

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 年度～2010 年度

課題番号：20560482

研究課題名（和文） 水面の位置を陽的に扱う新しい3次元数値風洞水槽の開発

研究課題名（英文） Development of a 3D numerical wind wave tank using an explicit method of water surface location

研究代表者

水谷 夏樹 (NATSUKI MIZUTANI)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：50356036

研究成果の概要（和文）：

本研究では風波の発達を数値的に再現する数値風洞水槽の開発を試みた。過去の研究成果から、水面において速度勾配が極めて大きいことが分かっており、その解決策として二種類の方法について考えていたが、いずれの方法も満足する精度を得ることは出来なかった。一方で、モデルの検証のために行っていた可視化実験からは、気流の剥離が運動量の輸送をコントロールしているという事実が明らかとなり、風波の自己調整機能に気流の剥離が強く関与していることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Development of a 3D numerical wind wave tank was tried to compute air flow, water flow and wind waves. From previous results, it has been found that there is large gradient of velocity at water surface. In this study, two explicit methods to treat water surface were proposed, but the numerical model using the methods didn't have enough accuracy. From visualization experiments carried out to be compared with numerical results, it was found that air flow separation over wind waves controlled momentum transfer between air side and water side. This result suggests that air flow separation strongly affects self control of development mechanism of wind waves.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：風波，気流の剥離，運動量輸送，数値風洞水槽，可視化実験，自己調整機能

1. 研究開始当初の背景

海洋における風波の研究は、地球科学、流体力学的な観点のものから波浪推算などの防災工学的な観点のものまで幅広い。研究手法も理論計算や室内実験、現地観測、人工衛星画像を用いた研究まで多岐にわたる。

風波に関する数値流体力学的な研究も数多く行われており、DNS だけでなく気液混層流場に適した LES などの乱流モデルも多く開発されている。また、自由表面を有する数値計算モデルは、界面捕獲スキームの開発が研究対象となっているが、大きく分けて密

度関数型の方法と距離関数型の Level-set 法などが挙げられる。これらのスキームでは様々なテクニックが用いられ、密度界面の厚さを限りなくゼロに近づけるように工夫が重ねられている。

気相と液相の相互作用を考慮する目的から、両者を一方程式で解く方法が主流となっているが、密度界面の厚さをゼロに近づけるにつれて、界面を挟んだ各諸量の微分値は必然的に気相における格子点と液相における格子点の値を用いて微分が行われるようになる。

申請者は、過去の研究において水面から±1mm 以内の気流と水流の可視化計測を行い、その速度のオーダーが2桁も異なることを実験的に示した。この結果に基づけば、界面を挟んだ微分は正しい値を与えるとは考えることができず、格子点を非構造格子にするなどによって水面位置に確実に計算格子が来るように配置するスキームの開発が必要であると考へた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、水面を密度関数などで陰的に扱うことなく、計算格子が確実に水面位置に来るように配置した数値モデルの開発を行うことが目的である。また、界面付近の気流速度場、水流速度場の速度分布を明らかにし、移動する界面位置での表面移動速度を与えるモデルを構築する。さらに数値モデルの精度を検証するために界面ごく近傍の流れの構造を実験的にも明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

水面位置を陽的に扱うスキームは、(1)矢部ら(2003)によって開発されたソロバン格子の導入を試みた。また、(2)密度関数の値から格子内における界面位置を特定し、界面位置における表面移動速度を気流場、水流場双方から連続するように外挿して与え、界面を挟んだ微分を界面位置において行うようにした。

一方、可視化実験については、界面ごく近傍の気流速度場、水流速度場の PIV 計測を行い、特に風波が発達した状態で波面上の気流が波面から剥離する現象について詳細に検討を行った。

4. 研究成果

スキームの開発は、まずソロバン格子の導入について試みたが、逐次移動するソロバン格子上的物理量を時間発展させる際に、定型格子上的物理量を移動させる必要がある。これらの移動された物理量から再配置されたソロバン格子上に再び物理量を移動させて時間発展を行ったが、移動の度に空間補間が介在すること、また計算時間の損失が大きく、

