

風波飽和度の概念に基づく海面摩擦係数測定データの再評価

鈴木靖・鳥羽良明*

* 東北大学名誉教授

要 旨

海面摩擦係数の測定は、風洞水槽実験や海洋観測塔などの海洋観測によって行われてきた。ここでは風波飽和度という新しい概念を導入し、これまでの測定データを再評価する。風波飽和度は本来、風波スペクトルから算出されるものであるが、これまでの測定では風波スペクトルのデータが十分得られていない。風と局所平衡状態にある有義波高と有義波周期の間に成り立つ $3/2$ 乗則を用いることによって、スペクトル解析が得られない場合の風波飽和度を提案した。従来の海面摩擦係数測定データを風波飽和度を用いて再評価した結果、海面摩擦係数と風波飽和度との間には負の相関関係があることがわかった。風波飽和度が小さくスペクトルが局所平衡に達していない風波では、海面摩擦係数が大きく運動量輸送が活発であるのに対し、風波飽和度が大きくなると局所平衡状態に近づき運動量輸送が少なくなり、海面摩擦係数が小さくなるものと理解される。

キーワード：海面摩擦係数，風波飽和度， $3/2$ 乗則，風波スペクトル

1. はじめに

海面摩擦係数は大気海洋間の運動量輸送に関わる重要なパラメータである。大気境界層モデルにおいて、陸上では地表面状態に応じて与えられる粗度に対して、海上では風速、波浪、砕波やうねりなどの海面状態に応じて海面粗度が変化するものと考えられる。大気・海洋モデルにおける海面摩擦係数のパラメタリゼーションは大気海洋間の相互作用を表現し、モデルの予測精度に関わる重要な問題である。海面摩擦係数は海面状態や大気安定度などによって大きく変化することが観測や実験などによって明らかにされているが、海面摩擦係数の変化を表現するパラメタリゼーションについて十分な理解は進んでいない。

Charnock (1955)は海面粗度 z_0 を重力加速度 g と風の摩擦速度 u_* を用いて無次元化し、無次元粗度 $gz_0/u_*^2 = \text{定数}$ の関係を提案した。Masuda and Kusaba (1987)は無次元粗度を波齢に依存する関数として表現した。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = \beta \left(\frac{u_*}{C_p} \right)^k \quad (1)$$

ここに g は重力加速度、 C_p は風波の波速、 k と β は定数である。式(1)で $k=0$ が Charnock の式に相当する。Masuda and Kusaba (1987)は風洞水槽実験データから $k=1.10$, $\beta=0.0129$ を提案し、Toba and Koga (1986)は海洋観測と風洞水槽実験データから $k=-1$, $\beta=0.025$ を提案した。定数 k の符号が両者で全く異なるということは、無次元粗度と波齢の関係が全く逆になることを意味している。

Fig. 1 には海洋観測と風洞水槽実験のデータから、無次元粗度と波齢の逆数の関係を示す。測定データは無次元粗度一定の Charnock の式からのばらつきが大きく、海洋観測データ (左側) と風洞水槽実験データ (右側) は明らかに 2 つのグループに分離している。観測と実験データの空間スケールの違いがデータの分離に影響しているものと考えられ、式(1)の形で海面粗度と風波との関係を整理しようとする試みは困難であることがわかる。

波齢に代わるパラメータとして、Toba and Koga (1986)は風波に関わる様々な海面現象を表現する無次元パラメータを提案し、その後 Toba et al. (2006) はそれを風波レイノルズ数 R_B と名付けた。 R_B は次式 (2) で定義される。

$$R_B = \frac{u_*^2}{\nu \sigma_p} \quad (2)$$

ここに、 ν は空気の動粘性係数、 σ_p は風波のピーク周波数である。風波レイノルズ数 R_B を用いると、個々波の崩れ率、白波の面積率や海塩粒子の個数濃度がきれいな直線状に関係が整理されることが示された (Toba and Koga, 1986; Iida et al., 1992)。Toba et al. (2006)は風波レイノルズ数 R_B と海面摩擦係数の関係を調べ、波齢に代わる優位性を調べた。Fig. 2 には Fig.1 と同じデータに対する海面摩擦係数 C_D と風波レイノルズ数 R_B の関係を示す(Toba et al., 2006)。

風波レイノルズ数 R_B を用いて海面摩擦係数 C_D を整理すると、Fig.1では左右に分離していた海洋観測データと風洞水槽実験データとが重なり合い、海面摩擦係数は一義的には風波レイノルズ数の関数として表現できることがわかる。海洋観測データは R_B が 10^3 から 10^4 付近に分布しているのに対し、風洞水槽実験データは 10^2 から 10^6 と幅広く分布している。Fig. 3 には風洞水槽実験データに対する C_D と R_B の関係を、 C_D の移動平均と標準偏差を重ねて示す。 R_B が $2 \times 10^2 \sim 10^3$ 付近で海面摩擦係数の増加がフラットになっており、それを超えると再び増加している。これは Fig. 4 に示すように、 $R_B=2 \times 10^2 \sim 10^3$ を境に碎波が発生し、風波の乱流境界層の遷移が起こるためであると解釈されている (Toba et al., 2006)。海洋観測データを含む Fig. 2 では、Fig. 3 に比べてデータのばらつきが大きくなっている。海洋では常に何らかのうねりが混在しているためと考えられるが、その影響はまだ十分明らかとはなっていない。

以上のように、海面摩擦係数を何らかの海面状態のパラメータで表現しようとする様々な試みはまだ不十分であるが、鈴木ら(2010)は Toba (1972) による風波の $3/2$ 乗則から導かれる風波飽和度 B_n を新たに提案し、それをを用いて海面粗度を整理すると非常にきれいな線形関係が得られることを見いだした。本論文では、風波飽和度と海面摩擦係数の関係について考察するとともに、一連の解析の基礎となる海洋観測データと風洞水槽実験データの処理について詳しく説明する。

2. 測定データ

過去の文献から海洋観測データと風洞水槽実験データを電子化した。海洋観測データは、Kawai et al. (1977), Merzi and Graf(1985), Geernaert et al. (1987), Stewart (1961), Johnson et al. (1988), Donelan (1979), Suzuki et al. (2002)のデータを整理し、風洞水槽実験データは、Hamada (1963), Kunishi (1963), 国司・今

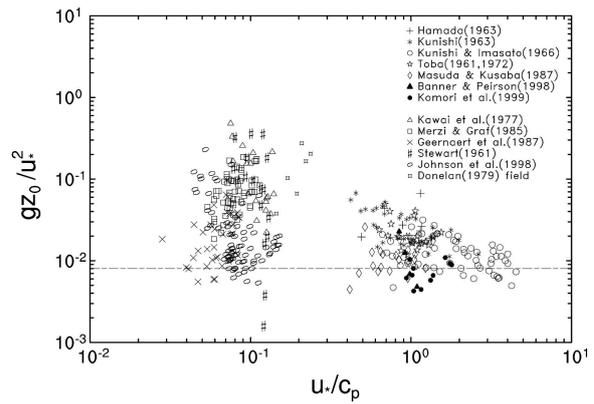


Fig.1 The relation between the non dimensional roughness parameter gz_0/u_*^2 and the inverse wave age u_*/C_p . Dashed line indicates $\beta=0.0185$ in Charnock relation. The figure is originally from Toba and Ebuchi (1991), but for the selected data in Table 1.

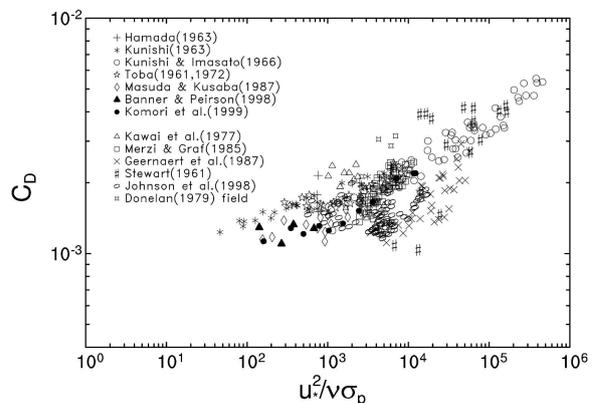


Fig.2 The relation between the sea surface drag coefficient C_D and the windsea Reynolds number $R_B=u_*^2/\nu\sigma_p$. The figure is originally from Toba et al. (2006), but for the selected data in Table 1.

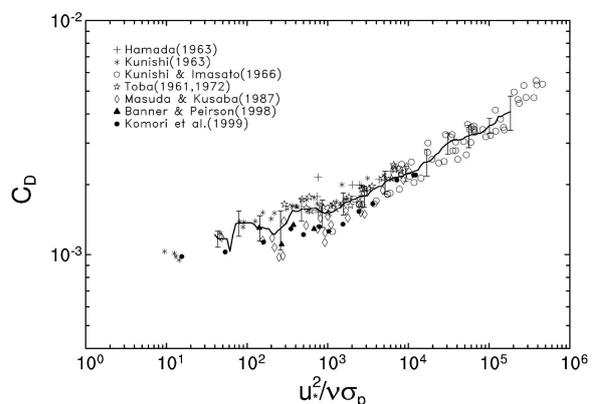


Fig.3 Same as Fig.2, but for the wind-wave tank data. The figure is originally from Toba et al. (2006), but for the selected data in Table 1.

