

研究終了報告書

「信頼される資源配分メカニズムの構築」

研究期間:2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者: 五十嵐歩美

1. 研究のねらい

公平分割理論とは、さまざまな「もの」や「こと」の公平な分け方を数理的に探究する学問領域である。1948年にHugo Steinhausが数学的なモデルを提案して以来、経済学、計算機科学、数学の多岐にわたる学問領域において、非常に高い関心を集めてきた。古典的な公平分割理論では、貨幣に代表される分割可能性(可分財)を仮定できるような財の配分に関する研究が中心であったが、近年、特に、仕事、家事、医療物資に代表される離散的な財(不可分財)を公平に配分するにはどうすればよいか、活発に研究が行われている。さらに、これまでの理論に基づいた応用研究も進んでおり、講義割り当てシステム Course Match や、家賃分担や財産分割などの一般向けウェブサービスである Spliddit は米国で大きな成功を収めている。

不可分財の配分の場合、無羨望配分の存在が保証されない。例えば、一つのダイヤモンドを二人に配分する場合、ダイヤモンドを配分されなかった方は他方に必ず妬みを持つ。そのような状況で不公平を取り除くために、近年国際的に活発に研究されているのは、近似的な公平性を担保する方法である。これは、参加者同士で妬みがあるかもしれないが、その妬みの度合いをできるだけ抑える公平性の概念である。一方、多くの応用例において公平性だけを満たす配分方法は満足のいくものとは言えず、現実には効率性と公平性の両立が求められる。例えば、どの顧客も配車しないというタクシー割当は妬みが発生しないため、無羨望配分となる。効率性とは、そのような意味のない解を除外し、必要な財を適切な参加者に配分する性質のことをいう。さらに、これらの望ましい性質を満たす配分を達成するには、配分の参加者・主催者双方のインセンティブを考慮し、メカニズムの信頼性を担保する必要がある。

本研究の目的は、配分する財あるいはタスクの可分性が必ずしも仮定できない状況において、資源配分問題の理論的性質と解法について深く考察することである。特に本研究では、メカニズムの公平性・効率性・信頼性がどのような状況でバランスがとれるのかを考察する。さらに、不可能性定理が成り立つ状況においては、これらの近似的な妥協点が存在するかを考察する。公平分割問題としてモデル化できる問題は非常に多く、例えば、仕事や財産をどう配分するか、大学の授業割当などの身近な問題から、自治体での医療食料物資の配分などが挙げられる。本研究では、さらに公平な資源配分メカニズムの社会実装を進め、幅広く社会にインパクトを与えることを目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、上述の不可分財の公平な資源配分について、様々な理論的な成果を上げ、さらには社会還元の第一歩となる応用研究を実施することができた。特に、以下の4つのテーマについて成果を出した。

(A) 公平配分理論の社会実装：公平な資源配分メカニズム理論の社会実装として、家事分担アプリを開発した。このアプリは、カップルやルームメイト間の家事分担の可視化並びに公平な家事分担を提案するというものである。有志のエンジニアとともに取り組んだこの活動は、2022年5月29日のNHKスペシャルにて放送された。2022年7月1日時点で、アプリのウェブサイト(kajibuntan.com)に1万を超えるアクセスがあり、大きな反響を呼んだ。

(B) 公平性・効率性・戦略的操作不可能性を満たすメカニズム開発：不可分財の公平配分は、一般に近似的な公平性と参加者が嘘をついても得ができない性質(戦略的操作不可能性)が、数学的に非常に限定的な状況においても両立しないことが知られている。本研究では、各エージェントがマトロイドのランク関数を効用関数として持ちうる時、追加的な財、すなわち補助金を導入することで、公平性、効率性、さらに戦略的操作不可能性を達成するメカニズムが存在することを示した。

(C) 近似的な公平性が達成される数理構造の解明：公平分割理論の殆どの研究では、複数の財が組み合わせ可能か否かは考慮せず、あらゆる財の組合せが可能であるという強い仮定がある。一方、現実には時間的・物理的な制約などにより、そのような仮定が成立しない場合も少なくない。さきがけの研究期間中に、制約下における不可分財の公平配分について数多くの成果を発表した。特に、このような制約をパスの連結制約として捉えて、制約を満たしつつ近似的な公平性であるEF1を達成できるかどうかは未解決問題であった。本研究では、任意のエージェント数で、各エージェントが単調な効用関数を持つのであれば、連結なEF1配分が存在することを示した。

(D) 公平なオンラインメカニズムの設計：例えば、フードバンク、ライドシェアリングサービス、ワクチン配分などの応用例では、割当の対象である資源が逐次的に到着するため、各エージェントの効用関数はあらかじめわからないことが多い。そのような状況において、複数のグループに対して公平な配分をモデル化し、かつ公平性を達成する効率的なアルゴリズムを設計した。

