



(2) 移動床実験状況

写真-1に示すように、津波が港口に入射した際に防波堤から渦の発生が見られた。また、主防波堤および副防波堤の角部から砂が巻き上がることが確認された。発生した渦は港内に次第に大きくなり、巻き上げられた浮遊砂の多くは、渦の中心に集まり、水位低下時に浮遊砂は港外へ流出された。この時、主防波堤側では防波堤に沿った流れ、副防波堤側では角部の渦によって砂の巻き上がりが生じていた。

図-2に2回実施した移動床実験による地形変化量を示す。2回の実験による地形変化パターンに差がないことから実験の再現性は良いことがわかる。港口部では速い流れによって侵食し、港内に運ばれた砂は写真-1に見られた港内の渦中心部に相当する箇所で堆積している。また、港口部から港外においても侵食域が見られるが、これは引き波時の港口部の高流速によるものであり、侵食された砂は港外へ浮遊して運ばれていた。

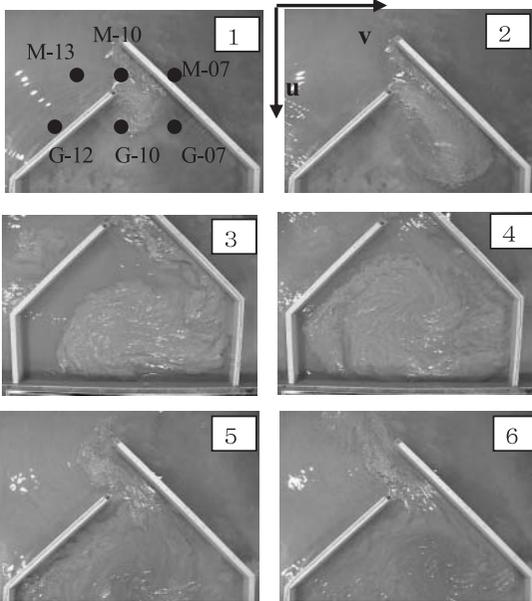


写真-1 移動床実験のスナップショット

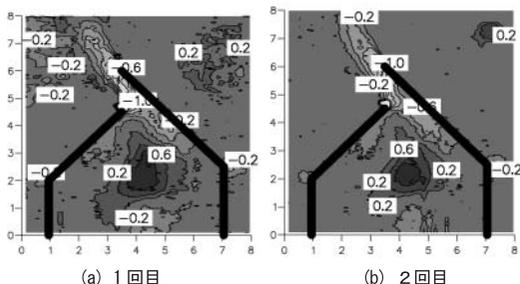


図-2 実験による地形変化 (単位: cm, +堆積 -侵食)

3. 地形変化モデルの概要

津波による地形変化の計算は高橋ら (1999) と同様に、非線形長波方程式による平面2次元の津波伝播計算から水位・流速を求め、それを外力とした底質の移動について掃流砂の連続式と浮遊砂の移流拡散方程式を解くことで実施した。

以下に、後の実験再現計算で用いた高橋ら (1999) と池野ら (2009a) の2つの地形変化モデルと地形変化に係わる計算式を示す。

(1) 高橋ら (1999) の地形変化モデル

高橋ら (1999) の地形変化モデルにおける掃流砂量算定式と掃流層・浮遊層間の交換砂量  $w_{ex}$  を以下に示す。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 21\psi^{3/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{w_{ex}}{\sqrt{sgd}} = 0.012\psi^2 - \frac{w\bar{C}}{\sqrt{sgd}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\psi = \frac{u_*^2}{sgd} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $q_B$ : 単位幅当たりの掃流砂量、 $\psi$ : シールズ数、 $s$ : 砂の水中比重、 $g$ : 重力加速度、 $d$ : 砂の粒径、 $w$ : 沈降速度、 $\bar{C}$ : 平均浮遊砂濃度である。式 (2) の右辺第1項は砂の巻上量、第2項は砂の沈降量として提案されたものである。式 (1) および式 (2) の右辺第1項の  $\psi$  に関する係数は、0.2mmの砂実験に基づき提案されている。

(2) 池野ら (2009a) の地形変化モデル

池野ら (2009a) は、トラップ実験結果との比較から掃流砂量の算定式として、河川流を対象に適用実績の高い次の芦田・道上 (1972) の式が有効であることを示した。

$$\frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = 17\psi^{3/2}(1 - \psi_c/\psi)\{1 - (\psi_c/\psi)^{1/2}\} \dots\dots\dots (4)$$

