

## 研究課題名：風波気液界面における熱輸送機構の解明とモデリング

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 26 年度～平成 26 年度

### 1. 研究目的

近年、世界各地で集中豪雨などの異常気象や強い熱帯低気圧による被害が増加しており、深刻な問題となっている。その対策を講じるうえで、集中豪雨や熱帯低気圧の規模、およびそれらの発生・発達を正確に予測することが重要である。大気海洋間の熱の移動はこのような気象現象の発生・発達に大きな影響を与えるため、大気海洋間の気液界面を通しての熱の移動量を正確に把握することは精密な気象予測を行ううえで不可欠である。本研究では、気液二相乱流である風波乱流場に対して直接数値計算（DNS）を適用することにより、低風速条件下から碎波を伴う高風速条件下にわたる風波気液界面を通しての熱の輸送機構を明らかにし、そのモデルを構築することを目的とする。

### 2. 研究計画

気液二相乱流である風波乱流場に対して直接数値計算（DNS）を適用することにより、気液界面を通しての熱フラックスに及ぼす主要因の解明、潜熱フラックスと顕熱フラックスの比の定量化、およびそれらのモデル化を試みる。また、飛散液滴や巻き込み気泡が熱輸送に及ぼす影響についても検討する。

### 3. 進捗状況

本計算ではナビエ・ストークス方程式とエネルギー方程式、水蒸気の移流拡散方程式を解くことにより、潜熱・顕熱の輸送を再現する。風波気液界面における境界条件として、比湿場には界面温度における飽和比湿を与え、温度場には熱収支の式を与える。また、複雑な移動、変形を伴う気液界面を追跡する手法として、領域全体の格子を界面形状に合わせて時々刻々と再構築する ALE 法（Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation）を用いる。

図1に計算領域の概略図を示す。格子点数は、約360万点（主流方向に201点、スパン方向に98点、鉛直方向に181点。格子間隔は、主流・スパン方向は等間隔（ $500\mu\text{m}$ ）、鉛直方向には不等間隔（ $10\sim 600\mu\text{m}$ ）とする。初期流動場として、気側に発達した壁面乱流を（ $U_{\infty} = 5.8 \text{ m/s}$ ）、液側には静止状態を与える。初期

の温度場には、気側に28度を、液側に46度を一様与え、比湿場には、 $15\text{g/kg}$ （相対湿度65%）を一様与える（Komori et al., *GAS TRANSPORT AT WATER SURFACES 2010*, 2011）。

はじめに、現実の風波乱流場が形成され、風波気液界面を通しての熱輸送現象が再現されているかを確認するために、気液界面を通しての潜熱輸送量に対する顕熱輸送量の比で定義されるパラメータである、ボウエン比 $Bo$ を評価した（図2）。図より、計算値は実験値と良く一致しており、本計算により碎波（散液滴や巻き込み気泡）を伴わない低風速条件下の風波乱流場および輸送現象が良好に再現されていることが分かる。

### 4. 今後の計画

碎波が熱輸送に及ぼす影響評価に着手する。また、これらの結果を整理、検討し、低風速～高風速条件下にわたる風波乱流場の熱輸送機構の解明を試みる。

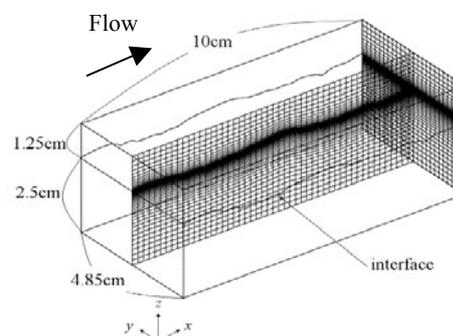


図1. 計算領域。

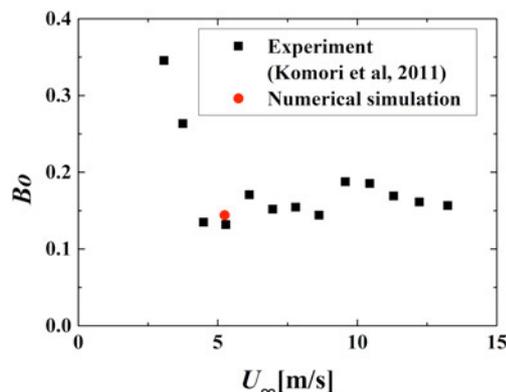


図2. ボウエン比。

5. 計算機資源の利用状況（2014年4月1日～11月30日）

実行ユーザ数: 3  
 CPU時間 v\_deb: 326.35 hours, v\_cpu: 0 hours, v\_8cpu: 0 hours, v\_16cpu: 20,059.20 hours, 計: 20,385.55 hours

