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*

山口 勝 治** 藤 井 忍** 間 島 隆 博***
山 之 内 博** 坂 本 真 二****

Workplace Concentration of Benzene Vapor during Marine Transfer Operations and Its Risk

By Katsuji Yamaguchi, Sinobu Fujii, Takahiro Majima,
Hiroshi Yamanouchi, Shinji Sakamoto

International Maritime Organization (IMO) recognized that chronic exposure to very low concentration of benzene vapor in air of the order of a few parts per million may cause cancer.

It is necessary to protect the health of sailors exposed to benzene vapor to the same level as that of shore-based workers performing compatible tasks.

Measurements of onboard environment benzene vapor concentration for tankers carrying benzene during loading, transit, unloading and tank cleaning operations of routine tanker operation were made during all seasons of the year for typical size of 500 tons and 1000 tons cargoes.

The vapor samples were collected from 11 tankers in 3 points on the ship to the canister and were subsequently analyzed by gas chromatography. The benzene vapor concentrations were varied with operations and onboard points.

The risk of health of sailors exposed to benzene vapor is assessed using time and area averaged concentration. Effectiveness of wearing respiratory equipment for reducing health risk of sailors due to benzene exposure during marine vessel transfer operations is suggested.

1. はじめに

化学物質は我々の生活に欠かせないものとなっており、多くの化学物質が海上輸送されている。有用な化学物質も輸送中の管理の仕方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。

液体化学物質の海上輸送中の安全や環境への影響に関しては、これまで漏洩ガスによる爆発の危険性や大量曝露による急性毒性の問題として取り組まれ、長期、微量曝露による健康影響に焦点が

あてられたことはほとんどなかった。しかし、化学物質の微量曝露、長期曝露による健康影響は遅れて現出するため、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。従って、予防的観点から実態を把握し、有害揮発性化学物質の海上輸送に従事する乗組員のみならず、岸壁での荷役従事者および周辺住民へのガス曝露による健康被害を防止するための対策を構築する必要がある。

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大量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頻繁に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

*原稿受付 平成12年1月14日

**正会員 船舶技術研究所 (三鷹市新川6-38-1)

***船舶技術研究所 (三鷹市新川6-38-1)

****海上保安庁 (千代田区霞が関2-1-3)

機会は多くなっている。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⁽¹⁾、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うると懸念されている。

本報告では有害揮発性化学物質である純ベンゼンを取りあげ、ベンゼンを輸送している船舶の通常積み荷役時、航海中、揚げ荷役時およびタンククリーニング時に、甲板上、ポンプ室及び居住区域で、健康被害防止の観点から環境中の微小なベンゼンガス濃度を測定し、それらのデータを用いて、ベンゼン輸送作業従事中の乗組員へのベンゼンガス曝露による健康影響の大きさを、リスクから評価した結果、について述べる。

2. 化学物質海上輸送の実態

2.1 輸送の実情

1997年、国内で海上輸送された液体化学物質は約230品目で、年間1万トン以上は約90品目、10万トン以上はキシレン、スチレン、ベンゼン、1,2-ジクロロエタン、アクリロニトリル、トルエン等の健康に有害な影響を及ぼす物質を含む26品目であ

り、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。液体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と岸壁での荷役作業者、荷役検査員および工場周辺住民が含まれる。

2.2 輸送作業の区分と環境濃度の形成

揮発性液体化学物質の海上輸送は、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。作業中に揮発性化学物質は蒸発してガスとなり表1に示す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。乗組員は呼吸することにより空気中に含まれた化学物質に曝露される。

2.3 船上での液体化学物質による曝露の特徴

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が時間的に一定せず、環境濃度は場所的にも時間的にも一定しない。

3. 液体化学物質海上輸送中のリスク評価

3.1 評価の方法

液体化学物質を海上輸送することによって生ずる環境への影響を定量的に評価するため、それをリスクとして表現し、リスクを使って船上環境濃度をどう管理すべきか検討する。

リスク評価は図1に示す手順で行った。(1)問題とその原因物質を特定し、評価する影響判定点を決定する。(2)現場調査に基づきモニタリング方法を決定する。(3)化学物質に曝露される量をモニタリングの結果および排出源情報と拡散情報に基づいて解析する。(4)化学物質の量と影響の

表1 ガス排出場所

作業形態	発生機構	排出場所
積み荷役	積み荷からの蒸発	ベント管出口
	漏洩液からの蒸発	ローディングアーム 接続部
	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	ベント管出口
	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	ベント管出口
	漏洩液からの蒸発	ローディングアーム 接続部
	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	ベント管出口
	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
	ポンプ配管系の解放により それらへの残液や付着液の 蒸発	ポンプ配管系

