

## 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：20-58）

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，M1）

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を現場観測によって調査し、従来の知見からどの程度乖離するのかを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豊後水道海域において波浪観測とともに水面変動に追従する流速計を用いて3次元流速観測を実施し、風波のエネルギーに対応した変化と海面応力に対応した変化が整合的に得られているかどうかを検証するためのデータを収集する。

## 研究内容

波浪の状況は、それによる海面の状態変化が経路差に影響する一方で、その影響を評価することができれば、海面表層の波成乱流の評価につながる可能性がある。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。

予備的な解析は、2016年5月24日に和歌山県田辺湾に設置されている田辺中島高潮観測塔（京大防災研）近傍で行った観測と2018年10月17日

## 別紙3

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气・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。また、代表者と共同研究者である森本教授は、2019 年 10 月に長崎大学練習船長崎丸（2019 年 10 月 18 日－20 日）に乗船して、本研究の準備としての観測を豊後水道において実施している。



写真 1：左：Vector ブイの全景．右：豊後水道における観測時の Vector ブイ（左）と GPS 波浪ブイ（右）

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（写真 1）。Vector で取得されたデータは浮体に装着しているため、その姿勢が常に変動するとともに姿勢変化の平行移動成分と回転成分によって見かけ上の流速を含む。本研究では、観測された流速からこれらの影響を除去するために、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。

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

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。田辺湾で実施した予備観測で得られた各成分の例を図 1 に示す。

田辺湾における観測では、

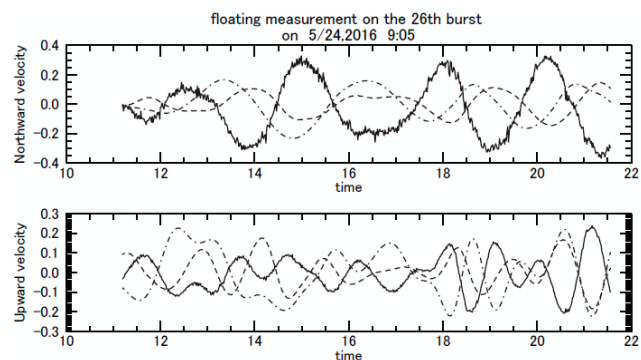


図 1: 真流速回復のための各成分（白浜観測におけるバースト 26 の例）。横軸は時間（秒）、縦軸は流速成分。それぞれ観測流速の姿勢変換（黒線）、センサーの平行移動成分（破線）、センサーの回転による成分（点鎖線）を示す。（上）北向き

浮体に付けて姿勢が変化する状態と、浮体を取り外したうえで観測塔から吊下げて水面に対してほぼ静止した状態での観測結果を比較することで姿勢補正の手法の妥当性を確認した（図は非表示）。回復した真流速は波浪周期に対応した流速変動と高周波数の流速変動成分が明瞭に見られる。

この手法を外洋域で実施した紀伊半島南方海域で得られた観測データにも適用し、海面直下 1.4m 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、波浪に伴う流速変動とともに高周波流速変動を得ることに成功した。流速変動成分は波浪スペクトル観測に現れた 2 つのピークを反映しており、水面下の流速変動を正確に評価できていると考えられる。同時観測した波浪スペクトルと比較すると、回復した流速の周波数領域では水位変動周期（0.1Hz 周辺）のピークと風波のピーク周波数はほぼ一致する。また、おおよそ 0.5-10Hz の範囲では Kolmogorov の  $-5/3$  乗則に沿ったスペクトル密度が得られた。これは、波成乱流や海面風応力から輸送された乱流生成エネルギーに対応する散逸領域と考えられる（図 2）。Vector の観測周波数は最大で 64Hz で取得することができるが、図 2 に見られるように、10Hz 以上の領域ではスペクトル形状はホワイトノイズ状となっている。Vector の観測精度は設定した流速レンジの 1%程度となっており、高周波数領域の流速変動幅がノイズレベル以下となっている可能性が高い。これらのスペクトル形状の性質は、田辺湾における観測や長崎丸で実施した観測など、そのほかの海況で取得したデータに共通して見られた。今後観測事例を増やし、このスペクトル形状の散逸領域における変化が波浪状態や海上風強度とどのような関係にあるのかを調査することが次に取り組む課題である。

長崎丸において実施した観測では観測システムに改善の必要があることが分か

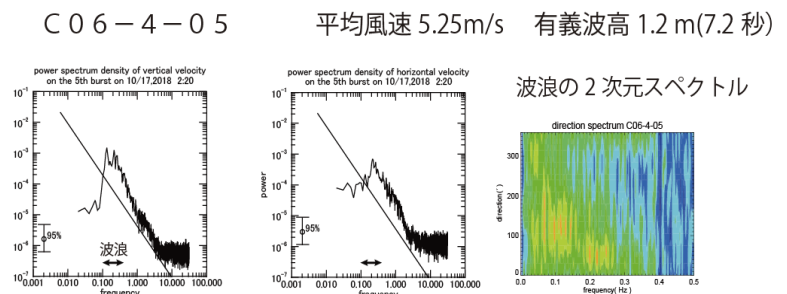


図 2: 新青丸航海で観測した真流速のパワースペクトル密度。(左)鉛直流速と(中)水平流速を示す。傾きが $-5/3$ の直線が図中に挿入されている。右図はGPS 波浪ブイから得られた 2 次元波浪スペクトルを示す。

