

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：21-43）

京都大学大学院理学研究科 根田昌典

共同研究者

大迫拓馬（京都大学大学院理学研究科，M2）

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乱流強度の変化を海面直下の3次元詳細流速観測によって調査することである。

風応力と風波の間に成り立つ局所的力学平衡状態に対して、波成乱流はこれまでは海洋の混合層形成過程においては軽視されてきた。特に、深水波近似が可能な海域において海面の波浪直下の乱流強度が計測された事例はほとんどない。そこで、森本教授らとともに波浪観測とともに水面変動に追随する流速計を用いて豊後水道における3次元流速観測を実施することを計画したが、COVID-19の影響により航海に参加することができなかった。そこで観測のための事前調査として、過去に取得したデータを用いて風波のエネルギーに対応した乱流強度変化と海面応力に対応した変化の検出を試みる。

研究内容

今年度は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。そのため、以前に取得した予備観測データの解析を行い、比較的静穏な状況での解析を基盤とし、2019年度に実施した豊後水道における急速に発達した風波の観測結果の解析を行った。

観測のための予備解析は、2018年10月17日から18日にかけて紀伊半島南方海域で実施した新青丸研究航海 KH-18-13「海底地震計・陸上同時連携観測による黒潮域の大気・海洋短周期変動過程の実態解明（代表小松幸生東大 AORI 准教授）」において実施した観測をもとにして実施した。

波浪と波成乱流の同時観測のために、Nortec 社製の慣性センサー付き精密 3 次元流速計 (Vector) を独自に製作した浮体システムに装着した。昨年度も報告しているように、観測された流速データを Edson et al. (1998, J. Atmos. Oceanic Technol., 15, 547-562) による船上での渦相関観測手法を応用して、以下の式に従って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， \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。この手法を用いて海面直下 1.6-1.8m における 3 次元流速変動を復元して解析した。この観測では、GPS 波浪ブイを用いて海面波の 2 次元スペクトルを同時に取得している。

今年度の報告では、風速と波浪の状況に注目して 3 つのレコードについて比較検討する (表 1)。図 1 は実施した観測のうち、2 つのレコードにおける鉛直流速と水平流速の

表 1 : 観測レコードの状況

	風速	有義波高 (周期)
C03-2-04	5.12m/s	1.0m (7.9s)
C03-3-03	3.57m/s	1.0m (8.9s)
C06-4-05	5.25m/s	1.2m (7.2s)

スペクトル密度分布を示す。各レコードは流速，加速度，各速度の 64Hz 観測を 10 分間継続して得た。C03-2-04 レコードにおいては平均風速 5.12ms^{-1} ，有義波高 1.0m であったのに対し，C06-4-05 レコードでは平均風速 5.25ms^{-1} ，有義波高は 1.2m であった。図より，風速がほぼ同等であるのに対して，有義波高が高い C06-4-05 の方が全周波数帯においてエネルギー散逸領域における流速スペクトルが高い値を示していることがわかる。流速スペクトルの鉛直成分と水平

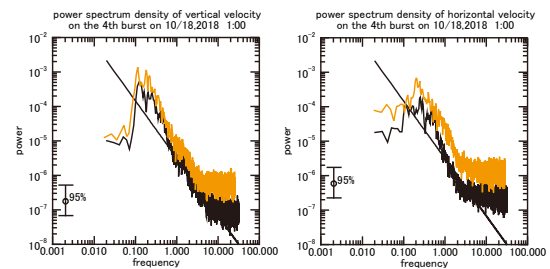


図 1 : C03-2-04 (黒) と C06-4-05 (橙) における海面直下の鉛直流速 (左) と水平流速 (右) のスペクトル密度分布。直線は Kolmogorov の $-5/3$ 乗則を示す。

