

砕波帯近傍における沿岸方向分散モデル

A longshore dispersion model in the surf zone

東京大学工学部 正会員 堀川清司
東京大学大学院 学生員 ○林 銘崇

1. 緒言

砕波帯付近の混合過程については、比較的最近になつて研究が開始された。先づ Harris et al. (1962)¹⁾ は先駆的な研究を行い、それに続いて、Inman et al. (1968, 1971)^{2), 3)} は初めて大規模な現地実験を行い、マクロ的な混合モデルを提案した。わが国においては、林・堀川・水口(1977)⁴⁾ が福島海岸での染料拡散実験の結果を報告した。

これらの研究によつて明らかにされたように、砕波帯内に投入された染料は、砕波によつて急速に砕波帯幅全域に拡散し、数分以内に二次元的拡散から沿岸方向への一次元的拡散に推移する。また、砕波帯外においては乱れが弱く、沖合水は砕波線をこえて岸側に輸送されるために、染料は砕波帯付近に閉じ込められる。したがつて、離岸流が存在するところを除いて、染料は容易には砕波帯の外に出ない。

以上によつて、砕波帯付近での混合過程はつぎの二つの作用から成り立っていると云える。その一つは砕波による乱れの作用であり、他の一つは砕波に伴う海浜流の作用である。従つて、砕波による汀線に直角方向の拡散と海浜流による汀線方向の分散の二つにわけて取り扱うことができる。本論文においては、流れによる分散機構を解明するための第一段階として、沿岸流の剪断効果による分散係数の算定式を求める。

2. 砕波帯近傍の混合に関する既往の研究

2.1 砕波による岸・沖方向の拡散モデル

Bowen・Inman (1972)⁵⁾ は、砕波による分散係数に関する既往の算定式をとりまとめているが、表-1 にはその後に発表された式をも加えて示した。

これらの式は $K_x \sim L U$ の関係から導くことができる。ここに、 K_x は拡散係数、 L 、 U はそれぞれ特性長さおよび特性速度である。 L として、Harris et al. は砕波波高を、Thornton は波による水粒子の水平変位を、Longuet-Higgins は汀線までの距離を、Inman et al. は bore の水平移動距離を、また James ならびに Battjes は共に水深をとつている。一方、 U として、Harris et al. は砕波波高と周期の比を、Thornton は波による水粒子の水平速度を、Inman et al. は bore の前進に伴う摩擦速度を、Longuet-Higgins および James は長波の波速を採用しているのに対し、Battjes は乱流理論の観点から、つぎのように考えた。すなわち、 U が乱れの速度スケールであり、かつ同じ入射波に対して、単位体積当りのエネルギー逸散が海浜勾配の減少にしたがつて減少することを考慮して、 U として長波の波速と海浜勾配の積を用いている。なお、最終的に、Battjes のモデルは Longuet-Higgins のもの

表 1. 提案された砕波による岸・沖方向の拡散係数

Authors	Formulae	Remarks
Harris et al. (1962) ¹⁾	$\frac{H_b^2}{T}$	field-experiment
Thornton (1970) ⁶⁾	$\frac{H^2}{8\pi^2} \frac{gT}{h} \cos\alpha$	theory
Longuet-Higgins (1970) ⁷⁾	$Nx/\sqrt{gh}$	theory
Inman et al. (1971) ³⁾	$\frac{H_b \pi b}{T}$	field
James (1974) ⁸⁾	$Nh/\sqrt{gh} s^{-1}$	theory
Battjes (1975) ⁹⁾	$M \left(\frac{5\pi^2}{16} \right)^{1/2} s^{1/2} h/\sqrt{gh}$ $= Nx/\sqrt{gh}$ $N = M \left(\frac{5\pi^2}{16} \right)^{1/2} s^{1/2}$	theory

h : water depth, H_b : breaker height, s : beach slope, x : width of surf zone, H : wave height, T : wave period, α : angle between shoreline and wave crest, ρ : water density, x : the distance from the shoreline, M , N : constant, r : ratio of wave height to water depth.

