

ケミカルタンカー乗組員の健康リスク解析

(第2報、非発がん性物質の場合)

環境・エネルギー研究領域 ＊間島 隆博
環境・エネルギー研究領域 宮田 修
環境・エネルギー研究領域 上田 浩一
環境・エネルギー研究領域 山之内 博

1. はじめに

国際海事機関（IMO）はタンカー乗組員への健康被害を憂慮し、ベンゼンを0.5%以上含む物質を輸送する船上でTWA(Time Weighted Average)が1(ppm)、STEL(Short Term Exposure Limit)が5(ppm)を越える場合、マスクなどの保護具を装着するよう勧告している。図1のように我が国において、ケミカルタンカーは多品目の化学物質を大量に輸送しており⁽¹⁾、その中にはベンゼンをはじめ健康に悪影響を及ぼす物質が多数含まれる。そのため輸送に従事する乗組員や岸壁での作業員、周辺住民への化学物質曝露による健康影響が懸念される。

輸送作業中に船内で蒸発した化学物質の一部は、船舶から排出・漏洩し、環境が汚染される。その環境中で活動する乗組員は主に呼吸により化学物質に曝露される。ケミカルタンカーの輸送品目は多種であり、輸送物質ごとに健康影響の種類や程度が異なる。これら化学物質に多様に曝露される乗組員のトータルの健康影響を予防的観点から評価し、対策を立て、管理する必要がある。

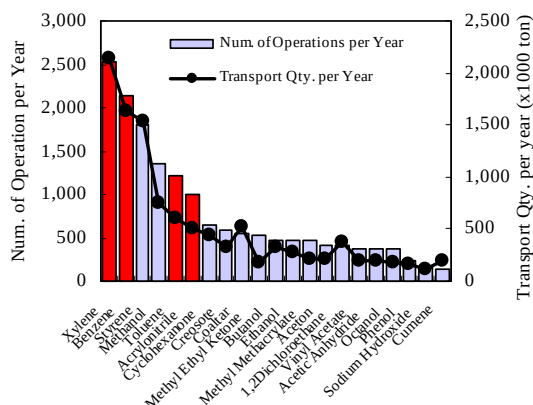


図1 海上輸送化学物質の年間輸送量と航海数

前報告⁽²⁾では発がん性物質であり、海上輸送量が多い、ベンゼン、アクリロニトリルに焦点を当て、ケミカルタンカー乗組員について損失余命を評価指標とする健康リスク解析を試みた。

評価指標として損失余命を用いる利点は従来困難であった、発がん性物質と非発がん性物質の影響を比較できる点にある。本報告ではこの利点を活かし、非発がん性物質であるキシレン、トルエンについて解析を行い、前報で明らかになった発がん性物質であるベンゼン、アクリロニトリルのリスクとの比較を行う。さらに、損失余命では曝露の年齢という重要な要素が考慮でき、就業年齢に比較的高濃度の曝露が集中するケミカルタンカー乗組員の解析に有効となる。

2. 曝露濃度

曝露濃度の実態が明らかでなければ、解析は進められない。そこで、ケミカルタンカー乗組員を対象とし、曝露濃度の調査、計測を行った。国内における化学物質の海上輸送では主に図2の499GT船が利用される。このクラスの船は液体貨物、約1,300KL,1000tonを積載できる能力を持つ。

