

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 6 日現在

機関番号：34310

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21937

研究課題名（和文）逆転の発想「風波抑制による気液界面下の乱流混合促進」に基づく赤潮防止策の開発

研究課題名（英文）Development of a technique for preventing red tide by damping wind waves and promoting turbulent mixing below the wavy air-water interface

研究代表者

小森 悟（KOMORI, SATORU）

同志社大学・研究開発推進機構・嘱託研究員

研究者番号：60127082

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：乱流の直接数値計算法を通常の純風波と減速風波とを気流方向に沿って帯状かつスパン方向に交互に並べた風波乱流場に適用した結果、純風波と減速風波の間隔を減速領域幅の8倍程度にした場合に気液界面下の流体混合が縦渦の生成により促進され、純風波のみに比べて混合が良くなることが明らかになった。また、表面張力を減少させた場合には、リップルの消滅により界面下の乱流混合が抑制されることが明らかになった。これらの結果から、海洋表層の赤潮や貧酸素化を防止する技術としては界面活性剤の散布よりも水面近傍に風波減速メッシュ等を風向きに沿って帯状かつスパン方向に交互に設置して縦渦を形成する方法が有望であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風波に減速領域と減速しない領域を風向きに直交するスパン方向に交互に設定することにより風波気液界面下に縦渦を発生させることができ、その結果、通常の風波の場合よりも混合を促進できることを直接数値計算法を用いて明らかにした。また、表面張力を下げた場合には、表面張力波と有義波のエネルギー輸送の観点から乱流が抑制されることを見出した。これらの学術的成果から、格子や網等を用いて人為的に風波を部分的に減速すれば、海洋表層の混合を促進させ沿岸域や湖沼での赤潮や貧酸素化などの水質汚染を防止できる可能性を示すに至った。

研究成果の概要（英文）：Direct numerical simulation was applied to controlled wind waves in which decelerated wind waves and undecelerated wind waves were alternately arranged at regular intervals in the spanwise direction. The predictions show that when the ratio of the width of the decelerated wave region to one interval is about 1/8, longitudinal vortices larger than those observed in pure wind waves without the decelerated region are generated below the air-water interface and fluid mixing is more promoted. In addition, the effects of surface tension on pure wind waves were investigated using the same direct numerical simulation. The predicted wave spectra show that surface tension reduction is not useful for promoting turbulent mixing below the interface. These results suggest that it is a promising technique for preventing red tide and oxygen depletion in the ocean surface to decelerate the surface current by means of zonal meshes like mesh fabric.

研究分野：環境流体力学

キーワード：風波気液界面 乱流混合 気液二相流 縦渦 表面張力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

風波気液界面を通しての運動量・熱・物質の輸送機構と輸送量が風波の状態と風波気液界面下に発生する乱流に大きく左右されることがよく知られている (Komori et al., *J. Physical Oceanography*, Vol.48, 2018) ことから、人為的に風波を制御することができれば、風波界面での乱流輸送機構や輸送量を変化させることができる可能性があるのではと当初予想した。また、もし、この制御が可能となれば、海洋表層の混合を促進させることにより沿岸域や湖沼での赤潮や貧酸素化などの水質汚染を防止できるのではないかと考えた。

具体的な風波の制御方法としては、研究代表者らの最近の研究結果 (Matthews et al, *Nature Geoscience*, Vol.10, 2017) から微量の界面活性剤が海水面に存在すれば風波が減衰し、それに伴い表面流速が減速することから表面張力を変化させる方法を発案した。つまり、常識的には風波は表層乱流を促進するものと考えられるが、風速数メートル毎秒程度の砕波を伴わない状態ではフラットに近い界面を界面活性剤を用いて人為的に作り出すことができれば風波界面に比べて形状抗力は低下するものの摩擦抗力は増加するため乱流混合が促進されるのではないかと当初は予想した。この点を明らかにするためには表面張力が気液界面下の乱流構造に及ぼす影響を明らかにすることも重要であると考えた。

一方、表面流速に手を加えない通常の風波 (以後、純風波と呼ぶ) と表面流速を下げた減速風波を風向きに沿って帯状に、かつ、スパン方向に交互に配置すれば表面流速の大小 (水面下に作用するせん断力の大小) 領域がスパン方向に交互に存在し Langmuir 循環流 (Leibovich, *Annual Review Fluid Mech.*, 1983) に類似した縦渦が形成され水面下の混合が促進されるのではないかと考えた。

