

剪断力の働く気液界面を通してのスカラー輸送機構の解明と
輸送量の評価—流体工学でしか出来ない大気・海洋間の炭酸ガス
及び熱の交換量の正確な評価—

Scalar Transfer Mechanisms at the Sheared Air-Water Interface
: Estimation of Scalar Transfer Rate

小森 悟 (Komori, Satoru)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

本研究は、風波乱流水槽等を用いた室内実験およびコンピュータを用いた数値シミュレーションにより、剪断力の働く気液界面を通してのスカラー輸送機構を解明するとともに、地球温暖化予測の研究において重要となる大気・海洋間でのスカラー（CO₂等の物質や熱）の輸送量に対する信頼性の高い評価法の確立を目指したものである。

研究分野／科研費の分科・細目／キーワード

工学／機械工学・流体工学／環境流体力学、乱流、混相流、反応流、数値流体力学

1. 研究開始当初の背景・動機

大気中CO₂濃度の上昇により引き起こされる地球温暖化現象は、世界的な環境問題とされている。この温暖化予測に関する研究の多くは、大気海洋循環モデル（GCM）と呼ばれる温暖化予測モデルを用いた数値シミュレーション手法の開発と計算精度の向上に主眼をおいており、GCMを構成する種々のサブモデルの信頼性を改善しようとする研究は数少ない。しかし、サブモデルの信頼性なくしては、それらを統合したGCMの不確定性を拭い去ることはできない。特に地球表面の約7割を占める海洋と大気との間のCO₂の交換量を正確に評価することは必要不可欠であるが、既往研究では、大気・海洋間でのCO₂交換量の評価には、非常にばらついた物質輸送速度(液側物質移動係数) k_L の実測値を海表面上10mの高さにおける風速に対する単純な増加関数で強引に相関するという極めて簡単な方法が使用されてきた。この方法では、近似相関関数を少し変化させるだけで大気・海洋間の炭素交換量が1ギガトン程度は簡単に変化するため、グローバルな炭素収支予測では、森林等の陸地は炭素の放出源にも吸収源にもなり得るといった不確実な予測結果が得られることになる。

2. 研究の目的

上記の理由から、本研究では、精巧な室内実験および直接数値計算を用いて剪断力の働く気液界面近傍での乱流構造と物質輸送機構を解明することにより、物理的根拠に基づいた物質輸送速度 k_L の正確な評価およびそのモデル化を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究費で製作した大型風波乱流水槽、小型風波乱流水槽、開水路乱流実験装置等を用いて、また、本研究経費で購入したLDV、PIV、TOCメータ、CO₂コントローラを用いて、気液界面近傍における乱流構造と気液界面を通してのCO₂輸送機構の解明のための乱流統計量を測定した。一方、本研究費で購入したワークステーション等を用いた直接数値計算（DNS）により、風波気液界面に働く流体力を評価するとともに、気泡・液滴周りの乱流構造や表面を通しての物質輸送機構に関する情報を得た。さらに、これらの結果と気象データベースを用いることにより、全球規模での大気海洋CO₂交換量の評価を試みた。

4. 研究の主な成果

1) 大型風波水槽および小型風波水槽を用いたCO₂の輸送実験により、既往研究における定説「物質輸送速度 k_L は気液界面上10mの高さにおける風速 U_{10} に単調に比例して増加する」とは異なり、「 k_L は U_{10} ではなく気液界面上の境界層外縁における一様風速 U_∞ により風波乱流場のスケールやフェッチに依存せず良好に相関され、 $U_\infty < 5\text{m/s}$ では U_∞ とともに単調増加し、 $U_\infty = 5 \sim 12\text{m/s}$ の領域で横ばいとなり、 $U_\infty > 12\text{m/s}$ で急激に上昇する」という結果を得た。この k_L の横ばい現象は、風波の発達過程において気液界面に働く剪断応力が波の背後に起こる剥離により風速が上昇しても増加しないため気液界面下のスカラー輸送を支配する乱流渦が成長しない風速域があることに起因して現れることを明らかにした。実際、物質輸送を支配する気液界面

下に作られる表面更新乱流渦の発生周波数と k_L との間には良好な比例関係が存在することを明らかにした。また、 $U_{10} > 12\text{m/s}$ の高風速域の k_L の急激な増加の主因は、これまで、風波の崩壊に伴う気泡の巻き込みと液滴の飛散にあると予想されてきた。しかし、液滴が全物質輸送速度におよぼす影響は無視できるほど小さく、気泡の影響は海水の場合には $U_{10} > 17\text{m/s}$ で全物質輸送速度の約 40% に達し、高風速域の k_L の急激な増加につながることを明らかにした。

