

博士論文

船舶需要予測用 SD モデルと
その活用に関する研究

(A Study on the System Dynamics Model and
its Application for Demand Forecasting of Ships)

平成 29 年 3 月

広島大学 大学院工学研究科

輸送・環境システム専攻

和田 祐次郎

目次

第1章 緒言

1.1	研究背景	1
1.1.1	海運・造船市場の推移	1
1.1.2	海運・造船市場のサイクル	3
1.2	研究目的	4
1.3	論文の構成	5
	参考文献	6

第2章 海運・造船市場の特徴と既往研究のレビュー

2.1	海運・造船市場の概要とその特徴	7
2.1.1	海運・造船市場の概要	7
2.1.2	海運・造船市場の特徴	8
2.2	既往研究のレビュー	9
2.2.1	既往研究の概要とその特徴	9
2.2.2	既往研究の需要予測モデルの特徴	11
2.2.3	既往研究の課題と本研究の位置付け	13
	参考文献	15

第3章 本研究の基本方針

3.1	データ処理基盤の進歩とデータ整備	16
3.2	船舶需要予測モデルへの要求事項	16
3.3	一般的な需要予測手法	19
3.4	システムダイナミクスとは	20
3.4.1	システムダイナミクスの概要	20
3.4.2	システムダイナミクスと計算機の利用	21
3.4.3	システムダイナミクスの考え方	21
3.4.4	システムダイナミクスの利用例	23

3.4.5 SD モデル作成の流れ.....	24
参考文献.....	26

第4章 モデル開発

4.1 船舶需要予測用 SD モデルの概要.....	28
4.1.1 対象船舶と対象貨物.....	28
4.1.2 モデル構築に利用するデータ.....	28
4.1.3 船舶需要予測用 SD モデルの基本構成.....	31
4.2 貨物輸送量予測モデル.....	32
4.3 発注量予測モデル.....	35
4.3.1 発注量予測モデルの概要.....	35
4.3.2 船舶航海距離による発注量の算出.....	36
4.3.3 船価による発注量の補正.....	37
4.3.4 手持工事量による発注量の補正.....	39
4.4 建造モデル.....	41
4.4.1 手持工事量と竣工量の関係.....	41
4.4.2 建造モデルの概要.....	42
4.5 船価予測モデル.....	45
4.5.1 船価予測モデルの基本的な考え方.....	45
4.5.2 船価予測モデルの概要.....	46
4.6 廃船モデル.....	48
4.6.1 廃船量と発注量の関係.....	48
4.6.2 船舶航海距離による廃船量の算出.....	49
4.6.3 発注量による廃船量の補正.....	50
4.7 モデルの適合性の検証.....	52
4.7.1 Sub-model での検証.....	52
4.7.2 全体モデルでの検証.....	54
4.7.3 本研究の需要予測モデルの特徴.....	57
(1) マクロ的な視点によるモデル構築.....	57
(2) 月別データの利用によるモデルの詳細化.....	58
(3) 市場の短期的な変動の影響を考慮.....	59
4.7.4 船舶需要予測用 SD モデルの性能検証.....	59
4.8 船舶サイズ別の需要予測.....	63
4.8.1 船舶サイズ別の需要予測の基本方針.....	63

4.8.2	船舶サイズ別需要予測モデルの開発	65
(1)	発注量配分モデル	65
(2)	船舶サイズ別の建造モデル	66
(3)	船舶サイズ別の廃船モデル	68
4.8.3	船舶サイズ別需要予測モデルの適合性の検証	70
4.9	将来シミュレーション	74
4.9.1	GDP 成長率の影響	74
	参考文献	77

第5章 不確実性を考慮した船舶の需要予測

5.1	船舶の需要予測における不確実性	78
5.1.1	不確実性を考慮する重要性	78
5.1.2	船舶需要予測用 SD モデルにおける不確実性	79
(1)	SD モデル内部の不確実性	79
(2)	SD モデル外部の不確実性	80
5.1.3	本章の目的	80
5.2	不確実性を考慮した需要予測に関する既往研究	81
5.2.1	不確実性を考慮した需要予測	81
5.2.2	本研究の位置付け	81
5.3	不確実性を考慮した船舶需要予測の基本方針	85
5.4	SD モデル外部の不確実性の考慮方法	87
5.5	SD モデル内部の不確実性の考慮方法	90
5.5.1	SD モデル内部の不確実性の解析	90
(1)	SD モデル内部の不確実性の考え方	90
(2)	不確実性の解析の流れ	91
5.5.2	貨物輸送量予測モデルの不確実性	92
5.5.3	発注量予測モデルの不確実性	94
(1)	発注量予測モデルの不確実性	94
(2)	手持工事量による発注量の補正の影響	97
(3)	船価による発注量の補正の影響	97
5.5.4	建造モデルの不確実性	99
5.5.5	船価予測モデルの不確実性	102
5.5.6	廃船モデルの不確実性	104
(1)	廃船モデルの不確実性	104

(2) 発注量による廃船量の補正の影響.....	106
5.6 不確実性を考慮することの効果.....	107
5.6.1 SD モデル内部の不確実性の効果.....	107
(1) 過去シミュレーションによる効果検証.....	108
(2) 不確実性が予測結果に与える影響の考察.....	112
5.6.2 SD モデル外部の不確実性の効果.....	115
(1) 過去シミュレーションによる効果検証.....	115
(2) 不確実性を考慮した船舶需要予測用 SD モデルの性能検証.....	118
(3) 将来シミュレーションによる効果検証.....	121
参考文献.....	123

第6章 船舶需要予測用SDモデルの活用

6.1 海運・造船市場の概況.....	125
6.1.1 現在の海運・造船市場の概況.....	125
6.1.2 船舶需要予測に基づく造船業の目標設定.....	125
6.1.3 SD による政策立案.....	126
6.1.4 本章の目的.....	126
6.2 最適化問題としてのモデル化.....	127
6.2.1 国際条約と造船市場の関係.....	127
6.2.2 船舶の建造能力と船価の関係.....	129
6.2.3 対象とする戦略.....	130
6.2.4 二段階最適化問題としてのモデル化.....	131
6.2.5 戦略が船舶需要予測用 SD モデルに与える影響.....	133
6.2.6 最適化手法 (SA の概要).....	135
6.3 建造能力調整戦略の概要.....	139
6.3.1 上位問題の定式化 (建造能力調整戦略).....	139
6.3.2 設計案の表現と近傍解の定義.....	142
6.3.3 シミュレーションによる知見の獲得.....	143
(1) 過去シミュレーションによる知見の獲得.....	143
(2) 制約条件を追加した場合の最適化.....	146
(3) 将来シミュレーションによる知見の獲得.....	148
6.4 施策による造船市場の活性化戦略.....	150
6.4.1 上位問題の定式化 (施策による造船市場の活性化戦略).....	150
6.4.2 設計案の表現と近傍解の定義.....	153

6.4.3 シミュレーションによる知見の獲得	156
6.5 船舶需要予測用 SD モデルの活用の課題	159
6.5.1 目的関数・制約条件の見直し	159
6.5.2 海運市場への影響の考慮	160
参考文献	162

第7章 結言

7.1 結論	164
7.2 今後の課題	167
7.3 今後の展望	168

謝辞

謝辞	169
----------	-----

図表一覧

図表一覧	170
------------	-----

第1章 緒言

1.1 研究背景

1.1.1 海運・造船市場の推移

現在、日本の造船業界は不況の時代にある。この不況はリーマンショック以前の過剰発注と、それによる船舶の供給過剰が原因となっている。実際に船舶の発注量推移を Fig.1.1.1^①に、竣工量の推移を Fig.1.1.2^②に示す。Fig.1.1.1 を見ると、2002 年から 2008 年の間は、中国の発展に伴う海上荷動き量の活発化により、船舶の受注量が急激に増加した。それにより造船市場はかつてない好況を呈した。これに伴い世界の船舶の建造能力も大きく向上し、大量の船舶が建造された(Fig.1.1.2)。特に、中国・韓国では大幅に建造能力を拡張していることが分かる。文献^③によれば 2006 年と 2009 年の船舶の建造能力を比較すると日本はほとんど拡張していないのに対し、中国は約 3 倍、韓国は 1.5 倍拡張したと報告されている。このように船舶の発注量の増加と共に、中国、韓国は船舶の建造能力を大幅に増強させた。

一方で 2009 年以降は、リーマンショックの影響と 2005 年-2008 年に発注された船舶が海運市場に投入された影響により、新造船の発注量は大きく減少した。2009 年-2015 年は、①船価の下落によって発生した投機的な需要の増加(Fig.1.1.1 と Fig.1.1.3)、②国際ルール適用前の駆け込み需要（騒音規制、NO_x・SO_x の規制等）^③により、発注量は大きく増減している。

しかし 2016 年現在、Fig.1.1.1 と Fig.1.1.3 に示すように船舶の発注量は激減、船価も大きく下落し、低水準な状況となっている。そのため造船市場は深刻な不況に陥っており、造船会社は極めて厳しい国際競争に晒されている。中国・韓国では建造能力を大きく拡張した影響により、造船所が軒並み倒産している。日本は、建造能力の拡張をほとんど実施しなかったため、倒産した造船会社はほとんどないものの、十分な手持工事量を確保できていない状況である。そのため日本の各造船会社は企業統合、事業撤退を検討し、業界再編を余儀なくされている。そして今後は、船腹量を構成する船齢の影響、シップリサイクル条約の影響による解撤の鈍化の影響等により、船腹量過多の状況が継続すると考えられ、海運・造船市場は深刻な不況が続くと予測されている。

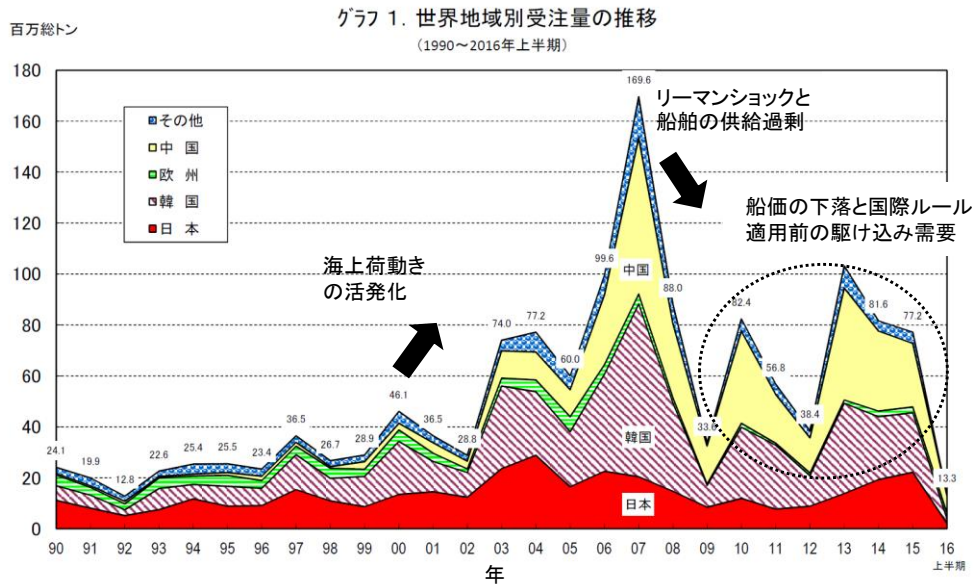


Fig.1.1.1 世界地域別の船舶受注量の推移 (日本造船工業会 2016年) (1)

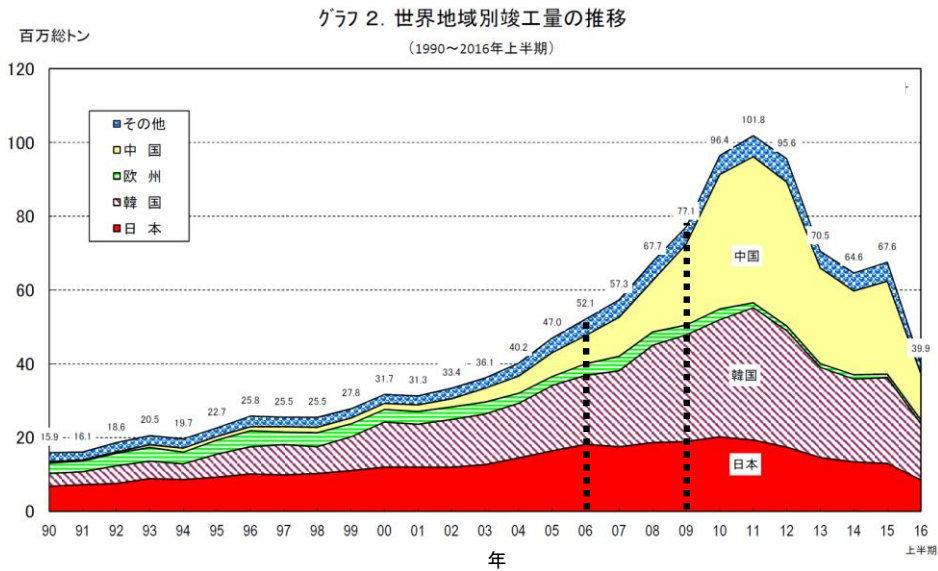


Fig.1.1.2 世界地域別の船舶竣工量の推移 (日本造船工業会 2016年) (1)

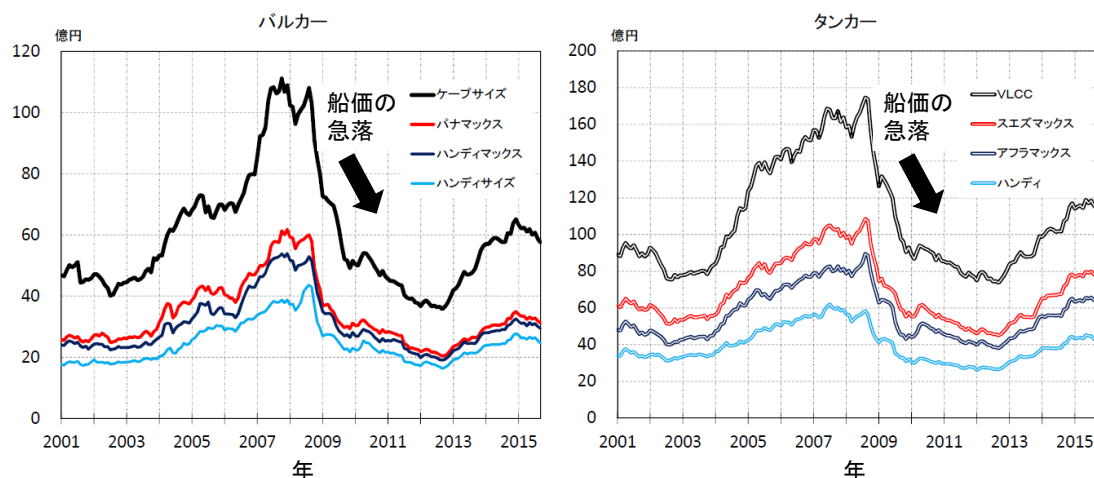


Fig.1.1.3 船価の推移 (日本造船工業会 2016年) (1)

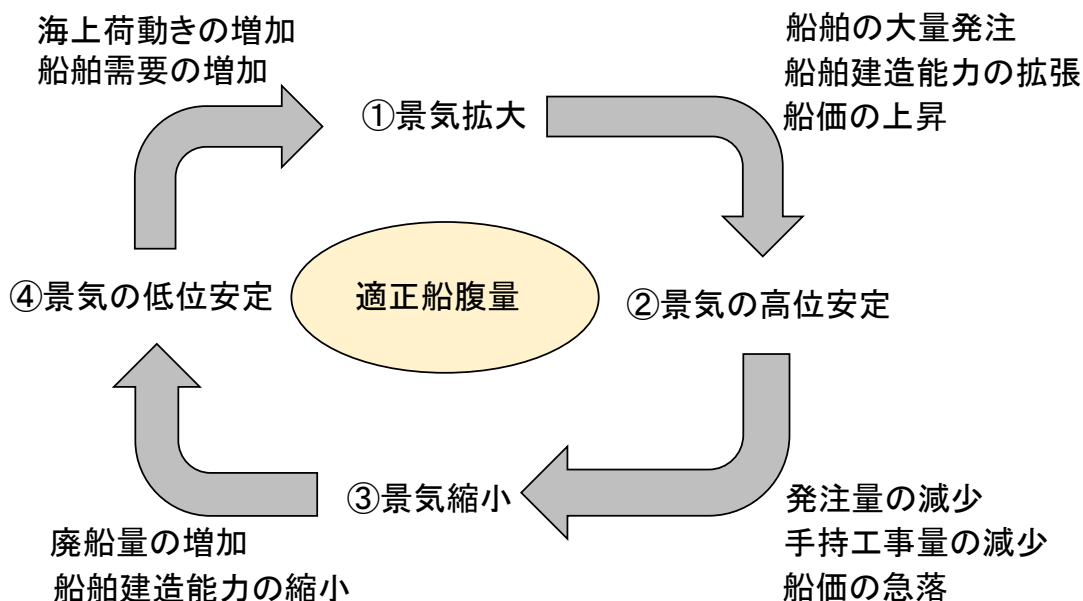
1.1.2 海運・造船市場のサイクル

造船市場は上述のような好不況の大きなサイクルを繰り返しており、日本の造船業界は造船不況を過去に3回経験している(第二次オイルショック(1978年)、プラザ合意の翌年(1986年)、韓国の大型設備投資による船価の下落(1999年)) (4)。

Fig1.1.4は海運・造船市場の好不況のサイクルを示した図である。海運・造船市場のサイクルの特徴を以下に整理する。

- (1) 「①景気拡大」によって海上荷動きの活発化、船舶の需要が増加する。
- (2) その後、船舶の大量発注が発生する。そして船価は上昇、造船所は建造能力を拡張し、造船業は「②景気の高位安定状態」となる。
- (3) 大量発注された船舶が船腹量に追加されると、船腹量過多の状態となり発注量は減少し、船価は急落する。そして、時間経過と共に造船所の手持工事量は減少し、「③景気縮小」に向かう。
- (4) 景気の縮小と共に廃船量は増加、造船所は倒産し始め、建造能力は縮小に向かう。その後、造船業界は「④景気の低位安定状態」となる。そして、船腹量の過多が解消された後、再び海運・造船市場は景気拡大に向かう。

このようなサイクルは「市場内部に様々な時間遅れが存在する」、「建造された船舶が海運・造船市場に長い期間残り続ける」という市場の特性により発生する。船舶の発注から建造にはある程度の期間を必要とする。そのため、市場の状況や様々な予測に合わせて船舶を発注しても、それが利用できるまでには、ある程度の期間が必要となる。しかし、その期間も市場は刻一刻と様々な要因を受けて変化し、発注した船舶が利用できる頃には、

Fig.1.1.4 造船市場のサイクル（海事産業研究所 研究資料⁽⁵⁾）

「船舶を発注した時期と市況が大きく異なる」ということが発生する。そのため、海運・造船市場は過剰発注が起きやすくなる。また、船舶の平均的な解撤船齢は25~30年である。そのため、一度大量発注が発生するとその期間に発注された船舶は25年~30年市場に残り続けるため、市場は船腹過剰状態となり深刻な不況が発生し、しばらくの間それが継続する。

上述のようなサイクルを繰り返しているため、造船業界は構造不況業種と呼ばれる⁽⁴⁾。このようなサイクルを繰り返す市場において、造船業が持続的に発展するためには、船舶需要を予測するとともに、それを基に経営戦略を立案することが重要である。

1.2 研究目的

上述の通り、変動が激しい市場で造船業が持続的に発展するためには、船舶需要を予測するとともに、それを基に経営戦略を立案することが重要である。そして、これまでも海運・造船会社の継続的な発展を支援するため、様々な研究が実施されている（詳細は第2章で述べる）。しかし既往研究では、造船・海運市場の一部に着目した研究がほとんどであるため、それらを用いて高度な意思決定を行うことは困難である。海運・造船市場全体をモデル化した研究は1970年代に実施されているものの、研究が実施された年代は古く、研究蓄積も未だに少ない状況である。そのため、現在の海運・造船市場の予測に適用するには不十分である。また、現在は海運・造船市場に関する多種多様なデータを容易に獲得できるため、これまでよりも精緻な予測モデルの構築が期待できる（詳細は第3章で述べ

る).

そこで本研究では、種々の要因が相互に影響する複雑システムのモデル化や分析に有効なSD(System Dynamics)の手法を用いて、船舶の需要予測のためのシミュレーションシステムを開発する。そして、各種シミュレーションを実施することで開発したシステムの有効性・妥当性を示す。

具体的には、以下の4つを本研究の目的とする。

- ・船舶需要予測における要求項目の整理
- ・船舶需要予測モデルの構築とシミュレーションシステムの開発
- ・海運・造船市場における不確実性の考慮
- ・船舶需要予測モデルの活用方法の例示

1.3 論文の構成

本論文における全体の構成を以下に示す。

第1章「諸言」では、研究背景と研究目的を述べた。

第2章「海運・造船市場の特徴と既往研究のレビュー」では、海運・造船市場の概要とその特徴を述べる。そして過去に行われた船舶需要予測に関する研究をレビューし、本研究の位置付けを明確化する。

第3章「本研究の基本方針」では、2章の考察を基に船舶需要予測の要求項目を整理すると共に、本研究で利用する手法であるシステムダイナミクス(SD)の概要と他分野における需要予測の手法を整理する。

第4章「モデル開発」では、構築する船舶需要予測モデルの概要と基本構成を述べると共に、船舶需要予測モデルを構成するSub-modelの詳細を示す。そして、各種シミュレーションを実施することで、モデルの妥当性を検証する。

第5章「不確実性を考慮した船舶の需要予測」では、海運・造船市場の不確実性を述べ、船舶の需要予測において不確実性を考慮することの重要性を述べる。そして、本研究で着目すべき不確実性を整理し、その考慮方法を示す。それに加え、各種シミュレーションを実施することで、不確実性が予測結果に与える影響を考察・分析する。

第6章「船舶需要予測用SDモデルの活用」では、構築した船舶の需要予測モデルの活用について述べ、造船業が継続的な発展するための知見を獲得する。

最後の第7章「結言」では、本研究で獲得した知見を総括し、結論を総括する。

参考文献

- (1) 日本造船工業会：造船関係資料，2016.
http://www.sajn.or.jp/pdf/Shipbuilding_Statistics_Sep2016.pdf，(2016/12/8 アクセス).
- (2) 国土交通省 海事局船舶産業課：造船市場と造船業の現状について，
<http://www.mlit.go.jp/common/001035550.pdf>，(2016/12/8 アクセス).
- (3) 独立行政法人日本貿易保険（NEXI）：e-NEXI(2016年2月号) 特集 わが国造船業の現状～活況は本物か～，pp.1-pp.5, 2016.
- (4) 永井 知美：東レ経営研究所「TBR産業経済の論点」 造船業界の現状と課題 - 利益なき繁忙からの脱出なるか -，2005.
- (5) 長塚誠治：新造船船価の推移と変化要因の分析,海事産業研究所 調査シリーズ, 2003-236, pp.1-55, 2003.

第2章 海運・造船市場の特徴と 既往研究のレビュー

2.1 海運・造船市場の概要とその特徴

2.1.1 海運・造船市場の概要

Fig.2.1.1 に海運・造船市場の概要を示す。以下にその特徴を整理する。

- (1) 海上荷動き量は世界経済の影響を受けその量が増加する。船社は、保有する船舶を用いて貨物を輸送する。
- (2) 新造船の発注量は海上荷動き量と船腹量の需給バランスの他、船価、手持工事量によっても増加する。船価が大きく下落すると投機的な影響により発注量は増加する。また、造船所は手持工事量が過多の状態となると新造船の発注を受けずに、キャンセルする。
- (3) 船価は、基本的にはその時の手持工事量、造船所の建造能力によって決定される⁽¹⁾。その他にも、外生的要因(条約、国際ルールの変更等)によっても増加する。
- (4) 発注された船舶は造船所の手持工事量に加えられる。そして、ある建造期間を経て船舶は建造され、船腹量に加えられる。その時の建造期間は、手持工事量、建造能力により異なる。また、造船所は現状の手持工事量を基に、建造能力が不足している場合は建造能力を拡張する。
- (5) 船舶の廃船量は海運市況によって増加する。市況が悪ければ、廃船量は増加し、市況が良ければ廃船量は減少する。また船舶の廃船量は船腹量の船齢構成によっても変動する。比較的若齢の船舶は中古船市場でリセールされ、再び船腹量に追加される。そのため、若齢の船舶は市場に長い期間残り続ける。老齢船は、中古船市場でのリセールはかからず解撤される。

このように新造船の発注量は様々な要因を受けて変動する。また、海運・造船市場にはFig.2.1.1 に示すように種々の時間遅れが存在し、急激な発注量の増減が発生する要因となっている。

以上より、海運・造船市場は全体として複雑システムを構成していることが分かる。そのため、新造船の発注量を予測するためには、このような市場全体を構成している要素とその関係性を正確にモデル化する必要がある。

2.1.2 海運・造船市場の特徴

上述の議論を基に、海運・造船市場の特徴を以下に整理する。

- (1) 海上荷動き量の増減により船舶の需要は大きく変化し、この海上荷動き量の増減が、市場に大きな影響を与える。
- (2) 船舶が発注されて完成されるまで、ある建造期間を経て船腹量に追加される。その建造期間は造船所の手持工事が多い時は、長くなる傾向がある。海運・造船市場にはこのような種々の時間遅れが存在し、それにより過剰発注、供給過剰が発生する。
- (3) 船舶の平均寿命は約 25~30 年である。そのため一旦供給過剰が発生すると、大量に供給された船舶は海運市場に残り続けるため、海運・造船市場全体は不況に陥る。そして、船舶の解撤に時間を要するため、供給過剰の解消に時間がかかる。つまり、一旦不況となると市場の早期回復が困難な市場であるという特徴を持つ。

海運・造船市場にはこのような特徴があるため、海運・造船市場の継続的な発展のためには、将来の船舶の需要を予測することが極めて重要である。

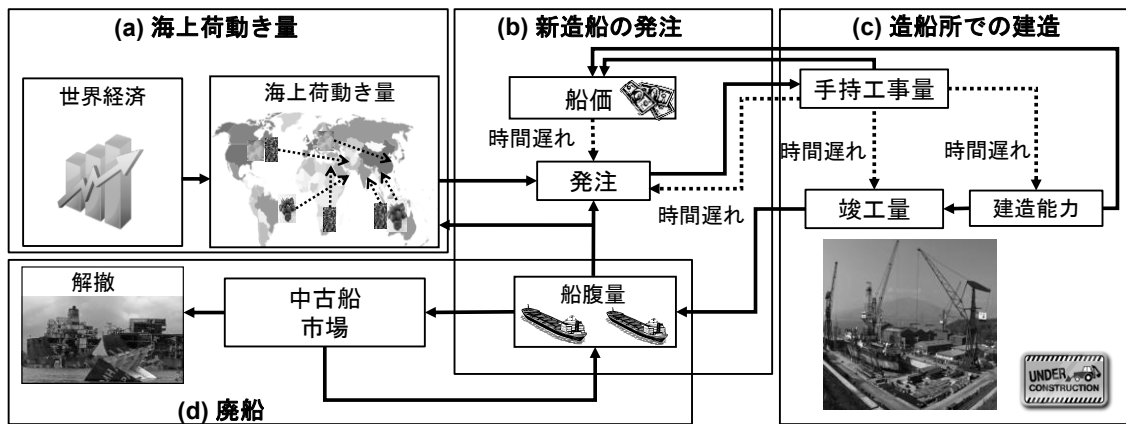


Fig.2.1.1 海運・造船市場の概要

2.2 既往研究のレビュー

2.2.1 既往研究の概要とその特徴

海運・造船会社の継続的な発展を支援するため、これまでも様々な船舶の需要予測に関する研究が実施されている。Table 2.2.1 に既往研究の特徴を整理する。

Thien らは⁽²⁾重回帰分析,需要-供給モデル,時系列解析を用いて海上荷動き量と船腹量を基にバルクキャリア市場の運賃市況を予測する手法を提案した。Luo らは⁽³⁾, コンテナサービスの需要とコンテナ船の船腹量を基に, 周期的に変動する市場の予測に有効な cobweb モデル⁽⁴⁾を用いてコンテナ市場の運賃を予測する手法を提案した。Wang らは⁽⁵⁾システムダイナミクス(略称: SD 詳細は第3章で述べる)を用いて GDP を基に港湾に集約されるコンテナ貨物量を予測するモデルを構築した。これらの研究はドライバルクやコンテナ運賃市場の予測を対象としているため, 海上荷動き量の予測を目的としていると考えられる。よってこれらは, Fig.2.1.1 の(a)に位置付けられる。

Akdemir らは⁽⁶⁾ニューラルネットワークを用いて, バルクキャリアの船腹量を予測する手法を提案した。Akdemir らの研究は船腹量の予測を対象としているため, Fig.2.1.1 の(b)に位置付けられる。Engelen らは⁽⁷⁾船舶の発注量, 船価, 船舶の建造の時間遅れを考慮したドライバルク市場における船主の意思決定モデルを構築した。また, この研究ではトンマイルベースの海上荷動き量が確率的に変動すると仮定し, ブラウン運動を用いてその変動をモデル化している。この研究では Fig.2.1.1 の中の (a)海上荷動き量, (b)新造船の発注, (c) 建造を対象としている。

Taylor らは⁽⁸⁾船舶の備船料が発注量に与える影響を考慮し, 造船市場の急激な発注量や竣工量の増減が発生するメカニズムを, SD を用いて考察した。海事産業研究所 SD 研究会は⁽⁹⁾1年間隔のデータを用いて, 海上荷動き量, 新造船の発注, 造船所での建造, 廃船をモデル化した。Lee らも⁽¹⁰⁾, 同様にタンカー市場の特徴を詳細にモデル化し, 船舶の発注量, 竣工量, タンカー運賃市況等を予測するモデルを構築した。これらの研究は海運・造船市場全体をモデル化し, 市場の循環を考慮している。そのため Fig.2.1.1 の中の (a)海上荷動き量, (b)新造船の発注, (c) 建造, (d)廃船に位置付けられる。(Taylor, Lee,の研究は(b)新造船の発注, (c) 建造, (d) 廃船を対象としている)

上述に示したように海運・造船業は全体として複雑なシステムを構成しており, 船舶の需要の長期的な予測のためには Fig.2.1.1 に示す市場を構成する要素をすべて考慮する必要がある。このような総合的な観点からの研究は, Taylor⁽⁸⁾, 海事産業研究所 SD 研究会⁽⁹⁾が先駆けて研究を実施している。しかしその研究の蓄積は少なく, 研究された年代が 1970 年代と古いため, 最新の市場データを用いていない。比較的最新の研究では Lee ら⁽¹⁰⁾が 2004 年に実施した研究があるが, それも 2016 年現在で 12 年前と比較的古い研究と位置付けられる。

Table 2.2.1 船舶の需要予測に関する既往研究

著者	船種	予測手法	研究目的	対象市場 (Fig.2.1.1)
Thien, et al ⁽²⁾	バルクキャリア	重回帰分析, 需要-供給モデル, 時系列解析	海上荷動き量と船腹量を基にバルクキャリアの運賃市況を予測する手法を提案した.	(a)
Luo, et al ⁽³⁾	コンテナ船	需要-供給モデル. (cobweb モデル)	経済的周期性を表現する cobweb モデルを用いてコンテナサービスの需要と船腹量を用いてコンテナ運賃市況を予測するモデルを構築した.	(a)
Wang, et al ⁽⁵⁾	コンテナ船	システム ダイナミクス	GDP を基に港湾に集約されるコンテナ貨物量を予測するモデルを構築した.	(a)
Akdemir, et al ⁽⁶⁾	バルクキャリア	ニューラル ネットワーク	ニューラルネットワークを用いて、バルクキャリアの船腹量を予測する手法提案した	(b)
Engelen, et al ⁽⁷⁾	バルクキャリア	システム ダイナミクス	船舶の発注量, 船価, 船舶の建造の時間遅れを考慮したドライババルク市場における船主の意思決定モデルを構築した.	(a),(b) & (c)
Taylor, A.J. ⁽⁸⁾	バルクキャリア	システム ダイナミクス	船舶の備船料が発注量に与える影響を考慮し, 造船市場の急激な発注量と竣工量の増減の発生メカニズムを考察した.	(b),(c) & (d)
海事産業 研究所 SD 研究会 ⁽⁹⁾	バルクキャリア タンカー	システム ダイナミクス	海上荷動き量, 新造船の発注量, 竣工量, 廃船量が海運・造船市場の与える影響を考慮し, それらを予測する手法を提案した.	(a), (b), (c) & (d)
Lee, T. et al ⁽¹⁰⁾	タンカー	システム ダイナミクス	タンカー市場を詳細にモデル化し, 船舶の発注量, 竣工量, タンカー運賃市況等を予測するモデルを構築した.	(b),(c) & (d)

Table 2.2.1 船舶の需要予測に関する既往研究 (続き)

著者	船種	予測手法	研究目的	対象市場 (Fig.2.1.1)
和田 ⁽¹¹⁾ , 三浦 ⁽¹²⁾ 他	バルクキャリア タンカー	システム ダイナミクス	最新の月別データを用いてドライバルク市場の海上荷動き量, 新造船の発注量, 竣工量, 廃船量を予測する手法を提案した. また, 投機的な発注量の増加や, 手持工事量の影響によるは発注量の減少などの短期的な影響も考慮した.	(a), (b), (c) & (d)
石原 ⁽¹³⁾ 他	タンカー	システム ダイナミクス	最新の月別データを用いてタンカー市場の海上荷動き量, 新造船の発注量, 竣工量, 廃船量を予測する手法を提案した. さらに, SDモデル内部における予測パラメータを自動的に同定する手法を提案した.	(a), (b), (c) & (d)

以上の背景を踏まえ, 和田⁽¹¹⁾や三浦⁽¹²⁾, 石原らは⁽¹³⁾, 最新の月別データを用いてドライバルク市場・タンカー市場の海上荷動き量, 新造船の発注量, 竣工量, 廃船量を予測する船舶需要予測モデルを構築した. さらに, 投機的な発注量の増加や, 手持工事量の影響による発注量の減少などの短期的な変動の影響も考慮した. また石原らにより, SDモデル内部における予測パラメータを自動的に同定する手法を検討した.

2.2.2 既往研究の需要予測モデルの特徴

ここでは, 既往研究の需要予測モデルを取り上げ, 本研究の需要予測モデルの違い・共通項目を整理する.

Fig.2.2.1(a)に Wang⁽⁶⁾らの需要予測モデルを示す. この研究は(a)海上荷動き量の予測を目的としている. この研究のモデル構造を海運・造船市場の観点(Fig.2.1.1)から整理すると, Fig.2.2.2(b)に示すように世界経済から海上荷動き量を予測するモデルとなっている. モデル構造を整理すると, 情報の流れが一方向であるという特徴が観察される. Thien⁽²⁾, Luo⁽³⁾,

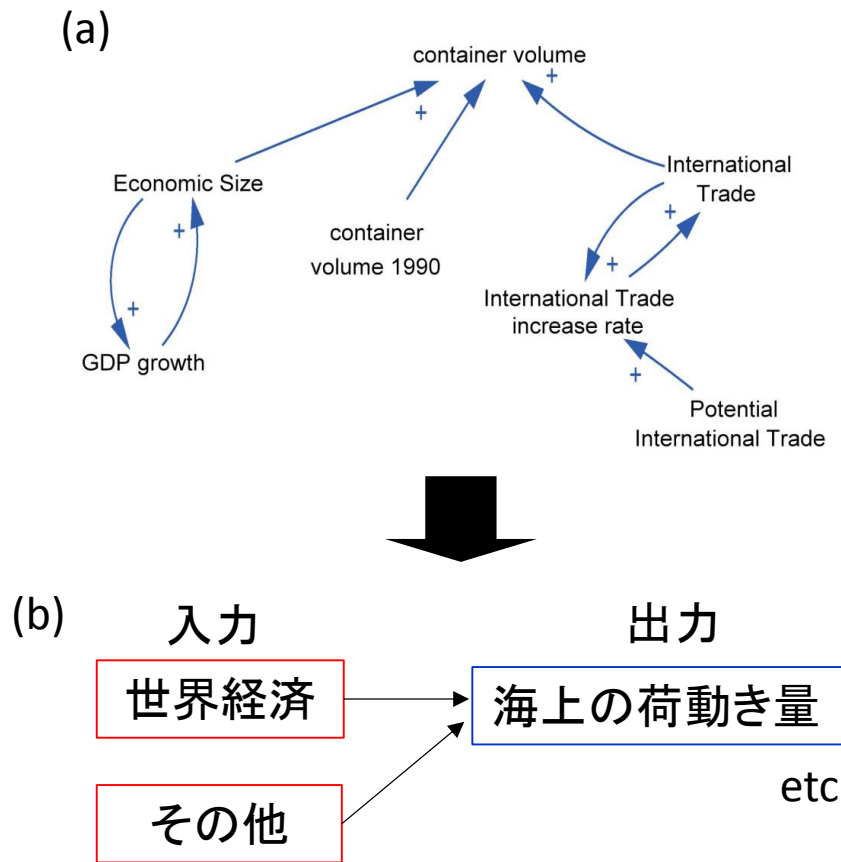


Fig.2.2.1 既往研究の需要予測モデルの特徴(1)

Akdemir⁽⁶⁾, Engelen⁽⁷⁾らの研究も同様で、情報の流れが一方方向であるという特徴が観察される。このようなモデル構造では、ある時(t)の計算結果が次のタイムステップ(t+1)の計算に与える影響を考慮できない。そのため、動的に変化する海運・造船市場の中長期的な需要予測が困難と考えられる。つまり、安定した市況における短期的な予測を行うのに適したモデルといえる。

一方、Taylor, 海事産業研究所 SD 研究会, Lee らの研究は異なるモデル構造を持つ。その特徴を示すために、Fig.2.2.2(a)に Lee⁽¹⁰⁾らの需要予測モデルを示す。この研究のモデル構造を海運・造船市場の特徴(Fig.2.1.1)の観点から整理する。Fig.2.2.2(b)に示すように貨物需要と現状の船腹量から船舶の発注量を決定し、それを基に手持工事量を算出する。そして、その手持工事量を基に竣工量を算出し、その竣工量と廃船量を基に船腹量を更新するというモデル構造となっている。このように、造船所の供給と廃船を考慮しながら、海上荷動き量と船腹量を基に、海運市場における船舶需要を予測するモデルとなっている。また、船腹量からのフィードバックを持つモデル構造も特徴である。Taylor⁽⁸⁾, 海事産業研究所 SD 研究会⁽⁹⁾, Lee⁽¹⁰⁾, 和田⁽¹¹⁾(三浦⁽¹²⁾, 石原ら⁽¹³⁾)らの研究も同様の特徴を持ち、フィードバックを持つモデル構造が観察される。これらの研究のモデルでは、船舶の発注から廃船(消

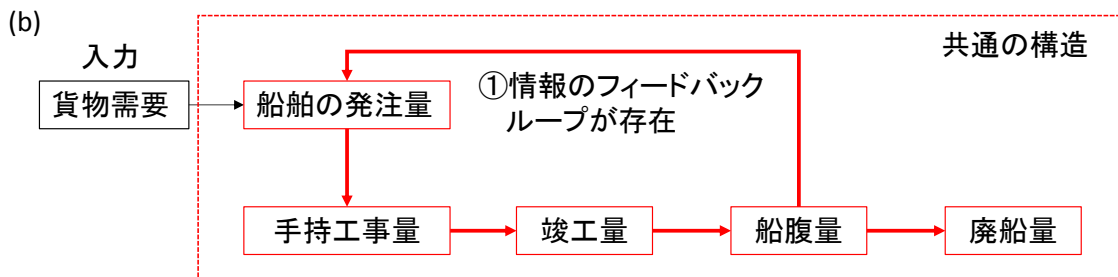
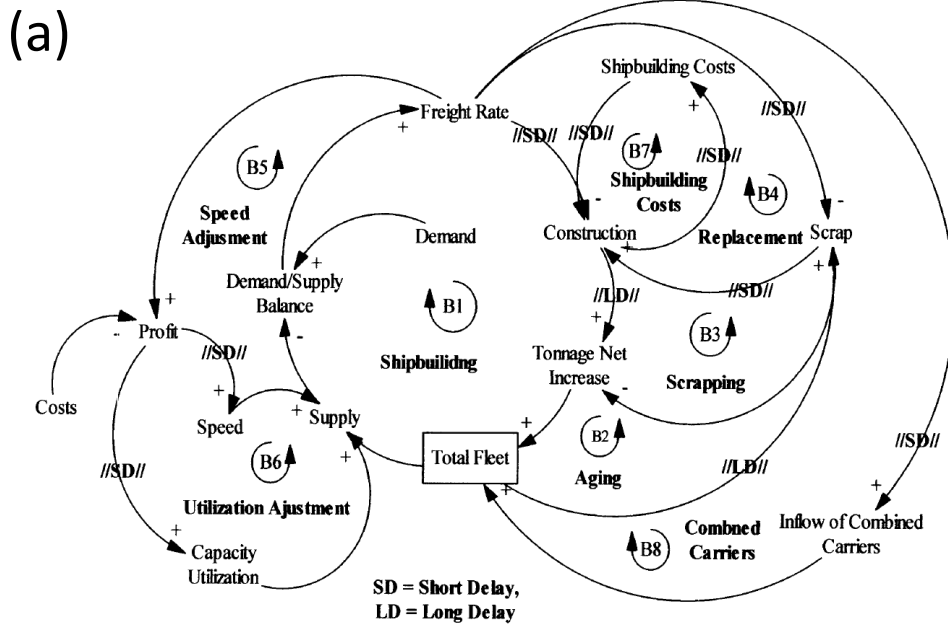


Fig.2.2.2 既往研究の需要予測モデルの特徴(2)

失)までの一連の流れを抑えているモデル構造であるため、海上荷動きの変化（入力シナリオの影響）、現状の市況状況等を考慮できるモデル構造となっている。またフィードバックループにより、ある時(t)の計算結果が次のタイムステップ(t+1)の計算に与える影響を考慮することができる。つまり、短期的な予測だけでなく中長期的な需要予測が可能なモデル構造となっている。

2.2.3 既往研究の課題と本研究の位置付け

以上のレビューを基に、既往研究の特徴と課題を整理する。

- (1) 中長期的な船舶の需要予測を実施するには Fig.2.1.1 に示す海運・造船市場の要素を考

- 慮した需要予測モデルを構築する必要がある。(海上荷動き量, 発注, 建造, 解撤 等)
- (2) 海運・造船市場全体をモデル化し, 市場の循環を考慮した研究は Taylor⁽⁸⁾, 海事産業研究所 SD 研究会⁽⁹⁾, Lee⁽¹⁰⁾らが研究を実施している。しかしその研究の蓄積は少なく, 研究された年代が 1970 年代, 2000 年代と古いため, 最新の市場データを用いていない。
 - (3) 和田⁽¹¹⁾, 三浦⁽¹²⁾, 石原⁽¹³⁾では, 最新の月別データを用いて船舶の市場の短期的な変動考慮したモデルを構築しているが, 船舶のサイズ別の予測, 船価の予測については言及されていない。
 - (4) 海運・造船市場の不確実性については, Englen らがそれらを考慮した需要予測を提案しているものの, 未だ研究蓄積は少ない状況である。また, Englen らの研究では, 市場の構成するすべて要素をモデル化しておらず, 市場の循環についても考慮できていない。そのため不確実性が海運・造船市場全体に与える影響の分析を十分に行えていない。
 - (5) Table 2.2.1 に示した研究はすべて, 海運・造船市場の需要予測を目的としており, モデルを活用した意思決定については言及されていない。

そこで本研究では, 以下に点に着目する。

- (1) 中長期的な船舶の需要予測を実施するため, Fig.2.1.1 に示す海運・造船市場の要素(海上荷動き量, 発注, 建造, 解撤)を考慮した需要予測モデルを構築する。
- (2) 最新のデータを用いて既存の研究よりも精緻な需要予測モデルを構築する。モデルのフレームワークについては, 海事産業研究所 SD 研究会のフレームワークを参考にする。
- (3) 和田⁽¹¹⁾, 三浦⁽¹²⁾, 石原⁽¹³⁾の研究成果を基に, 月別データを用いて詳細な予測を実現する。そして, これまでの研究で実現されていない船舶のサイズ別の需要予測, 船価の予測についても検討する。
- (4) 海運・造船市場の不確実性に着目し, 需要予測における市場の不確実性を整理する。そして既往研究で提案されている不確実性の考慮手法を用いて, 海運・造船市場の不確実性が予測結果に与える影響を定量的に分析する。
- (5) SD モデルを利用した意思決定の支援を検討する。具体的には船舶需要予測用 SD モデルを用いた市場の継続的な発展のシナリオを策定するためのシステムを開発する。そして構築したシステムを用いて, 造船市場の継続的発展が可能なシナリオを立案し, その効果を示す。

参考文献

- (1) 長塚誠治：新造船船価の推移と変化要因の分析, 海事産業研究所 調査シリーズ, 2003-236, pp.1-55, 2003.
- (2) Thien LD (2005) Forecasting the Dry Bulk Freight Market. World Maritime University, Malmo, Sweden.
- (3) Luo M, Fan L, Liu L (2008) A dynamic-economic model for container freight market. Department of Logistics and Maritime Studies, The Hong Kong Polytechnic University, 290–304.
- (4) Ezekiel, Mordecai. "The cobweb theorem." *The Quarterly Journal of Economics* (1938): 255-280.
- (5) Wang Y, Chou CC, Yeo GT (2013) Application and Improvement of a System Dynamics Model to Forecast the Volume of Containers. *Journal of Applied Science and Engineering* 16(2):187-196.
- (6) Akdemir B, Bilgili E, Ziarati M, Stockton D, Reis P (2008) Supply and demand in shipping market using intelligent neural networks. Piri Reis University, Turkey.
- (7) Engelen S, Meersman H, Eddy VDV (2006) Using system dynamics in maritime economics: an endogenous decision model for ship owners in the dry bulk sector. *Maritime Policy & Management* 33(2): 141–158.
- (8) Taylor AJ (1975) *The Dynamics of Supply and Demand in Shipping*. *Dynamica* 2(2): 62–71.
- (9) 海事産業研究所 SD 研究会. (1978 年). 海運・造船の SD モデル. 海事産業研究所報 No.142, 1978.
- (10) Lee, TaeSoo. *The dynamics of the oil tanker industry*. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- (11) Wada Y, Hamada K, Hirata N, Miura S, Ishihara Y, Arifin MD, Seki K (2015) A Study on System Dynamics Model for the Demand Forecasting of Shipbuilding. *IMDC* 2015(2): 167–18.
- (12) 三浦翔平, SD モデルを利用したバルクキャリアの需要に関する研究, 広島大学大学院工学研究科, 平成 25 年度修士論文.
- (13) 石原唯, 船舶需要予測用 SD モデルの一般化に関する研究, 広島大学大学院工学研究科, 平成 27 年度修士論文.

第3章 本研究の基本方針

3.1 データ処理基盤の進歩とデータ整備

近年「データサイエンス」と呼ばれる、データそのものに関する科学が着目されている。この「データサイエンス」とは、統計、情報技術(IT)、オペレーションリサーチ等の手法を用いて様々なデータを解析・分析することで、新たな知見の獲得や企業の意思決定の支援する科学と言われている。

データサイエンスが脚光を浴びる要因の一つは、IT 技術の進歩にある。中央演算処理装置 (CPU) の処理速度の向上、大量のデータを蓄積するのに十分な容量を持つ安価なデータ記録装置、大容量のデータやり取りできるネットワーク性能等の IT リソースが大きく進歩した。そのため、大容量のデータの短時間で大規模に処理できるようになっている。それに加え、プログラミング環境も従来に比べ大幅に改善されており、Matlab や R 等の比較的扱いやすい言語が利用しやすくなった。そして、IT リソースの進歩により高速に演算することが可能になったため、複雑なアルゴリズム開発にも適用可能になった。

こうしたデータ処理基盤の進歩と並んで「使えるデータ」の整備も進んでいる。近年では、行政や公的機関が「使えるデータ」を提供する「オープンデータ」が推進されている。

(引用：工藤卓哉・保科学世，データサイエンス超入門)⁽¹⁾

近年、海運・造船業においてもこのようなオープンデータや有料データの拡充が進んでおり日本造船工業会は造船関係資料⁽²⁾、日本船主協会は海上統計要覧⁽³⁾といったデータを提供している。有料データとしては、海運・造船市場の統計データ等は Clarkson 社⁽⁴⁾、AIS(Automatic identification system)データ⁽⁵⁾、船舶・港湾の仕様データ等は IHS 社⁽⁶⁾が提供している。このように海運・造船業においても従来よりも様々なデータを容易に入手することができるようになっており、海運・造船市場における「データサイエンス」も比較的容易になりつつある。

3.2 船舶需要予測モデルへの要求事項

国土交通省では航空需要予測における要求項目を文献⁽⁷⁾で整理している。本節では、この資料を参考に船舶需要予測モデルへの要求項目を整理する。

本研究における船舶の需要予測モデルの要求項目を Table 3.1.1 と以下に整理にする。

- (1) 船舶需要は海上荷動き量によって変化する。海上荷動き量は、①世界の経済成長の影響、②貨物輸送における輸出地域、輸入地域の距離の影響により変化する。そこで本研究では、世界 GDP と貨物輸送距離を入力値とすることで、世界経済の影響、海上物

流の影響を考慮する。

- (2) 第2章で示したように、船舶の中長期的な需要予測を実現するためには、船社・造船所の特性を考慮したモデルの構築が要求される。本研究では船社・造船所の特性を考慮したモデルを構築し、市場の中長期的な予測を可能とする。なお、本研究では、SDの手法を利用することでその影響を考慮する。詳細は第4章で述べる。
- (3) 造船所の経営戦略を支援するため、海上荷動き量、発注量、手持工事量、竣工量、廃船量、船腹量等が予測可能なモデルを構築する。また、造船所によって建造可能な船舶サイズ（建造が得意な船舶サイズ）が異なる。そのため全量での予測だけでなく、サイズ別の需要予測も可能とする。これらについても、SDの手法を利用することで、実現する。詳細は第4章で述べる。
- (4) 予測パラメータの入力値（将来GDPの推移、貨物輸送距離等）が多いと、市場の不確実性、変動性等の影響によりそのパラメータが外れ場合に大きく予測値が外れる可能性がある。つまり、予測パラメータ設定値ができるだけ少なくなるように、モデルを構築することが望ましい。本研究では、船価予測モデルを構築することで入力変数を削減する。詳細は第4章で述べる。
- (5) 海運・造船市場の不確実性の影響により、予測結果は大きく変化する可能性があり、それにより船社・造船会社を選択すべき戦略が大きく変化すると考えられる。よって、市場の不確実性を考慮した予測を可能とするモデルを構築することが要求される。本研究では、世界経済の不確実性、海上物流の不確実性については二項格子モデルを用いる。また、海運・造船市場内部の不確実性はモンテカルロシミュレーションを用いて考慮する。詳細は第5章で述べる。
- (6) 海運・造船市場は市場の内生要因の他、国際条約やルール改正等の外生要因の影響によっても変動する。そのため、条約・ルール改正の影響も需要予測モデルに取り込めるようにモデルを構築することが要求される。本研究では、SDのモデル構造が明確という点を生かし、これを実現する。詳細は第6章で述べる。
- (7) SDの最大の利点は、高度な意思決定や戦略・施策立案が検討可能な点にある。そのため、需要予測への利用というのはSDの一部の利用方法であると考えられる。そこで、本研究では、SDによる政策立案に関しても言及し、造船市場を活性化させるための施策・戦略について検討する。詳細は第6章で述べる。

以上の要求項目を踏まえた船舶需要予測モデルを構築することで、海運・造船市場の予測だけでなく、造船市場を活性化させるための施策・戦略について検討する。

また一般的に、需要予測モデルには、正確性（正確な予測が可能であること）、妥当性（予測結果が定量的に妥当であること）、持続性（モデル構造が中長期的に変わらないこと）、簡便性（簡易に予測パラメータ設定ができ、簡易に予測モデルを変更できること）が求められる。以上を十分に配慮して、予測手法を選択し、モデルを構築する。

Table 3.1.1 船舶需要予測モデルへの要求項目

項目		主な内容 (本研究での対応)
(1) 海上荷動き量の変化を適切に反映できること	①経済成長	海上荷動き量と相関が高い世界 GDP を入力値とすることで、経済成長を考慮
	②海洋物流の変化	輸出地域と輸入地域の世界の平均的な輸送距離(貨物輸送距離)を用いて考慮
(2) 造船所・船社の特性を十分に考慮すること	①船社の特性	船社の発注量, 廃船傾向を表現したモデルを構築すること. 本研究では, システムダイナミクスの手法の利用し, モデル構築(第4章)
	②造船所の特性	造船所の竣工量, 建造能力の拡張を表現したモデルを構築すること. 本研究では, システムダイナミクスの手法の利用し, モデル構築(第4章)
(3) 全量での予測, 船舶サイズ毎の予測ができること	①全量での予測	海上荷動き量, 発注量, 手持工事量, 竣工量, 廃船量, 船腹量が予測可能なこと本研究では, システムダイナミクスの手法の利用し, モデル構築(第4章)
	②サイズ毎の予測	全量での予測の他, サイズ毎の予測などより詳細な予測が可能であること本研究では, システムダイナミクスの手法の利用し, モデル構築(第4章)
(4) モデルへの入力値が少ないこと		入力パラメータの仮定値, 推定値が少なるように予測モデル構築すること. 本研究では, 船価予測モデルを構築(第4章). これにより, 人の主観による設定部分を減らす.
(5) 海運・造船市場の不確実性を考慮した予測が可能であること.		船舶需要予測における不確実性を整理し, その不確実性を考慮した予測手法を新たに提案すること. 世界経済の不確実性, 海上物流の不確実性については二項格子モデルを利用. 海運・造船市場内部の不確実性はモンテカルロシミュレーションを用いて考慮. (詳細は第5章)
(6) 海運・造船市場の外生的な影響も考慮出来ること		I M O 国際条約等のルール改正が海運・造船市場に与える影響を考慮可能なこと. SD のモデル構造が

Table 3.1.1 船舶需要予測モデルへの要求項目 (続き)

	明確という点を利用して実現。(詳細は第6章)
高度な意思決定や戦略・施策立案が検討可能なこと	造船市場を活性化させるための施策・戦略について検討。(船舶需要予測用 SD モデルの活用)

3.3 一般的な需要予測手法

一般的に需要予測に関する研究では、以下の手法が利用されている。

- (1) 時系列分析：時系列データの基本的な解析手法で、ARIMA モデル（自己回帰移動平均モデル）、SARIMA モデル（季節性自己回帰移動平均モデル）等の様々なモデルが存在する⁽⁸⁾。船舶海洋分野では海上荷動き量の予測⁽⁹⁾等に用いられている。
- (2) 機械学習：ニューラルネットワーク⁽¹⁰⁾、遺伝的プログラミング⁽¹¹⁾等のように学習データと訓練データを学習機に投入して学習モデルを生成し、その学習モデルを利用して予測やデータの判別を行う手法である。近年では、Deep learning⁽¹²⁾という階層の深いニューラルネットワークが提案され、画像認識分野等の様々な分野で応用されている⁽¹³⁾。
- (3) システムダイナミクス(以下 SD)：実績データを用いて要素間の因果関係を数値的に定義することによってモデルを構築する手法である（詳細は、下記の3.4項参照）。応用分野は幅広く海運・造船市場の予測の他に、都市経済の推移の予測、地球環境の変化の将来予測等に用いられている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。
- (4) データマイニング（パターン抽出）：大量のデータから新たな知識・知見を取り出し、それを活用する技術である⁽¹⁷⁾。需要予測分野においては「ある特定のパターンがある需要の予測（ビルの電力需要の予測）」などに使用されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

需要予測手法の整理

- (1) 時系列分析は、短期的な需要については予測可能であるものの、中長期的な需要予測の対応は困難である。また、過去データの推移を基にモデルを定義するため、国際条約等の市場構造の変化等を十分に考慮出来ない。
- (2) 機械学習では、学習データさえ用意すれば自動的にモデル構築ができるため、容易かつ短時間で需要予測モデルを構築できる。しかし、内部関数や変数の因果関係がブラックボックス化されており、なぜその結果を獲得できたかが十分に分析できない(予測結果の納得性が確保できない)。

- (3) SD は要素間の関係を数値的に定義するため、実績データを用いてモデル構築をする。近年、計算機の発展によりモデル構築は容易になっているものの、基本的には手動で試行錯誤を繰り返し、モデルを構築する。そのため、モデル構築に時間を要する。しかし、要素間の複雑な因果関係と時間遅れを表現可能であるため、予測値の納得性を確保することができる。
- (4) データマイニングは、特定の需要パターンが存在する場合には有効なものの、そのようなパターンが存在しない場合は、適用が難しい。つまり、一定の需要増加・減少のパターンの存在しない海運・造船市場の予測に適用することは困難である。

以上の需要予測手法の特徴と 3.2 項の需要予測モデルへの要求事項を踏まえると、SD の手法を用いることが妥当であると考えられる。

SD モデルの構築には様々な実績データが必要となる。3.1 項に示したように、近年、オープンデータ活用の推進等により、様々な海運・造船市場に関するデータを容易に収集可能となっている。つまり従来よりも SD モデルの構築、モデルの拡張等が容易になりつつある。それに加え、既往研究によりバルクキャリア市場、タンカー市場などの異なる市場でも、基本的な市場構造は共通であるため、共通の SD モデルの構造で需要予測モデルの構築が可能であることが確認されている（文献⁽¹⁹⁾）。

以上より、本研究では SD を用いて船舶需要予測モデルを構築する。

3.4 システムダイナミクスとは

3.4.1 システムダイナミクスの概要⁽²⁰⁾⁽²¹⁾

システムダイナミクスとは、システムの時間と共に変わるふるまいを追求するシミュレーションの一技法である。この手法は 1956 年に米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の Forrester 教授により創案された。SD はインダストリアルダイナミクス、(Industrial Dynamics)とも呼ばれる。システムダイナミクスの定義として、創案者の Forrester 教授は最初の著書 Industrial Dynamics(1961)の中で次のように述べている。「ID は経営のためのシステム分析の 1 つの方法である。それは時間と共に変わる経営システム部分間の相互作用を取り扱う」、また「ID は、企業システムのインフォメーションフィードバック特性の研究および企業形態の改良、政策設計のためのモデル利用である」と述べている。以上のことから SD は変動するシステムのシミュレーションモデルによって、そのシステムの動特性を明らかにしようとする方法である。

3.4.2 システムダイナミクスと計算機の利用

システムダイナミクスによって実世界の振る舞いをコンピュータ上に表現する為に、現在では多くのシミュレーション言語が開発されている。まず、システムダイナミクスが Industrial Dynamics として創案された頃、IBM コンピュータにかけるために MIT グループにより、DYNAMO というシミュレーション言語が開発された。DYNAMO は連続型シミュレーション言語として著名でシステムダイナミクスの普及に大きく貢献した。STELLA は 1985 年に Bary Richmond により開発された。SD に依拠したシミュレーションモデルをビジュアルプログラミングで構築・実行するソフトウェアである。モデル構成をビジュアルに進められるため判りやすいので近年普及しつつある。

本研究では、Matlab を用いて船舶需要予測用 SD モデルをテキストベースで開発した。

3.4.3 システムダイナミクスの考え方

システムダイナミクスでは以下に述べる 3 つの要素が一つのフィードバックループ上に組み込まれて機能することが特徴である(Fig.3.4.1 – Fig. 3.4.3)。

ストック (レベル : **Levels**) : 蓄積される量のこと、資源・情報などがある。

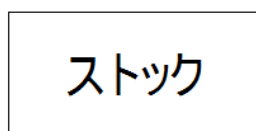


Fig.3.4.1 ストック

フロー (レート : **Flow Rates**) : 単位期間内あたりのストック間の変化量がフローである。



Fig. 3.4.2 フロー

補助変数 (コンバータ) : システムに必要な数値(定数)および情報の変換(関数)などを定義する。時間遅れについてもこの補助変数で表現される。

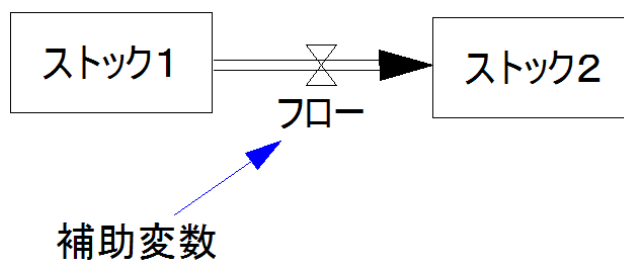


Fig. 3.4.3 補助変数

その他にSDでは、因果ループ図（SD定性モデル）という要素間の関係を示した記述により、モデル全体が正のフィードバック構造を持つか、負のフィードバック構造を持つかを判断する。

