

乱流境界層中の砕波を伴う風波乱流場の 3 次元数値解析

陸 田 秀 実*

1. はじめに

風波表面では、風波自体の相互作用に加えて、波の位相による風の応力分布とシア応力分布の両方が作用している。加えて、大気側の局所的なシア流とそれによる乱れ・砕波によって風波特有の自己調節機構が働きながらエネルギーを保有している。

風波表面の強非線形現象である砕波や気泡・海水滴の挙動は、大気海洋間の運動量・エネルギー・水蒸気・熱・諸物質などの輸送に深く関わっており、風波自体と大気側・海側の両乱流境界層における乱流構造やそれらと海面の相互作用において重要な役割を果たしている。

こうした大気海洋間の諸輸送量や輸送係数を精度良く見積もるには、風波乱流境界層内の極めて非線形性の強い素過程に着目した熱・物質スカラー輸送機構の解明や風波表面の乱流構造を定量的に把握する必要がある。

これまで風波に関する研究は、膨大な観測・実験データによる積み重ねによってかなり理解は進んだものの、風波に関する以前からの根本的な疑問に対しては已然として不明な点が多い。例えば、風波の $3/2$ 乗則は経験則であり根拠となる物理機構は未だ明らかにされていない。また、風波の発生に関する Phillips の共鳴理論やその後の発達に関する Miles の不安定理論などは現実の海の観測結果を説明するには至っていない。さらに、砕波による風波エネルギーの散逸機構の物理的解釈は、その現象の複雑さから最も遅れている。

そこで本研究では、風波の統計的性質を調べるのではなく、風波表面近傍の空気側・水側の両乱流境界層における乱流構造や連行気泡の組織構造を解明し、これらの熱・物質スカラー輸送への影響を明らかにすることを目的としている。したがって、砕波を伴う風波乱流場における運動量、熱・物質スカラー輸送量の定量的な把握とその推定を行うための前段階として本研究を位置付けている。

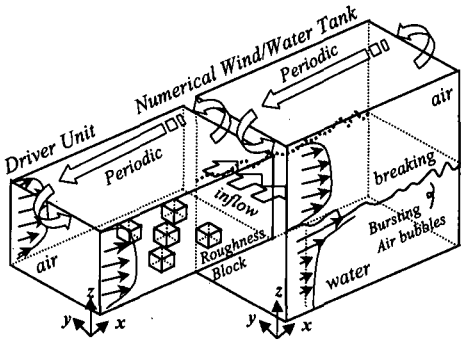


図-1 数値風洞水槽の概念図

2. 数値風洞水槽の概要

本研究で開発した数値風洞水槽は、図-1 に示すように空気側の乱流境界層を生成する「ドライバー領域」と水側の砕波を伴う風波乱流場を再現する「解析領域」から成る 2 つの計算領域で構成されている。

まず「ドライバー部」では、気流の非定常乱流計算を行うために平行平板間乱流による直接数値計算を行う。その際、底面に roughness block (粗度) を配置し、乱流境界層をある程度制御出来るようにした。なお、梶島 (1994) と同様に、時間積分には 2 次精度 Adams-Bashforth, 空間差分には 2 次精度中心差分, 圧力の反復計算には SOR 法を採用した。初期条件は Kasagi *et al.* (1992) の DNS データベースを利用し、乱流場の平均流速分布と乱れ強さを与え、一定の圧力勾配と周期境界条件の下、十分に発達した乱流境界層を生成する。

次に「解析領域」では、水と空気の間境界層の相互作用に加えて風波の砕波現象を再現する必要があるため、多相流体場の統一的な取り扱いが可能な CIP 法に Dynamic-SGS 乱流モデルを組み込んだ陸田ら (2000) の数値計算手法を用いた。ここでは、主流方向およびスパン方向に周期境界条件を適用しており実海域とは異なるが、本研究の目的からすれば問題はない。初期条件は、ドライバー部によって生成された乱流境界層を空気側に作用させるとともに、水側では静水状態とした。

支配方程式は、圧縮性粘性流体に基づく Navier-

* 正会員 博(工) 広島大学助手大学院工学研究科社会環境システム専攻 (兼 地球フロンティア研究システム研究員)

