

東京大学新領域創成科学研究科

人間環境学専攻

修士論文

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

2020年7月30日提出

指導教員 稗方 和夫 准教授 印

学生証番号 47-186824

趙 之楠

目次

目次.....	I
図目次.....	IV
表目次.....	VI
第1章 序論.....	1
1.1 背景.....	2
1.1.1 海事産業の現状.....	2
1.1.2 海事産業の技術開発.....	2
1.1.3 CO ₂ 排出削減の取り組み.....	3
1.1.4 相乗効果の創発.....	4
1.2 目的.....	6
1.3 本論文の構成.....	6
第2章 先行事例・関連研究.....	7
2.1 はじめに.....	8
2.2 海事産業における技術導入の研究事例.....	8
2.2.1 船用機器モニタリング.....	8
2.2.2 船用機器のリモートメンテナンス.....	9
2.2.3 港湾作業マネジメントシステム.....	10
2.2.4 ウェザールーティング.....	12
2.2.5 船舶の省エネ技術の開発.....	12
2.2.6 船舶運航におけるビッグデータの活用.....	15
2.3 システム設計を支援する手法.....	17
2.3.1 システムシンキング.....	17
2.3.2 トレードスペース分析.....	18
2.3.3 ポイント設計.....	19
2.3.4 Morphological Matrix.....	20

2.4 意思決定支援システム.....	21
2.4.1 意思決定支援システムとは.....	21
2.4.2 水処理における意思決定支援システムの開発.....	22
2.4.3 分散型意思決定支援システムの開発.....	23
2.4.4 船舶運用における意志決定支援システムの開発.....	24
第3章 既存の海事産業意思決定支援の研究と本研究の位置付け.....	26
3.1 はじめに.....	27
3.2 既存の海事産業における技術導入の評価手法.....	27
3.3 既存の評価手法が存在する課題.....	30
3.4 本研究の位置付け.....	31
第4章 提案した評価手法.....	32
4.1 はじめに.....	33
4.2 提案した手法の概要.....	33
4.3 海上物流シミュレータ.....	34
4.3.1 シミュレータの設定.....	35
4.3.2 シミュレータの機能.....	35
4.4 創発効果の評価手法.....	36
4.4.1 評価指標の計算.....	36
4.4.2 創発効果の探索.....	37
4.4.3 評価指標の可視化.....	45
4.5 海上物流シミュレーションの詳細.....	47
4.5.1 燃費モデルの作成.....	48
4.5.2 故障・気象モデルの作成.....	57
4.5.3 荷役モデルの作成.....	59
4.5.4 利益モデルの作成.....	60
4.5.5 市場モデルの作成.....	63
4.5.6 入渠ルール.....	65
4.5.7 シミュレーションの初期設定値.....	65
4.5.8 シミュレーションの流れ.....	66
第5章 ケーススタディ.....	69

5.1 はじめに.....	70
5.2 導入する技術群.....	70
5.3 初期設定と出力結果の確認.....	72
5.3.1 入力パラメータの設定.....	72
5.3.2 出力結果の確認.....	73
5.4 単一技術導入における結果の確認.....	75
5.5 技術の組み合わせの導入結果と分析.....	78
5.5.1 CO ₂ 排出原単位を考慮した場合.....	79
5.5.2 CO ₂ 排出量を考慮した場合.....	81
5.6 ケーススタディのまとめ.....	84
第6章 考察.....	85
6.1 はじめに.....	86
6.2 感度分析.....	86
6.3 提案手法に関する考察.....	90
6.3.1 海上物流シミュレータについて.....	90
6.3.2 提案した手法について.....	91
6.4 ケーススタディの結果に関する考察.....	91
第7章 結論.....	93
7.1 結論.....	94
7.2 今後の展望.....	94
参考文献.....	95
謝辞.....	99

図目次

図 1-1 EEDI の構成と計算式[5]	4
図 1-2 複数プロジェクトの効果の概念図 1[6]	5
図 1-3 複数プロジェクトの効果の概念図 2[6]	5
図 2-1 メンテナンスフレームワークに基づいた Condition monitoring の例[10]	9
図 2-2 リモートメンテナンスシステム概念図[12]	10
図 2-3 IoT を用いた港湾マネジメントシステムの概要図[14]	11
図 2-4 IoT を用いた倉庫管理システムの概要図[14]	11
図 2-5 ウェザールーティングの一例[17]	12
図 2-6 船の排熱回収システム[20]	13
図 2-7 PBCF の概要[20]	14
図 2-8 船首形状の改良[20]	14
図 2-9 同型・同サービスの船舶間の燃費データ比較例[21]	15
図 2-10 SIMS のシステム概要[22]	16
図 2-11 実海域性能解析の例[22]	17
図 2-12 馬力とコストを評価指標として作成したエンジンのトレードスペース [26]	18
図 2-13 火星探査機の Morphological Matrix の例[26]	21
図 2-14 廃水処理技術選択における支援システムの概要図[28]	22
図 2-15 分散型意思決定支援システムの概要図[29]	23
図 2-16 船舶運用における意志決定支援システムの概要[53]	25
図 3-1 評価手法の概要[9]	28
図 3-2 IoT 技術導入による QCD の評価結果[9]	29
図 3-3 IoT 技術導入による QCD の評価結果（感度分析） [9]	30
図 4-1 提案した手法の概要	34
図 4-2 パラメータ変更による技術導入の概要	36
図 4-3 総利益とCO2排出量における創発効果を計算する概要図	38
図 4-4 総利益とCO2排出量における「導入効果」計算のイメージ	39

図 4-5	総利益とCO2排出量における「創発効果」計算のイメージ	40
図 4-6	CO2排出原単位による創発効果を計算する概要図	42
図 4-7	CO2排出原単位における「導入効果」計算のイメージ	43
図 4-8	CO2排出原単位における「創発効果」計算のイメージ	44
図 4-9	縦軸がCO2排出原単位における「創発効果」のイメージ	46
図 4-10	縦軸がCO2排出量における「創発効果」のイメージ	47
図 4-11	燃料消費量算出の手順	48
図 4-12	主機の燃料消費率と最適出力値の例	52
図 4-13	燃料消費率改善の一例	53
図 4-14	実海域における船速低下概念図[42]	54
図 4-15	船体表面に付着した海洋生物[44]	55
図 4-16	気象影響による船速低下率から燃料消費量増加率の算出[35]	56
図 4-17	不信頼度(故障確率)の時間推移	58
図 4-18	定義する風力階級発現確率の例[58]	59
図 4-19	船舶運航の利益モデル	61
図 4-20	二項格子モデルの予測方法概略図	63
図 4-21	原油価格の予測例(5 シナリオ)	64
図 4-22	運賃率の予測例(5 シナリオ)	65
図 4-23	船舶運航シミュレーションの手順	67
図 5-1	初期設定における総利益の出力値分布	74
図 5-2	初期設定におけるCO2排出量の出力値分布	74
図 5-3	初期設定におけるCO2排出原単位の出力値分布	75
図 5-4	総利益における「導入効果」のシミュレーション結果	76
図 5-5	CO2排出量における「導入効果」のシミュレーション結果	76
図 5-6	CO2排出原単位における「導入効果」のシミュレーション結果	77
図 5-7	CO2排出原単位と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果	79
図 5-8	CO2排出量と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果	82
図 6-1	総利益における「創発効果」(船速感度分析)	87
図 6-2	CO2排出原単位における「創発効果」(船速感度分析)	88
図 6-3	CO2排出量における「創発効果」(船速感度分析)	88

表目次

表 2-1	2種類のハイブリッドカーに対するポイント設計の比較[24]	20
表 4-1	経年劣化率[43]	55
表 4-2	海上輸送シミュレーションの入力パラメータ一覧	66
表 5-1	導入される技術と設定値の変更箇所	71
表 5-2	パラメータ変更による単一技術を導入する例	72
表 5-3	パラメータ変更による複数の技術を同時に導入する例	72
表 5-4	シミュレーションの初期設定値（技術導入なし）	73
表 6-1	4つの船速のシナリオ	86
表 6-2	技術組み合わせ ID に対応する技術の組み合わせ	87

第1章 序論

1.1 背景.....	2
1.1.1 海事産業の現状.....	2
1.1.2 海事産業の技術開発.....	2
1.1.3 CO ₂ 排出削減の取り組み.....	3
1.1.4 相乗効果の創発.....	4
1.2 目的.....	6
1.3 本論文の構成.....	6

1.1 背景

1.1.1 海事産業の現状

近年の海事産業は未曾有の大不況に直面している。2007 年頃は中国の経済成長を背景に荷動きや運賃が上昇し、海事産業も好況の波に乗っていた。これに伴って海運各社は船の大型化や隻数の拡大を進めていたが、2008 年のリーマンショック以降、世界経済が落ち込み荷動きも低迷している。さらに、発注済みの船の竣工が相次ぐことで船が供給過剰状態に陥り、低運賃による赤字運航が続いている。2017 年現在も特にコンテナ船市場で不況が継続しており、大きな変革の時代を迎えている。

海運各社が競争力強化とコスト削減に励む中、日本国内でも 2016 年 10 月に海運大手 3 社のコンテナ船事業が統合するなど、規模拡大による効率化と競争力の強化を図っている。しかしながら統合後のシェアは世界 6 位(約 7%)と競争力はまだ不十分であり、不況を乗り越えるためにも効率化・コスト削減・競争力強化の追求が依然必要な状況にある。

1.1.2 海事産業の技術開発

海事産業界全体における情報・通信技術の発展が注目されている。多くのメディアで「2016 年は IoT 元年」と称されるように、様々な分野で IoT (Internet of Things) 技術の時代を迎えている。IoT とは、様々なモノがインターネットに接続され、相互に情報交換しながら制御を行うことであり、自動車の自動運転やスマートグリッド、医療分野などで利活用が盛んになっている。また IoT 化によって得られる大量のデータ(ビッグデータ)に関してもその活用方法が各分野で検討されている。

IoT 化の流れは海事産業界も例外ではない。従来、船陸間通信は、衛星通信量が従量課金制で高く通信速度も低速であったため、通信は必要最低限に限られており船舶は陸から隔絶された世界であった[1]。しかし 2010 年以降の衛星通信の低料金化・高速化により、海上ブロードバンド環境が進展しつつあり、運航中に得られた船用機器などの大量のデータを陸上へ送信・分析し、船舶へフィードバックすることができるようになった[1]。海上輸送システムの効率化・コスト削減・競争力強化が求められる現状において、国内の海事産業全体でも新たな技術利活用の環境整備が進められており、IoT 技術の効果的な利活用方法が模索・検討されている。

1.1.3 CO₂排出削減の取り組み

日本は国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)におけるCO₂排出削減に向けた国際的な枠組みづくりを主導してきた。2011年7月に開催された第62回海洋環境保護委員会(MEPC62)で、京都議定書と同様、先進国と新興国の間で「義務の差別化」が課題となっていたが、最終的に海洋汚染防止条約の一部改正案が採択され、船舶のCO₂排出性能に関する国際ルールが誕生した[2]。各国共通のCO₂排出抑制スキームを適用するのは、国際海運分野が初めての例となる。また、2018年4月にロンドンにおいて開催された第72回海洋環境保護委員会において、海上輸送におけるCO₂排出量を、2030年までに2008年比40%以上削減し、2050年までに70%を削減し、21世紀の出来るだけ早い段階で、その排出を0にすることで合意した[3]。これにより、CO₂の排出が規制されることとなる。

新たに導入されるルールの中の1つは、2013年1月以降に建造契約を結ぶ新造船に対して、CO₂排出指標の計算を義務づけることである。これは「EEDI:エネルギー効率設計指標」と呼ばれ、「一定条件下で、1トンの貨物を1マイル運ぶのに排出すると見積もられるCO₂グラム数」を意味する[2]。自動車というカタログ燃費に相当するが、船舶の場合は受注生産のためすべて仕様が異なり、個船ごとにEEDIの計算が必要となる。対象となるのは、総トン数400トン以上の国際航海を行う船舶である。EEDIはガイドラインに従って計算され、その計算方法の概要を図1-1[4]に示す。

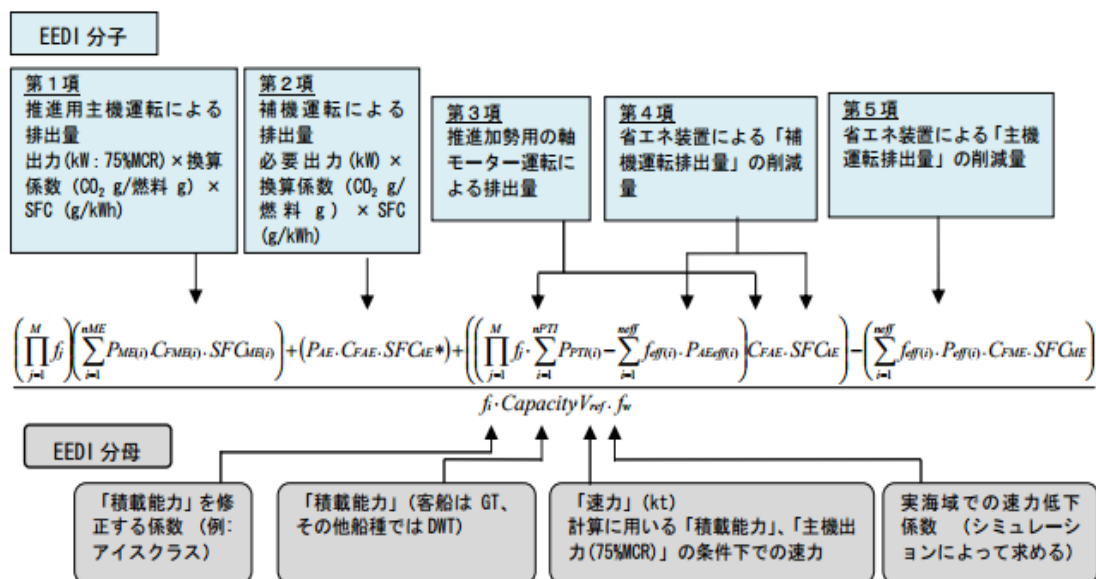


図 1-1 EEDI の構成と計算式[5]

2013 年以後の新造船は、満たすべく EEDI が設けられ、基準値を満足しないものは海運マーケットに投入不可といった制限を課されることとなる[5]。

1.1.4 相乗効果の創発

相乗効果とは、ある要素が他の要素と合わさる事によって単体で得られる以上の結果を上げること。相乗効果により、あるもの全体の効率化が発揮される。経済、社会、など様々な分野で、この効果は定量的に測ることはできる。相乗効果の創発に対する評価は以前から行なわれていた。

ここで創発とは、システムの構成要素であるエンティティが相互作用により、個々のエンティティの機能よりも大きい、あるいはこのエンティティとは異なる機能を発現する現象を指す[24]。

大洞ら[6]は、公共事業業界において相乗効果を考慮した複数のプロジェクトの経済評価の研究に、2つのプロジェクトが実施された場合は、各プロジェクトによる単独効果と両プロジェクトによる相乗効果から構成されると述べた。また、図 1-2 が示すように、2つのプロジェクトが同時に実施された場合の効果は、それぞれが個別に実施された場合の効果を合計したものより大きくなると期待されるが、2つのプロジェクトが共通因子をもつ場合、両プロジェクトは部分的に競合し、図 1-3 が示すような負の相乗効果が発生する場合もある。このような相乗効果の存在は、複数プロジェクトの組み合わせの検討に影響を与えるため、明らかにされ

ることが望まれると明示した。

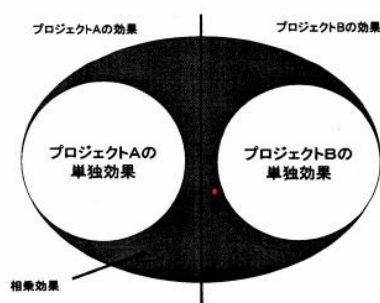


図 1-2 複数プロジェクトの効果の概念図 1[6]

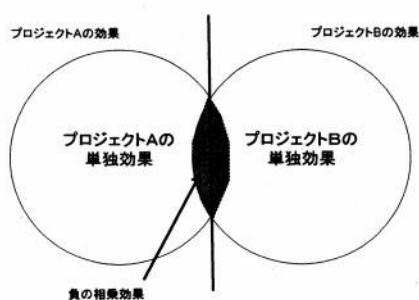


図 1-3 複数プロジェクトの効果の概念図 2[6]

また、他分野においても、大西ら[7]は、農商工連携における経済的パフォーマンス評価手法を開発した。農商工という複雑なシステムを持つ産業群における連携の取組に関して、どの程度の経済的メリットが得られるか、また、どうすれば経済的メリットが増大できるかを明らかにしなければならない。そこで、当研究は連携による経済的メリットを数値化するために、プレミアムという概念を提案した。具体的には、連携することによってプラスアルファで得られる経済的メリットがプレミアムであり、連携により商品価格や売上が減少した場合は、プレミアムは負の値を取ると述べた。

海事産業においても、省エネ対策の一環として省エネ技術の開発が進んでいるが、複数の省エネ装置を使った場合には、お互いにその効果を相殺したり増幅したりする場合がある[8]。

ここで、海事産業の競争力を維持しながらCO₂の排出量を抑えるための技術開発が進んで

いるが、個別の技術開発単体で国際的に合意された目標を達成することはできない。本研究では、個別の技術の組み合わせによる創発的な効果、相乗効果を適切にマネジメントすることでこの目標を達成することを目指す。

1.2 目的

以上の背景に踏まえ、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CO₂排出量の削減に対して相乗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ことを目的とする。

1.3 本論文の構成

本論文は全 6 章からなる。以下にその構成を示す。

第 1 章では、海事産業において技術導入が推進されている現状と、CO₂排出量削減における取り組みの現状と、他産業における相乗効果の創発について述べ、それを踏まえて本研究の目的を明示する。

第 2 章では、現在開発・検討が行われている海事産業の技術事例、意思決定支援分析に用いるシステムシンキングの先行研究と、意思決定支援システム開発の研究事例を紹介する。

第 3 章では、既存の海事産業における意思決定に関する研究とそれが持つ課題を紹介したうえで、本研究の位置づけを行う。

第 4 章では、提案した手法をシミュレータの構成から評価手法の詳細まで説明する。

第 4 章では、ケーススタディとして、海上輸送シミュレータを用いた複数の技術導入案を行い、開発した評価手法で海上物流システムにとって有効な技術組み合わせを分析する。

第 5 章では、感度分析を行った後、今回の評価手法とケーススタディの結果について考察する。

第 6 章では、本研究の結論と今後の展望を述べる。

第2章 先行事例・関連研究

2.1 はじめに.....	8
2.2 海事産業における技術導入の研究事例.....	8
2.2.1 船用機器モニタリング.....	8
2.2.2 船用機器のリモートメンテナンス.....	9
2.2.3 港湾作業マネジメントシステム.....	10
2.2.4 ウェザールーティング.....	12
2.2.5 船舶の省エネ技術の開発.....	12
2.2.6 船舶運航におけるビッグデータの活用.....	15
2.3 システム設計を支援する手法.....	17
2.3.1 システムシンキング.....	17
2.3.2 トレードスペース分析.....	18
2.3.3 ポイント設計.....	19
2.3.4 Morphological Matrix.....	20
2.4 意思決定支援システム.....	21
2.4.1 意思決定支援システムとは.....	21
2.4.2 水処理における意思決定支援システムの開発.....	22
2.4.3 分散型意思決定支援システムの開発.....	23
2.4.4 船舶運用における意志決定支援システムの開発.....	24

2.1 はじめに

本章では、海事産業界で近年検討されている技術の研究事例から、稗方ら[9]がまとめた技術を中心に本研究のシミュレーション内で評価対象とした技術を紹介する。次に、意思決定を支援のための手法やシステム開発について説明する。

2.2 海事産業における技術導入の研究事例

2.2.1 船用機器モニタリング

現在の船舶メンテナンスは、船舶構成機器を一定の寿命の仮定に基づいて運航後の故障率対応と定期検査が主である。しかし、船のライフタイムに対する見積もるは大きな不確実性を抱えている[10]。そのため多くの場合に、スケジュールされたメンテナンスの実行は早すぎたり遅すぎたりしており、不要な交換と機能障害のためのコストが高くなっている。従って、より適切で効率的なメンテナンスを実施するために、船用機器のモニタリング技術が開発された。図 2-1 はメンテナンスフレームワークに基づいた Condition monitoring の一例を示す[10]。各機器の測定データを常時取得する。そして、センサー出力の検証や、温度の変化幅や振動モードなどの機能を抽出して測定データを分析する。専門家がそちらのデータを分析しながら異常データが認められた時のみ必要部分のメンテナンスを実施する。それによって効率的な機器保全が可能になる。

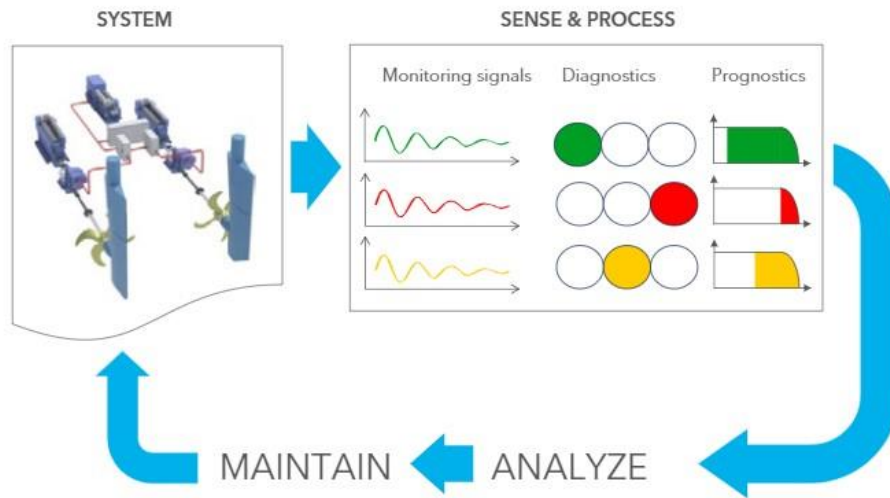


図 2-1 メンテナンスフレームワークに基づいた Condition monitoring の例[10]

また、モニタリングシステムとして、その基本機能である監視、警報、制御、記録機能向上している[11]。状態監視及び警報確認に用いるモニタ部は、画面サイズ、解像度及び表示色数が向上し、フルグラフィック画質の表現が可能となった。更に、ウィンドウ表示、分割表示、拡大・縮小表示機能などによりデータや情報の認識が容易になった。制御機能は、接点出力に加え、アナログ出力制御も可能となった。ヌーンログやアラームログなどの記録データはデータベースに格納され、指定期間のデータを素早く検索でき、USB メモリに出力保存することも可能となっている[11]。

2.2.2 船用機器のリモートメンテナンス

船舶搭載機器に対する課題の一つとして、ワールドワイドの保守サービスがある。近年では、安全航海のためポートステートコントロール(PSC)が強化されており、寄港地での確実な保守サービスが要求される。船用リモートメンテナンスシステムは、船舶に搭載された機器の状態を陸上からリモートで診断し、寄港地での的確な保守サービスをサポートする[12]。船舶搭載機器技術によってリアルタイムで船用機器メーカーとの情報共有が可能になり、ダウンタイム及びコストの削減が期待できる。図 2-2 は、リモートメンテナンスシステムの一例を示す。

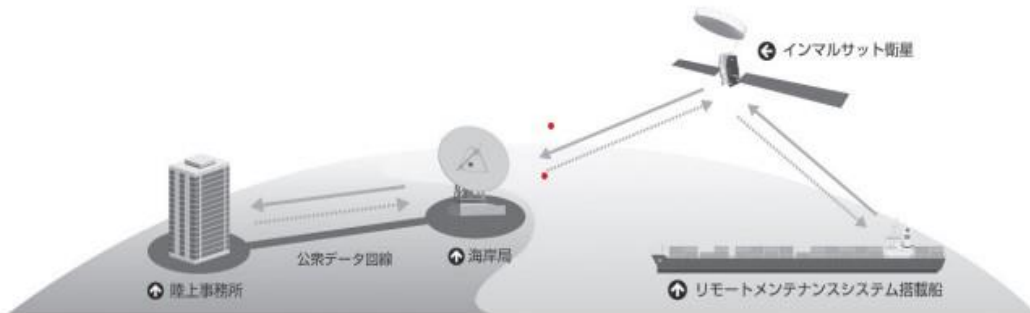


図 2-2 リモートメンテナンスシステム概念図[12]

また、陸上との柔軟な連携や陸上からのリモートメンテナンスが実現されることで、機器異常に伴う海上での緊急停止の回避や復旧時間の短縮が期待できる[13]。今後、船陸間通信の発展とともに、船舶搭載機器への導入が更に推進されることが予想される。

2.2.3 港湾作業マネジメントシステム

荷役スケジュールの厳守は係留時間増加に伴う港費の増加、ペナルティ加算に繋がるだけでなく、運航スケジュールの圧迫に伴う運航費の増加も引き起こす。荷役遅延の主な原因として、港湾オペレーションの管理と荷役装置の管理の不足があるが、属人的な港湾オペレーションの場合、無理なスケジュール設定によって遅延が生じる場合がある。近年の研究[14]では知能港湾の概念を提出した。図 2-3 は、IoT 技術を用いた港湾マネジメントシステムの一例を示す。

知能港湾とは、現代の IoT 技術に基づいた港湾輸送のためのサービスシステムであり、収集、処理、リリース、交換、分析、および関連情報の使用に基づいて多様な情報サービスを提供する。知能港湾はリアルタイムで車両やコンテナ、貨物、船、および通関手続きを、オンラインでモニタリングすることができ、最終的に全てのプロセスを視覚化するモニタリングシステムである。これによる港湾オペレーションを効率的に行うことで荷役遅延率を低減することが可能になる[14]。

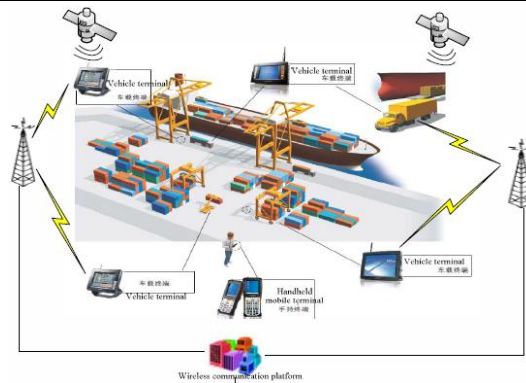


図 2-3 IoT を用いた港湾マネジメントシステムの概要図[14]

その中特に、無線通信情報技術により、データの取得と処理を高速かつ正確的に実現でき、港湾の倉庫ビジネスシステムを最適化することができる[14]。図 2-4 は倉庫管理システムの概要である。倉庫からの通関商品をリアルタイムで自動的に監視することによって通関の速度と効率を向上し、倉庫保管のコストが削減できるようになる。さらに、ヒューマンコンピュータのシステムは 3D 仮想現実技術と相互作用し、リアルタイムで倉庫の内部状況を表示し、倉庫内の商品の状況を理解しやすくするための隠し機能を備えた没入型ローミング商品をサポートすることができる。港湾作業の効率向上と、運用コスト削減を実現できる。

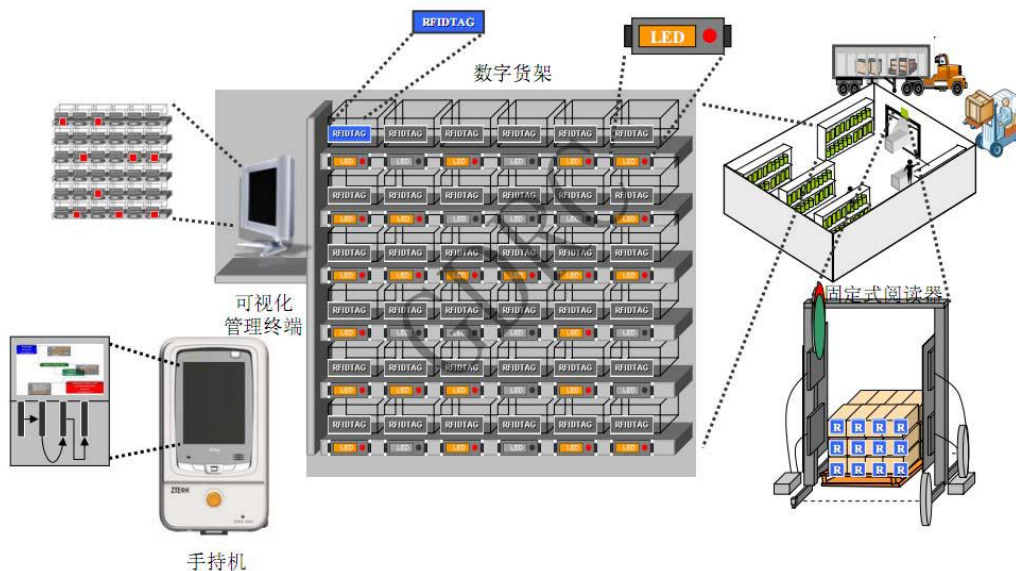


図 2-4 IoT を用いた倉庫管理システムの概要図[14]

