

三人ゲームにおける協力の発生とその進化

東大教養 秋山 英三、金子 邦彦

94/10/6

1 イントロダクション

1.1 2人非ゼロ和ゲームとコミュニケーション

二人ゼロ和（2人の player の利得の和が0）ゲームでは確率戦略の範囲でミニマックス値と呼ばれる解が存在する。ゼロ和なので両方の player の利害は常に対立しており、完全に競争的なゲームである。そして、二人非ゼロ和ゲームから、「協力」によって利得を増すことが可能なゲームが現れるため、「競争的であると同時に協力的である」といった状況が生まれる。従って、見方によって解の定義自体もかわってくる。例えば、表1では、相手とのコミュニケーションが不可能な場合、相手がどう出ようとも「D」を出したほうが高い利得を挙げることができる（得点1、1）が、もし、両 player が協力することができれば両方が「C」戦略をとることにより両方ともより高い利得を得ることが可能であり、ここにジレンマが生じる。協力して適応度を高めるためには、相手との間に何らかの形のコミュニケーションが必要で、（二人非ゼロ和ゲームでは有効だった）単なる確率戦略など相手の情報を全く考慮しない戦略は良い戦略とはなり得ない。

1.2 二人ゲームによるシュミレーション

次のような設定でゲームを行なった場合の結果について、R.Axelrod が以下のような考察を行なっている。（Iterated Prisoner's Dilemma）

1. player 間で囚人ジレンマゲーム（表1）を繰り返し行なう。全 player で総当たり戦を行ない、平均利得がそのまま適応度になる。

	C	D
C	(3, 3)	(0, 5)
D	(5, 0)	(1, 1)

表 1: Prisoner's Dilemma

2. 各 Player はお互いに出した過去数手から次の手を決めるアルゴリズム (戦略) をもつ。
3. 適応度に応じて population が増減するようにする。

この場合、割と早い時期に Tit-for-Tat (シッペ返し戦略) と呼ばれる、シンプルな戦略 1 種が全 population を占める状態に落ち着く [1]。(厳密には違う戦略集団が Tit-for-Tat を凌駕するときもある。population 構成によって事情は変わる [2]) 初手 C の TFT によるコミュニケーション方法は、TFT どうしの間で隙の無い協力状態を生み出す。

1.3 コミュニケーションの複雑化のために

実際の生態系でも TFT に近い行動が観察されることが報告されている。しかし、現実で見られるコミュニケーションには単純な決まり切ったやりとりも見られる一方で、複雑なやりとりもある。協力していたかと思うと気まぐれに裏切ってみたり、また、相手によって違う反応を示したりなど様々である。コミュニケーションが複雑化するためには、非ゼロサム性によるジレンマ的状况のほかには何か必要なのだろうか。分かっている要素を以下に述べる。

(1) player が一つの turn で選べる「手」の数 (囚人ジレンマでは「C」, 「D」の2つ。将棋なら「7六歩」その他多数) 自体を増やす。

例えば、チェスは二人ゼロ和完全情報ゲームで解の存在自体は証明できる (Zermelo の定理)。人間の能力が無限であればゲームをやる前から先手、後手のどちらが勝つか、あるいは引き分けるかが分かっている非常につまらないゲームである。しかし、チェスにおける戦略は今だに進化し続けていて、そこで見られるやりとりも複雑である。これは、チェスがもつ戦略空間の大きさと人間の計算能力の限界によるものであり、ジレンマ性が無い、最終的な固定点が存在する状況でさえこういうことが起こり得ることを示している。

(2) noise がゲームに入りうるようにする (K.Lidgren の繰り返し囚人ジレンマモデル [3])

