

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

池野正明*・森 信人**・田中寛好**

1. はじめに

砕波段波となって来襲する津波の波力とこれに運ばれる漂流物の挙動・衝突力を予め評価しておくことは、津波防災上極めて重要である。これまで、防波堤を対象とした非砕波段波津波や陸上遡上津波の波力算定式が提案されているが(谷本ら, 1984; 朝倉ら, 2000), 砕波して衝突する段波津波の波力特性を詳細に調べる必要がある。また、流木の縦衝突を対象とした一連の実験的研究や理論的研究の中で算定式の提案がなされているが(松富, 1999), 流木(円柱)以外の様々な形状の漂流物を対象とした適用性の広い衝突力の算定式を提案する必要がある。そこで、本研究では、貯水部のゲート開放により砕波段波津波を発生させて津波の波力を計測するとともに、形状・初期配置を変化させて漂流物の挙動と衝突力を調べる実験を実施し、砕波段波津波力の算定式と汎用性の高い漂流物衝突力の算定式を提案する。

2. 実験

(1) 漂流物模型

漂流物模型の材質として、喫水深が物体高さの半分程度となるように木材を使用した。漂流物の形状を3種類(円柱, 角柱, 球)とし、 L/D ; 円柱の場合、長さ/直径; 角柱の場合、横長さ/縦長さを1.3~30に変化させ、 D を2.6~8 cm (重量0.588~29.792 N)に変化させた。ただし、球については D を6.3~14 cm (重量0.784~6.468 N)に変化させた。また、漂流物の形状の違いによる運動や衝突形態の差異を調べるため、各形状間で重量が同じになるケースも実施した。

(2) 実験装置および実験条件

図一に実験装置を示す。長さ5.98 mの貯水部の静水位 H_1 を30, 40, 50, 60, 70 cm, 漂流物配置部の静水位 H_2 を5, 15 cmに変化させ、図中央のゲートを鉛直上向きに引き上げ急開により段波を発生させた。上流と下流の静水位差が大きくなると、ゲート開放時に発生する段波は砕波した。

(3) 波圧および衝突力の測定

ゲートの下流側3.77 mの地点に受波圧板を設け、半導体式小型波圧計(定格容量0.0098~0.0196 MPa)を水底から静水面付近を5 cm間隔、静水面から離れた上部で10 cm間隔で受波圧板の水路奥行き側半面部分に配置し計14地点の高さの波圧分布を計測した。また、受波圧板の背後に取り付けた2対のアルミ製力測板(止水壁より片持ち梁方式で固定)の表裏に歪ゲージを配置して水底から10 cm間隔で歪の鉛直分布を波圧計と同時に計測し、計測された歪から曲げ歪を分離し水平圧縮歪を算定した。さらに、これに弾性係数(6.86×10^4 MPa)を乗じて水平圧縮応力を算定した。漂流物が無い津波のみの場合の上記水平圧縮応力の鉛直方向積分値と波圧計による鉛直分布の積分値とを比較し水平合力をクロスチェックしたところ、両者はよく一致していた。

(4) 漂流物運動の測定

上記各種形状漂流物を受圧壁前面に縦向き(漂流物の長軸方向が受波圧板に垂直)および横向き(長軸が受波圧板に平行横置き)に配置し、受波圧板と配置地点との距離(図中の X 座標)を40, 80, 120, 160 cmに変化させて、漂流物の運動や衝突状況を調べた。図一の実験装置の正面ガラスより3.1 m水平に(手前に)離れた位置に高解像度デジタルビデオカメラを設置し、図一の(X, Z)座標で(79 cm, 55 cm)の位置を焦点として、漂流物の動きを撮影した。実験装置の正面ガラスから背面壁までの奥行きは90 cmであるが、この背面壁(背景)を黒色とし、漂流物追跡時の(X, Z)座標キャリブレーション用白色マーカーを10 cm格子間隔で下流側水域の背面壁全体に記入した。漂流物を構成する各面を異なる5色に着色し、これらをマーカーとしてカメラで認識させ、ゲート開放後の段波による漂流物各マーカーの運動を1/60 s毎に撮影した。マーカーの動きがカメラで認識しやすいように水路正面ガラス側近くに漂流物を配置した。漂流物マーカーと背景のキャリブレーション用マーカーとの奥行き方向の相対距離は最大で90 cmになるが、撮影時の投影面位置の違いにより、漂流物マーカーの(X, Z)座標に歪が生じる。このため、漂流物計測データをキャリブレーション用マーカーの投影面位置へ座標

