

海域における固定源からの連続拡散の実測

動力炉・核燃料開発事業団, ○大和愛司, 岩崎皓二

1 はじめに

海洋における拡散実験は、瞬間点源放出を扱ったものが多く報告されているが、連続源を用いた場合の報告¹⁻⁶⁾は比較的少ない。連続源について、大気では拡散能および周囲流速が大きく、短時間内にプリュームは大きく変化するので瞬間濃度分布は対象にされない場合が多い。これに対し水域では周囲流速が小さく瞬間濃度分布が問題とされるので、大気の解析方法を水域へ直接適用することは適当でない。連続源の拡散に関して、平均の拡がり巾は時間の1乗または $\frac{1}{2}$ 乗に比例する(Taylor),あるいは瞬間の拡がり巾は時間の1乗, $\frac{3}{2}$ 乗,または $\frac{1}{2}$ 乗に比例する(Richardson)ことが示されている。本実験では、プリュームの分布形および軸上濃度の変化を沿岸海域において実測調査したものである。一方、固定源からの噴流の希釈については、筆者の知る限りでは、実際の水域での測定の結果はなく、本実験において、実測値と理論式との比較を行なった結果についても報告する。

2 実験海域, 設備および方法

実験は、茨城県那珂郡東海村沿岸海域で通算3回行ない、その位置を図1に示した。実験に用いた放出管先端ノズルは距岸1.8 Km, 水深19.5 mの海底に設置され、ノズル口径5 cm, 鉛直上向きで、海底からノズルまでの立ち上がりは3 mである。実験日時は第1回 1974年12月6日, 第2回 1975年4月4日, 第3回 同7月31日ですべて午前8時に開始した。

トレーサーとして、フルオレツセイナトリウムを用い、容量200 m³のピット内の所定量の工業用水に溶解して調整した。溶液圧送ポンプの送液量は50 m³/hr程度で、その値は実験毎に若干異なつた。海域の状態を含め、これらの諸条件を表1に示した。

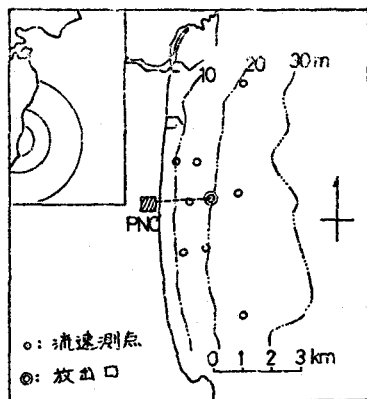


図1 実験海域図

表1 実験時の諸条件

項 目 \ 実験回	第 1 回	第 2 回	第 3 回
染料放出率 (m ³ /hr)	55.6	54.7	50.1
染料濃度 (mg/l)	660	510	836
海水温 (℃)	13.5	6.8~8.5	14.8~20.3
流向・流速 (cm/sec)	S, 10.7	N, 7.3	NE~E, 3.3
海上気温 (℃)	6.0~8.0	8.9~10.0	22.0~26.0
風向・風速 (m/sec)	NW, 5.8~11.1	SE, 0~3.8	S, 1.9~2.2

第2回および第3回実験では、ノズルから海面へ至るプリュームの希釈を知るために潜水土を配し、ノズル上1, 3, 6, 10, 14 m層および海面でプリューム内の採水を行なった。距離は目盛付ロープで測定し

た。染料雲の追跡は船上からの採水，曳航式蛍光計による直接測定および上空からの写真撮影によつた。採水は，第1回実験では海面下1 m層および染料雲流下軸付近の測点のみ1，3，5，7，10 m各層で，また，第3回実験では全点とも1，3，5，8，12 m各層および海底上1 m層の6層において行なつた。採水試料は褐色ポリエチレンビンに入れ持ち帰り，蛍光々度法で染料濃度を求めた。曳航式蛍光計は観測終了後，濃度既知の染料液で検定した。

3. 実験結果

3.1 上昇噴流の希釈度

ノズルから放出される染料液の初速は平均7.0 m/sec で，形式としては“鉛直に近いプリューム”であり，放出水の希釈はこの上昇過程と水平方向の一方向流によつて決められると考えられる。静水中のプリュームの希釈を表わす式として，Abraham⁷⁾ は次のように与えた。

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0} = 2.7 Frw_0^{\frac{2}{3}} \left(\frac{Z}{D_0} + 2 \right)^{\frac{5}{3}} \quad \text{----- (1)}$$

