

平成22年5月21日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19510137
 研究課題名（和文）ネットワーク理論の基盤整備と伸張

研究課題名（英文）Development of theoretical foundation and extension on networks

研究代表者

繁野 麻衣子（SHIGENO MAIKO）
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
 研究者番号：40272687

研究成果の概要（和文）：ネットワーク理論において横の広がりとなる基礎理論の構築と縦の広がりを作る実社会に適応したモデルの伸張を行い、基礎問題と拡張問題の両方に対して、アルゴリズム開発を行った。具体的には、修正可能性を考慮したネットワーク上の配置問題に対するアルゴリズム提案、通信ネットワークにおける耐故障性の指標開発、社会ネットワークにおけるコミュニティ抽出のハイパーグラフ上への拡張、グラフの向き付けに関する基本的性質やアルゴリズム開発などを行った。

研究成果の概要（英文）：On network theory, this research established fundamental theory to advance growth of field, and expanded models to enlarge its domain to real-world problems more. For both of basic and expanded network problems, efficient algorithms were developed. Especially, the following topics were focused: an efficient algorithm for location problem on a network with adjustability, new parameters for fault tolerance communication networks, community extraction approach on hypergraphs, and graph orientation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：組合せ最適化

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 ・ 社会システム工学・安全システム

キーワード：ネットワーク理論，アルゴリズム，組合せ最適化

1. 研究開始当初の背景

多様化複雑化する今日の社会・経済システムにおいて、グラフ・ネットワークの理論や最適化手法はシステムの効率化で重要な役割を担っている。オペレーションズリサーチ

の分野では、鉄道網、情報網、ソーシャルネットワーク、キャッシュフローなどの解析、設計にネットワーク理論が有用であることは古くから認識され、利用されてきた。一方、サービス科学などの新しい分野でもグラ

フ・ネットワークの理論の重要性が認識されつつある。ネットワーク最適化問題の代表例である最短路，最大流，最小費用流など古典フローの最適化は，ここ 80 年来盛んに研究され様々な社会システムの最適化に貢献してきた。また，ネットワーク最適化問題に対するアルゴリズムの基本アイデアは，他の最適化問題や組合せ構造をもつ抽象的な問題に影響を与えてきており，その有効性は広く認識されている。このように，ネットワーク理論は，実社会システムの最適化に貢献するのみでなく，数理計画，最適化理論全般に関わる基礎といえる。そこで，次世代社会システムに適応するネットワークモデルや最適化モデルを議論する上で，ネットワーク理論の基盤を整備し基礎を固めることは不可欠である。

一方で，刻々と変化する実社会に適したモデルと理論研究の対象となるモデルにギャップがあり，理論と応用に隔たりが生じてきている。そこで，ネットワークモデルをより一般的にしたり，付加情報をつけることで実社会を反映したモデルを構築し，そのモデルに対する問題構造の分析や最適化アルゴリズムの開発が必要といえる。特に不確定要素の多い今日ではロバスト最適化は欠かせない。数理計画の分野ではロバスト最適化が近年注目されているが，ネットワーク構造に着目した結果は少ない。その理由の一つに，ロバスト性を導入するとクラス NP-困難になって問題を解くことが困難となることが多いからである。そこで，ネットワーク構造を利用した近似解法などの開発は急務といえる。さらに，通信や防災ネットワークに見られる順序や向き付けをするネットワークに対しても，その応用が広範なことからもアルゴリズム開発は意味深い。

2. 研究の目的

ネットワーク理論において横の広がりとなる基盤整備と縦の広がりを作る実社会に適応したモデルの伸張を柱に（図 1）以下の

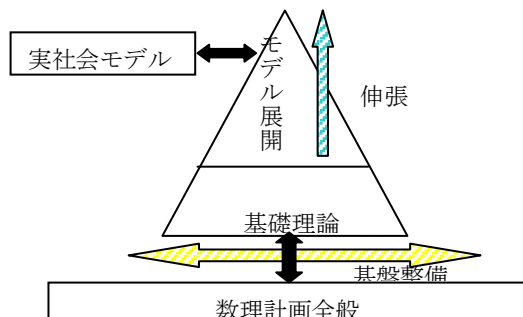


図 1：研究の 2 本柱による理論の広がり内容に重点をおき研究を遂行する。

(1) ネットワーク理論の基盤整備

これまでの研究業績である古典フローや劣

モジュラ流問題に対して開発したアルゴリズムや，理論展開を進展させ，ネットワーク理論における確固たる基礎を確立する。特に，研究代表者による古典フローとの関連に重点をおいた一般化最大流問題のサーベイを元にして，古典フローを拡張したフロー問題に対するアルゴリズム開発を行い，これらを元に，古典フローも含めた基礎理論を再度概観し，確固たる基礎を築く。

