動物の行動にみられる記号とその起源

神戸大学理学部地球惑星科学科 郡司ベギオ幸夫

学習院大学計算機センター 水上悦雄

理化学研究所脳科学総合研究センター 北林伸英

This report discusses how one can argue the origin of a symbol in animal behaviors, with respect to experiments and models. The results suggest that the frame-problem resulting in the power-law positively plays a role in the origin of a symbol.

frame-problem / power law / self-reference / symbolization

1. はじめに

物理学では生成という問題をどのように扱ってきただろうか？例えば偏微分方程式の解は、パターン生成の説明とされてきた。これを解くには、初期・境界条件（前提・フレーム）を指定してやらなければならない。ところがフレームを指定するフレームまで考えていくと、フレームは無限退行する。これが工学でいうフレーム問題¹⁾。この問題に対し、初期・境界条件を指定してしまうことは、フレーム問題を無視することだ。結局、工学でも自然科学でもフレーム問題は忌まわしき存在とみなされている。

逆ではないか。フレーム問題のおかげで真の生成が可能となるのだ。数字0の起源を考えてみよう。0生成以前、「数える」という行為のみに意味があり、人々は1, 2, ..を使った。このとき「『数えない』を数えてはいけない」という禁止条項はなかった。ただ暗黙のうちに数えないことをせず、人々は1, 2, ..を使っていた。すなわち1, 2, ..はフレーム問題に曝されながら使われていた。だからこそ、「数えないを数える」という記号0が生成したのである。数字0の生成によって他の数字の意味さえ変わり、以後算術は劇的に変化した。生成という問題はフレーム問題と同一のコインの表裏である。

本稿ではフレーム問題を避けたり解決するのではなく、むしろそれ自体を積極的に用いて生成や起源の問題に迫っていく。環境に取り囲まれてシステムが存在する

という状況は、フレーム問題に曝されているという観点で理解され、さらに、ある論理的枠組みがその外部との干渉を許すという形で表される。ここに矛盾や矛盾を肯定的に使うという、ある種の絶対的不定さが導入されることになる²⁾。本稿はこういった形での生成・起源について、記号論という切り口³⁾と、動物における記号使用という例で述べていこう。

2. 記号を創発する動物

記号論で議論される記号を説明しよう。記号は、不可能性と必然性を両義的にもつ。一方で、記号“(”の意味の集合が、特定の集合であるか否か論理的に証明できない（例えば文や句を挟むためのものと定義しても、現実には(^ ^)のような記号が許される）。他方、そうであるにもかかわらず、記号“(”がある状況で使われる限り、“(”の指し示す集合が何であるか自明と信じられる。後者を我々は、社会的必然性と呼ぶことにする。すなわち記号は、論理的不可能性と社会的必然性を両義的に備える。社会とは、物質科学の言葉で言うなら環境であり、記号は単に言葉としての記号の問題ではない⁴⁾。また、自然科学で必然性というとき、それは他の可能性を否定する論理的制約を意味するが、社会的必然性はそれと相容れない概念である。ゆえに記号過程は自然科学における起源・生成問題に対して、新しい視座を提供する。

記号の創発に関して、我々はいくつかの動物実験を以

The Origin of a Symbol in Animal Behaviors

Yukio-Pegio GUNJI*, Etsuo MIZUKAMI** and Nobuhide KITABAYASHI***

* Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

** Computer Center, Gakushuin University

***Laboratory for Dynamics of Emergent Intelligence, Brain Science Institute, RIKEN

下のように試みた。第一に、観測者の捉える論理的不可能事を特殊な実験状況として動物に与える。第二に、動物がこの状況を自らの生活の中で使うことを契機に、観測者にとって新しい行動が観測されるか否かを調べる。もし第二の要件が満足されたなら、動物は観測者が見出した限りの論理的不可能性に接続しながら、観測可能な形で創発的行動を、我々に示したことになる^{5), 6)}。観測者は、ここに記号の出現を発見できる。矛盾を動物に突きつけることによって、動物は論理的フレーム外部との干渉が可能であること、すなわちフレーム問題に曝されているということが、実験環境として構成される。

