免疫細胞間協同作用に基づく マルチエージェントの分業最適化に関する考察

當間愛晃 *1，遠藤聡志 *2，山田孝治 *2，宮城隼夫 *2

*1 琉球大学大学院理工学研究科 総合知能工学専攻，*2 琉球大学工学部情報工学科
〒 903-0213 沖縄県中城郡西原町字 1 番地 琉球大学工学部 1 号館 608 室

tnal@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp, {endo,koji,miyagi}@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp

本研究では，マルチエージェントシステムにおける分業問題最適化を目的とした，免疫系と抗原との共進化現象を応用した免疫的最適化手法を提案する．先行研究 [6] において提案した競合型免疫アルゴリズムでは，個々エージェントとエージェント全体における最適性とのバランス調整が困難であり，実問題への応用に当たりそれらを解消する必要があった．本手法は，免疫エージェントの細胞間協同作用による作業コスト最適化と抗原エージェントの逃避行動による平等な作業配分獲得に基づく探索を基本動作とする．抗原エージェントの逃避行動は，効率良く作業を行っている免疫エージェントの最適化行動を妨害することで免疫エージェント全体の作業コストを平等に配分するように実装しており，免疫エージェントによる最適化との相互進化によって分業解を獲得することが可能である．計算機実験では，提案手法の基本性能および探索性能を評価するために典型的な分業問題の一つである分業巡回セールスマン問題へ適用し，考察する．

マルチエージェントシステム，分業問題最適化，細胞間協同作用，共進化現象

A Study of an Optimization for the Division-of-labor Problems using the Immune Cell-cooperation and the Co-evolutionary

Naruaki Toma*1, Endo Satoshi*2, Koji Yamada*2, Hayao Miyagi*2

*1 Graduate Student, Doctoral Course in Complex Intelligent Systems Engineering,
Graduate School of Science and Engineering, University of the Ryukyus.

*2 Faculty of Engineering, University of the Ryukyus.

University of the Ryukyus, 1 Senbaru, Nishihara, Okinawa 903-0213 JAPAN.

tnal@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp, {endo,koji,miyagi}@eva.ie.u-ryukyu.ac.jp

The purpose of this paper is to propose an immune optimization algorithm using immune the cell-cooperation and the immune co-evolutionary phenomenon between immune agent and antigen agent. The immune agent optimizes own cost using division as well as integration processing based on ‘immune cell-cooperation’. The division as well as integration processing in our method are based on the splicing. The ‘splicing’ is one of the re-combination operator of genes, which function is used for forming the role. And the antigen agent computes even division of work domain using escape processing based on a phenomenon that the antigen evolves to escape from the elimination of immune system. In order to investigate the validity of the proposed method, this algorithm is applied to the “N-th agent’s Travelling Salesmen Problem (called the n-TSP)” as a typical problem of MAS. The property that is believed to function as solution driver for MAS shall be clarified using several simulations.

Division-of-labor problems optimizatoin, immune cell-cooperation, co-evolutionary phenomenon.

1　はじめに

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 [2, 3, 7, 8, 9]．免疫システムは，多様性のある抗体の産生およ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および二次免疫応答などの様々な高次情報処理機構により構成されている．

生体の免疫システムにおいて抗原排除に関わる主要な機構として，細胞間協同作用と呼ばれる概念がある．免疫システムにおける抗原排除とは，本来自己体内に存在していない要素である非自己を認識することを切っ掛けに，各種の免疫細胞群が協同することでその非自己を消化・分解・中和する抗体を産生する一連の手続きであり [4]，工学システムの観点からは役割分化を伴った一並列分散システムとして考えられる．

