

# 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

修了年月 2016年3月 人間環境学専攻  
47146703 齋藤 智輝 指導教員 稗方 和夫 准教授

In shipbuilding, the design objective is based on the performance in terms of technological aspects at given operational profile. This research proposes a methodology to improve Life Cycle Value, LCV, of the ship by introducing the concept of Real Option approach. This method considers the performance of a vessel based on ship theory, external disturbance, repairs and retrofits in a dockyard to obtain the optimized performance during the Life Cycle period of a ship with Monte Carlo simulation considering market fluctuation and real-sea environment. This method shows the difference in LCV between the ship design with multiple options and the ship design with no option. The case studies assume that a VLCC and multiple routes between Arabian Gulf and Asia, Arabian Gulf and South America and shows the validity that the flexible design can adopt to the uncertainty occurred by market and route change.

Key words: Real Option, Ship Design, Ship Performance Evaluation, Monte Carlo Simulation

## 1 緒言

船舶を設計・運用する際には、船舶のライフサイクル全体における利益を最大化することが重要となる。原油価格の変動は、船舶の運用コストの大部分を占める燃料費に大きく影響を与える。そのため、市場変動リスクを考慮することが必要不可欠であり、市場状況によって船舶のライフサイクル期間価値は負になる場合も Markus による研究<sup>1)</sup>によって示されている。

また、実際に船舶を運用する船会社などでは、船舶運用中における市場変動リスクへの対応や、やむを得ない航路変更などによるリスクに対応するため、船舶の運用途中での改修が考えられている。また、Page による研究<sup>2)</sup>において、リアルオプションを用いることで船舶の価値を高めるような研究も行われている。

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。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。

## 2 提案手法

### 2.1 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の概要を図1に示す。

提案手法では、船舶構成部品である船型・主機・プロペラの組み合わせからなる船舶の初期設計と複数のオプション及びそれらのオプションに必要な初期投資費用と船舶改修費用から定義される船舶設計案を用いる。また、船舶構成部品のモデル情報から推進性能のモデル化を行う。さらに、航路変更及び実海域影響を考慮するための航路モデルと経年劣化モデル、市場による不確実性を考慮するための市場モデルを構築する。以上で定義したモデルを用いて実際の航路における運航シミュレーションを実行することでライフサイクル期間における船舶設計案の評価を行う。

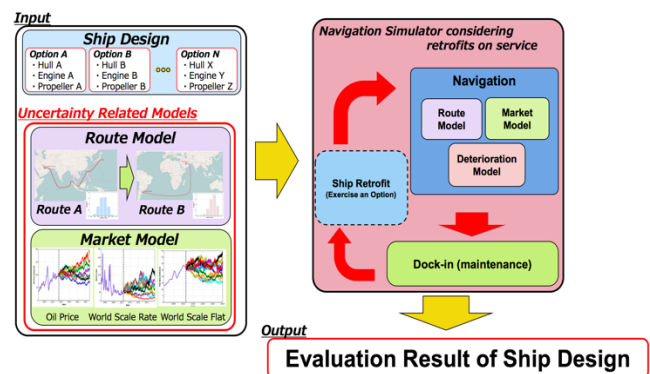


Fig.1 Overview of proposed method

### 2.2 基本となる船舶設計案

本手法ではまず、基本となる船舶設計案として改修に関連するリアルオプション等を考慮しない初期設計について定義を行う。基本となる船舶設計案は図2に示す船型・エンジン・プロペラによって定義される初期設計によって定義される。船舶がある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、推進性能を算出する。

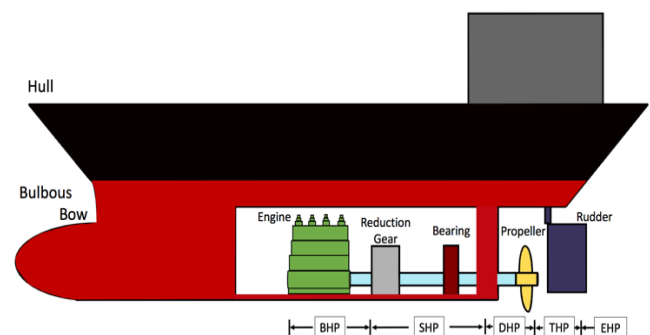


Fig.2 Ship components and the engine power

#### 2.2.1 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。

### 2.2.2 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。そのために、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。

