

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630053

研究課題名(和文)表面張力および粘度変化による風波乱流場の制御と台風の弱体化計画

研究課題名(英文)An idea for controlling and weakening tropical cyclones by changing surface tension and viscosity on wavy sheared air-water interface

研究代表者

小森 悟 (KOMORI, SATORU)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60127082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：風波水槽に界面活性剤を微量に混和させた溶液を満たし、その水面上に風を吹かせることにより、水面波の測定実験を行った。その結果、界面活性剤の影響は低風速域において特に顕著で、風波の発生を完全に抑制すること、また、砕波が生じる高風速域において界面活性剤は砕波を促進することが確認された。さらに、直接数値計算法を用いることにより、表面張力の低下は風波の波高を増加させること、このため界面活性剤による風波の抑制作用は表面張力の低下によるものではないことを明らかにした。また、粘性の変化も確認できなかったため、このような抑制作用は、マランゴニ効果によって引き起こされていると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Water level fluctuations were measured in a wind wave tank filled with tap water slightly contaminated by a surfactant. The measurements show that the damping effects of the surfactant on the water level fluctuations is remarkable at low wind speeds and the surfactant suppresses the generation and development of wind waves. At extremely high wind speeds, it is found that the surfactant acts to promote the wave breaking. In addition, direct numerical simulation shows that the wave height increases with decreasing surface tension. The promotion effect of the surface tension on the wave height implies that the decrease of surface tension due to the surfactant does not attenuate wind waves but the Marangoni effect may suppresses the wind waves.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学

### 1. 研究開始当初の背景

気液界面を通しての運動量およびスカラ(物質および熱)の乱流輸送には界面でのせん断応力のみならず表面張力の変化も大きな影響を与えると考えられている。例えば、タンカー等の転覆事故や巨大津波による海洋上への重油等の流出により海面が汚染されると表面張力が大きく変化することにより風波の形状と構造自体が変化し乱流輸送に大きな影響が現れるとされている。実際、Mitsuyasu and Honda(*J. Fluid Mech.*, 1982)や Ostrovsky and Stepanyants(*Rev. Geophys.* 2010)らは気液界面上を流れる気体のせん断力によって形成される風波気液界面上に界面活性剤等を散布した場合、界面上の風速が抗力減少により増加すること、つまり、表面張力の減少が風波乱流場に大きな影響を及ぼすことを推定しておりこれが上述の定説となっている。

しかしながら、表面張力は線形波に対する理論によれば cm 以下の小さな波にのみ大きな影響を及ぼすはずであり、重油等による海面汚染を考える場合、風波水槽や海洋に現れる cm 以上のスケールを持つ複雑に変形した風波界面に真に重油等による表面張力の変化が影響を及ぼしているのかどうかは疑問である。この表面張力の影響よりも重油等による表層液の粘性の変化の影響の方が遙かに大きいのではないかと推察されるがこれを裏付ける既往研究は皆無である。

### 2. 研究の目的

本研究では小型風波水槽を製作し、表層だけでなく水槽全体を満たす液体として真水、粘度調整をしたグリセリン水溶液、表面張力調整をしたアルコール水溶液、重油等を用いて、液面上の気流のせん断力により形成される風波の乱流構造および風波の形状等の計測を行うことにより、表面張力と粘性のどちらが風波乱流場に強く影響を及ぼすのか、また、どのような影響を及ぼすかを明らかにする。これらの実験結果を用いて、最近、気液二相流の風波乱流場の計算に使用されている ALE (Arbitrary Lagrangian and Eulerian) 法等に基づく 3次元直接数値計算法 (DNS) が真に表面張力や粘度の効果、および表層のみの表面張力や粘度の変化の影響を適切に表現出来るかどうかを実験結果との比較により明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 大型風波水槽実験

