

博士論文案_Rev01.pdf

WORD COUNT

29303

TIME SUBMITTED

07-DEC-2017 03:48PM

PAPER ID

33365852

博士論文

旅客船の総合安全性評価に関する研究

—FSA における一般化モデルの拡張²¹⁹と費用対効果の
観点からの要求区画指数 R の最適化—

(A study on Formal Safety Assessment of passenger ship
-expansion of generic model in FSA and optimization of re-
quired subdivision index ‘R’ from the viewpoint of
cost-effectiveness-)

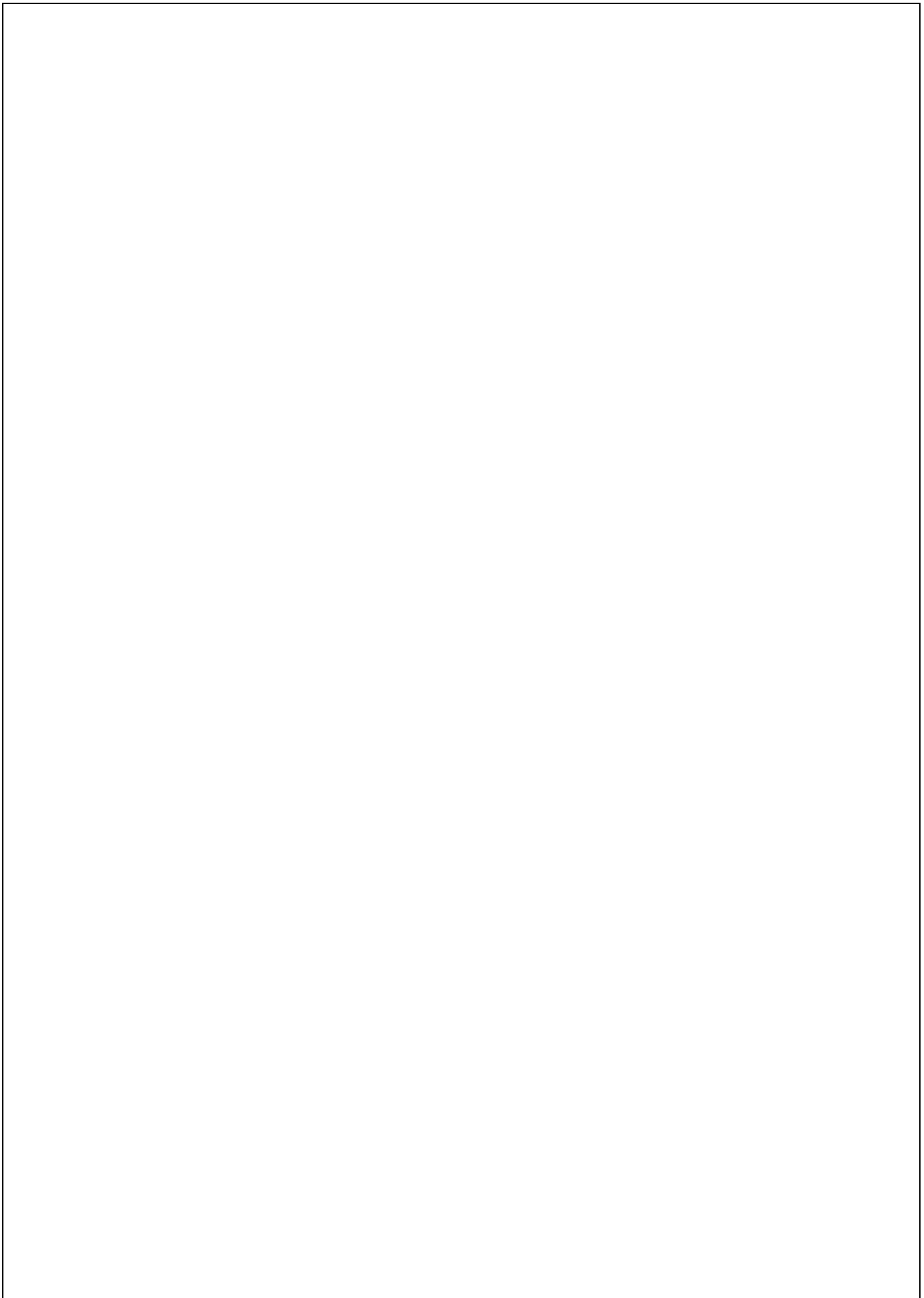
横浜国立大学大学院

工学府

柚井智洋

(Tomohiro YUZUI)

2017年12月



目次

目次	161	i
List of Figures		v
List of Tables		vii
第1章 序論		1
1.1 研究の背景と目的		1
1.2 研究の概要		4
第2章 船舶のリスク評価の方法		6
2.1 Formal Safety Assessment (FSA)の概要		6
2.1.1 ハザードの同定 (FSA Step 1)		7
2.1.2 リスク評価 (FSA Step 2)		8
2.1.3 リスク制御オプション (FSA Step 3)		8
2.1.4 費用対効果 (FSA Step 4)		8
2.1.5 意思決定のための勧告 (FSA Step 5)		9
2.2 リスクの定義		9
2.2.1 個人リスク		9
2.2.2 社会リスク		10
2.2.3 個人リスクと社会リスクの関係性		10
2.3 リスク定量化手法		11
2.3.1 Event Tree 解析を用いる方法		12
2.3.2 統計データに基づく方法		12
2.3.3 二種類の手法から求められるリスク間の関係		13
2.4 リスク評価法		13
2.4.1 個人リスクに対するリスク許容基準		13
2.4.2 社会リスクに対するリスク許容基準		14
2.5 GBS-SLA の概要		18
2.6 FSA の各 Step 及び GBS-SLA と本論文との関係		19
2.7 第2章のまとめ		20
第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価	160	21
3.1 背景と目的		21
3.2 対象船舶と対象海難		23

3.2.1	対象船舶	23
3.2.2	対象海難	24
3.3	リスク解析とリスク評価の方法	26
3.3.1	リスク解析方法	26
3.3.2	リスク評価方法	27
3.4	リスク解析結果	27
3.4.1	一般客船	27
3.4.2	RoPax 船	30
3.5	リスク評価結果	33
3.5.1	一般客船	33
3.5.2	RoPax 船	34
3.6	考察	35
3.6.1	F-N 線図の差の検定	36
3.6.2	リスク低減の優先度	37
3.6.3	F-N 線図が Intolerable にある理由	37
3.7	第 3 章のまとめ	38
第 4 章	旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価	40
4.1	目的と背景	40
4.2	要求区画指数(R-Index)とは	41
4.3	従来の FSA と本研究の違い（一般化モデル）	42
4.4	費用対効果評価の方法	44
4.4.1	リスク減少量の推定法	44
4.4.2	費用増加量の推定法	45
4.4.3	費用対効果の評価方法	47
4.5	費用対効果評価の結果	47
4.6	感度解析と不確かさ解析	49
4.6.1	初期事象の発生頻度が評価結果に与える影響	49
4.6.2	費用対効果が無いと判定される確率	50
4.7	第 4 章のまとめ	51
第 5 章	費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化	52
5.1	背景と目的	52
5.2	GBS-SLA における Tier I と Tier II の設定法	54

5.2.1	ALARP を利用する設定法	54
5.2.2	費用対効果評価を利用する設定法（費用と便益の絶対量の比較）	54
5.2.3	費用対効果評価を利用する設定法（費用と便益の現行規則からの変化量の比較）	55
5.3	最適化方法	55
5.3.1	概要	55
5.3.2	最適化手法	55
5.3.3	目的関数	56
5.3.4	制約条件	56
5.3.5	遺伝子設定	56
5.3.6	計算手順	57
5.4	最適化結果	58
5.4.1	一般客船	58
5.4.2	RoPax 船	59
5.5	考察	60
5.5.1	一般客船の最適化結果の比較	60
5.5.2	RoPax 船の最適化結果の比較	60
5.5.3	一般客船と RoPax 船の最適化結果の比較	61
5.5.4	今後の課題	61
5.6	第 5 章のまとめ	62
第 6 章	結論	63
	参考文献	65
	謝辞	69
付録 1	F-N 線図と PLL の信頼区間の求め方	70
A1.1	ポアソン分布と χ^2 分布の類似性とその信頼区間	70
A1.2	F-N 線図の信頼区間	71
A1.3	PLL の信頼区間	71
A1.4	PLL と F-N 線図の関係性	72
付録 2	費用対効果評価計算の詳細	73
A2.1	Event Tree 計算の詳細	73
A2.2	切断正規分布を利用している理由	73
A2.3	切断正規分布に従う乱数の発生法	74

A2.4	裾の長い分布の平均値と中央値.....	74
A2.5	費用対効果評価の閾値.....	75
付録 3	コスト関数.....	76
A3.1	大型船、中型船、小型船の定義.....	76
A3.2	コスト関数.....	78

List of Figures

74	Fig.2.1	Flow chart of the FSA methodology (IMO 2015)	7
	Fig.2.2	Relationship between IR and SR (PLL and F-N diagram)	11
	Fig.2.3	Risk acceptance criteria on F-N diagram for RoPax ships obtained by Norway's method, shown together with F-N curve for RoPax ships, data from 1989-1998. (Data source: LMIS) (Norway 2000)	15
	Fig.2.4	Hierarchic structure of GBS (IMO 2017a)	18
	Fig.2.5	Relation between FSA, GBS-SLA and this study	19
	Fig.3.1	Chronological changes of fleet of Passenger/Cruise ships (IHS Ships Database) ..	28
	Fig.3.2	Comparison of PLL of Passenger/Cruise ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.	29
	Fig.3.3	Comparison of F-N curves of all casualties of Passenger/Cruise ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.	30
	Fig.3.4	Chronological changes of fleet of RoPax ships (IHS Ships Database).	31
	Fig.3.5	Comparison of PLL of RoPax ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.	32
	Fig.3.6	Comparison of F-N curves of all casualties of RoPax ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.	33
	Fig.3.7	F-N curves of all casualties of Passenger/Cruise ships and the ALARP borders (Left: built before 1990, Right: built in or after 1990).	34
	Fig.3.8	F-N curves of all casualties of RoPax ships and the ALARP borders (Left: built before 1990, Right: built in or after 1990).	35
	Fig.3.9	t-value and 5% double sides of the difference between the F-N curve of ships built before 1990 and that of ships built in or after 1990 (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).	36
	Fig.3.10	World map of the fatal accidents of RoPax ships built before 1990 (Top: No. of the fatal accidents, Down: Total no. of the fatalities).	38
	Fig.4.1	R_{2009} and $R_{proposat}$ (柚井他 2016b)	42
	Fig.4.2	Histogram and CDF (Cumulative Distribution Function) of PoB (Left: Passenger/Cruise (T. Yuzui <i>et al.</i> 2016), Right: RoPax).	43
	Fig.4.3	Sketch of difference between previous FSA study and this study.	44
	Fig.4.4	Structure of ET	45
	Fig.4.5	Data of cost increase and the approximation (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).	46
	Fig.4.6	Flow chart of the calculation of $GCAF$	47

Fig.4.7	Histogram of random numbers following the truncated normal distribution with 90%CI (Confidence Interval) used for the collision frequency (Left: Passenger/Cruise (T. Yuzui <i>et al.</i> 2016), Right: RoPax).	48
Fig.4.8	Histogram of calculated <i>GCAF</i> (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).	49
Fig.5.1	R_{2009} and R_{MSC98} .	53
Fig.5.2	Flow chart of optimization calculation.	57
Fig.5.3	Optimized R (eqs. (5.9) and (5.10)) vs. R_{MSC98} .	58
Fig.5.4	Optimized R (eqs. (5.11) and (5.12)) vs. R_{MSC98} .	59
Fig.A2.1	Detail of ET and calculation of scenario PLL (T. Yuzui 2016).	73
Fig.A3.1	GRT or Loa v.s. Num. of PoB (built in or after 1990, $\geq 1,000$ GT, 1990-2012, IHS Ship Database) (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).	78
Fig.A3.2	Data of cost increase and the approximation of Passenger/Cruise ships (Top: Small, Bottom Left: Medium, Bottom Right: Large).	79
Fig.A3.3	Data of cost increase and the approximation of RoPax ships (Top: Small, Bottom Left: Medium, Bottom Right: Large).	80

List of Tables

Table 2. 1 An example of a risk matrix (IMO 2015).	8
Table 2. 2 Risk acceptance criteria for IR (IMO 2015).	13
Table 3. 1 Detail information of analyzed ships in this study.	24
Table 3. 2 Casualty codes and their definitions (by IHS).	25
Table 3. 3 Details of excluded data from IHS casualty database in this study.	25
Table 3. 4 Size of population (Passenger/Cruise ships) [ship×year].	28
Table 3. 5 Fatalities and PLL (Passenger/Cruise ships).	29
Table 3. 6 Size of population (RoPax ships) [ship×year].	31
Table 3. 7 Fatalities and PLL (RoPax ships).	32
Table 3. 8 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.	34
Table 3. 9 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.	34
Table 3. 10 Obtained parameters of RoPax ships built before 1990.	35
Table 3. 11 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.	35
Table 4. 1 Calculated <i>GCAF</i> [US\$/person].	49
Table 4. 2 Mean of collision frequency.	50
Table 4. 3 Calculated <i>GCAF</i> by using cost function obtained from medium and small size ships data [US\$/person].	50
Table 4. 4 Percentages that calculated <i>GCAF</i> is larger than CAF_{thr} [%].	51
Table 5. 1 Max. and Min. values of parameters in this optimization calculation.	57
Table 5. 2 Calculated <i>GCAF</i> of Passenger/Cruise ships based on eqs. (5.9) and (5.10) [US\$/person].	58
Table 5. 3 Calculated <i>GCAF</i> of RoPax ships based on eqs. (5.11) and (5.12) [US\$/person].	59
Table A3. 1 Num. of PoB of Cost increase data(EMSA 2015, R. Hamann <i>et al.</i> 2015, Papanikolaou A. <i>et al.</i> 2012, Papanikolaou A. <i>et al.</i> 2013).	76
Table A3. 2 Definitions of Small, Medium and Large ships in Cost increase data(EMSA 2015, R. Hamann <i>et al.</i> 2015, Papanikolaou A. <i>et al.</i> 2012, Papanikolaou A. <i>et al.</i> 2013).	77
Table A3. 3 Definitions of Small, Medium and Large ships in this study.	77

第1章 序論

24
ここでは、本研究の背景と目的を述べるとともに、本研究の概要を示す。

159 1.1 研究の背景と目的

1912年4月に発生したタイタニック号の事故以降、船舶の安全を確保するため、船舶の国際的な安全基準である SOLAS 条約 (International Convention for the Safety at Sea : 海上人命安全条約) が定められた。SOLAS 条約は、国際海事機関(International Maritime Organization, IMO)において、米国客船モロキャッスル号の火災事故、イタリア客船アンドレア・ドリア号の衝突転覆事故、カーフェリーのエストニア号の浸水転覆事故等の主に大事故に対応する形、すなわち reactive な形で、これまでに種々の改正がなされてきた。しかしながら、その過程は政治的な要素が強いため合理的とはいえず、設計の制約や不当な船価増加の一因になっているとの反省が関係各国の間に生じていた。

このような背景から IMO の第 62 回海上安全委員会(Maritime Safety Committee 62nd session, MSC 62)に英国から総合安全性評価(Formal Safety Assessment, FSA)が提案された(UK 1993)。FSA とは、安全基準の審議にリスク評価を織り込み、従来のような大事故が生じてから対応する reactive な対応ではなく、大事故が生じる前から対応する proactive な対応を可能とする基準審議の手続きである。FSA は、主に「リスク評価」と「費用対効果評価」から構成され、船舶の安全性向上と社会的(経済的)負担のバランスを両立させる合理的な基準を策定することを目的としている。IMO において議論と試験的な適用が積み重ねられ、その方法と手続きを定めた FSA ガイドラインが策定された(IMO 2015)。しかしながら、FSA ガイドラインは、その方法と手続きを抽象的に記述したものに過ぎず、リスクの解析法、評価法及び費用対効果評価の方法等に幾つか課題が残っている。

FSA の課題としては例えば、以下が考えられる。

① 対象とする船舶の現行リスクレベルを適切に推定する方法

リスクを船舶事故データ等の統計データから推定する場合、対象期間をどのよう
157
に設定するかとの課題がある。船舶のリスクは適用される安全基準により異なると考えられ、安全基準の適用対象船舶は建造年を基に決められることが多い

第1章 序論

め、船舶のリスクは建造年により異なると考えられる。したがって、FSA で現状船舶のリスク評価を実施する際には、対象とする安全基準を満たしている船舶のリスクを適切に評価するために建造年を考慮してリスク評価を実施する必要があると考えられる。しかしながら、これまでにこの観点から船舶のリスクを統計データから求めた例は存在しない。

② リスク許容基準

FSA ガイドラインには個人リスクのリスク許容基準の値と社会リスクの表現手法の一つである F-N 線図のリスク許容基準の設定法の例が示されており、過去に実施された種々の FSA study においてもそれらが de facto standard として使用されている。しかし、個人リスクのリスク許容基準と F-N 線図上のリスク許容基準は本来であれば同値であるはずが、FSA ガイドラインで参照されている設定法から求められる F-N 線図上のリスク許容基準は個人リスクのリスク許容基準と同値にならないという問題点があった。F. Kaneko *et al.* (2015a)は、この問題点を解消する F-N 線図上のリスク許容基準の設定法を開発したが、その設定法によってリスク評価が実施された例はこれまでに無い。

③ 一般化モデル

FSA は一般化モデルと呼ばれる抽象化された個船に対して実施される。しかしながら、船毎に船体構造や運航条件等が異なるためリスクや費用も異なり、FSA の費用対効果評価指標の一つである GCAF (Gross Cost of Averting a Fatality)も船毎に異なると考えられる。基準変更は FSA が実施された個船に対してではなく、対象とする船舶のフリート全体に影響するため、個船に対する現状の FSA では規制評価として不十分であると考えられる。

IMO では、FSA が導入されて暫くして 2003 年及び 2004 年に目標指向型基準(Goal-Based Standard, GBS)が提案された(Bahama and Greece 2003、IACS 2003、Bahama, Greece and IACS 2004)。GBS とは達成すべき目標を定め、その目標を達成するために必要な規則や基準を構築する IMO における安全基準体系である。GBS は次の 5 階層から構成される。すなわち、Tier I : 目標、Tier II : Tier I を達成するための機能要件、Tier III : 船級規則が Tier II を満足しているかどうかの検証、Tier IV : 船級規則、Tier V : 業界標準である。GBS には、Prescriptive approach による GBS (仕様の GBS) と Safety level approach による GBS-SLA の二種類がある。IMO においてまず前者について審議が進められ、SOLAS 条約附属書第 II-1 章第 3-10 規則「ばら積み船舶及び油タ

第1章 序論

1
ンカーの建造に係る「目標指向型新造船基準」が策定された。後者については現在、IMOにおいて議論されており、その暫定指針の開発が進められている(IMO 2017a)。仕様のGBSはとりあえず、ばら積み船舶と油タンカーの船体構造関連の規則を対象に、仕様記述的な方法でTier I~Tier IIIを定めることを目的に審議が進められた。一方、GBS-SLAは船種を問わず、基本的に「リスク」を使用し、構造関連だけでなくその他の規則についても、ある要件が確保すべき安全レベルを定量的に設定すること¹²²を目的としている。しかしながら、GBS-SLAの具体的な規則開発事例は存在せず、研究レベルでも構造関連規則についてGBS-SLAに関する研究が数例ある程度である。したがって、構造関連規則以外に関するGBS-SLAについての研究が望まれていると考えられる。

ところで、最近のIMOでは、2012年に発生したコスタ・コンコルディア号の座礁事故を受けて、旅客船の安全を促進するための長期戦略計画が立てられた。同計画に基づいて様々な安全対策について検討が進められ、その一つとして旅客船の損傷時復原性基準(SOLAS条約附属書第II-1章第6規則：要求区画指数R)の見直しが行われた。このR見直しのための審議において、欧州や日本等の数カ国・団体から複数のRの計算式案が提案された。このうち欧州や日本の提案はFSAに基づき提案された(Austria *et al.* 2015, Japan 2015)。これらのRの計算式案についてIMOにおいて審議が進められ、最終的にはこれまでに提案された計算式案ではなく、各国により調整された新しい計算式案(China *et al.* 2017)が満場一致で合意された(IMO 2017b)。

99
本研究では、上記のような背景から、FSAの課題の幾つかを解決する方法の提案、GBS-SLAの構造規則以外への適用を目的に、その適用対象として旅客船の要求区画指数Rを取り上げ、FSAやGBS-SLAの方法論の深化と提案する方法を用いた旅客船の要求区画指数Rに関するFSAやGBS-SLAのために次の課題を実施する。

1) 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

11
対象とする船舶の現行のリスクを適切に推定するために建造年を基に統計データを使用し、リスクを推定する。また、F. Kaneko *et al.* (2015a)によって開発されたF-N線図上のリスク許容基準の設定法から求められるリスク許容基準によってリスク評価を実施する。

2) 旅客船の要求区画指数R見直しに関する費用対効果評価

第 1 章 序論

FSA における一般化モデルを拡張し、旅客船のフリート全体の定員数毎の船舶数の分布を求め、その分布に従う乱数を発生させてモンテカルロ法により GCAF の確率分布を求める方法を提案する。この方法を用いて、旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価を実施する。

3) 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

GBS-SLA の構造分野以外への適用を目的に、GBS-SLA の Tier I をフリート全体の費用対効果の最大化として、Tier II として Tier I を満たす要求区画指数 R の式を算出する。つまり、費用対効果の観点から旅客船の要求区画指数 R の最適化を実施する。

1.2 研究の概要

本論文は 6 章からなり、第 1 章では、研究の背景と目的及び本研究の概要について述べている。

第 2 章では、船舶のリスク評価の方法として、FSA や GBS-SLA の概要について述べるとともに、リスクの定量化手法とリスク評価手法について詳しく述べる。また、FSA や GBS-SLA の課題を述べるとともに、FSA の各 Step 及び GBS-SLA と本論文の各章との関係について述べる。

第 3 章では、船舶のリスク評価でよく用いられる IHS Markit 社（旧 IHS Fairplay 社）の船舶要目及び海難データ（旧ロイド統計、これ以降 IHS データと呼ぶ）を用いて、統計データに基づくリスク解析と評価を、1990 年より前に建造された船舶と 1990 年以降に建造された船舶に分けて実施する。リスク評価は、F. Kaneko *et al.* (2015a) で開発された F-N 線図上のリスク許容基準の設定法から求められるリスク許容基準によって行う。その結果、旅客船の安全性は向上しているが、その人命損失リスクは ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 領域にあり、リスクを低減させる必要があることを示す。

第 4 章では、リスク低減策として要求区画指数 R の見直しを取り上げ、旅客船の要求区画指数 R を現行基準から新しい式に変更した場合の費用対効果評価を、FSA における費用対効果評価指標である GCAF を求めることにより実施する。ここでは、FSA における一般化モデルの考え方を拡張し、フリート全体に対する GCAF の確率

第 1 章 序論

分布を求めるといふ従来の FSA の⁹⁰費用対効果評価手法を深化させた⁷¹手法を提案し、その手法により費用対効果評価を実施する。

第 5 章では、4 章で提案・実施した費用対効果手法を利用し、GBS-SLA の Tier I をフリート全体の費用対効果の最大化として、Tier II として Tier I を満たす要求区画指数 R の式を算出する。つまり、費用対効果の観点からの要求区画指数 R の最適化を実施し、フリート全体の³⁴費用対効果を最大とする要求区画指数 R の式を算出する。

第 6 章では、以上の研究結果を総括として結論を述べる。

第2章 船舶のリスク評価の方法

1.1 節で述べた通り、リスク評価を応用した、FSA と呼ばれる規則制定手法や GBS-SLA と呼ばれる安全基準体系が IMO において策定されている。本章では、FSA の手順や評価手法等の詳細や GBS-SLA の概要について説明するとともに、FSA の各 Step 及び GBS-SLA と本研究との関係について述べる。

なお、工学的なリスクの定義は、「事故の発生頻度」と「事故時の影響度」の積であり、「事故時の影響度」として考慮される主要なものは、人命損失、環境影響、財産の喪失であるが、本論文では、「事故時の影響度」として人命損失のみを対象としているため、特に断りの無い限り、リスクとは人命損失リスクを指すこととする。

2.1 Formal Safety Assessment (FSA)の概要

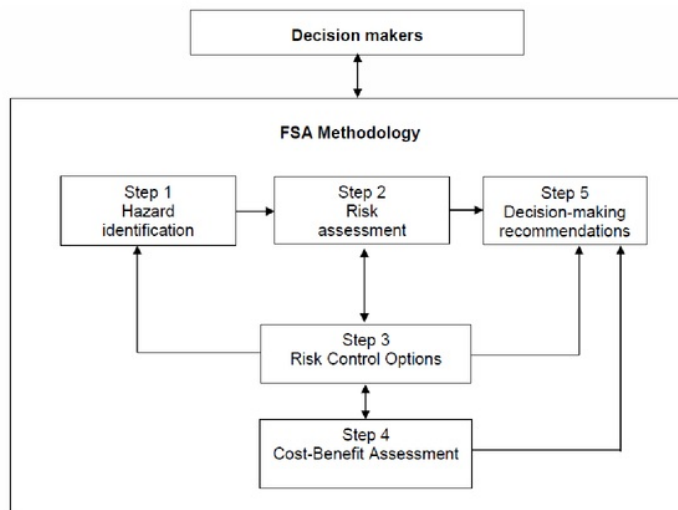
FSA とは、主に「リスク評価」と「費用対効果評価」を実施して、船舶の安全性向上と社会的（経済的）負担のバランスを両立させる合理的な基準を策定するための IMO における規則制定手法である。

最初に IMO の MSC 62 に英国から FSA の提案がなされ(UK 1993)、その後、議論と試験的な適用が積み重ねられ、FSA の方法と手続きを定めた FSA ガイドラインが第 74 回海上安全委員会(MSC 74)において承認された。その後、種々の安全基準の改正が FSA に基づき提案され、IMO において審議されている。

また、FSA は元来、安全基準の検討のためのガイドラインとして策定された（以降、安全 FSA と呼ぶ）が、近年では、その適用範囲を環境基準にも広げ、その第一ステップとして油流出に対する検討がなされた。IMO において審議が重ねられ、油流出に対する項目を取り込んだ FSA ガイドライン（以降、環境 FSA と呼ぶ）が第 91 回海上安全委員会(MSC 91)及び第 65 回海洋環境保護委員会(Marine Environment Protection Committee 65th session, MEPC 65)において承認された。

安全 FSA、環境 FSA とともに、その手順は同じであり、Fig.2.1 に示すフローチャートの通りである。

第2章 船舶のリスク評価の方法



74
Fig.2.1 Flow chart of the FSA methodology (IMO 2015)

217
本論文では安全 FSA を利用しているため、本節では、Fig.2.1 に示したフローチャートに従い、金湖他（2008）を参考に、安全 FSA の概要を述べる。なお、Step 2 のリスク評価については、2.2 節以降で詳しく述べる。また、本節の最後で FSA の各 Step と本論文の関連を述べる。

2.1.1 ハザードの同定 (FSA Step 1)

Step 1 では、人命損失を生じさせる可能性のある種々の危険性（ハザード）を特定する。そのために種々の分野の専門家の意見を組織的に汲み上げる方法を主体とした創造的な手法と、種々の海難データ、事故の記述等の分析を主体とする分析的な方法が用いられる。創造的な方法はこれまでに実績のない分野の proactive な評価を確実に行うために重要であり、分析的な方法はこれまでの実績を正しく考慮に入れるために重要である。

1
さらにハザード発生から被害の発生に至る粗い事故シナリオを作成し、その発生頻度や被害の大きさの粗い定量化を実施する。その数値を基に、Table 2.1 に示されるようなリスクマトリクスを用いて、ハザード発生時のリスクの定量化を行う。これによりリスクの大きいハザードとその事故シナリオの絞り込みを行う。

第2章 船舶のリスク評価の方法

Table 2.1 An example of a risk matrix (IMO 2015).