### 2.2.3 プロペラ

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。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<sup>3)</sup>を用いることで、特定のプロペラ(the Wageningen B-Series Propellers)について式(1)と(2)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。

$$K_Q = K_{Q0} + K_{Q1}J + K_{Q2}J^2 \quad (1)$$

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

## 2.3 リアルオプションを導入した船舶設計案

ここで定義する船舶設計案は、図3に示すように初期設計と複数の改修オプションを持つ。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定義され、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。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、改修前後の設計の組み合わせ毎に設定する。

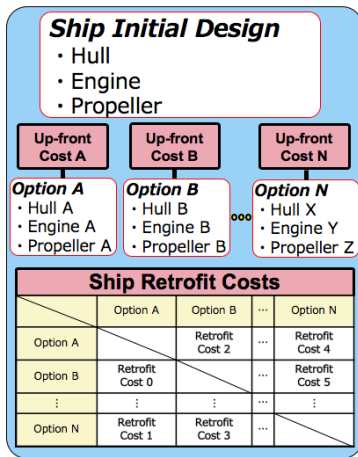


Fig.3 Ship design considering Real option

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なる。

## 2.4 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。

### 2.4.1 航路モデル

航路毎の運航状況の違い及び運行中の航路変更を考慮するために、本研究では航路モデルとして航路変更が行わ

れるルールと各航路における気象状態を定義する。航路変更決定ルールについては、確率モデルで定義することとし、気象状態については、ビューフォート風力階級の発現確率及び、各階級における船速低下率の定義を行った。これには、佐々木らの研究<sup>4)</sup>によって風力階級毎に定義された有義波高などの指標から気象影響を算出する。

### 2.4.2 市場モデル

本研究では、市場変動を考慮する際の指標として原油価格、対象航路における運賃基準WS、運賃率FRを用いる。具体的には、シミュレーション期間における各指標を過去データと二項格子モデルを用いて市場モデルを生成する。生成した市場モデルを用いて、原油価格を2015年12月から15年間分予測した例として、図4に予測した10シナリオを示す。

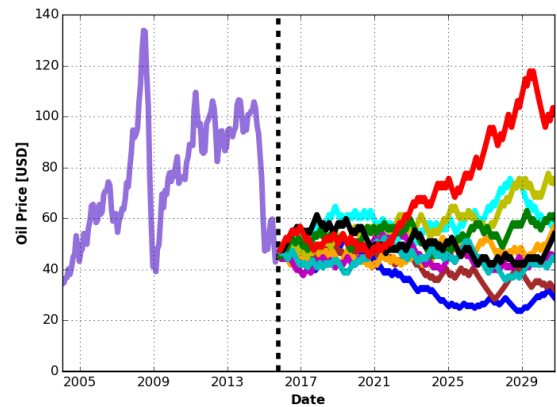


Fig.4 Predicted 10 scenarios of oil price

## 2.5 リアルオプション分析

本章で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ついて、リアルオプション分析を行うことで、各船舶設計案の価値を比較する。本節では、正味現在価値(Net Present Value, NPV)の導出と、改修オプションについての意志決定について説明する。

### 2.5.1 NPVの導出

基本的に1航海毎に発生するキャッシュフロー $CF_n$ 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。その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、NPVを算出する。次の式(3)~(5)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、ICRは収入のうち間接費に占める割合を表しており、運航シミュレータで用いる燃料費、固定費、港湾使用料を $C_{fuel}$ ,  $C_{fix}$ ,  $C_{port}$ で定義した。また、 $PV_n$ 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、 $r$ は月毎の割引率、 $t$ は就航を開始したときから現在までの月数である。

$$CF_n = (1 - ICR)I_n - C_{fuel} - C_{fix} - C_{port} \quad (3)$$

$$PV_n = CF_n / (1 + r)^t \quad (4)$$

$$NPV = \sum PV_k \quad (5)$$

### 2.5.2 船舶改修を行うかどうかの意志決定

リアルオプション分析を行う際に、船舶設計案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。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が、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や、航路変更状態を基にルールを構築することなどが考えられる。