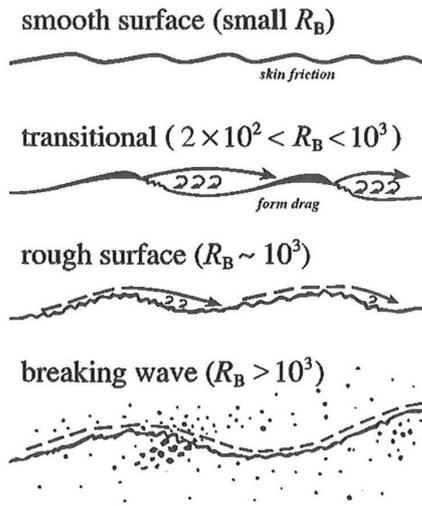


Fig.4 Schematic representation of the regime shift of the windsea boundary layer as a function of R_B (from Toba et al., 2006).

里(1966), Toba (1961,1972), Masuda and Kusaba (1987), Banner and Peirson (1998), Komori et al. (1999)のデータを整理した。最近の測定技術では渦相関法により鉛直運動量フラックスを直接測定することが多いが、ここで引用した測定データは全て風速の多点観測から鉛直プロファイルを求め、対数則にあてはめて摩擦速度 u_* を求めたものである。安定度が中立な条件で、うねりの影響の少ない風波のデータが選定されているが、対数則への適合度が十分検証されている。

海面摩擦係数 C_D 、摩擦速度 u_* と 10m 高度の風速 U_{10} とは以下の関係にある。

$$u_* = \sqrt{C_D} U_{10} \quad (3)$$

また、大気安定度が中立の場合、風速の鉛直分布 $U(z)$ は対数則に従うことが知られている。

$$\frac{U(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

ここに κ はカルマン定数 $\kappa=0.4$ である。式(3)と式(4)から、海面摩擦係数 C_D と海面粗度 z_0 の一義的な関係式が導かれる。

$$C_D = \left(\frac{1}{\kappa} \log \frac{z}{z_0} \right)^{-2} \quad (5)$$

付録 Table 1 には、文献から得られた測定データに対して網かけをして示している。網かけをしていないデータは、上記の関係式等によって計算されたデー

タである。表には、波齢の逆数 u_*/C_p 、無次元粗度 gz_0/u_*^2 、風波レイノルズ数 R_B 、粗度レイノルズ数 u_*z_0/ν 、有義波高 H_s 、有義波周期 T_s も示されている。

鈴木ら(2010)はデータ解析に際し、下記の条件でさらにデータを絞り込み、重力波としての風波の本質的な特徴を保持しているデータだけを解析対象とした。Table 1 のデータは下記の条件で絞り込んだ後のデータである。

- フェッチ 5m 以下の測定データを除く
- 乱れが十分発達していない ($u_*z_0/\nu < 1$) データを除く
- 重力と表面張力の比が 10 以下のデータ (表面張力波) を除く

3. 風波飽和度の概念

Toba (1972)は風と局所平衡状態にある風波の波高 H_s と周期 T_s の間には次式の 3/2 乗則の関係が成り立つことを示した。

$$H^* = BT^{*3/2} \quad (6)$$

ここに $H^* = gH_s/u_*^2$ 、 $T^* = gT_s/u_*$ は無次元波高および周期であり、 g は重力加速度、 u_* は摩擦速度、 $B=0.062$ は経験定数である。Fig. 5 に示すように、海洋観測データと風洞水槽実験データはともに 3/2 乗則に適合していることが分かる。ただし、国司・今里(1966)

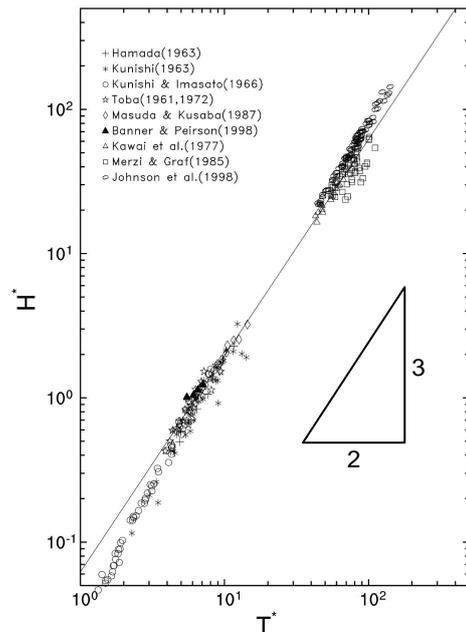


Fig.5 The relation between non dimensional wave height H^* and period T^* . The 3/2 power law (Toba, 1972) is plotted as a thin line.

の風洞水槽実験データは高速風洞水槽の初期波の発生発達を対象にしており、風波の局所平衡状態にはまだ十分達していないため、周期が短くなるにつれて 3/2 乗則の直線からは下方にずれている。Johnson et al. (1988)などの海洋観測データ（右側）の一部には 3/2 乗則の直線よりも上側に位置するデータが見られる。これは、風と局所平衡状態にある風波に対して急激な風速の減少があると、風波の応答が遅れるためである。波高と周期がほとんど変わらずに風速だけが変化する場、無次元波高と周期の定義式より $H^* \propto u_*^{-2}$ 、 $T^* \propto u_*^{-1}$ となるから $H^* \propto T^{*2}$ となり、3/2 乗則よりも勾配の大きい T^* の 2 乗に比例する変化となる。

式(6)を次元付きで表現すると式(7)が得られる。

$$H_s = B(gu_*^3)^{1/2} T_s^{3/2} \quad (7)$$

Toba (1973)によれば、風波の 1 次元スペクトル $\phi(\sigma)$ は自己相似の形を維持するとの仮定により、

$$\frac{1}{\phi_p \sigma_p} \int_0^\infty \phi(\sigma) d\sigma = \text{constant} = A \quad (8)$$

が成り立つ必要がある。ここに σ_p はピーク周波数、 ϕ_p はスペクトルピーク値、 A は定数である。一方、有義波高は風波スペクトルと次式の関係にある。

$$\int_0^\infty \phi(\sigma) d\sigma = \frac{H_s^2}{16} \quad (9)$$

式(7)、式(8)、式(9)より

$$\phi_p = \frac{1}{\sigma_p} \frac{H_s^2}{16} \frac{1}{A} = \frac{(2\pi)^3}{16A} B^2 g u_*^3 \sigma_p^{-4} \quad (10)$$

が得られる。式(10)は風波スペクトルのピークが周波数の -4 乗に比例して発達することを示している。Toba (1973) はスペクトルの高周波側が σ^{-4} に比例するスペクトルを提案した。

$$\phi(\sigma) = \alpha_s g u_*^3 \sigma^{-4} \quad (11)$$

ここに α_s は経験定数で風と風波スペクトルとの局所平衡状態を示すパラメータであるが、ここでは風波スペクトルの発達状態（飽和度）を表すパラメータとして解釈する。式(10)と式(11)によれば

$$\alpha_s = \frac{(2\pi)^3}{16A} B^2 \quad (12)$$

と表される。すなわち、スペクトルの飽和度 α_s は 3/2 乗則の比例定数 B^2 と比例関係にあることが示される。鈴木ら(2010)は B の経験定数を用いて規格化した風波飽和度 B_n^2 を次式によって導入した。

$$B_n^2 = \left(\frac{B}{0.062} \right)^2 = \frac{1}{0.062^2} \frac{H_s^2}{g u_*^3 T_s^3} \quad (13)$$

鈴木ら(2010)が新たに導入した風波飽和度は、スペクトル観測をしていないデータからでも、有義波高と周期を用いて計算することが可能であり、スペクトルの飽和度という観点から従来のデータを再評価することができるという利点を有する。

4. 海面摩擦係数の評価

4.1 風波飽和度と海面摩擦係数の関係

Table 1 に示された測定データの中から、有義波高と周期が測定されているデータセットについて、式(13)で定義される風波飽和度と海面摩擦係数の関係を調べる。風波のピーク周波数を測定しているデータは、ピーク周波数から有義波の周期に換算した。

Fig. 6 には、国司・今里(1966)の高速風洞水槽の実験データ、Toba (1961, 1972)の風洞水槽実験データ、および Kawai et al. (1977)、鳥羽ら(1971)の白浜海洋観測塔における測定データから計算された風波飽和度 B_n^2 と、海面摩擦係数 C_D の関係を示す。海面摩擦係数と風波飽和度との間には対数軸上で直線状に分布する明らかな負の相関関係が存在している。回帰式を求めると

$$C_D = 0.00194 (B_n^2)^{-0.592} \quad (14)$$

の関係式が得られる。相関係数は -0.90 と非常に高い相関関係である。ただし、この回帰式は国司・今里(1966)の測定データの影響が大きいことに留意する必要がある。

Fig. 7 には、海洋観測データを含む全データを用いて、海面摩擦係数 C_D と風波飽和度 B_n^2 の関係を示す。海洋観測のデータは B_n がほぼ 1 の前後にデータが集まる。風洞水槽実験では風波の発達が未成熟な波も測定可能であるが、海洋では風と局所平衡状態にある風波が観測されるためである。発達段階の風波であれば風波飽和度が 1 を超えることはないと期待されるが、実際には $B_n > 1$ を示すデータも存在する。ほ

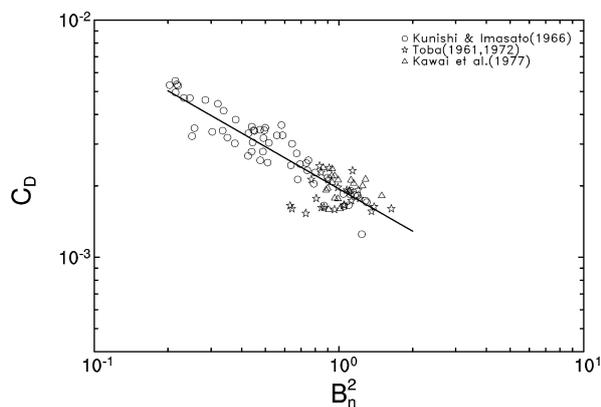


Fig.6 The relation between sea surface drag coefficient C_D and windsea saturation ratio B_n^2 for selected data (Kunishi and Imasato, 1966; Toba, 1961, 1972; Kawai et al., 1977). Thin line shows the regression eq. (14).

