Triple-I に基づく原油タンカーの包括的環境影響評価指標の開発

正員 柚 井 智 洋* 正員 荒 井 誠**
正員 金 湖 富士夫***

Development of Inclusive Environmental-impact Assessment Index of Oil Tankers based on Triple-I

by Tomohiro Yuzui, *Member* Makoto Arai, *Member*
Fujio Kaneko, *Member*

Summary

In recent years, the necessity of risk assessment is rising in various study fields and in the industry. It is the same in the maritime field. The environmental risk assessment is especially important because the damage for marine environment is serious once the accident of the oil tanker occurs. However the environmental risk assessment is more complex than the safety risk assessment because many things must be considered. The study of the method for assessing the pollution by oil spill from tankers has started in IMO, the volume of spilled oil was adopted as its basic index. On the other hand, Inclusive Impact Index (Triple I) has been proposed by the IMPACT Research Committee in The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. Triple-I is defined and calculated based on the ecological footprint, ecological risk, human risk, cost, and benefit. By using this index, we can objectively discuss the societal importance of the risk control option from both environmental and economical viewpoints. In this paper we try to apply Triple-I to the environmental risk assessment in the maritime field, and evaluate the risk of the oil tanker and discuss whether Triple-I can be used for the cost effectiveness assessment.

1. 結 言

原油タンカーの事故は一度起こってしまうと人命のみならず海洋環境に深刻な影響をもたらす。現に Exxon Valdez 号、Nakhodka 号、Prestige 号等の事故が海洋環境へ甚大な被害をもたらしたことはご承知の通りである。このような背景から、二重船殻化をはじめさまざまな安全対策がとられてきたが、原油タンカーの安全性に対する不安感を完全にぬぐい去ることは困難である。船舶の安全は、国際連合の専門機関である International Maritime Organization (IMO)が策定した種々の安全基準より構成される条約を各国が批准し、各国に属する船舶がそれらを遵守することにより達成されると認識されている¹⁾。IMO では、その規則制定の過程で安全 FSA (Formal Safety Assessment) という概念を導入している。FSA とは、従来の事故が生じてから対応する reactive な対応ではなく、事故が生じる前から対応する proactive な手続きである。近年では、安全 FSA だけでなく環境 FSA に関する議論も開始され、その第 1 段階の指標として油流出リスクに関す

る研究が進められている。将来的には CO₂、NO_x、SO_x も環境 FSA の検討対象となると想定され、最終的には安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価指標の構築についての議論が想定されている²⁾。

一方、安全と環境と経済を包括的に扱い、海洋の大規模利用技術进行评估する指標として、日本船舶海洋工学会 IMPACT 委員会より Triple-I (III; Inclusive Impact Index)が提案されている。

そこで本研究では、原油タンカーの包括的環境影響評価に Triple-I を応用し、原油タンカーの社会的有益性を評価する。更に、安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果検証手法への Triple-I の適用可能性を示す。

2. 包括的環境影響評価指標³⁾

2.1 Ecological Footprint

Ecological Footprint (EF)は、人間経済活動による資源やエネルギーの利用、廃棄物の処理などに必要な生態系の生産(処理)能力を、生産性のある土地(耕作地、牧草地、森林地、生産力のある水域、生産力阻害地に区分される)の面積に換算して表す評価指標である。上述の土地区分の間にはそれぞれ生産力に差があるため、土地面積を合計する際には Table 1 に示すような等価係数(Equivalence Factor)を掛ける

* 海上技術安全研究所
(研究当時、横浜国立大学大学院工学府)

** 横浜国立大学大学院工学研究院

*** 海上技術安全研究所

ことによって平均的な土地面積に換算する。この平均的な土地面積の単位には global hectares (gha) が用いられる。1 gha とは、世界の平均的な生物生産力を持つ土地面積 1ha のことである。わかりやすい例を挙げると、土地が牧草地の場合、牧草地の生物生産力が低いことから 1ha は 1gha とはならず 0.49gha となる。一方、1ha の農耕地の場合は生物生産力が高いことを考慮して、2.21gha となる。

EF は土地面積という非常に単純でわかりやすい指標となっているため、ヨーロッパや北米をはじめとする多くの国、自治体で現在急速に普及しつつある。しかしながら、EF は基本的に年度ごとの統計データを基礎として計算されるため、将来的な価値や寿命、技術革新などが反映されないという批判もあり、意思(政策)決定に用いる際には、長期的な観点からの比較評価をどう取り入れるかが課題となっている。

Table 1 Equivalence factors for ecological footprint.⁴⁾

Area type	Equivalence factors [gha/ha]
Cropland	2.21
Pasture	0.49
Forest	1.34
Built-up area	2.21
Productive sea area	0.36

2.2 包括的環境影響評価指標 (Triple-I, III)