以上の背景から風波気液界面下の乱流に及ぼす表面張力の影響、および、純風波と減速風波の領域をスパン方向に交互に配置した場合の両風波の相互作用が風波気液界面下の乱流混合に及ぼす影響を明らかにすべく本研究を開始するに至った。

2. 研究の目的

本研究では、直接数値計算 (DNS) と室内実験を用いて、風波気液界面下の乱流構造に及ぼす表面張力の影響の解明、及び、風波の制御による風波気液界面下の乱流混合促進技術の開発とその混合促進機構の解明を行うことを研究目的とした。具体的には、気液二相乱流を再現できる 3 次元直接数値計算法 (DNS) を風波乱流場に適用し、表面張力が風波気液界面下の乱流に及ぼす影響、及び、純風波と人為的に表面流速を抑制した減速風波とを流れの方向に帯状に、かつ、スパン方向に交互に設定した場合の気液界面下の乱流構造と流体混合機構について明らかにした。また、小型風波水槽を製作し、可視化実験を行うことにより DNS の結果を検証することを試みた。

3. 研究の方法

(1) 直接数値計算 (DNS)

気相および液相の流れの支配方程式は非圧縮性流れの Navier-Stokes 方程式である。気液界面の追跡には、界面の鉛直方向位置を示す高さ関数 η についての 2 次元輸送方程式を用いた。本 DNS では、界面の変形に応じて鉛直方向に移動する格子点を持つ境界適合格子を設定し、Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法を用いて支配方程式を計算した。なお、支配方程式、気液界面における力学的境界条件および計算手法の詳細については、研究代表者らの論文 (Komori et al., *J. Turbulence*, Vol.11, 2010) に記載されている。

界面流速を減速させる場合には、次式に基づいて、界面の接線方向速度 U_s を定数 T_c ($= 1.45 \times 10^{-4}$ s) を用いてダンピングする強制外力を加えた。

$$(\partial U_s / \partial t)_{\text{damp}} = -U_s / T_c$$

本研究では、主流、スパンおよび鉛直方向長さがそれぞれ 16δ 、 3.84δ および 3δ の計算領域を設定した。ここで、 $\delta = 1.25 \times 10^{-2}$ m である。計算領域底面から 2δ の高さに初期気液界面を設定した。主流およびスパン方向には等間隔格子を採用した。鉛直方向には不等間隔格子を採用し、界面付近に格子点を密

に配置した。速度の境界条件として、主流およびスパン方向に周期境界条件を、鉛直方向には滑り境界条件を適用した。気側の初期流動場には、領域上端速度が $U_{top} = 4.7 \text{ m/s}$ の十分に発達した壁面乱流場を与えた。流れの駆動力として、気側主流方向に一定の圧力勾配を与え、7秒間の時間発展を計算した。気液界面に働く表面張力には、水の表面張力 ($\sigma_w = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N/m}$) を設定した。

フラットな移動界面および静止界面がスパン方向に交互に並ぶDNSに対しては、液側だけの計算であり、水深 $\delta (= 2.5 \times 10^{-2} \text{ m})$ に対して主流、スパンおよび鉛直方向長さがそれぞれ 8δ 、 3.36δ および δ の計算領域を設定した。界面速度の境界条件として、フラットな移動界面に対しては 5 m/s の流速を、静止界面に対しては流速 0 を与え、底面および側面に対しては非滑り条件を、主流方向に対しては周期境界条件を適用した。

(2) 室内実験

本研究では DNS の計算領域に相当する程度の大きさをもつ小型風波水槽を製作した。水槽部分は全長 1 m 、全幅 0.1 m 、全高 0.14 m であり、水深を 0.04 m とした。整流した空気を気液界面上の $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ の正方形ダクト内に一様流速を数メートル毎秒で流し気液界面上に風波を発生させた。風波の一部の領域の表面流速を減衰させるため、 $1.6 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$ の空隙サイズを持つグラスファイバー製のスクリーンメッシュを幅 0.01 m 幅、長さ 1 m の帯状に水面位置に張り付けた。この流動条件で、風波水面下の流体混合状態をポイントソースからメチレンブルーを放出することにより水槽底面から可視化した。

