1次元トーラス網状離島モデルに基づく 遺伝的局所探索における島間距離戦略の検討

学生員 飯村 伊智郎* 非会員 松岡 賢一郎**
正員 中山 茂*

Consideration on Islands' Distance Strategy in a Genetic Local Search based on One-dimensional Torus Type Island Model

Ichiro Iimura*, Student Member, Ken'ichiro Matsuoka**, Non-member, Shigeru Nakayama*, Member

In a genetic local search (GLS) which is a hybrid technique of a genetic algorithm (GA) and a local search (LS), the undesirable phenomenon of premature convergence can often occur. Premature convergence is the phenomenon where the diversity of a group is lost. This phenomenon occurs because identical individuals are increased rapidly in the group while searching. Therefore, crossover loses its function. Once the premature convergence occurs, the search by the GLS becomes meaningless. Therefore, it is important to avoid the premature convergence and maintain the diversity. We made the parallel GLS to improve its searching ability and, in this paper, we propose a method named "Islands' Distance Strategy" to improve the searching ability of the GLS by introducing the concept of distance between the islands on one-dimensional torus type island model and by limiting the islands' range to which migrants can migrate. The problems used in these experiments are traveling salesman problems (TSPs) in 48 cities arranged in double-concentric-circle. The experimental results show that the proposed method achieved 100.0% as the attainment rate to the optimal solution, where the number of islands (subpopulations) $N_{sp} = 20, 25$ and the islands' range to which migrants can migrate $r = 1, 2$. Furthermore we demonstrated the existence of an appropriate islands' range to which migrants can migrate, and confirmed that the appropriate islands' range $r = 2$ in these experimental conditions.

キーワード: 遺伝的局所探索, 多様性, 初期収束, 離島モデル, 1次元トーラス網, 巡回セールスマン問題

Keywords: Genetic local search (GLS), Diversity, Premature convergence, Island model, One-dimensional torus, Traveling salesman problem (TSP)

1. はじめに

生物進化の過程に着想を得た遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) ⁽¹⁾⁻⁽³⁾ は, 最適化や探索のためのアルゴリズムとして種々の問題に適用されている。しかし, GA は交叉演算を中心に新しい探索点を生成するため, 解

空間の大域的な探索を得意とする反面, 良い解の近傍における系統的な探索が苦手であることが知られている。この点に留意したハイブリット化手法の一つに遺伝的局所探索 (Genetic Local Search: GLS) ⁽⁴⁾ がある。GLS では, 個体を評価する際に, 個体が表す解をそのまま評価するのではなく, その個体を初期値として局所探索 (Local Search: LS) を行うことで, GA の欠点を補っている。この GLS の効果を示すものとして, 文献 (4) が挙げられる。この文献より, GLS は, 多点スタート局所探索法 (Multi-start Local Search: MLS), シミュレーテッド・アニーリング法 (Simulated Annealing: SA), および GA を単独で用いる方法のいずれよりも同程度以下の計算時間でよい結果を出していることがわかる。その一方で, GLS には GA 同様, 個体集団内で同じ個体が急増するなどして探索の初期段階で個体集団の多様性が失われてしまい, 探索を非効率

* 鹿児島大学工学部情報工学科

〒 890-0065 鹿児島市都元 1-21-40

Dept. of Information and Computer Science, Faculty of Engineering, Kagoshima University.

1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065

** (株) サイバースステムズ

〒 105-0001 東京都港区虎ノ門 4-1-7 第 1 松坂ビル 4F

CyberSystems, Inc.

Daiichi-Matsuzaka Bldg. 4F, 4-1-7 Toranomon, Minato-ku, Tokyo 105-0001

的なものとしてしまう初期収束 (premature convergence) という現象が起こり得る。一旦、初期収束が起こると交叉演算はその機能を失い、探索がほとんど意味のないものになってしまう。なお、GA の多様性維持に関する筆者らの研究については、文献 (5) で既に報告している。

以上のことを踏まえ、筆者らはこの GLS の探索能力の改善を目的として、GLS の並列化を行った。並列化手法の一つである離島モデルでは、島および移住 (移民) の考え方が導入されたが、本研究では離島モデルの各島間に距離の概念を導入し、移民が移住できる島の範囲を限定することで GLS の探索能力を向上させる手法を提案する。本論文では、各島を 1 次元トーラス網状⁽⁶⁾⁽⁷⁾に配置した実験を通して、移住可能な島範囲の導入効果を検討することが目的である。具体的には、移住可能な島範囲の変化が探索能力に及ぼす影響 (最適解への到達率、探索世代数、そして探索時間) を調べることで、適切な移住可能な島範囲の存在について論ずる。

2. 離島モデルに基づいた GLS

GA は、選択、交叉、突然変異といった遺伝的操作や各個体の適応度計算を何世代にもわたって行うため、膨大な計算量が必要とされる。しかし、各個体は同時並行に遺伝的操作や適応度計算を実行することができ、GA は並列性の高いアルゴリズムであるといえる。そのため、GA の高速計算を主眼として、様々な並列化手法が提案されており次のように大別される⁽⁸⁾。この内、分解型アプローチには並列化による計算時間の短縮の他に、進化が局所的に進むので集団全体としての多様性を維持しやすい、という特徴もある⁽⁸⁾。