(2) ネットワーク理論の伸張

リスク管理が重要視されている現代，入力データを複数のシナリオでもつロバスト最適化は有用である。離散構造上のロバスト最適化は 90 年代から注目されているが，新たな展開を目指す。シナリオに従って解の更新を行ったり，ネットワーク構造にロバスト性のあるモデルも新たに導入して理論展開を図る。

通信ネットワークや防災におけるネットワークモデルでは，通信順序などが重要である。そこで順序を考慮したネットワークのデザインや連結度計算の効率的なアルゴリズムを目指す。順序をもつネットワークは通信の分野においてゴシップ問題，ブロードキャスト問題として扱われているが，その分野の結果をネットワーク理論に融合させて理論展開を図る。また，グラフの向き付けとも関連させて理論展開を試みる

3. 研究の方法

ネットワーク理論の基盤整備と伸張モデルの確立では，その結果は互いに作用するので，平行して研究を行うことで促進を図った。平成 19 年度は基礎的な研究に焦点をあてアルゴリズムの構築と伸張モデルの分析を行った。平成 20 年度以降は，継続してアルゴリズムの構築を行うとともに，アルゴリズムの検証，実社会システムへの還元，モデルの見直しなどを行った。各研究分担者の専門分野をネットワーク理論に融合し発展させることで総合的な展開を図った。

4. 研究成果

ネットワーク理論において横の広がりとなる基礎理論の構築と縦の広がりを作る実社会に適応したモデルの伸張を行い，基礎問題と拡張問題の両方に対して，アルゴリズム開発を行った。

(1) サービスサイエンスなどで重要視される不確実性を取り入れたモデルとして，入力確定後に解の修正ができる新たなロバスト最適化モデルを提案した。このモデルは，解を修正する費用の調整により，解の修正を許さないモデルやパラメータ決定後にいくつかの変数を決められるモデルも含んでいる。ネットワーク上の問題にこのモデルを適用したときに効率よく解ける問題を見極め，そ

の一つである木構造上の配置問題に対して効率的なアルゴリズムを構築した。入力が増える前に解を構築する問題としては、近年注目され始めた2段階オンライン構築問題と関連しており、重要なモデルといえる。本結果で扱った問題は1-メディアン問題のみであるが、他の配置問題でのアルゴリズム開発も望まれる。

(2) 予算制約を加えた最短路問題に対する完全多項式近似アルゴリズムを構築した。構築したアルゴリズムの枠組みがより広い組合せ最適化問題に適用できることを検証し、より一般的な枠組みとしてスケジューリング問題に対するアルゴリズムとして提案した。

(3) 通信ネットワークにおける基本的な通信プロセスモデルにおける故障耐性に関する指標を提示した。いくつかの通信が故障してもゴシップと呼ばれる通信プロセスが働くための最小通信数の指標を与えた。さらに、ブロードキャストと呼ばれる通信プロセスに対する単純なアルゴリズムが働くための新たな指標をネットワーク連結度に関する概念である最大隣接順序を用いて示した。特に、ブロードキャストに対しては、既存の指標を求めるための計算量や既存の指標と提案する指標の差が大きくなるネットワークの例を提示することで、提案する指標が優れていることを示した。この結果より、通信ネットワークの頑強性に関する新たな指標として、グラフ連結度に関する概念の適用可能性が期待される。

(4) 社会ネットワークなどのコミュニティ抽出におけるネットワーク理論を利用した概念とアルゴリズムを、ハイパーグラフ上に拡張した。グラフでは表現できないグループ関係をハイパーグラフは表現できることから、ハイパーグラフ上でのコミュニティを議論する重要性をまず示した。そして、コミュニティの概念をハイパーグラフ上に拡張し、アルゴリズムを構築した。最初に、密な部分集合によりコミュニティ抽出をおこなった。密な部分集合を求めるアルゴリズムの枠組みは、最大平均カットなど他のパラメトリックなネットワーク問題に対しても有効であることも示した。次に、隣接数に着目して、コミュニティ抽出を行った。隣接数に着目したときのコミュニティの定義を4つ提案し、各々、グラフの変換により最小カットアルゴリズムでコミュニティが抽出できることを示した。提案するコミュニティ抽出を、複数の共著者ネットワークにおいて、実証し有効性を検討した。その結果、抽出されたコミュニティはいずれも適切なグループであるが、ハイパーグラフの特徴に左右されることが分かり、今後、より多くのデータで検証し、妥当性を示す必要がある。

(5) 組合せ論に絡めて、グラフの向き付けに関する基礎的な結果を導いた。また、与えられたグラフにある条件を満たすような頂点の順序付けや費用最小となる枝の向き付けを与える問題に対して、効率よいアルゴリズムを提案した。頂点の順序付けや枝の向き付けの結果は、基本的なネットワークの性質を導くことができる。さらに、通信ネットワークにおいては、通信の方向性が重要であり、今後はこれらの結果の融合も望まれる。

