

波と流れによる砂移動の形態とその発生領域について

Ahmad Sana*・田 中 仁**・Dang Van To***

1. 序 論

波による漂砂の形態はシールズ数などを用いて分類され、外力の増加に伴い移動なしの状態から、移動限界・砂漣発生域を経てシートフロー領域に到ることが知られている。同様の分類は定常流下の砂移動現象に対しても行われている。これに対して、波と流れによる漂砂形態については、その重要性にもかかわらず現在までにこの種の研究はほぼ皆無である。唯一、Arnott and Southard (1990) による研究があるが、一種類の底質を用いた自身のデータのみに基づいており、また無次元表示がなされていないため、提案された図表の普遍性には疑問が残るところである。

この様な背景から、従来の共存場漂砂量算定式では特に移動形態を明確にしないままで、移動量を無次元掃流力の関数として定式化するものが多い。漂砂形態を明確に分類した上で、それぞれに対する漂砂量を検討して行くことにより、より精度の高い漂砂量則が得られるものと考えられる。

そこで、本研究では著者らのデータ及び現在までに行われたデータを収集し、これを解析することにより砂移動の発生形態を分類し、それらの領域区分について検討を行う。また、これに関連して波・流れによる底質移動限界および砂漣形状の表示式に関する検討を行った。最近、著者の一人は全ての flow regime に適用できる完全陽形式の波・流れ共存場の摩擦係数算定式を提案しており (田中・トゥー, 1993), 本研究の解析には同式を用いている。

2. 実験データとデータの解析方法

波・流れ共存下の砂移動実験のデータを収集した (表-1)。これらは、二次元造波水路での著者らの実験値や他の研究者のデータ、定常流と振動流が同方向に進行する条件下での振動流装置による実験結果、さらに 90°で交差する振動平板と一方向流による実験データからなる。こ

表-1 実験データ

実 験 者	実験装置	交差角	実 験 項 目		
			移動限界	砂 漣	シートフロー
Hammond & Collins (1979)	振動平板	0°	○		
Tanaka & Shuto (1981)	造波水路	180°	○		
Young & Sleath (1989)	振動平板	90°	○		
Inman & Bowen (1963)	造波水路	0°		○	
Abou-Seida (1964)	造波水路	0°		○	
田中・小笹・小笠原 (1973)	造波水路	0° 180°		○	
田中・首藤 (1984)	造波水路	180°		○	
Gray et al. (1991)	造波水路	0°		○	
Van Rijn et al. (1993)	造波水路	0° 180°		○	
Arnott & Southard (1990)	振動流	0°	○	○	○

れらのうちで、交差条件のもとで行われたものは Young and Sleath (1989) の移動限界実験のみである。

上記のデータのうち、振動平板および U 字管振動流装置による実験については波動成分流速の値が論文中に示されている。造波水路でのそれについては、論文に記された波高、周期、水深を用い微小振幅波理論により算定した。ただし、Gray et al.および Van Rijn et al.は不規則波により実験を行っているので、有義波の諸元を用いて波動による流速振幅を推定した。

剪断力の算定には最近提案された全 flow regime に適用できる完全陽形式摩擦係数算定式 (田中・トゥー, 1993) を用いた。ここで、相当粗度としては底質粒径を用いた。また、U 字管振動流装置によるデータの解析に際しては、観測部の砂面・上板の間隔の半分を水深 z_h とした。

* 正会員 M.Eng. 東北大学助手 工学部土木工学科
 ** 正会員 工 博 東北大学助教授 工学部土木工学科
 *** M.Eng. ホーチミン市大学講師 海洋物理学科

3. 波・流れによる砂移動形態

3.1 砂移動形態と発生領域

表一に示された実験結果から砂移動形態は、(1)移動なし、(2)砂漣発生域、(3)シートフローに分類された。Arnott and Southard (1990) はさらに砂漣発生域を、二次元砂漣、小規模三次元砂漣、大規模三次元砂漣などと細分化している。なお、振動流下においても同様な現象が観察されることが佐藤ら (1985, 1987) により報告されている。Arnott らは自身のデータをもとに発生領域の regime 図を提案しているが、無次元表示されておらず粒径の効果を加味したものとなっていない。

