

ケミカルタンカー乗組員の健康リスク解析

(第3報、ケミカルタンカー乗組員のリスクレベル)

環境・エネルギー研究領域

*間島 隆博、宮田 修、山之内 博、柴田 清

1. はじめに

国内のケミカルタンカーは多種、大量の化学物質を輸送しているが、その多くは揮発性有機化合物(VOC)であり、低濃度であっても長期的な曝露により健康への影響が懸念される物質が多数含まれる。ケミカルタンカー乗組員は貨物の蒸発ガスに曝露する環境下で日々作業を繰り返しており、IMO（国際海事機関）ではベンゼンについて保護具装着に関する勧告を出している。図1は平成10年から13年までの4年間の貨物別の年平均航海数と年平均輸送量⁽¹⁾を示す。

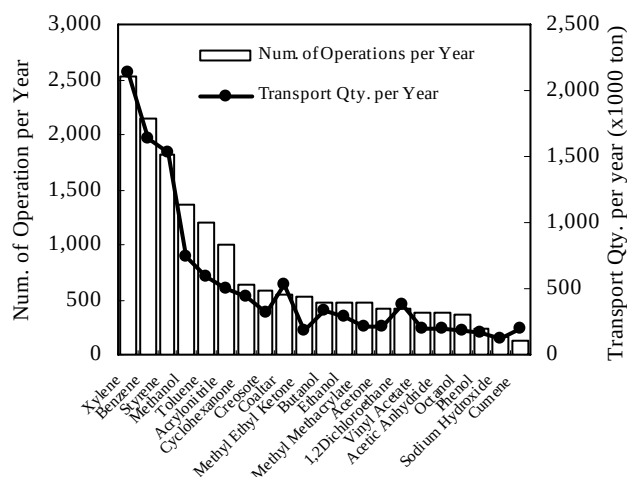


図1 国内化学物質の年間輸送量と航海数

前2報^{(2),(3)}により、著者らは発がん性物質（ベンゼン、アクリロニトリル）、非発がん性物質（キシレン、トルエン）についてケミカルタンカー乗組員の健康影響リスク解析を損失余命という指標を用いて実施した。このように損失余命を評価指標として利用する利点の1つは従来困難であった発がん性、非発がん性、両物質の影響を比較できる点にある。ここでは、非発がん性物質と考えられ、新たにデータが得られたスチレンの曝露濃度を用いて評価を行うとともに、海上輸送される他

の化学物質についても、損失余命によるリスク解析を進める。さらに、ケミカルタンカー乗組員という集団にとって健康への影響の度合いが大きな物質（貨物）に順位付けを行い、リスクランキングを作成する。

2. 解析方法

ここでは健康影響リスクの評価指標として損失余命を用い、蒲生らが提案したモデルによる計算を行う。ここでは損失余命の概要にふれ、詳細なモデルの導出過程や計算方法等は文献^{(4),(5)}を参照されたい。

2.1 損失余命

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。ここでは曝露の影響を受けないコントロール集団と曝露の影響を受けるケミカルタンカー乗組員集団との余命の差を表す。本報で曝露とはケミカルタンカーから排出される化学物質への曝露を意味する。両集団の生存曲線を模式的に示すと図2のようになり、乗組員集団の曲線は曝露に起因する過剰な死亡率の上昇により下方へ移動することが示されている。

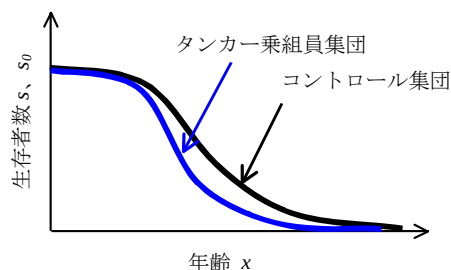


図2 生存曲線の模式図

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。これを用いて損失余命は以下のように計算される。

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。

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

次に、乗組員集団の x 歳における全死因死亡率を $\lambda(x)$ とし、 x 歳での生存者数 $s(x)$ は、

$$s(x) = p \times s(x-1) \times \{1 - \lambda(x-1)\} + (1-p) \times s(x-1) \times \{1 - \lambda_0(x-1)\} \quad (2)$$