ここで $\Delta\rho/\Delta\rho_0$ ；希釈度，Frwo；放出液の内部フルード数，Z；ノズルからの高さ，Do；ノズルの直径である。また首藤⁸⁾は一方向流中でのプリュームの希釈を表わす式として

$$\frac{Z}{D_0} = 1.5 K^{\frac{1}{3}} Fru^{\frac{-2}{3}} \left(\frac{x}{D_0} + 0.7 Frw_0 \right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{----- (2)}$$

および

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0} = K^{\frac{1}{3}} Fru^{\frac{4}{3}} \left(\frac{x}{D_0} + 0.7 Frw_0 \right)^{\frac{4}{3}} \quad \text{----- (3)}$$

を与えた。

ここでK；放出水と周囲水の流速比(=W/U)，Fru；周囲水のフルード数である。式(2)はx≧0でのみ適用されるから，実験条件ではZ≧4.2 mとなる。また(2)²×(3)より

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_0} = 2.25 K \left(\frac{Z}{D_0} \right)^2 \quad \text{----- (4)}$$

となる。

実験条件に近似させたFruおよびKを用いて，式(1)あるいは式(4)から得られる海面到達時の理論希釈度および実測の平均希釈度を表2に示した。

表2 実験条件の近似値と希釈度

実 験 回		1	2	3
周囲流速 [m/sec]		0.105	0.070	0.035
放出水初速 W [m/sec]		7.78		7.07
Frw		74.1		66.6
K		74.1	111	214
[$\Delta\rho/\Delta\rho_0$] ₃₃₀ Th	式(1)	0.010		0.011
	式(4)	0.0014	0.0022	0.0042
[$\Delta\rho/\Delta\rho_0$] ₃₃₀ ^{Pr} ※		0.0010	0.0015	0.0015

※ 実測した[$\Delta\rho/\Delta\rho_0$]₃₃₀^{Pr}は実験2，3については各21試料の平均値，実験1では1試料の値である。

海面到達時の平均希釈度は式(4)の実験1，2の条件時の値に比較的近いものとなつた。図2にノズルから海

面到達までの間の実測値ならびに表2の実験1～3に対応する式(1)および(4)の値をA1～3, S1～3, と
して示した。

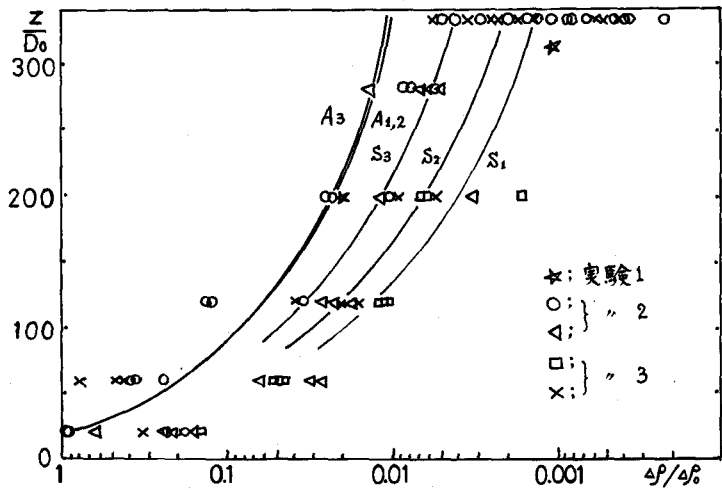


図2 プリュームの希釈度

3.2 染料雲の拡散

プリュームの海面到達後の拡がりの様子を図3, 4および表3に示した。

表3 実験1および3の染料雲の大きさ

実験	経過時間 (sec)	長さ (m)	最大巾 (m)
1	1,800	280	130
	3,600	520	240
	7,200	730	290
	10,800	770	320
	(14,400) ※	1,030	390
3	1,200	250	80
	3,000	510	120
	7,200	1,050	220
	8,940	1,480	330
	12,940	(1,100) ※※※	
	(16,540) ※	—	— ※※

- ※ ノズルからの放出は停止している。
- ※※ “しおめ”の外側に大部分が移っている。
- ※※※ 先端が“しおめ”にかかり、折れまがつたようにみえる。放出口から“しおめ”までの距離。

実験実施時の放出口付近の海域の鉛直密度分布を求めるために、水温塩分を観測し、その結果を図5に示した。染料雲の流下方向に直交する横断測線Ⅰの放出口からの距離(X)と測線Ⅰ上のY方向の濃度分布を図6に、またこの分布から求めた $\bar{Y}^2$ および断面Ⅰの濃度の積分値を表4に示した。

図 5 拡散実験時の海水密度分布

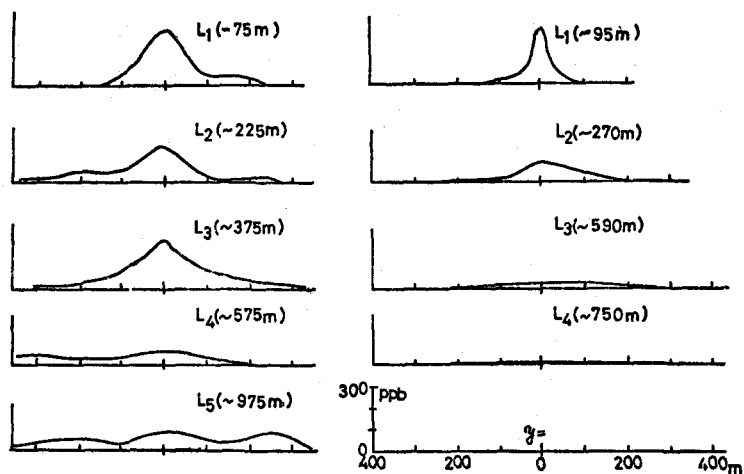
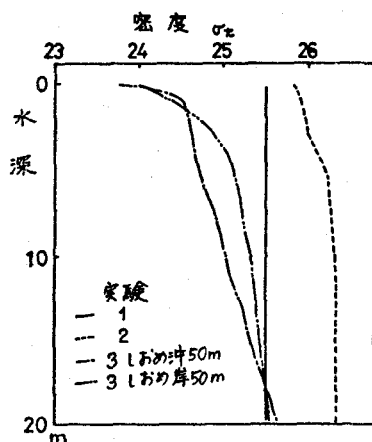


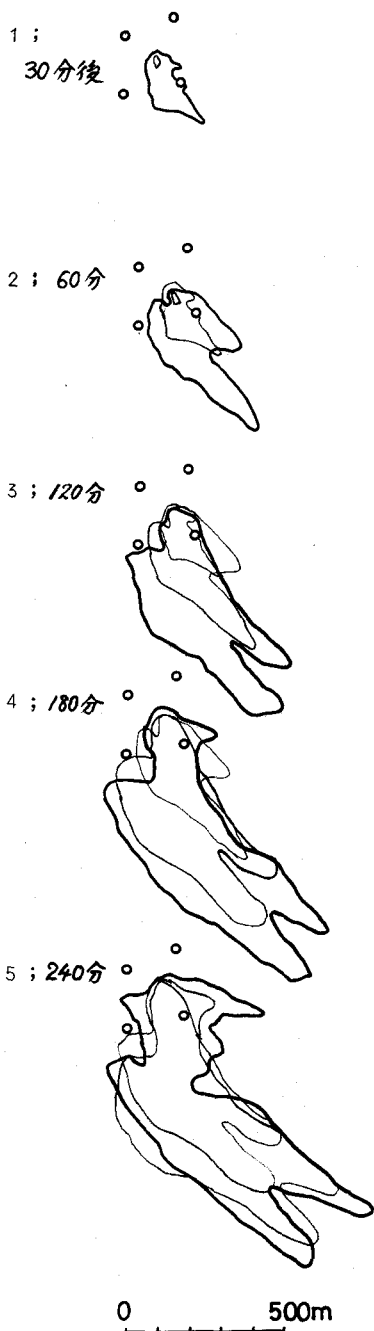
図 6 ブリユームの平均濃度分布

表 4 観測断面から得たブリユームの巾

実験	測線	X (m)	$\bar{Y}^2$ (m ²)	S (相対値)
1	1	95	0.38×10^2	7.39
	2	270	$1.10 \times "$	4.96
	3	590	$2.23 \times "$	2.47
	4	750	$3.73 \times "$	2.87
3	1	75	1.43×10^2	7.89
	2	225	$3.30 \times "$	6.11
	3	375	$3.70 \times "$	7.70
	4	575	$7.83 \times "$	(3.30)
	5	775	$7.13 \times "$	7.14

表 4 の実験 1 の値は 1 m 層のデーターのみで計算したので、S の値は放出口に近い測線で大きく、放出口から離れるに従って減少している。これは、観測層以深への鉛直方向の拡散による逸失を示していると考えら

実験 1



実験 3

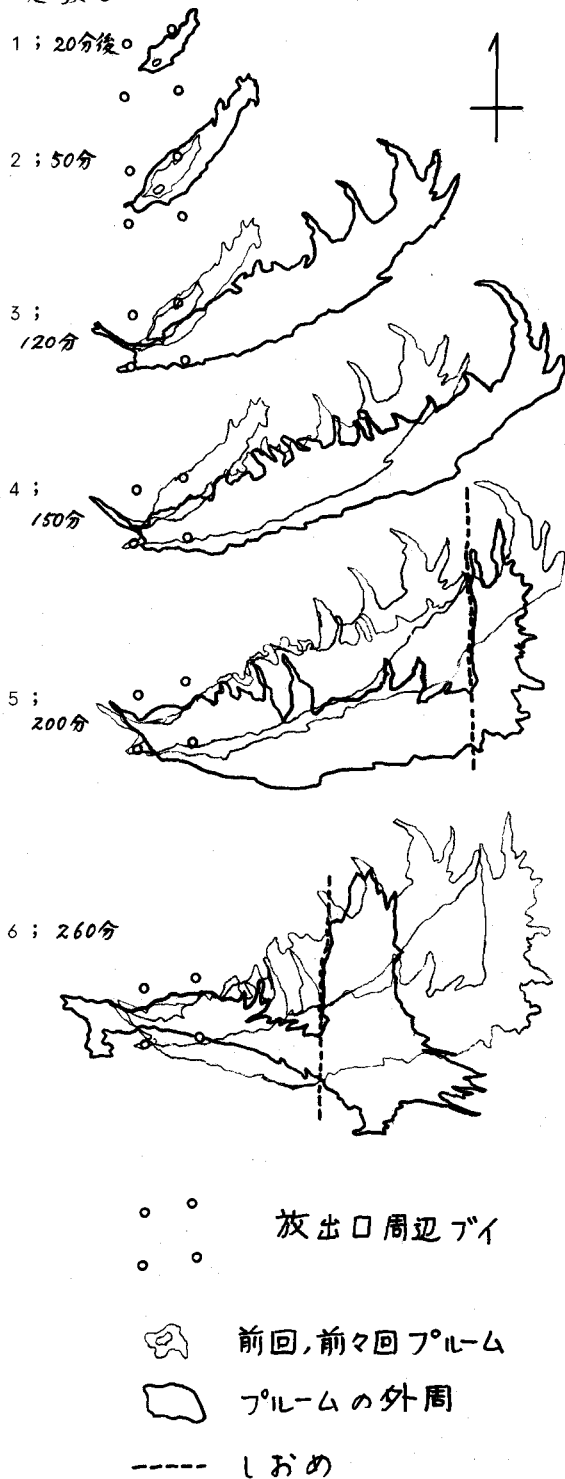


図 3 ~ 4 染料雲の拡がり様子

れる。一方、実験3の値は測線上の海面から海底までの全データを用いたので、Sの値は測線4を除きほぼ一定値となつた。実験1における目視による最高濃度付近の鉛直分布の1例を図7に示した。図から、鉛直方向の拡散厚みは距離の増加に従つて増大し、図5からも推察されるように鉛直混合が活発であることがわかる。一方、実験3では流下軸に直交する断面の濃度分布を求め、図8にその1例を示した。この実験時の

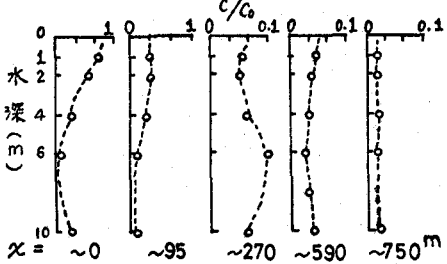


図7 鉛直濃度分布（実験1）

の海域はきわめて平穏かつ海水の密度勾配があり、上下混合の少ない条件であつたために鉛直方向の濃度分布には偏りがみられる。断面濃度分布において最も高い濃度を示した点を含む連続した層の高濃度点を平均した値をもつてその断面における“流下軸上の平均濃度”とした。実験1では上下層の濃度に大きな差はないので1 m層の最高濃度の平均値を軸上濃度とした。

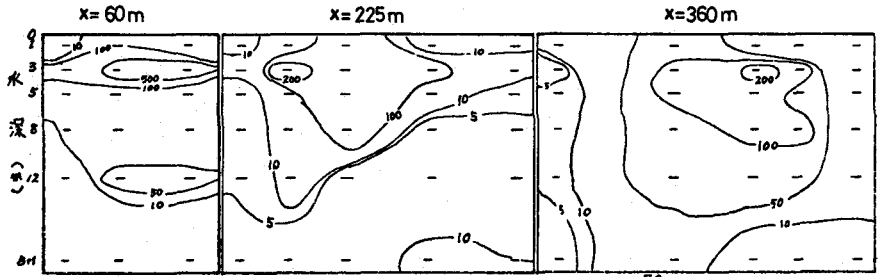


図8 横断面染料濃度分布（実験3）

東海村沿岸域における流下軸濃度と距離の間には、次の式が過去の多数回の染料拡散実験および河川水の追跡から提案されている。⁹⁾

$$C(x) = 0.75 \frac{q}{X \cdot H} \quad (5)$$

ここで $C(x)$; 距離 x における軸上濃度 [unit/cm]
 q ; 放出率 [unit/sec]
 H ; 拡散層の厚さ
 0.75 ; [sec/cm] の次元を有す定数

式(5)を用いて、各測線の“流下軸上の平均濃度”をプロットすると図9のとおりとなる。実験1では勾配は式(5)よりかなり大きく、放出口から最も離れた点を除くと距離の $-3/2$ 乗に比例する関係がうかがえ、また実験3においても観測された最大濃度のうち放出口に近い1点を除くと同様である。これらのことから、この実験領域では $3/2$ 乗則が成り立っているのかも知れない。実験3の平均濃度は、ほぼ距離に逆比例する関係に近い。以上のことから平穏かつ日射により成層の発達する夏期には二次元モデルによる近似も成立するが、上下混合の活発な冬期には三次元モデルを用いることが必要である。

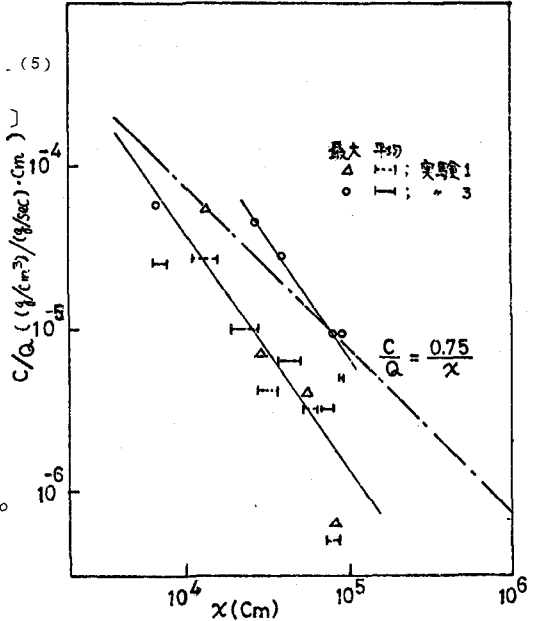


図9 軸上濃度と距離の関係

謝辞：本研究を行なうにあたり東京工業大学工学部・日野幹雄教授に多くの教示を受けた。ここに記して深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Murthy, C.R., Experimental studies of relative diffusion in Lake Huron, J.Phys. Oceanog. Vol.1, 17-24 (1971)
- 2) Ozmidov, R.V., Astok, V.K., Gezenlsvey, A.N. and Yukhato, M.K., Statistical characteristics of the Concentration field of a passive impurity introduced into the sea, Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, Vol.7, No.9, 963-973 (1971)
- 3) Csanady, G.T., Turbulent diffusion in Lake Huron, J.Fluid. Mechanics Vol.17, 360-384 (1963)
- 4) Huang, J.C.K., Eddy diffusivity in Lake Michigan, J.Geophy. Res. Vol.76, No.33, 8147-8152 (1971)
- 5) 大久保 明, 海洋物理 I, 第Ⅲ編海洋乱流・拡散, 322-380 東海大学出版会 (1973)
- 6) Itoh, N.Fukuda, M. and Tanigawa, Y., Small-scale horizontal diffusion near the coast. Sympto. "Disposal of Radioactive wastes into Seas, Oceans and Surface Waters" IAEA (1966)
- 7) Abraham, G., Jet diffusion in liquid of greater density, J.Hydraulic Div., Proc. ASCE, Vol.86, No.HY6, 1-13 (1960)
- 8) 首藤 伸夫, 第17回海岸工学講演会 論文集, 流水中での重力拡散 (昭和45年)
- 9) 海洋放出調査特別委員会試算分科会報告書(Ⅱ) 18-30, 原子力安全研究協会 (昭和42年10月)