

風波とうねりが混在する波浪場の海面抵抗則に関する研究

杉原 裕司* ・津守 博通**・大賀 崇史***
吉 岡 洋****・芹澤 重厚*****

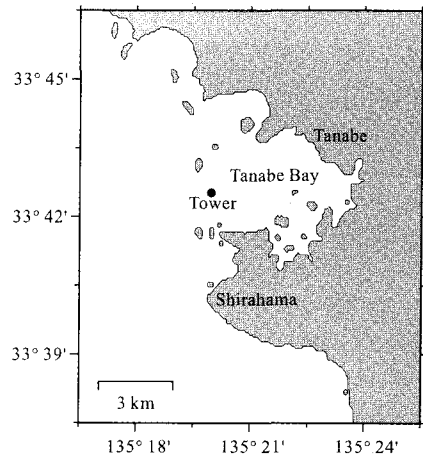
海洋観測塔において得られた海上風乱流と波浪の現地観測データに基づいて, 風波とうねりが混在する波浪場における海面抵抗係数と海面粗度の特性を検討した。特に, 方向スペクトルから風波とうねりの伝播方向を同定し, 海面抵抗則がそれらの偏角にどのように影響を受けるのかに着目した。うねりが存在する場合の有義波高と有義波周期の関係は $3/2$ 乗則よりも下方に大きく外れることがわかった。海面抵抗係数に対するうねりの影響は主に低風速域において現れ, 高風速域では明瞭な依存性は認められなかった。また, 風波とうねりが混在する波浪場においても風波成分波が海面粗度を規定する主要な因子であることが明らかとなった。

1. 緒 論

海洋における海面抵抗係数や海面粗度を定量化することは, 海面境界過程研究の最も重要な課題の一つである(例えば, Jones・Toba, 2001)。海面抵抗則については, これまで多くの研究が行われているにも関わらずその定量化手法は未だ確立していない。通常, 海面抵抗則は局所平衡状態にある理想的な風波波浪場を対象に検討されているが, 実海洋では普遍的にうねりが存在し, それは局所平衡性を破る大きな要因の一つとなる。そのため, うねりの存在が海面抵抗係数や海面粗度にどのような影響を及ぼすかを調べることは, 海面抵抗則を確立する上で重要である。

Donelan ら (1997) はうねりが存在する状況下において, 運動量フラックスの現地観測を行った。彼らは, 波の方向スペクトルからうねりと風波の伝播方向を同定し, それらの偏角に海面抵抗係数がどのように依存するのかを調べた。彼らは, 風と逆向きに伝播するうねりが存在する場合, 低風速域において海面抵抗係数が顕著に増大することを指摘した。しかし, 海面粗度に対するうねりの影響については検討されておらず, また観測データも十分に得られているとは言い難い。

本研究の目的は, 沖合の海洋観測塔において超音波風速計により得られた海上風乱流と WAVEADCP により得られた波浪の現地観測データに基づいて, 風波とうねりが混在する波浪場における海面抵抗係数と海面粗度の特性を検討することである。



図一 田辺中島高潮観測塔の位置

2. 観測概要

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 $135^{\circ}19'58''$, 北緯 $33^{\circ}42'32''$) に位置する田辺中島高潮観測塔 (京都大学防災研究所災害観測実験研究センター所有) において行われた。図一に, 観測塔の位置と周辺海域の概略図を示す。図からわかるように, 観測塔の設置海域は南西方向が外海に面しており, 付近の平均水深は約 30 m である。ただし, 観測塔は海域にある水深約 10 m の岩礁の上に設置されている。ここでは, 比較的大きなうねりは主に南西方向から伝播してくることになる。

観測塔には, 平均海面から高度 23 m の位置に超音波風速計が設置されており, 毎時 20 分間, サンプリング周波数 10 Hz で風速の 3 方向成分の瞬時値が取得されている。本研究では, 超音波風速計からの出力値を 10 分ごとのブロックに分け, 風向・風速の 10 分間平均値および摩擦速度 u_* を算定した。1 点での風速計測から摩擦速度を算定する方法には渦相関法と慣性散逸法がある (ギャリーワトソンら, 1997)。本研究では, 慣性散逸法