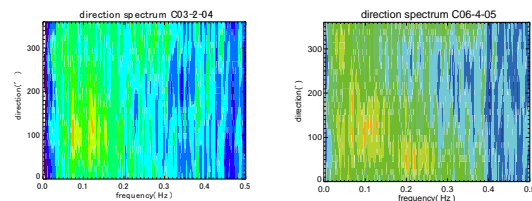


図 2 : C03-2-04 (左) と C06-4-05 (右) の 2 次元波浪スペクトル

別紙3

成分ともに高波数域において差が見られるが，鉛直成分においては明瞭ではない一方，水平成分に関しては 2Hz 程度のピーク周波数帯より高波数域において明瞭な差異がある．この違いは波浪の状況を反映していると予想し，観測時の 2 次元波浪スペクトルを示す（図 2）．両レコードは風速の条件はほぼ等しいのに対して，波浪状況には差異がある．C03-2-04 はう

ねりに相当する 0.1Hz 程度の周波数帯のみに波浪のエネルギーピークがあるが，C06-4-05 はうねりに加えて風波領域にもエネルギーがある．外洋域の記録であることから，風波領域におけるエネルギーピークの有無は吹走時間の違いによるものであろうと考えられるが，まだ詳細には検討していない．このような状況下での海面直下の乱流強度は風によるシア乱流によるものだけではなく，両ケースの乱流エネルギーの差異は波浪による影響がある可能性があると考えられる．

また，C03-2-04 と C03-3-03 は有義波高が両レコードともに 1.0m である一方で風速が異なる．図 4 に示した C03-3-03 の波浪の 2 次元スペクトルからは C03-2-04 と同様に風波領域での顕著なエネルギーピークは観測されていないが，うねりのピーク周波数よりも高周波の散逸領域でのエネルギーは C03-2-04 の方がわずかに大きく，風速の差異を反映していると考えられる．図 3 に示した流速スペクトルの比較では，両者のスペクトル形状はほぼ一致しているが，鉛直流速においては散逸領域のエネルギーが小さい．一方，水平流速のスペクトルではそのような違いは明瞭ではない．これは C03-2-04 と C06-4-05 の流速スペクトルの関係から得られた予想と整合的である．これら

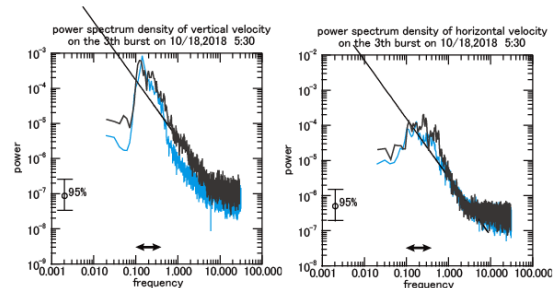


図 3：図 1 に同じ．ただし，C03-2-04（黒）と C03-3-03（青）におけるスペクトル密度分布

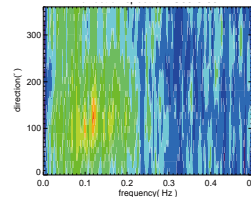


図 4：C03-3-03 の 2 次元波浪スペク

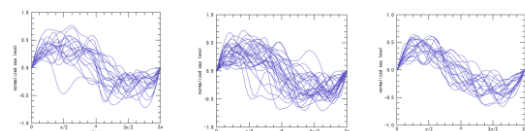


図 5：（左）C03-2-04，（中）C03-3-03，（右）C06-4-05 で抽出された規格化された個別波の波形．横軸は位相 (0-2π) を示す．

別紙3

の3つのレコードでの流速スペクトルの対比から以下の可能性が指摘できる。まず、明瞭な風波ピークが観測されなくても、海上風の強さの影響は散逸領域のスペクトルの大きさに現れることが挙げられる。また、水面波にエネルギーピークがある場合は鉛直流速と水平流速ともにその周波数での変動エネルギーが観測される。水位変動に伴って波の峰と谷では鉛直流速の変化が大きいから、流速スペクトルの鉛直成分も水位変動のピーク周波数で大きいことから、海面直下では散逸領域での流速変動エネルギーが必ずしも等方的ではないことが示唆される。

