

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01271

研究課題名(和文) 過不足のない効率的な海上輸送実現のための最適化・シミュレーションシステムの構築

研究課題名(英文) Development of optimization-simulation system for the construction of efficient maritime logistics

研究代表者

小林 和博 (Kobayashi, Kazuhiro)

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00450677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：消費燃料を最小化するための航路計画を作成する数理最適化モデルを開発し、その解を導出するための計算手法を開発した。その際に、燃料消費の特性が異なる様々な船種に対応するために、非線形な燃料消費量モデルを取り入れることを可能にした。さらに、この航路計画作成手法を、船隊全体の効率的な運用を実現する船舶スケジューリングモデルと融合する手法を開発した。これにより、船隊内の各船舶の効率的な運用と、個別の航海における環境負荷の低減を同時に行うことが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海上での物資輸送における重要な意思決定として、船舶スケジューリングと航路計画が挙げられる。これらの問題は、海上で物資を輸送する複数の船舶を効率的に運用するためのものである。このスケジューリング・計画として良いものができれば、船舶運航による環境負荷を低減できると同時に、船隊として輸送能力を高く保つことができる。本研究では、数理最適化モデルを用いてこのための方法を開発した。

研究成果の概要(英文)：A mathematical optimization model for ship routing to minimize fuel consumption was developed, and a computational algorithms to derive its solution was developed. In doing so, we developed a framework incorporate a nonlinear fuel consumption model to accommodate various ship types with different fuel consumption characteristics. Furthermore, we have developed a method to integrate this ship routing method with a ship scheduling model to realize efficient operation of the entire fleet. This makes it possible to operate each vessel in the fleet efficiently and reduce the environmental impact of individual voyages at the same time.

研究分野：数理最適化

キーワード：数理最適化 ロジスティクス 船舶海洋工学 高性能計算

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

温室効果ガスの排出量を低減することは、各産業で取り組むべき問題と考えられている。ところが、海運においては、他の産業に比べて排出規制の導入が遅れている。最近になり、海運においても排出規制が実施されるようになった。これらの規制の中で、十分な輸送を行うためには、船舶のスケジュール・運航計画として、効率の良いものを作成する方法が必要である。このような計画を作成する方法として数理最適化モデルの利用が有効であるが、船舶の運航にあたっては、非線形な制約式を目的を表現することが求められる。そこで、数理最適化の分野で最近発展してきた、非線形の目的関数や制約式を扱うための手法を応用し、このような計画を系統的に求めるための手法を開発する研究を実施することとした。

### 2. 研究の目的

本研究では、生活の根本である物資輸送の効率化を実現する社会基盤システムとして、船舶による海上輸送システムの課題を解決することを目的とする。特に、過不足のない輸送能力の確保と運用に関する数理モデルの構築と、それらの高速計算手法の開発と検証に重点をおく。効率的な輸送システムの実現には、国・地域間の輸送データの活用が重要であり、また、意思決定のために使うことのできる期間（日・月・年）と影響の及ぶ期間を分類し、適切な手法を開発する必要がある。本研究では、これらに応じたデータ解析及び最適化モデルの開発を行う。将来的には、官公庁や関連企業と連携し、開発した数理最適化モデルやシミュレーションの活用により、現実の海上輸送の複雑な条件の最適化を実現するための社会実装を推進することを目的とする。

### 3. 研究の方法

(1) 海上輸送システムにおける重要な意思決定問題の一つに、船舶スケジューリングが挙げられる。船隊を効率的に運用するためのこの計画問題を、数理最適化問題として定式化するモデル化手法を開発する。特に、最適解も求めるための手法やソフトウェアが十分に発達している整数最適化モデルとしての定式化を用いる。ただし、実務規模の問題を解くには、現在の最新のソフトウェアでも計算時間の長さが課題となる。そこで、計算時間を短縮するために問題の効率を活用したアルゴリズムの開発を行う。

(2) 海上輸送システムの運用から生じる環境負荷を低減する方法の一つに、2港間の航海における燃料消費量を小さくする方法がある。この計画を作成する問題を、航路計画問題と呼ぶ。速度を低く抑えることで燃料消費量を削減する方法は、Slow steamingなどと呼ばれ、すでに海運企業で試験運行が行われているが、その運行航路を計画する工学的方法は未だ確立されていない。そこで、この問題を数理計画モデルとして定式化する方法を開発する。特に、気象・海象の変化や船の種類による燃料消費の特徴を捉えるモデルを開発することで、将来的に広範囲に実用されることを目指す。