定量的関係性を評価する。(5) 人健康リスクの大きさを算定し、評価する。(6) リスク削減のための代替案を選択し代替案を評価する。

3.2 対象物質としてベンゼンを特定

ベンゼンは化学製品の基礎材料であるため1995年には420万トンもの量が生産され、そのうち国内の海上輸送量は130万トンであり、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関東以西の太平洋および瀬戸内海地域、九州地区に幅広く分布し、工場内の海に面した湾内または内海の岸壁であり、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人の乗組員によって運行されている。岸壁では2～3人の作業員が直接荷役作業に従事する。

ベンゼンは発ガン物質であるため、厳しい環境濃度管理が求められており、作業環境ベンゼン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、保護具を装着するよう勧告している。

このようにベンゼンは有害物質であること、大量・頻繁に輸送されていること、IMOで濃度管理が勧告されたこと、等により海上輸送中の液体化学物質のリスク評価対象物質としてベンゼンを特定した。「癌になる危険性」を影響判定点として、

ベンゼン環境濃度測定データを用い、ベンゼン輸送に従事する乗組員に対する健康リスク評価を行った。

4. 環境濃度計測

4.1 測定船舶の概要と計測条件

測定対象船舶として選定したのは我が国の内航タンカーのうち、最も数が多く、よく用いられる499総トンおよび399総トンの液体化学薬品バラ積み船タイプⅢである。航海あたりのベンゼン輸送量は499GT船では約1000トン、399GT船では約500トンである。

499GT船(399GT)の全長は63m(52m)、型幅は10m(9m)である。なお、括弧は399GTについての記述である。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。

499GT輸送船の概要を図2に示す。本研究の測定対象船、作業形態、計測条件を表2に示す。500トン積み船6隻、1000トン積み船6隻について合計19ケース測定した。

図1 リスク評価の手順

図2 499GT輸送船の概要と計測場所

4.2 測定場所

船内でのベンゼンガスの採取は多くの乗組員が長時間過ごす場所で行った。乗組員が室内で作業及び休息する操舵室、居室及び食堂のある「居住区域」、ベンゼンの揚げ荷時等に使用され、濃度が比較的高いと考えられる「ポンプ室」、荷役作業中弁操作や貨物監視等の作業が長時間にわたり、作業がよく行われる甲板上とした。甲板上の代表点として「ベント管下」を選定した。居住区と同じ方法で換気が行われている機関室は居住区と同一区画と考えた。

4.3 ガス採取方法及び分析方法

ガスの採取及び分析は環境庁「有害大気汚染物質測定マニュアル」⁽²⁾に従って行った。

食堂、操舵室、ポンプ室、ベント管下に、あらかじめ洗浄され、真空ポンプで1mmHg以下に脱気された内容積15リットルのステンレス製の容器

キャニスターを設置し、作業形態ごとに作業の開始から終了までの間、一定流量で大気を採取した。このため採取されたガスは或る場所、或る作業区分での平均濃度を示すものとなる。採取点の高さは床から1m～1.5mであった。

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求めた。

5. 計測結果

船舶ごと、また「積み荷作業」「航海時の作業」「揚げ荷作業」「タンククリーニング作業」の作業形態ごとに、および「居住区」「ポンプ室」「ベント管下」の場所ごとに計測した結果を示す。

5.1 船舶ごとの環境濃度

船舶ごとに、計測場所をパラメータに、作業形態に対する環境濃度の測定例を図3に示す。環境濃度は作業形態ごとに、また計測場所ごとに大きく変化することを示している。場所ごとの作業形態に対する濃度変化の傾向は一定しておらず、船舶ごとに異なっている。船舶ごとにまた作業形態ごとに排出源条件や気象条件が異なることを示している。

5.2 作業形態ごとの環境濃度

居住区、ポンプ室、ベント管下で作業形態ごとに得られた測定結果を図4に棒グラフで示す。それぞれの棒は一般ごとの測定値を表している。

5.2.1 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る。積み荷役中、貨物の蒸発によってタンク内で発生したガスはベント管から排出される。ポンプ停止後、積み込み管系に残留し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。岸壁側と船側の接続管が切り離され、この時、積み込み管系に残った少量のベンゼンが漏れ、周辺の大気が汚染される。積み荷役中に計測された環境濃度を図4(a)に示す。ガス排出口であるベ