大型風波水槽を用いて、既往研究において報告されている低風速域( $U_\infty < 15$  m/s)における界面活性剤の影響を確認するとともに、既往研究では調べられていない中風速～高風速域( $U_\infty > 15$  m/s)の風波に界面活性剤が及ぼす影響を調べた。

大型風波水槽は、上流側から送風機、拡散胴、整流胴、縮流胴、テストセクション、排

気胴から構成される全長 23.2 m の吹き出し式風波水槽である。整流胴は幅 1.6 m、高さ 1.6 m の正方断面を持ち、その内部には対辺距離 10 mm、主流方向長さ 0.1 m のアルミニウム製のハニカムが設置されている。また、整流用金網(線径 0.3 mm、メッシュ 20)が拡散胴に 1 枚、整流胴に 3 枚取り付けられている。縮流胴は 2 次元的な余弦曲線形状をしており、整流胴とテストセクション入口部は絞り比 4 : 1 で滑らかに接続されている。テストセクション入口部は幅 0.8 m、高さ 0.8 m、テストセクションは長さ 15.0 m、幅 0.8 m、高さ 1.6 m であり、水深を 0.71 ~ 0.78 m とした。テストセクションの側面および底面は透明のガラス製であり、上面はアクリル製である。気流の生成は、遠心ファン(Showa Denki Co., Ltd.: S2TKR-00)を 75 kW のインバータ方式 3 相モータにより駆動させ、テストセクション内に気流を流入させることにより行った。テストセクション内に活性炭濾過装置(NIPPON RENSUI CO.: RAC-200)を通して作成した濾過水または SDS 水溶液(300ppm)を貯め、整流された空気をテストセクション上部に流すことにより気液界面上に風波を発生させた。テストセクション入り口部および末端部には、波の反射を防ぐために消波装置を設置した。

水位変動の測定には抵抗式波高計(KENEK 本体: CH-601, センサ: CHT4-HR60BNC)を用いた。測定は  $x = 6.5$  m の位置において、サンプリング時間を 300 s、サンプリング周波数を 500 Hz として行った。測定データをデジタルレコーダ(TEAC: es-8)に記録し、コンピュータにより統計的に処理した。測定された水位変動データにゼロアップクロス法を適用し、有義波高  $H_s$ 、有義波周期  $T_s$  を求めた。

本実験では、濾過水と界面活性剤水溶液としてドデシル硫酸ナトリウム水溶液(以降、SDS)ならびに Triton x-100 水溶液を濃度 300 ppm で使用した。濾過水は水道水を全自動濾過装置(栄光: TF-75N)および 5  $\mu$ m のマイクロポアフィルタ(栄光: SH3-2)を通すことにより作成した。界面活性剤水溶液は濾過水に界面活性剤を混和させることにより作成した。表面張力の測定にはデュヌイ氏表面張力試験機(大平理化学工業株式会社)、粘性係数の測定にはレオメータ(Anton-paar 社: MCR301)を使用した。表面張力は界面活性剤水溶液の場合、濾過水の約半分の値を示す。また、界面活性剤水溶液の粘性係数はせん断速度に対して概ね一定であり、水と同程度の値を示す。一部の界面活性剤には、粘性係数がせん断速度に依存して大きく変化する非ニュートン性を示すものが存在するが、本実験で使用した界面活性剤水溶液にはそのような性質を確認することはできなかった。

