

座標軸に応じた波と流れの共存場におけるレイノルズ応力の変化

佐賀大学大学院 学生員 田中宏明 正員 押川英夫 九州大学大学院 正員 田井明

1. はじめに

内湾浅海域における底泥動態の評価・予測においては、潮流だけでなく波浪や碎波などの影響を考慮する必要性が指摘されている^{1),2)}。一方、海域のような波と流れの共存場において底質の巻き上げなどを検討する際に重要となるレイノルズ応力の適切な評価のためには、水平方向の座標軸の取り方が重要と考えられる。本研究では、諫早湾内での定点連続観測により得られたデータを基に、適切な座標軸の取り方に関する検討を行った。

2. 現地観測の概要

2013 年度と 2015 年度、および 2016 年度の冬期に約 2 ヶ月間、図 1 に示す有明海諫早湾内の九州農政局により水質自動観測機が設置された B3 地点(32°53'48"N, 130°12'59"E)において、各種計測器を海底設置させて連続観測を実施した。2013 年度と 2015 年度および 2016 年度の観測の主な計測機器と条件をそれぞれ表 1、表 2 に示す。表中の測定高さは機器設置時の海底面上のセンサーの測定位置である。

3. 解析の方法

バースト毎に得られた超音波式流速計による北方、東方、鉛直上向きの 3 方向の各流速成分 u, v, w と圧力水頭 p などから、乱流特性量やスペクトルを求めた。結果の例として、2014 年 2 月 11 日 17 時のスペクトルを図 2(1)に示す。なお、 $F_u(f)$, $F_v(f)$, $F_w(f)$ は各流速成分(u, v, w)のスペクトルで、 $F_p(f)$ は底層水圧のスペクトル、 f は周波数(Hz)である。水圧と流速のスペクトルで同じ $f=0.22\text{Hz}$ に顕著なピークが見られており、風波の運動が底面付近の流速波形にも明瞭に表れている。このように、波浪が卓越している流速データには乱れと波が重合していることから、図 2(2)に示すように風波のピーク周波数付近の流速スペクトルのパワーを $-5/3$ 乗則で置き換え $[F(f)=\alpha f^{5/3}]$, α は各方向の流速成分で定数として同定し、波浪成分を除去した上で、フーリエ逆変換した流速の時系列からレイノルズ応力などを再計算した^{1),2)}。

レイノルズ応力に及ぼす座標軸の影響を把握するために、波と流れの特性が異なる Series-A~Series-D の 4 種類のデータを用いて検討を行った。Series-A は 2014 年 2 月 11 日 17 時で波高と流速が共に大きく波向き(θ_w)と平均流速の方向(θ_r)がほぼ等しい場合、Series-B は 2016 年 3 月 9 日 10 時で波高と流速が共に大きいものの θ_w と θ_r が顕著に異なる場合、Series-C は 2017 年 1 月 5 日 20 時の干潮時で平均流速が小さく潮流の影響が小さいものの波高が大きい場合、Series-D は 2017 年 2 月 10 日 0 時の平均流速が大きいものの波高が小さい場合となっている。波向きとしては、東を 0° とした平均波向き $\theta_w = \tan^{-1}[\langle p'u' \rangle / \langle p'v' \rangle]$ を用いた。ただし、 u', v', p' はそれぞれ、 u, v, p の変動成分、 $\langle \rangle$ は時間平均を表す。座標軸の影響を検討するために、各 Series の水平方向流速の瞬時値 (u, v) を平均流速と波向きの方向(θ_r および θ_w)に加えて、 $0^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で 10° 毎、および 45° と 135° の方向に座標変換を行った。なお、第 3 もしくは第 4 象限内 ($-180^\circ \sim 0^\circ$) に θ_r や θ_w が得られた場合には、その値まで 10° 刻みで座標変換を行っている。

4. 結果および考察

Series-A では $\theta_w=87.2^\circ$, $\theta_r=86.8^\circ$, 有義波高 $H_{1/3}=0.92\text{m}$, 底層平均流速 $|V|=8.0\text{cm/s}$, 平均水深 $WL=8.47\text{m}$ であ

