

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
人間環境学専攻

平成 27 年度  
修士論文

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

2016 年 2 月 4 日提出

指導教員 稗方 和夫 准教授 印

学生証番号 47-146703

齋藤 智輝



---

# 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 燃料消費量.....	2
1.1.2 市場変動による影響.....	3
1.1.3 気象による性能変化.....	4
1.1.4 経年変化による性能変化.....	6
1.1.5 船渠での船舶改修.....	8
1.2 目的.....	9
1.3 本論文の構成.....	10
第2章 関連研究.....	11
2.1 はじめに.....	12
2.2 船舶の経済性評価.....	12
2.2.1 船舶のライフサイクル評価.....	12
2.2.2 船舶改修の考慮.....	14
2.3 実海域における船舶の推進性能評価.....	16
2.3.1 実海域下での船舶推進性能の評価.....	16
2.3.2 気象影響による船舶性能の変化.....	17
2.3.3 経年影響による船舶性能の変化.....	20
2.4 リアルオプション分析に関する研究.....	21
2.5 本研究の位置づけ.....	23
第3章 提案手法.....	24
3.1 提案手法の概要.....	25

---

---

3.2 基本となる船舶設計案 .....	25
3.2.1 データ構造 .....	26
3.2.2 船型 .....	27
3.2.3 エンジン .....	28
3.2.4 プロペラ .....	31
3.2.5 エンジン回転数と船速の関係 .....	33
3.3 リアルオプションを導入した船舶設計案 .....	35
3.3.1 データ構造 .....	35
3.3.2 初期費用と改修費用 .....	36
3.4 不確実性に関連するモデル .....	36
3.4.1 航路モデル .....	37
3.4.2 市場モデル .....	38
3.5 リアルオプション分析 .....	42
3.5.1 NPV の導出 .....	42
3.5.2 船舶改修を行うかどうかの意志決定 .....	43
3.6 構築した運航シミュレータ .....	43
3.6.1 運航シミュレータの概要 .....	43
3.6.2 運航シミュレータの詳細 .....	44
第4章 運航シミュレータの検証 .....	49
4.1 はじめに .....	50
4.2 シミュレーションの設定 .....	50
4.2.1 船舶設計案 .....	52
4.2.2 航路モデル .....	58
4.2.3 市場モデル .....	62
4.2.4 経年劣化モデル .....	64
4.3 概算結果との比較によるシミュレーション結果の検証 .....	65
4.4 航路の違いによる船舶構成案の経済性影響分析 .....	66
4.5 市場状況の変動による経済性影響分析 .....	67
4.6 まとめ .....	68
第5章 リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価 ..	69

---



---

5.1 はじめに.....	70
5.2 ケーススタディの基本設定.....	70
5.3 市場変動を考慮する場合 .....	71
5.3.1 ケーススタディの詳細設定 .....	71
5.3.2 ケーススタディの結果 .....	74
5.4 航路変更を考慮する場合 .....	75
5.4.1 ケーススタディの詳細設定 .....	75
5.4.2 ケーススタディの結果 .....	78
5.5 市場変動と航路変更を考慮する場合 .....	79
5.5.1 ケーススタディの詳細設定 .....	79
5.5.2 ケーススタディの結果 .....	82
5.6 ケーススタディのまとめ .....	83
第6章 考察 .....	84
6.1 提案手法に関する考察 .....	85
6.1.1 構築した運航シミュレータについて .....	85
6.1.2 構築した各モデルについて .....	85
6.2 ケーススタディに関する考察 .....	86
6.2.1 ケーススタディの設定について .....	86
6.2.2 ケーススタディの結果について .....	89
6.2.3 船舶改修について .....	90
6.3 本研究の課題 .....	90
6.3.1 構築したモデルについての課題 .....	90
6.3.2 リアルオプションについての課題 .....	91
第7章 結論 .....	92
7.1 結論 .....	93
7.2 今後の展望 .....	93
謝辞 .....	94
参考文献 .....	97
APPENDIX .....	101

---

---

 図目次

図 1-1	主機の燃料消費率と最適出力値の例.....	3
図 1-2	風速と船速低下量についての実船計測例[1][2].....	4
図 1-3	船体表面に付着した海洋生物[5].....	6
図 1-4	スクリュープロペラへの海洋生物付着例[5].....	6
図 1-5	主機における消耗要因[6].....	7
図 1-6	船上に搭載された SIMS の計測装置[8].....	8
図 1-7	実際に船舶改修が行われた例[10].....	9
図 2-1	燃料費予測図 [11].....	13
図 2-2	燃料のライフサイクル段階[13].....	14
図 2-3	有害物質排出量解析結果[13].....	14
図 2-4	船体コーティングにおける塗装部分管理[14].....	15
図 2-5	実海域再現水槽での実験例[17].....	17
図 2-6	波浪中抵抗増加が速力低下に及ぼす影響[18].....	18
図 2-7	水面上の船体計上を表す主要寸法の定義[20].....	19
図 2-8	ウェザールーティング実行結果[21].....	20
図 2-9	速力と回転数の経年劣化の関係[23].....	21
図 2-10	不確実性に対応するために定義した戦略[26].....	22
図 3-1	提案手法の概要図.....	25
図 3-2	船舶の構成部品及び主機出力の馬力伝達.....	26
図 3-3	基本的な船舶設計案の概要図.....	27
図 3-4	エンジンディレーティングの一例.....	30
図 3-5	仕様書より生成したエンジンの BHP-RPM 特性.....	31
図 3-6	定義したプロペラのトルク係数 $KQ$ と推進係数 $KT$ の関係 ( $PD = 0.880, EAR = 0.540, D = 8.800, Z = 4$ ).....	32
図 3-7	船舶設計案の詳細図.....	35
図 3-8	定義する風力階級発現確率の例.....	38
図 3-9	二項格子モデルの予測方法概略図.....	39
図 3-10	原油価格の予測例(10 シナリオ).....	40

---

図 3-11	運賃率の予測例(10 シナリオ)	41
図 3-12	基準運賃の予測例(10 シナリオ)	41
図 3-13	運航シミュレータの概要図	44
図 3-14	運航シミュレータのシミュレーションフロー	45
図 4-1	シミュレーションで想定する航路(航路 A)	50
図 4-2	シミュレーションで想定する航路(航路 B)	51
図 4-3	平水中におけるバルバスバウの有無による全抵抗係数の変化	54
図 4-4	荒い海象(風力階級 7)でのバルバスバウの有無による全抵抗係数の変化	55
図 4-5	軽荷(Ballast)状態における BF2~BF6 でのバルバスバウによる全抵抗係数の変化	56
図 4-6	満載(Full)状態における BF2~BF6 でのバルバスバウによる全抵抗係数の変化	56
図 4-7	3 種類のエンジンの回転数に対する燃料消費率の差異	57
図 4-8	航路 A 上において解析対象にした気象観測範囲	59
図 4-9	航路 B 上において解析対象にした気象観測範囲	59
図 4-10	観測範囲における航路別月次平均風速のヒストグラム	60
図 4-11	定義した想定航路 A における風力階級発現確率	61
図 4-12	定義した想定航路 B における風力階級発現確率	61
図 4-13	有義波高と船速低下の関係	62
図 4-14	シミュレーションで用いた原油価格シナリオ	63
図 4-15	シミュレーションで用いた基準運賃シナリオ	63
図 4-16	シミュレーションで用いた運賃率シナリオ	64
図 5-17	市場変動に対応する船舶設計案	73
図 5-18	市場変動に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム	75
図 5-19	航路変更に対応する船舶設計案	77
図 5-20	航路変更に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム	79
図 5-21	市場及び航路変動に対応する船舶設計案	81
図 5-22	市場及び航路変動に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム	82
図 6-1	商船三井の運用する油送船の航路[39]	87
図 A-1	運賃率抽出グラフ[41]	102
図 A-2	基準運賃抽出グラフ[42]	103

---

表目次

---

表 1-1 風力階級(Beaufort Scale) [4] .....	5
表 2-1 経年劣化率[23].....	21
表 3-1 シミュレーションに用いた設定値 .....	47
表 4-1 運航シミュレーションにおける基本パラメータ .....	51
表 4-2 固定費に関するパラメータ .....	52
表 4-3 使用する船型のパラメータ .....	53
表 4-4 使用する船型の EHP 係数.....	53
表 4-5 バルバスバウを取り付けることによる影響.....	53
表 4-6 使用するエンジンのパラメータ .....	57
表 4-7 定義したエンジンの最適回転数と燃料消費率 .....	58
表 4-8 プロペラ生成に用いたパラメータ .....	58
表 4-9 風力階級別の平均風速・有義波高・平均波周期[16].....	60
表 4-10 市場価格使用データ .....	62
表 4-11 経年劣化率[23].....	64
表 4-12 船舶設計案 H1E1P0 についてのシミュレーション結果 .....	65
表 4-13 航路毎に最適化された船舶構成案の経済価値 .....	67
表 4-14 市場状態に最適化された船舶構成案の経済価値 .....	68
表 5-1 シミュレーションにおける基本パラメータ設定 .....	70
表 5-2 本研究で用いる初期費用及び改修費の設定.....	71
表 5-3 各市場シナリオにおいて最適な船舶構成 .....	72
表 5-4 市場変動を考慮した際のシミュレーション結果 .....	74
表 5-5 各航路において最適な船舶構成 .....	76
表 5-6 船舶の入渠時に航路変更が行われる確率 .....	77
表 5-7 航路変更のタイミングが一定確率で変化する際のシミュレーション結果 .....	78
表 5-8 航路 B での各市場シナリオにおいて最適な船舶構成 .....	80
表 5-9 船舶設計案を構成する初期設計と改修オプション .....	80
表 5-10 市場変動及び航路変更を考慮した際のシミュレーション結果.....	82
表 6-1 航路変更時期による船舶設計価値変動.....	88

---

---

表 A-1 原油価格月次過去データ（単位: [USD/barrel]）[40] .....	101
表 A-2 運賃率月次過去データ（単位: [%]）[41] .....	102
表 A-3 基準運賃月次過去データ（単位: [USD/ton]）[42] .....	103
表 A-4 評価環境 .....	104

---

## 第1章 序論

---

1.1 背景 .....	2
1.1.1 燃料消費量 .....	2
1.1.2 市場変動による影響 .....	3
1.1.3 気象による性能変化 .....	4
1.1.4 経年変化による性能変化 .....	6
1.1.5 船渠での船舶改修 .....	8
1.2 目的 .....	9
1.3 本論文の構成 .....	10

---

## 1.1 背景

船舶を建造する造船会社などにおいて船舶の設計・運用をする際に、建造された船舶によって運用されると予想される航海状況にて、ライフサイクル全体での利益を最大化することが重要となる。その際、船舶の運用コストの大部分を占めている燃料費を考慮するために、原油価格の変動をはじめとする市場変動リスクを考慮することが必要不可欠である。また、新たに船舶を建造する設計段階で実運航データなどから実海域性能を精度良く推定する技術や、船舶を運航する海運会社等においても、航海計画を立てる段階で燃料を節約しつつ時間通りの運航が出来るよう、実海域での性能を精度良く評価する技術が求められている。

以上で挙げた市場変動リスクに対して、船舶の運用途中の改修・形態変更を考慮した船舶設計の経済性評価が考えられているが、船舶の推進性能を大きく左右する要因となる実海域での風や波の影響、船舶を構成する部品の経年劣化などを考慮するような研究は行われていない。そのため、より正確な船舶の価値を評価し、設計などにフィードバックするためには、実海域船舶推進性能及び、実際に船舶を運用する際に発生する様々なリスクを考慮した上での船舶の経済性評価が求められる。

### 1.1.1 燃料消費量

背景でも述べたように船舶を運用する際に必要なコストの大部分を占めているのは、燃料費である。本項では船舶を運用する上でどのような意志決定が行われて燃料が消費されているのかを説明する。

一般的な船舶では主機としてディーゼル主機を搭載しており、ガバナー（整圧器）により回転数を一定に保ちつつ作動する。ただし、実海域における船舶の運航では、波風などによる外力の作用から生じる船舶推進性能への影響を考慮する必要がある。そのため、船体抵抗の増加やプロペラトルクの増加、推進効率の低下などが原因となって主機トルクが増加するが、トルクが過大になる際にはトルクリミットに達しないように主機の回転数を下げる運航を行う。

主機は、図 1-1 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。ここで、SFOC, BHP はそれぞれ燃料消費率、主機出力を示す。

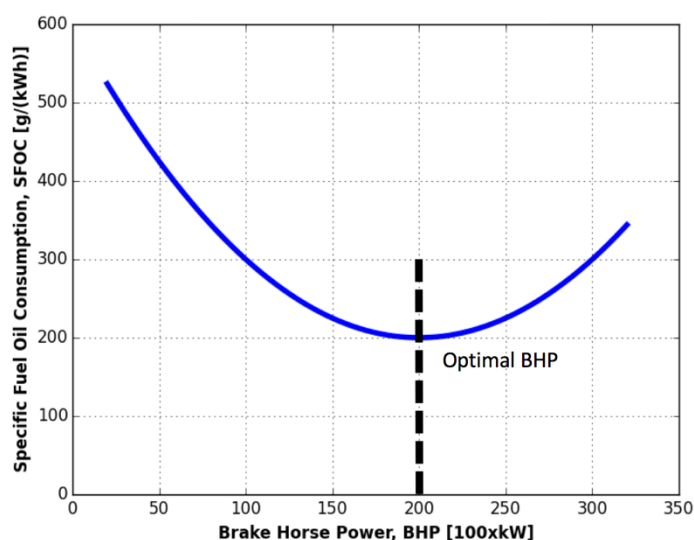


図 1-1 主機の燃料消費率と最適出力値の例

そのため、現在では、運航する海域の状況や、市場価格などの要因から主機の燃料消費効率を考慮し、作動を制限する運航が考えられている。また、燃料指針(Fuel Index, FI)により燃料投入量の上限を定め、上限を超える場合は回転数を低下させる運転を実施する船舶も増えてつある。

### 1.1.2 市場変動による影響

船舶を運用するコストには、クルーにかかる人件費、停泊する際に必要となる港湾使用料や船舶のメンテナンス費などの固定費などが挙げられるが、大部分の割合を燃料費が占める。そして、これらの燃料費を決定する原油価格(Crude Oil Price)や、運賃を決定する指標となる基準運賃(World Scale Flat)や運賃率(World Scale Rate)などが市場価格として挙げられ、これら市場価格の変動が船舶の運用コストに大きく影響する。例えば、原油価格が高くなると燃料消費量を抑える観点から減速走行をする運用にシフトするが、減速走行によって船舶のライフサイクル全体で考えたときの港間往復回数が減少することで、運賃収入の減少につながる。また、設計船速から外れるような運航をすることで主機の燃料消費効率及び推進性能が低下する恐れなど、市場変動によって様々な問題が生じる可能性がある。

そこで、このような市場変動リスクに対応するために予め原油価格を定めた長期契約を行うことや、供給が潤沢であり比較的安定している天然ガスを代替燃料源とする取り組みが行われている。



### 1.1.3 気象による性能変化

船舶を実際に運航する際、気象による推進性能の変化は非常に大きく、効率の良い運航を行うためにはこれらの要因による影響を無視することは出来ない。気象を考慮するにあたって、主に風と波による船体抵抗の増加やプロペラトルクの増加、推進効率の低下などが推進性能に大きく関わってくることがわかっている。具体例として、図 1-2 に示すように実際に運航する船舶での風速と船速の関係を見ても、最大で 8[knot]も船速が低下していることが確認できる。

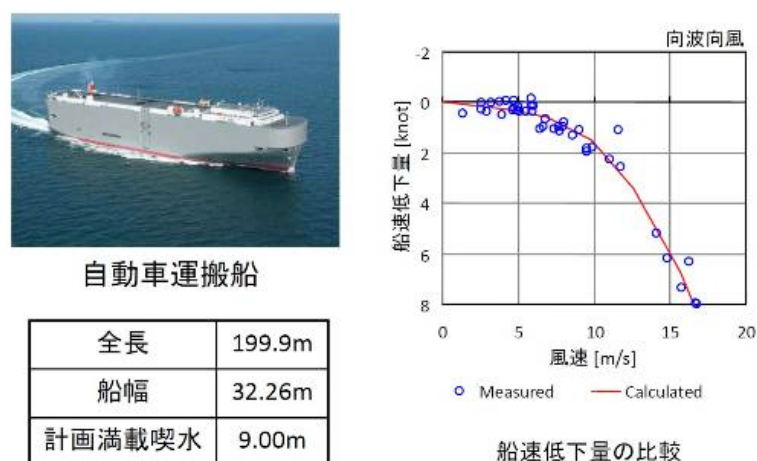


図 1-2 風速と船速低下量についての実船計測例[1][2]

そのため、このような波風による船舶への推進性能に対する影響を評価するために従来行われていた、模型船を用いて行う水槽試験から得られる推進性能指標に加えて、「海の 10 モード指標」と呼ばれる実際に航行する海象の下での推進性能を表す指標も重要になっている。また、船舶の設計情報などから実海域での推進性能を推定するようなツールも開発されている。[3]

また、このような波風の影響を定量的に評価するため、世界気象機関の定義した表 1-1 に示すような風力階級(Beaufort Scale)[4]が定義されている。

表 1-1 風力階級(Beaufort Scale) [4]

風力	海面の様子	風速[knot]	風速[m/s]
0	鏡のような海面。	<1	0.0-0.2
1	うろこのようなさざ波ができているが波頭に泡は無い。	1-3	0.3-1.5
2	小さい小波ができている。波長は短い、はっきりわかる。波頭は滑らかに見え、砕けていない。	4-6	1.6-3.3
3	大きい小波ができている。波頭が砕け始め、泡がガラスのように見える。ところどころに白波が現れることもある	7-10	3.4-5.4
4	小さい中波ができている。波長は3よりはながく、白波がかなり多い。	11-16	5.5-7.9
5	中くらいの波で波長は4より長く、一層はつきりしている。白波が沢山立っている。(しぶきを生じていることもある。)	17-21	8.0-10.7
6	中波の大きいものができ始める。至る所で、波頭が白く泡立ち、その範囲は5より一層広い。(しぶきを生じていることが多い)	22-27	10.8-13.8
7	波は、6より大きく、波頭が砕けてできた白い泡は、筋を引いて風下に吹き流され始める。	28-33	13.9-17.1
8	大波のやや小さい波で、波長は長い。波頭の端は、砕けて水煙となり始める。泡は、はっきりした筋を引いて風下に吹き流されている	34-40	17.2-20.7
9	大波。泡は濃い筋を引いて、風下に吹き流されている。波頭は、のめり、崩れ落ち、逆巻き始める。しぶきのため、視程は悪いこともある	41-47	20.8-24.4
10	波頭が、長くのしかかるような非常に高い大波。大きな塊固まりとなった泡は、濃い白色の筋を引いて、風下に吹き流されている。海面は全体として白く見える。波の崩れ方は、激しく、衝撃的である。視程は悪い。	48-55	24.5-28.4
11	山のような高い大波。中小船舶は、一時波の陰に見えなくなることもある程の大波。海面は、風に吹き流された長い白色の泡の固まりで完全に覆われている。至る所で波頭の端が吹き飛ばされて水煙となり、視程が悪い。	56-63	28.5-32.6
12	大気が泡としぶきとで充滿している。海面は、吹き飛ぶしぶきのために、完全に白くなっている。視程が著しく悪い。	64-	32.7-

#### 1.1.4 経年変化による性能変化

実海域によるもう一つの影響として、船舶の推進性能は経年による船体汚損に大きく影響される。経年によって船舶の推進性能が低下する要因として、例えば図 1-3、図 1-4 に示すような船体表面もしくは、プロペラに付着する海洋生物であったり、図 1-5 にあげるような船舶の主機機関の消耗などが挙げられる。



図 1-3 船体表面に付着した海洋生物[5]



図 1-4 スクリュープロペラへの海洋生物付着例[5]

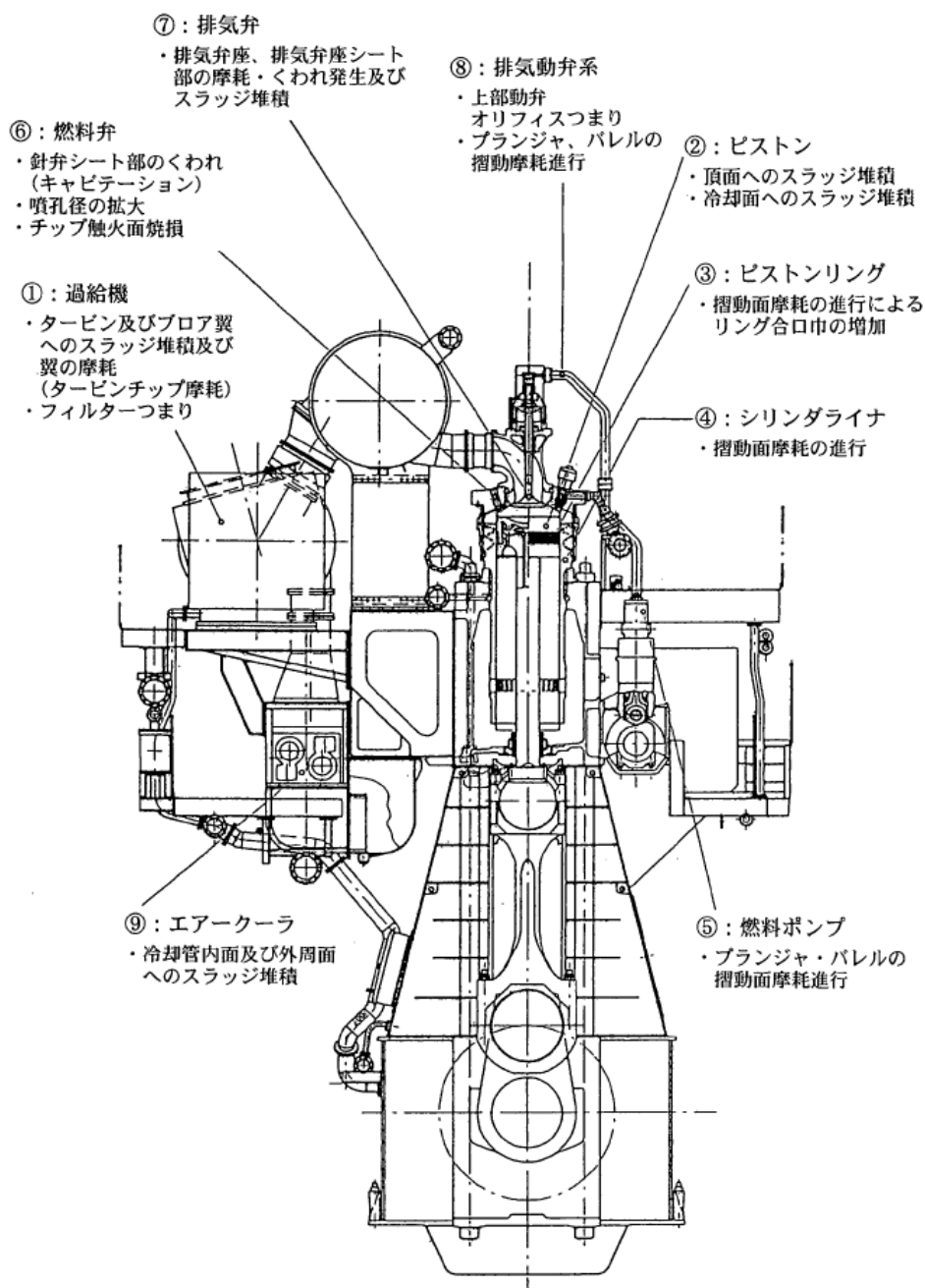


図 1-5 主機における消耗要因[6]

これらの要因から船舶にかかる抵抗が増加し、推進性能の低下や主機構成部品などの消耗によって燃料消費効率が低下することにつながってしまう。船舶運航の省エネルギー化を実現するためにも、経年劣化による運航コストの上昇を解消することは非常に重要である。そのため、実際に船舶を運用する際には、一定期間ごとに船渠(Dock)に入渠し、船体表面もし

くはプロペラへの付着物の除去清掃及び主機機関の整備なども同時に行われる。また、船渠に入渠するような大規模な整備以外に、港に停泊中の船舶に対してダイバーが船底やプロペラ等の清掃を行うことで推進性能の回復を期待することや、船底やプロペラに海洋生物が付着しないような工夫を施した塗料の研究なども進んでいる。[7]

また、情報技術の発展から実際に航行している船舶に計測装置を取り付け、一定の間隔で航行時の高精度なパフォーマンスデータを記録し、そのデータを船陸で共有し活用するようなシステムも研究されている。具体例として株式会社 MTI(以下、MTI)の開発した SIMS(Ship Information Management System)[8]があり、SIMS で蓄積したデータを用いて、性能解析や経年による燃料消費率の変化を検知し、プロペラ汚染などの把握やメンテナンス時期を決定することに利用されることもある。[9]



図 1-6 船上に搭載された SIMS の計測装置[8]

### 1.1.5 船渠での船舶改修

実際に船舶を運航する際に、世界情勢の変化などから市場価格の変動が大きくなることによる燃料費の増加が考えられる。また、環境への影響から船舶が運航することによる排出物の規制が厳しくなることから、設計時に想定していた運航条件とは異なる条件での運航を余儀なくされる。そのような不確実性に対応するため、就航中の船舶改修が考えられている。

このような船舶改修による不確実性への対応は、図 1-7 に示すように実際に 2015 年 11 月下旬に MTI によって行われている[10]。この事例は、対象船舶の燃料費変動に加え、運用する航路の変更も行われたことで、運航条件が著しく変化してしまい、設計時に想定してい

た条件での運航が難しくなったため船舶改修を余儀なくされた。

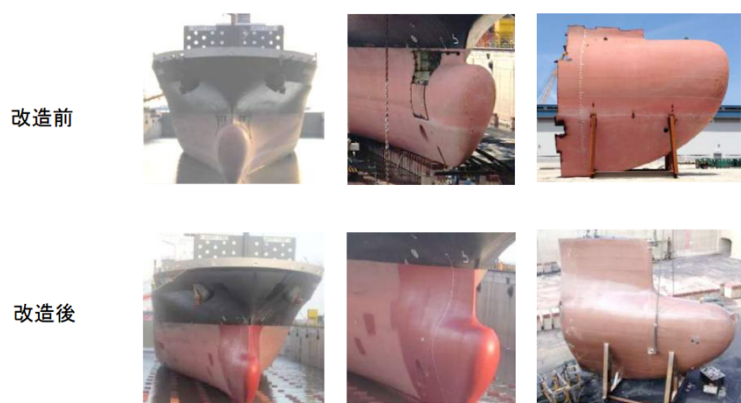


図 1-7 実際に船舶改修が行われた例[10]

## 1.2 目的

前節で紹介した事例をはじめとして、様々な不確実性に対応するために船舶の改修が行われることがある。そのような状況に対して本研究では、船舶を設計する段階から不確実性に対応するための複数オプションを有する船舶設計案、すなわちリアルオプションを導入した船舶設計案を提案する。これにより、実際に船渠での改修作業が必要となったときにその作業を安価かつ容易に済ませられることが考えられる。

また、リアルオプションを導入した船舶設計案のライフサイクル期間における価値を定量的に評価するための手法を提案する。具体的には、市場変動と航路変更を不確実な要素として扱うこととし、それらの不確実性を考慮した上でリアルオプションを導入した船舶設計案の価値を定量的に評価する。そのために、市場変動と航路変更を確率変動モデルとして定義し、船渠内での改修オプションの行使を考慮可能な運航シミュレータを用いてモンテカルロ法により、リアルオプションを導入した船舶設計案のライフサイクル期間における価値を算出する。

