

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月 24日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22700241

 研究課題名（和文） 中立性と動的環境における遺伝アルゴリズムの  
ダイナミクスに関する研究

研究課題名（英文） Evolutionary Dynamics of GAs in Dynamical Environment and Neutrality

研究代表者

片田 喜章 (KATADA YOSHIAKI)

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：30411705

研究成果の概要（和文）：生物は自身が生きている環境の変動に適応する様々なメカニズムをもつ。近年、計算生物学の分野において、環境変動によって個体が中立ネットワークとよばれる遺伝子空間の異なる領域に分布することが示されている。本研究では中立性を含む動的な環境モデルにおける遺伝アルゴリズムの進化ダイナミクスの解析を行った。得られた結果は計算生物学において得られている結果と整合性を持ち、遺伝子型の分布は環境の変動率と突然変異率によって変化することを確認した。

研究成果の概要（英文）：Biological organisms have various mechanisms of coping with the dynamical environments in which they live. Recent papers in computational biology show that individuals reside in deferent regions of neutral networks according to environmental variation. This work investigated evolutionary dynamics of GAs in dynamical environments with neutrality using a simple model. The evolutionary dynamics observed were consistent with those observed in the experiments of biological evolution, confirming that the genotype distributions change depending on the rates of environmental variation as well as mutation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：遺伝アルゴリズム・動的環境・進化論的計算

## 1. 研究開始当初の背景

分子進化の中立説(neutral theory)は1968年に集団遺伝学者・木村資生により提唱された。これに基づき、表現型に現れない遺伝子メカニズムを生物がうまく利用し進化的な時間スケールで環境変動に適応している可能性が報告されている。

進化論的計算の分野においても冗長性に基づく中立性が確認されている。進化論的計算の分野で中立説が盛んに議論されるようになったのは、1996年にHarveyによって中立ネットワークという概念が導入されたことが契機であるように思われる。サセックス大学(英国)・サンタフェ研究所(米国)を中心に1990年代後半から研究が活発化し、さまざまな成果が報告されている。それらの中心は、つぎの2つに分類される。(a) 1つは、表現型-適応度写像における冗長性に基づくもので、進化型ロボット(ER)における神経回路網コントローラや進化型ハードウェア(EHW)などに代表される、問題自体に中立ネットワークが含まれる場合において、進化ダイナミクスを解析したり、適応度景観の中立部分を特徴量化しようという研究である。

(b) もう1つは、従来、冗長性を排しコンパクトに設計することが良いとされてきた遺伝子型-表現型写像、つまり、個体表現に上述の考え方をもとに意図的に冗長性を導入し、遺伝アルゴリズム(GA)の解探索能力を高めようという研究である。

(a)において、中立性に基づいて動的な環境で進化論的計算が示すダイナミクスや有効な遺伝的操作について研究した報告は研究代表者の知る限り存在しない。(b)において、中立性の話題とは独立に、80年代後半より動的な環境において進化論的計算に倍数体を用いるモデルが導入され、以前有益であ

った遺伝子がある種の「記憶」として保持するという研究が盛んに行われている。しかしながら、倍数体表現の特徴は明らかに遺伝子型-表現型写像における冗長性にあるにもかかわらず、中立性という立場からこれらを検証した例はない。同様に(b)に分類されると考えられる遺伝的プログラミング(GP)においても進化の結果得られる解に多くのイントロンや機能的に冗長な部分が含まれており、近年ではGPの研究グループが盛んに中立性の重要性を強調している。

研究代表者らはこれまで中立性を含む問題に取り組む中で、中立ネットワークの概念を集合として数学的に定義し、問題の解空間の構造を調べてきた。また、中立性を含むテスト問題を用いたGAの進化ダイナミクスの解析及びこれらの問題に有効な拡張型GAの提案とそれらの実問題での検証を行ってきた。これと並行して、適応度景観の特徴量の抽出に着目し、中立性の度合いの推定法を提案している。しかしながら、これらはすべて静的な問題を扱っている。

計算生物学の分野において、Meyersら(2005)は周期的に入れ替わる2つの環境における進化を簡単な数学モデルおよび1つのアミノ酸モデルを用いて解析している。ここでは、環境の変動率によって、個体集団が中立ネットワーク内の異なる領域に分布し、環境変動に対応して表現型をすばやく変えることを確かめている。この知見をもとに進化論的計算分野においてYu(2007)は動的な環境におけるブール関数合成についてGPの進化ダイナミクスを考察している。GPではその解表現から上述の生物学との対応を直接的に議論することはできないが、環境変動に対応できる表現型をすばやく獲得するという観点からは同じアナロジーが成り立つ。

これらの知見をもとに、進化論的計算(とくに表現型-適応度写像が冗長になる GA)においても中立ネットワークを構成することから、動的な環境で同じようなダイナミクスが観察されるのではないかと、という着想に至った。また、遺伝子型-表現型写像が冗長になる場合には、GP 同様に中立ネットワークを定義するのは困難だが、GP の例で見たようなダイナミクスが観察されると予想される。