また、浮遊砂の巻上量  $P$  の算定式としては、砂粒径効果を考慮した次式の無次元巻上量算定式が提案された。

$$\frac{P}{\sqrt{sgd}} = a(v^2/sgd^3)^{0.2} \left\{ \frac{w}{\sqrt{sgd}} \right\}^{0.8} (\psi - \psi_c)^2 \dots (5)$$

ここに、 $\psi_c$ : 限界シールズ数、 $\nu$ : 動粘性係数である。池野ら (2009b) は、係数  $a$  を既往の実験結果から0.1~0.2の範囲と推定しており、本研究では実験の再現計算結果を踏まえてその範囲内で設定する。式 (5) と高橋式 (2) の右辺第2項を比べると巻上量式中のシールズ数項以外の部分が砂粒径により変化することがわかる (池野ら, 2009a)。

ここで、砂の粒径を0.08mm、 $a=0.15$ とした場合、巻上量  $P$  は  $0.056(\psi - \psi_c)^2$  となる。また、砂の粒径を0.2mm、 $a=0.15$ とした場合、巻上量  $P$  は  $0.015(\psi - \psi_c)^2$  となり、高橋

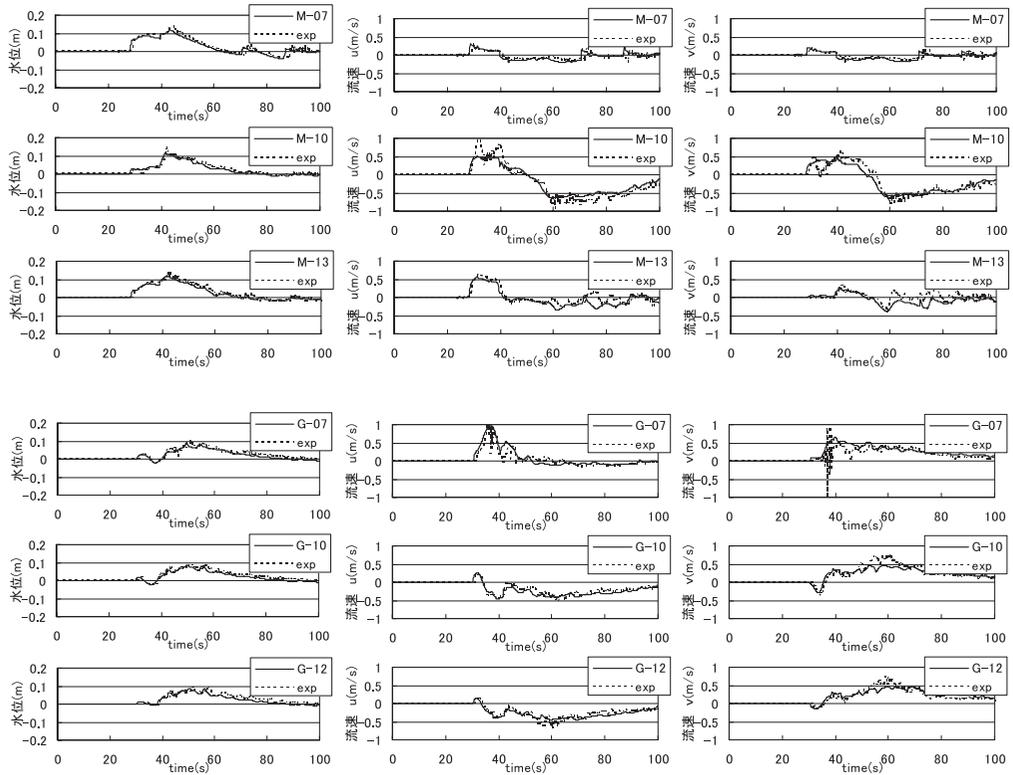


図-3 水位・流速波形の計算結果（実線）と実験結果（点線）の比較

ら (1999) の地形変化モデルにおける式 (2) の右辺第1項の係数0.012と同程度となっている。

(3) 掃流砂と浮遊砂の計算

地形変化の計算には、次式に示す掃流砂量の連続式と掃流層・浮遊層間の交換砂量式を用いる。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left( \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} - P + wC_b \right) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial \bar{C}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{C}M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{C}N}{\partial y} - P + wC_b \dots\dots\dots (7)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial \bar{C}D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_h \frac{\partial \bar{C}D}{\partial y} \right)$$

