

波浪状態の分類に基づく海面抵抗係数の評価に関する研究

Evaluation of Drag Coefficient over the Ocean Surface Based on Wave-Field Conditions

安東卓哉¹・桜木幸司²・杉原裕司³・芹澤重厚⁴・吉岡 洋⁵

Takuya ANDO, Koji SAKURAGI, Yuji SUGIHARA, Shigeatsu SERIZAWA and Hiroshi YOSHIOKA

Estimations of the drag coefficient over the ocean surface were made by means of the eddy correlation and inertial dissipation methods. The variation of the drag coefficient with the wave age and swell conditions was investigated by using data set, showing good agreements between both methods. On the basis of directional wave spectra, we classified swell conditions into five groups, i.e., Pure windsea, Swell-dominated sea, Cross, Following and Counter swells. The present data show that the drag coefficient increases obviously with decreasing the wave age under same wind speeds, whereas the dependence of the drag coefficient on the swell conditions is unclear in comparison with that on the wave age. This suggests that the drag coefficient depends strongly on microstructures of the wave field, not lower-frequency structures for swells.

1. 序論

海面を通しての運動量フラックス、すなわち海面風応力が、波浪状態（海面形状）に依存して変化することは当然のことに思われる。海面風応力は、海面抵抗係数として量化化されることが多い。しかし、海面抵抗係数が、波の発達とともに増大するのか減少するのかという非常に基本的な問題についてすら確定した結論は得られていない。実海洋では風波やうねりが混在しており非常に複雑な波浪場が形成されている。海面抵抗係数の変化が波の発達状態（波齢）の違いによって生じたのか、うねりの作用によって生じたのかを明らかにするためには、波浪場がどのような風波成分波やうねり成分波から構成されているのかを評価する必要がある。

本研究の目的は、波の方向スペクトルに基づいて波浪状態を分類することにより、波齢とうねりが海面抵抗係数と海上風速の関係に及ぼす影響について検討することである。実海洋では風向に対して様々な角度からうねりが伝播してくる。そこで、波の方向スペクトルを用いて、風向とうねりの伝播方向の偏角によってうねりの条件を分類する。また、複雑で微妙な海面抵抗係数の波浪依存性を見出すためには、測定方法に起因する誤差の小さなデータセットを構築する必要がある。本研究においては、理想的な接水大気境界層では渦相関法（Eddy Correlation

Method: ECM）と慣性散逸法（Inertial Dissipation Method: IDM）によって得られた摩擦速度の値が一致するという考えに基づき、両者の相対誤差が小さいデータを抽出し、精度の高いデータセットを構築する。さらに、波齢やうねりの影響を正しく見るためには、一方のパラメータの値を固定して調べる必要がある。本研究では、その点に着目して海面抵抗係数の波浪依存性について検討する。

2. 海面抵抗係数の算定

海面抵抗係数 C_{Dz} は、平均風速 U_z と摩擦速度 u_* を用いて次式のように定義されている。

$$C_{Dz} = \frac{u_*^2}{U_z^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、添え字 z は海面高度 z において定義される諸量であることを示す。摩擦速度 u_* は次のように与えられる。

$$u_* = (\tau/\rho_a)^{1/2} = (-\overline{u'w'})^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u' (m/s)、 w' (m/s) は平均風向および鉛直方向の風速変動、 τ (N/m²) は海面せん断応力、 ρ_a (kg/m³) は空気の密度、 $\overline{\quad}$ は時間平均を示す。

摩擦速度 u_* 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、式 (2) における風速の乱流変動成分を応答性の高い測器を用いて計測し、 u_* を直接算定する手法である。一方、IDMは乱流エネルギー散逸率 ϵ を用いて u_* を算定する手法であり、乱流運動エネルギー方程式においてシアと浮力による生成項と散逸項がバランスする局所平衡性や、Taylorの凍結乱流仮説など様々な仮定を用いている。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。本研究では、両者の

1 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
2 修(工) JFEスチール株式会社
3 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
4 京都大学助教 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

