

ベンゼン等有害揮発性物質の船舶からの 排出量低減に関する研究

間島 隆博*、 山口 勝治*、 藤井 忍*、 山之内 博*
阿曾 薫*、 坂本 真二**、 山尾 崇***

Study on Reduction of Gas Emissions from Harmful Volatile Cargo
such as Benzene during Marine Vessel Transfer Operations

by

Takahiro MAJIMA , Katsuji YAMAGUCHI , Shinobu FUJII
Hiroshi YAMANOUCHI , Kaoru ASO
Takashi YAMAO and Shinji SAKAMOTO

Abstract

International Maritime Organization (IMO) recognized that chronic exposure to very low concentrations of benzene vapors in air of the order of a few parts per million may cause cancer. In order to reduce the health risk of crews to the same level as that of shore-based workers performing comparable tasks, it is necessary to reduce occupational exposure to benzene vapor.

To cope with the standard and to prevent the suffering of the people who are engaged in the cargo work and the people who live around the berth, the actual onboard conditions of vapor expelled from the cargo tanks of the chemical tankers were investigated.

The purposes of this research are to provide data on the exposure concentration to the marine harmful volatile cargo such as benzene, toluene and xylene, and to find out the effective countermeasures to reduce the health risks caused from that exposure.

* 装備部

** 海上保安庁 装備技術部 船舶課

*** 国土交通省 総合政策局技術安全課

原稿受付 平成13年3月30日

審査済 平成13年9月12日

To achieve these purposes, the onboard measurements on the working environment and the personal exposure concentration of the chemical vapors emitted from the cargo tanks were carried out. The concentration measurements for typical size of 500 tons and 1000 tons cargoes in Japan were conducted during the routine chemical tanker operations composed of loading, unloading, transit and tank cleaning throughout all seasons of the year. The vapor concentration of the emission sources was also measured. The vapor samples were collected in the vapor sample canisters, bottles or bags and VOC (Volatile Organic Compound) gas monitors, and the samples were subsequently analyzed by the gas chromatography.

Meanwhile, to make clear the mechanism of diffusion and vaporization in the cargo tanks, a method to estimate the vapor emissions during the loading and the cleaning operations were developed using the 1/10 scale model of a cargo tank.

Furthermore, the risk assessment of crews exposed to chemicals was conducted to clarify the effectiveness of several countermeasures.

The followings are found.:

- 1) The effectiveness of the methods employed in this study for measuring the working environment and the personal exposure concentration is confirmed.
- 2) The data of environment concentrations of the benzene vapor at some onboard points showed that the benzene concentrations vary with the operations. The higher concentration occurs during the tank cleaning operation and in the pump room.
- 3) The personal exposure levels of the crews to volatile chemicals such as benzene, toluene and xylene vary with the person.
- 4) The calculation models to estimate the concentrations of the emitted vapor from the vent post during the loading operation and the tank cleaning operation are proposed. The comparison between the experimental data and that of the calculation shows good agreements.
- 5) The methods to reduce the vapor emissions and to mitigate the exposure levels of crews are investigated and the effectiveness of the methods is assessed quantitatively.
- 6) The risk of health for crews due to the exposures during marine vessel transfer operations varies with the exposure level, the exposure time, the frequency to engage in the operation and the hazardousness of the cargo.

目次

1. 緒言
2. 海上曝露環境の特徴
3. 研究のフロー
4. 輸送船の概要
5. 輸送作業の区分と環境濃度の形成
6. 実船計測
 - 6.1 環境濃度測定
 - 6.1.1 測定船舶
 - 6.1.2 測定場所
 - 6.1.3 ガスの採取及び分析方法
 - 6.1.4 測定結果
 - 6.1.4.1 作業形態ごとの環境濃度
 - 6.1.4.2 測定場所ごとの環境濃度
 - 6.1.4.3 環境濃度測定のまとめ
 - 6.2 曝露濃度測定
 - 6.2.1 測定船舶
 - 6.2.2 曝露濃度測定方法
 - 6.2.3 曝露濃度測定結果
 - 6.2.4 曝露濃度測定結果の検討
 - 6.3 環境濃度と個人曝露濃度
7. 濃度の予測
 - 7.1 排出濃度、排出量の予測モデル
 - 7.2 積み込みモデル
 - 7.2.1 模型貨物タンク
 - 7.2.2 一次元分子拡散
 - 7.2.3 天井付近の移流の影響
 - 7.2.4 液面上の乱れの影響
 - 7.2.5 計算結果
 - 7.3 クリーニングモデル
 - 7.3.1 計測装置
 - 7.3.2 実験手法
 - 7.3.2.1 蒸発率
 - 7.3.2.2 タンククリーニング
 - 7.3.2.3 タンク壁面の残留量の影響
 - 7.3.3 モデル化
 - 7.3.4 実船の計算
 - 7.4 大気拡散モデル
 - 7.4.1 計算モデル
 - 7.4. 解析結果(大気中拡散モデル)
 - 7.5 まとめ
8. 健康影響評価
 - 8.1 発ガン物質の場合
 - 8.1.1 ベンゼンの場合
 - 8.1.2 アクリロニトリルの場合
 - 8.2 非発ガン物質の場合
 - 8.3 化学物質の複合曝露を受ける場合
9. 対策
 - 9.1 荷揚げ後の残留貨物量の低減

- 9.1.1 はじめに
- 9.1.2 実験装置、実験方法
 - 9.1.2.1 実験装置の概要
 - 9.1.2.2 実験方法
 - 9.1.2.3 実験結果
- 9.1.3 残留貨物量低減のまとめ
- 9.1.4 残留貨物量低減の効果
- 9.2 呼吸具の装着
10. まとめ
- 謝辞
- 参考文献
- 研究発表

1. 緒言

化学物質は我々の生活に欠かせないものとなっており、年々種類は増え続け現在数万種類が流通している。そのうちの多くの化学物質が海上輸送されており、輸送中の化学物質の管理方法によっては人の健康や生態系に有害な影響を及ぼすおそれがある。

ベンゼンは化学製品の基礎材料として幅広く使われるため大量に生産され、生産地から消費地へ頻繁に海上輸送されている。海上輸送は比較的小型の内航ケミカルタンカーによって行われており、通常500トンまたは1000トン単位で輸送される。このため、大量の純ベンゼンが海上輸送されることになり、輸送作業に従事する乗組員や荷役従事者、荷役検査従事者のベンゼンを取り扱う機会も多くなる。

ベンゼン等揮発性物質は岸壁での荷役作業中及び海上輸送中に蒸発しガスとなって、船舶から大気中に漏出・排出され、移流・拡散して大気を汚染するが、低濃度のベンゼンガスでも乗組員及び荷役従事者等が慢性的に曝露されると白血病の原因になり得ると懸念されている。

化学物質の微量曝露による影響は遅れて現出するため事後の対処は難しく、事前の予防的対策が有効となる。長期曝露に伴う健康影響が顕在化してから対策に取り組むのでは手遅れとなるため、船舶からのベンゼンガス漏出・排出実態、排出源や環境中の挙動、環境中の濃度、曝露量等を定量的に把握分析して知見の充実を図りつつ、乗組員のみならず、岸壁での荷役従事者および周辺住民へのベンゼンガスによる健康被害の未然防止の観点に立って、排出抑制、影響緩和等の対策を講じる必要がある。

本報告は、公害防止等試験研究費による3年間の成果をまとめたものである。純ベンゼン輸送中に船上および船舶周辺での環境濃度測定、乗組員個人のガス曝露濃度の測定および排出ガス濃度の測定を行い、環境濃度および排出ガス濃度の予測法の開発、

ガス曝露による人への健康影響評価およびガス曝露が乗組員の健康に及ぼす影響を緩和する方法とその対策法を評価した結果について報告する。さらに、健康に悪影響を及ぼすと考えられているアクリロニトリル、トルエンおよびキシレン輸送中の乗組員のガス曝露濃度についても計測を実施し、健康への影響を評価した。

2. 海上曝露環境の特徴

1997年、国内で海上輸送された化学物質は約230品目あり、年間1万トン以上のものは約90品目、10万トン以上は26品目であった。輸送量の約90%が年間1万トン以上の約90品目で占められている。化学物質を国内輸送する一般ケミカル船は約230隻あり、輸送によるガス曝露の可能性のある者は輸送に直接従事する乗組員、岸壁での荷役作業員、荷役検査員および工場周辺の住民が含まれる。

ベンゼンは絶縁油、一般溶剤、抽出剤、染料、合成ゴム、合成洗剤、合成繊維、合成樹脂、可塑剤、防虫剤等の化学製品の基礎材料となる。またスチレンモノマーの原料でもあり、石油製品・石炭製品製造業、化学工業、電気業、ガス業において大量に消費され、1995年には420万トンが生産された。このうち自家消費量が167万トン、残りが生産地から出荷されたもので、パイプラインによって90万トンが輸送され、輸出が13万トン、国内の海上輸送量は130万トンであった。この状況の年変化は少なく1996年および1997年には140万トンが海上輸送されている。

ベンゼンの出荷地及び受荷地は海に面した湾内または内海の工場内の岸壁であり、関東以西の太平洋岸および瀬戸内海地域、九州地区に幅広く分布している。工場に隣接して民家や一般道がある。海上輸送には300～500総トンケミカル船が多く使用されており、4～7人の乗組員で運航されている。岸壁では2～3人の作業員が直接荷役作業に従事する。

岸壁での荷役作業中および海上輸送中にベンゼン等の揮発性液体化学物質が蒸発してガスとなり、発生源から排出されたガスは空气中を移流・拡散して船上および周辺の空気を汚染する。汚染された空気を呼吸することにより人は化学物質に曝露される。一般にケミカルタンカーでは、輸送ごとに貨物の種類が変わり、従って輸送ごとに乗組員の曝露される化学物質の種類が、例えばベンゼン、トルエン、キシレン等と変化する。また一回の輸送においては貨物の積み込み、海上輸送、荷揚げ、タンククリーニングという過程を経るため発生源の場所や強度および乗組員の作業内容や作業場所が時間とともに変化し、環境濃度や乗組員の曝露濃度は一定しない。

ベンゼンの場合、作業環境濃度は通常の陸上の作業者を反映してIMO(国際海事機関)では8時間作業中の平均濃度(TWA)1ppm、15分間平均濃度(STEL)5ppmを超える場合、保護具を装着して作業するよう勧告している。一般環境に居住する工場周辺の住民に対しては、環境基準として1ppbが設定されている。

3. 研究のフロー

図-1に示すフローに沿って研究を行った。発ガン性化学物質ベンゼンの海上輸送中、現場調査に基づいてモニタリング方法や計測場所を決定し、船上と船舶周辺でのガス濃度および排出されるガスの濃度を測定して実態を把握する。これらのデータとベンゼンの毒性データに基づき、ベンゼンガスが人に及ぼす健康影響を評価し、影響削減のための対策案を選択して、さらにその案を評価する。

人への健康影響はベンゼン曝露量と影響の定量的関係を用い、リスクによって定量的に評価した。

一方、輸送中のガス曝露量は解析モデルと環境ガス濃度およびガス排出量データ、荷役データ、気象データから開発された方法で予測され、計測点以外での濃度推定が可能となる。ベンゼン以外の揮発性化学物質についても同様のフローに沿って調査が行われた。

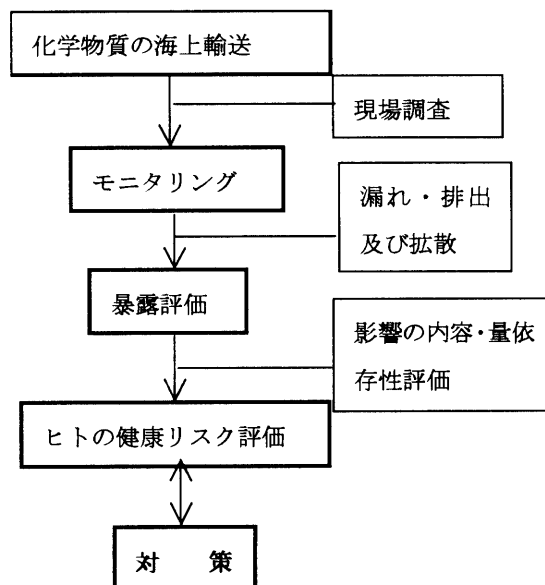


図-1 研究のフロー

4. 輸送船の概要

我が国の内航タンカーのうち、もっとも数が多くよく用いられるのは図-2に示す499総トン(Gross Tonnage)および399総トンの液体化学薬品バラ積み船であり、これらの船を測定対象船として選定した。499GT船は一回の輸送でベンゼン約1000トン、399GT船は約500トン積まれる。499GT船(399GT)の全長は63m(52m)、型幅は10m(9m)である。機関室および船橋は船尾に位置し、船橋より前部は貨物タンクとなっている。船中央部にベント管、機関室に隣接してポンプ室が配置されている。左右に2タンク、前後に4タンク(3タンク)、合計8タンク(6タンク)を有し、各タンクの容積は約140(80)から約180m³(140m³)、合計約1300(660)m³である。左右舷タンクと前後方向タンク共通、つまり4タンク共通の高さ6mのベント管を2本有している。

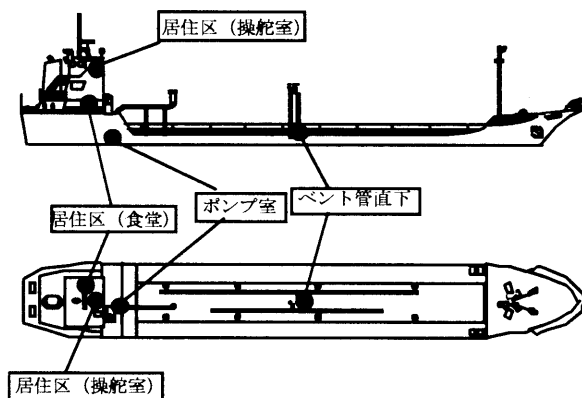


図-2 499総トン輸送船の概要と環境濃度計測点

5. 輸送作業の区分と環境濃度の形成

ベンゼンの海上輸送は図-3に示すように、岸壁での「積み荷作業」および「揚げ荷作業」、出荷地から受荷地までの「航海中の作業」、揚げ荷後、出荷地に向かう間に行われる「タンククリーニング作業」の4つに区分できる作業サイクルを繰り返しながら行われる。作業中にベンゼンは蒸発してガスとなり、発生源から排出されたガスは空気中を移流・拡散して船上および周辺の空気を汚染し環境濃度が形成される。汚染された空気を呼吸することにより人はベンゼンに曝露される。表-1にガスの発生と推定排出場所を示す。

表-1 ガスの発生と推定排出場所

作業形態	発生機構	排出場所
積み荷役	積み荷からの蒸発	ベント管
	漏洩液からの蒸発	ローディング・アーム接続部近傍
	シール部等からの漏洩	弁、フランジ部等
航海	積み荷からの蒸発	ベント管
	シール部等からの漏洩	弁、フランジ部等
揚げ荷役	揚げ該当タンク以外のタンクの積み荷からの蒸発	ベント管
	漏洩液からの蒸発	ローディング・アーム接続部近傍
	積み荷からの蒸発	タンクハッチ
	シール部等からの漏洩	ポンプ・シール部等
タンククリーニング	揚げ荷後の残液からの蒸発	ベント管
	揚げ荷後タンク内残留ガス	タンクハッチ
	配管系に残留した貨物のドレインよりの蒸発	甲板上やポンプ室のドレイン場所
	クリーニング作業・作業確認	貨物タンク内

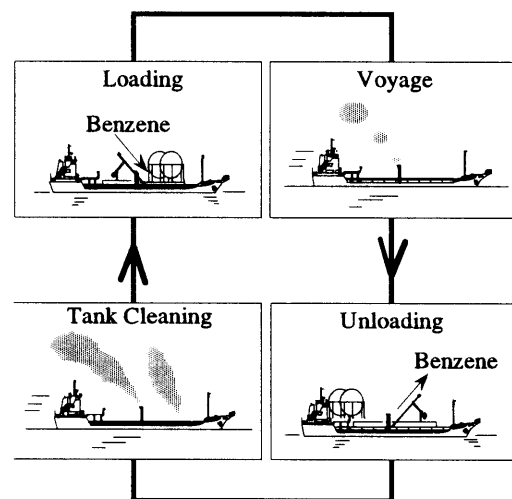


図-3 輸送サイクル

6. 実船計測

ケミカルタンカーで輸送している揮発性化学物質は、荷役作業及び輸送中にも船内で有害ガスを発生する。発生ガスは船内外に拡散し、乗組員及び港湾作業員が呼吸器、皮膚、消化器等から体内に吸収している。

表－2.1 作業形態と測定条件

船舶番号	101	102	103	104	108	109	112	102	105	108	109
測定月	5	7	2	2	8	9	11	7	8	8	9
作業形態	L0	L0	L0	L0	L0	L0	L0	V0	V0	V0	V0
総トン数 (トン)	499	498	489	498	499	263	499	498	499	499	263
積載量 (トン)	1000	1000	500	1000	500	500	1000	1000	1000	500	500
採取時間 (分)	215	200	94	270	90	150	180	70	1730	90	150
計測場所	食堂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	操舵室										
	ベント管下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ポンプ室	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ベント管出口	○					○				
平均気温 (℃)	20	31	9	9	30	30	15	31	24	30	30
平均風速 (m/s)	2	5	5	0	—	—	—	—	—	—	—

表－2.2 作業形態と測定条件

船舶番号	111	106A	102	110	108	106B	106A	107	110	113	106B
測定月	10	7	7	7	8	9	7	9	7	9	10
作業形態	V0	UL	UL	UL	UL	UL	TC	TC	TC	TC	TC
総トン数 (トン)	499	344	498	498	499	344	499	344	498	499	344
積載量 (トン)	500	500	1000	500	500	500	1000	500	500	1000	500
採取時間 (分)	1080	100	110	150	90	210	180	300	150	2060	210
計測場所	食堂	○		○	○	○	○		○	○	○
	操舵室		○					○			
	ベント管下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ポンプ室	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	ベント管出口	○									
平均気温 (℃)	23	23	31	30	30	23	23	23	30	34	23
平均風速 (m/s)	—	4	—	6	—	6	—	10	6	4	6

L0：積み荷役

V0：航海

UL：揚げ荷役

TC：タンククリーニング

そのため、実船では、船内各所における環境ガス濃度及び当該船舶に従事している乗組員個人の作業形態毎の曝露濃度を測定した。

6.1 環境濃度測定

国内で化学物質を輸送している船舶は、500 から 1000 トン積みの船舶が主で、乗組員が 4～6 名の内航船舶を対象とした。主要輸送地域は東京湾内の千葉及び川崎地区であった。

対象揮発性ガスとして発ガン性の恐れがあるベン

ゼンとし、主な測定場所は図－2 に示した通りである。

6.1.1 測定船舶

3 年間の研究期間中に測定した対象船、作業形態、計測条件等を表－2.1, 2.2 に示す。

積載量別では 500 トン船舶 4 隻、1000 トン船舶 10 隻（船舶番号 106 は平成 9 年及び 11 年の 2 回測定した）、合計 22 ケース、積載量別では、500 ト

ン13ケース、1000トン9ケースについて測定した。

環境濃度測定は、同一船舶で積み荷役からタンククリーニングまで作業形態ごとに実施することが理想的であったが、航海中及びタンククリーニング中には、ガスの採取機器の操作を当該船舶の乗組員に依頼しなければならないことから、同一船舶で連続して実施することができなかった。

しかし、積み荷役から揚げ荷役までと揚げ荷役からタンククリーニングまでの測定を、乗組員の協力によって数ケース実施することができた。

船内の大気中環境濃度は発生源より排出されるガスが空気中を移流、拡散することによるもので、正確なデータ解析には気象情報が必要とされるが、実船では表に示されている平均気温・風速等のみで、これらに関する十分な計測データは得られなかった。特に、タンククリーニングと航海中の気象等の各種データ取得が難しかった。

6.1.2 測定場所

ガス濃度を測定する場所の決定は現場調査や聞き取り調査から行い、船内での荷役作業等によってベンゼンガスが発生すると思われる場所と、乗組員が休憩等によって長時間過ごす居住区を選定した。

ベンゼンの積み荷役を行う場合に発生するガスと、航海中に積み荷のベンゼン液面から発生するガスを放出する甲板上のベント管付近と、揚げ荷時等に使用される荷役ポンプが稼働し、ガス濃度が比較的高いと考えられるポンプ室、居住区として乗組員が操船作業及び食事をする場所である操舵室または食堂とした。

積みおよび揚げ荷役終了後のベンゼンを移送するローディングアームを切り離すときに、パイプ内に残留しているベンゼン液が漏出する図-4に示す船内配管との接続場所(液受皿付近)においても測定を行った。