計算精度的にも実用的にも十分なスキームの開発には至らなかった。

次に水面位置を陽的に特定し、水面での移動速度を外層によって与える方法を試みた。これまで比較的低風速の実験結果から、水面ごく近傍の気流、水流場についてその分布特性について明らかにしてきたが、風波が発達する様な風速域においては水表面付近の乱流が強く発達し、水面の両層から表面移動速度を外挿するスキームを構築することができなかった。特に気流が剥離するような場合は、気流速度分布特性が大きく変化するが、その発生要因と発生頻度が明確でないため、気流の剥離に応じた表面移動速度が空間的に分布を持つことも原因となった。

一方、可視化実験からは風波の発達に伴い **図1**のような波頂部風下側に気流の剥離現象を明確に捉えることができた。

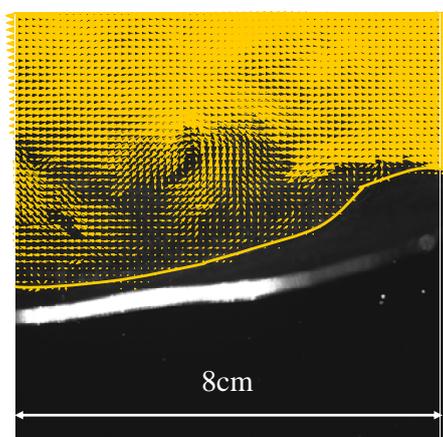


図1 気流が剥離する様子(P06/case06)

これらの実験は、全長 8m、幅 0.2m、水深 0.45m、通風部の高さ 0.25m の実験風洞水槽を用いて行われたものであり、**図1**は気流の吹き出し口から 5.15m のところで計測された $U_{10}=17.6\text{m/s}$ のケースの撮影画像と PIV による気流速度分布である。

気流は図の右から流入しており、波頂部を超えると波面から剥離して一部が波の振幅程度のスケールを持つ渦を形成している。波頂部より上層を流れる気流速度に比べれば剥離域の波面近くはほとんど気流が流れておらず、剥離の発生によって水面近傍の速度分布が大きく異なることがわかる。当然、水面に作用するせん断力は減少し、形状抵抗の値にも影響が生じることは容易に推察できる。

そこで本研究ではこの気流の剥離現象をマクロ的に捉え、計測された全 6 ケースのうち風波がある程度発達した 4 ケースの合計 5 つの計測点において気流の剥離が発生する頻度を目視によりカウントした。

図2に気流の剥離の発生頻度と風波レイノルズ数、 R_B (Toba ら, 1986)の関係を示す。剥

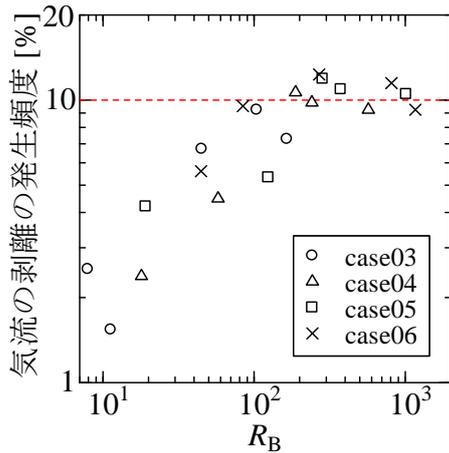


図2 気流の剥離の発生頻度と R_B の関係

離の発生頻度は R_B の増加とともに上昇し、概ね $R_B = 200$ 以上でどの風速のケースも 10% 程度に収束している。Toba ら(2006)では、 $R_B = 200 \sim 1000$ において碎波が発生し始め、風波の乱流境界層への遷移が起こると解釈されており、結果として水面の抵抗係数 C_D が増大しないと述べている。

そこで図3に水面の抵抗係数 C_D と R_B の関係を示す。 R_B に対する C_D の増加は、ばらつきはあるものの、やはり $R_B = 200$ 以上で一定値に収束しており、剥離の発生頻度の変動と対応している。風波の自己調整機能は気流と水面下の乱流が風波を通じて結合した結果と考えられており、その中でも碎波によるエネルギーの各成分への再分配機構は大きいと考えられている。本研究において計測した条件では、P07(吹送距離 7.30m)において高風速時に若干の気泡の連行が確認でき、風波の碎波が確認できたが、ほとんどの条件では碎波は確認できなかった。

