

定常流・振動流交差装置による漂砂量測定

香 取 完 和*・ 榊 山 勉**・ 渡 辺 晃***

1. 結 論

沿岸域においては、来襲する波浪とそれに起因する海浜流が共存するため、流体の運動は様々な様相を呈する。そして、その複雑な流体運動と地形形状に対応して海底の底質が移動し、地形変化が生じる。このような海浜過程を把握し、さらには構造物が設置された場合の地形変化を予測するためには、より一般的な条件での漂砂現象の究明と、流体運動と底質の移動量を関係づける漂砂量算定式の確立が必要となる。

漂砂量算定式に関する従来の研究では、漂砂現象を漂砂の方向により、岸沖漂砂¹⁾と沿岸漂砂²⁾に分けて扱うことが多い。著者の一人は任意方向の漂砂量算定式を提案しているが³⁾、実測データによる検証が課題として残されている。

そこで本研究は、波と流れが交差する場における海底面近傍の現象を再現するために定常流・振動流交差装置を製作し、漂砂現象を観察すると共に漂砂量の測定を試みたものである。

2. 定常流・振動流交差装置の概要

沿岸域では波の進行方向と流れの方向が場所により変化するため、任意地点での流況を実験室で再現しようとするならば、波と流れの交わる角度を任意に変えられる実験装置が必要となる。このような装置としてスネーク型造波装置や定常流・振動流交差装置⁴⁾などが考えられる。

前者は多連の造波板を平面水槽の周囲に配列し、各造波板の運動位相を調整することにより水槽内の波を任意の方向に発生させるもので、同時に向かい合う2辺の一方で給水し他方で排水することにより流れを作り出し、波と流れが共存する場を再現することができる。しかし、この方法は各造波板の調整が困難で、装置が大がかりになるわりには大きな流速は得られない。

これに対して後者の方法は、互いに直交する2つの管

路を用いて、管路交差部で海底面近傍の現象を再現するものである。交差流の発生原理を図-1に示す。まず、所要の定常流（流速 V ）は互いに直交する定常流を合成することによって得られ、それぞれの流速を変えることにより任意の流向と流速を得ることができる。この合成された定常流に振動流（流速 $U_w = \hat{U}_w \sin(2\pi t/T)$ ）を重ね合わせることで、波と流れが角度 α で交差する場合の流速変動 $v(t)$ が得られる。ここで、 $\hat{U}_w$ 、 T はそれぞれ振動流の流速振幅、周期、 t は時間である。ただし、この原理を利用して交差部のほぼ全域で所定の流況を得るためには、流速 $v(t)$ に一致して運動するガイド羽根を交差部周囲に設ける必要がある。このような定常流・振動流交差装置を用いると、観測域（管路交差部）

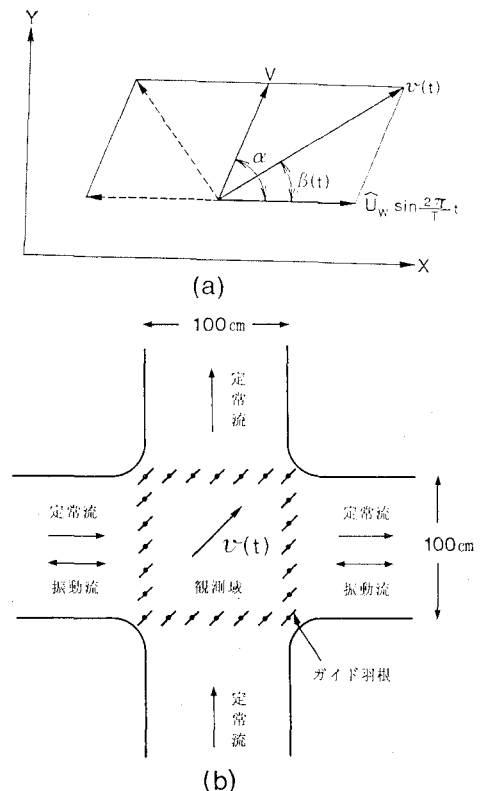


図-1 交差流発生原理

* 正会員 工修 海岸環境工学研究センター

** 正会員 工修 (財)電力中央研究所土木研究所

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

はスネーク型造波装置に比べて狭くなるものの、操作が容易で、より大きな流速を得ることができる。底面に働く流体力ならびに漂砂量を評価しようとする場合、より現地スケールに近い流速場が設定できるものが望まれることから、定常流・振動流交差方式が優れている。