一方，大規模化・複雑化の一途を辿る問題に対し，並列分散処理により実時間で実行可能な優良解を獲得する手法に関する研究が近年盛んに行われている．そのようなシステムの一つであるマルチエージェントシステム（Multi-agent system：MAS）は，複数の自律した計算主体がお互いに相互作用することにより問題解決を行う枠組であり，MAS における比較検証は工学的にも非常に有意義である．本研究では，エージェントにより問題を解決する際に，(1) 個々エージェントの作業領域を平等に配分し，かつ，(2) 各領域を担当するエージェントの作業コストを最適化することにより全体として最適な分業を獲得することを目的とした分業問題最適化を課題としており，その解決手法として免疫学に学んだ手法が有効に機能することを示す．

これまでの研究成果において提案してきた MAS を基本枠組みとする免疫的分散競合型アルゴリズムは，個々エージェントの最適性とエージェント全体での最適性とのバランス調整が非常に困難という課題が未解決のまま残されていた [6]．分業問題の典型的な一例である分業巡回セールスマン問題（N-th agent's Travelling Salesmen Problem：n-TSP）へ適用した [6] における評価実験では，円周上に均等に都市を配置したシングル円の問題においては最適な分業を獲得したが，円周を二重にした二重同心円型の都市配置においては平等な分業結果を獲得できておらず，計算機実験からも調整が困難であることが示されている．

エージェント間における競合型アプローチでは前述したバランス調整の問題点が生じ，その調整は解くべき問題毎に行う必要があるため，実応用の面からは適用が困難である．本研究ではより適用性の高いシステムとして，抗原を排除しようと進化する免疫系とそれから逃れるように進化する抗原に見られる共進化現象 [4] をモデルとした，次に示す二種類のエージェントが共進化的に解探索を行う分業最適化手法を提案する．

1. 作業（免疫）エージェント：作業エージェントとは解探索および分業解を保持する計算主体であり，役割分化を実現する細胞間協同作用を応用した分割・統合処理により動作する．分割処理とは保持する解の一部分を他の作業エージェントへ依託する探索オペレータであり，統合処理とは他の作業エージェントの解を吸収するオペレータである．分業問題において特定の作業領域を担当することが役割であり，その役割形成を通して作業領域の特定および作業コスト最適化を行う．
2. 要素（抗原）エージェント：要素エージェントとは，与えられた問題を実装する際に環境上に現れる要素（例えば，巡回セールスマン問題における都市，人工蟻の捕食問題における餌など）を指す．このような要素は計算主体として設計されることは多くの場合見られない．本手法では，作業エージェントによって作業される立場である要素自体が主体となり，抗原の逃避行動をモチーフとした作業エージェントの最適化行動を妨害するような行動を採る．逃避行動と言っても実際に都市が移動するのではなく，効率良く作業を行っている作業エージェントの作業領域へ含まれるように作業領域を変化させるという間接的な行動で逃避を実現する．結果として，作業エージェントの保持する解の効率度は一次的に減少するが，全ての作業エージェントの効率度が均一になれば抗原はそれ以上逃げ回ることができなくなる．効率度が均一な状態とは平等な配分がなされていることを示しており，このような抗原の逃避行同により平等な作業配分獲得を目指す．

本研究では，免疫エージェントによる作業コスト最適化と，作業配分平等化という進化を採る抗原エージェントによる免疫的共進化現象に基づいた最適化手法を提案する．提案手法の探索動作を解析するため，本実験では分業問題の一例である分業巡回セールスマン問題（N-th agent's Travelling Salesmen Problem：n-TSP）へ適用し，その探索動作を考察する．

2　問題設計

2.1　分業問題

MAS は，分散人工知能の研究領域の一つであり，複数のエージェントと呼ばれる自律した計算主体がお互いに相互作用することにより問題解決を行う情報処理技術である [5]．分散問題解決システムを構築するには，その通信手段の設計やタスク配分をどのように実現するか等の様々な課題を対象問題毎に解決する必要がある．本節で扱う分業問題最適化とは，タスク配分に重点をおいた課題であり，以下のように定義する．

