

## 【資料】

## 最大拡散半径等を求めるノモグラムの自動算出

梅津 隆弘<sup>1</sup>

## Automatic Calculation of Nomogram for Determining the Maximum Spread Radius, etc.

Takahiro Umetsu<sup>1</sup>

## Abstract

In response to accidents at sea of Hazardous and Noxious Substances (HNS), it is indispensable to evaluate releases of hazardous chemical vapors towards downwind. At present, there is the monogram, developed by the Maritime Disaster Prevention Center (MDPC), which evaluates the maximum spread radius and the reaching period based on the volume, density, vapor pressure and viscosity of the substance. Since the MDPC monogram is calculated through the logarithm graph, it is supposed to be difficult for the persons concerned including the Japan Coast Guard officers. This paper proposes Excel spreadsheets which automatically calculate the monogram.

**Keywords:** Harmful liquid, Maximum Spread Radius

## 1 はじめに

危険・有害物質(HNS)事故対応において、海上に漏洩した浮遊性の有害液体から生じる有毒な蒸気が風下にどのように拡散するのかを予測するためには、海上漏洩した有害液体がどれだけの面積を有するのかという情報が必要となる。また、この海上漏洩した有害液体が全て蒸発するために必要とされる時間を推定することは、生じる毒性蒸気により影響を受ける期間の目安となる。現在のところ、有害液体の広がり及び消失時間を推定するため、海上保安庁は海上災害防止センター編の有毒性ガスの防護対策に関する調査研究<sup>1)</sup>に掲げられている浮遊する有害液体に関する元良の式の厳密解及び蒸発による大気拡散のボックスモデルに基づいたノモグラムを利用している。このノモグラムは、漏洩した有害液体の体積、密度、蒸気圧及び粘度をもとに最大拡散半径及び最大拡散半径到達時間を予測するものである。しかしながら、普段の業務において、両対数グラフなどを利用する機会がほとんどない海上保安官によりこのノモグラムが積極的に使用されていないように思われる。そのため、このノモグラムを簡便に利用することができるように、自動計算を行う Excel のスプレッドシートを作成した。

## 2 方法

## 2.1 ノモグラムの数値化

参考文献 1)に掲げられている多数のノモグラムの内、今回利用したものは液流出量と蒸気圧から密度 0.8 g/cm<sup>3</sup>、粘度 0.6 mPa・s の液体の最大拡散半径を求める「図 34 液流出量と蒸気圧により最大拡散半径を求めるノモグラム」<sup>2)</sup>、異なる液密度及び粘度の液体の最大拡散半径に補正するための補正比率を求める「図 35 液密度と粘度により最大拡散半径の補正比率  $\epsilon$  を求めるノモグラム」<sup>3)</sup>、蒸気圧と液密度から体積 150 kL、粘度 0.6 mPa・s の液体の最大拡散半径到達時間を求める「図 36 蒸気圧と液密度により最大拡散半径到達時間を求めるノモグラム」<sup>4)</sup>並びに異なる流出量及び粘度の液体の最大拡散半径到達時間に補正するための補正比率を求める「図 37 液流出量と粘度により最大拡散半径到達時間の補正比率を求めるノモグラム」<sup>5)</sup>の 4 つである。このうち、図 36 のみが両対数グラフ上に描かれている。

これらのグラフ上に描かれている曲線を読み取り、Excel のスプレッドシート上に記入した。この作業において、図 34 の流出量と最大拡散半径の関係を表している曲線及び図 37 の流失量と補正比率の関係を表している曲線については、流出量が 300 kL までとなっていること及びこの両者の関係の

