

津波による砂移動に関する実験的研究

Experimental Study of Sediment Transport caused by Tsunami

吉井匠¹・池野正明²・松山昌史³

Takumi Yoshii, Masaaki Ikeno and Masafumi Matsuyama

The sediment transport caused by tsunami was measured by a simple experiment. We measured the velocities and suspended concentrations caused by one solitary wave which is assumed as tsunami passing on the plane sand bed without breaking and splitting. It was found that there are phase lag between peaks of suspended concentration and velocity, and the time variations of vertical distribution of suspended concentration are in good agreement with approximated curve with exponential function. We found that the Brown's formula is inconsistent with the time variations of sediment flux measured in the experiment because it can't explain the phase lag between velocities and total sediment flux. The bed load formula by Ashida-Michiue shows a close agreement with amount of bed load.

1. はじめに

沿岸域に来襲した津波は, その波力による構造物への影響もさることながら, 沿岸域に大規模な砂移動を発生させることが指摘されている。沿岸域に立地する発電所においては, 津波来襲時の砂移動により, 取水口部が埋没することが懸念されている。そのため, 津波来襲時に港湾内外での砂移動を定量的に予測する手法が必要となっている(榊山ら(2007), 木原・松山(2007))。

これまで実験的検討により, 従来の流砂量式の津波に対する適応性については検討がなされている(例えば, 藤井ら(1998))。しかし, これまでの津波による砂移動実験にはいくつかの問題点がある。第1に, 管路を用いて津波の流速を模擬した実験や, 砂の代わりに比重の軽い粒子を用いる実験では, 実際の津波による砂移動現象を再現できていない可能性がある。第2に, これらの研究において, 時々刻々の濃度分布等が計測されていないため, 砂の詳細な移動形態が不明である。実務上用いられる平面2次元計算では, 浮遊砂濃度にどのような鉛直分布形状を仮定するかにより, 計算結果が大きく変わること西畑ら(2005)が報告している。計算精度を向上させるためにも, 砂移動の形態について詳細に検討する必要がある。

そこで, 本研究では, 造波装置を用いて非碎波, 非分裂の津波による高シールズ数での砂移動の基礎的実験を行い, 津波による砂移動を詳細に計測することで, その移動特性を解明することを目的とする。

2. 実験手法

(1) 実験装置および模型

実験には図-1に示す, 長さ78.0m, 幅0.9mの2次元造波水路を用いた。実験水路中には水路幅が0.3mとなる狭窄部を設けており, この狭窄部により波の水位を上昇させることにより, 高シールズ数の状況が発生させた。地形は砂層部を除きモルタル製の固定床である。水路奥部は湾曲した形状とし, 水路の裏側で波を減衰させることで水路奥部からの反射波を防いだ。

砂層は狭窄部先端より7.2mの地点から岸向きに10.5mの長さで設置した。砂層先端部分は勾配1/5で固定床にすりつけている。狭窄部先端から砂層開始点までの距離7.2mは, 狭窄部によって生じる水路幅方向の流速成分が減少し, 津波本来の長波とみなせる距離として, 予備実験により決定した。水位は砂層上で0.09m(造波場所で0.7m)とした。

砂層には相馬珪砂の中央粒径0.08mm, および0.2mmの2種類の砂を用い, 砂粒径の異なる実験を実施した。砂の比重は2.65であり, 均等係数はそれぞれ1.7, 2.4である。

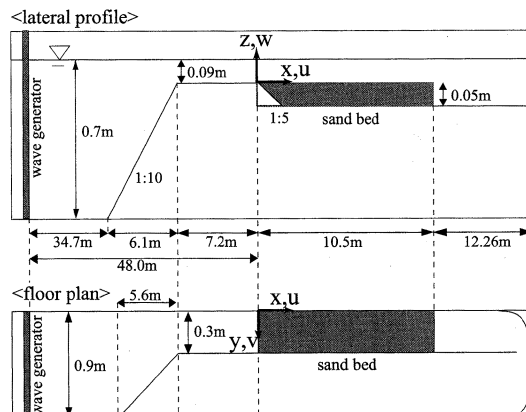


図-1 実験模型図

1 正 会 員 修(工)(財法)電力中央研究所 環境科学研究所
2 正 会 員 工博 (財法)電力中央研究所 環境科学研究所
3 正 会 員 工修 (財法)電力中央研究所 地球工学研究所