2.2.4 ウェザールーティング

ウェザールーティングとは、航海中の気象・海象状態をできる限り正確に予測し、当該船舶の耐航性能を考慮した評価基準に対する最適な航路を選択することである。気象・海象・運航モニタリングなどを用いた航路計画・船速計画の最適化に関する既存研究[15][16]が多数ある。ウェザールーティングの一例を図 2-5 に示す[17]。航海時最短の直線航路ではなく、気象・海象状態を考慮した最適な航路で航海している様子が分かる。航路の最適化を行う際には、実海域中での機関馬力と船速との関係が重要となり、最適航路計算を支援する船舶の実海域推進性能の推定に関する研究[18][19]もなされている。

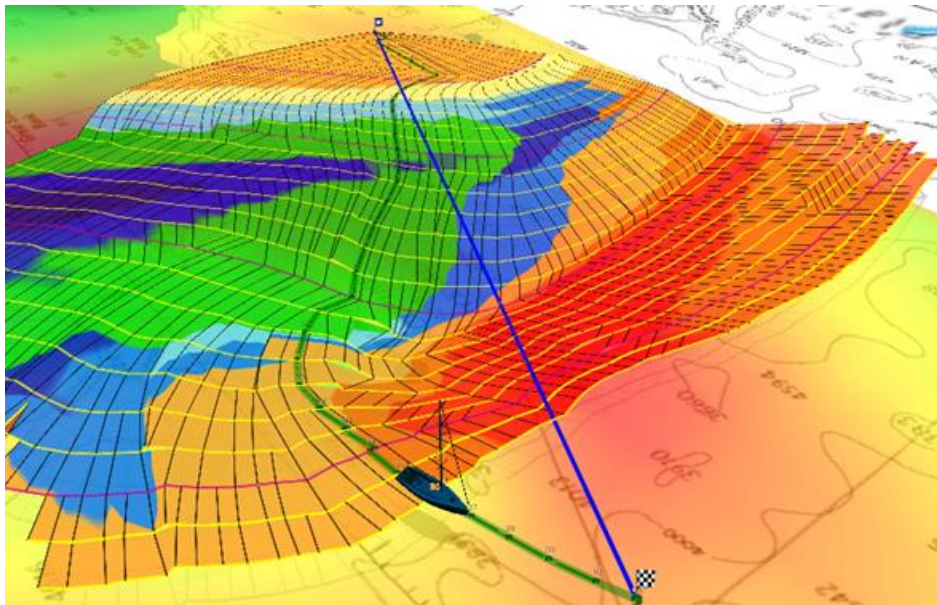


図 2-5 ウェザールーティングの一例[17]

2.2.5 船舶の省エネ技術の開発

船のCO₂排出量を削減するためには燃費効率を上げる省エネ技術の導入が必要である。海事会社は、燃料価格の上昇を契機に、エンジンやプロペラの改良、抵抗の少ない船舶の設計、船の軽量化など幅広い省エネ技術の開発に取り組んできた[20]。

2.2.5.1 エンジン効率の改善

船はディーゼルエンジンで燃料を燃やして動力を得るが、このディーゼルエンジンの燃費効

率を改善する努力が続けられてきた。図 2-6 はその一例である排熱回収システムを示す[20]。船のエンジンで燃やされる燃料の持つ熱エネルギーは全て動力に転換されるではないため、排熱回収システムはその排気ガスという形で捨てられる熱を再利用する技術として注目されている。また、エンジンから空気中または海中に捨てられる排熱エネルギーの再利用技術、エンジンへの燃料供給量の電子制御技術、CO₂排出量が少ない天然ガスを燃料とするガスエンジンの開発などのエンジン効率を改善技術革新が続けられている。

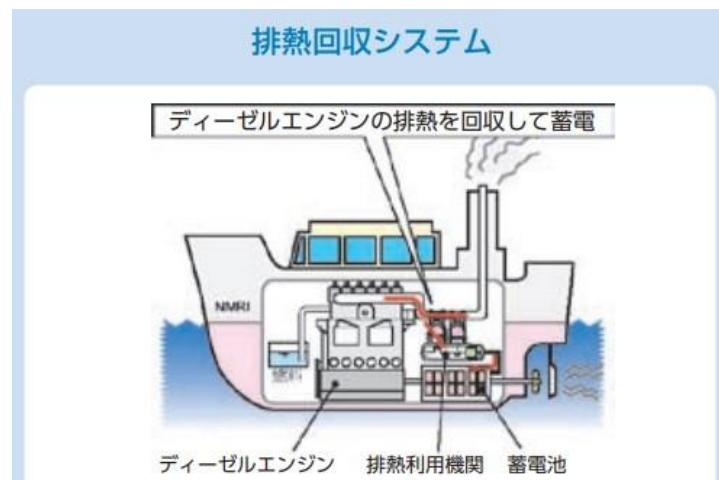


図 2-6 船の排熱回収システム[20]

2.2.5.2 プロペラ効率の改善

船のプロペラは回転運動により推進力を生み出すが、プロペラ周辺に発生する渦などの要因により推進エネルギーの一部が失われる。そのため、プロペラ後方の水の流れを整える「PBCF(プロペラ・ボス・キャップ・フィンズ)」や「二重反転プロペラ」推進効率を改善するダクトやバルブ(球状の物体、)フィン(翼)などの省エネ装置の開発や船型改良による推進効率の改善が進められる。図 2-7 をプロペラの PBCF の概要である[20]。PBCF のフィンにより、プロペラの後流にできた渦が消えることで燃費効率を約 5%改善することができる。

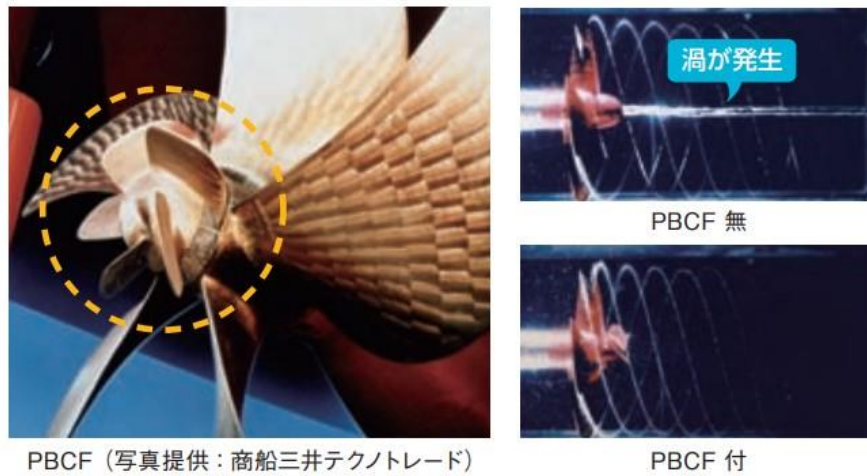


図 2-7 PBCF の概要[20]

2.2.5.3 船体抵抗の軽減

燃費効率を改善するために、船が受ける様々な抵抗を軽減する技術も開発されている。海面下の船の表面と海水との摩擦抵抗を減らす特殊塗料の開発や、船底と海水の間に空気を送り込むことで抵抗を減らす「空気潤滑システム」の実用化に向けた開発が進められている。また、波を起こすことで発生する抵抗を減らすために、船首が斧の形をした「Ax-Bow (アックスバウ)」や鋭角な形をした「LEADGE-Bow (レッジバウ)」など、船首の形が改良された。図 2-8 は船首形状の改良の一例である[20]。



船首形状の改良
(左：従来型船首、中：Ax-Bow、右：LEADGE-Bow)

図 2-8 船首形状の改良[20]

また、船首部分を斜めにカットしてラウンド形状にし、船の側面に風の通り道を確保することで正面や側面から受ける風の抵抗を軽減した船も作られている。

2.2.6 船舶運航におけるビッグデータの活用

国内外の船社を中心として、計測データを利用した船舶のパフォーマンス・モニタリング、最適トリム、機関コンディションモニタリング、リモートメンテナンスをはじめとする各種のサービスの提供が開始されている[21]。こうした大量の船の計測データ及びそれを利用した解析サービスをどのように活用するのかなどのビッグデータへの取り組み方を模索していく状況が続くと考えられる。

同じサービスに就航する同サイズの大型コンテナ船の一航海における燃費に大きなばらつきが見られた[21]。図 2-9 はその一例である。最も多かった航海で 6500MT 程度。逆に最も少なかったもので 4700MT 程度と、1800MT もの大きな差が存在する。

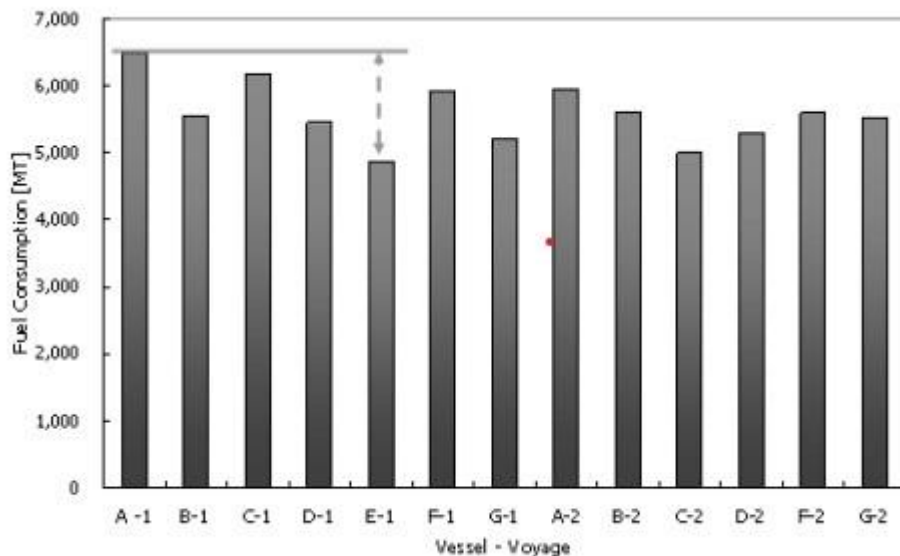


図 2-9 同型・同サービスの船舶間の燃費データ比較例[21]

そこで、船舶パフォーマンスデータを収集するパフォーマンス・モニタリングシステム (SIMS: Ship Information Management System)を開発し[22]、同航路に就航するコンテナ船数隻に搭載し、システム及び計測データの検証を行うデータ活用の方法を検討した。図 2-10 は SIMS のシステム概要を示す。具体的には、SIMS は船舶の回転数、船速、燃費、風

向風速をはじめとする燃費性能に関わる運航データを毎時間自動的に陸側システムに送信、データを解析することで省エネ運航や省エネ船型開発に利用した。

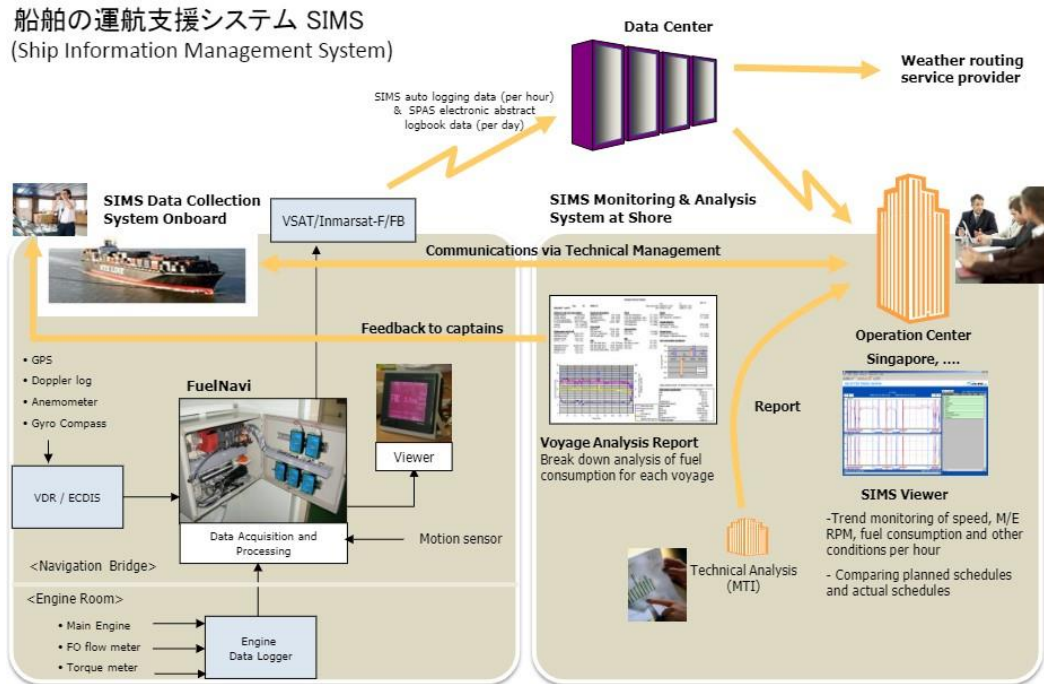


図 2-10 SIMS のシステム概要[22]

データ解析技術を活用して、効率的な操船を支援するシステムを開発することで、操船のムダ・ムラが減少し、燃費効率の良い運航が期待できる。また、図 2-11 が示すように、実海域性能については、数値計算と実船計測データによる検証を繰り返し、波、風の中で、回転数毎の船速低下、燃費増加を予測できるレベルとなった。検証実験によって実海域性能モデルを使って船速・燃費を精度良く計算できることを確認した。

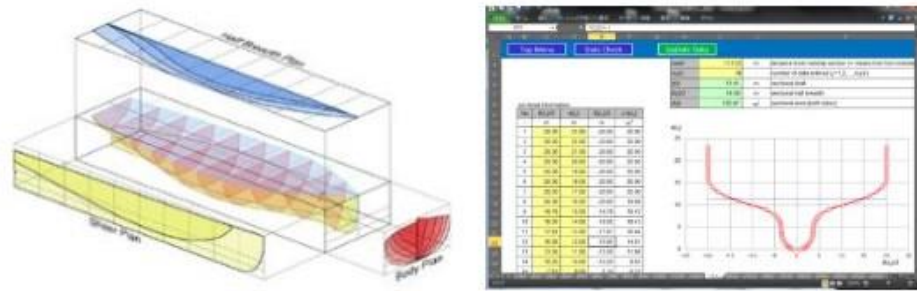


図 2-11 実海域性能解析の例[22]

2.3 システム設計を支援する手法

船舶単体の性能ではなく、海上物流のような複雑なシステムとしての輸送効率やCO₂排出量を検討する際には、システムズエンジニアリングなどを始めとしたシステム設計の体系で利用される手法の利用が必要である。本節ではこれらの手法を紹介する。

2.3.1 システムシンキング

システムズアプローチとは、複雑性のある問題に対して事象全体をシステムとして認識するシステムシンキングを利用して問題にアプローチを図る方法論のことである[23]。ここではシステムシンキングについて紹介する。

システムシンキングは、既存のシステムの振る舞いやパフォーマンスを理解する、システムが変更されたらどうなるを想像する、システムの本質的な決定や判断を知る、システムの設計やシンセシスを支援する、などの多くの目的のために使用する。これは、システム・アーキテクチャである[24]。

また、研究方法としてシステムズアプローチを考えた場合、そのプロセスは(1)システム認識、(2)システム分析、(3)システム設計の三過程からなっている。坂口[25]は特に、システム分析を「組織にとってもっとも有効な戦略的意思決定を行えるように判断と計算を統合するための方法である」としたうえで、考慮する本質的事項として以下の6つを挙げている。

- 1) 意思決定者の達成しようとする目的の明確化
- 2) 目的達成のための代替案の探求
- 3) 各代替案の選択の際の機会費用の測定

- 4) モデル化による現象(問題)の再現
- 5) 各代替案の効果の予測
- 6) 評価基準の決定

意思決定としてのシステムズアプローチに関する研究は多数存在しているが、ここでは、本研究に関連する分析手法を簡単に紹介する。

2.3.2 トレードスペース分析

システム・アーキテクチャの意思決定は、アーキテクチャを意思決定の問題としてコード化し単一の評価指標に基づいて最良のアーキテクチャを選ぶといった簡単な話ではない。それよりも、意思決定間の主なトレードオフの理解や、最終的なソリューションを視野に据えた評価指標間の重みづけの評価。そしていしけっていの組み合わせに関する理解が求められる[24]。

一般的に、システムにおけるトレードスペースは 2 つ以上の評価指標によって定義され、空間におけるアーキテクチャ群の記述である[24]。例えば、図 2-12 では様々な自動車のエンジンによるトレードスペースを描いている。エンジンを表す点が性能(馬力)とコスト(ドル)の 2 軸の間に数多く記述されている。これらのエンジンに関するあらゆることを性能とコストという 2 つの評価指標に凝縮しており、この記述はシンプルであり包括である。

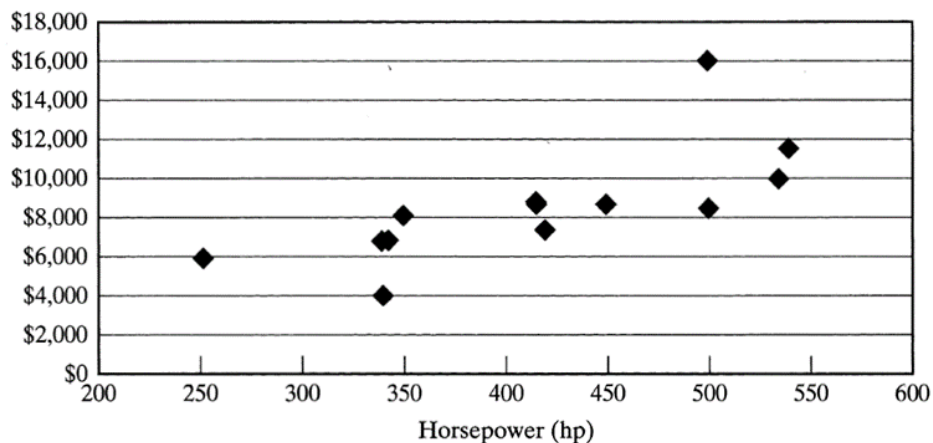


図 2-12 馬力とコストを評価指標として作成したエンジンのトレードスペース [26]

また、システムを評価するためのトレードスペース分析に関しては以下の事項を提案したい。

- 全ての評価指標の透明性を担保すること。
- アーキテクチャにおける重要なトレードオフを記述するような評価指標を 2 つか 3 つ特

定すること。

- 意思決定者に選択肢として提示することで、意思決定者により多くの可視性と権限を提供すること。
- 差別化していない評価指標の長々とした一覧を提示することは避けること。
- 重要なニーズや制約に基づいて、意思決定者が優先度の高い評価指標の間での重要なトレードオフを見えるようにし、重要性が低い目標に沿って残りの選択肢を差別化すること。

2.3.3 ポイント設計

ポイント設計は少数のソリューションに対して細部にまで設計にこだわる多大な作業を表すことである[24]。ポイント設計は数々の細かい評価指標によって特徴付けられるものであり、例としては表 2-1 のように、ハイブリットカーに対して抽出したものなどがこれにあたる。これらの中から選択することは個別に精査することを意味しており、ペア毎の比較による精査も含まれる。

表 2-1 2種類のハイブリッドカーに対するポイント設計の比較[24]

	Point Design 1	Point Design 2
<i>Critically</i>		
Must have an environmental satisfaction to the driver, and impact [as measured by EPA standards]	128 g CO ₂ /km	200 g CO ₂ /km
Must engage suppliers in long-term stable relationships with good revenue streams to them (mildly constraining) [as measured by supplier survey]	Average 4/5 survey score	Average 4/5 survey score
Must accommodate a driver (size) (constraining) [as measured by % American male and female]	94% of males 98% of females	95% of males 99% of females
<i>Importantly</i>		
Shall provide transport range [miles]	200 km	140 km
Shall satisfy regulatory requirements (constraining) [certificate of compliance]	Satisfies	Satisfies
Shall carry passenger (size and number) [how many]	5	5
Shall provide stable and rewarding employment [turnover rate]	2%/year	2%/year
Shall have good fuel efficiency [L/100km]	4.2 L/100 km	5.2 L/100 km
<i>Desirably</i>		
Shall require modest investment from corporate, shall sell in volume, and shall provide good contributions and return (mildly constraining) [ROI, Revenue \$]	24% ROI	19% ROI
Shall have desirable handling characteristics [skidpad acceleration in g's]	0.95 g	0.82 g
Shall carry cargo (mass, dimension, and volume) [cubic feet]	1.1 m ³	1.5 m³
Shall be inexpensive [sales price not to exceed]	\$32,000	\$28,000

ここで、2つのポイント設計の間で意思決定を整理する上で、複数のヒューリスティックスを用いている。

2.3.4 Morphological Matrix

Morphological Matrix は表形式で意思決定を行う一般的な手法である。Morphological Matrix は 1950 年代に Fritz Zwicky によって考案され、現在でもエンジニアリングデザイン分野で用いられている。図 2-13 に火星探索機的设计を対象とした Morphological Matrix の使用例を示す[26]。各行に意思決定項目を並べ、各列にそれぞれの選択肢を列挙している。Morphological Matrix は様々な組み合わせが考えられるシステム設計を容易かつシンプルに行えるという利点がある。一方で、簡潔さ故に意思決定間の制約やシミュレーションによる詳細評価が難しいという特徴もある。

Decision	alt A	alt B	alt C	alt D	alt E	alt F	alt G
Number of Crew	3	4	5				
Number of Crew Compartments	1	2					
Number of Propellant Stages	2	3	4				
Prop Type -- Stage 1	LOX/LH2	LOX/LCH4	N2O4/Aerozine-50				
Prop Type -- Stage 2	LOX/LH2	LOX/LCH4	N2O4/Aerozine-50				
Prop Type -- Stage 3	LOX/LH2	LOX/LCH4	N2O4/Aerozine-50	N/A			
Prop Type -- Stage 4	LOX/LH2	LOX/LCH4	N2O4/Aerozine-50	N/A			
Stage / Maneuver Assignments	type A	type B	type C	type D	type E	type F	type G
Moon LV Solution	Ares Iplus / Ares V	Ares Iminus / Ares V	Ares V only				
TSS LV Solution	Ares Iplus	Ares Iminus	Foreign	COTS			

図 2-13 火星探査機の Morphological Matrix の例[26]

2.4 意思決定支援システム

2.4.1 意思決定支援システムとは

意思決定支援システム(DSS)は、ユーザーがより短い時間で最適なソリューションを選択することを支援する情報システムである。

意思決定支援という概念は2つの研究から生まれた[27]。ひとつは1950年代末期から1960年代初期にカーネギー工科大学でなされた組織的意思決定の理論的研究である。もうひとつは1960年代にマサチューセッツ工科大学で行われた研究に端を発する対話型コンピュータシステムの技術的成果である。1970年代中ごろにはDSSは独自の研究領域を形成するようになり、1980年代には産業への応用が始まった。

優れたDSSの代表的な特徴は以下の4点が挙げられる。

- i. システムズ分析手法に基づいている。
- ii. 当面の問題に関連する知識が取得、表現、分析可能である。
- iii. 柔軟かつ欠落や不確実なデータを処理できる。
- iv. ユーザーフレンドリーである。
- v. 有用な出力を生成する能力を持っている。

また、DSS開発に使用される一般的な手順は、(i)問題の分析と解釈、(ii)知識の表現と推論、(iii)代替案を生成と評価するための順次最適化設計、および(iv)DSSロジックの有用性と強化されたユーザーインタラクティビティの検証と検証。以下は意思決定支援システムの開発における事例を紹介する。

2.4.2 水処理における意思決定支援システムの開発

意思決定支援システムが水処理領域に開発されている例として、Abaid Ullah ら[28]は、廃水処理技術を選択するための意思決定支援システム(DSS)を提案した。

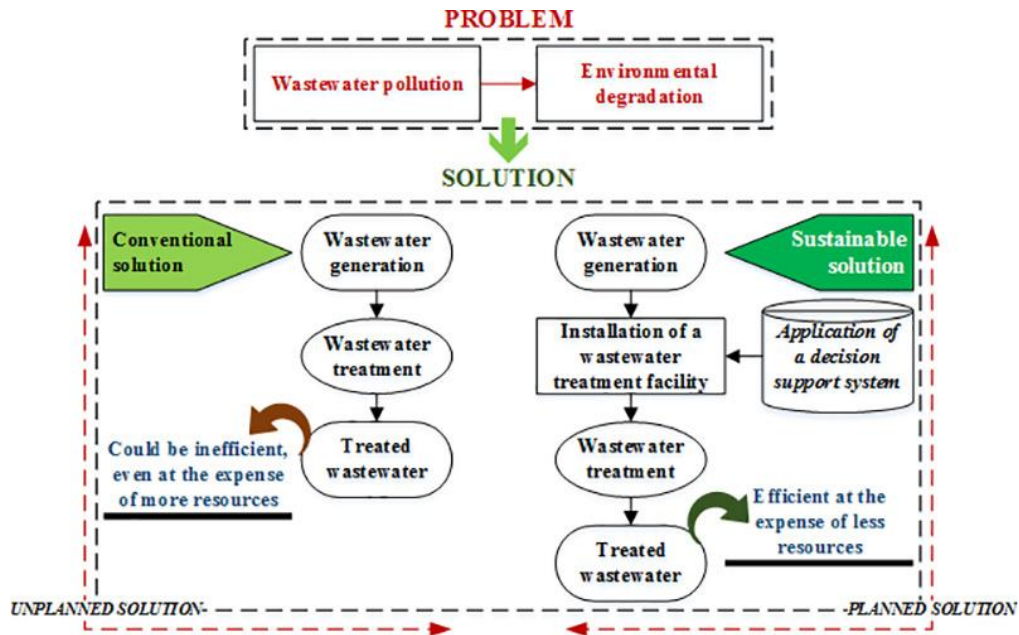


図 2-14 廃水処理技術選択における支援システムの概要図[28]

提案されたシステムは、廃水処理における各種の最先端技術を、図 2-14 のように詳細なレビューに基づいて整理することで、計画した解決案と未計画な解決案に分けて設計している。本システムは廃水成分の複雑さと処理が必要な程度に基づいて、4 つの処理レベルに分類され、前処理、初級、二級、および三級処理が含まれる。特定の処理レベルに基づいて、提案されたシステムは、物理、生物、化学、またはハイブリッド処理のプロセスを提案した。

開発された DSS は、ユーザー制約、矛盾する要件、および検討中の一般条件を維持しながら一連の代替案から適切な廃水処理技術を選択することを支援する。また、このシステムは、最小化したコストで計画段階に処理法の集合をカスタマイズすることと、計画および設計段階で間違いを排除することができる。ユーザー要件と一般条件、顧客要求への取り組み、持続可能な開発への促進に従い、代替解決案を絞り込むことで意思決定を容易にした。

2.4.3 分散型意思決定支援システムの開発

Pinson ら[29]は、戦略的計画を立てるために、分散型意思決定支援システムを開発した。最近、人工知能の進歩、特にマルチエージェント理論の分野には、戦略的計画プロセスのモデル化することに大きな期待をもたらしている。その領域では、問題を解決するために協力する個別の認知エージェントを導入する機能により、より複雑で不適切な構造問題を処理することが可能になる。よって、分散型意思決定と分散型人工知能両方の進歩を統合する分散型戦略的意思決定支援システム(DSDSS)を構築した。図 2-15 はこのシステムのフレームワークを示す。