と同じ形の式となっているが、 K_x が海浜勾配 s と波高水深比 r の関数である所が異なっている。

これらのモデルにおいて、問題となるのは定数 N および M にいかなる値を与えるかである。Bowen・Inman(1972)はHarris et al.およびInman et al.のデータを用いて、いろいろなケースの場合の N の値を計算している。またJamesは彼のモデルにおける N の計算値をBowen・Inmanの計算値と比較している。次節に述べる本研究の沿岸方向分散モデルにおいては、Battjesの式に基礎をおいているので、定数 M について以下に若干の説明を試みる。

Battjes(1976)¹⁰⁾はBowen・Inmanの求めた N の値を用いて、計算した結果、 $1/10$ の急勾配の海岸(実験室および現地)に対して、 M の値は $0.3 \sim 1.8$ で、ほぼ1のオーダーであるが、 $1/100$ の緩勾配(現地)に対しては、 M の値は $21 \sim 45$ の大きさになることを述べている。一方、Swart(1975)¹¹⁾は、非常に緩い勾配の斜面上で実験を行った結果、 N の値は 0.016 よりも非常に小さく、 M は $0.46 \sim 1.62$ で、ほぼ1.0のオーダーであつた。緩勾配の現地海岸でのデータが少ないので、明確に結論づけることはできないが、現地での M の値は実験室の値よりも大きいように思われる。

また、Huntley(1976)¹²⁾は、緩勾配の現地海岸において、砕波帯内に1台の電磁流速計を設置し、岸・沖方向および沿岸方向の流速変動を測定した結果から、Battjesのモデルの方がLonguet-Higginsのモデルよりも妥当であると述べている。

2.2 沿岸方向混合モデル— Inman et al. のボックスモデル

現在までに提案されている沿岸方向混合モデルはInman et al.(1968,1971)^{2),3)}のもののみである。

Inman et al.は等深線が汀線に平行な直線状の海岸に波が入射する場合を対象として、砕波帯近傍の混合セルモデルを、波向によつて対称セルモデルと非対称セルモデルと分けている。このモデルは相隣る離岸流によつて囲まれた水域は一つの循環セルを構成しており、海浜循環セルに伴う流量の収支を基礎とした、いわゆるボックスモデルである。すなわち、 $(X_b + X_r) \cdot Y$ のセルを一つのボックスとして、ボックスとボックスとの間の物質の交換を考え、ボックスごとの平均的混合特性を調べている。ここに、 X_b , X_r , Y はそれぞれ砕波帯幅、砕波点から離岸流頭までの距離および離岸流間隔である。Inman et al.(1968)²⁾は、とくに非対称セルのモデルに対して、いくつかの仮定条件のもとで、対象モデルの濃度を求める解析解を導いた。近似的結果として、沖合の海岸流が強く、二次的混合水域($X_r \cdot Y$)の水質が沖合水の水質と同じとみなしうる場合には、濃度は投入点からの距離と共に指数的に減少する。さらに、沿岸方向の分散係数はオーダー的に $Y \langle v \rangle$ である。ここに、 Y , $\langle v \rangle$ はおのおの離岸流間隔および平均沿岸流速を表わす。

上に述べたように、Inman et al.のモデルは、本質的にはマクロ・スケールのモデルであり、拡散機構を明らかにするためには、もう少し小さなスケールで現象をながめる必要があり、そのためには、セル内部の機構に立ち入って調べる必要があろう。

3. 沿岸方向分散モデル

第1節に述べたように、離岸流が存在しているところを除いては、砕波帯に投入された染料は容易には砕波帯外に出ない。Longuet-Higgins(1970)⁷⁾らはradiation stressの概念に基づいて沿岸流の流速分布 $v(x)$ を求めている。ここに x は岸・沖方向であり、沿岸流速は横方向 x のみの関数であると考えている。また、Fischer(1967)¹³⁾は自然河川に対して、鉛直方向の流れの剪断効果よりも横方向の方がはるかに大きいことと明らかにした。