### 4. 研究成果

(1) 船舶スケジューリング問題を、数理最適化問題として定式化する方法を開発した。特に、港の使用時間の制限や、港間の航海にかかる時間など、船舶と港の複雑な運用条件を適切に反映できるように、時間を離散化したモデルを開発した。数理最適化問題としては、0-1変数を持つ整数最適化問題を採用した。0-1整数最適化問題は、現在利用可能なソフトウェアで解くことができるが、実務規模の問題を解くには、問題をそのまま入力することでは対応できない。そこで、解の質を損ねることなく、用いる変数の数を十分に小さくする方法を用いて実用的な時間で計算を行う方法を開発した。具体的には、初期状態としてごく少数の変数を用意した状態で計算を開始し、反復的に最適解を求めるのに必要な変数を追加していき、必要な変数が追加し終わったところで反復計算を終了する方法を採用した。これにより、解の質を損なうことなく、問題で扱う解の数を数百倍小さくすることができた。本アプローチは、国内の複数の企業に注目され、電機メーカーからの打診で共同研究に至り、海事産業における新分野への発展に繋がりがつつある。

(2) 航路計画問題では、気象・海象を考慮することが重要である。それは、船舶の燃料消費量は、海流・潮流・風の影響を受け、運航する日時によって最適な航行ルートは最短距離のルートとは限らないからである。船舶の航行中の燃料消費量は、船速の関数として評価されることが、様々な実験から明らかになっている。また、船舶には、運搬する貨物の種類によって、様々な種類がある。それらは、エンジンや船舶の形状がそれぞれ異なっており、それに伴って、燃料消費量を表す関数の形も異なる。具体的には、船速の2次関数  $f(v) = av^2 + bv + c$ 、3次関数  $f(v) = av^3 + bv^2 + cv + d$ 、4次関数  $f(v) = av^4 + bv^3 + cv^2 + dv + e$  など、多項式で表されることが多い。どの次数の評価式を採用するかは、運搬する貨物の種類や、実際の船舶の仕様などで評価される。本研究では、二港間の航行時の燃料消費量を最小化するための数理最適化問題を定式化し、それを効率よく解くための計算手順を開発した。ここでは、燃料消費量が船速の非線

形な多項式で表される場合には、数理最適化問題の目的関数が非線形関数となる。さらに、航行時間の制限や気象・海象による影響を取り入れるためには、制約式にも非線形関数を取り入れる必要がある。このため、数理最適化問題は、整数変数を持つ非線形最適化問題（混合整数非線形最適化問題）となる。

本研究では、燃料消費量を多項式で表した際に、その問題を二次錐制約として定式化する方法を開発した。混合整数二次錐最適化問題を解くソフトウェアはあるが、この問題は十分に速く解くことができない。そこで、より効率の良い計算アルゴリズムを開発した。

(3) 実際の船舶運航において、大きな問題となるのが、空きバース問題である。これは、船舶が港の沖まで到着していても、バースに空きがないために接岸・荷役ができないため、待機しなければならない、という問題である。これまで、バースの空きまでを考慮した船舶スケジューリングはあまり研究がなされていない。そこで、バースの空きに加えて、特に原材料の輸送で問題となる遅延滞船料を小さくする計画を得るための数理最適化モデルを定式化した。そして、この最適化モデルを解くために、時刻の離散化を理由した解法を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Kazuhiro Kobayashi, Mirai Tanaka
2. 発表標題 Accelerated column generation for a ship routing problem with speed optimization
3. 学会等名 23rd International Symposium on Mathematical Programming (ISMP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中未来, 小林和博
2. 発表標題 船速最適化を実現する船舶スケジューリングに対する高速な列生成アルゴリズム
3. 学会等名 日本応用数学会2018年度学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kawakami and M. Tanaka
2. 発表標題 Ship routing problem with berthing time clash avoidance constraints and minimizing demurrage
3. 学会等名 Proceedings of the Tenth Triennial Symposium on Transportation Analysis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mirai Tanaka and Kazuhiro Kobayashi
2. 発表標題 A Route Generation Algorithm for Finding the Shipping Route with Minimal Fuel Consumption
3. 学会等名 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuo Oyama and Kazuhiro Kobayashi
2. 発表標題 Path-counting Problem and Survivability Function - Definition, Approximation and Applications
3. 学会等名 21st Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林和博
2. 発表標題 Pythonパッケージを用いた数理最適化の実践
3. 学会等名 日本リアルオプション学会2019研究発表大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2019年度ORセミナー 第1回 『Python言語によるヒ&#12441;シ&#12441;ネスアナリティクス』2019/5, 株式会社東芝研究開発センターセミナー「整数計画を用いた船舶スケジ&#12441;ユー リンク&#12441;手法の設計」2019年7月, 東京電機大学数学講演会「数理最適化の応用事例 -ネットワーク最適化, 推薦 システム etc -」2019年12月

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
研究分担者	田中 未来  (Tanaka Mirai)  (40737053)	統計数理研究所・数理・推論研究系・助教    (62603)	