Fig.3.4.4(a)の場合は相関関係に負(-)の要素が組み込まれていないため、全体としては正のフィードバックとなり、仕事の機会と共に移住、労働人口、仕事は増加する。(b)の場合は労働人口増加と共に、仕事の機会が減少するモデルとなっている。この場合、負の要素が1つ（奇数個）組み込まれているため、全体としては負のフィードバックとなる。なお、負の要素が偶数個組み込まれている場合は、全体として正のフィードバックとなり極性が変化する。そして(a)、(b)のモデルを統合すると(c)の因果ループ図が完成し、モデル全体の要素の相関関係を把握することが可能となる。

本研究では、これらの記述を参考に、需要予測モデルを記述する。

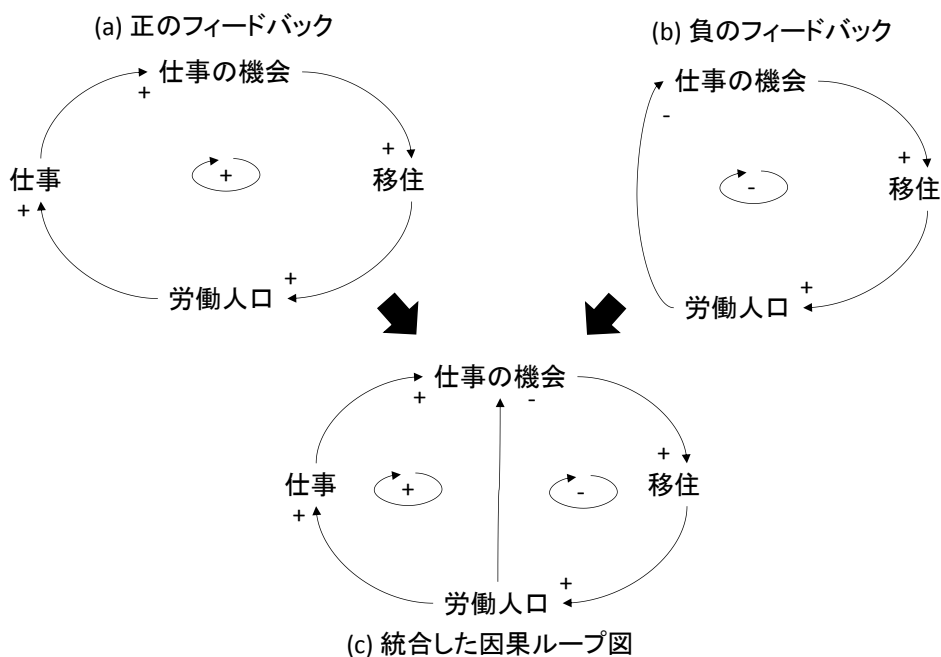


Fig. 3.4.4 因果ループ図

3.4.4 システムダイナミクスの利用例(20)(22)(23)

民間のシンクタンクであるローマクラブは世界システムの限界とそれが人口や人間活動に対する制約について見通しを得るため、MITのDennis L. Meadows博士らにその解析を依頼した。その際、Meadows博士はSDの手法を利用し、その結果を1972年、*The limits to Growth*という報告書に取りまとめられ、日本でも「成長の限界」として同年出版された。成長の限界では、その当時から現在に至るまでも幾何級数的成長を続けている人口、食糧生産、工業化、資源の使用についての世界モデルを作成した(Fig.3.4.5)。世界モデルを用いたシミュレーションの結果1900~2100年の間の変動として現在のシステムに大きな変革がない限りは、人口と工業の成長は次の21世紀には確実に停止すると結論付けている。

以上のように、個々のモデルを組み合わせることで全体のモデルを作成し、対象となるシステムを表現する。さらに、モデルを用いたシミュレーションによってシステムの因果関係を理解することができ、パラメータの変更による将来予測も可能である。

また近年では、MITのStermanらによりSDはさらなる発展を遂げている。Stermanらは⁽¹⁵⁾、SDを用いて全世界の炭素循環とヒートバランスをモデル化し、将来のCO₂濃度と地球全体の表面温度の推移を予測した。Olivaらは⁽¹⁶⁾、e-businesses(所謂, electronic commerce)をSDを用いてモデル化し、e-businessesの将来の成長を予測した。これらの研究により、SDの手法が複雑システムのモデル化や分析の有効であることが示されている。

SDを用いた主な事例:成長の限界(ローマクラブ 1972)

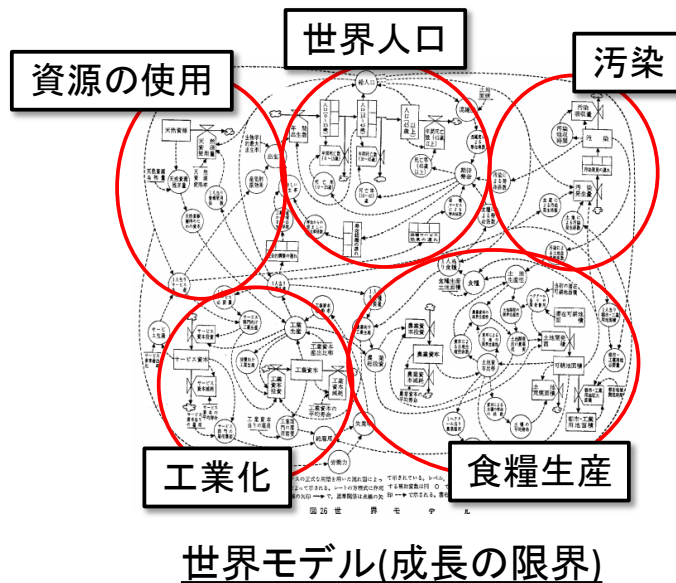


Fig. 3.4.5 世界モデル(成長の限界)

3.4.5 SD モデル作成の流れ⁽²⁰⁾

SD モデルを作成するステップを Fig.3.4.6 に示す。

各ステップの詳しい説明を述べる。

1. 問題の定義

対象となる問題をさまざまな角度から分析し、解明すべき問題を明確に定義する。ここでは、問題にかかわる人への聞き取り調査や資料、データの収集を行う。

2. システムの概念化

モデルの要素、要素間の因果関係、フィードバックグループについて明記する。

3. モデルの定式化

モデルに細かい関数や係数を組み込む。

4. モデル行動の分析

モデルを動かした結果が現実的なものであるために、モデルの評価、モデルの定式化と連動しつつ、モデルの改善を行う。

5. モデルの評価

改善したモデルの振る舞いを評価し、更なる改善とモデルとして何を主張できるのかを判断する。

6. 政策分析、政策の改善

種々の条件下で、モデルがどのような振る舞いをするのか分析を行う。また問題行動を改善できる政策をモデル上で実行し、問題を解決に向かわせるよりよい政策の設計を行う。

以上のステップは順を追って進んでいくような単純なものではなく、実際にはステップ間を行き戻りして、何度もトライ&エラーを繰り返しながら、SD モデルをチューニングし構築していく。

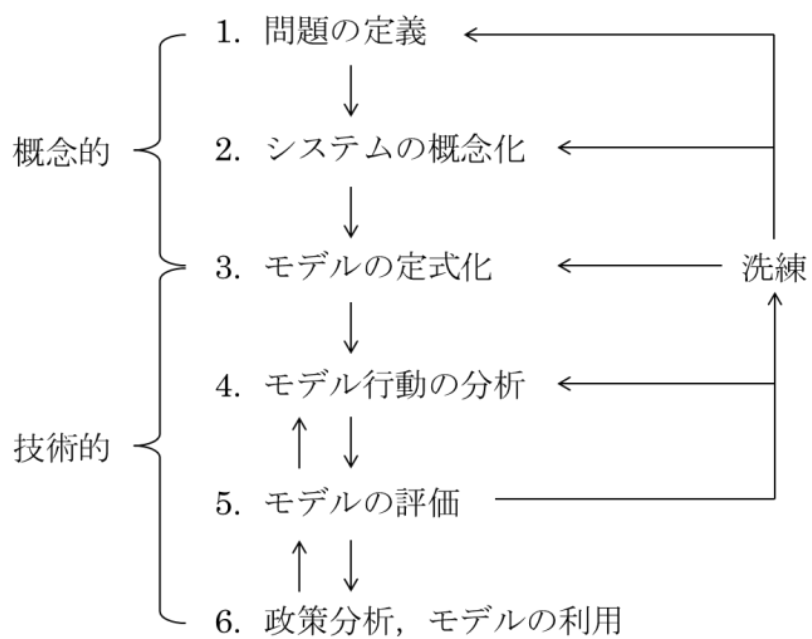


Fig. 3.4.6 SD モデル作成の流れ

参考文献

- (1) 工藤卓哉, 保科学世, データサイエンス超入門: ビジネスで役立つ「統計学」の本当の活かし方, 日経 BP 社, 2013.
- (2) 日本造船工業会 : 造船関係資料, 2016.
http://www.sajn.or.jp/pdf/Shipbuilding_Statistics_Mar2011.pdf, (2016/12/8 アクセス).
- (3) 日本船主協会, 海運統計要覧 2012, 天理寺報社, 2012.
- (4) Clarksons, Clarksons Shipping Intelligence Network, <http://www.clarksons.net>
- (5) IHS Mint (Marine intelligence Network) : <http://marketintelligencenetwork.com>
- (6) IHS Sea-web : http://www.sea-web.com/seaweb_welcome.aspx
- (7) 国土交通省 : 航空需要予測について, 交通政策審議会 第9回航空分科会配付資料, 2007.
- (8) Gerolimetto, Margherita. "ARIMA and SARIMA models." Ca'Foscari University of Venice, Italy (2010).
- (9) 川崎智也, 松田琢磨, 花岡伸也 (2013) : 東アジア積米国揚コンテナ荷動きにおける SARIMA モデルの適用性, 日本物流学会誌, 第 21 号, pp.167-174, 2013.6.
- (10) Hopfield, John J., and David W. Tank. "'Neural' computation of decisions in optimization problems." *Biological cybernetics* 52.3 (1985): 141-152.
- (11) Koza, John R. "Genetic programming II: Automatic discovery of reusable subprograms." Cambridge, MA, USA (1994).
- (12) 麻生英樹他 : 深層学習 Deep Learning (監修:人工知能学会), 近代科学社, 2015
- (13) Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton. "Imagenet classification with deep convolutional neural networks." *Advances in neural information processing systems*. 2012.
- (14) 上藤一郎, et al. "地域別経済指標に基づく静岡 SD モデルの開発: モデル分析に利用する地域統計データの整備とその精度." *地域研究* 2 (2011): 1-12.
- (15) Sterman JD, Sweeney LB (2002) Cloudy skies: assessing public understanding of global warming. *System Dynamics Review* 18(2):207-240 .
- (16) Oliva R, Sterman JD, Giese M (2003) Limits to growth in the new economy: exploring the "get big fast" strategy in e-commerce. *System Dynamics Review* 19(2):83-160 .
- (17) 藤巻遼平, and 森永聡. "ビッグデータ時代の最先端データマイニング." *NEC 技報* 65.2 (2012): 81.
- (18) 仲尾由雄, and 谷口剛. "大規模シミュレーションに基づく自然エネルギーの最適運用 (特集 環境)." *Fujitsu* 65.2 (2014): 28-33.
- (19) 海事産業研究所 SD 研究会. (1978 年). 海運・造船の SD モデル. 海事産業研究所報 No.142, 1978.

- (20) 島田俊郎. (1994年). システムダイナミクス入門. 日科技連出版社.
システムダイナミクス学会日本支部 JSD
- (21) Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WWIII (1972) The Limits to Growth.
Universe Books
- (22) 大来佐武郎監訳. (1972年). 成長の限界. ダイヤモンド社.

第4章 モデル開発

4.1 船舶需要予測用 SD モデルの概要

4.1.1 対象船舶と対象貨物

Fig.4.1.1 は、世界の海上に荷動き量の総量を示した図である。図に示すように、海上荷動き量の中で、ドライバルクは 40%を占め、その中でも 3 大バルク貨物は 28%と大きな割合を占める。そこで本研究では対象船舶をバルクキャリアとし、貨物の対象品目はドライバルク市場の主要 3 品目である鉄鉱石、石炭、穀物とする。

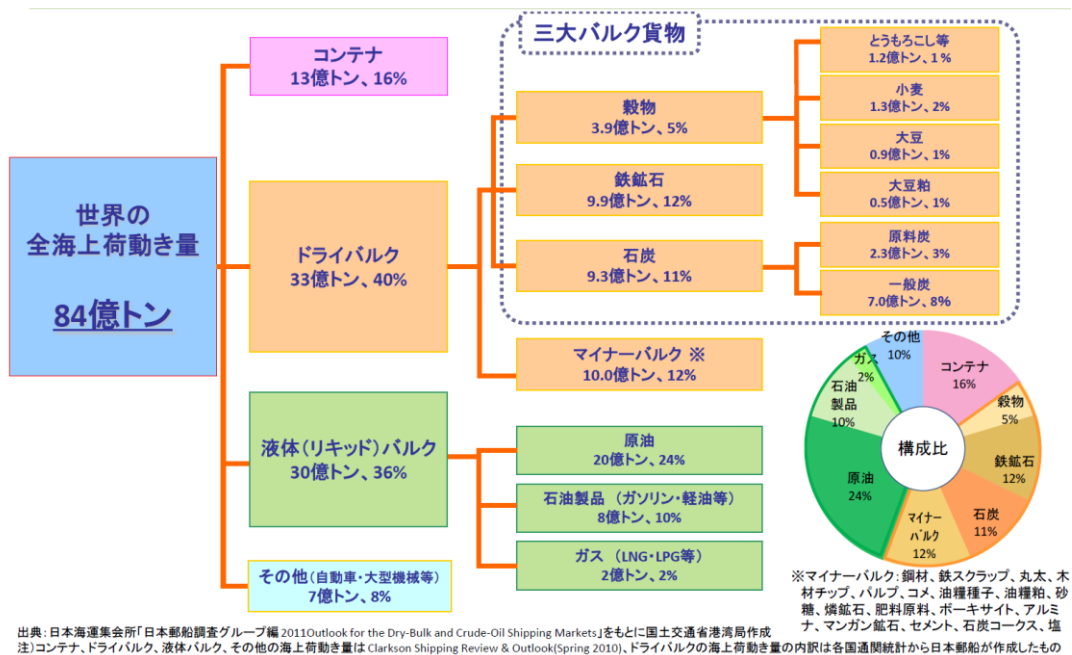


Fig.4.1.1 世界の海上荷動き量（経済産業省資料）⁽¹⁾

4.1.2 モデル構築に利用するデータ

本研究では Table 4.1.1 に示すデータを用いて、需要予測モデルを開発する。その詳細を以下に示す。

(1) 世界 GDP :

世界 GDP とは全世界の GDP を平均した経済的指標である。単位は USD で記録されて

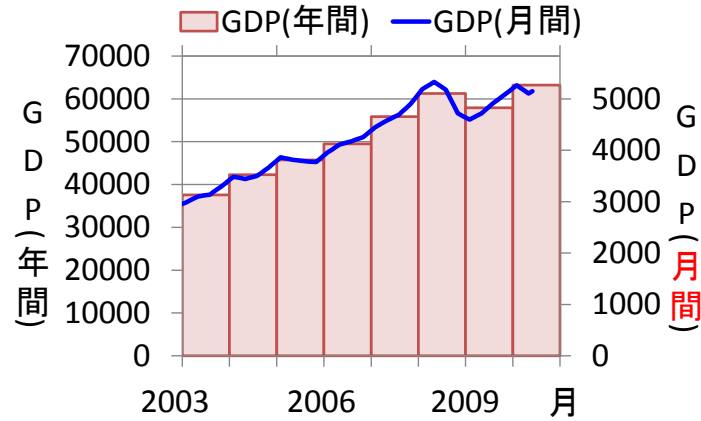


Fig.4.1.2 世界 GDP の月別データへの変換

いる。本研究では、世界銀行の年別データ⁽²⁾を OECD⁽³⁾の4半期別データ傾向を基に補正することで月別データに変換した。その結果を Fig.4.1.2 に示す。

(2) 貨物輸送量と貨物輸送距離：

海上荷動き量は貨物輸送量と貨物輸送距離によって表現される。貨物輸送量は(tons)で表現され、貨物輸送距離は(mile)で表現される。これらのデータは造船関係資料⁽⁴⁾のデータを用いる。しかし、記録されてデータは年別データであるため、線形補間を用いて月別データに変換する。変換した月別データに変換した結果を Fig.4.1.3, Fig.4.1.4 に示す。

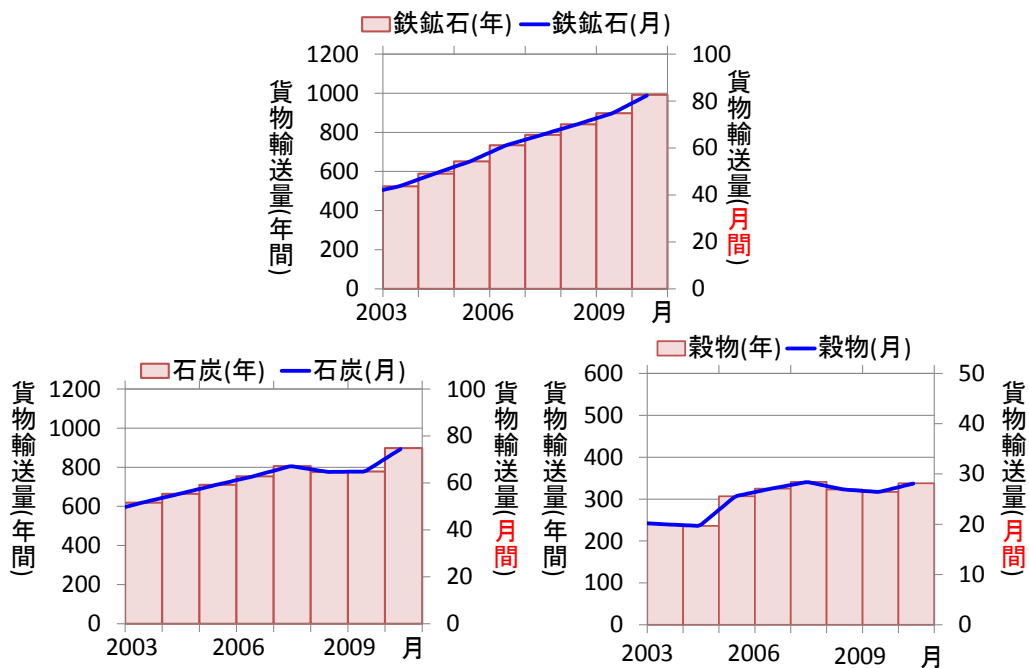


Fig.4.1.3 貨物輸送量の月別データへの変換

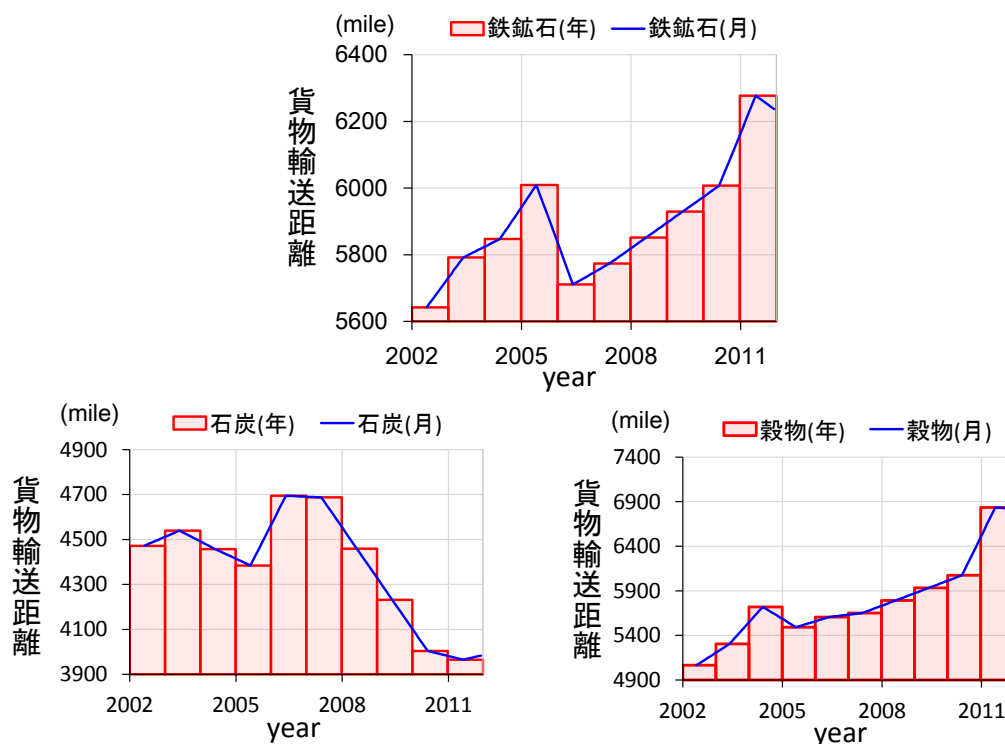


Fig.4.1.4 貨物輸送距離の月別データへの変換

(3) 発注量, 手持工事量, 竣工量, 解撤量, 船腹量, 船価:

発注量は船社から造船会社に発注された総量で表現される。手持工事量は全世界の造船会社の手持工事量の総和, 竣工量は完工した船腹量, 解撤量は解撤船腹量の示す。船腹量は船社の保有する船腹量を示す。これらはすべて, 全世界の総和とし, すべて単位はDWTと表現する。船価に関しては船舶サイズ毎の平均値を用いて表現し, index^{*1} という Clarkson 社が定義する値を用いる。これらはすべて Clarkson 社が提供する Shipping Intelligence Network⁽⁵⁾を用いて入手した。これらはすべて月別データとして保存されているため, そのまま用いる。

(※1: index とは 1988 年 1 月の船価の平均値を 100 として換算した指標である)

Table 4.1.1 本研究で利用するデータ

データ名	データ ソース	単位	データ 間隔	データ 補正方法	データ 利用期間
(1) 世界 GDP	World bank ⁽²⁾ OECD ⁽³⁾	USD	年	線形補間	2003 年 – 2010 年
(2)-1 海上荷動き量	造船工業会資料 ⁽⁴⁾	Tons	年	線形補間	2003 年 – 2010 年
(2)-2 貨物輸送距離	造船工業会資料 ⁽⁴⁾	Mile	年	線形補間	2000 年 – 2012 年
(3)-1 発注量, 手持工 事量, 竣工量, 解撤量, 船腹量	Clarkson Shipping Intelligence Network ⁽⁵⁾	DWT	月	-	モデルによ る
(3)-2 船価	Clarkson Shipping Intelligence Network ⁽⁵⁾	Index	月	-	1996 年 – 2011 年

4.1.3 船舶需要予測用 SD モデルの基本構成

Fig.4.1.5 に本研究の船舶需要予測モデルの概要を示す。本研究の SD モデルは、下記に示す 5 つのモデルにより構成される。

- (1) 貨物輸送量予測モデル：世界 GDP と貨物輸送距離を用いて世界の海上荷動き量を予測する。
- (2) 発注量予測モデル：世界の海上荷動き量と現状の船腹量を用いて新造船の発注量を決定する。そして、その時点の船価、手持工事量、造船所の建造能力を用いて発注量を補正する。
- (3) 建造モデル：発注された船舶はある建造期間を経て、海運市場へ投入される。なお、竣工量は造船所の建造能力と手持工事量に基づいて決定する。
- (4) 船価予測モデル：船価は造船所の手持工事量と建造能力を基に決定する。
- (5) 廃船モデル：海運・造船市況を示す、船舶航海距離を基に廃船量を決定する。そして、発注量の大きな増減が発生した場合、その発注量を用いて廃船量を補正する。

Fig.4.1.5 に示すように、世界 GDP と貨物の輸送距離を入力することにより、船舶の発注

量, 竣工量, 廃船量等の各種情報を予測する. モデルの全体構成は文献⁽⁶⁾・⁽⁷⁾の成果を利用している.

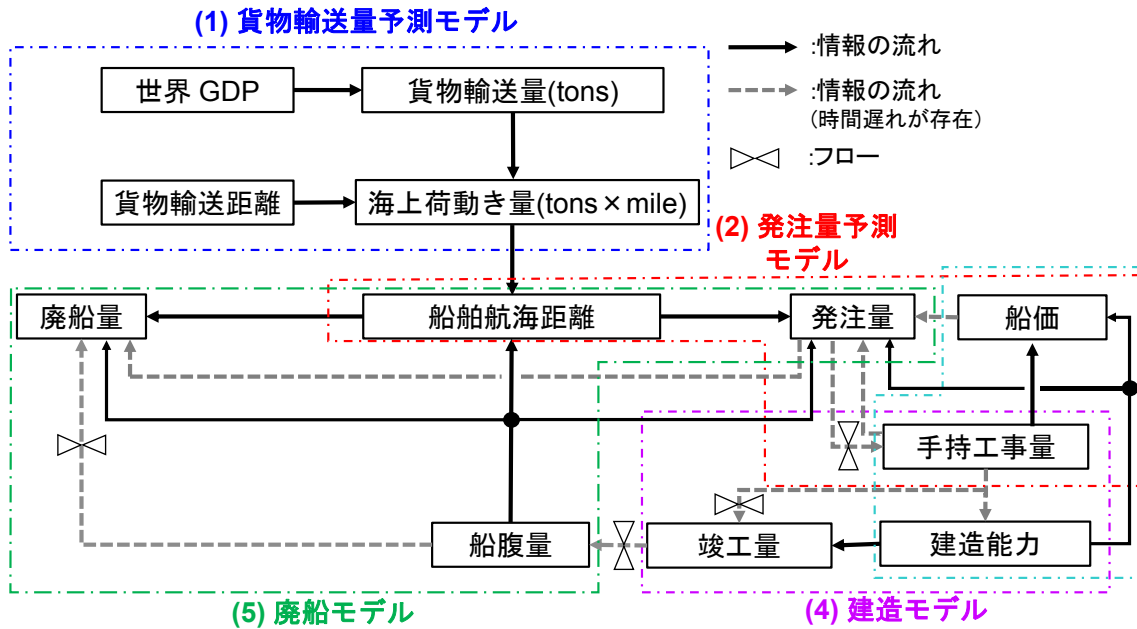


Fig.4.1.5 本研究の船舶需要予測モデルの概要

4.2 貨物輸送量予測モデル

Fig.4.2.1 の貨物輸送量予測モデルの概要を示す. 図に示すように本研究では, 世界 GDP と貨物輸送距離を入力値とする. そして, 世界 GDP を用いて品目別の貨物輸送量(tons)を予測し, それに品目別の貨物輸送距離を乗じた後, 総和することでトンマイルベースの貨物輸送量(tons×mile)を予測する.

世界 GDP と貨物輸送量(tons)の関係を示す. Fig.4.2.2 に示すように世界 GDP と貨物輸送量(tons)の間には線形の関係を確認できる. 本研究では(4-1)式にて貨物輸送量(tons)を算出する. なお, 以下のデータを用いてモデルを構築した.

利用データ :

- (1)世界 GDP (USD) : 2003 年-2010 年
- (2)貨物輸送量 (tons) : 2003 年-2010 年

$$VC_t = f(G_t) \tag{4-1}$$

ここに VC_t : トンベースの貨物輸送量(tons)
 G_t : 世界 GDP(USD)
 t : シミュレーション内部時間(month)

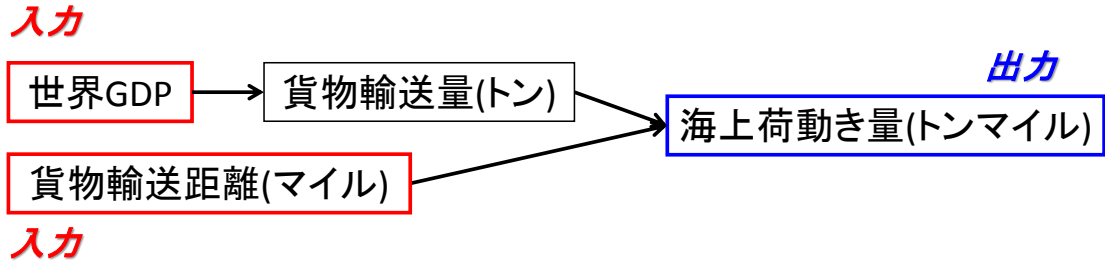


Fig.4.2.1 貨物輸送量予測モデルの計算の流れ

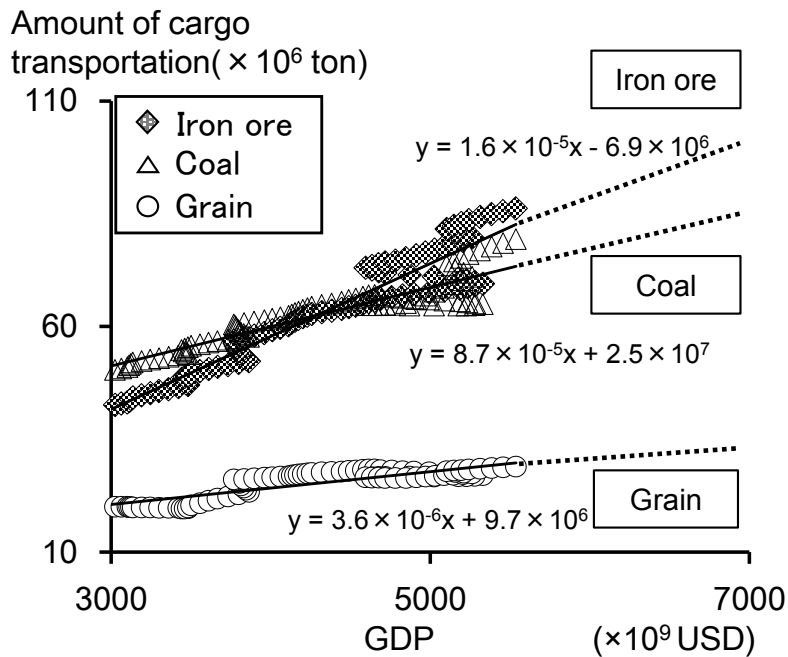


Fig.4.2.2 世界 GDP と貨物輸送量の関係

Fig.4.2.3 に貨物輸送距離の推移を示す。貨物輸送距離とは全世界の月間で輸送される貨物輸送距離の平均値を示す。(4-1)式で算出した品目毎の貨物輸送量(tons)に貨物輸送距離(mile)を乗じた後、それらを総和する(鉄鉱石、石炭、穀物の海上荷動き量(tons×mile)を総和)することでドライバルク市場の海上荷動き量(tons×mile)を算出する((4-2)式)。

貨物輸送距離の推移は以下のデータを利用した。

(1)貨物輸送距離：2000年-2012年

$$VCtm_t = \sum (VC_t \times TD_t) \quad (4-2)$$

ここに VC_t : トンベースの貨物輸送量(tons)

VC_m : トンマイルベースの海上荷動き量(tons×mile)

TD_t : 貨物輸送距離(mile)

t : シミュレーション内部時間(month)

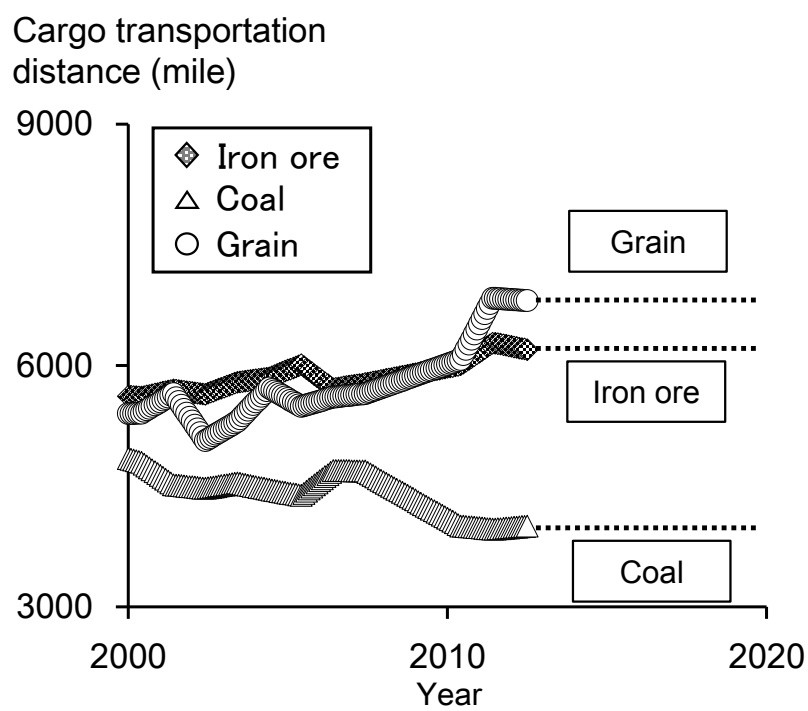


Fig.4.2.3 貨物輸送距離の推移(鉄鉱石, 石炭, 穀物)

4.3 発注量予測モデル

4.3.1 発注量予測モデルの概要

発注量予測モデルは、世界の海上荷動きを含む様々な要素から船舶の発注量を決定するモデルである。一般的に船舶の発注量は、世界の海上荷動き量を基に決定される。しかし、船価や手持工事量などの細かな要素によって短期的に変動する(Fig.4.3.1)。そこで、本研究の発注量予測モデルでは、貨物輸送量予測モデルにて算出されたトンマイルベースの海上荷動き量を基に発注量を求め、船価や手持工事量を用いて、その算出した発注量を補正する。

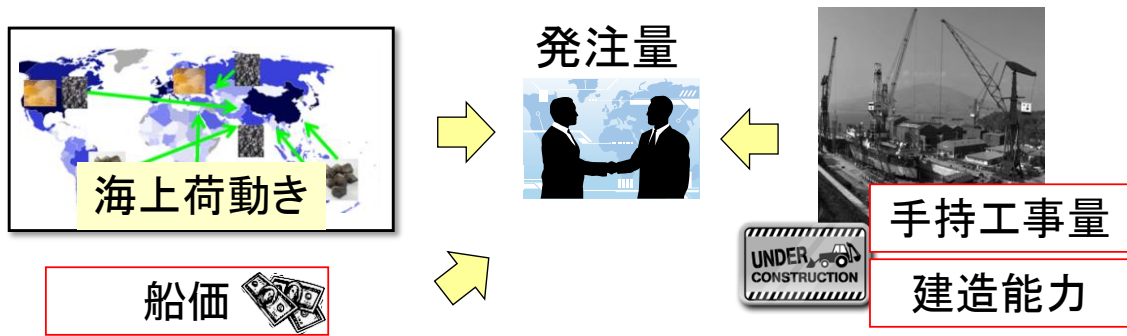


Fig.4.3.1 発注量予測モデルの概要

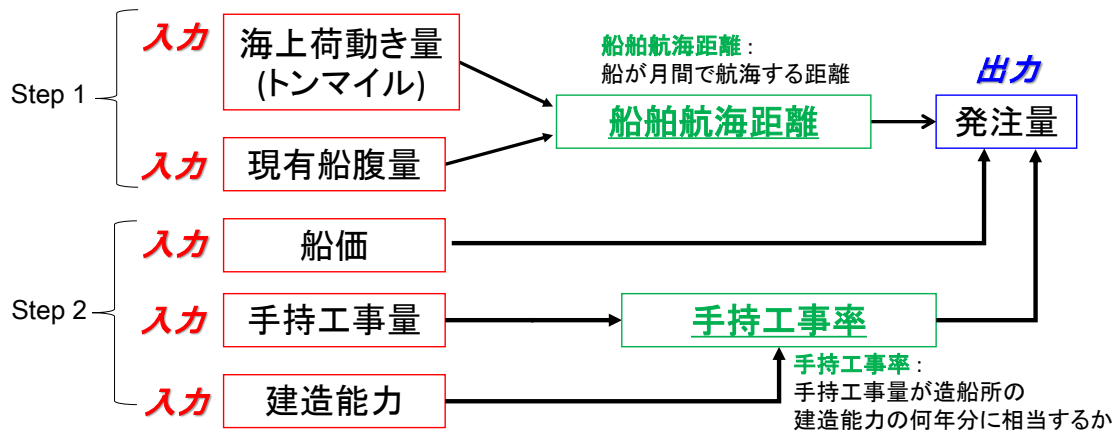


Fig.4.3.2 発注量予測モデルの計算の流れ

発注量の計算の流れを以下と Fig. 4.3.2 に示す。

Step1：貨物輸送量予測モデルにて算出されたトンマイルベースの海上荷動き量とバルクキャリアの現有船腹量から、船舶航海距離(Ship running distance)という値を算出する。そして

算出された船舶航海距離を用いて、発注量を算出する。船舶航海距離は1ヶ月で船舶が航海する距離の平均値で、海運・造船市場の市況を表す指標ともなる。

Step2: 船舶航海距離から算出された発注量に対して、船価の下落による発注の上昇、造船所の手持工事率による発注量の減少を考慮して、その発注量を補正する。また、船価や造船所の手持工事量と発注量の補正の間には時間遅れが存在する。手持工事率は、造船所の建造能力の何年分に相当するかを示す指標である。これは、造船所の手持工事量と建造能力を基に算出する。

4.3.2 船舶航海距離による発注量の算出

トンマイルベースの海上荷動き量とバルクキャリアの現有船腹量に基づき(4-3)式で定義される船舶航海距離を算出する。船舶航海距離は、船舶がある期間で航海する距離を示しており、海運業の市況の良し悪しを表現する指標である。その後、(4-4)式を用いてバルクキャリアの発注量を計算する。

$$E_t = \frac{VCtm_t}{V_t} \quad (4-3)$$

$$O_t = f(E_t) \times V_t \quad (4-4)$$

ここに、 E_t : 船舶航海距離(mile)

$VCtm_t$: 海上荷動き量(tons×mile)

V_t : バルクキャリアの現有船腹量(DWT)

O_t : バルクキャリアの発注量(DWT)

t : シミュレーション内部時間(month)

船舶航海距離と発注量の関係を Fig.4.3.3 に示す。x 軸の船舶航海距離は、貨物輸送量(tons)と貨物輸送距離(mile) の実績データを基に海上荷動き量(tons×mile)と計算し、それを船腹量の実績データで割ることにより算出した。y 軸は発注量を船腹量で割ることによって無次元化している。以下にその特徴を示す。

(1) 一般的な状態では、船舶航海距離が伸びるにつれて、発注量も徐々に増加する(図中(a)).

本研究では1996年から2005年, 2009年の実績値を参考に, 線形の関係を仮定している.

- (2) 船舶航海距離が大きい場合, 船舶航海距離がある程度に達すると, 船舶の運用が限界に達し, 急激に受注が増加する(図中(b)). 本研究では, 新造船の発注が集中した2005年から2008年の実績値を参考に, 線形の関係を仮定した.
- (3) 船舶航海距離が極めて少ない場合, 船舶航海距離が極めて少ない不況の場合でも, 古い船舶の代替や営業活動の促進により, 最低限の発注は確保されると考える. そのため, 実績データの中で最も発注量が少ない値を発注量の下限值を設定する. そして, Fig.4.3.3に示すように船舶航海距離が減少し続けても, 下限値より発注量は減少しないと仮定する(図中(c)).

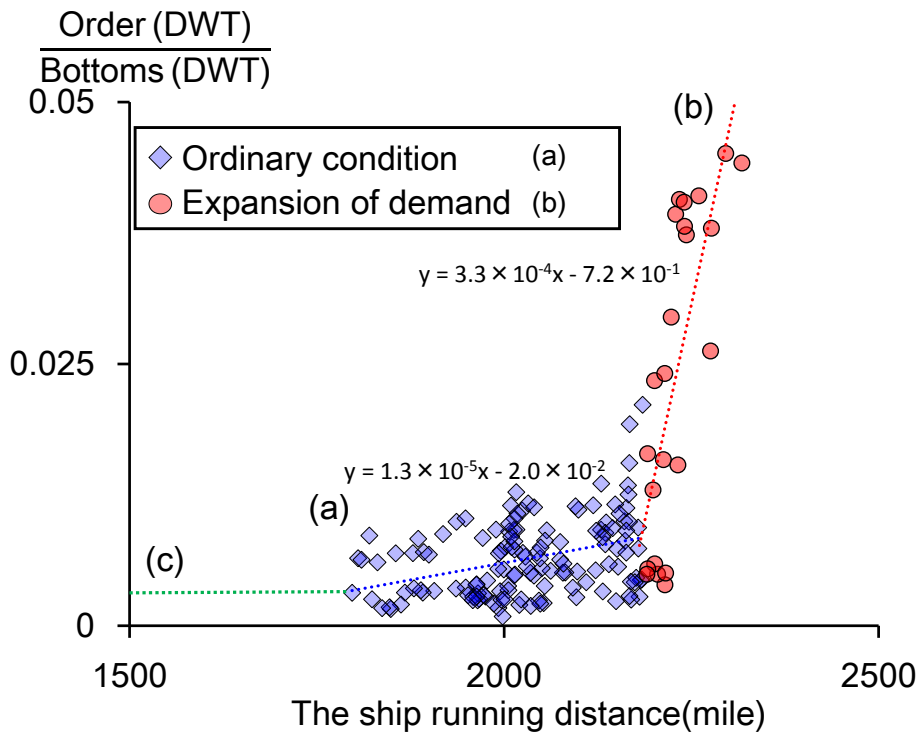


Fig.4.3.3 船舶航海距離と発注量の関係

4.3.3 船価による発注量の補正

一般的に船価が急落すると投機的な資金の流入により短期的に発注量が増加する傾向がある. Fig.4.3.4に, 船価と発注量の実績値の推移を示す. 船価と発注量の間には以下の特徴が観察される.

- ・ 船価が減少している期間が連続して続くと, その減少値と船腹量に応じて, 発注が上昇する.
- ・ 船価の減少と発注の上昇の間には7ヶ月の時間遅れが伴う.

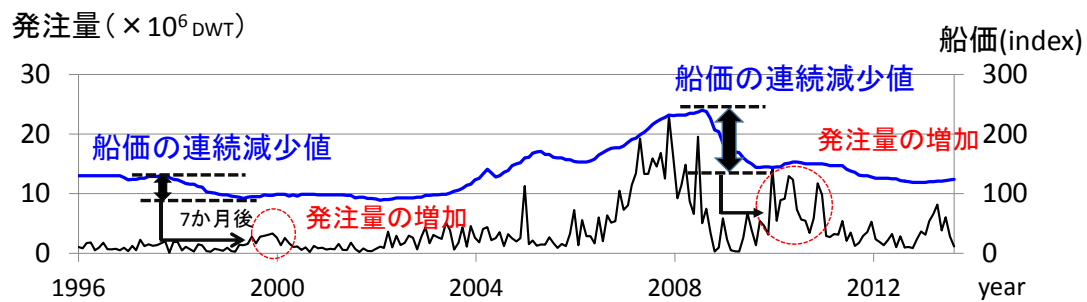


Fig.4.3.4 船価と発注量の関係

本研究では、船舶航海距離で発注量を算出した後、船価による発注量の補正を行う。船価がある期間連続して減少した場合の減少値を船価の連続減少値（T）と定義し、この連続減少値を用いて、(4-5)式と Fig.4.3.5 の関係を用いて、発注量の補正値を算出する。

Fig.4.3.5 に船価の連続減少値（T）と発注量の補正値の関係を示す、この図に示すように、船価の連続減少値（T）が大きくなると発注量の補正値が増加していることが分かる。

$$Op_t = f(T_{t-7}) \times V_t \quad (4-5)$$

- ここに、 Op_t : 発注量の補正量(DWT)
 T_t : 船価の連続減少値(DWT)
 V_t : バルクキャリアの現有船腹量(DWT)
 t : シミュレーション内部時間(month)

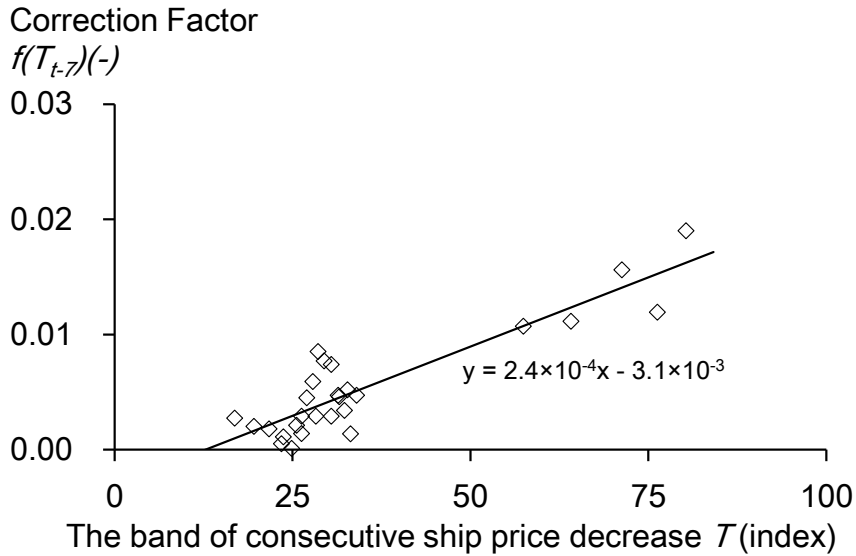


Fig.4.3.5 船価の連続減少値と発注量の補正値の関係

4.3.4 手持工事量による発注量の補正

船舶の発注量は船価の影響だけでなく、手持工事量の影響も受ける。一般的には造船所は、為替の変動や世界経済の急変に対応するために、建造能力以上の手持工事量を持たないという特性がある。ヒアリングによればその上限は、3～5年相当とされており、それを超える場合は、発注量をキャンセルする。

Fig.4.3.6 に手持工事率と発注量の推移を示す。図に示すように、手持工事率が4年相当(それ以上)になると、発注量が減少していることが分かる。

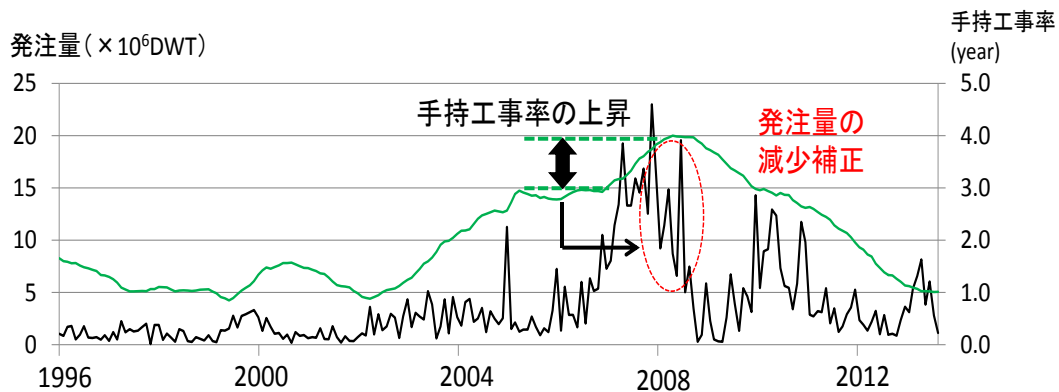


Fig.4.3.6 手持工事率と発注量の関係

本研究では、現状の手持工事量が建造能力の何年分に相当するかを示す指標として手持工事率と定義する。手持工事率は下記に示す(4-6)式を用いて算出し、(4-7)式と Fig.4.3.7 を用いて発注量の補正値を算出する。

Fig.4.3.7 に手持工事率とそれによる発注量の補正値の関係を示す。この図に示すように、手持工事量が4年を超えると発注量が線形的に減少していることが分かる。この関係を用いて発注量の補正値（手持工事率による減少）を算出する。

$$Bl_t = \frac{Ob_t}{f(Cp_t)} \tag{4-6}$$

$$Og_t = f(Bl_t) \times V_t (Og_t < 0) \tag{4-7}$$

- ここに、 Bl_t : 手持工事率(-)
- Ob_t : 手持工事量(DWT)
- Cp_t : 造船所の建造能力(DWT)
- Og_t : 発注量の補正値(DWT)
- V_t : バルクキャリアの現有船腹量(DWT)
- t : シミュレーション内部時間(month)

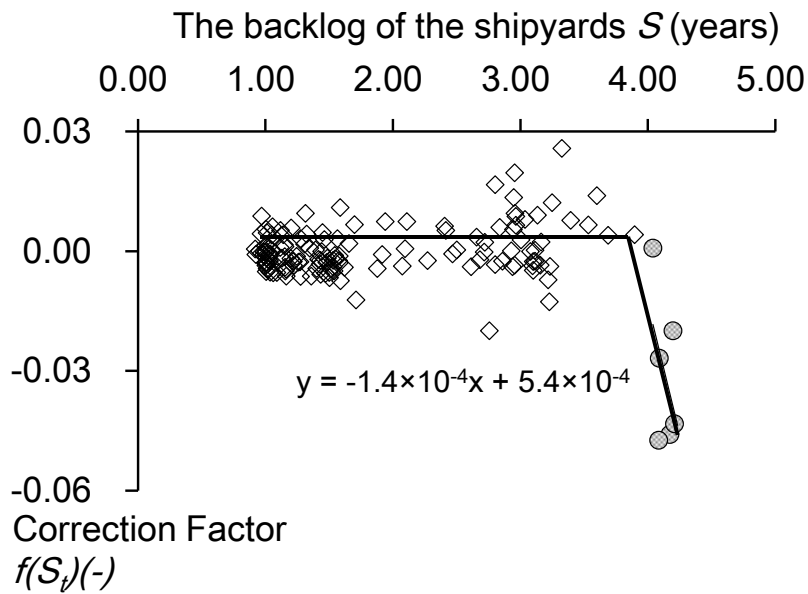


Fig.4.3.7 手持工事率と発注量の補正値の関係

そして、(4-8)式を用いて船舶航海距離で算出した発注量を補正する。なお、手持工事量の補正には1ヶ月の時間遅れが存在する。

$$Or_t = O_t + Op_t - Og_{t-1} \quad (4-8)$$

ここに、 Or_t ：補正後の発注量(DWT)
 O_t ：船舶航海距離によって算出した発注量(DWT)
 Op_t ：船価よる発注量の補正值(DWT)
 Og_t ：手持工事率による発注量の補正值(DWT)
 t ：シミュレーション内部時間(month)

発注量予測モデルの構築には以下のデータを用いた。

- (1) 海上荷動き量(tons × mile): 貨物輸送量(tons)と貨物輸送距離(mile)の実績データを用いた計算結果を利用した：1996年-2012年
- (2) 船腹量(DWT)：1996年-2012年
- (3) 発注量(DWT)：1996年-2012年
- (4) 船価(index)：1996年-2012年
- (5) 手持工事量(DWT)：1996年-2012年
- (6) 建造能力(DWT)：1996年-2012年(推定値)

4.4 建造モデル

4.4.1 手持工事量と竣工量の関係

発注された船舶は造船所の手持工事量に入り、数カ月の建造期間を経て竣工する。Fig.4.4.1に操船所の手持工事量と竣工量の推移を示す。図に示すように手持工事量と竣工量との間には時間遅れが生じている。そして、その時間遅れは2007年以降拡大している。第1章のFig.1.1.1, Fig.1.1.2を見ると、2007年のタイミングで中国・韓国が受注量を拡大し、2009年以降に船舶を大量に建造していることが分かる。つまり、2007年以降の時間遅れの拡大は、中国・韓国の建造能力拡張の影響であると考えられる。このように、船舶の竣工量と手持工事量の間には密接な関係があることが分かる。

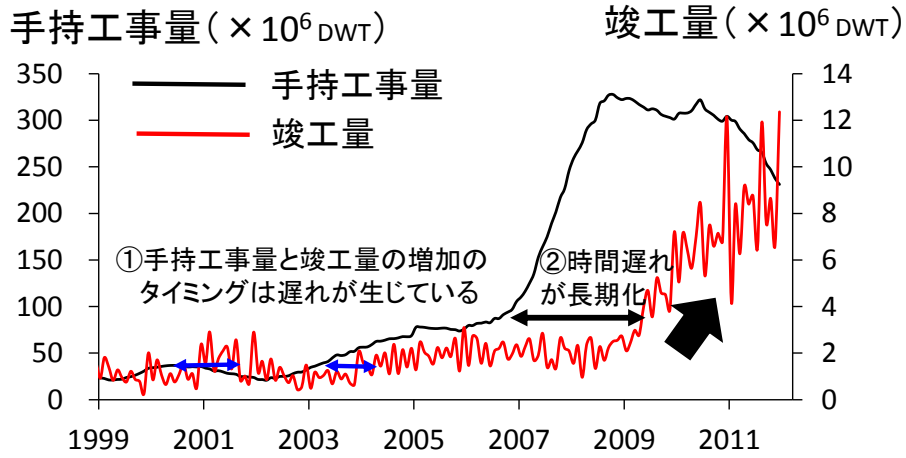


Fig.4.4.1 手持工事量と竣工量の関係

4.4.2 建造モデルの概要

手持工事量の算出には(4-9)式，竣工量の算出に関しては (4-10) 式と Fig.4.4.2，建造能力の算出に関しては (4-11) 式と Fig.4.4.2 を用いる。

$$Ob_{t+1} = Ob_t + Or_t - C_t \tag{4-9}$$

$$C_t = f(Ob_{t-9}) \tag{4-10}$$

$$Cp_t = f(Ob_{t-21}) \tag{4-11}$$

ここに， Ob_t : 手持工事量(DWT)

Or_t : 発注量(DWT)

C_t : 竣工量(DWT)

Cp_t : 建造能力(DWT)

t : シミュレーション内部時間(month)

建造モデルの基本的な考え方を Fig.4.4.2 に示す。このモデルでは，船舶の竣工量と手持工事量の間には造船所の操業状態によって変化する以下の関係があると考えられる。

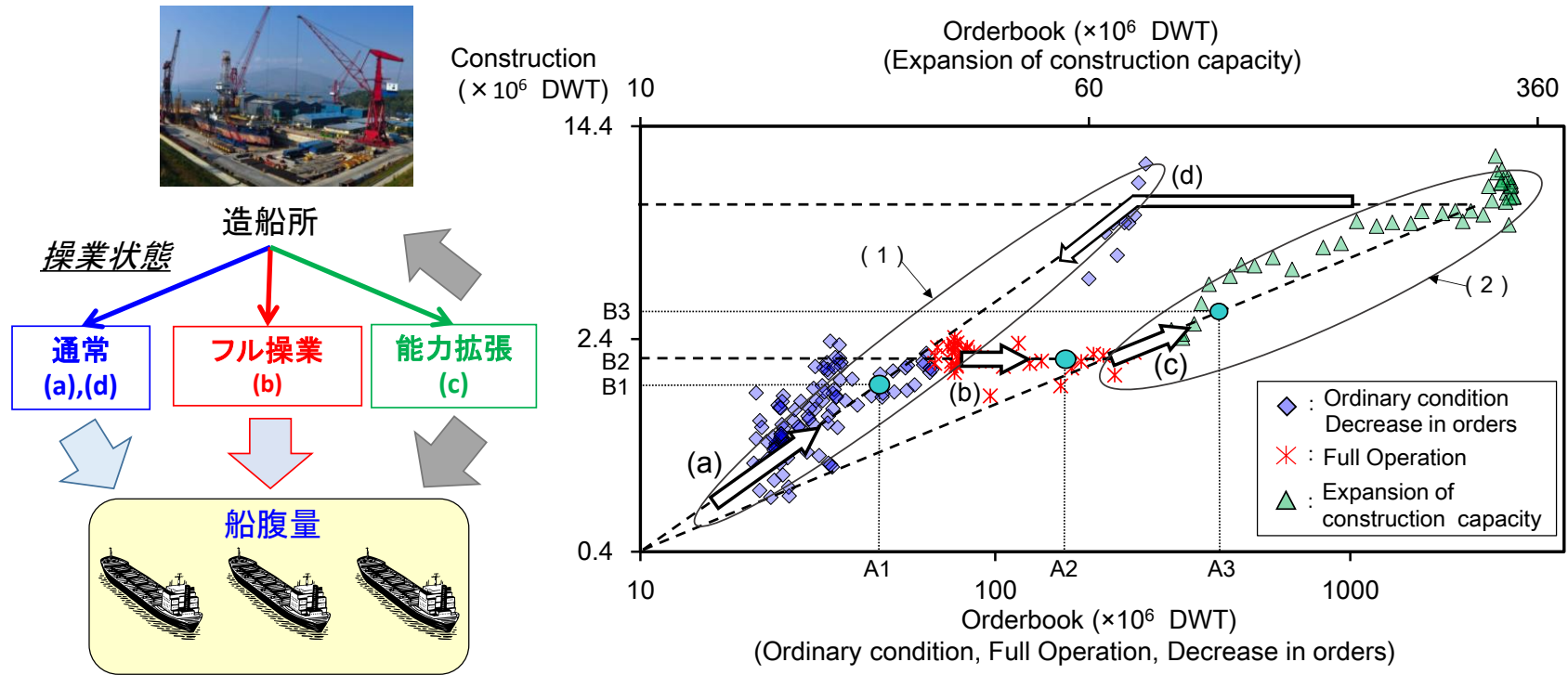


Fig.4.4.2 建造モデル

- (a) 通常の操業状態：通常の状態では、造船所は手持工事量にあわせて線形の関係で船舶を建造する。
- (b) フル操業状態：手持工事量が増加すると、造船所は建造能力の限界の状態ですべてフル操業を行う。このため、手持工事量が増加しても竣工量は増加しない。
- (c) 建造能力の拡張状態：フル操業状態から手持工事量が増加すると、造船所は設備投資を行い、建造能力を拡張する。この建造能力の拡張に伴い竣工量も増加する。
- (d) 手持工事量の減少：発注量が減少すると竣工量は減少する。但し、一度拡大した建造能力は拡大された状態で維持されるものとする。

具体的には以下の手順で竣工量を計算する。

- (1) 手持工事量が A1 にある場合、(a)の線形関係により竣工量は B1 に決定される。建造能力に関しては、シミュレーション開始時の設定を維持する。算出した竣工量は、9ヶ月後に船腹量に追加される。
- (2) 手持工事量が A2 の場合、手持工事量が建造能力の上限に達するため、竣工量は一定となり、図の B2 となる。この時は(b)の関係をを用いる。算出した竣工量は、算出した9ヶ月後に船腹量に追加される。
- (3) 手持工事量が A3 の場合、船舶の竣工量は(c)の関係に計算され、竣工量は B3 となる。算出した竣工量は、算出した9ヶ月後に船腹量に追加される。

また、実績値の相関分析(4-12式)により、建造期間と能力拡張期間を特定した。その結果を Fig.4.4.3 に示す。この結果に示すように、通常期では手持工事量と竣工量の間には9ヶ月の時間遅れを取った場合、相関係数は最大(0.960(-))となる。この結果より、建造期間を9ヶ月とした。能力拡張期間では30ヶ月の時間遅れを取った場合、相関係数は最大(0.961(-))となる。これは、建造期間の9ヶ月を含んだ値である。以上より能力拡張期間を21ヶ月(30ヶ月-9ヶ月(建造期間))と設定した。

建造モデルの構築は以下のデータを利用した。

- (1) 手持工事量 (DWT)：1996年-2013年
- (2) 竣工量 (DWT)：1996年-2013年

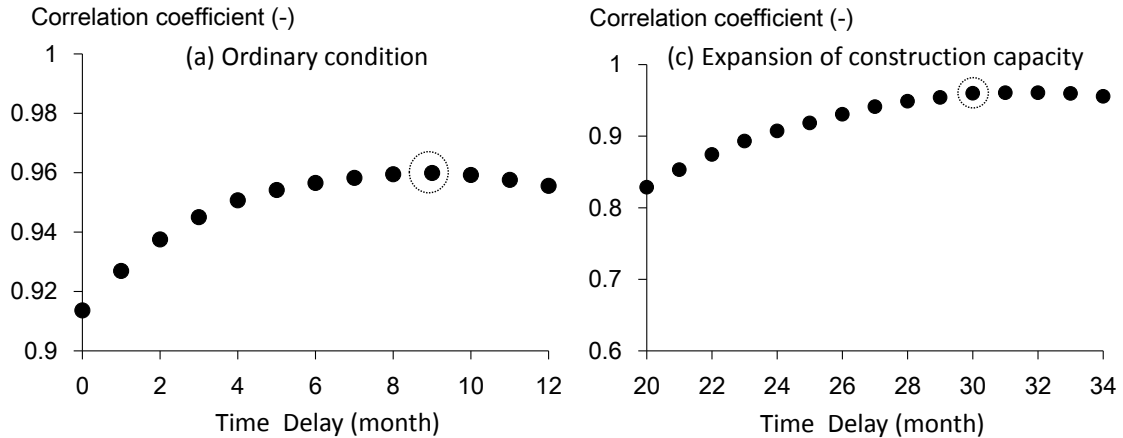


Fig.4.4.3 相関分析による建造期間(左), 能力拡張期間(右)の特定

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4-12)$$

ここに R : 相関係数
 x : 手持工事量 (DWT)
 y : 竣工量 (DWT)