著者の1人水上悦雄は、この手続きに従い、巧妙な学習実験を行った⁷⁾。まず水上はキンギョ（*Carrasius auratus*）に、水槽に半分沈められ水面下に開口部のある筒を与えた。これによってキンギョに、開口部から中を覗いて餌の有無を確認する方法を学習させた。水上はこのキンギョを用い、以下の本実験をした。キンギョには学習実験のセッションごとに2つの筒が与えられる（図1）。一方の筒では、開口部から覗くと水面に餌が

見える。しかし、餌と水面の間はガラス板で仕切られ、見える餌は決して食べることができない。もう1つの筒では、開口部から覗くと餌が見えない。こちらの筒内部には実は隠し部屋があって、餌はそこに隠されている。2つの筒は、毎回ランダムに位置を変えてキンギョに提示される。餌の存在は餌の非存在を意味し、逆に非存在は存在を意味する。キンギョに提示されたのは、予備実験の課題に比すと矛盾した状況である。

キンギョは当初、開口部からの覗きを繰り返し、餌が見える筒に固執する。しかし、次第に見える餌に接近できないことを学習し、他方の筒を探索して隠し部屋の餌を発見するに至る。このときキンギョは両者をほぼ同時に学習する。餌の見える筒に入ってはガラス板上の餌を食べようとし、数秒後他方の筒に入って餌を捜し、これを繰り返す。このような行動を、何セッションにも渡って繰り返した後、突然「餌がみえる = 非存在」、「みえない = 存在」なる記号を学習するのである。すなわちあるセッションにおいて、たまたま最初に覗いた筒に餌が見えると、すぐさま他方へ入って餌が見つかるまで探索する。逆に最初に覗いた筒に餌が見えないと、そこから出ることはなく餌を発見するまで捜す。

水上は学習過程を解析するのに、キンギョの各セッションごとの探索時系列を離散時間で表し、その相互情報量を調べた。円筒の覗き方を8通りに分けたとき、その時系列の距離 d に関する相互情報量 $M(d)$ は $M(d) = \sum \sum P_{ij}(d) \log(P_{ij}(d)/P_i P_j)$ によって定義される。ここで P_i は時系列における覗き方 i の存在確率であり $P_{ij}(d)$ は d ステップ離れて覗き方 i および j が併存する存在確率である。このとき記号を習得する直前のセッションにおいてのみ、 d に関する相互情報量は傾き - 1 のべき則に従う結果が得られた（図2）。

図1 キンギョの実験に用いた筒
開口部から覗いて見える餌は食べられず（左）、見えない餌は食べられる（右）。

図2 「見える = 食べられない」、「見えない = 食べられる」、概念学習過程におけるキンギョの行動時系列相互情報量
左は実験開始直後。右は概念習得直前。

べき則が学習過程の全般にみられず、不在という記号獲得の直前でのみ認められる点に意義がある。相互情報量は、距離 d で異なる事象が生起するエントロピーと各々独立に生起するエントロピーの差であるから、 d ステップ分過去の履歴の効果が評価されることになる。これがべき則を示すとは、過去の影響がどこまでも落ちず、無視できないことを意味している。ところで、現実の学習過程をあるパターンのメモリーへの収容とみなし、想起過程をその探索と考えるなら、メモリーは有限でなければならない。従って学習過程を理解しようとする枠組みにおいて、過去の影響は有限でそれ以上は無視できるというフレームが想定される。フレーム問題はこのフレームの発散を意味するから、キンギョの概念獲得寸前にフレーム問題が観察可能な形（べき則）で現われたことになる。フレーム問題の肯定的意味として、キンギョは記号化を示したといえよう。