分業問題最適化：

エージェントに配分する対象問題を作業領域WD，全作業領域を問題領域PDと定義する．このとき，

- (a) 作業配分平等化：問題領域PDにおいて，エージェントiの担当する作業領域WD_iを平等に分割し，かつ，
- (b) 各作業コストの最適化：作業領域WD_iにおけるエージェントiの作業を最適化（作業に要するコスト最小化）する．
- (c) 全作業コストの最適化：(a) と (b) を満足しつつ，個々エージェントの作業コスト総和，すなわち全エージェントの作業コストを最小化する．

すなわち，分業問題最適化とは予め固定された作業エージェント全てに平等に作業を配分しつつ並列分散処理する際のコストを最小に押えることが求められる課題であり，スケジューリング問題やネットワークで接続された並列計算機におけるジョブスケジューリング[1]などへの応用が期待できる．

2.2 分業巡回セールスマン問題

分業問題の典型的な評価問題として分業巡回セールスマン問題（n-TSP）を扱う．巡回セールスマン問題（TSP）は，NP困難に分類される問題の複雑さとその応用範囲の広さから，さまざまな解法による検討がなされてきた．しかし，今日の大規模複雑な工学的諸問題への対応には，各エージェント間の協力による効率良く問題を解決を行なうマルチエージェントシステムなどの，より強力な問題解決法が求められている．そこで，TSPにおけるエージェント数をn人に拡張した問題n-TSPを設定し，マルチエージェント型アルゴリズムの性能評価の基準問題として位置付ける[10]．

3 提案手法

3.1 免疫系からの知見

3.1.1 細胞間協同作用による役割分化を用いた作業コスト最適化

細胞間協同作用の免疫系における役割とは，(a) 抗原の細分化及び提示，(b) 特異的に反応可能な抗体を産生する免疫細胞の活性化，(c) 特異的抗体の産生による抗原排除，(d) それらの動作制御，の4機能から構成される．機能としての役割だけではなく，図1の左に示すように一つの抗原に対し，「抗原の性質を決定する複数の抗原決定基各々に対し特定の免疫細胞が反応する」という作業分担における役割分化も含まれている．同図は役割が確定した作業分担後の概念図を示しており，実際の抗体産生の過程においてはスプライシングと呼ばれる遺伝子操作が働いている．スプライシングにより，DNA・RNAが酵素的にその一部が切り取られ，切断端部が再結合され，一つの遺伝子としての機能を持つようになる[4]．

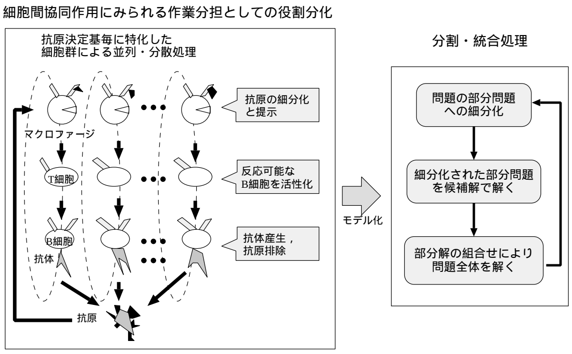


図 1: 細胞間協同作用の探索システムへの応用

このような作業分担における役割分化を実現している細胞間協同作用を探索アルゴリズムとして応用するにあたり，問題解決機として機能するための必要最小限の機能である (a)～(c) のモデル化を行った．提案手法においては，分割・統合処理と呼ばれる機能がそれに相当し，スプライシングを応用して構築した．免疫エージェントはこのような分割・統合処理を用い，抗原を問題，抗体を解として対応づけることにより，(A) 問題の細分化，(B) 特異的な優位性を示す部分解により細分化された部分問題を解く，(C) そのような部分解の組合せにより問題全体を解決する（図1右）．