2.6 構築した運航シミュレータ

本節では、構築した運航シミュレータによる処理について説明する。シミュレーションが開始されると、その時点における市場状況を考慮した上で 1 航海でのキャッシュフロー全体を最大化する船速を算出する。その後、導出された船速に対して、気象状態・経年劣化モデルの影響を考慮して実際の船速を導出する。このフローを 1 日単位で繰り返し、航海が終了した段階で運賃収入、燃料費、港湾使用費、人件費などの固定費から収入と支出の計上が行われる。

船舶の入渠時期については、1 航海が終了した段階の修理後期間によって入渠するかどうかを判断する。

以上の処理を、予め設定する船舶のライフサイクル期間が終了するまで行うことで、船舶設計案の価値を NPV の観点から算出する。また、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、船舶の経年劣化についても考える。経年劣化影響として、杉村の研究<sup>5)</sup>を参考に、船舶が船渠に入渠してから次に入渠するまでの間(Dock-to-Dock)での劣化、ライフサイクル全体で蓄積されていく劣化(Age Effect)の 2 つに分けて経年劣化モデルをシミュレータ内で定義する。

3 ケーススタディ

3.1 ケーススタディの設定

本ケーススタディでは、航路変更による気象変動を考慮するために、図 5 に示す航路 A(千葉-Arabia 間)及び航路 B(Arabia-Argentina 間)の 2 つの航路を用いる。また、これらの航路において運用される VLCC を想定して経済性評価を行った。ケーススタディを行う際に用いた基本パラメータは表 1 に示す。



Fig.5 Assumed routes for case study

Table 1 Basic parameters for the case study

	Value	Unit
Simulation time	10,000	times
Port Distance(Route A)	6,590	mile
Port Distance(Route B)	10,000	mile
Vessel's Life Cycle	15	years
Dock-in Interval	2	years
Retrofit Count limit	1	time

また、評価対象となる船舶設計案を生成するための船型は、波浪中抵抗増加を減少させるバルバスバウを持つ船型 A と持たない船型 B の 2 種類とする。そこで、軽荷(Ballast)及び満載(Full)状態について、船速 V、有効出力 EHP、波浪中抵抗増加 $R_{aw}$ に対するバルバスバウの特性を定義した。

エンジンについては、Web 上で公開されている仕様書に基づき 1 種類定義を行い、そのエンジンを基準として燃料消費率を変化させ、3 種類のエンジンを定義した。

プロペラについては、Barnitsas の論文による手法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、推進係数の値から 6 種類抽出することで用意した。

初期設計と複数の改修オプションの導出について、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、3 シナリオを用いる。具体的には、市場価格高騰時(high)、低迷時(low)、停滞時(stag)として設定を行った。

以上で定義した船舶構成部品及び、初期費用及び改修費用を部品毎に算出し、図 6 に示す船舶設計案を定義する。ここで、船舶改修費用については改修許容回数を 1 回のみとしたため、初期設計からの船舶改修費用のみを考慮して定義した。

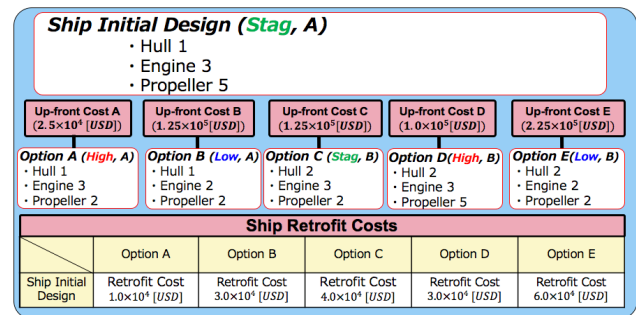


Fig.6 Ship design for the case study

また、船舶が船渠に入渠した段階で改修を行うかどうかの意志決定は、原油価格の変動傾向を基に行う。本ケーススタディでは、原油価格が 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、もしくは原油価格に 30%以上の変動が観測された段階で、改修オプションのうち、抽出された市場状況に最適なものを選出される。

航路モデルについては、航路変更が行われるルールとして、2 年ごとに一樣確率を設定した。航路毎の気象状態については、NCEP (National Centers for Environmental Prediction)の観測した月次平均風速の過去データを用いて想定航路における海象状態の解析を行った。観測データは 1995 年 1 月~2015 年 10 月までの約 20 年間とした。対象とした期間における航路毎の月次平均風速のヒストグラムを図 7 に示す。

