

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15230

研究課題名（和文）国際規則制定手法FSAにおける確率論的費用対効果評価法の開発

研究課題名（英文）Development of Probabilistic Cost-Benefit Assessment Method for Formal Safety Assessment (FSA)

研究代表者

柚井 智洋 (Yuzui, Tomohiro)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：80586694

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、国際海事機関IMO(International Maritime Organization)における規則制定ツールであるFSA(Formal Safety Assessment)における費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発した。具体的には、AISやECDISを対象にFSAの費用対効果評価指標であるGCAFの実績値を海難データ等から推定した。GCAFの閾値であるCAFthrの確率分布は正規分布に従うと仮定し、先に求めたGCAFの実績値を尤度として、ベイズ推定によりCAFthrの確率分布を求めた。これを利用して、FSAの費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、国際海事機関IMO(International Maritime Organization)における規則制定ツールであるFSA(Formal Safety Assessment)の費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発した。これまでのFSAの費用対効果評価は、点推定値により実施されており、学術的にも社会的にも十分に検討されていなかった。本研究は、それを確率論的に実施することを可能とし、学術的に世界初の試みである。これを実際のFSAにも適用することで、これまでよりも精緻な費用対効果評価が実施可能となり、社会的にも意義が大きなものである。

研究成果の概要（英文）：This study developed a probabilistic Cost-Benefit Assessment method for Formal Safety Assessment (FSA), a rule-making tool used in the IMO (International Maritime Organization). Firstly, actual values of GCAFs, which is an index used for cost-benefit assessment for FSA, of AIS and ECDIS were estimated from the casualty database. Next, it was assumed that CAFthr, which is a threshold used for cost-benefit assessment for FSA, follows a normal distribution, and the above-mentioned actual values of GCAFs were used as likelihood, and the probabilistic distribution of CAFthr was obtained by Bayesian estimation. Finally, using the probabilistic distribution of CAFthr, a probabilistic Cost-Benefit Assessment method for FSA was developed.

研究分野：船舶工学

キーワード：FSA 費用対効果評価 ベイズ推定 規制評価 統計的生命価値

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 国際海事機関 IMO (International Maritime Organization)において、国際安全規則の審議の際に、「リスク評価」と「費用対効果評価」を実施し、安全性向上と社会的(経済的)負担のバランスを考慮した合理的な規則制定のための手法 FSA(Formal Safety Assessment)の利用が推奨されており、そのためのガイドライン^①が策定されている。FSAでは、検討対象の安全対策 RCO (Risk Control Option) 導入による費用増加量と人命損失リスク減少量を推定し、それらの比である GCAF (Gross Cost of Averting a Fatality) を推定し、その値が閾値 CAFthr 以下であれば、その RCO は費用対効果があると判断される。これまでに種々の FSA study^②が実施され、幾つかの RCO が規制化されている。

(2) FSA は規制の事前評価に該当するが、より良い規則制定のためには、規制の事後評価も重要である。しかし、IMO において規制の事後評価は殆ど実施されておらず、そのための研究も殆ど実施されていない。

(3) FSA で求められるリスク値について、その評価の精度を高める確率論的手法が金湖^③により報告されている。しかし、リスク減少量や GCAF の値については、確率論的側面からこれまでに十分に検討されているとは言い難い。

(4) GCAF の閾値 CAFthr の設定法として、各国の一人当たり GDP と平均寿命等のデータから各国の ICAF (Implemented Cost of Averting a Fatality, GCAF とほぼ同じ意味を持つ指標) を求め、その代表値を CAFthr として設定する手法(従来法)^④が提案されており、この従来法がこれまでの FSA study では利用されている。従来法がデファクトスタンダードとなっているためか、FSA の費用対効果評価の閾値の設定法に関する研究は従来法以外に実施されていない。