さて、現在までに漂砂移動形態の分類のためのパラメータとして、幾つかの提案がなされている。代表的なものとしては、Komar and Miller (1975)、金子 (1980)、柴山・堀川 (1982)、土屋・坂野 (1987) などがある。波動のみのケースは共存場のひとつの極限であるので、この極限において既往の成果と矛盾の無い表示法を選定する必要がある。先に記した波動場での研究のうち、前三者は無次元パラメータとして波動流速が含まれるものを用いており、共存場への拡張性に難がある。これに対して、土屋らは無次元掃流力、無次元粒径を用いており、これらは容易に共存場にも拡張できる。そこで、以下では土屋らの成果を参考にして、共存時の最大せん断応力を基にした Shields 数 τ^* と無次元粒径 S_* の関係として整理することとする。ここで、それぞれの定義は以下の様である。

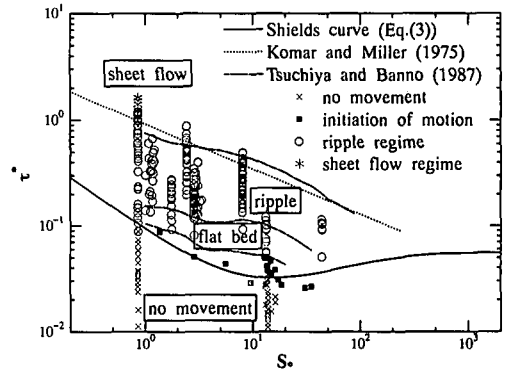
$$\tau^* = \frac{u_{\max}^2}{sgd} \quad (1)$$

$$S_* = \frac{\sqrt{sgd^3}}{4\nu} \quad (2)$$

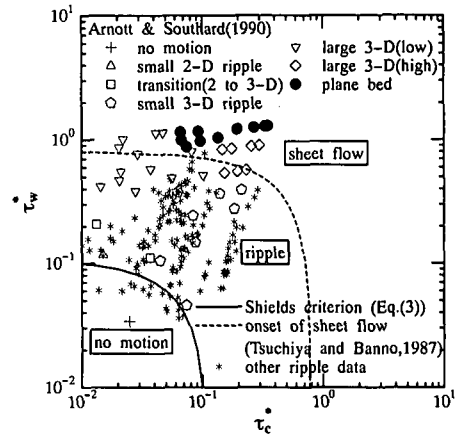
ここに、 $u_{\max}$ ：共存場での最大摩擦速度、 s ：底質の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：底質粒径、 ν ：動粘性係数である。

上記の2つの無次元量の関係でまとめた結果が図一である。ただし、移動限界のデータについては、図が煩雑になることを避けるために研究者ごとの平均値のみを図示し、詳細は次節に示す。また、Arnott and Southard (1990) は前述のように砂漣についてより詳細な分類をしているが、ここでは一括して示した。

τ^* および S_* を用いることにより、明瞭に上記の領域に分類されていることが判る。現在まで、共存場の砂移動現象に対してこの様な領域区分図が描かれたことは全くなかった。図中には波動場に対して提案されている各 regime の境界を示した。共存下でのシートフロー発生条件は、Komar and Miller (1975)、土屋・坂野 (1987) と非常に近い位置にあることがわかる。なお、土屋らに



図一 τ^* による砂移動形態の分類



図二 τ_w^* と τ_c^* による砂移動形態の分類

による砂漣発生前の平坦床領域に属するデータは見られなかった。

より詳細な傾向を検討するために、各データについて無次元掃流力の波動成分 τ_w^* と定常流成分 τ_c^* によりプロットした結果が図二である。図中には Arnott らの底質 ($S_* = 0.859$) に対する移動限界条件 (後述の式 (3) による)、及び図一の土屋らによるシートフロー発生条件式を共存場に拡張して図示した。すなわち、図一で $S_* = \text{const.}$ であれば、共存場での区分条件が $\tau^* = \text{const.}$ であるとし、 $\tau^* = \tau_w^* + \tau_c^*$ からこの条件を図二に示すことが出来る。Arnott らのデータについては砂漣の詳細な分類結果も示す。他の研究者の砂漣発生データについてはこの様な分類がなされていないので、まとめて * 印で示した。

