

II-291 蛍光砂の移動・拡散に関する研究

鳥取大学工学部 正員 野田英明

鳥取大学工学部 正員 〇黒岩正光

1. はじめに 従来、漂砂の移動形態を把握するため蛍光砂を用いた現地観測がなされてきたが一般に漂砂の観測は連続的なデータを得ることが困難である。著者ら¹⁾は、蛍光砂による調査結果を補間する意味を持つ蛍光砂の時空間分布に関する数値シミュレーション手法を開発してきた。ここでは従来の瞬間投入モデルによる数値計算結果を示すとともに連続投入モデルの開発を試みる。

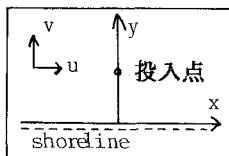


図-1 基礎式説明図

2. 蛍光砂の移動拡散モデル 図-1 に示すように汀線を x 軸にとりそれと直角冲向きに y 軸をとると、蛍光砂の拡散方程式は、平面2次元で表され、すなわち

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \lambda C \quad (1)$$

となる。ここに、C は蛍光砂濃度、u および v はそれぞれ x および y 方向の蛍光砂平均移動速度、 k_x および k_y は各方向の拡散係数、 λ は表面蛍光砂減少係数である。つぎに、蛍光砂の連続投入モデルについて簡単に述べる。砂の移動速度は x 方向のみでかつ、正とし、x 方向の拡散は y 方向のそれに比べ小さく無視できるものとする。また各地点には濃度差はあるが時間的に変化しないとすると、式(1) から基礎式は、

$$\frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \lambda C \quad (2)$$

となる。 k_y は一定とし、u はの x 関数であると仮定する。すなわち、 $u(x) = \lambda_0 x + u_0$ とする。境界条件は $x=0$ で $C(0, y) = f(y) = C_0 (= \text{const})$ $-b/2 < y < b/2$ (3), $y \rightarrow \pm\infty$ で $C(x, y) = 0$ (4) である。ここに、b は蛍光砂の投入幅を表す。式(2) を条件式 (3), (4) を用いて解くと

$$C(x, y) = \left(\frac{u_0}{\lambda_0 x + u_0} \right)^{\lambda / \lambda_0 + 1} \frac{C_0}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_1}^{z_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (5)$$

ここに、 $z_1 = -(b/2 + y) / \sqrt{2k_y / \lambda_0 \ln(a)}$, $z_2 = (b/2 - y) / \sqrt{2k_y / \lambda_0 \ln(a)}$, $a = (\lambda_0 x + u_0) / u_0$ となる。つぎに、解析解のみでは現地への適用に対して不十分であるため、堀江²⁾の差分法を適用して数値計算する。式(2)を x 方向に陰形式で差分する。さらに、各係数は無次元量で表し、 $U_0 = u_0 T / b$, $K_y = k_y T / b^2$, $\Lambda = \lambda T$, $\Lambda_0 = \lambda_0 T$ とする。また、 $U(X) = \Lambda_0 (i+1/2) \Delta X + U_0$ とする。

3. 各係数の推定法 各係数は従来の方法で推定する。すなわち、蛍光砂の移動速度は濃度分布の重心の移動速度で、拡散係数は分散の時間的変化率で表す。蛍光砂減少係数は表面蛍光砂総個数の時間的変化率で表すことにする。

4. 現地観測結果と数値計算結果 まず、従来の瞬間投入モデルによる計算結果を示す。式(1) を A.D.I. 法¹⁾ で計算する。図-2 は 1985 年 8 月に鳥取砂丘海岸で実施された蛍光砂調査結果³⁾ をもとに計算したもので、図中に示す実線は蛍光砂投入 2 日後の観測結果で、破線はその計算結果を表す。また、◎印は蛍光砂投入点を表す。なお、計算条件として、格子間隔 $\Delta X = \Delta Y = 0.5 (= 2.5 \text{ m/L})$, 時間間隔 $\Delta t = 0.005 (= 0.04 \text{ day/T})$ とした。各係数は、場所的にも時間的にも一定とし、すなわち

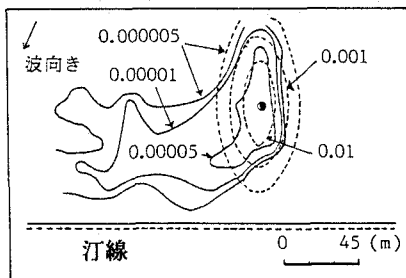


図-2 現地観測結果および数値計算結果 (1985年 8月 22日 投入 2 日後)

$u=-0.04(\text{m/day})$, $v=0.65(\text{m/day})$, $k_x=1.76(\text{m}^2/\text{day})$, $k_y=3.06(\text{m}^2/\text{day})$, $\lambda=0.52(1/\text{day})$ とした。図-3 は蛍光砂投入9日後の観測結果および数値計算結果を示したものである。各係数は, $u=0.47(\text{m/day})$, $v=0.09(\text{m/day})$, $k_x=11.94(\text{m}^2/\text{day})$, $k_y=2.3(\text{m}^2/\text{day})$, $\lambda=0.52(1/\text{day})$ とした。野田ら³⁾によると, 投入4日目まで比較的静穏で蛍光砂は投入点付近に停滞していたことを報告している。その影響で, 蛍光砂投入2日目の拡散係数の推定値が小さくなっているため, 計算結果は, 現地観測結果を十分に再現していない。9日目にもなるとかなり観測結果を再現している。つぎに, 連続投入モデルによる計算結果を示す。前述した蛍光砂投入2日後の観測結果を例にとり, 解析解を用いて計算する。

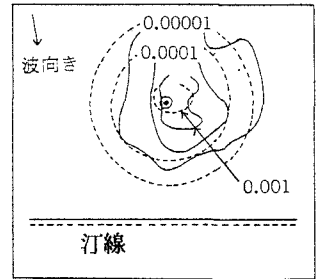


図-3 現地観測結果
および数値計算結果
1985年8月29日 投入9日後

図-3 は蛍光砂投入2日後の現地観測結果（実線）と理論解による計算結果（破線）を示したものである。図中に示す◎印は蛍光砂投入点を表す。各係数は, $u_0=0.347(\text{m/day})$, $k_y=2.886(\text{m}^2/\text{day})$, $\lambda=0.52(1/\text{day})$, $\lambda_0=0.7(1/\text{day})$ とし, 投入幅 $b=2.0(\text{m})$ とした。ただし, u_0 および k_y は投入点とその沖側の測点の蛍光砂を除いて推定した。また, 速度勾配 λ_0 はその推定法がまだ確立されていないので現地観測結果に合うように種々計算のうえ推定した。この図からわかるように定常解による計算結果は観測結果をかなりよく再現している。つぎに, Ingle³⁾ が実施した蛍光砂調査結果を用いて数値計算する。図-5 は蛍光砂投入 120 min 後の観測結果（実線）および数値解法による計算結果（破線）を示したものである。図中に示す・印は蛍光砂の投入点を表し, 計算では濃度が最も高い点を投入点（◎印）とした。なお計算条件として格子間隔は $\Delta x=0.1 \text{ m}$, $\Delta y=0.25 \text{ m}$, 各係数は $u_0=0.3 (\text{m/min})$, $\lambda=0.025(1/\text{min})$, $\lambda_0=0.033 (1/\text{min})$ とした。また, 基準長さを投入幅($b=1.0 \text{ m}$)にとり, 基準時間を観測時間 ($T=120 \text{ min}$)として無次元化して計算した。拡散係数は投入点より岸側を一定とし, 沖側を場所的に変化させた。すなわち, 投入点より岸側を $k_y=0.167 (\text{m}^2/\text{min})$ 沖側を無次元量で $\Delta Y (0.25)$ ステップ毎に K_y を1ずつ増加させた。その結果, 沿岸方向の濃度分布の非対称性のみでなく岸沖方向の濃度分布の非対称性も再現できた。

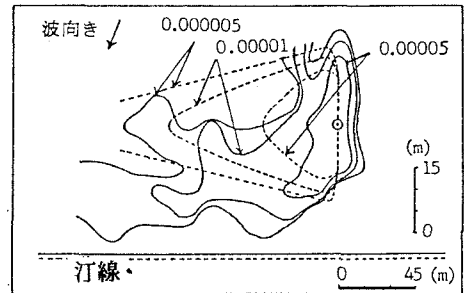


図-4 現地観測結果および定常解
(1985年 8月 22日 投入 2 日後)

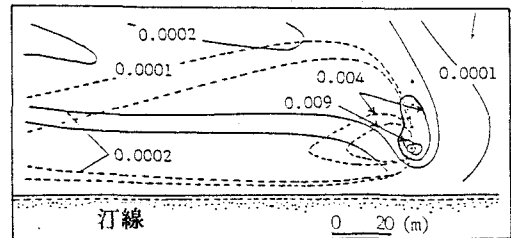


図-5 現地観測結果および数値計算結果
(1962年 3月15日 SANTA MONICA 120 min 後)

5. おわりに 連続投入モデルを用いて, 沿岸方向および岸沖方向の濃度分布の非対称性を再現できることがわかった。現地観測結果は連続投入モデルと瞬間投入モデルとを分けて再現しなければならない。観測期間毎に蛍光砂の移動および拡散を再現する場合においては定常解では不可能である。今後, 非定常の連続投入モデルを開発する必要がある。

【参考文献】 1) 野田英明・黒岩正光：蛍光砂移動の数値シミュレーションに関する研究, 第40回土木学会中国四国支部講演概要集 2) 堀江毅：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究, 港湾技研資料, pp45-67, No.360, Dec.1970 3) 野田英明・的場善博・小林幹和：写真撮影方式による蛍光砂調査法の研究, 第33回海岸工学講演会論文集, 4) Ingle, J.C. : The movement of beach sand, Elsevier Publishing Co., 221p, 1966