曲線は流出量が300 kLに近づくにつれほぼ直線となっていること並びに海難審判庁の海難審判採決録に記録されているばら積みの有害液体運搬船の事故記録における最大流出量は400 kLを超えているものがあること<sup>9)</sup>から、300 kLを超えた場合にも使用できるように、当初、600 kLまで直線で外挿していた。その後、平成25年12月29日、韓国南岸沖で発生した外航ケミカル・タンカーとコンテナ船の衝突<sup>7)</sup>により有害液体の海上流出及び流出のおそれがあり、当該ケミカル・タンカーの1つのタンク容量が2400 kLであったこと及び複数のタンクからの流出の可能性があったことから、600 kL以上の海上漏洩について計算するために、この値を超える部分については直線で更に外挿した。

## 2.2 近似式の決定

数値化された曲線データについて、Excelの分析ツールの回帰分析を使用して、試行錯誤により、これらの曲線をより良く表す近似式を求めた。その結果、以下のような近似式が得られた。

### (1) 図34の曲線

図34の曲線は次の近似式で表すことができた。

$$R'_{\max} = aVo^{1/2} - bVo + cVo^{3/2} \quad (Vo \leq 600 \text{ kL}) \quad (1)$$

$$R'_{\max} = d + e(Vo - 600) \quad (Vo > 600 \text{ kL})$$

ここで、 $R'_{\max}$ は最大拡散半径(m)、 $Vo$ は液流出量(kL)である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 及び $e$ はそれぞれの蒸気圧の曲線固有の定数であり、表1のとおりである。また、表1には、(1)の上段の式の重決定係数 $R^2$ も併記した。

### (2) 図35の曲線

図35の曲線は次の近似式で表すことができた。

$$\varepsilon = a - b\rho + c\rho^2 - d\rho^3 \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon$ は補正比率、 $\rho$ は密度( $\text{g/cm}^3$ )である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 及び $d$ はそれぞれの粘度の曲線固有の定数であり、表2のとおりである。また、表2には、(2)式の決定係数 $R^2$ も併記した。

### (3) 図36の曲線

図36の曲線は次の近似式で表すことができた。

$$\log(T'_{\max}) = a - b \log(VP) + c [\log(VP)]^2 - d [\log(VP)]^3 \quad (3)$$

ここで、 $T'_{\max}$ は最大拡散半径到達時間(min)、 $VP$ は蒸気圧(mmHg)である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 及び $d$ はそれぞれの蒸気圧の曲線固有の定数であり、表3のとおりである。また、表3には、(3)式の決定係数 $R^2$ も併記した。

### (4) 図37の曲線

図37の曲線は次の近似式で表すことができた。

$$\begin{aligned} \zeta &= a Vo^{1/2} - b Vo + c Vo^{3/2} \\ &\quad (Vo \leq 600 \text{ kL}) \\ \zeta &= d + e(Vo - 600) \\ &\quad (Vo > 600 \text{ kL}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\zeta$ は補正比率、 $Vo$ は液流出量(kL)である。また、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 及び $e$ はそれぞれの粘度の曲線固有の定数であり、表4のとおりである。また、表4には、(4)の上段の式の重決定係数 $R^2$ も併記した。

## 2.3 近似式を用いた補間

### (1) 最大拡散半径 $R'_{\max}$

液流出量100 kLのときの最大拡散半径のノモグラムの曲線データの値及び近似式の値並びに近似式の値の対数での回帰式を図1に示す。

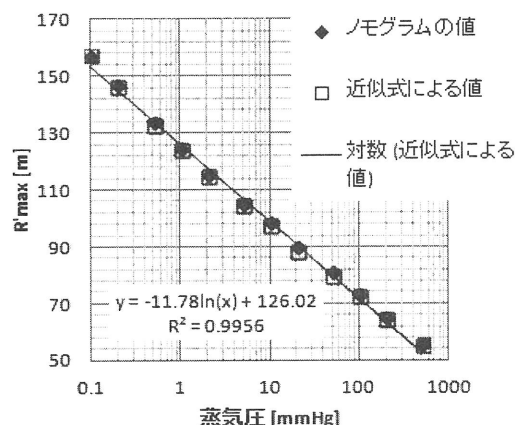


図1 ノモグラムの値と近似式による値との関係及び近似式による値の対数回帰直線

図1は、近似式による値がノモグラムの曲線にほぼ合致していること及び片対数グラフ上ではほぼ直線であることを示している。これらのことから、ある液流出量における任意の蒸気圧  $VPx$  mmHgでの最大拡散半径  $R'_{\max}$ を次式により補間することとした。

