生体内の分散監視・防衛システム

正員 藤田 博之 (東京大)

正員 合原 一幸 (東京電機大)

1. はじめに

生体（ここでは主として、哺乳動物を考える）は、その進化の過程で様々の外敵からの防衛機構と、体内の監視機構を進化させてきた。これらの機構は生体の再生機能と相まって、ホメオスタシス（生体恒常性）の維持に貢献している。一方、飛行機や化学プラントのように人間の作った工学システムに目を向けると、それはますます巨大化し、複雑になっているにもかかわらず、いわゆる制御の対象とされていない外乱（例えば、腐食によって生ずる配管の漏れ、人間のバルブの閉め忘れ、電子回路に直接入る種々の雑音源からのノイズ、など）に対して十分な対応ができるような機構が組み込まれていない。すなわち、多様な外乱がシステムの不特定の部分に侵入するような状況に対して、従来の工学システムは脆弱な構造となっている。

本論文ではこのような外乱に対抗すべく進化してきた、生体の防衛システムの概要を紹介し、それを参考として工学システムの監視・安全確保システムや電子機器のノイズ対策、更に防衛システムの情報処理手法にならった知的情報処理について考えてみる。特にここでは、学習能力と自己組織化能力を備えた、自律分散防衛システムである免疫系を中心に話を進める⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

なお、従来、免疫系の工学的検討としてそのモデル化とシミュレーションが行われているが、それについての紹介は成書⁽⁸⁾に譲り、本稿では免疫系の仕組み（構成概念）を工学的に応用する立場⁽⁹⁾で考えてゆく。

2. 生体防衛の仕組み

まず、生体の防衛システムについて概観してみよう⁽⁵⁾⁽⁶⁾。このとき最初に気が付くことは、防衛機構が

何重にもなっていることである。第一のレベルは、頭脳による集中的・意識的防衛であり、外敵を避けたり、毒物を食べないようにしたり、安全な住処を作ったり、という例が挙げられよう。この場合、自分自身の間一髪経験から学んだり、親や群れの構成員から教えられたりして、防衛方法を学習する機会が多いと考えられる。このような防衛方法の対象は、他の動物など主として目に見えるマクロな外敵である。また、別に脳・神経系のレベルの無意識的な防衛としては、反射（咳やくしゃみが出る、物が飛んでくると目をつむる）や本能に基づく行動がある。これについては、遺伝子のレベルでシステムがほぼ完全に形成されているのではないかと推測される。

次に、細菌などのミクロな対象についても幾つかの防衛レベルがある。第一に、皮膚や呼吸器官、消化器官は、異物を締め出す物理的防壁になっている。更にこれを補助するために、気管にある繊毛や、胃酸による殺菌、腸内細菌による有害細菌の排除などの、機械的・化学的防壁がある。第二に、体内の非特異的な（すなわち、個々の異物を認識せず無差別な）異物排除機構として、アメーバ状の種々の細胞群（マクロファージや好中球など、いわゆる白血球）による食作用や、補体（後に説明する）と呼ばれるタンパク質、インターフェロンなどの血液中の循環物質がある。最後に控えているのが、免疫系であり、個々の異物を認識・記憶しており二回目以降の感染に対する反応が素早く大変有効であるという特質を持っている。

3. 免疫系

〈3.1〉免疫系の概要 前章で、生体防衛の多重性について述べたが、その一つのレベルである免疫系自体も二重構造を持っている。第一は、体液性免疫機構と呼ばれるもので、抗体として知られる循環性のタンパク質（免疫グロブリン）を産生し、抗原（免疫系に外来物質として認識された物質）を排除する。体液

A Distributed Surveillance and Protection System in Living Organisms. By Hiroyuki Fujita, Member (Institute of Industrial Science, University of Tokyo) & Kazuyuki Aihara, Member (Tokyo Denki University)

藤田博之：正員，東京大学生産技術研究所
合原一幸：正員，東京電機大学工学部

表 1 免疫グロブリンの種類
Table 1. Subclasses of immunoglobulins.

