

急激な底面変動により水面に発生する 高周波成分に関する水理実験

EXPERIMENTAL STUDY ON HIGHT FREQUENCY COMPONENT OF SURFACE
WATER WAVES GENERATED BY ABRUPT BOTTOM DEFORMATION

渡部 勇太¹・高橋 智幸²・菅野 高弘³

Yuta WATANABE, Tomoyuki TAKAHASHI and Takahiro SUGANO

¹学生会員 修士(工学) 秋田大学大学院 工学資源学研究科土木環境工学専攻
(〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1-1)

²正会員 博士(工学) 秋田大学准教授 工学資源学部 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1-1)

³正会員 博士(工学)(独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室長
(〒269-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

A reliability of the tsunami warning system depends on its capacity for detecting tsunamis and the present systems use observed seismic waves to detect them. Unfortunately, the detection method may underestimate some kinds of tsunamis. Then, it is expected to develop a new tsunami detection system to observe sea surface directly by using remote sensing. The authors had proposed high frequency component of sea surface water waves due to a crustal deformation as the detection index. In this study, the waves were generated by using an underwater shaking table and spectral analysis was carried out to understand a relationship between the waves and bottom deformation.

Key Words : Underwater shaking table, tsunami source, tsunami warning system, detection index, spectral analysis

1. はじめに

現在の津波警報システムは、図-1 に示すように、観測された地震波から断層モデルを推測し、これを基に津波の発生を推測している。さらに気象庁の量的津波予報では、断層モデルから推測された海面変動を初期条件とした約 10 万件の数値解析結果により既にデータベースが構築されている¹⁾。そして、地震が発生すると、地震波解析から得られる地震モデルを基にデータベースを検索して、沿岸に襲来する津波を推測している。しかし、2004 年 12 月のスマトラ島沖地震の発生直後ではマグニチュードや震源域の広さが過小評価となった²⁾。すなわち、超巨大地震の発生時には、津波も過小評価となる危険性が高い。よって、従来の地震波を用いた津波検知システムに加え、津波波源を直接観測する技術が必要とされている³⁾。その一つの方法として、著者らは、図-2 に示すような海洋レーダや人工衛星画像などのリモートセンシング技術の応用を検討してきた⁴⁾。

リモートセンシングにより津波の発生を検知するためには、津波波源を周辺海域と識別する指標が重要となる。その識別指標として、著者らは、断層運動に伴う急激な海底変動によって発生する表面波を

利用することを提案している⁵⁾。しかし、津波波源上で増大すると考えられる表面波が、海底変動とどのような関係にあるのかは十分には分かっていない。そこで、基礎的研究として、様々な時間関数を用いて水中振動台を急激に稼働させ、発生する表面波を測定した。そして、観測した表面波のスペクトル解析を行い、振動台の時間関数や水深、初期水面の状態などによる表面波の発生状況を検討した。

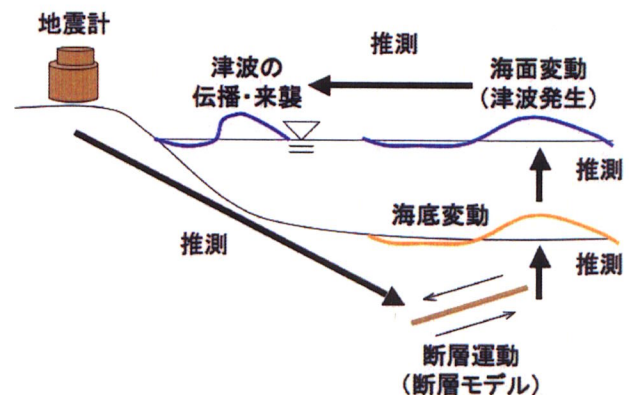
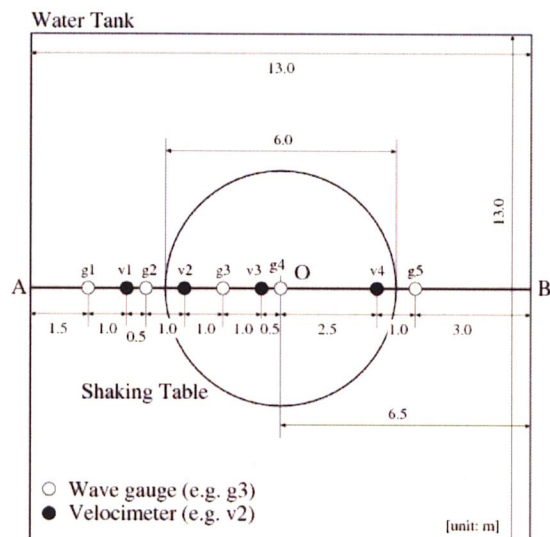
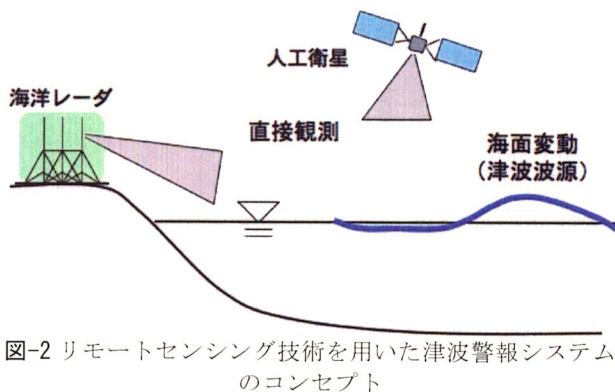


