

群れのエージェントモデルシミュレーション - 階級構造と群れの進化 -

大西 輝明
(NPO 法人) 科学技術社会研究所
(2011 年 2 月)

当報文では人々や複数の生物個体がかかわって形成される集合体、すなわち群れは、個体の種類にかかわらず普遍的で、かつ簡単な法則に基づいてその動的挙動が決まることを示す。ここで群れとは単に形ある集合体のみをさすものではなく、社会心理的、地政学的な意味合いでの集合状態をもさすものとする。したがって、テロリストや特定の政治信条を奉ずる集団 [1, 2]、選挙において周囲の意見に同調して特定の候補者に投票する人々、宗教などによるある種の制約のために人々が周囲と類似の意識や態度を保有する状態となる社会、さらに人々の関心が一つの流行中心に引きつけられ、人々の心や行動様式がその中心を模倣する流行現象などはすべて、不可視な社会心理的群れの状態にあると言えよう。地政学的な側面から世界の歴史を見ると、強い国力を有する国々は、自身を中心とした新たな世界秩序構築のために周辺国を包含し、地理学的には世界的規模ともなる覇権を現出してきた。このような覇権は一つの中央集権体を中心とした、多くの民族や小国家群の群れであるとも解釈できる。以下ではこのような多民族や多くの自治体から成る連邦国家や多国家間同盟のような無生物の実体でさえも、一般的な群れの法則に従って時間進化するものであることを指摘する。

1. はじめに

世界は相互に影響を及ぼし合う、意思を持った国家や自治体からなる一つのシステムであると考えられる場合 [3]、世界がダイナミカルに時間進化するのは必然的であることになる。こうしたシステム論的観点からすれば、弱小な国々は力を有する強い、いくつかの覇権国に政治的、軍事的、経済的、または文化的に統合、支配され、覇権国の周辺に地政学的な群れを作ることになる。しかし覇権国自身は、覇権間での闘争(戦争)や(地震、火山、気候変動などの)自然災害の勃発、覇権国内部での(収入を超過した軍事費への支出などの)自己矛盾の表出や人口増加に伴うマルサスの食糧危機などを契機として衰亡過程をたどり、新たな覇権国に取って代わられることになる。こうした場合、従来の弱小国家は新生の覇権国周辺に再統合されて新たな群れを形成し、新たな世界秩序が形成されることになる。複数の覇権国が同時に存在する場合、覇権国間では排他的、反発的状态に陥る可能性も大きい。覇権国の勃興や滅亡は世界史的な時間スケールで見れば周期的でさえあるとも指摘されている [4, 5, 6, 7]。

ヨーロッパ、北アフリカ、およびオリエントから成る地中海をめぐる地域では、古代から地理的には大規模な、すなわち周辺の小国家を、ある場合には武力的に従えた強力な覇権が連続して現出してきた。覇権は中央集権的な力をもって周辺の国々を統合して群れ形成を強制し、また周辺国は共通した利益や権益の確保のために群れに参入してきたと解釈される。この地域における紀元前 5 世紀から 19 世紀までの覇権の準周期的な出現状況を模式的に図 1 に示す。また、16 世紀の世界の実権はポルトガル、17 世紀にはオランダ、18 および 19 世紀にはイギリス、さらに 20 世紀にはアメリカ合衆国によって握られてきたが、これは近代の覇権国の興亡と交代を示すものに他ならない。

人々のスケールでの集団現象としては、例えば流行が考えられよう。流行現象は個々

人が孤立による不利益を恐れるなどの理由で、周囲の人々や社会の大勢を模倣することによって生ずる [8]。この場合、流行の源周辺で人々相互に情報の授受があり、情報を得た人々はその流行を模倣し、さらにかねらの周辺にあって未だに流行に“感染”していない人々との間で情報の授受をおこなう結果、流行は外部へ伝播、伝染し、拡大することになる [9, 10]。こうした状況下では、流行中心（源）はいわば社会心理的なアトラクターであり、人々はこの中心に引き付けられ、中心周辺に自発的に、心理的群れを形成することになる。この場合、流行中心は人々を心理的に引きずるリーダーであるとも解釈できよう。ところで一般に、いかなる流行にも有限の寿命が存在するので、流行の最盛期を過ぎれば流行支持者はしだいに減少し、最終的には次の新たな流行にとって代わられることになる。このため、流行の規模の時間推移はその流行の最盛期をピークとする「波」となる [9]。したがって流行が次々に変移する場合、その模式的な時間推移は、時間スケールは異なるものの図 1 に類似したものになるであろう。

人々の関与する現象をはなれ、脊椎動物や昆虫などの小生物の集団運動を語るとき、群れの特性はより明確なものとして現われる [11]。霊長類やその他の哺乳動物、海生動物などでは力の強い雄個体や最年長個体、すなわちリーダーによる群れの統率や、群れを構成する個体のダイナミカルな離合集散による新たな群れの形成などが特徴的である [12, 13, 14]。また、集団間同士での空間的棲み分けやテリトリーの確保、すなわち、集団同士での反発状態なども指摘されている [12, 13, 14]。こうした大型哺乳動物に限らず、多くの鳥類や魚類、蟻や蜂などの社会的昆虫については、特定方向へ移動するためや一つの目的を達成するためにも群れを形成することがある。鳥類や魚類の移動では群れの中に少数だが複数の、より多くの詳細情報を有していると思われるリーダーが存在し、群れ中の他の個体はこのようなリーダーに従うこと [15]、蟻や蜂などの群れでも、女王蟻や女王蜂などの中心的な個体の存在の周辺に群れを形成することなどはよく知られた事実である [16, 17, 18, 19]。リーダーを中心としたこれら動物群の統一的な行動は、群れの個体間に明らかな情報の共有があることを示唆している。実際、比較的小さな集団の場合には、個体相互間での情報の交換は常に可能である [20]。こうした場合、相互の情報のやり取りによって情報量の多寡に係る階級構造が形成されることになるが、リーダーとはこの構造の頂点にある個体であると言うことができよう。（しかし大規模な集団では情報の直接交換は不可能となり、局所的なコミュニケーションの波がグループ内を伝播することによってグループ全体に情報が伝わることになる。このような場合には、情報の階級的な構造が形成されることはなく、したがってリーダーも存在しないことになる。）

以下では単一のリーダー、または複数個のサブリーダーが存在する比較的小規模の群れについて検討する。次章ではエージェントを用いたセルオートマトン・モデルの方法論について述べ、第三章ではこのモデルを用いた群れのシミュレーション結果について述べる。第四章は群れに内在する階級構造の必然性についての結論を示す。

2. エージェント・セルオートマトンモデル

前章で示したような、人々の活動に係る抽象的な群れや動物の群れなどを統一的に捉えようとする場合、次のような共通の特徴の存在に気がつく。

(1) 群れは一つのシステムであり、群れの構成個体同士は周辺の個体と相互に作用しあい、思想や精神をも含めた情報や物質、(地政学的システムの場合には貿易、金融、移民などを介した) 何らかの便益やある種の力の交換を常に行っている。こうして交換し、獲得した情報、物質や富、便益や力などの量を最大に持つ個体が群れのリーダ

一（すなわち中央集権的な覇権者）となる。

（２）群れの構成個体は様々な理由で孤立することを恐れ、社会心理的、地政学的、または生理学的にこのリーダーに接近する。一方、リーダーは自身を中心とする社会秩序構築のために周辺の個体を支配しようとする。

