

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19710153

研究課題名 (和文) 気液混合境界層に着目した気象-海象場応力相互作用モデルの開発

研究課題名 (英文) Development of interaction model for mixing layer between gas and liquid

研究代表者

小笠原 敏記 (OGASAWARA TOSHINORI)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：60374865

研究成果の概要 (和文)：水面勾配を用いた海面せん断応力より求めた抵抗係数は、風の吹き始めにおいて既存の経験式よりも強風下になると約 1 オーダー大きな値を示すことを明らかにし、波浪推算や海流モデルにおける一様な抵抗係数の取り扱いには検討の余地があることを示唆した。さらに、MPS 法特有の圧力振動問題に対して、圧力のポアソン方程式のソース項の修正に着目した手法を取り込み、従来の MPS 法との比較を行った。二相連成解析において、圧力振動が力の相互作用および弾性体の変形に強い影響を与えることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Based on wave profiles obtained by analysis of image which were captured by a high speed video camera, we investigate the characteristic on development of waves under blow beginning. It was found that the drag coefficients determined by the shear-stress become one-order larger than the experience formula. Further, for unreal pressure oscillation in fluid particles due to MPS method, an algorithm which corrected the source term in the Poisson equation are compared with original MPS method. As a result, we made clear that the oscillation of pressure strongly affects the structure deformation because the fluid force does not accurately act on the elastic body.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	0	800,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	360,000	2,360,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 自然災害科学

キーワード：風波, MPS, 連成解析

1. 研究開始当初の背景

風応力が作用する海面直下で発達した気液混合境界層は、大気・海洋間での熱・エアレーション交換、溶存酸素、プランクトンあ

るいは漂砂などの物質輸送の役割を果たし、沿岸海洋の環境に大きな影響を与えている。特に、海面が白波に覆われるような強風下の気液混合境界層で生成される強吹送流は、高

潮災害や大規模な海浜変形の要因となる。また、潮流が弱く停滞性の強い内湾の水質環境を激変させる役割を担っていることも報告されている(橋本ら, 2000)。

これまでも気液混合境界層のメカニズムを解明するために多くの研究が行われて来た。Mitsuyasu(1985)および Melville・Rapp(1985)は、風から吹送流に供給された運動量の相当部分が砕波応力を介して吹送流に輸送されることを室内実験より明らかにした。Kitaigrodskiiら(1983)は、砕波の影響を受ける水面直下に、対数則層によるエネルギー損失率を2桁以上も上回る非対数則層が形成されていることを現地観測より明らかにし、有義波高の数倍程度の深さにも及ぶことを報告している。境界層の輸送・混合現象との関連で研究を進めた Terrayら(1996)によって、砕波を伴う風波下には砕波の直接作用を受けて強い渦粘性が生じる Breaker layer の存在を明らかにした。表層での吹送流の鉛直分布の推算には、この層内で行われる応力相互作用をどのように定式化するかが問題であり、その鉛直分布のモデル化も実験結果を基に Craig(1996)や Bourassa(2000)によって試みられて来た。

しかしながら、風波砕波自体の特性が未解明なこともあり、実際に砕波応力がどのように気液混合境界層の運動量や乱流エネルギーの輸送過程に関わっているのか不明であるため、吹送流の鉛直分布などの内部構造に大きな疑問が残されたままである。特に、砕波や気流のはく離による激しい海面の変動と気泡を伴った強乱流場が生成される表層では、現地観測における流速計測が不十分となる。その点では、一定条件下で風波場を再現できる室内実験は有利であるが、閉境界水槽条件に支配された固有の戻り流れが必然的に生成されるため、風応力によって生じる真の吹送流を計測することができず、室内実験においても吹送流の鉛直分布の実態に不明な点が多く残されている。

そこで申請者は、吹送流の流量の連続条件を満たし、戻り流れの影響を取り除くために、水槽底面に両端開境界のダクトを設置した自然循環式二重床風洞水槽を構築した。その結果、非砕波から白波砕波までの多様な海面状態における海水駆動力作用と攪乱による渦粘性作用の鉛直構造を明らかにし、物理法則に基づいた定式化を行った。特に、表層で輸送される流量が、吹送流の全流量の2~3割を占めていることを示し、その流速の鉛直分布がベキ則に従う分布を持つことを明らかにした。本研究では、こうした実験結果が生成される気象条件を明確にするため、風波砕波の駆動力と風応力の下方伝達を担う渦粘性の鉛直分布効果を局所的に評価する3次元気象-海象応力相互作用モデルの構築