波浪に伴う乱流エネルギーの生成が1波長内の水位変動と関係があることが示唆されるため、波の位相に対応して乱流エネルギーが変化するかどうかを調査することを試みる。各レコードの水面変位をゼロ・アップクロス法によって個別波に分解し(図5)、それぞれの個別波の位相を8分割($\pi/4$ 毎)した流速変動を取りまとめることで、波浪の位相ごとの流速スペクトルを計算した。個別波の波高によって流速の振幅自体も変化するため、各流速成分は個別波ごとの流速の標準偏差で規格化している。図5を見ると、うねりと風波の両方にエネルギーピークがあるC06-4-05の波形のばらつきが小さい。うねりのスペクトル幅が狭いことを考えると奇妙な印象を受けるが、C03-2-04とC03-3-03においても風波領域にはエネルギーがあり、風波が発達する途中で卓越周期が目立たないことを反映しているのかもしれない。

図6は各レコードで得られた個別波の位相ごとの鉛直成分の流速スペクトルを示す。有義波高の違いを反映して、すべての位相においてC6-4-05が大きく、ほとんどの位相でC03-2-04とC03-3-03のスペクトルは近い値を示している。すべてのレコードでフェーズ2のエネルギーが大きいことがわかるが、明瞭な

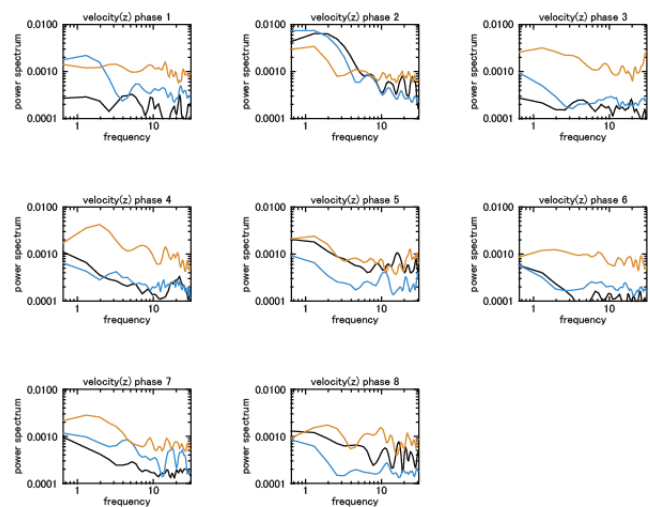


図6: 各レコードで抽出された個別波の位相($\pi/4$)ごとの鉛直成分の流速スペクトル。各レコードのスペクトルは図1, 3と同様の色で示している。

風波ピークがない C03-2-04 と C03-3-03 においては，ほかのフェーズでのエネルギーは小さくなる傾向にある．図 1 と図 3 を参照した議論で指摘した風波のエネルギーピークの有無による鉛直成分の流速スペクトルの差異を参考にすると，風波がある場合は個別波の全位相で流速変動があるが，うねりによる流速変動は個別波の位相と関係があることが示唆される．ただし，これらの推測は限られたデータを参照して得られたものであり，一般性があるかどうかについての議論は今後観測データを増やしてよく検討する必要がある．

本研究に関連した研究発表

- 根田昌典，うねりの方向が風波の発達に与える影響，名古屋大学 ISEE 共同利用研究集会「大気海洋相互作用に関する研究集会」2021 年 12 月 23 日－24 日，京都大学（オンライン開催）
- 根田昌典，うねりの方向が風波の発達に与える影響名古屋大学 ISEE 共同利用研究集会「海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ」2022 年 3 月 8 日－9 日，名古屋大学（オンライン参加）

今後の問題点

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，観測機会を増やす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．また，今年度はレコード内で抽出した個別波の位相ごとの流速スペクトルを推定する手法を導入したが，1 レコード当たりのデータ数が限られている中でのピリオドグラム計算の信頼性についての検討は不十分である．この解析手法の検証も引き続き行う必要がある．