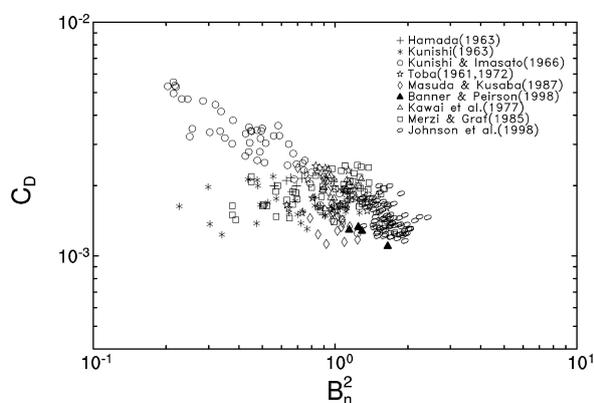


Fig.7 Same as Fig. 6, but for the all data (open sea measurement and wind-wave tank experiment).

とんどの海洋観測のデータは、観測データの処理の際に風波としての代表性がチェックされ、うねりの影響の少ないデータが整理されており、 $B_n > 1$ となるデータは少ない。しかし、Johnson et al. (1998)のデータはデンマーク沖合の水深 5-20m, フェッチ 15-20km の内湾での測定値であるため、浅海の影響により、波高と周期の $3/2$ 乗則の関係が多少ずれているものと考えられる。

海洋観測データを含めると Fig. 6 に比べてデータのばらつきが大きくなる。純粋な風波成分だけではなくうねり成分が含まれると、波浪スペクトルが単峰型ではなくなることに加えて、うねりと風波が共存し相互作用することによる特有の現象があるものと考えられ、より複雑な影響を考慮する必要があることを示唆している。

Fig. 7ではKunishi (1963) のデータのばらつきが他のデータに比べて顕著である。 $B_n < 1$ の領域でも C_D が左上がりに増加しないデータが目立っている。

Kunishi (1963) の実験は国司・今里(1966)よりも一回り小さな風洞水槽 (長さ 21.6m × 高さ 1.0m × 幅 0.75m ; 水深 0.5m) を用いて、風速の弱い初期波の発生発達を対象としているため、風波の局所平衡状態にはまだ十分発達していないデータの影響などが考えられる。また国司・今里(1966) の高速風洞水槽の実験は、より大型の風洞水槽(長さ 40m × 高さ 2.3m × 幅 0.8m ; 水深 1.5m) を用いているものの、測定風速が速く、風と局所平衡状態に達していない風波であることや、境界層の発達などの影響が考えられる。高速風洞水槽の新たな測定データを解析することが必要であると言える。

4.2 風波の発達と海面摩擦係数、運動量輸送との関係

海面摩擦係数 C_D と風波飽和度 B_n^2 の間に負の相関関係があることは、次のように解釈される。すなわち、 B_n が小さくて風と局所平衡状態にまだ達していない風波では、海面摩擦係数が大きく運動量輸送が活発であるのに対し、 B_n が大きくなると局所平衡状態に達するため運動量交換が少なくなり、海面摩擦係数が小さくなるものと理解される。風波スペクトルにはある飽和レベルが存在すると考えた場合、その飽和レベルの周りの風波スペクトル変動量が運動量輸送と密接に関連する。風波飽和度はこの飽和レベルを表すパラメータとして定義されており、海面摩擦係数 (運動量輸送) との相関の高さは、この推察を裏付けるものである。

Toba and Ebuchi (1991) は白浜海象観測塔における風と風波スペクトルの細かな変動を調べた。Fig. 8 は風速 U_{10} , u_* および海面粗度 z_0 の3分移動平均データと、波浪の1分データをスペクトル解析したピーク周波数 f_p , 飽和度 $\tilde{\alpha}_s$ の30分間の変動を示す。なお $\tilde{\alpha}_s$ は式(11)のスペクトル飽和度 α_s とは符号が逆として定義されている。図から明らかのように、海面粗度 z_0 のと $\tilde{\alpha}_s$ の時間変化は非常によく対応している。海面粗度の変化は海面摩擦係数の変化そのものであることから、Fig. 8のデータは、すでに4.1節で述べたように海面摩擦係数とスペクトル飽和度 α_s との間に逆相関の関係があることを示している。通常、風速や波浪の計測は10分から20分間のデータから解析されることがほとんどであるが、Toba and Ebuchi (1991)のように細かな1分程度の風と波のデータをさらに様々な気象海象条件で測定することにより、風波飽和度と海面摩擦係数の関係をさらに明らかにできる可能性がある。

4.3 うねりの影響

鈴木ら(2010)は、うねりの存在が海面摩擦係数と風

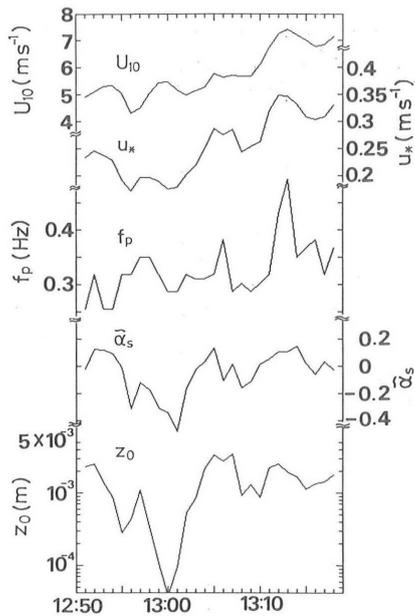


Fig.8 Time series of U_{10} , u_* , f_p , $\tilde{\alpha}_s$ and z_0 from the 3 min moving average of wind and the data of f_p and $\tilde{\alpha}_s$ are from the 1 min data (from Toba and Ebuchi, 1991). The $\tilde{\alpha}_s$ is defined here as a reverse sign of α_s .

波飽和度との間の関係に及ぼす影響を調べた。Fig. 9 には Suzuki et al. (2002)が平塚沖の観測データを解析した結果から、風波に逆向きのうねりが存在するデータと、多方向からのうねりが混在するデータを整理した結果を示す。いずれの場合でも、うねりの存在によって波高が大きめに評価されることから、風波飽和度が1を超えている。逆向きのうねりが存在する場合には、風波だけから推定された回帰式よりも大きな海面摩擦係数を示している。大きい場合には C_D が2ないし3倍にも達していることがわかる。それに対して、多方向からのうねりが混在する場合には、風波だけの場合と概ね同程度か、小さめの海面摩擦係数となっている。うねりが存在する場合には海面摩擦係数が何らかの影響を受けていることは確かであり、特に風に逆向きのうねりが存在する場合の海面摩擦係数は倍以上となる可能性がある。風に逆行するうねりが存在する場合には、うねりの存在により風波の発達が大いに影響されるという風洞水槽実験結果 (Toba et al., 1986; 光易・吉田, 1989; Suzuki et al., 2002) もあることから、海面摩擦係数の変化は風波の発達率と密接に関連しているものと考えられる。

5. おわりに

鈴木ら(2010)は、Toba(1972)による風と局所平衡状態にある有義波高と有義波周期の間に成り立つ3/2

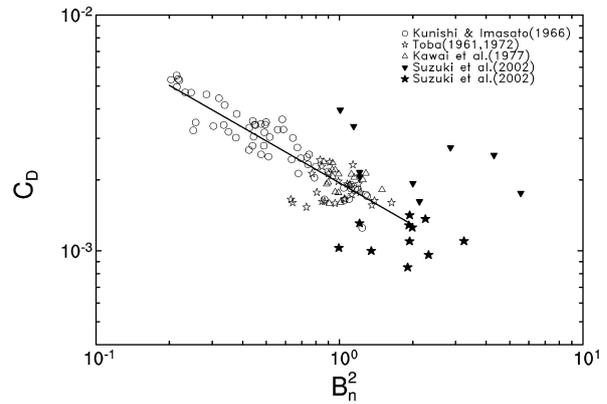


Fig.9 Same as Fig. 5, but for the data with swells from Suzuki et al. (2002) are added. (\blacktriangledown ; swells against winds, \star ; multi directional swells).

乗則に基づく風波飽和度という新たな概念を導入した。式(13)で定義される風波飽和度は、本来は風波データのスペクトル解析を行わなければ得ることができないスペクトル飽和度に関連するパラメータである。風波飽和度は、スペクトル解析データが存在していなくても、有義波高と周期からスペクトル飽和度に相当するパラメータを求めることができるという特長をもっている。その結果、従来から蓄積されてきた海洋観測データや風洞水槽実験データを、風波飽和度という新しい観点から再解析することが可能となった。

新たに定義された風波飽和度を用いて、従来の海洋観測データと風洞水槽実験データを再評価した。その結果、海面摩擦係数と風波飽和度との間には明らかな負の相関関係が存在していることがわかった。その解釈として、 B_n が小さくて風と局所平衡状態にまだ達していない風波では、海面摩擦係数が大きく運動量輸送が活発であるのに対し、 B_n が大きくなると局所平衡状態に達するため運動量交換が少なくなり、海面摩擦係数が小さくなるものと理解される。その関係は、風から波への運動量輸送がスペクトルピークよりも高周波側の平衡領域で行われることから、風波の発達と運動量輸送のプロセスから解釈できることを示している。

風波飽和度の概念は、風波の局所平衡状態からのずれが海面粗度の変動と関連しているとのToba and Ebuchi (1991)の考察をさらに発展させたものである。風波に局所平衡状態が存在することは、ウィルソン等の公式、風波の3/2乗則、風波の-4乗スペクトルなどの経験則の積み重ねから裏付けられており、それらの経験則は風波の相似則が様々な側面を持つことを示している。海面摩擦係数は風速の鉛直シア、すなわち風の運動量の鉛直輸送と関連している。海面に運ばれた風の運動量は海面応力として、吹送流