## (2) 小型風波水槽実験

本実験では小型風波水槽を使用した。本実験で使用した風洞は、上流側から送風機、拡散胴、整流胴、縮流胴、テストセクション、排気胴から構成される全長 10.5 m のエッフェル式風洞である。整流胴は幅 0.9 m、高さ 0.9 m の正方断面を持ち、その内部にはアルミニウム製のハニカムが設置されている。縮流胴は 2 次元的な余弦曲線形状をしており、整流胴とテストセクション入口部は絞り比 3:1 で滑らかに接続されている。テストセクションは幅 0.3 m、高さ 0.3 m、長さ 5.0 m であり、その側面および底面はガラス製、上面はアクリル製である。気流の生成は、軸流ファン(ShowaDenki Co., Ltd.: MFTC-6) を 5.5 kW のインバータ方式 3 相モータにより駆動させ、テストセクション内に気流を流入させることにより行った。風洞内に小型のアクリル製水槽を設置し、整流された空気をテストセクションに流すことにより水槽内の気液界面上に風波を発生させた。なお、水槽により気流が乱れるのを防ぐため、水槽前方には傾斜 4° のアルミニウム製のスロープを設けた。図 1 に風洞内に設置した水槽の概略図を示す。水槽は長さ 1.05 m、幅 0.20 m、高さ 0.05 m の閉鎖回流型水槽であり、溶液が循環するような構造になっている。水槽のテストセクションは、幅 0.09 m、高さ 0.05 m、長さ 0.9 m であり、テストセクション以外の部分は気流と接しないようにアクリル製の蓋がしてある。また、水槽のテストセクション終端には波の反射を防ぐために長さ 0.10 m、幅 0.09 m のアクリル製消波板を設置した。実験はすべて室内で行い、その際の室温は 10°C ~ 20°C であった。

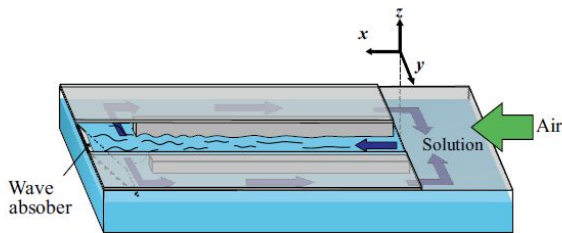


図 1 小型風波水槽の概要

水位変動の測定には静電容量式非接触変位計(岩通計測株式会社本体: ST-3572, プロープ: ST-0717A)を用いた。静電容量式変位計は、プロープを水面の上空に設置し、プロープと水面の距離による静電容量の変化を検出することにより水位変動を測定する装置である。静電容量式変位計は抵抗式波高計より、測定可能な水位変動の大きさは制限されるものの、時間・空間分解能が非常に優れている。測定時のプロープは、 $z = 0.0020$  m または  $0.0030$  m に設置した。測定は  $x = 0.70$  m の位置において、サンプリング時間を 300 s、

サンプリング周波数を 1000 Hz として行った。測定データをデジタルレコーダ(SONY: EX-UT10)に記録し、コンピュータにより統計的に処理した。測定データには 1.0 Hz 以下の低周波数域において外乱の影響と思われる成分が確認されたため、統計処理のプレ処理として 1.0 Hz 以下の周波数成分を除去するハイパスフィルタ操作を施した。ハイパスフィルタ操作を施された水位変動データにゼロアップクロス法を適用し、波を分割し、有義波高  $H_s$ 、有義波周期  $T_s$  を求めた。

本実験では、表面張力の低下が風波の波高に及ぼす影響を調べるため、エタノール水溶液とグリセリン水溶液の濃度を調整し、粘度が同程度で、表面張力のみが大きく異なる二種類の水溶液を作成した。また比較のために、前章で使用した SDS, Triton x-100(300ppm) 水溶液と濾過水を用いて同様の実験を行った。表 3.1 に本実験で使用した試料溶液の表面張力および粘度の測定値を示す。表面張力の測定にはデュヌイ氏表面張力試験機(大平理化学工業株式会社)を、粘度の測定にはウペローデ粘度計(柴田科学株式会社: SU-4725)を使用した。

また、これまで風波のシミュレーション手法として代表研究者らが主に提案した ALE (Arbitrary Lagrangian and Eulerian) 法を用いた直接数値計算を行った。計算領域の大きさを主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ 0.10 m、0.0485 m、0.0375 m とする。格子点数は主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ 200 点、98 点、180 点の約 350 万点とする。本計算では、表面張力が風波に及ぼす影響を調べるため、表面張力  $\sigma$  を  $\sigma = 1.0\sigma_w$ ,  $0.5\sigma_w$  ( $\sigma_w = 0.072$  N/m) とした二条件の計算を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 大型風波水槽実験結果