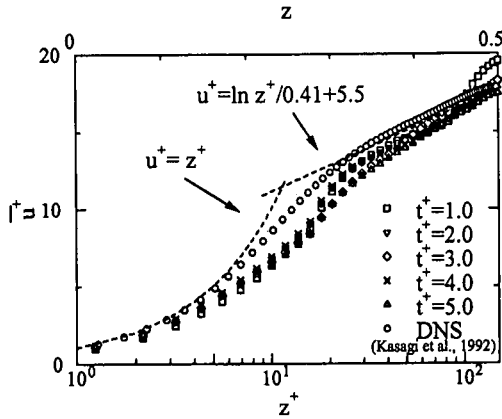


図-2 主流方向の平均速度の鉛直分布

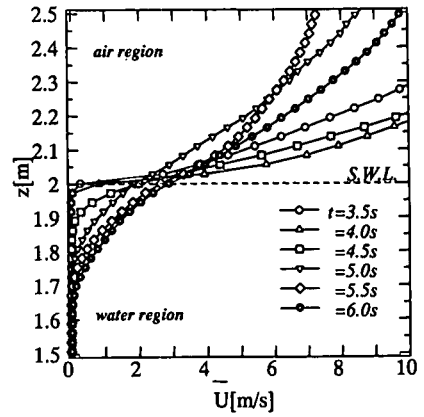


図-4 主流方向の速度の鉛直分布

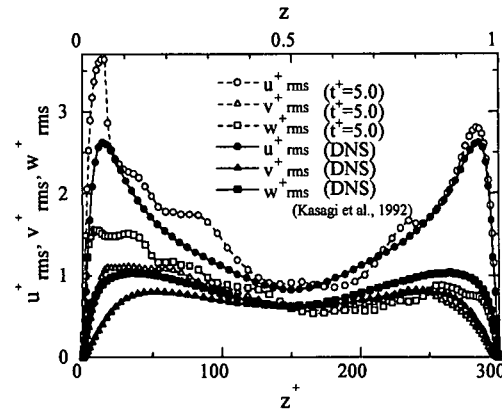


図-3 速度変動強度の鉛直分布

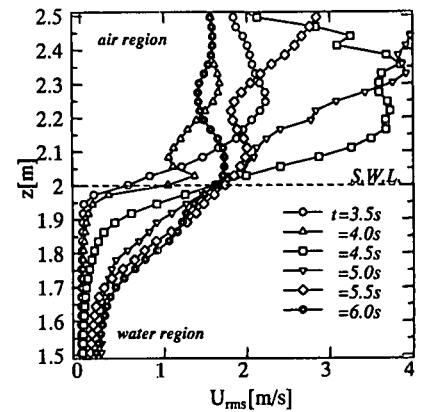


図-5 主流方向の速度変動強度の鉛直分布

Stokes 方程式、密度の保存式、時間発展型の圧力方程式、状態方程式、熱・物質のスカラー量に関する移流拡散方程式である。主流方向、スパン方向および鉛直方向の格子数は、ドライバー部において $32 \times 32 \times 73$ 、解析領域において $34 \times 34 \times 148$ とした。また、解析領域の時間刻みは 0.0001 s であり、解析空間は $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 、初期水深は 2 m とした。

3. 数値計算結果

(1) ドライバー部の気流性状

図-2 は主流方向の平均速度分布を壁法則および対数則と比較したものであり、同時に Kasagi *et al.* の DNS データベースによる結果も示しておく。なお、速度、時間および距離は、壁面せん断応力 τ_w を用いた摩擦速度 $u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho_a}$ と平板間距離 δ で無次元化されている。図から、 $t^+ = 5.0$ 以降において主流方向の平均速度分布は DNS データベースに近い分布型となっていることが分かる。さらに、乱流諸量特性を調べるため、 $t^+ = 5.0$ における速度変動強度 rms の鉛直分布特性を DNS データ

