

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：23-10）

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．豊後水道における追加観測を実施するとともに，昨年度までの共同研究の結果を取りまとめて海面直下の乱流強度における海面風応力によるシア乱流強度と波浪に伴う乱流強度の分離評価が可能かどうかについて検討する．

研究内容

2023年10月26日から実施された長崎丸航海（松山港－豊後水道－松山港）に森本教授とともに乗船し，2019年度航海と同様の手法でVectorを用いた海面直下の3次元流速観測とGPS波浪ブイによる波浪観測を実施した．まず，本共同研究で開発した手法を用いて海面直下の水平・鉛直速度成分を得，流速変動の周波数スペクトル密度を計算した．次いで，これまで本共同研究を含む複数回の同様の観測データを取りまとめ，統計的な手法を用いて海面直下の乱流強度における海面風応力によるシア乱流強度と波浪に伴う乱流強度の分離評価の可能性を検討した．

手法の概要

本研究で用いたデータは2018年10月に紀伊半島南方海域において実施された新青丸研究航海KT-18-13, 2019年に実施された長崎丸第41次航海，今年度実施された長崎丸第124次航海で取得されたものである．

これまでの観測と同様に Nortec 社製の慣性センサー付き精密3次元流

速計 (Vector) を用いて観測し、流速データを以下の式に従って変換することで地球座標系における真流速値を回復した。

$$\mathbf{V}_{true} = \mathbf{T}\mathbf{V}_{obs} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{T}(\mathbf{M} - \mathbf{S}) + \mathbf{V}_{mot}$$

ここで、 \mathbf{V}_{true} は真流速ベクトル、 \mathbf{V}_{obs} は観測された流速、 \mathbf{V}_{mot} は回転による見かけ上の接線流速、 \mathbf{T} は姿勢変換行列、 $\boldsymbol{\Omega}$ は Vector の角速度、 $\mathbf{M}-\mathbf{S}$ は IMU を起点とする流速観測点の位置ベクトルである。同時に行った計算によって Vector に装着した圧力計と慣性センサーから得た Vector の鉛直方向の変位情報の差から水面の鉛直変位（波高）も計算した。

今年度の航海で得られた例を図 1 に示す。0.1Hz から 1Hz の間に極大値を持ち、うねり成分と風波成分が存在することがわかる。流速のスペクトルは、波浪のピークと同じ周波数にパワースペクトル密度の極大値が存在する。また鉛直成分と水平成分のエネルギーを比較すると、ピーク周波数はほぼ一致するものの、スペクトル形状には差異が見られる。今回の観測では明瞭ではないが、これまでの観測結果（2021 年度報告など）ではおよそ 0.5Hz くらいから Kolmogorov の $-5/3$ 乗則に沿う傾向が強いため、今年度の解析では 0.5Hz を境にして低周波数側を波浪領域、高周波数側を散逸領域と設定する。また、海面波の位相速度が 12ms^{-1} の波浪の周期が約 7.7 秒となることから、簡便さのために周期 8 秒 (0.125Hz) をうねりと風波の遮断周波数とした。これらの閾値の一般性は今後の検討課題である。

結果の概要

散逸領域の乱流エネルギーの水平成分と鉛直成分の大きさの関係について確認するために、これまでに実施した 3 回の観測航海の観測値について両者を比較した (図 2 左図)。両者はほぼ正相関の関係になっているが、低

エネルギー領域では水平成分が鉛直成分よりも大きい傾向があり、これらは低風速時に多く発生していることから、波浪と風の状況が

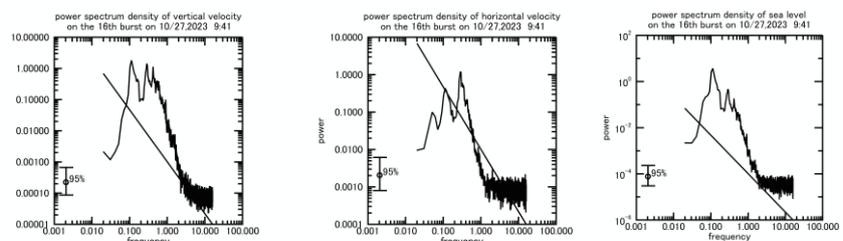


図 1：長崎丸第 124 次航海で得られた Vector 観測で得られた海面直下の (左) 鉛直 (中) 水平流速と (右) 水位変動のパワースペクトル密度。直線は Kolmogorov の $-5/3$ 乗則を示す。

別紙3

影響している可能性が考えられる。一方，図 2 右図において水位変動のうねり成分と風波成分も比較したところ，明瞭な正の相関関係がみられた。遠方の台風などがなかったなどの観測条件によって生じた関係であることが推察される。

2021 年度に実施した研究では，同じ風速であっても散逸領域の乱流エネルギーには波高に見合った強度変化が観測される可能性を指摘した。この作業仮説に基づき，散逸領域のエネルギーと風速の関係を図 3 に示す。等方乱流であれば鉛直成分と水平成分のエネルギー分布はほぼ同じになることが予想されるが，鉛直成分のうち，特に比較的弱風速の場合にばらつきが大きい。

