

情報ネットワーク科学シリーズ 第1巻

情報ネットワーク科学入門

電子情報通信学会 監修
村田正幸・成瀬 誠 編著

コロナ社 90周年記念出版
創立 1927年



コロナ社

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 1 卷

情報ネットワーク科学入門

電子情報通信学会 [監修]

村田 正幸
成瀬 誠 [編著]

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、産業革命に継ぐ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・運用がい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

情報ネットワークはモバイル利用など種々のサービス利用や用途に応じた制御が行われており、秒～日オーダーの短期的な情報流の変動が絶えず起こっているシステムである。更に、長期にわたる変動、すなわち、利用者の増大に伴って情報流が増大しながら、かつ、新しい利用法の創出によって劇的な変化も頻繁に発生している。すなわち、情報ネットワークはその内的環境、外的環境が相互に影響を及ぼし合いながら絶えず変化する、ほかに類を見ない大規模複雑な人工システムである。これまで情報ネットワークは、その基本技術である光通信技術や無線通信技術などの絶えまない変革によって、情報流の量的拡大への対応がなされてきた。また、利用端末（コンピュータやスマートフォンなど）の仕様に基づいて機能を階層化・分割し、全体を組み上げるという要素還元論的手法によるシステム設計が行われてきた。しかし、情報ネットワークは

- (1) それ自体、多くの構成要素から成り立ち、それらの相互依存性がますます高まっていること。
- (2) さまざまな通信要求を処理し伝達する開放系であるが、その要求は日々増大し、かつ、利用者の要求の多様化や変化に依存して大きく変動するシステムであること。
- (3) データ観測や電力制御等さまざまな社会システムが情報ネットワークに依存するようになり、利用形態がますます複雑化していること。

などの特性を持つ。その結果、エネルギー効率やコスト、規模などを考慮すると、量的拡大による手法ももはや限界に近づきつつある。

既存の学術基盤における根本的問題は、実世界や人・社会との調和を十分に考慮しないまま「情報ネットワーク」のみを対象として、更に、その性能や通信品質に関する研究開発が多くなされてきたところにある。例えば、航空機は

その部品数が数百万点に達する複雑なシステムであるにもかかわらず、利用者が一定の信頼感を持つのは、長年にわたる信頼性理論や安定性理論など確固たる学術基盤の発展によって事故率が低く抑えられているからにはほかならない。一方、情報ネットワークは、接続されているコンピュータ数が数億台、移動体通信などもあわせた端末数が数十億台といわれる大規模システムであり、2020年には接続端末数は数百億台に達するといわれている。更に、航空機のような閉じたシステムではなく、情報流が絶えず変動しながら、成長を続ける開放系である。本学術領域は、このような大規模複雑な、かつ、外的環境や内的環境が変動する動的な情報ネットワークの根底をなす科学の創成を目指すものであり、それなくして利用者の安全・安心、更には信頼の実感は有り得ない。

このような状況に危機感を覚えた編著者らは、平成23年に「情報ネットワーク科学時限研究専門委員会 (NetSci 研究会)」を電子情報通信学会通信ソサイエティに設立し、これまでに合計13回の研究会・ワークショップ・シンポジウムを開催し、情報ネットワーク科学における重要課題の抽出と議論を進めてきた。また、その成果を公表するために、英文論文誌特集号も2回刊行している。本書は、同研究会の活動をもとに、情報ネットワーク科学に興味のある学生や企業研究者・技術者の方への一般的解説書としてふさわしい内容となるよう書き下ろしたものである。執筆者は研究会委員や共同研究分担者であり、内容も同研究会で生まれつつあるフィロソフィが中核となっているが、この分野の現状並びに将来について幅広い観点から解説を行うように配慮している。

もちろん、情報ネットワーク科学はまだ発展途上である。多くの研究者が、それぞれの研究者の視点・考え方という窓を通じて、情報ネットワーク科学を構築しようと努力している状況である。全体の考え方が十分確立していないために、用語や内容など統一感に欠ける部分もあるが、それも黎明期にある研究の息吹と感じ取っていただければ幸甚である。本書によって、この分野に興味を持って取り組もうとされる研究者・技術者の方が一人でも増え、情報ネットワークの更なる発展につながれば、それは編著者の望外の喜びである。