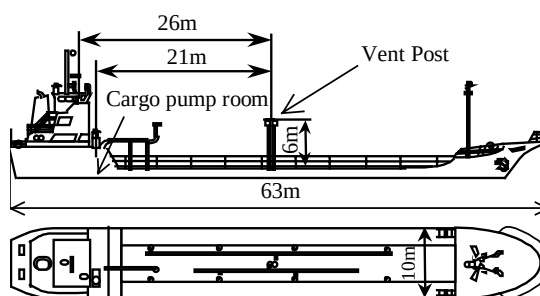


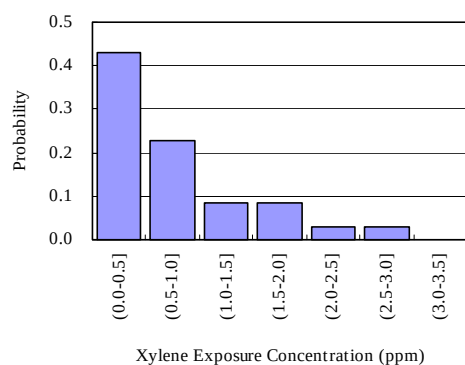
図2 499GT ケミカルタンカー

計測手法は文献⁽³⁾と同じであり、キシレン、トルエン輸送船乗組員の襟元にパッシブサンプラー（住友 3M ガスモニター #3500、#3520）を装着したまま、積み荷役、航海、揚げ荷役、タンククリーニング（ここでは乾燥作業も含む）で構成される輸送サイクルの各作業を行う。よって、マスク装着などの保護措置の影響はデータに反映されない。タンククリーニング作業の終了後、パッシブサンプラーを密封、回収し、後日分析する。これより、ある化学物質の積み込みからタンククリーニング終了までの 1 輸送サイクル中における時間平均曝露濃度を得る。

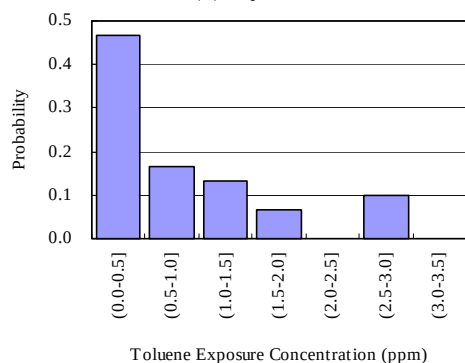
表 1 曝露濃度計測結果

物質*		BZ	AN	XY	TL
算術平均 曝露濃度	(ppm)	3.5	3.1	1.6	1.8
	(mg/m ³)	11	6.7	6.9	6.8
GM, c_0	(ppm)	1.5	1.4	0.7	0.7
	(mg/m ³)	4.9	3.1	2.9	2.6
GSDe		4.5	4.3	3.7	3.6
T	(day)	0.59	0.75	0.86	0.79

* BZ: Benzene, AN: Acronitorile, XY: Xylene, TL: Toluene



(a) Xylene



(b) Toluene

図 3 曝露濃度分布の計測結果

一般的に曝露濃度は対数正規分布となり、乗組員の曝露濃度もこの分布とよく一致する。キシレン、トルエン輸送船乗組員から得られた濃度分布を図 3 (a)、(b)に示す。サンプル数はキシレン輸送船 8 隻、乗組員数 35 人、トルエン輸送船 7 隻、乗組員数 31 人であった。1 輸送作業の平均時間、すなわち平均曝露時間 T 、及び算術、幾何平均曝露濃度(GM)、幾何標準偏差(GSDe)を前報で報告したベンゼン、アクリロニトリルと合わせて表 1 にまとめる。

3. 損失余命計算法

蒲生らが提案したモデルを解析手法として用いる。ここではモデルの大略を記述するに止め、詳細は文献⁽⁴⁾を参照されたい。本モデルで用いる損失余命は余命の短縮を意味し、死亡年齢が早まることを扱った指標である。本報でいう「曝露」とはケミカルタンカーから排出される化学物質（キシレン、トルエン）への曝露を意味し、損失余命とは、式(5)による曝露を受けた集団（以降、乗組員集団）の平均余命と、式(4)による曝露を受けない集団（以降、コントロール集団）の平均余命との差、式 (6) である。この両集団の生存曲線を模式的に表すと図 4 のようになる。

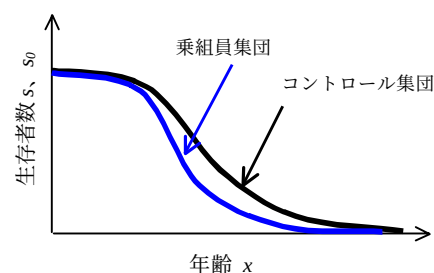


図 4 生存曲線模式図

化学物質への曝露による過剰な死亡により、乗組員集団の曲線はコントロール集団と比較して下方へ移動することが示されている。ここで、コントロール集団の生存曲線は平成 7 年生命表(男性)を用い、平均余命は年齢死亡率をもとに、生命表を用いた計算により各年齢について得られる。コントロール集団の $x-1$ 歳における全死因死亡率を $\lambda_0(x-1)$ とすると、 x 歳における生存者数 $s_0(x)$ は以下の式で表される。

