

段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性

川崎浩司¹・山口 聡²・袴田充哉³

水谷法美⁴・宮島正悟⁵

津波による二次災害を低減するためには、物体の漂流・衝突特性や漂流物体の作用波圧特性を把握することが重要である。しかし、漂流中の物体の作用波圧を検討した研究例はこれまでほとんどない。そこで、本研究では、断面 2 次元場を対象に、固定・非固定状態にある矩形物体に段波が衝突した際の物体の作用波圧特性を、水理実験と数値解析により検討した。その結果、段波と物体、そして物体と壁の衝突の際、作用波圧が急激に増加し、特に底面付近でその値が大きくなること、物体の作用波圧は、段波衝突後、指数関数的に減少すること、漂流した物体が壁面に衝突した際の衝撃波圧は物体に段波が衝突した際の作用波圧よりも大きいことなどが判明した。

1. 序 論

近年、我が国では東海・東南海・南海地震をはじめとする巨大地震に伴う津波災害への警戒心が高まっている。津波災害として、津波力による直接的な一次災害のみならず、津波によって漂流する車体、コンテナ、建材などが沿岸域周辺施設に衝突することにより、より一層被害の拡大化が予想されるなど、津波による二次災害が懸念されている。したがって、津波による二次災害を低減するためには、物体の漂流・衝突特性や漂流する物体の作用波力・波圧特性を把握することが極めて重要である。これまで、固定された構造物に作用する波力・波圧特性に関する研究は水理実験や数値解析により数多く実施されてきた。例えば、固定構造物に作用する波圧特性に関しては、松富(1991)が砕波段波の鉛直壁に作用する波圧分布を詳細に計測し、その波圧特性が砕波後の波圧より大きくなることを示した。また、五十里ら(2005)は、疑似圧縮型粒子法を用いて、鉛直壁に作用する衝撃波圧を数値的に推定している。津波による漂流物に関する研究例として、直立護岸前面に配置された漂流物の動的挙動と衝突力を実験的に検討した池野ら(2001, 2003)の研究、陸上を遡上する津波によって漂流するコンテナの挙動特性と衝突力を水理実験により議論した水谷ら(2005)の研究が挙げられる。しかしながら、津波による二次災害に大きな影響を及ぼす、漂流中の物体を対象に作用波圧特性を検討した研究例はこれまでほとんどない。

本研究では、断面 2 次元場を対象に、固定・非固定時の矩形物体に段波が衝突した際の物体に作用する波力・

波圧特性を、水理実験と固気液多相乱流数値モデルを用いた数値解析により検討する。

2. 水理模型実験

本研究では、段波が矩形物体に衝突した際に作用する波圧・波力特性と物体の漂流特性を解明するために、水理模型実験を実施した。以下に実験装置および実験方法の概要、実験条件について記述する。

アクリル製実験水槽(幅 115.0 cm, 高さ 40.0 cm, 奥行き 20.0 cm)を作製・使用し、水理模型実験を行った。実験水槽の諸元を図-1 に示す。水槽の一端から 15.0 cm の位置の両壁に幅 0.82 cm, 深さ 0.5 cm の溝を削り、そこに厚さ 0.8 cm, 幅 20.5 cm, 高さ 50.0 cm のアクリル板を差込み、これをゲートとした。ゲートで仕切られた幅 15.0 cm, 高さ 40.0 cm, 奥行き 20.0 cm の領域に水を貯留し、ゲートを上方へ急開することにより水柱崩壊に伴う段波を発生させた。なお、ゲートの開閉を滑らかにするために、両壁の溝に 0.02 cm の隙間を設けた。しかし、貯留水が隙間から漏れることが考えられるため、ゲートの壁面と底面にシリコン樹脂を薄く塗布することにより、水漏れ問題を解消した。

まず矩形物体の漂流・衝突特性を把握するために、高速度デジタルビデオカメラ FASTEC IMAGING 製 TROUBLESHOOTER (60 fps, シャッター速度 1/1,200 s) を使用して実験状況を撮影した。模型の詳細については、幅 B_s を 4.0 cm と固定し、高さ H_s と重量を表-1 に示すように設定した。物体の設置状況として、固定・非固定の場合を取り上げ、表-1 に示す計 96 ケースの水理実験を実施した。ついで、矩形物体に作用する水平・鉛直波力 F_x , F_z に関しては、矩形物体に鋼製枠を取り付け、三分力計(共和電業製 LSM-5KBS)を用いて作用波力をサンプリング時間 0.01 s で計測した。なお、三分力計による計測のため、矩形物体と底面の間に数 mm 程度の隙間を設ける必要があった。また、三分力計と矩形物体を一体化しているため、物体が移動し

