

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360069

研究課題名(和文)中-高風速遷移域における風波気液界面を通してのスカラ輸送メカニズムの完全解明

研究課題名(英文) Scalar transfer across the sheared air-water interface at middle-high transient wind speeds

研究代表者

黒瀬 良一 (KUROSE, Ryoichi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70371622

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：風波気液界面を通しての二酸化炭素や熱等のスカラ輸送メカニズムを明らかにし、その信頼性の高いモデルを構築することは、大気・海洋間の炭素収支、ひいては地球の温暖化や台風の発達進路を正確に見積もる上で極めて重要である。本研究では、大規模かつ高精度の数値シミュレーション(DNSおよびLES)により、風波気液界面を通してのスカラ輸送メカニズムを、気液界面近傍の乱流挙動とスカラ輸送の関連性を詳細に調べることによって明らかにすることを目的とした。本研究により、気液界面を通してのスカラ輸送には気液界面近傍両側に発生する縦型の乱流渦が強く影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：It is of great importance to develop reliable ocean-atmosphere coupled models for estimating the momentum and scalar exchange rates across the air-sea interface, not only for the prediction of the global carbon and heat cycles closely linked to climate change, but also for the prediction of unusual weather conditions such as hurricanes, typhoons and local heavy rain causing natural disasters. In this study, three-dimensional numerical simulations (DNS and LES) are applied to velocity and scalar (mass concentration and temperature) fields in a wind-driven air-water two-phase flow, and the relationship between turbulence structure and scalar transfer (i.e. mass and heat including latent, sensible and radiative heat) across the wind-driven air-water interface was investigated. The results showed that the scalar transfer across the wind-driven air-water interface was strongly affected by longitudinal vortical structures in the liquid and gas sides.

研究分野：流体工学

キーワード：風波 気液界面 物質移動 熱移動 数値シミュレーション 砕波

1. 研究開始当初の背景

風波気液界面を通しての二酸化炭素や熱等のスカラ輸送メカニズムを明らかにし、その信頼性の高いモデルを構築することは、大気・海洋間の炭素収支、ひいては地球の温暖化や台風の発達進路を正確に見積もるうえで極めて重要である。既往研究により、風波気液界面を通してのスカラ輸送係数は気流速度 U_{∞} の増加に伴い、低風速域 ($U_{\infty} \leq 7$ m/s) では単調に増加するが、中風速域 (7 m/s $\leq U_{\infty} \leq 9$ m/s) で一旦増加傾向が弱まり、高風速への遷移域 (9 m/s $\leq U_{\infty} \leq 14$ m/s) で再び急激な増加に転ずることが報告されている。しかし、複雑な形状を呈する風波気液界面近傍の乱流構造およびスカラ輸送量の正確な計測が極めて困難であることから、そのメカニズムは解明されていない。

2. 研究の目的

研究では、大規模かつ高精度の数値シミュレーションにより、風波気液界面を通してのスカラ輸送メカニズムを、気液界面近傍の乱流挙動とスカラ輸送の関連性を詳細に調べることによって明らかにすることを目的とする。具体的な実施内容は以下の通りである。

- (1) 砕波を伴わない低～中風速領域条件下における風波乱流場に直接数値シミュレーション (DNS) およびラージ・エディ・シミュレーション (LES) を適用することにより、風波気液界面を通しての物質の輸送メカニズムを明らかにする。
- (2) 砕波を伴う高風速領域条件下における風波乱流場に直接数値シミュレーション (DNS) を適用することにより、しぶきの形成メカニズム、および風波気液界面を通しての物質の輸送メカニズムを明らかにする。
- (3) 全熱輸送量に対する顕熱輸送量、潜熱輸送量および短波放射熱量の割合を正確に見積もると共に、熱の輸送メカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

