

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04904

研究課題名（和文）理論的根拠にもとづくマルコフ決定過程の近似最適化アルゴリズム

研究課題名（英文）Approximate Optimization Algorithms with Theoretical Rationales in Markov Decision Processes

研究代表者

中出 康一（Nakade, Koichi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50207825

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：生産システムをはじめとする様々な問題に適切に対処することは困難な場合が多く、役に立つデータを大量に取り入れることは時間・費用の面で限界がある。いくつかの問題に対し定性的あるいは定量的特徴を考慮して最適に近い政策を求めるアルゴリズムを開発した。具体的には、待ち行列における窓口への最適割当て、新旧の商品が存在するコンビニにおける発注政策、発注者と生産者が個々の利益を最大にするように適切な発注量と生産量を求める問題、洋上風力発電における保全計画、グリーンサプライチェーンにおける最適化モデルなどを取り上げた。また、最適政策が持つ理論的性質についても議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、サプライチェーンをはじめとする様々な生産、物流、販売等のシステムをマルコフ決定過程で定式化し、それぞれのシステムがもつ特性に適切な（近似）最適化アルゴリズムを適用して、ある程度大きな問題に対する優れた決定政策を求め、また、そのシステムの近似最適政策が持つ性質を導くことができた。この性質を知ることにより、大規模で数値的に計算が困難な問題においてもどのような方針で運用すれば良いかを得るための知見を売ることができる。

研究成果の概要（英文）：The appropriate algorithm for various problems including the production systems to optimize the system is hard to apply. In addition, it is difficult to collect many real data to evaluate policies appropriately and optimize the system. We developed the near-optimal policy for several problems considering their qualitative and quantitative properties. The optimal allocation of customers to servers in the queueing systems, the optimal order policies in stores with perishable goods, the optimal orders and production policies in a supply chain, optimal preventive maintenance policies in offshore wind turbines with seasonality, and optimal model in a green supply chain are discussed.

研究分野：経営工学，オペレーションズリサーチ

キーワード：マルコフ決定過程 最適化 数値解析 アルゴリズム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

計算機やネットワークの急速な発展により、人工知能の分野でも第3のブームとしてビッグデータと、それらを活用した深層学習等によるシステムへの応用が急速に進んでいる。この分野の一つに強化学習の分野が存在する。

### 2. 研究の目的

研究では、マルコフ決定過程の理論を基礎とした、より汎用性の高い近似アルゴリズムの開発を目指す。推移確率や期待値が既知である大規模問題について、問題がもつ理論的な性質をアルゴリズムに取り入れる。いくつかの最適化問題では、最適政策がもつ単調性やしきい値型政策といった理論的性質、最適政策下の総期待利得や平均利得を表す最適値関数がもつ性質に関する研究はいくつかなされているが、未解決な問題も多い。そのような問題や新たな問題に対し、最適政策がもつ性質を理論的、又数値的に導き出す。これらの性質を最適または近似政策を求めるアルゴリズムに組み込むことで、より早く近似最適政策を求めることができる。問題の規模により推移確率等の計算機での記憶・計算が難しい場合は、強化学習に見られるシミュレーションを用いた値更新法を適切に加えることでより高速なアルゴリズムを開発する。

### 3. 研究の方法

最適政策を持つ性質については、値関数の持つ凸性、劣モジュラー性等を用いてしきい値型政策の最適性等の証明がいくつかの問題についてなされている。生産在庫物流販売システム、信頼性のモデルに対する様々な問題について、これらの手法をもとにしきい値型政策の最適性等の証明を試みる。さらに、これらの性質を活用して、簡単に最適政策を求めることができる最適化アルゴリズムを示す。また、証明はできないもののこれと似た性質が得られると期待される問題については、近似アルゴリズムの手法にそれらの性質を組み込みながら、列生成法等を適用することにより最適政策に近い動的近似政策を求める方法も考察する。大規模な問題については、はじめは対象とする問題を生産システムに限定してはじめる。その結果を見ながらより範囲を広げていく。

### 4. 研究成果

(1) 待ち行列における客の窓口へのサービス割当て問題では、待ち行列の長さや先頭の待ち行列から窓口までの歩行時間を考慮しながら、窓口の稼働数と待ち時間に関する費用を最小にするように適切に待っている客を割り当てる必要がある。この問題では、現在の期と次の期の2期の総期待値を最小にする決定をとることが、最適に近いことがわかった。

(2) コンビニ等において複数回納入・廃棄が行われているシステムにおいて、最適な発注政策を求める問題をマルコフ決定過程により定式化し、その最適政策あるいは近似最適政策がもつ性質を数値計算をして考察した。

