D304

海上流出化学物質の海上拡散、蒸発ガス拡散解析

間島 隆博[○](海上技術安全研究所), 樋富 和夫(海上技術安全研究所)

Dispersion Analysis of Liquid and Vapor for Chemical Spill on the Sea

Takahiro MAJIMA and Kazuo HITOMI

ABSTRACT

Chemical tankers in Japan transport various kinds and large amount of chemical substance. Some of them have adverse effects to the human health condition. However they are VOC (Volatile Organic Compound) and vapor gas emits into the atmospheric environment easily. Considering this background, we developed a calculation model to estimate vapor gas concentration distribution evaporated from spilled chemical substances on the sea. The calculation model is composed of four elements, wind profile estimation model, dispersion model for the spilled liquid on the sea, evaporation rate estimation including a spilled liquid spreading model and atmospheric dispersion model. The calculation result agreed with observed concentration obtained from an oil spill accident in Tokyo bay.

Keywords: Chemical Tanker, Chemical Spill, Dispersion Analysis, Mass-Consistent Model, Benzene

1. 緒言

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いる。その多くは揮発性有機化合物(VOC)であり、健康に悪影響を及ぼす物質が多数含まれる。また、緊急防除に関する国際協力体制の構築を主たる目的とした OPRC 条約では対象物質を油から有害危険物質に広げている。我々はケミカルタンカーの座礁、衝突事故などにより海上に流出した化学物質の挙動を予測すべく、解析プログラムを作成した。海上輸送される化学物質は海面に浮遊し、揮発しやすい物質が多く含まれる。本プログラムではこの特性に特化し、海面上の液体拡散、蒸発、大気中のガス拡散を解析対象として、ガス濃度の時間履歴や、液体の海上拡散の様子を捉えることを目的としている。ここでは、新たに風速推定モデルとの結合を行い、計算結果を東京湾で起きた油流出事故の記録と比較し妥当な結果が得られた。また、この事故時の状況設定で流出物質が油ではなくベンゼン(発がん性物質)であった場合の解析も試行した。

2. 計算モデル

解析プログラムは大きく2つに分かれている。1つは複数地点の AMeDAS データ等から、空間補間により拡散解析で対象とする領域の風速分布を求めるものである。

2つ目は、拡散解析プログラムであり、計算モデルは3つの要素からなる。1つは海面上の液体拡散解析、2

つ目はその液体からの蒸発量算定、最後に、大気中のガス拡散解析である。水面上及び大気中の両拡散解析を行うため、流出液体及びガスの挙動を粒子の動きにより模擬するランダムウォーク法を採用した。なお、各計算モデルで1つ目の風速分布推定プログラムで得られた計算結果が利用される。以下、この2つの解析プログラムについて記述する。

2.1 風速分布の推定

変分法を用いた MATHEW モデル⁽¹⁾を基本とし、鉛直方向の格子点分布は地上付近で密となるように、指数関数を用いる座標変換を行った。通常の座標系 (x, y, z) で、 z は鉛直方向、 x, y は東西、南北方向を意味しており、変換は次式による。

$$x = \xi, \quad y = \eta, \quad z = b \{ \exp(a\zeta) - 1 \} \\ a = c / \zeta_{\max}, \quad b = z_i / \{ \exp(c) - 1 \}$$

ここで、 z_i は後述の混合層高さ(m)で、風速分布推定プログラムの計算領域最高高度である。 c は格子点分布を調整する変数であり、0へ近づけると通常の線形分布となる。これより、鉛直方向 ζ を等間隔な格子点で表すと、実際の座標系 z では指数分布となり、座標系 (ξ, η, ζ) で連続の式を表すと次式になる。

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \zeta} = 0, \quad r = ab \exp(a\zeta)$$

ここで、 u, v, w は東西、南北、鉛直方向の各風速である。次に未定乗数を $\lambda(x, y, z)$ として次式を定義する。

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \alpha_1^2 (u - u_o)^2 + \alpha_1^2 (v - v_o)^2 + \alpha_2^2 (w - w_o)^2 + \lambda \{u_\xi + v_\eta + w_\zeta / r\} dV$$

ここで、 α_1, α_2 は大気安定度に依存した係数であり、 u_o, v_o, w_o は後述する方法により各格子点で与えられる風速の1次推定値である。Lagrange の未定乗数法により上の連続の式を満足し、かつ E を最小化する必要条件、 E の変分 $\delta E = 0$ 、から次式が導出される。

$$u = u_o + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \xi}, \quad v = v_o + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \eta}, \quad w = w_o + \frac{1}{2\alpha_2^2 r} \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta}$$