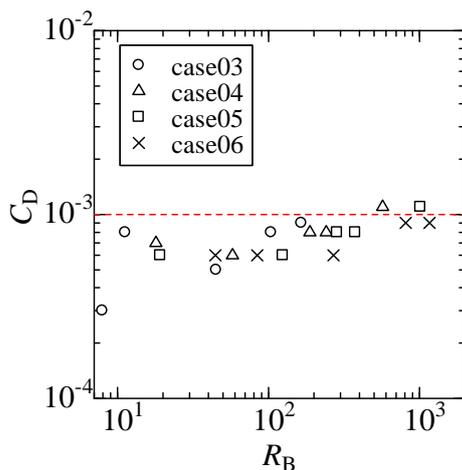


図3 水面の抵抗係数 C_D と R_B の関係

次に示す図4は、Srokosz(1986)による深海波の碎波率、 B と R_B の関係である。この碎波率、 B は、基本的には水位変動スペクトルの

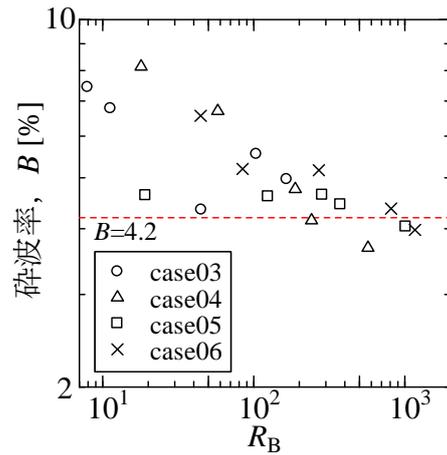


図4 風波の碎波率 B と R_B の関係

4次モーメントを正規化したものであり、目視による碎波と対応するものではない。 $R_B = 200$ 以上で $B = 4 \sim 5\%$ の値を取っており、碎波率も一定値に収束しつつあるように見える。

図5は、波形勾配と R_B の関係について示したものである。波形勾配については明確に $R_B = 200$ 以上で $H_{1/3}/L_{1/3} = 0.125$ に収束している。小規模な実験水槽の場合、 R_B が小さい領域は波高、周期ともに小さく表面張力の影響など注意が必要だが、波が比較的発達する $R_B = 200$ 以上の領域で一定値となるのは事実であり、気流の剥離による風波の自己調整機能の結果であると考えられる。

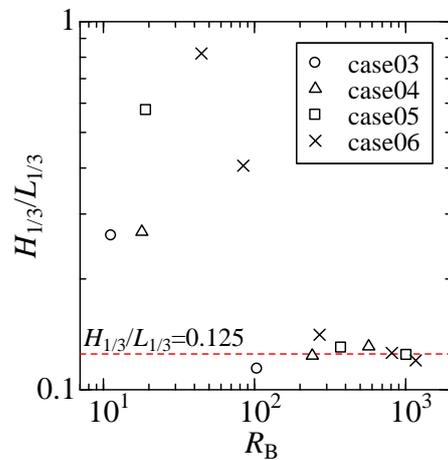


図5 波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ と R_B の関係

以上のことより、 R_B が 1000 以下の領域においては、風波の自己調整機能は碎波による波の発達の抑制や流れ、乱れの生成、波動成分のエネルギーの再分配機構ではなく、波面上から気流の剥離が生じることで、気流から水面への運動量輸送量そのものを調整して波の発達を調整していると考えられる。

