

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510135

研究課題名（和文） ネットワーク構造解析アルゴリズムの開発とネットワークアルゴリズムの総合的展開

研究課題名（英文） Algorithm developments for network structure analysis and comprehensive expansions of network algorithms

研究代表者

繁野 麻衣子（SHIGENO MAIKO）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40272687

研究成果の概要（和文）：ネットワーク最適化に対する基礎理論を発展させ、ゲーム理論やグラフ理論と融合することで、社会システムにおけるネットワーク構造の分析を行った。具体的には、コミュニティ抽出のアルゴリズム構築と有効性の検証、情報伝播ネットワークの特徴付け、グラフの一意性を表す飽和グラフの分析などである。また、仮想計算機配置問題、オークションの財の割当、スタッフスケジューリング、タクシー配車問題などにネットワーク基礎理論が適用できることも示した。

研究成果の概要（英文）：This research analyzed network structures in social system based on basic theory for network optimization, together with game theory and graph theory. Especially, the following topics were focused: algorithms for community extraction and its evaluation, characteristics for information diffusion network, and analysis of saturated graphs. In addition, we showed the possibility of approach using network theory for vertical machine location, auction, staff scheduling, and taxi allocation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

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：アルゴリズム，ネットワーク，最適化，システム工学

### 1. 研究開始当初の背景

複雑な社会システムの解析において、ネットワーク理論やネットワーク最適化技法は重要な役割を果たしている。なかでも、ネットワークフローに対する理論やアルゴリズムは、20世紀後半に基盤が確立し、発展を続

けている分野である。ネットワークフロー問題に対する効率的なアルゴリズムを構築する基礎概念が、別の基本的な離散最適化問題に対するアルゴリズム構築に影響を与えており、特に、ネットワークフロー最適化と劣モジュラ関数最小化などの抽象化された離

散最適化問題は密接に関係して発展してきている。

一方で、社会システムの解析においては、社会ネットワークやウェブネットワーク、コミュニケーションネットワークをグラフで表現し、その構造を特徴づける研究が古くから行われている。近年の計算機の発展により、大規模なネットワークの解析ができるようになってきており、構造解析や特徴判定のための効率よいアルゴリズムの開発が、より重要となっている。これまでに、ウェブコミュニティ抽出にネットワークフローの概念を用いたり、伝播ネットワークと劣モジュラ関数の関係から特徴付けが議論されたりして、アルゴリズムが構築されてきた。しかし、これらのネットワーク構造解析や特徴判定とネットワークフロー最適化や抽象化された離散最適化問題との関係は、前述のネットワークフロー最適化と劣モジュラ関数最小化などの問題との関係ほど密接ではない。

申請者はこれまで、ネットワークフロー最適化技法の研究に従事してきており、数々のアルゴリズム開発を行ってきた。また、それらの知識を生かし、ブロードキャスト問題の特徴判定や、コミュニティ抽出の拡張などの成果を出している。そこで、ネットワーク構造解析や特徴判定に対しても、ネットワークフロー最適化技法と密接に関連づけることにより、効率よいアルゴリズムの開発が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、ネットワーク最適化技法の基礎概念や劣モジュラ関数最小化などの抽象化された問題と、社会ネットワークやウェブネットワークなどのネットワーク構造解析や特徴判定を密接に結びつけ、ネットワーク構造解析に対する効率的なアルゴリズムの開発と、それらアルゴリズムの総合的な発展

を目的とする。

(1) ネットワーク最適化技法や劣モジュラ関数最小化などの基礎概念を利用して、ネットワーク構造解析や特徴判定のアルゴリズム開発を目指す。ネットワークフロー問題に対する性質を基礎に、コミュニケーションネットワーク上のゴシップ問題やブロードキャスト問題に対する構造解析アルゴリズムをより広いモデルに拡張する。また、未解決部分の多い伝播ネットワークの解析への適用性について研究する。そして、コミュニティ抽出の拡張のさらなる発展も目指す。

(2) 組合せ論やゲーム理論からネットワーク構造解析を行い、アルゴリズムの開発をする。さらに、NP-困難となる問題に対しては非線形計画技法を用いることで新たな知見を得ることを目指す。そして、開発したネットワーク構造解析や特徴判定のためのアルゴリズムをもとに、逆に、ネットワークフローや抽象化された問題に対してアルゴリズムを展開し、ネットワークアルゴリズムの新たな枠組みを構築することを目指す。

## 3. 研究の方法

ネットワーク構造解析と特徴判定アルゴリズムの構築のために、ネットワークフローや組合せ論、ゲーム理論、非線形計画手法を用いたアプローチで研究分担者の個々の専門分野を生かして研究を行い、それらの結果を融合して総合的な展開を目指す。