- (1) 単純並列 (単一集団) アプローチ
- (2) 分解型 (複数集団) アプローチ
 - (a) 離島モデル
 - (b) 近傍モデル

GLS は GA と LS のハイブリット化手法であるため、文献 (8) に示されている GA の並列化モデルがそのまま適用できる。筆者らは、分解型アプローチの持つ特徴に着目し、また GLS の実装の際に用いるオブジェクト共有空間やワーカ複製形式との親和性の観点から、GLS の並列化モデルとして離島モデルを採用した。

3. 1 次元トーラス網状島配置と島間距離戦略

離島モデルに基づいた GLS において、各島 (部分集団) が全く独立であるならば、GLS を複数回実行しているのと同じである。そのため、通常、並列化においては、各島間で個体を交換し互いに刺激しあうことで効率的な探索を行うことを目的とした移住という操作がある。一般に、移住対象である移民は適応度の高い個体が選ばれるため、単純に移住を行うと、個体集団内で同じ個体が急増するなどして探索の初期段階で個体集団の多様性が失われてしまい、探索を非効率的なものとしてしまう初期収束現象が起こる

図 1 1 次元トーラス網状島配置と移住可能な島

Fig. 1. Island arrangement based on one-dimensional torus type and islands to which migrant m_k can migrate in the case of $r = 4$.

危険性を秘めている。筆者らはその危険性を軽減するため、各島を特定の形状に配置し島間に距離の概念を導入することで、移民が移住できる島の範囲を限定した。つまり、近い距離に位置する島同士では移住が行われるが、一方遠く離れた島同士では移住が行われなくすることで多様性の維持を図る。この戦略は、各島間に距離の概念を導入したことから、ここでは島間距離戦略 (islands' distance strategy) と呼ぶことにする。図 1 は、今回用いた島配置である 1 次元トーラス網状島配置と、その島配置に対する島間距離戦略を示している。この島配置では、島がリング状に配置され、各島はそれぞれ 2 つの島と隣り合う。ここで、隣り合う島 x, y 間の距離 $d(x, y) (= d(y, x))$ を 1 とする。移住可能な島範囲 r (0 を含む正の整数) が 4 のとき、島 k 出身の移民 m_k が移住できる島 I_{m_k} は、この図に示すように出身の島を含む両側の 2 島 (出身の島および距離 2 の範囲に位置する両側の島々) となる。ここで、 N_{sp} を全島数、 i ($i = 0, 1, 2, \dots, N_{sp} - 1$) を島番号、 k を移民の出身島番号、そして r を移住可能な島範囲とすると、島 k 出身の移民 m_k が移住できる島 I_{m_k} は次式で与えられる。

$$I_{m_k} = \{i \mid i = \tilde{i} \bmod N_{sp}, k - \lfloor r/2 \rfloor \leq \tilde{i} \leq k + \lceil r/2 \rceil\} \dots \dots \dots (1)$$

例えば、 $N_{sp} = 20, k = 19, r = 4$ の場合、

$$I_{m_{19}} = \{17, 18, 19, 0, 1\} \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで説明の都合上、時計回りを + (プラス)、反時計回りを - (マイナス) とすると、移住可能な島範囲 r が奇数の場合、(1) 式に従うと + (プラス) 向きの島数が - (マイナス) 向きの島数よりも 1 島多くなる。これは、以

降述べる実験における便宜上のものであり、特に大きな意味はない。なお (1) 式は、見方を変えると、島 k が受け入れることができる移民 m_k の出身島 I_{m_k} を表しているとも考えることができる。

4. 実験

上述した 1 次元トーラス網状島配置を用い、巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem: TSP)⁽⁹⁾ を対象として、移住可能な島範囲を変化させたときの探索能力 (最適解への到達率, 探索世代数, そして探索時間) への影響を調べる実験を行った。

4.1 対象とした TSP TSP は、 N 個の都市を 1 回ずつ通って巡回する最短の経路を見つける問題である。ここでは、都市の位置は 2 次元座標として与えられ、任意の 2 つの都市間の移動は 2 都市を結ぶ線分上を通過して行われることを前提にする。今回の実験では、移住可能な島範囲の導入効果を検討することが目的であるため、ランダムな都市配置ではなく、得られた解が最適解であるかどうかを厳密に確認できるように既に最適解 (最短の巡回路) が知られている都市配置を用いる。最適解が明らかな都市配置は、都市を格子状に配置したものや、ある閉曲線上に狭い間隔で都市を配置したもの、そして TSPLIB[†]などが考えられる。しかし今回は、文献 (4) (10) ~ (12) でも取り上げられた都市配置を対象とするものとした。この都市配置は、問題の難易度を容易に変えられ、明らかな最適解、局所解を持つ。その配置は、図 2 に示すように二重の同心円状に同数 n の都市 (従って全都市数は $2n$) が均等に並んだものである。ここで図 2 は、 $2n = 48$ の場合を示している。この配置における TSP は、内外円の半径比 τ^{2n} によって、図 3、図 4 のような C 型、O 型の最適解を持つという面白い性質がある。外円の半径を 1 と固定して、内円の半径を変化させると、内外円の半径比 τ_{th}^{2n} で最適解が入れ替わることが知られており、その閾値 τ_{th}^{2n} は、次式で与えられる。

$$\tau_{th}^{2n} = \frac{1 - \sin(2\pi/2n)}{1 + \sin(2\pi/2n)} \dots\dots\dots (3)$$

