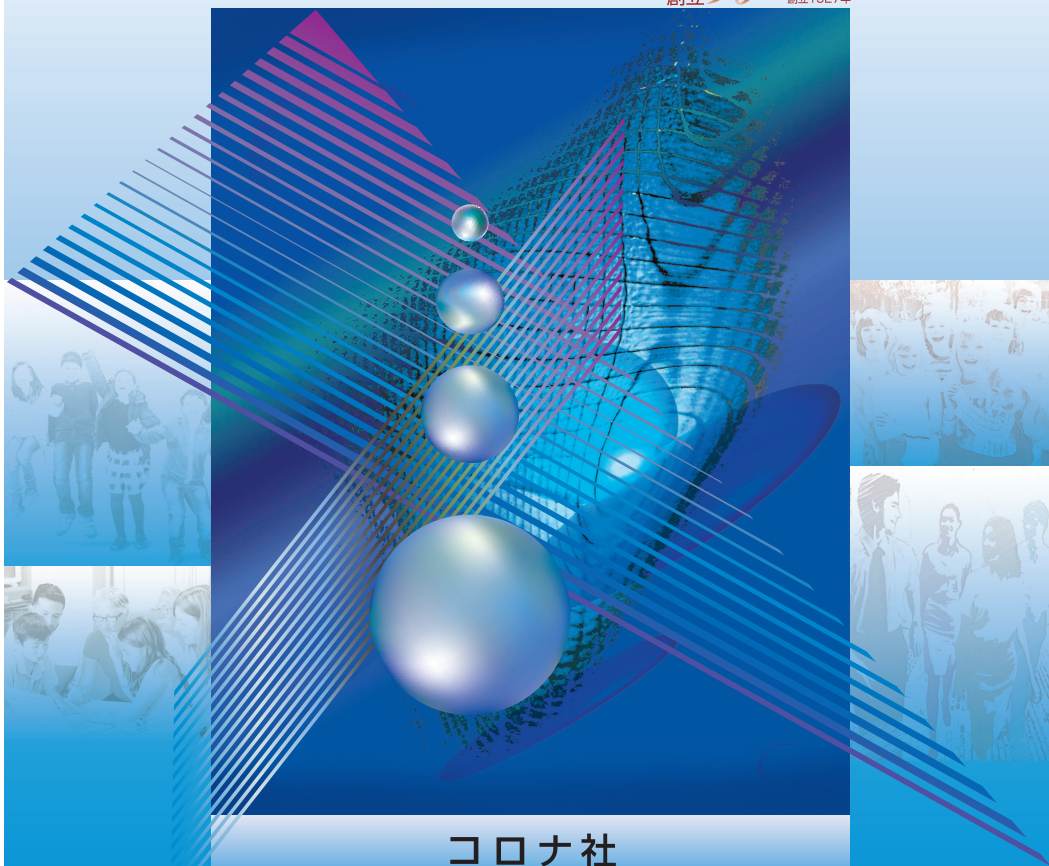


情報ネットワーク科学シリーズ 第3巻

情報ネットワークの 分散制御と階層構造

電子情報通信学会 監修
会田雅樹 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**3**巻

情報ネットワークの 分散制御と階層構造

電子情報通信学会 [監修]

会田 雅樹 [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よそいい難い。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

著者が大学院で情報ネットワーク工学分野の教育・研究に取り組むようになって10年が経過したが、この間、博士課程に進学する学生の少ないことが気になっていた。殆どの大学院生が、修士課程の修了とともに民間企業に就職してしまうのである。この原因はいうまでもなく、修了後の進路に関する状況が大きく影響している。企業からの求人は学士や修士を対象としたものが主流で、博士号を持った学生に対する求人は多くない。博士号を取得しても研究者のポストの数は限られており、研究者の就職難が大きな問題となっている。こうした状況では、修士で民間企業に就職することが合理的な選択ということになるのであろう。このような事情は情報ネットワーク工学分野に限ったものではなく、他の多くの工学系の分野でも同様な状況であると思われる。