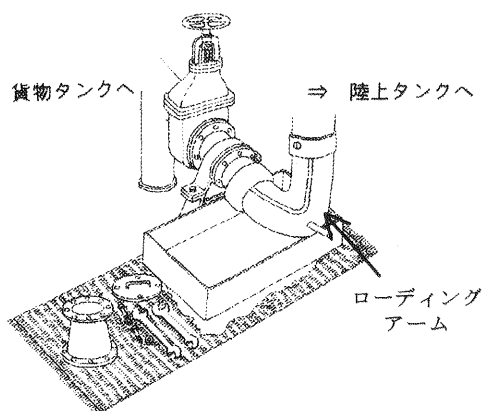


図-4 ローディングアーム（接続部）

6.1.3 ガスの採取及び分析方法

ケミカルタンカーの場合は、船内に電気的な火花等が発生する恐れがある一般のガス測定機器を用いることができないため¹⁾、ガスを電気式ではなく自動的に採取する機器を用いることとし、採取及び分析方法は平成9年環境庁大気保全局によって示された「有害大気汚染物質測定マニュアル」に従って行った²⁾。ガスの採取容器は、あらかじめ真空ポンプで1mmHg以下に脱気された内容積15Lのステンレス製のキャニスター(写真-1)を用い、各測定場所に設置し、荷役作業ごとに作業の開始と同時に容器のニードルバルブを解放し、作業の終了時に閉じ、作業時間の間、一定流量でガスを採取した。採取容器の採取口の高さは床から1~1.5mとした。

また、積み及び揚げ荷役時の液を輸送するローディングアーム切り離し時の測定は、液受皿近傍および風下で手動ポンプによって採取袋にガスを採取した。

ガスの分析方法は、採取したガスをガスクロマトグラフ質量法にて分析し、ガス採取時間内の平均ベンゼンガス濃度を得た。

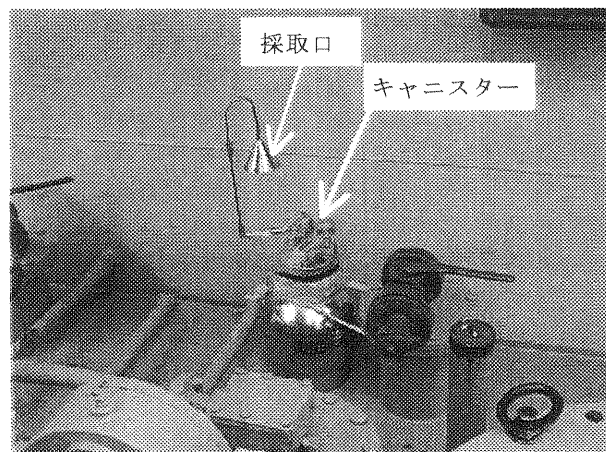


写真-1 甲板上のキャニスター設置状況

6.1.4 測定結果

6.1.4.1 作業形態ごとの環境濃度

測定した居住区(操舵室を含む)、ポンプ室、ベント管下における作業形態ごとの測定結果を以下に示す。

(1) 積み荷作業中の環境濃度

ベンゼンは陸上のポンプによって貯蔵タンクから船の貨物タンクに、タンク深さの98%程度まで積み込まれた後ポンプを停止し、積み込み管系に残留し

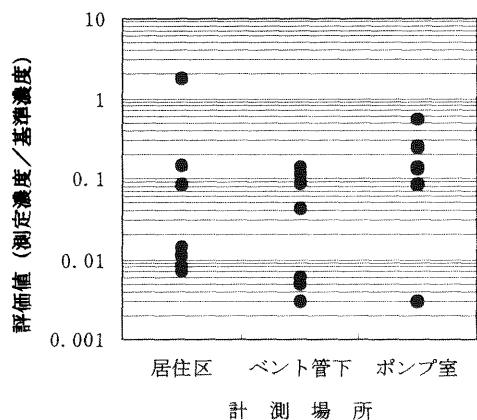


図-5 積み荷役中の環境濃度評価値

たベンゼンは窒素ガスを用いて陸側より船側に押し込まれる。積み荷役中の主たるガス排出源はベント管で、貨物の蒸発によってタンク内で発生したガスが放出される。

積み荷役中に測定した環境濃度を IMO で勧告されている 24 時間中 8 時間作業中の平均濃度 (TW A) 1ppm を基準濃度とし全測定濃度データを除して評価値として表示したのが図-5 である。データ点は一船ごとの測定値を示す。

ベント管下及びポンプ室の環境濃度は 1ppm 以下であった。居住区域には 1ppm を超える箇所があったが、これは作業着等にベンゼン液が付着したまま乗組員が居住区に入った可能性があり、それを除外して整理したのが図-6 である。ここで算術平均濃度は船舶ごとの測定濃度値の算術平均値であり、加重平均濃度は船舶ごとの測定濃度値に測定時間を掛けて全測定船の和を求め、測定時間の和で除して濃度とした。これから、加重平均濃度は居住区 0.047、ベント管下 0.07、ポンプ室 0.23ppm となり、ポン

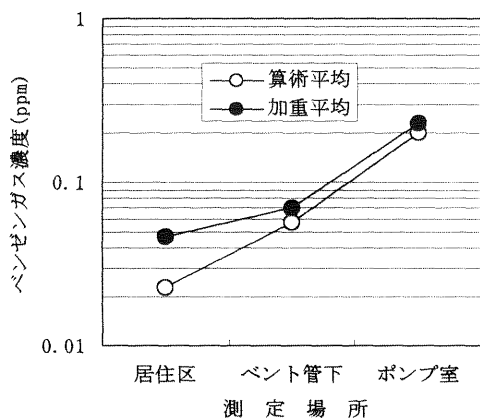


図-6 積み荷役中の平均環境濃度

プ室が一番高いが 1ppm 以下である。計測場所で船ごとのデータは大きくばらつくが計測場所ごとのデータのばらつきは、あまり変わらない。

(2) 航海中の環境濃度

積み荷を満載した航海中に測定した環境濃度を積み荷役と同様に評価値として表し図-7 に示す。

航海中の環境ガス濃度は、居住区に比べ、ポンプ室が一部高い値を示したが、ほぼ 1 ppm 以下である。これは航海中の主なガス発生源がベント管で、大気中に拡散後、急速に濃度が低下するためと考えられる。

各測定場所毎の平均濃度を図-8 に示す。各測定場所の加重平均濃度は、居住区 0.017、ベント管下 0.064、ポンプ室 0.15ppm と積み荷役時と同様居住区、ベント管下、ポンプ室の順に高くなる。

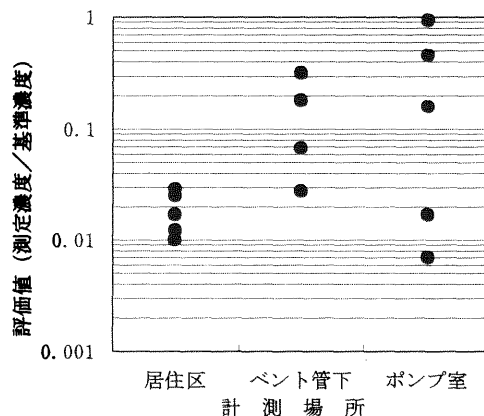


図-7 航海中の環境濃度評価値

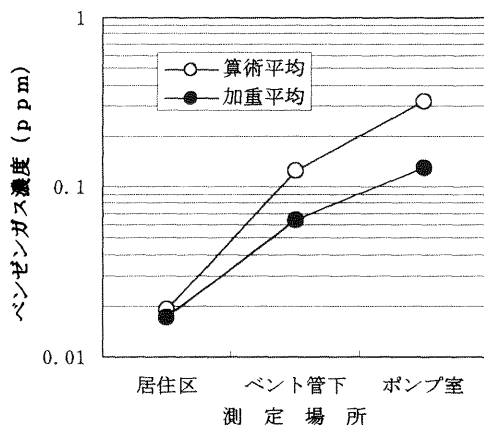


図-8 航海中の平均環境濃度

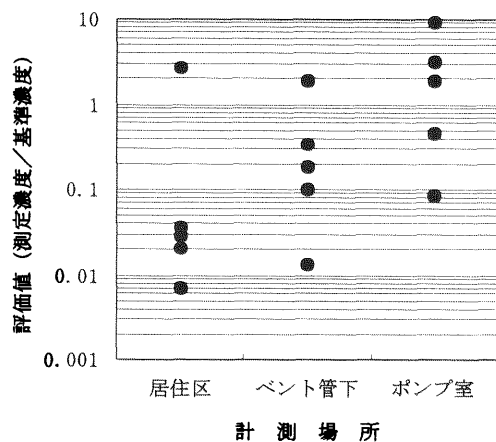


図-9 揚げ荷役中の環境濃度評価値

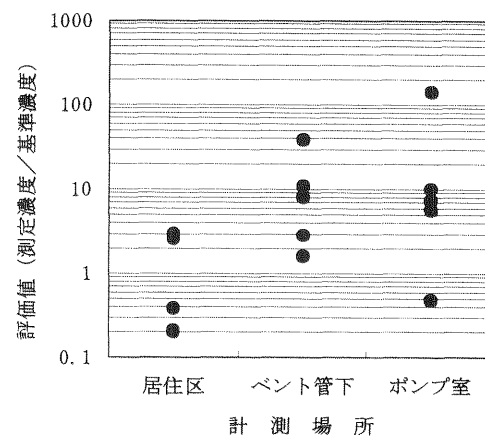


図-11 タンククリーニング中の環境濃度評価値

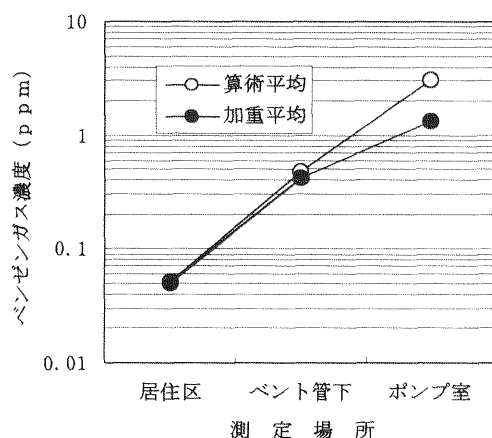


図-10 揚げ荷役中の平均環境濃度

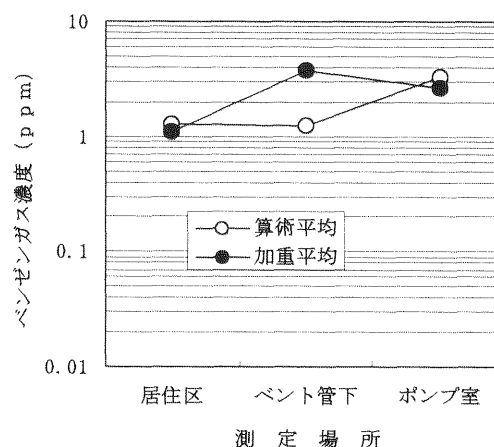


図-12 タンククリーニング中の平均環境濃度

(3) 揚げ荷役中の環境濃度

船舶から陸上のタンクへの荷揚げは船舶に備えられたポンプによって実施される。

図-9は揚げ荷役中の濃度を評価したものである。これから、居住区及び甲板上では濃度が低い船が多く、ポンプ室の濃度は高い。

各測定場所の加重平均値は図-10に示すとおり、居住区 0.05、ベント管下 0.42、ポンプ室 1.3ppm となっている。

ポンプ室の平均値は 1 ppm 以上であることから、ここで作業を行う場合は、防具が必要と考えられる。

ポンプ室の濃度が高いのは、船舶に備えているポンプで貨物を陸上の貯蔵タンクへ送り込むとき、配管システムのシールから漏れが発生するために他の場所に比べ高い値を示すものと考えられる。また、測定データのばらつきは、積み荷役及び航海中に比べて大きい。

(4) タンククリーニング作業中の環境濃度

各測定場所の環境濃度評価値を図-11に示す。

これから、タンククリーニング中の環境濃度評価値の多くは、1を上回り、ポンプ室では100を越す場合があることがわかる。このように、高濃度になる原因として、タンククリーニングを行う場合、タンクハッチを開放して水洗浄後通風洗浄を行っているためと推測することができる。

図-12には加重平均値と、算術平均値を示している。

これから、加重平均濃度は、居住区で 1.1、ベント管下で 3.7、ポンプ室では 2.6ppm である。このようにベント管下の濃度が高いのは、主なガス発生源が甲板上にあるためと考えられる。

この結果が示すとおり、各場所とも加重および算術平均値で基準濃度の 1ppm を超えており、この作業時における対策の必要性が指摘される。

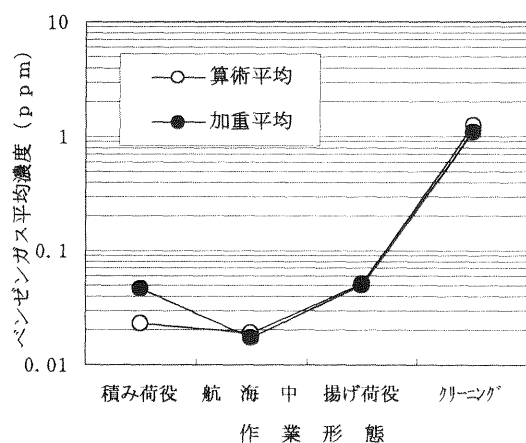


図-13 作業形態毎の居住区平均環境濃度

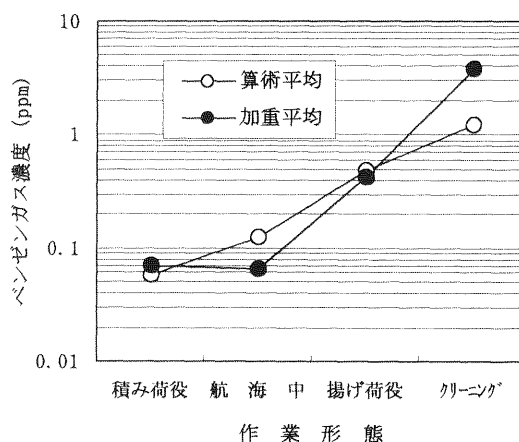


図-15 作業形態毎のポンプ室平均環境濃度

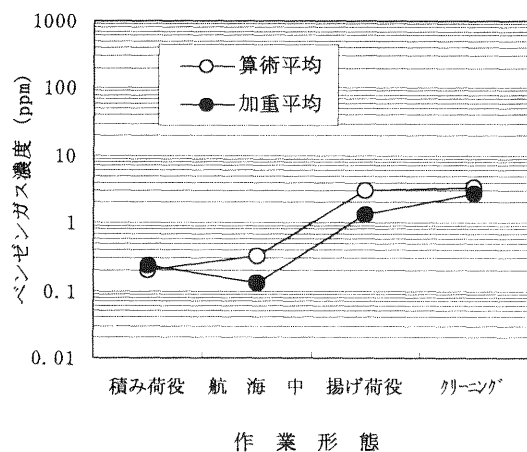


図-14 作業形態毎のベント管下平均環境濃度

6.1.4.2 測定場所ごとの環境濃度

(1) 居住区での作業形態ごとの平均環境濃度

居住区での作業形態毎の環境濃度を図-13 に示す。

この図から明らかなように、積み及び航海中の環境濃度はほぼ同一濃度と見なすことができ、揚げ荷役及びタンククリーニング中の濃度は積み荷役及び航海中に比べ高くなっている。また、算術平均と加重平均とが殆ど同じ値を示していることから、居住区内では船ごとの濃度の変化があまりないことが分かる。

(2) ベント管下での作業形態ごとの平均環境濃度

図-14 にベント管下における作業形態毎の平均環境濃度を示している。これから、平均環境濃度は積み荷役と航海中に比べ、揚げ荷役とタンククリーニングの場合は基準値を超える高い濃度を示した。

積み及び航海中の平均濃度は、0.2ppm、揚げ及びタンククリーニングは2ppmと高く、作業中には防具を装着する必要がある。

(3) ポンプ室での作業形態ごとの平均環境濃度

図-15 にポンプ室での作業形態ごとの平均環境濃度を示す。図から明かなように、ポンプ室でも居住区及びベント管下と同様の傾向を示し、ポンプ室では1ppmを超えている。

ポンプ室の高濃度は揚げ荷役中にはポンプが稼働し、シール等から液が漏洩しているためであり、タンククリーニング中には配管系を解放し、残液除去作業を行う時に発生するガスが原因と考えられる。

(4) 連続計測結果

積み荷役からタンククリーニングまで四つの作業形態すべてを通した計測は実施できなかったが、積み荷役から揚げ荷役まで測定した例を図-16, 17 に示す。

図-17 の船舶番号 108 のように揚げ荷役に比べ積み荷役と航海中の環境濃度が比較的低く、測定場所による濃度は居住区、ベント管下、ポンプ室の順に高くなっている。これは前述の作業形態ごとの濃度の傾向と一致し、図-16 の船舶番号 102 は作業形態による違いがあるがおおよそ同じ傾向を示している。図-18 は、同じ船舶を約2年の間に2回測定したものである。計測時期は7月と10月で同一気温であったが濃度の傾向は異なっている。特にベント管下では両作業とも2回の計測結果で1桁以上の大きな差が生じている。ベント管下は温度だけでなく、風向、風速などの気象条件の影響を受けやすい場所である。

本結果は同一船舶であっても環境濃度は測定時の

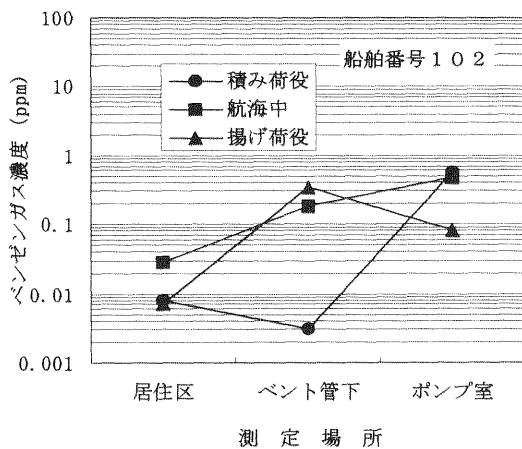


図-16 連続環境濃度測定結果

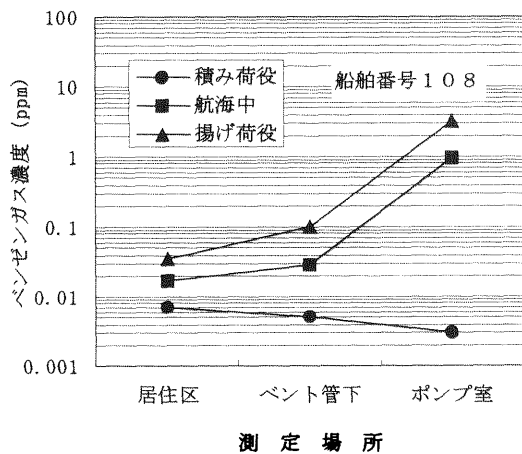


図-17 連続環境濃度測定結果

気象条件等の影響を大きく受け、同一濃度とならないことを表している。

(5) ローディングアーム切り離し時の環境ガス濃度

図-4 のローディングアーム周辺での環境濃度を測定した結果は、荷役機器（特に船舶及び陸上のポンプの性能）及び作業方法によって大きく異なり、作業の中心部（液が漏洩している場所）と風上および風下部にて測定した環境濃度の値は下記の通りである。

中心部 : 0.055~310 ppm

風下1m : 150 ppm

風下5m : 52~58 ppm

風上1m : 1.3 ppm

通常接続部よりおよそ 10L 程度の残液が漏出

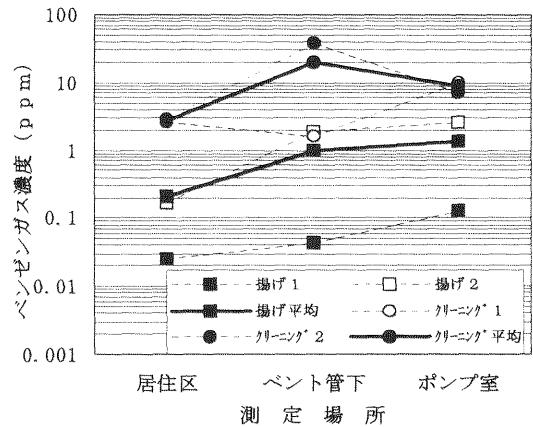


図-18 同一船舶環境濃度計測結果

するため、環境濃度が高く最高 310ppm、風下5mでも 58ppm となっている。

接続部は殆どの乗組員が集中して作業を行っている場所であり、揮発性ガスの低減化が望まれるとともに、作業時には防具の装着が必要である。

6.1.4.3 環境濃度測定のまとめ

ケミカルタンカーの環境濃度について 22 ケースの測定を行った結果、以下の事項が明らかとなった。

- ① ベンゼン輸送船上の加重平均環境濃度が表-3 のように得られた。

表-3 加重平均環境濃度のまとめ(単位:ppm)

	居住区	ベント管下	ポンプルーム
積み荷役	0.05	0.07	0.23
航海	0.017	0.064	0.15
揚げ荷役	0.05	0.42	1.3
クリーニング	1.1	3.7	2.6