図-1 現在の津波警報システム



2. 実験方法及び解析方法

(1) 実験装置

(独) 港湾空港技術研究所が所有する三次元水中振動台及び水槽を用いて実験を行った。実験装置の構成を図-3 及び写真-1 に示す。振動台は三次元での稼働が可能だが、本実験では底面変動と表面波の関係を明らかにすることが目的であるため、単純に鉛直方向にのみ稼働させた。水槽は縦 13m、横 13m、

表-1 振動台を稼働させる時間関数の一覧

	関数名	関数形 (Z:振動台変位, t:時間)
非周期関数	[L-1]	$Z=0.5t-0.1(0 \leq t \leq 0.36)$
	[L-2]	$Z=0.25t-0.1(0 \leq t \leq 0.8)$
	[L-3]	$Z=0.5t-0.1(0 \leq t \leq 0.2)$
	[Q-1]	$Z=0.3t^2-0.1(0 \leq t \leq 0.8)$
	[Q-2]	$Z=0.3t^2-0.1(0 \leq t \leq 0.56)$
	[S-1]	$Z=0.1\sin(2\pi 20.79t+3\pi/2) (0 \leq t \leq 0.56)$
周期関数	[S-2]	$Z=0.1\sin(2\pi 20.79t+3\pi/2) (0 \leq t \leq 0.3)$
	[P-1]	$Z=0.019\sin(2\pi \times 2t) (0 \leq t \leq 15)$
	[P-2]	$Z=0.034\sin(2\pi \times 1.5t) (0 \leq t \leq 16)$
	[P-3]	$Z=0.019\sin(2\pi \times 2t) (0 \leq t \leq 22.5)$
非周期関数+周期関数	[P-4]	$Z=0.0084\sin(2\pi \times 3t) (0 \leq t \leq 15)$
	[S-2]	$Z=0.1\sin(2\pi 20.79t+3\pi/2) (0 \leq t \leq 0.3)$
	[SP-1]	$Z=-0.044\sin(2\pi \times 1.59t+3\pi/2)+0.045 (0.32 \leq t \leq 14.2)$

表-2 実験ケース一覧

実験種別	予備	振動台の時間関数に関する比較													水深に関する比較					初期水面に関する比較									
実験グループ	PE**	A**													B**		C**			D**		E**							
実験ケース	1	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	4	5	6	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
振動台位置の時間関数	L-1	○															○	○						○					
	L-2			○																									
	L-3				○																								
	Q-1					○																							
	Q-2						○																						
	S-1							○	○												○				○				
	S-2									○																			
	P-1										○											○				○			
	P-2		○									○											○						
	P-3												○														○		
P-4													○				○						○				○		
SP-1														○									○						
水深	1.5m			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○										○	○	○	○	
	1.3m																○	○	○										
	1.0m	○	○																	○	○	○	○	○					
初期水面	なし	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○											
	S-1																												
	S-2																								○	○	○	○	
		1	2	7	8	9	10	11	5	6	12	16	15	17	18	21	28	26	27	3	4	24	23	25	13	14	19	20	22