前節で述べたように、EF を意思決定に用いるためには、将来的な不確実性をどのように意思決定に反映させるかが課題である。リスクは、未来を含む負の価値を確率と事象の大きさの積で表したものであるから、リスクをうまく統合することができれば EF に長期的な観点が加わることになる。一方、環境リスク論では、環境リスク(Ecological Risk, ER)をどのようにコスト換算するかが課題となっている。未来を含む生態系の価値は根本的に人間の経済活動の価値基準を用いて評価することは難しいが、生物生産量を基本的な価値と考えれば、フットプリントとして換算することが可能となる。すなわち、リスクのうち ER は EF に含めることが可能で、そうすることにより EF に長期的な観点を加えることができる。

生態系の視点でのみ評価するのであれば、上記の指標で十分であるといえる。しかしながら、意思(政策)決定の判断基準に用いるためには、人命のリスク(Human Risk, HR)や従来型の経済価値評価を無視することはできない。従って、ER を含めた EF と、HR を含めたコスト(Cost, C)を統合するための換算係数を導入することができれば、包括的指標を作ることができる。ここでは、対象となる海洋利用技術の適用が想定される、国あるいは地域の EF と国内総生産(Gross Domestic Product, GDP)の比 $\sum EF_{region} / \sum GDP_{region}$ (ただし、二酸化

炭素海洋隔離など外洋を対象とする技術については世界の総 EF と総 GDP の比 $\sum EF_{region} / \sum GDP_{region}$ を用いる) を換算係数として導入する日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会提案の統合指標 Inclusive Impact Index (Triple-I, III) の適用を考える。

$$III = EF + \alpha ER + \frac{\sum EF_{region}}{\sum GDP_{region}} [\beta HR + (C - B)] \quad (1)$$

ここで、EF は Ecological Footprint、ER は Ecological Risk、HR は Human Risk、C は Cost、B は便益(Benefit)を表わし、 α は ER を gha 単位に換算する係数、 β は HR を金額換算する係数を表わす。

(1)式を見ればわかるように、B にマイナス符号が付いているので、Triple-I としては、負の値を取ればそのシステムが社会的に有益なシステムであると評価できる。

3. 原油タンカーの Triple-I

3.1 評価項目

本研究では、同じ時期に建造された同じ載貨重量 (afamax; 87,000 dwt) のシングルハルとダブルハルタンカーについて、Triple-I を算出する。各項目を統合する換算係数については、対象となる場所が外洋上であることから、2005 年における世界の EF (=17 Ggha)⁴⁾ と GDP (=45.1 兆 US\$)⁵⁾ の比 ($\sum EF_{region} / \sum GDP_{region} = 3.88 \times 10^{-4}$ [gha/US\$]) を用いることとする。

なお本研究では、原油タンカーが直接影響を与える範囲を解析の対象とする。つまり、原油タンカーそのものとは直接的な関係が無いと考えられる「原油掘削時の社会的影響」や「原油を消費することによる社会的影響」は対象外とする。従って本研究では、1 隻の原油タンカーから発生する社会的影響として、「タンカー運航時の社会的影響 (つまり、二酸化炭素排出量と環境リスク及び人命リスクと経済的影響)」と、「タンカーが運搬した原油そのものの社会的影響 (つまり、原油の売上げ)」を対象とする。原油タンカーの社会との関わりを簡単に示すと Fig.1 のようになると考えられるが、本研究で対象とするのは Fig.1 の点線内である。1 隻の原油タンカーから発生する社会的影響としては Fig.1 の点線外のタンカー建造時及び解体時の社会的影響も考慮する必要があると考えられるが、それらに関するデータは入手できなかったため本研究では解析の対象としなかった。

また、本研究ではタンカーの寿命を 25 年とする。これは最近 IMO で議論されている GBS (Goal Based Standard) や IACS の CSR (Common Structure Rule) で船の寿命を 25 年とし

ている⁶⁾ことを参考にした。

Fig.1 本研究のシステム範囲(点線内)

3.2 EFの算出

個々の生産活動や経済活動によるEF消費の大部分はCO₂排出に伴う森林の消費(排出したCO₂を全て吸収するだけの森林面積が必要と考える)で換算されるため、従来から行われているCO₂排出量を指標とするLife Cycle Assessment(LCA)の手法が応用できる。そこで、本研究ではシングルハルタンカーについては文献⁷⁾で求められているCO₂排出量を使用した。そのデータをTable 2に示す。ダブルハルタンカーについてはCO₂排出量に関するデータが入手できなかったため、簡易なLCAを行いEFを求めた。シングルハルタンカーと同様にダブルハルタンカーについても建造、運航(25年)、解体、リサイクル(伸鉄材生産)、各段階でCO₂排出量を求めることとした。その割合はダブルハルタンカーについても、Table 2のような割合になると考えられる。Table 2から運航時のCO₂排出量の割合が大きい(98.4%)ことがわかるので、ダブルハルタンカーについて運航時のCO₂排出量を求めて、建造、解体、リサイクルの各段階については、Table 2の割合から推定した。シングルハルとダブルハルとで運航時の速力を同じとした場合、運航時のCO₂排出量は主に主機関の燃料消費量によって異なる。そこで、参考文献⁸⁾よりアフラマックスダブルハルタンカーの主機関の燃料消費量を調査した。その結果をFig.2に示す。これより、(2)式のように載荷重量(x)により主機関の燃料消費量(y)を1次式で近似し、定式化した。