FREQUENCY (FI)		Risk Index (RI)			
		SEVERITY (SI)			
		1	2	3	4
		Minor	Significant	Severe	Catastrophic
7	Frequent	8	9	10	11
6		7	8	9	10
5	Reasonably probable	6	7	8	9
4		5	6	7	8
3	Remote	4	5	6	7
2		3	4	5	6
1	Extremely remote	2	3	4	5

2.1.2 リスク評価 (FSA Step 2)

Step 2 では、Step 1 で特定されたハザードにおける事故シナリオの詳細なリスク解析を行う。すなわち、2.3 節で述べる方法により対象船舶の総リスクの定量化を行う。

求めた総リスクを 2.4 節で述べるリスク許容基準と比較し、対象船舶の現状のリスクが i) Negligible、ii) ALARP (As Low As Reasonably Practicable)、iii) Intolerable、のどれに当てはまるかを確認する。リスクが iii) Intolerable である場合には、リスク低減策の導入が緊急に必要となる。ii) ALARP である場合には、費用対効果が良ければ何らかのリスク低減策の導入をすることとなる。したがって、対象船舶の現状のリスクが ALARP か Intolerable であると評価された場合には Step 3 以降を検討することになる。

2.1.3 リスク制御オプション (FSA Step 3)

Step 3 では、事故の発生を抑制する対策や被害拡大を抑制する対策を考案する。FSA では、個別の対策のことをリスク制御手段(Risk Control Measure, RCM)、それらが複数集まり 1 つのまとまった対策として導入される RCM の集合をリスク制御オプション(Risk Control Options, RCOs)と呼んでいる。

2.1.4 費用対効果 (FSA Step 4)

Step 3 で考案された種々の RCO を導入した場合のリスク減少量と費用増加量を推定する。次に下記の指標値を求める。

$$GCAF = \frac{\Delta Cost}{\Delta PLL} \quad (2.1)$$

$$NCAF = \frac{\Delta Cost - \Delta Benefit}{\Delta PLL} \quad (2.2)$$

第2章 船舶のリスク評価の方法

ここで、 Δ PLL : RCO の導入により削減されるリスク [fatalities/ship]、 Δ Cost : RCO の導入による追加コスト (RCO の価格、訓練費用、逸失利益等) [US\$/ship]、 Δ Benefit : RCO の導入による経済的利益 [US\$/ship] である。

GCAF とは、Gross Cost of Averting a Fatality のことであり、1 人の人命損失を回避するための費用を意味する。また、NCAF とは、Net Cost of Averting a Fatality のことであり、分母は GCAF と同じであるが、分子は Δ Cost から Δ Benefit を引いた値であり、RCO 導入により利益が得られる場合の正味のコストを意味する。

これらの指標の値が閾値以下であれば、その RCO は費用対効果が有ると判定される。そのため、この閾値が重要となる。FSA ガイドラインでは、ノルウェーが提出した文書(Norway 2000)に言及し、OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development : 経済協力開発機構) 加盟国の当時の GCAF の値から、死亡及び傷害・疾病の場合の閾値として 300 万 [US\$/person] を提案している。ただし、FSA ガイドラインでは、この閾値は単なる例示に過ぎず、実際の FSA study では、根拠を示した上で適切な値を用いるべきであると記されている。そのため、最近実施された FSA では、400 万 [US\$/person] (EC 2015)、624 万 [US\$/person] (Norway 2013)、745 万 [US\$/person] (GOALDS 2012)、800 万 [US\$/person] (EC 2015) と 300 万 [US\$/person] より大きな値が利用される傾向にある。

2.1.5 意思決定のための勧告 (FSA Step 5)

Step 4 の結果から「費用対効果有り」と判定された RCO を、安全基準として導入すべき RCO として IMO に提案する。

2.2 リスクの定義

リスクの表現手法としては、個人リスクと社会リスクの2つがある。ここでは、それらについて説明するとともに、それらの関係性を示す。

2.2.1 個人リスク

個人リスク (Individual Risk, IR) とは、個人が交通機関を利用している、工場で作業している等の考慮対象の危険に暴露されている期間中にその個人にどれほど被害があるか、すなわち死傷の頻度はどれ位かを示す指標である。IR の表現として、評価対象の年間の死者数 [1/年]、あるいは、対象となる集団においてある状況 (就労等) が

第2章 船舶のリスク評価の方法

継続したと仮定した場合の一定時間当たりの死者数(FAR: Fatal Accident Rate)を使用する人が多い(日本海事協会 2009)。後者には1億時間当たりの死者数が使用され、年間死者数と1年当たりの状況の継続時間(年間労働時間等)から推定して求められる(日本海事協会 2009)。FSAでは、一般的に前者が用いられ、個人や場所に依存する指標である(IMO 2015)。IRは交通モード間、あるいは、労働災害とのリスク比較に有用である(日本海事協会 2009)。

2.2.2 社会リスク

社会リスク(Societal Risk, SR)とは、あるグループの¹人間が考慮対象の危険に暴露されている期間中にそのグループにどれほど被害があるか、すなわち死傷の頻度はどれ位か¹を示す指標である(日本海事協会 2009)。人間のグループとして、ある種類の交通機関に乗っている人々、ある工場に勤めている人々等がある(日本海事協会 2009)。SRはIRとは異なり、個人や場所に依存しない(IMO 2015)。

²²船舶においては、船舶単位に安全対策を実施していく必要があることから、船舶間の比較を行う上では、船舶単位のリスクを評価できるSRの分析は重要である(日本海事協会 2009)。

社会リスクの表現手法としては、Potential Loss of Life (PLL)とF-N線図(Frequency vs. Number of fatalities diagram)の2種類がある。以下で、それらについて説明する。

2.2.2.1 Potential Loss of Life (PLL)

SRの簡単な表現法であり、¹²船舶の場合は1隻1年当たりの死者数の期待値として表現される。

2.2.2.2 F-N線図 (Frequency vs. Number of fatalities diagram)

SRに関しては、PLLの値が同じであっても、¹1回で多数の死者を出す事故ほど社会は許容し難くなる(日本海事協会 2009)。この観点を反映したものがF-N線図である。¹²⁰F-N線図は、横軸に人命損失数、縦軸に人命損失数の超過頻度を取った図であり、人命損失数の超過頻度図である。

2.2.3 個人リスクと社会リスクの関係性

個人リスクIRと社会リスクの表現手法の1つであるPLL¹¹⁹との間には、(2.3)式の関係がある。

第2章 船舶のリスク評価の方法

$$PLL = \sum_{j=1}^P (N_j \cdot IR_j) \quad (2.3)$$

ここで、 IR_j ：場所 j における個人リスク(IR)、 N_j ：場所 j に存在する人間の数、 P ：社会リスクの対象となる場所の数である。

厳密に言えば、船内の場所（例：機関室、居室、船橋等）により IR は異なると考えられるが、船内に存在する人間を対象とした船舶のリスク評価において、この違いが考慮された事例は著者の知る限り存在しない。また、船舶周辺への被害（例えば、港湾で LNG 船が爆発した際の周辺住民への被害）を考慮した例も存在しない。つまり、船舶のリスク評価の場合、 $P=1$ であることが一般的であり、この場合、PLL は IR に船舶の乗船者数を掛けた値となる。

また、PLL と F-N 線図の間には、付録 1 に示す通り、F-N 線図の各死者数での超過頻度の総和が PLL であるという関係がある。

したがって、船舶のリスク評価の場合、IR と PLL と F-N 線図の間には 118 Fig.2.2 に示すような関係性がある。

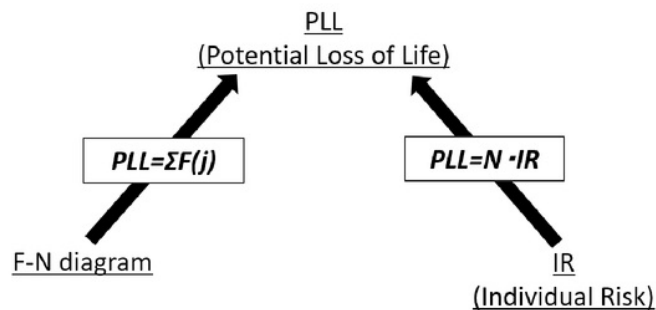


Fig.2.2 Relationship between IR and SR (PLL and F-N diagram)

2.3 リスク定量化手法

リスクを定量化する方法としては、2 つある。一つは統計データに基づく方法であり、もう一つは Event Tree (ET) や Fault Tree (FT) 及び Bayesian Network (BN) 等のリスクモデルを用いる方法である。本論文の第 3 章では統計データに基づく方法によりリスクを定量化しており、第 4 章と第 5 章ではリスクモデルを用いてリスクの定量化を実施している。なお、上に挙げたリスクモデルのうち、ET を利用してリスクの定量化を行っている。

第2章 船舶のリスク評価の方法

原子力発電所や化学プラント等の船舶以外の分野³⁸におけるリスク評価では、リスク²³⁹モデルを用いる方法²¹⁵によりリスクを定量化することが一般的である。これは、そのようなシステムでは人命損失を伴う事故が殆ど発生しておらず、統計データに基づく方法¹⁵では信頼性の高いリスク値を得ることが困難なためであると考えられる。一方、船舶分野におけるリスク評価では、人命損失を伴う事故が原子力発電や化学プラント等と比較すると多く発生しており、統計データに基づく方法によって信頼性の高いリスク値¹³を得ることが可能である。

本節では、これらのリスクの定量化の方法の概要を述べる。

2.3.1 Event Tree 解析を用いる方法

ET 解析手法は、事故シナリオ毎にリスクを定量化する手法であり、まず初期事象（例えば、衝突や座礁等）から事象を分岐させ、最終結果（本研究では、人命損失）をもたらすシナリオを構築する。次に、初期事象やそれに続く事象の分岐確率及び最終結果（人命損失の場合は死者数）を事故データの解析や専門家判断等により設定する。そして、シナリオ毎にそれらを掛けることにより、シナリオ毎の PLL を求める。最後にシナリオ毎の PLL³⁶の総和を求めることにより、対象海難（初期事象）の PLL を求める。これを対象船舶の全ての海難について行い、海難毎の PLL を求め、それらの総和³⁶を取ることにより、対象船舶のトータルリスクを求める。

なお、非常に微小なリスクが算出されるシナリオについては、考慮しないことが多い。

2.3.2 統計データに基づく方法

リスク(PLL)は一般的に事故発生頻度¹ F と事故の被害の大きさ S （被害度が人命損失の場合は死者数）の積で表される。ここで F と S は、 n を対象期間中の事故数、 M を対象期間中の Exposure、 k を対象期間中の人命損失数とすると、(2.4)式と(2.5)式¹⁵から求められる。したがって、リスク(PLL)は、(2.6)式の通り、対象期間中の人命損失数を対象期間中の Exposure で除した値として求められる。

$$F = \frac{n}{M} \quad (2.4)$$

$$S = \frac{k}{n} \quad (2.5)$$

第2章 船舶のリスク評価の方法

$$PLL = F \cdot S = \frac{k}{M} \quad (2.6)$$

対象期間中の人命損失数と対象期間中の Exposure は、統計データから求めることが可能なため、統計データに基づきリスクを定量化することができる。

2.3.3 二種類の手法から求められるリスク間の関係

統計データに基づく方法により求められるリスクを $Risk_{Statistics}$ と ET 解析を用いる方法により求められるリスクを $Risk_{ET}$ とすると、これらには(2.7)式のような関係があると考えられる。ET 解析では、実際には未だ発生していないが発生の可能性が考えられる事故シナリオも考慮できるため、 $Risk_{ET}$ は $Risk_{Statistics}$ より大きな値となると考えられる。ただし、十分な統計データが無い場合には、 $Risk_{Statistics}$ の方が大きな値となる場合もあり得る。

$$Risk_{ET} \geq Risk_{Statistics} \quad (2.7)$$

2.4 リスク評価法

リスク評価とは、2.3 節で示した方法により定量化されたリスクをリスク許容基準と比較し、そのリスクの許容性を検討することである。ここでは、個人リスクに対するリスク許容基準と社会リスクに対するリスク許容基準を示す。

2.4.1 個人リスクに対するリスク許容基準

FSA では、英国の安全衛生庁(Health and Safety Executive, HSE)による文献(HSE 2001)に基づき、Table 2.2 に示す ALARP 領域の上限と下限を示している。ただし、FSA ガイドラインでは、これは単なる例示に過ぎず、それぞれの FSA study において、理由を示した上で適切な値を用いるように記されている。

Table 2.2 Risk acceptance criteria for IR (IMO 2015).

	Lower bound for ALARP region [1/year]	Upper bound for ALARP region [1/year]
To crew member	10^{-6}	10^{-3}
To passenger	10^{-6}	10^{-4}
To third parties, member of public ashore	10^{-6}	10^{-4}
Target values for new ships	10^{-6}	Above values to be reduced by one order of magnitude

第2章 船舶のリスク評価の方法

2.4.2 社会リスクに対するリスク許容基準

前述したように社会リスクの表現法は、PLL と F-N 線図の 2 種類あるが、FSA において、社会リスクの許容基準は F-N 線図に対するものしか存在しない。ここでは、FSA ⁸⁹ ガイドラインで利用が推奨されている経済性を考慮した F-N 線図に対するリスク許容基準の設定法と、F. Kaneko *et al.* (2015a)によって開発された F-N 線図に対するリスク許容基準の設定法について示す。

2.4.2.1 経済性を考慮した F-N 線図に対するリスク許容基準

ノルウェーが IMO に提案した方法(Norway 2000)である。ここでは、文献（日本船舶技術研究協会 2012）を参考にその概要を示す。

まず、ALARP 領域の上下限の線を、平均の F-N 曲線（理想的 F-N 曲線）から 1 桁ずつ上下する線としている。つまり、理想的 F-N 曲線を求めれば、ALARP 領域の上下限の線を求められる。以下では、理想的 F-N 曲線の求め方を述べる。

前提条件として、次の二つを置いている。

- ① リスクの総量は対象の経済規模に比例する。
- ② 大規模な事故のリスクは小規模な事故のリスクより小さくなければならない。

前提条件①は、経済規模の大きな産業ほど大きなリスクを許容しているとの仮定を示している。対象船舶の経済価値と許容 PLL をそれぞれ、 $EV[\text{US}\$/(\text{ship}\times\text{year})]$ 、 $PLL_A[\text{fatalities}/(\text{ship}\times\text{year})]$ とすると、前提条件①は(2.8)式として表現できる。

$$PLL_A = \frac{NOF}{GNP} \cdot EV \quad (2.8)$$

ここで、NOF: Number of occupational fatalities (for crew) or number of fatalities due to transportation (for passengers) [fatalities/year]、GNP: Gross National Product (for crew) or Contribution to GNP from transportation (for passengers) [US\$/year]である。

次に前提条件②より、死者数が 10 倍になると、それ以上の死者数を発生する事故の頻度は 10^{-b} 以下で無いと許容されない、つまり、F-N 曲線の傾きを $-b$ と仮定し、(2.9)式が導かれる。

$$F(i) = F(1)i^{-b} \quad (2.9)$$

PLL は、F-N 曲線の各死者数 i での超過頻度 $F(i)$ の総和と等しいので、(2.9)式を利用して、(2.10)式が導かれる。

第 2 章 船舶のリスク評価の方法

$$PLL_A = \sum_{i=1}^{N_u} (i) = F(1) \sum_{i=1}^{N_u} i^{-b}$$

$$\therefore F(1) = \frac{PLL_A}{\sum_{i=1}^{N_u} i^{-b}} \tag{2.10}$$

ここで、 N_u は死者数の最大値である。

これを(2.9)式に代入すると、

$$F(i) = \frac{PLL_A}{\sum_{i=1}^{N_u} i^{-b}} i^{-b} \tag{2.11}$$

以上から、対象船種の理想的 F-N 曲線を求めるには、NOF、GNP、EV 及び N_u が必要となる。

文献 (Norway 2000) にある RoPax 船の理想的 F-N 曲線について下記に示す。

(2.8)式の NOF/GNP は、定期航空機輸送産業のデータ (ICAO(International Civil Aviation Organization)の統計)を用いて、 $NOF/GNP=8.6 \times 10^{-9}$ [fatalities/£]が得られている。チケット収入より $EV=1.6 \times 10^7$ [US\$/year]とすると、 $PLL_A=0.138$ が得られる。

死者数の最大値 N_u は、乗客の数 1,900 人とし、 $b=1$ とした場合、理想的 F-N 曲線として、(2.12)式が得られる。これから 1 桁ずつ上下する線として ALARP 領域の上下限線を図示すると、Fig.2.3 となる。

$$F(i) = \frac{0.138}{\sum_{i=1}^{1900} i^{-1}} i^{-1} \tag{2.12}$$

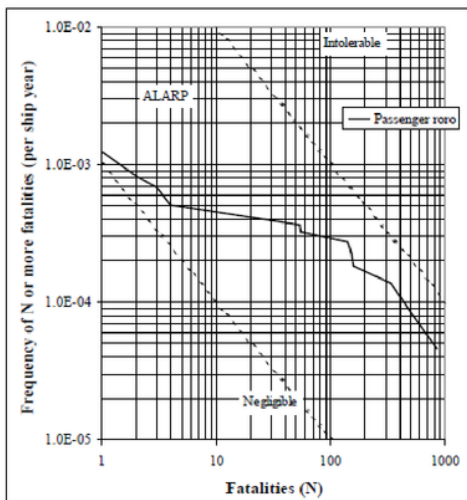


Fig.2.3 Risk acceptance criteria on F-N diagram for RoPax ships obtained by Norway's method, shown together with F-N curve for RoPax ships, data from 1989-1998. (Data source: LMIS) (Norway 2000)

第2章 船舶のリスク評価の方法

2.5.2.2 IRのリスク許容基準を考慮したF-N線図に対するリスク許容基準

IRのALARP領域の上下限とF-N線図上のそれらが一致するようにF-N線図上のALARP領域の上下限を設定する方法(F. Kaneko *et al.* 2015a)である。文献(柚井他2016a)を参考にその概要を示す。

FSAガイドラインでは、上述した対象船舶の経済性を考慮した設定法が参考文献として挙げられており、この設定法が過去の種々のFSAにおいてde facto standardとして使われている。前述したようにIRとF-N線図には関連があるため、それらのリスク許容基準は本来であれば同値である。しかし、この経済性を考慮した設定法により求められるF-N線図上のリスク許容基準はIRのリスク許容基準と同値ではないという問題点があることをF. Kaneko *et al.* (2015a)が指摘している。F. Kaneko *et al.* (2015a)は、事故データから求められるF-N線図の近似関数を開発し、その関数を利用して、F-N線図上のALARP上下限とIRのそれらとを一致させるF-N線図上のALARP上下限の設定法として2種類の設定法を提案している。ここでは、より簡易な方法であるType 1の方法について述べる。

Type 1の方法は、F-N線図とALARP上限線との差(許容率)を横軸(Number of fatality)のどの部分でも同じにする設定法である。以下にこの設定法について簡単に説明する。詳細についてはF. Kaneko *et al.* (2015a)を参照されたい。

2.2.3節で述べたようにPLLはIRと乗船者数との積により求められる。したがって、IRのALARP上限値 $IR_{ALARP-U}$ に乗船者数 N_{obd} (passengerとcrewの合計)を掛けることによりPLLのALARP上限値が求められる。また2.2.3節で述べたようにPLLは、F-N線図の各死者数での超過頻度の総和からも求められる。したがって、近似関数によるF-N線図の各死者数での超過頻度($FN_{apprx}(n)$)の総和からPLLが求められる。これらの比は、F-N線図とALARP上限線との許容率になり、これに $FN_{apprx}(n)$ を掛けると、F-N線図とALARP上限線との差(許容率)が横軸(Number of fatality)のどの部分でも同じになるようなF-N線図のALARP上限線 $FN_{ALARP-U}$ が求められ、F-N線図と個人リスクのALARP上限とが一致する。この比が1より大きい場合、 $FN_{apprx}(n)$ はALARP領域内にあり、1より小さい場合、 $FN_{apprx}(n)$ はIntolerableの領域にあることになる。これを式で表すと、(2.13)式のようなになる。ここで、 N_{max} は死者数の最大値である。

第2章 船舶のリスク評価の方法

$$FN_{ALARP-U}(n) = \frac{IR_{ALARP-U} \cdot N_{obd}}{\sum_{i=1}^{N_{max}} FN_{aprx}(i)} FN_{aprx}(n) \quad (2.13)$$

$FN_{aprx}(n)$ は、死者数の相補累積分布関数の近似関数を $CCDF_{aprx}(n)$ とすると、これに死亡事故頻度を掛けることで得られる。つまり、(2.14)式から求められる。

$$FN_{aprx}(n) = FN_{data}(1) \cdot CCDF_{aprx}(n) \quad (2.14)$$

事故における人命損失等の被害はべき乗則に従っており、その相補累積分布関数 (CCDF) がべき乗分布で表現されることが知られている。Clauset, A. *et al.* (2009)は自然数の定義域を持つべき乗分布の CCDF を、 N_{min} は n の最小値 (n は N_{min} より小さな値を取ることはできない)、 $b > 0$ として、(2.15)式のように定義している。

$$CCDF(n) = \frac{\zeta(b, n)}{\zeta(b, N_{min})} \quad (2.15)$$

ここで、 $\zeta(b, n)$ はフルヴィッツのゼータ関数であり、(2.16)式のように表される。

$$\zeta(b, n) = \sum_{i=0}^{\infty} (i+n)^{-b} \quad (2.16)$$

船舶事故における死亡者数の CCDF としては、(2.15)式の CCDF は不適当であると考えられる。何故なら、船舶事故には死者数の最大値が存在するため、CCDF でもその点を考慮する必要があると考えられるためである。この点を考慮した CCDF は (2.17)式のように表される。

$$\begin{aligned} CCDF(n) &= \frac{\sum_{i=n}^{N_{max}} i^{-b}}{\sum_{i=N_{min}}^{N_{max}} i^{-b}} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^{\infty} (i+n)^{-b} - \sum_{i=0}^{\infty} (i+N_{max}+1)^{-b}}{\sum_{i=0}^{\infty} (i+N_{min})^{-b} - \sum_{i=0}^{\infty} (i+N_{max}+1)^{-b}} \\ &= \frac{\zeta(b, n) - \zeta(b, N_{max}+1)}{\zeta(b, N_{min}) - \zeta(b, N_{max}+1)} \end{aligned} \quad (2.17)$$

さらに、船舶は同一船種においても個船毎に乗船者数が異なるため、この点も考慮に入れる必要がある。乗船者数別にサブグループを構成し、そのサブグループ数を n_s 、サブグループ j の死者数の最大値を N_{max-j} 、指数を b_j 、全体に占めるサブグループ j の死者数の割合を r_j とすると、 $CCDF_{aprx}(n)$ は(2.18)式のように表される。

$$CCDF_{aprx}(n) = \sum_{j=1}^{ns} r_j \frac{\sum_{i=n}^{N_{max-j}} i^{-b_j}}{\sum_{i=1}^{N_{max-j}} i^{-b_j}} \quad (2.18)$$

F-N 線図の下限線は、(2.13)式の $IR_{ALARP-U}$ を $IR_{ALARP-L}$ (個人リスクの ALARP 下限値) にすれば求められる。

2.5 GBS-SLA の概要

前述したように GBS-SLA とは船種を問わず、基本的に「リスク」を使用し、構造関連だけでなくその他の規則についても、ある要件が確保すべき安全レベルを定量的に設定することを目的とした GBS であり、IMO において現在、GBS-SLA の暫定指針の開発が進められており、それと同時に IMO 事務局は具体的な GBS-SLA の例の提出を IMO 加盟国に求めている(IMO 2017a)。暫定指針には GBS-SLA も仕様の GBS と同様に Tier I~Tier V の階層構造を持つことが示されているが、Tier I や Tier II の値やその設定法等については具体的には示されておらず、不明点が多い。ただし、暫定指針には、Tier I の一例として FSA ガイドラインで定められる ALARP 領域を用いることが可能であることや、Tier II の一例として FSA ガイドラインで示されるハザードの同定法が利用可能であることが示されている等、GBS-SLA と FSA には関係があることが示されている。

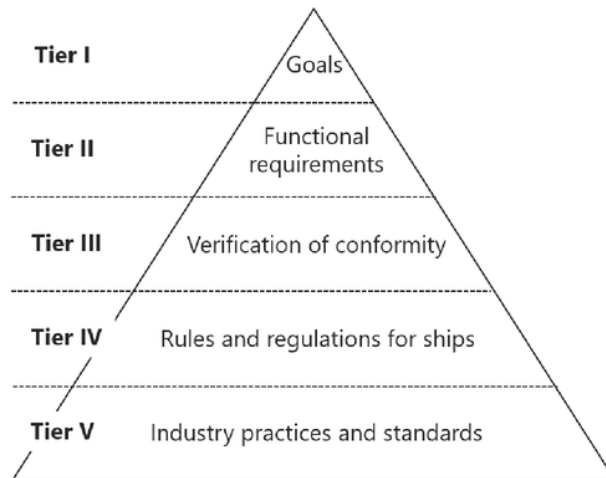


Fig.2.4 Hierarchic structure of GBS (IMO 2017a)

2.6 FSAの各Step及びGBS-SLAと本論文との関係

本論文の主要部分である第3章～第5章とFSAの各Step及びGBS-SLAとの関係は次の通りである。

本論文の第3章はFSAのStep 1とStep 2に該当する。IHSデータを利用し、リスクを算出する。つまり、Step 1において創造的な手法ではなく、分析的な方法を用いていることになる。Step 2では前述した通り、F. Kaneko *et al.* (2015)の設定法により得られるF-N線図上のALARP領域でリスク評価を実施する。

本論文の第4章は、FSAのStep 3及びStep 4に該当する。RCOとして、損傷時復原性の安全規則である要求区画指数Rの見直しを取り上げ、その費用対効果評価を実施する。

本論文の第5章は、GBS-SLAのTier IとTier IIに該当する。FSAにおけるリスクモデルやリスク許容基準等はGBS-SLAで利用可能であることが示唆されている(R. Hamann *et al.* 2013)が、その具体的な利用法については未だ定まっていない。例えば、GBS-SLAのTier IやTier IIとしては、FSA step 2のリスク許容基準やFSA step 4の費用対効果評価が利用可能であると考えられる。本研究では後者、つまりGBS-SLAのTier IやTier IIとしてFSA step 4の費用対効果評価を利用する。つまり、Tier Iを「費用対効果の最大化」として、Tier IIとして費用対効果を最大化する要求区画指数Rの式を算出する。

以上の関係を図示すると、Fig.2.5となる。

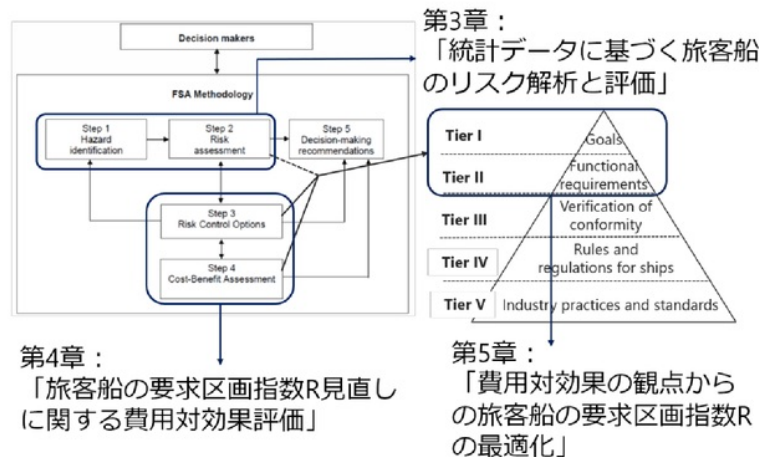


Fig.2.5 Relation between FSA, GBS-SLA and this study.