（３）こうしたシステムはダイナミカルである。従って、群れには興亡があり、群れの構成個体は離合集散を繰り返す。

当章ではこのような単純な前提に立って群れの一般モデルを構築する。当モデルではシステムの構成個体をエージェント、または一般エージェントと呼び、リーダーに相当するエージェントをパワーエージェントと呼ぶことにする。また、エージェント同士の相互作用によって獲得する“力”を、一般にパワーと呼ぶことにする。

ここでは簡単のために $(L \times L)$ の二次元セル領域を動く複数個のエージェントのシステムを考慮しよう。こうしたエージェントは我々が問題とする個々の国民国家や動物の個々の個体に相当するものである。離散的な時間幅 t 毎に、各エージェントは自身を中心とした半径 r_c 内の全エージェントと相互に作用し合い、そのつど互いにパワーを獲得し、自身のパワーを上昇させるものとする。ここでパワーとは既述した情報や物質などを抽象的に総称してさすものとする。また相互作用とは、人々の社会では金融や貿易、政治経済的駆け引きや説得、相手の様態の観察や注目、紛争、文化や人々の移動などであり、社会的動物の場合には群れ同士での争いや相手の様態の観察、鳴き声や音、ダンスシグナルなどによる信号の授受、フェロモンの放出と感知などに対応するものである。離散的な時間幅 t は現実の時間間隔に対応したものではなく、こうした相互作用の一過程が発生するための平均的、抽象的な時間間隔である。

時刻 $t + t$ における第 i エージェントのパワー p_i^{t+t} を以下のように与える。

$$p_i^{t+\Delta t} = p_i^t - \alpha (p_i^t)^{m+\epsilon} + \sum_j \Delta p_{j \rightarrow i}$$

ただし、 α 、 m は定数であり、右辺第 2 項は時間幅 t 内でのパワーの減衰分を与え、この大きさはパワーのべき乗に比例する、すなわちマルサスの見地から幾何級数的に増加すると仮定する。また、右辺第 3 項 $p_{j \rightarrow i}$ は第 j エージェントとの相互作用によって第 i エージェントが獲得するパワーであり、以下のように与える。

$$\Delta p_{j \rightarrow i} = \delta / \left[1 + \exp \left\{ -\eta (p_i - p_j) \right\} \right]$$

ただし δ および η は定数、 p_n は第 n エージェントのパワーである。 $\eta = 0$ の場合は、相互作用する二つのエージェントはその作用ごとに常に同一のパワーが付与されることになり、この結果、システムは平等（主義）社会となる。一方、 $\eta \gg 1$ の場合には、より大きいパワーを持つエージェントについてのみパワーが付与されるので、システムは階級社会に移行することとなる。

当モデルでは、任意の時刻 t においてそのパワーがある閾値 P_M を越えるエージェントのうち最も大きいパワーを持つ n_p 個のエージェントをパワーエージェントとする。第 M 番目パワーエージェントは第 i 番目の一般のエージェントに対して、以下のような引力を持つとする。

$$f_{iM} = \varepsilon P_M \exp \left\{ -\gamma |r_i - r_M| \right\}$$

ただし ε および γ は定数、 r_n は第 n エージェントの位置するセル座標、 P_M は第 M 番目パワーエージェントのパワーである。当モデルでは引力の形は重要ではないので、こ

では指数関数型とする。さらにパワーエージェント同士は反発力を持つとし、第 M 番目パワーエージェントが第 K 番目パワーエージェントから受ける反発力 F_{MK} を以下のようにとるものとする。

$$F_{MK} = -E P_K \exp\{-\gamma|r_M - r_K|\}$$

ただし E は定数パラメータである。ここでは力の大きさを、時間幅 t の間に各エージェントが力の方向に移動するセル数で与えるものとする。

こうした力の方向への移動に重畳して、従来のこのタイプのモデル [28, 29, 30] と同様に、エージェントはタイムステップごとにそれぞれのムーア近傍中の空いたセルへランダムに移動し得るものとする。パワーエージェントのこうした運動では、移動すべきセルに既に一般エージェントが存在する場合にはそのエージェントとは場所の交換を行い、一方、一般エージェントの移動に関しては移動すべきセルが空きセルの場合のみ、そのセルへの移動が可能であるとしよう。さらにパワーエージェントおよび一般エージェントともに、 $[t, t + \Delta t]$ の時間範囲において有限の衰退確率 R を有するものとする。時刻 $t=t_1$ においてエージェント i が一旦“衰退”したとすれば、その後、 $t > t_1$ のパワーはそのパワーが初期値以下に下がるまで、 Δt 当たり常に一定の割合で減衰し続けるものとする。こうした仮定は覇権の遷移や交代、流行や人々の関与する組織の非持続性、生物の有限の寿命などに基づいて導入されるものである。

当報文では $L=100$ とする 2 次元のセル平面上に、初めに $[0.9, 1.1]$ の範囲のランダムな値を持つ n_a 個のエージェントをランダムに配置する。周期境界条件を仮定し、 $r_c = L / (n_p)^{1/2}$, $P_m=400$, $\Delta t=2/L$, $R=0.998$ とする。時刻 $[t, t + \Delta t]$ において、 n_a 個のエージェントの各々は他の $(n_a - 1)$ 個のエージェントと一度だけ相互作用するものとする。したがって、全相互作用数は $n_a(n_a - 1)/2$ である。

3. 群れのシミュレーション

はじめにこうしたエージェントモデルによって、魚群の運動を模擬し得る可能性を見定める (図 2)。当システムのエージェント数 n_a は 200、この中で常に一個のパワーエージェント、すなわち一個のリーダーが存在し ($n_p=1$)、一般エージェントはこのリーダーに引き付けられ、リーダーに従って運動するものとする。リーダーの運動は当システムの縁辺部に沿って (縁辺部から 5 セル分だけ内側の距離にある正方形上を)、速度 $v=2.0$ セル/ Δt で反時計周りに周回し続けるものとする。ここで Δt はモデルの単位時間である。リーダーが消失する場合、次に続く第 2 のパワーエージェントがリーダーとなるが、それはこの縁辺部に到達後、縁辺部に沿って先のリーダーと同様な運動を続けるものとする。このような状況は極限された水槽内を回遊する小魚の群れを想起させるものである。当該モデルでは時刻 $t=300$ で群れの様相が芽生え、 $t > 500$ ではリーダーに追従する群れが出現し、それが持続する様相が見られる。リーダーとしての役割時間は有限であり、したがって常にリーダーは入れ替わる。現実の魚群でもこのような頻繁なリーダーの交代が観察されている [21]。 $t=800$ および 1300 はリーダー交代直後のシステムの状況であり、 $t=900$ の直前では群れを先導するリーダーが消滅し、二番目に強いパワーを持つエージェントが新たなリーダーとして現出した (すなわち、最も強いパワーを持つエージェントとなった) 状態に対応する。このため、旧来の群れの外形は乱れて拡散し、新たなリーダー方向に移動しつつある状況にある。こうしたことのため、時間経過しても群れの様相は定常状態とはならない。群れ中でのパワー保有量の多寡に係るヒエラルキーは時刻が 4000 までには時間と共にしだいに成長し、 $t=4000$ においてはリーダーの

パワー P_{max} は 486、最も力の弱い個体のパワー P_{min} は 1.25 となり、群れ中の個体間でのパワー分布はほぼ直線的となる。この後、リーダーのパワーはほとんど変化することはないが ($t=9000$ で $P_{max}=470$)、 P_{min} は時間とともに増加し($t=9000$ で $P_{min}=55.6$)、このシステムのエージェントはしだいに緩む傾向を持つ。