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 流体科学部

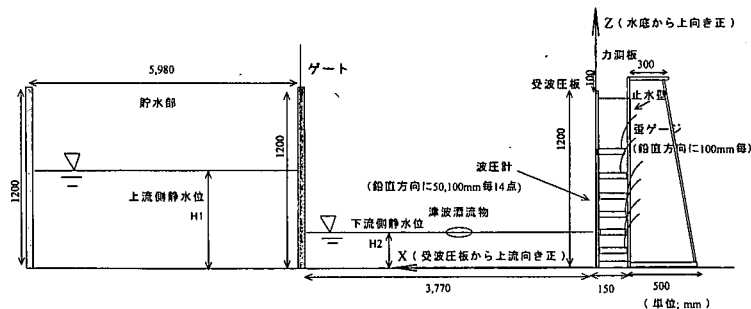


図-1 実験装置

変換することにより歪を補正した。このようにして得られた漂流物の変位データを時間微分して、衝突直前・直

後の水平・鉛直速度を算定した。

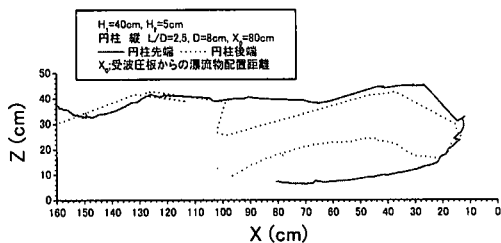
(5) 段波の水位・流速の測定

漂流物模型が無い場合に、受波圧板から $X=15, 165, 307 \text{ cm}$ の3地点に容量式波高計と鉛直2次元電磁流速計を、受波圧板から $X=165 \text{ cm}$ の位置に超音波ドップラー3次元流速計を設置し、段波の水位と流速を計測した。ただし、 H_2 が 5 cm の場合は、下流側水深が浅いため流速計による計測ができなかった。なお、段波の水位・流速、波圧、衝突力はデジタルデータレコーダーで同時計測し、サンプリング周波数と時間は 1 kHz と 20 s である。

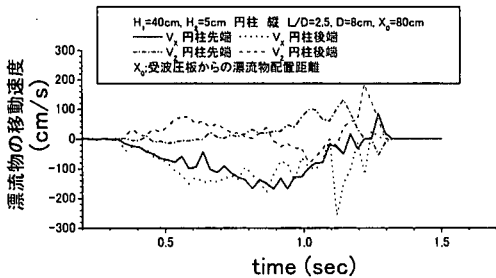
3. 実験結果と考察

(1) 漂流物の挙動特性

図-2(a)に、円柱漂流物の断面2次元移動変位の履歴例を示す。下流側静水位 $H_2=5 \text{ cm}$ 、初期 (X, Z) 座標 $(80 \text{ cm}, 5 \text{ cm})$ の位置に先端が位置するように縦向きに配置された円柱は段波の先端部により下流側へ斜めやや上向きに運ばれ受波圧板に衝突後、段波の受波圧板に沿った遡上に伴い円柱も上向きに打ち上げられ、反射波とともに上流側斜め上向きに押し戻される様子がわかる。円柱の座標データを時間微分することにより、円柱の水平・