一方、理学系では（著者の個人的な経験の範囲ではあるが）工学系に比べて博士課程への進学率が高いという印象を持っている。これはなぜだろうか。工学系で博士号を取得した場合、修士に比べれば求人数が限られているとはいえ、民間企業を含む様々な進路で研究者として活躍できる。これは工学系の専門分野が民間企業の技術開発に直接的に役立っているためであろう。特に情報ネットワーク工学は、昨今の情報ネットワーク社会の発展も目覚ましく、工学系の中でも民間企業で活躍しやすい分野のはずである。それに比べて理学系で博士号を取得した場合、理学系の専門分野が基礎的であるために、専門を活かして民間企業で研究する可能性は工学系に比べて非常に低いのが実情である。大学で研究する場合にも就職難の問題は工学系以上に深刻であるように感じる。それにもかかわらず、多くの学生が博士課程に進学するのである。工学系の学生の合理的選択のマインドと比較すると、実に驚くべきことではないだろうか。

この原因はおそらく、学問自体が持つ魅力の差にあるのではないかと思う。理

学系の学問には、例えば「宇宙の果てはどうなっているのか」、「時間とは何か」、「生命はどのように始まったか」など少年少女の夢をかき立てるテーマに溢れており、研究者を志す若者の心を虜にする「魔力」があるのだと思う。もちろん、理学系の就職難の問題を根本的に解決することなしに博士課程への進学率の高さのみを賞賛することは適切ではないが、学問の持つ妖艶な「魔力」に関しては工学系でも大いに参考にしたいところである。

本書は 20 歳前後の自分自身をイメージしながら、あの頃にどんな解説をしてもらえたら情報ネットワーク工学に興味を持っただろうか、ということ念頭に内容を構成している。もちろん、著者自身の浅学非才により妖艶な「魔力」の実現は望むべくもないが、研究者人生の選択に影響を受けてくれる読者が少数でも存在したなら、著者の目論見が成功したということにしたい。

著者は、大規模で複雑なシステムをいくらかでも統一的な見方で認識するための枠組みとして、制御動作の時間スケールや制御範囲の空間スケールに基づく階層構造の考え方が有効であると信じており、本書はそのための考え方やものの見方を中心に解説したものである。情報ネットワーク分野の伝統的な基礎理論である待ち行列理論やグラフ理論に関する内容は殆ど含まれず、また通信プロトコルの詳細に関する実践的な説明も扱わない。それらは前提知識として必要となる部分のみを必要最小限度で記述するに留めている。そのかわり、情報ネットワークを分散制御と階層化という観点で見たときに必要になる考え方や方法について詳しく記述した。

本書の内容は、標準的な情報ネットワーク分野の学部生が使う教科書とは趣を異にした構成となっているが、複雑な対象を解明するためには標準的な考え方だけでなく、いろいろな引出しを用意しておくことは重要であると信じている。特に、情報ネットワークに関する前提知識を仮定していないので、全くの初学者でも本書の内容は問題なく読みこなせると考えている。情報ネットワーク分野に現れる各種プロトコルなどのアルファベットの略語を記憶することに抵抗感のある学生諸君には、ぜひ本書を読んでほしい。将来、本書の考え方を発展させた実システムの登場や、本書の考え方を深掘りした基礎理論の発展な

どで、本書の内容が新しい情報ネットワーク分野の発展にいささかでも貢献できれば、著者の望外の喜びとするところである。

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/9784339028034/>

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。

本書の執筆は、「情報ネットワーク科学」シリーズのうちの一巻として企画したものである。シリーズの編集委員長であり本書の執筆を勧めていただいた大阪大学 村田正幸氏、並びに私とともにシリーズの編集委員を担当した情報通信研究機構 成瀬 誠氏、東京理科大学 長谷川幹雄氏に感謝します。自律分散制御に関する研究を進めるにあたり協力をいただいた広島市立大学 高野知佐氏、東京大学 本間裕大氏、首都大学東京 作元雄輔氏、並びに研究の進め方についてご指導いただいた元日本電信電話株式会社 齊藤孝文氏・久保輝之氏に感謝します。また、大学院生として個々の研究を推進してくれた首都大学東京 杉山慶太氏・渡部康平氏・高山裕紀氏・高木健志氏・畠山創太氏・高橋友里氏・劉永超氏・森田良輔氏、並びに広島市立大学 濱本 亮氏に感謝します。

