

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)

環境・エネルギー研究領域 リモセンシング研究グループ *間島 隆博
環境・エネルギー研究領域 海洋汚染防止研究グループ 宮田 修
環境・エネルギー研究領域 海洋汚染防止研究グループ 上田 浩一
環境・エネルギー研究領域 リモセンシング研究グループ 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。

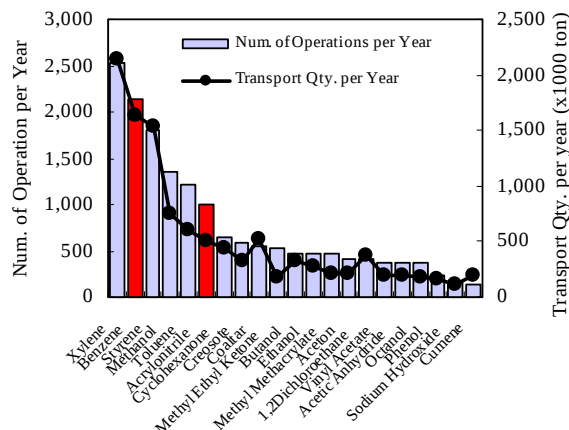


図1 海上輸送化学物質の年間輸送量と航海数

本報告は「船舶から発生する有害揮発性ガスによる複合汚染の低減に関する研究」の一環として実施した内容であり、この研究テーマはケミカルタンカーから排出される化学物質に起因する汚染レベルを、ある1物質に限定せず複合的に把握、解明し、健康影響リスク評価を実施するとともに、タンカーからの化学物質排出抑制技術を確立することである。本テーマはこの目的に則して以下の3つの研究要素から構成される。

- (1) 現状の汚染レベルの把握
- (2) ケミカルタンカー乗組員の健康影響リスク評価
- (3) 船舶搭載型、揮発性ガス排出低減化装置開発のための基礎データ収集

それぞれの研究要素の関係と研究の流れを図2に示す。

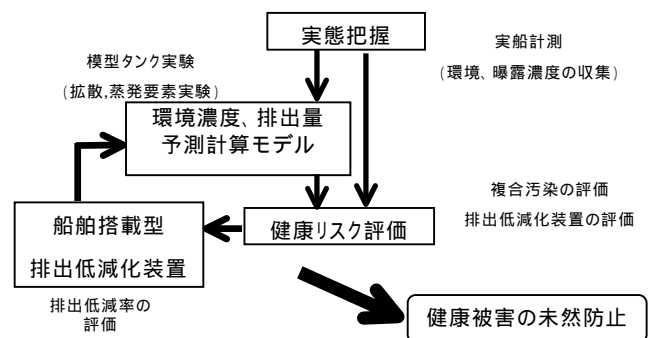


図2 研究の流れ

本報告は上記項目の(1)、(2)に該当し、発がん性

物質であるとともに海上輸送量が多いベンゼンとアクリロニトリルに議論を絞り、損失寿命（0歳における損失余命）の計算を試みた。本計算手法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である。これらの結果をまとめ、発がん性化学物質輸送に従事する乗組員の作業条件を考慮した簡易な損失寿命推定式を提示し、健康影響評価手法のフレームを構築した。

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3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。