北林伸英は、アリにおける道具（記号）の獲得を実験的に提示してみせた⁸⁾。まずアリにおける餌運搬のフレームを考えてみる。それは運ぶべき対象の単位を完全に同定し、単位が小さい（ばらばら）なら単独で、単位が大きい（単一）なら多数で運ぶというものだ。このフレーム外部を実験的に与えるために、アリにはカーペット状のあまり好まれない餌の上に顆粒状の好まれる餌を載せて提示した。この特殊な餌では、全体を1個とみるか多数の集合体とみるか判然としない。だから単位が確定できないという意味でこの特殊な餌はフレーム外部にある。アリは最初、カーペット上の餌を個別に運搬するが、次第にカーペット周辺に取りつき顆粒状の餌を上に乗せたまま、カーペットを巣へと運ぶ。フレーム外部を内部に取り込んだ矛盾は、単位が小さい・大きいの共存（矛盾）を許したまま、それを繋ぐ運搬用の台座とし

図3 シートに餌を載せたまま運ぶ直前のアリ行動時系列に関するスペクトル解析
アリが餌にふれる度合いを数値化し、その時系列を評価している。横軸はその周波数、縦軸はパワー。1/fゆらぎが認められる。

て創発されたのだ。このとき、アリの行動時系列の道具使用開始直前、厳密な1/fノイズやジップ則が認められた（図3）。以上を踏まえ、次節では記号と記号を生み出すシステム、および矛盾や矛盾の表現の出現に関して議論しよう。

3. 記号を創発するシステム

フレーム問題に曝されている限り、任意の時刻における相互作用は、フレーム外部と干渉している。ここに相互作用 = 内部観測^{9), 10)} という視座が発見できる。記号の創発は、すべての相互作用に潜在するこの働きが、表に現われる瞬間に過ぎない。

ラッセルの逆理の証明過程でこの潜在性を考えよう。自分自身を含まないものの集合を第一種、含むものの集合を第二種とする。このとき第一種集合の全体 M は第一種か第二種かと問う。 M を第一種と仮定すると、第一種の定義より M は M を含まない。ところが M 自体の定義（第一種集合の全体）より、第一種である M は M に含まれ、 M は第二種と結論され矛盾する（ M を第二種と仮定しても同様）。こうして証明が終了し、逆理はここで現われる。しかし、この証明は本来、集合と要素を厳然と区別するフレームから出発し「自分自身を含む（含まない）」なる言明一点において両者の混同を仮定し、この一点から矛盾を導くことを指向している。この一点以外に別な仕掛けがあるなら、証明の手続きが誤っているとさえ思われる。別な仕掛けはある。それは不定なる全体を指示する名前・記号（ここでは M ）において不可避に現われる。全体に対する記号は、それ自体特定の個物であるから、記号が現われた途端、我々はこれ操作対象として扱得る。この、記号のもつ不定な全体性と個別性の両義性が、証明過程の途中でさえ本質的役割を果たし、「自分自身を含む集合」なる文における言葉「自分」に M を代入することさえでき、これを介して第一種から第二種への転換、すなわち矛盾が導かれるのだ。

記号 M のもつ問題は証明のごまかしでも特殊な仕掛けでもない。証明過程は、記号の操作において個別と一般の区別というフレームを採用しながら、このフレームを全体という記号によって無効にし混同する。区別とその無効化の連鎖は連鎖と進行し、その結果最終的帰結が導かれる¹¹⁾。

我々は、フレーム問題に曝された相互作用をいくつかのモデルとして構成してきた。マップを用いた力学系によって時間発展を考える場合、フレームとなるのはオペランドとオペレータの分離である。ここでは状態の集合 X とマップの集合 $\text{Hom}(X, X)$ が区別されてい