また、ケーススタディにおいて、実際の航路を運航する VLCC を対象に定義した、基本となる船舶設計案とリアルオプションを導入した船舶設計案に対してリアルオプション分析を行うことで、基本となる船舶設計案と、リアルオプションを導入した船舶設計案のライフサイクル



期間での価値を評価する手法の有効性の検証を行う。

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下に示すとおりである。

第1章では、研究の背景及び目的について述べた。

第2章では、平水中における船舶の経済評価に関連する研究及び、実海域における船舶の性能評価に関連する研究、リアルオプションに関する研究について述べる。

第3章では、本研究で提案する手法及び用いるモデルについて詳細に述べる。

第4章では、船舶設計案の価値を評価するための運航シミュレータの検証及びその検証結果について述べる。

第5章では、ケーススタディとして、実際の航路を運航するVLCCを想定したリアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価を行い、その結果について述べる。

第6章では、本研究で行ったケーススタディの結果に基づき、運航シミュレータ及び提案手法に関する考察を行う。また、本研究の課題についても言及する。

第7章では、本研究の結論を述べる。

## 第2章 関連研究

2.1 はじめに.....	12
2.2 船舶の経済性評価 .....	12
2.2.1 船舶のライフサイクル評価 .....	12
2.2.2 船舶改修の考慮 .....	14
2.3 実海域における船舶の推進性能評価 .....	16
2.3.1 実海域下での船舶推進性能の評価 .....	16
2.3.2 気象影響による船舶性能の変化 .....	17
2.3.3 経年影響による船舶性能の変化 .....	20
2.4 リアルオプション分析に関する研究 .....	21
2.5 本研究の位置づけ .....	23



## 2.1 はじめに

本章では、市場変動や海象の変化に対応できるような船舶設計案の価値を評価するために、船舶の経済評価及び、実海域における船舶の性能評価の研究に加え、リアルオプションに関する研究について概観する。

## 2.2 船舶の経済性評価

船舶の経済評価に関する研究では、船舶が市場に現れてから引退するまでのライフサイクル期間において生み出す価値として定義される、船舶のライフサイクル価値(Life Cycle Value, LCV)を基に評価するような手法が一般的である。本節では、そのような研究の紹介と共に、船の運用コストを大きく変動させる市場リスクに対応するために考えられた、船舶改修を含んだ運用に関する研究について記述する。

### 2.2.1 船舶のライフサイクル評価

船舶のライフサイクル評価に関する研究として、Markus らの研究[11]が挙げられる。この研究は、ヨーロッパで行われる 2025-2050 の間に海事産業によるエネルギー消費、有毒ガス排出を減らす目的で始められた JOULES(Joint Operation for Ultra Low Emission Shipping)プロジェクト[12]のベースラインを作る研究として行われたものである。具体的な内容としては、図 2-1 のようにエネルギー資源の価格の予測を 2020 年から 2050 年まで行い、独自に開発したソフトウェア(LCPA-tool)を用いて複数のエネルギー種別における燃料消費量などを算出した。また、現行の Ro-Pax フェリーと呼ばれる客船の設計を用いてライフサイクル評価を行っている。ここで、Brent Crude Oil は原油、HFO は Heavy Fuel Oil、MGO は Marine Gas Oil を表している。このように予測した燃料費を用いて LCV を算出していたが、単調増加する傾向を持つ燃料費予測を行ってしまっていたため、対象船舶におけるライフサイクル期間全体でのキャッシュフローとしては負の値が算出されていた。

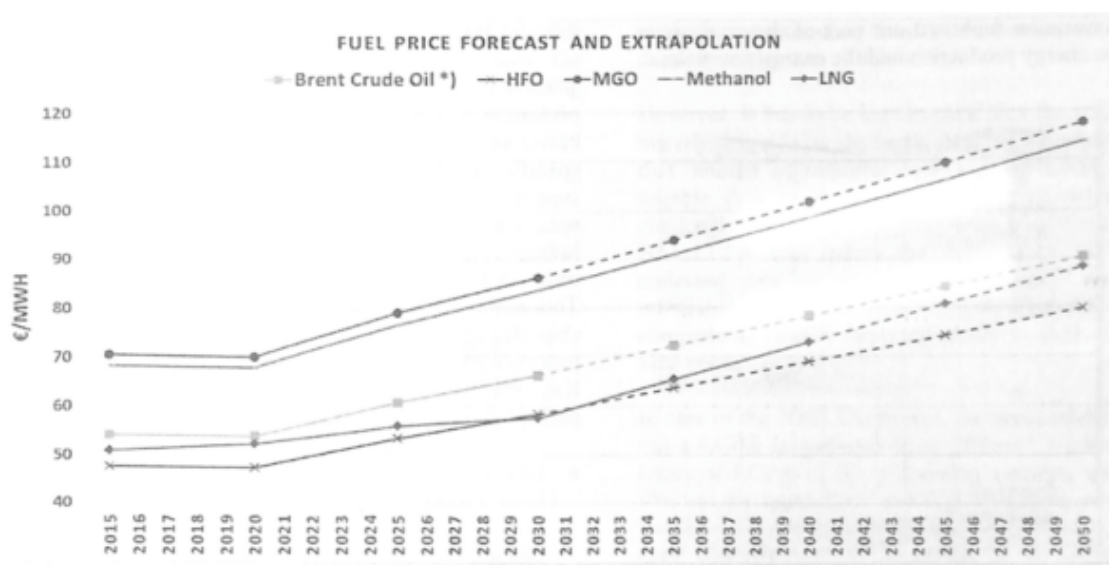


図 2-1 燃料費予測図 [11]

また、船舶のライフサイクル評価として直接は行ってはいないものの、関連研究として船舶の主機種類に対してライフサイクル期間での燃料消費量及び有害物質排出量の解析を行った James らの研究[13]が挙げられる。この研究では、GREET(the Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation)モデルと呼ばれる軽自動車用の温室効果ガス排出量解析システムを船舶に応用するために開発した TEAMS(the Total Energy & Emissions Analysis for Marine Systems)という解析モデルを用いている。ケーススタディとして、航行距離とエンジン特性を入力として、燃料種類別にフェリー、タンカー、コンテナ船の燃料消費量、有害物質排出量を算出している。具体的には、燃料のライフサイクルを図 2-2 に示した原料から船舶運用時の 3 段階に分けて、各段階での有害物質排出量を図 2-3 のように詳細に解析した。この結果は、ヒューストン-ニューヨーク間を運航するタンカーが平均船速 14 ノットで航行したときの 1 航海分の有害物質排出量を解析したものであり、燃料のライフサイクル毎の寄与率を示したものである。このように、船舶の運用コストの大部分を占める燃料費の計算に必要となる、燃料消費量を始めとした値を詳細に予測することで、船舶のライフサイクル価値の算出に用いることが出来る。

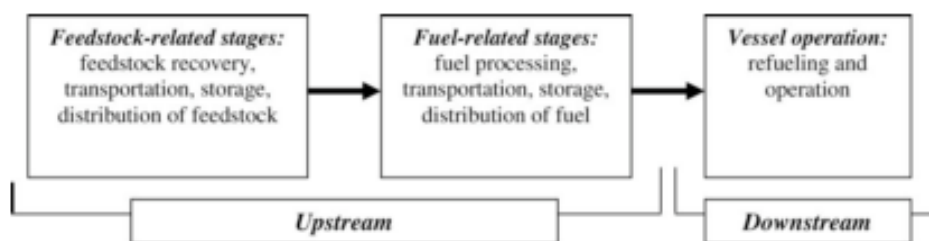


図 2-2 燃料のライフサイクル段階[13]

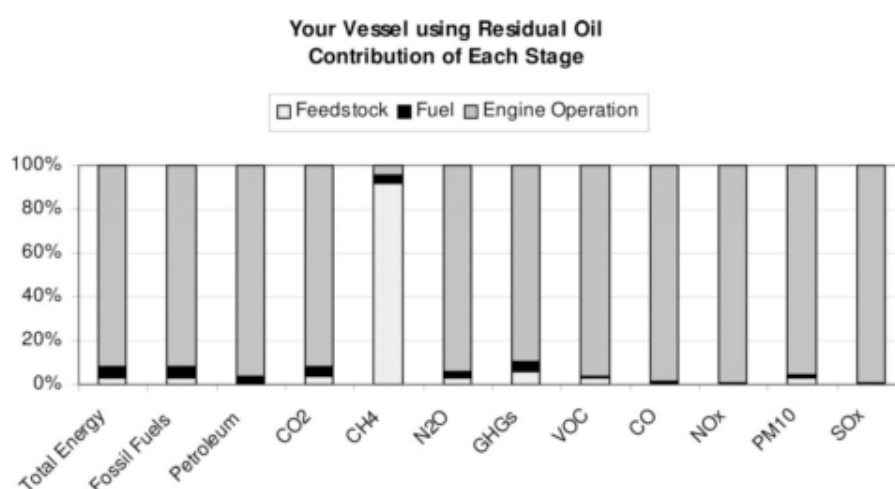


図 2-3 有害物質排出量解析結果[13]

## 2.2.2 船舶改修の考慮

船舶を運用するにあたり、市場変動や省エネ運航による減速走行、航路変更による海象変化などの様々な要因によって設計段階で想定していた運航条件とは異なる条件で航行することを余儀なくされる場合がある。昨今では、このような不確実性に対応するため、背景で紹介した MTI の例[10]のように船舶改修を行うことがある。本項ではそのような船舶改修を考慮する研究について概観する。

まず、Blanco-Davis らの研究[14]ではフェリーを対象とした。船渠内での比較的シンプルな船舶改修方法として、新しい船体コーティング手法の提案を行っている。この研究で提案される新しいコーティング手法では、図 2-4 に示すように船体の各表面部分における塗料を厳密に管理し、従来の研削材を用いて行われるグリットブラスティング(Grit Blasting)と呼ばれる

下地処理の代わりに水を高い圧力(600~800 bars)で吹き付けるハイドロブラスティング(Hydro Blasting)を行うことで、船体に付着している塩や他の汚染要因を洗浄する。



図 2-4 船体コーティングにおける塗装部分管理[14]

このような下地処理が終了した段階で塗装を行った後、厳密な温度・湿度管理を行う工程が提案する新しいコーティング手法である。その際、提案した新しいコーティング手法の価値を評価するために、新しい船体コーティング手法を行う際の工程に対して初期費用を定義する。その後、対象船舶のライフサイクル期間を25年間として、ライフサイクル期間の半分である12.5年経過した段階で船体コーティングを行った場合と行わなかった場合に評価された値がどのような差分を持つかを比較している。

また、稗方らの研究[15]では、市場変動に対応するために平水中のタンカー船を構成するプロペラとエンジンの改修を考慮し、対象船舶のライフサイクル評価を行っている。この研究では、過去のデータから燃料費や運賃計算に必要な市場価格を予測し、その予測結果を用いてライフサイクル期間内でプロペラもしくはエンジンの全取り替えを行った場合の船舶のライフサイクル価値を評価・比較することで、市場変動に対応できているかを検証している。

## 2.3 実海域における船舶の推進性能評価

実海域における船舶の推進性能の予測が難しいため、実海域における船舶の経済性評価を直接行っている研究はまだ存在しない。しかし、現実的な値を算出・評価するために、推進性能に大きく影響を与えるとされる実海域影響として、気象による船舶性能の変化と経年による船舶性能の変化について考慮する必要がある。本節では、実海域下での船舶推進性能の評価に関する研究に加え、気象及び経年影響それぞれの研究について概観したい。

### 2.3.1 実海域下での船舶推進性能の評価

実海域における船舶の推進性能の評価を行う際、従来行われてきた水槽試験などの結果から実海域での推進性能を予測することが考えられる。佐々木らの研究[16]では自動車の10-15 モード燃費指標の概念について、船舶の場合でも同様に燃費評価をする必要があるとして、実海域中での海象における船舶の性能評価を行うために、従来の平水中での条件を実海域条件下に移す評価指標の開発を行った。また、これらの各指標について評価できるように粉原の研究[3]では VESTA(Vessel Performance Evaluation Tool in Actual Seas)として、実運航時の船舶性能を評価するための実運航性能シミュレータを開発し、任意海象下での対象船舶の推進性能を高精度で評価することができる。これによって実海域での推進性能を精度良く推定することが出来るようになり、エネルギー効率指標や燃料節約の指標を考慮した運航のための意志決定に用いることができる。

また、海上技術安全研究所では、実海域再現水槽と呼ばれる実海域での波浪場や風の状態を再現できるような施設が平成 22 年に竣工された[17]。この施設は 382 台の造波機と 8m 幅の送風機を備えており、実海域における船舶の推進性能や操縦性能などを評価するような試験を実施することが出来る施設となっている。実際の例として、図 2-5 に示す従来の水槽実験では再現できなかった実海域での波浪場を再現した実験を行うことができる。

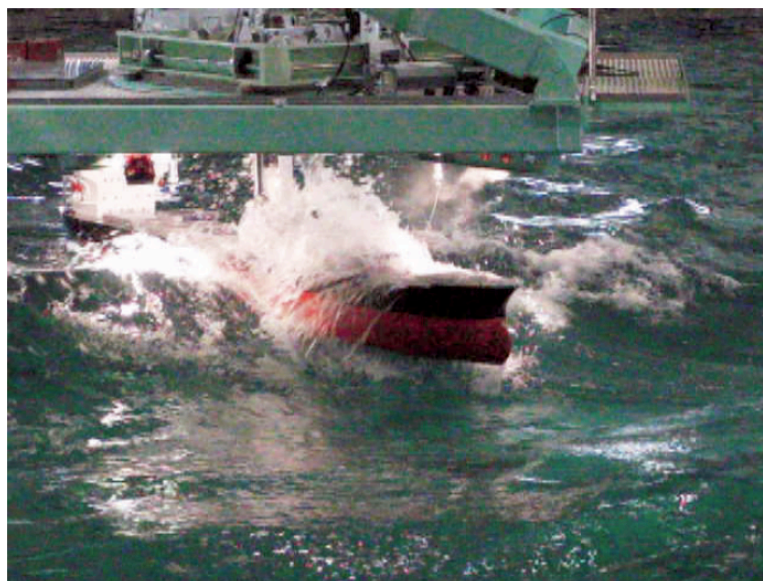


図 2-5 実海域再現水槽での実験例[17]

### 2.3.2 気象影響による船舶性能の変化

気象影響による船舶性能変化の要因として主に波による波浪中抵抗増加と風による風圧力が挙げられる。波浪中抵抗増加については、丸尾の理論[18]などで詳細に計算出来るが、実際に模型船を用いて、波が船舶の推進性能にどの程度影響を与えるかについて観測した日本船舶技術研究協会による実験[19]もある。実験では、VLCC の模型船を用いて向かい波を想定した波浪中抵抗試験を行い速力低下量算定を行っている。実験から得られた波浪中抵抗増加の値から図 2-6 に示すような速力低下に及ぼす影響値の算出を行うことで、佐々木らの研究[16]における推定値が妥当であることを検証している。

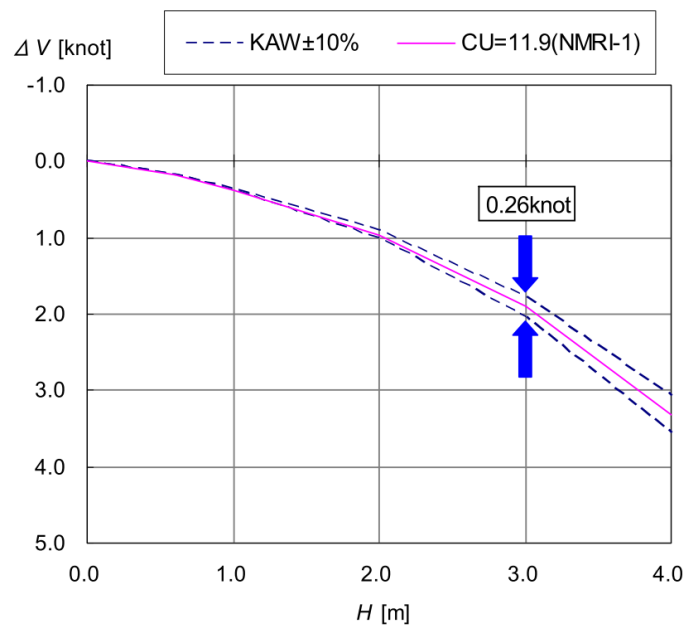


図 2-6 波浪中抵抗増加が速力低下に及ぼす影響[18]

また、推進性能に大きな影響を与える要因の一つである風による風圧力であるが、こちらについても藤原らの研究[20]によって推定式が求められている。この研究では、「タンカー」、「貨物船」、「コンテナ船」、「客船」、「漁船」の5つの船種毎に68隻の船舶について風圧力データの収集を行い、図 2-7 に示す水面上の船体計上を表す主要寸法から風圧力の推定を行っている。背景で紹介した「海の10モードプロジェクト」や解析ツール「VESTA」についても風圧力については藤原の式を基に構築されており、SIMS によって得られた実運航データを用いることで実海域影響による船舶推進性能への影響の検証も行われている。

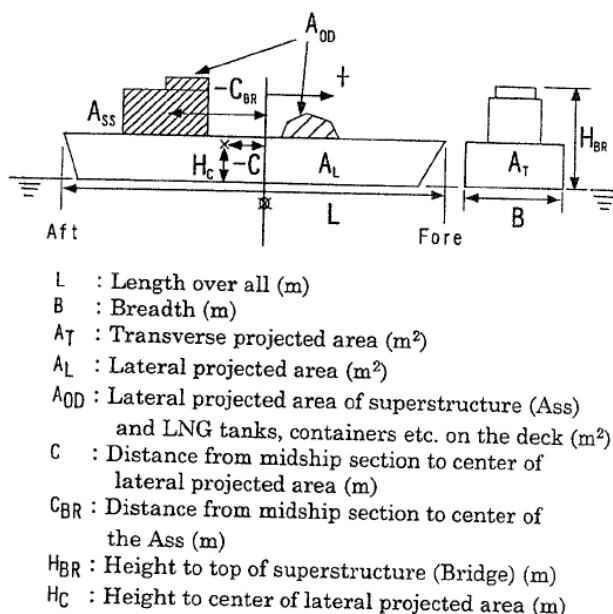


図 2-7 水面上の船体計上を表す主要寸法の定義[20]

また、このような気象による推進性能への影響を船舶の運航方法によって軽減させる方法もウェザールーティングとして研究されている。Ishi らの研究[21]では、図 2-8 に示す横浜-サンフランシスコ間で運航するコンテナ船を想定したウェザールーティングを行っており、過去データを用いて港間の海象データの予測を行い、ウェザールーティングの有無による影響を比較している。過去データを用いることで船体への風波の入射角などを計算出来るため、詳細に実海域影響を算出できる。ウェザールーティング手法として、ベジェ曲線を基に荒い海象を避けつつ航行時間を最小にするルーティングを行ったとき、次元の数を変動させていくと航行時間がどのように変動するかを比較しており、大圏航路による航行時間と比較して最大で 2 時間(1%)程度航行時間を短くすることが示されている。



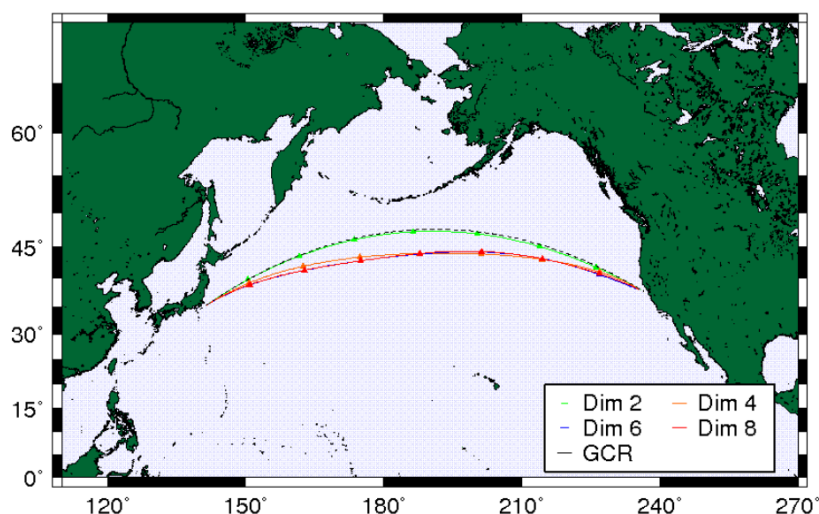


図 2-8 ウェザールーティング実行結果[21]

### 2.3.3 経年影響による船舶性能の変化

経年による船舶構成部品の摩耗や主機の部品消耗、船底への海洋付着物による船舶の推進性能への影響については背景でも述べたが、本項では経年影響がどの程度推進性能に影響するのかを定量的に評価している研究について記述する。

宮本の研究[22]では、船体、主機、プロペラからなる船型設計について実海域中推進性能を考慮して新しい船型設計を提案する中で、船型によって汚損・経年影響がどの程度異なるかを考察している。具体的には、推進性能の評価に馬力変化、船速低下、回転数低下を用いて、汚損・経年影響について 1970 年頃に自己研磨型防汚塗料(SPC-AF)が一般化した時期を境に比較し、それらの影響が有する一般的な傾向を表現する推定式を提案した。

また、主に船速と回転数の経年劣化の関係については、杉村による研究[23]において図 2-9 に示すような傾向が示されている。経年劣化による影響は、船舶の速力低下や同じ速度を出すために必要な馬力変化などが挙げられるが、杉村は経年劣化による推進性能への影響を、図 2-9 に示すように船渠に入渠することで回復する図中の実線部分、船渠に入渠しても回復せず経過年数が増えるに辺り蓄積されている図中の波線部分の二つに分類している。それらの経年劣化を、それぞれ「Dock to Dock(船渠間経年劣化)」と「Age Effect(累積経年劣化)」とに分けて考えている。

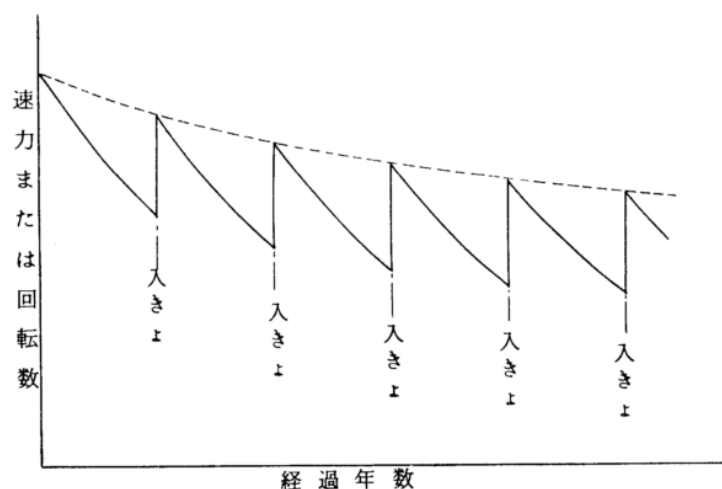


図 2-9 速力と回転数の経年劣化の関係[23]

さらに、経年劣化による影響を Dock to Dock と Age Effect に分けて考えたとき、VLCC などの肥大タンカー船における各推進性能指標への影響について、目安として表 2-1 に示すような値を挙げている。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 2-1 経年劣化率[23]

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

## 2.4 リアルオプション分析に関する研究

本節では、リアルオプションの考えを導入するに先立ち、リアルオプションに関する研究について記述したい。

まず、リアルオプションという言葉は金融工学において、実物資産への投資をする際に用いられ、Myers による論文[24]が初期の研究として挙げられる。リアルオプションとは、具体的

に、「ある資産を一定の価格で購入または売却できる権利のことである。これは、指定された条件の下で資産を買うもしくは売ることが出来る権利であって義務ではない」とされる。このリアルオプションの考えを用いた研究として、安達らの研究[25]が挙げられる。これは、モンテカルロ法を用いた計算手法である SSA(Stratified State Aggregation)法を基礎として改良を施すことで、資源開発プロジェクトへの適用をする研究である。SSA 法は他資産アメリカンオプション（権利行使期間中にいつでも権利行使が出来るオプション）の評価に適した手法として取り挙げられている。具体的には、多段階投資からなる油田開発プロジェクトを、あるオプションを現資産とするオプション取引であるコンパウンドオプションと考えることで評価する手法の開発を行った。

また、船舶の分野でのリアルオプション分析を用いた研究として、Bendall らによる研究[26]が挙げられる。この研究では、2つの港間におけるコンテナ船の運用を対象に、コンテナ船の数や使用する港の数を変動させるなどの3つの運用戦略を定義した。そして、それら3つの戦略を図 2-10 に示すように、不確実性を持つ要因として、各港での需要や市場価格である運賃を考慮して戦略を変更するか否かを決定する。

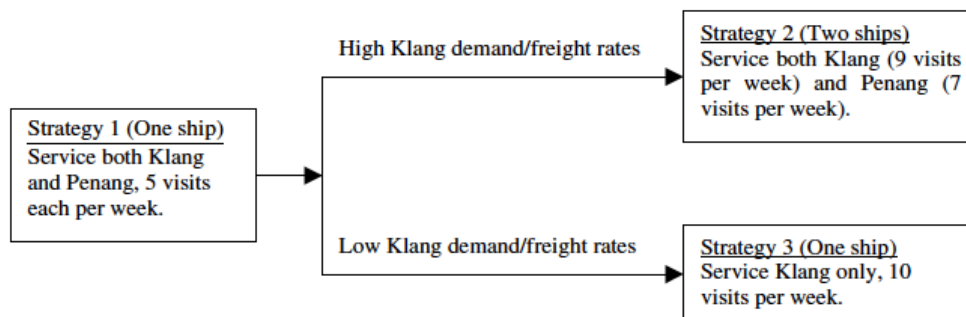


図 2-10 不確実性に対応するために定義した戦略[26]

以上の戦略設定の他に、6ヶ月間隔でこのオプション行使をするかどうかの判断を行うことや評価期間は3年間とすること、固定費、燃料費などのパラメータを定義する。その後、モンテカルロシミュレーションを15,000回程行うことで、オプションを有するプロジェクト全体の価値を評価し、提案する柔軟性を持った戦略により価値が上昇することを示していた。

## 2.5 本研究の位置づけ

本章で紹介した関連研究などにもあるように、近年、原油価格を始めとした市場価格の変動による不確実性に対応するための船舶改修についての研究は盛んに行われており、実際に就航中の船舶に対して改修工事が行われた事例も存在する。しかし、今回関連研究などで取り上げた改修事例は、市場変動による燃料費増加及び対象船舶の航路変更によって、設計時に想定していた設計条件と実際の海象での運航条件に差異があったことが実際の運航によって判明したため行われたものであった。また、船舶を設計する段階で改修を考慮し、実海域影響もしくは市場変動に応じるための船舶改修案として、リアルオプションを導入し、改修オプションを含んだ設計と、そのような改修オプションを考慮しない設計を比較し、船舶の価値を定量的に評価するようなリアルオプションの考えに基づいた研究は行われていない。

以上の状況を考慮した上で、本研究の新規性として挙げられるものは以下の2つである。

- リアルオプションを導入した船舶設計案の提案
- 市場変動と航路変更による不確実性を考慮した上で、リアルオプションを導入した船舶設計案のライフサイクル期間での価値を定量的に評価する手法の提案

