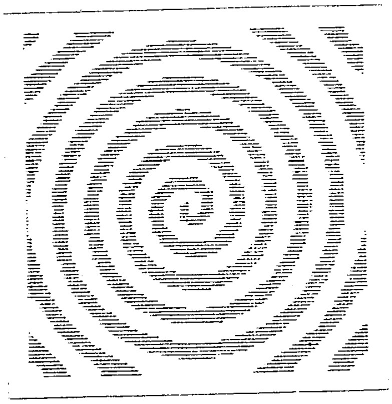

図 II a

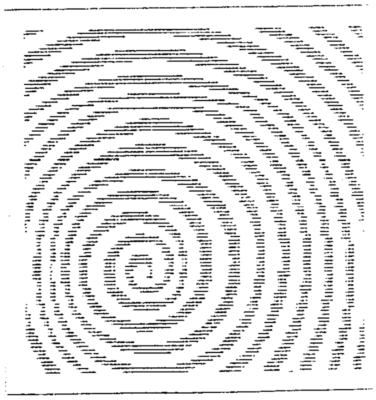

図 II b

9. 「ゲーム世界」における生態系のパターン・ダイナミクス

富士通国際情報社会科学研究所　松尾和洋，安達統衛，細木信也

§1　はじめに．

６０年代に華々しい成果を上げた物性物理学・統計物理学は，７０年代に入り，時代の要請もあり，余勢をかって，様々な複雑なシステムの解析に乗り出した．例えば，海外では，I. Prigogineの「交通システム」，Haken の「Synergetics 」運動，E. Montroll の「社会現象の定量的解析」，Kadanoffの「都市問題」などがある．一方，我が国ではこれらの動きに比べ新しい分野への進出はかなり慎重であった．すなわち，久保らによる非線型非平衡の統計力学の解析方法への新しい発展への足掛かりをもとに，化学反応系，流体系への展開とその解析の試みである．これらの試みの結果を現時点で評価すると，時代の要請に一定の貢献をしたが，実質的な進展と云う点からいうと，物理・化学系以外の新しい分野での成果はあまり捗々しくなかった．原因としては，物質界における法則と構造の単純さに比して，対象とするシステムが複雑であること，その複雑さが本質的であるのに対処する方法論が用意されていなかったことと，解析手段が発展していなかったことなどが考えられる．その後の展開は，物理学者の多くは本来の固体物理や統計物理の分野に戻り，物理学者以外のシステム科学者達が，これらの分野で研究を続けてきた．それらの中で，Haken は「Synergetics 」運動を継続させ，新しい総合科学の確立を目指して活動を続けている．

物理科学のパラダイムを生物系や社会系などのシステムへ展開させるこのような運動は，それ以前にも L. von Bertalanffy 達による「一般システム理論」運動等に見られた．この場合もある一定の役割を果たした後先細りし，現在ではシステム科学の一分野として細々と続いている．

８０年代に入って，物理科学のパラダイムから新しいパラダイムを構築・展開しようとする動きが，大きなうねりを見せている．このパラダイムを構築する試みが先進的哲学者や科学者により行われて来た．これらの試みは思想や概念の上の議論と，数理的な議論との２つの流れがある．しかしながら，現在のところこの両者の間の距離はまだかなり遠く，新しいパラダイムの思想を数理的に実現させたような事例はほとんど見られない．その理由としては次のようなものが考えられる．新しいパラダイムの思想を記述する数理的な表現言語なり，表現形式が，上述の物性物理学・統計物理学において発展させた数理表現にとどまらず，論理的，情報構造的な表現も含んだ広範囲な分野の理論的内容を統合しなけ

ればならないため，まだあまり進展していないということと，まだ多くの人がそのような問題意識を持っていないこととである．

我々は新しいパラダイムの思想を数理的に表現することを目指す試みの糸口を探ることを目的として生物界や人間社会におけるゲーム的な行動の側面と，エコロジカルな淘汰・発展の側面をモデル化するために，ゲーム理論的相互作用を持つ多体系を「ゲーム世界」として定義して来た[1]．ここでいうゲームとは，規範的な世界における規則と行為の組み合わせたものとして総称的に用いている．もちろん，数理的に議論を進める場合には，ゲーム理論における具体的な特定のゲームを採り上げて解析を行うが，これは，上記の目的への道程の一つである．これまでの一連の研究では，「ゲーム世界」を導入し，定式化することから始め，それらの中で代表的な具体的なモデル「ジレンマ世界」についてシミュレーションを行い，その結果を基にしてゲーム世界のダイナミカルな諸現象を分類・考察して来た[1)-7)]．さらに，ゲーム世界の中で戦略種の母集団をあらかじめ固定化せず，進化のメカニズムを導入して，発展的に変化していく事例も考えた[2]．そこでは，世界の内で戦略種の創生の過程を採り入れることを試みており，ゲーム理論におけるゲーム戦略の最適化問題に対して，自律的，淘汰的なアプローチの例を与えるものであった．