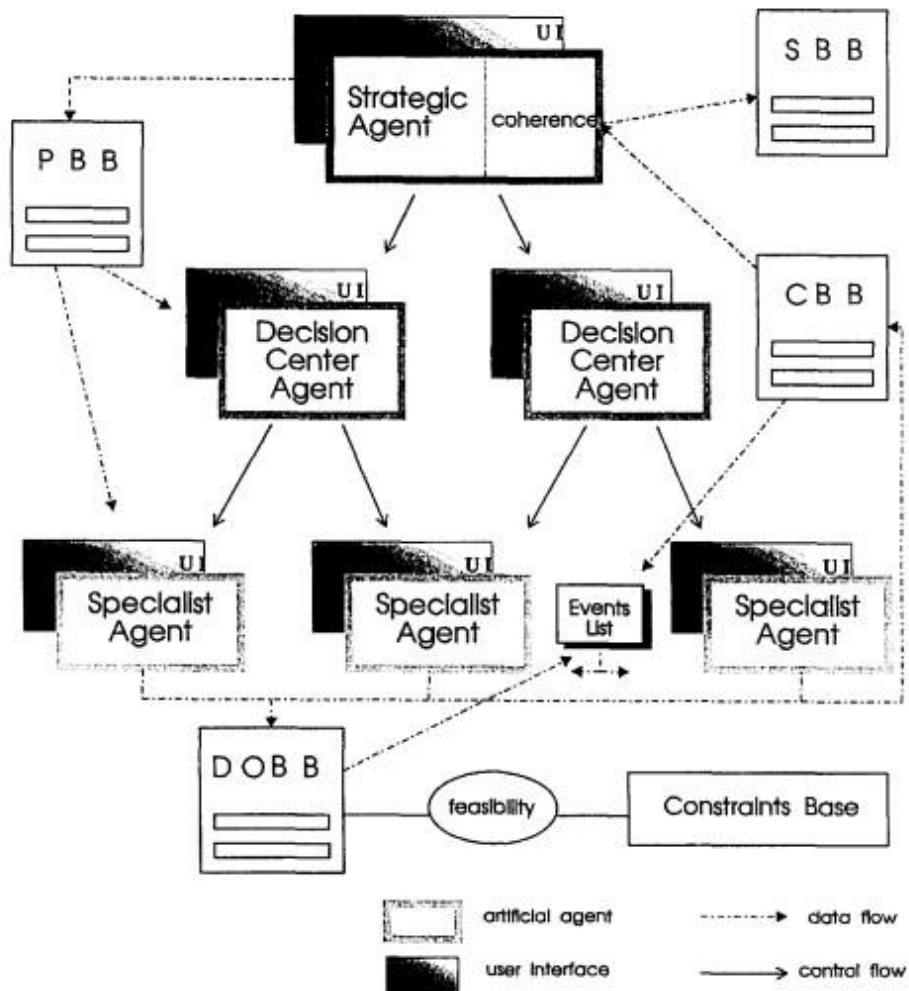


図 2-15 分散型意思決定支援システムの概要図[29]

問題を複数のモジュールに分解することにより、知的エージェント(Intelligent Agents)が独自の知識、目標、スキル、および計画を使用して相互協力することによってより複雑な問題を処理できるようになった。また、高レベルの共通目標を満たすために、3つの認知エージェントが相互作用する。意思決定プロセス中に、異なる視点の結果として競合が発生する可能性が存在するため、Simonの妥協概念[30]と意思決定者の認知マップに基づき、競合の検出と解決のための特定の方法が提案された。Multi-blackboard Architectureによる戦略的知見とドメイン知識の分離により、システムは階層的な分散型意思決定プロセスの表現に適していると考えられる。その結果、この分散型意思決定支援システムは、マーケティングにおける戦略的意
思決定の問題領域に適用されることが確認できた。

2.4.4 船舶運用における意志決定支援システムの開発

堀井[31]は、燃料価格、船体価格、輸送需要などの不確実性の下で、海運会社が船隊構成の意思決定をするための支援システムを開発した。図 2-16 は開発したシステムの概要である。開発したシステムは、長期間での海運会社の船隊構成の遷移計画と、対象期間の不確実性要素の値を入力として、各年度におけるCO₂排出規制を遵守した場合での OPEX(Operating Expense)、CAPEX(Capital Expenditure)および運航計画を主な出力とするシミュレーションを行う。

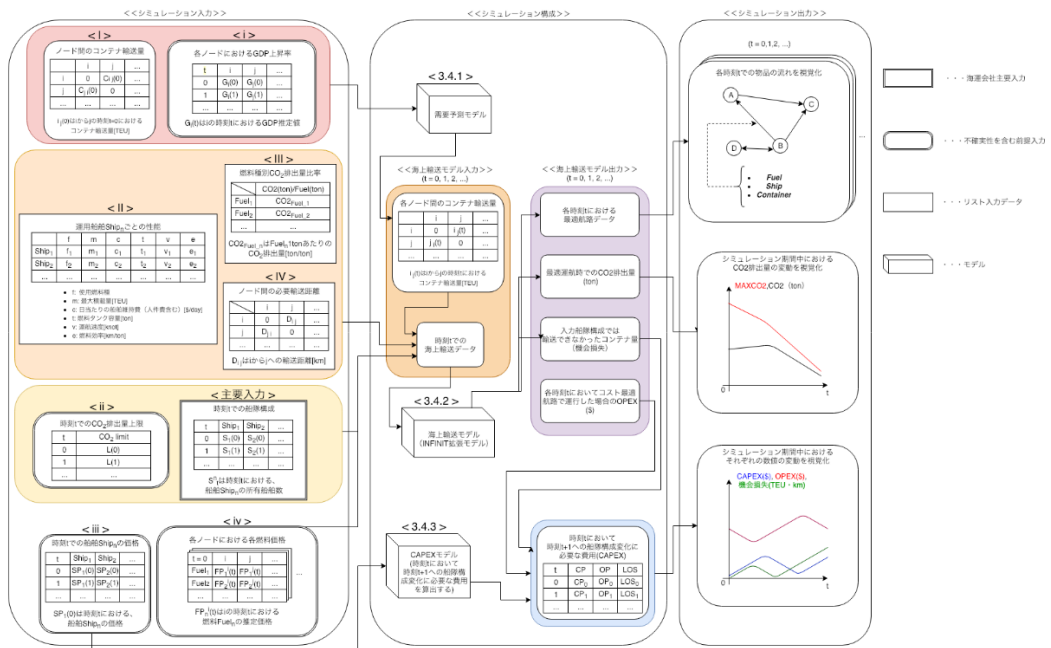


図 2-16 船舶運用における意思決定支援システムの概要[53]

ケーススタディとしては、石松ら[32]が火星へ人間及び物資を輸送するための航路の最適化するために提案した INFINIT モデルを利用し、拡張した複数燃料、燃料の地域価格差、運河のモデル、所有船舶隻数による最大輸送能力の制約、CO₂排出量の規制について詳細な挙動を確認し、海上輸送モデルの検証を行った。また、シミュレーションの結果を比較して、複数の船隊構成遷移計画の評価を行うことができ、意思決定支援への有用性があるシステムを作成することができた。

第3章 既存の海事産業意思決定支援の研究 と本研究の位置付け

3.1 はじめに	27
3.2 既存の海事産業における技術導入の評価手法.....	27
3.3 既存の評価手法が存在する課題.....	30
3.4 本研究の位置付け	31

3.1 はじめに

本研究の提案手法を説明する前に、既存の海事産業における意思決定支援に関する研究が持つ課題を明らかにする必要がある。本章では、既存の海事産業における意思決定に関する研究とそれが持つ課題を紹介したうえで、本研究の位置づけを行う。

3.2 既存の海事産業における技術導入の評価手法

本節では、海事産業における技術導入の意思決定支援手法を説明する。

稗方ら[9]は、海事産業界において効率化・競争力強化を目的とし、海事産業における IoT 技術導入の意思決定支援手法を提案した。

まずは、Systems Approach の手法を用い、海事産業の要求分析と、海事産業の機能分析を行った。海事産業における意思決定運航サービスが応えるべき要求を、荷主の要求を考慮した QCD を向上すると定義した。具体的には、Q は Quality:安全で確実な輸送、C は Cost:安価な輸送、D は Delivery:確実納期な輸送とした。技術導入の効果を一元的に評価するために、評価軸は以下の 3 つと定義した。

- Quality : 運航サービスにおける事故・故障の発生件数
- Cost : 運航サービスにおける船会社の運航利益
- Delivery : 運航サービスにおける遅延時間

次に、技術導入の効果を評価するために、運航シミュレーションによる定量的な評価手法を開発した。評価手法の概要を図 3-1 に示す。

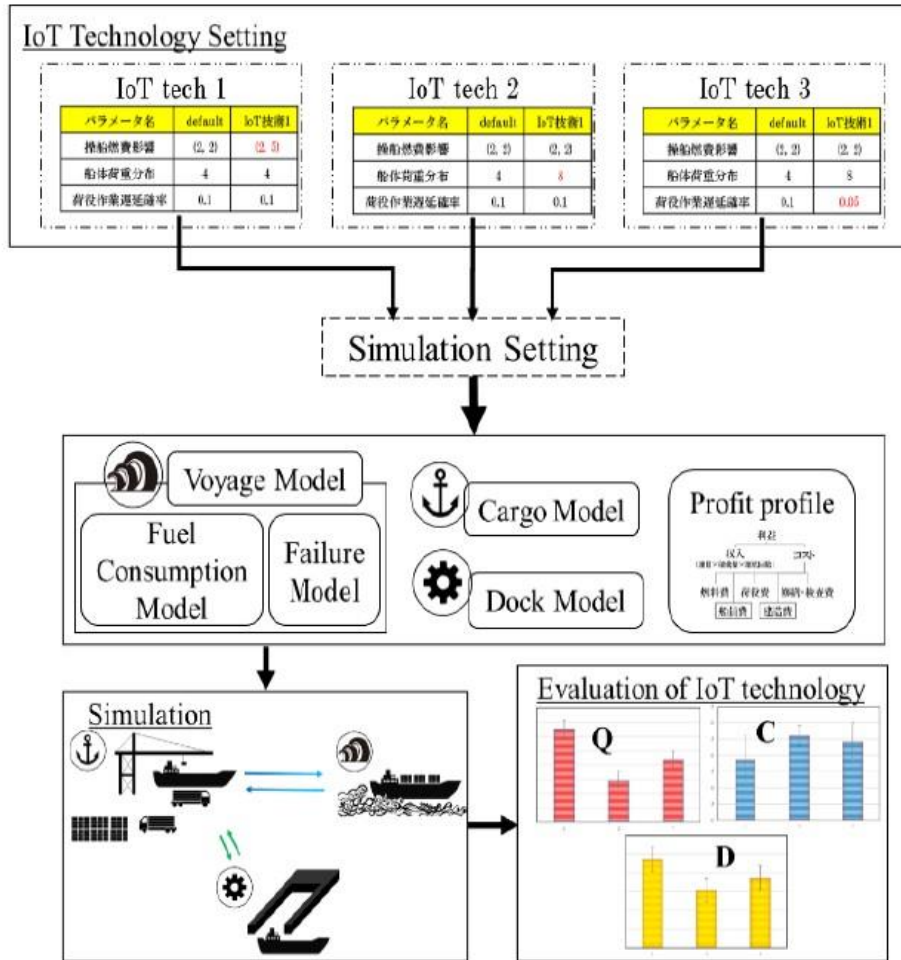


図 3-1 評価手法の概要[9]

運航中の船舶がとり得る状態を「運航」、「荷役」、「入渠」の 3 状態であるとしたうえで、前述した評価基準に対して運航モデル、荷役モデル、入渠モデルと利益モデルの 4 つのモデルに分類して作成する。IoT 技術の導入効果は、作成したモデルの入力パラメータの値を変更させることにより表現し、QCD の評価指標の値を比較することによって定量的に評価する。

ケーススタディとして、実際に考案された 25 個の IoT 技術導入の評価を行った。その結果は図 3-2 に示す。シミュレーションの入力として種々の IoT 技術の機能をパラメータとして与えることで、IoT 技術の導入効果を比較検討し、各評価軸の観点から有効な IoT 技術の選定の議論が可能になった。

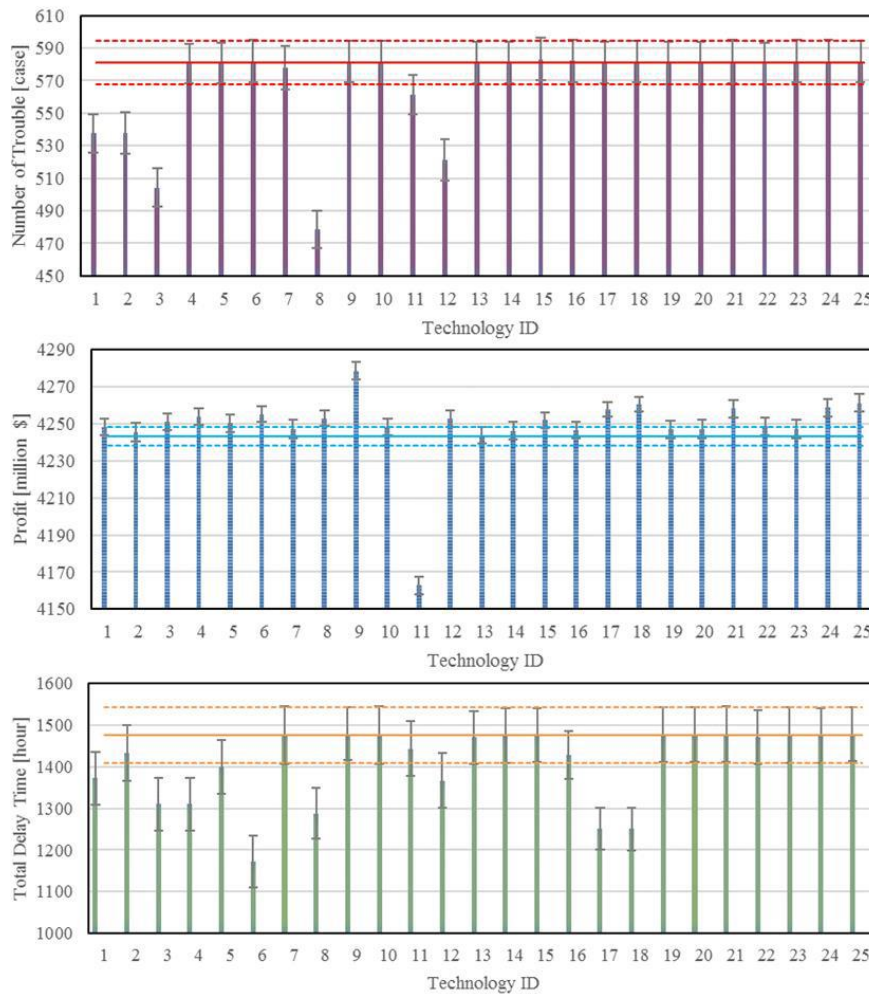


図 3-2 IoT 技術導入による QCD の評価結果[9]

また、稗方ら[30]は、技術成熟度を考慮したパラメータの感度分析を行った。導入検討する IoT 技術を i. 技術成熟度が低い場合、ii. 中程度の技術成熟度、iii. 技術成熟度が高い場合の 3 段階を想定し、それぞれにパラメータ変更値を付与した。その結果は図 3-3 を示す。感度の高い IoT 技術は、導入の意思決定の際には、妥当な評価を下すためには IoT 技術の技術成熟度を精査することで現実的な効果(パラメータ設定値)を見積もることが重要になると確認した。また、技術成熟度によって必要な技術や積極的な投資の価値がある技術について考察することが可能であることも示した。

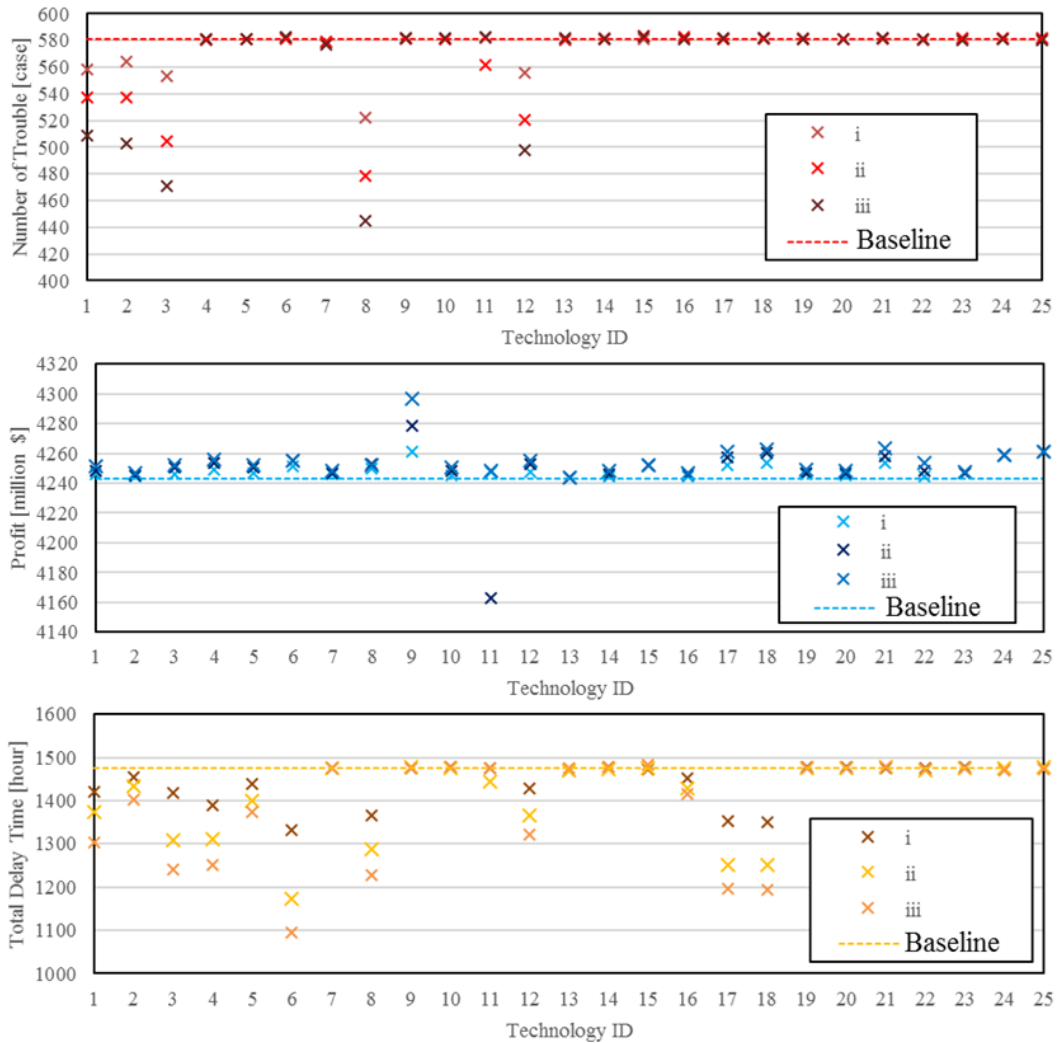


図 3-3 IoT 技術導入による QCD の評価結果（感度分析） [9]

3.3 既存の評価手法が存在する課題

本節では、海事産業における IoT 技術導入の意思決定支援に関する手法を、本研究の先行研究である穂方ら[9]による評価手法を用いて紹介した。IoT 技術の効果をシミュレーションの入力パラメータ変更で表現することで、その価値を相対的に評価・判断できることを示し、導入・開発の投資価値がある技術についても議論することができた。

一方、ケーススタディによる結果から、以下のことが分かった。

- 船舶運航中に、原油価格や運賃のように不確実性が存在するパラメータに関しては、シミュレーションには定数として設定されたため、市場の不確実性は考慮されていないこと。
- 評価軸については荷主の要求を考慮した QCD を設定したが、海上輸送のパフォーマンスに多大な影響を与えるCO₂排出状況は考慮されていないこと。
- 単一の技術導入効果だけを評価し、複数の技術を導入する際の相互作用は考慮されていないこと。

また、技術組み合わせにおける導入効果の定量的評価にあたっては、近年では Gaspher ら[33]や Calleya ら[34]によって船舶設計や船舶技術の評価軸として運航の経済性やCO₂削減量を掲げているが、その選定方法や評価機能の展開方法は普及性がまだ低いと考えられる。

3.4 本研究の位置付け

稗方ら[9]は、多くの技術から投資対象となる技術を選定する意思決定問題の支援を行ったが、複数の技術の組み合わせを導入する際の効果を、シミュレーションによって検討する手法が必要である。また、評価指標として、CO₂排出状況に関する評価軸の選定も必要であると考えられる。

本研究は、技術の組み合わせによる創発的な効果も活用することで、運航コストの制約の中で世界で合意されているCO₂排出目標などの困難な目標を実現する方法を検討する。技術の導入効果を評価するためのシミュレーターは先行研究のものに基づいて機能を追加、削減および変更することによって開発し、創発効果の分析に重きを置く。

以上を踏まえて、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CO₂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相乗的な効果を探索し、海事産業へ意思決定支援手法の提案。

第4章 提案した評価手法

4.1 はじめに.....	33
4.2 提案した手法の概要.....	33
4.3 海上物流シミュレータ.....	34
4.3.1 シミュレータの設定.....	35
4.3.2 シミュレータの機能.....	35
4.4 創発効果の評価手法.....	36
4.4.1 評価指標の計算.....	36
4.4.2 創発効果の探索.....	37
4.4.3 評価指標の可視化.....	45
4.5 海上物流シミュレーションの詳細.....	47
4.5.1 燃費モデルの作成.....	48
4.5.2 故障・気象モデルの作成.....	57
4.5.3 荷役モデルの作成.....	59
4.5.4 利益モデルの作成.....	60
4.5.5 市場モデルの作成.....	63
4.5.6 入渠ルール.....	65
4.5.7 シミュレーションの初期設定値.....	65
4.5.8 シミュレーションの流れ.....	66

4.1 はじめに

本章では、海上物流システムにおける技術導入による相乗効果の探索手法について述べる。

具体的に、まずは提案した評価手法の概要を図を用いて説明する。次に構築した海上物流シミュレータの概要を紹介する。その後、開発した評価手法として、運行利益の向上とCO₂排出量の削減の観点から、評価基準の選定と技術導入による創出効果の定量的な算出手法を詳しく紹介する。最後に、第2章で海事産業における開発、または導入を検討されている技術群を参考にシミュレータの構築にあたってモデルの作成を詳しく説明する。なお、船舶の技術的なモデルは稗方ら[9]、上野[35]から、市場や為替などに関するモデルは稗方ら[36]、斎藤[37]を参考に作成した

4.2 提案した手法の概要

提案した手法の概要を図 4-1 に示す。4.3 節からは手法の詳細を順に説明する。

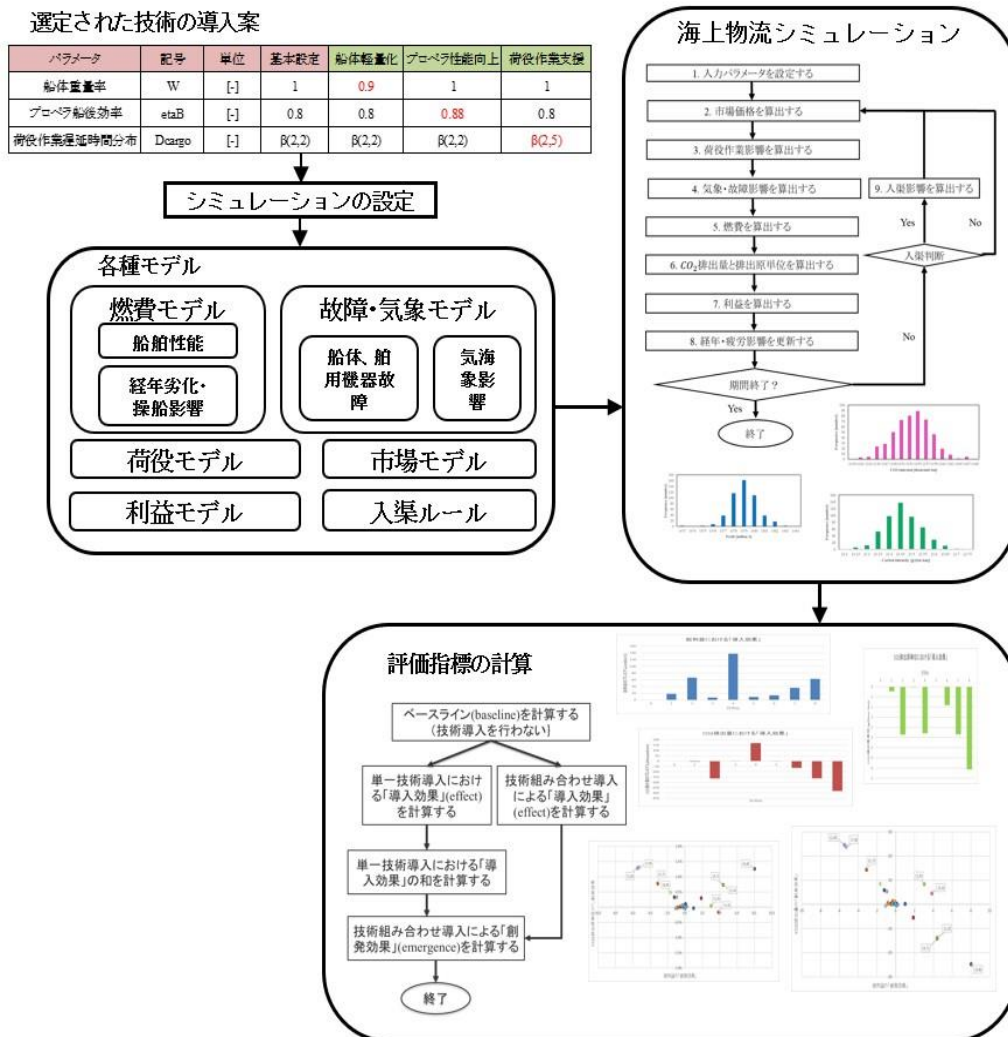


図 4-1 提案した手法の概要

4.3 海上物流シミュレータ

本節では、構築した海上物流シミュレータの概要を説明する。本研究で構築するシミュレータは、基本的に第3章で紹介した本研究の先行研究である稗方ら[9]と上野[35]が作成した船舶運航シミュレータに基づいて構築した。具体的には、先行研究のシミュレータに構成する数式モデルと各モデル間の関係を参考にしたが、複数技術導入と市場変動のような新しい要素を考慮したため、シミュレータの実行に関するコードを再検討した。モデルの作成については4.5節から詳しく説明する。

4.3.1 シミュレータの設定

本シミュレータは、コンテナ船1隻を対象とした海上物流シミュレーションを行う。実海域の船舶の運航と合わせるため、外部影響として気象影響のほか、燃費コストや運賃に関わる市場変動の不確実性と、運航中に往復路における船舶の積載量の変化による運航状況の変化を考慮した。なお、本シミュレータは海難事故や、船舶消失に繋がる重大なものは考慮せず、運航中または入渠時の修理によって復旧可能な事故・故障のみを考慮した。

4.3.2 シミュレータの機能

実海域に貨物輸送を行う船舶の状態を「運航」、「荷役」、「入渠」の3つに整理した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。入力には各モデルで設定されるパラメータと海上輸送における航路長、船速などの基本設定であり、最終的な出力はCO₂排出量、CO₂排出原単位、運航利益、の3つである。

出力のうち、CO₂排出量は船舶がライフサイクルのうち海上輸送運航によって排出したCO₂総量である。CO₂排出原単位は、1.1.3で紹介されたEEDI指標[2]であり、CO₂の排出効率を計算する指標である。本海上物流シミュレータの場合は、「1トンの貨物を1キロメートル運ぶのに排出するCO₂グラム数」を定義する。運航利益は海運業の利益構造[38]において影響がある運航収益と運航諸費用を考慮する。各出力の計算方法は4.4節に詳しく説明する。

シミュレータを構築するには、海上物流システムのモデル化による技術導入効果の評価が必要である。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。作成したモデルにパラメータを入力することで、導入する技術の組み合わせに対して海上輸送のモンテカルロシミュレーションを実行する。図4-2は表現手法の概要である。

パラメータ	記号	単位	基本設定	船体軽量化	プロペラ性能向上	荷役作業支援
船体重量率	W	[-]	1	0.9	1	1
プロペラ船後効率	etaB	[-]	0.8	0.8	0.88	0.8
荷役作業遅延時間分布	Dcargo	[-]	$\beta(2,2)$	$\beta(2,2)$	$\beta(2,2)$	$\beta(2,5)$

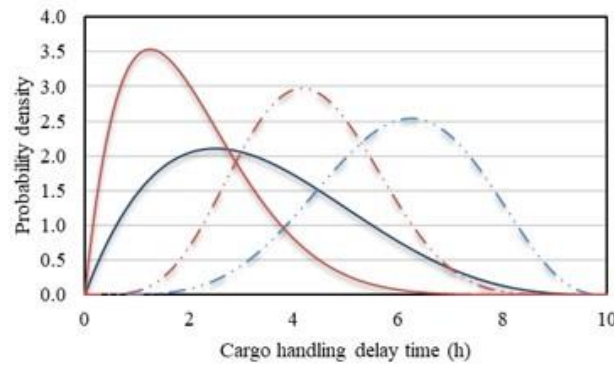


図 4-2 パラメータ変更による技術導入の概要

4.4 創発効果の評価手法

3.4 節で本研究の新規性としては 1. 運行利益の向上とCO₂排出量の削減を定量的に評価することの提案と 2. 複数の技術を同時に導入することで相乗的な効果を探査し、海事産業へ意思決定支援手法の提案と述べたが、異なる種類の評価指標の使用と導入される複数技術間から生成された創発的な効果を考慮するため、新しい評価手法の開発が必要である。

