

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**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

電子情報通信学会 [監修]

巳波 弘佳 [共著]
井上 武

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

情報ネットワークの研究が扱う「ネットワーク」とは、その幾何的構造に焦点をあてると、頂点の集合と2頂点間を結ぶ線分(辺)の集合から構成される幾何図形、つまりグラフとみることができる。グラフに関する研究は古くから積み重ねられ、離散数学の一分野であるグラフ理論を築いてきた。定義は単純であるが、奥深い性質を豊富にもち、位相幾何学などほかの数学の分野とも密接につながっている。また、現実の世界とも強い結びつきをもっている。実際、インターネットやSNSなどはもちろん、地図・交通網や、建築設計・LSI設計・化学・生命科学など多くの領域に、グラフとしてモデル化できるものが多数存在する。また、限られた制約の範囲内で何かを最適化するという最適化問題は現実の世界には多々存在するが、よく知られた最短路問題はグラフ上の最適化問題である。

情報ネットワークを数理的に扱うといっても、多様な視点がある。幾何的構造を扱おうとするか、ウイルス感染などネットワーク上で起こる現象を扱おうとするか、ネットワークの設計や制御の方法を扱おうとするかなどによって、用いる数理的アプローチは変わってくる。しかし、どのような視点であれ共通して必要なものは、グラフ理論の概念であり、グラフに関わる基本的なアルゴリズムであり、アルゴリズムの性能を測るための計算量である。そこで本書では、情報ネットワークにおけるグラフ理論と最適化とアルゴリズムに関する事項を中心に述べることにした。

情報ネットワークと密接につながりがある応用として、インターネットのほかに、電力網や道路網などがある。これらに共通していえるのは、ネットワークは所与のものとして眺めるだけの対象ではなく、実際に設計し、制御しなければならない対象だということである。特に、社会の重要なインフラとしてな

くてはならない存在にもなっている情報ネットワークは、理想的には、最適に設計され、最適に制御されなければならない。そのため、これまでさまざまな最適化問題が検討され、アルゴリズムが作られ、それらを用いて設計や制御がなされてきた。ひとたび設計法や制御法が作られたとしてもそれで終わりではなく、技術の進歩や利用状況の変化、新たなサービスの導入などによって、それらに応じた新たな設計法や制御法が必要となる。更に、最適解を見つけることは一般に容易ではなく、多くの設計法や制御法は近似アルゴリズムやヒューリスティックアルゴリズムに基づくものであるため、常に暫定的なものといっても過言ではなく、より効率的なアルゴリズムが不断に探求されている。このように、理論だけでなく実際の応用の観点からも、最適化とアルゴリズムの研究は今もなお日々行われているのである。

本書では、ネットワークの設計や制御における基本的な最適化問題のみならず、近年の情報ネットワーク分野の変化に伴って現れてきた新しい最適化問題やアルゴリズムも紹介する。また、近年注目されている BDD (Binary Decision Diagram) というデータ構造とアルゴリズムについても紹介する。もとは他分野で発展した技術であるが、これを用いた新たな最適化のアプローチが成功を収めている。これらは類書ではまだほとんど扱われていないが、特に現実の情報ネットワークを扱っていく上で今後重要なツールの一つになると思われる。

本書の構成について述べる。

1章では、情報ネットワークを扱う上で基本的な知識として、グラフ理論、最適化問題、アルゴリズムと計算量、ネットワークのデータ構造と基本アルゴリズム、そして動的計画法について述べた。

2章では、情報ネットワークの制御、特に経路制御に関する基本的なアルゴリズムとして、最短路問題やネットワークフロー問題とそれらに対するアルゴリズムをまとめた。最短路問題とは、頂点間をつなぐ辺重みの和が最小となるような経路を求めるものであるが、逆に辺重みを変えることにより最短路を変更する経路制御が考えられている。この経路制御は最適化問題として扱えるが、これまで類書ではあまり取り上げられていないため、本書ではこれについても

