

令和元年6月25日現在

機関番号：62603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16357

研究課題名（和文）不確実性に対して頑健な船舶スケジューリングを実現するための最適化手法の研究

研究課題名（英文）A study on optimization methods for robust ship scheduling

研究代表者

田中 未来 (Tanaka, Mirai)

統計数理研究所・数理・推論研究系・助教

研究者番号：40737053

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：2 港間を航行する船舶について航路と船速を最適化することにより燃料の消費量を最小化する問題，船速を考慮した船舶スケジューリング問題，現実的な制約条件を考慮した船舶スケジューリング問題について解きやすい定式化について検討し，効率のよいアルゴリズムを構築した．最初の問題に対しては，船速と航路の最適化を交互に行なうアルゴリズムを構築した．残りの 2 つの問題に対しては列生成法に基づくアルゴリズムを構築した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

島国であるわが国にとって，海上輸送は大量輸送を行なうためには不可欠であり，効率のよい輸送の実現は重要な研究課題の 1 つといえる．本研究では，現実的な問題設定のもとで効率のよい船舶スケジュールを効率よく求める方法を開発した．これを繰り返し用いることにより不確実性に対して頑健な船舶スケジュールを求めるためのシミュレーション解析が可能となる可能性がある．

研究成果の概要（英文）：We considered modeling and algorithms for a fuel consumption minimization problem by optimizing shipping route and speed, a ship scheduling problem with shipping speed optimization, and a ship scheduling problem with realistic constraints. For the first problem, we proposed an alternating minimization algorithm. For the second and the third problems, we proposed algorithms based on the column generation method.

研究分野：数理最適化

キーワード：数理最適化 船舶スケジューリング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

島国であるわが国にとって、海上輸送は大量輸送を行なうためには不可欠であり、効率のよい輸送の実現は重要な研究課題の 1 つといえる。効率のよい輸送を実現するための研究の歴史は長く、古くは Garvin et al. (1957) による石油会社の輸送網の研究がある。特に、船舶での輸送に限っても Brown et al. (1987) は原油タンカーのスケジューリングを扱っている。近年では Christiansen et al. (2013) が 2000 年以降の船舶スケジューリングに関する多くの研究を分類・整理している。また、他の輸送方式では、トラックやトレーラーなどといった自動車による輸送を念頭に入れた研究がよくなされている。特に、配送計画問題 (VRP, vehicle routing problem, 運搬経路問題) と呼ばれる問題に関する研究は多い (久保, 2002)。船舶による輸送と自動車による輸送との間には共通点も多いが、自動車は複数の同じ仕様のものを区別する必要がない一方で、船舶はそれぞれの仕様が異なるため区別を要するという違いがある。また、船舶特有の制約等も存在する。そのため、船舶スケジューリング問題に対して配送計画問題における豊富な既存研究をそのまま用いることはできないことも多い。

### 2. 研究の目的

本研究では、不確実性に対して頑健な船舶のスケジュールを効率よく求めるためのアルゴリズムを構築することを目的とした。船舶での輸送は天候などの不確実性の影響を強く受けるため、不確実性に対して頑健なスケジューリングは重要である。そのようなスケジュールのうち効率のよいものを現実的な仮定のもとで計算するためには、解きやすいモデルと優れたアルゴリズムの構築が必要となる。本研究では、このような問題をネットワーク上の 2 次錐計画問題を用いてモデル化し、列生成法などの解法を基礎としたアルゴリズムを開発することで、実用的に十分な精度の近似解を得ることを目指した。

### 3. 研究の方法

まず、2 港間を航行する船舶について航路と船速を最適化することにより燃料の消費量を最小化する問題について検討した。船舶の移動コストは船速の非線形関数となるため、この問題はネットワーク上の非線形最適化問題として定式化できる。このような問題は既存のソフトウェアで効率よく解くことが難しいが、航路を固定すると船速の最適化は容易であり、船速を固定すると航路の最適化は比較的容易であるという特徴に着目することにより、これらを交互に繰り返すアルゴリズムを構築した。これにより現実的な計算時間で制度保証のある近似解を得ることができるようになった。