例えば図 2 のような $2n = 48$ の場合、この閾値 τ_{th}^{2n} は 0.769087716643286... となる。

先程、二重同心円状に配置された都市を対象とした TSP に関する文献として、文献 (4) (10) ~ (12) を取り上げた。ここで注意すべき点は、本実験で用いた半径比 τ^{48} (詳しくは、4.3 節を参照のこと) のような閾値 τ_{th}^{48} との差が極めて僅少である厳しい条件下での実験は、従来行われていないことである。

なお、この都市配置は単純な nearest neighbor 法などでは最適解を求めることができない。図 5 は、半径比 $\tau^{2n} = \tau_{th}^{2n}$ のときの $2n$ 都市二重同心円状配置から、内円 2 都市、外

図 2 二重同心円状に配置された 48 都市

Fig. 2. 48 cities arranged in double-concentric-circle.

図 3 C 型 ($2n = 48, \tau^{48} < \tau_{th}^{48}$)

Fig. 3. C-type ($2n = 48, \tau^{48} < \tau_{th}^{48}$).

図 4 O 型 ($2n = 48, \tau^{48} > \tau_{th}^{48}$)

Fig. 4. O-type ($2n = 48, \tau^{48} > \tau_{th}^{48}$).

円 2 都市の計 4 都市を抽出し拡大して示したものである。辺 a, b, c の長さは次式で与えられ、これらの大小関係は $a < c < b$ ($\tau^{2n} = \tau_{th}^{2n}$ のとき) となる。

[†] <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/index.html> を参照のこと。

図 5 $\tau^{2n} = \tau_{th}^{2n}$ のときの a, b, c の関係

Fig. 5. Relation among a, b , and c in the case of $\tau^{2n} = \tau_{th}^{2n}$.

$$\theta = 2\pi/n \dots \dots \dots (4)$$

$$a = 2\tau_{th}^{2n} \sin(2\pi/2n) = 2\tau_{th}^{2n} \sin(\theta/2) \dots \dots \dots (5)$$

$$b = 2 \sin(2\pi/2n) = 2 \sin(\theta/2) \dots \dots \dots (6)$$

$$c = 1 - \tau_{th}^{2n} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、内円の半径 τ^{2n} を徐々に長くしていくと、 c は短くなり、 a は長くなる。 c は短くなり a は長くなるが、まだ $a < c$ の関係が保たれている場合を考える。すると、このとき $\tau^{2n} > \tau_{th}^{2n}$ であるため最適解は O 型であるが、 $a < c$ の関係があるため、nearest neighbor 法では内円の弧をたどるように探索が進み、解は C 型になることが容易に予想される。したがって、 $2n$ 都市二重同心円状配置に nearest neighbor 法を適用した場合、その解の最適性は保証されないことになる。

4.2 離島モデルに基づいた GLS の実装方法 本実験では、離島モデルに基づいた GLS の実装にオブジェクト共有空間 JavaSpaces^{(5)(13)~(16)} を用い、分散並列処理を行うためにワーカー複製形式^{(5)(13)~(16)} と呼ばれる処理形式を用いた。図 6 は、オブジェクト共有空間を用いたワーカー複製形式の概念図である。この形式では、処理をマスタ部分とワーカー部分とに分ける。マスタは処理全体の制御を行い、仕事を分割してワーカーに配り、ワーカーから処理結果を収集する。ワーカーは割り当てられたデータに対して演算処理を行い、その処理結果をマスタに返すのみである。演算対象とする離島モデルが N_{sp} 個の島（部分集団）からなるとき、ワーカーによる遺伝的操作や局所探索、そして適応度計算は N_{sp} 個の島毎に独立して行える。このワーカーの役割を複数の計算機に行わせることにより、分散並列処理が実現される。

具体的には、マスタは初期母集団を生成しそれらを複数個の部分集団に分割して、それを内容にもつ仕事エントリ (task entry) をオブジェクト共有空間に書き込む。そしてオブジェクト共有空間を監視し、各ワーカーにより最良個体をもつ結果エントリ (result entry) が書き込まれたならば、そのエントリをオブジェクト共有空間から取り去る。一方、各ワーカーはオブジェクト共有空間を監視し、マスタにより部分集団を内容にもつ仕事エントリが書き込まれたならば、そのエントリをオブジェクト共有空間から取り去る。そしてその情報をもとに、選択、交叉、突然変異などの遺伝的操作や局所探索、そして適応度計算を行い、その結果得ら

図 6 オブジェクト共有空間を用いたワーカー複製形式

Fig. 6. Replicated-worker pattern with object-shared space.