最後に、本企画を受け入れてサポートしていただいたコロナ社の皆様に感謝します。

2015 年 8 月

会 田 雅 樹

目 次

1. 自律分散制御と階層構造

1.1 大規模複雑システムとしての情報ネットワーク	1
1.2 自然界の秩序はどこからくるのか	3
1.3 ミクロとマクロを結び付けるしくみ	5
1.3.1 階層構造の例	6
1.3.2 近接作用の考え方から見た自律分散制御	9
1.3.3 くりこみ群の考え方から見た階層構造	15
1.3.4 自律分散制御と階層構造	24
1.3.5 自律分散制御と階層構造に関する若干の補足	28
章 末 問 題	30

2. 偏微分方程式に基づく自律分散制御

2.1 局所動作規則と偏微分方程式	32
2.1.1 連続の式	32
2.1.2 拡散方程式	33
2.1.3 拡散方程式の解	36
2.2 偏微分方程式に基づく自律分散制御の構成法	41
2.2.1 偏微分方程式に基づく自律分散制御	42
2.2.2 離散化に伴う注意事項	43
2.3 ネットワーク上の拡散方程式	52
2.3.1 ラプラシアン行列と固有値問題	52
2.3.2 ネットワーク上の拡散方程式と拡散の流れ	58

2.3.3	ラブラシアン行列の固有値問題とフーリエ変換	63
2.4	拡散現象のくりこみ変換を用いた自律分散制御法	67
2.4.1	拡散現象のくりこみ変換と偏微分方程式	67
2.4.2	空間構造を生み出す自律分散制御	71
	章 末 問 題	75

3. 拡散現象に基づく自律分散クラスタリング

3.1	MANET の階層型経路制御とクラスタリング	77
3.2	自律分散クラスタリングのためのドリフト項設計	78
3.3	制御動作の離散的な記述	81
3.4	クラスタ構造の安定化技術	84
3.4.1	逆拡散ポテンシャル	84
3.4.2	拡散とドリフトの強さの自律調整機構	87
3.4.3	空間構造の履歴情報を用いたクラスタ構造の安定化技術	94
3.5	偏微分方程式に基づくその他の空間構造生成法と注意事項	98
	章 末 問 題	104

4. ホイヘンスの原理に基づく自律分散クラスタリング

4.1	ホイヘンスの原理を利用した自律分散クラスタリング	105
4.1.1	ホイヘンスの原理とくりこみ変換	105
4.1.2	空間構造分布のレンジと増幅	111
4.2	ホイヘンスの原理に基づく自律分散クラスタリングの特徴	114
4.3	生成されるクラスタ数の制御技術	121
	章 末 問 題	124

5. カオスを利用した分散制御

5.1 予備知識の簡単な解説	125
5.1.1 TCP の動作概要と TCP グローバル同期問題	125
5.1.2 RED の狙いと動作概要	127
5.1.3 カオスを利用した階層型ネットワーク制御のコンセプト	128
5.2 結合振動子に現れるカオスと送信レート制御への応用	131
5.2.1 緩和振動子からなる結合振動子	132
5.2.2 カオスを利用した送信レート制御	136
5.3 リンク帯域の制限を考慮した送信レート制御の特性とカオスの回復	143
5.3.1 リンク帯域の制限を考慮した送信レート制御	143
5.3.2 送信レートの最大値の振舞い	147
5.3.3 カオスに基づく階層制御の枠組みの回復	151
章 末 問 題	156

6. くりこみ変換と階層構造

6.1 準静的アプローチ	157
6.1.1 ユーザと通信システム間の相互作用と階層構造	157
6.1.2 準静的アプローチのコンセプト	162
6.1.3 準静的アプローチに現れるゆらぎの表現方法	166
6.2 ユーザの時間分解能のくりこみ群と準静的アプローチ	173
6.2.1 再試行を含む入力トラヒックレートのくりこみ変換	173
6.2.2 入力トラヒックレートのくりこみ群方程式	178
6.3 ダイナミクスの縮約と準静的アプローチ	179
6.3.1 断熱近似とくりこみ群方程式	179
6.3.2 非断熱効果の摂動展開と準静的アプローチの理解	181
6.4 再試行を含む入力トラヒック量の時間発展方程式	185

