

ソリトン分裂と砕波を伴う津波の防波堤に作用する波力評価に関する実験的研究

池野正明*・松山昌史**・榊山 勉***・柳沢 賢****

大型造波水路を用いて、津波がソリトン分裂する場合さらに分裂波が砕波する場合について、防波堤に作用する津波波力の実験を実施し、波力評価法の検討を行った。その結果、注目すべき波力特性として、津波波力が最大になり得るのは、分裂波第1波ピーク時（砕波直前あるいは砕波点に対応）と津波本体重複波ピーク時（分裂波の砕波直後に対応）であることがわかった。入射津波本体の波長が短くなると、段波状に発達しやすく、その上に顕著な分裂波が重畳しやすくなる。このため、分裂波の砕波前後で大きな波圧が発生しやすくなる。実験結果に基づき、新たな津波波圧算定式を提案した。

1. はじめに

大陸棚上に伝播し浅水変形により段波状に発達した津波がソリトン分裂し、さらに分裂波が砕波しながら海岸構造物に衝突する場合の波圧分布特性や波力特性については、未解明な点が多い。朝倉ら（2000）は陸上構造物を対象とし、護岸上に越流遡上する津波波力を実験により検討している。池野ら（1998a；1998b）は防波堤に作用するソリトン分裂津波の波力実験を実施し波圧算定式を提案している。しかしながら、分裂波の非砕波条件を対象としているため、砕波による波力特性は未解明である。また、これらの検討では、得られた波圧の鉛直分布の各最大値を包絡するように波圧算定式が導かれており、これを積分して求めた波力としては、過大な評価となっている。そこで、本研究では、ソリトン分裂津波とその砕波が、防波堤に作用する場合の波圧分布特性や波力特性を、まず、大型造波水路を用いた模型実験により詳細に分析する。つぎに、実験で得られた注目すべき波力特性を考慮して、構造物の安定性に対して合理的なソリトン分裂・砕波津波の波圧算定式を提案する。

2. 実験方法と実験条件

(1) 概 要

大型造波水路（長さ205 m、幅3.4 m、高さ6 m）に、海底勾配が1/200の緩勾配で岸沖長さ100 m の大陸棚を設置した（松山ら, 2005）。水深の異なる大陸棚上に2種類の防波堤（防波堤 A, B：図-1, 2 参照）を設置した。津波の波形として孤立波と正弦波をピストン型造波板で発生させた。造波振幅（水深4 m）を2～15 cm、周期

を20～120 s に変化させた。孤立波の周期は計測地点を孤立波1波が通過する時間の2倍（押波波形の後に対称な波形の引波が仮想的に存在すると考えた時の周期）と定義した。大陸棚上で段波状に発達した津波が、ソリトン分裂する場合としない場合、分裂波が砕波する場合としない場合の波圧分布と波力を比較検討した。大陸棚上、防波堤周辺に容量式波高計を6～10台配置し水位変動を計測した。防波堤壁面に小型波圧計を8箇所配置し、波圧分布を同時計測した。サンプリング周波数は1 kHz である。同時波圧データを積分することにより波力合力を求めた。

(2) 防波堤 A および防波堤 B

まず、静水面より上部の波圧分布形状を捉えるため、大陸棚上の水深25 cm 地点に、天端高さが非常に高い防波堤として、図-1 に示す防波堤 A を設置し、重複波時の最大水位振幅50-70 cm の津波を対象に、分裂非砕波・砕波の波圧分布等を計測した。つぎに、大陸棚上の水深10 cm 地点に、現実的な天端高さの防波堤として、図-2 に示す防波堤 B を設置し、重複波時の最大水位振幅10-20 cm の津波を対象に、分裂非砕波・砕波の波圧分布や越流水深等を計測した。B では天端高さを5 cm, 10 cm の2種類とした。防波堤は移動しないように大陸棚上に固定した。得られた実験データから、津波本体（段波）部分とソリトン分裂波部分の水位振幅と波圧分布、波力との相関関係を分析した。