(1) コミュニケーションネットワーク上で、通信モデルや故障モデルを変えたときの特徴判定のアルゴリズム構築を目指す。

(2) ブロードキャストと伝播ネットワークの関連性、グラフ連結性やネットワークフローとの関係性を整理し、新たな方向性を探究する。

(3) ネットワーク上のコミュニティ抽出に関しては、共著者関係などのグループ関係を表

現可能なハイパーグラフモデルに拡張する研究を継続し、特に、実社会で受け入れやすい指標づくりとその抽出アルゴリズムの開発をおこなう。

(4) 社会ネットワークの構造解析で重要となる他の問題にも視野を広げ、これまで扱ってきた問題との関連性を検討する。

以上、個々の問題の関連性について十分に検討し、ネットワークアルゴリズムを総合的、包括的に扱う方向性について検討する。

#### 4. 研究成果

ネットワークフローに対する基礎理論を発展させて、社会ネットワークにおける問題のアルゴリズム開発を行った。特に、ゲーム理論やグラフ理論と融合することで、社会システムにおけるネットワーク構造の分析を行った。

(1) グラフの一様性に関して、飽和グラフの特徴付けを行った。長さ  $6$  の閉路に対する飽和グラフの最小枝数の上下限を示し、既存研究を発展させた。上下限の間にはギャップは残るものの、閉路の長さが  $5$  以下のときの結果しか知られていなかったものを拡張することで、最小枝数を厳密に得るための可能性を示唆した。

(2) 伝播ネットワークの一つのモデルとして、情報拡散ゲームに対して、ゲーム理論とグラフ理論の両面から解析を行った。各プレイヤーが初期に情報を与えるノードを一つ選択して単位時間毎に隣接ノードに情報を拡散させるとき、各プレイヤーの初期のノードの選び方のナッシュ均衡の有無について、その特徴付けを与えた。さらに、情報が衝突したときの振る舞いが異なる離散ボロノイゲームとの対比も行った。

(3) コミュニティ抽出に関して、ネットワーク表現をグラフからハイパーグラフに拡張

したときに、コミュニティ内外の関連性を測る指標において、ノード数とエッジ数のどちらに着目するかで  $4$  パターンの基準を示し、どの基準でもグラフの変換により最小カット問題を用いて効率よくコミュニティ抽出ができることを示した。さらに、共著者関係などの複数データを用いて、その違いを分析した。

(4) 一見、ネットワーク構造を持たない社会システム問題に対しても、ネットワークフロー技術を用いることで、効率的なアルゴリズムが開発できることを示した。消費電力削減を目的として仮想計算機を物理計算機に配置する問題、オークションで複数の財を入札者に配分し、その支払額を決定する問題において、ネットワークアルゴリズムの基礎理論を発展させて、アルゴリズムを提案した。さらに、スタッフスケジューリングの解の構造の表示、タクシー配車などのスケジューリング問題でもネットワーク構造が便利であることを示した。

なかでも、消費電力削減を目的とした仮想計算機再配置問題は、これまで、整数計画法として定式化して解いたり、ヒューリスティックアルゴリズムを用いて解を求めたりしていた。しかし、単位時間に移動できる仮想計算機は物理計算機ごとにならぬという制約があると、この問題は最小費用マッチング問題と関係し、マッチング問題を用いて効率のよいアルゴリズムが構築でき、数値実験により、実際にも高速なアルゴリズムであることを示した。このことより、実社会の問題を解決する際に、単に数理計画問題として定式化してソルバーを利用して解くのではなく、問題の構造を見極める重要性が分かった。

#### 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 8 件)

- ① 高橋里司, 竹房あつ子, 繁野麻衣子, 中田秀基, 工藤知宏, 吉瀬章子, 省電力化のためのマッチングに基づく仮想計算機パッキングアルゴリズム, 情報処理学会論文誌, コンピューティングシステム, 査読有, 5巻, 2012, 33-43
- ② M. Zhang, S. Lou, M. Shigeno, On the number of edges in a minimum C6-saturated graph, Discussion paper, 査読無, No. 1299, 2012, 1-15
- ③ S. Takehara, M. Hachimori, M. Shigeno, A comment on pure-strategy Nash equilibria in competitive diffusion games, Information Processing Letters, 査読有, 112巻, 2012, 59-60, 10.1016/j.ipl.2011.10.015
- ④ 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, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1773巻, 2012, 121-131
- ⑤ 竹原令依子, 繁野麻衣子, ネットワーク上の情報拡散ゲームに関する一考察, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1773巻, 2012, 131-141
- ⑥ S. Takahashi, M. Shigeno, Approximation algorithms for a winner determination problem of single-item multi-unit auctions, JSIAM Letters, 査読有, 3巻, 2011, 29-32
- ⑦ S. Fukai, N. Hirose, K. Miki, M. Shigeno, Case studies of scheduling in traffic services by optimization technique, Proceedings of International Symposium on Scheduling 2011, 査読有, 2011, 85-89
- ⑧ H. Miyagawa, M. Shigeno, S. Takahashi, M. Zhang, Community extraction in hypergraphs based on adjacent numbers,

Lecture Notes in Operations Research, 査読有, 12巻, 2010, 309-316.