また境界条件として、側面では $\lambda \delta u = \lambda \delta v = 0$ より、 $\lambda = 0$ とした。これは境界に沿う方向に対して、修正成分が0であることを意味している。一方、地上では、風速の鉛直方向成分が0とするため、その修正量を $\delta w = 0$ とした。これより λ は、上の風速を求める3式を連続の式に代入した次の式から求まる。この式を、緩和法を用いた数値解析により λ の分布を求め、上の風速を求める3式から最終的な風速分布が得られる。

$$2\alpha_1^2 \left\{ \frac{\partial u_o}{\partial \xi} + \frac{\partial v_o}{\partial \eta} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_o}{\partial \zeta} \right\} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \eta^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\partial^2 \lambda}{\partial \zeta^2} - \frac{a}{r} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{\partial \lambda}{\partial \zeta} = 0$$

さらに、地上での境界条件 $\delta w = 0$ より、地上の $\lambda_{\zeta=0}$ に対しては、次式が得られる。

$$\frac{\lambda_{\zeta=1} - \lambda_{\zeta=0}}{\Delta \zeta} = \frac{2\alpha_1^2 \left\{ u_o|_{\zeta=0} \frac{\partial h}{\partial \xi} + v_o|_{\zeta=0} \frac{\partial h}{\partial \eta} - w_o|_{\zeta=0} \right\}}{\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \frac{1}{r_{\zeta=0}}}$$

また、風速の1次推定値は AMeDAS 等の観測データから以下の手法を用いて、各格子点で求める。まず、水平方向に対して、

$$\bar{u}_o(i, j) = \sum_k (U_k / d_{i,j,k}) / \sum_k (1 / d_{i,j,k})$$

ここで、 $\bar{u}_o(i, j)$ は格子点 (i, j) での風速の1次推定値、

U_k は観測点 k での風速、 $d_{i,j,k}$ は観測点 k と格子点 (i, j) との距離である。さらに、この水平面の値から、鉛直方向の分布は OCD (Offshore Coastal Dispersion) モデル⁽²⁾を参考にして次式により求める。

$$\bar{u}_o(z) = \frac{u_*}{k} \{ \ln(z/z_0) - \psi_u(z/L) \}$$

$$z_0 = 2.0 \times 10^{-6} \cdot W^{2.5}, \quad u_*^2 = C_{UN} W^2$$

$$C_{UN} = (0.75 + 0.067W) \times 10^{-3}$$

$L < 0$ では

$$\psi_u = 2 \cdot \ln \left\{ \frac{(1 + \phi_u^{-1})}{2} \right\} + \left\{ \frac{(1 + \phi_u^{-2})}{2} \right\} - 2 \tan^{-1}(\phi_u^{-1}) + \frac{\pi}{2}$$

$$\phi_u = (1 - 15z/L)^{-1/4}$$

$L > 0$ では $\psi_u = -4.7z/L$

ここで、 L は Monin-Obukhov の大気安定度長、 k はカルマン定数(0.4)である。また、 W は地上 10m での風速であり、通常、観測点が置かれている高さである。これより、1次推定値の空間分布が得られ、前述の λ より最終的な風速分布が得られる。

2.2 拡散モデル

拡散モデルは3つ計算モデルからなる。1つは海面上の液体拡散解析、2つ目はその液体からの蒸発量算定、最後に、大気中のガス拡散解析である。水面上及び大気中の両拡散解析を行うため、流出液体及びガスの挙動を粒子の動きにより模擬するランダムウォーク法を採用した。なお、各計算モデルで前節の風速分布推定プログラムで得られた計算結果が利用される。ここではモデルの大略を述べ、詳細は既報⁽³⁾を参照されたい。

2.2.1 海上拡散

海上拡散では文献⁽⁴⁾を参考にした。粒子は風速、海流の合成ベクトルにより海面上を移流し、拡散係数の1/2乗と乱数の積に比例して散逸する。なお、レイノルズアナロジーにより拡散係数には潮流解析の渦粘性係数を用いる。以下の記述で、 n は現時間ステップ、 $n+1$ は Δt (sec) の時間幅を持たせた次のステップを表し、 x_i は各粒子の i 方向の座標を示すものとする。

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t \cdot (\alpha_w W_i + V_i + V_i'), \quad V_i' = (4D/\Delta t)^{1/2} R_n e^{i\theta'}$$

i	: x, y 方向
x	: 粒子の座標(m)
W	: 水面上 10m の風速(m/s)
V	: 水面流速(m/s)
D	: 渦動拡散係数(m ² /s)
R_n	: 平均 0、標準偏差 1 の正規分布乱数
θ'	: $0 \sim 2\pi$ の一様乱数
α_w	: 係数(=0.03)