ここでは，まず，ゲーム世界の定式化について簡単に概略を紹介する．囚人のジレンマ・ゲームを基本とする「ジレンマ世界」に限定して考察する．次に，戦略種について説明する．これまでの研究の成果を生かし，戦略種を1状態オートマトンで記述されるものに限って議論を進める．そして，ジレンマ世界において各戦略種に属する個体プレイヤーの集団が示すパターン・ダイナミクスについて，コンピュータ・シミュレーション結果の解析を基に考察することにする．

§2　ゲーム世界．

ゲーム世界では，世界を構成する構成員（個体プレイヤー）がどれかの種（戦略種）に属している．個体プレイヤーはその属する戦略種に固有のゲーム戦略に従って，局所的な近傍系とあらかじめ定められたゲーム的な相互作用（基本となるゲームの有限回の試行のこと）を行って，ゲームの得点を獲得する．ゲーム的な相互作用の後，ゲームの成績により，個体プレイヤーの淘汰が，ある特定の規則に従って行われる．このように，ゲーム世界は，集団としての戦略種相互の協調・競合関係を示しながら，生態系としてのダイナミズムを実現する．

ゲーム世界は，その基本となるゲーム的相互作用の種類によって，異なる世界を形成する．本節では，まず簡単にゲーム世界の定式化を要約し，ジレンマ世界と共にその他のゲーム世界についても考察を行う．

2.1 定式化．

ゲーム世界を構成する空間Γは，k次元格子空間の有限連結部分集合$\Gamma \subset I \times I \times \ldots \times I$である．（ここでは，2次元正方格子空間を考える．）また，各格子点には高々一個の個体プレイヤーが存在するものとする．

個体プレイヤーが存在する各格子点と，そのプレイヤーに関係する個体プレイヤーのいる格子点により，近傍系が構成される．ゲーム世界における近傍系として，通常のゲーム的相互作用を行うゲーム近傍系Δ_gと，戦略種が増殖する際に関係する増殖近傍系Δ_pとを考える．

個体プレイヤーは自分の属するℓ番目の戦略種の戦略$\mathscr{S}_\ell$を記述した遺伝子$\mathscr{g}_\ell$を持つものとする．一般的にはゲームの規則やその他の情報も同様に遺伝子として記述されていると考えるべきだろうが，ここではそれらの情報自体を問題にしていないので，戦略$\mathscr{S}_\ell$

についてだけ考慮する．　ゲーム世界の時間的構成は，最初の「創世期」から始まって，「発生期」，「営存期」と「淘汰期」との繰り返しにより構成される世代 t （∈T）からなる．

戦略種の持つ戦略の集合を$\mathcal{S}$，遺伝子の集合を$\mathcal{L}$とすると，遺伝子の分布G，戦略種の分布S，得点の分布Pはそれぞれ次のように表される．

$$G \ : \ \Gamma \times T \longrightarrow \mathcal{L}$$
$$S \ : \ \Gamma \times T \longrightarrow \mathcal{S}$$
$$P \ : \ \Gamma \times T \longrightarrow R$$

このときそれぞれの期は次のように表される．

・創世期：個体の遺伝子の初期分布を与える時期である．

$$\mathcal{I} : \quad \longrightarrow \mathcal{L}^{\Gamma \times \{0\}}$$

・発生期：翻訳規則により，個体の遺伝子から有限状態オートマトンが生成される時期である．

$$\mathcal{H} : \mathcal{L}^{\Gamma \times T} \longrightarrow \mathcal{S}^{\Gamma \times T}$$

・営存期：各個体プレイヤーがゲーム近傍系とゲーム的な相互作用を行い，ゲームの得点を獲得する時期である．

$$\mathcal{G} : \mathcal{S}^{\Gamma \times T} \longrightarrow R^{\Gamma \times T}$$

・淘汰期：プレイヤーの獲得した得点に基づいて選択・増殖を行う時期である．

$$\mathcal{F} : \mathcal{S}^{\Gamma \times T} \times R^{\Gamma \times T} \longrightarrow \mathcal{L}^{\Gamma \times T}$$

