

論文審査報告書

氏名	まつざき じん 松崎 仁平
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博総第4号
学位授与日	令和7年3月22日
論文題目	社会システムに対する数理計画に基づくシミュレーション技法に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 教授 榊原 一紀 教授 奥原 浩之 教授 中村 正樹 准教授 小島 千昭 室蘭工業大学 教授 渡邊 真也

内容の要旨

ICT や IoT、AI 技術が発展・定着するにつれて、それらを束ねて有機的に結び付け、社会や環境との関係性も考慮する形でシステムと捉えることによって、全体としての機能を高めることがますます肝要となっている。時間や空間を超えた「人と人」、「モノとモノ」、「人とモノ」の間の繋がりが容易かつ安価になった現代においては、個別的な技術要素の探求と並び、要素を組み合わせることでシステムを構築することによる課題解決がより高付加価値を生む傾向にある。このような見方・方向性が、Industrie 4.0 に端を発する「第4次産業革命」や第5期および第6期科学技術基本計画における「Society 5.0」の実現を可能にするものであると考えられる。

Society 5.0 の実現に向けては、社会に内在する人々の意思決定プロセスのモデル化が課題となっており、その手法の一つとして社会シミュレーションが注目されている。その一方で、高度化した ICT などの技術の進展に伴い、近年蓄積されてきた膨大かつ多様なデータを活用した新たなサービスの検討も進められている。これらのシステムにおいては既存のものか新規なものに関わらず、人々の局所的な意思決定がシステムの大域的挙動を形成し、他方で大域的な挙動が個人々の意思決定に拘束を与えるという、ミクロ・マクロ・プロセスであることが知られている。そのようなシステムの理解あるいは設計に向けての一方策として、システムに内在する各個人が最適な行動を取る、またはそのシステムに最大限貢献することを前提として、人々の意思決定および相互作用のダイナミクスを記述することにより、そのシステムの性能の上界値を求め、これを運用方針やシステム設定の良し悪しを測る評価基準とすることが考えられる。

特に人が関わるサービスの改善や検討、社会現象の評価などにおいては、マルチエージェントシミュレーションを代表としたシミュレーション手法が取られるのが代表的である。しかしこうしたシミュレーションでは個々の意思決定主体(人など)がそれぞれ自身の利益を最大化するような行動をとることが前提となる場合が多く、システムの運用の観点からシステムを適切に評価できているとは言い難い。こうした背景を踏まえシステム運用の観点からシステム全体を最適化する最適化手法をシミュレーションに組み込む取り組みも見られる。本論文ではこれらのアプローチを一般的枠組みに昇華するべく、特に社会システムの最適化モデリングやシステム評価のための最適化モデルを前提としたシミュレーション手法を検討している。

一方、意思決定やシステムの運用方法の立案を最適化問題と捉えた際に、計算時間が課題となることが多い。そのような最適化問題を解くに当たってはヒューリスティック手法が用いられることが多いが、ヒューリスティック手法のみで解く場合には目的関数と制約条件で構成されるモデルが明示されない。そこで本論文では数理計画モデルに着目しこれを用いることの利点を整理する。その上でヒューリスティック手法と組み合わせる場合のモデリングや最適化手法を取り上げ、対象問題の構造理解や分解方法について議論している。

本論文は全6章で構成されている。第1章では、上記の背景や課題が整理され、本論文の位置づけを明確にしている。また **Society 5.0** やスマート社会の実現に向けて、社会システムにおける意思決定プロセスのモデル化が重要な課題であることを指摘している。特に、エネルギーや交通などの社会サービスの高度化に向けて、シミュレーション手法の活用が求められる。従来のシミュレーション手法では、個々の意思決定主体が最適な行動を取ることを前提とすることが多く、システム運用の観点から適切に評価することが難しいという課題があった。本研究では、システム全体の最適な運用を目指すために、数理計画法を活用し、さらに計算時間の課題を解決するためにヒューリスティック手法と組み合わせたハイブリッド手法を検討している。これにより、社会システムの最適化モデルを構築し、実際の社会サービスへの応用可能性を探ることを目的としている。

第2章では、社会システムのモデリング手法を整理し、数理計画法を基盤としたシミュレーション手法を提案している。数理計画法は、システムの理想的な振る舞いを求めることで、運用の評価や改善の指標を得るために用いられる。しかし、現実の社会システムに適用する際には、計算時間の増大が課題となる。そのため、本研究では数理計画法のみを使用するのではなく、ヒューリスティック手法と組み合わせたハイブリッド手法を導入し、計算量を削減しながら実用的な解を得る方法を示している。具体的には、メタヒューリスティクスを活用し、数理計画法の解探索の効率を向上させることで、社会システムの運用方針の決定に有益な情報を提供する。

第3章では、新たなシステムの設計・評価を目的として、EV タクシーを活用した電力需給調整システムを数理計画モデルとして構築し、その評価を行っている。本システムでは、EV タクシーがバッテリー交換式とすることで、電力需要のピークカットに貢献する仕組みを提案している。EV タクシーの運行スケジュールやバッテリーの充放電計画を最適化し、ピークカット効果を最大化することを目的としている。実際の電力需要データと EV タクシーの運行データを用いたシミュレーションにより、バッテリー容量の増減がピークカット効果に及ぼす影響を定量的に評価し、電力需給の効率的な調整が可能であることを示した。夏と冬の電力需要の違いに応じたシミュレーション結果を比較し、最適な運用戦略を検討することで、EV タクシーを活用したスマートグリッドの可能性を示唆している。