本研究で用いた定常流・振動流交差方式による実験装置の基本配管図および本体組立図をそれぞれ 図-2、図-3 に示した。定常流は 図-2 に示すように 2 つの循環路により与えられ、流入側の流量調節弁によって各管の流速を変えることができる。このような循環路においては循環路の内側に近いほど流速が速くなるため、図中に示す整流槽を設けた。この整流槽内で流速を一旦落して整流することにより、観測域内の流速を揃ったものにする事ができる。一方、振動流は 図-3 に示すように観測域の両側に設けられた 2 つの鉛直管内のピストンを上下に単振動させることにより与えられる。

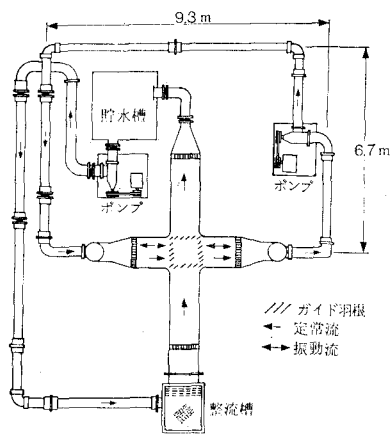


図-2 定常流・振動流交差装置の配管図

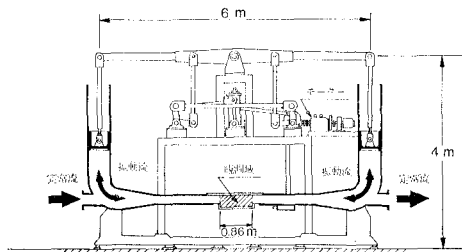


図-3 定常流・振動流交差装置の本体組立図

管路交差部に設けられた 24 枚のガイド羽根は、図が煩雑になるので図中には示されていないが、羽根の動きがピストンの動きと同期するように、ピストンを動かすクランクの軸から駆動力が伝達される。そして、各ガイド羽根の軸の下端に取り付けられた歯車に往復回転を与えガイド羽根を作動させる。

図-4 は本装置によって得られた流況の一例を示したもので、定常流と振動流が直交し、かつ定常流の流速と

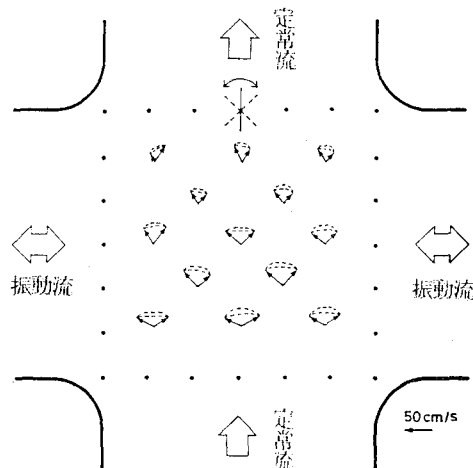


図-4 観測域内の平面流況 (定常流・振動流共存)

振動流の流速振幅が同程度の場合である。なお主流は直径 1.6 cm の浮子に水糸 (長さ 10 cm) を付け、その端を底面に固定して浮子の動きを追跡することにより得たものである。図中の矢印は振動流流速が最大になる位相での流速ベクトルを、破線は流速変動の軌跡である。またガイド羽根の動きを図中の上側 1 点についてのみ示したが、他の 23 点でもガイド羽根の動きは同様である。

観測域内の流況を概観すると、振動流の振幅が定常流の流入側で広がり、流出側で狭くなっていることがわかる。これは流入側では通過断面積が拡大して定常流の流向が両側辺方向に広がり、流出側では流出口に流れが集中するためである。

