

流れをもつ海域中に放出された浮上プリュームの 分岐拡散の現象について

林 泰 造*・原 嶋 伸 郎**

1. ま え が き

水平方向に一樣な流れのある海域において、海底近くから放出された廃液の浮上プリュームは、海面近くで二条に分岐し、煙突からの浮上プリュームとは異なった現象を呈することがある。

この現象について筆者の一人、林は第17回、第18回海岸工学講演会等において、理論的考察および実験結果を報告してきたが^{1)~3)}、この実験のためには十分に幅の広い水路が必要であり、前報で使用した循環式水路では水路幅の不足が感ぜられていた。今回、本研究においてはこの水路側壁の影響を除去するために、十分広い平面水槽を使用し、この中を廃液を放出させつつ放出口を移動させることによって同様の実験を行い、やはり同様の分岐拡散の現象の発生を認め、その発生の条件を研究した。本論文はその研究について記述するものである。

2. 分岐拡散の現象

水平流を持つ海域中へ鉛直上向きの初速度と浮力を持

った廃液が定常的に放出された場合、放出直後の段階では浮力と初速度によってプリュームは上昇を続け、その連行作用によって周囲水が動き始める。さらにプリュームは上昇するにしたがってその上昇速度を減じて行き、水平流の影響を強く受けるようになりプリュームの経路はしだいに水平方向に傾けられて行く。そしてプリュームが水面下に達し、ほとんど上昇速度を失ってしまった後にも連行によって生じた周囲水の動きは消滅せず、水底近くにあった周囲水が水面にまで達して放出された廃液を押し分けて分岐拡散の現象を呈する。

3. 分岐拡散パターンの分類

分岐拡散の現象の発生要因として周囲水の挙動に着目する。

浮上プリュームの連行作用によって一樣な水平流を持つ周囲水に加えられた運動は、流れとともに下流に運搬されて行く。浮上プリュームの上昇速度が早い初期の段階では周囲水の動きは、図-1 ①断面図に示されているようにプリュームの連行作用と一致するが、上昇速度が

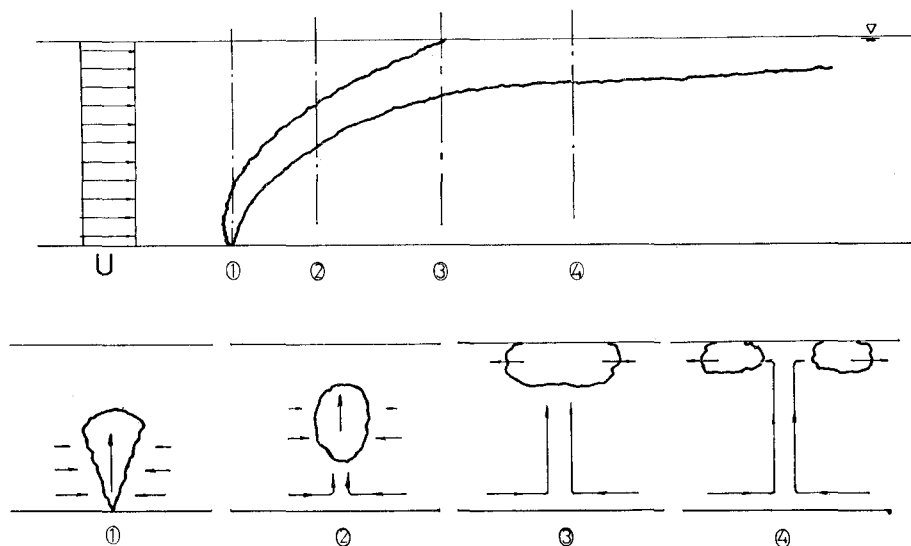


図-1 浮上プリュームと周囲水の動き

* 正 会 員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 学生会員 中央大学大学院理工学研究科

しだいに減少し水平流の影響を強く受ける 図-1 ③断面図に示される段階になるともはや浮上ブリュームの連行現象はほとんど無視できると考えられる。しかしこのような状態になってもそれ以前の連行作用によって周囲水に加えられ、一樣流速 U で移流してきた y, z 方向の運動は消滅せず、ブリュームより下層の周囲水はまだ上昇速度を維持しており 図-1 ④断面図のごとく水面下に到達して廃液を左右に押し分ける。