表 1 実験で使った計算機

Table 1. Computer used in the experiments.

CPU	Intel Pentium4 Mobile CPU 1.7GHz
RAM	1.0GB
OS	Microsoft Windows XP Pro. SP1
Ver. of JDK	J2SE 1.3.1-02
Ver. of Jini	1.1

れた最良個体をもつ結果エントリをオブジェクト共有空間に書き込む。これらの処理を予め指定した世代数分繰り返すと、分散並列処理部分は完了となる。ここで、進化の過程に関するデータ採取が必要な場合、最良個体を内容にもつ結果エントリを各ワーカーがオブジェクト共有空間に毎世代書き込み、それをマスタが毎世代取り去る必要がある。しかし、最終結果のみ必要な場合は、これらの処理は最終世代のみ行えばよい。オブジェクト共有空間には、このように最良個体の一時格納を行わせているほか、移住時の移民の一時格納も行わせている。

今回は、実験環境の都合上、オブジェクト共有空間、マスタ、そして各ワーカーの演算を 1 台の計算機でコンカレント処理 (concurrent processing) した。使用した計算機は、表 1 に示す通りである。使用ソフトウェアは Java 言語の開発環境である JDK (Java Development Kit) と、オブジェクト共有空間を提供する Jini である。

4.3 実験要領 実験で用いた内外円の半径比 τ^{48} は、閾値 τ_{th}^{48} に極めて近い $\tau_C^{48} = 0.7690876$ (τ_{th}^{48} と τ_C^{48} の相対誤差は、約 $0.15 \times 10^{-4}\%$) と $\tau_O^{48} = 0.7690878$ (τ_{th}^{48} と τ_O^{48} の相対誤差は、約 $0.11 \times 10^{-4}\%$) の 2 種類とした。これらの半径比を実験の対象とすることにより、先にも述べたが、文献 (4) (10) ~ (12) で取り上げられた二重同心円状配置よりも極めて困難な問題設定となる。島数 (部分集団数) $N_{sp} = 1, 10, 20, 25$, 移住可能な島範囲 $r = \text{any}, 1, 2, 4, 6, 8$ ($r = 8$ は $N_{sp} = 25$ のときのみ) と変化させた場合について、 τ_C^{48} , τ_O^{48} に対する試行回数をそれぞれ 30 回とし、合計 1,020 回の数値実験を行った。ここで、移住可能な島範囲 r が “any” とは、移住可能な島範囲に制限を設けない、

図 7 1本の枝 b の接続を逆転させる操作

Fig. 7. Operation which reverses connection of one branch b .

つまりいずれの島へも制限なく移住が可能であることを意味する。

4.3.1 遺伝的操作と局所探索 個体の染色体は、訪問する順に都市番号 i を 1 次元的に並べた配列としてコーディングした。選択は適応度比例戦略を採用し、それにより選ばれた個体同士の交叉には部分写像交叉を用いた。また、集団の中で最も適応度の高い個体をそのまま残すエリート戦略も採用した。さらに突然変異は、2 箇所をランダムに選択し入れ替える操作を用いた。遺伝的パラメータの値は、個体数 $N_{ind} = 1,600$ 、交叉率 $P_{cro} = 60\%$ 、突然変異率 $P_{mut} = 0.1\%$ とした。

局所探索としては、2-opt 法と、図 7 に示すように 1 本の枝の接続を逆転させて解が改善した場合のみそれを受け入れる操作のどちらか一方をランダムに行った。この局所探索の結果は、ラマルク主義 (Lamarckism) により遺伝子型に反映させた。

各部分集団における個体は、初期母集団に属する個体を均等に分割配分するものとした。最大世代数 $G_{max} = 800$ とし、最適解が求まった時点で進化を終了させた。

4.3.2 移 住 各島における移民は、適応度比例戦略に基づいて選ばれた 1 個体を複製したものとした。つまり、各世代での移民の総数は島数と同じである。移住は毎世代行い、各島による移民の受け入れは移入確率 $P_{mig} = 30\%$ とし、受け入れた移民はランダムに選ばれた 1 個体と置き換えた。したがって、各島に属する個体の総数は各世代で変わらないものとした。

島 k が受け入れることができる移民 m_k の出身島は、(1) 式で定められる島々のうちからランダムに 1 島決定した。その決定された島出身の移民が、既に他の島に移住してしまい対象とする移民がオブジェクト共有空間に存在しなかった場合は、移住は行わないものとした。但し、移住可能な島範囲 r が any の場合はこの限りではなく、どの島出身の移民でも制限なく受け入れることができる。

5. 実験結果と考察

5.1 最適解への到達率 図 8 は、部分集団数 $N_{sp} = 1, 10, 20, 25$ について、移住可能な島範囲 r に対して最適解への到達率が変化する様子を示している。各値は、半径比が τ_C^{48} と τ_O^{48} について、それぞれ 30 回、合計 60 回試行した結果であり、60 回試行中 60 回最適解に到達した場合を 100.0% とする値である。また、その詳細な数値を表 2 に示す (表中の下線で示した値は N_{sp} 毎の最も高い最適解への

図 8 最適解への到達率

Fig. 8. Attainment rate to the optimal solution.

