船 槽 外 放 出 ガ ス の 挙 動 — I .

村 山 義 夫*・タヌジャヤ, W**・西 山 安 武***

The Movement of Atmospheric Gas Emitted from Ship's Tank — I

Yoshio MURAYAMA, Widiharja TANUDJAJA
and Yasutake NISHIYAMA

Abstract

The movement of atmospheric gas emitted from oil tanker originated in water ballasting and cargo loading, will be affected strongly due to causative elements - wind, emitting gas velocity, difference of density between gas and air, freeboard and super structure of ship and other environmental conditions.

In this connection, the authors tried to study about the correlations between the extension of gas explosive zone and several elements above stated by model test using propane gas, making use of wind tunnel with water tank.

A summary of the results is shown as follows :

- (1) In case of high wind speed and small freeboard of ship, maximum density on the sea surface were similar to the calculated results by Sutton's solution. But in case of high wind speed and large freeboard of ship, they foot up to 8~10 times of theoretical values.
- (2) In case of low wind speed, they foot up to 5~9 times of theoretical values. And the highest of them was 0.31% when wind speed was 0.45m/sec.

1 は じ め に

可燃性液体を積載したタンカーの荷役中に放出されるガスによって、微風速のときには船体周辺で火災・爆発がおこる可能性が指摘されている⁽¹⁾。無風時の実験⁽²⁾や微風時の実測⁽³⁾から、ベントの直下または予想外の位置で高濃度のガスが確認されている。

大気に放出されて拡散したガスの濃度の推定は、工場の排煙等による大気汚染現象について数多く検討され、いくつかの有用な予測式が得られている。タンカーの荷役中の危険性の推定には、この予測式に実測に基づく係数を与えた式を用いている⁽⁴⁾。

しかし、これはベントからの危険範囲を求めるもので、船体周辺の海面濃度はこれと異なり、ベントの高さやガス密度と大気風の関係や船体による風の流況によって変化する。そこで、筆者らは船体周辺海面の危険性を推定するため風洞実験を行い、微風のときにガスと空気の密度差及び乾舷の高さが船体周辺海面濃度に及ぼす影響について検討し、火災・爆発の可能性のある危険範囲とそのときの風速の推定を試みた。

2 放出ガスの挙動

2.1 大 気 拡 散

大気拡散現象の研究は Taylor に始まって以来、輸送理論と統計理論の仮説に大別できる理論または半経験的ないくつかの予測式が報告されている⁽⁵⁾。坂上の式や Sutton の式は各々の代表的なもので、特に後者は計算の

* 正会員 海上労働科学研究所（東京都千代田区麴町4-5）

** 正会員 P. T. ARPENI PARATAMA OCEAN LINE（インドネシア）

*** 正会員 東京商船大学（東京都江東区越中島2-1-6）

簡易さから多用されてきた。

放出されたガスは大気風の運動量とその変動によって、風下へ流されながらしだいに拡がる拡散プルームを形成する。Sutton は大気風の乱れの不規則性から、この拡散プルームの風の流れに垂直な方向の濃度分布は正規分布をなすと仮定して、ある位置の濃度を次式で表した⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left\{-\frac{(H_e+z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} + \exp\left\{-\frac{(H_e-z)^2}{2\sigma_z^2}\right\} \right] \dots\dots\dots(1)$$

ここで座標 (x, y, z) 及び H_e は図1のとおりとし、 Q はガス放出量、 u は風速、 π は円周率、添字 x, y, z は方向を示す。分散 σ^2 は風速変動のラグランジュ相関と、ある一塊のガスがバントを出てからの経過時間とに対応するもので、混合距離理論と実測から距離 (x) と風速分布と拡散係数 (C) は

$$2\sigma_y^2 = C_y^2 \cdot x^{2-n}, \quad 2\sigma_z^2 = C_z^2 \cdot x^{2-n} \dots\dots\dots(2)$$

の関係があるとした。但し n は大気風の境界層高さを z_1 、一様流域の風速を u_1 としたとき風速分布のプロファイルを示す

$$\frac{u_1}{u} = \left(\frac{z_1}{z}\right)^{-\frac{n}{2-n}} \dots\dots\dots(3)$$

で求められる Sutton の大気安定度である。 C は拡散係数で大気安定状態と地表面からの高さによって決まる値であり、中立の大気安定状態では $n=0.25$, $C_y=C_z=0.12$ ($z=25\text{m}$) である。