ここに、 $Z_B$ ：基準面からの底面高さ、 $\lambda$ ：底面砂の空隙率、 $q_{Bx}$ 、 $q_{By}$ ：掃流砂量のx、y方向成分、 $C_b$ ：底面濃度、 $M$ 、 $N$ ：津波計算から求められるx、y方向成分の線流量、 $K_h$ ：水平渦粘性係数、 $D$ ：全水深である。

式 (6)、式 (7) の $wC_b$ は沈降量を示しているが、沈降量に係わる濃度としては、式 (2) の右辺第2項の平均濃度と底面濃度を用いる方法がある。沈降に関して平均濃度を用いる方法では、浮遊砂層からの沈降量が過小評価されると考えられる。また、池野ら (2009a) は浮遊砂濃度の鉛直分布が指数分布で適用可能であることを実験によって確認している。そこで本研究では、浮遊砂濃度

の鉛直分布を指数分布と仮定して底面濃度を用いることとした。以下に用いた底面濃度について述べる。

浮遊砂濃度の鉛直分布 $C'(z)$ は、鉛直拡散係数 $k_z$ を用いて、

$$C'(z) = C_b \exp\left(-\frac{w}{k_z} z\right) \dots\dots\dots (8)$$

と仮定する。また、鉛直拡散係数 $k_z$ は、藤井ら (1998) にならない未定定数 $c_k (=0.2)$ を用いて以下のように仮定する。

$$k_z = \kappa u_* (h + \eta) \times c_k \dots\dots\dots (9)$$

したがって、底面濃度は次式で求められる。

$$C_b = \frac{w(h + \eta)}{[1 - \exp\{-w(h + \eta)/k_z\}]} \bar{C} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $\kappa$ ：カルマン定数 (=0.4)、 $u_*$ ：摩擦速度、 $\eta$ ：水位である。

4. 実験の再現計算結果

固定床実験に対して、計算格子間隔を5cm、マンシングの粗度係数を0.012s/m<sup>1/3</sup>、拡散係数を0.0001m<sup>2</sup>/sとした津波計算を実施した。実験と計算の水位・流速時間波形の比較を図-3に示す。比較点は、写真-1に示した6点である。水位の時間波形は、進行波と40秒以降の港湾内の反射波も含めて実験結果を良く再現できている。流速の場合、港口部M-10の実験結果は急激に流速が大きくなる

が、計算結果はその半分程度であった。港口部を除けば2方向とも計算結果は、実験結果の時間変化を十分に再現できている。

流速ベクトルの比較を図-4に示す。計算の流速ベクトルは実験結果と概ね一致しているが、30秒の港口部付近の計算結果が実験結果より小さい。それ以外については、押し波時において防波堤先端部で渦が発生し、その結果、縮流されて流れが加速される状況、港内で時計回りの大きな循環流が形成される状況、引き波時に港内から港外へ高流速が発生する状況、その後港内に渦が僅かに残っている状況が両結果とも確認され、計算結果は実験結果を概ね再現できている。

図-5に高橋ら(1999)と池野ら(2009a)の地形変化モデルによる地形変化量の計算結果と実験結果の比較を示す。池野ら(2009a)の地形変化モデルでは、沈降項の浮遊砂濃度として平均濃度と底面濃度を用い、再現を試みた。また、池野ら(2009a)の地形変化モデルでは、巻上量算定式(5)の係数 $a$ を変化させて計算した。図には、実験結果と比較して再現性が良かった0.15の場合の結果を示している。図から、押し波時の流況に対応した港口部から港内にかけての侵食、同様に引き波時に港口部から港外にかけての侵食、港内中央部の渦の中心付近への堆積傾向は、計算結果と実験結果で一致しているこ