ここでは，「選択閾値」と「増殖閾値」なる２つの閾値による選択・増殖を行う．

この淘汰期において，進化の素過程として突然変異を考える場合には，次の突然変異過程 $\mathcal{E}$ を含める．

$$\mathcal{E} : \mathcal{L}^{\Gamma \times T} \longrightarrow \mathcal{L}^{\Gamma \times T}$$

前回の発表では，この突然変異のメカニズムとして，遺伝子の記号表現における記号の偶発的置換を考慮していたが，今回は簡単化して，戦略種間相互の遷移が特定の確率で起こるものとした．従って，「発生期」の意味が無いので，「営存期」と「淘汰期」との繰り返しとなる．

2.2 基本となるゲーム

営存期におけるゲーム的な相互作用はお互いのプレイヤーの示す態度の組み合わせに対する利得行列で特徴付けられる．ここでは簡単のため，空の態度ϕを除いて取り得る態度が２種類に限った場合，すなわち，対称な２×２非協力非ゼロ和ゲームを採り上げている．この２種類の態度を記号的に｛1，0｝で表し，自分の態度が i で，相手の態度が j の場合に得られる利得をa_{ij}と書く．四人のジレンマ・ゲームの場合には，利得の間の大小関係として，次のような不等式が成り立つ．

$$a_{01} > a_{11} > a_{00} > a_{10}, \quad 2a_{11} > a_{10} + a_{01}.$$

ゲームの特徴は，ゲーム理論で議論されるNash解や max-min解に端的に現れている．囚人のジレンマ・ゲームでは，Nash解， max-min解が，お互いに非協調的態度（裏切り）(0, 0)を示した場合である．一方，両者が共に益となる場合つまりお互いが協調的態度を示す場合（1, 1）は，解として孤立している．

§3 戦略種.

まず，戦略種の記述について述べ，次いで種族の概念を導入する．

3.1 戦略種の定義.

我々は，戦略種を定義するゲーム戦略を統一的に記述するために，（計数型遷移規則を持つ）有限状態オートマトンによる記述を選んだ．正確に記述すると，有限状態オートマトンMは，5項組

$$M = (\Sigma, Q, \delta, \sigma_0, q_0)$$

により，定義できる．ここで，Σは入力および出力記号の有限集合．$\Sigma = \{1, 0, \phi\}$．Qは状態の有限集合．δは遷移規則の有限集合（遷移関数）．σ_0は初期（出力）記号．$\sigma_0 \in \Sigma$ かつ $\sigma_0 \neq \phi$．q_0は初期状態．$q_0 \in Q$．

また，遷移関数δを，εを近傍系の大きさとして，次のように定義した．

$$\delta : (\| (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \cdots, \sigma_i^\varepsilon) \|, q_i) \mapsto (\sigma_m, q_m)$$

ここで，σ_i^j はオートマトンへの入力記号．$\sigma_i^j \in \Sigma$．q_i は現状態．$q_i \in Q$．σ_m はオートマトンからの出力記号．$\sigma_m \in \Sigma$．q_m は次状態．$q_m \in Q$．

但し，入力記号のノルム$\| (\sigma^1, \cdots, \sigma^\varepsilon) \|$を，$(\sigma^1, \cdots, \sigma^\varepsilon)$に含まれる0の個数（$\in \{0, 1, \ldots, \varepsilon\}$）で定義しており，2種類の態度の間に対称性はない．

有限状態オートマトンMにより戦略種を記述したが，前回の進化現象の考察の結果，多くの場合1状態オートマトンで記述される戦略種が支配的であることが明らかになったので，ここで取り扱う戦略種としては，1状態オートマトンで記述されるものに限定する．まず，この1状態オートマトンを簡明に表現する．

3.2 1状態オートマトン表現.

上記のオートマトンMは，状態数が1の場合3項組

$$M' = (\Sigma, \delta', \sigma_i)$$

なる縮退した表現になる．ここで，遷移関数δ'は，

$$\delta' : \| (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \cdots, \sigma_i^\varepsilon) \| \mapsto \sigma_m$$

つまり，M' は，入力ノルム

$$\| (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \cdots, \sigma_i^\varepsilon) \| = j \quad (j \in \{0, 1, \cdots, \varepsilon\})$$

に対応する出力記号σ_jと初期態度σ_iとの（$\varepsilon + 2$）個の記号列 $\sigma_i \sigma_0 \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_\varepsilon$によって表現することができる．以下では，戦略種を表す記号にこの記号列（0，1の$\varepsilon + 2$ビット列）の2進数表現を用い，10進数表現や他の記号表現も適宜用いることにする．