$$\begin{aligned} R'_{\max}(VPx) &= R'_{\max}(0.1) \\ &\quad + [R'_{\max}(500) - R'_{\max}(0.1)] \\ &\quad \times [\log(VPx) - \log(0.1)] \\ &\quad \div [\log(500) - \log(0.1)] \end{aligned} \quad (5)$$

### (2) 最大拡散半径の補正比率 $\varepsilon$

液密度  $0.8 \text{ g/cm}^3$ のときの最大拡散半径の補正比率のノモグラムの曲線データの値及び近似式の値並びに近似式の値の対数での回帰式を図2に示す。

表1 (1)式の蒸気圧毎の係数及び重決定係数  $R^2$ 

蒸気圧 [mmHg]	a	b	c	$R^2$	d	e
0.1	21.50195	0.78725	0.021395	0.999988	367	0.4
0.2	19.24345	0.59435	0.013581	0.999987	313	0.3
0.5	17.54764	0.5653	0.014049	0.999991	297	0.3
1	16.03868	0.4606	0.010218	0.999985	267	0.25
2	14.97871	0.45712	0.010962	0.999992	254	0.25
5	13.89314	0.46127	0.011916	0.999987	238	0.25
10	13.21658	0.4693	0.012721	0.999976	228.5	0.25
20	11.89902	0.42527	0.012352	0.999976	217	0.25
50	10.62142	0.35527	0.09469	0.999911	186	0.2
100	9.7338	0.34521	0.009892	0.99987	176	0.2
200	8.306699	0.27278	0.008706	0.999916	167	0.2
500	7.461351	0.25635	0.006366	0.999779	122.5	0.125

表2 (2)式の粘度毎の係数及び重決定係数  $R^2$ 

粘度 [mPa・s]	a	b	c	d	$R^2$
0.1	6.482464	21.7915	30.86317	14.9075	0.999362
0.2	5.100245	16.4475	23.816077	11.8556	0.999705
0.3	5.960033	19.8697	27.993987	13.5077	0.998968
0.6	5.16865	16.9265	24.073177	11.7641	0.999742
1	4.777616	15.6274	22.30635	10.9364	0.99973
2	4.935687	16.3688	23.18552	11.2699	0.999875
3	4.547425	14.7814	20.79582	10.1102	0.999484
6	4.228258	14.0926	20.27752	9.98733	0.999514
10	4.656419	15.8872	22.41739	10.7904	0.99885

表3 (3)式の粘度毎の係数及び重決定係数  $R^2$ 

密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	a	b	c	d	$R^2$
0.6	1.898822	0.7214	0.086031	0.00521	0.999806
0.7	1.99698	0.74282	0.076089	0.0002	0.999915
0.8	2.105218	0.75897	0.073428	0.00041	0.999956
0.9	2.308068	0.81705	0.062567	0.004028	0.999981
0.95	2.466281	0.85191	0.059162	0.004236	0.999973
1	2.760872	0.90981	0.066121	0.003446	0.999949

表4 (4)式の粘度毎の係数及び重決定係数  $R^2$ 

粘 度 [mPa・s]	a	b	c	$R^2$	d	e
0.1	0.139952	0.00724	0.000153	0.999869	1.31291611185087	0.00087882822902845
0.6	0.157002	0.000182	0.000182	0.999857	1.50846490393761	0.0011223131063345
1	0.164199	0.00859	0.000186	0.999856	1.57941791896519	0.00114133536237415
2	0.179206	0.00934	0.0002	0.999887	1.70306258322237	0.0011984021304928
5	0.204272	0.01048	0.000221	0.99992	1.94407456724368	0.0013315579227700
10	0.22434	0.01133	0.000234	0.999869	2.10386151797604	0.0013315579227698