3.1.2 抗原の逃避行動による共進化現象を用いた作業配分平等化

免疫系の抗原排除から逃げるように進化する抗原に対して免疫系そのものが進化するという共進化現象の概念を導入した．導入した共進化現象の目的は，逃げ回る抗原を対象問題における環境を形成する要素の変化として捉え，その抗原による逃避行動と免疫系による適応行動の共進化（図2）により互いの妥協点となる収束解を導くことであり，[6]における個々エージェントの最適性とエージェント全体における最適性のバランス調整問題を解消することが期待できる．

このような逃避行動を実装するにあたり，本手法では抗原エージェントが作業領域WDを変更（移動）するという間接的な行動で逃避を実現した．すなわち，環境内の要素そのものが変化するのではなく，その要素を含む作業領域WD_iをWD_jへと変化させることで免疫エージェントiからjへ逃避することを表現した．この逃避行動は，後述のアルゴリズムに記載したように，作業コストの優れた免疫エージェントの作業領域へ変更するように行われる．結果として，免疫エージェントの保持する解の作業コストは一次的に悪化するが，全ての免疫エージェントの作業コストが均一になれば

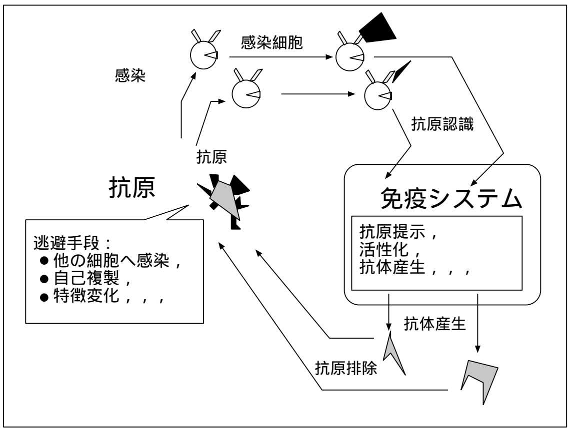


図 2: 免疫系と抗原との共進化モデル

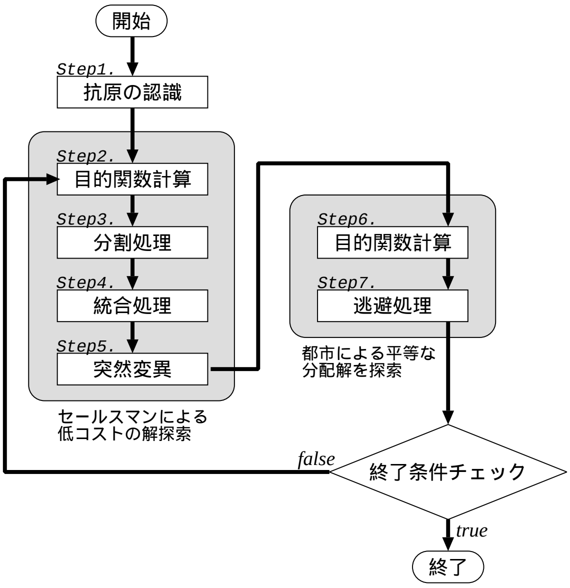


図 3: フローチャート

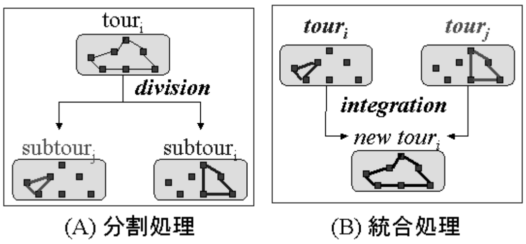
抗原はそれ以上逃げ回ることができなくなる．作業コストが均一な状態とは平等な配分がなされていることを示しており，このような抗原の逃避行同により作業配分平等化を目指す．

3.2　アルゴリズム

図 3 に，提案手法のフローチャートを示す．本手法は，(1) 免疫エージェント間の相互作用を基本動作とする分割・統合処理と，(2) 抗原エージェントが免疫エージェントと相互作用を行う逃避処理，という二種類のエージェントによる共進化現象に基づく探索を動作原理とする．