$$y = -7 \times 10^{-6} x + 1.4392 \quad (2)$$

Fig.2 載荷重量による燃料消費量

対象としているダブルハルタンカーは87,000dwtなので、(2)式より、燃料消費量を推定できる。これと、航海距離が12,000km(片道)⁷⁾であることと、生涯航海数が222回⁷⁾であることを考慮して、ダブルハルタンカーのlifecyle(25年)での運航時のCO₂排出量を算出すると、Table 3のようになる。ただし、燃料消費量からCO₂排出量を算出する際は、C重油のCO₂排出係数である3.0[ton-CO₂/kl]⁹⁾を使用した。この運航時のCO₂排出量をもとに、Table 2の割合に合うように、ダブルハルタンカーの各段階でのCO₂排出量を推定するとTable 4のようになる。

Table 2 シングルハルタンカーのCO₂排出量⁷⁾

	CO ₂ 排出量[ton-CO ₂]	割合
建造	2.00×10^4	1.5%
運航(25年)	1.30×10^6	98.4%
解体	3.60×10^2	0.0%
伸鉄材生産	1.10×10^3	0.1%
合計	1.32×10^6	100.0%

Table 3 運航時の燃料消費量と二酸化炭素排出量
(ダブルハルタンカー)

燃料消費量[g/ton-km]	0.83
1航海(往復)の燃料消費量[ton]	1.73×10^3
CO ₂ 排出量(25年)[ton-CO ₂]	1.36×10^6

Table 4 ダブルハルタンカーのCO₂排出量

	CO ₂ 排出量[ton-CO ₂]	割合
建造	2.08×10^4	1.5%
運航(25年)	1.36×10^6	98.4%
解体	4.14×10^2	0.0%
伸鉄材生産	1.10×10^3	0.1%
合計	1.38×10^6	100.0%

本研究で対象としている範囲は運航時のみなので、運航時のCO₂排出量を簡単のためにライフサイクル25年で平均化し1年当たりのCO₂排出量に直して、森林のCO₂吸収係数

として $5.20[\text{ton-CO}_2/\text{ha}/\text{年}]^3$ を使用してシングルハルタンカーとダブルハルタンカーの EF を算出すると Table 5 のようになる。Fig.3 にシングルハルタンカーとダブルハルタンカーの EF を比較して示す。ダブルハルタンカーの EF はシングルハルタンカーの EF に比べ、約 4.6% 増加していることが分かる。

なお、本研究では運航時のみを考慮したが、建造時から解体時までを含めて EF を算出するとシングルハルタンカーが 1.37×10^4 [gha]、ダブルハルタンカーが 1.43×10^4 [gha] となる。運航時の CO_2 排出量が全体に占める割合は約 98.4% と大きく、建造時及び解体時の CO_2 排出量は運航時に比べ桁違いに小さいので、運航時を考慮するのみで十分であると考えられる。

Table 5 シングルハルタンカーとダブルハルタンカーの EF

	Single	Double
CO_2 排出量[ton- CO_2 /年]	5.20×10^4	5.44×10^4
森林の CO_2 吸収係数 [ton- CO_2 /ha/年]	5.20	5.20
EF[gha]	1.34×10^4	1.40×10^4

Fig.3 シングルハルとダブルハルの EF の比較

3.3 HR の算出

本研究では原油タンカーの HR としては、運航時の事故による死亡リスクのみを考慮する。シングルハルとダブルハルについてそれぞれ、Lloyd's Register Fairplay(LRFP) casualty data の 1991 年から 2003 年の 13 年間について事故データを調査し HR を算出した。Table 6 および Fig.4 にシングルハルとダブルハルタンカーの事故データと HR を比較して示す。なお、Table 6 中の母集団の大きさの定義は「対象期間における毎年の航行船舶数の合計」である。

Fig.4 より、ダブルハルタンカーの HR はシングルハルタンカーに比べ、約 4 分の 1 に減少していることが分かる。

Table 6 シングルハルとダブルハルの事故データと HR

	single	double
母集団の大きさ[隻・年]	66,983	14,751
事故件数[件]	755	15
人命損失数[人]	551	29
HR [fatalities/(隻・年)]	8.23×10^{-3}	1.97×10^{-3}
HR (lifecycle) [fatalities/隻]	0.206	4.91×10^{-2}

Fig.4 シングルハルとダブルハルの HR(lifecycle)の比較

3.4 ER の算出

原油タンカーの ER としては、運航時の事故による漏油リスクを考慮する。HR と同様に LRFP casualty data の 1991 年から 2003 年の 13 年間について事故データを調査し ER を算出した。

