

表-1 実験ケースと測定条件

case	測深器	分解能 (mm)	反射波吸収制御
1	車輪式砂面計	1.0	あり
2	レーザー	0.1	あり
3	変位計	0.1	あり
4	同上	0.1	なし

の影響を調べるために、case2 最終地形をそのまま初期地形として反射波吸収制御のない条件で1ケース(case4)行った。

水路内の多重反射波を低減するために、造波板から10 m 地点の水位変動と流速の時系列を用いて、水口(1991)の長周期波の入射波分離法で予め反射波成分を抽出し、造波制御で防波堤模型からの反射波を吸収させた。図-2は、 $t = 0$ sから50 sの時間帯が造波水位、約60 sから100 sの時間帯が反射波の水位の符号を変えた水位変動を示す。この水位に対応する造波板の動きにより反射波を吸収制御した。海底地形斜面からの反射波や高周波成分の反射波は消波かこの投入タイミングを調整し低減させた。

図-3(a)に反射波吸収制御の有無による水位の時間変化の比較を示す。 $t = 100$ から125 sの小さい水位変動は1/10 勾配の海底斜面からの反射波である。吸収制御しない場合には多重反射が繰り返されるのに対して、吸

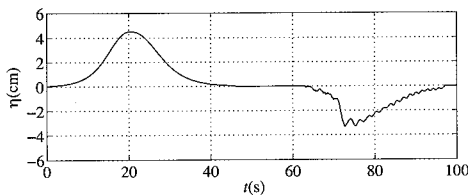
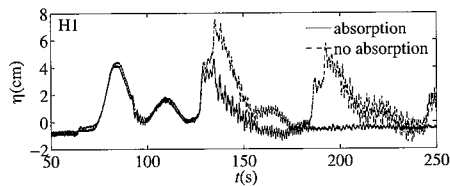
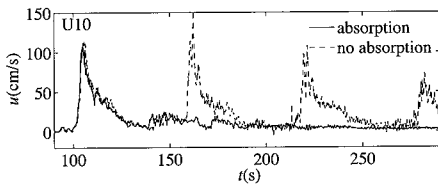


図-2 反射波吸収制御による造波水位



(a) 造波板から10m地点の水位変動



(b) 港内の水平流速成分(図-1のU10)

図-3 反射波吸収制御による水位、流速時系列

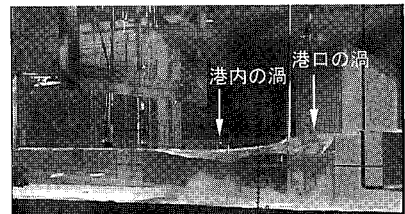
収制御をした場合には顕著な反射波はみられず、図-3 (b)の港湾内の水平流速成分 u にも反射の影響はほとんどない。

3. 実験結果と考察

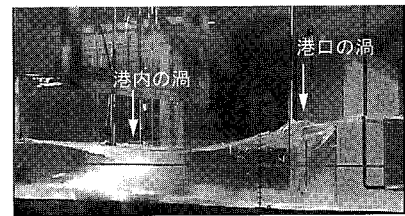
図-4に港口部と港内で発生した渦の写真を示す。港口部の流速が増加すると防波堤の港内側背後と港口部でそれぞれ渦が発生し、前者の渦は流速の増加に伴い発達し、砂を巻き上げながら港内中心部へ移動した。港内水位が下がり始めるとこの渦は減衰した。港口部の渦はその場に留まり発達し、防波堤付近の砂を巻き上げた。この渦は港湾内外の水位差の解消とともに減衰した。巻き上げられた砂は港内に運ばれて、前者の渦の中に取り込まれた。以上のような過程で、砂が大量に巻き上げられ浮遊し移流された。浮遊砂の多くは港内渦に集まり、渦の減衰とともに乱れ強度が小さくなり、渦の中心部に沈降・堆積した。一部の浮遊砂は港外に運ばれた。また、渦が形成される場の底面の境界層付近では流速が遅いので遠心力が働かないため、圧力の高い渦の外側から中心へ2次流が発生する。これをエクマン層というが、この層内を掃流状態で渦中心に輸送される可能性がある。