アルゴリズムを n-TSP に適用する際の設計を示す．以下の手続きにおいて，Step1 はエージェントの初期化のために一度だけ実行され，各エージェントは Step2～Step6 を繰り返すことで問題の最適化を行う．

[Step1. 抗原の認識]　問題の定式化（都市数，都市配置），およびセールスマンの定義（セールスマン数，MHC）を行う．また，初期セールスマン数や都市の MHC 情報はランダムに初期値を決定する．MHC とは各セールスマンの ID であり，各都市がその都市を巡回するセールスマン ID を情報として有する．MHC は，他のセールスマンを認識し，分割・統合する際に参照するために使用される．



(A) 分割処理　　(B) 統合処理

図 4: 分割・統合処理の例

[Step2. 目的関数計算]　各セールスマンの巡回経路の評価値として巡回経路長を計算する．

$$Cost(S_i) = \sum distance(tour_{S_i}) \qquad (1)$$

- S_i: セールスマン i．
- $tour_{S_i}$: セールスマン i の巡回経路．

[Step3. 分割処理]　各セールスマンは，現在の自らの順路のコストを下げるためにコストの少ない 2 つのサブツアー（順路）へと分割処理を行う（図 4-(A)）．

1. セールスマン S_i は現在の巡回経路から任意の二点間により決定されるサブツアー $subtour_i$ を生成する．
2. セールスマン i から $subtour_i$ を除いた順路 $subtour_j$ を，まだ一つの都市も訪問していない新たに生成したエージェントの順路として設定する．
3. 分割により生じた二つの順路 $subtour_i$，$subtour_j$ のコストを計算する．もし，分割後の二順路のコスト総和が分割前のコストよりも減少しているならば，その分割処理を実行する．逆にコストが増加しているならば元の順路へと戻す．

従って，分割処理が実行されるならば，効率の良い分業解を生成するために新たなセールスマンを生成することになる．

[Step4. 統合処理]　任意の 2 セールスマンは，各々の順路を統合することにより総和コストの減少を図る（図 4-(B)）．

1. 二つの順路 $tour_i, tour_j$ の結合ポイントを任意に決定する．

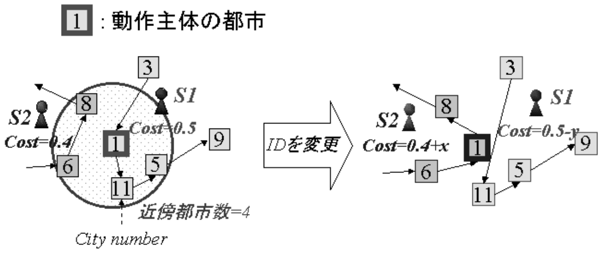


図 5: 逃避処理

2. 決定した結合ポイントに，一方の巡回経路を結合し，新たな順路 new_tour_i を作成．
3. 新たに生成された順路のコストを計算する．もし，結合後のコストが減少しているならばその結合処理を実行する．逆に，コストが増加しているならば元の順路へと戻す．

従って，結合処理が実行されるならば，分割処理とは逆に，効率の良い分業解を生成するために既存のセールスマンを削除することになる．

[Step5. 突然変異] 各セールスマンは，任意の二都市の巡回順序を入れ換える突然変異操作を実行し，新たな順路を生成する．突然変異後の順路が元のコストよりも減少するならばその順路を次ステップにおける巡回経路として設定する．

[Step6. 目的関数計算] 抗原エージェントである都市の進化に必要となる目的関数を計算する．ここでは，その都市を訪問しているセールスマンのコストをそのまま採用する．

[Step7. 逃避処理] 各都市が近傍都市を訪問するセールスマンのコストを比較し，コストの低いセールスマンの ID へ変更する．

1. 予め設定された近傍都市数によって規定される近傍都市群に対し，それらの都市を訪問しているセールスマンのコストを確認する．
2. 自都市のセールスマン S_i のコストを下回るセールスマン S_j が存在するなら，自都市の ID を S_j へと変更する．