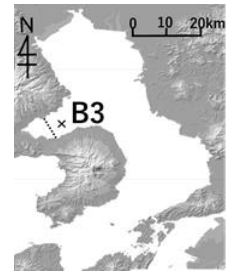


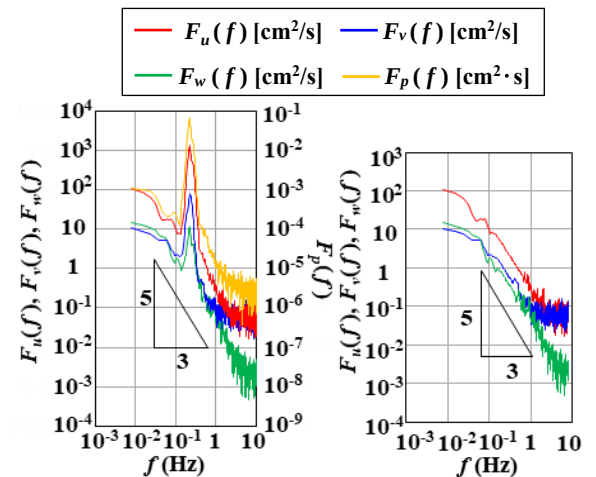
図 1 観測地点

表 1 主な使用機器と計測条件 (2013 年度)

測定項目	使用機器	測定高さ	記録間隔など
流速	超音波式流速計(Nortek社製, Vector, 水圧センサー付き)	25cm	2時間毎に32Hzで128秒
波と水深	超音波式波高計(アイオーテック社製, Wave Hunter04-S)	50cm	1時間毎に5Hzで20分間

表 2 主な使用機器と計測条件 (2015・2016 年度)

測定項目	使用機器	測定高さ	記録間隔など
流速	超音波式流速計(Nortek社製, Vector, 水圧センサー付き)	30cm	2時間毎に16Hzで256秒
波と水深	超音波式波高計(アイオーテック社製, Wave Hunter04-S)	55cm	1時間毎に5Hzで20分間



(1) 波浪成分の除去前 (2) 波浪成分の除去後

図 2 周波数スペクトル (2014 年 2 月 11 日 17 時)

った。座標変換後の波浪成分除去前のレイノルズ応力の各成分 ($\langle u'v' \rangle$, $\langle u'w' \rangle$, $\langle v'w' \rangle$) とその絶対値 $|R_s| = [(\langle u'v' \rangle)^2 + (\langle u'w' \rangle)^2 + (\langle v'w' \rangle)^2]^{1/2}$ の結果を図 3(1), 図 2 と同様に流速スペクトルを用いて波浪成分を除去したそれぞれの結果を図 3(2)に示す。図 3(1)で波浪を含む場合の $|R_s|$ および $\langle u'v' \rangle$ の絶対値は, 87° 付近の波向き若しくは平均流速の方向への座標変換時に最小となっている。なお, $\langle u'v' \rangle$ は 90° 毎に符号が異なるものの絶対値は不変である。 $\langle u'w' \rangle$ と $\langle v'w' \rangle$ は 90° 位相がずれた結果となるものの, $|R_s|$ および $\langle u'v' \rangle$ と比較して絶対値が全体的に小さい。従って, $\langle u'v' \rangle$ の絶対値は $|R_s|$ とほぼ等しい。一方, 図 3(2)では波浪成分を除去したことで, 特に $|R_s|$ と $\langle u'v' \rangle$ の絶対値が小さくなっているものの, 波浪を含む場合と同様に, それらは波向き若しくは平均流速の方向付近で最小となっている。

Series-B では, $\theta_W = 38.3^\circ$, $\theta_V = -1.22^\circ$, $H_{1/3} = 0.89\text{m}$, $|V| = 10.9\text{cm/s}$, $WL = 9.61\text{m}$ であった。図 3 と同様な形式で Series-B の結果を図 4 に示す(凡例は図 3 と共通)。波浪成分を含む場合の $\langle u'v' \rangle$ の絶対値と $|R_s|$ は, 図 4(1)より Series-A と同様に θ_W 付近の角度で最小となっているものの, 波浪除去後の図 4(2)では θ_V の角度付近で最小となっている。

波浪のみが卓越している Series-C では $\theta_W = 20.6^\circ$, $\theta_V = -18.0^\circ$, $H_{1/3} = 0.72\text{m}$, $|V| = 5.71\text{cm/s}$, $WL = 7.17\text{m}$ であった。Series-C の結果を図 3 と同様な形式で図 5 に示す。図 5(1)より波浪を含む場合の $\langle u'v' \rangle$ の絶対値と $|R_s|$ は θ_W の角度で最小となっているものの, 波浪成分を除去した図 5(2)では θ_V で最小となっており, Series-B と同様な結果であった。Series-A, B, C の結果より, 風波が卓越している場合には, 波浪成分を除去することで平均流速の方向である θ_V の角度付近でレイノルズ応力の大きさが最小になったものと考えられる。