図-5は津波作用後に港内中央に砂が堆積して形成された地形を示す。渦の回転運動に沿った砂面の模様が残っている。写真の左下が港口部であり、港口部から港内へ向かう流れにより形成された砂面と堆積した地形の表面の模様は明らかに異なっている。右下には、港内から港口部へ向かう流れに沿った模様がみられる。

図-6に防波堤周辺と港内の地形変化量 Δz の平面分布を示す。中央に堆積した領域が顕著にみられる。港口部の防波堤周辺に等高線が密集し局所的な洗掘が発生した



(a) 港口部の渦の発生と港内への渦の移動



(b) 港口部と港内で渦の発達

図-4 港口部と港内の渦の発達

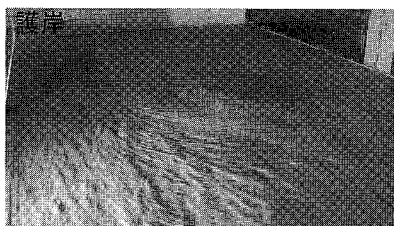
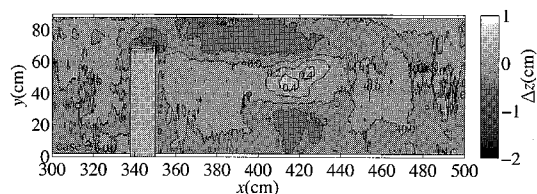
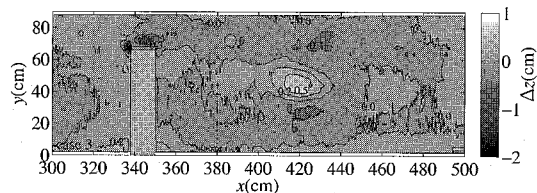


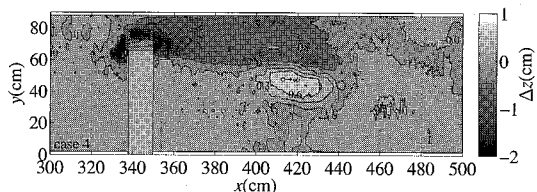
図-5 津波作用後の港内海底地形



(a) case 2, 反射波吸収制御あり



(b) case 3, 反射波吸収制御あり



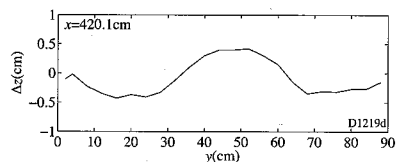
(c) case 4, 反射波吸収制御なし

図-6 津波作用後の地形変化量の平面分布

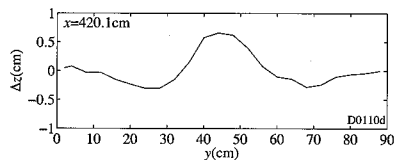
ことを示している。港口から港内に水路側壁に沿って等高線が現れているのは港内への速い流れにより侵食された領域を示している。また、港内でも湾奥と防波堤の背後隅角部の死水域に堆積している。図は省略したが全域の等高線図からは港内から流出した浮遊砂が港口部の外に堆積している様子がみてとれた。

図-7に港内の地形変化量 Δz の沿岸方向の変化、図-8に水路中心の岸沖方向の変化を示す。港内での地形変化は、港湾の大きさ、アスペクト比で決まる渦により、その中心に堆積領域、その周辺に侵食領域が形成される。