図-5 は観測域の中央に 2 成分電磁流速計を設置して流速変動の各方向成分を測定した結果で、振動流の 20 周期分の時間にわたり位相平均されている。図で定常流方向成分を見ると、振動流の一周期の間にその 1/2 の周期で流速が変動しているのがわかる。その変動の位相を見ると、振動流の流速が小さくなる位相で定常流の流速が大きくなる傾向を示している。これは、定常流は常に観測域内に流入しようとするが、振動流が流入する際には流れが抑えられ、また振動流の流速が小さいときには

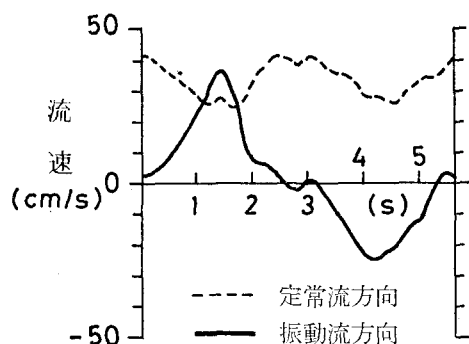


図-5 実測流速波形 (観測域中央)

妨げられることなく定常流が流入するためと思われる。

以上のように実験条件として特殊な例を挙げて本装置によって得られる流況を説明したが、観測域の広さが必ずしも十分でないことから、装置の特性が流況にかなり影響を与えていると考えられる。また、ここに示した実験の他に、定常流と振動流のなす角度が15度、30度、45度の場合についても同様に流況を調べたが、現在までのところ十分に満足しうる流況を得るには至っていない。

3. 底質の移動限界

定常流のみの場合と定常流と振動流が直交する場合について移動床実験を行い、底質の移動限界条件を評価した。前者は本装置によって得られる実験結果を従来の結果と比較検討するため、後者は定常流と振動流が交差する場合の典型であると同時に、実験が比較的容易であることから選択された。

実験は粒径の異なる3種類の砂(中央粒径0.2, 0.4, 0.7 mm)について行い、砂を観測域の底面に設けた堆砂槽に敷き、観測域の上端面であるアクリル板を透して砂の動きを観察した。また、観測域の中央に2成分電磁流速計を設置して主流の流速を測定し、この流速データから砂面に働く底面剪断応力を評価した。定常流と振動流が直交する場合の流況は、図-4と図-5に示した状態であることから、ここでは次のような解析方法を検討した。

定常流と振動流が共存する場合の底面剪断応力の評価方法として、田中・首藤⁵⁾が提案した波と流れが共存する場合の境界層理論がある。しかし、この理論で直接扱える現象は定常流と単一周成分のみを有する振動流が共存する場合の現象であり、先に示した流況に対しては提案された式をそのまま利用することはできない。そこで田中・首藤の理論の基本的な考え方に立ち戻り、今回の実験データをより合理的に解析できると思われる方法を以下のように検討した。

まず田中・首藤の理論を適用するために次のような仮定を設ける。

- ① 流速変動の各方向および各周波数成分によって底面境界層内に形成される流速分布は、基本的には各成分ごとに独立である。
- ② ただし、底面境界層内の各流速変動成分の流速場を決定する渦動粘性係数は、共通の合成底面摩擦速度の振幅 $\hat{u}_{cw}^*$ によって支配される。
- ③ 各流速変動成分ごとに得られる底面せん断応力のベクトル和を取ることににより、全体としての底面剪断応力が表わされる。