## 2. 研究の目的

動的な環境での最適化は進化論的計算が担うべき重要な適用領域である。しかしながら、中立性の存在はこれまでの理論が想定していた前提が成り立たないことを示唆するため、中立性と環境変動を同時に扱える新しい理論体系の構築を図る。本研究では、表現型-適応度写像に冗長性が存在する場合(上述の(a))に着目し、周期的に入れ替わる2つの環境をもつ簡単なモデル問題をつくり、環境変動と突然変異によって現れるGA の進化ダイナミクスを解析する。

## 3. 研究の方法

ここで述べる設定は、背景で述べた生物学で得られている知見とGA で得られるダイナミクスとの比較を目的に行っている。解析を容易にするために4 ビットの遺伝子型を用いる。Meyersらの参考文献(2005)を参考に、遺伝子型集合を表1のように定義し、適応度関数をつぎのように定義する。

$$w_A(g_i) = \begin{cases} 2 & (0 \leq i \leq 5) \\ 1.5 & (6 \leq i \leq 9) \\ 1 & (10 \leq i \leq 15) \end{cases}$$

$$w_B(g_i) = \begin{cases} 1 & (0 \leq i \leq 5) \\ 1.5 & (6 \leq i \leq 9) \\ 2 & (10 \leq i \leq 15) \end{cases}$$

表1 遺伝子集合

genotype ( $g_i$ )	ID ( $i$ )	Nickname
1011	0	NN1-c
1111	1	NN1-e1
1101	2	NN1-e2
1001	3	NN1-e3
1010	4	NN1-e4
0011	5	NN1-e5
1110	6	INV-1
1000	7	INV-2
0111	8	INV-3
0001	9	INV-4
0100	10	NN2-c
0110	11	NN2-e1
0010	12	NN2-e2
0000	13	NN2-e3
0101	14	NN2-e4
1100	15	NN2-e5

ここで、 $w_A$ および $w_B$ は周期的に入れ替わる環境 $E_A$ および $E_B$ における適応度関数である。中立ネットワークの定義より、 $i = 0, \dots, 5$ の個体群および $i = 10, \dots, 15$ の個体群は $w_A$ ,  $w_B$ の両環境で中立ネットワークを形成する(表1中にNN1, NN2と表す)。適応度関数の式からわかるように、これらの中立ネットワークは各々の環境で最も高い適応度と最も低い適応度を示す。また、各々の中立ネットワークにおいて、1 ビットの突然変異ではその中立ネットワーク以外に変異しない遺伝子型を中立ネットワークの中心に位置していると考え(表1 NN1-c, NN2-c)、1 ビットの突然変異でその中立ネットワーク以外に変異する可能性のある遺伝子型をネットワークの端に位置していると考え(表1 NN1-e, NN2-e)。なお、中立ネットワークの中心に位置する遺伝子型はそれぞれの中立ネットワークに1つだけ存在する。その他の個体( $i = 6, \dots,$

9) はすべて中間の適応度を示すが、中立ネットワークは形成しない。

上述のモデル問題においてGA を適用する。個体数を10, 遺伝子長を4 とする。背景で述べたように、本研究は中立性を含む環境の簡易モデルにおける突然変異と環境変動によって現れるGA の進化ダイナミクスを解析することを目的としていることから、遺伝的操作として点突然変異のみを用いる。点突然変異率を $q \in \{0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5\}$  とする。選択法としてルーレット選択を用いる。各試行の最終世代数を2,000 とする。環境の変動周期を $\lambda$  とし、1 から1000 の範囲に設定し実験を行う。(ただし、変化の幅は $\Delta \lambda = 1$  ( $\lambda \leq 20$ ), 10 ( $20 < \lambda \leq 100$ ), 100 ( $100 < \lambda \leq 1000$ ) とする)。初期環境を $E_A$  とし、 $\lambda$  世代毎に $E_A \rightarrow E_B \rightarrow E_A \rightarrow \dots$  のように環境を交互に変更する。独立に50 試行を行い、それぞれの結果の平均を以下に示す。

#### 4. 研究成果

図1-3 に上記  $q$  の範囲で代表的なダイナミクスを示す  $q$  の値に関して環境変動周期  $\lambda$  に対する各遺伝子型の割合を示す。

$0.025 \leq q \leq 0.1$  では(図1), 変動周期が長い場合には環境 $E_A \cdot E_B$  とともに高い適応度を示す中立ネットワークの中心に位置する遺伝子型の割合が他の遺伝子型に対し最も大きくなっている。また、中立ネットワークの端に位置する遺伝子型もそれに次ぐ割合で存在している。これは計算生物学で述べられている genetic robustness の状態と一致する。変動周期が短くなると中立ネットワークの端に位置する遺伝子型の割合が最も大きくなる。これは計算生物学で述べられている genetic potential の状態と一致する。この中立ネットワークの端に位置する遺伝子型の割合が最も大きくなる現象が現れる  $\lambda$  の範囲は  $q$  が大き

