

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2010～2012

課題番号：22246020

研究課題名（和文）気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼすウインドシアア、降雨およびうねりの相乗効果

研究課題名（英文） Combined effects of wind shear, rainfall and swell on mass transfer across the air-water interface

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

研究成果の概要（和文）：スカラ輸送実験により、気液界面を通しての物質移動に及ぼす吹送距離、塩分および巻き込み気泡の影響が小さいことを明らかにした。加えて、降雨を伴う場合におけるスカラ輸送実験および単一液滴の気液界面衝突現象に着目した実験と数値計算により、ウインドシアアの有無によらず、液滴の界面衝突が液側の下降流を生成すること、および風波気液間物質移動を支配する降雨パラメータは雨滴の鉛直方向運動量フラックスであることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The measurements in a wind-wave tank without rainfall show that the effects of fetch, salinity and entrained bubbles on mass transfer across the wind-sheared air-water interface are negligibly small. The measurements in a wind-wave tank with a rainfall show that the mass transfer coefficient promoted by raindrops' impingement is well correlated with the vertical momentum flux of rainfall. In addition, both experimental visualization of water flow induced by a falling drop and numerical predictions show that the impingement of a single liquid drop on the water surface generates the downward flow on the liquid side and enhances the mass transfer across the air-water interface.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2011年度	11,600,000	3,480,000	15,080,000
2012年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：環境乱流、乱流、混相流、数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

大気と海洋の間での運動量およびスカラ（熱と物質）の輸送、つまり、大気海洋相互作用を解明することは、地球温暖化の予測ならびに異常気象の予測を正確に行ううえで極めて重要である。特に、高風速を伴う荒天下ではウインドシアア（風による剪断力）に加えて降雨およびうねりを伴う場合が多く、

運動量およびスカラ輸送を含めた大気海洋相互作用を正確に評価するにはウインドシアア、降雨、うねりの3つの影響因子の相乗作用を明らかにしなければならない。しかし、これらの3つの因子の相乗作用は非常に複雑であると予想されるため既往研究では全く取り扱われていない。

2. 研究の目的

(1) 降雨を伴わない風波乱流場中におけるスカラ輸送実験を行うことにより、気液界面を通しての運動量及びスカラ輸送に及ぼすウインドシアの影響を解明する。具体的には、中風速域における風波気液界面を通しての運動量輸送に及ぼす砕波の影響、および低～中風速域における巻き込み気泡および吹送距離の影響を明らかにする。

(2) 降雨を伴う風波乱流場中におけるスカラ輸送実験を行うことにより、気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼすウインドシア、降雨、うねりの影響を解明する。さらに、降雨下での自由表面近傍の流れ場とCO₂の濃度場の可視化を室内実験及び数値計算を用いて実施することにより、どのような渦が降雨により形成され、かつ、物質移動を支配するのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 降雨を伴わない風波乱流場中におけるスカラ輸送実験では、風波水槽を使用し、CO₂を一定の高濃度で溶解した水道水もしくは3.5wt%塩水を水槽内に満たし、液側から気側に放散するCO₂の量を計測した。

また、降雨を伴わない風波乱流場中における運動量輸送実験では、比較的高風速の風波乱流場を再現可能な風波水槽を使用し、砕波を伴う風波気液界面を通しての運動量の輸送機構の解明を試みた。気相・液相の流動場の測定および水位変動を測定することにより、砕波を伴う風波気液界面を通しての運動量輸送機構の解明を試みた。

(2) 降雨を伴う風波乱流場中におけるスカラ輸送実験では、上部に降雨発生装置を取り付けた風波水槽を用いた。風波水槽を使用した実験においては無風時の降雨実験装置と異なり気側を密閉系にできないので、CO₂を一定の高濃度で水槽内に溶かし込みながら、液側から気側に放散するCO₂の量を計測した。

また、降雨を伴う風波乱流場中における気液間の物質移動に及ぼす降雨の影響を解明するための基礎研究として、単一液滴に着目し、単一液滴の気液界面衝突後の液側の流動場やスカラ濃度場の可視化を実験と数値計算により実施した。具体的には、風波乱流場中における着色した単一液滴の落下・衝突実験を行い、単一液滴の界面衝突後の液側表面近傍の流動場の可視化を行い、液滴衝突後の液側流動場と液滴衝突を伴わない液側流動場との差異について検証した。また、実験では再現不可能な液滴径が2mm以下という小さ

な液滴の衝突現象に対しても成り立つかどうかを、VOF法もしくはレベルセット法を用いた3次元直接数値計算法を用いて検討した。

4. 研究成果

(1) 降雨を伴わない場合：

①液側物質移動係数 k_L を評価するために、あらかじめCO₂を十分溶解させた水道水もしくは3.5wt%塩水を風波水槽内に貯め、気液界面上に風を吹かせることにより液側の溶存CO₂を気側へと放散させる実験を行った。測定は、気側一様流速 $U_\infty = 3.5 \sim 17 \text{ m/s}$ 、吹送距離4～13.5mの範囲で行った。その結果、吹送距