2.7 第2章のまとめ

FSA の手順や評価手法等の詳細や GBS-SLA の概要について説明するとともに、FSA の各 Step 及び GBS-SLA と本研究との関係について述べた。その中で個人リスクと社会リスクの関係性について示し、原理的に個人リスクのリスク許容基準と F-N 線図上のリスク許容基準は一致する必要があることを示した。また、それらが一致するような F-N 線図上のリスク許容基準の設定法について述べた。これにより従来より原理的に正しくリスク評価を実施可能となった。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

本章では、旅客船の現行のリスクを適切に推定するために建造年を基に、船舶のリスク評価で一般的によく利用される IHS データを使用し、リスクを推定する。また、F. Kaneko *et al.* (2015a)によって開発された F-N 線図上のリスク許容基準の設定法から求められるリスク許容基準によってリスク評価を実施する。これにより原理的に適切にリスク評価を実施できると考えられる。以上の結果として、旅客船のリスクは低減しているように見えるが、両側 5%の危険率では有意差はなく、現行のリスクは ALARP 領域にあるため、RCO の検討が必要であることを示す。(柚井他 2016a)

3.1 背景と目的

2.3 節で述べた通り、リスクを定量化する方法としては、二つある。一つは統計データに基づく方法であり、もう一つはリスクモデルを用いる方法である。本章では前者の方法によりリスクの定量化を行う。使用する統計データは IHS データである。IHS データとは、船舶のリスク評価で良く用いられるデータベースであり、100GT 以上の IMO 番号を持つ全ての船舶の船舶要目と海難事故の情報が収録されたデータベースである。

船舶のリスクは適用される安全基準により異なると考えられ、安全基準の適用対象船舶は建造年を基に決められることが多いため、船舶のリスクは建造年により異なると考えられる。したがって、現行の船のリスクレベルを適切に評価するためには、建造年を基にリスク解析を行う必要があると言える。そこで、本章では建造年を基準にリスク解析を実施する。

IHS データの解析により旅客船のリスクを推定した研究として、著者らの研究 (T. Yuzui *et al.* 2014, Japan 2013, T. Yuzui *et al.* 2015a, 柚井他 2014, T. Yuzui *et al.* 2015b) がある。T. Yuzui *et al.* (2014)及び Japan (2013)は、1,000GT 以上の一般客船と RoPax 船について、建造年を考慮しない場合と建造年を考慮し 1990 年以降に建造された船についての 2 種類について、損傷時復原性と関連があると考えられる海難 (衝突、座礁、接触及び沈没) の人命損失リスクを IHS データの解析により求めている。T. Yuzui *et al.* (2015a)は、1,000GT 以上の一般客船について、1990 年より前に建造された船と 1990 年以降に建造された船とに分けて、前述した 4 種類の海難に 5 種類の海難 (火災・爆発、船体損失・機関故障、行方不明、戦争等による損傷、その他) を加え、海

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

難別の人命損失リスクを IHS データから求めている。柚井他 (2014) 及び T. Yuzui *et al.* (2015b) は、1,000GT 未満の一般客船と RoPax 船について、1990 年より前に建造された船と 1990 年以降に建造された船とに分けて、海難種類別の人命損失リスクを IHS データの解析により求めている。

これらの研究の他には D. Konovessis *et al.* (2008) ⁶⁹がある。D. Konovessis *et al.* (2008) は IHS データを使用し、1,000GT 以上の RoPax 船について 1994 年から 2004 年に発生した事故について PLL と F-N 線図を求めている。しかし、建造年を考慮した解析はされていない。

²⁰⁷ リスク評価で重要なことの一つにリスク許容基準がある。リスク評価の手順として、リスク解析の後に、求められたリスク値とリスク許容基準とを比較し、対象システムのリスクの許容性を検討する。FSA ガイドラインには、個人リスクのリスク許容基準の値と F-N 線図上のリスク許容基準の設定法の例が示されている。⁵⁹過去に実施された種々の FSA ²³⁷においては、F-N 線図上のリスク許容基準として、対象船舶の経済性を考慮した設定法により求められるリスク許容基準が *de facto standard* として使われている。しかし、個人リスクのリスク許容基準と F-N 線図上のリスク許容基準は本来であれば同値であるはずが、この設定法により求められる F-N 線図上のリスク許容基準は個人リスクのリスク許容基準と同値ではないという問題点があることを F. Kaneko *et al.* (2015) ²³⁷が指摘している。F. Kaneko *et al.* (2015a) は、この問題点を解消する形で、F-N 線図上のリスク許容基準の設定法を開発している。本章では、F. Kaneko *et al.* (2015a) によって開発された設定法により求められるリスク許容基準を用いて、旅客船のリスクの許容性を検討した。

本章は、T. Yuzui *et al.* (2014)、Japan (2013) 及び T. Yuzui *et al.* (2015a) の延長線上にある研究結果を示すものであり、1,000GT 以上の一般客船と RoPax 船の人命損失リスクを建造年を基に IHS データから求め、更にそれらの不確実さ解析を実施した結果を示し、また、求められたリスクの許容性を F. Kaneko *et al.* (2015a) で開発された方法により評価した結果を示すものである。

3.2 対象船舶と対象海難

88

3.2.1 対象船舶

本研究で対象とした船舶を Table 3.1 に示す。調査対象船舶、すなわち標本として 1,000GT 以上の一般客船と RoPax 船について、建造年が 1990 年より前と 1990 年以降の船舶すべてを考慮し、それらに対してリスク解析と評価を実施した。

調査対象船舶を建造年が 1990 年より前か以降かで分けた理由は、近年の旅客船のリスクレベルを調査するためである。前述したように、船舶のリスクは適用される安全基準により異なると考えられ、安全基準の適用対象船舶は建造年を基に決められることが多いため、船舶のリスクは建造年により異なると考えられる。したがって、本研究では建造年を基に対象船舶を分けた。建造年を基準にリスク解析を実施した例は著者の知る限り存在せず、この点は本研究の独創的な点の一つである。

F. Kaneko *et al.* (2015b)によると、1980 年から 2010 年の間に発生した旅客船事故において、浸水または沈没が生じた事故の人命損失数は全体の人命損失数の約 8 割を占めている。したがって、浸水または沈没は旅客船の人命損失リスクの主要因であると言える。

浸水や沈没事故は損傷時復原性に関連があり、それに関する安全基準としては、SOLAS 条約第 II-1 章がある。これの最新の規則は、2009 年に発効した SOLAS 条約 (SOLAS 2009) である。したがって近年の旅客船のリスクレベルを調査するためには、SOLAS 2009 適用船舶と非適用船舶に分けてリスク解析を実施するのが望ましいと考えられる。しかし、SOLAS 2009 適用船舶はまだ数が少なく、その数はリスク解析を実施するために十分であるとは言い難いと考えられる。

SOLAS 2009 は従来、決定論で扱われていた旅客船の損傷時復原性要件を貨物船等と同様に確率論的手法で扱う要件に調和することを主な目的として改正された。また、1990 年に発効された SOLAS 条約 (SOLAS 90) と同等の安全性を維持することも目的にしていた(Luc, L *et al.* 2013)。したがって、SOLAS 2009 適用船舶と SOLAS 90 適用船舶は同等のリスクレベルであると考えられる。よって、本研究では、SOLAS 90 適用船舶を 1990 年以降に建造された船舶であると仮定して、調査対象船舶を建造年が 1990 年より前か以降かで分けた。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

なお、SOLAS 条約適用対象船舶を²³⁶本研究の対象としているため、外航船が²⁷本研究の対象となる。

旅客船の種類は、IHS データの船種の分類コードである STATCODE により、一般客船及び RoPax 船に分類した。

Table 3. 1 Detail information of analyzed ships in this study.

Ship Type	Passenger/Cruise ships		Ro ⁵ ax ships	
STATCODE	A37A2PC: passenger/cruise ^{*1} A37B2PS: passenger ship ^{*2}		A36A2PR: passenger/ro-ro ship (vehicles) ^{*3} A36A2PT: passenger/ro-ro ship (vehicles/rail) ^{*4} A36B2PL: passenger/landing craft ^{*5}	
Ship Size	1,000GT and the above			
Built year	Built before 1990	Built in or after 1990	Built before 1990	Built in or after 1990
Considered period ²⁶	1978-2012	1990-2012	1978-2012	1990-2012

*1 A vessel certificated to carry more than 12 passengers, all of whom may be accommodated in cabins

*2 A vessel certificated to carry more than 12 passengers, some of whom may be accommodated in cabins⁵

*3 A ro-ro cargo ship with accommodation for more than 12 passengers

*4 A ro-ro cargo ship for the additional carriage of rail-vehicles and with accommodation for more than 12 passengers

*5 A landing craft certificated to carry more than 12 passengers

¹³ 3.2.2 対象海難

本研究では、IHS データで使用されている海難コードに基づき、リスク解析を実施した。Table 3.2 に IHS データで使用されている海難コードの詳細を示す。次節以降では、Table 3.2 の Casualty Code で各種海難を示す。

なお、IHS データには、内航船の事故データであったり、死者数がダブルカウントされていたり、実際とは異なる船種として分類されている等の本研究のリスク解析に含めるには不適切なデータが含まれている¹⁴⁷可能性があるため、可能な限りデータの³詳細を調査した。その結果、Table 3.3 に示す事故のデータを本研究の解析から除外した。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

Table 3. 2 Casualty codes and their definitions (by IHS).

Casualty (Category)	Casualty Code	Definition
Foundered (1)	FD	Includes ships which sank as a result of heavy weather, springing of leaks, breaking it two etc., and not as a consequence of categories 2-7 or 9.
Wrecked/ Stranded (2)	WS	Includes ships reported hard and fast for an appreciable period of time and cases reported touching sea bottom. This category includes entanglement on under water wrecks.
Contact (3)	CT	Striking or being struck by an external substance but not another ship or the sea bottom (see categories 2/4). This category includes striking drilling rigs/platforms, regardless of whether in fixed position or in tow.
Collision (4)	CN	Striking or being struck by another ship, regardless of whether under way, anchored or moored. This category does not include striking under water wrecks.
Fire & Explosion (5)	FX	Where the fire and/or explosion is the first event reported (except where first event is a hull/machinery failure leading to fire/explosion). Note: It therefore follows that casualties involving fires and/or explosions after collisions, stranding etc., are categorized under 'Collision', 'Stranding'. Scavenge fires and crankcase explosions are included in this category.
Missing Vessel (6)	MG	After a reasonable period of time, no news having been received of a ship and its fate being therefore undetermined, the ship is posted as "Missing" at the Corporation of Lloyd's and is included in the Missing category on the data base together with similar cases reported by other reliable sources. Note: In peacetime, missing ships are considered as losses by marine perils.
War Loss/ Damage During Hostilities (7)	LT	This category is intended to encompass damage or other incidents occasioned to ships by hostile acts.
Hull/ Machinery Damage (8)	HM	Includes ships lost or damaged as a result of hull/machinery damage or failure which is not attributable to categories 1-7 or category 9.
Miscellaneous (9)	XX	Includes ships which have been lost or damaged which, for want of sufficient information, or for other reasons, cannot be classified.

Table 3. 3 Details of excluded data from IHS casualty database in this study.

Exclusion or Inclusion	Casualty Code	Fatalities and Missings	Reason for exclusion or inclusion
Exclusion	FD	970	This ship was a government-owned and domestic vessel.
Exclusion	CN	1	This casualty is not the RoPax ships but the fishing vessel (MARINE ACCIDENT INVESTIGATION BRANCH).
Exclusion	CN	1	This accident is same as the under column. It is double counts for fatalities.
Inclusion	CT	1	This accident is same as the above column. Fatality of this casualty is the passenger of this ship (Number 088 ****DAILY SHIPPING NEWSLETTER****). Therefore this data is included.

3.3 リスク解析とリスク評価の方法

115

3.3.1 リスク解析方法

3.3.1.1 母集団の大きさ

船舶のリスク解析では、母集団の大きさの単位として ship×year が一般的に使用されている。58 S_i を i 年の 1 年間に稼働していた船舶の隻数、 $start$ を対象期間の開始年、 end を対象期間の終了年とすると、母集団の大きさ M は(3.1)式から求められる。それはすなわち対象期間中の毎年のフリートの合計である。

$$M = \sum_{i=start}^{end} S_i \quad (3.1)$$

IHS データから船舶毎の” Date of built ” と ” Date of death date ” が分かるため、ここから i 年 l 月のフリート $Y_{i,l}$ を求め、そこからフリートの年間の平均を(3.2)式より求め、これを S_i とみなし M を求めた。

$$S_i = \frac{1}{12} \sum_{l=1}^{12} Y_{i,l} \quad (3.2)$$

3.3.1.2 PLL

死亡者数を K とすると、PLL は(3.3)式より求めることが出来る。また、その信頼区間は、146 (3.4)式のようにして求められる。なお、(3.4)式において、 α は危険率、 $\chi^2_D(\beta)$ は自由度 D で累積確率 β に対応する χ^2 値である。信頼区間の求め方の詳細は付録 1 を参照されたい。

$$PLL = \frac{K}{M} \quad (3.3)$$

$$\frac{\chi^2_{2K} \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right)}{2M} \leq PLL \leq \frac{\chi^2_{2(K+1)} \left(\frac{\alpha}{2} \right)}{2M} \quad (3.4)$$

3.3.1.3 F-N 線図

事故データから求められる人命損失数 k の事故の発生数を m_k 、人命損失数の最大値を k_{max} とすると、F-N 線図の縦軸の値 $FN_{data(j)}$ は(3.5)式のようにして求められる。87 また、その信頼区間は(3.6)式のようになる。信頼区間の求め方の詳細は付録 1 を参照されたい。

$$FN_{data}(j) = \sum_{k=j}^{k_{max}} \frac{m_k}{M} \quad (3.5)$$

$$\frac{\chi^2_{2M \cdot FN_{data}(j)} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)}{2M} \leq FN_{data}(j) \leq \frac{\chi^2_{2(M \cdot FN_{data}(j)+1)} \left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2M} \quad (3.6)$$

3.3.2 リスク評価方法

第2章に示した F. Kaneko *et al.* (2015a)により開発された F-N 線図上の ALARP 上下限と個人リスクのそれらとを一致させる F-N 線図上の ALARP 上下限の設定法から求められる F-N 線図上の ALARP 上下限により、リスクの許容性を検討する。なお、(2.18)式のパラメータ b_i, r_j, N_{maxj} は、F. Kaneko *et al.* (2015a)と同様に近似関数と被近似関数の対数の偏差の二乗和を目的関数とする最適化計算により求めた。その最適化計算の手法は、非線形最適化手法のうち共役傾斜法と呼ばれる手法の一つである Davidon-Fletcher-Powell 法である。サブグループは最大乗船者数別に構成される。この最大乗船者数は、サブグループ毎の死者数の最大値 N_{maxj} と同値であり、この値は最適化計算により求められる。 $IR_{ALARP-U}$ と $IR_{ALARP-L}$ はそれぞれ 1×10^{-4} と 1×10^{-6} とし、 ns は3とした。 N_{obs} は、IHS データより平均値を求め、それを利用した。

3.4 リスク解析結果

3.4.1 一般客船

3.4.1.1 母集団の大きさ

Fig.3.1 に毎年フリートの大きさを、Table 3.4 に母集団の大きさを示す。Fig.3.1 はその年に存在していた対象船舶の隻数を ship×year 単位で表している。例えばその年の7月に建造された船は、その年には0.5年存在していたことになり、0.5 ship×year と数える。したがって、縦軸の単位は ship×year である。これは Fig.3.4 でも同様である。なお、Fig.3.1 の凡例において、1990年より前に建造された船舶を B.B. 1990、1990年以降に建造された船舶を B.A. 1990 で示している。これ以降の図の凡例においても同様の表記を用いることとする。Fig. 3.1 より以下がわかる。

- ✓ 1990年より前に建造された船舶は、1990年以降は船舶数が増えないため当然であるが、1990年を境に漸減傾向にある。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

- ✓ 一方、1990年以降に建造された船舶は、毎年増加しており、2007年以降、1990年以降に建造された船舶の方が多くなっている。

Table 3.4 Size of population (Passenger/Cruise ships) [ship×year].

Built before 1990	Built in or after 1990
10,291	4,019

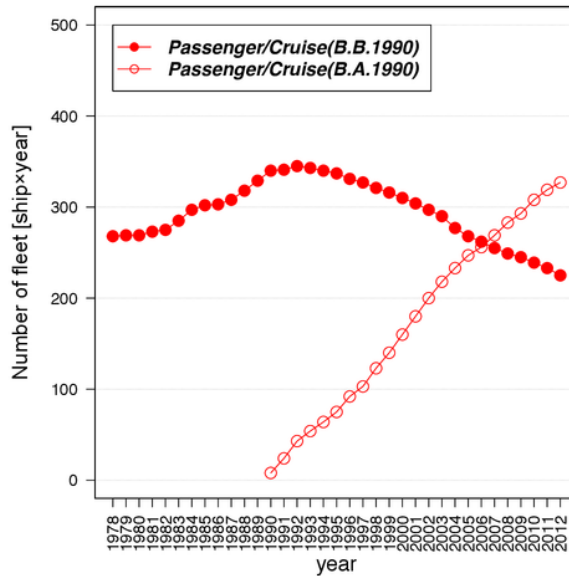


Fig.3.1 Chronological changes of fleet of Passenger/Cruise ships (IHS Ships Database).

3.4.1.2 PLL

海難種類毎の死者数と PLL 及び 95%信頼区間を Table 3.5 に、海難種類毎の PLL と 95%信頼区間を Fig.3.2 に示す。Fig. 3.2 には、紙面の都合上、信頼区間の下限が 1×10^{-5} より小さいものは示していないため、その場合は Table 3.5 を参照されたい。

Fig. 3.2 と Table 3.5 より次のことがわかる。

- ✓ 1990年以降に建造された船舶では CN、WS、FX 及び HM でのみ死亡事故が起きており、これら以外の海難では死亡事故は発生していない。
- ✓ 1990年より前に建造された船舶と 1990年以降に建造された船舶の PLL の平均値を比べると、WS と HM を除いて 1990年以降に建造された船舶の方が小さい。ただし、95%信頼区間を見た場合、FX は 1990年以降に建造された船舶の方が明らかに小さいが、それ以外の海難については何とも言えない。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

- ✓ 全海難の合計の PLL は、1990 年以降に建造された船舶の方が小さく、95%信頼区間を見た場合でも明らかに小さい。
- ✓ 1990 年より前に建造された船舶の PLL は、FX、WS が大きく、それに FD、CN、CT、HM が続く。
- ✓ 1990 年以降に建造された船舶の PLL は、WS が大幅に大きく、それに CN、FX、HM が続く。この WS の PLL は、コスタ・コンコルディア号の事故 1 件の影響で大きくなっている。

Table 3. 5 Fatalities and PLL (Passenger/Cruise ships).

	No. of Fatalities and Missings [fatalities]		PLL (mean) [fatalities/(ship×year)]		PLL (lower limit) [fatalities/(ship×year)]		PLL (upper limit) [fatalities/(ship×year)]	
	Built before 1990	Built in or after 1990	Built before	Built in or	Built before	Built in or	Built before	Built in or
			1990	after 1990	1990	after 1990	1990	after 1990
CN	13	4	1.26×10^{-3}	9.95×10^{-4}	6.73×10^{-4}	2.71×10^{-4}	2.16×10^{-3}	2.55×10^{-3}
CT	3	0	2.92×10^{-4}	0.00	6.01×10^{-5}	-	8.52×10^{-4}	9.18×10^{-4}
WS	61	32	5.93×10^{-3}	7.96×10^{-3}	4.53×10^{-3}	5.45×10^{-3}	7.61×10^{-3}	1.12×10^{-2}
FD	15	0	1.46×10^{-3}	0.00	8.16×10^{-4}	-	2.40×10^{-3}	9.18×10^{-4}
FX	100	2	9.72×10^{-3}	4.98×10^{-4}	7.91×10^{-3}	6.03×10^{-5}	1.18×10^{-2}	1.80×10^{-3}
HM	2	2	1.94×10^{-4}	4.98×10^{-4}	2.35×10^{-5}	6.03×10^{-5}	7.02×10^{-4}	1.80×10^{-3}
LT	0	0	0.00	0.00	-	-	3.58×10^{-4}	9.18×10^{-4}
MG	0	0	0.00	0.00	-	-	3.58×10^{-4}	9.18×10^{-4}
XX	0	0	0.00	0.00	-	-	3.58×10^{-4}	9.18×10^{-4}
Total	194	40	1.89×10^{-2}	9.95×10^{-3}	1.64×10^{-2}	7.11×10^{-3}	2.17×10^{-2}	1.36×10^{-2}

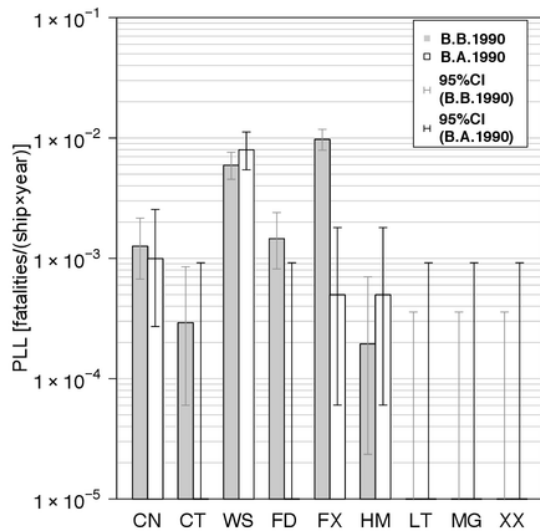


Fig.3.2 Comparison of PLL of Passenger/Cruise ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.

3.4.1.3 F-N線図

Fig. 3.3 に全海難の合計の F-N 線図を示す。図には、95%信頼区間も示す。Fig. 3.3 より、以下のことがわかる。

- ✓ 平均の F-N 線図は、死者数が 10 人未満の部分では、1990 年以降に建造された船舶の方が 1990 年より前に建造された船舶より下に位置している。一方、死者数が 10 人以上の部分では、1990 年以降に建造された船舶の方が 1990 年より前に建造された船舶よりやや上に位置している。
- ✓ 死者の最大値は、1990 年より前に建造された船舶で 58 人、1990 年以降に建造された船舶で 32 人であり、1990 年以降に建造された船舶の方が小さい。この 1990 年以降に建造された船舶の最大死者数の事故はコスタ・コンコルディア号の事故である。

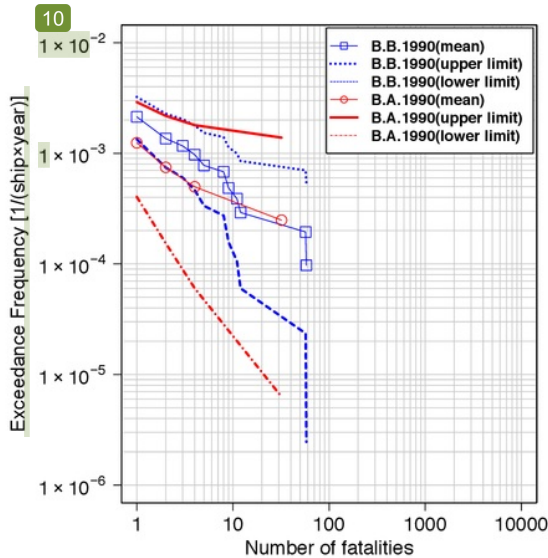


Fig.3.3 Comparison of F-N curves of all casualties of Passenger/Cruise ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.

3.4.2 RoPax 船

3.4.2.1 母集団の大きさ

66 Fig.3.4 に毎年フリートを、Table 3.6 に毎年母集団の大きさを示す。Fig. 3.4 より以下がわかる。

- ✓ 一般客船と同様に、当然であるが、1990 年より前に建造された船舶は 1990 年を境に漸減傾向にある。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

- ✓ 一方、1990年以降に建造された船舶は、毎年増加しており、2011年以降、1990年以降に建造された船舶の方が多くなっている。

Table 3.6 Size of population (RoPax ships) [ship×year].

Built before 1990	Built in or after 1990
36,543	10,554

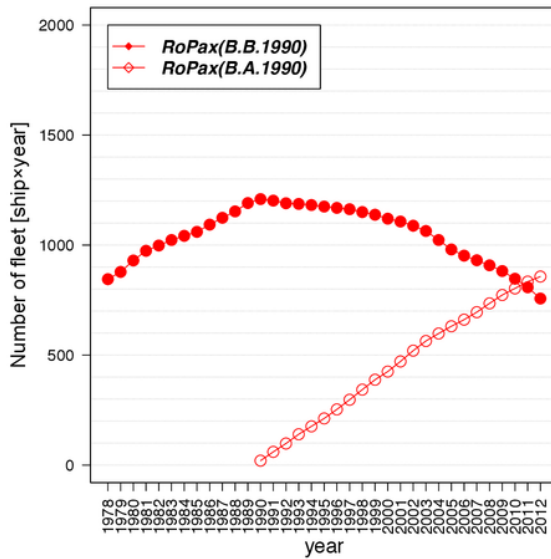


Fig.3.4 Chronological changes of fleet of RoPax ships (IHS Ships Database).

3.4.2.2 PLL

海難種類毎の死者数と PLL 及び 95%信頼区間を ²⁰³ Table 3.7 に示す。また、Fig. 3.5 に ⁶⁸ 海難種類毎の PLL と 95%信頼区間を示す。Fig. 3.5 には、紙面の都合上、信頼区間の下限が 1×10^{-5} より小さいものは示していないので、その場合は Table 3.7 を参照されたい。Fig. 3.5 と Table 3.7 より次のことがわかる。

- ✓ 1990年以降に建造された船舶では CT、FX 及び HM でのみ死亡事故が起きており、これら以外の海難 ⁶⁷ では死亡事故は発生していない。
- ✓ 1990年より前に建造された船舶と 1990年以降に建造された船舶の PLL の平均値を比べると、CTを除いて 1990年以降に建造された船舶の方が小さい。ただし、95%信頼区間を見た場合、CN、WS、FD 及び FX は 1990年以降に建造された船舶の方が明らかに小さいが、それ以外の海難については何とも言えない。
- ✓ 全海難の合計の PLL は、1990年以降に建造された船舶の方が小さく、95%信頼区間を見た場合でも明らかに小さい。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

- ✓ 1990年より前に建造された船舶のPLLは、FX、FD及びWSが大きく、それにCN、HM、LT、CTが続く。
- ✓ 1990年以降に建造された船舶のPLLは、FXが大きく、それにHM、CTが続く。

Table 3.7 Fatalities and PLL (RoPax ships).

