

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04732

研究課題名（和文）自律船導入による波及効果シミュレーションモデルの開発

研究課題名（英文）Ripple effect simulation model by the appearance of autonomous vessel

研究代表者

川崎 智也（Kawasaki, Tomoya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：30705702

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：自律船開発動向の実態調査に基づき、船舶寄港シミュレーションモデルを開発した。本モデルをインド発着貨物に適用し、欧州・東アジア直航便が増加してコロンボ港のデハブ化現象が進行することが示されたが、インド-コロンボ間のフィーダー輸送に自動船を投入することによりコロンボ港のハブ機能を維持する効果が出ることが分かった。また、自動船導入により全世界的に船型はやや小型化し、運航頻度がやや増加する結果となった。さらに、モデルを全世界実ネットワークに適用し、自動船導入と港湾政策のあり方について提言した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自律船の導入は人手不足解消、事故削減等が主な背景であるが、海運市場に与える影響も大きい。そこで本研究において自律船導入による船舶ネットワーク形成の変化を考察できるシミュレーションモデルを開発した。これにより、自律船導入による輸送効率性などの波及効果に関して、従来の有人船と比較した定量的な評価が可能となるとともに、自律船導入により顕在化する波及効果を計測するために必要な配船パターンが把握可能となった。

研究成果の概要（英文）：Based on the interview surveys, a simulation model of vessel port calling pattern was developed. The model was applied to container cargo to/from India, and it was shown that the phenomenon of de-hubbing Colombo Port will progress due to the increase in direct services to/from Europe and East Asia. However, the introduction of automated vessels for feeder transport between India and Colombo has the effect of maintaining the hub function of Colombo Port. In addition, the introduction of automated vessels resulted in a slight downsizing of the overall vessel size and a slight increase in the frequency of the services. Furthermore, the model was applied to the actual global network and recommendations were made regarding the introduction of automated vessels and port policy.

研究分野：海運ネットワーク分析

キーワード：海運ネットワーク 社会システム 配船パターン 物流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、物流業界ではトラックドライバーや船員の労働者不足を背景として自動化技術の導入が進んでおり、海上輸送関係ではコンテナターミナルの自動化などが注目されている。各国・各関連企業は「部分的あるいは完全な自律制御を可能にする先進意思決定支援システム」と「船上及び船外からのワイヤレスの監視及び制御を可能にする次世代型モジュラー制御システム及び通信システム」を持つ自律船の実現を目指している。自律船は人手不足解消、事故削減等に主眼が置かれているが、海運市場に与える影響（輸送効率性、船舶サイズ選択など）も大きいと考えられるものの、それら効果をミクロ計量的に検証した研究は少なく学術的な議論は進んでいない。自律船研究には以下の重要課題が存在するものと考えている。

- 自律船が従来の有人船と異なる点（利点、欠点）は具体的に何か。
- 自律船導入により海運ネットワークにどのような波及効果が及ぶか。

特に前者については、かつて燃料費高騰から船社は減速航行を実施し、その結果として荷主のリードタイム増加と船舶大型化が顕在化したように、自律船の海運ネットワークへの投入により様々な主体への波及効果が予想されるが、それらのミクロ計量的研究が進展していない。さらに、後者が明確になっていない現状では、自律船導入の社会的便益に対する影響は未知であるといえる。これらが本研究の社会的・学術的背景である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つである。

- 自律船技術開発動向を考慮した上で、自律船導入による輸送効率性などの波及効果に関して、従来の有人船と比較した定量的な評価を実施する。
- 自律船導入により顕在化する波及効果を計測するための「船社」と「荷主」の行動を考慮したシミュレーションモデルを開発する。このモデルを実輸送ネットワークに適用し、自律船導入が我が国及び国際海運ネットワークに与える影響を評価する。