ここで、 p は曝露を受ける集団の中で影響を被る割合を意味し、発症する閾値（それ以下では毒性が発現しないと見なせる用量）と関連している。

次に、 x 歳の平均余命はコントロール集団の生存者数、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

$$L_0(x) = \frac{\frac{s_0(x) + s_0(110)}{2} + \sum_{y=x+1}^{109} s_0(y)}{s_0(x)} \times 1(\text{year}) \quad (3)$$

乗組員集団

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

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。最終的に x 歳での損失余命(LLE)は以下の式により計算される。

$$LLE(x) = L_0(x) - L(x) \quad (5)$$

なお、0 歳における損失余命 $LLE(x=0)$ を損失寿命と呼び、本報では損失寿命により議論を進める。

2. 2 曝露と死亡率の関連

図 3 には曝露濃度分布を模式的に示した。一般的に、曝露濃度分布は対数正規分布となり、幾何平均値(GM)と幾何標準偏差(GSD)により一意に決定できる。式(2)の健康影響を被る割合 p について、発がん性物質の場合は閾値が存在せず、微小な用

量であってもそれに比例したリスクを被ると考えられており、 $p=1$ となる。非発がん性物質の場合は、図 3 の通り物質固有の閾値、 C_{TV} を用いて計算する。また乗組員集団の死亡率 $\lambda(x)$ には曝露により被る新たな死亡率が加味され、発がん性物質、非発がん性物質により計算過程が異なる。

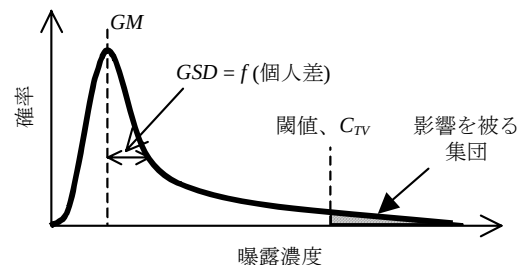


図 3 曝露濃度分布の模式図

発がん性物質の場合

$$\lambda(x) = \lambda_0(x) + \Delta\mu(x) \quad (6)$$

ここで、 $\Delta\mu$ が曝露による死亡率上昇を意味しているが、曝露を受ける年齢、物質固有のユニットリスク(UR)などを考慮して決定される。

非発がん性物質の場合

$$\lambda(x) = R^{E(x)} \cdot \lambda_0(x) \quad (7)$$

ここで、 E は x 歳での曝露の有無により 1,0 をとる。 R はコントロール集団に対する乗組員集団の相対死亡率を表し、表 1 のように曝露により被る重篤度に応じて値が決定される。（なお、 p 及び λ についての計算方法は既報を参照されたい。）

表 1 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	慢性的病態（複数の慢性疾患 ^{*)} ）	1.37
IV	慢性的病態（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、慢性的肝障害、等。

本報で解析対象となる全物質の毒性に関するデータを表 2 にまとめる。ここで n は図 1 に示した

年間航海数から算出したタンカー 1 隻当たりの平均航海数である。

表 2 物質の毒性データ

化学物質	UR(m ³ /μg)	閾値C _{TV} (mg/m ³)	健康状態	n
Benzene	5.0×10 ⁻⁶ (*)	-----	-----	8
Acrylonitrile	6.8×10 ⁻⁵ (**)	-----	-----	4
Xylene	-----	5 (***)	V (***)	10
Toluene	-----	12 (***)	V (***)	5
Styrene	-----	34 (+)	V (+)	8
1,2-Dichloroethane	2.6×10 ⁻⁵ (++)	-----	-----	2
Vinyl Acetate	-----	5 (+++)	V (+++)	2

(*) USEPA IRIS(Integrated Risk Information System), Benzene

Average of 2.2×10⁻⁶~7.8×10⁻⁶(m³/μg)

(**) USEPA IRIS, Acrylonitrile

(***) Gamo(2003) (6)

(+) USEPA (IRIS) determined the NOAEL to be 34(mg/m³) based on an occupational study, and it was assumed that the most sensitive person in the occupational population would be of average sensitivity in the general population.