図 3 には飛鳥の群れをシミュレートしている。パワーエージェントは常に図上方 (+y 方向)に速度 $v=3$ セル/ t で飛翔するとしており、当図は当リーダーが $(x,y)=(50, 95)$ の位置に静止するような座標系を採用している。一般エージェントの運動は初めにランダムであり、決して+y 方向にそろった速度成分を持つものではないが、 $t > 300$ においては一般エージェントはリーダー後方に追従する様相となり、時間経過と共にそれらの+y 方向の速度はリーダーのそれに近づく。したがって $t > 500$ では群れは明確な航跡を形成することになる。しかし、さらなる時間経過と共にこうした外形はしだいに崩れ、一般エージェントはリーダー周辺に塊状になって凝集し、 $t > 4000$ ではシステム内の全エージェントはほとんど一体化した状態で+y 方向に移動することになる。この場合にも、システム中でヒエラルキーの状態は $t = 4000$ までは時間と共に成長し続けることになる。こうしたダイナミカルな様相は、我々が通常自然界で観察する飛鳥の群れのそれによく類似していると言えよう。

図 4 はシステム中に常に有限の寿命を持つ 3 個のパワーエージェントが存在する場合の、エージェントの 2 次元分布の時間変化を示している。パワーエージェント同士は互いに反発すること、一つのパワーエージェントの消滅後には異なった場所に新たなパワーエージェントが発生すること、一般のエージェントはこうしたパワーエージェントからの距離やパワーの大きさに依存して離合集散をすることなどの理由で、システムの様相は極めてダイナミカルである。こうした様相は群れて生活する鳥類や哺乳類のテリトリー (の規模や場所)、群れの構成員数の時間的変化や構成員同士のつながりの緊密さの程度、群れ相互間での構成員の移動や群れの分裂の様相を定性的にはあるが、視覚的によく表現していると言えよう [12, 13, 14]。さらに言えば、当図は人間のある種の集団の挙動、例えば母系制家族の寄り集まりと分裂 [22]、序列的な日本人社会における社会人類学的集団の盛衰 [23] などを想起させるものでもある。

このように一般に、生物界においてリーダーの存在する群れの現象論的説明は基本的には、(1) 構成員 (エージェント) 間での階級的な力の分配、(2) 一般のエージェントを引き付ける単一、または複数個のリーダーの存在、および (3) エージェントの寿命の有限性、の 3 条件が満足されれば可能となることがわかった。では、こうした条件下で人々の集団の群れの説明も可能であるか否かについて次に検討しよう。

人間の歴史の中で人々の集団が集団単独で孤立して永続してきたことはほとんどなく、その大部分は近傍の他集団 (集落や小国家、民族国家など) との交流や闘争などの相互作用を通して同盟や連携、融合や分裂などを行い、離合集散を繰り返してきた。我々の場合、こうした相互作用の結果、物質や情報が少数の集団に集積して全体のシステムが階層的になれば、ヒエラルキーの頂点に位置する少数の集団がパワー集団となって周囲の非パワー集団を引き付け、大集団を形成することになるとするシナリオである。この例を近代のヨーロッパ、および現代世界に見てみよう。

中世から 19 世紀半ば迄の中部ヨーロッパでは小国や公国、独立性を有する自由都市などが無数といえるほどに乱立し、相互に交易や人々の流れ、情報のやりとりなどを行ってきたことは歴史の明らかにするところである。しかし、1851 年、こうした小公国や都市を統合して中部ヨーロッパではドイツ連邦が、1871 年にはイタリア半島ではイタリア帝国が現出した。我々のモデルによれば、このような統合は一つの強い力を持つ国家の周囲に、他の弱小国家や公国群が心理的、地政学的に凝集し、一つの群れをなし

た状態にあったとも解釈できよう。この場合の力の指標としては政治力、軍事力、経済力、文化の先進性などが考えられるが、現在我々がこうした指標として利用し得る統計量として、ここでは人口、またはGNPを採用するものとしよう。階層的な不均質相互作用の結果、世界システム中ではエージェント間で（現実の世界では小国、公国、自由都市、独立した民族国家などの間で）統計量の階層的分布が現出することになる。

図 5(a) には人口をパワーの指標とした場合の (1) 1855 年における (上位 18 の公国と自由都市から成る) ドイツ連邦 [24]、(2) 1871 年における (9 個の独立した地域からなる) イタリア帝国 [24]、(3) (上位 16 の国家から成る) 1871 年のヨーロッパ [25]、および (4) GNP をパワーの指標とする (上位 50 の国家から成る) 2006 年の世界 [26]、のそれぞれにおけるローレンツ曲線を示している。これらのローレンツ曲線からパワーの分布に関するジニ (Gini) 係数を算出すれば、それぞれ (1) 0.67、(2) 0.20、(3) 0.50 および (4) 0.64 となる。ここでジニ係数とはパワーの分配の均質、不均質さを与える指標であり、それが 0.0 の場合は平等社会、1.0 の場合は 1 個のエージェントに全パワーが集中する、極端な階級社会に対応するものである。図 5(b) に $n_a=50$ の場合における我々の群れモデルによって算出した (a) とほぼ同一値の Gini 係数を与えるローレンツ曲線を示している。1871 年のヨーロッパのケースを除いては (このケースにおけるモデルと現実世界に対応するローレンツ曲線の外形の違いから、19 世紀中葉のヨーロッパ社会は大きいパワーを持った少数の国々によって席捲され、これら大国と残りの小国家との間には十分な相互作用に欠けていたとする可能性を指摘することができるが) 群れモデルは概して現実世界をよく再現できるといえよう。これらのことから、人口や GNP を集団や国家などの人々の集合体のパワーの指標とし得ること、したがって逆に、現実世界の人口や GNP の階層構造は人々のこのような集合体間の相互作用の結果の表れであること、さらに、人口や GNP が量的に最も大きい国家や人々の集団が、全体システムの覇権者となりえることなども推察できる。

図 5(c)~(f) にセル平面、この場合は地政学的な抽象平面上でのエージェントの分布を示している。分布や凝集の程度は、世界システムを構成する (国家や公国などの) エージェント間での結びつきの緊密度を示唆するものである。これらの図によれば、19 世紀中葉でのドイツ連邦内での結びつきはゆるく、一方、イタリア帝国は極めて堅固な結束状態にあったことになる。こうした視覚的な表現は緊密度の程度を直感的に把握できるので、地政学的な理解のためには極めて有用なものとも言えようが、現実世界での相互関係の強さや社会的な位置関係が実際に図 5(c)~(f) のようであったか否かについては、我々は明確な判断材料を持ってはいない。しかし、ドイツ連邦は「上からの建国」と言う統一過程をとったため弱い結びつきの同盟状態にすぎなかったこと、したがって 1866 年にはこの連邦は解体し、連邦構成国間で一種の内戦状態 (プロイセン-オーストリア戦争) となったこと、1871 年成立のドイツ帝国についても暴力によって生まれた民族国家という印象が強いこと [4] などに注意すれば、国家の弱い結束状況が推察されるところである。一方 1871 年のイタリア統一では、サルジニア王国を中心とした周辺国は住民投票によってイタリア王国に合併、併合されることを自ら選んだことに注意すれば、イタリア統一国家の緊密さに関して何がしかの示唆が得られよう。

