

共同研究報告書

波浪に伴う海面直下の流速の変化の精密観測（課題番号：22-17）

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

共同研究者

森本昭彦（愛媛大学沿岸環境科学研究センター，教授，拠点対応教員）

研究目的

本研究の目的は、海面の波浪に起因する海洋混合層における乱流強度の変化の観測を実行し、沿岸域における物質拡散に寄与する海表面の乱流強度変化における波浪の影響を調査することである。昨年度までの共同研究の結果を検討し、瀬戸内海で一般的である非碎波条件を含んだ事例を観測し、海上風、波浪、波浪直下の乱流強度の同時観測を実施することを目的とする。

研究内容

当初計画と異なり、今年度も COVID-19 の影響で予定していた森本教授の実習航海には参加することができなかった。過去に得られた波浪の 2 次元スペクトルに代表される詳細な波浪情報を用いて解析を行い、うねりの存在が風波の状態に与える影響を評価する。うねりの波形勾配と風波のエネルギーの関係をさらに詳細に検討し、風波エネルギーに加えてうねりの非等方的な影響に着目する。また、今年度は LaMer 特別講演会（兼 CMES 博士課程先端科学セミナー，2023 年 1 月 12 日）を担当し、大学院生に向けた講義を行った（波浪と大気海洋境界層の関係の再評価の試み）。同時に愛媛大学沿岸環境科学研究センターに滞在中の研究者と議論し、将来的な東シナ海における共同研究の可能性についても検討した。

手法の概要

本研究で用いたデータは 2014 年白鳳丸航海 KH14-1 で行った波浪観測において取得されたものである。波浪観測は GPS 波浪ブイ（ゼニライトブイ

製) を利用した. 本研究では磯部ら(1988, Proc. Coast. Eng. Jap. Soc. Civ. Eng., 31, 173-177)に従って 2次元波浪スペクトルを求めた. 風浪は海面変異の周波数スペクトルから分離することとし, Tracy et al.(2007 Proc. 10th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Sym.)に倣い, 発達した風波の位相速度と海上風速の比率の経験値に基づいて分離境界周波数(cut-off frequency)を以下の式で定めた.

$$f_c = 0.588 \frac{g}{2\pi u \cos\theta} \tag{1}$$

これまで実施した研究結果から, 従来行われている海上風から海面の風応力を推定する手法には, 介在するバルクパラメタリゼーションが波浪の影響を受けるといふ本質的な問題が含まれていることが分かっている. そのため, Toba(1972, J. Oceanogr. Soc. Japan, 28, 109-120)で提唱された風波に対する関係式を用いて, 風波が平衡状態にある場合の摩擦速度(風波摩擦速度)を定義して利用する(式(2)).

$$u_{w*} = \frac{H_s^2}{gB^2T_s^3} \tag{2}$$

通常, 摩擦速度はベクトルとしては扱わないが, 風波摩擦速度は風波の励起と直接的に対応するため, 風波摩擦速度は海上風の方向ではなく風波の方向に沿った成分であるとして扱う. このようにして得た風波摩擦速度は従来のバルク法に較べて渦相関法で求めた値とよりよく一致する(図1). このことは, バルク法によるパラメタリゼーションが波浪の影響を反映していないために生じる不正確さを風波摩擦速度がある程度軽減させていることに加え, 海上風と風波の発達との関係を調査するためには波浪の影響を加味していない風応力(従って摩擦速度)推定値を用いることによって, 系統的なエラーが生じる可能性を示す.

