

コロナ社創立 90 周年記念出版 [創立 1927 年]

情報ネットワーク科学シリーズ 第5巻

生命のしくみに学ぶ 情報ネットワーク設計・制御

電子情報通信学会 [監修]

若宮 直紀 [共著]
荒川 伸一

コロナ社

情報ネットワーク科学シリーズ編集委員会

編集委員長 村田 正幸 (大阪大学, 工学博士)

編集委員 会田 雅樹 (首都大学東京, 博士 (工学))

成瀬 誠 (情報通信研究機構, 博士 (工学))

長谷川幹雄 (東京理科大学, 博士 (工学))

(五十音順, 2015年8月現在)

シリーズ刊行のことば

情報通信分野の技術革新はライフスタイルだけでなく社会構造の変革をも引き起こし、農業革命、産業革命に続く第三の革命といわれるほどの社会的影響を与えている。この変革はネットワーク技術の活用によって社会の隅々まで浸透し、電力・交通・物流・商取引などの重要な社会システムもネットワークなしには存在し得ない状況になっている。すなわち、ネットワークは人類の生存や社会の成り立ちに不可欠なクリティカルインフラとなっている。

しかし、「情報ネットワークそのもの」については、その学術的基礎が十分に理解されないままに今日の興隆を招いているという現実がある。その結果、情報ネットワークが大きな役割を果たしているさまざまな社会システムにおいて、特にそれらの信頼性において極めて重大な問題を抱えていることを指摘せざるを得ない。劇的に変化し続ける現代社会において、情報ネットワークが人や環境と調和しながら持続発展し続けるために、確固たる基盤となる学術及び技術が必要である。

現状を翻ってみると、現場では技術者の経験に基づいた情報ネットワークの設計・運用がまだまだ多くなされており、従来、情報ネットワークの学術基盤とされてきた諸理論との乖離はますます大きくなっている。実際、例えば、大学における「ネットワーク」講義のシラバスを見ると、旧来の待ち行列理論・トラヒック理論に終始するものも多く、現実の諸問題を解決する基礎とはおおよしい難い。一方、実用を志向するものも確かに存在するが、そこでは既存の通信プロトコルを羅列し紹介するだけの講義をもって実学教育としている。

本シリーズでは、そのような現状を打破すべく、従来の情報ネットワーク分野における学術基盤では取り扱うことが困難な諸問題、すなわち、大量で多様な端末の収容、ネットワークの大規模化・多様化・複雑化・モバイル化・仮想

ii シリーズ刊行のことば

化、省エネルギーに代表される環境調和性能を含めた物理世界とネットワーク世界の調和、安全性・信頼性の確保などの問題を克服し、今後の情報ネットワークのますますの発展を支えるための学術基盤としての「情報ネットワーク科学」の体系化を目指すものである。そのためには、既存のいわゆる情報通信工学だけでなく、その周辺分野、更には異種分野からの接近、数理・物理からの接近、社会経済的視点からの接近など、多様で新しい視座からのアプローチが重要になる。

シリーズ第1巻において、そのような可能性を秘めた新しい取組みを俯瞰した後、情報ネットワークの新しいモデリング手法や設計・制御手法などについて、順次、発刊していく予定である。なお、本シリーズは主として、情報ネットワークを専門とする学部や大学院の学生や、研究者・技術者の専門書になることを目指したものであるが、従来の大学専門教育のカリキュラムに飽き足りない関係者にもぜひ一読していただきたい。

電子情報通信学会の監修のもと、この分野の書籍の出版に長年の実績と功績があるコロナ社の創立90周年記念出版の事業の一つとして、本シリーズを次代を担う学生諸君に贈ることができるようになったことはたいへん意義深いものである。

最後に、本シリーズの企画に賛同いただいたコロナ社の皆様に心よりお礼申し上げます。

2015年8月

編集委員長 村田正幸

ま え が き

この四半世紀の情報ネットワークの成長、発展は目を見張るばかりである。電車内では年齢性別を問わず多くの乗客が熱心にスマートフォンを操作している。また、いわゆるデジタルネイティブにとって「ネット」の無い生活は考え難く、耐え難い。しかし、果たしてそのうちの何割が情報ネットワークやそれを支える技術、更に、その危うさを認識しているだろうか。

