

風波特性量に基づく海面粗度・海面抵抗係数のパラメタリゼーション

Descriptions of Sea-Surface Roughness and Drag Coefficient Based on Windsea Parameters

杉原裕司¹・安東卓哉²・佐伯拓朗³・芹澤重厚⁴・吉岡 洋⁵

Yuji SUGIHARA, Takuya ANDO, Takuro SAEKI, Shigeatsu SERIZAWA and Hiroshi YOSHIOKA

We examined field observation data of the friction velocity on the sea surface to describe the roughness and the drag coefficient in terms of windsea parameters. Estimations of the friction velocity were made by the combined use of the eddy correlation and inertial dissipation methods. Based on directional wave spectra, we extracted only pure windsea data to carry out the parameterizations for ideal wave-fields. The sea-surface roughness was parameterized in terms of two dimensionless windsea parameters, i.e., the wave-wind coefficient and the windsea Keulegan number. The drag coefficient was formulated empirically on the basis of the result of the roughness parameterization. The validity of the empirical expression for the drag coefficient was confirmed in comparison with the field observation data.

1. はじめに

大気海洋相互作用を記述するための最も基本的な特性量が海面風応力である。海面風応力は、大気から海洋への運動量輸送量を表しており、海面抵抗係数を用いて評価されることが多い。平均風向の風応力 τ と海面抵抗係数 C_{Dz} は次式のように定義される。

$$\tau = -\rho_a \overline{u'w'}, \quad C_{Dz} = \frac{u_*^2}{U_z^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 u' および w' はそれぞれ平均風向および鉛直方向の風速変動、 ρ_a は空気密度、 $\overline{\quad}$ は時間平均を示す。また、 u_* は摩擦速度 $(= (\tau/\rho_a)^{1/2})$ であり、 U_z は海上高度 z における平均風速である。海面抵抗係数が、海面状態（すなわち波浪状態）に依存して変化するの当然のことのように思われる。

海面抵抗係数と等価な量として海面粗度がある。海面粗度 z_0 は次式のように平均風速の対数分布則を用いて定義される。

$$U_z = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 κ はKarman定数 $(= 0.4)$ である。図-1に過去の研究において提案された波風径数 $(\equiv \omega_p u_* / g)$ をパラメータとした代表的な海面粗度の経験式を示す。ここで、 g は重力加速度、 ω_p は波のピーク角周波数であり、無次元

元粗度 $(\equiv gz_0/u_*^2)$ と波風径数の関係が与えられている。この図から、多種多様な経験式が提案されており、海面粗度の波浪依存性について多くの見解があることがわかる。この図は、海面粗度の波浪依存性の問題がいかに手強いかを端的に表している。図中には、実海洋での観測データに基づく経験式に加えて、室内実験に基づくDonelan (1990) およびMasuda and Kusaba (1987) の経験式も併せて示されている。注目すべきことは、実験室と実海洋での波風径数が大きく異なる（波のスケールが大きく異なる）にも関わらず、無次元粗度の大きさが概ね同じ（Charnock定数程度）になることである。これらのことは、無次元粗度は波風径数のみで普遍表示できず、他のパラメータにも依存することを示唆している。

