

粗面不規則波動下における 底面境界層の特性

INVESTIGATION OF ROUGH BOTTOM BOUNDARY LAYER UNDER IRREGULAR WAVES

鈴木 健¹・田中 仁²・山路 弘人³

Takeshi SUZUKI, Hitoshi TANAKA and Hiroto YAMAJI

¹ 学生員 東北大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉 06)

² 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉 06)

³ 正会員 東北大学教務職員 大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区青葉 06)

Most of investigations on bottom boundary layer are for sinusoidal waves. In this study, flow properties in bottom boundary layer under irregular waves has been investigated from experimental data for rough bed condition. A method has been proposed to calculate instantaneous turbulent bottom shear stress from the variation in free stream velocity under irregular waves for rough bed condition. Instantaneous free stream velocity and a friction factor for significant wave or each waves included irregular wave have been introduced. Instantaneous bottom shear stress computed by the proposed method has been compared with experimental data. Proposed method presents a good agreement and has been found to be very convenient to use from the viewpoint of practical application.

Key Words: bottom shear stress, bottom boundary layer, turbulence, irregular wave, rough bottom

1. はじめに

近年、波動の不規則性を考慮した海浜変形計算が行われている(たとえば、佐藤・Kabiling¹⁾). 一般にモデルは波動モデルと砂移動モデルとからなるが、両者をつなぐためには底面せん断力の評価が必要となる。これまでに底面境界層に対する研究は数多くなされてきている(たとえば Hino et al.²⁾, Jensen et al.³⁾). しかしそのほとんどは正弦波を対象としたものであり、不規則波を扱ったものは極めて少ないというのが現状である。

サマドラ⁴⁾は乱流モデルを用いた数値計算によって不規則波動下の底面境界層の研究を行い、底面境界層特性を検討し滑面乱流域での底面せん断力瞬時値の簡易計算法を示している。さらにサマドラ⁵⁾は不規則波動下の実験によっても境界層特性を検討している。しかしこれらの研究は滑面を対象としたものであり、砂移動現象を扱うには粗面乱流域での議論が必要となる。

そこで本研究では粗面乱流域での実験を行い、その結果から粗面乱流域での底面境界層特性について検討する。また、これまでになされてきた正弦波での知見を用いた粗面不規則波動下の底面せん断力簡易計算方法についても検討した。

2. 実験装置と方法

本実験はその内部の観察が水に比べて容易であるため空気をういて行った。実験装置は不規則振動流発生装置と風洞部からなる。装置の概要を図-1 に示す。駆動部にはサーボモータを使用しており、任意の不規則信号を入力することができる。サマドラ⁴⁾にならい、表面波形として Bretschneider・光易型スペクトルを用い、線形波の伝達関数を用いて底面流速の時系列を求めた後、これを振動流発生装置に入力している。12 波程度の不規則波からなる信号を繰り返し入力することにより、流速のアンサンブル平均を求める。

風洞は全長 5.0m, 20cm×10cm の矩形断面を有し、その底面には直径 1.0cm のアルミナビーズを細密に敷き詰めて粗面とした。両側面と上面は塩化ビニルを貼りつけることで滑面としている。風洞中央部においてレーザードップラー流速計を用いて鉛直方向に 20 ヶ所で測定し、流速の鉛直分布を得る。データは 1/100s 間隔で AD 変換を行い、50 波の平均値から平均流速を求めた。

入力波は、式(1)のレイノルズ数で $Re_{1/3} = 5.0 \times 10^5$, 有義波周期: $T_{1/3} = 3.0s$ であり、完全粗面乱流が得られるように設定して実験を行った。