もちろん明日、突然に世界中の情報ネットワークが停止することはない。しかし、多くの研究者、技術者の英知の結晶である情報ネットワークの脆^{もろ}さや限界が指摘されているのもまた事実である。

本書では、重要な社会基盤の一つとして情報ネットワークが今後も持続発展するため、生物のしくみに学び、研究開発、技術発展の道しるべとする新しいアプローチについて論じている。

生物はいい加減である。しかし驚くほどうまくできている。構造、機構のいずれをとっても無駄だらけに見えるが、絶妙な無駄具合が生物の生存、繁栄に役立っている。生物の生態を紹介するテレビ番組やビデオの人気が高いのは、単に可愛さや格好良さだけでなく、その驚異的な能力やしくみに多くの人が魅了され、感動するためであろう。

我々人間も含め現存する生物は進化によって最適化され、選抜された勝者であると考えることができる。何が生物の頑健性や適応性を生み出しているのか、また、観測される形態は何を意味しており、どのように獲得されたのか。そのありさまは、工学システムである情報ネットワークのあるべき姿について多くの示唆を与えてくれる。

もちろん、生物と工学システムには大きな隔たりがあり、生物のしくみや動作原理がそのまま工学システムの制御技術として使えるわけではない。また、生

物分野の研究は長期にわたる観測と実験を必要とするため、ある生物の振舞いを工学応用につなげるためには、新たな発見や理論の構築を待たなければならぬことも多い。

生物に着想を得た情報通信技術（bio-inspired ICT）の研究に着手した約10年前の著者の学会発表に対する感想は「面白い」だった。ところが最近では、「使えそう」「使ってみたい」「使ってみた」に変わりつつある。更に10年後、20年後には、昆虫型（のしくみを使った）スマートフォンや通信機器が脳型（のしくみを使った）インターネットに接続され、世界中の人やモノが時間や空間の壁を超えてやりとりするようになるかもしれない。

わかりづらい点、説明不足な点なども多々あるかと思われるが、本書を手にした方々にも、生物の面白さ、また、生物に学ぶことの意義や可能性を感じて頂ければ幸甚である。

なお、本書の章末問題の解答はコロナ社の web ページ

<http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339028058/>

からダウンロードできるので、ぜひ章末問題にも取り組んでいただきたい。

末筆ながら、この機会を与えて頂き、また、企画段階よりさまざまなご助言を頂戴した編集委員長の大阪大学 村田正幸氏、編集委員である首都大学東京 会田雅樹氏、情報通信研究機構 成瀬誠氏、東京理科大学 長谷川幹雄氏に深謝いたします。また、執筆の遅れに辛抱強くご対応頂いたコロナ社の皆様に心より感謝いたします。

2015年8月

若 宮 直 紀
荒 川 伸 一

目 次

1. 序 論

1.1 大規模化する情報ネットワーク	1
1.2 通信事業者から見た情報ネットワークの変貌	3
1.3 情報ネットワークにおける重要課題	6
1.4 生物に学ぶ情報ネットワーク	9
章 末 問 題	10

2. 生命のしくみに学ぶ

2.1 生物のロバスト性に学ぶ	13
2.2 生物のゆらぎに学ぶ	16
2.3 生物の進化に学ぶ	18
2.4 生物のしくみに学ぶ情報ネットワーク	22
章 末 問 題	24

3. 自己組織化と情報ネットワーク制御

3.1 アリの採餌行動と情報ネットワーク制御	26
3.2 ホタルの発光同期と情報ネットワーク制御	32
3.3 体表の模様形成と情報ネットワーク制御	41
3.4 ミツバチの役割分担と情報ネットワーク制御	49
3.5 自己組織的な情報ネットワーク制御	61

章 末 問 題	62
---------	----

4. 生体ゆらぎと情報ネットワーク制御

4.1 生体ゆらぎとその効用	63
4.2 ゆらぎ制御	66
4.3 ゆらぎ制御にもとづく情報ネットワークのトポロジー制御	67
4.4 ゆらぎ制御にもとづく情報ネットワークの経路制御	84
4.5 ゆらぎ制御の階層化	92
章 末 問 題	103

5. 生体ネットワークと情報ネットワーク

5.1 情報ネットワークの構造的特徴	104
5.2 生体ネットワークと情報ネットワークの類似点・相違点	129
5.3 生体ネットワークに学ぶ情報ネットワークの構築	134
章 末 問 題	144