本書をまとめるにあたっては、情報ネットワーク科学研究会の総勢58名の多

くの関係各位に感謝するとともに、本書の完成にご尽力くださったコロナ社の皆様に心よりお礼申し上げます。

2015年8月

村田 正幸
成瀬 誠

————— 編著者・執筆者一覧 —————

【編著者】

村田 正幸（大阪大学）
成瀬 誠（情報通信研究機構）

【執筆者】

村田 正幸（大阪大学） 0部
成瀬 誠（情報通信研究機構） 0部，6章，8章
巳波 弘佳（関西学院大学） 1章
井上 武（日本電信電話株式会社） 1章
長谷川 幹雄（東京理科大学） 2章
合原 一幸（東京大学） 2章
関屋 大雄（千葉大学） 3章
若宮 直紀（大阪大学） 4章
荒川 伸一（大阪大学） 4章
会田 雅樹（首都大学東京） 5章，11章
高野 知佐（広島市立大学） 5章
青野 真士（東京工業大学） 6章
金 成 主（物質・材料研究機構） 6章
佐藤 健一（名古屋大学） 7章
長谷川 浩（名古屋大学） 7章
石川 正俊（東京大学） 8章
林 幸 雄（北陸先端科学技術大学院大学） 9章
新井田 統（株式会社 KDDI 研究所） 10章
新熊 亮一（京都大学） 11章
安 田 雪（関西大学） 12章

（執筆順，2015年8月現在）

目 次

第0部 序—情報ネットワーク科学

- 1. 情報ネットワークの科学基盤はあったか? 1
- 2. 情報ネットワーク科学：本書のアプローチ 2

第1部 情報ネットワークのための数理基礎

1. 情報ネットワークの基本的性質を捉える数理

- 1.1 ネットワークの構造 6
 - 1.1.1 現実のさまざまなネットワーク 6
 - 1.1.2 グラフの定義と性質 6
 - 1.1.3 現実のネットワークが持つ性質 10
 - 1.1.4 ネットワーク生成モデル 13
- 1.2 ネットワークの最適化 17
 - 1.2.1 最適化とアルゴリズムと計算量 17
 - 1.2.2 最 短 路 問 題 19
 - 1.2.3 最大フロー問題 22
 - 1.2.4 信頼性の高いネットワーク設計 26

☞ コラム：スケールフリーネットワークの信頼性 30

2. 複雑系理論と情報ネットワーク

- 2.1 複雑系とカオス 31

2.2 カオスと通信	40
2.3 カオスと最適化	46
☞ コラム：カオスデザイン	52

3. プロトコル設計と数理基礎理論

3.1 CSMA/CA の動作解析	53
3.1.1 CSMA/CA の基本動作	54
3.1.2 フレーム衝突の発生要因	57
3.2 マルチホップネットワークへの拡張	60
3.2.1 マルチホップネットワークの数理モデル	62
3.2.2 フロー制限に基づく特性解析	68
3.2.3 数理モデルの評価と考察	73
3.3 数理モデルの構築とプロトコル設計	76

第2部 ネットワークダイナミクスを扱う情報ネットワーク科学

4. 生命のしくみに学ぶ情報ネットワーク

4.1 生命における自己組織化とネットワークへの応用	79
4.2 生命の環境適応性と情報ネットワーク	81
4.3 生命の階層性と情報ネットワーク	84

5. 自然界の階層構造に学ぶ自律分散制御モデル

5.1 近接作用の考え方に基づく自律分散制御	89
5.1.1 遠隔作用と近接作用	89
5.1.2 近接作用と偏微分方程式	91

5.1.3	偏微分方程式に基づく自律分散制御	94
5.2	時間的・空間的スケールと自律分散制御	95
5.2.1	自律分散制御とスケールの階層構造	95
5.2.2	自律分散制御の必要性	97
5.3	拡散型フロー制御技術	98
5.3.1	拡散型フロー制御技術の構成法	98
5.3.2	拡散型フロー制御技術の動作特性	103

6. 自然界のダイナミクスに学ぶ情報ネットワーク機能

6.1	固体光電子系におけるネットワーク	105
6.2	制約充足問題の解決	107
6.3	充足可能性問題の解決	109
6.4	意思決定問題の解決	111

第3部 リアルワールド情報ネットワーク科学

7. 情報ネットワークと消費エネルギー

7.1	情報ネットワークの消費エネルギー	115
7.2	通信ネットワークの消費電力	117
7.3	コンピュータ・データセンタの低消費電力化	120
7.4	低消費電力化の限界	123
7.5	低消費電力ネットワークの実現	126