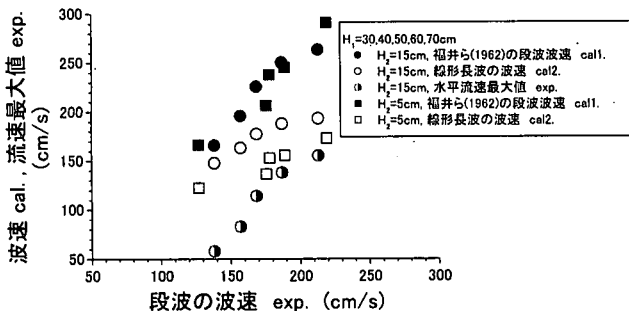


(a) 円柱漂流物の断面2次元移動変位の履歴例

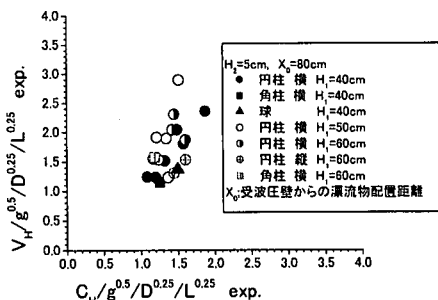


(b) 円柱漂流物の断面2次元移動速度の時系列例

図-2 円柱漂流物の断面2次元移動変位と速度の代表例



(a) 段波波速の実験値と理論値、最大水平流速の実験値との関係



(b) 段波先端波速と漂流物の水平移動速度との実験値比較

図-3 漂流物の移動速度と段波波速諸量との関係

鉛直移動速度が、図-2(b) のように得られる。

図-2(b) によれば、円柱の衝突直前の水平移動速度は 2 m/s 程度となることがわかる。

図-3(a) に、3 地点間の水位時間差より求めた段波先端波速の実験値と、段波波速の理論値、最大水平流速の実験値等との関係を示す。また、図-3(b) に、有意な衝突が生じた際の段波先端波速と各種漂流物の衝突直前の水平移動速度との実験値比較を示す。まず、図-3(a) によると、段波先端波速の実験値は、上流側と下流側の静水位差が大きくなり発生段波の波高が大きくなるとともに増加している。また、波速の実験値は、次式で示す福井ら (1962a) による段波波速の理論値とよく対応し、この理論値で安全側の評価となっているが、線形長波の波速理論値よりもかなり大きくなる場合がある。また、波速の実験値は、最大水平流速の実験値のおよそ 2 倍程度となっている。

$$c_H = \sqrt{\frac{g(a_H + h)(a_H + 2h)}{2(a_H + h - \kappa \cdot a_H)}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 c_H は段波の波速 (福井ら, 1962a), a_H は段波振幅, κ は抵抗係数 (福井ら, 1962a), h は静水深, g は重力加速度である。

つぎに、図-3(b) によると、各種漂流物の衝突直前の水平移動速度は、上流側と下流側の静水位差が大きくなり発生段波の波高が大きくなるとともに増加している。各種漂流物の衝突直前の水平移動速度は、若干のばらつきがあるものの、段波先端波速と高い相関が認められ、有意な衝突が生じる際の漂流物は段波先端波速と同程度の速度で移動していると判断できる。

(2) 段波波圧と漂流物の衝突力波形

図-4 に、砕波段波波圧の時間波形例を示す。図には、水底上鉛直高さに対応した波圧波形を示している。段波先端部が衝突する高さに相当する $Z=10$ cm の波圧波形で最大波圧が生じている。 $t=3$ s の時に砕波段波の衝突により波圧のピークが生じ、 $t=3.5$ s の時に受波圧板に沿った遡上に伴う水圧増加によりピークが生じている。

図-5(a) に、円柱漂流物の衝突時圧縮応力の時間波形例を示す。また、図-5(b) に、圧縮応力を鉛直方向に積分して求めた円柱漂流物の衝突力の時間波形例を示す。図中データには、ノイズを除去するため 50 Hz ローパスフィルターを施している。本実験から、漂流物に有意な衝突を生じさせるためには、漂流物が段波先端により下流方向へ運ばれ、段波と同時にやや先に漂流物が受波圧板に衝突する必要があることがわかった。漂流物より先に段波が衝突すると、段波の反射波により漂流物が受波圧板に衝突する前に上流方向へ押し戻されてしまう。図-5(a) によると、円柱および段波先端部は、水底上 $Z=10$ cm の高さ付近に衝突するため、この鉛直高さに

