# 免疫ネットワークを用いた
# 分業巡回セールスルマン問題の解法に関する検討

○ 當間 愛晃　遠藤 聡志　山田 孝治
(琉 球 大 学)

# Immune algorithms with immune network for nTSP

Naruaki Toma, Satoshi Endo, Koji Yamada (University of the Ryukyus)

**Abstract :** Adaptive problem solving techniques such as neural networks and genetic algorithms become so popular in the AI field. These techniques are applied many kinds of optimization problems. The immune system is one of the adaptive biological system whose functions are to identify and to eliminate foreign material. In this paper, we propose an optimization algorithm based on immune model with immune network theory and Major Histocompatibility Complex (MHC). MHC is a information defined oneself. And we apply immune algorithm to multi-agent system. This model performs adaptive behaviors of distributed cooperative for problem solving.

キーワード :免疫アルゴリズム，免疫ネットワーク，主要組織適合遺伝子複合体，遺伝的アルゴリズム
(Immune algorithm, Immune network, Major Histocompatibility Complex, Genetic algorithm)

## 1 はじめに

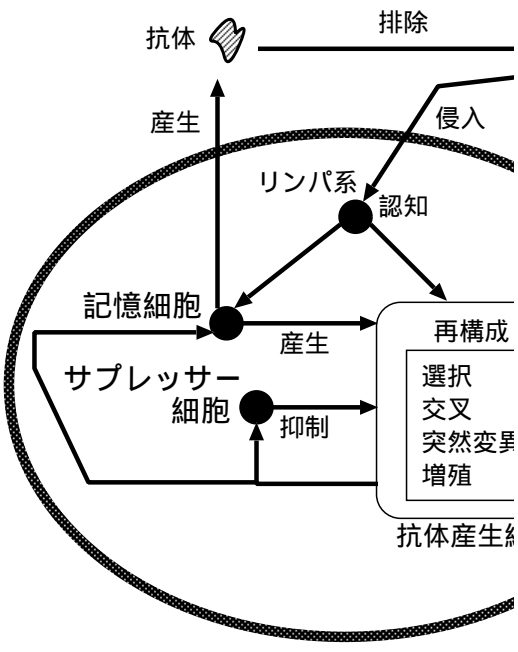
ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms :GA) 等の適応アルゴリズムは，従来の工学的最適化手法にはない，生物の優れた情報処理機能に基づいており，その有効性は様々な研究により示されている [1, 2]．

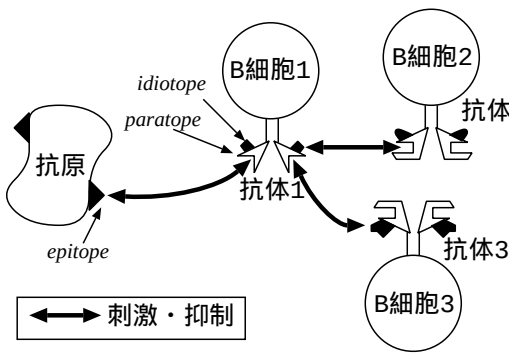
近年，脳神経系，遺伝適応系と並ぶ第三の生体システムとして免疫システムが取り上げられている [3]．免疫システムは，多様性のある抗体の産生及びその自己調節機構，抗体の特異性や免疫学的記憶に基づいた一次免疫応答及び二次免疫応答等の様々な高次情報処理機構により構成されている．このような特徴を持つ免疫システムを最適化手法として捉えた研究例として，多峰性関数最適化 [4]，一個体による多機能型適応システム [5] 等がある．

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．我々は，同アルゴリズムに 2 つの記憶機構を加えた探索アルゴリズムを提案し，一般的な組合せ最適化問題である巡回セールスマン問題 (Traveling Salesman Problem :TSP) [6] におけるだまし問題へ適用し，問題固有の解の特徴抽出による冗長性を省いた抗体の記憶及び，記憶を用いた局所探索能力の向上と再探索の抑制による探索効率の改善が可能であることを示した [7 ~ 9]．しかしながら，TSP のセールスマン数を n 人に拡張した分業巡回セールスマン問題 (n-Traveling Salesman Problem :nTSP) [10] に対しては以下のような問題点が明らかになった．