以上の仮定に従うと境界層内の流速場を決定する底面摩擦速度の振幅 $\hat{u}_{cw}^*$ は以下のように表わされる。

$$\hat{u}_{cw}^* = \text{Max} [u_x^{*2}(t) + u_y^{*2}(t)]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Max は最大値を意味する。 $u_x^*(t)$ と $u_y^*(t)$ は水平 x, y 方向の底面摩擦速度の時間変化で、田中・首藤の理論を拡張すれば次式によって与えられる。

$$u_i^{*2}(t) = u_{ci}^{*2} + \sum_n u_{win}^{*2}(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$u_{win}^*(t) = \sqrt{\kappa \hat{u}_{cw}^* \sigma_n z_0} \hat{U} \sin A_{win} t \times \cos \left(\sigma_n t + \theta_{win} - \frac{\pi}{4} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで κ はカルマン定数、 σ は振動流の角周波数、 z_0 は粗度長さ、 $\hat{U}$ は境界層外縁流速の振幅、 t は時間、 A および θ は底面境界層内の流速振幅の変化と位相の進みを表わす。また添字 i は方向 (x, y) を、添字 n は各成分波要素を、添字 c と w はそれぞれ定常成分と振動成分を示す。

ところでここで注意を要することは、式(3)は流れの場が乱流の場合の式であるとともに、滑面乱流が粗面乱流かによって粗度長さ z_0 の与え方が異なることである。また、流れの場が層流のときには従来の層流解を用いて上記と同様の方法で解を求める必要がある。よって実際に底面剪断応力を計算する際には flow regime を判定する必要があるが、今回のデータ解析においては、流体運動の場が層流、滑面乱流および粗面乱流としておのおの剪断応力を計算し、計算された値の中で最も大きな値を示すものをもって解とした。このことは flow regime において滑面乱流と粗面乱流との間に存在する遷移領域でも粗面乱流の扱いをしたことになる。

図-6 は目視により観察された全面移動限界時の流速データから、上記の方法に従い底面剪断応力を求めた結果である。ここでは Madsen・Grant⁶⁾ にならぬ次の2つのパラメーターで実験結果を整理した。

$$\psi_m = \frac{\hat{u}_{cw}^{*2}}{s dg}, \quad S_* = \frac{d \sqrt{s dg}}{4\nu} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\hat{u}_{cw}^*$ は底面摩擦速度の最大値、 s は底質の水中比重、 d は粒径、 g は重力加速度、 ν は水の動粘性係数である。図中の曲線は定常流に対する移動限界を示すシールズ曲線であり、縦棒群は波動場での移動限界データ

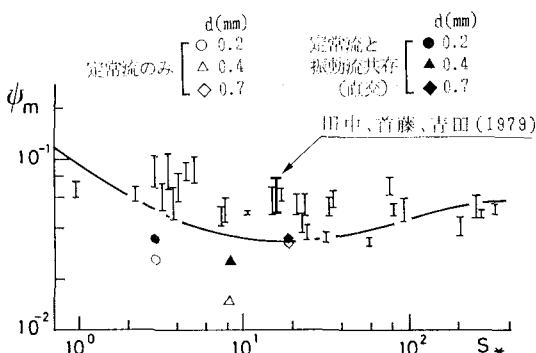


図-6 底質の移動限界

を Madsen・Grant が整理したものである。田中・首藤・青田⁷⁾のデータは波が流れを遡る条件で得たデータで、振動流と定常流が平行する場合に相当する。

図—6 によれば今回の実験結果に関しては、定常流のみの場合に比べて振動流が共存する場合の方が移動限界シールズ数 ϕ_m が小さく、これまでの研究結果と同様の傾向を示すが、他のデータに比べて全体的に限界値が小さい。この実験結果の是非は、本装置の特性や移動限界の判定規準等をさらに検討した上で判断される必要があるが、観測域の定常流方向上流端から底質粗度に対応して発生する境界層が、観測域の広さが十分でないことから完全に発達し得ず、計算値より大きな剪断応力が底面に作用していることも考えられる。

4. 砂の動きの観察

底面に働くせん断応力が底質の移動限界値を越えると底質は少しずつ動き出し、やがて砂れんが形成される。さらに底面に働く力が大きくなると、砂れんの波長は徐々に長くなるとともにその高さは小さくなりやがて消滅し、底質は sheet flow 状態で動くようになる。このような現象についてはこれまでに多くの研究が重ねられてきたが、それらは波の場が支配的な岸沖方向の現象に関するものがほとんどで、波と流れが交差する場合の現象についての研究は遅れている。ここに報告する現象は定常流と振動流が直交し、かつ両者の流速が同程度という条件でのものではあるが、波と流れが交差する場合の漂砂現象の一端を知ることができるものと考えられる。