本節は、本研究における評価手法に関して詳しく説明していく。

4.4.1 評価指標の計算

本項は評価指標の計算手法を説明する。

シミュレータの出力値は総利益、CO₂総排出量とCO₂原単位である。総利益に関する計算の仕組みは 4.5.4 節に詳しく説明するが、ここで、海上物流における総利益 π を式 4.1 のように、総収入 I と総費用 $Cost$ の差分を定義する。また、総費用の単位は million \$を設定する。

$$\pi = I - Cost \quad 4.1$$

次に、CO₂総排出量*E*の計算について説明する。船舶1隻のある時間内におけるCO₂排出量は曹[39]が作成した評価関数を参考して式4.2のように定義する。CO₂排出量係数、馬力とC重油比重は、シミュレータの初期設定値として設定され、運航時間は航行距離と船速の設定によって求められる、燃料消費率の計算は4.5節燃費モデルに詳しく説明する。また、CO₂総排出量の単位は thousand ton (千トン)である。

$$E = CO_2 \text{ 排出量係数}(kg/l) \times \text{馬力}(PS) \times \text{燃料消費率}(kg/PS/h) \quad 4.2$$

$$\times \text{運航時間}(h) / C \text{ 重油比重}(kg/l)$$

最後にCO₂原単位*CI*の計算を説明する。CO₂原単位の定義は4.3.2で述べたように、「1トンの貨物を1キロメートル運ぶのに排出するCO₂グラム数」である。ここで、船のCO₂原単位は基本的に1年の輸送活動に基づいて計算されるため、式4.3は、船1隻が1年間の輸送活動におけるCO₂原単位の計算式を示す。ここで、*E_s*は前に定義された一年間のCO₂排出量であり、「貨物量×運行距離」は船一年間の活動量で定義できる。CO₂排出量係数とC重油比重は環境省温室効果ガス排出量の算定・報告・公表制度に基づいて設定する。また、CO₂原単位の単位は(g/(ton・km))である。

$$CI = \frac{E_s(\text{thousand ton})}{\text{貨物量}_{\text{year}}(\text{ton}) \times \text{運航距離}(km) \times 10^6} \quad 4.3$$

以上、本項はシミュレータの出力である総利益、CO₂総排出量とCO₂原単位の定義と計算手法を説明した。

4.4.2 創発効果の探索

複数技術の導入における相互作用の効果を探索するために、導入効果間で比較する必要がある。そのため、評価指標の基準となるベースラインを設定しなければならない。本研究における各評価指標総利益(million \$)、CO₂排出量(thousand ton)、CO₂排出原単位(g/(ton・km))は、それぞれの基準は評価指標によって導入効果の計算方法が異なるため、これからは詳しく説明する。

4.4.2.1 総利益とCO₂排出量における創発効果の探索

まずは総利益とCO₂排出量の正規化手法を説明する。図 4-3 は計算手法の概要を示す。両方は総量を表す単位なので、計算方法は同様である。ここで、単一技術または複数技術の組み合わせを導入した時に生じた「導入効果」(Introduction effect)の計算を行う。計算手順は以下となる。

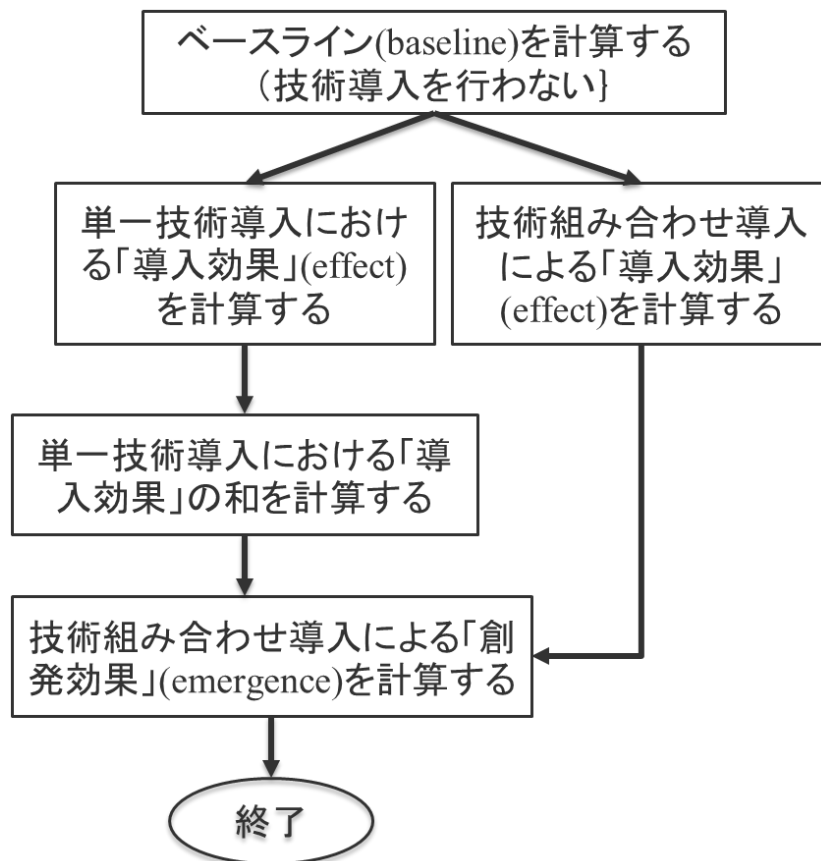


図 4-3 総利益とCO₂排出量における創発効果を計算する概要図

- i. 技術導入を行わない時にシミュレーションを行う。入力するパラメータは全て基本設定のパラメータであるため、その出力はベースライン、または基準値($simulation_{T_0}$)とする。
- ii. 単一の技術を導入するシミュレーションを行う。ここで、技術 ID i の場合、シミュレーションの出力は $simulation_{T_i}$ とする。
- iii. 複数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を行う。ここで、例えば技術 ID i, j, \dots の組み合わせを同時に導入したシミュレーションの結果は

$simulation_{Ti+Tj+\dots}$ とする。

- iv. 単一技術導入の効果を定量化するために、ii で計算した結果と、i で計算した基準値の差分($effect_{single}$)を計算する。この差分は単一技術導入による「導入効果」である。計算式を式 4.4 に示す。

v.

$$effect_{single} = simulation_{Ti} - simulation_{T0} \quad 4.4$$

- vi. 技術の組み合わせを導入する効果を定量化するために、iii で計算した結果と、i で計算した基準値の差分($effect_{combi}$)を計算する。この差分は複数技術の導入による「導入効果」である。計算式を式 4.5 に示す。

$$effect_{combi} = simulation_{Ti+Tj+\dots} - simulation_{T0} \quad 4.5$$

ここまでは単一技術の導入または複数技術の組み合わせの導入が生じた「導入効果」の計算である。具体的なイメージを図 4-4 に示す。図 4-4 では、技術導入を行わない時に「導入効果」が存在しないので、「導入効果」は 0 である。技術を導入する際、技術によって効果が異なるため、「導入効果」も異なる。

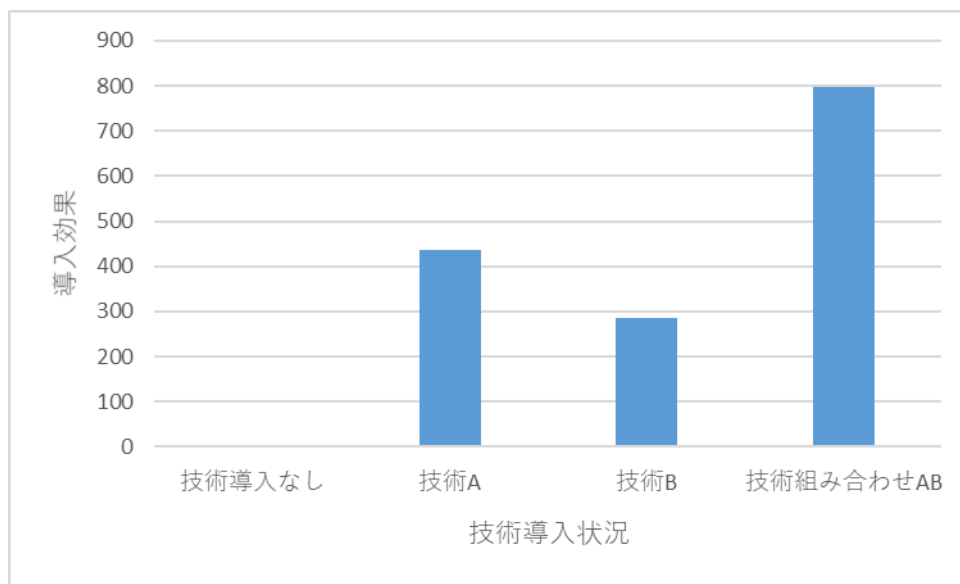


図 4-4 総利益とCO₂排出量における「導入効果」計算のイメージ

ここまでは総利益とCO₂排出量の「導入効果」をそれぞれ式 4.4 と式 4.5 で計算し、技術導入による海事産業へもたらす効果の定量化を行った。これからは、技術の組み合わせを導入する際の創発的な効果を検証するため、単一の技術導入効果と比較して相互作用を探索する。ここで、この創発的な効果を「創発効果」(Emergence effect)と定義する。

複数の技術(ID i, j)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($emergence_{combi}$)を計算する。この差分は、「創発効果」である。計算式を式 4.6 に示す。「創発効果」のイメージを図 4-5 に示す。

$$emergence_{combi} = effect_{combi} - (effect_{single,i} + effect_{single,j} + \dots) \quad 4.6$$

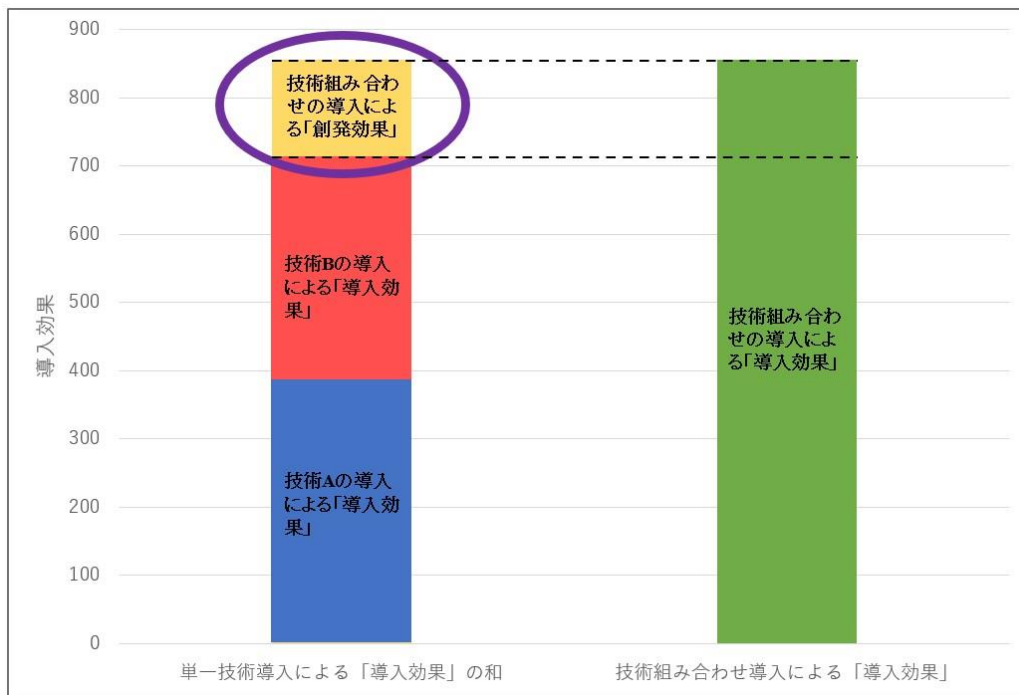


図 4-5 総利益とCO₂排出量における「創発効果」計算のイメージ

ここで、各評価指標における「創発効果」の意味を説明する。

まず、総利益の場合を考える。運航総利益は技術導入によって増加していくと想定される。従って、総利益における「創発効果」が正数の場合は、技術組み合わせを同時に導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の和より大きい

と考えられる。その場合は技術の組み合わせ導入によって良い「創発効果」が存在することを意味する。

一方、総利益における「創発効果」が負数の場合は、技術組み合わせを同時に導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の和より小さいと考えられる。その場合は技術の組み合わせ導入によってマイナスの「創発効果」が存在することを意味する。

また、「創発効果」が 0 に近い場合は、技術の組み合わせを導入することによる相互作用がほぼ存在しないという意味である。

次に、CO₂排出量の場合を考える。総利益の「創発効果」と逆に、CO₂排出量は技術導入によって減少していくと想定される。従って、CO₂排出量における「創発効果」が負数の場合は、技術組み合わせを同時に導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の和より大きいと考えられる。この場合は技術の組み合わせ導入によって良い「創発効果」が存在することを意味する。

一方、CO₂排出量における「創発効果」が正数の場合は、技術組み合わせを同時に導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の和より小さいと考えられる。その場合は技術導入によるマイナスの「創発効果」が存在することを意味する。

また、「創発効果」が 0 に近い場合は、技術の組み合わせを導入することによる相互作用がほぼ存在しないという意味である。なお、CO₂排出量における効果は比率で示されるため、複数の技術を導入した場合の効果のベースラインは後述するように積とする。

4.4.2.2 CO₂排出原単位における創発効果の探索

次に、CO₂排出原単位の「創発効果」の計算手法を説明する。CO₂排出原単位の「創発効果」の計算手法の概要を図 4-6 に示す。CO₂排出原単位は効率を表す単位なので、導入効果をパーセンテージで表示する。計算を行う際にはパーセンテージに変更する。

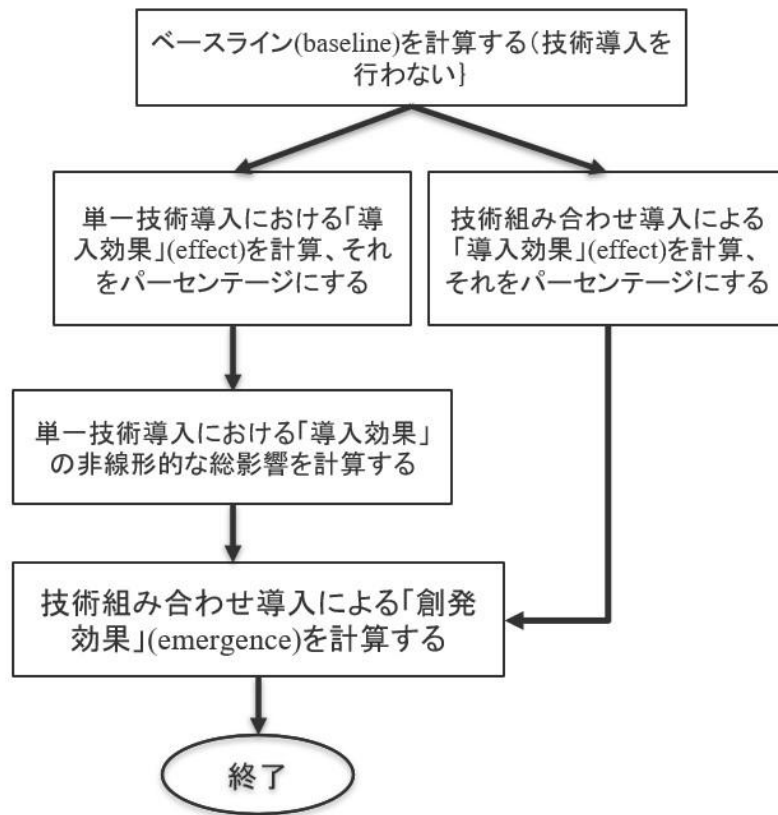


図 4-6 CO₂排出原単位による創発効果を計算する概要図

手順は以下となる。

- i. 技術導入を行わない時のシミュレーションを行う。入力するパラメータは全て基本設定のパラメータであるため、その出力はベースライン、または基準値($simulation_{T_0}$)とする。
- ii. 単一の技術を導入するシミュレーションを行う。ここで、技術 ID i の場合、シミュレーションの出力は $simulation_{T_i}$ とする。
- iii. 複数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を行う。ここで、例えば技術 ID i, j, \dots の組み合わせを同時に導入したシミュレーションの結果は $simulation_{T_i+T_j+\dots}$ とする。
- iv. 単一技術導入の効果を定量化するために、ii で計算した結果と、i で計算した基準値の差分を計算する。そして、この差分を基準値($simulation_{T_0}$)で割り、得られた結果($effect_{single}$)は単一技術導入による「導入効果」である。計算式を式 4.7 に示す。

$$effect_{single} = \frac{simulation_{Ti} - simulation_{T0}}{simulation_{T0}} \times 100\% \quad 4.7$$

- v. 技術の組み合わせを導入する効果を定量化するために、iii で計算した結果と、i で計算した基準値の差分を計算する。この差分を基準値($simulation_{T0}$)で割り、得られた結果($effect_{combi}$)は複数技術の導入による「導入効果」である。計算式を式 4.8 に示す。

$$effect_{combi} = \frac{simulation_{Ti+Tj+\dots} - simulation_{T0}}{simulation_{T0}} \times 100\% \quad 4.8$$

ここまでは単一技術の導入または複数技術の組み合わせの導入が生じた「導入効果」の計算である。具体的なイメージを図 4-7 に示す。4.4.2.1 での説明と同じように、図 4-7 に、技術導入を行わない時に「導入効果」が存在しないので、「導入効果」は 0 である。技術を導入する際、技術によって効果が異なるため、「導入効果」も異なる。

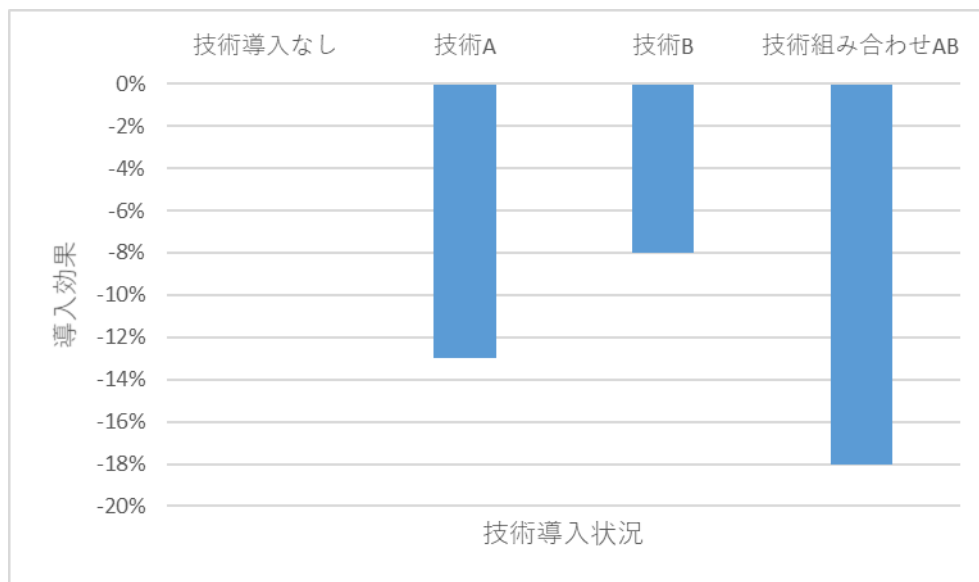


図 4-7 CO₂排出原単位における「導入効果」計算のイメージ

4.4.2.1 と同様に、ここまではCO₂排出原単位の「導入効果」を式 4.7 と式 4.8 で計算し、技術導入による海事産業へもたらす効果の定量化を行った。これからは、技術の組み合わせを導

入する際の創発的な効果を検証するため、単一の技術導入効果と比較して「創発効果」を探索していく。

ここで、CO₂排出原単位の「導入効果」がパーセンテージなので、複数の技術をそれぞれ単独的に導入する際の「導入効果」の総影響($influence_{combi}$)は、線形的な和ではなく、式 4.9 で定義された計算式で計算される。

$$influence_{combi} = ((1 - |effect_{single,i}|) \times (1 - |effect_{single,j}|) \times \dots) \quad 4.9$$

そして、複数の技術(ID i, j)の組み合わせを同時に導入する際の「導入効果」と、その総影響の差分($emergence_{combi}$)を計算する。この差分は、「創発効果」である。計算式を式 4.10 に示す。「創発効果」のイメージを図 4-8 に示す。

$$emergence_{combi} = effect_{combi} - influence_{combi} \quad 4.10$$

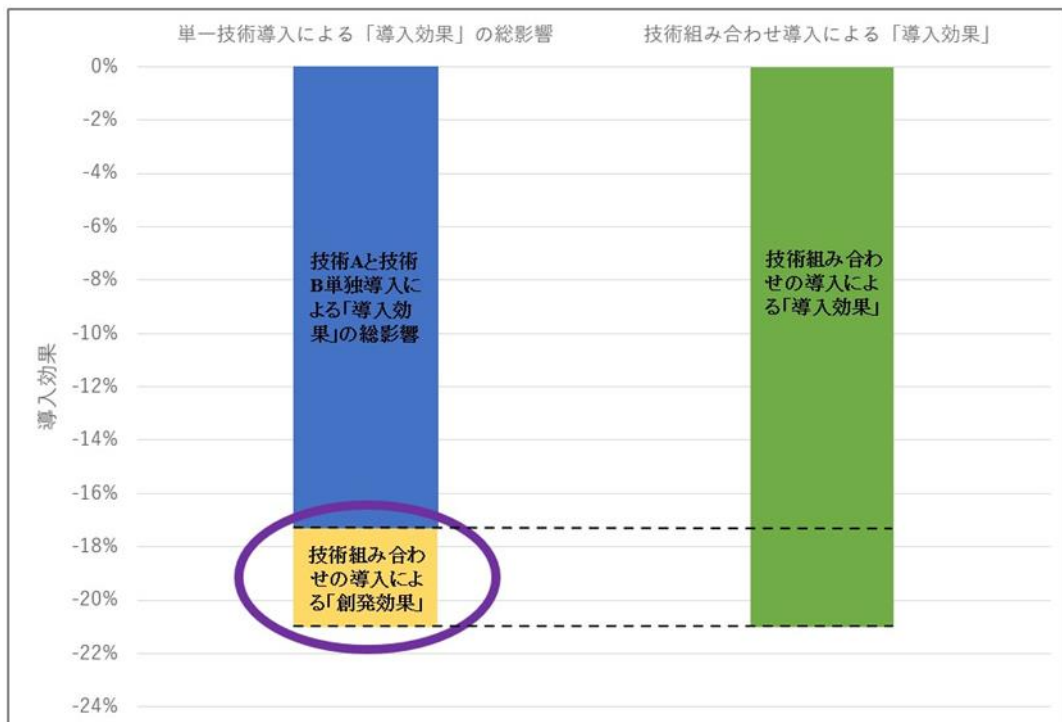


図 4-8 CO₂排出原単位における「創発効果」計算のイメージ

ここで、こちらの「創発効果」の意味を説明していく。

CO₂排出量の「創発効果」と同じく、CO₂排出原単位は技術導入によって減少していくと想定される。従って、CO₂排出原単位における「創発効果」が負数の場合は、複数の技術を組み合わせて導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の総影響より大きいと考えられる。この場合は技術の組み合わせ導入によって良い「創発効果」が存在することを意味する。

一方、CO₂排出原単位における「創発効果」が正数の場合は、複数の技術を組み合わせて導入した時の「導入効果」が、技術が分かれてそれぞれ導入された時の「導入効果」の総影響より小さいと考えられる。その場合は技術導入によるマイナスの「創発効果」が存在することを意味する。

また、「創発効果」が0に近い場合は、技術の組み合わせを導入することによる相互作用がほぼ存在しないことを意味する。

以上、本項は評価手法を用いる評価指標の正規化と、技術導入による「導入効果」を「創発効果」を説明した。

4.4.3 評価指標の可視化

本項は、意思決定者のハイパフォーマンスな技術の組み合わせへの投資を容易にするために、指標の可視化が必要である。以下は評価指標の可視化手法を説明する。

本研究は、二次元的に技術組み合わせの導入による「創発効果」を分析・評価するため、同時に導入する技術の数を2個に設定する。また、第2章で紹介されたシステムズアーキテクチャにおけるトレードスペース分析と Morphological Matrix に基づき、技術組み合わせを導入する際の相互作用の評価図を作成した。作成したグラフのイメージは 2.3.1 の図 2-12 自動車のエンジンによるトレードスペースを参考し、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する。

ここで、CO₂排出状況を表すのは、排出効率を代表するCO₂排出原単位と排出総量を代表するCO₂排出量の2つの指標である。従って、本研究が作成するトレードスペースの縦軸を、CO₂排出原単位の「創発効果」と、CO₂排出量の「創発効果」2種類に分けて設定する。横軸は運航利益を代表する総利益の「創発効果」である。

まず、トレードスペースの縦軸がCO₂排出原単位の「創発効果」に設定された場合に対して図 4-9 を用いて説明する。

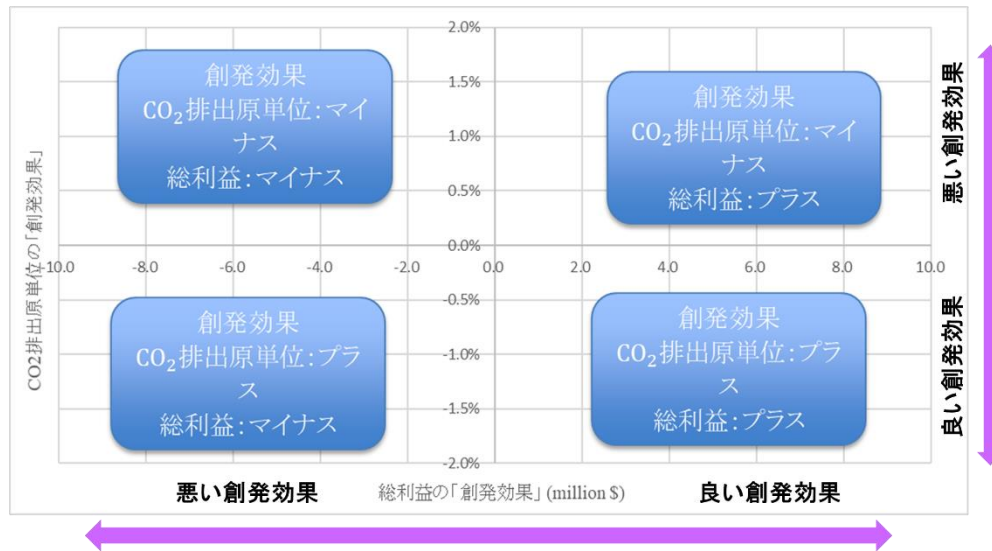


図 4-9 縦軸がCO₂排出原単位における「創発効果」のイメージ

図 4-9 が 4 つの部分に分けられる: 総利益の「創発効果」とCO₂排出原単位の「創発効果」が全て正数である第一象限、総利益の「創発効果」が正数で、CO₂排出原単位の「創発効果」が負数である第二象限、総利益の「創発効果」とCO₂排出原単位の「創発効果」が全て負数である第三象限と、総利益の「創発効果」が負数で、CO₂排出原単位の「創発効果」が正数である第四象限。各象限と横軸、縦軸が持つ意味を図 4-9 に示すように、CO₂排出原単位が正の場合は悪い創発効果が現れ、総利益が正の場合は良い創発効果が現れると考えられる。従って、第二象限は技術導入によって良い総合創発効果、第四象限は技術導入によって悪い総合創発効果が現れることを意味する。

次に縦軸がCO₂排出量の「創発効果」とした場合に、図 4-10 を用いて説明する。

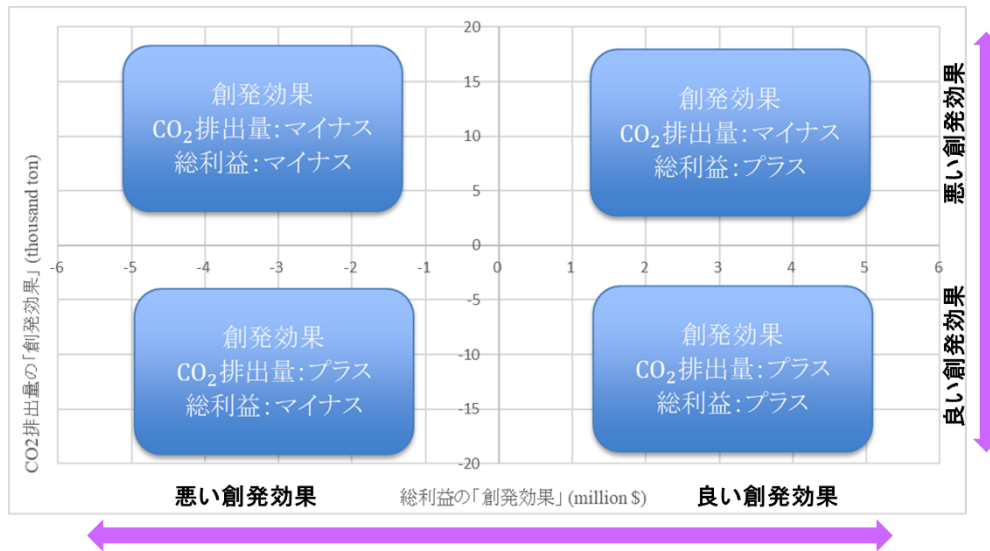


図 4-10 縦軸がCO₂排出量における「創発効果」のイメージ

図 4-9 と同じのように、図 4-10 が 4 つの部分に分けられる: 総利益とCO₂排出量の「創発効果」が全て正数である第一象限、総利益の「創発効果」が正数で、CO₂排出量の「創発効果」が負数である第二象限、総利益とCO₂排出量の「創発効果」が全て負数である第三象限と、総利益の「創発効果」が負数で、CO₂排出量の「創発効果」が正数である第四象限。各象限が持つ意味を図 4-10 に示すように、CO₂排出量が正の場合は悪い創発効果が現れ、総利益が正の場合は良い創発効果が現れると考えられる。従って、第二象限は技術導入によって良い総合創発効果、第四象限は技術導入によって悪い総合創発効果が現れることを意味する。