図 5 の例では，対象都市の ID を S_2 へと変更することで順路を修正した様子を示している．

以下，終了条件（処理ステップ数）に達するまで Step2～6 を繰り返す．

このような手順に基づき，エージェント（セールスマン）は各々の作業領域における解の最適化，環境内の構成要素（都市）は分業の平等化を実行している．なお，本節で行った計算機実験においては，分割処理において実際に分割を実行する回数が非常に低いため，初期ステップではやきなまし法を導入することで実行回数の調整を行った．

表 1: 問題設定

都市数	25
セールスマン数	3
都市配置	二重円
出発都市	円の中心
半径	out=0.5, in=0.384
終了ステップ数	1000

表 2: パラメータ

近傍都市数	4
初期エージェント数	under 24
終了ステップ数	2000

4 計算機実験

4.1 実験設計

実験では，表 1 で定義される二重円環型 n-TSP へ適用し，基本性能を確認するとともに，その探索動作を検証する．なお，本手法で用いたパラメータは表 2 のように設定した．

4.2 結果

図 6-(A) は獲得した解を示しており，作業配分の平等化および各エージェントの作業コスト最適化が実現している．表 3 は，本手法における各処理の試行回数および実行回数を例示している．括弧内の回数は焼きなまし法を導入する前の実行回数である．分業処理の実行回数の増加に比例して統合処理回数も増えており，それらの処理が十分に機能するだけの回数が実行されていることが分かる．図 6-(B) はステップ毎のコスト推移を示しており，コストの増減を繰り返しながらステップ 400 過ぎには収束している．

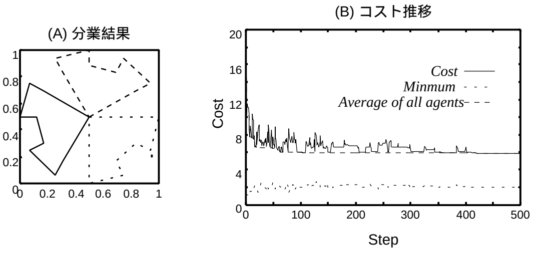


図 6: 分業結果と作業コスト推移

次に，本手法の探索動作を検証するため，各エージェントの巡回都市数の推移を図 7,8 に図示した．同図より，初期ステップでは小数の都市を多くのエージェントにより訪問する解（図 7）で構成されているが，50 ステップ目以降の解は約 8 都市を 3 人のエージェントで全都市の訪問を行う解（図 8）へと変更されており，またその変更にともない 50 ステップまでにおけるコストの大幅な減少が実現している．この平等な分業は，

表 3: 各処理の試行回数と実行回数の内訳例．(括弧内の数値はやきなまし法未導入時の例)

	試行回数	実行回数
分割処理	6,242	221 (6)
統合処理	546	225 (16)
突然変異	6,037	50
逃避処理	47,876	47,876
総計	60,701	48,372

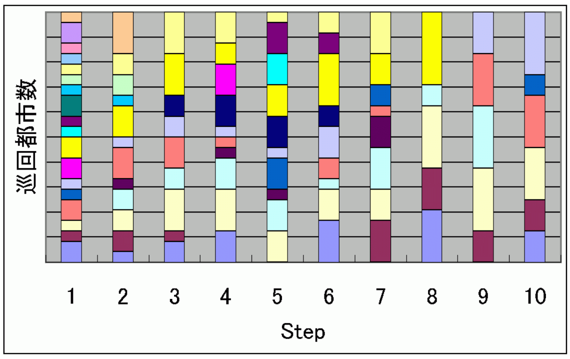


図 7: 各エージェントの巡回都市数の推移 (ステップ 1～10)

提案手法における逃避処理により実現されている．その後のステップにおいては，ほぼ平等な分業を保持したまま，各作業領域における解の最適化が行われており，500 ステップ目以降はコストと巡回都市数が収束した．最終的に獲得した解は，図 6 に示したように，8 都市を 3 エージェントで訪問する解である．