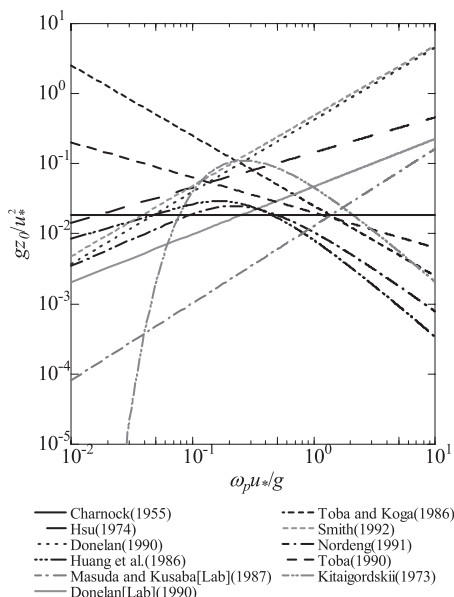


図-1 代表的な経験式における無次元粗度と波風径数の関係

- | | | | |
|---|-----|------|--------------------------------------|
| 1 | 正会員 | 博(工) | 九州大学准教授 大学院総合理工学研究
院流体環境理工学部門 |
| 2 | | 修(工) | TOTO株式会社 |
| 3 | | | 九州大学大学院総合理工学府 大気海洋
環境システム学専攻 修士課程 |
| 4 | | | 京都大学 防災研究所流域災害研究セン
ター |
| 5 | 正会員 | 理博 | 愛知県立大学教授 情報科学部地域情報
科学科 |

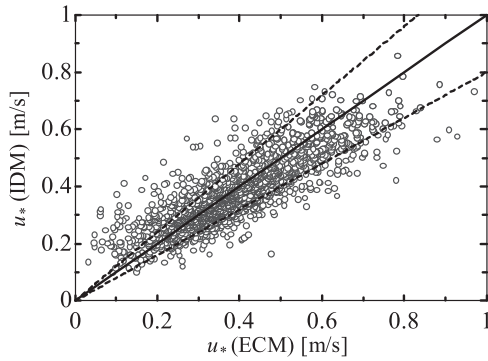


図-2 Pure windseaにおけるECMとIDMによる摩擦速度の比較

本研究では、海洋観測塔において得られた、風波の卓越する波浪場の現地観測データを対象として、海面粗度および海面抵抗係数のパラメタリゼーションについて検討する。なお、本研究においては、測定方法に起因した誤差の小さなデータを選定するために、摩擦速度の測定方法として渦相関法と慣性散逸法を同時併用する。また、WAVEADCPの測定値から算定された波の方向スペクトルを用いて、風波が卓越する波浪場（Pure windsea）のデータを抽出した。このようにして得られたデータセットに基づいて、波風径数と風波クーリガン数を取り込んだ海面粗度のパラメタリゼーションを行う。また、海面粗度に関する知見を基に、海面抵抗係数の経験式を構築することを試みる。

2. 現地観測の方法

観測は、和歌山県西牟婁郡白浜町の田辺湾沖合約2 km（東経135° 20′ 08″，北緯33° 42′ 19″）に位置する田辺中島高潮観測塔（京都大学防災研究所流域災害研究センター所有）において実施された。観測塔の高さは、海上約23mである。本研究では、波浪条件が海面粗度や海面抵抗係数に及ぼす影響を検討するために、波浪データを備えたデータセットの構築が不可欠である。また、荒天時も含めた様々な気象・海象条件について検討を行う必要がある。そのようなデータセットの取得は、調査船観測では困難であり、本研究のような観測塔などの海上プラットフォームにおける調査が最適であると考えられる。観測塔の設置海域は南西方向が外海に面しており、比較的大きなうねりは主に南西方向から伝播してくる。観測塔付近の平均水深は約30mである。ただし、観測塔は海域にある水深約10mの岩礁の上に設置されている。観測期間は2006年3月22日から5月4日の45日間、および2007年1月24日から3月14日までの50日間である。

