

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19206023

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雨滴とウインドシアアの相乗効果

研究課題名（英文）

Effects of rainfall and wind shear on mass transfer across the air-water interface

研究代表者

小森 悟 (KOMORI SATORU)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：60127082

研究成果の概要（和文）：上部に降雨装置を取り付けた風波水槽を用いた実験により，風波気液界面を通しての物質移動が降雨により促進されること，また，降雨およびウインドシアアが共存する場合の物質移動量がそれぞれ単独の物質移動量の足し合わせにより概ね予測可能であることを明らかにした．さらに，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，液滴の界面衝突が液側の表面更新渦を生成し，気液界面を通しての物質移動を促進す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 with a rain generator shows that mass transfer across the wind-sheared air-water interface is promoted by rainfall and that the mass transfer coefficient in the combined condition with both rainfall and wind-shear is generally estimated by the sum of the individual mass transfer coefficient for rainfall and that for wind-shear. In addition, both experimental and numerical predictions show that the impingement of a single liquid drop on the water surface generates the surface renewal motion 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
2007年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
2008年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
2009年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
年度			
年度			
総計	37,300,000	11,190,000	48,490,000

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・海洋間のスカラ（物質および熱）の交換量を正確に評価することは，地球温暖化予測において非常に重要である．この交換量

に影響を及ぼす要因として，海洋の至る所で頻繁にみられるウインドシアアおよび降雨の効果は挙げられる．ウインドシアアの効果に関しては，これまで多くの研究がなされて

いるものの、降雨に関する研究は 2~3 例しか存在せず、大気・海洋間のスカラ交換量に及ぼす降雨の影響はいまだ明らかにされていない。

2. 研究の目的

(1) 無風状態において降雨が単独で存在する場合に対して、スカラ(物質および熱)輸送実験を行うことにより、降雨が気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす影響を解明する。また、実際の海洋では塩水の上に真水の雨滴が落下するため、安定な密度成層が気液界面下の表層に形成される。そこで、この密度成層(浮力)効果が気液界面近くの乱流構造およびスカラの輸送機構に影響を及ぼす可能性についても調査を行う。さらに、降雨下での自由表面近傍の流れ場と CO_2 の濃度場を計測することにより、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。上記の成果をもとに、全海洋面に対して大気・海洋間の CO_2 交換量を計算し、全球規模での降雨の効果を明らかにする。

(2) 降雨と風が共存する場合に対して、スカラ輸送実験を行うことにより、降雨が風波気液界面下の乱流構造および気液界面を通してのスカラ輸送に及ぼす影響を解明するとともに、降雨とウインドシアの相乗効果により気液両相の乱流構造とスカラ輸送機構が如何に変化するかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 上部に降雨発生装置を取り付けた開水路を用いて、無風状態における物質輸送実験を行う。本実験においては、降雨装置のチャンバ内に純 CO_2 を充填させることにより降雨による物質輸送量の計測を行う。

降雨により形成される密度効果の検討では、上記の開水路内に海水と同じ 3.5wt% の塩分濃度を有する食塩水を流し、その上に真水の雨滴を落下させる。塩水より密度の小さな真水(雨滴)に覆われるため形成された安定密度成層が、降雨による物質輸送促進効果にどのような影響を及ぼすかを物質移動実験を行うことにより明らかにする。

また、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、単一液滴が気液界面に衝突することにより引き起こされる液側の流動特性や気液界面を通しての物質移動機構を、実験と数値計算により解明する。具体的には、単一液滴衝突後の自由表面近傍の流れ場と CO_2 の濃度場を粒子画像流速計(PIV)およびレーザ蛍光法(LIF)を用いて計測する。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、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する。

さらに、上記の室内実験を通して降雨時の液側物質移動係数と降雨パラメータとの相関関係が決定されるため、この相関関係と大気・海洋間の CO_2 の分圧差のグローバルデータベース(Takahashi et al., *Deep-Sea Res.* 2002)を利用することにより、全球規模での大気・海洋間の CO_2 交換量に及ぼす降雨の貢献率を算出する。

(2) 風波と雨が共存する場合の実験研究では、上部に降雨発生装置を取り付けた風波水槽を用いる。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、 CO_2 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 CO_2 の量を計測する。さらに、降雨と風波乱流の相互作用を解明するために、気液両相の流速分布等をPIVならびにレーザドップラ流速計(LDV)を用いて計測する。