IMO では、「漏油の補償金額」を漏油リスクの単位としているが、それは経済的損失であるので後述する C (Cost) の項に含めた。ER(環境価値の損失)の算出については未だ確立された手法が無いが、本研究では海上に漏れた油が「海域の生産力を阻害している」という Ecological Footprint の視点から漏油リスクを求めたものを ER とした。

LRFP casualty data にある漏油量の記述には複数の単位が使用されているため Kilo Liter に換算し、文献 10)にある漏油量と漏油面積の推定図から (3) 式のような関係式を求め、漏油面積を推定した。ここで、 x は漏油量[m^3]、 y は漏油面積[km^2]を表す。ただし、 $1\text{kl} = 1\text{m}^3$ である。

$$y = 7.25x \quad (3)$$

これより求めた漏油面積[km^2]を ha 単位に直し、それに Table 1 中の Productive Sea area の等価係数 0.36 を掛けることにより漏油面積[gha]が求められ、ER が推定できる。事故は様々な海域で起こっているが、本研究では Productive Sea Area でのみ事故が起きていると仮定し ER を推定した。また海面に漏れた油により汚染された海域は、ある期間の後に回復すると考えることもできるが、本研究ではその期間は考慮しなかった。

Table 7 と Fig.5 にシングルハルとダブルハルタンカーの事故データと ER を比較して示す。Fig.5 より、ダブルハルタンカーの ER はシングルハルタンカーに比べ、約 18 分の 1 と激減していることが分かる。

Table 7 シングルハルとダブルハルの事故データと ER

	Single hull	Double hull
母集団の大きさ[隻・年]	66,983	14,751
事故件数[件]	755	15
漏油量[kl]	4.51×10^5	5.57×10^3
漏油量[m ³]	4.51×10^5	5.57×10^3
漏油面積[km ²]	3.27×10^6	4.04×10^4
漏油面積[ha]	3.27×10^8	4.04×10^6
漏油面積[gha]	1.18×10^8	1.45×10^6
ER[gha/(隻・年)]	1.76×10^3	98.6
ER (lifecycle)[gha/隻]	4.41×10^4	2.46×10^3

Fig.5 シングルハルとダブルハルの ER(lifecycle)の比較

3.5 C と B の算出

Fig.1 より、原油タンカーの経済的影響は Benefit としては国内市場への原油の売上げ、Cost としては産油国からの原油の仕入れ、運用費、漏油リスク、解体費が考えられる。何故なら Fig.1 中で石油会社の Cost「運賃」と船会社の Benefit「運賃」は同じものなので相殺されるからである。

産油国からの原油の仕入れ価格はドバイ原油価格から求められるが、以下で Benefit を求める際に、CIF 価格からドバイ原油価格を引いた値、つまり原油 1 トン当たりの利益から Benefit を求めた。そのため、本研究では原油タンカーを投入したことによる Benefit を原油の売上げ利益、Cost を運用費(燃料費、船員費、港費、修繕費、減価償却費、その他)と解体費として推定した。ただし、3.4 節で述べたように補償金額による漏油リスクも Cost とした。

また、Cost や Benefit は時間的に変動が激しく取り扱いが難しい項目である。本研究では変動する項目（原油価格、C 重油価格、船価）については平均値を用いることとした。す

なわち、シングルハルタンカーの船価を文献 11)より 2005 年から 2008 年の平均値で 7180 万 US\$ と推定した。この船価が減価償却費となる。また、燃料費は 2005 年から 2008 年の C 重油価格の平均値(595US\$/ton)¹²⁾と燃料消費量⁷⁾より推定した。船員費は文献 13)、14)より推定した。ダブルハルタンカーの船価はシングルハルの 10%増とし、減価償却費として計上した。ダブルハルタンカーの燃料費は燃料消費量の増分から推定した。その他の運用費はこれまでの保守経費の実績から求めた。シングルハルタンカーの解体費については解撤船価格相場が 160\$/LDT¹⁵⁾であることと軽荷重量が 14,500ton⁷⁾であることから求めた。ダブルハルタンカーの解体費を求める際は軽荷重量をシングルハルの 10%増として求めた。補償金額による漏油リスク推定の詳細を Table 8 に示す。

原油 1 トン当たりの利益は、2005 年から 2008 年の原油 CIF 価格の平均値(564US\$/ton)¹⁶⁾から同期間のドバイ原油価格の平均値(507US\$/ton)¹⁷⁾を引いた値で 57US\$/ton と推定した。これと貨物重量から原油売上利益を推定した。

Table 9 にシングルハルタンカーとダブルハルタンカーの Cost を Table 10 に Benefit を示す。また、Fig.6 にシングルハルとダブルハルの Cost を比較して示す。ダブルハルタンカーの C はシングルハルタンカーに比べ、約 3.6%増加している。

Table 8 補償金額による漏油リスク

	Single hull	Double hull
母集団の大きさ[隻・年]	66,983	14,751
事故件数[件]	755	15
補償金額[US\$]	5.39×10^8	2.19×10^7
漏油リスク[US\$/(隻・年)]	8.05×10^3	1.48×10^3
漏油リスク(lifecycle)[US\$/隻]	2.01×10^5	3.71×10^4

