

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K12644

研究課題名（和文）動的最適化による大規模マルコフゲームの求解と社会システムデザイン

研究課題名（英文）Dynamic Optimization for Solving Large-Scale Markov Games and Social System Design

研究代表者

吉良 知文 (Kira, Akifumi)

群馬大学・情報学部・准教授

研究者番号：50635860

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：きょうだいを考慮した保育所の利用調整（選考）に対して、展開形（マルコフ）ゲームとしてモデル化して解くことにより、公平な選考結果を得るアプローチを提案してきたが、その高速な解法（動的最適化技術）について整理して正当性を示した。また、ゲーム理論の枠組みと動的最適化技術を用いて、共同輸送をおこなうメリットがある企業の組合せを瞬時に列挙するアルゴリズムを開発し、物流業界の全体最適化に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会的課題に対して、真に実利あるソリューションを生み出す方法論としてのマルコフゲームアプローチを確立するために、社会の現場と協働しながら研究をおこなった。保育所の利用調整（選考）に関する成果は多くの自治体で実際に活用されており、研究代表者を含む富士通ソーシャル数理共同研究チーム7名が2018年度 人工知能学会 現場イノベーション賞「金賞」を受賞した。共同輸送に関する研究成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成も受けて、社会実装が大きく進んでいる。

研究成果の概要（英文）：For nursery school matching in consideration of siblings, we have proposed an approach to obtain fair selection results by modeling and solving as an extensive-form game (Markov game). In this research project, we proved the correctness of our high-speed solution method (dynamic optimization technique). In addition, using the framework of game theory and dynamic optimization technology, we developed an algorithm that instantly enumerates the combinations of companies with high cooperative effects, and contributed to the overall optimization of the logistics industry.

研究分野：ソーシャル数理

キーワード：動的計画法 保育所マッチング セキュリティゲーム 物流システム 展開形ゲーム 最適化

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

数理最適化が現実に役立つ学問と認識される一方で、ゲーム理論は直接的には現実に応用できないといわれることがしばしばある。最適化問題とゲームは意思決定主体が単数が複数かのみ違いであり、有用性の誤解は主として、後者における大規模計算と実践型研究開発の不足によると考えられる。

近年、政府の科学技術政策だけでなく、企業のビジネス現場においても、都市・教育・医療・環境・エネルギーなどに関する社会的課題が注目されている。しかし、多様なステークホルダーが含まれる社会システムでは様々なコンフリクトが生じるため、全ての人にとって公平で納得性の高い社会のしくみをデザインするためにはゲーム理論の枠組みと大規模な実問題を解く計算技術が不可欠である。

人々が現実に遭遇する意思決定問題の多くは、意思決定が一度限りではなく、一度とった決定の結果から生じる状況の変化に応じて何度も決定を下すというタイプの多段階の問題に帰着される。この種の問題を効率よく解決する最適化手法が動的計画法である。ただし、動的計画法を使って解くためには、問題をきちんと数理モデルとして定式化する必要がある。このような数理モデルの一つにマルコフゲームがあり、(1) 時間の経過とともに起こる逐次的な意思決定、(2) 状況変化の不確実性(マルコフ性をもつ確率的推移)、(3) 競合する複数の意思決定主体、という3つの要素を考慮する。野球がこの3つの要素をあわせもつ良い例である。

野球を約645万状態からなる大規模マルコフゲームとして定式化し、両チームの監督がそれぞれ状態毎に打撃・盗塁・犠打・敬遠を選択し勝つ確率を最大化するという仮定の下でのマルコフ完全均衡点の計算を2秒未満で計算できることを示した。これは先行研究(Turocy, 2008)を大幅に改善するパフォーマンスであり、動的計画法の研究者としての技術を示したといえる。この計算により、仮定の下で野球がわずかに後攻チームに有利なルールであることを証明した。これを応用することでステークホルダー間に有利/不利がない公平で納得度の高い社会のしくみを設計することにつながることを期待できる。