地政学的な世界システムは群れのアナロジーで説明できるとする他の、別の例を見よう。我々の世界システムのモデルでは個々のエージェントが人々の小集団や単一民族、または単一の国家に相当し、パワーエージェントは階級構造の頂点に立つ中央集権的な強力集団に相当する。したがってこれらのエージェントが集合して覇権を作る場合、その覇権パワーは、パワーエージェント自身のパワーとパワーエージェント周辺に凝集した一般エージェントのパワーの和として算出されることに注意しよう。

いま、(世界)システム中には常に3個のパワーエージェントが存在するものとしよう。図6(a)はこうした3個のパワーエージェントのパワーの大きさの時間的推移を示している。当図はパワーエージェントが有限の寿命を持って衰退することや、次々に新たなパワーエージェントがシステム中に出現してくる状況を表している。図6(b)に、このようなパワーエージェントが中心となって作る覇権の強さの時間変化を示しており、当図(b)が前出の図1に比すべき図ともなる。覇権パワーの外形はパワーの影響範囲($r < r_c$)へランダムに出入りする一般エージェントの存在のために時間的に不規則かつ微細に振動しスムーズにはならないが、一つの世界的覇権の出現状況や、その覇権の消滅が次の新たな世界的覇権の発生に続く状況などが現実世界のそれによく類似していると言えよう。

図7は図6と全く同一のパラメータ値を採用して、初めにランダムに分布し、かつ運動する生物群中に「負の覇権」、すなわち一般エージェントに忌避されるパワーエージェントが現出した場合のシステムの様相を示している。この場合、パワーエージェントから一般エージェントに働く力は反発力である。図7(a)は魚群または鳥群中に一個の捕食者が投入された場合にも相当するものであり、図2と同様に、パワーエージェントはシステムの縁辺に沿って速度2セル/ t で反時計回りに周回し続ける場合の状況である。当モデルでは周期境界条件を付しているので、「負の覇権」者、すなわち捕食者も(図示範囲外であるが)周期的に配置されていることになる。したがってシステム中の一般エージェント、すなわち被食者群は周囲を捕食者群に囲まれた状態にあることになる。こうした状況下では被食者群は容易に捕食者グループの力から逃れることはできず、(当図では捕食者が正方形に運動するので、被食者群もそれに相当した形状に凝集するが)群れは中央部において球状に凝集することになる[27]。当図(a)はこうした状況を示している。

一方、図7(b)はシステムを中心点に、 $t=0$ において「負の覇権」者が現出した場合の一般エージェントの乱れと動きを表している。当図は平常状態にある魚群に外部から(例えば投石などの)何らかの擾乱を投入した場合の群れの集団暴走(スタンピード)状態をも想起させるものである。この場合、一般エージェントはこの擾乱を逃れるべく速やかに擾乱中心から遠ざかる方向に移動するため、システム中にはリング状の密度波が形成されることになる。こうした例をとおして、世界システムの動静を表現し得るモデルとパラメータ値は同時に生物群のダイナミクスをも表現できることが判明したが、これは換言すれば、世界システムの拳動も生物群のそれも基本的には同一の集団社会現象であることを意味することに他ならないであろう。

4. おわりに

このように、非線形な相互作用過程が働いて物質、情報、精神などに関する階級構造が集団内で生起し、それがパワーにつながる場合には、その集団は一個または複数個のリーダーを擁する群れとなる。この種の群れを構成する個体は社会的昆虫から動物、人、さらには超人間的規模の民族や国家、社会心理的な不可視なものに至るまで、我々の世界の広いスケール範囲で普遍的に現出するものであるが、それにも拘らず群れ現出の法則は時空間スケールの大小に係りなく、極めて単純で普遍的なものであることに注目したい。群れ形成は種の生き残りのための防衛本能に根ざしたものであるとされるが、群れはその内に階級構造を埋め込んだものであることにも注意したい。これは換言すれば、階級構造の形成は人間をもふくめた生物全般や人間が構築する国家などにとってのメリット、すなわち自身が生存し種を維持し続け得るというメリット獲得のための本能的、

かつ重要な事柄であることを意味していよう。階級構造の存在社会は無構造社会に比してより安定でより正常な状態であり、そうした社会の構築が(闘争的な過程を経るか否かにかかわらず)生物系の一つの目的であるとさえも極言できよう。人々の歴史においては多くの覇権が出現し衰亡することを繰り返してきたが、覇権は中央集権的なパワーの周りに民族集団や小国家が集まって作る階級構造の一つの形態であるとすれば、覇権の興亡は人々が生存し続けてき、また今後も、し続けるための不可欠で、かつ必然的な現象であるとも言える。

References

- [1] Bohorguez, J.C., Gourley, S., Dixon, A.R., Spagat, M., and Johnson, N.F.; "Common ecology quantifies human insurgency", *Nature*, 462(2010), 911-914.
- [2] M.Laver (2005); "Policy and the dynamics of political competition", *Am.Polit.Sci.Rev.*, 99(2), 263-281.
- [3] Wallerstein, I.; "A world-system perspective on the social sciences", *Brit.J.Sociology*, 27(1976), 343-352.
- [4] Toynbee, A.J., "A Study of History" (Oxford Univ.Press, London, 1934-1954).
- [5] P.J.Taylor (1989), "Political Geography – World-Economics, Nation-State and Locality" (Longman Scientific & Technical, Harlow, UK).
- [6] G.Modelski (1987); "Long cycles of world politics" (McMillan, London).
- [7] P.Kennedy (1988); "The Rise and Fall of the Great Power" (Random House, NY).
- [8] G.de Tarde ; "Les lois de l'imitation, 2e ed.", (Seuil, Paris, 2001).
- [9] Best, J.; "Flavor of the Month – why smart people fall for fads" (Univ. California Press, 2006), and references therein.
- [10] Monneyron, F. ; "La sociologie de la mode" (Presses Universitaires de France, Paris, 2006).
- [11] Camazine, S., Deneubourg, J-L., Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G. and Bonabeau, E.; "Self-organization in biological systems" (Princeton Univ. Press, New Jersey, 2001).
- [12] I.Hanski : "Metapopulation Dynamics" (Cambridge Univ. Press, London, 1999),
- [13] I.Hanski, and M.E.Gilpin; "Metapopulation Biology; Ecology, Genetics and Evolution" (Academic Press, N.Y., 1997).
- [14] D.I.Rubenstein and R.W. Wrangham ; "Ecological Aspects of Social Evolution: Birds and Mammals" (Princeton Univ. Press, Princeton, 1986).
- [15] Couzin, I.D., Krause, J., Franks, N.R., and Levin, S.A.; "Effective leadership and decision-making in animal groups on the move", *Nature* 433(2005), 513-516.
- [16] Gregoire, G., Chate, H. and Tu, Y.; "Moving and staying together without a leader", *Physica D* 181(2003), 157-170.
- [17] Sumpter, D.J.T. ; "The principles of collective animal behavior", *Phil.Trans.R.Soc.* B361 (2006), 5-22.
- [18] Couzin, I.D., Krause, J., James, R., Ruxton, G.D., and Franks, N.R.; "Collective memory and spatial sorting in animal groups", *J.Theor.Biol.*, 218 (2002), 1-11.
- [19] Conradt, L. and Roper, T.J.; "Consensus decision making in animals", *Trend Ecol. Evolution*, 20 (2005), 449-456.