よって本節では、運行利益とCO₂排出状況を評価指標としたうえで、技術の組み合わせを導入する際、相互作用を考慮した効果を分析できる評価手法を提案した。

4.5 海上物流シミュレーションの詳細

4.1 節から 4.4 節までは提案手法の概要と評価手法の詳細を説明したが、ここからは海上物流シミュレーションの詳細を説明する。まず、シミュレータを構成する各モデルを節ごとに分けて詳しく説明した後、シミュレーションの入力パラメータを整理する。最後はシミュレーションの流れを説明する。

4.5.1 燃費モデルの作成

4.5.1.1 船舶性能

CO₂排出量とCO₂排出原単位を算出するために、燃料消費量の計算が必要である。燃料消費量に関わる部分の概要を図 4-11 に示す。燃料消費量 FOC [ton/h]の算出は、船速 v [knot]を入力として、船体性能、エンジン性能、プロペラ性能を定義することと、経年劣化・生物汚損影響、操船・気海象影響を算出することから行う。なお、計算された燃料消費量に航行時間[h]と燃料価格[\$/ton]を乗ずることで燃料費[\$]とする。

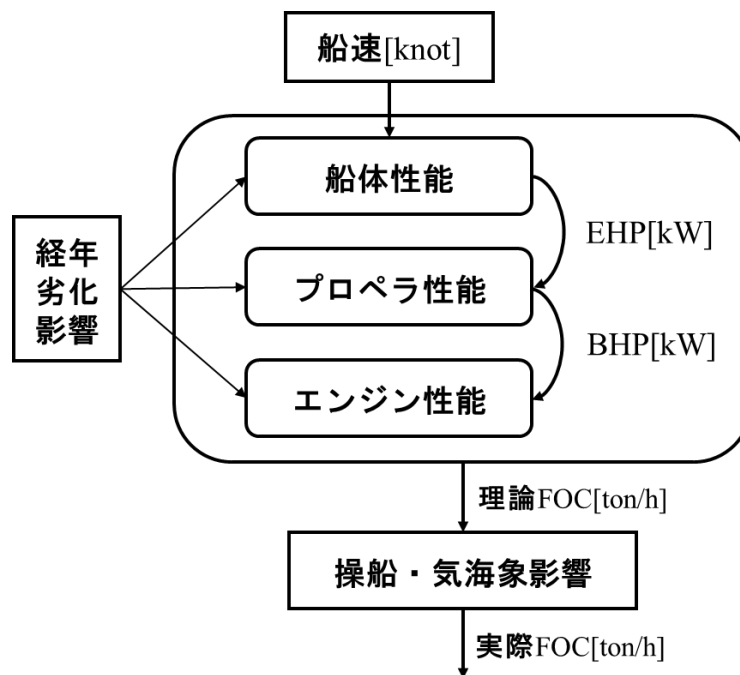


図 4-11 燃料消費量算出の手順

船舶性能部分は船型・エンジン・プロペラで構成される。この構成より構築される船舶性能モデルを用いて船舶のライフサイクル期間における運航を行う。そのため、基本となる船舶性能ではライフサイクル期間中において初期設計のみで使用され、船体・エンジン・プロペラの構成が変化することはない。なお、船舶性能モデルを構築するための船舶性能指標を導出する際に船舶海洋工学シリーズ[40][41]を参考にした。

以下の項で、これらの船体・プロペラ・主機から構築される船舶性能部分について詳述する。

4.5.1.1.1. 船体

船舶推進性能を左右する要素として、船舶の船体(Hull)は、船舶の進行速度、波や風などから受ける抵抗などに影響し、船舶全体にかかる抵抗全てに影響を及ぼす。そのため、本研究では、入力値船速(Velocity, V)に対する有効馬力(Effective Horse Power, EHP)を定義することで船型の定義を行う。

そこで、船速 V [m/s]と有効馬力 EHP[kW]の関係について、船体の全抵抗 R_t [N]を用いると、次の式 4.11 のように表せる。

$$EHP(V) = \frac{R_t \cdot V}{1000} \quad 4.11$$

全抵抗 R_t は全抵抗係数 C_{ts} および浸水面積 S [m^2]、海水の密度 ρ [$kg \cdot s^2/m^4$]を用いて式 4.12 のように定義される。

$$R_t = \frac{1}{2} \rho C_{ts} V^2 S \quad 4.12$$

なお、平水中全抵抗係数 C_{ts} は三次元外挿法により形状影響係数 k および、造波抵抗係数 C_w 、摩擦抵抗係数 C_{fs} を用いて式 4.13 のように表せる。また、造波抵抗係数 C_w は船型データから式 4.14 のように船速 V [m/s]の二次式で近似し、形状影響係数 k は船型情報を参考に設定する。

$$C_{ts} = C_w + (1 + k)C_{fs} \quad 4.13$$

$$C_w = C_{w0} + C_{w1}V + C_{w2}V^2 \quad 4.14$$

$$C_{w0}, C_{w1}, C_{w2} : \text{定数}$$

摩擦抵抗係数 C_f は Schoenherr 簡便式により、レイノルズ数 Re (式 4.15)を用いて式 4.16 のように算出される。なお、 L は実船の代表長さ[m]、 ν は動粘性係数[m^2/s]である。

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad 4.15$$

$$C_f = 0.463 \cdot (\log_{10} Re)^{-2.6} \quad 4.16$$

船体性能の改善は造波抵抗係数 C_w の減少として考える。つまり式(4.13)のパラメータ C_{w0} , C_{w1} , C_{w2} の変更を考慮して有効馬力 EHP[kW]の変更を行う。

4.5.1.1.2. プロペラ

プロペラ部では、制動馬力(Brake Horse Power, BHP)から軸馬力(Shaft Horse Power, SHP)、伝達馬力 (Delivered Horse Power, DHP)、推力馬力(Thrust Horse Power, THP)、有効馬力(Effective Horse Power, EHP)と順に船体全体へ力が変換されている。制動馬力 BHP が EHP まで伝達される際に生じる出力の損失は元の出力と伝達された出力の比から各効率として表すことが出来る。そのため、制動馬力 BHP から軸馬力 SHP への変換効率を機械効率 η_M 、軸馬力 SHP から伝達馬力 DHP への変換効率を伝達効率 η_T 、伝達馬力 DHP からプロペラの推力馬力 THP への変換効率をプロペラ船後効率 η_B 、推力馬力 THP から有効馬力 EHP への変換効率を船殻効率 η_H と定義すると以下の式 4.17、式 4.18、式 4.19、式 4.20 のように表現できる。

$$\eta_M = \frac{SHP}{BHP} \quad 4.17$$

$$\eta_T = \frac{DHP}{SHP} \quad 4.18$$

$$\eta_B = \frac{THP}{DHP} \quad 4.19$$

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP} \quad 4.20$$

従って、船体部で算出された有効馬力 EHP からエンジン出力である制動馬力 BHP[kW] を式 4.21 のようにまとめられる。

$$EHP = \eta_M \eta_T \eta_B \eta_H \cdot BHP \quad 4.21$$

ここで、制動馬力 BHP から有効馬力 EHP への変換効率について式 4.22 のように変換できる。

$$\eta_M \eta_T \eta_B \eta_H = \frac{EHP}{BHP} = \frac{EHP}{DHP} \cdot \frac{DHP}{BHP} = \eta \cdot \eta_s \quad 4.22$$

効馬力 EHP と伝達馬力 DHP の比率である推進効率 η と、伝達馬力 DHP と制動馬力 BHP の比率であるシャフト効率 η_s に分けて考える。式 4.23 に示すプロペラ流入速度 V_a と船速 V の比である有効伴流係数 w と式 4.24 に示す船体抵抗 R_T とプロペラの推力 T の比であるスラスト減少係数 t を用いることで、推進効率 η は式 4.25 のように表せる。

$$1 - w = \frac{V_a}{V} \quad 4.23$$

$$1 - t = \frac{R_T}{T} \quad 4.24$$

$$\eta = \frac{EHP}{DHP} = \frac{1 - t}{1 - w} \eta_B \quad 4.25$$

また、プロペラ船後効率 η_B はプロペラトルク Q と推力 T を用いることで次の式 4.26 のように表せる。

$$\eta_B = T \cdot \frac{V_a}{2\pi n Q} \quad 4.26$$

ここで、プロペラ性能を向上させるには、式(4.18)のプロペラ船後効率 η_B パラメータを変更することによって表現する。

4.5.1.1.3. エンジン

船舶性能を改善することに加え、最終目的である船舶が航行するのに必要な燃料消費量を求めるために、船舶構成機器の 1 つである主機エンジン(Engine)についてディーゼル機関を想定して定義を行う。

エンジン部では、プロペラ部で算出された制動馬力 BHP から燃料消費率 $SFOC$ [g/kWh] を算出する。燃料消費率 $SFOC$ はエンジンの相対負荷である $Load$ をエンジン最大出力 BHP_{max} [kW] と制動馬力 BHP を用いて式 4.27 のように 2 次式で近似する。

$$SFOC = SFOC_0 + SFOC_1 \cdot Load + SFOC_2 \cdot Load^2 \quad 4.27$$

$$= SFOC_0 + SFOC_1 \left(\frac{BHP}{BHP_{max}} \right) + SFOC_2 \left(\frac{BHP}{BHP_{max}} \right)^2$$

$SFOC_0, SFOC_1, SFOC_2$: 定数

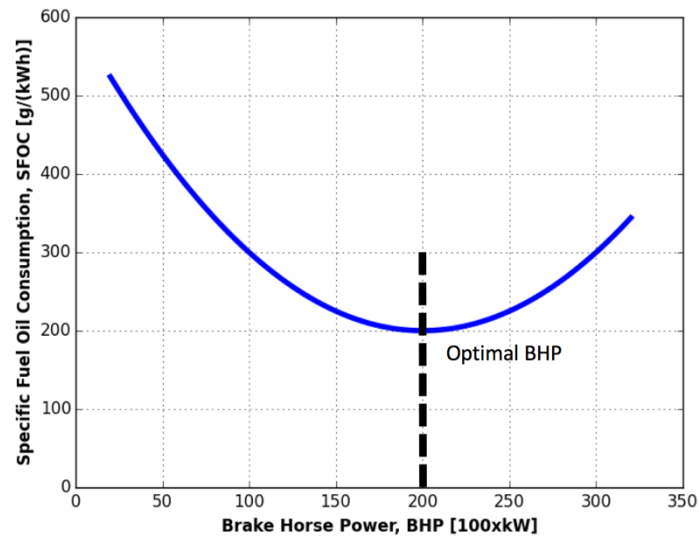


図 4-12 主機の燃料消費率と最適出力値の例

最終的に、理論上の燃料消費量 FOC [ton/h] は燃料消費率 $SFOC$ [g/kWh] と制動馬力 BHP [kW] を乗ずることで式 4.28 のように算出できる。

$$FOC_{theory} = \frac{SFOC \cdot BHP}{1000} \quad 4.28$$

図 4-12 は主機の燃料消費率と最適出力値の一例である。燃料消費率 $SFOC$ について、通常は 1 つのエンジンに対して図 4-13 に示すようにある回転数もしくは出力の際に燃料消費率が最小になるような最適回転数、最適出力値を持つように設計されている。燃料消費率を改善するために、最小となるような最適回転数を調整することができるため、燃料消費の改善が実現出来る。

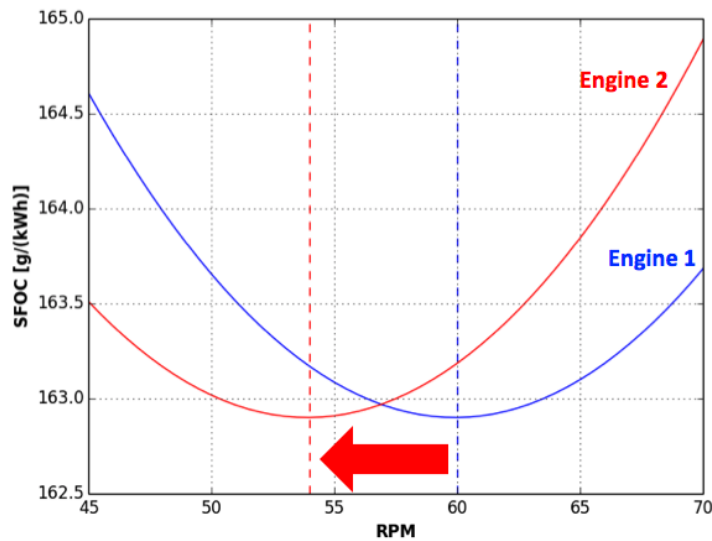


図 4-13 燃料消費率改善の一例

仕様書などに記載されているエンジンの最大回転数 N_{max} を用いて主機出力 BHP を定義する際、 BHP を回転数 n の関数として近似することができ、以下の式 4.29 のように 2 次関数を用いて表すことができる。

$$BHP = BHP_0 + BHP_1 \cdot \frac{n}{N_{max}} + BHP_2 \cdot \left(\frac{n}{N_{max}}\right)^2 \quad 4.29$$

以上より、本研究で用いるプロペラ回転数に対する機関出力の制動馬力 BHP 及び燃料消費率の特性を $BHP_i (i = 0,1,2)$ 及び $SFOC_i (i = 0,1,2)$ の定数、エンジンの仕様書等より得るエンジン最大出力 BHP_{max} 及びエンジンの最大回転数 N_{max} を用いて定義することが出来る。

ここで、エンジン性能の向上は、燃料消費率に影響を与えられられるため、燃料消費率特性を表すパラメータ $SFOC_0, SFOC_1, SFOC_2$ の変更を考慮する。

4.5.1.1.4. 船体重量率

通常、船舶は積載能力の向上による積載可能量の増加が想定される。しかし本研究では需要量(積載量)の変化は考慮しないため、積載能力の向上を船舶小型化と定義して影響を考える。これは、船舶の燃料消費量は水との接触領域の面積と形状によって決まり、積載可

エネルギーが同一の場合。船体抵抗が低減されるよう船舶を縮小することが想定されるからである。船体重量影響として船体重量率 W ($0 \sim 1$, default を 1 とする) を定義し、式 4.30、式 4.31 と式 4.32 に示す船長 $L[m]$ 、浸水面積 $S[m^2]$ 、建造費 $C_{ship}[\$]$ (材料費) の 3 要素への影響を考慮する。

$$L_{actual} = L \cdot \sqrt{W} \quad 4.30$$

$$S_{actual} = S \cdot W \quad 4.31$$

$$C_{ship_{actual}} = C_{ship} \cdot W \quad 4.32$$

ここで、船体重量率の減少による船舶積載能力の向上は、船体重量率を表すパラメータ W ($0 \sim 1$) の変更を考慮する。

4.5.1.2 経年劣化・操船影響

実海域における船舶推進性能は、種々の要因によって変化する。図 4-14 に内藤[42]が作成した実海域中の船速低下概念図を示す。実海域で船舶性能に影響を及ぼす要因は大別して経年劣化、生物汚損と季節影響の 3 つであるといえる。

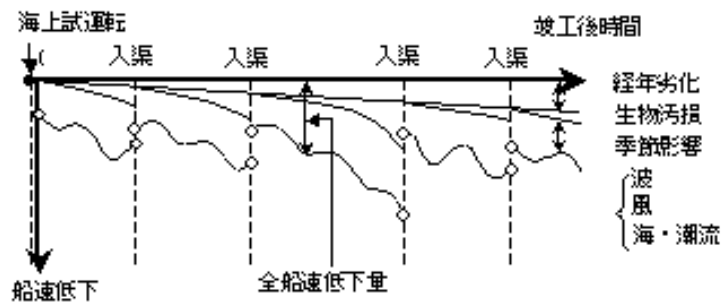


図 4-14 実海域における船速低下概念図[42]

経年劣化は、船体外板の粗度増加による抵抗の増加、主機、プロペラ等の劣化による推進力の低下であり、基本的には回復することはない。経年劣化率の目安として表 4-1 に示すような値を挙げている[43]。これらの値はプロペラ特性の経年劣化はないものとして、異なる時期に様々な種類の船で計測された経年劣化率の平均値とされている。

表 4-1 経年劣化率[43]

指標	Dock-to-dock	Age Effect
船速[knot]	1.0	0.1 / year
回転数[rpm]	2.0 ~ 4.0	0.5 ~ 2 / year
馬力[%]	20 ~ 60	20 / 8 year

生物汚損は、船体外板やプロペラにスライムと呼ばれる細菌分泌物の皮膜が生じ、その上に海洋生物が順次付着することにより生じる。図 4-15 は船体の表面に付着する海洋生物の例である[44]。これは入渠時に洗浄することにより回復する。



図 4-15 船体表面に付着した海洋生物[44]

季節影響は、海流・潮流による船速の変化や、波、風、操船等による抵抗の変化、推進性能の変化により生じる。しかしこれらの要因の燃費影響は、現在はアナログデータを解析することによって分解・評価されており、リアルタイムな把握には至っていない。新しい技術による計測技術の向上によってこれらの要因がリアルタイムモニタリング可能になれば、最適なタイミングでの汚損洗浄などで燃費改善とダウンタイムの削減が期待できる。

4.5.1.2.1. 経年劣化影響

平水中における設計時の船舶推進性能は 4.5.1.1 のように算出できるが、経年劣化の影響によって推進性能は低下する。本研究では、稗方ら[9]のモデルを参考にして、船体、プロペラとエンジン部に経年劣化率と生物汚損率を設定する。具体的には式 4.33、式 4.34 と式 4.35 の

ように船体部は摩擦抵抗の増加、プロペラ部はプロペラ単独効率の低下、エンジン部は燃料消費率の増加による劣化を定義する。なお、経年劣化率・生物汚損率は、設定された範囲内から航海毎にランダム抽出されるものとする。

$$Cf_{actual} = Cf_{design} / (1 - \eta_{Hd})(1 - \eta_{Hf}) \quad 4.33$$

$$\eta_{0_{actual}} = \eta_{0_{design}} * (1 - \eta_{Pd})(1 - \eta_{Pf}) \quad 4.34$$

$$SFOC_{actual} = SFOC_{design} / (1 - \eta_{Ed}) \quad 4.35$$

η_{Hd} : 船体経年劣化率, η_{Hf} : 船体生物汚損率, η_{Pd} : プロペラ経年劣化率,
 η_{Pf} : プロペラ生物汚損率 η_{Ed} : エンジン経年劣化率

4.5.1.2.2. 操船影響

荒い気海象中を航行する場合は、波風の抵抗を多分に受けるため船の推進性能は平水中推進性能よりも低い値となる。操船・気海象による燃料消費量への影響は、気海象による燃料消費量増加率 $\Delta SFOC$ と操船影響 $\varepsilon_{maneuvering}$ を用いて式 4.36 のように定義する。

$$FOC_{actual} = FOC'_{theory} \cdot (1 + \varepsilon_{maneuvering}) \quad 4.36$$

$$= \frac{SFOC \cdot (1 + \Delta SFOC) \cdot BHP}{1000} \cdot (1 + \varepsilon_{maneuvering})$$

燃料消費量増加率 $\Delta SFOC$ は、佐々木らによる海の 10 モード指標の先行研究[18]から得られる船速低下率 ΔV から船速一定条件の下、4.5.1.1 節で説明した燃費モデルを用いて求める。

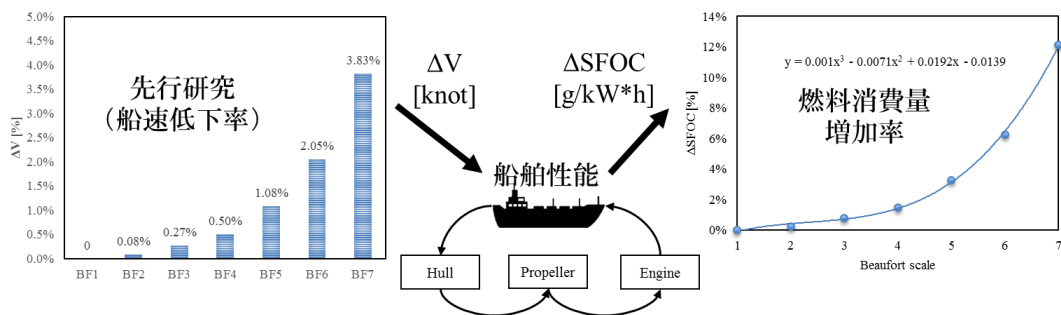


図 4-16 気海象影響による船速低下率から燃料消費量増加率の算出[35]

操船影響は、先行事例[22]において実運航データの解析により理論値から 10%程度の燃費変動が観測されたので、 $\varepsilon_{maneuvering}$ に対して 0~0.1 の値を確率的に割り振ることで定義する。それはベータ分布 ($\alpha = \alpha_{maneu}$, $\beta = \beta_{maneu}$) に従うものとして、式 4.37 に示す確率密度関数と式 4.38 に示すベータ関数に従って操船影響を発生させる。

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{0.1}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{x}{0.1}\right)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad 4.37$$

$$B(\alpha, \beta) = \frac{(\alpha - 1)! (\beta - 1)!}{(\alpha + \beta - 1)!} \quad (\alpha, \beta : \text{自然数}) \quad 4.38$$

燃料消費モデルの操船影響の変化に対しては燃費変動確率を表すパラメータ (α_{maneu} , β_{maneu}) が変更される。

4.5.2 故障・気象モデルの作成

本研究で作成した事故・故障モデルは稗方ら[9]の研究を参考した。

4.5.2.1 船体・船用機器故障

船体・船用機器故障の影響は、運航サービス停止を伴うダウンタイム時間と、航海中の停船修理による遅延時間に設定する。

船体・船用機器の故障は一般的な信頼性工学の枠組みに従って、航行時間に依存する疲労蓄積を考慮してモデル化を行う。対象における故障の時間分布は一般的にワイブル分布を用いて表現され[45]、式 4.39 のように使用時間 t に依存した β と σ の 2 パラメータで表すことができる。図 4-17 に不信頼度 (故障確率) の時間推移と β と σ による形状の違いを示した。

$$R(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\sigma} \right)^\beta \right] \quad 4.39$$

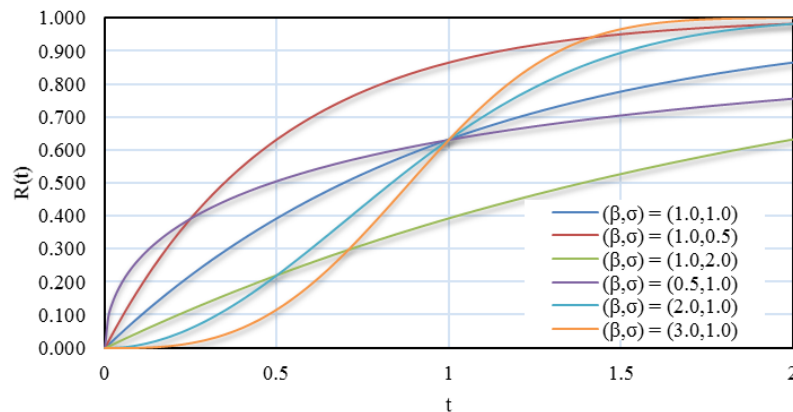


図 4-17 不信頼度(故障確率)の時間推移

船体と各船用機器に β と σ を設定することで、故障モデルを作成する。具体的には、船用機器(エンジン・航海機器・補機)に対してパラメータ β , σ と平均復旧時間 $T_{repair}[h/case]$ を設定し、船体の疲労度合を t として航海ごとに t を更新することで、各航海の故障確率 $R(t)$ を定義する。復旧時間は式 4.40 の確率密度関数で表されるベータ分布($\alpha = 2$, $\beta = 2$)に従って発生させる。なお、復旧後の疲労度合 t は 0 に更新される。

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{T_{repair}}\right) \left(1 - \frac{x}{T_{repair}}\right)}{B(2, 2)} \quad 4.40$$

4.5.2.2 気海象影響

船舶が実海域に航行する際、荒天に遭遇する確率は、ベータ分布($\alpha = \alpha_{meteo}$, $\beta = \beta_{meteo}$)を用いて式 4.41 に示す確率密度関数によって定義する。

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{7}\right)^{\alpha_{meteo}-1} \left(1 - \frac{x}{7}\right)^{\beta_{meteo}-1}}{B(\alpha_{meteo}, \beta_{meteo})} \quad 4.41$$

本研究では、世界気象機関の定義した風力階級(Beaufort Scale)を基に航路毎に異なる海象状態を想定することとした。具体的には、齋藤[37]がアメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)や Global Wave Statistics などの機関が蓄積している気象過去データを解析し、船舶の運用を行う対象とする想定航路における風力階

級の発現確率を定義した。定義する風力階級の発現確率を例として次の図 4-18 に示す。

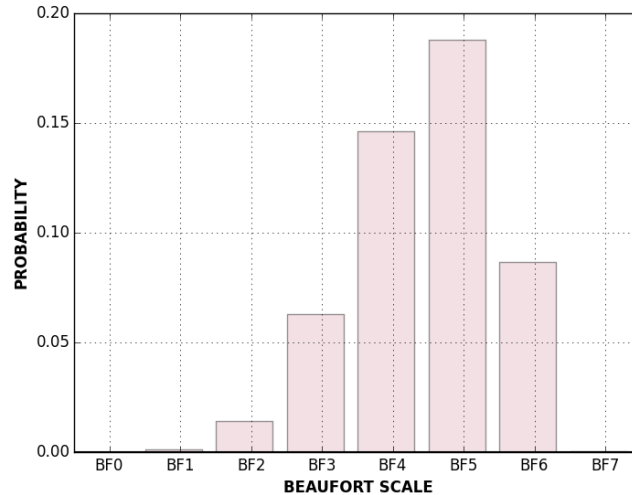


図 4-18 定義する風力階級発現確率の例[58]

気象モデルにおける荒天に遭遇する確率に従っているベータ分布 ($\alpha = \alpha_{meteo}$, $\beta = \beta_{meteo}$) のパラメータを変更によって技術導入の影響を定義することができる。

4.5.3 荷役モデルの作成

港湾での荷役作業は、遅延時間および荷役費用などに影響を与える。遅延時間は荷役作業遅延と荷役装置故障の 2 つに分けて、式 4.42 に示すように荷役作業時間は荷役作業基準時間 T_{base} と、荷役作業遅延 T_{cargo} による遅延時間と荷役装置故障 $T_{machine}$ による遅延時間の和を定義する。

$$Time_{cargo} = T_{base} + T_{cargo} + T_{machine} \quad 4.42$$

具体的な遅延時間は、荷役作業遅延確率 $P_{cdelay}[case/port]$ と荷役装置故障確率 $P_{cfault}[case/port]$ に従って、作業遅延と装置故障が発生する。荷役作業遅延 T_{cargo} と荷役装置故障遅延 $T_{machine}$ は同様に、平均遅延時間 $T_{cdelay}[hour/case]$ 、遅延時間分布 $\alpha_{cargo}, \beta_{cargo}$ を入力して式 4.43 の確率密度関数を定義する。

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{T_{Cdelay}}\right)^{\alpha_{delay}-1} \left(1 - \frac{x}{T_{Cdelay}}\right)^{\beta_{delay}-1}}{B(\alpha_{delay}, \beta_{delay})} \quad 4.43$$

また、荷役に関する費用は荷役費と港費から構成される。荷役費は更に貨物費と、遅延が発生した場合の待機料金になっている。積載量に応じて支払う港費と貨物費、遅延に応じて支払う待機料金の計上に関しては 4.5.4 節の利益モデル中に述べる。

4.5.4 利益モデルの作成

海上輸送システムズにおける運航利益は、収入とコストの 2 つからなる。

収入は運賃、積載量と運航回数の積で表現される。本研究では運賃における市場変化を考慮したが、積載量の変化は考慮しない。遅延や修繕によってダウンタイムが増加すると運航回数が減少し船舶のライフサイクルにおける収入は減少する。

船舶運航のコストは、大きく運航費と船費に分けられる。その詳細を図 4-19 に示す。コンテナ船など定期航路の場合、海運会社が船主に定期傭船するか自社保有の船を使うかの 2 種類の使用形態に分けられる[46]。本研究では、自社保有の船を使うと設定しているため、運航費と船費は全て海運会社が負担することになっている。以下、これらを詳しく説明していく。