海面の最大濃度 (C_{max}) とその位置 (X_{max}) は、(1)式で $y=z=0$ としたときの極大値とそのときの x であり、次式で求められる。

$$C_{max} = \frac{2Q}{\pi e u H_e^2} \cdot \frac{C_z}{C_y} \dots\dots\dots(4)$$

$$X_{max} = \left(\frac{H_e}{C_z}\right)^{\frac{2}{2-n}} \dots\dots\dots(5)$$

2.2 拡散軸の沈降と down draught

ガスと空氣の密度差が大きく、しかも、微風速のときには、拡散プルームは上昇（又は沈降）しながら風下へ運ばれる。このときの上昇の程度は密度差に働く重力と大気風の慣性力の比にほぼ対応するとし、Froude 数 (F_r) の一致を上昇（又は沈降）過程の相似条件としている。ここに $F_r = u / \sqrt{\Delta\rho \cdot g \cdot L / \rho}$, $\Delta\rho$ は密度差、 ρ は空氣密度、 g は重力加速度、 L は代表長さである。さらに、上昇過程での粘性力や渦によるエネルギーの散逸を考慮した場合には、空氣と温度差がある気体の実測結果を熱力学上の諸パラメータを用いて検討し、風下側の距離 x までの上昇距離 ΔH を次式で表した⁽⁸⁾。

$$\Delta H = \frac{1.6 F_r^{\frac{1}{3}} x^{\frac{2}{3}}}{u} \dots\dots\dots(6)$$

ここで F は放出熱量を Q_H 、定圧比熱を C_p 、大気温度を T とすると $F = Q_H \cdot g / \pi \cdot C_p \cdot \rho \cdot T$ である。空氣とガスの温度が同一で密度が異なるときは、空氣の Schmidt 数が約1であるから、 $F = Q \cdot \Delta\rho \cdot g / \rho \cdot \pi$ である。

船体を越えた風は、風下側で巻き降りる現象（down draught 現象）が生じるため、これに伴って拡散プルームは下方へ巻き込まれるとともに風の乱れの増大によって拡散も激しくなる。この程度は理論的には流線及び渦度の計算から定性的に把握できるが、大気風の渦動粘性係数が不定であるため定量的な推定が困難である。そこで、これらの影響を調べる実験や実測が行われている⁽⁹⁾。その結果、down draught 現象の影響は煙突と構造物の高さの比 (H_e/H) が2.5以下で著しく、 $H_e/H=1.5$ では地表面の濃度が約2倍になる。また、構造物の高さ以下での拡散の大きさは、その構造物の風に垂直な面の面積に応じて増大することが確認されている。

3 実験方法

実験には、前面に一辺 1 cm の正六角形の蜂巢状整流装置が設けられている東京商船大学の開放型吸込型風洞

図1 放出ガスの挙動模式図

装置を用いた。この中に G・T 2 万トン級タンカーの1/50に相当する甲板上の構造物を省略した模型を風に対して直角に置き、濃度が約100%のプロパンガスを船体中央の単一ベントから風下方向に水平に放出し、このときの風速分布、風速変動、ガス濃度分布を測定した。これらの装置の構成は図2に示すとおりである。

図2 実験装置概要

表1 実験条件

	実験	実船
幾何学的尺度	λ	1/50
船幅	B	40 cm
乾舷高さ	H	5, 10, 15 cm
ベント高さ(甲板面)	h (H ₀ -H)	15 cm
ガス放出量	Q	1.33 cm ³ /sec
噴流初速度	u ₀	42 cm/sec
初期濃度(純ガス)	C ₀	1.0
ガス空気密度差	Δρ/ρ	0.5
実験風速	u	10, 20, 30 cm/sec
大気安定度	n	0.25
拡散係数(鉛直方向)	C _z	0.237 (cm) ²
フルード数	Fr (=uΔρgB/ρ)	0.07, 0.14, 0.21
実船換算風速	u _p (=0.0447u)	0.45, 0.88, 1.34 m/sec
実船換算濃度	C _p (=C×0.25u _p)	5.6C

4 実験結果と考察

4.1 拡散パラメータ

船体がないときの風速の測定結果について、一様な風速となる高さを境界層高さ (z_1) として風速分布のプロファイルを求めると図3のとおりであり、Sutton の大気安定度分類の中立からやや安定な状態に相当する。

また、風の乱れの測定から笠口の方法¹⁰⁾で拡散係数を求めると、風速分布から得た Sutton の分類に対応する値である。この方法によって船体があるときの拡散係数を求めると、甲板の高さで最大で一様流の1.5~2倍であった。したがって拡散の速さは船体の有無、乾舷高さ、乾舷高さとの関係によって異なる。この差を逐次計算に取り入れることは容易でないので、乾舷の高さと放出口の高さの相対位置、即ちベント高さと乾舷高さの比 (H_0/H)、によって変化する拡散幅の違いを拡散速度に対するこれらの影響の近似的な傾向とみなして検討すると以下のとおりである。