また、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、実験では再現不可能な液滴が鉛直方向ばかりでなく水平方向にも運動量を持つ場合について、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する。

4. 研究成果

(1) 無風状態において降雨が単独で存在する場合:

① 開水路を用いた物質移動実験を通して、無風状態では、降雨による液側物質移動係数は衝突する液滴の持つ運動量フラックスにより良好に相関されることがわかった。また、降雨により安定密度成層が形成された場合での物質移動実験を通して、降雨により形成される安定密度成層は、降雨による物質輸送係数に影響を及ぼさないことがわかった。

② 単一液滴の落下衝突装置を用いた液滴衝突後のPIV/LIF測定を通して、液滴の衝突を伴う気液界面を通しての物質移動は液滴の衝突によってつくられる表面更新渦によって促進されること、また、その発生周波数は液滴の運動量で一意に決定されることがわかった。さらに、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結果、液滴径が 1.2mm~2.2mm という小さな液滴の衝突現象に対しても、衝突液滴の運動量と生成される渦輪の平均強度の間には良好な相関関係が成り立つことを明らかにした。以上の実験研究および計算研究の主な成果の一つとして、図 1 に液滴衝突により生成される平均的な渦輪の強度と衝突する液滴の運動

量の関係を示す。ここで、渦輪の強度は、渦輪の半径(r_v)の三乗と渦輪の中心速度(l)の積で表わされる値である。また、図中の白抜きのプロットは実験値を、塗りつぶしのプロットは計算値を表している。図より、実験値と計算値は一本の直線上にあること、および、衝突液滴の運動量が増加するに従って、生成される渦輪の強度が増加することがわかるが、このことは、表面更新渦の概念に従えば、降雨を伴う気液界面を通しての物質移動係数と降雨の運動量フラックスの間に強い相関関係が存在することを示している。

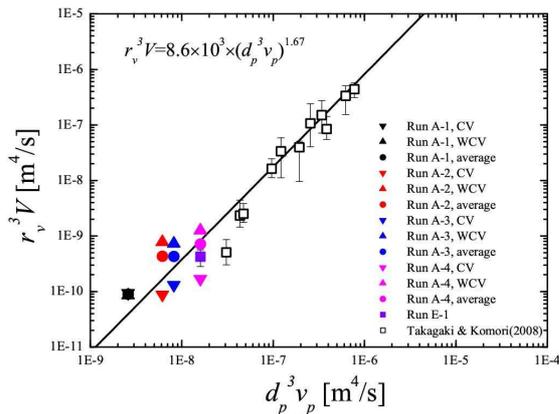


図1：衝突液滴の運動量と生成される渦輪の平均強度の関係(図は学会発表⑤より引用)

③ 大気・海洋間のCO₂の分圧差のグローバルデータベースを使用した全球でのウィンドシアアおよび降雨の影響に関して検討した。その結果、降雨に起因する大気・海洋間での二酸化炭素の交換量は、海洋全体では風に起因する二酸化炭素の交換量 5%程度と小さいが、赤道付近など局所的な領域では 50%程度に相当し、その影響は大きいことがわかった。

(2) 降雨と風が共存する場合：

① 降雨発生装置を作成し、風波乱流水槽上部に設置した。降雨下における気液両相の流動場測定の結果、降雨により風波気液界面近傍における液流の流速および乱れは大きくなること明らかにした(図2参照)。また、この影響は低風速時には顕著であるが高風速時には非常に小さいことを明らかにした。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CO₂放散量を測定した。その結果、降雨による物質移動係数は風の有無によらず、雨滴の鉛直方向運動量フラックスにより良好に相関されることを明らかにした。なお、開水路および風波水槽を用いて行うことを予定していた熱輸送実験は、計測技術の開発が間に合わなかったため、検討できなかった。降雨による伝熱移動量の変化は今後の課

題であり、今後検討する予定である。

② 落下液滴衝突現象に関する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水平方向に運動量を持つ液滴が気液界面へと衝突した直後の気液界面近傍の流動構造について検討した。その結果、液滴が界面に対して斜めに衝突する場合には、生成される表面更新渦の挙動が鉛直衝突時に比べて大きく異なる可能性を示した。