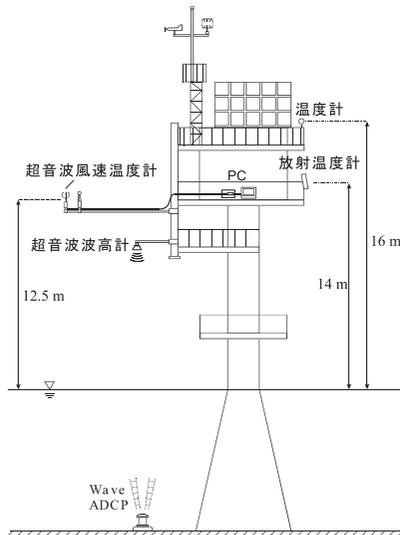


図-1 観測塔および計測システム

適合性の高いデータのみを解析対象としている。

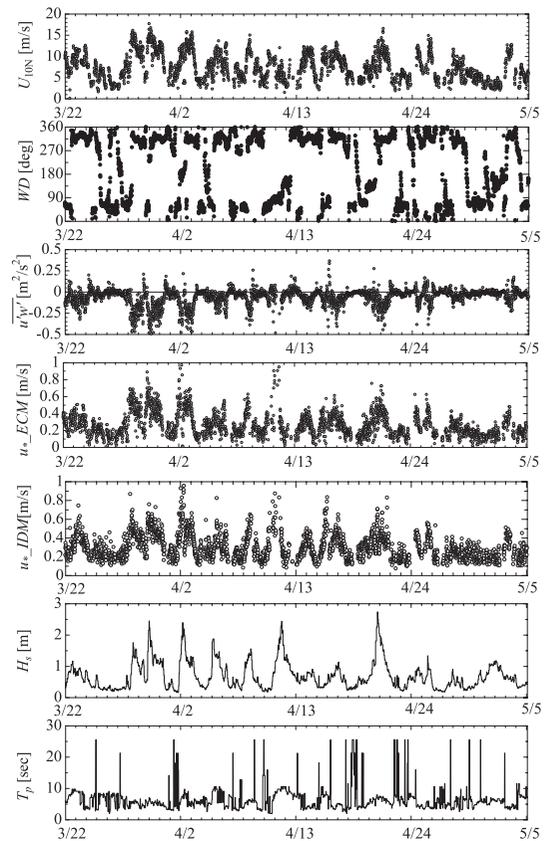
3. 現地観測の方法と観測期間における気象・海象特性

(1) 海洋観測塔と計測システム

観測は、和歌山県西牟婁郡白浜町の田辺湾沖合約2km (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。図-1に、観測塔および計測システムの概略図を示す。観測塔の高さは、海上約23mである。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。本研究で解析対象とするデータは、2006年3月22日から5月4日の45日間 (観測期間A)、および2007年1月24日から3月14日までの50日間 (観測期間B) の2回の観測期間において取得された。

(2) 気象・海象特性量の時系列

図-2に、観測期間Aにおける中立状態に換算された高度10mにおける平均風速 U_{10N} (m/s)、平均風向 WD (deg)、渦相関法による運動量フラックス $\overline{u'w'}$ (m^2/s^2)、渦相関法および慣性散逸法により算定された摩擦速度 u_*_{ECM} (m/s) および u_*_{IDM} (m/s)、有義波高 H_s (m)、ピーク波周期 T_p (s) の時系列を示す。ここで、 H_s および T_p に関しては20分間平均値 (毎時1点) を表しており、他の時系列については15分間平均値 (毎時4点) を表している。また、図中の風速および風向は、高度12.5mに設置された超音波風速温度計のデータから評価されている。超音波風速温度計の設置位置が塔の南側であるために、風向が $\pm 30^\circ$ の範

図-2 観測期間Aにおける U_{10N} 、 WD 、 $\overline{u'w'}$ 、 u_*_{ECM} 、 u_*_{IDM} 、 H_s 、 T_p の時系列

囲にあるデータ (北寄りのデータ) を解析対象から除外している。運動量フラックスは観測期間を通じて概ね負の値をとっている。このことは、運動量が大气から海洋へ輸送されていたことを示している。なお、図中の u_* および U_{10N} の時系列において、運動量フラックスが正の値をとる場合のデータは除外されている。図の観測期間Aにおける有義波高は最大で2.5m程度であったことがわかる。また、ピーク波周期においては時折、非常に長い周期が観測されているが、これらはいずれも対応するものであると考えられる。