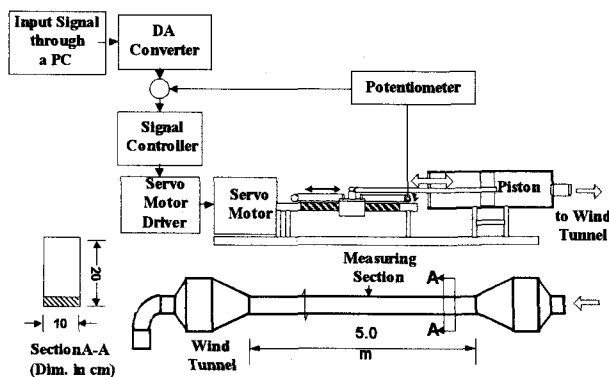


図-1 実験装置概要

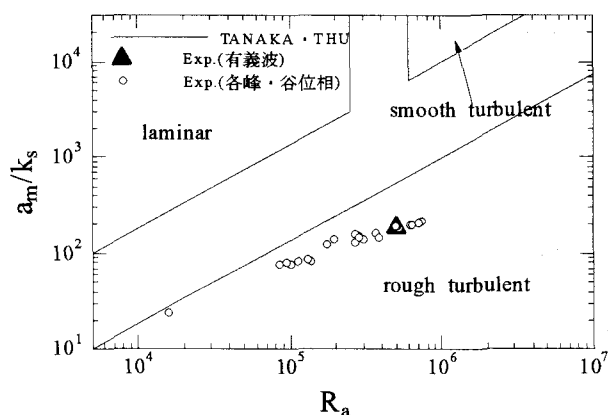


図-2 flow regime

$$Re_{1/3} = \frac{U_{1/3}^2}{\nu \omega_{1/3}}, \quad \omega_{1/3} = \frac{2\pi}{T_{1/3}} \quad (1)$$

である。ここで $U_{1/3}$: 有義波の諸元に基づく代表流速, ν : 動粘性係数である。また不規則波の実験と共に $Re=5.0 \times 10^5$ の正弦波実験も行っている。

3. 結果と考察

(1) flow regime

図-2 において田中・Thu⁹⁾により提案された flow regime に本実験の条件をプロットした。ここで、横軸は次の式(2)に示されるレイノルズ数である。

$$Re_a = \frac{\hat{U}_w a_m}{\nu} \quad (2)$$

$\hat{U}_w$: 境界層外縁流速の振幅, a_m : 波動による底面流体粒子の軌道振幅である。

縦軸は a_m/k_s , ここで k_s はニクラーズの相当粗度であり粗度粒径(1cm)に等しいとして示してある。有義波の緒元で示されたレイノルズ数では粗面乱流域と判断される。

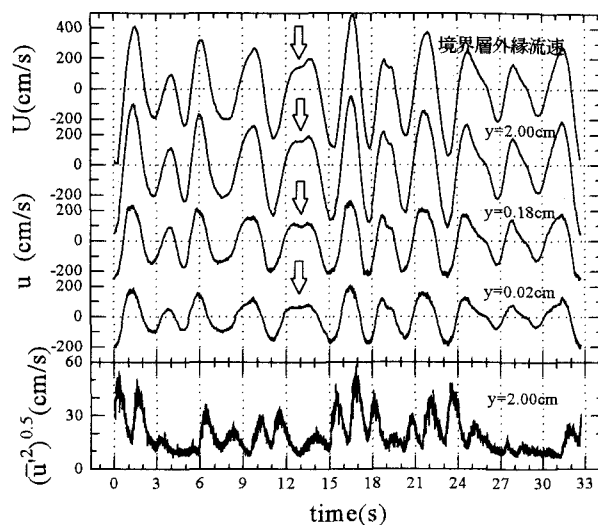


図-3 流速波形と乱れ強度

しかし、入力波形は不規則波であるため、当然の事ながらそこには振幅や周期の大きな波もあれば小さい波も含まれている。そこで境界層外縁流速波形の峰位相と谷位相を正弦振動の半分とみなし、波の峰位相、谷位相それぞれに対して以下の式で示されるレイノルズ数 Re_p を算出した。

$$Re_p = \frac{U_p^2}{\nu \omega_p}, \quad \omega_p = \frac{\pi}{T_p} \quad (3)$$

ここで、 U_p : 峰位相または谷位相の流速最大値, T_p : 峰位相または谷位相の継続時間である。これを導入することで、不規則波を構成している波ひとつひとつにレイノルズ数を与えることができる。これらも合わせて flow regime 図に示した。全ての波において粗面乱流域に含まれる結果となるが、後述のように実際には流速の小さな部分では粗面乱流とは異なる場合もあることが確認された。