商品棚には少し前に納入されたものと新しく納入されたものが並んでおり、古いものから順に廃棄される。売り上げ、廃棄や在庫費用を考慮して発注をおこなう。数値実験から、仮に連続する時間間隔での需要が同一だとしても、納入される製品の数を変えた方が、利益をより高くすることがわかった。この導出について、線形計画法を用いた近似政策の導出方法を用いている。

(3) 生産が不安定である2段階生産システムにおいて、発注者は生産が不安定であることを考慮して自己の利益を最大にするように発注し、生産者はそれを見越して生産する問題を考え、発注者の最適発注政策をマルコフ決定過程により定式化している。また、需要情報の情報量が最適化に及ぼす影響についても議論した。

(4) マルコフ決定過程の応用として、洋上風力発電所における最適な保全計画政策を求めた。洋上発電では、修理・部品交換のために施設に向かおうとしても、天候等の理由により修理に向かえないことがあり、その確率は季節によって異なる。また、季節により停電による損失費用も季節により異なる。本研究では、このことを考慮して20年間における最適な保全政策を求めた。保全には、維持(何もしない)、事前修理、事前大規模修理、事後修理、事後交換がある。修理を考慮した経過年齢を状態としてマルコフ決定過程として定式化し、各期における最適な保全政策を求めた。さらに、周期的に行う保全政策との比較をおこなった。

(5) 生産者と販売者が存在する2段サプライチェーンにおいて、生産者の最適生産政策と販売者の最適発注政策を求めた。生産者は、販売者の発注を受けて、作りすぎ、不良品発生、輸送、環境負荷費用と生産利益を考慮して最適な生産量を作る。販売者は、生産者がこの生産政策をとることを知った上で、在庫量や需要分布をもとに最適な発注政策を求める。販売者の問題をマルコフ決定過程として定式化し、最適な発注政策を数値計算により求めた。

(6) マルコフ決定過程や強化学習に関する応用と近似最適化についておこなった。コンビニに

おける発注の利益最大化問題では、発注を1日2回と3回の場合に分け、それぞれの場合について在庫量、発注残などシステムの状態に応じた最適な発注量を求める問題について、マルコフ決定過程により定式化し、各状態に対する最適な発注量、利益等の比較をおこなった。また SDGs の観点から、CO2 排出量等の要素を考慮したコスト構造により発注の回数による最適政策の比較をおこなった。CO2 の排出量に対するコストが少ない場合は、3回の発注のほうがきめ細かく対応できるため、利益をより多くもたすが、このコストが多くなると1日2回までの発注で、ある程度まとめて発注する方が望ましいことがわかった。なお、以前示された線形計画法を用いた近似解法について適用を試みたが近似解が得られなかった。

(7) 生産・販売からなるサプライチェーンの各工程の発注・生産にかんする最適化問題について強化学習による近似最適化を試みた。近年見られるオンライン需要と、店舗販売の両方を考慮し、それぞれの発注量と、生産工程における1日の生産数について、状態を考慮した最適に近い政策について議論した。コストとして、平均費用だけでなく、各期費用と平均費用のばらつきも評価規範に取り入れ、この表記規範のもとで最適に近い政策を得る方法を試みた。最適政策と比べ、強化学習モデルの方が販売者からの発注量に変化が見られ、最適政策には近くなるものの、数パーセント程度の差が見られた。

(8) マルコフ決定過程の最適政策が持つ性質を理論的に示す方法についていくつかとりあげた。具体的には、在庫政策の閾値政策の最適性、待ち行列の到着・サービス制御に関する最適政策が持つ性質、並列待ち行列の最適割当て、劣化部品の予防取り替え、最適発注政策とLナチュラル凸性等から求められる最適発注政策の上下限に関する性質等を取り上げている。これらの結果から、今後の研究の方向性について検討した。

(9) グリーンサプライチェーンにおける小売業者と製造業者の個別最適化モデルをとりあげ、その中で小売業者は、生産業者からの卸売価格が与えられた時にマルコフ決定過程により最適発注と小売価格を定め、生産業者は炭素税コストを抑えるように投資を行いながら最適な生産量と卸売価格を定める問題を取り上げている。小売業者が発注する政策について数値例を通して議論した。さらに、顧客のリクエストに応じてタクシーを回送する経路とどのリクエストに対応するかを決定する問題をマルコフ決定過程をもちいて検討し、顧客のリクエストが次期まで許される場合、到着率の大小によって、リクエストの一部を次期に回すかどうか異なることを示している。このようにマルコフ決定過程の理論的性質を調べ、又適用例を通じた数値実験から最適政策がもつ性質についても個々のもでるについて考察することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rubayet Karim, Koichi Nakade	4. 巻 8
2. 論文標題 Modeling a one retailer-one manufacturer supply chain system considering environmental sustainability and disruption	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of System Science: Operations and Logistics	6. 最初と最後の頁 297-320
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/23302674.2020.1756006	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 該当する