- [20] Couzin,I.; “Collective minds”, *Nature* 445(2007),715.
- [21] Partridge,B.L.; “The structure and function of fish schools”, *Scientific American* 246(#6, 1982), 90-99.
- [22] L.Holy; “Strategies and Norms in a Changing Matrilineal Society” (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1986).
- [23] C.Nakane; “Japanese Society” (Weidenfeld & Nicolson, London, 1970).
- [24] P.Flora (ed); “State, Economy, and Society in Western Europe 1815-1975”,Vol.I (Campus Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 1983).
- [25] Mitchell,B. (ed); “International Historical Statistics : Europe 1750-1993”, (Macmillan Reference Ltd, 1998).
- [26] United Nations, Department of Economics and Social Affairs; “Statistical Yearbook”, Vol.52 (2008).
- [27] B.Hoare; “Atlas of Animal Migration” (Marshall Edition Ltd., Singapore, 2009).
- [28] Tsujiguchi,M. and Odagaki,T.; “Self-organizing social hierarchy and villages in a challenging society”, *Physica A*375(2007), 317-322.
- [29] Fujie,R. and Odagaki,T.; “Self organization of social hierarchy and clusters in a challenging society with free random walks”, *Physica A*389(2010), 1471-1479.
- [30] Xiaoping,Z. and Wei,L., and Chao,G.; “Simulation of evacuation process in a square with a partition wall using a cellular automaton model for pedestrian dynamics”, *Physica A*389(2010), 2177-2188.
- [31] Black,J. (ed); “DK Atlas of World History”, (Dorling Kindersley Limited, London, 1999).

Figure Captions

図 1 地中海周辺地域における覇権の時間的推移。覇権の大きさとして、ここでは領土の広さを指標とした。当ダイアグラム値は reference [31] を用いて推算したが、極めて大まかな数値にすぎない。Crtg: カルタゴ、Grc: 古代ギリシャ、Ptlmy: エジプトプトレマイオス朝、Roman: 古代ローマ帝国、Byzant: ビザンチン帝国、SassPrs: ササン朝ペルシャとその後継国、Umayya: ウマイヤ朝とその後継国、Frank: フランク王国、HolyRom: 神聖ローマ帝国、Spn: スペイン、Eng: イギリス、Ottoman: オットマントルコ。

図 2 閉じられた容器内を回遊する魚群のシミュレーション。一個のリーダーを赤、一般エージェントを青いドットで示す。リーダーは左上図の赤矢印のごとく、反時計方向、容器縁辺に沿って速度 $v=2.0$ セル/ t で運動する。図中の数字は時刻を表す。 $n_p=3$, $n_a=200$, $\mu=7.5 \times 10^{-3}$, $\sigma=1.25 \times 10^{-3}$ 。

図 3 飛翔する鳥群のシミュレーション。赤いドットで示された群れのリーダーは、左上図の矢印方向へ速度 $v=3.0$ セル/ t で飛翔する。図中の数字は時刻を表す。 $n_p=1$, $n_a=200$, $R=0.0$, $\mu=7.5 \times 10^{-3}$, $\sigma=2.5 \times 10^{-3}$ 。

図 4 力を持ったリーダー(赤いドット)がシステム中に常に 3 固体存在する場合の群れの離合集散状況。図中の数字は計算開始からの時刻。 $n_p=3$, $R=0.001$, 他パラメータ値は前図と同じ。

図 5 19 世紀中葉におけるドイツ連邦 (1855 年)、イタリア帝国 (1871 年)、ヨーロッパ (1871 年)、および 2006 年の世界におけるパワーの分布に関するローレンツ曲線 (a, b)、および社会心理平面上でのエージェントの分布状況 (c - f)。ここでのローレンツ曲線とは、横軸にエージェントの累積比、縦軸にパワーの累積比をプロットしたものである。ただし、パワーの指標は前三者に対しては国や公国、自由都市などの人口、2006 年の世界については国の GNP を採用した。(a): 現実世界における実測値、(b): シミュレーション値、ただし $n_a=50$, $n_p=1$, $\mu=3.0 \times 10^{-3}$, $E=3.0 \times 10^{-2}$, $\sigma=8.0 \times 10^{-2}$, $\rho=10.0$ のパラメータ値による $t=20000$ での値、(c): 1855 年のドイツ連邦、(d): 1871 年のイタリア帝国、(e): 1871 年のヨーロッパ、および (f): 2006 年の世界。

図 6 力を持ったリーダー数 $n_p=3$ 、一般エージェント数 $n_a=1000$ のシステムの時間進化。(a): リーダーのパワーの成長と衰亡の様相。異なるリーダーはそれぞれ異なる色線で示す。 $\mu=1.5 \times 10^{-3}$, $E=2.5 \times 10^{-4}$, $\sigma=1.0 \times 10^{-4}$ 。(b): (a)のリーダーを中心に形成される覇権国家の力の大きさ P の時間推移。異なる覇権はそれぞれ異なる色線で示す。 $t=10000$ および 20000 近傍では、錯綜をさけるため最強の覇権国家のパワーのみを示す。

図 7 図 6 と同一パラメータ値を用いた場合の捕食者(赤)と被食者(青)のダイナミクス。(a) 捕食者は図 2 と同様、赤矢印(反時計)方向、システム縁辺に沿って運動する場合 (b) システム中央部に捕食者や投石などの擾乱が投入された場合。