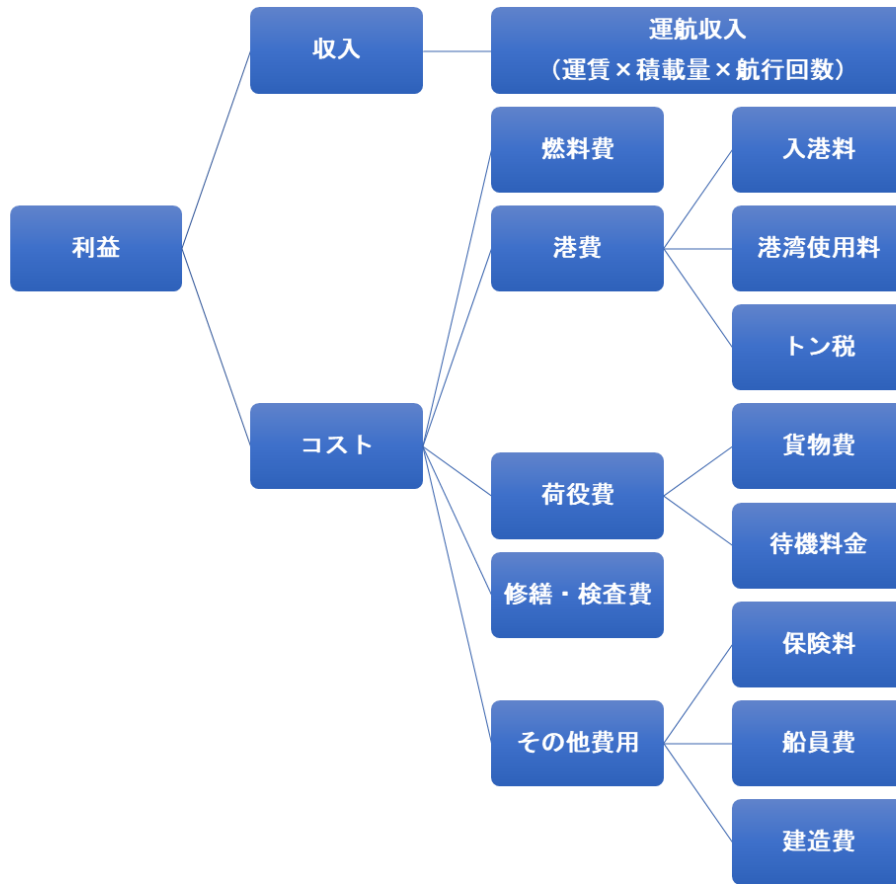


図 4-19 船舶運航の利益モデル

燃料費は燃料価格 P_{fuel} 、実質運航時間 D/V および燃費モデルから算出される燃料消費率 FOC_i を用いて式 4.44 で計算される。

$$Cost_{fuel,i} = P_{fuel} \cdot FOC_i \cdot \frac{D}{V} \tag{4.44}$$

港費 $Cost_{port,i}$ は入港料 $Cost_{enter}$ 、港湾使用料 $Cost_{harber}$ とトン税 $Cost_{tax}$ から構成され、船舶が入港する際に積載している貨物のトン数 $W_{cargo,i}$ に応じて基準入港料 C_{basic_e} 、基準港湾使用料 C_{basic_h} と基準トン税 C_{basic_t} を乗じて計算ことになっている。計算は式 4.45 で示す。

$$Cost_{port,i} = W_{cargo,i} \cdot (C_{basic_e} + C_{basic_h} + C_{basic_t}) \tag{4.45}$$

荷役費 $Cost_{load,i}$ は貨物費 $Cost_{cargo}$ と待機料金 $Cost_{wait}$ から構成される。通常遅延が発生した場合は待機料金 $Cost_{wait}$ を支払うことになっている。待機料金は荷役時に発生する遅延時間 $T_{cargo,i}, T_{machine,i}$ に応じて基準待機料金 C_{basic_d} を乗じて計算される。一航海中の合計荷役費は式 4.46 のように計算される。

$$Cost_{load,i} = Cost_{cargo} + C_{basic_d} \cdot (\varepsilon_{cargo,i} + \varepsilon_{machine,i}) \quad 4.46$$

修繕・検査費 $Cost_{repair,i}$ は一航海中の各種事故・故障数(船用機器故障数 $N_{fail_m,i}$ 、船体故障数 $N_{fail_s,i}$)を用いて式 4.47 で示される。

$$Cost_{repair,i} = C_{dock,i} + Cost_{repair_m} \cdot N_{fail_m,i} + Cost_{repair_s} \cdot N_{fail_s,i} \quad 4.47$$

また、保険料 $Cost_{insurance,i}$ 、船員費 $Cost_{crew,i}$ と建造費 $Cost_{ship,i}$ は式 4.48、式 4.49 および式 4.50 のように、航海間の時間 $(t_i - t_{i-1})$ を用いて一航海当たりの費用に修正する。なお、建造費の減価償却は船舶の一般的な寿命である 20 年間とした。

$$Cost_{insurance,i} = C_{insurance} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{24 \cdot 30 \cdot 12} \quad 4.48$$

$$Cost_{crew,i} = P_{crew} \cdot N_{crew} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{24 \cdot 30} \quad 4.49$$

$$Cost_{ship,i} = C_{ship} \cdot \frac{t_i - t_{i-1}}{24 \cdot 30 \cdot 12 \cdot 20} \quad 4.50$$

以上の定義により、利益モデルでは最終的に式 4.51 と式 4.52 によって一航海の利益を計算する

$$Cost_i = Cost_{fuel,i} + Cost_{port,i} + Cost_{load,i} + Cost_{repair,i} \quad 4.51$$

$$+ Cost_{insurance,i} + Cost_{crew,i} + Cost_{ship,i}$$

$$\pi_i = I_i - Cost_i \quad 4.52$$

船舶損益が黒字にするためには、運航費と船費を上回る運賃収入がなくてはならない。定

期船の運賃は品目毎に海運同盟によって一率に定められているため、収益を上げるために、運航費の節減を行うことが極めて重要となっている。従って、本研究では、多様な新技術を海上輸送システムに導入することによって運航費の削減が可能であると想定している。

4.5.5 市場モデルの作成

本研究では、経済的な不確実性を発生させる要因として市場変動の不確実性を考慮するため、市場変動に対応するために市場モデルの定義を行う。なお、原油価格とコンテナ船の運賃について長期取引によって1ヶ月1回変化することを設定する[47]。

本節では、燃料費及び運賃を算出するために必要となる、原油価格 [USD/barrel]及び具体的な運賃を算出するために必要な船主・荷主間の輸送契約で合意する値である運賃率WRの予測モデルについて述べる。ここで、運賃を算出するためのもう1つの要素である基準運賃WFについては、シミュレータの実装を簡単化するために、定数 C_{WF} として扱う。従って、対象とする航路A-B間において、運賃 F_{AB} [USD]は載貨重量DWT (Dead weight tonnage)及びこれら3つの指標から式4.53のように算出できる。

$$F_{AB} = DWT \times WR \times C_{WF} \tag{4.53}$$

市場価格の予測について、本研究では二項格子モデル(Binomial Lattice Model)[48]を用いる。二項格子モデルは、図4-20に示すようにある時点 t での価格に対して確率 p で u 倍になり、確率 $1-p$ で d 倍になるという価格変動を想定したモデルとなっている。

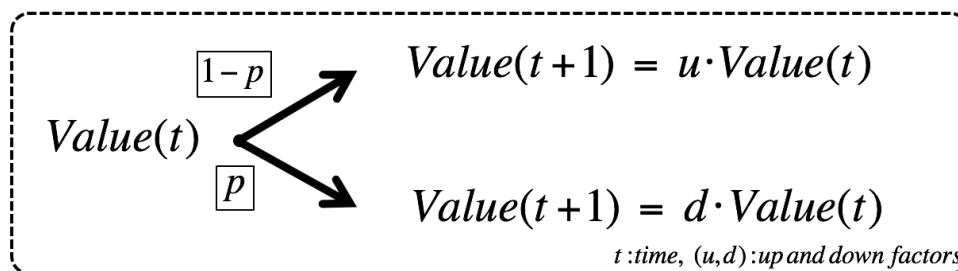


図 4-20 二項格子モデルの予測方法概略図

ここで用いた u 及び d は上昇下降係数と呼ばれ過去データより決定する。具体的には、 ν を年次期待成長率、 σ を年次の標準偏差、 S_0 を初期価格、 S_T を1年後の価格とすると式4.54

と式 4.55 から ν と σ^2 を計算できる。

$$\nu = E[\ln(S_T/S_0)] \quad 4.54$$

$$\sigma^2 = \text{var}[\ln(S_T/S_0)] \quad 4.55$$

また、1 より十分小さい期間長 Δt で価格が上昇もしくは下降する確率 p についても同時に決定される。式 4.56、式 4.57 と式 4.58 を用いることで過去データからこれらのパラメータを算出できる。

$$p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\nu}{\sigma} \right) \sqrt{\Delta t} \quad 4.56$$

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad 4.57$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad 4.58$$

各指標である、原油価格、運賃率を 5 シナリオずつ予測した例を図 4-21、図 4-22 に示す。

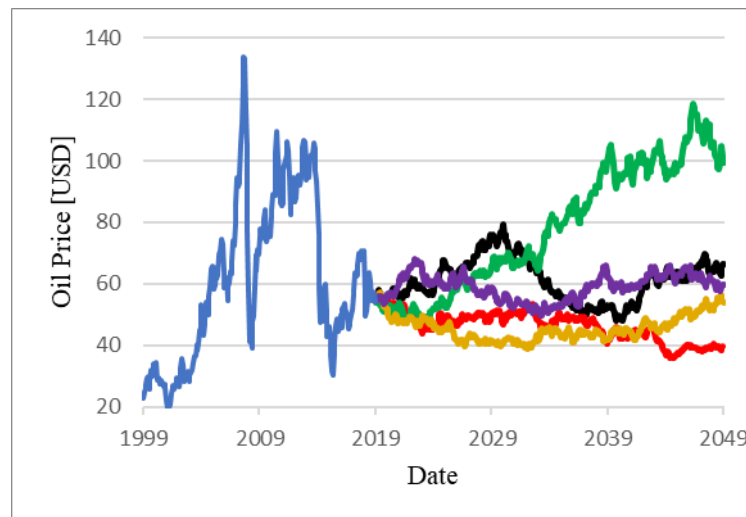


図 4-21 原油価格の予測例(5 シナリオ)

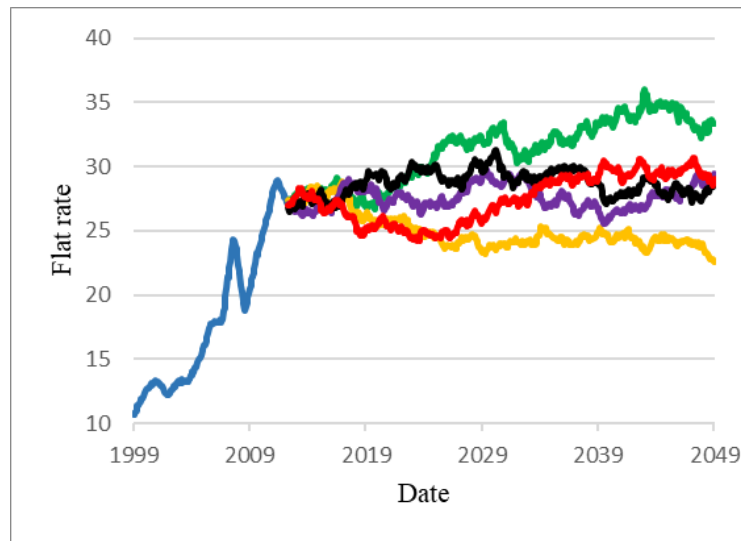


図 4-22 運賃率の予測例(5 シナリオ)

本研究では、以上のように市場価格を予測することで市場モデルを定義し、対象船舶のライフサイクル期間における燃費と運賃を算出する。

4.5.6 入渠ルール

本研究は、入渠時間を算出するに、従来の船級検査ルール通り一定期間(通常は 2.5 年)経過した後に入渠して船級検査を受けること[49]を定義する。入渠検査時には通常、船体・プロペラの洗浄と船体の修繕が行われるため、入渠時には以下の 2 つのパラメータ更新を行う。

- ◆ 船体・プロペラ生物汚損 $\Pi(1 - \eta_{Hf})$, $\Pi(1 - \eta_{Pf})$ の回復
- ◆ 船体疲労度 $\sum t$ の回復

4.5.7 シミュレーションの初期設定値

海上輸送シミュレーションの設定値として、表 4-2 に本章で述べたパラメータを含めた全ての入力パラメータを一覧としてまとめた。これらのパラメータを設定し、モデルに入力として与えることでシミュレーションを行う。

表 4-2 海上輸送シミュレーションの入力パラメーター一覧

パラメータ名	記号	単位	パラメータ名	記号	単位
往路積載量	Laway	[TEU]	エンジン最大出力	bhpMax	[kW]
復路積載量	Lhome	[TEU]	燃料消費率補係数	sfoc0	[-]
往路基準運賃	Paway	[\$/TEU]		sfoc1	[-]
復路基準運賃	Phome	[\$/TEU]		sfoc2	[-]
船員賃金	Wage	[\$/(man*month)]	船体劣化率	etaDh	[/month]
船員数	Ncrew	[man]	プロペラ劣化率	etaDp	[/month]
保険料	Cinsur	[\$/year]	エンジン劣化率	etaDe	[/month]
修繕費	Crepair	[\$/case]	船体汚損率	etaFh	[/month]
建造費	Ccons	[million \$]	プロペラ汚損率	etaFp	[/month]
基準貨物費用	Ccargo	[\$/ton]	操船影響	maneuA	[-]
基準待機料金	Cwait	[\$/ton]		maneuB	[-]
基準入港料	Center	[\$/ton]	気海象発現率(春)	meteoAspr	[-]
基準港湾使用料	Cport	[\$/ton]		meteoBspr	[-]
基準トン税	Ctax	[\$/ton]	気海象発現率(夏)	meteoAsum	[-]
標準荷役時間	Tcargo	[h]		meteoBsum	[-]
航路長	D	[km]	気海象発現率(秋)	meteoAut	[-]
運航船速	V	[knot]		meteoBaut	[-]
運航船速	v	[km/h]	気海象発現率(冬)	meteoAwin	[-]
船長	Lpp	[m]		meteoBwin	[-]
浸水面積	S	[m ²]	疲労分布	ContLoad	[-]
CO ₂ 排出量係数	E	[l/kg]	主機故障率	ramdaE	[case/h]
C重油比重	G	[kg/l]	主機平均復旧時間	repairEave	[h]
船体重量率	Weight	[-]	航海機器故障率	ramdaV	[case/h]
造波抵抗補係数	cw0	[-]	航海機器平均復旧時間	repairVave	[h]
	cw1	[-]	補機故障率	ramdaA	[case/h]
	cw2	[-]	補機平均復旧時間	repairAave	[h]
船殻効率	etaH	[-]	荷役作業遅延確率	ramdaC	[case/port]
プロペラ船後効率	etaB	[-]	遅延時間確率	delayCa	[-]
伝達効率	etaT	[-]		delayCb	[-]
機械効率	etaM	[-]	荷役装置故障確率	ramdaMc	[case/port]
気海象影響	meteo0	[-]	荷役装置復旧時間	repairM	[h]
	meteo1	[-]	入渠コスト	checkCost	[\$]
	meteo2	[-]	入渠時間	checkTime	[h]
	meteo3	[-]			

4.5.8 シミュレーションの流れ

海上輸送シミュレーションの流れを図 4-23 に示す。初期設定を行った後は、各航海

の運航期間が終了するまで以下の手順を繰り返す。本項では順を追って説明していく。

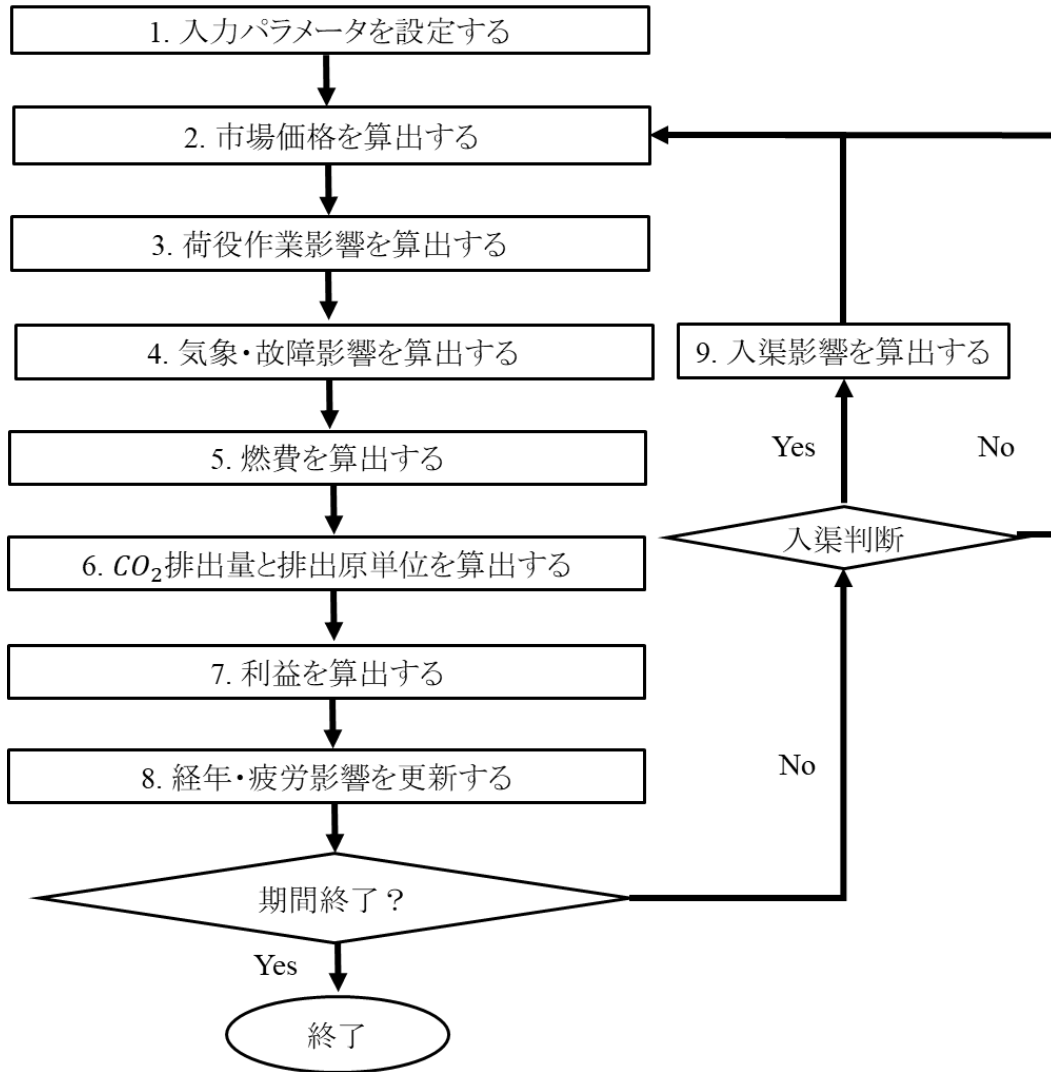


図 4-23 船舶運航シミュレーションの手順

1. 初期設定： 4.5.7 で述べた各設定値の入力を行い、運航回数 i 、合計時間 t 、利益 π 、経年・汚損影響などを全て 0 に設定して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各市場価格について、シミュレーション内での現在時刻での価格を算出する。対象は原油価格と運賃とする。
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に、それに伴う費用を算出する。
4. 気象・故障影響の算出： 故障・気象モデルに基づいて、船体故障と船用機器故障を

算出した後、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いて、単位時間当たりの燃料消費量 FOC_i を算出し、燃費と CO_2 排出量を算出する。
6. CO_2 排出量と CO_2 排出原単位の算出：4.4.1で述べた CO_2 排出量と CO_2 排出原単位の算出手法に従って CO_2 排出量と CO_2 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 π_i を算出する。またここで遅延時間 Td_i 、合計航行時間 t_i 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いて、船舶推進性能を更新する。
9. 入渠影響の算出：入渠ルールに基づいて入渠有無の判断を行う。入渠有りの場合は入渠検査の費用 $C_{dock,i}$ と所要時間 T_{dock} を費用 $Cost_i$ と経過時間 t_i に計上し、同時に船舶の生物汚損率と疲労度合を0にリセットする。入渠無しの場合は手順2に戻って $i+1$ 回目の航海を開始する。
10. シミュレーション終了の判定：シミュレーションの終了判定は経過時間の総和 $\sum t_i$ が船舶のライフサイクル期間 $LT[year]$ を超過した場合とする。シミュレーションが終了したら総利益の集計 $\sum \pi_i$ と CO_2 総排出量の集計 $\sum E_i$ を行う。

最終的なシミュレーションの出力として以下の3つが得られる

- ◆ 運航期間全体の総利益 $\pi[million \$]$
- ◆ 運航期間全体の CO_2 総排出量 $E[thousand ton]$
- ◆ 運航期間の平均 CO_2 排出原単位 $CI[g/(ton \cdot km)]$

第5章 ケーススタディ

5.1 はじめに.....	70
5.2 導入する技術群	70
5.3 初期設定と出力結果の確認.....	72
5.3.1 入力パラメータの設定	72
5.3.2 出力結果の確認.....	73
5.4 単一技術導入における結果の確認	75
5.5 技術の組み合わせの導入結果と分析.....	78
5.5.1 CO ₂ 排出原単位を考慮した場合	79
5.5.2 CO ₂ 排出量を考慮した場合	81
5.6 ケーススタディのまとめ	84

5.1 はじめに

本章では、第4章で提案した評価手法を用いて実際に技術導入における相互作用の評価を行う。具体的には、まず第2章で紹介された技術を中心に本シミュレーション内で評価対象とする技術を選定し、同章の分析に基づいて各技術が船社の機能要求を実現するために変更する箇所を入力パラメータとして整理する。その後、第4章で述べた入力パラメータの該当箇所のパラメータを変更する。その後、ケースとして20年間のコンテナ船運航の海上物流シミュレータによって、様々な技術または技術の組み合わせが与える“運航利益の向上”と“CO₂排出の削減”への相互作用を検証し、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。

5.2 導入する技術群

本ケーススタディでは、先行研究(2.2)を参考に、第4章で述べた手法に則って、導入される技術が海事産業に実現できる詳細な機能について、入力パラメータの変更を行う。実際に導入評価する技術の一覧とシミュレータへの入力(パラメータの変更項目)をまとめたものを表5-1に示した。パラメータの変更値は稗方ら[9]の研究および参考文献の調査を参考に設定した。

表 5-1 導入される技術と設定値の変更箇所

技術ID	導入する技術名	変更するパラメータ	基本設定	変更後の値
1	舶用機器モニタリング とリモートメンテナンス	主機故障確率 [case/h]	0.086	0.040
		航海機器故障確率 [case/h]	0.114	0.060
		補機故障確率 [case/h]	0.321	0.150
		主機復旧時間 [h/case]	2.367	1.200
		航海機器復旧時間 [h/case]	0.933	0.500
		補機復旧時間 [h/case]	2.150	1.000
		船員数 [man]	25	15
2	船体軽量化	船体重量率 [-]	1	0.9
3	ウェザールーティング	気象遭遇分布(春) [-]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
		気象遭遇分布(秋) [-]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
4	港湾作業マネジメント システム	基準荷役作業時間 [h]	48	24
		荷役作業遅延時間分布 [-]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
		荷役遅延時間確率 [case/port]	0.1	0.06
		荷役装置故障確率 [case/port]	0.010	0.005
		荷役装置復旧時間 [h/case]	24	12
5	実海域データ解析	実海域燃費率増加確率 [-]	Beta(2, 2)	Beta(2, 5)
6	船体性能改善	造波抵抗係数 (Cw0, Cw1, Cw2) [-]	-1.07E-04	-9.07E-05
			7.44E-06	6.32E-06
			4.23E-06	3.59E-06
7	プロペラ性能改善	プロペラ船後効率 [-]	0.8	0.88
8	エンジン性能改善	エンジン燃料消費効率 (SFOC0, SFOC1, SFOC2) [-]	191.66	162.91
			-45.58	-38.74
			25.51	2.69

また、シミュレーション上の導入手法については、4.3.2 項で述べたパラメータの変更による技術を導入する手法で行う。具体的には、1 つの技術を導入する際は、その技術に該当するモデルのパラメータのみ変更する。複数の技術を同時に導入する際は、該当する全てのモデルのパラメータを同時に変更する。そのイメージを表 5-2 と表 5-3 に示す。

表 5-2 パラメータ変更による単一技術を導入する例

技術ID	パラメータ	基本設定	変更後
1	船体重量率	1	0.9
2	プロペラ船後効率	0.8	0.8
3	基本荷役作業時間	48	48

表 5-3 パラメータ変更による複数の技術を同時に導入する例

技術ID	パラメータ	基本設定	変更後
1	船体重量率	1	0.9
2	プロペラ船後効率	0.8	0.88
3	基本荷役作業時間	48	24

5.3 初期設定と出力結果の確認

5.3.1 入力パラメータの設定

初期設定については、前節で整理した技術が“総利益”、“CO₂排出量”、“CO₂排出原単位”の出力に与える効果を船舶運航シミュレータを用いて検証する。

ケーススタディにおける技術導入の相互効果の評価では、東京ーロサンゼルス間(8825km)を往復運航する6000TEU積みのコンテナ船を想定する。運航期間は通常、コンテナ船のライフサイクル時間である20年間とし、500回のモンテカルロ・シミュレーションにより期待される導入の相互効果を定量化する。シミュレーションの各種初期設定値は表5-4に示した。

コンテナ船の船型データは模型船による実際の水槽試験から得られた結果を用い、プロペラデータとエンジンデータ、また船の経年劣化や生物汚損値は先行研究[9]を参考に設定した。

表 5-4 シミュレーションの初期設定値（技術導入なし）

パラメータ名	記号	単位	設定値	パラメータ名	記号	単位	設定値
往路積載量	Laway	[TEU]	6000	エンジン最大出力	bhpMax	[kW]	41000
復路積載量	Lhome	[TEU]	1000	燃料消費率補係数	sfoc0	[-]	162.91
往路基準運賃	Paway	[\$/TEU]	62.5		sfoc1	[-]	-38.74
復路基準運賃	Phome	[\$/TEU]	20.8		sfoc2	[-]	21.69
船員賃金	Wage	[\$/(man*month)]	4000	船体劣化率	etaDh	[/month]	0.20%
船員数	Ncrew	[man]	25	プロペラ劣化率	etaDp	[/month]	0.10%
保険料	Cinsur	[\$/year]	100000	エンジン劣化率	etaDe	[/month]	0.10%
修繕費	Crepair	[\$/case]	1000	船体汚損率	etaFh	[/month]	1.50%
建造費	Ccons	[million \$]	300	プロペラ汚損率	etaFp	[/month]	1.00%
基準貨物費用	Ccargo	[\$/ton]	100	操船影響	maneuA	[-]	2
基準待機料金	Cwait	[\$/ton]	1818		maneuB	[-]	2
基準入港料	Center	[\$/ton]	0.6	気象発現率(春)	meteoAspr	[-]	2
基準港湾使用料	Cport	[\$/ton]	2		meteoBspr	[-]	2
基準トン税	Ctax	[\$/ton]	0	気象発現率(夏)	meteoAsum	[-]	5
標準荷役時間	Tcargo	[h]	48		meteoBsum	[-]	2
航路長	D	[km]	8825	気象発現率(秋)	meteoAaut	[-]	2
運航船速	V	[knot]	20		meteoBaut	[-]	2
運航船速	v	[km/h]	37	気象発現率(冬)	meteoAwin	[-]	2
船長	Lpp	[m]	284		meteoBwin	[-]	5
浸水面積	S	[m2]	15301	疲労分布	ContLoad	[-]	4
CO2排出量係数	E	[l/kg]	2.986	主機故障率	ramdaE	[case/h]	0.0856%
C重油比重	G	[kg/l]	0.95	主機平均復旧時間	repairEave	[h]	2.367
船体重量率	Weight	[-]	1	航海機器故障率	ramdaV	[case/h]	0.1135%
造波抵抗補係数	cw0	[-]	-1.E-04	航海機器平均復旧時間	repairVave	[h]	0.933
	cw1	[-]	7.E-06	補機故障率	ramdaA	[case/h]	0.3211%
	cw2	[-]	4.E-06	補機平均復旧時間	repairAave	[h]	2.150
船殻効率	etaH	[-]	0.85	荷役作業遅延確率	ramdaC	[case/port]	0.1
プロペラ船後効率	etaB	[-]	0.80	遅延時間確率	delayCa	[-]	2
伝達効率	etaT	[-]	1.00		delayCb	[-]	2
機械効率	etaM	[-]	1.00	荷役装置故障確率	ramdaMc	[case/port]	0.01
気象影響	meteo0	[-]	-0.014	荷役装置復旧時間	repairM	[h]	24
	meteo1	[-]	0.019	入渠コスト	checkCost	[\$]	100000
	meteo2	[-]	-0.007	入渠時間	checkTime	[h]	96
	meteo3	[-]	0.001				

