

# 技術導入の相互作用を考慮した海事産業への意思決定支援システムの開発

47-186824 趙 之楠

人間環境学専攻

2020年9月

指導教員 稗方 和夫 准教授

Maritime industry is trying to utilize new technology for enhancing their competitiveness to overcome today's severe economic situation. And some interact effects, or potentially, Emergence effects will emergence during the introduction of those technologies. In this study, a decision support methodology for evaluating the emergence of Emergence effect of multiple technology introduction is proposed. To evaluate the introduction effect of technology combinations correctly and accurately, maritime transportation simulation is constructed. To explore the emergence effect when multiple technologies are introduced, an evaluation method is developed, which can evaluate the interact effect from the view of profit improvement and CO<sub>2</sub> reduction during transportation period. As a case study, a decision making of introducing 28 technology combinations to maritime industry was conducted and the utility of the proposed methodology was assessed.

Key words: Emergence effect, Technology Introduction, Maritime Industry, Decision Making Support System

## 1 序論

近年の海事産業は効率化・コスト削減・競争力強化に励んでいる。一方で海事産業内では技術利活用の環境整備が進められており、技術の効果的な利活用方法が模索・検討されている。

また、ある要素が他の要素と合わさる事によって相乗効果の創発と評価に関する研究も現在、各産業に進んでいる1)。

本研究では、海事産業の意思決定者の観点から、導入する技術間の相互作用から運航利益の向上とCO<sub>2</sub>排出量の削減に対して創発的な効果が得られる技術の組み合わせを探索することで、複雑な海上輸送システムのパフォーマンスを向上するための意思決定支援システムの開発を行う。

## 2 本研究の新規性

### 2.1 既存手法における課題

既存の先行研究2)は、海事産業における単一の技術導入による効果を評価したが、複数の技術を導入する際の相互作用を考慮していない。複数の技術の組み合わせを導入による相乗効果は、シミュレーションによって評価する必要がある。また、海上物流システムにおけるCO<sub>2</sub>排出状況の評価する指標の選定も必要であると考えられる。

### 2.2 本研究の新規性

本研究の新規性としては以下の2点を挙げる。

- 運行利益の向上とCO<sub>2</sub>排出量の削減を定量的に評価することの提案。
- 複数の技術を同時に導入することで創発的な効果を探索し、海事産業へ意思決定支援手法の提案。

## 3 提案した手法

### 3.1 はじめに

提案手法として、先行研究である稗方ら2)が作成したシミュレータに基づき、海事産業における開発、または導入が検討されている技術群を参考にモデルに要素を追加、削除および変更することで海上物流シミュレータを構築する。その後、シミュレーションの出力値に対し、運行利