名 称	分 子 量	機 能・特 徴
IgG	150,000	二次応答 入免疫グロブリンの 70%
IgM	900,000	一次応答 強力な凝集素
IgA	170,000	唾液、涙、呼吸器、消化器の分泌液中 に存在する。 粘膜上の防衛
IgE	200,000	アレルギー反応
IgD	150,000	リンパ球表面に存在 機能は不明

性免疫機構の中心は、リンパ球の一種である B リンパ球とそれが変化したプラズマ細胞である。プラズマ細胞は、B リンパ球が抗原の刺激と T リンパ球（特に T_H 細胞）という他の種類のリンパ球の助けとによって分化したもので、免疫グロブリンを産生し、循環系に放出する。抗体は表 1 に示すような種類があり、各々役割を分担している。抗体が抗原に働いて、それを阻止する機構には次の 4 通りがある⁽¹⁾⁽⁵⁾。

- (1) 抗体の結合による抗原の無害化
- (2) 補体系タンパク質の活性化による異物排除
- (3) オプソニン効果による食作用の助長
- (4) 抗体依存細胞傷害

これらの作用のうち下の三つは、抗原抗体複合体が引き起こす、いわゆる炎症作用の一部である。

第二の機構は、細胞性免疫機構で T リンパ球がその中心をなす。この機構は、特に細胞内のウィルス、真菌、寄生虫、細菌の感染を防ぐのに重要である。また、臓器などの移植に伴う拒否反応や、腫瘍の監視にも働いている。T リンパ球のうち T_D 細胞と T_K 細胞が、抗原に結合し前者はリンホカインという物質を分泌してマクロファージを活性化して抗原を排除するし、後者は直接抗原性の細胞に接触して、それを破壊する。ウィルスが感染していれば異物化した自己細胞や、癌化した細胞、元々非自己である移植された同種の細胞が T_K の標的となる。

このように、自己の細胞や物質とそれ以外を認識する能力を持つのが免疫系の特徴で、例えば相手の細胞表面に現れている分子の形を手がかりにこのような認識をすると考えられている。また、免疫系には記憶作用もあり、麻疹のような病気に一度かかると、二度目からはウィルスに感染しても免疫系が強力に排除するため発病には至らない。このような記憶作用は、記憶 B 細胞と記憶 T 細胞が受け持っている。

図 1 は、ある生体にとって未知の抗原を初めて与えたとき（一次応答）と、しばらくして 2 度目に与えた

図 1 抗体産生の一次応答と二次応答

Fig. 1. A primary and secondary antibody response.

とき（二次応答）の抗体の産生量を比べたものである。抗原 1 に対する抗体のみ大きな応答をすることから、二次応答は抗原特異的であり、一次応答に比べ迅速で強力であることが理解される⁽⁴⁾。更に作られる抗体の反応性（抗原への結合能力）を比べると、二次応答の方が遙かに高いことが知られている。細胞性免疫においても同様の二次応答が見られる。表 2 には、免疫系を構成する主な細胞についてまとめている。

〈3・2〉免疫系の認識機構と自己組織化 免疫系の認識機構で興味深いのは、(1)多様な未知の異物をどうやって認識するか、(2)自己と非自己の区別をどのようにして行っているかの 2 点である。まず、認識の多様性については、近年の DNA の解析法の進歩により初めて解明された。ここでは、細胞性免疫の担い手である B リンパ球の認識機構（表面レセプタ）の多様性の起源について説明しよう。

図 2 に模式的に示すように、B リンパ球の表面には

表 2 免疫系を構成する主な細胞

Table 2. Major cell types in the immune system.

細胞の名称	機能因子	機能
処女 T 細胞	T 細胞レセプタ	一次応答における抗原認識
処女 B 細胞	レセプタ IgM レセプタ IgD	
効奏 T 細胞	T_K T_D	抗原の排除
効奏 B 細胞 (プラズマ細胞)	T 細胞レセプタ リンホカイン産生 PC	
調節 T 細胞	T_H T_S	免疫応答の調節
調節 B 細胞	レセプタ I_g , 抗イデオタイプ抗体の産生	
記憶 T 細胞	T 細胞レセプタ	二次応答における抗原認識
記憶 B 細胞	レセプタ I_g	
マクロファージ	インターロイキン 1 の産生、補体の産生	抗原処理 抗原呈示

図 2 Bリンパ球のレセプタ (免疫グロブリンに類似の分子)

Fig. 2. Receptors on B-cell surfaces.