## 第3章 提案手法

---

3.1 提案手法の概要 .....	25
3.2 基本となる船舶設計案 .....	25
3.2.1 データ構造 .....	26
3.2.2 船型 .....	27
3.2.3 エンジン .....	28
3.2.4 プロペラ .....	31
3.2.5 エンジン回転数と船速の関係 .....	33
3.3 リアルオプションを導入した船舶設計案 .....	35
3.3.1 データ構造 .....	35
3.3.2 初期費用と改修費用 .....	36
3.4 不確実性に関連するモデル .....	36
3.4.1 航路モデル .....	37
3.4.2 市場モデル .....	38
3.5 リアルオプション分析 .....	42
3.5.1 NPV の導出 .....	42
3.5.2 船舶改修を行うかどうかの意志決定 .....	43
3.6 構築した運航シミュレータ .....	43
3.6.1 運航シミュレータの概要 .....	43
3.6.2 運航シミュレータの詳細 .....	44

---

### 3.1 提案手法の概要

本研究における提案手法では、不確実性に関連するモデルを定義した上で、基本的な船舶設計案及びリアルオプションを導入した船舶設計案に対してそれぞれリアルオプション分析を行うことで、対象船舶のライフサイクル期間における評価を行う。提案手法の概要として、入力として与えた船舶設計案を評価するフローを図 3-1 に示す。

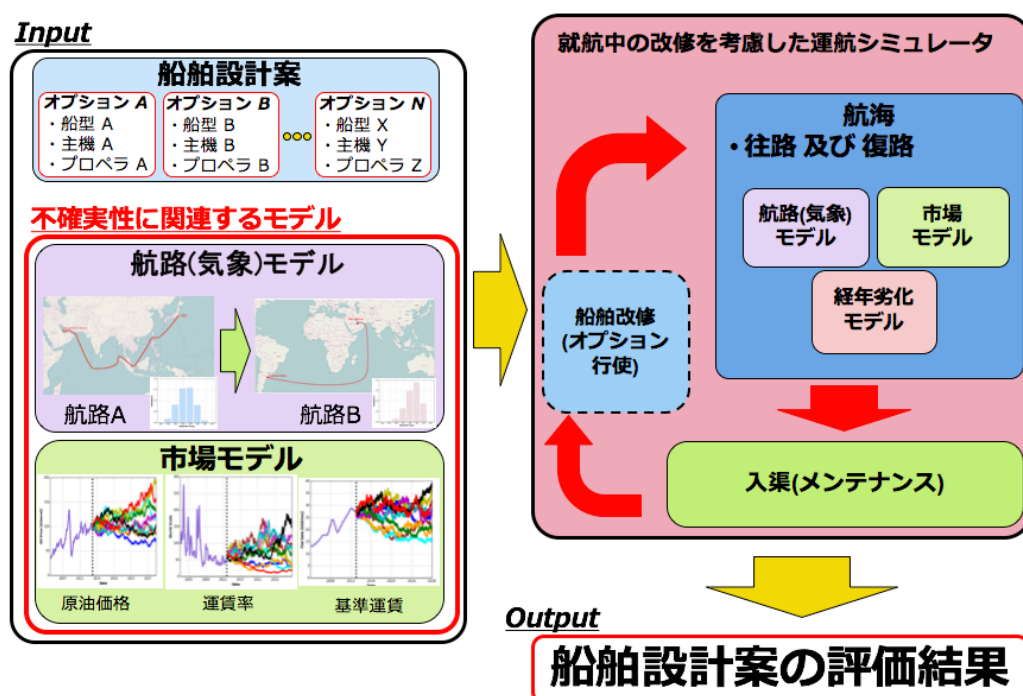


図 3-1 提案手法の概要図

本章では各船舶設計案の評価を行う上で定義した基本的な船舶設計案とリアルオプションを導入した船舶設計案及び、不確実性に関連するモデルとして定義した航路(気象)モデルと市場モデルについて詳述する。その後、本研究で行ったリアルオプション分析について詳述した上で、最後に構築した運航シミュレータについての説明を行う。

### 3.2 基本となる船舶設計案

本手法では、ある船舶が与えられた船速で航行した際のプロペラ回転数、燃料消費量を算出するために、図 3-2 に示す船舶構成部品より船型・エンジン・プロペラを定義する。そし

て、それらによって構成される船舶構成案について推進性能を算出する船舶性能モデルを定義した。船舶性能モデルを詳細に定義することによって船舶構成部品の特徴が表現でき、最終的な経済的価値に現実的な影響を与えることになる。

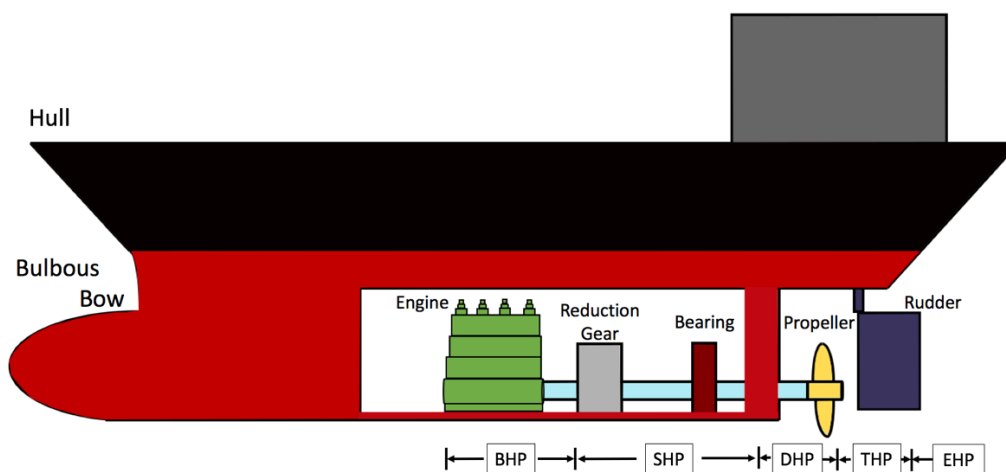


図 3-2 船舶の構成部品及び主機出力の馬力伝達

本節では従来の船舶を表現するための船舶設計案について定義をした後にそのデータ構造の詳細及び船舶性能モデルを構成するのに必要な各構成部品である船型・エンジン・プロペラについて記述する。また、船舶構成案よりエンジン回転数と燃料消費量を導出する方法について詳述する。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「船舶性能設計」[27]及び、小山の研究[28]を参考にした。

### 3.2.1 データ構造

本項では、基本的な船舶設計案として改修に関連するリアルオプションなどを全く考慮しない船舶設計案のデータ構造について定義を行う。基本的な船舶設計案の概要図を図 3-3 に示す。

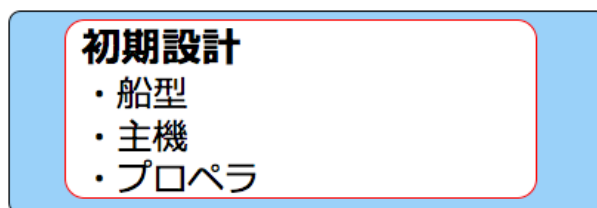


図 3-3 基本的な船舶設計案の概要図

基本的な船舶設計案では、初期設計として船型・エンジン・プロペラで構成される船舶構成案 1 つのみによって定義され、この船舶構成より構築される船舶性能モデルのみを用いてライフサイクル期間における運航を行う。そのため、基本となる船舶設計案ではライフサイクル期間中において初期設計のみで運用され、船型・主機・プロペラの構成が変化することはない。

以下の項で、これらの船型・エンジン・プロペラからなる船舶構成から構築される船舶の推進性能モデルについて詳述する。

### 3.2.2 船型

船舶推進性能を左右する要素として、船舶の船型(Hull)は、船舶の進む速度、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、船速(Velocity,  $V$ )に対する有効馬力(Effective Horse Power, EHP)を定義することでシミュレーションに用いる船型の定義を行う。

そこで、船速  $V[\text{m/s}]$  と有効馬力  $\text{EHP}[\text{W}]$  の関係について、船体の全抵抗  $R_t[\text{N}]$  を用いると、次の式(3.1)のように表せる。

$$\text{EHP}(V) = R_t \cdot V \quad (3.1)$$

また、この全抵抗  $R_t$  は佐々木らの研究[16]より、式のように表せる。ここで、 $L_{pp}$  は船体の垂線間長(Length Between Perpendiculars)、 $d_{max}$  は計画満載喫水、 $C_t$  は平水中抵抗係数となり船速の 4 次式として式(3.2)、(3.3)のように表すことが出来る。

$$R_t = \frac{1}{2} \rho L_{pp} d_{max} C_t(V) \quad (3.2)$$



$$C_t(V) = C_{t0} + C_{t1}V + C_{t2}V^2 + C_{t3}V^3 + C_{t4}V^4 \quad (3.3)$$

これより EHP は式(3.4)のように近似できる。(5 次式の項は考慮しないこととする)

$$\begin{aligned} EHP(V) &= R_t \cdot V \\ &= \frac{1}{2} \rho L_{pp} d C_t(V) \cdot V \\ &= \frac{1}{2} \rho L_{pp} d (C_{t0} + C_{t1}V + C_{t2}V^2 + C_{t3}V^3 + C_{t4}V^4) V \\ &\approx EHP_0 + EHP_1V + EHP_2V^2 + EHP_3V^3 + EHP_4V^4 \end{aligned} \quad (3.4)$$

以上より、各係数  $EHP_i (i = 1, 2, 3, 4)$  を定義することにより船型を表現することができる。

### 3.2.3 エンジン

本手法では、船舶の推進性能を求めることに加え、船舶が航行するのに必要な燃料消費量を求めるために、船舶構成部品の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。具体的には、プロペラ回転数に対する機関出力の制動馬力 (Brake Horse Power, BHP) 及び燃料消費率 (Specific Fuel Oil Consumption, SFOC) の特性を定義する。

まず、制動馬力 BHP[W] についてであるが、主にプロペラ回転数  $n[\text{rps}]$  と内燃機関の軸で計測されるトルク  $Q[\text{N}]$  を用いて式(3.5)のように表せる。

$$BHP(V) = 2\pi nQ \quad (3.5)$$

その後、制動馬力から図 3-2 に示したように軸馬力 (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  $\eta_M$ 、軸馬力 SHP から伝達馬力 DHP への変換効率を伝達効率  $\eta_T$ 、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  $\eta_B$ 、推力馬力 THP から有効馬力 EHP への変換効

率を船殻効率 $\eta_H$ と定義すると以下の式(3.6)~(3.9)のように表現できる。

$$\eta_M = \frac{SHP}{BHP} \quad (3.6)$$

$$\eta_T = \frac{DHP}{SHP} \quad (3.7)$$

$$\eta_B = \frac{THP}{DHP} \quad (3.8)$$

$$\eta_H = \frac{EHP}{THP} \quad (3.9)$$

また、燃料消費率 SFOC について、エンジンの相対負荷である Load をエンジン最大出力  $BHP_{max}$  と制動馬力 BHP を用いて表すことで次の式(3.10)、(3.11)が成り立つ。

$$Load = \frac{BHP}{BHP_{max}} \quad (3.10)$$

$$SFOC = SFOC_0 + SFOC_1 \cdot Load + SFOC_2 \cdot Load^2 \quad (3.11)$$

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 1-1 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が、エンジンディレーティングという低燃費化できる仕様を持つ機関も多く存在している。[29]

エンジンディレーティングを実現する方法としてエンジンシリンダ内最高圧力 $P_{max}$ と正味平均有効圧力 $P_{me}$ との比を大きくすることなどが考えられ、この方法を用いることで図 3-4 のように燃料消費率が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。

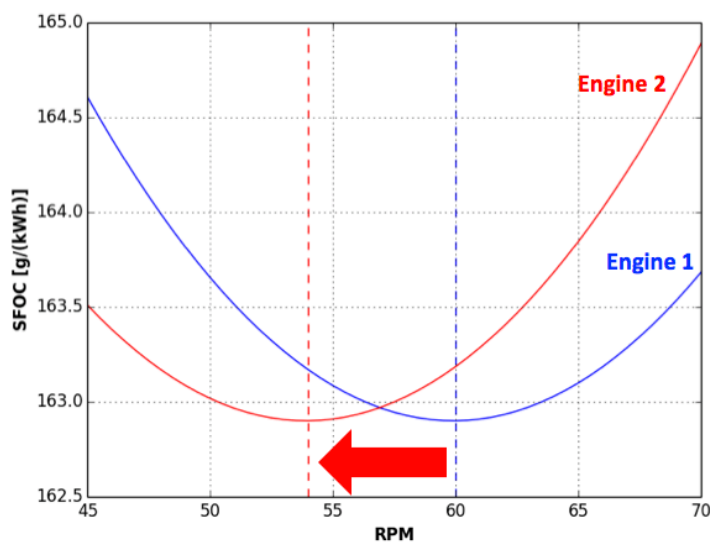


図 3-4 エンジンディレーティングの一例

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(3.12)のように 2 次関数を用いて表すことが出来る。

$$BHP = BHP_0 + BHP_1 \cdot \frac{n}{N_{max}} + BHP_2 \cdot \left(\frac{n}{N_{max}}\right)^2 \quad (3.12)$$

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。

次の図 3-5 に Web 上で公開されている三菱重工業株式会社の UE 型ディーゼルエンジンの仕様書[30]より、プロペラ回転数に対する機関出力の制動馬力 BHP を 3 種類のエンジンに対してそれぞれ定義を行い、プロットした結果を示す。

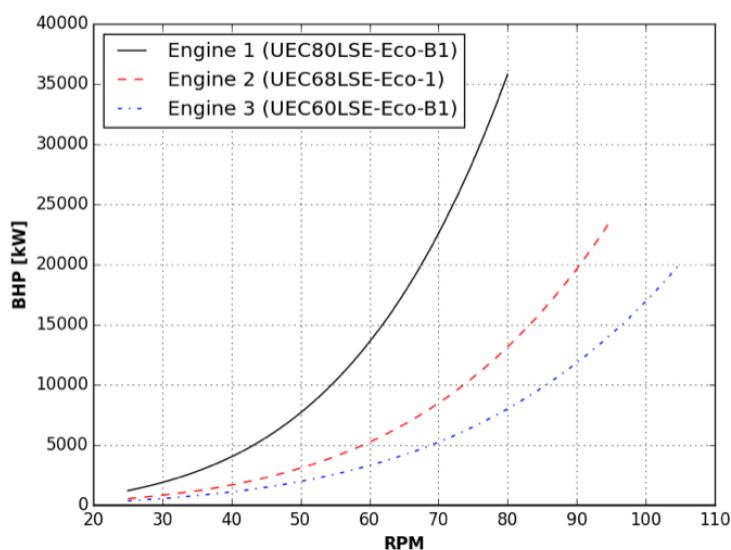


図 3-5 仕様書より生成したエンジンの BHP-RPM 特性

### 3.2.4 プロペラ

本手法では船舶構成部品の最後の構成要素であるプロペラについて詳述する。本手法におけるプロペラは主にプロペラ回転数とプロペラが与える推力の関係を示すものである。例えばプロペラ固有の以下のパラメータを定義し、Bernitsas らの計算手法[31]を用いることで、特定のプロペラシリーズ(the Wageningen B-Series Propellers)について式(3.13)、(3.14)に示すトルク係数 $K_Q$ 及びスラスト係数 $K_T$ を算出することが出来る。また、制約条件としてスラスト係数 $K_T$ は正とする。

- ピッチ直径比 (Pitch-Diameter Ratio, P/D)
- 展開面積比 (Expanded Area Ratio, EAR)
- プロペラ直径[m] (Diameter, D)
- プロペラ枚数 (Z)

$$K_Q = K_{Q0} + K_{Q1}J + K_{Q2}J^2 \quad (3.13)$$

$$K_T = K_{T0} + K_{T1}J + K_{T2}J^2 \quad (3.14)$$

また、ここで、 $J$  はプロペラ前進係数、 $V_a$ [m/s]はプロペラ流入速度を表し、プロペラ回転数

n[rps]より次の式(3.15)、(3.16)で表せる。

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (3.15)$$

$$V_a = (1 - w)V \quad (3.16)$$

以上で定義した、トルク係数 $K_Q$ 及びスラスト係数 $K_T$ を用いることで、プロペラのトルク  $Q$ [N]と推力  $T$ [N]を次の式で表すことが出来る。ここで、 $\rho$ は水の密度とした。

$$Q = \rho n^2 D^5 K_Q \quad (3.17)$$

$$T = \rho n^2 D^4 K_T \quad (3.18)$$

よって、本手法ではプロペラ固有のパラメータを定義することで、トルク係数 $K_Q$ 及びスラスト係数 $K_T$ を算出し、用いることとする。例として先に挙げた各パラメータを用いてプロペラトルク係数 $K_Q$ 、推進係数 $K_T$ の関係を定義したものを次の図 3-6 に示す。

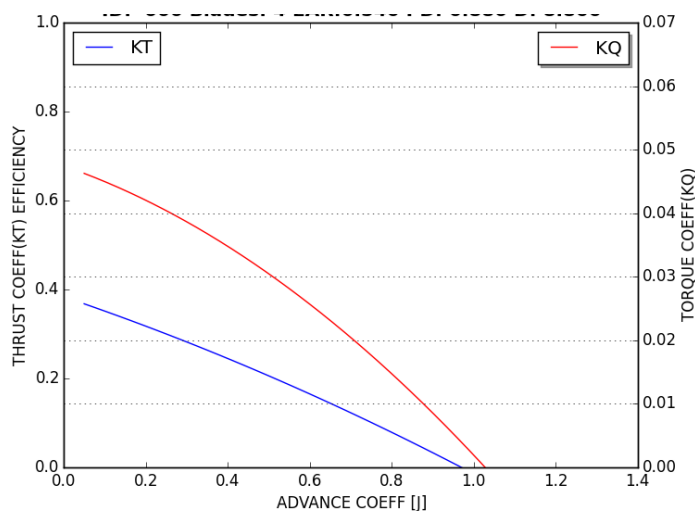


図 3-6 定義したプロペラのトルク係数 $K_Q$ と推進係数 $K_T$ の関係  
( $P/D = 0.880, EAR = 0.540, D = 8.800, Z = 4$ )

### 3.2.5 エンジン回転数と船速の関係

本手法では、以上で説明した船舶の構成要素である船型・エンジン・プロペラが定義されることで、エンジン回転数  $n$  と船速  $V$  の関係を定義することが出来る。本項では、エンジン回転数と船速の関係について詳述する。

まず、エンジンを定義することで、式(3.12)より制動馬力  $BHP$  を算出できる。また、式(3.6)～式(3.9)より定義される変換効率を用いて制動馬力  $BHP$  から有効馬力  $EHP$  までの変換を考えたときに次のような式(3.19)が成り立つ。

$$EHP = \eta_M \eta_T \eta_B \eta_H \cdot BHP \quad (3.19)$$

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(3.20)のように導出できる。

$$\begin{aligned} \eta_M \eta_T \eta_B \eta_H &= \frac{EHP}{BHP} \\ &= \frac{EHP}{DHP} \cdot \frac{DHP}{BHP} \\ &= \eta \cdot \eta_s \end{aligned} \quad (3.20)$$

ここで、効馬力  $EHP$  と伝達馬力  $DHP$  の比率である推進効率 $\eta$ と、伝達馬力  $DHP$  と制動馬力  $BHP$  の比率であるシャフト効率 $\eta_s$ に分けて考える。すると、式(3.21)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(3.22)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 $\eta$ は式(3.23)のように表せる。

$$1 - w = \frac{V_a}{V} \quad (3.21)$$

$$1 - t = \frac{R_T}{T} \quad (3.22)$$

$$\eta = \frac{EHP}{DHP} = \frac{1 - t}{1 - w} \eta_B \quad (3.23)$$

また、プロペラ船後効率 $\eta_B$ はプロペラトルク  $Q$  と推力  $T$  を用いることで次の式(3.24)のように表せる。

$$\eta_B = T \cdot \frac{V_a}{2\pi n Q} \quad (3.24)$$

よって、以上で示した式より推進効率 $\eta$ は式(3.25)のように  $n$  と  $V$  の関数として表すことが出来る。

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{1-t}{1-w} \cdot T \cdot \frac{V_a}{2\pi n Q} \\ &= \frac{1-t}{1-w} \cdot \rho n^2 D^4 K_T \cdot \frac{(1-w)V}{2\pi n \cdot \rho n^2 D^5 K_Q} \quad (\because \text{式(3.16), (3.17), (3.18)}) \\ &= (1-t) \cdot \frac{V}{2\pi n D} \cdot \frac{K_{T0} + K_{T1}J + K_{T2}J^2}{K_{Q0} + K_{Q1}J + K_{Q2}J^2} \quad (\because \text{式(3.13), (3.14)}) \end{aligned} \quad (3.25)$$

そこで、式(3.4)、(3.19)、(3.20)を用いると制動馬力  $BHP$  は式(3.26)のように表せる。

$$\begin{aligned} BHP &= \frac{EHP}{\eta \eta_s} \\ &= \frac{EHP_0 + EHP_1 V + EHP_2 V^2 + EHP_3 V^3 + EHP_4 V^4}{(1-t) \cdot \frac{V}{2\pi n D} \cdot \frac{K_{T0} + K_{T1}J + K_{T2}J^2}{K_{Q0} + K_{Q1}J + K_{Q2}J^2} \cdot \eta_s} \end{aligned} \quad (3.26)$$

よって、式(3.12)を用いると最終的に式(3.27)が成り立つ。

$$\begin{aligned} BHP_0 + BHP_1 \cdot \frac{n}{N_{max}} + BHP_2 \cdot \left( \frac{n}{N_{max}} \right)^2 \\ = \frac{EHP_0 + EHP_1 V + EHP_2 V^2 + EHP_3 V^3 + EHP_4 V^4}{(1-t) \cdot \frac{V}{2\pi n D} \cdot \frac{K_{T0} + K_{T1}J + K_{T2}J^2}{K_{Q0} + K_{Q1}J + K_{Q2}J^2} \cdot \eta_s} \end{aligned} \quad (3.27)$$

式(3.27)は左辺と右辺共に制動馬力  $BHP$  を表しており、船速  $V$  とエンジン回転数  $n$  のみの

関数で成り立っている。ここで、式(3.14)におけるスラスト係数 $K_T \geq 0$ 、式(3.25)における推進効率 $\eta \geq 0$ という制約条件を用いるとエンジン回転数  $n$  に対して船速  $V$  が一意に定まる。以上で示した式(3.27)を用いることで、本手法における船舶の構成要素である船型・エンジン・プロペラを定義することで、エンジン回転数  $n$  と船速  $V$  の関係を定義することが出来る。

### 3.3 リアルオプションを導入した船舶設計案

本節において、前節で記述した基本となる船舶設計案を基に、本研究の新規性であるリアルオプションの考えを用いるために定義したリアルオプションを導入した船舶設計案について詳述する。

#### 3.3.1 データ構造

本項では、提案手法において入力として与えるリアルオプションを導入した船舶設計案のデータ構造について詳述する。本研究で用いるリアルオプションを導入した船舶設計案とは、図 3-7 に示したものである。

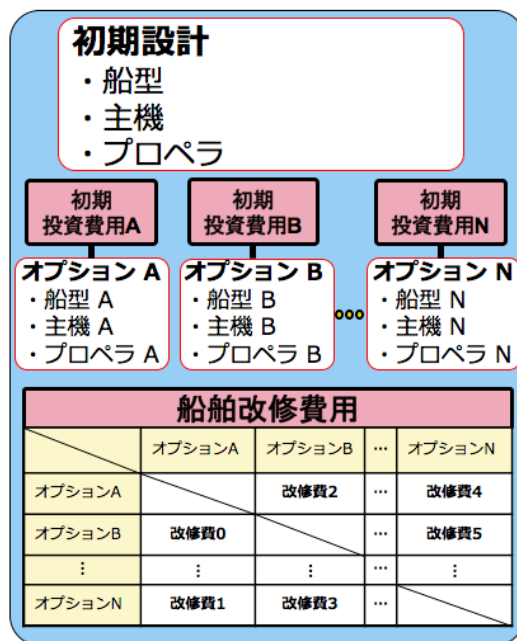


図 3-7 船舶設計案の詳細図



ここで、定義する船舶設計案は図 3-3 で定義した船舶構成部品である船型・エンジン・プロペラからなる初期設計の他に、初期設計とは異なる船舶構成部品の組み合わせからなる複数のオプションを持つ。また、船舶改修を考慮するために必要な費用として、オプションを保持するのに必要な投資である初期投資額がオプション毎に決められており、オプションを行使するのに必要な費用として船舶改修費用が定義されている。

このように初期費用と改修費用を含めたデータ構造を用いた船舶設計案を定義することで、就航中の改修を設計の段階で考慮することができるようになる。従来の船舶を想定した基本となる船舶設計案に対しても、改修するための複数オプションの数を 0、初期投資費用、船舶改修費用を 0 円と定義することで表現することが出来る。このような船舶設計案を定義することで、リアルオプションの考えを導入し、従来の船舶とのライフサイクル価値の比較を行えるようにする。

### 3.3.2 初期費用と改修費用

本項では、船舶設計案の定義に必要な初期投資費用と船舶改修費用についての説明を行う。

初期投資費用は初期設計の他に予め改修オプションを持つ際に必要となる投資費用となり、初期設計と改修オプションが構成される船舶構成部品によって計算されることとした。そのため、船舶構成部品毎に初期投資費用が定義される必要がある。例えば初期設計と各オプション間で 2 種類の船型が用いられていて、他の構成部品(主機・プロペラ)が同じような構成だった場合、初期投資費用として船型 1 つ分の費用のみが定義される。

船舶改修費用は、基の設計から次の設計に対象船舶を改修した場合の費用を改修前設計と改修後設計の組み合わせ毎に個別に設定する。そのため、図 3-7 のように行列形式で定義を行うこととした。船舶改修費用についても初期投資費用と同様に、船舶構成部品毎に予め定義を行い、初期設計と改修オプションが決定した段階で具体値の算出を行う。

また、本研究では同じ部品から同じ部品への改修は考慮しないこととした。

## 3.4 不確実性に関連するモデル

本節では、リアルオプションを導入するために、不確実性に関連するモデルとして航路モデルと市場モデルの定義を行った。いずれのモデルについても、実際に船舶を運用するに

あたり、ライフサイクル価値に大きな影響を与える重要な要因となっている。以下の項でそれら2つのモデルについて詳述する。

### 3.4.1 航路モデル

本研究では、対象船舶が運航途中に航路変更が行われることを想定して航路モデルを定義する。背景にも示した通り、船舶を風や波のある実海域において運用する際、船舶の推進性能を大きく左右する気象変動について無視することはできない。本節では航路毎に異なる海象状態などを始めとする運航状況を考慮するため、本手法で定義した航路モデルについて詳述する。

航路モデルでは、ライフサイクル期間中に航路変更が起きることを想定して航路変更が発生するルールを定義する。本研究では、対象航路で使用する港などの政治的要因など、やむを得ない理由による航路変更を考え、確率モデルで航路変更発生確率を定義することを想定する。航路モデルを用いることで、対象船舶のライフサイクル期間中に発生する航路変更、及び航路毎の距離の違い、海象状況などを考慮して運航シミュレーションを行うことが出来る。

実海域影響による船舶の推進性能への影響は、主に風や波による影響となっており、具体的には航行中における船体への風圧抵抗(Wind Resistance)の増加と波浪中抵抗増加(Added Wave Resistance)によるものである。本研究では実海域影響として、風・波2つの要因のうち、波浪中抵抗増加のみを実海域影響として考慮した。以降、波浪中抵抗増加について詳述する。