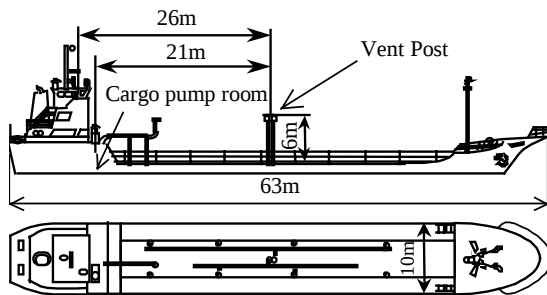


図3 499GT ケミカルタンカー

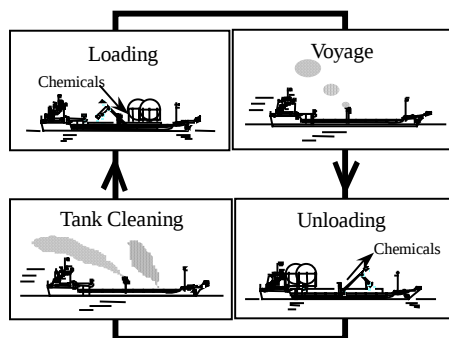


図4 輸送サイクル

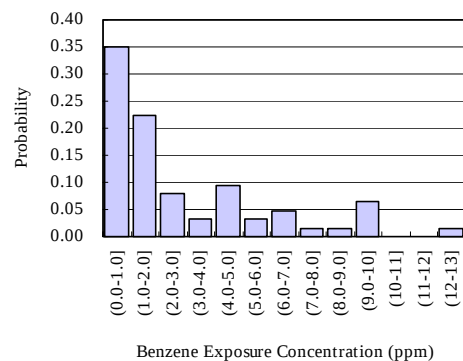
計測手法は文献⁽²⁾と同じであり、ベンゼン、アクリロニトリル輸送船乗組員の襟元にパッシブサンプラー（住友3Mガスモニター-#3500、#3520）を装着したまま、図4に示す積み荷役、航海、揚げ荷役、タンククリーニングで構成される輸送サイ

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。

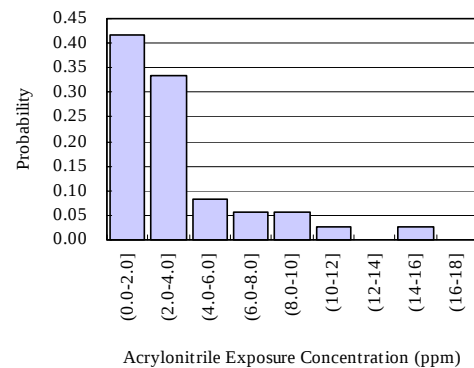
表1 曝露濃度計測結果

物質	算術平均曝露濃度 $c(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	平均曝露時間 $T(\text{日})$	ユニットリスク $UR^{(3)}$ ($\text{m}^3/\mu\text{g}$)
ベンゼン	1.1×10^4	0.59	5.0×10^{-6} 注)
アクリロニトリル	6.7×10^3	0.75	6.8×10^{-5}

注) ベンゼンのURは $2.2 \times 10^{-6} \sim 7.8 \times 10^{-6}$ であるが、その中間値を用いた



(a) Benzene, GM=1.5(ppm), 4.9(mg/m^3), GSD=4.5



(b) Acrylonitrile, GM=1.4(ppm), 3.1(mg/m^3), GSD=4.3

図5 曝露濃度分布

得られた曝露濃度分布を幾何平均（GM）、幾何標準偏差（GSD）とともに図5(a)、(b)に示す。サンプル数はベンゼン輸送船12隻、乗組員数63人、アクリロニトリル輸送船6隻、乗組員数36人であった。1輸送サイクル当たりの平均曝露時間、ユニットリスク $UR^{(3)}$ 及び算術平均濃度を各物質に

ついて表 1 にまとめる。後述の解析では表に示した平均曝露濃度を用いる。濃度は気象、船舶、役職等、様々な条件により大きく変化するが、就業期間中の長期的な曝露により、乗組員各員の曝露濃度は平均的な値に落ち着くと考えられるためである。

3. 損失余命計算法

蒲生らが提案したモデルを評価手法として用いる。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。なお、文献中でいくつかのモデルが示されているが、基準モデルと称されるモデルを使う。また、ここでいう「発がん」とはがん死亡と同義ではないものの、生涯発がんリスクを、生涯がん死亡リスクと解釈する。よって、発がん後の治癒は考慮しない。

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（ベンゼン、アクリロニトリル）への曝露を意味し、「発がん物質の曝露による損失余命」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 6 のようになる。

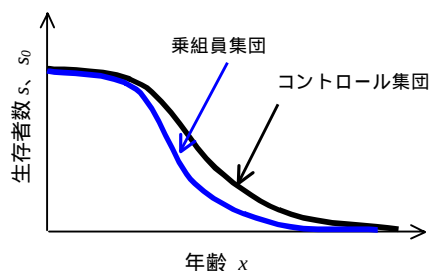


図 6 生存曲線模式図

発がん物質への曝露による過剰ながん死亡により、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、曝露による、新たな死亡率（発がんリスク） $\Delta\mu(x)$ が加算され、以下の式で表される。

$$\lambda(x) = \lambda_0(x) + \Delta\mu(x) \quad \text{式(2)}$$

この式が図 6 に示される乗組員集団の生存曲線が下方へ移動する原因となる。乗組員集団の x 歳での生存者数 $s(x)$ は、

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

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。

コントロール集団では、

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

乗組員集団では、

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

ここで、式中の 110 という数字は男性の最高年齢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るため、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る。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(Loss of Life Expectancy)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。

