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 20 年度～平成 20 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、まず初めに、うねりを伴う風波気液界面を模した波状壁面上の乱流場にDNSを適用し、うねりが波状壁面上の乱流構造および壁面に作用する抗力に及ぼす影響を評価する。次に、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

今年度は気液二相流のDNSコードの開発を行った。本研究では、界面を追跡する手法としてALE（Arbitrary Lagrangian Eulerian）法を用いた。図 1 に吹送時間t=4.5sにおける風波気液界面形状を示す。図より、スパン方向にほぼ一様の 2 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 2 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。図より、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、本研究では、気液界面から液流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 3 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。図より、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。室内実験では風波気液界面極近傍における流動場を三次元的に調査することは困難であるため、これらの知見は非常に有用なものである。

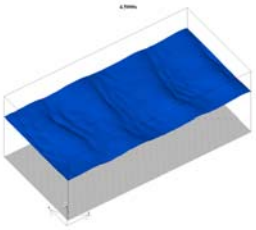

図 1　風波気液界面形状

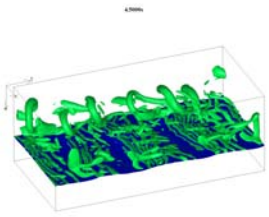

図 2　液側流動場の第二不変量の等値面

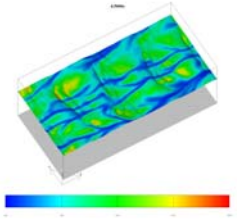

図 3　局所スカラフラックスの瞬間分布

4. 今後の計画

今後は、引き続き風波乱流場のDNSを行い、風波気液界面近傍の乱流構造および物質輸送機構をより詳細に調べる予定である。また、LESを導入することにより、より高風速域における風波乱流場やうねりを伴う風波乱流場の数値シミュレーションを行い、正確な物質輸送モデルを考案する予定である。

5. 計算機資源の利用状況（2008 年 4 月から 10 月まで）

実行ユーザ数：3　CPU時間 1 ノード未満：393 hours, 1 ノード:24,436 hours, 2 ノード:0 hour, 計 24,829 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

今年度と同じ。

6.3. 昨年度研究課題の成果概要

6.3.1 目的

風波気液界面の形状を模した波状壁面上の乱流場にDNSを適用することにより、気液界面近傍の乱流構造や界面に作用する抗力に及ぼすうねりの影響について検討を行う。

6.3.2 計算方法

非圧縮性流体の支配方程式である連続の式およびNavier-Stokes方程式の解法には有限差分法に基づくMAC（Marker And Cell）法を用いた。図 4 に各場合における計算領域の概略を示す。本研究では、風波やうねりの位相速度が風速に比べて十分に小さいことから、気液界面を固定の波状壁面とみなし、気流のみを解いた。計算は、うねりのない純風波の場合（Run 1）、うねりが風波と同方向（0°）に存在している場合（Run 2）、および、うねりが風波に対して斜め（27°, 48°, 70°）に存在している場合（Run 3, 4, 5）、およびうねりが風波に対して垂直方向（90°）に存在している場合（Run 6）の計 6 つのケースについて行った。計算領域の鉛直下壁を気液界面で模した波状壁面とし、鉛直上側を平滑面とした。主流方向およびスパン方向には周期境界条件を用い、主流方向に平均圧力勾配を作用させることで流れを発生させた。

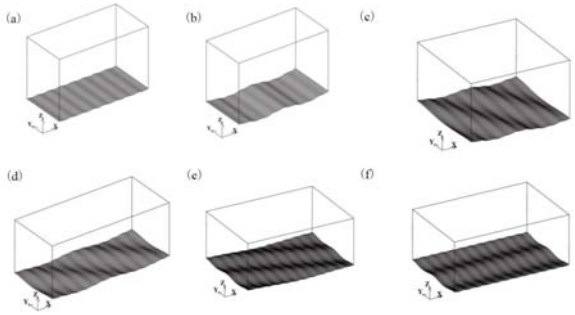

図 4　計算領域の概略図。(a) Run 1, (b) Run 2, (c) Run 3, (d) Run 4, (e) Run 5, (f) Run 6.

6.3.3 計算結果および考察

図 5 に、下側波状壁面に作用する摩擦抗力$D_{F,w}$と圧力抗力$D_{P,w}$、および上側滑面に作用する摩擦抗力$D_{F,f}$の割合を示す。図から、風波に加えてうねりが存在すると波状壁面上の圧力抗力は増加、摩擦抗力は逆に減少し、それらの和である全抗力は増加することがわかる。また、これらの効果は順うねりの場合に最も大きく、うねりの角度が大きくなるにつれて小さくなる。

図 6 に、波状壁面に作用する摩擦抗力$D_{F,w}$とうねりの角度 θ の関係を示す。図から、摩擦抗力はうねりの角度の増加に伴い直線的に増加し、双方には図中の近似式で表わされる相関関係があることがわかる。

現実の風波乱流場では摩擦抗力が液側の表面更新渦の発生に寄与することを考慮すると、これらの結果は、風波気液界面を通しての物質交換速度がうねりにより抑制されること、この抑制効果が順うねりの場合に最も顕著でうねりの角度が大きくなるにつれて弱くなること、また、その効果は本研究で提案したモデルを用いて定量的に予測可能であることを示唆している。なお、斜めのうねりについては観測および室内実験では調査するのは困難であるため、この知見は非常に有用なものとなる。

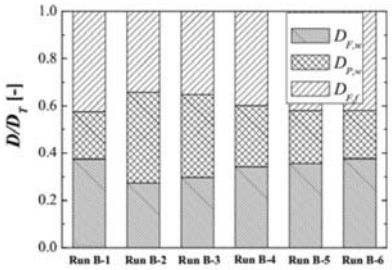

図 5　波状壁面に作用する抗力。

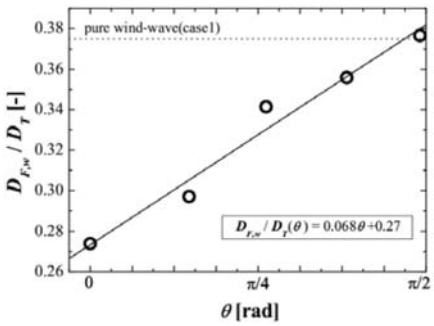

図 6　摩擦抗力とうねりの角度の関係。

6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数 : 4　CPU時間 1 ノード未満 : 5,40 7hours,
1 ノード : 44,570 hours, 2 ノード : 188 hours,
計 50,166 hours