6.4.1 具体的な時間発展方程式 185

6.4.2 評価例 188

章末問題..... 192

7. ま と め

7.1 全体のまとめ..... 193

7.2 更なる勉強のための情報..... 195

付 録..... 197

A.1 マルコフ過程..... 197

A.2 マスター方程式..... 199

A.3 ランジュバン方程式とフォッカー・プランク方程式..... 201

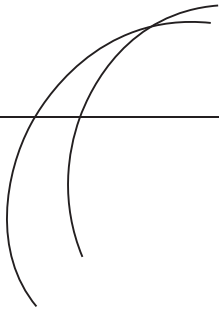
A.4 伊藤過程と伊藤の補題..... 206

引用・参考文献..... 210

索 引..... 215

第 1 章

自律分散制御と階層構造



情報ネットワークは人間が創り出した世界最大規模のシステムであり、日々進化を続けている。このような大規模複雑システムを適切かつ持続的に運用するためには、どのようなネットワーク設計・制御技術が求められるであろうか。従来のネットワーク制御アーキテクチャは、機能に基づいた階層構成を採っているが、実装面でのメリット以外に原理的な必然性があるわけではない。一方、大規模システムの典型例である自然界では、システム全体の秩序立った振舞いの背後に、しばしば時間的及び空間的スケールによる階層構造が見いだされる。これにより我々は、例えば、原子・分子レベルの複雑な運動に気を留めることなく、日常の生活を送ることができる。情報ネットワークにおいても自然界のような階層構造を考えることができれば、システム自体の詳細な状態情報を完全には把握していなくても、情報ネットワークを適切かつ持続的に運用することができるかもしれない。本書では、ネットワークの内部で行われる各種の制御動作について、時間的及び空間的スケールの観点から階層構造を考察し、ネットワークの自律分散制御と階層構造の枠組みを考察する。それに先立ち、まず本章において基本となる考え方を明らかにする^{1), 2)†}。

1.1 大規模複雑システムとしての情報ネットワーク

情報ネットワークは、空間的な広がりの意味でも、接続する機器の数の意味でも人間が創り出した最大規模のシステムである。また、情報ネットワークのアプリケーションの多様化や社会との結び付きの深化により、今や人間の生命や財産に関わる重要な社会活動まで、情報ネットワーク抜きでは考えられない社会になっている。このような状況から、情報ネットワークは社会活動と密接

† 肩付き数字は巻末の引用・参考文献番号を表す。

2 1. 自律分散制御と階層構造

に関係しながら日々動的な進化を続ける「大規模複雑システム」であり、しかも、システムが停止した場合の社会的影響が極めて大きいために高い信頼性が求められるシステムである。

上記のような情報ネットワークの特徴を、他の工学的システムと比較してみよう。例えば、電化製品や自動車であれば、設計時に想定した使用条件のもとで、性能や信頼性が満足できるように作られている。当然、市販の自動車がそのままレーシングサーキットを走行するようなことは想定しておらず、また、そのような状況において自動車の信頼性が保てるとは考えられない。ところが、情報ネットワークをシステムとして見ると、電化製品や自動車製品とは大きく異なる使用条件にさらされていることが分かる。

伝統的な情報ネットワークは電話網であり、これは音声信号を運ぶことに特化して作られてきた。しかし、電話網上でモデムを介してデータ通信をしたり、高周波領域を使った ADSL による高速データ通信が実現するなど、新たな利用法が生み出されてきた。携帯電話についても、当初は移動しながら大容量のストリーム動画を視聴することなど想定していなかったはずである。

また、情報ネットワークのユーザは爆発的に増加し、ユーザはやすやすと国境を越えてつながり、データ転送速度も桁違いに拡大し、情報ネットワークが運ぶデータのトラフィック量も爆発的に増大している。信頼性の要求についても、当初はゲームや趣味での利用が多かったデータ通信が、今や人間生活の根幹を支えるまで社会に浸透し、非常に高い信頼性が期待されるようになってきた。