触れた。

3章では、信頼性の高い情報ネットワークの設計に関するさまざまな最適化問題とそのアルゴリズムについて述べた。特に情報ネットワークの設計を意識して説明したが、道路網や鉄道網の設計など他分野においても類似のものが存在する汎用性の高い最適化問題である。

4～6章では、より現実的で複雑な対象も扱うことができる BDD と、それが威力を発揮するさまざまな問題とアルゴリズムを紹介した。

まず、4章では、各リンクが確率的に故障するとき、ノード間に通信経路が存在する確率を計算する方法について述べた。これは、ネットワークの信頼性を評価するための基盤となる重要なアルゴリズムである。

5章では、マルチキャストと呼ばれる同報型のデータ配信方式を想定し、現状からの設定変更回数や機器の限界特性など複雑な制約条件の下で配信経路を最適化するアルゴリズムを紹介する。マルチキャストにおける配信経路を求める問題は、2章の最短路問題など一見類似したものであるが、制約条件が少し変わるだけで問題としての性質は大きく異なり、アルゴリズム設計のアプローチも異なることがわかるであろう。

6章では、最適化手法などを用いて設計したネットワークの「正しさ」を検証する方法について述べた。現在のネットワークは宛先への到達性だけでなく、通信品質やセキュリティも考慮して経路を設定するため、全体として正しく動作させることは簡単ではない。

7章では、現実の多くのネットワークがもつ性質を紹介し、そのような性質を再現できるネットワーク生成モデルを紹介した。これらの性質は近年知られ始め、ようやくネットワーク生成モデルの探求が一段落したばかりであり、現実のネットワークの性質を利用したアルゴリズムの設計はまだほとんど進んでいない。今後、より高度なネットワークの設計法や制御法を作るにあたって、これらのアルゴリズムの必要性が高まってくるであろう。

8章では、本書では特に触れなかった新たなタイプのアルゴリズム研究の萌芽^{ほう}について紹介した。現実の情報ネットワークとも関わりのある興味深いもの

であるが、かなり高度であるため、基盤的な知識の修得に重きを置いた本書では詳細は割愛した。興味のある人は更に学んでいって欲しい。

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/9784339028027/>

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。

なお、1～3章及び7章、8章は巳波が主に担当し、4～6章は井上が主に担当して執筆した。

最後に、本書を執筆するにあたり、多くの方々に多大なご協力をいただいたことに心より深く感謝する。特に、編集委員長の大阪大学 村田正幸氏からは全体を通して有益なコメントをいただいた。また、福井工業大学 藤原明広氏と関西学院大学 土村展之氏には特に1～3章及び7章に対してさまざまなコメントをいただいた。日本電信電話株式会社 永田尚志氏とウォータールー大学 Chen Richard 氏には特に4～6章を丁寧に読んでいただき、多くの改善案をいただいた。また、本書を出版するにあたり、多大なご協力をいただいたコロナ社の関係各位に厚くお礼申し上げます。

2015年10月

巳 波 弘 佳
井 上 武

目 次

1.	情報ネットワークを数理的に扱うとは、ということか	
1.1	グラフ理論の基礎	1
1.2	最適化のための基本的な概念	9
1.2.1	最適化問題	9
1.2.2	アルゴリズムと計算量	12
1.2.3	グラフのデータ構造	19
1.2.4	グラフの探索アルゴリズム	22
1.2.5	動的計画法	25
☞	コラム：NP困難性	30
	章末問題	31
2.	どのように最適な経路を見つけるのか	
2.1	最短経路問題	32
2.1.1	ダイクストラ法	33
2.1.2	ベルマン・フォード法	36
2.1.3	ワーシャル・フロイド法	40
2.2	ネットワークフロー問題	41
2.2.1	最大フロー問題	42
2.2.2	最小コストフロー問題	47
2.2.3	多品種フロー問題	49
2.2.4	独立経路	50
2.3	辺重み設定による経路制御	51