(2) 流速波形と乱れの分布

境界層外縁流速と幾つかの高さでの流速波形を図-3に示す。図中で U は境界層外縁流速, u は境界層内流速である。図中矢印では底面近傍において境界層外縁流速とは異なる波形がみられる。これは正弦波動下では見られない現象である。また、合わせて底面粗度頂から高さ 2.0cm の乱れ強度も示した。境界層外縁流速に連動して乱れ強度も変化している。入力波形では $t=4 \sim 6s$, $26 \sim 30s$ で流速が小さくなっており、そこでは乱れが小さくなっている。

(3) 履歴効果

波の峰位相、谷位相それぞれに対し、以下の式(4)のようにして乱れ強度の平均値をそれぞれ求め、 Re_p ととも

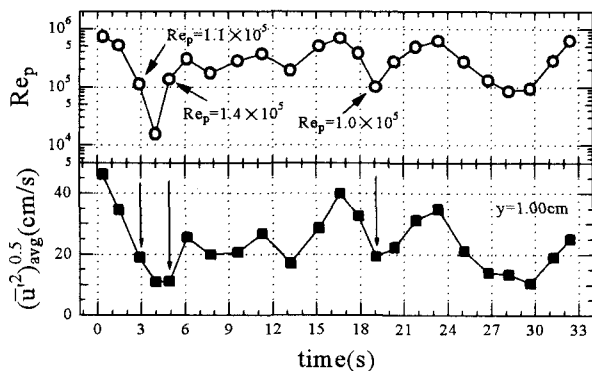


図-4 Re_p と乱れ強度平均値

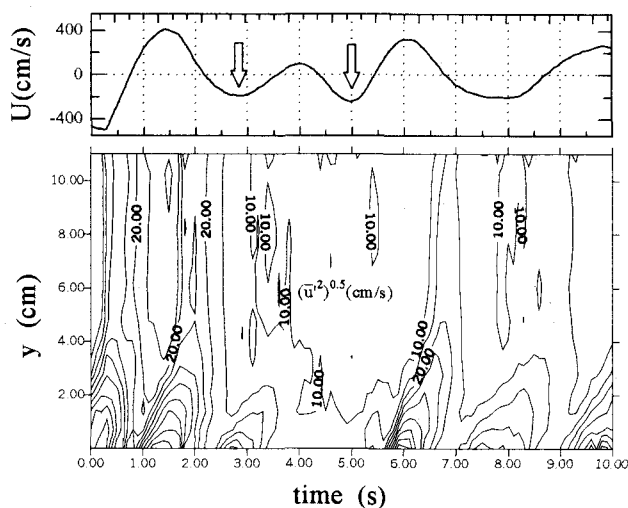


図-5 乱れ強度コンター図

にその時間変化を図-4 に示した。

$$\sqrt{u'^2}_{avg} = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \sqrt{u'^2} dt \quad (4)$$

Re_p の増加とともに乱れも増加するが、必ずしも Re_p の大きなものほど乱れも大きいわけではない。図中矢印においては Re_p はほぼ同じであるのに乱れは大きく異なっているのが分かる。直前の波を比較すると乱れの大きいもの前には乱れの大きな波が、乱れのほとんどないもの前には乱れのほとんどない波が存在している。このことから乱れはその時点での Re_p の大小だけでなくそれ以前の波の影響を受けているものと考えられる。同じ波が繰り返される規則波では見られない現象である。なお、このような履歴効果は滑面実験でも確認されている⁷⁾。

また、履歴効果の見られる位相の乱れのコンターと流速鉛直分布を図-5、図-6 に示す。コンターから乱れは底面付近で乱れが発生して上方へ拡散していく様子がわかるが、先に示した二つの波を比べると境界層外縁流速がほぼ同じでも乱れの状況ははっきりと異なるのがわかる。乱れはほとんど生じておらず、流速分布にも違いが見られる。A は流速の一様化が見られるのに対し B は