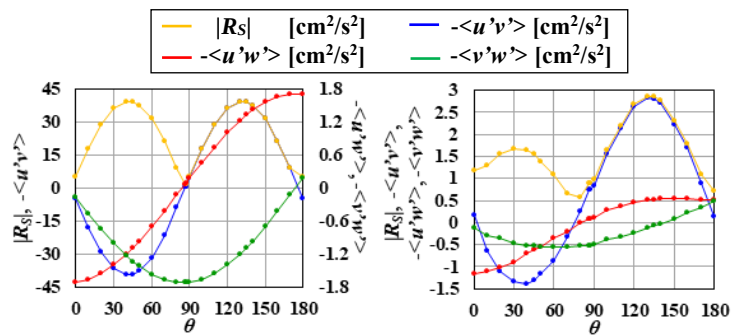
波の影響が小さく, 平均流が卓越している Series-D では $\theta_W = 4.49^\circ$, $\theta_V = -8.44^\circ$, $H_{1/3} = 0.14\text{m}$, $|V| = 17.8\text{cm/s}$, $WL = 7.51\text{m}$ であった。図 6 に(波浪成分を除去していない)各方向のレイノルズ応力と $|R_s|$ の結果を示す。これより, θ_V の角度で $|R_s|$ が最小となっていることが分かる。Series-D のみ波高が小さいために $\langle u'v' \rangle$ の絶対値が $\langle u'w' \rangle$ および $\langle v'w' \rangle$ と同程度となっていることから, Series-A, B, C と比較すると $\langle u'v' \rangle$ の絶対値と $|R_s|$ の座標軸依存性が顕著に異なっていると同時に, $|R_s|$ の変化は小さい。

4. おわりに

本研究では, 波と流れの共存場におけるレイノルズ応力を適切に評価するために, レイノルズ応力の座標軸への依存性について検討を行った。その結果, 波浪が卓越している場合は波向きの方向, 波浪が卓越していない場合, もしくは波浪成分の除去後には水平面内の平均流速の方向に座標変換を行うことで, レイノルズ応力の絶対値が小さくなることが分かった。従って, 波浪と平均流の卓越方向を考慮した座標軸を用いることで, より詳細な流況の把握・評価が可能になるものと考えられる。

謝辞: 本研究の一部は, 有明海地域共同観測プロジェクト(COMPAS)の援助の下に行われた。ここに記して謝意を表します。

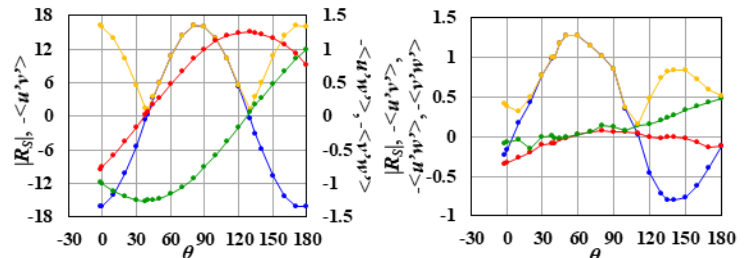
参考文献 1) 押川ら: 内湾浅海域における懸濁物質の応答特性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, 1_937-1_942, 2016.
2) 押川ら: 内湾浅海域の濁度に及ぼす外力の検討, 日本流体力学会年会 2020 講演論文集, 3p., 2020.



(1) 波浪成分の除去前

(2) 波浪成分の除去後

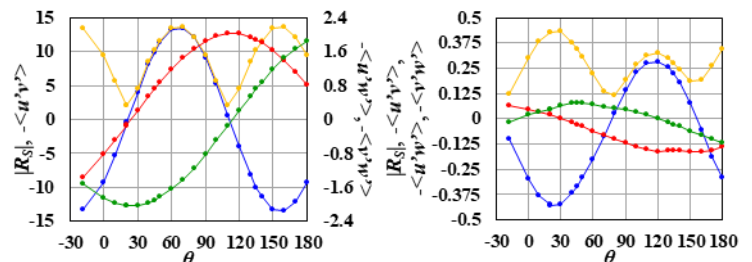
図 3 Series-A の座標軸に応じたレイノルズ応力



(1) 波浪成分の除去前

(2) 波浪成分の除去後

図 4 Series-B の座標軸に応じたレイノルズ応力



(1) 波浪成分の除去前

(2) 波浪成分の除去後

図 5 Series-C の座標軸に応じたレイノルズ応力

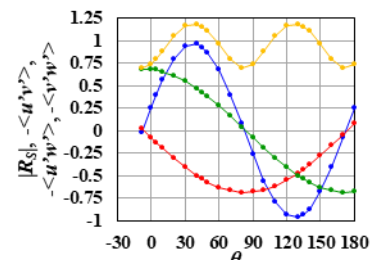


図 6 Series-D のレイノルズ応力