

交差する波と流れによる底面剪断力に関する研究

Ahmad Sana*・田中 仁**

1. はじめに

三次元海浜変形モデルでは、波と流れによる摩擦係数により剪断力を計算し、これから得られる漂砂量を用いて地形予測を行う。よって、抵抗則の精度が地形予測精度に直接的に反映されることになる。

ところで、波と流れによる境界層理論の検証に用いられるデータは、直線開水路で得られたものが多く（例えば、Bakker・Van Doorn, 1978; Brevik・Aas, 1980; Brevik, 1980; Kemp・Simons, 1982, 1983; 浅野・岡本・岩垣, 1983; スパラティドら, 1991）、交差条件での実験はきわめて少ない。これは、平面水槽を用いた大規模な実験が困難であることによる。三次元海浜変形モデルを適用する碎波帯内や河口近傍において、一般に波と流れが交差していることを考えると、直線水路でのデータによる境界層理論の検証は十分ではない。交差する波・流れ場においては境界層が三次元的構造を有し、一周期内に剪断応力の作用方向が二次元平面上で複雑に変化するのに対し、直線開水路中では順・逆の2方向にしか変化しないからである。交差する波と流れによる底質移動量・移動方向はこのような複雑な剪断応力の変化特性と密接に結びついており、海浜地形変化予測の精度を上げるためには、交差する条件での実験値により総合的な境界層理論の検証を行うことが望まれる。

香取ら（1983）は交差する振動流・一方向流発生装置を開発し、流れ場や砂移動に関する実験を行ったが、各種抵抗則の検証を行うのに十分なデータは蓄積されていない。幸い、ここ約2～3年の間に交差条件下での実験の報告が幾つかなされている（Sleath, 1990; Simons et al., 1992; Arnskov et al., 1993）。そこで、本研究ではこれらの斜交する波・流れの実験データを収集し、これをもとに理論値との比較を行った。

2. 実験データとその解析方法

本研究で用いた実験データとしては、交差角90°で行われたSleath (1990), Simons et al. (1992), および交差角

90°, 108°, 72°でのArnskov et al. (1993)である。剪断応力測定方法はそれぞれ、流速分布(対数則)、シアメータ、ホットフィルムである。これらのうち、Sleathの実験は厳密には波・流れの実験ではなく、波動の代わりに振動平板による振動流を発生させている。他の二者は平面水槽により交差実験を行っている。実験条件は、 $0.6 \text{ cm} \leq H \leq 14 \text{ cm}$, $1.0 \text{ s} \leq T \leq 2.5 \text{ s}$, $40 \text{ cm} \leq z_n \leq 70 \text{ cm}$, $12.5 \text{ cm/s} \leq \bar{u}_c \leq 40.0 \text{ cm/s}$, $0.054 \text{ cm} \leq k_s \leq 2.025 \text{ cm}$ であり、広い実験範囲をカバーしている。ここで、 H : 波高, T : 周期, z_n : 水深, \bar{u}_c : 定常流の断面平均流速, k_s : ニクラークの相当粗度である。

比較する水理量としては、①底面剪断応力最大値とその作用方向、②流れ方向に作用する平均剪断応力、③底面剪断力の経時変化である。

これと比較する理論としては、現在までに実務上の問題に多く用いられている田中・首藤（1980）の理論をもとにした陽形式摩擦係数近似式（田中, 1990; 田中・トゥー, 1993）を用いた。また、底面剪断力の経時変化の計算には田中・トゥー（1993）の手法を用いた。

なお、Simons et al. (1992) およびArnskov et al. (1993)は境界層外縁での波動成分流速の測定も行っているが、ここでは微小振幅波理論により得られる流速を用いて諸量の計算を行った。また、Sleath (1990)の実験は表面波ではなく振動平板によるものなので、実験条件の流速値をそのまま用い、微小振幅波理論は用いない。ただし、Sleathは論文中に \bar{u}_c の値を記していないので、速度分布図からこれを評価した。Simons et al.のデータには反射率が大きいものが見られた。そこで、30%以上の反射率のデータは解析から除外した。

