

講演 社会に貢献する海上技術安全研究所の研究 —最近の受託研究・共同研究の成果から—

研究統括主幹 千田 哲也

1. まえがき

海上技術安全研究所では、研究成果や研究能力を広く活用していただくために、企業や国からの委託を受けた研究や企業や団体との共同研究を実施している。本稿は、これらの受託研究や共同研究として実施し、その成果が具体的に活用されたテーマの中で、依頼元や相手先のご了解が得られたものについてご紹介するものである。最初の2件はシミュレーション手法を活用した安全性や経済性の評価に関するもの、次の1件は事故原因の調査と対策に関するもの、最後の2件は装置の開発に関するものである。

2. 大型客船における緊急時の乗客・乗員の避難シミュレーション

2.1 はじめに

旅客船においては、緊急時の避難システムが機能するかどうかを評価しておく必要がある。1995年のSOLAS条約の規則改正で、国際航海に従事するRO/RO旅客船については、設計の初期段階で避難解析を実施し、実行可能な限り混雑が排除されていること及び避難経路配置には十分な柔軟性が確保されていることを示すことが義務づけられた。さらに、RO/RO旅客船に限らず、旅客船の設計段階で避難解析を実施することは安全上望ましいとの考えに基づき、2002年の国際海事機関第75回海上安全委員会で、MSC/Circ.1033「新造及び現存旅客船のための暫定避難解析指針」(Interim Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships)が採択された。

一方、海上技術安全研究所では、旅客船の避難シミュレーションプログラムを開発している。このプログラムはマルチエージェントシミュレーションであり、一人一人の歩行速度や避難開始時間を個々に設定でき、かつ、避難経路の通行制限や不通箇所といったローカルな条件を変えることができる。また、結果を再現するツールにより避難解析結果を再現し、避難の移動の様子や混雑の状況をビジュアルに確認できること、複数の避難経路の避難人数の配分を最適にして、最短避難時間とその経路を求めることができること等の特徴をもつ。さらに、全ての避難が完了する総避難時間、避難者の個々の避難時間、避難者が使用した避難経路、個々の避難者が混雑箇所です待つ時間(滞留時間)等を求める機能を有している。このシミュレーションプログラムを用いて、わが国で建造された世界最大級のクルーズ船(図2-1)を対象に、MSC/Circ.1033に示された避難解析指針にしたがって避難解析を実施した。

2.2 シミュレーションによる解析

MSC/Circ.1033では、表計算を用いる概略解析とコンピュータシミュレーションプログラムを用いる詳細解析の2つの解析方法があるが、本研究では後者による避難解析を実施した。避難解析指針には4つのシナリオが用意されている。夜間と昼間それぞれの乗客及び乗員が過ごす場所を想定した2つの基本シナリオ(夜: case1、昼: case2)及びある主垂

直区域（MVZ: Main Vertical Zone）の避難経路が制限された場合のそれぞれの基本シナリオに対応する2つの非常シナリオ（夜: case 3、昼: case 4）である。避難する対象は、乗客・乗員であり、昼間は乗客 3,115 人、乗員 1,188 人、夜間は乗客 3,115 人、乗員 1,122 人である。乗客は男女と年齢層の構成比が、また乗員は男女の構成比がそれぞれ指定され、各人の歩行速度と避難開始時刻が固有の範囲内でランダムに設定される。

なお、全てのシナリオにおいて、一部の乗員が乗客の客室に行ってから集合場所に避難するという行動をとる（夜の case 1 及び 3 では乗員の 8.3%、昼の case 2 及び 4 では乗員の 25%）。これらの乗員は、集合場所へと避難する多くの旅客に対して対抗して移動することになる。

避難解析指針に対応した乗客・乗員の初期配置を図 2-2（case1 及び 3）及び図 2-3（case2 及び 4）に示す。夜は主として私室に、昼は主として公室及びサービススペースに配置されている。印のない数字は、普通に避難する乗客・乗員の数、太字斜体下線の数字は、客室に移動してから避難する乗員の初期位置での数



図 2-1 解析対象とした大型旅客船

	MVZ7			MVZ6			MVZ5			MVZ4			MVZ3			MVZ2			MVZ1		
deck16	0																				
deck15	0			0									0			0					
deck14	0			0									25			113 3			14		
deck12	階段8・階段9	123	4	64 3 53 2			階段4	79	2	116	3				113 3			10			
deck11		115	3	88 3 93 2				103	2	78	3				115 3			21			
deck10		111	3	88 3 101 2				51	2	68	3				113 3			29			
deck9		126	3	84 3 50 2				60	2	85	3				111 3			74 3			
deck8		99	3	64 3 61 2				61	2	56	3				60 3			67 3			
deck7	16			15			20			0			18			18			0 3		
deck6	0			30			階段5・6	0			0			0			12			32	
deck5	0			30				0			0			112 3			145 3			32	
deck4	10			10				49			23			32			93			17	
deck3	10			0				109			94			130			119			0	
deck2	0			0				18			72			12			0			0	

図 2-2 Case1 及び 3 の初期配置（夜間：私室にいる乗客・乗員が多い）

	MVZ7			MVZ6			MVZ5			MVZ4			MVZ3			MVZ2			MVZ1		
deck16	階段 8・階段 9	136		階段 7																	
deck15		49			1						73			121							
deck14		188			170						21			33	21		33	0			
deck12		21	34		21	34	21	34	21	34	21			21				階段 1	0		
deck11		21			21		21		21		21		21		21		0				
deck10		21			21		21		21		21		21		21		21		36		
deck9		21			21		21		21		21		21		21		21				
deck8		21			21		21		21		21		21		21		21				
deck7		34			34		68		階段 4		219		33		56		0				
deck6		331			31	階段 5-6	307		128		階段 3	234		36		28					
deck5	175		32		300		78		22			22		23	32						
deck4	15		15		25		14		17		0		12								
deck3	10		0		12		24		39		34		0								
deck2	0		0		18		48		0		0		0								