益の向上とCO<sub>2</sub>排出の削減の観点から、評価基準を選定し、技術の組み合わせの導入による創発効果の定量化評価手法を説明する。

### 3.2 提案手法の概要

提案手法の概要を Fig.1 に示す。

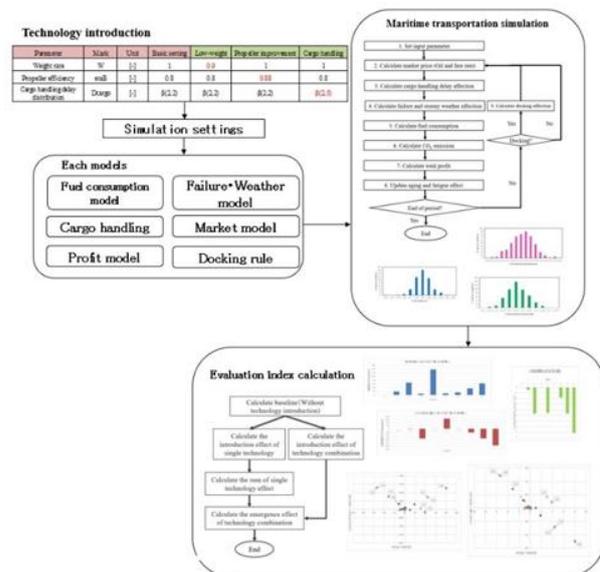


Fig.1 Overview of proposed method

貨物輸送を行う船舶の各状態に基づいてシミュレータの機能を燃費モデル、故障・気象モデル、荷役モデル、利益モデルと市場モデルの5つのモデルと入渠ルールに分類して作成する。入力としては各モデルで設定されるパラメータであり、最終的な出力は総利益、CO<sub>2</sub>排出量、CO<sub>2</sub>排出原単位である。

導入する技術あるいは技術の組み合わせの効果は作成したモデルのパラメータを変更することによって表現する。

### 3.3 評価手法の詳細

出力値の単位の基準が異なるため、出力値を最終の評価指標にするために、一定的な基準に従い、データの正規化を行う必要がある。出力値の正規化する手順を Fig.2 に示している。

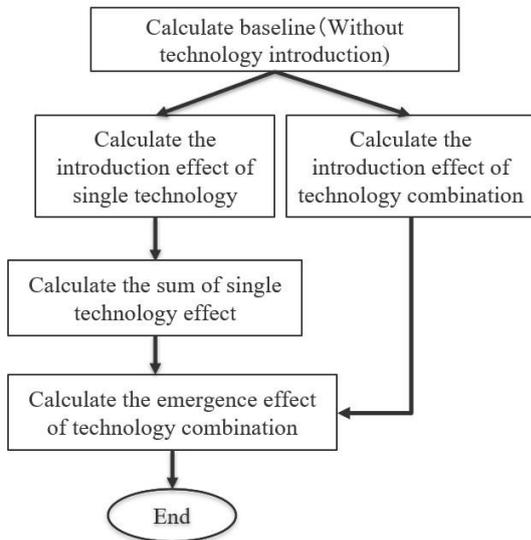


Fig.2 Flowchart of proposed evaluation method

1. 技術導入を行わない時のシミュレーション出力はベースライン、または基準値とする。
2. 単一の技術を導入する際のシミュレーション計算を行う。
3. 技術の組み合わせを同時に導入する際のシミュレーション計算を行う
4. 2で計算した結果と、1で計算された基準値の差分である「導入効果」を計算する。
5. 3で計算した結果と、1で計算した基準値の差分である「導入効果」を計算する。
6. 複数技術の組み合わせを同時に導入する際の「導入効果」と、複数の技術をそれぞれ単独的に導入する際の「導入効果」の和を計算し、その差分「創発効果」を計算する。

計算結果を可視化するために、意思決定支援ツールであるトレードスペース分析 4)に基づき、2つの評価指標に絞っており、技術導入効果を二次元的に評価できるMorphological Matrixを作成する。