また，これらの図では散逸領域のエネルギーの風速に系統的な依存性は不明瞭だが，風速が 6ms^{-1} を超えた領域に着目すると風速の増加に対して散逸領域のエネルギーが増加する傾向にある。風波の強度に対しては，特に鉛直成分のエネルギーが波の強度によって変化する傾向が見られる。このことは鉛直成分のエネルギーが風速に対して大きくばらつくことと関係しているのかもしれない。この傾向を詳細にみるために鉛直流速の散逸領域のエネルギーと風波の強度の関係を図 4 に示す（水平成分は非表示）。風速が 6ms^{-1} 以下の観測では，ほぼ無風であるに

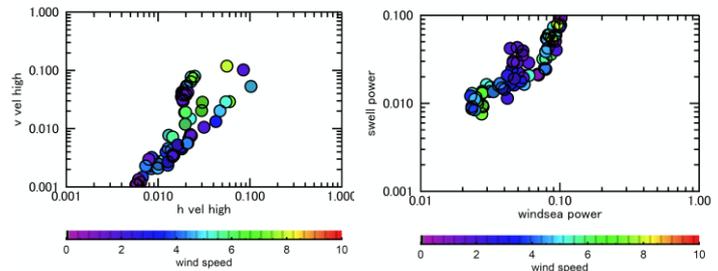


図 2 : (左) 水平流速成分（横軸）と鉛直成分（縦軸）の散逸領域のエネルギーの比較。(右) 風波成分（横軸）とうねり成分（縦軸）の波高エネルギーの比較。色は 10m 高度換算風速を表す。

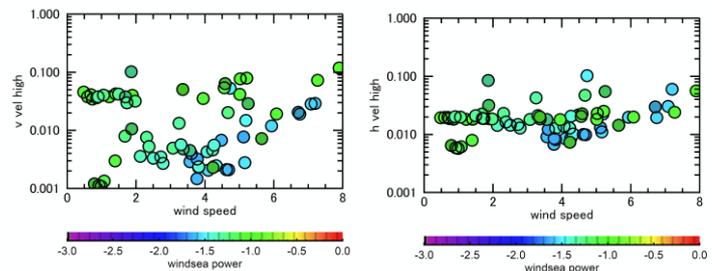


図 3 : (左) 鉛直流速と (右) 水平流速それぞれの散逸領域のエネルギー（縦軸）と 10m 高度換算風速（横軸）の関係。色は風波成分のエネルギーの常用対数を表す。

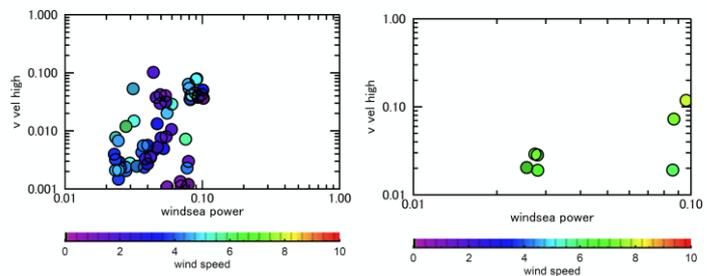


図 4 : 鉛直流速の散逸領域のエネルギー（縦軸）と風波のエネルギーの関係。左は風速 6ms^{-1} 以下の条件，右は風速 6ms^{-1} 以上の場合を示す。

別紙3

も関わらず風波が存在する数例を除けば風波の強度との対応がよい。6ms⁻¹以上の観測値は少ないものの、同様の関係が見られ、且つ高風速時に風波のエネルギーが大きい傾向がある。

一方、波浪のピークに相当する周波数領域における流速のエネルギーは波の強度に対する依存性がより明瞭であった（図5）。両者は風速によらず正相関の関係にあるが、6ms⁻¹以上の場合（図5右）の風波への依存性は弱風速（同左）の場合の半分程度であった。