1 正 会 員 博(工) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

2 正 会 員 修(工) 日本上下水道設計(株)東京総合事務所

3 学生会員 学(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

4 正 会 員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻

5 正 会 員 修(工) 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所

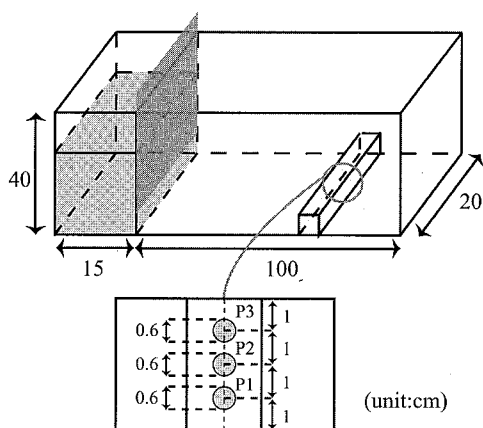


図-1 実験水槽の諸元

ている際の波力を計測することが不可能であり、表-2に示すように、固定物体のみを対象に24ケースの実験を行った。作用波圧に対しては、図-1に図示するように、超小型圧力センサー（共和電業製 PS-05KC）を水槽底面から1 cm 間隔に P1, P2, P3 の計3地点に設置し、固定・非固定の矩形物体を対象に、サンプリング時間 $500 \mu\text{s}$ で作用波圧の計測を行った。実験条件は表-3に示すとおりである。

3. 2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D

本研究で用いた数値モデルは川崎・袴田(2005)が開発した2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic Interaction-2 Dimension version)である。その特徴としては、高精度な移流計算が可能な CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法(Yabe・Aoki, 1991), 非圧縮性・圧縮性流体を同時解析できるようにした拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法(川崎ら, 2001), さらに剛体の並進・回転運動解析法を駆使することにより、気液界面、物体の動的挙動を始め固相・気相・液相の非線形相互干渉を同時に数値解析できるところにある。また、乱流モデルとして、Smagorinsky モデルに基づく LES (Large Eddy Simulation) を採用している。

4. 段波と固定矩形物体の衝突・漂流過程

(1) 水面変動特性

図-2は、水柱高さ H が 20.0 cm 、物体高さ H_s が 4.0 cm の場合で、ゲート前面から $l_s = 70.0 \text{ cm}$ の設置位置に模型を固定したときの計算結果を示したものである。ゲート開放に伴い流出した水塊は、時刻約 0.4 s において矩形物体と衝突している。段波が矩形物体に衝突した

表-1 水面形に関する実験条件

水柱高さ $H(\text{cm})$		15, 20, 25, 30		
矩形物体	高さ $H_s(\text{cm})$	4		
	重量(N)	1.046	1.345	3.355
	高さ $H_s(\text{cm})$	8		
	重量(N)	1.657	2.128	6.710
物体の設置位置 $l_s(\text{cm})$		55, 70, 80		
設置状況		固定, 非固定		

表-2 作用波力に関する実験条件

水柱高さ $H(\text{cm})$		15, 20, 25, 30	
矩形物体	高さ $H_s(\text{cm})$	4	8
	重量(N)	3.355	6.710
物体の設置位置 $l_s(\text{cm})$		55, 70, 80	
設置状況		固定	

表-3 作用波圧に関する実験条件

水柱高さ $H(\text{cm})$		15, 20, 25	
矩形物体	高さ $H_s(\text{cm})$	4	
	重量(N)	3.355	
物体の設置位置 $l_s(\text{cm})$		55, 70, 80	
設置状況		固定, 非固定	