図 2-3 Case2 及び 4 の初期配置（昼間：乗客は公室、乗員はサービススペースに主としている）

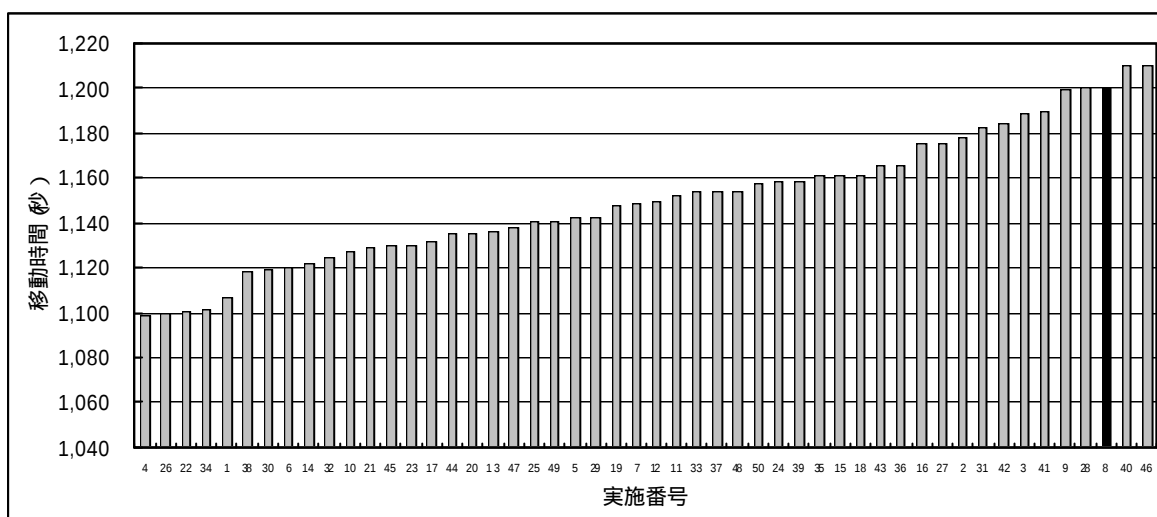


図 2-4 Case1 避難解析 50 回分の移動時間（移動時間の小さい順に並び替えた：右から 3 番目が 95%を越えた値）

を、斜体の数字は、その移動する先の位置での数をそれぞれ示す。図 2-2 及び 2-3 には、避難時に重要となる階段の位置と番号を示し、公室をグレーで、集合場所をドットで示した。避難経路が制限された場合である case3 及び 4 では、階段 4 の通路幅が制限される。

表 2-1 総移動時間の計算結果

シナリオ	移動時間 T_l (sec)	余裕時間 (sec)	総移動時間 T_c	
			(sec)	(分・秒)
Case1	1,201	600	1,801	30分01秒
Case2	853	600	1,453	24分13秒
Case3	1,326	200	1,526	25分26秒
Case4	968	200	1,168	19分28秒

2.3 解析結果

避難解析指針にしたがい、乗客・乗員各人の歩行速度と避難開始時刻を固有の範囲内でランダムに設定し、4つのシナリオについてそれぞれ50回ずつ計算を実施した。各シナリオで最短から95%を越えた位置の移動完了時間 T_l を求め（図 2-4 に示す case 1 では黒色表示）、それぞれ規定の安全余裕時間を加え、各シナリオの総移動時間 T_c を求めた結果を表 2-1 に示す。Case 1 から 4 の T_c の最大値（対象船では case 1 の 30 分 1 秒）が総移動時間の代表値 T となる。対象船では MVZ が 4 以上あり、MSC/Circ.1033 では、救命設備の利用に要する時間を 30 分とした場合、 T が 60 分以下である必要があるが、シミュレーションの結果はこれを満足するものであった。

3 旅客フェリーによる危険物タンクローリーの輸送に関する調査

3.1 はじめに

国際海上危険物規程（IMDG Code）では、ガソリン、LPG（液化石油ガス）及び液体酸素は多数の乗客とともに運送することが禁止されている。一方、離島等では、旅客船がほとんど唯一の輸送手段になる場合があり、図 3-1 に示すような旅客を乗船させた船舶で各種危険物も輸送したいという要望がある。特に、ガソリン、LPG 及び液体酸素（医療用）

(以下、「調査対象危険物」と呼ぶ。)は、日常生活に必要であり、タンクローリーに収納した状態で旅客船により運送したいとの要望がある。そこで、調査対象危険物を収納したタンクローリー(以下、「調査対象タンク車両」と呼ぶ。)を、一定数以上の旅客を搭載した船舶で運送する場合の人命に関するリスクを評価するとともに、その経済効果の推定を行った。



図 3-1 離島航路の旅客フェリー

3.2 リスク評価の方法

船舶の事故の種類別の発生数と人命損失数等を、海難審判庁裁決録等に公表されているデータにより調べ、事故発生確率等を推定した。事故は、一件当たりの死者等が多い転覆または沈没(Catastrophic 事故。小型船のみ)、荷役中の交通事故等人命損失を伴うが積載車両に殆ど影響しない事故(Critical 事故)、衝突、乗揚げ、火災・爆発等で代表される事故(Marginal 事故)、機関損傷事故、施設損傷事故等の人命損失が無視できる程度の事故(Negligible 事故)の4種類に分け、それぞれについて発生確率及び人命損失数の期待値を概略推定した。この推定結果は、危険物の積載が影響しなかった事故を代表すると考えられ、これを基本リスクと呼ぶ。基本リスクを表 3-1 に示す。

表 3-1 総トン数別の基本リスク

総トン数区分	基本リスク	
	航海当たり	一人当たり
-20	1.0×10^{-6}	1.7×10^{-8}
20 - 100	1.8×10^{-5}	1.9×10^{-7}
100 - 500	1.2×10^{-5}	5.1×10^{-8}
500 - 3000	8.1×10^{-6}	1.7×10^{-8}
3000 -	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-7}
平均	1.4×10^{-5}	4.9×10^{-8}

カーフェリーの事故の中では、座礁、船舶・岸壁への衝突といった大きな加速度を伴う事故と、火災のうち車両区域に影響するものが、調査対象タンク車両に影響を及ぼすと考えた。また、カーフェリーの事故に起因しないタンク車両からの漏洩及び火災事故も考慮し、調査対象タンク車両の積載に起因するリスクの増分を求めた。