## 2. 研究の目的

今日において解決が望まれる社会的課題に対処するためにはゲーム理論の枠組みと大規模な実問題を解く計算技術(数理最適化)が不可欠である。本研究では、マルコフゲームの問題記述能力と動的計画法の計算能力をフル活用し、多様なステークホルダーが含まれる現実の複雑な社会を適切にモデル化して、公平で納得感のある制度や施策を設計するアプローチを試みる。本研究の目的は、現実の大規模なマルコフゲームの均衡点を計算する動的最適化技術を構築し、社会的課題に対して真に実利あるソリューションを生み出す方法論としてのマルコフゲームアプローチを確立することである。

## 3. 研究の方法

社会的課題に対して、真に実利あるソリューションを生み出す方法論としてのマルコフゲームアプローチを確立するために、社会の現場と協働して以下の(1)~(4)を一貫して実施する。

- (1) 社会的課題の問題状況とステークホルダーの意思決定をマルコフゲームとして定式化する。
- (2) 定式化したマルコフゲームを効率良く解くアルゴリズムを構築し実装する。
- (3) マルコフゲームの解を元に、公平で納得感のある制度や施策を設計する。
- (4) 制度や施策をフィールド実装し効果を検証する。必要があれば(1)ヘフィールドバッグをおこなう。

## 4. 研究成果

(1) 保育所の利用調整(選考)では、保育の必要性に基づく子どもの優先順位だけでなく、きょうだいの同一保育所への入所希望も考慮する(Matching with Couples)展開形(マルコフ)ゲームとしてモデル化して解くことで公平な選考結果を得るアプローチを提案してきたが(共同研究の既存成果)現実規模の問題を解くには様々な課題が残されていた。神山直之氏(九州大学)と岩下洋哲氏(富士通研究所)との共同研究において、保育所の利用調整がモデル化された展開形(マルコフ)ゲームを高速に解くためのバックトラック探索と枝刈りについて、アルゴリズムを整理して正当性(部分ゲーム完全均衡点上のプレイを正しく出力すること)の証明をおこなった。なお、本アプローチは多くの自治体で実際に活用されており、研究代表者を含む富士通

ソーシャル数理共同研究チーム7名が2018年度人工知能学会 現場イノベーション賞「金賞」を受賞している。また、本研究の副産物として、安定マッチングに関する理論的考察を進め、Serial Dictatorship メカニズムの(選好の申告に関する)純戦略ナッシュ均衡が導く結果の集合と、真の選好プロフィールの下での安定マッチングの集合は一致することを示した。

(2) 研究代表者らの既存成果である野球をモデル化した約645万状態のマルコフゲームでは、引き分けがある非ゼロ和ゲームであるため、両チームの均衡勝率の一意性が保証されない。ゆえに、戦略や選手の評価が困難になるという不備があった。そこで、真に導出すべき均衡点の精緻化をおこない、均衡勝率の一意性を保証した。また、このモデルに基づいて、「情報の価値」の観点から野球のルールの公平性について再分析をおこなった。

(3) 都市や施設における望ましい警備計画のありかたを、警備員と侵入者による非協力ゲームと捉えて議論する試みが人工知能分野で活発である。警備員や侵入者が一定の場所にとどまらずに施設内を巡回する、あるいは巧妙な侵入者が時間の経過とともに警備員の動きを学習することを考慮するとマルコフゲームとして定式化できる。このような動的警備計画の定式化に関する研究代表者らのこれまでの共同研究の成果を論文にまとめ投稿した。また、日本オペレーションズ・リサーチ学会等で成果発表をおこなった。

(4) 学生の希望を考慮しながら受講クラスを決める割当問題はクラス編成問題とよばれ、東京工業大学での事例研究(今野・朱, 1991)が有名である。研究分野の英知を身近な社会に還元すべく、群馬大学の教養教育において約1100人の学生のそれぞれを約50のクラスのいずれかに割り当てる抽選作業を4年間に渡り担当した。現実のインスタンスに応じてより良い抽選結果を得るためには、議論の余地が多々あることが分かり、杉山学氏(群馬大学)、永野清仁氏(群馬大学)、神山直之氏(九州大学)と共同研究をおこなった。第一の選択肢は、学生の満足度の合計の最大化である。しかし、「不運な学生を減らしたい」という大学側の要望もあり、第k希望への配属学生数を下位から辞書式順序に最小化するfair matchingとよばれる方法も有力である。我々は両者の折衷案を提案し採用された。さらに、現実のインスタンスに対して様々な方法を比較するなかで、学校選択問題の文脈で知られている「受入保留方式と抽選(同順位の解消)を併用することの非効率性」についても観察できた。