- 適応度関数には分業によるコストを含めたが，セールスマン相互による協調を生じさせるシステムになっていない．
- 問題空間 (都市数またはセールスマン数) のサイズが大きくなるに従い最適解の発見に多大な時間を要する．
- 再探索の抑制により探索点の移動が可能であるが，問題空間が複雑なフィットネス・ランドスケープの場合は，局所解を渡り歩き続ける．そこで最適解へと導く何らかの圧力が必要と思われる．

本稿では，マルチエージェントシステムにおける分業による協調作業を適応的に行う，免疫ネットワークと




主要組織適合遺伝子複合体 (Major Histocompatibility Complex :MHC)，を用いた免疫アルゴリズムを提案する．ここで，免疫ネットワークはエージェント内部の状態を調節するモデル，MHC は各エージェントの持つ個性として定義付ける．また，制約条件付き nTSP へ適用するための設計を行う．

# 2 免疫システム

## 2.1 概要

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 [11]．

図 1: 免疫システム

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．

免疫システムは (1) 自己と非自己を見分けることから生まれた MHC に基づく抗原の認識機構 (2) 抗体による抗原の排除機構 (3) 免疫ネットワークに基づく自己調節機構 (4) 免疫学的記憶を用いた二次免疫応答，を特徴に持つ．工学的立場で考えると，免役システムをマルチエージェントシステムへ適用することで (1) 動的に変化のある環境を認知 (2) その環境に適応するための手段生成 (3) 変化した自己の再定義 (4) 過去に遭遇した環境への素早い適応，といった特徴を持つモデルが構築できると思われる．

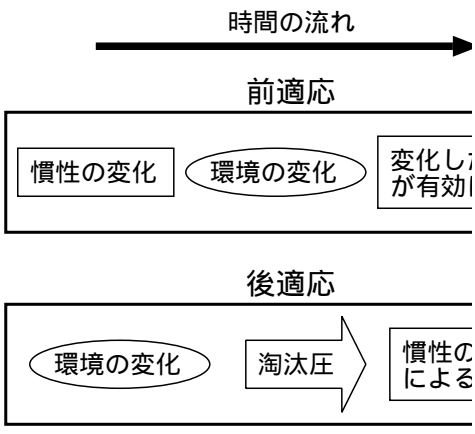
## 2.2 免疫ネットワーク

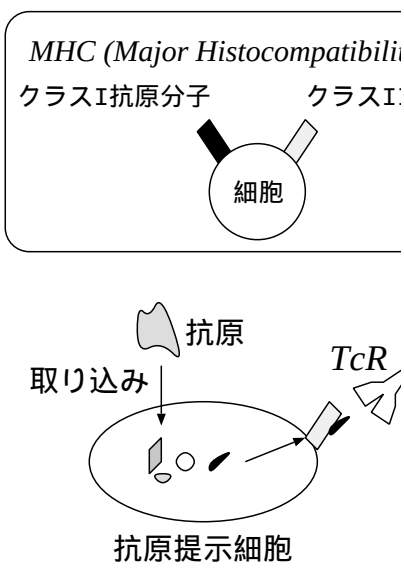
抗体の調整機構を説明する仮説として，Jerne の提唱した免疫ネットワークがある．これは，各抗体は個別に抗原に反応しているのではなく，相互に刺激・抑制しあいながらネットワークを形成しているという仮説である．

抗原を排除するには，抗体上の抗原結合部位 (パラトープ ;paratope) が抗原上の抗原決定基 (エピトープ ; epitope) を認識し，刺激・抑制が相互作用的に行われることで可能となる．この抗原-抗体間の相互作用が抗体-抗体間にも存在しており，相互作用の影響がネットワーク的に伝達されるというのが免疫ネットワーク説の核となっている (図 2)．

図 2: 免疫ネットワークの概念図

その原理は，抗体上には抗原を認識するパラトープと，抗原と同じ役割を持つ抗原決定基 (イディオトープ ;idiotope) が存在することに基づいている．免疫ネットワークの特徴は，抗体産生の調節やその多様性維持，さらに抗体間の刺激・抑制がネットワークを形成する抗




体群に影響を及ぼし合うことで動的なネットワークを構成しているである．

マルチエージェントシステムへのアプローチとして，免疫ネットワークをエージェント内部の調節機構としてモデル化を行う．エージェントの行動調停機構としては既に石黒 [12] により提案されている．ここでは，マルチエージェントシステムへの拡張の一貫として MHC を導入する．