(2) 入射波

造波は押し波1波とし、砂層終端まで入射波が分裂・砕波しないよう、図-2(a)に示す造波時間30sの後傾した形状の波を造波信号として用いた。造波波形を後傾させたのは、波が浅水変形や狭窄部での変形に伴って前傾化し、砕波するのを防ぐためである。なお、造波信号中の30s～60sの動作は、斜面および狭窄部からの反射波を吸収するための造波である。

図-2(b)(c)に $x=2.0\text{m}$ 、および $x=7.0\text{m}$ での水位変化の計測結果を示す。図中の時間は造波前60sを基準とした経過時間である。図-2を見ると、入射波は砂層先端付近では、前後対照に近い波形となり、浅水変形と狭窄部の効果により水位変化が増幅されていることが確認できる。砂層終端になると、やや前傾化するものの、砕波や分裂が起こらないことが分かる(図-2(c))。また反射波吸収制御の効果が図-2(c)の約130s以降に確認できる。

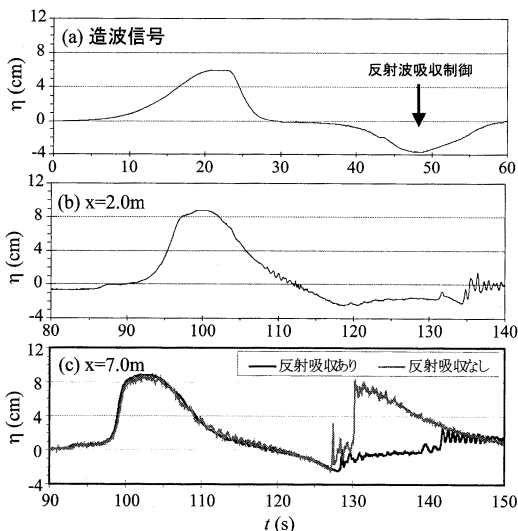


図-2 造波信号と入射波の変形

表-1に実験ケースを示す。図-2(a)に示した造波信号における、造波水位のみを変化させて実験を行った。砂粒径は前述した2種類の砂を用いた。

(3) 計測方法

a) 鉛直分布計測

鉛直分布の計測は $x=7.0\text{m}$ の地点で、電磁流速計(東

表-1 実験ケース

	砂粒径 (mm)	造波水位 (cm)	造波時間 (s)
case1	0.08	6.0	30
case2	0.08	5.0	30
case3	0.08	4.5	30
case4	0.08	4.0	30
case5	0.08	3.0	30
case6	0.2	6.0	30
case7	0.2	5.0	30
case8	0.2	4.5	30

京計測(株)製 SFT-200-05L)、後方散乱式濁度計(D&A Instrument company製OBS-3+)を用いて、岸沖流速、浮遊砂濃度を、底面より1cm～8cm まで1cm 間隔で計測した。また同地点には容量式波高計(東京計測(株)製HAT-30)も設置しており、水位変化についても計測を行った。データの計測間隔は全ての機材で0.01sとした。なお、予備実験により砂層先端の砂はこの地点まで到達しないことを確認しており、計測結果に砂層の長さは影響していないと考えられる。

水路幅が30cmと狭いため、流れに影響を与えないよう測定器の設置数は最小限にし、設置高さを変更して実験を複数回繰り返すことで、鉛直分布を計測した。

case1～5については鉛直分布を2度計測した。case6～8については1度の計測のみである。

b) トラップ計測

砂層終端部($x=10.5\text{m}$)において、津波1波分の掃流砂量を計測するために、トラップ計測を行った。トラップ幅は30cmであり、トラップの開口高を設置限界である底面より1mmとして計測を行った。トラップにはプランクトンネット(目開き $25\mu\text{m}$)を用いており、ほぼ全ての砂を捕砂できる。捕らえた砂は十分乾燥させた後、乾燥重量を計測した。

