研 究

論 文

733. 原子力船乗組員の被曝線量評価のための気象統計

今井和彦*, 茅野政道*

(1981年 5月25日 受理)

Statistics of Meteorology for Dose Evaluation of Crews of Nuclear Ship

By Kazuhiko IMAI and Masamichi CHINO

For the purpose of the dose evaluation of crews of a nuclear ship, the statistics of wind speed and direction relative to the ship is discussed, using wind data which are reported from ships cruising sea around Japan Island.

The analysis on the data shows that the occurrence frequency of wind speed can be fitted with the γ -distribution having parameter p around 3 and wind direction frequency can be treated as a uniform distribution.

Using these distributions and taking the ship speed u_s and the long-term mean speed of natural wind $\bar{u}$ as constant parameters, frequency distribution of wind speed and direction relative to the ship was calculated and statistical quantities necessary for dose evaluation were obtained in the way similar to the procedure for reactor sites on land.

The 97% value of wind speed u_{97} , which should be used in the dose evaluation for accidental releases may give conservative doses, if it is evaluated as follows, $u_{97}=0.64 u_s$ in the cases $u_s > \bar{u}$, and $u_{97}=0.86 \bar{u}$ in the cases $u_s < \bar{u}$ including $u_s=0$.

KEYWORDS: crews, wind speed, gamma distribution, wind direction, statistical quantities, accidental release, radiation doses, nuclear ships

1. 緒 言

原子力船などの乗組員の被曝線量を評価する場合、居住区域が原子力施設に近接していることなど、陸上施設と異なった特別の事情がある。航行中の船の排気筒から放出される放射性気体廃棄物による乗組員の被曝線量の評価もその一つである。

陸上施設と異なる点は、次のとおりである。

- (1) 海上の気象条件
- (2) 船が航行中であること
- (3) 船上特有の大気拡散状況

本報では、被曝計算に必要なパラメータとしての気象要素にかかわる(1)と(2)の項目について述べる。(3)については、風洞実験等により建屋近傍の拡散を表わす拡散モデルを開発して用いればよいが、現在そのような実験はほとんどないので、従来のガウス型拡散式を

用いる。

船の排気筒から放出される放射性ブルームによる、船上における被曝は、放出源と被曝評価点との相対位置が固定されるので、船に相対的な風を用いれば、固定源からの拡散として陸上施設の周辺環境における被曝線量評価とはほぼ同様に扱うことができる。気象条件のうち大気安定度については観測例が少ないが、一般に海上では極端な安定または不安定は少なく、この問題では大気安定度の影響はあまり大きくないと考えられる。海上の風向、風速の観測は、ほとんど航行中の船によるものであり、直接測定されるのは、正にここで必要としている船に相対的な風である。しかし、これらは船の動きを考慮して修正し自然風として報告されており、統計処理に利用し得るのは海上の自然風である。

* 日本原子力研究所(Japan At. Energy Res. Inst.)

本報では、海上の自然風の統計的性質として風向風速の出現頻度分布を求め、それをもとに船に相対的な風について被曝線量評価に必要な統計的諸量を決定することを試みた。気象データ例は日本付近の海域のデータを用いた。

Ⅱ. 海上風の統計処理

統計処理には、気象庁の国際海上気象統計の1975年度版気象データを用いた。このデータはFig. 1に示す9海域において船舶により得られたもので、船の航行速度および進行方向の補正がなされ、自然風のデータと報告されている。データ内容は、観測日時、緯度、経度、風向、風速、気圧、海域番号である。

Fig. 1 Sea area and area number where meteorological data are obtained from ships

測定値は3時間ごとに記録されるが、毎回各海域から入力があるわけではなく、年間の観測数は海域により異なる。海域ごとの年間観測数をTable 1に示す。海域No. 1と6では観測数は少なく、海域ごとのデータ処理において誤差が大きいと思われる。処理内容は、各海域および全海域での平均風速、通年および季節別の風向、風速分布等である。

Table 1 Number of measurement in each sea area through one year

Sea area No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Number of measurement	163	1,790	1,034	4,076	10,210	134	7,718	10,302	4,079

1. 風向分布

全海域の通年および季節別の風向分布をFig. 2に示す。これによれば、風向分布は春はほぼ等方的であるが、他の季節ではそれぞれ異なった卓越風向があり、西風が卓越する季節は存在しない。その結果、Fig. 2のように全海域の通年分布はほぼ等方的ながら西風の頻度は少なくなっている。

Fig. 2 Occurrence frequencies of wind direction for whole sea area through one year and each season