後、水柱の初期高さ 20 cm を超える位置まで水塊が上方に打ち上がり、その後、水塊は自重により落下し、段波進行方向と逆方向に分かれて矩形物体を越流している。計算結果は水塊の打ち上がり高さなど水理実験で観察された水柱崩壊や物体と段波の衝突特性を良好に再現していることを確認しており、本研究で用いた固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の有用性が検証された。

(2) 作用波力

図-3は、実験結果に基づき、物体の初期設置位置 l_s/H が及ぼす固定矩形物体の無次元最大水平波力 $F_{x \max}/\rho g H S$ の影響を図示したものである。ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 S は矩形物体の高さと奥行きからなる表面積を示す。同図より、矩形物体の高さ H_s に関係なく、最大水平波力は物体の初期設置位置がゲートから離れるにつれて減少していることがわかる。また、水柱高さ最大と最大水平波力の実験結果を示す図-4から、水柱高さ、つまり段波の規模の増大に伴い、最大水平波力が増加していることが認められる。

水柱高さ $H = 25.0 \text{ cm}$ 、物体高さ $H_s = 4 \text{ cm}$ 、物体初期設置位置 $l_s = 55 \text{ cm}$ に対する無次元水平波力の時系列変化を図-5に示す。ここで、横軸は段波が物体に衝突した瞬間を基準時間 0 s とした。また、実線は計算結果、点線は実験結果である。段波が矩形物体に衝突した瞬間、計算波形は数万分の1秒のオーダーで瞬間的に増加している。一方、水理実験では、数値計算のような瞬間的な

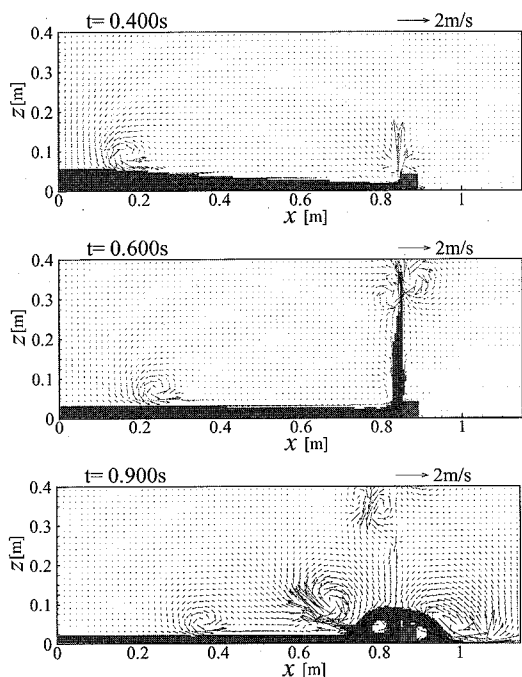


図-2 段波と固定物体の衝突に伴う水面形変化
($H=20.0\text{cm}$, $H_s=4\text{cm}$, $l_s=70.0\text{cm}$)

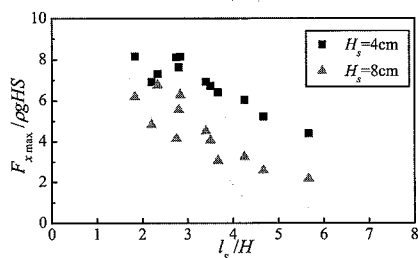


図-3 最大水平波力に及ぼす物体の初期位置の影響

衝撃波力はみられず、段波が物体に衝突した後、約 0.1 s に作用波力が最大値に達している。両者の違いの一原因として、波力の計測時間間隔が、計算時間間隔 10^{-6}s に比べて、0.01 s とかなり粗いことがあげられる。また、水理実験では、三分力計により作用波力を計測しているため、物体と水槽底面に数 mm 程度の隙間を設けていることも大きな要因である。ここでは図示しないが、物体と底面に 5 mm の隙間を考慮して同様な数値計算を行ったところ、計算波形の傾きが、実験でみられるように、なだらかになった。このことは、物体と底面の数 mm 程度の隙間が作用波力に大きな影響を及ぼすことを示唆している。