なお、トラップの抵抗が流れに与える影響が懸念されたため、鉛直分布の計測とトラップ計測は別に行った。またトラップ計測は全てのケースで2度計測を行った。

3. 実験結果

(1) 計測結果

図-3にcase1の実験結果を示す。横軸の時間は造波開始60s前からの時間である。水位については計測値の平均値を取っている。流速に関しては図が煩雑となるため、2cm間隔のデータを示した。濁度計のデータには高周波数のノイズ成分が含まれていたため、2.0HzのFFTローパスフィルターを使用している。2.0Hzはノイズの周波数特性を基に決定した。フィルター使用後のノイズは最大約200mg/Lである。また図が煩雑となるため、 $z=5.7\text{cm}$ のデータは省いた。

図-3より、水位は約101s～105sの間で値が最大となり、流速も水位とほぼ同期した変動を示している。また流速は底面付近で値が小さくなっていることが確認できる。これは底面の抵抗による影響と考えられる。一方、濃度は流速の増加からやや遅れて濃度が上昇しはじめ、流速が最大となる時間より数秒程度遅れて最大濃度となっており、両者の間には時間差が存在していた。図-3(d)には、後述する対数則を用いて算出した摩擦速度から求められたシールズ数である。本実験の最大シールズ数はほぼ1程度であった。濃度については、波が通過し、シー

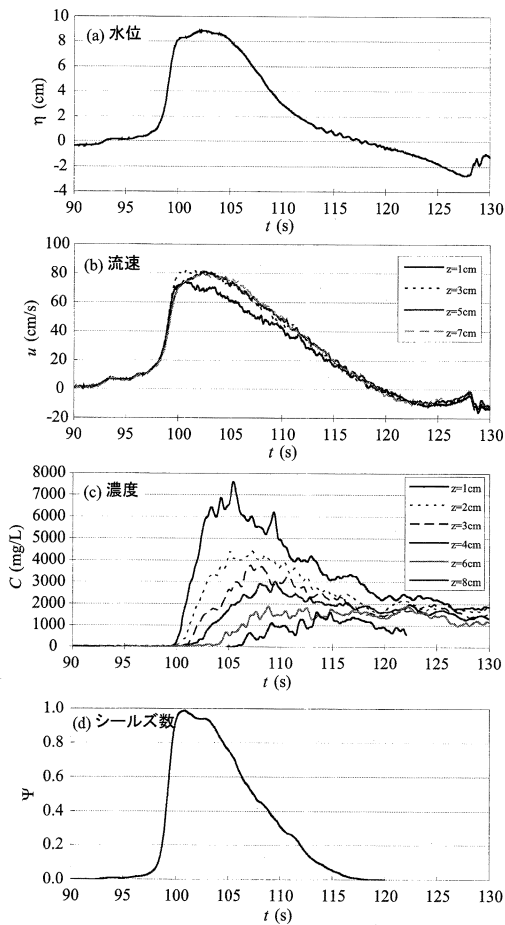


図-3 case1の計測結果

ルズ数が低下した後も約2000mg/Lの濃度が依然浮遊した状態であった。同様の傾向は粒径0.08mmを用いた他の実験ケースにも見られ、この濁りは実験後しばらく浮遊していた。これは、砂試料の粒径のバラつきにより、沈降速度の遅い細かい砂が巻き上がったため、浮遊砂濃度の低下が起こりにくかったものと考えられる。

次に、図-4にcase6の濃度、シールズ数の計測結果を示す。水位、流速に関してはcase1とほぼ同じであったので、ここでは省略する。図を見ると、濃度の上昇はcase1と同様な傾向であるが、流速が低下し始めた105s以降に、各層の濃度が急激に低下し、シールズ数が低下した時間では濃度はほとんどないことが分かる。粒径0.2mmのケースについては、中央粒径が大きかったためか、波の通過後に残る浮遊砂濃度はほとんどなかった。

(2) 岸沖流速、浮遊濃度の鉛直分布

図-5に、case1の各時刻での岸沖流速、濃度の鉛直分布、および図-6にcase6の各時刻での濃度の鉛直分布を示す。図中のプロット点が実験結果であり、瞬間的なノイズ成分を取り除くため、1sの移動平均をとっている。