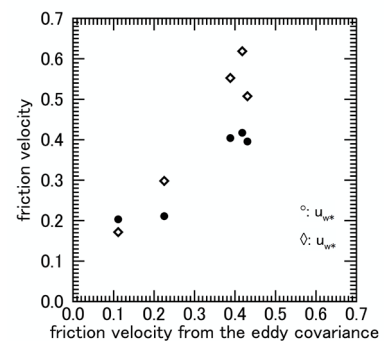


図 1: 渦相関法で求めた摩擦速度(横軸)に対する風波摩擦速度(●)とバルク法で求めた摩擦速度(◇)の相関関係

結果の概要

風波の状態についてはいくつかの無次元数間のべき乗関係が成立することが知られている. その中でも特に波齢と波浪エネルギーはよく成立することが知られて

いる(式(3)). 一方, エネルギーとフェッチの関係(式(4))については KH-14-1 ではフェッチを確定することが難しいことから Kahma and Calkoen (1992, J. Phys. Oceanogr., 22, 1389-1405) が得た関係式を用いて有次元のフェッチを推定して用いる.

$$\widetilde{E}_*^w = b_{w*} \widetilde{W}_*^{a_{w*}} \tag{3}$$

$$\widetilde{E}_{10}^w = b_{x10} \widetilde{X}_{10}^{a_{x10}} \tag{4}$$

ここで, \widetilde{E}^w は風波の無次元エネルギー, \widetilde{W} と \widetilde{X} はそれぞれ無次元の波齢とフェッチであり, 添え字の*と 10 はそれぞれ風波摩擦速度と 10m 風速で無次元化されていることを示す. a と b はそれぞれ経験的に決定される係数である. 図 2 はこれらの関係式を有次元に戻して, そこからの個々の観測データの乖離をうねりの波形勾配に対して調べたものである. 式(3)で得られる平均的な関係からの乖離については系統的な傾向はみられないが, 式(4)については, 波形勾配が大きい場合に無次元エネルギーが減少する傾向がみられる. 式(3)が波齢という波の状態に関するものであるのに対して, 式(4)で表されるフェッチとの関係については風波の励起に関するものであることに注意すると, このような差異は風から風波へのエネルギー輸送が影響していると考えられる. これには輸送係数とともに風波が風向となす角度にも関係していると予想される.

うねりがエネルギー輸送

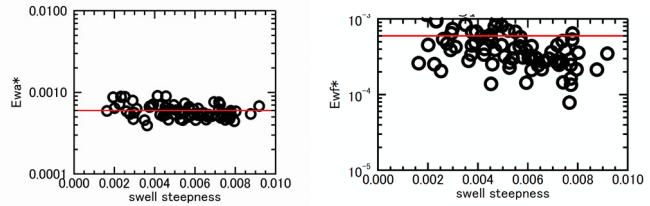


図 2: (左) 風浪エネルギーと波齢との関係式(赤線)からの乖離(縦軸)に対するうねりの波形勾配(横軸)との関係. (右) は同様に風浪エネルギーとフェッチの関係式からの乖離を示す.

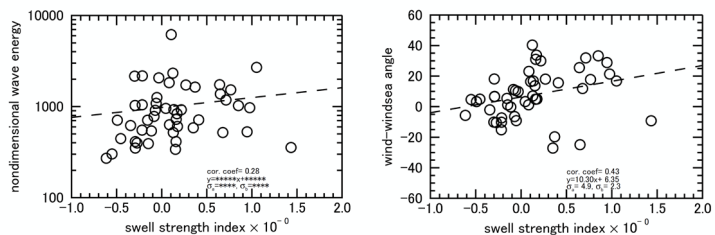


図 3: swsi に対する(左)無次元風浪エネルギーと(右)風と風波のなす角度の依存性. 強不安定(Ri<0.01)を除いて示している. 点線は線形回帰直線を示す.

の関係に影響する可能性として，うねりによる大気海洋境界層への上向きの運動量輸送が考えられる (Donelan, 1990, The Sea-Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas, Vol. 9, John Wiley and Sons, 239-292, 他). そこで，うねりの強度と角度を考慮した指標 (swell-windsea strength index: $swwsi$) を導入し，この指数に対するエネルギーや風波の方向を調査する.

$$swwsi = \left(\frac{h_s}{h_w} \frac{f_s}{f_w} \right)^2 \cos \theta_s, \tag{5}$$

ここで， h と f はそれぞれ波高と周波数を表し，添え字はうねり (s) と風波 (w) を示す. θ_s はうねりと海上風の角度を表す.

