

Baldwin effect : 【ボールドウィン効果】

学習など個体の生涯における環境との相互作用で生じる形質の変化に基づく適応が、集団レベルの遺伝的進化の方向性や速度に間接的に影響を及ぼし、その結果、ラマルク主義的に獲得形質が直接子孫に遺伝する仕組みがなくても、学習によって獲得されていた適応的形質が、次第に遺伝的に獲得されるように進化する。1800年代末にこのような影響を初めて指摘した研究者の一人であるJ. M. Baldwinにちなんで名付けられた。

人工生命研究では、1987年にHintonとNowlanによる遺伝的アルゴリズムに基づく計算機進化実験でボールドウィン効果の発生過程が明確に示されて以来、進化と学習の相互作用について議論されている。特に、この過程を適応的形質を学習可能でメリットを得た個体が集団中に広まる第1段階と、それらのうち学習にかかるコストがより小さい（つまり、より生得的に適応的形質を獲得した）個体が集団に広まる第2段階からなるものにとらえ、学習のメリットとコストのバランスが進化の方向性や速度に与える影響について論じられている。なお、第2段階は遺伝的同化（genetic assimilation）とも呼ばれる。

Emergence, emergent behaviors : 【創発、創発的振る舞い】

多数の要素の相互作用から、要素レベルには還元できない全体としての性質が出現し、またその性質が要素レベルの相互作用に影響すること。もしくは、生物進化における多様な種の出現など、時間経過に伴って新たな構造が出現すること。人工生命研究では、創発現象を生命現象の持つ重要な特徴であると捉え、その理解を大きな目標としている。

Fitness (Lifetime fitness, Innate fitness) 【適応度（生涯適応度、生得的適応度）】

生物学的には、ある個体が次世代に残すことのできる繁殖可能な個体の期待値。ただし、本発表のモデルでは、各個体がコミュニケーションから得られる適応度貢献の生涯を通じた平均値をLifetime fitness（生涯適応度）として定義し、次世代への子孫の残しやすさを示す相対値と見なして集団を進化させている。また、Innate fitness（生得的適応度）と呼ぶ、各世代で個体が学習を行わずに相互作用したと仮定した場合に算出される仮想的な適応度と比較することで、学習による適応度変化を明確にしている。

Fitness landscape 【適応度地形】

S. Wrightによって提案された生物の適応進化を理解するための概念。一次元もしくは二次元空間にある生物種が持つ可能な遺伝子の空間（似た遺伝子同士が近くに並んだ空間）とみなし、各場所に対応する遺伝情報を持つ個体のある環境条件における適応度をもう一つの軸として描いたグラフを適応度地形と呼ぶ（スピーチアブストラクト Fig. 1参照）。生物、もしくは、生物集団は地形上の一点もしくは領域で表され、その適応進化は地形上の近傍の高い方へ登っていく過程として捉えることができる。実世界では様々な要因によって適応度地形の形は変化しうる。本発表では、個体の生涯の学習が適応度を変化させ、地形を改変することの進化への影響について論ずる。

Genetic algorithm 【遺伝的アルゴリズム】

生物の適応進化の過程を計算機上で表現するためのアルゴリズム、もしくは、適応進化に着想を得た解の汎用的な探索手法。各個体はビット列や整数・実数値などで表された遺伝情報を持ち、それに基づいて決まる表現型（解）と環境条件（問題設定）との関

係によって各個体の適応度が決められる。適応度が高い個体ほど次世代に子孫を多く残す選択操作と、交叉や突然変異などの遺伝操作によって次世代の集団を生成し、これを繰り返して集団を進化させる。

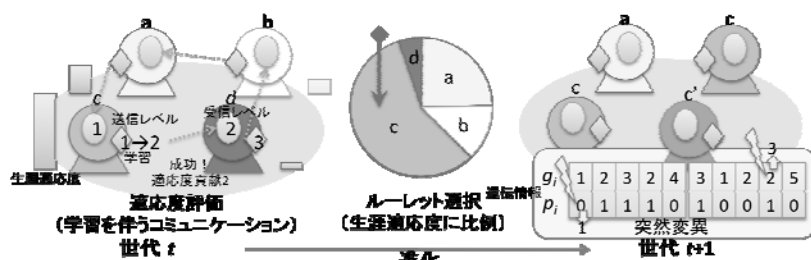


図1：本モデルで用いる遺伝的アルゴリズムのイメージ

Language evolution 【言語進化】

ヒトの言語能力の遺伝的基盤の起源と進化、話し言葉の文化的進化、もしくは、両者の相互作用の理解に関する議論の総称。言語能力の遺伝的基盤の起源と進化には様々な立場があり、既存の言語をより学習しやすいように進化した結果とする説、試行錯誤的に獲得された原始的言語ルールがボールドウィン効果によって遺伝的に獲得されてきたとする説、他の適応的形質の進化の副産物として生じたとする説、適応進化に基づく説明に否定的、もしくは、突然変異によって生じたとする説などがある。これらの議論が容易でない理由として、言語は化石記録として残らないことや、脳の生物進化、認知・学習過程、言語の文化進化といったレベルと時間スケールが異なる様々なプロセスが影響し合っていることが挙げられる。そのため、構成論的計算モデルに基づく進化シミュレーション実験による仮説の妥当性の検証や可能なシナリオの提示が有力な理解の方法の一つとなっている（参考：有田隆也、計測と制御、48(1), 39-46 (2009)）。

言語能力の進化と学習の関係に関する従来の計算モデルでは、学習で獲得された言語的形質がボールドウィン効果でどのように遺伝的に獲得されるかが主に議論されてきた。一方、本発表では、話し手と聞き手の間で言語が共有されないと成り立たないというコミュニケーションの持つ本質的特徴から生じる言語能力の適応進化の停滞現象に注目する。進化と学習の相互作用が停滞を解消してより高次（高適応度）の言語能力の進化を促進することを示し、究極のコミュニケーション能力としてのヒト言語の起源と進化において進化と学習の相互作用が果たす役割について論ずる。

