

不規則振動流中における砂移動機構と砂漣の消滅限界

佐藤 慎司*・杉浦 志樹**・渡辺 晃***

1. 序 論

波運動下で形成される砂漣の形状特性や大きな底面摩擦応力条件下におけるその消滅限界については、規則波に関しては近年豊富な研究が蓄積されつつあるが不規則波を対象とした研究は少ない。不規則波のもとでの海浜変形に関する実験的研究も近年活発に行なわれているが、実験室で得られた結果を現地に適用するためにはさらに現地条件に近い大きな底面摩擦応力条件のもとでのデータを蓄積することが重要である。

大きい底面摩擦応力条件下では一般に砂の移動量も極めて多く、波による砂移動現象を理解する上で工学的に重要であるが、実験室でこのような条件を再現することは困難なため詳細な研究が行なわれるようになったのは極く最近になってからのことである。Manohar¹⁾は振動板を用いて砂移動に関する実験を行ない、砂漣の消滅限界が無次元流速振幅とレイノルズ数との関数で表されることを示した。Komar・Miller²⁾はManohar¹⁾らのデータを再整理して、シールズ数とレイノルズ数とを用いることにより砂漣の消滅限界式を提案している。またDingler³⁾は主として現地における底面形状の観測結果をもとに、無次元流速振幅がある値以上になると平坦な砂床部が観測されることを報告した。これらの研究をもとに、Hori-kawa et al.⁴⁾は振動流装置を用いて広い条件のもとでの実験を行ない、球に近い形状の粒子に対してはManohar¹⁾やKomar・Miller²⁾の導いた表示式がシートフロー状態への妥当な限界値を与えることを示すと同時に、砂粒子の速度と濃度の鉛直分布を詳細に測定することによりシートフロー状態での砂移動量を評価した。その後もシートフロー状態における砂の移動機構については、Staub et al.⁵⁾、山下ら⁶⁾、Bakker・Van Kesteren⁷⁾らにより詳細な研究が行なわれている。一方、不規則波のもとでの底面微地形と砂移動に関しては、Inman⁸⁾、Nielsen⁹⁾、Nielsen・Gordon¹⁰⁾らによる現地観測を中心にしてその特性が報告されている。しかし、現地条件に近い制御された条件

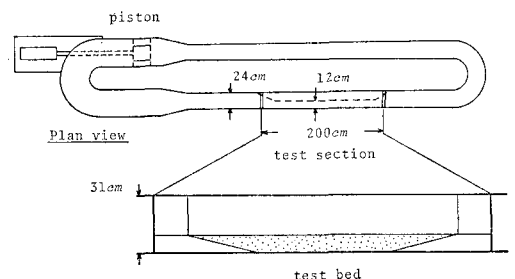
での室内実験については佐藤ら¹¹⁾の研究などがあるものの研究例は少なく、漂砂現象に与える波の不規則性の影響に関しては今後もさらに精密な実験を継続していくことが必要である。

本研究では、任意波形の振動流を発生させることができる振動流装置を用いて、従来ほとんど行なわれていない大きな底面摩擦応力条件の不規則振動流のもとでの砂移動に関する実験を行なう。そして砂移動形式の観察と詳細な地形測定をもとに、現実の条件により近い不規則波のもとでの砂移動機構の理解に資するとともに、現地波浪条件にも適用し得る砂漣の消滅限界の表示式を提案することを目的とする。

2. 実験装置および方法

図—1に示すような油圧サーボシステムにより駆動されるピストンを有する振動流装置内に長さ160 cmの平坦な砂床部分を設け観測部とした。振動流の作用により発達する砂床部の地形が定常に達した時点で振動流の作用を中止し、砂床部の地形変化を3本の測線上で連続式砂面計により計測した。今回の実験では主として振動流の振幅が大きな条件を対象としたため、実験条件によってはピストンの許容ストロークの制限により観測部で所定の振動流を得ることができないケースがあった。そのような場合には、図—1に破線で示したように、観測部の水路幅を半分に縮小して実験を行なった。

振動流装置に入力する不規則信号は、沖波の水位変動のスペクトルをBretschneider・光易型で与え、線形フィルターを用いて底面における水粒子の軌道を計算するこ



図—1 実験装置と観測部断面

* 正会員 工博 横浜国立大学助手 工学部建設学科
 ** 正会員 地域振興整備公団
 *** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