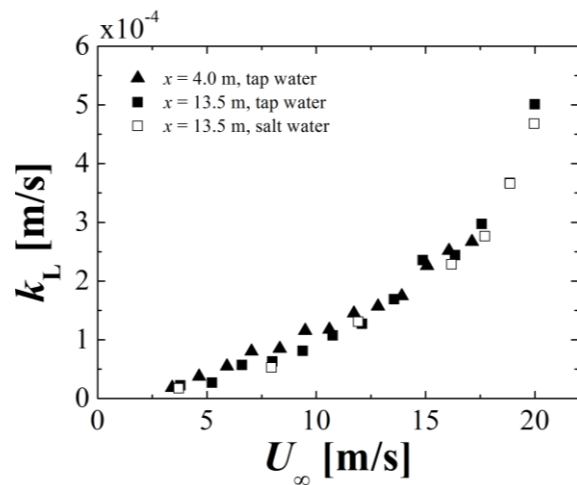


図1: 降雨を伴わない場合の液側物質移動係数と気側一様流速の関係 (図は学会発表⑤より引用)

離の差異および塩分の有無は液側物質移動係数に影響を及ぼさないことを明らかにした。さらに、粒子画像解析法を用いて砕波を伴う風波乱流場における巻き込み気泡量の測定を行い、気液界面を通しての物質輸送に及ぼす巻き込み気泡の影響を検証した。その結果、本研究対象とした風速域においては、気液界面を通しての物質移動に及ぼす巻き込み気泡の影響は小さいことを明らかにした。また、さまざまな波長のうねりを伴う風波気液界面を通しての物質輸送の実験を行うために、波長制御が可能な造波装置を製作し、うねりとウインドシアとの相互作用を確認した。

②新規に設置したより高風速域に対応した風洞水槽の試運転を行い、少なくとも風速30m/sの風速を実現できることを確認した。さらに、新規に液滴付着防止装置を開発することにより、位相ドップラ式粒子流速計(PDA)を用いた飛散液滴の分散を伴う気流中での流速測定技術を確立した。本計測手

法を用いて、気側流速の変動を計測した結果、碎波を伴う高風速下において、抗力係数は風速の増加とともに一定値に近づくことを明らかにした。また、抗力係数と水位変動のエネルギーおよび卓越周波数との良好な相関関係を明らかにした。

(2) 降雨を伴う場合：

① 上部に降雨発生装置を取り付けた風波水槽を用い、雨が降り、風が吹く状態における風波気液界面を通しての CO_2 放散量を測定した。測定は、降雨装置下において、気側一様流速 $U_\infty = 3.5 \sim 11 \text{ m/s}$ 、降雨量 $R = 0, 32, 102 \text{ mm/h}$ の範囲で行った。その結果、気液間 CO_2 移動はウインドシアーおよび降雨により

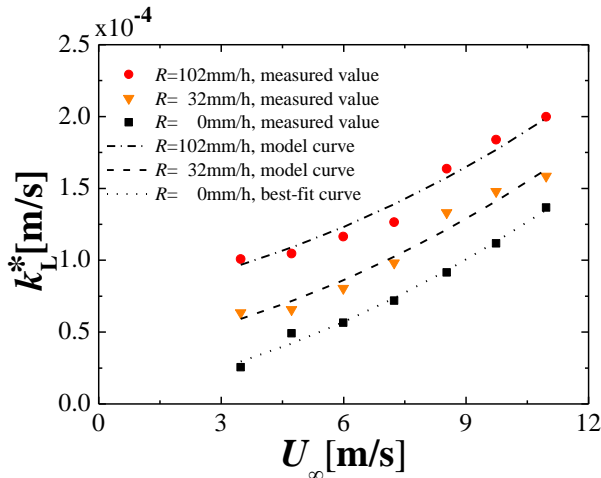


図 2：降雨を伴う場合の液側物質移動係数と気側一様流速の関係（図は学会発表⑧より引用）

促進されることが確認された。さらに、気液間 CO_2 移動に対する降雨およびウインドシアーの相互作用は風速によらず非常に小さく、降雨による物質移動係数の増分は雨滴の鉛直方向運動量フラックスと強い相関があることがわかった。以上より、降雨を伴う風波乱流場において気液間 CO_2 移動を支配する降雨パラメータは、雨滴の鉛直方向運動量フラックスであることがわかった。さらに、着色した単一液滴の落下・衝突実験を行い、ウインドシアーの有無によらず雨滴の界面衝突により液側界面近傍には下降流が生成される可能性を示した。