* 正 会 員 博(工) 九州大学助教授 大学院総合理工学研究院流体力学環境理工学部門
** 学生会員 修(工) 日本学術振興会特別研究員 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
*** 学生会員 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
**** 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
***** 京都大学助手 防災研究所災害観測実験研究センター

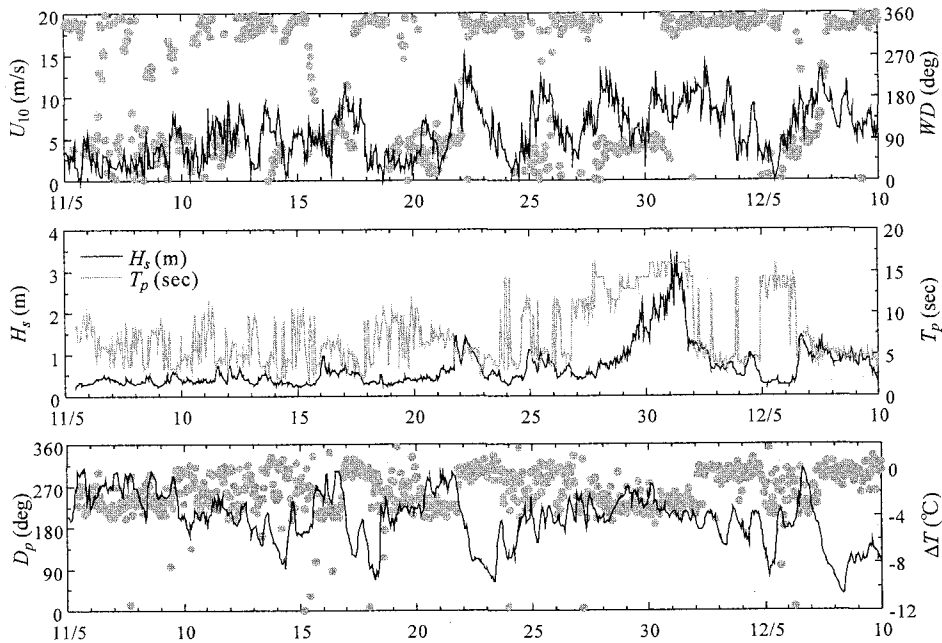


図-2 気象・波浪データの時系列

により得られた摩擦速度を用いて海面抵抗係数 C_D および海面粗度 z_0 を算定した。ただし、慣性散逸法による摩擦速度と渦相関法による摩擦速度の相対誤差が20%未満に収まる時間帯のものを解析対象とした。また、高度23 mの平均風速と摩擦速度から、対数分布則を用いて高度10 mにおける平均風速 U_{10} を算定した。

同観測塔では、高度16 mの位置に気温 T_a を測定する温度計が、高度14 mの位置に海面温度 T_s を測定する放射温度計が設置されている。これらのデータは、30秒間隔で記録されており、大気安定度を示す $\Delta T (= T_a - T_s)$ を評価するために用いられた。観測塔から南西に20 m離れた海底には WAVEADCP が設置されており、毎時20分間その直上の水位変動の定時観測が行われている。WAVEADCP で得られたデータから、毎時20分ごとに波浪特性量として、有義波高 H_s 、ピーク波周期 T_p 、ピーク波向き D_p および波の方向スペクトルを算定した。風波およびうねりの伝播方向を方向スペクトルから同定し、それらの伝播方向の偏角を算定した。本研究では、2003年11月5日から12月9日の35日間に渡って得られた観測データを対象としている。

3. 観測期間における気象・波浪特性

図-2に、観測された風速 U_{10} 、風向 WD 、有義波高 H_s 、ピーク波周期 T_p 、ピーク波向き D_p および大気安定度 ΔT の時系列を示す。図中の風速、風向、有義波高、ピーク波周期およびピーク波向きは20分平均値(毎時1点)