る。この区別を $X \simeq \text{Hom}(X, X)$ によって無効にしようとき、フレームの外に出ることになる。 $X \simeq \text{Hom}(X, X)$ を再度フレーム内に持ち込むと、それ自体矛盾を表す。我々はここで数字0の起源が矛盾の肯定的現われだったように、 $X \simeq \text{Hom}(X, X)$ を肯定的に扱う。すなわち、これを方程式と読み替えてこれを解き、解として得られる自己相似集合をマップとして使い、時間を進めるのである（フレーム内部に戻ることで状態とマップはまた区別されているから）。これを1ステップとし、繰り返すことによって時間発展を計算するのである。 X をツリー状データに対応する完備半順序集合とすると、方程式の解はツリーのすべての端を折り返したループで与えられる。これはもはやプログラムであり規則として使用できる。システムは、この規則を自らのデータに適用し、データを変換していくのだ。この系では厳密な $1/f$ ゆらぎが生成される¹²⁾。また離散時間で相互作用する系において、データを他個体の $t-1, t$ 時刻状態対（状態は $[0.0, 1.0]$ の実数）として集めるとき、方程式の解は $[0.0, 1.0]$ の直積空間上の自己相似集合として得られる。各個体は毎時方程式を解き、自己相似集合を時間遷移規則として自らに適用して時間発展する。このとき系全体の協調の出現と崩壊、クラスター化が継続的に現われる¹³⁾。我々はこれを魚の群れのモデルに適用し、群れの出現と崩壊、場合によっては縄張りさえ現われることを示した¹⁴⁾。相互作用は反発性と親和性とを両義的にもち、結果的に群れと縄張りのどちらを創るかは相互作用の結果決まってくるというわけだ。

以上の延長線上に、我々は記号を生成するシステムを構築した^{15) 16)}。ここでは論理的フレームとして形式言語における文法と言語間のアジャンクションを採用した。文法は有向辺グラフ、言語はグラフから導かれる自由カテゴリーとして表される（いま簡単にグラフの節は集合、辺は関数と考える）。文法から言語への変換を F 、逆の変換を U とするとき文法 G と言語 L の間には、 $FG \rightarrow L$ と $G \rightarrow UL$ 間の一対一対応が存在する。このとき F と G はアジャンクションであると言い、これによって文法・言語間の論理的整合性（フレーム）が整備されるわけだ。我々はこの区別を無効にして有向辺グラフを時間的に変換していく。従って、区別を無効にするという操作は、グラフから出発した区別の与え方、すなわちグラフから自由カテゴリーを得る変換操作 F の意味を失わせるという形式で定義される。変換操作 F は、グラフの辺の合成（接続）と恒等射（入力と同じ値を出力するという関数でグラフのすべての節に想定される）を付け加える操作である。だから、 F の無効操作は、合成操作の意味を失わせ、恒等射の意味を失わせる操

図4 有向辺グラフ（文法）から自由カテゴリー（言語）への変換（ F ）を無効化して、フレーム問題に曝される状況を構成するモデルの、グラフ時間遷移。

作である。

恒等射の無効化のみ説明する（図4）。まず、ある節の恒等射の役割を、それに接続する関数と合成したとき意味のない関数と考える。例えば $f: A \rightarrow B$ が $A \in \{0, 1, 2\}$ で $B \in \{0, 1\}$ 、 $f(x) = 0$ ($x = A$) なら、 B の恒等射 $1_B: B \rightarrow B$ は f をした後に 1_B をしても f のみ計算することと結果は同じである。このように「意味のない計算」を隣接する辺に関してのみ限定するなら、 $\text{Lid}_B: B \rightarrow B$ 、 $\text{Lid}_B(x) = 0$ ($x = B$) によって 1_B を置き換えることも可能である。しかし、 Lid_B は恒等射の本来の定義を満たさない。我々はこういった 1_B から Lid_B への置き換えを、恒等射の無効化と定義した。グラフ $G(t)$ に F を適用して $FG(t)$ とし、その後 F を無効化してその結果を $G(t+1)$ とする。これをグラフの時間遷移と定義した。