を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究は、これまで行って来た室内実験の成果を基に、強風下海面境界層のダイナミクスのモデル化を行い、気象-海象場応力相互作用モデルを開発する。さらに、実験で得られた強吹送流が発生する風応力条件の定式化を試みるものである。

(1) 海面バースト層内の吹送流駆動力に及ぼす砕波応力のモデル化

従来の砕波応力のモデル化は、 $k-\epsilon$ 乱流モデルや Mellor-Yamada 乱流モデルの海面境界条件に砕波の効果を与えて渦粘性係数に反映させている。本研究では、吹送流の流速成分を平均流成分、平均流起源の乱流成分および粘性流体中の波動運動と砕波起源の乱流成分に分類する。そして、基礎式となる Reynolds 方程式に平均流起源の乱流成分をブシネスクの渦粘性仮定として適用し、波動・砕波による乱流成分を砕波応力項として付加することによって砕波応力のモデル化を行う。

(2) MPS 法を用いた海象場数値シミュレーションの開発

上述の砕波応力モデルを個々の水粒子にスカラー量として与えることが可能な粒子法 (MPS: Moving Particle Semi-implicit method)を用いて、海象場の数値シミュレーションの開発を行う。バースト層内のダイナミクスを詳細に解明するため、水深方向は有義波高の5倍程度、水平・奥行方向は代表波長の2倍程度とした局所スケールの空間条件とする。

(3) 海象場数値シミュレーションの精度検証のための PIV 画像解析

PIV 画像解析によって求めた流速値と 2. で開発したモデルの計算値との比較検証を行う。精度検証に用いる実測データは、大阪産業大学(海岸工学研究室)所有の風洞水槽および高精度 PIV 画像計測装置によって撮影された気液境界層の画像データを提供して頂く予定である。そのデータ解析は、申請者が開発したサブピクセル移動量を考慮した階層的相関法 PIV を用いる。

(4) 気象-海象場応力相互作用モデルの構築

実海域への拡張を図るため、気液混合境界(バースト)層内の応力相互作用(風応力・砕波応力など)を考慮した三次元気象-海象結合モデルの構築を試みる。本モデルの構築によって、バースト層内の流速分布が強流速勾配なベキ側に従うという実験室レベルの事実が実海域を想定した場で必要となる気象条件を明確にし、その支配因子の定式化を行う。気象場の数値計算手法には、移流項に CIP, 乱流モデルに LES を組み込んだ差分法 (FDM: finite differential method)を用いて、

計算負荷を軽減する。

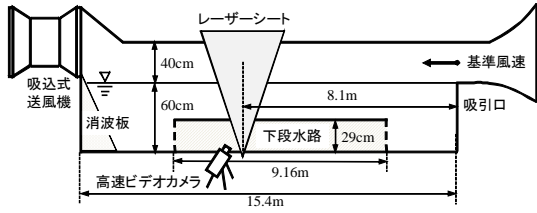


図-1 風洞水槽の概要

3. 研究の方法

次に挙げる項目に対して研究を行った。

(1) 画像データを基にした風の吹き始めにおける波の発達特性

風波の画像データは、図-1に示すような長さ15.4m、高さ1.0m、幅0.4mの3面ガラス張り風洞水槽（岐阜大学所有）の吸引口から8.1mの位置の側面に設置した高速度ビデオカメラ（撮影速度：60fps、解像度：480×480 pixel、フレーム数：2,048枚）で撮影された。その空間解像度は0.056cm/pixelである。また、吸引口での基準風速 U_r を6.7、10.4および15.1m/sの3通りとし、風の吹き始めから34.1秒間の撮影によって得られた画像である。それらの画像データを基に、以下の手順で風波の水面を抽出する。

- ① 原画像を画像解析ソフト Image J を用いて0~255の輝度値で表したテキストデータに変換する。
- ② 気体と液体の界面を鮮明にするため、モード法による2値化処理を行う。
- ③ 波形以外の雑音は、孤立点収縮や穴埋め処理の論理フィルタリングによって除去する。
- ④ 輝度値0（黒）から1（白）に変化する画素の位置を読み取ることによって波形を検出する。

なお、風速の増大に伴い碎波によって水面を判定することが困難な画像も含まれたが、風速6.7m/sでは、抽出された波形の有効フレーム数は2,048枚中1,401枚（全体の68%）、風速10.4および15.1m/sの強風下では、2,048枚中999枚（全体の49%）および865枚（全体の42%）であり、その波の発達の傾向を調べる上で特に問題は無かったと考える。

