

# 研究報告書

## 「都市・社会システム最適化のための離散的数学理論の深化」

研究タイプ： 通常型

研究期間： 平成26年10月～平成30年3月

研究者： 神山 直之

### 1. 研究のねらい

数理モデルの研究における大きな目標の一つに、現実を観測可能な現象を忠実に再現することができるモデルを構築することが挙げられる。仮想的に現象を再現することにより、今後起きうる未来を予測しその結果に対する対策を講じることができる。このような数理モデルの研究は、物理学や生物学との相性が良く、微分方程式が重要な数学的道具となる。微分方程式の研究は、その応用の拡大のみならず、数値解析・数値計算といった数学理論の深化と共に大きく発展してきた。一方、現実には観測することの出来ない数学的に曖昧な問題を、数学的な問題として表現し解決することが出来る点も、数理モデルの大きな力の一つである。曖昧な概念そのものを、新たに数学的に定義することにより観測可能なものとし、課題を解決することを目的とする研究である。このような数理モデルの研究は、前述のシミュレーション型の数理モデルの研究と対比させると、問題解決型数理モデルの研究といえることができる。

問題解決型の数理モデルは、通信や仮想空間を扱う情報科学や、社会的公平性や戦略的行動を扱う経済学における課題と相性が良く、さらに多くの問題が離散的な構造を有している。前述のシミュレーション型数理モデルの研究が物理現象といった、人類の誕生より脈々と続く問題を扱う非常に伝統的なものであるに比べ、問題解決型数理モデルは社会や仮想空間といった近代文明において発展したものとの関連性が強く、比較的新しいものであるといえる。それゆえ、シミュレーション型数理モデルにおける微分方程式のような確固たる理論的柱が構築されているとは言い難い。本研究では、問題解決型、特に離散的な構造を有する数理モデルの理論的基盤として、離散最適化・グラフ理論・計算量理論を中心に据える。グラフ理論はどのように課題をモデル化すべきかを示唆し、離散最適化の理論はモデルを解析する手法を与え、計算量理論はどの手法を選ぶべきかの指針を与える。本来これらの3つの分野は1つの塊として絡み合うことによりその力を十分に発揮することができるものであるが、現状ではその融合は十分であるとはいえない。本研究ではこれらの理論の深化および融合を通じて、数理モデル研究の新たな理論的柱の構築に向けた第一歩を目指す。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究課題は上記の研究のねらいを踏まえ、問題解決型数理モデルの社会的課題への応用先として特に、2つの集団間の良い割り当てを求めるマッチング問題に対するアルゴリズムおよび人・ものの流れに関連する問題に対するアルゴリズムを中心的な課題とし研究を進めた。得られた具体的な成果に関しては以下の詳細を参照していただくこととして、ここではその概要を説明する。

上でも述べたように、本研究課題ではマッチング問題に対するアルゴリズムおよび人・もの

の流れの最適化を中心的な課題とし、それぞれを研究テーマA・研究テーマBとして研究を進めた。それぞれのテーマには更にA1, A2, A3 および B1, B2, B3 と分けられている。テーマA1, A2, B1, B2 は理論的な研究である。A1, B1 においては特に古典的な設定に対す

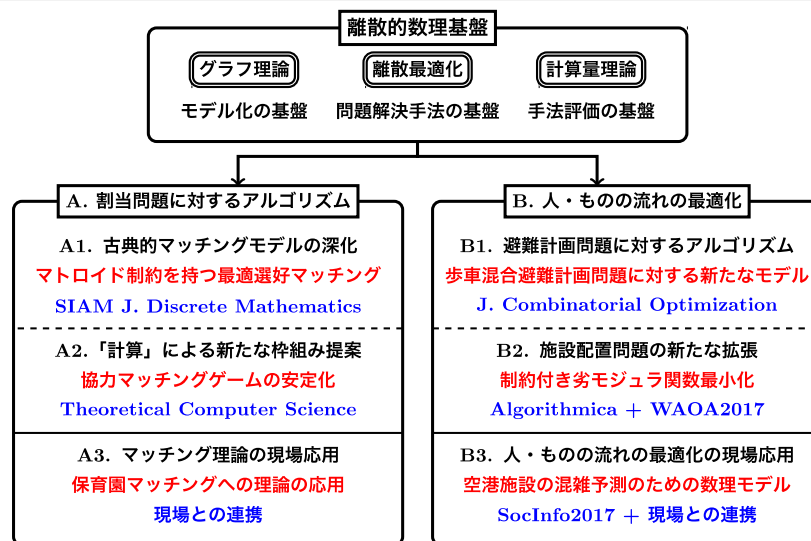


図 1. 各テーマの主要な成果

る離散最適化アプローチの深化を目的として研究を進めた。またA2, B2 も理論的な研究であるが、本サブテーマにおいては現実問題への応用を意識した新たな問題設定や枠組み、そして問題に対する見方を提案することを目的として研究を進めた。そして残るA3, B3 は応用的な研究であり、現場における理論の活用を第一に掲げ、現場との連携の方法も含めて研究の対象として研究を行った。各テーマで得られた主要な成果は図 1 を参照。