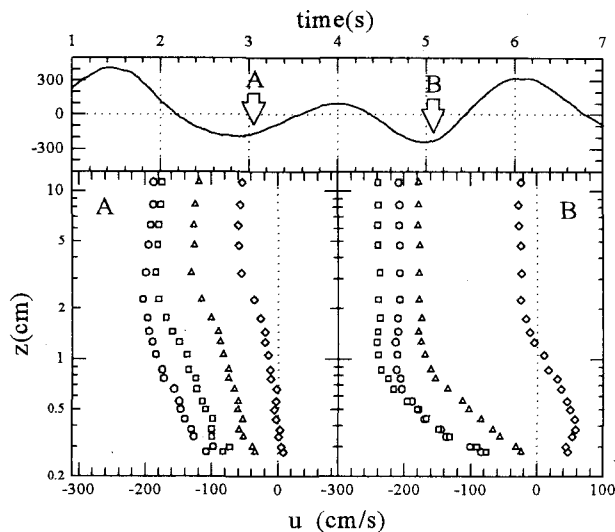


図-6 流速鉛直分布の比較

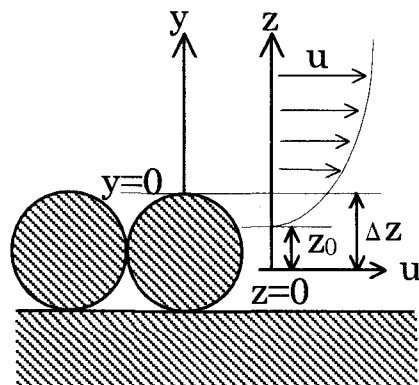


図-7 記号定義図

層流に近い分布形状になっていると考えられる。このように履歴効果によって流速分布が変わるほどの乱れの変化が生じている。

(4) 底面せん断力の算定

流速の鉛直分布から式(5)に示す対数分布則を用いて底面せん断力を求めた。

$$u(z) = \frac{U_\tau}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

$$U_\tau = \sqrt{\tau_0 / \rho}, \quad z = y + \Delta z \quad (6)$$

ここで、 U_τ : 摩擦速度、 κ : カルマン定数 ($\kappa=0.4$)、 τ_0 :

底面せん断力、 ρ : 密度、 y : 粗度頂からの高さ、 Δz :

仮想底面高さを示している。記号の定義については図-7 に示す。ここで仮想底面高さおよび粗度長さについては、この不規則入力波の $Re_{1/3}$ と等しいレイノルズ数が得られる正弦波の実験結果から流速鉛直分布と対数分布則との相関が最も良くなる値を求め、平均値を算出

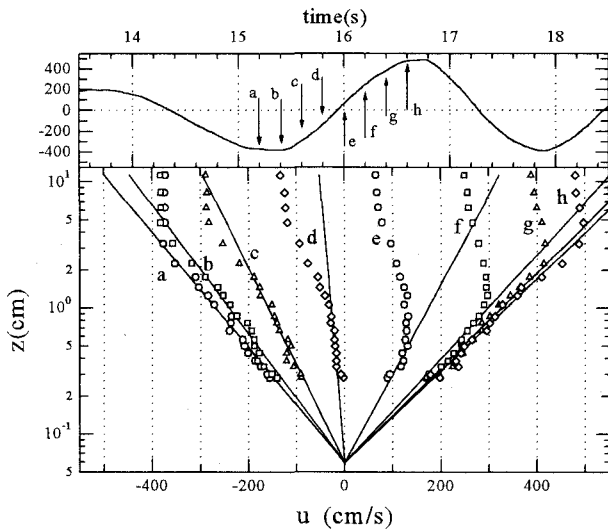


図-8 対数分布則

して用いている。対数分布則を実験値に当てはめることにより、摩擦速度を求めた。実験値の流速鉛直分布とそれに当てはめた式(5)の対数分布則を図-8に示す。底面近傍においては広い範囲で対数分布則が成立している事がわかる。