そこで、いま、上述の結果に基づいて、砕波帯を、図→1に示すように、三角形断面の開水路とみなし、かつ砕波帯近傍において沿岸流の拡散に果す役割は最も大きいと考えて、沿岸方向の分散現象をモデル化する。図中、 x , y , z はそれぞれ離岸方向、沿岸方向および鉛直方向を示す。 x_b は砕波点であり、 x_c は砕波帯外の分散の限界線である。

碎波帯での水域は浅いので、物理量が水深方向に一様であると仮定する。従つて、水平面における拡散方程式は次のように表わされる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここに、 C は濃度、 t は時間を示す。 K_x, K_y はそれぞれ x, y 方向の拡散係数、 v は沿岸流速である。次に、Aris (1956)¹⁴⁾の concentration moment 法により、

$$C_p = \int_{-\infty}^{\infty} y P_C(x, y, t) dy \quad (2)$$

とおく。ここに、 C_p は場所 x 、時間 t における濃度の P 次のモーメントを表わし、 P は整数である。そして、式(1)に y^P を乗じて y について $-\infty$ から ∞ まで積分すると、式(3)を得る。

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_p}{\partial x} \right) = P(P-1) K_y C_{p-2} + P v C_{p-1} \quad (3)$$

とくに、0次、1次、2次のモーメントに関する方程式は次の通りである。

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_0}{\partial x} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) = v C_0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) = 2 K_y C_0 + 2 v C_1 \quad (6)$$

染料は十分に長い時間経過すると、 x 方向に一様に近く拡がると考えられる。そこで、式(4)より、 $\frac{\partial C_0}{\partial t} = 0$ 、すなわち $C_0 = \text{const} = \frac{q}{x_c}$ (7)

となる。ここに、 q は投入される物質の総量である。

次に、

$$m_p = \frac{1}{x_c} \int_0^{x_c} C_p dx \quad (8)$$

とおき、また、 $\frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial C_1}{\partial x} \Big|_{x=x_c} = 0$ の条件を基にして、式(5)を開水路の幅 x_c で平均し、同時に式(7)を使うと、次式が得られる。

$$\frac{\partial m_1}{\partial t} = \frac{q}{x_c} \bar{v} = \text{const} \quad (9)$$

ここに、

$$\bar{v} = \frac{1}{x_c} \int_0^{x_c} v(x) dx \quad (10)$$

式(9)により、染料雲の重心は一定速度 $\bar{v}$ で進むことがわかる。従つて、1次のモーメントは

$$C_1(x, t) = \frac{q}{x_c} \{ \bar{v} t + \vartheta(x) \} \quad (11)$$

のように書ける。ここに、 $\vartheta(x)$ は式(5)によつて決められる。すなわち、式(11)を式(5)に代入して演算をほどこせば、 $\vartheta(x)$ は次の形となる。

$$\vartheta(x) = \int_0^x \frac{dx}{K_x} \int_0^x (\bar{v} - v) dx \quad (12)$$

したがつて、染料雲の重心は

$$y_c = \frac{C_1}{C_0} = \bar{v} t + \vartheta(x) \quad (13)$$

である。また、物質の沿岸方向(y 方向)の拡がり、すなわち、統計的分散 $\sigma_y^2 = \frac{C_2}{C_0} - y_c^2$ を開水路幅 x_c で平均すれば、

$$\sigma_y^2 = \frac{x_c}{q} m_2 - (\bar{v} t)^2 \quad (14)$$

を得る。ここに、文字の上の横線は幅平均を表わす。式(6)を開水路幅 x_c で平均すると、 m_2 に関する式として、次の関係を得る。

$$\frac{\partial m_2}{\partial t} = \frac{2q}{x_c} \left(K_y + \bar{v}^2 t + \frac{1}{x_c} \int_0^{x_c} v \vartheta dx \right) \quad (15)$$

式(14)および式(15)より、

$$\frac{\partial \sigma_y^2}{\partial t} = 2 K_y + \frac{2}{x_c} \int_0^{x_c} v \vartheta dx \quad (16)$$

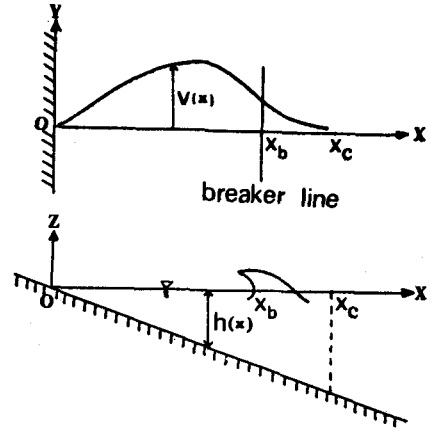


図-1 座標説明図

が得られる。よつて、

$$\overline{\sigma_y^2} = 2t (\overline{K_y} + K_e) \quad (17)$$

をうる。ここに、 K_e は沿岸流の剪断流による分散係数であり、次式によつて求められる。

$$K_e = \frac{1}{x_c} \int_0^{x_c} x v(x) dx \int_0^x \frac{dx}{K_x} \int_0^x (\bar{v} - v) dx \quad (18)$$

したがつて、沿岸方向の有効拡散係数 D_L は $D_L = \frac{1}{2} \frac{d\overline{\sigma_y^2}}{dt} = \overline{K_y} + K_e$

となる。しかしながら、一般に、砕波帯近傍において、 K_y は K_x に比してはるかに小さいので、無視することができる。

3.1 岸・沖方向の拡散係数について

既に第2節に述べたように、Battjes (1975)⁹⁾のモデルはいままで提案されたものの中で最も合理的であると思われるので、ここに、 K_x についてはBattjesの式を用いることにする。

3.2 沿岸流の流速分布について

沿岸流の流速分布に関する理論的モデルはいろいろのものがあるが、ここには、Longuet-Higgins (1970)⁷⁾の式を採用する。すなわち、

$$\frac{v}{v_b} = \begin{cases} B_1 \left(\frac{x}{x_b} \right)^{p_1} + A \left(\frac{x}{x_b} \right) & 0 < \frac{x}{x_b} < 1 \\ B_2 \left(\frac{x}{x_b} \right)^{p_2} & 1 < \frac{x}{x_b} < \infty \end{cases} \quad (19)$$

ここに、

$$v_b = \left(\frac{5\pi r}{8f_w} \right) (gh_b) \left(s \frac{\sin \alpha_b}{c_b} \right) \quad (20)$$

$$p_1 = -3/4 + (9/16 + 1/P)^{1/2}, \quad p_2 = -3/4 - (9/16 + 1/P)^{1/2}$$

$$A = (1 - 5P/2)^{-1}, \quad B_1 = (p_2 - 1)A / (p_1 - p_2), \quad B_2 = (p_1 - 1)A / (p_1 - p_2)$$

ただし、 $P \approx 2/5$ とする。ここに、 $P = \pi s N / r f_w$ は水平混合の相対的な重要度を示すパラメータであり、 v_b は水平混合を考慮しない場合($P=0$)における砕波線での沿岸流速である。また、 r , f_w , α_b , h_b , s , c_b はそれぞれ波高水深比、波の運動に対する摩擦係数、砕波点での波の入射角、砕波点での水深、海浜勾配および砕波点での波速である。

3.3 分散係数の算定式

上に述べた砕波による拡散係数の式および沿岸流速分布の式(19)を用いて、演算を行なえば、分散係数の式(18)は次のようになる。

$$\begin{aligned} K_e = \frac{v_b^2 x_b^{3/2}}{R x_c} \{ & - \frac{2B_1}{p_1 + 3/2} \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right) - \frac{B_1^2}{(p_1 + 1)(p_1 + 1/2)(2p_1 + 3/2)} - \frac{4}{5} A \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right) \\ & - AB_1 \left[\frac{1}{3(p_1 + 5/2)} + \frac{1}{(p_1 + 1)(p_1 + 1/2)(p_1 + 5/2)} \right] - \frac{2}{21} A^2 \\ & - \frac{2B_2 \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right)}{p_2 + 3/2} (x_b^{-p_2 - 3/2} \cdot x_c^{p_2 + 3/2} - 1) \\ & - \frac{B_2^2}{(p_2 + 1)(p_2 + 1/2)(2p_2 + 3/2)} (x_b^{-2p_2 - 3/2} \cdot x_c^{2p_2 + 3/2} - 1) \} \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、 $R = (5\pi^2/16)^{1/3} g^{1/2} M s^{11/6}$, M , g はそれぞれ定数および重力の加速度である。沿岸流速は一般に砕波帯を越えると、急速に落ちるので、 $x_c = 1.5x_b$ と仮定すると、

$$\begin{aligned} K_e = \frac{2v_b^2 x_b^{1/2}}{3R} \{ & - \frac{2B_1}{p_1 + 3/2} \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right) - \frac{B_1^2}{(p_1 + 1)(p_1 + 1/2)(2p_1 + 3/2)} - \frac{4}{5} A \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right) - AB_1 \left[\frac{1}{3(p_1 + 5/2)} \right. \\ & + \left. \frac{1}{(p_1 + 1)(p_1 + 1/2)(p_1 + 5/2)} \right] - \frac{2}{21} A^2 - \frac{2B_2 \left(\frac{\bar{v}}{v_b} \right)}{p_2 + 3/2} \left[\left(\frac{3}{2} \right)^{p_2 + 3/2} - 1 \right] \\ & - \frac{B_2^2}{(p_2 + 1)(p_2 + 1/2)(2p_2 + 3/2)} \left[\left(\frac{3}{2} \right)^{2p_2 + 3/2} - 1 \right] \} \end{aligned} \quad (22)$$

を得る。

Longuet-Higgins は, Galvin・Eagleson (1964)の実験データを用いて, パラメータPの値を0.1~0.4と評価した。一方, Horikawa (1977)¹⁶⁾は, 渡辺(1973)および佐々木(1974)の求めた結果から, 現地海岸において, Pの値はLonguet-Higginsの評価よりも大きい, ほぼ1のオーダーであると述べている。そこで, ここには, 現地観測の結果と対比するために, Pの値を1とすると, K_e は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} K_e &= \beta s^{-11/6} v_b^2 x_b^{1/2} \\ \beta &= 0.073 \left(\frac{5r^2}{16}\right)^{-1/3} g^{-1/2} M^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

一方, Pの値を0.2とすれば, K_e は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} K_e &= \beta s^{-11/6} v_b^2 x_b^{1/2} \\ \beta &= 0.155 \left(\frac{5r^2}{16}\right)^{-1/3} g^{-1/2} M^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式(23)および式(24)をまとめると, 沿岸方向分散係数 K_e は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} K_e &= \alpha \left(\frac{5r^2}{16}\right)^{-1/3} g^{-1/2} M^{-1} s^{-11/6} v_b^2 x_b^{1/2} \\ \alpha &= \begin{cases} 0.073 & \text{現地海岸} \\ 0.155 & \text{実験室} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

4. 現地観測結果との比較

林・堀川・水口(1977)⁴⁾の現地実験の結果によれば, 砕波帯近傍での沿岸方向の濃度変化は図-2のようである。この図より, 拡散を一次元的なものと考え, 濃度は Gauss 分布と仮定して沿岸方向の分散係数を計算した結果を図-3に示す。投入点より400mの地点における投入後1時間の沿岸方向分散係数は $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。なお, Inman et al. (1971)³⁾は沿岸方向の分散係数は一般的に $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であることを報告している。

第3節に述べた分散モデルは, 本質的には Taylor(1954)¹⁵⁾の解析の適用である。Taylorの解析の基本的な考え方は, 十分な流下距離においては, 剪断流による断面濃度変化の増加と断面混合による濃度変化の減少との間には, バランスが生じるということであ

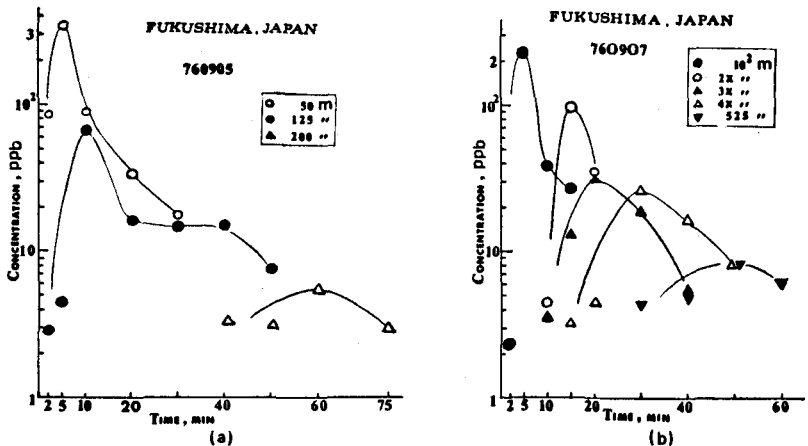


図-2 沿岸方向の濃度変化⁴⁾

り、いわゆる漸近的解析である。いま、無次元時間 t' を、 $t' = t\varepsilon/\ell^2$ のように定義する。ここに、 t 、 ε 、 ℓ はおおの分散時間、断面の特性拡散係数および特性長さである。すなわち、 ℓ^2/ε は断面混合の必要時間である。Fischer (1967)¹³⁾によれば、このTaylorによる解析が適用される無次元時間は $t' \geq 0.4$ である。

さて、実験地域の福島海岸においては、海底勾配は約1/50であり、観測時の碎波帯幅は約100m、碎波波高および周期はそれぞれ1.2mおよび12秒であつた。従つて、汀線に直角方向の碎波による拡散係数は、一応の目安としてInman et al.(1971)³⁾の式 $K_x = H_b X_b / T$ を用いれば、 $10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ のオーダーである。いま、特性長さを碎波帯幅とし、特性拡散係数を汀線に直角方向の碎波による拡散係数とすれば、分散時間も6.7分である。すなわち、いま考慮しているケースに対して、分散時間が6.7分よりも長ければ、混合特性は定常的となる。例えば、この定常的な沿岸方向分散モデルは染料投入約1時間後の平均濃度に対し、適用できると考えられる。

いま、観測値のデータ ($s=1/50$, $h_b=2\text{m}$, $\alpha_b=9.5^\circ$)を用い、海底摩擦係数 $f_w=0.02$ および波高水深比 $r=0.6$ (緩勾配)とし、式(20)によつて求めると、 $v_b=8.6 \text{ cm/sec}$ を得る。そこで、式(23)より、

$$K_e = 9.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

が得られる。Mは1のオーダーとすれば、 $K_e=9.2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$

で、実測値よりやや大きい、オーダー的にはほぼ一致している。

一方、第2節に述べたように現地においては、Mの値は実験室での値よりも大きいと考えられるから、Mの値を便宜的に10とすれば、 $K_e=10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、実測値とよく一致する。

一方、実験室の K_e の値に関しては、式(24)より、次のようになる。

$$K_e = 1.96 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

ここで、Mの値を1とすれば、 $K_e=1.96 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、現地での実測値よりも1桁大きいことになる。この値の妥当性については、現在進行中の実験の結果によつて検討する予定である。