以上の解析から想定航路における海象が表され、各風力階級と平均風速の関係より海象をビューフォート風力階級の発現確率として定義した。定義した風力階級によって発生する波が推進性能に及ぼす影響は日本船舶技術研究協会によって行われた水槽実験の結果<sup>6)</sup>を基に定義した。

以上で行ったケーススタディの設定を基に、基本的な船舶設計案(Design A)とリアルオプションを導入した船舶設計案(Design B)をシミュレーションにより評価する。

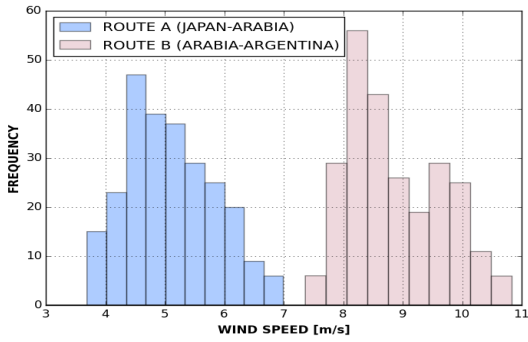


Fig.7 Monthly average wind speed on each route

### 3.2 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を行った結果を表3に示す。ここで、オプション有効回数は船舶改修を行うことで船舶設計の価値を向上させた回数を示す。

Table 3 Case Study Result

	Design A	Design B
Avg. NPV [USD]	$3.065 \times 10^8$	$3.180 \times 10^8$
NPV Avg. Delta [USD]	$1.153 \times 10^7$	
NPV Max. Delta [USD]	$1.688 \times 10^8$	
Option Exercise Number	10,000	
Option Effective Number	9,752	

この結果から、市場変動及び航路変更両方の不確実性を考慮した場合でも、提案するリアルオプションを導入した船舶設計案を用いることで船舶設計案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8に示す。ヒストグラムにおいても、97%以上の確率でNPV差分の値が正の方向に偏ることが観測されたことから、提案手法の有用性が確認できる。

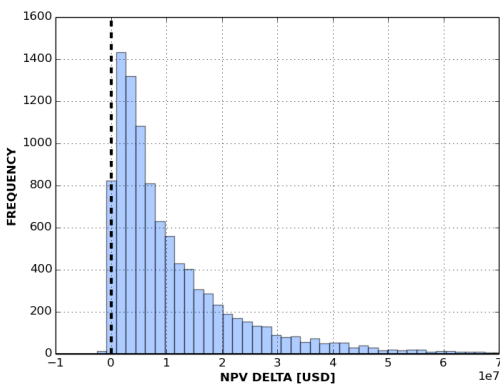


Fig.8 Monthly average wind speed on each route

## 4 考察

ケーススタディでは、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った。ケーススタディにおけるNPV平均差分の値を比較すると、市場変動と航路変更の不確実性に対応できていることが確認できる。また、モンテカルロ法を用いたことで、提案した船舶設計案が市場変動と航路変更に対して頑健に対応できていることが示されたといえる。

また本研究では、複数の船舶改修オプションを用意する際に、市場停滞時、高騰時、低迷時を模擬した市場シナリオを用いることで最適船舶構成を抽出した。しかし、各船舶構成部品について詳細に分析を行うことで、さらに船舶価値を向上させる船舶設計案を提案出来ると考えられる。

## 5 結論

本研究では、市場変動と航路変更による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構築した。これら2つのモデルより、船舶改修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。

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・比較した。その結果、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。

今後、船舶の設計段階において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、省エネ運航により運航条件が厳しくなったときの船舶運用に対して有効な手法と考えられる。また同様に、パナマ運河の拡張などに伴う対象船舶の急な航路変更による海象の変化に対しても非常に有用な手法であると考えられる。

## 文献

- 1) Markus Lehne et al., 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.
- 2) Jonathan Page, Flexibility in early stage design of U.S. navy ships: an analysis of options, Journal of Ship Production and Design, Vol. 28, No. 3, pp. 128-133, 2012.
- 3) Barnitsas, M. M., D. Ray, and P. Kinley. KT, KQ and efficiency curves for the Wageningen B-series propellers, University of Michigan, 1981.
- 4) 佐々木紀幸, et al. 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.
- 5) 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.
- 6) 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.