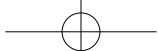




HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	動物にとって理ことわりとは何かー経済的意思決定をめぐる
Author(s)	松島, 俊也
Relation	動物は何を考えているのか? : 学習と記憶の比較生物学 (動物の多様な生き方 / 日本比較生理生化学会編 ; 4) ISBN:9784320056909
Issue Date	2009-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/59790
Type	book part
File Information	Matsushima_2009_Kyouritu.pdf





■ ■ ■ 第1章 学習行動の比較生物学 ■ ■ ■

6

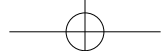
動物にとって^{ことわり}理とは何か —— 経済的意思決定をめぐる

松島俊也

動物の心を自由に、そして厳格に問うためには、新しいサイエンスが必要である。そのためには、行動の合理性とその進化を問いたださなくてはならない。従来の心理学・動物行動学・生態学・認知科学・脳科学の枠を越えて、行動そのものを深く理解しなくてはならない。われわれはヒヨコを被験者に選び、遅延報酬によって強化された色弁別オペラント課題における行動を解析した。予期報酬に基づく二者択一テストの成績に基づいて、ヒヨコの選択の神経機構（至近要因）と行動生態（究極要因）を議論した。長期的な利益を最大化する貪欲な行為者は、個々の餌の利潤率に基づいて選択すべきだと、最適採餌理論は予測している。現実のヒヨコは正しく利潤率を予期推定するものの、ヒヨコの合理性には明確な限界と逸脱があった。価値関数には楽観的な初期値を採用しているし、行為は対応則に基づいているため、収益は明らかに棄損しているのだ。ヒヨコは最適採餌者ではありえず、利益最大化から逸脱しているのだ。ここでは最適化を原則として、そこから動物をさまざまに逸脱させる要因について考察する。

はじめに

脳は心の器官（organ of mind）であり、行動の機関（engine of behavior）である。脳は世界を感じとり解釈し記憶にとどめて、今を生き抜くためにより



行動を生成する。ならば、すべての動物の脳と行動は、個体の利益（繁殖成功度）を最大にするように選択を受けてきたはずだ。進化的な時間のなかでは、脳も行動も、ある最適な1点に向けて収斂してきたはずだ。論理的な科学者である筆者はそうにうそぶく。しかしこの考え方は、動物との格闘者である筆者が見てきた現実とは真っ向から反している。動物たちの世界は、実に多様な脳と行動と知性にあふれているからだ。昆虫には昆虫の、トリにはトリの、サルにはサルの^{ことわり}合理性があり、知的世界があるようだ。動物にとって理とは何か、この問題を考えよう。

1 動物に心があるか？

1.1 迂回路課題から学ぶこと

私は牛肉が好きだ。家ではイヌを飼っているが、去年去勢手術を受けさせた。そして毎日、ヒヨコを使って研究をしている。このような人間にとって、「動物に心があるか」ということほど厄介な問いかけはない。問われて困る問いはない。動物の命のうえに生活を養っているのだから、できたらこの問題は避けたいのだ。私自身が動物だから、本当はこの問題を考えずに生きていきたいのだ。しかし避けることができないので、正面から向き合うことにした。

1つの逃げ道は、「人間は賢いが、動物は賢くない」ということだ。動物は過去の出来事を思い出すこともなければ、未来を見通す力もない愚かな存在だ。だから今の苦痛を避けていれば何をしてもよい。賢い人間は愚かな動物を支配してもよい。この議論の不快な臭気を別としても、それは正しいだろうか？ 賢さを計る共通の物差しがあるのだろうか？

古い教科書には「物差しはある」と書いてある。迂回路課題とよばれるものが、その一例だ（図1）。左右と前の三方を壁で仕切った小箱を用意する。正面は透明なガラス板で、前は見える。そのガラス越しに餌がある。（あるいは仲間がいる。）動物は餌（仲間）に近づきたいが、ガラス板に当たってばかりでらちがあかない。ゴールに届くためには餌（仲間）から離れなければならない。一度後ろに下がり、左右の壁を迂回しなくてはならない。迂回路課題を解くことができるならば、その動物は自分を取り囲む世界の鳥瞰図を心の中に

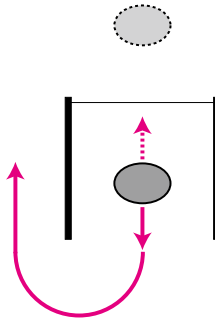
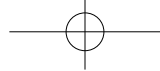


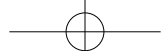
図1 迂回路課題

ガラス窓の先の餌に（仲間に），どうしたら近づけるか？

もっているはずだ．それに従う経路を計算できるはずだ．認知地図の上にみずからをおいて，次の手を打つ手を計算する高度の知性をもっているはずだ．この課題は多くの動物で試することができるから，知性の物差しとして適切だ……と信じられた．魚類や両生類はこの課題を解き得ず，鳥類や哺乳類は容易に解くだろうと信じられた．

イタリア，トリエステ大学の心理学者 Zucca と Vallortigara らは，カモメ（若鳥）とカナリアとウズラ（ともに成鳥）で迂回路課題を厳格に比較した¹⁾．カモメとウズラはすばらしくこの課題を解いて簡単に迂回したが，カナリアは惨憺たるものだった．ガラスにぶつかっては落ちて，飽かなかったという．彼らによると，系統樹上の位置は関係がないという．両生類のなかでもヒキガエルはよく解くし，トノサマガエルはカナリアと同じで衝突をくり返すという．

問題はその種がおかれている生態的条件だと，彼らは主張する．カナリアはそもそも迂回路課題が想定するような障害物の世界には生きていない．ゴールに向かってまっすぐに飛んで行けばよい，開けた世界に生きている．彼らには無用な課題なのだ．他方，ヒキガエルやウズラが迂回路課題を解くために，認知地図を用いていると考えるべき理由もない．つねに行動にノイズを乗せて，粗い制御をかけているだけでよい．何回か正面のガラス板にぶち当たっても，ある頻度で後ろに下がる行動が出る．迂回路課題の罠から逃げ出す機会は，ノイズの分だけ高い．精密な走性から適切に逸脱していることが，迂回を容易に



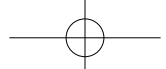
しているのだと、彼らは主張する。

1.2 メンタル・ローテーションとサッチャー錯視

実際、トリを使った心理学者の実験結果には、驚くべきものが多い。慶応義塾大学の心理学者、渡辺茂はハトにピカソとモネの絵を見分けるすべを教えた²⁾。10枚のピカソの絵と10枚のモネの絵を用意した。ハトにピカソの絵を見せて、目の前のスイッチをついばめば餌を与えた。モネの絵が出たときには餌は出ない。かなり苦勞されたようだが（渡辺先生が？ハトが？）、ハトはピカソの絵だけに反応するようになった。（半分のハトにはモネの絵だけに反応するよう、教え込む。）そのあとで、ハトに11番目のピカソの（あるいはモネの）絵を見せた。初めてみる絵であるが、ハトは正しく反応した。この学習をオペラント条件づけとよび、餌を強化子とよぶ。10枚の絵からハトは「ピカソ」というカテゴリーをつくりあげて、11枚目の絵が初めてみるものであっても、ピカソの画風を弁別したと解釈される。この成績は大学生を対象とした成績とほぼ同じだったという。慶応のハトは、慶応の学生と同じくらい賢い。