[学会発表] (計 14 件)

- ①坂井教人, 繁野麻衣子, タクシー車両配分計画に関する一考察, 日本応用数学会研究部会連合発表会, 2013. 3. 14-15, 東洋大学
- ② 坂井教人, 繁野麻衣子, 塚本一也, タクシー配車問題へのOR手法の適用事例, 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会, 2013. 3. 5-6, 東京大学
- ③ 八森正泰, 竹原令依子, 繁野麻衣子, 直径2のグラフ上の離散ボロノイゲーム, 応用数理合同研究集会, 2012. 12. 20-22, 龍谷大学
- ④S. Takahashi, A. Takefusa, M. Shigeno, H. Nakata, T. Kudoh, A. Yoshise, Virtual Machine Packing Algorithms for Lower Power Consumption, 4th IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science, 2012. 12. 3-6, 台北 (台湾)
- ⑤八森正泰, 竹原令依子, 繁野麻衣子, グラフ上の離散ボロノイゲームにおけるナッシュ均衡, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会, 2012. 9. 12-13, ウィンク愛知
- ⑥ S. Luo, M. Zhang, M. Shigeno, A nonadaptive probabilistic group testing algorithm for detecting consecutive positive of linear DNA library, 21st International Symposium on Mathematical Programming, 2012. 8. 19-24, ベルリン (ドイツ)
- ⑦Yoichi Izunaga, Maiko Shigeno, Satoshi Takahashi, Naoki Watanabe, 2-approximation algorithms for the winner determination problem in VCG based single-item multi-unit auctions, 21st International Symposium on

Mathematical Programming, 2012. 8. 19-24,  
ベルリン (ドイツ)

⑧ 高橋里司, 竹房あつ子, 繁野麻衣子, 中  
田秀基, 工藤知宏, 吉瀬章子, 省電力化のた  
めの仮想計算機パッキング問題に対する解法,  
日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研  
究発表会, 2012. 3. 27-28, 防衛大学校

⑨ 宮崎未来, 繁野麻衣子, 最終完了時刻最小  
化のオンラインスケジューリングに関する一  
考察, スケジューリングシンポジウム,  
2011. 9. 24-25, 大阪工業大学

⑩ 高橋里司, 繁野麻衣子, VCGメカニズムに  
よるオークションの最適供給量に関する一考  
察, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋  
季研究発表会2011. 9. 15-16, 甲南大学

⑪ 張明超, 羅松, 繁野麻衣子, 2-連結なC6-  
飽和グラフの最小枝数, 離散数学とその応用  
研究集会, 2011. 7. 31-8. 2, 奈良県文化会館,  
奈良県婦人会館

⑫ 八森正泰, 2次元のobstruction to  
shellabilityについて, 応用数理合同研究集  
会, 2010. 12. 18, 龍谷大学

⑬ 池上敦子, 繁野麻衣子, サービス業におけ  
る勤務スケジュール作成, スケジューリング  
シンポジウム, 2010. 9. 11-12, 法政大学

⑭ H. Miyagawa, M. Shigeno, S. Takahashi,  
M. Zhang, Community Extraction in  
Hypergraphs Based on Adjacent Numbers, 9 th  
International Symposium on Operations  
Research and its Applications,  
2010. 8. 19-23, Tinet Hotel (中国)

[図書] (計2件)

① 久野誉人, 繁野麻衣子, 後藤順哉, 数理  
最適化, オーム社, 2012, 262 ページ

② 繁野麻衣子, ネットワーク最適化とアル  
ゴリズム, 2010, 188 ページ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

繁野 麻衣子 (SHIGENO MAIKO)

筑波大学・システム情報系・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・システム情報系・教授

研究者番号: 00119033

吉瀬 章子 (YOSHISE AKIKO)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号: 50234472

八森 正泰 (HACHIMORI MASAHIRO)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 00344862

### (3) 連携研究者

岩田 覚 (IWATA SATORU)

京都大学・数理解析研究所・教授

研究者番号: 00263161

(H23→H24: 連携研究者)