別紙3

った．例として回復した流速に断続的に不連続なジャンプや流速変動に断続的に急激な変動がみられた（図 3）．これが生じる原因として，①観測流速レンジの事前設定が小さすぎることで，②超音波流速計の信号にみられる典型的なノイズ発生の問題③Vector ブイと GPS 波浪ブイを連結するロープが頻繁に緊張することが予想される．また，GPS 波浪ブイの転覆があった．観測システムの改善や，より適切な信号処理フィルターの使用を含め，今後の観測の課題となった．

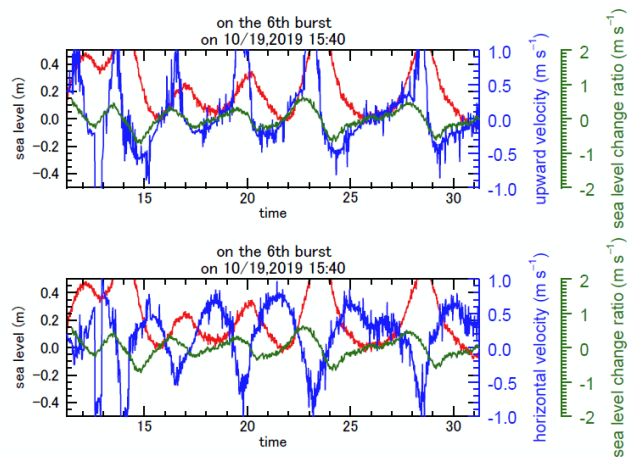


図 3: 長崎丸における流速観測の例．真流速（青線），水位変動（赤線），水位変動の

長崎丸における観測では，前述のように観測作業自体に問題が生じたために継続的な観測ができなかった．そのため，最初の投入から約 1 時間の間のデータ（20 分おきに 3 セット）のみを解析している（表 1）．この期間内で風速はいずれも 12m/s を超えているが，期間内の風速変化と風波の有義波高変化は必ずしも一致しない（表 1）．これに対応した水平流速成分のスペクトル（図 4）は，統計的に有意なレベルではないが乱流領域のスペクトル密度の大きさが有義波高（または風波の有義波高）に対応して小さくなっており，海面風応力による乱流エネルギーの供給と区別できる可能性が示唆される．しかし，観測ケースの蓄積は不十分であり，時間的に連続な観測結果を増やしていくことが次年度以降の課題である．

表 1 観測時の波浪状況

時刻	風速 (m/s)	有義波高	有義波高 (風波)	有義波高 (うねり)
14:42	13.3	1.5 m	1.6 m	1.2 m
15:02	12.3	1.4 m	1.4 m	0.9 m
15:22	12.8	1.3 m	1.3 m	1.1 m

本研究に関連した研究発表

- 根田昌典, 矢島啓, 市川香, 由布圭, 馬場康之, 水谷英朗, 久保輝広, 小

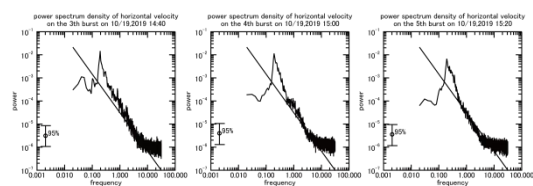


図 4: 海面下水平流速スペクトル（左から 14:42, 15:02, 15:22 からの観測）

松幸生(2019): 波浪に伴う海面直下の3次元流速変動の高周波数観測, 2019年度日本海洋学会秋季大会, 2019年9月27日, 19F-10-P1, 富山市

### 今後の問題点

本研究では令和2年度に観測データを取得し, 事例を増やすことによって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観測を実施することを目的とした。残念ながら今年度は観測を実施することができなかった。当初計画していた観測は1つだけであり, 次年度以降は田辺湾や他船舶を利用した観測を計画してリスクの分散を図る必要がある。また, 海面下流速観測(Vector観測)と波浪観測(GPS波浪ブイ観測)の同時観測のための観測システムにみられた問題点によって, 荒天時の観測を継続的に実施することができなかった。両ブイの運動が互いに干渉することを避けるとともに, 安定した観測を実施する工夫をすることが必要である。現在までに利用できるデータは限定的であり, 観測機会を増やすことと連続的なデータ取得を可能にすることによって, データ間の相互比較を容易にする必要がある。これらの改善点は次年度以降の共同研究で取り組む予定である。