6. 結 論

引用・参考文献	147
索 引	155

第 1 章

序

論

1.1 大規模化する情報ネットワーク

「ネットワーク」という言葉から連想される「モノ」を思い浮かべて欲しい。多くの人は、インターネットのような「情報ネットワークシステム」を思い浮かべるであろう。情報技術 (Information Technology : IT) や情報通信技術 (Information Communication Technology : ICT) という言葉が世の中に普及して久しく、情報ネットワークは政治、経済、医療、教育の各方面に利用され、我々の生活に深く浸透しつつある。世界最大規模の情報ネットワークシステムともいわれる「インターネット」はもはや、我々が生活を営むうえで必要不可欠な社会インフラといっても過言ではないであろう。

インターネットは、1990年代は主として学術活動に利用されており、現在と比較して小規模であった。いまにして思えば、社会普及に向けた前段階としての研究者らによる (研究者らにとっては大規模な) 実験的な情報ネットワークであったと考えられよう。その後、90年代後半から現在にかけて、企業や個人による情報発信や情報取得の場となり、また、インターネットを介したさまざまなネットワークサービスが展開され、我々にとって身近な存在となっている。

図 1.1 は、インターネットを構成する AS (Autonomous System) 数の推移を示したものである。AS は、自社でネットワークを構築しているネットワーク事業者であり、インターネットサービスプロバイダ (Internet Service Provider : ISP) などが該当している。

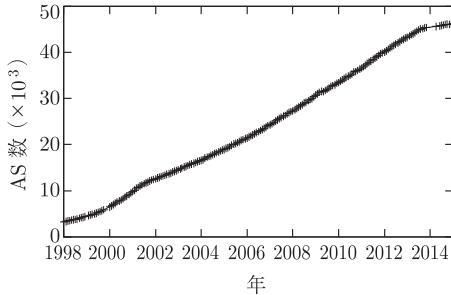


図 1.1 インターネットを構成する AS 数の推移

この図を見ると、90年代から現在にかけてインターネットを構成する AS 数が爆発的に増大していることがわかる。この図には AS を構成するルータ台数は含まれていないが、利用者増加に伴ってインターネットの大規模化が進んでいるといえよう。

インターネットの根幹をなすネットワーク技術は TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) である。ただし、インターネット誕生以来、同一のプロトコル実装を使用し続けているわけではなく、例えば通信技術の発展による通信容量の大容量化に伴う機能改良や、アドレス空間拡大に対する社会的な要望に応えるための機能追加がなされている。すなわち、TCP/IP の基本的な考え方を踏襲しつつも、さまざまな通信技術、ネットワーク制御技術、そしてネットワークアプリケーションの技術進展や社会環境（社会要望を含む）に応じて修正が行われている。

過去のインターネットと現在のインターネットを比較したときに決定的に異なる点は利用者数の違いである。先にも述べたように、過去のインターネットは、誰でもつながることは可能であったものの、専ら特定の利用者が特定の目的のもとで情報交換を行うための場となっていた。現在のインターネットは、さまざまな利用者が、さまざまな目的のもとで、情報交換を含むさまざまなサービスを楽しむ場となっている。

例えば、今日の我々は、スマートフォンなどのパーソナルデバイスを（ほぼ常時）手に持ち、電車などで高速に移動しながら乗継ぎ地や目的地に関する情報

を取得し、情報を取得したのちにはメールサービスや映像ストリーミングサービスや SNS サービスを享受している。周りを見渡してもパーソナルデバイスを相手に、自身と同様のサービスを享受しているものや、自身が知らないサービスを享受しているものが見られるであろう。

1.2 通信事業者から見た情報ネットワークの変貌

このようなインターネット利用形態の変貌は、通信事業者の観点からは以下のように捉えることができる。第一に、過去のインターネットでは、インターネットに接続するデバイスは職場や自宅に置かれたパーソナルコンピュータであったが、現在は移動性をもつデバイスが加わっている。

第二に、利用者が享受するサービスが多様化し、利用アプリケーションの違いにより利用者が発する通信の量（以降、トラフィック量と呼ぶ）が時間軸に対して大きく変動する。アプリケーションソフトウェアの中には発するトラフィック量の変動が小規模のものもあれば、予期不能なものもあり、また、新たなアプリケーションソフトウェアによって、通信事業者の想定外のトラフィック量を発するものも考えられる。