Table 9 シングルハルとダブルハルの Cost (lifecycle)

	Single hull	Double hull
燃料費[US\$]	2.19×10^8	2.29×10^8
船員費[US\$]	6.13×10^7	6.13×10^7
港費[US\$]	3.68×10^7	3.68×10^7
修繕費[US\$]	2.94×10^7	2.94×10^7
減価償却費[US\$]	7.18×10^7	7.89×10^7
その他[US\$]	4.14×10^7	4.14×10^7
漏油リスク[US\$]	2.01×10^5	3.71×10^4
解体費[US\$]	2.32×10^6	2.55×10^6
Cost 合計[US\$]	4.62×10^8	4.79×10^8

Table 10 Benefit (lifecycle)

貨物重量[ton]	79,380
原油1トン当たりの利益[US\$/ton]	57
生涯航海数	222
原油の売上げ[US\$]	1.00×10^9

Fig.6 シングルハルとダブルハルの C(lifecycle)の比較

3.6 Triple-Iの算出

これまでに得られた EF, HR, ER, C, B の値を(1)式に代入して Triple-I (III) を求める。なお ER は既に gha 単位に換算されているので $\alpha=1$ である。また β は $\beta=300$ 万[US\$/人]とした。この 300 万[US\$/人]という値は、安全 FSA (Formal Safety Assessment) の費用対効果の評価において 1 人当たりの人命リスクを削減する場合にかけられる上限のコストとして設定されている値である¹⁾。簡単のために、C や B を 25 年で平均化して 1 年当たりの C や B に直して Triple-I を算出した。ただし、ER についてはタンカーが存在することによる環境リスクを考慮した。そのため ER の値は lifecycle(25 年)での値を用いて Triple-I を算出した。その結果を Table 11 に示す。シングルハルとダブルハルの Triple-I を比較して Fig.7 に示す。

Table 11、Fig.7 よりダブルハルの Triple-I の値はシングルハルの約 5 分の 1 であり、シングルハルよりかなり小さく、このことはシングルハルよりダブルハルの方が社会的に有益であることを意味している。特に 3.4 節で述べたようにシングルハルに比べてダブルハルの ER が約 18 分の 1 と小さいため、このような結果になったと考えられる。

Table 11 シングルハルとダブルハルの III

	Single hull	Double hull
EF[gha/隻]	1.34×10^4	1.40×10^4
HR[US\$/隻・年]	2.47×10^4	5.90×10^3
ER[gha/隻]	4.41×10^4	2.46×10^3
C[US\$/隻・年]	1.85×10^7	1.92×10^7
B[US\$/隻・年]	4.00×10^7	4.00×10^7
$\Sigma EF / \Sigma GDP$ [gha・年/US\$]	3.88×10^{-4}	3.88×10^{-4}
III[gha/隻]	4.92×10^4	8.39×10^3

Fig.7 シングルハルとダブルハルの Triple-I(III)の比較

またシングルハル、ダブルハルの Triple-I の値は両方とも正の値であることが分かる。これは、環境影響と経済性を包括的に評価した場合、原油タンカーは社会的に有益ではないということを意味する。Triple-I による絶対評価では、経済的利益より環境負荷が大きいと評価されたために Triple-I の値が正の値になったと言える。ただし、ER の推定は未だ確立された方法が無い中で、本研究では漏油面積から ER を推定した。そこで、ER を除外して Triple-I の値を算出してみる。すると、それでも Triple-I の値は Table 12 のように正の値となる。つまり原油タンカーの経済的利益より CO₂ による環境負荷の方が大きいということが分かる。Triple-I では CO₂ を EF により評価しているが、EF が CO₂ による環境負荷を過大に評価している可能性も考えられる。CO₂ や ER については精度の高い評価手法を確立することが今後の課題であると言える。

また、各係数 (α , β 及び $\Sigma EF / \Sigma GDP$) の設定によっても結果は異なってくると考えられる。各係数の設定についても、更なる検討が必要である。

本研究では原油タンカーが直接影響を与える範囲を解析の対象としたが、入手可能なデータの不足等の理由により「タンカー運航時の社会的影響」のみの解析とした。本研究で考慮しなかった「タンカー建造時及び解体時の二酸化炭素以外の環境影響」を考慮することにより更に実態に即した原油タンカーの社会的有用性を検討できると考えられる。特に解体の場合は、解体場所により海洋汚染を引き起こしている例があるので、それらを考慮することが今後の課題である。

Table 12 ER と EF を除外した各場合についての III

	Single hull	Double hull
III[gha/隻]	4.92×10^4	8.39×10^3
III(EF, ER 除外) [gha/隻]	-8.34×10^3	-8.09×10^3
III(ER 除外) [gha/隻]	5.06×10^3	5.93×10^3
III(EF 除外) [gha/隻]	3.58×10^4	-5.63×10^3