ベースと比較したものを図-3 に示す。底面近傍の roughness block による乱れの生成によって、 $z^+ = 0$ 近傍のそれは DNS データベースと一致していないが、その他の領域においては概ね良い一致を示している。以上のことから、ドライバー部によって生成された気流性状は、一定の時刻以降において十分発達した乱流境界層となっていることが確認できた。そこで、解析領域において初期擾乱の全くない静水面にこの空気側の乱流境界層を作用させることにした。

(2) 風波の平均速度場

図-4 および図-5 は、主流方向の平均速度 $\bar{U}$ および rms 値 U_{rms} の鉛直分布(静水面付近 $\pm 50 \text{ cm}$)を示したものである。図から、波の発生初期の時刻において、自由表面近傍の数 cm 程度の範囲内においてわずかな吹送流が発生し、その後、風波の発達と砕波現象によって、自由表面の吹送流は増大し、その影響範囲も水深約 30 cm の深さまで到達する。また、その時の U_{rms} は、吹送流および風波の発達に伴って自由水面下において卓越する一方で、自由水面上においては減衰している。

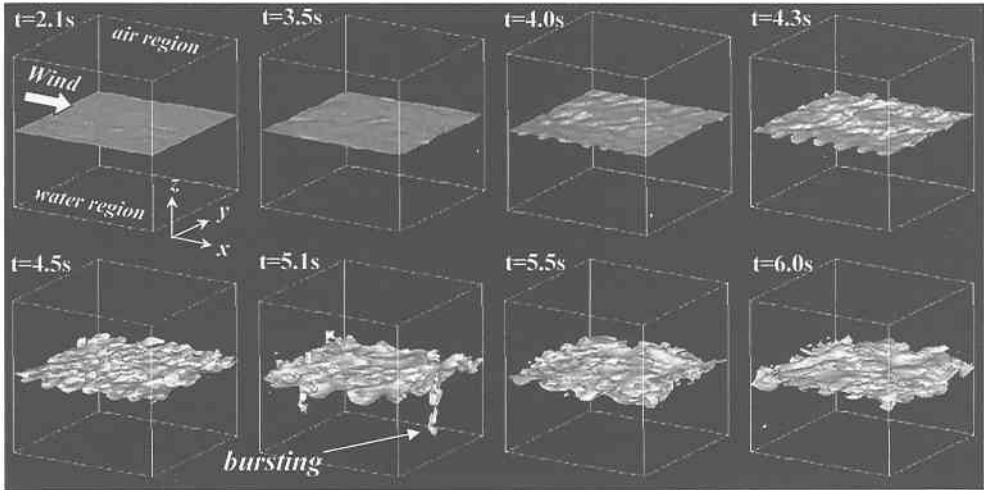


図-6 乱流境界層における風波の発生・発達・碎波過程の波形変化

(3) 風波の発生，発達，碎波過程

図-6は、基準風速 $U \approx 15.0$ m/s の乱流境界層中の風波の空間波形変化を示したものである。風作用開始から 3.5 s 付近までは、いわゆる漣が形成され、その後、個々の波の峰が急峻となって、4.0 s 付近において碎波現象が現れる。さらに、 $t=4.5$ s 以降において、空気側と水側の乱流境界層が結合した風波特有の自由表面混合層が形成されていく。なお、 $t=5.1$ s において表層流体の下層への間欠的な突っ込み（バースト現象）が再現されていることから、空気側と水側の乱流混合層において下向きの運動量輸送が活発になってきていることが予想される。

(4) 風波乱流境界層における秩序構造

図-7は、それぞれ $x-z$ 断面（スパン方向中央 $y=2.0$ m）、 $y-z$ 断面（主流方向中央 $x=2.0$ m）、 $x-y$ 断面（静水面 $z=2.0$ m）における空気側および水側の流速ベクトルと圧力分布を示したものであり、水側の流速ベクトルは便宜上 10 倍している。 $x-z$ 断面の図から、風波の峯の風下側において気流が剝離し、その剝離渦の上端は波打っている。また、低圧場である剝離渦内にあった低速気流は高圧場である風下側の波の背後に再付着し、それとともに波面に沿って上側の高速気流の中へ入っていく。また、 $y-z$ 断面の図から、スパン方向に軸を持つ旋回性の渦が風波表面に多数形成されている。このことから、乱流境界層中の碎波を伴う風波表面では空気側・水側の運動量輸送が活発であり、両層の界面相互作用を無視するは出来ない。さらに、 $x-y$ 断面の図から、細かい筋状のパッチ構造に風波の峯と谷が対応し、谷において低圧場、峯において高圧場となり、それに相応して高速流および低速流の速度分布が形成されている。