### 3.4 モデルの作成

燃費モデルは、先行研究 3)のモデル化手法を参考に一般的な船舶性能の算出法に経年・汚損影響を考慮してモデル化した。

故障・気象モデルは、船体・舶用機器故障と悪天気に遭遇する確率密度関数で現れるベータ分布を用いてモデルを作成する。

荷役モデルは基準荷役時間と荷役遅延による時間の和としてモデルを定義する。

利益モデルは収入とコストの 2 の部分に分けて計算を行ってモデルを定義する。

市場モデルは先行研究 3)二項格子モデル(Binomial

Lattice Model)を用いて過去のデータから原油価格と運賃率を予測する。

入渠ルールは従来の船級検査ルールと定義する。

### 3.5 シミュレーションの手順

シミュレーションの手順を Fig.3 に示す。

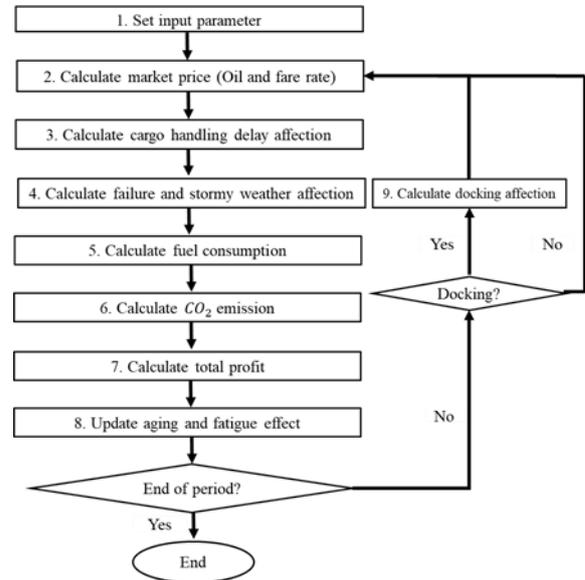


Fig.3 Flowchart of simulation

シミュレーションは各設定値の入力を行った後、運航期間が終了するまで航海ごとに以下の手順を繰り返す。

1. 初期設定：各設定値の入力を行い、シミュレーションを開始する。
2. 市場価格の算出：市場モデルより予測された原油価格と運賃率を算出する。
3. 荷役作業影響の算出：荷役モデルに基づいて、荷役装置故障と荷役作業遅延を算出した後、それに伴う費用を算出する。
4. 気象・故障影響の算出：故障・気象モデルに基づき、船体と舶用機器故障に伴う遅延時間と費用を算出する。
5. 燃費の算出：燃料消費モデルに基づき、燃料消費量を算出し、燃費の算出を行う。
6. CO<sub>2</sub>排出量とCO<sub>2</sub>排出原単位の算出：CO<sub>2</sub>排出量とCO<sub>2</sub>排出原単位の算出手法に従ってCO<sub>2</sub>排出量とCO<sub>2</sub>排出原単位を算出する。
7. 利益の算出：利益モデルに基づいて収入とコストから利益を算出し、遅延時間と航行時間の集計を行う。
8. 経年・疲労影響の更新：燃料消費モデルの経年劣化影響に基づき、船舶推進性能を更新する。
9. 入渠影響の算出：入渠有無の判断を行う。
10. シミュレーション終了の判定：船舶のライフサイクル期間を超過した場合は、シミュレーションが終了したら総利益の集計とCO<sub>2</sub>総排出量の集計を行う。

シミュレーションはモンテカルロ・シミュレーションによって、3つの評価軸に対する各技術または技術組み合わせの導入効果を計算する。

## 4 ケーススタディ

4.1 はじめに

先行事例 2)を参考に、複数の技術を選定し、各技術が意思決定者の要求を実現するために変更する箇所を整理し、各モデルにおける該当箇所のパラメータを変更する。その後、海上物流シミュレータによって全ての技術の組合せが与える“運航利益の向上”と“CO<sub>2</sub>排出の削減”への創発効果を検証し、それらの結果を比較することで相乗的な効果が現れる技術の組み合わせへの投資の意思決定について検討する。