高さ 2.0m であり、固有振動数は水深が 1.5m のとき 0.27Hz、水深 1.3m のとき 0.25Hz、水深 1.0m のとき 0.22Hz である。

中心 O から水槽の左右側面の中央 A 及び B に向かって、二つの測線 OA 及び OB を設けた。測線 OA 上には 4 台の容量式波高計 (g1-g4) と 3 台の流速計 (v1-v3) を設置し、測線 OB には対称性を確認するための波高計 (g5) と流速計 (v4) を 1 台ずつ設置した。各計測器を設置した測線には長さ 10m の鉄鋼を使用し、水底に固定した高さ約 2m の 2 台の脚立に載せた上、頭上からワイヤー 2 本を用いて固定した。さらに、2 台のビデオカメラで水面変動を撮影した。1 台は水槽の上方から、もう 1 台は水槽の側面から撮影するように設置した。

(2) 実験条件

表-1 に示すような様々な時間関数で水中振動台を鉛直方向にのみ稼働させた。時間関数は、振動台を 1 回だけ上昇させる場合を非周期関数、繰り返し上昇下降させる場合を周期関数と定義した。非周期関数では一次関数、二次関数、正弦波関数を用い、周期関数では正弦波関数を用いている。なお、時間関数の振幅や時間は振動台が稼働可能な最大加速度と変位を考慮して設定した。また、水槽の高さは 2.0m であるため、水深は底面変動による水面の上昇を考慮して、1.0m、1.3m、1.5m での比較を行った。さらに、初期水面の擾乱の有無による表面波の

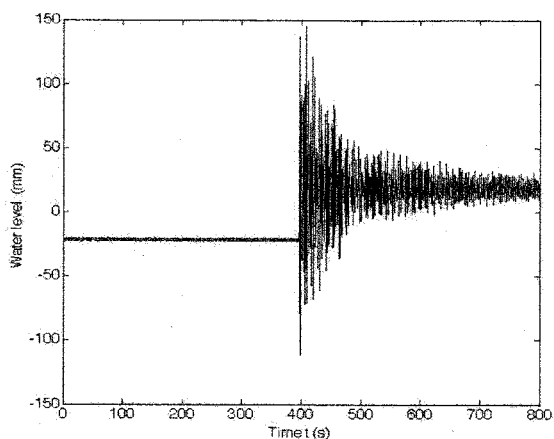


図-4 実験ケース A-6 における水位の時間変化

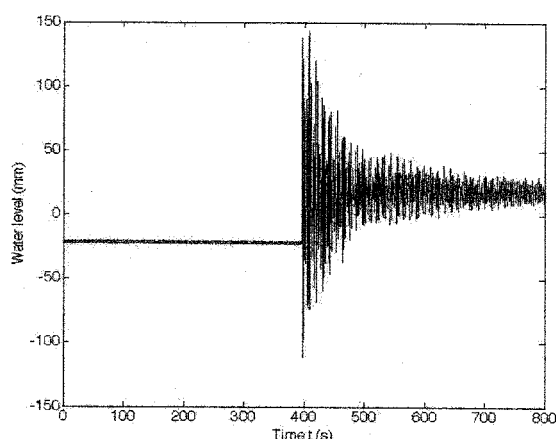


図-6 実験ケース A-7 における水位の時間変化

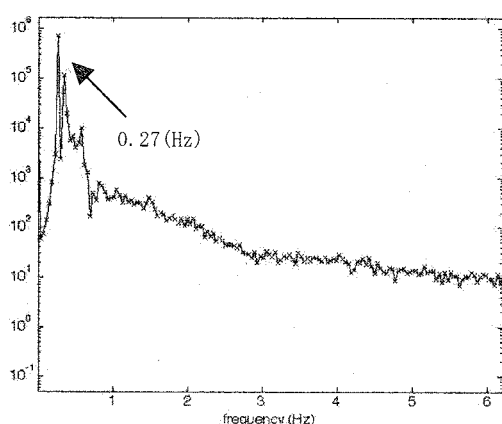


図-5 実験ケース A-6 における水位のパワースペクトル

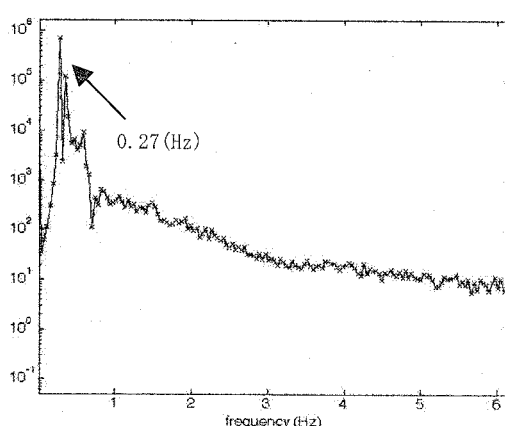


図-7 実験ケース A-7 における水位のパワースペクトル

発生の相違を調べるため、静水状態と擾乱状態で同様に振動台を稼働させて比較した。静水状態の実験では、各振動台の稼働の間に 30 分程度、静穏化させる時間をとった。擾乱状態では、まず予備的に非周期関数で振動台を稼働して水面に表面波を発生させ、その 5 分後に本稼働を行った。