4.5 船価予測モデル

4.5.1 船価予測モデルの基本的な考え方

一般的に、船価は造船市場の需給変動による内生的な影響と条約の改正等の外生的な影響により変動する。長塚ら⁽⁸⁾によれば船価は以下に示す要因で変動すると述べている。

- (1) 造船市場の内生要因 :
船価は世界の船舶建造能力, 手持工事量の影響が大きく, それにより大きく変動する。
- (2) 造船市場の外生要因 :
IMO 等の規制による建造コスト増加に伴う, 船価の上昇が考えられる (例えば, タンカーのダブルハル化等)。また OECD 造船協定等による国際的な低船価受注の抑制の取り決めや不公正な国家助成の禁止によっても変動すると考えられる。

外生的な影響による船価の変動を予測することは困難であるため, 本研究では造船市場

の内生要因と船価の関係に着目する。また、本研究では外生変数の入力を少なくするため、SDモデルの内生変数、即ち手持工事量、建造能力及び船価の関係を定量的に分析する。

4.5.2 船価予測モデルの概要

上述に示したように、船価はSDモデルの内生変数である手持工事量、建造能力を用いて船価を予測する。そこで本研究では、(4-6)式によって算出する手持工事率を用いて船価を予測する(式(4-13))。これにより、手持工事量と建造能力の増減による船価の変動を考慮する。

$$Sp_t = f(Bl_t) \quad (4-13)$$

ここに、 Sp_t : 船価(index)

Bl_t : 手持工事率(-)

t : シミュレーション内部時間 (month)

バルクキャリアにおける手持工事率と船価の関係を Fig.4.5.1 に示す。これは 1996 年-2011 年までの実績データを用いて定義されており、手持工事率によって変化する以下の(1)-(3)のサイクルを用いて船価を予測する。

- (1) 船価の上昇期：造船所の手持工事率の上昇に伴い、船価は上昇する。手持工事率が 1.0-3.0 年までは船価は急速な上昇傾向を辿り、手持工事率が 3.0 年以上になると船価は緩やかな上昇傾向に変化する。
- (2) 船価の下落期：建造能力の拡張の影響により手持工事率が急速に低下し、その影響により船価は急速に下落する。手持工事率が 3.0 年を下回ると船価は緩やかな減少傾向に変化する。
- (3) 船価の強制下落期：手持工事率が 1.0 年程度になると造船所は、将来の手持工事量を確保するために安い船価で受注を確保する。そして、船価が底値に達した段階で(1)の状態に戻る。

長塚ら⁽⁸⁾も同様に船価予測モデルを構築している(Fig.4.5.2)。長塚らの研究では、手持工事期間(本研究では手持工事率)の上昇に伴い、見積り船価が線形に上昇すると仮定している。そのため船価の上昇時と下降時の変化率が同じであるのが長塚モデルの特徴である。それに対し、本研究の予測モデルは、船価の上昇時と下降時で変化率が異なるヒステリシス(船価の履歴効果)を持つモデルとなっていることが特徴である。なお、船価に関しては index

という Clarkson 社が定義する指標を用いており，1988年1月の船価の平均値を100とする指標である。

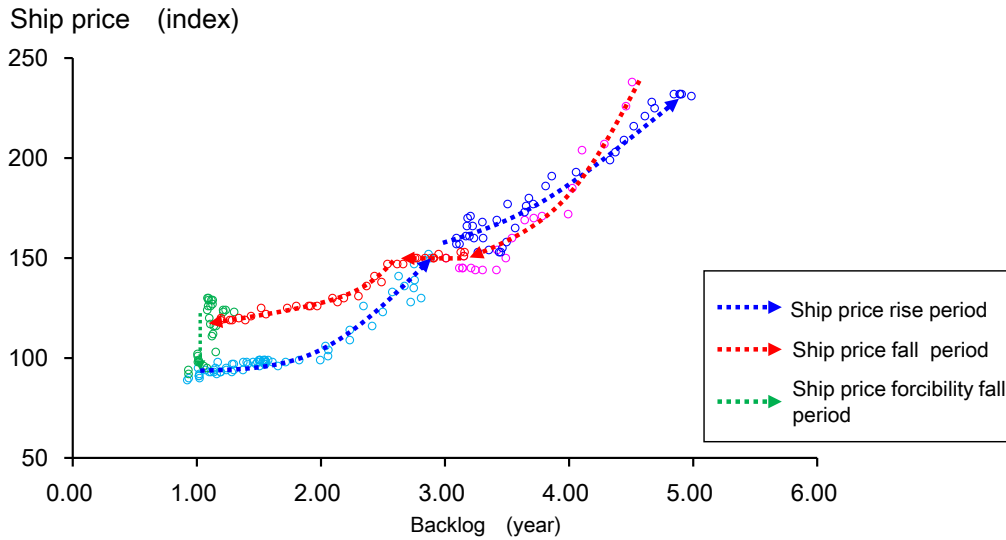


Fig. 4.5.1 船価予測モデル (本研究の提案モデル)

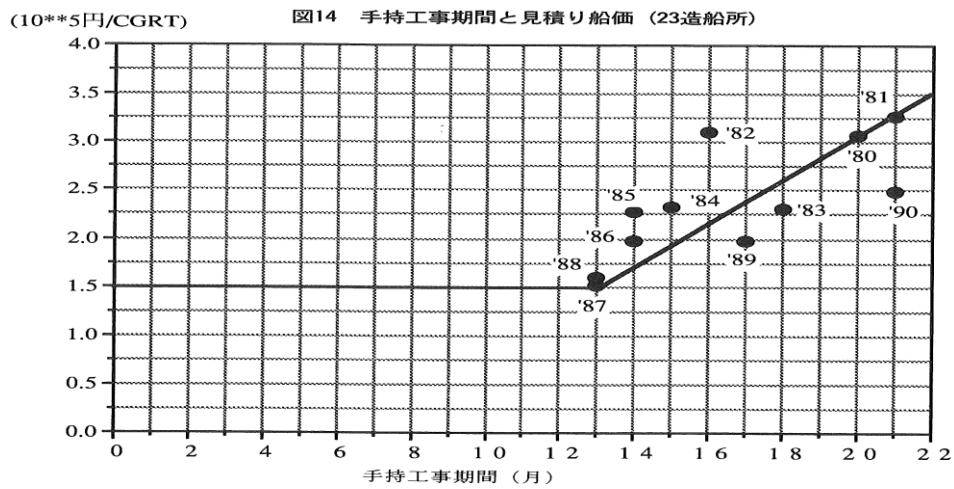


Fig. 4.5.2 船価予測モデル (長塚らの提案モデル)⁽⁸⁾

船価予測モデルの構築には以下のデータを利用した。

- (1) 手持工事量 (DWT) : 1996年-2011年
- (2) 船舶の建造能力(DWT) : 1996年-2011年
- (3) 船価 (index) : 1996年-2011年

4.6 廃船モデル

4.6.1 廃船量と発注量の関係

Fig.4.6.1 に発注量と廃船量の推移を示す。Fig.4.6.1 に示すように、発注量が多い時には廃船量は少なり、発注量が少ない時には廃船量が多くなるという傾向がある。つまり、発注量と廃船量は対称的な動きをしているため、発注量の算出に用いる船舶航海距離と関係があると考えられる。また 2008 年以降、廃船量が大きく増減している。これは 2007 年に大量発注された船舶が完工し、海運市場に流入した影響と考えられる。以下に廃船量の算出の方針を示す。

- ・船舶の廃船量は、発注量と対照的な動きをしていることから船舶航海距離を基に基本となる廃船量を算出する。
- ・大量発注された船舶が完工し、海運市場に流入するタイミング廃船量が急激に増減しているため、廃船量をそれにより補正する。

本研究では、Fig.4.6.2 に示すように船舶航海距離を基に廃船量を算出した後(Step 1)、発注量により廃船量を補正する(Step 2)。

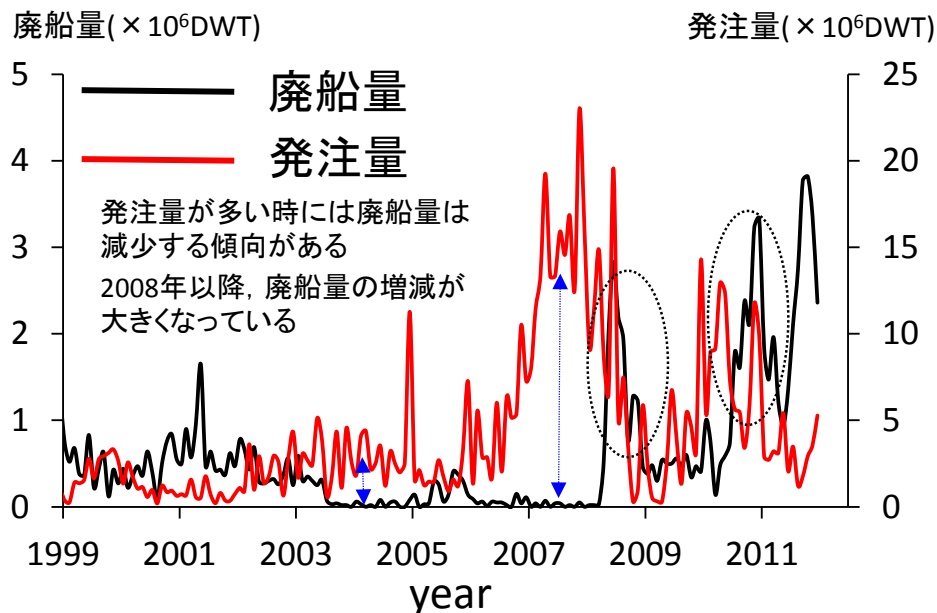


Fig.4.6.1 廃船量と発注量の関係

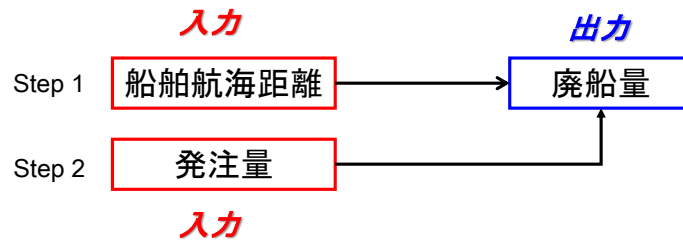


Fig.4.6.2 廃船量の算出の流れ

4.6.2 船舶航海距離による廃船量の算出

本研究では基本となる廃船関数を定義することにより，海運市場の状態を考慮して廃船量を算出する．(4-14)式と Fig.4.6.3 を利用して，全体の廃船量を決定する．

$$Ds_t = f(E_t) \times V_t \tag{4-14}$$

ここに， Ds_t : 船舶航海距離によって算出された廃船量(DWT)

E_t : 船舶航海距離(mile)

V_t : バルクキャリアの船腹量 DWT)

t : シミュレーション内部時間(month)

船舶航海距離と廃船量の関係を Fig.4.6.3 に示す．y 軸は廃船量を船腹量で無次元化した値を取る．この図に示すように，船舶航海距離が少ない時は廃船量が増加し，船舶航海距離が大きい時は廃船量が減少するという特徴を持つことが分かる．船舶航海距離と発注量の関係(Fig.4.3.3)と比較すると，対照的な動きをしていることが分かる．

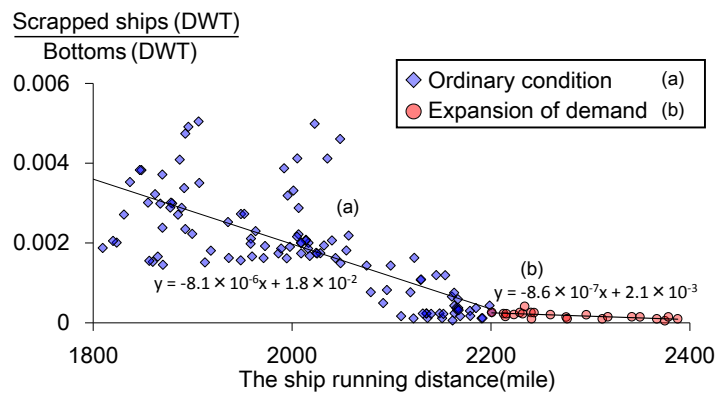


Fig.4.6.3 船舶航海距離と廃船量の関係

4.6.3 発注量による廃船量の補正

基本となる廃船量の算出後，(4-15)式とFig.4.6.4の關係を用いて，廃船量の補正值を算出する．本研究では，船舶需要の急激な変動による廃船量の急激な増減を考慮するために発注量の連続増減値(DWT)を定義し，これを基に廃船量の補正值を算出する．Fig.4.6.4に示すように発注量の連続増減値と廃船量の補正量の間には線形の關係が存在する．また，Fig.4.6.5に示すように，発注量の連続増減値(DWT)と廃船量の補正值の間には17ヶ月の時間遅れが存在する．そして，(4-16)式を用いて廃船量を補正する．その後，(4-17)式を用いて船腹量を更新する．

$$Do_t = f(Oc_{t-17}) \quad (4-15)$$

ここに， Do_t ：廃船量の補正值(DWT)
 Oc_t ：発注量の連続増減値(DWT)
 t ：シミュレーション内部時間(month)

$$D_t = Ds_t + Do_t \quad (4-16)$$

$$V_{t+1} = V_t + C_t - D_t \quad (4-17)$$

ここに， D_t ：補正した廃船量(DWT)
 Ds_t ：船舶航海距離によって算出された廃船量(DWT)
 Do_t ：廃船量の補正值(DWT)
 V_t ：バルクキャリアの船腹量(DWT)
 C_t ：バルクキャリアの竣工量(DWT)
 t ：シミュレーション内部時間(month)

廃船モデルの構築には以下のデータを利用した

- (1) 廃船量(DWT)：1999年-2012年
- (2) 船舶航海距離(mile)：貨物輸送量(ton)と貨物輸送距離(mile)の実績データを用いた計算結果を利用した：1999年-2012年
- (3) 発注量(DWT)：1999年-2012年

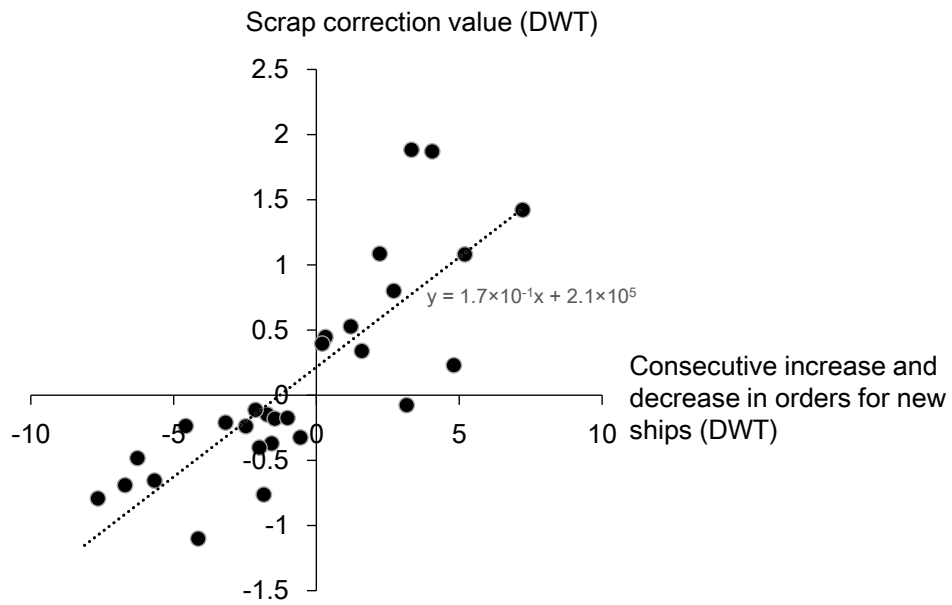


Fig.4.6.4 発注量の連続増減値と廃船量の補正値の関係

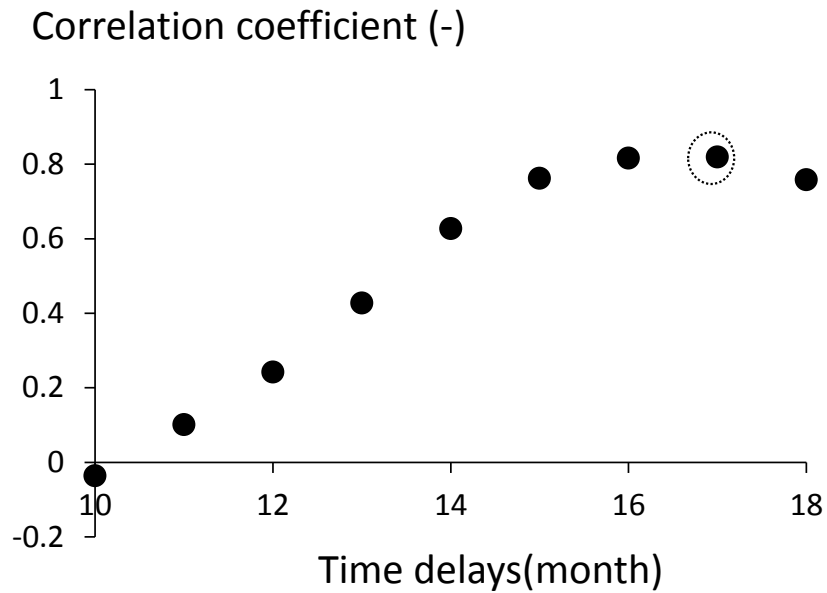


Fig.4.6.5 発注量の連続増減値の時間遅れ

4.7 モデルの適合性の検証

4.7.1 Sub-Model での検証

構築した各々のモデルが実績の傾向を再現できるか検証するため、各モデルに実績データ入力し、その再現性を確認する。Table 4.7.1 に各モデルへする実績データの詳細を整理する。

Table 4.7.1 Sub-model 検証用データ

モデル名	入力値(実績データ) : 1999/1 – 2012/4	Output
(A)貨物量予測モデル	(1) 世界 GDP (USD) (2) 貨物輸送距離(mile)	海上荷動き量 (tons×mile)
(B)発注量予測モデル	(1) 船舶航海距離(mile) (4) 船価 (Index) (2) 船腹量 (DWT) (5) 手持工事量(DWT) (3) 建造能力(DWT)	発注量(DWT)
(C) 建造モデル	入力値(期間) : 1999/1 – 2012/4 (1) 手持工事量 (DWT) 初期値: 1999/1 (2) 建造能力: 2.09×10^6 (DWT) (3) 建造中の船腹量: 1.11×10^7 (DWT)	竣工量(DWT)
(D) 船価予測モデル	(1) 手持工事量 (DWT) (2) 建造能力(DWT)	船価(index)
(E) 廃船モデル	(1) 船舶航海距離(mile) (3) 発注量 (DWT) (2) 船腹量 (DWT)	廃船量(DWT)

Fig.4.7.1, Fig.4.7.2 に再現性を確認した結果を示す。海上荷動き量に関しては、年々の増加傾向を再現できている。発注量に関しては、2007年から2009年の海上荷動きの活発化による発注量の増加、船価の下落による2009年から2011年の発注量の増加を再現されている。竣工量に関しては2008年以降の竣工量の増加を再現できている。船価も、全体の傾向を再現できている。廃船量に関しても、2008年以降の廃船量の増減を再現できている。以上より、構築したモデルすべて、実績の傾向を再現できていることが分かる。

以上の結果より、Sub-model についての再現性は十分に確保できていると考えられる。

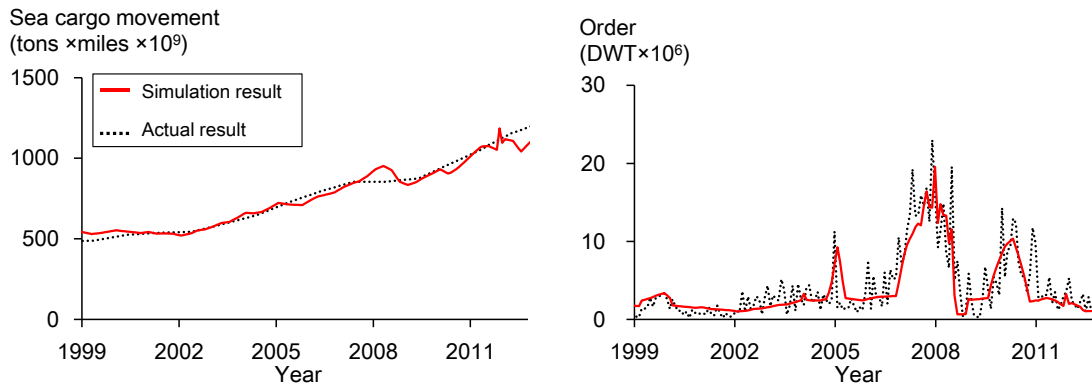


Fig.4.7.1 海上荷動き量（左）と発注量(右)の予測結果 (Sub-model での検証)

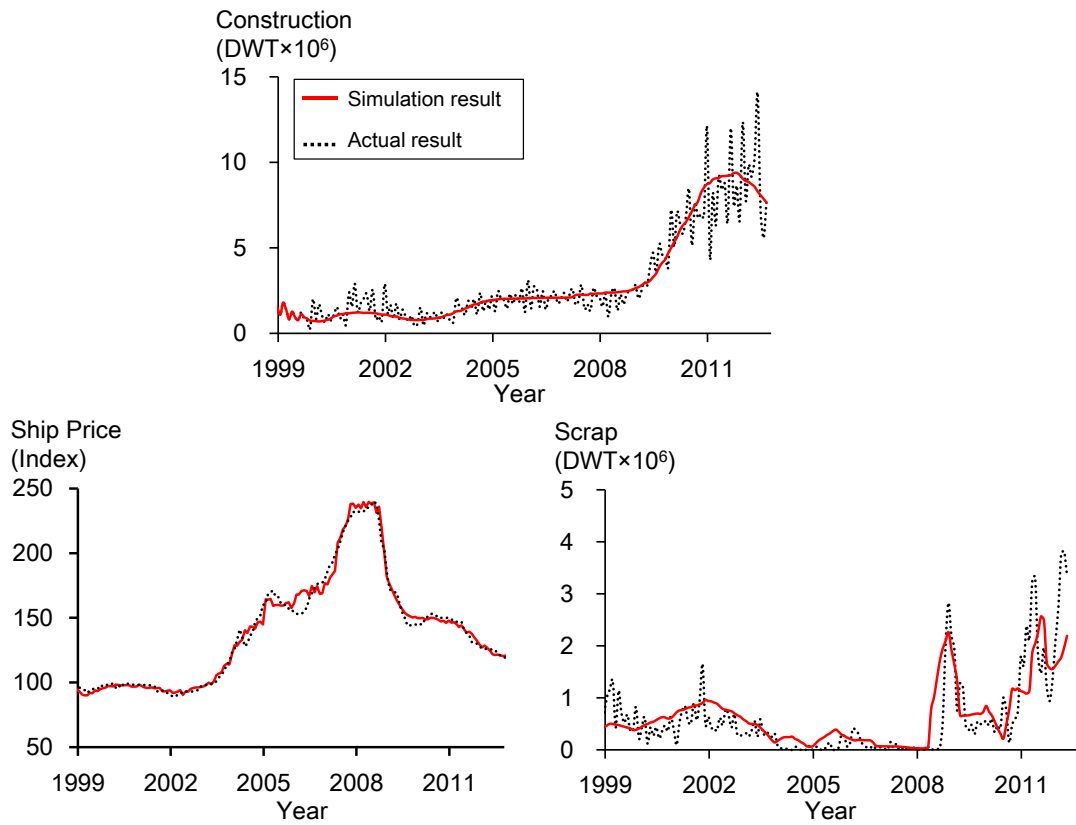


Fig. 4.7.2 竣工量(上), 船価(左下), 廃船量(右下)の予測結果 (Sub-model での検証)

4.7.2 全体モデルでの検証

本項では、構築した Sub-model を連結・統合し、モデル全体の再現性を確認する。以下に入力データを示す。

- ・ 入力値：1999 /1 -2012/9
 - (1) 世界 GDP (actual data)
 - (2) 貨物輸送距離(actual data)
- ・ 初期値：1999 /1
 - (1) 船腹量 2.64×10^8 (DWT)
 - (2) 手持工事量: 2.41×10^7 (DWT)
 - (3) 建造能力: 2.09×10^6 (DWT)
 - (4) 建造中の船舶: 1.11×10^7 (DWT)

需要予測モデル全体で再現性を確認した結果を Fig. 4.7.3, Fig. 4.7.4 に示す。発注量，竣工量，船価，廃船量，船腹量の全体的な傾向を再現できていることが分かる。船腹量に関しても同様に，全体の傾向を再現できている。しかし，Sub-model の検証結果と同様，短期的な変動に関しては十分に再現できていないことが分かる。

そのため，実績値の移動平均値と予測値の相関分析を実施し，全体モデルの予測結果がどの程度実績傾向を再現しているかを確認した。その結果を Fig. 4.7.5 -Fig. 4.7.6, Table 4.7.2 に示す。これらの結果に示すように，発注量は 5 ヶ月，竣工量は 5 ヶ月，船価は 3 ヶ月，廃船量は 10 ヶ月，船腹量は 1 ヶ月（移動平均なし）という結果となった。廃船量の移動平均期間は他と比べ，長くなっている。これは，船腹量の船齢構成，廃船船齢の影響を考慮

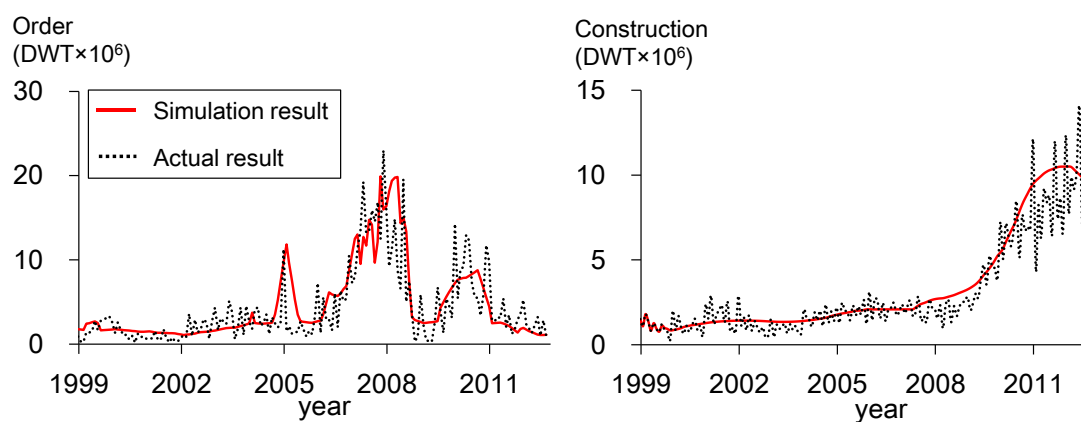


Fig. 4.7.3 発注量(左)，竣工量(右)の予測結果 (全体 model での検証)

していない影響だと考えられる。また Fig. 4.7.7- Fig. 4.7.8 に示すように、実績値の移動平均期間を取った場合は実績値の短期的な変動が平均された影響により、変動が少なくなる。以上より、構築した SD モデルは Table 4.7.2, Fig. 4.7.7- Fig. 4.7.8 に示す程度の再現性を有することが分かる。

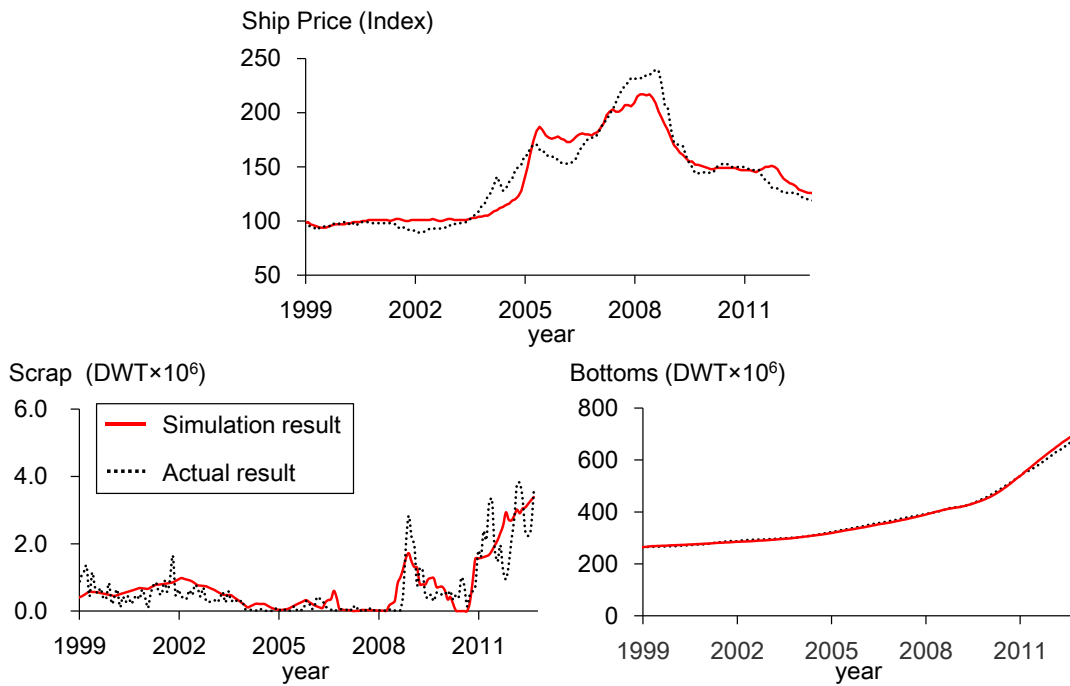


Fig. 4.7.4 船価(上), 廃船量(左下), 船腹量(右下)の予測結果 (全体 model での検証)

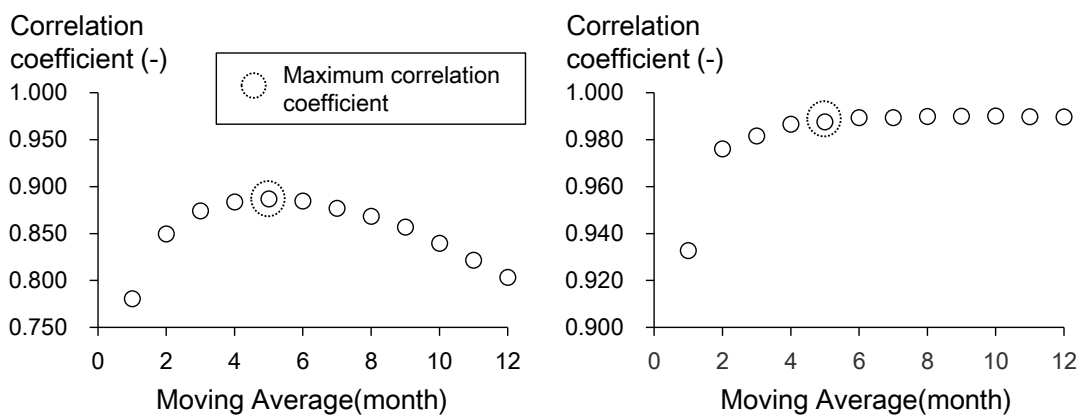


Fig. 4.7.5 発注量(左), 竣工量(右)の予測結果の相関分析 (全体 model での検証)

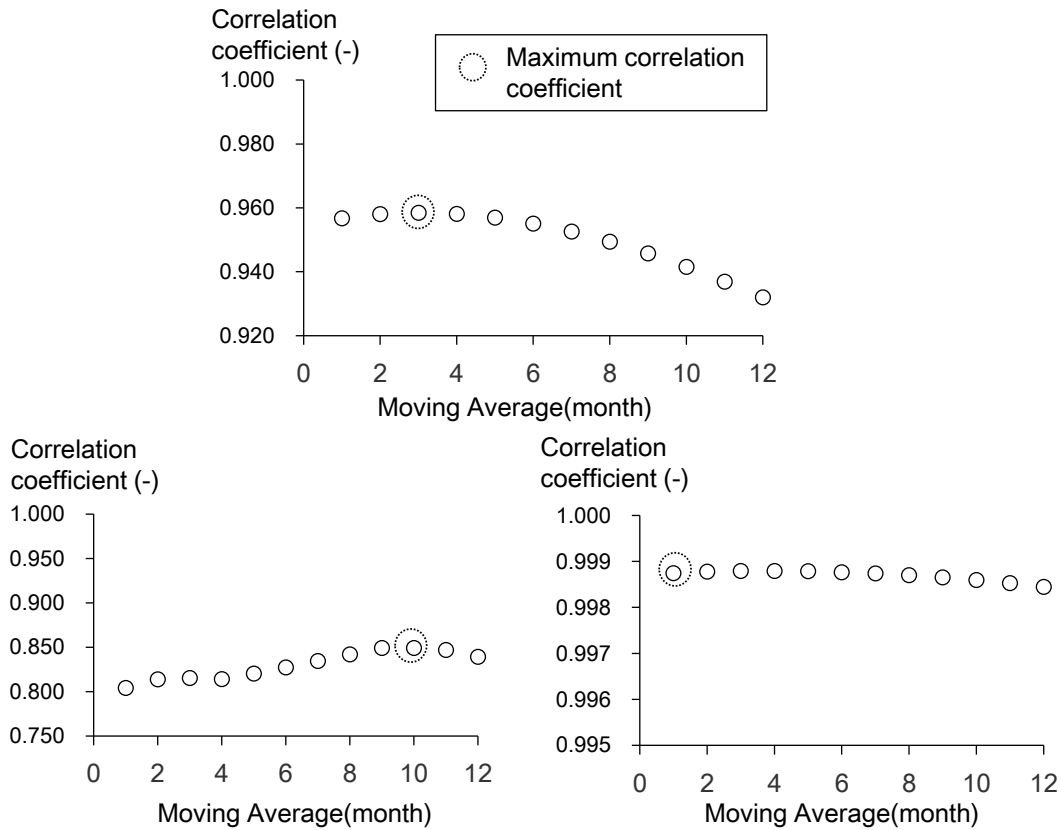


Fig. 4.7.6 船価(上), 廃船量(左下), 船腹量(右下) の予測結果の相関分析 (全体 model での検証)

Table 4.7.2 相関係数が最大となる実績値の移動平均期間

対称	発注量	竣工量	船価	廃船量	船腹量
相関係数が最大となる移動平均期間	5ヶ月	5ヶ月	3ヶ月	10ヶ月	1ヶ月

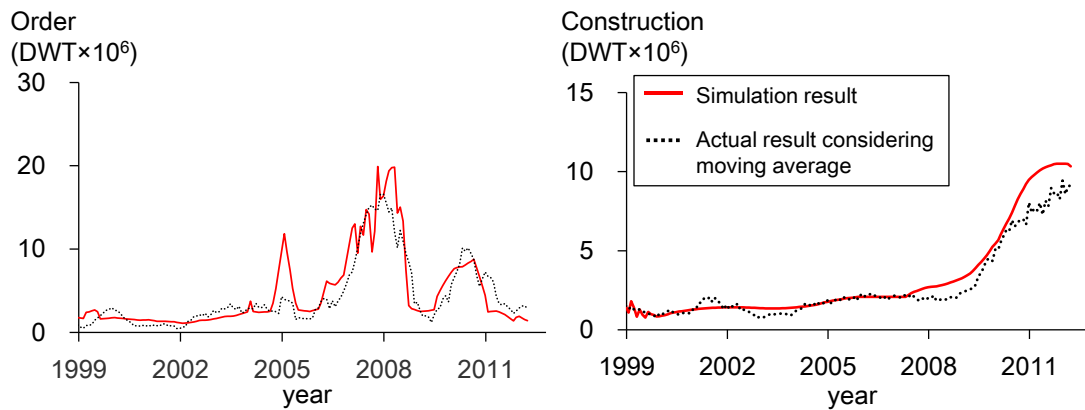


Fig. 4.7.7 発注量(左), 竣工量(右)の予測結果

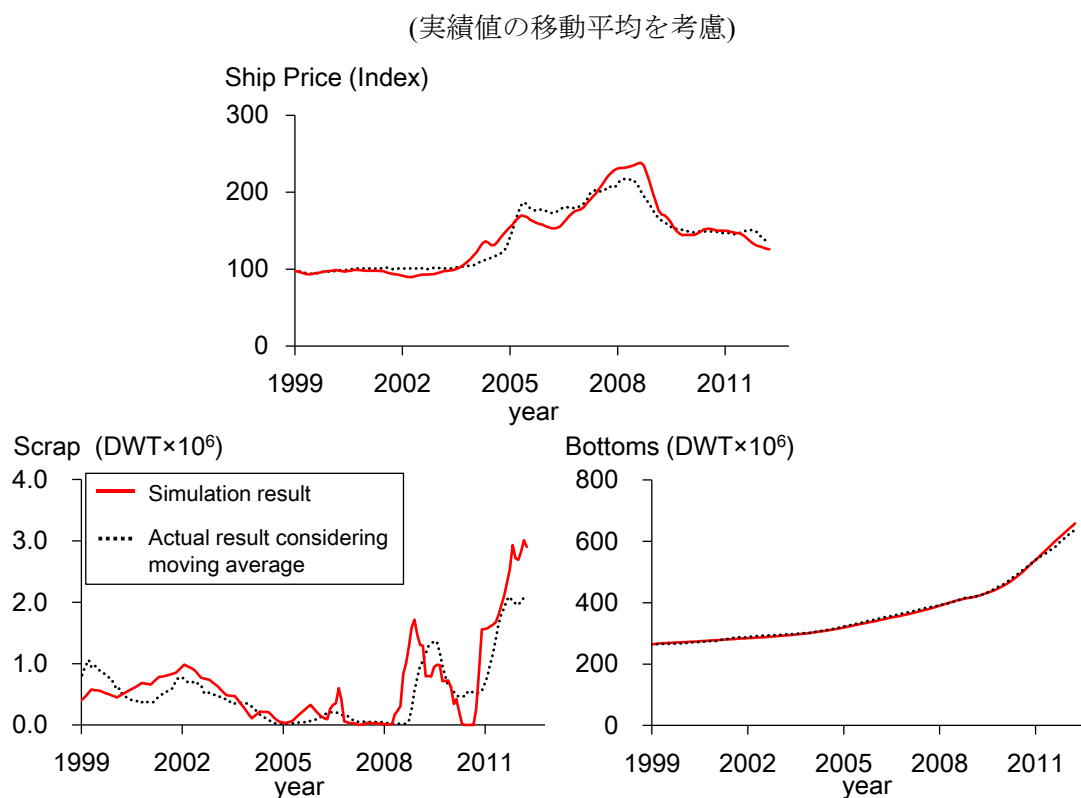


Fig. 4.7.8 船価 (上) , 廃船量 (左下) , 船腹量 (右下) の予測結果
(実績値の移動平均を考慮)

4.7.3 本研究の需要予測モデルの特徴

(1) マクロ的な視点によるモデル構築

本研究の需要予測モデルは、海運・造船市場をマクロ的な視点でとらえモデルを構築している。具体的には、世界全体の船腹量は1社で管理し、造船所も世界全体で1社と仮定し、モデルを構築している。このようにマクロ的な視点でモデルを構築することで船舶需要予測という問題を、基本的には海上荷動き量、船腹量の需給バランスによって決定される問題として捉えている。これにより為替の影響等の難しいモデル化の部分を排除し、モデルを簡易化している。例えば、世界の国別の船舶発注量を予測する場合、各国間の競争(技術力、コスト競争力)、為替等の影響をモデル化する必要がある。しかし、それらを正確に考慮してモデルを構築することは難しく、複雑なモデルが要求される。しかし、海運・造船市場をマクロ的な視点でとらえることで、各国間の競争(技術力、コスト競争力)、為替等の影響の部分をモデル化する必要がなくなる。このように本研究では、船舶需要予測モデルをマクロ的な視点で構築することで船舶需要予測という問題を簡易化している。

(2) 月別データの利用によるモデルの詳細化

既往研究⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾では基本的には年間データを用いて需要予測モデルを構築している。一方、本研究では、月別データを用いることでモデルを詳細化している。Fig.4.7.9に発注量予測モデルの比較を示す。こちらに示すように、年間データを用いた実績点が少なくなる。また年間データを用いた場合、発注量が大きく増加する発注爆発期間のデータ数が3点となり、回帰直線を引くには十分なデータ数を確保できていない。つまり、サンプル数が不十分であるため、ある程度の信頼性を確保したモデルを構築することが困難となる。

Fig.4.7.9のモデルを用いてシミュレーションした結果をFig.4.7.10に示す。この結果に示すように、年間データを用いた場合、年単位での総量と傾向は予測できているものの、発注量の急激な変化やそのタイミングについては全く予測できていないことが分かる。一方、月別データを用いた場合は、発注量の急激な変化やそのタイミングを予測できることが分かる。例えば、2005年に発生する発注量の急激な増減は、月別の場合では予測できるものの、年別の場合には予測できないことが分かる。このように月別データを用いることで詳細な予測を実現している。また、造船所の経営戦略の視点からしても、このような詳細な予測ができる月別での予測の方が有効であると考えられる。

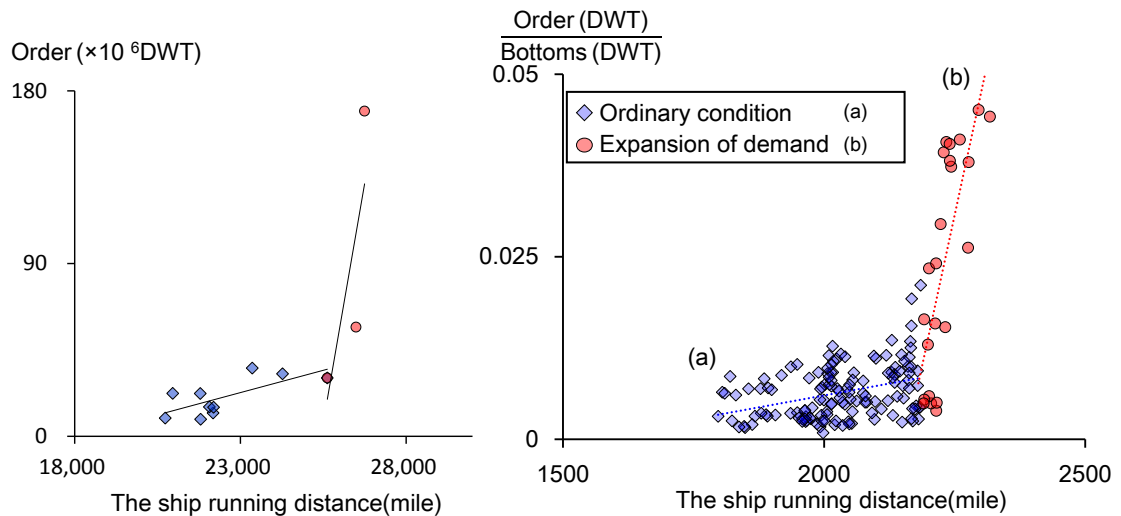


Fig.4.7.9 発注量予測モデルの比較
(年間データによるモデル定義(左), 月別データによるモデル定義(右))

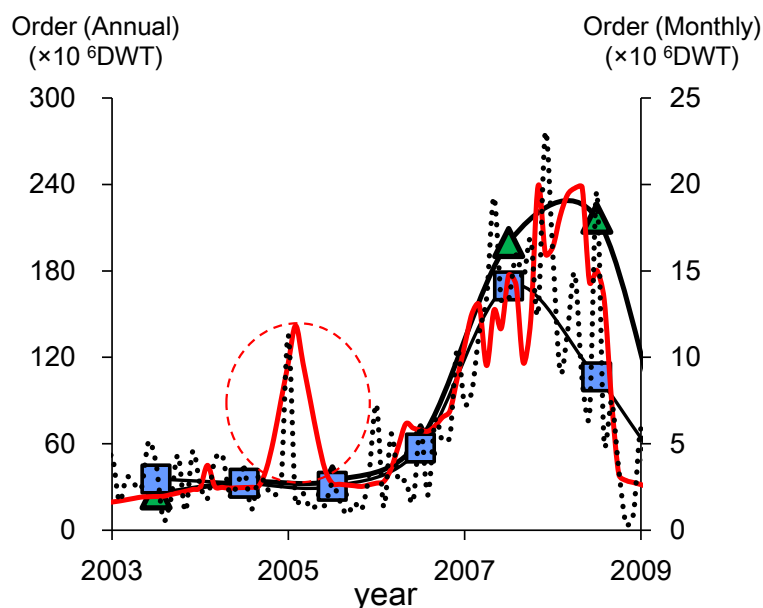


Fig.4.7.10 発注量の予測結果の比較

(3) 市場の短期的な変動の影響を考慮

本研究の船舶需要予測モデルの基本的なフレームワークは、海事産業研究所 SD 研究会⁽¹⁰⁾の研究成果を参考にしている。しかし、この研究では船価の下落による発注量の増加、造船所の手持工事量が過多の時の発注キャンセルによる発注量の減少などの市場の短期的な変動を考慮していない。本研究では船舶需要予測モデルを拡張し、①船価の下落による発注量の増加、②手持工事量が過多の時の発注量の減少、③発注量の急激な増減の後の廃船量の短期的な変動を考慮している。また、このような短期的な変動の影響は既往研究⁽⁹⁾⁽¹¹⁾(Taylor⁽⁹⁾, Lee⁽¹¹⁾)でも、考慮されていない。

4.7.4 船舶需要予測用 SD モデルの性能検証

上述の 4.7.2 項では、世界 GDP、貨物輸送距離の実績値を入力し、構築した船舶需要予測用 SD モデルが発注量、竣工量等の傾向を再現できることを確認した。本項では、世界 GDP、貨物輸送距離が分からない(予測値・推定値)という条件を用いて、構築した船舶需要予測用 SD モデルがどの程度予測できるか検証する。Table 4.7.3 に入力データを示す。世界 GDP は IMF の予測結果を基に設定した⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。この IMF の世界 GDP の予測では 6 年の予測値が記載されているため、シミュレーション期間を 6 年間と設定した。貨物輸送距離は、過去の実績値の推移を基に設定している。シミュレーションケースは、①2003 年/1-2008 年/12、②2004 年/1-2009 年/12、

③2005年/1-2010年/12の3ケースとし、2006年-2009年に発生する発注爆発が予測可能か検証する。

Fig.4.7.13に発注量のシミュレーション結果を示す。この結果に示すように、①2003年からの予測の場合、発注爆発のタイミングが2008年となり、発注量の爆発のタイミングが予測できていないことが分かる。これは、鉄鉱石、石炭、穀物の貨物輸送距離が2003年では実績と大きく推移が異なっている影響であると考えられる。特に、石炭、穀物は実績と大きく異なることが分かる。そのため、世界GDPをIMFの予測値(Fig.4.7.11)、貨物輸送距離を実績値、2003年を計算開始タイミングとしてシミュレーションを実行した。その結果をFig.4.7.14に示す。この結果より、発注爆発のタイミングを予測できていることが分かる。つまり、2003年の段階では貨物輸送距離の正確な予測ができれば、発注爆発を予測できたと考えられる。

また、②2004年からの予測、③2005年からの予測の場合は発注量爆発のタイミングが予測できる(Fig.4.7.13)。しかし、②2004年からの予測、③2005年からの予測でもリーマンショックによる世界金融危機(2009年)を予測できていないため、発注量が一定に増加していくという結果となった。また2004年では貨物輸送距離の将来シナリオが異なるものの、発注爆発のタイミングを予測できている。これは、世界GDPの予測結果が実績よりも大きい影響であると考えられる。その影響を考察するため、世界GDPを実績値、貨物輸送距離を予測値(Fig.4.7.12)、2004年を計算開始タイミングとしてシミュレーションを実行した。その結果をFig.4.7.14に示す。この結果より、発注爆発のタイミングを予測できないことが分かる。つまり、世界GDPが実績値よりも大きいため、発注爆発が発生したと考えられる。

以上の結果を総合すると、2004年の段階で予測が可能であることが考えられる。そして、正確な予測を行うためには、正確な将来シナリオの入力が必要であることが分かる。

Table 4.7.3 パラメータの設定値と入力値

	2003年/1- 2008年/12	2004年/1- 2009年/12	2005年/1- 2010年/12
世界GDP	IMFの予測値 (文献) ⁽¹²⁾ Fig.4.7.11 ①	IMFの予測値 (文献) ⁽¹³⁾ Fig.4.7.11 ②	IMFの予測値 (文献) ⁽¹⁴⁾ Fig.4.7.11 ③
貨物輸送距離	2000-2002年の 実績を基にし た予測値 Fig.4.7.12 ①	2000-2003年の 実績を基にした 予測値 Fig.4.7.12 ②	2000-2004年の 実績を基にした 予測値 Fig.4.7.12 ③

Table 4.7.3 パラメータの設定値と入力値 (続き)

初期設定			
パラメータ名	2003年/1- 2008年/12	2004年/1- 2009年/12	2005年/1- 2010年/12
船腹量 (DWT)	2.95×10^8	3.02×10^8	3.22×10^8
手持工事量 (DWT)	3.19×10^7	5.58×10^7	6.87×10^7
建造能力 (DWT)	2.09×10^6	2.09×10^6	2.09×10^6
建造中の船舶 (DWT)	0.89×10^7	1.50×10^7	1.76×10^7

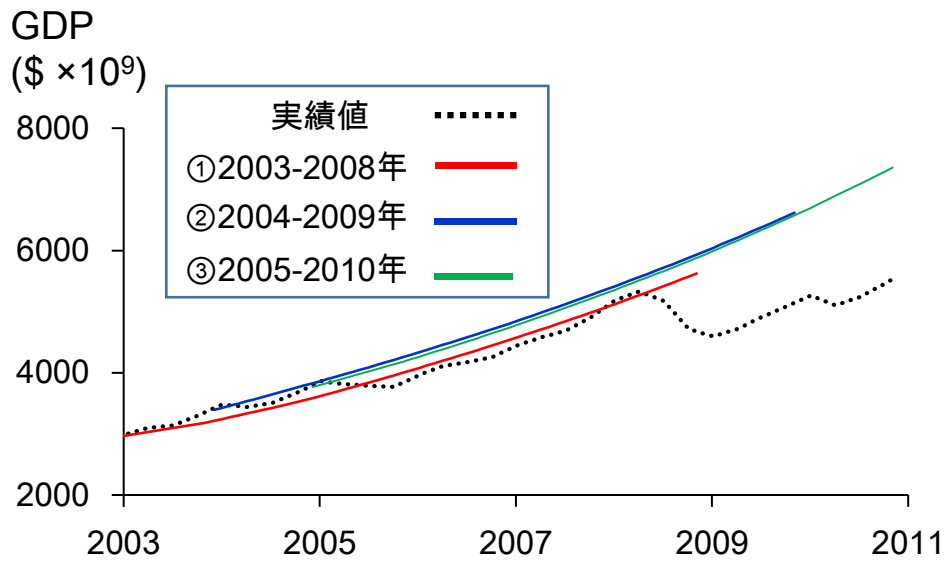


Fig. 4.7.11 世界 GDP の入力値

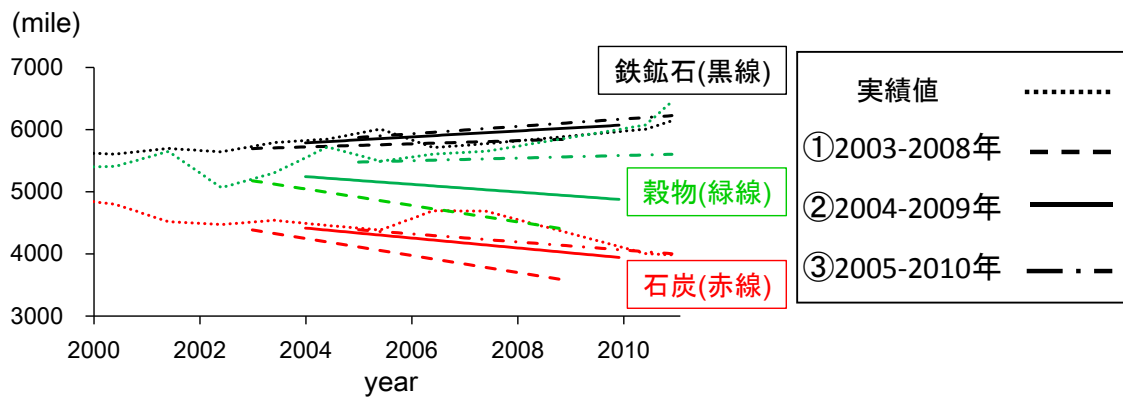


Fig. 4.7.12 貨物輸送距離の入力値

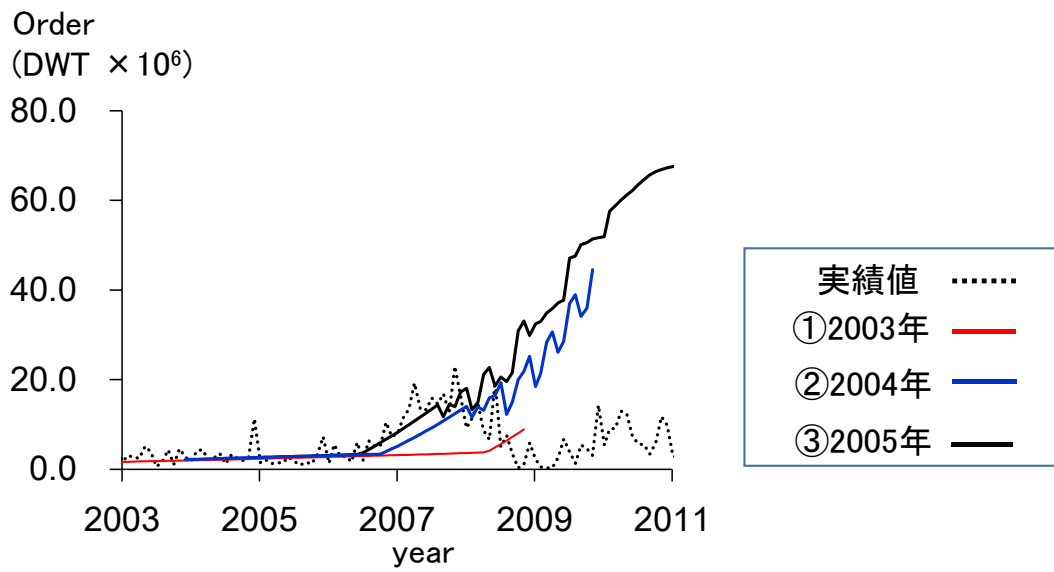


Fig. 4.7.13 発注量の予測結果 (1)

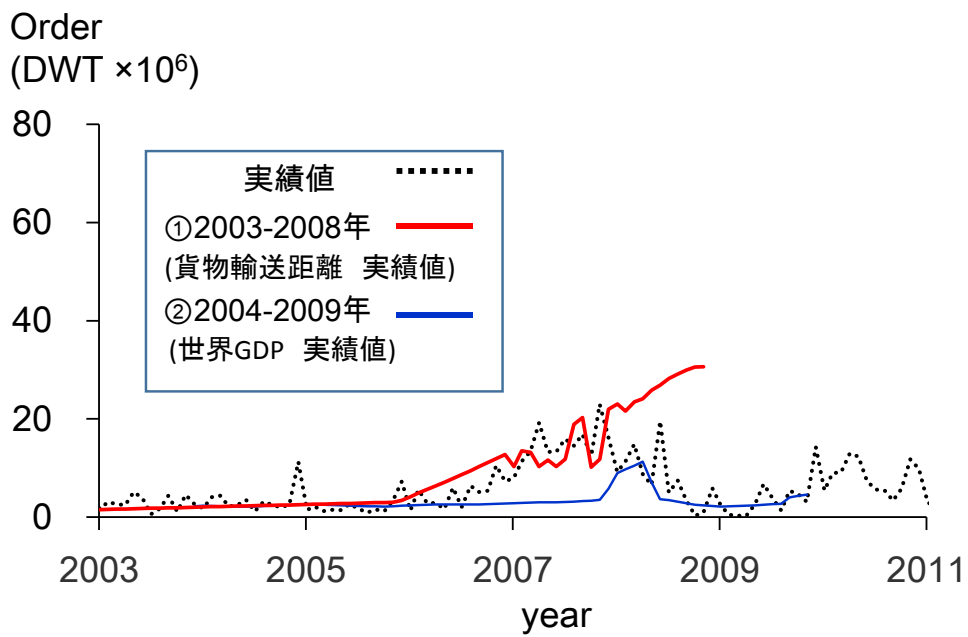


Fig. 4.7.14 発注量の予測結果 (2) (2003年, 2004年)

4.8 船舶サイズ別の需要予測

4.8.1 船舶サイズ別の需要予測の基本方針

本項では、船舶サイズ別に需要予測するための基本方針を示す。Clarkson 社のデータ⁽⁶⁾には総量のデータ（船舶サイズ毎のデータを総和したもの）の他、船舶サイズ別のデータも獲得することができる。本研究では、この詳細なデータを利用することで、船舶サイズ別の需要予測モデルを構築する。

船舶サイズ別の需要予測の基本方針を Fig.4.8.1 に示す。以下に示す流れで、サイズ別の発注量、竣工量、廃船量等を予測する。

- (1) 貨物輸送量予測モデルを用いて、海上荷動き量(tons×mile)を計算する。(Fig. 4.8.1 (A,(1)))
- (2) サイズ毎の船腹量を総和することで、Total の船腹量を算出する。その後、船舶航海距離をその Total の船腹量を用いて計算する。(Fig. 4.8.1 (A,(2)))
- (3) 発注量予測モデルを用いて発注量の総量を計算する。その後、発注量配分モデルを用いてサイズ別の発注量を計算する(Fig. 4.8.1 (A,(3)))
- (4) 船舶サイズ別の建造モデル、廃船モデルを用いて、サイズ別の竣工量、廃船量を算出する。建造モデル、廃船モデルの構築方法は、上述の 4.4、4.6 節と同様である。(Fig. 4.8.1A,(4))

Fig. 4.8.1 に示すように、(A) 詳細モデルと (B) 全体モデルを比較すると基本的な計算の流れは同じである。しかし、発注量配分モデルを構築している点、船舶サイズ別に建造モデル、廃船モデルを構築している点が異なる。

以上の基本方針を用いて、船舶サイズ別の需要予測を行う。実際には、船舶サイズ毎に1ヶ月に移動する距離(船舶航海距離)は異なる。本研究では、Total の船腹量を用いて算出した、船舶航海距離の平均値を用いてサイズ別の発注量を予測する。なお、船舶サイズの定義は Clarkson 社の定義に従う。

船舶サイズの定義：

Capesize: 100,000 DWT and over;

Panamax: 65,000–100,000 DWT;

Handymax: 40,000–65,000 DWT;

Handysize: 10,000–40,000 DWT.

(Definition on September 12th, 2015.)