2.2.2 蒸発量算定

蒸発量を見積もるためには流出液体の表面積を求める必要がある。ここでは、文献⁽⁴⁾と同様油の拡がりを見積もる際に良く用いられる、FAY のモデルを利用した。このモデルでは円形に拡がる液体の半径が計算される。さらに、この面積と流出物質の物性、風速から蒸発量を推定するが、油と純粋な化学物質の場合で計算方法が異なり、文献⁽⁴⁾⁽⁵⁾による方法を用いている。

2.2.3 大気拡散

蒸発ガスの挙動も海洋拡散と同様、ランダムウォークによる。次式のように各粒子の位置は拡散するパフの中

心座標を表し、パフの拡散は別途、乱流成分から計算される。

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \Delta t \cdot u_i, \quad u_i = \bar{u}_i + u_i'$$

ここで、

- i : x, y, z 方向を表す。
- x : ガス粒子の座標(m)
- $\bar{u}$: 前節、風速分布解析による風速(m/s)
- u' : 乱流速度成分(m/s)

上記、乱流速度成分は様々なパラメータから計算されるが、海上では海水が日射を受けるため、温度が陸ほど急激な変化を示さず、乱流の構造は陸上と異なる。そのため、一般的に海上の拡散幅は陸より小さく見積もられる傾向にある。よって、海上の大気拡散のために開発された OCD (Offshore Coastal Dispersion) モデル⁽²⁾を参考にし、乱流速度成分の導出過程を本モデルに適用した。さらに、多くの大気拡散モデルで利用される方法と同様、本モデルもラグランジュの時間の積分スケールを使用し、前時間ステップとの相関を考慮した形式を採用した。

3. 解析結果

本モデルを平成9年7月2日午前10時、東京湾内横浜港沖で起きた Diamond Grace 号の油流出事故に適用してみる。この事故では、比較的軽い成分を多く含む原油が流出した。南風が強いこともあり、東京湾最奥部にあたる、東京江戸川区を中心として流出油の蒸発ガスが原因とされる異臭が報告された事故である。事故の状況を Fig.1(a)と Table 1 にまとめる。

Table 1 Outline of the Oil Spill Accident⁽⁶⁾

Spill Time	10:05, July 2 nd , 1997
Spill Site	35°22.99'N, 139°42.44'E (Estimated, see Fig.1(a))
Ship Name	Diamond Grace (256,999 DWT)
Spill Amount	1500(KL)
Spill Oil	Light Crude Oil (Umm Shaif)

Fig.1 Calculation Region, Tokyo Bay (a) Spill Site (b) Estimated Wind Distribution at Height of 10m

東京湾のような閉鎖系湾内では特に潮流の影響が大き

く、実際の事故時に対応する場合は、潮汐残差流を用いるより、潮流分布を時系列として得た方が望ましい。ここでは海面の流速分布を得るために(株)構造計画研究所、Water Design⁽⁷⁾を利用した。本ソフトウェアにより予め計算された潮流ファイルを保存しておき、流出液体を表す粒子の位置、時間に応じて潮流が内挿処理され、粒子に速度が与えられる。潮流解析で用いた渦粘性係数は水平方向に $100(\text{m}^2/\text{s})$ 、垂直方向には $0.01(\text{m}^2/\text{s})$ とし、東京湾の解析に良く用いられる値とした。また、M2 及び S2 分潮を模擬するため、境界条件として湾口部において、振幅 0.6m、12 時間周期の正弦波を入力した。計算結果の妥当性は事故当日の東京検潮所での潮位観測結果との比較により確認した。

Table 2 Calculation Parameters

Time Step Interval, Δt	10 (sec)
No. of Particles for Spill	300
Interval of Producing Gas Particles	800(sec)
No. of Produced Gas Particles	1 / 1 Liquid Particle
Air Temperature	25(°C) ⁽⁶⁾
Sea Temperature	23(°C) ⁽⁶⁾
API Gravity of the Spilled Oil	37
Molar Vol. of the Spilled Oil, v	0.3 (m^3/kmol) *

*) Assumed as Middle Value of the Report⁽⁴⁾

Fig.2 Tidal Current and Spilled Oil (Particle) Distribution

Fig.3 Vapor Gas Concentration Distribution (ppm)

さらに、事故時における東京湾周辺の AMeDAS 観測データ⁽⁸⁾を用い、2.1 に示した風速分布の推定を行い、Fig.1(b)の結果が得られた。なお、陸、海とも起伏がない平面を仮定し、垂直方向は 10 層、格子点間隔を調整するパラメータ c は 2 とし、水平方向は上記、潮流解析の格子間隔を用いた。さらに、大気安定度に関するパラメータ $(\alpha_1/\alpha_2)^2$ は文献⁽⁹⁾を参考に 0.0015 とした。以降の拡散解析では、この風速分布を用いて行っている。流出形態は 1,500KL の油が瞬間的に流出したと仮定し、その他の計算パラメータは Table 2 にまとめる。