自律船と有人船舶との違いを明示的に考慮・評価するモデルを開発する点と、そのモデルにより自律船の波及効果を定量的に評価できる点に本研究の独自性がある。また、自律船導入に向けて我が国が取るべき方策・インフラ整備計画を定量的に検討できる点も本研究により可能となる。さらに本研究では、従来考慮されてこなかった一隻当たりの規模の経済向上による運賃低下、実際の物資輸送の特性などを明示的に考慮し、航路を所与とした「航海速度」「寄港頻度」「船型」の三変数関数として表現する。モデルをアジア近海航路に適用してモデルの汎用性を明らかにした上で、今後必要となるインフラ整備と制度設計の考察及び提言を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は大きく4つの項目により構成され、本研究の核となるシミュレーションモデルの開発は2つのサブモデルに分類される。以下、各項目について説明する。

#### (1) 自律船開発動向の実態調査（海外・国内先進事例、自律船に対する需要調査など）

##### ヒアリングによる自律船開発動向の実態調査

研究上の分析シナリオ、前提条件、制約条件の設定を目的として最新動向の実態調査を行う。具体的には、自律船の概念を構築したMUNINプロジェクトに関わったEU諸国の研究機関（ドイツ Fraunhofer CML、ノルウェー MARINTEK、など）を対象として自律船の船型、電動船技術の具体的な開発状況及び展望について、無人船で実証実験を行ったノルウェーの財団法人・DNV GL、ノルウェー科学技術大学、日本郵船、日本海洋科学を対象として実証実験で得られた知見や導入に向けた課題について、国内港湾管理主体を対象として自律船導入により必要になると考えられる港湾内専用施設について、ヒアリング調査を実施する。

##### 自律船を導入した場合のシミュレーションモデルの入力値推定

上記のヒアリング結果を基に、自律船導入を想定したシミュレーションの入力値を推定する。例えば、Allal et al. (2018)は自律船の導入による船内居住空間の廃止により、一日当たり357米ドルの燃料費削減が見込めることを示している。このように、自律船の導入は従来有人船とはシミュレーションモデルへの入力値が異なる。特に、居住空間の廃止から生じる一隻当たりの積載容量の増加（規模の経済の向上）、人件費の削減による運賃低下などはモデルに考慮する。これら輸送上の特性をDrewry Ship Operating Costs: Annual Review and Forecastのデータを用いて、技術進展による自律船の段階的導入（例えば、航海の一部のみを自動化した場合など）を想定して各入力値を推定する。

#### (2) 海運ネットワークシミュレーションモデルの開発

国際海運ネットワークでは、港湾管理者、船社、荷主、ターミナルオペレータなど様々な主体が複雑に相互作用している。そのため、自律船導入による波及効果を検討する際にはそれらを考

慮する必要がある。本研究課題では、海上輸送市場の主たる行動主体である「船社」と「荷主」に着目して、それらの相互作用を考慮して自律船導入による波及効果を表現するシミュレーションモデルを開発する。両者は需要（荷主）とサービスの提供（船社）という点で相互作用があり、各々が自身の関心を優先（自身の目的関数を最適化）する状況を想定する。

#### 船社サブモデル

船社の定期航路計画においては「ネットワーク」「寄港港湾」「航海速度」「寄港頻度」「船型」が自身の利潤を最大化するように決定される。本モデルは航路（ネットワーク及び寄港港湾）を所与として「航海速度」「寄港頻度」「船型」の三変数関数の最適化問題として取り扱う。本モデルのように船社の航路計画を考慮している既往研究の多くでは、本モデルで着目する三変数のうち少なくとも一つが所与であるため、自律船導入による変化が予想される「航海速度」「寄港頻度」「船型」への影響を正確に記述することができない。本研究では、自律船の航路計画への波及効果を詳細に記述可能なモデルの開発を予定している。ただし、特に寄港港湾の組み合わせ最適化では、選択肢集合が膨大であるため計算不可能となる可能性が高い。したがって、実ネットワークに適用する際には選択肢集合を主要港湾に絞って計算する。

#### 荷主サブモデル

荷主は「運賃」「リードタイム」「寄港頻度」を基に輸送費用最小化により経路選択を行うものとして扱う。これらは航路計画時に船社により決定される。頻度に関しても荷主の行動決定における重要な要因であるが、既往研究の多くでは待ち時間を構成する一要素としてのみで評価されており（頻度の逆数）、十分に考慮されているとは言えない。そこで本モデルにおいては、船舶の寄港頻度の重要性を明示的に考慮する荷主サブモデルの開発を行う。