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

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。がん死亡率の上昇(発がんリスク) $\Delta\mu(x)$ は放射線曝露の疫学調査の結果にもとづく、いくつかの定性的な傾向^{(5)、(6)}をまとめ、係数 α を乗じた次式による。

$$\begin{cases} \Delta\mu(x)=0 & (x < d) \\ \Delta\mu(x)=\alpha \times \mu(x) \times \sum_{y=d}^x \{E(y-d) \times k(y-d)\} & (x \geq d) \end{cases} \quad \text{式(7)}$$

ここで、

$\mu(x)$ ：コントロール集団の x 歳でのがん死亡率⁽⁷⁾
(5歳階級の値を各年齢に内挿して得た)

$E(x)$ ： x 歳での曝露の有無

(x 歳で曝露有り $E(x)=1$ ，無し $E(x)=0$)

d ：ある年齢での曝露が発がんに対して有効となる時間遅れで、10年とする。

$k(x)$ は発がん率が曝露を受ける年齢に依存することを表現するための係数であり、0歳を1とした相対的な値として表すと、図7のような曲線となる。

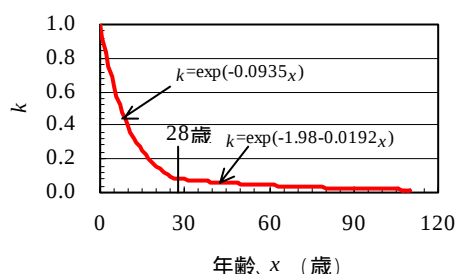


図7 k の年齢分布

α の値を得るため、この式を用いて生涯曝露を設定(すべての年齢で $E=1$)し、生涯の間に生じる過剰ながん死亡率が次式で表される。

$$R' = \frac{1}{s(0)} \sum_{y=0}^{110} \{\Delta\mu(y) \times s(y)\} \quad \text{式(8)}$$

α の値は現在リスク解析で広く用いられる生涯発がん確率 R (式(10)のように曝露濃度とユニットリスクの積で求められる⁽⁸⁾) が式(8)で示される過剰な死亡率と一致($R=R'$)するように選ぶ。なお、

ここで生涯発がん確率が損失余命という尺度に変換される。曝露濃度計測値から損失寿命に至るまでの具体的な計算手順は以下になる。

生命表の最小単位は1年であるため、曝露濃度は年平均曝露濃度に換算して扱わなければならない。ある物質(ベンゼン又はアクリロニトリル)に対する年間輸送従事回数 n (回/年)、1輸送サイクル中の時間平均曝露濃度 c ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)、1輸送サイクルの平均時間、つまり平均曝露時間 T (日)から年平均曝露濃度 c_{year} は

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

となる。次に、この濃度 c_{year} に生涯曝露されると仮定し、生涯曝露による発がん確率 R は表1のユニットリスク UR を用いて次式で計算される。

$$R = c_{\text{year}} UR \quad \text{式(10)}$$

この R における α の値を決定するため、 E はすべての年齢で1とし、式(7)でも生涯曝露を設定する。これより、式(8)の過剰な死亡率 R' が上記発がん確率 R と一致する α の値を見つけ出す。得られた α を用い、曝露を受けない年齢を $E=0$ として、式(1)~(7)から損失余命、 LLE が計算される。最後に、 $x=0$ での損失余命が損失寿命、 $LLE(x=0)$ となる。

表2 濃度 C_{R-5} の曝露による損失寿命(単位: 分)

曝露開始年齢 E_s (歳)	曝露期間、 E_d (年)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
15	5.06	8.21	10.3	12.0	13.6	14.9	16.0	16.9	17.5	17.9
20	3.15	5.21	6.99	8.55	9.88	11.0	11.8	12.5	12.9	
25	2.06	3.83	5.40	6.73	7.84	8.70	9.31	9.70		
30	1.78	3.34	4.68	5.78	6.64	7.25	7.64			
35	1.56	2.90	4.00	4.86	5.48	5.87				
40	1.34	2.44	3.30	3.91	4.30					
45	1.10	1.97	2.58	2.97						
50	0.86	1.47	1.86							
55	0.61	1.00								
60	0.39									