表 2 最適解への到達率の詳細

Table 2. Details of the attainment rate to the optimal solution.

N_{sp}	Islands' range to which migrants can migrate					
	$r = \text{any}$	$r = 1$	$r = 2$	$r = 4$	$r = 6$	$r = 8$
25	80.0 %	<u>100.0 %</u>	<u>100.0 %</u>	96.7 %	91.7 %	86.7 %
20	76.7 %	<u>100.0 %</u>	<u>100.0 %</u>	96.7 %	78.3 %	—
10	65.0 %	85.0 %	85.0 %	<u>86.7 %</u>	70.0 %	—
1	38.3 %	→	→	→	→	→

到達率であり、“→”は同左の意味である)。実験で使用した半径比 τ_C^{48} と τ_O^{48} の τ_{th}^{48} に対する相対誤差の差が僅少であるが異なることや、使用した遺伝的操作の性質などにより両者の結果には違いを呈するが、ここでは、離島モデルの各島間に距離の概念を導入し移住可能な島の範囲内で移住を行うことによる探索能力への影響を検証することに主眼を置いており、その効果を容易に把握できるように、2 種類の半径比の結果を併せて提示するものとした。

図 8 より、 $N_{sp} = 10, 20, 25$ のいずれの場合も移住可能な島の範囲を限定することで、最適解への到達率が向上していることがわかる。特に $N_{sp} = 20, 25$ で $r = 1, 2$ の場合、最適解への到達率 100.0% を達成できている。一方、移住可能な島範囲 r を 6 まで広げた場合、 $N_{sp} = 10, 20$ では最適解への到達率に極端な低下が見られる。 $N_{sp} = 25$ でも、 $r = 6, 8$ まで広げた場合、やはり低下傾向にあることが認められる。

最適解への到達率の値を詳細に見てみると、表 2 より、 $N_{sp} = 20, 25$ の場合は $r = 1, 2$ (100.0%) のとき、 $N_{sp} = 10$ の場合は $r = 4$ (約 86.7%) のときが最も高い最適解への到達率となっている。なお、 $N_{sp} = 10$ での $r = 2$ と 4 における到達率の差は約 1.7% で、 $r = 4$ の方が 60 回中 1 回最適解への到達回数が多い。また $N_{sp} = 20, 25$ での

図 9 探索世代数

Fig. 9. Number of search generations.

表 3 探索世代数の詳細

Table 3. Details of the number of search generations.

N_{sp}	Islands' range to which migrants can migrate					
	$r = \text{any}$	$r = 1$	$r = 2$	$r = 4$	$r = 6$	$r = 8$
1	692 gen	→	→	→	→	→
10	541 gen	474 gen	460 gen	460 gen	509 gen	→
20	464 gen	390 gen	386 gen	396 gen	469 gen	→
25	440 gen	389 gen	365 gen	389 gen	392 gen	415 gen

$r = 2$ と 4 では、その差は約 3.3% で、 $r = 4$ の方が 60 回中 2 回最適解への到達回数が多い。

以上の結果から考えると、移住可能な島範囲 r にはその効果が現れる適切な範囲が存在することがうかがえる。そしてその範囲を、ここでは各部分集団数 N_{sp} において最大の到達率を示した範囲と考え、今回の実験条件の下では r が 1 以上 4 以下が適切であるものと考えられる。これは、1 次元トーラス網に配置された各島は比較的狭い範囲内で移住することが、最適解への到達率の観点からは適していることを意味するものと思われる。しかしながら、部分集団数 N_{sp} と移住可能な島範囲 r の明確な関係については本実験では明らかになっておらず、今後さらなる研究を行い検討する余地があると考えている。また図 8 は、部分集団数 N_{sp} が増えるごとに最適解への到達率が高くなることも示している。

5.2 探索世代数 図 9 は、部分集団数 $N_{sp} = 1, 10, 20, 25$ について、移住可能な島範囲 r に対して探索世代数が変化する様子を示している。各値は、半径比が τ_C^{48} と τ_O^{48} について、それぞれ 30 回、合計 60 回試行した結果の平均値である。また、その詳細な数値を表 3 に示す（表中の単位 “gen” は “世代” を表し、下線で示した値は N_{sp} 毎の最も少ない探索世代数であり、また “→” は同左の意