を表している。また、大気安定度は10分平均値(毎時6点)を示している。観測期間の前半は比較的風速が小さく波も穏やかであるが、後半には11月30日から翌日にかけて台風が接近したために、風速、有義波高およびピーク波周期が増加している。観測期間を通じておおよそ2つの卓越風向(NNW, E)が見られることがわかる。NNWは冬季の季節風に対応する風向である。また、観測期間における最大平均風速、有義波高、ピーク波周期はそれぞれ15 m/s, 3 m, 15 s程度であった。ピーク波向きの卓越方向は(SW, NW)であり、SWは外海から伝播するうねりに、NWは季節風によって発生した風波に対応する波向きである。特に有義波高の大きい台風接近時にはSW方向からの周期の長いうねりの伝播が認められる。以上のように、この観測点では、代表的な波浪状態としてNW方向から風波が伝播する場合、SW方向からうねりが伝播する場合、これらが混在する場合が考えられる。大気安定度 ΔT は、おおよそ0 ~ -11°Cで変化しており、観測期間を通じて概ね負の値を示していることがわかる。このことは、観測期間の大部分において海面付近の大気の状態が不安定であったことを意味する。

解析対象とした時間帯における全ての波の方向スペクトルを算出した。その結果、波浪場の状態は、風波のみが存在する場合(Pure windsea)、うねりが卓越する場合(Swell-dominated sea)、風波の伝播方向と同じ向きにうねりが伝播する場合(Following swell)、風波の伝播方向