更には、第一で述べたデバイスの移動性に伴って、時間軸のみならず空間軸に対してもトラフィック量が増加する。特に、デジタルネイティブの成長に伴ってあまねく全世代にわたって ICT のヘビー・コアユーザになると予想されることから、トラフィック量の増加だけではなく、各世代の趣向に応じたサービス展開に伴うトラフィック量の変動が極めて複雑になるものと考えられる。

このようなインターネットの利用形態の変貌に際し、通信事業者は自身のネットワークをどのように構築し制御すればよいのだろうか。最も単純な方法は、過去のインターネットの利用形態に応じて取り組んだ方法を、今後も踏襲していくことである。

例えば、通信回線の敷設や増強にあたって、過去の通信量の履歴から将来の通信需要やその変動を予測し、通信遅延やスループットなどに関する性能要求

とコストのバランスにもとづいて、必要十分な回線容量と配置場所を決定する、などが挙げられる。これは、情報ネットワークを工学システムとして捉え、社会インフラとして求められる性能要件を満たすための最適設計と、それにもとづく決定論的な制御を行うものである。

少なくとも現在我々が利用しているインターネットは、最適設計と TCP/IP に準じる決定論的な制御によって動作しており、利用者が性能に満足を感じず離れていかない限りは取って代わる必要はないかもしれない。しかし、将来のインターネット、あるいは、インターネットに準じる情報ネットワークにおいても、このような方法論は通用するのだろうか。残念ながらこの問いに明確に答えることは困難である。なぜなら、利用者がインターネットに何を求めるか、また、通信技術がどのように発展するかに依存するためである。

利用者がインターネットにいま以上のものを求めず、また、新たに利用が増えないという前提のもとでは、現状維持が有力な対処策となろう。しかし、先にも述べたデジタルネイティブの成長に伴う利用者人口の増大は確実に見込まれる。また、最近では人が操作するデバイスだけではなく、センシングデバイスと通信デバイスをもった「モノ」がセンサなどによって状態を計測し、ネットワーク接続し、その情報交換によって新たなサービス創発を促進しようとする **IoT** (Internet of Things)/**M2M** (Machine-to-Machine communication) の概念も提唱されている。

一説では、2020 年には 250 億個の「モノ」がネットワークに接続されるといわれており¹⁾†、インターネットの設計・制御のあり方にも大きなインパクトを与えるであろう利用形態が議論されている。これらのデバイスが有線通信で接続されることは考え難く、ほぼ全てが無線通信で接続されるため、通信帯域が逼迫^{ひっばく}することが容易に予想される。

また、デバイス当りデータ通信量、すなわちユーザプレーン (U-Plane: User Plane) トラフィックは小さいものの、その制御、管理のための制御プレーン (C-Plane: Control Plane)、管理プレーン (M-Plane: Management Plane) の

† 肩付数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

コストは無視できないほど大きい。そのため、IoT デバイスや M2M デバイスの制御・管理手順を簡略化するなどの検討が進められている。

ただし、ここでは IoT や M2M が実際に社会導入されていくかは重要ではなく、現在のインターネットに対して新たな利用形態やそれに伴う価値を付与しようという取組みが継続的になされ、ネットワーク側では、その要求に応えるための対策を常に講じ続けなければならない点が重要である。

結局のところ、利用者はインターネットに対してこれ以上何も求めないということはなく、常に新しく便利なサービスを求めるものである。利用者数が増加しトラフィック量が増大したとしても、その増大に見合う収益があれば、最適設計にもとづくネットワーク設計・制御でも対処可能である。極端にいえば、利用者の総トラフィック量が2倍になったとしても、現在のインターネットと同一の情報ネットワークをもう一つ用意すれば、現状の通信品質を維持することができる。

ただし、この場合は利用者が支払う接続料金は2倍以上となる。2倍以上としているのは、ネットワークの維持費だけでなく運用費用も勘案しているためである。一方、事業者間の競争の中で接続料金は低廉化しており、また、IoT、M2M については ARPU (Average Revenue Per User) が携帯電話の数%程度であると考えられている。そのため、回線コストを一定にしつつ容量を引き上げる通信技術や、パケット処理を行うルータコストを一定にしつつ処理能力を引き上げるルータ技術に期待し、実際にこれまで期待どおりに発展してきた。