(5) 風波表面の過度・レイノルズ応力の分布

図-8は、 $x-y$ 断面（静水面 $z=2.0$ m）における碎波

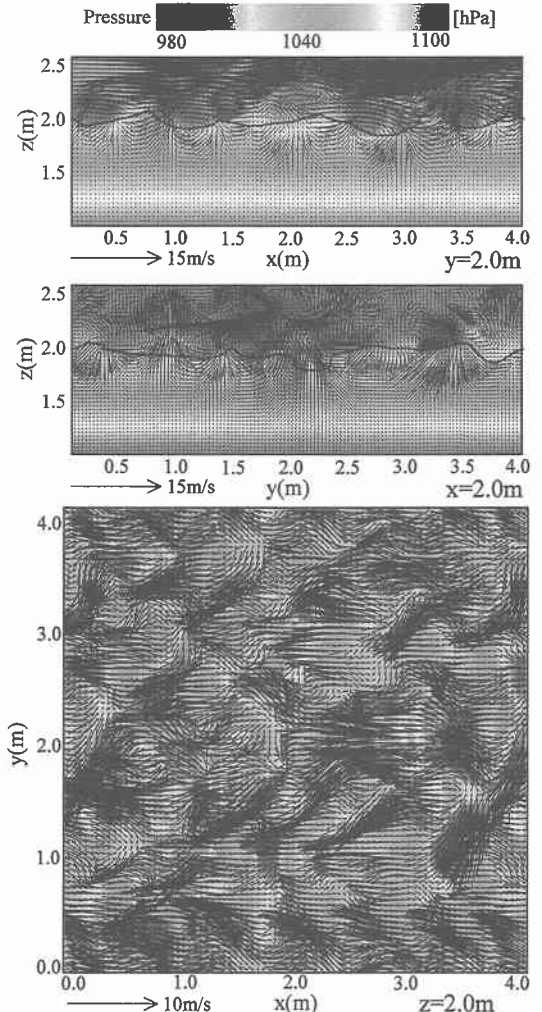
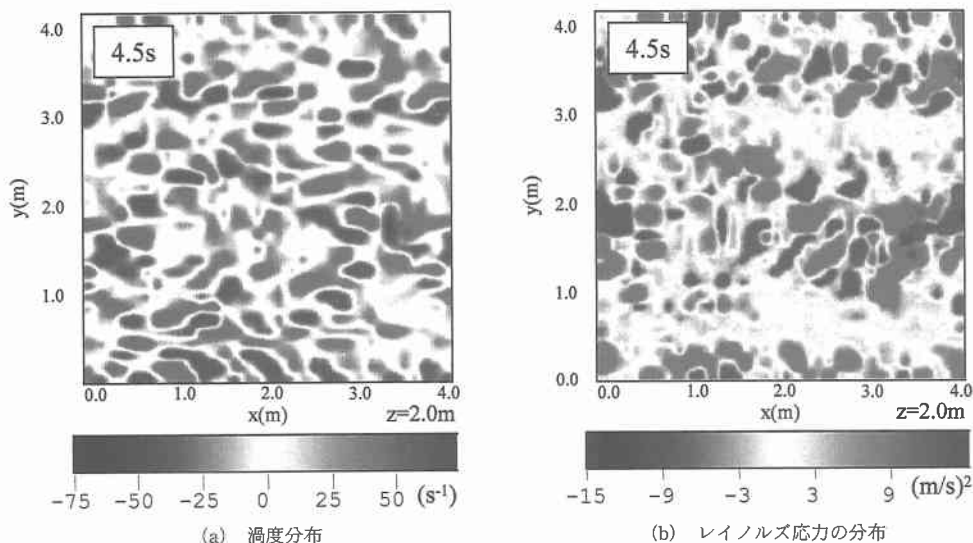
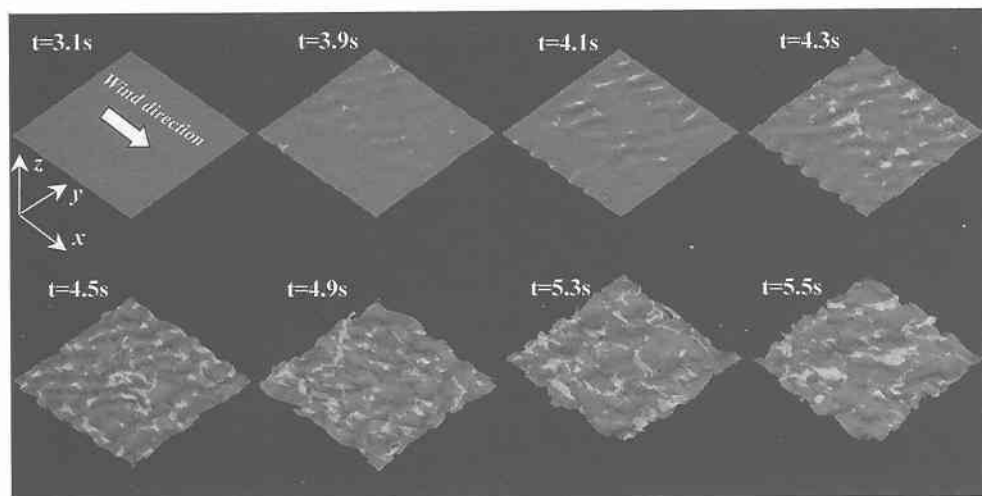