$$s_0(x) = s_0(x-1) \times \{1 - \lambda_0(x-1)\} \quad \text{式(1)}$$

乗組員集団の x 歳における全死因死亡率 $\lambda(x)$ は、曝露により生じる死亡率の上昇が加味され、以下の式で表される。

$$\lambda(x) = R^{E(x)} \cdot \lambda_0(x) \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $E(x)$ は x 歳での曝露の有無を表し、曝露がある場合は 1、無い場合は 0 となる。 R は健康者を 1 とした死亡率の相対的な値を示し、曝露により被る重篤度（健康状態の悪化の度合い）に応じて表 2 のように表される。

表 2 相対死亡率と重篤度

	健康状態	相対死亡率, R
I	重度の障害（日常生活が不可）	3.67
II	軽度の障害（日常生活が困難）	1.81
III	慢性の病態（複数の慢性疾患 *）	1.37
IV	慢性の病態（一つの慢性疾患 *）	1.21
V	自覚症状（痙攣や疲労など）	1.11
VI	無症状	1.00

*）高血圧、喘息、てんかん、糖尿病、がん、結核、胃潰瘍、慢性の肝障害、等。

これより乗組員集団の $x-1$ 歳における死亡率 $\lambda(x-1)$ から、 x 歳における生存者数 $s(x)$ は以下の式で表される。

$$s(x) = p \times s(x-1) \times \{1 - \lambda(x-1)\} + (1-p) \times s(x-1) \times \{1 - \lambda_0(x-1)\} \quad \text{式(3)}$$

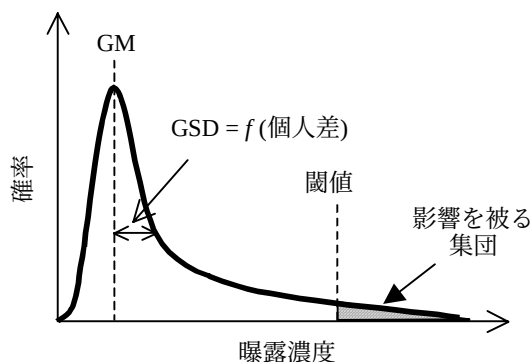


図 5 曝露分布の模式図

ここで、 p は曝露濃度分布を模式的に表した図 5 のように、曝露を受ける乗組員集団の中で閾値（それ以下では毒性が発現しないと見なせる用量）を超える割合を示す。 p の算出方法及び閾値については後述する。

次に、 x 歳の平均余命はコントロール集団の生存者数と乗組員集団の生存者数から、それぞれ次のように表される。

コントロール集団

$$L_0(x) = \frac{\frac{s_0(x) + s_0(110)}{2} + \sum_{y=x+1}^{109} s_0(y)}{s_0(x)} \times 1(\text{year}) \quad \text{式(4)}$$

乗組員集団

$$L(x) = \frac{\frac{s(x) + s(110)}{2} + \sum_{y=x+1}^{109} s(y)}{s(x)} \times 1(\text{year}) \quad \text{式(5)}$$

ここで、式中の 110 という数字は男性の最高齢者の年齢を示している。

曝露により乗組員集団の生存者数はコントロール集団の生存者数より小さくなり、図 4 に示す両集団の差となる。よって、上式で示される平均余命も乗組員集団のほうが小さい値となり、この差がコントロール集団より乗組員集団が損失している余命、つまり損失余命(LLE)である。よって x 歳での損失余命は以下の式により計算される。

$$LLE(x) = L_0(x) - L(x) \quad \text{式(6)}$$

健康リスク解析において非発がん性物質が発がん性物質と異なる点は、閾値（式(3)の p に関連する）が存在すると考えられている点にある。つまり、非発がん性物質であるキシレンやトルエンでは図 3 に示した曝露分布が閾値を越えないのであれば、曝露により被るリスクはなく、損失余命は 0 となる。（一方、発がん性物質の場合は閾値がなく、いかなる微少な用量であっても、その用量に比例した発がんリスクを被ると考えられている。）図 5 には非発がん性物質の曝露分布とその影響を受ける集団を模式的に示した。

