免疫システムに基づく組合せ最適化アルゴリズムの検討

當間 愛晃　遠藤 聡志　山田 孝治

Study of Combinatorial Optimization Algorithm Based on Immune System

Naruaki Toma, Satoshi Endo, Koji Yamada

琉球大学大学院理工学研究科情報工学専攻

Masters Course in Information Engineering, Graduate School of Science and Engineering

Abstract

The immune system is one of the adaptive biological system whose functions are to identify and to eliminate foreign material. Applying this system to the engineering problems, these processes are regard as the effective search and optimization. In this paper, we propose an optimization algorithm based on immune system with two memory mechanisms. The one is used to change search scope effectivly and the other is used to solve similar problems repeatedly. Some computer simulations are designed to investigate the performance of the immune algorithm. The results of simulations represent that the immune algorithm shows good performance for TSP.

1　はじめに

ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms :GA) 等の適応アルゴリズムは，従来の工学的最適化手法にはない，生物の優れた情報処理機能に基づいており，その有効性は様々な研究により示されている [9]．

近年，脳神経系，遺伝適応系と並ぶ第三の生体システムとして免疫システムが取り上げられている．免疫システムは，多様性のある抗体の産生及びその自己調節機構，抗体の特異性や免疫学的記憶に基づいた一次免疫応答及び二次免疫応答等の様々な高次情報処理機構により構成されている．このような特徴を持つ免疫システムを最適化手法として捉えた研究例として，多峰性関数最適化 [4, 5]，一個体による多機能型適応システム [8] 等がある．森らにより提案された免疫アルゴリズム (Immune Algorithms :IA) は，多様性のある抗体産生機構とその調節機構，探索過程で得た有効抗体の記憶細胞とサプレッサー細胞への分化機構と，サプレッサー細胞による抗体産生の抑制機構により構成される．同アルゴリズムでは，多峰性関数における複数最適解の獲得が可能となる．一方，細胞遺伝子の再構成法として増殖オペレータを導入することによる局所探索の実現や，探索により得られた記憶をその後の問題解決で利用することによる探索効率の改善が考えられる．

本論文では，IA を GA の強力な大域探索能力に，記憶機構を加えた探索アルゴリズムとして捉え，提案する記憶機構を用いることで，問題固有の解の特徴抽出及び，探索効率の改善が可能であることを示す．導入する記憶機構は，問題に対する解は相互に刺激・抑制しあいながら閉鎖的なネットワークを形成しているという免疫ネットワーク説に基づいた，一次記憶と二次記憶により構成される．

一次記憶機構 ：探索中に発見した優位解の特徴を記憶し，それを基に増殖プロセスを積極的に支援することで，探索空間の絞り込みを行う．

二次記憶機構 ：ある局所解に収束しつつある探索点を記憶し，それを基に再探索の抑制行う．

二つの記憶機構を用いた探索では，(1) 一次記憶機構により局所探索を促進し，効率良く局所解を発見可能，(2) 二次記憶機構により局所解からの脱出，という特長が予想できる．すなわち，大域探索と局所探索を使い分けることで，解の特徴である局所解を獲得し続けるものと期待できる．また，同じ特徴を持つ問題の再探索においては，得られた局所解を有効に利用することで一度目の探索よりも効率良く探索することが可能と思われる．提案する記憶機構の有効性を検証するため，二つの実験を設定する．

2　免疫システム

免疫システムとは，生体内に侵入する未知の抗原に対応するため，細胞遺伝子の再構築を行なって抗原に対応する抗体を産生し，抗原を排除する生体監視防衛機構である．

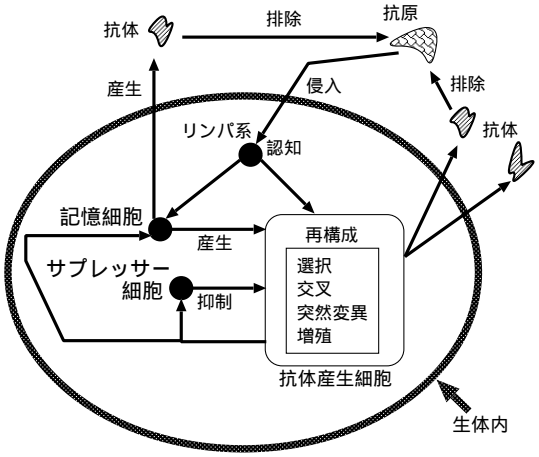

図 1: Immune system

図 1に免疫システムの基本機構を示す．免疫システムは，

- 抗原の認識機構 :生体内に侵入した抗原をリンパ系が認識
- 細胞遺伝子の再構成機構 :その抗原に対応する抗体産生細胞の増殖，再構成
- 抗原の排除機構 :抗原の排除による生体防御
- 抗体の記憶機構 :過去に排除した抗原に，素早く対応するためにその抗体を記憶
- 抗体の調整機構 :自己に対しても免疫性を示し，大量に発生した抗体の産生を抑えることで調節