- ② 環境濃度は居住区、ベント管下、ポンプ室の順で高くなっており、居住区ではほぼ 1ppm 以下の濃度となるが、ベント管下及びポンプ室では確実に 1ppm を超えることから、防具を装着する必要がある。
- ③ 環境濃度の平均値には、計測時間を加味した加重平均を用いるのが妥当と考えられる。
- ④ 連続計測を行った結果、同一船舶でも作業形態によって濃度が異なり、気象、荷役条件等の影響が大きいことが明らかとなった。
- ⑤ 積み及び揚げ荷役作業の終了後のローディングアーム切り離し作業時に発生する濃度は最高 310ppm と高く、作業時には乗組員はマスク等の防具を装着する必要がある。

表-4 曝露濃度測定船舶一覧表

船舶 番号	検 体 数				G/T	輸送量 ton	計測 月	輸送化学物質名
	LO	VO	UL	TC				
1	4				498	1000	5	船舶番号1～11番まで はベンゼンである。
2			1	5	499	500	7	
3	5	5	5	5	499	500	8	
4	5	5	5	5	499	500	8	
5	9	5	4	4	263	500	9	
6	6	6	6	6	499	500	10	
7	6	6	6	6	499	500	11	
8	6	6	6	6	499	500	11	
9	6	6	6	6	499	1000	9	
10	5	5	5	5	499	1000	9	
11	6	6	6	6	499	1000	10	
12	15				499	1000	1, 2	ベンゼン、キシレン、 トルエン
13	12				263	500	2, 3	

LO：積み、VO：航海、UL：揚げ、TC：クリーニング

6.2 曝露濃度測定

陸上における個人曝露濃度測定は、我国では、最近までほとんど行われていないが、人体に対して有害な化学物質の種類や量が増え、特に発ガン性物質、環境ホルモンが問題となるにつれ行われるようになった。

化学物質輸送に従事しているケミカルタンカーの乗組員は荷役作業中に有害なガスを呼吸器及び皮膚から吸収しているものと考えられる。このような現状から、ベンゼンを輸送している船舶に乗船している乗組員一人一人の曝露濃度を把握するため実船計測を実施した。

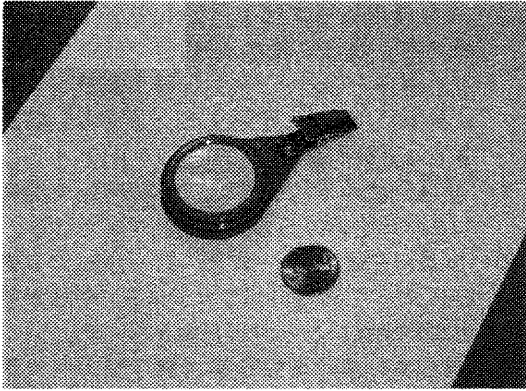


写真-2 有機ガスモニター、住友 3M No.3500
(ガスモニター横の丸は百円玉)

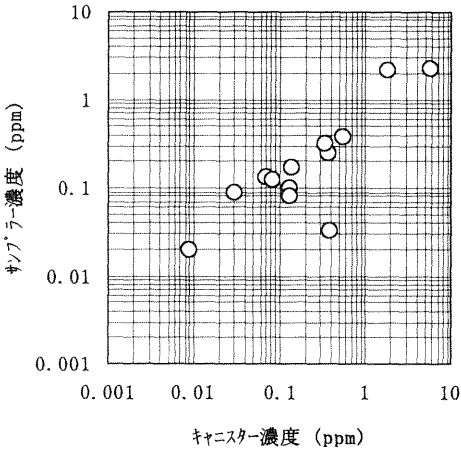


図-19 キャニスターとガスモニターとの相関

6.2.1 測定船舶

乗組員の曝露濃度を測定した対象船舶は、表-4に示す13隻で、そのうち積載量500トンが8隻、1000トンが5隻である。

曝露濃度測定用のガスモニター（写真2）総検体数は239個で、作業形態ごとに測定したガスモニター数は、積み荷役58、航海50、揚げ荷役50、タンククリーニング54個となる。

また、測定船舶番号12、13は、作業形態による区分をせず、ベンゼンおよび他の化学物質の積み荷役開始からタンククリーニング終了まで連続して測定を行った。

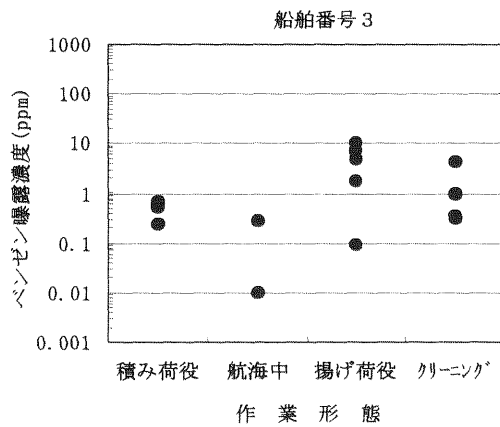


図-20.1 船舶番号3の曝露濃度

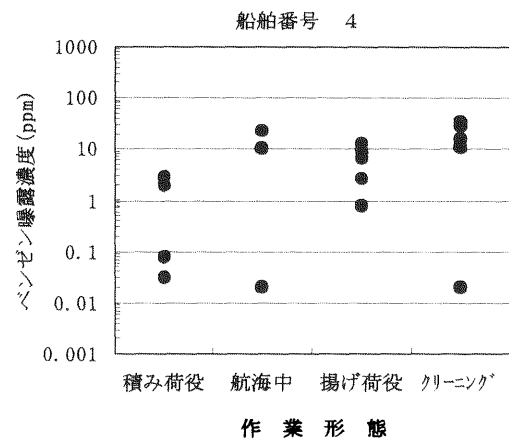


図-20.2 船舶番号4の曝露濃度

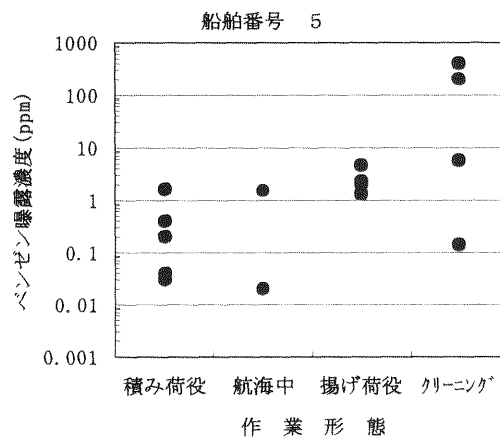


図-20.3 船舶番号5の曝露濃度

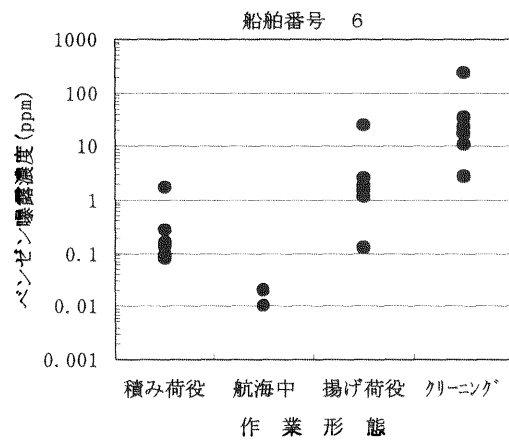


図-20.4 船舶番号6の曝露濃度

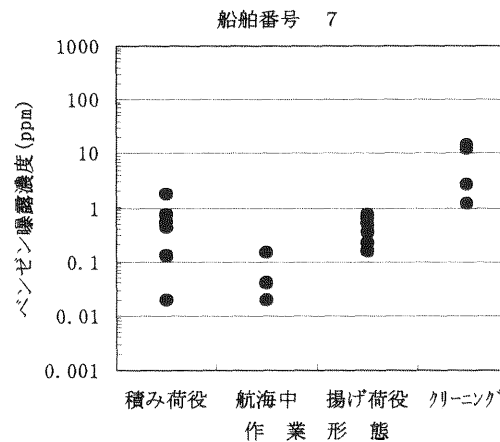


図-20.5 船舶番号7の曝露濃度

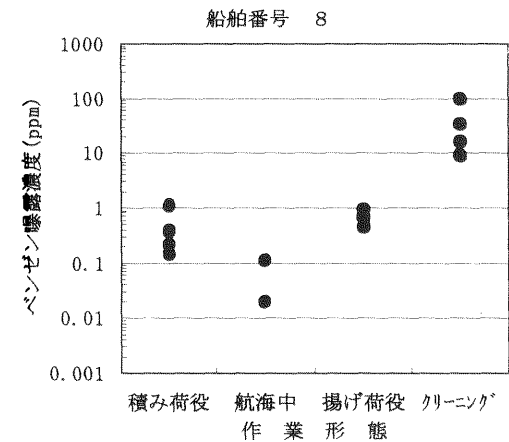


図-20.6 船舶番号8の曝露濃度

6.2.2 曝露濃度測定方法

曝露濃度測定用のガスモニターを調査した結果、風速が与える計測濃度への影響が少ない写真2に示

す住友3MのガスモニターNo.3500を選択した。

本ガスモニターは、計測面に張られたメンブレンにより風の影響を抑制し、ガスモニター本体内での

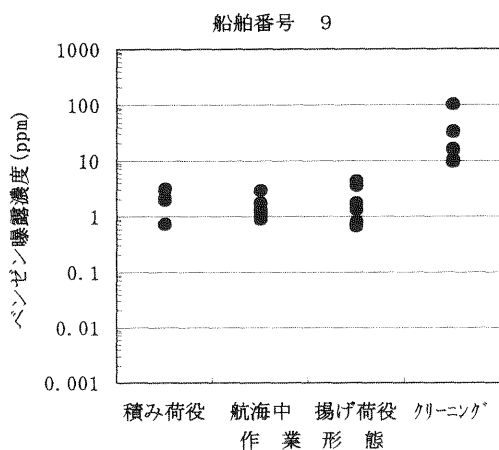


図-20.7 船舶番号9の曝露濃度

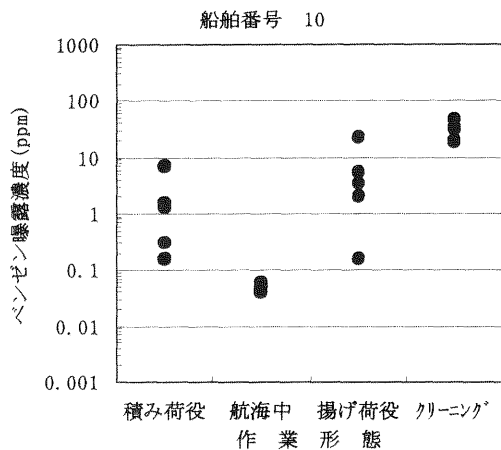


図-20.8 船舶番号10の曝露濃度

計測対象ガスの分子拡散現象を利用して各種有害ガス濃度を測定するもので、吸引ポンプ等が不要なため、容易に個人曝露濃度を測定できる³⁾。個人曝露濃度の測定は次のようにして行った。

作業開始とともに乗組員一人一人の作業着の襟元にガスモニターを装着した。作業終了後にガスモニターを回収して分析することにより、乗組員ごとの測定期間（作業期間）平均の曝露濃度を求めた。また、ガスモニターにより得られる濃度値の妥当性を検証するため、ガスモニターより正確な測定が行え、環境濃度の測定に用いたキャニスター（写真1）にガスモニターを取り付け、両手法により16検体測定した。濃度の比較結果を図-19に示す。これから、数点を除けばキャニスターとの相関があることが明らかとなり、本ガスモニターでの測定値をそのまま曝露濃度値として用いることとした。

6.2.3 曝露濃度測定結果

船舶毎の曝露濃度測定例を図-20.1～20.9に示す。測定点はそれぞれの作業形態における乗組員個人個人の値を示している。曝露濃度は、船舶毎に異なり濃度のばらつきが大きい。

積み荷役中の曝露濃度は航海中と同一かわずかに高い値を示した。また環境濃度と同様に曝露濃度は航海中から揚げ荷役中、タンククリーニングへと順次高い値を示している。また、表-5に各作業における曝露濃度算術及び加重平均値を示す。

表-5 曝露濃度平均値(ppm)

	積み荷役	航海	揚げ荷役	クリーニング [※]	全平均
算術平均	0.92	1.6	3.1	32	9.4
加重平均	0.99	0.64	2.8	23	6.8

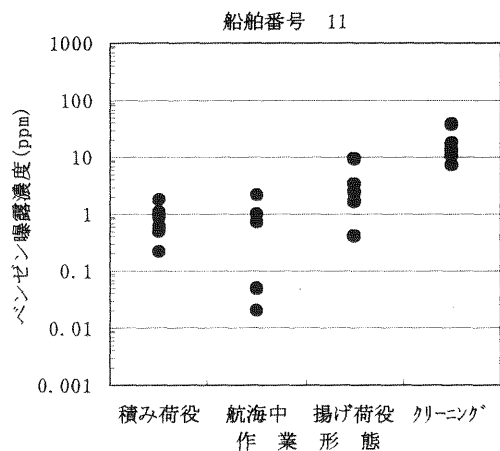


図-20.9 船舶番号11の曝露濃度

図-21には全船舶での全計測対象乗組員のベンゼンガス曝露濃度を示している。積み荷役及び航海中以外は加重平均濃度が1ppmを超えていることから、揚げ荷役及びタンククリーニング作業を行う場合は防具を装着する必要があると考えられる。図-22にベンゼン、トルエン、キシレンを輸送した船舶における乗組員の曝露濃度を、積み荷役からタンククリーニングまでの1輸送サイクルを通して測定した結果を示す。平均という形でデータを整理すると、曝露濃度は1ppmを超える。これより、ベンゼン輸送作業を行う際には健康上、環境濃度が高くなる時間と場所でマスクの装着が必要であることが明らかである。

6.2.4 曝露濃度測定結果の検討

曝露濃度の測定は船主等の協力を得て、乗組員にガスモニターを装着して実施した。その結果、多数の乗組員から曝露濃度データを取得できたが、図-

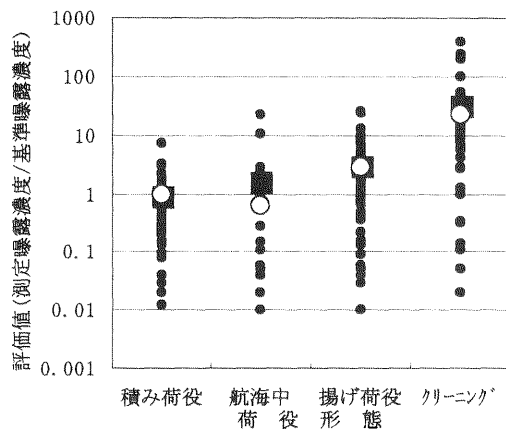


図-21 荷役形態における評価値
(■：算術平均、○：加重平均)

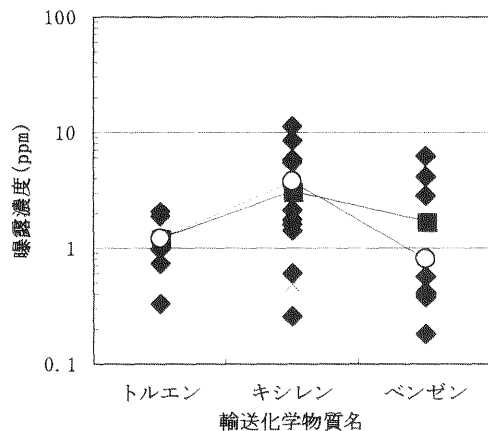


図-22 連続（積み～クリーニング）測定結果
(■：算術平均、○：加重平均)

20.1～20.9 までに示したように、個々の船舶によってデータが非常にばらついている。これは、船舶によって操船方法、荷役方法等が異なっていることと、測定時の気象条件、乗組員の作業内容の違いによるものと考えられる。

曝露濃度は図-21 で示したように、積み荷役以外は1 ppm を超えていることから、甲板上及びポンプ室における作業時には、マスクを装着する必要がある。また、環境濃度の計測結果に示したように、積み荷役、揚げ荷役後に行われるローディングアームの切り離し作業時は短時間ではあるが漏出した液体ベンゼンから高濃度のガスが排出されるため、特にマスクの着用が勧められる。

しかし現実には、船舶によって異なるが作業中にマスクを装着する乗組員は少数であり、装着を徹底する施策が必要である。

6.3 環境濃度と個人曝露濃度

本研究で計測した船内各所における環境濃度と個人の乗組員が曝露した濃度との関係を検討した。

陸上設備等における大気中濃度（環境濃度）は、作業場毎に無作為に定めた5箇所以上の測定点で濃度を測るA測定と、最も濃度が高くなる場所で10分間測るB測定の結果から環境濃度の評価を行っている。このように工場等陸上施設内の場合には、ある固定された空間内であるが、船舶の場合は作業場所自体が移動し、時間や作業内容により大きく濃度に変化する空間で作業を行う。その上本研究で計測した環境濃度は船内の3箇所の時間的な平均濃度のみであり、個々の乗組員の曝露濃度との関連を数値化することは難しい。表-6 に作業形態ごとの濃度比較を示す。これから明らかなように、環境濃度に対して曝露濃度は広い範囲に分布している。

表-6 環境濃度と曝露濃度

作業形態	濃 度(ppm)	
	環境濃度	曝露濃度
積み荷役	0.02～0.2	0.01～8.0
航 海	0.02～0.3	0.01～25.0
揚げ荷役	0.06～3.0	0.01～25.0
タンククリーニング*	1.0～4.0	0.02～400

7. 濃度の予測

7.1 排出濃度、排出量の予測モデル

ベンゼンを含む化学物質のケミカルタンカーによる海上輸送は、積み込み作業、航海、荷揚げ作業、タンククリーニングの4つの作業からなる。それぞれの作業におけるベンゼンの排出、拡散メカニズムが大きく異なるため、輸送サイクル全体で精度良く排出量、排出濃度を求めるには、それぞれの作業に対して計算モデルが必要となる。図-23 は各作業とそれに対応する計算モデルを示している。積み込み作業では、積み込まれる液体ベンゼンから蒸発するガスが大気中に排出される濃度の時間履歴を求めるための計算モデルである。揚げ荷役の計算モデルでは揚げ荷役終了後にタンクの壁面、底面に付着し、残留する液体ベンゼンの総量を求める。タンククリーニングの計算モデルでは揚げ荷役後、タンクに残留する液体ベンゼンからの蒸発を考慮し、排出されるベンゼン濃度の時間履歴を求める。ここで航海中の排出濃度、排出量を求めるモデルは示されていない。航海中の排出量は船体の動揺、日射などの気象条件により左右され、モデル化が困難な現象である。実船計測値によると4つの作業中最も環境濃度が低

いことが分かっており、この作業に対応する計算モデルの開発は行わなかった。また、積み込み、クリーニングの計算モデルで算出される濃度値は、タンク内ガスの排気口であるベントポストにおける濃度を表している。必要なデータは作業環境濃度や曝露濃度であるため、これらの濃度値は大気拡散モデルに渡され、空間における濃度分布が計算される。以下、積み込みモデル、揚げ荷役後のタンク内ベンゼン残留量の計算を含むクリーニングモデル、大気拡散モデルの各計算モデルについて記す。

7.2. 積み込みモデル

積み込み作業時のタンク内拡散は次の3つの機構により拡散が進行すると考えられる。

- 1) 積み込み初期における、液面の乱れにより誘発される液面上の渦拡散。
- 2) 渦拡散が影響しない程度の液面高さにおける分子拡散。
- 3) タンクと排気管接続部付近の3次元的な流れの構造による移流の影響。