味である）。

図 9 より、 $N_{sp} = 10, 20, 25$ のいずれの場合も移住可能な島の範囲を限定することで、探索世代数が改善（減少）していることがわかる。一方、移住可能な島範囲 r を 6 まで広げた場合、 $N_{sp} = 10, 20$ では探索世代数に増加が見られる。 $N_{sp} = 25$ でも、 $r = 6, 8$ まで広げた場合、やはり増加傾向にあることが認められる。これは、最適解への到達率の結果である図 8 から説明できる。つまり、 $r = 6, 8$ のとき到達率が低下し、最適解に到達できず最大世代数 G_{max} まで進化が進んだケースが増えたために、探索世代数の増加を引き起こしたものと考えられる。

探索世代数の値を詳細に見てみると、表 3 より、 $N_{sp} = 10$ の場合は $r = 2, 4$ (460 世代) のとき、 $N_{sp} = 20$ の場合は $r = 2$ (386 世代) のとき、そして $N_{sp} = 25$ の場合も $r = 2$ (365 世代) のときが最も少ない探索世代数となっている。

以上の結果から考えると、先程の実験結果と同様、移住可能な島範囲 r にはその効果が現れる適切な範囲が存在することがうかがえる。そしてその範囲を、ここでは各部分集団数 N_{sp} において最少の探索世代数を示した範囲と考え、今回の実験条件の下では $r = 2$ が適切であるものと考えられる。これは、先の実験の場合と同様、1 次元トーラス網に配置された各島は比較的狭い範囲内で移住することが、探索世代数の観点からも適していることを意味するものと思われる。また図 9 は、部分集団数 N_{sp} が増えるごとに探索世代数が少なくなることも示している。

5.3 探索時間 図 10 は、部分集団数 $N_{sp} = 1, 10, 20, 25$ について、移住可能な島範囲 r に対して探索時間が変化する様子を示している。各値は、半径比が τ_C^{48} と τ_O^{48} について、それぞれ 30 回、合計 60 回試行した結果の平均値である。また、その詳細な数値を表 4 に示す（表中の単位 “sec” は “秒” を表し、下線で示した値は N_{sp} 毎の最も短い探索時間であり、また “→” は同左の意味である）。

今回の実験はコンカレントに処理を行ったため、図 10 に示すとおり、 N_{sp} が増すごとに探索時間が増加する結果となった。ここで N_{sp} が 1 と 10 の場合を見てみると、ほぼ近い探索時間となっている。これは、 N_{sp} の 10 倍増による探索世代数の減少とオブジェクト共有空間へのアクセス負荷などの増加が相殺して、このような結果になったものと思われる。移住可能な島範囲 r を 6 まで広げた場合、 $N_{sp} = 10, 20$ では探索時間が極端に増加しているが、これは探索世代数の結果である図 9 の場合と同様の理由によるものと思われる。また、 $N_{sp} = 25$ でも、 $r = 6, 8$ まで広げた場合、やはり増加傾向にあることが認められるが、これも探索世代数の場合と同様の理由によるものと思われる。ここで $r = 6$ のとき、 N_{sp} が 20 と 25 で探索時間の逆転が見受けられる。 $N_{sp} = 25$ においては、移住可能な島範囲 r を 6 まで広げた場合、最適解への到達率が低下傾向にあることを先に示したが、その低下の度合いは $N_{sp} = 20$ の場合に比べて緩やかであった。つまり、 $N_{sp} = 20$ の場合は、

図 10 探索時間

Fig. 10. Search time.

表 4 探索時間の詳細

Table 4. Details of the search time.

N_{sp}	Islands' range to which migrants can migrate					
	$r = \text{any}$	$r = 1$	$r = 2$	$r = 4$	$r = 6$	$r = 8$
25	428 sec	381 sec	362 sec	380 sec	384 sec	402 sec
20	400 sec	341 sec	338 sec	343 sec	405 sec	—
10	301 sec	266 sec	256 sec	258 sec	287 sec	—
1	280 sec	→	→	→	→	→

極端に最適解への到達率が低下したことにより最適解へ到達できずに最大世代数 G_{max} まで進化が進んだケースが増え、それにより探索世代数が大幅に増加し、その結果、比較的緩やかな最適解への到達率の低下を示した $N_{sp} = 25$ よりも探索時間が長くなる結果になったものと思われる。

探索時間の値を詳細に見てみると、表 4 より、 $N_{sp} = 10, 20, 25$ のいずれの場合も $r = 2$ (それぞれ 256 秒, 338 秒, 362 秒) のときが最も短い探索時間となっている。

以上の結果から考えると、先の 2 つの実験結果と同様、移住可能な島範囲 r にはその効果が現れる適切な範囲が存在することがうかがえる。そしてその範囲を、ここでは各部分集団数 N_{sp} において最短の探索時間を示した範囲と考え、今回の実験条件の下では $r = 2$ が適切であるものと考えられる。これは、これまでの実験結果と同様、1 次元トーラス網状に配置された各島は比較的狭い範囲内で移住することが、探索時間の観点からも適していることを意味するものと思われる。

5・4 多様性の維持 ここでは、部分集団数 N_{sp} が 20 の場合の実験結果をもとに多様性の維持能力について述べる。図 11, 図 12 は最適解が C 型の場合であり、それぞれ、 r が any と 2 のときの最適解が求まった時点における各島の最良解の 1 ケースを 1 次元トーラス網状に配置して示したものである。同様に図 13, 図 14 は、最適解が O 型

図 11 各島の最良解 (最適解: C 型, 移住可能な島範囲 r : any, 308 世代)

Fig. 11. The best solution on each island (Optimal solution: C-type, Islands' range to which migrants can migrate r : any, 308th generation).