(3) 作用波圧

段波との衝突に伴う固定矩形物体に作用する波圧の時間変化を図-6 に例示する。ここで、図中の実線は計算値、

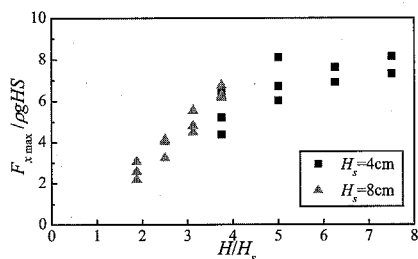


図-4 水柱高さ最大水平波力の関係

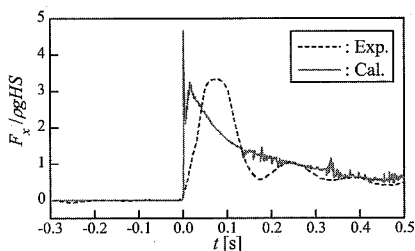


図-5 固定矩形物体に作用する水平波力の時系列変化

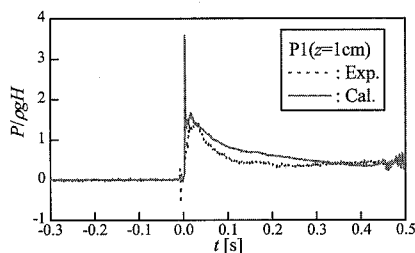


図-6 固定矩形物体の作用波圧の時間変化

点線は実験値を示す。また、計測点は水槽底面から上方 1 cm の P1 地点である。計算波形は、段波が矩形物体に衝突した直後に、実験波形より大きな衝撃圧力の発生を示す。これは、計算時間間隔 $1\mu\text{s}$ と計測時間間隔 $500\mu\text{s}$ の差によるものと考えられる。また、作用波圧の実験波形は、図-5 に示す実験波力とは異なり、切り立った波形となっている。この理由として、作用波圧を計測する際は、水槽底面と物体間に隙間を設けていないためといえる。図-6 に示す計算結果と実験結果を比較すると、瞬間的な衝撃波形を除けば、計算波圧は実験波圧を高精度に再現しており、本研究で使用した 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の妥当性が検証された。

5. 段波と非固定矩形物体の衝突・漂流過程

(1) 矩形物体と水塊の挙動特性

水柱高さ $H=20.0\text{cm}$ 、模型高さ $H_s=4.0\text{cm}$ 、比重 $\rho_s/\rho_w=1.05$ 、物体の初期設置位置 $l_s=70.0\text{cm}$ の条件下における段波と非固定物体の衝突・漂流過程を対象に、高速度デジタルビデオカメラで撮影した静止画像を写真

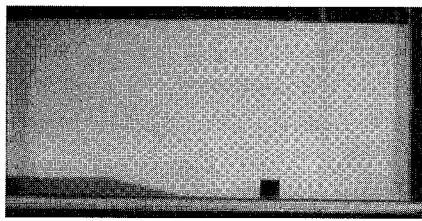
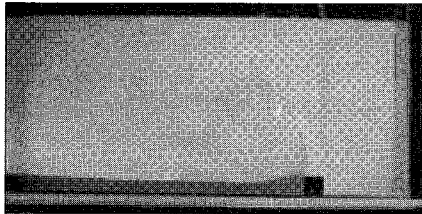
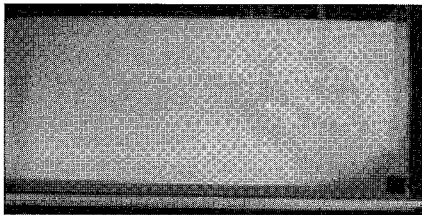

 (a) $t=0.30\text{s}$

 (b) $t=0.50\text{s}$

 (c) $t=0.70\text{s}$

写真-1 水面形の撮影画像

-1に、計算結果を図-7に示す。段波が矩形物体に衝突後、水塊が上方に打ち上がり、矩形物体は漂流し始める。実験では、衝突後の水塊の打ち上がりが水柱の初期高さ20 cm とほぼ同程度となっている。一方、計算結果では水塊の打ち上がりがほとんど認められない。なお、実験で確認された打ち上がった水塊の厚さは非常に薄く、高速度デジタルビデオカメラの撮影のため強い照明を当てていることから、水しぶきが連なって見えている可能性もある。段波との衝突後、漂流した物体は回転せずに右方に並進運動し、衝突から約0.2 s後、右壁に衝突している。また、計算結果から、矩形物体が壁に衝突すると水塊が上方に打ち上がり、矩形物体を越流してそのまま壁に衝突している様子が認められる。