通信技術については、ギルダー (Gilder) の法則²⁾と呼ばれる「通信容量は半年間で2倍になる」という経験則があり、また、ルータ処理能力そのものの経験則ではないが、ルータにおけるパケット処理の中核をなすプロセッサや集積回路については、「集積回路当りのトランジスタ数は約2年ごとに2倍になる」という経験則であるムーア (Moore) の法則がある。これらは自然摂理などではなく、関連技術の開発によって達成されるものである。

1.3 情報ネットワークにおける重要課題

今後もこの経験則を維持できるかは関連技術の開発に依存するため不確定であるが、維持できたとしても生じる問題が二つある。一つは先にも挙げたトラフィック量の変動への対処や機器故障への対処、すなわちロバスト性であり、もう一つは省エネルギー性である。

通信事業者が最適設計によりネットワークを構築する場合を考える。ネットワーク構築は、過去の通信量の履歴から将来の通信需要やその変動予測にもとづいて行われるが、ネットワークを介して交換されるトラフィック量は常に変動するものであるため、何らかのネットワーク制御によって短中期的な変動を吸収する必要がある。

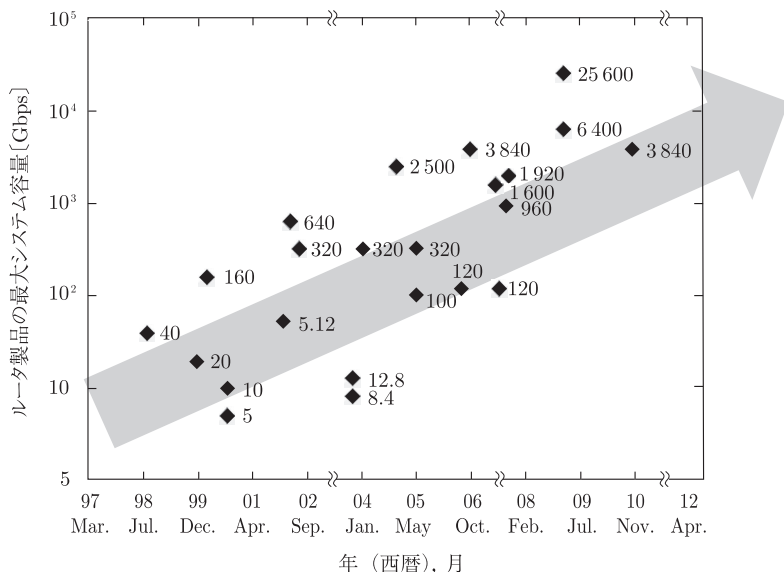
軽微なトラフィック量の変動に対しては、あらかじめ回線容量に余裕を持たせるなどしておくことが考えられる。いわゆるオーバプロビジョニングの考え方である。軽微ではないトラフィック量の変動が生じ、オーバプロビジョニングにより余裕を持たせた回線容量では対応しきれなくなって通信性能が悪化すると、トラフィックが流れる経路を制御し、変更することで通信性能の悪化から脱却することも考えられている。このような制御は、トラフィックエンジニアリング (traffic engineering) と呼ばれている。

トラフィックエンジニアリングは、構築済みのネットワークの限りあるネットワーク資源を有効に活用するべく、トラフィック量の変動に対応したネットワーク制御を行うものである。ただし、トラフィック量の変動が生じた際に、再び最適設計にもとづいて最適な経路を求め、ネットワーク全体の最適化を図るためには、ネットワークの構造、トポロジー (topology) や、通信需要、また、通信回線品質などをリアルタイムかつ正確に把握し、更に、それらの環境条件が変化する前に制御に反映しなければならないため、頻繁に大量の制御情報をやりとりすることで通信容量を圧迫するという問題が生じる。

また、情報ネットワークが大規模、複雑になるに従って、実用的な時間や計

算量で、構成要素の複雑な連携や相互作用を考慮した最適解を導出すること自体が困難になりつつある。更に、そのような情報ネットワークの複雑化は、事前に想定できないレベルの変動や障害を引き起こす可能性を高めている。