とがわかる。しかし、高橋ら(1999)の地形変化モデルによる計算では港口部の侵食が過大であるため浮遊砂の上限濃度を5%としてそれ以上巻き上がりが発生しないようにしているにもかかわらず侵食量が多く、そのため堆積範囲が広がった。一方、池野ら(2009a)の地形変化モデルによる計算では、巻上量算定式(7)の係数 $a$ を0.15とすることによって侵食が実験と同程度となった。ただし、沈降項において平均濃度を用いた場合、堆積し難くなり、実験に比べて港内中心付近の堆積量が過小評価であった。そこで、沈降項に底面濃度を用いることにより、堆積高さ0.2cmのコンターは実験と同範囲に改善された。しかしながら、港内中心の堆積高さは過小評価となっており、これに関しては今後の課題である。

図-6に池野ら(2009a)の地形変化モデルによる地形変化量と砂の濃度分布の時間変化の計算結果を示す。砂の濃度分布は図-4の流速ベクトルと良く対応した分布形状である。また、濃度は2%以下であった。港内における堆積は、40~50秒の引き波が始まる時間以降において生じていることがわかる。渦中心の濃度は小さくなっているが、写真-1では渦中心に濁りが見られる。計算において港内中央部の堆積値が小さい原因としては、榊山(2008)が指摘する渦中心に向かう2次流を今回の計算で考慮していないことが考えられる。

図-7は領域に分けた侵食量と堆積量を計算と実験との比で比較したものである。高橋ら(1999)の地形変化モデルは、侵食量と堆積量とも全体的に過大である。池野ら(2009a)の地形変化モデルの沈降項に底面濃度を用いた場合の計算では、巻上量算定式(5)の係数 $a$ を0.1, 0.15, 0.2と変化させた。 $a=0.1$ の結果は侵食量と堆積量

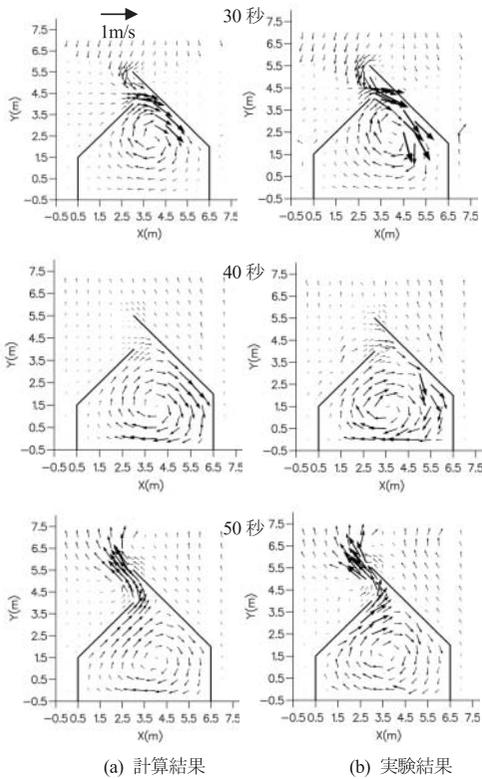


図-4 流速ベクトルの比較

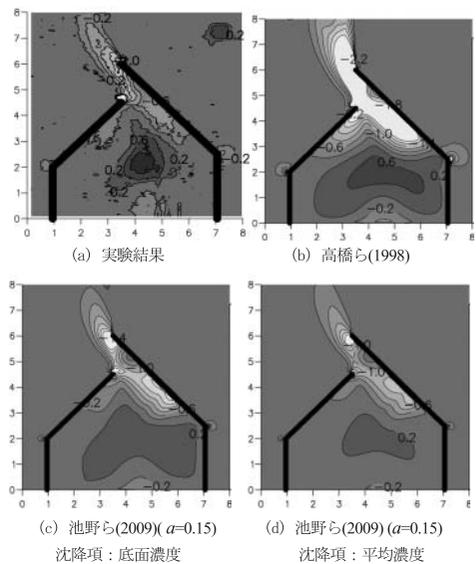
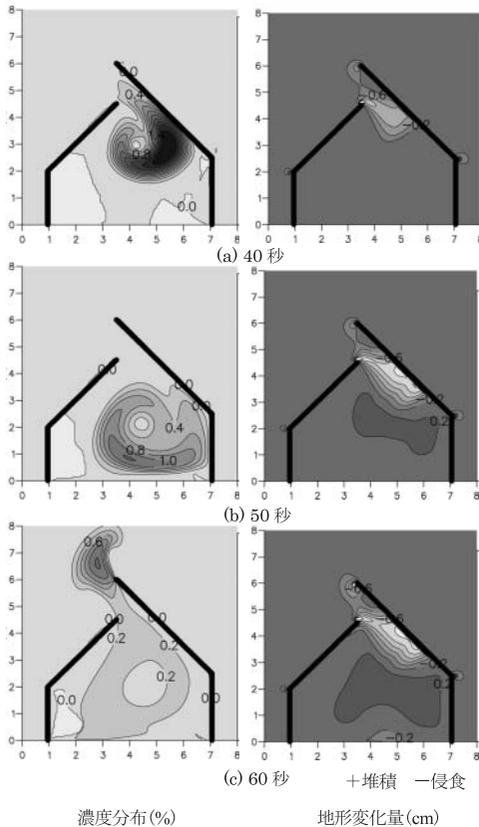