まず、波浪中抵抗増加について、船舶が実海域を航行するとき、波浪によって船体が動揺したり、船体への入射波を反射することによって新たな波が発生する。このとき、平水中を航行した際の船体に掛かる抵抗に比べて、この波による抵抗増加分だけ抵抗が大きくなる。この船体への抵抗増加分を波浪中抵抗増加と呼ぶ。

そこで、佐々木らの研究[16]によると波浪中抵抗増加の計算方法については国内外を問わず数多く発表され、最も普及し実用化されている方法等も確立されている。本手法では経済評価を行うため、船舶のライフサイクル期間という長期間での気象影響を大まかに予測し、波浪中抵抗増加の計算方法に代表される丸尾の理論[18]のような詳細な計算は行わない。

そこで、本研究における波浪中抵抗増加の考慮方法について、主に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、アメリカ海洋大気庁 (National Oceanic and Atmospheric Administration,

NOAA)[32]や Global Wave Statistics[33]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する。定義する風力階級の発現確率を例として次の図 3-8 に示す。

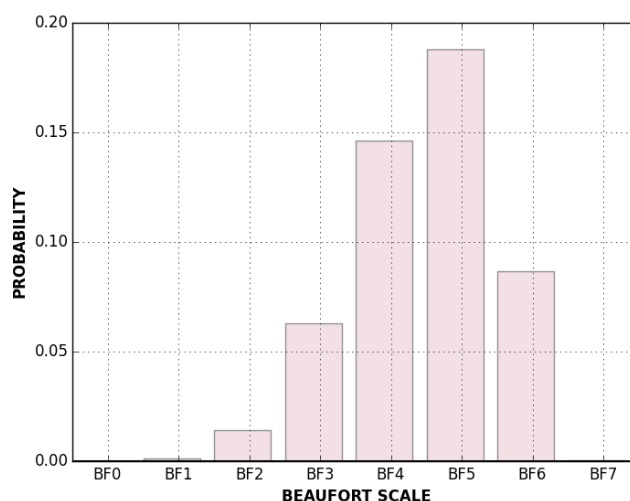


図 3-8 定義する風力階級発現確率の例

図 3-8 では、横軸が風力階級(BF0~BF7)を示しており、縦軸がその風量階級の発現確率を示している。ここで、示す例は、BF4~BF5 にピークを持つ荒い海象を想定した場合の発現確率となっている。本手法では、このような風量階級別の発現確率を定義し、海象変化がこの確率に従うようにシミュレーションを行うことで実際の海象を想定していることとした。

以上のように、航路モデルでは想定する複数の航路間における航路変更ルール及び航路毎の海象状態をモデル化するようにした。

### 3.4.2 市場モデル

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について着目する。そのため、市場変動に対応するために市場モデルの定義を行う。タンカーの運賃は 1 航海(スポット)で輸送された石油 1 トン辺りの報酬を基に決められるか、期間もしくは長期取引によって 1 ヶ月 1 トン辺りの報酬を決められるかの 2 種類がある[34]。そのうち、本研究では前者である 1 航海で輸送する石油の重量によって報酬を決定する。

本節では、VLCC の燃料費及び運賃を算出するために必要となる、原油価格 CP(Crude Oil Price)[USD/barrel]及び具体的な運賃を算出するために必要な航路毎にワールドスケー

ル協会(Worldscale Association)[35]が定める基準運賃 WF (World Scale Flat)[USD/ton]と船主・荷主間の輸送契約で合意する値である運賃率 WR (World Scale Rate)の予測方法について詳述する。なお、対象とする航路 A-B 間において、VLCC の運賃 $F_{AB}$ [USD]は載貨重量 DWT (Dead weight tonnage)及びこれら 3 つの指標から式(3.28)のように算出できる。

$$F_{AB} = DWT \times WF \times WR \quad (3.28)$$

市場価格の予測について、多くの手法が知られているが本研究では二項格子モデル (Binomial Lattice Model)[36]を用いる。二項格子モデルは、図 3-9 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。

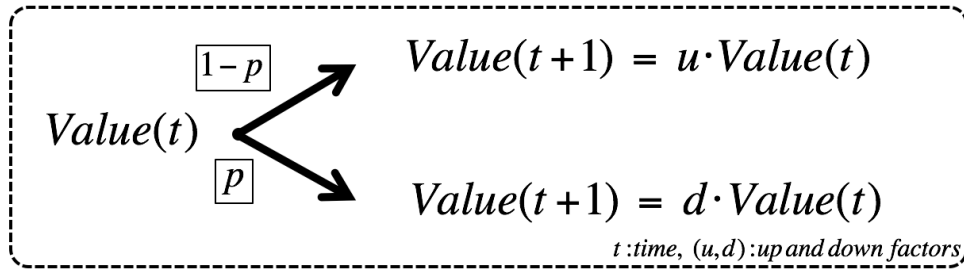


図 3-9 二項格子モデルの予測方法概略図

ここで用いた  $u$  及び  $d$  は上昇下降係数(up and down factor)と呼ばれ過去データより決定する。具体例として、 $\nu$ を年次期待成長率、 $\sigma$ 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(3.29)、(3.30)から $\nu$ と $\sigma^2$ を計算できる。

$$\nu = E[\ln(S_T/S_0)] \quad (3.29)$$

$$\sigma^2 = var[\ln(S_T/S_0)] \quad (3.30)$$

また、1 より十分小さい期間長  $\Delta t$  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(3.31)、(3.32)、(3.33)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。

$$p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{v}{\sigma} \right) \sqrt{\Delta t} \quad (3.31)$$

$$u = e^{\sigma \sqrt{\Delta t}} \quad (3.32)$$

$$d = e^{-\sigma \sqrt{\Delta t}} \quad (3.33)$$

本研究では、前述した二項格子モデルを用いて市場価格の予測を行ったが、過去データを解析することで原油価格と運賃率の間に負の相関が観測できたため、運賃率は二項格子モデルによる予測の他に原油価格の変動を考慮して、式(3.34)のように予測した。

$$WR(t+1) = WR(t+1)_{binomial} - \frac{\Delta CP}{CP(t)} \cdot WR(t+1)_{binomial} \quad (3.34)$$

各指標である、原油価格、運賃率を 10 シナリオずつ予測した例を図 3-10、図 3-11 に示す。

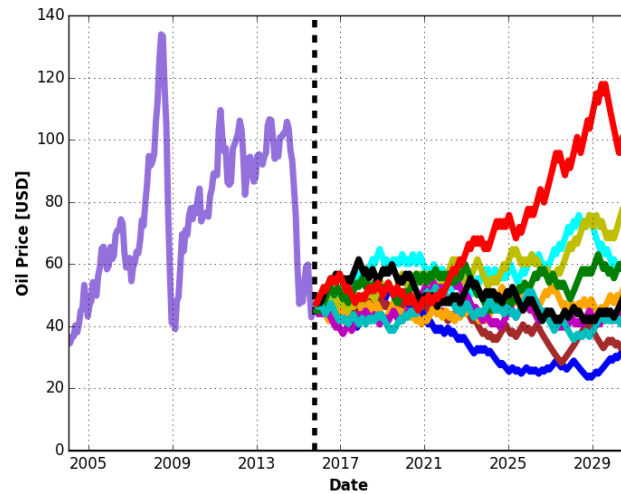


図 3-10 原油価格の予測例(10 シナリオ)

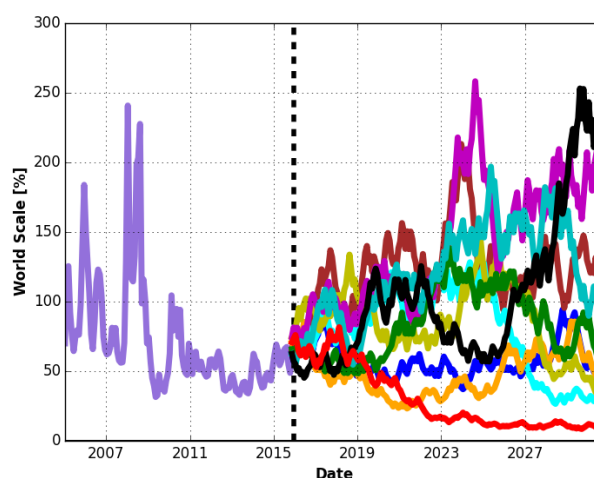


図 3-11 運賃率の予測例(10 シナリオ)

図より、各シナリオにおいて、原油価格の上昇に応じて運賃率が下降しているのが観測できる。運賃率は前年の原油価格を基準として決定されるため、運賃価格をある程度一定に保つためにこのような負の相関が出ていると考えられるが、式(3.34)によって生成した各シナリオでも同じような傾向が出ていることが観測できる。

同様に基準運賃について二項格子モデルを用いて 10 シナリオ予測した結果を図 3-12 に示す。運賃率と同様に原油価格との相関について調査したが、両指標間に相関が観測できなかったため、基準運賃の場合とは異なり、予測には二項格子モデルのみを用いる。

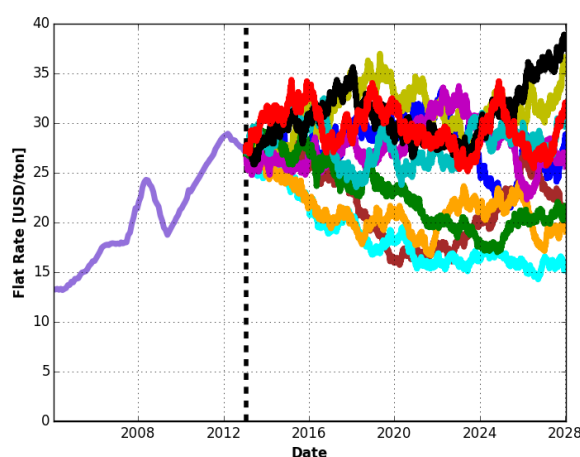


図 3-12 基準運賃の予測例(10 シナリオ)

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価値を算出することにする。

## 3.5 リアルオプション分析

本研究では、本章で定義した基本的な船舶設計案とリアルオプションを導入した船舶設計案を用いてリアルオプション分析を行い各船舶設計案の価値を比較する。本節では、比較する際に必要な NPV の導出方法と、リアルオプションを導入した船舶設計案で定義した改修オプションを用いる際の船舶改修を行うかどうかの意志決定について詳述する。

### 3.5.1 NPV の導出

本手法では、各船舶設計案の価値として、ライフサイクル期間における正味現在価値(Net Present Value, NPV)を用いることとする。そこで、本項では正味現在価値 NPV の導出方法についてここで説明する。

基本的に 1 航海毎に発生するキャッシュフロー  $CF_{navigation}$  [USD] 及び定義された船舶設計案に応じてオプションを保持するための初期投資費用及び船舶改修費用を考慮することで DCF(Discounted Cash Flow)法から、正味現在価値 NPV を算出する。次の式(3.35)、(3.36)、(3.37)にライフサイクル期間において航海を  $N$  回行ったときの NPV を示す。ここで、 $PV_n$  は第  $n$  航海を行ったときのキャッシュフローの現在価値、 $ICR$  は収入のうち間接費に占める割合を示す。詳細は次節で述べるが、 $C_{fuel}$ ,  $C_{fix}$ ,  $C_{port}$  は順に燃料費、固定費、港湾使用料として、主に船舶の運航に必要な経費を表し、 $r$  は月毎の割引率、 $t$  は就航を開始したときから現在まで経過した月数である。

$$CF_{navigation} = (1 - ICR)I_{navigation} - C_{fuel} - C_{fix} - C_{port} \quad (3.35)$$

$$PV_n = \frac{CF_{navigation, n}}{(1+r)^t} \quad (3.36)$$

$$NPV = \sum_{k=1}^N PV_k \quad (3.37)$$

### 3.5.2 船舶改修を行うかどうかの意志決定

本研究では、船舶設計案内で定義された改修オプションについて、船渠に入渠した段階で船舶改修を行うかどうかの意志決定を行う必要がある。本研究では、手法として意志決定ルールについて具体的なものは定めないこととするが、ケーススタディなどを行う際にはこのような意志決定ルールが必要となることに留意したい。実際に必要な意志決定ルールとして、例えば入渠時点から一定期間における市場価格推移を基にルール構築することや、航路変更状態を基にすることなどが考えられる。

意志決定ルールによって、船渠に入渠した段階で船舶改修が行われると決定された場合、提案手法としては以下のフローで表される処理は必須で行うこととする。

1. 船舶改修作業
2. 船舶改修費用支払い
3. 経年劣化率リセット

予め定義した意志決定ルールによって船舶改修が行われることが決定した場合、以上で示したような船舶改修作業の後、船舶設計案を定義した際にオプション毎に定義を行った船舶改修費用を支払う義務が発生する。

## 3.6 構築した運航シミュレータ

本研究では、設計段階で船舶の就航中の改修を考慮した場合の価値を評価するため、就航中の船舶改修を考慮した運航シミュレータを用いる。本節では、構築した運航シミュレータについて詳述する。

### 3.6.1 運航シミュレータの概要

次の図 3-13 に運航シミュレータの概要を示す。



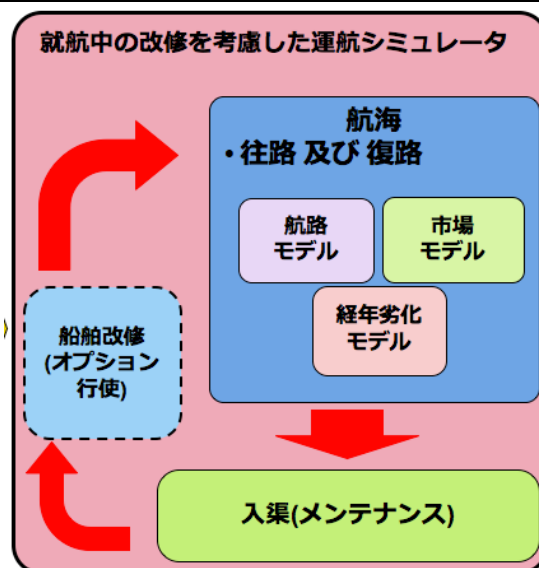


図 3-13 運航シミュレータの概要図

本研究で用いる運航シミュレータは、船会社が実際に船舶を運用するフローを想定して構築した。具体的には、船舶の運用が開始される段階から船舶が規定のライフサイクル期間運用されるまで、入力される航路、航路モデル、市場モデル、経年劣化モデルを考慮しながら運航を行う。航海毎に直近の船渠入渠日からの経過時間を確認し、予め設定する一定期間が経過している場合、船渠への入渠を行い、船舶のメンテナンスを行う。船渠ではさらに船舶の改修を行うかどうかの意志決定が行われ、改修を行う場合、現在の船舶構成から船舶設計案の持つオプションのいずれかの船舶構成に改修が行われる。

### 3.6.2 運航シミュレータの詳細

本項では、構築した運航シミュレータについてフロー図と共に詳述する。構築した運航シミュレータについての詳細フローを図 3-14 に示す。

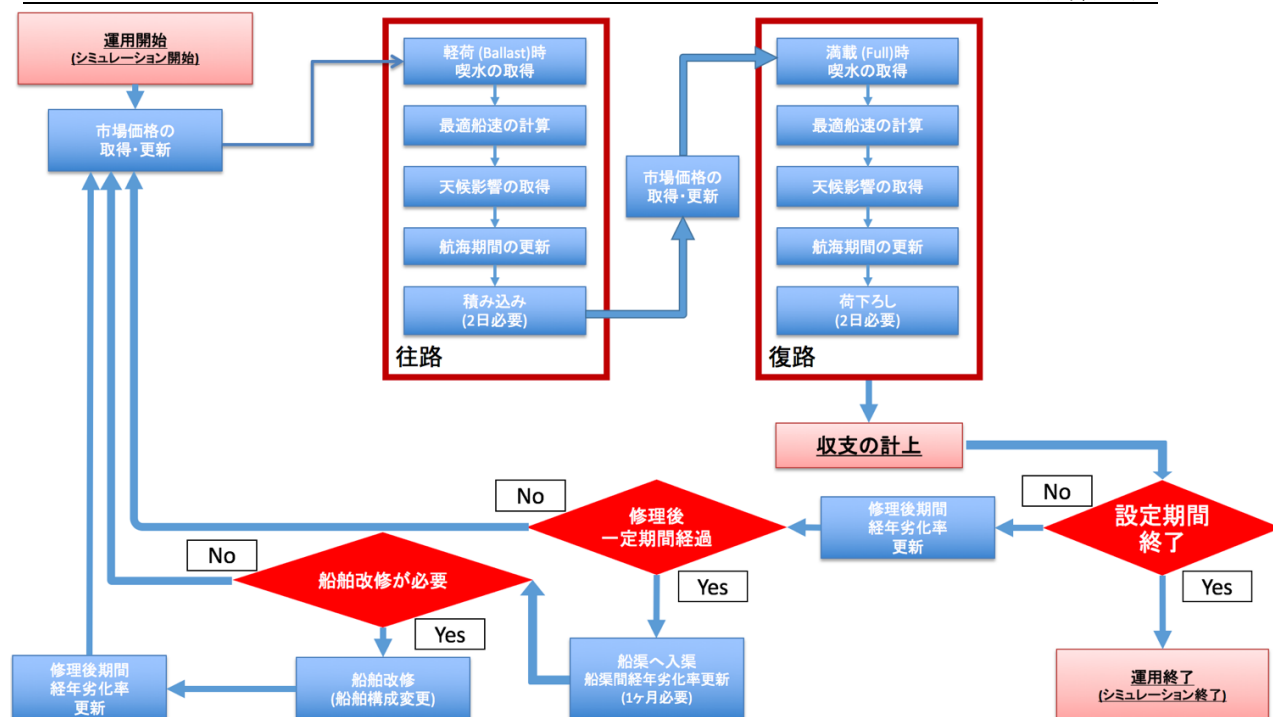


図 3-14 運航シミュレータのシミュレーションフロー

船舶の運用を開始し、まず市場価格の取得を行う。対象とする市場価格は次に示す。

1. 原油価格(Oil Price)
2. 基準運賃(World Scale Flat)
3. 運賃率(World Scale Rate)

これらを対象とし、入力として与えられた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取得する。その後、往路・復路に分けて航海を開始する。

往路・復路については、基本的にシミュレーションで行うフローに差異はないが、対象船舶の積載状態が満載(Full)状態と軽荷(Ballast)状態の2つの状態間で遷移するため、積載状態による船舶性能や海象による影響を加味するため往路と復路は別々にシミュレーションを行う必要がある。各積載状態によって異なる喫水を想定すること以外の処理については次に示す。これらは積載状態に限らず同じフローとなっている。

1. 最適船速の計算
2. 天候影響の取得
3. 航海期間の更新

#### 4. 貨物の積み込み or 荷下ろし

往路の航海が終了し、貨物の積み込みが終了した段階で、船舶への給油を想定し、市場価格の更新を行う。その後、復路の航海を終了した段階で 1 航海分の収入を得てキャッシュフローを計算、収支の計上を行う。

収支の計上が終わった段階で、次の航海に備える必要があるが、対象船舶の運用を開始したときから現在まで(もしくは、前回船渠に入渠したときから現在まで)の期間を計算し、一定期間が経過していれば船渠に入渠する。また、経年劣化率の更新もこのタイミングで行う。

船渠では、船舶のメンテナンスが 1 ヶ月掛けて行われ、船渠間経年劣化率がリセットされる。また、同時に予め決められたルールに基づいて船舶の改修が必要かどうかの意志決定が行われ、改修が必要な場合は、船舶設計案内で定義された船舶改修費が支払われ改修が行われる。

船渠での作業が終了した段階で、次の航海に向けて市場価格の更新が行われ、この過程で船渠に入渠しなかったフローと同じフローに戻る。

以上の過程を予め設定する船舶のライフサイクル期間行うことで船舶設計案の価値を算出する。

##### 3.6.2.1 最適船速の導出

最適船速の導出については、以下の式(3.38)で示される 1 航海におけるキャッシュフロー  $CF[\text{USD}]$  を最大にするような最適船速を計算する。

$$CF = CF_{day} \times ND \quad (3.38)$$

ここで、 $CF_{day}[\text{USD}]$  は 1 日あたりのキャッシュフロー、 $ND[\text{days}]$  は 1 往復航海に掛かる日数を表し、それぞれ次の式(3.39)、(3.40)のように算出される。

$$CF_{day} = (1 - ICR)I_{day} - C_{fuel,day} - C_{fix,day} - C_{port,day} \quad (3.39)$$

$$ND = \frac{s}{V_{ballast}} + \frac{s}{V_{full}} \quad (3.40)$$

式(3.39)において $CF_{day}$ を計算する際に用いた、港や船渠の使用料などを始めとする各設定値を表 3-1 に示し、式(3.40)における  $s$  は港間距離[mile]、 $V_{ballast}$ [m/s]及び $V_{full}$ [m/s]は船舶の各積載状態における船速とした。また、各設定値より1日分の港湾使用料 $C_{port,day}$ [USD]、1日分の固定費 $C_{fix,day}$ [USD]、は以下の式(3.41)、式(3.42)のように計算できる。

$$C_{port,day} = \frac{2 \cdot 2 \cdot C_{port}}{ND} \quad (3.41)$$

$$C_{fix,day} = \frac{C_{fix}}{ND} \quad (3.42)$$

表 3-1 シミュレーションに用いた設定値

パラメータ名	説明	単位
$ICR$	運賃収入のうち、間接費に掛かる割合	-
$C_{fix}$	船渠でのメンテナンス費用 メンテナンス費用 作業員の人件費及び保険料などの固定費 (航海日数によらず一定)	[USD]
$C_{port}$	1回あたりの港湾使用費	[USD]

### 3.6.2.2 経年劣化モデル

本研究では、実海域における推進性能を考える上で無視することの出来ない要因として、船舶の経年変化についても考える。そこで、本手法で考える経年劣化による船舶の推進性能の影響は杉村による研究[23]を参考に、船渠に入渠することで回復する「Dock to Dock(船渠間経年劣化)」、船渠に入渠しても回復せず経過年数が増えるに当たり蓄積される「Age Effect(累積経年劣化)」の二つに分類した。運航シミュレーションにおいて、船渠に入渠した場合、Dock to Dockでの経年劣化率はリセットされ、Age Effectでの経年劣化率は更新しないことで、以上二つの経年劣化について表現する。

また、経年劣化の影響を受ける船舶推進性能指標としては船速・エンジン回転数・馬力の

3 つに限定し、例えば、入渠間隔が  $N$  年毎、航海に  $X$  日掛かった場合には、次の式

(3.43)~(3.45)に示した割合のように低下していくこととした。

$(\Delta V_s, \Delta V_e), (\Delta N_s, \Delta N_e), (\Delta HP_s, \Delta HP_e)$  はそれぞれ船速、エンジン回転数・馬力の低下率とし、劣化率が範囲で定義出来るよう考慮した。最終的に範囲内の値を小数点第 1 位の範囲でランダムに抽出し実際に劣化する割合を算出することとした。

$$\frac{\Delta V_s}{N \cdot 365} X \sim \frac{\Delta V_e}{N \cdot 365} X \text{ [knot]} \quad (3.43)$$

$$\frac{\Delta N_s}{N \cdot 365} X \sim \frac{\Delta N_e}{N \cdot 365} X \text{ [rpm]} \quad (3.44)$$

$$\frac{\Delta HP_s}{N \cdot 365} X \sim \frac{\Delta HP_e}{N \cdot 365} X \text{ [%]} \quad (3.45)$$

## 第4章 運航シミュレータの検証

---

4.1 はじめに.....	50
4.2 シミュレーションの設定 .....	50
4.2.1 船舶設計案 .....	52
4.2.2 航路モデル .....	58
4.2.3 市場モデル .....	62
4.2.4 経年劣化モデル .....	64
4.3 概算結果との比較によるシミュレーション結果の検証.....	65
4.4 航路の違いによる船舶構成案の経済性影響分析 .....	66
4.5 市場状況の変動による経済性影響分析 .....	67
4.6 まとめ .....	68

---

## 4.1 はじめに

本章では提案手法を実現するために構築した就航中の船舶改修を考慮した運航シミュレータについての検証を行う。具体的には、ある海象、市場状態において船舶設計案を1航海のキャッシュフローについて評価した際の値を概算した理論値と比較することで、シミュレータの妥当性の検証を行う。

また、シミュレータ上で用いた航路モデル、市場モデル、経年劣化モデルをそれぞれ考慮することによるシミュレータの出力結果の変動についての妥当性の検証も合わせて行う。

## 4.2 シミュレーションの設定

本節では、本章で行うシミュレーションにおける設定について詳述する。

また航海シミュレーションを行う際の基本的な設定であるが実際に運航する VLCC を想定してシミュレーションを行う。想定航路は図 4-1 に示す日本の千葉港とサウジアラビアの Ras Tanura port を結び航路とした。

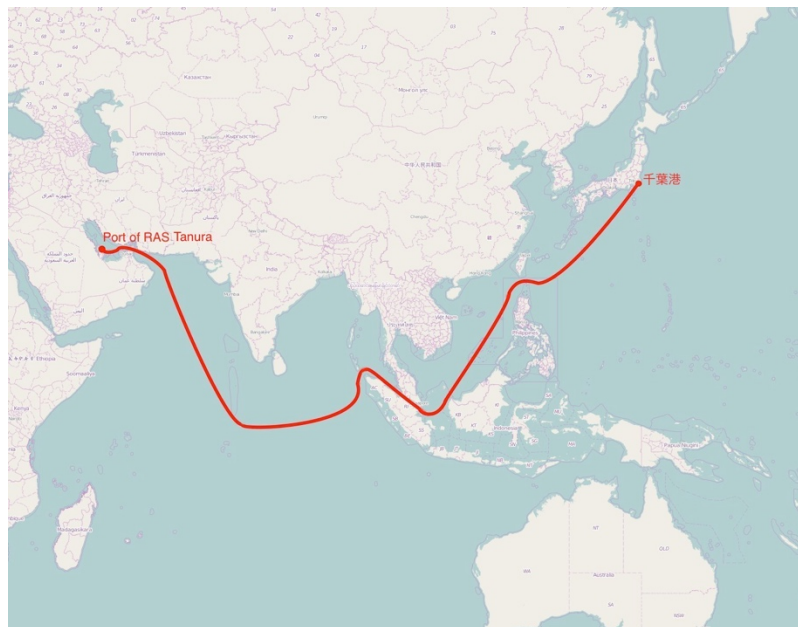


図 4-1 シミュレーションで想定する航路(航路 A)

また、航路変更による変動を考慮するためにさらにもう一つ想定航路を用意した。以上で定義した図 4-1 に示す日本の千葉港とサウジアラビアの Ras Tanura port を結ぶ航路の他

に Ras Tanura port とアルゼンチン共和国の Buenos Aires port を結ぶ図 4-2 に示す航路を新たな航路(航路 B)として定義する。