4. Cost Benefit Assessment

4.1 費用対効果評価の概要

費用対効果評価(Cost Benefit Assessment)とは、リスク評価を行った結果についてリスクを低減させる安全対策を検討し、その安全対策を導入した場合にどの程度のリスクの減少が得られるかを再度評価し、その安全対策を実施するための必要経費と実施に伴い得られるベネフィット(削減されたリスクに伴うすべての便益)とを比較・評価することである。

安全 FSA における費用対効果評価の場合、4.2 節で説明する GCAF と呼ばれる指標により評価する。また、IMO では現在、環境 FSA に関する検討が行われており、第 1 ステップとして、油流出リスクに対する検討が行われている。その油流出リスクに対する費用対効果評価の場合、4.3 節で説明する CATS と呼ばれる指標が検討されている。

油流出リスクの次には、現在 MEPC (IMO の海洋環境防止委員会)で集中的に審議されている GHG 対策や、NO_x、SO_x が環境 FSA の検討対象となることが考えられる。さらにその後には、安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価検証手法の構築についての議論が想定される²⁾。本研究では、この安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価検証手法として 4.4 節で説明する ΔIII の適用を提案する。

4.2 GCAF

安全 FSA では、Step3 と呼ばれる評価プロセスで考案された種々の RCO(Risk Control Option)を実行するためのコストを評価し、妥当なコスト指標値を求めることにより費用対効果の評価を行い、その値の小さい順で RCO に優先順位を付ける。IMO では指標値として以下の式が使用されている。

$$GCAF = \angle C / \angle HR \quad (4)$$

ただし、 $\angle HR$ は RCO の導入により削減される人命リスク、 $\angle C$ は RCO の導入による追加コスト(RCO の価格、訓練費用、逸失利益等を含む)を表す。重要なのは、この指標の閾値である。安全 FSA では、(4)式の値が 300 万 US ドル/人より小さい場合、その RCO は費用対効果があると判定できるとしている¹⁾。

4.3 CATS

環境 FSA の漏油リスクにおいては、安全 FSA の GCAF に対応するものとして、油流出 1 トンを防ぐために拠出する金額として、CATS (Cost of Averting a Ton of oil Spilt)という概念が提案されている。CATS は次のように定義される²⁾。

$$CATS = \angle C / \angle ER \quad (5)$$

ただし、 $\angle ER$ は RCO 導入により削減される油流出リスクである。安全 FSA における手法と同様に、この CATS の値が閾値 (CATS_{cr} と定義する) より小さい場合、RCO による費用対効果があると判定する。IMO では、現在、費用対効果の判定基準となる CATS_{cr} の値の設定について議論が行われている。EU の研究プロジェクトの一つである SAFEDOR より CATS_{cr}=60,000[US\$/ton]が提案されており、IMO での承認を得る前からいくつかの文献で引用されている。しかし、日本からもそれに対抗する値として国際油補償基金 (IOPCF) による油流出事故に対する補償額の解析により、流出油量に依存する CATS_{cr} が提案されている。MEPC ではこの 2 つのうち、後者の採用がほぼ合意されており、MEPC60 において最終化する見込みとなっている¹⁸⁾。

4.4 ΔIII

前述したように、現在、環境 FSA で検討されている CATS の次には、MEPC (IMO の海洋環境防止委員会)で集中的に審議されている GHG 対策や、NO_x、SO_x が環境 FSA の検討対象となることが考えられ、その後には、安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価検証手法の構築についての議論が想定される。

Triple-I(III)は、EF で二酸化炭素排出量を、ER で油流出リスクを、HR で人命リスクを、C と B で経済性を考慮しているので、安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価検証手法として応用できると考えられる。本研究では Triple-I の変化として ΔIII を次のように定義する。

$$\Delta III = \Delta EF + \alpha \Delta ER + \frac{\sum EF_{region}}{\sum GDP_{region}} (\beta \Delta HR + \Delta C) \quad (6)$$

ΔIII が負の値を取れば、その RCO は環境面、安全面、経済面から考えてその導入によって負荷が軽減される社会的に有効な対策(費用対効果がある対策)と判定できる。また、費用対効果があると判定できた場合、 ΔIII は負の値なので、 ΔIII の絶対値 $|\Delta III|$ が大きい順で RCO の優先順位付けをすることができる。

4.5 GCAF、CATS と ΔIII の比較

IMO 文書¹⁹⁾を参考にオイルタンカーについて具体的な Cost Benefit Assessment を行った。Table 13、Table 14 と Fig.8 に結果を示す。ただし、Table 13 中の ER は IMO における漏油リスク、つまり漏油の補償金額を意味している。また、 ΔIII を求める際、(6)式のうち $\angle EF$ はデータが無かったため考慮しなかったが、3.1 節からわかるように船舶の EF は運航時のものがほとんどである。従って漏油対策によって EF の変動