メンタル・ローテーションという実験では、ハトはヒトよりもよい成績をおさめた。2次元図形の弁別課題だが、テストではもとの絵を90°あるいは180°回転させて見せる。ハトは（ヒトは）その絵の網膜像を心の中でぐりと回転させて、同じかどうかを弁別しなくてはならない。この課題ではヒトはハトより劣るという。

ヒトでは「**サッチャー錯視**」とよばれる、おもしろい現象がある。かつて鉄の宰相とよばれたサッチャー女史の写真をもとに、その目もとと口もとを切り取って180°ひっくり返すと、お化けのような顔になる。そのお化けのようなモンタージュ写真を、さらに上下にひっくり返してみると、その印象は非常に弱いものになってしまう。さほど異常さを感じない。私たちヒトはたいてい、頭を上にして生きている。だから、頭を上にした顔ばかり見慣れている。その履歴（ヒトの進化としても、個人の発達のなかでも）に照らして、最もありうる姿をとらえるということだ。同様の偏りは数限りなく報告されている。私たちの視覚とその脳内機構についてはほかにすばらしい本³⁾があるから、詳細な議論は省いて結論を急ごう。



1.3 世界の蓋然性

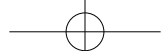
私たち動物は、その履歴のなかで最も**蓋然性**が高く、出会う頻度も高い対象を処理するよう、進化のなかで形づくられてきたということだ。いかに精緻であっても、感覚器官は世界のごく一部分しかとらえていない。網膜を見てみよう。世界は縦・横・高さをもつ3次元の構造を備えており、物にはいつも物陰がある。しかし、網膜はその2次元的な射影像しか受けとらない。数学の問題で x 、 y 、 z の3つの未知数があるのに方程式が2つしかなければ、そもそも解くことができないだろう。同じように、感覚器は脳に**不完全な情報**しか与えておらず、正しい解はいく通りもありうる。その世界で私たちは生き延びていかねばならなかった。

トラの尾らしきものが、一瞬、木の幹の向こうを通り過ぎた。完全な解がなければ(トラの全身像が見えなければ)私は逃げないよ、というのは勝手だが、そんな奴は真っ先にトラに食われ、淘汰されてしまうことだろう。サッチャー女史であれわが家内であれ、怒っている顔に無関心な者は社会的知性を疑ってよい。物理的世界に対しても社会的世界に対しても、知性は淘汰圧のもとにあり、いち早く問題を解くものが有利だ。

不完全な情報に基づいて問題を解くためには、前提をおく必要がある。ありそうにもない解は、はじめから排除してしまうのだ。たいていの場合太陽は頭の上にあるから、下から光を浴びる状況を考えることはあまり意味がないだろう。たいていの場合ヒトは逆立ちで歩いていないから、正立した顔から表情をいち早く読みとることに、脳は専念すべきだろう。しかし、3次元の世界を飛び回るハトにとって、眼に映る世界の上下は速やかに変わる。反転した世界を読み解く必要がある。蓋然性の高い状況そのものは、種ごとに大きく異なっていると考えて、間違いではないだろうと考えられる。

1.4 合理性の進化

「賢さ」を動物の個々の生態に還元してしまうと、実際、多くの問題は「適応」の妥当性を問うことに単純化できる。「ある行動がある。これこれの局面で、その個体の生存に役立ち、その繁殖の可能性を高める」と記述できればよい。



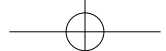
それは実にすばらしい科学だが、ちょっとおかしい。2つの点でつまづきを覚える。

1つは、**生理的拘束**である。チョウの飛翔は驚くべくエネルギー効率の高いシステムで、大陸や大洋を渡る力を備えているが、機関銃で重武装することは不可能である⁴⁾。動物が取りうる戦略のパラメータ空間は思った以上に狭く有界であって、多くの生理的拘束がかかっている。進化は万能ではないのだ。行動と知性の進化にあっても同じかも知れない。私たちの脳は、私たちがまだよく理解していない生理的拘束を受けていて、特定の問題を解くことにしか向かない装置であるにすぎぬかもしれない。ならば、知性の適応を問うことは、恐ろしく場違いだ。

もう1つは**並行進化**、あるいは**進化的収束**である。同じコインの裏表の問題になるが、同じ哺乳類であっても、オーストラリアの有袋類とユーラシアの真獣類とは並行進化を遂げた。同じ生態学的問題でも、その解き方は一意ではないのだ。結果から緩やかに帰納することはできても、がっちりと演繹的な議論を展開することはどうもむずかしい。

ここはどうやら、問題を厳しく単純化してかからねばならないようだ。ピカソを見分けるハトを見るのは実に楽しいのだが、この現象を進化的まな板に乗せても、板前はさばいて作りうる料理の、あまりの多種多様さに音をあげてしまう。ハトの美学を説明する適応的意義を考えていくとたくさんの仮説に立ち至るが、そのどれもが排他的ではなく、私たちは豊かな学問の花畑に遊ぶことはできても、光明の筋を見いだすことは容易ではない。

これからは美学を離れて、「食うこと」に話題を絞るが、ご容赦いただきたい。単純に、食うことは定量的に測れるし動物の適応に直結するから、議論の「まぎれ」や「ずれ」が少ないのだ。具体的な議論をすることができるのだ。しばし動物の行動経済学的话题を紹介して、動物にとって合理的であるとはどんなことか、考えてみよう。そのうえで改めて「心の進化」を考えることにしよう。



2 ヒヨコのピコ経済学

2.1 最適採餌理論と利潤率原則

1976年、生態学者 Charnov は1編の論文を発表した⁵⁾。これはのちに**最適採餌理論**として発展する核となった。生態学のなかでも最も強い影響力を及ぼした論文の1つである。現実の動物の採餌行動からみれば随分と単純化した状況を仮定していたし、予測のほとんどは修正なくして現実とのすり合わせが適わなかった。にもかかわらず、その明快さと力強さは多くの生態学者をとらえ、10年を経ずに豊かな成果をあげた^{6, 7)}。理論の骨格についてはコラムを参照していただきたい。さらに詳細を知りたい方には、粕谷英一の教科書⁴⁾がすばらしい指南となる。ここでは、最適餌メニューモデルに着目する。

Charnov は、さらに17年先立つホーリングの円盤方程式⁸⁾に基づいて、採餌決定の本質を簡潔な数式で表現した。世界には餌が一様に分布している。採餌者はその世界をランダムに歩きながら餌をとっている。あるとき偶然に、ある餌に出会う。それをとって食うべきか？ それともその餌を「猫またぎ」して探索を続けるべきか、これが問題である(図2)。

出会う餌すべてを無条件に食う、動物はそうに行動するだろうと思うかもしれない。しかし Charnov は、それではいけないという。最適な採餌を実現できないという。1つの餌から得られるエネルギー利得を e としよう。その餌を食いつくすまでに投資しなくてはならない時間(処理時間)を h としよう。 e の大きな餌はよい餌だ。 h の短い餌もよい餌だ。だが世の中、よい餌ばかりではない。 e は大きいが h の長い餌もあるだろう。ブツクリと身の重い牡蠣が、

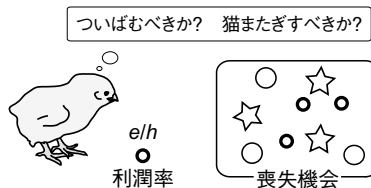
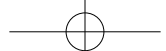