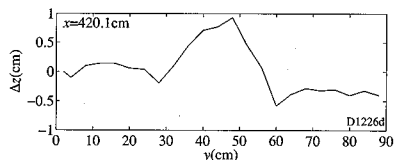
反射波吸収制御をしない場合には、1回の津波作用に比べて変化量は大きくなり、地形変化が明瞭になった。津波1波により堆積ピークの周辺は侵食されたが数波継続して作用すると、港口部の延長線上では侵食が進むが流速が反転して防波堤に向かう側では逆に堆積した(図-7(c))。縦断面図からは防波堤背後、護岸前面に堆積



(a) case 2, 反射波吸収制御あり

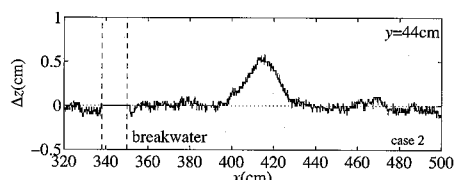


(b) case 3, 反射波吸収制御あり

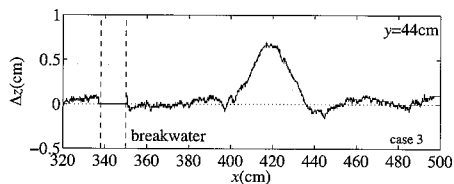


(c) case 4, 反射波吸収制御なし

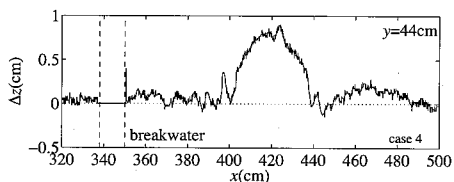
図-7 地形変化量の沿岸方向変化



(a) case 2, 反射波吸収制御あり



(b) case 3, 反射波吸収制御あり



(c) case 4, 反射波吸収制御なし

図-8 地形変化量の岸沖方向変化

が進行することがわかる(図-8(c))。

図-9に港口部防波堤先端での局所洗掘の状況を示す。測深結果を図示した図-10はこの地形と良好に対応している。防波堤の港内外の両角部に局所的な洗掘穴が発生し、侵食が進行しこれらは連続的な侵食地形になった。地形データを収集するためにはこのような充分な解像度

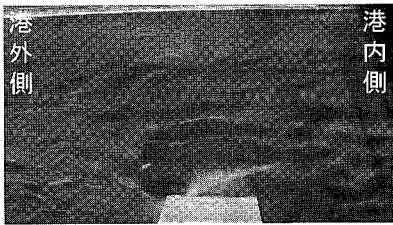


図-9 津波作用後の防波堤先端の局所洗掘

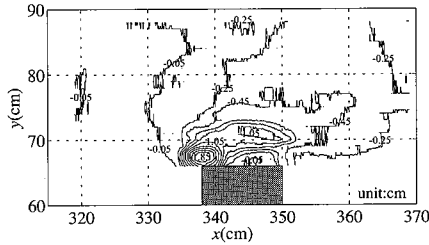
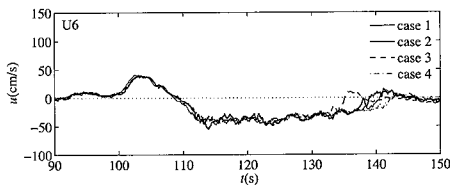
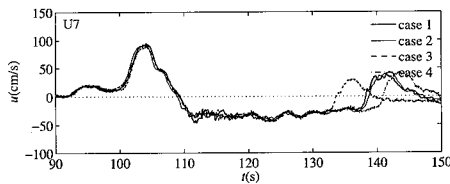


