

不規則振動流下における砂漣形状と漂砂量

佐藤 慎司*・美谷 邦章**・渡辺 晃***

1. 序 論

波運動下で形成される砂漣の形状特性や砂漣上での漂砂量については、規則波に関しては豊富な研究例があるものの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最近になって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に近い条件でのデータを蓄積することが重要である。

波運動下における砂漣の形状に関して、本間ら¹⁾は砂漣の波長および波高と水理量との関係を整理し、底質粒径ごとに成立する経験式を提案した。その後振動流装置を用いた実験が精力的に行なわれ、Kaneko²⁾、Vongvissomjai³⁾、Nielsen⁴⁾ はこれらの広範な条件でのデータを含めて統一的な整理を試みている。しかし波の不規則性が砂漣の形状特性に与える影響は、制御された条件のもとでのデータが少ないこともあって十分には明らかにされていない。また、不規則波のもとでの砂漣上の漂砂量についても大塚ら⁵⁾、入江ら⁶⁾、佐藤ら⁷⁾の研究によりその特性が明らかにされつつあるが、不規則波の非線形性が net の漂砂量に及ぼす効果についての定量的解明はまだ不十分である。

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のもとで発達する砂漣の形状を測定し、砂漣の形成に及ぼす波の不規則性の影響について考察するとともに、これまでに発表されたデータを含めて砂漣形状を再整理し、その統一的な整理法を提案する。さらに不規則波を構成する成分波の二次干渉を考慮して非線形波をシミュレートし、弱い非線形性を有する不規則振動流のもとでの砂の移動機構と net の漂砂量について考察することを目的とする。

2. 実験装置および方法

2.1 砂漣の形状

振動流装置内に長さ 160 cm の砂床部を設け、豊浦標

準砂(中央粒径 $D=0.018$ cm)を平坦に敷きならした。振動流を作用させ、砂床部の地形が定常に達した時点でその地形変化を水路横断方向にとった 3 つの測線に対して、連続式砂面計で測定した。実験条件については、まず周期 3.9 s の正弦振動流を用いた実験を行なった後、これらの条件と同一の有義周期、有義流速値を持つような不規則振動流のもとでの実験を行なった。装置に入力する不規則信号の作成に際しては、沖波のスペクトルを Bretschneider-光易型で与え、これより振幅が等しく周期の異なる N 個の成分波を決定した。そして、あらかじめ想定した水深における底面流速変動を微小振幅波理論により計算し、これらを重ね合わせるにより入力波形とした。流速変動のスペクトル形状が異なる広範な条件で実験を行なうために、水深は 10 m, 2 m, 0.5 m の 3 通りを想定し、3 種類の不規則信号を作成した。対応する相対水深を有義周期をもとに計算すると、それぞれ $kh=2.67, 0.80, 0.37$ である。これらの線形振動流を用いた実験は、規則波に対して 4 ケース、不規則波に対しては 12 ケース行なった。

2.2 net の漂砂量

波の不規則性および非線形性が底質の移動機構におよぼす影響を明らかにするために、スペクトルの二次干渉理論により弱い非線形性を含んだ不規則波をシミュレートし、砂漣形状および net の漂砂量の測定実験を行なった。非線形振動流の作成に際しては、2.1 で述べた方法である水深における N 個の成分波の諸元を決定し、さらにこれら成分波相互の二次干渉を考慮することにより非線形性の効果をとりのぞいた。実際の計算では $N=20$ とし、2.1 で対象としたすべてのケースに対してそれぞれ非線形波の計算を行なった。このようにして作成した振動流の流速変動の波形の一例を図-1 に、パワースペクトルの一例を図-2 に示す。これら非線形不規則波の統計的性質を解析すると、表面波形についてはそのひずみ度が正值となるものが多いが、底面流速波形(岸向きを正)では二次干渉の結果生じる短周期成分波よりも長周期成分波の影響が強く、今回対象とした条件ではそのひずみ度はすべて負値となっている。不規則波のもとでの底面流速を測定した実験例においても碎波点以深では