K.Lindgren のモデルは、基本的なルールは第 1.2 小節に述べたモデルと同じである。各 player はお互いに出した過去数手から次の手を決めるアルゴリズムをもつのだが、このモデルでは、ある一定の割合でそのアルゴリズムと違う間違えた手を出す (noise)。また、適応度に応じた数の子孫を残すのだが、そのとき、mutation によりアルゴリズムが違った種族が現れるようにした。この Lidgren の artificial ecology では、進化する生物種の集団どうしの間で競争を通じて戦略が複雑化していったり、いくつかの集団が互いに共進化していったりする状況があらわれ、その他、現実の生態系で見られるような複雑な振舞が見られた。

では、noise なしの状態 (ゲームのルール自体は完全に決定論的な状況) で、コミュニティ内でゲームをする個体どうしの相互作用のみで、各集団の algorithm は進化して複雑、多様化して行かないだろうか。そして ecology 全体としても多様になって行かないだろうか？

1.4 進化をする player による三人ゲーム

3人以上のゲーム(n 人ゲーム)では2人非ゼロ和ゲームの特徴に加えて(interactする相手が単純に一人増えるという事実はさることながら)、場にいる player の中で誰とどのように「結託」を形成するか、またそのうえでどのように利得を「配分」するかが本質的な問題となる。

一般に、人数が増えるに従ってゲームの解自体が多様化し、はっきりとした解を定義することが困難になる。幾つも可能性がある解のなかからどの解が有効になるかはその社会を構成する player 達の状態に大いに依存する。ある player がどの戦略をとるのが有効かはその他(n 人のうちの $n-1$ 人)の player の様子によって決まる。逆に、ある player が進化して、以前 system 内で有効だった解とは別の解を、協力者とともに実現して、古い player を陥れて新しい社会を築くことも(結託構造をとれる) n 人ゲームであれば可能である。単純な3人ゲームにおいて、ゲームの解自体の多様さ、結託構造によって、

- どのような結託が形成されていくのか。
- アルゴリズムとコミュニケーションはどのようにして進化していくのか、複雑化、多様化は起こり得るのか
- どのような社会が実現されるのか

今回のシュミレーションでは、以上のこと着目して調べてみた。

2 モデルの構成

2.1 基本的なルール

分割できない2つの資源をめぐる3人の間の結託の構成をモデルとしたゲームである。1つの round における基本的なルールは以下の通り。

1. 3 個体間で対戦する。
2. 各 Player はカード 0、カード 1 のうちのどちらかを各人が持つアルゴリズムに従って出す。
3. 同じカードを出した2人(結託に入れたプレイヤー)は得点をもらえる。(全員同じカードなら全員0点)
4. 以上を 1round とし、1000round まで繰り返す。

状態	左	右	自分	得点
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	3
3	0	1	1	3
4	1	0	0	3
5	1	0	1	3
6	1	1	0	0
7	1	1	1	0

カード「0」または「1」を3人の player がそれぞれ出すので、左のように8つの状態が考えられる。そのうち「自分」にとって得点になる(結託に入っている)のは、状態2～状態5である。

round	1 2 3 4 5 ... 1000
左	1 1 1 0 1 ... 1
右	0 0 1 1 1 ... 0
自分	0 0 0 1 1 ... 1
自分の状態	4 4 6 3 7 ... 5
得点	3 3 0 3 0 ... 3

各 player は過去の round の状態から各個体の持つアルゴリズムに従って一意に次の出す手を決める。ここで、「memory length = 過去何 round 前の状態まで参照するか」とする。また、各個体は初手に何を出すかについて情報を持つ。

2.2 種族（同じアルゴリズムを持った個体の集団）と世代交替に関するルール

- アルゴリズムとしては tree (8 分木) を使った。(memory の長さをに制限をつけた。アルゴリズムの実装の詳細は省略)
- 個体は同族集団も含めたすべての個体と戦う
- 各集団の個体数は、1 を全体にした割合で表される。
- 得点が全体の平均を上回っている種族は得点に応じて次世代の種族を増やす。
- 得点が平均より低い種族は次の世代で人口を減らす。その時、ある人口より少ない種族は絶滅する。
- 世代が変わる時、ある一定の割合で mutation が起こる。