### 2.3 MHC

免疫システムでは自己を MHC という情報で定義している．非自己の認識は，ある非自己を取り込んだ免疫細胞上の MHC が自己と異なる場合に可能となる (図 3 )．抗原の排除を引き起こす一要素である非自己の認識は MHC の変化にある．

図 3: MHC と非自己の認識

マルチエージェントシステムにおける一つの課題として，エージェント相互の協調問題がある．エージェントを一つの生命体と見做した場合，他のエージェントは非自己であり，エージェント間の情報伝達は MHC の差異により実現可能と考えられる．この MHC の差異によりエージェントの相互作用を引き起こし，結果として自己保存のために協調を生じさせることが期待できる．また，同じ処理を行うエージェントの存在は冗長であるため好ましくない．そこで各エージェントをある情報 (MHC ) で定義付け，これらの情報のエントロピーを最大化することで各エージェントに特徴を持たせる．その結果，冗長なエージェントを含まず分業を効率良く行うことが可能と思われる．

### 2.4 前適応と後適応

適応の形態には前適応と後適応がある (図 4 )．

図 4: 前適応と後適応

前適応とは，予め生物のもつ慣性を変化させることでいつか起こるであろう環境の変化に効率よく適応することである．後適応とは，環境の変化による淘汰圧が先にあり，その中で自己を存続させるためにその慣性を変化させることで適応することである [13]．自己保存のための適応として，前適応のみを用いた場合には環境からの淘汰圧が予想と大きく異なる場合に死滅する可能性が大きくなる．逆に後適応のみの場合，環境変化のスピードが極端に速い状況や淘汰圧が強力な状況ではうまく適応することが出来ない．つまり，両方の適応手段を使い分ける，もしくは両立させることが自己保存のために有効である．免疫システムでは，免疫ネットワークによる自己調節機構が前適応，MHC による抗原の認識から始まる抗原排除機構が後適応に相当する．この 2 つの適応を両立させることにより，停滞することなく進化するモデルの構築が可能と思われる．

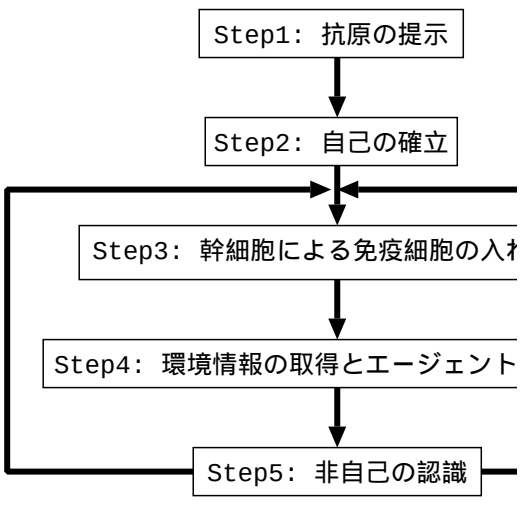
## 3 免疫アルゴリズム

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．

免疫ネットワーク及び MHC に基づくマルチエージェントモデルのアプローチとしての免疫アルゴリズムを図 5に示す．ここで，抗原はエージェントの解くべき問題，免疫細胞で構成される 1 個体は 1 エージェント自身を指す．

**Step1.** 抗原の提示

動的な環境を作り出すパラメータを含め，エージェントが認識可能な情報をエピトープとして設定する．




**Step2.** 自己の確立

MHC で定義付けられた，免疫細胞で構成される初期エージェントを作成する．免疫細胞はランダム，もしくは記憶を用いて生成する．抗体 (B 細胞) は，エピトープを認識し，行動を起こすパラトープと，抗体間の相互作用を起こすイディオトープで構成する．

**Step3.** 幹細胞による免疫細胞の入れ換え

免疫細胞は存在エネルギーを持ち，エネルギーを失ったものは死滅する．死滅した細胞を補充するために，新たに細胞を作成し入れ換える．

**Step4.** 環境情報の取得とエージェントへの提示

エージェントは MHC の異なる異物を認識することで環境情報の取得が可能である．免疫細胞の一つマクロファージは，他のエージェントを含めた環境情報を取り込み MHC を変化させる．また，抗原を認識可能な抗体を持つ B 細胞は抗原を排除することができる．