* 正 会 員 工 修 東京大学助手 工学部土木工学科

** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

*** 正 会 員 工 博 東京大学教授 工学部土木工学科

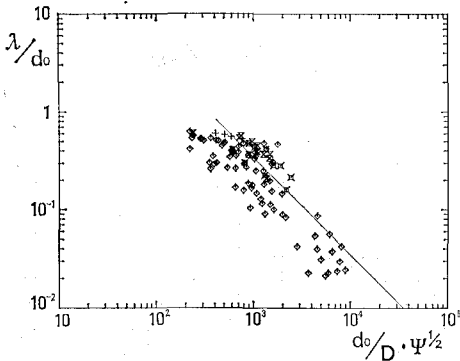


図-4 規則振動流中における砂漣の波長 (三次元砂漣)

$$\lambda/d_0 = 1.4(d_0/D \cdot \Psi^{1/2})^{-0.146} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda/d_0 = 350(d_0/D \cdot \Psi^{1/2})^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

図-5 は造波水槽で得られたデータをまとめたものである。ただし、この場合は砂漣の二次元性を明記したデータが少ないので区別していない。図-3, 4, 5 より、規則振動流中で形成される砂漣の波長は、広範な条件にわたって式(1)、式(2)で表わされることがわかる。

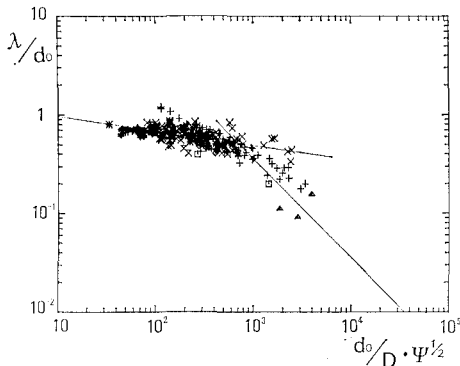


図-5 規則振動流中における砂漣の波長 (造波水槽)

不規則振動流に対しても d_0 および Ψ を代表波を用いて評価することにより同様の整理が可能である。図-6 は不規則波のもとでの海浜変形実験で得られたデータと振動流装置でのデータをあわせて有義波の諸元を用いて整理したものである。データ数が少ないので実験装置や砂漣の二次元性による分類はできないが、 λ/d_0 は $d_0/D \cdot \Psi^{1/2} < 500$ では式(3)、 $d_0/D \cdot \Psi^{1/2} > 500$ では先に示した式(2)であらわされることがわかる。

$$\lambda/d_0 = 3.68(d_0/D \cdot \phi^{1/2})^{-1.28} \dots\dots\dots (3)$$

規則波の場合と不規則波の場合とを比較すると、 $d_0/D \cdot \Psi^{1/2}$ の値が大きい領域では規則振動流、不規則振動流とも同程度の波長の砂漣が発達するが、 $d_0/D \cdot \Psi^{1/2}$ の値が小さな領域では不規則振動流の方が波長のやや大きな砂漣が形成されていることがわかる。

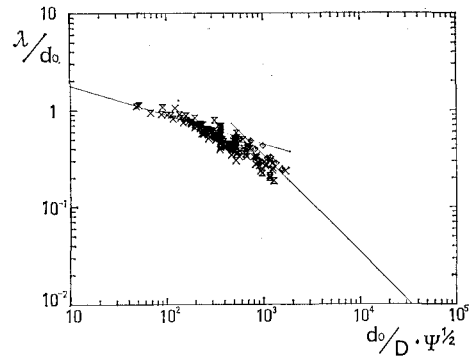


図-6 不規則振動流中における砂漣の波長 (室内実験)