砂漣発生域の * 印のデータはほぼ二つの曲線にはさまれる領域に位置している。また、Arnott らのシートフローのデータはいずれも土屋らの線より上方に位置する

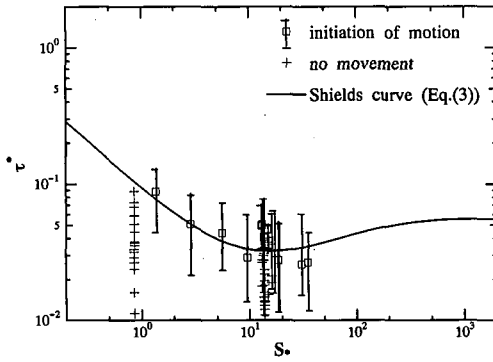


図-3 底質移動限界

が, Arnott らの大規模三次元砂漣データのうちでこの線より上にプロットされるものも幾つか見られる。佐藤ら (1987) による振動流下での実験によれば, 大規模地形が見られる場合でも, 砂移動形式はほぼシートフロー状態になっているとの報告があり, ここに示した▽印の一部, 特にシールズ数の大きいデータはシートフローに分類すべきである可能性が高い。

以上の結果から, 土屋らの振動流場における砂移動形態の領域区分図において振動流のシールズ数を波と流れによるそれに置き換えたものは, 共存場においても適用性が高いものと判断される。

3.2 移動限界

図-3 には移動限界データのばらつきの範囲と平均値とを図示した。また, シールズ曲線を実線で示した。ここでは, Tanaka and Dang (1995) が得た簡便な式,

$$\tau_{cr}^* = 0.055(1 - \exp(-0.09 S_*^{5.58})) + 0.09 S_*^{-0.72} \quad (3)$$

を図中に示した。

定常流や波動場に比べてばらつきが大きいものの, 平均的には共存場に対してもシールズ曲線を適用出来ることがわかる。特に, 左端の領域で右下がりの傾向はシールズ曲線と良く一致している。また, 図-1 で「移動なし」のデータは確かにこの曲線の下方に位置している。なお, 図-1, 図-2 によれば, 図の右側の粗な底質による実験が全く行われていないことがわかる。

3.3 砂漣形状

共存場における砂漣形状については渡辺ら (1989) による報告もあるが, ここでは, 著者の一人により提案されている砂漣波長 λ の算定式 (田中・首藤, 1984) との比較を行った。式の形は以下のようである。

$$\frac{\lambda}{d} = 0.65 \alpha \frac{d_0}{d} \quad \left(\alpha \frac{d_0}{d} \leq 1600 \right) \quad (4)$$

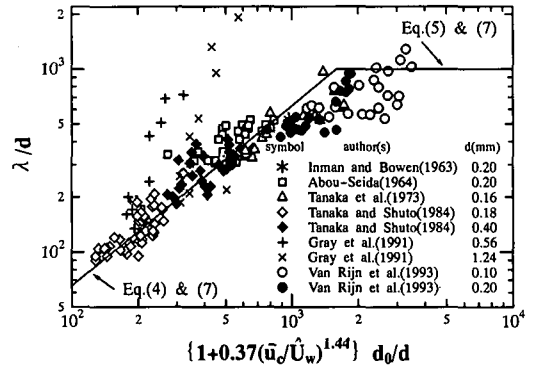
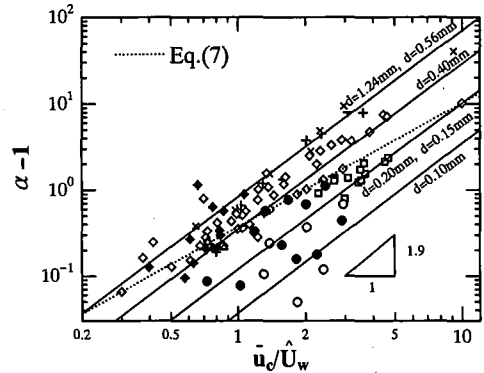


図-4 従来の算定式による砂漣波長

図-5 式 (4), (5) 中の係数 α

$$\frac{\lambda}{d} = 1000 \quad \left(\alpha \frac{d_0}{d} > 1600 \right) \quad (5)$$

上式との比較を行った結果が図-4 である。ここで, d : 底質粒径, d_0 : 波動による底面水粒子軌道全振幅 (式 (6)) であり, また α は式 (7) で与えられる。

$$d_0 = \frac{H}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (6)$$

$$\alpha = 1 + 0.37 \left(\frac{\bar{u}_c}{\bar{U}_w} \right)^{1.44} \quad (7)$$

ここで, H : 波高, h : 水深, L : 波長, $\bar{u}_c$: 定常流の断面平均流速, $\bar{U}_w$: 波動境界層外縁での波動流速の振幅である。上式は波動場で成立する Komar and Miller (1980) の式を共存場に拡張したものであり, 式 (7) が重畳した流れの効果を表す。

図-4 中で実線が式 (4), (5) である。Gray et al. (1990) による粗砂のデータ (図中の $\times, +$) は実験式の上方に位置し, 一方, Van Rijn et al. (1993) による細砂のデータ (図中の $\circ$) はこれと逆の傾向を示していることがわかる。このことから, 式 (7) では粒径の効果

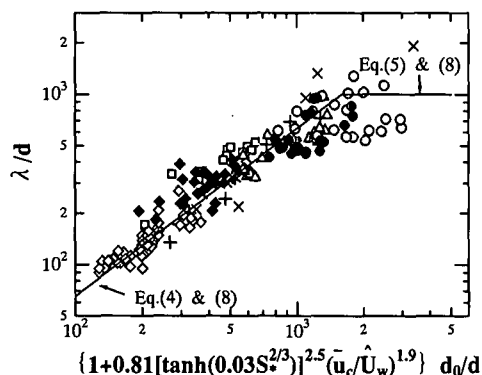


図-6 新しい算定式による砂漣波長

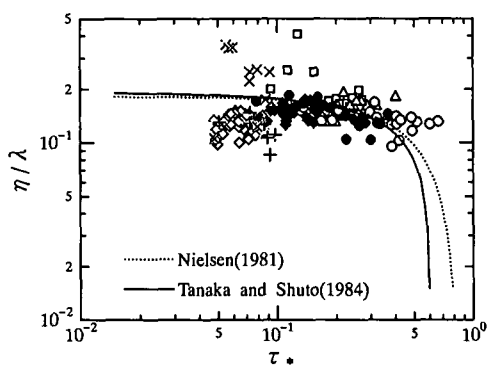


図-7 砂漣波形勾配

を十分に表現していないことが推察される。そこで、この点を考慮して新たな式を提案することとする。

前報(田中・首藤, 1984)と同様に係数 α を算定し直した結果を図-5に示した。前報では式(7)の様に α を $\bar{u}_c/\bar{U}_w$ のみの関数として表現したが、さらに図より粒径への依存性が見られる。そこで、新たな式形として次式を得た。

$$\alpha = 1 + 0.81 \left\{ \tanh(0.03 S_*^{2/3}) \right\}^{2.5} \left(\frac{\bar{u}_c}{\bar{U}_w} \right)^{1.9} \dots\dots\dots (8)$$

上式中の S_* は式(2)で定義された無次元量である。上式を式(4), (5)に代入したものが新たな算定式となる。これによる算定結果と実験値との比較を行った結果が図-6であり、図-4に比べはるかに改善されていることが判る。

