

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

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 22 年度～平成 22 年度

1. 研究目的

地球温暖化およびそれに伴う異常気象の発生や海洋汚染の予測を正確に行う上で、大気・海洋間での炭酸ガスなどの物質の交換速度を正確に評価することは重要である。本研究では、うねりを伴う風波気液界面に対して数値計算を適用することにより、風波やうねりが海水面近傍の乱流構造や物質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

本研究では、気液界面を壁面とみなすことなく移動・変形する風波気液界面を再現可能な気液二相流の数値計算を行い、風波気液界面近傍の乱流構造および物質交換機構について詳細に調べた後、うねりの効果をも含めたより正確な物質交換モデルの考案を試みる。

3. 進捗状況

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計算 (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 ($Sc = 1$) に限られている。そこで今年度は、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進めている。

図 1 に LES により得られた初期気側一様流速 $U_{\infty,ini} = 7.0$ m/s、気側高さ $\delta = 2.5 \times 10^{-2}$ m ($u^* = 0.35$ m/s、 $Re_{ini} = 11550$) の条件下における気液界面を通しての局所スカラフラックスの瞬間分布を示す。DNS により得られた $U_{\infty,ini} = 5.2$ m/s、 $\delta = 1.25 \times 10^{-2}$ m ($u^* = 0.25$ m/s、 $Re_{ini} = 4340$) の条件下における分布 (後述の図 4) に比べて、スパン方向に存在する局所スカラフラックスストリークの数は増加し、より広い領域の挙動が捉えられていることがわかる。

図 2 にスカラ濃度の $y-z$ 断面分布の時間変化を Sc

$= 1$ と $Sc = 600$ の場合を比較して示す。なお、これらの計算ではともに流れ場の計算を DNS、スカラ場の計算を LES により行っている。両ケースともに、スカラは気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されるが、 $Sc = 600$ の場合のスカラ輸送量は $Sc = 1$ の場合に比べて極端に少ないことがわかる。

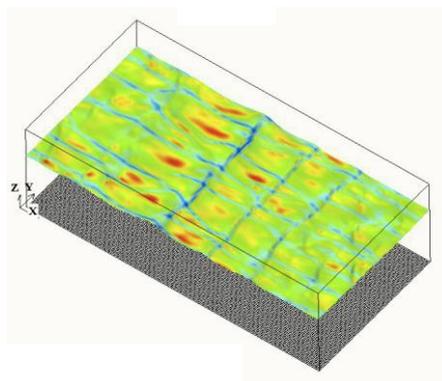


図 1 LES により得られた局所スカラフラックスの瞬間分布。

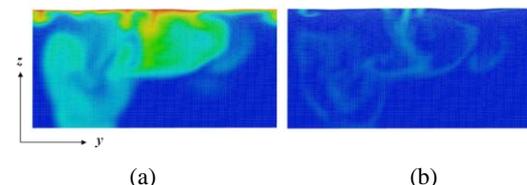


図 2 スカラ場の LES により得られたスカラ濃度の $y-z$ 断面分布。(a) $Sc = 1$ 。(b) $Sc = 600$ 。

4. 今後の計画

LES コードの開発により、うねりの計算に可能な高 Reynolds 数条件下における計算、および実際の物質 (CO_2) の特性に近い高 Schmidt 数条件下における計算が可能となった。そこで、今後は、高 Reynolds 数、高 Schmidt 数条件下における風波気液界面を通してのスカラ輸送機構を明らかにするとともに、うねりの影響についての調査にとりかかる。

5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：3 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：4,668 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：4,668 hrs.