図2 利潤率原則

ついばむべきか？ 猫またぎすべきか？ それが問題だ。



column

チャルノフの最適採餌理論

Charnov の思考をその原著⁵⁾に沿って追ってみることにしよう。多少の数学的記述が、理解を簡明に、かつ豊かにする。これはよい理論が備えるべき指針であろう。

コラム

合理的で全知の採餌者を 1 人、採餌空間におく。そこでは n 種類の異なるタイプの餌が分布しており、採餌者はいつどの餌に出会うか、知ることができない。ただすべてのタイプの餌について、その餌 (タイプ i) の 1 粒から得られるエネルギー利得 (e_i)、消費しつくすまでに必要な時間的投資 (h_i)、遭遇頻度 (λ_i) を知っている。その知識は完全で、想起するにも決断するにもいっさいの時間的コストがない、と仮定する。これら餌のパラメータは一意のスカラー量である。確率分布として与えられる必要はない。以上が仮定である。

ある餌に遭遇したとき、それをとるべきだろうか、それとも猫またぎをしてよりよい餌を探すべきだろうか。これが問題である。この決定を確率 p_i で与えて、採餌者の決定変数としよう。採餌者に許されることは、この確率を決めることだけである。この確率を適切に定めて、長期的な利益率を最大にしたい。

餌の探査に費やす総時間を T_s とすると、長期平均利益率 (R) は

$$R = \frac{\text{総利得}}{\text{探索時間} + \text{処理時間}} = \frac{T_s \cdot \sum_{i=1}^n p_i \lambda_i e_i}{T_s + T_s \cdot \sum_{i=1}^n p_i \lambda_i h_i} \quad (1)$$

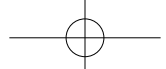
で与えられる。それぞれの餌 i に対して R を p_i で微分すると、

$$\frac{\partial R}{\partial p_i} = \frac{\lambda_i (e_i c_i - h_i k_i)}{(c_i + \lambda_i e_i h_i)^2} \quad \text{ただし} \quad k_i = \sum_{j \neq i} p_j \lambda_j e_j, \quad c_i = 1 + \sum_{j \neq i} p_j \lambda_j h_j \quad (2)$$

となる。この微分が正ならば $p = 1$ が、負ならば $p = 0$ が、それぞれ R を最大にすることがわかるだろう。つまり、採餌者には「とるか」「とらぬか」の二者択一しか許されないのだ。(2) 式の右辺に着目すると、偏微分値を負にする条件 ($p = 0$ が利益率を最大化する条件、猫またぎ条件) は、

$$\frac{e_i}{h_i} < \frac{\sum_{j \neq i} p_j \lambda_j e_j}{1 + \sum_{j \neq i} p_j \lambda_j h_j} \quad (3)$$

となる。この (3) 式の左辺は「目の前の餌の利潤率」である。他方、右辺は (1) 式から i 項を除いたもの、すなわち「目の前の餌をとらないと決めた採餌者が期待する、平均利益率」である。これは喪失機会そのものにほかならない。



固く厚い殻に覆われていることを思い出してほしい。旨いが食うのはたいへんだ。他方、 h が短くとも e の小さな餌もあるだろう。小さな粟や稗の実が1粒落ちていところを想像してほしい。問題は両者の比なのだ。最適な採餌者はこの比、

$$e/h = \text{利潤率}$$

に基づいて餌を値踏みし、高いものからとるようにまれているべきだ、と彼は考えた。問題は**利潤率**の低い餌をどの水準まで許容するかであるが、これは状況しだいだ。世界が豊かなら、利潤率の高い餌だけをとるよう水準を定めればよい。世界が貧しければ、利潤率の低い餌でもとるよう努めなければならぬ。目の前の餌の価値は、それをとらないと決めたとき、かわりに得るはずの利益**(喪失機会)**の大小によって決まるのだ。

これが本当なら、淘汰圧は利潤率に基づいて正しく採餌する個体に対して有利にはたらくだろう。動物は目の前の餌の利潤率を正しく値踏みする能力においても、強い淘汰圧を受けてきたと期待できる。同時に、利潤率の予期推定から行為選択に至る過程は、採餌空間の全体的な評価（豊かか貧しいか）に依存して柔軟に変わるべきだ。ここに「動物にとって合理的な判断とは何か」を議論する正しい道筋があると、私は感じた。ヒヨコの**ピコ経済学**について、筆者らが行った実験的な研究の結果を紹介したい。ヒヨコだからピコ経済学とよぶのではない。マクロ経済学でもミクロ経済学でもない、1人の行為者と世界の関係だけを問題にする、最小規模の経済学を指している言葉である⁹⁾。

2.2 ヒヨコの選択

孵化後数日のヒヨコは、目立つものを見ると見境なくついばむ。新しいものを好むネオフィリア（neophilia）として生まれついている。足もとの小石でも粟粒でも、また自分の糞であっても、ついばんでやまない。数日のうちには、小石や糞はついばんでも益のないものであることを学び、粟や胡麻の粒は餌として積極的についばむようになる。これが彼らの最初の学習経験となる。これを利用した。

手芸品の店から色とりどりのビーズを買ってきて、細いプラスチック棒の

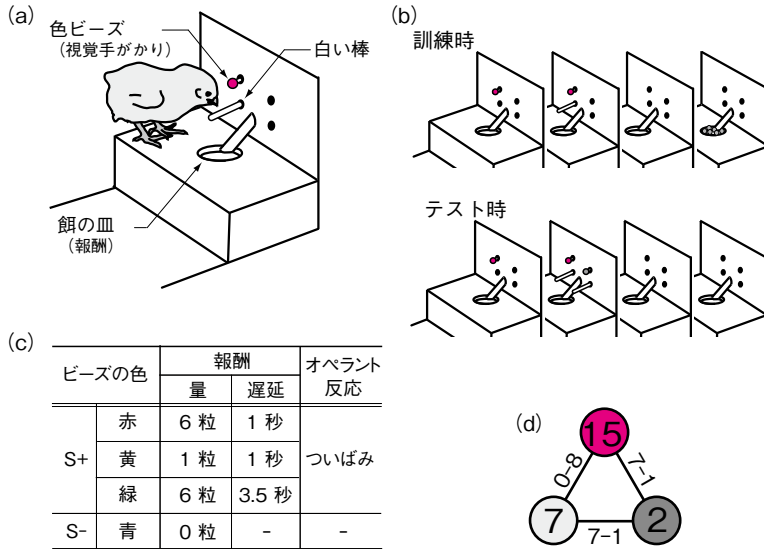
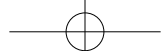
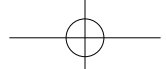


図3 ヒヨコを選択

(a) 実験装置：ヒヨコは色ビーズを見て白い棒をついで、ついでんだ側の色に応じた報酬を餌の皿から得ることができる。(b) 実験手順：訓練時、色ビーズが提示され、ついで白い棒が出てくる。棒を正しくついでば、待ち時間のあとに餌が与えられる。(c) ビーズの色(赤・黄・緑：S+)に応じて、餌の量と遅延(待ち時間)が決まっている。青の場合には餌は与えられない(S-)。(d) 結果の一例。それぞれの組合せで8回試した。赤・黄の二者択一では8-0で赤を選んだ。赤・緑では7-1。黄・緑では7-1となった。それぞれの丸の中の数字は、それぞれのスコアを足した値である。赤>黄>緑の順番で、好まれていることがわかる。