2.3 役割の分化

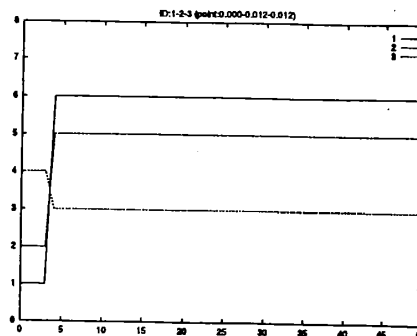
適応度を上げるためには、誰かが譲って（二人で残りの一人をはめて）役割を分担して、2 対 1 に分化しなければ得点を得られない。(三人が同じ手を出す状況(誰も得点を得られない)はシステム全体にとっても不毛である) 後の結果で分かるように、大きく分けて2通りの分化の仕方が考えられる。

1. 役割を固定したままの、一方に偏った分化 (階層的分化)

2. 役割を時間軸に沿って交替していく分化 (時間的分化)

表 2: 階層的分化

round	0 1 2 3 4 5 6 7 8 ..
player1	1 1 1 1 0 0 0 0 0 ..
player2	0 0 0 0 1 1 1 1 1 ..
player3	0 0 0 0 1 1 1 1 1 ..
player1 の状態	1 1 1 1 6 6 6 6 6 ..
player2 の状態	2 2 2 2 5 5 5 5 5 ..
player3 の状態	4 4 4 4 3 3 3 3 3 ..

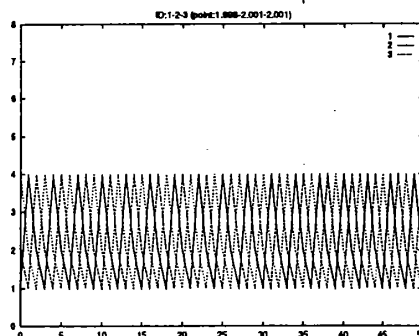


縦軸：状態

横軸：round

表 3: 時間的分化

round	0 1 2 3 4 5 6 7 8 ..
player1	1 0 0 1 0 0 1 0 0 ..
player2	0 1 0 0 1 0 0 1 0 ..
player3	0 0 1 0 0 1 0 0 1 ..
player1 の状態	1 4 2 1 4 2 1 4 2 ..
player2 の状態	2 1 4 2 1 4 2 1 4 ..
player3 の状態	4 2 1 4 2 1 4 2 1 ..



2.4 このモデルの特徴

1. noise がないので、同じアルゴリズムを持つプレイヤーが3人集まっても0点しかとれない。(誰かが何らかの形で均衡を崩さない限り得点は得られない。)
2. 各プレイヤーの持つメモリの長さは有限で、かつ noise がないので、コミュニケーション(3人の暗号のやりとり)は transient 部を経た後、必ず最終的には周期状態に落ち着く。
 - tree は transient の部分のやりとりについてと、周期状態のやりとりについての2つの情報をもつ。
 - transient の部分で、相手の戦略を予想する。(相手のリアクションを見る。)
3. 「カード0」、「カード1」という「手」自体に意味はなく、ある時点でどういうコミュニケーションの方法が有利かは system 全体の傾向に大いに左右されるので、いわば社会のルール自体が個体どうしの相互作用によって決っていく状況が生まれる。

3 シミュレーションの経過

システム全体のコミュニケーションの流れの概要は次の通り。

1. 初期は全体としてまとまりのない単調なやりとりが行なわれる。枝の長さが伸びて行き、秩序とその崩壊を繰り返して行く。
2. コミュニティ内で行なわれる全てのコミュニケーションがある固定した周期的時間分化の形式をとる、かなり強力な秩序をもった社会が現れる。周期は長い時間をかけて 6 周期, 18 周期, $3n \pm 1$ 周期, 3 周期 … と移り変わっていく。
3. monotonic な周期社会の変遷の後、同じ社会の中で 3、6 周期のコミュニケーションが混在する社会が生まれる。transient 部分が 100 round を越えるものも生まれるようになる
4. 一見予測のつかないようなやりとり、長い周期、単純な周期など、様々なコミュニケーションが現れる。相手によって違うコミュニケーションをとるものも多い。