や風波の発達に使われる。風波飽和度と海面摩擦係数が負の相関関係にあることは、海面応力の一部が風波の発達に寄与していることを別の側面から見ているものと解釈できる。ここに新たに導入した風波飽和度の概念は、風波の局所平衡状態からのずれ、風波の発達、及び海面摩擦係数の変動を結び付ける概念として位置づけられ、今後さらに発展させていく必要がある。

また、今後の課題として、測定データ、特に風洞水槽実験データの再評価を行う必要がある。風洞水槽内の境界層の発達の影響などをより詳細に調査し、有効なデータのみを用いて解析することと、新たに注意深く測定した高速域のデータを解析する必要がある。さらに、海面摩擦係数の変動を風波飽和度および風波の発達と結びつる理論的な検討が求められる。

参考文献

- 国司秀明・今里哲久 (1966) : 高速風洞水槽による風波の発達について, 京都大学防災研究所年報, 第9号, pp. 667-676.
- 鈴木靖・鳥羽良明 (1999) : 無次元粗度一波齢図における観測データの挙動について, 1999年度日本海洋学会春季大会講演要旨集, 講演番号 230.
- 鈴木靖・鳥羽良明・鈴木直弥・小森悟 (2010) : 風波スペクトルの飽和度に関連する海面抵抗係数の変動, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 101-105.
- 鳥羽良明・国司秀明・西勝也・河合三四郎・島田良恵・柴田中夫 (1971) : 白浜海洋観測塔による海面境界過程の研究, 京都大学防災研究所年報, 第14号 B, pp. 519-531.
- 光易恒・吉田賀一 (1989) : 風に逆行するうねりが存在する海面における大気海洋相互作用, 九州大学応用力学研究所所報, 第68号, pp. 47-71.
- Banner, M. L. and W. L. Peirson (1998) : Tangential stress beneath wind-driven air-water interfaces, *J. Fluid Mech.*, Vol. 364, pp. 115-145.
- Charnock, H. (1955) : Wind stress on a water surface, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 81, pp. 639-640.
- Donelan, M. A. (1979) : On the fraction of wind momentum retained by waves, *Marine Forecasting*, Ed. J. C. J. Nihoul, Elsevier, pp. 141-159.
- Geernaert, G. L., S. E. Larsen and F. Hansen (1987) : Measurements of the wind stress, heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, pp. 7667-7679.
- Hamada, T. (1963) : An experimental study of development of wind waves, *Rep. Port and Harbour Tech. Res. Inst.*, No.2, pp. 1-41.
- Iida, N., Y. Toba and M. Chaen (1992) : A new expression for the production rate of sea water droplets on the sea surface, *J. Oceanogr.*, Vol. 48, pp. 439-460.
- Johnson, H. K., J. Hojstrup, H. J. Vested and S. E. Larsen (1998) : On the dependence of sea surface roughness on wind waves, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 28, pp. 1702-1716.
- Kawai, S., K. Okada and Y. Toba (1977) : Field data support of three-seconds power law and the $gu_*\sigma^{-4}$ -spectral form for growing wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 33, pp. 137-150.
- Kunishi, H. (1963) : An experimental study on the generation and growth of wind waves, *Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bull.*, No.61, 41p.
- Masuda, A. and T. Kusaba (1987) : On the local equilibrium of winds and wind-waves in relation to surface drag, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 43, pp. 28-36.
- Merzi, N. and W. H. Graf (1985) : Evaluation of the drag coefficient considering the effects of mobility of the roughness elements, *Ann. Geophys.*, Vol. 3, pp. 473-478.
- Stewart, R. W. (1961) : The wave drag of wind over water, *J. Fluid Mech.*, Vol. 10, pp. 189-194.
- Suzuki, N., N. Ebuchi, C. Zhao, I. Watabe and Y. Sugimori (2002) : Study of the relationship between non-dimensional roughness length and wave age, effected by wave directionality, *Proc. Indian Acad. Sci.*, Vol. 111, No. 3, pp. 305-313.
- Toba, Y. (1961) : Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (III). Study by use of a wind flume, *Mem. Coll. Sci., Univ. of Kyoto, Ser. A.*, Vol. 29, pp. 313-344.
- Toba, Y. (1972) : Local balance in the air-sea boundary processes I. On the growth process of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 28, pp. 109-120.
- Toba, Y. (1973) : Local balance in the air-sea boundary processes III. On the spectrum of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 29, pp. 209-220.
- Toba, Y. and M. Koga (1986) : A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, *Oceanic Whitecaps*, Eds. E. C. Monahan & G. Mac Niocaill, D. Reidel Publishing Company, pp. 37-47.
- Toba, Y., M. Hatori, Y. Imai and M. Tokuda (1986) : Experimental study of elementary processes in wind-waves using wind over regular waves, *Wave*

Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface, Eds. O. M. Phillips and K. Hasselmann, Plenum Press, pp. 117-127.

in light of the windsea Reynolds number, Atmosphere–Ocean Interactions Volume 2, Ed. W. Perrie, WIT Press, pp. 53-82.

Toba, Y. and N. Ebuchi (1991) : Sea-surface roughness length fluctuating in concert with wind and waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 47, pp. 63-79.

Toba, Y., S. Komori, Y. Suzuki and D. Zhao (2006) : Similarity and dissimilarity in air-sea momentum and CO2 transfers: the nondimensional transfer coefficients

解析に用いられた海洋観測データおよび風洞水槽実験データのリストをTable 1として以下に掲載する。

付 録

Table 1 Data list (Measured data are shaded, and calculated data are not shaded.)

Hanada (1963)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10}, u_*)	σ_p (1/sec)	u_*/C_p $\sigma_p u_*/g$	gz_0/u_*^2	R_B $u_*^2/\nu\sigma_p$	u_*z_0/ν	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
50.72	0.178	2.161	22.14	1.146	0.0678	759	59.0	1.54	0.257	0.853
70.70	0.137	2.007	16.16	1.166	0.0269	2022	63.3	2.56	0.353	0.749
95.53	0.179	2.118	13.76	1.342	0.0192	4334	111.8	4.01	0.414	0.793
42.21	0.081	1.789	15.86	0.683	0.0446	734	22.3	2.47	0.359	0.909
69.13	0.136	2.005	12.57	0.886	0.0279	2486	61.4	4.1	0.454	0.832
101.30	0.248	2.294	11.07	1.144	0.0237	6059	164.2	6.24	0.515	0.865
38.39	0.03	1.516	12.57	0.492	0.0199	767	7.5	3.47	0.454	0.945
69.65	0.097	1.900	10.47	0.744	0.0196	3028	44.2	5.3	0.544	0.815
103.35	0.182	2.171	9.28	0.978	0.0167	7527	122.9	7.7	0.614	0.810

Kunishi(1963)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from z_0)	σ_p (1/sec)	u_*/C_p $\sigma_p u_*/g$	gz_0/u_*^2	R_B $u_*^2/\nu\sigma_p$	u_*z_0/ν	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
14.3	0.0118	1.243	28.91	0.422	0.0566	46	1.1	0.403	0.207	0.583
19.1	0.0162	1.315	26.71	0.521	0.0435	89	2.0	0.787	0.224	0.875
25.2	0.0221	1.392	32.88	0.845	0.0341	126	3.6	0.643	0.182	0.850
27.1	0.0336	1.508	22.00	0.608	0.0448	218	6.0	1.370	0.272	0.956
35.1	0.0411	1.569	26.25	0.940	0.0327	307	9.4	1.232	0.228	0.984
34.8	0.0471	1.612	19.24	0.683	0.0381	411	10.7	2.032	0.311	1.023
44.4	0.0666	1.730	23.65	1.072	0.0331	545	19.3	1.362	0.253	0.827
37	0.0366	1.533	16.17	0.611	0.0262	553	8.9	2.688	0.37	1.012
47.8	0.0404	1.563	20.42	0.996	0.0173	731	12.6	1.824	0.293	0.857
46.6	0.0376	1.541	14.05	0.668	0.0170	1010	11.5	2.960	0.426	0.803
66.6	0.0519	1.644	25.46	1.730	0.0115	1139	22.6	0.859	0.235	0.476
59.8	0.0618	1.703	18.24	1.113	0.0169	1281	24.2	2.048	0.328	0.726
60.2	0.0694	1.745	14.60	0.897	0.0188	1623	27.3	4.240	0.41	1.072
101	0.1268	1.987	25.46	2.624	0.0122	2618	83.7	1.214	0.235	0.547
79.1	0.0785	1.791	15.91	1.285	0.0123	2570	40.6	3.600	0.376	0.905
97.5	0.1694	2.122	11.73	1.167	0.0175	5295	108.0	6.944	0.51	0.995
20.9	0.0211	1.380	31.01	0.661	0.0473	92	2.9	0.414	0.193	0.551
17.6	0.0217	1.388	25.25	0.453	0.0687	80	2.5	0.646	0.237	0.688
25.3	0.0345	1.516	26.71	0.690	0.0528	157	5.7	0.866	0.224	0.836
24.4	0.0251	1.426	19.56	0.487	0.0413	199	4.0	2.000	0.306	1.232
36.2	0.0504	1.634	23.47	0.867	0.0377	365	11.9	1.478	0.255	0.983