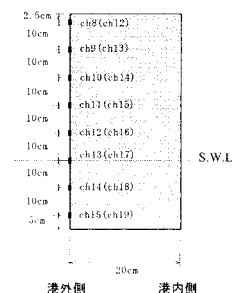


図-1 防波堤 A 断面図

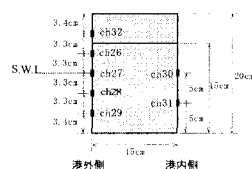


図-2 防波堤 B 断面図

* 正会員 工博 電力中央研究所 上席研究員 環境科学研究所
物理環境領域
** 正会員 工修 電力中央研究所 主任研究員 地球工学研究所
流体科学領域
*** 正会員 工博 電力中央研究所 上席研究員 地球工学研究所
流体科学領域
**** 正会員 工修 東京電力株式会社 原子力技術・品質安全部 土木グループ

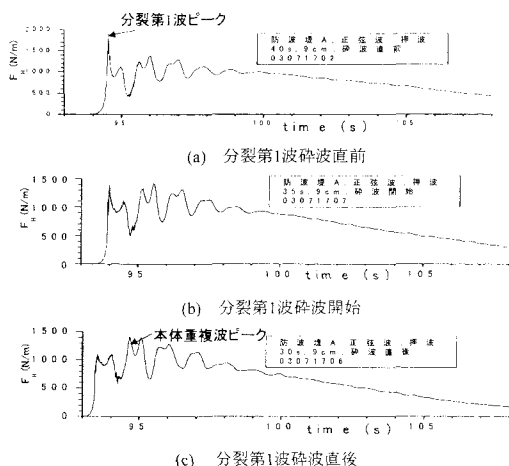


図-3 水平波力の時系列例 (防波堤 A, 正弦波, 押波)

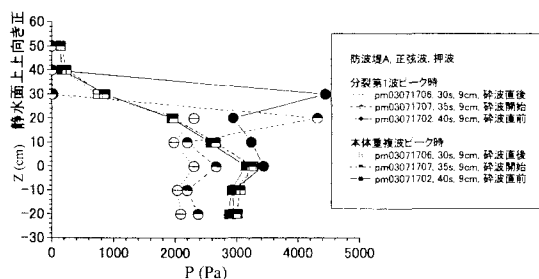


図-4 分裂第1波および津波本体重複波ピーク時における波圧の鉛直分布例 (防波堤 A, 正弦波, 押波)

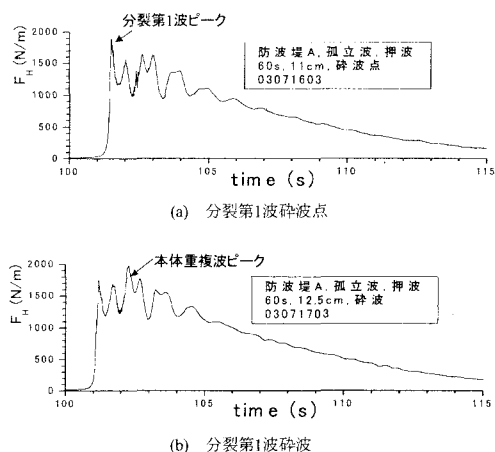


図-5 水平波力の時系列例 (防波堤 A, 孤立波, 押波)

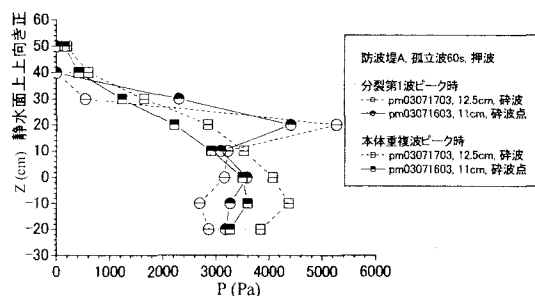


図-6 分裂第1波および津波本体重複波ピーク時における波圧の鉛直分布例 (防波堤 A, 孤立波, 押波)

3. 実験結果と考察

(1) 正弦波

図-3に、同じ振幅(9cm)で造波し周期が異なる(30, 35, 40s)押波初動の正弦波が大陸棚上で段波状に発達しその先端からソリトン分裂波が発生した後、分裂波の砕波前後で防波堤 A 前面壁に衝突する場合の水平波力時系列(同時波圧の鉛直方向積分値)の代表例を示す。