(5) 簡易計算法による結果と実験値との比較

a) 摩擦係数

ここでは対数分布則により得られた底面せん断力を正弦振動流の摩擦係数をもとに境界層外縁流速から簡便に求める手法を検討する。正弦波動下での摩擦係数の式形を考慮すれば、もっとも自然な計算方法は佐藤・Kabiling¹⁾により提案された次の式(7)であろう。

$$\tau_0(t) = \frac{\rho}{2} f_w U(t) U(t) \quad (7)$$

ここで f_w は摩擦係数である。摩擦係数については多くの研究成果があるが、ここでは簡便に算定できることを目的とするため、完全陽形式で示される田中・Thu⁹⁾によって正弦波に対して提案された次式(8)を用いる。

$$f_w = \exp \left\{ -7.53 + 8.07 \left(\frac{a_m}{z_0} \right)^{-0.100} \right\} \quad (8)$$

ここで式中の流体粒子の軌道振幅を次の二つの方法によって求めた。まず、式(9)で示される有義波に対応する流体粒子の軌道振幅 $a_{m1/3}$ を用いることで不規則波を代表する摩擦係数が一つ求まる。(Method 1)

$$a_{m1/3} = \frac{U_{1/3} T_{1/3}}{2\pi} \quad (9)$$

波の峰位相と谷位相を正弦振動の半分とみなし、波の峰・谷位相それぞれに対して定義された式(10)で示される軌

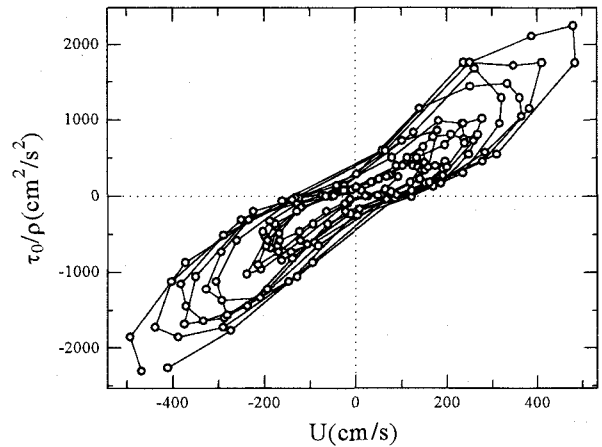


図-9 底面せん断力と境界層外縁流速の相関関係

道振幅 a_{mp} を用いれば各峰・谷位相に対してそれぞれ異なる摩擦係数が求められる。(Method 2)

$$a_{m_p} = \frac{U_p T_p}{\pi} \quad (10)$$

b) 位相差

境界層外縁流速と底面せん断力の関係を調べ図-9に示した。ループを描くことから両者の間には位相差が存在することがわかる。

その位相差を考慮するために田中・Thu⁹⁾により提案された次の式(11)を用いた。

$$\theta = 42.4 C^{0.153} \frac{1 + 0.00279 C^{-0.357}}{1 + 0.127 C^{0.563}} \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{\kappa \sqrt{\frac{f_w}{2} \frac{a_m}{z_0}}} \quad (12)$$

ここでも摩擦係数を求めた方法と同様に二つの方法が考えられる。有義波で定義するか、個々の波について定義するかである。また、実験値から境界層外縁流速と底面せん断力の相互相関を求め、最も相関の高くなる位相差を求めた。さらに、同時に行われた正弦波実験の結果についても位相差を求め図-10に示した。式(11)は実験値よりも若干過大だが、近い値を取っている。

位相差は各位相に対して定義してもその範囲は最小 20.03° から最大 25.71° とその範囲はせまく、一定値と考えて良いだろう。その位相差の平均値は 21.3° である。また有義波での位相差は 20.4° であり、両者にはほとんど差がないことから位相差は有義波で得られた値を用いることとする。