(2) 詳細

研究テーマ A「公平配分理論の社会実装：家事分担アプリの開発」

東京都の2021年の報告では、男女によって家事育児に携わる週当たりの時間が5時間以上の差があるなど、我が国において、ジェンダー間の不平等は深刻な社会問題となって

いる。そのような格差解消を目指し、公平な配分アルゴリズムを活用した家事分担アプリを開発した。世の中にある数多くの家事分担アプリと違い、開発されたアプリの特徴は、家事に対する個々人の好みを分担に反映させられることにある。具体的には、カップルやルームメイトなどが、2人で共有する家事のリストを決定した後、それぞれの家事に対して、どれくらい時間がかかるかと、三段階の好みのレベルのうち一つを選択し、個々人の家事に対する負担度を割り出す。それらを基に、現在の家事分担の可視化、また公平かつ効率的な家事配分を提案する。提案する家事分担の計算には、勝者調整アルゴリズムという可分財に対する90年代に提案された計算手法の離散版を用いる。離散版の勝者調整アルゴリズムは、効率性の尺度であるパレート最適性と近似的な公平性であるEF1性を満たすことが知られている[Aziz-Caragiannis-Igarashi-Walsh, IJCAI 2019]。パレート最適性の理論保証があるため、現状の家事分担より、パートナー間双方にとって負担度が悪くなることはない(図1)。

JSTのサイエンスインパクトラボをきっかけに、NPO法人Code for Japanの子育て育児ハッカソン参加し、公平なアルゴリズムを用いて家事分担アプリのプロトタイプを開発した。有志のエンジニアとともに取り組んだこの活動は、2022年5月29日のNHKスペシャルにて放送された。2022年7月1日時点で、アプリのウェブサイト(kajibuntan.com)に1万を超えるアクセスがあり、大きな反響を呼んだ。

研究テーマB「補助金付きの公平配分」

不可分財の配分において、公平性を達成するための他のアプローチとして、金銭的な補助により公平感を保つというものがある。例えば、夜勤シフトを割り当てられた雇用者、過疎地域での医療従事者などに対して追加での金銭的な補助をするなど、日常の様々な場面において、このような方法は使われている。使える補助金に上限がない場合、組合せオークションの古典的な結果から公平かつ効率的で、配分の参加者の嘘に頑健な配分メカニズムが存在することが知られている。しかし、現実にはそのような仮定は成り立たず、予算には限度額が設けられることが多い。そこで原著論文[Goko-Igarashi-Kawase-Makino-Sumita-Tamura-Yokoi-Yokoo, Games and Economic Behavior 2024]では、補助金に限度額がある場合の嘘に頑健な配分メカニズム設計について研究を行った。具体的な成果としては、エージェントの効用関数がマトロイドのランク関数で記述できる場合、各エージェントへの補助金額が高々効用関数の限界貢献度1で抑えられ、さらに公平性、効率性、戦略的操作不可能性を満たし、多項式時間で計算可能な資源配分メカニズムの構築に成功した。また、任意の加法的な効用関数においては、戦略的操作不可能性を満たすためには、全アイテム数に比例する補助金額が必要であることを示した。

研究テーマ C「制約下の公平配分」

公平分割理論の殆どの研究では、複数の財が組み合わせ可能か否かは考慮せず、あらゆる財の組合せが可能であるという強い仮定がある。一方、現実には時間的・物理的な制約などにより、そのような仮定が成立しない場合も少なくない。さきがけの研究期間中に、制約下における不可分財の公平配分について数多くの成果を発表した。特に、従業員へのシフトスケジューリング、研究室へのオフィスの割当などの応用例においては、できるだけ連結な割当を組むことが望ましい。[Igarashi-Zwicker, Mathematical Programming Series B 2023]では、連結制約下の連続量の資源分配を考え、 n 人エージェントに対して、無羨望な配分を保証する制約構造の特徴づけを与えた。さらに、[Igarashi, AAAI 2023]では、パス上の連結制約下の公平分割問題に対して、エージェントが単調な効用関数を持っていれば、近似的な公平性の概念である EF1 を満たす配分方法が常に存在することを示した。

また、時間的な制約下の公平配分、すなわち、セミナールームや体育館、手術室など、さまざまな施設の利用時間をいかに適切に配分するかという研究も行なっている。例えば、セミナーを行うための会議室を研究室に割り当てる際に、同じ時間帯に複数の会議室を 1 つの研究室に割り当てても資源の無駄である。国際会議録論文[Igarashi-Meunier, WINE 2021]では、このような時間制約下における公平分割問題を提案している。通常モデルでの公平配分の存在は、Sperner の補題/Brower の不動点定理を介して証明されることが定石である。しかし、効用関数の単調性が必ずしも成立しない場合や、複雑な制約構造がある場合には標準的な証明手法は適用できない。より一般の Borsuk-Ulam 型の不動点定理を用い、エージェント数が素数冪であれば、妬みのない配分方法が存在することを示している。この結果は、組合せ的位相幾何学を土台にした公平資源配分の解析に新たな知見を与えるものである。