(a)図は、津波本体に重畳した分裂波第1波が砕波する直前に水位振幅が最大になった状態で防波堤 A に衝突する場合である(周期40s)。(b)図は、分裂波第1波が砕波し始めながら作用する場合である(周期35s)。(c)図は、分裂波第1波の砕波直後に作用する場合である(周期30s)。同じ振幅で津波を造波した場合、周期が短い程、浅水変形による段波状への発達が顕著であり、その先端でソリトン分裂波が発生しやすくなる。このため、津波本体の周期が短い程ソリトン分裂が沖側で発生し、分裂波の砕波も沖側で生じることになる。

(a)図によると、砕波する直前に防波堤に衝突する場合には、分裂波第1波が衝突する時に水平波力が最大と

なることがわかる(分裂波第1波ピーク時)。つぎに、(c)図によると、砕波直後に防波堤に衝突する場合には、分裂波第1波は砕波により水位が低下しているため、この時点では水平波力は最大となっていない。その後、津波本体とこれに重畳した第2波目以降の分裂波が防波堤前面壁に衝突して完全重複波を形成した時に水平波力が最大となることがわかる(本体重複波ピーク時)。つぎに、(b)図では、上記両者の中間の特徴を有し、砕波し始めながら衝突する分裂波第1波とその後の津波本体重複波とで同程度の波力が生じている。

図-4は、図-3(a)(b)(c)の3つの波力に対応した波圧のうち、分裂波第1波の波力ピーク時刻と津波本体重複波の波力ピーク時刻の同時波圧分布を比較したものである。

まず、分裂波第1波が砕波する直前に防波堤に作用する場合(周期40s, 砕波直前)では、静水面位置(縦軸 $Z=0$ cm)から35 cm 上の高さに分裂波第1波の波面が衝突した時に大きな波圧(最大値)が生じており、これより低い高さ(静水面以下)では波圧値が減少している。この時、波圧を鉛直方向に積分した波力が最大値を示し

ている（分裂波第1波ピーク時）。つぎに、分裂波第1波の碎波直後に防波堤に衝突する場合（周期30 s、碎波直後）では、分裂波第1波衝突時には大きな波圧は発生していない。その後、津波本体とこれに重畳した第2波日以降の分裂波が防波堤に衝突して完全重複波を形成した時に、静水面付近から下で大きな波圧が生じている。この時、波力が最大値を示している（本体重複波ピーク時）。分裂波第1波ピーク時と本体重複波ピーク時の同時波圧の鉛直分布形はかなり異なっていることがわかる。

防波堤への衝突が碎波直前の場合（周期40 s）と碎波直後の場合（周期30 s）とを比較すると、分裂波第1波ピーク時の波圧分布は碎波直前の方が大きく、津波本体重複波ピーク時の波圧分布は碎波直後の方が若干大きくなっている。分裂波第1波が碎波し始めながら衝突する場合（周期35 s）では、波圧分布も上記両者の中間の特徴を有している。

(2) 孤立波

図-5に、造波振幅の異なる孤立波（振幅11, 12.5 cm, 周期が前述の定義で60 s）が大陸棚上で段波状に発達し、発生したソリトン分裂波の碎波前後で防波堤 A に衝突する場合の水平波力時系列の代表例を示す。(a)図は、分裂波第1波が碎波する直前に（碎波点で）防波堤 A に衝突する場合（振幅11 cm）、(b)図は、分裂波第1波が碎波しながら防波堤 A に衝突する場合（振幅12.5 cm）である。

図-6は、図-5(a)(b)の2つの波力に対応した波圧のうち、分裂波第1波の波力ピーク時刻と津波本体重複波の波力ピーク時刻の同時波圧分布を比較したものである。碎波点の場合（振幅11 cm）と碎波の場合（振幅12.5 cm）を比較すると、分裂波第1波ピーク時の波圧分布は同程度であるが、津波本体重複波ピーク時の波圧分布は碎波の方（振幅12.5 cm）が大きくなっている。波圧を積分した結果として、碎波点（振幅11 cm）では分裂波第1波ピーク時に、碎波進行時（振幅12.5 cm）では、津波本体重複波ピーク時に、波力が最大になっている。