2. 風速分布

全海域の風速分布をFig. 3(a)に、季節別の全海域の風速分布をFig. 3(b)に示す。図中の曲線は、風速分布の関数近似に用いた γ 分布関数であり詳細は後に述べるが、よく近似できているといえる。Fig. 3(b)に示すように、季節的には冬期に風速分布が高風速側へずれるが、他の季節ではほぼ分布状態は等しく、全季節とも分布型は同一とみることができる。また、各海域の分布も同様の分布型をもつ。方位ごとの風速分布は観測点が少なくばらつくが、同様の傾向がある。平均風速については全海域平均で8 m/s、各海域については海域No. 1と6を前述の理由で除くと6.5~9.5 m/sの間に分布しており、各海域とも似かよった風速分布型をもつ。

Ⅲ. 風速分布の関数近似

乗組員の被曝計算に用いる気象条件を求めるためには、風速分布を適当な分布関数で近似して計算する必要がある。風速分布に適用された分布関数の例としては対数正規分布¹⁾等があるが、風速値の出現頻度分布

(a) One year

(b) Each season

Fig. 3 (a), (b) Occurrence frequency of wind speed through and each season for whole sea area

は物理的根拠のある分布型が特にないので、一般性のある次の γ 分布を仮定し、それにデータを適合させてパラメータ値を決めた。 γ 分布関数は、

$$f(u) = \frac{1}{a\Gamma(p)} \left(\frac{u}{a}\right)^{p-1} e^{-u/a}, \quad (0 \leq u) \quad (1)$$

ここで、 u は風速値、 p と a はパラメータでその物理的意味は、

$$p = (\bar{u}/\sigma)^2, \quad a = \bar{u}(\sigma/\bar{u})^2 \quad (2)$$

ここで、 $\bar{u}$: 平均風速

σ : 風速分布の標準偏差

(2)式より p と a は、

$$a = \bar{u}/p \quad (3)$$

である。(3)式を(1)式に代入して、各海域の気象データ u および $\bar{u}$ より、シンプレックス法⁴⁾を用いてパラメータ p を求めた。各海域の通年の p および全海域の通年と季節別の p 値をTable 2に示す。

Table 2 Optimum values of parameter p of γ -distribution function fitted for wind speed data through one year in each sea area and through each season in whole sea area

Sea area No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>p</i>	2.98	3.55	3.96	3.51	3.99	6.55	3.72	3.71	3.86
Season	Spring	Summer	Autumn	Winter	One year				
<i>p</i>	3.64	3.58	3.98	4.79	3.66				

Fig. 4に、全海域、通年の風速の累積頻度分布を対数正規確率紙と γ 分布確率紙⁵⁾に示す。両関数とも低風速側で直線からのズレがあるが、よく風速分布を表わしている。Fig. 3(a), (b)および4に示すように、 p の値を適当に選択することで γ 分布の風速分布への適用

は妥当といえる。 p の値はほぼ3~4であるが、季節的には冬期に4以上になる。このことは、冬期に平均風速が高く、変動が少ないことに対応している。

Fig. 4 Cumulative probability of wind speed distribution for whole sea area through one year, on log-normal and γ -probability coordinates

IV. 乗組員の被曝計算に用いる気象条件

航行中の船の乗組員の被曝線量計算に用いる気象条件としては、船に相対的な風についての統計量が必要である。

船の進行方向に相対的な風向については、定期航路と季節的卓越風向を考えると特定風向が多いことも考えられるが、今回は船の航路を特定しない。また風向は、船首方向を方位0、1方位幅を $2\pi/16$ として左右に正負の番号をつけ、船尾方向を第8方位とし船に相

対的な量として取り扱う。これにより風向は卓越風向の有無にかかわらず一様分布を仮定することができる。船に相対的な風速の分布については以下のように求めた。航行中の船の刻々の位置における自然風の風速を u , 風向を θ とし, 常に船首方向を $\theta=0$ として風向・風速の出現頻度分布を考え, これを $f(u, \theta)ud\theta du$ とする。すなわち,

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} f(u, \theta)ud\theta du = 1 \quad (4)$$

θ の一様分布と前述の風速の γ 分布の仮定より,

$$f(u, \theta)ud\theta du = \frac{1}{2\pi a \Gamma(p)} \left(\frac{u}{a}\right)^{p-1} e^{-u/a} du d\theta \quad (5)$$