等の複数の高次情報処理機構から構成され，抗原に対応し続けることを可能とする．抗体の調整機構を説明する仮説として，免疫ネットワーク説がある．これは，抗体各々は個別に抗原に反応しているのではなく，相互に刺激 ･抑制しあいながらネットワークを形成しているという仮説である．ここで，抗体が相互に刺激しあうことで増殖プロセスを行い，抗原を排除可能な抗体の産生を促す機構が提案する一次記憶機構である．また，抗体が相互に抑制しあうことでネットワークを調節する機構が二次記憶機構である．

実際の免疫システムにおける免疫応答には，最初に免疫した場合に見られる応答である一次免疫応答と，二度目の免疫によって見られる応答である二次免疫応答がある．二次免疫応答では，一次免疫応答と比べ比較的早い段階で抗原に対応可能な抗体が大量に血清中に現れる．このような免疫システムの記憶を免疫学的記憶という．記憶を利用することで，抗原の特異性や抗体の多様性を保つことが可能となる．本論文で提案する記憶機構は，上述した二種類の免疫応答を次のように捉え，それを支援する記憶機構として位置付ける．

- 一次免疫応答
  問題の持つ特徴の探索
- 二次免疫応答
  一次記憶により得られた特徴を活用した探索

すなわち，ある抗原に対応可能な抗体の持つ特徴を記憶と捉え，その記憶を活用することで二次免疫応答と同様な反応がみられると考える．

3　免疫アルゴリズム (Immune Algorithm)

免疫システムの工学的応用の一例として，最適化システムとしての免疫アルゴリズムが挙げられる．例えば，図 1における抗原を排除する機構は，抗原を排除するのに最適な抗体の探索と捉えられることから，最適化問題に対する最適解の発見と考えられる．本章では，IA による最適化問題の解決システムとして提案する，一次記憶機構及び二次記憶機構から構成される記憶機構を説明する．

3.1　アルゴリズムの構成

3.1.1　IA の特徴

森らにより提案された IA はその基本構成を，遺伝的アルゴリズムに基づく解の再構成，記憶細胞による有効解の記憶，サプレッサー細胞による記憶解の再探索の抑制とする (図 2)．

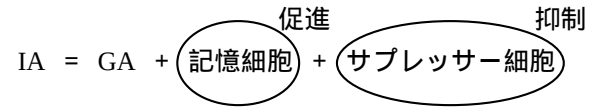

図 2: Relation between IA and GA

この構成により GA の持つ強力な広域な探索能力に加え，有効解を利用した再探索の抑制により探索効率の上昇が期待される．この結果，多峰性関数における複数最適解の獲得が可能となっている．その一方で次のような検討点が残っている．

- 細胞遺伝子の再構成オペレータには GA の基本遺伝子オペレータ (選択，交叉，突然変異) のみを用いており，免疫システムにある増殖を明示的に行っていない．
- 記憶を利用するのは，記憶を得た探索中のみであり，その後の探索に活用されていない．