2章で示したように曝露濃度分布は対数正規分布とみなせ、表1にまとめた幾何平均値(GM)と幾何標準偏差(GSD)により一意に決定される。ここで、幾何標準偏差(GSD)には、感受性($GSD_s=2.7$)⁽⁵⁾、代謝($GSD_m=1.4$)⁽⁶⁾の個人差が加味され、表1に示した曝露濃度分布の個人差 GSD_e と合わせて、以下の式により値を算出する。

$$\log GSD = \sqrt{(\log GSD_s)^2 + (\log GSD_m)^2 + (\log GSD_e)^2} \quad \text{式(7)}$$

ここで、代謝、感受性、曝露の個人差の分布はお互いに独立であることが仮定されている。これより、図5のように閾値 c_{TV} を越える割合 p は次式で得られる。

$$p = 1 - \int_0^{c_{TV}} \text{probability}(c) dc \quad \text{式(8)}$$

ただし、損失余命を計算する上で基準となるコントロール集団の生存曲線は生命表から得られるが、この表の時間に関する最小単位は1年である。よって曝露濃度も年間平均値に換算する必要がある。以下の式により輸送作業中の幾何平均曝露濃度 c_o を年間曝露濃度 c_{year} に換算しておく。

$$c_{year} = \frac{c_o n T}{365} \quad \text{式(9)}$$

ここで n はキシレン、トルエン輸送に従事する年平均回数、 T は輸送作業の平均時間（表1でキシレン：0.86日、トルエン：0.79日）である。

また、式(2)の相対死亡率 R は曝露により被る重篤度により変化する。重篤度は6つの段階に分類され、表2のようにまとめられている⁽⁷⁾。各重篤度は9年間の追跡調査⁽⁸⁾により得られた生存率から年間死亡率が割り出され、最も健康状態が良く自覚症状がない集団、分類VIの死亡率を1とした相対死亡率 R として表される。よって、分類VIの集団の死亡率は曝露を受けないコントロール集団の死亡率 λ_0 に等しい。キシレンまたはトルエンの場合、曝露により、分類Vの自覚症状が見られ、 $R=1.11$ が与えられるものと仮定する⁽⁷⁾。

以上で表1の輸送作業中の幾何平均濃度 c_o と式(9)より計算された c_{year} 、表1の曝露濃度に関する

幾何標準偏差(GSD_e)と式(7)より計算された GSD から図5の分布が決定される。これより c_{TV} を閾値として式(8)から閾値を越える割合が計算され、さらに式(6)より損失余命が得られる。

ここで、キシレン、トルエンの閾値は文献⁽⁷⁾に用いられた値、 $5(\text{mg}/\text{m}^3)$ 、 $12(\text{mg}/\text{m}^3)$ を使用する。なお、本来の閾値は個人差を考慮して、さらに安全側の値とし、大多数の人が健康被害を受けない用量を表す。一方、本モデルでは個人差を式(7)の中で組み込んでいるため、上で設定した閾値は一般的に用いられる値より大きくなっている。

以上の計算過程は複雑であり、計算機の支援が必須となる。文献⁽⁹⁾では、電卓などを用いて簡易に計算ができる方法を提案している。

4. 解析結果

前章までの手法を用いて、キシレン、トルエン輸送作業により被るリスクを示すとともに前報に記載した発がん性物質であるベンゼン、アクリロニトリルの輸送作業と比較してみる。なお、以下では、0歳における損失余命である損失寿命、 $LLE(x=0)$ を用いて議論する。