とする。船速を u_s (一定) とし, 船に相対的な風の風向・風速分布を $g(u', \theta')u'd\theta' du'$ とすると, Fig. 5 に示す自然風, 船速, 船への相対的な風の関係から次式が成り立つ。

$$u = (u'^2 + u_s^2 - 2u'u_s \cos \theta')^{1/2} \quad (6)$$

$$\theta = \tan^{-1}(u' \sin \theta' / (u' \cos \theta' - u_s)) \quad (7)$$

また,

$$ud\theta du = J du' d\theta' = u' du' d\theta' \quad (8)$$

ここで, J : ヤコビアン

である。以上の関係から,

$$f(u, \theta)ud\theta du = g(u', \theta')u'du'd\theta' \quad (9)$$

したがって, (5)式に(6)および(8)式を代入して(9)式の関係を用いると, 船に相対的な風速の分布 $g(u', \theta')u'du'd\theta'$ は

$$\begin{aligned} g(u', \theta')u'du'd\theta' &= \frac{1}{2\pi \Gamma(p)} \left(\frac{1}{a}\right)^p (u'^2 + u_s^2 - 2u'u_s \cos \theta')^{p/2-1} \\ &\quad \cdot \exp\left[-\frac{1}{a}\sqrt{u'^2 + u_s^2 - 2u'u_s \cos \theta'}\right] \\ &\quad \cdot u' du' d\theta' \end{aligned} \quad (10)$$

となる。前述の船に相対的な風向の定義法によれば, 左右の対称性から $+j$ 番目と $-j$ 番目の風向における諸量は等しくなる。

Fig. 5 Relation of vectors between natural wind speed, ship's speed and relative wind speed to ship

被曝評価に必要な気象条件は平常運転時と想定事故

時で異なる。大気中濃度分布式は, ガウス分布を仮定して地表面で次式で表わされる。

$$\chi(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (11)$$

ここで, $\chi(x, y, 0)$: 点 $(x, y, 0)$ における濃度

(Ci/m³)

Q : 放出率 (Ci/s)

u : 風速 (m/s)

H : 放出源高さ (m)

σ_y, σ_z : 濃度分布の y, z 方向の拡がり
のパラメータ (m)

平常運転時の被曝線量評価に必要な年間の平均空気中濃度は, 単位放出率 (1 Ci/s), 単位風速 (1 m/s) の時の地表空気中濃度を χ_0 とすれば, 「発電用原子炉の気象指針」⁽⁶⁾ に準じて連続放出および間欠放出について次式で表わされる。

$$\chi_{cont} = Q_{cont} \chi_0 \frac{1}{N_i} S_j \quad (12)$$

$$\chi_{in} = Q_{in} \chi_0 \frac{n_s}{n_y} \cdot \frac{1}{f_{jt}} \cdot \frac{N_j}{N_i} \cdot \frac{S_j}{N_i} \quad (13)$$

ここで, χ_{cont}, χ_{in} : 連続および間欠放出の年間平均濃度 (Ci/m³)

Q_{cont}, Q_{in} : 連続および間欠放出の総量が1年間一様に連続放出されるとした時の放出率

(Ci/s)

N_i : 総観測回数 (8,760)

N_j : 方位 j の出現回数

n_y, n_s : 間欠放出の回数とその影響回数 (3方位に対する回数)

f_{jt} : 着目方位とその隣接方位に対する風向出現頻度の和

S_j : j 方位内風速逆数和 (s/m)

したがって, 平常運転時, 想定事故時の被曝評価に必要な気象統計量は次のようになる。

1. 平常運転時

平常運転時には(12), (13)式より1方位内風向頻度と1方位内風速逆数平均が必要であり, 次式で表わされる。

1方位内風向頻度(%)

$$F_j = \int_0^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_{j+1}} g(u', \theta')u'd\theta' du' \quad (14)$$

1方位内風速逆数平均(s/m)

$$\begin{aligned} \bar{S}_j &= S_j / N_i \\ &= \int_0^{\infty} \int_{\theta_{j-1}}^{\theta_{j+1}} \frac{1}{u'} g(u', \theta')u'd\theta' du' \end{aligned} \quad (15)$$

ここで,

$$\varphi_j = \frac{\pi}{16}(2j+1), \quad (j=0, 1, \dots, 8)$$

(14)および(15)式の2重積分は電子計算機(原研計算センター FACOM 230-75)で Gauss-Legendre 求積法で行なった。

2. 想定事故時

想定事故時の濃度計算では、(11)式の風速 u にどのような値を用いるかが問題となる。大気安定度のデータがないので、ここでは想定事故時の気象条件として風速を「原子炉安全解析のための気象手引」¹⁰⁾と同様な扱いで1年の風速データの97%をカバーするような十分厳しい値を求めることとした。すなわち、 j 方位でその値を $u_{97,j}$ とすると、(10)式を用いて次式を満たすように決める。

$$\int_0^{u_{97,j}} \int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} g(u', \theta') u' d\theta' du' = \frac{3}{100} \quad (16)$$