(5) FSA における費用対効果評価は GCAF の値が閾値 CAFthr 以下であれば、費用対効果が有ると判定される。これまでの FSA study における費用対効果評価は、点推定値の比較により実施されているが、GCAF, CAFthr とともに確率分布として与えれば、確率論的に費用対効果評価を実施でき、これまでより精緻な費用対効果評価が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、FSA における費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発することである。これを実現するために、下記のことを実施する。

- (1) これまでに規制化された RCO のリスク減少量等の実績値の推定
- (2) GCAF の閾値 CAFthr の確率分布の推定
- (3) FSA における確率論的費用対効果評価手法の開発

3. 研究の方法

(1) これまでに規制化された RCO の事故発生頻度や人命損失リスクについて、IHS Markit 社の船舶要目及び海難データベース(船舶分野のリスク評価で最も良く利用されているデータベース)から規制化の前後のリスク減少量等を求めた。単に規制化の前後におけるリスク等の差としてリスク減少量等を求めると、規制化以外の要因も含まれるため、医療政策学等の学問分野において利用されている差の差分手法を利用し、規制化によるリスク減少量等を推定した。

(2) 閾値 CAFthr の確率分布として、これまでに規制化された RCO の GCAF の実績値の確率分布を設定する方法が考えられる。しかし、GCAF の実績値を求められる例は多くなく、その確率分布を明らかにすることは難しい。そこで本研究ではデータが少なくても推測可能で、データが多くなるほど正確になるという利点があるベイズ更新により GCAF の確率分布を推定した。具体的には、これまでに規則化がなされた RCO について、海難データ等からそのリスク減少量と費用増加量を推定し、その GCAF の実績値のデータを求める。次に事前分布として無情報事前分布又は OECD 加盟国の ICAF の分布を仮定し、GCAF の実績値データを尤度とし、ベイズ更新により、GCAF の確率分布を求めた。

(3) ベイズ更新により求められた GCAF の確率分布を閾値 CAFthr の確率分布として、それと Event Tree 等により求められる対象 RCO の GCAF の確率分布とを比較し、費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発した。

4. 研究成果

(1) これまでに規制化された RCO のリスク減少量等の実績値の推定

①規制化以外の要因を除いて規制の効果を推定するために、差の差分を実施した。本研究では、IGC コード(International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)の適用効果を推定した。IHS Markit 社の船舶要目及び海難データベースを利用したが、本データには船舶に適用されている規制に関する情報は収録されていない。そこで本研究では、建造年月又は船種変更年月を基に適用規則の可否を判断することとした。差の差分は次式により実施した。

$$F_{y,i} = \alpha + \beta BD_{y,i} TD_{y,i} + \gamma BD_{y,i} + \delta TD_{y,i} + \varepsilon_{y,i}$$

ここで、 $F_{y,i}$ は、建造年月又は船種変更年月の基準 y が A 又は B である船舶グループ i の事故頻度、 $BD_{y,i}$ は建造年月又は船種変更年月の基準が A 又は B であることを示すダミー変数 ($y=A$ なら 0, B なら 1), $TD_{y,i}$ はトリートメントグループ (対象規制適用のグループ) かコントロールグループ (対象規制非適用のグループ) かを示すダミー変数 (コントロールグループなら 0, トリートメントグループなら 1), $\varepsilon_{y,i}$ は誤差項 (平均 0 の誤差項で他の変数と相関していないと仮定する)。 $BD_{y,i}$, $TD_{y,i}$ の係数である β が IGC コード義務化の効果を表す。 β が負であれば事故頻度を低減させる効果があることを意味し、その値の大きさが低減量を表す。

②本研究では、IGC コード適用の効果があると考えられる火災/爆発事故及び船体/機関損傷事故を対象とした。それらの事故発生頻度を船種毎に求めた。火災/爆発事故の頻度を図 1 に示す。

③LPG 運搬船をトリートメントグループ、その他の船種をコントロールグループとして、差の差分析を実施した。計算は統計ソフトウェア R の `lm` 関数を用いて実施した。その結果を図 2 に示す。図 2 の β の値から、IGC コード義務化は、火災爆発頻度を 6.99×10^{-4} [1/(隻・年)] 低減させる効果があることが示唆されたが、有意差は認められない。