(++)USEPA IRIS(Integrated Risk Information System),1,2Dichloroethane

(+++) USEPA (IRIS) determined the NOAEL to be 5(mg/m³) based on an occupational study, and it was assumed that the most sensitive person in the occupational population would be of average sensitivity in the general population.

3. 解析

実船計測により得られたスチレンを輸送するケミカルタンカー乗組員の曝露濃度を既報の物質に関するデータとまとめて表 3 に示す。また、図 4 は曝露、環境濃度と各物質の 20℃における蒸気圧との関係である。

表 3 曝露濃度

化学物質 ^{*)}	BZ	AN	XY	TL	ST	
対象人数	60	35	34	36	30	
蒸気圧(20℃) (kPa)	10	11.0	0.9	2.9	0.6	
GM	(ppm)	1.8	1.5	0.70	0.78	0.5
	(mg/m ³)	5.8	3.4	3.1	3.0	1.9
算術平均	(ppm)	3.7	3.1	1.6	1.9	2.2
	(mg/m ³)	12	6.9	7.1	7.1	8.4
GSD _e	3.7	4.0	3.5	3.9	6.2	
作業時間 T _i (day)	0.6	0.8	0.8	0.8	1.1	
作業環境濃度	(ppm)	1.1	---	1.7	2.1	---
	(mg/m ³)	3.5	---	7.6	8.1	---

*) BZ: Benzene, AN: Acrylonitrile, XY: Xylene, TL: Toluene, ST: Styrene

曝露濃度データが得られた物質について上記解析を行う。図 5 はケミカルタンカーに 20 歳から 59 歳まで、40 年間勤務すると仮定して計算した、各物質の年間平均航海数と損失寿命の関係である。発がん性物質は航海数に対して直線的に増加するが、非発がん性物質は曲線となる。トルエン、スチレンの損失寿命はほぼ同じオーダーとなり、5 つの物質の中で最も小さい。輸送回数が多くなるとキシレンはベンゼンと同程度となるが、5 物質

中最大のアクリロニトリルほどにはならない。この図から明らかなように、損失余命という評価指標を使うと、必ずしも発がん性物質が非発がん性物質より高いリスクを示すとは限らない。