また、事故発生後外洋に停船することもあると考えられるが、この場合の船に相対的な風は自然風そのものであるから、 $u_{97,j}$ は(5)式を用いて、

$$\int_0^{u_{97,j}} \int_{\varphi_{j-1}}^{\varphi_j} f(u, \theta) u d\theta du = \frac{3}{100} \quad (17)$$

から求める。(16)および(17)式の2重積分は Gauss-Legendre 求積法により求め、台形積分法およびロンベルグ積分法で値を検証した。

V. 計算結果と検討

1. 平常運転時

方位別の風向頻度 F_j と風速逆数平均 $\bar{S}_j$ の計算例を Table 3 に示す。計算条件は自然風の平均風速 $\bar{u}$ と船速 u_s の比 $\bar{u}/u_s=0.5$, $p=3$, $a=1.33$ とした。 $F_j, \bar{S}_j$ ともに $j=0$ つまり船首から風がくる時に最大値をとり、大気中濃度計算に $F_0, \bar{S}_0$ を用いれば安全側評価とな

Table 3 Average values of reciprocal of wind speed $\bar{S}_j$ from each direction j and occurrence frequencies F_j of wind direction j , in condition of $\bar{u}/u_s=0.5$, $p=3$ and $a=1.33$

j	$\bar{S}_j$ (s/m)	F_j
0	0.0481	0.387
1, -1	0.0301	0.228
2, -2	0.0092	0.057
3, -3	0.0029	0.014
4, -4	0.0013	0.004
5, -5	0.0007	0.002
6, -6	0.0005	0.001
7, -7	0.0004	0.001

る。次に Table 4 に船首方向($j=0$)からの風向頻度 F_0 と風速逆数 $\bar{S}_0$ を $\bar{u}/u_s$ の関数として計算した結果を示す。パラメータ p は Table 2 からみて $p=3$ が妥当と考えられるが、比較のため $p=2$ および 4 についても計算した。Table 4 に示すように、自然風が弱いほど、あるいは船速が速いほど、船首方向から吹く船に相対的な風は船速に近づき風向頻度も100%に近づく。

Table 4 Variations with $\bar{u}/u_s$ of average values of reciprocal of wind speed $\bar{S}_0$ and occurrence frequencies F_0 from bow direction in case of $p=2, 3$ and 4

$\bar{u}/u_s$	$\bar{S}_0$ (s/m)			F_0 (%)		
	$p=2$	$p=3$	$p=4$	$p=2$	$p=3$	$p=4$
0.1	0.122	0.126	0.125	96.0	99.7	99.1
0.2	0.0987	0.0990	0.0989	78.4	78.9	79.0
0.3	0.0788	0.0758	0.0737	62.7	60.3	58.7
0.4	0.0643	0.0595	0.0562	51.4	47.5	44.8
0.5	0.0538	0.0481	0.0446	43.3	38.7	35.7
0.6	0.0458	0.0399	0.0364	37.4	32.5	29.6
0.7	0.0397	0.0337	0.0303	32.9	28.0	25.2
0.8	0.0348	0.0288	0.0257	29.5	24.7	22.1
0.9	0.0308	0.0250	0.0220	26.7	22.1	19.7
1.0	0.0276	0.0219	0.0191	24.5	20.1	17.9
1.1	0.0249	0.0194	0.0167	22.6	18.5	16.5
1.2	0.0226	0.0173	0.0148	21.1	17.2	15.3

2. 想定事故時

想定事故時に用いる船首方向からの風の $u_{97,0}$ の計算結果を Fig. 6 および Table 5 に示す。計算に用いた p の値は上記平常運転時と同様である。Table 5 では $u_{97,0}$ の $\bar{u}$ による変化を、それぞれを u_s で規格化して求めている。Fig. 6 では $u_s/\bar{u}$ の変化に対する $u_{97,0}/\bar{u}$

Fig. 6 Variation with $u_s/\bar{u}$ of 97% value of wind speed from bow direction, normalized with $\bar{u}$ and u_s , $u_{97,0}/\bar{u}$ and $u_{97,0}/u_s$, in case of γ -function parameter $p=2, 3$ and 4

Table 5 Variations of 97% values of wind speed from bow direction, normalized with $\bar{u}$ and u_s , $u_{97,0}/\bar{u}$ and $u_{97,0}/u_s$, in case of γ -function parameter $p=2, 3$ and 4