④本研究により、海事分野の安全規制の効果の推定に差の差分析が世界で初めて実施された。また、差の差分析が海事分野の安全規制の効果推定にも有効であることが示唆された。しかし、その結果の信頼性については十分とは言い難いとする。信頼性向上に向けた課題が幾つか考えられ、今後はこの課題解決の研究が必要である。

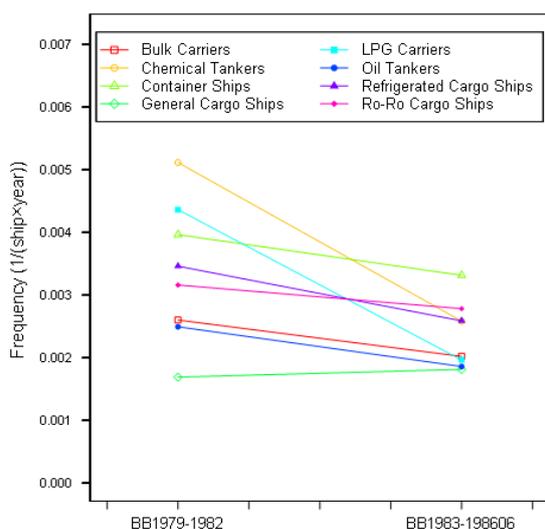


図 1 IGC コード非適用の火災爆発頻度 (BB1979-1982) と IGC コード適用の火災爆発頻度 (BB1983-198606)

| | FX | |
|----------------|------------------------|-----------------------|
| | Estimate | p-value |
| γ | -1.31×10^{-3} | 6.44×10^{-3} |
| δ | 3.81×10^{-4} | 0.557 |
| β | -6.99×10^{-4} | 0.450 |
| R^2 | 0.711 | |
| Adjusted R^2 | 0.602 | |

図 2 差の差分析の結果

(2) GCAF の閾値 CAF_{thr} の確率分布の推定

①GCAF の実績値は次式対数正規分布に従うと仮定し、この母数 (μ と σ) をベイズ推定することにより、GCAF の確率分布を推定した。本研究で開発した手法は、GCAF の実績値を CAF_{thr} として利用する手法であり、GCAF の実績値の確率分布は、すなわち CAF_{thr} の確率分布となる。

$$f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

②IHS Markit 社の船舶要目及び海難データベースを利用して、AIS 義務化前後及び ECDIS 義務化前後の人命損失リスクを船種やサイズ毎に推定し、それらの差を人命損失リスクの減少量として推定した。更に、AIS 及び ECDIS 導入による費用増加量を、文献からそれぞれ 2 万\$と 6 万\$と仮定し、これらから GCAF の実績値を推定した (なお、人命損失リスクの減少量が 0 や負の値となったデータは除外した)。この結果を図 3 に示す。GCAF の平均値と中央値は、それぞれ 1.63×10^7 (US\$/人), 3.13×10^6 (US\$/人) である。

③OECD 加盟国の一人当たり GDP 及び平均寿命を世界銀行の 2019 年のデータを利用して、国別の ICAF を求めた。そのヒストグラムを図 4 に示す。平均値と中央値はそれぞれ 5.64×10^6 (US\$/人), 5.90×10^6 (US\$/人) である。

④事前分布を変えた 2 種類のベイズ推定を実施した。Case 1 では、事前分布として無情報事前分布、尤度として図 3 を利用した。Case 2 では、2 段階のベイズ推定を実施した。まず 1 段階目のベイズ推定では、事前分布として無情報事前分布、尤度として図 4 を利用した。次に 2 段階目のベイズ推定では、1 段階目のベイズ推定の結果である μ と σ の分布を正規分布近似したもの事前分布とし、尤度として、Case 1 と同じ図 3 を利用した。Case 1 と Case 2 の違いは、