図 12 各島の最良解 (最適解: C 型, 移住可能な島範囲 r : 2, 302 世代)

Fig. 12. The best solution on each island (Optimal solution: C-type, Islands' range to which migrants can migrate r : 2, 302nd generation).

の場合のものである。いずれも灰色に塗られた島の最良解が、求められた最適解である。

$r = \text{any}$ の場合の結果を見てみると、全ての島が一様に C 型あるいは O 型のどちらかに収束している。一方 $r = 2$ の場合は、C 型と O 型の両方の存在が確認できる。さらに C 型に進化している島群と O 型に進化している島群が 1 次元トーラス網状島配置の対極に位置していることもわかる。

図 13 各島の最良解（最適解：O 型，移住可能な島範囲 r : any, 344 世代）

Fig. 13. The best solution on each island (Optimal solution: O-type, Islands' range to which migrants can migrate r : any, 344th generation).

図 14 各島の最良解（最適解：O 型，移住可能な島範囲 r : 2, 382 世代）

Fig. 14. The best solution on each island (Optimal solution: O-type, Islands' range to which migrants can migrate r : 2, 382nd generation).

これらの結果から，移住可能な島範囲を導入することで集団全体の多様性が維持され易くなることが確認できる。

6. おわりに

離島モデルの各島間に距離の概念を導入し，移民が移住できる島の範囲を限定することで GLS の探索能力を向上させる手法として島間距離戦略を提案した。本手法では，GLS

における遺伝的操作や局所探索は従来の基本的な枠組みによる単純なものであるが，移住可能な島の範囲内で移住を行うことで多様性の維持を図り初期収束現象を回避する。実験の結果，提案手法によって， $N_{sp} = 20, 25$ で $r = 1, 2$ の場合に 100.0% という高い最適解への到達率を達成できた。さらに，最適解への到達率，探索世代数，そして探索時間の 3 つの観点から，移住可能な島範囲 r にはその効果が現れる適切な範囲が存在することを示した。そしてその範囲は，これら 3 つの実験結果から総合的に考えると，本実験の条件下では $r = 2$ が適切であるものと考えられる。以上述べてきたとおり，離島モデルの各島間に「距離」の概念を導入することは探索性能の向上に有効であり，今後の探索性能向上における研究の一つの方向性を示唆するものと思われる。

今後は，他の都市配置を対象として実験を行うと共に，部分集団数 N_{sp} と移住可能な島範囲 r の相関について検討を進める予定である。また，1 次元トーラス網状以外の島配置についても同様の実験を行い，移住可能な島範囲の導入効果と適切な移住可能な島範囲を検討していきたい。

（平成 15 年 5 月 27 日受付，平成 16 年 4 月 7 日再受付）

文 献

- (1) J.H. Holland: "Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence", Univ. of Michigan Press, Ann Arbor (1975)
- (2) D.E. Goldberg: "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, Mass. (1989)
- (3) H. Iba: "Genetic Algorithms", IGAKU-SHUPPAN, Tokyo (2002) (in Japanese)
伊庭育志:「遺伝的アルゴリズム」, 医学出版, 東京 (2002)
- (4) K. Maekawa, H. Tamaki, H. Kita, and Y. Nishikawa: "A Method for the Traveling Salesman Problem Based on the Genetic Algorithm", *T. SICE*, Vol.31, No.5, pp.598-605 (1995) (in Japanese)
前川景示・玉置 久・喜多 一・西川禎一:「遺伝アルゴリズムによる巡回セールスマン問題の一解法」, 計測自動制御学会論文集, 31, 5, pp.598-605 (1995)
- (5) I. Iimura, S. Ikehata, and S. Nakayama: "Consideration on Noah's Ark Strategy in Parallel Genetic Algorithm with Object-shared Space", *Journal of JSIK*, Vol.13, No.2, pp.1-17 (2003-2) (in Japanese)
飯村伊智郎・池端伸哉・中山 茂:「オブジェクト共有空間を用いた並列遺伝的アルゴリズムにおけるノアの箱舟戦略の検討」, 情報知識学誌, 13, 2, pp.1-17 (2003-2)
- (6) 飯村伊智郎・松岡賢一郎・中山 茂:「1 次元トーラス網状相互接続による複数集団型島モデル並列遺伝的局所探索の研究」, 電気関係学会九州支部第 55 回連合大会講演論文集, 1104, p.574 (2002)
- (7) I. Iimura, K. Matsuoka, and S. Nakayama: "Study on Traveling Salesman Problem by Parallel Genetic Local Search with Object-shared Space", *Proc. The 15th Computational Mechanics Conference, JSME*, No.02-02, 143, pp.85-86 (2002) (in Japanese)
飯村伊智郎・松岡賢一郎・中山 茂:「オブジェクト共有空間を用いた並列遺伝的局所探索による巡回セールスマン問題の研究」, 日本機械学会第 15 回計算力学講演会講演論文集, No.02-02, 143, pp.85-86 (2002)
- (8) N. Sannomiya, H. Kita, H. Tamaki, and T. Iwamoto: "Genetic Algorithms and Optimization", Asakurashoten, Tokyo (1998) (in Japanese)
三宮信夫・喜多 一・玉置 久・岩本貴司:「遺伝アルゴリズムと最