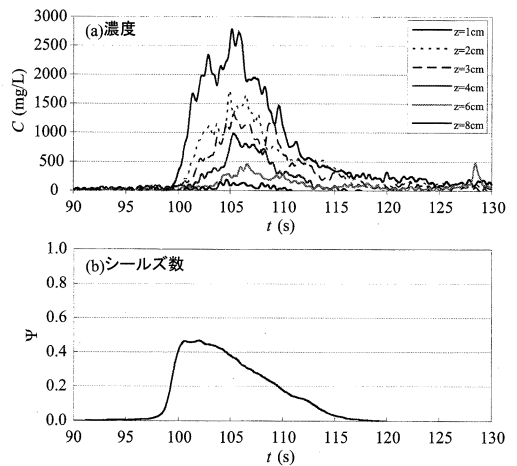


図-4 case6の濃度の計測結果

図より、流速は底面付近を除いてほぼ一定値となる事が分かり、水位および流速の最大となる時間はほぼ一致している。一方で、濃度は流速の発生と共に底面から巻き上がり始め、巻き上がる過程では鉛直方向に大きな濃度分布がある。しかし、底面濃度が最大となった後は、底面付近の濃度が低下する一方で、拡散による影響からか、上層の濃度は上昇し、結果として鉛直方向にほぼ一様な分布へと近づいていった。

図中の曲線は、流速、濃度の実験値より求めた近似曲線である。流速については底面付近を、1~3cmのデータに対数則を用いて近似した。相当粗度は $k_s=d$ とし、時々刻々の摩擦速度を求めて近似した。上層は流速の鉛直分布が小さかったため、4cm~8cmの計測値の平均値とした。

濃度については式(1)に示す指数関数を用いて近似を行った。

$$C(z) = C_b \exp(-Az) \quad (1)$$

ここで C_b は底面での濃度、 A は係数であり、実験値を基に時々刻々の値を計算した。なお式(1)は渦動拡散係数を水深方向に一樣とし、等流、かつ浮遊砂状態が平衡状態の仮定の下に、拡散方程式より導かれる式と式形は同じである。

図を見ると、流速、および濃度の鉛直分布を近似曲線がよく表せている事が分かる。なお粒径が異なるcase6の場合も、case1と同様に近似曲線は実験結果とよく一致している(図-6)。

ただし、濃度分布が式(1)で近似が可能であったことについては、流体の乱流状態について整理できるほどのデータが得られていないため、実際に渦動拡散係数が水深方向に一定であるのかについては、さらなる検討が必要である。

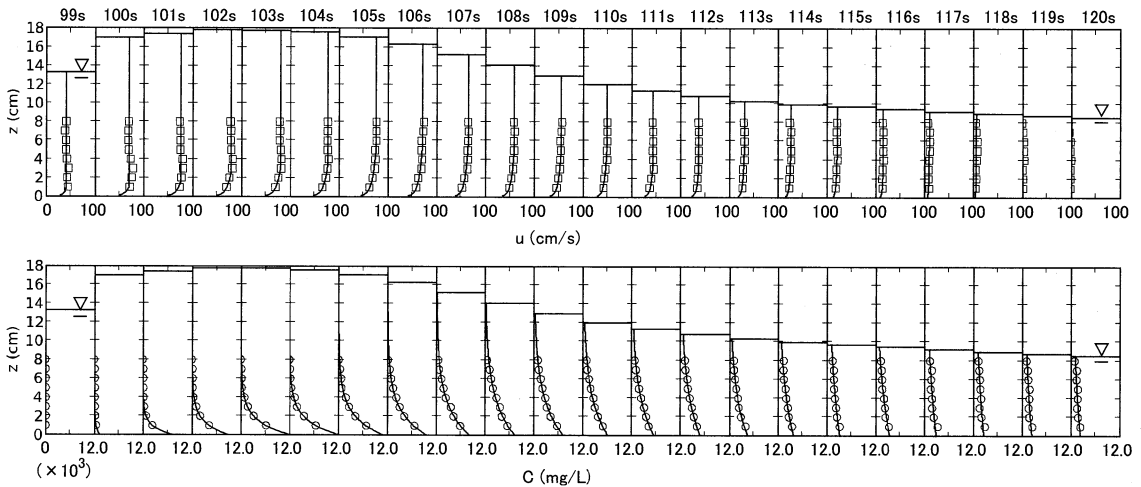


図-5 case1での流速(上)と浮遊砂濃度(下)の鉛直分布の時間変化(プロット点:実験値)