先につけ、ヒヨコに突き出した。ヒヨコはビーズめがけてツンツンとついでんだ。そのまま試行をくり返していけばついでみ回数は徐々に低下して、きれいな馴化曲線(habituation curve)を引くことができた¹⁰⁾。馴化したあとで色の違うビーズを見せると、再び活発についでんだ。ついでみ行動そのものが抑制されたのではない。しっかりと色を弁別しているのだ。1回のついでみの直後に1滴の水を、または1粒の粟を与えた。これは非常に強い強化子となって、ヒヨコはビーズの色を覚えた。はて、何を覚えたのだろうか？そして、色ビーズからヒヨコは何を想起するのだろうか？この最初の小さな疑問が、その後10年以上もの間、筆者の研究方向を決めてしまった。

図3aのような装置を作った。ヒヨコに色ビーズを見せる。すぐあとに白い



棒が出てくるから、ヒヨコはこの棒をついばむ。上手についばむと、数秒の待ち時間（遅延）のあとに粟（報酬）が出てくる。ここでポイントは色によって遅延と報酬量が異なるということである。ビーズが赤ければ、6粒の粟を1秒待って得る。黄色なら1粒を1秒待って得る。緑色なら6粒与えられるが、ヒヨコは3.5秒待たねばならない。そして青色なら餌は出ない。このオペラント反応を、ヒヨコは速やかに学習する。1日に数十分ずつの経験を数日から1週間ほどくり返すことで、連合学習はほぼ完全なものとなる。もっとも、棒をついばむよう仕込むためには多少の時間を要する。青色では餌を出さないため、やがてヒヨコは青色を無視するようになった。

つづいてヒヨコをテストした。今度は図 3b のように、2つのビーズを同時に見せる。たとえば赤色と黄色である。ヒヨコはどちらを選ぶだろうか。8回くり返して、ヒヨコは8回とも赤色を選んだ。遅延が同じなら報酬の多いほうがよい。赤色と緑色ではどうか。ヒヨコは7回まで赤色を選んだ。量が同じなら遅延が短いほうがよい。確かにヒヨコは量と遅延に基づいて合理的な判断をしているようにみえる。

では黄色と緑色ではどうか？ ヒヨコはほとんど黄色を選んで、すぐにもらえる1粒の粟をとったのである。あと2.5秒待つことができさえすれば、6粒の餌が手に入ったはずだ。なんという気の短さ！……しかし待てよ？ 利潤率で考えると、これは不合理ではないか。

黄色 1粒 / 1秒

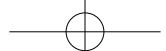
緑色 6粒 / 3.5秒

緑色のほうがよいではないか？ ヒヨコはチャルノフの最適採餌理論を知らないのか？

当然だ。トリは飛ぶために航空力学を学ぶ必要はない。よい商売人になるために、経済学の博士号が必要だとは思われぬ。ヒヨコ^{ことわり}の理をしっかりと理解するために、利潤率を厳格に計算してみることにした。

2.3 価値、時間的割引きと対応則

選択肢ひとつひとつの利潤率 R を、餌1粒をエネルギー単位として求めた。

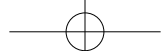


ヒヨコの視運動制御は優れているが、それでもはずすことがある。1粒の餌を獲得するために、ヒヨコはしばしば何度もついでをくり返す。この比を**労働コスト係数** κ とする。1回のついで動作にも時間的投資がかかるから、これを τ とする。実際、1羽ごとに κ と τ の値を実測できる。ついで動作1回に消費するエネルギーも、間接的に推定して式に放り込んだ。D秒の遅延で得られる n 粒の餌の利潤率 $R(n)$ は、客観的には次の双曲線関数で与えられる。 g は餌1粒の利得、 ϕ は1回のついで運動に必要なコストである。

$$\begin{aligned} R(n) &= \frac{\text{収益} - \text{労働コスト}}{\text{待ち時間} + \text{消費時間}} \\ &= \frac{gn - \phi\kappa n}{D + \tau\kappa n} \end{aligned} \quad (1)$$

この関数は、利潤率で測られる餌の価値が、報酬が遅れる（遅延が長くなる）に従って割り引かれる程度を表している。これは「遅延報酬の**時間的割引き**」という大きな未解決問題と同じである。生態学の最適採餌理論からは、これまでの議論をみていただければ明らかなように、双曲線関数はきわめて当然のことのように思える。他方、心理学者、特に人間の経済行動を実験心理学的な立場から検討してきた研究者（行動経済学者、実験経済学者）も、同様の双曲線割引きを主張してきた。この経緯は Ainslie⁹⁾ と Mazur¹¹⁾ に詳しいので、興味のある方はぜひ読んでみてほしい（**コラム「時間割引き」**参照）。

さて、価値評価が決まったとして、どのように行動に反映すべきだろうか？ 利潤率から選択比を決めるために、最も単純な仮定をおいた。2つの選択肢があるなら、両者の価値に応じて決定する、という仮定である。仮に一方に1000円、他方に500円、そのような二者択一を考えよう。どちらを選ぶべきか。「価値に応じて選ぶ」とは、1000円を2回選んだら、500円を1回の割合で選ぶということである。なんと不合理な！ 私なら（いかに愚かな私でも？）、いつでも何度でも1000円のほうを選ぶだろう。実際、チャルノフの最適採餌理論からは、「いつでもとるか、いつでも猫またぎするか」という、ゼロ・ワン則にのっとった選択しか出てこない。合理的で全知の採餌者は、そんな不合理性を示さないはずなのだ。しかしヒトでも動物でも、現実の多くの選択は最



column

コラム

時間割引き：双曲線関数か指数関数か

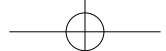
未来の報酬を双曲線関数ではなく、指数関数によって割り引くべきだとする主張も根強い。実際、強化学習の理論はこれを前提として価値関数を定義している¹²⁾。単位時間のあとに与えられる報酬に

割引き率 γ ($0 < \gamma < 1$) をかけて、現在における価値とおくのである。 $\gamma = 0.7$ ならば、明日飲む1杯のビールの価値は、今日の0.7杯と等しい。明後日のビール1杯は、今日の0.49杯と等しい。これは金融経済における金利の概念に対応するもので、人間の経済活動を考える場合にはごく自然な前提とされている。

無限に続く未来にわたって得られる報酬から、現在の状態の価値を計算することを考えると、指数関数のほうがずっとよい。今日1杯のビールが飲めるから、今日の私はその分だけ幸せである。明日も1杯のビールが飲めるが、これは今日の幸せにあまり寄与していない。私は死ぬまでに何千杯ものビールを飲むだろうが、それをすべて足し合わせた総和を求めても、その何千 l という値は「今日の私の幸せ」をよく表現していない。無限に続く未来については、その「遠さ」に応じて割り引いたうえで足し合わせる必要がある。

実際、無限の指数級数の和は有限の値に収束するのである。他方、双曲線級数の和は発散し、無限の時間のなかでは無限の値をとる。強化学習の枠組みで双曲線割引きを嫌ったのは、有限エピソードでも無限エピソードでも同一の形式で有限の値をもつ価値関数を定義したいという、理論家の勝手な理屈にすぎないように思える。指数関数を正当化する、もう1つの理由がある。なぜ遠くの報酬を割り引くべきなのか、という根本にかかわる理由である。未来に約束された報酬は、現実にはさまざまに邪魔が入ることで現実にならないかもしれない、手に入らないものになるかもしれない。そのリスクだけを考慮するならば、そしてリスクが単位時間あたりにつねに一定の確率で生じるものであるのならば、指数関数以外の選択肢はなくなってしまう。このような立派な理由があるにもかかわらず、動物もヒトもどうやら指数関数を採用してはいないようだ。