33.2	0.0474	1.614	17.10	0.579	0.0421	421	10.3	2.448	0.35	1.057
43.5	0.0501	1.632	30.85	1.369	0.0259	401	14.2	1.152	0.194	1.053
46.3	0.0745	1.771	20.71	0.978	0.0341	677	22.5	1.550	0.289	0.756
37.4	0.0398	1.559	15.34	0.586	0.0279	596	9.7	3.040	0.39	1.052
52.8	0.0562	1.671	24.52	1.321	0.0198	743	19.4	1.190	0.244	0.700
47.6	0.0377	1.542	17.76	0.862	0.0163	834	11.7	2.944	0.337	1.124
45.9	0.0322	1.495	13.15	0.616	0.0150	1047	9.7	3.840	0.455	0.951
73.7	0.134	2.012	23.65	1.779	0.0242	1501	64.5	1.469	0.253	0.693
57.7	0.0536	1.654	15.38	0.906	0.0158	1415	20.2	3.248	0.389	0.908
59.8	0.0696	1.746	13.60	0.830	0.0191	1719	27.2	4.864	0.44	1.110
97.6	0.1761	2.141	19.95	1.987	0.0181	3121	112.3	2.080	0.3	0.660
100.5	0.1993	2.204	13.15	1.349	0.0193	5020	130.9	4.448	0.455	0.745
97.9	0.1717	2.129	10.35	1.034	0.0176	6051	109.9	5.824	0.578	0.690

Kunishi & Imasato(1966)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from z_0)	σ_p (1/sec)	$\frac{u_* C_p}{\sigma_p u_* / g}$	gz_0 / u_*^2	$\frac{R_B}{u_*^2 / v \sigma_p}$	$u_* z_0 / v$	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
69.3	0.055	1.663	12.79	0.905	0.0112	2454	24.9	4.816	0.468	0.932
63.8	0.053	1.651	10.85	0.706	0.0128	2452	22.1	6.496	0.551	1.023
78.4	0.056	1.669	10.72	0.858	0.0089	3748	28.7	7.504	0.558	1.047
107.5	0.313	2.457	9.18	1.007	0.0265	8230	219.9	8.448	0.652	0.797
94.8	0.0919	1.852	9.92	0.959	0.0100	5923	56.9	9.344	0.603	1.055
114.8	0.235	2.292	8.62	1.010	0.0175	9987	176.3	10.736	0.694	0.893
123.9	0.191	2.182	9.70	1.226	0.0122	10345	154.7	9.920	0.617	0.947
143.9	0.177	2.144	9.46	1.389	0.0084	14312	166.5	9.648	0.633	0.823
207.7	0.935	3.289	8.10	1.716	0.0212	34821	1269.3	13.632	0.739	0.767
184	0.329	2.488	9.29	1.744	0.0095	23818	395.7	11.328	0.644	0.832
251.5	1.313	3.634	7.63	1.958	0.0203	54179	2158.3	16.304	0.784	0.763
264.2	0.733	3.071	9.44	2.545	0.0103	48331	1265.7	10.608	0.634	0.666
275.1	1.087	3.436	7.57	2.124	0.0141	65384	1954.5	15.216	0.791	0.672
235.1	0.38	2.580	8.84	2.121	0.0067	40863	583.9	11.440	0.677	0.690
277	1.004	3.357	7.61	2.151	0.0128	65912	1817.7	14.720	0.786	0.653
267.9	0.45	2.694	8.99	2.458	0.0061	52174	787.9	11.248	0.666	0.652
304.3	1.104	3.451	7.28	2.262	0.0117	83087	2195.7	17.744	0.822	0.704
390	1.05	3.401	8.25	3.283	0.0068	120520	2676.5	13.040	0.725	0.551
488.4	2.806	4.634	6.84	3.410	0.0115	227870	8957.2	18.704	0.875	0.533
430.1	1.186	3.525	8.05	3.532	0.0063	150231	3334.0	13.072	0.744	0.507
482.9	2.515	4.466	6.45	3.178	0.0106	236294	7937.9	21.552	0.928	0.565
51	0.0127	1.259	14.88	0.774	0.0048	1143	4.2	3.936	0.402	1.113
62	0.0691	1.743	11.79	0.746	0.0176	2130	28.0	6.256	0.507	1.133
65.6	0.0939	1.861	9.92	0.664	0.0214	2836	40.3	7.520	0.603	1.021
85.7	0.0642	1.717	12.06	1.055	0.0086	3979	36.0	7.152	0.496	1.139
109.3	0.257	2.341	10.05	1.121	0.0211	7770	183.6	8.032	0.596	0.861
85.7	0.087	1.830	8.75	0.765	0.0116	5484	48.7	11.088	0.684	1.092
96.9	0.0887	1.838	11.22	1.109	0.0093	5470	56.2	8.016	0.533	1.077
123.9	0.342	2.512	9.24	1.168	0.0218	10857	277.0	9.648	0.647	0.857
145.8	0.697	3.028	7.96	1.185	0.0321	17447	664.2	12.240	0.751	0.802
112.9	0.109	1.922	10.79	1.243	0.0084	7724	80.4	8.992	0.555	1.055

153	0.494	2.761	8.86	1.383	0.0207	17277	494.0	10.928	0.676	0.819
182.2	0.932	3.286	7.50	1.395	0.0275	28927	1109.9	13.936	0.798	0.747
138.5	0.147	2.054	10.68	1.509	0.0075	11743	133.1	8.512	0.560	0.888
160.3	0.38	2.580	8.57	1.402	0.0145	19600	398.1	12.416	0.698	0.866
195	0.851	3.202	7.34	1.461	0.0219	33838	1084.6	13.968	0.815	0.701
204.1	0.349	2.525	9.84	2.050	0.0082	27661	465.6	9.392	0.608	0.715
222.3	0.722	3.058	8.42	1.910	0.0143	38364	1049.0	12.464	0.711	0.719
255.1	1.202	3.539	7.08	1.843	0.0181	60078	2004.1	17.024	0.845	0.707
240.5	0.526	2.807	10.61	2.604	0.0089	35623	826.8	8.448	0.564	0.663
273.3	1.103	3.450	8.49	2.367	0.0145	57525	1970.3	12.704	0.705	0.669
264.2	1.245	3.576	7.07	1.906	0.0175	64527	2149.9	16.304	0.846	0.664
249.6	0.527	2.808	10.59	2.698	0.0083	38446	859.7	9.104	0.565	0.699
291.6	1.127	3.472	8.64	2.570	0.0130	64333	2147.9	13.184	0.693	0.690
461	3.467	4.987	6.83	3.214	0.0160	203282	10446.3	15.824	0.876	0.463
300.7	0.707	3.040	9.97	3.060	0.0077	59259	1389.5	9.584	0.600	0.613
388.1	2.053	4.178	8.22	3.256	0.0134	119721	5207.6	13.792	0.728	0.581
524.8	4.16	5.324	6.69	3.581	0.0148	269221	14269.1	17.648	0.895	0.469
360.8	0.866	3.218	9.34	3.439	0.0065	91099	2042.2	11.184	0.641	0.592
402.7	1.558	3.829	7.66	3.149	0.0094	138305	4100.7	16.528	0.781	0.615
612.3	4.715	5.575	6.41	4.006	0.0123	382212	18869.2	20.048	0.933	0.463
379	0.909	3.262	9.04	3.495	0.0062	103889	2251.7	10.192	0.662	0.501
555.8	2.971	4.725	7.06	4.004	0.0094	285952	10792.7	17.200	0.848	0.482
597.7	4.215	5.349	5.97	3.641	0.0116	391098	16466.0	21.456	1.002	0.451
461	1.092	3.440	9.01	4.237	0.0050	154232	3290.3	13.056	0.664	0.578
623.2	2.96	4.719	7.09	4.508	0.0075	358072	12056.7	18.624	0.844	0.496
643	4.3	5.388	5.90	3.869	0.0102	458241	18071.2	23.456	1.015	0.466

Toba(1961 1972)

u^* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$	σ_p (1/sec)	$\frac{u^* C_p}{\sigma_p u^* / g}$	gz_0 / u^{*2}	$\frac{R_B}{u^{*2} / v \sigma_p}$	$u^* z_0 / v$	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
35.9	0.054	1.66	29.05	1.064	0.0414	290	12.8	0.86	0.206	0.795
45.2	0.076	1.78	22.67	1.045	0.0366	589	22.5	1.95	0.264	1.103
49.3	0.050	1.63	19.43	0.977	0.0201	818	16.0	2.14	0.308	0.920
56.5	0.054	1.66	17.76	1.024	0.0167	1175	20.1	2.93	0.337	1.026
63.2	0.056	1.67	16.95	1.093	0.0138	1540	23.2	3.31	0.353	1.023
78.6	0.109	1.92	15.34	1.231	0.0172	2632	55.7	4.40	0.390	1.050
88.1	0.125	1.98	14.32	1.287	0.0157	3544	71.8	4.90	0.418	0.994
114.9	0.304	2.44	13.15	1.542	0.0226	6561	228.5	5.82	0.455	0.912
33.5	0.047	1.61	21.60	0.738	0.0409	340	10.3	1.31	0.277	0.801
39.4	0.045	1.60	18.70	0.752	0.0287	543	11.7	2.16	0.320	0.979
47.8	0.047	1.61	17.00	0.829	0.0201	878	14.6	3.58	0.352	1.279
54.8	0.041	1.57	15.50	0.867	0.0135	1266	14.8	4.02	0.386	1.166
64.8	0.051	1.64	14.38	0.951	0.0120	1908	21.7	4.94	0.416	1.179
81.7	0.111	1.93	13.45	1.121	0.0163	3244	59.3	5.70	0.445	1.094
113	0.280	2.39	12.41	1.432	0.0215	6722	206.5	6.59	0.482	0.955
111.6	0.252	2.33	12.06	1.374	0.0198	6747	183.7	7.63	0.496	1.066
36.7	0.068	1.74	18.36	0.687	0.0498	480	16.4	2.32	0.326	1.060
38.9	0.037	1.54	16.00	0.635	0.0242	618	9.5	2.37	0.374	0.855
48.9	0.050	1.63	14.38	0.718	0.0204	1086	15.9	3.39	0.416	0.931