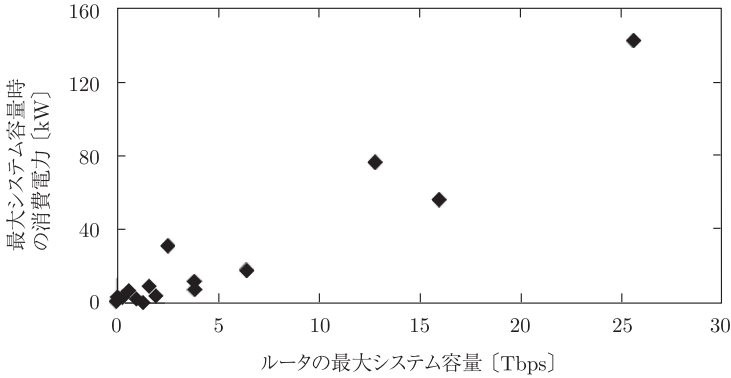
もう一つの問題は、ネットワークの省エネルギー性である。図 1.2 は、米国のルータベンダであるジュニパー社が発表したルータ製品の発表時期と最大システム容量を示したものである。この図から、ルータのシステム容量が年月とともに着実に向上していることがわかる。



発表時期はプレスリリースの掲載年月としている。また、ルータ製品の最大システム容量は対数目盛としている。

図 1.2 ルータ製品の発表時期と、そのルータ製品の最大システム容量

一方で、ルータの最大システム容量時の消費電力を示したものが図 1.3 である。図を見ると、システム容量の増加に伴って、消費電力が着実に増大していることがわかる。すなわち、利用者数の増加に伴うトラフィック量増大を吸収するべく通信容量を増大させていったとしても、通信容量増大に伴う消費電力が上昇する課題が顕在化している。



システム容量の増加に伴って消費電力が増大している。

図 1.3 ルータの最大システム容量時の消費電力

文献3) に示されている試算によれば、2020年時点の国内に配置されるルータの総消費電力量は、2007年時点の国内の総消費電力に到達するともいわれている。現在のインターネット構築に用いられてきた設計原理を、継続して使用していくと、消費電力の観点からは存続自体が危ぶまれる事態に陥りかねない。

このような顕在化しつつある問題に対して、どのように対処し持続発展可能なインターネットや情報ネットワークを構築していくことは重要な研究課題となっている。我が国においても **Green of ICT** として、情報通信システムそのものの省電力化に国を挙げて取り組んでいる。

省エネルギー性については、ネットワーク構築の仕方を工夫することによってのみ達成されるものではなく、さまざまな技術開発と一体となって実現していく必要があると考えられる。例えば、省エネルギー性デバイスの開発によってルータ自体の消費電力を削減することは不可欠であろう。デバイス自体の省エネルギー化が促進されるときに課題となるのが、ネットワークの構築や制御に要する消費電力の削減である。

これについては、例えば、優れたネットワーク制御手法を導入することによって、トラフィック量の変動を吸収するためのオーバプロビジョニングを抑制するといったことや、従来のネットワーク制御手法で考えられてきたような、計算に

要する消費電力が膨大となる最適化制御の代替手法を用意しておくことである。

情報ネットワークの構築手法や制御手法については、これまでは最適性が追求されてきた。最適なネットワークを求めるにあたって前提となるのが、今現在のネットワーク環境がどのようになっているかを把握しておくことであり、そのうえで工学システムのようにある規定された環境や想定範囲内で最大の能力を発揮するための最適化を図るものである。

ところが、現在のインターネットは、さまざまな利用者が、さまざまな目的のもとで情報交換を含むさまざまなサービスを楽しむ場となっており、情報ネットワークに求められる性能要件や機能要件も多様化している。これに伴って工学的アプローチによる最適化を図るための環境規定や想定すること自体が困難となりつつある。

1.4 生物に学ぶ情報ネットワーク

このような状況に直面するなかで、今後のインターネットや情報ネットワークの構築手法や制御手法として何を考えていけばよいのだろうか。一つの考え方としては、最適性の追求を取りやめて、ネットワーク環境の規定が不要、かつ、想定自体も不要としつつも、トラフィック量の変動に柔軟に対応していくことが可能な構築手法や制御手法を用いることが挙げられる。