これらの影響を分離して模型貨物タンクによる実験を行い、タンク内拡散現象の機構を解析し、モデル化を行った。

タンクへのベンゼンの積み込み作業を再現するため、1/10 縮尺の貨物タンクの模型を含む「揮発性ガ

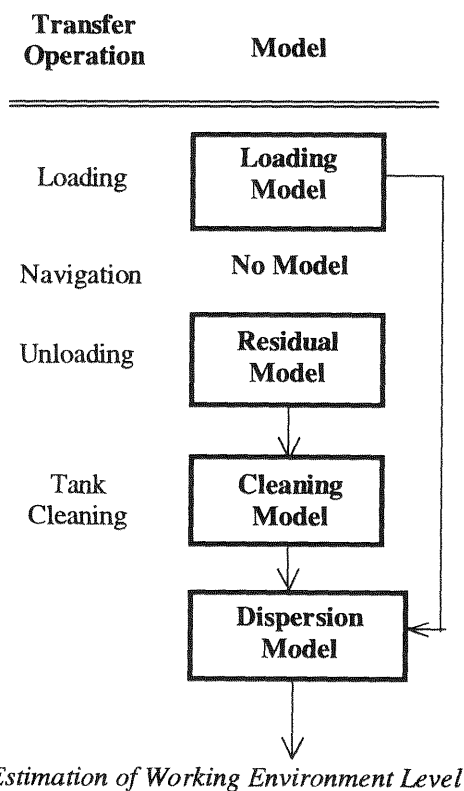


図-23 作業環境濃度予測モデルとデータの流れ図

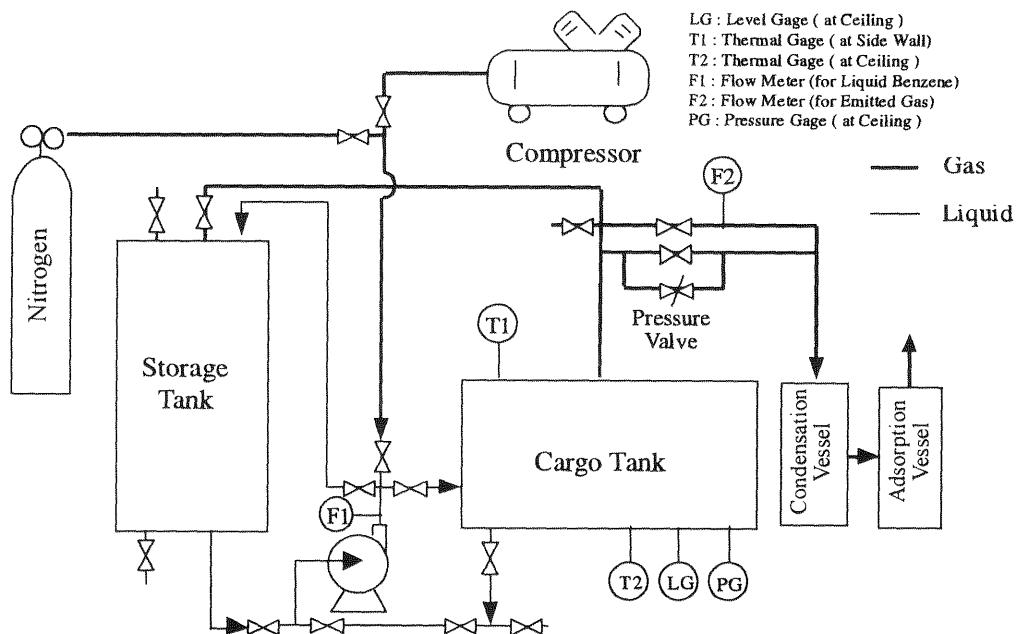


図-24 揮発性ガス発生試験装置

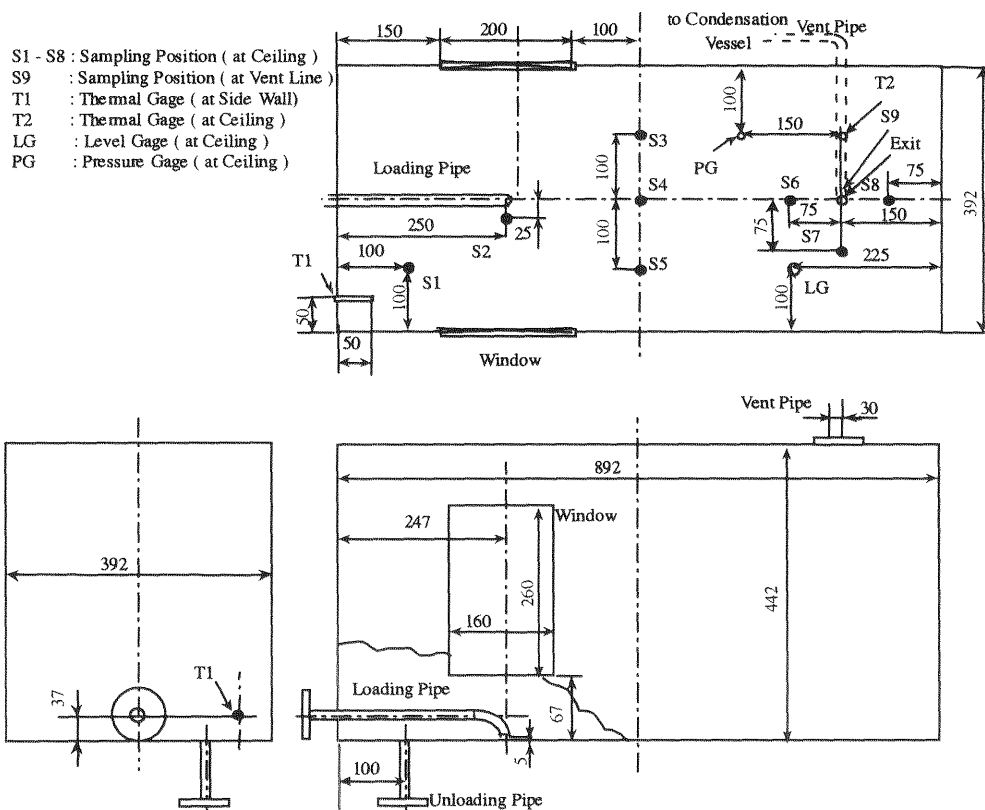


図-25 1/10 縮尺模型貨物タンク

ス発生試験装置」を作成した。図-24に装置全体のガス、液体の流れ図を、図-25には模型貨物タンクの概要を示す。

模型タンクへの液体ベンゼンの積み込み前には防爆のため窒素ガスを注入している。窒素の配管は積み込み配管に接続され、一部の積み込み配管と貨物タンク及び排気管が窒素で満たされる。よってタンク内では、窒素を媒体として蒸発したベンゼンガスが拡散することになる。

貨物タンクから排出される気体は、貨物タンク天井に設置された排気管を通り、冷却水による凝縮器、活性炭が充填された吸着器によりベンゼンが除去された後、大気中に放出される。

7.2.1 模型貨物タンク

対象となるタンクは、ベンゼン輸送に最も利用される 499GT 内航ケミカルタンカーの最大貨物タンクである。このタンクは長さ 9m、幅 4m、高さ 4.5m であり、満載状態にすると約 150KL、130t のベンゼンを積み込むことができる。模型の縮尺は 1/10 で、図-25に示すように、計測のための各種装置及びタンク内の気体を採取するサンプリング口 (S1-S9) が取り付けられている。

また、両側面に窓ガラスを設置し、吐出口における液体ベンゼンの流入状況が目視できるようにしてある。吐出口は実船と同様、下向きにベンゼンが流入するように設置され、タンク底面から吐出口の端までは 5mm の距離がある。サンプリング管は液体ベンゼンの付着を防止するため、天井に設置されている。また、温度計が 2 つ、圧力計が 1 つ設けられ、実験中のタンク内の状態を監視できるようにしてある。液面高さは超音波により天井から液面までの距離を計測し、タンク高さから逆算して得られるようになっている。

7.2.2 一次元分子拡散

タンク内の液体から蒸発したベンゼンガスの拡散は、流れの影響がなければ垂直方向上向きに進行する一次元分子拡散方程式に従うはずである。後述する解析手法はこの拡散方程式を基礎としている。

1次元の分子拡散方程式は、

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (1)$$

ここで、

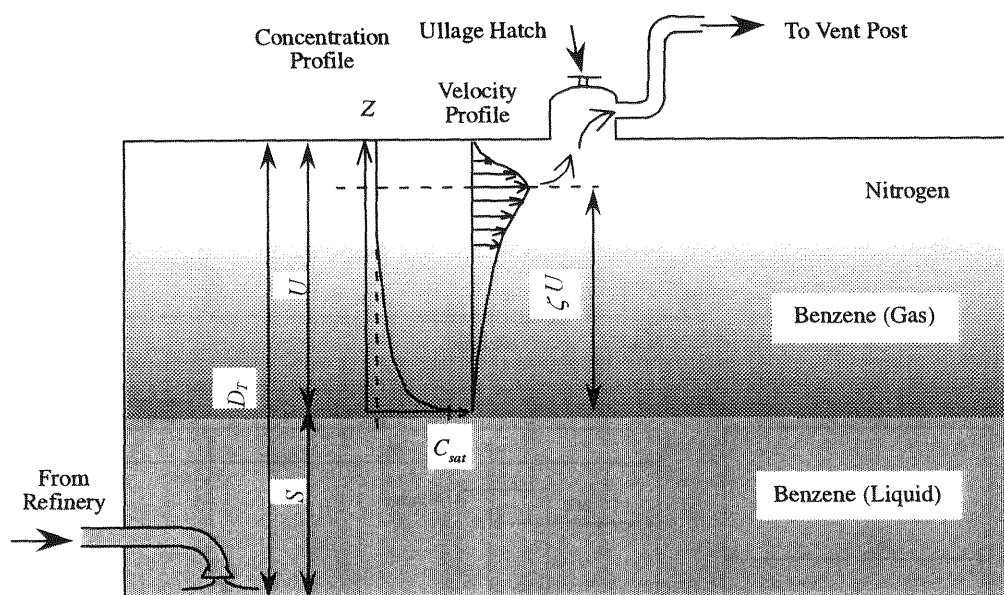


図-26 タンク内拡散の模式図

- t : 拡散時間(sec)
 D : 拡散係数(m^2/s)
 z : 垂直方向上向きで液面上に原点を持つ座標(m)
 c : 濃度(ppm 等)

また、境界条件は

$$c = c_{\text{sat}} \quad \text{at} \quad z = 0, \quad c = 0 \quad \text{at} \quad z = \infty \quad (2)$$

として、この解は次のようになる⁴⁾。

$$c = c_{\text{sat}} \{1 - \text{erf}(\xi)\}, \quad \xi = \frac{z}{\sqrt{4Dt}} \quad (3)$$

$$\text{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi \exp(-x^2) dx \quad (4)$$

ここで分子拡散係数は、Chapman-Enskog の理論より^{4)、5)}、また、飽和濃度 c_{sat} は Antoine の式⁶⁾より求めた。

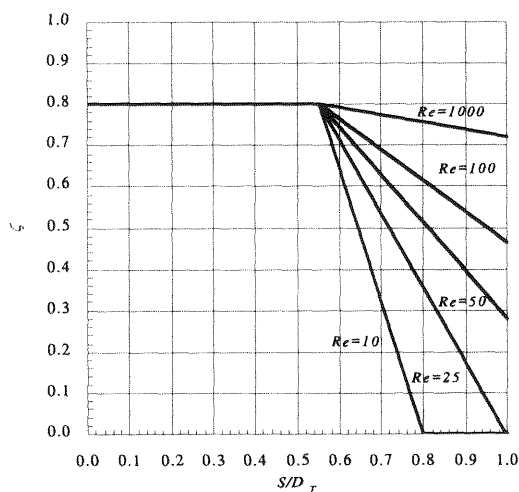
7.2.3 天井付近の移流の影響

「タンク内天井付近の三次元的な移流の影響」を評価するため実際の積み込み作業と同様、空の状態からベンゼンを連続して積み込み、各時間におけるタンク内の天井付近の濃度値と排気管内(図-25の採取位置 S9)の濃度を測定して両者の違いを観察した。実験結果より、液面高さが低い間は垂直方向に進行する一次元分子拡散に従い、液面が高くなって

も、排気管周辺を除いてほぼ分子拡散に従うことが確認されている。また、貨物タンクと排気管との接続部分周辺における三次元的な流れの構造による移流の影響が存在し、実験結果は分子拡散の仮定で計算された天井付近の濃度より大きな排出濃度を示すことが明らかとなった。

図-26 にタンク内の水平方向の流れ分布、分子拡散による濃度分布の模式図を示す。

この図に示す通り U はアレジ高さを示す。分子拡散を基礎とした計算結果は、式(3)中で $z=U$ として天井での濃度を排出濃度としている。実際には図-

図-27 補正係数 ξ の導出チャート

26に示すように、ベンゼンは天井より低い位置で排気管に向かう流れに輸送されてタンク外へ排出されることが考えられる。天井より低い位置の濃度は天井の濃度より高いことは明らかであり、実験値と分子拡散による計算値との差を表すことになる。ここでは排出される濃度の位置を天井に相当する $z=U$ ではなく、補正係数 ζ を用いて、 $z=\zeta U$ として、 ζ の挙動をモデル化した。図-27は補正係数 ζ 導出のためのチャートである。横軸は液面高さをタンク高さで除した S/D_T を示し、レイノルズ数 Re は次式により計算を行う。

$$Re = V_{SL} L / \nu_N \quad (5)$$

ν_N : 窒素の動粘性係数(m^2/s)
 L : タンク水平断面での対角線長さ(m)
 V_{SL} : 液面上昇速度(m/s)

窒素は理想気体とし、気温(タンク内温度)を用いて式(6),(7),(8)から算出した⁷⁾。

$$\nu_N = \mu_N / \rho_N \quad (6)$$

$$\mu_N = 17.6 \times 10^{-6} \left\{ \frac{397}{T_G + 104} \right\} \left(\frac{T_G}{293} \right)^{3/2} \quad (7)$$

$$\rho_N = \frac{M_N}{22.4} \times \left(\frac{273}{T_G} \right) \quad (8)$$

ここで、

μ_N : 窒素の粘性係数(Pa・s)
 T_G : タンク内温度(K)
 ρ_N : 窒素の密度(kg/m³)
 M_N : 窒素の分子量(28 g/mol)

図-27の ζ は式で表すと次のようになる。

$$\begin{cases} \zeta = 0.8 & , 0 \leq S/D_T < 0.55 \\ \zeta = m(S/D_T - 0.55) + 0.8 & , 0.55 \leq S/D_T \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$m = -13.7 Re^{-0.632} \quad (10)$$

補正係数 ζ を用いて、最終的に次式で求まる参照高さ z_{ref} を式(3)の z に代入して排出濃度を求める。

$$z_{ref} = \zeta U \quad (11)$$

7.2.4 液面上の乱れの影響

積み込み初期は液面が低いために、液面上に乱れが生じ、この乱れによりベンゼンガスの蒸発、拡散が助長される。この影響により形成されるタンク内垂直方向のベンゼン濃度分布は、前節の天井付近の移流の影響とは独立であると考ええる。ここでは、分子拡散係数に液面の乱れによる新たな拡散係数を加え、タンク内垂直方向へ拡散するベンゼンガスの濃度分布を導出する手法を示す。⁸⁾

実験方法は、まず、図-24の貨物タンクに、目標の液面高さまでベンゼンを積み込み、積み込み用の配管を貯液タンクから貨物タンクの積み出し用配管に切り替える。これにより、貨物タンク内の液体ベンゼンを循環させ(蒸発分のベンゼンを無視すれば)液面高さを一定に保持し、液面上の乱れも定常状態に保つことができる。この状態で、時間の進行によるベンゼン濃度分布の時間履歴を観測し、液面上の乱れによる拡散係数を評価した。

渦拡散は三次元の乱流構造による拡散機構であるが、簡易的に対処するため垂直方向への一次元拡散を仮定している。まず、積み込まれる液体の表面における乱れのエネルギーを次式により求める。

$$k = k_0 \exp \left(- \sqrt{\frac{2c^*}{3}} \frac{z'}{l} \right) \quad (12)$$

$$k_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_L}{A_p} \right)^2 \frac{A_p}{B_T L_T} \quad (13)$$

ここで、

k : 流体の乱れの(運動)エネルギー(m^2/s^2)、
 z' : タンク底面に原点を持つ鉛直方向上向きの座標(m)
 l : 吐出管直径(m)
 L_T : タンク長さ(m)
 B_T : タンク幅(m)
 Q_L : 積み込み流量(m^3/s)
 A_p : 吐出管断面積(m^2)
 c^* : 補正係数 (=25)

これより、ある液面高さ S を z' に代入して液面上の乱れのエネルギーが導出できる。ただし、吐出口が位置するタンク底面($z'=0$)でのエネルギー k_0 は式(14)のように吐出口からのエネルギー流入量をタンク水平断面で除した値を用いている。

次に液面上のタンク内気相部のエネルギー分布にも式(13)を適用する。この場合 z' は液面からの距離 z に置き換えられる。さらに、液面上では液体の動きに一致して気体が運動するものと考え、液面直上

の気体の速度は液面での液体の速度に等しいと置ける。よって境界条件である、 k_0 は式 (13) の代わりに液面上での $k(z'=S)$ を用いる。最後に、渦拡散係数はレイノルズのアナロジにより渦動粘性係数と同じ値を用いるとする。

渦拡散係数を用いて、濃度の拡散方程式は次のように表せ、数値解析により計算する。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D_{eff} \frac{\partial c}{\partial z} \right\} \quad (14)$$

$$D_{eff} = D + D_i = D + l\sqrt{k} \quad (15)$$

模型タンク内の拡散係数の垂直分布を図-28に示す。液面の高さはベンゼンをタンクとポンプの間で循環させることにより 6, 11(mm)に保持し、液体の吐出流量は 12(L/min)である。横軸は液面からの高さを示している。この図から渦拡散係数は液面から離れると急激に減少することが分かる。なお、式(15)、右辺第一項の分子拡散係数は $0.1(\text{cm}^2/\text{s})$ のオーダーであり、液面直上では一桁以上大きな値となっている。

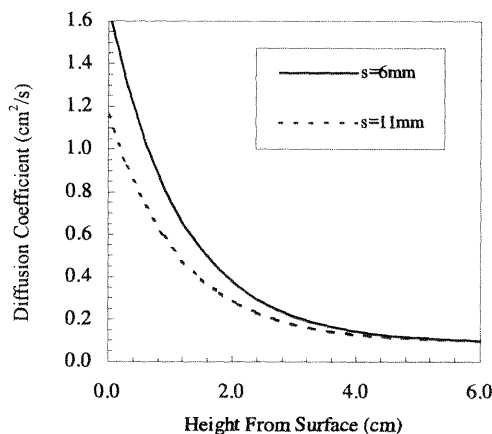


図-28 渦拡散係数の分布

7.2.5 計算結果

7.2.3、と 7.2.4 より 7.2 に示した 3 つの拡散要素を考慮した計算モデルができた。これより 499GT ケミカルタンカーの貨物タンク(長さ 7.1m、幅 5m、高さ 4.0m、積み込み管直径 0.15m、流量 144.7KL/h、大気温度 26℃、液体ベンゼン温度 23℃)にベンゼンを積み込む際に排出される濃度を計算し計測値と

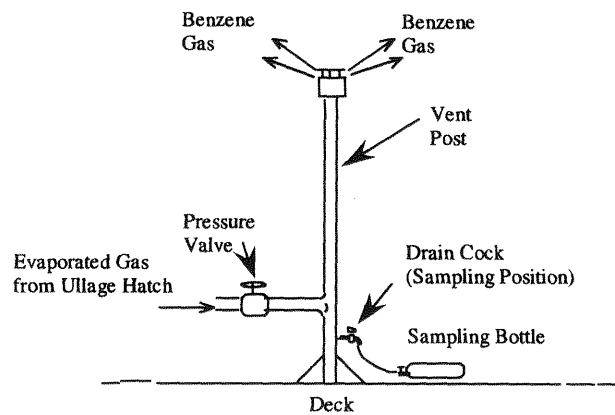


図-29 実船における積み込み作業時の排出ガス採取方法

比較してみる。なお、計測値を得るため、実船では次のような方法を使った。積み込みは左右舷を 1 組として組毎 (2 タンク同時) に積み込まれ、タンク内で蒸発したガスはタンク天井 (甲板) に取り付けられた排気管を通り 4 タンク共通のベントポストから船外へ排出される。1 組のタンクが満載状態になると次の組に配管を切替えるので、ガスの採取は最初に積み込む 1 組目の作業の間とした。あらかじめ真空ポンプにより脱気された内容積 1 L の真空瓶を図-29 に示すようにテフロン管を介してカーゴタンクの排気管が集約されるベントポストのドレンコックに接続した。タンク内のベンゼン液面がある高さ (ある積み込み時間) になった時、ドレンコック及び真空瓶のコックを開放して瞬間的にガスを採取した。この採取作業を繰り返し、ある液面高さの

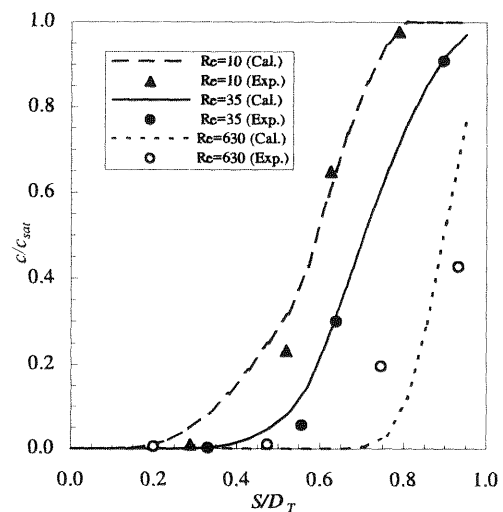


図-30 排出濃度と液面高さの関係

時に排出されるベンゼン濃度の関係を得ることとした。また、採取されたガスのベンゼン濃度はガスクロマトグラフにより分析された。

図-30 に排出濃度と液面高さとの関係を示す。なお、排出濃度は飽和濃度、液面高さはタンク高さで無次元化されている。また、図中に示す Re は式 (5) で定義したレイノルズ数で、黒い記号は模型の実験結果、白抜き記号は実船計測値である。図より濃度の急激な上昇が捉えられており、定性的には妥当な結果が示されている。模型実験では、ほぼ分子拡散により拡散が進行し、精度の良い結果が得られている。しかし、実船での計測値は液面がタンク高さの70%程度で濃度の上昇が見られるが、計算結果では、さらに液面が上昇しないとこの濃度に達しない。実船計測では積み込まれる液体ベンゼンが大気及びタンク内温度より高い温度であったため、液面直上に温度の拡散が生じ、今回考えなかった自然対流の