図 3 遺伝子の組替え

Fig. 3. Rearrangement of genes coding the V region in a L chain.

免疫グロブリンに類似した分子構造を持つ、レセプタと呼ばれる分子が頭を出している。この分子の先端の二箇所に、抗原の形を認識する部位 (結合部位) があり、この部位の形は各々の B リンパ球に固有で、多種多様の外来抗原に対応する形をしている。しかし、同じ遺伝子 (DNA) から作られた分子の形が、なぜ多様になりうるのであろうか。これは、遺伝子のかき混ぜ組替え機構で説明されている⁽¹⁰⁾。

図 3 は結合部位の一部 (L 鎖 V 領域) をコードする遺伝子の模式図で、V, J, C という 3 個のモジュールが組合さって初めて RNA に転写され、タンパク質が合成される。ここで、V モジュールは約 250 個、J モジュールは 5 個の異なったバリエーションがあり、各々の B リンパ球で全くランダムに組み合わせられる (V/J 組替え機構)。結合部位の他の部分を表現する遺伝子についても、V/D/J 組替え機構という $250 \times 10 \times 5$ 程度のバリエーションがある。更にこの組替えの生ずるとき、DNA は必ずしも同じように連結されるわけではなく、ちょうどボタンを掛け違えるように柔軟な連結をする。この自由度を各々 5 とすると、全体で $250 \times 5 \times 5 \times 250 \times 10 \times 5 \times 5 \sim 15$ 億個の多様性が得られる計算になる⁽¹¹⁾。加えて、各遺伝子に独自に起こる体細胞突然変異もこの多様性に寄与する⁽¹⁰⁾ので、B 細胞のレセプタは人類の人口を遙かに越えるレパー

ある量の抗原を連日投与した後の、一定量の抗原の 2 次投与に対する応答を示す。AG: 連日投与する抗原の量。AB: 2 次応答の抗体レベル。AB₀: 全く前投与をしない場合の抗体レベル (一次応答レベル)。

図 4 免疫寛容の説明図

Fig. 4. Low-dose and high-dose immunological tolerance.

AG: Amount of antigen repeatedly dosed.

AB: Secondary response level of after repeated dose.

AB₀: Primary response level with no previous dose.

トリーを持っているのである。

次に、自己と非自己の識別はどのように行われているのであろうか。これは、免疫寛容という概念で説明される。免疫寛容とは、極めて少量か、極めて大量の抗原を連続的に与えると、その抗原に対する二次応答が抑制されてしまう現象である (図 4)。このような現象の起きる原因は、次節で述べる免疫系の調節機構と深くかかわっており、現在でも十分に明らかにされていない。しかし、現象論的には、まだ、十分に分化の進んでいない未熟なリンパ球に対して、免疫寛容が容易に導入されることがわかっている。すなわち、未熟なリンパ球しか持たない胎児のうちに大量の自己物質と出会うために、自己抗原に対する免疫寛容が成立すると考えられる⁽⁴⁾。ちなみに、体内を循環せずリンパ球と遭遇する機会のない物質は、自己に由来するものであっても免疫応答を引き起こすことが知られている。現在、提案されている免疫寛容の機構は、サプレッサ T 細胞 (Ts 細胞)・自分が産出した抗体に対する抗体 (抗イデオタイプ抗体)・マクロファージのいずれかによる抑制効果、および自己抗原を認識するリンパ球クローンの死滅などの説がある。免疫系という大規模システムの制御問題であるから、その原因を同定することは困難であり、システム工学手法の適用が問題解決の一助となろう。この解明が行われれば、臓器移植、自己免疫疾患⁽⁷⁾、がんの免疫療法⁽¹¹⁾などに重大な貢献となる。

以上述べたように免疫系は、遺伝子の組替え機構に

より無数と言ってもよい認識の多様性を備えているが、そのうち自己物質を認識するものは免疫寛容により抑制し、また、一度対応する抗原と遭遇したものは細胞分裂して多くの記憶細胞を作り防備を強化するなど、学習による自己組織化能力を備えていることがわかる。