ガソリンを収納したタンク車両に起因する事故については、消防庁の「危険物に係る事故事例」に基づき、移動タンク貯蔵所の事故事例を調査した。また、LPG等の事故については高圧ガス保安協会による「事故事例検索システム」を用いて調査した。そして、カーフェリーの事故発生確率との比較のためのモデル化を行い、ガソリンを収納したタンクローリーについては、一航海一台当たりの火災・爆発事故及び漏洩事故の発生確率は、それぞれ 2.3×10^{-8} 及び 2.0×10^{-7} と推定した。また、LPG 事故事例データベースにはタンク車両の事故は含まれていなかったため、車両の漏洩事故件数を 12 年間に 1 件と仮定して一航海一台当たりの事故の発生確率を求めたところ、 1.7×10^{-7} であった。

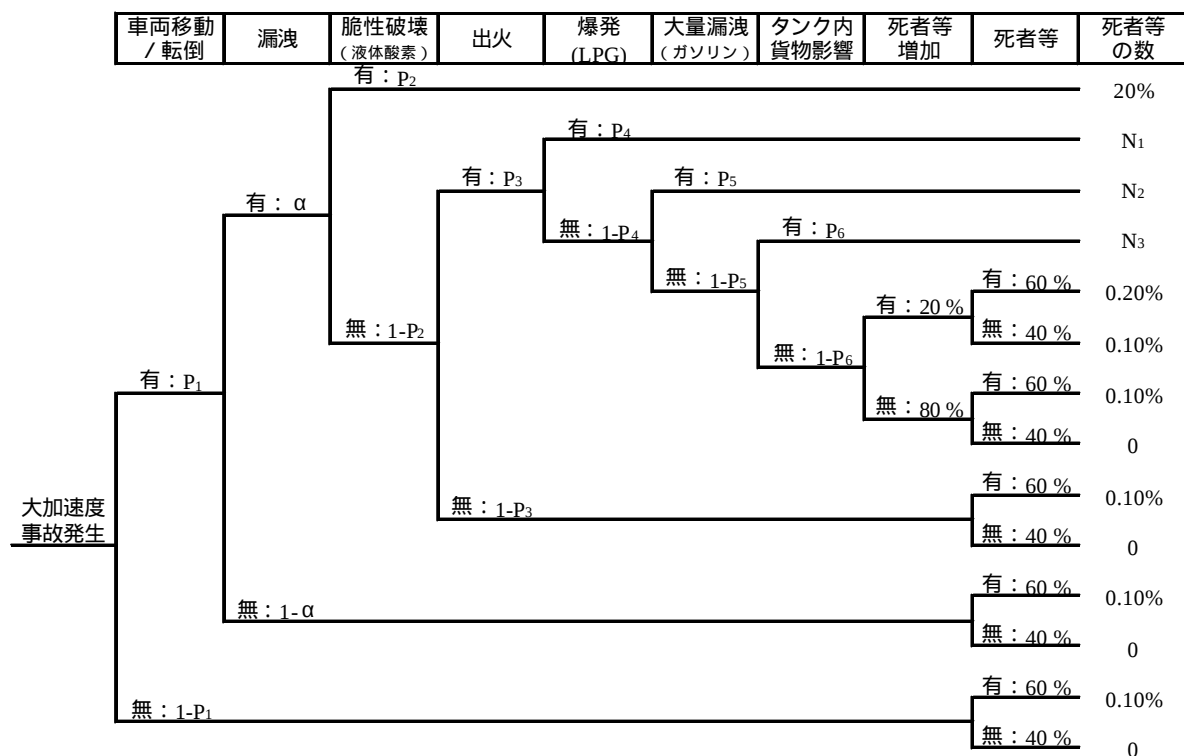


図 3-2 調査対象タンク車両を積載した際の大加速度事故

リスクの増分を求める際には、車両の乗船前の点検、車両の固定といった安全対策を考慮した。車両の固定の効果の評価するため、大加速度事故時の車両甲板における甲板面方向の最大加速度を推定し、車両の固定が無い場合は 0.1G（大加速度事故の 27％）固定がある場合は 0.7 G

表 3-2 タンク車両の積載によるリスクの増分

漏洩確率	危険物	積載場所	リスクの増分	
			平均値	一人当
a = 0.1	ガソリン	開放型	1.1×10^{-5}	3.7×10^{-8}
		閉囲型	1.8×10^{-5}	6.3×10^{-8}
	LPG	開放型	1.7×10^{-5}	5.8×10^{-8}
		閉囲型	2.8×10^{-5}	9.8×10^{-8}
	液体酸素	開放型	3.1×10^{-5}	1.1×10^{-7}
		閉囲型	4.1×10^{-5}	1.4×10^{-7}

（大加速度事故の 60％）の加速度に耐えられると仮定した。また、移動タンク貯蔵所の事故例より、乗船前点検により漏洩等の事故が 60％防止できると仮定した。事故例分析の例として、大加速度事故の場合を図 3-2 に示す。図 3-2 において"a"は、調査対象タンク車両または周囲の車両が移動／転倒した際に、調査対象タンク車両から調査対象危険物が漏洩する確率を意味する。

3.3 リスク評価結果

カーフェリーの航海が保有する乗船者の人命に関する基本リスクは 1.4×10^{-5} であった。a = 0.1 と仮定した場合について、調査対象タンク車両の積載による安全対策を実施した場合のリスクの増分を表 3-2 に示す。ガソリンのタンク車両の積載及び LPG のタンク車両の開放型車両区域への積載は、前述の安全対策を実施すれば、リスクの増分は基本リスクの

約 1.3 倍であった。この値は、IMDG Code で多数の旅客と同時に積載することが認められている灯油等のタンク車両を積載した場合のリスクの増分(特別な安全対策なしのケース)と同等であった。

一方、閉囲型車両区域への LPG タンク車両の積載によるリスクの増分は、安全対策を実施したとしても基本リスクの 2 倍程度であり、液体酸素タンク車両を積載することによるリスクの増分はさらに大きい。