4. 研究成果

(1) 表面張力が乱流に及ぼす効果

図1に風波の主流方向の1次元波高スペクトル $S_{\eta\eta}(k)$ を水の表面張力 σ_w の場合と水の半分の表面張力 $0.5\sigma_w$ の場合に対して示す。ここで、 k は波数である。本研究で扱う風波では、波長の長い有義波とリップル状の表面張力波が高調波共鳴作用によって形成される。これは、有義波が風から受け取ったエネルギーの一部が、高調波共鳴によって高波数の波へ輸送されることを意味する。図に黒色の線で示す $\sigma = \sigma_w$ の水の場合、高波数側のスペクトルは表面張力波の波数 k_c まで緩やかなスロープを示し、 k_c 付近より高波数では急激に強度が低下することが確認できる。また、赤色の線で示す水の半分の表面張力 $\sigma = 0.5\sigma_w$ の場合には、風波がより発達しているため低波数域にある有義波の波数 k_s の周辺のピークが黒色の線で示す水の場合 ($\sigma = \sigma_w$) より大きい。一方、高波数側では、 $\sigma = 0.5\sigma_w$ の場合は、表面張力の低下によって有義波と共鳴する表面張力波の波数 k_c が大きくなるため、 $\sigma = \sigma_w$ の場合の k_c 周辺では強度が低下し、 $\sigma = 0.5\sigma_w$ の場合の k_c 周辺では強度が増加している。ただし、 $\sigma = 0.5\sigma_w$ の場合の k_c 付近での強度は $\sigma = \sigma_w$ の場合の強度よりも約2オーダー小さい。この結果は、表面張力の低下によって、有義波から表面張力波へのエネルギー輸送が抑制されていることを示している。したがって、表面張力の低下による有義波の成長速度の増加は、表面張力波へのエネルギー輸送の抑制によって有義波がより多くのエネルギーを蓄積するようになることに起因することが明らかになった。

次に、このように表面張力を低下させた場合に、研究開始当初の予想のように風波気液界面下の乱流が促進される

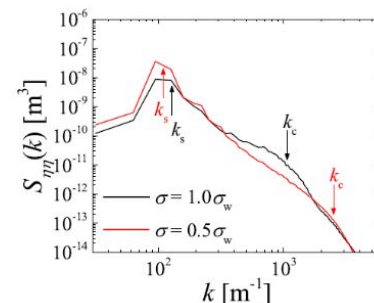


図1. 風波のスペクトルに及ぼす表面張力の影響

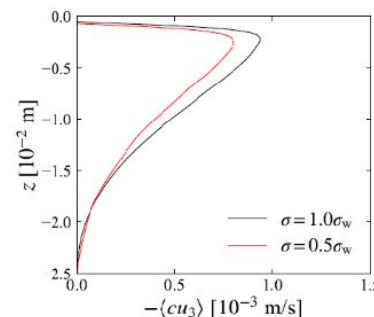


図2. 鉛直方向スカラー流束に及ぼす表面張力の影響

のかどうかを風波乱流場にスカラ場を重畳させることにより検討した。図2に鉛直方向に乱流輸送されるスカラ流束 $-\overline{u_3 c}$ の鉛直方向分布を示す。ここで、 c はスカラ濃度変動、 u_3 は鉛直方向速度変動、及び、オーバーバーは時間・空間平均値を表す。この図より、下向き乱流スカラ流束のピーク値は、表面張力が小さい場合の方が小さい値を示すことがわかる。この結果は、表面張力が低下した場合、気液界面下に作られる乱流が抑制されるために気液界面を通してのスカラ輸送が抑えられることを示しており、表面張力を低下させることにより気液界面下の乱流を促進するという当初のアイデアは有効ではないことが明らかになった。

(2) 純風波と減速風波の相互作用

スパン方向に純風波の領域と界面接線方向速度を減速させた減速風波の領域を帯状、かつスパン方向に交互に配置することにより、ストリーク状の速度差を人為的に作り出した。減速風波領域と純風波領域のペアを1サイクルとして、スパン方向に3サイクル配置したケース(1サイクル幅1.6 cm)と2サイクル配置したケース(1サイクル幅2.4 cm)について直接数値計算(DNS)を行った。なお、減速風波領域の幅と1サイクル幅の比率 D (以後、ダンピング比率と呼ぶ)を1/2および1/8の二つの場合に設定した。