研究方法の概要を以下に示す。

- (1) 移動・変形を伴う風波気液界面を再現可能な既存の気液二相流 DNS コードを、より高い風速条件下にも適用可能とするため、LES コードに拡張する。界面追跡手法としては、風波気液界面の形状に合わせて計算領域全体の格子形状を境界適合座標系により時々刻々再構成する ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation) 法をベースとする。
- (2) 高風速条件下において生じる砕波、およびそれに伴って発生する飛散液滴を再

現するため、VOF (Volume-of-Fluid) 法を上記(1)コードに組み込む。

- (3) 風波気液界面を通しての全熱輸送量、顕熱輸送量、および潜熱輸送量を予測可能とする数理モデルを上記(1)コードに組み込む。
- (4) 上記(1)～(3)のコードを用いて、低風速条件下～高風速条件下における物質および熱の輸送メカニズムを明らかにする。この際、必要に応じて風洞実験を実施し、数値シミュレーションの検証用データを取得する。

4. 研究成果

得られた主な結果を以下にまとめる。

- (1) 砕波を伴わない低～中風速 (物質輸送)

図 1 に計算領域の概略を示す。x, y, z 方向をそれぞれ主流、スパン、鉛直方向として、気液界面を挟んで鉛直上側を気相、鉛直下側を液相とした。計算領域および格子点数は主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ $8\delta \times 4\delta \times 3\delta$, $200 \times 100 \times 180$ とした。流動場の支配方程式の数値解法には有限差分法に基づく MAC (Marker And Cell) 法を用いた。物質濃度の計算は液側流動場に対してのみ行い、その Schmidt 数 (Sc) を実際の海洋に CO_2 が溶解する場合に合わせて 600 とした。物質濃度の初期値としては全液側領域に $C = 0$ を与え、計算開始以後は界面の境界条件に $C = 1$ を与えた。今回の計算は、初期気側一様流速 $U_{\infty, ini}$ および気側高さ δ 基準の Reynolds 数 Re_{ini} を 4340 ($U_{\infty, ini} = 5.2$ m/s, $\delta = 1.25 \times 10^{-2}$ m), 11550 ($U_{\infty, ini} = 7.0$ m/s, $\delta = 2.5 \times 10^{-2}$ m) とした 2 ケースに対して行った。なお、 Re_{ini} が比較的低い前者のケースに対しては乱流モデルを用いない DNS を、 Re_{ini} が高い後者のケースに対しては乱流モデルを用いる LES を適用した。

図 2, 3 に、 $Re_{ini} = 11550$ のケースにおける風波気液界面の瞬間形状および物質濃度の y-z, z-x 断面瞬間分布をそれぞれ示す。図から、物質は風波気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されることがわかる。この結果は低風速条件下で行った DNS でも同様に観察された。図 4 に、風波気液界面を通しての物質輸送係数 k_L と摩擦速度 u_{*a} の関係を風洞装置を用いた既往実測値 (Iwano et al. 2011) と比較して示す。図から、計算値は実験値と比較的よく一致することがわかる。

なお、ここでは詳細な説明は省略するが、本研究により、Langmuir circulation と呼ばれる風波によって液側に生じる特徴的な大規模縦渦の存在は、風波気液界面を通しての物質移動にあまり影響を及ぼさないこともわかった。