3.1 初期の進化

ランダムに造られたアルゴリズムをもつ幾つかの種族からスタートしているので、たまたまその時の状況で有利なコミュニケーションを行なっているものが生き残って行く。

そのうち、memory がより長い種族がより高度なコミュニケーションで前世代の種族を凌駕する（主に階層的分化）状況が生まれて来る。(図 1) アルゴリズム的には、memory が長い枝を使うことによってより短い種族をはめる、という意味より、memory が長くなることで自分がはめられることを防げる、という意味の方が強い。

何回か新しい種族の登場を繰り返した後、ある一種が長い間 population をほとんど独占する状況が生まれる。(図 2 ID 329)

しばらくして、また巧妙な階層的分化を行なう新しい種族の登場が幾つかあった後、次の強力な 6 周期社会に入る

3.2 周期的時間的分化の社会とその変遷

3.2.1 6 周期

全種族が全ての相手と(同種族が 3 人集まった時は除く) 6 周期の時間的分化を行なう社会が現れ(図 3)、かなり長い間その状態が続く。新しい種族の登場は見られるが、それは transient 部でのコミュニケーションを古い種族より微妙に効率化した結果である。やがて 6 周期の社会を階層的分化によって凌駕する種族が現れ、次の 18 周期の社会に入っていく。

3.2.2 18 周期、 $3n \pm 1$ 周期

やはり、全種族が全ての相手と(同種族が3人集まった時は除く)18周期の時間的分化を行なう社会が現れ(図4)、かなり長い間その状態が続く。

一般に、3人のplayerが平等に、かつ効率的に利得を挙げるには $3n$ 周期で「譲る」役割を交替しなければならない。また、社会全体から見てもそれが一番無駄のない、安定した状態である。

18周期社会のplayerどおしは当然18周期で役割交替をするが、6周期playerは18周期playerが相手の時には、18周期playerの暗号を読み切れずに階層的分化の形ではめられる。

やがて、次に完全に $3n \pm 1$ 周期の社会(図5)がある程度続いた後、3周期の社会に入っていく。

3.2.3 3 周期

全種族が全ての相手と(同種族が3人集まった時は除く)3周期の時間的分化を行なう社会が現れる(図6)。

3周期は周期的時間的分化の中でも一番単純な形だけにかなり長い間続く。

3.3 最終状態

3周期の社会の中で、相手によって6周期のコミュニケーションをする物が生まれ(図7)、次第に相手によって違うやりとりをする状況が生まれて来る。ecology全体として多様な社会が生まれる。

やがて15周期のコミュニケーションも混在したり、また、transient部が非常に長いがりやりとりも見られるようになる。安定して得点を得るには周期的分化の輪に加わらなければならないが、同時に相手を出し抜いて適応度を上げるためにはtransient部で周期状態をあまり損しない程度に外して、相手を揺さぶるのも一つの手である。

最終的にはtransient部が伸びて、一見予測のつかないコミュニケーション(ランダムとは違い、例えば状態0、状態7のような無駄な状態に陥ることは非常に少ない。秩序状態と、それを揺さぶる状態が混在する。)が現れて来たり、73周期のコミュニケーションが現れたり、かと思うと3周期のコミュニケーションがあったりなど、1つの社会のなかに単純なコミュニケーションと複雑なコミュニケーションが混在する状況が生まれる。

4 シミュレーションの結果および考察

1. 限られたmemoryの長さの中でmemory長さが伸びながら、進化が起こって行く様子が見られた。具体的にはmemoryの長い新しい種族が古い種族をより高度なコミュニケーションによって凌駕する。その際、主に役割の「階層的分化」に行なわれている。