このような周囲水の動きによって分岐拡散の現象が発生すると考えると、水面の位置によって水面直下での廃液の広がりかたに差異が生じてくる。廃液の放出速度、内部フルード数などの放出条件が一定である時、十分な水深下の水底から放出された場合には、ブリュームは周囲水を連行することによって上昇速度を減じて行き、水面直下では水平流の流速に比較してその上昇速度は小さくなり水面下横方向に広がる速度も小さくなるであろう。また水深が浅い場合にはブリュームは十分に減衰されずに初速度の影響を持ったまま水面下に達し、流れによって曲げられたブリュームというよりも鉛直に浮上するブリュームに近くなってしまふ。水平流の流速に関しては流速が早ければブリュームを水平方向に曲げる作用も大きくなるし、逆に遅くなれば鉛直に浮上するブリュームのようになるであろう。また廃液の放出速度によっても拡散のパターンは異なってくるであろう。つまり拡散パターンは水平流の影響をほとんど無視し得る状態、すなわち静止した海域中に放出された鉛直浮上ブリュームがえがくようなパターンと煙突から排出された浮上ブリュームが形成するパターンを両極端としたいいくつかの遷移的なパターンに分類されるであろう。

4. 分岐拡散の現象の発生条件

浮上ブリュームが十分に減衰されずに水面に到達すると、ブリュームの上向き速度成分は水面下を水平方向に進む密度流の段波のそれに变化する。この水平方向に進む密度流の段波の速度 (ω) が水平流の速度 (U) より

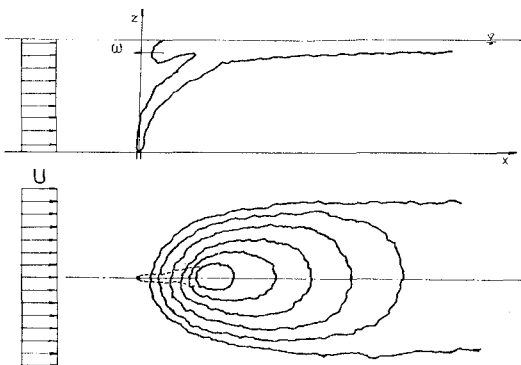


図-2 浮上ブリュームの広がり速度と水平流

も大きい場合には、図-2 に示されるように廃液の一部は流れにさからって溯上しブリュームが水面に達した所の上流側に廃液の濃い層が発達し楕円形の広がりを呈して分岐現象は発生し得ない。この状態が分岐拡散の現象の発生しない限界であると考えたと次式で表わされる。

$$\omega/U \geq 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

放出口を原点として一樣流れの方向に x 軸をとり、放出口から水面に向けて z 軸をとる。Slawson-Csanady⁴⁾ および首藤⁵⁾ の研究によると、放出水の経路は次のように表わされる。

$$\frac{z-z_0}{l} = 3^{1/3} \cdot 2^{-1} \cdot \alpha^{-2/3} [x-x_0]^2 l^{-2/3} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 z_0, x_0 は仮想原点の位置、また l は、

$$l = \frac{F}{U^3} = \left(\frac{w_0}{U} \right)^3 D_0 \cdot Fr^{-2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で定義されるパラメーター、 α は連行係数、 F は欠損密度流量 (フラックス)、 w_0 は廃液放出速度、 D_0 は放出口径、 Fr は廃液の内部フルード数である。

また、希釈率、ブリューム径についても次の式のように書き表わされる。

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta \rho_0} = \frac{w_0}{U} \cdot \frac{D_0^3}{3^{2/3} \cdot \alpha^{2/3} \cdot l^{2/3} (x-x_0)^{4/3}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$D = 3^{1/3} \cdot \alpha^{1/3} (w_0/U) D_0^{1/3} \cdot Fr^{-2/3} (x-x_0) \quad \dots\dots (5)$$