双曲線関数でも指数関数でもたいした違いはない、と思われるかもしれない。どちらの場合でも、未来が遠いほど得られる報酬の価値は低く見積もられる。しかし、両者にはもう1つ、著しい違いがある⁹⁾。双曲線型の割引きでは「目の前の小銭」が「遠くの大宝物」より高い価値を生じることが起こりやすい。他方、指数型の割引きではこのような逆転は生じにくい。現実はどうだろうか？ アイスクリームを目の前に出されたとき、あなたは耐えて拒否できるだろうか？ それとも、あなたの体重を増やし糖尿病に一步近づくことを理解しながら、あなたはアイスクリームをほおぼるだろうか？ 多



くの人間と動物の行動は逆転を伴うものだから、双曲線割引きのほうがよりよい説明を与える。

進化的に考えても、双曲線割引きは実に困った話なのだ。同種の繁殖集団の中に2つの行動形質（戦略）をもつものを考えよう。ある個体は双曲線割引きを取り、別の個体は指数割引きを採用したと仮定しよう。利潤率の異なるさまざまな餌のばらまかれた世界に、両者を解き放つのだ。容易に想像できるように、指数割引き個体のほうが、長期的な利益を高く積み上げていく。さらに、2つの個体の間に商取引をさせてみよう。出会ったときに所有する財を交換させるシミュレーションを組めばよい。指数割引き個体はどんどん双曲線割引き個体から財を吸い上げていくだろう。銀行員と商売を競ってはいけないのだ。資源が均一に分布する単純な世界では、指数割引きがつねに上手をとって、世代を重ねるごとに集団を独占していくはずである。私のような、そしてヒヨコのような近視眼的な行為者は、速やかに淘汰されてしまったはずなのだ。しかし、本文で議論されているように、双曲線割引きは動物の現実を实によく説明してくれる。指数と双曲線、この小さな問題をめぐって、経済学と心理学と生態学と進化生物学がまだ格闘を続けている。まだ結論は出ていない。

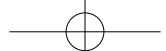
適選択から逸脱してしまう。価値に依存してしまう。これを**対応則**という¹¹⁾。

ヒヨコは、ヒトと同じく対応則に従う。というより、対応則を仮定すると、ヒヨコの行動は簡単に説明できる。前節でみた異様なほどの短気さ・辛抱のなさ・気短さが、実はきわめて合理的な行為であるとわかるのだ。先ほど示した利潤率の式(1)を、次の式(2)に代入してみよう。ここで左辺の C_1 と C_6 はそれぞれ1粒の餌、6粒の餌の選択肢を選びとった回数である。この式は選択比を与えているのだ。 $R(1)$ と $R(6)$ はそれぞれの選択肢の利潤率である。

$$\frac{C_6}{C_6 + C_1} = \frac{R(6)}{R(6) + R(1)} \quad (2)$$

この式は次の2つの予測を生み出す。

- (1) $D_1 < D_n$ の場合 (1粒の餌の遅延がきわめて短く、 $n = 6$ 粒の餌が大きく割り引かれている場合)、この式は次のようになる。



$$\begin{aligned}\text{選択比} &= \frac{n(D_1 + \tau\kappa)}{nD_1 + D_n + 2n\tau\kappa} \\ &= \frac{6(D_1 + \tau\kappa)}{6D_1 + D_6 + 12\tau\kappa} \quad (n=6 \text{ の場合})\end{aligned}\quad (3)$$

(2) $D_1 = D_n = D$ の場合 (遅延時間の違いによって2つの選択肢に差がつかない場合), この式は次のようになる.

$$\text{選択比} = 0.5 = \frac{(n-1)a}{2[(n+1)a + \kappa]} \quad (a = D/n\tau) \quad (4)$$

中学で習った数学を思い出してほしい. D_6 が大きく D_1 が小さいとき, 式 (3) の右辺は限りなく 0 に近づくだらう. つまり, 6 粒よりも 1 粒をより多く選ぶことになる. 量だけみればより小さな餌が選択される, このような選択の逆転が生じる条件は, けっして特殊なものではないことがわかる. ヒヨコのピコ経済学では, 図 4a のように 1~2 秒の D_6 によって逆転が起こるはずだと予測された. 実験的に求めた選択比は図 4b のようになった. 確かに 2 秒で逆転し, それより長い遅延時間がかかった場合, ヒヨコは 6 粒より 1 粒を選ぶようになった.

第二の予測, つまり式 (4) はどうだろうか? ここで a は定数だから κ が重要な因子となる. κ が大きくなればなるほど, 選択比は 0.5 に近づく. 1 粒と n 粒の利潤率は近づいていく. さらにきわめて大きな κ 値のもとでは両者には差がなくなって, ヒヨコは等しい頻度で 1 粒と n 粒を選ぶはずだ. $n=6$ においてグラフに描くと, 図 4c のようになる. 現実のヒヨコの選択は図 4d のようであった. 定性的には見事に一致した.

κ を実験的に操作するのは, そんなにむずかしいことではない. ヒヨコは粟粒のような小さな餌を, きわめて巧妙に効率よくつまみ上げていくことに長けた動物だ. それでも 100 発 100 中ではない. 餌をスポンジの上に置いたとき, κ 値は 1.21 となった. 5 粒の餌を約 6 回のついでみでとりきっている. 餌をプラスチック板の上に置くと, κ 値は 2 に近づく. 5 粒に対して 10 回近くついでまなくてはならない. 実際, ヒヨコはくちばしで餌をつまみ上げているのではないのだ. わずかに開けたくちばしを餌の上下に打ち当て, その衝撃によっ

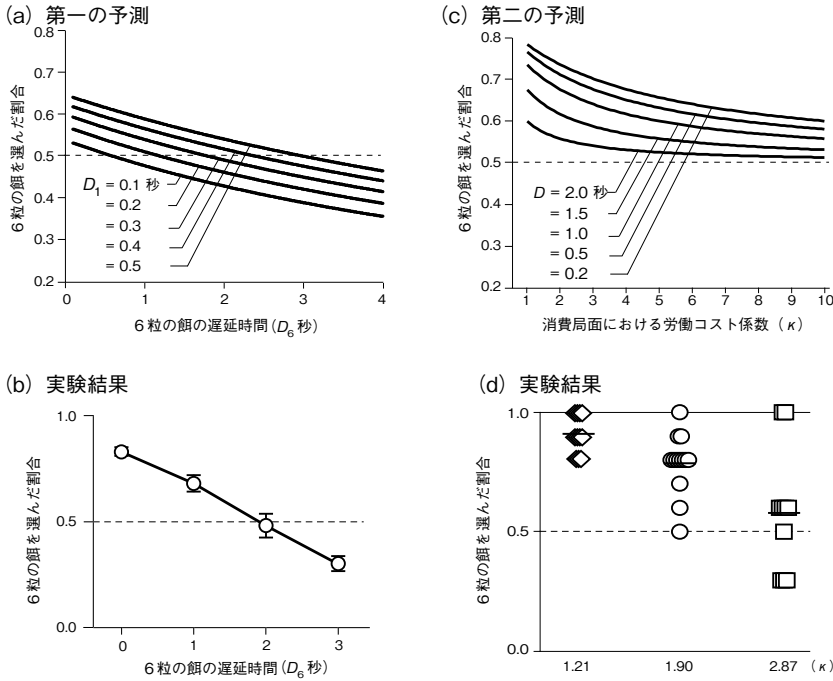
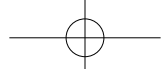