第4章では、既存システムの設計・評価を目的として、のごみ収集・運搬サービスの最適化をテーマ

に、メタヒューリスティクスと数理計画法を組み合わせた手法を提案している。ごみ収集・運搬サービスは、自治体にとって財政負担の大きい業務であり、運用の効率化が求められている。本研究では、ごみステーションの配置と収集・運搬ルートを同時に最適化することで、運用コストの削減を目指す。住民の利便性を考慮しながら、ごみ捨て場の数を最小限に抑えるステーション配置問題を集合被覆モデルとして定式化し、さらに収集・運搬ルートを最適化することで、効率的なごみ収集を実現する。実際の自治体データを用いたシミュレーションの結果、提案手法によって収集・運搬コストを大幅に削減できる可能性があることが確認された。また、住民の意識調査を基にしたアンケートデータを活用することで、地域ごとの適切なステーション配置を検討する枠組みを構築し、持続可能なごみ収集システムの実現に寄与することが期待される。

第5章では、大規模かつ多制約を伴うスケジューリング問題として、機械加工のスケジューリングを対象に、混合整数計画法（MIP）とヒューリスティクスを組み合わせたハイブリッド手法を提案している。機械加工プロセスでは、多数の制約のもとで最適なスケジューリングを決定する必要があり、厳密解を求めることが計算上困難である。そのため、本研究では、MIPに基づく局所探索手法を適用し、メタヒューリスティクスと組み合わせることで、探索効率を向上させる手法を検討している。提案手法では、解空間を効率的に探索しながら、スケジューリングの最適解を求めるアプローチを採用している。実験の結果、従来手法と比較して計算時間を抑えつつ高精度なスケジューリングが可能であることが示された。本手法は、機械加工の最適化にとどまらず、他の大規模なスケジューリング問題にも応用可能であり、実用性の高い最適化技術として期待される。

第6章では、全体のまとめとして、数理計画法に基づくシミュレーション技法の有効性を示し、社会システムの最適化に寄与することを明らかにした。特に、EV タクシーを活用した電力需給調整、ごみ収集サービスの効率化、大規模スケジューリング問題への適用といった具体的な事例を通じて、その実用性を検証した。シミュレーション結果を基に、数理計画モデルを活用することで社会システムの運用方針を定量的に評価し、最適化することが可能であることを示した。一方で、今後の課題として、提案手法のさらなる一般化や、実データを用いた長期的な評価、計算負荷の軽減などが挙げられる。特に、社会システムのダイナミクスを考慮した最適化手法の開発や、リアルタイムの意思決定支援への応用が求められる。本研究の成果は、スマート社会の実現に向けた意思決定支援の基盤となり、今後の発展が期待される。

審査の結果の要旨

本論文ではスマートシティなどの実現に向けて、社会システムの運用者の観点からのシミュレーション手法の検討を行った。対象システムがある設定の下で最大限得られる利益や振る舞いを示すことでそのシステム設定を評価し、システム運用の方針決定に寄与することを目的とした。数理計画モデルに基づくシミュレーション手法を提案し、複数の社会システムを対象として検討を行った。とくに EV タクシーを活用した電力需給調整、ごみ収集サービスの効率化、機械加工スケジューリングの最適化を対象とし、数理計画法とメタヒューリスティクスを組み合わせたハイブリッド手法を提案した。シミュレーションの結果、電力のピークカットや運用コストの削減が可能であることが確認され、提案手法の有効性が実証された。以下に各章ごとの概要を記す。

第 1 章では、上記の背景や課題が整理され、本論文の位置づけを明確にしている。

第 2 章では、本論文が目指す最適化手法に基づくシミュレーションの概要について述べた。さらに個々の意思決定主体に着目したシミュレーション手法と異なり、システム運用者の視点からシステム設計に寄与するためのシミュレーション手法であることを整理した。また大規模な社会システムに対応するためのハイブリッド手法について、一般化した議論も行っている。

第 3 章では、スマートグリッドを取り上げ、EV タクシーを活用した電力需給調整を行う新たなサービスの運用方法と実現可能性を検討した。対象サービスを数理計画モデルとしてモデル化し、システム設定にあたるバッテリーの性能などの定数を変え様々なシミュレーションを行うことで、EV タクシーの動きや得られた効果を示した。これにより提案手法がシステムの評価・設計に寄与することを示した。

第 4 章では、ごみ収集サービスの運用効率化を目指し、ヒューリスティック手法と数理計画法を組み合わせた手法を提案した。特にごみの収集に関する運用に着目し、ごみ捨て場の配置と収集ルートを最適化することで効率化を目指した。問題規模が大きくなるためヒューリスティクスを取り入れ、計算量を削減した。検証では実在する地域を対象として様々な設定でシミュレーションを行い、住民の利便性やごみ収集にかかるコストの変化を定量的に示した。以上の結果により提案手法が対象サービスの運用方針の決定において検討材料となることを示した。

第 5 章では、ヒューリスティック手法と数理計画法の融合に着目し、より複雑な問題である機械加工スケジューリング問題を対象として、これまでの提案手法の拡張について議論した。本章では数理計画モデルの構造に着目し、変数同士が相互に影響するような複雑な問題に対しても本論文が提案するシミュレーション手法が有効であることを示すため、数理計画モデルに基づいてヒューリスティクスを取り入れたハイブリッド手法を提案した。検証によって本手法が短時間で良好な解が得られることを示した。

第 6 章では、全体をまとめるとともに、研究の今後の課題が示されている。

本論文に関する発表は、掲載決定の査読付き学術論文が 7 件、うち 4 件が申請者が筆頭著者である。また申請者を筆頭著者とする 2 件の査読付き国際会議発表がある。

令和 7 年 1 月 30 日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定し、博士（工学）の学位論文として合格であると認められた。