(2) MPSを用いた二相連成解析の開発

MPS法は、自由表面を含む非圧縮性流れの複雑な流動を計算する目的で開発された。その特徴は、勾配、発散およびラプラシアンを微分演算子に粒子間相互作用モデルを用いて、微分方程式を離散化する点と圧力計算に密度の時間微分がゼロであることを利用し

て、計算点の密集度を表す粒子数密度を使用する点にある。

流体場には連続式およびN-S方程式を用いる。構造物には応力とひずみの関係を線形とした弾性体の支配方程式を用いる。弾性構造物を有限個の粒子で表わし、各粒子に座標、速度、角度および角速度の自由度を与える。

二相連成解析アルゴリズムについて、最初に、各時間ステップにおいて、流体粒子と弾性体粒子の全粒子を区別することなく非圧縮性流れとして計算を行い、新しい時刻の速度と位置を求める。NS方程式の粘性項と重力項を陽的に、圧力勾配項を陰的に計算する。圧力のポアソン方程式の解法には、反復法の一つであるICCG法を用いる。次に、上述した動的解析モデルを用いて、弾性体粒子の相対位置の関係を元の初期相対位置に戻す。このとき、弾性体の変形は流体運動に比べて微小であるため、弾性体から流体への作用を無視した構造解析が可能である。最後に、弾性体粒子の位置の修正が終了したら次の時間ステップに進む。計測終了時間まで上記の流れで繰り返し計算を行う。

4. 研究成果

研究方法で挙げた(1)および(2)における主要な研究成果を以下に述べる。

図-2は、各風速 U_r における水位変動の増加率の時間変化である。風速6.7m/sでは、波

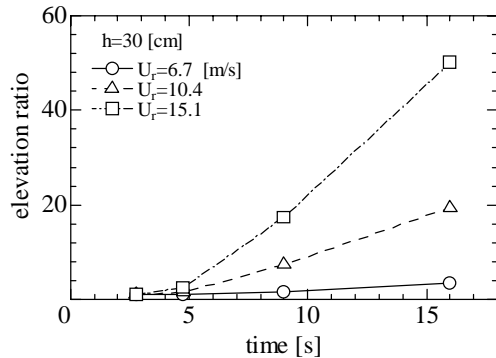


図-2 各風速 U_r における水位変動の増加率の時間変化

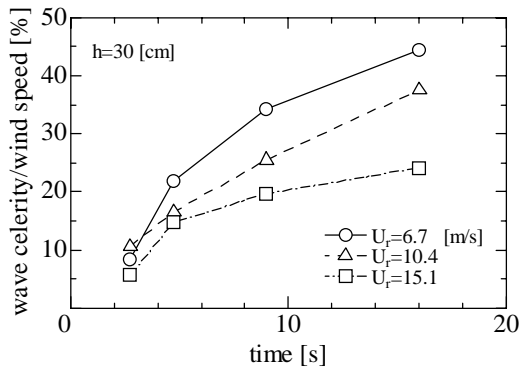


図-3 各風速 U_r に占める波速の割合の時間変化

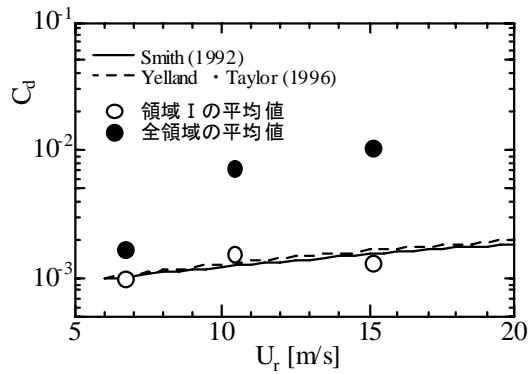


図-4 流体力によって倒壊した構造物が他の構造物に衝突し破壊される様子

は余り発達しないが、白波砕波を伴うような強風下の 15.1m/s では、領域IVになると波が約 50 倍に成長していることから、風の吹き始めから 20 秒間という短時間に表面張力波から白波砕波へと波の状態が急激に変化しながら発達している。つまり、風速の規模によって水面に及ぼす風の役割が異なるのではないかと推測される。そこで、各風速 U_r に対する波速の占める割合の時間変化を図-3に示す。風速 6.7m/s では、波速の占める割合が 40% を越えているが、風速 15.1m/s では、風速 6.7m/s の半分の 20% 程度に留まっていることがわかる。以上より、風の吹き始めの短時間における風の応力の作用は、微小砕波を伴う弱風下では、波高の発達と共に波の輸送に大部分を費やす。しかし、白波砕波が発生するような強風下では、急激な波高の発達と共に砕波を伴う波自体の変形に費やされるものと推察される。