図4 ヒヨコの選択

それぞれの選択肢の利潤率を正確に予期し、経済的に合理的な選択をしていると考え、ヒヨコの行動は最もよく理解できる。

て跳ね返った餌が口の中に飛び込んでくるのである。だから、この板に小さな凸凹をつけると、 κ 値は大きくはね上がる。穴の大きさと深さを精密に工作していくと、 κ 値を自由に統制していくことができた。観察された κ の上限値はほぼ 10。つまり、ヒヨコは 1 粒の餌のために、10 回までのついでばみを投資するのだ。この上限値に多少の個体差があるが、明確な上限があること自体には例外がない。ヒヨコがみずからの労働投資をつねに計っていて、それ以上の労働投資が利益を割る瞬間に、ヒヨコは餌から離脱する。

当然、選択にあたっても、労働投資は考慮されているのだ。図 4c, d にみられる一致は、ヒヨコが合理的な行為者であることを強く示している¹³⁾。



2.4 採餌者と餌の共進化、経済学と生態学の齟齬からみえてくるもの

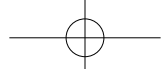
ここで1つ注意を喚起したいことがある。経済学と生態学の仮定の齟齬がここにあるのだ。経済学では消費とは文字どおり財の消滅の局面であって、そこにおお投資すべき労働コストがあるとは考えない。経済学者の議論のなかから κ 値のような消費局面における労働コスト係数は出てこないのである。他方、生態学では、消費局面でもなお採餌者と餌が格闘のまっただなかにあると考えている。なぜだろうか。

生態学的な議論が内包している進化的淘汰圧という考え方を、ここで表に出してみよう。採餌者は、より効率的な採餌行動に向けて強い淘汰圧を受けてきた、と考える。少しでも効率の悪い採餌者は生き延びず、あるいは十分な繁殖を実現せず、よって長い世代のあとには淘汰される。同様に、餌もまた淘汰圧を受けていることを、生態学は当然のことと考える。これまでのすべての議論を、餌の観点から見直してみるのだ。

私は餌だ。生き延びるためには、採餌者にとって悪い餌になるべきだ。利潤率の低い餌になるべきだ。そのためには2つの戦略がありうる。1つは遅延時間(D)を長くすることだ。採餌者に見つかったとき、できるだけ速く逃げることであれば、捕獲までの時間を延ばし、結果として私の餌としての利潤率は小さくなる。体を軽くしよう、強い脚をもとう、早く逃げよう。手はもう1つある。早く逃げることはあきらめよう。そのかわり κ 値をできるだけ大きくするのだ。固い殻をかぶろう、がっちりと岩にへばりつこう、食われる手間を最大にしよう。

餌が生き延びるためには、2つの両立できない戦略がある。速く走ることと、分厚く装甲することの間にはトレードオフの関係があり、両立しがたいのである。採餌者と餌が共進化する状況では、採餌者はその2つの戦略に走り込む餌と格闘する必要がある。この状況では、餌の近さ(足の速さの逆数)と、餌のやさしさ(装甲の厚さの逆数)を正確に推定する能力が求められたことだろう。正しく推定し、両者を統合して行為を定める行為者が最適な採餌を実現したことだろう。

実験室の中で統制された条件にさらされて、ヒヨコはオペラント行動を示し、



決定を行った。これまで述べてきたヒヨコの行動は、まったく実験心理学の扱
うべき枠組みの中にあるようにみえる。しかし、行動をよりよく説明する筋道
を追っていくと、その先に自然を垣間みることができる。数千年もの間の家畜
化された時代の前に、東南アジアの森の中で餌と格闘してきたセキショクヤケ
イの姿を考えることができる。経済学と生態学と進化生物学を統合する、まだ
開かれぬ研究分野を垣間みることもできる。

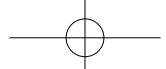
しかし今は足を速めて、もっと先に進もう。脳はどうか？ さらに神経科学
と切り結ぶことは可能か？

2.5 多元的な価値と分散表現、選択と意思決定

線条体、特にその奥深くに**側坐核** (nucleus accumbens) とよばれる神経核
がある。この領域はヤツメウナギからヒトまで、脊椎動物すべてに保存された
構造である。魚にも相同領域があるが、性成熟した雄のヒメマスを使って植込
み電極を介して電気刺激を加えると、その瞬間に放精が起こる¹⁴⁾。ヒトの脳
のイメージングの研究では、この領域が1片のチョコレートによって強く活動
を示すことが知られている。さらに、あなたにとって気に食わない人がいる場
合、その人の手に注射針が刺さろうとする瞬間を示すビデオ映像は、あなたの
側坐核に活動をひき起こすだろう¹⁵⁾。復讐は蜜のように甘いのだ。ただし、
このような活動は男性に限られて、女性では明らかではないという。男は深く
側坐核の現実に関心すべきだろう。

無論、ヒヨコにもこの領域がある。餌の提示、報酬そのものに対して、この
領域のニューロンは強い活動を示す¹⁶⁾。さらに詳細に調べたところ、餌のよ
さを表現する2群のニューロンを分離できた¹⁷⁾。1群のニューロンは餌の近さ
が大きいほど(遅延時間が短いほど)、発火率を高めた。報酬の予期遅延を符
号化している。ほかの1群のニューロンは餌が大きいほど発火率を高めた。報
酬の予期量を符号化している。これまでのところ、利潤率を一意に表現する活
動を観察していない。価値は分散表現されているようだ。

さらに、脳の局所破壊実験の結果は、処理時間のなかの遅延と消費時間を分
離するものだった。側坐核を破壊すると、ヒヨコはさらに衝動的な選択をする
ようになった¹⁸⁾。1粒の餌はただちに(たかだか0.2秒ほどの遅れで)与えら

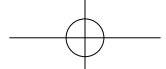


れる。他方、6粒の餌は1秒を待たねばならない。この状況で合理的な判断は、なお6粒の選択である。側坐核を破壊したのち、ヒヨコはこの判断を捨て、1粒の選択肢をより多く選ぶようになった。ただし、6粒の餌もただちに与えられるような状況では話が異なる。この場合、量の大小だけが問題だ。この状況では側坐核破壊の効果はまったくみられない。遅延時間による価値の割引きを、側坐核破壊後のヒヨコは非常に強く重く受けとっているようにみえる。餌が現実よりずっと遠くにあるように感じた、そのような行為者であるようだ。性格が短気になったのではない。認知がゆがんでいるのである。

トリの脳の連合野の1つに**弓外套** (arcopallium) がある。さえずる小鳥の脳にも、音源に素早く定位するフクロウの脳にもあって、発声の制御や音源の作業記憶にかかわる。この領域が、ヒヨコでは経済的意思決定にもかかわっていた¹⁹⁾。前節で述べたように、 κ 値の予期推定は、決定を支配する第二の時間要因である。弓外套の破壊のあと、ヒヨコは手間のかかる餌を著しく忌避するようになった。やはり量に基づく選択は妥当に保たれているし、時間割引きの強さにも影響は現われていない。歪みは認知にあり、弓外套破壊後のヒヨコは餌の消費コストを過剰に推定するようになっていたのである。