このアルゴリズムを，記憶を用いた増殖オペレータの導入及び記憶の二次応用により改善するため，2 種類の記憶機構を提案する．

3.1.2　拡張アルゴリズム

提案する記憶機構を Step4-1，Step4-2 として変更を加えた (図 3) アルゴリズムを以下に示す．

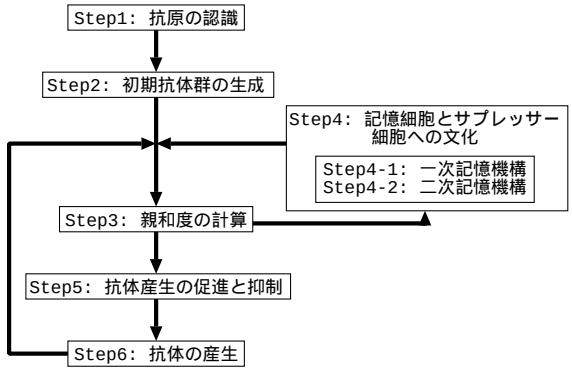

図 3: Immune algorithm with memory mechanism

Step1. 抗原の認識

抗原を入力情報として認識する．

Step2. 初期抗体群の生成

記憶細胞から過去に有効であった抗体群を生成する．記憶細胞が存在しない時は，抗体の遺伝子をランダムに決定することで抗体群を生成する．

Step3. 親和度の計算

抗原と抗体 vの親和度 ax_v，抗体 vと抗体 wの親和度 $ay_{v,w}$を計算する． ここで，親和度とは，抗体の抗原に対する結合度合，または抗体同士の認識度合のことである．

Step4. 記憶細胞とサプレッサー細胞への分化

全ての抗体の濃度を計算し， 抗体 vの濃度 c_vが閾値 Tc を越えた場合に記憶を行う．通常探索中であれば Step4-1，局所探索中であれば Step4-2 へ．

Step4-1. 一次記憶機構

現抗体群が共通して持つ特徴をテンプレートとして作成し，記憶細胞に記憶する．そのテンプレートを用いて抗体群を再構築し，局所探索の促進を計る．

Step4-2. 二次記憶機構

現抗体群から，最大濃度を持つ抗体を計算し，サプレッサー細胞に記憶する．その後の探索においては，記憶解に類似する抗体の産生を抑制する．また，現抗体群をランダムに初期化することで，通常の大域探索に戻る．

Step5. 抗体産生の促進と抑制

次世代に残る抗体 vの期待値 e_vを計算する．

Step6. 抗体の産生

期待値に基づいた選択，交叉，突然変移により抗体の再構成を行う．以下， 世代があらかじめ設定した最終世代に達するまで Step3 ~ 6 を繰り返す．

ここで，Step3 における二種類の親和度を次のように定義する．

- 適応度 (抗原と抗体の親和度)
  最適化問題に対する解の評価値
- 類似度 (抗体と抗体の親和度)
  ある二つの解の類似性を表す尺度

集団内に，ある抗体に類似する抗体の存在する割合を濃度という．IA は，濃度の高い抗体が現れ始めるとその抗体を記憶細胞とサプレッサー細胞に記憶する．この時，記憶した抗体はある問題に対する局所的もしくは大域的最適解と考えられる．一般的にそのような解は，その問題における優位解であることから，類似度をどのように設定するかが重要な一要素であることが分かる．

この適応度，類似度，濃度を，抗体の次世代に残る期待値に用いることにより，抗体の産生を自己調節し，多様な抗体を産生する免疫システムのモデル化を実現している．

3.2 記憶機構

3.2.1 一次記憶機構

一次記憶機構では，積極的に局所探索を促進することで局所解の発見を目的とする．その実現のために記憶細胞を活用したアルゴリズムを示す．その概念図を図 4に示す．

Step1. テンプレートの計算

現集団で最大濃度を持つ抗体との類似度が閾値 $TAC1$ を越えるような抗体群において，共通する遺伝子パターン (スキマタ) をカウントする．抗体群にたいし，$Memory_T$以上の抗体に共通するパターンを集めてテンプレートとする．

Step2. テンプレートを記憶細胞に記憶

記憶しているテンプレート数が記憶細胞総数に達していたら，最も共通するパターンを持つテンプレートと入れ換える．

Step3. テンプレートから類似する抗体群 (集団) を作成

テンプレートに，解を構成するのに不足している情報をランダムに作成することで，類似解から構成される新抗体群を作成．この結果，テンプレートに対する局所探索を促進することが可能となる．

Step4. 局所探索に移行

Step3 で作成された抗体群に対し，閾値 (Tc や $TAC1$) を上げることにより，より深く探索を行なう．

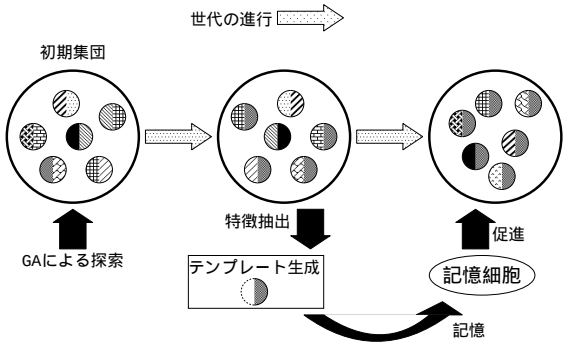

図 4: Primary memory mechanism

3.2.2 二次記憶機構

二次記憶機構では，一次記憶機構により促進された局所探索終了後，探索点の移動を目指す．サプレッサー細胞を活用した再探索の抑制を行うアルゴリズムを以下に示す．その概念図を図 5に示す．