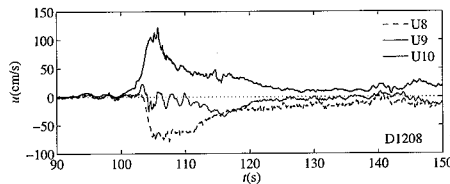
図-10 津波作用後の防波堤先端の測深結果



(a) 港口外側 U6



(b) 港口部 U7

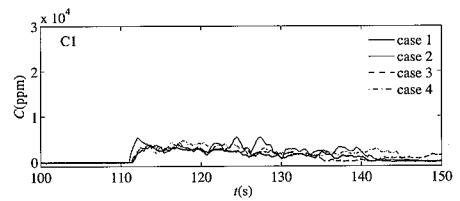


(c) 港内 港口部近傍U10, 港内中心U9, 湾奥U8

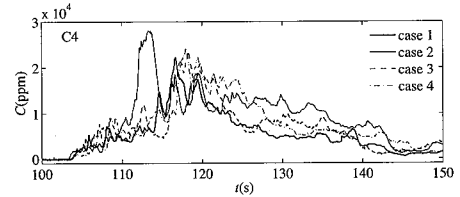
図-11 水平流速の時間変化

で測深する必要がある。木原・松山(2007)は、静水圧3次元モデルを用いて本実験結果を対象に津波による港湾内の地形変化計算を行った。数値計算により津波による地形変化を再現するためには水位変動や流速の観点に加えて、地形変化からも格子サイズを考慮する必要がある。

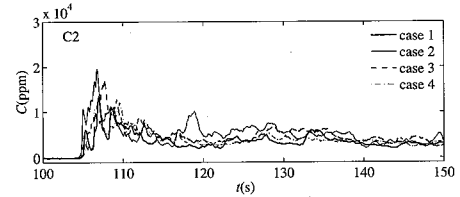
図-11に港外、港内の岸沖方向流速成分の時系列を示す。流速の再現性は良好である。港口部外側U6の押し



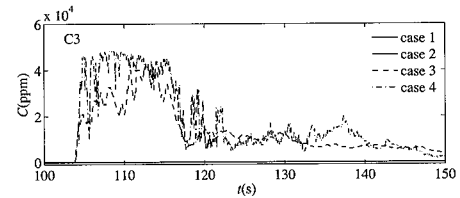
(a) 港口外側 C1



(b) 港口部港内側 C4



(c) 港内奥 C2



(d) 港内中心部 C3

図-12 浮遊砂濃度の時間変化

波時の最大流速は50 cm/s弱で岸向きの継続時間は約10 sと造波時間に比べて短い。港口部の流速U7は岸向き最大流速約100 cm/s、沖向きは50 cm/sで継続時間が長い。反射波吸収制御をしたが、 $t = 140$ 辺りに水位のピークがみられる。これは、海底斜面からの反射波の再反射波で最大流速は50 cm/s程度であるので、港口部での侵食への寄与はほとんどない。U10とU8では港湾中心部を挟んだ反対の位置にあるので流向が逆転する。渦の発達によりU8では急激に沖向きの流速が増加する。U9は港湾中心部付近に位置し渦の中心近傍で流速の値は小さくなく、むしろ水路幅方向の流速成分が大きく変動した。

図-12に浮遊砂の濃度の時間変化を示す。港口外側C1地点の最大水平流速は約50 cm/sであったが、砂の移動は発生しなかったことを観察により確認した。C1の濃度上昇は最も遅く、港内から港外へ流れるときに検出されたものである。港口部港内側のC4は、防波堤先