2. ある周期の「時間的分化」をしながら、「多種が共存」する安定な社会が実現した。
3. ある周期の時間的分化をする社会を幾つか経たのち、様々な周期の時間分化が、一つの社会に混在するようになり、ecology 全体として複雑になる様子が見られた。
4. transient の部分は、初期の段階は階層的分化の状態をつくるために使われ、時間的分化の社会では、周期状態に入るためにお互いの phase を外す意味で主に使われる。
5. 最後の方では transient の部分を伸ばすことで時々周期状態を抜けて、相手を凌駕しようと試みる戦略が現れ、ある程度得点を稼げる行動範囲を保ちつつも、一見予測がつかない複雑なコミュニケーションが現れた。
6. 最終的には単純な時間分化、長い周期のコミュニケーション複雑なコミュニケーションが共存する様子が見られる。

各 player が 1 round あたりで選択できる「手」が僅かに 2 つで、ゲームそのものには全く noise によるゆらぎも入れてない完全に決定論的であるという条件のもと、コミュニティ内で 3 人ゲームを行なう各個体の相互作用のみによって、以上で述べてきたような役割の時間的分化による協力状態、コミュニケーションの複雑さ、そして ecology 全体としての複雑さが生まれ得ることがわかった。

参考文献

- [1] Robert Axelrod. *The Evolution of Cooperation*. New York: Basic Books, 1984.
- [2] Robert Boyd. Mistakes allow evolutionary stability in the repeated prisoner's dilemma game. *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 136, pp. 47–56, 1989.
- [3] Kristian Lindgren. Evolutionary phenomena in symple dynamics. *Artificial Life II*, pp. 295–312, 1991.

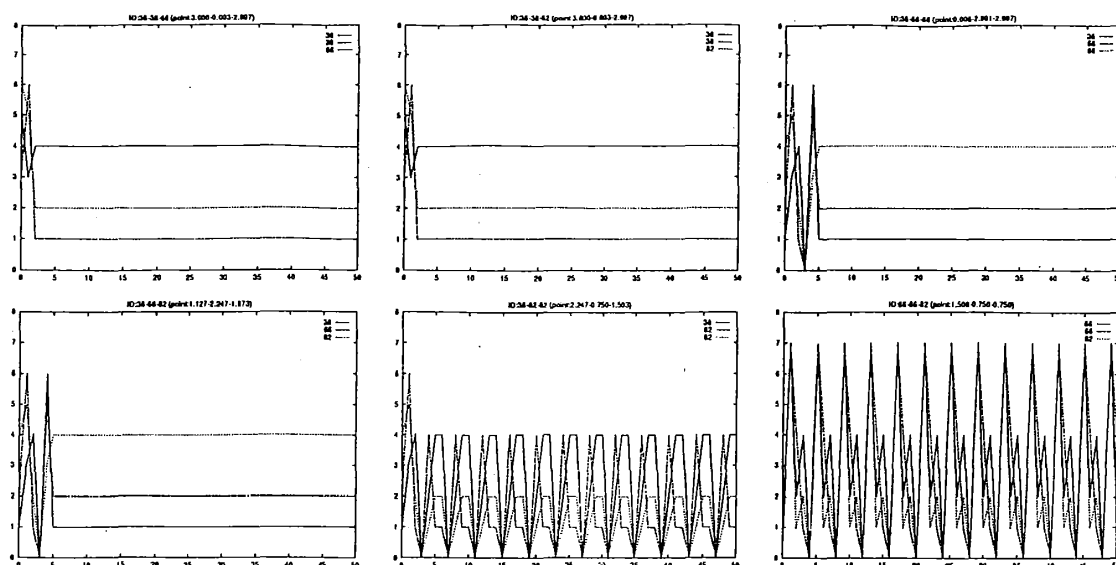


図 1

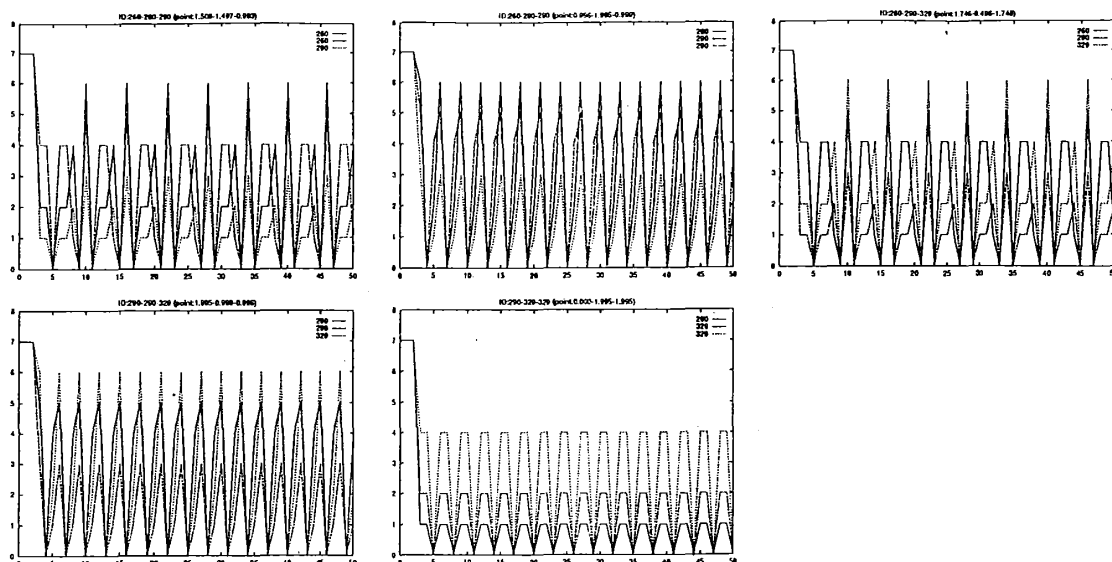


図 2

ID 329 が、memory の長さで以前の種を凌駕する。
そのまま、かなり長い間 1 種独占の状況が生まれる。

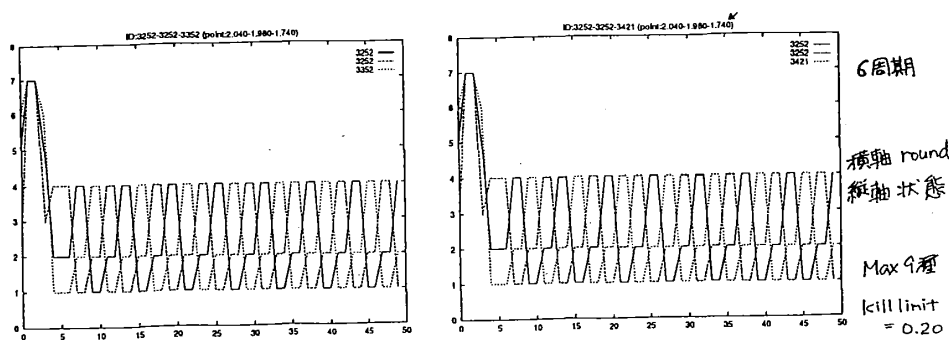


図 3

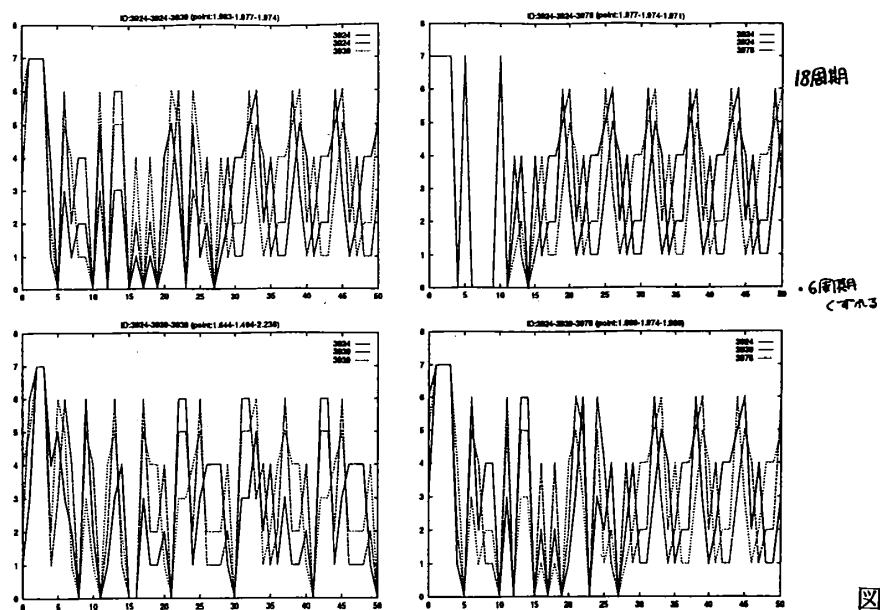