(3) うねりの条件の分類

うねりの条件の分類のために、解析対象であるすべての時間帯における波の方向スペクトルを算定した。本研究ではうねりの条件を5つのケースに分類した。図-3にそれら5つのケースの波の方向スペクトルの代表的な一例を示す。(a)はPure windsea, (b)はSwell-dominated sea, (c)はCross swell, (d)はFollowing swell, (e)はCounter swellを示している。図中にはこの時間帯における U_{10N} 、 u_* 、 WD 、 H_s 、 T_p 、 D_p が示されている。ただし、 D_p はピーク波向きである。図中の矢印は風速ベクトルを示し、方向スペク

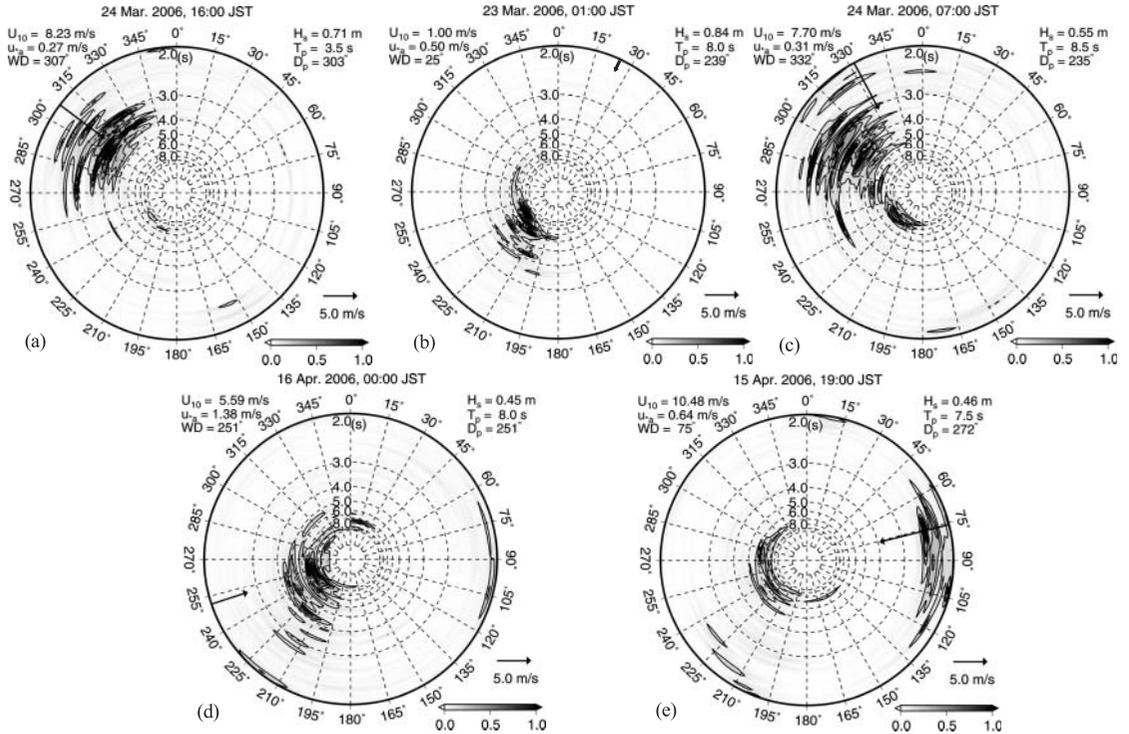


図-3 波浪場の方向スペクトル
 (a) Pure windsea, (b) Swell-dominated sea, (c) Cross swell, (d) Following swell, (e) Counter swell

トルの方位は波が伝播してくる方角を表わしている。ただし、方向スペクトルは各時間帯の最大値を用いて無次元化されている。また、図中のコンターは方向スペクトルの値を示しており、半径軸方向は波の周期を示している。ここで、Pure windseaは風波が卓越する波浪場、Swell-dominated seaはうねりが卓越する波浪場である。ここでは、風波の卓越周波数におけるエネルギースペクトルの大きさが、うねり成分波のそれに比べて1オーダー大きい場合をPure windsea、逆にうねり成分波の方が大きい場合をSwell-dominated seaとした。また、風向とうねりの伝播角の偏角が $\pm 135^\circ \sim 180^\circ$ の場合をCounter swell、 $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の場合をCross swell、 $0^\circ \sim \pm 45^\circ$ の場合をFollowing swellとしている。この分類の基準は、Donelanら(1997)およびDrennanら(1999)の風波とうねりの伝播方向の偏角に基づく分類に準じている。なお、うねりと風波が判別できないデータは解析対象から除外した。波の方向スペクトルからうねりが外洋に面している南西方向から主に伝播してくることがわかる。

