導入する方法が考えられる。
- (3) しかし、局所性の導入に関しては、情報統制を行って知識伝播を制限するだけでなく、資源のやりとりに関しても強い局所性を課した閉鎖的社会となつて、初めて創発可能性が高まると云うものであった。このような社会では、元々環境崩壊する命運にある社会が強い統制によってサステナブル社会を保ち得るけれど、社会的free riderと環境維持に向かう人々との併存平衡による格差社会となる。また、強い局所性を課しても、ゲーム構造によってはサステナブル社会の創発可能性が縮退する場合もある。これは、元々サステナブル社会に到達し得る社会なのに、強い社会統制があるため、局所的にfree riderが侵入可能となり、彼らの環境貪りにより、環境崩壊に至ってしまう場合に相当する。

【参考文献】

- [1] 神事直人, 1996, 「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 Vol.11 (2), 145-156.
- [2] Tanimoto, J., Sagara, H., 2007, Relationship between dilemma occurrence and the existence of weakly dominate strategy in a two-player symmetric game, *Bio Systems, in Press*.
- [3] Akiyama, E., Kaneko, K., 2002, Dynamical systems game theory 2 A new approach to the problem of the social dilemma, *Physical D* 167, 36-71.
- [4] Tanimoto, J., 2005, Environmental dilemma game to establish a sustainable society dealing with an emergent value system, *Physical D* 200, 1-24.
- [5] Browning, I. and Colman, A., 2004, Evolution of coordinated alternating reciprocity in repeated dynamic games, *Journal of Theoretical Biology* 229, pp.549-557.
- [6] Ifi, M., Killingback, T., Doebeli, M., 2004, Effects of neighborhood size and connectivity on the spatial continuous Prisoner's Dilemma, *Journal of Theoretical Biology* 231, 97-106.