6. 昨年度研究課題のまとめ

6.1. 昨年度研究課題名

風波乱流中の気液界面を通しての運動量とスカラ輸送に及ぼす砕波と降雨の影響

6.2. 昨年度研究課題の目的

気液二相乱流である風波乱流場に対して直接数値計算（DNS）を適用することにより、風波、砕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（物質および熱）輸送に及ぼす影響を明らかにする。

6.3. 昨年度研究課題の成果概要

6.3.1 風波乱流場における砕波現象

計算領域の概要を図3に示す。計算では約10 m/sの風速を形成させた。図4に本計算で得られた結果（上図）と、本計算とほぼ同条件で行われた実験（下図）における界面形状の比較を示す。図より、本計算では、波頭付近において水柱が飛び出し、気泡が巻き込まれる現象が良好に再現できていることが分かる。なお、詳細は省略するが、本風速条件下において、液の微粒化によるスカラ輸送への影響は軽微であることを示唆する結果が得られた。

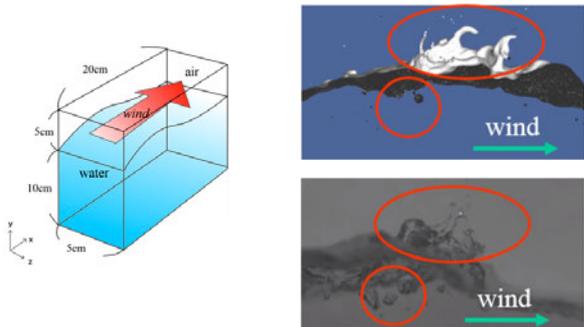


図3. 計算領域。

図4. 砕波の界面形状。

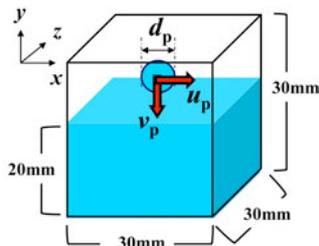


図5. 計算領域。

6.3.2 単一液滴の界面衝突現象

図5に計算領域の概要を示す。図6に液滴衝突によって生成される渦輪により促進される液側物質移動係数と液滴の運動量の関係を、既往実験値（Takagaki and Komori, *JGR*, 2007; *IJMF*, 2014）と比較したものを示す。図より、液滴の持つ運動量が増加するに従って液側物質移動係数が増加するという実験研究の傾向を良く再現していることが分かる。

6.3.3 風波気液界面を通してのスカラ（熱）輸送

計算領域および計算条件は前ページと同様である（図1）。図7に時刻t=4.5sにおける主流方向に垂直な断面における気側の(a)温度分布ならびにベクトル線図、(b)温度分布、(c)比湿分布を示す。図より、気側の縦渦構造により上昇流が生じる領域に高温・高比湿領域が形成されることが確認できる。このことは気側の鉛直方向の熱輸送において、縦渦を伴う乱流組織構造が大きな役割を果たすことを示唆している。

6.4. 昨年度計算機資源の利用状況（2013年6月1日～2014年3月31日）

実行ユーザ数: 3  
 CPU時間 v\_deb: 2,348.23 hours, v\_cpu: 0 hours, v\_8cpu: 715.06 hours, v\_16cpu: 20,001.43 hours, 計: 23,064.72 hours

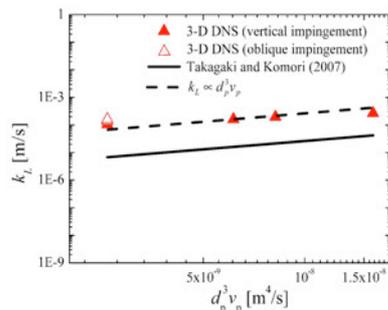


図6. 液側物質移動係数と液滴運動量の関係。

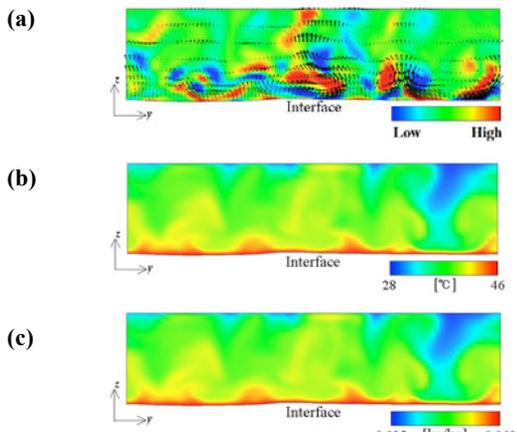


図7. 気側の流動場とスカラ場。