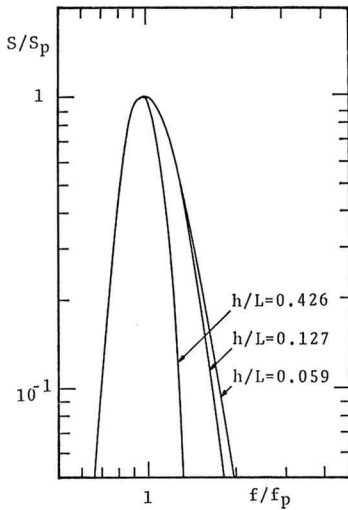


図-2 不規則振動流の流速変動のスペクトル

とにより作成した。有義波周期は 1~7 秒とし、それぞれの周期に対して 3 種類の相対水深をとるように条件を設定し、図-2 に示すようなスペクトル特性を有する 3 種類の不規則信号を作成した。ただし、図-2 の縦軸はスペクトルのピーク値で、横軸はピーク周波数で無次元化して描いてある。現地波浪条件下での流速変動は波の非線形性や碎波の影響を含むものであり、今回線形理論に基づいて作成した信号はこれらの非線形性に起因する非対称な波形を再現していない。非線形性を含んだ流速変動のシミュレーション法には佐藤ら¹¹⁾の用いた方法などが考えられるが、今回の研究では振動流の非対称性に伴う砂移動量ではなくその不規則性が微地形の形成と砂の移動形式に与える影響に注目しているため、全てのケースで線形理論に基づいて流速変動を計算することにした。Sato・Horikawa¹²⁾によれば、流速変動の非対称性がかなり強い条件に対しても砂漣の形状に関しては、流速変動の自乗平均値をもとに換算した流速振幅を用いれば対称振動流に対する結果と統一的な整理が行なえる。従ってこのような整理法を採用すれば、本研究の結果を現実の波浪条件下に対しても適用することができると思われる。

底質には中央粒径 $D=0.018$ cm と 0.056 cm の 2 種類の粒径のよくそろった砂を用い、砂漣の消滅限界付近の大きな底面摩擦応力条件のもとで、規則振動流を含めて合計 58 ケースの実験を行なった。各条件における底質砂の移動形式および底面地形の発達過程は水槽側面から 35 mm カメラで記録した。

3. 不規則振動流中での砂移動機構の特徴

写真-1, 2 はそれぞれ不規則振動流および規則振動流中で大きな底面摩擦応力条件下で発達した底面地形の例

である。規則振動流中では流速振幅が大きな条件では一般に三次元的な砂漣の発達を観察された。さらに流速振幅が大きくなると、波長が 100 cm 程度の大規模な地形が出現し、その後平坦な砂床状態へと遷移していった。通常の砂漣に比べて大規模なこのような地形の発生は、Bosman¹³⁾ や Sakakiyama et al.¹⁴⁾ らによっても報告されており、その形状特性には興味もたれる。しかし、今回の実験ではこのような大規模な地形の波長は観測部の長さと同程度であったため、今回の実験結果をもとにその形状特性について議論するには無理があるものと思われる。ただし、このような条件のもとでの砂移動形式はほぼ全面にわたってシートフロー状態となっていることが観察されたため、本研究ではこれらの場合は砂漣が消滅しているものと判断した。

これに対し、不規則振動流中では大規模な地形の発達はみられず、流速振幅の増加とともに砂漣の波形勾配が徐々に減少し、そのまま平坦な砂床状態へと移行した。また、砂漣の消滅限界付近では規則振動流中に比べて波長・波高ともに小さな二次元的な砂漣が形成されることが多かった。規則振動流中においても砂漣の発達の初期段階ではこれらと類似の小規模な二次元砂漣が形成されることから考えると、大きい底面摩擦応力条件の不規則振動流中でみられるこれらの砂漣は、大小の波の作用により砂漣が成長したり消滅しかかったりを繰り返すこと

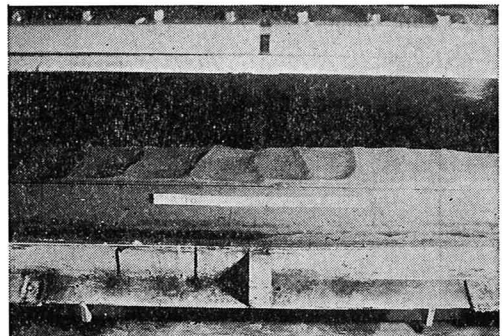
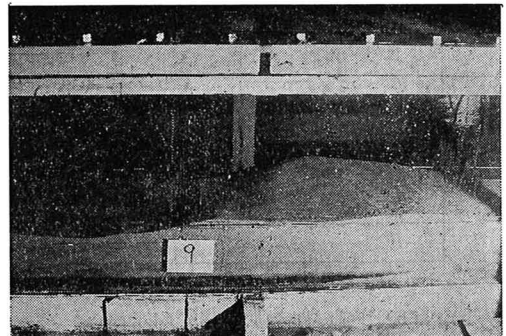
写真-1 不規則振動流下における底面形状 ($\lambda=9.8$ cm, $\eta=0.7$ cm)

写真-2 規則振動流下における底面形状 (砂漣消滅)

きな領域での不規則波条件での実験データが少なく十分な議論がされていなかったが、今回の実験により得られた砂漣の波長は従来の提案式よりやや小さめとなる傾向があることがわかる。図-5は砂漣の波形勾配とシールズ数との関係を示したものである。全般的に佐藤ら¹⁴⁾により導かれた実験式に従う傾向を示しているが、消滅限界付近ではちらばりが大きい様である。

4. 砂漣の消滅限界

本研究および従来の研究で得られたデータを用いてまず Manohar¹⁾ および Komar・Miller²⁾ らの整理法で砂漣の消滅限界を検討したところ、良好な結果が得られなかった。そこで本節では、砂漣の形状特性を整理するうえで重要な無次元量である d_0/D と Ψ とを用いて、砂漣の消滅限界をさらに詳細に検討する。図-6は正弦規則振動流に対して、横軸に d_0/D 、縦軸に Ψ をとって砂漣の存在、非存在を分類したものである。図中には今回の実験結果に加え、Bosman¹⁸⁾、Horikawa et al.⁴⁾ のデータも合わせて示してある。また、砂漣の波高の測定精度などを考えて、波形勾配が 0.05 以下の砂漣は実質的には有意でないと判断し、砂漣非存在のグループに分類した。図に示した条件の範囲内では砂漣の消滅限界は次式で示される図中の破線で表されることがわかる。

$$\Psi = 7.8(d_0/D)^{-1/3} \quad \text{.....(2)}$$

図-7は不規則振動流を用いた今回の実験結果を示したものである。なおシールズ数は流速変動を直接解析して得られる有義流速振幅をもとに算定してある。データ数は少ないものの不規則振動流に対しても式(2)で砂漣の消滅限界を良好に判定できるものと思われる。図-8は現地で観測されたデータに対して同様の整理を行ったものである。ただしこの場合は底面における流速変動が実測されていないため、 d_0 や Ψ は有義波高から微小振

幅波理論により算出したものを用いている。現地のデータはちらばりが大きい、式(2)ではほぼ砂漣の存在、非存在が分類できる様である。

最後に、図-9は今回の不規則振動流中のデータに対して砂漣の消滅を規定すると考えられるパラメーター Ψ ・

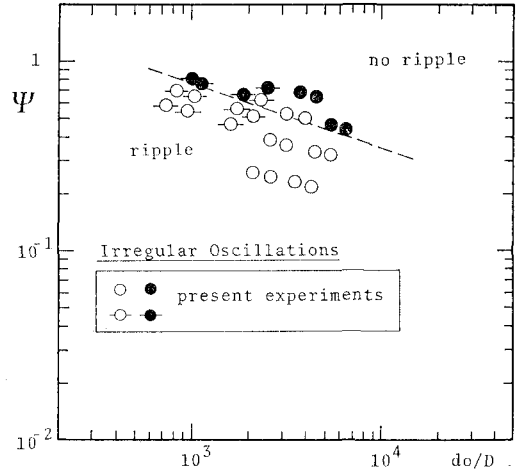


図-7 不規則振動流中での砂漣の消滅限界

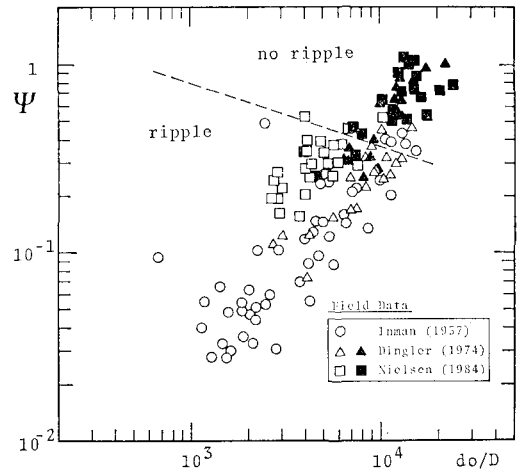


図-8 現地観測データにおける砂漣の消滅限界

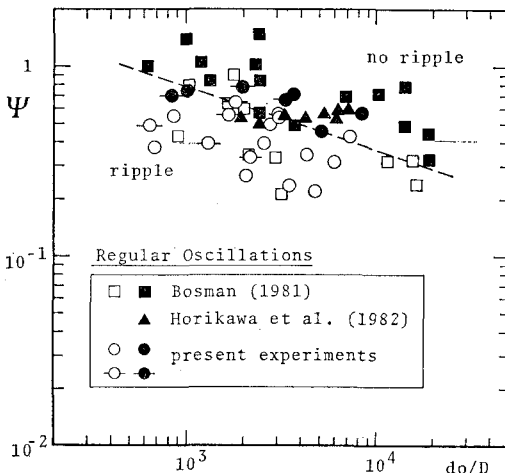


図-6 規則振動流中での砂漣の消滅限界

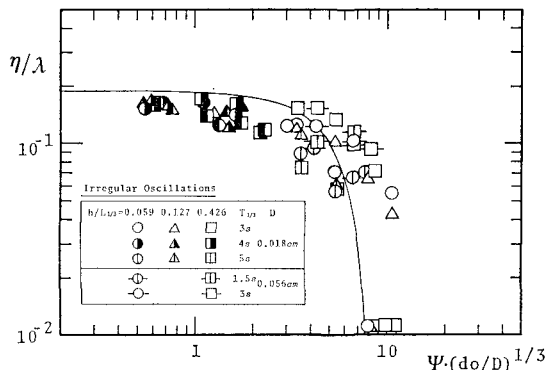


図-9 不規則振動流中における砂漣の波形勾配

$(d_0/D)^{1/3}$ と砂漣の波形勾配との関係を示したものである。図中の実線はデータをもとに引いた次の実験式を表している。

$$\eta/\lambda = 0.191 \{1 - [\Psi \cdot (d_0/D)^{1/3} / 7.8]^2\} \dots\dots\dots (3)$$

図-5 に比べて砂漣の消滅限界付近におけるデータのちらばりが改善されており、上式により不規則振動流中の砂漣の波形勾配をシールズ数の広い範囲にわたって精度良く評価できることがわかる。

5. 結 論

本研究では、任意波形振動流装置を用いて規則振動流および不規則振動流中における砂移動に関する実験を行ない、砂漣の消滅限界付近の大きな底面摩擦応力条件下での砂移動機構を検討することにより以下の結論を得た。

1) 不規則振動流中で形成される砂漣の形状は、底面流速変動の有義振幅値を用いて整理すると流速変動のスペクトル特性によらず統一的な評価ができる。

2) 大きな底面摩擦応力条件のもとでは、規則振動流中では通常の砂漣に比べて大規模な地形の形成を経て平坦な砂床へと遷移していくのに対し、不規則振動流下では大規模な地形の形成は顕著ではなく、砂漣の消滅限界直前まで波長・波高ともに小さな二次元的な砂漣が形成されていることが多い。

3) 振動流中における砂漣の消滅限界は、 d_0/D と Ψ との二つのパラメーターにより、現地データを含めて統一的に評価することができる。

参 考 文 献

1) Manohar, M.: Mechanics of bottom sediment move-

ment due to wave action, B.E.B. Tech. Memo., No. 75, 121 p., 1955.

- 2) Komar, P. D. and M. C. Miller: The initiation of oscillatory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stresses under waves, J. Sediment. Petrol., Vol. 45, No. 3, pp. 697~703, 1975.
- 3) Dingle, R. J.: Wave formed ripples in nearshore sands, Ph. D. Thesis, Univ. of California, 136 p., 1974.
- 4) Horikawa, K., A. Watanabe and S. Katori: Sediment transport under sheet flow condition, Proc. 18th ICCE, pp. 1335~1352, 1982.
- 5) Staub, C., I. G. Jonsson and I. A. Svendsen: Variation of sediment suspension in oscillatory flow, Proc. 19th ICCE, pp. 2310~2321, 1984.
- 6) 山下俊彦・沢本正樹・武田秀幸・横森源治: 移動床上の振動流境界層とシートフロー状砂移動に関する研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 297~301, 1985.
- 7) Bakker, W. T. and W. G. M. Van Kesteren: The dynamics of sediment transport under oscillating sheetflow condition, Proc. 20th ICCE, pp. 940~954, 1986.
- 8) Inman, D. L.: Wave generated ripples in nearshore sand, B.E.B. Tech. Memo., No. 100, 42 p., 1957.
- 9) Nielsen, P.: Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, Coastal Eng., Vol. 8, No. 1, pp. 51~72, 1984.
- 10) Nielsen, A. F. and A. D. Gordon: Sediment responses to natural waves, Proc. 19th ICCE, pp. 1799~1815, 1984.
- 11) 佐藤慎司・美谷邦章・渡辺 晃: 不規則振動流下における砂漣形状と漂砂量, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 228~232, 1986.
- 12) Sato, S. and K. Horikawa: Laboratory study on sand transport due to asymmetric oscillatory flows, Proc. 20th ICCE, pp. 1481~1495, 1986.
- 13) Bosman, J. J.: Bed behavior and sand concentration under oscillatory water motion, Delft Hydraulics Lab. M1695-1, 49 p., 1981.
- 14) Sakakiyama, T., T. Shimizu, R. Kajima, S. Saito and K. Maruyama: Sand ripples generated by prototype waves in a large wave flume, Coastal Eng. in Japan, Vol. 28, pp. 147~160, 1985.