進化のメカニズムを考慮する場合，遺伝子の複写時に次のような突然変異が生じている

と考える．すなわち，戦略種の $\varepsilon+2$ ビット列表現に対して，ハミング距離が1の戦略種へ確率 p_J で遷移し，残りの確率でそのまま変わらないものとする．但し，$j\in\{i,0,1,\ldots,\varepsilon\}$ はビット反転した位置の添え字である．

我々は具体的には2次元正方格子空間を考え，ゲーム近傍系としては4近傍系（$\varepsilon=4$）を考えているので，全戦略種は64種となる．ここで，遷移関数について（入力態度ノルムに対する出力態度）の規則性を基にして，戦略種を（初期態度を考慮しない形で）種族（ファミリー）に分類する．

{ C, D, S, H, SH, HS, Q }

それぞれの種族に属する戦略種は，次の通りである．ここで，1状態オートマトンの記号列表現は，〔...〕で示す．

C： 〔11111〕
D： 〔00000〕
S： 〔10000〕 〔11000〕 〔11100〕 〔11110〕
H： 〔00001〕 〔00011〕 〔00111〕 〔01111〕
SH： 〔10001〕 〔10011〕 〔10111〕 〔11001〕
〔11011〕 〔11101〕
HS： 〔00010〕 〔00100〕 〔00110〕 〔01000〕
〔01100〕 〔01110〕
Q： 〔00101〕 〔01001〕 〔01010〕 〔01011〕 〔01101〕
〔10010〕 〔10100〕 〔10101〕 〔10110〕 〔11010〕

初期態度の区別を考慮する必要があるときには，0Sや1Sのように上記の種族記号の前に初期態度の記号を付加した表現を用いる．

§4 戦略種の性質とパターン・ダイナミクス．

前節では，各戦略種と種族について説明したが，ここではそれらが集団として示す性質とそのパターン・ダイナミクスについて，シミュレーション実験の結果を基に考察する．

4.1 代表的な戦略種の特徴．

3.2 では，空でない戦略種として，1状態オートマトンで表現される全戦略種を定義した．これらの戦略種は，たとえ同じ戦略であっても，異なるゲーム世界では，異なる意味合いを持ち，その挙動・性質が変わる．以下では代表的な戦略種についてジレンマ世界の場合を調べてみよう．

「ジレンマ世界」では，態度（オートマトンの出力記号）1は，協調に，態度0は裏切りに対応する．これまでに考察してきたジレンマ世界で用いてきた戦略種の名称は，元々このような前提のもとでの戦略種の持つ性質に由来して付けたものである．それらの一例を示すと次の通りである．

① 〔000000〕 〔100000〕：D種族（裏切り(all-D)）．

（初期態度を除き）どのような場合にも，裏切りの態度しか示さない．相手を裏切ることにより，生き延びる戦略であり，同一種の集団でも互いに抗生的となって，子孫を残すことが難しい．

② 〔111111〕：１Ｃ種族（協調(all-C)）．（初期態度を除き）どのような場合にも，相手に対して協調の態度を示す．他の戦略種に裏切られても，協調態度を示し続ける「お人好し」であるため，色々な種の雑居集団の中では弱い立場である．しかし，ある程度の大きさの同一種の集団になると，相互の協調が勢力を持ち，自生的な集団になれる．

③ 〔110000〕〔111000〕〔111100〕〔111110〕：１Ｓ種族（しっぺ返し（tit-for-k-tats））．近傍系内でｋ個以上の裏切りがあると裏切り態度を示し，それ以外は協調態度を示す．（ k=1,2,3,4 ）　ｋが大きいほど裏切りに対して寛容であるが，色々な種の雑居集団の中では，周りの複雑な変化に対応して裏切り返す場合が多くなる．特に，ｋ＝１の場合には，周りの裏切りに敏感過ぎて，協調的態度の集団以外では，ほとんど「裏切り」と同じ振舞いをする．

④ 〔000001〕〔000011〕〔000111〕〔001111〕：０Ｈ種族（へそ曲がり（contradictious-k））．「しっぺ返し」とは逆に，近傍系内でｋ個以上の裏切りがあると，協調態度を示し，それ以外のときは裏切り態度を示す．（ k=1,2,3,4 ）同一種の集団中では，協調と裏切りの態度を交互に示す（例えば，出力態度列　0101... のように)．それゆえ，環境パラメータにもよるが，適度な回数の裏切りを含むため，「世にはびこり」易い．色々な種が雑居する集団中では，複雑な出力態度列を与える．