図—7 は、図—4 に示した流況下で観察された砂の動きと砂れんの代表的な例を模式的に示したものである。ただし、図中円内の印で ← は振動流が図中上方に向う際の、←- ← は下方に向う際の砂の移動方向を示し、— は砂れんの峰を表わす。観察された現象を説明すると以下のようなものである。

- (a) 振動流の流速振幅に対して定常流の流速が小さい場合、定常流の流下方向に砂れんの峰が発達し、砂は振動流によって砂れんの峰を交互に通過しながら

下流方向に移動する。

- (b) 振動流の流速振幅と定常流流速が同程度の場合、波と流れが共存する際の基本的な砂の移動形態と思われる菱形地形が見られる。振動流の往復時にそれぞれの最大流速方向に砂れんの峰が形成されるため砂れんの峰は全体として菱形を呈し、このような形を保ちつつ砂は全体として流下方向に移動する。
- (c) 振動流の往復時に流速の最大値が異なる場合、最大値の大きい時に生じる砂れんの峰を残して片側が消滅する。砂の移動方向は全体として定常流の流下方向に近いようである。

以上、観察された砂の動きを簡単に述べたが、形成される砂れんの長さや高さを測定するには至っていない。このような砂れんの特性に関しては今後の課題である。

5. 漂砂量の測定

第1節においても述べたように、任意方向の漂砂量に関する実験データは少なく、特に数値計算によって波と流れの場を求め海浜地形の変化を予測するためには、より一般的な漂砂量の算定式を与える必要がある。このための第一段階として、定常流と振動流が直交するという条件に対して、本装置を用いて漂砂量を測定した。

実験では観測部の底面に深さ 2.5 cm のビニール板のトレイ (86×86 cm) を設け、底質を 2.5 cm の厚さに敷き均して、トレイ内に敷かれた砂が所定の時間後にどれ

表—1 漂砂量測定時の実験条件

	粒 径 (mm)	定常流流速 V (cm/s)	振動流流速振幅 [*] $\hat{U}_w$ (cm/s)	周 期 [*] T (s)
定常流のみ	0.2	21~60		
	0.4	30~63		
	0.7	37~60		
定常流・振動流共存	0.2	14~39	13~30	4.6~9.1
	0.4	15~51	9~43	3.0~5.8
	0.7	24~39	25~31	3.1~5.3

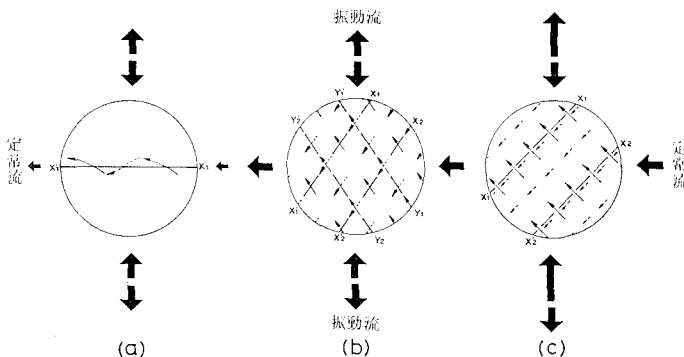
注: * 印は基本周期成分のみを示した。

だけ減少したかを計量することにより漂砂量を求めた。なお、トレイの四辺には 2.5 cm の段差による影響を低減するため、ビニール板で曲面を作った。実験条件の概略は表—1 に示す通りである。