3. 結果

(1) flow regime

先ず、田中・トゥー（1993）のflow regime図により、境界層の判定を行った。結果を図-1に示す。これによれば、多くのデータは滑面乱流と粗面乱流の間の遷移域に位置する。

(2) 最大剪断応力とその作用方向

底質移動量の定式化に用いられる底面剪断応力最大値

* 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

τ_{0max} について、計算値と実測値との比較を図-2に示す。(a)は、全てのflow regimeに適用可能なfull-range公式(田中・トウ、1993)によるもの、(b)は田中(1990)の陽形式粗面乱流式による結果である。この τ_{0max} に関する実測値はArnskov et al. (1993)によるもので、他の二報告はこの測定を行っていない。図によると、full-range公式による計算結果は全体的に過小評価で、その誤差は50%程度である。これに対して、粗面乱流式によ

る計算結果は良い一致を示す。

最大剪断応力 τ_{0max} の作用方向 ϕ_{max} について同様な比較を行った結果を図-3に示す。現在までに、この値について理論値と実験値との比較はまったくなされていない。これも、Arnskov et al. (1993)による値である。図-2と同様に、full-range公式による結果と陽形式粗面乱流式によるものを図示した。計算式による違いはほとんど見られない。ただ、理論では波高の増加と共に徐々に増加するが、実測値は40°程度において頭打ちの傾向を示す。この理由として波の非線形性の影響が考えられたので、ストークス波理論に基づく計算も行ったが、改善はみられなかった。図-4は(実測値)/(計算値)と波形勾配の関係を示す。これより、図-4中に実線で示した次の補正式を得る。

$$\phi_{max(meas)} = 1.7 \exp\left(-29 \frac{H}{L}\right) \phi_{max(cal)} \dots\dots (1)$$

図-5はSimons et al. (1992)により測定された波の進行方向に作用する剪断力の最大値 τ_{0wmax} の比較を示したものである。ばらつきがかなり大きいのが全体的な誤差は粗面乱流式による予測値の方が小さい。

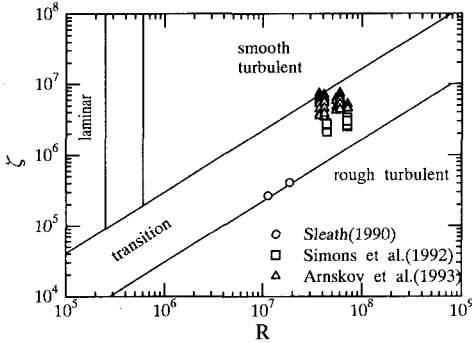
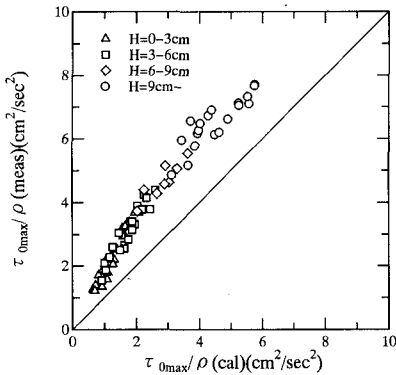
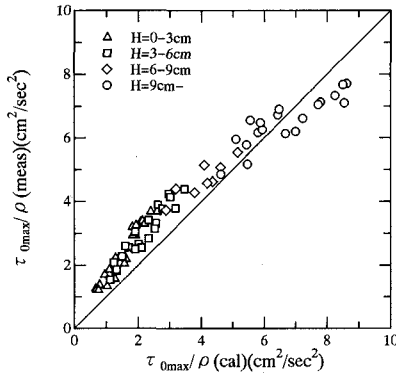