気相・液相の流動場については、段波が矩形物体に衝突すると、鉛直上向き方向の流速が卓越している。しかし、物体が漂流し始めると、強い反時計回りの循環流が気相場で確認される。そして、時刻 $t=0.610\text{s}$ の図に示すように、物体が右壁に衝突すると、物体と壁の隙間にある気相が急激に圧縮されるため、放射状に広がる非常に大きな流速場が形成されている。

(2) 作用波圧

本研究で用いた数値モデルの妥当性を検証するために、非固定時における矩形物体の作用波圧の時間変化に対し

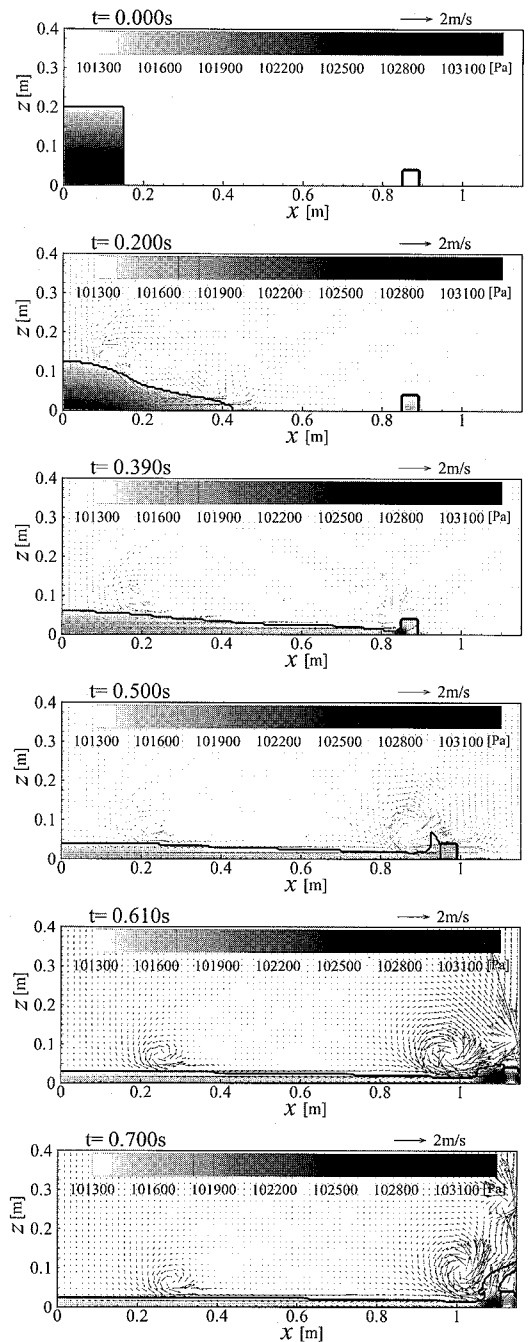


図-7 段波と非固定矩形物体の衝突・漂流過程の計算結果

て計算結果と実験結果を比較する。図-8は、図-7と同じ条件における作用波圧の時間変化である。ここで、実線は計算値、点線は実験値を示す。まず作用波圧の鉛直分布に関しては、底面近傍のP1地点で最も大きく、P2、P3地点と物体上方にいくほど圧力値が小さくなっている。2つ目のピーク、すなわち漂流した矩形物体が右壁