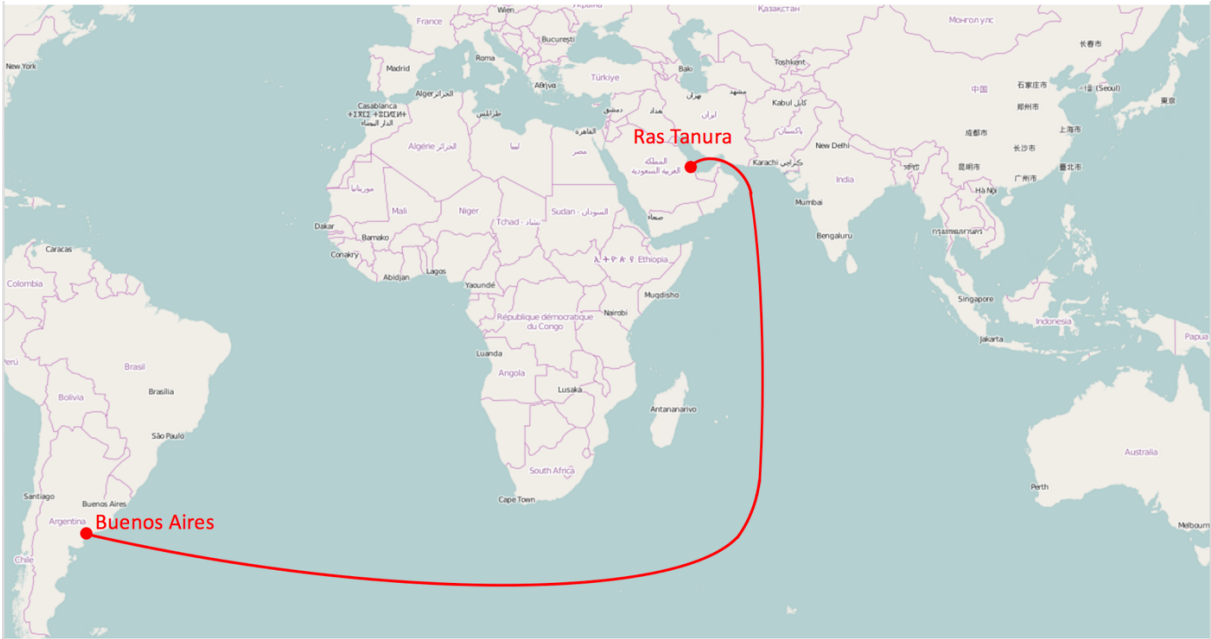


図 4-2 シミュレーションで想定する航路(航路 B)

シミュレーションを行う際に定義した港間距離や船渠への入渠間隔、ライフサイクル期間などのパラメータは表 4-1 に示すものとした。ここで、簡単のため航路 A と航路 B における航路間での違いは海象状況のみとして市場価格については航路によらず同じものを使うことにした。

表 4-1 運航シミュレーションにおける基本パラメータ

パラメータ名	値	単位
港間距離(航路 A)	6,590	mile
港間距離(航路 B)	10,000	mile
ライフサイクル期間	15	year
入渠間隔	2	year
割引率	0.01	-



また、間接費、メンテナンス費用などの固定費に関するパラメータについてシミュレーション内で使用した値を表 4-2 に示す。

表 4-2 固定費に関するパラメータ

パラメータ名	値	備考
Dry Dock Maintenance Fee [USD/year]	800,000	年間船渠使用料
Maintenance Fee [USD/year]	240,000	年間メンテナンス費
Crew Labor Cost [USD/year]	2,400,000	年間人件費
Insurance Cost [USD/year]	240,000	保険料
ICR	0.05	運賃収入のうち、 間接費に掛かる割合

## 4.2.1 船舶設計案

### 4.2.1.1 船型

本シミュレーションではバルバスバウの有無によって異なる海象を想定した 2 種類の船型を考える。2 つの船型間において、バルバスバウの有無による影響以外は表 4-3、表 4-4 に示すパラメータで示される全く同型の船型を想定した。また、ケーススタディでは既存研究より以下の表 4-5 に示すようにバルバスバウを取り付けることによる影響を定義した。

表 4-3 使用する船型のパラメータ

パラメータ名	値	備考
Deadweight [ton]	300,610	載貨重量トン数
Length overall (Loa) [m]	333	全長
Length between perpendiculars [m]	324	垂線間長さ
Breadth molded (Bmld) [m]	60	型幅
Depth molded (Dmld) [m]	29	型深さ
Draft (Full) [m]	20.529	満載時の喫水
Draft (ballast) [m]	9.740	軽荷時の喫水
Gross tonnage [ton]	159,960	総トン数
Displacement [ton]	341,610	満載時の排水量
Light weight [ton]	41,000	軽荷時の排水量
Block coefficient (Cb)	0.83510802	方形肥瘦係数

表 4-4 使用する船型の EHP 係数

	EHP 係数				
	EHP <sub>0</sub>	EHP <sub>1</sub>	EHP <sub>2</sub>	EHP <sub>3</sub>	EHP <sub>4</sub>
満載時	5398	-4652	1452	-172.3	9.626
軽荷時	5387	-4640	1445	-178.0	9.647

表 4-5 バルバスバウを取り付けることによる影響

船舶性能指標	変動率[%]	
	Ballast	Full
船速	$-\sqrt[3]{16}$	$-\sqrt[3]{3}$
有効馬力	-16	-3
波浪中抵抗増加	-40	-50

次の図 4-3 及び図 4-4 に平水中及び、荒い海象(風力階級 7)でのバルバスバウの有無による全抵抗係数の変化を示す。なお、横軸は  $L$  を船の長さとしたときに式(4.46)で示されるフルード数とする。図より、平水中ではバルバスバウを有する船型の全抵抗係数はバルバスバウを持たない船型よりも高く、荒い海象(風力階級 7)では、低くなっていることが確認でき

る。これは、バルバスバウが荒い海象の際に波浪中抵抗増加を小さくしている様子を表している。

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4.46)$$

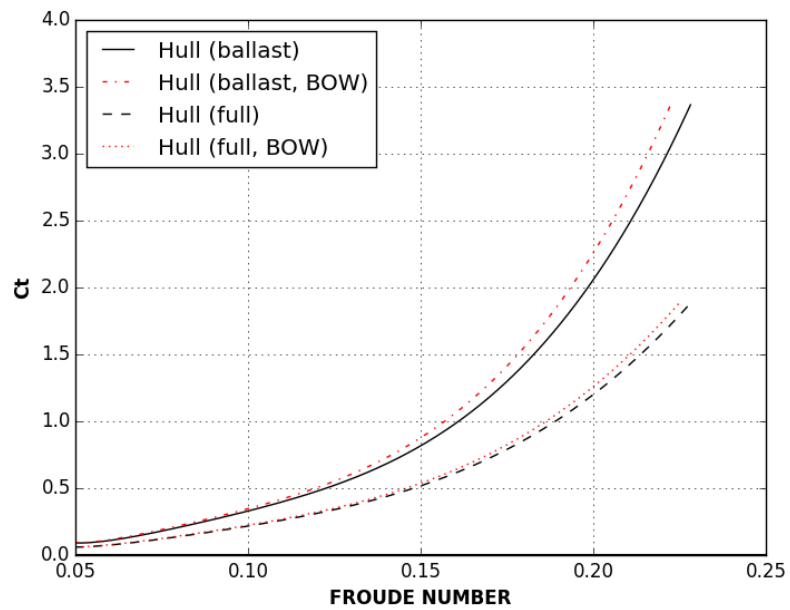


図 4-3 平水中におけるバルバスバウの有無による全抵抗係数の変化

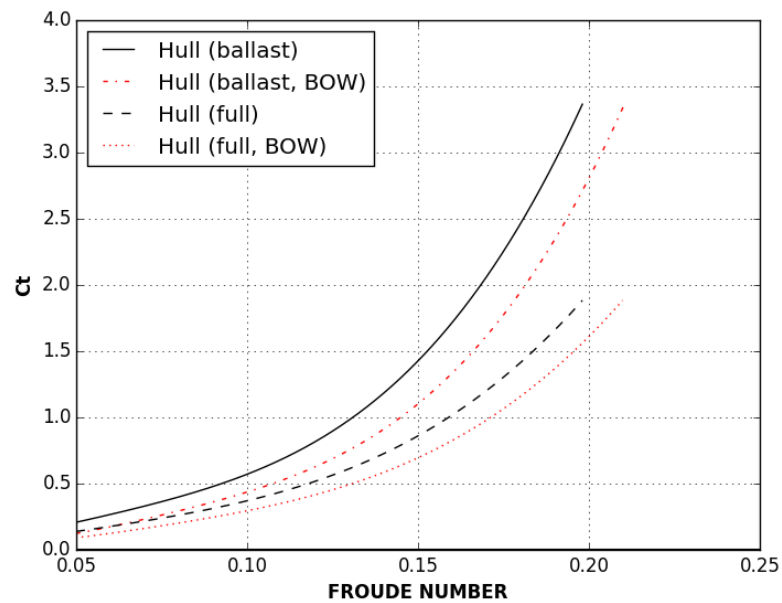


図 4-4 荒い海象(風力階級 7)でのバルバスバウの有無による全抵抗係数の変化

また、図 4-5、図 4-6 に貨物の積載状態毎に風力階級を BF2~BF6 まで変化させたときの全抵抗係数 $C_t$ を示す。図より、BF5 でバルバスバウを有する船型とバルバスバウを持たない船型での全抵抗係数の大きさが逆転していることが観測できる。これは BF5 を境界としてバルバスバウを取り付けたときに船舶に掛かる抵抗を小さくすることができるかどうかが決定的される。BF5 よりも穏やかな海象が想定航路であればバルバスバウを取り付けることで対象の船舶設計案の価値を下げる事が出来る。逆に、BF5 よりも荒い海象が想定航路であればバルバスバウを取り付けることで対象の船舶設計案の価値を上昇させる事が出来るというを示している。

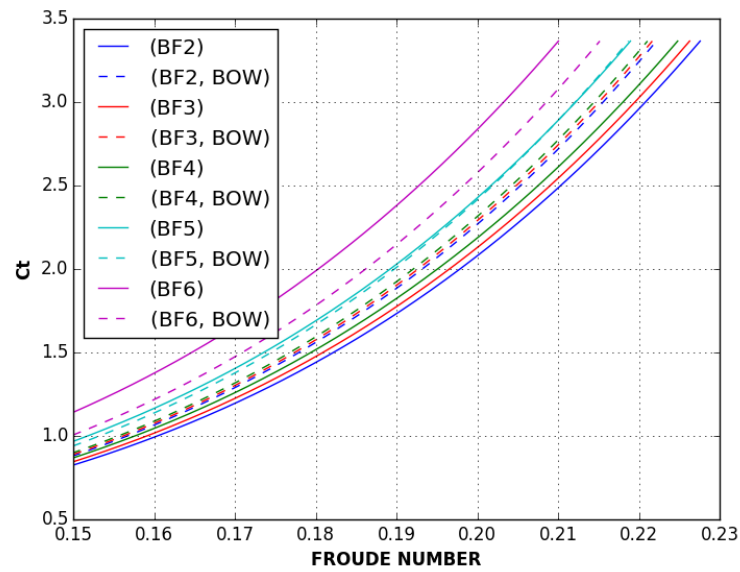


図 4-5 軽荷(Ballast)状態における BF2~BF6 でのバルバスバウによる全抵抗係数の変化

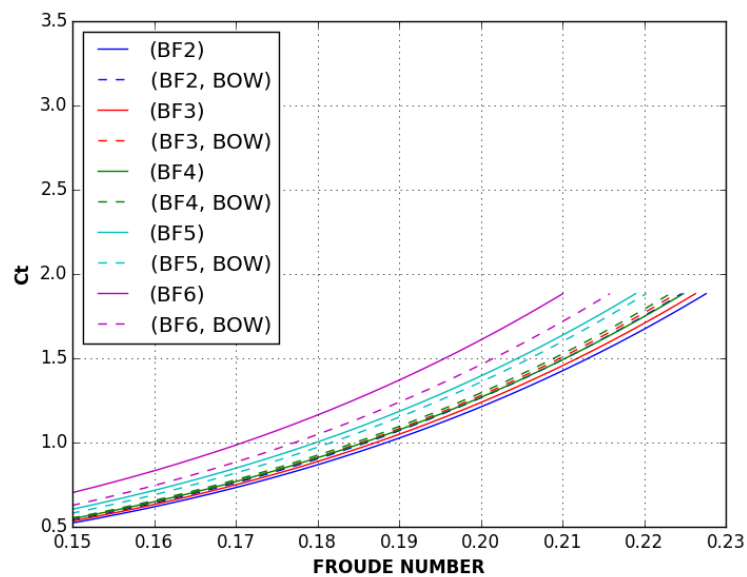


図 4-6 満載(Full)状態における BF2~BF6 でのバルバスバウによる全抵抗係数の変化

#### 4.2.1.2 エンジン

本シミュレーションでは、エンジン特性を Web 上で公開されている三菱重工業株式会社の UE 型ディーゼルエンジンの仕様書[30]より表 4-6 に示すパラメータを持つエンジン1種

類について定義を行い、そのエンジンを基準として燃料消費率を変化させることで、3種類のエンジンを定義した。図 4-7 に定義した3種類のエンジンの回転数に対する燃料消費率を示す。

表 4-6 使用するエンジンのパラメータ

パラメータ名	値	備考
$sfoc_0$	190.6	燃料消費率算出係数 0
$sfoc_1$	-73.933	燃料消費率算出係数 1
$sfoc_2$	49.333	燃料消費率算出係数 2
$BHP_0$	53.333	制動馬力算出係数 0
$BHP_1$	35466.67	制動馬力算出係数 1
$BHP_2$	0	制動馬力算出係数 2
$RPM_{max}$	80	主機最大回転数
$Load_{max}$	35520	主機最大出力

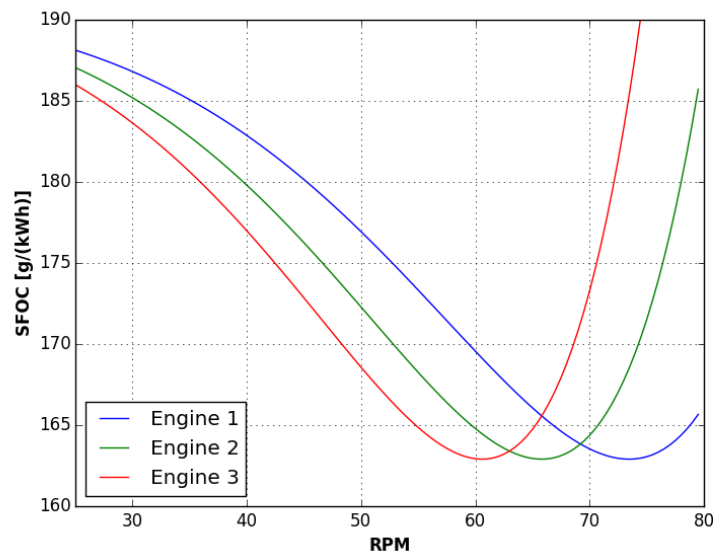


図 4-7 3種類のエンジンの回転数に対する燃料消費率の差異

また、定義したエンジンにおける最適回転数とそのときの燃料消費率、最適回転数の範囲を調べると以下の表 4-7 に示すようになった。

表 4-7 定義したエンジンの最適回転数と燃料消費率

エンジン名	最適回転数 [rpm]	最適 SFOC [g/(kWh)]	最適回転数範囲 [rpm]
エンジン 1	73.3	162.9	69.4 ~ 80.0
エンジン 2	65.8	162.9	62.7 ~ 69.4
エンジン 3	60.3	162.9	25.0 ~ 62.7

#### 4.2.1.3 プロペラ

船型とエンジンの定義と同様にプロペラの定義を行う。本シミュレーションでは、以下の表に示す 3 つのパラメータを一定の範囲内で変化させて Barnitsas の論文による手法[31]を用いることで合計 847 個のプロペラを生成し、トルク係数、推進係数の値の差が大きくなるように 6 種類のみ抽出した。

表 4-8 プロペラ生成に用いたパラメータ

パラメータ名	範囲	刻み幅	組み合わせ数
ピッチ直径比(P/D)	0.880 ~ 0.1020	0.014	11
展開面積比(EAR)	0.540 ~ 0.620	0.008	11
プロペラ直径(D)	8.8 ~ 10.0	0.2	7

#### 4.2.2 航路モデル

航路モデルとして、各航路の海象状態を定義する。そのため、まず NCEP(National Centers for Environmental Prediction)[37]の観測した月次平均風速の過去データを用いて各想定航路における海象状態の解析を行った。航路 A、航路 B における観測点は想定航路上における図 4-8、図 4-9 に示す赤い点の部分とし、観測データは 1995 年 1 月~2015 年 10 月までの約 20 年間とした。また、対象とした期間における月次平均風速のヒストグラムを図 4-10 に示す。図 4-10 では、日本-アラビア間を結ぶ航路 A での月次平均風速を青いヒストグラム、アラビア-アルゼンチン間を結ぶ航路 B での月次平均風速を赤いヒストグラムで示した。

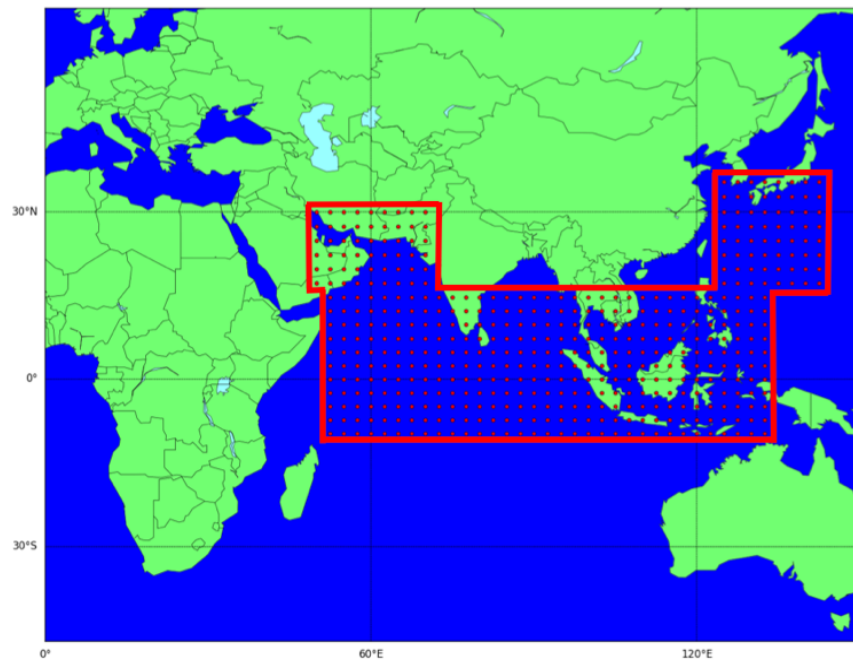


図 4-8 航路 A 上において解析対象にした気象観測範囲

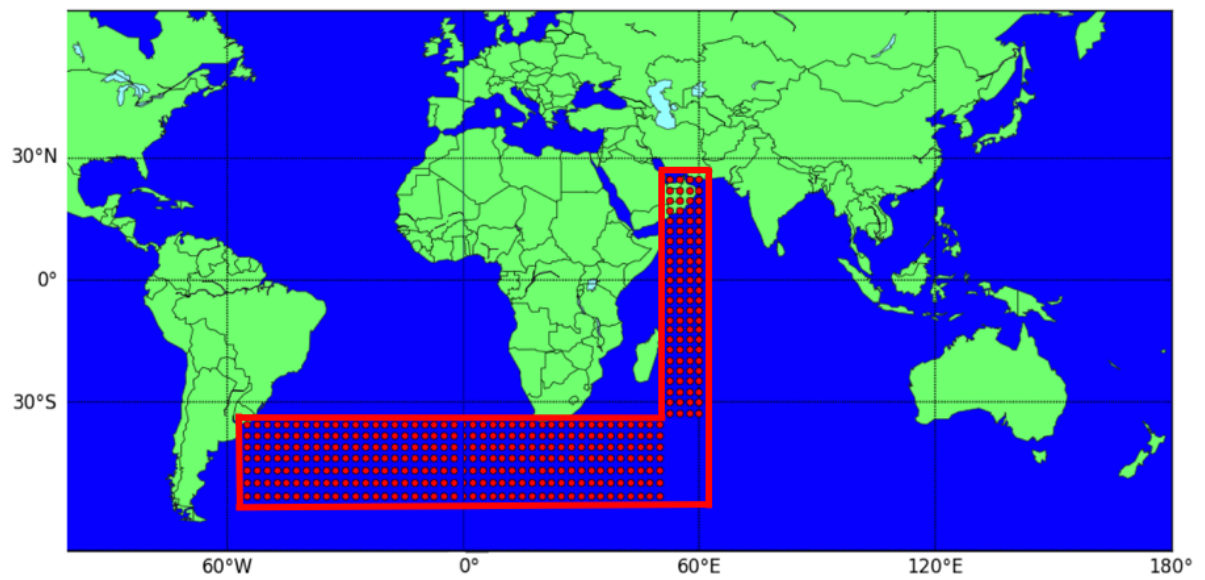


図 4-9 航路 B 上において解析対象にした気象観測範囲



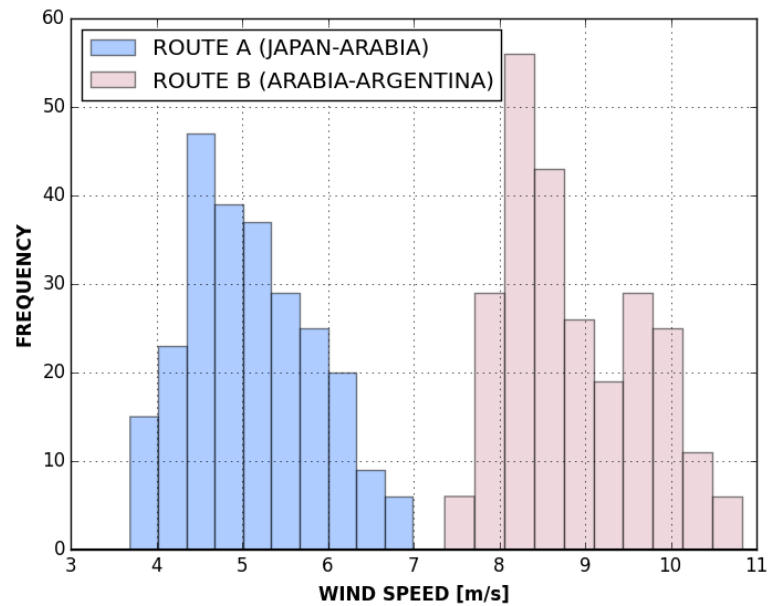


図 4-10 観測範囲における航路別月次平均風速のヒストグラム

図 4-10 に示した解析結果より、航路 A と航路 B を比較して、航路 B の月次平均風速の値が明らかに大きく、航路 B の方が荒い海象であることが確認できる。図のヒストグラムによって想定航路における海象が表されたと仮定し、佐々木らの研究[16]による各風力階級と平均風速の関係より次の図 4-11、図 4-12 のように想定航路での海象を定義した。シミュレーションで用いる各航路における風力階級発現確率は、航路 A が風力階級 3~4、航路 B では風力階級 4~6 にかけてピークを持つような確率分布として定義した。

表 4-9 風力階級別の平均風速・有義波高・平均波周期[16]

風力階級	平均風速 $U_{wind}[m/s]$	有義波高 $H[m]$	平均波周期 $T[s]$	方向
BF3	4.4	0.6	3.0	向い及び 全方位平均
BF4	6.9	1.0	3.9	
BF5	9.8	2.0	5.5	
BF6	12.6	3.0	6.7	
BF7	15.7	4.0	7.7	

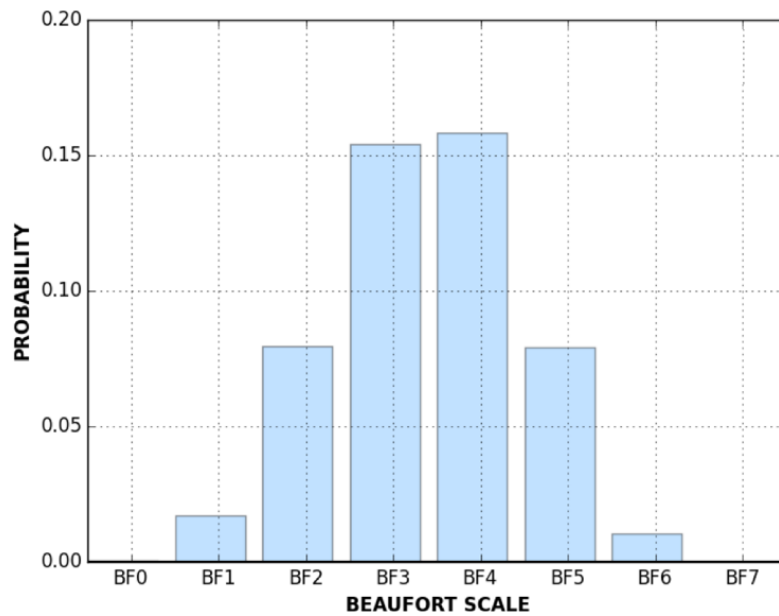


図 4-11 定義した想定航路 A における風力階級発現確率

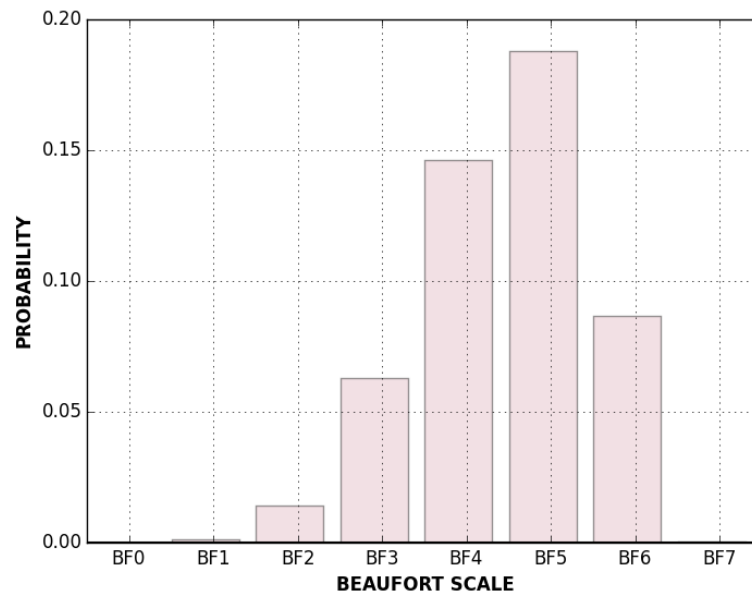


図 4-12 定義した想定航路 B における風力階級発現確率

以上で定義した発現確率に準じて発生する各風力階級であるが、発生した風量階級における影響は VLCC 模型船を用いた日本船舶技術研究協会による波浪中抵抗増加試験の実験報告書[19]を参考に定義した。定義した有義波高と船速低下の関係を図 4-13 に示す。