	No. of Fatalities and Missings [fatalities]		PLL (mean) [fatalities/(ship·year)]		PLL (lower limit) [fatalities/(ship·year)]		PLL (upper limit) [fatalities/(ship·year)]	
	Built before 1990	Built in or after 1990	Built before 1990	Built in or after 1990	Built before 1990	Built in or after 1990	Built before 1990	Built in or after 1990
CN	175	0	4.79×10^{-3}	0.00	4.11×10^{-3}	-	5.55×10^{-3}	3.50×10^{-4}
CT	1	1	2.74×10^{-5}	9.48×10^{-5}	6.93×10^{-7}	2.40×10^{-6}	1.52×10^{-4}	5.28×10^{-4}
WS	1,381	0	3.78×10^{-2}	0.00	3.58×10^{-2}	-	3.98×10^{-2}	3.50×10^{-4}
FD	1,692	0	4.63×10^{-2}	0.00	4.41×10^{-2}	-	4.86×10^{-2}	3.50×10^{-4}
FX	2,206	44	6.04×10^{-2}	4.17×10^{-3}	5.79×10^{-2}	3.03×10^{-3}	6.29×10^{-2}	5.60×10^{-3}
HM	16	3	4.38×10^{-4}	2.84×10^{-4}	2.50×10^{-4}	5.86×10^{-5}	7.11×10^{-4}	8.31×10^{-4}
LT	2	0	5.47×10^{-5}	0.00	6.63×10^{-6}	-	1.98×10^{-4}	3.50×10^{-4}
MG	0	0	0.00	0.00	-	-	1.01×10^{-4}	3.50×10^{-4}
XX	0	0	0.00	0.00	-	-	1.01×10^{-4}	3.50×10^{-4}
Total	5,473	48	1.50×10^{-1}	4.55×10^{-3}	1.46×10^{-1}	3.35×10^{-3}	1.54×10^{-1}	6.03×10^{-3}

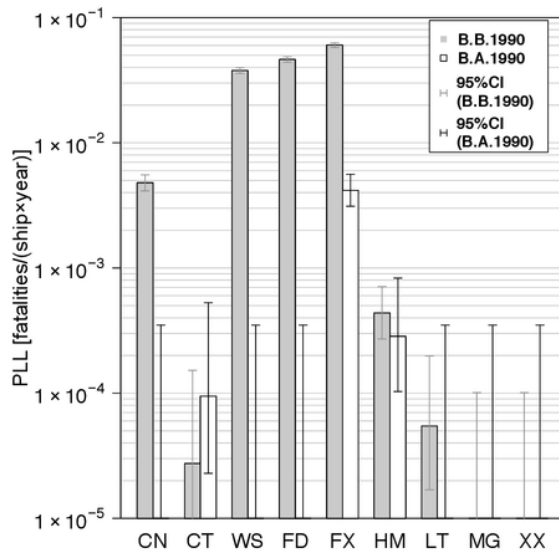


Fig.3.5 Comparison of PLL of RoPax ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.

3.4.2.3 F-N線図

Fig. 3.6 に全海難の合計の F-N 線図を示す。図には、95%信頼区間も示す。Fig. 3.6 より、以下のことがわかる。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

- ✓ 平均の F-N 線図は、死者数に関わらず、1990 年以降に建造された船舶が 1990 年より前に建造された船舶より下に位置している。
- ✓ 死者数の最大値は、1990 年より前に建造された船舶で 988 人、1990 年以降に建造された船舶で 28 人であり、1990 年以降に建造された船舶の方が小さい。

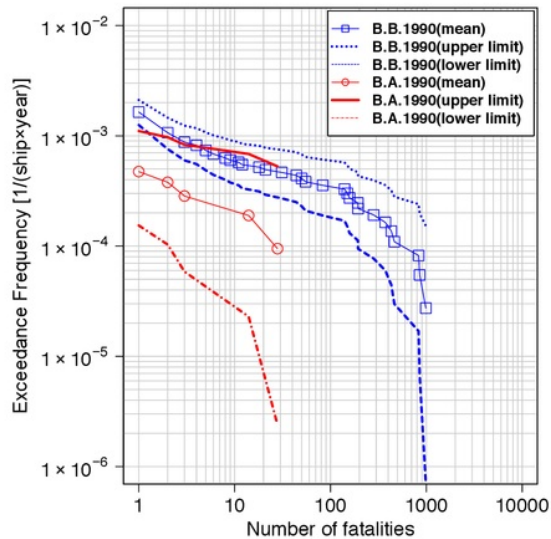


Fig.3.6 Comparison of F-N curves of all casualties of RoPax ships between ships built before 1990 and ships built in or after 1990.

3.5 リスク評価結果

3.5.1 一般客船

1990 年より前に建造された船舶と 1990 年以降に建造された船舶の全海難の合計のデータによる F-N 線図と近似関数による F-N 線図及び ALARP 上下限線をそれぞれ Fig.3.7 に示す。また、近似関数の最適化された各パラメータの値を Table 3.8、Table 3.9 に示す。Fig.3.7 より、以下のことがわかる。

- ✓ 1990 年より前に建造された船舶のデータから求められる F-N 線図は、死者数が 57 人のところで Intolerable の領域に位置している。ただし、近似関数による F-N 線図は死者数に関わらず ALARP 領域内に位置している。
- ✓ 1990 年以降に建造された船舶の F-N 線図は ALARP 領域内に位置する。
- ✓ 1990 年より前に建造された船舶と 1990 年以降に建造された船舶では、1990 年より前に建造された船舶の方が ALARP 上限線に近い所に位置している。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

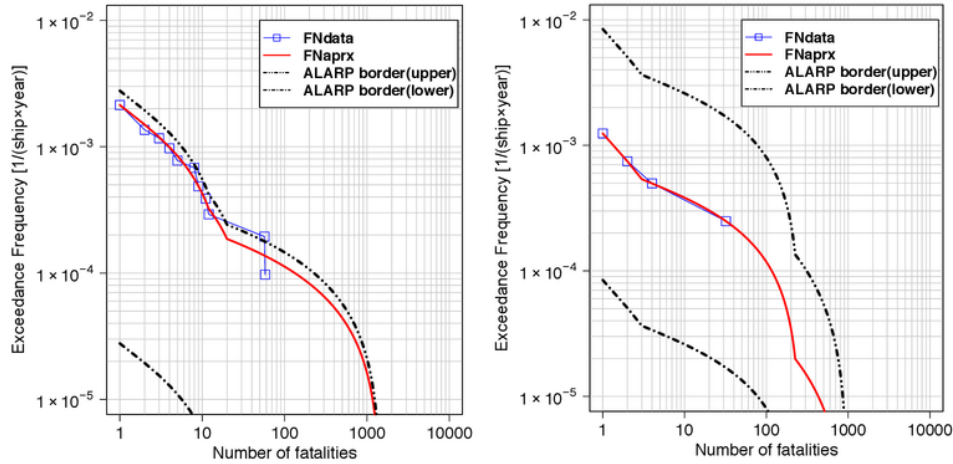


Fig.3.7 F-N curves of all casualties of Passenger/Cruise ships and the ALARP borders (Left: built before 1990, Right: built in or after 1990).

Table 3. 8 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.

20	Exponent (b_j)	Max. no. of fatalities (N_{max-j})	Ratio (r_j)
Sub-group 1	1.074	11	0.442
Sub-group 2	1.067	19	0.387
Sub-group 3	1.042	1,509	0.171

Table 3. 9 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.

20	Exponent (b_j)	Max. no. of fatalities (N_{max-j})	Ratio (r_j)
Sub-group 1	1.074	11	0.442
Sub-group 2	1.067	19	0.387
Sub-group 3	1.042	1,509	0.171

3.5.2 RoPax 船

1990年より前に建造された船舶と1990年以降に建造された船舶の全海難の合計のデータによるF-N線図と近似関数によるF-N線図及びALARP上下限線をそれぞれFig.3.8に示す。また、近似関数の最適化された各パラメータの値をTable 3.10、Table 3.11に示す。Fig.3.8より、以下のことがわかる。

- ✓ 1990年より前に建造された船舶のF-N線図は、そのALARP上限線より上に位置しており、Intolerableの領域にある。
- ✓ 1990年以降に建造された船舶のF-N線図はALARP領域内に位置する。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

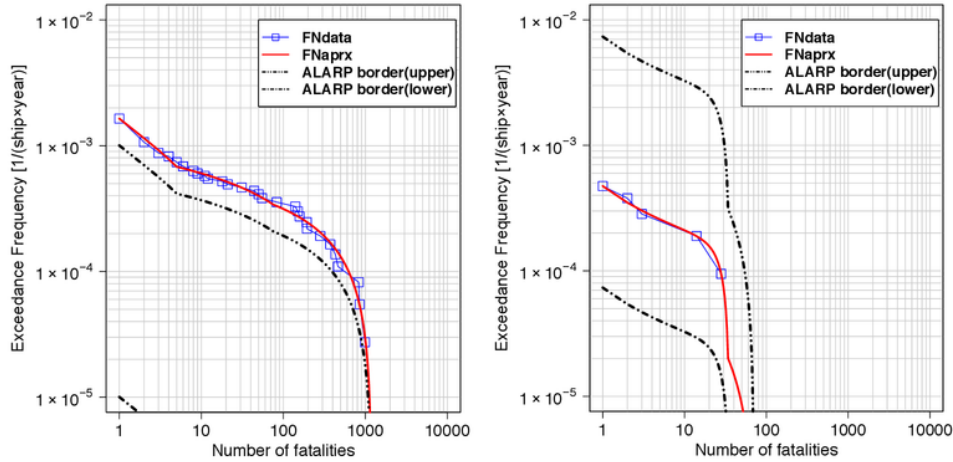


Fig.3.8 F-N curves of all casualties of RoPax ships and the ALARP borders (Left: built before 1990, Right: built in or after 1990).

Table 3. 10 Obtained parameters of RoPax ships built before 1990.

20	Exponent (b_j)	Max. no. of fatalities (N_{max-j})	Ratio (r_j)
Sub-group 1	1.212	4	0.474
Sub-group 2	0.962	75	0.163
Sub-group 3	0.767	1,192	0.363

Table 3. 11 Obtained parameters of Passenger/Cruise ships built before 1990.

20	Exponent (b_j)	Max. no. of fatalities (N_{max-j})	Ratio (r_j)
Sub-group 1	-2.339	33	0.298
Sub-group 2	1.390	69	0.702
Sub-group 3	0.688	731	1.60×10^{-6}

3.6 考察

リスク解析の結果、全海難の PLL は 95%信頼区間を見た場合でも明らかに 1990 年以降に建造された船舶の方が小さく、平均の F-N 線図も 1990 年以降に建造された船舶の方が下に位置していることがわかった。これらの結果より、一般客船、RoPax 船とも安全性は向上している可能性が高いと考えられるが、実際に検定を実施してみないと確信できないことに注意すべきである。そこで、ここでは、F-N 線図の差の検定を実施した。また、リスク評価の結果、そのリスクは ALARP 領域もしくは Intolerable 領域にあることが示された。即ち、RCO の検討を実施する必要がある。そこで、リスク低減の優先度の高いサブグループに関して検討した結果を示す。また、F-N 線図が Intolerable にあると示された船舶については、その理由を考察した。

3.6.1 F-N 線図の差の検定

1990年より前に建造された船舶と1990年以降に建造された船舶のF-N線図の差の検定を実施した。二つのF-N線図の差が有意かどうかを検定する。ここでは、危険率を両側5%として判断することとする。統計解析ソフトウェアR 3.2.1betaを用いて Welchのt検定を実施した。一般客船とRoPax船のt値をFig.3.9に示す。

Fig.3.9より、一般客船のF-N線図は、死者数の全体に渡って、1990年より前に建造された船舶と1990年以降に建造された船舶の間には、両側5%の危険率では、有意差無しとの結果となった。一方、RoPax船のF-N線図は、死者数が12人以下では有意差有りとの結果だが、14人以上では有意差無しとの結果となった。Fig.3.9右図において右の三つのサンプリング点では有意差有りとの結果であるが、死者数が多い事故は事故数が少なく、不確かさの幅が大きいため、有意差に関して論じる必要性は低いと考えられる。また、F-N線図は死者数の超過頻度を示しているため、死者数が14人の点で有意差無しということは、14人以上の死者を出す事故においては、両側5%の危険率では、有意差無しということの意味する。

これらは、両側5%の危険率による有意差の判定では、一般客船の安全性の向上は認められず、RoPax船の安全性の向上は死者数が12人以下では認められるが14人以上では認められないことを意味している。

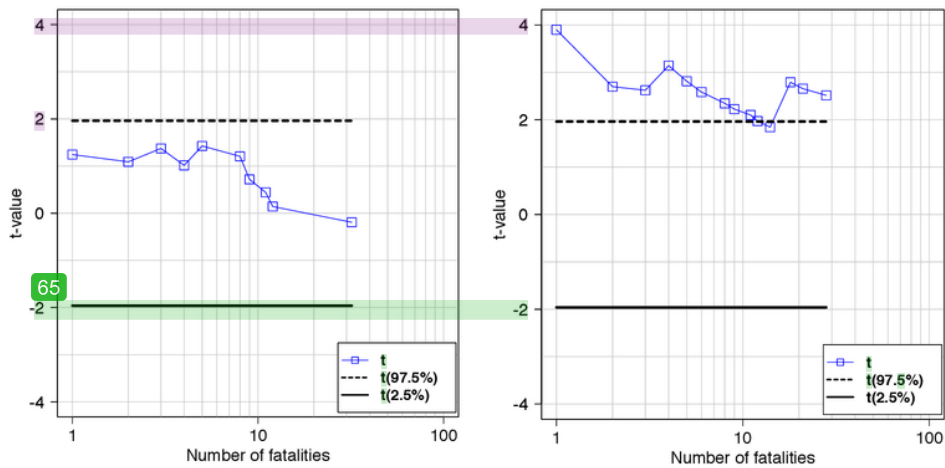


Fig.3.9 t-value and 5% double sides of the difference between the F-N curve of ships built before 1990 and that of ships built in or after 1990 (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).

3.6.2 リスク低減の優先度

(2.18)式の b_j は、risk aversive を示すパラメータであり、この値が他のサブグループに対して小さいサブグループは、死者数が多い事故ほど発生頻度が高い危険なサブグループであることを示している。したがって、指数が小さいサブグループで最大死者数が多いサブグループに対して効果のある RCO を検討することがリスク低減に効果的であると言える。これを考慮すると、Table 3.8～Table 3.11 より、1990 年より前に建造された船舶は一般客船、RoPax 船ともに乗船者数が最も多い Sub-group 3 に対して効果のある RCO を、1990 年以降に建造された一般客船は乗船者数が 2 番目に多い Sub-group 2 に対して効果のある RCO を、1990 年以降に建造された RoPax 船は乗船者数が最も少ない Sub-group 1 に対して効果のある RCO を検討することが重要であると考えられる。ただし、1990 年以降に建造された船舶は一般客船、RoPax 船ともに死亡事故数が少ないため、このような結果になった可能性があり、更なる詳細な調査が必要であると考えられる。今後の課題としたい。

3.6.3 F-N 線図が Intolerable にある理由

1990 年より前に建造された RoPax 船は、そのリスクが Intolerable の領域にあることが示された。これは、対象船舶の条件（総トン数、建造年、対象期間）が異なるが、F. Kaneko *et al.* (2015b) と同様の結果である。F. Kaneko *et al.* (2015b) で指摘されているように、これは、フィリピンやインドネシア周辺を航行している内航船の事故の影響である可能性が考えられる。IHS データからは内航/外航の別は調査できないが、MARSDENGRID により事故発生場所を特定できるため、事故の発生場所分布図を作成した。MARSDENGRID とは、緯度/経度を概ね 10 度刻みで分割し番号付けした格子である。Fig.3.10 に 1990 年より前に建造された RoPax 船の死亡事故の発生場所分布を示す。色付けされた格子が死亡事故の発生した場所を示しており、上段の数値はその格子で発生した死亡事故数の合計、下段の数値はその格子で発生した死亡事故による合計の死者数である。Fig.3.10 より、フィリピンやインドネシア周辺の海域で多くの死亡事故が発生しており、死者数の合計も多いことがわかる。これらの海域では、内航船の事故が多いため、これらの事故も内航船の事故である可能性がある。これらの事故による影響で、1990 年より前に建造された RoPax 船は、そのリスクが Intolerable の領域にあるとの結果になった可能性があり、本研究の対象としている外航船のリスクを推定するためには、内航船を除いて解析を行う必要がある。今後の課題としたい。

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

また、1990年より前に建造された一般客船は、データから求められるF-N線図が一部の死者数でIntolerableの領域にあることが示された。しかし、Fig.3.3で明らかのように1990年より前に建造された一般客船のF-N線図は多数の死者を出す事故においては件数が少なく不確かさの幅が大きい。したがって、その部分においてデータから求められるF-N線図が近似曲線から求められるALARP上限線を若干越えていたとしても、その部分のリスクがIntolerableの領域にあると直ちに結論する必要は無いと考えられる。

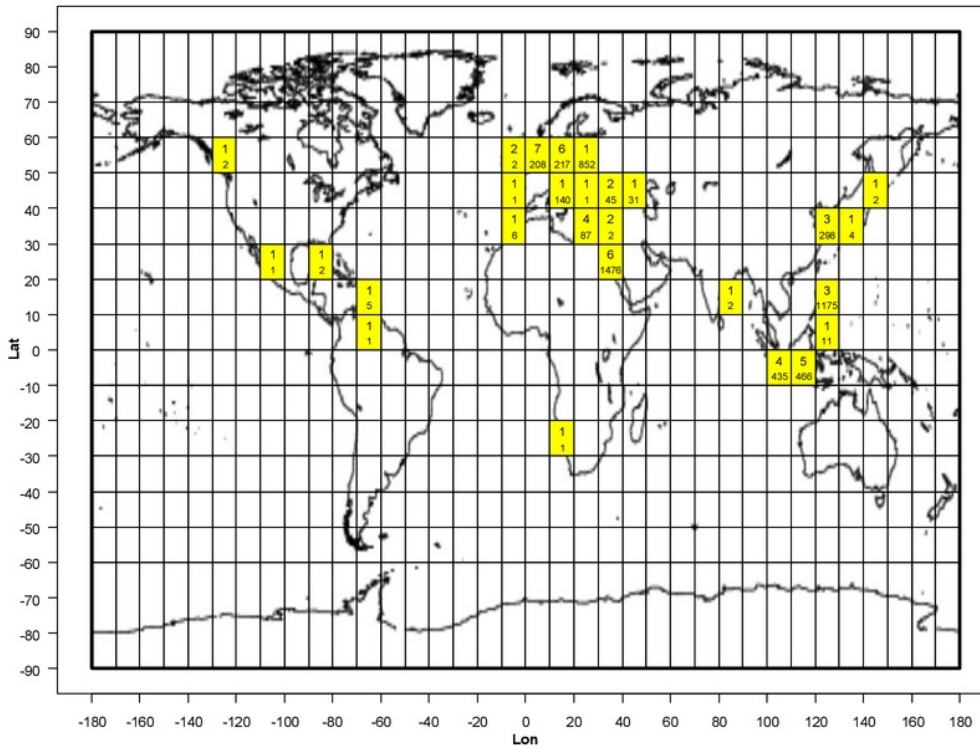


Fig.3.10 World map of the fatal accidents of RoPax ships built before 1990 (Top: No. of the fatal accidents, Down: Total no. of the fatalities).

3.7 第3章のまとめ

本章では、1,000GT以上の一般客船とRoPax船について、1990年より前に建造された船舶と1990年以降に建造された船舶の2種類に分けて、IHSデータを用いてリスク解析(PLLとF-N線図の算出及びそれらの不確かさ解析)とリスク評価(F-N線図上のALARP領域による評価)を実施した。建造年を基に分析することにより、現行のリスクレベルを従来より適切に考慮した分析が可能となり、個人リスクのリスク

第3章 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

許容基準を考慮した設定法から求められる F-N 線図上の ALARP 領域により⁴¹リスク評価を実施することにより、従来の方法より原理的に正しくリスクを評価できた。

リスク解析とリスク評価の結果、得られた知見は以下である。

- ✓ 一般客船、RoPax 船ともにリスクは低減しているように見えるが、両側 5%の危険率ではリスク低減は認められない。
- ✓ 一般客船、RoPax 船ともに現行のリスクは ALARP 領域にあり、Risk Control Option (RCO)の検討が必要である。

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

第3章で旅客船の現行のリスクは ALARP 領域にあることが示された。そのため、リスク低減策の検討が必要となる。本章では、リスク低減策として要求区画指数 R の見直しを取り上げ、旅客船の要求区画指数 R を現行基準から新しい式（日本案）に変更した場合の費用対効果評価を、FSA における費用対効果評価指標である GCAF を求めることにより実施する。この評価において、FSA における一般化モデルの考え方を拡張し、フリート全体に対する GCAF の確率分布を求めるという従来の FSA の費用対効果評価手法を深化させた手法を提案し、その手法により費用対効果評価を実施し、その結果、日本案の R は費用対効果が有る可能性が高いことを示す。（柚井他 2017）

4.1 目的と背景

2012 年 1 月イタリア沖で発生したコスタ・コンコルディア号座礁事故を受けて、IMO では、旅客船の安全を促進するための長期戦略計画が立てられ、同計画に基づいて様々な安全対策について検討が進められている（国土交通省 2016）。同計画には、旅客船の損傷時復原性基準（SOLAS 条約附属書 II-1 章第 6 規則：要求区画指数 R）の強化が含まれており、これまでに欧州（Austria *et al.* 2015）や日本（Japan 2015）等の数カ国・団体から要求区画指数 R の計算式案が提案された。これらの計算式案は、IMO の船舶設計・建造小委員会や海上安全委員会等において審議が進められ、これまでに提案されてきた計算式案ではなく、各国により調整された新しい計算式案（China *et al.* 2017）が IMO MSC 98 で最終化された。

前述した欧州や日本等の R の式は、FSA に基づき提案された。本章では、日本の提案文書（Japan 2015）の FSA の発展版について、その計算の詳細を報告する。FSA は、Step 1 から Step 5 までの手順を含むが、Step 1 と Step 2（リスク評価）の詳細については第3章で報告しているため、本章では Step 3 と Step 4（費用対効果評価）の詳細について報告する。

FSA は、一般化モデルと呼ばれる抽象化された個船に対して実施され、欧州提案の根拠となる FSA 研究（EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015）では大型、中型及び小型の、

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

その先行研究 (Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)では、大型及び中型のそれぞれ一般客船と RoPax 船の一般化モデルに対して FSA を実施している。一方、本稿では、人命損失リスクに影響する船の定員数の分布を考慮し、フリート全体の FSA (費用対効果評価) を実施し、FSA における費用対効果評価指標である GCAF の分布の算出を試みた。これにより、一般化モデルを用いていた従来の FSA よりも詳細に要求区画指数 R の強化が社会 (フリート全体) へ与える影響の大きさを検討することが可能となると考えられる。これまで GCAF の確率分布を求めた事例は存在せず、本研究の学術的な意義の一つであると言える。

本章の構成は次の通りである。4.2 節では、要求区画指数 R について簡単に説明する。4.3 節では、一般化モデルを用いていた従来の FSA と本章の FSA の違いを示す。4.4 節と 4.5 節で費用対効果評価の方法とその結果をそれぞれ示し、4.6 節では GCAF の感度解析と不確実性解析結果について示す。最後に 4.7 節でまとめを述べる。

4.2 要求区画指数(R-Index)とは

区画指数とは、船舶が損傷を受けた際に浮いていられる確率を表す (国土交通省 2016)。規則により要求される区画指数が要求区画指数 R、設計時に計算される区画指数が到達区画指数 A であり、 $A \geq R$ であることが求められる。R や A の値が大きいほど、沈没しにくい、すなわち安全性が高いことを意味している。

研究時点での最新規則の R は、(4.1)式から求められる。これは SOLAS 2009 と呼ばれるため、本章では R_{2009} と表記する。

$$R_{2009} = 1 - \frac{5,000}{L_s + 2.5N + 15,225} \quad (4.1)$$

ここで、 L_s : 船長、 $N = N_1 + 2N_2$ 、 N_1 : 救命艇の定員、 N_2 : N_1 を超えて搭乗できる乗員の人数である。

なお、(4.1)式は、 L_s と N の関数であるが、計算の都合上、 $L_s/B = 6.5$ 、 $Area = 0.8 \times L_s \times B$ 、 $Area = 2.5N'$ 、 $N' = N$ (N' は最大搭載人員) と仮定 (IMO 2014) し、本研究では、(4.1)式を N' のみの関数とした式を使用した。

一方、日本提案の R は(4.2)式で表される (Japan 2015)。これを本章では、 $R_{proposal}$ と表記する。

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

$$R_{proposal} = 0.0719 \times \ln N' + 0.291 \quad (4.2)$$

R_{2009} は最大搭載人員が大きくなると大きくなる関数であり、小型船より大型船の安全性が高くなるようになっている。しかしながら、SOLAS 2009 を満足する旅客船のリスク解析の結果 (EMSA 2015) によると、大型旅客船の衝突による人命損失リスク (Potential Loss of Life, PLL) は小型旅客船の約 7 倍大きい。したがって、小型旅客船より大型旅客船の方がリスクを低減させる必要性が高い。このため、 $R_{proposal}$ は最大搭載人員の小さい方より大きい方で、 R_{2009} からの上昇幅が大きくなるように設定された。

R_{2009} と $R_{proposal}$ を図示すると、Fig. 4.1 となる。本研究では、R を R_{2009} から $R_{proposal}$ に変更した場合のリスク減少量と費用増加量を推定し、費用対効果評価を実施する。

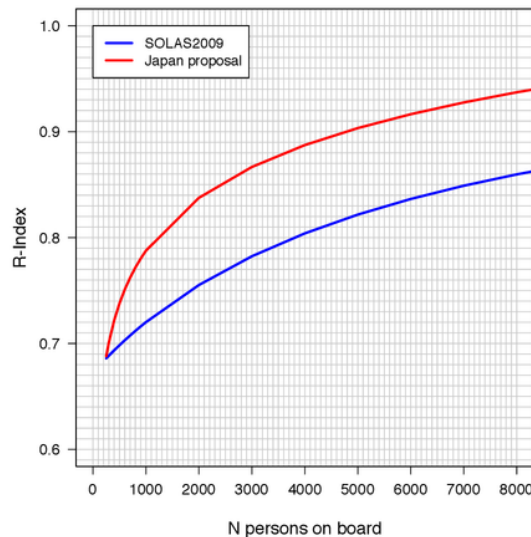


Fig.4.1 R_{2009} and $R_{proposal}$ (柚井他 2016b).

4.3 従来の FSA と本研究の違い（一般化モデル）

個船毎に船体構造、運航条件や定員数等は異なる。したがって、事故発生頻度や死者数、ひいてはリスクも個船毎に異なり、 $GCAF$ や $NCAF$ も個船毎に異なる。このため、規則の対象となる船舶全てに対して FSA を実施する必要があると考えられるが、それは時間や費用を要し難しい。よって、FSA では、検討対象となる船舶に共通する特徴をシステムや機能等の集合として定義する一般化モデルと呼ばれる船舶の抽象化が行われる。FSA では、この一般化モデルで定義された船舶に対して、リスク評価と費用対効果評価を実施することになる。

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

本研究の対象である旅客船の FSA の一般化モデルにおいて、特に重要となるのは、定員数であると考えられる。なぜなら、死者数や要求区画指数 R は定員数が関係するためである。貨物船の場合、船の大きさによらず、定員数に大きな差は無いため、定員数の重要性は旅客船ほどでないと考えられるが、旅客船の場合は定員数に大きな差があると考えられる。IHS データから求められる旅客船の定員数(Persons on Board, PoB)の分布は Fig. 4.2 となり、確かに旅客船の定員数には大きな差があると言える。このため欧州が実施した研究(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015) では、一般客船と RoPax 船についてそれぞれ定員数が異なる 3 隻、計 6 隻の船を対象に費用対効果評価が実施されていると考えられる。しかしながら、Fig. 4.2 に示すように定員数は一様に分布しておらず、定員数が異なる各 3 隻のみの検討では、基準変更がフリート全体に与える影響の検討には不十分であると考えられる。そのため本研究では、この定員数の差及びその船舶数の分布を考慮するため、定員数を実際の分布に従う乱数として与え、モンテカルロ法により、費用対効果評価を実施した。従来の FSA における GCAF 等の意味と本研究における GCAF 等の意味の違いを Fig.4.3 に示す。本研究のような検討を行うことにより、GCAF の確率分布が求められ、定員数を一定としていた従来の FSA よりも詳細に、基準変更が社会（フリート全体）へ与える影響の大きさを検討することが可能となると考えられる。

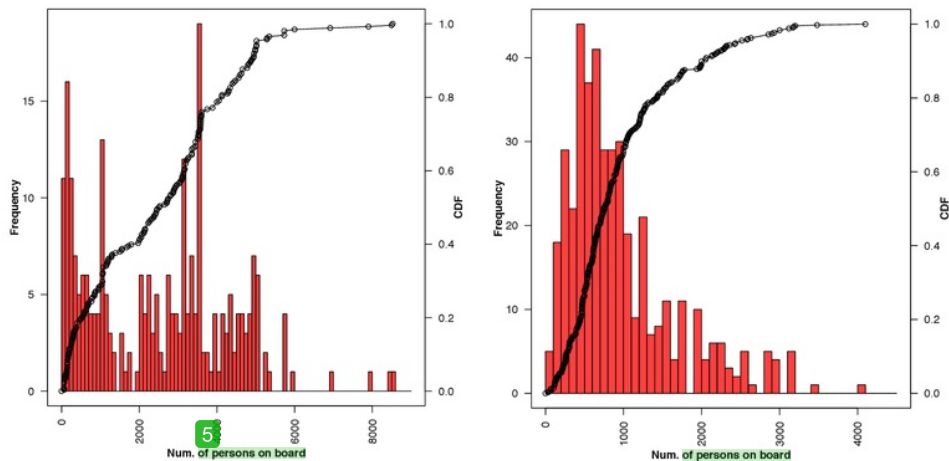
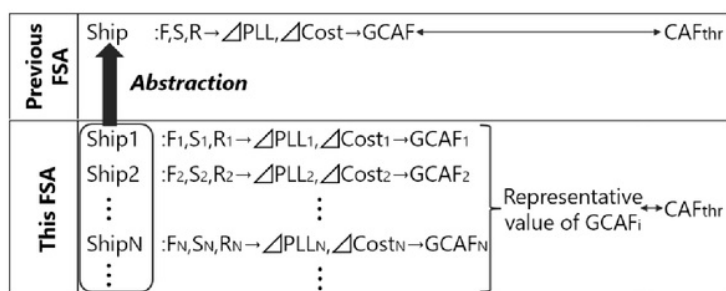


Fig.4.2 Histogram and CDF (Cumulative Distribution Function) of PoB (Left: Passenger/Cruise (T. Yuzui *et al.* 2016), Right: RoPax).

