

# 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

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  
 実施年度: 平成 23 年度～平成 23 年度

## 1. 研究目的

地表面上の約 7 割を占める海洋と大気間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 (碎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

気液二相乱流場の数値シミュレーションを様々な風速条件のもとで実施することにより、風波気液界面を通しての運動量とスカラの輸送機構を検討する。また、単一液滴周りの流れや単一液滴の界面衝突現象の数値シミュレーションを実施することにより、碎波液滴や降雨の挙動を検討する。

## 3. 進捗状況

### 3.1 風波気液界面の数値シミュレーション

初期気側一様流速  $U_{\infty,ini} = 7.0 \text{ m/s}$  の計算を引き続き実施中である (後述の 6 節参照)。

### 3.2 単一液滴界面衝突の数値シミュレーション

気液界面を追跡する手法の 1 つである Level-Set 法を用いた 3 次元直接数値シミュレーション (DNS) コードを新たに作成し、本コードの液滴衝突現象への適用可能性について検討を進めている。

本数値計算における計算領域を図 1 に示す。直径  $d_p$  の球形液滴を静止気液界面上方から落下させ、この液を詳しく調べた。図 2 に本数値計算により再現された

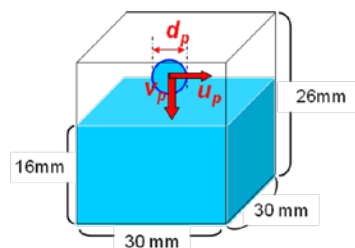


図 1 計算領域。

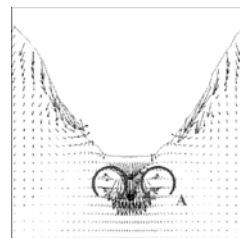


図 2 液滴衝突後の界面形状。

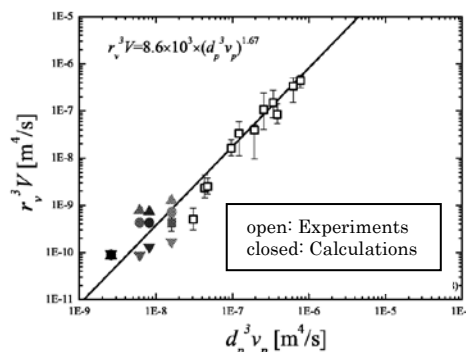


図 3 衝突液滴の運動量と渦輪強度の関係。

クレータと渦輪の様子の一例を示す。また、図 3 に衝突液滴の持つ運動量と液滴衝突により生成される渦輪の強度の相関関係を示す。ここで、 $d_p$  は液滴径、 $v_p$  は液滴衝突速度、 $r_v$  は渦輪半径、 $V$  は渦輪の中心移動速度である。図より、実験では確認できなかった自然界に多く存在する直径 1~2mm 程度の小さな液滴に対しても、運動量と渦輪強度の間には既往実験で報告されている乗数則が成り立つことがわかる。

## 4. 今後の計画

今年度前半に構築した液滴の界面衝突を再現可能なコードを用いて、液滴が水面に対して斜めに衝突する

場合の運動量と渦輪強度との関係を明らかにする。また、これらの結果をもとに、風波気液界面を通しての物質移動に及ぼす風波と降雨の相乗効果を調べる。

**5. 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: 0 hour, 1 ノード: 2,027 hours, 2 ノード: 0 hour, 計: 2,027 hours

**6. 昨年度研究課題のまとめ**

**6.1. 昨年度研究課題名**

海水面および海中での物質の乱流拡散機構の解明と海水面を通しての物質の交換機構に及ぼすうねりの効果

**6.2. 昨年度研究課題の目的**

うねりを伴う海水面を通しての乱流拡散機構および物質交換機構を調査するうえで有用となる、移動・変形を伴う風波気液界面を再現可能で、かつ高 Reynolds 数、高 Schmidt 数条件に適用可能な数値シミュレーションコードを開発する。また、このコードを用いて、風波気液界面を通しての乱流拡散機構およびスカラ輸送機構を詳しく調べる。