濃度測定の結果、鉛直濃度分布は図4(a)に示す如くであった。これを正規確率紙にプロットすると図4(b)に示す近似直線が得られるから、拡散係

図3 風速分布プロファイル
 z_1 : 境界層高さ, u_1 : 一様流風速, Δ , $\square$, $\circ$;
 $u = 27, 49, 64$ cm/sec

図4(a) 鉛直濃度分布 ($H=10$ cm)
 $\diamond, \circ, \bullet, \triangle$; $x=S, 0.5B, B, 2B$

図4(b) 累積濃度 ($H=10$ cm, $x=B$)
 $\bullet, \triangle, \circ$; $u=10, 20, 30$ cm/sec

ルームの鉛直濃度分布は(1)式のとおり正規分布で、この標準偏差は拡散係数に相当する。これらの拡散係数を H_e/H に対して各風速毎に比較すると図5のとおりである。

拡散係数は風速の違いによって30%程度の差がみられるが、 H_e/H に対する変化の方が著しく、 H_e/H が小さくなると2~3倍に増大する。

4.2 みかけの放出位置の低下

図4(a)のような鉛直濃度分布から等濃度線を求めて拡散のプロファイルを示すと図6の如くである。乾舷が低く風速が小さいときは拡散軸が海面付近まで低下し、風速が大きくなるとしだいに平行に近づく。乾舷が高く風速が大きいときは down draught 現象によって拡散幅と拡散軸の低下が大きい。

拡散軸の低下は(1), (4), (5)式のベント高さ (H_e) をみかけ上低くしたとみなせる。通常の荷役中に火災・爆発の危険性がある範囲は近距離であり、微風時には拡散プルームがその範囲で乾舷高さ付近まで低下し、その後は船体後流の強い乱れで拡散が激しくなると推察されることから、 $x = 2B$ までの拡散軸の低下をベントのみかけ上の低下 (ΔH) として実験結果を比較すると図7のとおりである。 ΔH は風速に反比例するとともに、 $H_e/H = 1.75$ では、 $H_e/H \geq 2$ のときの約1.3倍となる。これらは Froude 数または(6)式に示される密度差 ($\Delta\rho$) と風速 (u) の関係についての低下と、down draught 現象による低下と考えられる(5)(8)(9)。

4.3 海面上最大濃度の予測

拡散軸直下海面の濃度は図8に示す分布であった。濃度が最大になる位置は、乾舷が低いとき ($H_e/H = 2.5$) には風速が増すと風下へ離れる傾向があるが、高くなると down draught 現象による拡散軸の低下と

拡散係数の増大が、風によるベントのみかけ上の低下の減少とベントが高くなった効果とを相殺していずれも $x = 2B$ 付近で最大となる。濃度は風速が増すとベントのみかけ上の低下が減少するため低下する。乾舷高さが高くなるとその傾向は小さくなるか逆転する。

図8 海面上濃度分布

○, △, ●; $u = 10, 20, 30$ cm/sec

図5 拡散係数の変化

C_z : 鉛直拡散係数, H_e/H ; ベント高さ/乾舷高さ
△, ○, ●; $u = 10, 20, 30$ cm/sec

図7 拡散軸低下 ($x = 2B$)

ΔH ; 軸低下距離

○, ●, △; $H_e/H = 1.75, 2, 2.5$

以上の結果から、このような場合の海面上の最大濃度 (C_{max}) やその位置 (X_{max}) は、(4), (5)式をそのまま用いて求めることができないのが分る。そこで、図5に実線で示した H_e/H と拡散係数の関係、並びに図7に示した風速及び H_e/H と拡散軸の低下の関係によって(4), (5)式のベント高さ (H_e) と拡散係数 (C) を補正すると、密度差と風の流況の影響を考慮した近似値が求め得ると考えられる。補正拡散係数 (C') は、各 H_e/H に対する C_s を図5の実線から求め、 C_y' を C_s' の増加率 ($\Delta = (C_s' - C_s)/C_s$) の $1/2$ だけ増加すると仮定して $C_y' = (1 + \Delta/2)C_y$ とする。みかけのベント高さ (H_e') は H_e から拡散軸の密度差による低下と down draught による低下を減ずる。

実験値、(4)式による予測値、及び補正を行った予測値を示すと図8のとおりである。(4)式による予測値は $H=10\text{cm}$ のときに $u=30\text{cm/sec}$ では実測値と近い値であるが、密度差による軸の低下を見込んでいないため風速が小さくなるほど差が大きくなり、 $u=10\text{cm/sec}$ は実測値の $1/9$ である。乾舷が高いときは拡散が著しくなって実測値が低下するため予測値は実測値の $1/5$ と近づくが、風速が増すと巻き降しによって濃度が上昇するため差は大きくなる。