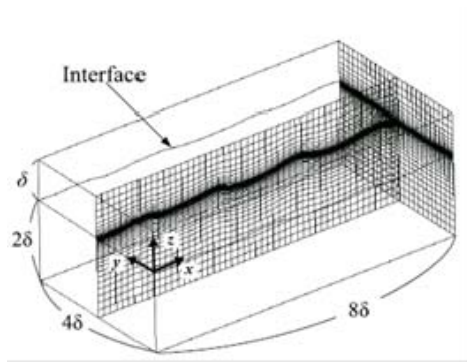


図1 計算領域

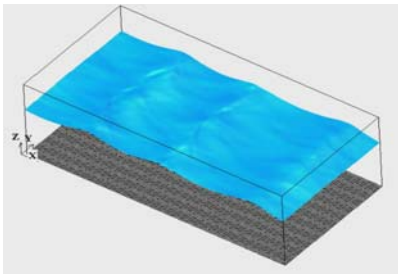


図2 風波形状

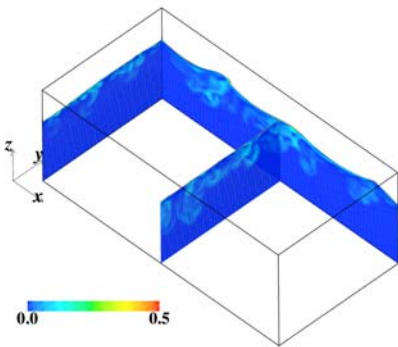


図3 液側における物質濃度瞬間分布

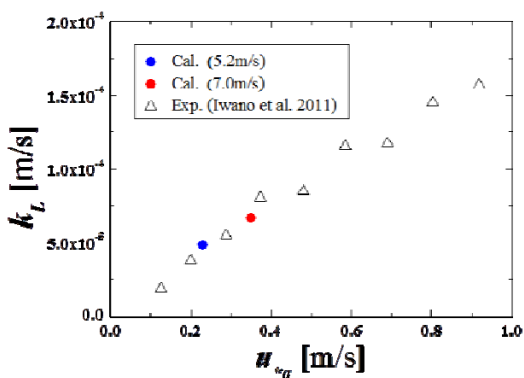


図4 物質輸送係数 k_L の実測値との比較

(2) 砕波を伴う高風速 (物質輸送)

本計算では、約 10 m/s の風速を与えることにより、DNS を用いて砕波を形成させた。図 5 に砕波を伴う気液界面形状の一例を示す。図より、波頭において波の先端が斜め上方向に伸長する様子が確認できる。また、本計算

で得られた結果と、本計算とほぼ同条件で行われた実験における界面形状の比較を行ったところ、本計算では、波頭付近において水柱が飛び出し、気泡が巻き込まれる現象や、波頭が風下側へ崩れる崩れ波 (spilling breaking) が良好に再現できていることがわかった。さらに、飛散液滴の物質濃度を調べたところほぼ 1 に近いことから、今回の条件下では、気液界面を通しての物質移動に及ぼす砕波の影響は小さいことが示唆された。

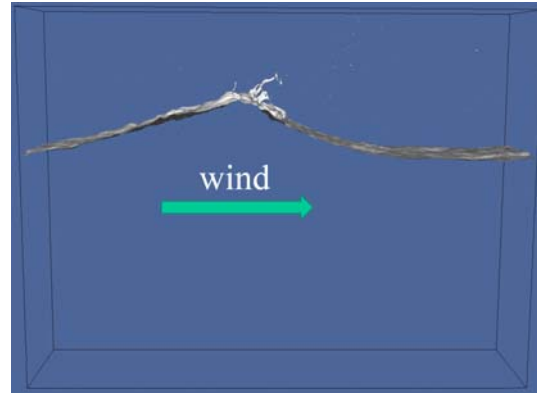


図5 砕波現象

(3) 熱輸送

初期の気相の温度を 28°C、液相の温度を 46°C とし、気相の比湿を 0.015g/g とし、DNS を実施した。この際の、Prandtl 数は気相が 0.71、液相が 4.72、気相比湿場の Schmidt 数は 0.55 となる。まず、現実の風波乱流場が形成され、風波気液界面を通しての熱輸送現象が再現されているかを確認するために、気液界面を通しての潜熱輸送量に対する顕熱輸送量の比で定義されるパラメータである、ボウエン比 Bo を評価した (図 6)。図より、計算値は実験値 (Komori et al. 2011) と良く一致しており、本計算により砕波 (散液滴や巻き込み気泡) を伴わない低風速条件下の風波乱流場および熱輸送現象が良好に再現されていることがわかる。