(6) 従業員スケジューリングなどで重要となる従属関係のあるマッチング問題に対し、既存のモデルを拡張し、複数の従属関係がある場合に、そのうち一つを満たせばよいというモデルにおいて、多項式時間で解けるケースとNP-困難となるケースを示した。この結果は、制約付きのネットワーク最適化問題への拡張が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

- ① A. Ichimura and M. SHIGENO, A new parameter for a broadcast algorithm with locally bounded Byzantine faults, Information Processing Letters, 査読有, Vol. 110, 2010, 514-517.
- ② 張明超, 高橋里司, 繁野麻衣子, 最大密度部分集合問題と近似2分探索による解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌, 査読有, 53巻, 2010, 1-13.
- ③ S. Iwata and Y. Kobayashi, An algorithm for minimum cost arc-connectivity orientations, Algorithmica, 査読有, Vol. 56, 2010, 437-447.
- ④ Z. Hou and M. Shigeno, New Bounds on the Minimum Number of Calls in Failure-Tolerant Gossiping, Networks, 査読有, Vol. 53, 2009, 35-38.
- ⑤ 八森正泰, セル複体に付随するグラフの向き付けとその最適解, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1629巻, 2009, 214-224.
- ⑥ M. Shigeno, An adjustable robust approach for a 1-median location problem on a tree, Journal of the Operations Research Society of Japan, 査読有, Vol. 51, 2008, 127-135.
- ⑦ A. Bernath, S. Iwata, T. Kiraly, Z. Kiraly, and Z. Szigeti, Recent Results on Well-Balanced Orientations, Discrete Optimization, 査読有, Vol. 5, 2008, 663-676.
- ⑧ S. Iwata and T. Matsuda, Finding Coherent Cyclic Orders in Strong

Digraphs, Combinatorica, 査読有, Vol. 28, 2008, 83-88.

- ⑨ T. Kabasawa, K. Murata, M. Shigeno, A note on FPTAS for single machine weighted tardiness problem with a common due date, Discussion Paper Series Department of Social Systems and Management, University of Tsukuba, 査読無, No. 1198, 2008.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 天沼拓人, 繁野麻衣子, 従属条件付きマッチング問題に関する一考察, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2010年3月4日, 首都大学東京.
- ② 宮川裕幸, 繁野麻衣子, 高橋里司, 張明超, 隣接数に着目したハイパーグラフ上のコミュニティ抽出, 第6回ネットワーク生態学シンポジウム, 2009年12月17日, 産業技術総合研究所.
- ③ 八森正泰, 確率グラフの不変量の期待値を計算するモンテカルロ法, 組合せ論サマースクール 2009年9月9日, 稚内北星学園大学.
- ④ S. Takahashi, M. Shigeno and M. Zhang, An Algorithm for a Maximum Density Subset Problem Based on Approximate Binary Search, The 20th International Symposium of Mathematical Programming, August 23 2009, Chicago Marriott Downtown, Chicago, USA.
- ⑤ S. Iwata and K. Nagano, Submodular Function Minimization under Covering Constraints, The 20th International Symposium of Mathematical Programming, August 23 2009, Chicago Marriott Downtown, Chicago, USA.
- ⑥ 市村陽, 繁野麻衣子, ブロードキャストアルゴリズムに対するビザンチンフォールトトレラント性, 日本オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会, 2009年3月17日, 筑波大学.
- ⑦ 張明超, 高橋里司, 繁野麻衣子, 最大密度部分集合問題と近似2分探索による解法, 日本オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会, 2009年3月17日, 筑波大学.
- ⑧ 八森正泰, 単体的複体の分割に関する問題, 組合せ論サマースクール 2008, 2008年9月9日, 沖縄カルチャーリゾートフェストーネ.
- ⑨ 八森正泰, セル複体に付随するグラフの向き付けとその最適解, 数理解析研究所 研究集会, 2008年7月25日, 京都大学.
- ⑩ 八森正泰, 3次元球面・球体の三角形分割と結び目のその後, 組合せ論サマースク

ール 2007, 2007年9月3日, 沖縄カルチャーリゾートフェストーネ.

- ⑪ 八森正泰, 2次元単体的複体の partitionability の obstruction, 第19回位相幾何学的グラフ理論研究集会, 2007年11月15日, 横浜国立大学.

[その他]

ホームページ等

<http://infoshako.sk.tsukuba.ac.jp/~maiko/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

繁野 麻衣子 (SHIGENO Maiko)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号: 40272687

(2) 研究分担者

山本 芳嗣 (YAMAMOTO YOSHITSUGU)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 00119033

吉瀬 章子 (YOSHISE AKIKO)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・教授
研究者番号: 50234472

八森 正泰 (HACHIMORI MASAHIRO)
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授
研究者番号: 00344862

岩田 覚 (IWATA SATORU)
京都大学・数理解析研究所・教授
研究者番号: 00263161

(3) 連携研究者

なし