② 落下液滴衝突現象に関する VOF 法およびレベルセット法をベースにした数値計算手法を用い、実験的に観察が困難な液滴径 $1 \sim 2 \text{ mm}$ の範囲の微小な単一液滴が気液界面に衝突した直後の気液界面近傍の流動構造およびスカラ場について検討した。その結果、液滴の界面衝突時に生成される下降流により自由界面が更新され、気液間物質移動が促進

されることを示した。

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 5 件）

- (1) R. Kurose, M. Anami, A. Fujita, S. Komori, "Numerical simulation of flow past a heated/cooled sphere", *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, 692, 2012, 332-346.
- (2) N. Takagaki, S. Komori, N. Suzuki, K. Iwano, T. Kuramoto, S. Shimada, R. Kurose, and K. Takahashi, Strong correlation between the drag coefficient and the shape of the wind sea spectrum over a broad range of wind speeds, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 39, 2012, L23604, doi:10.1029/2012GL053988.
- (3) S. Komori, R. Kurose, N. Takagaki, S. Ohtsubo, K. Iwano, K. Handa, S. Shimada, Sensible and latent heat transfer across the air-water interface in wind-driven turbulence, *Gas Transfer at Water Surfaces* (eds. S. Komori, W. McGillis, R. Kurose), Kyoto University Press, Kyoto, 査読有, 2011, pp.78-89.
- (4) 高垣直尚, 中島裕一郎, 黒瀬良一, 小森 悟, 馬場雄也, 単一液滴衝突時における自由界面下液側流動場およびスカラ場の直接数値シミュレーション, *日本機械学会論文集 B 編*, 査読有, 76 巻, 2010, pp.2065-2074.
- (5) 黒瀬良一, 鶴飼健弘, 小森 悟, 固定波状気液界面を通してのスカラ輸送機構, *日本機械学会論文集 B 編*, 査読有, 76 巻, 2010, pp.2075-2082.

〔学会発表〕（計 12 件）

- (1) Iyer Krithika, 高垣直尚, 明珮陽介, 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, 2012 年 12 月 18 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.
- (2) 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, 2012 年 11 月 17 日, 同志社大学.
- (3) 高垣直尚, 倉本武典, 神内浩行, 岩野耕治, 黒瀬良一, 小森 悟, 強風速下における風波の波形勾配の評価, 第 90 期 日本機械学会 流体工学部門講演会, 2012 年 11 月 17 日, 同志社大学.
- (4) K. Iwano, N. Takagaki, R. Kurose and S. Komori, Mass transfer across the air-water

interface with wave breaking, In Proc. of the twelfth Kyoto - Tsinghua - Seoul National University Thermal Engineering Conference, Nov. 10 - 11, 2012, Kyoto, Japan.

- (5) 高垣直尚, 坂本遼平, 藤井一穂, 岩野耕治, 黒瀬良一, 小森 悟, 風波乱流場における気液間CO2移動に関する降雨パラメータの検討, 日本流体力学会 年会 2012, 2012年9月16日, 高知大学
- (6) 高垣直尚, 島田 暁, 倉本武典, 岩野耕治, 神内浩行, 黒瀬良一, 小森 悟, 砕波を伴う高風速下における水位変動の測定, 日本流体力学会 年会 2012, 2012年9月16日, 高知大学.
- (7) N. Takagaki & S. Komori, Measurement of momentum flux across the air-water interface in high-speed wind-wave tank", *Invited lecture: Japan Geoscience Union Meeting 2012*AAS02-01, May 20-25 2012, Makuhari Messe - International Convention Complex, Japan.
- (8) K. Iwano, N. Takagaki, E. Ilyasov, R. Kurose & S. Komori, Effect of Fetch and Entrained Bubbles on Mass Transfer Velocity across the Wind-Driven Air-Water Interface with Wave Breaking, The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Incheon, Korea, 2012. May 18-21.
- (9) 高垣直尚, 岩野耕治, 島田 暁, 倉本武典, 黒瀬良一, 小森 悟, 高速風洞水槽を用いた風波界面上の抗力測定, 2012年度日本海洋学会春季大会, 2012年3月27日, 筑波大学.
- (10) N. Takagaki, S. Shimada, T. Kuramoto, K. Iwano, R. Kurose & S. Komori, Momentum transfer at the air-water interface in extremely-high wind conditions, 2012 Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City, Utha, USA, 2012.Feb. 19-24.
- (11) 岩野耕治, 高垣直尚, Ilyasov Emil, 黒瀬良一, 小森 悟, 砕波を伴う高風速域における物質輸送量の評価, 日本機械学会 2011年度年次大会, 2011年9月13日, 東京工業大学大岡山キャンパス.
- (12) 倉本武典, 島田 暁, 岩野耕治, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森 悟, 高風速下における砕波気液界面を通しての運動量輸送, 日本流体力学会年会 2011, 2011年9月7日, 首都大学東京南大沢キャンパス.

[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

(4) 連携研究者

鈴木 直弥 (SUZUKI NAOYA)
近畿大学・理工学部・講師
研究者番号：40422985