研究テーマ D「オンライン下での公平配分」

シンガポールでは、国民の大多数が公的宿舎に居住しており、各エスニックグループにできるだけ公平な公的宿舎の割り当てを行う必要がある。しかしながら、このような応用例では、割当の対象が逐次的に到着するため、各エージェントの効用関数はあらかじめわからないことが多い。そのような状況において、国際会議論文[Hosseini-Huang-Igarashi-Shah, AAAI2023]では、各グループの効用をグループのメンバーとグループに割り当てられたアイテム集合のマッチングサイズとする公平配分モデルを考え、公平性を達成する効率的なアルゴリズムを設計できるかを検証した。具体的には、各グループが比例保証の少なくとも 0.593 倍の効用をもらいつつ、資源の無駄を限りなく少なくする (non-wastefulness) オンラインマッチングメカニズムを提案した。

3. 今後の展開

家事分担アプリ開発に携わった経験から、公平性や安定性などの概念の数理化は、一般の人々

にはあまり馴染みがなく、しばしばそのような性質を達成するアルゴリズムの存在自体に驚かれることも多いことを感じた。そこで、今後の展開としては、アウトリーチ活動を積極的に行い、身近な不公平感を解消していくといった小さな成功例を積み重ねていき、より大きな社会問題解決に取り組みたいと考えている。具体的には、家事分担、査読割り当て、業務割り当てなどのタスクの分担に着目し、一般向けのソフトウェア開発を行う。応用上、アルゴリズムの仕組み・性質を説明できるかどうかは非常に重要となる。そこで、現場のエキスパートと協力し、適切にアルゴリズムを設計し、ユーザーに納得してもらえるようにできるだけわかりやすい説明を考える。

4. 自己評価

さがりけでの研究により、社会的にも学術的にも十分なインパクトを与えられたと思う。特に、多くの人にとって身近な家事分担という問題に、公平な資源配分理論を応用した効果は大きかったと感じている。家事分担アプリ開発を通して、自民党戦略研究会での講演、新聞テレビなどの各種メディア出演をし、一般向けの普及活動を積極的に行うことができた。さらに、学術的な成果としては、不可分財の公平配分理論、並びに、それを実現するアルゴリズムの研究において、CORE 国際会議ランキング A*の国際会議(AAAI, AAMAS, IJCAI)を中心に 17 篇以上の論文を発表している他、国際会議 IJCAI-2022 におけるチュートリアル講演なども行なっている。これまでの公平性の数理に関する活動が評価され、MIT テクノロジーレビューが主催する世界的アワードの日本版「Innovators Under 35 Japan 2021」を受賞した。

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: 19件

1. Ayumi Igarashi, How to cut a discrete cake fairly, Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), AAAI Press, 2023.
公平分割理論の殆どの研究では、複数の財が組み合わせ可能か否かは考慮せず、あらゆる財の組合せが可能であるという強い仮定がある。一方、現実には時間的・物理的な制約などにより、そのような仮定が成立しない場合も少なくない。特に、従業員へのシフトスケジューリング、研究室へのオフィスの割当などの応用例においては、できるだけ連結な割当を組むことが望ましい。このような制約をパスの連結制約として捉えて、制約を満たしつつ近似的な公平性である EF1 を達成できるかどうかを検証した。エージェント数が 4 人までであれば、近似的な公平性の概念である EF1 を満たす配分方法が存在することが知られていたが、一般のエージェント数では未解決問題であった。本研究では、任意のエージェント数で、各エージェントが単調な効用関数を持つのであれば、連結な EF1 配分が存在することを示した。
2. Hiromichi Goko, Ayumi Igarashi, Yasushi Kawase, Kazuhisa Makino, Hanna Sumita, Akihisa Tamura, Yu Yokoi, Makoto Yokoo, Fair and Truthful Allocation with Limited Subsidy, Games and Economic Behavior, volume 144, pages 49-70, 2024.
この論文では、望ましい補助金付きの公平配分メカニズムを考察している。例えば、従業員へ

のシフト割当において、一人に仕事が集中してしまった場合、報酬を十分に与えることによって妬みを取り除くことができる。しかし、ただ単に妬みを取り除くメカニズムでは、参加者が嘘をつく可能性がある。本論文では、各参加者が効用関数としてマトロイドのランク関数を持つ場合、無羨望性・耐戦性・パレート最適を満たし、さらに補助金額が高々最大の限界効用度分で抑えられるようなメカニズムを設計した。

3. Hadi Hosseini, Zhiyi Huang, Ayumi Igarashi, N. Shah, Class fairness in online matching, Proceedings of the 37th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), AAAI Press, 2023.

割当を逐次的に行う場合の公平なオンラインアルゴリズムの研究を行った。例えば、フードバンク、ライドシェアリングサービス、ワクチン配分などの応用例では、割当の対象である資源が逐次的に到着するため、各エージェントの効用関数はあらかじめわからないことが多い。そのような状況において、複数のグループに対して公平な配分を数学的に定式化し、かつ公平性を達成する効率的なアルゴリズムを設計できるかを検証した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数：0 件 (特許公開前のものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	
	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	
2	発 明 者	
	発 明 の 名 称	
	出 願 人	
	出 願 日	
	出 願 番 号	
	概 要	

(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)

Innovators Under 35 Japan 2021 MIT Technology Review

船井研究奨励賞