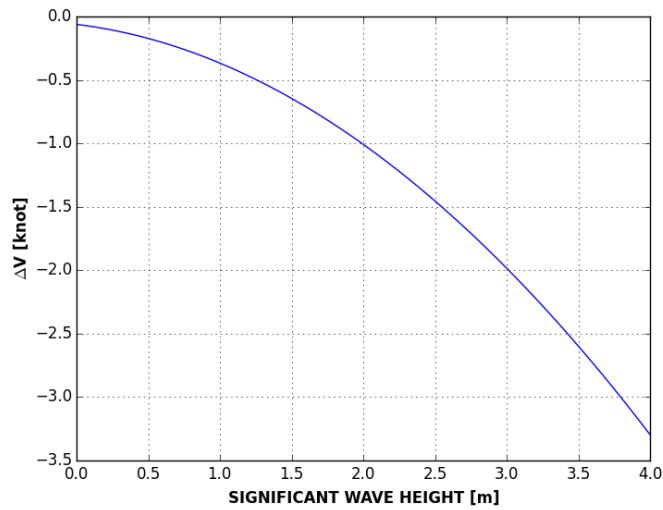


図 4-13 有義波高と船速低下の関係

### 4.2.3 市場モデル

本シミュレーションでは、シミュレータの検証及び市場シナリオの差異による影響を評価したいため、市場現在価格(stagnant price)を用いることとする。

具体的には、原油過去データから表 4-10 に示す最新の値を用いて、シミュレーションを実行する。基準運賃と運賃率についても同様に最新価格を使用した。

表 4-10 市場価格使用データ

	原油価格 [USD/barrel]	基準運賃 [USD/ton]	運賃率 [%]
最新価格	46.22	27.05	68.279

また、ライフサイクル期間における船舶価値を評価する際の市場価格については、定義した市場モデルを用いて生成した複数のシナリオから抽出した、図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示すシナリオを用いることとする。

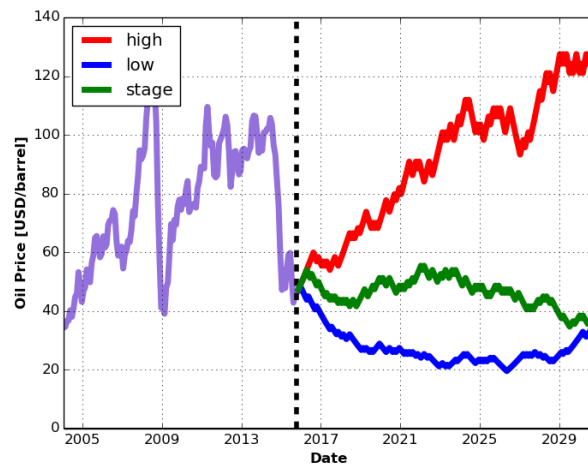


図 4-14 シミュレーションで用いた原油価格シナリオ

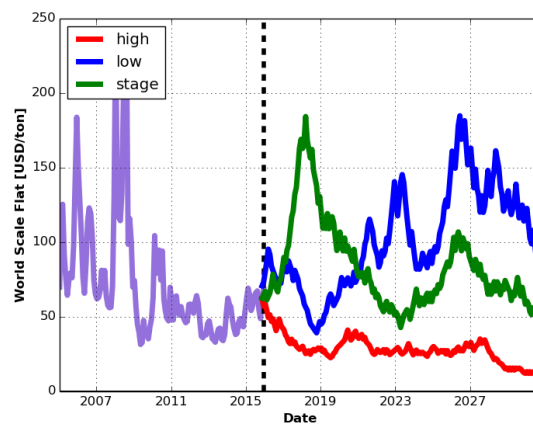


図 4-15 シミュレーションで用いた基準運賃シナリオ

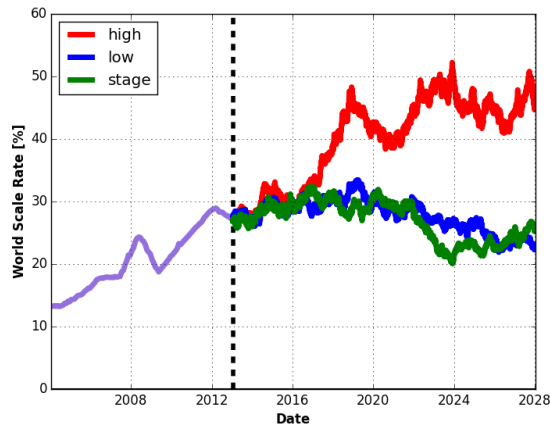


図 4-16 シミュレーションで用いた運賃率シナリオ

ここに示すシナリオは原油価格の傾向より抽出され、停滞時(stagnant)、市場価格高騰時(high)、低迷時(low)の各市場変動を表していると考えられる。

#### 4.2.4 経年劣化モデル

本項では、シミュレーションにおける経年劣化モデルについて詳述する。杉村の研究[23]と同様に、経年劣化の特徴を「Dock-to-dock」と「Age Effect」の2種類に分けて考えて経年劣化率の定義を行った。船速、回転数、馬力について定義した経年劣化率を表 4-11 に示す。

表 4-11 経年劣化率[23]

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 years

ここで定義した経年劣化率であるが、例えば、入渠間隔が N 年毎、航海に X 日掛かった場合には、次の式(4.47)~(4.49)に示した割合で低下していく。

$$\frac{1.0}{N \cdot 365} \cdot X \text{ [knot]} \quad (4.47)$$

$$\frac{2.0}{N \cdot 365} X \sim \frac{4.0}{N \cdot 365} X \text{ [rpm]} \quad (4.48)$$

$$\frac{20}{N \cdot 365} X \sim \frac{60}{N \cdot 365} X \text{ [%]} \quad (4.49)$$

提案手法でも述べたように、劣化率が範囲で定義されているものは範囲内の値を小数点第1位の範囲でランダムに抽出するように設定を行った。また、Dock-to-Dockの経年劣化率は船渠に入渠した段階でリセットされ、Age Effectによる経年劣化は船渠に入渠してもリセットされず、船舶のライフサイクル期間を通して蓄積されていく。

### 4.3 概算結果との比較によるシミュレーション結果の検証

本節では、本研究で提案手法を実現するために構築したシミュレータが、本章で設定したパラメータを用いてシミュレーションを行った際の結果が妥当かどうかについて概算結果と比較することによって検証を行う。具体的には、1つの船舶構成について構築シミュレータを用いてライフサイクル期間における船舶構成案の価値を算出し、その値と定義したパラメータと市場価格を用いて概算した現在価値の値を比較することにより検証を行う。

表 4-12 に検証する船舶構成案についてシミュレーションを行った結果として航路 A 上での平水中と実海象下におけるバウバスバウを持たない船型(H1)とエンジン 1(E1)、プロペラ 0(P0)についてのシミュレーション結果を示す。また、概算結果との比較をしやすくするため、市場価格については表 4-10 に示した最新価格を用い、NPV を算出する際の割引率については考慮しないこととした。

表 4-12 船舶設計案 H1E1P0 についてのシミュレーション結果

パラメータ名	海象	
	平水中	実海域
NPV [USD]	$6.42 \times 10^8$	$6.32 \times 10^8$
燃料費 [USD]	$7.85 \times 10^7$	$7.79 \times 10^7$
往復回数[times]	158	155

次に、本章で定義したパラメータよりライフサイクル期間での船舶設計案の価値を概算する。本手法で定義したパラメータを用いると船舶構成案の価値  $V$  は次の式(4.50)、(4.51)、(4.52)で算出できる。ここで、 $C_{all}$ [USD]は固定費の累計、 $T_{navigation}$ [times]はライフサイクル期間での往復回数、 $d_{life}$ [year]はライフサイクル期間の年数(15 年)を示す。

$$V = I \cdot (1.0 - ICR) - C_{all} \quad (4.50)$$

$$I = DWT \cdot WF \cdot WR \cdot T_{navigation} \quad (4.51)$$

$$C_{all} = (C_{fix} + C_{port}) \cdot d_{life} \quad (4.52)$$

これらの式を用いて平水中において、ライフサイクル期間中にシミュレーション時と同じ往復回数運航をした際の船舶構成案の価値  $V$  を概算すると次の式のようにになる。

$$I = 300,610 \cdot 27.05 \cdot 0.68 \cdot 158 \approx 8.74 \times 10^8 \quad (4.53)$$

$$C_{all} = 3,680,000 \cdot 15 = 5.52 \times 10^7 \quad (4.54)$$

$$V = I \cdot (1.0 - 0.05) - C_{all} \approx 7.75 \times 10^8 \quad (4.55)$$

よって、表 4-12 における平水中での NPV と燃料費の累計値  $7.10 \times 10^8$ [USD]と概算結果のオーダーについて比較した結果、構築したシミュレータの妥当性が示されたと考えられる。また、概算値とシミュレータによる値の差異には、概算による丸め誤差の他に、シミュレータ上では、人件費を日割りで計算していることが挙げられる。また、同様に実海域においても概算値を計算した結果、 $7.59 \times 10^8$ [USD]となり、シミュレータによる値  $7.10 \times 10^8$ [USD]と比較しても同様にオーダーが一致することが確認できた。

## 4.4 航路の違いによる船舶構成案の経済性影響分析

本節では航路の違いによる影響が、船舶構成案の価値にどの程度影響するかについて詳述する。具体的には図 4-1、図 4-2 に示す想定航路において、対象船舶がライフサイクル期間運航した際に、船舶構成案によってどのような影響があるかを検証する。

なお、市場価格については図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示す市場停滞時のシナリオを用いてシミュレーションを行い、割引率を 0.01 として NPV の計算を行った。

航路 A において最適な船舶構成案 *Design A\** 及び航路 B において最適な船舶構成案

*Design B\**の価値を表 4-13 に示す。

表 4-13 航路毎に最適化された船舶構成案の経済価値

最適構成案 (部品 ID)	NPV (燃料費) [USD]	
	航路 A	航路 B
<i>Design A*</i> (H1E3P5)	$4.399 \times 10^8$ ( $7.567 \times 10^7$ )	$2.738 \times 10^8$ ( $6.664 \times 10^7$ )
<i>Design B*</i> (H2E3P2)	$4.380 \times 10^8$ ( $7.811 \times 10^7$ )	$2.800 \times 10^8$ ( $6.986 \times 10^7$ )

以上に示した結果の NPV、燃料費に注目すると、*Design A\**について $1.668 \times 10^8$  [USD]の差が各航路によって値が変動していることがわかる。これは、市場価格が等しい上で距離の長い航路 B に変更されたことから 1 航海あたりの利益が減ってしまったことが要因と考えられる。また、航路 A 及び航路 B における最適船舶構成案を比較すると、海象が荒い航路 B に最適化された船舶構成はバルバスバウを持つことが確認できる。このように、船舶構成毎の NPV を比較することで、実際に各航路に最適化された船舶構成が航路毎にどのような特徴を持つかが定量的に分析できる。

## 4.5 市場状況の変動による経済性影響分析

本節では、市場価格が高騰しているときと低迷しているときの 2 つの状態において、船舶構成の違いによって経済性にどのような影響があるかについて説明する。今回は、前節とは異なり、航路 A において対象船舶がライフサイクル期間の運航を行う。結果より、船舶構成の違いによってどのような影響があるかを定量的に検証する。

市場価格について、図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示す各市場状態(高騰時、低迷時)を用いてシミュレーションを行う。海象状態については航路 A を想定し実海域影響については考慮しない。前節と同様に割引率を 0.01 として NPV の計算を行った。

ここで、市場状態が高騰している状態において最適な船舶構成案*Design H\**、市場状態が低迷している状態において最適な船舶構成案*Design L\**を設定する。各市場状態における船舶構成*Design H\**、*Design L\**の価値をに示す。



表 4-14 市場状態に最適化された船舶構成案の経済価値

船舶構成案 (部品 ID)	NPV (燃料費) [USD]	
	市場高騰時	市場低迷時
<i>Design H*</i> (H1E3P2)	$1.696 \times 10^8$ ( $6.919 \times 10^7$ )	$4.304 \times 10^8$ ( $7.634 \times 10^7$ )
<i>Design L*</i> (H1E2P2)	$1.682 \times 10^8$ ( $7.184 \times 10^7$ )	$4.316 \times 10^8$ ( $7.953 \times 10^7$ )

結果より、市場状態の違いによって燃料費にはあまり大きな差は確認できない。しかし、NPV については顕著な差が確認できる。*Design H\**について各市場状態の NPV を比較すると  $2.608 \times 10^8$  [USD] の差が確認できる。これは、原油高騰によって収入によって得た利益が燃料費と相殺されてしまうことが原因だと考えられる。

また、各市場状態に最適化された船舶構成案を比較すると、エンジンのみ差異が生まれ、航路変更による海象変動を考慮していないため船型の差異は生じていない。また、図 4-7 よりエンジン E2 と E3 の燃料消費率を比較すると E3 エンジンが低速での燃料消費効率が良いことが確認できる。そのため、市場高騰時に行われる減速運航において、効率の良い運航ができるようになり船舶構成案の価値を高めることが出来たのであると考えられる。

## 4.6 まとめ

本章では、構築した運航シミュレータの検証を運賃収入から算出した概算理論値との比較を行い、実海域影響及び市場状況の変動を考慮した場合としない場合についての船舶構成案の価値を評価、比較を行った。結果として、構築シミュレータで算出した値が概算理論値のオーダーと一致することを確認し、シミュレータの妥当性の検証が出来た。また、船型やエンジンを変化させてライフサイクル期間における船舶構成案の価値を比較することで、各船舶構成部品毎の特徴も検出することや、市場状態や気象状態に応じた船舶設計案を定義するための知見を得ることが出来たと考えられる。

## 第5章 リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価

---

5.1 はじめに.....	70
5.2 ケーススタディの基本設定.....	70
5.3 市場変動を考慮する場合 .....	71
5.3.1 ケーススタディの詳細設定 .....	71
5.3.2 ケーススタディの結果 .....	74
5.4 航路変更を考慮する場合 .....	75
5.4.1 ケーススタディの詳細設定 .....	75
5.4.2 ケーススタディの結果 .....	78
5.5 市場変動と航路変更を考慮する場合 .....	79
5.5.1 ケーススタディの詳細設定 .....	79
5.5.2 ケーススタディの結果 .....	82
5.6 ケーススタディのまとめ .....	83

---

## 5.1 はじめに

本章では、ケーススタディとして複数のオプションを持つ船舶設計案とオプションを持たない船舶設計案について、リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価を行う。市場変動の不確実性及び航路変更の不確実性を考慮するためにモンテカルロシミュレーションを用いて、船舶設計案の評価を行ったと同時に、それぞれの不確実性を各々考慮するためにケーススタディの設定を行った。具体的には、市場変動による不確実性を考慮する場合、航路変更による不確実性を考慮する場合、市場変動と航路変更による不確実性を考慮する場合についてケーススタディを行った。

## 5.2 ケーススタディの基本設定

本節では、ケーススタディの基本設定について記述する。

まず、市場変動及び航路変更によって生じる不確実性を考慮するため、モンテカルロシミュレーションを行ったがシミュレーションにおける基本的なパラメータを次の表 5-1 に示す。

表 5-1 シミュレーションにおける基本パラメータ設定

	値
ライフサイクル期間	15 years
入渠間隔	2 years
改修許容回数	1 time
割引率	0.01

本章で行うケーススタディでは、船舶構成部品と船舶性能モデル、性能劣化モデルについては第 4 章で定義したものと同じように定義を行い、市場モデルについては、3.4.2 項で定義したように二項格子モデルを用いてシナリオを生成する。二項格子モデルを用いる際に使用した原油価格、基準運賃、運賃率の各指標の過去データは付録の表 A-1～表 A-3 に示す。これら 3 つの市場価格についてシミュレーション毎に独立なシナリオを生成した。

本研究のケーススタディでの船舶構成案を定義する際に、船型、エンジン、プロペラの初期費用及び改修費用として表 5-2 に示すように定義を行った。これらの値は正確には算出できないが、オーダーについては、基本的に船会社の方へのヒアリングによる情報及び

---

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価  
James らの研究[38]を参考に決定した。シミュレーションを行う際に定義する船舶設計案に応じて初期費用、改修費用を各船舶構成部品毎に算出する際に必要となる。

表 5-2 本研究で用いる初期費用及び改修費の設定

	初期費用 [USD]	改修費用 [USD]
船型	$3.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^4$
エンジン	$2.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^4$
プロペラ	$1.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^4$

ここで、初期設計と複数の改修オプションの導出についてであるが、本ケーススタディでは主に、図 4-14、図 4-15、図 4-16 で示した各シナリオにおいて最適な船舶構成を用いることで船舶設計案を定義した。

また、ケーススタディを行うため、図 3-14 下部に示したように船渠内で船舶の改修が必要かどうかの意志決定ルールを定義する必要がある。そして、市場変動に対応するためには、原油価格の過去データの変動率を基に直近の変動傾向から意志決定をするようなルールを定め、航路変更に対応するためには、航路が変更された段階で意志決定をすることとした。

また、航路モデルについては航路変更ルールの設定及び、変更前後の航路についての海象を定義し、実際の運用で行われる航路変更を想定する必要がある。これらの詳細については、各ケーススタディで説明する。

## 5.3 市場変動を考慮する場合

### 5.3.1 ケーススタディの詳細設定

本ケーススタディでは、航路変更による海象の変化を考慮せず、市場変動において提案手法が有用であるかについて検証する。具体的には、3.4.2 項で定義した市場モデルを用いて生成した原油価格、基準運賃、運賃率の各市場価格の持つ変動性に対して、複数のオプションを持つ船舶設計案とオプションを持たない初期設計のみで定義される船舶設計案のライフサイクル期間での価値を比較する。

また、本ケーススタディで定義する船舶設計案として初期設計及び改修オプションを複数

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価  
 定める必要があるが、図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示す市場価格停滞時(stagnant)、高騰  
 時(high)、低迷時(low)の各市場変動シナリオの結果から設定を行った。具体的には、市場  
 価格が停滞時に最適な船舶構成を定義する船舶構成案の初期設計とし、市場価格高騰時  
 と低迷時にそれぞれ最適な船舶構成をその船舶設計案が持つ改修オプションとした。各市  
 場シナリオにおいて最適な船舶構成及びそのときの NPV を表 5-3 に示す。

表 5-3 各市場シナリオにおいて最適な船舶構成

	船舶構成 (船型 id, 主機 id, プロペラ id)	NPV [USD]
市場停滞時 (stag, 初期設計)	(1, 3, 5)	$4.399 \times 10^8$
市場高騰時 (high, 改修オプション A)	(1, 3, 2)	$1.696 \times 10^8$
市場低迷時 (low, 改修オプション B)	(1, 2, 2)	$4.316 \times 10^8$

このようにして得られた初期設計及び改修オプションについて船渠での改修を行うかどう  
 かの意志決定ルールを定義する。主に、船舶が市場に進出した時点の原油価格及び、対象  
 船舶が船渠に入渠した時点から、前回船渠に入渠した時点(初回の場合は市場進出時)の間  
 での原油価格の変動傾向を用いて意志決定を行う。具体的には以下の条件式(5.56)、(5.57)  
 のように意志決定ルールを定めた。ここで、 $a_{oilprice}$ は対象期間での月あたり原油価格変動  
 比であり、 $c_{increase}$ 、 $c_{decrease}$ はそれぞれ上昇もしくは下降傾向かを決定する閾値である。ま  
 た、 $P_0$ は船舶が市場に進出した際の原油価格[USD/barrel]を表しており、 $\mu$ は対象期間にお  
 ける原油平均価格[USD/barrel]、 $c_{high}$ 、 $c_{low}$ はそれぞれ原油価格が高騰もしくは低迷してい  
 るかを決定するために用いる係数を表している。

$$(a_{oilprice} > c_{increase}) \vee (P_0 \cdot c_{high} < \mu) \quad (5.56)$$

$$(a_{oilprice} < c_{decrease}) \vee (P_0 \cdot c_{low} > \mu) \quad (5.57)$$

条件式(5.56)について、対象期間の原油価格変動率 $a_{oilprice}$ が閾値 $c_{increase}$ を超えた場  
 合もしくは、対象期間における原油平均価格 $\mu$ が船舶が市場に進出した際の原油価格 $P_0$ に

係数 $c_{high}$ を乗じた価格よりも低かった場合、初期設計が市場高騰時に最適な船舶構成に改修される。同様に条件式(5.57)を満たした場合、初期設計が市場低迷時に最適な船舶構成に改修されることとなる。

本ケーススタディでは、各閾値及び係数は表 A-1 の原油価格過去データを基にそれぞれ $(c_{increase}, c_{decrease}) = (1.05, 0.95)$ 、 $(c_{high}, c_{low}) = (1.3, 0.7)$ と定めることとする。そのため、シミュレーション中で対象期間における原油価格の値が 5%以上の傾きで急上昇もしくは急降下するような傾向を持つとき、または原油価格に 30%以上の変動が観測された段階で船渠での改修が行われることになる。

また、オプションを保持する費用及び船渠内で船舶改修を行う費用をそれぞれ定義する必要があるが、初期設計及びオプションで用いる船舶構成について表 5-2 から各部品について計算を行うことにより、本ケーススタディで定義する船舶設計案は次の図 5-17 のようになる。

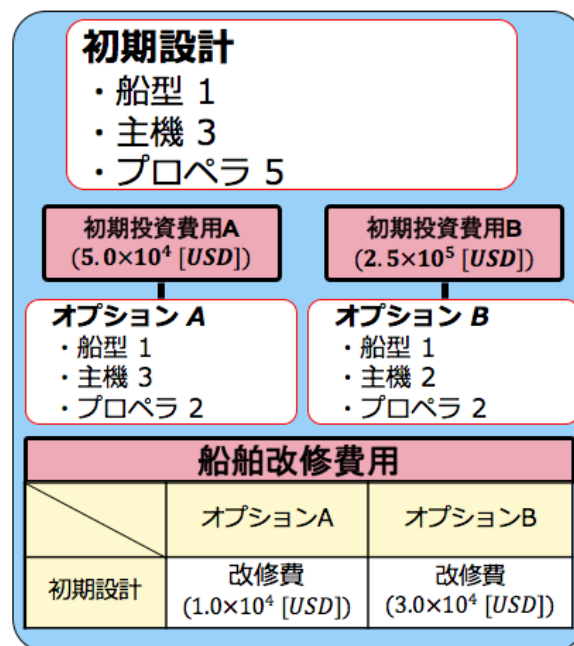


図 5-17 市場変動に対応する船舶設計案

第 4 章で用いた設定と同様に、想定航路は図 4-1 に示す日本の千葉港とサウジアラビアの Ras Tanura port を結ぶ航路 A、各航路における気象状態については、4.2.2 項と同様の方法で図 4-11 で示した発現確率を用いることにする。

以上の設定のもとで、初期設計のみで構成される船舶設計案と複数の改修オプションを持

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価  
 つ船舶設計案についてリアルオプション分析を用いた評価を行い、各船舶設計案の NPV を  
 比較する。

### 5.3.2 ケーススタディの結果

市場変動を考慮してモンテカルロシミュレーションを 1,000 回行った結果を表 5-4 に示  
 す。なお、オプション行使回数累計はモンテカルロシミュレーション 1,000 回のうち、オプショ  
 ンが行使された、すなわち船舶改修が行われた回数を表す。また、オプション有効回数は船  
 舶改修が行われた際に、その改修によって船舶設計案の価値が向上した回数を示す。

表 5-4 市場変動を考慮した際のシミュレーション結果

	船舶設計案 (初期設計のみ)	船舶設計案 (改修オプションあり)
平均 NPV [USD]	$3.341 \times 10^8$	$3.369 \times 10^8$
NPV 平均差分[USD]	$2.827 \times 10^6$	
NPV 最大差分 [USD]	$2.854 \times 10^7$	
オプション行使回数累計	1,000	
オプション有効回数	961	

また、以上で比較した 2 つの船舶設計案について各シミュレーションにおける NPV の差  
 分をヒストグラムにしたものを図 5-18 に示す。縦軸はモンテカルロシミュレーション 1,000 回  
 における頻度を表し、横軸は同じ航路・市場・気象環境下における複数オプションを持つ船  
 舶設計案の NPV から改修オプションを持たず初期設計だけで構成される船舶構成案の  
 NPV の差をとった値を表している。モンテカルロシミュレーション 1,000 回行った結果、NPV  
 の差分平均は  $2.827 \times 10^6$  [USD] となり、最大で  $2.854 \times 10^7$  [USD] の差分が生じることとなっ  
 た。

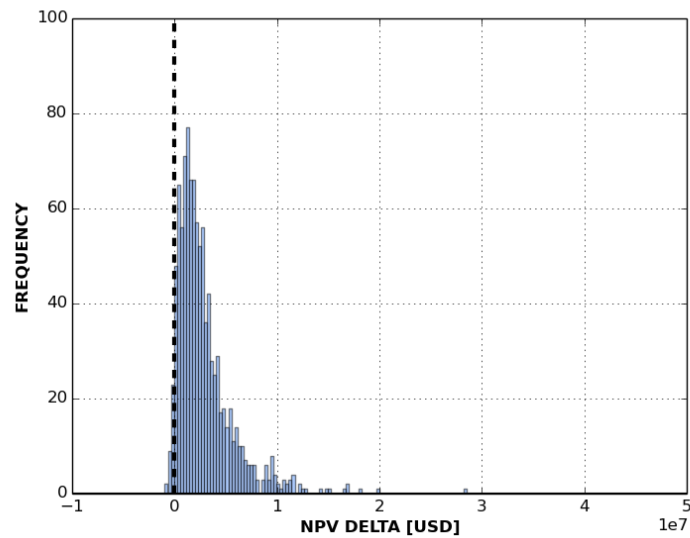


図 5-18 市場変動に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム

これらの結果から 96%以上の割合で複数オプションを持つ船舶設計案の価値の方が初期設計案のみで構成される船舶構成案の価値よりも高いことがわかり、以上に示したヒストグラムにおいて、NPV の差分が正の側に寄っていることから、複数オプションを持つ船舶設計案が市場価格の不確実性に対応出来ていると考えられる。

## 5.4 航路変更を考慮する場合

### 5.4.1 ケーススタディの詳細設定

本ケーススタディでは、前節において考慮した市場変動リスクではなく航路変更による海象の変化によるリスクに対応することを考える。具体的には、本研究で定義する複数オプションを持つ船舶設計案が船舶のライフサイクル期間に発生する航路変更などによる海象変化に対しても、初期設計のみで構成される船舶構成案と比較し価値を上げることができるかどうかを定量的に示す。本項では、そのような海象の変化に対応するためのケーススタディの設定について詳述する。

まず市場モデルについて、原油価格については航路が変更しても大きな変化は発生しないため前節と同様のものを扱う。また、通常基準運賃及び運賃率は航路毎に定義されるもので航路変更が起きた場合、新たに定義をし直す必要がある。しかし、本ケーススタディでは主



---

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価

に海象の変化による船舶設計案の価値の変化に焦点を合わせるため、これら 2 つの市場価格についても前節で用いたものと同様の値、つまり航路変更によらずこれらの指標は大きく変化しないものとした。

また、本ケーススタディで定義する船舶設計案であるが、市場モデルは市場停滞時 (stagnant) のシナリオを用いて、千葉と Ras Tanura port を結ぶ航路 A と Ras Tanura port と Buenos Aires port を結ぶ航路 B の 2 つの航路についてシミュレーションを行い、各航路において最適な船舶構成から定義することにした。各航路において最適な船舶構成とそのときの NPV を次の表 5-5 に示す。

表 5-5 各航路において最適な船舶構成

	船舶構成 (船型 id, 主機 id, プロペラ id)	NPV[USD]
航路 A (初期設計) (千葉 – Ras Tanura 間)	(1, 3, 5)	$4.399 \times 10^8$
航路 B (改修オプション A) (Ras Tanura – Buenos Aires 間)	(2, 3, 2)	$2.800 \times 10^8$

ここで、前節の航路での船舶設計案の価値と比較し、新たに想定した航路では、バルバスバウを有する荒い海象に強い船型が最適な船舶構成案として抽出されているのが確認できる。本ケーススタディでは、航路 A で最適な船舶構成を初期設計とし、航路 B で最適な船舶構成を改修オプション A とした。