また、砂漣の波形勾配とシールズ数との関係を示したものが図-7である。特にGray et al. (1990)のデータのばらつきが大きい様であるが、平均的な波形勾配は0.15程度であり、この値を用いれば λ の算定を介して η が算定可能となる。

4. 結 語

波と流れによる砂移動の形態を分類し、その発生領域を推定するための図表を得た。このうち、移動限界条件については、ばらつきは大きいもののシールズ曲線に近い傾向を示す。また、砂漣の波長、波高を算定するための実験式を導いた。全体的に粗砂を用いた実験並びに交差する条件下での実験データが少ないことが判明した。今後、これらについてさらに資料を蓄積していくことが必要であろう。

謝辞：本研究の公表に際して、小川記念基金の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 金子 新 (1980): 振動流中で形成されるサンド・リップルの波長, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 207-210.
- 佐藤慎司・伊藤春起・渡辺 晃 (1985): 非対称振動流下における砂の移動機構と漂砂量に関する実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 283-287.
- 佐藤慎司・杉浦志樹・渡辺 晃 (1987): 不規則振動流中における砂移動機構と砂漣の消滅限界, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 246-250.
- 柴山知也・堀川清司・矢吹信喜・半田真一 (1982): 二次元海浜変形予測手法の実験による検討, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 249-253.
- 田中則男・小笹博昭・小笠原 昭 (1973): 波と流れによる砂移動に関する実験, 運輸省港湾技術研究所報告, 第12巻, 第4号, pp. 3-12.
- 田中 仁・首藤伸夫 (1984): 河口部の砂移動に関する実験および現地観測, 第28回水理講演会論文集, pp. 137-142.
- 田中 仁・アウン トゥー (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No. 467/II-23, pp. 93-102.
- 土屋義人・坂野雅人 (1987): 漂砂形態とその発生領域, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 222-226.
- 渡辺 晃・先瀬正成・磯部雅彦 (1989): 波・流れ共存場における砂漣形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 299-303.
- Abou-Seida, M. M. (1964): Sediment transport by waves and current, Tech. Rep., No. HEL-2-7, Univ. California, Berkeley, 34 p.
- Arnott, R. W. and J. B. Southard (1990): Exploratory flow-duct experiments on combined-flow bed configurations and some implications for interpreting storm-event stratification, J. Sed. Pet., Vol. 60, No. 2, pp. 211-219.
- Gray, C., J. Fredsøe, and R. Deigaard (1991): Flume experiments on bed wave shape and sand transport by currents and waves, Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Eng., Tech. Univ. Denmark, Prog. Rep., No. 74, pp. 7-20.
- Hammond, T. M. and M. B. Collins (1979): On the threshold of transport of sand-sized sediment under the combined influence of unidirectional and oscillatory flow, Sedimentology, Vol. 26, pp. 795-812.
- Inman, D. L. and A. J. Bowen (1963): Flume experiments on sand transport by waves and currents, Proc. 8th Int. Conf. Coast. Eng., pp. 137-150.
- Komar, P. D. and M. C. Miller (1975): The initiation of oscil-

- latory ripple marks and the development of plane-bed at high shear stress under waves, *J. Sed. Pet.*, Vol. 45, pp. 697-703.
- Miller, M. C. and P. D. Komar (1980): Oscillation sand ripples generated by laboratory apparatus, *J. Sed. Pet.*, Vol. 45, No. 1, pp. 173-181.
- Tanaka, H. and N. Shuto (1981): Friction coefficient for a wave-current coexistent system, *Coast. Eng. in Japan*, Vol. 24, pp. 105-128.
- Tanaka, H. and V. T. Dang (1995): Initial motion of sediment under waves and wave-current combined motions, *Coast. Eng.* (in press)
- Van Rijn, L. C., W. C. Nieuwjaar, T. V. D. Kaay, E. Nap, and A. V. Kampen (1993): Transport of fine sands by currents and waves, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 119, No. 2, pp. 123-143.
- Young, J. S. L. and J. F. A. Sleath (1989): Initial motion in combined wave and current flows, *Proc. 21st Int. Conf. Coast. Eng.*, pp. 1140-1151.
-