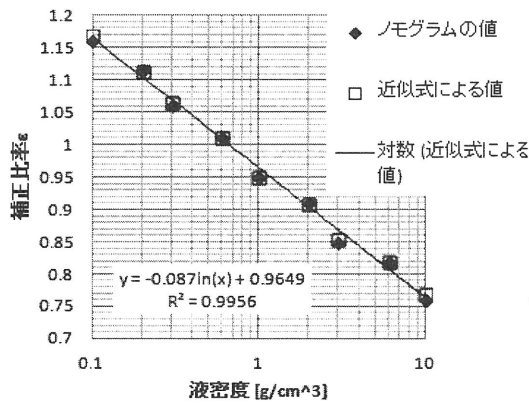


図2 ノモグラムの値と近似式による値との関係及び近似式による値の対数回帰直線

図2は、図1と同様に、近似式による値がノモグラムの曲線にはほぼ合致していること及び片対数グラフ上ではほぼ直線であることを示している。これらのことから、ある密度における任意の粘度  $\eta \times \text{mPa} \cdot \text{s}$  での最大拡散半径の補正比率  $\varepsilon$  を次式により補間することにした。

$$\begin{aligned} \varepsilon(\eta x) &= \varepsilon(0.1) + [\varepsilon(10) - \varepsilon(0.1)] \\ &\quad \times [\log(\eta x) - \log(0.1)] \\ &\quad \div [\log(10) - \log(0.1)] \end{aligned} \quad (6)$$

(3) 最大拡散半径到達時間  $T'_{\text{max}}$

蒸気圧 10 mmHg のときの最大拡散半径到達時間のノモグラムの曲線データの値及び近似式の値を図3に示す。

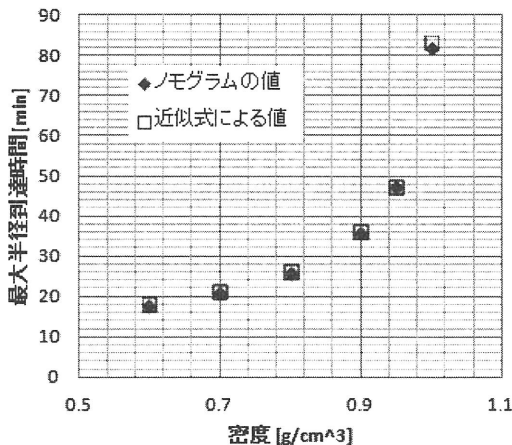


図3 ノモグラムの値と近似式による値との関係

図3は、近似式による値がノモグラムの曲線にはほぼ合致していることを示している。しかしながら、図1及び2のように、近似式の値に対する回帰式は見出せなかった。このため、区間ごとに直線近似にて処理するため、ある蒸気圧における任意の密度  $\rho x \text{ g/cm}^3$  での最大拡散半径到達時間