## (2) 詳細

### 研究テーマA 離散最適化的アプローチを中心とするマッチング問題に関する研究

#### － テーマA1 複雑な制約を持つマッチング問題に対するアルゴリズムに関する研究

本サブテーマにおいては、特に古典的なマッチング問題に対してマトロイド制約を加えた拡張および先行順序に同順位を許す場合へ拡張を扱った。マトロイド制約は単純な容量制約だけではなく階層的な容量制約等の応用上重要な設定も扱うことができ、同順位を含む選好も応用上重要な設定である。具体的には以下の課題に関する成果を得た。

- － マトロイド制約を持つ重み付き最適選好マッチングの特徴付け
- － マトロイド制約および同順位を持つ最適選好マッチング（主要論文 4）
- － 同順位を持つ木における最大弱安定マッチング問題
- － マトロイド制約・マスターリストを持つ強/超安定マッチング（主要論文 5）
- － 片側マトロイド制約を持つパレート安定マッチング問題
- － マトロイド制約および両側選好を持つ最適選好マッチング問題

#### － テーマA2 「計算」を軸とするマッチング問題の新たな方向性に関する研究

本サブテーマにおいては、これまでの古典的な設定とは異なったマッチング問題の設定を「計算」の観点から提案・観察することを目的とし研究を行った。特に解の遷移やゲームの安定化、そして戦略的操作を求めるアルゴリズム等の研究を中心に行い以下の成果を得た。

- － 重み付きマッチングの遷移問題
- － 協力マッチングゲームの安定化に関する研究
- － 得点制限付きマッチング問題における戦略的操作

- テーマA3 社会的課題に対するマッチング理論の応用可能性に関する研究

本サブテーマにおいてはマッチング理論を現場で応用することを目的とし、実際に企業及び現場と連携することにより、保育園の入園に関するマッチング問題に対する理論の応用の研究に取り組んだ。詳細に関してはプレスリリース 1 を参照。

#### 研究テーマ B ネットワークフローモデルを中心とする人・ものの流れの最適化に関する研究

- テーマ B1 動的ネットワークフローモデルに対するアルゴリズムに関する研究

本サブテーマにおいてはネットワークフローモデルを用いた古典的な避難計画モデルの基礎となる動的ネットワークフローに対する研究を中心に進め以下の成果を得た。特にこのテーマにおいては離散最適化における抽象的な概念である劣モジュラ関数が重要な役割を果たした。

- 歩車混合避難計画問題に対するアルゴリズム（主要論文 1）
- 避難計画問題に対する離散ニュートン法

- テーマ B2 施設配置および人の流れに関する新たなモデルに関する研究

本サブテーマにおいては施設配置問題や人・ものの流れの最適化に関する新たなモデルおよびアルゴリズムに対する研究を中心に進め以下の成果を得た。テーマ B1 同様、このテーマにおいても、劣モジュラ関数が重要な役割を果たした。

- 被覆型不等式制約を持つ劣モジュラ関数最小化問題（主要論文 2）
- 劣モジュラ被覆制約と順序制約を持つ劣モジュラ関数最小化問題
- サーバー割当問題に対する近似アルゴリズム
- 劣モジュラ罰則を持つ劣モジュラ費用点被覆問題
- 劣加法性を持つ提携構造形成とその相乗りへの応用

- ・テーマ B3: 社会的課題に対するネットワークフローモデルの応用可能性に関する研究

本サブテーマにおいては社会的課題に対するネットワークフローモデルの応用を中心に研究を進め、空港施設における人の流れのモデル化（主要論文 3）に関する成果が得られた。詳細に関してはプレスリリース 2 も参照。

### 3. 今後の展開

本研究課題で得られた成果は、理論面・応用面のいずれの方向に関しても発展の可能性が多く残されており、引き続き研究を続ける必要がある。例えば、理論面に関しては本研究では多くの問題が通常のグラフ上で定義されているが、さらに複雑な状況を扱うためにはハイパーグラフ上の問題を考える必要が生じてくる。さらに入力に関して事前に全て与えられている設定を考えているが、現実問題への応用を考慮すると不完全な情報が与えられる場合、動的に設定を考える必要が出てくる。応用面では、例えばマッチング理論の応用に関して今回は現場で応用することを第一目標としていたため、今後はさらに汎用的な技術として完成させ他の現場でも応用可能なものを目指す必要がある。また現場に関しては今回の保育園の割り当てという課題は比較的マッチング理論との相性が良いものであるため、今後は一見相性が悪いと思われる課題の中にも理論の適用可能な応用があるかを探る必要がある。また人・ものの流れの最適化に関しても、シミュレーション技術との融合との課題が残されている。