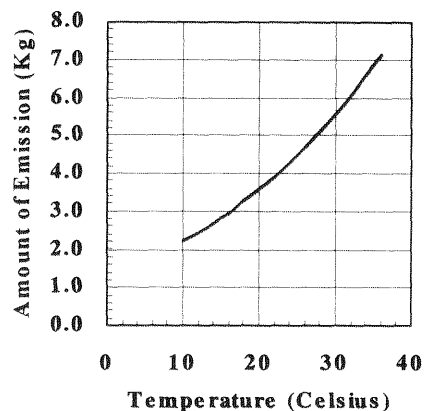


図-31 排出量とベンゼン温度の関係

影響があるはずである。また、モデル化に際し設定した大胆な仮定も誤差の要因となる。しかし、全体的な傾向から、排出濃度のオーダーを予測する上で

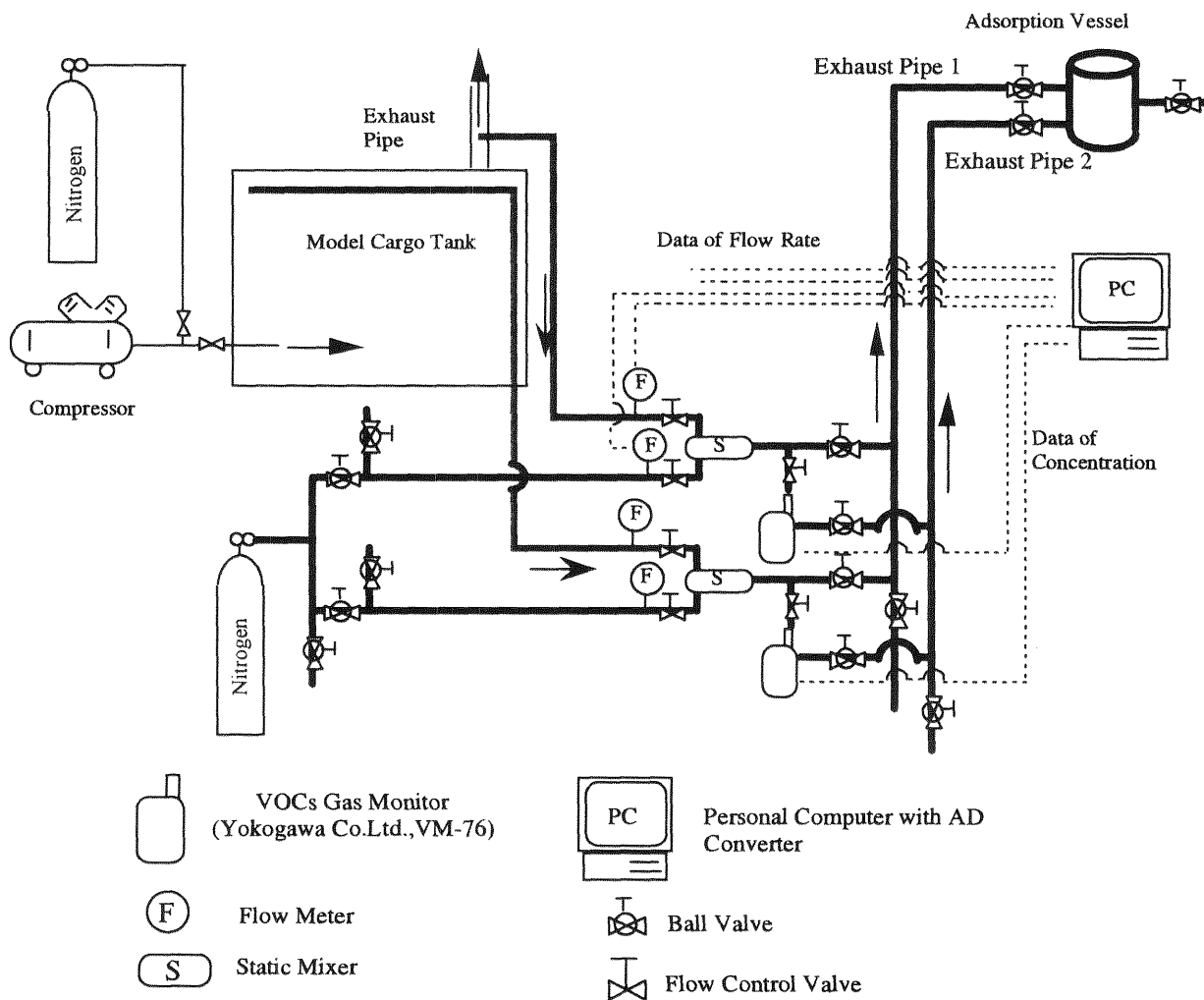


図-32 自動採取、分析装置の概略図

は十分な精度を持った計算モデルであると考える。

図-31では図30で示した実サイズの貨物タンクの計算条件と同じであるが、気温（および液体ベンゼン温度）を変化させた時の排出量の試算結果を示している。飽和濃度は温度に対して敏感であるため、温度が下がると排出量は急激に低下する。温度30度と10度では2倍以上の排出量の差となり、温度制御が排出量抑制の観点から有効であることがわかる。

ここで示した積み込みモデルにより、考えられる3つの拡散機構を考慮し、簡易に排出濃度が得られるようになった。モデル化に際してはできるだけ物理的要因を取り込み、なおかつ、市販のPCで利用できる表計算ソフトで計算可能なものとなった。

7.3 クリーニングモデル

タンククリーニング作業中に排出されるガス濃度の計算モデルについて記す。タンククリーニングは揚げ荷役に続いて行われる作業であり、次に積載される貨物との混合を防ぐために行われる。ここでは、クリーニングの方法として送風機を用いたベンチレーションを扱う。タンククリーニング中に排出されるベンゼンガスの起源は揚げ荷役後、タンク壁面、底面に付着、残留するベンゼン残液である。ベンゼンが液体の形で残るため、実船計測の結果ではクリーニング作業中に4つの作業の中で最大の環境濃度が観測されている。クリーニング中のタンク内で起こる蒸発、排出メカニズムを明らかにするため、模型貨物タンクを使った実験を行った。

7.3.1 計測装置

使用した模型貨物タンクは図-24、25で示される。この模型に付け加えて、タンク内のガスを自動採取、自動分析するための装置を新たに構築した。この装置の概要図を図-32に示す。このシステムは2系統の採取管と濃度を分析する2つのVOCモニター（横河電機、VOCガスモニター、VM-76）からなる。それぞれの系統はタンク内の任意の位置でガスを採取することが可能である。タンク内のガスは高濃度であるため、VOCモニターの測定可能な範囲まで希釈する必要がある。このため採取されたガスは窒素により100-1000倍で希釈した後、VOCモニターに導入している。希釈率は希釈する窒素の流量と希釈される採取ガスとの流量を計測することにより求めている。適当な希釈率を得るため、採取管、希釈ガスの供給管には流量調整用の弁が設けられており、VOCモニターに表示される濃度値により手動で流量調整を行っている。得られた流量データはAD変換器を通してリアルタイムでパーソナルコンピュータへ転送される。なお、VOCモニターで測定され

た濃度データは、あらかじめ設定された時間間隔でモニター内の記憶装置に保存される。実験終了後、VOCモニター内の濃度データはRS232Cポートを介してコンピュータへ転送され、希釈率により逆算して実際の濃度が計算される。

7.3.2 実験手法

7.3.2.1 蒸発率

タンク底面に残留している液体ベンゼンからの蒸発率は排出濃度、排出量を予測する上で重要な要素となる。この蒸発率を明らかにするため次のような実験を行った。

まず、貯液タンクからダイアフラムポンプにより貨物タンク底面が覆われるまで、液体ベンゼンを供給する。タンク内の液面高さは積み込み管の端の高さより低い位置に止めている。この手順の後、タンククリーニング用のガスである窒素が積み込み管を通して一定流量で吹き込まれる。吹き込みははじめから、ある程度の時間が経過するとVOCモニターで観測される濃度は一定値を示すようになる。この現象は液体ベンゼンからの蒸発によりタンク内気相部に供給されるベンゼンガス量とタンクから排出されるベンゼンガス量とが釣り合った状態であることを意味する。この状態を形成して濃度値、流量から蒸発量を計算した。この実験の排出濃度履歴を図-33に示す。

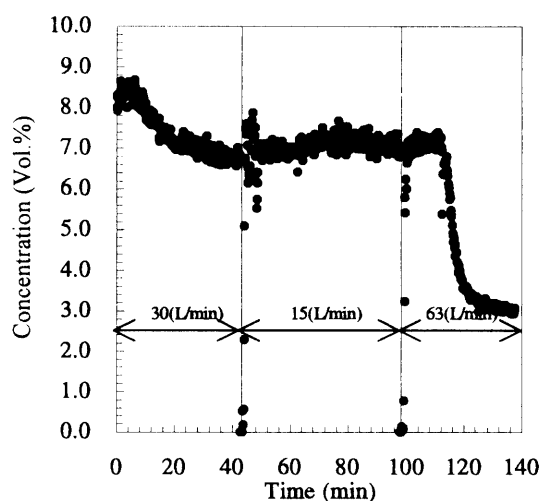


図-33 蒸発量実験中の濃度の時間履歴

7.3.2.2 タンククリーニング

実船での通常のタンククリーニングの手順と同様にして排出濃度の時間履歴を計測した。まず、貯液タンクからダイアフラムポンプにより貨物タンクに液面がある高さになるまで液体ベンゼンを移送し、

その後配管を切り替えて、貨物タンクから貯液タンクへ液体ベンゼンを戻した。これより、液体ベンゼンがタンク壁面、底面に付着する状態が形成される。これらの残留ベンゼンはタンククリーニング中に排出されるベンゼンガスの源となる。この手順の後、通常のタンククリーニングの作業が行われ、この期間で排出濃度が計測された。図34はこの手法によって計測された排出濃度の時間履歴の一例を示している。クリーニング時の流量は60(L/min)であり、タンククリーニングが行われる前に積み込まれる液体ベンゼンの液面高さは約200(mm)である。この結果よりクリーニング開始から10分、20分付近で排出濃度の傾きが変化する点が観測されていることが分かる。この現象は次のように説明できる。10分より前はクリーニング開始からすでにガス状になっていたベンゼンとタンク壁面、底面に付着している液体から蒸発するベンゼンが排出される（以降、Phase Iとする）。その後、次の傾きが変わる点までは底面上の液体ベンゼンから蒸発する成分が影響し、傾きが緩やかになる。この時、液面の面積が一定であれば図-33のように時間に対して排出濃度が変化しなくなるはずであるが、実際には濡れている面積が蒸発に伴い減少していく。このため、ある傾きを持って排出濃度が減少する（以降、Phase IIとする）。20分以降では底面からの蒸発がほぼ終了し、蒸発しにくい壁面上の液体からのみガスが供給されるため、傾きが大きくなる（以降、Phase IIIとする）。このときも壁面上の濡れている面積が減少するため傾きを持つことになる。

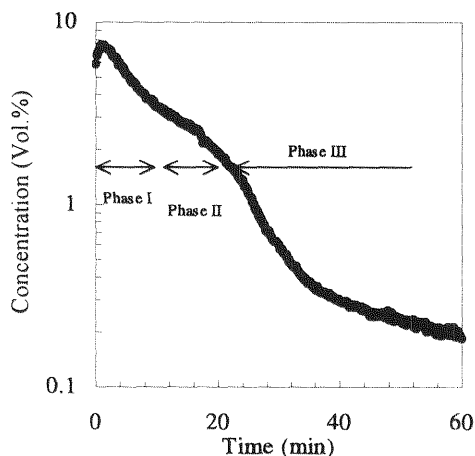


図-34 通常のタンククリーニング時の排出濃度

7.3.2.3 タンク壁面の残留量の影響

クリーニング以前に積み込まれる液体ベンゼンの液面高さを変化させて、クリーニング時の排出濃度

の時間履歴を計測した。この結果からタンク壁面に付着しているベンゼンの影響が無視できない量であることが分かった。図-35は計測濃度の時間履歴を積分して得られる総排出量と積み込まれた液面高さとの関係を示している。液面高さの上昇に伴い、総排出量が増加している。実線は実験値から得られた最小二乗法による結果である。これより垂直軸切片がタンク底面の残留量を示し、傾きが単位垂直軸方向長さあたりの残留量を示している。単位面積あたりに変換すると、底面には0.29(kg/m²)、壁面には0.093(kg/m²)のベンゼンが付着して残留することが分かった。

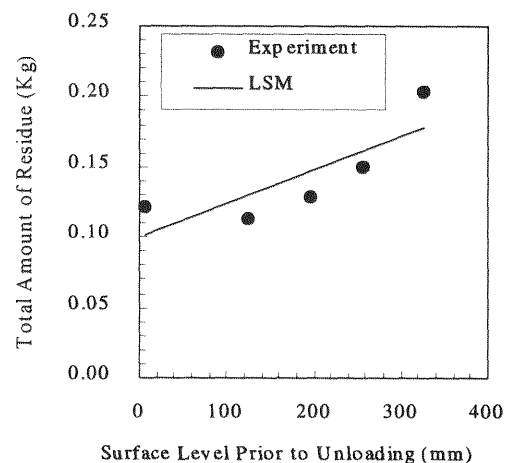


図-35 積み込み高さと残留量の関係

7.3.3 モデル化

タンク内に残留するベンゼンは液体として存在するものがあり、前節の計算により見積もれることが明らかになった。排出濃度の履歴を求める際、液体からの蒸発率が重要な要素となる。ここではタンク内に付着、残留したベンゼンからの蒸発を底面と壁面に分離して考える。

まず、タンク底面にある液体ベンゼンからの蒸発のみ考慮し、蒸発率の計算方法を示す。タンク底面に残留、付着した液体からの蒸発率は以下の式により計算する。^{9)、10)}

$$m_B = A_B \frac{DM_B P_V}{RT_G F} \quad (16)$$

ここで、

A_B : タンク底面の面積 (m²)

M_B : ベンゼン分子量 (kg/kmol)
 R : ガス定数 (J/kmol K)
 P_V : ベンゼン蒸気圧 (Pa)
 F : 等価拡散層厚さ (m)

等価拡散層厚さ¹¹⁾ F 、は次の実験式¹²⁾ から得られる。

$$1/F = 21.7 Sc^{-0.9} (Sc U_B)^{0.625 Sc^{0.3}} \quad (17)$$

Sc はシュミット数であり、次の定義による。

$$Sc = \nu_N / D \quad (18)$$

ν_N (m²/s) は窒素の動粘性係数であり、式(6)により計算した。また、式(17)中の U_B は次式により計算する。

$$U_B = \beta \left[\frac{1.4 U_0 d^n}{1-n} r_2^{-n} \left\{ 1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^{1-n} \right\} \right] \quad (19)$$

この変数はタンク底面上の平均速度を示しており、(m/s)の次元である。また、上式中の未知数は以下の通りである。

$$n = 1.12 \quad (20)$$

$$U_0 = Q_C / A_p \quad (21)$$

$$r_1 = 1.5d, r_2 = 0.75L_T \quad (22)$$

$$\beta = 0.331 \quad (23)$$

ここで、

Q_C : クリーニングガス流量 (m³/s)
 U_0 : クリーニングガス流入速度 (m/s)
 d : 積み込み管直径 (m)

ただし、参照した文献⁹⁾ では、クリーニングに用いる空気の吐出口がタンク天井に位置している。本研究で対象とした 499GT ケミカルタンカーをはじめとする日本国内の化学物質の輸送に従事する船舶ではクリーニングに用いるガスを積み込み管からタンク内へ吹き出しており、その吐出口はタンク底面の直上に位置し、タンク底に向かって下向きである。この違いを考慮し、式(17)は文献¹³⁾ にある Wall Jet Region (Region IV)のみを考慮して修正を施してある。最終的に式(17)-(23)及び式(6)を用いて式(16)に

より蒸発率が計算できることになる。

次にタンク壁面からの蒸発を考える。7.3.2.3 よりタンク壁面への付着量がタンク全体の残留量として無視できないオーダーであることが示された。単位面積あたりの残留量でみると、壁面への付着量はタンク底面のそれと比較して小さい値となるが、壁面の面積が大きいためにタンク全体の残留量に対して影響を与えることになる。ただし、底面と同様に、実験により壁面からの定常的な蒸発量を求めることは困難である。そこでタンク底面からの蒸発と同じ理論により式(16)を使って壁面からの蒸発を考える。ただし、式(19)により求められる代表速度は壁面からの蒸発に支配的と考えられる速度に置き換えなくてはならない。ブローによりタンク内に送り込まれるクリーニングガスはタンク底面直上に位置する。また、タンク内ガスの出口はタンク天井にあるハッチに接続されている。本模型タンクも同様にタンク底面直上から吹き出し、タンク天井から排出される。よって、鉛直方向の1次元的な流れを考え、次式によるガスの上向き平均速度を代表速度とする。

$$U_w = \frac{Q_C}{L_T B_T} \quad (24)$$

以上より、タンク底面、壁面からの蒸発率が計算できるが、式(16)により求まる蒸発率は面積一定の条件である。実際の乾きやすさは場所により異なるはずであり、このことは図-34 により明らかで、Phase II、III の傾きは先に述べたように滞っている面積（以降、滞れ面積とする）の減少を意味する。ここでは、滞れ面積が時間とともに線形に減少すると仮定して次のような支配方程式とした。

$$V \frac{dc}{dt} = -cQ_C + m_B(t) + m_W(t) \quad (25)$$

ここで、

V : タンク体積 (m³)
 c : 排出濃度 (kg/m³)
 t : クリーニング時間 (s)
 m_B : 底面蒸発率 (kg/s)
 m_W : 壁面蒸発率 (kg/s)

この式はタンク内の濃度が均一として、左辺に示すタンク内ベンゼン濃度の減少量と右辺第1項のクリーニングガスによりタンク外へ排出されるベンゼン量との釣り合いを考えている。ただし、右辺第2、3項にはタンク底面及び壁面に付着している液体ベンゼンからの蒸発成分が新たなベンゼンガスの発生

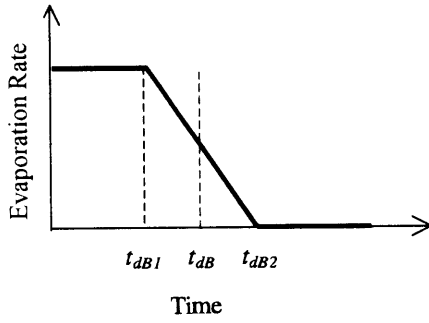


図-36 蒸発率の時間履歴の模式図 (底面)

量として付加されており、その濡れ面積は図-36 および次式のように時間に対して線形に減少する形とする。

$$t \leq t_{dB1}, \quad m_B(t) = A_B \frac{DM_B P_V}{RT_G F_B} \quad (26)$$

$$t_{dB1} < t < t_{dB2}, \quad m_B(t) = A_B \left(1 - \frac{t - t_{dB1}}{\Delta t_B}\right) \frac{DM_B P_V}{RT_G F_B} \quad (27)$$

$$t_{dB2} < t, \quad m_B(t) = 0 \quad (28)$$

$$t_{dB1} = 2t_{dB} - \gamma_B t_{dB}, \quad t_{dB2} = \gamma_B t_{dB} \quad (29)$$

$$t_{dB} = R_B L_T B_T / m_B(0) \quad (30)$$

$$\Delta t_B = t_{dB2} - t_{dB1} \quad (31)$$

ここで、

- t_{dB} : 底面乾燥時間 (s)
- γ_B : 底面乾燥係数(1~2)
- F_B : 底面蒸発量の等価拡散層厚さ(m)
- A_B : 初期底面濡れ面積(m²)
- R_B : 単位面積当たりの底面残留量(kg/m²)

上式群は底面に対する式であるが、壁面も同様に考える。ただし、初期底面、壁面濡れ面積は次式のようになる。

$$A_B = L_T B_T, \quad A_W = 2S_T(L_T + B_T) \quad (32)$$

S_T : 液体ベンゼン積み込み高さ(m)

式(25)の解は、底面と壁面に分離して考えると次式のようになる。

$$c(t) = c_B(t'_B) + c_W(t'_W) \quad (33)$$

$$c_B(t'_B) = \frac{1}{\alpha} \left\{ \tau_{0B} - \tau_B \left(t'_B - \frac{1}{\alpha} \right) \right\} + \frac{1}{e^{\alpha t'_B}} \left(c'_B - \frac{\tau_{0B}}{\alpha} - \frac{\tau_B}{\alpha^2} \right) \quad (34)$$

$$c_W(t'_W) = \frac{1}{\alpha} \left\{ \tau_{0W} - \tau_W \left(t'_W - \frac{1}{\alpha} \right) \right\} + \frac{1}{e^{\alpha t'_W}} \left(c'_W - \frac{\tau_{0W}}{\alpha} - \frac{\tau_W}{\alpha^2} \right) \quad (35)$$

$$\alpha \equiv \frac{Q_C}{V} \quad (36)$$

簡単のため、底面からの蒸発のみ記述すると、

$$\tau_{0B} \equiv \frac{A_B}{V} \frac{DM_B P_V}{RT_G F_B}, \quad \tau_B \equiv \frac{1}{V} \frac{A_B}{\Delta t_B} \frac{DM_B P_V}{RT_G F_B} \quad (37)$$