3. 海面摩擦速度の算定方法

海面摩擦速度の代表的な算定方法として渦相関法（ECM）と慣性散逸法（IDM）がある。ECMは高応答の測器を用いて測定した風速の変動成分の相関を計算して、摩擦速度を算定する方法である。ECMは係数の不確定性や相似則を仮定する必要がないことから、最も直接的で信頼性の高い方法と考えられている。一方、IDMは風速変動のスペクトルから得られた乱流エネルギー散逸率 ε を用いて u_* を算定する方法であり、様々な仮定に基づいている。理想的な接水大気境界層においては、ECMとIDMによって算定された u_* の値は一致すると考えられる。従って、両者の適合度の高いデータを抽出することで、測定法に起因する誤差の小さなデータセットを構築することができる。図-2に、風波が卓越する波浪場（Pure windsea）における、ECMとIDMによって算定された u_* の比較を示す。なお、本研究におけるPure windseaの定義は、風波成分波のエネルギースペクトルのピークがうねり成分波のそれより1オーダー以上大きい波浪場としている。図中の実線は両者の値が等しい場合の比例関係を示しており、破線に囲まれた範囲のデータは両者の相対誤差が20%未満に収まるものに対応する。この図から、多少の分散はあるものの、ECMとIDMのデータは概ね1:1の比例関係をとるように見える。本研究では、両者の相対誤差が20%未満に収まるデータのみを解析対象としている。

4. 海面粗度および海面抵抗係数のパラメタリゼーション

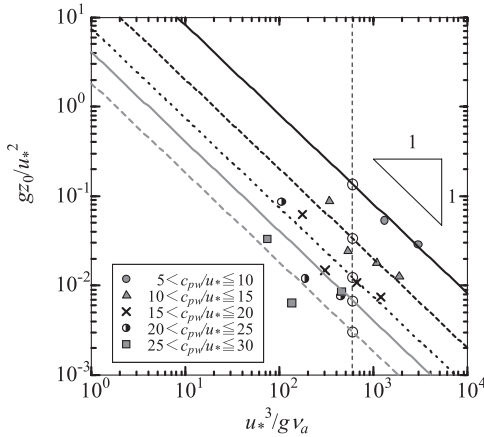
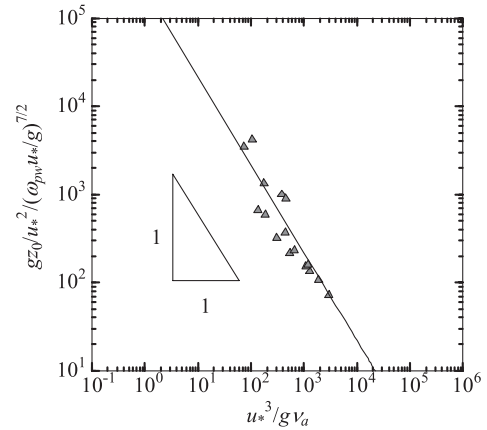
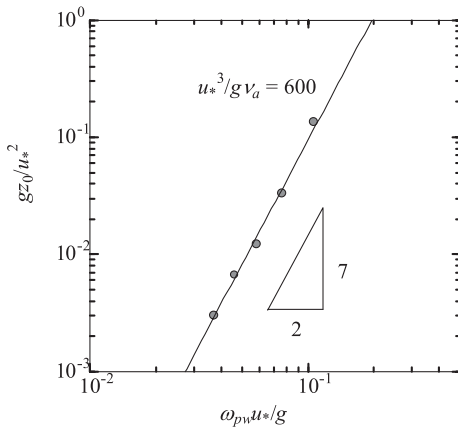
本研究では、海面粗度 z_0 が、波風径数（または波齢）だけではなく、物性値に関わるパラメータにも依存するものとして、次のようなパラメータに支配されていると考える。

$$z_0 = f(u_*, g, \omega_{pw}, \gamma, \nu_a; \text{spectral structure}) \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 ω_{pw} は風波のピーク角周波数、 γ は表面張力係数、 ν_a は空気動粘性係数である。また、うねりの作用等、波浪場のスペクトル構造を変化させる影響因子をspectral structureとして表している。上式に関して次元解析を行うと次式が得られる。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = f\left(\frac{\omega_{pw}u_*}{g}, \frac{u_*^3}{g\nu_a}, \frac{\gamma^3}{g\nu_a^4}; \text{spectral structure}\right) \quad \cdots (4)$$