4.2 基本設定

ケーススタディにおいて評価する技術と機能及び変更パラメータの一覧を Table.1 に示す。

Technology ID	Technology name	Parameter to be changed	Unit	Basic setting	After changing
1	Ship equipment monitoring and remote maintenance technology	Probability of engine failure	[case%]	0.085	0.040
		Probability of navigation equipment failure	[case%]	0.114	0.060
		Probability of auxiliary machine failure	[case%]	0.221	0.150
		Engine repairing time	[h case]	2.97	1.200
		Navigation equipment repairing time	[h case]	0.933	0.500
		Auxiliary machine repairing time	[h case]	2.150	1.000
2	Ship weight reduction	Number of crew	[man]	25	15
3	Weather-routing	Distribution of probability of encountering stormy weather (Spring)	[ ]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
		Distribution of probability of encountering stormy weather (Autumn)	[ ]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
4	Port management system	Standard cargo handling time	[h]	48	24
		Distribution of cargo handling operation delay time	[ ]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
		Probability of cargo handling operation delay	[case port]	0.1	0.05
		Probability of port facility failure	[case port]	0.010	0.005
		Port facility repairing time	[h case]	24	12
5	Data analysis in real ship operation	Distribution of fuel consumption increase probability	[ ]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
6	Hull performance improving technology	Wave drag auxiliary coefficient (Cwd, Cwl, Cw2)	[ ]	-1.07E-04	-9.07E-05
			[ ]	7.44E-05	6.52E-05
			[ ]	4.23E-05	3.59E-05
7	Propeller performance improving technology	Propeller ship-behind efficiency	[ ]	0.8	0.88
8	Engine performance improving technology	Fuel consumption rate coefficient (SFOC, SFOCI, SFOC2)	[ ]	191.66	162.91
			[ ]	-45.38	-38.74
			[ ]	25.51	2.69

Table.1 List of technology for the case study

また、シミュレーション評価において想定する設定として、東京ーロサンゼルス間 (8825 km) を船速 20knot で往復運航する 6000TEU 積みのコンテナ船をとし、運航期間は 20 年間とした。

4.3 結果

4.3.1 CO<sub>2</sub>排出原単位を考慮する場合の結果

シミュレーションの結果を Fig.4 に示す。

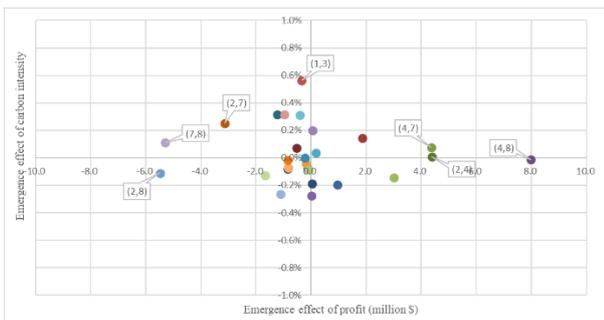


Fig.4 Result of simulation considering carbon intensity

シミュレーションの結果からCO<sub>2</sub>排出原単位における「創発効果」が非常にゼロに近いことが確認された。これは、技術組み合わせの導入によってCO<sub>2</sub>排出効率に対しては創発効果が極めて低いと考えられる。この結果から、単一技術の導入による効果と、複数の技術を同時に導入することによる効果は基本的には同じであることが確認した。しかし、その中でも他の技術組み合わせより効果が高い組み合わせが存在する

技術 ID(4, 8)の組み合わせを同時に導入した時、運航効率の向上と、燃料消費効率の向上と共に作用し、収益を増やす同時にコストを削減することができ、総利益における良い創発効果が現れた。一方、2つの技術を同時に導入してもCO<sub>2</sub>の排出原単位における「創発効果」は存在しない。

技術 ID(1, 3)の組み合わせ導入した時、運航中の遅延時間の短縮と、燃費性能の向上と共に作用し、総利益における創発効果が存在しない。一方、遅延時間の短縮による運航効率と燃料消費効率が向上したため、CO<sub>2</sub>排出効率における良い「創発効果」存在すると確認できた。

技術 ID(2, 8)の組み合わせを同時に導入した時、それぞれが持つ燃費を減少する効果が相殺してしまったため、最終的に総利益とCO<sub>2</sub>排出効率に対して悪い創発的な効果が生じた。一方、こちらの2つの技術を同時に導入してもCO<sub>2</sub>排出効率に対して向上できるとは言えないため、CO<sub>2</sub>排出原単位における「創発効果」がわずかにマイナスであると考えられる。