〈3.3〉 免疫系の調節機構 免疫系のホメオスタシスを維持するために、様々の調節機構が存在する。第一の機構は、表2に調節Tリンパ球として挙げられている、 T_H 細胞と T_s 細胞によるものである。図5にこの調節機構の模式図を示す。マクロファージの食作用で処理された抗原は、やはりマクロファージの分泌するインタロイキン1と同時に作用することで、対応するレセプタを持つ T_H 細胞（ヘルパT細胞）を活性化する。ヘルパは、Bリンパ球成長因子を産生して、抗原の刺激を受けたBリンパ球が、増殖し抗体産生細胞や記憶細胞に分化するのを助ける。また、細胞性免疫の担い手である T_K と T_D 細胞、そしてもう一つの調節細胞である T_s 細胞（サプレッサT細胞）も活性化する。サプレッサは、ヘルパより遅れて成熟し負のフィードバックをかける。こうして免疫応答は時間とともに抑制される⁽¹⁾。なお、現在注目をあつめている AIDS のウイルスは、 T_H 細胞を攻撃するためすべての免疫反応が不活発となり、重篤な症状を引き起こすのである⁽¹²⁾。第二の機構は、抗体と抗原の結合した免疫複合体による制御で、図5に示される通りBリンパ球に作用し、その抗体産生を抑制する。

第三の機構は、抗イデオタイプ抗体と呼ばれる、「ある自己の抗体の結合部位に対する抗体」による調節である⁽²⁾。図6に示すように抗体の結合部位（イデオタイプ）は、その抗原の鋳型になっているので免疫系からは、非自己と見なされる。このためある抗体のイデオタイプを抗原として認識するBリンパ球が活性化され、抗イデオタイプ抗体を産生する。しかし、結

図5 T細胞調節回路

Fig. 5. A T-cell regulated immune circuit.

図6 抗イデオタイプ抗体ネットワーク

Fig. 6. Idiotypic/anti-idiotypic network.

合部位の鋳型の種々の部所を認識する抗イデオタイプ抗体があり、一つのイデオタイプに複数の抗イデオタイプ抗体が対応する。他方、類似のイデオタイプが複数ある場合、結合の強弱は別として、これらのイデオタイプも一つの抗イデオタイプ抗体と結合する可能性があり、その連鎖は免疫系の認識レパートリをネットワーク的に結び付ける。これを、イデオタイプ・抗イデオタイプ・ネットワークと呼んでいる⁽¹³⁾。そして、いろいろの実験により抗イデオタイプ抗体が、もとの抗体（イデオタイプ抗体）の産生を抑制することがわかってきた。すなわち、図5に示すような一つの抗原に特異的なユニット機能セルが、〈3.2〉節に述べたレパートリーの数だけ存在し、この自律的機能セルが相互に認識し合い、抑制しあって平衡状態になっている。このネットワークに抗原という刺激が加わると、平衡が乱されて免疫応答が生ずるのである。しかし、この調節機構の詳細については現在研究が行われている段階であり、いまだ不明の点が多い。

さて、本節の最後に、抗体を助けて異物の排除に参加する、補体系の活性化と制御について触れる⁽¹⁴⁾。補体系は連鎖的に反応を起こす十数種類のタンパク質からなる。この連鎖反応は、抗体により古典経路と呼ばれる連鎖で引き起こされ、最終生成物は細胞膜にドーナツ上の穴を開け細菌を殺す作用がある。しかし、抗体なしでも補体系は活性化され、それを第二経路という。第二経路は、興味深いフィードバック系になっているので紹介しよう(図7)。この図で、C3は補体系のタンパク質、B, D, I, H, Pは調節因子、C3b, BbはそれぞれC3とBの分画である。さて、体液中に豊富にあるC3分子とB, D因子が出会うと、C3Bbができる。C3BbはC3を切断し活性な分子C3aを作る。しかし、C3aが、体液中にあるとH, I因子によって直ちに不活性化されてしまう(C3ai)。ところが、もしそこに細菌などが侵入するとC3aは細胞壁に付着し、P因子の助けなどもあり活性を保つことが

図 7 補体活性化第二経路の開始点のブロック図

Fig. 7. A block diagram showing the early stages of the alternative pathway that activates a complement system.