このように、システムの設計当初とは異なった使われ方が次々と開発され、規模やシステムの動作速度も拡大しながら、同時進行的にその運用について高い信頼性が求められている。このような状況は、他の一般の工学的システムにはない情報ネットワークの特徴である。

このような厳しい要求を突き付けられた情報ネットワークシステムをうまく設計し、適切に制御・管理していくためにはどのようなしくみが必要となるのであろうか。身の回りにある大規模複雑システムの典型例は、この世界そのものである。この世界を形成する構成要素の数や、そこから生み出される多様性

は、究極の大規模複雑システムであろう。では、この究極のシステムたる世界はなぜ「安定」して存在しているのでしょうか。

我々は、明日の朝も目覚めたらやはり宇宙は存在していて、これまでと同じように日が昇ると信じて疑わない。我々の世界を構成するミクロな原子や素粒子のスケールでは、過去と同じ状態が再び繰り返されることは一切期待できない世界であるにもかかわらず、である。このような身の回りの世界の安定性や秩序がどこからくるのかを追究することは、以下のような問い掛けに対応するかもしれない。もし神様が世の中を創造したとすれば、そのときに考慮したであろう「世界に秩序が生まれるための仕掛け」とは何であろうか。別の表現をするなら「この世界にあたかも神様が存在しているかのように秩序立って見える仕掛け」とは何か、と言い換えてもよい。

本章では、そのような「仕掛け」が何であるかを考察し、それを情報ネットワークの設計・制御に利用することで、大規模複雑システムとしての情報通信ネットワークの安定な設計・制御法を生み出すための枠組みを取り扱う。つまり、工学的なシステムの創造主たる人間が、神様が世界を創造したのを真似て、秩序ある大規模複雑システムを作り出すために、どのような方向で検討を進めていけばよいのか、という課題についての一つの考え方を記述する。この中で、具体的には制御動作の時間スケールや、制御の及ぶ範囲の空間スケールから考えた情報ネットワークの制御動作のあり方、及びそれらのスケールによる階層構造について述べる。

1.2 自然界の秩序はどこからくるのか

身の回りの世界が秩序立って存在するための「仕掛け」とは何かという問いに対し、人それぞれいろいろな考えが存在する。例えば、人間原理的な立場では以下のような説明も可能かもしれない。そもそも、世界が秩序立って存在するからこそ人間のような知的生命体が出現し、この世界の安定性や秩序について思いを巡らすことができる。つまり「世界はなぜ秩序立って存在しているの

4 1. 自律分散制御と階層構造

か」という問い掛けは秩序立った世界でしか発生しないもので、問い掛け自体が一種のトートロジーである、というのも一つの立場である³⁾。

現時点において、人間は自然界の全ての法則を完全に理解しているわけではないので、我々は「仕掛け」に関して完全な回答を与えることはできないかもしれない。しかし我々は自然を理解すること自体が目的ではなく、工学的応用が目的であるので、現時点で考えられる「仕掛け」に当たりを付け、工学的な有用性を試してみることができる。この「仕掛け」として、本書では以下の二つの要因を想定することにする。

- **近接作用（作用の局所性）** 物理的なシステムにおいて異なる位置にある対象同士の間を生じる何らかの作用を考えると、作用の及ぼし方によって遠隔作用と近接作用の二つの考え方が存在する。遠隔作用とは離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うと考えるモデルである。一方、近接作用では、離れた対象同士が直接的に作用を及ぼし合うことはなく、作用が直接伝わるのは近隣のみであって、近隣同士間の作用の影響が徐々に空間を伝わっていくことで、離れた対象に作用が到達すると考える。現代の物理学では近接作用の立場を支持しており、相互作用は局所的に起こるとしている。このようなモデルでは、空間の各点に何らかの物理量があるとする「場」を考え、ある点での物理量の変化が空間各点の近隣同士の局所的なやりとりを介して空間を伝わっていくことになる。
- **くりこみ可能性（粗視化による自由度の縮約可能性）** くりこみ理論とは、何らかの対象を観察する際に、観察のスケール（時間的または空間的な分解能など）を粗くするような「ものの見方の変換」を考え、その変換に対してものの見え方がどのように変化するか「応答」をシステムティックに記述しようとする理論の枠組みである。ここで用いられるものの見方の変換をくりこみ変換という。ミクロスケールで観測したときに多数の（または無限の）自由度で記述されるようなシステムが、くりこみ変換によってマクロスケールでは少数の（または有限の）自由度