上述の計算手順は実質的には計算機を利用しなければならない。計算により得られた結果を近似式で示せば、電卓で個別の条件に対応でき、利便性が増す。以下の手順で近似式を求める。

ここでは、ケミカルタンカー乗組員を対象とするため、曝露が起こる時期は15歳から65歳と仮

定する。この期間で、「生涯曝露により 10^{-5} の生涯発がん確率を生じる濃度」(濃度 C_{R-5} とする)に曝露されることを考えて α を固定し、曝露開始年齢 E_s を変化させて損失寿命を計算した。結果を表 2、図 8 にまとめる。

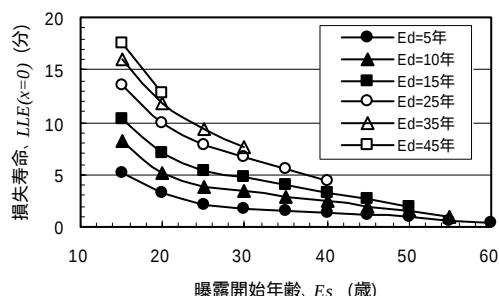


図 8 損失寿命と曝露期間の関係

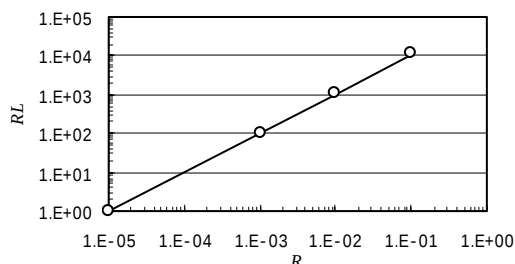


図 9 R と RL の関係

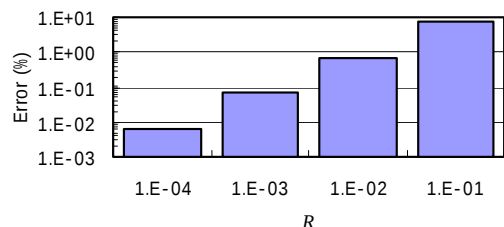


図 10 簡易計算法の誤差

図 8 から明らかなように損失寿命は E_s や E_d に対して線形な関係ではない。

一方、「生涯曝露による発がん確率」 R が 10^{-2} 以下ならば、 R に対して損失寿命は線形で近似できる。様々な「生涯曝露による発がん確率」 R で表 2 と同じ計算をした結果と表 2 内の各値との比をとり、さらに、得られた表の算術平均値を RL とすると、 R と RL の関係は図 9 のようになり、線形な関係が確認できる。 R は式(10)から、曝露濃度 c や年間航海数 n 、ユニットリスク UR の積

で表されるので、これらの変数に対して損失寿命は線形であることになる。つまり、 R が表 2 の作成で用いた 1000 倍に相当する 10^{-2} ならば、単に表 2 の値を 1000 倍にすれば良い。よって、曝露期間が設定できれば、表 2 で読みとれる値 A と、次式により損失寿命が計算できる。

$$LLE(x=0) = A \times R \times 10^5 \quad (\text{単位: 分})$$

$$= A \times UR \times n \times T \times c \times 10^5 / 365 \quad \text{式(11)}$$

ただし、すべての R の範囲において線形性が保障されるわけではない。式(11)で得られる値は、 R が 10^{-2} までは 1 % 以内の誤差であるが、図 10 に示すように R が 10^{-1} の場合は 7% 程度の誤差となる。本来ユニットリスクはこのような高い発がん確率の推定を目的としたものではないため、過大評価か過小評価かは今のところ判断する材料がない。この意味で R が 10^{-1} のオーダーでは注意が必要である。

4. 解析結果

前章の簡易計算法と表 1 で得られたベンゼン、アクリロニトリルの計測値を用いて、20 歳 ~ 59 歳までの 40 年間の勤務を考え、損失寿命を年間航海回数、 n に対しプロットすると図 11 を得る。