低速風波水槽実験における濾過水と SDS 水溶液の場合の風波の様子の写真撮影を実施した。写真は  $x = 4.0$  m の地点で撮影したものであり、風は左方から右方に向かって吹いている。濾過水の場合、 $U_\infty = 5.4$  m/s においてさざ波が発生し、風速の増加に伴い、波高・波長の大きな風波が形成される様子を確認できる。また波頭の風下にはリップルと呼ばれる微小な波が形成されている。一方、SDS 水溶液の場合  $U_\infty = 5.4, 8.9$  m/s において風波が完全に抑制され、気液界面はほぼ平面形状を保っていることが確認できる。 $U_\infty = 13.0, 15.7$  m/s においては、濾過水と同様の風波の形成を確認することができる。図は記載しないが、Triton x-100 においても SDS と同様の傾向を確認することができた。

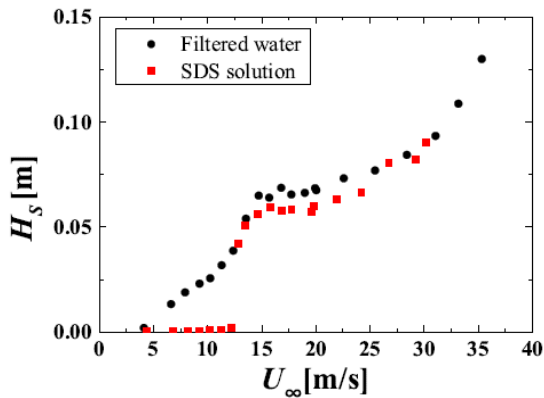


図2 有義波高と気側一様流速の関係

図2に有義波高と気側一様流速の関係を示す。濾過水、SDS水溶液ともに風速の増加に伴い、有義波高が増加することが確認できる。また、その増加傾向は $U_\infty = 15 \text{ m/s}$ を境に変化している。これは $U_\infty > 15 \text{ m/s}$ の風速域において飛散液滴や巻き込み気泡を伴う碎波により風波の発達抑制されるためである。

界面活性剤が風波に及ぼす影響に関しては、低風速域( $U_\infty < 15 \text{ m/s}$ )では有義波高ともに低下しており、風波の発生が完全に抑制されることが確認される。 $U_\infty = 15 \text{ m/s}$ 近傍では界面活性剤の影響は軽微であり、波高が急激に増加している。中風速域( $15 \text{ m/s} < U_\infty < 25 \text{ m/s}$ )においては、有義波高は減少している。さらに風速の速い高風速域( $U_\infty > 25 \text{ m/s}$ )においては、有義波高の差は微小である。以上の結果より、界面活性剤が風波に及ぼす影響は碎波が生じない低風速域で顕著であるものの、碎波が生じる中風速～高風速域においても存在することが明らかになった。

以上より、界面活性剤の影響は碎波が生じない低風速域において特に顕著で、風波の発生を完全に抑制すること、また、碎波が生じる中風速～高風速域において界面活性剤は碎波を促進し、その結果、風波の波形勾配が低下することが確認された。さらに、碎波が生じる中風速から高風速域における界面活性剤による碎波の促進には表面張力の低下が影響している可能性があることを明らかにした。

#### (2) 小型風波水槽実験結果

図3にDNSにより得られた有義波高の時間変化の様子を示す。図より、表面張力の低下は、碎波が生じない低風速域において風波の波高を増加させること、このため低風速域における界面活性剤による風波の抑制作用は表面張力の低下によるものではないことを明らかにした。また、図は省略するが、粘性の変化も確認できなかったため、低風速域における界面活性剤による風波の抑制作用は、