5.3.2 出力結果の確認

技術の導入評価を行う前に、初期設定の出力と挙動について確認する。初期設定における500回のシミュレーション結果の出力値の分布を図 5-1、図 5-2 と図 5-3 に示す。なお、船速を20knotに設定した。

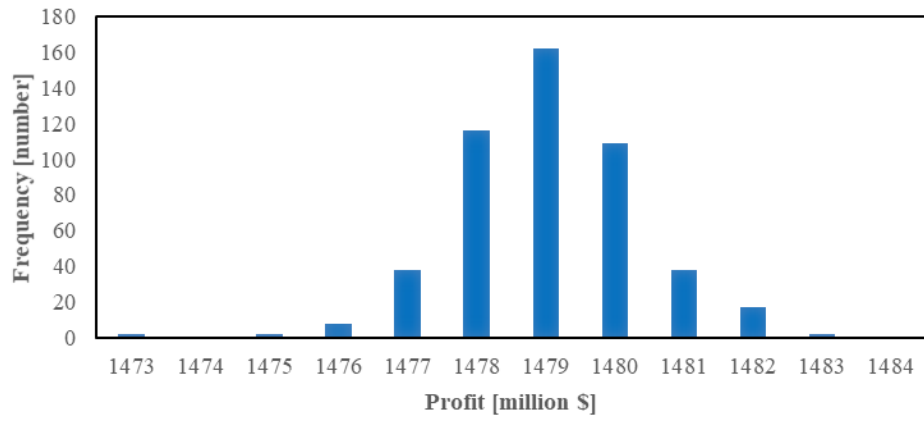


図 5-1 初期設定における総利益の出力値分布

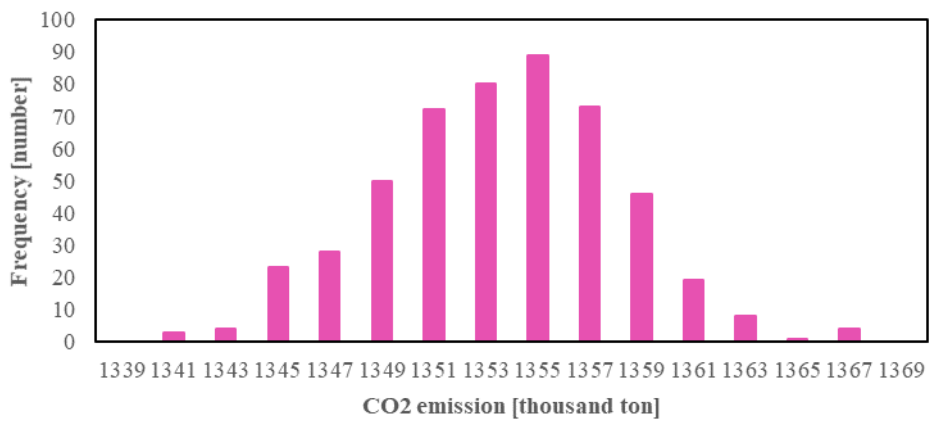


図 5-2 初期設定におけるCO₂排出量の出力値分布

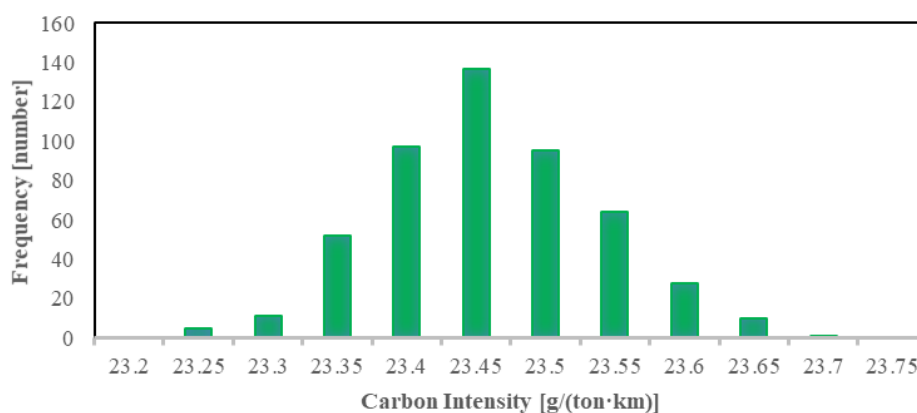


図 5-3 初期設定におけるCO₂排出原単位の出力値分布

図 5-1、図 5-2 と図 5-3 から、モンテカルロ・シミュレーションの実行により、設定したパラメータに従って出力値が滑らかに分布することが確認された。なお、運航利益はシミュレーション終了時の船舶運航地点の差異を考慮して、往復運航を終えた時点での時間当たりの利益に正規化して計算を行っている。

5.4 単一技術導入における結果の確認

本ケーススタディでは、単一技術を導入する際の効果を確認するために、ベースラインと、1 つの技術を導入することによる“総利益”、“CO₂排出量”と“CO₂排出原単位”の「導入効果」を算出するために、シミュレーションを行った。結果をそれぞれ図 5-4、図 5-5 と図 5-6 に示す。横軸は技術を区別するための技術 ID であり、表 5-1 での技術 ID と対応している。また、技術を導入しない場合（ベースライン）の「導入効果」は技術 ID.0 に対応している。

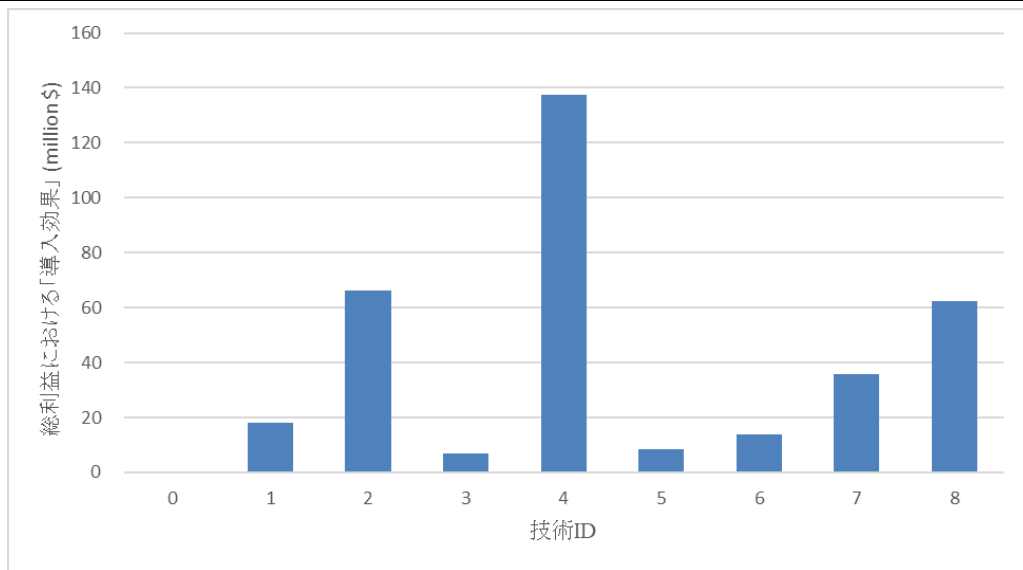


図 5-4 総利益における「導入効果」のシミュレーション結果

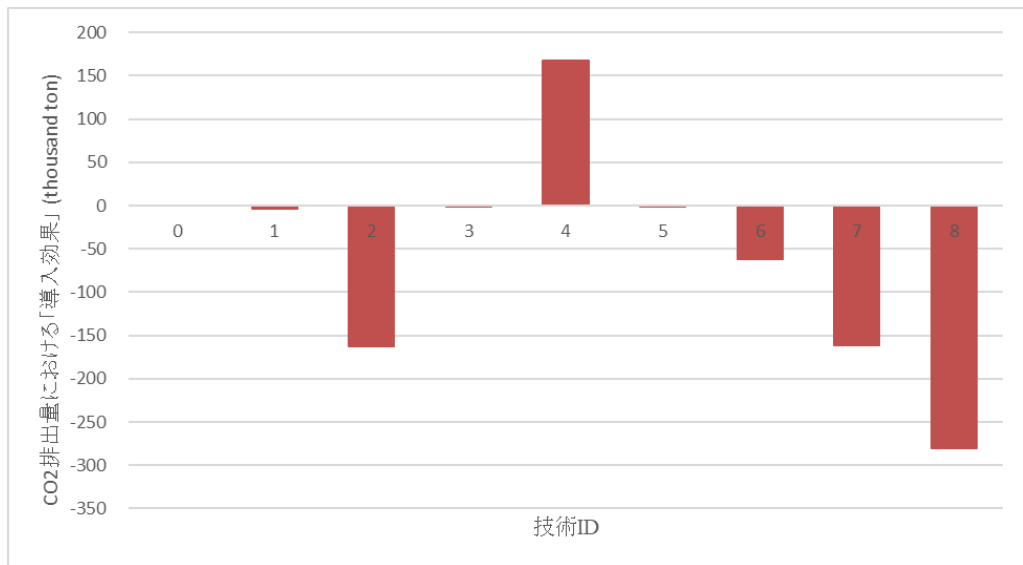


図 5-5 CO₂排出量における「導入効果」のシミュレーション結果

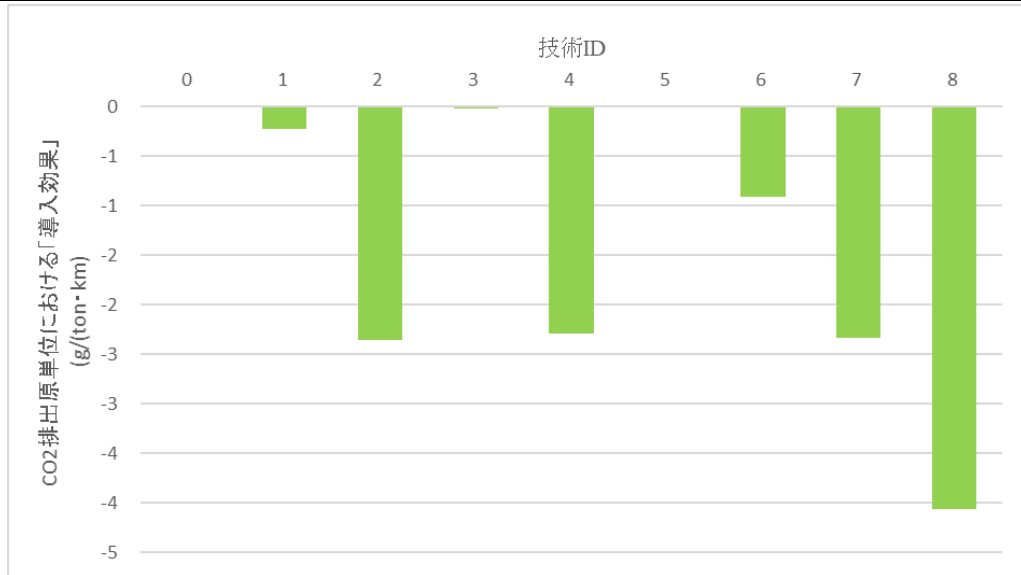


図 5-6 CO₂排出原単位における「導入効果」のシミュレーション結果

総利益における「導入効果」の場合は、全ての技術において、導入による運航利益の向上が確認できた。その中でも特に以下の技術が導入の効果が高いと考えられる。

- ID. 2 船体軽量化
- ID. 4 港湾作業マネジメントシステム
- ID. 8 エンジン性能改善

船体軽量化 (ID. 2) は、船体や機器にかかる疲労や負荷を軽減する技術であり、負荷や疲労軽減によって船体強度を緩和させることで船体軽量化が可能なることによる、建造時の材料費低下が大きな要因であったと推察される。港湾作業マネジメントシステム (ID. 4) は、港湾作業の基準時間と遅延時間を減少する技術であり、作業時間と遅延時間の減少によって船の海上運航する時間と比率が増加する。従って、航海回数が増えることによる収入上昇が大きな要因であったと推察される。エンジン性能改善 (ID. 8) は、エンジンにおける燃料消費効率を改善する技術であり、燃料消費効率の改善によって燃料消費量を削減することができ、それによる燃費の低下が大きな原因であったと推察される。

CO₂排出量における「導入効果」については、以下の技術は導入による船の運航中にCO₂排出量の削減が確認でき、導入効果が高いと考えられる。

- ID. 2 船体軽量化
- ID. 7 プロペラ性能改善
- ID. 8 エンジン性能改善

船体軽量化 (ID. 2) は、船体や機器にかかる疲労や負荷を軽減する技術であり、負荷や疲労軽減によって船体抵抗と浸水面積が減少し、運航時間は大きな変化がないのに燃料消費率を改善できるが大きな原因であったと推察される。プロペラ性能改善 (ID. 7) は、プロペラにおける EHP から BHP までの伝達効率を向上することによってエンジンの負荷を改善できることが大きな原因であったと推察される。また、エンジン性能改善 (ID. 8) は、エンジンにおける燃料消費効率を改善することで燃料消費量を削減できることが大きな原因であったと推察される。

しかし、港湾作業マネジメントシステム (ID. 4) は、CO₂排出量における「導入効果」が 0 より大きいこともあった。それは、港湾作業の基準時間と遅延時間を減少する技術であり、作業時間と遅延時間の減少によって船の海上運航する時間と比率が増加し、CO₂排出量が逆に増加したことが原因であったと推察される。

CO₂排出原単位における「導入効果」の場合は、以下の技術は導入による船のライフサイクル中のCO₂排出の効率の向上が確認でき、導入効果が高いと考えられる。

ID. 2	船体軽量化
ID. 4	港湾作業マネジメントシステム
ID. 6	船体性能改善
ID. 7	プロペラ性能改善
ID. 8	エンジン性能改善

CO₂排出原単位は、CO₂排出量に比べて、船の運航時間にかかわらず、同じ経済活動の下でCO₂排出の効率を表すものであるため、最終的に燃料消費率を改善することができる技術であれば、CO₂排出の効率を向上させられることが必然であると考えられる。従って、技術 ID. 2, 6, 7, 8 の導入効果は比較的が高い。一方、港湾作業マネジメントシステム (ID. 4) は、導入されることによってCO₂排出総量が増加したが、船の運航距離と貨物取扱量も増加した。しかし、港湾作業の効率化によって貨物の輸送効率が向上させ、同じ経済活動で考えた際に排出されたCO₂が減少したと考えられる。

以上、シミュレーションの入力として種々の技術の機能をパラメータとして与えることで、単一技術を導入する際の効果を確認できた。

5.5 技術の組み合わせの導入結果と分析

本ケーススタディでは、技術間の導入による相互作用を簡単かつ明瞭的に分析するために、

同時に導入する技術の数を2個に設定する。従って、表 5-1 に示した8個の技術を組み合わせる際の組み合わせの総数は28個である。

初期設定と個々の技術におけるパラメータの変更項目と変更値は 5.3.1 項と同じく設定しており、各技術組み合わせに対して500回のモンテカルロ・シミュレーションを行った。

5.5.1 CO₂ 排出原単位を考慮した場合

まずはCO₂排出原単位と総利益を評価軸とし、技術組み合わせの導入による相互作用を分析する。一般的に、船社や荷主などの意思決定者は船舶のライフサイクルでのCO₂排出総量より、CO₂の排出効率を代表するCO₂排出原単位が重視するため、本ケーススタディではこちらの結果を優先的に考える。

シミュレーションの結果を図 5-7 に示す。縦軸はCO₂排出原単位における「創発効果」、横軸は総利益における「創発効果」(million \$)である。散布している個々の点はそれぞれの技術組み合わせ導入効果の計算結果で、データのラベルは組み合わせされた2つの技術IDである。なお、技術IDは表 5-1 の内容と対応している。

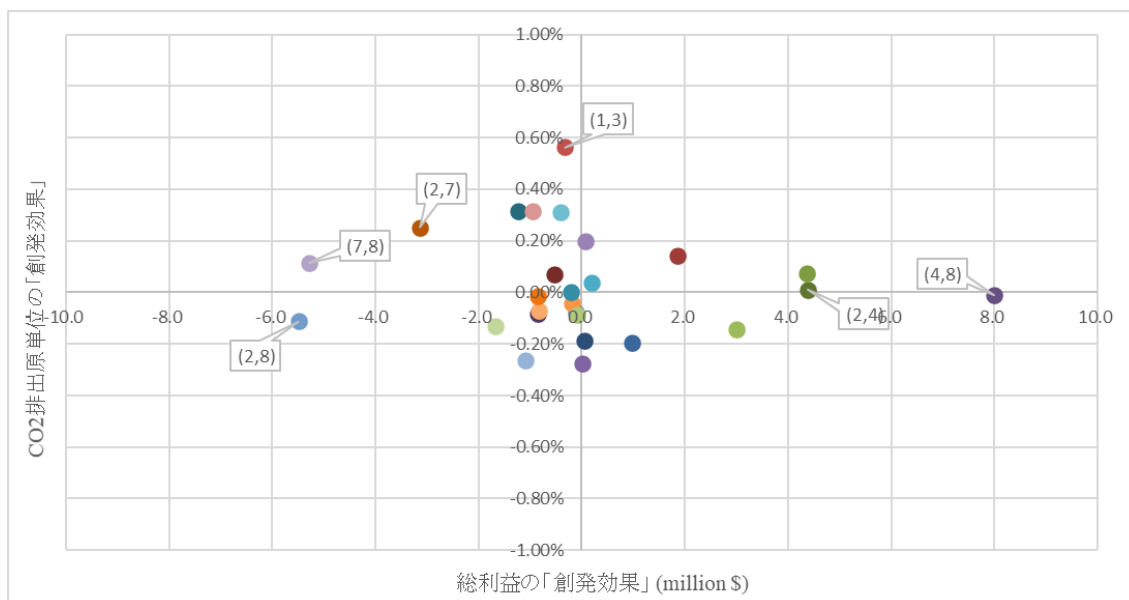


図 5-7 CO₂排出原単位と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果

図 5-7 からCO₂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CO₂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ので、この結果について、原点に遠い以下の技術組み合わせを分析する

まずは技術 ID(4, 8)の組み合わせについて分析する。

ID. 4 港湾作業マネジメントシステム

ID. 8 エンジン性能改善

技術 ID. 4(港湾作業マネジメントシステム)の導入によって港湾作業の基準時間と遅延時間が減少し、船の海上航行する時間と比率が増加し、運航の効率を向上させることができる。技術 ID. 8(エンジン性能改善)の導入によってエンジンの燃料消費効率は改善し、同じ経済活動で考えた際のCO₂排出量が削減できる。こちらの 2 つの技術を組み合わせで導入した時、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、ID.4 港湾作業マネジメントシステムは、CO₂の排出効率に影響がないので、2 つの技術を同時に導入してもCO₂の排出効率、つまりCO₂の排出原単位における「創発効果」は存在しない。

そのほか、技術 ID(2, 4)も、同様の創発効果が現れた。これらの技術組み合わせは、前述した組み合わせ ID(4, 8)に類似した技術組み合わせであり、航行時間の増加と燃料消費効率の向上による総利益のみにおける創発効果の確認ができた。

次に、技術 ID(1, 3)の組み合わせについて分析する。

ID. 1 船用機器モニタリングとリモートメンテナンス

ID. 3 ウェザールーティング

技術 ID. 1(船用機器モニタリングとリモートメンテナンス)の導入によって船船設備の故障率が減少し、そちらの復旧による遅延時間も短縮できる。技術 ID. 3(ウェザールーティング)の導入によって船は荒天に遭遇する確率が減少し、遅延時間を短縮することで燃費性能を向上させることができる。こちらの 2 つの技術を組み合わせで導入した時、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、総利益に直接に大きな関係がないため、総利益における創発効果が存在しない。一方、それらの 2 つの技術を同時に導入することによって燃料消費効率が向上したが、運航時間も増加したため、CO₂排出原単位における悪い「創発効果」存在すると確認できた。

最後は技術 ID(2, 8)の組み合わせについて分析する。

ID. 2	船体軽量化
ID. 8	エンジン性能改善

技術 ID. 2(船体軽量化)の導入によって船体抵抗と浸水面積が減少し、船の燃料消費率を改善することができる。技術 ID. 8(エンジン性能改善)の導入によってエンジンの燃料消費効率を改善し、燃料消費量を削減することができる。両者とも船の燃料消費性能を向上させる技術であり、組み合わせると同時に導入した時、それぞれが持つ燃費の減少が相殺してしまったため、最終的に総利益とCO₂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CO₂排出効率に対して向上できるとは言えないため、CO₂排出原単位における「創発効果」がわずかに良くなったと考えられる。

そのほか、技術 ID(2, 7)と(7, 8)の組み合わせも、よく似た結果が出た。これらの技術組み合わせは、前述した組み合わせ ID(2, 8)と同様に、燃料消費性能を向上させるという共通の機能を持ち、同時に導入された時、総利益に対して個々の導入効果における相殺作用が生じたと考えられる。

以上は、CO₂排出原単位と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果、およびそれに関する創発効果が確認できた。シミュレータで見られたこれらの挙動と、物理現象との整合することで技術導入に関してより深い検討を行うことができる。

5.5.2 CO₂ 排出量を考慮した場合

次に、CO₂排出量と総利益を評価軸として技術の組み合わせの導入による相互作用を分析する。なお、CO₂排出については、経済活動の拡大に応じて総排出量も増えるため排出原単位での評価を基本とするが、ここでは参考のために船舶のライフサイクルを通じた総排出量への影響の検討も行う。

シミュレーションの結果を図 5-8 に示す。縦軸はCO₂排出量における「創発効果」(thousand ton)で、横軸は総利益における「創発効果」(million \$)である。散布している個々の点は個々の技術組み合わせ導入効果の計算結果で、データのラベルは組み合わせされた 2 つの技術 ID である。なお、技術 ID は表 5-1 の内容と対応している。

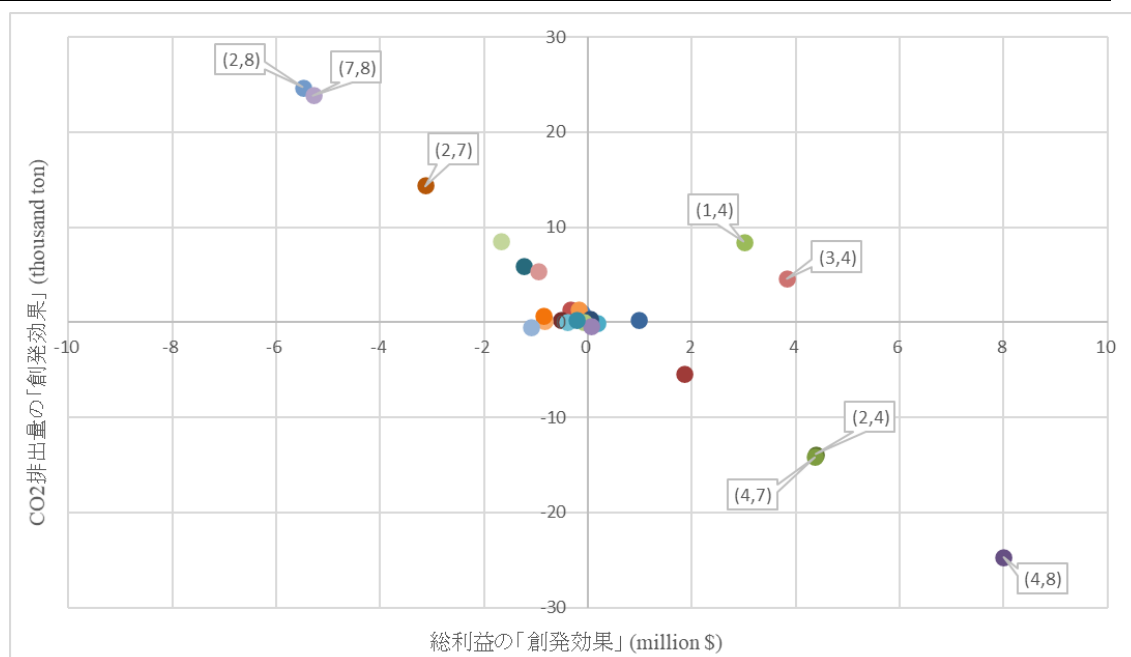


図 5-8 CO₂排出量と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果

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、CO₂排出量両方とは良い創発効果が存在すると考えられる。原点に距離が遠いほど、効果が明らかになる。ここで、原点に距離が最も遠い技術 ID(4, 8)の組み合わせについて分析する。

ID. 4 港湾作業マネジメントシステム

ID. 8 エンジン性能改善

技術 ID. 4(港湾作業マネジメントシステム)の導入によって港湾作業の基準時間と遅延時間が減少し、船の海上航行する時間と比率を増加することができる。技術 ID. 8(エンジン性能改善)の導入によってエンジンの燃料消費効率を改善し、燃料消費量を削減することができる。これらの2つの技術を組み合わせて導入した時、航行時間と比率の増加と、燃料消費効率の向上が共に作用し、収益を増やす同時にコストを削減することができ、CO₂排出量も燃料消費効率の向上により削減することが可能であり、最終的に良い創発効果が生じることが分かった。

そのほか、技術 ID(2, 4)と(4, 7)の組み合わせも、良い創発効果が現れた。これらの技術組み合わせは、前述した組み合わせ ID(4, 8)に類似の技術組み合わせであり、航行時間の増加と燃料消費効率の向上による相互作用の確認ができた。

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存在するが、CO₂排出量の方に悪い創発作用が存在すると考えられる。ここで、技術 ID(1, 4)の

組み合わせについて分析する。

ID. 1 船用機器モニタリングとリモートメンテナンス

ID. 4 港湾作業マネジメントシステム

技術 ID. 1 (船用機器モニタリングとリモートメンテナンス) の導入によって船舶設備の故障率が減少し、故障からの復旧による遅延時間も短縮できる。また、船員数を減らすことでコストの節約も可能になる。技術 ID. 4 (港湾作業マネジメントシステム) の導入によって港湾作業の基準時間と遅延時間が減少し、船の海上航行する時間と比率が増加する。こちらの 2 つの技術を組み合わせて導入した時、航行時間と比率の増加と、航行中の遅延時間の減少が共に作用し、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生じたが、燃料消費に関する改善がないため、CO₂排出量は航行時間の増加に伴って増えてしまい、最終的にCO₂総排出量に対しては悪い創発効果が現れた。

また、技術 ID(3, 4)の組み合わせも似たような創発効果が現れた。

ID. 3 ウェザールーティング

ID. 4 港湾作業マネジメントシステム

技術 ID. 3 (ウェザールーティング) の導入によって船は荒天に遭遇する確率が減少し、遅延時間を短縮することで燃費性能を向上させることができる。これらの 2 つの技術を組み合わせて導入した時、航行時間と比率の増加と、遅延時間の短縮と共に作用し、収益を増やすと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。しかし、燃費性能は少し改善したが、船の航行時間増加の方が著しく、最終的にCO₂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、CO₂排出量両方に悪い創発効果が存在すると考えられる。原点に距離が遠いほど、悪い効果がより明らかになる。ここで、原点に距離が遠い技術 ID(2, 8)の組み合わせについて分析する。

ID. 2 船体軽量化

ID. 8 エンジン性能改善

技術 ID. 2 (船体軽量化) の導入によって船体抵抗と浸水面積が減少し、船の燃料消費率を改善することができる。技術 ID. 8 (エンジン性能改善) の導入によってエンジンの燃料消費効率を改善し、燃料消費量を削減することができる。両者とも船の燃料消費性能を向上させる技術であり、組み合わせて同時に導入した時、相殺的な作用が生じたため、最終的に総利益もCO₂排出量も悪い創発効果が現れた。

そのほか、技術 ID(7, 8)と(2, 7)の組み合わせも相似な結果が出た。これは、2つの共通の要素を持つ技術同士が同時に導入される時、2つの技術の作用が相殺され、技術組み合わせの導入による悪い創発効果が生じる可能性もある。

以上の結果から、CO₂排出量と総利益を考慮した場合のシミュレーション結果、およびそれに関する創発効果が確認できた。

5.6 ケーススタディのまとめ

本章では、実際の技術または技術組み合わせの導入に投資する意思決定を行うことを想定し、5.2節、5.3節において導入される技術群の整理とシミュレータの初期設定および挙動確認を行った後、5.4節、5.5節において、前章で提案した評価手法を用いて単一技術または技術の組合せの導入による創発効果について検討した。