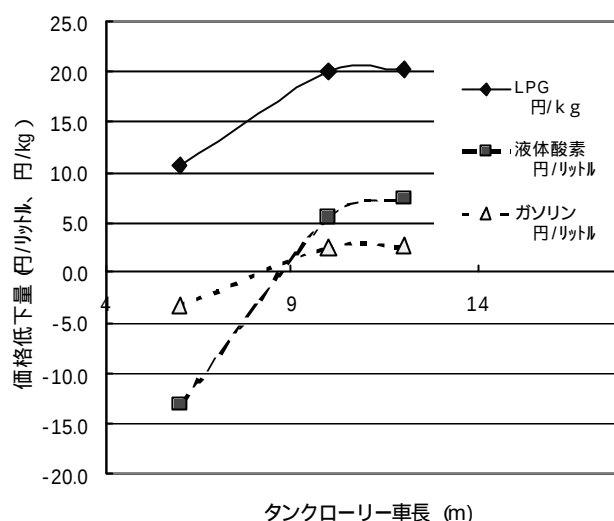


図 3-3 タンクローリー車長と価格低下量

3.4 タンク車両の旅客フェリーへの積載による経済効果

離島における実地調査及び各種統計資料等を元に、タンクローリーによる調査対象危険物輸送の規制を変更することで期待される経済効果を推定した。

調査時点で離島航路でトラックを運ぶ旅客フェリーが寄港している離島は 101、航路は 191 あった。このなかで、ガソリン・LPG の場合、経済効果が現れるのは、現在貨物船やフェリー特例にてドラム缶やボンベが輸送されているケースであり、こうした離島は 11 あった。直接的経済効果として、輸送原価の削減による製品価格の低下であり、その結果、離島の物価水準の引き下げに寄与しうる。試算結果は、図 3-3 に示すように、9 m 車長のタンクローリーを使用した場合、ガソリンについては 1 L 当たり約 2.6 円で価格の約 2.0 %、LPG については 1 kg 当たり約 20.1 円で価格の 5 % (5 m³ 価格) の輸送原価削減効果となった。タンクローリーが離島フェリー航路に積載可能になったとした場合、ガソリンに関しては対象離島 11 島の合計で約 1,200 万円/年の輸送経費削減と推定された。さらに、間接的な効果を推定するために、産業連関表 (平成 7 年度) の誘発係数 (1.551) を用いると、約 2,000 万円/年の生産誘発効果になると試算される。LPG は、対象離島 11 島で合計で約 1 億 5,000 万円/年の輸送経費削減になり、間接効果としては約 2 億 3,100 万円/年の生産誘発効果になると試算された。これらすべての合計では約 1 億 5,000 万円/年の輸送経費削減であり、これによって約 2 億 5,000 万円/年の生産誘発効果が期待される。

3.5 まとめ

リスク解析からは、液体酸素のタンク車両は多数の乗客を乗せたカーフェリーに積載すべきではなく、LPG のタンク車両は、こうした船の閉囲型車両区域に積載すべきでないといえる。また、経済効果の評価では、離島では需要量が大きくはないため、経済効果の規模自体はそれほど大きくはないものの、市場に対する競争原理の一層の導入等の波及効果と併せると、離島の地域経済には一定程度の影響はあると考えられる。

本調査研究の成果を踏まえ、危険物船舶運送及び貯蔵規則及び同告示が改正され、平成 15 年 10 月 1 日より、追加の安全対策の実施を条件として、離島航路においてはガソリン

及びLPGのタンクローリーを旅客船で運送することが可能になった。

4．漁船「第五龍寶丸」転覆事故要因に関する検討

4.1 はじめに

2000年9月11日、北海道襟裳岬沖で、底びき網漁船「第五龍寶丸」が転覆し、乗組員18名中14名が行方不明となる事故が発生した。この事故を受けて、運輸省（当時）に漁船「第五龍寶丸」事故再発防止検討会が設置され、転覆に至った状況を調査・検証し、それに基づいて同種事故の再発防止対策の検討を行った。海上技術安全研究所では、この検討の一環として、事故状況の検証及び転覆事故要因の分析評価を実施した。

4.2 事故状況の検証

第五龍寶丸（図4-1）は、昭和58年に竣工した総トン数160トンの船尾トロール式漁船であり、全国で約60隻の同型船が操業している。事故発生状況から、以下のような事故シナリオが想定された（図4-2参照）。第五龍寶丸は、第一回目の揚網時に、約50tの漁獲物が入った漁網（コッド）を甲板上に引揚げた後、右舵一杯として全速前進をかけた。操船直後、船体は一旦右舷側に内方傾斜し