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価



NOTE: F, S, R, ∠PLL, ∠Cost and GCAF are frequency, severity, risk, ∠PLL, ∠Cost and GCAF of abstracted ship, respectively. F_i, S_i, R_i, ∠PLL_i, ∠Cost_i and GCAF_i are frequency, severity, risk, ∠PLL, ∠Cost and GCAF of ship i, respectively.

Fig.4.3 Sketch of difference between previous FSA study and this study.

4.4 費用対効果評価の方法

4.4.1 リスク減少量の推定法

リスク減少量は ET (Event Tree) 解析により推定し、その ET は文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)と同じものを利用した。その ET の概要を Fig.4.4 に示す。ET 及びその計算の詳細は付録 2 に示す。

Fig.4.4 に示す”Sinking”の確率として、要求区画指数 R の値を使用した。R は、前述したように定員数の関数として求められるため、Fig. 4.4 の”Num. of fatalities”の推定のために用いる”Num. of PoB”から求められる。R は衝突後に船舶が沈没しない確率を意味するため、沈没する確率は”1-R”となり、これを Fig.4.4 に示す”Sinking”の確率とした。この ET から求められる要求区画指数 R を R_{2009} 及び $R_{proposal}$ とした場合の衝突に関する人命損失リスク $PLL_{Collision}(R_{2009})$ 及び $PLL_{Collision}(R_{proposal})$ は付録 2 の Fig.A2.1 に示す ET の各シナリオの PLL の総和として求められる。各シナリオの PLL は Fig.A2.1 に示す計算式から求められる。

文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)では座礁に関する PLL も衝突と同様に ET から推定しているが、本研究では座礁リスクは簡易的に推定した。すなわち、文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)の推定結果によると座礁リスクは衝突リスクの約 3.0 倍（一般客船）、約 2.4 倍（RoPax 船）であるため、本研究ではこの関係から座礁リスクを推定した。

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

リスク減少量 $\Delta Risk$ は(4.3)式から求められる。PLL は一般的に 1 隻 1 年当たりの死者数[fatalities/(ship×year)]として求められるが、GCAF は一般的に Lifetime でのリスク減少量と費用増加量から求められる。そのため、(4.3)式では Lifetime (T 年) を掛けている。

$$\Delta Risk = T \times (PLL(R_{2009}) - PLL(R_{proposal})) \quad (4.3)$$

ここで、 $PLL(R_{2009})$ 、 $PLL(R_{proposal})$ は要求区画指数 R を R_{2009} 、 $R_{proposal}$ とした場合の衝突と座礁に関する PLL である。

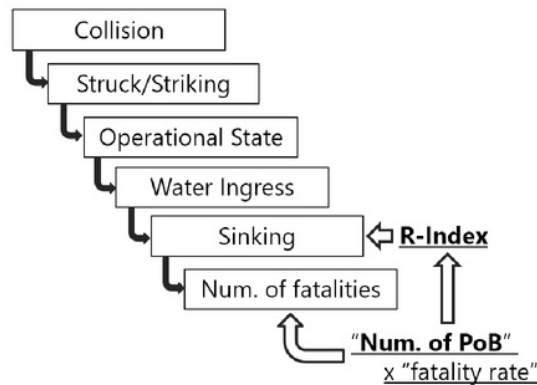


Fig.4.4 Structure of ET.

4.4.2 費用増加量の推定法

R の見直しにより設計変更等が必要になり、建造費及び運航費等の増加が考えられる。設計変更としては、例えば区画変更や船幅の増加等が考えられ、文献(EMSA 2015, R. Hamann ⁴ *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)では船毎に数種類の設計変更案を考え、変更案毎の到達区画指数 A の変化と Lifetime (30 年) での費用増加量を推定している。前述したように規則は $A \geq R$ であること求めているが、その差が大きいほどコストが大きくなるため、 $A = R$ となるように設計されることが考えられる。したがって、本研究では、 $A = R$ とみなし、 R の増加率を変数とする費用増加量の近似式 (以降、コスト関数と呼ぶ) を求め、これを利用して、費用増加量を推定した。文献(EMSA 2015, R. Hamann ⁴ *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)では大型船、中型船及び小型船の費用増加量を推定しており、その内訳は、「建造費」、「燃料費」、「保守費」等である。文献(Japan 2015)で小型船の費用増加量は大型船と比較すると相対的に高くなることが指摘されている

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

が、文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)のデータは単純に船が大きいかほど費用増加量が大きくなるように推定されており、小型船の区画増加による設計の難化等は考慮されていない。そこで本研究では、近似式の変数を R の増加率とすることにより、同じ R の増加量でも大型船より小型船の方が費用増加量が大きくなるようにした。また、本研究の対象としている(2)式の場合、R の増加率は最大で約 0.11 であるため、文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)のデータのうち R の増加率が 0.11 以上のデータを除外してコスト関数を求めた。

一般客船、RoPax 船に関するコスト関数を(4.4)、(4.5)式に、コスト関数の根拠となるデータを Fig.4.5 に示す。図において三角形で示した点は、外れ値として扱い、近似式の算出には含んでいない。近似式は統計解析ソフトウェア R3.2.2 を用いて、線形近似、指数近似及び累乗近似を検討し、残差平方和が小さいものをコスト関数として利用した。

$$\Delta Cost = 3.3 \times 10^7 \times \frac{(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}} + 5.3 \times 10^6 \quad (4.4)$$

$$\Delta Cost = 3.3 \times 10^9 \times \left(\frac{R_{proposal} - R_{2009}}{R_{2009}} \right)^{2.2} \quad (4.5)$$

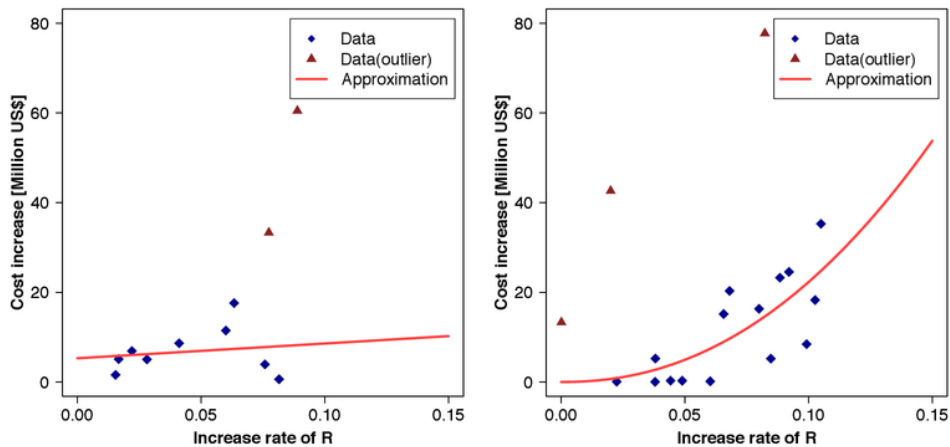


Fig.4.5 Data of cost increase and the approximation (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).

4.4.3 費用対効果の評価方法

ET の初期事象(Collision)の発生頻度、それに続く各ヘディングの分岐確率及び”Num. of PoB”は、それぞれ仮定した確率分布に従う乱数として発生させる。試行回数が N 回の場合、N 個の $\Delta Risk$ 及び $\Delta Cost$ が求められ、GCAF も N 個求められる。GCAF 算出のフローチャートを Fig. 4.6 に示す。

求められた GCAF の代表値が閾値 CAF_{thr} より小さければ、対象としている要求区画指数 R への基準変更は費用対効果が有ると判定される。

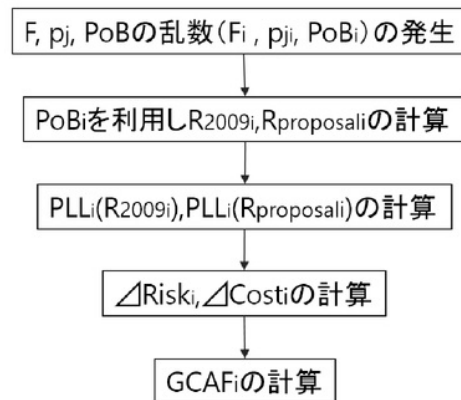


Fig.4.6 Flow chart of the calculation of GCAF.

4.5 費用対効果評価の結果

リスク減少量推定の入力値である初期事象(Collision)の発生頻度、それに続く各分岐確率及び”Num. of PoB”を乱数として発生させた。初期事象の発生頻度は IHS データから求められる平均値及び分散を持つ切断正規分布に従うと仮定して、乱数を発生させた。データの対象期間は第3章と同じく1990年-2012年とした。各分岐確率は文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)と同様の平均値及び分散を持つ切断正規分布に従うと仮定して、乱数を発生させた。正規分布でなく切断正規分布を利用している理由と切断正規分布に従う乱数の発生法は付録2を参照されたい。 ”Num. of PoB”は実際の分布に従う乱数を発生させた。なお、日本案の R は 241 人以下で SOLAS 2009 の R より小さくなるため、242 人以上についてのみ計算した。発生された乱数の一例として、衝突事故発生頻度のヒストグラムを Fig. 4.7 に示す。なお、文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)と同様に Lifetime は T=30 とした。

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

費用増加量は、(4.4)式と(4.5)式のコスト関数から推定した。

以上から試行回数 N を 10 万回として推定された $GCAF$ のヒストグラムを Fig. 4.8 に、その平均値や中央値等を Table 4.1 に示す。なお、 $GCAF$ の最大値は Table 4.1 に示す通りであるが、Fig.4.8 の横軸の最大値は、紙面の都合上、これより小さくしていることに留意されたい。

Fig. 4.8 と Table 4.1 を見て分かる通り、求められた $GCAF$ は裾の長い分布となっている。付録 2 に示すように、裾の長い分布は平均値より中央値で評価する方が適切であると考えられるため、本稿では、中央値を基に費用対効果評価を実施することにする。また、費用対効果評価の閾値 CAF_{thr} は付録 2 に示す理由から $CAF_{thr} = 800$ 万 [US\$/person] として費用対効果評価を実施することにする。そうすると、Table 4.1 に示す通り、一般客船の $GCAF$ の中央値は CAF_{thr} より小さく費用対効果有り、RoPax 船の $GCAF$ の中央値は CAF_{thr} より大きく、費用対効果無しという結果となった。

なお、 $GCAF$ の代表値として中央値以外を利用したり、 CAF_{thr} として 800 万以外の値を利用した場合、結果が変わる可能性がある。これらの値の妥当性については検証が必要であると考えられる。

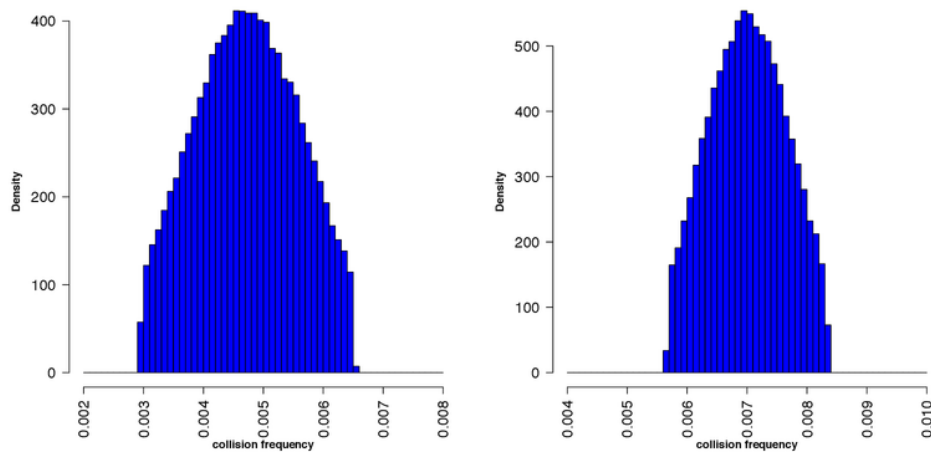


Fig.4.7 Histogram of random numbers following the truncated normal distribution with 90%CI (Confidence Interval) used for the collision frequency (Left: Passenger/Cruise (T. Yuzui *et al.* 2016), Right: RoPax).

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

Table 4.1 Calculated *GCAF* [US\$/person].

	Passenger/Cruise	RoPax
Mean	1.10×10^8	1.29×10^7
Median	5.28×10^6	1.07×10^7
Minimum	6.00×10^4	2.34×10^3
Maximum	1.02×10^{11}	3.98×10^8
Lower limit (5%)	1.71×10^6	3.19×10^6
Upper limit (95%)	1.49×10^8	2.90×10^7

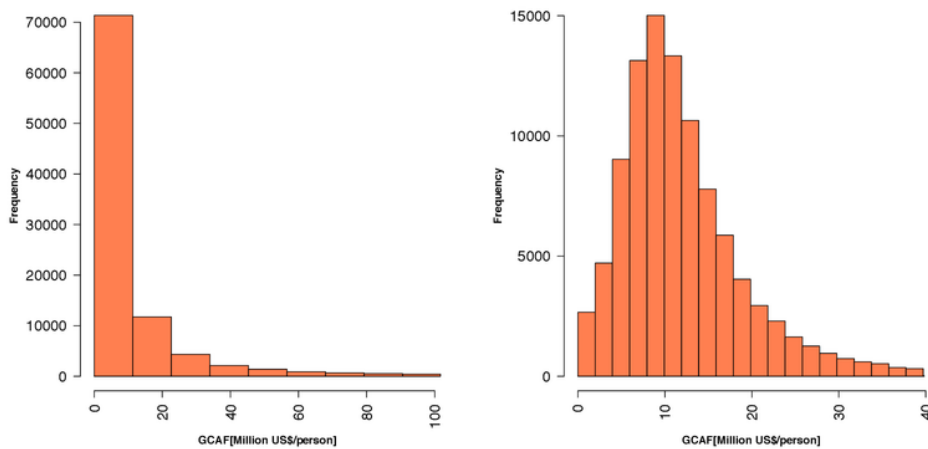


Fig.4.8 Histogram of calculated *GCAF* (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).

4.6 感度解析と不確かさ解析

FSA は入力パラメータが多く、その多くに不確かさがあるため、出力である *GCAF* の不確かさも大きい。そのため、FSA ガイドライン (IMO 2015) では感度解析と不確かさ解析の実施を求めている。本章では、入力パラメータのうち、初期事象の発生頻度に着目し、感度解析と不確かさ解析を実施した。感度解析としては、初期事象の発生頻度が費用対効果評価結果に与える影響について検証し、不確かさ解析としては、費用対効果が無いと判定される確率について調査した。

4.6.1 初期事象の発生頻度が評価結果に与える影響

4.5 節の評価では、初期事象（衝突）の発生頻度として、対象期間を 1990 年から 2012 年として IHS データから求められる値 (Fig.4.7) を用いていたが、ここでは文献 (EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015) と同様の値を用いることとする。それらから求め

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

られる平均値を Table 4.2 に示す。文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)では、IHS データを主要なデータとしているが、独自に他の利用可能なデータも調査し、それらを合わせて開発されたデータベースを利用し、対象期間を 2000 年から 2012 年として、発生頻度を求めている。つまり、対象期間としては、4.5 節の評価より近年の船を対象としている。¹³⁸しかしながら、Table 4.2 に示すように近年の方が衝突頻度は大きくなっている。

この衝突頻度を用いて $GCAF$ を計算した結果を Table 4.3 に示す。¹⁵4.5 節と同様に $CAF_{thr}=800$ 万 [US\$/person] とすると、一般客船、RoPax 船ともに費用対効果有りとの結果となった。近年の船の衝突頻度を対象とした場合、4.5 節での評価より人命損失リスクが大きく推定され、 $GCAF$ の分母であるリスク減少量も大きくなるため、4.5 節での評価より $GCAF$ が小さく推定されたと考えられる。

Table 4.2 Mean of collision frequency.

	Fig. 4.7	文献 (EMSA 2015, R. Hamann <i>et al.</i> 2015)
Passenger/Cruise	4.73×10^{-3}	6.36×10^{-3}
RoPax	7.01×10^{-3}	9.95×10^{-3}

Table 4.3 Calculated $GCAF$ by using cost function obtained from medium and small size ships data [US\$/person].

	Passenger/Cruise	RoPax
Mean	7.75×10^7	9.14×10^6
Median	3.94×10^6	7.56×10^6
Minimum	5.45×10^4	1.82×10^3
Maximum	1.86×10^{11}	3.38×10^8
Lower limit (5%)	1.26×10^6	2.25×10^6
Upper limit (95%)	1.09×10^8	2.05×10^7

4.6.2 費用対効果が無いと判定される確率

4.5 節や 4.6.1 節では、概ね費用対効果があると結論された。しかし、それは $GCAF$ の中央値が CAF_{thr} より小さいとの観点からであった。⁸これは、 CAF_{thr} より大きい $GCAF$ が存在する、つまり費用対効果が無い場合もあることを意味する。⁸⁹そこで本節では、費用対効果が無いと判定される確率がどの程度であるのかを調査する。¹⁰⁸

本研究ではモンテカルロ法の試行回数を 10 万回としているため、それで計算された一般客船と RoPax 船それぞれ 10 万個の $GCAF$ について、そのうち何%の $GCAF$ が

第4章 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

³ CAF_{thr} より大きいかを調査した。その結果を Table 4.4 に示す。4.5 節の評価では一般客船は約 37%、RoPax 船は約 70%、4.6.1 節の評価では一般客船は約 29.7%、RoPax 船は 45.9% の確率で費用対効果が無いと判定されるとの結果となった。4.5 節での RoPax 船の評価以外は費用対効果が無いと判定される確率が 50% より小さく、高い確信度で費用対効果が有ると言える。

Table 4. 4 Percentages that calculated $GCAF$ is larger than CAF_{thr} [%].

	Passenger/Cruise	RoPax
Section 4.5	36.9	70.0
Section 4.6.1	29.7	45.9

4.7 第4章のまとめ

⁵⁰ FSA の一般化モデルの考え方を拡張し、フリート全体に対する費用対効果を検証する方法を提案した。⁵⁰ これにより、従来より適切に安全基準改正の費用対効果を評価可能となると考えられる。

¹¹ この方法に基づき、旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価を実施し、その結果、評価を実施した要求区画指数 R の案は、費用対効果が有る可能性が高いことを示した。ただし、利用可能なデータの制約により、費用対効果評価の計算に使用したコスト関数は信頼性が低いと考えられる。費用増加量のデータの収集及び信頼性の高いコスト関数の開発は今後の課題である。

第 5 章 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

本章では、GBS-SLA の構造分野以外への適用を目的に、第 4 章で提案・実施した費用対効果評価手法を利用し、GBS-SLA の Tier I をフリート全体の費用対効果の最大化として、Tier II として Tier I を満たす要求区画指数 R の式を算出する。つまり、費用対効果の観点からの要求区画指数 R の最適化を実施し、フリート全体の費用対効果を最大とする要求区画指数 R の式を算出する。

70 5.1 背景と目的

1.1 節で述べたように現在 IMO では、ある要件が確保すべき安全レベルを定量的に設定する GBS-SLA と呼ばれる GBS の暫定指針の開発が進められており、IMO 事務局は具体的な GBS-SLA の例の提出を IMO 加盟国に求めている(IMO 2017a)。しかしながら、著者の知る限り、GBS-SLA による規則開発事例は存在せず、研究レベルでも構造規則に関して GBS-SLA の観点から検討した例が数例ある程度である。飯島他(2011)は、リスクから便益を引いた正味リスクが最小化される安全レベルが社会から許容される最も受容性の高い安全レベルであるとの考えのもと、タンカーとバルクキャリアの船体縦曲げ強度²¹を対象に、費用対効果の観点からアップパーデッキ部の板厚増減に関する安全性指標を求めている。R. Skjong *et al.* (2002)は GBS-SLA については言及していないが、油タンカーの Hull girder の信頼性指標の違いによる FSA の費用対効果評価指標 GCAF や NCAF の違いを推定し、その逆算から目標信頼性指標が設定できる⁶³ことを示唆している。また、GBS-SLA の目的である規則開発を目的にはしていないが、川村他(2010)や Papanikolaou A. *et al.* (2010)ではリスクの観点から船体構造の最適化を実施している。川村他(2010)では、建造費、運航費や運航収入等の経済性、事故による船体破壊リスク等を考慮した安全性、事故による油流出リスクや船舶運航による CO2 排出リスクを考慮した環境性の 3 側面を総合的に考慮した船舶のライフサイクルにおける便益最大化の観点から船体構造の最適化を実施している。Papanikolaou A. *et al.* (2010)では、貨物容積の最大化、油流出リスクの最小化及び船体重量の最小化の観点から油タンカー設計の多目的最適化を実施している。これらは構造に関する GBS-SLA⁷⁷であり、前述したように構造分野以外¹⁵の規則に関して GBS-SLA の観点から研究した例は著者の知る限り存在しない。

7
第5章 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

24

そこで本研究では、GBS-SLA の構造分野以外への適用を目的に、その適用対象として旅客船の要求区画指数 R を取り上げる。5.2 節で述べるように Tier I や Tier II の設定法としては幾つか考えられるが、ここでは第 4 章での成果を利用するため、Tier I をフリート全体の費用対効果の最大化として、Tier II は Tier I を満たす要求区画指数 R とする。したがって、フリート全体の費用対効果を最大とする要求区画指数 R の式の算出を本章の目的とする。

なお、第 4 章では日本案の R に対して研究当時の最新規則である SOLAS 2009 からのリスクと費用の変化量をベースに費用対効果評価を実施したが、2017 年 6 月に開催された MSC 98 において、(5.1)式及び Fig.5.1 に示す新しい R の式が合意された (IMO 2017b)ため、要求区画指数 R を規定した SOLAS 条約附属書第 II-1 章第 6 規則は新しい式に改正される。よって、本章では、この新しい式をベースにリスクと費用の変化量を推定し費用対効果評価を実施し、フリート全体の費用対効果を最大とする要求区画指数 R の式を算出することとする。

$$R_{MSC98} = \begin{cases} 0.722 & (N' < 400) \\ \frac{N'}{7,580} + 0.66923 & (400 \leq N' \leq 1,350) \\ 0.0369 \cdot LN(N'+89.048) + 0.579 & (1,350 < N' \leq 6,000) \\ 1 - \frac{852.5 + 0.03875 \cdot N'}{N'+5,000} & (N' > 6,000) \end{cases} \quad (5.1)$$

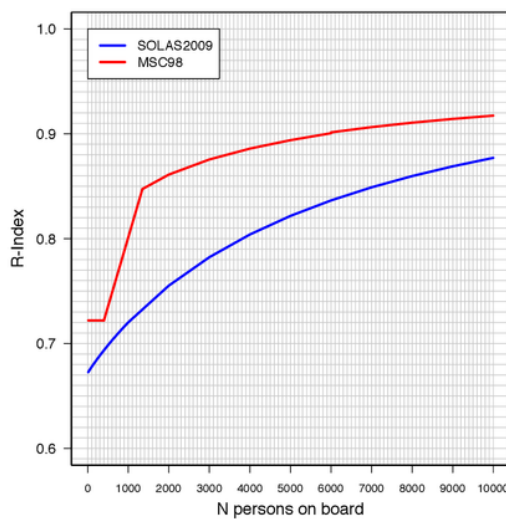


Fig.5.1 R_{2009} and R_{MSC98} .