$T'_{\text{max}}$  を次式により補間することにした。

$$\begin{aligned} T'_{\text{max}}(\rho x) &= T'_{\text{max}}(0.5) \\ &\quad + [T'_{\text{max}}(0.7) - T'_{\text{max}}(0.5)] \\ &\quad \times (\rho x - 0.5) / (0.7 - 0.5) \\ &\quad (\text{if } 0.5 \leq \rho x < 0.7) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{max}}(\rho x) &= T'_{\text{max}}(0.7) \\ &\quad + [T'_{\text{max}}(0.8) - T'_{\text{max}}(0.7)] \\ &\quad \times (\rho x - 0.7) / (0.8 - 0.7) \\ &\quad (\text{if } 0.7 \leq \rho x < 0.8) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{max}}(\rho x) &= T'_{\text{max}}(0.8) \\ &\quad + [T'_{\text{max}}(0.9) - T'_{\text{max}}(0.8)] \\ &\quad \times (\rho x - 0.8) / (0.9 - 0.8) \\ &\quad (\text{if } 0.8 \leq \rho x < 0.9) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{max}}(\rho x) &= T'_{\text{max}}(0.9) \\ &\quad + [T'_{\text{max}}(0.95) - T'_{\text{max}}(0.9)] \\ &\quad \times (\rho x - 0.9) / (0.95 - 0.9) \\ &\quad (\text{if } 0.9 \leq \rho x < 0.95) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} T'_{\text{max}}(\rho x) &= T'_{\text{max}}(0.95) \\ &\quad + [T'_{\text{max}}(1.0) - T'_{\text{max}}(0.95)] \\ &\quad \times (\rho x - 0.95) / (1.0 - 0.95) \\ &\quad (\text{if } 0.95 \leq \rho x < 1.0) \end{aligned} \quad (11)$$

(4) 最大拡散半径到達時間の補正比率と

液流出量 100 kL のときの最大拡散半径到達時間の補正比率のノモグラムの曲線データの値及び近似式の値を図4に示す。

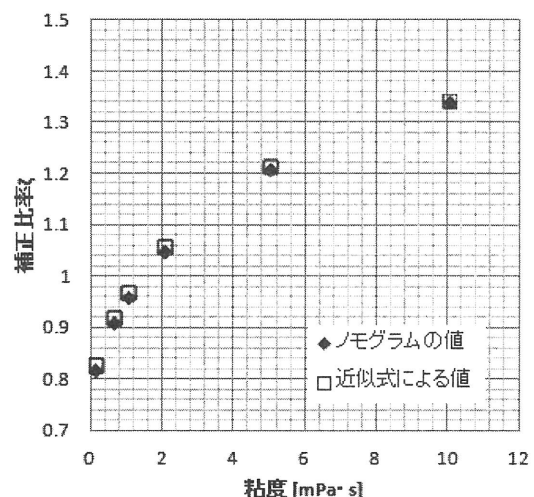


図4 ノモグラムの値と近似式による値との関係

図4は、近似式による値がノモグラムの曲線にはほぼ合致していることを示している。しかしながら、図3と同様に、図1及び2のように、近似式

の値に対する回帰式は見出せなかった。このため、区間ごとに直線近似にて処理するため、ある密度における任意の粘度  $\eta \times \text{mPa} \cdot \text{s}$  での最大拡散半径到達時間の補正比率  $\zeta$  を次式により補間することにした。

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(0.1) \\ & + [\zeta(0.2) - \zeta(0.1)] \\ & \times (\eta x - 0.1) / (0.2 - 0.1) \end{aligned} \quad (12)$$

(if  $0.1 \leq \eta x < 0.2$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(0.2) \\ & + [\zeta(0.3) - \zeta(0.2)] \\ & \times (\eta x - 0.2) / (0.3 - 0.2) \end{aligned} \quad (13)$$

(if  $0.2 \leq \eta x < 0.3$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(0.3) \\ & + [\zeta(0.6) - \zeta(0.3)] \\ & \times (\eta x - 0.3) / (0.6 - 0.3) \end{aligned} \quad (14)$$

(if  $0.3 \leq \eta x < 0.6$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(0.6) \\ & + [\zeta(1) - \zeta(0.6)] \\ & \times (\eta x - 0.6) / (1 - 0.6) \end{aligned} \quad (15)$$

(if  $0.6 \leq \eta x < 1$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(1) \\ & + [\zeta(2) - \zeta(1)] \\ & \times (\eta x - 1) / (2 - 1) \end{aligned} \quad (16)$$

(if  $1 \leq \eta x < 2$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(2) \\ & + [\zeta(3) - \zeta(2)] \\ & \times (\eta x - 2) / (3 - 2) \end{aligned} \quad (17)$$