がほとんどないと考えられるので $\angle EF$ を無視しても差し支えないと考えられる。(6)式の換算係数(α 、 β 、 $\Sigma EF/\Sigma GDP$)は3章と同じ値を用いた。

Fig.8の縦軸はそれぞれGCAF、CATS、 $\angle III$ に対し最も費用対効果があるオプションの値を1、全く効果のない(すなわちCATS等が閾値 $CATS_{cr}$ 等より大きいまたは等しい)場合を0として表示したものである。横軸はオプション(RCO)の番号である。

費用対効果評価結果からGCAFに関してはRCO5が一番良いリスク制御装置であり、次いでRCO6が良いと考えられ、その他のRCOについてはGCAFが閾値(300万)より大きい値なので費用対効果は無いと考えられる。

CATSに関してはRCO6、RCO1、RCO2、RCO5の順に良いリスク制御装置という結果となった。その他のRCOについては、費用対効果は無いという評価となった。

GCAFとCATSの結果より、安全と環境の両方を考えた場合、費用対効果があると考えられるリスク制御装置はRCO6とRCO5であると考えられる。

一方、 $\angle III$ を基に費用対効果を考えると、良いリスク制御装置であると考えられる順にRCO6、RCO2、RCO5、RCO1という結果となった。その他のRCOについては、費用対効果は無いという結果となった。

$\angle III$ による費用対効果の結果は、GCAF、CATSの両方から費用対効果を考えた場合と同様にRCO6、RCO5が良いリスク制御装置であるという結果となった。一方、RCO2はGCAFによる評価では評価点が低く候補に挙がらなかったが、 $\angle III$ による費用対効果の結果では2番目に良いリスク制御装置であるという結果となった。これはRCO2はコスト増は大きいがERの点で極めて良いため総合的には費用対効果があるという結果になったと考えられる。

また、CATSと $\angle III$ による費用対効果の評価は、費用対効果の順位は異なるが、費用対効果があると判定されたRCOは同じである。よって、 $\angle III$ による評価は、環境項の影響を受けやすいと考えられる。このことから重み付けにより各項のバランスを取ることが今後の課題であると考えられる。

このように、 $\angle III$ による費用対効果の評価は、GCAFとCATSをそれぞれ単独に適用するよりも合理的かつ総合的な費用対効果の判定ができると考えられる。ただし、各係数(α 、 β 及び $\Sigma EF/\Sigma GDP$)の設定によって結果は異なってくると考えられるので、各係数の設定については、更なる検討が必要である。

Table 13 Results of cost benefit assessment

	$\angle HR$	$\angle ER$	$\angle C$	GCAF	CATS	$CATS_{cr}$	$\angle III$
RCO1	-1.20×10^{-4}	-16	$+4.80 \times 10^3$	4.00×10^7	300	872	-3.69
RCO2	-1.20×10^{-3}	-170	$+7.50 \times 10^4$	6.25×10^7	441	882	-30.4
RCO3	N/A	-4	$+8.60 \times 10^4$	N/A	2.15×10^4	871	32.0
RCO4	-4.90×10^{-4}	-70	$+1.97 \times 10^5$	4.01×10^8	2.81×10^3	875	51.9
RCO5	-1.90×10^{-2}	-45	$+2.80 \times 10^4$	1.47×10^6	622	874	-26.5
RCO6	-1.40×10^{-2}	-154	$+3.90 \times 10^4$	2.79×10^6	253	880	-53.8
RCO7	-4.40×10^{-3}	N/A	$+1.38 \times 10^4$	3.15×10^6	N/A	N/A	0.25
RCO8	-5.30×10^{-4}	-4	$+1.28 \times 10^5$	2.42×10^8	3.20×10^4	871	47.7

[注] $\angle HR$ の単位は[人/(隻・lifecycle)]、 $\angle ER$ の単位は[ton/(隻・lifecycle)]、 $\angle C$ の単位は[US\$/ (隻・lifecycle)]である。また、

RCO1: Active Steering Gear Redundancy

RCO2: ECDIS

RCO3: Terminal Proximity & Speed Sensors

RCO4: Navigational Sonar

RCO5: Hot Works Procedures Training

RCO6: Double Sheathed Low Pressure Fuel Pipes

RCO7: Engine Control Room Additional Emergency Exit

RCO8: Hull Stress & Fatigue Monitoring System

Table 14 それぞれの指標によるRCOの判定

	GCAF	CATS	$\angle III$
RCO1	×	②	④
RCO2	×	③	②
RCO3	×	×	×
RCO4	×	×	×
RCO5	①	④	③
RCO6	②	①	①
RCO7	×	×	×
RCO8	×	×	×

[注] ×は費用対効果が無いことを、円内数字はRCOの順位を表わす。

Fig.8 Results of cost benefit assessment

5. 結言

本研究ではアフラマックス型原油タンカーの包括的環境

影響評価に Triple-I を応用し、原油タンカーが直接影響を与える範囲という条件のもとで、原油タンカーの社会的有益性を評価し、更に安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価指標としての Triple-I の適用可能性を検討した。その結果、以下の知見を得た。