4. 海面抵抗係数の風速依存性

図-4に観測期間AにおけるECMおよびIDMによって算定された u_w の比較を示す。ここでは、風波が卓越する波浪場(Pure windsea)とうねりと風波が混在する波浪場

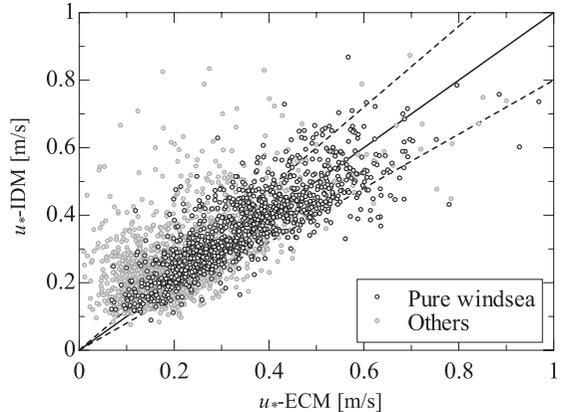


図-4 ECMとIDMによる u_w の比較(観測期間A)

(Others)の2つのケースに分類されている。実線は両者の値が等しい場合の比例関係を示し、2つの破線に囲まれたデータは両者の相対誤差が $\pm 20\%$ 未満に収まるデータを示している。この図より、データの分散は大きいですが、ECMとIDMによって算定された両者の u_w の値は統計的にはほぼ1:1の関係をとっている。また、ECMとIDMの適合度はPure windseaのデータの方が高く、うねりが混在する場合には適合度が低下するように見える。Grachev(2003)は平均風向に対してうねりが斜めに伝播

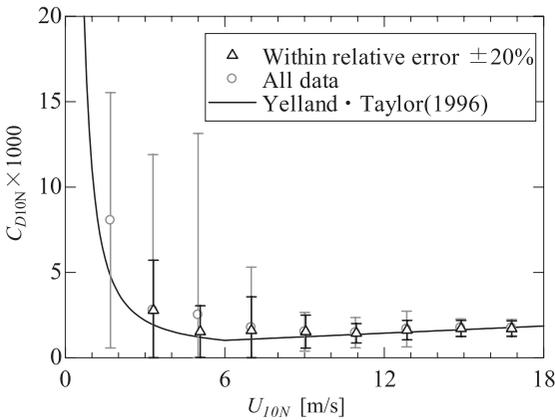


図-5 海面抵抗係数の風速依存性

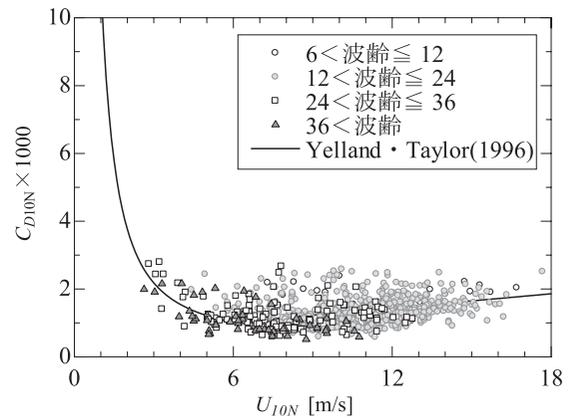


図-6 波齢を指標としたPure windseaの海面抵抗係数と風速の関係 (観測期間A)

する場合に、海面風応力がうねりの伝播方向に偏向することを報告している。本研究の結果はこのことを反映している可能性がある。ECMとIDMの相対誤差の大きなデータは算定的前提条件が破綻していることが予想されるため、そのようなデータの信頼性は相対的に低くなる。