**Step5.** 非自己の認識

変化した MHC を T 細胞や B 細胞が認識することで非自己を認識する．認識した細胞は刺激されることで活性化し，より非自己との新和度を高めるように熟成する．刺激とはエネルギーの流れであり，免疫ネットワークにより調節される．新和度とは抗原と抗体の結合度合であり，高い新和度を持つ抗体 (解) であれば抗原排除 (問題解決) のために適応度の高い手段であることを意味する．

**Step6.** B 細胞の分化による抗体産生と記憶保持

エネルギーがある閾値を越えた B 細胞は，自己の持つ抗体に変異を加えた抗体産生と，認識した抗原を記憶するために分化する．分化した B 細胞はエネルギーを消費し，やがて抗体産生を行えなくなるように抑制される．以下，Step3 ~ Step6 を 1 ステップとし，指定されたステップ数に達するまで繰り返す．

ここで，免疫細胞とはマクロファージ，T 細胞，B 細胞を指す．各免疫細胞はエネルギーを持つ．このエネルギーは細胞の多様度としての情報量 (エントロピー ; entropy) と存在エネルギーの両者を合わせ持つ．このとき，1 エージェント内に自己と類似した細胞の存在割合 (これを濃度と定義する) を存在エネルギーとすることで，濃度の高い細胞は生存しやすくなる．また，1 エージェントの持つ総エネルギーは固定とする．この定義により，前適応のために多様度を作り出そうとするが，極度に多様度を保とうとすると各細胞は生存エネルギーが低くなるという状況を作り出すことが出来る．このプライオリティ関係により細胞間の相互作用を引き起こすことが可能と考えられる．

図 5: 免疫ネットワークと MHC を導入した免疫アルゴリズム

# 4 分業巡回セールスマン問題:nTSP

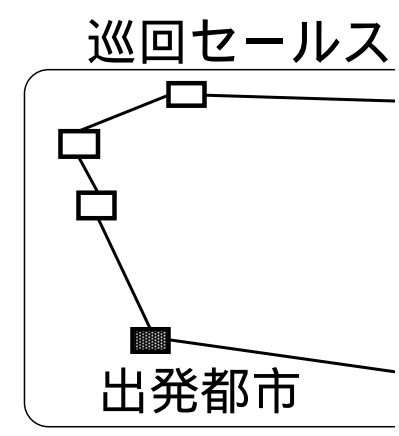
## 4.1 TSP と nTSP

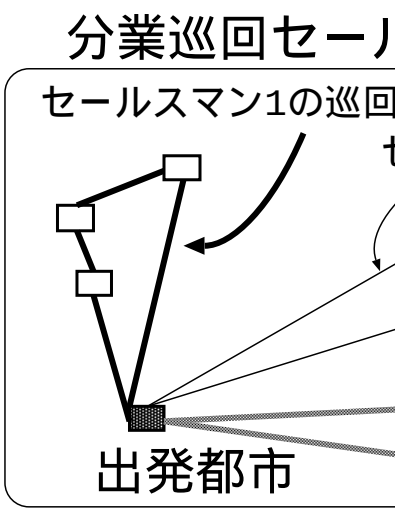
巡回セールスマン問題 TSP は NP-hard に分類される問題の複雑さとその応用範囲の広さからさまざまな解法による検討がなされてきた．しかし今日の大規模複雑な工学的諸問題への対応には各エージェント間の協力による効率良く問題を解決を行なうマルチエージェントシステムなどのより強力な問題解決法が求められている (図 6)．そこで TSP におけるエージェント数を n 人に拡張した問題 nTSP を設定し，マルチエージェント型アルゴリズムの性能評価の基準問題として位置付ける．

## 4.2 分業と最適化

nTSP は本質的に各セールスマンに対する都市配分とその最短経路探索という 2 面性を持つ．これらの 2 面性は相互に関連しているため個別に逐次的に解くことが困難であるという特徴を持つ．

提案する免疫アルゴリズムでは，セールスマンを自律的に情報処理を行うエージェントとして設計し，免疫ネットワークによる自己調節機構と MHC による自己の確立を持たせ，セールスマン相互またはセールスマンと環境相互の作用により適応的に分業を行う．このよう



