

研究終了報告書

「数理的システムデザインに潜む離散構造の研究とその応用」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：神山 直之

1. 研究のねらい

制度や仕組みの複雑化・高度化が進む社会において、数学・数理科学が果たす役割は大きく分けて2つあると言える。まず1つ目は「予測」であり、大量のデータから結果や行動を予測することを目的とする。この領域においては、統計学や機械学習といった数学・数理科学の分野が中心的な役割を果たす。この数学・数理科学の「予測」の役割は、ビッグデータや深層学習といったキーワードで語られ、実社会における種々のデータ解析の成功として実を結んでいる。そして、数学・数理科学のもう一つの役割が、本研究課題のテーマの「計画」である。この領域においては、数理技術を用いて様々な社会的課題に対する制度構築や計画立案を行うことを目的とする。この数学・数理科学の「計画」の役割においては、最適化やゲーム理論といった数学・数理科学の分野が中心的な役割を果たす。いわゆるノーベル経済学賞がマッチング理論の関連研究に対して与えられたことが示すように、理論的にも応用的にも重要な分野として認識され、研修医配属問題や公立学校選択制など現実社会の種々の制度設計として実を結んでいる。本研究課題では、この「数理技術による社会的課題に対する制度構築や計画立案の研究そして応用」を、「数理的システムデザイン」と呼び、これまで申請者が培ってきた離散最適化やグラフ理論を中心とする離散的数学理論の知識を駆使し、制度構築や計画立案に関わる社会的課題の解決のための基盤技術開発および技術の応用を目指す。

本研究課題の具体的な研究テーマとしては、現代の社会システムにおいて非常に基盤的な課題となる、資源のより良い分配を目指す「割当問題に対する基盤技術開発とその応用」、および社会における人やものの流れの効率化を目指す「人・ものの流れの最適化技術の開発」を中心的な課題として据える。これらの課題に対して、特にこれまで理論構築が困難であった構造の悪い理論的問題の研究、現実問題に対する応用の推進、そしてシミュレーション等の他分野の技術との融合を目指す。本研究課題の全体像に関しては図1を参照。

数理的システムデザイン

＝ 数理技術による社会的課題に対する制度構築・計画立案

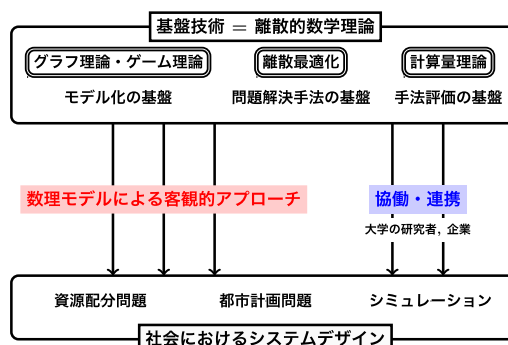


図1. 研究の全体像

2. 研究成果

(1) 概要

「研究のねらい」で述べたように本研究課題の目標は、現代の社会システムにおける基盤的な課題である「割当問題に対する基盤技術開発とその応用」、そして「人・ものの流れの最適

化技術の開発」である。この目標に対して以下のような理論的そして応用的な成果を得ることができた。まず「割当問題に対する基盤技術開発とその応用」に関する代表的な成果を説明する。マッチング問題においては参加者の選好は推移性を満たすと仮定することがこれまで一般的であった。本研究課題では、この仮定を取り除いた一般的な設定における基盤技術の構築をおこなった(主な研究成果リスト1参照)。また、多くのマッチング問題はグラフ上で定義されるが、本研究課題ではグラフを一般化したハイパーグラフにおけるマッチング問題の複雑性に関する成果が得られた。さらに、複雑な設定のマッチング問題を扱うことのできるマトロイド制約に関する成果も得られた(主な研究成果リスト3参照)。これらの基盤技術の一般化により、さらに広い現実課題への技術応用可能性が高まったと考えている。また、応用面の研究に関しては、実際の大学におけるクラス編成に対して技術を応用することができた。続いて、「人・ものの流れの最適化技術の開発」に関する代表的な成果を説明する。まず、理論的な成果としては、グラフ上のネットワークフローを用いた人・ものの流れの最適化のモデルに対して、新たな解概念を導入し、その解を求めるアルゴリズムを提案した(主な研究成果リスト2参照)。先ほどのマッチング問題同様、基盤技術の一般化により、さらに広い現実課題への技術応用可能性が高まったと考えている。また、応用面の研究に関しては、テーマパーク等における周遊行動のシミュレーションを用いたハンチング現象を回避する情報配信を求める問題に対するアルゴリズムの開発を行なった。最適化技術とシミュレーション技術は、どちらも人・ものの流れの最適化において非常に重要な技術であり、それらの技術を融合することにより、さらなる現実問題への応用が期待される。全体の成果のまとめとしては、特に研究開始当初の目標であった「理論構築が困難であった構造の悪い理論的問題の研究」、「現実問題に対する応用の推進」、「シミュレーション等の他分野の技術との融合」に関する成果が得ることができたと考えている。