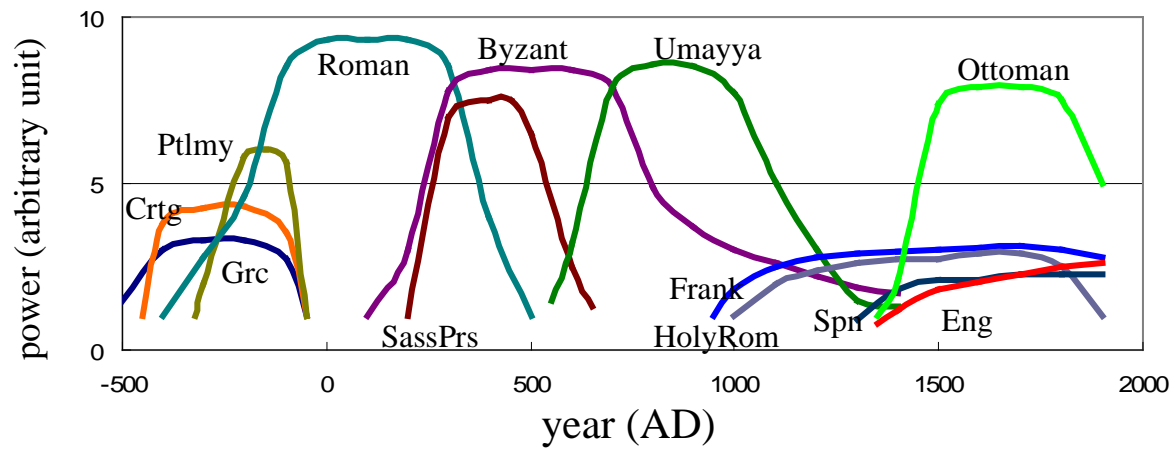
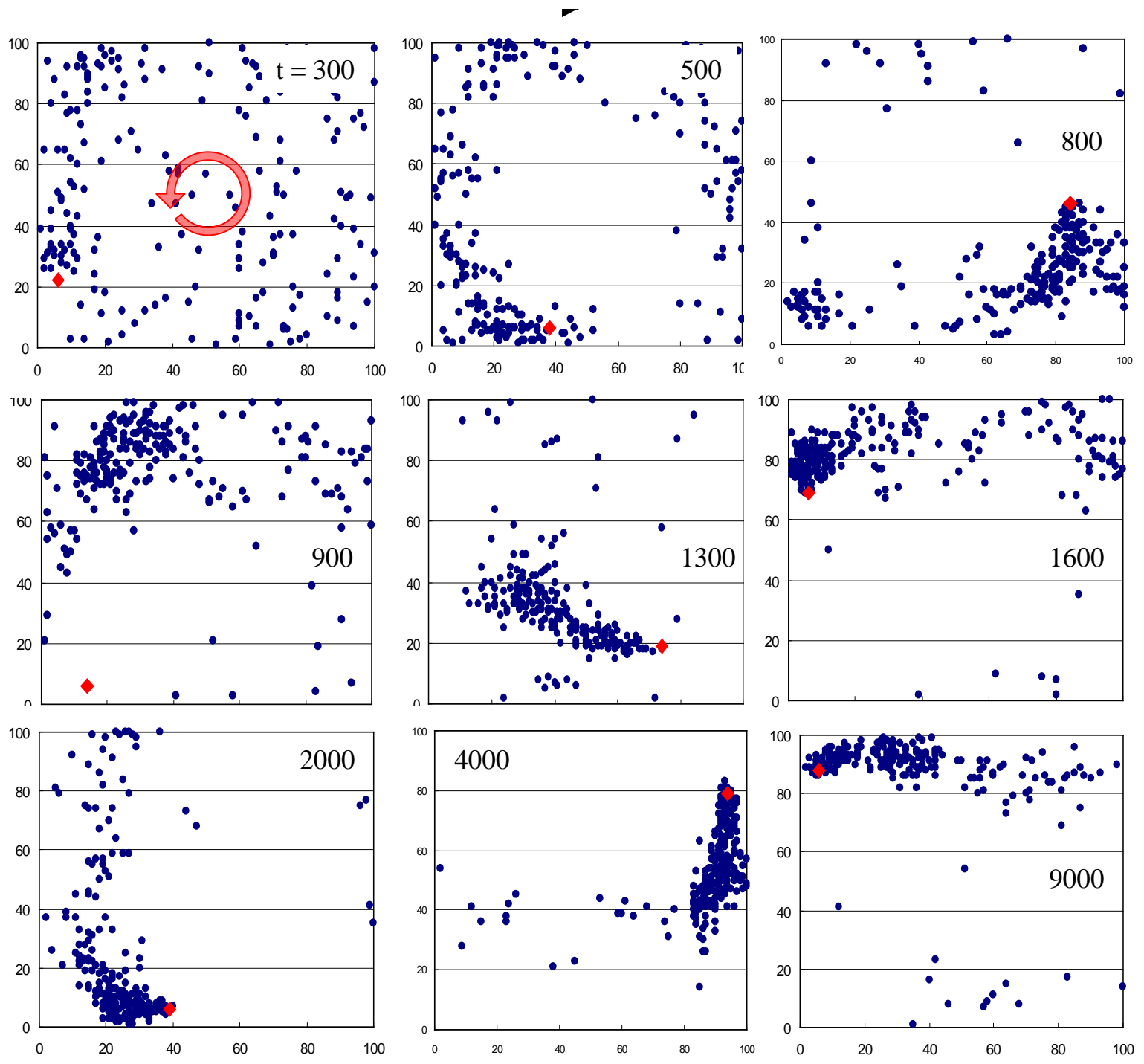