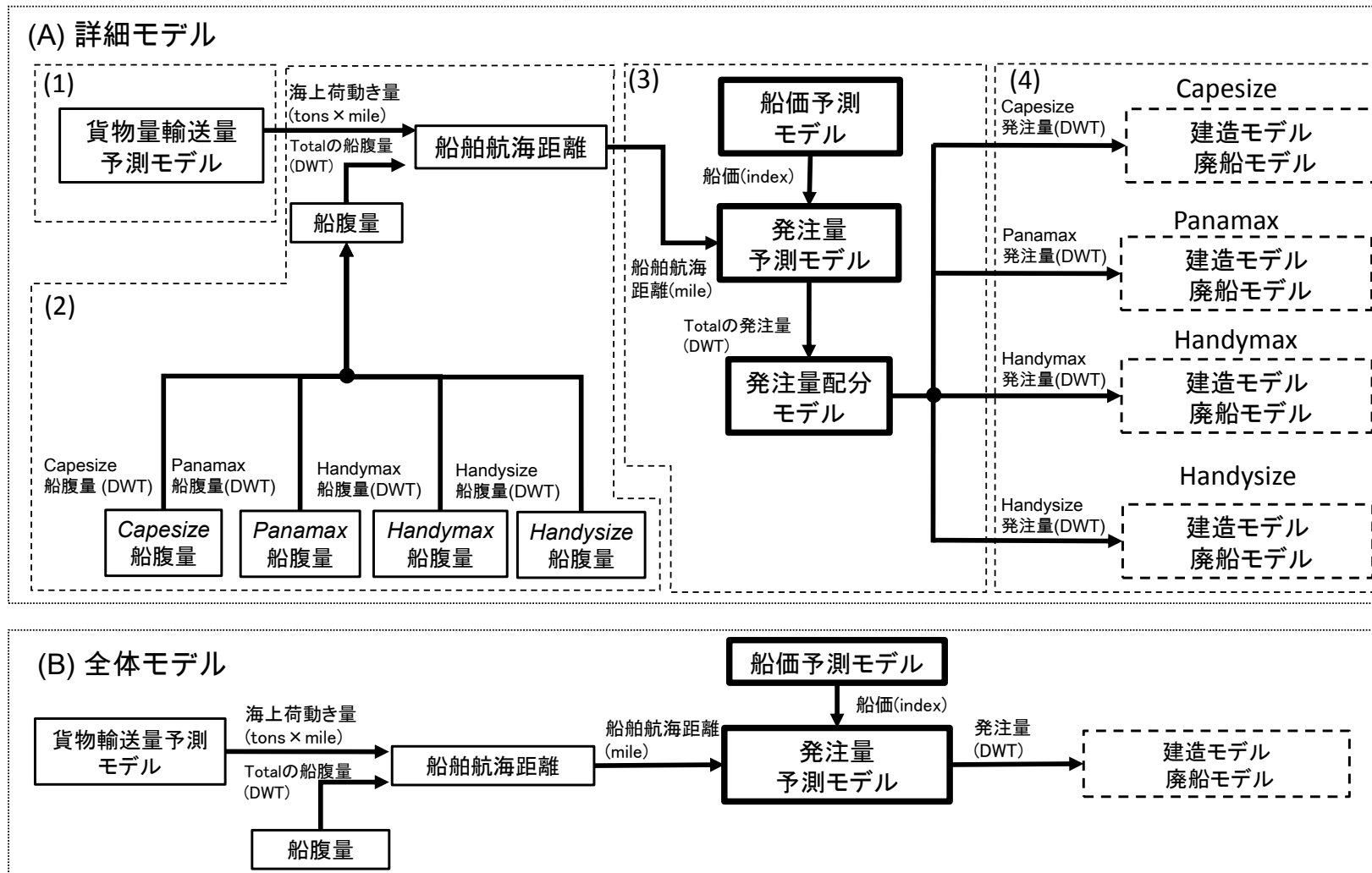


Fig. 4.8.1 船舶サイズ別の需要予測の基本方針

4.8.2 船舶サイズ別需要予測モデルの開発

(1) 発注量配分モデル

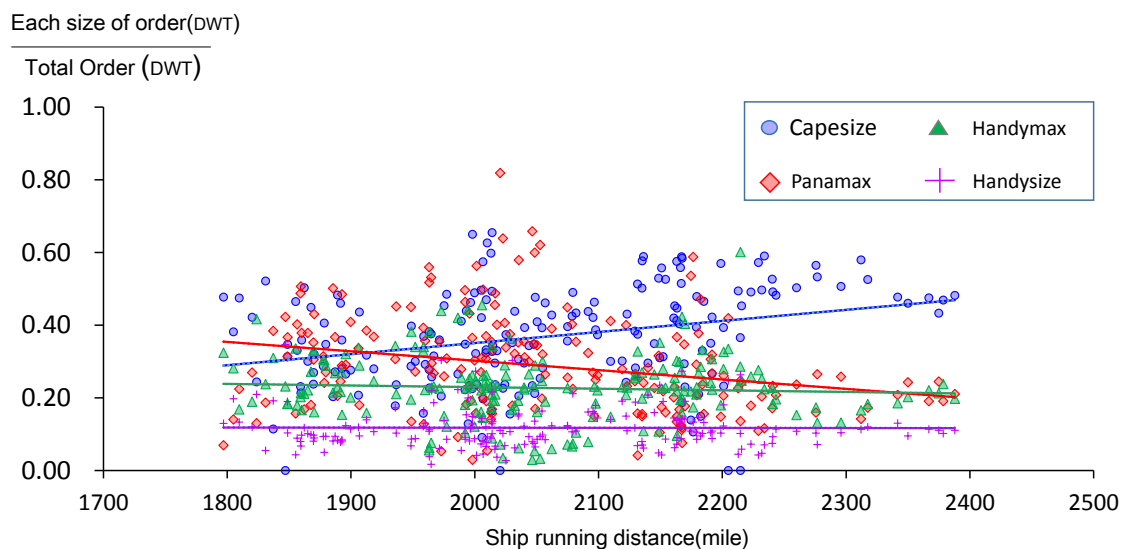


Fig. 4.8.2 発注量配分モデル

サイズ別の発注量は、(4-18)式と Fig.4.8.2(発注量配分モデル)を用いて算出する。Fig.4.8.2 の x 軸は船舶航海距離、y 軸は全体の発注量に占める、サイズ別の発注量の割合を示す。この図より、以下の特徴が観察される。

- Capesize は船舶航海距離の増加に伴い、発注量の割合が増加する。
- Panamax は船舶航海距離の増加に伴い、発注量の割合が減少する。
- Handymax, Handysize は船舶航海距離に関わらず、ほぼ一定の割合で発注される。

船舶航海距離は海運造船業の市況の良し悪しを表現する指標であり、船舶の1ヶ月で航海する距離を示す。Fig.4.8.2 の場合、船舶航海距離の増加する場合は少数の船舶で、大量の貨物を輸送するという働きが働き、全体に占める Capesize の割合が多くなると考えられる。一方、船舶航海距離が減少した場合、Capesize（例えば、300,000DWT 以上 Ore Carrier）の船舶は港湾の入港制限等の制約により、様々な荷主のニーズに対応することが難しい。そのため、比較的使い勝手の良い Panamax の発注量が増加すると考えられる。Handymax, Handysize に関しては、市場が独立しているため、全体に占める割合は変化しないと考えられる。

$$(Oc_t, Opm_t, Ohm_t, Oh_t) = f(Or_t) \quad (4-18)$$

ここに, Or_t : 船価, 手持工事量によって補正された Total の発注量(DWT)

Oc_t : Capesize の発注量(DWT)

Opm_t : Panamax の発注量(DWT)

Ohm_t : Handymax の発注量(DWT)

Oh_t : Handysize の発注量(DWT)

t : シミュレーション内部時間(month)

発注量配分モデルは以下のデータを用いて構築した.

- (1) 船舶航海距離(mile): 貨物輸送量(tons)と貨物輸送距離(mile)の実績データを用いた計算結果を利用した: 1999年-2012年
- (2) 船腹量(DWT): 1996年-2012年
- (3) 発注量(DWT): 1996年-2012年

(2) 船舶サイズ別の建造モデル

Fig.4.8.3 に船舶サイズ別に定義した建造モデルを示す. この図に示すように Fig.4.4.2 と同様の建造モデルが, サイズ別に定義できていることが分かる.

船舶サイズ別の建造モデルの建造期間, 能力拡張期間を特定するため, 相関分析を行った. その結果を Fig.4.8.4, Table 4.8.1 に示す. これらに示すように建造期間は, Capesize は 8 ヶ月, Panamax は 11 ヶ月, Handymax は 9 ヶ月, Handysize は 7 ヶ月という結果となった. 能力拡張期間は, Capesize は 19 ヶ月, Panamax は 26 ヶ月, Handymax は 23 ヶ月, Handysize は 21 ヶ月という結果となった. この結果より, Capesize の建造期間, 能力拡張期間が他のサイズに比べて, 比較的短いことが分かる. これは, モデル構築に利用したデータ期間が 1996年-2013年と Capesize の需要が大きくなった期間である. その影響により, Capesize の建造期間が短くなった可能性がある. また, Capesize を建造可能な造船所は設備的, 人的なリソースが豊富であることが考えられ, その影響により建造期間が短くなっていると考えられる.

船舶サイズ別の建造モデルの構築には以下のデータを利用した.

- (1) 手持工事量 (DWT): 1996年-2013年
- (2) 竣工量 (DWT) : 1996年-2013年

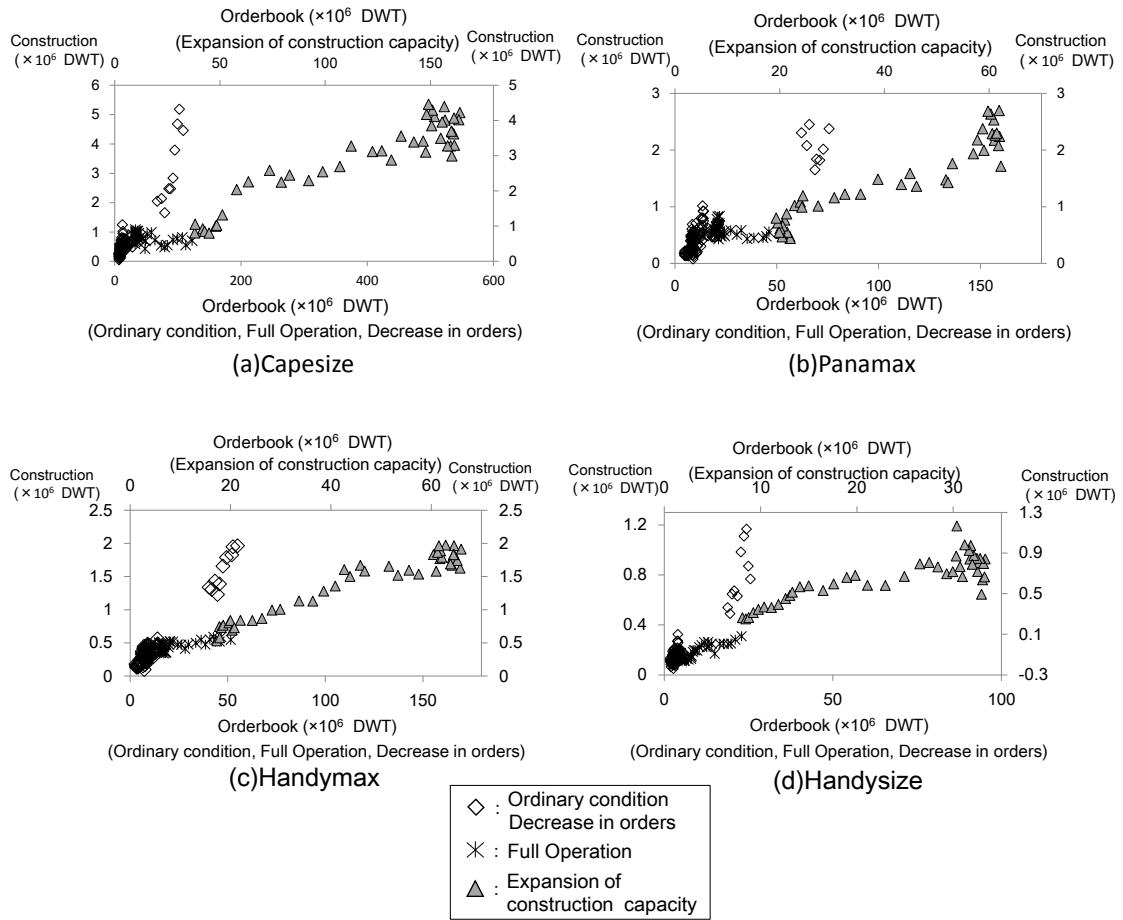


Fig. 4.8.3 船舶サイズ別の建造モデル

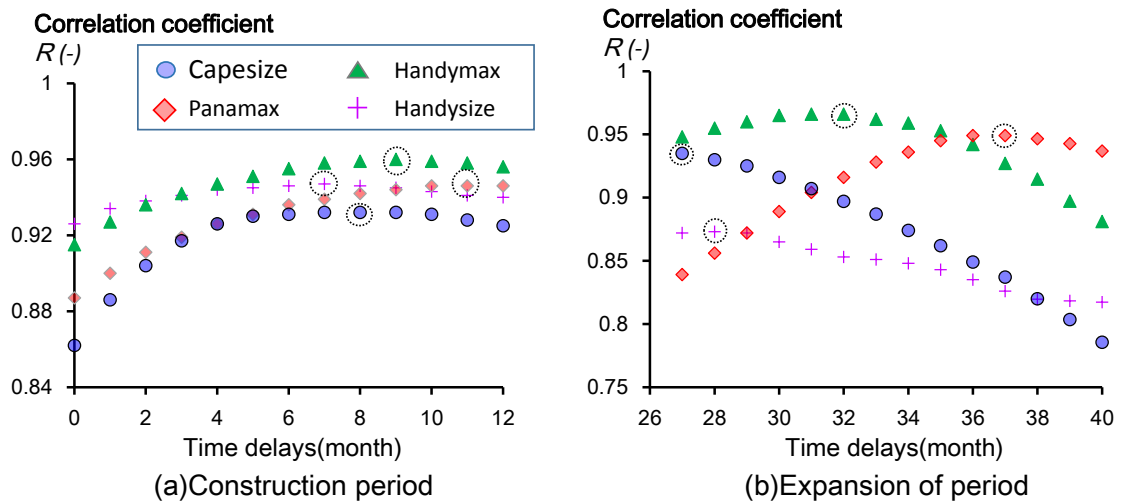


Fig. 4.8.4 建造期間，能力拡張期間の特定(船舶サイズ別)

Table.4.8.1 船舶サイズ別の建造モデルの建造期間，能力拡張期間

	Capesize	Panamax	Handymax	Handysize
建造期間	8ヶ月	11ヶ月	9ヶ月	7ヶ月
能力拡張期間	19ヶ月 (27ヶ月-8ヶ月)	26ヶ月 (37ヶ月-11ヶ月)	23ヶ月 (32ヶ月-9ヶ月)	21ヶ月 (28ヶ月-7ヶ月)

(3) 船舶サイズ別の廃船モデル

Fig.4.8.5 に船舶サイズ毎に定義した廃船モデルを示す. この図に示すように Fig.4.6.3 と同様の, 船舶航海距離が少ない時は廃船量が増加し, 船舶航海距離が大きい時は廃船量が減少するという共通の傾向をサイズ毎に持つことが分かる. そして, 船舶航海距離が 2200(mile)付近で, 減少傾向が大きく変化することも共通である.

また, サイズ別に発注量の連続増減値の時間遅れを分析した. その結果を Fig.4.8.6, Table 4.8.2 に示す. これらの結果に示すように, Capesize では 17ヶ月, Panamax では 18ヶ月, Handymax では 17ヶ月, Handysize では 19ヶ月の時間遅れが存在する. また, Fig.4.8.7 に示すように, 全体モデルと同様の廃船量の補正関数を定義できていることが分かる.

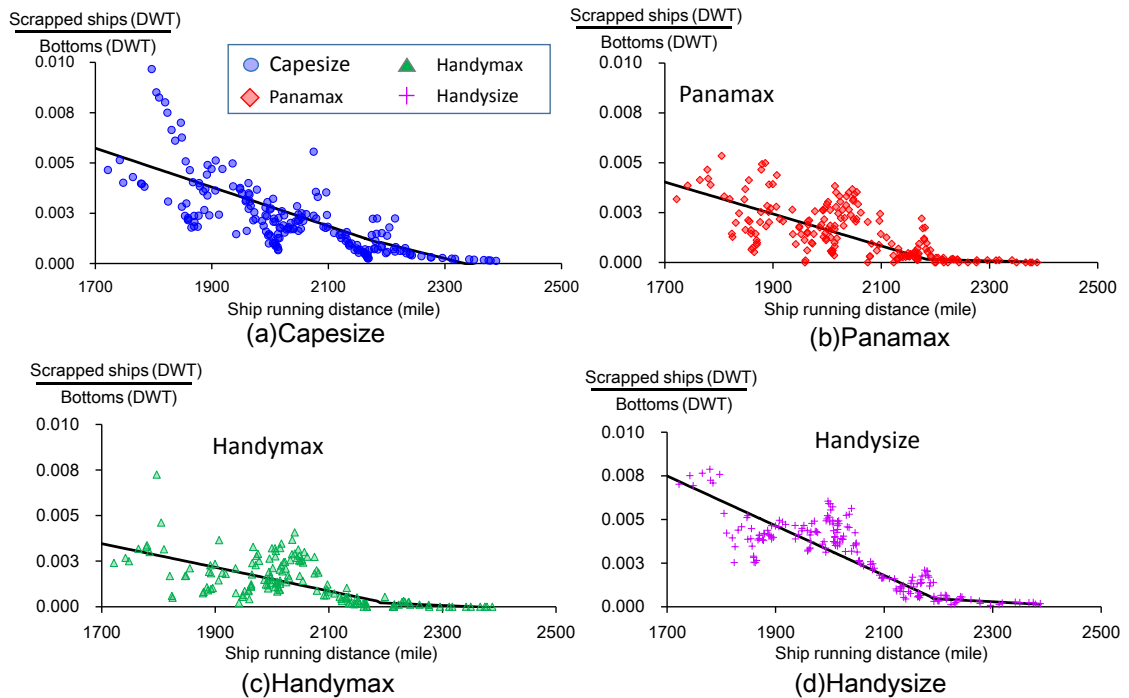


Fig. 4.8.5 船舶サイズ別の廃船モデル

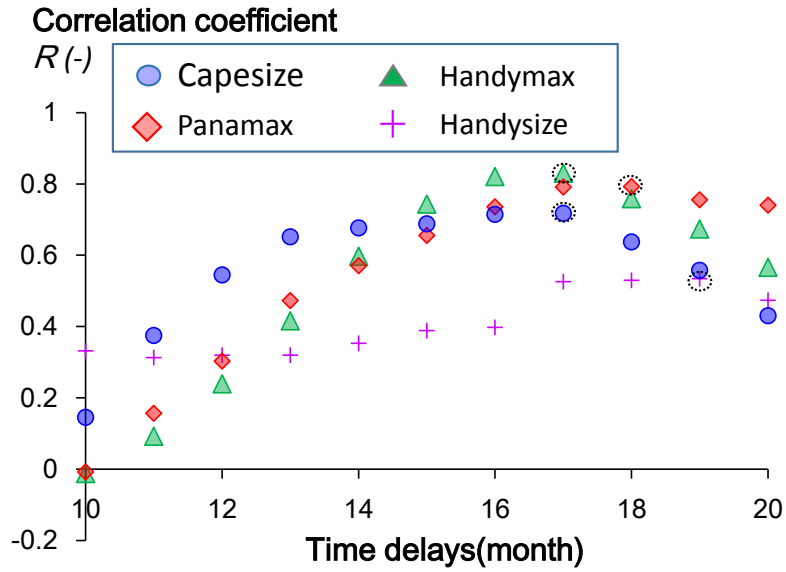


Fig. 4.8.6 発注量の連続増減値の時間遅れ (相関分析の結果)

Table.4.8.2 発注量の連続増減値の時間遅れ

	Capesize	Panamax	Handymax	Handysize
時間遅れ	17ヶ月	18ヶ月	17ヶ月	19ヶ月

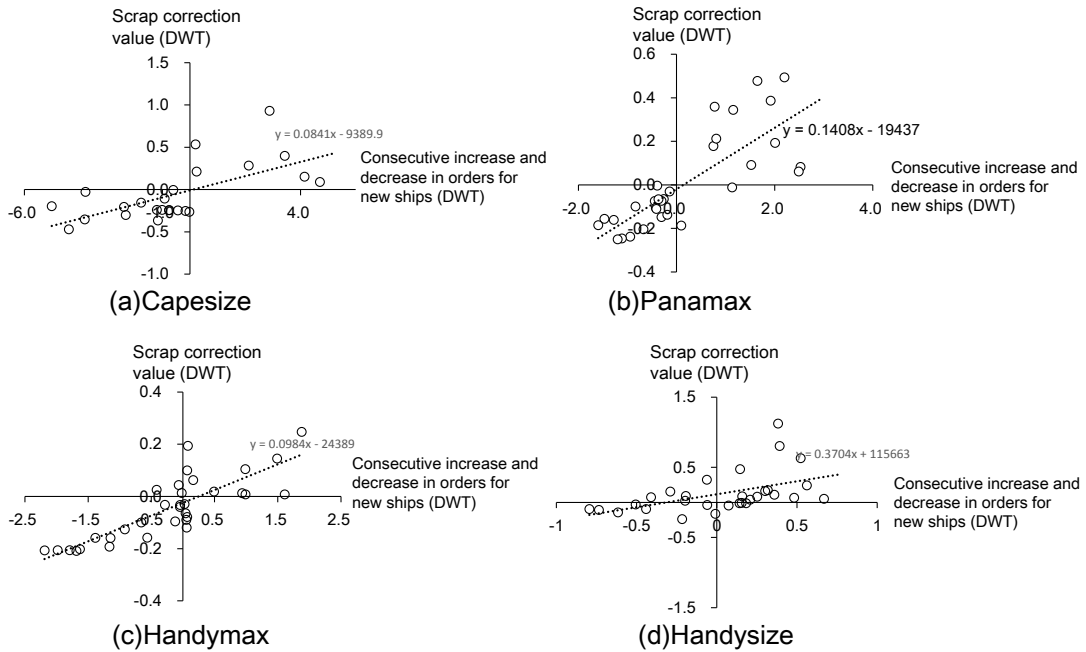


Fig. 4.8.7 発注量の連続増減値と廃船量の補正值の関係 (船舶サイズ別)

船舶サイズ別の廃船モデルの構築には以下のデータを利用した。

- (1) 廃船量(DWT) : 1999年-2012年
- (2) 船舶航海距離(mile): 貨物輸送量(tons)と貨物輸送距離(mile)の実績データを用いた計算結果を利用した : 1999年-2012年
- (3) 発注量(DWT) : 1999年-2012年

4.8.3 船舶サイズ別需要予測モデルの適合性の検証

本項では、構築した発注量予測モデル、サイズ別の建造モデル、廃船モデルを連結し、船舶サイズ別需要予測モデルの再現性を確認する。以下に入力データを示す。

- ・ 入力値 : 1999 /1 -2012/9
 - (1) 世界 GDP (actual data)
 - (2) 貨物輸送距離(actual data)
- ・ 初期値 : 1999 /1
 - (1) 船腹量 2.64×10^8 (DWT)
 - (2) 手持工事量: 2.41×10^7 (DWT)
 - (3) 建造能力: 2.09×10^6 (DWT)
 - (4) 建造中の船舶: 1.11×10^7 (DWT)

需要予測モデル全体で再現性を確認した結果を Fig.4.8.8- Fig.4.8.10 に示す。全量のシミュレーションと同様、発注量、竣工量、廃船量の全体的な傾向を再現できていることが分かる。しかし、全量のシミュレーションと同様に、短期的な変動に関しては十分に再現できていないことが分かる。

そのため、実績値の移動平均値と予測値の相関分析を実施し、サイズ別の予測結果がどの程度、実績傾向を再現しているかを確認した。その結果を Fig.4.8.11- Fig.4.8.13, Table 4.8.3 に示す。サイズ毎に移動平均期間は異なるものの、発注量は 5-6 ヶ月の移動平均期間を取った場合、相関係数は最大となる。竣工量に関しては移動平均期間を 4-12 ヶ月で取った場合に最大となり、サイズ毎に移動平均期間は大きく異なる。また、ある期間が過ぎると相関係数は一定となる傾向がある。同様に廃船量に関しても、移動平均期間を 2-12 ヶ月で取った場合に最大となり、サイズ毎に移動平均期間は大きく異なる。また、実績値の移動平均を取ることによって予測値と比較的に近い傾向となることが分かる。以上より、サイズ別の予測でも、実績の傾向を再現できることを確認した。

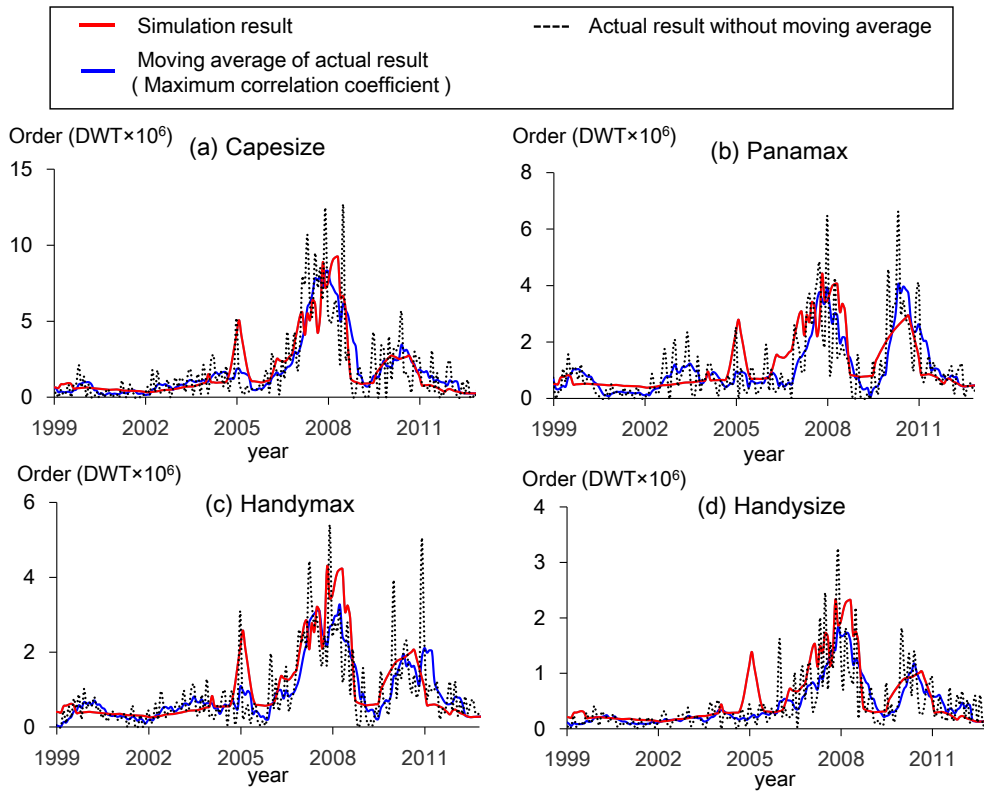


Fig. 4.8.8 船舶サイズ別の発注量の予測結果

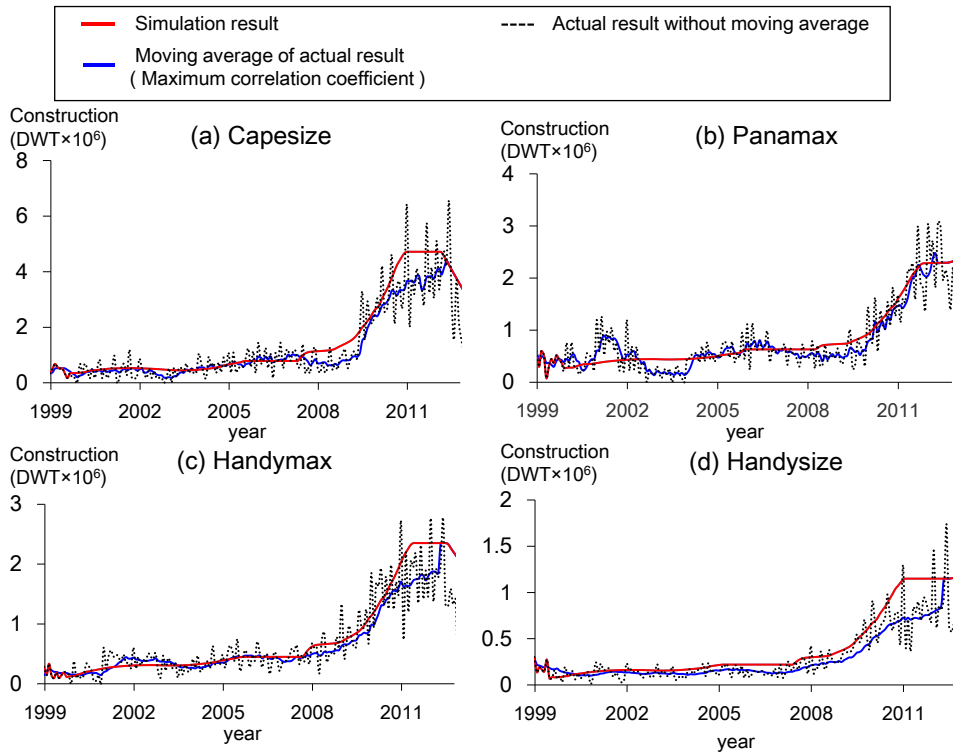


Fig. 4.8.9 船舶サイズ別の竣工量の予測結果

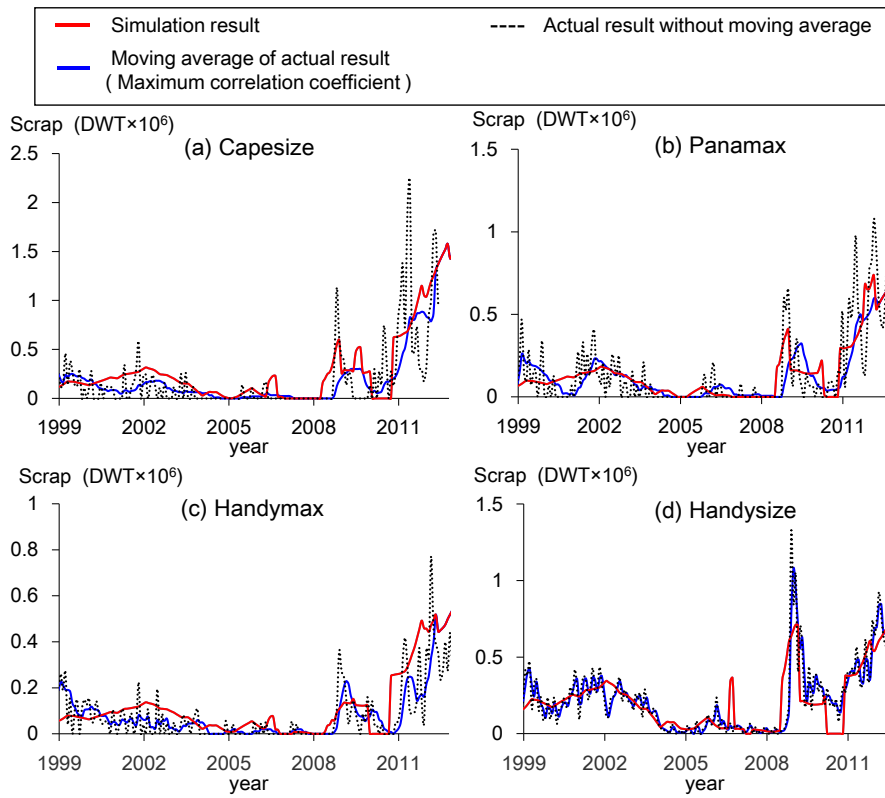


Fig. 4.8.10 船舶サイズ別の廃船量の予測結果

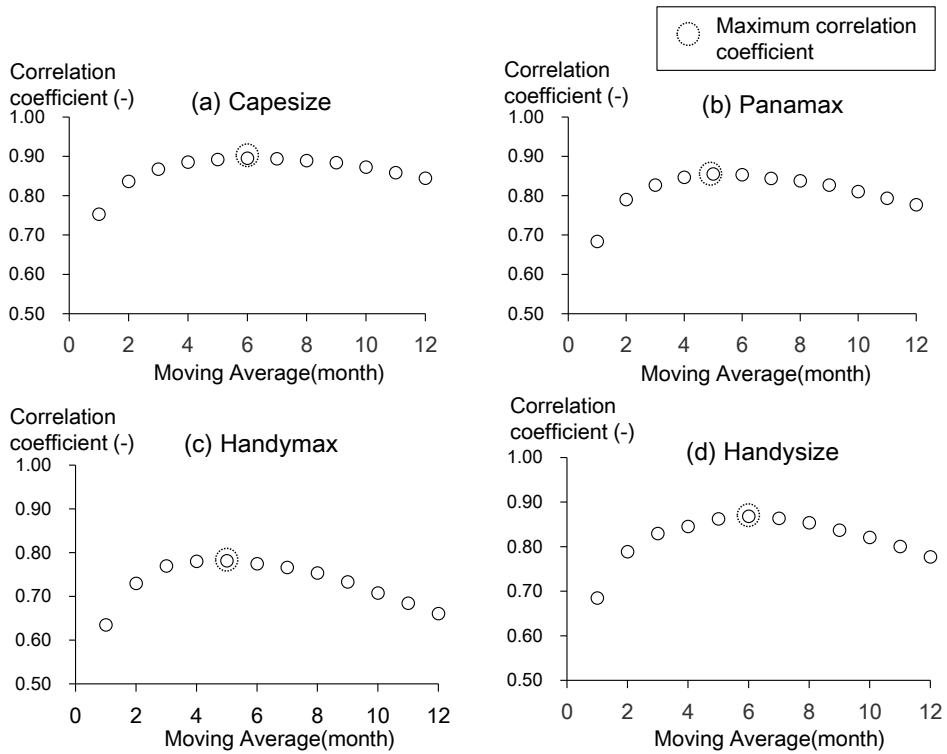


Fig. 4.8.11 発注量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)

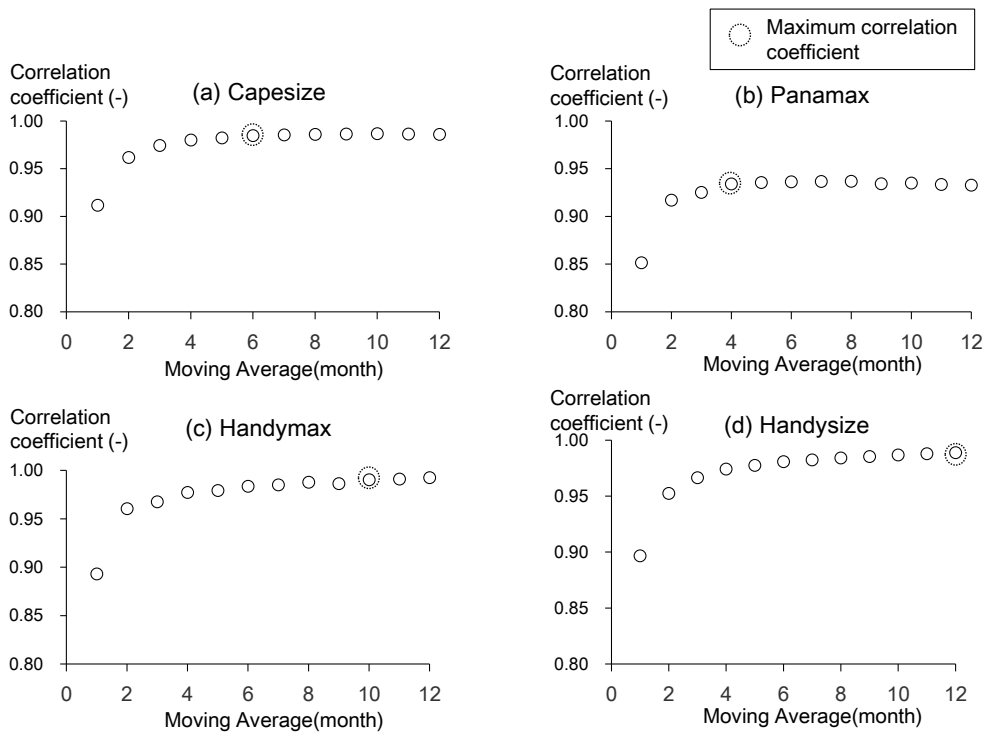


Fig. 4.8.12 竣工量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)

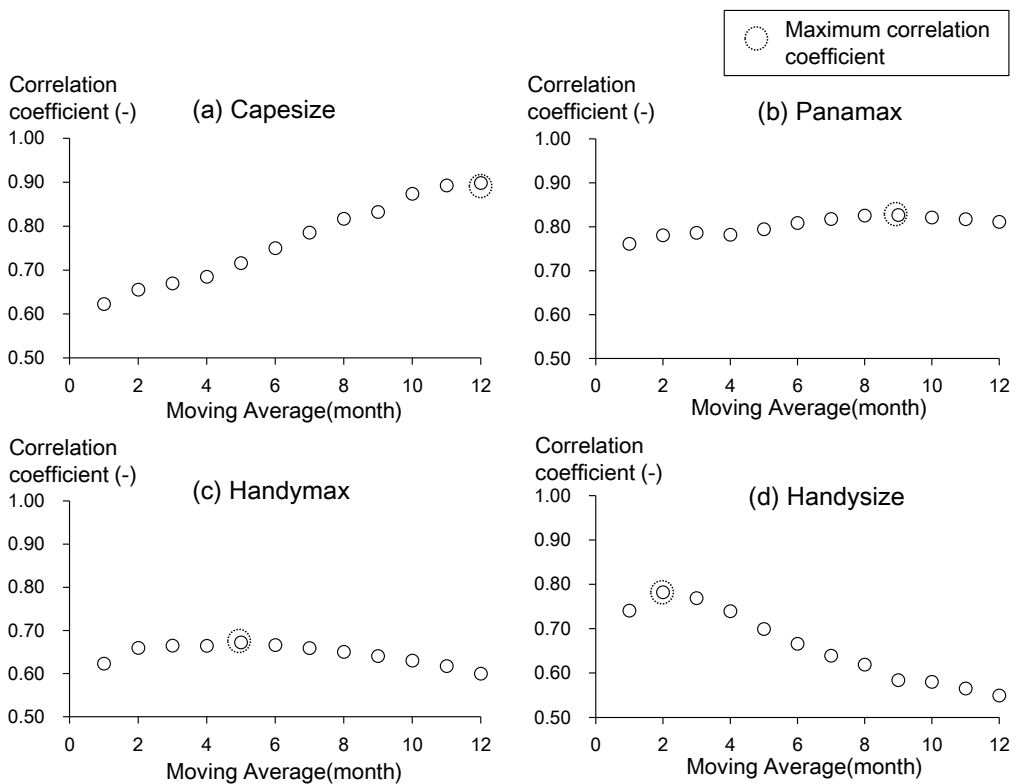


Fig. 4.8.13 廃船量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)

Table.4.8.3 発注量，竣工量，廃船量の相関分析結果（船舶サイズ別での検証）

	対称	発注量	竣工量	廃船量
相関係数が最大となる移動平均期間	Capesize	6ヶ月	6ヶ月	12ヶ月
	Panamax	5ヶ月	4ヶ月	9ヶ月
	Handymax	5ヶ月	10ヶ月	5ヶ月
	Handysize	6ヶ月	12ヶ月	2ヶ月

4.9 将来シミュレーション

4.9.1 GDP 成長率の影響

構築した需要予測モデルを用いて将来シミュレーションを実施し，GDP 成長率の大きさが与える影響を分析する．以下に入力データを示す．なお，建造容量に関しては，変化しないと仮定しシミュレーションを実施した．

- ・ 入力値：2012/7-2030/1
 - (1) 世界 GDP (2012-2015 年：実績データ)
(2016-2030 年：GDP 成長率 2.0%, 3.5%, 5.0%と仮定)
 - (2) 貨物輸送距離(2012 年-2012 年：一定)
 - ・ 初期値：2012/7
 - (1) 船腹量: 6.68×10^8 (DWT)
 - (2) 手持工事量: 1.72×10^8 (DWT)
 - (3) 建造容量: 9.70×10^6 (DWT)
 - (4) 建造中の船腹量： 5.57×10^7 (DWT)

シミュレーション結果を Fig.4.9.1 に全量のシミュレーション結果を示す．この図に示すように，GDP 成長率が大きくなるにつれて，船舶航海距離に回復のタイミングが早くなり，発注量が増加することが分かる．2012 年-2015 年は船価の下落により発注量が増加するものの，2015 年-2017 年にかけて発注量は激減し，最低水準となる．そして，2018 年頃から再び発注量は回復に向かう．なお，船価に関しては，GDP 成長率が 5.0%の場合 2024 年頃から回復に向かうものの，建造容量が過剰であるため GDP 成長率が増加しても低水準で推移するという予測結果となった．

また，Fig.4.9.2 にサイズ毎のシミュレーション結果を示す．このシミュレーション結果に示すように(a)GDP 成長率が 5.0%，(b)3.5%の場合，2020 年頃までは Capesize より Panamax

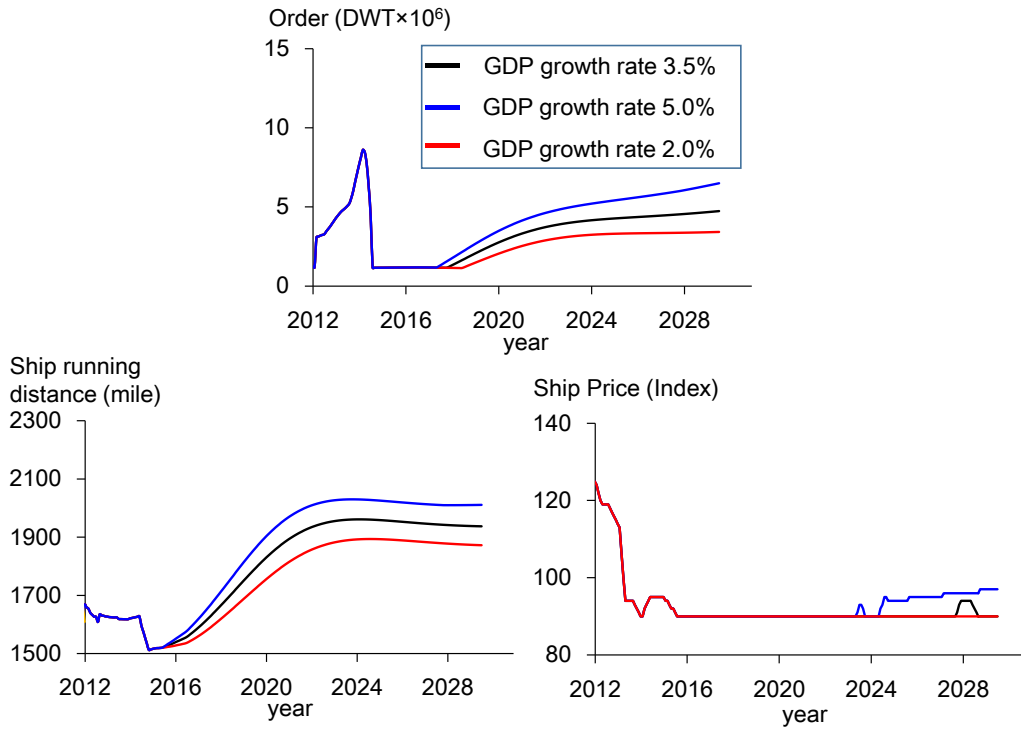


Fig. 4.9.1 将来シミュレーション結果(発注量(全量)(上), 船舶航海距離(左下), 船価(右下))

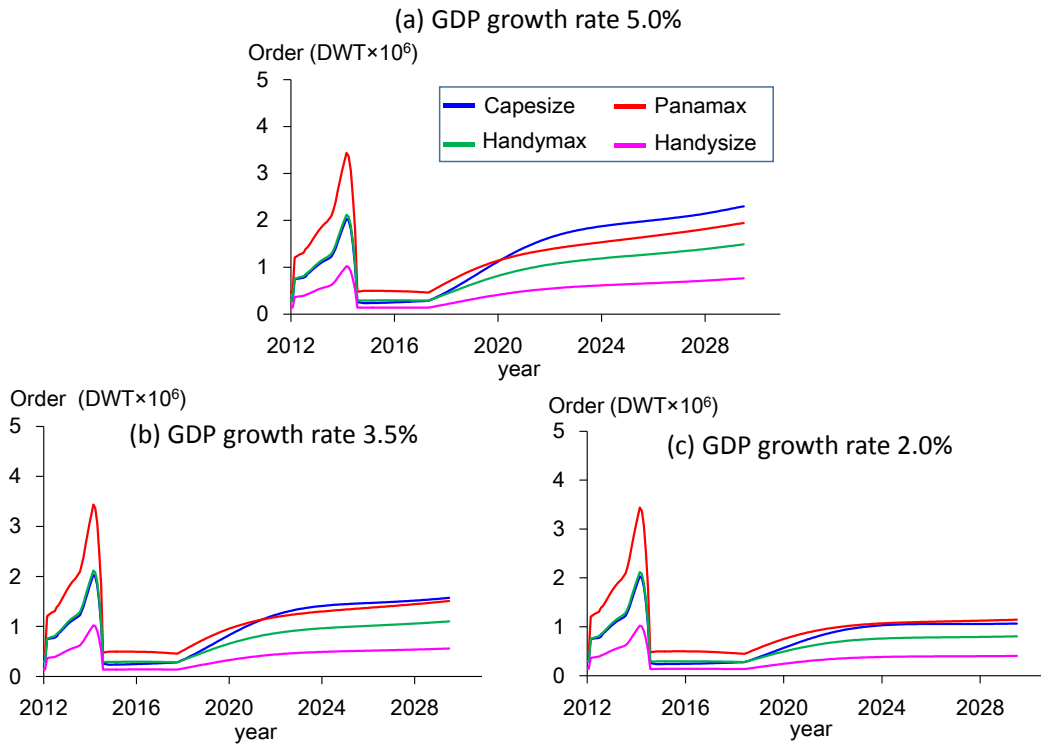


Fig. 4.9.2 船舶サイズ別の将来シミュレーション結果
(GDP 成長率 5.0%(上), 3.5%(左下), 2.0%(右下))

の方が発注量は多くなり、2020年以降に Capesize の発注量が多くなる事が分かる。これは、船舶航海距離が低水準となる影響（海運市況の不況）により、様々な荷主のニーズに対応することが可能な Panamax の発注量が増加するためである。また、(c)GDP成長率が2.0%の場合は、Capesize よりも Panamax の方が発注量は多くなるという結果となった。これは、船舶航海距離が約 1900(mile)で漸近する影響である。Fig.4.8.2 に示すように Capesize と Panamax の発注量の割合が逆転する点は約 1900(mile)である。つまり、(c)GDP成長率が2.0%の場合は Capesize と Panamax の発注量の割合が逆転する船舶航海距離まで到達しないため、Panamax の方が Capesize よりも発注量は多くなる。

以上より、GDP成長率の大きさが市場に与える影響を考察した。

参考文献

- (1) 経済産業省資料 :
http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/shoryu/butsuryu_shisaku/pdf/001_03_03.pdf
[2016/12/31 アクセス].
- (2) The World Bank, GDP Data, <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>.
[Accessed 7 June 2013].
- (3) OECD, OECD. Stat, Available at: <<http://stats.oecd.org/>> [Accessed 7 June 2013]
- (4) The Shipbuilders' Association of Japan (2011) SAJ Shipbuilding Statistics [pdf]. (in Japanese)
Available at: <http://www.sajn.or.jp/pdf/Shipbuilding_Statistics_Mar2011.pdf> [Accessed 19 August 2013].
- (5) Clarksons, Clarksons Shipping Intelligence Network, Available at: <<http://www.clarksons.net>>
[Accessed 4 October 2013].
- (6) Wada Y, Hamada K, Hirata N, Miura S, Ishihara Y, Arifin MD, Seki K (2015) A Study on System Dynamics Model for the Demand Forecasting of Shipbuilding. IMDC 2015(2): 167-18.
- (7) 和田祐次郎, 濱田邦裕, 平田法隆, 船価の影響を考慮した船舶需要予測用 SD モデルに関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集(CD-ROM), 第 21 号, 2015.
- (8) 長塚誠治: 国内造船所の手持工事データの分析と SD モデル, 海事産業研究所 調査シリーズ, 93-154, pp.1-73, 1993.
- (9) Taylor AJ (1975) The Dynamics of Supply and Demand in Shipping. *Dynamica* 2(2): 62-71.
- (10) 海事産業研究所 SD 研究会. (1978 年). 海運・造船の SD モデル. 海事産業研究所報 No.142, 1978.
- (11) Lee, TaeSoo. The dynamics of the oil tanker industry. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- (12) IMF (2003), World Economic Outlook, April 2003.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2003/01/>> [Accessed 3 February 2017]
- (13) IMF (2004), World Economic Outlook, April 2004.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2004/01/>> [Accessed 3 February 2017]
- (14) IMF (2005), World Economic Outlook, April 2005.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2005/01/>> [Accessed 3 February 2017]

第5章 不確実性を考慮した船舶の需要予測

5.1 船舶の需要予測における不確実性

5.1.1 不確実性を考慮する重要性

株価や世界経済の推移を予測する研究分野や、船舶等の「モノ」に関する需要予測の研究分野は非常に難しい。それは、様々なところに「不確実性」が存在していることが起因している。そのため正確な予測モデルを構築しても、その不確実性の影響により予測結果が大きく変動する可能性がある。よって、需要予測を基にした意思決定を行うためには、様々な不確実性を考慮して、予測結果に含まれる「リスク」を十分に考慮しなければならない。

経済産業省 [先進企業から学ぶ事業リスクマネジメント 実践テキスト]⁽¹⁾によれば、リスクを「組織の収益や損失に影響を与える不確実性」と定義し、以下の三つに分類している。

- ・プラスの影響、マイナスの影響どちらも与えるもの（財務関連のリスクや戦略リスク）。
- ・マイナスに影響をするもののみを言い、プラスの影響は視野に入れない（事故リスク）。
- ・マイナスに影響をするもののみを言い、プラスに影響するものに別の名前（「機会」など）つけ視野に入れる。

また一般的に、下記に示すような企業のリスクが考えられ、企業の持続的な発展のためにはこれらを適切なマネジメントする「リスクマネジメント」が求められる⁽²⁾。

リスクの種類

- ・為替等の経済的な変動リスク（為替の変動、原油価格の変動等）
- ・自然災害のリスク（地震や異常気象などのリスク）
- ・モノのリスク（商品の欠陥・リコール、プラントの事故リスク等）
- ・ヒトのリスク（モラルハザード、ヒューマンエラー） etc

このように近年、リスクを考慮した意思決定が重要となっており、船舶海洋分野でもリスクに関する研究が盛んに実施されている^{(3),(4),(5)}。本研究では、船舶の需要予測におけるリスク、つまり海運・造船市場の不確実性に着目し、その不確実性が予測結果に与える影響を分析する。

5.1.2 船舶需要予測用 SD モデルにおける不確実性

(1) SD モデル内部の不確実性

Fig. 5.1.1 に定義した船舶航海距離と発注量の関係を示す。本研究では単回帰直線による近似を用いているため、定義したモデルの内部にバラつきがあることが分かる。発注爆発期の相関係数は 0.76(-)と比較的に高い値を示すものの、通常期に関しては、0.36(-)と低い値を示す。これは、船社毎の構成する船腹量の船型・船齢の違い、財務状況、企業戦略による違いが値に表れていると考えられる。建造モデルについても同様で、各造船所の手持工事量の状況、建造能力、企業戦略等の違いにより値がバラつくと考えられる。そのため Fig. 5.1.2 に示すように、予測結果に関しても発注量・竣工量の傾向は予測できているものの、発注量・竣工量の細かい短期的な変動は予測できていないことが分かる。このように第 4 章で構築した SD モデルでは、モデル内部に存在する不確実性の影響を十分に考慮できておらず、予測結果が将来的にどの程度バラつく可能性があるかの予測はできない。以上より、中央値 (Fig.5.1.1 の黒い点線) の予測結果を基にした経営戦略の立案はリスクを伴う。つまり、需要予測を基にして経営戦略を立案するためには、そのリスクの定量的な把握が必要である。

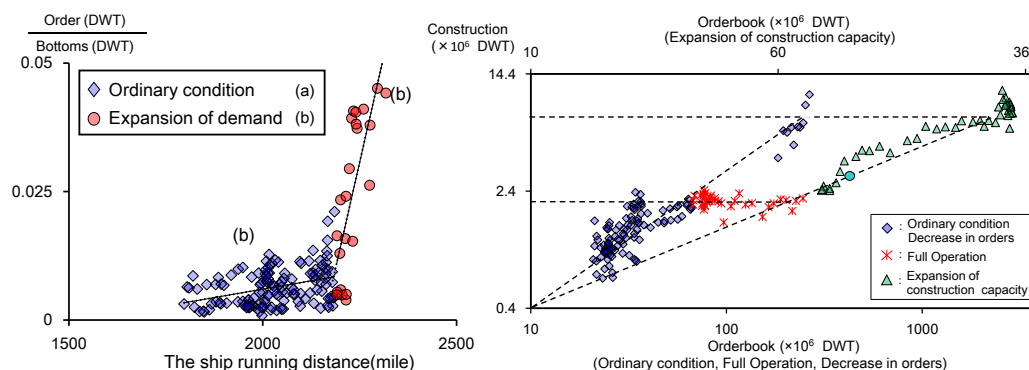


Fig. 5.1.1 発注量予測モデルと建造モデルのバラつき

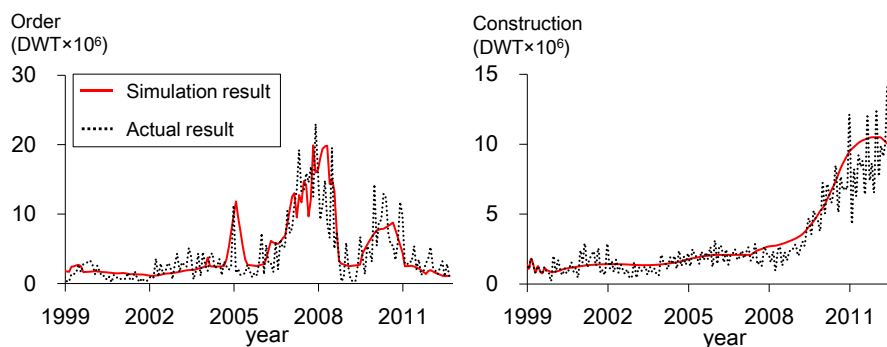


Fig. 5.1.2 発注量と竣工量の予測結果

(2) SD モデル外部の不確実性

4.7 節に示した過去シミュレーションでは、世界 GDP と貨物輸送距離の実績値を入力しシミュレーションを行い、再現性を確認した。この結果より、「正確な世界 GDP と貨物輸送距離のシナリオ」を入力すれば、比較的正確な予測結果が獲得できた。しかし、実際には世界の経済状況、海運物流は様々な要因によって変動し、正確な将来シナリオ（世界 GDP、貨物輸送距離）の設定は困難である (Fig.5.1.3)。そのため、将来シナリオの不確実性を考慮したシナリオの作成・入力が求められる。

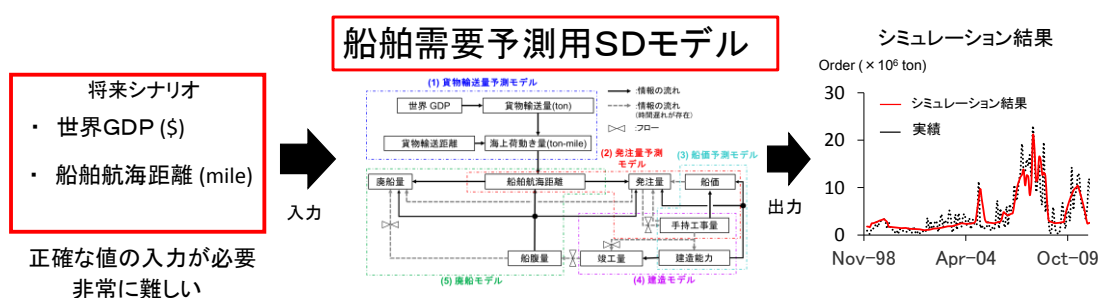


Fig. 5.1.3 将来シナリオの設定困難性

5.1.3 本章の目的

そこで本研究では、上述の議論に基づき、既往研究で提案されている不確実性の考慮手法を用いて、不確実性が需要予測の結果に与える影響を定量的に分析する。具体的には SD モデル内部の不確実性を定量的に分析し、それらを船舶需要予測用 SD モデルに反映させる。また、将来シナリオの不確実性を考慮したシナリオの作成についても検討する。そして、船舶需要予測用 SD モデルを構成する Sub-model のバラつきが発注量の予測結果に与える影響を分析し、精度向上すべきモデルを明確化する。それに加え、世界 GDP と貨物輸送距離の将来シナリオが分からない場合、どの程度までの需要予測が可能か検証する。

5.2 不確実性を考慮した需要予測に関する既往研究

5.2.1 不確実性を考慮した需要予測

需要予測分野に関する既往研究では、様々な手法を用いて不確実性の影響を分析、考察している(Table 5.2.1).

Cui らは⁽⁶⁾システムダイナミクスを利用して新商品の販売戦略立案するモデルを構築した。また、不確実性を有するパラメータを変動させ、獲得できる利益がどのように変動するかを分析した。Chanwoog らは⁽⁷⁾経済活動、環境変化、エネルギーの消費量の動向等を、システムダイナミクスを用いてモデル化し、太陽光発電技術の価値の推移を予測した。太陽光発電の市場には様々な不確定なパラメータが存在するため、それらのパラメータを、モンテカルロシミュレーションを用いて一様分布に従って変動させることで市場の不確実性を考慮し、予測値の推移と変動を分析した。Pretorious らは⁽⁸⁾ロトカ・ヴォルテラ方程式とシステムダイナミクスを利用して、競争下における技術発達の推移を予測した。市場には様々な不確実性が存在するため、モデル内部のパラメータも変動する可能性がある。この研究でもモンテカルロシミュレーションを利用し、モデルの内部パラメータを正規分布に従って変動させることで、技術発達の推移と変動の影響を分析した。Cooke は⁽⁹⁾ブラウン運動を用いて株価の変動をモデル化した。そして、ブラックショールズの式を用いて、株価の推移とその変動を予測した。Girard らは⁽¹⁰⁾、時系列解析にガウス過程を導入し、バラつきの連鎖を考慮したシミュレーション手法を提案した。そして pH の変化の予測シミュレーションに適用し、その有効性を示した。

船舶海洋分野では、Engelen ら⁽¹¹⁾、稗方⁽¹²⁾、Erikstad⁽¹³⁾が市場の不確実性に着目した研究を行っている。Engelen らは⁽¹¹⁾バルクキャリア市場の船舶の発注量、建造期間、船価の予測モデルを構築した。対象品目の tons-mile の変化が確率的に変動すると仮定し、ブラウン運動を用いてその変動をモデル化した。そして、バルクキャリア市場の船舶の発注量を予測した。稗方⁽¹²⁾はリアルオプションを利用した船舶のライフサイクル価値向上に関する研究を実施している。この研究では、二項格子モデルを用いて市場の不確実性をモデル化し、船舶設計段階から市場変動に対応するための船舶設計案の立案手法を提案した。Erikstad らも⁽¹³⁾船舶設計段階から様々な不確実性を考慮することの重要性を指摘している。そして、ケーススタディとして RORO 船を対象に、不確実性が設計案に与える影響を分析した。

5.2.2 本研究の位置付け

上述の研究は、モデルの内部・外部パラメータを変動させることで、それらの変動が予測結果に与える影響を分析した。しかしこれらの研究は、モデルの外部・内部パラメータのどちらか一方に着目した研究がほとんどであり、モデルの外部・内部パラメータの不確

Table 5.2.1 既往研究のレビュー

著者	予測方法	不確実性の考慮方法	目的
Anna shaojie cui et al ⁽⁶⁾	システム ダイナミクス	一様分布に従い,SD モデルの内部パラメータを変動 (感度解析の利用)	システムダイナミクスを利用して新商品の販売戦略立案するモデルを構築した. また, 感度分析を利用し, 市場の不確実性をモデル化することで, 新商品の販売による獲得できる利益の変動を分析した.
Chanwoog jean et al ⁽⁷⁾	システム ダイナミクス	モンテカルロシミュレーションを用いて内部パラメータをランダム(一様分布)に変動させ, 市場の不確実性を考慮 (感度解析の利用)	経済, 環境, エネルギーの関係をモデル化し, 太陽光発電技術の価値の推移を予測した. 太陽光発電の市場には様々な不確定なパラメータ存在 (税金, 為替, 政府のサポート) するため, それらのパラメータをモンテカルロシミュレーションでランダムに変動させることで, 市場の不確実性を考慮し, 予測値がどの程度変動するか分析した.
L.Pretorious et al ⁽⁸⁾	システム ダイナミクス	モンテカルロシミュレーションを用いてパラメータを正規分布に従って変動させ, 市場の不確実性を考慮 (感度解析の利用)	ロトカ・ヴォルテラ方程式をシステムダイナミクス利用してモデル化し, 競争下における技術発達の推移を予測した. SD モデルの内部パラメータを正規分布に従って変動させて市場の不確実性を考慮し, 技術発達の推移とその変動を予測した.
Cooke ⁽⁹⁾	システム ダイナミクス	ブラウン運動	Cooke は株価変化がブラウン運動を用いて株価の変動をモデル化した. そして, ブラックショールズの式を用いて, 株価の推移とその変動を予測した.