また申請者は、より長い吹送距離における風波の発達や碎波の影響を検討するため、全

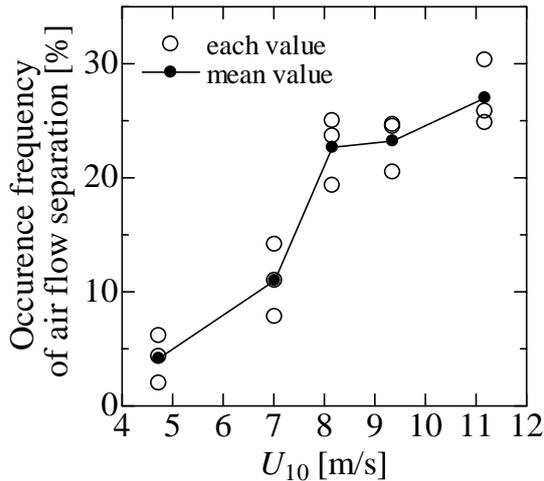


図6 気流の剥離の発生頻度と U_{10} の関係

長 20m の大型水槽を用い、吹送距離 12m において同様の実験を行った。

図6に気流の発生頻度と U_{10} の関係を示す。吹送距離 12m における気流の剥離の発生頻度は、風速とともに増加し、おおよそ 30% にまで達した。 $U_{10} = 8\text{m/s}$ の付近で発生頻度が単調増加から上方へずれており、水槽内における風波を観察すると、この風速条件では碎波が発生し始めていることがわかった。

図7は波形勾配と U_{10} の関係を示したものである。気流の剥離が一時的に増大する $U_{10} = 8\text{m/s}$ 付近では、波形勾配の増加が碎波の発生によって一時的に鈍化している。

Kawai(1982)は、気流の剥離と波形勾配の関係を示しているが、必ずしも剥離の発生を波形勾配で整理できるわけではなく、むしろ波頂部付近の局所的な水面勾配によって支配されていることを示している。これらの結果は、水谷ら(2002)でも同様の傾向が確認されており、碎波による局所的な水面勾配の増加が気流の剥離の発生頻度を増加させたもの

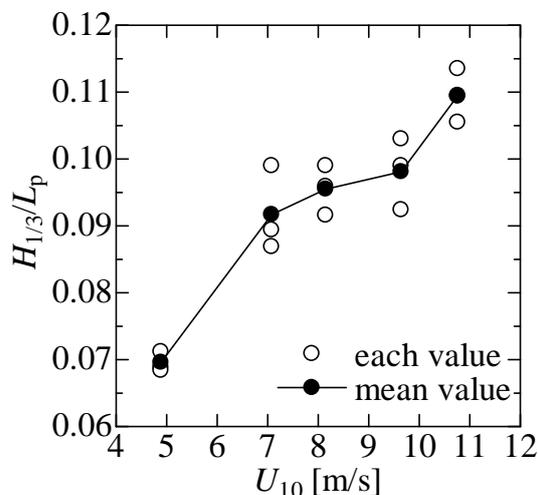


図7 波形勾配と U_{10} の関係

と推察することができる。

Powell ら(2003)がサイクロンの中で生じる高風速時において海面の抵抗係数が減少することを示しているが、本研究の結果からそのメカニズムが気流の剥離であることが推測される。 $R_B = 200 \sim 1000$ において見られた気流の剥離と水面の抵抗係数、また波形勾配との関係については実験的事実であるが、これを碎波が伴うような高風速時にそのまま当てはめて考えられるかどうかについては、議論の余地があり、さらに実験データを揃えていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 水谷夏樹, Edwin A. Cowen, 宮島昌弘, 風波上の気流の剥離の発生頻度とその要因について, 土木学会論文集B2(海岸工学), 査読有, Vol. 65, No.1, 2009, 76-80.
- ② 水谷夏樹, 水面の抵抗係数に及ぼす風波界面上の気流の影響, ながれ, 査読有, 第30巻, No.3, 2011, 印刷中.
- ③ 水谷夏樹, 鍛冶允啓, 宮島昌弘, 碎波を伴わない風波の自己調整機能に対する気流の剥離の役割について, 土木学会論文集B2(海岸工学), 査読有, Vol. 67, 2011, 印刷中.

[学会発表] (計 1 件)

- ① Mizutani, N. and E. A. Cowen, The relationship between occurrence frequency of air flow separation over wind waves and statistic values of wind waves, The 6th International Symposium on Gas Transfer at Water Surface, 2010.5.19, Kyoto, JAPAN.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水谷夏樹 (NATSUKI MIZUTANI)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号: 50356036