解析結果として流出事故発生から、1、3、5 時間後の潮流分布と液体粒子の分布を Fig.2 に、蒸発ガス濃度の分布を Fig.3 に示す。蒸発は流出後油に見られる風化の中で初期段階におきる現象である。この事故では軽い成分を多く含む原油であったため、Fig.3 より流出直後に比較的高い濃度の蒸発ガスが、風によって北東方向へ流れていく様子が描かれている。また、当時の新聞報道によると、東京ディズニーランド、葛西臨海公園、等で異臭があったことが記録されている。江戸川区南葛西の測定局での炭化水素濃度との比較を Fig.4 に示す。若干齟齬があるものの、南葛西での濃度変化をほぼ再現できている。

Fig.4 Time History of Vapor Gas Concentration at Minami Kasai

次に、同じ条件下で流出物質が油ではなく、発がん性物質であるベンゼンで合った場合の解析を試みた。なお、流出量は、国内ケミカルタンカーの主力である 499GT ケミカルタンカーの満載積載量、1000 トンとし、液体粒子数は 200 とした。Fig.5 に蒸発ガス濃度分布の時間履歴を示す。

Fig.5 Concentration Distribution of Benzene (ppm)

Fig.6 Region where Benzene Concentration Exceeds 1ppm (1.5 Hour)

Diamond Grace 号の事故で流出した油は比較的蒸発しやすい油であったが、ベンゼンの場合にはそれ以上に激しい蒸発が起こり、非常に高濃度のガスが広範囲に分布することが示されている。ベンゼンの場合、労働環境の基準値は 1 ppm のオーダーであり、通常の大気環境濃度の

基準値に対して 1000 倍程度となっている。解析結果の濃度の最高値は 100ppm のオーダーで、この濃度が陸域にまで到達している。Fig.6 では、事故発生から 1.5 時間後における濃度 1ppm の等高線を描き、この等高線で囲まれた陸域を黒く塗りつぶしている。このように、本システムでは危険が及ぶ範囲を視覚的な情報にまとめて提供できる能力も持つ。

4. 結 言

海上流出事故における流出液体からの蒸発ガス濃度の空間分布を得ることを目的とした解析プログラムを作成した。解析プログラムは浮遊する流出液体の海上拡散、液体からの蒸発、蒸発ガスの大気拡散という 3 つの要素からなり、風速分布の空間補間プログラムとの結合を行った。さらに、本プログラムを東京湾内で起きた油流出事故に適用し、妥当な結果を得ることができた。さらに、この事故と同条件下におけるベンゼンの流出に置き換えた解析結果から、大規模なベンゼン流出の場合、健康影響が懸念される濃度の蒸発ガスが陸域まで到達する可能性が示唆された。

参 考 文 献

- (1) 横山 長之 編: 大気環境シミュレーション - 大気の流れと拡散 -, 白亜書房, (1992)
- (2) Hanna, S.R., Paine, R.J. Schulman, L.L.: Overwater Dispersion in Coastal Regions, Boundary-Layer Met., Vol.30, (1984), pp.389-411,
- (3) 間島隆博: 海上流出化学物質の蒸発ガス拡散解析, 第4回海上技術安全研究所研究発表会講演集, (2004), p.249-254
- (4) Shen, H.T., Yapa, P.D., Petroski, P.D.: Simulation of Oil Slick Transport in Great Lakes Connecting Channels, Report No.86-1, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, (1986)
- (5) Mackay, D., Paterson, S., Nadeau, S., "Calculation of the Evaporation Rate of Volatile Liquids", Proc. National Conference on Control of Hazardous Material Spills, Louisville, KY, (1980), pp.161-368
- (6) Okamoto, K., Spaulding, M.L., "Oil Spill Simulation on the Diamond Grace Accident in Tokyo Bay", 第15回海洋工学シンポジウム講演集, (2000), pp.391-396
- (7) <http://www.4.kke.co.jp/kaiseki/packages/Water-design/inquiry.htm>, (2005, 4月現在)
- (8) 気象業務支援センター、平成9年アメダス観測年報(時日別値), (1997, CD-ROM)
- (9) Kitada, T. "Estimation of Vertical Air Motion from Limited Horizontal Wind Data - A Numerical Experiment", Atmospheric Environment, Vol.17, No.11, (1983), pp.2181-2192