本研究では、Pure windseaのデータのみを対象とするため、spectral structureの因子をある理想的な条件に固定したものと考えることができる。また、 $\gamma^3/g\nu_a^4$ は近似的に定数と見なすことができるので、無次元粗度 gz_0/u_*^2 を規

図-3 波齢を指標とした gz_0/u_*^2 と u_*^3/gv_a の関係図-5 $gz_0/u_*^2 / (\omega_{pw}u_*/g)^{7/2}$ と u_*^3/gv_a の関係図-4 u_*^3/gv_a を 600 に固定した場合の gz_0/u_*^2 と $\omega_{pw}u_*/g$ の関係

定している実質的なパラメータは、波風径数 $\omega_{pw}u_*/g$ と風波クーリガン数 u_*^3/gv_a の2つである。無次元粗度の各パラメータに対する依存性を正しく見るためには、他のパラメータの値を固定した状態でパラメータ依存性を調べる必要があることに注意する。そのために、波風径数（または波齢）と風波クーリガン数で分類された無次元粗度のデータセットを作成した。

図-3に波齢（波風径数の逆数）によって分類された gz_0/u_*^2 と u_*^3/gv_a の関係を示す。図中の実線および破線は、風波クーリガン数の-1乗のべき関数を各データ群に最小自乗法により適合させた曲線を示す。なお、-1乗のべき指数は最もデータ数の多い2つのデータ群（ $10 < c_{pw}/u_* \leq 15$ および $15 < c_{pw}/u_* \leq 20$ ）から最小自乗近似により算定されたものである。この図から、各データ群が風波クーリガン数のおよそ-1乗で減衰していることがわかる。また、波齢（つまり波風径数）の異なる全てのデータに対して近似的に同じべき関数形が適合することから、 $\omega_{pw}u_*/g$ と u_*^3/gv_a は変数分離可能であり、無次元粗度は各々

のパラメータの関数の積として表すことができることがわかる。

次に、 u_*^3/gv_a の値が一定のデータに対して gz_0/u_*^2 と $\omega_{pw}u_*/g$ の関係を調べる。図-4に u_*^3/gv_a の値を600に固定した場合の gz_0/u_*^2 と $\omega_{pw}u_*/g$ の関係を示す。ここでプロットされたデータは図-3における $u_*^3/gv_a=600$ の破線とデータ適合曲線との交点（図中の白丸）より算定されたものである。この図から、本研究のデータは7/2乗のべき関数に適合していることがわかる。従って、 u_*^3/gv_a の値を一定に固定した場合、無次元粗度 gz_0/u_*^2 は波風径数 $\omega_{pw}u_*/g$ の7/2乗に比例することがわかった。

以上より、無次元粗度は以下の関数形で表される。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = B \left(\frac{\omega_{pw}u_*}{g} \right)^{7/2} \left(\frac{u_*^3}{gv_a} \right)^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 B は比例定数である。パラメタリゼーションに用いた全てのデータに対して、式（5）の適合性を検討するために、図-5に $gz_0/u_*^2 / (\omega_{pw}u_*/g)^{7/2}$ と u_*^3/gv_a の関係を示す。最小自乗法から、本研究の観測データに対しては $B=2.2 \times 10^5$ が最もよく適合することがわかった。従って、本研究における観測データから求められた海面粗度の経験式は次式で与えられる。

$$\frac{gz_0}{u_*^2} = 2.2 \times 10^5 \left(\frac{\omega_{pw}u_*}{g} \right)^{7/2} \left(\frac{u_*^3}{gv_a} \right)^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、本経験式は、図-2から判断して、風波クーリガン数が概ね $100 < u_*^3/gv_a < 3000$ の範囲にある場合に適用することに注意する。図-1に示したような従来の経験式では、 z_0 の u_* 依存性がおおよそ2～3乗になっている。式（6）における z_0 は u_* の2.5乗に比例することになり、その依存性は従来の経験式のそれと整合している。

図-6に、 gz_0/u_*^2 と u_*^3/gv_a の観測データと Tsumori et al.

