

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 21 年度～平成 21 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うえで、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極めて重要である。本研究では、うねりを伴う風波気液界面に対して直接数値計算（DNS）を適用することにより、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 DNS 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、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 DNS コードの開発に成功した。そこで今年度は、界面形状を平滑面に固定し風波を発生させない平滑気液界面に対する計算を併せて実施し、それとの比較によって風波気液界面近傍の乱流構造とスカラ輸送機構を詳しく調べている。以下では、風波および平滑気液界面近傍の乱流場をそれぞれ風波乱流場、平滑乱流場と呼ぶ。

図 1 に $t = 4.5\text{s}$ における風波乱流場および平滑乱流場での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。図より、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（カラーレンジが異なることに注意されたい）。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）乱流渦が界面近傍のスカラを更新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。このことは、図 2 に示したスカラ濃度の $x-z$ および $y-z$ 断面分布の時間変化からも確認できる。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。

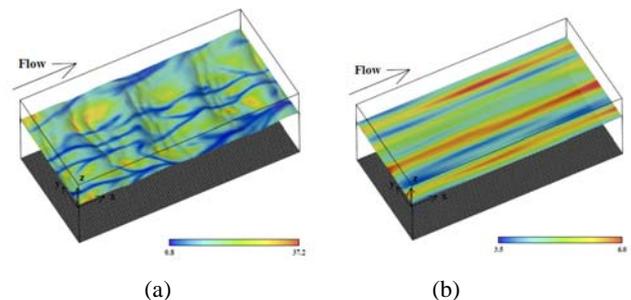


図 1 局所スカラフラックスの瞬間分布。(a) 風波乱流場。(b) 平滑乱流場。

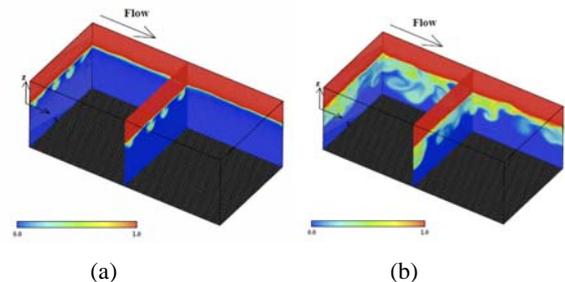


図 2 スカラ濃度の $x-z$ および $y-z$ 断面分布（風波乱流場）。(a) $t = 3.0\text{ s}$ 。(b) $t = 5.0\text{ s}$ 。

4. 今後の計画

これまでの研究により、風波気液界面を通してのスカラ輸送は液側流動場の縦渦を伴うバースティング運動により強く支配されることが示された。しかし、さらに風速が上がると、風波の発達に伴って横渦型の（スパン方向に軸をもつ）乱流渦が顕著になることが予想される。従って、今後は、より風速が高い条件下にお

ける縦渦と横渦の関連性や、それがスカラ輸送に及ぼす影響を明らかにしていく予定である。

5. 計算機資源の利用状況 (2009 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数: 3 CPU 時間 1 ノード未満: 55 hours,
1 ノード: 12,305 hours, 2 ノード: 0 hour,
計: 12,360 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

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 DNS コードを開発する。

6.3.2 計算方法

図 3 に計算領域の概略を示す。界面を追跡する手法として ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法を用いた。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。また、支配方程式の数値解法には有限差分法に基づく MAC 法を用いた。初期気側一様流速 $U_{\infty,ini}$ を 5.2 m/s、初期気側摩擦速度 u^* を 0.25 m/s とした。

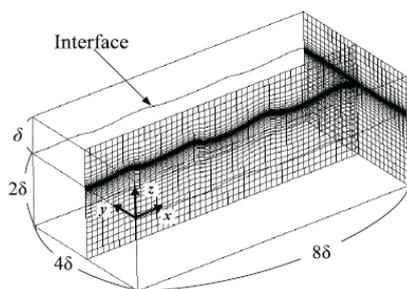


図 3 計算領域と計算格子。

6.3.3 計算結果および考察

図 4 に吹送時間 $t = 4.5s$ における風波気液界面形状を示す。3 次元的な風波が発達しており、風波の下流側

斜面にはリップルが形成されていることが確認できる。この結果は、低風速域の室内実験において観測される風波と一致する。図 5 に $t = 4.5s$ における液側流動場の第二不変量の等値面を示す。図は、計算領域の下側から見たものである。界面近傍には馬蹄形渦が見られ、一般的な壁面乱流場によく見られるバースティング運動が発生していることがわかる。また、風波の下流側で形成されるリップルによって強い渦が形成されていることもわかる。

さらに、気液界面から液側側にスカラを浸透させる計算を行い、風波気液界面を通してのスカラ輸送機構と界面近傍液側の乱流構造との関連性について検討を行った。図 6 に $t = 4.5s$ 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。風波気液界面を通してのスカラフラックスは、ストリーク状に低い値をとり、液側乱流が強い値を示す風波の下流側斜面において高い値をとることがわかる。これらの現象は、液側のバースティング運動やリップルの存在に起因するものと考えられる。

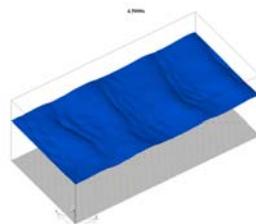


図 4 風波気液界面形状。

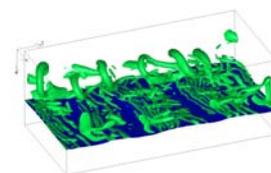


図 5 液側流動場の第二不変量の等値面。

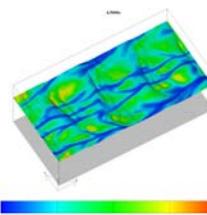


図 6 局所スカラフラックスの瞬間分布。

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: 992 hours,
1 ノード: 38,396 hours, 2 ノード: 0 hour,
計: 39,387 hours