以上のことから、波圧と波力の時系列を分析した結果、津波波力が最大になり得るのは、分裂波第1波ピーク時（碎波直前あるいは碎波点）と津波本体重複波ピーク時（分裂波第1波の碎波直後）のどちらかであることがわかる。

4. 津波波圧算定式の提案

図-4および図-6における、分裂波第1波ピーク時と津波本体重複波ピーク時の同時波圧分布を比較すると、防波堤への衝突が碎波直前および碎波点の場合、分裂波第1波ピーク時に静水面より上の位置に生じる波圧の最

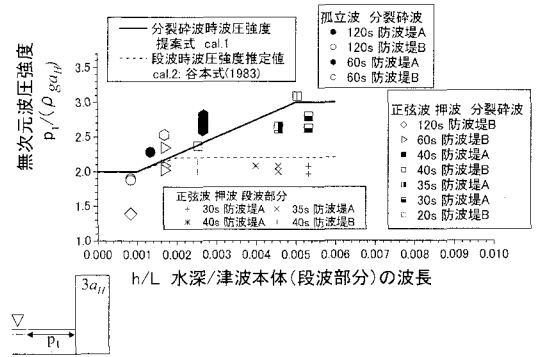
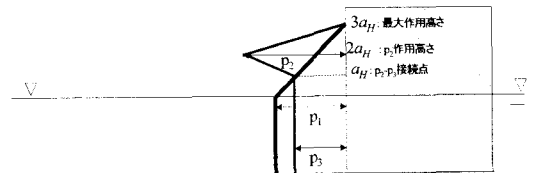


図-7 波圧強度 p_1 の無次元量と水深/津波本体(段波部分)の波長との関係（防波堤 A, B）

分裂波碎波直前および碎波点での分裂第1波衝突時

$$p_2 = 1.2 * p_1, p_3 = 0.8 * p_1$$



分裂波碎波直後の津波本体重複波衝突時

$$p_1/(\rho ga_H) = 2.0; 0 \leq h/L \leq 0.001, p_1/(\rho ga_H) = 3.0; 0.005 \leq h/L$$

$$p_1/(\rho ga_H) = 250 * (h/L) + 1.75; 0.001 \leq h/L \leq 0.005$$

図-8 津波波圧算定式の提案（分裂波碎波直前と直後）

大値は、津波本体重複波ピーク時に静水面付近で生じる波圧の最大値の1.2倍程度である。つぎに、防波堤への衝突が碎波直後の場合、分裂波第1波ピーク時に静水面以下で生じる波圧値は、津波本体重複波ピーク時に静水面付近で生じる波圧最大値の0.8倍程度となっている。

これらを踏まえて、津波本体重複波ピーク時の静水面付近の波圧最大値 p_1 を対象に、本実験結果による無次元波圧強度（＝波圧強度/（流体密度×重力加速度×進行波段波振幅））と水深波長比（＝水深/津波本体（段波部分）の波長）との関係を図-7のように整理した。ここでは、波長を構造物設置地点での波速と周期の積で定義している。

図-7によれば、横軸 h/L が 0.001 以下の場合には、水深に比べて入射津波本体の波長が非常に長い。このため、津波本体が段波状に十分発達せず、分裂波も生じにくいので、波圧は、入射水位振幅が防波堤前面において完全反射状態で重複波を形成したときに生じる波圧（入射波振幅の2倍に相当する静水圧に対応）となる。つぎに、 h/L が 0.001～0.005 の場合は、 h/L が大きくなるに従い、無次元波圧強度が 2.0 から 3.0 まで増加している。これは、 h/L が大きくなると、入射津波本体の波長が相対的に短

くなるため、段波状に著しく発達し、段波波面が鋭く切立ってきて、その波頂上にはっきりとした分裂波が重畳してくるためである。このため、分裂波の砕波前後に大きな波圧が発生しやすくなる。 h/L が0.005以上の実験ケースは少ないが、波圧最大値は入射水位振幅の3倍相当と推察される。図中には、比較のため、分裂しない場合の段波波圧強度推定値 (cal. 2: 谷本式(1983))と段波部分の波圧実験値も併記している。

