

## 研究課題名：風波乱流中の気液界面を通しての運動量とスカラの輸送に及ぼす風波と降雨の影響

課題代表者：京都大学大学院工学研究科 小森 悟  
 共同研究者：京都大学大学院工学研究科 黒瀬良一・高垣直尚  
 国立環境研究所地域環境研究センター 大原利真

実施年度：平成 24 年度～平成 24 年度

### 1. 研究目的

海洋と大気との運動量およびスカラの輸送量を正確に評価するモデルを構築することは、地球温暖化予測において必要不可欠であるグローバルなスケールでの炭素収支や熱収支を見積もるうえで、また、近年問題とされる局所的に甚大な被害を及ぼすハリケーン、台風、集中豪雨等の異常気象の発生成長過程および進路等を正確に予測するうえで、極めて重要である。しかし、現在の大気海洋大循環モデル（GCM）で用いられているサブモデルでは、運動量およびスカラの交換速度は風速でのみ相関されており、風波（砕波やうねり等を含む）や降雨の効果が全く考慮されていない。そこで本研究では、大気海洋間の風波や降雨を伴う気液二相乱流場に対して数値シミュレーションを適用することにより、風波および降雨が気液界面を通しての運動量およびスカラ輸送に及ぼす影響を明らかにし、その影響をモデル化することを目的とする。

### 2. 研究計画

高速条件下の風波乱流中に生成される砕波を再現可能な数値シミュレーション法を確立する。また、単一液滴の気液界面衝突により生じる気液間のスカラ輸送現象を再現可能な数値シミュレーション法を確立する。

### 3. 進捗状況

#### 3.1 風波乱流場の数値シミュレーション

図 1 に VOF（Volume of Fluid）法に基づく 2 次元数値シミュレーションにより得られた風波乱流中気液界面の砕波の様子を示す。図より、まだ試行段階ではあるが、本手法が風波の砕波現象を模擬しうる事が確認できる。

#### 3.2 単一液滴界面衝突の数値シミュレーション

図 2 に VOF 法に基づく 3 次元直接数値シミュレーション（DNS）により得られた単一液滴の界面衝突後のある時刻における瞬間スカラ濃度分布を示す。図より、液側に形成される渦がスカラを下方へと輸送する様子が確認できる。

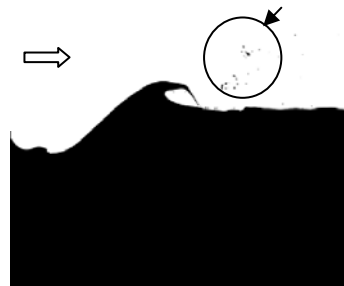


図 1 風波乱流中気液界面の砕波現象。

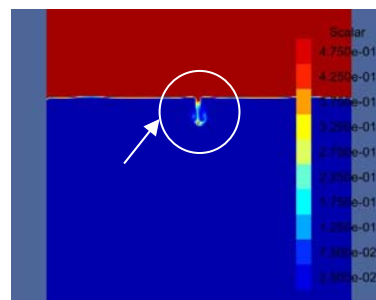


図 2 液滴衝突により生じる瞬間スカラ濃度分布。

### 4. 今後の計画

- (1) 風波乱流場の数値シミュレーションを 3 次元計算へ拡張する。
- (2) 実測値との比較により本計算の妥当性を検証する。

### 5. 計算機資源の利用状況(2012年4月～9月)

実行ユーザ数: 3 CPU 時間 1 ノード未満: 15 hours,  
 1 ノード: 12,570 hours, 2 ノード: 523 hours,  
 計: 13,107 hours

### 6. 昨年度研究課題のまとめ

#### 6.1. 昨年度研究課題名

大気海洋間の気液界面を通しての運動量とスカラの輸送に及ぼす風波と降雨の影響

#### 6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同様。

#### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

##### 6.3.1 目的

砕波を伴わない低速条件下の風波乱流場に数値シミュレーションを適用することにより、スカラ輸送係数  $k_L$  の再現性を実測値との比較によって評価

する。また、単一液滴の気液界面衝突現象に数値シミュレーションを適用することにより、気液界面を通しての運動量輸送機構を検討する。

### 6.3.2 風波乱流場の数値シミュレーション

本計算では、界面追跡手法として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) 法を採用した。

図 3 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。今回の計算は、初期気側一様流速  $U_{\infty,ini}$  および気側高さ  $\delta$  基準の Reynolds 数  $Re_{ini}$  を 4340 ( $U_{\infty,ini} = 5.2 \text{ m/s}$ ,  $\delta = 1.25 \times 10^{-2} \text{ m}$ )、11550 ( $U_{\infty,ini} = 7.0 \text{ m/s}$ ,  $\delta = 2.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ ) 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直接数値シミュレーション (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 Large-Eddy Simulation (LES) を適用した。