ただし、図-36 で示す蒸発率の変化に対応して、

$$t \leq t_{dB1} \quad t'_B = t, \quad \tau_B = 0, \quad c'_B = c_0/2 (= c'_W) \quad (38)$$

$$t_{dB1} < t < t_{dB2} \quad t'_B = t - t_{dB1}, \quad c'_B = c_B(t_{dB1}) \quad (39)$$

$$t_{dB2} \leq t \quad t'_B = t - t_{dB2}, \quad \tau_B = \tau_{0B} = 0, \quad c'_B = c_B(t_{dB2}) \quad (40)$$

また式(38)中の c'_B, c'_W は積分定数であり、初期条件(タンク内初期濃度 c_0)を満足するように与えた。各乾燥時間は実験値に合うように1以上、2以下の乾燥係数を掛けて調整する。図-37 では模型タンクのクリーニング実験の結果と式(33)により計算された濃度の比較を示している。縦軸は排出濃度を実験時の気温による飽和濃度で無次元化し、横軸はタンク内に吹き込まれたクリーニングガスの体積をタンク体積で除して置換回数¹⁴⁾として無次元化してある。実験、計算条件は $S_T = 0.326$ (m)、 $Q_C = 0.09$ (m³/min)、 $T_G = 300$ (K)である。

ここで、計算に用いた底面、壁面乾燥時間の係数 γ_B 、 γ_w は実験値との比較から2とし、初期濃度は実験値のピーク値を用いた。計算結果は実験値より大きな値を算出しているが、実験値と計算値の曲線が平行して変化しており、履歴の形状は実験とほぼ同じと見ることが出来る。ただし、最後で計算値と実験値にずれが生じている。この点以降で、計算では壁面、底面からの蒸発が終了し、ガス中のベンゼンだけを排出し始めたためである。このずれが始まる点で濃度は初期値より二桁ほど小さく、排出量から見れば、Phase II まででほぼ残留ベンゼンはタンク外へ排出されたことになる。よって、この点以降のずれはさほど影響がないものと考えることができる。

なお、乾燥係数は、さまざまな要素を含む係数であることに注意を要する。考えられる要素は、タンク形状、吹き込み位置、排出位置、縮尺効果、等を挙げることができる。さらに支配方程式から明らかなように、タンク内ではベンゼンガスとクリーニングガスが均一に混合され濃度が一様であることが仮定となっている。クリーニング開始後、しばらくの間はこの仮定で推定できるが、濃度が薄くなると、この仮定による計算は実際の濃度より低く見積もる傾向を示すはずである。これは、タンク内は均一混合ではなく、ガスを排出しにくい場所があることを表している。図-37の最後の計算値、実験値の大きなずれにはこの要素も含まれている。また、乾燥係数による調整はこの均一混合からのずれも含めてしまっている点にも注意を要する。

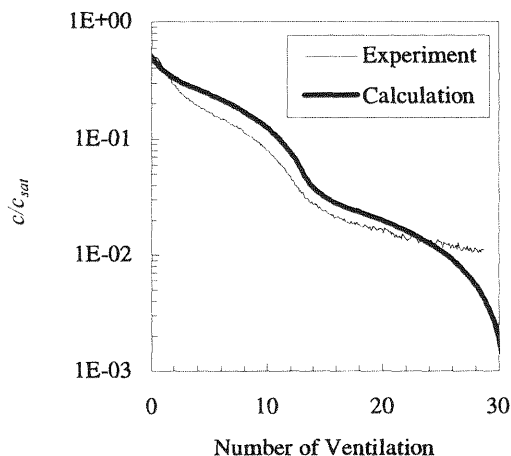


図-37 排出濃度の時間履歴

7.3.4 実船の計算

縮尺効果等の問題は残るものの、ここまでで得られた計算モデルを実船に搭載されている貨物タンク

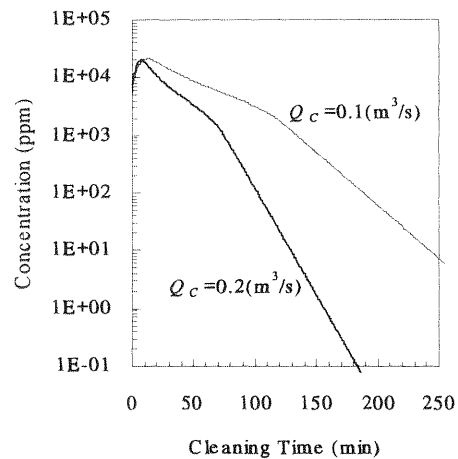


図-38 実船での排出濃度時間履歴

について試算してみる。対象タンクは図-30中の計算に用いた貨物タンクとする。クリーニングを開始する時の初期濃度の求め方は以下のようにした。

揚げ荷役を行う前のアレジスペース（タンク内のガス相の空間）が飽和濃度であったとする。この仮定は航海時間や船の動揺などを考えると十分妥当な仮定である。この飽和ガスが揚げ荷役作業でタンク内に導入される空気により希釈されるとした。よって95%の積み付け率であるので、タンク内ガスは飽和ガス濃度の1/20となる。なお、揚げ荷役作業中に壁面、底面の残留液体ベンゼンからの蒸発はないものとした。図-38に計算結果を示す。通風機により供給できるクリーニングガスの流量を80(m³/min)程度とすれば、1タンクあたりでは0.1から0.2(m³/s)の流量となる。図中には流量0.1、0.2(m³/s)の結果が描かれている。

クリーニング開始直後は壁面、底面から蒸発するベンゼンガスの供給により排出濃度が上昇している。その後、滞れ面積の減少により、傾きが負となる。液体からの蒸発が終了(0.2(m³/s)の場合は70分、0.1(m³/s)で120分後)してからは傾きがさらに減少する。実船を使ったクリーニング中の排出濃度の実験は困難であるためシミュレーションの結果だけを示すが、実船での作業は4時間程度でクリーニングを終了するケースが多い。この図からどちらの流量の場合も4時間を経過すると液体からの蒸発が終了し、ガス相に残っているベンゼンを排出する段階に入っている。4時間後の排出濃度は0.1(m³/s)の場合11(ppm)程度、0.2(m³/s)の場合は0.001(ppm)以下となっている。また、この段階でどちらの場合も99%以上の残留ベンゼンが排出されたことになり、タン

ク内が十分に換気されたことが示される。

7.4 大気拡散モデル

前節までの手法により積み込み作業、クリーニング作業中に排出されるベンゼンガス濃度の時間履歴を計算するモデルが得られた。ただし、排出されるガスは甲板中央に設置されたベントポストから大気中に放出される。環境濃度を求めるためにはさらに放出後の大気中における拡散を計算する必要がある。ここでは一般的に用いられる大気拡散モデルによる解析を行った。

7.4.1 計算モデル

液体ベンゼンのケミカルタンカーへの積み込み作業は岸壁で行われる。積み込み作業中に貨物タンク内で発生するベンゼンガスは、一部の事業所を除き、そのまま大気中へ放出している。このため、作業中に排出されるベンゼンガスへの曝露の可能性は、乗組員はもとより、岸壁作業員、事業所職員、周辺住民と対象が大きくなる。ここでは、一般的に広く用いられる大気拡散モデル¹⁵⁾を使用して解析を試みる。

座標系を図-39のように定めるとき、発生源が($x=0, y=0, z=H$)であるプルームの拡散式は式(41)のようになる。なお、この式は、地面で完全反射するという条件が設定されている。

$$c(x, y, z) = \frac{Q_0}{2\pi u_a \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (41)$$

ここで、

Q_0 : 単位時間当たりの排出貨物ガス量 (体積)
($\text{ppm} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

u_a : 平均風速 (m/s)

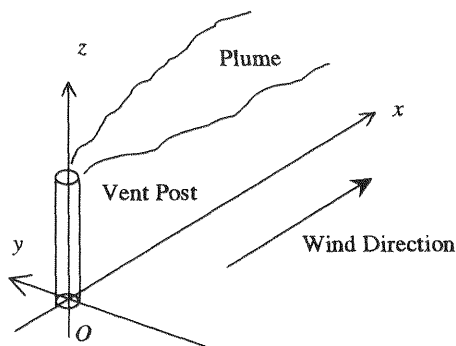


図-39 大気中拡散モデルの座標系

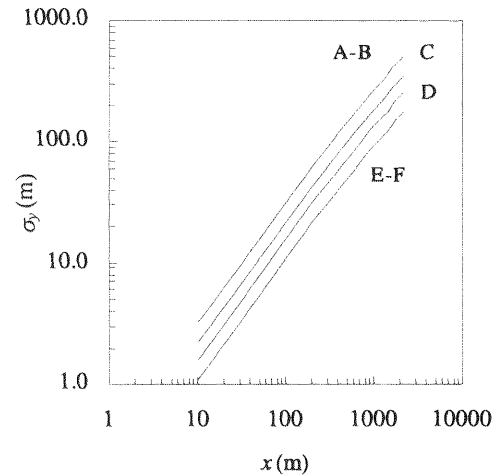


図-40.1 y方向の標準偏差

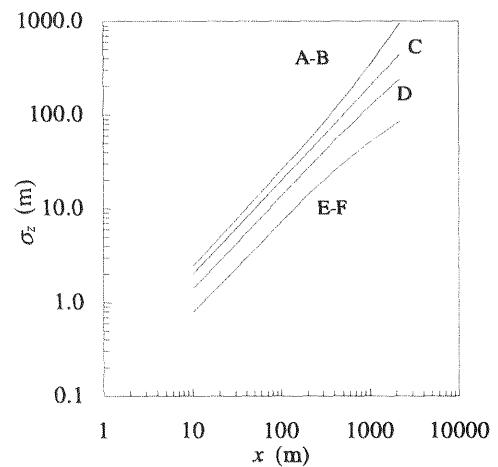


図-40.2 z方向の標準偏差

H : 発生源の地面からの高さ(m)

σ_y : 座標 x における y 方向の風の標準偏差(m)

σ_z : 座標 x における z 方向の風の標準偏差(m)

c : 濃度 (ppm)

各標準偏差は Briggs の市街地における値¹⁶⁾を用いた。このチャートを図-40.1、40.2 に示す。なお、図中の A~F の記号は Pasquill の大気安定度であり、風速、日射などにより決定する^{15)、16)}。

7.4.2 解析結果(大気中拡散モデル)

積み込み作業中のタンカー周辺における濃度分布を計算してみる。図-41 は 7.2 で示した積み込みモデルによる計算結果で、液体ベンゼンの積み込み作業中に、タンクから排出される濃度の時間履歴である。ここで貨物タンクは長さ 8.5(m)、幅 5(m)、高さ 4(m)、タンク内温度 33(℃)、積み込み流量は

125(KL/hr)で計算している。なお、タンカーには複数の貨物タンクがあるが、他のタンクでもほぼ同じ時間履歴になると考えられるため、図-41の平均濃度は積み込み作業全体の平均濃度を示すことになる。この図の、平均排出濃度は約16,000(ppm)であるため、単位時間の排出貨物ガス量は1,111(ppm・m³/s)となる。ただし、左舷、右舷の2タンク同時に積み込みをするため、放出流量は250(KL/hr)としている。また、この積み込み作業中に曝露濃度の計測に用いたガスモニターを用い、大気中濃度の計測を行った。ガスモニターの位置は、高さ1(m)のスタンドに風上方向へ捕集面を向け、図-42に示す配置とした。風については、船橋の風向風速計を目視により定期的に記録した結果、積み込み作業全体で、左舷90度から約2(m/s)の風が吹いていた。なお、この風速ではパッシブサンプラーで示される濃度は風の影響を受けないとの報告がある。¹⁷⁾

図-43に計算結果と計測値を示す。濃度を計算する高さは地面から1(m)とした。ペントポストの高さは、積み荷役中の乾舷の変化、潮汐変化があるた

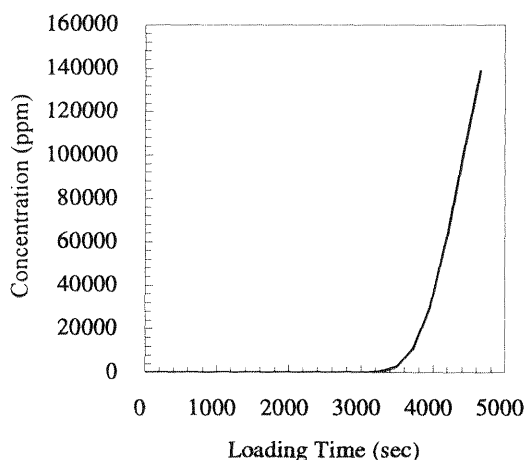


図-41 積み込み作業時の排出濃度

め地面から7,8,9(m)で計算した。なお、この風速で天気が晴れであったので、大気安定度はクラスBとなり、図-40中のA-Bの標準偏差を用いた。また、風の乱れは棧橋、岸壁、船橋、荷役配管といった障害物の影響を受けるが、ここでは障害物の存在を無視している。図はx軸上の濃度を示している。原点にあるペントポストに最も近い計測値は計算値と大きく異なり、どのHに対しても合わないが、他の2点はH=9(m)の計算結果に近い。この計算モデルは比較的長距離の拡散現象に対応したモデルといわれており、100(m)以内の範囲において取り扱いに注意を要すると報告されている¹⁸⁾が、この図からオーダーの解析には利用できる可能性が示唆される。

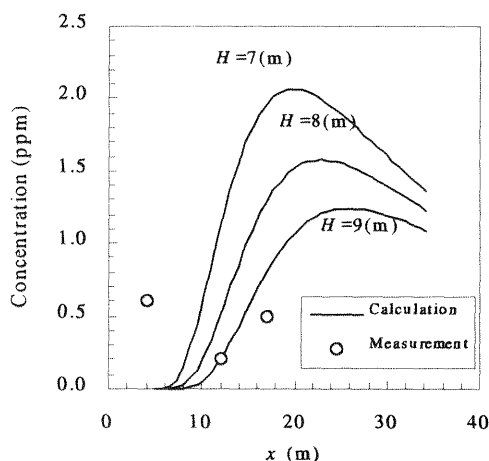


図-43 x軸上の濃度分布

図-44にはH=9(m)、濃度の検知面の高さを1.5(m)とした時の水平面内の濃度分布を示す。この検知面の高さでは、最高濃度はペントポストから風下25m付近で約1.3(ppm)という結果になった。排出源近傍には1(ppm)オーダーの濃度が存在するものの、数百m離れると急激に濃度が減少して0.1(ppm)のオーダーになり、拡散による希釈の効果が大きいことが分かる。しかし、大気汚染防止法ではベンゼンの環境基準値を3(μg/m³)としており、これは約1(ppb)という値になる。計算結果では風下1.4(km)を越えないとこの濃度にまで到達しない。

次に、このタンクのタンククリーニング中の濃度分布を計算してみる。揚げ荷役後の残留量は1タンク当たり約26(kg)となり、前節のクリーニングモデルを用いて、流量が0.2(m³/s)、4時間の平均排出濃度は約2,800(ppm)となる。他の7つの貨物タンクも同じ残留量、平均排出濃度になると仮定すると、単位時間当たりの排出貨物ガス量は全貨物タンクで4,480(ppm・m³/s)となる。この値を用いて、比較の

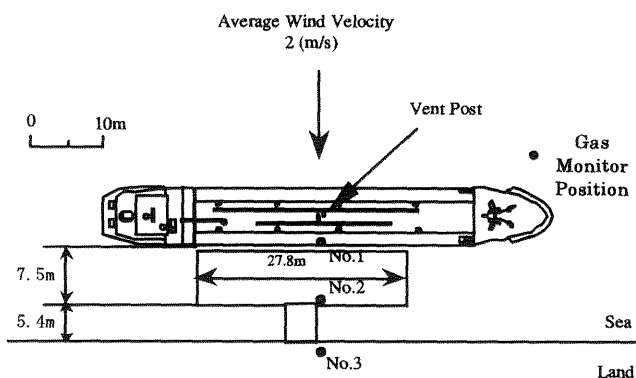


図-42 パッシブサンプラーの配置図

環境濃度に影響を与えているはずである。

7.5 計算モデルのまとめ

ベンゼンを輸送するケミカルタンカー上の作業環境濃度を予測する計算モデルを作成した。蒸発、排出機構が輸送サイクルを構成する4作業で大きく異なるため、計算モデルを作業別に用意した。これより、貨物タンクから排出されるベンゼンガスの濃度を物理的なパラメータと関連付けて計算することが可能となった。さらに、一般的に用いられる大気中拡散モデルにより、排出された後のベンゼンガス濃度の分布を把握することができた。

これらの計算モデルを組み合わせることで、オーダーではあるが作業環境濃度の値が得られるようになった。今回はベンゼンガスを対象としているが、他の化学物質についても物理的、化学的パラメータを変更すれば適応できる可能性がある。さらに、排出量低減化対策の試算など、さまざまな用途が考えられる。

8. 健康影響評価

化学物質に曝露されることによる健康への影響を発ガン物質の場合と非発ガン物質の場合それぞれにおいて評価した。なお、国際がん研究機関(IARC)によりベンゼンおよびアクリロニトリルは発ガン物質に、トルエンとキシレンは非発ガン物質に分類されている。

8.1 発ガン物質の場合

環境濃度における大気中の発ガン物質を呼吸することによる人への健康被害の影響を発ガンリスクから評価した。発ガン性ガスに曝露された時追加され

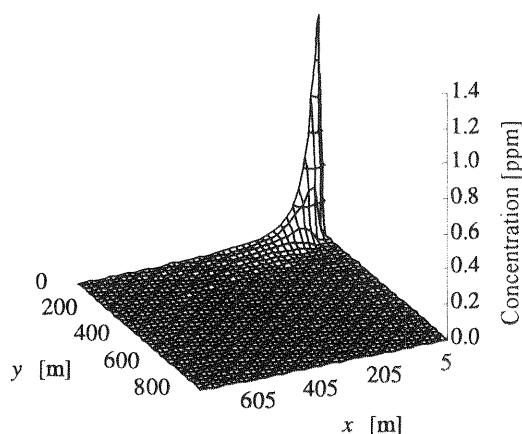


図-44 水平面内の濃度分布 (積み込み作業時)

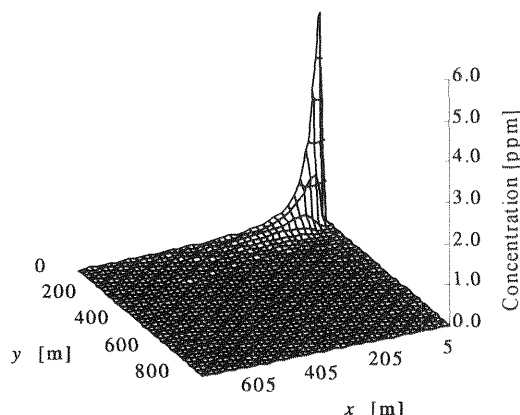


図-45 クリーニング中の濃度分布

ため図-44と同様な条件で計算した結果を図-45に示す。この図中の最高値は5(ppm)を越えており、積み込み作業の4倍程度の値となった。

実船計測による作業環境濃度の結果では、タンククリーニング中の濃度は、積み込み作業時の濃度より1桁以上大きな値となっている。今回の計算結果では1桁もの違いはないが、計算モデルにおいてもタンククリーニング中の環境濃度が積み込み作業中より高くなるという傾向が示された。なお、実船ではタンククリーニング中のガス排出を、ベントポストだけではなく、甲板上のハッチを開放して行うこともあり、これらの要因がタンククリーニング時の

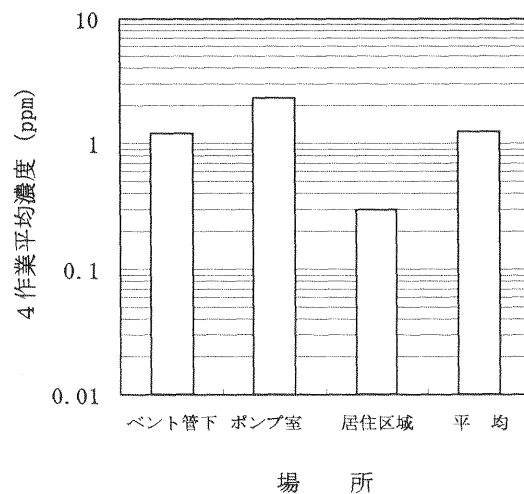


図-46 4作業平均濃度

る発ガンリスクは量－反応関係で無しきい値、直線モデルを用い、発ガンリスクの上限を推定する次の関係¹⁹⁾から求めた。

$$P_c = UR \times C \quad (42)$$

ここで

P_c : 生涯発ガンリスク

UR : ユニットリスク($m^3/\mu g$)