図 7 にある時刻の界面における全熱フラックスの瞬間分布を示す。図中の赤色の点線は波頭の位置を示す。全熱フラックスの分布には、低フラックス領域にストリーク構造が確認でき、また波頭の風下側においてもフラックスが低くなることが確認できる。図 8 に気液両相の渦度の瞬間分布を示す。渦度は赤色が反時計周りの渦を、青色が時計周りの渦を示す。図中の細い赤色の矢印と太い赤色の矢印は図 7 中のものと対応しており、ストリークの位置を示す。図より、細い矢印で示したストリーク構造は気相の渦構造との関連性を示し、太い矢印で示したストリーク構造は液相の渦構造との関連性を示すことが確認できる。このことは、熱フラックスのストリーク構造が気液両相の渦構造の影響を受けて形成されることを示唆する。なお、頭の風下側における全熱フラックスの低下は、剥離流により高温・高比湿な流体が滞留すること

に起因すると考えられる。以上の考察より、風波気液界面を通しての熱輸送は気液両相の組織的渦構造と風波形状の影響を受けていることがわかる。

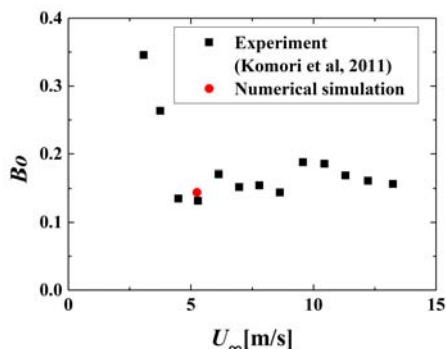


図6 ボウエン比

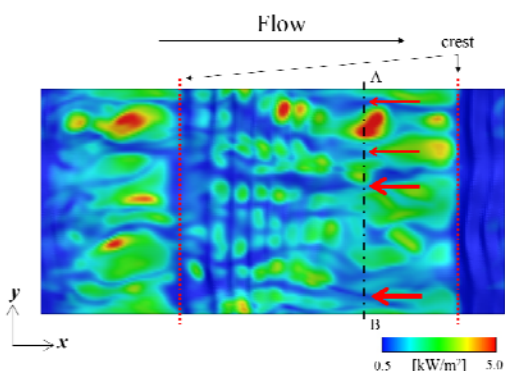
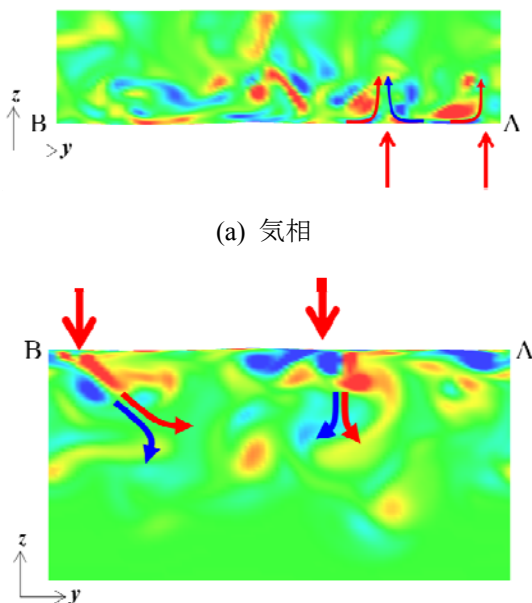


図7 界面の全熱フラックスの瞬間分布



(a) 気相

(b) 液相

図8 気液両相の渦度の瞬間分布

<引用文献>

Iwano K., Takagaki N., Ilyasov E., Kurose R., Komori S. (2011) Effects of Fetch and Entrained Bubbles on Mass Transfer across the Air-Water Interface with Wave Breaking. Proceedings of The eight KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Songdo Convebsia Center, Incheon, Korea, CD-ROM.