Table 5.2.1 既往研究のレビュー (続き)

著者	予測方法	不確実性の考慮方法	目的
Agathe girard et al ⁽¹⁰⁾	K step ahead prediction of time series (時系列解析の一 種)	ガウス過程によるバ ラツキの蓄積を考慮	時系列解析にガウス過程を導 入し、バラツキの連鎖を考慮し たシミュレーション手法を提 案. pH の変化の予測シミュレ ーションに適用し、有効性を示 した.
Engelen S et al ⁽¹¹⁾	システム ダイナミクス	ブラウン運動	バルクキャリア市場の船舶の 発注量, 建造期間, 船価の予測 モデルを構築した. 市場の品目 の tons-mile の変化が確率的に 変動すると仮定し, ブラウン運 動を用いてその変動をモデル 化した.
稗方 和夫 他 ⁽¹²⁾	-	リアルオプション (二項格子モデル)	リアルオプションを利用した 船舶のライフサイクル価値向 上に関する研究を実施. この研 究では, 二項格子モデルを用い て市場の不確実性をモデル化 し, 船舶設計段階から市場変動 に対応するための船舶設計案 立案手法を提案.
Erikstad,S.T. et al ⁽¹³⁾	確率的最適化 Stochastic optimization	リアルオプション (多項格子モデル)	船舶設計段階から様々な不確 実性を考慮することの重要性 を指摘している. ケーススタデ ィとして RORO 船を対象とし, 市場の不確実性が設計案に与 える影響を分析した.

実性の双方に着目した研究に関しては、ほとんどない。また船舶の需要予測における研究では Engelen らが市場の不確実性の影響を考慮しているものの、未だその研究蓄積は少ない状況である。また、Engelen らは海運・造船市場全体をモデル化しておらず、市場の循環についても考慮していない。そのため、市場の不確実性がどのように海運・造船市場に拡散していくかについては十分に考察ができていない。本研究では、既往研究のアプローチ・手法を参考に、船舶の需要予測に海運・造船市場の不確実性の影響を取り入れ、その影響

を分析する。

一般的に不確実性の考慮手法に関しては、モンテカルロシミュレーションの他に誤差伝播の法則が用いられている。しかし、Table 5.2.1 に示すように、不確実性を考慮した需要予測に関する研究では、システムダイナミクスとモンテカルロシミュレーションを併用したアプローチが多用されている。モンテカルロシミュレーションの特徴と誤差伝搬法則の特徴を以下に整理する。

- ・ モンテカルロシミュレーションを用いた不確実性の考慮
適用及びコーディングが非常に簡単であるため、様々な分野で応用されている。しかしその反面、計算コストが非常に大きくなり、大規模な問題の求解には十分な計算リソースが必要となる。
- ・ 誤差伝播の法則を用いた不確実性の考慮
不確実性が変数に与える影響をすべてモデル化する必要があるため、モデル化に時間がかかる。その一方、計算時間は非常に短くなるため、計算コストは小さい。

このようにモンテカルロシミュレーションを用いた不確実性の考慮方法は「実験的なアプローチ」、誤差伝播の法則を用いた不確実性の考慮方法は、「解析的なアプローチ」と位置付けることができる。

本研究で開発したシステムダイナミクスを用いたシミュレーションシステムには、大規模な計算リソースは必要なく、短時間で計算可能である（シミュレーションの内部処理時間：約0.1秒/回）。つまり、モンテカルロシミュレーションを適用しても求解に時間はかからないと考えられる。一方、誤差伝播の法則を用いる場合、不確実性が変数に与える影響をすべて解析する必要があるため、モデル構築に多大な時間を要する。

以上より、本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いて、船舶需要予測モデル内部・外部の不確実性を考慮する。

5.3 不確実性を考慮した船舶需要予測の基本方針

上述の 5.2.2 項で示したように本研究では、モンテカルロシミュレーションを用いて SD モデル内部、外部の変動を総合的に考慮する。Fig.5.3.1 に本研究の不確実性を考慮した船舶の需要予測の基本方針を示す。本研究では、以下の方針に従って不確実性の影響を考慮する。

- (a) 入力情報である世界 GDP，貨物輸送距離は二項格子モデルを用いて確率的な計算を行いその値を計算する。これにより，SD モデル外部の不確実性を考慮する(Fig. 5.3.1(a)).
- (b) 貨物輸送量予測モデル，発注量予測モデル，建造モデル，船価予測モデル，廃船モデルを用いて予測計算を実施する。計算する際は，各モデルに正規乱数を与えながら予測計算を実施する(Fig. 5.3.1(b)). ノイズの与え方については，各モデルの不確実性の解析結果に基づいて与える。
- (c) モンテカルロシミュレーションを用いて，(a)，(b)を繰り返し実施する。そして予測計算の結果を蓄積する(Fig. 5.3.1(c)).
- (d) 蓄積した計算結果を基に，予測結果の期待値と，標準偏差を計算する(Fig. 5.3.1(d)).

本研究で考慮する不確実性とその考慮手法を以下に整理する。

- SD モデル外部の不確実性
世界 GDP，貨物輸送距離
考慮手法：二項格子モデル
- SD モデル内部の不確実性
貨物輸送量予測モデル，発注量予測モデル，建造モデル，船価予測モデル，廃船モデル
考慮手法：モンテカルロシミュレーションと正規乱数

以上の SD モデル外部，内部の不確実性の与え方については 5.4 節，5.5 節に示す。

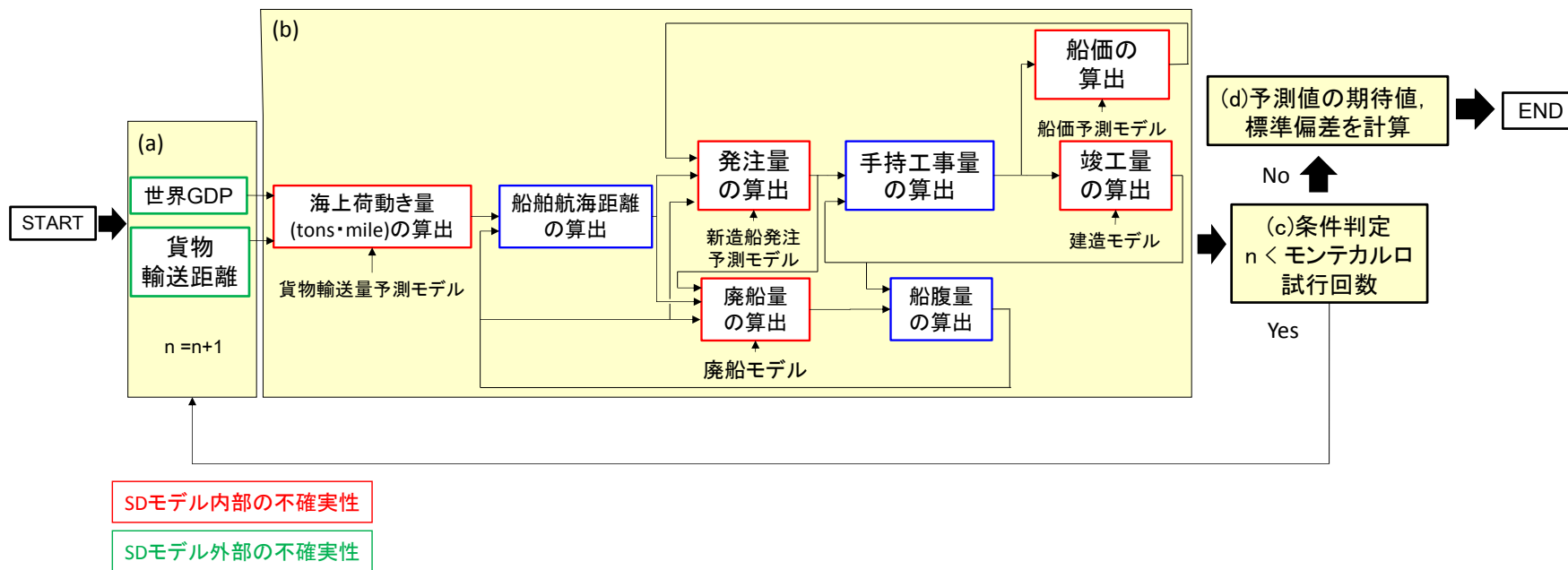


Fig.5.3.1 本研究の不確実性の考慮方法

5.4 SD モデル外部の不確実性の考慮方法

市場の不確実性を考慮するために、様々な手法が既往研究で提案されている(分布関数による表現, ブラウン運動による表現, 二項格子モデル等). 世界 GDP, 貨物輸送距離は時間的に変化するため, 時間的な変化の概念を持つ二項格子モデルの適用が適切であると考えられる. 以下に二項格子モデルの概要を示す.

二項格子モデルは確率過程を用いて, 将来の価格(株価, 先物価格)等を予測する手法である. 応用分野としては金融工学で利用されることが多く, 株価の予測, 先物価格の予測, 金融資産のポートフォリオ評価等に用いられている.

Fig.5.4.1 に示すように, 上昇確率 q , 上昇率 u , 下落率 d を用いて時間変化に伴う価格の変化を考慮する. $t=0$ の価格(初期値)が p の場合, $t=1$ では, 確率 q で価格は $p_u(p \times u)$ となり, $1-q$ の確率で価格は $p_d(p \times d)$ となる. $t=2$ の場合は $t=1$ の価格 p_u と p_d により価格は決定され, $p_{uu}(p \times u \times u)$, $p_{ud}(p \times u \times d)$, $p_{dd}(p \times d \times d)$ の3通りが取りうる価格の候補となる. 以上を繰り返すことで, 価格の推移を予測する.

本研究では, 世界 GDP と貨物輸送距離の将来予測に二項格子モデル適用する. (5-1)式-(5-4)式に算出式を示す. 上昇確率 q , 上昇幅 u , 下落幅 d については過去データを用いて決定する.

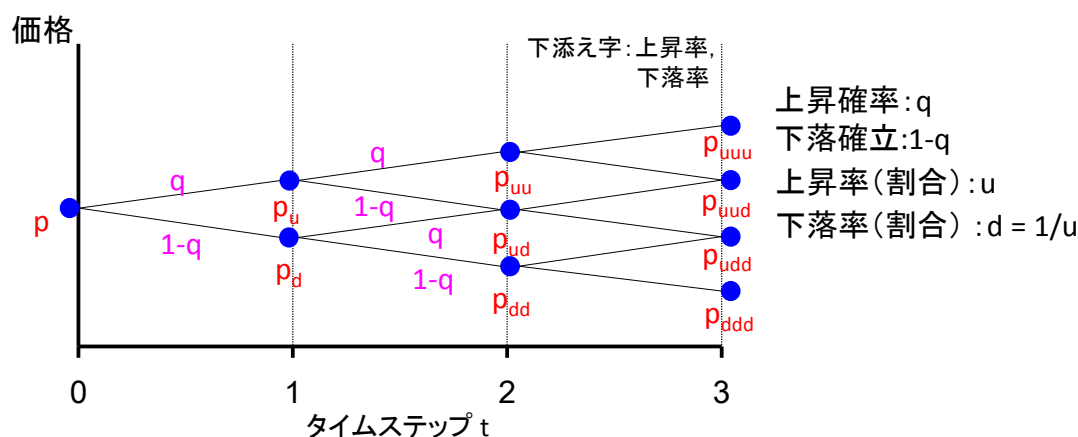


Fig. 5.4.1 二項格子モデルの概要

$$G_t = \begin{cases} u \times G_{t-1} & (q) \\ d \times G_{t-1} & (1-q) \end{cases} \quad (5-1)$$

ここに, G_t : 世界 GDP(USD)

u : 上昇率(-)

$d=1/u$: 下落率(-)

q : 上昇確率(-) ($0 \leq q \leq 1$)

t : シミュレーション内部時間(month)

$$TDi_t = \begin{cases} u_i \times TDi_{t-1} & (q_i) \\ d_i \times TDi_{t-1} & (1 - q_i) \end{cases} \quad (5-2)$$

$$TDC_t = \begin{cases} u_c \times TDC_{t-1} & (q_c) \\ d_c \times TDC_{t-1} & (1 - q_c) \end{cases} \quad (5-3)$$

$$TDg_t = \begin{cases} u_g \times TDg_{t-1} & (q_g) \\ d_g \times TDg_{t-1} & (1 - q_g) \end{cases} \quad (5-4)$$

ここに, TDi_t : 鉄鉱石の貨物輸送距離(mile)

TDC_t : 石炭の貨物輸送距離(mile)

TDg_t : 穀物の貨物輸送距離(mile)

u_i : 鉄鉱石の上昇率(-)

u_c : 石炭の上昇率(-)

u_g : 穀物の上昇率(-)

$d_i=1/u_i$: 鉄鉱石の下落率(-)

$d_g=1/u_i$: 石炭の下落率(-)

$d_c=1/u_i$: 穀物の下落率(-)

q_i : 上昇確率(-) ($0 \leq q_i \leq 1$)

q_c : 上昇確率(-) ($0 \leq q_c \leq 1$)

q_g : 上昇確率(-) ($0 \leq q_g \leq 1$)

t : シミュレーション内部時間(month)

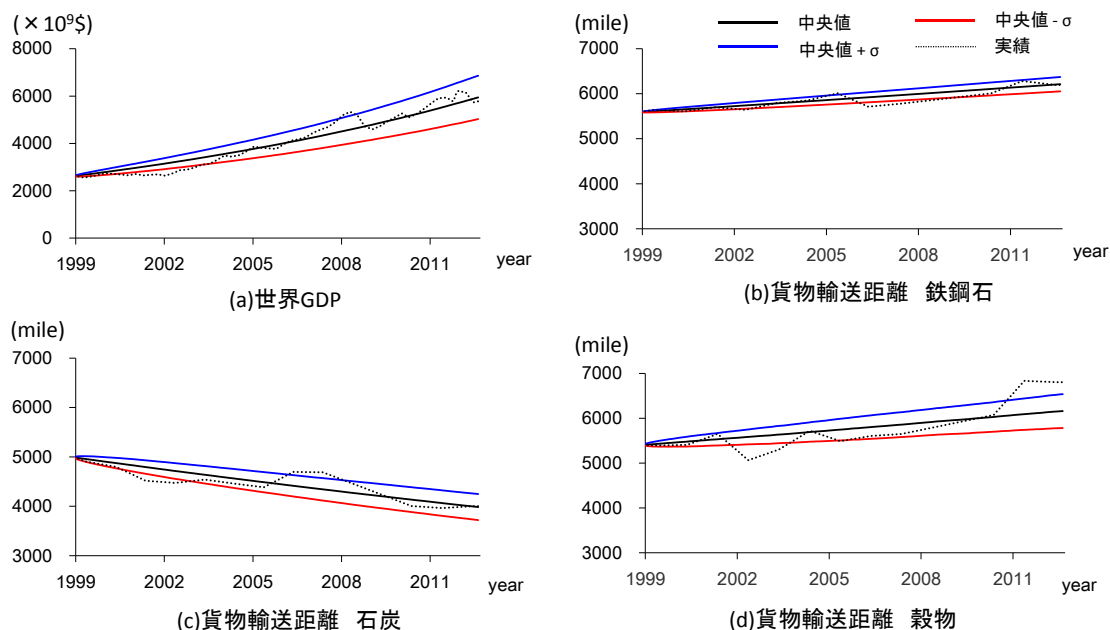


Fig.5.4.2 二項格子モデルの適用結果

Fig.5.4.2 に世界 GDP の予測、品目毎の貨物輸送距離の予測に二項格子モデルを適用した結果を示す。この図に示すように、世界 GDP、貨物輸送距離ともに実績の傾向を再現できていることが分かる。また、時間の推移共に、標準偏差(SD)が拡大していくことが分かる。これは、時間の推移共に、世界 GDP、貨物輸送距離の取りうる値の範囲が増加するためである。

上昇確率 q 、上昇率、下落率の u, d については 1999 年-2012 年のデータを基に設定した。Table 5.4.1 にその値を整理する。その際、実績値が標準偏差内に収まる確率をすべて 68.3%を満たすように設定した。

Table 5.4.1 二項格子モデルの入力パラメータ

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鋼石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q (-)	0.689	0.651	0.373	0.581
上昇率 u (-)	1.013	1.002	1.005	1.005
下落率 d (-)	0.987	0.998	0.995	0.995

5.5 SD モデル内部の不確実性の考慮方法

5.5.1 SD モデル内部の不確実性の解析

(1) SD モデル内部の不確実性の考え方

本研究では、①標準偏差(SD)、②相対残差の標準偏差(RSD)の視点から分析を行う。標準偏差で各モデルの不確実性を考慮する場合、基準値(各モデルの基準関数(u_i))に対する実績値の残差(Re_i)をモデル内部の不確実性と定義する((5-6)式)。そして、この残差と残差の平均値(ARE)を基に標準偏差を求め、それをモデル内部の不確実性として取り扱う((5-7)式)。②相対残差の標準偏差(RSD) ((5-7)式)の場合、(5-8)式に示すように残差を基準値(各モデルの基準関数(u_i))を割ることで、モデルの相対残差(Rs_i)を算出する。そしてこの値とその相対残差の平均値(ARs)を基に、相対残差の標準偏差を算出し、モデル内部の不確実性として取り扱う((5-9)式)。

Fig.5.5.1 に示すように、残差の標準偏差で不確実性を考慮する場合は基準値に対して、一定の幅で推移する。一方相対残差の標準偏差の場合で不確実性を考慮する場合、 $RSD \times u$ でその不確実性は表現されるため、基準値の大きさに対して幅が変化するのが特徴である。本研究では、以上の残差の標準偏差の視点と相対残差の標準偏差の視点の二つ視点からモデル内部のバラつきを分析する。なお、残差の平均値(ARE)、相対残差の平均値(ARs)は基準値(u_i)を中心にバラつく場合は0となるが、 y 差がある場合は0とならない。その点についても考慮してバラつきを解析する。

$$Re_i = y_i - u_i \quad (5-6)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Re_i - ARE)^2} \quad (5-7)$$

$$Rs_i = \frac{y_i - u_i}{u_i} \quad (5-8)$$

$$RSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Rs_i - ARs)^2} \quad (5-9)$$

ここに, Re_i : i 番目のデータの残差
 y_i : i 番目のデータの実績値
 u_i : モデルの基準値
 ARe : 残差の平均値
 SD : 残差の標準偏差
 n : データ数
 Rs_i : i 番目のデータの相対残差
 ARs : 相対残差の平均値
 RSD : 相対残差の標準偏差

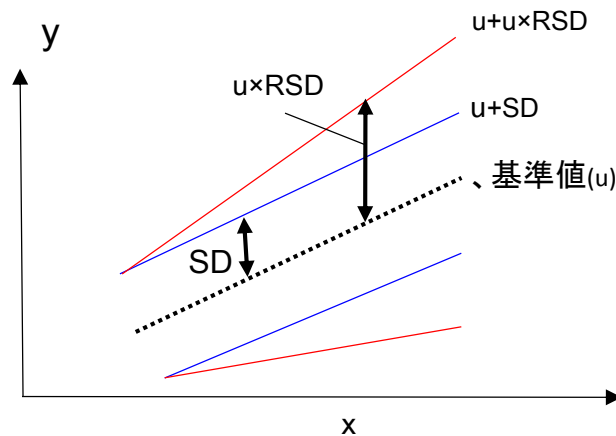


Fig.5.5.1 SD モデル内部の不確実性の考え方

(2) 不確実性の解析の流れ

バラつきの分布の特定には, コロモゴロフ・スミノフ検定 (以下 **KS 検定**)⁽¹⁴⁾を用いる. この手法はノンパラメトリック手法^{*1}の一つで, 二つの母集団の確率分布が異なるものであるかどうかを調べる際に用いられる. その際に必要なデータ数(n)は 20 以上とされている⁽¹⁵⁾. 本研究では, データの残差の分布の特定に用いる. 評価指標としては **P 値**を用いて, 有意水準は 95.0%(P 値 ≥ 0.05)とする.

SD モデル内部の不確実性の解析の流れを以下に示す.

- (1) 各モデルの残差を算出し, その残差を基に①標準偏差(**SD**), ②相対残差の標準偏差(**RSD**)を算出する.
- (2) データの正規性の検定を行い, それに従わない場合は別の分布を仮定し, バラつきの分布を特定する. また上述に示した着目するデータのバラつきについては, ①標準偏差(**SD**), ②相対残差の標準偏差 (**RSD**)とする.
- (3) ①標準偏差(**SD**), ②相対残差の標準偏差 (**RSD**)のどちらかでバラつきの正規性を仮定

できる場合は、バラつきの正規性を確保できる方をそのモデルのバラつきとする。

- (4) グラフの可視化によりバラつきの等分散性を確認する。
- (5) t検定を行い、残差が基準値 u を中心にバラついているか確認する。有意差がある場合、その有意差をモデルに考慮する。

Table 5.5.1 にバラつきの選択方法を整理する。こちらに示すように、標準偏差、相対残差の標準偏差のいずれか(Table 5.5.1(1),(2))でそのバラつきの正規性が確保できる場合は、そちらを選択する。また両方で正規性が確保できる場合 (Table 5.5.1(3)), 実績の傾向を高確率で捉えられるものを選択する。具体的には、Sub-model のシミュレーションを実施することでモデルのバラつきを決定する。また、両方で正規性が確保できない場合(Table 5.5.1(4)), 別の分布を仮定する。

なお KS 検定には、統計分析ソフトの R を用いて解析を行った。

(※1: ノンパラメトリック手法とはデータの分布によらない検定と言われ、データ大小関係を表す順位の検定、データの分布の検定等に用いられる)

Table 5.5.1 バラつきの選択方法

バラつきの解析結果 (バラつきの正規性)		バラつきの選択	
標準偏差(SD)	相対残差の標準偏差 (RSD)		
(1)	○	×	標準偏差(SD)
(2)	×	○	相対残差の標準偏差(RSD)
(3)	○	○	実績の傾向を高確率で捉えられるもの (Sub-model のシミュレーションを実施) (発注量予測モデルに適用)
(4)	×	×	別の分布でバラつきを考慮 (本研究では適用なし)

5.5.2 貨物輸送量予測モデルの不確実性

貨物輸送量予測モデルでは、世界 GDP と貨物輸送量の関係に不確実性があり、バラつきが発生すると考える。Fig.5.5.2 に示すように、鉄鉱石の貨物輸送量と世界 GDP の間には線形の関係が定義できるものの、バラつきが発生していることが分かる。この関数の残差に

着目し、標準偏差と相対残差の標準偏差のバラつきを、KS 検定を用いて検定した。

その結果を Table 5.5.2 に示す。この表に示すように、バラつきを標準偏差(SD)で考えた場合、穀物の P 値が 0.05 未満となり、正規性の仮定ができない。一方、相対残差の標準偏差(RSD)の場合の P 値に関しては、すべて 0.05 以上となり、正規性を確保できることが分かる。また、Fig.5.5.3 にバラつきの等分散性に関して確認した結果を示す。この結果より等分散性を確保できていると考えられる。文献⁽¹⁶⁾によれば、このような分散傾向が確認できる場合は何らかの変数を追加することでモデルが改善すると指摘しているが、本研究では特に言及せずに世界 GDP のみで貨物輸送量を予測する。

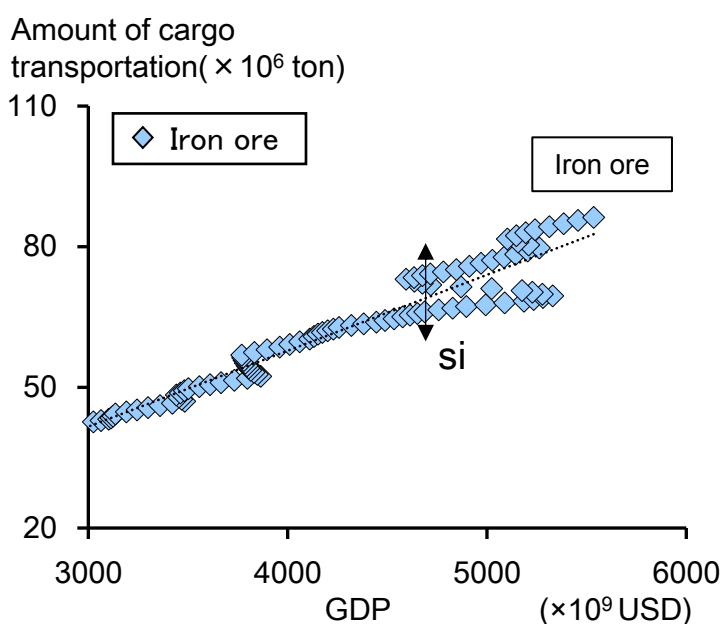


Fig.5.5.2 貨物輸送量予測モデルの不確実性

Table 5.5.2 貨物輸送量予測モデルの不確実性の解析結果

		標準偏差(SD)					相対残差の標準偏差(RSD)		
		鉄鉱石	石炭	穀物			鉄鉱石	石炭	穀物
サンプル数		102	102	102	サンプル数	102	102	102	
標準偏差 ($\times 10^6$ tons)		3.54	2.59	1.64	標準偏差 ($\times 10^{-2}$ (-))	4.87	3.77	6.69	
KS 検定 (P 値 ≥ 0.05)	P 値	0.17	0.22	0.043	KS 検定 (P ≥ 0.05)	P 値	0.40	0.33	0.10
t 検定(基準値= μ)		-	-	-	t 検定(基準値= μ)		○	○	○

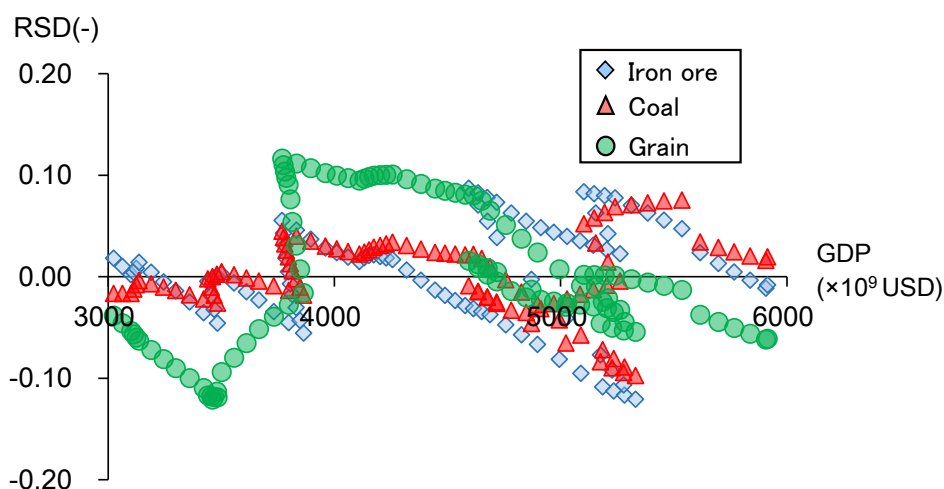


Fig.5.5.3 貨物輸送量予測モデルの等分散性

5.5.3 発注量予測モデルの不確実性

(1) 発注量予測モデルの不確実性

発注量予測モデルでは、船舶航海距離と発注量の関係に (Fig. 5.5.4) 不確実性があり、バラつきが発生すると考える。基本方針としては、(a)モデル全体に着目する方法、(b)通常期、発注爆発期の二つに分けて不確実性を定義する方法の2種類が考えられる。以上の方針を基に、標準偏差、相対残差の標準偏差を検定する。

不確実性の解析結果を Table 5.5.3 に示す。この表に示すように、標準偏差(SD)、相対残差の標準偏差(RSD)と共に P 値 ≥ 0.05 となり、正規性を確保できていることが分かる。基準値 $=u$ とした t 検定では(a)全体で不確実性を考慮した場合、方針(b)の通常期では基準値 u を中心にバラつくものの、爆発期には基準値 u を中心にしてバラつかずに、偏差が生じることが分かった。

等分散性を確認したところ、標準偏差(SD)の場合は爆発期に分散が拡大する傾向があり、等分散性を確保することが困難であった。その場合は変数変換による対応が有効であると指摘されているため⁽¹⁶⁾、本研究では標準偏差(SD)の対数をとって等分散性を確認した。その結果、Fig.5.5.5 に示すように、等分散性が確保できている。

以上の結果より、発注量予測モデルに関しては、標準偏差、相対残差の標準偏差の両方で取り扱うことができる。

そこで、Sub-model によるシミュレーションを実施し、バラつきを考慮することで実績値をどの程度捉えられるか調査した。その結果を Table 5.5.4, Fig.5.5.6 に示す。このシミュレーションでは 2002 年-2008 年までの期間とし、船価の下落による発注量の増加期間を除外している。この結果に示すように、移動平均 1 ヶ月 (移動平均なし) の時、実績が予測値

の $\pm 1\sigma$ の範囲に入る確率は相対残差の標準偏差で方針 (b) (通常期, 発注爆発期の二つに分けた場合) の時, 最大となる. よって, 本研究では相対残差の標準偏差で方針 (b) に基づき, そのバラつきを考慮する.

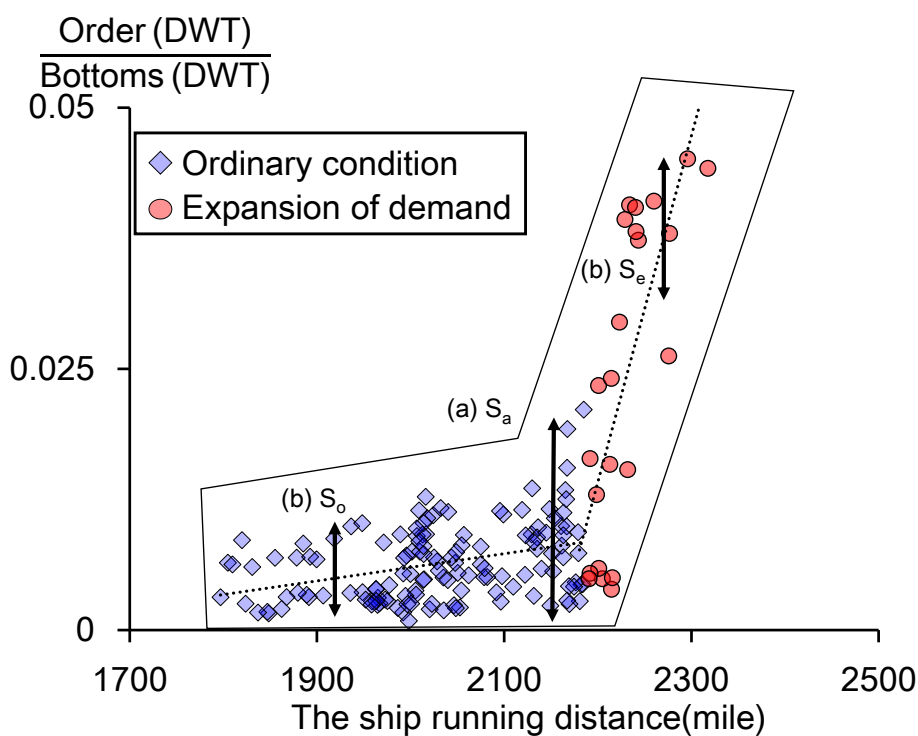


Fig.5.5.4 発注量予測モデルの不確実性

Table 5.5.3 発注量予測モデルの不確実性の解析結果(1)

		標準偏差(SD)					相対残差の標準偏差(RSD)		
		(a)全体	(b)通常期	(b)爆発期			(a)全体	(b)通常期	(b)爆発期
サンプル数		165	135	30	サンプル数		165	135	30
標準偏差 ($\times 10^{-3}(-)$)		4.92	3.24	8.78	標準偏差 ($\times 10^{-2}(-)$)		1.56	3.05	22.27
KS 検定 (P 値 ≥ 0.05)	P 値	0.24	0.11	0.94	KS 検定 (P ≥ 0.05)	P 値	0.08	0.08	0.51
	t 検定 (基準値= μ)	○	○	×		t 検定 (基準値= μ)	○	○	×

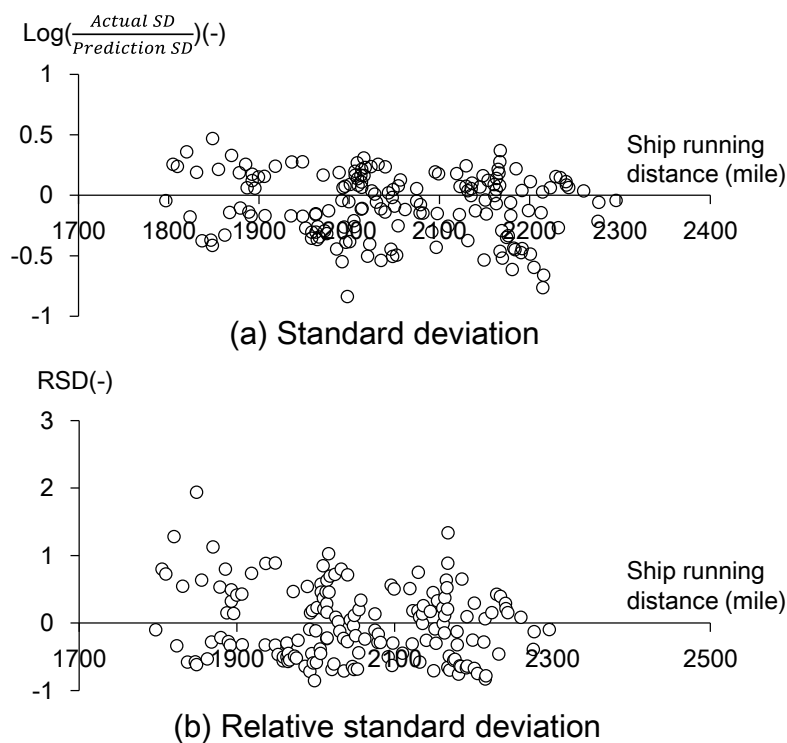


Fig.5.5.5 発注量予測モデルの等分散性

Table 5.5.4 発注量予測モデルの不確実性の解析結果(2) (Sub-modelによる検証)

移動平均 期間 モデル名	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	4ヶ月	5ヶ月	9ヶ月
	(a)モデル全体で標準偏差を用いて 不確実性を考慮 (単位：%)	54.3	65.4	70.4	70.4	72.8
(b)通常期と爆発期を分け、標準偏差を 用いて不確実性を考慮 (単位：%)	53.1	60.5	64.2	64.2	71.6	69.1
(a)モデル全体で相対残差の標準偏差 を用いて不確実性を考慮 (単位：%)	56.8	71.6	77.8	77.8	84.0	90.1
(b)通常期と爆発期を分け、相対残差の 標準偏差を用いて不確実性を考慮 (単位：%)	64.2	71.6	74.1	76.5	80.2	84.0

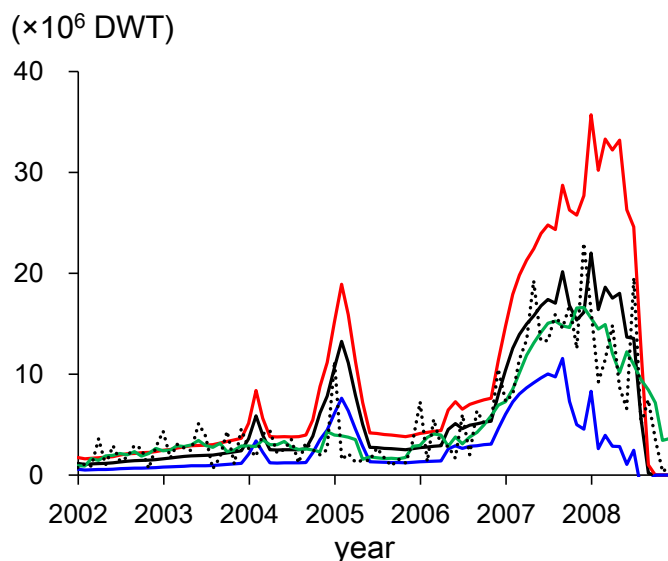


Fig.5.5.6 Sub-model による検証 (発注量予測モデル)
(相対残差の標準偏差 方針(b)によるシミュレーション結果)

(2) 手持工事量による発注量の補正の影響

手持工事量による補正の発生する部分は、データ数を十分確保できなかったため(データ数が 20 以下), KS 検定を適用できない。そのため、手持工事量の補正部分で発生する不確実性は考慮しない。

(3) 船価による発注量の補正の影響

船価による発注量の補正を考慮する場合, Fig.5.5.7 に示す船価の連続下落値と補正量の関係にバラつきが発生すると考えられる。上述の(1)発注量予測モデルの不確実性の考慮方法と統一するため、船価による補正のバラつきも相対残差の標準偏差を用いて考慮する。不確実性の解析結果を Table 5.5.5 に示す。この表に示すように、正規性の仮定は妥当であることが分かる。また、Fig.5.5.8 に示すように等分散性についても、妥当であることが分かる。しかし、t 検定の結果、バラつきに偏りがあったため、その影響を考慮して変動を与える。

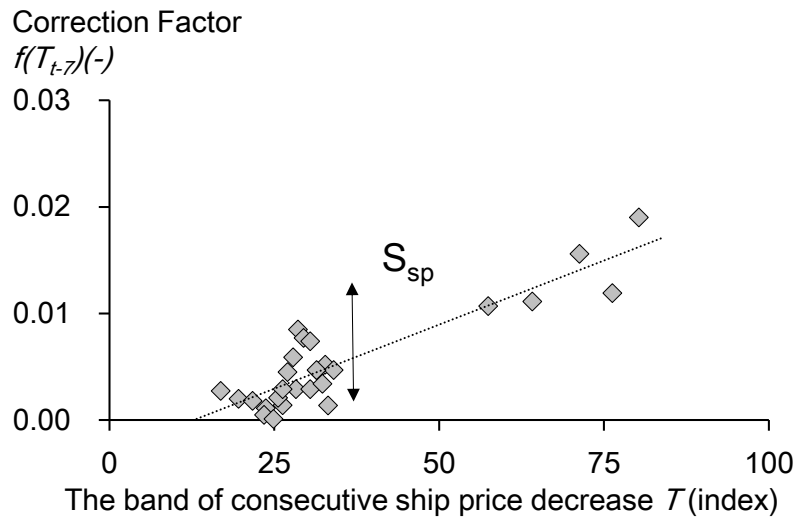


Fig.5.5.7 船価による発注量の補正の不確実性

Table 5.5.5 不確実性の解析結果 (船価による発注量の補正)

		相対残差の標準偏差(RSD)
サンプル数		26
相対残差の標準偏差(-)		0.77
KS 検定 (P 値 ≥ 0.05)	P 値	0.16
t 検定 (基準値= μ)		×

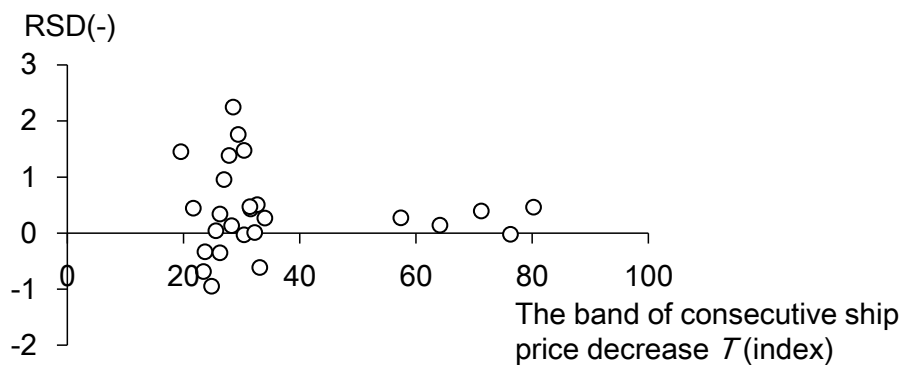


Fig.5.5.8 等分散性の確認 (船価による発注量の補正)

5.5.4 建造モデルの不確実性

建造モデルでは、手持工事量と竣工量の関係に (Fig.5.5.9) バラつきが発生すると考える。基本方針としては、発注量予測モデルと同様(a)モデル全体に着目する方法、(b)通常期、フル操業期、能力拡張期に分けて不確実性を定義する方法の2種類が考えられる。以上の方針に基づき、標準偏差、相対残差の標準偏差のバラつきを検定する。

不確実性の解析結果を Table 5.5.6- Table 5.5.7 に示す。これらの表に示すように、標準偏差 (SD)の場合、すべてのサイズの(a)全体、(b)通常期で正規性を確保することができない。

一方、相対残差の標準偏差との場合は、方針(a)モデル全体で考慮する方法では正規性を確保できないものの、方針(b)の三つの期間に分けた場合、すべて P 値 \geq 0.05 となり、正規性を確保できることが分かる。しかし、基準値=u とした t 検定では、バラつきに偏りが生じる期間があるため、それを考慮してパラメータを設定する。よって基本方針としては、方針(b)を採用し、通常期、フル操業期、能力拡張期の三つの状態に分けて不確実性を考慮する。

また、等分散性を確認したところ、 Fig. 5.5.10- Fig. 5.5.12 に示すように、すべての期間で等分散性が確保できていることが分かった。

以上の解析結果に基づき、建造モデルの不確実性のパラメータを設定する。

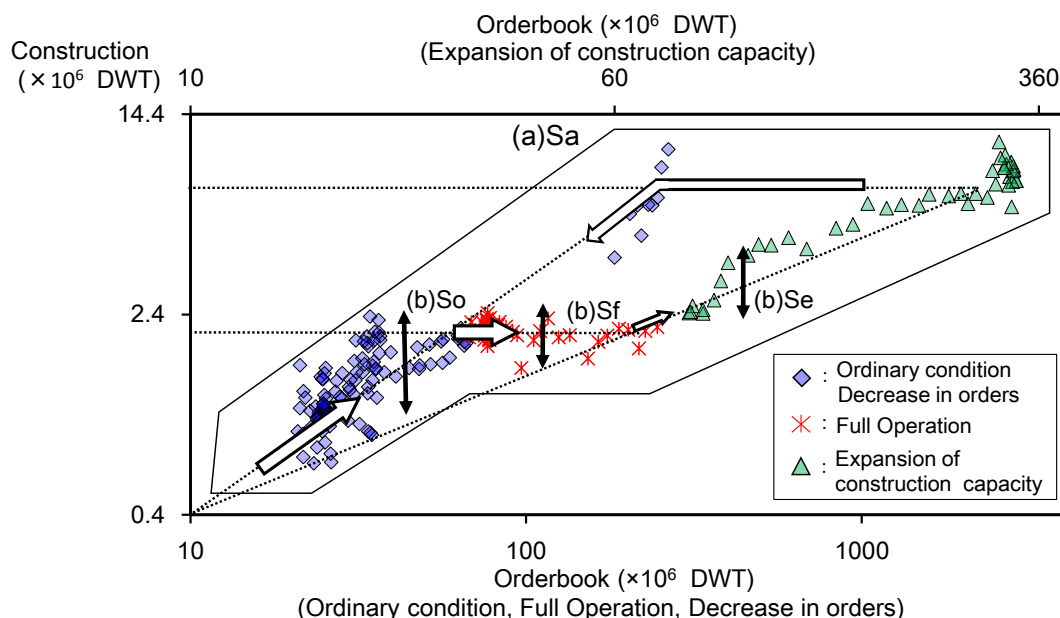


Fig.5.5.9 建造モデルの不確実性

Table 5.5.6 建造モデルの不確実性の解析結果(1) (標準偏差(SD))

		Capesize				Panamax			
		全体	通常期	フル 操業期	爆発期	全体	通常期	フル 操業期	爆発期
サンプル数		185	131	47	43	193	131	55	43
標準偏差($\times 10^5(-)$)		6.31	5.85	3.81	9.09	3.53	3.61	2.45	4.32
KS 検定	P 値	0.02	0.01	0.17	0.84	0.00	0.00	0.61	0.36
t 検定 (基準値= μ)		-	-	○	×	-	-	○	×
		Handymax				Handysize			
		全体	通常期	フル 操業期	爆発期	全体	通常期	フル 操業期	爆発期
サンプル数		177	131	39	43	166	131	28	43
標準偏差($\times 10^5(-)$)		2.90	2.37	1.50	4.50	1.50	1.29	8.88	2.12
KS 検定	P 値	0.03	0.03	0.98	0.90	0.00	0.00	0.79	0.66
t 検定 (基準値= μ)		-	-	○	○	-	-	○	○

Table 5.5.7 建造モデルの不確実性の解析結果(2) (相対残差の標準偏差(RSD))

		Capesize				Panamax			
		全体	通常期	フル 操業期	爆発期	全体	通常期	フル 操業期	爆発期
サンプル数		185	95	47	43	193	95	55	43
相対残差の標準偏差(-)		0.49	0.91	0.45	0.27	0.53	0.59	0.39	0.53
KS 検定	P 値	0.04	0.16	0.23	0.29	0.01	0.07	0.57	0.71
t 検定 (基準値= μ)		-	○	○	×	-	×	○	○
		Handymax				Handysize			
		全体	通常期	フル 操業期	爆発期	全体	通常期	フル 操業期	爆発期
サンプル数		177	95	39	43	166	95	28	43
相対残差の標準偏差(-)		0.51	0.63	0.32	0.41	0.48	0.66	0.40	0.34
KS 検定	P 値	0.11	0.13	0.07	0.12	0.10	0.11	0.12	0.08
t 検定 (基準値= μ)		×	×	○	×	×	×	○	×

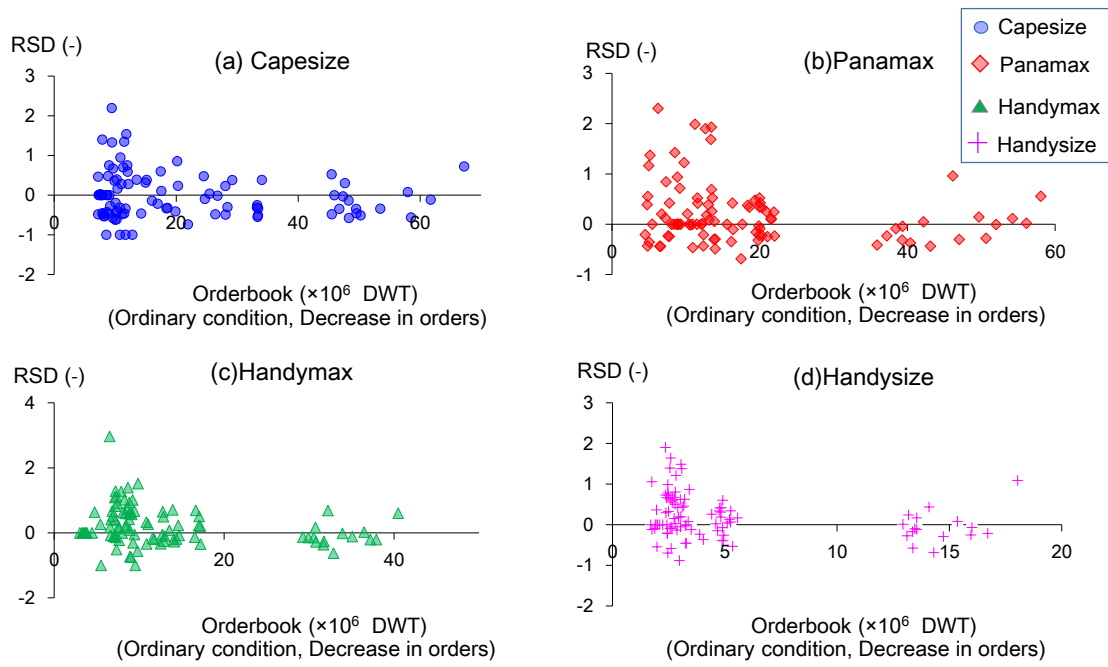


Fig.5.5.10 通常期の等分散性

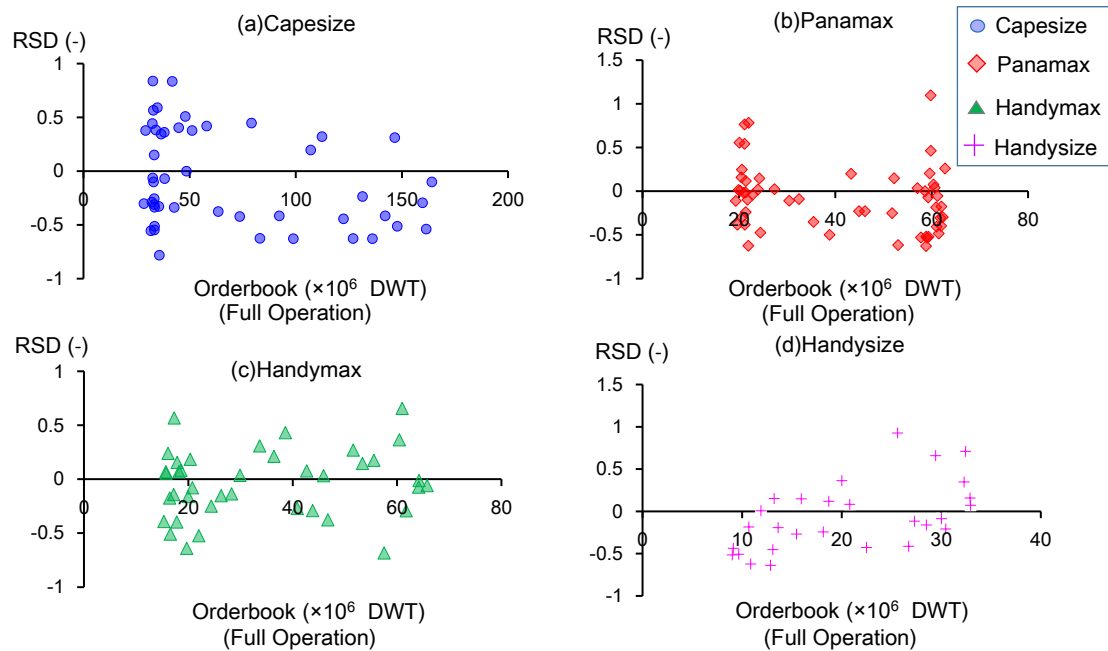


Fig.5.5.11 フル操業期の等分散性

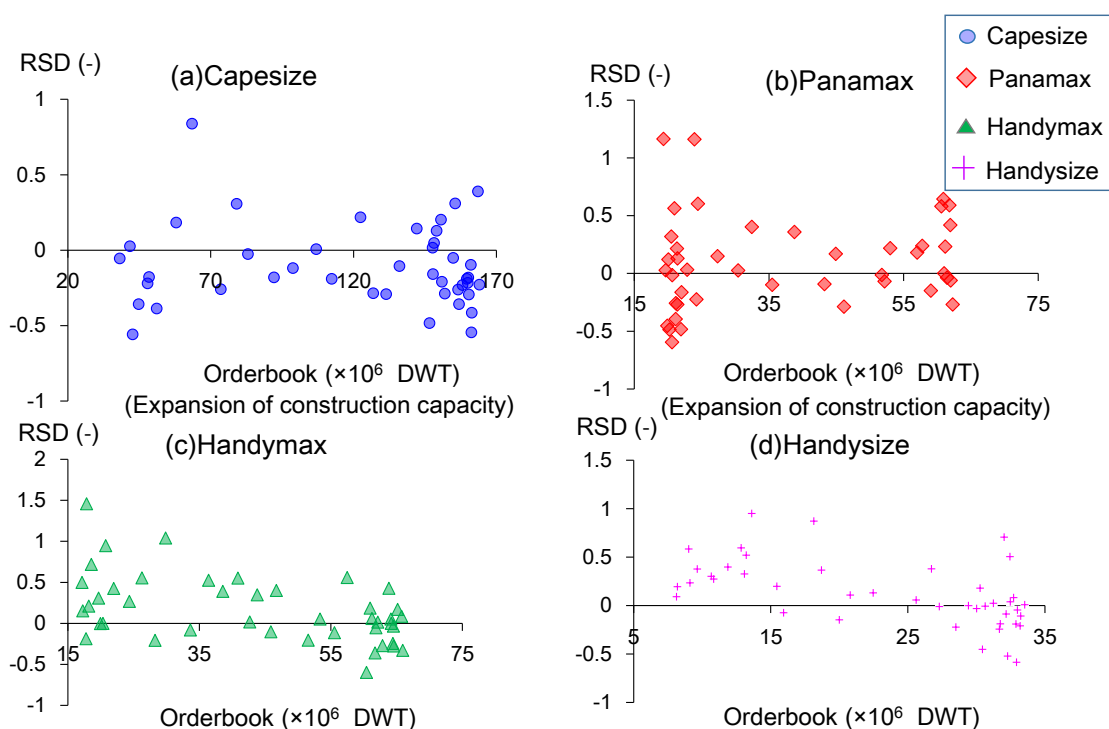


Fig.5.5.12 能力拡張期の等分散性

5.5.5 船価予測モデルの不確実性

船価予測モデルでは、手持工事率と船価の関係にバラつきが発生すると考える(Fig.5.5.13). 発注量予測モデルと同様に基本方針としては、(a)モデル全体に着目する方法、(b)強制下落期(Sf), 上昇期①(Si1), 上昇期②(Si2), 下落期①(Sd1), 下落期②(Sd2)の5つに分けて不確実性を定義する方法の2種類が考えられ、この方針に基づいて、標準偏差、相対残差の標準偏差のバラつきを検定する。

不確実性の解析結果を Table 5.5.8- Table 5.5.9 に示す. この表に示すように、標準偏差(SD), 相対残差の標準偏差の検定結果ともに(a)モデル全体に着目した場合は、 P 値 ≥ 0.05 を満足しない. 一方、(b)5つの期間に分けた場合はすべて P 値 ≥ 0.05 を満足する. また、相対残差の標準偏差(RSD)を用いた場合と標準偏差(SD)を用いた場合を比較すると、 t 検定の結果が基準値= u を満足しない期間に差があり、標準偏差(SD)の方が少ないことが分かる (強制下落期と下落期①). この結果より、船価に関しては、方針(b)と標準偏差に基づいて不確実性を考慮する。

また、等分散性を確認したところ、Fig.5.5.14 に示すように、すべての期間で等分散性が確保できていることが分かった。

以上の解析結果に基づいて、船価予測モデルの不確実性のパラメータを設定する。

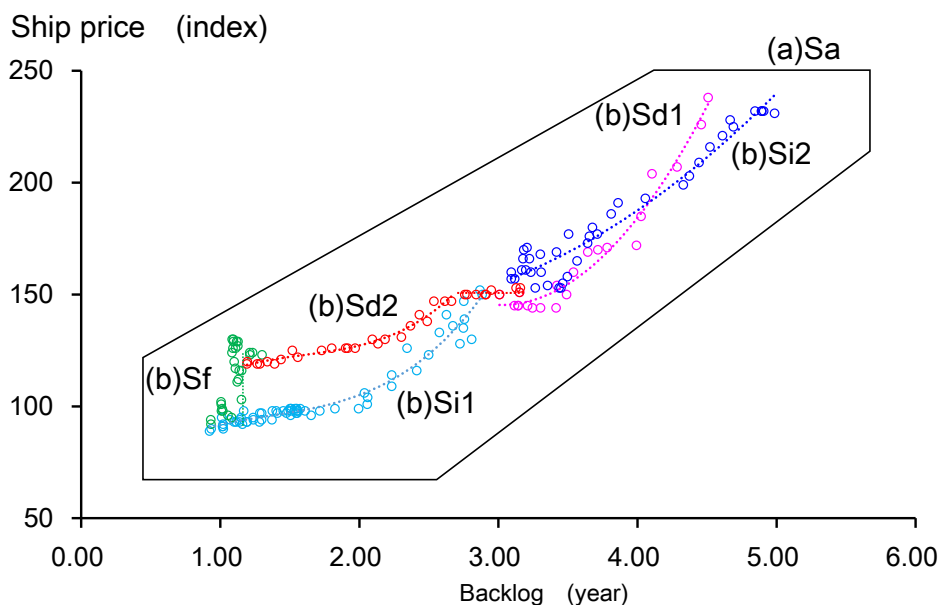


Fig.5.5.13 船価予測モデルの不確実性

Table 5.5.8 船価予測モデルの不確実性の解析結果(1) (標準偏差(SD))

		全体	強制 下落期 (Sf)	上昇期① (Si1)	上昇期② (Si2)	下落期① (Sd1)	下落期② (Sd2)
個数		196	29	67	44	22	34
標準偏差(-)		4.76	3.54	3.48	7.14	5.47	2.22
KS 検定 (P 値 \geq 0.05)	P 値	0.04	0.25	0.13	0.43	0.87	0.94
t 検定結果 (基準値= μ)		-	×	○	○	○	○

Table 5.5.9 船価予測モデルの不確実性の解析結果(2) (相対残差の標準偏差(RSD))

		全体	強制 下落期 (Sf)	上昇期① (Si1)	上昇期② (Si2)	下落期① (Sd1)	下落期② (Sd2)
個数		196	29	67	44	22	34
標準偏差 ($\times 10^{-2}$ (-))		3.16	3.15	2.86	3.98	3.23	1.60
KS 検定 (P 値 \geq 0.05)	P 値	0.02	0.07	0.18	0.14	0.94	0.33
t 検定結果 (基準値= μ)		-	×	○	○	×	○

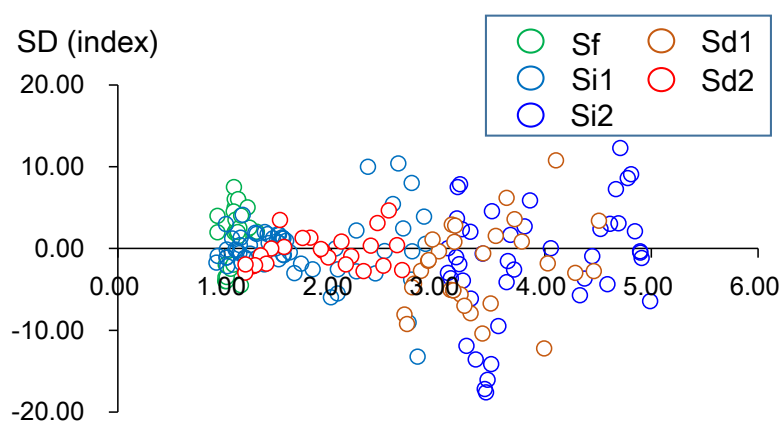


Fig.5.5.14 船価予測モデルの等分散性

5.5.6 廃船モデルの不確実性

(1) 廃船モデルの不確実性

廃船モデルでは、船舶航海距離と廃船量の関係に (Fig.5.5.15) バラつきが発生すると考える。基本方針としては発注量予測モデルと同様、(a)モデル全体に着目する方法、(b)通常期、減少期に分けてバラつきを定義する方法の2種類が考えられる。以上の方針に基づき、標準偏差、相対残差の標準偏差のバラつきを検定する。

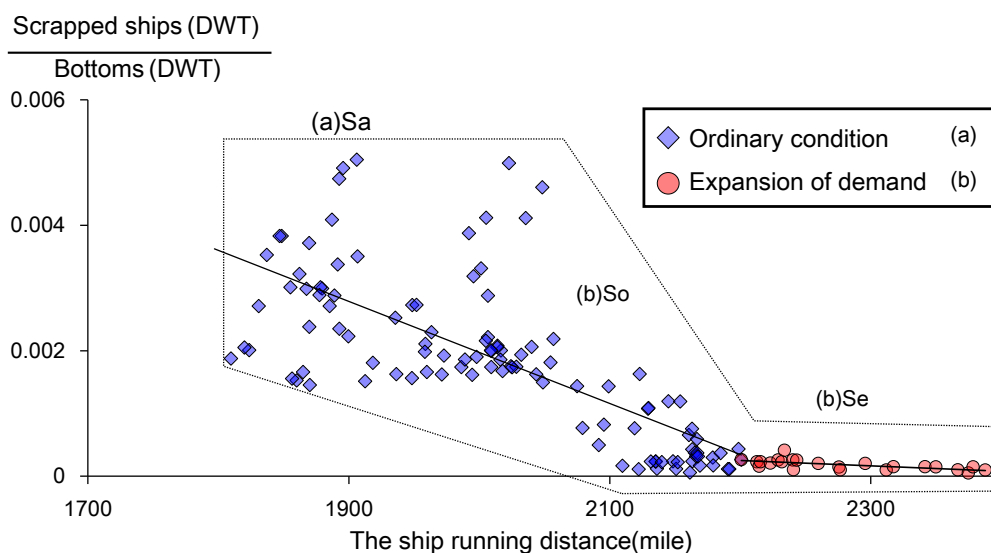


Fig.5.5.15 廃船モデルの不確実性

Table 5.5.10 廃船モデルの不確実性の解析結果(1) (標準偏差(SD))

	廃船量 Capesize			廃船量 Panamax		
	全体	通常期	爆発期	全体	通常期	爆発期
サンプル数	136	112	24	136	111	25
標準偏差($\times 10^{-3}$ (-))	1.03	1.09	0.08	1.08	1.19	0.10
KS 検定 P 値	0.21	0.84	0.29	0.002	0.12	0.14
t 検定 (基準値= μ)	×	×	×	-	○	×
	廃船量 Handymax			廃船量 Handysize		
	全体	通常期	爆発期	全体	通常期	爆発期
サンプル数	137	116	21	136	112	24
標準偏差($\times 10^{-3}$ (-))	1.08	1.17	0.11	1.11	1.20	0.19
KS 検定 P 値	0.01	0.09	0.82	0.06	0.44	0.70
t 検定 (基準値= μ)	-	×	○	×	×	○

Table 5.5.11 廃船モデルの不確実性の解析結果(2) (相対残差の標準偏差(RSD))

	廃船量 Capesize			廃船量 Panamax		
	全体	通常期	爆発期	全体	通常期	爆発期
サンプル数	136	112	24	136	111	25
標準偏差 (-)	1.75	1.44	2.79	1.03	1.01	0.99
KS 検定 P 値	0.00	0.00	0.00	0.00	0.1	0.00
t 検定 (基準値= μ)	-	-	-	-	×	-
	廃船量 Handymax			廃船量 Handysize		
	全体	通常期	爆発期	全体	通常期	爆発期
サンプル数	137	116	21	136	112	24
標準偏差 (-)	0.67	0.66	0.73	0.53	0.52	0.50
KS 検定 P 値	0.02	0.08	0.05	0.17	0.26	0.54
t 検定 (基準値= μ)	-	×	×	×	×	○

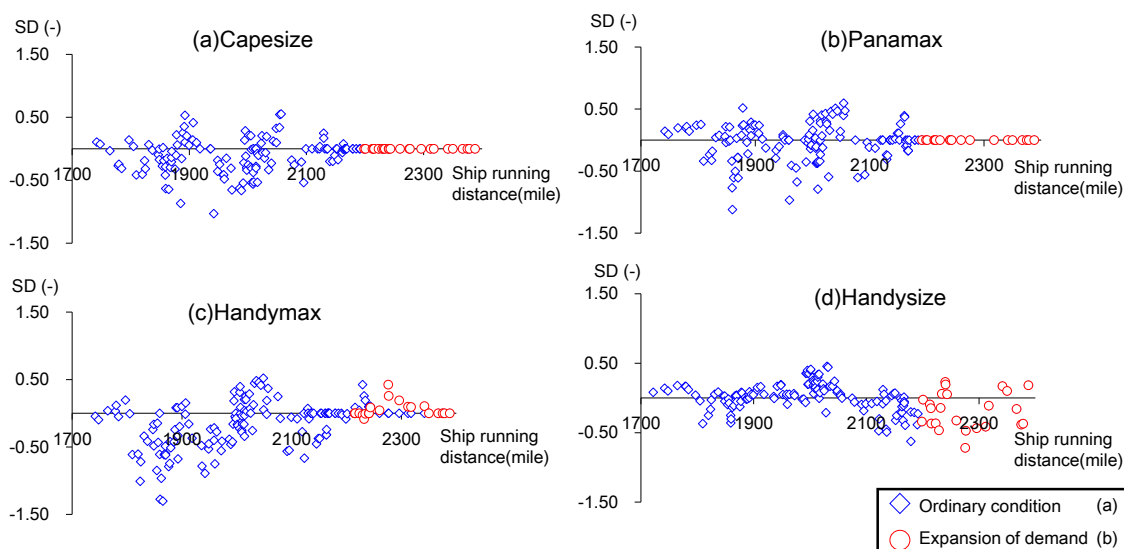


Fig.5.5.16 廃船モデルの等分散性

不確実性の解析結果を Table 5.5.10- Table 5.5.11 に示す. これらの表に示すように, 相対残差の標準偏差(RSD)の場合, Capesize の正規性を確保することは困難である.