C : 生涯平均曝露濃度($\mu g/m^3$)

8.1.1 ベンゼンの場合

ベンゼンのユニットリスクは $2.2 \times 10^{-6} \sim 7.8 \times 10^{-6} (m^3/\mu g)$ であることが示されている²⁰⁾。ここでは平均値の $5 \times 10^{-6} (m^3/\mu g)$ を用いる。生涯平均曝露濃度は次のようにして求めた。生涯曝露時間は nE_T となる (n : 生涯輸送従事回数 E_T : 1 輸送あたりの曝露時間[day])。従って生涯曝露量は nE_TC_0 である。 C_0 は積み荷役、航海、揚げ荷役、タンククリーニングの 1 輸送の間、船内で作業する乗組員が呼吸する大気的环境ガス濃度である。図-46 に示す 4 作業平均環境濃度の 3 場所平均濃度と図-47 に示す全測定対象乗組員の曝露濃度の中央値は一致しており、この測定結果より、 $C_0 = 1.3 \text{ ppm} (= 4.1 \times 10^3 (\mu g/m^3))$ を用いる。

生涯を 70 年とすれば $C = nE_TC_0 / (70 \times 365)$ となる。以上の関係を用いると、曝露時間をパラメータにして、乗組員の生涯ベンゼン輸送従事回数と発ガンリスクとの関係図-48 が求められる。また、輸送あたりの曝露濃度をパラメータにした場合は図-49 が得られる。乗組員の健康被害の大きさは曝露濃度のみならず、船上での作業時間、輸送従事回数等によっても大きく変わり、これらの条件によってもリスクをコントロールできることになる。

10^{-6} の発ガンリスクが一般的に認められている許容値である。この数値は 70 年の生涯に 100 万人に 1 人の割合で発ガンすることを示している。職業

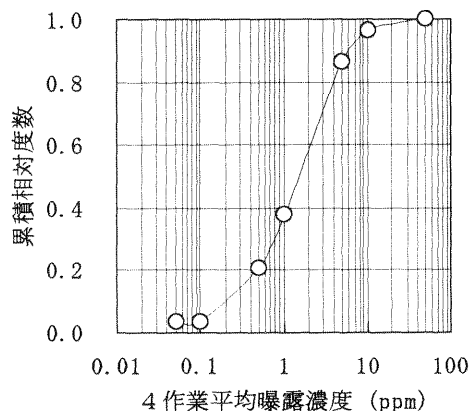


図-47 4 作業時間荷重平均曝露濃度の累積相対度数

的曝露は一般集団を対象としたものより大きい値がよく用いられ、0.001 程度とされている²¹⁾。リスク

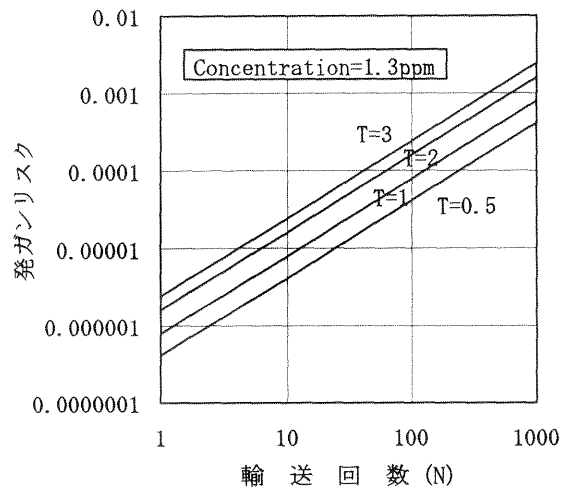


図-48 平均環境濃度における発ガンリスク

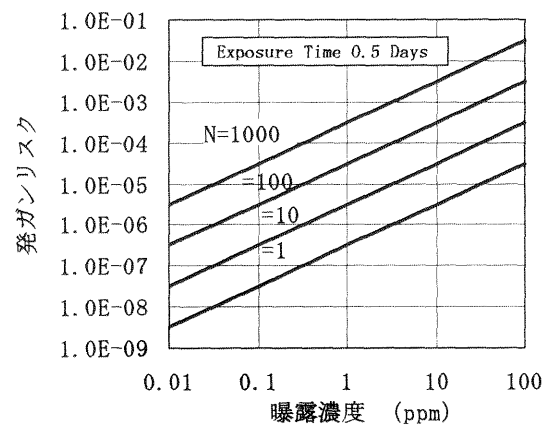


図-49.1 発ガンリスクの評価
輸送あたりの曝露時間 0.5 日の場合

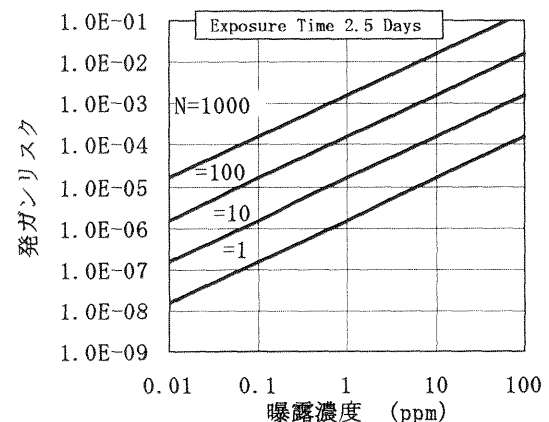


図-49.2 発ガンリスクの評価
輸送あたりの曝露時間 2.5 日の場合

限界値が 0.001 であるから、図-49.2 より濃度 1ppm、輸送時間が 2.5 日の場合、生涯輸送従事回数は 600 程度となることが分かる。

リスク評価は、量-反応関係で無き値、直線モデルを用い、データには個人差なし、曝露の単純算術処理等の仮定に基づいており、得られるリスク値にはかなりの不確実性を伴っている。

8.1.2 アクリロニトリルの場合

計測結果を図-50 に示す。多くの乗組員は 1～5ppm の範囲に曝露されており、曝露濃度の中央値は 2.1ppm である。ユニットリスク 6.8×10^{-5} ($\text{m}^3/\mu\text{g}$)、輸送あたりの曝露時間 0.93 日を用いて

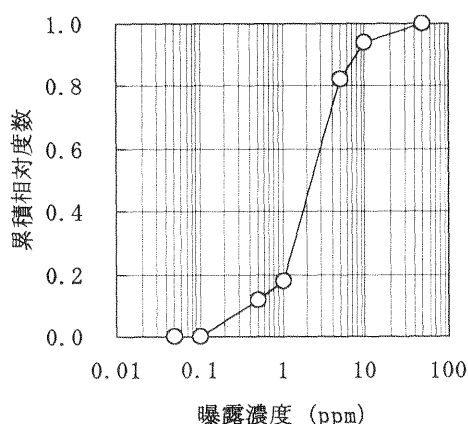


図-50 曝露濃度 (アクリロニトリル)

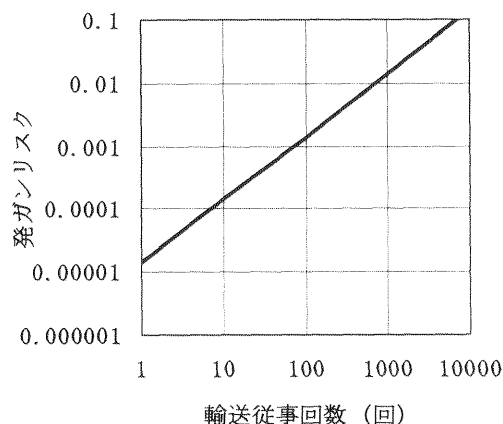


図-51 アクリロニトリルの発ガンリスク

発ガンリスクを求めると、図-51 が得られる。輸送従事回数 100 程度で発ガンリスクは 10^{-3} になると評価される。

8.2 非発ガン物質の場合

非発ガン物質による単独曝露の場合の評価は許容濃度を超えたかどうかによってなされる。

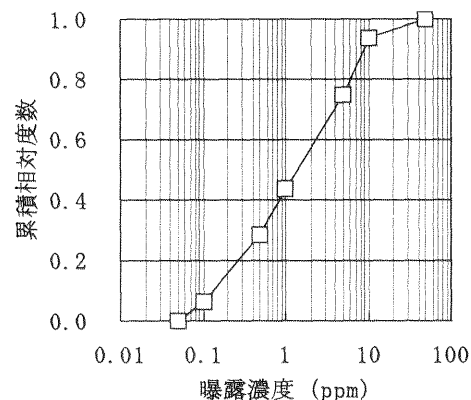


図-52 輸送サイクル平均曝露濃度の累積相対度数 (キシレン)

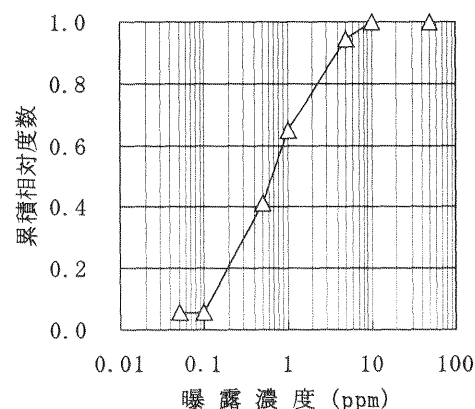


図-53 輸送サイクル平均曝露濃度の累積相対度数 (トルエン)

$$C/RfC < 1$$

が条件となる。

ここで

C : 化学物質の大気中濃度

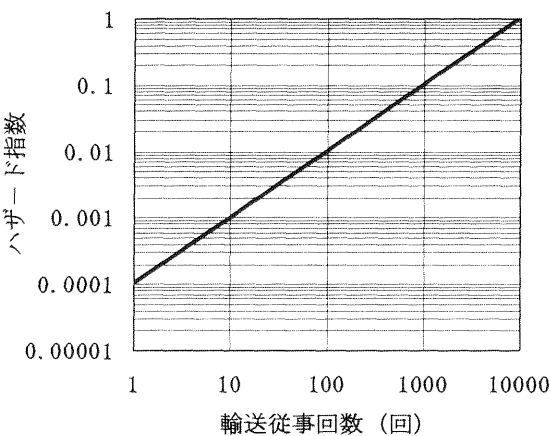
RfC : 化学物質の参照濃度

である。トルエンの参照濃度は表-7 に示す値が提示されている。キシレンについては求められていない。

表-7 参照濃度

	mg/m ³	ppm
キシレン	—	—
トルエン	0.4	0.11

図-53 に示すトルエンの曝露濃度中央値および 1 輸送に要する平均時間のデータを用い、発ガン物質の場合と同様に生涯曝露濃度を算出して、C/RfC と輸送従事回数との関係を求めた結果を図-54 に示す。1000 回を越す輸送に従事しても許容値内にあることが示されている。



図－54 トルエンのリスク評価

8.3 化学物質の複合曝露を受ける場合

通常ケミカルタンカーでは複数の化学物質を同時に輸送したり、航海ごとに異なる化学物質が輸送される。このため乗組員は複数の発ガン物質または複数の非発ガン物質に同時に、あるいは経時的に曝露される。このような場合のリスクは単独曝露の場合より更に増加する。

9. 対 策

乗組員のガス曝露を少なくする方法には発生源対策と影響緩和策がある。発生源対策ではガス発生を抑制して環境濃度を低下させる方法であり、影響緩和策では乗組員の曝露機会を少なくする方法である。タンククリーニング時の濃度低減のため荷揚げ後の残留貨物量の削減と環境濃度が高い作業で呼吸具を装着する方法が環境濃度、曝露濃度、リスクに及ぼす影響について検討した。

9.1 荷揚げ後の残留貨物量の低減

9.1.1 ストリッピング

主貨物ポンプによる荷揚げ終了後も、貨物はカーゴラインやタンク内に残留する。残留貨物は次に積み込まれる貨物と混合し、新たな貨物の純度を下げることとなるので、残留貨物量は少ないことが望ましい。このため、次の貨物の積み込みが始まるまでに、ストリッピングおよびタンククリーニングが行われる。海洋環境汚染防止に関する基準ではベンゼン貨物の場合、残留貨物量は1タンク当たり、300リットル以下と定められている。表－8 は我が国のケミカルタンカーで水試験と呼ばれる方法によって行われたストリッピング後の残留水量の測定値を示す（国土交通省 環境・海洋課資料）。25リットル未満のタンクがおおよそ半数で、50リットル未満のタン

クは80%を超えている。平均1タンク当たりの残留水量は33リットル程度である。これらの残留貨物は水洗浄された後スロップタンクに回収され、または水洗浄されないまま通風によるタンククリーニングによって大気中に排出されるため、船内のベンゼンガス濃度は増大する。

本研究はこの実態に対応するため、タンククリーニングによって大気中に排出される船内のベンゼンガス濃度を低減させるために有効と考えられる荷揚げ終了後の残留貨物量を低減する方法、即ち吸引管を通して負圧に保たれた吸引タンクに残留貨物を吸引上げる方法について検討したものである。

表－8 ストリッピング残留量別ケミカル船のタンク数

ストリッピング 残量（L）	25 未満	50 未満	100 未満	100 以上	合計
タンク数	824	652	284	12	1772

9.1.2 実験装置、実験方法

9.1.2.1 実験装置の概要

図－55 に残液回収実験装置を示す。実験装置は、初めに一定量の水を入れておくモデルタンク、実験の初期に大気圧から一定の初期負圧に減圧される吸引タンク（内容積：約52リットル）、吸引タンクの初期負圧を得るための真空ポンプ、モデルタンクと吸引タンクを接続するための吸引管、配管に取り付けられた弁により構成される。

9.1.2.2 実験方法

モデルタンクを市販の重さ秤の上に乗せ、水道水を一定量入れた後、吸引タンクを負圧にして負圧吸引試験を行い、時間経過と重量の変化を計測した。同時に浮き子式の液面計を取り付け、水位の変化を記録した。吸引タンクには絶対圧力計を取り付け、圧力の変化を計測するとともに熱電対により内部の温度変化を計測した。

9.1.2.3 実験結果

直径5.1mm、長さ4mの吸引管を使用した実験時の吸引タンク内圧力変化を図－56.1に、吸引タンク内の計測された温度変化を図－56.2に、モデルタンクの液位の変化を図－56.3に示す。

図－56.1では横軸に経過時間を取り、縦軸に吸引タンク内の圧力を示している。実験は吸引弁を閉じ、排気弁を開いた状態で真空ポンプ（定格排気量：100L／分）を起動し、吸引タンク内の空気を抜き、内部の圧力を大気圧から減圧していく。約100秒経過後に内部の圧力が－70cmHgになった時点で排気弁

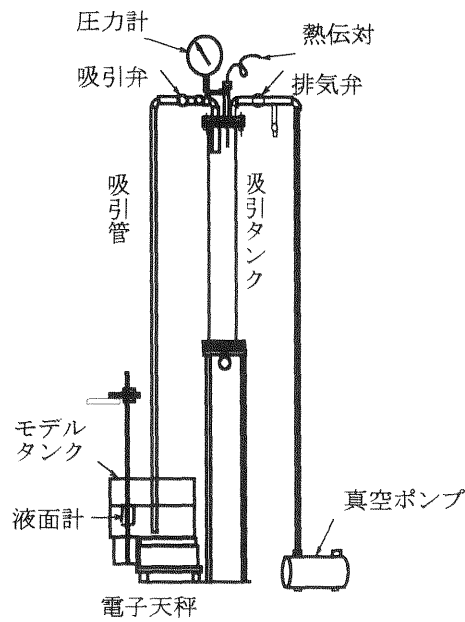


図-55 残液回収実験装置

を閉じ、吸引弁を開けると吸引管からモデルタンク内の水が連続的に吸引される。この実験の場合、経過時間 100 秒から 300 秒までの間、水は連続的に吸引される。初め 10kg の水をモデルタンクに入れ、吸引管とモデルタンク底板間の間隙を 25mm とした時の結果である。この間に約 7.8kg の水が吸引タンクへ吸引された。この吸引された水に比例する分だけ吸引タンクの体積が減少し、内部の圧力は吸引直後 0.11kgf/cm^2 から 0.13kgf/cm^2 へとわずかに上昇した。その後、モデルタンク内の水位が下がり、吸引管下端が空気に触れると空気と水が連続的に吸引されるようになり、吸引タンク内の圧力は急激に大気圧に近づいていく。今回の実験の場合、吸引管下端から最終的なモデルタンク内の液面までは約 4mm の間隔があった。

図-56.2 では、横軸に実験の経過時間を取り、縦軸に吸引タンク内の計測された温度の変化を示している。実験開始時、気温が 27.9°C で水温が 19.0°C であったが、吸引タンクを減圧するにつれて始め温度が低下し、水の流入が始まると 100 秒から 300 秒にかけてほとんど一定の温度となり、300 秒以降急速に空気を吸い始めると温度の上昇が見られる。

図-56.3 では、横軸に実験の経過時間を取り、縦軸に浮き子式液面計で計測した液面高さの変化を示している。モデルタンクの大きさが $30\times 30\text{cm}$ で単位時間当たりのデータの傾きが 0.0464 なので 41g/sec 程度の吸引量であった。また、重量の変化から求めた値は 40g/sec 程度であった。

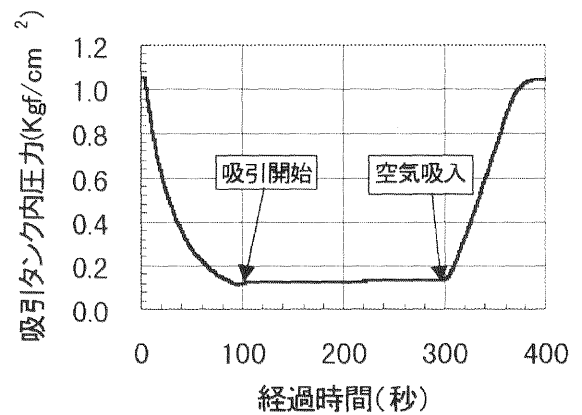


図-56.1 吸引タンク内圧力変化

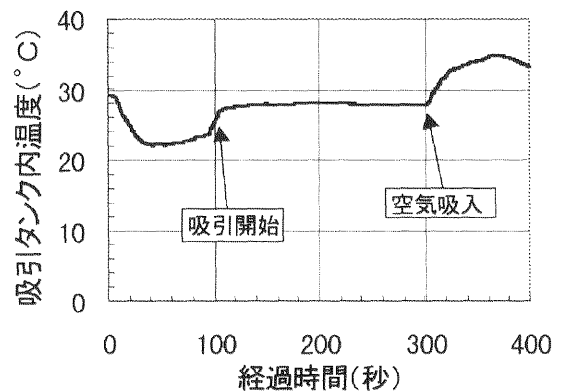


図-56.2 吸引タンク内温度変化

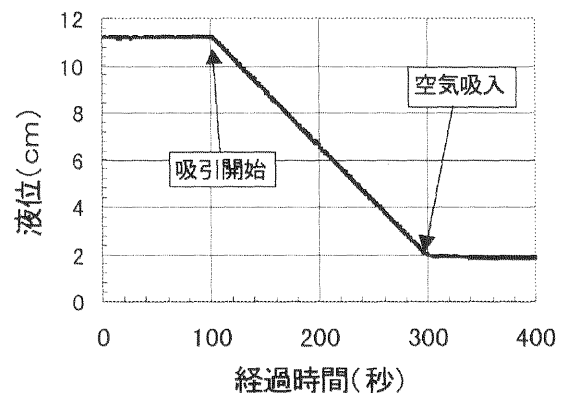


図-56.3 負圧吸引による液位の変化

図-57 に吸引管長さ、吸引管直径を変えたときの残液量を示す。横軸に吸引管とモデルタンク底板間の距離を取り、縦軸に残液量を示している。直径 5.1 mm の吸引管では吸引口距離を 5mm 程度にすると、残液量は 100g 程度に減少することが分かる。また

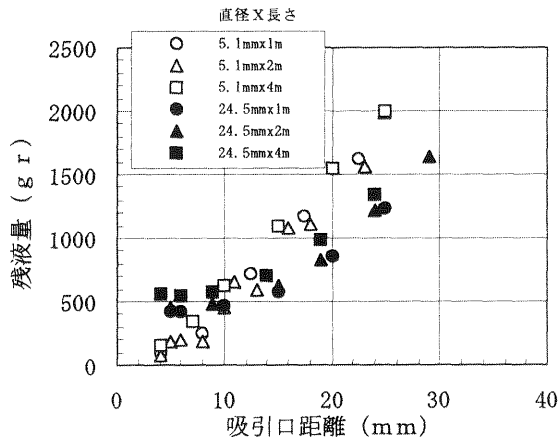


図-57 吸引口距離と残液量

直径 24.5mm の吸引管では吸引口距離を 5mm 程度にしても約 500g 程度が残る。一部の実験において吸引管径が大きい場合には、図-58 に示すような状態で残液の残ることが観察された。図-59 に吸引高さを変えたときの吸引流量の変化を示す。吸引タンクの初期負圧は-70cmHg で、吸引管径 5.1mm についての計測結果である。アクリル管を使用した今回の実験では、垂直部分の長さを 1m から 4m にすることにより、吸引流量は半分以下になっている。