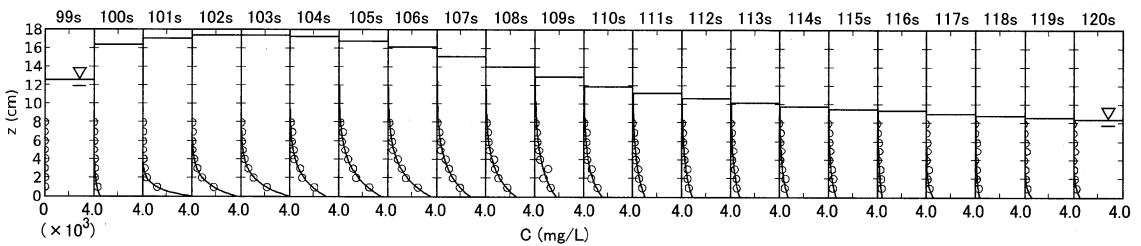


図-6 case6での浮遊砂濃度の鉛直分布の時間変化(プロット点:実験値)

一方、平面2次元計算の濃度分布に用いられることのある、底面からの高さのべき乗の分布形(拡散方程式中に渦動拡散係数を水深に比例する形で与えると求まる)では、底面付近で極端に大きな濃度となり、上層付近の濃度が実験値よりやや大きくなることを確認している。

(3) 全流砂量式の適応性

次に、Brown型の全流砂量式の適用性について検討を行う。Brown型の全流砂量式は、全流砂量フラックスがシールズ数の乗数に係数をかけたもので表される式であり、津波に適用した場合の乗数および係数については、既に様々な値が検討されている(例えば、藤井ら, 1998)。

本研究では、乗数を一般的に用いられる2.5とし、藤井ら(1998)にならい、通過流砂量を満足するよう係数を決定する。なお係数、乗数は津波通過を通して一定値とする。

前述した流速と濃度の近似式を用いて算出した全流砂フラックスを、1波分積分して求めた全流砂量を無次元化したものと、シールズ数の2.5乗を1波分積分したものとを比較を図-7に示す。この図を見ると、両者は線形に近い対応をしていることが分かる。近似直線を求めると係数が約30となり、Brown型の全流砂量式として式(2)の関係が得られる。

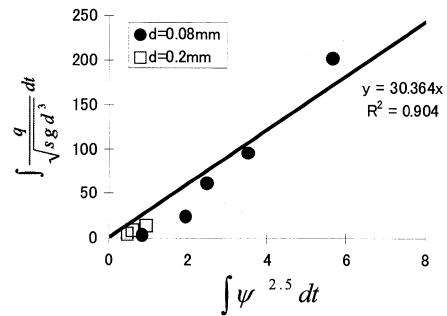


図-7 シールズ数の2.5乗、および無次元流砂フラックスの1波分の積分値の比較

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{s}gd^3} = 30\psi^{2.5} \quad (2)$$

次に、図-7より求められた式(2)を用いて求めた無次元流砂量の時々刻々の変化と、本実験で求められた無次元浮遊砂フラックスの時間変化を図-8に示す。

図より、先ほどの時間積分した検討では、流砂量をよく捉えていた式(2)と実験値の全流砂フラックスの時間変化には大きな差異があることが分かる。これは実験結果において、先に述べた浮遊砂濃度の増加が流速の増加に対して遅れる傾向があるためであり、シールズ数のみ

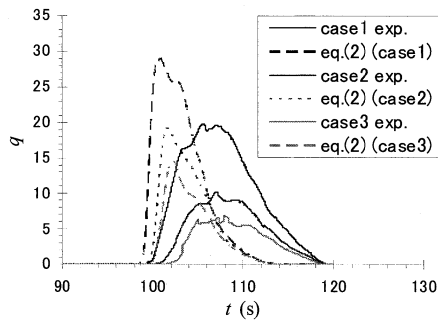


図-8 実験結果と全流砂量式との比較

で流砂量を算出する式では、時々刻々の流砂量が適切に表されていないことが分かる。平面2次元計算において、このような濃度の非定常性を考慮するためには、高橋ら(1999)のように、巻上げ量を介して掃流砂層と浮遊砂層の2層で砂移動をモデル化するなどの、漂砂モデルの改良が必要であると考えられる。