图 1

图 2



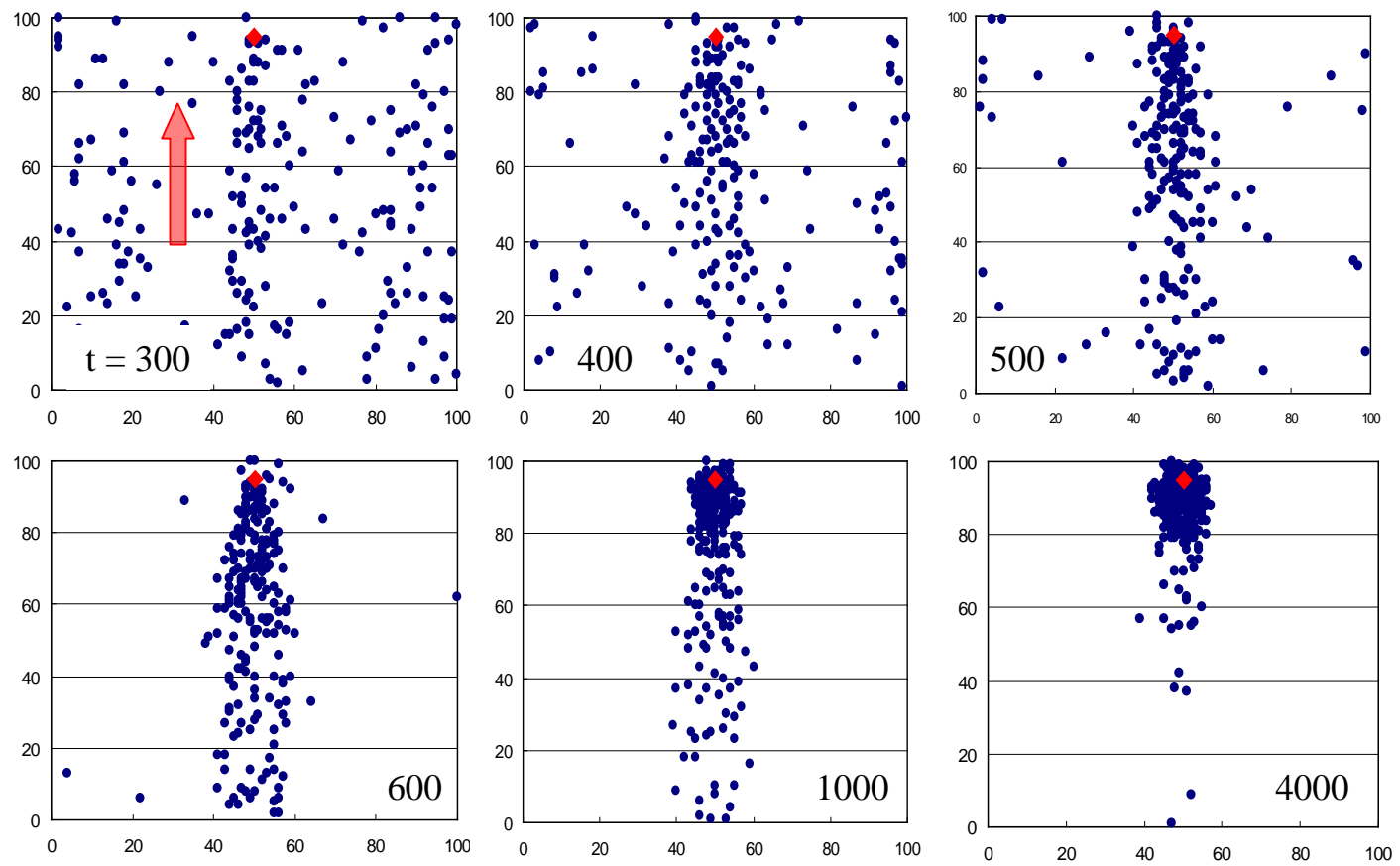


图 3

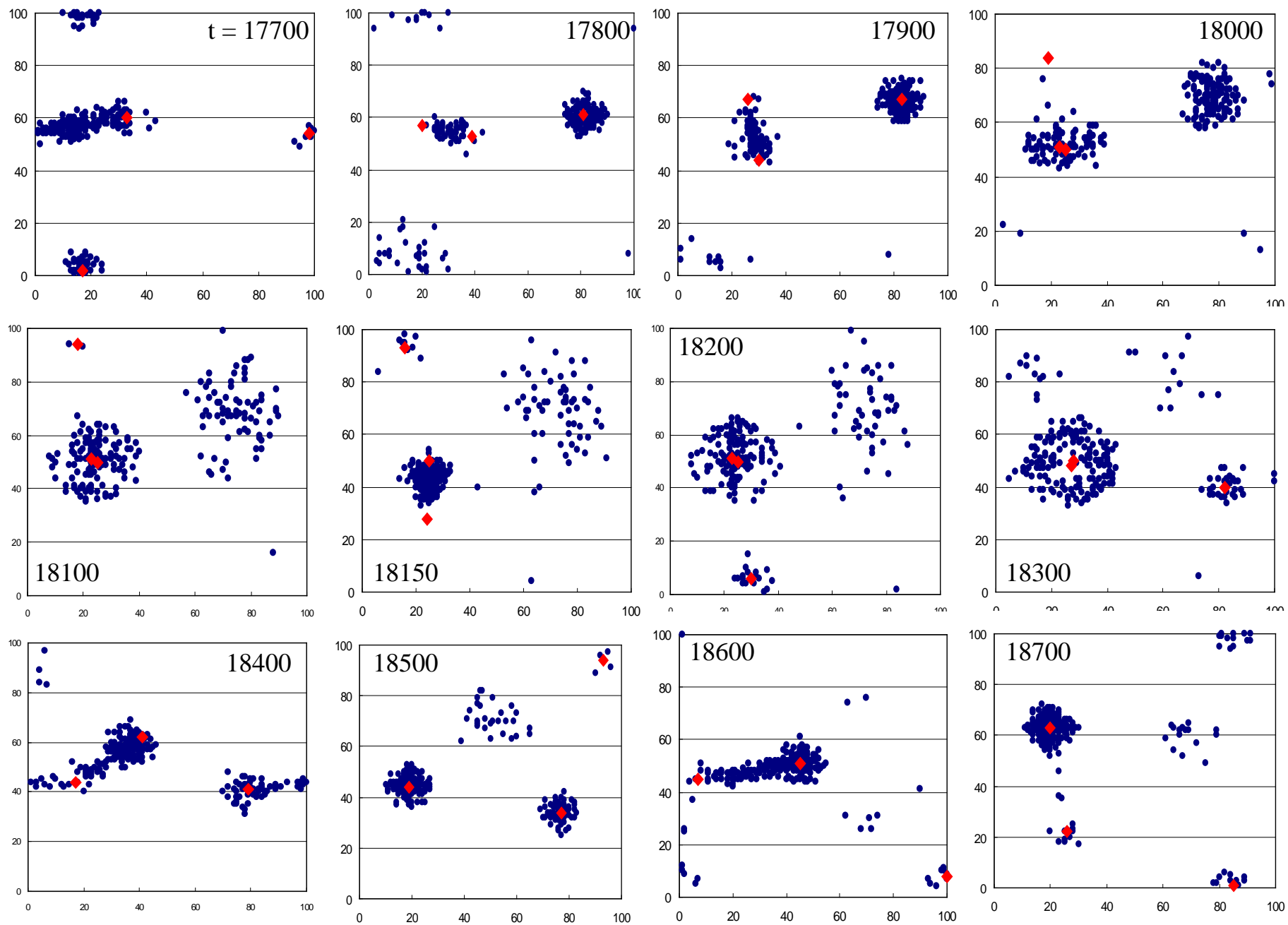


图 4

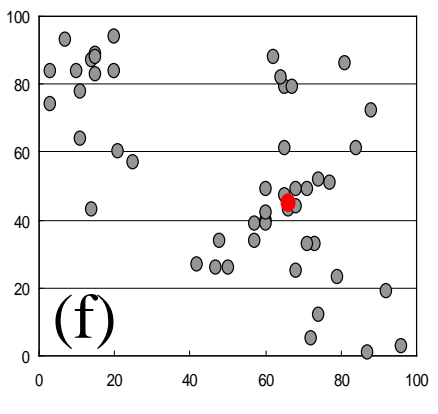
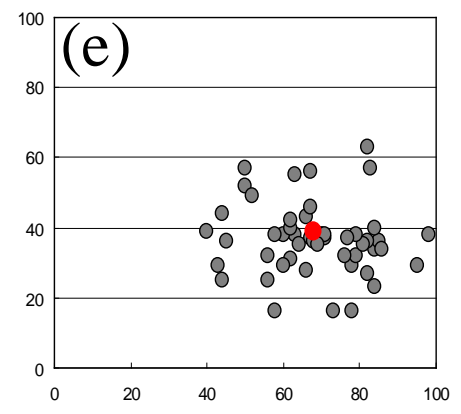
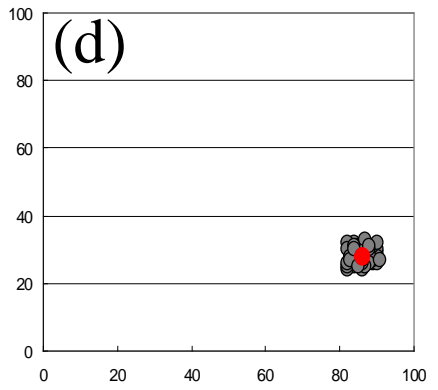
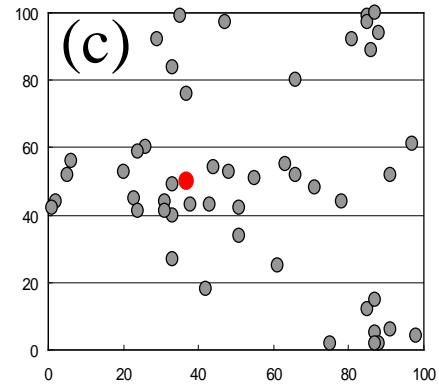
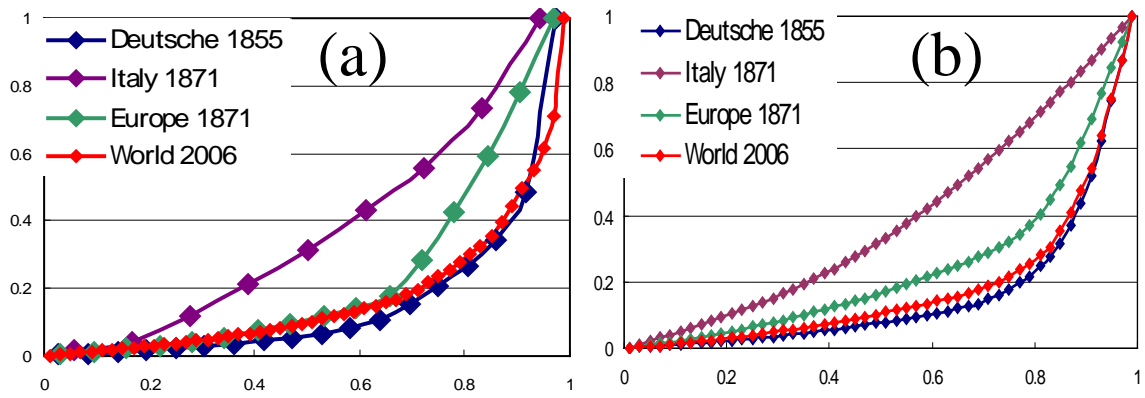