図-1 flow regime 図

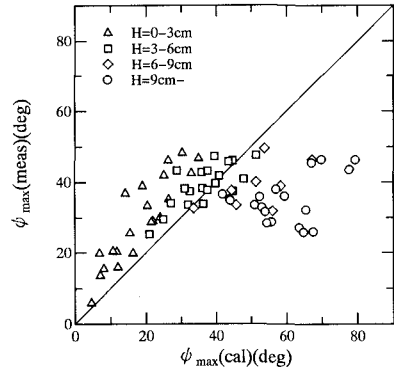


(a)

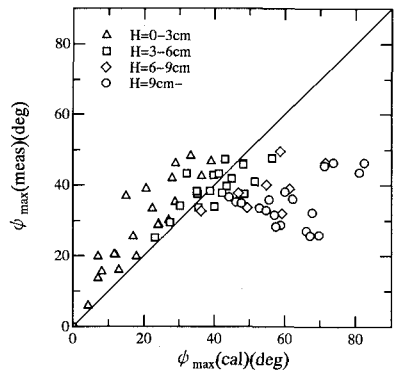


(b)

図-2 最大剪断力



(a)



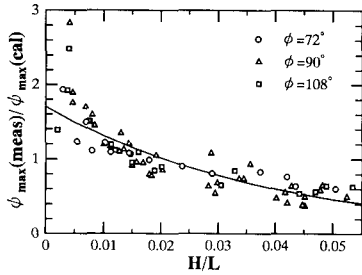
(b)

図-3 最大剪断力の作用方向

(3) 流れ方向の平均剪断応力

流れ方向の平均剪断応力 τ_{0mean} についての比較を図一6に示す。この量は平均流による砂移動量を定式化する際に重要となる。図一6(a) (full range式) と (b) (粗面乱流式) を比べると、ここでも後者の結果が実測値と良い一致を示している。

以上の結果によれば、全体的な傾向として full range式による計算結果よりも粗面乱流式によるものが実測値と良く一致する。田中・トゥー (1983) の flow regime判定式は、波のみおよび流れのみの場合には矛盾なく過去の結果に漸近するが、共存場についてはこれら二つの



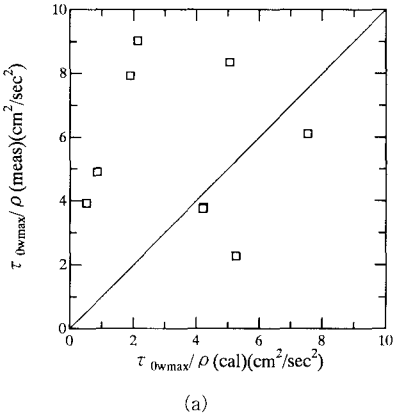
図一4 作用方向計算値と実験値の比と波形勾配

極限値を適当に補間したものになっている。このため、共存場についてはその精度が不明であった。以上の比較結果から判断すると、これを改善する必要があるように思われるが、その具体的な形を決定するには至らなかった。

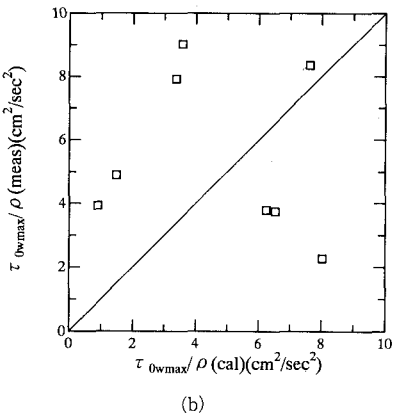
(4) 剪断応力とその作用方向の経時変化

田中・トゥー (1993) は交差する波・流れによる底面剪断力の一周期内の剪断力を計算するための簡便な手法を提案した。田中・首藤の蔽密解 (1980) は複素ベッセル関数により表現されたが、簡易計算法では複雑な計算を必要としない。ただ、その検証は波のみおよび順方向に進行する波・流れのケースに限られていた。そこで、以下では、Arnskov et al. (1993) および Simons et al. (1992) の実験値との比較を行う。ただし、上記の結果をもとに、粗面乱流式による計算結果のみを示す。