既存手法による結果（ICAF の分布）の利用の有無である。本研究のベイズ推定では、ベイズ推定のオープンソースソフトウェアである Stan を R 言語で使うためのインターフェースである Rstan により計算を実施した。対数正規分布の母数のベイズ推定結果の平均値を利用して、対数正規分布に従う GCAF の確率密度を図示すると、図 5 となる。これらの平均値と中央値は、Case 1 については、それぞれ 2.97×10^7 (US\$/人)及び 2.72×10^6 (US\$/人)、Case 2 についてはそれぞれ 6.12×10^6 (US\$/人)、 4.52×10^6 (US\$/人)である。本研究で尤度として利用した GCAF の実績値のデータ等や本研究で置いた仮定等に課題があるため、これらの値自体はまだ議論に耐えるものではないと考えるが、CAFthr としてこれまでに利用されてきた値と大きな乖離が無いため、概ね妥当な値が得られていると考えられる。

⑤本研究により、GCAF の実績値の確率分布が世界で初めて求められた。また、これを尤度として、ベイズ推定により CAFthr の確率分布を求める手法が世界で初めて開発された。しかし、その結果の信頼性については十分とは言い難いとする。信頼性向上に向けた課題が幾つか考えられ、今後はこの課題解決の研究が必要である。

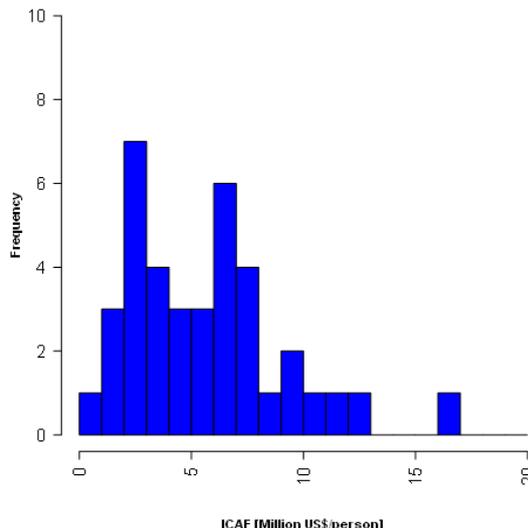
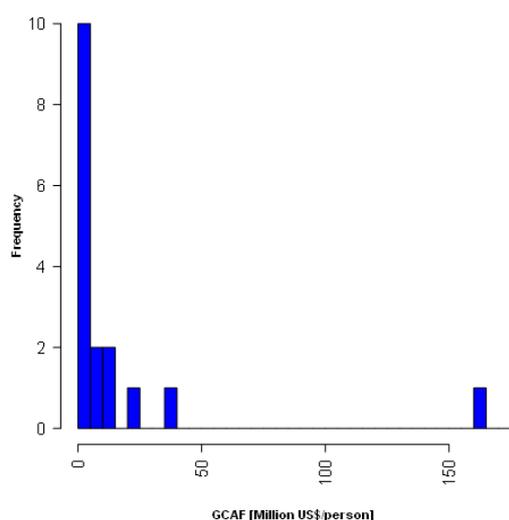