一方, 標準偏差(SD)の場合は, 方針(a)のモデル全体に着目した場合は正規性を満足しないサイズがあるものの, (b)の二つの状態に分けた場合, すべてのサイズで P 値 ≥ 0.05 となり, 正規性を確保できている. しかし, 基準値= u とした t 検定では, バラつきに偏りが生じる期間があるため, それを考慮してパラメータを設定する. よって基本方針としては, 方針(b)の二つの状態に分ける方法でバラつきを考慮する.

また, 等分散性を確認したところ, 発注量予測モデルと同様, 等分散性を確保することが困難であったため, 変数変換によって等分散性を確認した. その結果, Fig.5.5.16 に示すように, 等分散性が確保できている.

以上の解析結果を基に, 廃船モデルの不確実性のパラメータを設定する.

(2)発注量による廃船量の補正の影響

発注量による廃船量の補正については, 上述の(1)廃船モデルの不確実性の議論に基づき, 標準偏差(SD)を用いて補正関数のバラつきを考慮することで, 不確実性の考慮方法を統一する. 廃船量の補正関数の不確実性の解析結果を Table 5.5.12 に示す. この表に示すように, P 値 ≥ 0.05 以上を満足し, t 検定でも基準値= u の仮定が妥当である. バラつきの等分散性についても Fig.5.5.17 に示すように妥当であることが分かる.

Table 5.5.12 不確実性の解析結果 (発注量による廃船量の補正)

		Capesize	Panamax	Handymax	Handysize
サンプル数		24	31	26	30
標準偏差 ($\times 10^5$ (DWT))		2.51	1.48	0.73	2.55
KS 検定 (P 値 ≥ 0.05)	P 値	0.41	0.61	0.60	0.41
t 検定 (基準値= μ)		○	○	○	○

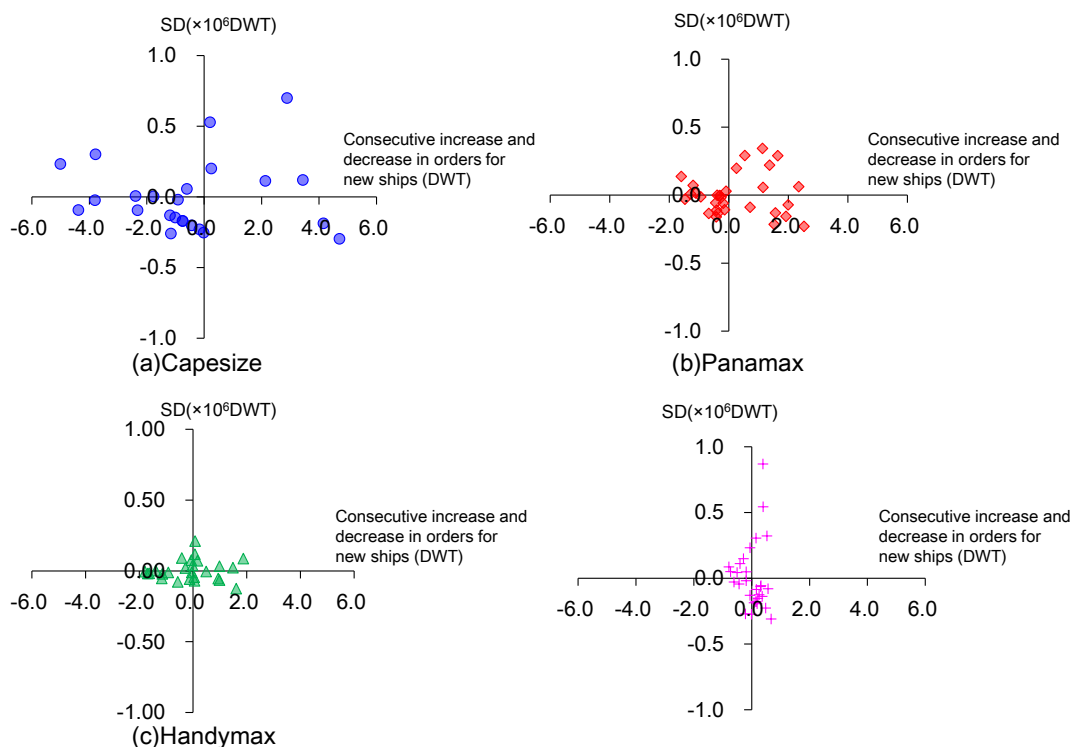


Fig.5.5.17 等分散性の確認 (発注量による廃船量の補正)

5.6 不確実性を考慮することの効果

5.6.1 SD モデル内部の不確実性の効果

本項では、不確実性を考慮した効果をシミュレーションにより確認する。以下に入力データを示す。なお、世界 GDP と貨物輸送距離については実績値を入力し、SD モデル内部の不確実性を考慮した影響を分析する。

- ・ 入力値：1999 /1 -2012/9
 - (1) 世界 GDP (actual data)
 - (2) 貨物輸送距離(actual data)
 - ・ 初期値：1999 /1
 - (1) 船腹量 2.64×10^8 (DWT)
 - (2) 手持工事量: 2.41×10^7 (DWT)
 - (3) 建造能力: 2.09×10^6 (DWT)
 - (4) 建造中の船舶: 1.11×10^7 (DWT)
- モンテカルロ試行回数：10000(回)

(1) 過去シミュレーションによる効果検証

Fig.5.6.1, Table 5.6.1 に全体のシミュレーション結果を示す。この図に示すように中央値の傾向は、不確実性を考慮する場合と考慮しない場合で変化していることが分かる。また、 $\pm 1\sigma$ を取った場合、発注量は 71.5%，竣工量は 68.5%，廃船量は 57.0%，船腹量は 99.4% という結果となり、廃船量以外は 68.3%以上の確率で実績値が $\pm 1\sigma$ 範囲内に収まっていることが分かる。また Table 5.6.1 に示すように、実績値の移動平均を取った場合、実績値が $\pm 1\sigma$ 範囲内に収まる確率が大きく向上することが分かる。この時の実績値の移動平均期間に関しては、4.7.2 項の解析結果を基にしている。また、Fig. 5.6.1 の船腹量の結果より、バラつきが大きく拡大しないことが分かる。

バラつきの拡大の傾向の分析するため、2012/9 時点の期待値 (Fig. 5.6.1 の黒線) に対する標準偏差の割合を解析した。その結果を Table 5.6.2 に整理する。この結果に示すように、海上荷動き量のバラつきの割合は比較的小さい。しかし、発注量、手持工事量、竣工量、廃船量のバラつきの割合は、20~80%の範囲でバラついており、バラつきの割合が大きいことが分かる。つまり、海上荷動き量の微小な変動が海運・造船市場に大きな影響を与えることが分かる。しかし、船腹量の標準偏差の比率は、上述の項目(発注量、竣工量、廃船量)に比べ、小さい値を示す(9.0%)。これは、船腹量は発注量、竣工量、廃船量に対してオーダーが異なり、発注量、竣工量、廃船量がバラついていても船腹量でその影響が薄まるため、結果的にバラつきの割合が大きく拡大しないと考えられる。

また、Fig.5.6.2 - Fig.5.6.4, Table 5.6.3 にサイズ別の予測結果を示す。これらに示すように、サイズ毎の予測結果も中央値の傾向が異なることが分かる。また、 $\pm 1\sigma$ を取った場合、発注量は 58.2~71.6%，竣工量は 71.5~86.1%，廃船量は 65.4~89.5% という結果となり、Capesize, Panamax の発注量、Capesize の廃船量が 68.3%を満足していないことが分かる。実績値の移動平均を取った場合、全体の時と同様に 68.3%以上の確率で実績値が $\pm 1\sigma$ 範囲内に収まること分かる。実績値の移動平均期間に関しては、4.8.3 項の解析結果を基にしている。

以上より、SD モデル内部の不確実性を考慮することで市場の不確実性を考慮した需要予

測が可能となり，予測結果が将来的にどのように変動するかまで予測可能となる。

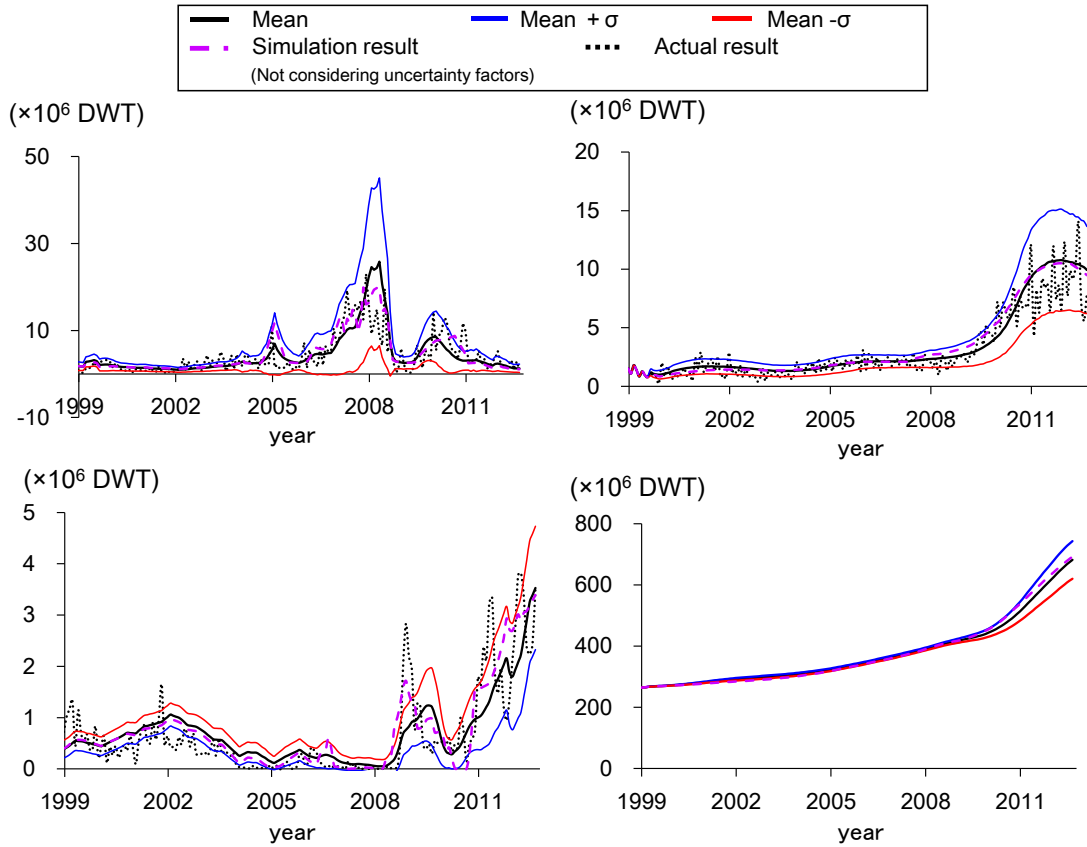


Fig.5.6.1 発注量，竣工量，廃船量，船腹量の予測結果（全量での検証）
（発注量(左上)，竣工量(右上)，廃船量(左下)，船腹量(右下)）

Table 5.6.1 実績値が中央値 $\pm 1\sigma$ に収まる確率（全量）

		発注量	竣工量	廃船量	船腹量
移動平均なし (%)		71.5	68.5	57.0	99.4
移動平均あり	範囲内の確率 (%)	82.4	95.2	66.7	99.4
	移動平均期間 (month)	5	5	10	1

Table 5.6.2 不確実性の伝搬の分析 (2012/9 時点)

	海上 荷動き量	船舶航海 距離	船腹量	発注量	手持 工事量	竣工量	廃船量
バラつきの割合 (%) (標準偏差/期待値)	3.1	9.3	9.0	72.9	22.2	37.4	34.1

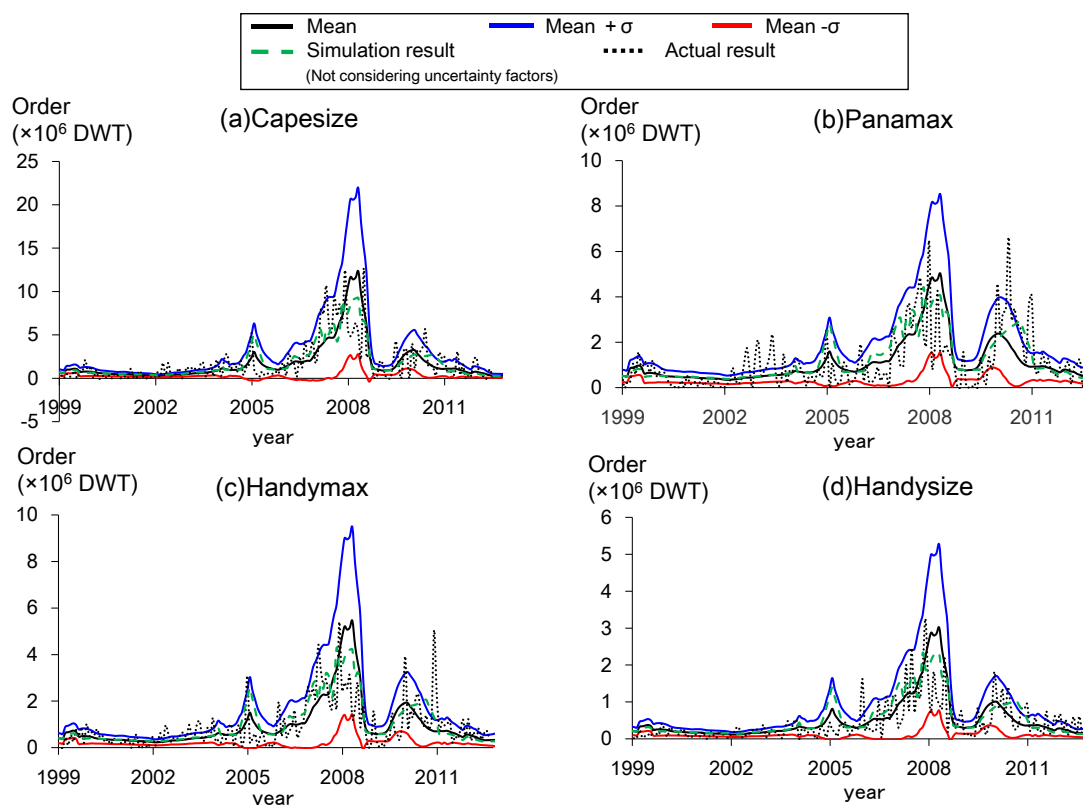


Fig.5.6.2 発注量の予測結果 (船舶サイズ別)

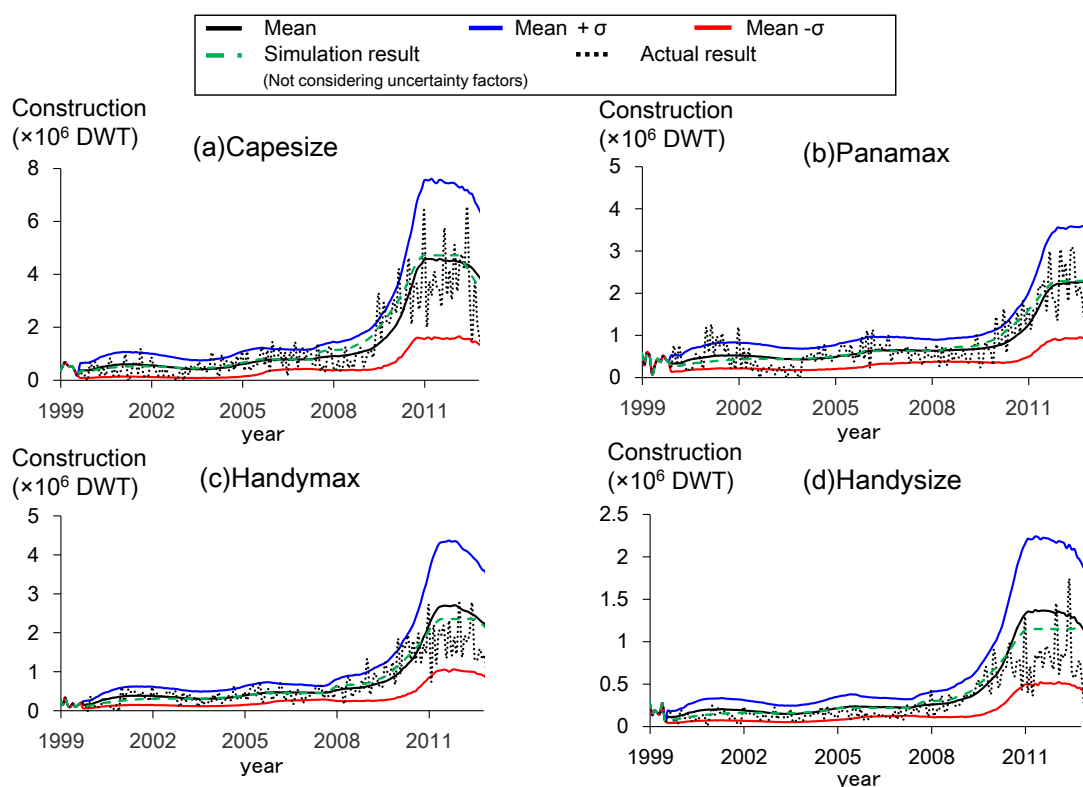


Fig.5.6.3 竣工量の予測結果 (船舶サイズ別)

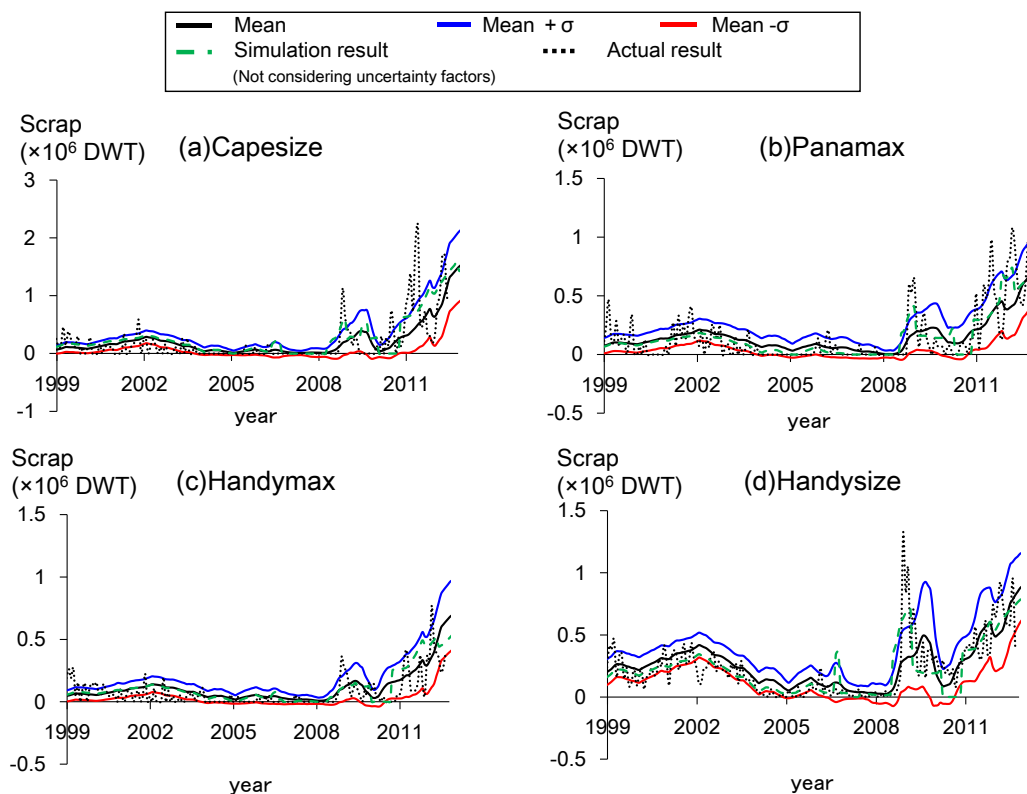


Fig.5.6.4 廃船量の予測結果 (船舶サイズ別)

Table 5.6.3 実績値が中央値 $\pm 1\sigma$ に収まる確率 (船舶サイズ別)

サイズ	実績値の取り扱い		発注量	竣工量	廃船量
Capesize	移動平均なし (%)		58.2	82.4	65.4
	移動平均あり	範囲内の確率 (%)	80.6	93.9	84.0
		移動平均期間 (month)	6	6	12
Panamax	移動平均なし (%)		61.7	71.5	71.0
	移動平均あり	範囲内の確率 (%)	70.4	83.6	89.5
		移動平均期間 (month)	5	4	9
Handymax	移動平均なし (%)		68.5	83.6	71.0
	移動平均あり	範囲内の確率 (%)	79.0	94.5	80.9
		移動平均期間 (month)	5	10	5
Handysize	移動平均なし (%)		71.6	86.1	75.3
	移動平均あり	範囲内の確率 (%)	88.3	93.9	79.6
		移動平均期間 (month)	6	12	2

(2) 不確実性が予測結果に与える影響の考察

Fig.5.6.1 に示すように、発注量、竣工量、廃船量、船腹量の傾向を幅で捉えられていることが分かる。しかし、2008年1月の竣工量のバラつき σ (標準偏差/期待値)は32.1%に対して、発注量は74.5%と他の項目に比べバラつきが大きい。ここでは発注量に着目し、どのSub-modelが発注量のバラつきに大きな影響を与えているか明らかにし、今後、精度を向上すべきモデルを明確にする。

本研究では、各々のSub-modelのバラつきを0としてシミュレーションを行い、すべて考慮する場合の結果と比較することで各Sub-modelが発注量にどの程度影響を与えるか分析する。

Fig.5.6.5, Table 5.6.4 にその解析結果を示す。これらの結果に示すように、建造モデル、船価予測モデル、廃船モデルは発注量のバラつきに大きな影響を与えておらず、すべてを考慮した場合と比べても、大きな変化がないことが分かる。

一方、発注量予測モデルのバラつきを0とした場合、バラつきが小さくなることが分かる。これは、発注量予測モデルが発注量の算出に直接影響を与えるモデルであるため、このバラつきを抑えれば発注量のバラつきが大きく減少する。

また、貨物輸送量予測モデルのバラつきを0とした場合も、バラつきが小さくなってい

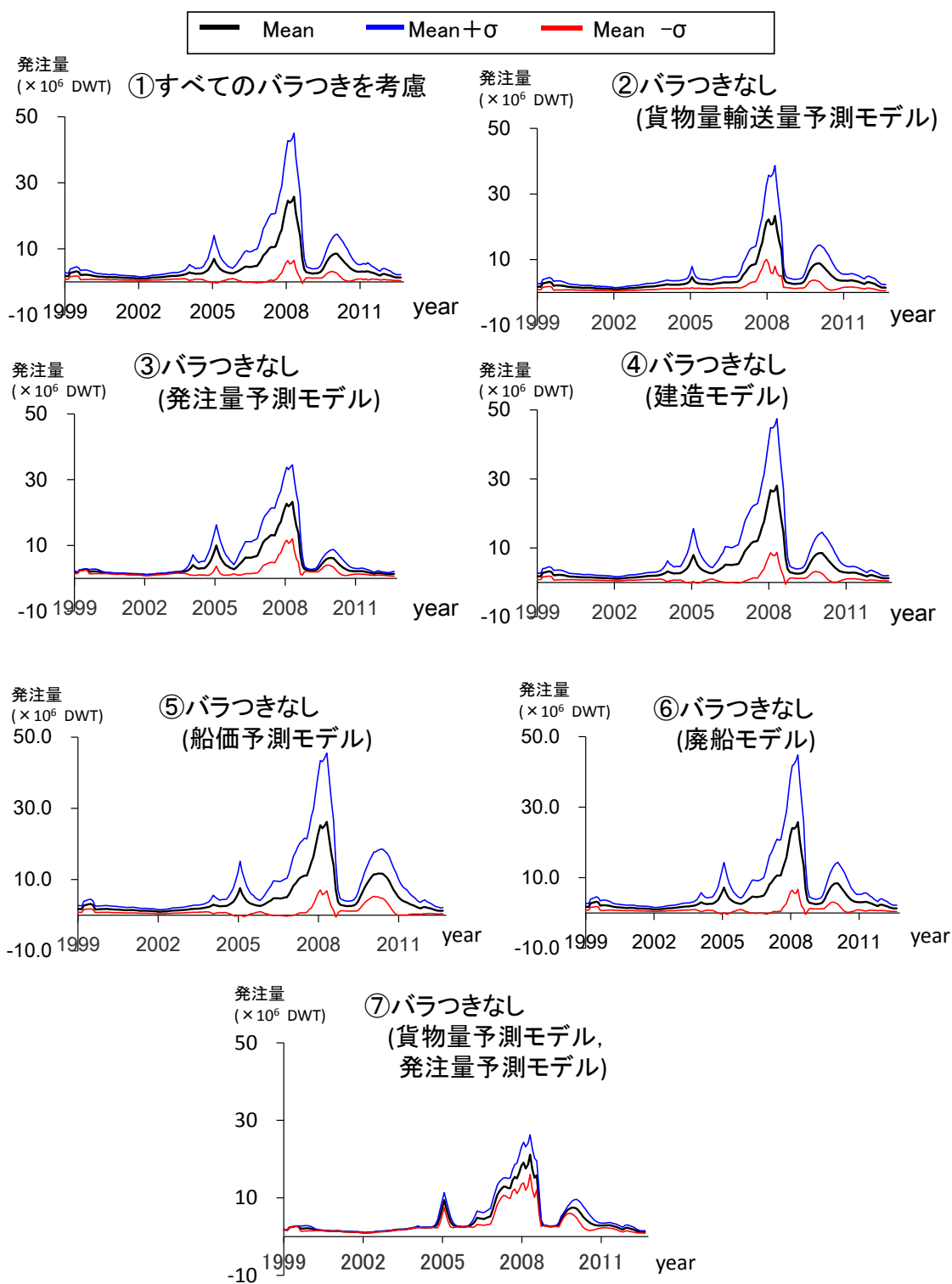


Fig.5.6.5 不確実性が発注量の予測結果に与える影響の分析

ることが分かる。そして、貨物輸送量予測モデル、発注量予測モデルのバラつきの双方を0とした場合、平均的なバラつきは17.4%となり、すべてのSub-modelのバラつきを考慮する

Table 5.6.4 SDモデル内部の不確実性の影響

バラつきを考慮 しない Sub-model	①なし (すべて考慮)	②貨物輸送量 予測モデル	③発注量 予測モデル	④建造 モデル
発注量のバラつき の平均値(%) (標準偏差/期待値)	71.2	56.8	35.5	70.3
バラつきを考慮 しない Sub-model	⑤船価予測 モデル	⑥廃船モデル	⑦貨物輸送量予測モデル 発注量予測モデル	
発注量のバラつき の平均値(%) (標準偏差/期待値)	71.2	71.6	17.4	

場合に比べ、大きくその割合が減少する (Table 5.6.4, Fig.5.6.5).

また貨物輸送量予測モデルのバラつきを考慮しないことで、発注爆発のタイミングはほぼ同時で、 $\pm 1\sigma$ のラインでほぼ揃うことが分かる(Fig.5.6.5②)。発注関数の通常爆発期、発注爆発値が切り替わる点は船舶航海距離が 2171.57(mile)の点となる(Fig.4.3.3 船舶航海距離と発注量の関係)。この船舶航海距離の値を基準に分析した場合、①すべてのバラつきを考慮する場合、中央値のラインでは 2006/5、 $+\sigma$ のラインでは 2005/12、 $-\sigma$ のラインでは 2007/5 が船舶航海距離 2171.57(mile)を超えるタイミングとなる。中央値のラインを基準とすると $+\sigma$ のラインでは-5ヶ月、 $-\sigma$ のラインでは+12ヶ月の差が生じる。同様に、②貨物輸送量予測モデルのバラつきを考慮しない場合、中央値のラインでは 2006/4、 $+\sigma$ のラインでは 2006/2、 $-\sigma$ のラインでは 2006/12 が船舶航海距離 2171.57(mile)を超えるタイミングとなる。この場合も中央値のラインを基準とすると $+\sigma$ のラインでは-2ヶ月、 $-\sigma$ のラインでは+8ヶ月の差が生じる。この結果から分かる通り、船舶航海距離が 2171.57(mile)を超えるタイミングは貨物輸送量予測モデルのバラつきを考慮する場合としない場合で異なり、貨物輸送量予測モデルのバラつきを考慮することでその期間が増加する。これは、船舶航海距離の $\pm 1\sigma$ の幅に差があるためである。

船舶航海距離の $\pm 1\sigma$ の幅の差を分析するため、船舶航海距離のシミュレーション結果を Fig.5.6.6 に示す。この図に示すように、中央値のラインを対して $\pm 1\sigma$ の幅が貨物輸送量予測モデルのバラつきを考慮することで拡大している。これは、海上荷動き量のバラつき(tons×mile)が船舶航海距離のバラつきに大きな影響を与えているためである。第4章の(4-3)式に示すように、海上荷動き量を船腹量で割ることで船舶航海距離を算出する。トンマイルベースの海上荷動き量は 2006/5 時点では 7.65×10^{11} (tons×mile)、船腹量は 3.53×10^8 (DWT) である。この時、海上荷動き量が $\pm 1\sigma$ で 1%バラついた場合、船舶航海距離のバラつきは 21.67 (mile)となる。この場合、 $+\sigma$ のラインで船舶航海距離は 2193.24(mile)、 $-\sigma$ のラインで船舶航海距離は 2149.9(mile)となり、 $+\sigma$ では発注爆発期、 $-\sigma$ では通常期で計算される。こ

のように、海上荷動き量がバラつくことにより船舶航海距離のバラつきが発生し、発注爆発のタイミングの差に大きな影響を与えている。そして、そのバラつきを考慮する場合としない場合で、船舶航海距離の $\pm 1\sigma$ の幅に差が発生する。

以上の分析により、発注量のバラつきに大きな影響を与えている Sub-model は貨物輸送量予測モデル、発注量予測モデルのバラつきであることが分かった。本研究では、単回帰直線を用いて、海上荷動き量、発注量を予測している。今後は時系列解析、重回帰分析、機械学習等の手法を用いて、モデル精度を向上し、バラつきを小さくする必要がある。

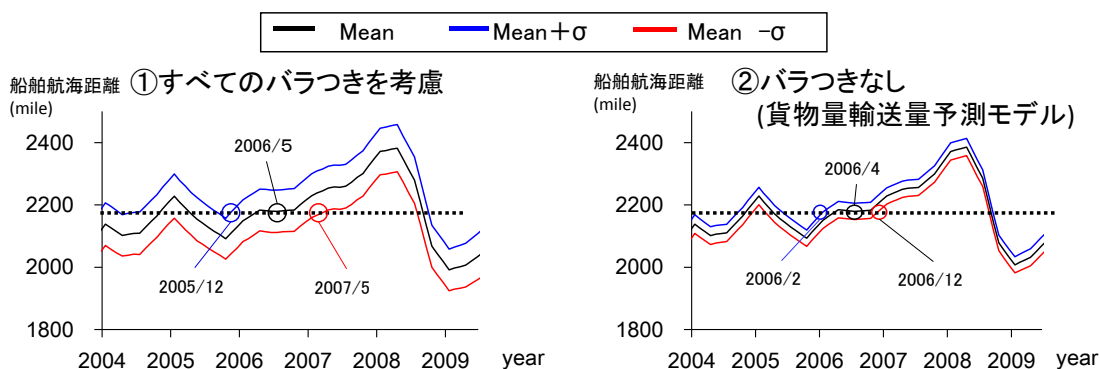


Fig.5.6.6 船舶航海距離の比較

5.6.2 SD モデル外部の不確実性の効果

(1)過去シミュレーションによる効果検証

二項格子モデルを用いて過去シミュレーション実施し、世界 GDP と貨物輸送距離が不明な状況下で、どの程度の予測が可能か検証した。入力値は Table 5.6.5 - Table 5.6.8 に示す。モンテカルロ試行回数については、全 Case 10000 回とした。世界 GDP、貨物輸送距離の上昇確率、上昇率、下落率は過去の値を基に、実績値が $\pm 1\sigma$ の範囲で 68.3%を満足するように設定した。

シミュレーション結果を Fig.5.6.7 - Fig. 5.6.8 に示す。海上荷動き量はすべての結果、実績値が $\pm 1\sigma$ の範囲内で、68.3%以上を満足するように推移する。しかし発注量は 1999 年の段

Table 5.6.5 パラメータの設定値と入力値 (1999)

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鉱石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q	0.689	0.651	0.373	0.581
上昇率 u	1.013	1.002	1.005	1.005
下落率 d	0.987	0.998	0.995	0.995

Table 5.6.5 パラメータの設定値と入力値 (1999) (続き)

初期設定	船腹量	手持工事量	建造能力:	建造中の船舶
入力値	2.64×10 ⁸ (DWT)	2.41×10 ⁷ (DWT)	2.09×10 ⁶ (DWT)	1.11×10 ⁷ (DWT)

Table 5.6.6 パラメータの設定値と入力値 (2003)

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鉱石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q	0.770	0.592	0.433	0.717
上昇率 u	1.014	1.003	1.006	1.005
下落率 d	0.986	0.997	0.994	0.995
初期設定	船腹量	手持工事量	建造能力:	建造中の船舶
入力値	2.95×10 ⁸ (DWT)	3.19×10 ⁷ (DWT)	2.09×10 ⁶ (DWT)	0.89×10 ⁷ (DWT)

Table 5.6.7 パラメータの設定値と入力値 (2004)

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鉱石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q	0.694	0.571	0.453	0.612
上昇率 u	1.017	1.004	1.010	1.007
下落率 d	0.983	0.996	0.990	0.993
初期設定	船腹量	手持工事量	建造能力:	建造中の船舶
入力値	3.02×10 ⁸ (DWT)	5.58×10 ⁷ (DWT)	2.09×10 ⁶ (DWT)	1.50×10 ⁷ (DWT)

Table 5.6.8 パラメータの設定値と入力値 (2005)

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鉱石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q	0.704	0.526	0.473	0.612
上昇率 u	1.014	1.005	1.010	1.007

Table 5.6.8 パラメータの設定値と入力値 (2005) (続き)

下落率 d	0.986	0.995	0.990	0.993
初期設定	船腹量	手持工事量	建造能力:	建造中の船舶
入力値	3.22×10^8 (DWT)	6.87×10^7 (DWT)	2.09×10^6 (DWT)	1.76×10^7 (DWT)

階では、2006年-2009年の発注量の爆発は予測困難であることが分かる。しかし、2003年では発注量が急激に上昇する傾向が見られ、2004年・2005年では2008年の発注量の急激な増加を予測でき、それ以降の発注量の減少まで予測できる。標準偏差に関しては、世界GDPと貨物輸送距離の実績値を入力したFig.5.6.1の結果に比べ大きくなっており、正確な予測のためには可能な限り正確なGDPと貨物輸送距離の入力が必要であることも分かる。

以上のシミュレーション結果より、3-5年前の予測は構築したモデルを用いて予測可能であることが分かる。

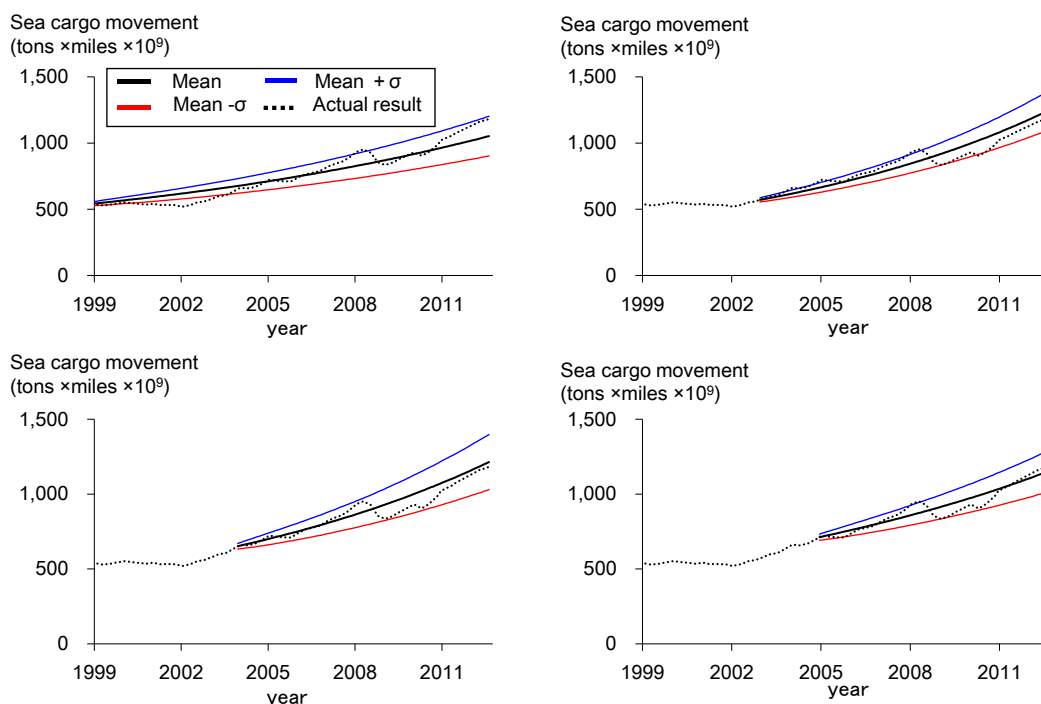


Fig.5.6.7 海上荷動き量の予測結果 (全量での検証)

(1999年開始(左上), 2003年開始(右上), 2004年開始(左下), 2005年開始(右下))

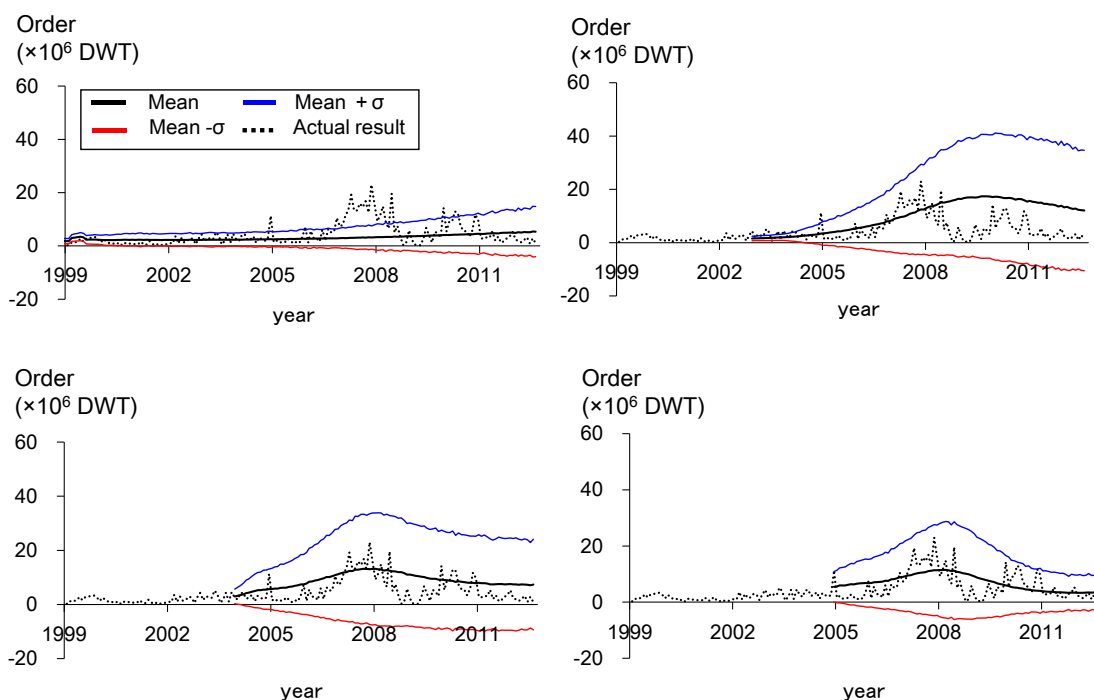


Fig.5.6.8 発注量の予測結果

(1999年開始(左上), 2003年開始(右上), 2004年開始(左下), 2005年開始(右下))

(2) 不確実性を考慮した

船舶需要予測用 SD モデルの性能検証

4.7.4 項と同様に、世界 GDP、貨物輸送距離が分からない(予測値・推定値)という条件を用いて、不確実性を考慮した船舶需要予測用 SD モデルがどの程度予測できるか検証する。Table 5.6.9 に入力データを示す。世界 GDP は IMF の予測結果を基に設定している⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。この場合、二項格子モデルの中央値を IMF の GDP 予測結果に沿うように上昇確率、上昇率、下落率をチューニングした(Fig.5.6.9)。シミュレーション期間は 6 年間とし、貨物輸送距離は、過去の実績値の推移を基に設定している(Fig.5.6.10)。シミュレーションケースは、①2003 年/1-2008 年/12、②2004 年/1-2009 年/12、③2005 年/1-2010 年/12 の 3 ケースとする。モンテカルロ試行回数は 10000 回と設定した。

Fig.5.6.11 に発注量のシミュレーション結果を示す。この結果に示すように、①2003 年からの予測の場合、発注爆発のタイミングが 2007 年となり、発注量の爆発のタイミング・その傾向を捉えていることが分かる。一方、Fig.5.6.12 に示す不確実性を考慮しない場合は、発注量の爆発のおよそのタイミング・その傾向を予測できていない。これは、GDP の予測値の中央値が IMF の予測結果よりも若干高い値となっていることが影響だと考えられる (F

Table 5.6.9 パラメータの設定値と入力値 (2003, 2004, 2005)

		2003年/1- 2008年/12	2004年/1- 2009年/12	2005年/1- 2010年/12
世界 GDP IMF の予測値 (17)(18)(19)	上昇確率 q	0.770	0.774	0.704
	上昇率 u	1.017	1.017	1.014
	下落率 d	0.983	0.983	0.986
貨物輸送距離		2000-2002 年の 実績を基にし た予測 Fig.5.6.10 ①	2000-2003 年の 実績を基にした 予測 Fig. 5.6.10 ②	2000-2004 年の 実績を基にした 予測 Fig. 5.6.10 ③
初期設定				
パラメータ名		2003年/1- 2008年/12	2004年/1- 2009年/12	2005年/1- 2010年/12
船腹量 (DWT)		2.95×10^8	3.02×10^8	3.22×10^8
手持工事量 (DWT)		3.19×10^7	5.58×10^7	6.87×10^7
建造能力 (DWT)		2.09×10^6	2.09×10^6	2.09×10^6
建造中の船舶 (DWT)		0.89×10^7	1.50×10^7	1.76×10^7

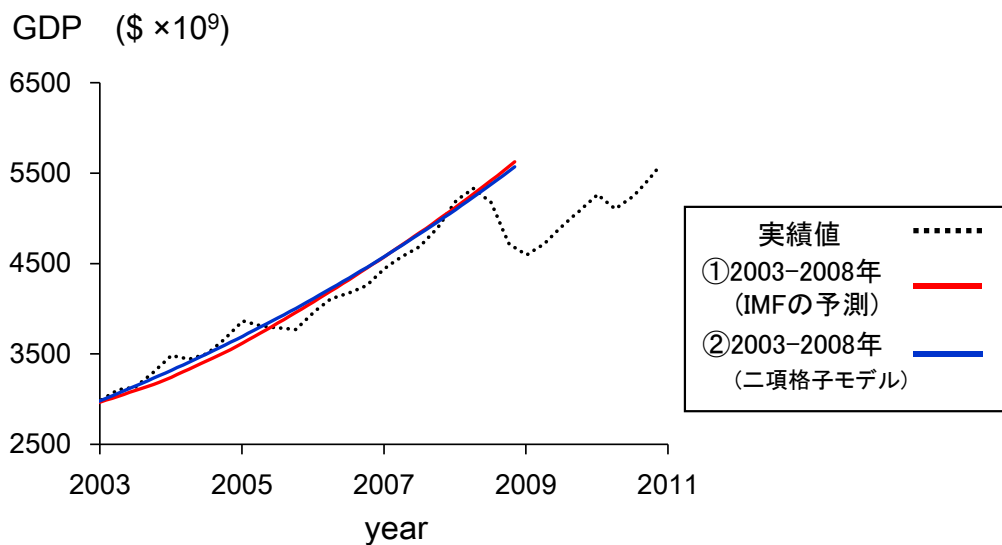


Fig. 5.6.9 世界 GDP の推移の比較 (2003 年)

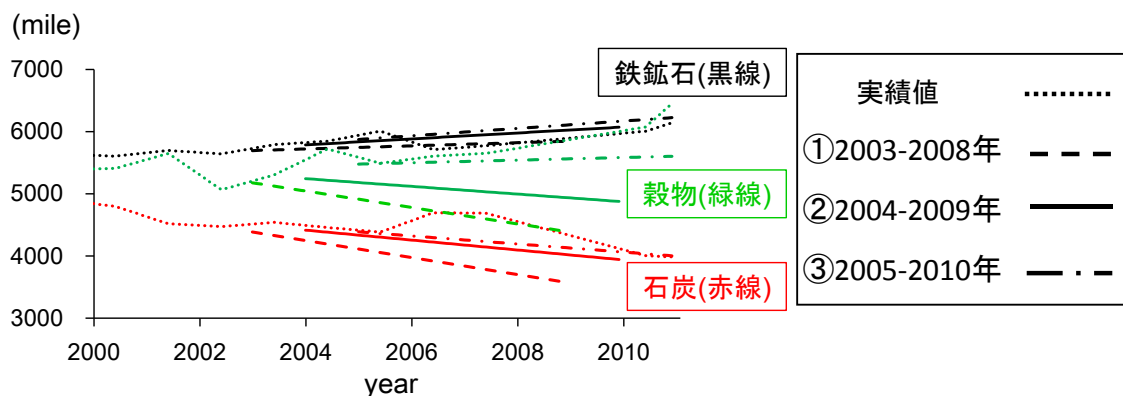


Fig. 5.6.10 貨物輸送距離の入力値

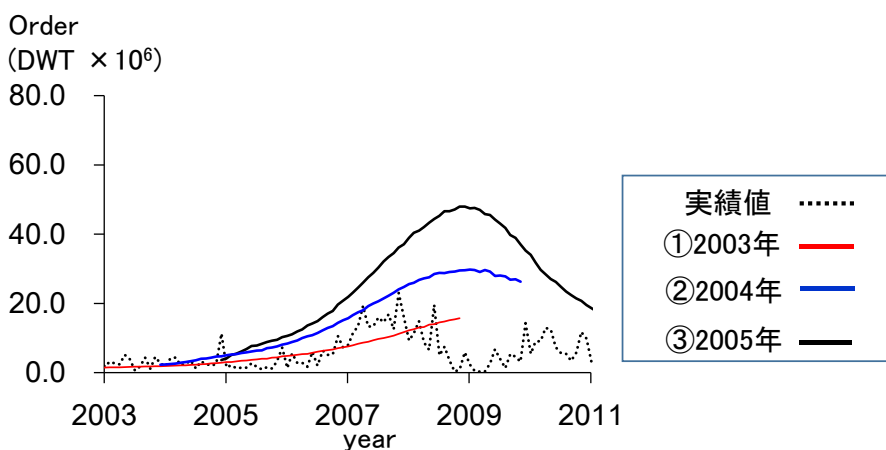


Fig. 5.6.11 発注量の予測結果 (不確実性あり)

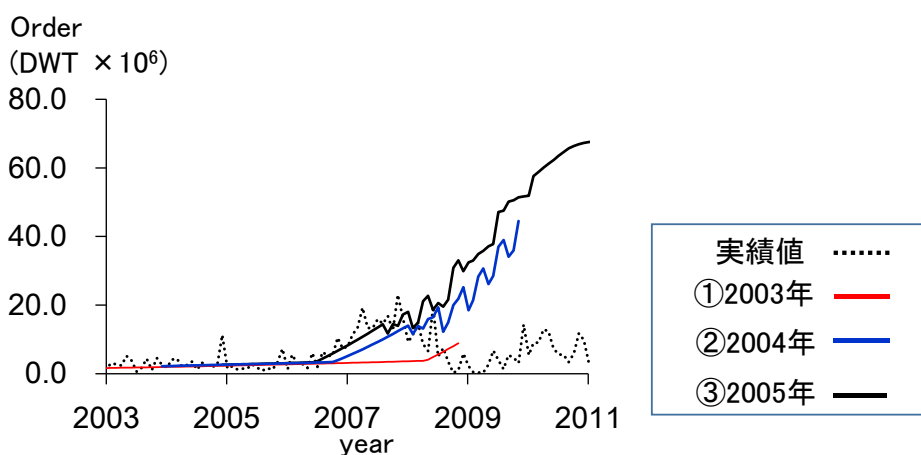


Fig. 5.6.12 発注量の予測結果 (不確実性なし)

Fig.5.6.9). また, Fig.5.6.13 に示すバラツキの偏りが影響を与えている可能性も考えられる(詳細は下記を参照のこと). ②2004年からの予測, ③2005年からの予測の場合, ③2005年からの予測の場合には発注量爆発のおよそのタイミングを予測できている. しかし, ②2004年か

らの予測, ③2005年からの予測の場合, 2008年以降の発注量は予測できていない。これは, IMFの予測結果にリーマンショックの予測が考慮されていないためである。

実際に2007年1月時点のバラつきの調査した結果を Fig.5.6.13 に示す。こちらに示すように, バラつきに偏りが生じていることが分かる。本研究では, 正規分布を用いてその不確実性を考慮している。正規分布は, $-\infty$ から $+\infty$ の値を理論的にはとることが可能である。しかし, 実際の船舶の発注量の最小値は0で負の値を取ることはない。そのため, 発注量=0(DWT)の頻度が378となっている。そのため, このようなバラつきの偏りが生じる。このバラつきの偏りが, その後の2007年1月以降の計算に複雑に伝播するため, 不確実性を考慮する場合としない場合で予測結果が変化すると考えられる。

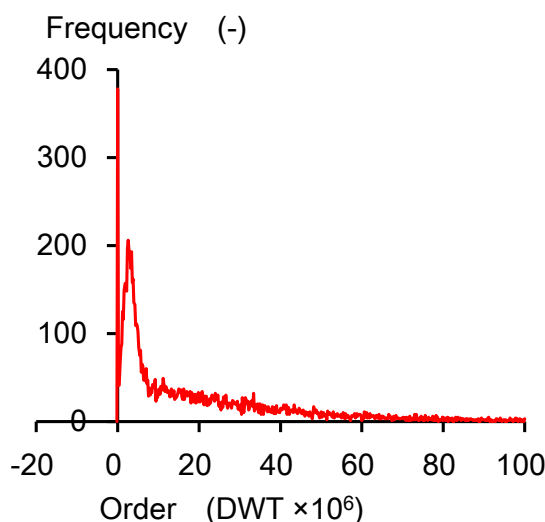


Fig. 5.6.13 発注量のバラつき (2007年1月時点)

(3) 将来シミュレーションによる効果検証

構築した需要予測モデルを用いて, 世界GDPと貨物輸送距離が不明な状況下での将来シミュレーションを実施する。入力値, 初期値を Table 5.6.10 に整理する。入力値に関しては, 1999年の上昇確率, 上昇率, 下落率を基に設定した。なお, モンテカルロ試行回数は10000回と設定した。

Fig.5.6.14 にシミュレーション結果を示す。この結果に示すように, 発注量は2015年-2020年にかけてなだらかに回復に向かうものの, 低水準で推移することが分かる。しかし, 2017年以降は海上荷動き量のバラつきが大きく拡大していく影響により, 発注量のバラつきが急激に大きくなり, それ以降の予測は困難であることが分かる。船価に関しても同様の傾向が確認できる。具体的には, 2017年頃までは最低水準をキープし, その後徐々に回復に向かう。しかし, 2018年以降のバラつきは大きく拡大しているため, 今後どのように推移

するかは現状では分からない。

以上の結果より、今後は2017年-2018年まで海運・造船市場は深刻な不況が続き、その後回復に向かうと予測される。

Table 5.6.10 パラメータの設定値と入力値 (2012-2030)

パラメータ名	世界 GDP	貨物輸送距離 鉄鉱石	貨物輸送距離 石炭	貨物輸送距離 穀物
上昇確率 q	0.689	0.651	0.373	0.581
上昇率 u	1.013	1.002	1.005	1.005
下落率 d	0.987	0.998	0.995	0.995
初期設定	船腹量	手持工事量	建造能力:	建造中の船舶
入力値 (DWT)	6.68×10^8	1.72×10^8	9.70×10^6	5.57×10^7

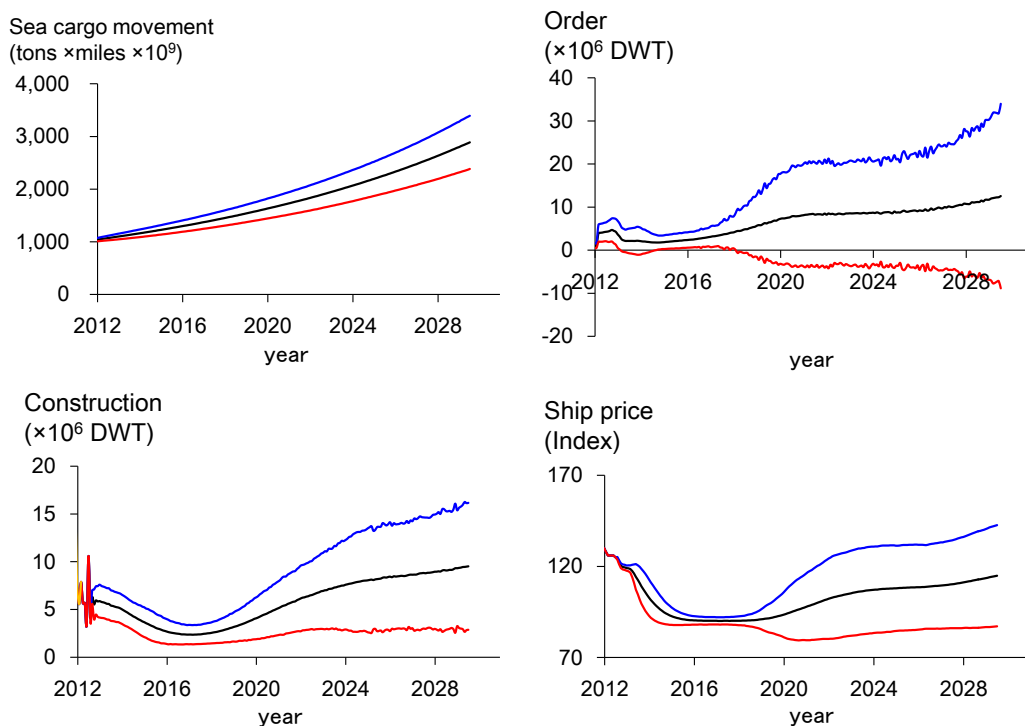


Fig.5.6.14 将来シミュレーションの結果 (全量での検証)
(発注量(左上), 竣工量(右上), 廃船量(左下), 船価(右下))

参考文献

- (1) 経済産業省. "先進企業から学ぶ事業リスクマネジメント実践テキスト." 2005 年 23 (2005).
- (2) 石橋 輝雄. "経済情報-リスクマネジメントについて", エネルギア総研レビュー No.5, 2006.
- (3) Yuzui, T., Kaneko, F., Ogawa, Y., "Estimation of Risk Levels of Small Passenger Ships based on IHSF databases", International Marine Design Conference (IMDC2015), Tokyo, 2015.
- (4) 篠田岳思, "ヒューマン・エラーを考慮した衝突海難のリスク評価法", 日本船舶海洋工学会講演会論文集 (21), 9-11, 2015-11 .
- (5) 和田祐次郎, 濱田邦裕, 平田法隆, 「不確実性を考慮した配船計画の最適化に関する研究」, 日本航海学会論文集, 第 135 号, 2016.
- (6) Cui, Anna Shaojie, Meng Zhao, and T. Ravichandran. "Market uncertainty and dynamic new product launch strategies: a system dynamics model." *IEEE Transactions on Engineering Management* 58.3 (2011): 530-550.
- (7) Jeon, Chanwoong, and Juneseuk Shin. "Long-term renewable energy technology valuation using system dynamics and Monte Carlo simulation: Photovoltaic technology case." *Energy* 66 (2014): 447-457.
- (8) Pretorius, Leon, and S. J. Benade. "A systems dynamics approach to competing technologies under uncertainty." *Proc. 6th annual INCOSE SA Conference*. 2009.
- (9) Cooke, DAVID L. "Using system dynamics models to enhance the visualization of stochastic price processes." *Proceeding of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*. 2004.
- (10) Girard, Agathe, et al. "Gaussian process priors with uncertain inputs? application to multiple-step ahead time series forecasting." (2003).
- (11) Engelen, Steve, Hilda Meersman, and Eddy Van De Voorde. "Using system dynamics in maritime economics: an endogenous decision model for shipowners in the dry bulk sector." *Maritime Policy & Management* 33.2 (2006): 141-158.
- (12) 稗方 和夫他, "リアルオプションを導入した船舶のライフサイクル価値向上に関する研究", 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 23 (2016), p. 231-237.
- (13) Erikstad, Stein Ove, and Carl Fredrik Rehn. "Handling Uncertainty in Marine Systems Design-State-of-the-Art and Need for Research." 12th International Marine Design Conference 2015 Proceedings. Vol. 2. 2015.
- (14) Massey, F. J. "The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit." *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 46, No. 253, 1951, pp. 68-78.

