

瞬間点源拡散実験の解析法について

早川典生*

Analytic Method of the Data of the Slug Dye Diffusion Experiment

Norio HAYAKAWA*

The slug dye release study was quite commonly carried out in 1960s to 1970s in Japan in order to investigate the oceanic diffusion property. The most common practice then was to take an areal photograph of diffusing dye cloud and calculate the rate of the increase of the dye cloud area to obtain the horizontal diffusivity. This practice is thought to be too simple and leaves the doubt as to reliability of the obtained diffusivity. In this paper several methods of analysis has been reviewed and, among them, the method originally proposed by Adachi et al. is scrutinized and the method originally proposed by Gifford for the atmospheric diffusion is extended to apply for the oceanic diffusion and the latter is shown to give a good result with the variance of dye concentration distribution estimated in the process.

Key words : oceanic diffusion, horizontal diffusivity, dye diffusion

1. はじめに

海洋環境調査において、海水の運動と拡散を知ることは、海洋環境を決定する物質が海洋中でどのような振る舞いをするかを知るために極めて重要である。この場合、海水の運動を調べるのは、流速を測定するとして理解しやすいが、拡散現象を定量的に調べるのは大変困難であり、手法的に十分に確立しているとは言いがたい状況にある。

海の拡散特性を調べ、水平拡散係数を測る方法として、染料の瞬間点源拡散実験は直接的に物質の拡散を調べているという意味で、流速計記録の統計解析等の他の方法に比べて明解である。我が国では1960-70年代、海洋環境事前調査としてしばしば行われていた瞬間点源拡散実験では、多くの場合染料雲写真面積の時間変化だけが測定結果として得られている。また水理模型実験でも、そのスケールの小ささゆえに例外なくそうである。その解析にあっては染料雲面積の時間変化率を水平拡散係数におきかえることが多い。この方法は単純で明快ではあるが、単純過ぎるくらいも否めない。ここでは海洋拡散理論にもとづいた2、3の方法についてレビューする。次に染料雲面積の最大値が得られているときに、直接的に染料濃度の分散値を求めることのできるGiffordの方法の海洋拡散理論への一般化した理論式

を導くものである。

2. 点源染料拡散実験と従来の解析法について

一般に点源染料拡散実験では染料水数十リットルを船上より海水面にほぼ瞬間的に放出することにより行われる。染料には人体に無害であるとされている一般的な染料、赤色のローダミン又は黄色のフルオレッセンナトリウム（いわゆるウラニン）などが用いられる。海水面に放出された染料水は次第に薄まりながら海水の流れによって運ばれると同時に、海水運動の乱流成分により広がっていく。これを染料雲と呼んでいる。広がっていく染料雲はその外縁の染料濃度が次第に目では確認できないほど薄まっていくので、染料雲は見かけ上、最大面積を経て縮小していく。やがては染料雲全体の濃度が目で見えないほど薄まると染料雲は消滅する。このような染料雲の時刻毎の濃度分布を測定するのは大変困難でありまれにしか行われたことが無い。多くの場合、上空に飛行機を飛ばし、染料雲の写真撮影による観測が行われる。その場合、各時刻 t_i における染料雲の面積 S_i が得られるデータである。

このように染料雲面積の時間変化だけが与えられた時の水平拡散係数の解析法には、(1) 前述の面積の時間変化率を拡散係数とみなす法 (2) 面積・時間曲線に拡散理論をあてはめる法 (3) 足立の方法¹⁾ (4) Giffordの方法²⁾ の4種がある。このうち (1) の方法はよく用いられるが、データがバラツクこと、時間変化率が負になると使えないこと等の欠点があるほか、

原稿受付：平成15年5月20日

*長岡技術科学大学環境・建設系

何と言ってもこの方法は単純過ぎるきらいがあるといわざるを得ない。(2)の方法は染料雲面積が減少しはじめるまでデータがある時に有効であるが、複雑な曲線にデータをフィットさせるという困難な作業を伴うのが難点である。(3)の方法は実験時間が短いときに有効である。ここでは結果を見やすくするため少し改良した方法を次節で紹介する。(4)の方法は染料雲面積の最大値が得られている時に、拡散の直接的な目安である分散半径の推定値が得られるという意味で優れているが、元来正規分布を仮定して推算式が得られているので、ここでは各種の海洋拡散理論式に当てはまるように一般化した方法を導く。