Step1. 最大濃度を持つ抗体をサプレッサー細胞に記憶

その集団における最大濃度を持つ抗体は局所解と考えられる．この局所解を優位解と見做し，サプレッサー細胞に記憶する．

Step2. 集団をランダムに作成

探索点の移動を行う．

Step3. 通常探索に戻る

一次記憶機構により上げられた閾値を戻すことで，通常の大域探索に戻る．

Step4. 記憶した細胞に類似する抗体を抑制

今後の探索では，記憶した優位解に類似する解の産生を抑制することで再探索防止を計る．

3.2.3 記憶機構の位置付け

一次記憶機構と二次記憶機構の関係は，図 6に示すように 2 サイクルにより構成される記憶機構である．提案する記憶機構を用いた IA は

- 記憶細胞を活用した局所探索の促進
- サプレッサー細胞を活用した探索点のシフト

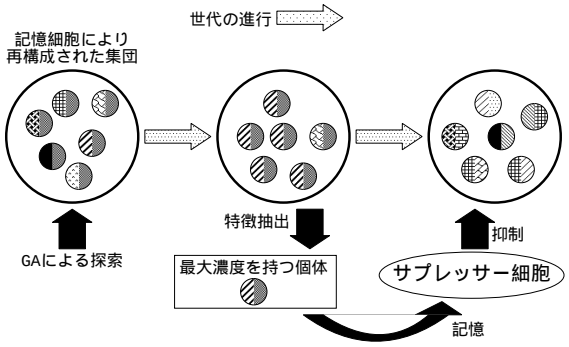

図 5: Secondary memory mechanism

を動作原理とすることから，対象とする問題空間における大域的最適解を含めた局所解を探索 (記憶) し続けると考えられる．局所解は，最適解ではないが，ある一面において優良である特徴を持っている．その特徴を有効に活用することで，類似する特徴を持つ問題に対する探索を効率良く行えることが期待できる．

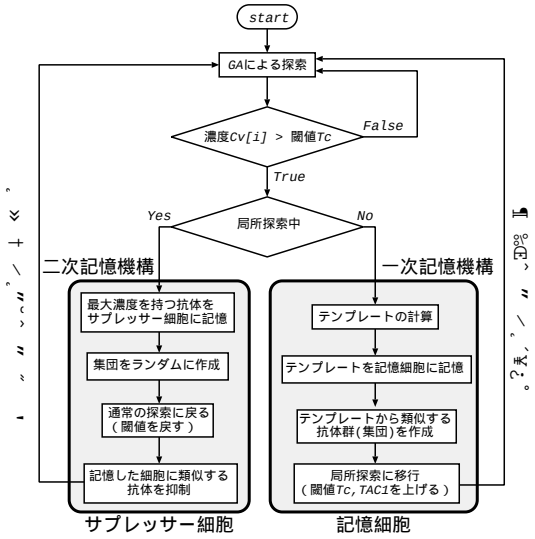

図 6: Memory processes

4 実験環境及び IA の設計

4.1 だまし問題

記憶機構の有効性を検証するため，組合せ最適化問題の典型例である巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem :TSP) におけるだまし問題を設定する．だまし問題とは 2 重の同心円上に同数の都市が均等に並んだ都市配置である．その内外円の半径比によって 2 通りの異なる最適解，局所解を持つ．図 7は都市数 12 の例である．同図 (a) はどちらか一方の円を巡回してから他方を巡回するプラン，c-type が最適解となる例で，同図 (b) は外円と内円を交互に巡回するプラン，o-type が最適解となる例である．

図 7における二つの問題の Fitness Landscape は図 8のようになっており，一般的な類似問題といえる．同図から分かるように，一方の問題の最適解と局所解は他方の問題における局所解と最適解に相当する．このことから，類似問題においては局所解や最適解といった，特徴ある優位解を利用することでその探索効率を改善することが可能と考えられる．