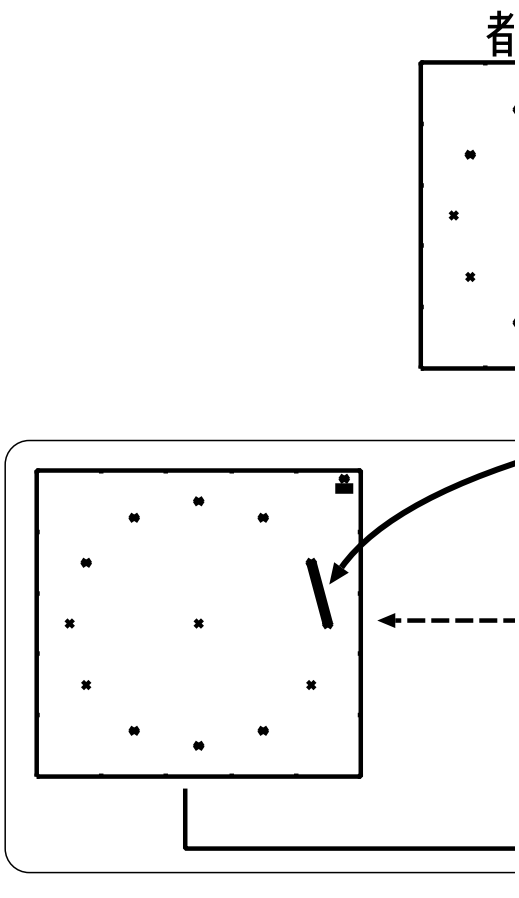




図 6: nTSP の概念図

な構成から，免疫アルゴリズムはマルチエージェントモデルとして有効に働くと思われる．

## 5 計算機実験

### 5.1 IA の設計

免疫ネットワークを nTSP に適用する際，抗原，抗体及び刺激 ･抑制を設定する必要がある．

抗原 ：nTSP を決定する要素として都市数，都市配置，セールスマン数，評価尺度の 4 つが挙げられる．ここでエピトープは都市数と都市配置とし，それらのパラメータの変化により動的な環境を設定する．

抗体 ：都市数と都市配置から構成される抗原を認識するパラトープと，エピトープの役割として働くイディオトープを持った抗体が必要である．エージェント設計において必要な環境情報の認識，行動選択の決定を nTSP に当てはめると以下のような設計が考えられる．(1) 現在訪問中の都市とそれ以外の都市配置の関係と (2) 自己を含めた各エージェントの巡回経路を認識し (3) 次に訪問すべき都市を決定する処理要素をセールスマンとして設計する．そこで (1) を 「都市配置を現在訪問中の都市からの距離として認識」し，その環境情報から (3) を決定することで，都市番号に依存しない行動を可能とするよう行動ルールの一般化を計る．これをエピトープとして設定する．また，(2) は抗体間の認識であることから，これをイディオトープとして設定する．

刺激 ：刺激とは，ある細胞を活性化させるためのエネルギーの伝達及びその現象を意味し，免疫ネットワークにより制御される．刺激が起きる要因は (1) マクロファージが抗原を取り込んだ場合，(2) T 細胞 (B 細胞) がマクロファージにより提示された MHC を認識可能である場合，(3) B 細胞の持つ抗体が直接抗原を認識可能である場合，に分けられる．また，マクロファージや T 細胞はエネルギーの伝達が主な役割であるが，B 細胞は抗体産生や記憶保持のための分化に使われる．