(4) トラップ計測結果

トラップによる計測結果を表-2に示す。表中には鉛直分布の近似式より求めた、津波1波による通過全流砂量も併記している。トラップによる計測結果と、芦田・道上式(1972)、津波を対象として提案された高橋ら(1999)の式(式(3)),および福田ら(2008)による高橋式の修正式(式(3)中の係数を8とする)との比較を表-3に示す。ここでトラップの開口高さ1mmが掃流砂層厚に対して適切であるかについては、議論の余地があるため、表には計算値と実験値との比(計算値/実験値)としてまとめた。case5については計測値が誤差の範囲内であるので、比較対象から外した。

$$q_b = \frac{q_b}{\sqrt{sgd^3}} = 21\psi^{1.5} \quad (3)$$

表-3を基に考察すると、高橋らの式、福田らの式には、同じ粒径の実験間でばらつきが大きいことが分かる。一方、芦田・道上式は同じ粒径の実験間で変化が少なく、実験の傾向を捉えているものと考えられる。また、高橋らの式では、他の式に比べて計算値が2倍程度となり、掃流砂量式により算出される結果が大きい。高橋式を修正した福田らの式では、芦田・道上式と近い値となっている。

表-2 トラップ計測結果

	通過全流 砂量(g)	乾燥重量 (g)		通過全流 砂量(g)	乾燥重量 (g)
case1	463.3	90.5	case6	128.2	97.2
case2	220.6	54.1	case7	79.2	39.3
case3	142.1	38.2	case8	47.3	32.9
case4	57.2	17.7			
case5	8.7	1.7			

表-3 実験結果と掃流砂量式の比

	高橋ら (式(3))	福田ら	芦田・道上
case1	3.9	1.5	1.5
case2	4.9	1.9	1.7
case3	5.6	2.1	1.8
case4	10.4	4.0	3.1
case6	5.0	1.9	1.8
case7	9.2	3.5	2.9
case8	9.6	3.7	2.8

ただし、今回の実験はシールズ数が最大1程度であるため、さらに高シールズ数の条件下における各式の適用性については今後検討する必要があると考えられる。

4. 結 論

本研究では、水路を通過する非碎波・非分散条件の津波によって生じる砂移動についての実験を実施し、最大シールズ数が1程度までの砂移動形態を詳細に計測した。以下に結論をまとめる。

- (1) シールズ数が最大となる時間と全流砂フラックスが最大となる時間には数秒程度の差があることが分かった。そのため流砂量フラックスをシールズ数の乗数で表す流砂量式では実験の時間変化を捉えられない。
- (2) 鉛直分布の測定結果より、浮遊砂濃度の鉛直分布形状は指数関数分布とよく一致した。
- (3) 開口高1mmのトラップによる捕砂量と、掃流砂量式による算出結果を比較した結果、芦田・道上式が実験の傾向をよく捕らえていた。

参 考 文 献

- 芦田和男・道上正規(1972): 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 206号, pp.59-69.
- 岩垣雄一(1956): 限界層流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 41号, pp.1-21.
- 木原直人・松山昌史(2007): 静水圧3次元数値モデルを用いた津波による地形変化の数値計算, 第54回海岸工学論文集, pp.516-520.
- 小林昭男・織田幸伸・東江隆夫・高尾誠・藤井直樹(1996): 津波による砂移動に関する研究, 第43回海岸工学論文集, pp.691-695.
- 榊山勉・松山昌史・吉井匠(2007): 津波による港湾内の海底地形変化に関する実験的検討, 第54回海岸工学論文集, pp.506-510.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999): 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 第46回海岸工学論文集, pp.606-610.
- 西岡剛・田島芳満・森屋陽一・関本恒浩(2005): 津波による地形変化の検証—2004年スマトラ沖地震津波 スリランカ・キリンダ港—, 第52回海岸工学論文集, pp.1386-1390.
- 福田祐司・後藤和久・今村文彦・高橋智幸(2008): 高シールズ数に対応した掃流砂量式に基づく津波土砂移動モデルの改良, 平成19年度土木学会東北支部技術研究発表会, II-92.
- 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進・大谷英夫(1998): 津波による海底地形変化に関する研究, 第45回海岸工学論文集, pp.376-380.