で記述できるような自由度の縮約が可能な場合、観測対象のシステムはくりこみ可能であるという。くりこみ理論は物理学の諸分野において多くの鮮やかな成功例がある反面、適用する問題ごとにカスタマイズしたくりこみ理論が必要であり、現状では必ずしも誰にでも使える汎用的な分析手法とはいえないようである³⁾。

近接作用では、ある対象が他者から影響を受けたり他者に影響を与えたりするのは、瞬間的には近隣のみであることになる。遠隔作用の世界では、宇宙の果てを含む全ての場所で起こった現象が瞬間的に自分に影響を与え、逆に自分は世界の全現象に即座に影響を与えることになり、恐らく世界はその構成要素同士が非常に強く結び付いた自縄自縛の世界になるに違いない。このことから近接作用の世界は、局所的な行動の自由を確保しつつ、システム全体に安定な秩序を与えるための鍵であると思われる。

我々は世界のしくみを完全には理解していなかったとしても、また原子のようなミクロな構成要素の存在を知らなかったとしても、世界の秩序を実感することができる。これは、世界をマイクロレベルで見たときの膨大な自由度が、人間が観察可能なレベルの粗いスケールで見たときには殆ど消えてしまい、比較的少数のマクロなパラメータのみによって世界が記述できるからである。これは世界がある意味でくりこみ可能であることにほかならない。

本書では、これら二つの考え方に基づき、情報ネットワークの自律分散制御と、時間的及び空間的スケールによる階層化の観点から、情報ネットワークの設計・制御に有用な基本的な考え方を解説する。

1.3 ミクロとマクロを結び付けるしくみ

自然界に現れる各種システムでは、システム全体の秩序ある振舞いの背後に、しばしば時間的及び空間的スケールによる階層構造が見いだされる。本書では、1.2節で見た二つの「仕掛け」がこの階層構造を構成するうえで不可欠のものであり、世界が安定して存在したりダイナミックな秩序が現れたりする現象を支

索引

	【あ】	拡散方程式	36, 43	くりこみ変換	4, 17, 67,
		確率過程	197		107, 175
アトラクタ	146	確率微分方程式	167, 206	クロネッカーのデルタ	53,
	【い】	確率密度関数	39, 197		144
伊藤過程	167, 206	重ね合わせの原理	41		【け】
伊東の大地震モデル	134	カダノフ変換	176	結合振動子	132, 134
伊藤の補題	168, 207	活性因子	100	決定論的システム	128
移流方程式	35	完全グラフ	12		【こ】
	【う】	ガンマ関数	208		
		緩和振動子	133		
ウィーナー過程			【き】	構造安定	130
	167, 201, 206	逆拡散	84	構造安定性	131
ウィンドウ制御	132	境界条件	36, 44, 134	勾配比例方式	85, 98
	【え】	共存性	130	固有値	55, 56
遠隔作用	4, 11	局所性	4, 24	固有値問題	55
	【お】	局所動作規則	42, 72, 79	固有ベクトル	56
		近接作用	4, 11, 24		【さ】
往復遅延時間	126		【く】	再帰的	145
重み付き次数行列	53	空間構造ベクトル	95	最急勾配方式	85, 98
オルンシュタイン・		クラスタリング	77	最大次数	48
ウーレンバック過程	72	グラフラブラシアン	53	最短経路問題	28
	【か】	クラマース・モヤル展開	11	座標系	71
階層構造	1, 131	グラム・シュミットの正規		差分方程式	9, 12, 44
ガウス過程	201	直交化法	57		【し】
ガウス積分	39	グリーディアルゴリズム	29	閾値	132
ガウス白色雑音	167, 187,	くりこみ	16	次数	15, 53
	201, 207	くりこみ可能	5, 24	次数行列	53
カオス	128	くりこみ可能性	129	周期境界条件	134
拡散行列	63	くりこみ群	16, 19, 178	自由振動子	132
拡散係数	36, 45, 48, 50	くりこみ群方程式	18, 21, 178	準静的アプローチ	158, 163
拡散項	72, 75			準静的過程	163
				条件付き確率密度関数	197