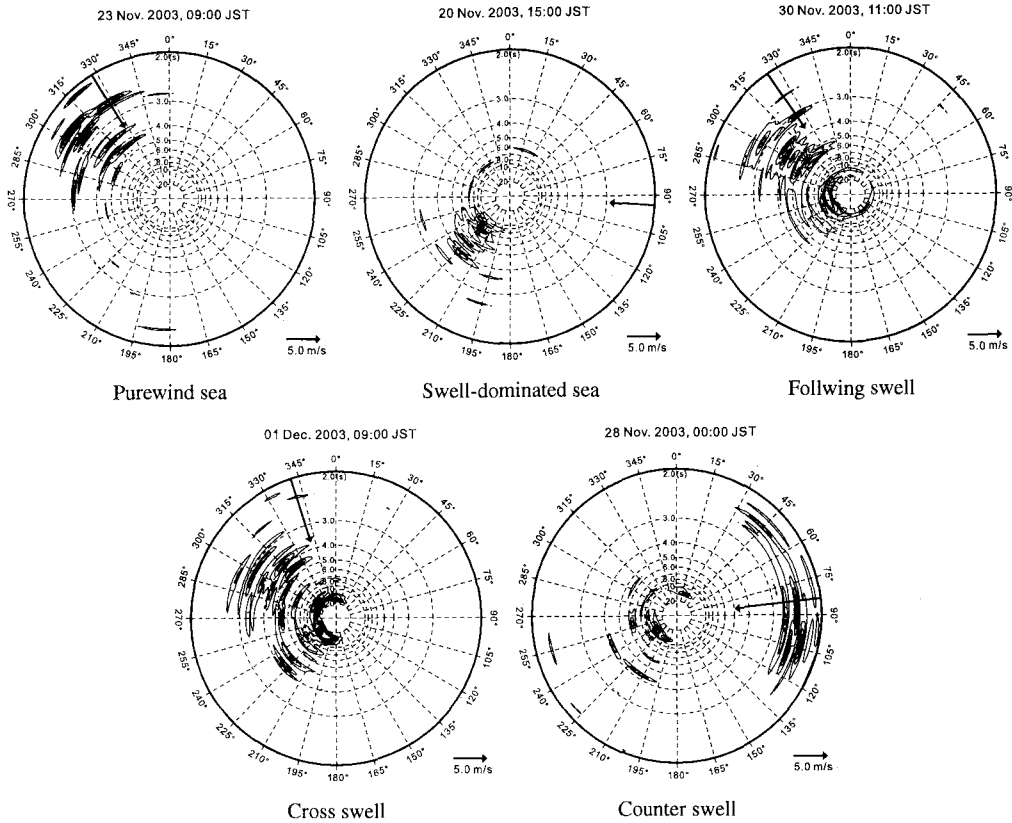


図-3 波の方向スペクトル

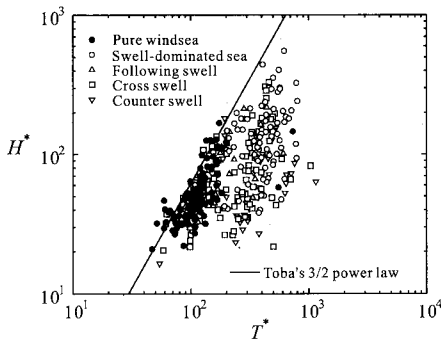
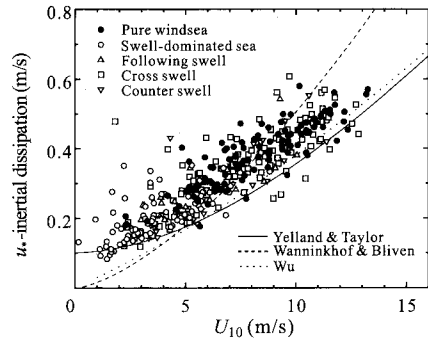
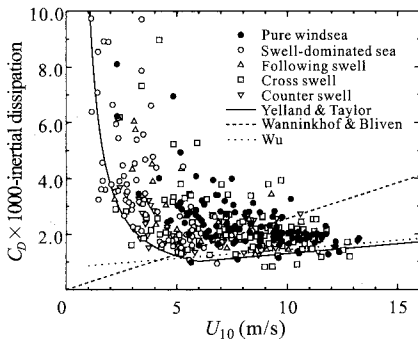
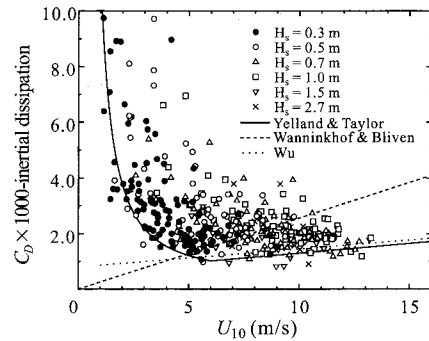
に対して横から交差するようにうねりが伝播する場合 (Cross swell), 風波の伝播方向と逆向きにうねりが伝播する場合 (Counter swell) の5つのケースに分類できることがわかった。ただし、うねりが卓越する場合においても、風は吹いており小さな風波は存在していることに注意する。本研究では、風波の伝播方向に対して $\pm 45^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合をFollowing swell, $\pm 45^\circ \sim 135^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合をCross swell, $\pm 135^\circ \sim 180^\circ$ の方向にうねりが伝播する場合をCounter swellとした。このような分類の基準は、Donelanら(1997)が海面抵抗係数におけるうねりの影響を考察する際に用いたものと同じである。

図-3に、これらの代表的な5つの波浪条件における方向スペクトルの一例を示す。ここで、図中の矢印は風速ベクトルを示し、方向スペクトルは波が伝播してくる方位を表していることに注意する。Pure windseaの場合でも、厳密には風向に対して西寄りに伝播方向が傾いており、さまざまな方向からの波が混在している。また、うねりは外海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. うねりが海面抵抗則に及ぼす影響