図3にダンピング比率 D を1/2と1/8にして3サイクルの減速領域を設定した場合の風波乱流場におけるスパン方向流速変動のrms値 $u_{2,rms}$ の鉛直方向分布を示す。この図よりダンピング比率 $D=1/2$ の場合(青線)は、減速風波領域を有しない全領域が通常の純風波のみの場合(黒線)に比べて明らかに乱流は抑制され、 $D=1/8$ の場合(緑線)はやや抑制されていることが分かる。そこで、ダンピング比率 $D=1/8$ の場合(緑線)のサイクル数を2に減少して減速風波と純風波の間隔を大きくしたところ図4に黄土色の線で示すように水面下の深い領域で乱流が促進されていることが分かる。そこで、これらの場合の風波水面下の乱流渦を速度勾配テンソルの第二不変量を用いて可視化した。

図5に、減速風波領域を有しない全領域が通常の純風波のみの乱流場と $D=1/8$ で3サイクルおよび2サイクルの減速領域を設定した場合の風波乱流場の可視化図を示す。界面上のカラーコンターは主流方向界面流速を表し、液側側面のカラーコンターは主流方向渦度を表す。また、界面下には速度勾配テンソルの第二不変量の等値面を描画した。図5(左)の通常の純風波のみの場合は、界面上に流速の速いストリーク状構造が生じ、これに対応して界面下に馬蹄形渦列が形成される。このストリーク状構造に伴う乱流場が液側の乱流混合を促進する。また、3つの高速のストリーク状構造が見られる。3サイクルの減速領域を設定した図5(中)では、純風波領域の中央に高速のストリーク状構造が形成され、その下に3つの馬蹄形渦列が主流方向に整列しながら発達することが確認できる。一方、減速領域を2サイクルに設定した図5(右)では、2つのストリーク状構造が形成され、同様に2つの馬蹄形渦列が界面下に発達している。また、3サイクルの場合に比べて、馬蹄形渦がより大きく発達していることも確認できる。つまり、同じ時刻でも、2サイクルの方が深い位置にまで乱流渦が到達しており、図4に示す流速変動強度の結果とも一致する。このことは、界面の速度の減速と減速風波と純風波の間隔に応じて界面下の乱流構造が変わることを示している。したがって、界面に帯状に

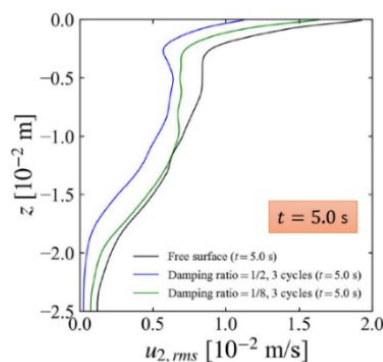


図3 . スパン方向流速強度
 $D=1/2$ と $1/8$ (3サイクル)

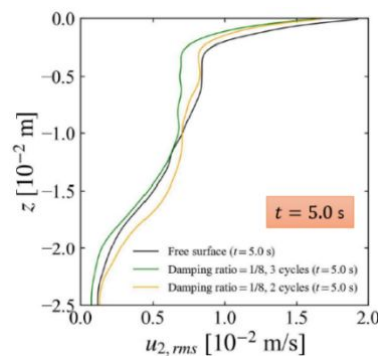


図4 . スパン方向流速強度
3と2サイクル ($D=1/8$)

格子や網を張るなどして界面の流速を減衰させ、減速領域のスパン方向設置間隔を調節することで、液側での乱流混合を純風波のみの場合よりも促進させることができる可能性が示唆される。

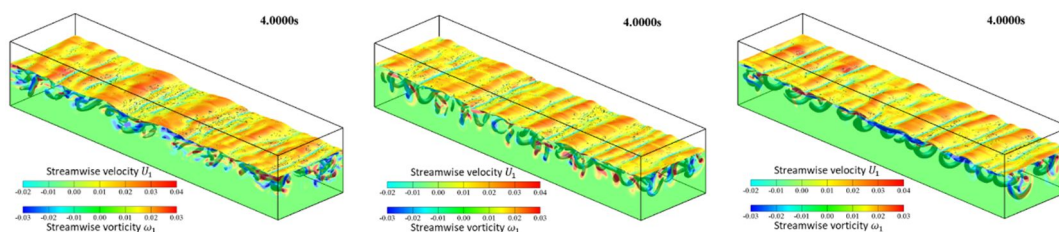


図5 . 風波気液界面上の主流方向流速 U_1 、液側の主流方向渦度 ω_1 、および速度勾配テンソルの第二不変量の等値面の分布 (時刻 $t = 4.0$ 秒)
 (左) 界面速度の減速領域のない純風波 (中) 3 サイクルの減速領域を設定した風波 ($D=1/8$)
 (右) 2 サイクルの減速領域を設定した風波 ($D=1/8$)