図-7 各スライス断面における空気側・水側の流速ベクトルと圧力分布

図一8 $x-y$ 断面における風波表面の乱流構造

図一9 乱流境界層における連行気泡の組織的構造の時間的变化

後の風波表面の渦度 (z 軸周り ζ) とレイノルズ応力 ($-u'u'$) の空間分布を示したものである。図から、風波表面には正負の渦度が多数形成され、しかもその分布形態はかなり不規則である。また、レイノルズ応力 ($-u'u'$) の正負はパッチ状に細かく分布しており、風波表面を介して空気側と水側の運動量輸送が活発であることを示している。従来の風波計算 (例えば、S. Komori, 1993; P. Lombardi, 1996; L. Shen, 1999) では、自由表面変動をゼロもしくは微小とした取り扱いがほとんどである。しかしながら、実際には風波表面は碎波による連行気泡や海水滴が生成され、それらは乱流境界層における乱流諸量、運動量やスカラー輸送に大きな役割を果たしているため、本数値計算のようなアプローチによって、これら

の運動諸量を見積もることが重要であると言える。

(6) 連行気泡の組織的構造とスカラー輸送

図一9 は、碎波を伴う風波乱流境界層内の連行気泡の挙動を示したものであり、明るい部分が気泡領域を表している。図から、約 4 s 前後より碎波による白波が立ち始め、スパン方向に軸を持つ切れ切れの微小気泡が多数出現する。その後、風波表面に 2 次的に形成された縦渦 (図一7) によって、主流方向と平行な軸を持つリブ構造に対応した気泡分布へと遷移し、それらは結合して大気泡へと成長していく。このような高渦度層内の連行気泡の構造形態は、自由せん断乱流場に見られるものと酷似しており、風波表面の下向きバースト現象 (図一6) やガス交換等に深く関わっているものと推察される。