図 3 AIS 及び ECDIS 導入による GCAF の実績値の分布

図 4 OECD 加盟国の ICAF の分布

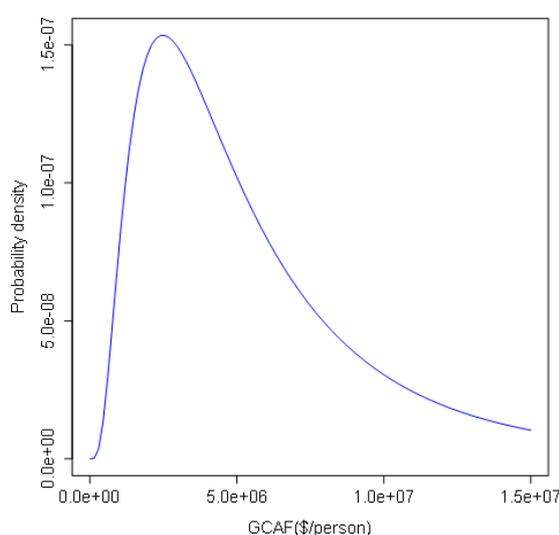
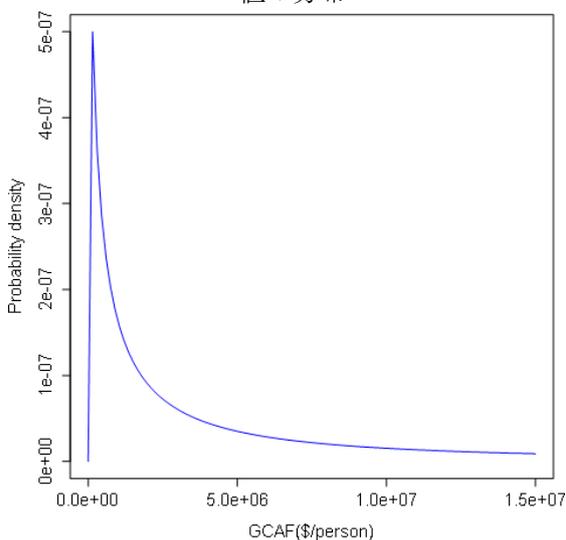


図 5 ベイズ推定結果による GCAF の確率密度（左：Case 1，右：Case 2）

(3) FSA における確率論的費用対効果評価手法の開発

①②で求められる CAFthr の確率分布を利用し、FSA における費用対効果評価を確率論的に実施する手法を開発した。本手法のイメージを図 6 に示す。これまでの FSA study では、GCAF、CAFthr とともに点推定値が利用されてきたが、本手法では、これらの確率分布を利用する。確率分布の代表値（平均値や中央値等）を利用すれば、これまで通りの点推定値の費用対効果評価も可能であり、有用な手法であると考えられる。

②本研究により、世界で初めて FSA における確率論的費用対効果評価手法が開発された。今後は、本手法を実際の FSA study に可能な限り多く適用し、手法の有効性を検証する必要がある。

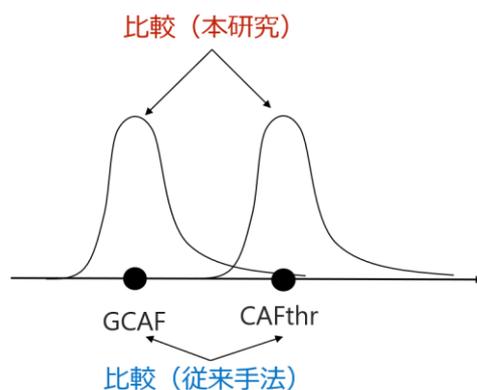


図 6 開発した FSA における確率論的費用対効果評価手法のイメージ

<引用文献>

- ① IMO: REVISED GUIDELINES FOR FORMAL SAFETY ASSESSMENT (FSA) FOR USE IN THE IMO RULE-MAKING PROCESS, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, 2018.
- ② 例えば E. Vanem et al.: Analysing the risk of LNG carrier operations, Reliability Engineering and System Safety 93, pp.1328-1344, 2008.
- ③ 例えば, 金湖: 船舶の確率論的安全評価手法—その 4: リスク評価における不確実さの扱い—, 日本造船学会論文集, 第 194 号, pp.255-269, 2003.
- ④ R. Skjong et al.: SOCIETAL INDICATORS AND RISK ACCEPTANCE, Proceeding of 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 柚井智洋 |
| 2. 発表標題 FSAにおける費用対効果評価の閾値設定手法の開発 |
| 3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 柚井智洋 |
| 2. 発表標題 海事分野における安全規制の事後評価に関する研究-差の差分分析を用いたIGCコード義務化による事故頻度低減効果の推定の試み- |
| 3. 学会等名 日本船舶海洋工学会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|