(5) ゲーム理論の枠組みと大規模な実問題を解く計算技術で、物流業界の全体最適化に貢献することを目標として、日本パレットレンタル株式会社と共同研究をおこなった。物流業界では人手不足が顕在化しつつあり(物流クライシス)、より少ないトラックでより多くの荷物を運ぶことができる共同輸送の必要性が更に高まっている。三角輸送および混載輸送とよばれる共同輸送の形態に着目し、連携・協働するメリットが高い企業同士を高速に見つけるアルゴリズムの開発に成功した。協力することによる効果が一定以上ある企業の組合せをすべて列挙する際に、動的最適化の技術を用いて、効果の上界を算出することで、枝刈り(探索する組合せの除外)を効率よくおこなうものである。これらを整理し特許出願をおこなった。本研究の社会的意義も評価されており、社会実装に向けた一連の研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業として採択され(「ホワイト物流を実現する業界横断型共同輸送マッチングサービス」)、2019年10月から2021年3月まで助成を受けている。さらに、2021年度から基盤研究(C)「協力価値を見出す劣加法性の数理の研究とその社会への展開」が採択された。これは、社会(ビッグデータ)の中から協力すると互いにメリットがある者同士を抽出し、連携・協力を促す数理技術の開発をより広い視野で推し進めるものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 A. Kira, K. Nagano, M. Sugiyama, and N. Kamiyama	4. 巻 arXiv:2103.16879
2. 論文標題 Optimal class assignment problem: a case study at Gunma University	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 arXiv (プレプリント)	6. 最初と最後の頁 15pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2103.16879	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 永野清仁, 吉良知文	4. 巻 27
2. 論文標題 辞書式最適ネットワークフローによる公平なクラス編成問題へのアプローチ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 群馬大学社会情報学部研究論集	6. 最初と最後の頁 63--78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 A. Kira, N. Kamiyama, H. Anai, H. Iwashita, and K. Ohori	4. 巻 62-4
2. 論文標題 On dynamic patrolling security games	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Operations Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 152--168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15807/jorsj.62.152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 A. Kira, K. Inakawa, and T. Fujita	4. 巻 62-2
2. 論文標題 A dynamic programming algorithm for optimizing baseball	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Operations Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 64--82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15807/jorsj.62.64	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 A. Kira, H. Iwane, H. Anai, Y. Kimura, and K. Fujisawa	4. 巻 9
2. 論文標題 An indirect search algorithm for disaster restoration with precedence and synchronization constraints	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Pacific Journal of Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 no.7(15pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40736-017-0032-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Yamada, K. Ohori, T. Iwao, A. Kira, N. Kamiyama, H. Yoshida, and H. Anai	4. 巻 10540
2. 論文標題 Modeling and Managing Airport Passenger Flow under Uncertainty: A Case of Fukuoka Airport in Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Social Informatics (Proceedings of SocInfo 2017), Lecture Note in Computer Science	6. 最初と最後の頁 419--430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-67256-4_33	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計20件(うち招待講演 7件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 市原寛之*, 吉良知文, 検崎朴郎, 寺島伸男, 田中元, 山本広高
2. 発表標題 物流インフラとしてのパレット レンタル網の最適化,
3. 学会等名 RIMS 研究集会「数理最適化の理論・アルゴリズム・応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉良知文*, 永野清仁, 杉山学, 神山直之
2. 発表標題 クラス編成問題: 群馬大学のOR活用と実践
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「動的決定モデルとその応用」研究部会(第7回)・「評価のOR」研究部会(第89回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 物流ネットワークの最適化
3. 学会等名 群馬大学次世代モビリティ社会実装研究センター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 動的ゲームと社会システムデザイン
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「超スマート社会のシステムデザインのための理論と応用」研究部会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 野球のマルコフゲームとしての定式化（再考）