以上の実験結果を踏まえて、津波波圧分布の算定式を以下のように提案する (図-8 参照)。

・分裂波砕波直後の場合

津波本体重複波衝突時に静水面付近で最大波圧強度 p_1 が発生すると考える (図-7 中 cal. 1 参照)。図-8 に示すように、最大作用高さは、実験結果に基づき進行波段波振幅の3倍とし、 p_1 は静水面以下で一様分布とする。

$$p_1/(\rho g a_H) = 2.0 \quad ; 0 \leq h/L \leq 0.001 \cdots (1.a)$$

$$p_1/(\rho g a_H) = 250 * (h/L) + 1.75 \quad ; 0.001 \leq h/L \leq 0.005 \cdots (1.b)$$

$$p_1/(\rho g a_H) = 3.0 \quad ; 0.005 \leq h/L \cdots (1.c)$$

a_H : 進行波段波振幅

・分裂波砕波直前あるいは砕波点の場合

分裂波第1波の波面が、静水面上進行波段波振幅の2倍の高さに衝突し、最大波圧強度 p_2 が発生すると考える。この時、進行波段波振幅の高さ以下では、波圧強度 p_3 になると考える。 p_2 と p_3 は、実験値を整理した結果、図-9 に示すように、平均的に p_2 は p_1 の1.2倍、 p_3 は p_1 の0.8倍になることがわかった。そこで、 p_1 から p_2 と p_3 を以下のように算定する。

$$p_2 = 1.2 * p_1 \cdots (2.a)$$

$$p_3 = 0.8 * p_1 \cdots (2.b)$$

上記2つの波圧式を用いて、防波堤Aの水平波力を実験値と比較してみる。図-10は、本波圧算定式による水平波力を実験値と比較した例である。cal.1が津波本体重複波ピーク時、cal.2が分裂波第1波ピーク時の波圧式に対応している。図によれば、cal.2の方が、cal.1よりも若干大きくなっている。これは、防波堤Aは水深25cmに対して静水面上高さが52.5cmもあり、実際の構造物としては天端高さが非常に高く、cal.2の水平波力には、図-8の p_2 の作用点もすっぽり含まれるためである。(静水面より上部の波圧分布形状を正確に捉える実験目的のため)。両波圧式とも実験値によく対応している。

図-11(a)(b)は、本算定式による分裂波第1波ピーク時および本体重複波ピーク時の波圧分布を実験値と比較した例を示す。図によれば、本算定式は防波堤A、Bに作用する波圧分布によく対応している。

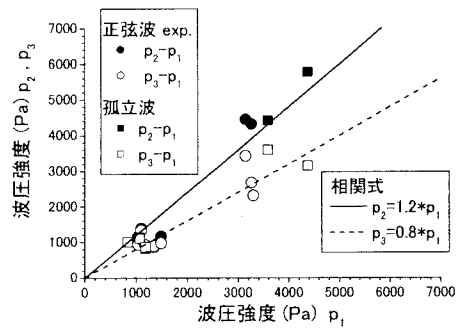


図-9 波圧強度 p_1 と p_2 、 p_3 の関係 (防波堤 A)

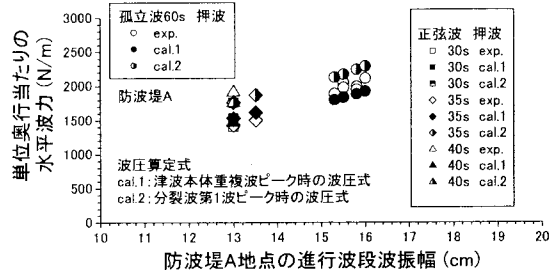
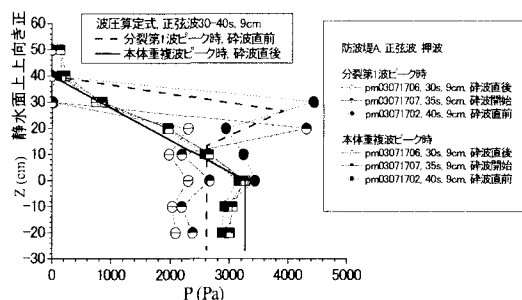
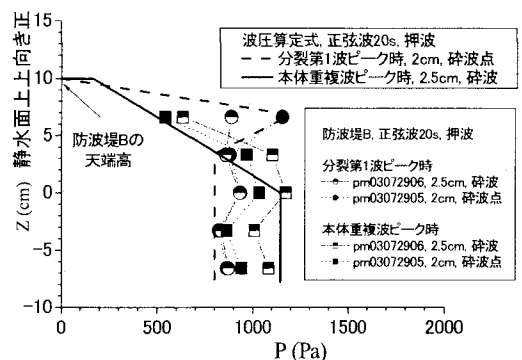


図-10 波圧算定式による水平波力の実験値との比較例 (防波堤 A)

最後に、提案した津波波圧算定式を既存の防波堤断面に適用し、津波波力を試算する。モデルケースとして、能代港第2北防波堤標準断面 (国土交通省東北地方整備局秋田港湾事務所 HP, 2005-04-25 参照) を対象とし、本津波波圧算定式を適用する。津波としては、日本海中部地震津波(1983)を対象とする。この津波を、池野ら(1998a; 1886b)のソリトン分裂限界指標に適用すると、水深13m地点で段波振幅が2.6mまで浅水変形して増幅すると、ソリトン分裂する可能性があるかと推察される。能代港第2北防波堤の設置水深は約18mなのでソリトン分裂する可能性は低いと推察されるが、津波が段波状に発達するがソリトン分裂しない場合 (段波波圧式: 谷本ら, 1993) と分裂、砕波する場合 (本波圧式) と両方の津波波力を算定した。岩瀬ら(2001)による能代地点における日本海中部地震津波水位の計算結果によると、水深6m地点での段波部分の振幅と分裂波を含む最大水位振幅は4mと6m、段波部分と分裂波の周期は5minと10sと算定されている。これらは、防波堤設置地点よりも浅い場所での値であるが、安全側の値として津波波圧算定式への入力値とした。その結果、段波波力1.92 MN/m (196 tf/m)、分裂・砕波直前波力1.85 MN/m (189 tf/m)、分裂・砕波波力2.18 MN/m (222 tf/m) と算定される (単位奥行当りの値)。



(a) 防波堤 A, 正弦波



(b) 防波堤 B, 正弦波

図-11 本算定式による波圧分布と実験値との比較例

5. 結 論

- 1) 実験で得られた注目すべき特徴として、ソリトン分裂津波の波力が最大になり得るのは、分裂波第1波ピーク時（分裂波の砕波直前あるいは砕波点での波力）と津波本体重複波ピーク時（分裂波砕波直後の波力）である。

- 2) 入射津波本体の波長が短くなると、段波状に発達しやすく、その上に顕著な分裂波が重畳しやすくなる。このため、分裂波の砕波前後で大きな波圧が発生しやすくなる。
- 3) 上記の特性を踏まえ、分裂波の砕波直前および砕波直後に対する津波波圧算定式を提案した。

最後に、本研究は、電力共通研究の成果の一部であることを付記するとともに、(社)土木学会原子力土木委員会津波評価部会（主査 首藤伸夫教授）の委員の皆様から有益な助言を賜りました。ここに記して、謝意を表す次第です。

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・大森政則(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。
- 岩瀬浩之・見上敏文・後藤智明(2001)：日本海中部地震津波の分裂に関する数値計算，海岸工学論文集，第48巻，pp. 361-365。
- 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。
- 国土交通省東北地方整備局秋田港湾事務所：同 HP(オンライン)，<http://www.pa.thr.mlit.go.jp/akita>，参照2005-04-25。
- (社)土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002)：原子力発電所の津波評価技術，3. レビュー編，pp. 16-31。
- 谷本勝利他 9 名(1983)：1983年日本海中部地震津波の実態と二，三の考察，港湾技研資料，No. 470，299p。
- 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。
- 松山昌史・池野正明・榊山 勉・柳沢 賢・藤井直樹(2005)：大陸棚上におけるソリトン分裂した津波の砕波に関する無ひずみ模型実験，海岸工学論文集，第52巻，pp. 241-245。