恒等射の無効化はそれ自体冗長な経路を創り出すだけだが、合成の無効化との組み合わせで、冗長な経路のみが文法構造に残り、結果的に文法を変えてしまうことが起こり得る。こうして文法（グラフ）はその構造と機能を変え続ける。この繰り返しによって、システムはグラフの一部に、次のような記号さえ創り出してしまふ。すなわち、ある経路 $g \dots fs$ の出発点となり得る任意の節 X に対し $g \dots fp$ の出発点となる特殊な節 Z が存在し、 X から経路 $g \dots fp$ へ至る経路 u を決めようとするとき $g \dots fpu = g \dots fs$ なる u はただ1つに決まる。 Z はカテゴリー論で極限と呼ばれるもので、これが記号と考えられる。なぜなら Z へ至るさまざまな経路（集合概念）をある意味で指し示す単独の経路こそが u であり、 u とともにある Z は生成されながらいつ消えるともしれぬ崩壊に常に開かれているからだ。

我々のシステムでは例えば、ビット列集合の節から構成されるグラフにおいて、無限長ビット列集合上の関数が出現する。それは、有限ビット列の直積部分集合のある系列を縮小・繰り込みした極限であり、帰納法によって極限が得られるときのみ出現する。図5はそのような有限ビット列の直積部分集合パターン例である。極限に至らない場合、システムは各パターンを参照してビット列としての状態を変換し、かつさまざまなパ

図5 極限として関数の集合を生成する直積部分集合の例
これらはある縮小画像で結ばれた順序を構成している。

ターンを時間的に経巡ることになる。このときビット列を実数化し、ある閾値以下を0、以上を1として、1の連続する時間長頻度分布をみると傾き-1のべき分布が得られる。すなわち、記号が生成され始めるとき間欠の状態変化が始まり、その挙動はべき則に従う。記号が生成されてしまうとべき則は崩れる。プログラム（グラフ）内に生成された記号もまた、その可能な経路の無効化に曝され続け（それはフレーム問題に曝されることである）、崩壊に開かれ続けている。このようなモデルによって、キンギョやアリでみられた記号の創発とそれに伴うべき則を理解できるだろう。

5. むすび：創発し使われる記号

相互作用とは、論理的に不可能でありながら社会的に必然的な選択である。論理的不可能性が選択担体と無関係でないからこそ、選択は創発に開かれている。選択の必然性は論理的に無根拠である。だから、ある選択が実現された途端に無根拠性があらわとなり、それが次なる選択を駆動していく。選択過程の継起に現われ、選択が担う運動を構造化した形態として、記号は生成される。

記号は創発されることが可能であるからこそ、新たな機能に常に開かれている。生物はあらゆる意味においてこういった記号を使って活動する。このような描像が与えられるとき、例えば探索過程は目印をみずから創りながら進行する活動と理解される。目印とは記号である。右に曲がれば学校へ辿り着く目印としてのポストは、潜在的に他の地理（左は煙草屋など）をも包摂し全体性を指示しながら、他の使われ方に開かれている。このような目印が次々と現われ他の目印との関係

を変えていくとき、目印レベルの関係が変化することで、目印の担う地理も変化していく。

このような目印を使った探索行動は、前節の記号生成モデルで構成できるであろう。全体に関する詳細な地図を作成することはない。創られ使われる目印間の関係（最も粗い）と、各目印の担う局所的地理（最も細かい）のみが明示的データとして取り込まれ改変される。このとき目印の局所的地理を極限とするような、目印間の関係から出発した縮小画像が構成され、これを用いてさまざまなレベルの地理が補完的に得られる。つまり、各目印ごとに極限的地図へ至る経路が図5にみられるパターン群のように構成される。探索者は、できる限り最も細かいパターンを用いて探索する。しかし、目印近傍以外は類推で得られたものだから、未知の障害物に遭遇し得る。このとき探索者はより粗い地図へと地図を変更する。地図の精度を変えながら探索し、別の目印に入ったら、その目印起源の地図経路へ入る。これを繰り返しながらも、目印が不用になって消されたり新たに生成されたりすることで、地図経路の全体がその都度変化する（しかし探索者は使う地図をその都度作るだけである。また、地理に関する意味論を概念束としてその都度構成し利用することもできる¹⁷⁾）。