图 5

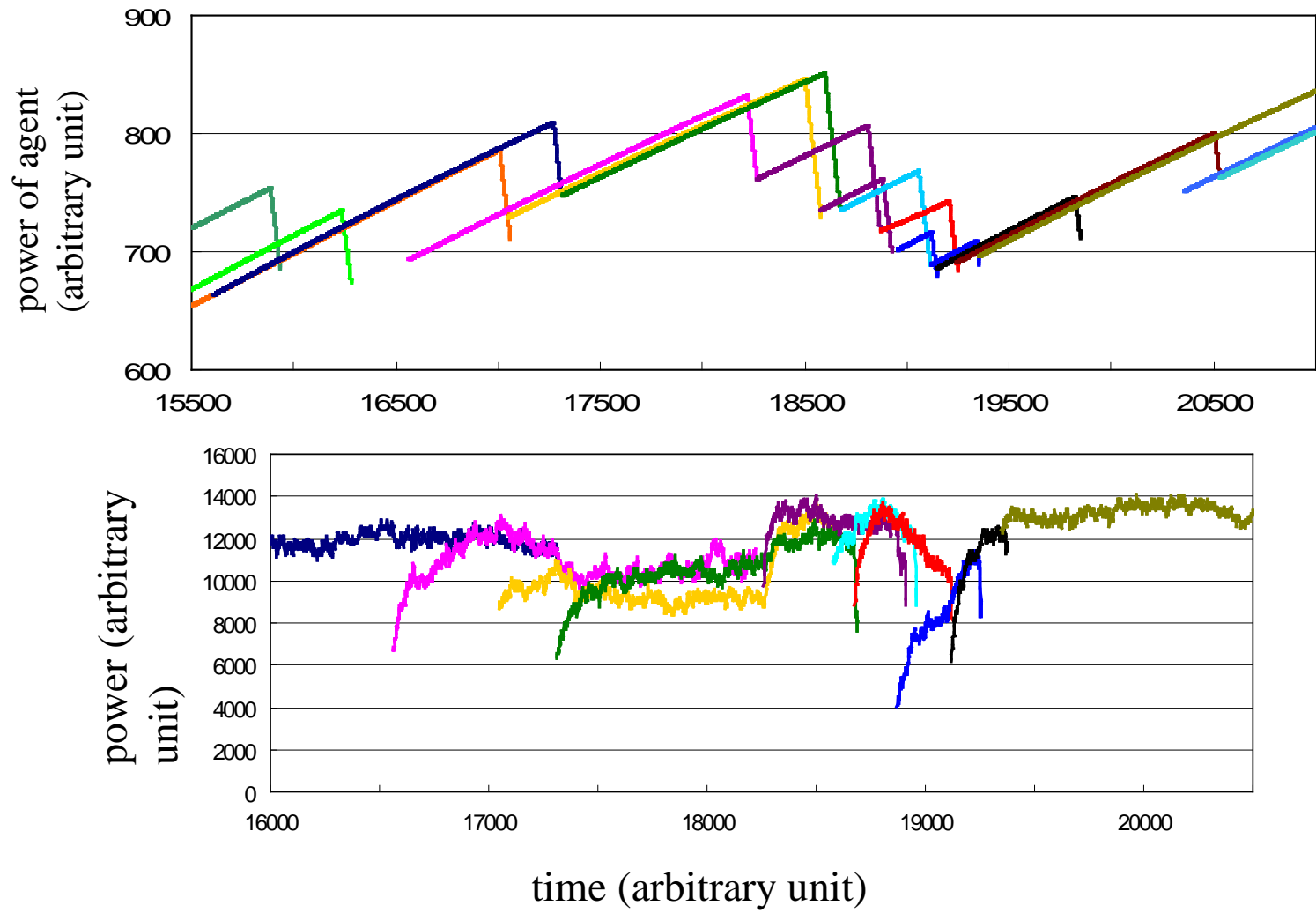


图 6

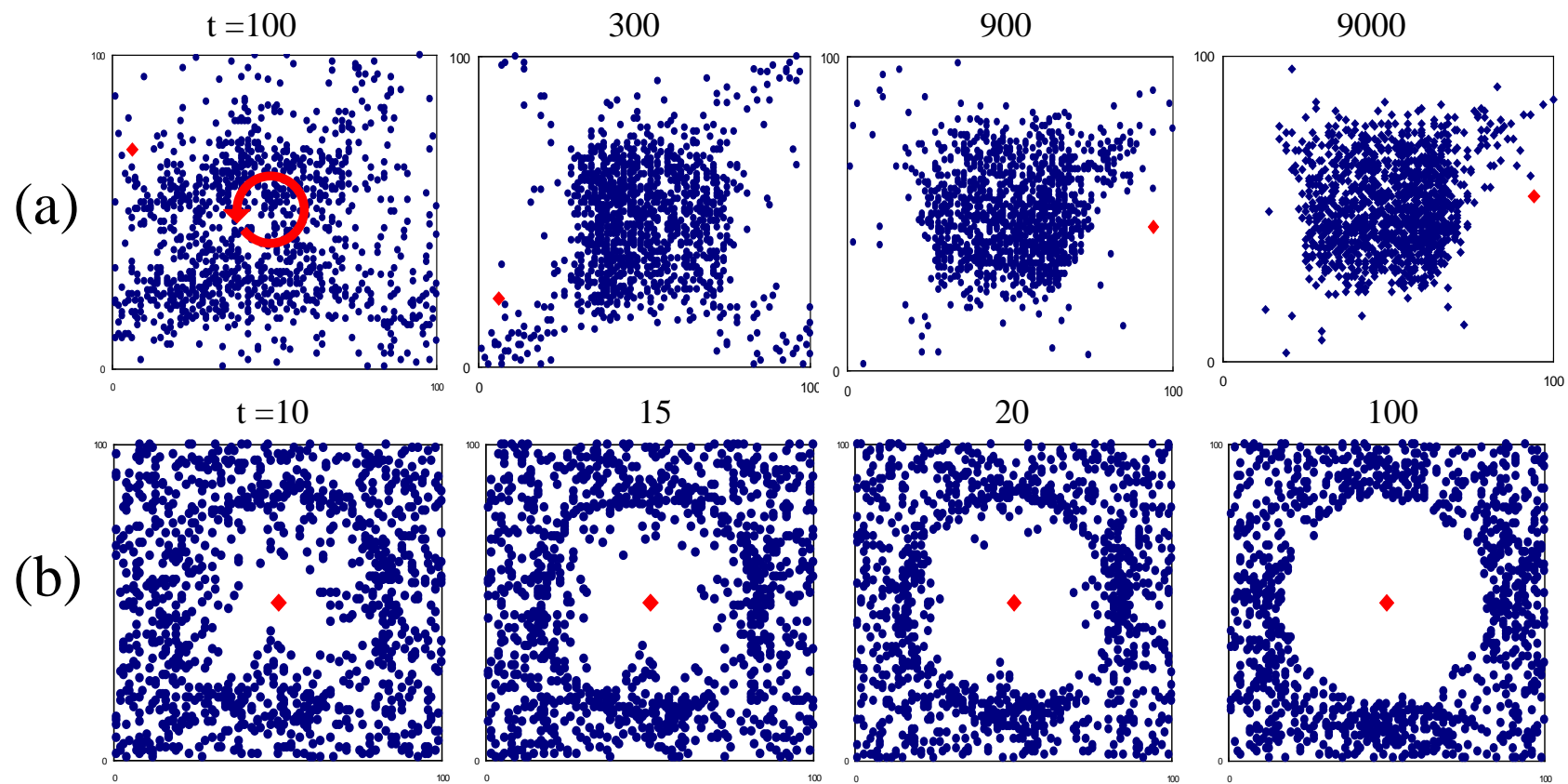


图 7