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

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

移動・変形する風波気液界面近傍の乱流場とスカラ場を再現可能な気液二相流の直接数値計算 (DNS) コードを開発し、スカラ輸送機構を検討する。

6.3.2 計算方法

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 (Boundary Fitted Coordinate, BFC) 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。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。支配方程式の数値解法には有限差分法に基づく MAC (Marker And Cell) 法を用いた。本計算では、初期気側一様流速 $U_{\infty,ini}$ を 5.2m/s、初期気側摩擦速度 u_* を 0.25 m/s とした。この時の気側一様流速 U_{∞} と気側高さ $\delta (=1.25 \times 10^{-2} \text{m})$ 基準の Reynolds 数 Re_{ini} は 4340、気側摩擦速度と δ 基準の Reynolds 数 $Re_{\tau,ini}$ は 210 となる。またスカラ場の計算は $t = 2.35\text{s}$ から開始した。ここで、時間 t は気液界面上に風を吹かせ始めてからの時間である吹送時間を表す。本研究では、風波が発達する乱流場 (以下、風波乱流場と呼ぶ) と、界面形状を平滑面に固定し風波を発達させない乱流場 (以下、平滑乱流場と呼ぶ) の 2 ケースについて計算を行った。

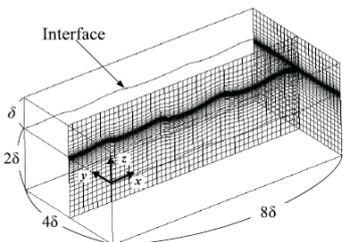


図 3 計算領域と計算格子。

6.3.3 計算結果および考察

図 4 に風波乱流場および平滑乱流場での $t = 4.5\text{s}$ における気液界面を通しての局所スカラフラックスの瞬間

分布をそれぞれ示す。局所スカラフラックスは風波乱流場の方が平滑乱流場より高い値をとることがわかる。また、風波乱流場と平滑乱流場の局所スカラフラックス分布にはともに主流方向にストリーク状の低い値をとる領域が存在するが、その低局所スカラフラックスストリークは風波乱流場の方が非一様に分布していることもわかる。このような低局所スカラフラックスストリークは、液側の界面近傍領域に発生するバースティング運動に寄与する縦渦型の (主流方向に軸をもつ) 乱流渦が界面付近のスカラを輸送するために現れることが知られている。従って、風波乱流場では、波動運動が乱流の発達を促進し、液側の界面近傍におけるバースティング運動の発生を活発にするため、平滑乱流場に比べて局所スカラフラックスが高く、低局所スカラフラックスストリークが非一様に分布するようになると考えられる。図 5 にスカラ濃度の $x-z$ および $y-z$ 断面分布の時間変化を示す。風波乱流場のスカラは気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されることがわかる。

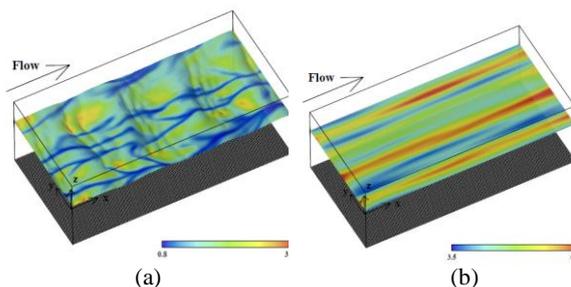


図 4 局所スカラフラックスの瞬間分布。(a) 風波乱流場。(b) 平滑乱流場。

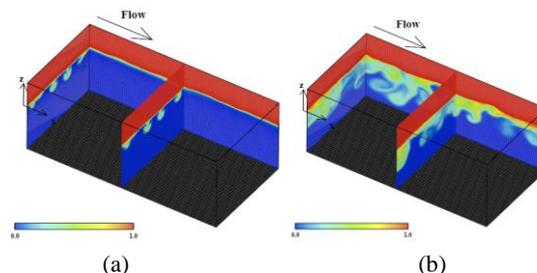


図 5 スカラ濃度の $x-z$ および $y-z$ 断面分布 (風波乱流場)。(a) $t = 3.0 \text{ s}$ 。(b) $t = 5.0 \text{ s}$ 。

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 : 72 hrs, 1 ノード : 21,765 hrs, 2 ノード : 0 hr, 計 : 21,838 hrs.