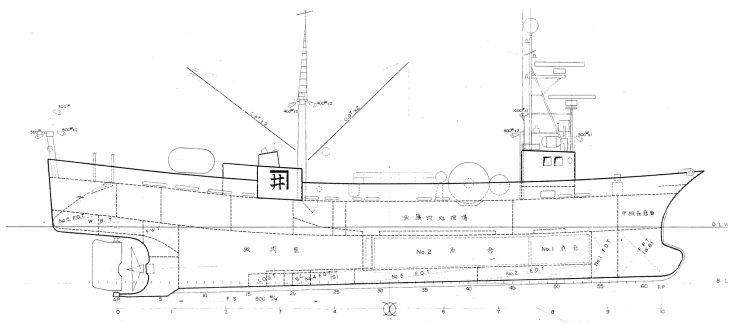


図 4-1 第五龍寶丸の一般配置図

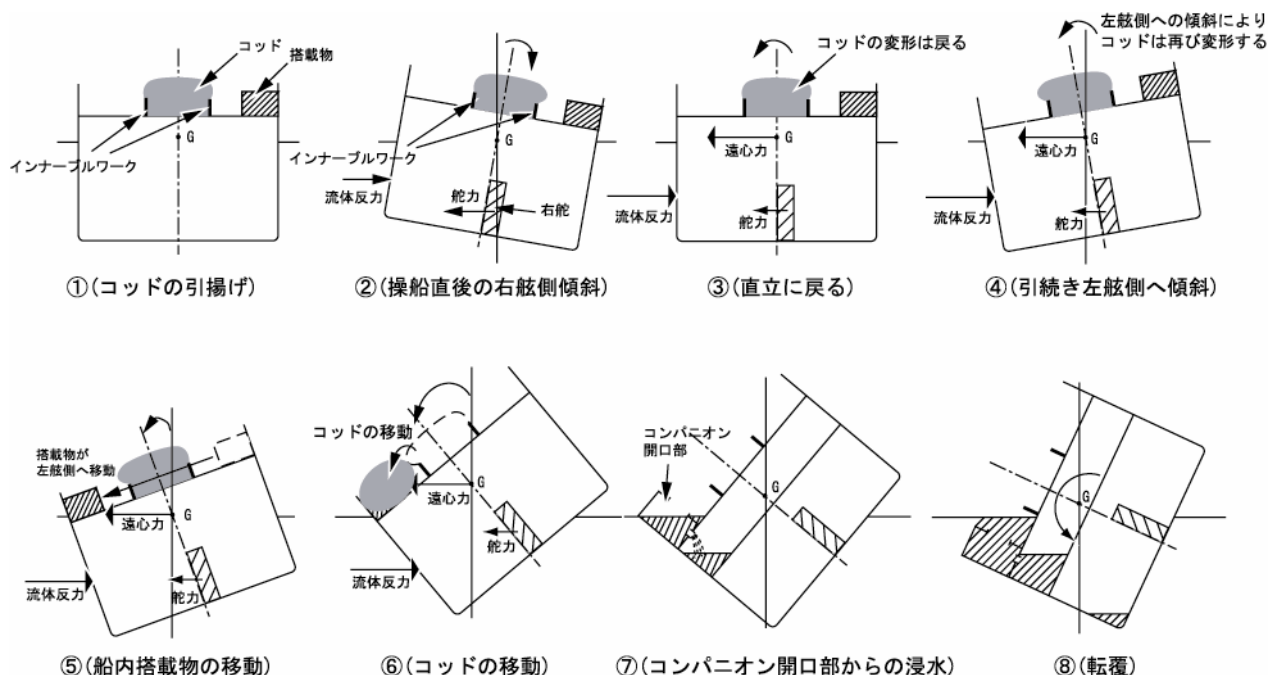


図 4-1 転覆事故の想定されるシナリオ

たが、旋回運動の発達とともに左舷側に大きく外方傾斜し、船内の搭載物やコッドが移動した。その結果、傾斜がコンパニオン開口部の海水流入角を越えて船内へ浸水し、転覆した。

次に、事故発生時の復原力及び傾斜モーメントを推定し、事故シナリオに沿った計算を行い、事故状況を検証した。事故発生時の復原力を計算したところ、多量の漁獲物の入ったコッドの引揚げにより重心が高くなり、メタセンタ高さ (GM) が引揚げ前に比べて 28cm も小さくなるなど復原力が大幅に減少していたと推定された。また、事故発生時に作用したと想定される傾斜モーメントは、急激な操船による内方傾斜により 16.8 t-m、外方傾斜により 35.1 t-m、袖網等の移動により 11.8 t-m となり、コッドの移動による傾斜モーメントは 76.8 t-m となった。これらの推定に基づいて、事故発生時の値が不明であった初期傾斜角 (θ_i)、船速 (V_t) 及びコッド移動傾斜角 (θ_c) の値を現実的な範囲で 2 通りに変化させ、合計 8 通りのケースについて、復原方向のエネルギーと傾斜方向のエネルギーの比を計算して転覆するかどうか評価

した結果を表 4-1 に示す。4 ケースでエネルギー比が 1 を下回り、転覆が発生すると評価された。このことから、想定した事故シナリオによって第五龍寶丸が転覆し得ること、また、復原力および傾斜モーメントの推定がほぼ妥当であったことが分かる。

表 4-1 復原性に関する計算結果

ケース	θ_i (deg.)	V_t (kt)	θ_c (deg.)	計算結果
1	4	7.68	25	× (0.18)
2	4	7.68	35	× (0.90)
3	4	6.14	25	× (0.80)
4	4	6.14	35	○ (2.02)
5	2	7.68	25	× (0.29)
6	2	7.68	35	○ (1.41)
7	2	6.14	25	○ (1.08)
8	2	6.14	35	○ (2.95)

注) ○：非転覆、×：転覆

() 内は復原方向のエネルギーと傾斜方向のエネルギーの比

4.3 事故要因に関する考察

事故状況の検証結果から、第五龍寶丸転覆事故は、(i) 多量の漁獲物の入ったコッドの引揚げ、(ii) 急激な操船による内方・外方傾斜、(iii) 袖網等コッド以外の搭載物の移動、(iv) 漁獲物の入ったコッドの移動の 4 つの要因が複合して発生したと推定できた。

次に、事故再発防止策を検討するために、各事故要因を分析するとともに、転覆への影響度を評価した。主要な事故要因である、多

表 4-2 メタセンタ高さ (GM)、コンパニオンからの海水流入角までの動復原力 (D_{st}) 及びコンパニオンからの海水流入角 (θ_v)

	GM (m)	D_{st} (m・rad)	θ_v (deg.)
コッド引揚げ前 (漁場着)	0.613 (1.00)	0.211 (1.00)	46 (1.00)
コッド引揚げ時 (30t)	0.435 (0.71)	0.128 (0.61)	41 (0.89)
コッド引揚げ時 (40t)	0.384 (0.63)	0.104 (0.49)	39 (0.85)
コッド引揚げ時 (50t)	0.327 (0.53)	0.087 (0.41)	38 (0.83)

注)：() 内は、コッド引揚げ前の値との比

量の漁獲物の入ったコッドの引揚げとコッドの移動について考察した。多量の漁獲物の入ったコッドを甲板上に引揚げれば、重心が上昇して復原力が減少する。また、副次的効果として、船体の沈下による海水流入角の減少、荷崩れ・移動した場合の傾斜モーメントの発生、遠心力による外方傾斜モーメントのレバーの増加があげられる。