図一7, 8は Arnskov et al. (1993) による実験結果について示したものである。(a)は剪断応力の絶対値、(b)は剪断力ベクトルの向きを示す。図一7については、理論は比較的良好な結果を与える。図一8のケースでは波高がかなり低く、図一8(a)の理論値では波動の効果がほとんど見られない。実験値には振動が見られるものの、周

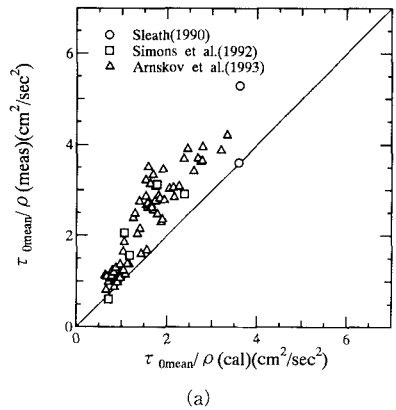


(a)

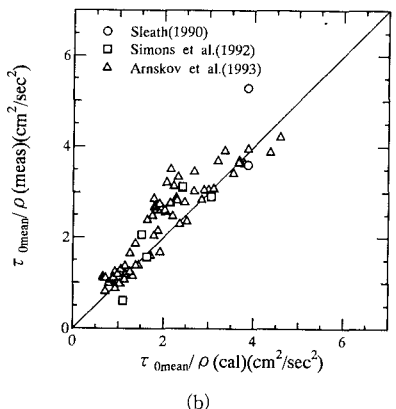


(b)

図一5 波の進行方向の最大剪断力

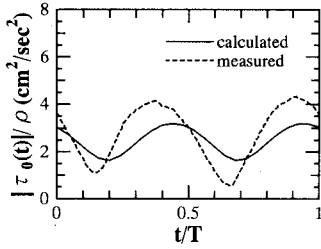


(a)

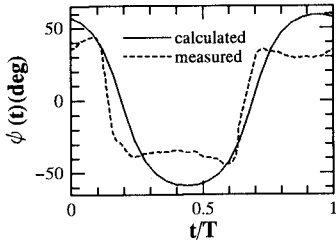


(b)

図一6 流れ方向の平均剪断力

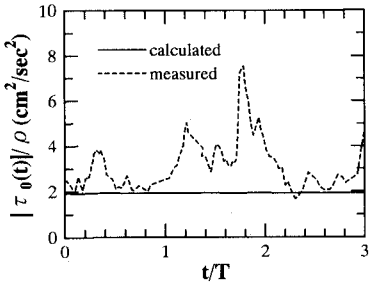


(a) 絶対値

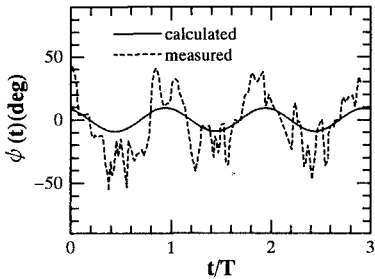


(b) 作用方向

図-7 Arnskov et al. (1993) の剪断力実測波形との比較 (Test No. 261; $H=7.7$ cm, $T=1.5$ s, $\bar{u}_c=20.6$ cm/s, $z_h=40$ cm, $\phi=90^\circ$, $k_s=0.054$ cm)



(a) 絶対値



(b) 作用方向

図-8 Arnskov et al. (1993) の剪断力実測波形との比較 (Test No. 304; $H=1.2$ cm, $T=1.5$ s, $\bar{u}_c=29.7$ cm/s, $z_h=40$ cm, $\phi=90^\circ$, $k_s=0.054$ cm)