4.3.2 CO<sub>2</sub>排出量を考慮する場合の結果

シミュレーションの結果を Fig.5 に示す。

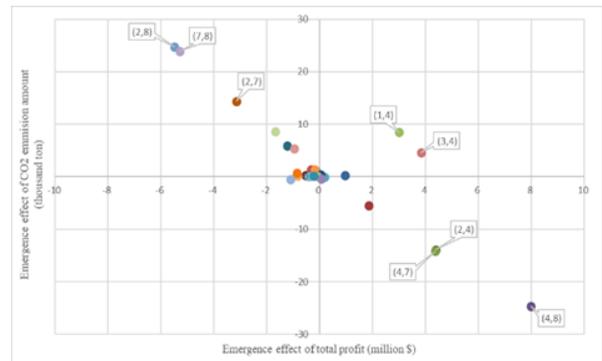


Fig.5 Result of simulation considering CO2 emission

第二象限にある技術組み合わせは導入することによって総利益と、CO<sub>2</sub>排出量両方とは良い創発効果が現れたと考えられる。該当する技術の組み合わせは技術 ID(4, 8)、技術 ID(2, 4)と技術 ID(4, 7)である。これらの技術組み合わせは、航行時間の増加と燃料消費効率の向上による良い創発効果が確認できた。

第一象限にある技術組み合わせは導入することによって総利益の方に良い創発効果が現れたが、CO<sub>2</sub>排出量の方に悪い創発効果があったと考えられる。該当する技術の組み合わせは技術 ID(1, 4)と技術 ID(3, 4)である。それらの組み合わせを導入した時、航行時間と比率の増加と、遅延時間の短縮が共に作用し、収益を増やす同時にコストを削減することができ、利益における良い創発効果が確かに現

れた。燃費性能が少し改善したが、船の航行時間増加の方が著しく、最終的にCO<sub>2</sub>排出量に関しては悪い創発効果が現れた。

第四象限にある技術組み合わせは導入することによって総利益と、CO<sub>2</sub>排出量両方とは悪い創発効果が現れたと考えられる。該当する技術の組み合わせは技術 ID(2, 8)、技術 ID(2, 7)と技術 ID(7, 8)である。2つの共通要素を持つ技術同士が同時に導入された時、それらの作用が相殺され、悪い創発効果が生じる可能性もある。

## 5 考察

### 5.1 感度分析

本ケーススタディでは、船速を 18knot、20knot、22knot と 24knot の 4つのシナリオに設定して感度分析を行った。Fig.6 感度分析の結果を示す。

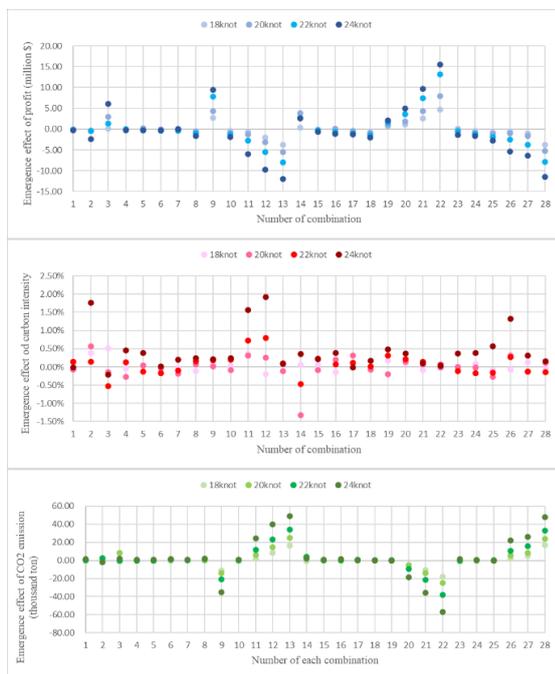


Fig.6 Sensitivity analysis for speed

総利益における「創発効果」では、技術組み合わせ(1, 4), (2, 4), (4, 7), (4, 8)は、良い創発効果が大きい。一方、技術組み合わせ(2, 6), (2, 7), (2, 8), (6, 7), (6, 8), (7, 8)は、悪い創発効果が大きい。また、技術組み合わせ(1, 4), (2, 4), (6, 7)について、技術間相互作用の効果は船速の上昇に伴ってより明らかになることが分かった。