事故発生時の載荷状態で、コッドを引揚げる前と 30t～50t のコッドを引揚げた場合のメタセンタ高さ (GM)、コンパニオンからの海水流入角 (θ_v) 及びその角度までの GZ 曲線の面積 (動復原力 Dst) を計算した結果を表 4-2 に示す。コッドの重量の増加によりいずれの値も大幅に減少し、特に、今回の事故のような場合の復原性を示す Dst は、初期復原力を示す GM より変化が大きく、50t のコッドを甲板上に引揚げた場合、引揚げ前の半分以下になる。また、コッドの移動の影響もかなり大きく、50t のコッドが傾斜角 25 度で移動した場合、コッド移動傾斜角からコンパニオン開口部の没水角までの動復原力は、移動前に比べて約 60% も減少する。従って、多量の漁獲物の入ったコッドを一気に甲板上に引揚げないこと、及びコッドの横移動を抑制する措置をとることが、転覆防止に大きく寄与すると考えられた。

4.4 まとめ

漁船「第五龍寶丸」転覆事故について、事故状況を検証し、事故要因の抽出、各要因の影響を定量的に検討した結果、(i) 多量の漁獲物の入ったコッドの引揚げ、(ii) 急激な操船による内方傾斜・外方傾斜、(iii) 袖網等コッド以外の搭載物の移動、(iv) 漁獲物の入ったコッドの移動が事故要因となったこと、及びそのなかで多量の漁獲物の引揚げとコッドの移動が相対的に大きな要因となったことを明らかにした。この結果を含む検討会の報告を基に、2001 年 8 月 3 日付けで、国土交通省海事局長から漁業関係団体に、事故再発防止対策についての通達が出された。

5 ディーゼル機関排ガス消音システムの開発

5.1 はじめに

近年、暴露甲板上に設置するタイプの発電機モジュールが多く搭載されるようになった (図 5-1)。これは、従来、機関室内に設置されていたディーゼルエンジンと発電機・配電盤などを、モジュールとして一体化してコンテナに収納したもので、主に船舶電装設計の省力化と設置面積の低減を目的に開発されたものである。これら、船舶の発電機用ディーゼル機関からは、主に排気音に起因する低周波音 (周波数 80 Hz 以下) が発生する。一般に低周波音は減衰しにくい性質があり、港湾周辺地域では、停泊中の運転により住宅の窓が震える等、特に夜間における騒音公害となることがある。一方、従来型の排ガス消音器 (膨脹空洞共鳴型) の原理で低周波音に低減効果のある設計をすると、現実には搭載不可能な大型の寸法となってしまう、モジュール化の目的意義を失ってしまう。そこで、ディーゼル機関などレシプロ型エンジン特有の低周波域騒音発生メカニズムに着目して、低周波音低減に効果のある消音システムの開発を行った。

5.2 騒音原の特定

実験では 200kW 型の発電機モジュールを使用し、ディーゼル機関 (6 シリンダー) を一

定回転数（1800rpm、発電周波数 60Hz）で、定格最大出力の 1/2 出力（94 kW）で運転した場合の騒音を計測した。2.5～80 Hz の低周波音はフラット特性で 75～130 dB 程度の音圧が測定された。本来、6 気筒エンジンからの排気音は、同回転数の単気筒エンジンに比較して 6 倍の周波数成分でピークを示す周波数特性となることが予想されるが、計測した音圧の周波数特性分析結果からは、それよりも低い周波数に多くのピークを示す結果となった。これは、各シリンダーからの排気の、シリンダー出口から排気マニホールドを経て合流するまでの到達距離に差異があるため、各音圧の位相が時間的にずれることに起因する「うなり音」とであると推定された。

そこで、従来の膨張 / 吸音型消音器に加え、位相調整装置を付加した低周波騒音減衰型排ガス消音システムを開発した。その概念図を図 5-2 に示す。位相調整装置内部には、ディーゼル機関の各シリンダーからの排気管内の音圧伝播距離を均一に調整するために、長さの異なる管路が組み合わされた構造を持っている。

5.3 消音システムの性能

エンジンに位相調整装置のみを設置したところ、回転機械のようなめらかな排ガス音が確認され、「うなり音」が抑制されていることが確認された。このとき、図 5-3 に示すように、音圧も約 10dB 低下していた。また、可聴低音域の音圧は、図 5-4 に示すように、従来の消音器のみを使用した場合に対し、音圧で約 10～15dB 低下した。また、中高温域においても、100 Hz で 25 dB、1000 Hz で 10 dB の音圧低下があった。これらのデータから、開発した消音器は、低周波だけでなく可聴音全域に対する