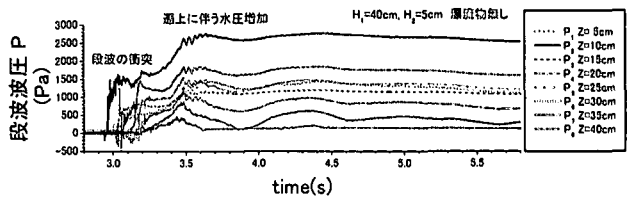
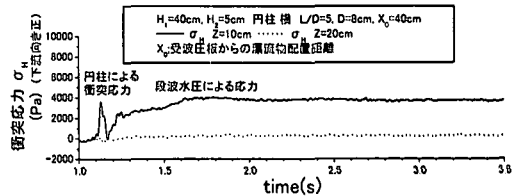
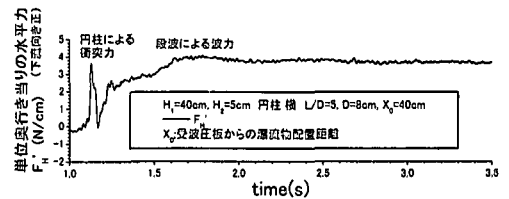


図-4 段波波圧の時間波形例



(a) 円柱漂流物の衝突時圧縮応力の時間波形例



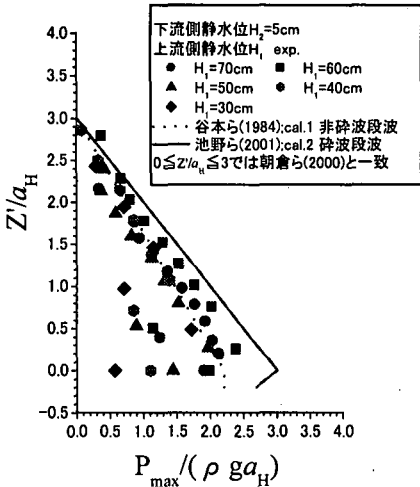
(b) 円柱漂流物の衝突力の時間波形例

図-5 円柱漂流物の衝突時圧縮応力、衝突力の時間波形例

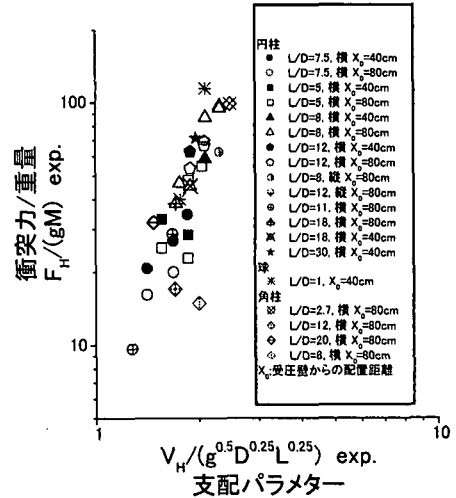
相当する圧縮応力が最大値を示す。まず $t=1.15$ s の時に円柱衝突時のピークが発生し、その後の段波の衝突による水圧増加により圧縮応力が増大している。上記円柱の衝突応力は非常に局所的であり、衝突位置から 10 cm 程度上方に離れた $Z=20$ cm の位置では圧縮応力に衝突時の有意なピークは認められない。また、図-5(b) によると、衝突合力にも円柱衝突時のピークが認められる。