8. センシングと情報ネットワークの基本課題

8.1	センシング技術の基本構造	133
-----	--------------	-----

8.1.1	センサフュージョンの基本	133
8.1.2	センサフュージョンをネットワークにおいて実現するための基本課題	134
8.2	センシングから見たネットワーク技術の基本課題	137

第4部 人・社会に広がる情報ネットワークの科学


9. 情報ネットワークとレジリエンス

9.1	地域メッシュデータ	139
9.2	レジリエントな情報ネットワークに向けて ：災害時に必要な情報，物資，人材	141
9.3	レジリエントな玉葱状ネットワーク	145
☉	コラム：ノード攻撃に耐える玉葱状構造	153

10. 通信行動とユーザ心理のモデル化

10.1	通信ネットワークの QoE	154
10.1.1	QoE と は	155
10.1.2	インターネットサービスの QoE 測定方法	156
10.1.3	QoE 評価に基づくネットワークの設計手法	158
10.2	人とネットワークの相互作用	159
10.3	心理・行動のモデル化	160
10.3.1	「待つ」行為の認知モデル	160
10.3.2	待ち時間満足度の数理モデル	162
10.4	通信行動のモデル化に向けて	165
☉	コラム：マルチタスキングは，パフォーマンスを低下させる？	166

11. ソーシャルネットワーク構造を反映した 情報ネットワーク制御モデル

11.1	ソーシャルネットワーク構造と社会的距離	167
11.1.1	社会的距離とコンテンツ流通範囲	167
11.1.2	さまざまな社会的距離の尺度とソーシャルネットワーク構造の変化	169
11.2	社会的距離を反映したネットワーク制御	171
11.2.1	社会的距離に基づく論理ネットワークの制御	171
11.2.2	社会的距離に基づく物理ネットワークの制御	172
11.3	ソーシャルネットワークの構造・分割・ノード間相互作用のモデル	176
11.3.1	ラプラシアン行列とその基本的な性質	176
11.3.2	ラプラシアン行列によるグラフの分割	178
11.3.3	ネットワーク上の拡散方程式とノード間の非対称相互作用	180
	コラム：普遍性と不変性	183

12. 社会的ネットワークと情報ネットワーク科学の創発

12.1	グラフ理論の応用・社会的ネットワーク分析・情報ネットワーク	184
12.2	情報ネットワーク科学と社会的ネットワーク分析の相互の貢献	190
12.3	社会的ネットワークに固有な特徴	192
12.4	情報ネットワーク科学との創発へ	198
引用・参考文献		200
索 引		214

ここでは、情報ネットワーク科学に至った課題意識を簡潔に論じるとともに、本書の構成と内容を概観する。

1. 情報ネットワークの科学基盤はあったか？

ネットワーク技術の誕生をどのように定義するかは見解がわかれるところであるが、いわゆるインターネットの源流となる研究は、1950年代のコンピュータの発展とともに始まり、やがてパケット通信技術が生まれた。その後の発展は瞬く間といえ、情報ネットワークは人類の生存と社会の成立ちに不可欠なクリティカルなインフラへ発展した。

さて、このように急速に発展した情報ネットワークを支える科学はあるのだろうか。本書は、「現時点ではそれが存在していない」、「それこそが問題である」、という立場をとる。

回線交換機を基礎としていた固定電話網の時代では、トラヒック理論は最適な設備設計を実現するために有効な理論であり、通信ネットワークの学問的基礎をなしていた。また、インターネットの萌芽期において、パケット交換機の設計を行うための基礎として、待ち行列理論は確かに有用であった。しかしながら、今日ではインターネットの設計制御において、待ち行列理論の適用可能な領域はすでに消滅し、例えばネットワークの運用はオペレータの経験と勘に強く依存する事態となっている^{1)†}。

従来、インターネットの発展は、相互接続性を保証するためにネットワークプロトコルの階層構造によって維持されてきた。それによって、新たなアプリケーションの収容、帯域の拡大、使用形態の変化に対してこの枠組みで対応し、基本設計の上に機能を追加することによって柔軟な対応を可能としていた。その結果、新しい機能追加はそのためのプロトコル設計を意味し、そのプロトコ

[†] 肩付数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

ルが「きちんと動作するかどうか」の問題に帰着する。「無矛盾性を保証するための理論」、すなわち、プロトコルの仕様記述と検証が基礎理論となり得るが、ネットワークへの要求機能の多様化のために、確固とした理論的基礎になり得ていない。その結果、機能追加に対して、既存アーキテクチャへのプロトコル追加だけでは対応できない旨の報告もある¹⁾。