このような可能性をもつシステムが生物システムである。生物システムは、常に変化する環境下でも、最適ではないにしても、それなりに動作、機能するしくみを有しており、生来的に適応的で頑健であることが知られている。ただし、当然のことながら、生物システムと情報ネットワークは、その構築目的や要件が異なる別個のシステムである。

したがって、生物システムの振舞いをそのまま模倣するのではなく、生物システムが有するネットワークダイナミクス、すなわち、どのような情報を取得し、ネットワークを介してどのように上手に活用しているか、というその本質を理解し、情報ネットワークの新たな設計・制御原理に取り入れることが重要

である。これによって飛躍的な発展を遂げた情報ネットワークが、将来においても重要かつ信頼のできる社会基盤システムとして更に持続発展できる可能性がある。

本書では、まず2章において、生物システムのもつロバスト性、省エネルギー性などの特性やその原理を概観し、持続発展可能な情報ネットワークの実現にあたって生物のしくみに学ぶことの意義や期待される効果について論じる。

次に、3章において、生物システムの主要かつ重要な原理の一つである自己組織化と、その数理モデルの情報ネットワーク制御への応用例について述べる。生物システムと情報ネットワークは多数の自律動作可能な要素によって構成されている点において非常に類似している。生物システムの自己組織化に学ぶことにより、拡張性、適応性、耐故障性の高い情報ネットワークを構築できる。

また、4章では、生物のゆらぎに着目する。生物はさまざまな外乱、内乱にさらされているが、工学システムのようにゆらぎを抑制、除去して制御効果を高めるのではなく、むしろ、ゆらぎを積極的に利用することによって高い適応性を獲得している。4章では、ゆらぎを活用するネットワーク制御技術の例を挙げ、その効果を論じる。

5章では、まず情報ネットワークの構造解析を行ったあと、生物システムの転写因子ネットワークと情報ネットワークの構造面の類似性に着目した取組みについて述べる。更に、トポロジーの有する構造多様性を情報理論的アプローチによって分析する。

最後に6章において、本分野の今後の展開、展望などについて述べる。

章 末 問 題

- 【1】 自身がインターネットに接続するための手段を列举せよ。それぞれの手段に対して自身が求める性能や機能を述べよ。
- 【2】 情報ネットワークを構築する目的と、構築するにあたって考慮しなければならない事項について、通信事業者の立場からまとめよ。
- 【3】 インターネットを流れる通信量を調べ、予測値を述べている文献がいくつか存

在する。そのような文献を一つ挙げ、何の通信量を調べているのか、予測値が何にもとづいているのかをまとめよ。

- 【4】 通信量が変動する要因として考えられるものを列挙し、その時間軸、空間軸上での変動の大小を表としてまとめよ。
- 【5】 情報ネットワークを運用していくうえで必要となる消費電力の内訳を調査して示せ。また、昨今の通信ネットワークを取り巻く環境を鑑みたうえで、5年後に内訳がどのように推移するかを、その理由とともに述べよ。

— 著者略歴 —

若宮 直紀 (わかみや なおき)	荒川 伸一 (あらかわ しんいち)
1992年 大阪大学基礎工学部情報 工学科3年 中退	1998年 大阪大学基礎工学部情報 工学科3年 中退
1994年 大阪大学大学院基礎工学 研究科博士前期課程修了 (物理系専攻)	2000年 大阪大学大学院基礎工学 研究科博士前期課程修了 (物理系専攻)
1996年 大阪大学大学院基礎工学 研究科博士後期課程修了 (物理系専攻)	2000年 大阪大学大学院基礎工学 研究科博士後期課程中退 (物理系専攻)
1996年 博士(工学)	2000年 大阪大学助手
2002年 大阪大学助手	2003年 博士(工学)(大阪大学)
2007年 大阪大学助教	2007年 大阪大学助教(職名変更)
2007年 大阪大学准教授(職名変更)	2011年 大阪大学准教授
2011年 大阪大学教授	現在に至る
現在に至る	

生命のしくみに学ぶ情報ネットワーク設計・制御

Bio-inspired Design and Control of Information Networks

© 一般社団法人 電子情報通信学会 2015

2015年10月5日 初版第1刷発行

検印省略

監修者 一般社団法人
電子情報通信学会
<http://www.ieice.org/>
著者 若宮直紀
荒川伸一
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-02805-8

(製本:愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします