

螢光砂を用いた局所的砂移動と移動量の観測

灘岡和夫*・田中則男**・加藤一正***

1. はじめに

現在、海浜変形に関する数値シミュレーションの試みが盛んに行われるようになってきている。このうち one-line-theory に基づくいわゆる一次元モデル（汀線モデル）についてはある程度実用に供し得る段階にまで到達している。これに対して二次元モデル（水深モデル）に関しては、二・三の報告例^{1),2)}があるものの未だ満足な段階には達していない。その大きな理由としては、その依拠すべき局所的漂砂量公式が現在のところ十分信頼を得る段階に達していないということがあげられる。

このようなことから、局所的砂移動の問題はその実態の解明が急がれている重要な課題となっている。しかし、砂移動の外力となる波や流れの研究に比べると、砂移動そのものに関しては室内実験によるものが主で、現地での実測に基づく議論は浮遊砂濃度に関するものを除けばほとんど行われていないのが現状である。

本論文では、従来主として数百から数千 m といった空間的拡がりの場で用いられてきた螢光砂を 10~20 m といった局所的な場に用いることにより、碎波帯内の局所的砂移動を観測することを試みた結果について報告する。本論文で述べる方法では、砂粒子の運動のランダム性を直接反映したデータが得られるが、ここでは、これから得られる砂粒子の平均移動方向や平均移動速度と、波や流れといった外力特性との関連について検討した。また、三色の螢光砂を同一観測点に時間をずらして投入することにより、砂層内部での砂の鉛直混合過程について興味ある知見を得た。最後に、ここで得られた螢光砂データから、局所的漂砂量を算定する方法について論じた。

2. 観測方法・観測概況等について

観測は、1980年の2月29日~3月2日（以後第1回目と呼ぶ）と、同年の9月1日（以後第2回目と呼ぶ）の2回にわたって、茨城県の阿字ヶ浦海岸で行われた。

(1) 観測方法

まず、図-1に示すように半径 R の円を測定対象地点に設定する。 R の値は、第1回目・第2回目でそれぞれ $R=10\text{ m}$, 8.75 m とした。この円の中心付近には、図に示すように電磁流速計（図中 EMC と略記されている）を設置しておき、測定期間中の流速記録（水平方向二成分）をとった。流速計の設置高は、砂面上 5~20 cm である。

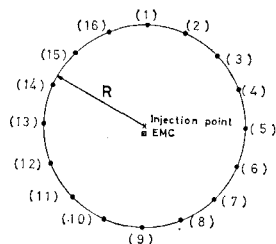


図-1 調査方法の概略図

次に、この円の中心点に螢光砂を投入し、その後15分間隔で円周上の16地点でコア・サンプルを採用した。サンプリング継続時間は、2~5時間である。得られたコア・サンプルは、径 3.4 cm で長さ 20~30 cm のものであるが、これを 2 cm 程度の厚さで層状に分割し、表層から6層までを最終的なサンプルとして取得した。これらのサンプルは、暗室内で適当な大きさに薄く拡げた状態でブラックライトを照射し、表面に見出される螢光砂を肉眼でカウントした。そうした後、各サンプルのカウント数は、別に作成した較正曲線から濃度値に変換された。

上述の円は、碎波帯内の水深 1~1.2 m 程度の地点に設定された。測定回数は、第1回目が3回、第2回目が1回である。ただし、第2回目では三色の螢光砂を用いて、緑・赤・黄橙の順で1時間おきに投入し、各色についてのデータを取得したので、その意味では3回の測定を行ったとも言える。なお、第2回目では赤色螢光砂投入 35 分後に1度だけ格子点上のサンプリングも実施した（図-4 参照）。

(2) 観測概況

第1回目と第2回目では、波や流れの状況がかなり異なり、第2回目の方が、波高・平均流速ともに大きな値を示していた。特に平均流については、第1回目が 10 cm/s 前後の流速で流向もかなりフラついていたのに対して、第2回目では、50 cm/s 程度のかかなり大きな流速で沿岸方向にほぼ一定の向きの流れがあった。

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室 研究員

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 漂砂研究室長

*** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官

なお、観測方法・観測概況等の詳細については、文献3)を参照されたい。

3. 波・流れ等の外力と螢光砂の移動特性との関連

(1) 螢光砂の移動特性量の算定方法

以下の議論においては、座標軸を通常行われるように形式的に岸沖方向と沿岸方向に設定するのではなく、図-2に示すように波の進行方向に ξ 軸、それと直角方向に η 軸をとって考えることにする。

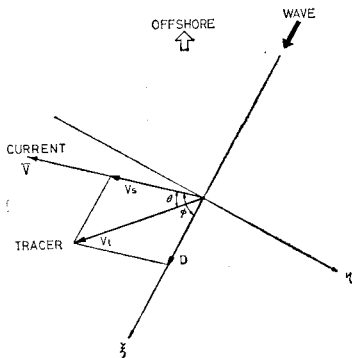


図-2 座標軸および記号の定義図

今回の調査では、螢光砂投入後の時刻 t における円周上の点 (R, ω) での螢光砂濃度 $c(\omega, t)$ が得られるわけであるが(ω は ξ 軸を始線としたときの偏角)、これは見方をかえれば、投入時刻に円の中心に位置していた一粒の砂粒子が、時刻 t に位置 (R, ω) に移行する確率を求めていることに等しい。またこのとき、螢光砂粒子はトラベルタイム t で ξ, η 方向にそれぞれ $R \cos \omega, R \sin \omega$ ほど移動したとみなせるから、移動速度としてはそれぞれの方向に $R \cos \omega/t, R \sin \omega/t$ を有していることになる。したがって、 ξ, η 方向の平均移動速度 u_m, v_m は、その確率平均をとって次式で表わすことができる。

$$u_m = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) \frac{R \cos \omega}{t} d\omega dt}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) d\omega dt} \quad \dots\dots\dots (1.a)$$

$$v_m = \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) \frac{R \sin \omega}{t} d\omega dt}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) d\omega dt} \quad \dots\dots\dots (1.b)$$

したがって、螢光砂の平均移動方向 θ と平均移動速度 V_t は次式で表わせる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_m}{u_m} \right) + \phi - 2\pi \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V_t = \sqrt{u_m^2 + v_m^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ϕ は波と流れの交差角である。また、これより平均流方向への平均移動速度 V_s は、

$$V_s = V_t \frac{\sin(\phi - \theta)}{\sin \phi} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(2) 平均移動方向について

これらの算定式を用いて、まず螢光砂の平均移動方向を求めてみた。その結果が図-3と4である。ここで第1回目の結果を示す図-3では、電磁流速計の設置精度に問題があったため、各測定日での波の主流方向が汀線に直角になるものと仮定して方位を修正してデータを処理している。

これらの図から、螢光砂の平均移動方向は平均流の方向には必ずしも一致せず、第1回目の3月2日の結果を除けば、全て平均流の方向より岸側にズレていることが分かる。このことは、例えば二次元海浜変形シミュレーションモデルにおけるFlemingら¹⁾の取扱いに見られる

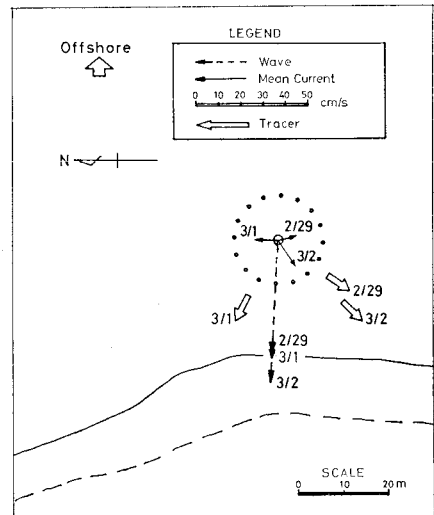


図-3 波・流れと螢光砂の平均移動方向 (第1回目)

(1. SEP. 1980 AJIGAURA)

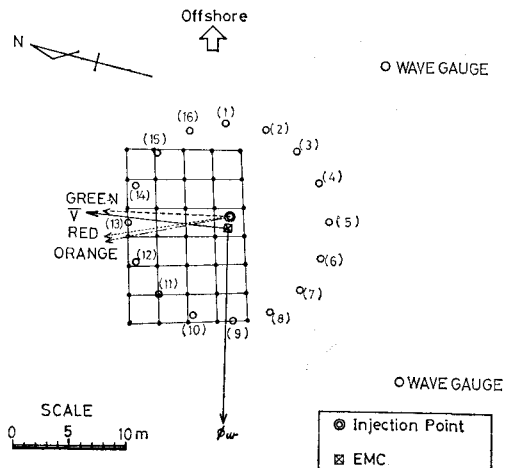


図-4 波・流れと螢光砂の平均移動方向 (第2回目)

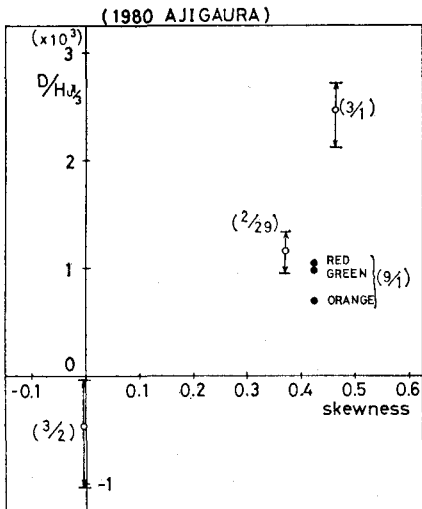
ように、砂が単に平均流の方向に輸送されるという形の漂砂量式を用いてモデルを構成するやり方が妥当性を欠くものであることを示している。

(3) 波の進行方向への平均移動速度

このような平均流方向からのズレは、波の存在に基づく波の進行方向(ξ 方向)への砂輸送効果——すなわち、「岸・沖漂砂」に起因するものと考えられる。この岸・沖漂砂については最近かなり注目されるようになっており、特に沖浜領域に関してはいくつかの研究が報告されている。例えば、砂村ら⁶⁾は、浮遊砂の場合には ripple の存在によって沖向きの砂輸送が生じるとしてその輸送量を ripple のスケール等と結びつける試みを行っている。一方、野田ら⁷⁾は、掃流砂の場合には流速変動の非対称性が大きく影響し、輸送方向は常に岸向きになると述べている。

ここで問題としている碎波帯内の場合には、ripple が存在しないのが普通であるから上述の砂村らの議論は適用できないが、掃流砂に関する野田らの議論は定量的な面は別としてある程度碎波帯内にも適用できると考えられる。そこでここでは、流速変動の非対称性を表わすパラメーターとして skewness を採用し、それと式(1・a)で計算される ξ 方向への砂粒子の平均移動方向 u_m の関係について調べてみた。その結果を図—5に示す。ここで図の縦軸には、 u_m を新たに D と記し、それを流速変動の有義波高 $H_{u1/3}$ で割って無次元化したものを用いている。また、図中のポイントに矢印で範囲を示したものがあがるが、これは先述のように、第1回目では電磁流速計の設置方向を汀線に直角になるように修正して処理したので、参考のためそれから設置方位が ± 10 度ズレたと仮定した場合の計算値を示したものである。

図—5によると、skewness の増加に対応して $D/H_{u1/3}$



図—5 $D/H_{u1/3}$ と流速変動の skewness の関係

の値も増加していく様子がうかがえる。ただ、第2回目の結果は1回目の結果に比べて相対的に値が小さくなっている。これは、第2回目の方が平均流速及び変動流速ともかなり大きな値となっているので底面せん断力が大きく、そのために相対的に浮遊砂の割合が増大したためと考えられる。いずれにしても、上記のことから、流速変動の skewness の砂輸送過程に対する影響の度合にはかなり大きなものがあるといえよう。

(4) 平均流方向への平均移動速度

次に螢光砂の平均流方向への平均移動速度 V_s について述べる。表—1に示す値は、先の式(4)によって計算された値であるが、 V_s の値は各ケースでかなり異った値を示している。しかし、平均流速 $\bar{V}$ との比で見るとあまり大きな違いはなく、一部のものを除けば $V_s/\bar{V}$ の値はほぼ 1~2% の値になっていることが分る。

表—1 V_s の算定結果および平均流速との関係

ケース名	V_s (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	$V_s/\bar{V}$ (%)
第1回目	2/29	(0.301)*	8.0
	3/1	0.167	10.4
	3/2	0.282	14.0
第2回目	緑	0.691	49.0
	赤	0.598	49.0
	黄 橙	0.379	49.0
橋本・宇多 ⁶⁾	2~8	20~40	—
Kraus et al. ⁷⁾	0.2~1.6	20~50	—

* サンプル継続時間不足のため信頼性が劣る。

同表の下段には、今回の観測結果と比較するために同じ阿字ヶ浦海岸で行われた橋本・宇多⁶⁾の調査結果と Kraus et al.⁷⁾ の調査結果をあわせて示してある。ただし、これらの報告例はいずれも空間的平均値としての移動速度である。これらの値と比較すると、今回の測定値はやや小さめの値となっている。しかし、一方で、螢光砂の碎波帯内における平均埋没深さと碎波々高の間に比例関係を仮定し、その比例定数として Madsen⁸⁾ にならって 0.505 を用いれば、 V_s の碎波帯全体の平均値を $\bar{V}_s$ 、平均沿岸流速を $\bar{V}_l$ とするとき

$$\bar{V}_s \cong c_f \bar{V}_l \dots\dots\dots (5)$$

という関係が得られる⁸⁾。式中の c_f は、Longuet-Higgins の沿岸流公式⁹⁾中に用いられる摩擦係数であるが、この値としてよく使われる $c_f=0.01$ を上式に代入すれば $\bar{V}_s/\bar{V}_l \cong 0.01$ となる。このことから、今回の測定結果がほぼ妥当な範囲にあると推定される。

4. 螢光砂の鉛直混合過程について

第2回目の調査では、螢光砂の砂層内での鉛直混合過程を探る目的から、三色の螢光砂を用い、緑・赤・黄橙

の順に1時間おきに同一地点に投入した。図-6は、Kraus et al.⁷⁾の提案した80% cut-offで定義される螢光砂の埋没深さの時間変化を示したものである。これから、かなりの部分が色の違いに無関係にほぼ同じようなパターンで変動していることが分る。また、同様のことが赤の螢光砂投入後35分後に1度だけ実施された格子上のサンプリング(図-4参照)からも確認された。

また、図-7は三色のトレーサー相互の鉛直分布形の相関を示しているが、これから濃度の鉛直分布形の相関もかなり高いことが分る。

これらのことから、螢光砂の鉛直混合過程には投入時点を1時間ずつずらした効果は現われず、三色の螢光砂の砂層内への埋没過程には、かなりの規模の鉛直混合が何らかの機構で行われているものと考えられる。また、図-6によれば、螢光砂の埋没深さは、投入後5分です

で2~4cmの値を示すことが分る。このことから、上述の鉛直混合のプロセスを特徴づける時間スケールは、数分以下であると推察される。

なお、螢光砂の平均的埋没深さは、その点の波高の8%程度となるようであった。この値は先述のMadsen⁸⁾の値(11%)に比較的近くなっている。ただし、埋没深さはrippleの有無にも密接に関連し、rippleのある場合には埋没深さが増大することが確認された⁸⁾。

5. 局所的漂砂量の算定方法

螢光砂を用いて、砂の輸送量を測定する方法には、大きく別けて、○時間積分法、○空間積分法、○定常希釈法の三つがある。これらの方法は、既にいくつかの海岸での漂砂量測定に应用されているが、それらはいずれも沿岸漂砂量の測定を目的としたものであるため、そのままの形では使用できない。

そこでここでは、新たに二次元的な拡がりを持つ場での局所的漂砂量の測定方法として、上記の方法のうち、時間積分法と空間積分法を一部修正して用いることを試みた。ただし、ここでは紙面の都合から、その要点のみについて述べる(文献3)参照。

(1) 時間積分法による局所的漂砂量の算定法

この方法では、以下の仮定が必要とされる。

- (仮定1) 螢光砂と周囲の自然砂の運動が全く同一。
- (仮定2) 円内では、漂砂量が平面的に一樣。
- (仮定3) 平均流あるいは波動による砂の移流効果が水平方向の拡散効果に

比べて卓越していること。

(仮定4) 逆に、鉛直方向の砂の拡散効果は、移流効果に比べて卓越していること。

そうすると、螢光砂の投入量を M とすると、漂砂量は次式で算定される。

$$Q = \frac{M}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) R \cos \omega \, d\omega \, dt} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、この場合の ω は、 $\int_0^\infty \int_0^{2\pi} c(\omega, t) R \sin \omega \, d\omega \, dt$ がゼロとなるような軸からとった偏角である。

(2) 空間積分法の応用による局所的漂砂量の算定法

空間積分法では、螢光砂の混合層厚を b 、螢光砂移動速度の空間的平均値を V_a とすると、漂砂量は、 $Q = bV_a$ で与えられる。しかし、今の場合には、移動速度の空間的平均値ではなく時間的平均値 V_t (式(3))が得

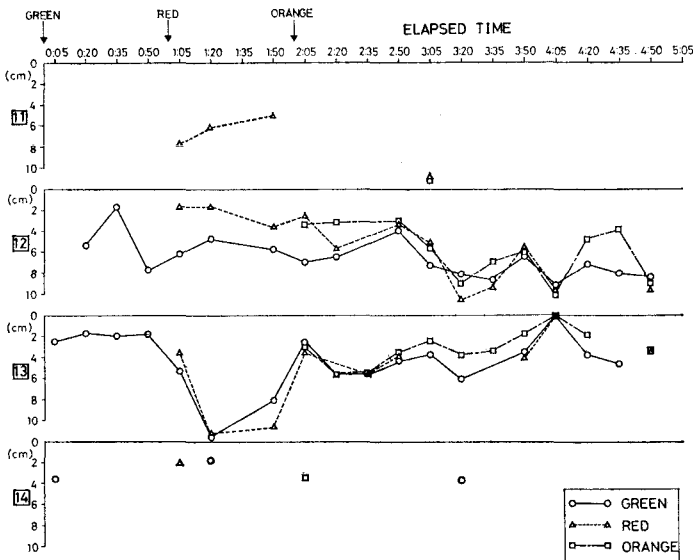


図-6 三色の螢光砂の埋没深さの時間変化

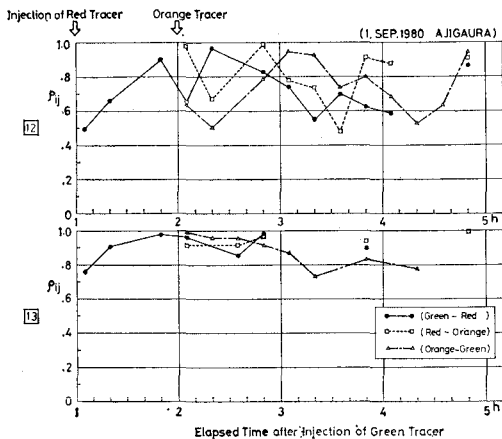


図-7 螢光砂濃度の鉛直分布形の相関

られているのでこれで代用することを考える。したがって

$$Q = bV_i \dots\dots\dots (7)$$

によって漂砂量が求まる。

(3) 計算結果

表—2 に、第2回目の三色の螢光砂に対する計算結果を示す。このときの外力条件は測定期間中ほぼ一定であった。このことから、計算値は螢光砂の色に関係なくほぼ一定になることが期待されるが、時間積分法の結果は、比較的バラツキが大きくなっている。一方、空間積分法ではバラツキは小さく、相対的に安定した値になっていることが分る。ただ値そのものは両方とも同程度のオーダーの値になっている。

表—2 漂砂量の算定結果

	(時間積分法)		(空間積分法)	
	Q	Qの平均流方向の成分	Q	Qの平均流方向の成分
緑	0.43	0.43	1.32	1.33
赤	1.46	1.44	1.27	1.25
黄橙	1.84	1.81	0.68	0.67

(単位; m³/h/m)

ここで参考のため、従来の漂砂量公式を用いて漂砂量を算出し上記の計算結果と比較してみる。ここで使用したのは Bijker⁽¹⁰⁾ による算定式で、これは Van de Graaff et al.⁽¹¹⁾ によって、(岸沖方向の積分値が CERC 式の傾向と良く一致するという意味で)、その有効性が指摘されているものである。ただ値そのものは、CERC 式の5割前後の値となるようである。以下に計算結果を示す。ただし、同式では底面粗度 k_s の値を必要とするため、ここでは $k_s=1$ cm, 5 cm, 10 cm の3ケースについて計算を行った。

$$Q = \begin{cases} 0.267 & (k_s=1 \text{ cm}) \\ 0.850 & (k_s=5 \text{ cm}) \dots\dots\dots (8) \\ 1.066 & (k_s=10 \text{ cm}) \end{cases}$$

(単位; m³/h/m)

これらの値を2倍したものと、表—2の値を比較すると、ほぼ、オーダー的に同程度の値となっている。

以上のことから、ここで示した二つの漂砂量測定法は比較的良好な結果を与えることが分る。この二つの方法のうちでは、空間積分法を応用した方法の方が、計算値

が比較的稳定していること、計算式の導出過程にあまり多くの仮定を含まないことなどの有利な点があり、優れているように思われる。

6. おわりに

漂砂現象に関する現地観測は、その実態の解明という側面と、漂砂量の具体的な計測という側面の二つの面を持つが、本論文では、この両面において一応の成果が得られたと思われる。ただ、本論文で述べた調査手法では砂の移動方向特性などは明確に把握えられるが、例えば砂の拡散特性については定性的なデータしか得られないというような欠点がある。今後は、このような点の改良も含めてこの種の調査を継続し、さらに種々の条件下でのデータを蓄積して行きたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Fleming, C. A. and J. N. Huut: Application of a sediment transport model, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., pp. 1184~1202, 1976.
- 2) 宇多高明・橋本 宏: 海岸構造物周辺の海浜流と地形変化の特性, 第23回水理講演会論文集, pp. 181~186, 1979.
- 3) 灘岡和夫・田中則男・加藤一正: 螢光砂を用いた碎波帯内における局所的砂移動の観測, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp. 75~126, 1981.
- 4) 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司: 非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1978.
- 5) 野田英明・松原雄平: 岸・沖向き漂砂量に関する研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 197~201, 1980.
- 6) 橋本 宏・宇多高明: 螢光砂を用いた漂砂の現地観測, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 335~338, 1975.
- 7) Kraus, N. C., R. S. Farinato・堀川清司: 沿岸漂砂量に関する現地観測——岸沖方向分布および時間変動について——, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 245~249, 1980.
- 8) Madsen, O. S.: The stability of a sand bed under the action of breaking waves, MIT Report, No. 182, 1974.
- 9) Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves 1, Jour. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778~6789, 1970.
- 10) Bijker, E. W.: Longshore transport computations, Proc. ASCE, Jour. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Div., WW4, pp. 687~701, 1971.
- 11) Van de Graaff, J. and Van Overeem, J.: Evaluation of sediment transport formulae in coastal engineering practice, Coastal Eng., Vol. 3, No. 1, pp. 1~32, 1979.