上記のように、既存の「学術」が今日では限界を抱えているということに加え、本書は、そもそも、このように「通信」だけを切り取って論じること自体に、今日ではさほどの重要性はないのではないかと、いや、むしろそれこそが問題なのではないかと、という立場をとる。その様相をつぎに概観する。

2. 情報ネットワーク科学：本書のアプローチ

情報ネットワークは社会の隅々まで浸透し、電力・交通・物流・商取引など重要な社会システムも情報ネットワークなしには存在し得ない。すなわち、ネットワークは人類の生命や財産に関わる重要な社会活動にも強く影響を与えるクリティカルな社会基盤である。しかしながら、これは一例にすぎないが、その信頼性はほかの社会システムと比べても著しく低いといわざるを得ない。例えば、2014年9月に発表された総務省「電気通信サービスの事故発生状況」において2013年の「事故」（大部分は障害と考えられる）の発生件数は、電気通信事業法の規程に基づいた報告義務のあるものに限っても約45000件に上る。その結果、ネットワークの障害が大きな社会的問題を引き起こすだけでなく、ネットワーク障害がほかの社会システムに波及し、障害のさらなる拡大によって甚大な被害を各所にもたらすという事態も頻繁に起きている。

それにもかかわらず根本的な対策が講じられていないのは、あるいは講じることができていないのはなぜだろうか。

この問題に対して、本書は、情報ネットワークが、これまでの工学的システムに見られなかった大規模複雑で、かつ、新しいサービスが常に付加的に開発されている動的開放システムであるからという仮説に依拠する。情報ネットワー

クに接続されるコンピュータ数は数億台に達し、端末数は移動体などもあわせて数十億台、近い将来には500億台に達するといわれている²⁾。もちろん、端末は極めて多様である。また、モバイル利用など種々のサービスや用途に応じた制御が行われており、ミリ秒オーダーのリアルタイム性を必要とする状況から、利用者の増減や新しい利用法の創出などの長期スパンでの劇的な変化も頻繁に発生している。すなわち、空間ダイナミクスだけでなく、時間ダイナミクスを有するシステムである。

このような簡単な考察だけからしても、情報ネットワークの科学が「通信」だけを切り取って論じるのみでは不十分であり、人や社会も含んだ全体システムとして捉えるものでなくてはならないことは明らかにわかる。

そこで本書は、つぎのような4部構成でこの問題に取り組む。

まず第1部において「情報ネットワークのための数理基礎」を整備する（第1章～第3章）。第1部の内容は第2部～第4部の基礎と位置付けることができる。

第1章「情報ネットワークの基本的性質を捉える数理」では、グラフ理論の基礎を押さえた上で、スモールワールドネットワーク、スケールフリーなどの情報ネットワークの数理基礎を実際の情報ネットワークの具体例を用いながら導入する。また、情報ネットワークを扱う最適化アルゴリズムについても触れる。第1章で扱う個々の内容については多くの類書が出ているが、本書では、情報ネットワークのモデル化と分析の最重要な基礎に焦点を絞ったコンパクトな記述をしている。詳細は本シリーズの第2巻「情報ネットワークの数理と最適化—性能や信頼性を高めるためのデータ構造とアルゴリズム—（巴波弘佳・井上武共著）」を参照されたい。

第2章「複雑系理論と情報ネットワーク」では力学系・カオスの基礎などいわゆる複雑系理論の基礎を情報ネットワークの特徴に沿って概説する。複雑系に関しては類書が多数出ているが、本書は情報ネットワークとの対応に留意した記述としており、前述の開放型システムの特徴付けの基礎とすることを狙っている。第2章の詳細については本シリーズの第4巻「ネットワーク・カオス—

非線形ダイナミクス・複雑系と情報ネットワーク—（長谷川幹雄・中尾裕也・合原一幸共著）」を参照されたい。

第3章「プロトコル設計と数理基礎理論」は、従来のプロトコル設計の課題を打破すべく、数理的基礎を伴う形でのプロトコル設計という新しい取組みを示す。

つぎに第2部を「ネットワークダイナミクスを扱う情報ネットワーク科学」と題し、情報ネットワークのダイナミクスの理解と応用を試みる（第4章～第6章）。

第4章「生命のしくみに学ぶ情報ネットワーク」では動的開放システムとして現実に機能している生命システムを一つの規範として、情報ネットワークの設計・制御に展開する議論を示す。第4章の詳細については本シリーズの第5巻「生命のしくみに学ぶ情報ネットワーク設計・制御（若宮直紀・荒川伸一共著）」を参照されたい。