5. むすび

実測値と予測値とを比較照合した結果、沿岸方向分散係数の式(25)は、碎波帯近傍における沿岸方向分散係数の概略値を求めるのに有効であることが確認された。式(25)に対する検討、とくに定数P、Mおよび海底摩擦係数 f_w の評価については、なお問題が残される。また、碎波帯近傍においては、離岸流の存在を無視することができない。この離岸流の効果をも考慮に入れたモデルについては現在検討中である。

おわりに、本研究の遂行に当り、東京大学助教授玉井信行博士ならびに東京大学助手水口 優氏からは有益な助言を受け、また、現地観測の実施に当つては、海岸環境工学研究センター佐々木民雄博士らの協力を受けた。最後に、本研究は文部省科学研究費特定研究(海洋保全)による研究成果の一部であることを付記する。

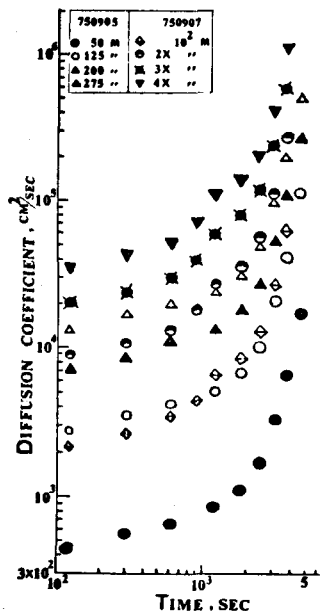


図-3 実験による分散係数⁴⁾

参考文献

- 1) Harris et al. (1962): Mixing in the surf zone, Proc. International Conf. on Water Pollution Research, London.
- 2) Inman et al. (1968): Dispersion of water and sediment in the surf zone, Univ. of California, Scripps Institution of Oceanography, SIO Ref. 69-10
- 3) Inman et al. (1971): Mixing in the surf zone, J. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 3493-3514.
- 4) 林 銘崇・堀川清司・水口 優 (1977): 碎波帯内における分散の現地観測, 土木学会第32回年次学術講演会講演概要集第2部, PP. 475-476.
- 5) Bowen, A. J. and D. L. Inman (1972): Nearshore mixing due to waves and wave-induced currents, ICES Symposium on Physical Processes Responsible for Dispersion of Pollutants in the Sea, Aarhus, Denmark, 6-12.
- 6) Thornton, E. B. (1970): Variation of longshore currents across the surf zone, Proc. 12th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 291-308.
- 7) Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, parts 1 and 2. J. Geophys. Res., Vol. 75, pp. 6778-6801.
- 8) James, I. D. (1974): A non-linear theory of longshore currents, Estuarine and Coastal Marine Sci., Vol. 2, pp. 235-249.
- 9) Battjes, J. A. (1975): Modeling of turbulence in the surf zone, Proc. Symposium on Modeling Techniques, ASCE, pp. 1050-1061.
- 10) Battjes, J. A. (1976): Turbulence model for the surf zone, with applications to longshore current calculations, 15th International Conf. Coastal Eng. Abstract, pp. 403-406.
- 11) Swart, D. H. (1975): 文献10)より引用。
- 12) Huntley, D. A. (1976): Lateral and bottom forces on longshore currents, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 645-659.
- 13) Fischer, H. B. (1967): The mechanics of dispersion in natural streams, J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 93, No. HY6, pp. 187-216.
- 14) Aris, R. (1956): On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube, Proc. Royal Soc., Ser. A, Vol. 235, pp. 67-77.
- 15) Taylor, G. I. (1954): The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe, Proc. Royal Soc., Ser. A, Vol. 223, pp. 446-468.
- 16) Horikawa, K. (1977): Nearshore current treatments and their applications to engineering problems, Proc. 4th International Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Conditions.