章 末 問 題	57
---------	----


3. どのようにネットワークを高信頼化するのか

3.1 連 結 度	59
3.2 新規ネットワーク設計	65
3.2.1 信頼性を考慮しない新規ネットワーク設計	66
3.2.2 信頼性の高い新規ネットワーク設計	69
3.3 既設ネットワークの高信頼化	74
3.3.1 辺付加設計	75
3.3.2 辺保護・頂点保護設計	78
☺コラム：アルゴリズム研究と社会	90
章 末 問 題	91


4. ネットワークの信頼性をより正確に測るには

4.1 ネットワークの信頼性	93
☺コラム：BDD の特徴と応用分野	95
4.2 素 朴 な 方 法	95
4.3 BDD (二分決定グラフ)	98
4.4 連結状態を表す BDD 構築アルゴリズム BUILD	99
4.5 BDD 構築の効率化	105
4.6 確率計算アルゴリズム PROB	107
☺コラム：Graphillion	110
章 末 問 題	111

5. 複雑な制約条件のもとで最適解を見つけるには

5.1 ネットワークのさまざまな制約条件	112
5.2 BDD による最適化	114
5.3 構成変更を制限するハミング距離アルゴリズム	115
5.4 制約条件を組み合わせるための論理積アルゴリズム	119
5.5 論理和アルゴリズム	125
 コラム：BDD と ZDD	129
章末問題	130

6. ネットワークの設定ミスをなくせるか

6.1 設定ミスによる不具合	131
6.2 ノード設定	132
6.3 範囲を表す BDD	135
6.4 ルール表の BDD	139
6.5 ノード間を通過するパケット	142
6.6 検証の実施	146
 コラム：Software-Defined Networking	148
章末問題	148

7. ネットワークはどのような形をしているのか

7.1 現実のさまざまなネットワーク	150
7.2 現実のネットワークの構造	153
7.2.1 現実のネットワークに見られる性質	153
7.2.2 ネットワーク生成モデル	157

7.2.3 コミュニティ構造 165

☎コラム：ネットワーク描画ツール 172

章末問題..... 173

8. おわりに

引用・参考文献..... 177

索引..... 184

第 1 章

情報ネットワークを数理的に 扱うとは、どういうことか

本書では、情報ネットワークの特に幾何的構造に焦点をあてて、その数理的側面について紹介する。頂点の集合と、頂点と頂点をつなぐ線分から構成される図形であるグラフを扱う、**グラフ理論** (graph theory) という学問分野がある。興味深い性質を豊富に含んでいるグラフは、離散数学の一分野において深く研究されている。一方、インターネットに代表される情報ネットワークや電力網・道路網など、現実の世界の中に存在するネットワークの幾何的構造はグラフによってモデル化されて設計・制御される対象でもある。設計や制御のためには、最適化やそのためのアルゴリズムが必要となる。

本章では、情報ネットワークを扱う際に必要不可欠な、グラフ理論・最適化・アルゴリズムに関する基本的な事項をまとめる。

1.1 グラフ理論の基礎

情報ネットワークの幾何的構造を扱うための基盤的な学問として、グラフ理論がある。ここでグラフ (graph) とは、**頂点** (vertex) の集合と、頂点と頂点をつなぐ線分である**辺** (edge) から構成される図形である。グラフは頂点の接続関係のみを表し、一般に座標をもたない。 x - y 平面上に描かれた放物線や三角関数のようなものもグラフと呼ばれるが、情報ネットワーク分野ではそれとは使い分けている。なお、グラフという用語は構造を表し、ネットワークという用語は、グラフの辺や頂点に重みなどの数値が付与されたものとして区別することが多い。グラフの定義は単純であるが、情報科学の諸問題のみならず現実のさまざまな問題やシステムをモデル化できる高い能力をもつ。

2 1. 情報ネットワークを数理的に扱うとは、どういうことか

グラフは、正確には頂点集合 V と辺集合 $E (\subseteq V \times V)$ の組 $G = (V, E)$ として定義される．図 1.1 は、頂点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_9\}$ 、辺集合 $\{(v_1, v_2), (v_1, v_4), (v_1, v_5), (v_2, v_3), (v_2, v_4), (v_2, v_6), (v_3, v_4), (v_3, v_6), (v_3, v_7), (v_4, v_5), (v_5, v_6), (v_7, v_8), (v_7, v_9), (v_8, v_9)\}$ のグラフの例である．

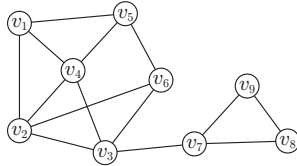


図 1.1 頂点集合、辺集合のグラフの例

頂点 v と頂点 w の間に辺があるとき、 v と w は隣接している (adjacent) という．辺 $e = (v, w)$ に対して、頂点 v 及び w を辺 e の端点 (end vertex) という．また、辺 e は頂点 v 及び頂点 w に接続している (incident) という．頂点 v, w の間に 2 本以上の辺があるとき、それらを多重辺 (multi-edge) といい、辺の両端の頂点が同一であるとき、その辺をループ (loop) という．

辺 (v, w) と辺 (w, v) を区別しないものを無向グラフ (undirected graph)、区別するものを有向グラフ (directed graph : digraph) という．本書では、単にグラフと書いた場合、無向グラフを指すものとする．有向グラフにおける辺を特に有向辺 (directed edge, arc) ともいい、有向辺 (v, w) は向きを表す矢印で表される．有向辺 (v, w) の頂点 v を始点 (tail vertex)、頂点 w を終点 (head vertex) という．図 1.2 は有向グラフの例である．

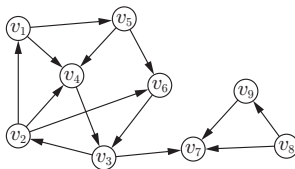


図 1.2 有向グラフの例

インターネットは、ルータなど通信ノードを頂点、ノード間をつなぐ通信リンクを辺と考えることで無向グラフによりモデル化できる．WWW は、Web ページを頂点、Web ページ内部からほかの Web ページへ張られているハイパー

リンクを有向辺と考えることで有向グラフとしてモデル化できる。

無向グラフにおける頂点の次数 (degree) とは、その頂点に接続している辺数のことである。例えば、図 1.1 の頂点 v_1 の次数は 3 である。有向グラフにおいては、その頂点からほかの頂点へ向かう有向辺の本数を出次数 (out-degree) といい、ほかの頂点から入ってくる有向辺の本数を入次数 (in-degree) という。図 1.2 における頂点 v_4 の出次数は 1、入次数は 3 である。

路 (walk) とは、頂点の系列 $(v_{i_1}, v_{i_2}, \dots, v_{i_k})$ であって

$$(v_{i_1}, v_{i_2}), (v_{i_2}, v_{i_3}), \dots, (v_{i_{k-1}}, v_{i_k}) \in E$$

つまりグラフの中で辺をたどってつながっている頂点の系列であるものをいう。有向グラフの場合は特に有向路 (directed walk) ともいう。 v_{i_1}, v_{i_k} を路の端点、 $v_{i_2}, \dots, v_{i_{k-1}}$ を内点 (inner vertex) という。頂点がすべて異なる路を経路 (path) といい、 $v_{i_1} = v_{i_k}$ である経路のことを閉路 (cycle) という。有向グラフの場合は有向閉路 (directed cycle) という。図 1.3(a) の $(v_1, v_2, v_3, v_7, v_9)$ は経路の例、図 (b) の $(v_1, v_2, v_3, v_6, v_5, v_1)$ は閉路の例である。また、図 1.4(a) の $(v_1, v_5, v_6, v_3, v_7)$ は有向路の例、図 (b) の $(v_1, v_5, v_4, v_3, v_2, v_1)$ は有向閉路の例

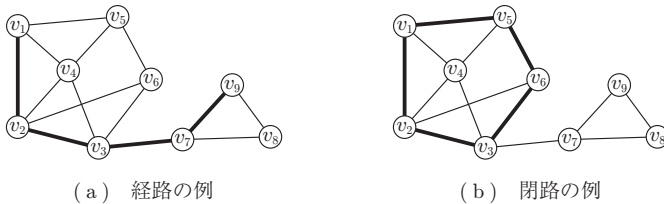


図 1.3 経路, 閉路の例

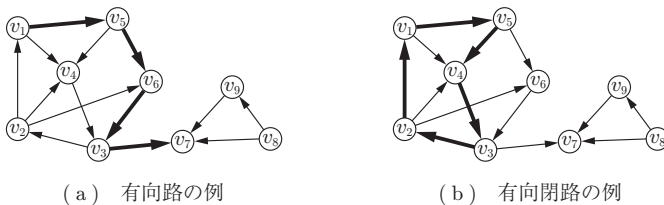


図 1.4 有向路, 有向閉路の例

の例である.

グラフにおいて、頂点 v と頂点 w との間に路が存在するとき、 v と w は連結 (connected) であるという. グラフの任意の 2 頂点が連結しているとき、連結グラフ (connected graph) という.

よく使われる特殊な形状のグラフをいくつか挙げる (図 1.5). 図 (a) の完全グラフ (complete graph) とは、全ての頂点が互いに隣接しているグラフのことである. また、図 (b) の二部グラフ (bipartite graph) とは、 V が V_1 と V_2 と分割され、全ての辺 (v, w) において $v \in V_1$, $w \in V_2$ となるものをいう. 図 (c) のように閉路をもたない連結なグラフを木 (tree) という. なお、閉路を持たない (連結とは限らない) グラフを森 (forest) という. 図 (d) の格子グラフ (grid graph) とは \mathbf{Z}^2 (整数格子点) を頂点集合とし、各頂点は x 座標値または y 座標値が 1 だけ異なる頂点と隣接しているグラフである.

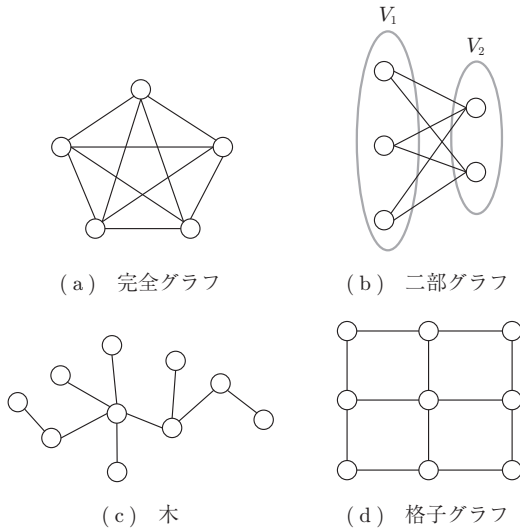


図 1.5 完全グラフ, 二部グラフ, 木, 格子グラフ

有向グラフの場合に特徴的でよく用いられるものとして、有向木 (directed tree, arborescence) がある. 有向木とは、有向グラフ $T = (V, E)$ において辺

の向きを無視して得られる無向グラフが木となっており，更に全ての頂点の入次数が1以下であるか，あるいは全ての頂点の出次数が1以下であるものをいう．特に，前者は**出木** (out-tree)，後者は**入木** (in-tree) という．前者では入次数が0の頂点，後者では出次数が0の頂点がそれぞれ唯一存在するため，そのような頂点を**根** (root) という．そのため，有向木のことを**根付木** (rooted tree) ともいう．有向木の頂点 v に対して， v の隣接点のうち，根に近い側の頂点 (根と v をつなぐ有向路上にある隣接点) を**親** (parent) といい，その他の隣接点を**子** (child) という．有向木の例を図 1.6 に挙げる．なお，図 (b) の出木において，頂点 v_8 の親は頂点 v_7 であり，頂点 v_4 の子は v_1 と v_5 である．

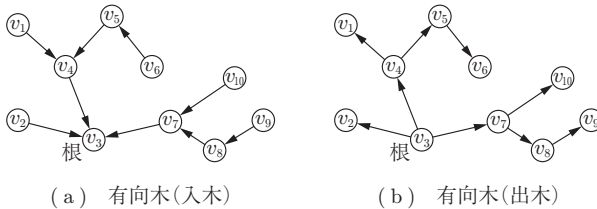


図 1.6 有 向 木

無向グラフ $G = (V, E)$ において， $V' (\subseteq V)$ と $E' (\subseteq E)$ によって定まる $G' = (V', E')$ がグラフであるとき，つまり， $e = (v, w) \in E'$ なら $v, w \in V'$ であるとき， G' を G の部分グラフ (subgraph) という．特に， $V' = V$ であるとき， G' を全域部分グラフ (spanning subgraph) という．また，全域部分グラフが木であるとき，特に**全域木** (spanning tree) ともいう．グラフ $G'' = (V'', E'')$ が

$$V'' \subseteq V$$

$$E'' = \{e = (v, w) \in E : v, w \in V''\}$$

を満たすとき， G'' を G から V'' で誘導される**生成部分グラフ** (induced subgraph) という．なお，集合 A が，集合 B の要素 a で条件 P を満たすものの集まりであるとき， $A = \{a \in B : P\}$ と表記する．したがって， E'' は， E に

索引

【あ】
 アクセス制御リスト 133
 アルゴリズム 12

【い】
 遺伝アルゴリズム 18

【お】
 オーダ 13
 重み 8
 親 5

【か】
 カット 60
 カットサイズ 60
 完全グラフ 4

【き】
 木 4
 基本閉路 67
 規約化 129
 キュー 19
 強多項式時間
 アルゴリズム 45
 橋 辺 80
 強連結 6
 強連結成分 7
 局所探索法 18
 局所点連結度 61
 局所辺連結度 60
 近似アルゴリズム 17

【く】
 空間しきい値モデル 162

クラスカル法 68
 クラスタ係数 155
 グラフ 1
 グラフ理論 1
 クリーク 162, 166

【け】

計算量 13
 経路 3
 経路コスト 8
 経路長 7, 8
 経路の重み 8
 決定問題 12

【こ】

子 5
 格子グラフ 4
 コスト 8
 孤立クリーク 168

【さ】

最小木 9, 66
 最小木定理 67
 最小木問題 9
 最小コストフロー問題 48
 最小シュタイナー木 114
 最小全域木 9, 66
 最小費用流問題 48
 最大クリーク問題 168
 最大フロー・最小カット
 の定理 61
 最大フロー問題 41, 43
 最大流問題 41, 43
 最短距離 7, 8
 最短路 7, 8

最短路木 32
 最短路問題 32
 最適解 10
 最適化問題 9, 113
 最適性原理 25
 残余ネットワーク 44

【し】

しきい値グラフ 162
 しきい値モデル 161
 次数 3
 指数オーダ 17
 指数時間アルゴリズム 17
 次数分布 153
 実行可能解 10
 始点 2
 シミュレーテッド
 アニーリング 18
 終点 2
 シュタイナー木 114
 出木 5
 出次数 3