図 4

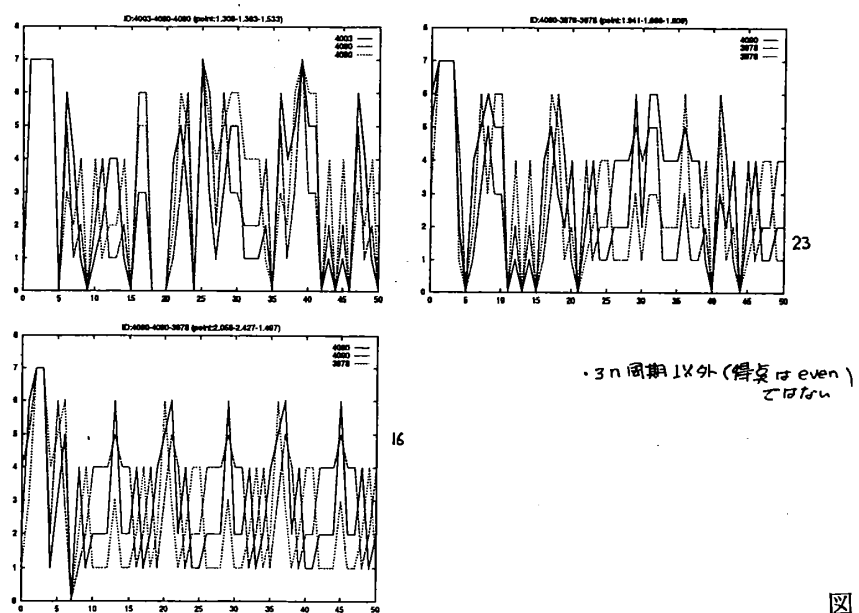


図 5

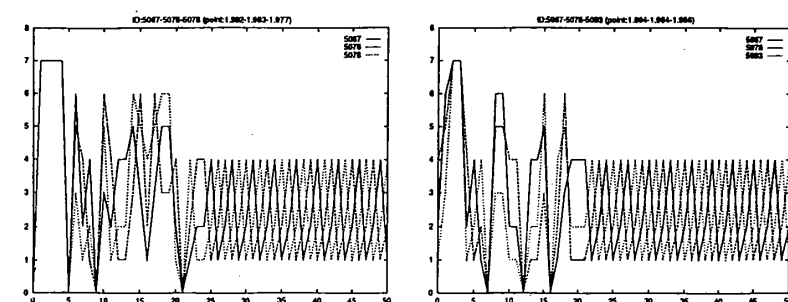
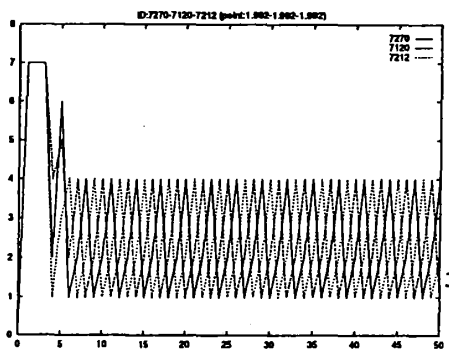
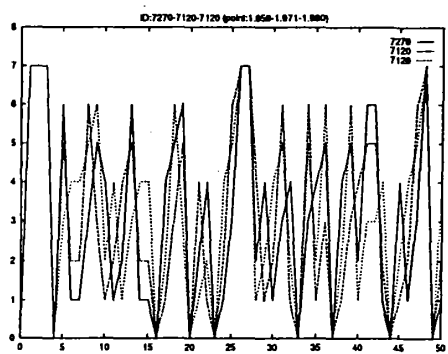
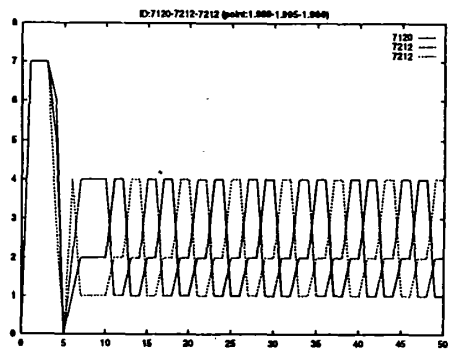
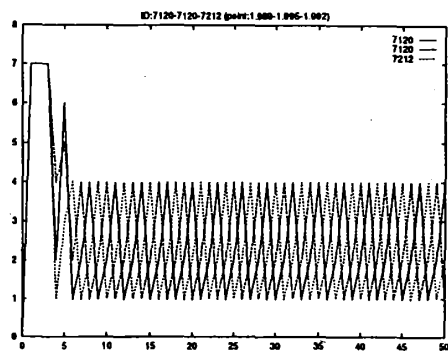