5.2 GBS-SLA における Tier I と Tier II の設定法

2.5 節で述べたように GBS-SLA の Tier I や Tier II の値やその設定法は未だ確立していないが、大きく分けて ALARP を利用する方法と費用対効果評価を利用する方法の 2 種類があると考えられる。前者については、GBS-SLA の暫定指針で Tier I の一例として ALARP が利用可能であることが記述されており、後者については、飯島他 (2011) や R. Skjong *et al.* (2002) で費用対効果評価が利用されている。また、後者は更に二つに分けられる。一つは、FSA のような現行規則からの変化量ではなく、費用や便益の絶対量を利用する方法、もう一つは、FSA と同様に現行規則からの費用や便益の変化量を利用する方法である。本節では、これらの概要について述べる。

なお、前述したように本研究では 5.2.3 節に示す費用対効果評価を利用する設定法 (現行規則からの費用と便益の変化量の比較) により Tier I と Tier II を設定している。

5.2.1 ALARP を利用する設定法

Tier I や Tier II として FSA のリスク許容基準、つまり許容可能なリスクの最大値として ALARP 領域の上限を用いることが可能であると考えられる。2.4 節で述べたように FSA ガイドライン (IMO 2015) には個人リスクの許容基準が示されている。ただし、これはある特定のハザードのリスク許容基準ではなく、危険に暴露されている人間が経験する全てのハザードのリスクの合計、つまりトータルリスクの許容基準であることに注意する必要がある。したがって、これは Tier I として利用し、これを満たすように Tier II を設定する必要がある。つまり、Tier II として、例えば、衝突のリスク許容基準、座礁のリスク許容基準等をそれぞれ設定し、それらの合計が Tier I を超えないように Tier II のそれぞれの許容基準を設定する必要がある。

以上は人命損失に対する許容基準であるが、環境影響や財産喪失等の観点からリスク許容基準を設定する必要もあろう。しかしながら、それらについては人命損失のようなリスク許容基準は海事分野では未だ設定されいないため、それらのリスク許容基準については、一から検討する必要があると考えられる。

5.2.2 費用対効果評価を利用する設定法 (費用と便益の絶対量の比較)

Tier I や Tier II の目標安全性が高ければ、事故発生の可能性の低減や被害の拡大を防ぐことに効果的であるが、費用の増大に繋がる恐れがある。したがって、安全性と経済性の両方を考慮した妥当な安全レベルが存在すると考えられ、安全性、環境影響

第 5 章 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

及び経済性等の要素を定量的に評価し、定量的に評価された値をベースに目標安全性を設定することが可能であると考えられる。すなわち、川村他 (2010) や Papanikolaou A. *et al.* (2010) のように安全性、環境影響及び経済性等を全て考慮し、船舶のライフサイクルにおける便益を最大化する最適化問題として扱い、その最適解を目標安全性として設定可能であると考えられる。

5.2.3 費用対効果評価を利用する設定法（費用と便益の現行規則からの変化量の比較）

5.2.2 節と同様の費用対効果評価を利用する設定法であるが、費用やリスクとして、現行規則からの変化量を用いる点が異なる設定法であり、飯島他(2011)や R. Skjong *et al.* (2002) で利用されている設定法である。飯島他(2011)ではリスク減少量と費用増加量の「差」から目標安全性を検討しているが、R. Skjong *et al.* (2002) では FSA の費用対効果評価指標である GCAF や NCAF を利用している。つまり、リスク減少量と費用増加量の「比」から目標安全性を検討している。本研究では、4 章での研究成果を利用するため、R. Skjong *et al.* (2002) と同様にリスク減少量と費用増加量の「比」、つまり GCAF から目標安全性を検討する。

5.3 最適化方法

5.3.1 概要

GCAF の代表値が最小となるような R の式を求める。本章では第 4 章と同じく代表値として中央値を用いる。R の式としては、(5.2)式と(5.3)式に示す 2 種類を考慮した。

$$R_{opt1}(N') = 1 - \frac{c}{aN'+b} \quad (5.2)$$

$$R_{opt2}(N') = dLN(N'+e) + f \quad (5.3)$$

GCAF の中央値は第 4 章と同様の手法を用いて求めるが、コスト関数は付録 3 に示す通り、第 4 章とは異なるものを利用した。

5.3.2 最適化手法

本研究では、最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) を用いた。Carroll によって開発された GA driver (Carroll, David L. 1999) を本研究用

に改良した。GA の設定としては、1 世代の個体（遺伝子）総数を 10,000、突然変異率を 0.2 又は 0.3、交差アルゴリズムとしては一様交叉を用いた。

5.3.3 目的関数

前述したように目的関数は GCAF の中央値の最小化である。R の式を(5.2)式や(5.3)式にした場合の GCAF を求め、その中央値を最小化するような(a,b,c)又は(d,e,f)の組み合わせを求める。

5.3.4 制約条件

要求区画指数 R は確率であるため 0 以上 1 以下であることが求められる。したがって、(5.4)式が制約条件となる。

$$0 \leq R_{opti}(N') \leq 1 \quad (5.4)$$

また、全ての Num. of PoB においてリスク増加は認められない、つまり R_{opti} は R_{MSC98} より大きくなくてはいけないとの考えのもと、(5.5)式も制約条件とした。

$$R_{opti}(N') > R_{MSC98}(N') \quad (5.5)$$

更に(5.6)式の通り、R は増加関数であるとの条件も制約条件とした。

$$R_{opti}(N'+1) > R_{opti}(N') \quad (5.6)$$

5.3.5 遺伝子設定

本研究の最適化計算¹⁸⁰では(5.2)式と(5.3)式に示す a~f をパラメータとしており、これらを GA 処理の染色体として表現している。これらのパラメータは 5.3.4 節で示した制約条件から(5.7)式と(5.8)式を満たす数となる。

$$a > 0 \quad \text{and} \quad b > -aN' \quad \text{and} \quad 0 < c \leq aN'+b \quad (5.7)$$

$$e > -N' \quad \text{and} \quad -dLN(N'+e) \leq f \leq 1-dLN(N'+e) \quad (5.8)$$

(5.7)式や(5.8)式を満たすように a~f の最小値と最大値は Table 5.1 に示すように設定した。また、計算コスト⁵⁶の節約の観点から a, b, c 及び e については整数とし、d 及び f については連続変数であるが適切な Interval を有する実数とした。なお、N' は旅客船の定義から 13 人以上とし(IMO 1974)、計算の都合上 9,999 人以下とした。また、

7
第5章 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

40 (a,b,c)や(d,e,f)の組み合わせによっては、制約条件を満たさない場合もあるため、その場合には目的関数の計算の際に penalty を与えるようにした。134

Table 5.1 Max. and Min. values of parameters in this optimization calculation.

	a	b	c	d	e	f
Min.	1	-9,998	-9,998	0.01	-12	-1.0
Max.	32	9,998	9,998	10.0	9,999	1.0

5.3.6 計算手順

15 本最適化計算のフローチャートを Fig.5.2 に示す。各世代、遺伝子毎に GCAF が計算されるが、その計算では同じ乱数を使用している。よって、最初に GCAF 計算のための乱数を発生させている。その乱数を使用し、異なる R の式に対して GCAF の中央値を計算する流れである。この GCAF の中央値を計算する際は、第 4 章と同じ方法を用いているが、次の 2 点のみ異なる。一つは、前述したように SOLAS 2009 の R の式からのリスク減少量や費用増加量を計算しているのではなく MSC 98 で合意された R の式からのリスク減少量や費用増加量を計算している点、もう一つはコスト関数を付録 3 に示す関数に変更している点である。その他については、第 4 章と同じである。

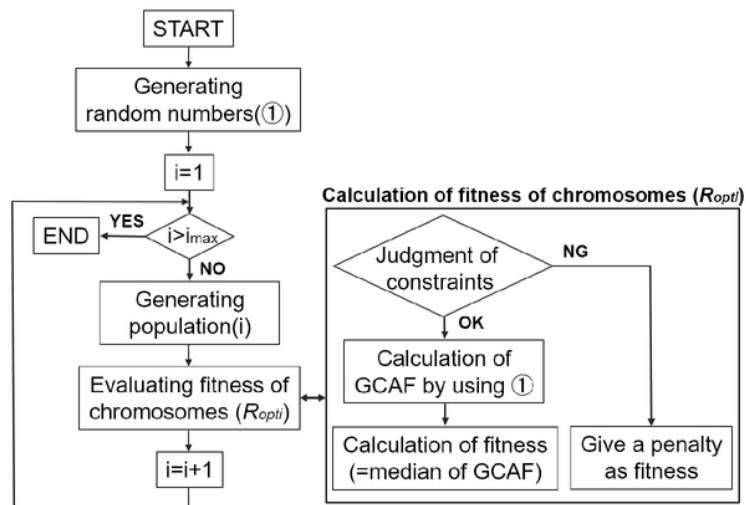


Fig.5.2 Flow chart of optimization calculation.

5.4 最適化結果

5.4.1 一般客船

(5.2)式や(5.3)式に基づき最適化された一般客船の R の式はそれぞれ(5.9)式、(5.10)式の通りである。これらを図示すると、Fig.5.3 となる。これらの式に基づく GCAF の計算結果は Table 5.2 の通りである。

$$R_{opt1}(N') = 1 - \frac{2,264}{5N' + 8,803} \quad (5.9)$$

$$R_{opt2}(N') = 0.044LN(N'+105) + 0.552 \quad (5.10)$$

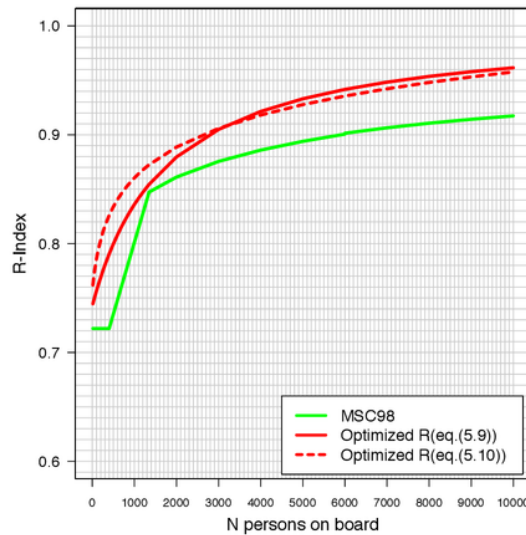


Fig.5.3 Optimized R (eqs. (5.9) and (5.10)) vs. R_{MSC98} .

Table 5.2 Calculated GCAF of Passenger/Cruise ships based on eqs. (5.9) and (5.10)

	[US\$/person].	
	Eq. (5.9)	Eq. (5.10)
Mean	6.30×10^6	6.29×10^6
Median	4.29×10^6	4.28×10^6
Minimum	1.47×10^5	1.16×10^5
Maximum	1.16×10^8	1.10×10^8
Lower limit (5%)	1.38×10^6	1.46×10^6
Upper limit (95%)	1.78×10^7	1.77×10^7

5.4.2 RoPax 船

RoPax 船の最適化結果を(5.11)式、(5.12)式及び Fig.5.4 に示す。また、これらの式に基づく GCAF の計算結果を Table 5.3 に示す。

$$R_{opt1}(N') = 1 - \frac{2,743}{6N' + 9,885} \quad (5.11)$$

$$R_{opt2}(N') = 0.073LN(N'+262) + 0.316 \quad (5.12)$$

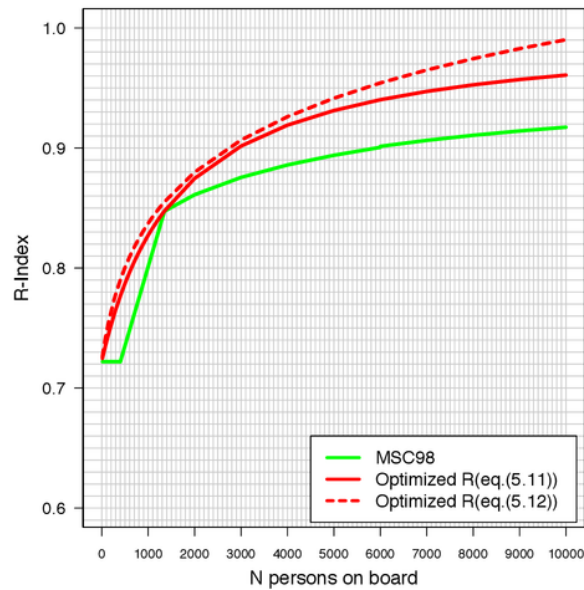


Fig.5.4 Optimized R (eqs. (5.11) and (5.12)) vs. R_{MSC98} .

Table 5.3 Calculated GCAF of RoPax ships based on eqs. (5.11) and (5.12) [US\$/person].

	Eq. (5.11)	Eq. (5.12)
Mean	4.54×10^6	2.64×10^6
Median	5.35×10^5	5.70×10^5
Minimum	6.66×10^3	6.26×10^3
Maximum	3.82×10^8	1.08×10^8
Lower limit (5%)	1.23×10^5	1.22×10^5
Upper limit (95%)	1.82×10^7	9.80×10^6

5.5 考察

5.5.1 一般客船の最適化結果の比較

Fig.5.3 を見ると、Num of PoB が 3,000 人以上では二つの式はほぼ重なっているが、3,000 人より小さい部分では(5.10)式の方が R の値が大きくなっていることが分かる。ただし、Table 5.2 より GCAF の中央値は(5.9)式も(5.10)式もほぼ同じである。したがって、どちらの式も最適解が得られている可能性が高いと考えられる。なお、GCAF の中央値は(5.10)式の方が小さいため、(5.10)式の方が費用対効果が高い式であることがわかる。

Fig.5.3 を見ると、(5.10)式の R は、Num. of PoB が 2,000 人より小さい部分の方が Num. of PoB が 2,000 人より大きい部分より MSC98 からの R の増加量が大きい傾向にあり、Num. of PoB が 2,000 人より大きい部分では MSC98 からの R の増加量が一定であることがわかる。この理由としては下記が考えられる。

付録 3 に示すように小型船のコスト関数は R が増加しても費用があまり大きくなるような関数となっており、中型船と大型船のコスト関数は R の増加率が 0.03 程度まではあまり変わらないがそれ以上の R の増加率では急激に費用増加量が大きくなるコスト関数となっている。そのため、Num. of PoB が 2,000 人より小さい部分では R を大きく増加させることによりリスク減少量を大きくしているが、Num. of PoB が 2,000 人より大きい部分では R の増加率は 0.03 程度としリスク減少量を最大限大きくする中で費用増加量を抑え、費用対効果を大きくしていると考えられる。このために、GCAF の中央値は(5.10)式の方が小さくなっていると考えられる。

5.5.2 RoPax 船の最適化結果の比較

Fig.5.4 を見ると、Num of PoB に関わらず、(5.12)式の方が R の値が大きくなっていることが分かる。しかし、Num of PoB が 4,000 人までは(5.11)式と(5.12)式の差は小さくなく、その形状は近いものとなっている。Fig.4.3 に示す通り RoPax の Num. of PoB の最大値は 4,000 人程度であり、それ以上の Num. of PoB は GCAF 計算に影響しない。つまり、Num of PoB が 4,000 人までは(5.11)式と(5.12)式の差が大きくないことは、どちらも最適解が得られている可能性が高いことを示唆していると考えられる。ただし、Table 5.3 より GCAF の中央値は(5.11)式の方が小さい、つまり(5.11)式の方が費用対効果が高い式であることがわかる。

第 5 章 ⁷ 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

Fig.5.4 を見ると、一般客船のように Num. of PoB の小さい部分で、MSC98 からの R の増加量が大きくなっていないことがわかる。⁶⁵ この理由としては下記が考えられる。

²³⁰ 付録 3 に示すように RoPax 船の小型船のコスト関数は一般客船と同様に R の増加率が大きくなって費用増加量があまり大きく変わらない関数であるが、RoPax 船の中型船と大型船のコスト関数は一般客船のコスト関数と異なり、R の増加率が大きくなると費用増加量が急激に大きくなるコスト関数となっている。そのため、中型船や大型船のコスト関数の適用範囲である Num. of PoB が約 1,000 人より大きい部分で R の増加率を可能な限り小さくし費用増加量を小さくしていると考えられる。小型船のコスト関数は R の増加率が大きくなって費用増加量はあまり変わらないため、小型船のコスト関数の適用範囲である Num. of PoB が約 1,000 人より小さい部分で一般客船と同様に R の増加率を大きくすることも可能であると考えられるが、本研究では Num. of PoB ²² に関わらず最適化される R を一つの式として表現しているため、Num. of PoB が約 1,000 人より大きい部分で R の増加率を可能な限り小さくするために、⁷³ Num. of PoB が約 1,000 人より小さい部分でも R の増加率はそれほど大きくなっていないものと考えられる。

5.5.3 一般客船と RoPax 船の最適化結果の比較

これまでの SOLAS 2009 の R の式や MSC 98 で合意された R の式は、一般客船、RoPax 船ともに同じ R の式が用いられている。しかし、5.4 節に示した結果を見るとわかるとおり、費用対効果の観点から最適化された R の式は、一般客船と RoPax 船で異なる式となっている。これは、一般客船、RoPax 船それぞれのリスクレベルや経済的影響を考慮した場合、つまり GBS-SLA の観点からは、それぞれ異なる R の式を用いる方が合理的¹³²であることを示唆していると考えられる。

5.5.4 今後の課題

本章で最適化された式は、FSA の費用対効果の観点から最適化された結果であり、実際に規則等に反映する場合は、損傷時復原性の観点からの妥当性の検証等も必要であろう。

また、FSA の観点からも、GCAF 計算の入力値¹⁷⁸について検証する必要がある。コスト関数は信頼性が低いと考えられるため、第 4 章と同様にデータの収集及びコスト関数の信頼性の向上は今後の課題である。更に、本章の計算では、コスト関数を小型

第 5 章 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

船、中型船、大型船で異なる関数を利用しているが、その他の衝突頻度等の入力値についても、小型船、中型船、大型船で異なる値を利用することにより、より精密な計算が可能であると考えられる。

本最適化計算は、GCAF の中央値の最小化の観点からの最適化計算であるが、本計算方法は GCAF の確率分布を算出可能な点が特徴であるため、中央値だけでなく他の観点からの最適化や、どのような観点からの最適化が規則策定（GBS-SLA）にとって適切であるかの検討も今後の課題である。

本研究の費用対効果評価は人命損失リスクと建造費や運航費等のみを考慮しているが、GBS-SLA の観点からは、この他に船体重量増加による二酸化炭素排出量の増加や区画増加による燃料油等の油流出リスクの減少等の環境影響についても考慮する必要がある。

5.6 第 5 章のまとめ

本章では、構造規則以外の規則への GBS-SLA の適用を目的に、GBS-SLA の観点から旅客船の損傷時復原性規則である要求区画指数 R について検討した。すなわち、第 4 章で提案した一般化モデルを拡張した費用対効果評価手法を用いて、MSC98 で合意された R の式を基準にした費用対効果の観点から旅客船の要求区画指数 R の最適化を実施した。その結果、フリート全体の費用対効果を最大化する要求区画指数 R の式を得ることが出来た。また、この最適化結果から、現行規則では一般客船と RoPax 船で同じ R の式を用いているが、それぞれのリスクレベルや経済的影響を考慮した場合、つまり GBS-SLA の観点からは、それぞれ異なる R の式を用いる方が合理的であることが示唆された。

ただし、最適化計算の入力値の不確実性は高いと考えられるため、本章の結果も不確実性が高いと考えられる。入力値の信頼性の向上が今後の課題の一つである。

第6章 結論

本研究では FSA や GBS-SLA における課題の幾つかを解決する方法を提案し、その方法の適用対象として旅客船の要求区画指数 R を取り上げ、FSA や GBS-SLA の方法論の深化と提案する方法を用いた旅客船の要求区画指数 R に関する FSA や GBS-SLA を目的に次の課題を実施した。

- ① 統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価
- ② 旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価
- ③ 費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

174
その結果、以下の知見を得た。

①統計データに基づく旅客船のリスク解析と評価

1,000GT 以上の一般客船と RoPax 船について、1990 年より前に建造された船舶と 1990 年以降に建造された船舶の 2 種類に分けて分析した。建造年を基に分析することにより、現行のリスクレベルを従来より適切に考慮した分析が可能となり、更に個人リスクのリスク許容基準を考慮した設定法から求められる F-N 線図上の ALARP 領域によりリスク評価を実施することにより、従来方法より原理的に正しくリスクを評価できた。その結果、一般客船、RoPax 船ともにリスクは低減しているように見えるが、両側 5%の危険率ではリスク低減は認められなく、現行のリスクは ALARP 領域にあり、Risk Control Option (RCO)の検討が必要であることがわかった。

②旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価

FSA の一般化モデルの考え方を拡張し、フリート全体に対する費用対効果を検証する方法を提案した。これにより、従来より適切に安全基準改正の費用対効果を評価可能となると考えられる。この方法に基づき、旅客船の要求区画指数 R 見直しに関する費用対効果評価を実施し、その結果、評価を実施した要求区画指数 R の案は、費用対効果が有る可能性が高いことを示した。ただし、費用対効果計算の入力値（特にコスト関数）の信頼性の向上等が今後の課題である。

③費用対効果の観点からの旅客船の要求区画指数 R の最適化

②で提案した一般化モデルを拡張した費用対効果評価手法を用いて、MSC98 で合意された R の式を基準にした費用対効果の観点から旅客船の要求区画指数 R の最適

第6章 結論

化を実施した。つまり、構造規則以外の規則へ初めて GBS-SLA²³ を適用した。その結果、現行規則では一般客船と RoPax 船で同じ R の式を用いているが、それぞれのリスクレベルや経済的影響を考慮した場合、つまり GBS-SLA の観点からは、それぞれ異なる R の式を用いる方が合理的であることが示唆された。入力値（特にコスト関数）の信頼性の向上やコスト関数以外の入力値についても小型船、中型船及び大型船を区別した計算、環境影響等も考慮した費用対効果の最適化計算等が⁶⁰今後の課題である。

参考文献

第1章の参考文献

- 96
- [1] the United Kingdom (1993): Formal Safety Assessment, MSC 62/24/3.
- [2] IMO (2015): REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1.
- [3] F. Kaneko *et al.* (2015a): On a novel method for approximation of FN diagram and setting ALARP borders, *Journal of Marine Science and Technology*, Volume 20, Number 1, pp.14-36.
- [4] Bahama and Greece (2003): Consideration of the strategy and policy of the Organization including the report of the working group IMO Strategic Plan – New build standards, MSC 77/2/5.
- [5] IACS (2003): IMO Strategic Plan, MSC 77/2/3.
- [6] Bahama, Greece and IACS (2004): GOAL-BASED NEW SHIP CONSTRUCTION STANDARDS, MSC 78/6/2.
- [7] IMO (2017a): DRAFT REPORT OF THE MARITIME SAFETY COMMITTEE ON ITS NINETY-EIGHT SESSION (continued), p.11, MSC 98/WP.1/Add.1.
- [8] Austria *et al.* (2015): Proposal for the required subdivision index ‘R’, SDC 3/3/7.
- [9] Japan (2015): Proposal on required subdivision index ‘R’ taking into account the risk level of small passenger ships, SDC 3/3/8.
- [10] China *et al.* (2017): Proposal for a consensus SOLAS regulation II-1/6 (Required subdivision index R) for passenger ships, MSC 98/3/3.
- [11] IMO (2017b): DRAFT REPORT OF THE MARITIME SAFETY COMMITTEE ON ITS NINETY-EIGHT SESSION, p.5, MSC 98/WP.1.

第2章の参考文献

- [12] 金湖他 (2008) : 船舶海洋分野におけるリスク評価の事例としてのFSA, 海上技術安全研究所報告第8巻第4号, pp.19-58.
- [13] EC (2015): Combined assessment for cost-effectiveness of previous parts, FSA compilation and recommendations for decision making, EMSA/OP/10/2013.
- [14] Norway (2013): Report of the Correspondence Group on e-navigation to NAV 59, NAV 59/6.
- [15] GOALDS (2012): Development of a new damage stability requirement based on Cost-Benefit Assessment, GOALDS-D-WP.7.3-GL-INF Paper-rev1.
- [16] 日本海事協会 (2009) : リスク評価ガイドライン.

参考文献

- [17] HSE (2001): Reducing Risks, Protecting People. HSE's Decision-Making Process, Health & Safety Executive.
- [18] 日本船舶技術研究協会 (2012) : タンカー・バルカー等の構造に係る基準整備に関する調査研究 (2011年度報告書) , pp.115-116.
- [19] Norway (2000): Decision parameters including risk acceptance criteria, MSC 72/16.
- [20] 柚井他 (2016a) : IHS データに基づく旅客船のリスク解析と評価、日本船舶海洋工学会論文集第 23 号, pp.199-212.
- [21] Clauset, A. *et al.* (2009): Power-law distributions in empirical data. *SIAM Rev* 51:661-703.
- [22] R. Hamann *et al.* (2013): Goal-Based Standards and Risk-Based Design, *Ship Technology Research*, Volume 60, Issue 2, pp.46-56.

第 3 章の参考文献

- [23] T. Yuzui *et al.* (2014): Consideration of risk level in terms of damage stability of old ship, *Proceedings of The 14th International Ship Stability Workshop*, pp.278-285.
- [24] Japan (2013): Detailed Information on the results on the study on survivability of passenger ships, IMO SDC I/INF.7.
- [25] T. Yuzui *et al.* (2015a): Risk Analysis of Passenger/Cruise Ships based on IHS databases, *Proceedings of the 29th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2015)*, pp.279-283.
- [26] 柚井他 (2014) : IHS データに基づく小型旅客船のリスク解析, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 19 号, pp.319-322.
- [27] T. Yuzui *et al.* (2015b): Estimation of Risk Levels of Small Passenger Ships based on IHS databases, *Proceedings of the 12th INTERNATIONAL MARINE DESIGN CONFERENCE, VOLUME 2*, pp.479-494.
- [28] F. Kaneko *et al.* (2015b): A method for analysing fire risk of passenger ships utilizing simulation technique in risk-based design, *Proceedings of the 12th INTERNATIONAL MARINE DESIGN CONFERENCE, VOLUME 2*, pp.437-4457.
- [29] D. Konovessis *et al.* (2008): Risk Analysis for RoPax Vessels, *WMU Journal of Maritime Affairs*, Vol.7, No.1, pp.109-131.
- [30] Luc, L. *et al.* (2013): Interpretation and design implications of probabilistic damage stability regulation, *Proceedings of The 13th International Ship Stability Workshop*, pp.1-14.
- [31] ISO (2014): Safety aspects – Guidelines for their inclusion in standards, *ISO/IEC Guide 51:2014*.

参考文献

- [32] The R Core Team: R: A Language and Environment for Statistical Computing, Version 3.2.1beta, available at: <http://www.r-project.org/>
- [33] MARINE ACCIDENT INVESTIGATION BRANCH: FLYER TO THE FISHING INDUSTRY.
- [34] Number 088 ****DAILY SHIPPING NEWSLETTER**** Thursday 03-07-2003, Page 6.

第4章の参考文献

- [35] 柚井他 (2017) : 旅客船の要求区画指数 R 見直し FSA における費用対効果評価, 日本船舶海洋工学会論文集第 26 号, 掲載予定.
- [36] 国土交通省 (2016) : 国際海事機関 (IMO) 第 3 回船舶設計・建造小委員会 (SDC 3) の結果について.
- [37] European Maritime Safety Agency, EMSA (2015): Risk Acceptance Criteria and Risk Based Damage Stability, Final Report, part2: Formal Safety Assessment, EM-SA/OP/10/2013.
- [38] R. Hamann *et al.* (2015): Damage Stability Requirements for Passenger Ships - Collision Risk based Cost Benefit Assessment, Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, pp.307-316.
- [39] Papanikolaou A. *et al.* (2012): GOALDS - Goal Based Ships Stability & Safety Standards, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, pp.449-463.
- [40] Papanikolaou A. *et al.* (2013): GOALDS - Goal Based Damage Stability of Passenger Ships, SNAME 2013 Annual Meeting.
- [41] IMO (2014): SDS Correspondence Group 2014; Agenda Item 5; SOLAS Amendments Background Paper, p.8.
- [42] 柚井他 (2016b) : 旅客船の要求区画指数の見直しに関する予備的 FSA, 日本船舶海洋工学会講演会論文集第 23 号, pp.549-553.
- [43] The R Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing, Version 3.2.2, available at: <http://www.r-project.org/>
- [44] T. Yuzui *et al.* (2016): Risk Analysis in terms of damage stability of Passenger/Cruise Ships based on Event Tree Analysis, Proceedings of the 30th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (TEAM 2016), pp.554-560.

第5章の参考文献

- [45] Carroll, David L. (1999): FORTRAN Generic algorithm (GA) driver. Version 1.6.4, 1999. <http://www.cuaerospace.com/Technology/GeneticAlgorithm/GADriverFreeVersion.aspx>

参考文献

- [46] IMO (1974): Consolidated Text of the annex to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (Including its Protocol of 1988 and the amendments entered into force before 1 September 2014), CHAPTER I General provisions Part A Application, definitions, etc. Regulation 2 Definitions.

付録 1 の参考文献

- [47] 区間推定の考え方, <<http://www5d.biglobe.ne.jp/~pomath/study/seimitsuhou.pdf>>
(参照 2015-12-17)

付録 2 の参考文献

- [48] 熊本 (2015) : モダン信頼性工学 - リスクの数値化と概念化 -, コロナ社,
p.121.

付録 3 の参考文献

- [49] R. Haman et al. (2012): Development of a new damage stability requirement based on Cost-Benefit Assessment, GOALDS-D-WP.7.3-GL-INF Paper-rev1.