角振動数についてもこれまで同様二つ定義できる。位相差を考慮しないものもひとつの方法(Method A)と考え

表-1 底面せん断力算定方法

Method	算定式	
1-A	$\tau_0(t)$	$= \frac{\rho}{2} f_w \left(\frac{a_{m_{1/3}}}{z_0} \right) U(t) U(t) $
1-B	$\tau_0 \left(t - \frac{\theta}{\omega_{1/3}} \right)$	
1-C	$\tau_0 \left(t - \frac{\theta}{\omega_p} \right)$	
2-A	$\tau_0(t)$	$= \frac{\rho}{2} f_w \left(\frac{a_{m_p}}{z_0} \right) U(t) U(t) $
2-B	$\tau_0 \left(t - \frac{\theta}{\omega_{1/3}} \right)$	
2-C	$\tau_0 \left(t - \frac{\theta}{\omega_p} \right)$	

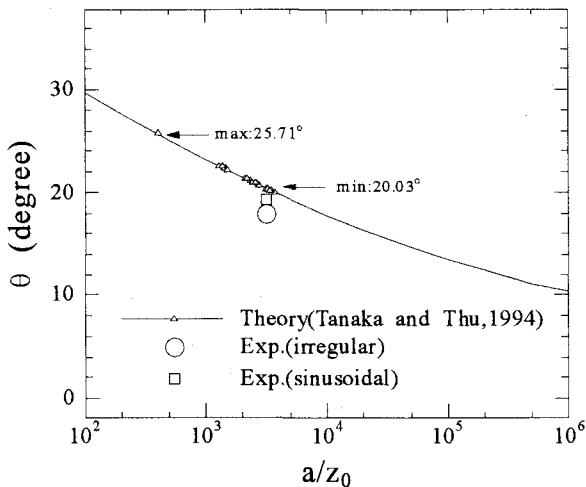


図-10 位相差

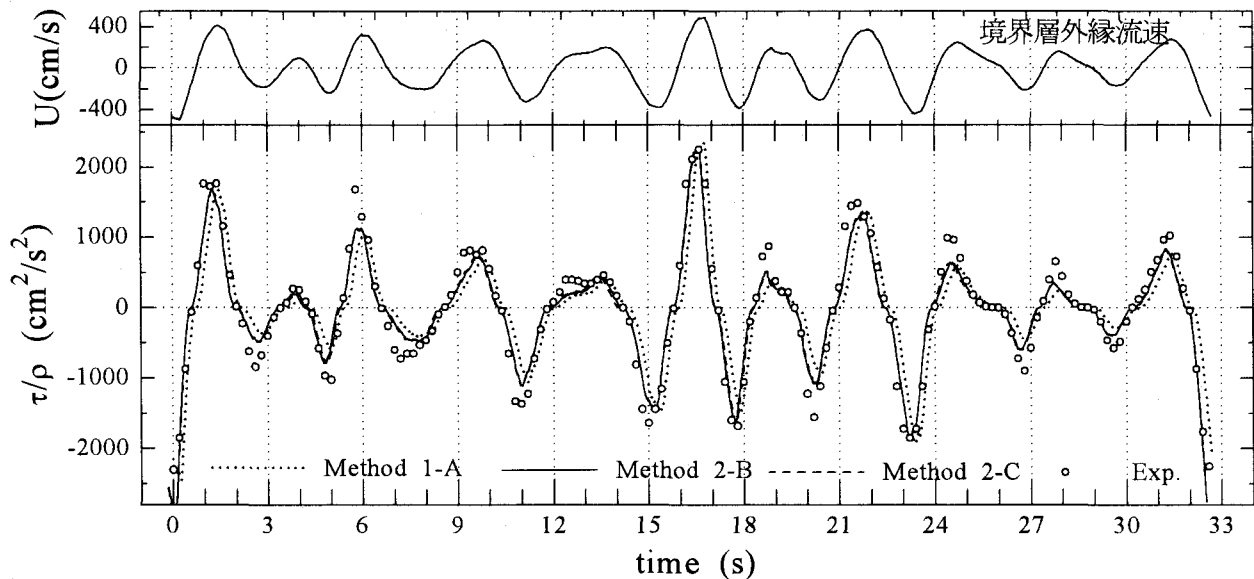


図-11 底面せん断力計算値と実験値の比較

れば、有義波の角振動数を用いる方法(Method B)、個々の波の角振動数を用いる方法(Method C)の3種類が考えられる。したがって境界層外縁流速から底面せん断力を算定するための簡易計算法として表-1に示す6種類の方法が挙げられる。