状態空間 136
 状態遷移速度図 160
 常微分方程式 19, 37
 初期条件 38
 初期値鋭敏性 129, 141
 自律調整機構 88
 自律分散クラスタリング 105
 自律分散制御 1, 8, 12,
 42, 43
 振幅変調 23

【す】

スケール変換 17
 ストレンジアトラクタ
 131, 142
 スループット 131, 142, 153
 スロースタートフェーズ
 126, 134

【せ】

正規化ラプラス行列 57
 正規分布 39
 遷移確率密度 197
 漸近解析 19
 線形方程式 41

【そ】

送信レート制御 131
 素元波 106
 粗視化 17

【た】

大群化効果 158
 代数的連結度 56
 単位円グラフ 92, 114
 断熱近似 179, 180

【ち】

チャップマン・コルモゴロフ
 方程式 198
 チューリングパターン 100
 調和関数 13

【て】

テイラー展開 10, 203
 停留値問題 55
 デルタ関数 39, 68, 133

【と】

同時確率密度関数 197
 トーラス 92, 114, 136
 トポロジー構造 138
 ドリフト項 72, 75

【な】

ナップサック問題 29

【に】

二次形式 54

【ね】

ネットワークトポロジー
 48, 71

【の】

ノードの次数 47

【は】

バタフライ効果 129
 半群 178
 搬送波 23
 反応拡散方程式 100

【ひ】

非負定値行列 55
 非連結グラフ 56

【ふ】

フィードラーベクトル 56
 フィックの法則 36, 42,
 43, 58
 フーリエ級数 44
 フーリエ変換 37, 98
 フォッカー・プランク方程式
 15, 71, 72, 187, 206

輻輳回避フェーズ 126
 不動点 18, 110
 分散制御 131

【へ】

平衡解 73
 ベクトル場 137
 変位 132
 変数分離形 35
 偏微分方程式 12

【ほ】

ポアソン過程 186
 ポアソン分布 186
 ホイヘンスの原理 105
 包絡線 19, 21, 106
 ポテンシャル関数 79

【ま】

マスター方程式 9, 11, 201
 マルコフ過程 198
 マルコフ連鎖 162

【む】

無次元量 47

【も】

モバイルアドホック
 ネットワーク 77

【ゆ】

ユニバーサリティ 26

【よ】

揺動散逸定理 74, 81
 抑制因子 100

【ら】

ラグランジュの未定乗数 55
 ラグランジュの未定乗数法
 55
 ラプラスアン 13
 ラプラスアン行列 53

ラプラス方程式 13 ランジュバン方程式 167, 187, 201, 206 ランダムウォーク 63 ランダム初期検知 127 <p style="text-align: center;">【り】</p> 力学系 19	隣接関係 隣接行列 <p style="text-align: center;">【れ】</p> 連結成分 連続極限 連続の式	134 52 ローレンツアトラクタ 129, 138 ローレンツ方程式 129 ローレンツモデル 129 ロジスティック曲線 90
--	--	---

<p style="text-align: center;">【A】</p> AM 23 <p style="text-align: center;">【M】</p> MANET 77 M/M/1 待ち行列 159	<p style="text-align: center;">【N】</p> NP 完全 29 <p style="text-align: center;">【R】</p> RED 127, 141 RTT 126	<p style="text-align: center;">【T】</p> TCP 125, 132, 134 TCP グローバル同期問題 126
---	---	---

— 著者略歴 —

1987年 立教大学理学部物理学科卒業
1989年 立教大学大学院理学研究科博士課程前期課程修了(原子物理学専攻)
1989年 日本電信電話株式会社勤務
1999年 博士(工学)(東京大学)
2005年 首都大学東京准教授
2007年 首都大学東京教授
現在に至る

情報ネットワークの分散制御と階層構造

Distributed Control and Hierarchical Structure in
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 あい だ まさ き
会 田 雅 樹
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 978-4-339-02803-4

(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