謝辞

本論文を纏めるに当たって、数多くの方々にお世話になりました。

指導教官としてご指導頂きました横浜国立大学大学院工学研究院荒井誠教授には、学生時分から終始懇切なるご指導を賜り、心から御礼申し上げます。

元海上技術安全研究所海洋リスク評価系系付上席研究員金湖富士夫博士には、著者の修士時からお世話になり、時には親身に、時には厳しくご指導頂き、研究者としての基礎を据えて頂きました。心から御礼申し上げます。

171 社会人博士課程での学位取得に当たり、著者が勤務する海上技術安全研究所の皆様からも多大な御支援を賜りました。通常業務に対しご支援頂いた海上技術安全研究所の方々、同海洋リスク評価系の皆さまに感謝致します。

45 本論文の第3章と第4章は国土交通省請負研究として実施した研究の成果の一部を含んでおります。1 国土交通省海事局安全政策課及び関係各位に感謝申し上げます。

129 その他に種々の委員会等において数多くの方々にお世話になりました。全ての方々に心から感謝申し上げます。

付録1 F-N線図とPLLの信頼区間の求め方

ここでは、F-N線図とPLLの信頼区間の求め方について示す。(柚井他 2016a)

A1.1 ポアソン分布と χ^2 分布の類似性とその信頼区間

文献(区間推定の考え方)を参考にポアソン分布と χ^2 分布の類似性とその信頼区間について示す。

91 $Po(\lambda)$ を平均 λ のポアソン分布に従う確率変数とすると、 $Po(\lambda)$ が t 以上になる確率は(A1.1)式となる。

$$\begin{aligned}
 P(Po(\lambda) \geq t) &= 1 - P(Po(\lambda) \leq t-1) \\
 &= 1 - \sum_0^{t-1} Po(\lambda) \\
 &= 1 - \left(\frac{\lambda^{t-1} e^{-\lambda}}{(t-1)!} + \frac{\lambda^{t-2} e^{-\lambda}}{(t-2)!} + \dots + \lambda e^{-\lambda} + e^{-\lambda} \right) \\
 &= - \left(\frac{\lambda^{t-1} e^{-\lambda}}{(t-1)!} + \frac{\lambda^{t-2} e^{-\lambda}}{(t-2)!} + \dots + \lambda e^{-\lambda} \right) + 1 - e^{-\lambda} \\
 &= - \left(\frac{\lambda^{t-1} e^{-\lambda}}{(t-1)!} + \frac{\lambda^{t-2} e^{-\lambda}}{(t-2)!} + \dots + \lambda e^{-\lambda} \right) + \int_0^{2\lambda} \frac{e^{-x}}{2} dx
 \end{aligned}
 \tag{A1.1}$$

χ^2_{2t} を自由度 $2t$ の χ^2 分布に従う確率変数とすると、その確率密度関数 $c_{2t}(x)$ は、(A1.2)式のようになる。

$$c_{2t}(x) = \frac{x^{t-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}}}{2^t \cdot \Gamma(t)} = \frac{x^{t-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}}}{2^t \cdot (t-1)!} = \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^{t-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}}}{2(t-1)!}
 \tag{A1.2}$$

χ^2_{2t} が 2λ 以下になる確率は、(A1.3)式のようになる。

$$\begin{aligned}
 P(\chi^2_{2t} \leq 2\lambda) &= \int_0^{2\lambda} c_{2t}(x) dx \\
 &= - \left(\frac{\lambda^{t-1} e^{-\lambda}}{(t-1)!} + \frac{\lambda^{t-2} e^{-\lambda}}{(t-2)!} + \dots + \lambda e^{-\lambda} \right) + \int_0^{2\lambda} \frac{e^{-x}}{2} dx
 \end{aligned}
 \tag{A1.3}$$

(A1.1)式と(A1.3)式より、(A1.4)式が成り立つ。

$$P(Po(\lambda) \geq t) = P(\chi^2_{2t} \leq 2\lambda)
 \tag{A1.4}$$

この余事象をとると、(A1.5)式になる。

$$P(Po(\lambda) \leq t-1) = P(\chi^2_{2t} \geq 2\lambda)
 \tag{A1.5}$$

危険率を γ とすると、(A1.6)式と(A1.7)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{2} &= P(Po(\lambda) \leq t) \\ &= P(\chi^2_{2(t+1)} \geq 2\lambda) \end{aligned} \quad (A1.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{2} &= P(Po(\lambda) \geq t) \\ &= 1 - P(Po(\lambda) \leq t-1) \\ &= 1 - P(\chi^2_{2t} \geq 2\lambda) \end{aligned} \quad (A1.7)$$

λ_U を λ の信頼区間の上限とすると、(A1.6)式より

$$\begin{aligned} P(\chi^2_{2(t+1)} \geq 2\lambda_U) &= \frac{\gamma}{2} \\ 2\lambda_U &= \chi^2_{2(t+1)} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \\ \therefore \lambda_U &= \frac{\chi^2_{2(t+1)} \left(\frac{\gamma}{2} \right)}{2} \end{aligned} \quad (A1.8)$$

λ_L を λ の信頼区間の下限とすると、(A1.7)式より

$$\begin{aligned} 1 - P(\chi^2_{2t} \geq 2\lambda_L) &= \frac{\gamma}{2} \\ \therefore \lambda_L &= \frac{\chi^2_{2t} \left(1 - \frac{\gamma}{2} \right)}{2} \end{aligned} \quad (A1.9)$$

以上より、 λ の信頼区間は、(A1.10)式で表される

$$\frac{\chi^2_{2t} \left(1 - \frac{\gamma}{2} \right)}{2} \leq \lambda \leq \frac{\chi^2_{2(t+1)} \left(\frac{\gamma}{2} \right)}{2} \quad (A1.10)$$

A1.2 F-N 線図の信頼区間

F-N 線図の縦軸の値 $FN_{data}(j)$ はポアソン分布に従う。したがって、ポアソン分布と χ^2 分布の類似性より、その信頼区間は、(A1.11)式となる。

$$\frac{\chi^2_{2 \sum_{k=j}^{k_{\max}} m_k} \left(1 - \frac{\gamma}{2} \right)}{2M} \leq \frac{\sum_{k=j}^{k_{\max}} m_k}{M} \leq \frac{\chi^2_{2 \left(\sum_{k=j}^{k_{\max}} m_k + 1 \right)} \left(\frac{\gamma}{2} \right)}{2M} \quad (A1.11)$$

γ を α とし、 $FN_{data}(j)$ の表記に直すと、(3.6)式となる。

A1.3 PLL の信頼区間

前述したように F-N 線図の縦軸の値 $FN_{data}(j)$ はポアソン分布に従う。ポアソン分布と χ^2 分布の類似性より $2 \cdot M \cdot FN_{data}(j)$ は χ^2 分布に従う確率変数となる。その自由度は

付録1 F-N線図とPLLの信頼区間の求め方

2C であり、ここで C は対象期間中の死亡事故の件数で、 $C = M \cdot FN_{data}(j)$ である。PLL が F-N 線図の各死者数での超過頻度の総和である (A1.4 参照) ことと、 χ^2 分布の再帰性を考慮すると、 $2 \cdot M \cdot \sum FN_{data}(j) = 2 \cdot M \cdot PLL$ も χ^2 分布に従う確率変数となる。 χ^2 分布の再帰性より、その自由度は $2 \cdot M \cdot \sum FN_{data}(j)$ となる。ここで、 $PLL = \sum FN_{data}(j)$ と $PLL = K/M$ を考慮すると、この自由度は (A1.12) 式となる。

$$2M \sum_{j=1}^{k_{max}} FN_{data}(j) = 2M \cdot PLL = 2K \quad (A1.12)$$

したがって、PLL の信頼区間は (3.4) 式となる。

A1.4 PLL と F-N 線図の関係性

PLL が F-N 線図の各死者数での超過頻度の総和であることを文献 (F. Kaneko *et al.* 2015a) を参考に示す。

まず、PLL は (A1.13) 式のように定義される。

$$PLL = \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}} i \cdot fn(i) \quad (A1.13)$$

ここで、 i : 死亡者数、 $fn(i)$: 死亡者数が i 人である事故の発生頻度である。

この式は下記のように展開される。

$$\begin{aligned} PLL &= \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}} i \cdot fn(i) \\ &= \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}-1} i \cdot (FN(i) - FN(i+1)) + N_{max} \cdot FN(N_{max}) \quad (\because FN(N_{max}) = fn(N_{max})) \\ &= \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}-1} i \cdot FN(i) - \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}-1} i \cdot FN(i+1) + N_{max} \cdot FN(N_{max}) \\ &= \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}-1} i \cdot FN(i) - \sum_{i=N_{min}+1}^{N_{max}-1} (i+1) \cdot FN(i+1) + N_{max} \cdot FN(N_{max}) \\ &= \sum_{i=N_{min}}^{N_{max}-1} i \cdot FN(i) - \sum_{i=N_{min}+1}^{N_{max}} i \cdot FN(i) + N_{max} \cdot FN(N_{max}) \\ &= N_{min} \cdot FN(N_{min}) - N_{max} \cdot FN(N_{max}) + \sum_{i=N_{min}+1}^{N_{max}} FN(i) + N_{max} \cdot FN(N_{max}) \\ &= N_{min} \cdot FN(N_{min}) + \sum_{i=N_{min}+1}^{N_{max}} FN(i) \end{aligned} \quad (A1.14)$$

ここで、 $FN(i)$: 死亡者数が i 人以上である事故発生頻度、 N_{max} : 死亡者数の最大値、 N_{min} : 死亡者数の最小値である。

$N_{min}=1$ の場合は、(A1.15) 式が成り立つ。

$$PLL = 1 \cdot FN(1) + \sum_{i=1+1}^{N_{max}} FN(i) = \sum_{i=1}^{N_{max}} FN(i) \quad (A1.15)$$

以上より、PLL が F-N 線図の各死者数での超過頻度の総和であることがわかる。

付録 2 費用対効果評価計算の詳細

ここでは第 4 章で実施した費用対効果評価の計算の詳細について示す。(柚井他 2017)

A2.1 Event Tree 計算の詳細

Fig.4.4 に ET の概略を示したが、その詳細を Fig. A2.1 に示す。図中の f は衝突頻度、 p_i ($i=1,2,\dots,6$) は各分岐確率、 N は Num. of PoB、 $RIndex$ は要求区画指数 R の値を示している。シナリオ毎にこれらを掛けて、シナリオ毎の PLL が求められ、それらの総和が衝突に関する人命損失リスク $PLL_{Collision}$ となる。

Collision	Struck/ Striking	Operational State	Water Ingress	Sinking	Sinking speed	Num. of PoB	Fatality rate	Scenario PLL			
f	$p1$	Limited Waters	Yes	Yes	Fast	N	$p5$	$f \cdot p1 \cdot p2 \cdot p3 \cdot (1-RIndex) \cdot p4 \cdot N \cdot p5$			
					Slow			$f \cdot p1 \cdot p2 \cdot p3 \cdot (1-RIndex) \cdot (1-p4) \cdot N \cdot p6$			
					No			$RIndex$	N	0	0
				No			$1-p3$	N	0	0	
					Terminal	Yes	Yes	Fast	N	$p5$	$f \cdot p1 \cdot (1-p2) \cdot p3 \cdot (1-RIndex) \cdot p4 \cdot N \cdot p5$
								Slow			$f \cdot p1 \cdot (1-p2) \cdot p3 \cdot (1-RIndex) \cdot (1-p4) \cdot N \cdot p6$
		No	$RIndex$	N	0	0					
				No			$1-p3'$	N	0	0	
				Striking			$1-p1$	N	0	0	

Fig.A2.1 Detail of ET and calculation of scenario PLL (T. Yuzui 2016).

A2.2 切断正規分布を利用している理由

正規分布の確率密度関数 $p(x)$ は、平均を μ 、分散を σ^2 とすると、(A2.1)式で与えられる。

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (A2.1)$$

(A2.1)式の x の範囲は、 $-\infty < x < +\infty$ である。したがって、ET の初期事象の発生頻度や分岐確率を正規分布に従う乱数として発生させた場合、 $-\infty$ から $+\infty$ の乱数が発生する。

付録2 費用対効果評価計算の詳細

しかし、初期事象の発生頻度は0以上の値であり、分岐確率は0から1までしか取らないため、不都合が生じる。したがって本研究では、文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)と同様に90%信頼区間の上下限で切断した正規分布を使用した。

A2.3 切断正規分布に従う乱数の発生法

切断正規分布の累積分布関数 $CDF_{trunc}(x)$ は、(A2.2)式で表される。

$$CDF_{trunc}(x) = \frac{1}{\int_a^b p(x) dx} \int_a^x p(x) dx = \frac{1}{CDF(b) - CDF(a)} (CDF(y) - CDF(a)) \quad (A2.2)$$

ここで、 $CDF(x)$ は正規分布の累積分布関数であり、本研究では、 $CDF(a)=0.05$ 、 $CDF(b)=0.95$ である。

(A2.2)式を $CDF(y)$ の形で整理すると(A2.3)式となり、その逆関数から切断正規分布に従う x を求めることができる。つまり、 $CDF_{trunc}(x)$ として一様乱数を発生させ、 $CDF(y)$ を求め、その逆関数を求めると、切断正規分布に従う乱数が発生する。

$$CDF(y) = (CDF(b) - CDF(a)) CDF_{trunc}(x) + CDF(a) \quad (A2.3)$$

$$x = CDF^{-1}(y) \quad (A2.4)$$

A2.4 裾の長い分布の平均値と中央値

裾の長い分布として代表的な分布である対数正規分布を例に、その平均値と中央値の関係について考える。対数正規分布は、パラメータ μ_y と σ_y から定まり、その確率密度関数 $p(x)$ は(A2.5)式のように示される。また、その平均値 \bar{x} と中央値 \tilde{x} はそれぞれ(A2.6)式と(A2.7)式から求められる(熊本 2015)。

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_y x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln(x) - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (A2.5)$$

$$\bar{x} = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad (A2.6)$$

$$\tilde{x} = \exp(\mu_y) \quad (A2.7)$$

したがって、平均値と中央値の比は、 $\exp(\sigma_y^2/2)$ となり、平均値は必ず中央値以上となる。また、 σ_y が大きいほど、その比は大きくなる。よって、FSA における費用対効果評価において、 $GCAF$ の平均値を使用すると、中央値を使用する場合より費用対効果が無いとの結果となりやすくなる。FSA の目的は、合理的な基準の策定であるため、本稿においては $GCAF$ の平均値でなく中央値を使用して費用対効果評価を実施の方が適切であると考え、平均値でなく中央値を使用した。

A2.5 費用対効果評価の閾値

費用対効果の閾値 CAF_{thr} は、一人の人間を救うのに掛けられる上限の費用を意味し、FSA ガイドライン(IMO 2015)では 300 万[US\$/person]が示されている。この 300 万という値は、国民一人当たりの GDP と平均寿命等の統計データを使用する設定法から 1998 年のデータを利用し OECD 加盟国の値を求め、それらを考慮して設定された値である(Norway 2000)。ただし、FSA ガイドライン(IMO 2015)では、これは単なる一例であり、実際の FSA study では解析者が根拠を示した上でどのような値を使用しても良いことになっている。

本稿と同じ旅客船 FSA を実施している文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)では、400 万[US\$/person]と 800 万[US\$/person]の 2 種類を利用している。これらの値は、鉄道や航空機等の他の輸送モード、原子力産業やプロセス産業等の他産業における規制評価で利用されている CAF_{thr} と同様の意味を持つ値を調査し、多くの分野で概ね 400 万から 800 万の間の値が利用されているとの調査結果から設定された。

また文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)の先行研究(Papanikolaou A. *et al.* 2013)では、前述した FSA ガイドライン(IMO 2015)で 300 万という値を得た方法と同じ方法を用いて 2010 年のデータを利用し 745 万[US\$/person]という値を得ている。

以上より本研究では、本研究の最新の類似研究(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015)で 400 万と 800 万の 2 種類の値を利用しているが、FSA ガイドライン(IMO 2015)と同じ方法で 2010 年のデータを使用し得られた値が 745 万であることを考慮し、簡単のために $CAF_{thr}=800$ 万[US\$/person]と設定した。

CAF_{thr} として 800 万という値を用いることは、それより小さい値を用いるより費用対効果有りという結果になりやすいことを意味するが、費用対効果は CAF_{thr} と $GCAF$ の比較により決まり、 $GCAF$ 推定のベースとなる費用増加量推定に本研究で用いたデータは、最近の油価格等を用いて推定されたデータであるため、 CAF_{thr} も最近の経済データを用いて推定された値に近い 800 万を使用するのが適切であると考えられる。

付録3 コスト関数

ここでは第5章で実施した最適化計算において GCAF を計算する際に利用したコスト関数の詳細を示す。前述したように第4章で実施した費用対効果評価計算で利用したコスト関数とは異なる。第4章では大型船、中型船、小型船の区別なくコスト関数を求めていたが、ここではそれらを区別しコスト関数を求めた。大型船、中型船、小型船は文献(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)で定義されているが、それらは要求区画指数 R の関数の変数である定員数で定義されていないため、まずそれらを定員数で定義し直した結果について示す。次に大型船、中型船、小型船を区別しコスト関数を求めた結果について示す。

A3.1 大型船、中型船、小型船の定義

コスト関数算出のために用いたデータは第4章のコスト関数と同じデータである。これらのデータは Table A3.1 に示す定員数の船舶に対するものであるが、小型船、中型船、大型船を Table A3.2 のように定義されている。

Table A3. 1 Num. of PoB of Cost increase data(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013).

		No. of passenger	No. of crew	Total	Ref.
Passenger/Cruise	Small	316	162	478	EMSA (2015)
	Medium	1,750	650	2,400	R. Hamann <i>et al.</i> 2012
	Large	5,135	1,595	6,730	EMSA (2015)
	Large	4,200	1,400	5,600	R. Hamann <i>et al.</i> 2012
RoPax	Small	600	25	625	EMSA (2015)
	Small	600	10	610	EMSA (2015)
	Medium	1,600	100	1,700	EMSA (2015)
	Medium	2,080	120	2,200	R. Hamann <i>et al.</i> 2012
	Large	3,060	220	3,280	EMSA (2015)
	Large	3,300	200	3,500	R. Hamann <i>et al.</i> 2012

付録3 コスト関数

Table A3. 2 Definitions of Small, Medium and Large ships in Cost increase data(EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013).

	Small	Medium	Large
Passenger/Cruise	1,000<=GRT <20,000	20,000<=GRT <100,000	GRT>= 100,000
RoPax	Loa<140m	140m<=Loa <200m	Loa>=200m

要求区画指数 R は定員数を変数とする関数であるが Table A3.2 に示す通り、文献 (EMSA 2015, R. Hamann *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013) は定員数で小型船、中型船、大型船を定義していない。したがって、本研究では、IHS データより GRT と Num. of PoB (一般客船)、Loa と Num. of PoB (RoPax 船) の関係を示す近似式を求め、そこから Table A3.2 に示す定義を Table A3.3 に示す Num. of PoB により小型船、中型船、大型船を定義し直した。

Table A3. 3 Definitions of Small, Medium and Large ships in this study.

	Small	Medium	Large
Passenger/Cruise	13<=PoB <1,052	1,052<=PoB< 4,052	PoB>=4,052
RoPax	13<=PoB <972	972<=PoB <1,345	PoB>=1,345

この Num. of PoB に応じてコスト関数を使い分け、費用増加量を推定した。GRT と Num. of PoB (一般客船)及び Loa と Num. of PoB (RoPax 船)の関係を示す近似式をそれぞれ(A.3.1)式と(A.3.2)式に示す。この近似式の根拠となるデータを Fig.A3.1 に示す。Fig.A3.1 に示すように一般客船の GRT と PoB の R²値は大きく、良く近似できていると考えられるが、Loa と PoB の R²値は小さいため、RoPax 船の PoB による小型・中型・大型の定義は文献の Loa による定義を適切に反映できていない可能性があると考えられる。これらを改良し、コスト関数の信頼性を上げることは今後の課題であると考えられる。

$$PoB = 0.0375 \times GRT + 301.99 \quad (A3.1)$$

$$PoB = 6.298 \times L_{oA} + 89.795 \quad (A3.2)$$

付録3 コスト関数

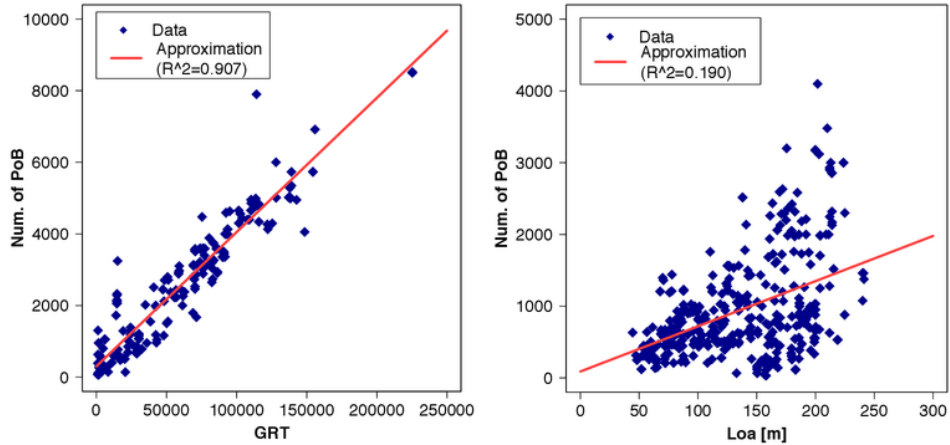


Fig.A3.1 GRT or Loa v.s. Num. of PoB (built in or after 1990, $\geq 1,000$ GT, 1990-2012, IHS Ship Database) (Left: Passenger/Cruise, Right: RoPax).

A3.2 コスト関数

文献(EMSA 2015, R. Hamann ⁴ *et al.* 2015, Papanikolaou A. *et al.* 2012, Papanikolaou A. *et al.* 2013)では大型船、中型船及び小型船の費用増加量を推定 ¹⁶³ しており、ここではそのデータを使用し、一般客船及び RoPax 船のそれぞれ小型船、中型船、大型船のコスト関数を求めた。

(A3.3)-(A3.5)式は一般客船のそれぞれ小型船、中型船、大型船のコスト関数、(A3.6)-(A3.8)式は RoPax 船のそれぞれ小型船、中型船、大型船のコスト関数である。中型船、大型船の近似式は統計解析ソフトウェア R3.2.2 を用いて、線形近似、指数近似及び累乗近似を検討し、残差平方和が小さいものをコスト関数として利用した。小型船についてはデータが2点のみであるため、ここでは中型船、大型船の近似式を参考に指数近似とした。Figs A3.2-A3.3 にこれらのデータと近似曲線を示す。

²²⁰ Figs.A3.2-A3.3 に示すように小型船のデータは一般客船、RoPax 船ともに2点のみでありコスト関数の信頼性は低いと考えられる。更なるデータを収集し、コスト関数の信頼性を上げることは今後の課題であると考えられる

$$\Delta Cost = 1.4 \times 10^5 \times \exp\left(\frac{17.9(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}}\right) \quad (A3.3)$$

$$\Delta Cost = 1.4 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{18.3(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}}\right) \quad (A3.4)$$

付録3 コスト関数

$$\Delta Cost = 7.5 \times 10^5 \times \exp\left(\frac{49.3(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}}\right) \quad \begin{matrix} 162 \\ (A3.5) \end{matrix}$$

$$\Delta Cost = 5.5 \times 10^4 \times \exp\left(\frac{16.6(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}}\right) \quad (A3.6)$$

$$\Delta Cost = 1.2 \times 10^9 \times \left(\frac{R_{proposal} - R_{2009}}{R_{2009}}\right)^{1.7} \quad (A3.7)$$

$$\Delta Cost = 2.8 \times 10^6 \times \exp\left(\frac{19.7(R_{proposal} - R_{2009})}{R_{2009}}\right) \quad (A3.8)$$

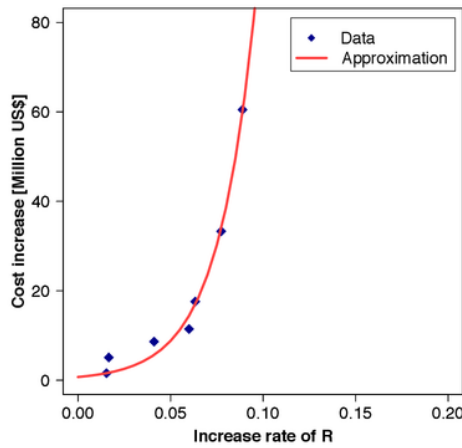
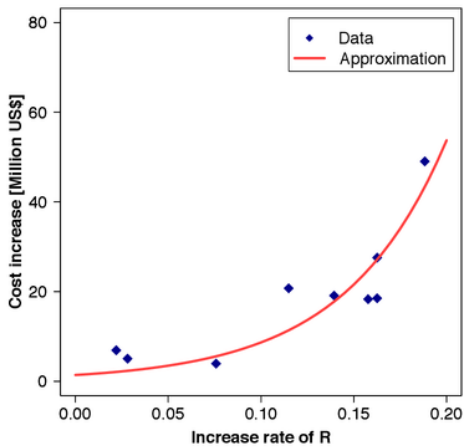
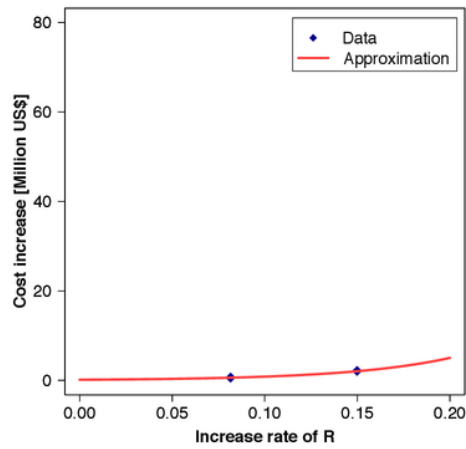


Fig.A3.2 Data of cost increase and the approximation of Passenger/Cruise ships (Top: Small, Bottom Left: Medium, Bottom Right: Large).

付録3 コスト関数

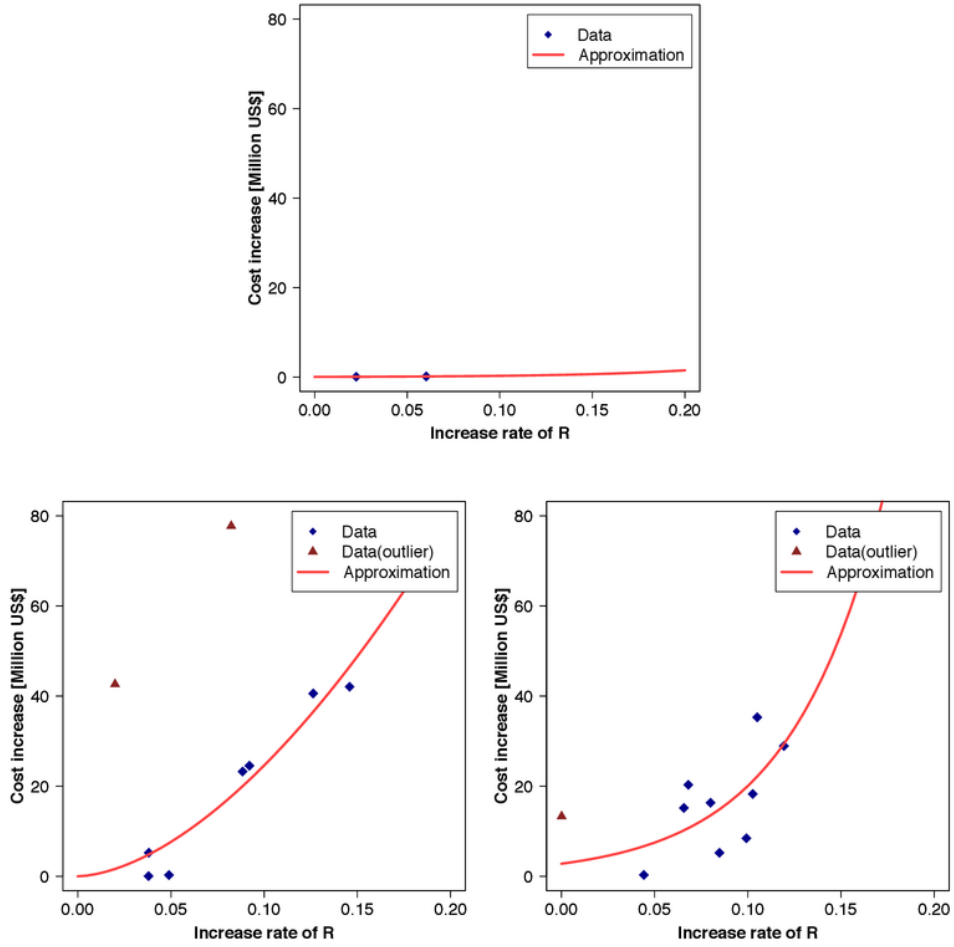


Fig.A3.3 Data of cost increase and the approximation of RoPax ships (Top: Small, Bottom Left: Medium, Bottom Right: Large).