61.5	0.076	1.78	13.51	0.848	0.0198	1830	30.7	4.03	0.443	0.898
73.7	0.111	1.93	12.52	0.941	0.0200	2836	53.5	5.71	0.478	1.037
92.6	0.176	2.14	11.55	1.092	0.0201	4851	106.3	6.11	0.518	0.878
102.2	0.176	2.14	11.08	1.156	0.0165	6160	117.4	7.39	0.540	0.949
114.3	0.234	2.29	10.69	1.246	0.0176	7991	175.1	8.00	0.560	0.920

Masuda & Kusaba(1987)

u^* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10,u^*})	σ_p (1/sec)	u^*/C_p $\sigma_p u^*/g$	gz_0/u^{*2}	R_B $u^{*2}/v\sigma_p$	u^*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
26.0	0.0089	1.182	21.55	0.571	0.0129	204	1.5	1.61	0.278	1.113
28.1	0.0212	1.392	18.03	0.517	0.0263	286	3.9	2.04	0.332	1.037
46.1	0.0256	1.432	17.15	0.807	0.0118	809	7.7	2.68	0.349	0.986
45.9	0.0285	1.460	13.76	0.645	0.0132	1002	8.6	3.35	0.435	0.888
73.2	0.0580	1.682	14.07	1.051	0.0106	2488	27.7	4.53	0.425	0.983
71.1	0.0494	1.626	13.01	0.944	0.0096	2540	23.0	5.40	0.460	1.057
124.9	0.2820	2.395	10.74	1.369	0.0177	9487	230.2	7.55	0.557	0.837
62.6	0.0384	1.548	15.27	0.975	0.0096	1675	15.7	0.04	0.392	0.989
25.0	0.0078	1.155	26.20	0.668	0.0122	156	1.3	1.11	0.228	1.045
40.8	0.0177	1.337	20.23	0.843	0.0104	539	4.7	2.06	0.296	1.030
40.2	0.0145	1.290	14.14	0.580	0.0088	748	3.8	3.43	0.423	1.011
40.4	0.0119	1.245	11.50	0.474	0.0071	928	3.1	4.27	0.520	0.922
38.5	0.0069	1.132	10.56	0.415	0.0045	919	1.7	4.93	0.567	0.959
53.9	0.0184	1.346	17.34	0.954	0.0062	1097	6.5	3.10	0.345	1.072
58.1	0.0262	1.436	12.44	0.737	0.0076	1771	9.9	5.11	0.481	1.035
63.0	0.0344	1.515	10.12	0.650	0.0085	2565	14.2	6.91	0.592	0.985
64.4	0.0316	1.490	9.49	0.623	0.0075	2856	13.3	7.90	0.631	1.013
79.3	0.0528	1.648	15.21	1.230	0.0082	2702	27.4	4.25	0.394	0.997
91.4	0.1040	1.903	11.37	1.061	0.0122	4801	62.1	6.86	0.526	0.968
108.1	0.2080	2.226	9.36	1.033	0.0174	8158	147.0	9.77	0.639	0.948
107.5	0.1630	2.105	8.73	0.958	0.0138	8648	114.5	10.95	0.685	0.960

Banner & Peirson(1998)

u^* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10,u^*})	σ_p (1/sec)	u^*/C_p $\sigma_p u^*/g$	gz_0/u^{*2}	R_B $u^{*2}/v\sigma_p$	u^*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
26	0.016	1.304	31.79	0.843	0.0232	142	2.8	0.86	0.188	1.069
35	0.0061	1.111	30.54	1.091	0.0049	267	1.4	1.28	0.196	1.285
37	0.0177	1.342	24.25	0.916	0.0127	376	4.4	1.62	0.247	1.117
46	0.0151	1.292	20.92	0.982	0.0070	674	4.6	2.29	0.286	1.136

Komori et al.(1999)

u^* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10,u^*})	σ_p (1/sec)	u^*/C_p $\sigma_p u^*/g$	gz_0/u^{*2}	R_B $u^{*2}/v\sigma_p$	u^*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
29	0.007	1.137	34.98	1.035	0.0082	160	1.4	-	0.171	-
37	0.015	1.293	26.12	0.986	0.0106	349	3.6	-	0.229	-
41	0.011	1.222	22.40	0.937	0.0063	500	2.9	-	0.267	-
49	0.017	1.321	20.34	1.017	0.0068	786	5.4	-	0.294	-
54	0.013	1.262	18.87	1.040	0.0043	1030	4.6	-	0.317	-
64	0.019	1.353	17.70	1.156	0.0045	1542	8.1	-	0.338	-

78	0.036	1.532	16.66	1.326	0.0059	2433	19.0	-	0.359	-
90	0.056	1.667	14.95	1.373	0.0067	3610	33.4	-	0.400	-
120	0.163	2.104	13.35	1.635	0.0111	7187	130.6	-	0.448	-
144	0.201	2.207	11.89	1.747	0.0095	11620	192.5	-	0.503	-
148	0.202	2.212	11.89	1.796	0.0091	12275	199.8	-	0.503	-

Kawai et al.(1977)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10,u_*})	σ_p (1/sec)	u_*/C_p $\sigma_p u_*/g$	gz_0/u_*^2	R_B $u_*^2/v\sigma_p$	u_*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
35.8	0.287	2.405	3.74	0.137	0.2194	2240	67.1	21.8	1.6	0.928
30.6	0.204	2.216	3.32	0.104	0.2136	1841	40.8	25.4	1.8	0.980
27.8	0.206	2.220	3.15	0.089	0.2608	1604	37.4	25.9	1.9	0.966
23.4	0.273	2.377	3.15	0.075	0.4890	1136	41.8	23.8	1.9	0.968
22.7	0.178	2.146	3.32	0.077	0.3383	1013	26.4	25.3	1.8	1.133
25.5	0.112	1.933	2.99	0.078	0.1686	1420	18.6	26.1	2.0	0.942
32.8	0.174	2.134	2.99	0.100	0.1582	2350	37.2	31.3	2.0	0.996
31.0	0.155	2.078	2.99	0.095	0.1577	2099	31.3	29.6	2.0	0.968
33.3	0.076	1.777	2.85	0.097	0.0669	2543	16.5	33.9	2.1	0.995
37.2	0.078	1.787	2.85	0.108	0.0550	3174	18.9	35.3	2.1	0.980
37.6	0.045	1.600	2.85	0.109	0.0315	3243	11.2	34.5	2.1	0.953
45.4	0.047	1.614	2.72	0.126	0.0226	4953	14.1	42.9	2.2	1.005
49.5	0.150	2.062	2.49	0.126	0.0598	6423	48.4	54.4	2.4	1.071
46.2	0.134	2.012	2.72	0.128	0.0615	5129	40.5	48.1	2.2	1.117
47.0	0.121	1.966	2.60	0.125	0.0536	5549	37.1	44.0	2.3	0.948
50.3	0.172	2.130	2.72	0.140	0.0666	6080	56.5	47.5	2.2	1.057
44.9	0.087	1.829	2.72	0.125	0.0421	4844	25.4	51.9	2.2	1.223
52.5	0.107	1.914	2.49	0.134	0.0380	7225	36.7	54.9	2.4	1.050

Merzi & Graf(1985)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10,u_*})	σ_p (1/sec)	u_*/C_p $\sigma_p u_*/g$	gz_0/u_*^2	R_B $u_*^2/v\sigma_p$	u_*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
40	0.164	1.941	2.64	0.108	0.1005	3963	42.9	49	2.268	1.169
43	0.161	1.973	2.32	0.102	0.0853	5198	45.2	47	2.574	0.894
37	0.052	1.579	2.07	0.078	0.0372	4315	12.6	54	2.886	0.933
40	0.119	1.874	2.07	0.085	0.0729	5044	31.1	50	2.886	0.831
33	0.081	1.644	1.82	0.061	0.0729	3906	17.5	47	3.284	0.708
29	0.040	1.483	1.82	0.054	0.0466	3017	7.6	47	3.284	0.756
35	0.087	1.761	2.07	0.074	0.0696	3861	19.9	47	2.886	0.835
35	0.079	1.672	2.07	0.074	0.0632	3861	18.1	46	2.886	0.817
37	0.073	1.748	2.07	0.078	0.0523	4315	17.7	46	2.886	0.795
43	0.131	1.894	2.07	0.091	0.0694	5828	36.8	51	2.886	0.817
34	0.107	1.802	2.07	0.072	0.0907	3644	23.8	52	2.886	0.937
28	0.046	1.451	2.07	0.059	0.0575	2471	8.4	52	2.886	1.033
50	0.247	2.196	1.70	0.087	0.0968	9632	80.7	61	3.527	0.671
45	0.181	2.087	1.82	0.084	0.0876	7264	53.2	52	3.284	0.671
42	0.173	2.013	1.82	0.078	0.0961	6327	47.5	57	3.284	0.761
37	0.133	1.899	1.82	0.069	0.0952	4911	32.2	53	3.284	0.754
33	0.070	1.652	1.82	0.061	0.0630	3906	15.1	48	3.284	0.723