画像解析で抽出した波形より算出した海面せん断応力と既存の観測等による抗力係数との比較を行い、画像解析による海面せん断応力の妥当性を検証する。抗力係数 C_d は、

$$C_d = \frac{2 \rho_w g h}{3 \rho_a U_{10}^2} I \quad (a)$$

と表すことができる。ここで、 ρ_a は空気 の密度、 U_{10} は海面からの高さ 10m の風速であり、本研究では $U_{10} \doteq U_r$ と見なした。式 (a) を用いて各領域の個々の波の峰に着目した波形勾配から求めた抵抗係数の平均値 C_d と風速 U_r の関係を図-4に示す。また、全領域の平均値の比較として、領域 I (風の吹き始めから 2.0 秒~3.5 秒) の抵抗係数を図中白丸で示す。なお、図中の実線および破線は Smith ら (1992) および Yelland・Taylor (1996) のそれぞれの経験式である。画像情報を基に求めた抵抗係数の平均値は、経験式と同様に風速に伴って増大する傾向を示すが、強風速 10.4m/s および 15.1m/s では、その値が経験式よりも 1 オーダー近く過大な評価となる。しかし、吹き始め約 3 秒間の現象に着目すれば、経験式

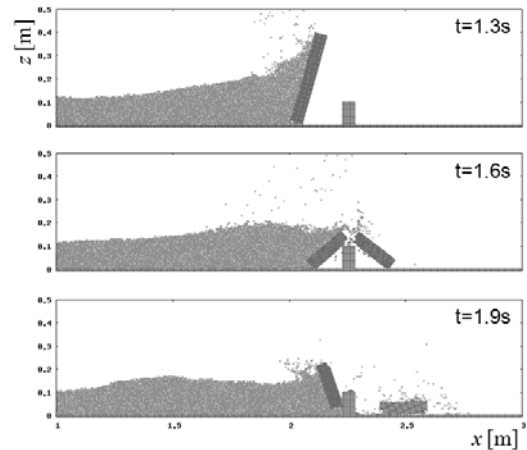


図-5 流体力によって倒壊した構造物が他の構造物に衝突し破壊される様子

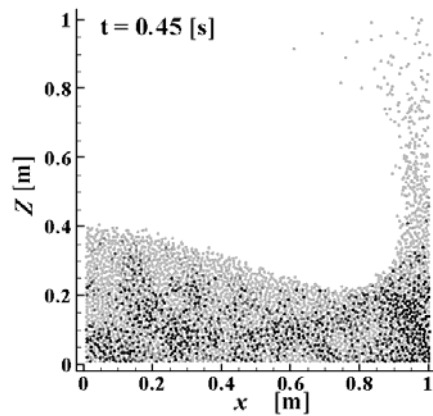
と良く一致していることがわかる。式 (a) で表される抵抗係数は、風速および水深が一樣なため、水面勾配に強く依存することは明白であるが、本研究で用いた画像の水平方向の距離は、26.9cm、解析時間は約 20 秒であるため、現地観測に比べて時間的・空間的にも非常に局所的な水位変化を捕らえているのではないかと考えられる。そのため、強風条件下では波の発達が早いため、水面勾配と言うよりはむしろ波形勾配と見なした方が良くもしい。以上より、風の吹き始めと言う特異な条件下の強風下ではあるが、抵抗係数が既存の経験式よりも大きくなる事実は、波浪推算や海流モデルで用いる抵抗係数を一樣な係数として与えることに検討の余地があることを示唆するものと考察される。

次に、MPS 法を用いた二相連成解析の開発に関する主要な結果を以下の述べる。

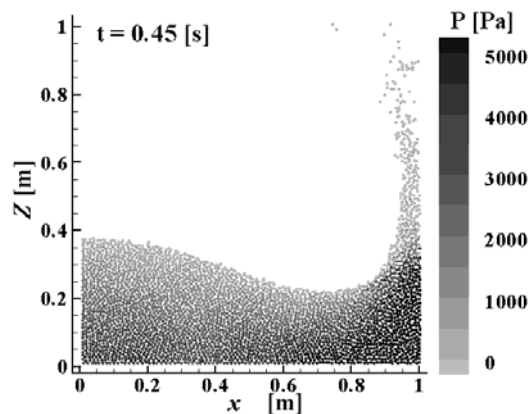
ラグランジュ的な計算点を使用する粒子法の一手法である MPS 法を用いた二相の二次元動的連成解析手法を開発し、流体の衝撃力による構造物の大変形と破壊を伴う解析が可能となった。図-5に示すような構造物同士の衝突による破壊問題にも適用できるので、実験では再現することが難しい現象について、本手法を用いて解析できる可能性を示したと考察される。