#### 4. 評価

##### (1) 自己評価

(研究者)

理論的・応用面でも申請の段階で計画していたものは概ね実現できたと考えている。応用面では、これまでの研究生活ではあまり使っていなかった力が必要となりその部分が鍛えられたため、今後の研究においても非常に力となると確信している。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

都市・社会システムの最適化を目的とした数理モデルの構築に、離散最適化・グラフ理論・計算量理論の手法を用いて大きな成果を挙げた。理論研究においては、複雑な組合せ的制約を有する割り当て問題とネットワークフロー(人やものの流れ)の最適化に関して多くの良い成果を得て、トップレベルの国際的学術誌や国際会議に採録されたことは、国内外の評価の現れであるといえる。

また特に、現実の社会的問題の解決として、空港での混雑のシミュレーション予測に関連した富士通との共同研究と、さいたま市や富士通との連携による「保育所と入園希望者とのマッチング」手法の実現が特筆すべき成果といえる。これらで開発された手法は6件の特許取得として結実し、プレスリリースなども行って反響を得た。

数学的方法やアイデアをもって現場に入り込んで社会的課題の解決にあたるという本領域の趣旨によく合致した取り組みであり、それに関して大きな成果を挙げたことは高く評価される。

数学セミナーへの連載などのアウトリーチを活発に行ったことも領域の活動への貢献となった。

#### 5. 主な研究成果リスト

##### (1) 論文(原著論文)発表

1. Yosuke Hanawa, Yuya Higashikawa, Naoyuki Kamiyama, Naoki Katoh, and Atsushi Takizawa: **The Mixed Evacuation Problem**, *Journal of Combinatorial Optimization*, accepted.
2. Naoyuki Kamiyama: **A Note on Submodular Function Minimization with Covering Type Linear Constraints**, *Algorithmica*, accepted.
3. Hiroaki Yamada, Kotaro Ohori, Tadashige Iwao, Akifumi Kira, Naoyuki Kamiyama, Hiroaki Yoshida, and Hirokazu Anai: **Modeling and Managing Airport Passenger Flow under Uncertainty: A Case of Fukuoka Airport in Japan**, *Proceedings of the 9th International Conference on Social Informatics*, LNCS 10540, 419–430, 2017.
4. Naoyuki Kamiyama: **Popular Matchings with Ties and Matroid Constraints**, *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 31(3):1801–1819, 2017.
5. Naoyuki Kamiyama: **Stable Matchings with Ties, Master Preference Lists, and Matroid Constraints**, *Proceedings of the 8th International Symposium on Algorithmic Game Theory*, LNCS 9347, 1–12, 2015.

(2)特許出願

研究期間累積件数:6件(公開前の出願件名については件数のみ記載)

1.

発 明 者:穴井宏和, 大堀耕太郎, 岩根秀直, 神山直之, 吉良知文

発明の名称 :運行計画プログラム、運行計画方法、運行計画装置および運行計画システム

出 願 人:富士通株式会社, 国立大学法人九州大学

出 願 日:2016/4/14

出 願 番 号 :特願 2016-081319

(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)

・主要な学会発表

1. Naoyuki Kamiyama: **Mathematical Models for Evacuation Problems based on Dynamic Network Flows**, 2nd ISM-ZIB-IMI MODAL Workshop on Mathematical Optimization and Data Analysis (2017).

2. Naoyuki Kamiyama: **Practical Algorithms and Models for Evacuation Problems**, 10th Japanese-Hungarian Symposium on Discrete Mathematics and Its Applications (2017). 招待講演

・プレスリリース

1. 最適な保育所入所選考を実現する AI を用いたマッチング技術を開発 (2017.8.30)  
[https://www.kyushu-u.ac.jp/f/31361/17\\_09\\_01.pdf](https://www.kyushu-u.ac.jp/f/31361/17_09_01.pdf)

2. 九州大学と福岡空港ビルディング, 富士通研究所が旅客満足度向上にむけた実証実験を開始 (2015.9.10)  
[http://www.kyushu-u.ac.jp/f/6024/2015\\_09\\_10\\_2.pdf](http://www.kyushu-u.ac.jp/f/6024/2015_09_10_2.pdf)