34	0.086	1.670	1.82	0.063	0.0729	4147	19.1	48	3.284	0.713
33	0.040	1.462	2.07	0.070	0.0360	3433	8.6	44	2.886	0.805
32	0.032	1.411	1.82	0.059	0.0306	3673	6.7	65	3.284	0.995
30	0.108	1.717	2.32	0.071	0.1176	2530	21.2	51	2.574	1.162
35	0.126	1.761	2.32	0.083	0.1008	3444	28.8	54	2.574	1.139
37	0.149	1.895	2.32	0.088	0.1067	3849	36.0	56	2.574	1.149
37	0.184	1.963	2.32	0.088	0.1317	3849	44.5	55	2.574	1.128
36	0.184	1.900	2.32	0.085	0.1391	3644	43.3	51	2.574	1.060
31	0.099	1.638	2.32	0.074	0.1010	2702	20.1	50	2.574	1.120
30	0.099	1.684	2.32	0.071	0.1078	2530	19.4	50	2.574	1.139
32	0.102	1.687	2.32	0.076	0.0976	2879	21.3	47	2.574	1.037
37	0.194	2.002	2.32	0.088	0.1389	3849	46.9	52	2.574	1.067
43	0.185	1.949	2.32	0.102	0.0981	5198	52.0	55	2.574	1.046
45	0.348	2.377	2.32	0.107	0.1684	5693	102.4	53	2.574	0.986
46	0.368	2.335	2.32	0.109	0.1704	5949	110.6	56	2.574	1.030
46	0.385	2.452	2.32	0.109	0.1783	5949	115.8	57	2.574	1.049
40	0.306	2.189	2.32	0.095	0.1874	4498	80.0	57	2.574	1.124
39	0.224	2.000	2.07	0.083	0.1443	4795	57.1	56	2.886	0.942
38	0.279	2.116	2.32	0.090	0.1893	4060	69.3	53	2.574	1.073
31	0.168	1.760	2.32	0.074	0.1713	2702	34.0	48	2.574	1.076
28	0.015	1.368	2.07	0.059	0.0188	2471	2.7	64	2.886	1.271
34	0.053	1.698	2.07	0.072	0.0449	3644	11.8	64	2.886	1.153
39	0.089	1.916	2.07	0.083	0.0573	4795	22.7	64	2.886	1.077
37	0.068	1.772	2.07	0.078	0.0487	4315	16.4	68	2.886	1.175
39	0.050	1.671	2.07	0.083	0.0322	4795	12.7	72	2.886	1.212
37	0.081	1.851	2.07	0.078	0.0580	4315	19.6	72	2.886	1.244
47	0.108	2.007	2.07	0.099	0.0479	6963	33.2	73	2.886	1.119
54	0.254	2.406	2.07	0.114	0.0854	9192	89.6	82	2.886	1.173
47	0.103	1.959	2.07	0.099	0.0457	6963	31.6	82	2.886	1.257
49	0.155	2.097	1.82	0.091	0.0633	8612	49.6	88	3.284	1.088
54	0.211	2.272	1.82	0.100	0.0709	10460	74.5	93	3.284	1.096
47	0.121	2.070	1.82	0.087	0.0537	7924	37.2	93	3.284	1.174
47	0.115	2.038	1.57	0.075	0.0510	9191	35.3	103	3.810	1.041
45	0.109	1.946	1.57	0.072	0.0528	8426	32.1	97	3.810	1.002
57	0.237	2.461	1.82	0.106	0.0715	11654	88.3	97	3.284	1.112
55	0.218	2.420	1.82	0.102	0.0706	10851	78.4	97	3.284	1.132
46	0.081	1.953	1.82	0.086	0.0375	7590	24.4	99	3.284	1.264
43	0.135	2.223	1.82	0.080	0.0716	6632	37.9	69	3.284	0.911
40	0.074	1.932	1.82	0.074	0.0453	5739	19.3	69	3.284	0.944
32	0.035	1.645	1.82	0.059	0.0335	3673	7.3	66	3.284	1.010
32	0.029	1.508	2.07	0.068	0.0278	3228	6.1	33	2.886	0.613
31	0.022	1.436	2.07	0.066	0.0224	3029	4.5	33	2.886	0.623
32	0.055	1.649	2.07	0.068	0.0526	3228	11.5	33	2.886	0.613

Geernaert et al.(1987)

u^* (from U_{10}, C_D) (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$	σ_p (from $H_s, 3/2$ law) (1/sec)	u^*/C_p $\sigma_p u^*/g$	gz_0/u^{*2}	R_B $u^{*2}/v\sigma_p$	u^*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
24.3	0.011	1.232	1.14	0.028	0.0187	3374	1.8	115	-	-
34.6	0.016	1.318	1.34	0.047	0.0134	5848	3.7	108	-	-
33.5	0.006	1.120	1.38	0.047	0.0056	5344	1.4	102	-	-
37.0	0.020	1.363	1.42	0.054	0.0141	6294	4.8	102	-	-
40.3	0.017	1.329	1.41	0.058	0.0104	7536	4.5	108	-	-
42.4	0.011	1.227	1.36	0.059	0.0060	8603	3.0	116	-	-
45.6	0.024	1.415	1.34	0.062	0.0113	10170	7.2	124	-	-
46.3	0.024	1.415	1.29	0.061	0.0110	10867	7.3	132	-	-
46.4	0.033	1.500	1.25	0.059	0.0149	11231	9.9	138	-	-
43.3	0.017	1.320	1.21	0.053	0.0086	10156	4.7	141	-	-
54.8	0.118	1.957	1.36	0.076	0.0386	14393	42.4	132	-	-
57.4	0.115	1.946	1.44	0.085	0.0343	14905	43.3	124	-	-
54.4	0.085	1.820	1.41	0.078	0.0281	13686	30.1	125	-	-
55.3	0.067	1.734	1.35	0.076	0.0216	14809	24.3	135	-	-
51.9	0.024	1.415	1.26	0.067	0.0088	13979	8.2	145	-	-
60.2	0.081	1.803	1.26	0.078	0.0219	18713	31.9	155	-	-
59.3	0.036	1.529	1.21	0.073	0.0101	19032	14.0	165	-	-
67.9	0.165	2.109	1.21	0.084	0.0350	24832	73.2	175	-	-
69.1	0.193	2.186	1.18	0.083	0.0395	26521	87.0	185	-	-
63.5	0.165	2.109	1.10	0.072	0.0401	23837	68.4	195	-	-
67.0	0.178	2.146	1.09	0.074	0.0388	26964	77.9	205	-	-
57.3	0.020	1.370	1.02	0.060	0.0061	20962	7.6	208	-	-
65.8	0.095	1.866	1.00	0.067	0.0215	28284	40.9	230	-	-
62.3	0.047	1.613	1.31	0.083	0.0119	19398	19.2	150	-	-
75.6	0.360	2.544	0.94	0.072	0.0617	39793	177.6	272	-	-
78.2	0.625	2.940	0.89	0.071	0.1001	44826	319.8	298	-	-
71.6	0.257	2.342	0.81	0.059	0.0491	41408	120.4	330	-	-
65.3	0.099	1.880	0.76	0.051	0.0226	36633	42.0	346	-	-
55.0	0.026	1.436	0.71	0.040	0.0084	27909	9.4	353	-	-
52.7	0.023	1.402	0.76	0.041	0.0081	23782	7.9	309	-	-
60.2	0.104	1.903	0.72	0.045	0.0281	32766	41.0	358	-	-
59.5	0.040	1.559	0.73	0.044	0.0110	31857	15.5	354	-	-
71.4	0.146	2.052	0.78	0.057	0.0281	42914	68.2	351	-	-
84.9	0.480	2.740	0.81	0.070	0.0653	57939	266.4	357	-	-
76.8	0.149	2.061	0.76	0.060	0.0248	50438	74.8	373	-	-

Stewart(1961)

u^* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$	σ_p (1/sec)	u^*/C_p $\sigma_p u^*/g$	gz_0/u^{*2}	R_B $u^{*2}/v\sigma_p$	u^*z_0/v	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
39.6	0.032	1.568	3.15	0.127	0.0199	3251	8.3	-	-	-
47.7	0.185	2.275	2.39	0.116	0.0797	6221	57.7	-	-	-
62.7	1.450	3.931	1.87	0.119	0.3615	13765	594	-	-	-
62.9	1.480	3.956	1.57	0.101	0.3666	16456	608	-	-	-
61.4	1.260	3.770	1.28	0.080	0.3275	19308	506	-	-	-

49.5	0.004	1.089	2.39	0.121	0.0016	6699	1.3	-	-	-
64.2	0.069	1.832	1.87	0.122	0.0164	14432	29	-	-	-
81.0	0.504	2.916	1.46	0.120	0.0753	29429	267	-	-	-
97.2	1.790	4.199	1.28	0.127	0.1857	48387	1140	-	-	-
96.9	1.750	4.173	0.96	0.095	0.1826	63800	1110	-	-	-
90.9	1.150	3.672	0.84	0.078	0.1364	64074	683	-	-	-
64.6	0.003	1.043	2.07	0.136	0.0007	13198	1.3	-	-	-
76.8	0.023	1.475	1.57	0.123	0.0038	24532	11.6	-	-	-
104.2	0.382	2.714	1.22	0.130	0.0345	58213	260	-	-	-
110.6	0.603	3.058	1.03	0.116	0.0483	77729	436	-	-	-
127.4	1.600	4.058	0.80	0.104	0.0966	132921	1330	-	-	-
130.8	1.890	4.277	0.70	0.093	0.1083	160619	1620	-	-	-
126.8	1.550	4.020	0.64	0.082	0.0945	165181	1280	-	-	-

Johnson et al.(1998)