3. 水平拡散の円形パッチ理論

一般に染料雲は流れや風の影響を受けて不定形をしている。しかしながらそのままでは水平拡散係数を見積もるには不便であるので、不定形の染料雲を円形に置き換えて解析するのが一般的であり、これを円形パッチ理論と呼んでいる。

円形パッチ理論では時刻 t の染料濃度を中心からの距離 r の同心円状分布に置き換えて考える。水平拡散係数 K の一般形を $K = k r^{2-m} t^{n-1}$ とおけば、染料濃度 C は二次元極座標表示の拡散方程式を解いて、次式で与えられる。

$$C = \frac{A}{(kt)^{2n/m}} \exp\left(-\frac{nr^m}{m^2 kt^n}\right) \quad (1)$$

ここで、 A は染料の全量、 r は中心からの距離、 t は時間、 k 、 m 、 n は拡散理論によって異なるパラメータであり、表-1³⁾ に各種海洋拡散理論毎に与えられている値を示す。

表-1には又、染料雲半径の最大値 r_m に達する迄の時間 t_m 、一定濃度 C_0 を与える半径 r_0 の時間変化、が染料雲の寿命時間 T をパラメータにして与えられている。これによると、一定染料濃度 C_0 を与える r_0 は、最初は0から増加し、時刻 t_m で最大値 r_m に達し、その後減少に転じて時刻 T で消滅 ($r_0 = 0$) する。また表-1には次式で求められる。染料濃度の分散値 σ_r^2 も示している。

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{A} \int_0^\infty r^2 C 2\pi r dr \quad (2)$$

4. 足立の方法の一般化

式(1)の対数をとって i 番目のデータから0番目のデータを差し引き無次元化して表すと次式を得る。

$$1 - \frac{(r_i/r_0)^m}{(t_i/t_0)^n} = \frac{2mk(t_0^n/r_0^m)}{\log e} \log \frac{t_i}{t_0} \quad (3)$$

すなわち、左辺の値と t_i/t_0 の値を片対数紙にプロットし、直線にのるならばその海洋拡散理論に従うと結論付けることができる。

図-1は豊後高田沖で行われた実験例(現地実験と水理模型実験)であり、この海域では(原型資料) Ozmidov (Oz)、Okubo (Ok)、Obukhov (Ob) の理論式が適応される⁴⁾。瀬戸内海では過去に岡山水道沖、水島灘、備後灘、姫路沖、周防灘、別府湾、広島湾で点源拡散実験の行われたことが報じられ、これらの資料を解析した結果、Oz、Ok、Obの理論式に従う例と、Oz、Joseph・Sendner (JS)、Okubo・Pritchard (OP) の理論式に従う例とがあるが、潮流速・地形などとの関連はあまり明らかではない。どの地点でもOzはある程度あてはまるようである⁴⁾。

5. Giffordの理論の一般化

Giffordの方法では、染料雲の識別できる外縁半径 r_0 は一定濃度 C_0 であると仮定する。この r_0 は式(1)を r について解いて、時間 t の関数として求められる。一般には r_0 時間 t と共に増加し、最大値 r_m に達した後減少し、時刻 T で0になる。すなわち時刻 T では染料雲全体の染料濃度は最早識別できないほど薄くなる。この挙動は表-1の r_0 から見て取れる。

ここで表-1に示した濃度 C_0 を与える半径 r_0 、分散半径 σ_r を用い、さらに最大半径 r_m を式(1)から求めて寿命時間 T を消去すると、分散半径 σ_r が最大半径 r_m をパラメータとして求めることができる。

Okubo³⁾ によって海洋拡散に応用された式は、濃度分布に正規分布を仮定しており、OP、Obの分布形にのみ当てはまるものである。上記の手順により他の理論分布式についてもあてはまるような一般式が次式のように表される。

$$\sigma_r^2 = ar^2 \left[\ln(br_m^2 e^{2/m}) - \ln \sigma_r^2 \right]^{-2/m} \quad (4)$$

表1 海洋拡散理論

理論式 (記号)	拡散係数	t_m	m	n	一定濃度 C_o を与える半径 r_o の時間変	$\bar{r} - \bar{t}$ の関係	分散値 σ_r^2
Fick (Fi)	$K = \bar{h}$	T/e	2	1	$r_o = 2\sqrt{K}(t \ln T/t)^{1/2}$	$\bar{r} = (\bar{t}(1 - \ln \bar{t}))^{1/2}$	$16\pi kt$
Joseph & Sendner (Js)	$K = pr$ p : diffusion velocity	T/e	1	1	$r_o = pt \ln T/t$	$\bar{r} = \bar{t}(1 - \ln \bar{t})$	$6p^2 t^2$
Ozmidov (Oz)	$K = \gamma r^{3/4}$ γ : energy dissipation parameter	T/e	2/3	1	$r_o = (\gamma t \ln T/t)^{3/2}$	$\bar{r} = (\bar{t}(1 - \ln \bar{t}))^{3/2}$	$60\gamma^3 t^3$
Okudo & Pritchard (OP)	$K = \omega^2 t$ ω , diffusion velocity	T/e ^{1/2}	2	2	$r_o = (\omega^2 t^2 \ln T/t)^{1/2}$	$\bar{r} = \bar{t}(1 - 2 \ln \bar{t})/\sqrt{2}$	$\omega^2 t^2$
Okubo (Ok)	$K = \alpha^2 r^{2/3} t$ α , energy dissipation parameter	T/e ^{1/2}	4/3	2	$r_o = (\alpha^2 t^2 \ln T/t)^{3/4}$	$\bar{r} = (\bar{t}(1 - 2 \ln \bar{t}))^{3/4}$	$4\alpha^3 t^3 / \sqrt{\pi}$
Obukhov (Ob)	$K = \beta^3 t^2$ β , energy dissipation parameter	T/e ^{1/3}	2	3	$r_o = (\beta^3 t^3 \ln T/t)^{1/2}$	$\bar{r} = (\bar{t}(1 - 3 \ln \bar{t}))^{1/2}$	$\beta^3 t^3$

T: 染料雲の寿命時間, t_m : 最大半径 r_m に到達する時間, $\bar{r} = r/r_m$, $\bar{t} = t/t_m$

ここで a, b の値は各理論式について表-2 のように与えられる。

すなわちこの方法では、染料雲の最大半径 r_m が知られていれば、各時刻における染料雲面積の等価半径 r より、その時刻における染料雲の分散半径 σ_r を求めることができる。得られた σ_r が拡散理論から得られる時間のべき乗関係を満たせばその理論式に従うと判断され、理論式を当てはめることにより、拡散係数も

求めることができる。これらについて理論式から期待される σ_r^2 の時間に関する関数関係は表-1 に与えられているように、JS, OP で 2 乗、Oz, Ok, Ob で 3 乗のべき乗関係である。

6. 各手法の適用例

図-2 は豊後高田沖の例について OP, Ob (式 (4) は同一になる) による計算値 (○)、Oz による計算値 (□) を示した。

表-1 によれば OP, Ob 式の σ_r^2 は 各々 t^2, t^3 に比例し、Oz では t^3 に比例する。ところで、図2 では OP, Ob (式 (4) は同一になる) による計算値 (○) は t^3 に、Oz による計算値 (□) は t^4 に比例している。これだけから言えば、この海域の拡散実験は Ob の理論式に合っていると見える。このように Gifford の方法は拡

表2 (4) 式の定数値

理論式	a	b
JS	6	3/2
OZ	60	20/9
O-P	1	1
OK	$4/\sqrt{\pi}$	$8\sqrt{2/3\pi}$
Ob	1	1

表3 拡散パラメーターの計算例（豊後高田沖，解析法は本文参照）

理論式	拡散パラメーター	方法 (2)	方法 (3)	方法 (4)	$d\langle r^2 \rangle / dt (m^2 / s)$
JS	$\rho (cm / sec)$	1.0	—		—
Oz	$\gamma (cm^{2/3} / sec)$	4.5×10^{-2}	1.20×10^{-2}	(1.50×10^{-2})	1.11×10^{-2}
OP	$\varpi (cm / sec)$	1.5	—		
Ok	$\alpha (cm^{2/3} / sec)$	6.4×10^{-2}	3.84×10^{-2}		3.31×10^{-2}
Ob	$\beta (cm^{2/3} / sec)$	6.5×10^{-2}	5.27×10^{-2}	5.49×10^{-2}	4.34×10^{-2}

散現象の直接的な目安である濃度の分散値を与えているという点で優れているといえるものの、式（4）の解法は簡単でないという難点もある。

図3は豊後高田沖で行われた染料拡散実験で、蛍光濃度計を曳航して得られた染料の濃度分布を示す。この実験から各理論の拡散パラメーターを求め、また染料濃度の分散値を求めてその時間変化率より得られた値 ($d\langle r^2 \rangle / dt$) とともに示したのが表-3である。この表は各種の方法がそれぞれ使えることを示している。

7. 結 論

瞬間点源拡散実験データの解析法について各種の方法をレビューし、特にGiffordの方法を各種海洋拡散理論に適用できるように一般化した。これらの方法を実際の現地データで使用できることを示した。

瞬間点源拡散実験は拡散特性を調べる優れた手法であり、もっと見直されるべきである。

参考文献

- 1) 足立昭平, 中村俊六, 森 章: 潮汐による港内の移流・拡散に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集 (1974)
- 2) Gifford: Relative Atmospheric Diffusion of Smoke Puffs, Journal of Meteorology, Vol.11 (1957)
- 3) Okubo, A.: Diffusion from an Instantaneous Point Source due to Ocean Turbulence, Johns Hopkins University Tech Report p. 39 (1962)
- 4) 湯浅一郎, 早川典生: 瞬間点源拡散実験から見た水理模型の拡散現象, 中国工業技術試験所報告, 第10号, pp.19-52, (1980)