図-5に中立換算された海面抵抗係数 C_{D10N} と海上高度10mでの平均風速 U_{10N} の関係を示す。図中には、観測期間A、Bにおける全てのデータとECMとIDMによって得られた摩擦速度の相対誤差が $\pm 20\%$ 未満に収まるデータを、風速レンジにより9つのグループに分け、標準偏差と共に示している。また、本研究のデータは、Panら(2005)、Wu(1980)、Drennanら(1999)、Yelland・Taylor(1996)と比較するとYelland・Taylor(1996)の経験式(3)と概ね一致するため、比較のための参考値としてYelland・Taylor(1996)の経験式のみを表示する。

$$\left. \begin{aligned} 1000C_{D10N} &= 0.29 + \frac{3.1}{U_{10N}} + \frac{7.7}{U_{10N}^2} \quad (U_{10N} < 6\text{m/s}) \\ 1000C_{D10N} &= 0.60 + 0.070U_{10N} \quad (6\text{m/s} \leq U_{10N} \leq 26\text{m/s}) \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

この図より、 C_{D10N} は低風速域では U_{10N} の増加と共に急激に減少し、風速が6m/sを超えると増大する傾向を示すことがわかる。また、全てのデータと比較して、ECMとIDMの相対誤差が $\pm 20\%$ 未満に収まるデータは標準偏差の値が小さく、データの分散が小さいことがわかる。

5. 海面抵抗係数の波浪依存性

(1) 波齢に対する依存性

図-6に、観測期間Aにおける波齢を指標としたPure windseaにおける C_{D10N} と U_{10N} の関係を示す。ここでは、波齢を4つのグループに分類している。波齢 c_{pw}/u_* は、風波成分波の位相速度 c_{pw} に基づいて定義されており、 c_{pw}

は風波成分波のピーク角周波数と分散関係から算定されている。なお、低風速域では相対的に測定精度が低下するため、以降の解析においては2m/s以下のデータを解析対象から除外していることに注意する。この図では、うねりの条件をPure windseaに固定することによって、波の発達状態(波齢)が海面抵抗係数に及ぼす影響を正確に評価することができると考えられる。また、波齢依存性をより明瞭に示すために、観測期間Bのデータも含めて各波齢のデータを風速レンジにより7つのグループに分け、それらをグループごとに平均化した。平均化された海面抵抗係数の値とその標準偏差を図-7に示す。この図より、波齢が小さいほど、 C_{D10N} は相対的に大きな値を示すことが明瞭である。波齢が小さいほど波の非線形度が大きくなり、波齢が大きいかほどピーク波のスケールは増大する。このことは、海面抵抗は波のスケールそのものよりも微細な海面起伏の状態を反映することを示唆している。Masuda・Kusaba(1987)は、 C_{D10N} は波風径数(波齢の逆数)が大きくなるほど増大し、そのような依存性は高風速域ほど拡大する傾向があるとしている。本研究の結果は、 C_{D10N} は波齢が小さいほど増大するという点では彼らの結果と定性的に一致するが、 C_{D10N} の波齢依存性の強さに関しては風速領域による違いは顕著でないように見える。いずれにしても、本研究の結果は、海面抵抗係数は波齢が小さいほど(波風径数大きいほど)増大するという性質を強く支持するものである。

(2) うねりに対する依存性

次に、波齢の値を固定した C_{D10N} と U_{10N} の関係に対して、うねりの条件が及ぼす影響について検討する。波齢をそろえることにより、 C_{D10N} に対する純粋なうねりの影響を見ることができる。図-8にうねりの条件を指標とした波齢が12より大きく24以下の場合に対する C_{D10N} と U_{10N} の関係を示す。ここでは、得られたデータをPure