第5章「自然界の階層構造に学ぶ自律分散制御モデル」では、一定の秩序を示す動的モデルシステムを規範として、そこから自律性やロバスト性などの情報ネットワーク機能を獲得する議論を示す。第5章の詳細については本シリーズの第3巻「情報ネットワークの分散制御と階層構造（会田雅樹著）」を参照されたい。

第6章「自然界のダイナミクスに学ぶ情報ネットワーク機能」では、自然界の物質系（固体電子系）におけるネットワークが開放系として環境と相互作用することで、解探索や意思決定という知的機能をもたらすことを示す。

つぎに第3部を「リアルワールド情報ネットワーク科学」と題し、現実の物理世界とサイバー世界の境界に位置する基本的課題を概観する（第7章、第8章）。

第7章「情報ネットワークと消費エネルギー」では情報ネットワーク全体の消費電力について概観し、その上で情報ネットワークの技術課題を考察する。

第8章「センシングと情報ネットワークの基本課題」では、情報の効率的伝達を目的としてきた通信技術と物理世界の理解を目的としてきたセンシング技

術には構造的な差異が存在することを指摘し、その克服に向けた重要課題を論じる。

つぎに第4部を「人・社会に広がる情報ネットワークの科学」と題し、さまざまな社会システムと情報ネットワークの関わりでの学術的基礎を構成する試みを論じる（第9章～第12章）。

第9章「情報ネットワークとレジリエンス」では、耐災害性の観点から情報ネットワークを考察し、その上で、頑健性や復旧能力（レジリエンス）に優れたネットワーク構造の自己組織的な構成法を示す。

第10章「通信行動とユーザ心理のモデル化」では、情報サービスの利用者である人の行動を「通信行動」として捉え、認知的人工物としての通信ネットワークという概念設定やその分析を示す。

第11章「ソーシャルネットワーク構造を反映した情報ネットワーク制御モデル」では、ソーシャルネットワークにおけるユーザ間またはユーザと事業者間などに関する社会的距離を考え、望ましい情報ネットワークの制御方法について議論する。

第12章「社会的ネットワークと情報ネットワーク科学の創発」では人の群集行動など社会学的知見と情報ネットワークの分析がどのように相互関係するかなど社会学と情報ネットワーク学の境界に関する取組みの例を示す。

以上のように、第1部の基礎数理、第2部のダイナミクスから、第3部の実世界物理との関わり、第4部の人・社会との関わりへと移るにつれて、動的開放システムにおける開放性を伴う部分がより具体的な内容となっている。ただし、各章は独立して読むことが可能なように配慮されている。

索引

【あ】		カット	27	結束度	194
アトラクタ	52, 83	カットサイズ	27	減 災	141
アルゴリズム	17	カルマン写像	46	権 力	194
暗 号	37	環境適応	81	【こ】	
		頑健性	146, 153	構造的空隙	194
		完全グラフ	9	構造同値	194
【い】		管理型自己組織化	81	国勢調査	139
意思決定問題	105	【き】		固定電話網	1
石巻モデル	143	木	9	固有値	177
インターネット	1	機密性	168	固有値問題	177
		境界条件	100	固有ベクトル	177
【え】		境界問題	188	コラボレーション構造	87
エアタイム	62	競 争	194	コンテンツ	168
衛星通信	144	協調原理	148	【さ】	
エノン写像	35	共通隣接ノード数	169	災害時	140, 141
遠隔作用	89	局所辺連結度	27	最小ホップ数	167
		距 離	9	最大フロー・最小カットの	
【お】		近接作用	89	定 理	27
オピニオン評価	155	【く】		最大フロー問題	22
		空間稠密性	135	最短路	9
【か】		組合せ最適化	39, 46	最短路木	19
回線交換機	1	組合せ爆発	105	最短路問題	19
階層構造	84	クラスタ係数	12, 194	サービスマ	70
階層的並列分散構造	135	グラフ	7, 167	三者の一体性	197
解探索	105	グラフ理論	185	サンプリング定理	135
カオス	31	グローバルミニマム	48	【し】	
カオス工学	31	群知能	79	時間多重化	137
カオスタブナーサーチ	39	【け】		時刻同期	134
カオスニューラルネット		計算量	17	自己相似性	37, 38
ワーク	39	経 路	8	自己組織化	79, 144, 146
カオスニューロン写像	37	経路長	8	自己平均	148
カオス符号	41, 46	結 合	194	次 数	8, 194
拡散型フロー制御	98				
拡散方程式	93, 180				
隠れ端末問題	58				