次に、船速を考慮した船舶スケジューリング問題の情報が確定的な場合についてモデル化とアルゴリズムの設計を行なった。問題のモデル化では、港での荷の積み下ろしとその時点での荷の状態を頂点とするネットワークを構築し、船速を考慮した船舶スケジューリング問題をネットワーク上の最適化問題として定式化した。この問題もネットワーク上の非線形最適化問題となる。このような問題は既存のソフトウェアで効率よく解くことが難しい。そこで、本研究ではこの問題に対する列生成法に基づくアルゴリズムについて検討した。この問題に対して素朴に列生成法を適用するとその各反復では目的関数が非線形な制約付き最短路問題を繰り返し解く必要があり、莫大な時間がかかる。そこで本研究では、非線形関数を区分離形近似して得られる下界関数を目的関数とする補助問題を各反復で解く不確実な列生成法を構築した。これにより、アルゴリズムの正当性を失うことなく各反復での計算時間を削減することに成功した。

また、船舶スケジューリングにおいては複数の港での積み降ろしを行なう可能性があることや複数の船舶が同時に同じ港に停泊できないなどといった現実的な問題設定を考慮する必要がある。これらについて検討し、最適化問題としての定式化を行なった。この問題は集合分割問題として定式化することができ、列生成法を適用することができる。しかしながら、各反復で解く子問題の規模が大規模になることから、これを効率よく解くためのラベリングアルゴリズムを提案した。

#### 4. 研究成果

2 港間を航行する船舶について航路と船速を最適化することにより燃料の消費量を最小化に関する研究の成果（航路の最適化と船速の最適化を交互に繰り返すアルゴリズム）は国際誌 *International Transactions in Operational Research* に採択された。この成果は比較的短期間の船舶の航行の際に航行コストを最小化することにつながる。

また、船速を考慮した船舶スケジューリング問題に対する不確実な列生成法に関する研究成果は日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会、国際会議 *The Fifth International Conference on Continuous Optimization* および *The 23rd International Symposium on Mathematical Programming* で発表した。現在この成果は論文としてまとめている最中であり、国際誌に投稿する予定である。この成果は船速の最適化を考慮した船舶スケジューリングを可能にするものであり、後述する現実的な制約条件を組み込むことにより有用性が高まるものと考えられる。

また、現実的な制約条件を考慮した船舶スケジューリング問題に対する列生成法およびラベリングアルゴリズムに関する研究成果は国際会議 *The Tenth Triennial Symposium on Transportation Analysis* で発表した。この成果はさらなる改善が見込まれるが、並行して実用化に向けて検討を重ねているところである。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Kosuke Kawakami and Mirai Tanaka: Ship routing problem with berthing time clash avoidance constraints and minimizing demurrage, in *Proceedings of the Tenth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, 2019 (査読あり, DOI なし, ウェブで公開予定).

Mirai Tanaka and Kazuhiro Kobayashi: A route generation algorithm for an optimal fuel routing problem between two single ports, *International Transactions in Operational Research* **26** (2019) 529–550 (査読あり, DOI: <https://doi.org/10.1111/itor.12410>).

〔学会発表〕(計 4 件)

Kosuke Kawakami and Mirai Tanaka: Ship routing problem with berthing time clash avoidance constraints and minimizing demurrage, *The Tenth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, 2019.

Kazuhiro Kobayashi and Mirai Tanaka: Accelerated column generation for a ship routing problem with speed optimization, *The 23rd International Symposium on Mathematical Programming*, 2018.

田中未来, 小林和博: 燃料最小化航路計画問題に対するルート生成アルゴリズム, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, 2016.

Kazuhiro Kobayashi and Mirai Tanaka: MISOCP formulation for the optimal fuel routing problem and the route generation algorithm, *The Fifth International Conference on Continuous Optimization*, 2016.

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名 : 田中未来

ローマ字氏名 : (TANAKA, Mirai)

所属研究機関名 : 統計数理研究所

部局名 : 数理・推論研究系

職名 : 助教

研究者番号 ( 8 桁 ) : 40737053

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、研究者個人に帰属されます。