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「動的決定モデルとその応用」研究部会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 検崎朴郎*, 寺島伸男, 吉良知文
2. 発表標題 日本パレットレンタルにおける物流ネットワーク最適化の取り組み
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第44回企業事例交流会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 数理技術による公平性の追求
3. 学会等名 シンポジウム『データとICTを活用したまちづくり』 話題提供プレゼン, 地域とつながる群馬大学 研究者に質問を投げかける日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 保育所の利用調整：きょうだい同所希望への配慮と展開形ゲーム
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 SSOR
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 保育所マッチング：きょうだい同所希望への配慮と公平性の両立
3. 学会等名 社会情報学シンポジウム2018「社会的 マッチング」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 社会システムの施策や制度設計を最適化する数理技術について
3. 学会等名 群馬大学次世代モビリティオープンイノベーション協議会 第 5 回要素技術開発研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 輸送問題とその応用
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会「確率モデルとその応用」研究部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 保育所マッチング：展開形ゲームによる公平性の追求
3. 学会等名 応用計量統計ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 動的警備計画に対する3つの定式化
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第9回 危機管理と防衛のOR研究部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福本康秀*, 中尾悠里, 大堀耕太郎, 大輪拓也, 吉田宏章, 穴井宏和, 吉良知文, 神山直之
2. 発表標題 福岡県糸島市におけるAIによる移住地推薦に関する実証実験
3. 学会等名 電気学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩下洋哲, 吉良知文*, 神山直之, 大堀耕太郎, 穴井宏和
2. 発表標題 保育所マッチング: きょうだいの考慮と展開形ゲーム
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 第41回企業事例交流会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉良知文*, 神山直之, 穴井宏和, 岩下洋哲, 大堀耕太郎
2. 発表標題 動的セキュリティゲームと最適化
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 保育所の入所選考と動的計画とその周辺
3. 学会等名 第13回DP研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 協力ゲームの理論に基づく相乗り交通のデザイン
3. 学会等名 第13回DP研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩下洋哲, 吉良知文*, 神山直之, 大堀耕太郎
2. 発表標題 きょうだいを考慮した保育所マッチングと展開形ゲーム
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会60周年記念事業「九州地区におけるOR若手研究交流会--2017湯布院--」(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉良知文
2. 発表標題 社会システムデザインのための数理と社会実装へのアプローチ
3. 学会等名 社会情報学シンポジウム2017「自動運転×社会情報学で議論する群馬発 超スマート社会」
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 輸送組み合わせ列挙システム、輸送組み合わせ列挙方法及び輸送組み合わせ列挙プログラム	発明者 吉良知文, 寺島伸男, 渡邊安彦	権利者 日本バレットレ ンタル株式会 社、群馬大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-171440	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 マッチングプログラム、マッチング方法およびマッチング装置	発明者 岩下洋哲, 大堀耕太 郎, 神山直之, 吉良 知文	権利者 富士通株式会 社、九州大学
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6896254号	取得年 2021年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

<p>吉良 知文 ホームページ  <a href="http://kira.si.gunma-u.ac.jp/~kira/">http://kira.si.gunma-u.ac.jp/~kira/</a>          社会情報学部の教員らが人工知能学会「現場イノベーション賞(金賞)」を受賞  <a href="https://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/07/20190702press_shajyo.pdf">https://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/07/20190702press_shajyo.pdf</a>          プレスリリース：ホワイト物流を実現する業界横断型共同輸送マッチングサービス事業がNEDO助成事業に  <a href="https://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/12/20191205press_shajyo_nedo.pdf">https://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/12/20191205press_shajyo_nedo.pdf</a>          プレスリリース 2019.02.20：物流ネットワークの効率化・合理化に向けた産学連携開始のお知らせ  <a href="http://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/02/press_20190220.pdf">http://www.gunma-u.ac.jp/wp-content/uploads/2019/02/press_20190220.pdf</a>          プレスリリース2017.08.30：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  <a href="http://www.kyushu-u.ac.jp/f/31361/17_09_01.pdf">http://www.kyushu-u.ac.jp/f/31361/17_09_01.pdf</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------