図-5 地形変化量の比較 (単位: cm, +堆積 -侵食)



濃度分布(%) 地形変化量(cm)  
図-6 計算による砂の濃度分布と地形変化量

が全体的に小さく、 $a=0.2$ の結果は全体的に大きめである。 $a=0.15$ の結果は、実験の再現性が最も良好と判断される。

## 5. おわりに

本研究では、津波による地形変化の予測モデルの構築を目指して、平面水槽内に防波堤模型を設置した水位と流速の平面分布を計測する固定床実験と砂移動による海底地形変化量を計測する移動床実験を実施し、予測モデルに必要な検証データを取得するとともに、その再現計算を実施した。以下に得られた結果を示す。

- ・防波堤先端部から発生した渦は港内中央部を中心とした循環流となること、港口部では速い流れによって侵食されて渦中心部に堆積することが把握された。
- ・固定床実験の再現計算から、実験結果と港内流況が概ね一致することを確認した。
- ・地形変化モデルを用いて実験の再現計算を実施した結果、池野ら(2009a)のモデルは実験に比べて港内中央部の堆積高さは過小であるものの、港口部で大きく侵食し、渦中心部に堆積域が生じる傾向が再現できた。このときの浮遊砂濃度は、最大で2%程度であった。

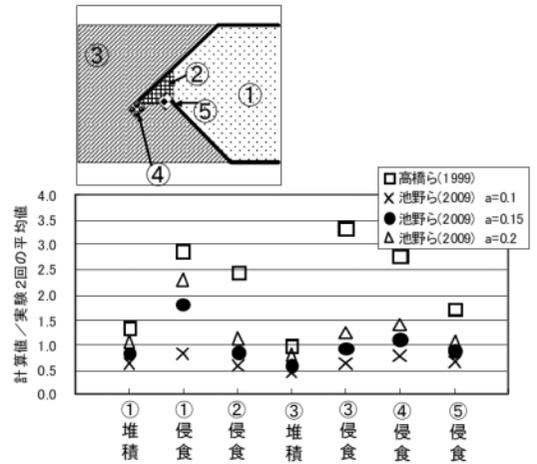


図-7 領域別地形変化量の比較

・高橋ら(1999)のモデルによる計算結果は、実験に比べて侵食量と堆積量とも過大に評価された。これは、巻上量式が砂粒径0.2mmの実験に基づいているためであり、異なる砂粒径に適用する場合は、池野ら(2009a)の砂粒径効果を考慮した巻上量式によって再現が向上することを確認した。

今後は港湾中央部の堆積高さの課題について検討し、地形変化モデルの精度向上を図る必要がある。

**謝辞**：本研究は、電力11社による電力共通研究として実施した成果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 日本大学教授)の委員や先生方に、研究成果をご審議頂き、有益なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表す。

## 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，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69.
- 池野正明・吉井 匠・松山昌史・藤井直樹(2009a)：津波による砂移動量実験と浮遊砂巻上量式の提案，電力中央研究所研究報告V08064，43p.
- 池野正明・吉井 匠・松山昌史・藤井直樹(2009b)：津波実験に基づく浮遊砂巻上量の算定と巻上量式の提案，海岸工学論文集，第56巻(投稿中)。
- 榊山 勉・松山昌史・木原直人(2008)：津波による港湾内の海底地形変化に及ぼす流速場の影響，海岸工学論文集，第55巻，pp.256-260.
- 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，海岸工学論文集，第46巻，pp.606-610.
- 西畑 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-，海岸工学論文集，第52巻，pp.1386-1390.
- 藤井直樹・大森正則・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，海岸工学論文集，第45巻，pp.376-380.