記号（目印）を創り、使っていく探索は、正しい道を発見できたから目的地へ到達するのではない。道に再現性はない場合でさえ、目的地へは辿り着けるだろう。目印が1つでも変わると、道の把握は大きく変化することも予想される。探索において環境と対話する（選択する）探索者は、記号によって目的地へ辿り着く。目的地という記号さえ創ることが可能であろう。これは探索に限定された問題ではない。対話を科学に持ち込むとき、我々は再現性のある程度犠牲にする代わりに、結果としての合目的性・自律性を解読する方法を得ることとなる。

文 献

- 1) McCarthy, J. and Hayes, P. J. (1969) Machine Intelligence (Meltzer, B. and Michie, D. eds.), 4, pp. 463-502, Edinburgh Univ. Press, Edinburgh.
- 2) 郡司ベギオ-幸夫, (2001) 原生計算または存在論的観測, 東京大学出版会 (印刷中)。
- 3) Hoffmeyer, J. (1996) Signs of Meaning in the Universe, Indiana Univ. Press, Indiana. (邦訳 = 1999) 生命記号論 (松野孝一郎・高原美規訳), 青土社。
- 4) Kripke, S. (1982) Wittgenstein on Rules and Private Language, Basil Blackwell, New York.
- 5) Gunji, Y.-P. (1995) *BioSystems* **35**, 33-62.
- 6) Gunji, Y.-P. (1996) *Rev. Biologia* **89**, 69-86.
- 7) Mizukami, E., Gunji, Y.-P. and Migita, M. (1999) *BioSystems*

- 54, 91-104.
- 8) Kitabayashi, N. and Gunji, Y-P. (1999) *BioSystems* **50**, 143-156.
- 9) Matusno, K. (1989) *Protobiology: Physical Basis of Biology*, CRC press, Boca Raton, MI.
- 10) 郡司ベギオ-幸夫, オットーレスラー, 松野孝一郎 (1997) 複雑系の科学と現代思想: 内部観測, 青土社.
- 11) Gunji, Y-P. and Ito, G. (1999) *Physica* **D126**, 261-274.
- 12) Gunji, Y-P. and Toyoda, S. (1997) *Physica* **D101**, 27-54.
- 13) Gunji, Y-P., Ito, K. and Kusunoki, Y. (1997) *Physica* **D110**, 289-312.
- 14) Gunji, Y-P., Kusunoki, Y., Kitabayashi, N., Mochizuki, T., Ishikawa, M. and Watanabe, T. (1999) *BioSystems* **50**, 27-47.
- 15) Gunji, Y-P., Higashi, H. and Nomura, S. (2000) *Computing Anticipatory Systems; AIP Conference Proceedings* (D. M. Dubois, ed.) pp. 479-490, Springer-Verlag.
- 16) Gunji, Y-P. and Higashi, H. (2001) *Physica* **D156**, 283-313.
- 17) Gunji, Y.-P., Kusunoki, Y. and Aono, M. (2002) *Chaos, Solitons and Fractals* **13**, 261-284.

郡司ベギオ幸夫

郡司ベギオ幸夫 (ぐんじ ゆきお)
 神戸大学理学部および同大学院自然科学研究科情報メディア科学専攻 教授
 東北大学大学院博士課程修了 (1987年) 後神戸大学助手, 助教授を経て現職. 最近では局所的意味論と現象論的計算をキーワードに現象としての計算概念の拡張と, その枠組みの中で意識を考える研究および粘菌を用いた論理計算機の開発中.
 連絡先: 〒657-8501 神戸市灘区六甲台 1-1
 E-mail: yg@scipx.planet.kobe-u.ac.jp
 水上悦雄 (みずかみ えつお)
 学習院大学計算機センター 助手
 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了後, 現職. 現在はチャットにおける会話の間の意味を研究中.
 北林伸英 (きたばやし のぶひで)
 理化学研究所脳科学総合研究センター 研究員
 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程修了後, 現職. 現在は頓知に気づくという創発と脳の関係を研究中.
 E-mail: wassi@brain.riken.go.jp