Phenotypic plasticity 【表現型可塑性】

ある（一種類の）遺伝子に対応して発現する表現型（形態や行動などの特徴）が、主に個体発生過程における環境条件に依存して変化する性質のこと。例えば、ミジンコは天敵の存在を天敵から放出される化学物質によって察知し、存在するときはその頭部を尖らせ、捕食されにくい形態に変化する。このような形態の変化から、ヒトの高度な知能の学習に基づく適応まで、多くの生物は多様なレベルで形質に可塑性を持っており、これら表現型可塑性のメカニズムや進化的な意義の理解が、特に、進化発生生物学（Evo-devo, エボデボ）や発生生態学（Eco-devo, エコデボ）を中心に進められている。表現型可塑性は、上のように変動する環境において個体レベルでの適応を可能にする点に加え、新規な形質の発現と進化においても重要な要因であるという議論があり、ボールドウィン効果に基づく適応進化はこのようなシナリオの典型であると言える。

Positive frequency dependent selection 【正の頻度依存選択】

集団においてある形質が多数であるほどその適応性が高くなる状況での進

化. Glossary 《Artificial Life/Artificial Evolution》

Baldwin effect:

A hypothesis on indirect effects of learning or ontogenetic adaptation on evolution, especially on a process in which an acquired trait initially through interactions between individuals and their environment can become genetic one without any direct inheritance of acquired trait so-called the Lamarckian mechanism. Since Hinton and Nowlan (1987) clearly showed the existence of this effect using their pioneering computational experiment, interactions between evolution and learning have been one of the central topics in ALife field. Especially, the Baldwin effect has been interpreted as a two-step evolution: individuals that have successfully adapted their own trait to their environment through their lifetime learning processes occupy the population (the first step), and then the evolutionary path finds the innate trait that can replace the learned trait (the second step) because of the cost of learning (*genetic assimilation*). An important question is how balances between benefit and cost of learning can effect the direction or speed of adaptive evolution.

Emergence, emergent behaviors:

An appearance of higher-level features from local interactions of lower elements in general. The appeared features cannot be easily reduced to (explained by) the properties of elements, and can further determine the lower-level interactions in turn. The general understanding of emergent phenomena is one of the most important themes in Artificial Life studies, because they are supposed to be fundamental properties of biological systems.

Fitness (*Lifetime fitness, Innate fitness*):

In general, the fitness of an individual refers to the expected number of its offspring in the next generation. In our model, we define the *lifetime fitness* of each individual as the average fitness contribution that obtained from successful communicative interactions with other individuals, which is actually used in evolutionary process. In addition, we also define an index termed *innate fitness*, which is the expected fitness value if each agent communicated without any leaning mechanisms, so as to quantify the net benefit and cost of learning.

Fitness landscape:

A biological concept proposed by Wright so as to visualize and intuitively understand evolutionary dynamics of the population. This is the landscape of the fitness on a possible one or two-dimensional genotypic space on which the more similar genotypes are, the closer position they are located on the space. The height of the landscape is the fitness value of corresponding genotype, and the adaptive evolution of the population can be represented as a hill-climbing process on the landscape. In a real environment, the shape of fitness landscape could be changed by various factors. In this talk, we discuss how learning can change the shape of the landscape, and as a result, can affect adaptive evolution.

Genetic algorithm:

A computational algorithm for simulating adaptive evolution of the population, or a search technique to find approximate solutions in optimization problems inspired by biological evolution. Each individual in a population has genetic information represented by a set of binary, integer or real values, and it produces a phenotype (or a candidate solution for a solving problem). The fitness of each individual is determined by the relationship between the phenotype and the environmental condition (a problem setting), and the population evolves using a selection operation in which the fitter individuals have more chances to raise their offspring in the next generation, accompanied by mutation or crossover operations on genotypes of the offspring.

Language evolution:

A growing interdisciplinary field of studies with regard to genetic evolution of human linguistic abilities, cultural evolution of language, and mutual interactions between them. There are various hypotheses on the origin and evolution of genetic basis of linguistic abilities such as a result of genetic assimilation of learned linguistic rules through the Baldwin effect, a by-product of the adaptation for other adaptive cognitive traits, a result of a big mutation, and so on. The main reasons that it is not straightforward to discuss this are that there is no fossil record of language, and this is essentially a complex phenomenon in which there exist mutual interactions among various processes on different timescales such as biological evolution of brain, cognitive or learning processes and cultural evolution of learning. Thus, the verification of hypothesis or to show possible scenarios by using simulation experiments based on constructive models are regarded as one of the most promising approaches.

In this talk, we focus on the several problems in evolution of communication arising from its coevolutionary and frequency dependent aspects, and show that learning can drastically facilitate evolution of communication abilities.

Phenotypic plasticity:

Variation in the phenotype of a given genotype when individuals undergo their development in different environments. From an adaptive plasticity in morphological traits such as a predator-induced polyphenism in insects to human behavioral adaptation based on intelligent learning mechanism, a wide variety of organisms more or less plasticity in their traits. The roles of phenotypic plasticity in evolution have been discussed in evolutionary developmental biology called Evo-devo or Eco-devo. It is recently focused on as a source of expression of a novel trait without genetic changes (*phenotypic accommodation*), which can potentially increase the evolvability of the population. The evolution through the Baldwin effect is a typical case of this evolutionary scenario.

Positive frequency dependent selection:

An evolutionary process through which the more common individuals are in the population, the more adaptive they are.