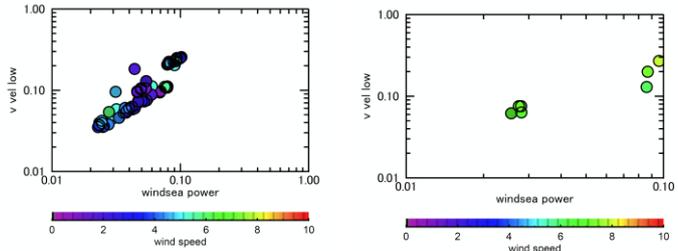


図5：図4と同じ。ただし、縦軸は波浪領域の乱流エネルギーを表す。

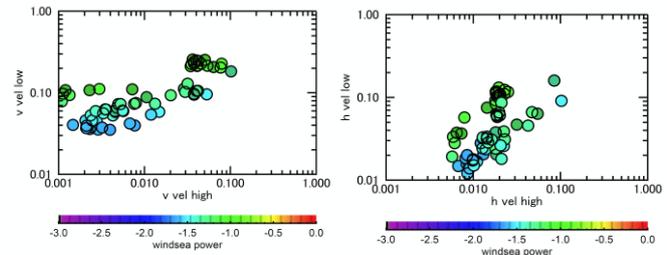


図6：流速の（左）鉛直成分と（右）水平成分の散逸領域（横軸）と波浪領域（縦軸）の関係。色は風波エネルギー強度を表す。

は弱風速（同左）の場合の半分程度であった。これらは、海面直下の乱流強度が海面風応力の影響を受けているとともに波浪の影響も強く受け、特に波浪と同程度の周期変動に対しては波浪に伴う軌道流速変動が散逸領域のエネルギーにも密接に関係することを示唆する。この推測は流速の鉛直成分と水平成分のそれぞれについての散逸領域と波浪領域のエネルギーが正相関の関係にあるものの、波エネルギーが大きい時に波浪領域のエネルギーが大きくなる（図6）ことと整合性がある。

これらのことを統計的に確認するために、流速変動のエネルギーに対して下記の線形重回帰分析を行った。

$$\log_{10} E_{dp} = a \cdot ws + b \cdot \log_{10} Q_w + c \cdot \log_{10} Q_s + d$$

E は流速のエネルギー、添え字(d, p)はそれぞれ流速成分（ v :鉛直成分, h :水平成分）と周波数領域（ d :散逸領域, w :波浪領域）を表し、 ws は海上風速、 Q_w と Q_s はそれぞれ風波とうねりのエネルギーを表す。図7は鉛直流速変動のエネルギーに対して線形重回帰を行った推定値の関係を示す（水平成分の図は非表示）。説明変数の寄与を評価するため、それぞれの偏相関係数も計算した。これまでの解析結果に基づいて、風速6ms⁻¹を境界としてそれぞれ同様の重回帰分析も行った（表1）。

まず全体で見ると散逸領域に較べて波浪領域の相関係数は有意に高い。ただし、波浪領域では海上風の係数が散逸領域の1/10となっており、この領域のエネルギーに対しては風による直接的な乱流インプットよりも波浪による軌道流速の寄与が大きいことを示している。また全体で

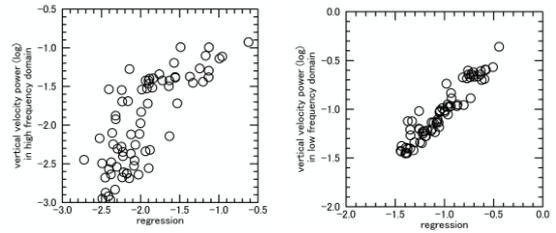


図 7：鉛直流速変動のエネルギーに対して線形重回帰を行った推定値の比較。(左)散逸領域、(右)波浪領域における回帰結果を示す。

は海上風の偏相関係数は 0.5 以下であるのに対し、散逸領域と波浪領域ともに高風速時には 0.8 程度であり、海面直下の乱流との対応関係が明瞭になるのは風速が 6ms^{-1} を超える程度になってからであることがわかる。風速のレンジを分けた回帰分析の結果の再現性が大きく向上していることから、海面直下の乱流強度に対して海上風の影響が顕著になるのは比較的高風速時であることが示唆される。これは白波が発生する風速が 6ms^{-1} 程度と言われていることと整合性があり、高風速時での砕波の影響が予想される。また、散逸領域における風波の強度の偏相関係数はどの場合でも負値となっている。理由については不明であるが、図 2 に示した観測時のうねりと風波の強度の関係が影響している可能性もあり、その一般性については今後検討する必要がある。

これらの結果は海面直下の乱流強度が海上風と波浪の両方の影響を受け、それが風速のレンジによって変化することから、風の影響と波の影響を分離評価できる可能性を示していると考えている。ただし、初期的な解析では、乱流エネルギーの波浪領域と散逸領域の区別やうねりと風波の分離の基準の客観性などの課題は多く、今後さらに検討する。

本研究に関連した研究発表
様式 3 - 共同研究報告書 (2023 年度) (23-10 根田) 参照

乱流エネルギー	a	b	c	相関係数	偏相関係数		
					風速	風波	うねり
散逸領域	0.1	1.1	2.3	0.76	0.49	-0.27	0.61
波浪領域	0.018	0.69	0.47	0.95	0.39	0.6	0.55
散逸領域 (高風速)	0.15	1.1	1.2	0.92	0.79	-0.58	0.75
散逸領域 (低風速)	0.065	-1.3	2.6	0.79	0.25	-0.32	0.67
波浪領域 (高風速)	0.067	0.33	0.34	0.99	0.87	0.54	0.7
波浪領域 (低風速)	0.0062	0.61	0.57	0.96	0.11	0.58	0.68