ヒヨコの脳の中で、餌の量・餌の近さ・労働コスト、これら3つの要因は分離できることがわかった。ニューロンのレベルにおいても、神経核のレベルにおいても、決定にかかわる要因は多元的に分散表現されている。いったい、どのように統合するのか？ 利潤率の計算は、どのようなアルゴリズムで実現しているのか。そもそも利潤率を算出し確定したうえで、選択肢を決定しているという仮定すら怪しい。決定に時間がかかるということは、実に困ったことだからだ。悩む一瞬のうちに、餌は逃げるだろう。利潤率を正確に推定する前に、仲間が来てその餌を横どりするかもしれない。決定そのものを多元的な過程、並行して進むものと考えたほうが、生態学的にも計算機論的にも妥当なのかもしれぬ。この問題については、稿を改めて議論することにしよう。

合理的意思決定から、多くの行為は逸脱している。対応則そのものが利益最大化から逸脱していることは、すでに述べたとおりである。最後に逸脱の事例をいくつかあげて、解釈と展望を試みよう。



3 経済的合理性からの逸脱

3.1 情報利得、ネオフィリアと楽観的な初期値

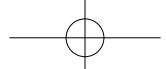
強化学習の特徴は、エージェントがヒトであれロボットであれ動物であれ、あるいはコンピューター内の仮想的存在であれ、行った行為の帰結を評価して次の行動を動的に変えていくことにある¹²⁾。経験から得た知識を利用して、行為をよりよいものに変えていく。ただし、「こうすればよい」と明示的に教えてくれる親切な教師はいない。自分で評価しなくてはならない。

ここで問題になるのが、**探査**と**知識利用**の問題である。探査して初めて知識を得る。得た知識を利用して採餌を続ける。この探査と知識利用は対立する要求なのだ。どれほどの時間を探査に振り分けるべきか、自明な答えは存在していない。最適採餌理論では全知の採餌者を仮定して、この問題を回避してしまった。しかし、現実の動物は全知ではないし、餌の量や処理時間はいつ変動するかもしれない。昨日は青く熟さない餌も、今日は高い利潤率を与えるかもしれない。その逆もあろう。つねに探査を続け、情報を更新しつづけてはならないのである。今は利益に結びつかなくとも、明日の利益のために餌の情報を集めつづけてなければならないのである。

イギリス、ニューカッスル大学の Ian Inglis らはこの問題を体系的に扱い²⁰⁾、実に多くの動物が探査のために経済的合理性から踏みはずす事例を紹介している。サカナ (*Betta splendens*)、ハト、ムクドリ、カラス、ラット、サルそしてヒトまで、この「**反たかり**」行動はむしろ普遍的である。

ただし、すべての可能な選択肢を均等に探査する必要はない。むしろ、そうしてもよいのだが、採餌世界の変動の幅に制限があつて、極端に大きな変化が起こりそうもない場合、無条件に均等な探査は妥当性を欠くだろう。過去の経験に基づく（そして現在、仮にもっているところの）主観的価値に応じて、探査することが妥当であろう。価値が低いものは少なく探し、大きいものはより多く探すのである。これは強化学習の世界で**ソフトマックス行動選択**とよばれている規則と同じである。先に述べた対応則を、ここから説明してもよいだろう。

孵化直後のヒヨコに見いだされる強いネオフィリアもまた、最適な探査を行



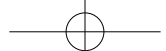
うための戦略として進化したのかもしれない。ヒヨコは孵化直後から自立して歩き、みずから餌をとらねばならぬ。腹の中に蓄えた卵黄は数日の絶食を耐えさせるが、その後の成長と生存はみずからの採餌に完全に依存する。実際、キジ科鳥類（コウライキジ、ヨーロッパウズラなど）では、孵化後に巣立つまでの死亡率は65%から84%に及ぶ²¹⁾。この危険な時期を速やかに脱することは決定的に重要である。速やかな成長に寄与する行動形質は、何であれ強く選択されたことだろう。ネオフィリアもまた、そのような形質の1つと考えることができる。孵化後の雛に、餌の情報をすべて完全な知識として与えることはできない。そのかわり、ヒヨコは出会う物体すべての価値にきわめて**楽観的な初期値**を与えるよう、しくまれて生まれたのかもしれぬ。餌であろうと糞であろうと、価値の初期値は高いのだから、とりあえずついばむ。ついばみが何も生まなければ、速やかに価値関数を低い値に更新すればよろしい。この戦略もまた、探査と知識利用の間のトレードオフを解決するきわめて有効な手段である。

しかし、情報利得としては理解することができない逸脱もある。ムクドリと私たちヒトの行動に、同じ逸脱の事例が観察されている。

3.2 コンコルドの誤信とホシムクドリの選択

「あなたは2000ドルを払ってファンシーなノートパソコンを買った²²⁾。翌週、その上位機種が1000ドルで売り出された。さらにとんでもないことに、400ドルを余計に払えば、新しい機種に交換してくれるという。あなたはこの話に乗るだろうか？」これが経済学の初歩の教科書に載っている**サunk・コスト**の事例である。経済学的に正しいやり方とは何か、を教える例としてあげられることが多い。上位機種と今の機種の機能の差が、400ドルに見合うかどうかだけを問題にせよ、と経済学は教えるのだ。払ってしまった2000ドルのことは忘れてしまえ。それは取り返すことのできないサunk・コストだから、これからの意思決定に反映させるべきではない、と教える。そのとおりだ。合理的な決定は、つねに未来に向かうべきだ。

しかし、私ならそのような話には乗るまい。2000ドルで買ったパソコンを使いづけるだろう。すでに投資してしまったコストの大きさが、目の前のノートパソコンを実に魅力的に見せるからだ。

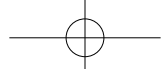


コンコルドは英仏が国の威信をかけて開発した超音速旅客機だった。70年代アメリカも同じような旅客機を開発したが、早々に撤退している。なぜなら、超音速で飛ぶ飛行機が経済的な利益を生み出さないことが、開発段階ですでに明らかだったからだ。速度を2倍にしても、ヨーロッパからアメリカへ飛ぶのに要する時間は数時間しか短縮しないのだ。その数時間のために誰が百万円を余計に払うだろうか？ しかし、英仏はあきらめなかった。なぜか？ その経済性の問題が明らかになった時点で、すでにあまりに多くを開発費として投じていたからである。すでに投資したものの大きさが、今後に生み出される利益の低さに対して政策決定者を盲目にしてしまった。**コンコルドの誤信**ともよぶのは、このためである。

英国、オックスフォード大学の動物学者 Alex Kacelnik は、ホシムクドリ of 採餌選択に同様の逸脱を見いだしている²³⁾。ムクドリ of 正面に餌箱が1つ、餌箱の左右に赤と青のスイッチランプがある。さらに鳥かごの中には止まり木が2本あって、ムクドリはその間をピョンピョンと飛び渡らなくてはならない。16往復すると赤ランプが点灯するから、それをついばめ。ついでに青ランプが点灯するから、それをついばめ。餌が出てくる。このような課題はムクドリにとってむずかしくはない。せつせと止まり木を往復するようになる。そのうちにルールを1つ追加する。4往復した時点で、今度は青ランプを点灯するのである。そして点灯した青ランプをついばんでも同じ量の餌を与えるのである。ムクドリはこの予期せぬボーナスも速やかに学んで、両方の課題をこなすようになる。問題はその後である。いきなり赤と青のランプスイッチを同時に点灯するのである。ムクドリはどちらを選ぶだろう？ 16往復して得られる赤か、4往復して得られる青か？ ここで餌はまったく同じであることを思い出してほしい。経済的には違いはないのだ。しかし Kacelnik のムクドリは赤を選んだ。より多く投資した選択肢が、より高い価値をもっているかのようだ。この行為はあからさまな経済的逸脱であって、情報利得では説明できない。コンコルドの誤信とよばれるゆえんである。