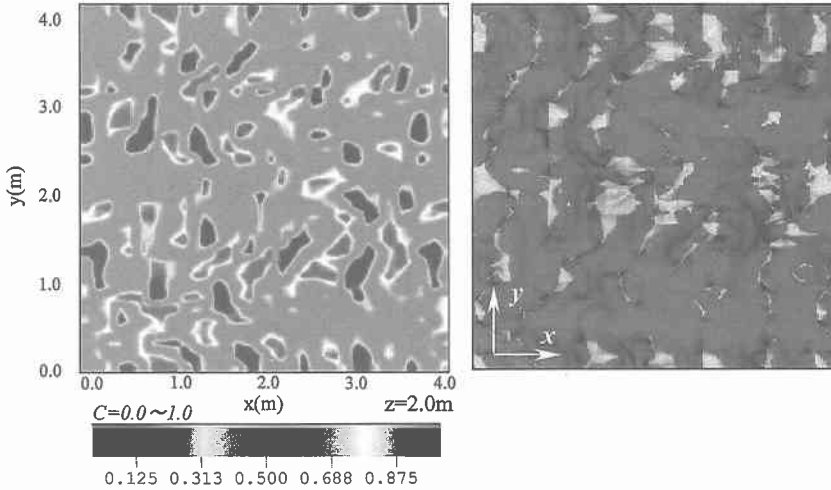


図-10 風波表面における熱・物質スカラー輸送と連行気泡の関係

そこで、パッシブスカラー輸送方程式を用いてスカラー濃度分布の時間発展計算を行い、風波表面における熱・物質のスカラー濃度を検討した。なお、空気側・水側における初期のスカラー濃度 C を便宜的にそれぞれ $C=1, 0$ とした。図-10 は、 x - y 断面（静水面 $z=2.0$ m）における連行気泡とスカラー輸送との関連性を示したものである。なお、右図が気泡分布、左図がスカラー濃度 C の分布を表している。図から、砕波によって気泡が取り込まれる領域においてスカラー濃度も高くなる傾向にあるが、すべて対応している訳ではない。これは、図-8 に示したように、崩れを伴わない風波表面下においても組織的な渦構造が存在し、かつ乱流境界層内におけるレイノルズ応力の時空間的な変動によって流体の表面更新が行なわれるためである。

4. おわりに

本研究では、風波表面近傍の空気側・水側の乱流境界層における乱流構造や連行気泡の組織構造、これらと熱・物質スカラー輸送との関係を明らかにするため、数値風洞水槽を開発し、以下に示す主要な結論を得た。

1. 風波の発生・発達・砕波過程において、風波はその位相に沿った流速や圧力変動を気流から受けており、それらの秩序構造が明らかとなった。
2. 風波表面のレイノルズ応力はパッチ状に細かく分布しており、砕波を伴う風波表面の運動量輸送において無視できない。

3. 風波乱流境界層における連行気泡の挙動は、スパン方向に軸を持つ切れ切れの微小気泡と縦渦による主流方向のリップ構造に対応した気泡の両方が相互作用し、バースト現象を励起している。
4. 砕波によって気泡が存在する領域でスカラー輸送は活発であるが、崩れを伴わない風波表面の更新渦による輸送形態もあり、それらはレイノルズ応力に関係している。

謝辞：本論文は、造船学術研究推進機構および地球フロンティアの成果であり、ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 梶島岳夫 (1994): 対流項の差分形式とその保存性, 機論, 第 60 巻, 574 号, pp. 2058-2063.
- 陸田秀実, 河合ひろみ, 安田孝志 (2000): Dynamic-LES 乱流モデルを用いた砕波後の連行気泡と乱流特性に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 171-175.
- Kasagi, N., Tomita, Y. and Kuroda, A. (1992): Direct numerical simulation of passive scalar field in a turbulent channel flow, J. Heat Transf., Vol. 114, pp. 598-606.
- Komori S., R. Nagaosa, Y. Murakami, S. Chiba, K. Ishii and K. Kuwahara (1993): Direct numerical simulation of three-dimensional open-channel flow with zero-shear gas-liquid interface, Phys. Fluids, 5(1), pp. 115-125.
- Lombardi, P., V. D. Angelis and S. Banerjee (1996): Direct numerical simulation of near-interface turbulence in coupled gas-liquid flow, Phys. Fluids 8(6), pp. 1643-1665.
- Shen, L., X. Zhang, D. K. P. Yen and G. S. Triantafyllou (1999): The surface layer for free-surface turbulent flows, J. F. M., Vol. 386, pp. 167-212.