４．２ シミュレーション実験による考察．

戦略種が持つ社会的な役割は，そのゲーム戦略が基本となるゲームにおいて持つ性質とは大きく異なることは，これまでの報告の中で，部分的に触れてきた．ゲーム世界では，空間的な拡がりが様々な効果や影響を蓄積し，遅延させ，重ね合わせさせる．従って，モデルの複雑さとも組み合わさって，計算機によるシミュレーション以外には適当な解析方法が考えられない．

ここでは，ジレンマ世界について具体的にシミュレーションを実行した結果を例示的に報告することにし，ゲーム世界における戦略種の集団の示すパターン・ダイナミクスを調べる．

ジレンマ世界の利得行列は，これまでと同様に

$$a_{11}=2,\ a_{01}=4,\ a_{10}=-1,\ a_{00}=0,$$

とする．空間は，100×100 の正方格子空間．考慮する戦略種は，64種全てを考える．

幾つかのランダムな初期分布に対する生態系のダイナミクスのシミュレーション解析の結果から次のような戦略種の集団のパターン・ダイナミクスの特徴的性質が得られた．

① 「しっぺ返し－１」種および「しっぺ返し－２」種が示す優越性はこれまで強調されて来たが，優越性を確立するためには前提がある．(a)成長するためには，ある臨界サイズよりも大きな集団で存在することが必要．(b)増殖閾値が大きくなり過ぎないこと．(c)突然変異過程が存在する場合には，変異率が大き過ぎないこと．

② 「しっぺ返し－１」種は，小さなサイズの抗生的種を排除する免疫抗体的な役割を果たす（弾性的安定性）．

③ 「しっぺ返し－２」種は，小さなサイズの抗生的種を取り込んで，保持する貯蔵庫的な役割を果たす（塑性的安定性）．

④ 「へそ曲がり－１」種から「へそ曲がり－３」種までが示すダイナミックな振舞いと優

越性.

⑤「へそ曲がり－3」種と「裏切り」種（あるいは，「しっぺ返し－1」種）との二重層構造によるグライダー伝播運動の実現.

⑥「へそ曲がり－1」種あるいは「へそ曲がり－3」種と「裏切り」種との抗生的寄生関係による優勢なダイナミックな振舞い.

上記に示した代表的な戦略種の性質・役割は，当然のことながら，利得の大きさ，淘汰期における2つの閾値等に大きく依存する．利得の差を大きくすると，ジレンマ世界のギャンブル的な性格が強くなり，へそ曲がり種がより優勢となる.

§5　まとめに換えて.

情報構造を持つ要素単位が集まった集団系の集団力学，生態ダイナミクスを取り扱って来た．ゲーム世界については，多体ジレンマ・ゲームとしての考察から出発し，ゲーム世界における戦略種の表現として有限状態オートマトンを導入し，その記号的表現に突然変異を採り入れて，進化のメカニズムを考えて来た．ここでは，ジレンマ世界において戦略種を1状態オートマトンとして簡素に表現できるものだけに限定して，それら戦略種の集団の示すパターン・ダイナミクスについて考察した結果を報告している.

ゲーム世界における戦略種の集団の示すパターン・ダイナミクスは，非常な多様性を示すが，それらを系統的に分類することはまだ完全には行っていない．詳しい解析は，現在進行中であるので，別の機会に譲ることにしたい.

参考文献

1）松尾和洋，「ジレンマ世界における戦略種の淘汰と発展」国際情報社会科学研究所研究報告，第16号，p.1-43，1984年9月.

2）松尾和洋，安達統衛，細木信也，「ゲーム世界における戦略種の進化」 第11回システム・シンポジウム，計測自動制御学会，1985年8月.

3）松尾和洋，安達統衛，「ジレンマ世界の生態学　I．その定式化」 1985日本物理学会秋の分科会，昭和60年10月.

4）安達統衛，松尾和洋，細木信也，「ジレンマ世界の生態学　II．進化現象のシミュレーション」 1985日本物理学会秋の分科会，昭和60年10月.

5）K. Matsuo, "Ecological Characteristics of Strategic Groups in 'Dilemmatic World'", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tucson, Nov. 1985.

6）K. Matsuo, N. Adachi and S. Hosogi, "Automaton Formalization of Evolution Processes in Ecological Model World", International Symposium on Mathematical Biology, Kyoto, Nov. 1985.

7）松尾和洋，安達統衛，細木信也，「ゲーム世界における戦略種の社会的役割」 第12回システム・シンポジウム，計測自動制御学会，1986年6月.