Komori, S., Kurose, R., Takagaki, N., Ohtsubo, S., Iwano, K., Handa, K., and Shimada, S. (2011) Sensible and latent heat transfer across the air-water interface in wind-driven turbulence. GAS TRANSFER AT WATER SURFACES 2010 (Eds. S. Komori, W. McGillis, R. Kurose), Kyoto University Press, Kyoto, Japan, pp.78-89.

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 3 件)

① N. Takagaki, R. Kurose, Y. Tsujimoto, S. Komori, K. Takahashi, “Effects of turbulent eddies and Langmuir circulations on scalar transfer in a sheared wind-driven liquid flow”, *Physics of Fluids*, 査読有, Vol. 27, 016603 (19 pages) (2015), <http://dx.doi.org/10.1063/1.4905845>

② N. Takagaki, R. Kurose, Y. Nakajima, Y. Baba, S. Komori, “Relationship between momentum of an impinging drop and intensities of vortex rings generated below free surface”, *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有, Vol. 65, pp. 1-10 (2014), doi:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.05.005

③ K. Iwano, N. Takagaki, R. Kurose, S. Komori, “Mass transfer velocity across the breaking air-water interface at extremely high wind speeds”, *Tellus B*, 査読有, Vol. 65, 21341 (2013), <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.21341>

[学会発表] (計 10 件)

① 小森 悟, 大気・海洋間の運動量, 熱および物質の輸送機構の解明とモデル化, 日本機械学会関西支部第 90 期定時総会講演会, 京都大学桂キャンパス (京都), 2015 年 3 月 16 日

② 高垣直尚, 大気・海洋間を通しての物質輸送 —高ウィンドシア・吹送距離・雨滴衝突の影響—, 日本機械学会関西支部

流体工学懇話会 第 174 回研究会, 大阪
市立大学梅田サテライトキャンパス文化
交流センターホール (大阪), 2014 年 12
月 13 日

- ③ 木村厚思, 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 風波気液界面を通しての熱輸送に関する直接数値シミュレーション, 第 28 回数値流体シンポジウム, タワーホール船堀 (東京), 2014 年 12 月 11 日
- ④ 小森 悟, 風波気液界面における乱流輸送現象, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京), 2014 年 9 月 8 日
- ⑤ 高垣直尚, 室谷春樹, 越智啓介, 岩野耕治, 黒瀬良一, 小森 悟, 長吹送距離における風波気液界面を通しての物質輸送の評価, 日本流体力学会年会 2014, 東北大学川内北キャンパス (仙台), 2014 年 9 月 17 日
- ⑥ 岩野耕治, 石田瑞紀, 高井敬介, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 高風速下における風波気液界面を通しての熱輸送の評価, 日本流体力学会年会 2014, 東北大学川内北キャンパス (仙台), 2014 年 9 月 17 日
- ⑦ 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 風波気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす Schmidt 数の影響, 第 27 回数値流体力学シンポジウム, 名古屋大学東山キャンパス (名古屋), 2013 年 12 月 19 日
- ⑧ 辻本悠太, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 高橋桂子, 風波気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす液側乱流渦と Langmuir circulation の影響, 第 91 期日本機械学会流体工学部門講演会, 九州大学伊都キャンパス (福岡), 2013 年 11 月 10 日
- ⑨ アイヤルクリティカ, 高垣直尚, 明珎陽介, 黒瀬良一, 小森 悟, 単一液滴衝突時における自由界面を通しての物質輸送の直接数値シミュレーション, 第 26 回数値流体力学シンポジウム, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京), 2012 年 12 月 18 日
- ⑩ 辻本悠太, 藤井聡司, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 風波気液界面近傍の乱流構造とスカラ輸送機構の数値シミュレーション, 第 90 期日本機械学会流体工学部門講演会, 同志社大学今出川キャンパス寒梅館 (京都), 2012 年 11 月 17 日

[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

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

(2) 研究分担者

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) 研究分担者

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