ここでは、20～59歳までの40年間の就業期間を設定し、各物質を輸送する年間平均航海数を横軸に変化させて計算した損失寿命の結果を図6に示す。

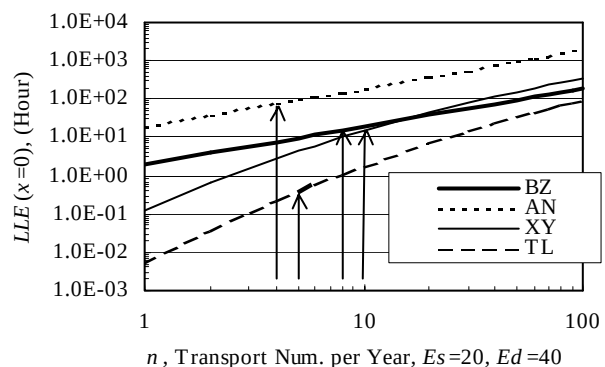


図6 損失寿命の比較

発がん性物質の損失寿命は平均年間航海数 n に対して直線的な増加傾向を示しているが、非発がん性物質のキシレン、トルエンでは曲線となる。キシレンとベンゼンの結果を比較してみると、

$n=14$ を境界にしてそれ以下ではベンゼンの損失寿命が大きくなり、それ以上ではキシレンが大きくなる。しかしながらどの物質もアクリロニトリルほど大きな損失寿命には至らず、トルエンはどの物質よりも小さなリスクとなる。

現在、ケミカルタンカー数は約 260 隻であり、図 1 よりキシレン輸送回数は年間 2,500 回程度となるため、1 隻あたり年間 10 回程度のキシレン輸送を経験することになる。タンカー乗組員としての勤務を 20～59 歳の 40 年とし、年平均 10 回のキシレン輸送に従事するとした場合、損失寿命 $LLE(x=0)$ は 15 時間となる。ベンゼンとアクリロニトリル、トルエンも同様に計算すると、年間の平均輸送回数はベンゼン 8 回、アクリロニトリル 4 回、トルエン 5 回程度となり、損失余命はそれぞれ 15 時間、80 時間、0.4 時間となる。この結果を表 3 にまとめる。

表 3 損失寿命のまとめ

	XY	BZ	AN	TL
年間輸送回数, n	10	8	4	5
曝露期間	Age:20～59 ($Es=20, Ed=40$)			
LLE (Hour)	15	15	80	0.4
LLE (Hour)[with Mask]	0.6	3	16	0.006

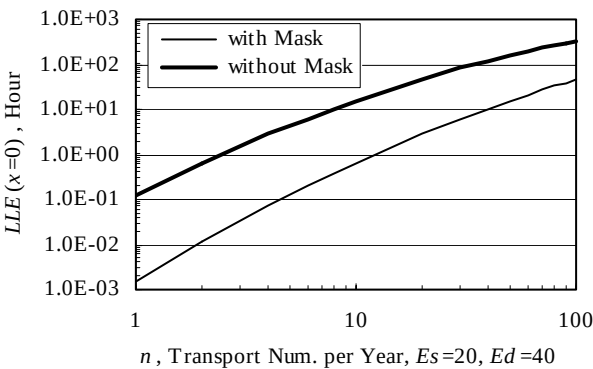


図 7 マスク装着の効果（キシレンの場合）

本来は上記計算に各物質の 1 人あたりの年間平均輸送従事回数 n を用いるべきである。しかし、ケミカルタンカー乗組員総数、1 隻あたりの乗組員数、各輸送物質に従事する回数及びこれらの相

互に関連する詳細な輸送の実態が明確でないため、各物質の 1 隻あたりの年間平均航海数を用いた。

人によって大小があるはずの輸送回数について、平均化された数値を用いることは、曝露レベルを平均化している（つまり曝露の個人差 GSD_e を過小評価している）ことから、健康影響を被る人の割合、ひいては、計算される損失寿命を過小評価している可能性がある。

一方で、本報告で用いた GSD_e には、曝露濃度のばらつきを過大評価、すなわち損失余命を過大評価している可能性もある。というのも、一回一回の作業従事が図 3 の曝露濃度の確率分布（ばらつきが GSD_e ）に従っているとしても、輸送のたびに様々な曝露濃度を経験するとすれば、輸送従事回数 n 回の平均曝露濃度のばらつきは $\log GSD_e$ ではなく $\log GSD_e / \sqrt{n}$ となるはずである。本報告で GSD_e をそのまま用いたことは、乗組員が毎回決まった濃度に曝露すると仮定したことを意味している（乗組員の集合で考えると図 3 の分布となる）。