15%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

- 1** www.nmri.go.jp 434 words — 1%
Internet
- 2** Yamamoto, K., T. Kitamura, K. Shibata, Y. Ouchi, T. Ito, J.D. McClure, J. D. Pierce, G. F. Hohnstreiter, and J. D. Smith. "Study of the Accident Environment During Sea Transport of Nuclear Material: Probabilistic Safety Analysis of Plutonium Transport from Europe to Japan", International Journal of Radioactive Materials Transport, 2000. 268 words — 1%
Crossref
- 3** repository.kulib.kyoto-u.ac.jp 112 words — < 1%
Internet
- 4** Louise Rh Illum, Stine T Bak, Sten Lund, Anders Lade Nielsen. "DNA methylation in epigenetic inheritance of metabolic diseases through the male germ line", Journal of Molecular Endocrinology, 2017 88 words — < 1%
Crossref
- 5** www.onthemosway.eu 87 words — < 1%
Internet
- 6** www.safedor.org 85 words — < 1%
Internet
- 7** YAMAZAKI, Hisamichi. "Information management using "IT"", Journal of Information Processing and Management, 2002. 77 words — < 1%
Crossref

8	www.lib.kobe-u.ac.jp Internet	70 words — < 1%
9	nk.jiho.jp Internet	70 words — < 1%
10	Kaneko, Fujio, Toshiro Arima, Koichi Yoshida, and Tomohiro Yuzui. "On a novel method for approximation of FN diagram and setting ALARP borders", <i>Journal of Marine Science and Technology</i> , 2015. Crossref	63 words — < 1%
11	www.mof.go.jp Internet	60 words — < 1%
12	www.scj.go.jp Internet	54 words — < 1%
13	dspace.wul.waseda.ac.jp Internet	50 words — < 1%
14	aaltodoc.aalto.fi Internet	47 words — < 1%
15	tdl.libra.titech.ac.jp Internet	44 words — < 1%
16	repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp Internet	44 words — < 1%
17	digitalassets.lib.berkeley.edu Internet	41 words — < 1%
18	www.mizuho-ir.co.jp Internet	40 words — < 1%
19	csidoc.insa-lyon.fr Internet	38 words — < 1%

20	www2.iee.or.jp Internet	38 words — < 1%
21	library.jsce.or.jp Internet	33 words — < 1%
22	www.jstage.jst.go.jp Internet	33 words — < 1%
23	soil.en.a.u-tokyo.ac.jp Internet	33 words — < 1%
24	ir.library.osaka-u.ac.jp Internet	32 words — < 1%
25	Okada, Tetsuo, Takashi Toyama, and Yasumi Kawamura. "Theoretical strength assessment of unstiffened bilge shell plating and some considerations on rule prescriptions", Journal of Marine Science and Technology, 2016. Crossref	30 words — < 1%
26	www.lrfairplay.com Internet	30 words — < 1%
27	ir.lib.shizuoka.ac.jp Internet	28 words — < 1%
28	ds9.jaist.ac.jp:8080 Internet	26 words — < 1%
29	松本, 純. "新しい数学モデルを用いた永久磁石同期モータの位置センサレス制御系のロバスト化に関する研究", NAGOYA Repository, 2014. Publications	26 words — < 1%
30	www.nikkeishin.or.jp Internet	26 words — < 1%
31	rafhladan.is Internet	25 words — < 1%

32	91.231.216.7 Internet	24 words — < 1%
33	www.slp.ics.tut.ac.jp Internet	24 words — < 1%
34	www.seis.nagoya-u.ac.jp Internet	24 words — < 1%
35	www.zenrosaikyokai.or.jp Internet	22 words — < 1%
36	ja.wikipedia.org Internet	22 words — < 1%
37	Skjong, Rolf. "Formal Safety Assessment and Goal Based Regulations at IMO: Lessons Learned (Invited Lecture)", 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering Volume 2, 2005. Crossref	22 words — < 1%
38	土屋, 仁美. "憲法における健康権の保障と食品の安全性の確保", 法政大学, 2014. Publications	22 words — < 1%
39	www.f.waseda.jp Internet	20 words — < 1%
40	高田, 俊次. "PWM波励磁における電磁鋼板の磁気特性に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1997. Publications	20 words — < 1%
41	www.jsme.or.jp Internet	20 words — < 1%
42	古川, 忠稔 and 大森, 博司. "環境負荷低減型建築構造創生支援統合環境の構築に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2014. Publications	20 words — < 1%

43	Bergström, Martin, Stein Ove Erikstad, and Sören Ehlers. "Assessment of the applicability of goal- and risk-based design on Arctic sea transport systems", Ocean Engineering, 2016. Crossref	19 words — < 1%
44	tsukuba.repo.nii.ac.jp Internet	19 words — < 1%
45	www.j3.jstage.jst.go.jp Internet	19 words — < 1%
46	lbm.ab.a.u-tokyo.ac.jp Internet	19 words — < 1%
47	www.vtt.fi Internet	18 words — < 1%
48	nippon.zaidan.info Internet	18 words — < 1%
49	"New Findings from Yokohama National University in the Area of Marine Science Described (On a novel m", Life Science Weekly, April 14 2015 Issue Publications	18 words — < 1%
50	repository.osakafu-u.ac.jp Internet	18 words — < 1%
51	miuse.mie-u.ac.jp Internet	18 words — < 1%
52	Rolf Skjong. "Regulatory Framework", Risk-Based Ship Design, 2009 Crossref	18 words — < 1%
53	www.mlit.go.jp Internet	18 words — < 1%
54	Ruponen, Pekka. "On the effects of non-watertight doors on progressive flooding in a damaged	17 words — < 1%

passenger ship", Ocean Engineering, 2017.

Crossref

55 Ana I. Borthagaray. "Connecting landscape structure and patterns in body size distributions", Oikos, 05/2012
17 words — < 1%
Crossref

56 www.jspf.or.jp
Internet
17 words — < 1%

57 www.soumu.go.jp
Internet
17 words — < 1%

58 aichi-pu.repo.nii.ac.jp
Internet
17 words — < 1%

59 gd.isas.jaxa.jp
Internet
17 words — < 1%

60 田中, 慎一. "長ギャップ気中直流アークの挙動に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2010.
17 words — < 1%
Publications

61 Kuwabara, Mamoru and 桑原, 守. "高炉プロセスのモデル化と解析に関する冶金反応工学的研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1989.
16 words — < 1%
Publications

62 www.suita-shinsenkaikai.jp
Internet
16 words — < 1%

63 Takayama, Teruou and 高山, 彰優. "高温超伝導体内遮蔽電流密度の時間発展シミュレーション: 高性能解析法とその応用", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2013.
16 words — < 1%
Publications

64 georisk.kuciv.kyoto-u.ac.jp
Internet
16 words — < 1%

65	aquarius30.cse.kyutech.ac.jp Internet	16 words — < 1%
66	KOYAMA, Shuto and 小山, 修人. "CFRPおよび高分子材料を用いたシールドのスペースデブリ防御性能", Hosei University, 2008. Publications	16 words — < 1%
67	210.148.110.37 Internet	16 words — < 1%
68	MORI, Yusai, Katsuhiko MATSUMOTO, Hiroshi KANNAN, Hideki MORI, Hiroshi HOSOMI, Hiroko AGO, Takenobu TASAKI, Chooichiro ASANO, and Shiffeaki BABA. "Study on Diabetic State and Reguratory Function by Multivariate Statistical Analysis", Folia Endocrinologica Japonica, 1973. Crossref	16 words — < 1%
69	ncu.repo.nii.ac.jp Internet	16 words — < 1%
70	ir.nul.nagoya-u.ac.jp Internet	16 words — < 1%
71	www.juse.or.jp Internet	16 words — < 1%
72	yokoya.naist.jp Internet	16 words — < 1%
73	mainichisundayman.blog.eonet.jp Internet	16 words — < 1%
74	www.merikotka.fi Internet	16 words — < 1%
75	www.city.kyoto.lg.jp Internet	15 words — < 1%
76	zenodo.org	

Internet

14 words — < 1%

77 KOHNO, Makiko and 河野, 真貴子(一橋大学大学院
法学研究科). "アメリカにおける化学物質管理法制
度とリスク評価", HERMESIR, 2013.

Publications

14 words — < 1%

78 www.kagome.co.jp

Internet

14 words — < 1%

79 gsejournal.biomedcentral.com

Internet

13 words — < 1%

80 Ship Design, 2014.

Crossref

13 words — < 1%

81 www.jscpt.jp

Internet

13 words — < 1%

82 Bačkalov, Igor, Gabriele Bulian, Jakub Cichowicz,
Eleftheria Eliopoulou, Dimitris Konovessis, Jean-
François Leguen, Anders Rosén, and Nikolaos Themelis. "Ship
stability, dynamics and safety: Status and perspectives from a
review of recent STAB conferences and ISSW events", Ocean
Engineering, 2016.

Crossref

13 words — < 1%

83 INUIGUCHI, Masahiro, Yasufumi KUME, and
Hidetomo ICHIHASHI. "On Possibility and
Necessity Using G^o Implication", Transactions of the
Society of Instrument and Control Engineers, 1989.

Crossref

13 words — < 1%

84 WANG, YUN and 王, 昀. "オーステナイト系ステン
レス鋼の塑性変形および初期疲労損傷に関する微視
的研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014),
2007.

Publications

13 words — < 1%

Takayuki KOIZUMI, Nobutaka TSUJIUCHI, Yoshiki NORITOU.

85	"618 Active Control of Child Restraint System in Frontal Crashes", The Proceedings of the Dynamics & Design Conference, 2010 Crossref	12 words — < 1%
86	柴田, 敦司. "4-アルキルフェノール類の嫌氣的微生物分解に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2007. Publications	12 words — < 1%
87	大沼, 巧. "新しい座標系を用いた埋込磁石同期モータの位置センサレス制御に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2011. Publications	12 words — < 1%
88	CHATANI, Satoru and 茶谷, 聡. "日本国内の大気質に対する都市・半球スケール大気汚染の影響", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2011. Publications	12 words — < 1%
89	"Proceedings", The Japanese Journal of Gastroenterological Surgery, 2010. Crossref	12 words — < 1%
90	廣瀬, 圭一. "高信頼度を必要とする需要家設備への給電方式に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2011. Publications	12 words — < 1%
91	okwave.jp Internet	11 words — < 1%
92	Apostolos Papanikolaou, Byung Suk Lee, Christian Mains, Odd Olufsen, Dracos Vassalos, George Zaraphonitis. "GOALDS—Goal Based Ship Stability & Safety Standards", Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012 Crossref	11 words — < 1%
93	shipstab.org Internet	11 words — < 1%
94	www.scribd.com Internet	11 words — < 1%

95	Ryszard Wawruch. "The Concept of a Single Window in e-Navigation and According to the EU Regulations", TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2015 Crossref	11 words — < 1%
96	Griffiths, Gwyn. "References", Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles, 2002. Crossref	11 words — < 1%
97	www.dc-koenji.jp Internet	11 words — < 1%
98	www.sccj.net Internet	11 words — < 1%
99	mitizane.ll.chiba-u.jp Internet	11 words — < 1%
100	www.chukyo-u.ac.jp Internet	11 words — < 1%
101	www.amita-oshiete.jp Internet	11 words — < 1%
102	brage.bibsys.no Internet	11 words — < 1%
103	www.terrapub.co.jp Internet	10 words — < 1%
104	Fuchino, Koichi, Yasushi Kawabata, Shigeyuki Tateno, Yoshihumi Tsuge, and Hisayoshi Matsuyama. "An Algorithm for Diagnosing Faulty Sensors and Design of a Diagnosis System.", KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU, 1995. Crossref	10 words — < 1%

Goloka Behari Sahoo. "Microgenetic algorithms and artificial

105	neural networks to assess minimum data requirements for prediction of pesticide concentrations in shallow groundwater on a regional scale", Water Resources Research, 05/20/2008 Crossref	10 words — < 1%
106	ftvjapan.ddo.jp Internet	10 words — < 1%
107	www.saitama-med.ac.jp Internet	10 words — < 1%
108	catalog.lib.kyushu-u.ac.jp Internet	10 words — < 1%
109	天野, 嘉春. "熱交換プロセスの動特性に関する回路論的視点にもとづく考察", [出版者不明], 2014. Publications	10 words — < 1%
110	中原, 信生, 久野, 覚, 伊藤, 尚寛, 奥宮, 正哉, 山羽, 基, 相良, 和伸 and 辻本, 誠. "知識情報作業空間の最適環境制御に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2014. Publications	10 words — < 1%
111	www.tsukuba-tech.ac.jp Internet	10 words — < 1%
112	www.graphicscience.jp Internet	10 words — < 1%
113	team1mile.com Internet	10 words — < 1%
114	www.ojk.info.gifu-u.ac.jp Internet	10 words — < 1%
115	oacis.repo.nii.ac.jp Internet	10 words — < 1%
116	S.A. Campbell, I. Ncube, J. Wu. "Multistability and stable asynchronous periodic oscillations in a	10 words — < 1%

-
- 117 TAKEDA, Koichi and 竹田, 光一. "小型軸流ファンの設計法に関する研究 -性能向上に寄与する入口流速の検討-", Hosei University, 2013. 10 words — < 1%
Publications
-
- 118 www.hino.meisei-u.ac.jp 10 words — < 1%
Internet
-
- 119 www.nict.go.jp 10 words — < 1%
Internet
-
- 120 小笠原, 慎弥. "高精度協同トムソン散乱計測のためのミリ波帯大電力ジャイロトロンにおける不要モード発振抑制に関する研究", NAGOYA Repository, 2014. 10 words — < 1%
Publications
-
- 121 小路 和幸. "ワークデザインにおけるダイナミックモデルに関する研究：システム設計法としてのワークデザインの課題抽出と分析 博士学位申請論文", [出版者不明], 2013. 10 words — < 1%
Publications
-
- 122 www.acis.famic.go.jp 10 words — < 1%
Internet
-
- 123 www.lcis.com.tw 9 words — < 1%
Internet
-
- 124 www.nantoka.com 9 words — < 1%
Internet
-
- 125 UETSUHARA, Masahiko, Kazuaki MANIWA, Toshiya HANADA, and Yukihiro KITAZAWA. "Confidence Evaluation Method for Orbital Debris Flux Model", AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, 2011. 9 words — < 1%
Crossref

126	www13.plala.or.jp Internet	9 words — < 1%
127	www.tet.tu-cottbus.de Internet	9 words — < 1%
128	kr.mathworks.com Internet	9 words — < 1%
129	illustrons.com Internet	9 words — < 1%
130	www.rtnet-biz.jp Internet	9 words — < 1%
131	aoki2.si.gunma-u.ac.jp Internet	9 words — < 1%
132	小高, 猛司. "水-土骨格連成極限つり合い解析に基づく複合地盤の支持力に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1993. Publications	9 words — < 1%
133	dspace.bunka.ac.jp Internet	9 words — < 1%
134	www.kansa.or.jp Internet	9 words — < 1%
135	sakae-tsushin.co.jp Internet	9 words — < 1%
136	伊藤, 教子. "混みあいに関する環境心理学的考察 : 公共的な空間を対象とした検討 博士(人間科学)学位論文", Waseda University, 2005. Publications	9 words — < 1%
137	www.esri.go.jp Internet	9 words — < 1%
138	森川, 彰. "自動車排気浄化三元触媒用拡散障壁導入型酸素貯蔵材に	

関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2009.

Publications

9 words — < 1 %

139 kanazawa-u.repo.nii.ac.jp
Internet

9 words — < 1 %

140 repository.nihon-u.ac.jp
Internet

9 words — < 1 %

141 www.asiadisability.com
Internet

9 words — < 1 %

142 www.mmjp.or.jp
Internet

9 words — < 1 %

143 www.lifescience.mext.go.jp
Internet

9 words — < 1 %

144 tdb.kinjo-u.ac.jp
Internet

9 words — < 1 %

145 petit.lib.yamaguchi-u.ac.jp
Internet

9 words — < 1 %

146 畠, 靖人(Hatake, Yasuhito). "木造密集市街地における容積移転導入による影響分析", 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学研究系社会文化環境学専攻, 2013.
Publications

9 words — < 1 %

147 www.anzen.mofa.go.jp
Internet

9 words — < 1 %

148 www.mishima-kaiun.or.jp
Internet

9 words — < 1 %

149 jpmac.or.jp
Internet

9 words — < 1 %

150 www.hiroshima-u.ac.jp
Internet

9 words — < 1 %

151	www.econ.hit-u.ac.jp Internet	9 words — < 1%
152	www.dagliano.unimi.it Internet	9 words — < 1%
153	www.eco.osakafu-u.ac.jp Internet	9 words — < 1%
154	www.iit.tsukuba.ac.jp Internet	9 words — < 1%
155	www.classnk.or.jp Internet	9 words — < 1%
156	www.tokiorisk.co.jp Internet	9 words — < 1%
157	www.imes.boj.or.jp Internet	9 words — < 1%
158	www.ieice-hbkb.org Internet	9 words — < 1%
159	www.cpij-kansai.jp Internet	9 words — < 1%
160	lib.nagaokaut.ac.jp Internet	9 words — < 1%
161	Turnitin 한국 DB, 국민대학교 Publications	9 words — < 1%
162	brazil.crl.edu Internet	8 words — < 1%
163	www.spinnet.jp Internet	8 words — < 1%
164	Okamura, Sachio, and Toshiro Murase. "Performance of the Overflow Pipes -Quiet steady-	8 words — < 1%

overflow of liquids-", Chemical engineering, 1961.

Crossref

-
- 165 www.jst.go.jp
Internet 8 words — < 1%
-
- 166 www.meti.go.jp
Internet 8 words — < 1%
-
- 167 apmath.spbu.ru
Internet 8 words — < 1%
-
- 168 Minako IIDA, Kazuo EMURA. "NORMALITY TESTS OF THE ERROR TERM IN REGRESSION MODELS FOR THE THERMAL SENSATION VOTE : Statistical methods for categorical data", Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ), 1996
Crossref 8 words — < 1%
-
- 169 studentsrepo.um.edu.my
Internet 8 words — < 1%
-
- 170 www.mtome.com
Internet 8 words — < 1%
-
- 171 career.nikkei.co.jp
Internet 8 words — < 1%
-
- 172 strathprints.strath.ac.uk
Internet 8 words — < 1%
-
- 173 www.iri.pref.niigata.jp
Internet 8 words — < 1%
-
- 174 小林, 敬幸. "熱的操作を用いる異種エネルギー変換に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1996.
Publications 8 words — < 1%
-
- 175 www.sens.sys.es.osaka-u.ac.jp
Internet 8 words — < 1%

176	research.nttcoms.com Internet	8 words — < 1%
177	u-ru2ftab.blog.so-net.ne.jp Internet	8 words — < 1%
178	BUNSEKI KAGAKU, 1968. Crossref	8 words — < 1%
179	Bernard Gaveau. "Theory of nonequilibrium first-order phase transitions for stochastic dynamics", Journal of Mathematical Physics, 1998 Crossref	8 words — < 1%
180	leo.aichi-u.ac.jp Internet	8 words — < 1%
181	近藤, 圭一郎. "鉄道車両駆動用永久磁石同期電動機の制御システムに関する研究：博士論文", [出版者不明], 2014. Publications	8 words — < 1%
182	www1.hus.ac.jp Internet	8 words — < 1%
183	清水, 昭伸. "医用X線像の自動診断システムの設計と評価に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1995. Publications	8 words — < 1%
184	www.canon-igs.org Internet	8 words — < 1%
185	mutukina.net Internet	8 words — < 1%
186	repo.flib.u-fukui.ac.jp Internet	8 words — < 1%
187	YAMADA, Yasushi, Mitsuaki KOBIKI, and Nobuo FUJIMOTO. "Patent Management and Patent	8 words — < 1%

188	www2.gec.jp Internet	8 words — < 1%
189	www.nies.go.jp Internet	8 words — < 1%
190	渡邊, 智昭. "化学反応を伴う乱流拡散および混合現象に関する研究", NAGOYA Repository, 2014. Publications	8 words — < 1%
191	www.risk.tsukuba.ac.jp Internet	8 words — < 1%
192	Tsuyoshi SHIODA, Nobuhiro TAKAMATSU, Kenji SUZUKI. "Intra-Board Level Optical Interconnection Using Polymeric Waveguide Film", Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, 2003 Crossref	8 words — < 1%
193	藤田, 明吾. "改良9Cr-1Mo鋼再熱蒸気管溶接部のクリープ強度評価", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2011. Publications	8 words — < 1%
194	www.panasonic.com Internet	8 words — < 1%
195	hokuga.hgu.jp Internet	8 words — < 1%
196	www.china-epc.cn Internet	8 words — < 1%
197	agriknowledge.affrc.go.jp Internet	8 words — < 1%
198	nanonet.mext.go.jp Internet	8 words — < 1%

199	www.iae.or.jp Internet	8 words — < 1%
200	www.police.pref.niigata.jp Internet	8 words — < 1%
201	www-bm.mhlw.go.jp Internet	8 words — < 1%
202	documents.mx Internet	8 words — < 1%
203	若井 隆純. "高速炉機器・構造の長時間健全性評価に関する破壊力学のおよび材料学的研究", Ritsumeikan Asia Pacific University, 2013. Publications	8 words — < 1%
204	www.alternationbook.com Internet	8 words — < 1%
205	blog.livedoor.jp Internet	8 words — < 1%
206	高橋, 秀行. "小型底曳網漁業の労働実態の把握と改善に関する研究", Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers, 2014. Publications	8 words — < 1%
207	www.kanrou.net Internet	8 words — < 1%
208	www.ekouhou.net Internet	8 words — < 1%
209	R. Barbier, C. Bérat, M. Besançon, M. Chemtob, A. Deandrea, E. Dudas, P. Fayet, S. Lavignac, G. Moreau, E. Perez, Y. Sirois. "R-Parity-violating supersymmetry", Physics Reports, 2005 Crossref	8 words — < 1%
210	eprints.lib.okayama-u.ac.jp Internet	8 words — < 1%

-
- 211 玉木, 徹. "画像中の物体および人物領域の抽出手法に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2001. 8 words — < 1%
Publications
-
- 212 TAMURA, Hiroyuki, and Toshinaga AOTANI. "Large-Spatial Pattern Identification by Conversational GMDH", Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 1976. 8 words — < 1%
Crossref
-
- 213 77.68.107.10 8 words — < 1%
Internet
-
- 214 www2.sozo.ac.jp 8 words — < 1%
Internet
-
- 215 湊, 真悟. "InGaAs/GaPヘテロ構造の作製と評価に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2002. 8 words — < 1%
Publications
-
- 216 田中, 勇真. "頂点容量制約付き有向全域木パッキング問題に対する発見的解法", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2012. 8 words — < 1%
Publications
-
- 217 梶野, 智史. "表層部付加的せん断ひずみ層が細線材の引張り強さおよび内部組織に与える影響", [出版者不明], 2009. 8 words — < 1%
Publications
-
- 218 www2.lib.hokudai.ac.jp 8 words — < 1%
Internet
-
- 219 www.city.koto.lg.jp 8 words — < 1%
Internet
-
- 220 川邊, 岩夫. "測定値誤差とデータ解析の基礎事項：最小二乗法とランタニド四組効果", NAGOYA 7 words — < 1%

221 Torsten Grotendiek. "Optimal running times for systems of random walks involving several particles", Stochastic Models, 1997

7 words — < 1%

Crossref

222 山田, 剛史, 山野井, 真児 and 泉, 毅(Izumi, Tsuyoshi, Yamada, Tsuyoshi, Yamanoi, Shinji, イズミ, ツヨシ, ヤマダ, ツヨシ and ヤマノイ, シンジ). "テストレットの長さが項目反応理論のパラメタ推定に与える影響", Hyokyo Educational and Academic Resources for Teachers (HEART), 2015.

7 words — < 1%

Publications

223 島田, 隆. "超臨界直接抽出法による核燃料再処理技術の開発", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2007.

7 words — < 1%

Publications

224 MARUNO, SYUNICHI. "THE EFFECT OF DIMENSIONAL PREFERENCE AND DISCRIMINATION SET ON CONSECUTIVE SHIFT LEARNING", The Japanese journal of psychology, 1974.

7 words — < 1%

Crossref

225 Imanaka, Makoto and 今中, 誠. "金属系接着継手の強度特性に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 1986.

7 words — < 1%

Publications

226 垣内, 博行. "静止系融液内晶析現象を利用した潜熱蓄熱プロセスの開発 : 早稲田大学博士論文", [出版者不明], 2014.

7 words — < 1%

Publications

227 IGUCHI, Yoshio and 井口, 善生. "道具的弁別学習における弁別刺激-強化結果連合の形成に関する研究 : 表象媒介型条件づけを用いた実験的検討", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2009.

6 words — < 1%

Publications

228 Li, Xia, Dingping Liu, and Kun Wang. "A New Definition Method

of the Co-Structure Functions", ICTE 2011, 2011.

Crossref

6 words — < 1 %

229

Goerlandt, Floris, and Pentti Kujala. "On the reliability and validity of ship–ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk", *Safety Science*, 2014.

Crossref

6 words — < 1 %

230

MORIMOTO, Ryoko and 森本, 涼子. "交通システム整備のLCAにおける不確実性管理とシステム境界設定に関する研究", NAGOYA Repository, 2014.

Publications

6 words — < 1 %

231

田中, 耕司. "洪水氾濫区域における被害軽減のための非構造的な洪水対策に関する研究", Ritsumeikan Asia Pacific University, 2014.

Publications

6 words — < 1 %

232

Miwa, Tomio and 三輪, 富生. "プローブカーデータを用いた道路ネットワーク上の交通行動分析", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2005.

Publications

6 words — < 1 %

233

栗田 洋敬. "二輪車用アルミ合金製薄肉軽量ピストンおよびオールアルミ合金製シリンダの開発", [出版者不明], 2012.

Publications

6 words — < 1 %

234

Sugimura, Kazumi and 杉村, 和美. "関係性の観点から見た女子青年のアイデンティティ探求：2年間の縦断研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2003.

Publications

6 words — < 1 %

235

TERAMOTO, Atsushi and 寺本, 篤史. "セメント系材料の水和反応に依存する体積変化に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2012.

Publications

6 words — < 1 %

236 Denda, Masatoshi and 傳田, 正利. "河川中流域における一時的水域の生態的機能評価手法に関する研究", NAGOYA Repository (New oai_dc setup Aug 2014), 2007. 6 words — < 1%

Publications

237 平沼, 俊太郎. "ゴーイング・コンサーン情報と経営者の裁量行動", DSpace at Waseda University, 2014. 6 words — < 1%

Publications

238 Toyoda, Hideki, and Kazuya Ikehara. "An improved method using k-means to determine the optimal number of clusters, considering the relations between several variables", The Japanese journal of psychology, 2011. 6 words — < 1%

Crossref

239 ONODERA, Natsuo. "Toward intelligent information system. Hypertext - Computerized organization of knowledge.", Journal of Information Processing and Management, 1989. 6 words — < 1%

Crossref

240 Lušić, Zvonimir, Serđo Kos, and Stipe Galić. "STANDARDISATION OF PLOTTING COURSES AND SELECTING TURN POINTS IN MARITIME NAVIGATION", PROMET - Traffic&Transportation, 2014. 6 words — < 1%

Crossref

EXCLUDE QUOTES OFF

EXCLUDE MATCHES OFF

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY OFF