ここで $\Delta \rho_0$ は廃液欠損密度、 D はブリューム径である。浮上ブリュームが水面下に到達する位置は式 (2) において $z=H$ として

$$x = (H-z_0)^{3/2} \cdot 2^{2/3} \cdot 3^{1/2} \cdot \alpha \cdot l^{-1/2} + x_0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と表わされる。ただし H は水深である。

またブリューム軸線の傾きは式 (2) から

$$\frac{dz}{dx} = 3^{-2/3} \alpha^{-2/3} l^{1/3} (x-x_0)^{-1/3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

水面下での水平流速とブリューム上昇速度の関係は

$$\left(\frac{dz}{dx} \right)_{z=H} = \frac{w_s}{U} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。ただし w_s はブリューム上昇速度である。式 (6), (7), (8) から水面直下に達したブリュームの上昇速度は次のように与えられる。

$$w_s = 3^{-1/2} 2^{-1/2} \alpha^{-1} (H-z_0)^{-1/2} l^{1/2} U \quad \dots\dots\dots (9)$$

次に水面下での廃液の広がりについて考えると廃液の広がり速度は次のように書き表わすことができる。

$$\omega = \sqrt{\frac{\Delta \rho_s g h}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで $\Delta \rho_s$ は水面下での廃液の欠損密度、 h は廃液層の厚さである。

また流量の連続条件から

$$L h \omega = A w_s \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし L, A は 図-3 によって示されるように、水面に達したブリュームが水面によって切り取られる断面の

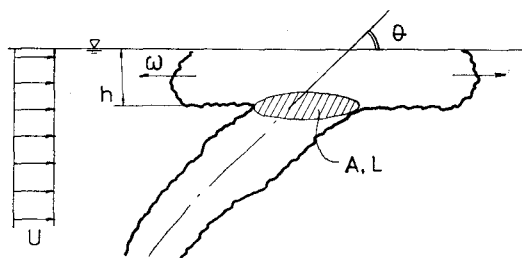


図-3 記号説明図

面積とその周囲の長さであり、それぞれ次式で計算される。

$$A = \pi \cdot D_s^2 / (4 \sin \theta) \dots \dots \dots (12)$$

$$L = \pi \cdot D_s / \sin \theta \dots \dots \dots (13)$$

ただし、 D_s は水面に達した浮上ブリュームの径、 θ はブリューム軸線と水面のなす角度である。式(12)、(13)を式(11)に代入し、次に式(10)と、式(11)から ω を求めると次のようになる。

$$\omega = \left(\frac{1}{4} \right)^{1/3} \left(\frac{\Delta \rho_s}{\rho} g \right)^{1/3} \cdot D_s^{1/3} w_s^{1/3} \dots \dots \dots (14)$$

一方、 D_s 、 $\Delta \rho_s$ は式(6)を考慮し、式(4)、(5)から

$$\Delta \rho_s = (2\alpha)^{-2} \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{-2} \left(\frac{w_0}{U} \right) \Delta \rho_0 \dots \dots \dots (15)$$

$$D_s = 2\alpha \left(\frac{w_0}{U} \right) D_0^{1/3} Fr^{-2/3} (H - z_0) l^{-1/3} \dots \dots \dots (16)$$

と表わされる。よって ω は次のようになる。

$$\begin{aligned} \omega &= 6^{-1/6} \left(\frac{1}{8\alpha^2} \right)^{1/3} \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{-1/2} \left(\frac{w_0}{U} \right)^{5/6} \\ Fr^{-11/9} l^{-1/9} w_0 &= 6^{-1/6} \left(\frac{1}{8\alpha^2} \right)^{1/3} \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{-1/2} \\ &\times \left(\frac{w_0}{U} \right)^{1/2} Fr^{-1} w_0 \dots \dots \dots (17) \end{aligned}$$

式(1)より分岐しない限界を表わす式は

$$\frac{\omega}{U} = 6^{-1/6} \left(\frac{1}{8\alpha^2} \right)^{1/3} \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{-1/2} Fr^{-1} \left(\frac{w_0}{U} \right)^{3/2} > 1 \dots \dots \dots (18)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{w_0}{U} &= 6^{1/9} \left(\frac{1}{8\alpha^2} \right)^{-2/9} \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{1/3} Fr^{2/3} \\ &= 0.881 \left(\frac{H - z_0}{D_0} \right)^{1/3} Fr^{2/3} \dots \dots \dots (19) \end{aligned}$$