くなるにつれ減少する。変動周期が非常に短くなる(おおよそ  $1 \leq \lambda \leq 3$ ) と、中間の適応度を示す遺伝子型の割合が最も大きくなる。これは計算生物学で述べられている organismal flexibility の状態と一致する。

$0.2 \leq q \leq 0.4$  では(図2), 変動周期が長い場合には、上述の高い適応度を示す中立ネットワークの中心に位置する遺伝子型および端に位置する遺伝子型の順で割合が大きいがそれぞれの値はほぼ0.1 以下となっている。この  $q$  の範囲では、変動周期が短くなっても、中立ネットワークの端に位置する遺伝子型の割合が最も大きくなるような現象は観察されない。変動周期が非常に短い場合( $\lambda = 1$ ) には、低い適応度と中間の適応度を示す遺伝子型の割合が高い適応度を示す遺伝子型の割合に比べ若干大きいかほぼ等しい割合で分布している。

$q = 0.5$  では、個体分布に関して明確な傾向は見られずランダムに存在することがわかる(図3)。

本研究の目的で述べたように、中立性に基づいて動的な環境で進化論的計算が示すダイナミクスについて研究した報告は研究代表者の知る限り国内外を問わず存在しない。中立性を含む環境の簡易モデルにおけるダイナミクスを明らかにしたことにより、複雑な環境におけるダイナミクスを理解する際の基本的な知識となり得ると考えられる。工学的な実問題の多くには中立性が含まれていることが知られている。これにより、動的な実問題への進化論的計算の適用が増え、今まで獲得することが困難であったような解が計算可能となることが期待される。また、本研究における計算機実験で得られた結果は計算生物学で得られている結果と完全に一致している。環境変動・中立性というキーワードから両分野の相互理解や発展が期待できると考えられる。

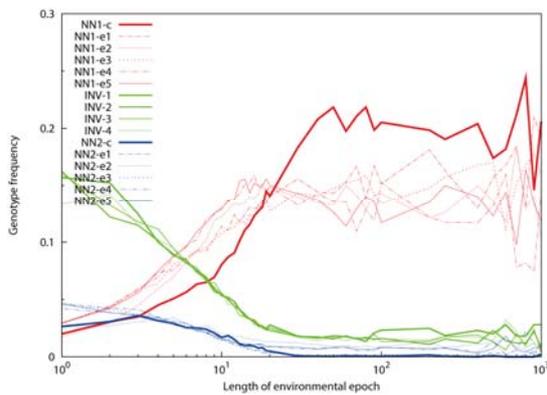


図1 変動周期に対する個体分布の推移 ( $q=0.025$ )

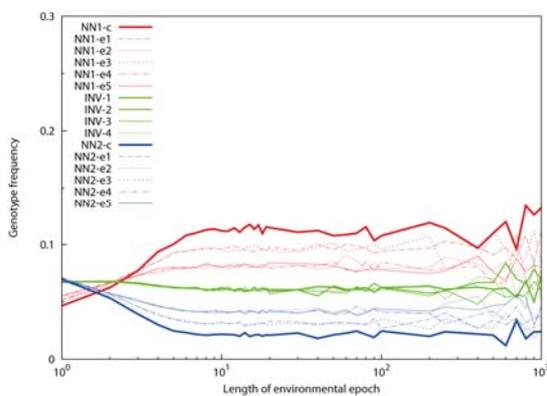


図2 変動周期に対する個体分布の推移 ( $q=0.2$ )

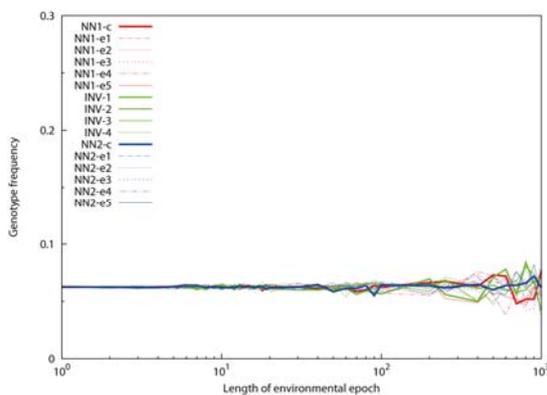


図3 変動周期に対する個体分布の推移 ( $q=0.5$ )

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Yoshiaki Katada, Evolutionary Dynamics of GAs in a Simple Model with Dynamical Environment and Neutrality, Proceedings of the European Conference on Artificial Life, 査読有, 2011, pp.388-395

[学会発表] (計 1 件)

① 片田喜章, 中立性を含む動的環境モデルにおけるGAの進化ダイナミクス, 人工知能学会第 4 回進化計算フロンティア研究会, 2010 年 6 月 4 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス, 研究会優秀賞受賞

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

片田 喜章 (KATADA YOSHIAKI)

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号 : 30411705