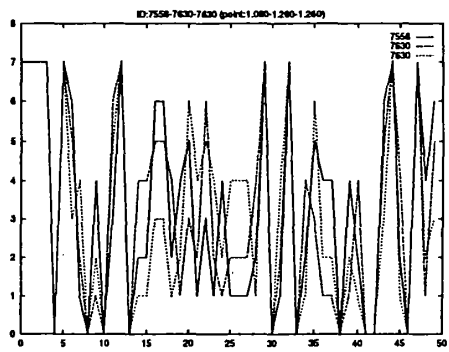
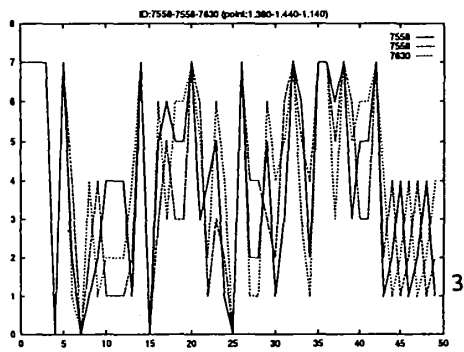


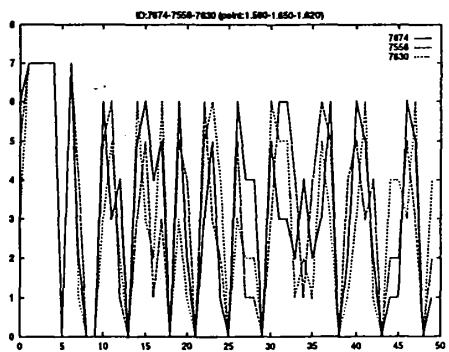
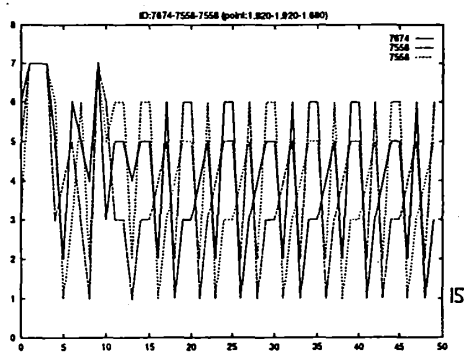
図 6



・様々な11°-n
α 共存始期
図 7



・transient α
長期化



最終状態