図 4 に、風波気液界面を通してのスカラ輸送係数  $k_L$  と摩擦速度  $u_{*a}$  の関係を風洞装置を用いた既往実測値と比較して示す。ここで、 $k_L$  は以下の式で求められる。

$$k_L = \frac{1}{(C_s - C_b)A} \int_s D \frac{\partial C}{\partial n} dS$$

式中の  $A$  は界面の表面積、 $C$  はスカラ濃度、 $D$  は拡散係数、 $n$  は気液界面に対する法線方向座標である。また、 $C_s - C_b$  は界面とバルクの濃度差である。図より、計算値は実験値と良く一致することがわかる。

### 6.3.3 単一液滴界面衝突の数値シミュレーション

本数値計算における計算領域を図 5 に示す。直径  $d_p$  の球形液滴を静止気液界面上方から鉛直および水平方向に速度 ( $v_p, u_p$ ) を与えて落下させ、この液滴の界面衝突に伴う気液界面の変形および液側流動場を 3 次元 DNS により調べた。

図 6 に水平方向に速度をもたない場合 (鉛直衝突する場合) ともつ場合 (斜め衝突する場合) の液滴の運動量 (横軸) と液滴衝突により生成される渦輪の強度 (縦軸) の関係を実測値と併せて示す。ここで、 $d_p$  は液滴径、 $v_p$  は液滴衝突速度、 $r_{VR}$  は渦輪半径、 $V_{VR}$  は渦輪の中心移動速度である。図より、鉛直衝突する場合の運動量と渦輪強度の間には実測値と同様の乗数則が成り立つことがわかる。一方、斜め衝突をする場合の渦輪の強度は、実験相関式よりやや大きな値を取ることがわかる。このことは、

鉛直衝突とななめ衝突では液滴衝突により形成される渦輪等の流動構造が異なること、また、これに伴って液滴衝突により引き起こされる気液間物質輸送の機構が異なることを示唆している。

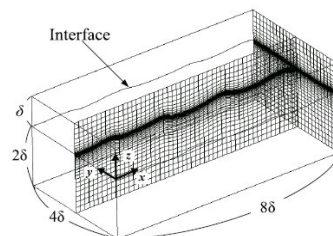


図 3 計算領域と計算格子。

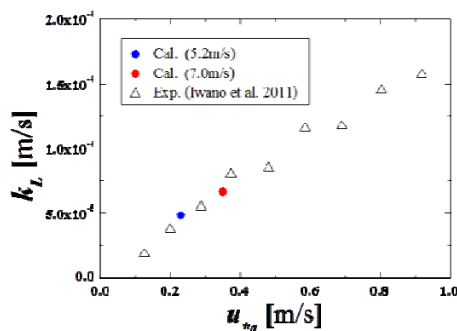


図 4 スカラ輸送係数  $k_L$  の実測値との比較。

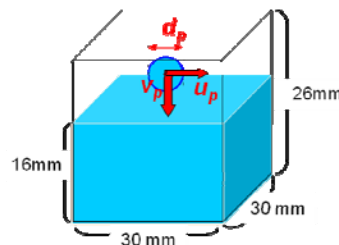


図 5 計算領域。

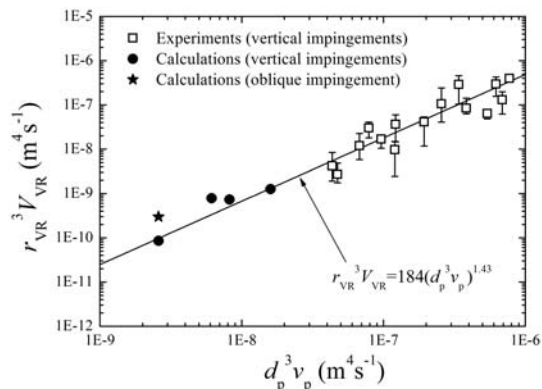


図 6 衝突液滴の運動量と渦輪強度の関係。

### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数: 3 CPU 時間 1 ノード未満: 349 hours, 1 ノード: 3,524 hours, 2 ノード: 0 hour, 計: 3,873 hours