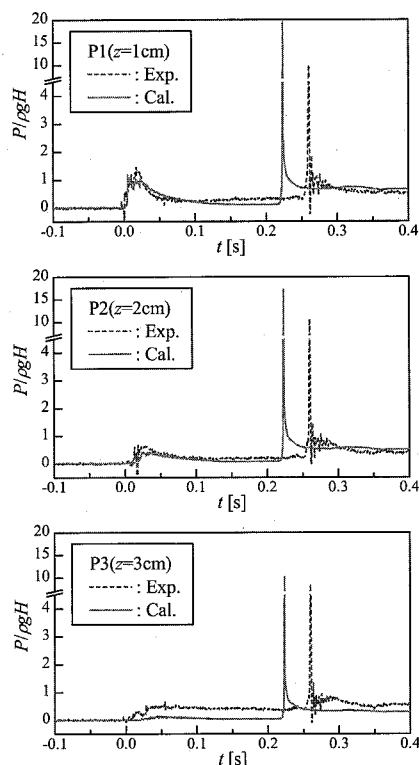


図-8 非固定矩形物体の作用波圧の時間変化

に衝突した際に発生する衝撃波圧は非常に大きな値を示すことがわかる。その最大値は、図-6 に示す固定時の物体の作用波圧より大きい。また、段波により漂流した矩形物体が右壁に衝突した時の作用波圧は、段波と物体の衝突時より、20～30 倍程度増大している。衝突後には、残留波圧が生じていることも実験結果と計算結果から認められる。計算波形は実験波形とほぼ一致しており、2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D は漂流物体に作用する波圧を精度良く再現できるといえる。なお、物体と右壁の衝突時における計算結果と実験結果で 0.05 s 程度の位相差が確認される。この原因として、数値解析での底面条件の設定方法、水理実験における物体と水槽側面の若干の隙間による影響が考えられる。

図-7 の計算結果より、段波と非固定矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧の空間分布を考察すると、段波と矩形物体が最初に衝突した際、衝突面の底面隅角部で作用波圧が大きくなる。一方、漂流した物体が右壁に衝突した時には、物体と水塊の接地面で急激に増加する波圧分布となることがわかる。

6. 結 論

本研究では、断面 2 次元場を対象に、固定・非固定状態にある矩形物体に段波が衝突した際の物体に作用する

波力・波圧特性を、水理実験と固気液多相乱流数値モデルを用いた数値解析により議論した。本研究で得られた主な研究成果を以下に列挙する。

- (1) 段波と物体の衝突あるいは物体と壁の衝突の際、作用波圧が急激に増加し、特に底面付近でその値が大きくなることが判明した。また、衝突後、上方に向かう強い反時計回りの循環流が形成されることが認められた。
- (2) 物体の初期設置状況（固定・非固定）に関わらず、物体の作用波圧は段波が衝撃した時に増大し、衝突後、指数関数的に減少することがわかった。
- (3) 段波により漂流した矩形物体が壁面に衝突した時の作用波圧は、段波と物体の衝突時より、20～30 倍程度増大すること、さらに衝突後、残留波圧が生じることが明らかになった。
- (4) 固定矩形物体に作用する最大水平方向波力は、物体の初期設置位置がゲートから離れるにつれて減少すること、また段波の規模の増大に伴い、つまり貯留水の水深に比例して増加することが判明した。
- (5) 実験結果と計算結果の比較から、本研究で用いた 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D は水理実験を良好に再現しており、その妥当性を定量的に検証することができた。したがって、同モデルは時々刻々変化する漂流物体の作用波力・波圧を評価可能であり、波・流れと構造物の非線形特性を解明する一手段として期待される。

謝辞：本研究の一部は平成 17 年度財団法人前田記念工学振興財団研究助成（代表：川崎浩司）を受けていることを付記し、深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 池野正明・田中寛好(2003)：陸上遡上津波と漂流物の衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 50 巻，pp. 721-725。
- 池野正明・森 信人・田中寛好(2001)：砕波段波津波による波力と漂流物の挙動・衝突力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 846-850。
- 五十里洋行・後藤仁志・酒井哲郎・谷岡弘邦(2005)：衝撃波圧推定への疑似圧縮型粒子法の適用性，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 731-735。
- 川崎浩司・袴田充哉(2005)：2 次元多相乱流数値モデルによる漂流剛体の衝撃波力解析，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 726-730。
- 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001)：固気液多相共存場に対する統一数値解法の構築と複雑水理現象への応用，海岸工学論文集，第 48 巻，pp. 1026-1030。
- 松富英夫(1991)：砕波段波衝突時の圧力分布と全波力，海岸工学論文集，第 38 巻，pp. 626-630。
- 水谷法美・高木祐介・白石和陸・宮島正悟・富田孝史(2005)：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 741-745。
- Yabe, T. and T. Aoki (1991)：Universal Solver for Hyperbolic Equations by Cubic-Polynomial Interpolation I. One-Dimensional Solver, Computer Physics Communications, Vol.66, pp. 219-232。