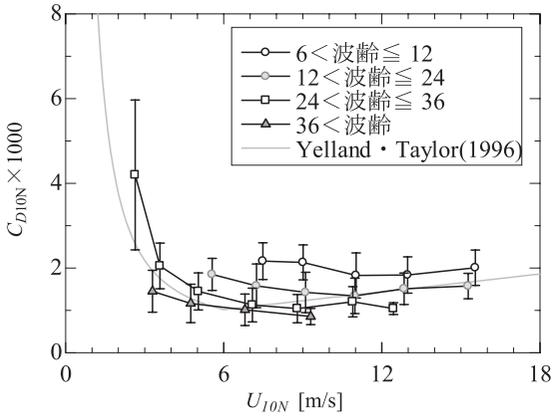


図-7 波齢を指標としたPure windseaにおける平均化された海面抵抗係数と風速の関係

windsea, Swell-dominated sea, Cross swell, Following swell, Counter swellの5つのグループに分類している。さらに、その依存性をより明瞭に示すために、両期間における各条件のデータを風速レンジにより最大14のデータ群に分け、それらをグループごとに平均化した。平均化された海面抵抗係数の値とその標準偏差を図-9に示す。これらの図より、Following swellの C_{D10N} は、他の条件のものとは比べて相対的に小さく、Swell-dominated seaのデータは大きな値をとるように見える。また、Cross swellのデータはPure windseaのデータと比べて明瞭な差はないように見える。しかしながら、本研究の結果からは、うねりの条件に対する依存性については系統的な傾向を見出すことは難しいように思われる。Donelanら(1997)は本研究と同様の分類を行い、低風速領域での C_{D10N} はCounter swellの場合に大きくなると指摘している。しかし、彼らのデータでは波齢の値が固定されていないため、うねりの影響を纯粹に評価できていない可能性がある。

6. おわりに

本研究の結果より、同一風速条件では波齢が小さい(海面起伏の非線形度が大きい)ほど海面抵抗係数が大きくなることがわかった。一方、海面抵抗係数のうねりの条件への依存性は相対的に弱いかもしれないが非常に複雑であると考えられる。これらのことは、海面抵抗は海面の微細な海面起伏の状態に強く規定されており、海面変動の低周波帯のスペクトル構造には明瞭に依存しないことを示唆している。

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。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)、京都大学防災研究所一般共同研究(代表者:杉原裕司)および科学研究費補

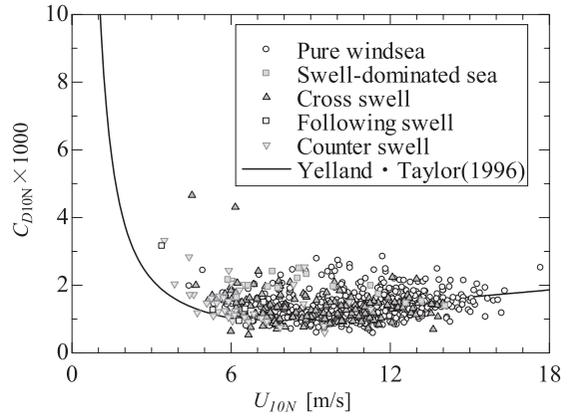


図-8 うねりの条件を指標とした12<波齢≤24の海面抵抗係数と風速の関係(観測期間A)

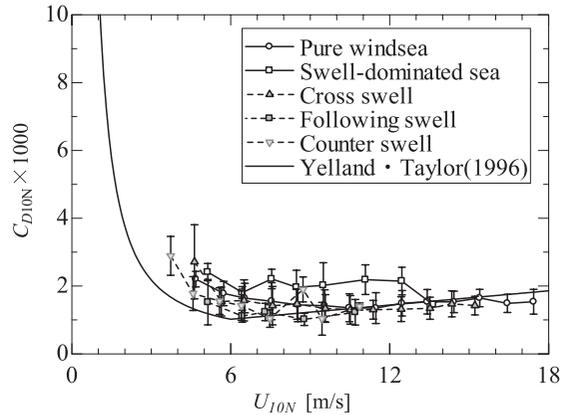


図-9 うねりの条件を指標とした12<波齢≤24における平均化された海面抵抗係数と風速の関係

助金基盤研究(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

Donelan, M. A., W. M. Drennan and K. B. Katsaros. (1997): The air-sea momentum flux in conditions of wind sea and swell, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 27, pp. 2087-2099.

Drennan, W. M., K. K. Kahma and M. A. Donelan. (1999): On momentum flux and velocity spectra over waves, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 92, pp. 489-515.

Grachev, A. A., C. W. Fairall, J. E. Hare, J. B. Edson and S. D. Miller (2003): Wind stress vector over ocean waves, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 33, pp. 2408-2429.

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.

Pan, J., D. W. Wang and P. A. Hwang (2005): A study of wave effects on wind stress over the ocean in a fetch-limited case, *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, pp. 1-15.

Wu, J. (1980): Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions - A revisit, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 10, pp. 727-740.

Yelland, M. and P. K. Taylor. (1996): Wind stress measurements from the open ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 26, pp. 541-55.