図-4に、局所平衡下の風波の相似則 (鳥羽の $3/2$ 乗則, Toba, 1972) に対するうねりの影響を示す。 H^* および T^* は、それぞれ gH_s/u_*^2 , gT_s/u_* で定義されており、 H_s は有義波高, T_s は有義波周期である。ここでは、慣性散逸法と渦相関法によって得られた摩擦速度の相対誤差が20%未満のデータのみが示されている。この図より、風波が卓越するPure windseaのデータは概ね $3/2$ 乗則に一致しているが、うねりが存在する条件では $3/2$ 乗則から下方へ大きく外れていることがわかる。ただし、うねりの伝播方向に対するデータの依存性はほとんど認められない。

図-5に、慣性散逸法により得られた u_* と U_{10} の関係を示す。図中には従来の研究で提案された経験式も併せて示されている。この図より、多少の定量的な差異は見られるものの、本研究データはYelland・Taylor (1996)の経験式に比較的近い挙動を示すことがわかる。低風速域ではSwell-dominated seaのデータが多くなるが、それらの値はPure windseaの挙動を低風速域に外挿した場合に比べて相対的に小さな値を取るように見える。ま

図-4 H^* と T^* の関係図-5 u_* と U_{10} の関係図-6 C_D と U_{10} の関係図-7 有義波高を指標とした C_D と U_{10} の関係

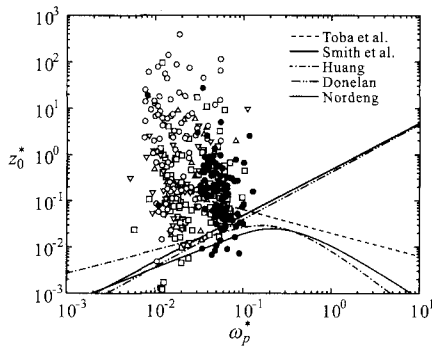
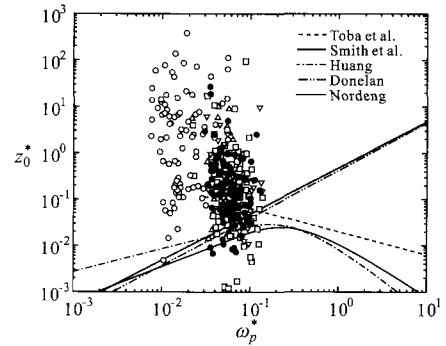
た、高風速域では Cross swell と Pure windsea のデータが最も卓越しているが、両者の挙動の間には明瞭な差異は見られないように思われる。

図-6 に、海面抵抗係数 $C_D (= u_*^2/U_{10}^2)$ と U_{10} の関係を示す。 C_D は低風速域では U_{10} の増加とともに急激に減少し、6 m/s を超えると再び増大する傾向を示すことがわかる。このような風速依存性は、Yelland・Taylor (1996) の経験式と概ね一致する。低風速域の C_D は主にうねりが存在する場合のデータで占められており、この領域での C_D はうねりが大きく影響することがわかる。中でも Swell-dominated sea のデータが最も卓越しており、Donelan ら (1997) が指摘したような、Counter swell の抵抗係数が著しく大きな値を示すような傾向は確認できない。一方、高風速域ではうねりに対する C_D の明瞭な依存性は見られないことがわかる。また、Pure windsea のデータは比較的分散が小さいが、うねりが混在する条件のデータが全体の分散をかなり大きくしていることがわかる。

図-7 に、有義波高を指標とした C_D と U_{10} の関係を示す。この図より、 $H_s=0.3$ m のデータは、0.5 m 以上のデータから分離されており、抵抗係数の下限に沿って存

在することがわかる。また、その挙動は Yelland・Taylor (1996) の経験式に定量的に一致する。 H_s が 0.5 m 以上のデータについては、 H_s に対するはっきりとした依存性は確認できない。従って、ある程度発達した波浪場では、 C_D の風速依存性はうねりの影響をあまり受けないものと考えられる。