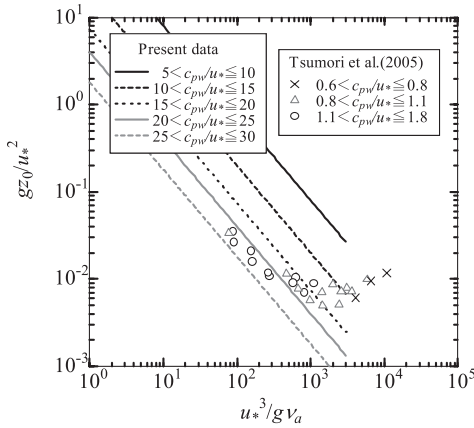
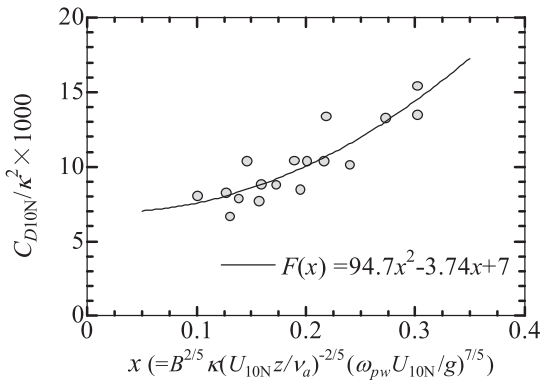

図-6 実験データにおける $g z_0 / u_*^2$ と $u_*^3 / g v_a$ の関係


図-7 海面抵抗係数の普遍表示

(2005) の実験データの比較を示す。この図から、風波クーリガン数が比較的小さな領域においては、観測データと実験データの挙動は定性的には一致しているように見える。ただし、波風径数依存性については、実験データから観測データにうまく接続できていない。このことは式 (6) が室内実験データには適用できないことを意味している。しかし、負のべき指数をもつ風波クーリガン数依存性が、実験データにおいても同様であることは注目になる。また、実験データでは $u_*^3 / g v_a$ が 1000 ～ 3000 付近の領域を境に $u_*^3 / g v_a$ に対する依存性が正の相関に変化することがわかる。 $u_*^3 / g v_a$ が大きな領域での観測データがないので確定的な判断はできないが、この領域では観測データにおいても波風径数依存性が大きく変化する可能性がある。このように、もし、ある風波クーリガン数を境に風波径数依存性が劇的に変化するという性質があるとする、そのことが観測データと室内実験データの無次元粗度と波風径数の依存性が異なって見えることの要因になっている可能性もある。これは、今後明らかにされるべき、極めて興味深い内容を含んでいる。本研究では、この点についてはこれ以上の検討は行わ

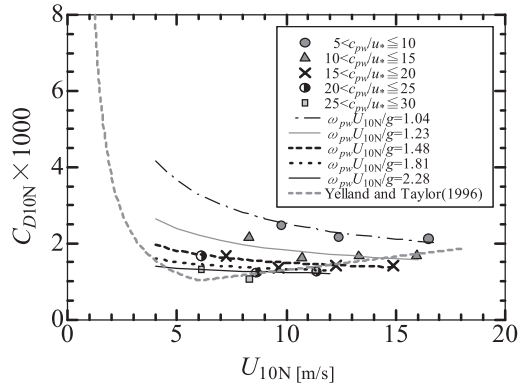


図-8 海面抵抗係数の経験式と観測データとの適合性

いが、本研究のように複数の風波パラメータに対する海面粗度の依存性を検討した研究は希であり、ここで得られた結果は海面粗度の波浪依存性を理解する上で重要な知見を示しているものと考えられる。