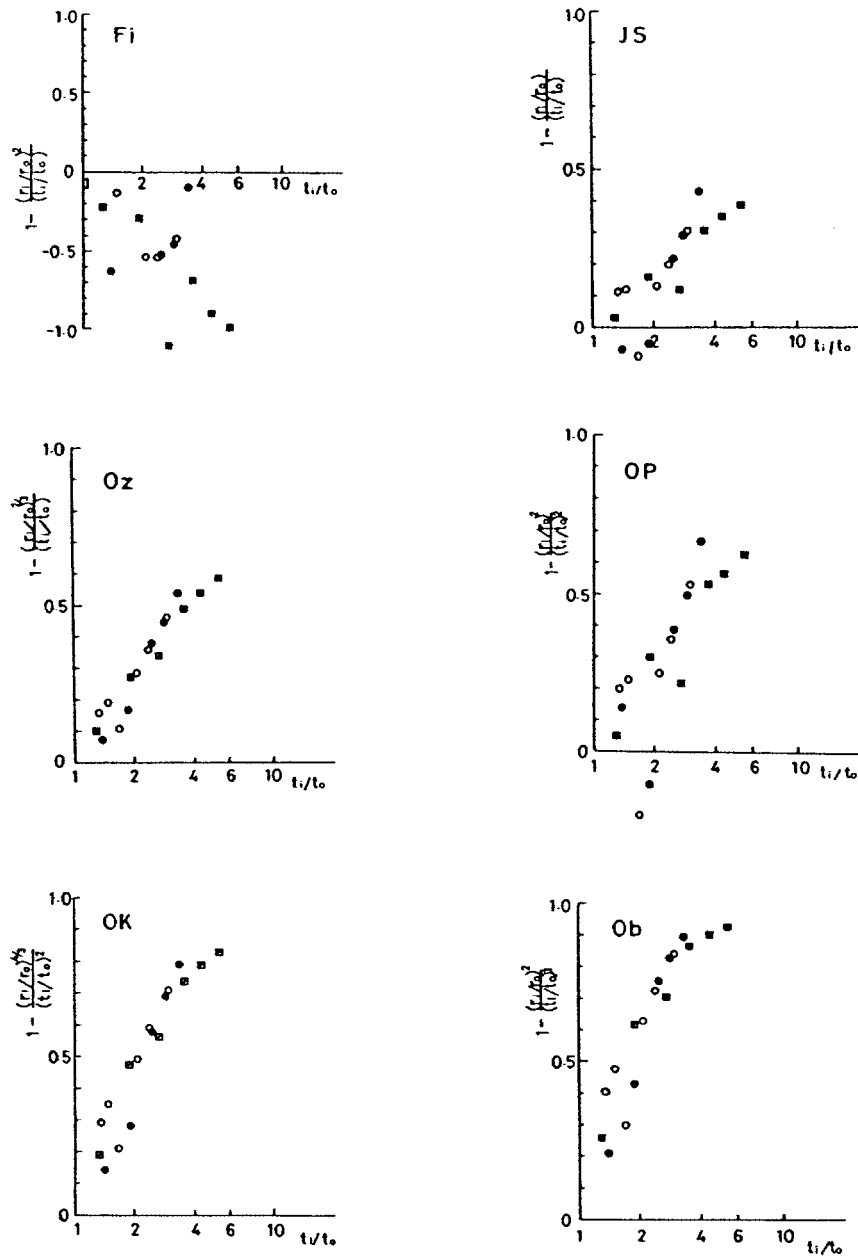


図1 足立の方法適用例 (豊後高田沖)

	Prototype	Model
flood	■	□
ebb	●	○

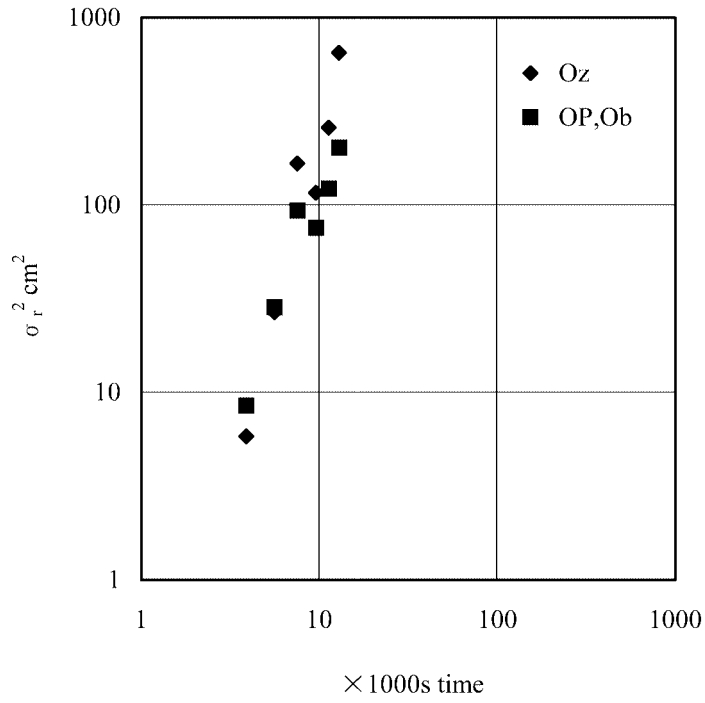


図 2 Gifford法応用例 (豊後高田沖データ)

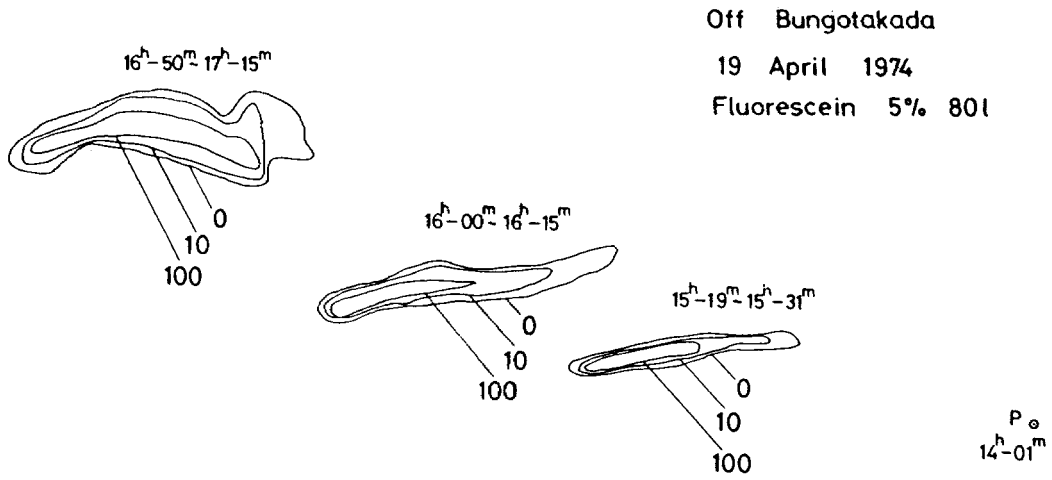


図 3 染料濃度分布の得られている実験例 (豊後高田沖)