表2 計測条件と作業形態

計測 船舶 番号	計 測 月	総ト ン数 (トン)	積載 量 (トン)	ガス採 取時間 (分)	作業 形態	平均 気温 (℃)
101	5	499	1000	215	LO	20
102	7	498	1000	177	LO	31
102	7	498	1000	70	VA	31
102	7	498	1000	110	UL	31
103	2	498	500	94	LO	9
104	2	498	1000	185	LO	9
105	8	499	500	90	LO	30
105	8	499	500	130	VA	30
105	8	499	500	110	UL	30
106	9	263	500	137	LO	30
106	9	263	500	120	VA	30
107	11	499	1000	175	LO	—
108	8	499	1000	1770	VA	26.5
109	10	499	500	1075	VA	23
109	9	499	1000	330	TC	23
110	7	344	500	97	UL	22.5
110	7	344	500	300	TC	22.5
111	7	498	500	148	UL	30
111	7	498	500	180	TC	30

LO:積み荷役 UL:揚げ荷役
VA:航海 TC:タンククリーニング

図3 船舶ごとの環境濃度

ント管から最も離れている居住区内での値は0.1ppm程度以下と低く、そこより排出源に近いポンプ室は多少高い値を示している。バックグラウンドや岸壁のベンゼン濃度は0.01ppm程度かそれ以下であり、居住区内ではバックグラウンドよりやや高い値である。排出源直下のベント管下ではあまり高い濃度ではなく、荷役中のガスは速度をもって排出されることや風速によって、排出ガスの多くはベント管下に達しないことを示している。

5.2.2 航海中の環境濃度

航海時に計測された環境濃度を図4(b)に示す。積み地から揚げ地への航海では、貨物タンクは通常満載であり、航海中、貨物が蒸発することにより発生したガスがベント管から排出されるか、時

にはタンクに接続されたポンプ、弁、フランジ等配管系からのリークによるガスが発生源と考えられ、発生源強度は大きくないものの船内に広く分布している。航海時の環境濃度は積み荷役時に比べ、ベント管下とポンプ室が高い値となっている。居住区域は低い値である。

5.2.3 揚げ荷作業中の環境濃度

ベンゼンの陸揚げ中荷揚げ当該タンク以外のタンクで発生したガスはベント管から排出される。揚げ荷の最終段階でタンク内の液面監視はタンクハッチを開け、目視によって行われることが多い。その際、タンクからガスの放出が起こる。その後本船の主ポンプによって陸揚げしきれないベルマウスより下位のベンゼン及び荷揚げ管系に残留し

5.3 計測時間

作業中にガス採取を行ったため、作業時間と環境濃度の計測時間は同じとなる。つまり図5は4作業での船ごとの計測時間を棒グラフで示すが、乗組員の各作業区分での曝露時間をも表している。どの作業も船ごとの曝露時間に大きな違いはなく数時間内で終了するが、一日以上航海が続く船もある。4作業の曝露時間の平均値は平均と表示され、1170分（0.81日）であった。

5.4 平均環境濃度

ベント管下、ポンプ室、居住区域での時間荷重平均ガス濃度の各作業における算術平均濃度を図6(a)に、また、3場所における4作業算術平均濃度

図5 計測（曝露）時間

(a) 3場所平均濃度

および、3場所4作業算術平均濃度を図6(b)に示す。クリーニング中が最も高く3ppmを超えており、揚げ荷役中がこれに続いている。航海中、積み荷役中は0.1ppm程度以下の低い濃度となっている。また、ポンプ室が最も高く2ppmを超えており、居住区域は0.3ppmと低い濃度である。クリーニング作業中の高濃度とポンプ室の機械類からのガスの漏洩・排出のため4作業、3場所での平均濃度は1.3ppmで、保護具装着濃度と同程度である。

6. リスク解析

ベンゼン輸送中の船上で、ベンゼンガスに曝露される乗組員の健康被害の影響を、発ガンリスクから評価する。ここでリスクは「どうしても避けたいことの発生確率」と定義され、どうしても避けたいことを「発ガン」とした。モニタリングによって得られた環境濃度で乗組員は曝露され、曝露時間は計測時間に一致するとして評価した。乗組員が呼吸し、発ガン性ベンゼンガスに曝露されることにより追加される発ガンリスクを、量-反応関係で無しきい値および直線モデルを用い、発ガンリスクの上限を推定する次の関係⁽³⁾から求めた。

$$PC = UR \times C$$

ここでPC：生涯発ガンリスク

UR:ユニットリスク [$\text{m}^3/\mu\text{g}$]