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$ (from U_{10}, u_*)	σ_p (1/sec)	u_*/C_p $\sigma_p u_*/g$	gz_0/u_*^2	R_B $u_*^2/v\sigma_p$	$u_* z_0/v$	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
17	0.069	1.686	2.99	0.052	0.2342	631	7.7	29.9	2.00	1.322
16	0.029	1.472	2.95	0.049	0.1108	567	3.0	34.9	2.03	1.555
25	0.019	1.352	2.76	0.071	0.0297	1482	3.1	35.5	2.17	1.144
18	0.025	1.361	2.36	0.045	0.0762	897	3.0	43.2	2.53	1.301
22	0.020	1.340	2.49	0.057	0.0395	1269	2.8	43.8	2.40	1.295
23	0.056	1.640	2.51	0.060	0.1043	1376	8.5	44.0	2.38	1.287
23	0.065	1.788	2.37	0.058	0.1197	1458	9.7	44.6	2.52	1.196
28	0.123	2.007	2.60	0.076	0.1536	1974	22.5	46.6	2.30	1.296
19	0.026	1.456	2.28	0.046	0.0695	1033	3.2	46.6	2.62	1.298
18	0.041	1.505	2.31	0.044	0.1247	917	4.9	47.8	2.59	1.393
21	0.031	1.479	2.49	0.055	0.0678	1156	4.2	49.4	2.40	1.495
25	0.062	1.719	2.35	0.062	0.0971	1736	10.1	49.4	2.54	1.256
21	0.046	1.669	2.18	0.049	0.1025	1321	6.3	51.8	2.74	1.283
23	0.015	1.287	2.29	0.057	0.0278	1508	2.3	54.6	2.61	1.390
22	0.021	1.429	2.31	0.054	0.0420	1369	3.0	55.5	2.59	1.463
27	0.019	1.368	2.16	0.063	0.0258	2207	3.4	62.9	2.77	1.351
24	0.015	1.310	2.05	0.054	0.0254	1839	2.3	68.0	2.92	1.430
32	0.012	1.245	2.07	0.073	0.0115	3228	2.5	68.3	2.89	1.269
33	0.013	1.276	2.00	0.073	0.0114	3557	2.7	70.6	2.99	1.224
39	0.035	1.546	2.12	0.091	0.0227	4683	9.0	70.7	2.82	1.233
45	0.046	1.594	2.16	0.105	0.0224	6130	13.6	72.0	2.77	1.199
39	0.013	1.255	2.20	0.093	0.0082	4525	3.2	72.3	2.72	1.327
47	0.144	2.011	2.21	0.113	0.0640	6526	44.3	73.0	2.70	1.233
32	0.011	1.248	2.07	0.073	0.0101	3228	2.2	73.4	2.89	1.364
34	0.013	1.276	2.07	0.078	0.0108	3656	2.8	73.9	2.90	1.326
37	0.022	1.394	2.10	0.085	0.0154	4258	5.2	74.2	2.85	1.309
40	0.031	1.499	2.07	0.091	0.0188	5060	8.0	77.3	2.90	1.278
34	0.034	1.513	1.98	0.075	0.0289	3812	7.6	77.3	3.02	1.302
35	0.027	1.483	1.90	0.075	0.0213	4218	6.1	77.9	3.15	1.212
34	0.016	1.297	1.93	0.073	0.0135	3920	3.5	78.7	3.10	1.271
36	0.019	1.344	1.91	0.077	0.0145	4435	4.5	78.7	3.13	1.219

44	0.053	1.666	2.02	0.099	0.0268	6263	15.2	78.9	2.96	1.202
47	0.012	1.264	2.17	0.112	0.0054	6664	3.8	79.4	2.76	1.299
40	0.016	1.296	2.01	0.090	0.0098	5209	4.2	79.4	2.98	1.256
35	0.010	1.230	2.03	0.079	0.0083	3950	2.4	80.5	2.95	1.382
40	0.025	1.416	1.93	0.088	0.0155	5409	6.6	80.6	3.10	1.206
35	0.015	1.313	2.06	0.079	0.0118	3887	3.4	80.6	2.90	1.419
44	0.028	1.464	2.05	0.100	0.0144	6183	8.2	81.1	2.92	1.260
36	0.019	1.330	1.88	0.077	0.0142	4503	4.4	81.6	3.18	1.235
41	0.020	1.387	2.03	0.093	0.0119	5403	5.5	82.4	2.94	1.313
36	0.029	1.448	1.89	0.077	0.0216	4489	6.7	82.4	3.17	1.253
42	0.010	1.215	2.03	0.095	0.0057	5688	2.8	83.4	2.95	1.306
42	0.018	1.369	1.91	0.091	0.0100	6037	5.0	83.7	3.13	1.199
34	0.031	1.463	1.90	0.072	0.0266	3980	7.0	83.8	3.15	1.324
37	0.011	1.223	1.89	0.080	0.0081	4742	2.7	84.2	3.17	1.262
45	0.017	1.309	1.99	0.102	0.0082	6656	5.0	84.3	3.01	1.240
38	0.010	1.198	1.98	0.085	0.0070	4762	2.6	84.5	3.02	1.346
35	0.017	1.318	2.01	0.078	0.0134	3988	3.8	84.5	2.98	1.429
39	0.042	1.546	1.87	0.082	0.0268	5316	10.6	84.5	3.20	1.218
34	0.012	1.241	1.92	0.074	0.0102	3944	2.7	84.8	3.12	1.357
46	0.022	1.378	2.05	0.105	0.0101	6757	6.6	85.4	2.92	1.298
42	0.013	1.256	1.90	0.091	0.0074	6074	3.6	85.9	3.15	1.220
34	0.012	1.254	1.92	0.075	0.0104	3932	2.7	87.5	3.11	1.407
37	0.028	1.464	1.93	0.080	0.0202	4642	6.8	87.7	3.10	1.358
35	0.020	1.372	1.93	0.076	0.0159	4154	4.5	88.3	3.10	1.406
35	0.010	1.213	1.83	0.074	0.0082	4384	2.3	88.6	3.28	1.302
39	0.054	1.661	1.81	0.080	0.0349	5506	13.8	89.4	3.31	1.223
38	0.020	1.374	1.92	0.082	0.0136	4912	5.0	89.6	3.11	1.363
49	0.029	1.484	2.01	0.111	0.0117	7792	9.2	89.8	2.97	1.290
38	0.011	1.224	1.77	0.078	0.0078	5332	2.8	91.0	3.38	1.224
52	0.028	1.441	2.01	0.118	0.0102	8804	9.5	91.2	2.98	1.266
41	0.088	1.863	1.93	0.089	0.0510	5683	23.5	92.6	3.10	1.369
41	0.017	1.335	1.76	0.084	0.0098	6243	4.5	93.8	3.40	1.203
39	0.019	1.359	1.85	0.082	0.0121	5379	4.8	93.8	3.24	1.328
37	0.009	1.167	1.88	0.078	0.0063	4771	2.1	93.8	3.19	1.394
33	0.012	1.251	1.80	0.069	0.0107	3954	2.6	94.2	3.32	1.395
36	0.017	1.347	1.83	0.076	0.0125	4638	3.9	94.7	3.28	1.372
34	0.014	1.260	1.79	0.071	0.0123	4221	3.2	95.5	3.34	1.381
58	0.051	1.634	1.89	0.125	0.0147	11618	19.2	96.5	3.16	1.161
65	0.086	1.843	1.96	0.145	0.0199	14108	36.4	97.6	3.06	1.167
59	0.043	1.570	1.95	0.131	0.0121	11696	16.5	99.5	3.08	1.237
65	0.060	1.703	1.95	0.144	0.0139	14196	25.5	101.1	3.08	1.198
60	0.046	1.583	1.95	0.132	0.0126	12096	18.1	101.4	3.08	1.251
63	0.070	1.732	1.94	0.140	0.0174	13377	29.0	101.8	3.09	1.219
62	0.059	1.684	1.97	0.139	0.0151	12756	24.0	102.4	3.04	1.265
38	0.016	1.330	1.62	0.076	0.0109	5813	4.0	106.6	3.69	1.259
69	0.077	1.781	1.89	0.150	0.0158	16492	34.6	107.5	3.17	1.181
69	0.077	1.790	1.84	0.147	0.0159	16938	34.7	108.0	3.26	1.140
69	0.099	1.886	1.91	0.151	0.0205	16294	44.8	110.6	3.13	1.236

51	0.025	1.410	1.74	0.105	0.0095	9794	8.4	113.8	3.45	1.282
----	-------	-------	------	-------	--------	------	-----	-------	------	-------

Donelan(1979) field

u_* (cm/s)	z_0 (cm)	$10^3 C_D$	σ_p (1/sec)	$\frac{u_* C_p}{\sigma_p u_* / g}$	gz_0 / u_*^2	$\frac{R_B}{u_*^2 / \nu \sigma_p}$	$u_* z_0 / \nu$	H_s (cm)	T_s (sec)	B_n
57.79	0.231	2.281	3.3	0.195	0.0676	6615	87.1	-	-	-
33.02	0.043	1.582	4.3	0.145	0.0386	1657	9.3	-	-	-
58.65	0.591	2.895	3.7	0.221	0.1683	6076	226.4	-	-	-
40.74	0.177	2.144	4.1	0.170	0.1046	2646	47.2	-	-	-
62.61	0.833	3.182	3.7	0.236	0.2081	6925	340.7	-	-	-
51.09	0.744	3.084	4.0	0.209	0.2795	4265	248.6	-	-	-

Re-Evaluation of Measurement Data of Sea-Surface Drag Coefficient Based on the Concept of the Windsea Saturation Ratio

Yasushi SUZUKI and Yoshiaki TOBA*

* Tohoku University (Emeritus)

Synopsis

Traditional measurement data of sea-surface drag coefficient have been re-evaluated based on a new concept of the windsea saturation ratio. The saturation ratio of wind wave spectrum is calculated by using spectral analyses in principle, however this parameter derived by the 3/2 power law gives us the saturation ratio without spectral analyses by using the significant wave height and period. It is found that a negative correlation between sea-surface drag and the windsea saturation ratio exists. The relation can be explained that the windsea conditions not in local equilibrium with the wind affect the momentum exchange rate from the wind to the waves, so the sea-surface drag varies in proportion to the momentum exchange rate.

Keywords: sea-surface drag coefficient, windsea saturation ratio, 3/2 power law, wind wave spectrum