補正を施した予測値と実測値とを比較すると微風ではよく一致するが、全般に、風速が大きいときに補正予測値の方がやや高い値を示す。ただし、乾舷が低く微風のとき、乾舷が高く風速が大きいときでは実測値が予測値より高い。これらは乾舷高さ以下の船体後流の乱れは乾舷が低いときに小さいことや、 H_e/H が小さいときの風の巻き込みの影響は $x=B$ の拡散係数と $x=2B$ までの拡散軸の低下では表せないことによると考えられる。

実測値を表1にしたがって実船における濃度と風速に換算すると、海面濃度の最大は満載に近い状態で風速が 0.45m/sec のとき 0.31% で、その他は 0.1% 以下である。無風時で安全率を5倍にとる提案²⁾にしたがって実測値を検討すると、爆発下限界を 1.2% としたときこれを超える可能性があるのはこの最大のときのみで、範囲は $x \leq 2B$ である。この範囲や条件は安全率のとり方によって異なるが、無風時の噴流と密度差による沈降流や大気拡散ブルームのように大きな渦や蛇行があるときの平均濃度は、制御された風洞内の平均濃度より低いと考えられること、及び放出の向きを正横に水平にしている点から、この実験結果は既にある程度の安全率を含んだものと推察される。

まとめ

微風下におけるタンカーの荷役中に放出される可燃性ガスによる火災・爆発危険性を予測するため、風洞を用いた模型実験を行った結果次の点が明らかになった。

- 1) 風速分布、変動から求めた風洞内の拡散係数は Sutton の大気安定度分類の中立～弱安定であったが、船体があるときには増大し、最大を示す甲板の高さでは、ないときの約2倍であった。
- 2) 放出したガスの拡がり、ベント高さ (H_e) と乾舷高さ (H) の比 (H_e/H) が小さいほど大きい。これを拡散幅から求めた拡散係数と比較すると、 $H_e/H=1.75$ では 2.5 のときの2～3倍である。
- 3) ガス拡散軸は空気とガスの密度差によって低下し、 $x=2B$ までの低下距離は風速に反比例する。 $x \geq 2B$ では、拡散軸は $u=20\text{cm/sec}$ (実船換算風速 1m/sec) 以上のとき水平に近くなる。
- 4) down draught 現象の影響は $H_e/H=1.75$ のとき顕著で、みかけ上ベント高さを乾舷高さの約25%低下させる。
- 5) 海面上最大濃度の実測値は、微風のとき Sutton の式による予測値の5～9倍であるが、船体による拡散係数の増大と密度差及び船体による拡散軸の低下を見込むことによって実測値に近い予測値が得られた。
- 6) 実験で爆発下限界を超える可能性がみられたのは、実船換算風速が 0.45m/sec 、ベント高さが 12.5m のとき、濃度30%のガスを $1000\text{m}^3/\text{h}$ の量だけ水平に放出したときであり、このときの距離は舷側より約40mである。

ここで推定した火災・爆発危険発生条件は、風速と拡散軸の低下の関係、安全率、沈降滞留したガスの移動等によって変化するものである点に注意し、これらに関する研究の進展を期する。

図9 海面上最大濃度 (C_{max}) の実測値と予測値の比較
○, ●, △; $H_e/H=1.75, 2, 2.5$
--- Sutton の式
— 補正計算値

参 考 文 献

- (1) 日本海難防止協会編；タンカー荷役中の石油ガス滞留に関する研究会報告書，日本海難防止協会，82—87，（1969）
- (2) 上原，佐藤；ベントから放出された可燃性ガスの拡がり，安全工学，10（8），86—91，（1971）
- (3) 日本船主協会訳；ICSタンカー安全指針（石油編），日本船主協会，（1970）
- (4) 航海便覧編集委員会；航海便覧，海文堂，784—786，（1972）
- (5) 笠口展宏；煙拡散に関する風洞実験，航空学会誌，15（167），417—425，（1967）
- (6) 丸尾，比企；大気汚染 I，数理科学，146，44—49，（1975）
- (7) Sutton, O. G. ; The Application to Micrometeorology of the Theory Turbulent Flow over Rough Surfaces, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 75, 335—351, （1949）
- (8) 鈴木武夫編；大気汚染の機構と解析，産業図書，（1980）
- (9) 笠口，岡本；煙拡散風洞による地上濃度予測法の開発，三菱重工技法，8（2），179—187，（1971）
- (10) 笠口，坂田，井手；乱流境界層を考慮した乱流拡散，航空学会誌，16（168），16—22，（1968）