(2) 詳細

本研究課題で得られた主な成果を以下にまとめる。

研究テーマ A 「割当問題に対する基盤技術開発とその応用」

- ハイパーグラフ上の安定小数マッチング問題の困難性に関する研究
(査読付き国際会議 ISAAC2018 に採録)
- 均等ネットワーク上のバランス化フローを求めるアルゴリズムに関する研究
(論文誌 Information Processing Letters に採録)
- 同順位・マスターリスト・マトロイド制約を持つ多対多安定マッチング問題に関する研究
(査読付き国際会議 AAMAS2019 に Full Paper として採録)
- 弱選好の代替性の判定に対するアルゴリズムの改良に関する研究
(論文誌 Mathematical Social Sciences に採録)
- 交互サイクルによる完全マッチングの最短遷移に関する研究
(査読付き国際会議 ESA2019 に採録)
- 各対比較による選好とマトロイド制約を持つ安定マッチング問題に関する研究
(査読付き国際会議 AAMAS2020 に Full Paper として採録)
- 構造変化に応じるロバスト修復可能マトロイド基問題に関する研究

- (第19回情報科学技術フォーラムにおいて共同研究者が発表)
- 大学のクラス編成問題に対するマッチングモデルの応用に関する研究
(日本オペレーションズ・リサーチ学会の研究部会において共同研究者が発表)
 - 超安定マッチング問題のマトロイドを用いた一般化に関する研究
(arXiv にプレプリントを公開)
- 研究テーマB「人・ものの流れの最適化技術の開発」
- グラフ上のゲリマンダリングに関するアルゴリズム的研究
(論文誌 Theoretical Computer Science に採録)
 - 辞書式最適最速到達フロー問題に関する研究
(論文誌 Networks に採録)
 - 距離制約とマトロイド制約を持つ施設配置問題に関する研究
(論文誌 Algorithmica に採録)
 - ハンチング現象を回避する情報配信に関する研究
(査読付き国際会議 PRIMA2020 に Regular Paper として採録)
- 上記の研究成果が示すように、特に研究開始当初の目標であった「理論構築が困難であった構造の悪い理論的問題の研究」、「現実問題に対する応用の推進」、「シミュレーション等の他分野の技術との融合」に関する成果が得ることができたと考えている。

3. 今後の展開

本研究課題を通じて、社会システムデザインのための離散最適化を軸とする基盤技術の構築を進めることができ、さらに具体的な応用も達成することができた。今後もこの研究の方向性を推し進め、社会システムデザインの基盤技術としての離散最適化の確立させる必要がある。さらに、今後は得られた基盤技術が広く社会で使われるようにするためには、さらなる啓蒙活動等が必要となると考えている。このために、まず離散最適化の技術にアクセスしやすい教科書もしくはサーベイを整備していく必要があると考えている。

4. 自己評価

当初目標としていたことは概ね達成することができたと考えている。さらに今後につながる研究もできた。特に、基盤技術のみならず、実際の現場での技術の応用、さらに応用に近い分野との融合に関する研究も推進できたと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 10件

1. Naoyuki Kamiyama, On Stable Matchings with Pairwise Preferences and Matroid Constraints, Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2020, pp.584-592.

安定マッチング問題とは、別の集団の参加者に対する選好を持つ2つの参加者の集団間の「安定」なマッチングを求める問題である。通常、参加者の選好は推移性を満たすと仮定する

が、本論文ではこの仮定を取り除いた一般的な選好を持つ安定マッチング問題を扱った。さらに、一般の選好を扱うのみならず、容量制約を一般化したマトロイド制約も扱った。本論文では、片側の参加者の選好がマスターリストによって決まる場合を考え、いくつかの困難性や計算容易性を示した。

2. Naoyuki Kamiyama, Lexicographically Optimal Earliest Arrival Flows, Networks, 2020, vol.75, no.1, pp.18-33.

動的ネットワークフローとは、通常の静的なネットワークフローモデルに時間的要素を加えたモデルである。この動的ネットワークフローモデルは、人やものの流れをモデル化する際に使われる。本論文では、この動的ネットワークフローの問題である最速到達フロー問題を扱った。具体的には、辞書式適最速到達フローという新しい解を提案し、それを求めるアルゴリズムを提案した。

3. Naoyuki Kamiyama, Many-to-Many Stable Matchings with Ties, Master Preference Lists, and Matroid Constraints, Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2019, pp.583-591.

本論文では最も重要なマッチング問題の一つである安定マッチング問題の拡張を扱った。最も基本的な安定マッチング問題においては、2つの集団の間の1対1のマッチングを考えるが、本論文では容量制約を一般化したマトロイド制約を考え、多対多の安定マッチング問題を扱った。特に、本論文では、片側の参加者の選好がマスターリストによって決まる場合を考え、いくつかの計算容易性を示した。

(2) 特許出願

研究期間累積件数: 0 件 (特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 第19回情報科学技術フォーラム FIT 船井ベストペーパー賞 (表彰式は2021年8月の予定、5名による共同受賞)
2. 日本オペレーションズ・リサーチ学会フェロー (2021年3月)
3. 第8回藤原洋数理科学奨励賞 (2019年9月)
4. 2018年度人工知能学会研究会優秀賞 (2019年6月、5名による共同受賞)
5. 2018年度人工知能学会現場イノベーション賞「金賞」 (2019年6月、7名による共同受賞)
6. 平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞 (2019年4月)