

(昭和 60 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

液化ガスタンカーの安全性に関する研究

(その 2 液化ガスタンカーの危険性評価)

正員 恵 美 洋 彦*

A Study on Safety of Liquefied Gas Tankers (Part 2 Risk Assessment of Liquefied Gas Tankers)

by Hirohiko Emi, *Member*

Summary

The paper describes a study of procedures on risk assessment of liquefied gas tankers. The study consists of: a) a proposal of a simple analysis method for the assessment, b) assumption of essential failures and human errors, and their probability involved, and c) an example of the assessment applied the proposal to a 70,000 m³ Ref. LPG tanker.

Concludedly, following formula is proposed for safe design of liquefied gas tankers;

$$P_i \leq A \cdot C_i^{-n} \text{ or } C_i \leq (P_i/A)^{-1/n}$$

P_i is probability of accident(i) per year. C_i is coefficient of accident effect and takes 100 for the maximum accident assumed, such as collision in a harbour, and reasonably decreases by risk level in each accident. A is 5×10^{-5} to 10^{-6} and n is 0.7 for Ref. LPG, LNG, Ethylene tankers.

1 序 論

本報では、機械-人間系危険、すなわち災害発生要因となる損傷・故障および人間エラーに関する調査研究結果について報告する。さらに、貨物の潜在的危険性評価¹⁾と組み合わせた総合的評価法について提案する。

液化ガスタンカーの最大危険として衝突による災害予測は、多くとりあげられている。衝突による災害が他の中小災害の累積被害より大きいとすれば、これも妥当な考え方である。この問題を検討するのも本研究の目的の一つである。このため、規則²⁾適用の低温式 LPG 船の危険性評価を行ったのでその概要も報告する。

2 評価の手順と方法

提案する評価法の手順は、Fig. 1 の通り。

この基本は、予想される多くの災害から代表的な災害を選び（以下、想定災害という）、その危険性を評価することである。ここで、危険とは、災害発生の初期または中間事象となる欠陥事象をいい、災害に至らない欠陥事象は含めない。たとえば、ポンプの不稼働故障は、災害発生の重要要因とはならないので危険とは考えない。また、災害とは、人身事故、船体重大破壊または周囲に

脅威的影響を及ぼす事故をいう。

最初に、Fig. 2 に示す事象の発生要因となる欠陥事象（以下、重要損傷等という）を選定する。低温式 LPG 船では、このうち漏えい・流出型のみを考える。

第二段階では、重要損傷などから派生する災害またはその一次原因（例：貨物流出）の大きさと発生確率を簡易予測する。そして、Table 1 および 2 によって災害の影響と発生確率（重要度）を分類表示する。

最終的に、重要度 B-3 および 4、C-2 ないし 4、および D-2 ないし 4 の事象を想定災害とし、評価する。

3 重要 損 傷 等

3.1 発生確率の定義

簡単のため、時間一定型発生率を考える。損傷・故障率 λ_f （時間単位）は

$$\lambda_f = r / (N \cdot t) \quad (1)$$

で表わす。 r は損傷・故障数、 N は観測数、 t は期間。安全設備等の通常時に使用しない設備の損傷・故障率 λ_s （事象単位）は、 t_{int} を検査間隔として

$$\lambda_s = \lambda_f \cdot t_{int} / 2 = r \cdot t_{int} / (2N \cdot t) \quad (2)$$

で求める。人間エラーやその他事象単位で表わすのが便利な欠陥事象発生率 λ_e は

$$\lambda_e = r_e / N_e = \lambda_f / N_{et} \quad (3)$$

* 日本海事協会 東京支部

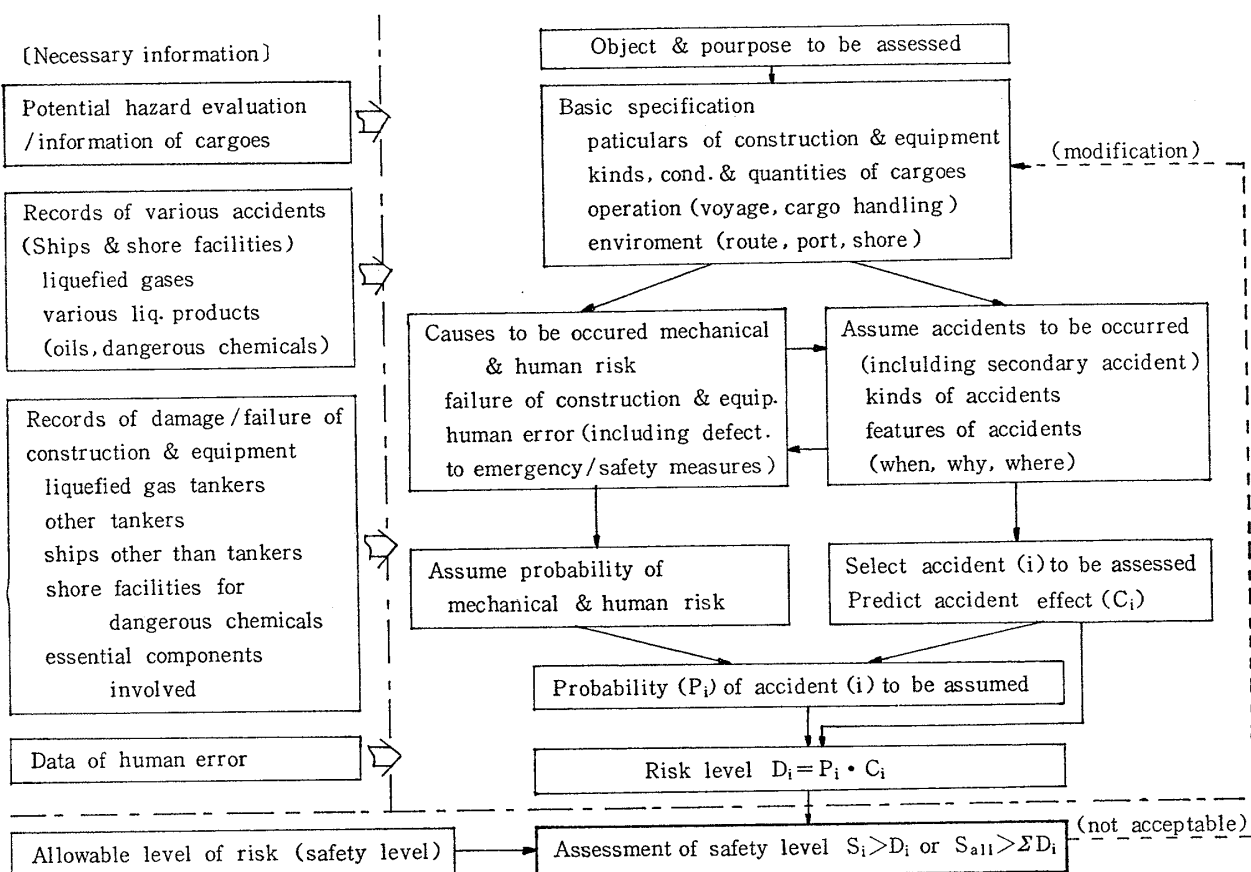


Fig.1 Procedure of Risk Assessment for Liquefied Gas Tankers

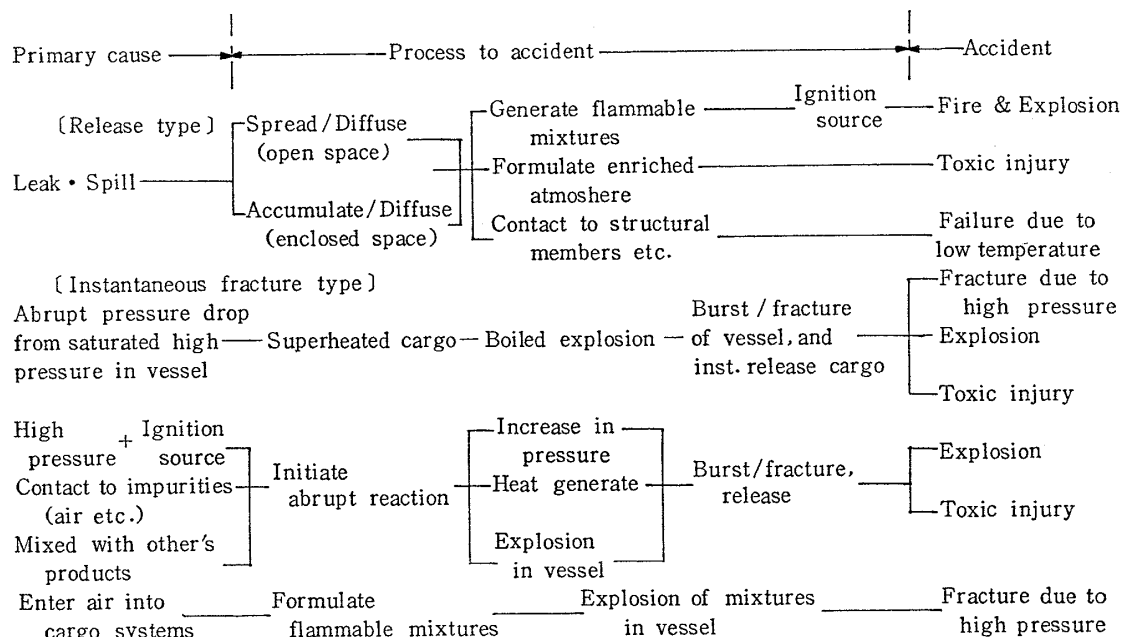


Fig.2 Feature of Occurrence of Accident

による。 r_e は、欠陥事象数、 N_e は観測数、 N_{et} は期間 t の間の事象数。

統計データの欠陥事象数が少ない ($r < 10$) 場合、信頼性試験の考え方³⁾を応用して

$$\alpha = \frac{\chi^2[2(r+1), (1-\beta)]}{2r} \quad (4)$$

から $r' = \alpha r$ を求め、 r' を (1) ないし (3) 式の r または r_e に置きかえる。 $\chi^2[2(r+1), (1-\beta)]$ は、 β を信頼水準とする $[2(r+1), (1-\beta)]$ の χ^2 分布を表わす。 β は、0.9 すなわち信頼水準 90% の損傷・故障率の上限値とする。なお、 $r=0$ のとき、 $r'=2.3$ とする。

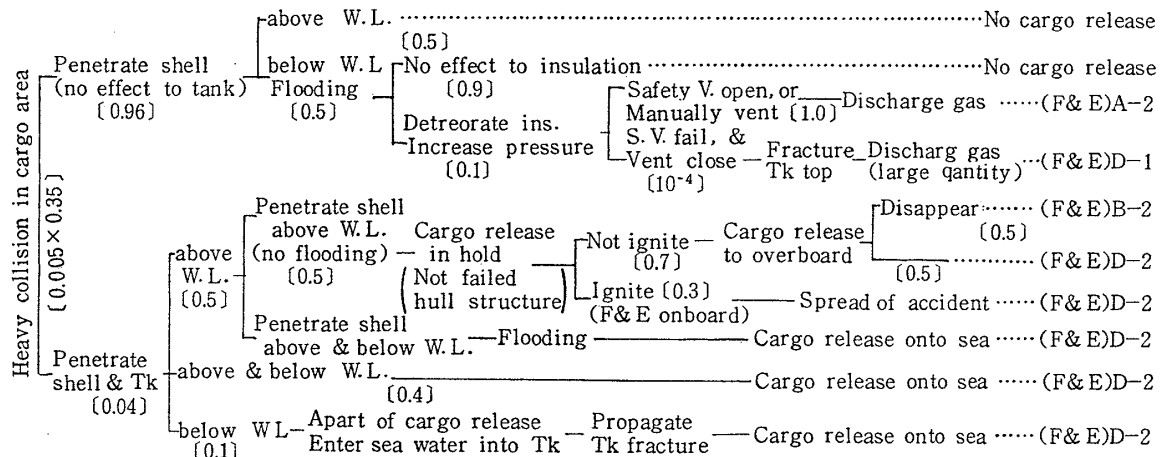
本報では、損傷・故障およびエラー率を単位要素・機

Table 1 Category of Accident Effect

分類 記号	災害の影響 (括弧内は、低温LPG開放区域への漏えい・流出の場合の流出速度。目安としての数値。)
A	故意や怠慢により放置しなければ災害に至ることのない事象 (0.05 kg/s 程度未満)
B	例えば、軽微な人身事故や僅かの期間の船舶の運航停止をもたらす災害 (5 kg/s 程度未満)
C	人間に重大な障害、船舶の長期運航停止、周囲環境に重大な影響をもたらす災害 (200 kg/s 程度未満)
D	多数の死亡事故、船舶の全損、周囲環境に脅威的な影響 (250 kg/s 程度以上)

Table 2 Category of Accident Probability

分類 記号	発生確率 (括弧内は、目安としての数値)
1	実質的に発生しないと想定できる。 ($P < 10^{-7}/Y$)
2	発生は極めて稀 ($10^{-7}/Y < P < 10^{-4}/Y$)
3	稀には発生する ($10^{-4}/Y < P < 10^{-2}/Y$)
4	比較的良好に発生 ($P > 10^{-2}/Y$)



NB; []: probability (Y^{-1}), Tk: Cargo tank, shell: Outer shell of Hull, F&E: Fire & Explosion

Fig. 3 ETA of Collision Damage (in Fig. is omitted collision other than cargo area)

器または動作に対し、時間 (H^{-1})、年間 (Y^{-1}) または事象・動作 (E^{-1}) で表わす。

3.2 外的要因

災害発生の外的要因としては、衝突・接触、座礁、沈没、転覆および近接火災を考える。荷役中の船体急激移動は、特定事象 (4.4 参照) にとりあげる。

外的要因による災害発生は、ETA (Event Tree Analysis) で明確にできる。低温式 LPG 船の衝突災害に対する ETA を Fig. 3 に示す。衝突によるタンク破壊発生確率の予測については、3.3 参照。

座礁、沈没および転覆による災害規模は、衝突と同程度以下、発生確率は 1 ケタ以上低い。ゆえに、これらは、衝突災害で代表させ得る。

近接火災としては、機関室火災を考えればよい。タンカーの統計⁴⁾では、機関室火災発生率 $2.5 \times 10^{-3}/Y$ 、貨物区域への延焼割合 2.9% である。これを参考として低温式 LPG 船について ETA で検討し、機関室火災・タンク破壊・貨物流出火災発生率を $3 \times 10^{-6}/Y$ と予測した。

3.3 衝突によるタンク破壊・貨物流出の発生確率

衝突によるタンク破壊は、他船との衝突のみを考えればよい。経験的にも、検討例⁵⁾でもそういえる。7 万 m^3 型低温式 LPG 船 (独立型方形、一重船側) の衝突によ

るタンク破壊発生率 P_F を次の手順・方法で推定した。

$$P_F = \sum_{i=1}^m P_{Fi} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{Fij} \quad (5)$$

$$P_{Fij} = P_{ci} \cdot a \cdot b_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_i \quad (6)$$

添字 i, j は水域、相手船大きさグループを表わす。

P_{ci} は全船舶の水域別重大衝突発生率で、要救助海難統計を参考として次の値を採用した。

港内	$4.5 \times 10^{-3}/Y$	$7.2 \times 10^{-5}/T$
沿海	$5 \times 10^{-4}/Y$	$8 \times 10^{-6}/T$
外洋	$5 \times 10^{-5}/Y$	$8 \times 10^{-7}/T$

(T^{-1} はトリップ当り発生率)

a は相手船が貨物タンク部に衝突する割合でタンク配置と船体衝突密度分布から求める。ここでは文献^{6), 7)}を参考として 0.35 とした。

b_{ij} は水域 i において大きさ j の船舶が限界速度 v_{jc} を超える速度で衝突する割合。衝突速度 v_{ij} は通常航海速度に比例し、正規分布すると仮定する。衝突速度の密度関数 $f(v_{ij}) = 1/(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma) \cdot \exp[-(v_{ij} - v_{ij\mu})^2/2\sigma^2]$ であるから b_{ij} は

$$b_{ij} = \int_{v_{jc}}^{\infty} f(v_{ij}) dv_{ij} = \int_{v_{jc}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[-\frac{(v_{ij} - v_{ij\mu})^2}{2\sigma^2}\right] \cdot dv_{ij} \quad (7)$$

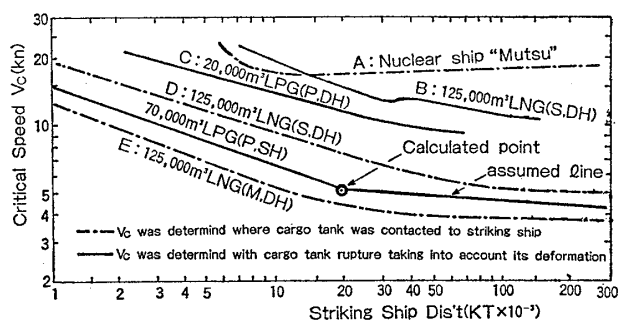


Fig. 4 Critical Ship Speed for Tank Failure
(struck ship: stationary, striking
angle: 90 degrees)

で求まる。 $v_{ij\mu}$ はグループ j の衝突速度の中央値で、衝突直前の回避動作や突入角度を考慮して通常航海速度の代表値 (Table 3) の 75% とする。 v_{jc} は Fig. 4 による。これは 1 点 (相手船排水量 2 万 KT) のみを文献⁸⁾の方法で計算し、ほかは A⁹⁾, B¹⁰⁾, C⁹⁾, D⁵⁾, E⁵⁾ の計算例から推定した。標準偏差 σ は通常航海速力の観測結果¹¹⁾を参照して $0.25v_{ij\mu}$ とした。

c_{ij} は水域 i における交通船舶の大きさグループ j の割合。Table 3 による。

d_i は水域 i における航行規制, 安全対策等による衝突の低下率。ここでは、港内 0.2, 沿海 0.5, 外洋 1.0 とする。

Table 4 に計算結果を示す。表中、タンク破孔 10m^2 は、破孔と相手船首横断面とが同じと仮定し、そのような突入量となる限界速度を平均的に 1kn 増として求めた。この結果では、タンク破壊発生と破孔大きさ 10m^2 との間に発生確率では有為的な差は得られなかった。

3.4 貨物格納設備の構造的要因による重要損傷

Table 5 に掲げる重要損傷および発生確率とする。これらは、液化ガスタンカー^{12),13)}, 一般船舶¹⁴⁾, 陸上設備^{15),16)}のデータに基づいて 3.1 によって予測した。

Table 5 Essential Failure of Cargo Containment System

設備の種類(機能)		重要損傷の種類	1基当たりの発生率	
			年間発生率	事象当たり発生率
独立型タンクタイプC		小漏えいを伴う貫通き裂等 大破壊	5×10^{-4} 1×10^{-5}	
独立型タンクタイプB		小漏えいを伴う貫通き裂等 液漏えいを伴う貫通き裂等*1 大破壊	5×10^{-3} 5×10^{-4} 1×10^{-5}	
その他のタンク		小漏えいを伴う貫通き裂等 大破壊	5×10^{-3} 5×10^{-4}	
ホールドスペース 周囲壁	二次防壁	二次防壁の機能*2を損なう損傷		1×10^{-2}
	防湿性・水密性 (タンク, 防熱の保護)	水密性を損なう程度の損傷 タンクや防熱が浸水する損傷	1×10^{-2} 1×10^{-3}	
	気密性	気密性を損なう損傷	2×10^{-2}	4×10^{-2}
二次防壁(ホールドスペース周囲壁兼用を除く)		二次防壁の機能*2を損なう損傷		1×10^{-2}

注: *1 二次防壁の容量の範囲内の最大限定破壊

*2 一般的には液密性を損なう損傷を想定する。その他, 計設条件による。

Table 3 Ship's Group

代表排水量 (KT)	250,000	60,000	13,000	2,500	400
代表速力 (kn)	18	16	13	11	8
隻数分布 %	港内, 沿海 外洋	1.0 2.1	3.5 12.2	8.8 30.6	15.9 55.0
					70.8 —

Table 4 Probability of Tank Failure due to
Collision for 70,000³ Ref. LPG Car-
rier

	年間発生確率*1		トリップ当たり発生確率*2	
	破壊発生	10m^2 破孔発生	破壊発生	10m^2 破孔発生
港内	4.3×10^{-5}	3.9×10^{-5}	2.35×10^{-6}	2.17×10^{-6}
沿岸	1.2×10^{-5}	1.1×10^{-5}	0.19×10^{-6}	0.17×10^{-6}
外洋	0.8×10^{-5}	0.7×10^{-5}	0.13×10^{-6}	0.12×10^{-6}
合計	6.3×10^{-5}	5.7×10^{-5}	5.4×10^{-6}	5.0×10^{-6}

*1 バラスト航海で貨物流出なしとすると、貨物流出率は、上記の数値の 1/2 となる。

*2 1トリップは積荷出航から最終揚荷入港まで。積地 1 港 (日本沿岸の発生率使用)、揚荷 2 港とし、合計は、[港内] $\times 2 +$ [沿岸 $\times 3$] + [外洋 $\times 1$] とする。

3.5 貨物用諸装置の構造的要因による重要損傷・故障

Table 6 に掲げる重要損傷・故障を想定する。これらは、液化ガスタンカー¹²⁾, 油タンカー¹⁷⁾, 陸上高压ガス¹⁸⁾, 陸上石油化学プラント¹⁶⁾の事故災害例を参照して予測した。したがって、典型的な重要損傷・故障は、ほぼ網羅したと考える。

発生確率は、文献^{12),15),16),18),20),21)}から Table 6 のように推定した。

3.6 貨物取扱いにおける重要人間エラー

貨物取扱いにおける重要人間エラーを構成する単純仕事のエラーは、Table 7 のように推定できる。これらは、文献^{16),19),22)}を参照して定めた。

人間エラーは、複合事象として災害発生に至ることが多い。また、修正動作があるのも特徴である。したがっ

Table 6 Essential Failure of Cargo handling System

設備	構成要素, サブシステム, 機器	表示番号 重要損傷・故障の形態	発生率		
			年間(Y)	時間(H)	事象(E)
一般貨物管	管要素 (管, 溶接継手, 分岐管等)	1. 疲労き裂, 腐食等による小孔 2. 大きき裂等による大破孔	$4 \times 10^{-5}(500)$ $7 \times 10^{-7}(500)$	8×10^{-8} 1.4×10^{-9}	
	フランジ継手 (盲フランジ, 分離フランジ等含む)	3. ゆるみ, ガasket不良等による小漏えい 4. 離脱, 大破壊等	$2 \times 10^{-3}(500)$ $7 \times 10^{-7}(500)$	4×10^{-6} 1.4×10^{-9}	
	ベローズ式膨脹継手	5. 疲労き裂, 腐食等による小孔 6. 大きき裂等の大破孔	$4 \times 10^{-4}(500)$ $7 \times 10^{-7}(500)$	8×10^{-7} 1.4×10^{-9}	
	計測用等小径管 (継手を含む) 管径 $\leq 25\text{mm}$	7. 疲労き裂, 継手ゆるみ等からの小漏えい 8. 離脱, 大破壊等	$5 \times 10^{-3}(500)$ $7 \times 10^{-6}(500)$	1×10^{-5} 1.4×10^{-8}	
	貨物ホース, アームカップリング等)	9. ゆるみ, き裂, 腐食等による小漏えい 10. 離脱, 大破壊等	$2 \times 10^{-3}(500)$ $7 \times 10^{-7}(500)$	4×10^{-6} 1.4×10^{-8}	
	貨物弁および制御機構 (止弁, 逆止弁, 流量調整弁, 自動/緊急しゃ断弁, その他)	11. グランド, パッキン, 小孔等からの小漏えい 12. 弁箱の完全破壊 13. 閉鎖不良 (弁体き裂, 弁座不良, 異物等) 14. 機動/手動開閉故障 (開閉不能, 誤作動)	$2 \times 10^{-4}(500)$ $7 \times 10^{-7}(500)$	4×10^{-5} 1.4×10^{-9}	1×10^{-3} 1×10^{-3}
	コック, プラグ, 取出し弁等	15. ゆるみ, き裂, 閉鎖不良等の小漏えい 16. 離脱, 破壊	$5 \times 10^{-3}(500)$ $7 \times 10^{-6}(500)$	1×10^{-5} 1.4×10^{-8}	
	タンク過圧安全弁	17. 弁座, 開閉機構等の不良 18. 閉塞故障 19. 弁箱小き裂, その他の外部への小漏えい 20. 弁箱の完全破壊	$5 \times 10^{-2}(C)$ $5 \times 10^{-4}(C)$ $1 \times 10^{-5}(C)$	7×10^{-6} 7×10^{-8} 1.4×10^{-9}	2×10^{-2}
	ベント管系統	21. 閉塞故障 (ドレン, 氷結, 目詰り等)			1×10^{-3}
	負圧安全弁, その他の負圧安全装置	22. タンク内大気吸引故障 (誤作動, その他) 23. 閉塞, 作動故障等のタンク負圧発生要因			2×10^{-2} 2×10^{-2}
貨物ポンプ	貨物管等の圧力逃し弁	24. 破壊 25. 閉塞故障	$7 \times 10^{-7}(500)$	1.4×10^{-9}	2×10^{-2}
	液中型ポンプ	26. 作動中の停止故障			1×10^{-4}
	独立型ポンプ	27. 漏えい損傷 28. ケーシング破壊	$1.7 \times 10^{-2}(C)$ $1 \times 10^{-5}(C)$	2.4×10^{-6} 1.4×10^{-9}	
圧縮機, プロウ, ファン等	漏えい貨液排出ポンプ	29. 不稼動故障			5×10^{-2}
	圧縮機, プロウ	30. 漏えい損傷 (軸封部等から) 31. ケーシング破壊 32. 過圧, 過熱等の着火 33. 冷却系統への漏えい損傷 34. 不稼動故障	$2 \times 10^{-2}(C)$ $1 \times 10^{-5}(C)$ $1 \times 10^{-4}(C)$ $3 \times 10^{-3}(C)$ $1 \times 10^{-2}(C)$	2.8×10^{-3} 1.4×10^{-9} 1.4×10^{-8} 4.2×10^{-7} 1.4×10^{-6}	
	換気用ファン	35. 稼動中の過熱, 摩擦等の着火源故障 36. 不稼動故障	$2 \times 10^{-4}(C)$ $1 \times 10^{-2}(C)$	2.8×10^{-5} 1.4×10^{-6}	
	貫通部	37. 漏えい損傷	$1 \times 10^{-2}(C)$	1.4×10^{-6}	
	熱交換器	38. き裂, 腐食等による小漏えい 39. 熱媒体系統への漏えい 40. 破壊	$5 \times 10^{-4}(C)$ $3 \times 10^{-3}(C)$ $1 \times 10^{-5}(C)$	7×10^{-8} 4.2×10^{-7} 1.4×10^{-9}	
	各種プロセス容器 (ベーパーライザ, 貨物ヒータ, 冷却器, 凝縮器)	41. き裂, 腐食等による小漏えい 42. 破壊	$5 \times 10^{-4}(C)$ $1 \times 10^{-5}(C)$	7×10^{-8} 1.4×10^{-9}	
計装品	分離器, レシーバ, バッファタンク等	43. 検出機構 (遠隔, 現場, 可搬) 故障 44. 電気系統故障 45. 空気系統故障		7×10^{-6} 7×10^{-5} 7×10^{-6}	1×10^{-3} 1×10^{-2} 1×10^{-3}
	監視, 計測, 制御装置 (圧力, ガス濃度, 温度, 液面, 遠隔指示/制御等)				
	防爆設備	46. 防爆機能喪失 (着火源) 47. 同上		7×10^{-5} 7×10^{-6}	1×10^{-2} 1×10^{-3}

注: 発生率は, 要素, 機器等1個あたりの発生ひん度。(C), (500)は, それぞれ, 年間300日(7,200時間)および500時間使用するときの値を表わす。

て, 危険性は, 構成する仕事要素や関連他事象を考慮して解析する必要がある。

3.7 着火源の危険

液化ガスタンカー, 油タンカー, 陸上設備等の火災爆発事例^{(4),(12),(16),(18)}で着火源となる事象を検討した。さらに, 陸上プラントの評価例⁽¹⁹⁾, LNG船の評価例⁽¹⁹⁾などを参考として Table 8 (Fig. 5 関連)の着火危険率を想定した。

4 想定災害の選定

想定災害は, 発生要因別, すなわち外的要因, 構造的要因, 人間エラーおよび特定事象に分けて選定する。次には, 7万 m^3 型低温式LPG船(独立型方形タンクタイプA)を対象とした解析結果を掲げる。外的要因は3.2参照。

Table 7 Probability of Human Error for Cargo handling

エラーの種類	動作1回当たりひん度	貨物取扱い作業における例
重要なスイッチの操作ミス	10^{-4}	ポンプや圧縮機の始動スイッチ
情報伝達/受信ミス	$10^{-4} \sim 10^{-1}$ (注)	各種作業の指示, 連絡, 報告
単純なスイッチ, 弁等の操作	10^{-3}	貨物弁一般, その他の機器
ボルト, ナット等の閉め付け不良	5×10^{-3}	盲フランジ, 接続フランジ, ホース等の取付け
計測の読取り間違い	5×10^{-3}	液面, 温度, 圧力, ガス濃度等の読取り
作業手順や判断の間違い	$10^{-3} \sim 10^{-1}$ (注)	マニュアルやチェックリストによる作業
怠慢的な人間エラー	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	長期間の監視, ひん繁な確認
急激かつ高度の緊張状態作業のミス	$0.1 \sim 0.25$	災害発生時の消火作業等

注: 内容の複雑さによって, エラーの程度が異なる。複雑なほど, エラー率は高くなる。

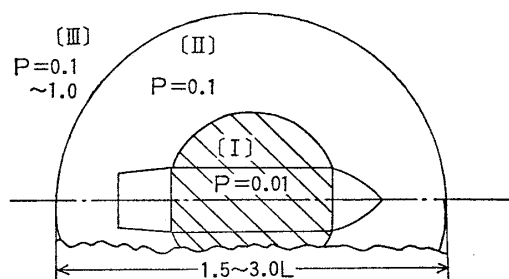


Fig. 5 Area of Ignition Risk

Table 8 Risk of Ignition

対象区域, 時期等	着火危険率
開放区域 I	$10^{-2}/E$
II	$0.05 \sim 0.1/E$ *1
III	$0.01 \sim 1.0/E$ *1
ガス危険閉鎖区域(電気設備なし)	$10^{-4}/E$
(耐圧防爆)	$10^{-2}/E$
(イナートニング)	0
衝突による貨物流出時	$0.3/E$ *2
蒸気爆発時	$1.0/E$

*1: 荷役時, 航海中, 港内, 沿海, 外洋等に応じて使い分ける。

*2: 瞬時着火の確率

4.1 貨物格納設備の構造的的要因による災害

Table 5 の重要損傷からの災害経過は, 比較的簡単であり, 単純流れ解析 (SA) によって, 後の Table 10 に掲げる想定災害を選定した。

4.2 貨物用諸装置の構造的要因による災害

重要損傷・故障のうち, 外部への漏えい損傷は数多いのでグループ化して検討した。ここで, 漏えい量, 場所, 時期などに応じたグループ i の漏えい発生率 P_{Ri} を

$$P_{Ri} = \sum_{j=1}^n a_i \cdot p_j \cdot n_{ij} \quad (8)$$

で求めた。 a_i は年間使用時間の修正, p_j は要素・機器 j の発生率 (Table 6), n_{ij} は要素・機器数である。

ほかの重要損傷・故障は, 個々に検討した。

単独事象として後の Table 10 の (e) ないし (g), 複合事象として (k), (m), (n) および (o) を想定災害の対象として選定した。

4.3 人間エラーによる災害

事故災害記録^{(12),(16),(17),(18)} および対象船舶の貨物取扱いを分析し, (a) アームなどの接続不良 (b) 管系統の接続・隔離・開放ミス (c) 液面監視ミス (d) 貨物弁の急速しゃ断など (e) 急速開放カップリングの誤開放 (f) ポンプ急激始動 (g) 荷役終了後管系残留物除去不十分 (h) 荷役手順ミス (弁の開閉手順など, 冷却, イナートニング, その他) (i) サンプリング弁取扱いミスについて検討した。そして, 単独事象として (b) および (e), 複合事象として (c), (d) および (f) を想定災害の対象とした。

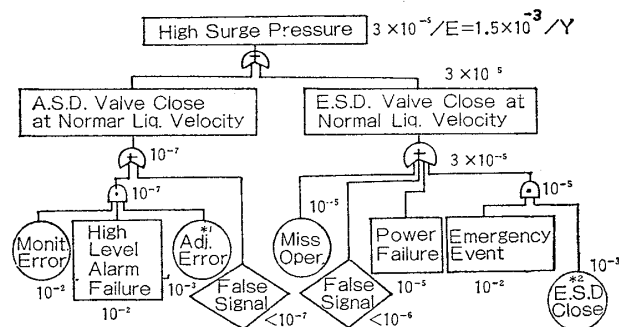
4.4 特定事象 (複合事象) による災害

特定事象は, 一次原因または災害発生を頂上事象とする SA または FTA (Fault Tree Analysis) で検討した。想定災害の対象としたのは, 後の Table 10 の通り。

次に, 1 例としてサージ圧危険の検討概要を示す。

液化ガスタンカーでは, これまで少なくとも 7 件のサージ圧による管系統破壊 (うち 6 件が貨物流出) 事故が発生している。原因は, 貨物弁急速しゃ断 4 件, ポンプ急激始動 2 件, 貨物弁急速開放 1 件である⁽¹²⁾。

貨物弁急速しゃ断による過大なサージ圧発生の FTA を簡易化して描くと Fig. 6 のようになる。最近, 緊急しゃ断弁 (E. S. D. V) の閉鎖速度を荷役前に調整する例



*1: Not adjusting liq. vel. and closing time of the valve at high level as appropriate

*2: Valve close before pump stop operation

Fig. 6 FTA for high Surge Pressure due to Shutting Cargo Valve

が多い。このような場合、サージ圧によって管系統の大破壊・貨物大量流出を招く確率は、1ヶタ程度小さくなると想定すると、後の Table 10 に示すような値となる。

弁の急速開放やポンプ急速始動の危険度は、弁の急速シャ断で代表させ得るほど十分に小さい。

5 液化ガスタンカーの危険性評価 (7万 m³ 型低温式 LPG 船。貨物はプロパン)

5.1 貨物の漏えい・流出

漏えい・流出量と発生確率の関係は、Fig. 7 のようになる。流出量は、0.001 m³/s (液としての流出速度) 以下のとき流出時間 1 分、0.001 ないし 1 m³/s 30 秒、約 60 m³/s (タンク大破壊：破孔面積 5 m² 程度) 5 分とした。

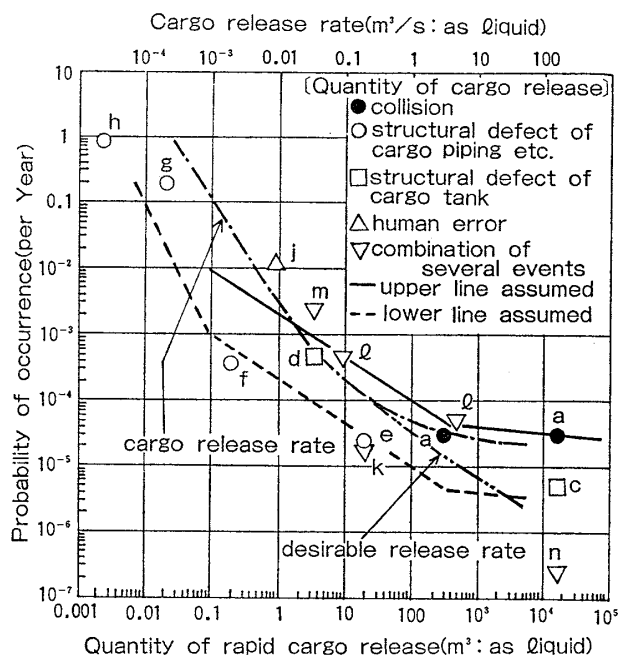


Fig. 7 Probability of Cargo Release
(a, b, --- correspond to events in Table 10)

5.2 想定災害の評価

前4で選定した想定災害を次の仮定で評価した。

(1) 大量流出事故は、プール火災および蒸気雲火災爆発に至る割合を予測し、それぞれ、評価すべきである。しかし、簡単のため開放区域の漏えい・流出事故は、後者のみで評価する。貨物圧縮機室は閉鎖空間爆発のみを想定する。いずれも、二次災害は考えない。

(2) 限界距離 x_c (m) は、前報¹⁾の簡易式にプロパンの物性値、風速 3 m/s、周囲温度 10°C を代入して得られる

$$\begin{aligned} \text{[流出速度 } w_R \geq 583 \text{ kg/s } (v_R \geq 1 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{液})] \\ x_c = 1200 v_R^{0.43} = 77 w_R^{0.43} \quad (9) \\ \text{[流出速度 } w_R \leq 60 \text{ kg/s}] \end{aligned}$$

$$x_c = m \cdot w_R^n \quad (10)$$

$$\begin{aligned} m=43 \quad n=0.37 & : x_c \leq 100 \text{ m} \\ =24 \quad =0.55 & : x_c > 100 \text{ m} \end{aligned}$$

から求める。中間の流出速度は、いずれか大きい方。

(3) 開放区域への流出箇所は、船体中央とする。危険範囲面積 A_c は、長さ/幅=5 の長だ円を想定し次による。

$$A_c = 0.125 x_c^2 \quad (11)$$

(4) 着火危険率 p_{Fi} は、Table 8 の最大値とする。

Table 9 Coefficient of accident Effect

区域	荷役時	開放区域			貨物ポンプ・圧縮機室	
		航海	沿岸	外洋	荷役中	航海中
I	1	0.1	0.1	0.1		
II	2	0.2	0.2	0.2	1	0.1
III	100	100	30	10		

(5) 開放区域の災害の大きさは、最大となる港内での衝突によるタンク破壊時を影響係数 $C_i=100$ として表わす。

以下、発生水域、限界距離等に応じ、次による。

$$\begin{aligned} C_i &= C_I \cdot A_I' / A_I & : x_c < x_I \\ C_{II} \cdot A_{II}' / A_{II} + C_I (\max 30) & & : x_I < x_c < x_{II} \\ C_{III} \cdot A_{III}' / A_{III} + C_{II} (\max 100) & & : x_c > x_{II} \end{aligned} \quad (12)$$

添字 I, II, III は Fig. 5 参照。 x_I は貨物区域長さの 1/2, x_{II} は船舶の長さの 1.5 倍, x_{III} はタンク大破壊時の x_c , A_I' は A_c が区域 I に占める部分の面積, A_I は (11) 式の x_c を x_I とした面積, C_I は Table 9 による。ほかもこれに準ずる。

(6) 貨物圧縮機室の影響係数は、Table 9 による。

(7) 想定災害 i の危険度 D_i は、 $P_i = P_{Ri} \cdot P_{Fi}$ として

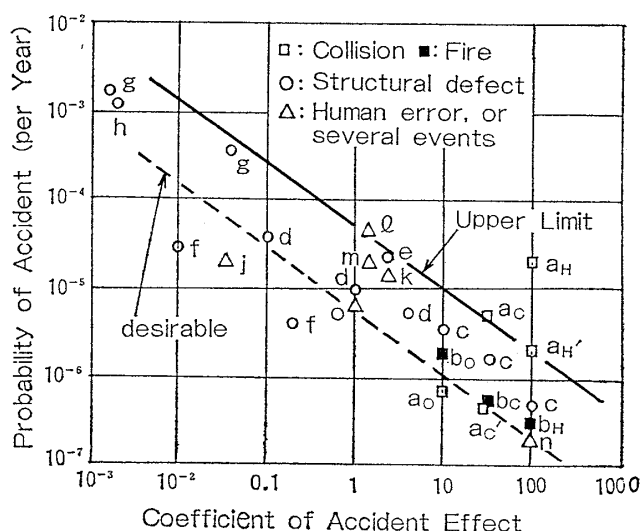


Fig. 8 Probability and Effect of Accident
(a, b, --- correspond to events in Table 10)

Table 10 Summary of Risk Assessment for Ref. LPG Carrier

想 定 災 害				貨 物 の 流 出			蒸 気 雲		火 災 爆 発 率		影響係数 C _i	危険度 D _i =C _i ・P _i	全危険度 ΣD _i に対する割合(%)
重 要 原 因	時期 場所	解析 法	重要 度	流出量 (液:㎡)	流出速度 (㎡/秒)	発生率 P _R (年間)	x _c (m)	A _C (㎡)	着火率 P _F	発生率 P _i =P _R ・P _F			
外 的 要 因 (衝突, 機関室火災)													
(a) 衝突によるタンク破壊	港内	ETA	D-2	17500	60	2.1×10 ⁻⁵	7000	6×10 ⁶	1.0	2.1×10 ⁻⁵	100	2.1×10 ⁻³	76.0
	沿海					6 ×10 ⁻⁶				30	1.8×10 ⁻⁴	6.5	
	外洋					8 ×10 ⁻⁷				10	8 ×10 ⁻⁶	0.3	
(b) 機関室火災からの延焼 によるタンク破壊	港内*1	ETA	D-2	17500	—	3 ×10 ⁻⁷	7000	6×10 ⁶	1.0	3 ×10 ⁻⁷	100	3 ×10 ⁻⁵	1.1
	沿海					6 ×10 ⁻⁷				30	1.8×10 ⁻⁵	0.7	
	外洋					2.1×10 ⁻⁶				10	2.1×10 ⁻⁵	0.8	
貨物格納設備の構造的要因													
(c) タンクと二次防壁の同時破壊	港内*1	S A	D-2	17500	60	5 ×10 ⁻⁷	7000	6×10 ⁶	1.0	5 ×10 ⁻⁷	100	5 ×10 ⁻⁵	1.8
	沿海					1.5×10 ⁻⁶				30	4.5×10 ⁻⁵	1.6	
	外洋					3.5×10 ⁻⁶				10	3.5×10 ⁻⁵	1.3	
(d) 暴露部タンク破壊	港内*1	S A	B-3	3	0.05	5 ×10 ⁻⁵	150	2.6×10 ³	0.1	5 ×10 ⁻⁶	1.1	5.5×10 ⁻⁶	0.2
	沿海					1. ×10 ⁻⁴				0.2	2 ×10 ⁻⁶	0.1	
	外洋					3.5×10 ⁻⁴				0.1	3.5×10 ⁻⁶	0.1	
貨物用諸装置の構造的要因													
(e) 大量漏えい・流出損傷	荷役時	S A	D-2	20	0.7	2.2×10 ⁻⁵	700	61×10 ³	1.0	2.2×10 ⁻⁵	2.1	8.8×10 ⁻⁵	3.2
(f) 中量漏えい・流出損傷	荷役時	S A	B-3	0.25	0.008	3.6×10 ⁻⁵	70	610	0.1	3.6×10 ⁻⁶	0.2	7.2×10 ⁻⁶	0.3
	航海中					2.7×10 ⁻⁴				2.7×10 ⁻⁵	0.01	2.7×10 ⁻⁷	0
(g) 小量漏えい・流出損傷	荷役時	S A	B-3	0.025	8×10 ⁻⁴	0.03	30	110	0.01	3 ×10 ⁻⁴	3.6×10 ⁻²	1 ×10 ⁻⁵	0.4
	航海中					0.17				1.7×10 ⁻³	1.8×10 ⁻³	3 ×10 ⁻⁶	0.1
(h) 微少漏えい・流出損傷 〔参考〕	荷役時	S A	A-4	0.0025	4×10 ⁻⁵	0.12	8	8	0.01	1.2×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	3.1×10 ⁻⁶	0.1
	航海中					0.76				7.6×10 ⁻³	1.3×10 ⁻⁴	1 ×10 ⁻⁶	< 0.1
人 間 エ ラ ー の み													
(i) 急速カップリング開放	荷役時	S A	C-2	20	0.7	[] *2	700	61×10 ³	1.0	[] *2	2.1	[] *2	—
(j) 荷役用継手開放ミス	荷役時	S A	B-3	2	8×10 ⁻⁴ *3	2 ×10 ⁻³	30	110	0.01	2 ×10 ⁻⁵	3.6×10 ⁻²	7.2×10 ⁻⁷	< 0.1
特 定 事 象 (複合的要因)													
(k) サージ圧による管破壊	荷役時	F T A	D-2	20	0.7	1.5×10 ⁻⁵	700	61×10 ³	1.0	1.5×10 ⁻⁵	2.1	3.1×10 ⁻⁵	1.1
(l) 船体移動による継手破壊	荷役時	F T A	C-2	10	0.3	5 ×10 ⁻⁴	220	6×10 ³	0.1	5 ×10 ⁻⁵	1.3	6.5×10 ⁻⁵	2.4
(m) 過剰積載によるオーバーフロー	積荷時	S A	B-3	2	0.07	2.5×10 ⁻⁴	150	2.8×10 ³	0.1	2 ×10 ⁻⁵	1.1	2.7×10 ⁻⁵	1.0
(n) 過剰積載によるタンク破壊	積荷時	S A	D-2	17500	60	2.5×10 ⁻⁷	7000	6×10 ⁶	1.0	2.5×10 ⁻⁷	100	2.5×10 ⁻⁵	0.9
(o) 貨物ポンプ・圧縮機室 ガス漏えい損傷	荷役時	F T A	C-3	0.0025	4×10 ⁻⁵	8 ×10 ⁻⁴ *4	—	—	0.01	8 ×10 ⁻⁶	1.0	8 ×10 ⁻⁶	0.3
	航海中		B-3	0.25	4×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻² *4				1.5×10 ⁻⁴	0.1	1.5×10 ⁻⁵	< 0.7

衝突によるタンク破壊危険度 = 2.28×10^{-3} (83%), その他の危険度 = 4.8×10^{-4} (17%), 合計 = 2.76×10^{-3} (100%)

x_c : 貨物蒸気雲ガス濃度危険限界距離 (m), A_c : 危険限界内面積 = $0.125 x_c^2$

*1 : 荷役時を含む *2 : 予測困難 *3 : 蒸発速度 *4 : 爆発下限濃度になる確率

〔船舶が輻輳する水域(港内および沿海)の衝突危険度を1ケタ下げた場合〕

衝突によるタンク破壊危険度 = 2.36×10^{-4} (32.8%), その他 = 4.84×10^{-4} (67.2%), 合計 7.2×10^{-4} (100%)

$$D_i = P_i \cdot C_i = P_{Ri} \cdot P_{Fi} \cdot C_i \quad (13)$$

から求める。P_{Ri} は漏えい・流出発生率である。ただし、貨物圧縮機室は代わりに爆発下限濃度到達率とする。これは、FTA で求める。

評価の結果は、Table 10 および Fig. 8 に示す。

5.3 考察

(1) Fig. 8 から港内での衝突事故の危険度(a_H)は、他に比べて極めて高いことがわかる。これは、衝突発生

率を一般船舶の 20% として計算した数値である。実際には、各港で厳しい規制や安全対策が実施されており、それらを正確に評価すれば、より低い数値になると思われる。

(2) 許容レベル上限を Fig. 8 の実線とすると衝突危険は a_H' 程度以下とすべきである。これは、衝突発生率を一般船舶より 1 ケタ以上低くする必要があることを示す。

(3) そのほかの危険は、十分に安全なレベルといえる。

(4) Fig. 8 の直線と点線は、個々の危険の許容または目標レベルである。これらは

$$P_i = A \cdot C_i^{-n} \quad (14)$$

$$C_i = (P_i/A)^{-1/n} \quad (15)$$

$$A = P_i \cdot C_i^n \quad (16)$$

と書ける。 n は 0.7, A は 5×10^{-5} : 許容上限, 5×10^{-6} : 好ましいレベル。ただし, P_i と C_i はこれらの式で表わす連続関係にはない。

6 結 び

本研究の結論としての考察と知見は、次の通り。

(1) 液化ガスタンカーの危険性は、提案の方法で評価することができる。ただし、4 および 5 に示した評価例は、事故災害の発生過程における時間的な影響、緊急対策 (消火、退避など)、二次災害などを考慮にいれていない。また、災害の大きさを表わす影響係数についても、実際の被害の大きさをより正確に表わすには、さらに検討すべきである。

(2) 評価例によると、発生確率の高い小規模災害の累積被害より発生確率の低い大規模災害の被害の方が大きい。したがって、港内での衝突・タンク破壊・貨物流出災害を安全対策として重点的にとりあげるのは適切である。

(3) 機械-人間系危険、すなわち重要損傷などとその発生率の予測は、評価の精度上、極めて重要である。本研究でも、できるだけ多くのデータを参照して予測したが十分とはいえない。今後、より広範囲の関連データの収集・調査が望まれる。

(4) 規則²⁾ 適用の就航中の低温式 LPG 船の安全性は、容認されるレベルであるとする。この場合、5.3(4) による評価法を新しい設備の設計、規則²⁾ の同等効力の安全性確認などの手段として採用できる。低温式 LPG 船のほか LNG 船、低温式エチレン船などは、(14) ないし (16) 式の常数を使用できる。

(5) 圧力式 LPG 船のように貨物の状態が異なる船舶、可燃以外の危険性を有する船舶などについても、提案の方法で危険性評価できる。ただし、低温式 LPG 船

に比べて検討すべき事象が増えるので、解析は複雑になる。

(6) 提案の解析手順は、災害危険を不稼働危険または損害危険に置きかえれば、信頼性評価にも応用できる。

終りに、本研究につき、示唆ご鞭達いただいた川上名誉教授 (広大)、ご講評下さった為廣教授 (広大)、資料閲覧の便を図っていただいた川崎重工業 (株) と石川島播磨重工業 (株)、および助言下さった多くの方々にお礼申し上げます。また、本報発表に便宜を図っていただいた日本海事協会に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 恵美: 液化ガスタンカーの安全性に関する研究, (その1 貨物の潜在的危険性とその評価), 造船学会論文集第 156 号, 昭和 59 年 12 月.
- 2) IMO, International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk.
- 3) たとえば, JIS C 5003, 電子部品の故障試験方法通則 (解説を含む).
- 4) IMO, Casualty Statistics, MSCXLI/7, 1980.
- 5) 日海防: 危険物積載船による災害の防止に関する調査研究報告書, 昭和 48 年度.
- 6) D. S. Aldwinckle et al: A Rational Assessment of Ships Reliability and Safety, RINA, 1982.
- 7) D. S. Aldwinckle: A Safety Review of Ships for Liquefied Gases and Future Legislative Needs, Gastech 84.
- 8) A. N. Kinkead, Further Study of Cargo Protection afforded by Ship Structures in Collision, Int. Symp. on Transport of Dangerous Goods by Sea and Inland Waterways, 1980.
- 9) IHI; 原子力船“むつ”船体部計画・建造の記録, IHI 技報・1970 年記念号.
- 10) S. Valsgård et al, Simplified nonlinear analysis of ship/ship collisions, Norwegian Maritime Research No. 3/1982.
- 11) 藤井: 序説海上交通工学, 海文堂 (32 ページ).
- 12) 恵美: LNG 船/LPG 船技術資料, 船舶技術協会 (41 ないし 54, 219 ないし 278, 343, および 346 ページ).
- 13) NK: 低温式 LPG 船の損傷歴, 昭和 58 年技術委員会配布資料.
- 14) NK: 船体損傷統計調査, 1978 年以降日本海事協会誌.
- 15) 井上: 圧力容器の信頼性について, 日本圧力容器研究会 (JPVRC) シンポジウム, 1984.
- 16) 化学工業協会: 事故災害事例と対策, 丸善 (154 ページ, 175 ないし 350 ページ).
- 17) NK: 船舶からの油流出防止のための指針, 1982.
- 18) 高圧ガス保安協会: 高圧ガス事故例集, 昭和 57 年 3 月.

- 19) J. R. Velker et al, Fire Safety aboard LNG Vessels, Jan. 1976, Report No. CG-D-94-76 (USCG).
 - 20) 信頼性管理便覧, 日刊工業 (467 ないし 507, 567 ないし 603, 853 ないし 883 ページ).
 - 21) NK: 機関々係の損傷事故報告, 日本海事協会々誌 (昭和 43 年以降).
 - 22) 総合安全工学研究所: FTA 安全工学, 日刊工業新聞, (45 ページ).
-