フレーム保持	62	マルチタスク化	159		
フロー値	23			【り】	
プロトコル設計	1	【み】		リアブノフ指数	35
フロー保存制約	22	路	8	リアルタイム性	134
分岐構造	33			リアルタイムパラレル プロセッシング	135
分岐図	33, 34	【む】		利己原理	145
分岐図ドレス	52	無向グラフ	8	量子ドット	105
分権型組織	144			リワイヤリング	146
分散システム	144	【め】		隣接行列	176
		メンガーの定理	28	倫理性	168
【へ】		【ゆ】			
平均頂点間距離	9	優位性	194	【れ】	
閉路	8	融合	133	レジリエンス	145
ヘヴィサイド関数	47	有向グラフ	8	レスラーシステム	52
べき乗則	10, 86	有向辺	8, 186	連結	9
辺	7, 186	有向路	8	連結グラフ	9
辺素	28	優先的選択	14	連合	134
辺連結度	27	有用性	168	連続の式	92
辺連結度増大問題	29	ゆらぎ	83		
		【よ】		【ろ】	
【ほ】		容量制約	22	ローカリゼーション	134
防災	141			ローカルミニマム	48
ポテンシャル関数	83	【ら】		ロジスティック写像	31, 48, 52
		ラプラシアン行列	177	ロバストネス	106
【ま】		ランダムグラフ	13	ローレンツシステム	52
マイクロ波通信	144				
待ち行列理論	1, 70				
待ち時間	154				

		CSMA/CA	54	【E】	
		CSMA/CD	54	ER モデル (Erdős-Rényi model)	13
ACK	56	CW (Contention Window)	54	explore-exploitation dilemma	111
		【D】		【F】	
【B】		DIFS (DCF Inter Frame Space)	54	Fechner の法則	162
BA モデル (Barabási- Albert model)	14	Duplication-Divergence モデル	147	Ford と Fulkerson による 最大フローアルゴリズム	23
BDD (Binary Decision Diagram)	19				
BT (Backoff Timer)	54				
【C】					
CDMA	40				

【G】	
green by ICT	115
green of ICT	115
【H】	
Hopfield-Tank ニューラル ネットワーク	47
【I】	
IEEE 802.11 DCF	54
【K】	
k 辺連結	27
【M】	
MAC 層	53
MOS (Mean Opinion Score)	155
MPLS (Multi Protocol Label Switching)	128
$M/M/1/K$ モデル	70

【N】	
nature-inspired computing	105
NAV (Network Allocation Vector)	59
NP 完全問題	109
NP 困難	18
【O】	
OTN (Optical Transport Network)	129
【P】	
$P \neq NP$ 問題	18
【Q】	
QoE (Quality of Experience)	155
QoS (Quality of Service)	155

【R】	
ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)	120
RTS/CTS	58
【S】	
SDH (Synchronous Digital Hierarchy)	129
SIFS (Short Inter Frame Space)	54
SNS (Social Networking Service)	142
Stevens のべき乗則	162
stigmergy	80
【Z】	
ZDD (Zero-suppressed BDD)	19
~~~~~	
<b>【数字】</b>	
2 次割り当て問題	48

— 編著者略歴 —

村田 正幸 (むらた まさゆき)	成瀬 誠 (なるせ まこと)
1982年 大阪大学基礎工学部情報工 学科卒業	1994年 東京大学工学部計数工学科 卒業
1984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)	1999年 東京大学大学院工学系研究 科博士課程修了(計数工学 専攻)
1984年 日本アイ・ビー・エム株式 会社東京基礎研究所研究員	1999年 東京大学産学共同研究セン ター研究員
1987年 大阪大学助手	2000年 東京大学助手
1988年 工学博士(大阪大学)	2002年 独立行政法人情報通信研究 機構研究員
1991年 大阪大学講師	2003年 国立研究開発法人情報通信 研究機構(2015年名称変更) 主任研究員
1992年 大阪大学助教授	現在に至る
1999年 大阪大学教授 現在に至る	

## 情報ネットワーク科学入門

Introduction to Information Network Science

© 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/>

編著者 村田 正幸  
成瀬 誠

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 978-4-339-02801-0

(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