できるようになる。C3_bにBの分画が結合したC3_bB_bは、強い活性を持つC3分解酵素であるため、更にC3_bが増加する正のフィードバックループが形成される。こうして蓄積されたC3_bは、(C3_b)₂B_bの形で結合し古典経路の連鎖の途中に連結する。この機構で強調しておきたいのは、酵素活性を巧みに利用して最初はずかであった細胞壁上のC3_bを、正のフィードバックループにより増幅している点である。

4. 免疫系と工学システム

〈4・1〉免疫系と防災・安全システム ここでは、第3章で紹介した免疫系の機構を手本として、工学システムの安全確保に応用することを考える。まず、第一に注目されるのは、至るところにみられた多重性である。工学の言葉に直せば冗長性であるが、原理の異なる防衛機構を幾つも並列に用意して誤動作を避けるとともに、情報のやり取りにおいては二つの異なった信号が同時に必要であるようにして、誤動作を防いでいる。一方、工学システムでは保全作業は現在もっぱら人間が行っているため、どうしても誤りが避けられない。現在でも原子炉の格納容器では、超音波、X線、渦流探傷などいくつかの非破壊検査法を併用し、各方法の短所を補うようにしている。また、人間のエラーの防止には、チェックリストや複数作業員による確認を行うことは効果大きい。このように、十分なバックアップ体制（独立した複数の組織や、機械によるもの）が、信頼性の確保に必須と考えられる。

次に、分散性に着目しよう。例えばプラントのメンテナンスを考えると、情報は計算機で集中管理すると

というのが、現在のプラントの方向だが、配管の劣化のようにどこに発生するのかわからないようなものに対しては、常時無意識的に監視を行ってくれる自律的な安定化要素が必要である。配管などに生ずる応力腐食割れは、水素イオンの発生を伴う。仮に配管内の流体に水素イオンと反応して壁に付着するような物質が混ざってあれば、ピンホールの位置を明示したり、穴自体を自動的に塞いだりできる。水素イオンの発生量に制限されてその物質の付着量があまりに少量過ぎるのなら、その付着物を触媒として更に他の物質が沈着するようにしておけば良い。これは、補体系でみた触媒作用による増幅機構の応用である。また、漏れや割れ・腐食の発生に伴う音（いわゆる AE）を検出するような自走センサ（微小ロボット）があれば、配管や压力容器表面を常時走り回らせて健全性の監視ができる。これは、リンパ球の代用である。更に、プラントの雑音と漏れの音との差を学習しながら巡回し、怪しげな音源の付近に群がって行くような習性を、その自走センサに与えることができれば、センサの特性や配置を自律的に変化させる適応的なセンシングが可能となる。従来のロボットが物体を運ぶことを目的としていたのに対して、この微小ロボットは多地点の情報を収集・運搬することを目的としていることが特徴である。

最後に、多様性について考えてみる。事故の原因は不慮の事態であるのが通例だが、プラントの機能と構造から考えられる事故の原因は、あたかも遺伝子のかき混ぜ組み替え機構のように、組み合わせ的な多さにすぎない。ということは、論理的に帰納したり、これまでの事故事例を組み合わせたり・組替えたりして、推論できる可能性がある。プラントの構造から論理的に推論されるいわゆる事故論理を踏まえ、それに入力として日常の運転時に得られる「ヒヤリ・ハット」の事例（あわや事故になりそうだ、という経験をこう呼ぶ）や、他のプラントの運転実績などからの情報を入れ、起こりうる事故原因を予測することが、考えられよう。これまでも、フォールト・トリーやイベント・トリーなど、事故の原因となりうるものを設計時に洗い出すためのいろいろの手法が開発されてきたが、この考え方では運転期間中ずっと学習しながら、事故を引き起こす原因を予測し続けるシステムを備えるわけである。これには、近年飛躍的に発展している人口知能の手法などが、応用できると考えられる⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。

〈4・2〉免疫系と電子機器のノイズ対策

近年のマイクロエレクトロニクスの急激な進歩に伴い、デジタル電子回路を用いた制御技術や通信技術

が種々の生産システムに積極的に導入され、生産システムは、いわば「神経系」を付与されつつある。ところが、これに伴って、生産システム内での、各種電子機器のノイズによる誤動作の問題が、同時に、顕在化しつつある。

この問題の背景は、主として三つである。第1点は、エレクトロニクスの進歩は、電子回路の高集積化・高速化に支えられているわけであるが、この高集積化・高速化は、反面では、より低い電圧のノイズがより短い時間加わっても、回路が誤動作する可能性があること、すなわち、ノイズ耐性の低下を意味している。第2点は、多くの電子回路はデジタル回路であるが、状態がデジタルであるということは、微少ノイズの影響を悉無律により除去できる一方、一度ノイズにより誤動作して状態が遷移すると、その影響が長時間残留するということである。アナログ回路に対するノイズの影響が一過性であることと、好対照をなす。第3点は、このような本質的にノイズに弱いデジタル集積化電子回路が、生産システムという、多数のノイズ源（例えば、モータ、リレー、スイッチ、サイリスタ、交流母線など）が混在する環境下で用いられているという実状である。

このように生産システム内でのノイズトラブルが顕在化しているが、しかしながら、これからの生産システムにとっては電子機器による制御や情報処理は不可欠であり、今後とも、ますます、電子機器が生産システムへ導入されるはずである。従って、電子機器のノイズ対策技術の重要性も、これに伴って急速に増大することが予想される。

このようなノイズ対策技術と免疫性とは、イムニティ (Immunity, 妨害排除能力) という単なる用語上の一致を越えて、その問題の性質に本質的な類似点がある。免疫系が、細菌やウィルスなどの数多くの外敵による攻撃から、常に個体を守り続けなければならないように、ノイズ対策技術も、生産システムという多数のノイズ源を有する悪環境の中で、電子回路を守り続ける必要がある。また、免疫系が外敵のみでなく、がん細胞のような体内の敵からも個体を守らなければならないように、ノイズ対策も、外来性ノイズに対してと同時に、機器内部で生成される内因性ノイズに対しても考慮される必要がある。(例えば、外来性および内因性の両ノイズの対策を実現した好例に、ノイズ・カット・トランスがある⁽¹⁶⁾)。更に、免疫系がごく微量のがん細胞を見落とすことが致命的な結果に至るように、ノイズ対策も、デジタルな誤動作を生じさせるノイズ一つ一つを抑える、分散的かつ総合的

な関点に立ったものである必要がある。このような類似点を考えると、生産システム全体の調和のとれたノイズ対策を考えるにあたって、免疫系の制御・情報処理メカニズムは、重要な示唆を与えるものである。

〈4・3〉 免疫系とイミュンコンピュータ

最近、生体の脳・神経系の持つ優れた制御・情報処理機能に学んで、将来のコンピュータ設計に役立てようという「バイオコンピュータ」⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾や「ニューラルコンピュータ」⁽¹⁹⁾に関する議論がさかに行われている。生体は、複雑な大規模階層システムであるが、その制御・情報処理機能に着目すると、(1)脳・神経系、(2)免疫系および(3)内分泌系という、異なった時空間スケールを持つ三つのシステムから主として成っている。「バイオコンピュータ」や「ニューラルコンピュータ」の構想は、このうち、脳・神経系のハードウェアやアーキテクチャに注目するものである。一方、免疫系の持つ情報処理能力も、極めて精緻なものであり、そのメカニズムの解明は、将来の新しい型の並列分散コンピュータを考えるに際して重要である⁽²⁰⁾。

〈3・2〉で概説したように、免疫系は、無数の異物の抗原決定基を認識するために、遺伝子の再構成により自発的に多様性を生み出す。そして特定の異物の侵入に際しては、その異物の抗原を受容できる抗体を表面に持つB細胞が選択され(クローン選択)、ヘルパーT細胞による活性化作用を経て、形質細胞へと分化して、大量の抗体を産生、分泌するようになる。この異物の認識に関しては、同一の抗原に対して複数の種類の抗体が異なった適合度で反応する。言いかえれば、免疫系のパターン認識は、all-or-noneの認識ではなく、“軟かい”認識である。また、一部のB細胞は、記憶細胞へと分化して、同一の異物の次の侵入に備える。これが、免疫系における記憶の成立である。