実用的な観点からは、海上風速と風波のピーク角周波数から、海面抵抗係数を評価できるような経験式を示すべきである。そこで、Ueno and Deushi (2003) の方法を参考にして、海面抵抗係数の経験式を構築する。ただし、本研究においては概ね中程度の風速条件を対象にしていることから、あらゆる風速レンジに適用可能な経験式を構築するのではなく、風波クーリガン数が 100 ～ 3000 程度の風波波浪場を対象としていることに注意する。式 (2) および経験式 (6) から次式が与えられる。

$$\frac{z_0}{z} = \exp \left(- \frac{\kappa}{\sqrt{C_{Dz}}} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$z_0 = 2.2 \times 10^5 \left(\frac{u_*^2}{g} \right) \left(\frac{\omega_{pw} u_*}{g} \right)^{7/2} \left(\frac{u_*^3}{g v_a} \right)^{-1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

本研究では、多少の一般性を持たせるために、高度 z と平均風速 U_z の形で定式化を行う。この 2 式から z_0 を消去すると次式が得られる。

$$\left(\frac{\sqrt{C_{Dz}}}{\kappa} \right)^{5/2} = \frac{1}{B \kappa^{5/2}} \left(\frac{U_z z}{v_a} \right) \left(\frac{\omega_{pw} U_z}{g} \right)^{-7/2} \exp \left(- \frac{\kappa}{\sqrt{C_{Dz}}} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

上式を C_{Dz} に関して解くことはできない。しかし、 C_{Dz}/κ^2 は以下のように、一つの無次元パラメータの関数として形式的に表せるはずである。

$$\frac{C_{Dz}}{\kappa^2} = F \left(B^{2/5} \kappa \left(\frac{U_z z}{v_a} \right)^{-2/5} \left(\frac{\omega_{pw} U_z}{g} \right)^{7/5} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 F は未知関数を示している。本研究では Ueno and Deushi (2003) とは異なり、波風径数 (または波齢)

をパラメータに組み込んでいるため、 F は U_z だけではなく ω_{pw} にも依存する。

それほど明瞭ではないが、観測データでは風速が増加するにつれて海面抵抗係数の波齢依存性が小さくなるように見えた (図-8を参照)。このことは F の関数形は、無次元パラメータが小さい領域において、その変化が緩やかになることを示唆している。ここでは、そのことを考慮して、観測データに2次関数を当てはめることにより最小自乗法を用いて F の関数形を決定した。図-7に C_{Dz}/κ^2 と $x=B^{2/5}\kappa(U_z z/v_a)^{-2/5}(\omega_{pw}U_z/g)^{7/5}$ の関係を示す。ここで、縦軸は1000倍されていることに注意する。図中には、最小自乗法より得られた曲線も併せて示されている。最終的に本研究で得られた海面抵抗係数の経験式を次式に示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{C_{Dz}}{\kappa^2} &= F(x) = 94.7x^2 - 3.74x + 7.0 \\ x &= (2.2 \times 10^5)^{2/5} \kappa \left(\frac{U_z z}{v_a} \right)^{-2/5} \left(\frac{\omega_{pw} U_z}{g} \right)^{7/5} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

図-8に、 $z=10\text{m}$ における中立換算された C_{D10N} と U_{10N} の関係における経験式 (11) と観測データの比較を示す。ここで、Yelland and Taylor (1996) の経験式も比較のために示している。図中の曲線が経験式の予測値を示しており、プロットは波齢を指標として分類した観測データである。本研究の経験式は、 u_* で定義された波齢ではなく、 U_z で定義された波風径数 (波齢の逆数) を含んでいる (u_* は求めるべきものである)。図中の曲線は観測データの波齢におおよそ対応する $\omega_{pw}U_{10N}/g$ の値に対して得られたものであることに注意する。本経験式は、本研究の観測データに基づいて定式化されていることからある意味当然のことであるが、提案された経験式は海面抵抗係数の波齢依存性を適切に表現していることがわかる。このことは本研究のパラメタリゼーションが妥当であることを示している。また、低風速域での海面抵抗係数の挙動や、風速の増加に伴う波齢依存性の減少傾向をよく再現できている。以上のように、本研究の経験式は、中間風速領域での海面抵抗係数の算定に有効であることが明らかとなった。今後、関数のべき指数や比例定数の精密化を行うとともに、高風速領域での関数形を明らかにすることが必要である。