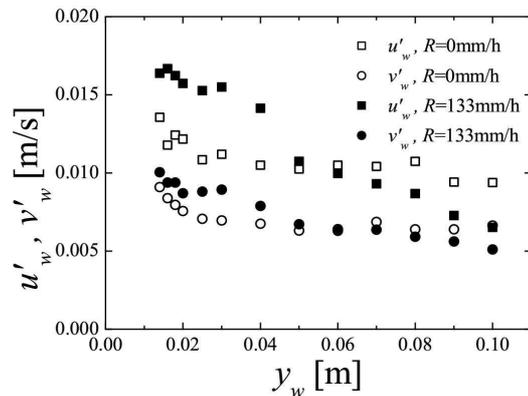


図2：主流および鉛直方向の速度変動強度の鉛直方向分布(図は学会発表⑥より引用)

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 高垣直尚, 小森悟, 液滴衝突による気液界面を通しての物質移動機構, 日本機械学会論文集(B編), 査読有, 74巻, 2008, pp. 2459-2465
- ② R. Kurose, A. Fujita, S. Komori, Effect of relative humidity on heat transfer across the surface of an evaporating water droplet in air flow, Journal of Fluid Mechanics, 査読有, 624, 2009, pp. 57-67
- ③ A. Fujita, R. Kurose, S. Komori, Experimental study on effect of relative humidity on heat transfer of an evaporating water droplet in air flow, International Journal of Multiphase Flow, 査読有, 36巻, 2010, pp. 244-247
- ④ 高垣直尚, 小森悟, 鈴木直弥, 大気・海洋間のCO₂移動に及ぼす降雨の影響, 日本海水学会誌, 査読無, 63巻, 2009, pp.

- ⑤ K. Sugioka, S. Komori, Drag and lift forces acting on a spherical gas droplet in homogeneous linear shear liquid flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 査読有, 629 巻, 2009, pp. 173-193

[学会発表] (計 8 件)

- ① 高垣直尚, 小森悟, 液滴の衝突を伴う気液界面を通しての物質移動機構の解明, 化学工学会 第 39 回秋季大会, 2007 年 9 月 13 日, 北海道大学
- ② N. Takagaki, S. Komori, Effects of an Impinging Droplet on CO2 Transfer Across the Air-Water Interface, the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2008 年 10 月 13 日~16 日, 北海道大学
- ③ 中島裕一郎, 高垣直尚, 黒瀬良一, 小森悟, Level-Set 法を用いた自由界面への単一液滴衝突現象の数値シミュレーション, 第 22 回数値流体シンポジウム, 2008 年 12 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター
- ④ S. Komori, R. Kurose, S. Ohstubo, K. Tanno, N. Suzuki, Heat and mass transfer across the wavy sheared interface in wind-driven turbulence, Proc. of 6th International symposium on turbulence and shear flow phenomena, 2009 年 6 月 22~24 日, ソウル国際大学
- ⑤ 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液側流動場の直接数値シミュレーション, 日本流体力学会年会 2009, 2009 年 9 月 4 日, 東洋大学
- ⑥ N. Takagaki, K. Iwano, S. Komori, The effects of rain on wind-wave turbulent flow, the European Turbulent Conference, 2009 年 9 月 7 日~10 日, Fachbereich Physik
- ⑦ 高垣直尚, 竹安恵一, 岩野耕治, 小森悟, 風波気液界面を通しての二酸化炭素移動に及ぼす降雨の影響, 第 87 期日本機械学会流体工学部門講演会, 2009 年 11 月 7 日~8 日, 名古屋工業大学

- ⑧ 高垣直尚, 小森悟, 気液界面を通しての二酸化炭素交換に及ぼす降雨の影響, 京都大学 数理解析研究所 共同研究集会 「乱流の動力学的記述と統計学的記述の相補性」, 2010 年 1 月 13~15 日, 京都大学

[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・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・工学研究科・准教授
研究者番号：70371622

高垣 直尚 (TAKAGAKI NAOHISA)
京都大学・工学研究科・助教
研究者番号：00554221
(H20→H21：研究分担者)

(3) 連携協力者

鈴木 直弥 (SUZUKI NAOYA)
近畿大学・理工学部・講師
研究者番号：40422985
(H19→H20：連携研究者)

(4) 研究協力者

伊藤 靖仁 (ITO YASUMASA)
ニューヨーク市立大学・
大学院工学研究科・研究員
研究者番号：40346078
(H19→H20：研究協力者)

(