#### (3) 自律船の導入による波及効果

自律船導入効果のシナリオ及び入力値を、開発したモデルに入力して自律船導入による波及効果を計測する。

#### 4. 研究成果

開発したモデルの妥当性を確認した上で、船舶寄港シミュレーションモデルをインド発着貨物の実ネットワークに適用した。その結果、将来的にインド発着の貨物量が増大することにより、インド港湾に欧州・東アジア直航便が増加してコロンボ港のデハブ化現象が進行することが示されたが、インド～コロンボ間のフィーダー輸送に自動船を投入することにより、コロンボ港のハブ機能を維持する効果があることが分かった。これは、自動船の単位輸送費用が比較的安価であるためである。さらに、モデルを主要港湾に絞った全世界実ネットワークに適用し、自律船導入が我が国港湾に与える影響を計測するとともに、大水深バースなどの大規模港湾の必要性、機構頻度増大によるバース数増加の必要性、などを議論した。また、貨物フローなどの量的な分析だけでなく、よりネットワークの質的評価を実施することで海上リンクやノードとしての港湾の重要性を評価するため、複雑ネットワーク理論を用いた分析を実施した。具体的には、自動船を導入したリンクについて船員削減、スペースの有効活用による輸送単価の減少、固定費用の低減、運航頻度などを考慮した重み付きリンクを提案し、自動船波及のリンク予測を行った。その結果、自動船の導入により全世界的に船型はやや小型化し、運航頻度がやや増加する結果となった。これは、自動船の運航費用が従来船よりも比較的安価であることが主な理由である。ただし、ネットワーク構造に劇的な変化はなかった。以上より、今後の自律船導入のネットワーク形成の予測と効果的な港湾インフラ計画の議論が可能となり、港湾政策のあり方を提言した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Wong, S., Yeung, J.K.W., Y., Lau, Y., Kawasaki, T.	4. 巻 15(9)
2. 論文標題 A Case Study of How Maersk Adopts Cloud-based Blockchain Integrated with Machine Learning for Sustainable Practices	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 7305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/su15097305	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 Tagawa, H., Kawasaki, T., Hanaoka, S.	4. 巻 3
2. 論文標題 Cooperative strategy at ports in different motivations: cooperation for regional welfare and for competition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Maritime Transport Research	6. 最初と最後の頁 100075
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.martra.2022.100075	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 Kawasaki, T., Tagawa, H., Kavirathna, C. A.	4. 巻 10(3)
2. 論文標題 Vessel deployment and de-hubbing in maritime network: A case study on Colombo port and its feeder market	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Marine Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 304
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/jmse10030304	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Tagawa, H., Kawasaki, T., Hanaoka, S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Shipping and Trade	6. 最初と最後の頁 掲載決定
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 該当する

1. 著者名 Tagawa, H., Kawasaki, T., Hanaoka, S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Exploring the factors influencing the cost-effective design of hub-and-spoke and point-to-point networks in maritime transport using a bi-level optimization model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Asian Journal of Shipping and Logistics	6. 最初と最後の頁 掲載決定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ajsl.2021.03.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawasaki, T., Hanaoka, S. Saito, Y., Tagawa, H.	4. 巻 2
2. 論文標題 Port Choice Problem in a Linear City: Application to Manila and Batangas Ports in the Philippines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Maritime Transport Research	6. 最初と最後の頁 100010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.martra.2021.100010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Tagawa, H., Kawasaki, T., Hanaoka, S.
2. 発表標題 Exploring the Established Conditions of De-hubbing Maritime Network
3. 学会等名 International Association of Maritime Economics (IAME) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kawasaki, T., Hanaoka, S., Saito, Y., Tagawa, H.
2. 発表標題 Multiple ports choice problem in linear city: Case study in Manila and Batangas port, Philippines
3. 学会等名 TLOG 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tagawa, H., Kawasaki, T., Hanaoka, S.
2. 発表標題 Bi-level optimization model for designing Point to Point or Hub and Spoke maritime network: Case study on East Asian ports
3. 学会等名 TLOG 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------