- 適化」, 朝倉書店, 東京 (1998)
- (9) 山本芳嗣・久保幹雄:「巡回セールスマン問題への招待」, 朝倉書店, 東京 (1997)
- (10) M. Yamamura, T. Ono, and S. Kobayashi: "Character-Preserving Genetic Algorithms for Traveling Salesman Problem", *Journal of JSAI*, Vol.7, No.6, pp.1049-1059 (1992) (in Japanese)
山村雅幸・小野貴久・小林重信:「形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法」, 人工知能学誌, 7, 6, pp.1049-1059 (1992)
- (11) H. Hatano: "Genetic Algorithm", *Journal of JSAI*, Vol.8, No.3, pp.312-319 (1993) (in Japanese)
波田野寿昭:「遺伝的アルゴリズム」, 人工知能学誌, 8, 3, pp.312-319 (1993)
- (12) H. Sengoku and I. Yoshihara: "An Evaluation of Optimizing Capability of Genetic Algorithm —GA vs SA—", Proc. The 47th National Convention of IPSJ, 6N-2 (1993) (in Japanese)
仙石浩明・吉原郁夫:「遺伝的アルゴリズムの最適解探索能力に関する評価 —GA と SA の比較—」, 情報処理学会第 47 回全国大会講演論文集, 6N-2 (1993)
- (13) E. Freeman, S. Hupfer, and K. Arnold: "JavaSpaces Principles, Patterns, and Practice", Addison-Wesley, Reading, Mass. (1999)
- (14) T. Yuizono and S. Nakayama: "Trial Experiments of Distributed Parallel Processing with JavaSpaces: Linda-based Object Shared Space", Technical Report of IEICE, Vol.99, No.547, SS99-59, pp.73-80 (2000) (in Japanese)
由井園隆也・中山 茂:「オブジェクト共有空間 JavaSpaces における分散並列処理の実験評価」, 電子情報通信学会技術報告, 99, 547, SS99-59, pp.73-80 (2000)
- (15) T. Yuizono, S. Nishi, K. Mori, and S. Nakayama: "Distributed Parallel Processing for High Speed Calculation in Computer-Generated Fresnel Hologram", *Kogaku (Journal of Optics)*, Vol.29, No.5, pp.316-322 (2000) (in Japanese)
由井園隆也・西 省吾・森 邦彦・中山 茂:「フレネル型計算機ホログラムの高速計算のための分散並列処理」, 光学, 29, 5, pp.316-322 (2000)
- (16) H. Tsurusawa, S. Nakayama, T. Futida, and S. Murashima: "Experiments on Distributed Parallel Processing for Speeding up Prime Factorization in the Elliptic Curve Method", *Trans. IEE of Japan*, Vol.122-C, No.5, pp.885-891 (2002-5) (in Japanese)
鶴沢偉伸・中山 茂・瀧田孝康・村島定行:「楕円曲線法における素因数分解高速化のための分散並列処理実験」, 電学論誌 C, 122, 5, pp.885-891 (2002-5)

飯 村 伊智郎 (学生員) 平 6 上智大学院博士前期課程修了, 同年 (株) 日立製作所日立研究所入社, 平 9 年熊本県立技術短大講師, 平 14 熊本県立大助手, 同年鹿児島大学院博士後期課程入学, 平 15 熊本県立大総合管理学部総合管理学科講師。修士 (工学)。平 13 情報処理学会大会奨励賞, 平 15 日本機械学会計算力学部門優秀講演表彰, 情報処理学会九州支部奨励賞各受賞。進化型計算, ITS, 分散オブジェクトの研究に従事。情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会, 情報知識学会, 情報文化学会, 日本計算工学会 各会員。

松 岡 賢一郎 (非会員) 平 14 熊本県立技術短大卒業。同年 (株) サイバースステムズ入社。進化的計算処理, 分散オブジェクト, POS データ分析, 統計処理の研究に従事。

中 山 茂 (正員) 昭 52 京都大学院博士課程修了, 同年上智大助手, 昭 56 京都工芸繊維大助手, 昭 62 兵庫教育大助教授, 平 9 年より鹿児島大工学部情報工学科教授。京大工博。平 8 情報文化学会学会賞, 平 12 九州工学教育協会賞各受賞。主として, 分散オブジェクト, 協調型仮想環境, エージェント, 並列 GA の研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 物理学会, 応用物理学会 各会員。