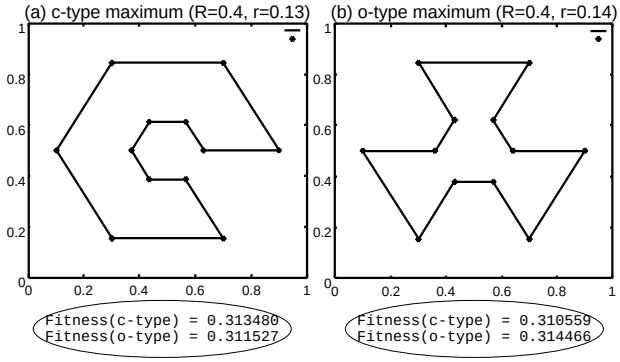

図 7: c-type and o-type

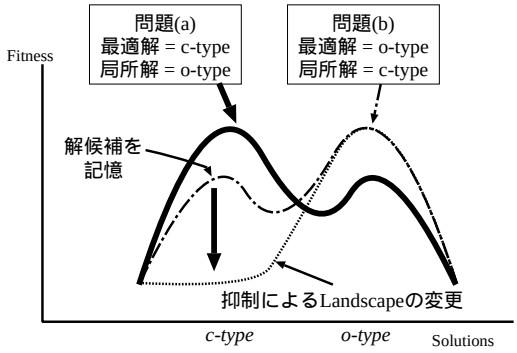

図 8: Difference in Fitness-landscape of similar problems

4.2 TSP に対する IA の設計

4.2.1 コーディングと遺伝子操作

nTSP に IA を適用するためには，問題の抗体を文字列表現する必要がある．IA の一評価尺度である濃度は，表現型における類似度から計算される．ここでは，TSP 解の類似度を，都市を巡回する順序の共通性と定義する．そこでコーディングには，共通する部分を抽出しやすい構造であるパス表現を用いる．

パス表現された遺伝子に通常の交叉操作を行なうと致死遺伝子を作成しやすくなるため特別な交叉操作を使用することになる．そこで形質の保全にマッチしたサブツアー交換交叉を採用することにした．また，任意の 2 都市を交換する突然変異を実装している．

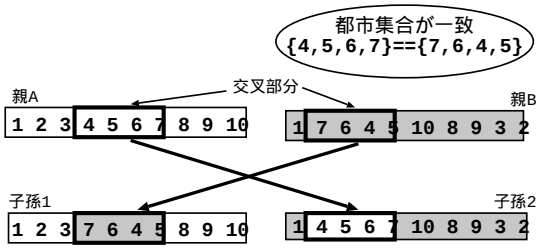

図 9: Subtour crossover

ここで実装したサブツアー交換交叉は以下のように変更を加えたものである．

Step1 親 A と親 B の交叉部分 (サブツアー) を決定する

Step2 親 A と親 B の交叉部分が集合として一致しているならば交叉する．

サブツアー交換交叉の例を図 9に示す．この交叉によって生まれる子孫 1，2 はどちらも親 A と親 B の形質を遺伝していることがわかる．なお，このような交叉方法では実行される交叉数が不十分なため，一組の親に対し複数回交叉処理を行っている．

4.3 各評価尺度の計算

免疫アルゴリズムにおいては，適応度，類似度，濃度，期待値の 4 つの計算尺度を求める必要がある．

適応度

$$fitness_i = 1/(Cost * Cost_W + Penalty * Penalty_W) \quad (1)$$

$Cost$:$\sum f_d(P_{S_i})$
$Cost_W$:$Cost$ の重み
$Penalty$:平等に分業するためのペナルティ
$Penalty_W$:$penalty$の重み

類似度

$$ay_{v,w} = (2 \text{ つの抗体に共通する順路の都市数})/m \quad (2)$$

濃度

$$c_v = (\text{類似度が閾値 } Tac1 \text{ を越えた数})/pop_size \quad (3)$$

期待値

$$e_v = fitness_i \times (1 - ay_{v,s}) \quad (4)$$

$ay_{v,s}$:抗体 vとサプレッサー細胞との類似度

ここで，$Penalty$は一プランにかかるコスト $(Cost)$ の平均と各セールスマンの巡回経路コストの差の総和を計算している．適応度を解の評価値，類似度を 2 つの解に共通する巡回経路の割合，濃度をある解が集団を支配する割合，期待値を次世代への残りやすさ，として扱うことにする．