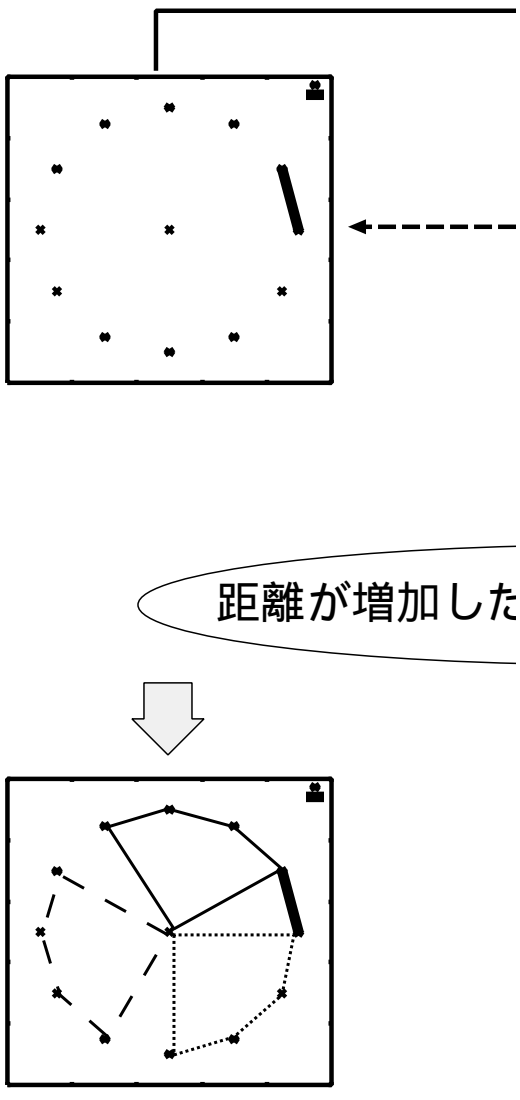
抑制 ：抑制とは，ある細胞の動作を抑えるためのエネルギーの伝達及びその現象を意味し，刺激と同様に免疫ネットワークにより制御される．抑制が起きる要因は，(1) 免疫細胞が別の細胞へエネルギーを伝達した場合，(2) B 細胞が分化によりエネルギーを消費した場合，に分けられる．また，受動的であるが免疫細胞の寿命も一つの抑制である．

図 7: 条件付き nTSP の例

### 5.2 問題設定

動的に変化する環境を作り出すため，制約条件付き nTSP を設定する．

ここで問題を簡略化するため，前提条件として (1) 一度の問題解決におけるセールスマン数は固定，(2) 前セールスマンの出発都市は同一を設定している．図 7は




動的な環境の 1 例である．都市配置は，出発都市を中心とした円形になっており，円周上の都市は均一に並べている．この問題は 「周期的に円周上に配置された 2 都市間の距離の重みが変化する」という制約条件の例であり，その重みの変化が円周上を移動する設定となっている．ただし，ある 2 都市間の距離の重みが変化しているとき，この 2 都市と他の都市間の距離は変化しないものとする．図 8のように距離の重みが増加する場合にはその順路を避ける巡回路が効率の良い分業であり，最適巡回路となる．

図 8: 分業の例

このように動的に変化する環境に適応することが出来れば提案するアルゴリズムが有用といえる．また，周期的な変化に対し記憶を用いることでより素早い適応を示すことも期待できる．

## 6 おわりに

マルチエージェントモデルのアプローチとして，エージェント内部の調節機構を担う免疫ネットワークとエージェントの個性を定義する MHC を導入した免疫アルゴリズムを提案した．また，マルチエージェント型システムの性能評価の基準問題として nTSP を取り上げ，免疫アルゴリズムを適用するための設計を行った．免疫アルゴリズムは，環境の認識能力，エージェント間の相互作用を伴った適応，エージェントの個性の定義，を特徴に持つことから，動的な環境へのアプローチであるマルチエージェントモデルとしての有効性が期待される．

本研究は，文部省科学研究費 (課題番号 10780240 ) の補助を受けて行った．

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

[3] 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 )

[4] 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, pp593-598 (1997 )

[5] 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, pp12-23 (1992 )

[6] 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 )

[7] 遠藤 聡志，當間 愛晃，山田 孝治 :“免疫アルゴリズムの nTSP に関する考察”，SICE 第 7 回インテリジェントシステムシンポジウム，FAN シンポジウム’97，pp.505-508 (1997 年 11 月 )

[8] 當間 愛晃，遠藤 聡志，山田 孝治 :“記憶機構を活用した免疫アルゴリズムによる nTSP の解法に関する検討”，情報処理学会第 56 回全国大会講演論文集 (2 )，pp.331-332 (1998 年 3 月 )

[9] 當間 愛晃，遠藤 聡志，山田 孝治 :“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”，ヒューマンインフォメーション研究会，映情学技報 VOL.22，NO.33 (1998，6 )

[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， 6， 20)

[11] 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

[12] 白井 靖浩，渡邊 祐司，石黒 章夫， 内川 嘉樹 :“免疫ネットワークを用いた自律移動ロボットの行動調停 ~ GA を用いたメタダイナミクス機能の実現 ~ ”，第 7 回 インテリジェント ・システム ・シンポジウム，1997.11.22 ・23

[13] 西山 賢一 :“免疫ネットワークの時代”，NHK ブックス (1995 )