4. 砕波段波の波圧算定式の提案

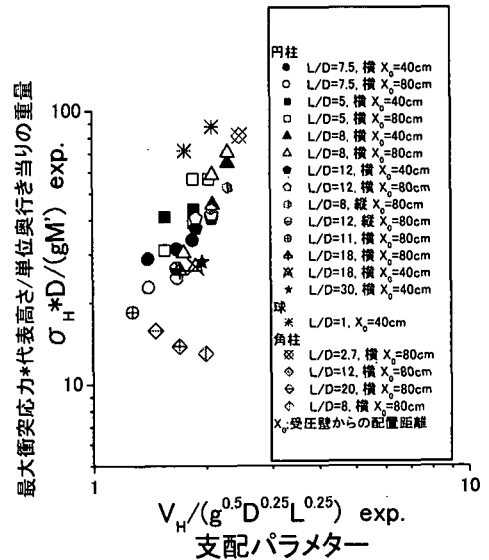
図-6 に、砕波段波波圧の鉛直分布例を示す。図によると、本実験による砕波段波の波圧分布では、静水面付近の最大波圧値が朝倉ら (2000) の陸上遡上津波 (砕波段波) の波圧値 (静水面付近の最大波圧値が進行波段波振幅の 3 倍に比例) にほぼ対応し、静水面下では谷本ら (1984) および池野ら (1998a; 1998b) の非砕波段波波圧算定式 (波圧値が進行波段波振幅の 2.2 倍に比例) に近づいている。本実験の性質上、陸上遡上時の津波 (朝倉ら, 2000) と、港湾水深部での津波 (池野ら, 1998a; 1998b) との中間的な特性を示すものと推察される。特に、本実験による静水面付近の最大波圧値は砕波段波の影響により、従来の非砕波段波の波圧値よりも概して 5 割程度増加している。ただし、本実験では、ゲートでの貯水部開



図一六 段波波圧の鉛直分布例



図一七 各種漂流物の無次元衝突力と支配パラメーターとの関係



図一八 各種漂流物の無次元最大衝突応力と支配パラメーターの関係

放により段波を発生させているため、実際の津波が浅水変形により段波状に発達したもの、あるいは無歪模型実験による段波津波に比べて波長が短くなってしまう点に注意する必要がある。池野ら (1998a; 1998b) の無歪模型実験によれば、非砕波段波津波の静水面下での波圧値は進行波段波振幅の2.2倍でほぼ一様分布形状となった。これに対し、本実験では、図一六に示すように、静水面下で水底に近づく程波圧値が減少している。この点は、実際の津波より相対的に波長が短くなっている影響であると考えられるので、設計を念頭に置くと、無歪実験での水面下の波圧分布特性を採用すべきであろう。砕波段波の波圧分布特性を考慮し砕波による割増係数を導入して、砕波段波津波の波圧式を次式のように提案し、図中に併記した。

$$p_m(z')/\rho g a_H = 2.2 \cdot (1 - z'/3a_H) \cdot \alpha \quad (0 \leq z'/a_H \leq 3) \quad (2a)$$

$$p_m(z')/\rho g a_H = 2.2 \cdot \alpha \quad (z'/a_H \leq 0) \quad (2b)$$

ここに、 p_m は最大波圧、 z' は静水面上向き正の座標、 a_H は進行波段波振幅、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度である。 α は砕波による波圧の割増係数で以下の値とする。

$$\alpha = 1.36 \quad (0 \leq z'/a_H \leq 3); \text{静水面上} \quad (2c)$$

$$\alpha = 1.36 \cdot (1 + 0.52 \cdot z'/a_H) \quad (-0.5 \leq z'/a_H \leq 0);$$

$$\text{静水面やや下} \quad (2d)$$

$$\alpha = 1.0 \quad (z'/a_H \leq -0.5); \text{静水面下}$$

$$(\text{池野ら, 1998a}) \quad (2e)$$

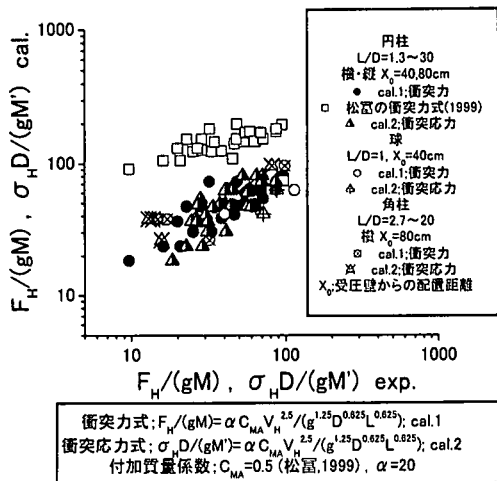


図-9 衝突力, 最大衝突応力算定式の適用性

5. 漂流物の衝突力・最大衝突応力算定式の提案

松富(1999)は, 貯水タンクのゲート開放により発生させた段波を用いた一連の実験により, 流木(円柱)の縦衝突を基本とした衝突力特性を明らかにし, これに基づき流木衝突力の算定式を提案している. 一方, 本実験では, 円柱以外の漂流物にも適用可能な衝突力算定式の確立を目指す.