5 おわりに

本研究では，MAS における分業問題最適化を目的とした免疫系と抗原間に見られる共進化現象をモデルとした免疫的分業最適化アルゴリズムを提案した．同アルゴリズムは，免疫エージェント間の局所的な相互作用により作業領域における解の最適化を行う分割・統合処理と，抗原エージェントの作業領域分担の平等化を行う逃避処理に基づいて探索を行う．計算機実験では，

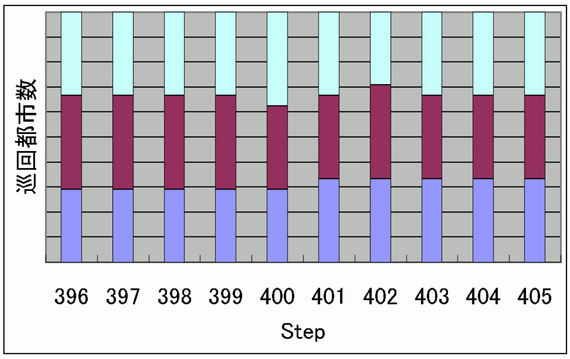


図 8: 各エージェントの巡回都市数の推移 (ステップ 396～405)

MAS においては，全てのエージェントや環境を構成する他の要素を考慮した目的関数を設計することは非常に困難であることから，局所的な相互作用により全体の最適化を図ることが望ましい．本手法は，局所的相互作用のみにより分業問題を最適化する能力を有する．すなわち，先行研究である免疫的分散競合型アルゴリズムの問題点 (個エージェントとエージェント全体における最適性のミスマッチ) を解消していることから，MAS における最適化システムとして有効に機能する能力を有すると期待できる．

本研究は，平成 13 年度科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) の補助を受けて行った．

参考文献

[1] E. G. Coffman : “Computer and Job-shop Scheduling Theory”, John Willey & Sons (1976).

[2] D.Dasgupta (editor) : “Artificial Immune Systems and Their Applications”, Springer (1999).

[3] S. Forrest, A.A. Perelson : “Genetic algorithm and the Immune system”, Proc. of 1st Workshop on Parallel Problem Solving from Nature, Dortmund, Federal Republic of Germany, 1-3, October, 1990.

[4] Charles A. Janeway, Jr., Paul Travers ; with assistance of Simon Hunt, Mark Walport : “Immunobiology : The Immune System in Health And Disease”, Garland Pub (1997).

[5] S.Russell and P.Norvig : “Artificial Intelligence: A Modern Approach”, Prentice-Hall (1995).

[6] Naruaki Toma, Satoshi Endo, Koji Yamada, Hayao Miyagi : “The Immune Distributed Competitive Problem Solver with MHC and Immune Network”, Intelligent Engineering Systems through Artificial Neural Networks, vol.10 (editor C.H. Dagli et al.), ASME PRESS SERIES (ISBN 0-7918-0161-6), pp.317-322 (2000).

[7] 石黒 章夫，近藤 敏之，渡邊 裕司，白井 靖浩，内川 嘉樹 :“免疫ネットワークに基づく自律移動ロボットの分散型行動調停機構の創発的構築に関する一手法”，電学論 C，117 巻 7 号 (1997)．

[8] 石田 好輝 :“免疫型システムとその応用 -免疫系に学んだ知能システム-”，コロナ社 (1998)．

[9] 當間 愛晃，遠藤 聡志，山田 孝治 :“二種類の記憶機構を導入した適応的免疫アルゴリズムの提案と評価”，人工知能学会，Vol.15, No.6, 2000. pp.1097-1106 (2000)．

[10] 中村 友洋, 角田 達彦, 田中 英彦 : “分業セールスマン問題のニューラルネットワークによる解法”, 人工知能 94-2 (1994).

[11] 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, pp.117-127 (1992).