さらに、MPS 法で計算される圧力は時・空間的に激しく振動するため、計算が不安定になる場合があり、その振動が連成解析の精度を低下させる恐れがある。そこで、圧力のポアソン方程式のソース項の修正に着目した手法を組み込んだ圧力修正モデル (以下、IP1 モデルと呼称) と従来の MPS 法 (以下、BP モデルと呼称) との比較検討を行った。

図-6 は、ダム崩壊時の水面形および圧力分布について、BP モデルと IP1 モデルとの比較を示す。水面の変形は、概ね同様な挙動を示すが、流体内部の圧力分布は、BP モデルで



(a) BP モデル



(b) IP1 モデル

図-6 従来モデル (BP) と圧力修正モデル (IP1) におけるダム崩壊時の水面変化および圧力分布の比較

は、大部分の粒子が自由表面あるいは負圧となるだけでなく、正圧の部分も滑らかな分布となっていない。IP1 モデルでは、流体内部に自由表面と判定された粒子はなく、圧力の分布が滑らかである。また、BP モデルでは、表面付近で弾けるような挙動の粒子が存在したが、IP1 モデルでは、ほとんど見られず安定性も向上している。

次に、流体の圧力振動が流体と構造物の力の相互作用および構造物の変形に及ぼす影響を検討した。リーフ上に高さ 30cm、厚さ 5cm の断面 2 次元構造物を設置し、その物性値は、ヤング率を $1.0 \times 10^6 \text{N/m}^2$ およびポアソン比を 0.30 とした。

図-7 は、波高 2cm から 7cm までにおける単位幅当たりの流体粒子の力 F_w および構造物粒子が受ける力 F_s の比較を示す。作用反作用の法則より $F_w = F_s$ となるはずであるが、波高の増大と共に F_w が大きくなる。特に、BP モデルでは、 F_w が F_s を大きく上回る。また、各波高での F_s の値も IP1 モデルよりも若干小さな値となることがわかる。

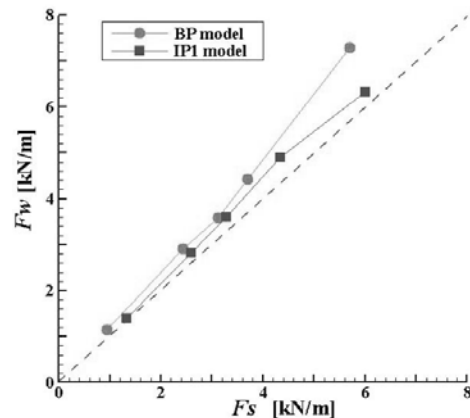


図-7 構造物前面の流体粒子の力 F_w および構造物粒子に作用する力 F_s の比較

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 2 件)

- ① 小笠原敏記、菊地重友、堺茂樹、MPS 法による構造物に及ぼす流体の圧力振動の影響、海岸工学論文集、査読有、第 56 巻、2009、pp. 26-30
- ② 小笠原敏記、菊地重友、佐々木信也、堺茂樹、MPS 法による流体-構造物の動的解析に関する検討、海岸工学論文集、査読有、第 55 巻、2008、pp. 21-25

[学会発表] (計 4 件)

- ① 下屋敷信、小笠原敏記、堺茂樹、風波画像を用いた PIV 解析におけるダイナミックレンジの最適条件の検討、土木学会東北支部技術研究発表会、2010. 3. 6、日本大学 (福島県)
- ② T.OGASAWARA, S.KIKUCHI, S.SAKAI, Dynamic Analysis of Fluid-elastic Solid Interaction Using the Moving Particle Semi-implicit Method, Coastal, Marine Structures and Breakwaters 2009.9.17, ICE, Edinburgh (UK)
- ③ 片山直、小笠原敏記、堺茂樹、画像解析による風波下の海面せん断応力の推定、土木学会東北支部技術研究発表会、2009. 3. 7、東北学院大学 (宮城県)
- ④ 菊地重友、佐々木信也、小笠原敏記、堺茂樹、粒子法による固-液混層場の崩壊と遡上に関する数値シミュレーション、土木学会東北支部技術研究発表会、2008. 3. 8、岩手大学 (岩手県)

[その他]
ホームページ等
<http://www.cande.iwate-u.ac.jp/mizu/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原敏記 (OGASAWARA TOSHINORI)
岩手大学・工学部・准教授
研究者番号：60374865