- ◆ 単一技術導入の場合、燃料消費性能の推進に関連する技術は、運航利益の向上とCO₂排出の削減に対して有効である。一方、港湾作業マネジメントシステムのような港湾作業を効率化する技術は、CO₂排出効率に対して有効であったが、CO₂の総排出量に対しては悪い効果を持っている。
- ◆ 技術の組み合わせ導入による創発効果に関しては
 - CO₂排出原単位を考慮した場合について、技術の組み合わせの導入によるCO₂排出原単位は、予想のような明らかに向上することではなく、「創発効果」が低いことが確認できた。一方、港湾作業を効率化する技術と船舶の燃料消費性能を向上する技術の組み合わせは総利益には良い創発効果が生じたが、2つの共通因子を持つ技術同士の組み合わせは、総利益には悪い創発効果が存在することが確認した。
 - CO₂排出量を考慮した場合について、港湾作業を効率化する技術と船舶の燃料消費性能を向上する技術の組み合わせは良い創発効果が存在すると分かった。しかし、2つの共通因子を持つ技術同士の組み合わせを導入した時、1つまたは2つの評価指標に対して悪い創発効果が存在することが確認できた。

第6章 考察

6.1 はじめに.....	86
6.2 感度分析.....	86
6.3 提案手法に関する考察.....	90
6.3.1 海上物流シミュレータについて.....	90
6.3.2 提案した手法について.....	91
6.4 ケーススタディの結果に関する考察.....	91

6.1 はじめに

本節では、まずは感度分析を行う、その後、提案手法に関する考察を行う。6.3.1 項では、構築した海上輸送シミュレータについて、妥当性及び改善点についての考察を行い、6.3.2 項では提案した評価手法についての考察を行う。

6.2 感度分析

本ケーススタディでは、船速を一定の速度として 20knot に設定するが、実際の海上輸送システムでは様々な不確実性や人為的な状況を考慮しなければならないため、必ずしも一定の速度で航行するとは言えない。また、船社は燃料消費を抑制するために、減速運航を行う場合もある。よって、このような船速の変更を考慮して技術組み合わせの導入効果を評価するために、入力船速を 4 つのシナリオに設定して感度分析を行った。

具体的な船速シナリオを表 6-1 に示す。

表 6-1 4 つの船速のシナリオ

航行状態	速度
低速	18knot
通常	20knot
やや高速	22knot
高速	24knot

入力船速の感度分析を行った結果を図 6-1、図 6-2 と図 6-3 に示した。ここで、組み合わせ番号に対応する導入技術の組み合わせは表 6-2 にまとめた。なお、各技術の ID は表 5-1 での内容と対応している。

表 6-2 技術組み合わせ ID に対応する技術の組み合わせ

組み合わせ番号	技術IDの組み合わせ	19	(4,5)
1	(1,2)	10	(2,5)
2	(1,3)	11	(2,6)
3	(1,4)	12	(2,7)
4	(1,5)	13	(2,8)
5	(1,6)	14	(3,4)
6	(1,7)	15	(3,5)
7	(1,8)	16	(3,6)
8	(2,3)	17	(3,7)
9	(2,4)	18	(3,8)
		20	(4,6)
		21	(4,7)
		22	(4,8)
		23	(5,6)
		24	(5,7)
		25	(5,8)
		26	(6,7)
		27	(6,8)
		28	(7,8)

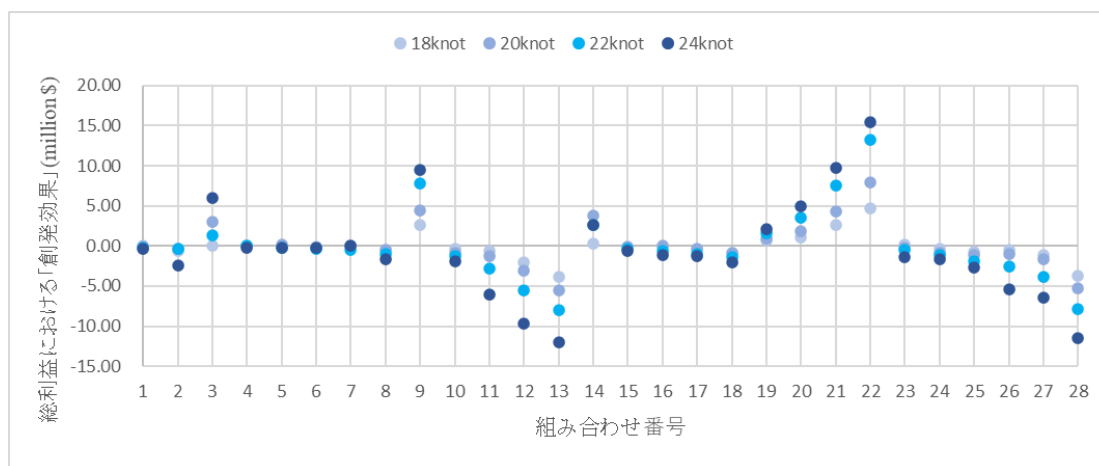


図 6-1 総利益における「創発効果」(船速感度分析)

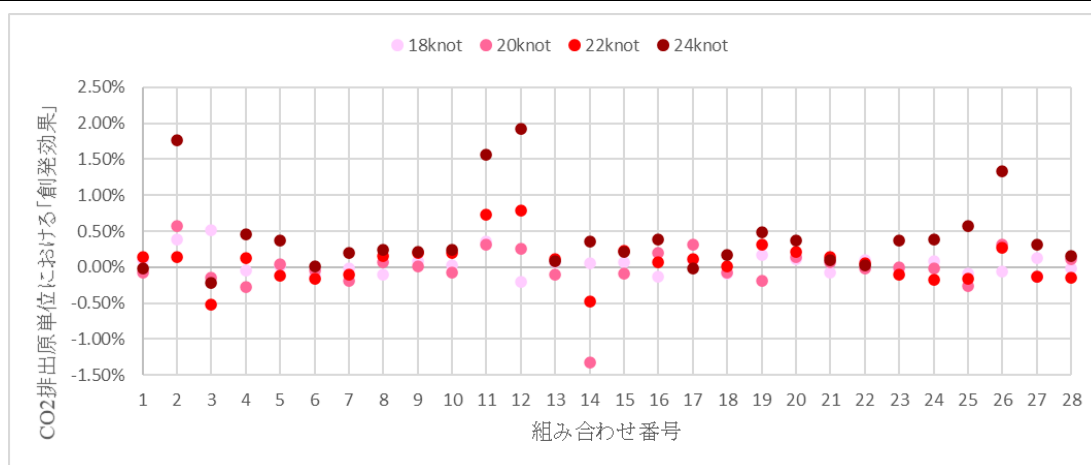


図 6-2 CO₂排出原単位における「創発効果」(船速感度分析)

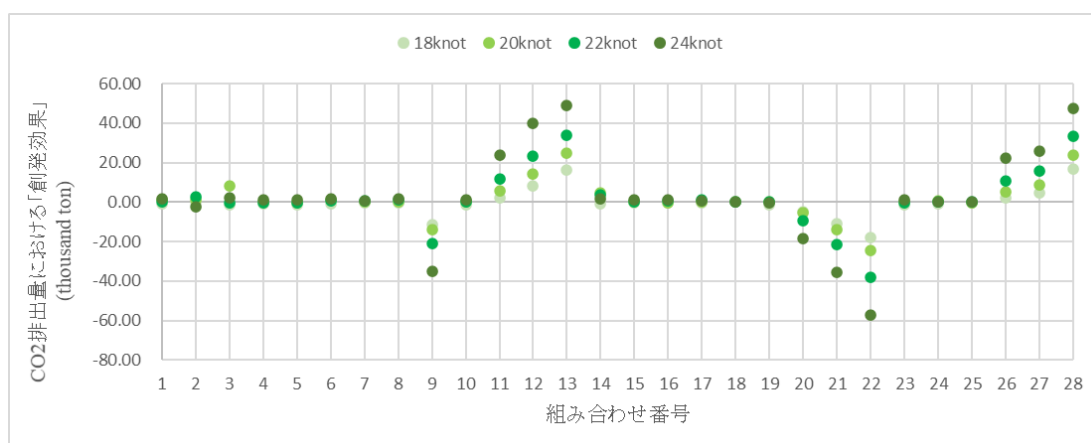


図 6-3 CO₂排出量における「創発効果」(船速感度分析)

図 6-1 の総利益における「創発効果」では、組み合わせ番号 3, 9, 21, 22、それぞれ対応する技術 ID の組み合わせ(1, 4), (2, 4), (4, 7), (4, 8)は、良い相乗効果が大い。ここで、組み合わせ(2, 4)を例に挙げて説明する。

- 技術の組み合わせ(2, 4): ID.2 船体軽量化(船舶の重量率を軽減する技術)、ID.4 港湾作業マネジメントシステム(港湾作業効率を効率化する技術)

船速が速いシナリオはこちらの組み合わせの技術導入によって良い創発効果が大きくなる事が分かった。この場合は、運航船速を変更する際、技術導入による良い創発効果が生じることを考慮して良いと考えられる。

一方、技術組み合わせ番号 11, 12, 13, 26, 27, 28、それぞれ対応する技術 ID の組み合わ

せ(2, 6), (2, 7), (2, 8), (6, 7), (6, 8), (7, 8)は、悪い相乗効果が大きい。ここで、組み合わせ(7, 8)を例に挙げて説明する。

- 技術の組み合わせ(7, 8): ID.7 プロペラ性能改善(船舶のプロペラの性能を向上する技術)、ID.8 エンジン性能改善(船舶のエンジンの性能を向上する技術)

船速が速いシナリオはこちらの組み合わせの技術導入によって悪い創発効果が大きくなることが分かった。この場合は、運航船速を変更する際、技術導入による悪い創発効果が生じることが考慮して良いと考えられる。

また、組み合わせ番号 3, 9, 26 について、船が低速運航の場合はほぼ効果がなく、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顕著に現れることが分かった。

図 6-2 のCO₂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CO₂排出原単位の変化が無規則であることが確認できた。それは、多くの技術組み合わせの導入に対し、CO₂排出原単位の「創発効果」がほぼない、結果はただの不確実性によるシミュレーションの誤差であると考えられる。しかし、技術組み合わせ番号 2, 11, 12, 26、それぞれ対応する技術 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CO₂排出原単位における悪い創発効果が現れた。こちらの技術組み合わせに対しては、船が高速運航をする際、技術導入による悪い創発効果が大きくなるという挙動が確認された。

図 6-3 のCO₂排出量における「創発効果」では、技術組み合わせ番号 9, 20, 21, 22、それぞれ対応する技術 ID の組み合わせ(2, 4), (4, 6), (4, 7), (4, 8)は、良い創発効果が大きい。ここで、組み合わせ(4, 8)を例に挙げて説明する。

- 技術の組み合わせ(4, 8): ID.4 港湾作業マネジメントシステム(港湾作業効率を効率化する技術)、ID.8 エンジン性能改善(船舶のエンジンの性能を向上する技術)

船速が速いシナリオはこちらの 2 つの技術導入によって良い創発効果がより著しくなることが分かった。この場合は、運航船速を変更する際、技術導入による良い創発効果を考慮して良いと考えられる。

一方、技術組み合わせ番号 11, 12, 13, 26, 27, 28、それぞれ対応する技術 ID の組み合わせ(2, 6), (2, 7), (2, 8), (6, 7), (6, 8), (7, 8)は、悪い創発効果が大きい。ここで、組み合わせ(2, 7)を例に挙げて説明する。

-
- 技術の組み合わせ(2, 7): ID.2 船体軽量化(船舶の重量率を軽減する技術)、ID.7 プロペラ性能改善(船舶のプロペラの性能を向上する技術)

船速が速いシナリオはこちらの2つの技術導入によって悪い創発効果がより著しくなることが分かった。この場合は、運航船速を変更する際、技術導入による悪い創発効果を考慮して良いと考えられる。

また、組み合わせ番号 11, 20, 26 について、船が低速運航の場合はほぼ効果がなく、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顕著に現れることが分かった。

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が可能であることも示した。

6.3 提案手法に関する考察

6.3.1 海上物流シミュレータについて

本項では、構築した運航シミュレータについて考察する。

本研究におけるシミュレータは先行研究の稗方ら[9]が作成した船舶運航シミュレータに基づき、機能を追加、削除して構築し、モンテカルロ法を用いてシミュレーションの実行による誤差は1%前後であるため、入力値に対する出力値の合理性は信頼することができる。また、構築したシミュレータは、実際に海事産業の意思決定者の利用を想定したため、荷役モデル、燃料消費モデルと利益モデルをより合理的に改善し、市場の不確実性に関するモデルを加え、機能と精度の向上ができた。

しかし、推進性能や強度変化については詳細で正確なデータの取得は現状困難であるため、シミュレーションの設定値の中には著者の判断で設定した項目も存在する。この点に関しては、今後の海事産業における技術開発の進行に伴ってデータ測定の精度が向上することは十分に期待できる。

6.3.2 提案した手法について

本項では、提案した評価手法について考察する。

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相互作用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CO₂排出量の削減を評価軸として二元的に評価した。

一方で、多様な技術組み合わせの中には本研究で定義した評価軸ではその機能を十分に評価できないものも存在する。本ケーススタディでは、特にCO₂排出原単位における「創発効果」、2つの技術の組み合わせを同時に導入する際に、ほぼ効果がない技術の組み合わせが非常に多く存在する。それは、該当する2つの技術の組み合わせが本研究で開発した評価手法によって相互作用が顕著に現れていないためである。しかし、本研究の結果から該当する2つの技術の組み合わせを同時に導入すべきないとは断言できない。本研究で使用しなかった評価軸による分析でこの2つの技術の組み合わせから大きな創発効果が現れることも考えられる。意思決定者の重視する評価軸によっては、該当する2つの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。例えば、本ケーススタディの事例では、船用機器モニタリングと実海域データ分析をそれぞれ独立な技術として扱っているが、実際の技術開発の観点では、船用機器モニタリングを実現した後にそこで得られた分析データを行うと考えられる。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。今回を例に挙げると、船体構造モニタリングと実海域データ解析の組み合わせのシミュレーション結果が低くても、実際に船用機器モニタリングに対してデータ解析の評価価値が高い場合は、この2つの技術の組み合わせに優先的に投資を行う可能性がある。

6.4 ケーススタディの結果に関する考察

本項では、ケーススタディの結果について以下のことを考察した。

- ◆ 単一技術導入の場合、燃料消費性能の推進に関連する技術は、運航利益の向上と

CO₂排出の削減に対して有効性がある。一方、港湾作業マネジメントシステムのような港湾作業を効率化する技術は、CO₂排出効率に対して有効であったが、CO₂の総排出量に対しては悪い導入効果を持つことが分かった。

- ◆ 技術の組み合わせ導入のパフォーマンスに関しては、
 - CO₂排出原単位と総利益を考慮した場合について、数多くの技術組み合わせは、CO₂排出原単位における良い創発効果がほぼ存在しない。従って、単に運航利益の向上を目的として意思決定を行うならば、港湾作業を効率化する技術と船舶の燃料消費性能を向上する技術の組み合わせを導入すべきである。CO₂排出原単位の削減を目的として複数の技術を導入する場合、創発効果により大きな削減を得ることは期待できないが、少なくとも悪い創発効果を避ける組み合わせを導入することが有効である。
 - CO₂排出量と総利益を考慮した場合について、運航利益の向上とCO₂排出量の削減を同時に目的として意思決定を行うならば、港湾作業を効率化する技術と船舶の燃料消費性能を向上する技術の組み合わせを導入すべきであると考えられる。しかし、2つの共通因子を持つ技術同士の組み合わせは悪い創発作用が存在するため、他の評価指標を使用して評価するなど、導入の意思決定を再検討する必要がある。
 - 多くの技術組み合わせは導入することによって発生する明確な創発効果は存在しないことが分かった。そういったケースでは、導入する技術や技術のパラメータ値の選定を検討する必要があると考えられる。
- ◆ 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。
- ◆ 本研究では、原油価格と運賃の波動などの市場の不確実性を考慮したため、船速の変動に伴う船舶ライフサイクル中の運航回数の変化による総利益の変動は非線形であることが確認できた。また、本ケーススタディでの結果は、市場の不確実性を考慮して技術の組み合わせの導入効果に従って投資を行う意思決定者にとっては信頼できる結果であることが確認できた。

第7章 結論

7.1 結論	94
7.2 今後の展望	94

7.1 結論

本研究では運航利益向上とCO₂排出削減の観点から総利益、CO₂排出原単位とCO₂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た。具体的には、システム・アーキテクチャ分野が使用しているトレードスペースという意味決定支援ツールを用いて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。

実際に本手法を用いて、現在海事産業界で考案されているものを含む 8 個の技術と 28 個の技術組合せ導入の評価を行うことで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CO₂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。

7.2 今後の展望

今後の展望としては、実際に海上物流システムの意関係者、あるいは意思決定者に評価手法を用いて技術組み合わせの導入や投資を行うことで、有識者の観点から考慮すべき評価指標や技術間の相互作用から生む創発的な効果の定量的分析等に関するフィードバックをもらうことが考えられる。海上物流のような複雑なシステムに技術導入を行うためのシミュレータの入力や出力データ整理の作業量は膨大である。従って、使用者が円滑かつ効率的のように本評価手法を使用できるために、シミュレータに対するウェブアプリケーションの開発と実装が必要であると考えられる。

また、産業内の技術導入に対する創発効果の評価手法は今回、著者が一意で決定したが、新たな評価指標の探索や、創発効果に新たな定量化手法の検討は、今後より必要であると考えられる。

参考文献

- [1]. 国土交通省交通政策審議会: 海事産業の生産性革命 (i-Shipping) による造船の輸出拡大と地方創生のために推進すべき取組について (答申) .
<http://www.mlit.go.jp/common/001135764.pdf>, Accessed on: Dec 15th 2016.
- [2]. 国土交通省プレスリリース, 国際海運における世界初の CO₂ 排出規制の導入について, 2011.
- [3]. IMO, UN body adopts climate change strategy for shipping, available from
<<http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitiastrategy.aspx>>, (参照日 2020 年 07 月 11 日).
- [4]. 国土交通省: 国際海事機関(IMO)第 3 回船舶のエネルギー効率に関する中間会合(EE-WG1)の開催結果, 2011.
- [5]. 上田直樹: 船舶からの温室効果ガス排出規制の動向と削減技術開発への取組み, 三菱重工技報低炭素社会特集, Vol.47, No.1, 2010.
- [6]. 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.
- [7]. 大西千絵, 森嶋輝也, 河野恵伸: 農商工連携の経済的パフォーマンス評価, 農業経営研究, Vol. 55, No. 2, 2017.
- [8]. 独立行政法人海上技術安全研究所: JSE 交流会船舶の省エネルギーについて (資料) , <https://www.nmri.go.jp/main/cooperation/demae/zisseki/JSE-kouryu.pdf>, 2002.
- [9]. 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.
- [10]. DNV GL: Beyond Condition Monitoring in the Maritime Industry, DNV GL Strategic Research & Innovation Position Paper 6-2014, 2014.
- [11]. 川本泰生: 船用機器の変遷—モニタリングシステムの変遷, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 51, No. 5, 2016, pp. 162-163.
- [12]. 下住明久: リモートメンテナンスシステムの実例, 日本マリンエンジニア

-
- リング学会誌, Vol. 46, No. 5, 2011, pp. 70-71.
- [13]. DNV GL: Ship Connectivity, DNV GL Strategic Research & Innovation Position Paper 04-2015, 2015.
- [14]. Dong Xisong, Xiong Gang, Guo Xiujiang, Li Yuantao, Lv Yisheng: Intelligent Ports Based on Internet of Things, Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE International Conference, 2013.
- [15]. 高嶋恭子, 萩原秀樹, 庄司るり, ウェザールーティングによる燃料節約: コンテナ船の航海データを用いたシミュレーション, 日本航海学会論文集, 第 13 号, pp259-266, 2004.
- [16]. 高嶋恭子, 萩原秀樹, 加納敏幸, 小林充: 高精度環境予測に基づく内航船の省エネルギー航法(<特集>Asia Navigation Conference), 日本航海学会誌, 第 167 号, p12, 2007.
- [17]. Brice Pryszo, MaxSea Weather Routing, 2012.
- [18]. 辻本勝, 佐々木紀幸, 藤原敏文, 上野道雄, 臼井謙彰, 加戸正治, 野村大吉, 高木健: 海の 10 モード指標計算法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 10 号, pp97-104, 2010.
- [19]. 小林充, 加納敏幸: 船舶運航時の燃料消費量簡易推定法について, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 6 号, 2008, pp411-412.
- [20]. 日本海事センター: 海事社会と地球温暖化問題 ~海の環境革命~ (DVD における参照資料), <http://www.jpmac.or.jp/img/relation/pdf/pdf-environment-p16-p24.pdf>, 2010.
- [21]. 安藤英幸: 船舶運航におけるビッグデータの活用ー燃費削減におけるケーススタディ, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 49, No. 5, 2014, pp. 86-91.
- [22]. 安藤英幸: 船舶版ビッグデータの時代へ~船舶情報グループの活動紹介~, https://www.monohakobi.com/ja/wp-content/uploads/2013/11/pdf-news_20131128-06.pdf, Monohakobi Techno Forum 2013 発表資料, Accessed on: Dec 31st 2016.
- [23]. 中野文平: システムズ・アプローチとは何か, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol. 33, No. 7, 1988-7, pp. 301-304.
- [24]. E. Crawley, B. Cameron, D. Selva: System Architecture, PEARSON,
-

-
- 2016.
- [25]. 坂口博: システムズ・アプローチの問題点, 城西経済学会誌, Vol. 11, 1975-11, pp. 164-179.
- [26]. W. Simmons: A Framework for Decision Support in Systems Architecting, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology Department of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [27]. Keen, P. G. W., Decision support systems: an organizational perspective, Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., ISBN 0-201-03667-3, 1978.
- [28]. Abaid Ullah, Salman Hussain, Ahmad Wasim, Mirza Jahanzaib: Development of a decision support system for the selection of wastewater treatment technologies, Science of Total Environment, vol. 731, 2020.
- [29]. Suzanne D. Pinson, Jorge Anacleto Louca, Pavlos Moraitis: A distributed decision support system for strategic planning, Decision Support Systems 20 (1997), pp. 35-51.
- [30]. H.A. Simon: Administrative Behavior (MacMillan, 1975).
- [31]. 堀井悠司: 海上輸送シミュレーションによる GHG 排出規制のための船舶運用意志決定支援システムの開発, 東京大学工学部システム創成学科卒業論文 (未公開), 2019.
- [32]. Ishimatsu, T., de Weck, O. L., Hoffman, J. A., Ohkami, Y., and Shishko, R. : Generalized Multicommodity Network Flow Model for the Earth-Moon-Mars Logistics System, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 53, No. 1 (2015), pp. 25-38.
- [33]. H. Gaspar, D. Rhodes, A. Ross and S. Erikstad: Addressing Complexity Aspects in Conceptual Ship Design: A Systems Engineering Approach, Journal of Ship Production and Design, Vol. 28, No. 4, November 2012, pp. 145-159.
- [34]. J. Calleya, P. Pawling, A. Greig: Ship impact model for technical assessment and selection of Carbon dioxide Reducing Technologies (CRTs), Vol. 97, March 2015, pp. 82-89. 2004.
- [35]. 上野隆治: 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, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文 (未公開), 2017.
-

-
- [36]. 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.
- [37]. 齋藤智輝: リアルオプション導入による船舶のライフサイクル価値向上に関する研究, 東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文 (未公開), 2016.
- [38]. 日本海運集会所: 入門「海運・物流講座」, 2004.
- [39]. 曹樺楠: シミュレーションによる太平洋コンテナ船定期航路の CO2 排出量とコスト削減の検討, 東京大学新領域創成科学研究科修士論文, (未公開), 2013.
- [40]. 荻原誠功, 山崎正三郎, 芳村康男, 足達宏之: 船舶海洋工学シリーズ⑪「船舶性能設計」, 成山堂書店, 2013.
- [41]. 鈴木和夫, 佐々木紀幸, 川村隆文: 船舶海洋工学シリーズ②「船体抵抗と推進」, 成山堂書店, 2013.
- [42]. 内藤林: 実海域船舶性能評価法の現状について, 日本造船学会・試験水槽委員会シンポジウム, 2003, pp. 1-9.
- [43]. 杉村泰: シーマージンとプロペラ設計, 日本船用機関学会誌, Vol. 7, No.9, pp.643-651, 1972.
- [44]. Kreij, K.: 船体表面の平滑性が失われることへの影響を検証・考察する (特集 機能性成膜形成の最新支援技術), 塗装技術, Vol. 52, No. 2, pp. 49-55, 2013.
- [45]. 熊本博光: モダン信頼性工学, コロナ社, 2005
- [46]. 森隆行: 定期船の運航と採算(<特集>船の経済), 日本船舶海洋工学会誌, 第5号, pp1-29, 2006.
- [47]. Zannetos, Zenon S, 地田知平, 石渡茂: 「タンカー運賃の理論 タンカー活動の経済的分析」, 海事産業研究所, 1968.
- [48]. David G. Luenberger: 「金融工学入門」, 日本経済新聞社 2002.
- [49]. 富田康光: 船: 引合から解船まで, 関西造船協会, 2004.
-

謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々にご助力を頂きました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

指導教官である東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 稗方和夫先生には、2年半の間に、外国人である私は研究生活だけではなく、普段の生活や人間関係からあらゆる面で丁寧に指導と教示をいただきました。入学した私を責任あるプロジェクトに受け入れていただき、以前からほとんど研究をしたことがない私が研究者としても大変成長させていただきました。研究に苦しんでいた根性がない私を最後まで丁寧に指導していただいたこと、修士になってから生活上で様々な水に合わないところに気を遣っていただいたこと、大変感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術専門員 榎本昌一様には、普段の研究に対するご相談や、研究室のインフラに関するサポートをいただき、時にも自身のエンジニアとしての経験もご教示いただきました。大変感謝いたします。

東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 秘書 山本和子様には、研究室の煩雑な事務手続きを行っていただき研究に打ち込める環境を用意していただきました。また、外国人である私に日本の慣れない生活の様々な方面から話をお付き合いいただくなど、大変感謝いたします。

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 粉原直人様には、プロジェクトを進めていく上で、船舶性能やデータ解析に関する知見など、私の未熟な理論的理解についてのご支援とご指導、普段メールのやりとりで貴重なデータをご提供いただき、大変多くを学ばせていただきました。

研究室の卒業生である笈田佳彰様、和中真之介様、水林義博様、宇野健介様、王汝佳様には私を辛抱強く指導していただきました。また、学部4年の卒業生である堀井悠司様、茶屋愛太郎様、大久保佳徳様、水野遊大様、橋本豪様には、研究生活を苦しんでいた私を元気を付けていただきました。特に大久保様は、私の日本語の勉強に関する建設的な意見をいただき、また中国語の勉強についても非常に高い趣味を示していただき、心から感謝いたします。

研究室半年上の先輩である笠原達也様、松尾康平様には、研究室での仕事のご協力

や、研究活動のご指導について、初めて研究室にきて何もわからない何もできない私に最後まで付き合っていたいただいたこと、大変感謝しております。三人で一緒に深夜まで研究室で雑談をしたことや、気分転換で焼肉を一緒に盛り上がったことはこれからも忘れません。

研究室の同輩である Khatun Mst Taskia 様には研究室の仕事のご協力や研究に関する議論、また、同じく留学生として生活の面からの助け合いや困難に落ちた私に優しく話を付き合っていたいただき、大変感謝しております。

研究室の後輩である城野裕大様、牧野美紗様、Saul Trujillo Castillo 様、王銘瑞様、柚山奈結様、彭思雄様には、主に研究室の仕事を行っていただき、研究活動、論文執筆に集中する環境を作っていただき、活気に満ちた研究室生活を送れたように思います。ありがとうございました。特に城野様は、研究室の後輩だけではなく、一人の友達としてグルメ情報の共有、就職活動の相談やアニメ、漫画に関する雑談まで、生活中的あらゆることをお付き合いいただいたこと、大変感謝しております。

学部4年生の鳥居克哉様、林倫生様には、学部生ながら高いレベルの知識と技術を用い、私の論文執筆にご意見をいただきました。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 特任准教授およびマサチューセッツ工科大学システムデザイン&マネジメント研究科 上級講師 Bryan Moser 先生には、GTL(Global Teamwork Lab)での活動を通して、システム思考的アプローチや、国際コミュニケーションの能力を養っていただきました。また、同じく GTL においては、東京大学外国人特別研究員 Giles Bruno Sioen 様、Ira Winder 様、とは共に研究室で過ごしながら、より深く関わらせていただきました。

最後になりましたが、大学院生活を実りあるものにしてくれた多くの友人と、大学院進学という私の我儘をいつも応援し支え続けてくれた家族に感謝の意を表し、本論文の結びとさせていただきます、本当に感謝いたします。

2020年7月13日

趙之楠