9.1.3 残留貨物量低減のまとめ

負圧吸引により残液量を低減させるためには、モデルタンクの底面の水平部分を小さくすることと、吸引管を細くすることが考えられる。吸引の最終段階で高速で吸引される空気によって水が運ばれるので、吸引口とタンク底板間の距離は 5～7mm 程度で良いと考えられる。

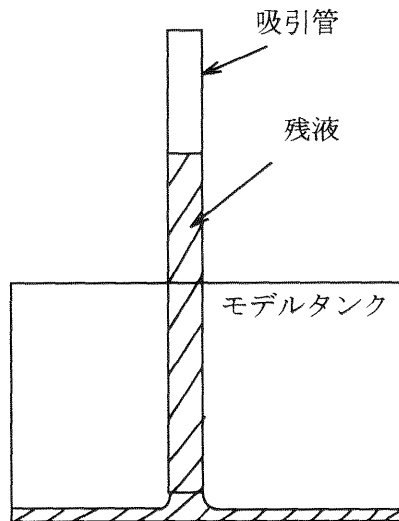


図-58 吸引管内に残液が残る場合

実際の貨物（ベンゼン）に対して負圧吸引方法を採用する場合には、ベンゼンの固有抵抗が $4.8 \times 10^{13} \Omega \text{m}$ と考えられており、帯電性物体として取り扱う必要がある²¹⁾。負圧によりベンゼンが配管内を高速で流れる場合発生する静電気の帯電による事故を防止するためには、モデルタンク内を不燃ガスで充填させるなど、発生すると予想される静電気に対する考慮が必要であると考えられる。

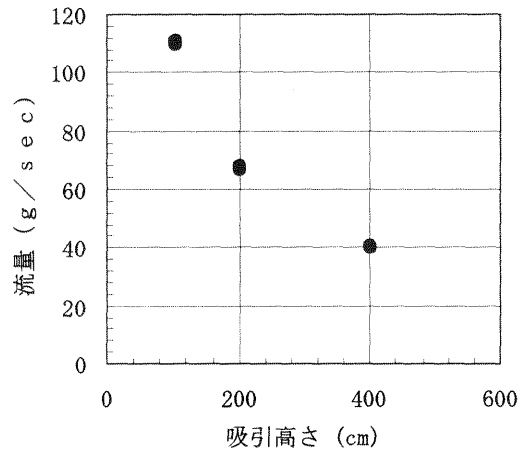


図-59 吸引高さの違いによる吸引量の変化
(初期負圧：-70cmHg 吸引管径：5.1mm)

9.1.4 残留貨物量低減の効果

環境濃度の最も高いタンククリーニング時の濃度低減のため行う残留貨物量低減の効果を検討した。評価に当たり、

1. タンククリーニング時の環境濃度はストリップ

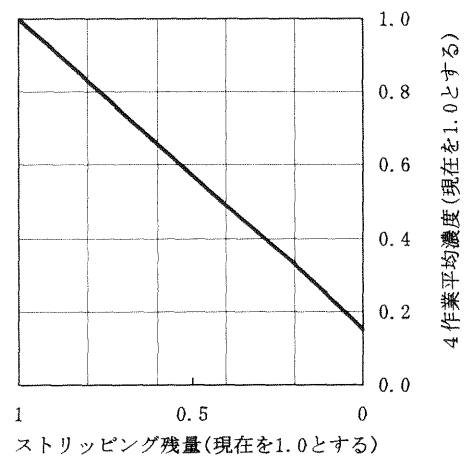


図-60 ストリッピング残量削減の効果

ング後タンクに残留したベンゼン貨物により形成されるとし

2. タンククリーニングの所要時間および風量は変えない
3. 船内平均環境濃度はストリッピング後の貨物残量に比例する、

とした。図-60は横軸に現状のストリッピング残量を基準に削減量の大きさをとり、縦軸には推定された平均環境濃度の低減の変化を示す。ストリッピング残量削減の平均環境濃度低減に及ぼす影響は大きく、ストリッピング残量削減は平均環境濃度低減の有効な手段であることが示されている。

9.2 呼吸具の装着

高環境濃度となる作業形態および場所で呼吸具を装着する次の対策を想定した。

- 対策A: クリーニング作業時の居住区以外での作業中には呼吸具を装着する
 対策B: ポンプ室での作業中にはすべての作業形態で呼吸具を装着する
 対策C: 対策Aと対策Bをあわせて行う

呼吸具装着によって乗組員はその作業中はガス曝露が緩和されるので、呼吸具装着の効果を0.90、つまり環境濃度が90%削減されるとし、居住区、甲板上、ポンプ室での作業時間の長さは同じとして評価した結果を図-61に示す。対策時の推定濃度は対策Aでは0.53ppm、対策Bでは0.57ppm、対策Cでは0.23ppmが得られる。現状の平均環境濃度が1.3ppmであるので対策Aまたは対策Bでは現状の40%になると推定され、対策Cを行うことにより約

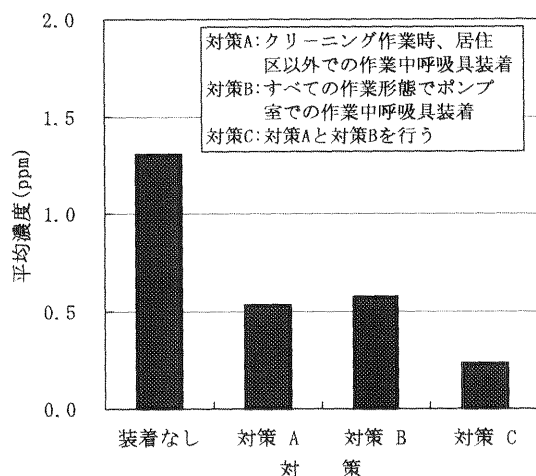


図-61 呼吸具装着の効果
(呼吸具のガス遮断効果 90%とする)

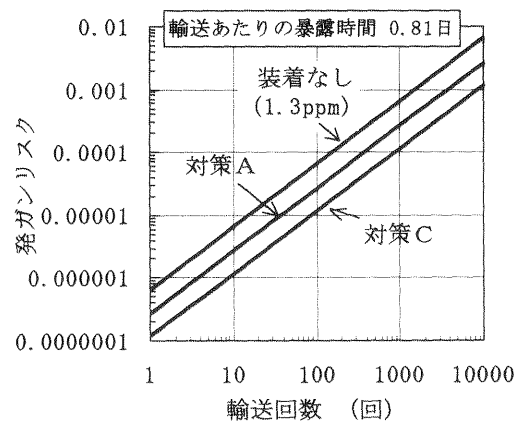


図-62 呼吸具装着時の発ガンリスク

20%となる。作業中呼吸具を装着することの効果の大きいことが示されている。

図-62 に輸送実績データから得られた輸送あたりの曝露時間 0.81 日に対するリスクを対策ごとに示した。呼吸具装着によって大幅なリスク低減が示唆されている。

10. まとめ

ベンゼン海上輸送に通常よく用いられる 500 トン積みまたは 1000 トン積み船を計測対象船として選定し、輸送 1 サイクルを積み荷、揚げ荷、航海およびタンククリーニングの 4 つの作業に区分し、作業区分毎に、船上の代表的作業場所でガス濃度を測定した。積み荷役作業中では更に排出源および岸壁でのベンゼンガス濃度についての測定も実施した。また、ベンゼン、トルエン、キシレン、アクリロニトリルについて、各物質の海上輸送作業中の乗組員一人一人の曝露濃度を測定した。データ解析にあたり、実船作業の状況や排出源情報、曝露情報等を得るため通常の荷役作業の現場調査、聞き取り調査、書面調査により乗組員や荷役従事者、荷役計画者等から情報を収集した。またモデル試験装置を用いた試験を実施して実情をより把握した。そして乗組員の健康確保についての評価法と対策について検討した。その結果以下の点が明らかとなった。

- ① ベンゼン輸送の場合、甲板上およびブリッジ内での環境ガス濃度は、クリーニング作業中を除き低濃度であった
- ② ベンゼン輸送の場合、1 輸送中の船上の平均環境ガス濃度はタンククリーニング作業中が高濃度であるため保護具装着勧告ガス濃度 1ppm に近い値と推測された。

- ③ 積み荷時のガス排出口であるベント管出口での濃度はかなり高いが、高さが十分にあり、風によって急速に拡散される。
- ④ ベンゼン輸送の場合、積み荷時およびタンククリーニング時排出されるガス濃度は予測される結果を超えている。貨物温度が大きく影響し、排出量を抑制するためには、貨物温度を下げることに有効であることがわかった。また、排出源はベント管以外にもあり、環境濃度はこの影響を大きく受けていることを示している。その一つにローディングアーム接続部があり、10分間程度の短時間であるが、高濃度のガス発生があり、対策が望まれる。
- ⑤ 海上輸送中の乗組員の健康確保のためには環境ガス濃度を下げるとともに、作業中に呼吸具を装着する乗組員への影響緩和が有効である。また、作業方法、設備のメンテナンス、輸送従事時間、回数、気象条件の利用等幅広い対策が可能と考えられる。特に、旧型船舶についてはコスト面からもある利な対応が望まれる。

謝 辞

実船でのガス濃度測定は工場関係者、船舶運航関係者、乗組員をはじめ多くの方々の協力によって行われた。また、研究遂行にあたり検討委員会の委員各位から多くの貴重な意見を頂いた。これら協力いただいた方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 内航タンカー安全指針、全国内航タンカー海運組合、1998
- 2) 有害大気汚染物質測定方法マニュアル平成9年2月、環境庁大気保全局大気規制課
- 3) スリーエムヘルスケア(株)：有機ガスモニター技術資料、技術ガイド
- 4) E.L. Cussler, "Diffusion (Mass Transfer in Fluid Systems)" 2nd Edition, Cambridge University Press, (1997)
- 5) R.Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, "Transport Phenomena", Wiley & Sons Inc. (1960)
- 6) Noel de Nevers, "Air Pollution Control Engineering", McGraw-Hill (1995)
- 7) 理科年表、国立天文台編、平成7年
- 8) 間島 隆博、山口 勝治他、"ケミカルタンカーにおけるベンゼン積み込み作業時の排出濃度予測モデル"、航海学会論文集、第104号、pp.155-164、2001
- 9) W.J. Astleford, et al "Investigation of the Hazards Posed by Chemical Vapors Released in Marine Operations Phase II, Final Report", Report No. CG-D-10-83, USCG, Apr. 1983
- 10) W.J. Astleford, T.B. Morrow et al, "Hazard Chemical Vapor Handbook for Marine Tank Vessels, Final Report - Phase II", Report No. CG-D-12-83, USCG, May 1983
- 11) 例えば、西川兼康、藤田恭伸「伝熱学」機械工学基礎講座、理工学社、1982
- 12) D.C. Gray, "Solvent Evaporation Rates", American Industrial Hygiene Association Journal, pp.695-710、November 1974
- 13) D.T.Lee, J.W. Gaunter, J.N.B. Livingood, "Experimental Flow Characteristics of A Single Turbulent Jet Impinging On A Flat Plate", NASA TN D-5690, March 1970
- 14) 福地 信義、"ガス置換によるタンク内ガス濃度分布について(第1報)"、日本造船学会論文集、第144号、PP.296-302、1978
- 15) A.K. Blackadar, "Turbulence and Diffusion in the Atmosphere, Lectures in Environmental Sciences", Springer, 1997
- 16) D.B. Turner, "Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates", 2nd Edition, Lewis Publishers, 1994
- 17) 吉永 次郎、石田尾 徹、他、"高気流中における有機ガス用パッシブサンプラーの捕集特性"、第39回日本労働衛生工学会抄録集、pp.62-63、1999
- 18) U.S. EPA "User's Guide for The Industrial Source Complex(ISC3) Dispersion Models, Volume II-Description of Model Algorithms", EPA-454/B-95-003b, Sep. 1995
- 19) 例えば リスクアセスメントハンドブック 平石次郎ほか訳編 丸善株式会社、1998
- 20) EPA IRIS Substance file-Benzene; CASRN 71-43-2 (10/16/1998)
- 21) 危険は予測できるか 宮本純之訳 化学同人社、1994
- 22) 「新安全工学便覧」 安全工学協会編 コロナ社

図表一覧表

- 図-1 研究のフロー
- 図-2 499 総トン輸送船の概要と環境濃度計測点
- 図-3 輸送サイクル
- 図-4 ローディングアーム (接続部)
- 図-5 積み荷役中の環境濃度評価値
- 図-6 積み荷役中の平均環境濃度
- 図-7 航海中の環境濃度評価値
- 図-8 航海中の平均環境濃度
- 図-9 揚げ荷役中の環境濃度評価値
- 図-10 揚げ荷役中の平均環境濃度
- 図-11 タンククリーニング中の環境濃度評価値
- 図-12 タンククリーニング中の平均環境濃度
- 図-13 作業形態毎の居住区平均環境濃度
- 図-14 作業形態毎のベント管下平均環境濃度
- 図-15 作業形態毎のポンプ室平均環境濃度
- 図-16 連続環境濃度測定結果
- 図-17 連続環境濃度測定結果
- 図-18 同一船舶環境濃度計測結果
- 図-19 キャニスターとガスモニターとの相関
- 図-20.1 船舶番号3の曝露濃度
- 図-20.2 船舶番号4の曝露濃度
- 図-20.3 船舶番号5の曝露濃度
- 図-20.4 船舶番号6の曝露濃度
- 図-20.5 船舶番号7の曝露濃度
- 図-20.6 船舶番号8の曝露濃度
- 図-20.7 船舶番号9の曝露濃度
- 図-20.8 船舶番号10の曝露濃度
- 図-20.9 船舶番号11の曝露濃度
- 図-21 荷役形態における評価値
- 図-22 連続 (積み～クリーニング) 測定結果
- 図-23 作業環境濃度予測モデルとデータの流れ図
- 図-24 揮発性ガス発生試験装置
- 図-25 1/10 縮尺模型貨物タンク
- 図-26 タンク内拡散の模式図
- 図-27 補正係数 ζ の導出チャート
- 図-28 渦拡散係数の分布
- 図-29 実船における積み込み作業時の排出ガス採取方法
- 図-30 排出濃度と液面高さの関係
- 図-31 排出量とベンゼン温度の関係
- 図-32 自動採取、分析装置の概略図
- 図-33 蒸発量実験中の濃度の時間履歴
- 図-34 通常のタンククリーニング時の排出濃度
- 図-35 積み込み高さと残留量の関係
- 図-36 蒸発率の時間履歴の模式図 (底面)
- 図-37 排出濃度の時間履歴
- 図-38 実船での排出濃度時間履歴

- 図－39 大気中拡散モデルの座標系
- 図－40.1 y方向の標準偏差
- 図－40.2 z方向の標準偏差
- 図－41 積み込み作業時の排出濃度
- 図－43 x軸上の濃度分布
- 図－44 水平面内の濃度分布（積み込み作業時）
- 図－45 クリーニング中の濃度分布
- 図－46 4作業平均濃度
- 図－47 4作業時間荷重平均曝露濃度の累積相対度数
- 図－48 平均環境濃度における発ガンリスク
- 図－49.1 発ガンリスクの評価輸送あたりの曝露時間 0.5日の場合
- 図－49.2 発ガンリスクの評価輸送あたりの曝露時間 2.5日の場合
- 図－50 曝露濃度（アクリロニトリル）
- 図－51 アクリロニトリルの発ガンリスク
- 図－52 輸送サイクル平均曝露濃度の累積相対度数(キシレン)
- 図－53 輸送サイクル平均曝露濃度の累積相対度数(トルエン)
- 図－54 トルエンのリスク評価
- 図－55 残液回収実験装置
- 図－56.1 吸引タンク内圧力変化
- 図－56.2 吸引タンク内温度変化
- 図－56.3 負圧吸引による液位の変化
- 図－57 吸引口距離と残液量
- 図－58 吸引管内に残液が残る場合
- 図－59 吸引高さの違いによる吸引量の変化（初期負圧：-70cmHg 吸引管径：5.1mm）
- 図－60 ストリッピング残量削減の効果
- 図－61 呼吸具装着の効果(呼吸具のガス遮断効果 90%とする)
- 図－62 呼吸具装着時の発ガンリスク

- 表－1 ガスの発生と推定排出場所
- 表－2.1 作業形態と測定条件
- 表－2.2 作業形態と測定条件
- 表－3 加重平均環境濃度のまとめ(単位:ppm)
- 表－4 曝露濃度測定船舶一覧表
- 表－5 曝露濃度平均値(ppm)
- 表－6 環境濃度と曝露濃度
- 表－7 参照濃度
- 表－8 ストリッピング残留量別ケミカル船のタンク数

- 写真－1 甲板上のキャニスター設置状況
- 写真－2 有機ガスモニター、住友 3M No.3500

研究発表

発表題名	学会等	発表年月	発表者
ケミカルタンカーにおけるベンゼン荷役、輸送中の作業環境濃度について	日本航海学会論文集 99号、p.91	1998.9	間島、山口、藤井、 山之内、坂本
ケミカルタンカーにおけるベンゼン輸送中の乗員のガス曝露について	日本航海学会論文集 102号、p.211	2000.3	山口、藤井、間島、 山之内、坂本
ケミカルタンカーにおけるベンゼン輸送中の環境濃度とそのリスク	日本船用機関学会誌 Vol.35, No.10	2000.10	山口、藤井、間島、 山之内、坂本
Experiment Using Scale Model of Cargo Tank to Estimate the Concentration of Benzene Gas Emitted from Chemical Tanker During Loading Operation	The 5th Society of Petroleum Engineering International Conference	2000.6	間島、山口、山之内、 藤井、坂本
Working Environmental Level on Chemical Tanker Engaged in Benzene Transfer Operation	ISME Tokyo 2000	2000.10	間島、山口、藤井、 山之内、坂本
ベンゼン輸送船におけるガス濃度計測	第71回船舶技術研究所研究発表会	1998.6	藤井、山口、間島、 山之内、坂本
ベンゼン輸送船の環境ガス濃度	日本労働衛生工学会 第38回学会	1998.10	山口、藤井、間島、 山之内、坂本
ケミカルタンカーにおけるベンゼン積み込み作業時の排出濃度	日本機械学会第7回 交通・物流部門大会	1998.10	間島、山口、藤井、 山之内、坂本
ベンゼン積み込み作業時のタンク内拡散について	第73回船舶技術研究所研究発表会	1999.6	間島、山口、藤井、 山之内、坂本
ベンゼン輸送船乗員のガス曝露について	日本労働衛生工学会 第39回学会	1999.11	山口、藤井、間島、 山之内、坂本
高気流中における有機ガス用パッシブサンプラーの捕集特性	日本労働衛生工学会 第39回学会	1999.11	山口、藤井、間島、山之内、 坂本、嵐谷、保利ほか
ケミカルタンカーにおけるベンゼン輸送中の環境濃度	第63回マリンエンジニアリング学術講演会	1999.11	山口、藤井、間島、 山之内、坂本
ベンゼン積み込み作業時のタンク内拡散について 第2報：模型貨物タンクによる実験	第74回船舶技術研究所研究発表会	2000.6	間島、山口、藤井、 山之内、坂本
ケミカルタンカーにおけるベンゼン積み込み作業時の排出濃度予測モデル	日本航海学会講演会	2000.10	間島、山口、 藤井、山之内
化学物質輸送船乗員のガス曝露について	日本労働衛生工学会 第40回学会	2000.11	山口、藤井、間島、 山之内、阿曾

研究発表

- 1) 藤井忍、山口勝治、間島隆博、山之内博、坂本真二 第 71 回船舶技術研究所研究発表会(1998.6)
- 2) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 日本航海学会論文集 99 号、91(1998.9)
- 3) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二 日本労働衛生工学会第 38 回学会(1998.10)
- 4) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 日本機械学会第 7 回交通・物流部門大会(1998.10)
- 5) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 第 73 回船舶技術研究所研究発表会(1999.6)
- 6) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二 日本労働衛生工学会第 39 回学会(1999.11)
- 7) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二、嵐谷圭一、保利一ほか 日本労働衛生工学会第 39 回学会(1999.11)
- 8) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二 第 63 回マリンエンジニアリング学術講演会(1999.11)
- 9) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二 日本航海学会論文集 102 号、211(2000.3)
- 10) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 第 74 回船舶技術研究所研究発表会(2000.6)
- 11) 間島隆博、山口勝治、山之内博、藤井忍、坂本真二 The 5th Society of Petroleum Engineering International Conference(2000.6)
- 12) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 ISME Tokyo 2000(2000.10)
- 13) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二 日本舶用機関学会誌、Vol.35, No.10(2000.10)
- 14) 間島隆博、山口勝治、藤井忍、山之内博、坂本真二 日本航海学会講演会(2000.10)
- 15) 山口勝治、藤井忍、間島隆博、山之内博、坂本真二、阿曾 薫 日本労働衛生工学会第 40 回学会(2000.11)