5 計算機シミュレーション

提案する記憶機構の有効性を検証するため，二つの実験を設定する．実験 1 では，IA をだまし問題に適用し，一度の問題解決で解の特徴が得られることを示す．具体的には，前述した異なる特徴を持つ二種類の解，最適解と局所解が抽出可能であることを示す．実験 2 では，実験 1 で得られた特徴を記憶として利用することで，類似問題の再探索を効率良く行えることを示す．検証方法は，記憶無し探索，記憶あり探索における最適解発見に要する世代数の比較により行う．

5.1 実験 1

5.1.1 シミュレーション設定

一次記憶の有効性を検証するために，記憶無しの状態でだまし問題の探索を行う．問題設定を表 1，IA のパラメータを表 2に示す．表 2において，TCは記憶，$TAC1$ は濃度計算，$TAC2$ は抑制，$MemoryT$はテンプレート作成に用いる閾値である．また，TC及び$TAC1$ の括弧内の値は，局所探索時の閾値であり，TC_{power}を掛けた値となっている．

表 1: Problem definition

最適解のタイプ	c-type
都市数	12
外円の半径	0.40
内円の半径	0.13
世代数	2000

5.1.2 実験結果と考察

実験の結果，探索で得られた記憶細胞を図 10に示す．また，その記憶が得られた世代及び局所解，最適解が得られた世代を表 3に示す．

図 10において，memory1 は c-type と o-type のどちらにも類似していない．しかし，memory2 は c-type(図 11左)，

表 2: Parameters

集団数	100
交叉確率	1.0
突然変移確率	0.01
記憶細胞総数	10
サプレッサー細胞総数	5
TC	0.6 (0.66)
$TAC1$	0.6 (0.66)
$TAC2$	0.7
TC_{power}	1.1
$MemoryT$	0.7

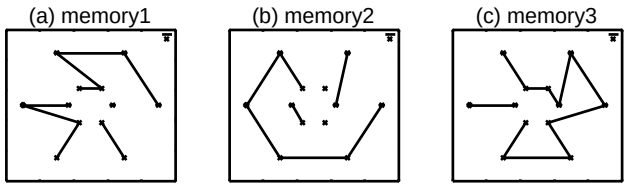

図 10: Obtained memorys

memory3 は o-type(図 11右) に酷似していることが見て取れる．この結果から，提案する記憶機構を IA に用いることにより，一度の問題解決で解の特徴抽出が可能であると考えられる．また表 3から，局所解は 53 世代目，最適解は 760 世代目に得ているのに対し，局所解に類似する記憶 3 は 1323 世代目，最適解に類似する記憶 2 は 883 世代目となっている．このことから，以下のような探索が行われたと考えられる．

[記憶 1 を得る前後] 探索中に局所解を発見．

[記憶 2 を得る前後] 最適解を発見．その後は，記憶 2 による抑制により，探索点の移動．

[記憶 3 を得る前後] 最適解の類似解の産生が抑制されることで，一時的に局所解の期待値が最大値になり，局所解を発見．

これは，一時記憶機構による記憶の獲得，二次記憶機構による探索点の移動により得られた結果といえる．

5.2 実験 2

5.2.1 問題設定

記憶を用いただまし問題の探索を行い，その最適解発見に要する世代数の比較により記憶の応用可能性に付いて検討する．記憶とは，探索の過程で得られたテンプレート (図

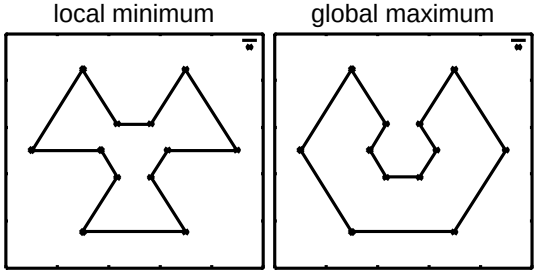

図 11: Local optimal solution and optimal solution

表 3: Generation obtained memorys and solutions

記憶細胞 1	468
記憶細胞 2	883
記憶細胞 3	1323
局所解 (o-type)	53
最適解 (c-type)	760

10) のことである．以下に示す 3 種類の記憶を用いた探索について，適応度の上昇率を比較する．

- 記憶なし
- c-type の問題を解いた記憶を利用
- o-type の問題を解いた記憶を利用

ここで，記憶を作るために用いる問題 (c-type と o-type) とその後に解く問題 (c'-type) を表 4に示す．なお，同表における c-type とは c-type の問題を意味する．IA のパラメータは，実験 1 の表 2と同様である．