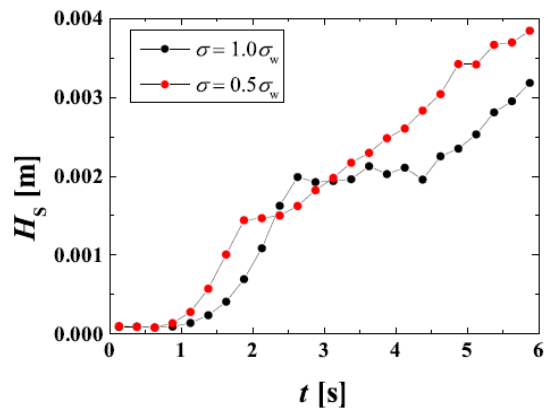


図3 有義波高の時間変化

マランゴニ効果によって引き起こされていると考えられる。マランゴニ効果とは、界面における温度差や界面活性剤の濃度差による表面張力の差により生じる流動現象のことを指し、界面活性剤水溶液内での気泡の上昇速度の低下などはこの効果により引き起こされると考えられている。波打つ界面においては、波の山と谷においては界面は圧縮され、波の中腹においては界面が引き伸ばされる。界面活性剤が界面にのみ存在すると仮定すると、界面活性剤の濃度は山と谷が高く、中腹では低くなる。その結果、界面において表面張力の差が生じ、界面接線方向へ応力が生じる。この応力はマランゴニ応力と呼ばれ、このマランゴニ応力が界面形状に対して規則的に作用することにより風波の抑制作用を引き起こしているといわれている。実際上記の仮定を考慮した線形安定性解析では、マランゴニ応力により界面の安定性が増加し、初期の風波の発生が著しく抑制されることが確認されている。ただし、一度風波が発生すると液相の界面近傍には乱流渦が形成され、界面とバルクの流体は混合されるため、界面活性剤の濃度分布は一様な状態になる。そうなると、マランゴニ応力は弱まり、その結果、波高が増加するとともにさらに乱流渦が強まり、ますますマランゴニ応力は弱まるという連鎖が引き起こされる。そのため、ある風速を境に界面活性剤による風波の抑制作用が急激に弱まったと推測される。マランゴニ効果により本研究で確認された低風速域における界面活性剤の影響を一通り説明可能であるが、実際に界面にマランゴニ応力が発生していることを観察することは難しく、実験的にマランゴニ効果の影響を実証した例はない。そのため、低風速域の界面活性剤による風波の抑制作用を解明するためにも界面における界面活性剤の濃度を測定しないしは可視化する技術が必要である。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

- (1) 木村厚思, 三輪将也, 高垣直尚, 黒瀬良二, 小森 悟, 界面活性剤による風波の減衰作用, 化学工学会第48回秋季大会, 2015年9月9日, 北海道大学札幌キャンパス.
- (2) 小森 悟, 室内実験による高風速下での気液界面を通しての乱流輸送現象の解明とモデリング, 日本海洋学会シンポジウム 大気海洋間物質輸送と環境災害問題における波浪と界面微細過程の役割 -機械工学, 海岸工学, 船舶工学を交えて-, 2016年3月14日, 東京, 東京大学本郷キャンパス(招待講演).
- (3) 高垣直尚, 高風速下かつ長吹送距離における風波気液界面を通しての物質輸送量の評価, 日本海洋学会シンポジウム 大気海洋間物質輸送と環境災害問題における波浪と界面微細過程の役割 -機械工学, 海岸工学, 船舶工学を交えて-, 2016年3月14日, 東京, 東京大学本郷キャンパス.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fluid.me.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小森 悟 (KOMORI SATORU)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60127082

(2)研究分担者

黒瀬 良一 (KUROSE RYOICHI)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 70371622

高垣 直尚 (TAKAGAKI NAOHISA)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 00554221

(3)連携研究者

なし