C：生涯平均暴露濃度 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

(b) 4作業平均濃度

図6 平均環境濃度

ベンゼンのユニットリスクは $2.2 \times 10^{-6} \sim 7.8 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\mu\text{g})$ であることが示されており⁽⁴⁾、平均値の $5 \times 10^{-6} (\text{m}^3/\mu\text{g})$ を用いる。生涯平均暴露濃度は次のようにして求めた。生涯暴露時間はNTとなる(N:生涯輸送従事回数 T:輸送あたりの曝露時間[day])。従って生涯曝露量はNTC₀である。C₀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の曝露濃度であり、生涯を70年とすれば $C = \text{NTC}_0/70 \times 365$ となる。以上の関係を用い、5.4で求めた平均濃度1.3ppm($=4.2 \times 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)に曝露される乗組員に対し、輸送あたりの曝露時間を5.3で求めた実船での運行実績より0.81日にとり、乗組員のベンゼン輸送従事回数と発ガンリスクとの関係を求めれば図7の「装着なし(1.3ppm)」が得られる。輸送従事回数が増えれば発ガンリスクは増加することが示されている。発ガンリスクは曝露濃度のみならず、輸送あたりの曝露時間や輸送回数によって変化し、平均濃度より高曝露濃度の乗組員の場合には輸送回数を少なくすることによりリスクを抑制でき、また低曝露濃度でも輸送回数が増大すればリスクは大きくなる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

10^{-6} の発ガンリスクが一般的に認められる許容値とされている。この値は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。平均曝露濃度の乗組員のベンゼン輸送に伴う発ガンリスクを一般人並にするには、生涯輸送従事回数を数回程度以下にする必要があることになる。職業的曝露は一般集団を対象としたものより大きい値が適用されており、0.001程度とされている⁽⁷⁾。このリスクに対応する輸送回数は1000回をやや超える程度となる。乗組員の健康被害の大きさは乗組

員の曝露濃度とともに船上での作業方法、作業時間、輸送従事回数等によって大きく変わると推定され、許容すべきリスク値が定められれば、これらの条件によっても許容リスク値内にコントロールすることが可能となる。

リスク評価は個人差の無視、曝露の単純算術処理などいくつかの仮定に基づいて行われており、得られたリスク値にはかなりの不確実性を伴っている。

7. 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考えられる。発生源対策ではガス発生・排出を抑制して環境濃度を低下させ、影響緩和策は乗組員の曝露機会を少なくする方法である。ここでは最も簡易な影響緩和策である、作業中に保護具装着の効果を検討した。高環境濃度となる作業形態および作業場所で呼吸具を装着する次の対策を想定した。

対策A：クリーニング時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

呼吸具装着の効果をも90%（乗組員は環境ガス濃度の10%に曝露される）として評価した4作業平均濃度を図8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。呼吸具を装着しない時が1.3ppmであるので対策Aまたは対策Bでは約40%の曝露濃度になると推定され、対策Cを行うことにより約20%となり、作業中呼吸具を装着する効果の大きいことが示されている。

呼吸具装着の効果を定量的に評価した結果は図7に示され、大きなリスク削減となって現れ、リスク削減の有効な手段である。

8. まとめ

船上のベンゼン環境ガス濃度を把握し、データに基づいた乗組員の健康リスク評価とリスク削減の検討を行い、以下の結果を得た。

図7 発ガンリスク

- 1) 輸送中の平均環境濃度は許容作業限界濃度に近い値と推定された。ただし、個人の曝露は作業方法、作業時間、作業場所等により相当の幅を持っているものと考えられる。
- 2) 積み荷役、航海中では濃度の推定値が呼吸具装着勧告値(8時間TWA=1ppm)を下回っていることから、人の健康に影響を及ぼしている可能性は小さいと考えられる。
- 3) 揚げ荷役、タンククリーニングにおいては、濃度の推定値が勧告値と同程度以上となることがあり得ることから、作業時には呼吸具を装着するか、環境中の濃度の低減を図る必要がある。
- 4) ベンゼン輸送中の乗組員の健康リスクは環境濃度、輸送あたりの曝露時間、生涯輸送従事回数によって影響され、これらを適切に組み合わせることによりリスクの大きさをコントロールできる。
- 5) クリーニング時やポンプ室での作業時に呼吸具装着の効果の大きいことが示された。

9. 謝 辞

本研究を実施するにあたり乗組員、荷役関係者、運行関係者、その他多くの方々の協力を得た。協力いただいたみなさまに感謝いたします。

文 献

- (1) 間島、山口、藤井、山之内、坂本、日本航海学会論文集 99号(1998)、91.
- (2) 環境庁大気保全局、「有害大気汚染物質測定マニュアル」平成9年
- (3) 例えば平石次郎ほか訳編、「リスクアセスメントハンドブック」(1998年)、丸善株式会社
- (4) EPA IRIS Substance file-Benzene; CASRN 71-43-2 (10/16/1998)
- (5) 山口、藤井、間島、山之内、坂本、日本航海学会論文集 102号、(1999).
- (6) 山口、藤井、間島、山之内、坂本、日本労働衛生工学会講演抄録集 BK-34、172(1999-11).
- (7) J.V. ロドリックス著 宮本純之訳、「危険は予測できるか」(1994年)、化学同人社

図8 呼吸具装着の効果