また、改修オプションを保持するために初期費用及び改修費用を定義する必要があるが、前節と同様にオプションを保持する費用及び船渠内で船舶改修を行う費用を表 5-2 から計算を行うことにより、本ケーススタディで定義する船舶設計案は次の図 5-19 のようになる。

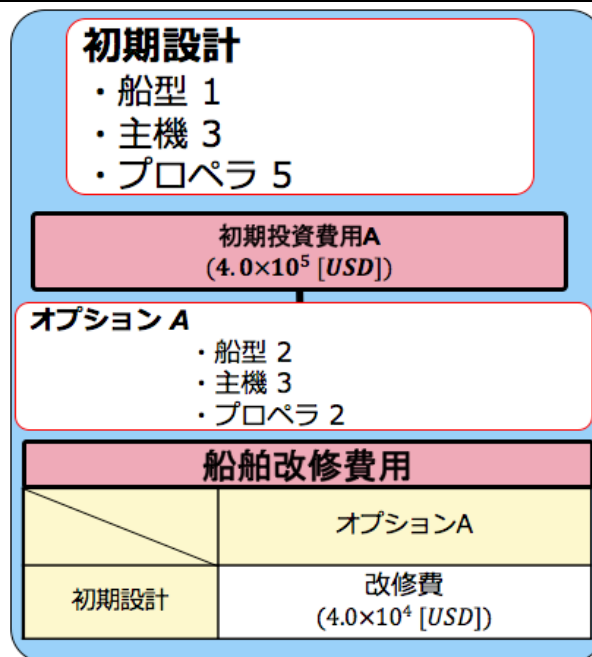


図 5-19 航路変更に対応する船舶設計案

航路モデルとして、航路を変更するルールを設定する。具体的にはライフサイクル期間において船渠に入渠した際に 1 度のみ航路変更が発生するように設定する。本ケーススタディでは、ライフサイクル期間を 15 年、船渠への入渠間隔を 2 年と設定しているため、ライフサイクル全体で 7 回入渠する必要がある、その中で 1 度のみ航路変更が行われることになる。航路変更は予め定めた確率によって行われ、本ケーススタディでは、各入渠時期に航路変更が行われる確率として表 5-6 のように定義する。ここで、航路変更確率は不確実性を考慮するために 15 年の船舶のライフサイクル期間のうちで船渠が行われる 7 回の場合の他に航路変更が行われない場合についても定義する。

表 5-6 船舶の入渠時に航路変更が行われる確率

	航路変更が行われる時期 [年後]							
	2	4	6	8	10	12	14	--
航路変更 確率 [%]	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5

最後に、船渠での改修を行うかどうかの意志決定ルールを定義する。本ケーススタディでは、主に航路変更が行われたかどうかを基に意志決定を行う。今回定義した船舶設計案で

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価は、初期設計が航路変更前の状態での最適設計案、改修オプションが航路変更後の状態での最適設計案であるため、航路変更が行われた段階で変更後の航路に最適な船舶構成案に改修を行うことで船舶の価値を上昇させることができる。そのため、改修を行う条件として、航路変更が行われたかどうかが重要になる。

これまでに行った設定から、初期設計のみで構成される船舶設計案と以上で定義した複数の改修オプションを持つ船舶設計案についてリアルオプション分析を用いた評価を行い、各船舶設計案の NPV を比較する。

#### 5.4.2 ケーススタディの結果

航路変更を考慮してモンテカルロシミュレーションを 1,000 回行った結果を表 5-7 に示す。

表 5-7 航路変更のタイミングが一定確率で変化する場合のシミュレーション結果

	船舶設計案 (初期設計のみ)	船舶設計案 (改修オプションあり)
平均 NPV [USD]	$4.064 \times 10^8$	$4.163 \times 10^8$
NPV 平均差分[USD]	$9.771 \times 10^6$	
NPV 最大差分 [USD]	$2.996 \times 10^7$	
オプション行使回数累計	739	
オプション有効回数	687	

この結果から航路変更を考慮した場合でも複数オプションを持つ船舶設計案を用いることで対象船舶の価値を高めることが出来たことがわかる。次の図 5-20 に前節と同じ計算方法で算出した 2 つの船舶設計案について各シミュレーションにおける NPV の差分をヒストグラムにしたものを示す。

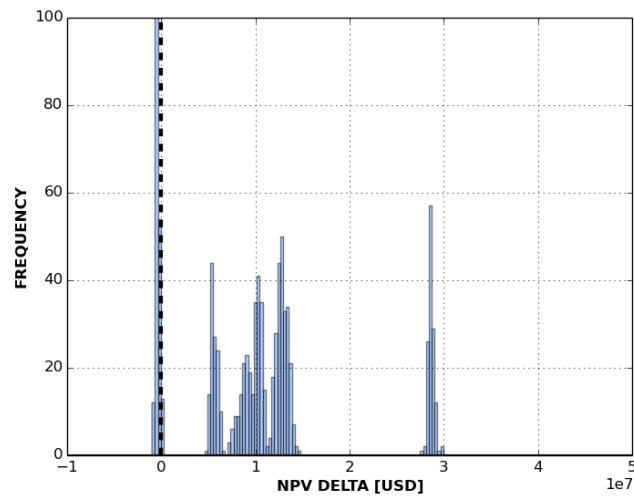


図 5-20 航路変更に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム

ヒストグラムより、改修オプションを持つ船舶設計案の NPV 差分が正の方向に出ていることが観測でき、提案手法の有用性が示される。また、ヒストグラム中で負の値を示す部分が見られるがこの値は、シミュレーションにおいて、ライフサイクル期間中に航路変更が行われず、船舶改修が実行されなかったときの結果であり、複数のオプションを保持するための初期費用分の NPV の値と一致している。NPV 差分がヒストグラムにおいて、離散的な値になるような傾向を持つが、これは航路変更が行われるタイミングが離散的な確率として定義されていることによって生じている。

## 5.5 市場変動と航路変更を考慮する場合

### 5.5.1 ケーススタディの詳細設定

本ケーススタディでは、前節で検証した市場変動および航路変更の不確実性を同時に考慮した際に提案手法が有用であるかを検証する。

本ケーススタディにおいても複数の改修オプションを持つ船舶構成案を定義する必要がある。市場変動の傾向及び航路変更の両方に対応するため、千葉と Ras Tanura port を結ぶ航路 A での市場価格高騰時(high)、低迷時(low)、停滞時(stagnant)の各市場変動シナリオに対して最適な船舶構成案である表 5-3 の結果に加え、Ras Tanura port と Buenos Aires port

リアルオプション分析によるライフサイクル期間での船舶設計案の評価を結ぶ航路 B における市場価格高騰時(high)、低迷時(low)、停滞時(stagnant)の各市場変動シナリオに対しても最適な船舶構成案の導出を行った。表 5-8 に Ras Tanura port と Buenos Aires port を結ぶ航路 B における各市場シナリオにおいて最適な船舶構成とその NPV を示す。

表 5-8 航路 B での各市場シナリオにおいて最適な船舶構成

	船舶構成 (船型 id, 主機 id, プロペラ id)	NPV [USD]
市場高騰時(high)	(2, 3, 5)	$9.572 \times 10^7$
市場低迷時(low)	(2, 2, 2)	$2.730 \times 10^8$
市場停滞時(stage)	(2, 3, 2)	$2.800 \times 10^8$

以上で得られた各航路、市場シナリオ別に最適な船舶構成より、船舶構成案を定義する。具体的には、初期設計を航路 A での市場停滞時に最適な船舶構成とし、残りの船舶構成案を全て改修オプションとした。表 5-9 に初期設計と改修オプションの一覧を示す。表内の航路と市場傾向は各船舶構成が最適とされたときのシミュレーションが行われた航路と市場傾向を示す。

表 5-9 船舶設計案を構成する初期設計と改修オプション

設計	船舶構成	航路	市場傾向
初期設計	(1, 3, 5)	A	停滞(stage)
改修オプション A	(1, 3, 2)	A	高騰(high)
改修オプション B	(1, 2, 2)	A	低迷(low)
改修オプション C	(2, 3, 2)	B	停滞(stage)
改修オプション D	(2, 3, 5)	B	高騰(high)
改修オプション E	(2, 2, 2)	B	低迷(low)

また、船渠での改修を行うかどうかの意志決定ルールについては、基本的に条件式 (5.56)、(5.57)に従うこととしたが、航路によって改修オプションを絞り込むことにした。具体的には、改修する段階ではまだ航路変更が起きておらず、対象船舶が航路 A 上にいる場合、改修オプションはオプション A と B のみが候補として挙げられ、航路 B 上に対象船舶がいる

場合、オプション C、D、E が候補としてあげられる。また、航路 B 上にいる場合にどのオプションに改修するかを判断する場合、条件式(5.56)、(5.57)のいずれの条件も満たさなかったときは市場停滞時に最適な船舶構成である改修オプション C に改修するように設定を行った。

また、例によって改修オプションを保持するための初期費用及び改修費用を定義する。前節と同様にオプションを保持する費用及び船渠内で船舶改修を行う費用を表 5-2 から計算を行うことにより、本ケーススタディで定義する船舶設計案は次の図 5-21 のようになる。

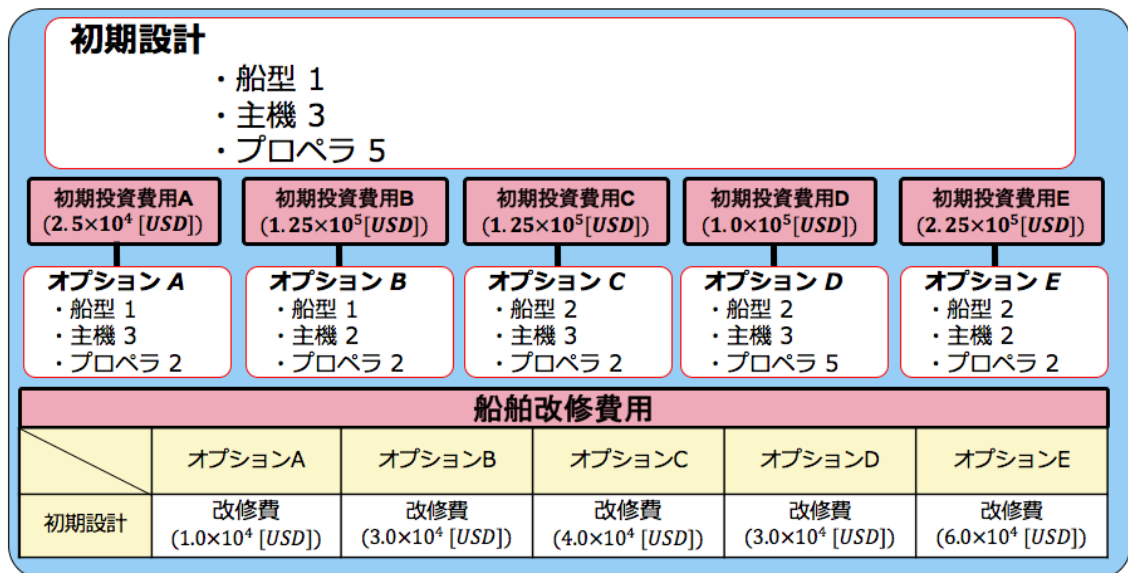


図 5-21 市場及び航路変動に対応する船舶設計案

また、航路変更及び市場変動による不確実性を考慮するために、各入渠時期に航路変更が行われる確率として定義した表 5-6 及び、市場モデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行う。

以上で行った設定から、初期設計のみで構成される船舶設計案と複数の改修オプションを持つ船舶設計案についてリアルオプション分析を用いた評価を行い、各船舶設計案の NPV を比較することで、本研究で提案する船舶設計案が航路変更及び市場変動による不確実性の両者に対応できるかどうかを検証する。

### 5.5.2 ケーススタディの結果

市場変動及び航路変更を考慮してモンテカルロシミュレーション 10,000 回行った結果を表 5-10 に示す。

表 5-10 市場変動及び航路変更を考慮した際のシミュレーション結果

	船舶設計案 (初期設計のみ)	船舶設計案 (改修オプションあり)
平均 NPV [USD]	$3.065 \times 10^8$	$3.180 \times 10^8$
NPV 平均差分[USD]	$1.153 \times 10^7$	
NPV 最大差分 [USD]	$1.688 \times 10^8$	
オプション行使回数累計	10,000	
オプション有効回数	9,752	

この結果から、市場変動及び航路変更の両方の不確実性を考慮した場合でも、提案する複数の改修オプションを持つ船舶設計案を用いることで対象船舶の価値を高めることができることを示した。また、前節と同様に 2 つの船舶設計案について各シミュレーションにおける NPV の差分をヒストグラムにしたものを図 5-22 に示す。

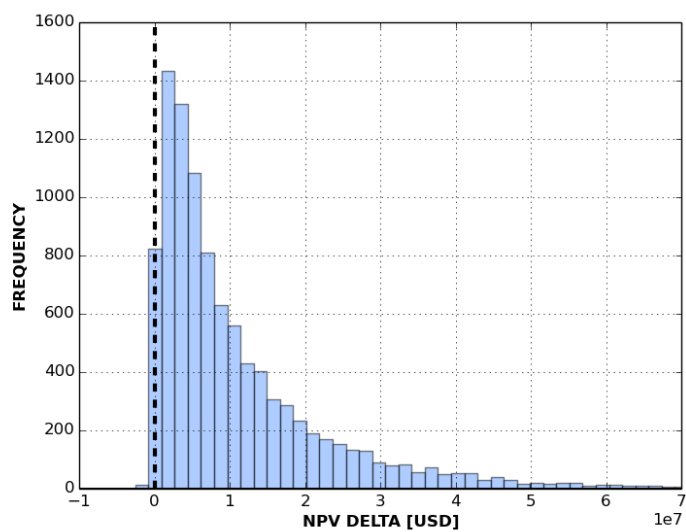


図 5-22 市場及び航路変動に対応する船舶設計案の NPV 差分ヒストグラム

こちらの図に示したヒストグラムについても NPV 差分の値が正の方向に偏ることが観測され、提案手法の有用性が確認できる。

## 5.6 ケーススタディのまとめ

本章で行ったケーススタディでは、複数の改修オプションを持つ船舶設計案を定義することで、市場変動による不確実性、航路変更による気象変動、市場変動と航路変更による両方の不確実性の 3 パターン全てに対して、対象船舶のライフサイクル価値を向上させることが出来ることを示した。また、各ケーススタディにおいての評価結果、特に初期設計のみで構成される船舶構成案と比較して向上させることができた NPV 平均差分を比較すると、差分が大きくなってきていることが確認できる。具体的には、市場変動による不確実性を考慮した場合、航路変更による気象変動を考慮した場合、市場変動と航路変更による両方の不確実性を考慮した場合となるにつれ、差分が増大している。

以上の結果から、本ケーススタディを行ったことで、市場変動による不確実性もしくは航路変更による気象の不確実性を考慮すること、もしくはその両方を考慮した場合にもリアルオプションを導入することによって、ライフサイクル期間における船舶の価値を向上させることを示すことが出来たと言える。



---

## 第6章 考察

---

6.1 提案手法に関する考察 .....	85
6.1.1 構築した運航シミュレータについて .....	85
6.1.2 構築した各モデルについて .....	85
6.2 ケーススタディに関する考察 .....	86
6.2.1 ケーススタディの設定について .....	86
6.2.2 ケーススタディの結果について .....	89
6.2.3 船舶改修について .....	90
6.3 本研究の課題 .....	90
6.3.1 構築したモデルについての課題 .....	90
6.3.2 リアルオプションについての課題 .....	91

---

## 6.1 提案手法に関する考察

本節では、提案手法に関する考察を行う。6.1.1 項では、構築した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、6.1.2 項では構築した船舶性能モデル、航路モデル、市場モデル、経年劣化モデルについての考察を行う。

### 6.1.1 構築した運航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の妥当性について考察する。

構築した運航シミュレータの妥当性として第 4 章で、燃料費やキャッシュフローについて、概算値との比較、市場変動及び海象変動による算出値の比較を行い、シミュレータの妥当性についてはある程度示した。しかし、どちらも理論値を用いて値を比較していることから、さらなるシミュレータの妥当性について議論するためには背景で紹介した SIMS[8]などによるパフォーマンスモニタリングシステムを用いた実運航データを基にした検証が必要だと考えられる。そのような実運航データなどを用いることで、風や波の向きや速度などの詳細な気象状況、本研究ではあまり考慮することのなかった喫水を変化させて行うトリム運航などによる影響もシミュレータに実装することが出来ると考えられる。

また、実運航データを用いることが出来ないとしても、トリム運航による船舶推進性能への影響などを定量的に定義することでシミュレーションに取り込むなど実際の運航を再現するためには改善・発展の余地が多く挙げられる。

### 6.1.2 構築した各モデルについて

本研究では、船舶性能モデル、航路モデル、市場モデル、経年劣化モデルを用いることで提案手法を実現したが、定義したモデルの妥当性については別途検証する必要があると考えられる。

船舶性能モデルについては、基本的に主要な船舶構成部品を船型・主機エンジン・プロペラの 3 種類に限定し、馬力や伝達率などの推進性能に関する指標を船舶工学において基本的な式を用いて計算した。また、抵抗係数などについても既存研究を基に、広く使われている式を採用したため、基本的な計算については信頼できる。

航路モデルについては、実際に発生した事例を参考に航路変更を考慮し、各航路におい

て異なる海象として、実海域影響を考慮する際によく用いられる風力階級を基に構築したこと、既存研究で紹介されている水槽実験結果から波浪影響を推定したことや、第 4 章で行った実海域影響を考慮することによる船舶の価値や燃料費の変動が定性的な現象と一致したことから妥当だと考えられる。

本研究での市場モデルについては、基本的に過去データから二項モデルのみを用いて生成し、ブラックショールズモデルなどを始めとする他の予測方法については言及していない。理由としては、多くの論文でこのような未来の株価予測、本研究における原油価格などの市場価格の予測精度はあまり高くなく、どの予測方法を用いて市場価格の予測を行ったとしても、本研究のケーススタディでは十分な回数のモンテカルロシミュレーションを行うことで、予測方法の差異がなくなってしまうのだと考えたためである。また、数ある予測方法の中でも、二項モデルは過去のデータ傾向を予測に取り入れることができるため、リーマンショックなどの大きなイベントを考慮しない限り今回用いた予測方法は妥当であったと言える。

経年劣化モデルについては、実海域影響を考慮する際に必要不可欠な要素として杉村の研究[23]を参考に設定を行ったが、妥当性の検証としては本研究では行っていない。ただし、ケーススタディにおける各シミュレーションでの経年影響は船舶設計案によらず同じ影響を再現しているので、本研究では航海シミュレータをより現実的なものにしたけにとどまっている。そのため、本研究で定義した経年劣化モデルについてはさらなる妥当性を検討する必要があり、船舶構成部品別に固有な経年劣化率を定義するなど、経年による影響について再考する必要がある。

## 6.2 ケーススタディに関する考察

本節では、ケーススタディに基づいた考察を行う。

6.2.1 項では、ケーススタディの設定について実験を含めた考察を行い、6.2.2 項では、ケーススタディの結果及びリアルオプション分析における意志決定ルールについて考察を行う。

### 6.2.1 ケーススタディの設定について

本項では、ケーススタディを行うにあたって設定した固定費や船舶構成部品、想定航路などについて考察する。

まず、今回用いた VLCC の運航する想定航路についてであるが、主に株式会社商船三井(以下、商船三井)のアンニュアルレポート[39]を基に設定を行った。図 6-1 に商船三井の運用する油送船の航路を示す。

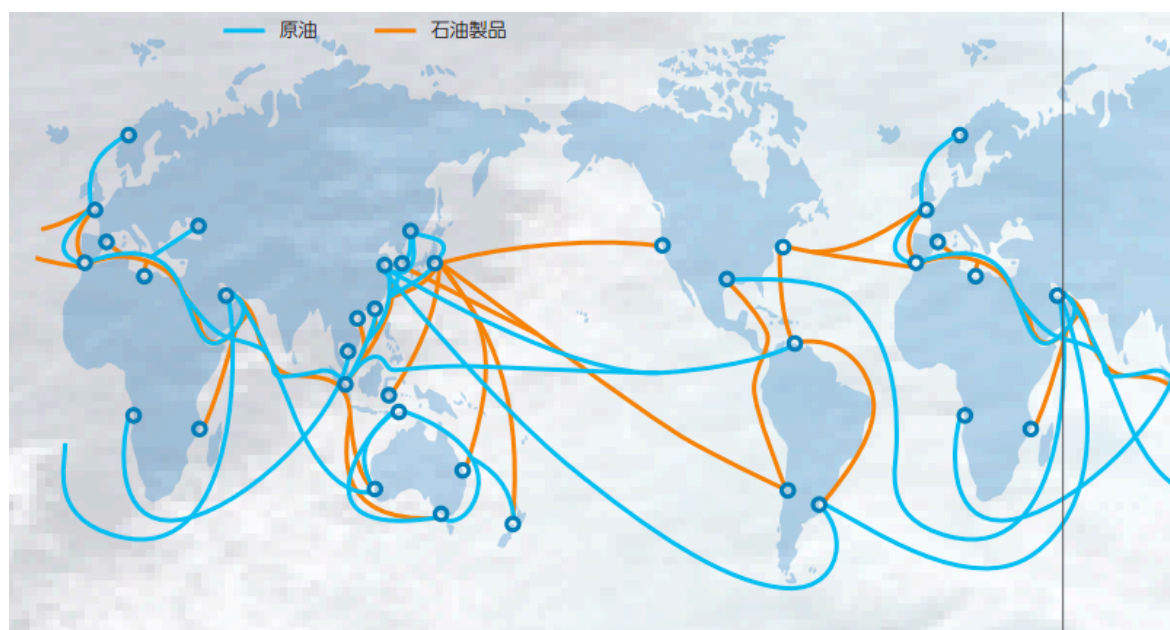


図 6-1 商船三井の運用する油送船の航路[39]

ケーススタディで想定した航路 2 つそれぞれについては、実際に油送船が運用されていることから、妥当性については問題がないと考えられるが、航路の変更については本当にそのような航路変更が行われるのかどうかという疑問が残る。

また、5.4 節、5.5 節では航路変更を考慮する際にはライフサイクル期間中における全ての船渠時において航路変更が行われる可能性があるとして一律に航路変更確率を割り振ることで航路変更による不確実性を考慮したが、ライフサイクル期間の終了間近に航路変更及び航路変更に伴う船舶構成の改修工事が行われてしまった場合、むしろ航路変更をしたときに船舶構成の改修を行わない方が良い場合もあるはずである。

船会社による複数の航路を隔てた船舶の運用方法について検討していくことも船舶のライフサイクル価値を高めるために重要な要因となることが考えられる。

本論文で行ったケーススタディでは、改修が行われたことによるライフサイクル期間の延長等は考慮しないため、ライフサイクル期間の終盤の段階で船舶の改修を行ったとしても改修に用いた費用を回収する前にライフサイクル期間が終了し、対象船舶

が市場から引退してしまうことも十分考えられる。そこで、本研究で不確実性に関連する要因として扱った市場変動と航路変更のうち、航路変更について定量的に考察する。

ライフサイクル期間で行われる各 7 回の航路変更タイミングのうち、どのタイミングで船舶設計案全体の価値が上昇するかをシミュレーションを行うことで検証する。ライフサイクル期間 15 年間において、2 年毎に行われる入渠（全 7 回）の各時点で航路変更が行われ、その航路変更に伴う改修が行われた場合、どの程度の価値の変動が生じるかを検証した結果を表 6-1 に示す。ここで、改修は航路変更が行われた時点で行うこととし、市場価格については図 4-14、図 4-15、図 4-16 に示した市場価格停滞時のシナリオを用いた。

表 6-1 航路変更時期による船舶設計価値変動

航路変更が行われる時期【年後】	NPV [USD]		
	船舶設計案 (初期設計のみ)	船舶設計案 (改修オプションあり)	差分
2	$1.266 \times 10^9$	$1.282 \times 10^9$	$1.680 \times 10^7$
4	$8.674 \times 10^8$	$8.803 \times 10^8$	$1.289 \times 10^7$
6	$2.555 \times 10^8$	$2.553 \times 10^8$	$-1.484 \times 10^5$
8	$5.102 \times 10^8$	$5.103 \times 10^8$	$1.267 \times 10^5$
10	$3.397 \times 10^8$	$3.305 \times 10^8$	$-9.262 \times 10^6$
12	$1.352 \times 10^9$	$1.334 \times 10^9$	$-1.843 \times 10^7$
14	$2.121 \times 10^9$	$2.083 \times 10^9$	$-3.830 \times 10^7$

この結果から、ライフサイクル期間 15 年のうち、6 年もしくは 8 年経過した際の入渠時点で航路変更が起きたときに船舶改修を行うと、ライフサイクル期間での船舶設計案の価値の向上が少ない、もしくは負の値になっていることが確認できる。そのため、航路変更が行われる時期による船舶設計案の価値の変動が 6～8 年の間を境に入れ替わることが予測される。

この結果に基づき、船舶設計案の価値を安定して向上させるような運用を行うためには、航路変更が行われた際に残りライフサイクル期間を加味して、船渠での改修を行

うかどうかの意志決定ルールを設定することが必要となる。例えば、以下のルールを設定することが考えられる。

1. 航路変更が行われた後であること
2. 航路変更後のライフサイクル期間が半分以上残っていること

このように、航路変更後のライフサイクル期間が半分以上残っていることを新たなルールの1つとして追加することで、改修による船舶設計案の価値を安定して向上させることができると考えられる。航路変更後の基準運賃や運賃率、海象の状態などを考えると一概にこの新ルールに効果があると示すにはさらなる検証が必要となるが、本考察では、意志決定ルールの改善によってさらに船舶の価値を向上させる見込みがあることを述べるだけにとどめることにする。

## 6.2.2 ケーススタディの結果について

本研究で行ったケーススタディの結果から、実世界において不可避な気象変動及び市場変動による不確実性の両者に対応するために定義した船舶設計案が最も船舶のライフサイクル価値を向上させることができたこととなる。このことから、ケーススタディによって実際に船舶を運用する際にも市場変動と航路変更による不確実性を考慮することが妥当であることを示せたと考えられる。

また、本研究においては、航路変更が行われる確率をライフサイクル期間の船渠入渠時において一様確率を用いて定義したが、実際にライフサイクル期間における航路変更がそれほど頻繁に行われるのかということに疑問が残る。

そこで、航路変更が設計時に想定した運航条件と実際に船舶が運航した際の運航条件の差異によってやむなく行われるのではなく、船舶を運用する船会社によって能動的に決められるものである場合について考えたい。具体的には、本論文で行ったケーススタディにおいて、航路変更確率を一様に定義するのではなく、複数の航路における市場価格などの状態から航路変更を行う。例えば、航路変更を行うかどうかの意志決定以外は 5.5.1 の設定と同じにし、航路 B における基準運賃及び運賃率について新たに市場モデルを用いて定義することで、航路 A とは別の変数を用意してモンテカルロシミュレーションを行う。航路変更を行うかどうかの意志決定については、船渠に入渠した段階から直近 2 年間の載荷重量あたりの月次運賃平均を航路 A と B についてそれぞれ計算を行うことで判断することとした。例えば、

航路 A で運航している船舶が入渠した段階で直近 2 年の過去データから航路 A と航路 B における月次平均運賃を算出し、航路 B における月次平均運賃が現在運航する航路 A での月次平均運賃よりも高ければ航路変更が行われることとなる。以上のようなケーススタディを実際に行ってみたが、対象船舶のライフサイクル価値をさらに高めるような結果は得られなかった。このような結果が得られたことの原因としてはやはり市場価格の予想は難しいことが挙げられる。そのため、過去の市場価格データから航路変更タイミングを行うためにはさらに詳細なルール構築が必要であると考えられる。