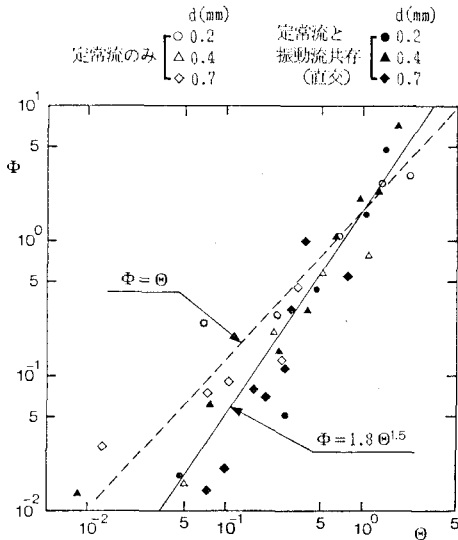
図—8 は渡辺³⁾にならって得られた漂砂量データを整理したものである。横軸は底面剪断応力と速度の積を $\rho(s dg)^{3/2}$ で割った無次元仕事率

$$\theta = \frac{(\tau_m - \tau_0)V}{\rho(s dg)^{3/2}} \dots\dots\dots (5)$$

であり、縦軸は無次元漂砂量 $\Phi (= \bar{q}/wd)$



図—7 定常流・振動流共存場における底質の運動

図-8 無次元仕事率 Θ と無次元漂砂量 Φ の関係

である。ここで、 τ_m は底面剪断応力の最大値、 τ_c は底質の移動限界せん断応力であり、両者を第3節に示した解析方法により求めた。また、 V は定常流流速、 ρ は水の密度、 s は底質の水中比重、 g は重力加速度で、 $\bar{q}$ は定常流方向の単位時間単位幅当りの漂砂量、 w は底質の沈降速度である。図より今回の実験結果は、

$$\Phi = 1.8\Theta^{1.5} \quad \dots\dots\dots (6)$$

により最も良く表わされるようである。しかし、底質の移動限界剪断応力の値が従来の研究結果に比べて小さかったことと、流速が大きくなるとガイド羽根によって発生する乱れが大きくなり、漂砂量が過大になり易いという実験中の観察から判断すると、本来の漂砂量は

$$\Phi = \Theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

に近い関係によって表わされるものと思われる。

なお、以上の結果は流速が不規則に変動していることを考慮して流速変動の第5周期成分までを用いて無次元仕事率 Θ を計算したものである。これを図-5における定常流方向の流速変動の平均値(定常成分)と振動流方向の流速変動の基本周期成分のみを用いて計算する

と、定常流のみの場合および定常流と振動流が共存する場合共にほぼ

$$\Phi = 2.7\Theta^{1.3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係によって漂砂量が統一的に表わされる。このことは流速変動の高周波成分が漂砂量にあまり影響を与えないことを示している。

6. 結 語

本研究で扱った定常流と振動流が交差する場合の漂砂現象は沿岸域に存在するより普遍的な現象であるにも拘らず、現象がかなり複雑であると共に現象を再現し得る適当な実験装置がなかったことから、研究が遅れていた問題である。ここに報告した定常流・振動流交差装置の性能は必ずしも満足し得る段階に到っていないが、今回行った実験により漂砂現象の一端を知ることができた。今後、より多くの実験データを蓄積し、漂砂現象の究明を画る予定である。

最後に、本研究にご指導を賜った東京大学堀川清司教授、実験データの解析に当り種々の助言を頂いた東北大学大学院田中 仁氏、また実験に当り熱心な協力を頂いた海岸環境工学研究センターの大森 宏君に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 砂村継夫：浅海域の岸沖漂砂に関する実験的研究，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 239～243，1982。
- 2) 小笹博昭・A. H. Brampton：護岸のある汀線変化計算，港湾技術研究所報告，18(4)，pp. 77～104，1979。
- 3) 渡辺 晃：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 285～289，1981。
- 4) 渡辺 晃：波と流れの干渉実験装置のパイロット・モデル，NERC Report No. 10, TR-79-1, pp. 33～45, 1980。
- 5) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存時の底面摩擦に関する研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 163～167，1980。
- 6) Madsen, O. S. and W. D. Grant: Quantitative description of sediment transport by waves, Proc. 15th Conf. on Coastal Eng., pp. 1093～1112, 1976。
- 7) 田中 仁・首藤伸夫・青田茂雄：波・流れ共存場における砂移動限界，第34回年次学術講演会概要集(II)，pp. 655～656，1979。