図-7に, 各種漂流物の無次元衝突力と支配パラメータ $V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})$ との関係を示す. ここで, V_H は漂流物の衝突直前の移動速度であるが, 本実験結果から, 推定が容易で安全側の評価となる段波波速理論値 C_H (福井, 1962a; 式(1))で近似している. また, 図-8に, 各種漂流物の無次元最大衝突応力と支配パラメータの関係を示す.

本実験結果から, 漂流物の衝突直前の運動量が同じならば, 漂流物の形状によらずほぼ同じ衝突力を示すことがわかった. また, 図-7および図-8によると, 衝突力および最大衝突応力は漂流物の形状や横向き・縦向きに係わらず, 支配パラメータ $V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})$ を用いて統一した整理が可能であることがわかる. そこで, この支配パラメータを基に衝突力および最大衝突応力の算定式を次のように提案した.

$$F_H/(gM) = 20 \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5} \\ = 20 \cdot C_{MA} \cdot V_H^{2.5} / (g^{1.25} D^{0.625} L^{0.625}) \dots \dots (3)$$

$$\sigma_H D/(gM') = 20 \cdot C_{MA} \cdot \{V_H/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})\}^{2.5} \\ = 20 \cdot C_{MA} \cdot V_H^{2.5} / (g^{1.25} D^{0.625} L^{0.625}) \dots (4)$$

ここに, F_H は漂流物の衝突力, D は漂流物の代表高さ,

L は漂流物の代表長さ, C_{MA} は付加質量係数で松富(1999)による $C_{MA}=0.5$ を用いる. M は漂流物の質量, g は重力加速度, $V_H (\approx C_H)$ は式(1)の段波波速, σ_H は漂流物の最大衝突応力, M' は漂流物の単位奥行き当りの質量である.

図-9に, 衝突力, 最大衝突応力算定式の適用性を示す. 図-9によれば, 本算定式による各種漂流物の衝突力, 最大衝突応力の実験値との対応は良好である.

6. 結 論

1) 本実験による静水面付近の最大波圧値は砕波段波の影響により, 非砕波段波の波圧値よりも5割程度増加する. 砕波段波の波圧分布特性を考慮し砕波による割増係数を導入して津波波圧算定式を提案した.

2) 漂流物の衝突直前の運動量が同じならば, 漂流物の形状によらずほぼ同じ衝突力を示し, 有意な衝突力が生じる際の衝突直前の漂流物移動速度は, 段波先端の流速と同程度とみなすことができる.

3) 衝突力および最大衝突応力は漂流物の形状や横向き・縦向きに係わらず, 支配パラメータ $V_H^{2.5}/(g^{1.25} D^{0.625} L^{0.625})$ を用いて統一した整理が可能であり, この支配パラメータを基に衝突力および最大衝突応力の算定式を提案した.

本研究を遂行するに当たり, 元(株)土木技術開発の関根 満氏, (株)シーアールエスの田山秀樹氏, 森谷一広氏の協力を得たことを付記して謝意を表する.

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政樹 (2000): 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻(2), pp. 911-915.
- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998a): ソリトン分裂津波の大陸棚上での変形とその防波堤設計波圧に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻(1), pp. 366-370.
- 池野正明・松山昌史・田中寛好 (1998b): 無ひずみ実験に基づくソリトン分裂津波の発生条件・防波堤波圧の評価, 電力中央研究所報告, 研究報告 U98006.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第12巻, 第3号, pp. 3-29.
- 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋 (1984): 1983年日本海中部地震津波による津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962a): 津波の研究(I)一段波津波の波速について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 44-49.
- 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄 (1962b): 津波の研究(II)一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第9回海岸工学講演会論文集, pp. 50-54.
- 松富秀夫 (1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No. 621/II-47, pp. 111-127.
- 水谷 将・今村文彦 (2000): 構造物に作用する段波波力に実験, 海岸工学論文集, 第47巻(2), pp. 946-950.