図 5-1 船舶に搭載された非常用発電機モジュール

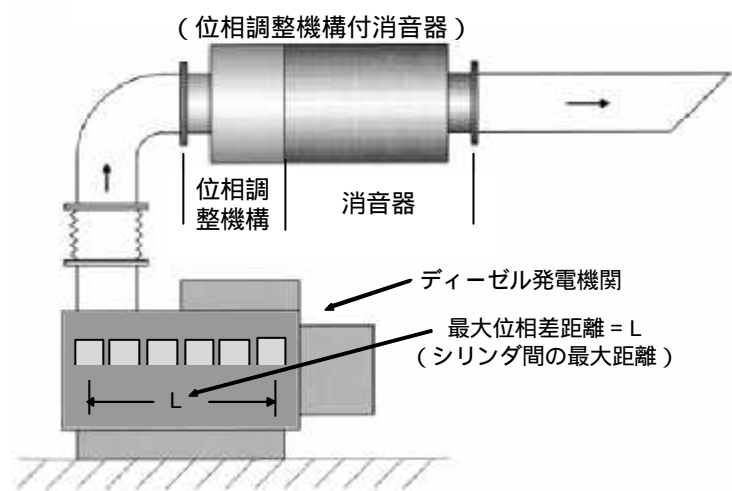


図 5-2 低周波騒音減衰型排ガス消音器の概念

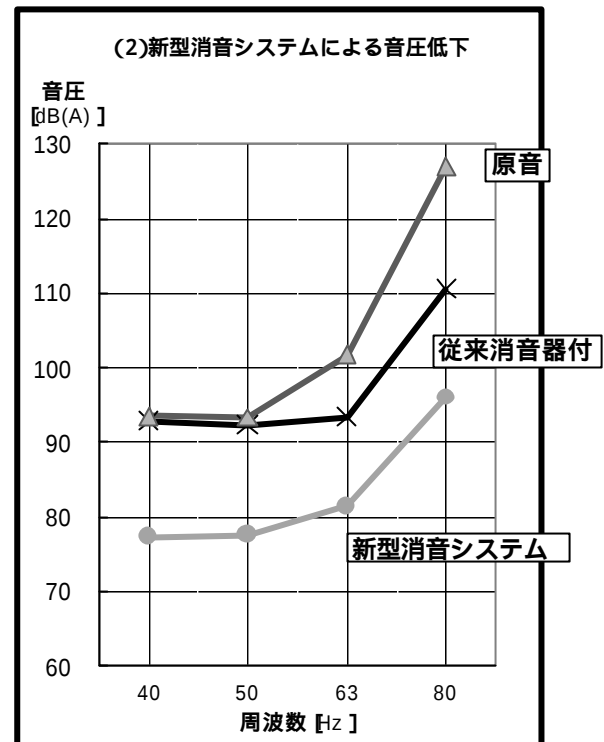
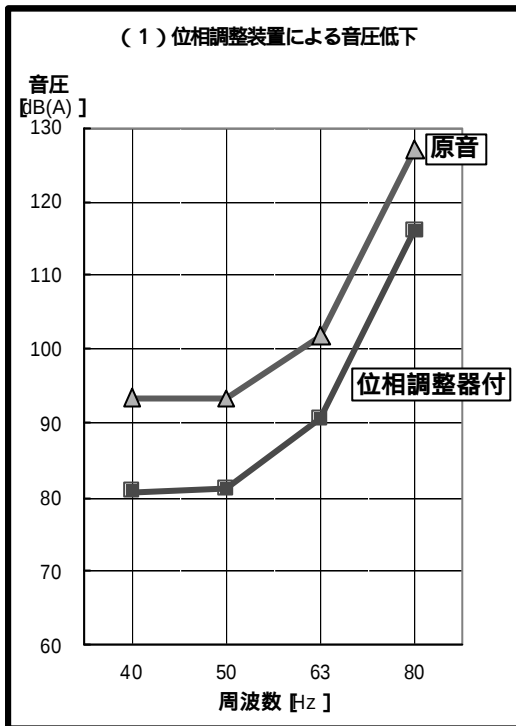


図 5-3 位相調整器による低周波音低減効果 図 5-4 開発したシステムによる消音効果

消音システムとしても有効であることが確認され、ディーゼル機関の排気騒音の低減に効果的であることが実証された。このシステムは、現在、実用機の開発が進められている。

6．防汚塗料検査装置の開発

6.1 はじめに

国際海事機関において、トリブチルスズ（TBT）等の有機スズ系船底塗料の使用を禁止する国際条約（AFS 条約）が採択された。発効すれば、2008 年以降に有機スズ系塗料で塗装された船舶の条約批准国への寄港が禁止される。AFS 条約では、検査は基本的に文書に基づくとしており、塗装されている防汚塗料が条約に適合することを示す文書を求めている。しかし、合理的理由があれば塗装されている塗膜を採取して検査することがありうることから、条約の実効性を確保するためには、塗膜成分の検査方法の確立が必要である。

検査法の要件として、サンプリング（試料採取）では船体を毀損しないこと、簡便で可能な限り船舶検査の現場で完了することが求められる。塗膜成分を厳密に特定するためには、専門機関での化学分析が必要であり、これには数日を要する。そこで、有機スズ系防汚剤以外に高い濃度でスズが船底塗料に含まれることがないことから、検査現場で実行可能な方法として、スズ含有量に着目した塗膜の検査（1 次検査）法を考案し、あわせて塗膜を採取するサンプリング機器の開発を行った。

6.2 塗膜のサンプリング方法

船体あるいは塗装を毀損しないでサンプリングを行う方法として、研磨紙により塗装の

ごく表層のみを採取する方法を提案し、直径 10mm の研磨紙を貼付した採取治具を製作した。検査の公正さを確保するために、採取者の個人差が現れないような専用の採取装置を開発した。これは、市販の電動ドリルを改造したもので、先端に取り付けた治具は、それ自身回転しながら中心軸の周囲を回転して船体表面から塗料片を採取する。図 6-1 に、試作した装置により船体表面から採取している様子を示す。これにより、塗装のごく表層(厚さ 10 μ m 以下)部分を数 mg(4~10mg)程度、サンプルとして採取することができた。



図 6-1 サンプルング装置(上)と船底からの試料採取状況

6.3 蛍光 X 線分析による 1 次検査方法

採取した試料は 2 段階の分析により条約適合性が判定される。まず、1 次検査として、船舶検査の現場で可能な方法として蛍光 X 線分析によりスズの定量分析を行う。この段階でスズが一定量(AFS 条約の閾値では 0.25%)未満であれば条約適合と判定される。この値を超える場合は、試料が専門の分析機関に送られ、ガスクロマトグラフ質量分析法により、禁止されている有機スズ化合物であるかどうかについて最終的な判断を行う(2 次検査)。

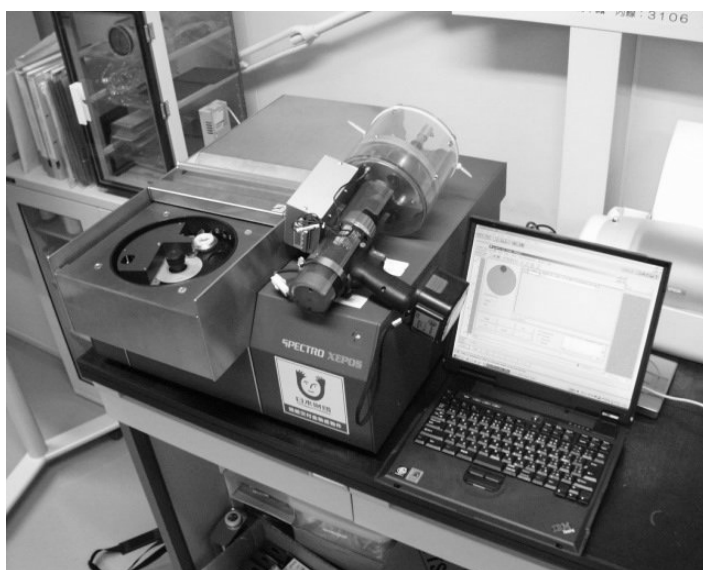


図 6-2 1 次分析用蛍光 X 線分析装置

本稿では、現場で実施することを前提とした 1 次検査用に開発した検査専用装置を紹介する。検査装置は図 6-2 に示すもので、市販の分析装置をベースとして開発した。これは、液体窒素による冷却が不要な可搬型蛍光 X 線分析装置で、分解能の高い SDD 型検出器を装備したエネルギー分散型分光方式を採用している。スズ(Sn)の定量分析には試料厚さが薄いことから Sn-La 線を対象とする。検査専用機は塗膜検査用のスズ検量線を内蔵し、検