おわりに

私が今着ている服を縫った人を、私は知らない。私が食う食物を育てた人を、

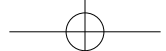


私は知らない。私は、私の知らない多くの人の働きのうえに生きている。あなたも同じだ。私たちの社会は見知らぬ他者との協同のうえに成り立っている²⁴⁾。直近の利潤率から逸脱した行為があって、はじめて生きている。同時に私はきわめて近視眼的だ。長期的な思惑などもちょうもなく、目の前の利益に引き回されている。衝動的であり、熟慮を欠いている⁹⁾。しかしなお私の行為にはどうやら進化的な理由があって、その見事さは否定のしようもない。この不合理な行為者のなかに組み込まれた理^{ことわり}と、その認知的表象と計算アルゴリズムの見事さには、溜息をつくばかりだ。その進化的要因・発達要因とメカニズム（至近要因）については、まだほとんど明らかになっていない。

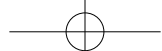
心は実体である²⁵⁾。実体であればこそ、脳に発現する遺伝子群を問うことに意味がある。見る経験・行為の履歴と帰結を受けとめて速やかに回路を変え、価値の表現を書き換えていく様子を分子・遺伝子のレベルでみたいと思う。あるときには進化は足かせとなって、私たちの心を縛るだろう。あるときには生態の要求が求めるままに、心はどこまでも変わっていくだろう。それを読み解くには最先端の統計と数理が必要だ。脳と行動の基本的な関係を追い求め、生きる世界との相互作用を厳格に語ることを通して、心の起源を正しく記述する概念と道具が得られることを願っている。その道筋を準備さえすれば、私たちよりはるかに優れた若者たちがあとを継いで、心の迷路を解いてくれることだろう。

引用文献

- 1) Zucca, P., *et al.* (2005) Detour behaviour in three species of birds: quails (*Coturnix* sp.), herring gulls (*Larus cachinnans*) and canaries (*Serinus canaria*). *Anim. Cogn.*, **8**, 122-128
- 2) 渡辺 茂 (1995) 『ピカソを見わけるハトーヒトの認知、動物の認知』, NHK ブックス **747**, 日本放送出版協会
- 3) 藤田一郎 (2007) 『「見る」とはということかー脳と心の関係をさぐる』, DOJIN 選書 7, 化学同人
- 4) 粕谷英一 (1990) 『行動生態学入門』, 東海大学出版会
- 5) Charnov, E. L. (1976) Optimal foraging: attack strategy of a mantid. *Amer. Natural.*, **110**, 141-151



- 6) Stephens, D. W., Krebs, J. R. (1986) Foraging theory. *Monographs in Behavior and Ecology*, Princeton University Press
- 7) J. R. クレブス, N. B. デイビス 著, 山岸 哲・巖佐 庸 訳 (1994) 『進化からみた行動生態学』, 蒼樹書房 [これは第3版の訳書である。現在第4版が出ており、特に社会的採餌行動を含めて重要な議論が展開されているので、できるならば新しい版を原著で参照してほしい。 Krebs, J. R., Davies, N. B. (1997) *Behavioural ecology, an evolutionary approach*. 4th edition, Blackwell Publishing]
- 8) Holling, C. S. (1959) Some characteristics of simple types of predation and parasitism. *Can. Entomol.*, **91**, 385-398.
- 9) G. エインズリー 著, 山形浩生 訳 (2006) 『誘惑される意思』, NTT 出版
- 10) Aoki, M., *et al.* (2000) Accurate visual memory of colors in controlling the pecking behavior of quail chicks. *Zool. Sci.*, **17**, 1053-1059.
- 11) Mazur, J. E. (2002) *Learning and Behavior*. 5th edition, Prentice Hall
- 12) R. S. サットン, A. G. バルト 著, 三上貞芳・皆川雅章 訳 (2000) 『強化学習』, 森北出版
- 13) Matsushima, T., *et al.* (2008) Neuro-economics in chicks: foraging choices based on amount, delay and cost. *Brain Res. Bull.*, **76**, 245-252
- 14) Satou, M., *et al.* (1984) Telencephalic and preoptic areas integrate sexual behavior in Hime salmon (landlocked red salmon, *Oncorhynchus nerka*): results of electrical brain stimulation experiments. *Physiol. Behav.*, **33**, 441-447
- 15) Singer, T., *et al.* (2006) Empathic neural responses are modulated by the perceived fairness of others. *Nature*, **439**, 466-469
- 16) Yanagihara, S., *et al.* (2001) Reward-related neuronal activities in basal ganglia of domestic chicks. *NeuroReport*, **12**, 1431-1435
- 17) Izawa, E-I., *et al.* (2005) Neural correlates of the proximity and quantity of anticipated food rewards in the ventral striatum. *Eur. J. Neurosci.*, **22**, 1502-1512
- 18) Izawa, E-I., *et al.* (2003) Localized lesion of caudal part of lobus parolfactorius caused impulsive choice in the domestic chick: evolutionarily conserved function of ventral striatum. *J. Neurosci.*, **23**, 1894-1902
- 19) Aoki, N., *et al.* (2006) Localized lesion of arcopallium intermedium of the lateral forebrain affected the choice of costly food reward without impairing reward-amount discrimination in the domestic chick. *Eur. J. Neurosci.*, **24**, 2314-2326
- 20) Inglis, I. R., *et al.* (1997) Free food or earned food? A review and fuzzy model of contrafreeloading. *Anim. Behav.*, **53**, 1171-1191
- 21) 伊藤嘉昭 (1959) 『比較生態学』, 岩波書店



- 22) Stiglitz, J. E., Walsh, C. E. (2002) *Principles of microeconomics*. 3rd edition, Norton & Co.
- 23) Kacelnik, A., Marsh, B. (2002) Cost can increase preference in starlings. *Anim. Behav.*, **63**, 245-250
- 24) Seabright, P. (2004) *The company of strangers, a natural history of economic life*, Princeton University Press
- 25) 宮川 剛 (2007) 「心は実体だ (あとがき)」, 『ブレイン・デコーディング —脳情報を読む』, オーム社

参考文献

動物の比較認知科学は、生まれたばかりの若い学問分野であるが、すでに国内外にいくつもの良書をもつ。ここでは1つずつ選んで、紹介しよう。

渡辺 茂 編 (2000) 『心の比較認知科学』, シリーズ「ことばと心の発達」第3巻, ミネルヴァ書房

Hauser, M. (2006) *Wild Minds: what animals really think*, Henry Holt

意思決定と経済学が問題意識と解析手法を共有していることは、けっして驚くべきことではない。むしろ両者がこれまで、実験的な行動科学に積極的に参入してこなかったことを、いぶかるべきかもしれない。すぐ隣に、すぐれた導師がいるのだ。学ばない理由はない。特に次の2つは際立って明確だ。本気で歯と顎を鍛えたいのなら、精読すべき本である。

松原 望 (2001) 『意思決定の基礎』, シリーズ「意思決定の科学」第1巻, 朝倉書店

依田高典 (1997) 『不確実性と意思決定の経済学』, 日本評論社