1) 同じ時期に建造された同じ載荷重量のシングルハルタンカーとダブルハルタンカーを Triple-I により環境影響評価した結果を比較すると、シングルハルよりダブルハルの方が社会的に有益であるという結果となった。

2) 原油タンカーが直接影響を与える範囲内では、原油タンカーの lifecycle(25 年)での Triple-I の値は、正の値を取るという結果を得た。III が正の値であるので、原油タンカーは包括的に考えて社会的に有益なシステムでは無いという結果になった。これは原油タンカーの経済的利益より CO₂ による環境負荷の方が大きいと評価されたためである。CO₂ による環境負荷が過大に評価された可能性もあるので、CO₂ による環境負荷の評価方法の確立が今後の課題であると考えられる。

3) Triple-I を応用した $\angle III$ という指標が安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果指標として有効であるかどうかを検討した。IMO 文書で検証されているオイルタンカーの RCO (Risk Control Option) 8 つについて、従来の安全 FSA における費用対効果評価指標 GCAF、環境 FSA における費用対効果評価指標 CATS および $\angle III$ によって費用対効果を比較検討した結果、 $\angle III$ による評価は、GCAF と CATS をそれぞれ単独で適用する場合に比べ、より総合的かつ合理的な判定ができるという結果を得た。すなわち、安全 FSA と環境 FSA を総合的に勘案した費用対効果評価検証手法として、 $\angle III$ は有効であると言える。ただし、 $\angle III$ による評価は環境項の影響を受けやすいため、重み付けにより各項のバランスを取ることが今後の課題であると考えられる。

4) 本研究ではオイルタンカーが社会的に有益ではないという直感的に受け入れがたい結果となった。そのため Triple-I は更なる検討を要する指標であると考えられる。しかし、現時点で安全、環境、経済性の包括的指標は存在せず、Triple-I はそのような指標として唯一である。また Triple-I は本研究のシングルハルとダブルハルの比較のような相対的比較には有用であると考えられる。Triple-I による評価の信頼性を高めるために、各係数の設定方法や各項のバランスの改善が今後の課題である。

参考文献

- 1) 金湖富士夫：FSA による船舶安全基準の新たな策定方法，安全工学 Vol.46, No.1, pp.2-9, 2007.
- 2) 山田安平：IMO における環境リスク評価基準の審議動

向について，海上技術安全研究所報告第 8 巻第 4 号特集号(平成 20 年度)小論文，pp.403-408, 2008.

- 3) (社)日本船舶海洋工学会 IMPACT 研究委員会：海洋の大規模利用技術に対する環境影響評価，2008.
- 4) WWF(World Wide Fund for Nature)：Living Planet Report 2006, 2006.
- 5) 総務省統計局：世界の統計 2009, pp.16, 2009
- 6) (社)日本船舶海洋工学会船体構造国際標準規則研究委員会：船体構造国際標準規則研究委員会報告書，pp.3, 2008.
- 7) 木原洸ら：船舶への LCA の適用に関する調査研究，海上技術安全研究所報告第 2 巻第 2 号(平成 14 年)総合報告，pp.35-185, 2002.
- 8) (独)海上技術安全研究所：船と海のサイエンス 新造船の要目データベース，
<http://www.nmri.go.jp/main/publications/paper/pidb/contentco/index.html>.
- 9) 山口県地球温暖化防止センター：
<http://www.yobou.or.jp/yccca/tomerinpic/news/070718keiske.html>.
- 10) タンカー油濁研究協会：流出油事故の対策と処理，成山堂書店，1976.
- 11) UNITED NATIONS New York and Geneva：Review of Maritime Transport 2009, pp.69, 2009.
- 12) 商船三井フェリー：C 重油紙バ価格推移表，
http://www.sunflower.co.jp/cargo/information/log/baf_kamiipa.html.
- 13) 船員労働統計調査第一号調査(一般船舶調査)、第三号調査(特殊船調査)報告書，
<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/05/labour01/index.pdf>.
- 14) 大隅多一郎：最近の海運市況 - 中国要因と資源要因 - 鉄鋼業とその原料輸送の立場から，
http://www.gscc-asianbusiness.jp/workshop/2005/asi2_04.pdf.
- 15) 成瀬健，平岡克英：中国における船舶解体の実態調査，独立行政法人海上技術安全研究第 3 回研究発表会講演集，pp.361-364, 2003.
- 16) 農林水産省：原油価格及び A 重油価格の推移，
<http://www.maff.go.jp/tokai/seisan/engei/gennyu/pdf/g2.pdf>.
- 17) BP 社：Statistical Review of World Energy, pp.16, 2009.
- 18) 金湖富士夫，山田安平：油流出防止対策の費用対効果の許容基準について，日本船舶海洋工学会講演会論文集第 9E 号，pp.79-80, 2009.
- 19) Denmark：FSA-Crude Oil Tankers, MEPC58/17/2, 2008.