表 4: Problem definition

パラメータ	c-type	c'-type	o-type
都市数	12	12	12
外円の半径	0.4	0.4	0.4
内円の半径	0.13	0.131	0.14
世代数	2000	2000	2000

5.2.2 実験結果と考察

c'-type について，3 種類の記憶の利用方法により探索を行った．その探索効率を図 12に示す．横軸は世代数，縦軸は適応度である．同図において，empty=記憶なし，c=c-type の問題を解いた時の記憶，o=o-type の問題を解いた時の記憶，を利用した探索を意味する．

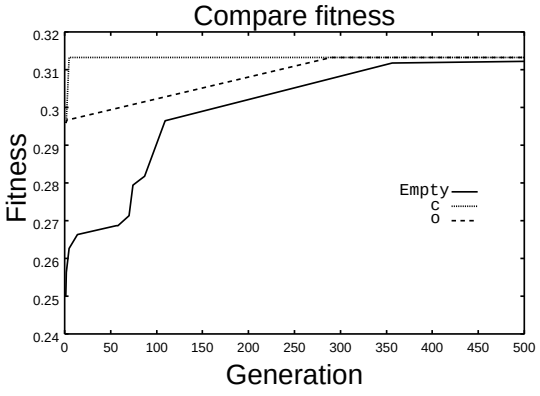

図 12: Compare efficiency

記憶を用いた探索の優位点は図 12より，初期世代の最大適応度の高さといえる．すなわち，記憶を用いた初期集団の構成により，類似問題への適応効率が上昇しているといえる．次に，3 つの探索が最適解発見に要した世代数を表 5に示す．世代数の比較により，c-type，o-type を解いた記憶を用いることが，内外円の半径比が異なる類似問題の探索効率の改善に役立つことが分かる．

免疫システムの持つ特徴の一つ，二次免疫応答とは，過去に排除した抗原に対して，対応する抗体を素早く大量に

表 5: Generation obtained oprimal solution

問題	記憶なし	記憶 c	記憶 o
世代	882	228	290

産生し排除するという免疫応答である．これは，抗体は抗原固有の特徴を認識するという特異性と免疫学的記憶に基づいたものと考えられる．本稿では，二次免疫応答に相当する機構の一実現方法として，記憶機構を活用したモデルを提案した．また，そのモデルが有効に働く可能性を実験結果を通して示せた．

6 おわりに

適応アルゴリズムの一手法である免疫アルゴリズムの記憶機構を提案した．その有効性を示すために類似問題としてだまし問題の検討を行い，適用した．記憶機構を用いた免疫アルゴリズムによる探索では，期待される特徴，一次記憶機構による解の特徴抽出，二次記憶機構による探索点の移動を用いた局所解からの脱出が観察できた．また，内外円の半径比が異なるだまし問題において，記憶を活用した再探索が有効であることを示した．このことから本アルゴリズムは，類似問題の繰り返し解決を必要とする種々の課題に対して有効に機能すると考えられる．

参考文献

[1] 北野宏明 :遺伝的アルゴリズム，産業図書株式会社，1993

[2] 廣田薫 :知能工学概論，昭晃堂，1996

[3] 藤原道夫 :コア免疫学 免疫システムを解き明かす，丸善株式会社，1997

[4] 森 一之，築山 誠，福田 豊生 :多様性を持つ免疫的アルゴリズムの提案と負荷割り当て問題への応用，T．IEE Japan， Vol．133-C， No．10， 1993．

[5] 森 一之，築山 誠，福田 豊生 :免疫アルゴリズムによる多峰性関数最適化，T．IEE Japan， Vol．117-C，No．5， 1997．

[6] 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，人工知能学会誌，Vol．7， No．6， Nov．1992

[7] 山本芳嗣，久保幹雄 :シリーズ [現代人の数理]12 巡回セールスマン問題への招待，朝倉書店，1997

[8] 和田 健之介，和田 佳子 山登り飛び虫の進化と免疫システム論について，数理科学，NO .353，NOVEMBER，1992

[9] Thomas Back (editor) :Proceedings of The Seventh International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann(1997)