実験値とこれら計算値の比較を6種類のうちの3種について図-11に示した。Method 1-AとMethod 2-B、2-Cを比較すると、流速の小さな部分においてはMethod 1-Aは若干の過小評価となっている。また、Method 1-Aには位相差が見られ、Method 2-B、Method 2-Cは非常に近い値を取るために重なって見えている。位相差についても3種の計算値と実験値の相関を調べて図-12に示した。Method B、Method Cはほぼ同様であり、時系列中に不連続が生じることや、計算が複雑になることを考えれば位相差については有義波で定義されたMethod Bで十分で

あると考えられる。ただし、先に触れた不規則波特有の波形の変化や、履歴の影響と見られる部分に付いてはズレが生じている。

4. 結論

本研究では、粗面不規則波動下における底面境界層について風洞実験をもとに検討を行った。主要な結論は以下のとおりである。
(1)履歴効果が確認された。乱れが前の波の影響を受けることで流速分布にまで影響していることが確認された。
(2)粗面での底面境界層瞬時値を計算する方法が提案された。摩擦係数については各峰・谷位相ごとに定義した方が精度がよい。しかし位相差に関しては有義波で定義

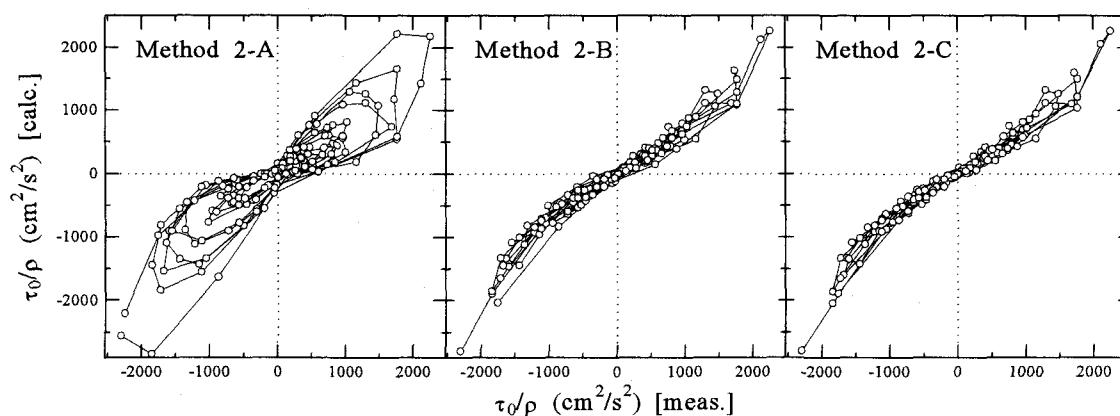


図-12 Method A,B,C の相関関係比較

れたもので十分である。実験値と計算値は精度良く一致している。ブーシネスク方程式による波動場計算手法と組み合わせることで、波動の不規則性を考慮した、より実用的な海浜変形モデルを構築することができる。

謝辞：本研究を実施するに際して、スカンジナビア・ニッポン ササカワ財団の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐藤慎司・Michael B. Kabiling : 波打ち帯を含む三次元海浜変形モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.401-405, 1994.
- 2) Hino,M., Kashiwayanagi,M., Nakayama,A., Hara,T. : Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow, J. Fluid Mech., Vol.131, pp.363-400, 1983.
- 3) Jensen,B.L., Sumner,B.M. and Fredsøe,J. : Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol.206, pp.265-297, 1989.
- 4) ムスタファ アタウス サマド・田中 仁・山路 弘人: 不規則波底面境界層の実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.21-25, 1999.
- 5) ムスタファ アタウス サマド・田中 仁: 不規則波動下の底面せん断力特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.91-95, 1998.
- 6) 田中 仁・Aung Thu : 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, 第467号/II-23, pp.93-102, 1994.
- 7) 鈴木 健・ムスタファ アタウス サマド・山路 弘人・田中 仁: 不規則波底面境界層の乱流遷移に対する履歴効果, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.61-65, 2000.

(2001. 10. 1受付)