- (15) 九州大学工学部地球環境工学科, 船舶海洋システム工学コース, 海事統計学
<http://sysplan.nams.kyushu-u.ac.jp/gen/edu/MarineStatistics/2016/kougi14/kougi14.pdf>
- (16) 東京大学 講義資料: 単回帰分析, 2004.
- (17) IMF (2003), World Economic Outlook, April 2003.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2003/01/>> [Accessed 3 February 2017]
- (18) IMF (2004), World Economic Outlook, April 2004.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2004/01/>> [Accessed 3 February 2017]
- (19) IMF (2005), World Economic Outlook, April 2005.
<<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2005/01/>> [Accessed 3 February 2017]

第6章 船舶需要予測用 SD モデルの活用

6.1 海運・造船市場の概況

6.1.1 現在の海運・造船市場の概況

第1章に示したように、2016年現在、2008年に大量に建造した船腹量、大幅に拡張した船舶の建造能力の影響により発注量は大きく激減、海上運賃・船価も下落し、海運・造船市場は深刻な不況状態となっている。

中央日報・Clarkson社によれば⁽¹⁾、2016年9月20日の段階で、全世界で稼働中の造船所は402カ所、最も好況だった2009年の931カ所から57%減ったと報告されている。特に中国が大きな打撃を受けていることが分かり、2009年382カ所の造船所が稼働していたが、最近では中小造船所の多くが廃業して現在は63%減となる140カ所となっている。日本は2008年71カ所の造船所で船舶を建造していたが、現在は17%減の59カ所だけが稼働している。韓国は2007年66カ所から昨年末47カ所となっており、29%減少している。また海運業界でも、韓国の大手海運会社の経営破綻等が発生し、海運・造船業界の再編を余儀なくされている状況である⁽²⁾。

このような現状において、韓国では造船業の支援のため政府が公的支援を行っている⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、韓国の公的支援は「造船市場における公正な競争」の妨げとなり、市場を大きく歪曲する可能性があるとしてOECD造船部会は指摘している⁽⁵⁾。

このような深刻な海運・造船業の不況状態を改善するには、「世界全体の船舶建造能力の調整」と「透明性を確保した適切な造船施策」により、海運・造船市場を活性化することが現在求められている。

6.1.2 船舶需要予測に基づく造船業の目標設定

船舶の需要予測に基づく施策やそれに基づく造船業の目標設定に関しては、これまでも行政側で行われている。国土交通省⁽⁶⁾では、Fig.6.1.1に示すモデルを用いて、新造船建造需要を算出し、2025年までの造船業の目標を設定した。しかし、第2章で示したように、Fig.6.1.1に示すモデルは、船腹量の変化の影響、船舶の供給側の特性が十分に考慮されていないため、このモデルは短期的な予測には適用可能なものの、中長期的な予測は困難であると考えられる。

一方本研究では、海上荷動き量の予測を基に、船腹量の変化、造船所の供給側の特性、を考慮して船舶需要を予測するモデルを構築した。そして、将来シナリオを正確に設定できれば、ある程度正確な需要予測が可能であることを示した。つまり、本研究のSDモデル

を利用することで、現状よりも的確な目標の設定が期待できる。

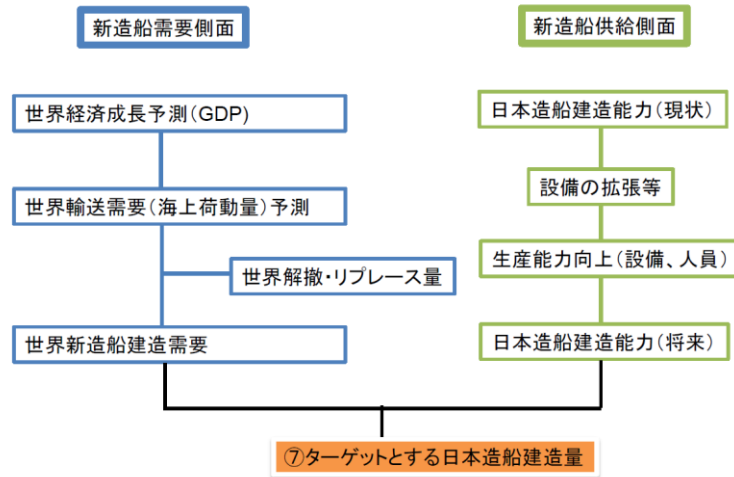


Fig.6.1.1 国土交通省の船舶需要予測手法⁽⁶⁾

6.1.3 SDによる政策立案

本来のSDの目的は「ある問題の対して良き理解を獲得し、その問題を解決すべき政策を策定するためにある」と言われている⁽⁷⁾。これはモデル構造が明確という特徴をSDが持っているため可能と考えられる。つまり、種々の条件下での行動特性を分析し、問題行動を改善するような政策設計を行うことがSDの本来の目的であると考えられることができる。

本論文の第4章ではSDを用いて船舶需要予測モデルを構築し、海運・造船市場の特徴を理解した。第5章では、船舶の需要予測において不確実性を考慮することの重要性を述べ、海運・造船市場の不確実性を整理し、その考慮方法を示した。そして、様々なシミュレーションを実施した。しかし、これらの章では、構築したモデルを用いて需要予測を行ったのみで、「現在取るべき施策・戦略の立案」というSDモデルの本来の活用方法については十分に言及されていない。

6.1.4 本章の目的

そこで本章では、構築した船舶需要予測用SDモデルを用いた市場の継続的な発展のシナリオを策定するためのシステムを開発する。そして構築したシステムを用いて、造船市場の継続的な発展が可能なシナリオを立案し、その効果を示す。対象とする市場は、バルクキャリア市場とする。

6.2 最適化問題としてのモデル化

6.2.1 国際条約と造船市場の関係

Table 6.2.1 にこれまで IMO で採択された条約⁸⁾の一部を整理する。本研究では以下のように採択された条約を分類する。

- (1) 特定の構造を有する船舶の運航禁止，利用禁止
シングルハルトンカーのフェーズアウトに見られるように，特定の構造を有する船舶（一重船殻構造を有する船舶）を運航（利用）禁止することで，海洋汚染を防止する。
- (2) 新規設備の導入による安全運航の支援，環境負荷の低減
復原性計算機の搭載義務化，ECDIS・BNWAS の設置のように新規設備を新たに導入することで安全運航の支援，環境負荷を低減する。
- (3) 速度低減による環境負荷の低減
EEDI(Energy Efficiency Design)の強制化によって地球温暖化ガスの削減することで，環境負荷を低減する。

(※1：IMO は船舶の安全及び船舶からの海洋汚染の防止等，海事問題に関する国際協力を促進する国連の専門機関である。)

以上はすべて，船舶の安全運航，環境負荷の低減に関する施策である。これらの施策により，造船市場は刺激される。例えば，Fig.6.2.1 に示すように 1999 年-2004 年にかけてシングルハルトンカーのフェーズアウトの影響により廃船量が増加している。このような強制廃船は，船腹量の強制的な減少を発生させるため，それにより海運・造船市場は刺激される。また，新規設備導入による船舶の改造は，造船所や船用機器メーカーへの追い風とな

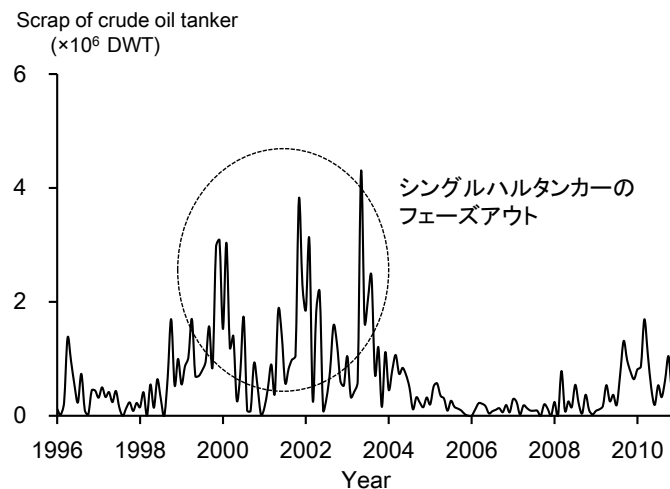


Fig.6.2.1 原油タンカーの廃船量の推移

Table 6.2.1 IMO で採択された条約 (一部)⁽⁸⁾

条約タイトル	発効日	船種	サイズ
復原性計算機の搭載義務化	2016/1/1	Oil Tanker, Chemical Tanker	All
MARPOL 付属書 VI - EEDI の強制化	2013/1/1	All	400GT or over
貨物油タンクの防食措置 (原油タンカー) の強制化	2012/1/1	Crude oil tanker	5,000DWT or over
ECDIS (electronic chart display and information system) の設置	2011/1/1	ALL	PS: 500GT or over Cargo Ship: 3,000GT or over
BNWAS (bridge navigational watch alarm system) の設置	2011/1/1	ALL	PS: All Cargo Ship: 150GT or over
MARPOL 付属書 VI 及び NOx テクニカルコード - NOx 及び SOx 次期規制	2010/7/1	ALL	ALL
MARPOL 付属書 I -ポンプルームの二重底	2007/1/1	Oil Tanker	5,000DWT or over
曳航及び係留設備	2007/1/1	ALL	500GT or over
復原性計算機	2006/7/1	Bulk Carrier	less than 150m in length
MARPOL 付属書 I -シングルハルタンカーでの 重質油輸送の禁止	2005/4/4	Oil Tanker Single hull tankers carrying heavy grade oil	600DWT and over
浸水警報装置	2004/7/1	Bulk Carrier	500GT or over
排水装置	2004/7/1	Bulk Carrier	500GT or over
機関の制御装置	2004/7/1	ALL	PS: All Cargo Ship: 500GT or over
AIS 搭載	2004/7/1	ALL	300-50,000GT

Table 6.2.1 IMO で採択された条約 (一部)⁽⁸⁾ (続き)

条約タイトル	発効日	船種	サイズ
MARPOL 附属書 I -シングルハルタンカー フェーズアウト適用の拡大	2001/1/1	Oil Tanker	20,000DWT or over

り、それにより造船所、船用機器メーカーは受注量を確保することができる。

このような間接な支援の他、公的資金を用いた直接的な造船業の支援が考えられるが、OECD 造船部会が採択した『造船業に対する不当な公的助成の廃止、及び加害的廉売の防止のための「造船協定」』により「造船市場における公正な競争」の妨げとなる公的助成は、基本的には禁止されている。

6.2.2 船舶の建造能力と船価の関係

第4章に示したように、一般的に船価は造船市場の需給変動による内生的な要因と条約の改正等の外生的な要因により変動する。本研究では造船市場の内生的な要因に着目し、船価予測モデルを用いて船価を予測した。Fig.6.2.2 に示すように、造船所の手持工事量と建造能力を入力することで手持工事率を算出し、それを基に平均船価を算出するモデルとなっている。この図に示すように、手持工事率が上昇することで船価は上昇し、手持工事率が減少すると船価は下落する。

つまり、船価が高い状態を維持するためには手持工事率を高い状態を維持することが重要となり、そのためには建造能力をできるだけ小さい状態を維持することが求められる。

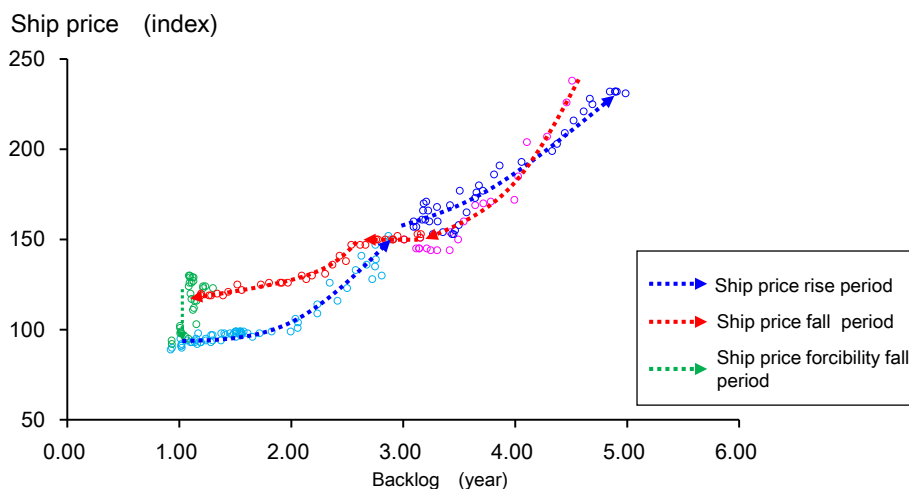


Fig.6.2.2 本研究の船価予測モデル

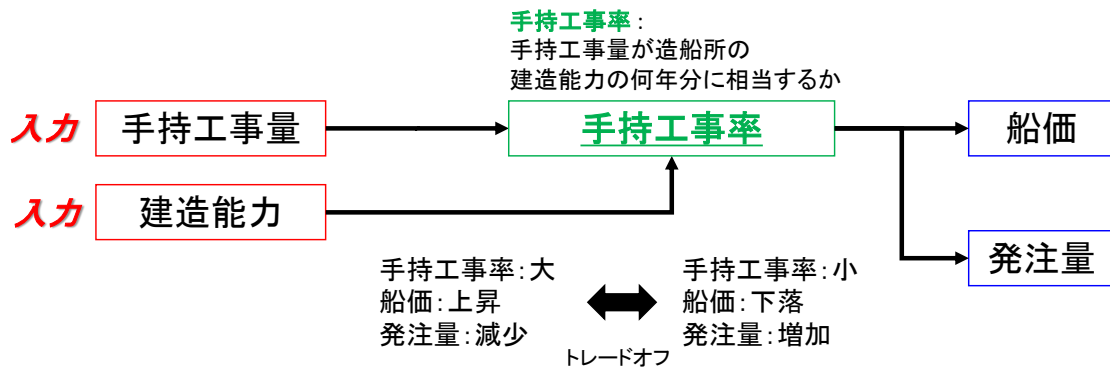


Fig.6.2.3 船価と発注量の関係

しかし、建造能力が手持工事量に対して大きく不足すると手持工事量の過剰による発注量の減少が発生し、造船市場は十分な売り上げを確保できなくなる。つまり、船価と発注量の間にはトレードオフの関係が存在する(Fig.6.2.3)。

このように造船市場全体の利益を大きくするためには、市場の状況に合わせて建造能力を適切に調整する必要がある。

6.2.3 対象とする戦略

以上を踏まえ、本研究では以下の戦略を対象に造船市場の活性化を検討する。

(1) 船舶建造能力の調整戦略

造船市場全体の建造能力を適切に調整することで、発注量と船価を適切にコントロールし、造船市場を活性化させる。

(2) 船舶の強制廃船戦略

シングルハルタンカーのフェーズアウトのように、特定の構造を有する船舶を強制的に海運市場から退出させ、造船市場を刺激する（例えば、バルクキャリアのダブルハル化の義務化等）。

(3) 新規設備の導入による船舶の利用停止戦略

ECDIS・BNWAS の設置のように新規設備を新たに導入することで造船市場の間接的に刺激する。（例えば、NOx,SOx 規制強化による新規設備導入の義務化、バラスト水処理装置の導入の義務化等）

(4) 速度低減による環境負荷の低減戦略

EEDI(Energy Efficiency Design)の強制化により船舶の減速による CO₂ 排出量の削減を義務化し⁹⁾、それにより造船市場を間接的に刺激する。

6.2.4 二段階最適化問題としてのモデル化

Table 6.2.2 最適計画の立案に関する既往研究

著者	最適化手法	目的
竹内章他 ⁽¹⁰⁾	タブ-サーチ法 遺伝的アルゴリズム	2005年、日本国際博覧会・中部臨空都市における地域集中実証試験で、1日の電力需要に合わせた発電設備の最適運転が可能であることを示した。
堀 嘉成 ⁽¹¹⁾ 他	遺伝的アルゴリズム	蓄熱槽を利用する地域冷暖房プラントの導入が活発化している。しかしその運転計画を最適化するには時間を要する。この研究では遺伝的アルゴリズムを応用して地域冷暖房プラントの最適運転計画を立案する方法を示した。
中尾由雄 ⁽¹²⁾ 他	モンテカルロ シミュレーション 需給予測に基づく シナリオ解析	低炭素社会の実現のために太陽光発電が利用されているが、気象の変化に発電量が変化するため、需要に合わせた効果的な運用は難しい。中尾らは、太陽光発電の有効活用のため、蓄電池を最適運用によるピーク電力の低減を目的に実証システムを構築した。
満行泰河 ⁽¹³⁾ 他	ランダムキー型 遺伝的アルゴリズム	東日本大震災の影響により、夏季の使用最大電力の15%削減が求められている。この研究では電力ピークカットを考慮した作業者と設備の割り振りを行うことで適切な作業計画を立案する。

近年、コンピューターの処理能力の向上、最適化技術の発展により最適な設備運転計画、作業計画を自動的に立案することが可能となっている。Table 6.2.2 に最適計画の立案に関する既往研究を示す。

竹内らは⁽¹⁰⁾、タブサーチ法(以下：TS法)、遺伝的アルゴリズム(以下GA)を用いて、2005年の「日本国際博覧会・中部臨空都市における地域集中実証試験」で1日の電力需要に合わせた発電設備の最適運転が可能であることを示した。堀らは⁽¹¹⁾、蓄熱槽を利用する地域冷暖房プラントの運転計画の最適化にGAを応用して最適運転計画を立案する手法を示した。中尾らは⁽¹²⁾太陽光発電の有効活用のため、蓄電池の最適運用によるピーク電力の低減を目的に実証システムを構築した。

これらの研究は、時間と伴に変化する需要・制約条件を満足しながら、目的関数が最良となる設備の最適運転計画を立案するための研究であると位置付けることができる。

船舶・海洋工学分野では満行らが⁽¹³⁾、電力ピークカットを考慮した作業者と設備の割り振り計画を自動的立案する研究を行っている。この研究では、作業戦略立案のためのディスプレイパッチングルールを予め設定し、作業計画シミュレーションとランダムキー型 GA を用いて最適化することで作業計画を立案した。

本研究ではこれらの研究を参考に、時間的に変化する海運・造船市場において、最適な造船所の建造能力、適用する施策量を決定する最適化問題と定式化する。そして、最適化シミュレーションを行うことで造船所が継続的な発展をするための知見を獲得する。具体的には Fig.6.2.4 に示すように、二段階最適化問題として問題を記述・モデル化する。上位問題では建造能力の拡張案、造船市場活性化施策の立案を行い、下位問題では、上位問題で決定された設計案を SD モデルに入力し、需要予測シミュレーションを実施する。そして、その予測結果を基に評価値を計算し、評価値が最良となる設計案を探索する。本研究では設計案の探索には、シミュレーテッド・アニーリング（以下 SA）（6.2.6 項参照）を用いる。なお、問題記述・モデル化に利用した二段階最適化問題については、その利用の可能性・有効性が文献⁽¹⁴⁾により議論されており、それを応用した研究についても示されている。以上より、二段階最適化問題としての問題記述・モデル化を利用した。上位問題の定式化、詳細については 6.3 節、6.4 節で議論する。

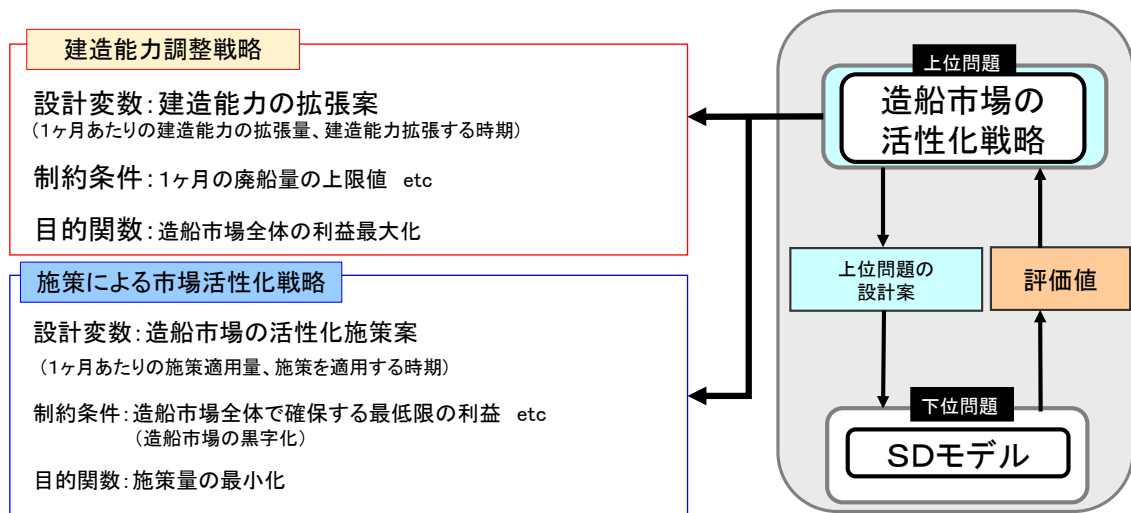


Fig.6.2.4 二段階最適化問題としてのモデル化

6.2.5 戦略が船舶需要予測用SDモデルへ与える影響

本項では、「船舶の建造能力調整戦略」、「条約による造船市場の活性化戦略」（船舶の強制廃船戦略、船舶の利用停止戦略、速度低減による環境負荷の低減戦略）が需要予測モデルへ与える影響を説明する。

(1) 船舶の建造能力調整戦略の影響

第4章に示したように、実績データを基に船舶の建造能力拡張を考慮した建造モデルを定義した。しかし、建造能力調整戦略を考慮する場合、建造能力の拡張はこの戦略に依存すると考える。つまり、建造モデルの建造能力拡張は考慮されず、通常状態による時間遅れを考慮した竣工量の算出のみが行われる（Fig.6.2.5）。そして、竣工量の上限值は建造能力の上限值となり、それを上回る量の船舶は建造されないと考える。

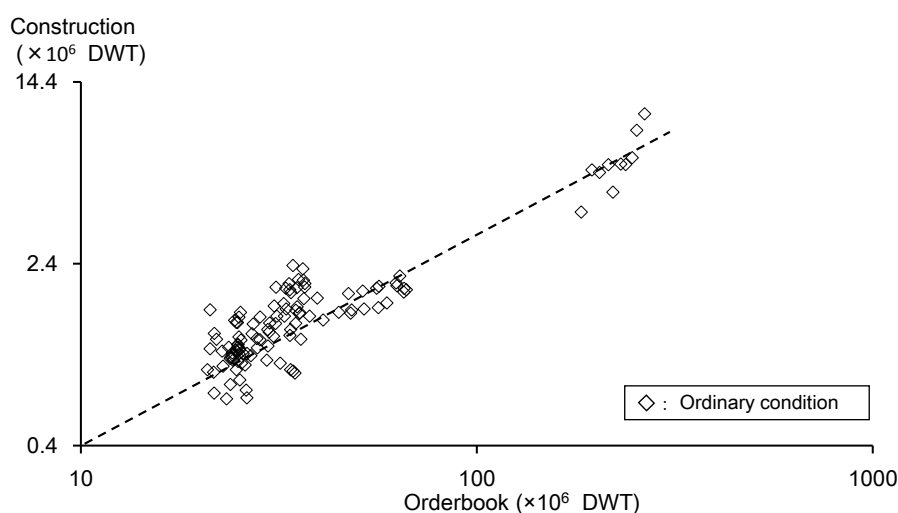


Fig.6.2.5 建造モデル(船舶の建造能力調整戦略を考慮する場合)

(2) 船舶の強制廃船戦略の影響

船舶の強制廃船を考慮する場合、廃船モデルを基に算出した廃船量に強制廃船量を加え、廃船量を強制的に増加させる((6-1)式)。

$$Df_t = D_t + FS_t \quad (6-1)$$

ここに

Df_t : 強制廃船を考慮した廃船量 (DWT)

D_t : 廃船モデルによって算出した廃船量(DWT)

FS_t : 強制廃船量 (DWT)

t : シミュレーション内部時間(month)

(3) 新規設備の導入による船舶の利用停止戦略の影響

船舶の利用停止戦略の影響を考慮する場合、利用船舶を指定した期間だけ利用停止する。この場合、現存船腹量から利用停止量を差し引くことでその影響を考慮する(式(6-2))。また、利用停止した船舶は一定期間だけ手持工事量に加えられ、手持工事率の算出に影響を与えると考える((6-3)式, (6-4)式)。

$$V_t = V_t - SV_t \quad (6-2)$$

$$Obs_t = Ob_t + SV_t \quad (6-3)$$

$$Bl_t = \frac{Obs_t}{f(Cp_t)} \quad (6-4)$$

ここに	V_t : バルクキャリアの現有船腹量 (DWT)
	SV_t : 利用停止船腹量(DWT)
	Obs_t : 利用停止船腹量を考慮した手持工事量 (DWT)
	Ob_t : 手持工事量 (DWT)
	Bl_t : 手持工事率(-)
	Cp_t : 建造能力 (DWT)
	t : シミュレーション内部時間(month)

(4) 速度低減による環境負荷の低減戦略の影響

船舶速度の減少は、発注量予測モデル、廃船モデルに影響を与える。船舶速度の減少は、発注・廃船モデルが船舶航海距離の短くなる方向に移動すると考える。例えば、Fig.6.2.6 の Point B の場合、現状に対して 5%減速するため、船舶航海距離が短くなる方向に 5%移動することとなる。同様に Point C (D)の場合は、20% (30%)減速するため、船舶航海距離が短くなる方向に 20% (30%) 移動することとなる。(6-5)式, (6-6)式を用いて、船舶速度の減少が発注量予測モデルと廃船モデルへ与える影響を考慮する。

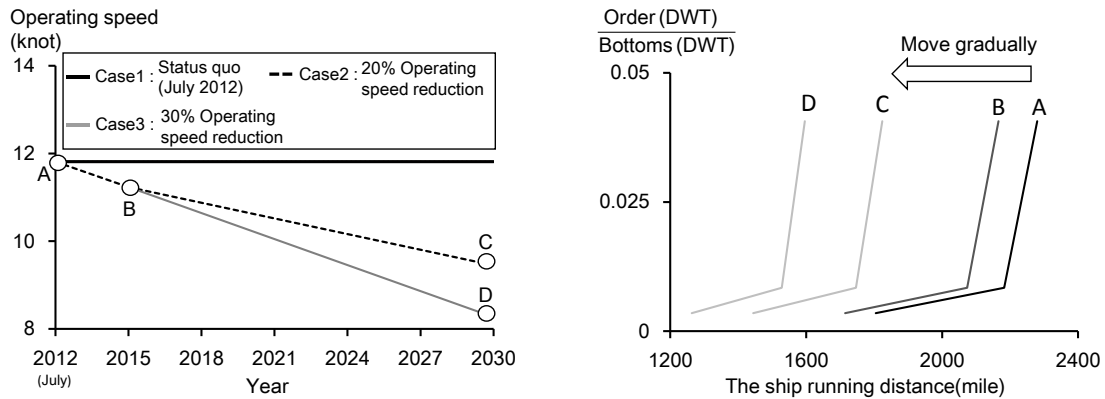


Fig.6.2.6 船舶の減速が船舶需要予測用 SD モデルに与える影響

$$O_t = f(E_t, S_t) \times V_t \tag{6-5}$$

$$D_t = f(E_t, S_t) \times V_t \tag{6-6}$$

- ここに、 O_t : 船舶の減速を考慮した発注量 (DWT)
- D_t : 船舶の減速を考慮した廃船量 (DWT)
- E_t : 船舶航海距離 (DWT)
- S_t : 船舶速度の減少量 (%)
- V_t : バルクキャリアの現有船腹量(DWT)
- t : シミュレーション内部時間(month)

6.2.6 最適化手法 (SA の概要)

シミュレーテッド・アニーリング(Simulated Annealing, 以下 SA)は Kirkpatrick ら⁽¹⁵⁾によって提案された最適化問題を解く汎用近似解法の一つである。SA は、高温で熔融状態にある物質を徐々に冷却することにより、もとの物質より欠陥の少ない優れた結晶などの低エネルギーの状態を得る物理プロセス(焼きなまし)を計算機上に模倣することにより最適化問題を解く手法である。

Fig.6.2.7 に解の探索イメージを示す。図に示すように、高温状態の場合、設計解は活発化に動くのに対し、低温になると設計解の変化は弱くなるという特徴がある。このように高温状態と低温状態を用いることで局所解の回避、最適解の探査性を保つ。

(※：本項については文献⁽¹⁶⁾を参考に記載した)

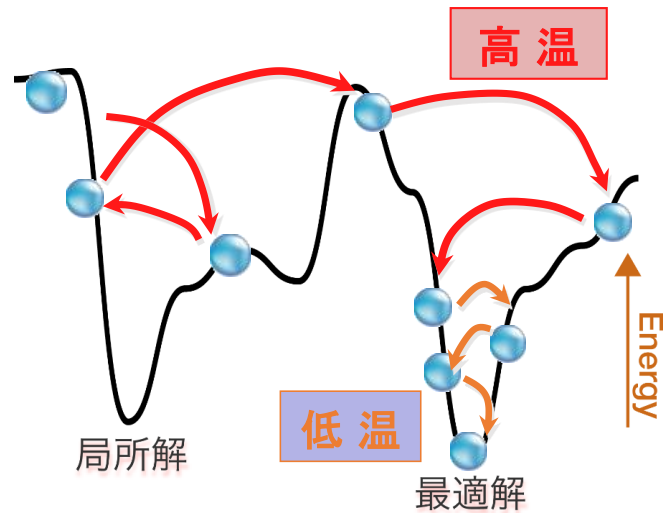


Fig.6.2.7 SA の最適化解の探索イメージ

(1) SA のアルゴリズム

SA は Fig.6.2.8 に示す流れにより解を探索する。

STEP1：初期設定

- ・ 温度パラメータを設定する(初期温度 T_0 、アニーリング回数、クーリング回数、温度低下の係数)。
- ・ 温度が T_0 (初期温度) の場合は、初期状態の設計案 x を生成する。
- ・ 生成した初期設計案の評価する。(目的関数 E の算出)

STEP2：設計案の生成

- ・ 現在の設計案 x を基に、設計案を変化させることで、新たな設計案 x' を生成する。

STEP3：設計案の評価

- ・ 生成した設計案 x' を評価する。(目的関数 E' の算出)

STEP4：受理判定

- ・ (6-7) 式を用いて、次の状態を受理するか否かの判定を行う。受理する場合は設計案を更新する。つまり $x=x'$ として、設計案を更新する。更新しない場合は $x=x$ とする。

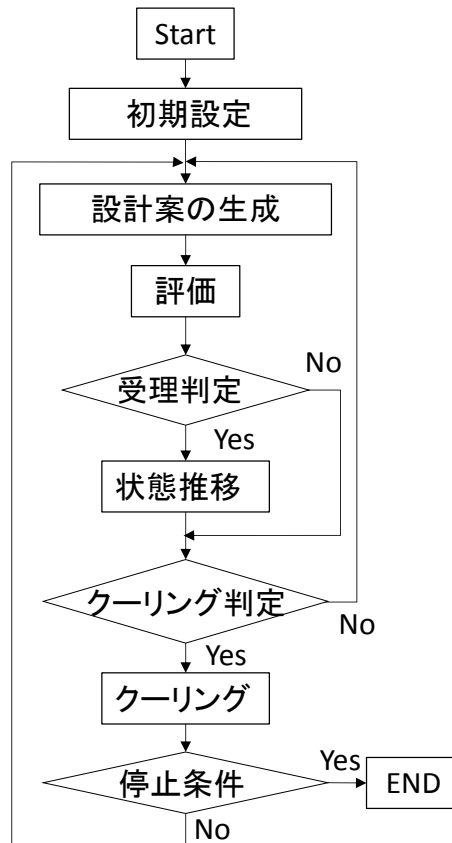


Fig.6.2.8 SA のアルゴリズム

受理判定は、次の状態 x' のエネルギー E' と現在の状態 x のエネルギー E との差分 $\Delta E (= E' - E)$ 、および温度パラメータ T が与えられ、次の状態への推移を受理するか否かの判定を行う。通常は (6-7) 式の Metropolis 基準が採用される。

$$\text{ACCEPT}(E, E', T) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta E < 0 \\ \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6-7)$$

この基準が返す値は受理する確率で、1 なら次状態に推移し、0 なら推移しない。温度が高い場合は悪い状態への推移確率も大きくなり、反対に温度が低い場合は良い方向に推移することになる。

以上の Step 2-Step 4 はアニーリングと呼ばれ、一定期間繰り返すことにより温度 T_k の最良の解を探索する。

STEP5 : クーリング

- 一定期間アニーリングを行った後にクーリングを行い、次の温度 T_{k+1} を求める。

- ・ その後、設計案の生成の戻り、温度 T_{k+1} の条件の下でアニーリングを実行する。

クーリングでは、アニーリング(除冷)の第 k ステップの温度 T_k を与えて、次のステップの温度 T_{k+1} を返す。最適解の漸近収束性を保証するためには急速な温度低下を避けなければならないという特徴がある。一般的には(6-8) 式が温度の算出に用いられる。

$$T_{k+1} = \gamma \times T_k \quad (0.8 \leq \gamma \leq 1) \quad (6-8)$$

クーリングは、各温度で“十分な探索”を行った後に実行する。この”十分な探索”としては

- ・ アニーリングを指定した回数だけ繰り返す。
- ・ 定めた受理(または棄却)回数になるまで繰り返す。

などの実装方法がある。

STEP6 : 終了

温度が十分に下がり、停止条件に達すればそのときの x を最適状態、 E を最適値として終了する。

SA の処理が停止するための条件には、次のような方法がある。

- ・ クーリングを定めた回数だけを繰り返して停止
- ・ 受理がほとんど起こらなくなったら停止
- ・ 温度が十分低くなったら停止

また、以下に SA の特徴を整理する。

長所

- ・ アルゴリズムが極めて汎用に出来ているため、広範囲の問題に適用することができる。
- ・ 目的関数に関する制約がほとんどなく柔軟である。
- ・ 実装が容易である。

短所

- ・ 最適解を求めるためには長い計算時間が必要である。
- ・ 汎用解法であるために、問題を解くために必要なパラメータチューニングなどを個別に行う必要がある。特に温度を制御するパラメータのチューニングは非常に難しい。

6.3 建造能力調整戦略の概要

本節では建造能力調整戦略の設計変数、目的関数、制約条件を示す。さらに、最適化シミュレーションを実施し、獲得した結果を整理・考察する。

6.3.1 上位問題の定式化 (建造能力調整戦略)

建造能力調整戦略の入力値（前提条件）、設計変数、制約条件、目的関数を以下に示す。式の各種記号、添え字に関しては Table 6.3.1 に整理する。

入力値（前提条件）：

- (1) シミュレーション条件：（シミュレーション期間、シミュレーション開始時の初期値）
- (2) 1ヶ月の建造能力最大拡張量。（今回設定した値を Table 6.3.2 に示す。これは、実績の建造能力拡張速度を参考に、最大2倍まで拡張速度が上昇可能と仮定し、船舶サイズ毎の最大拡張能力を設定した。）

Table 6.3.1 式の添え字 (建造能力調整戦略)

記号	説明	記号	説明
[添字等] t j	シミュレーション内部時間 船舶サイズの種類 1:Capesize, 2:Panamax, 3:Handymax,4:Handysize	[目的関数] $Order_t$ $Shipprice_t$ $Construction_t$ IC_t	時間tにおける発注量 (\$) 時間tにおける船価 (\$/DWT) 時間tにおける建造コスト (\$) 時間tにおける建造能力 拡張コスト (\$)
[設計変数] $Ep=[ep_t^j]$ ep_t^j	建造能力拡張案 1ヶ月の建造能力拡張量	LW^j sp_t	船舶サイズjの経過重量 (ton) 時間tにおける船価 (index)
[制約条件] D_t^j Mc	各月のサイズ別廃船量 (DWT) 最大廃船可能量 (5.0×10^6 (DWT))	[係数] α $steelprice$ β	コスト係数 (2.0(-)) 鋼材価格(1000(\$/ton)) 建造能力拡張係数 (1257.9(\$/DWT))
[目的関数] $Profit$ $Income$ $Cost$	造船市場全体の利益 (\$) 造船市場全体の収入 (\$) 造船市場全体のコスト (\$)	$size^j$	船舶サイズjの代表サイズ (DWT)

Table 6.3.2 1ヶ月あたり最大の建造能力拡張量

	Capesize	Panamax	Handymax	Handysize
1ヶ月当たりの 最大拡張量：(DWT)	235,000	113,000	75,000	51,000

・設計変数：

船舶サイズ毎の建造能力の拡張案. この式に示すように, シミュレーション期間, サイズ毎の配列で建造能力拡張案を表現する((6-9)式).

$$Ep = [ep_t^j] \quad (6-9)$$

なお, 船舶需要予測用 SD モデルに建造能力の拡張を考慮した建造モデルが定義されているが, 建造能力調整戦略を考慮する際は建造モデルによる建造能力拡張は考慮せず, (6-9)式によって建造能力が拡張すると考える.

・制約条件：

文献⁽¹⁷⁾を参考に, 1ヶ月の廃船量の最大値を 5.0×10^6 (DWT)以下とする((6-10)式).

$$\sum_j D_t^j \leq Mc \quad (6-10)$$

・目的関数：

本研究の目的関数を (6-11)式に示す. この式に示すように, 目的関数は, 造船市場全体の利益の最大化とする. 造船市場全体の収入, 各種コストに関しては (6-12)-(6-17)式を用いて算出する. 船価の単位の変換に関しては, Fig.6.3.1 の関係を利用し船価の平均値を算出する. 船舶サイズ別の代表サイズは Table 6.3.3 とし, この表のサイズを基にコストを算出する. 各種係数に関しては, 国土交通省⁽¹⁸⁾, 経済産業省⁽¹⁹⁾, 日本造船工業会⁽²⁰⁾⁽²¹⁾の資料を参考にした.

$$\max(\text{Profit}) = \text{Income} - \text{Cost} \quad (6-11)$$

$$\text{Income} = \sum_{t=1}^n (\text{Order}_t \times \text{Shipprice}_t) \quad (6-12)$$

$$\text{Cost} = \sum_{t=1}^n (\text{Construction}_t + \text{IC}_t) \quad (6-13)$$

$$\text{Construction}_t = \sum_j \text{Construction}_t^j = \alpha \times (LW^j \times \text{Steel Price} \times \frac{C_t^j}{\text{size}^j}) \quad (6-14)$$

$$LW^j = s(i \times \theta) \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \quad (6-15)$$

$$IC_t = \sum_j IC_t^j = \beta \times ep_t^j \quad (6-16)$$

$$Shipprice_t = f(sp_t) \quad (6-17)$$

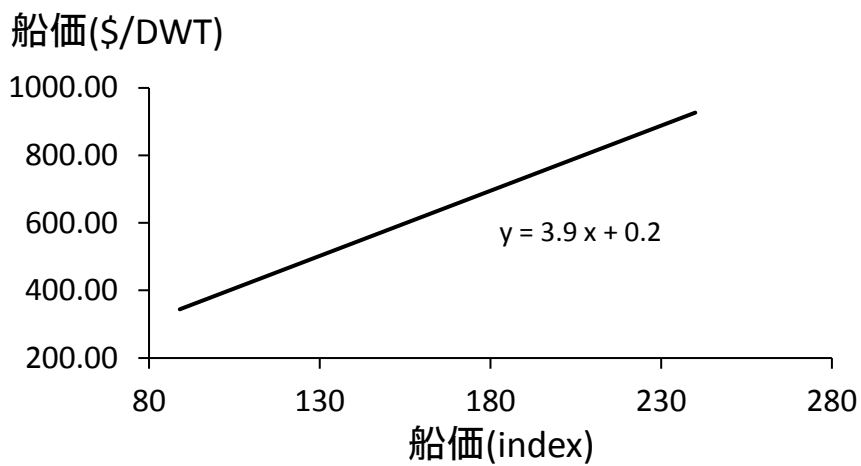


Fig.6.3.1 船価の平均値の算出

Table 6.3.3 コスト算出に用いる船舶の代表サイズ

サイズの種類	1	2	3	4
	Capesize	Panamax	Handymax	Handysize
代表サイズ : size (DWT)	180,000	80,000	60,000	35,000

6.3.2 設計案の表現と近傍解の定義

本研究では既往研究⁽¹⁾を参考に、船舶サイズ毎の建造能力拡張案を配列によって表現する。Fig.6.3.2 に示すように、各月の建造能力拡張案は[0-20]の数値によって表現され、この数値を基に各月の建造能力拡張量を決定する。例えば、Capesize の場合、1 ビット内の数字が”5”の場合、Table 6.3.1 に示す Capesize の 1 ヶ月当たりの最大能力拡張量が 235,000 (DWT) であるため、58,750 (DWT) (235,000(DWT)×5/20)となる。

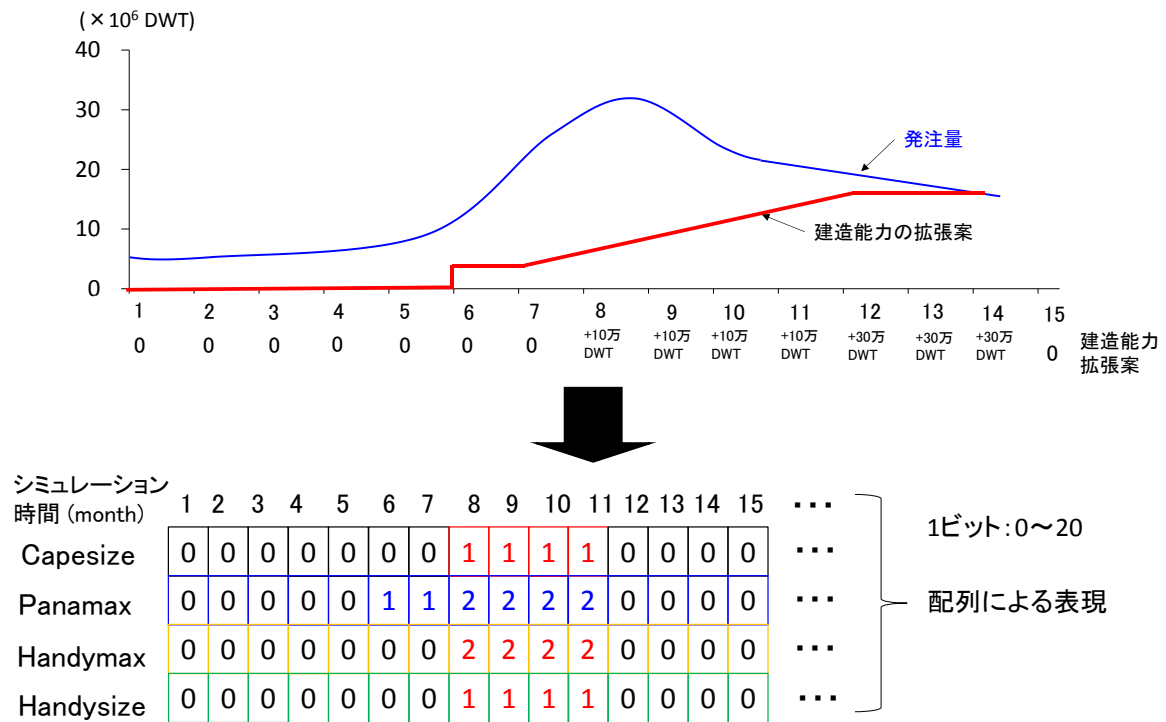


Fig.6.3.2 設計案の表現 (建造能力調整戦略)

Fig.6.3.2 に示すように、設計案をシミュレーション期間と船舶サイズの配列によって表現する。この場合、「造船市場の利益を最大化する配列の組み合わせを決定する最適化問題」として捉えることができる。この場合、SA では近傍解を定義し、その周囲を探索する必要がある。本研究では、Fig.6.3.3 に示す 5 種類の近傍探索法を用いて解を探索する。

- (a) Swap : 2 ビットをランダムに選択し、その 2 ビットの位置を入れ替える。
- (b) BitChange : 1 ビットをランダムに選択し、そのビットの数字を入れ替える。
- (c) Infection : 1 ビットをランダムに選択し、その周囲 2 ビットを選択した 1 ビットの数

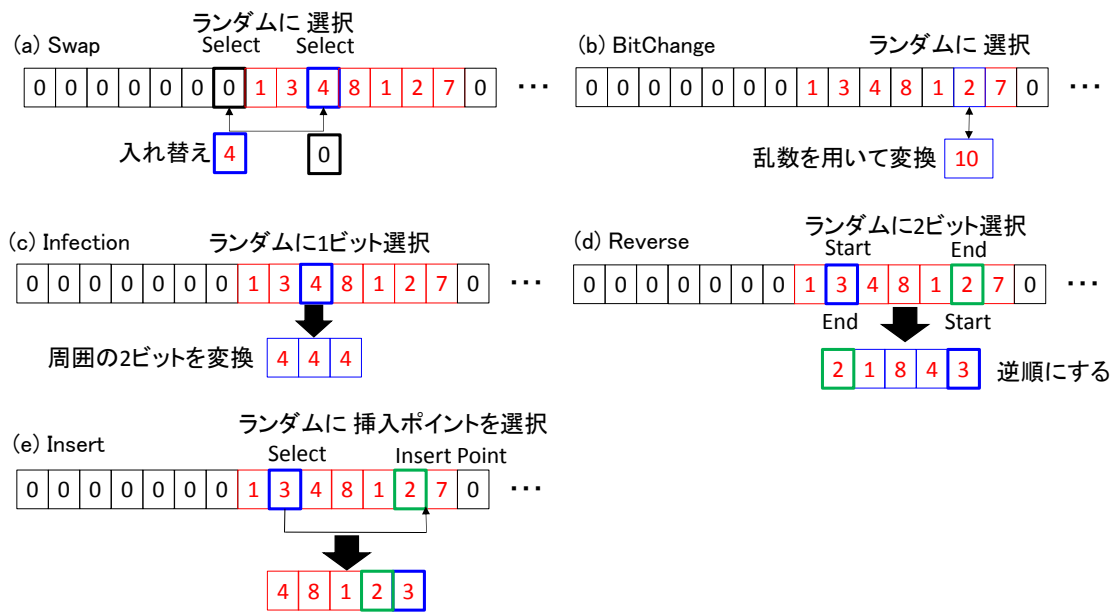


Fig.6.3.3 近傍解の探査 (建造能力調整戦略)

字に変換する。

- (d) Reverse : Start と End をランダムに選択し、その内部のある配列の順序を逆にする。
- (e) Insert : 1 ビット・挿入ポイントをランダムに選択し、その挿入ポイントに選択した選択した 1 ビットを挿入する。

6.3.3 シミュレーションによる知見の獲得

(1) 過去シミュレーションによる知見の獲得

2002 年の状態を初期状態とし、2002 年 1 月-2013 年 9 月までのシミュレーション(Case 1)と、2002 年 1 月-2020 年 12 月までのシミュレーション(Case 2)の結果を比較する。以下にシミュレーション条件を示す。また、Table 6.3.4 に最適化パラメータを示す。

- ・ 入力値 : 2002 年/1 月-2020/1 月
- (1) 世界 GDP (2002-2015 年 : 実績データ)
(2016-2020 年 : GDP 成長率 3.5%と仮定)
- (2) 貨物輸送距離(2002-2012 年 : 実績データ) :
(2012-2020 年 : 一定と仮定)
- ・ 初期値 : 2002 年/1 月
- (1) 船腹量: 2.86×10^8 (DWT)

- (2) 手持工事量: 2.39×10^7 (DWT)
- (3) 建造容量: 2.09×10^6 (DWT)
- (4) 建造中の船腹量 : 1.23×10^7 (DWT)

Table 6.3.4 SA の最適化パラメータ

パラメータ名	数値
クーリング回数 MaxC (回)	50000
アニーリング回数 MaxA (回)	20
初期温度 T0 (-)	0.015
温度低下係数 γ (-)	0.999

最適化結果を Table 6.3.5, Fig.6.3.4- Fig.6.3.6 示す. Table 6.3.5 に示すように, Case 1 の場合は市場全体で獲得できる利益は 3.93×10^{11} (\$), Case 2 の場合は 4.61×10^{11} (\$)となり Case 2 の方が獲得できる利益は大きくなる. また, Fig.6.3.4- Fig.6.3.5 に示すように, Case 1 の場合は実績値とほぼ同じタイミングで能力拡張を開始し急激に建造能力を拡張することで, 発注量を増加させていることが分かる. 一方 Case 2 の場合は, 建造能力の拡張を緩やかにすることで船価を高い水準に維持していることが分かる. しかし, その影響により, 2007 年-2015 年は手持工事量が多い状況が続く影響により, 発注量の減少が発生する.

Fig.6.3.6 に獲得できる利益の推移を示す. この図に示すように, 実績値と Case 1 は, 同様の傾向を取っていることが分かる. しかしそのため, 2012 年以降は発注量の減少, 船価の下落の影響により造船市場は赤字となっている. 一方 Case 2 の場合, 実績値, Case 1 と比べ大きな利益を獲得する年はないものの, 安定的に利益を獲得できている. つまり, 2002

Table 6.3.5 建造能力の最適化結果(1) (過去シミュレーション)

施策名	獲得できる利益 ($\times 10^{11}$ \$)	グラフ内の色
①実績値	2.74	-----
②Case1 (2002年-2013年)	3.93	—————
③Case2 (2002年-2020年)	4.61	—————

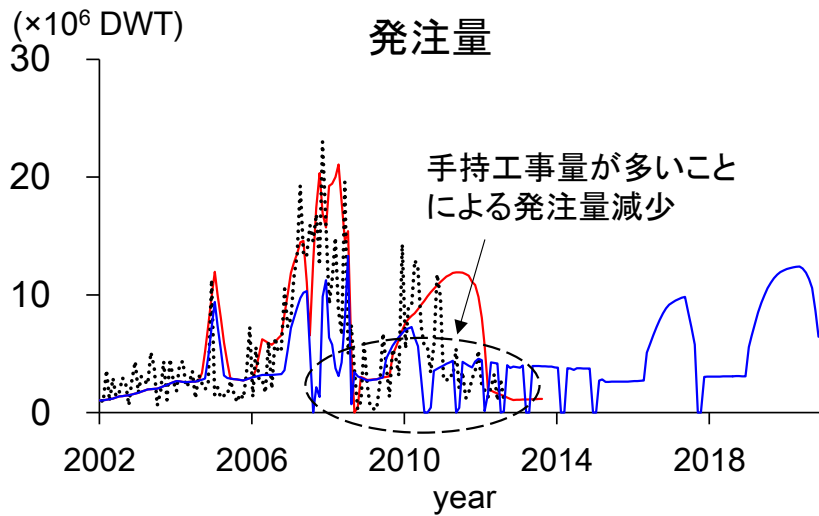


Fig.6.3.4 シミュレーション結果の比較(1) (発注量)

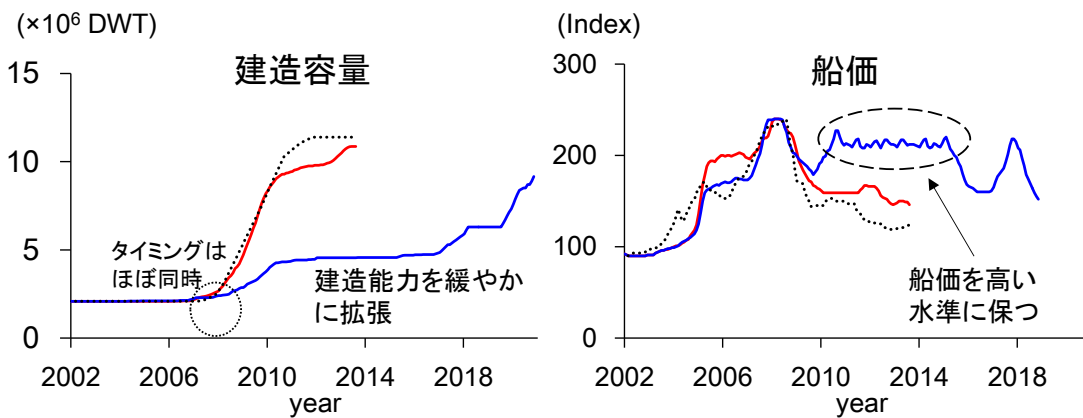


Fig.6.3.5 シミュレーション結果の比較(1) (建造容量, 船価)

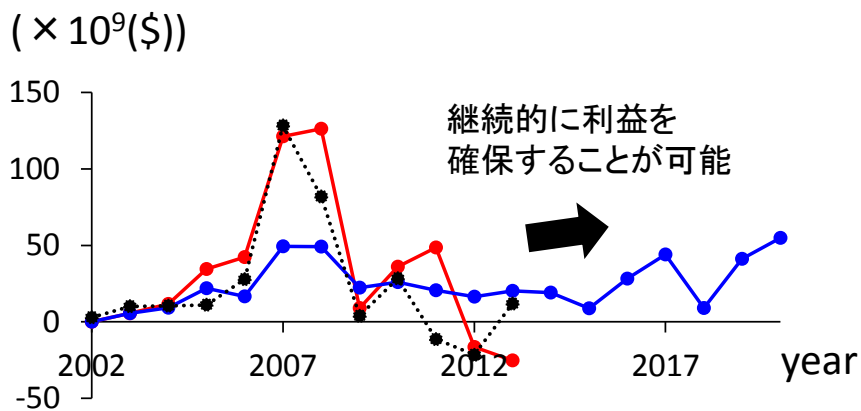


Fig.6.3.6 シミュレーション結果の比較(1) (市場全体の利益)

年-2013年という期間(約10年)で造船市場全体の利益を最大化するためには、2007年以降、急激に建造能力を拡張させる方が有効であったと考えられる。しかし、2002年-2020年までの期間(約18年)で考えると、建造能力を緩やかに拡張させた方が有効で、造船市場の継続的な発展という観点からも建造能力の緩やかな拡張をすべきであったと考えられる。つまり、現在の発生している造船市場の不況は建造能力を緩やかに拡張することで発生せず、利益を確保できる市場を維持できたと考えられる。

(2) 制約条件を追加した場合の最適化

上述では、シミュレーション期間中の利益を目的関数として最適化を実施した。次に、(6-18)式に示す「造船市場が設定した最低限の利益を確保する」という制約条件として設定し、最適結果がどのように変化するかを考察する。なお、この条件は月間で 8.33×10^8 、年間で 1.00×10^{10} (\$) の以上の利益を確保するという制約条件とした。

$$Profit_t \geq 8.33 \times 10^8 \quad (6-18)$$

2002年の状態を初期状態とし、2002年1月-2013年9月までの最適化シミュレーションを実行した。シミュレーション条件は、上述の(1)過去シミュレーションによる知見の獲得と同様である。

最適化結果を Table 6.3.6, Fig.6.3.7- Fig.6.3.9 示す。この結果に示すように、利益の制約条件((6-18)式)を設けた場合(Case 3), 3.31×10^{11} となり、制約条件を設けない Case 1 よりも利益は低下する。発注量の傾向、利益の傾向に関しては Case 3 は Case 2 とほぼ同様の傾向を

Table 6.3.6 建造能力の最適化結果(2) (過去シミュレーション)

施策名	獲得できる利益 ($\times 10^{11}$ \$) (2002年-2013年)	グラフ内の色
①実績値	2.74	-----
②Case1 (利益の制約条件((6-18)式): ×) (2002年-2013年)	3.93	—
③Case2 (利益の制約条件((6-18)式): ×) (2002年-2020年)	2.51	—
④Case3 (利益の制約条件((6-18)式): ○) (2002年-2013年)	3.31	—

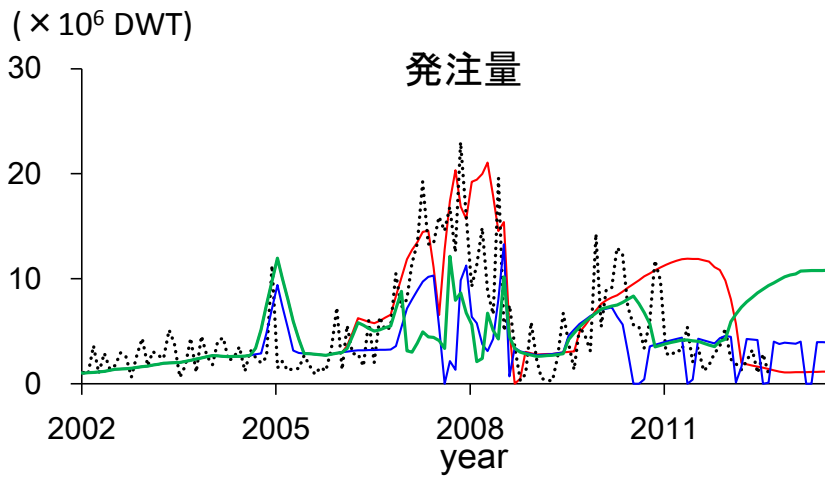


Fig.6.3.7 シミュレーション結果の比較(2) (発注量)



Fig.6.3.8 シミュレーション結果の比較(2) (建造容量, 船価)

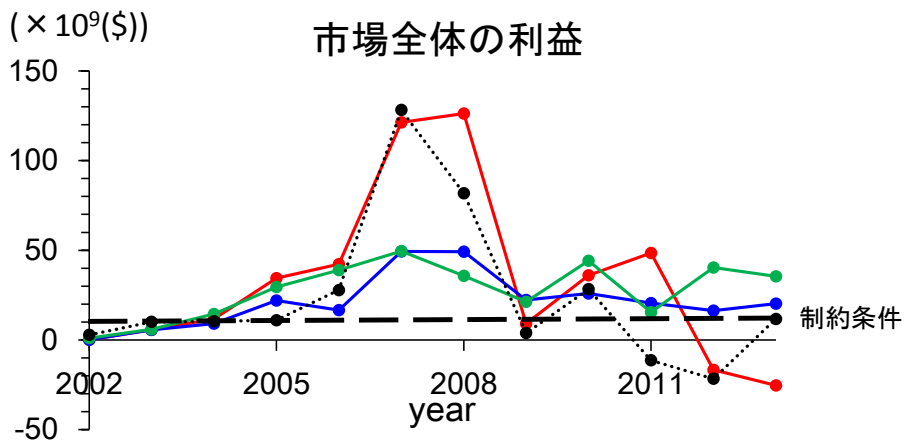


Fig.6.3.9 シミュレーション結果の比較(2) (市場全体の利益)

取っているものの、獲得できる利益は2002年-2013年の範囲では、Case 3の方が大きいことが分かる。これは、Case 3の場合は、2011年頃から建造容量を拡張することで、船価が高い状況を維持しながら、制約を満足する最低限の発注量を確保しているためであると考えられる。また、Case 2の場合は手持工事量の過剰による発注量の減少により、度々発注量が0となる月が発生している。しかし、Case 3の場合は、利益の制約条件の影響により、発注量が0となるような月が発生しない。このように建造容量タイミングを変更することで、2005年-2006年、2010年-2013年でCase 2よりもより多くの利益を確保する(Fig.6.3.9)。

このように制約条件を追加することで、最適解が大きく変化することが分かる。

(3) 将来シミュレーションによる知見の獲得

今後の建造能力の縮小戦略を考察するため、将来シミュレーションを実行した。シミュレーション期間は2012年7月-2030年1月とした。以下にシミュレーション条件を示す。

Case 1は2012年時点の最大5割減少（建造能力 $\geq 5.70 \times 10^6$ (DWT)）、Case 2は6割減少（建造能力 $\geq 4.56 \times 10^6$ (DWT)）という条件で最適化を行った。

- ・ 入力値：2012/7-2030/1
 - (1) 世界 GDP (2012年-2015年：実績データ)
(2016年-2030年：GDP成長率 3.5%と仮定)
 - (2) 貨物輸送距離(2012年-2030年：一定)
- ・ 初期値：2012/1
 - (1) 船腹量: 6.68×10^8 (DWT)
 - (2) 手持工事量: 1.72×10^8 (DWT)
 - (3) 建造容量: 9.70×10^6 (DWT)
 - (4) 建造中の船腹量： 5.57×10^7 (DWT)

最適化結果を Table 6.3.7, Fig.6.3.10- Fig.6.3.12 示す。この表に示すように建造能力が維持した場合、船舶の建造能力が過剰な影響により造船市場は赤字となり、そのため多くの造船所が倒産するという結果となった。Fig.6.3.10に示すように、船価は2016年以降、90(index)となり、船価が低い状態が続くことが分かる。また Table 6.3.7に示すように、Case 1の場合は市場全体で獲得できる利益は 6.35×10^{10} (\$), Case 2の場合は 8.89×10^{10} (\$)となり Case 2の方が獲得できる利益は大きい。つまり、建造容量を減らせば減らすほど獲得できる利益は増加すると考えられる。また Fig.6.3.12より、建造容量の減少が進んだ場合は2017年頃まで赤字となり船舶を建造しても利益を確保できない。しかし、2018年頃に黒字化、それ以降は赤字にならないように推移する。以上より、建造能力の縮小が進んだ場合、バルクキャリア市場の回復は2018年頃と予測される。

Table 6.3.7 建造能力の最適化結果 (将来シミュレーション)

施策名	獲得できる利益 ($\times 10^{10}$ \$)	グラフ内の色
①実績値	-0.78
②Case1	6.35	— (Red)
③Case2	8.89	— (Blue)

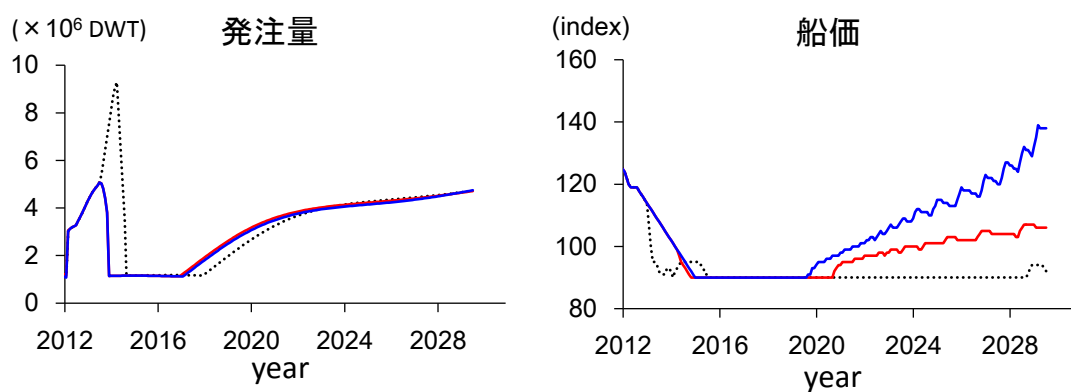


Fig.6.3.10 将来シミュレーション結果の比較 (発注量, 船価)

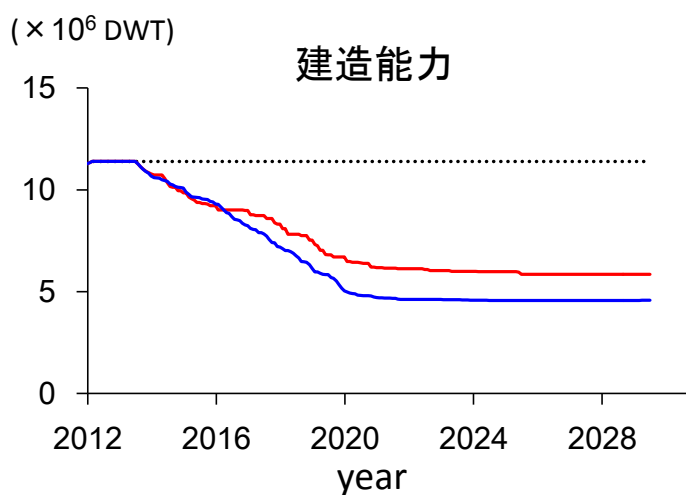


Fig.6.3.11 将来シミュレーション結果の比較 (獲得した設計案)

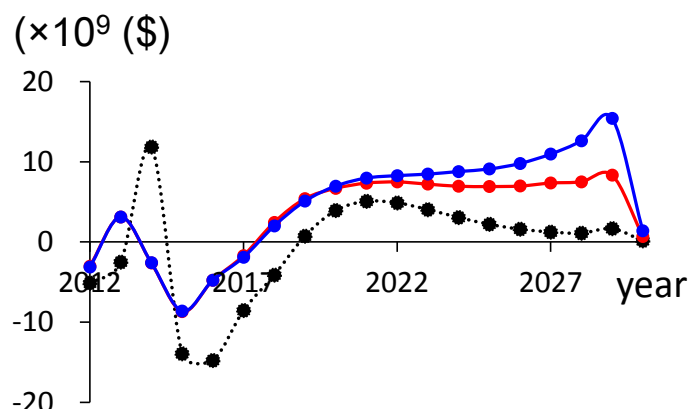


Fig. 6.3.12 将来シミュレーション結果の比較 (市場全体の利益)

6.4 施策による造船市場の活性化戦略

上述に示すように、本研究では、①船舶の強制廃船、②新規設備の導入による船舶の利用停止戦略、速度低減による環境負荷の低減戦略の三つの戦略による造船市場の活性化を検討する。本節では、これらの定式化、設計案の表現と近傍解の定義について説明する。さらに、最適化シミュレーションを実施し、獲得した結果を整理・考察する。

6.4.1 上位問題の定式化

(施策による造船市場の活性化戦略)

①船舶の強制廃船戦略、②新規設備の導入による船舶の利用停止戦略、③速度低減による環境負荷の低減戦略の入力値 (前提条件)、設計変数、制約条件、目的関数を以下に示す。式の各種記号、添え字に関しては Table 6.4.1 に整理する。

入力値 (前提条件) :

- (1) シミュレーション条件: (シミュレーション期間, シミュレーションの開始時の初期値)
- (2) シミュレーション期間内の廃船量の最大値, 船舶利用停止量の最大値, 速度減少量の最大値. 廃船量の最大値, 船舶利用停止量の最大値についてはシミュレーション開始時のサイズ毎の船腹量を上限とする. 速度減少量の最大値については, シミュレーション開始時の 40%を上限値とする.