ただし α は $\alpha = 0.17$ として計算した。

5. 実験および測定方法

本実験においては周囲水に様な水平流を与えるのに代えて、廃液を放出させながら放出口を移動することによって分岐拡散の現象を発生させた。様な水平流のある周囲水中に放出された場合には、その流れ自体が持つ乱れが影響をおよぼしてくるが、その影響が大きくなるのは放出口から十分に離れた下流部においてであり、放出口付近ではその影響は小さくこの方法でも十分正確に現象を表わしていると考えられる。

実験には中央大学理工学部水理実験室の長さ 12 m、幅 6 m、深さ 0.5 m の平面水槽を使用した。この水槽

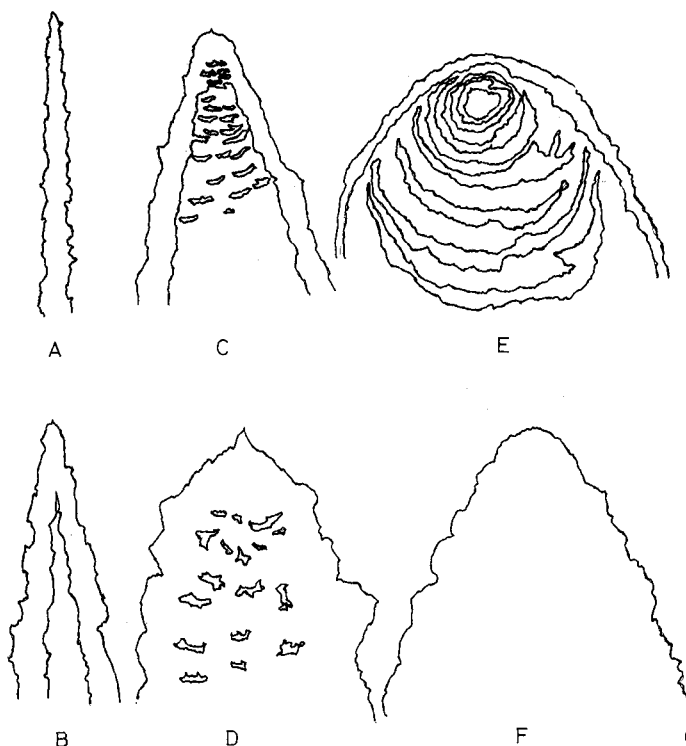


図-4 分岐拡散パターンの分類

上に矩形鋼管製のレーンを渡し、その上を放出口に相当する内径 3.8mm および 2.75mm の銅製パイプを取りつけた流速計検定用台車を走らせた。周囲水の流速にあたる台車の速度は走行時間と走行距離を測定することにより計算から求めた。

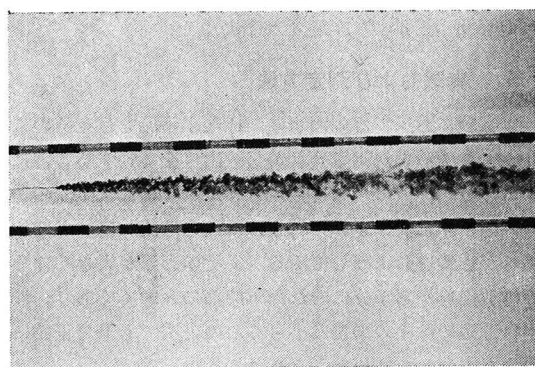
海水に相当する周囲水としては本実験では水道水を用い、放出廃液には希釈したアルコールを使用した。この液体には判別できるようにあらかじめウォーター・ブルーを混ぜておいた。液体の比重は Baumé の浮子型比重計を使って測定した。このようにした廃液の拡散の状態を水槽上約 5m の場所から写真撮影によって記録した。