(3) フラットな移動界面と静止界面の相互作用

前節に示したように純風波領域と減衰風波領域をスパン方向に交互に帯状に設定した場合に、気液界面下での乱流混合が促進されるのであれば、完全に消波した場合、つまり、気液界面をフラットな移動界面と完全に静止した界面をスパン方向に交互に帯状に設置した場合にも界面下の乱流混合が促進されるのではないかと考えた。図6に5m/sで移動する界面の幅と静止した界面の幅(ダンピング比率 D)を前節と同じ $1/8$ に設定して計算を行った場合のスパン方向流速 U_2 のカラーコンターを示す。静止及び移動界面の間に静止界面側から移動界面側に移動する流れ(渦)が存在するがその存在領域も流速も非常に小さく乱流混合を促進するようなものではない。このことは、平板等を用いて界面を覆い、風波ではなく完全消波したフラットな界面を減速させる方法では界面下の乱流混合を促進することができないことを示唆している。

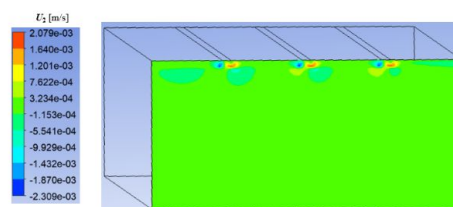


図6 . 移動界面と静止界面が交互に存在する界面下のスパン方向流速分布

(4) 小型風洞水槽実験結果

前述のDNSの結果を小型風洞水槽を用いた可視化実験により検証することを試みたが、コロナ禍の制約などにより実験を期間内に予定通りに進められず、純風波とファイバーメッシュで減速した領域幅を同じにしたダンピング比率 $D=1/2$ の場合の結果を得るに止まった。図7に、この場合の可視化写真を純風波(左)と減速風波(右)の場合に対して示すが、明らかに $D=1/2$ の場合の減速風波の場合にはDNSと同様にスパン方向の拡散が抑制されていることが分かる。今後、減速風波の間隔およびダンピング比率 D を変化させ、上記のDNSの結果の検証を行うとともに混合促進に最適な減速風波の間隔およびダンピング比率 D を探索する予定である。

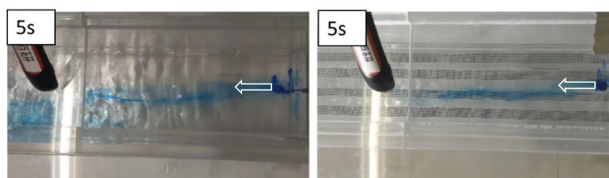


図7 . ポイントソースからの染料放出による水面下の流れ
 (左) 減速領域のない純風波
 (右) 減速領域を設定した風波 ($D=1/2$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松田景吾、小森悟、高垣直尚、大西領
2. 発表標題 風波の成長機構とスカラ輸送に及ぼす表面張力の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松田景吾、小森悟、高垣直尚、大西領
2. 発表標題 風波気液二相流での液側乱流混合の制御に関する数値的検討
3. 学会等名 第36回生研TSFDシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 C. Tanaka, N. Suzuki, N. Takagaki, Y. Troitskaya, S. Komori, A. Kandaurov, M. Vdovin, M. Konda
2. 発表標題 Effects of the sea surface current on the growth of wind wave in laboratory experiment
3. 学会等名 2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<http://komori-dousoukai.my.coocan.jp/study/study.html>
<https://www.eng.u-hyogo.ac.jp/outline/faculty/takagaki/index.html>
<http://www.jamstec.go.jp/ceist/esrg/matsuda/index.ja.html>
 分担者 高垣直尚 2019年度 日本流体力学会 竜門賞 受賞
 分担者 松田景吾 2020年度 日本流体力学会 竜門賞 受賞

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	高垣 直尚 (TAKAGAKI NAOHISA) (00554221)	兵庫県立大学・工学研究科・助教 (24506)	
研究 分担者	松田 景吾 (MATSUDA KEIGO) (50633880)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (地球情報基盤センター)・研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関