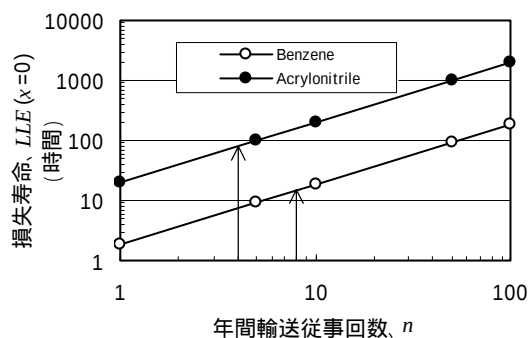


図 11 年間輸送従事回数と損失寿命の関係
各物質とも、 $E_s=20$ (歳)、 $E_d=40$ (年)

図のように同条件であればアクリロニトリルはベンゼンより大きな損失寿命となる。一方、図 1 に示される年間航海数、輸送量はベンゼンの方が大きく、平均するとタンカー乗組員はアクリロニトリルよりベンゼン輸送の機会が多いことになる。

図1で示した年間ベンゼン輸送航海数とケミカルタンカーの隻数から、1隻あたり8(回/年)程度のベンゼン輸送作業に従事する。これより、一例として、20歳～59歳までの40年間の勤務を考えると損失寿命は15時間程度となる。アクリロニトリルでも同様に考えると、年間航海数4回となり、40年間(20歳～59歳)の勤務で80時間程度と推定される。

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または1隻あたりの平均乗組員数などの数値が明確でないため、各物質の1隻あたりの年間平均航海数を用いた。この結果から、乗組員集団が持つベンゼンによるリスクを1とすると、アクリロニトリルはベンゼンの5倍程度のリスクとなる。よって、対策が必要となれば、その優先順位はアクリロニトリル、ベンゼンの順であり、対策の効果は5倍程度になる。

発がん確率が曝露濃度に比例し、損失寿命が発がん確率に比例するため、曝露濃度の低減率はそのまま発がん確率あるいは損失寿命の低減率となる。今回はマスク装着の効果が反映されない曝露濃度計測結果を用いたため、実態より高めの解析結果、損失寿命が得られているものと考えられる。既に励行されているようであるが、ベンゼン輸送船上の作業環境濃度のデータから適切な時期、場所におけるマスク装着により、曝露濃度が80%程度低減する可能性が示唆され⁽⁹⁾、大きな効果が期待できる。

5. まとめ

発がん性物質であるベンゼン、アクリロニトリルの海上輸送に従事するケミカルタンカー乗組員の健康リスク解析を実施し、損失余命(寿命)を得た。解析結果からベンゼンと同様、アクリロニトリルにも注意が必要ながことが判明した。損失余命を評価指標として用いる利点は、ここで示した曝露の時期を考慮できることだけでなく、従来別々に管理されてき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⁽¹⁰⁾。この長所は、1章に示した研究目的と合致するものであり、今後、非発がん性物質も含めてデータを収集し、損

失余命による評価を進める予定である。

【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、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
- (3) USEPA, Integrated Risk Information System、<http://www.epa.gov/iris/>
- (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) Gofman, J.W., Radiation and Human Health、Sierra Club Books、(1981)、今中哲司他(訳): 人間と放射線 - 医療用X線から原発まで、社会思想社、(1991)
- (6) Gofman, J.W., Radiation-Induced Cancer from Low-Dose Exposure : An Independent Analysis、Committee for Nuclear Responsibility、(1990)
- (7) 国立がんセンター、悪性新生物死亡率(平成9年、男性)、http://www.info.ncc.go.jp/jp/statistics/1999/tables/t04_j.html、
- (8) Kolluru, R.V. et al、Risk Assessment and Management Handbook、McGraw-Hill、(1996)、平石 次郎、池田 三郎他(訳): リスクアセスメントハンドブック - 化学物質総合安全管理のための - 、丸善株式会社、(1998)
- (9) 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)
- (10) Gamo, M., Oka, T., Nakanishi, J., A Method Evaluating Population Risks from Chemical Exposure: A Case Study Concerning Prohibition of Chlordane Use in Japan, Regulatory Toxicology and Pharmacology, **21**, pp.151-157, (1995)