【す】

スケールフリー 153
 スタック 19
 スモールワールド 156

【せ】

生成部分グラフ 5
 成長 159
 制約条件 113
 接続行列 19
 接続している 2
 全域木 5

全域部分グラフ	5	長 さ	8		
線形計画問題	11				
		【に】			【へ】
【そ】		二部グラフ	4	閉 路	3
属 性	146	入 木	5	べき乗則	153
疎なグラフ	20	入次数	3	バルマン・フォード法	36
				辺	1
		【ね】		辺 素	50
【た】		根	5	辺素パス問題	51
ダイクストラ法	33	根付木	5	辺独立経路問題	51
多項式オーダ	17	ネットワーク	9	辺連結度	61
多項式時間アルゴリズム	17	ネットワーク検証	132	辺連結度増大辺付加問題	76
多重辺	2	ネットワーク信頼性	94		
多品種最小コスト		ネットワークフロー問題	41		
フロー問題	50			【ほ】	
多品種最大フロー問題	50	【は】		補 木	67
タブーサーチ	18	媒介中心性	8	保 護	75
探索木	22	ハイパーグラフ	85		
端 点	2, 3	幅優先探索	22	【ま】	
		ハミング距離	116	待ち行列	19
				マルチキャスト	112
【ち】					
頂 点	1	【ひ】		【み】	
頂点被覆問題	85	非線形計画問題	11	路	3
直 径	7	否 定	127	密なグラフ	20
		ヒューリスティック			
【て】		アルゴリズム	17	【む】	
定数オーダ	14	品 種	50	無向グラフ	2
データ構造	19				
点カット	61	【ふ】		【め】	
点 素	50	深さ優先探索	22	メタヒューリスティックス	18
転送表	133	負荷分散辺重み決定問題	53	メンガーの定理	62
点素パス問題	51	輻 輳	51		
点独立経路問題	51	部分グラフ	5	【も】	
点連結度	61, 62	部分和问题	25	目的関数	113
		負閉路除去法	48	モジュラリティ	166
【と】		プリム法	68	森	4
到達性保障辺保護問題	79	ブール関数	119	問 題	10
動的計画法	25, 94, 143	フロー	42	問題例	10
独立経路問題	51	フロー追加路	45		
独立点集合	162	フロー保存制約	42	【ゆ】	
		フロンティア	105	有向木	4
【な】		フロンティア法	107	有向グラフ	2
内 素	63	分離する	60	有向閉路	3
内 点	3			有向辺	2

有向路	3	領域	64, 138	連結成分	6
優先的選択	159	領域グラフ	64	連結成分サイズ保障	
		隣接行列	19	頂点保護問題	83
【よ】		隣接している	2	連続最適化問題	11
容量制約	42	隣接リスト	20	【ろ】	
				論理関数	119
【ら】		【る】		論理積	119
ランダムグラフ	157	ループ	2	論理和	126
		【れ】		【わ】	
【り】		連結	4	ワーシャル・フロイド法	40
離散最適化問題	11	連結グラフ	4		
リスト	19				

【B】		【I】		【N】	
BA モデル	159	IP	132	NA 点連結度	64
BDD	18, 94	【K】		NA 辺連結度	64
【E】		k -孤立極大クリーク	168	NP 完全	17
ER モデル	157	k -孤立クリーク	168	NP 困難	17
【F】		k 端末ネットワーク		【P】	
FIFO	19	信頼性	94	$P \neq NP$ 問題	30
First-In-First-Out	19	k 点連結	61	pop	19
Ford-Fulkerson		k 辺連結	60	push	19
アルゴリズム	43	k 辺連結性を保存する	70	【T】	
【G】		k 辺連結全域		TCP	133
Graphillion	110	部分グラフ問題	69	Transit-Stub モデル	164
【H】		【L】		【W】	
HOT モデル	164	Last-In-First-Out	19	Waxman モデル	164
		LIFO	19	【Z】	
		【M】		ZDD	18, 129
		MA 順序	70		

— 著者略歴 —

巳波 弘佳 (みわ ひろよし)
1992年 東京大学理学部数学科卒業
1992年 日本電信電話株式会社 通信網総合
研究所 研究員
2000年 博士 (情報学) (京都大学)
2002年 関西学院大学専任講師
2006年 関西学院大学助教授
2007年 関西学院大学准教授 (職名変更)
2012年 関西学院大学教授
現在に至る

井上 武 (いのうえ たける)
1998年 京都大学工学部物理工学科卒業
2000年 京都大学大学院工学研究科博士前期
課程修了 (機械物理工学専攻)
2000年 日本電信電話株式会社 NTT 未来
ねっと研究所 研究員
2006年 京都大学大学院情報学研究科博士後
期課程修了 (通信情報システム専攻)
博士 (情報学)
2011年 独立行政法人科学技術振興機構
ERATO 研究員
2013年 日本電信電話株式会社 NTT 未来
ねっと研究所 主任研究員
現在に至る

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 —

Algorithms and Data Structures for Optimization in Information Networks

© 一般社団法人 電子情報通信学会 2015

2015年12月16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 巳波 弘 佳
井 上 武

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 978-4-339-02802-7

(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