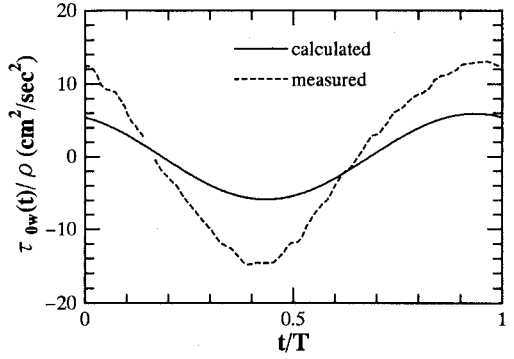


図-9 Simons et al. (1993) の剪断力実測波形との比較 (Run W2C; $H=17.5$ cm, $T=1.49$ s, $\bar{u}_c=20.0$ cm/s, $z_h=70$ cm, $\phi=90^\circ$, $k_s=0.15$ cm)

期的なものではない。図-8(b)においても実験値には高周波数の振動が重畳しているが、周期的変動は明瞭である。理論はその周期性を再現している。

図-9は Simons et al. (1992) の実測値について同様な比較を行ったものである。位相変化については良い結果が得られているが、振幅については倍程度の差が見られる。

4. 結 語

本研究では、交差する波・流れ実験のデータを収集し、田中・首藤 (1980) の理論をもとにした田中 (1990) の粗面乱流の陽形式近似式および田中・トゥー (1993) の full range 式による計算結果との比較を行った。得られた結論は以下のようである。

(1) 底面剪断応力最大値とその作用方向および一周平均剪断応力について比較を行ったところ、full range 式に比べ、粗面乱流の陽形式近似式の方が良い値を与えた。これは、full range 式における flow regime 判定条件が十分でないことによるものと考えられる。

(2) 最大剪断応力の作用方向に関しては、波形勾配の増大と共に理論値が過大になることが判った。そこで、理論を修正するための式を提案した。

(3) 一周内の剪断力の絶対値およびその作用方向についても粗面乱流式は良好な結果を与えることが判った。

謝辞：本研究のデータ収集を行うに際して、東北大学学部学生・横関雅樹君および同修士学生・高橋 淳君の協力を得た。また、本論文の公表に当たり、小川基金の補助を得た。ここに記して、謝意を表します。

参 考 文 献

浅野敏之・岡本 浩・岩垣雄一 (1883): 波と流れの共存場にお

- ける底面乱流境界層に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 84-88.
- 香取完和・榊山 勉・渡辺 晃 (1983): 定常流・振動流交差装置による漂砂量測定, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 204-208.
- スバラティド・セリー・田中 仁・首藤伸夫 (1981): 波・流れ共存場における流速分布に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 6-10.
- 田中 仁・首藤伸夫 (1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 田中 仁 (1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式, 土木学会論文集, No. 417/II-13, pp. 285-288.
- 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.
- Arnskov, M. M., J. Fredsøe, and B. M. Sumer (1993): Bed shear stress measurements over a smooth bed in three-dimensional wave-current motion, *Coastal Eng.*, Vol. 20, pp. 277-316.
- Bakker, W. T. and T. Van Doorn (1978): Near bottom velocities in waves with a current, *Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 1394-1413.
- Brevik, I. and B. Aas (1980): Flume experiment on waves and currets I. Rippled bed, *Coastal Engineering*, Vol. 3, pp. 149-177.
- Brevik, I. (1980): Flume experiment on waves and currets II. Smooth bed, *Coastal Engineering*, Vol. 4, pp. 89-110.
- Kemp, P. H. and R. R. Simons (1982): The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current, *J. Fluid Mech.*, Vol. 116, pp. 227-250.
- Kemp, P. H. and R. R. Simons (1983): The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating against the current, *J. Fluid Mech.*, Vol. 130, pp. 73-89.
- Simons, R. R., A. J. Grass, and M. Mansour-Tehrani (1992): Experiental study of waves and currents crossing at right angles, *Proc. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 604-617.
- Sleath, J. F. A. (1990): Velocities and bed friction in combined flows, *Proc. 22nd Int. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 450-463.
-