免疫系の情報処理系としてのアーキテクチャは、典型的な並列分散型である⁽¹⁹⁾。その基本情報処理ネットワークは、図5に示した特定抗原に対する一連の反応系である。このような基本ネットワークが分散的に多数共存し、それらが図6に示した抗イデオタイプネットワークおよびリンホカインなどを介した相互作用により全体としての並列ネットワークを構成する。抗体間の抗イデオタイプ・ネットワークのみを考えても、その非線形ダイナミクスは、ある種の工学的並列情報処理系(classifier system)⁽¹⁴⁾と定性的に同様であることが指摘されており⁽¹⁵⁾、免疫系の持つ種々の情報処理系としての性質、すなわち、(1)アミノ酸配列レベルでのミクロなパターン認識、(2)高度な並列分散型アーキテクチャ、および(3)記憶、自己組織化

能力の解明は、脳・神経系に学んだ「バイオコンピュータ」や「ニューラルコンピュータ」の構想と同様に、免疫系に学んだ「イミューンコンピュータ」(Immune Computer) 開発への道を開く可能性を秘めている⁽¹⁹⁾。

5. おわりに

生体の防御機構の一つである免疫系について、工学的立場から多重性・分散性・記憶能力・自己組織化能力・識別能力などについてまとめた。更に、免疫系を手本にした工学システムの例として、安全性確保システム・ノイズ対策手法・情報処理手法について、その考え方を述べた。自律分散ネットワークとしての免疫系は、従来から研究されてきた脳・神経系と並んで、今後の工学システムの構成概念に多くの示唆を与えるものである。(昭和62年5月27日受付)

文 献

- (1) 柏木・大谷：「図説免疫：免疫応答の仕組み」(昭60)日経サイエンス社
- (2) 中野，他：「免疫ネットワーク」新免疫学叢書9，(昭58)医学書院
- (3) G.J.V. Nossal 著，大沢訳：「抗体と免疫—免疫学入門」(昭55)東京化学同人
- (4) ロバート A. グッド編：「免疫系の発生と分化」(昭60)岩波講座免疫科学4
- (5) E.M. Kirkwood, C.J. Lewis 著，井口，他訳：「免疫学入門」(昭60)オーム社

- (6) 「生体防御と感染症」Medicina, 22, No. 11 (昭60)
- (7) 「免疫不全」医学のあゆみ 135, 第9号 (昭60)
- (8) 例えば, G.I. Bell, et al.: "Theoretical Immunology", Marcel Dekker, Inc. (1978)
G.I. Marchuk and L.N. Belykh: "Mathematical Modeling in Immunology and Medicine", North Holland Publ. Co. (1983)
R.R. Mohler, et al.: "A Systems Approach to Immunology", Proc. IEEE 68, No. 8, p. 964 (1980)
- (9) 石井：システム論的に見た免疫現象，「免疫：Mook Medicine No. 1」メディサイエンス社，p. 21 (昭56)
- (10) P. レーダー：遺伝子レベルでみた抗体の多様性，別冊サイエンス：免疫系のメカニズム，p. 18 (昭61-6) 日経サイエンス社
- (11) 山口・清水：腫瘍免疫の理論，数理科学 No. 216, p. 46 (昭56-6)
- (12) J. ローレンス：エイズの免疫機構，別冊サイエンス：免疫系のメカニズム (1986-6) 日経サイエンス社，p. 92
- (13) N.K. Jerne: The Immune System, Scien. Americ. 229, p. 52 (1973).
- (14) J.H. Holland: "A Mathematical Framework for Studying Learning in Classifier Systems", Physica, Vol. 22D, p. 307 (1986)
- (15) J.D. Farmer, N.H. Packard & A.S. Perelson: "The Immune System, Adaptation, and Machine Learning", ibid. p. 187
- (16) 矢ヶ崎：「ノイズ・カット・トランスの使い方」トランジスタ技術，20, 8号，278頁 (昭58-8)
- (17) 松本：「バイオコンピュータ」科学，54, 638頁 (昭59)
- (18) 甘利：「バイオコンピュータ」(昭61)岩波書店
- (19) 合原：「ニューラルコンピュータ」(出版予定)東京電機大学出版局
- (20) 合原：免疫系と情報処理，高度生体情報処理機能に関する調査研究報告書，(財)機械システム振興協会，第5部，97頁 (昭61-3)