5. おわりに

本研究では、波風径数と風波クーリガン数を用いた海面粗度のパラメタリゼーションを行った。その結果、それらの風波特性量に基づいた新しい海面粗度の経験式を構築することができた。ただし、本経験式は中間風速領

域 ($100 < u_*^3/gv_a < 3000$) の実海洋に対してのみ適用可能であることに注意する。また、海面粗度の結果に基づいて、海面抵抗係数の経験式を提案した。本経験式は、観測データの波浪依存性を適切に表現できることを確認した。

本研究を行うにあたり、九州大学松永信博教授にご助言を頂きました。また、観測に際して、京都大学防災研究所の武藤裕則准教授、米田格技術員およびJFEスチールの桜木幸司氏に多大なご助力を頂きました。本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (C) (代表者：杉原裕司)、基盤研究 (A) (代表者：小松利光) の援助を受けました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Charnock, H. (1995) : Wind stress on a water surface, *Quart. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 81, pp. 639-640.
- Donelan, M. A. (1990) : Air-sea interaction, *The Sea: Ocean Engineering Science*, edited by B. le Mehaute and D. M. Hanes, Vol. 9, pp. 239-292, John Wiley and Sons.
- Hsu, S. A. (1974) : A Dynamic Equation and its Application to Wind Stress Determination at the Air-Sea Interface. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 4, 116-120.
- Huang, N. E., L. F. Bliven, S. R. Long and P. S. De Leonibus. (1986) : A study of the relationship amongst wind speed, sea state, and drag coefficient for a developing wave field, *J. Geophys. Res.*, Vol. 91, pp. 7733-7742.
- Kitaigorodskii, S. A. (1973) : *Fizika vzaïm odestviya atmosfery i okeana*, Gidromet. Izdatel'stvo, Leningrad. Translated from Russian by A. Baruch., pp. 237.
- 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.
- Nordeng, T. E. (1991) : On the wave age dependent drag coefficient and roughness length at sea, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, pp. 7167-7174.
- Smith, S. D., R. J. Anderson, W. A. Oost, C. Kraan, N. Maat, J. DeCosmo, K. B. Katsaros, K. L. Davidson, K. Bumke, L. Hasse and H. M. Chadwick (1992): Sea surface wind stress and drag coefficients: The REXOS Results, *Boundary Layer Meteor.*, Vol. 60, pp. 109-142.
- Toba, Y., N. Iida, H. Kawamura, N. Ebuchi and I. Jones. (1990) : Wave dependence of sea-surface wind stress, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 20, pp. 476-492.
- Toba, Y. and M. Koga. (1986) : A parameter describing overall conditions of wave breaking, white-capping, sea-spray production and wind stress. In E. C. Monahan and G. Mac Niocaill, editors, *Oceanic Whitecaps*, pp. 37-47. D. Reidel.
- Tsumori, H., Y. Sugihara and Masuda. (2005) : A Parameterization for CO₂ transfer velocity at the surface of wind waves, *J. Hydroscience and Hydraulic Eng.*, Vol. 23, No. 1 May, pp. 43-55.
- Ueno, K. and M. Deushi. (2003) : A new empirical formula for the aerodynamic roughness of water surface waves, *J. Oceanogr.*, Vol. 59, pp. 819-831.
- Yelland, M. and P. K. Taylor. (1996) : Wind stress measurements from the open ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 26, pp. 541-558.