設計変数：

①船舶の強制廃船戦略

船舶サイズ毎の強制廃船量. 各月のサイズ毎の廃船量を配列によって表現する((6-19)式).

$$Fs = [fs_t^j] \quad (6-19)$$

②新規設備の導入による船舶の利用停止戦略

船舶サイズ毎の利用停止量. 各月のサイズ毎の利用停止量を配列によって表現する((6-20)式).

$$SV = [sv_t^j] \quad (6-20)$$

③速度低減による環境負荷の低減戦略

船舶速度の減少量. 1ヶ月の速度減少量を配列によって表現する((6-21)式).

$$Sr = [sr_t] \quad (6-21)$$

制約条件：

共通：①船舶の強制廃船戦略，②船舶の利用停止戦略，③速度低減による環境負荷の低減戦略

- ・ 1ヶ月の廃船量の最大値を 5.0×10^6 (DWT)以下とする(建造能力調整戦略と同様 (6-10)式).
- ・ 施策による市場の急激な変化(造船市場の歪曲)は発生させない. 具体的には, 発注爆発は発生させないように施策を立案することを制約条件として設定した.
- ・ 市場全体で獲得する利益の目標値(下限値)を設定する((6-22)式). 利益の算出に関しては, (6-11)式を用いる.

$$DV \leq Profit \quad (6-22)$$

②船舶の利用停止戦略,

1ヶ月の最大の建造容量を超えないように, 利用停止量を決定する. その際は, 竣工中の船舶の影響も考慮する((6-23)式). なお, 本研究では船舶の利用停止期間を1ヶ月と設定した.

$$Cp_t^j \geq C_t^j + sv_t^j \quad (6-23)$$

③速度低減による環境負荷の低減戦略

1ヶ月あたりの最大の速度減少量は最大2%とする((6-24)式).

$$ls \geq sr_t \quad (6-24)$$

目的関数：

①船舶の強制廃船戦略

シミュレーション期間中の船舶サイズ毎の強制廃船量を総和(シミュレーション期間, 船舶サイズ)し, その合計量を最小化する((6-25)式).

$$Min(mFS) = \sum_t \sum_j fs_t^j \quad (6-25)$$

②新規設備の導入による船舶の利用停止戦略

シミュレーション期間中の船舶サイズ毎の利用停止量を総和(シミュレーション期間, 船舶サイズ)し, その合計量を最小化する ((6-26)式).

$$Min(mSV) = \sum_t \sum_j sv_t^j \quad (6-26)$$

③速度低減による環境負荷の低減戦略

シミュレーション期間中の船舶速度の減少量を総和(シミュレーション期間, 船舶サイズ)し, その合計量を最小化する((6-27)式).

$$Min(mSr) = \sum_t sr_t \quad (6-27)$$

④三つの施策を同時に考慮する場合

シミュレーション期間中の総合した施策量の割合を総和(シミュレーション期間, 船舶サイズ)し, その合計量を最小化する((6-28)式).

$$Min(mSt) = \frac{\sum_t \sum_j fs_t^j}{\sum_j V^j} + \frac{\sum_t \sum_j sv_t^j}{\sum_j V^j} + \frac{\sum_t sr_t}{Sm} \quad (6-28)$$

Table 6.4.1 式の添え字 (施策による造船市場の活性化戦略)

記号	説明	記号	説明
[添字等]		[制約条件]	
t	シミュレーション内部時間	C_t^j	各月のサイズ毎の竣工量 (DWT)
j	船舶サイズの種類 1:Capesize, 2:Panamax, 3:Handymax,4:Handysize	Cp_t^j	各月のサイズ毎の建造容量 (DWT)
[設計変数]		ls	1ヶ月の最大の速度減少量 (-)
$Fs=[fs_t^j]$	強制廃船戦略の設計案	DV	利益の目標値 (\$)
$SV=[sv_t^j]$	船舶の利用停止戦略の設計案	$Profit$	造船市場全体の利益 (\$)
$Sr=[sr_t]$	速度低減戦略の設計案	[目的関数]	
fs_t^j	各月のサイズ毎の強制廃船量 (DWT)	mFS	強制廃船量 (DWT)
sv_t^j	各月のサイズ毎の船舶利用停止量 (DWT)	mSV	船舶利用停止量 (DWT)
sr_t	各月の船舶速度低減量 (-)	mSr	船舶速度低減量 (-)
		mSt	施策量の合計値 (-)
		V^j	シミュレーション開始時の船腹量 (DWT)
		Sm	速度低減量の最大値 (DWT)

このように、ある目標とする市場全体の利益に対して最小となる施策量とその施策を実行・終了するタイミングを決定することで、各々の施策がどの程度市場に影響を与えるかを考察する。

6.4.2 設計案の表現と近傍解の定義

本項では船舶の強制廃船戦略の設計案を例に、設計案の表現を説明する。Fig.6.4.1 に強制廃船戦略の設計案を示す。この図に示すように、14bit の配列によって設計案は表現される。その詳細を以下に示す。

- (1) 設計案全体の強制廃船量を決定する配列 (1 ビット目)

強制廃船量の全量を決定する。この配列は[0-20]の数値による表現され、この数値を基に強制廃船量の全量を決定する。例えば、シミュレーション開始時の船腹量が 1.0×10^8 (DWT)の場合、Fig.6.4.1 の場合、 5.0×10^7 (DWT)(1.0×10^8 (DWT) $\times 10/20$)となる。

- (2) 廃船量の全体パターンを決定する配列 (2 ビット目)

強制廃船量の全体パターンを決定する。Fig.6.4.2(a)に示すように、本研究では山の数を用いて、設計案を表現する。配列が”1”の場合は山は一つ、配列が”2”の場合は山は二つ、配列が”3”の場合は山は三つとする。本研究では最大の三つの山を取るよう設定

している。なお、この配列が2の場合は緑で囲んだ部分の配列については利用されず、10ビット目までが有効な配列となる。またある山と別の山が重なった場合、その重なりも考慮するように設計案を生成する。

- (3) 一つの山の詳細パターンを決定する配列 (3ビット目, 7ビット目, 11ビット目)
この配列では、一つの山の詳細なパターンを決定する。本研究では、Fig.6.4.2(b)に示すように、一定(a), 増加(b), 減少(c)の3パターンとし、1~3の整数で表現される。
- (4) 一つの山の廃船量を決定する配列 (4ビット目, 8ビット目, 12ビット目)
この配列では、一つの山の廃船量を決定する。具体的には、1ビット目で決定した廃船量を三つの山にどのように配分するかを決定する。Fig.6.4.1の設計案の場合、三つの山に全体の廃船量が配分されることになる。つまり、赤枠の一つ目の山に 1.1×10^7 (DWT)($3/(3+7+4)$), 青枠の二つ目の山に 2.5×10^7 (DWT) ($7/(3+7+4)$), 緑枠の三つ目の山に 1.4×10^7 (DWT) ($4/(3+7+4)$)の割合で配分されることとなる。
- (5) 強制廃船の開始時期を決定する配列 (5ビット目, 9ビット目, 13ビット目), 強制廃船の終了時期を決定する配列 (6ビット目, 10ビット目, 14ビット目)
これら配列により一つの山の強制廃船の開始・終了のタイミングを決定し、強制廃船を適用する時期を決定する。これらの配列はシミュレーション開始時からの経過時間 (month) を表しており、シミュレーション期間によりその最大値は変化する。

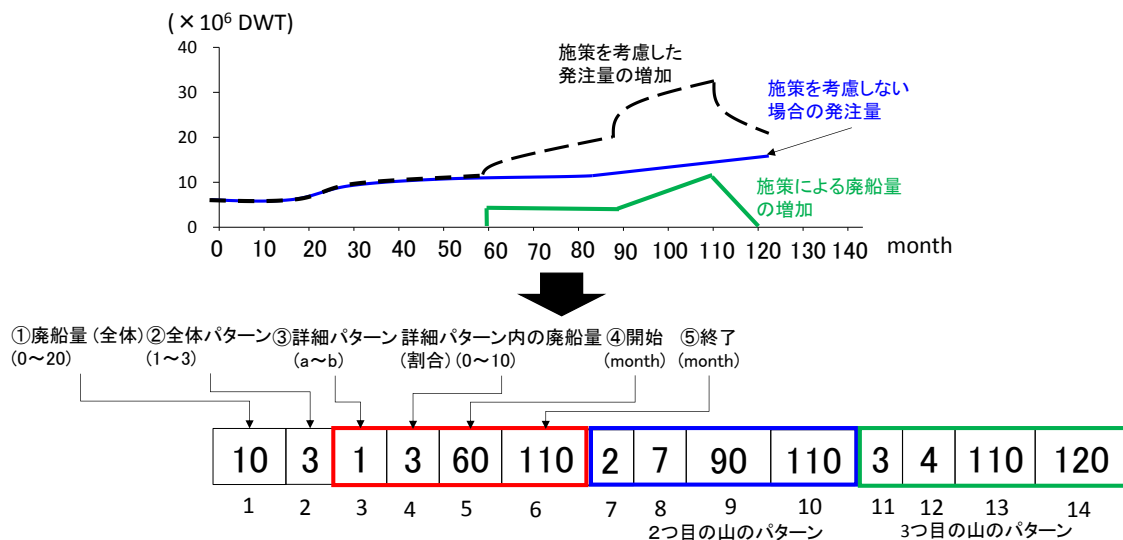


Fig. 6.4.1 設計案の表現(1) (施策による造船市場の活性化戦略)

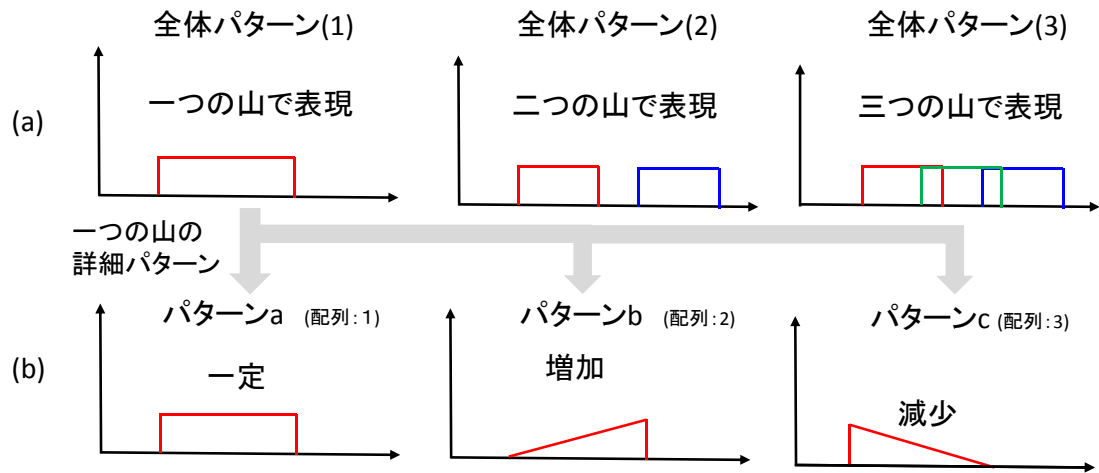


Fig. 6.4.2 設計案の表現(2) (施策による造船市場の活性化戦略)

以上により船舶の強制廃船量の設計案を表現する。この設計案の表現は、船舶の利用停止戦略、減速戦略でも共通である。なお、SDモデルへ入力する際は、強制廃船量、船舶の利用停止量、船舶の減速量を示す行列((6-19)式, (6-20)式, (6-21)式)に変換する。また、強制廃船量、船舶の利用停止量に関してはサイズ別に設計案を作成し (Capesize, Panamax, Handymax, Handysize の4種類), 減速戦略は一つの設計案で表現する。

施策による造船市場の活性化の場合も SA を用いるため、近傍解の探査が必要となる。Fig.6.4.1 の配列の場合、Swap, BitChange は建造能力調整戦略と同様である。その他に、Fig.6.4.3 の操作を用いる。なおブロックの定義は①詳細パターン (3 ビット目, 7 ビット目, 11 ビット目), ②詳細パターンの廃船量 (4 ビット目, 8 ビット目, 12 ビット目), ③④シミュレーションの開始 (5 ビット目, 9 ビット目, 13 ビット目)・終了時 (6 ビット目, 10 ビット目, 14 ビット目) の四つの塊を1ブロックと定義する。

- (a) BlockSwap : 2 ブロックをランダムに選択し、そのブロックの位置を入れ替える。
- (b) BlockInsert : 1 ブロックと挿入ポイントをランダムに選択し、挿入ポイントに選択したブロックを挿入する。

Table 6.4.2, Fig.6.4.4- Fig.6.4.6 に最適化結果を示す。この表に示すように施策を適用しない場合は上述に示したように、船舶の建造能力が過剰な影響により造船市場は赤字となり、そのため多くの造船所が倒産するという結果となる。一方、施策による造船市場の活性化戦略を取った場合、何もしない場合に比べ、造船市場全体で獲得できる利益が2026年以降、増加していることが分かる(Fig.6.4.5)。

船舶の強制廃船戦略を取った場合、発注量が施策を適用しない場合よりも多くなり、船価も2025年頃に回復していることが分かる(Table 6.4.2, Fig.6.4.4)。施策の適用量に関しては 2.94×10^8 (DWT)となり、これは2012年7月時点での44%量の廃船量であり、約半分の船腹量の廃船(フェーズアウト)が必要となる。

船舶の減速戦略を取る場合、2023年頃から減速を開始し、徐々に減速することによって発注量と船価を上昇させる。減速量は2012年時点での14.0%となっている。

船舶の利用停止戦略に関しては、制約条件を満足しないという結果となった。これは、建造能力が過剰のため利用停止船舶を手持工事量に追加しても、手持工事率はほとんど上昇せず、船価が上昇しないためと考えられる。つまり1ヶ月程度の利用停止では、市場は活性化しないと考えられる。

三つの戦略を考慮した場合、強制廃船量は 1.13×10^8 (DWT) (2012年時点での17%を廃船)、減速量は2012年時点での8.0%、船舶の利用停止戦略については0 DWTとなっている。この結果より、施策を複合させた方が廃船量、減速量は小さくできることが分かる。発注量は2025年、船価は2026年以降に増加している。これは、強制廃船と速度低減を同時期に行うことで、同時期に発注量と船価を増加・上昇させ、市場の全体の収入を増加させるためである(Fig.6.4.6)。

以上のシミュレーションにより、施策による市場活性化戦略の効果を定量的に把握した。

Table 6.4.2 最適化結果(施策による造船市場の活性化戦略)

施策名	施策量の 最小値	獲得できる利益 ($\times 10^{10}$ \$)	グラフ内の色
①施策なし (基準ライン)	—	-0.78	----
②強制廃船	2.94×10^8 (DWT)	1.57	—
③速度低減	14.0%	1.51	—
④利用停止	-	制約を満足しない	なし
⑤3つの 施策を考慮	強制廃船	1.13×10^8 (DWT)	—
	速度低減	8.0%	
	利用停止	0(DWT)	

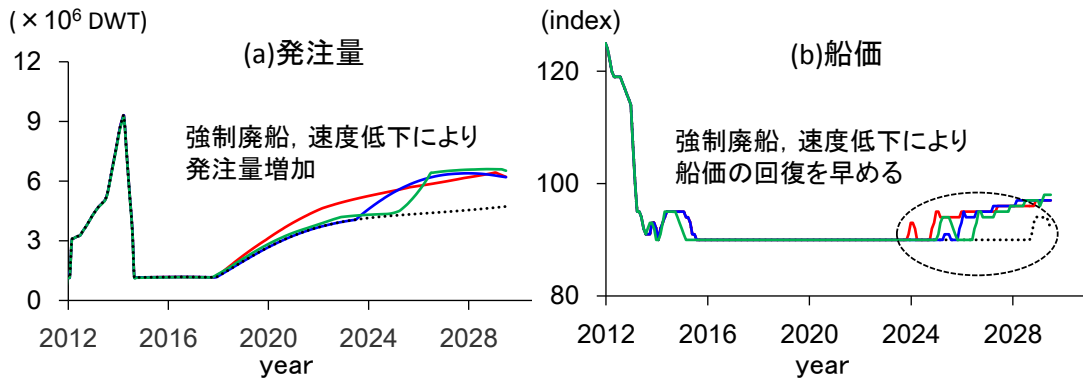


Fig. 6.4.4 将来シミュレーションの結果 (発注量, 船価)

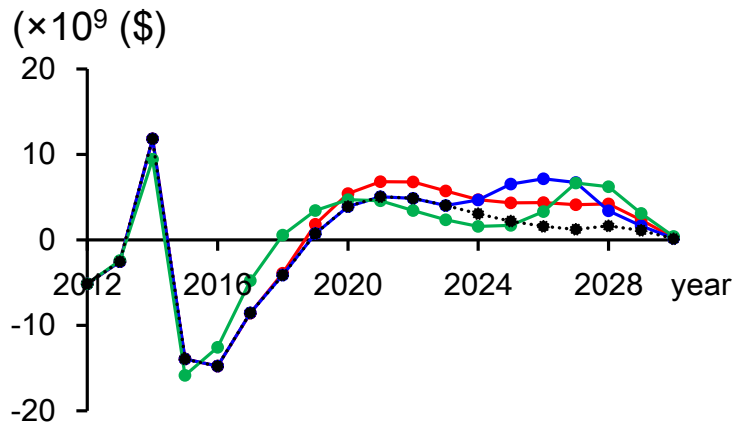


Fig. 6.4.5 将来シミュレーションの結果 (市場全体の利益)

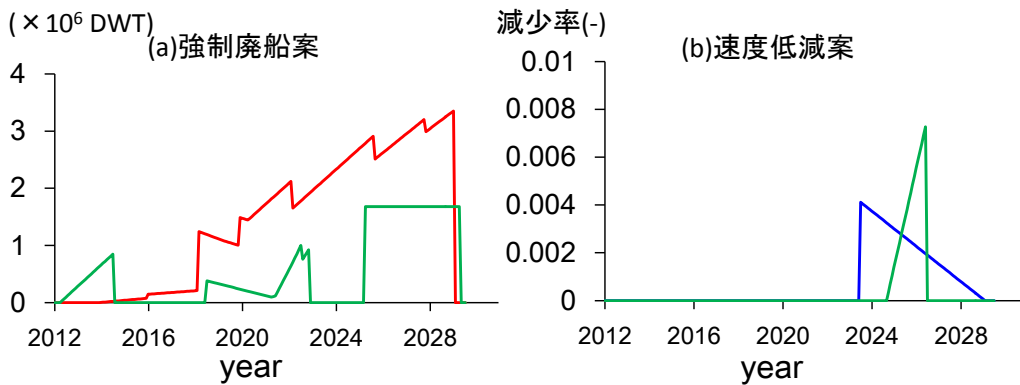


Fig. 6.4.6 獲得した設計案

6.5 船舶需要予測用 SD モデルの活用の課題

6.5.1 目的関数・制約条件の見直し

本研究では、造船市場を対象に市場の継続的な発展のシナリオを策定するためのシステムを開発し、その効果について議論した。その際、シミュレーション期間中の造船市場の利益最大化を目的関数にして、最適な施策を立案した。しかし実際は施策・政策の目的により、設定すべき目的関数・制約条件は大きく異なる。今後は施策・政策の目的を整理し、その目的に応じた目的関数・制約条件を設定する必要がある。

本研究では市場の継続的な発展を考慮した最適化を行うため、造船市場全体で確保する最低限の利益((6-18) 式)を制約条件として導入し、その効果を示した。しかし、本研究では単一目標最適化問題として定式化しているため、市場の安定化と利益の最大化のトレードオフの関係については把握できない。今後は、目的関数・制約条件に (6-29, 6-30, 6-31) 式を追加し、多目標最適化問題に拡張することで市場の安定化と利益の最大化のトレードオフの関係を定量的に把握する。

また、造船市場の早期救済措置政策を立案する場合は、造船市場全体の赤字期間の最小化((6-32, 6-33) 式)と、適用する施策量の最小化を目的関数と設定し((6-25, 6-26, 6-27, 6-28) 式)、多目標最適化問題に拡張することで、赤字期間と施策量の間を定量的に把握することが可能となる。その他にも、コスト算出式、収入やコスト発生するタイミングについても見直し、詳細に設定する必要がある。

$$\text{Min}(DP) = \sum_t (\text{Profit}_t - \text{Profit}_{t-1}) \quad (6-29)$$

$$\text{Profit}_t \geq 0 \quad (6-30)$$

$$\text{Profit}_t = \text{Order}_t \times \text{Shipprice}_t - (\text{Construction}_t + \text{IC}_t) \quad (6-31)$$

$$\text{Min}(SL) = \sum_t (sl_t) \quad (6-32)$$

$$sl_t = \begin{cases} 1 & \text{if } (\text{Profit}_t < 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6-33)$$

ここに、 Profit_t : 時間 t における造船市場の全体の利益

Order_t : 時間 t における発注量 (\$)

Shipprice_t : 時間 t における船価 (\$/DWT)

$Construction_t$: 時間 t における建造コスト (\$)

IC_t : 時間 t における建造能力拡張コスト (\$)

SL : 市場の赤字期間 (month)

sl : 時間 t における造船市場の状態 (month)

6.5.2 海運市場への影響の考慮

本研究では造船市場を対象に、その市場を活性化するための最適な戦略・施策の立案について検討した。実際は海運市場と造船市場は相互に関係しているため、施策が双方の市場に与える影響を定量的に考慮する必要がある。今後は、本研究のSDモデルを拡張し、海運市場の予測モデルを構築する。そして、造船市場と海運市場の双方を考慮した戦略・施策の立案が可能か議論する必要がある。

Fig.6.5.1(左)に船舶の発注量と海上運賃(Baltic freight index(BFI))の推移を示す。この図に示すように、船舶の発注量と海上運賃は同様に傾向で推移しており、発注爆発が発生したタイミングで海上運賃も最大となっている。船舶の発注量と海上運賃の関係を定義した結果を Fig.6.5.1(右)に示す。こちらに示すように、船舶の発注量と海上運賃の関係には線形関係を定義することができ、相関係数(R(-))も 0.798 と非常に高い値を示す。この関係を用いれば海運市場の予測は可能と考えられ、船舶需要予測用SDモデルの更なる拡張が期待できる。

そして Fig.6.5.2 に示すように、上位問題を造船市場の活性化と海運市場の活性化戦略の双方を考慮した多目標最適化問題に拡張し、造船市場と海運市場の双方を考慮した戦略・施策の立案について検討する。

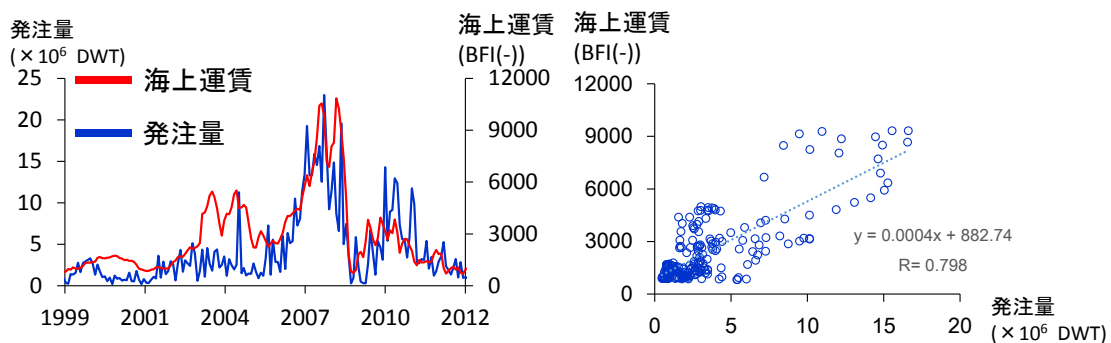


Fig. 6.5.1 船舶の発注量と海上運賃の推移と関係
(船舶の発注量と海上運賃の推移(左), 船舶の発注量と海上運賃の関係(右))

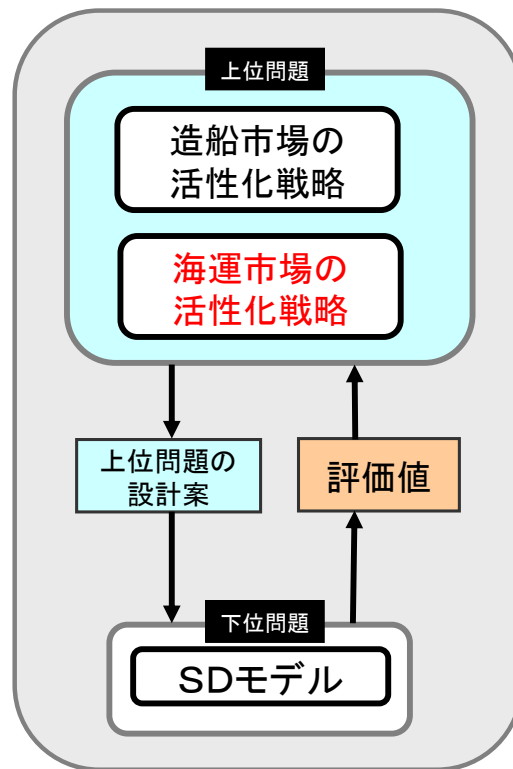


Fig. 6.5.2 海運市場への影響を考慮したモデル化

参考文献

- (1) 「中央日報社」：[世界造船業界の不況で韓国造船所 29%廃業...日本も 17%減], <http://japanese.joins.com/article/863/220863.html>, (2016.12.17 access)
- (2) 「ニュースイッチ」：[海運業界に再編の波. 国内 3 社, 韓台独と連合], <http://newswitch.jp/p/4769> (2016.12.17 Access)
- (3) 「産経ニュース」：[韓国海運破綻で世界中が大混乱], <http://www.sankei.com/world/news/160926/wor1609260034-n1.html> (2016.12.17 Access)
- (4) SankeBiz：[韓国政府, 造船に 1 兆円支援 250 隻発注など 20 年までに業界の効率性向上], <http://www.sankeibiz.jp/macro/news/161101/mcb1611010500012-n1.htm>, (2016.12.17 Access)
- (5) 国土交通省 海事局船舶産業課：「韓国造船業における公的支援について集中審議-第 123 回 OECD 造船部会及び OECD 造船部会創設 50 周年ワークショップの結果概要について-」, 国土交通省 Press release, 2016.
- (6) 国土交通省 日本の造船業の目標, <http://www.mlit.go.jp/common/001118265.pdf> 第 1 回 海事イノベーション部会, 2016 [Accessed 29 January 2017]
- (7) 島田俊郎. (1994 年). システムダイナミクス入門. 日科技連出版社. システムダイナミクス学会日本支部 JSD
- (8) ClassNK : IMO 及び IACS の動向 ”IMO 国際条約カレンダー”, http://www.classnk.or.jp/hp/ja/imo_conv_schedule/list_download.aspx, [Accessed 20 December 2016]
- (9) Lloyd's Register Marine, UCL energy institute (2014) Global marine fuel trends 2030. Available at: http://www.lr.org/en/_images/213-34172_Global_Marine_Fuel_Trends_2030.pdf [Accessed 9 December 2015]
- (10) 竹内章, 林俊宏, 岩崎登. "エネルギーネットワーク最適化技術 (特集 グリーン社会の実現に向けた環境・エネルギー技術)." *NTT 技術ジャーナル* 22.11 (2010): 24-27.
- (11) 堀嘉成, et al. "遺伝アルゴリズムを応用した蓄熱型地域冷暖房プラントの最適運転計画." *化学工学論文集* 22.4 (1996): 695-701.
- (12) 仲尾由雄, and 谷口剛. "大規模シミュレーションに基づく自然エネルギーの最適運用 (特集 環境)." *Fujitsu* 65.2 (2014): 28-33.
- (13) 満行泰河, 稗方和夫, 大和裕幸. 電力ピークカットを考慮した作業計画立案手法の研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 15 号, pp.123-126, 2012.
- (14) 宮城俊彦：均衡制約付き最適化問題の土木計画学の応用の可能性, 土木計画学研究・講演集, No.20, 1997.
- (15) Kirkpatrick, Scott, C. Daniel Gelatt, and Mario P. Vecchi. "Optimization by simulated

- annealing." *science* 220.4598 (1983): 671-680.
- (16) 輪湖純也, 三木光範, and 廣安知之. "最良解を基準とする SA の適応的温度スケジュール." *日本機械学会第 6 回最適化シンポジウム講演論文集* (2004).
 - (17) 仲篠靖男: 世界のサプライサイクル概要とインドプロジェクト, 第 2 回国際サプライサイクルシンポジウム in 室蘭, 2011
 - (18) 国土交通省: 日本造船業の耐替性 -船舶建造コスト構造の分析, 2015.
 - (19) 経済産業省: 鉄鋼業の現状と課題 (高炉を中心に), 2015.
 - (20) 日本造船工業会: 造船工業会ニュース, Vol.112,2008
 - (21) 日本造船工業会: 造船工業会ニュース Vol.124,2009

第7章 結言

7.1 結論

本研究では、システムダイナミクスを用いて船舶の需要予測モデルを構築した。以下に、本研究で獲得した知見を述べる。

① 船舶の需要予測モデルへの要求項目を整理

船舶の需要予測モデルに要求項目を整理した。船舶の需要予測モデルへの要求される項目は、海上荷動き量の変化を適切に反映できること、造船所・船社の特性を十分に考慮すること、全量での予測・船舶サイズ別の予測ができること、モデルへの入力値が少ないこと、海運・造船市場の不確実性を考慮した予測が可能であること、海運・造船市場の外生要因も考慮できること、高度な意思決定や戦略・施策立案が検討可能なことと整理した。また、一般的な需要予測手法を整理し、システムダイナミクスが船舶の需要予測モデルの構築において最も妥当な手法であると結論づけた。

② 海運・造船市場の特徴を考慮した需要予測モデルの構築

Clarkson 社のデータを用いることで、以下の特徴を持つモデルを構築し、海運・造船市場に特徴を考慮したモデルを構築した。

- (1) 貨物輸送量予測モデルでは、世界 GDP と貨物輸送距離により海上荷動き量を予測する。このモデルにより、世界経済の影響、貨物輸送における距離の影響を考慮する。
- (2) 発注量予測モデルでは、船舶の運用が限界に達すると、発注量の爆発が起きると定義した。さらに船価と手持工事量の影響で発注量は増減するため、その影響により発注量を短期的に補正した。
- (3) 建造モデルは、造船所の竣工量が造船所の操業状態によって船舶の着工量や建造能力が変化するようにモデル構築した。さらに相関分析を用いて、船舶の建造期間と造船所の建造能力拡張期間を特定し、モデルに反映した。
- (4) 船価予測モデルでは、市場の内生要因によって船価は変動すると考え、造船所の手持工事率を用いて船価を予測した。
- (5) 廃船モデルでは、市況によって廃船量は変化するとしてモデルを構築した。また、2008年以降の廃船量の短期的な増減の影響を発注量の急激な増減の影響と考え、発注量を用いて廃船量を補正した。

③ サイズ毎に予測するために詳細な需要予測モデルを構築

全量での予測に加え、船舶サイズ毎の需要予測を実現するため、詳細な船舶需要予測モデル構築した。以下にその特徴を示す。

- (1) サイズ別の需要予測を実現するための基本的な考えを示した。Clarkson 社では総量のデータの他、船舶サイズ毎の詳細なデータを獲得することができる。本研究では、これらのデータを用いて、発注量配分モデル、サイズ毎の建造モデル、廃船モデルを構築することでサイズ別の需要予測を実現した。
- (2) サイズ別の発注量を予測するため、発注量配分モデルを構築した。サイズ別の発注量は市況により変化すると考え、船舶航海距離と全量発注量の中に占めるサイズ毎の発注量の割合の関係を示した。
- (3) 建造モデル、廃船モデルは、総量での予測と同様の方針でモデルを定義した。建造モデルでは、建造期間、能力拡張期間がサイズ毎に異なることを示し、それをサイズ毎の建造モデルに反映した。廃船モデルも同様である。

④ 過去シミュレーションを行うことでモデルの妥当性を確認

1999年から2012年までのシミュレーションを実施し、モデルの妥当性を検証した。その結果、リーマンショック前後の発注量の激しい増減、船価の下落による発注量の増加等を再現することができた。また将来シナリオが不明な場合、構築したモデルがどの程度までの予測が可能かの性能検証を実施し、3~4年前からの予測が可能であることが分かった。サイズ別の需要予測でも、同様に1999年から2012年までのシミュレーションを実施し、モデルの妥当性、需要予測モデルの精度を議論した。

⑤ 船舶需要予測における不確実性の影響の考慮

海運・造船市場には様々な不確実性が存在し、それらが予測結果に大きな影響を与える。本研究では、既往研究で提案されている不確実性の考慮手法を用いて、不確実性が予測結果に与える影響を定量的に分析した。以下にその概要を示す。

- (1) 海運・造船市場の不確実性をSDモデル外部の不確実性、SDモデル内部の不確実性に整理し、その不確実性を考慮する方法を示した。そして、モンテカルロシミュレーションを用いてそれらの不確実性を総合的に考慮した。
- (2) SDモデル外部の不確実性である世界GDPと貨物輸送距離は、二項格子モデルを用いてその不確実性を考慮した。また、1999年から2012年までのシミュレーションを実施することで、二項格子モデルを用いた効果を検証した。
- (3) SDモデル内部の不確実性は、船舶需要予測モデルを構成するSub-modelのバラつきを分析し、その結果をモデルに組み込むことでそのバラつきを考慮した。具体的には、

コロモゴロフ・スミノフ検定, t 検定, グラフの可視化によって **Sub-model** のバラつきを分析した. そして, モンテカルロシミュレーションを用いて, タイムステップ毎に値を変動させてその不確実性を考慮した.

- (4) 各種シミュレーションを実行することで, **SD** モデル外部の不確実性, **SD** モデル内部の不確実性が予測結果に与える影響を分析した. そして今後, 精度向上を図るべき **Sub-model** を明確にした. また将来シナリオが不明な場合, 構築したモデルがどの程度までの予測が可能かの性能検証を実施し, 不確実性がない場合と同様, 3~5年前からの予測が可能であることが分かった.

⑥ 市場の活性化戦略を考慮したシステムを構築

船舶需要予測用 **SD** モデルを用いて, 市場の継続的な発展のシナリオを策定するためのシステムを開発した. そして, 構築したシステムを用いて造船市場の継続的な発展が可能なシナリオを立案し, その効果を示した. 本研究では **SD** モデルの内生要因である①船舶建造能力の調整, ②外生要因である施策による市場の活性化に着目し, その効果を示した. 以下にその概要を示す.

- (1) IMO で採択された国際条約・国際ルールを例に, これまで採択された条約を整理し, 船舶の強制的な廃船(フェーズアウト), 新規設備の導入による一定期間の利用停止, 速度低減による環境負荷の低減の三つに分類した.
- (2) 船舶の建造能力の調整, 施策による造船市場の活性化を最適化問題として定式化し, 設計変数, 制約条件, 目的関数を明確化した. 建造能力の調整戦略では, 造船市場全体で獲得できる利益を目的関数, 世界全体の船舶建造能力拡張量を設計変数とすることで, 造船市場全体の利益を最大化する建造能力の拡張案・縮小案を決定する問題として定式化した. 施策による造船市場活性化では, 施策により市場全体が獲得を目指す最低限の利益を満足する最小量の施策量とそのタイミングを決定する問題として定式化した. 本研究では, ①船舶の強制的な廃船(フェーズアウト), ②新規設備の導入による一定期間の利用停止, ③速度低減による環境負荷の低減の三つの施策を対象とした.
- (3) 過去シミュレーションを行うことで, 建造能力の調整戦略の効果を確認した. その結果, 2002年-2013年のシミュレーションでは, 実績値と同様に建造能力拡張を急激に進めて発注量を急激に増加させる戦略が有効であることが分かった. しかし, 2002年-2020年のシミュレーションでは, 建造能力を緩やかに増加させ, 発注量と船価を適切にコントロールする戦略が有効であることが分かった. そして, 造船市場の持続的な発展という視点でも, 建造能力を緩やかに増加させることが有効なことも分かった. また制約条件を追加した場合の最適化も実施し, 制約条件を追加することで最適解が大きく変化することが分かった.
- (4) 将来シミュレーションにより, 今後の船舶建造能力縮小量を分析した. その結果, 現

在は船舶の建造能力は過剰であり、5割程度減少すれば、2018年頃に造船市場は回復に向かうことが分かった。

- (5) 施策シミュレーションを実行し、①船舶の強制的な廃船(フェーズアウト)、②新規設備の導入による一定期間の利用停止、③速度低減による環境負荷の低減、の三つが造船市場に与える影響を分析した。シミュレーションした結果、①船舶の強制的な廃船(フェーズアウト)、③速度低減による環境負荷の低減、が市場の活性化には有効であることが分かった。また②新規設備の導入による一定期間の利用停止の結果より、1ヶ月程度の船舶の利用停止では海運・造船市場に与える影響が少ないことが分かった。また、三つの施策を複合して考慮した場合、単独で施策を考慮した場合に比べ、施策量を削減できることが分かった。

このように、本研究で構築したシステムを用いることで高度な意思決定の支援が可能であることを示した。また、目的関数・制約条件を見直し、今後の課題を整理した。

7.2 今後の課題

今後の課題を以下に整理する。

- **予測可能期間の長期化**
本研究で構築した船舶需要予測モデルは、3-4年程度の需要予測が可能であることが分かった。そのため、企業の経営戦略の立案には十分活用できるものの、実際に政策立案に適用するためには、予測可能な期間を長期化する必要がある。今後は、時系列解析、重回帰分析、機械学習等の手法を用いてモデルを改善することで予測期間を長期化する必要がある。
- **モデルの精度向上**
船腹量を構成している船齢も廃船量の変動に影響を与えている。しかし、現状では市況の影響・発注量の影響を用いて、廃船量を予測しており、船齢の影響を考慮していない。また、発注量予測モデルでもバラつきが大きく細かい変動まで予測ができていない。今後は、各モデルのバラつきを小さくするように、モデル定義手法、モデル定義に利用するデータの見直しが必要である。
- **不確実性を考慮した施策立案システムの構築**
本研究では船舶需要予測用 SD モデルを用いた市場の継続的なシナリオを策定するためのシステムを開発した。しかし、このシステムでは不確実性の影響を考慮しておらず、その影響により設計案が大きく変化する可能性がある。今後は、不確実性の影響を考慮出来るようにシステムを再構築する必要がある。

- **造船市場活性化に関する目的関数，制約条件の見直し**
本研究ではシミュレーション期間中の造船市場の利益最大化等を目的関数にして，最適な施策を立案した．しかし，実際は施策・政策の目的により，設定すべき目的関数・制約条件は大きく異なる．今後は施策・政策の目的を整理し，その目的に応じた目的関数・制約条件を設定する必要がある．
- **海運市場への影響を考慮した施策立案システムの構築**
海運市場と造船市場は相互に関係しているため，施策が双方の市場に与える影響を定量的に考慮する必要がある．今後は，本研究の SD モデルを拡張し，海運市場の予測モデルを構築する．そして，戦略・施策の立案問題を多目標最適化問題に拡張し，造船市場と海運市場の双方を考慮した戦略・施策の立案が可能か検討する必要がある．

7.3 今後の展望

今後の展望を以下に述べる．

- **船舶需要予測モデルにおける予測パラメータの自動的な同定**
モデル構築に多大な時間を要するという点がシステムダイナミクス of 欠点である．石原の研究（2015 年度 広島大学大学院での研究）では，船舶需要予測用 SD モデルにおける予測パラメータの自動的な同定について検討したものの，モデルの評価方法や結果の考察が不十分である．今後は，本研究の需要予測モデルが様々な分野で活用できるように，船舶需要予測モデルの一般化について研究する必要がある．
- **高度な船舶需要予測の実現**
近年，AIS(Automatic identification system)の発展，港湾情報や個船情報の充実により，船舶の位置情報やその仕様が詳細に獲得できるようになりつつある．それをを用いることで，海上荷動き量を正確に把握することが可能と考えられる．今後はこのような海上物流におけるビッグデータを利用し，需要が増加する航路とその船舶の仕様まで詳細に予測できるシステムを構築し，船社の船舶発注計画，造船会社の基本計画を支援することが必要である．

謝辞

本論文の完成にあたり，本研究に関して様々な助言，ご支援下さった多くの皆様に心より感謝申し上げます。特に，広島大学大学院 工学研究院教授 濱田 邦裕先生には研究当初からご指導を受け賜りました。先生のご助言，叱咤激励がなければ本論文は完成しなかったと思います。心から感謝申し上げます。

また，広島大学大学院 工学研究院助教 平田 法隆先生，広島大学名誉教授・小瀬邦治先生，東京大学名誉教授・小山健夫先生，関和隆氏，山田真慈氏をはじめとする常石造船の皆様には，研究遂行にあたり貴重なご意見とご援助を頂き，大変感謝しております。

そして，輸送・環境システム総合工学研究室の学生諸君には，議論を交える中で大いに刺激して頂き，非常に感謝しております。

最後に，本論文の作成するにあたり暖かく見守り，家庭を支えてくれた我が妻にも感謝いたします。

平成 29 年 冬
和田 祐次郎

図表一覧

第1章 緒言

Fig.1.1.1	世界地域別の船舶受注量の推移（造船工業会資料 2016 年）.....	2
Fig.1.1.2	世界地域別の船舶竣工量の推移（造船工業会資料 2016 年）.....	2
Fig.1.1.3	船価の推移（造船工業会資料 2016 年）.....	3
Fig.1.1.4	造船市場のサイクル（海事産業研究所 研究資料）.....	4

第2章 海運・造船市場の特徴と既往研究のレビュー

Fig.2.1.1	海運・造船市場の概要.....	8
Fig.2.2.1	既往研究の需要予測モデルの特徴(1).....	12
Fig.2.2.2	既往研究の需要予測モデルの特徴(2).....	13
Table 2.2.1	船舶の需要予測に関する既往研究.....	10

第3章 本研究の基本方針

Fig.3.4.1	ストック.....	21
Fig.3.4.2	フロー.....	21
Fig.3.4.3	補助変数.....	22
Fig.3.4.4	因果ループ図.....	22
Fig.3.4.5	世界モデル(成長の限界).....	23
Fig.3.4.6	SD モデル作成の流れ.....	25
Table 3.1.1	船舶需要予測モデルへの要求項目.....	18

第4章 モデル開発

Fig.4.1.1	世界の海上荷動き量（経済産業省資料）.....	28
Fig.4.1.2	世界 GDP の月別データへの変換.....	29
Fig.4.1.3	貨物輸送量の月別データへの変換.....	29

Fig.4.1.4	貨物輸送距離の月別データへの変換	30
Fig.4.1.5	本研究の船舶需要予測モデルの概要	32
Fig.4.2.1	貨物輸送量予測モデルの計算の流れ	33
Fig.4.2.2	世界 GDP と貨物輸送量の関係	33
Fig.4.2.3	貨物輸送距離の推移 (鉄鉱石, 石炭, 穀物)	34
Fig.4.3.1	発注量予測モデルの概要.....	35
Fig.4.3.2	発注量予測モデルの計算の流れ	35
Fig.4.3.3	船舶航海距離と発注量の関係.....	37
Fig.4.3.4	船価と発注量の関係	38
Fig.4.3.5	船価の連続減少値と発注量の補正值の関係.....	39
Fig.4.3.6	手持工事率と発注量の関係	39
Fig.4.3.7	手持工事率と発注量の補正值の関係	40
Fig.4.4.1	手持工事量と竣工量の関係	42
Fig.4.4.2	建造モデル	43
Fig.4.4.3	相関分析による建造期間, 能力拡張期間の特定	45
Fig.4.5.1	船価予測モデル (本研究の提案モデル)	47
Fig.4.5.2	船価予測モデル (長塚らの提案モデル)	47
Fig.4.6.1	廃船量と発注量の関係	48
Fig.4.6.2	廃船量の算出の流れ	49
Fig.4.6.3	船舶航海距離と廃船量の関係.....	49
Fig.4.6.4	発注量の連続増減値と廃船量の補正值の関係	51
Fig.4.6.5	発注量の連続増減値の時間遅れ	51
Fig.4.7.1	海上荷動き量と発注量の予測結果 (Sub-model での検証).....	53
Fig.4.7.2	竣工量, 船価, 廃船量の予測結果 (Sub-model での検証).....	53
Fig.4.7.3	発注量, 竣工量の予測結果 (全体 model での検証).....	54
Fig.4.7.4	船価, 廃船量, 船腹量の予測結果 (全体 model での検証).....	55
Fig.4.7.5	発注量, 竣工量の予測結果の相関分析.....	55
Fig.4.7.6	船価, 廃船量, 船腹量の予測結果の相関分析	56
Fig.4.7.7	発注量, 竣工量の予測結果 (実績値の移動平均を考慮).....	56
Fig.4.7.8	船価, 廃船量, 船腹量の予測結果 (実績値の移動平均を考慮).....	57
Fig.4.7.9	発注量予測モデルの比較.....	58
Fig.4.7.10	発注量の予測結果の比較.....	59
Fig.4.7.11	世界 GDP の入力値	61
Fig.4.7.12	貨物輸送距離の入力値.....	61
Fig.4.7.13	発注量の予測結果(1).....	62
Fig.4.7.14	発注量の予測結果(2) (2003 年, 2004 年).....	62

Fig.4.8.1	船舶サイズ別の需要予測の基本方針	64
Fig.4.8.2	発注量配分モデル	65
Fig.4.8.3	船舶サイズ別の建造モデル	67
Fig.4.8.4	建造期間, 能力拡張期間の特定 (船舶サイズ別)	67
Fig.4.8.5	船舶サイズ別の廃船モデル	68
Fig.4.8.6	発注量の連続増減値の時間遅れ (相関分析の結果)	69
Fig.4.8.7	発注量の連続増減値と廃船量の補正值の関係(船舶サイズ別)... ..	69
Fig.4.8.8	船舶サイズ別の発注量の予測結果	71
Fig.4.8.9	船舶サイズ別の竣工量の予測結果	71
Fig.4.8.10	船舶サイズ別の廃船量の予測結果	72
Fig.4.8.11	発注量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)	72
Fig.4.8.12	竣工量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)	73
Fig.4.8.13	廃船量の相関分析 (船舶サイズ別の検証)	73
Fig.4.9.1	将来シミュレーションの結果 (発注量, 船舶航海距離, 船価) ..	75
Fig.4.9.2	船舶サイズ別の将来シミュレーション結果	75
Table 4.1.1	本研究で利用するデータ	31
Table 4.7.1	Sub-model 検証用データ	52
Table 4.7.2	相関係数が最大となる実績値の移動平均期間	56
Table 4.7.3	パラメータの設定値と入力値	60
Table 4.8.1	船舶サイズ別の建造モデルの建造期間, 能力拡張期間	68
Table 4.8.2	発注量の連続増減値の時間遅れ	69
Table 4.8.3	発注量, 竣工量, 廃船量の相関分析結果	74

第5章 不確実性を考慮した船舶の需要予測

Fig.5.1.1	発注量予測モデルと建造モデルのバラつき	79
Fig.5.1.2	発注量・竣工量の予測結果	79
Fig.5.1.3	将来シナリオの設定困難性	80
Fig.5.3.1	本研究の不確実性の考慮方法	86
Fig.5.4.1	二項格子モデルの概要	87
Fig.5.4.2	二項格子モデルの適用結果	89
Fig.5.5.1	SD モデル内部の不確実性の考え方	91
Fig.5.5.2	貨物輸送量予測モデルの不確実性	93
Fig.5.5.3	貨物輸送量予測モデルの等分散性	94
Fig.5.5.4	発注量予測モデルの不確実性	95

Fig.5.5.5	発注量予測モデルの等分散性.....	96
Fig.5.5.6	Sub-model による検証 (発注量予測モデル).....	97
Fig.5.5.7	船価による発注量の補正の不確実性	98
Fig.5.5.8	等分散性の確認(船価による発注量の補正)	98
Fig.5.5.9	建造モデルの不確実性	99
Fig.5.5.10	通常期の等分散性.....	101
Fig.5.5.11	フル操業期の等分散性	101
Fig.5.5.12	能力拡張期の等分散性	102
Fig.5.5.13	船価予測モデルの不確実性	103
Fig.5.5.14	船価予測モデルの等分散性	104
Fig.5.5.15	廃船モデルの不確実性	104
Fig.5.5.16	廃船モデルの等分散性	106
Fig.5.5.17	等分散性の確認 (発注量による廃船量の補正)	107
Fig.5.6.1	発注量, 竣工量, 廃船量, 船腹量の予測結果.....	109
Fig.5.6.2	発注量の予測結果 (船舶サイズ別)	110
Fig.5.6.3	竣工量の予測結果 (船舶サイズ別)	111
Fig.5.6.4	廃船量の予測結果 (船舶サイズ別)	111
Fig.5.6.5	不確実性が発注量の予測結果に与える影響の分析.....	113
Fig.5.6.6	船舶航海距離の比較	115
Fig.5.6.7	海上荷動き量の予測結果.....	117
Fig.5.6.8	発注量の予測結果.....	118
Fig.5.6.9	世界 GDP の推移の比較 (2003 年)	119
Fig.5.6.10	貨物輸送距離の入力値.....	120
Fig.5.6.11	発注量の予測結果 (不確実性あり)	120
Fig.5.6.12	発注量の予測結果 (不確実性なし)	120
Fig.5.6.13	発注量のバラつき (2007 年 1 月時点)	121
Fig.5.6.14	将来シミュレーションの結果.....	122
Table 5.2.1	既往研究のレビュー	82
Table 5.4.1	二項格子モデルの入力パラメータ	89
Table 5.5.1	バラつきの選択方法	92
Table 5.5.2	貨物輸送量予測モデルの不確実性の解析結果	93
Table 5.5.3	発注量予測モデルの不確実性の解析結果(1)	95
Table 5.5.4	発注量予測モデルの不確実性の解析結果(2)	96
Table 5.5.5	不確実性の解析結果 (船価による発注量の補正)	98
Table 5.5.6	建造モデルの不確実性の解析結果(1)	100

Table 5.5.7	建造モデルの不確実性の解析結果(2)	100
Table 5.5.8	船価予測モデルの不確実性の解析結果(1).....	103
Table 5.5.9	船価予測モデルの不確実性の解析結果(2).....	103
Table 5.5.10	廃船モデルの不確実性の解析結果(1).....	105
Table 5.5.11	廃船モデルの不確実性の解析結果(2).....	105
Table 5.5.12	不確実性の解析結果 (発注量による廃船量の補正)	107
Table 5.6.1	実績値が中央値±1σに収まる確率 (全量).....	109
Table 5.6.2	不確実性の伝搬の分析.....	110
Table 5.6.3	実績値が中央値±1σに収まる確率 (船舶サイズ別).....	112
Table 5.6.4	SD モデル内部の不確実性の影響.....	114
Table 5.6.5	パラメータの設定値と入力値 (1999).....	115
Table 5.6.6	パラメータの設定値と入力値 (2003).....	116
Table 5.6.7	パラメータの設定値と入力値 (2004).....	116
Table 5.6.8	パラメータの設定値と入力値 (2005).....	116
Table 5.6.9	パラメータの設定値と入力値 (2003, 2004, 2005).....	119
Table 5.6.10	パラメータの設定値と入力値 (2012-2030).....	122

第6章 船舶需要予測用SDモデルの活用

Fig.6.1.1	国土交通省の船舶需要予測手法.....	126
Fig.6.2.1	原油タンカーの廃船量の推移	127
Fig.6.2.2	本研究の船価予測モデル	129
Fig.6.2.3	船価と発注量の関係.....	130
Fig.6.2.4	二段階最適化問題としてのモデル化.....	132
Fig.6.2.5	建造モデル (船舶の建造能力調整戦略を考慮する場合)	133
Fig.6.2.6	船舶の減速が船舶需要予測用SDモデルに与える影響	135
Fig.6.2.7	SA の最適解の探査イメージ.....	136
Fig.6.2.8	SA のアルゴリズム	137
Fig.6.3.1	船価の平均値の算出.....	141
Fig.6.3.2	設計案の表現 (建造能力調整戦略).....	142
Fig.6.3.3	近傍解の探査 (建造能力調整戦略).....	143
Fig.6.3.4	シミュレーション結果(1) (発注量).....	145
Fig.6.3.5	シミュレーション結果(1) (建造容量, 船価)	145
Fig.6.3.6	シミュレーション結果(1) (市場全体の利益)	145
Fig.6.3.7	シミュレーション結果(2) (発注量).....	147

Fig.6.3.8	シミュレーション結果(2) (建造容量, 船価)	147
Fig.6.3.9	シミュレーション結果(2) (市場全体の利益)	147
Fig.6.3.10	将来シミュレーションの結果 (発注量).....	149
Fig.6.3.11	将来シミュレーションの結果 (建造容量, 船価)	149
Fig.6.3.12	将来シミュレーションの結果 (市場全体の利益)	150
Fig.6.4.1	設計案の表現(1) (施策による造船市場の活性化戦略)	154
Fig.6.4.2	設計案の表現(2) (施策による造船市場の活性化戦略)	155
Fig.6.4.3	近傍解の探査 (施策による造船市場の活性化戦略).....	156
Fig.6.4.4	将来シミュレーションの結果 (発注量, 船価).....	158
Fig.6.4.5	将来シミュレーションの結果 (市場全体の利益)	158
Fig.6.4.6	獲得した設計案.....	158
Fig.6.5.1	船舶の発注量と海上運賃の推移と関係	160
Fig.6.5.2	海運市場への影響を考慮したモデル化.....	161
Table 6.2.1	IMO で採択された条約(一部)	128
Table 6.2.2	最適計画の立案に関する既往研究.....	131
Table 6.3.1	式の添え字 (建造能力調整戦略).....	139
Table 6.3.2	1ヶ月あたりの最大の建造能力拡張量	139
Table 6.3.3	コスト算出に用いる船舶の代表サイズ.....	141
Table 6.3.4	SA の最適化パラメータ	144
Table 6.3.5	建造能力の最適化結果(1) (過去シミュレーション).....	144
Table 6.3.6	建造能力の最適化結果(2) (過去シミュレーション).....	146
Table 6.3.7	建造能力の最適化結果 (将来シミュレーション)	149
Table 6.4.1	式の添え字 (施策による造船市場の活性化戦略)	153
Table 6.4.2	最適化結果 (施策による造船市場の活性化戦略)	157