図-8 に、無次元粗度 z_0^* と波風係数 ω_p^* の関係を示す。ここで、 z_0^* および ω_p^* はそれぞれ gz_0/u_*^2 、 $\omega_p u_*^2/g$ で定義されている。 z_0 は海面粗度、 ω_p は波のピーク角周波数であり、 z_0 は対数分布則に基づいて算定されている。図中には、従来の経験式が併せて図示されている。なお、 ω_p は波のスペクトルピークに対応する角周波数であることから、Pure windsea を除いて通常風波成分波の角周波数に一致しないことに注意する。この図より、おおよそ $\omega_p^* < 0.03$ 、 $z_0^* > 1$ の領域では Pure windsea のデータはほとんど存在しないことがわかる。また、うねりが混在する条件のデータは、偏角にほとんど無関係に Pure windsea の左側の領域に広く分散する。本研究のデータにおいては、 z_0^* と ω_p^* の間に明瞭な関数関係を見出すことは困難であり、どの経験式にも適合しないように思われる。ただし、その値だけに着目すれば、Pure windsea

図-8 z_0^* と ω_p^* の関係図-9 風波成分波の角周波数を用いた z_0^* と ω_p^* の関係

のデータは従来の経験式の交点付近に密集しており、特にデータの中心はTobaの経験式(Tobaら, 1990)から得られる値に近いことがわかる。

方向スペクトルから風波成分波の周期を算定し、Swell-dominated seaを除く全てのケースについて、 ω_p の算定に風波成分波のピーク角周波数を用いた場合の z_0^* と ω_p^* の関係を示したものが図-9である。この図より、Swell-dominated seaを除くうねりが混在する条件のデータがPure windseaのそれにほぼ一致していることがわかる。このことは、うねりが混在する波浪場においても風波成分波が海面粗度を規定する主要な因子であることを示している。

5. 結 論

本研究では、海洋観測塔において得られた海上風乱流と波浪の観測データを解析し、風波とうねりが混在する波浪場における海面抵抗係数と海面粗度の特性について検討した。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 風波が卓越するデータにおける有義波高と有義波周期の関係は概ね $3/2$ 乗則に一致する。うねりが存在する条件では $3/2$ 乗則から下方へ大きく外れる。なお、うねりの伝播方向に対するデータの依存性はほとんど認められない。
- (2) 海面抵抗係数の風速依存性は、Yelland・Taylor (1996)の経験式に近似的に一致する。また、低風速域のデータは主に Swell-dominated sea のデータで占められており、この領域での抵抗係数にはうねりが大きく影響する。一方、高風速域ではうねりに対する明瞭な依存性は認められない。
- (3) うねりが混在する波浪場においても風波成分波に着目した無次元海面粗度と波風係数の関係はPure windseaのそれにほぼ等しく、風波成分波が海面粗度を規定する主要な因子であることが明らかとなった。

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。本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B) 代表者: 杉原裕司, 特別奨励研究費 代表者: 津守博通)の援助の下で行われました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- ギャリーワトソン・山下隆男・林 泰一・芹澤重厚 (1997): 沖合い観測塔の風・波浪データに基づく海面せん断応力の評価, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 141-145.
- Donelan, M. A. (1990): Air-sea interaction, The Sea: Ocean Engineering Science, Vol. 9, edited by B. le Méhauté and D. M. Hanes, John Wiley and Sons, pp. 239-292.
- 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.
- Huang, N. E. (1986): An estimate of the influence of breaking waves on the dynamics of the upper ocean, Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface, edited by O. M. Phillips and K. Hasselmann, Plenum Press, pp. 295-314.
- Jones, I. S. F. and Y. Toba (2001): WIND STRESS OVER THE OCEAN, Cambridge University Press.
- 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 HEXOS results, Boundary-Layer Meteorol., Vol. 60, pp. 109-142.
- 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., N. Iida, H. Kawamura, N. Ebuchi and I. S. F. Jones (1990): The wave dependence of sea-surface wind stress, J. Phys. Oceanogr., Vol. 20, pp. 705-721.
- Wanninkhof, R. H. and L. F. Bliven (1991): Relationship between gas exchange, wind speed, and radar backscatter in a large wind-wave tank, J. Geophys. Res., Vol. 96, pp. 2785-2796.
- 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. 541-558.