2) うねりが物質輸送速度 k_L に与える影響を、風波水槽内に機械的にうねりを発生させて物質の輸送速度を測定することにより解明した。その結果、うねりは界面に作用する剪断応力を減少させるため砕波を伴わない風波気液界面を通しての k_L を減少させることを明らかにした。また、実験で再現ができない風波と角度をなす斜めうねりの影響については、風波気液界面を波状壁面で近似した気相乱流場に三次元直接数値計算を適用することにより得られた壁面摩擦応力の計算結果から、風波とうねりのなす角度に比例して減少することを明らかにした。

3) 降雨が気液界面を通してのスカラー輸送に及ぼす影響を解明するため、開水路乱流の気液界面上に降雨装置を設置し、降雨による物質輸送速度 k_L の測定を行った。その結果、降雨は気液界面を通しての物質輸送を著しく促進させ、雨量が多い場合の k_L は風速 14m/s 程度の風波乱流場での物質輸送速度に匹敵することを明らかにした。また、既往研究では降雨の影響が単位体積中に存在する降雨のエネルギーフラックスで決定されるとされていたが、本研究では、エネルギーフラックスは適切な支配パラメータではなく降雨の持つ運動量フラックスがより適切なパラメータになることを初めて明らかにした。一方、船舶事故等により漏出する重油が気液界面を覆う場合、如何なる濃度でどの程度の物質輸送速度の変化を引き起こすかを風波の崩壊現象との関係をも含めて明らかにした。また、重油の処理剤や化学反応物質等の乱流拡散の影響を明らかにすることも重要であり、そのための基礎研究として化学反応を伴う乱流場での混合反応機構を明らかにするための数値シミュレーション手法 (LES) を開発した。

4) 本研究で得られた k_L のモデルとコロンビア大学の研究チームらが作成した大気・海洋間の CO_2 の分圧差のデータベースを用いて全海洋と大気との 2001 年における炭素の交換量を評価した結果、従来のものに比べて年間 1ギガト程度の差が生じることを明らかにした。また、地球上の降雨

のデータベースに加えて本研究で得られた雨滴のもつ運動量フラックスと k_L の関係を示すモデルを用いて地球上の大気・海洋間での降雨によるスカラー輸送量を評価した結果、全球的に見れば降雨の影響は風の影響に比べて 5% 以下と非常に小さいが、熱帯地域等の多雨地帯では降雨の影響は 35% 程度と局所的に大きくなることを明らかにした。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

本研究で行った研究に対して 2006 年度の日本機械学会賞 (論文) や日本機械学会流体工学部門のフロンティア表彰を受けるに至った。また、国際的には、米国化学工学会年会、韓国流体工学会年会等の招待講演および基調講演において本研究で行った研究内容を報告することにより、本研究の重要性を示した。さらに、5 年ごとに開催される気液界面熱物質輸送に関する専門的国際会議である The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces が、研究代表者を委員長として 2010 年 5 月に京都市で開催することが決定されるに至った。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者には下線)

- N. Takagaki and **S. Komori**, Effects of rainfall on mass transfer across the air-water interface, *J. Geophys. Res.*, Vol.112, pp.c06006 (2007).
- K. Sugioka and **S. Komori**, Drag and lift forces acting on a spherical water droplet in homogeneous linear shear air flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 570, pp.155-175 (2007).
- S. Komori**, N. Takagaki, R. Saiki, N. Suzuki and K. Tanno, The Effects of Raindrops on Interfacial Turbulence and Air-Water Gas Transfer, in *Transport at the Air Sea Interface* (eds. C. Garbe et al.), pp.167-177, Springer Verlag (2007).
- D. Zhao, Y. Toba, K. Sugioka and **S. Komori**, New sea spray generation function for spume droplets, *J. Geophys. Res.*, Vol.111, pp.c02007 (2006).
- 杉岡健一、**小森 悟**、風波乱流場での物質移動に及ぼす飛散液滴の影響、日本機械学会論文集(B編)、71 巻 701 号、pp. 7-14 (2005).
- T. Michioka and **S. Komori**, Large-eddy simulation of a turbulent reacting liquid flow, *AIChE Journal*, Vol. 50 No. 11, pp. 2705-2720 (2004).
- 丹野賢二、**小森 悟**、風波気液界面近傍の乱流構造と物質移動に及ぼすうねりの影響、日本機械学会論文集(B編)、70 巻 691 号、pp. 644-649 (2004).

研究代表者ホームページ:

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