図 3 は $swwsi$ に対する無次元波浪エネルギーと海上風と風波のなす角度の依存性を示す. 強不安定状態 ($Ri < -0.01$) では $swwsi$ に対するこれらの依存性が弱くなるため描画から除いている. 図中には線形回帰直線も示したが，風波エネルギーとの関係における回帰直線は統計的に有意ではなかった. 一方，海上風と風波のなす角度に関しては有意な相関 (0.5) を得た. この関係からは，うねりと海上風の方向に大きな差がある場合には，風波の方向は海上風に対してうねりの進行方向に向かって屈折する傾向がみられる. これがうねりによる抵抗係数への影響に起因するのであれば，うねりによる非等方的な影響によって風応力の方向が変化する一方で，風波のエネルギーに対応する応力の大きさに与える影響は相対的に弱い可能性が高い. $swwsi$ を構成する各要素の相対的な重要性を検討するために (4) 式からうねりと海上風の角度，

波高比，周波数比をそれぞれ

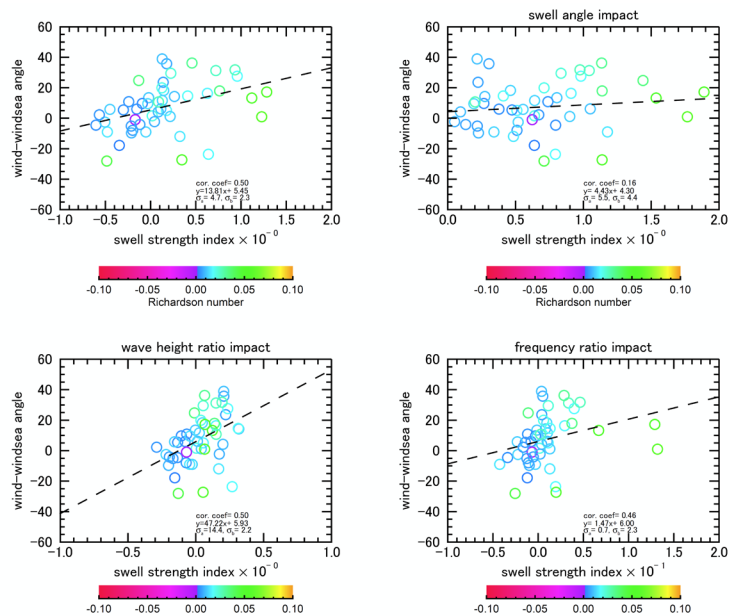


図 4: $swwsi$ に対する平均風向と風波の角度の依存性 (上左) と $swwsi$ から (上右) うねりと平均風向のなす角度 (下左) 風波とうねりの波高比 (下右) 風波とうねりの振動数をそれぞれ除いた指標に対する平均風向と風波の角度の関係

れ単独で除いた指数で同様の評価をしたところ、どの要素を除いても図 2 のような相関関係は悪化した（図 4）。海上風の方向に対する風波の方向の屈折に対してはこれらの各要素がそれぞれ影響していることも分かった。

これらの結果は、海上風と風波の両方によって生じる海面付近の乱流状態がうねりによる非等方な要素からの影響を受ける可能性を示している。

今後の展望

研究開始時の目的のひとつは、長崎丸の実習航海に参加し、森本教授と共同で波浪状態と海上風による乱流エネルギー輸送が海面直下の 3 次元流速に及ぼす影響を分離して解析するためのデータ収集を行うことであった。残念ながら今年度も COVID-19 の影響で観測を実施することができなかった。現在までに利用できるデータは限定的であり、観測機会を増やして連続的なデータ取得を可能にすることが必要である。今年度は LaMer の特別講演を行うことによって愛媛大に滞在する研究者との貴重な議論の機会を得た。引き続きこのような機会を利用してほかの研究者からの視点を生かして研究を推進する予定である。

本研究に関連した研究発表

様式 3 - 共同研究報告書（2022 年度）（22-17 根田）参照