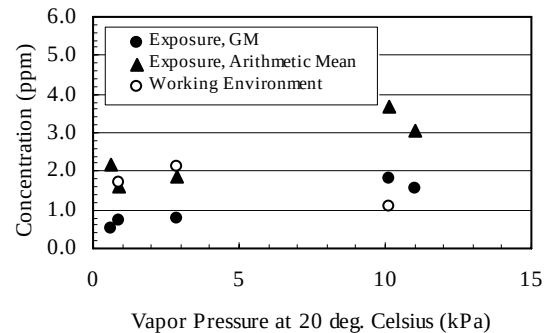


図 4 物質の 20℃の蒸気圧と曝露濃度の関係

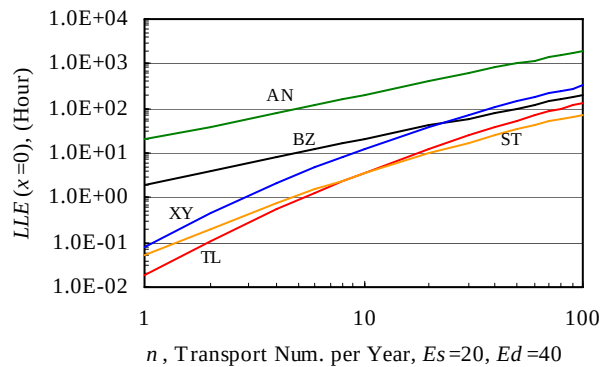


図 5 年間輸送回数 n と LLE(x=0)の関係

次に、曝露濃度の計測データがない、他の海上輸送化学物質について濃度の推定を行い、その推定濃度を用いて損失余命の計算を試みる。

図 4 から曝露濃度については蒸気圧との弱い相関が見られるが、スチレンとアクリロニトリルで 1 桁以上の蒸気圧差があるものの、曝露濃度ではそれほど差は生じていない。さらに、タンカー上の作業環境濃度 (BZ, TL, XY) は曝露濃度の算術平均値や幾何平均値と同じオーダーになることが分かる。まとめると、曝露濃度と環境濃度は同じオーダーとなり、物質の蒸気圧に大きく依存せず、オーダーで言えば 1ppm 程度となっている。よって、ここで計測されていない他の物質について曝露濃度を推定する際、上記 5 物質の算術平均値として見積もっても、オーダーの解析では問題ないと考えられる。

さらに、損失余命の見積もりには T 、輸送サイクルの時間(day)や非発がん性物質の場合には曝露濃度分布の幾何標準偏差(GSD_e)が必要である。これらの数値は表3の通り、どの物質も同じオーダーであることから、5物質の平均値を用いても解析結果のオーダーに影響はないと考える。これより、データが無い物質のデフォルトの値として、

算術平均曝露濃度：2.5(ppm)
幾何平均曝露濃度：1.1(ppm)
(ただし、20℃で蒸気圧0～10kPa程度の物質)
輸送サイクル(輸送作業)の時間、 T ：0.8日
曝露濃度幾何標準偏差、 GSD_e ：4.2

が得られる。

図1で輸送量が多く健康影響が懸念される物質として、1,2-ジクロロエタンと酢酸ビニルを取り上げてみる。なお、1,2-ジクロロエタンについてUSEPAではB2(ヒト発がん性があるかもしれない物質)に分類され、表2に示すようなユニットリスク(UR)が提示されている。一方、酢酸ビニルは非発がん性物質として、表2のように閾値を考えた。上記デフォルトの各値を用いて図5のようなケミカルタンカー1隻あたりの年間航海数 n に対する損失寿命を計算し、さらに、表2で示した各物質の n に対する損失寿命をまとめると図6が得られる。

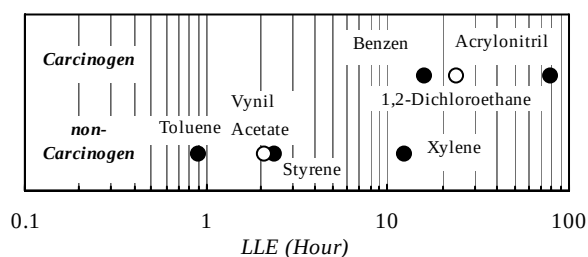


図6 国内ケミカルタンカー乗組員のリスクランキング

この図では、曝露濃度、物質の毒性、輸送量といった情報をすべて考慮して作成されているため、我が国のケミカルタンカー乗組員のリスクを包括的に捉えており、今後の施策展開に際し極めて有効な情報になると期待できる。

4. まとめ

発がん性、非発がん性、両物質の比較が可能となる損失余命によるタンカー乗組員の健康リスク解析を実施した。さらに、濃度データが得られていない物質についても解析を行える実例を示した。解析結果として、海上輸送量が多く健康影響が懸念される7つの物質についてリスクランキングとして示した。この結果、IMOから勧告が出されているベンゼン以上に、アクリロニトリルや1,2-ジクロロエタンにも注意が必要であることが示唆された。

【参考文献】

- (1) 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. 385-386、(2003)
- (3) 間島隆博、上田浩一、山之内博、柴田清、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)、第4回海上技術安全研究所研究発表会講演集、pp. 249-254、(2004)
- (4) 蒲生 昌志、岡 敏弘、中西 準子：発がん性物質への曝露がもたらす発がんリスクの損失余命による表現－生命表を用いた換算－、環境科学会誌、第9巻1号、pp. 1～8、(1996)
- (5) 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)
- (6) Gamo, M., Oka, T., Nakanishi, J., Ranking the Risks of 12 Major Environmental Pollutants that Occur in Japan, Chemosphere, 53, pp. 277-284, (2003)