(if  $2 \leq \eta x < 3$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(3) \\ & + [\zeta(6) - \zeta(3)] \\ & \times (\eta x - 3) / (6 - 3) \end{aligned} \quad (18)$$

(if  $3 \leq \eta x < 6$ )

$$\begin{aligned} \zeta(\eta x) = & \zeta(6) \\ & + [\zeta(10) - \zeta(6)] \\ & \times (\eta x - 6) / (10 - 6) \end{aligned} \quad (19)$$

(if  $6 \leq \eta x < 10$ )

### 3 計算結果

参考文献 1)には、これらのノモグラフを使用し

ての予測例の手法 4<sup>8)</sup>が掲げられている。そこで使用されているジイソブチレンの物性を使用して、今回の自動計算の妥当性を検討した。

ジイソブチレンの物性は、比重  $0.722 \text{ g/cm}^3$ 、粘度  $0.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 、蒸気圧  $50 \text{ mmHg}$  と記載されている。また、液流出量は  $150 \text{ kL}$  が用いられている。結果として、 $R'_{\text{max}} \doteq 95 \text{ m}$ 、 $\epsilon = 1.08$ 、 $R_{\text{max}} = \epsilon \times R'_{\text{max}} \doteq 100 \text{ m}$ 、 $T'_{\text{max}} \doteq 9 \text{ min}$ 、 $\zeta = 0.98$ 、 $T_{\text{max}} = \zeta \times T'_{\text{max}} \doteq 9 \text{ min}$  が提示されている。

自動計算の結果は、 $R'_{\text{max}} = 97.0 \text{ m}$ 、 $\epsilon = 1.08$ 、 $R_{\text{max}} = 104.9 \text{ m}$ 、 $T'_{\text{max}} = 9.4 \text{ min}$ 、 $\zeta = 0.99$ 、 $T_{\text{max}} = 9.26 \text{ min}$  となり、良く一致している。

### 4 おわりに

この自動計算のスプレッドシートにより、最大拡散半径及び最大拡散半径到達時間のほか、海上浮遊する有害液体の消失時間( $T_a = 10 \times T_{\text{max}}$ )、液面からの蒸気のおおよその放出速度( $V_o \times \text{密度} \times 1000 / T_a$ )、有害液体の面積( $\pi \times R_{\text{max}}^2 / 2$ )などが容易に求められる。消失時間は有害液体からの毒性蒸気の効果の終了時間の推定に、蒸気のおおよその放出速度は蒸気分散予測ソフトなどの入力情報に及び面積は ALOHA などでの液溜まりの面積の入力情報に使用することが可能である。

実際の事故では、物質及び流出量の特定は、事故対応初期における最も困難な部分であるため、すぐさまこのスプレッドシートが利用できることにはならないと考えられるが、なれないノモグラムを使用するという作業から、現場の海上保安官を解放することになると思われる。

### 参考文献

- 1) 海上災害防止センター編、海上防災の調査研究報告書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究、海上防災事業者協会、1988。
- 2) 海上災害防止センター編、海上防災の調査研究報告書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究、海上防災事業者協会、1988、96。
- 3) 海上災害防止センター編、海上防災の調査研究報告書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究、海上防災事業者協会、1988、97。
- 4) 海上災害防止センター編、海上防災の調査研究報告書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究、海上防災事業者協会、1988、98。
- 5) 海上災害防止センター編、海上防災の調査研究報告書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究、海上防災事業者協会、1988、99。
- 6) 例えば、(財)海難審判協会編、昭和五十一年一・

- 二・三月分海難審判庁裁決録, 海難審判協会,  
1976, 224-226.
- 7) 例えば、MSN 産経ニュース 2013.12.29 13:27,  
<http://sankei.jp.msn.com/affairs/news/131229/dst13122913290005-n1.htm>.
- 8) 海上災害防止センター編, 海上防災の調査研究報告  
書 有毒性ガスの防護対策に関する調査研究, 海  
上防災事業者協会, 1988,40-41.