	$\bar{u}/u_s$	$p=2$	$p=3$	$p=4$
$u_{97,0}/u_s$	0.1	0.845	0.853	0.859
	0.2	0.752	0.750	0.751
	0.3	0.704	0.689	0.682
	0.4	0.683	0.657	0.642
	0.5	0.680	0.649	0.628
	0.6	0.689	0.657	0.635
	0.7	0.705	0.679	0.662
	0.8	0.726	0.712	0.708
	0.9	0.752	0.756	0.785
	1.0	0.778	0.813	0.957
$u_{97,0}/\bar{u}$	1.0	0.778	0.813	0.957
	1.2	0.700	0.843	1.098
	1.4	0.645	0.875	1.082
	1.6	0.610	0.870	1.060
	1.8	0.582	0.862	1.040
	2.0	0.568	0.858	1.023
	3.0	0.555	0.837	0.965
	4.0	0.577	0.833	0.937
	5.0	0.602	0.833	0.925
	∞	0.806	0.865	0.895

値と $u_{97,0}/u_s$ 値の変化を示した。 $u_s/\bar{u} \rightarrow 0$ で $u_{97,0}/\bar{u}$ 値は(10)式から求めた船舶停止時の $u_{97,0}/\bar{u}$ 値である0.87に漸近していく。Table 5およびFig. 6に示すように $u_{97,0}/u_s$ は、 $\bar{u}/u_s$ が0.5の時に最小値を示す。また、他の方位(船首方向以外)についての $u_{97,0}/u_s$ の最小値はこの値よりも大きい。したがって、想定事故時の気象条件の選定にあたっては、事故発生後の退避の船速があまり遅くなく自然風の平均風速と同程度かそれ以上の場合、濃度計算に用いる風速 $u_{97,0}$ には、 $\bar{u}/u_s = 0.5$, $p=3$ の場合の値

$$u_{97,0} = 0.64 u_s \quad (18)$$

を用いることが安全側評価である。船速が自然風の平均値よりも遅い場合は $p=2$ では最小値をもつが、 $p=3, 4$ ではほぼ $\bar{u}$ に依存した $u_{97,0}$ 値となる。したがって、船速によらず $p=3$ の場合の値

$$u_{97,0} = 0.86 \bar{u} \quad (19)$$

とすることが安全側評価である。

また大気安定度については、平常時についても同様であるが、対象とする風下距離が放出点に近いことから内部被曝については近距離に最大濃度が現れるA型を用いることが安全側である。外部被曝については、この場合大気安定度による変化は小さいので、内部被曝線量評価と同じ大気安定度を用いてよいと考えられる。

Ⅵ. 結 言

本報では定期航路や季節的卓越風等については考慮せず一般的な取扱いであったが、これらの影響を受ける特定船についても同様な方法で F_j , $\bar{S}_j$ および $u_{97,j}$ を求めることができる。第Ⅳ章で求めた諸値は安全側評価であり、これらを原子力船航行時の乗組員の被曝線量評価の気象条件として用いることで、厳しい評価ができると考えられる。

— 参 考 文 献 —

- (1) LUNA, R.E., CHURCH, H.W.: Estimation of long-term concentrations using a "Universal" wind speed distribution, *J. Appl. Meteor.*, **13**, 910~916 (1974).
- (2) JACOBY, S.L.S., KOWALIK, J.S., PIZZO, J.T.: "Iterative Methods for Nonlinear Optimization Problems", (1972), Prentice-Hall.
- (3) 熊沢 著: 私 信, (1981).
- (4) 原子力委員会: 発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針, (1977).
- (5) 原子力委員会: 原子炉安全解析のための気象手引, (1977).

1982年度「学術関係国際会議」

代表派遣候補者を推薦します

1982年4月11日~1983年4月10日に開催される学術関係国際会議および派遣代表候補を希望する向きは、本会事務局へハガキで所定用紙をお申し込み下さい。

○添付書類

- ① 学術関係国際会議調書(1通)
- ② 日本学術会議派遣による学術関係国際会議出席のための申請書(1通)

○締切 所定書式で本会着 1982年1月9日

トリウムサイクル

研究開発の現状と発展の道

(「トリウムサイクル調査」研究専門委編)

—1980年10月発行。好評頒布中—

B5判 タイプオフ印刷, 約330p

定価 5,000円(会員特価 3,500円), 千350円

内容の詳細は「本誌」Vol. 22, No. 8 (p.657)参照。

ご希望の方は学会事務局へ。