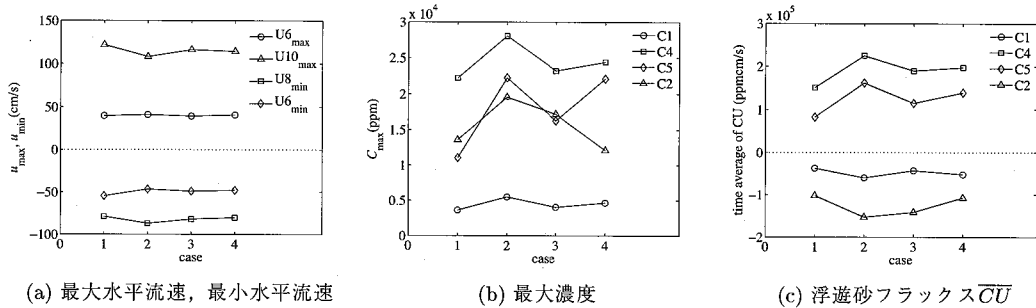


図-13 流速, 浮遊砂濃度に関する実験の再現性

端から発生する後流渦により巻き上げられた浮遊砂が渦の発達とともに港内へと浮遊状態で輸送された濃度に対応する。港湾内中心位置の濃度 C3 は短時間で高濃度に達し、急激な濃度の低下がみられる。他の位置に比べて濃度が2倍程度高くなった。これはこの地点が渦の中心に近く濃度、流速ともに変動しやすい位置にあるためである。湾奥の C2 のほうが港口に近い C4 より早い時間で高濃度に達している。このことは港内においても砂の巻き上げが発生していることを示すものである。

図-13 に実験の再現性を調べるための結果をまとめた。流速の時系列の比較を図-11 に示したように流速の最大値はほとんど一致し、砂移動の外力である流速の再現性は良好であることが認められた。これに対して、濃度の時系列、ピーク値は高濃度ほど変動し、同じ条件でも約2倍変動することがわかる。図-13(c) は、津波1波が作用している時間帯 $t = 100$ s から 150 s の間の時間平均濃度フラックスの比較を示したものである。港口外側の C1 の濃度フラックスは負であり冲向きに正味の浮遊砂が輸送されている。港内における濃度フラックスの時間平均値は最小値と最大値で約1.6倍変動した。

表-2 に地形変化量に関する実験の再現性の結果を示す。3回の実験での港内における堆積量は290, 370, 450 cm^3 であるので約1.5倍、侵食量も1.7倍程度の範囲で変動した。堆積の最大変化量は0.6～0.7 cm で同程度、侵食の最大変化量は-1.0～-1.5 cm であった。津波1波の作用により港外へ流出する漂砂量が多いことが確認された。case3 では港口部の詳細な測定結果から侵食量を算定した。港内の堆積量は450 cm^3 で、これに対して侵食量は980 cm^3 (港内 830 cm^3 と港口部 150

cm^3) で侵食量のほうが大きい。これは浮遊砂となって港外に流出したためである。

多重反射波が発生し数波津波が作用すると地形変化量が増大するだけではなく港内での堆積量が増加するというように傾向が変わることがわかった。

4. 結 言

津波による港湾内外の海底地形変化には、港口部急縮による内外の水位差に起因する港口での流速増加や港内での渦の形成が支配的な現象である。砂は流速が小さい渦の中心や港湾内の死水域に堆積した。沈降しきらない一部の浮遊砂は港外へと輸送され港口部前面に堆積した。このことは取水口閉塞や航路埋没の可能性を示唆するものである。今後実験のみならず数値計算と併用して明らかにしていく必要がある。

参 考 文 献

- 木原直人・松山昌史(2007): 静水圧3次元モデルを用いた津波による地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第54巻(印刷中)。
- 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, 土木学会, 62p。
- 原子力土木委員会津波評価部会(2007): 津波評価手法の高精度化研究-津波水位の確率論的評価法ならびに分散性と碎波を考慮した数値モデルの検討-, 土木学会論文集 B. Vol. 63 No. 2, pp. 168-177。
- 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, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 691-695。
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1991): 津波による流れと海底変動に関する研究-1960年チリ津波の気仙沼湾の場合-, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 161-165。
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1992): 土砂移動を伴う津波計算法の開発, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 231-235。
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1993): 津波移動床モデルの適用性と再現性の検討, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 171-175。
- 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。
- 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, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 376-380。
- 水口 優(1991): 浅海域における入・反射波の分離手法について, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 31-35。

表-2 地形変化の結果

case	港内(cm^3)		最大変化量(cm)	
	堆積量	侵食量	堆 積	侵 食
1	370	1200	0.7	-1.3
2	290	1400	0.6	-1.0
3	450	830	0.7	-1.5
4	1420	1700	0.9	-3.3