結果として得られる損失寿命が過大評価か、過小評価かの判断は詳細な運航実績を把握しなければならず、事実上解析は不可能である。しかし、ここでは、計算に用いた仮定（平均航海回数を用いること、および、作業従事ごとの曝露濃度のばらつきを曝露の個人差としたこと）が、実態と大きく乖離しないものと考えられる上に、仮にそうであっても、上記の過小評価と過大評価の要因が暗に相殺されるものと期待できる。したがって、リスクレベルの見積もりは概ね妥当と判断した。

3 章に記述した通り、実船計測で得られた曝露濃度データは保護具による効果を反映していないが、適切な時期、場所でマスクを装着すれば 80% 程度の大幅な曝露量の低減が期待できる⁽¹⁰⁾。発がん性物質の場合、曝露の低減率はそのまま損失寿命の低減率となる。マスク装着の効果を 80% の曝露濃度の低下 (c_{year} が 80% 減) とすれば、損失寿命はベンゼンで 3 時間、アクリロニトリルでは 16 時間へと削減できる。一方、キシレンの場合、マスク装着の効果を同様に 80% の曝露濃度の低減、 GSD は変化しないと仮定して計算した結果を図

7に示す。非発がん性物質の場合は、損失寿命が閾値を超える割合 p に依存する。 p の低減率は曝露濃度の低減率以上に大きくなるため、発がん性物質と比較して効果的にリスクを削減できる。表3の通りキシレンの損失寿命は $n=10$ で0.6時間となり95%程度のリスク削減が示され、トルエンの場合は0.006時間となり、99%のリスク削減となる。

5. まとめ

発がん性物質と非発がん性物質への曝露による健康リスクを統一的に評価することが可能な損失余命による健康リスク解析手法を、両物質の曝露を受けるケミカルタンカー乗組員に適用した。非発がん性物質であり国内の海上輸送量が多いキシレン、トルエンについて損失寿命を計算するとともに、発がん性物質であるベンゼンとアクリロニトリルによる結果と比較した。評価では実船での曝露濃度と運航データを用い、結果はキシレンの海上輸送によるリスクはベンゼンと同程度のレベルであるが、アクリロニトリルほどのリスクには至らなかった。トルエンの場合はここで比較した物質の中で最小のリスクとなることが示された。また、非発がん性物質の場合はマスク装着によるリスク削減が曝露量の低減率以上に期待できることが分かった。

謝辞

本報告に記載されたデータは多くのケミカルタンカー乗組員、化学工場事業所の協力の下、得られたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 全国内航タンカー海運組合、内航ケミカル船輸送品目、全国内航タンカー海運組合調査資料
- (2) 間島 隆博、宮田 修、上田 浩一、山之内 博、ケミカルタンカー乗組員の健康リスク解析（第1報、発がん性物質の場合）、第3回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp.259-264
- (3) 間島隆博、山口勝治、藤井忍他、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、海上技術安全研究所報告、第1巻、第4号、pp.257-295
- (4) 蒲生昌志：環境汚染物質の健康リスク評価に関する研究、東京大学博士論文、1995
- (5) Nordberg, G.F., Strangert, P. : In Effects and Dose-Response Relationships of Toxic Metals, pp.273-282, (Nordberg, G.F. Ed., Elsevier, 1976)
- (6) Masuyama, M. : Rep. Stat. Appl. Res. 24, 200-206, 1977
- (7) Gamo, M., Oka, T., Nakanishi, J., Ranking the Risks of 12 Major Environmental Pollutants that Occur in Japan, Chemosphere, 53, pp.277-284, 2003
- (8) Berkman, L.F., Breslow, L. : Health and Ways of Living - The Alameda County Study, Oxford University Press, 1983、森本兼曩 監訳、星旦二 編訳：生活習慣と健康 ライフスタイルの科学、HBJ 出版局、1989
- (9) 間島隆博、山口勝治、柴田 清、蒲生昌志：化学物質輸送船乗組員に及ぼす有害ガス曝露の健康影響評価－非発がん性物質の場合－、日本航海学会論文集、110号、pp.157-164、2004
- (10) Majima, T., Yamaguchi, K., Fujii, S. *et al* : Working Environment Level on Chemical Tanker Engaged in Benzene Transfer Operation, Proceedings of 6th ISME Tokyo, Vol. I, pp.101-106、2000