査専用プログラムにより容易にかつ迅速に（1 試料の分析所要時間は 5 分）検査が可能である。

図 6-3 に、厳密な化学分析(ICP-AES)で得られた値を基準にした検量線を示す。まず、0.1%程度の試料が再現性よく分析されており、閾値（0.25%）付近の低濃度スズが分析可能であることが確認できた。また、得られた検量線の直線性は、十分満足できるものであった。市販の非スズ系船底塗料を対象にサンプリングと 1 次分析を行った結果を図 6-4 に示す。対象塗料には AFS 条約の閾値を超えるものはなかったが、一部の試料に塗膜中の銅や亜鉛成分の不純物として微量のスズが含有されていた。分析データでは、0.1%以下のレベルでも本検査装置で検出されていることが確認された。なお、分析値は化学分析の結果と必ずしも一致しないが、これはスズが不純物として含有されているため塗膜内に均一に分散していないことが原因であり、やむを得ないばつきと考えられる。実際の検査では、ばらつきを考慮して十分な点数の試料を分析することが推奨されている。

この段階で条約適合の非スズ系塗料であることが確定するが、閾値を超えた場合の最終的な条約適合性の判断は、専門分析機関における 2 次検査の結果を待って行われる。

6.4 まとめ

AFS 条約の発効に備えて、条約に対応する塗膜検査のために、サンプリングと分析の方法を提案し、試作機を開発した。ここで開発された方式が、船舶検査の現場で容易にかつ迅速に実施可能であることを実証した。この方式は、IMO における条約審議の際に紹介され、AFS 条約に付属するガイドラインに、具体的な検査方法の例として採択された。

7 . あとがき

本稿では、受託研究または共同研究として実施した課題でその成果が産業や行政面で活

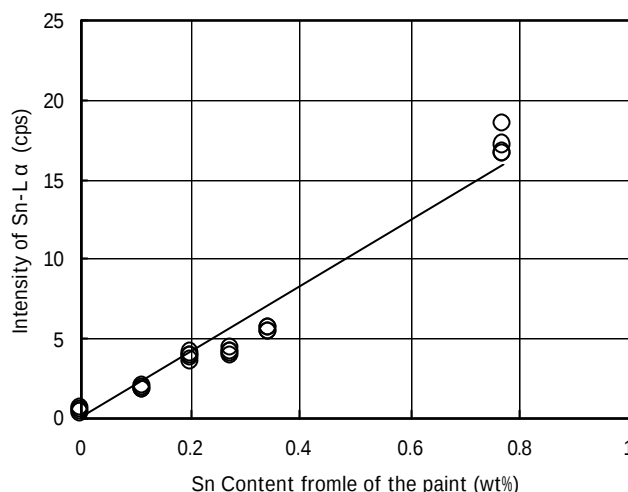


図 6-3 低濃度スズ分析のための検量線

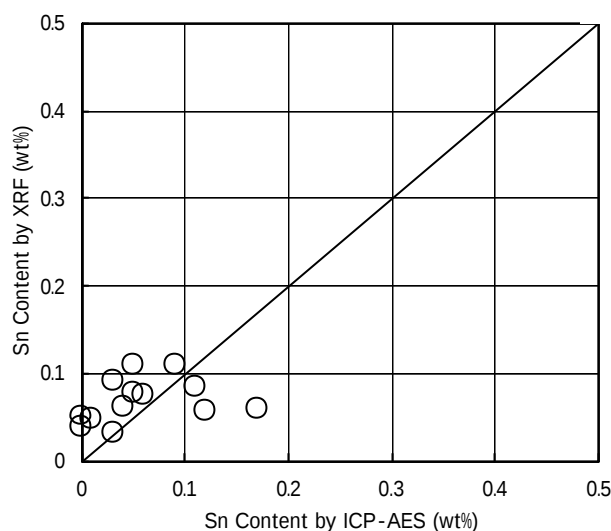


図 6-4 微量スズを含む塗膜の分析結果の比較

用されたものから 5 件を選び、その成果の概略をご紹介しました。海上技術安全研究所では、海事分野の広い範囲にわたって研究活動を実施しており、その能力や施設等を企業や団体の方々にご利用いただくことを積極的に進めています。

謝辞 避難シミュレーションは、三菱重工業株式会社のご依頼により、また危険物輸送評価及び底引き漁船の事故調査は、国土交通省海事局のご依頼によりそれぞれ実施しました。また、底引き漁船の事故要因分析では、委員長の藤野正隆東京大学教授をはじめ漁船「第五龍寶丸」事故再発防止検討会及び同作業部会の関係各位に有益なご討論を頂きました。消音装置の開発は、競艇交付金により、日本財団の援助を受けて財団法人シップ・アンド・オーシャン財団が行う技術開発基金による補助を受けた株式会社大晃産業との共同研究により実施しました。塗料検査装置の開発では、一部を日本財団の助成を受けた（社）日本造船研究協会との共同研究として、また一部を理学電機工業株式会社との共同研究として実施しました。成果を広く公表することをご了承いただいた関係者各位に深く感謝の意を表します。

本稿で述べた調査研究の海上技術安全研究所における実施担当者は以下の通りである。

避難シミュレーション：宮崎恵子、勝原光治郎、太田進

危険物カーフェリー：太田進、松倉洋史、勝原光治郎

第五龍寶丸事故調査：田口晴邦、石田茂資、渡辺巖、沢田博史、辻本勝

消音システムの開発器：山根健二

船底塗料検査装置：宮田修、千田哲也、柴田清