1. 著者名 NAKADE Koichi, TERASHIMA Ryo	4. 巻 14
2. 論文標題 An approximate optimal ordering policy with multiple deliveries and disposals for short-life time products	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0067	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 -

1. 著者名 KARIM Rubayet, NAKADE Koichi	4. 巻 14
2. 論文標題 A Markovian production-inventory system with consideration of random quality disruption	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2020jamdsm0071	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 -

1. 著者名 Nakade Koichi, Ito Ryuta	4. 巻 15
2. 論文標題 Analysis of a two-critical-number production policy in an M/G-type production system with waiting time information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Management Science and Engineering Management	6. 最初と最後の頁 226-236
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/17509653.2019.1710300	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 -

1. 著者名 Nakade Koichi, Nishimura Shunta	4. 巻 37
2. 論文標題 Service Rate and Admission Control in an M/G/1 Queue with State-Dependent Arrival Rates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Asia-Pacific Journal of Operational Research	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217595920500335	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 -

1. 著者名 Rubayet Karim, Koichi Nakade	4. 巻 39
2. 論文標題 Stochastic analysis of an imperfect production inventory system with consideration of random machine breakdown, rework, inspection, and environmental emissions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Int. J. of Industrial and Systems Engineering	6. 最初と最後の頁 72-122
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koichi Nakade, Ryuta Ito	4. 巻 15
2. 論文標題 Analysis of a two-critical-number production policy in an M/G-type production system with waiting time information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Management Science and Engineering Management	6. 最初と最後の頁 226-236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17509653.2019.1710300	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 -

1. 著者名 Nakade Koichi, Karim Rubayet	4. 巻 56
2. 論文標題 Analysis of a discrete-time Markov process with a bounded continuous state space by the Fredholm integral equation of the second kind	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RAIRO - Operations Research	6. 最初と最後の頁 2881-2894
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/ro/2022099	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 -

1. 著者名 Karim Rubayet、 Nakade Koichi	4. 巻 6
2. 論文標題 A Literature Review on the Sustainable EPQ Model, Focusing on Carbon Emissions and Product Recycling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Logistics	6. 最初と最後の頁 55
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/logistics6030055	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 該当する

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Kyoka Yamada, Koichi Nakade
2. 発表標題 PREVENTIVE MAINTENANCE OF OFFSHORE WIND TURBINES WITH SEASONALITY,
3. 学会等名 International Symposium on Scheduling 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Koichi Nakade, Tsubasa Seino,
2. 発表標題 Effect of Informed Demand Lead Time Under Imperfect Advance Demand Information
3. 学会等名 APMS 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合尾友希, 中出康一
2. 発表標題 マルチチャネルサプライチェーンにおけるリスク考慮型強化学習アルゴリズム
3. 学会等名 日本経営工学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清野翼, 中出康一
2. 発表標題 短寿命商品の納品体制における発注政策
3. 学会等名 日本OR学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田響佳, 中出康一
2. 発表標題 季節性を考慮した洋上風力発電設備の予防保全
3. 学会等名 2020年度日本経営工学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清野翼, 中出康一
2. 発表標題 需要情報の情報量による最適発注返品政策の比較
3. 学会等名 日本経営工学中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Koichi Nakade, Ryo Terashima
2. 発表標題 AN APPROXIMATE OPTIMAL ORDERING POLICY FOR PRODUCTS WITH MULTIPLE DELIVERIES AND DISPOSALS
3. 学会等名 International symposium of scheduling 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rubayet Karim, Koichi Nakade
2. 発表標題 OPTIMIZATION OF A PRODUCTION-INVENTORY SYSTEM WITH CONSIDERATION OF QUALITY FAILURE AND REWORK
3. 学会等名 International symposium of scheduling 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中出康一
2. 発表標題 マルコフ決定過程における最適政策の理論的導出
3. 学会等名 第34回RAMPシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 櫻井 航, 中出康一
2. 発表標題 グリーンサプライチェーンにおける小売業者と製造業者の個別最適化モデル
3. 学会等名 日本OR学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------