### 6.2.3 船舶改修について

船舶改修の回数についてであるが、本研究では全ケーススタディにおいて 1 度のみの船舶改修を許容したが、本研究でのケーススタディで示されたように、改修オプションを用いることでライフサイクル全体での船舶の価値を向上させることができるということから複数回の船舶改修を行うことも当然考えられる。また、構築したシミュレータについては、船渠での船舶改修期間についてはあまり考慮することなく通常のメンテナンス期間としていた期間内に全改修作業が終了することが想定されている。実際には、船舶改修の中でも改修部品毎に船舶改修作業に必要な作業量も決定されるはずであるが、船舶改修費については各船舶構成部品毎に改修費を定義することで改修部品別の違いは考慮出来ていると考えられる。背景で紹介した MTI の事例[10]のような実世界での船舶改修に関する事例の数はまだ多くなく、今後このような事例が増えいき、それらのワークフローなどから詳細な分析が出来るようになることで、本手法もさらに改善されると考えられる。

## 6.3 本研究の課題

### 6.3.1 構築したモデルについての課題

本研究で構築したモデルには、船舶性能モデル、航路モデル、市場モデル、経年劣化モデルとあるが、本論文では第一の目的として複数オプションを持つ船舶設計案を用意することで、ライフサイクル期間における対象船舶の価値を向上させることを挙げているため、いずれのモデルも実際の船舶運用における詳細な部分まではモデル化出来ているとは言えな

い。例えば、船舶性能モデルにおいては、船舶を構成する部品として船型、主機エンジン、プロペラのみしか考慮していない。航路モデルにおいて、航路変更による不確実性を実現する際に、一様確率を用いて航路変更時期の決定を行ったが、船会社の立場になると、各航路における需要などの指標を考慮することも考えられる。また、航路モデル内の気象状態においても、風の影響を考慮しておらず、波や風の向きである船体への入射角を全く考慮していない。そのため、今後さらに実際の運用に基づいた詳細な経済評価を行うには、以上のような要因から、経済価値を大きく変動させる要因のみを抽出し、シミュレーションモデルの詳細化を行うことが必要となる。また、実際の運用フローに基づいたモデル化も必要となってくる。

### 6.3.2 リアルオプションについての課題

本研究では、複数の船舶改修オプションを用意する際に、市場停滞時、市場高騰時、市場低迷時を模擬したシナリオを用いることで最適船舶構成を抽出したが、各船舶構成部品についての詳細な分析を行うことで、より船舶の評価を向上させるような船舶設計案を提議することができる。具体的には、本研究で用いた波浪中抵抗増加を減少させるバルバスバウを有する船型のように、エンジン、プロペラについても各海象、市場影響に対してメリットがあるかどうかを定量的に評価して改修オプションを用意することが出来れば、本ケーススタディをさらに改善できることが考えられる。

また、船舶改修についても、どのタイミングで改修を行うかという意志決定については原油価格の傾向を用いるなど非常にシンプルなルール設定を行ったが、環境を考慮して有害物質の排出量なども考慮することも考えられる。



## 第7章 結論

---

7.1 結論 .....	93
7.2 今後の展望 .....	93

---

## 7.1 結論

本研究では、市場変動と航路変更による不確実性が実際の運航で想定されるとして、それらの不確実性に対応するために、船舶を設計する段階から複数の改修オプションを保持するリアルオプションを導入した船舶設計案の提案を行った。また、市場変動と航路変更を船舶を運用する際の不確実性として扱うために、市場モデル及び航路モデルを実際の過去データより作成し、それら 2 つに加え、改修オプションの行使を考慮可能な運航シミュレータを用いて、モンテカルロ法を行うことで各船舶設計案のライフサイクル期間における価値を定量的に評価する手法を提案した。

また、ケーススタディにおいて、実際の航路を運航する VLCC を対象にリアルオプション分析を行った。基本となる船舶設計案とリアルオプションを導入した船舶設計案の価値を評価・比較することでリアルオプションを導入した船舶設計案が、ライフサイクル期間における船舶設計案の価値を向上できることを確認した。

## 7.2 今後の展望

本研究の提案する手法によって示される、船舶の設計段階における複数の船舶改修オプションを有する船舶設計案を考慮することは、今後燃料消費量削減を促すエコ対策による規制が厳しくなることや、パナマ運河の拡張などを例とした対象船舶の急な航路変更などによる海象の変化などに対して非常に有用であると考えられる。また、本研究の考え方から、それらの要因による運航状況の変化によって、船舶の設計条件を変更することが必要となった場合、従来よりも容易且つ安価に船舶改修を行うことが可能となる。

また、本研究では対象船舶の運航方法として、1 航海辺りのキャッシュフローを最大にするような船速で航行するように運航シミュレータを構築したが、昨今の環境問題などを考慮して船舶の運航による有害廃棄物の排出量を最小にするような運航をするような考え方が必要となる。

---

## 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。

東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 教授 大和裕幸先生には、東京大学理事・副学長という非常にご多忙なお立場にも関わらず、研究に所属した当時から現在に至るまで研究の進め方や研究に対する姿勢の在り方、心構えだけではなく、人としてどう在るべきかなどについて多岐にわたるご指導頂きました。大変お忙しい中、人として未熟な私に対して御指導頂けたことに感謝しております。深く感謝し、心より御礼を申し上げます。

東京大学大学院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、船舶のライフサイクル評価におけるリアルオプションの適用や根本的な考え方、提案手法の評価の仕方、論文の構成に関する御指導などをはじめ、研究に対する的確なアドバイスを数多く頂きました。また、研究以外にも情報技術などの知識を教えて頂いたり、技術コンテストへの参加などの貴重な機会を与えて頂いたこと、その際の議論に付き合ってくなど、大変お世話になり、非常に多くのことを学ばせて頂きました。深く感謝し、心より御礼を申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授 白山晋先生には、設計工学研究室大輪講において、シミュレーションの専門家として非常に的確且つ具体的なアドバイスを頂き、研究の参考とさせて頂きました。大変感謝しております。心より御礼を申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 助教 満行泰河先生には、研究全体に対するアドバイスやミーティングの設定、そして、プログラミングなどの細部にわたるまで幅広く丁寧に御指導頂きました。また、研究だけでなく課外活動において、新領域創成科学研究科長杯などの催しが開かれる度に、先頭に立って本研究室を牽引していく姿は非常に尊敬するものがあり、人として良い見本となっただけではなく、貴重な経験をさせて頂きました。深く御礼を申し上げます。

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 Bryan Moser 先生には、学部4年次に参加させて頂いた Global Project Design 社でのインターンシップの頃よりお世話になり、当時は初の渡米で神経質になっていた私に対し、非常に丁寧に御指導頂き、短い期間ではありながら大変貴重な体験が出来ました。また、インターンシップを終えても研究室での輪講などで研究に対する御指導を頂いただけではなく、IT企業などとの交流会などを手伝わせて頂くなど非常に貴重な経験をさせて頂きました。深く御礼を申し上げます。

株式会社 MTI の安藤英幸博士、角田領博士、菊田晋介様を始めとする船舶情報グループの皆様には、御自身の業務で大変忙しいのにも関わらず、船舶工学に関する多くの御指導を頂き船舶に関する研究を行う際の基礎として非常に参考になりました。心より感謝しております、深く御礼を申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 技術職員 榎本昌一様には、ネットワークやサーバを始めとする情報技術に関して多くのことを学ばせて頂きました。また、水槽実験などを行う際に、多大なサポートを頂きました。深く御礼を申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科の土屋好寛様には、水槽試験に関する手法、水槽の使用方法や試験準備など、多大なサポート及び貴重な御指導を頂きました。深く御礼を申し上げます。

東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 客員共同研究員 石松拓人様には、研究室での輪講などで研究に対するアドバイスや的確な指摘を頂くだけでなく、講義を通して御自身の研究、宇宙分野での先端技術などについての紹介をして頂き、分野は違えど非常に良い経験をさせて頂きました。心より御礼を申し上げます。

東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 秘書 大塚朋子様、鮫島文子様、山本和子様には私達学生が研究活動に専念出来るように煩雑な事務手続きを行って頂いただけではなく、日頃の生活においては優しく、ときには厳しく接して頂きました。心より感謝致します。

共同研究員である本多健様、同じく共同研究員である富士通株式会社の岡田伊策様、齋藤稔様、笈田佳彰様には研究室の勉強会や日頃の生活において多くのサポートを頂き大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

研究室の先輩である博士課程の孫晶鈺様、岡田伊策様、中村寛様、笈田佳彰様には、学術的、技術的なサポートから日頃の生活まで様々な面で大変お世話になりました。御自身の研究活動等でお忙しいのにも関わらず、相談や議論にご協力頂き非常に助かりました。心より感謝致します。

廣井貴彬様、松原洸也様、水林義博様、和中真之介様には研究室の同期として刺激し合いつつ非常に多くの苦楽を乗り越え、その中で人間として非常に大きく成長出来たと思っております。今後、それぞれが別の人生を歩み環境が変わってしまうことになってしまいますが、いつまでも支え合える存在であり続けることいたいと思っております。皆様の御陰で研究室での生活を非常に楽しく、充実したものに出来ました。心より感謝し、御礼申し上げます。

上野隆治様、後藤拓矢様、馬目信人様には、修士課程1年生として、ティーチングアシスタントや自身の研究で忙しい中、しっかりと研究室の運営を行って頂いただけではなく、研究への鋭い指摘を頂いたり、議論に付き合ってくなど非常に多くのサポートをして頂きました。また、学部生である伊藤航大様、岡田航太様にも輪講などで指摘を頂くなど非常に有意義な時間を過ごすことが出来ました。心より御礼申し上げます。

また、研究室の先輩である金載烈様、石黒慧様、河野裕様、深田直人様、学部4年次には研究室の同期として在籍していた安藤早紀様、留学生として研究室の一員となった Angel Yang 様と Zhang Mengmi 様、Suthee Ruangwises 様と研究室に在籍して非常に多くの方に支えられ、助けられながら本日に至ることが出来たと思っております。心より深く感謝させていただきます。

最後になってしまいますが、これまでの人生で私を支え続け、最も長く私のことを見守ってくださった家族にこの場を借りて心より感謝の意を述べさせて頂ければと思います。

---

参考文献

- [1]. 粉原直人, 上野道雄, 藤原敏文, 辻本勝, 佐々木紀幸:自動車運搬船及び大型油槽船の実船計測による速力低下計算法の検証, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 12, pp. 25-31, 2010.
- [2]. 海上技術安全研究所: 「海の 10 モードプロジェクト」, Available at: <  
[http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid\\_system\\_design/actual\\_sea\\_performance/umi-10/index\\_j.html](http://www.nmri.go.jp/institutes/fluid_system_design/actual_sea_performance/umi-10/index_j.html)>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [3]. 粉原直人: 実運航性能シミュレータ VESTA の開発, 海技研ニュース船と海のサイエンス, pp. 10-12, 2013.
- [4]. 気象庁: 船舶気象観測指針, 改訂第 5 版, pp. 36, 1994.
- [5]. 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.
- [6]. 日本造船研究協会: SR235 経年劣化に伴う機関性能ライフサイクルの研究 成果報告書, 1999.
- [7]. 亀山道弘, 小島隆志, 今井祥子, 柴田俊明, 上田浩一, 桐谷伸夫, 菅澤忍: 船体防汚塗料による生物付着防止効果の計測手法に関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 12 巻, 第 1 号, 2012.
- [8]. 安藤英幸: 環境負荷低減のための運航モニタリング, 計測と制御, 第 50 巻, 第 6 号, pp. 398-404, 2011.
- [9]. 堀内主計: 省エネ推進プラント-計画と実航行データ比較, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 46, No. 1, pp. 52-55, 2011.
- [10]. 株式会社 MTI, 柳田徹朗: 「ビックデータを活用したコンテナ船の船型最適化検討とその評価」, Available at: <  
[https://www.monohakobi.com/ja/wp-content/uploads/2015/11/pdf-mtf2015-04\\_yanagida.pdf](https://www.monohakobi.com/ja/wp-content/uploads/2015/11/pdf-mtf2015-04_yanagida.pdf)>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [11]. Markus Lehne, Christian Norden, Dr. Stephan Wurst, Rolf Nagel: Life Cycle performance assessment-method and tool for decision makers, Proc. of the 17th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, Vol.2, pp.181-190, 2015.10.

- 
- [12]. JOULES HOMEPAGE, Available at: < <http://www.joules-project.eu/> >, Accessed on Jan. 19th, 2016.
- [13]. James J. Winebrake, James J. Corbett, and Patrick E. Meyer: Energy use and emissions from marine vessels: a total fuel life cycle approach, *Journal of the Air & Waste Management Association* Vol.57, Issue 1, pp.102-110, 2007.
- [14]. Blanco-Davis, Eduardo, Francisco del Castillo, and Peilin Zhou: Fouling release coating application as an environmentally efficient retrofit: a case study of a ferry-type ship, *The International Journal of Life Cycle Assessment* Vol.19, Issue 10, pp.1705-1715, 2014.10.
- [15]. Kazuo Hiekata, Taiga Mitsuyuki, Hiroyuki Yamato, Kyohei Koyama, Shinnosuke Wanaka, Tomoki Saito and Bryan Moser. A Ship Design Evaluation Method to Maximize Operational Value under Uncertainty, *Proc. of the 12th International Marine Design Conference*, Vol.2, pp.287-295, 2015.6.
- [16]. 佐々木紀幸, 辻本勝, 黒田麻利子, 粉原直人, 一ノ瀬康雄, 臼井謙彰, 上野道雄, 藤原敏文, 星野邦弘, 川並康剛, 大松重雄, 柴田和也: 海の 10 モード指標の開発, *海上技術安全研究所報告*, Vol. 9, No. 4, pp. 219-264, 2010.
- [17]. 谷澤克治, 上野道雄, 田口晴邦, 藤原敏文, 宮崎英樹, 沢田博史, 塚田吉昭: 実海域再現水槽, *海上技術安全研究所報告*, Vol. 10, No. 4, pp.343-382, 2011.
- [18]. 藤井斉, 高橋雄: 肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究, *日本造船学会論文集*, No. 137, p. 132-137, 1975.
- [19]. 日本船舶技術研究協会: 大型低速超肥大船の実海域運航性能推定法の確立成果概要報告書, 2011, 3.
- [20]. 藤原敏文, 上野道雄, 二村正: 船体に働く風圧力の推定, *日本造船学会論文集*, No. 183, pp. 77-90, 1998.
- [21]. Ishii, E, Kobayashi, E, Mizunoe, T, Maki, A: Proposal of new-generation route optimization technique for an oceangoing vessel, *Proc. of the OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pp.1-6, 2010.
-

- 
- [22]. 宮本雅史: 実海域中推進性能の推定と評価 –汚損・経年、海象影響の検証と評価–, 日本船舶海洋工学会論文集, No.6, pp.205-214, 2007.
- [23]. 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.
- [24]. Stewart C. Myers: Determinants of Corporate Borrowing, *Journal of Financial Economics*, Vol. 5, No. 2, pp.147-175, 1977.
- [25]. 安達毅, 茂木源人, 足達哲男: 改良 SSA 法による多段階投資からなる資源開発プロジェクトのリアルオプション分析, *Journal of MMIJ*, Vol. 124, No. 9, pp. 576-582, 2008.
- [26]. Helen B. Bendall, Alan F. Stent: Ship Investment under Uncertainty: Valuing a Real Option on the Maximum of Several Strategies, *Journal of Maritime Economics & Logistics*, Vol. 7, No. 1, pp. 19-35, 2005.
- [27]. 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⑩「船舶性能設計」, 成山堂書店, 2013.
- [28]. 小山恭平: 市場変動に対応した就航中の改修が可能な船舶設計の評価に関する研究, 東京大学工学部システム創成学科, 卒業論文, 2015.
- [29]. 前原二郎, 高崎講二. ディレーティングの考え方とその方法, *日本造船学会誌* (638), pp.417-422, 1982.
- [30]. 三菱重工業株式会社: 「UE 型ディーゼルエンジン ラインアップ」, Available at < <https://www.mhi.co.jp/products/expand/mitsubishi-ue-diesel-engine-line-up.html> >, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [31]. Barnitsas, Michael M., Ray D., Kinley P.: KT, KQ and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers. Technical Reports of Department of Naval Architecture and Marine Engineering, The University of Michigan, 1981.
- [32]. National Oceanic and Atmospheric Administration, Available at < <http://www.noaa.gov/> >, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [33]. Global Wave Statistics, Available at < <http://www.globalwavestatisticsonline.com/> >, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [34]. 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.
-



- 
- [35]. New Worldwide Tanker Nominal Freight Scale, Available at <  
<https://www.worldscale.co.uk/>>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [36]. David G. Luenberger: 「金融工学入門」, 日本経済新聞社 2002.
- [37]. National Centers for Environmental Prediction, Available at <  
<http://www.cdc.noaa.gov/>>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [38]. James J. Corbett, Paul S. Fischbeck: Commercial Marine Emissions and Life-Cycle Analysis of Retrofit Controls in a Changing Science and Policy Environment, Naval Engineers Journal, Vol. 114, pp. 93-106, 2002.
- [39]. 株式会社商船三井, 「アニュアルレポート 2011 年版」, Available at: <  
[http://www.mol.co.jp/ir-j/data\\_j/pdf/annual/ar-j2011.pdf](http://www.mol.co.jp/ir-j/data_j/pdf/annual/ar-j2011.pdf)>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [40]. U.S. Energy Information Administration, 「Petroleum & Other Liquids Spot Prices」, Available at <  
[http://www.eia.gov/dnav/pet/pet\\_pri\\_spt\\_s1\\_d.htm](http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_pri_spt_s1_d.htm)>, Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [41]. 株式会社商船三井, 「マーケットデータ(2015 年 12 月)」, Available at: <  
[http://www.mol.co.jp/ir-j/data\\_j/pdf/market1512.pdf](http://www.mol.co.jp/ir-j/data_j/pdf/market1512.pdf)>. Accessed on: Jan. 19th, 2016.
- [42]. McQuilling Services, LLC, No. 21 – 2013 Worldscale Flat Rate Forecast, Tankers, 2012.
-

## Appendix

U.S. Energy Information Administration より得られた原油価格月次過去データ及び商船三井マーケットデータに掲載されていたアラビア湾・日本間における運賃率グラフ、McQuilling Partners. Inc.より得た基準運賃グラフから読み取り、本研究で過去データとして用いたデータを次の表 A-1、表 A-2、表 A-3 に示す。

表 A-1 原油価格月次過去データ (単位: [USD/barrel] ) [40]

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2004 年	34.31	34.69	36.74	36.75	40.28	38.03	40.78	44.9	45.94	53.28	48.47	43.15
2005 年	46.84	48.15	54.19	52.98	49.83	56.35	59.0	64.99	65.59	62.26	58.32	59.41
2006 年	65.49	61.63	62.69	69.44	70.84	70.95	74.41	73.04	63.8	58.89	59.08	61.96
2007 年	54.51	59.28	60.44	63.98	63.46	67.49	74.12	72.36	79.92	85.8	94.77	91.69
2008 年	92.97	95.39	105.5	112.6	125.4	133.9	133.4	116.7	104.1	76.61	57.31	41.12
2009 年	41.71	39.09	47.94	49.65	59.03	69.64	64.15	71.05	69.41	75.72	77.99	74.47
2010 年	78.33	76.39	81.2	84.29	73.74	75.34	76.32	76.6	75.24	81.89	84.25	89.15
2011 年	89.17	88.58	102.9	109.5	100.9	96.26	97.3	86.33	85.52	86.32	97.16	98.56
2012 年	100.3	102.2	106.2	103.3	94.66	82.3	87.9	94.13	94.51	89.49	86.53	87.86
2013 年	94.76	95.31	92.94	92.02	94.51	95.77	104.7	106.6	106.3	100.6	93.86	97.63
2014 年	94.62	100.8	100.8	102.1	102.2	105.8	103.6	96.54	93.21	84.4	75.79	59.29
2015 年	47.22	50.58	47.82	54.45	59.27	59.82	50.9	42.87	45.48	46.22	42.39	---

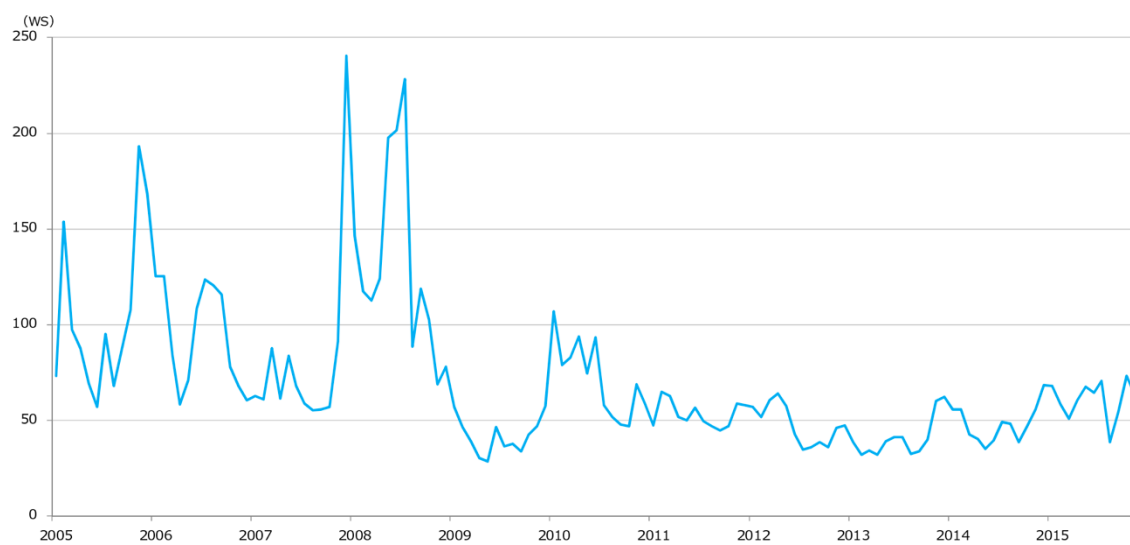


図 A-1 運賃率抽出グラフ[41]

表 A-2 運賃率月次過去データ (単位: [%]) [41]

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
<b>2005 年</b>	70.0	122.7	125.5	92.2	76.2	64.5	74.7	79.5	76.2	97.6	141.7	183.9
<b>2006 年</b>	149.6	126.1	105.7	76.5	65.8	85.3	113.4	123.0	119.4	103.9	74.7	65.2
<b>2007 年</b>	62.0	63.0	67.1	81.2	69.8	81.1	64.0	57.6	56.1	56.4	70.6	129.6
<b>2008 年</b>	240.8	137.6	116.9	114.5	132.8	198.3	203.3	227.6	98.7	115.9	100.5	70.0
<b>2009 年</b>	74.4	56.7	45.2	39.7	31.5	32.7	47.6	37.4	38.8	35.3	43.3	48.5
<b>2010 年</b>	62.7	104.5	79.2	83.2	94.7	74.7	94.1	61.6	53.4	48.8	47.3	69.8
<b>2011 年</b>	59.6	47.9	63.1	64.0	53.2	51.1	56.9	51.2	48.2	46.1	47.0	58.2
<b>2012 年</b>	58.5	57.9	52.5	60.1	64.2	59.2	47.9	37.0	36.0	38.5	37.9	45.5
<b>2013 年</b>	47.3	41.7	35.4	34.4	33.0	38.0	41.8	42.4	34.8	34.1	38.2	51.9
<b>2014 年</b>	62.5	58.2	56.7	47.6	42.1	38.2	38.9	46.5	48.8	43.9	43.3	53.2
<b>2015 年</b>	61.9	69.2	64.9	54.3	57.3	63.7	66.1	67.4	54.7	48.8	62.5	68.3

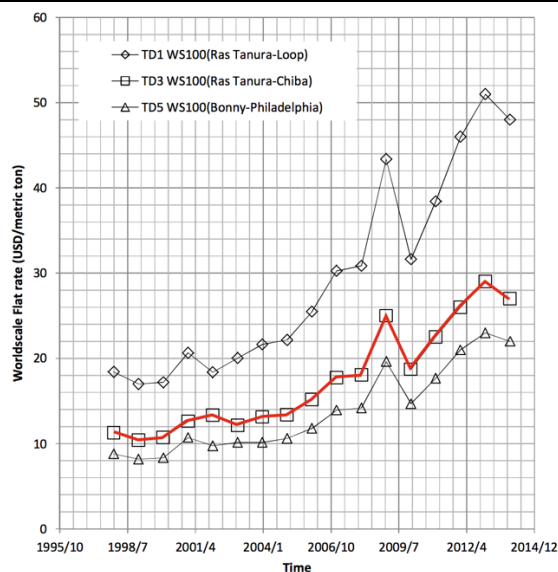


図 A-2 基準運賃抽出グラフ[42]

表 A-3 基準運賃月次過去データ (単位: [USD/ton]) [42]

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1999 年	10.42	10.39	10.51	10.45	10.56	10.51	10.73	10.65	10.73	10.68	10.73	10.82
2000 年	10.96	11.42	11.34	11.62	11.71	11.88	11.94	12.05	12.37	12.40	12.57	12.68
2001 年	12.74	12.74	12.91	13.08	12.97	13.02	13.20	13.20	13.28	13.25	13.20	13.02
2002 年	13.08	12.91	12.88	12.74	12.68	12.45	12.28	12.28	12.17	12.17	12.37	12.34
2003 年	12.57	12.62	12.85	12.88	12.85	13.14	13.08	13.23	13.31	13.08	13.14	13.43
2004 年	13.25	13.25	13.34	13.23	13.34	13.20	13.31	13.40	13.71	13.71	14.06	13.97
2005 年	14.34	14.34	14.40	14.74	14.97	15.03	15.09	15.31	15.66	15.83	16.12	16.12
2006 年	16.43	16.75	17.03	17.43	17.60	17.72	17.78	17.72	17.86	17.92	17.89	17.83
2007 年	17.89	17.83	18.01	17.89	17.98	18.01	18.75	18.98	19.90	20.52	21.44	21.38
2008 年	22.13	22.59	23.56	24.07	24.30	24.25	23.85	23.62	23.10	22.24	21.90	21.61
2009 年	20.70	20.18	19.49	19.24	18.75	19.09	19.44	19.78	20.07	20.47	20.75	21.24
2010 年	21.44	21.78	22.07	22.47	23.27	23.10	23.39	23.73	24.02	24.30	24.59	24.93
2011 年	25.22	25.56	25.85	26.08	26.36	26.59	26.88	27.40	27.68	28.00	28.31	28.54
2012 年	28.71	28.83	28.94	28.71	28.31	28.31	28.25	27.97	27.80	27.60	27.62	27.22
2013 年	27.05	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

本研究において提案手法を実現するために使用した評価環境について、表 A-4 に示す。

表 A-4 評価環境

項目	仕様
CPU	Intel® Xeon® CPU E5-2687W v2 @ 3.40GHz
コア数	16
メモリ	128 [GB]
OS	CentOS release 6.7
カーネル	Linux 2.6.32
使用言語	Python 2.7.8

計算時間については、モンテカルロシミュレーション 1 回にシングルスレッド計算で約 10 分必要となる。そのため、表 A-4 に示した評価環境においてマルチスレッド計算を用いると、モンテカルロシミュレーション 10,000 回実行するのに約 4 日必要となる。