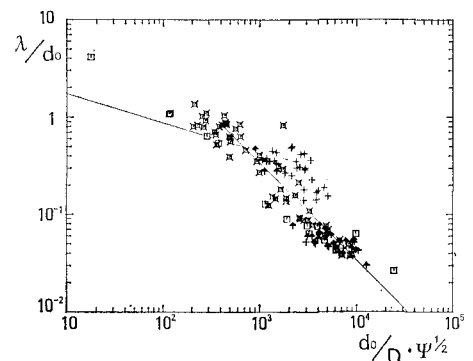


図-7 不規則振動流中における砂漣の波長 (現地観測)

図-7 は現地で観測されたデータを整理したものである。この場合も d_0 や Ψ の値は有義波の諸元に換算して評価した。ただし、スペクトルが顕著な双方向型となっている場合や、定常な砂漣が形成されていないと思われるデータは除外した。室内実験のデータに比べてちらばりが大きいものの統一的な整理ができています。

3.2 砂漣の波高

砂漣の波高に関しては Nielsen⁴⁾ も指摘しているように、砂漣の波形勾配とシールズ数をパラメータにとって整理するとまとまりの良い結果が得られた。振動流装置を用いて得られたデータを整理したものが図-8, 9 であり、ここでも発達する砂漣の二次元性で分類してある。ただし、Bosman¹⁴⁾ のデータは砂漣波高の測定精度に疑問があるため除いてある。砂漣の波形勾配は、三次元砂漣の方が小さくなり、それぞれ式(4)、式(5)で良く近似される。

$$\eta/\lambda = 0.191(1 - (\Psi/0.6)^2) \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta/\lambda = 0.158(1 - (\Psi/0.6)^2) \dots\dots\dots (5)$$

不規則振動流に対するデータをまとめたのが図-10 であり、規則振動流中のものと比較すると波形勾配は小さくなり、シールズ数との関係は次式で表される。

$$\eta/\lambda = 0.191(1 - \Psi/0.6) \dots\dots\dots (6)$$

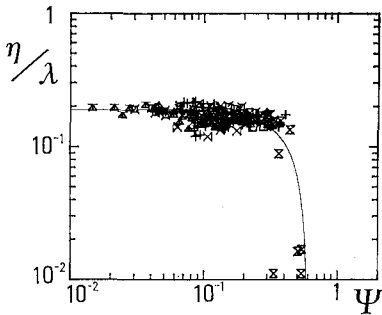


図-8 規則振動流中における砂漣の波形勾配(二次元砂漣)

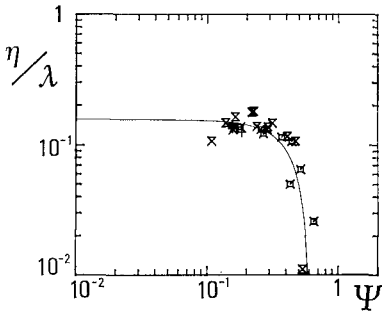


図-9 規則振動流中における砂漣の波形勾配(三次元砂漣)

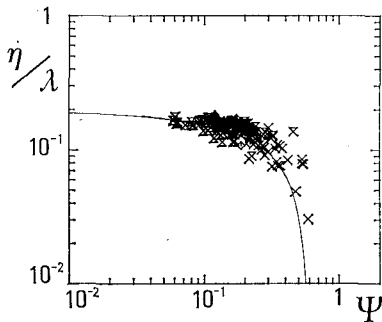


図-10 不規則振動流中における砂漣の波形勾配(室内実験)

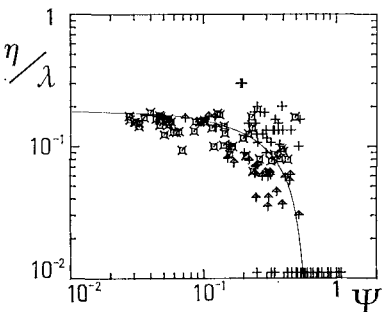


図-11 不規則振動流中における砂漣の波形勾配(現地観測)

図-11 は現地のデータを同様に整理したものであり、この場合も波形勾配の小さな砂漣が多く見受けられる。データのちらばりは大きいものの現地条件を含めて不規則振動流下での砂漣の波形勾配は式(6)で表され、規則振動流中のものより平均して約 20% 程度小さくなることとがわかる。

4. net の漂砂量

非線形振動流のもとでも今回の実験条件の範囲ではほぼ対称な砂漣が形成され、その形状は 3. で述べた方法で同様に整理できることが確認された。不規則振動流中での漂砂量に関して佐藤ら⁷⁾は、有限振幅波理論による流速波形を接続して非線形性の強い条件に対する実験を行ない、net の砂移動は冲向きとなることを示している。今回の実験で用いた非線形振動流では流速波形の非対称性を検討してみると、二次干渉の結果生じる高周波成分は岸向き流速値を大きくするのに対して、低周波成分については波高の大きな波のもとでは平均水位の低下に相当する長周期波が誘起されるため冲向き流速値を大きくする効果がある。これらの相反する作用の結果、net の砂移動は条件に応じて方向が複雑に変化し、岸向きとなったケースは 6 ケース、冲向きは 5 ケースとなった。

図-12 は無次元化した net の漂砂量 $\Phi (=Q/(w_s D))$: Q は体積漂砂量、 w_s は底質の沈降速度)の絶対値と流速変動の有義値をもとに評価したシールズ数との関係を示したものである。図中の実線は大塚ら⁵⁾が不規則波による海浜変形実験の結果をもとに提案した式を表しており、今回の実験および佐藤ら⁷⁾の実験で得られたデータもほぼ同式に従っている。ただし、発達する砂漣の二次元性による系統的な分散が見られること、今回の実験においてはかなり小さなシールズ数のもとでも有意な漂砂量が生じていることなど同式のみでは表現できない部分もあり、これらについては今後さらにデータを蓄積する

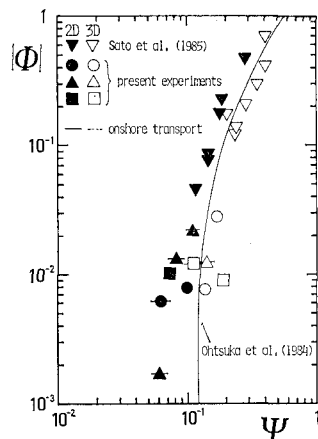


図-12 net の漂砂量とシールズ数との関係

とともに詳細な検討を行う必要がある。

図-13 は今回の実験データに対して net の漂砂量と流速波形のひずみ度との関係を示したものである。相対水深が大きな条件では、シーلز数およびひずみ度が大きくなるにつれて砂漣が三次元的になり、net の漂砂量も岸向きから沖向きへと遷移していくのに対して、相対水深の小さい条件では複雑な挙動を示している。相対水深の小さな条件に対しては、二次干渉理論の適用に無理があるものと思われ、より合理的な非線形不規則波のシミュレーションの方法を別途検討する必要がある。

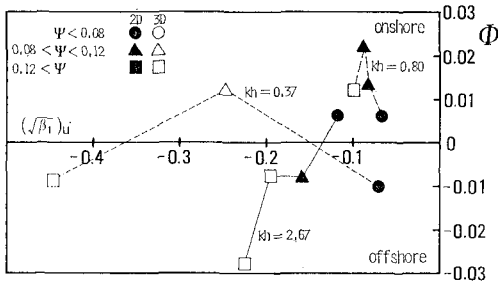


図-13 net の漂砂量と流速波形のひずみ度との関係

5. 結 論

本研究では規則振動流および不規則振動流のもとで形成される砂漣形状と漂砂量に関する移動床実験を行ない、以下の結論を得た。

(1) 波運動下で形成される砂漣の形状は、 d_0/D と Ψ との2つのパラメータを用いて統一的に整理できる。

(2) 不規則指動流中で形成される砂漣の形状は、規則振動流中のものと比べると波長は同程度であるが、波高は小さくなる。

(3) 弱い非線形性を持った不規則振動流中での net の漂砂量はシーلز数および流速波形のひずみ度によりその特性を知ることができる。

今後はさらに現地条件に近い高い底面摩擦応力下での不規則振動流中で形成される砂漣の特性を明らかにするとともに、相対水深の小さな条件での非線形性の評価法を検討していくことが必要である。

最後に、本研究は文部省科学研究費(一般研究(A)): 研究代表者 堀川清司)による研究成果の一部であることを付記し謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・堀川清司・鹿島遼一: 第11回海岸工学講演会, pp. 159~168, 1964.
- 2) Kaneko, A.: 九州大学学位論文, 172 p., 1981.
- 3) Vongvisessomjai, S.: J. Hydraulic Eng. Vol. 110, No. 3, pp. 247~266, 1984.
- 4) Nielsen, P.: J.G.R., Vol. 86, pp. 6467~6472.
- 5) 大塚行則: 東京大学大学院修士論文, 150 p., 1984.
- 6) 入江 靖: 東京大学大学院修士論文, 153 p., 1985.
- 7) 佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃: 第32回海岸工学講演会, pp. 283~287, 1985.
- 8) 嶋田昌義: 東京大学卒業論文, 116 p., 1982.
- 9) Carstens, M. R., F. M. Neilson and H. D. Altinbilek: CERC Tech. Memo., No. 28, 78 p., 1969.
- 10) Mogridge, G.R. and J.W. Kamphuis: Proc. ICCE, pp. 1123~1142, 1972.
- 11) Nakato, T., F.A. Locher, J.R. Glover and J.F. Kennedy: Proc. ASCE, Vol. 103, No. WW1, pp. 83~100, 1977.
- 12) Lofquist, K.E.B.: CERC Tech. Paper, No. 78-5, 101p., 1978.
- 13) Du Toit, C.G. and J.F.A. Sleath: J.F.M., Vol. 112, pp. 71~96, 1981.
- 14) Bosman, J. J.: Delft Hydraulics Lab., M1695-1, 49 p., 1981.
- 15) 橋本 宏・辻本剛三・早川典生: 第29回海岸工学講演会, pp. 244~248, 1982.
- 16) 浜本健一: 東京大学大学院修士論文, 122 p., 1982.
- 17) 半田真一: 東京大学卒業論文, 112 p., 1982.
- 18) Sleath, J.F.A.: J.H.R., Vol. 20, No. 5, pp. 439~452, 1982.
- 19) 鹿島遼一: 東京大学大学院修士論文, 75 p., 1964.
- 20) 松梨順三郎・大味啓介: 第11回海岸工学講演会, pp. 169~174, 1964.
- 21) Kennedy, J.F. and M. Falcon: M.I.T. Rep. No. 86, 55 p., 1965.
- 22) 細井正延・木田三次: 第20回海岸工学講演会, pp. 327~331, 1973.
- 23) Dingle, J.R.: Ph.D. Thesis, Univ. of California, 136 p., 1974.
- 24) Tunstall, E. B. and D. L. Inman: J.G.R., Vol. 80, No. 24, pp. 3475~3483, 1975.
- 25) 板東浩三: 東京大学大学院修士論文, 53 p., 1978.
- 26) Nielsen, P.: Ser. Paper 20, Tech. Univ. of Denmark, 160p. 1979.
- 27) Miller, M. C. and P. D. Komar: J. Sediment. Petrol., Vol. 50, No. 1, pp. 173~182, 1980.
- 28) Sawamoto, M., T. Yamashita and T. Kitamura: Proc. ICCE, pp. 282~296, 1982.
- 29) 早川典生・多仁正芳・涌井正樹: 第32回海岸工学講演会, pp. 288~292, 1985.
- 30) Inman, D. L.: B. E. B. Tech. Memo., No. 100, 42 p., 1957.
- 31) Miller, M. C. and P. D. Komar: J. Sediment. Petrol., Vol. 50, No. 1, pp. 183~191, 1980.
- 32) Nielsen, P.: Coastal Eng., Vol. 8, No. 1, pp. 51~72, 1984.