廃液の流量は放出口とビニール・チューブによってつながれた高水槽の液面低下と放出時間を測定することにより求めた。この高水槽は十分に高所にあつて液面低下は全落差に比較して非常に小さくなるようにしてあり、定常的に近い放出が行われたと考えられる。放出流速は放出流量を放出口断面積で割ることにより求めた。

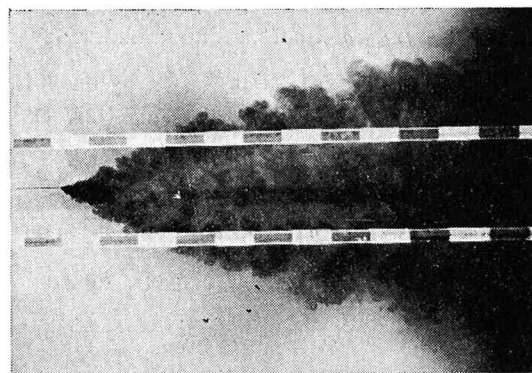
6. 実験結果

(1) 分岐パターンの分類

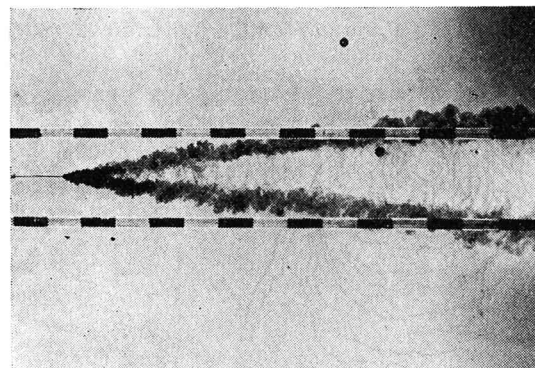
廃液の内部フルード数、放出口の移動速度、放出流速、放出口水深の違いによって変化する拡散パターンを図一



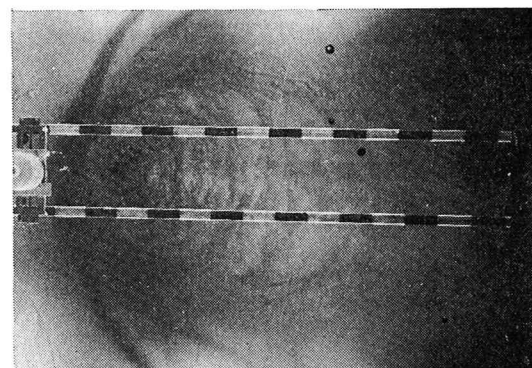
(a) $Fr=37.9$



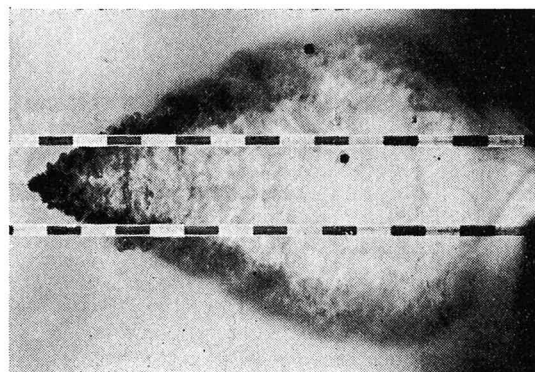
(d) $Fr=104.8$



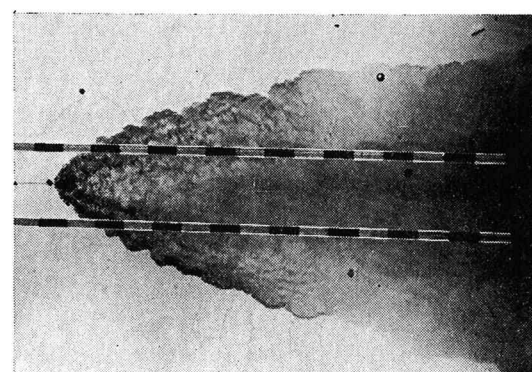
(b) $Fr=50.6$



(e) $Fr=12.6$



(c) $Fr=61.9$



(f) $Fr=13.5$

写真—1 浮上プルームの拡散の6つの典型的パターン

4 に示すような6種類に分類した。Aは煙突からの浮上ブリュームのような分岐せずに一本の棒状を呈すもの、Eは静止海域中に放出された浮上ブリュームのような楕円形の広がり呈すものである。この中間のパターンを、明確に分岐しているパターン、中央部に多少の廃液が残っているが両側に濃い分岐ブリュームが見られるもの、扇状に拡散するものの3種類に分けそれぞれ B, C, D とした。また F は極端に水深が浅い場合に見られるパターンで廃液は水面に薄く一様に広がって行く。この分類のうちで、B と C, D と E の相違を示す明確な基準はなく、この区別に関しては厳密なものではない。

写真—1 (a) ~ (f) はそれらの典型的な場合につき例示したものである。

(2) 分岐現象の発生範囲

図—5 は行った実験ケースについて分岐パターンをプロットしたもので、本実験においては、B, C を分岐しているパターンと考えた。図—5 の中には理論式(19)で与えられる直線を比較のために示してある。理論式は w_0/U が 50 以下の範囲でかなり良くあっていることが認められる。

7. む す び

水平な流れを持つ海域中に海底近くから鉛直上方に放出された廃液の浮上ブリュームの拡散について、前報において残されていた課題であった分岐拡散の現象の発生範囲を明らかにした。また式(18)の水平方向の広がりの初速度と一様流の流速との比は分岐角度を示す一つの手がかりとなるであろう。この式において右辺の

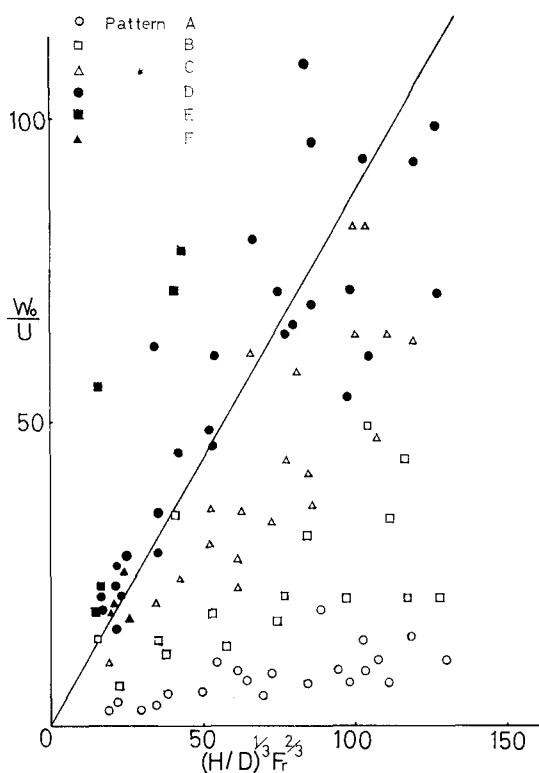
$$(H-z_0/D_0)^{1/2} Fr^{-1} (w_0/U)^{3/2}$$

なる項は前報の分岐角度を与える式と一致し、前報の式の妥当性が認められる。

なお本研究の遂行に当っては当時中央大学学生であった神山雄二君(現石川島播磨重工業(株))および神田重雄君(現日本工営(株))の熱心な協力を得た。ここに深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 林 泰造・首藤伸夫：流れの場に海洋放出された廃液の浮上ブリュームの分岐広がり，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 355~359.
- 2) 林 泰造・竹中 節：廃液浮上ブリュームの分岐拡散の現象について，第18回海岸工学講演会論文集，1971，pp. 305~312.
- 3) T. Hayashi: Turbulent buoyant jets of effluent discharged vertically upward from an orifice in a cross-current in the ocean, Proc. Fourteenth Congress of IAHR, Vol. 1, pp. 157~165, September 1971.
- 4) Slawson, P.R. and G. T. Csanady: On the mean path of buoyant, bent-over chimney plumes, J. Fluid Mech., Vol. 28, Part 2, pp. 311~322, 1967.
- 5) 首藤伸夫：流水中での重力拡散，第17回海岸工学講演会論文集，1970，pp. 349~354.



図—5 分岐現象の発生範囲