CO<sub>2</sub>排出原単位における「創発効果」では、多くの技術組み合わせに対し、速度の変化に伴ってCO<sub>2</sub>排出原単位の変化が無規則であることが確認できた。技術 ID の組み合わせ(1, 3), (2, 6), (2, 7), (3, 4)は、船が高速で運航する場合にCO<sub>2</sub>排出原単位における悪い創発効果が現れた。

CO<sub>2</sub>排出量における「創発効果」では、技術組み合わせ(2, 4), (4, 6), (4, 7), (4, 8)は、良い創発効果が大きい。一方、技術組み合わせ(2, 6), (2, 7), (2, 8), (6, 7), (6, 8), (7, 8)は、悪い相乗効果が大きい。また、組み合わせ(2, 6), (4, 6), (6, 7)について、船が低速運航の場合は効果がほぼなく、高速運航の場合は効果が現れたというケースも存在する。技術間相互作用の効果は船速の上昇に伴ってより明らかにな

ることが分かった。

感度分析の結果、運航船速の変更を考慮した感度分析によって、実際に海上輸送活動を行う際の船速設定、または一定の船速で運航する場合に積極的な投資の価値がある技術の組み合わせについて考察することが可能であることも示した。

### 5.2 考察のまとめ

本研究では、海事産業界において開発または活用している技術について、それらの技術の組み合わせを導入することによる創発効果を考慮した導入効果を、意思決定者の目線から、運航利益の向上とCO<sub>2</sub>排出量の削減を評価指標として二元的に評価できた。

一方で、本研究で使用しなかった評価軸による分析で技術の組み合わせから大きな創発効果が現れることもあると考えられる。意思決定者の重視する評価軸によっては、該当する技術の組み合わせの導入が有意義であると考えられる。

また、実際に本手法を用いて技術導入の相互作用を探索する際、技術自身の開発困難性や、技術どうしの依存関係について考慮する必要がある。そのため実際の技術組み合わせの導入における意思決定においては、技術が本評価手法によって実現する機能と効果以外にも将来的に価値が生まれることも考慮することが必要である。

## 6 結論

本研究では運航利益向上とCO<sub>2</sub>排出量削減の観点から総利益、CO<sub>2</sub>排出原単位とCO<sub>2</sub>総排出量を評価軸として、技術導入の影響を入力パラメータ値の変更によって表現することで、技術組み合わせの導入効果を定量的に評価可能な海上輸送シミュレータを構築した。

また、海上輸送システムのパフォーマンスの向上を目的とした技術組み合わせの相互作用を評価する手法を提案し、技術の組み合わせが同時に導入される際の創発効果を分析した。

ケーススタディとしては以下のことを検証した。

- 意思決定者の観点から技術導入の効果を運行利益とCO<sub>2</sub>排出量の2つの評価軸に基づいて定量的に比較評価した。
- 運航速度を入力パラメータ変更値とした感度分析によって、実際航行中に適切な設定船速と、同時に導入する価値がある技術の組み合わせの意思決定支援を行った。

## 文献

- 1) 大洞久佳, 大野栄治, 相乗効果を考慮した複数プロジェクトの経済評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, No. 1, 2003, pp. 127-135.
- 2) 稗方和夫, 満行泰河, 上野隆治, 和田良太, Moser Bryan: 海事産業におけるIoT技術導入の意思決定支援に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 25, 2017, pp. 175-182.
- 3) 稗方和夫, 満行泰河, Moser Bryan, 大和裕幸, 齋藤智輝, 和中真之介: リアルオプションを導入した船舶のライフサイクル価値向上に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 23, 2016, pp. 231-237.
- 4) E. Crawley, B. Cameron, D. Selva: System Architecture, PEARSON, 2016.