**6.3. 昨年度研究課題の成果概要**

**6.3.1 目的**

移動・変形を伴う風波気液界面を再現可能で、かつ高 Reynolds 数、高 Schmidt 数条件に適用可能な数値シミュレーションコードを開発する。また、このコードを用いて、風波気液界面を通しての乱流拡散機構およびスカラ輸送機構を詳しく調べる。

**6.3.2 計算方法**

一昨年度は移動・変形を伴う風波気液界面を再現可能な気液二相流の直接数値シミュレーション (DNS) コードの開発に成功し、風波気液界面を通してのスカラ輸送機構について検討を行った。しかし、DNS では計算コストの制約から、その適用可能な条件が低 Reynolds 数、低 Schmidt 数 ( $Sc = 1$ ) に限られていた。そこで昨年度は、より高い風速もしくはより広い領域を対象とした高 Reynolds 数条件下の計算や、実際の物質 ( $CO_2$ ) の輸送を対象とした高 Schmidt 数 ( $Sc \approx 600$ ) 条件下での計算を可能とするため、DNS コードのラージ・エディ・シミュレーション (LES) コードへの拡張を行い、そのコードを用いた検討を行った。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 4 に計算領域を示す。

$x, y, z$  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。気側高さ  $\delta$  m および初期気側一様流速  $U_{\infty,ini}$  m/s を  $(\delta, U_{\infty,ini}) = (2.5 \times 10^{-2}, 5.2), (5.0 \times 10^{-2}, 7.0)$  の 2 ケースに変化させた。これらの初期の摩擦速度  $u_{*a, ini}$  およびレイノルズ数  $Re_{ini}$  はそれぞれ  $u_{*a} = 0.25, 0.35$  m/s,  $Re_{ini} = 4340, 11550$  となる。

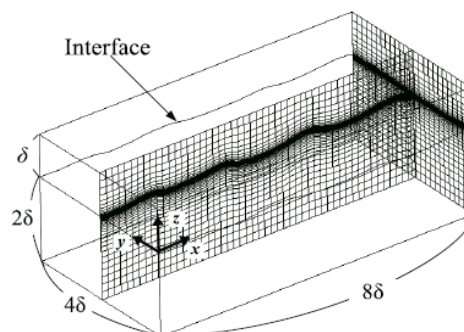


図 4 計算領域と計算格子。

**6.3.3 計算結果および考察**

図 5 にスカラ輸送係数  $k_L$  の計算値 ( $U_{\infty,ini} = 5.2$  m/s) と実験値の比較を示す。図より、 $k_L$  の計算値は実験値と良好に一致することわかる。計算値は実験値よりもわずかに高い値を示すが、これは実験で見られる表面活性剤による  $k_L$  の低減効果を数値シミュレーションでは考慮していないためであると考えられる。なお、 $U_{\infty,ini} = 7.0$  m/s のケースについては計算継続中である。

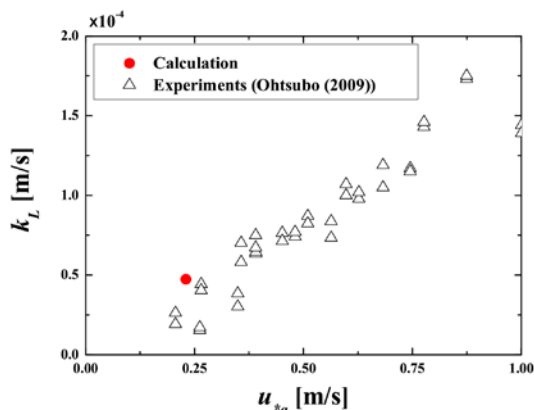


図 5 スカラ輸送係数の比較。

**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: 0 hour, 1 ノード: 12,342 hours, 2 ノード: 0 hour, 計: 12,342 hours