以上の実験条件から構成される実験ケースを表-2 に示す。実験グループの PE は予備実験、A は振動台の時間関数に関する比較、B 及び C は水深に関する比較、D 及び E は初期水面に関する比較である。

(3) 解析方法

実験データのサンプリング間隔を 0.05 秒とし、主稼働から 25.6 秒間 (512 データ) の水面波についてスペクトル解析を実施した。また、測定データにそれぞれ 0.5 秒、1 秒、2 秒の移動平均をかけ、目視で水面状態の相違を検討した。なお、以下の解析では、振動台の影響が最も顕著に表れる波高計 g4 での測定結果を用いる。

3. 実験結果及び考察

(1) 再現性の確認

実験の再現性を確認するため、全て同じ条件で水中振動台を稼働させた実験 (実験ケース PE-1 と C-1, PE-2 と C-3, A-6 と A-7) を実施した。一例として、水深が 1.5m 及び初期水面が静水状態の条件において、振動台を時間関数 S-1 で稼働させた実験ケース A-6 と A-7 の測定データを比較する。

A-6 における波高計 g4 での水位に 0.5 秒の移動平均をかけた波形を図-4、スペクトル解析の結果を図-5 に示す。また、再現性の確認のため、A-7 の結果をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。両実験ケースの波形は極めて一致していた。さらに、スペクトル解析結果でも、水槽の固有振動数 (0.27Hz) が卓越しているのに加え、第 2 及び第 3 スペクトルもほぼ同一の結果となった。他の再現性確認用の実験でも同様に一致しており、再現性が極めて高いことを確認した。

(2) 対象性の確認

中心から同じ距離にある測線 OA 上の g2 と測線 OB 上の g5 で測定された水位を比較したところ、ほぼ同様の傾向を示した。また、測線 OA 上の v2 と測線 OB 上の v4 で測定された流速を比較したところ、ほぼ同様の傾向を示しており、対称性があることが確認できた。

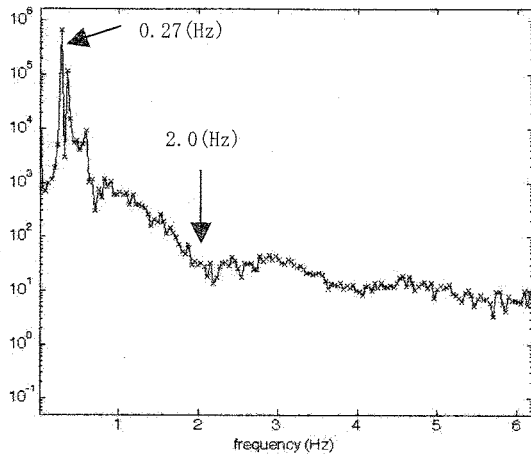


図-8 実験ケース A-4 における水位のパワースペクトル

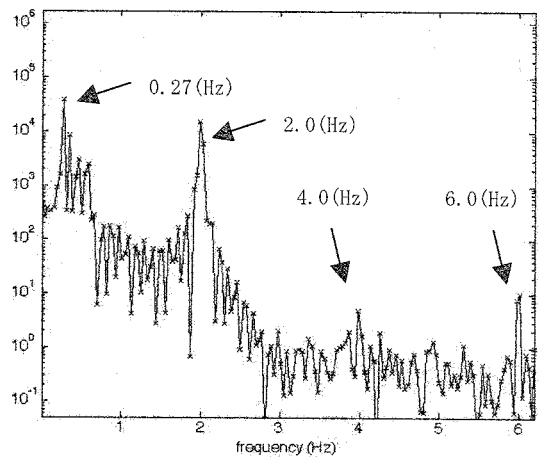


図-10 実験ケース A-10 における水位のパワースペクトル

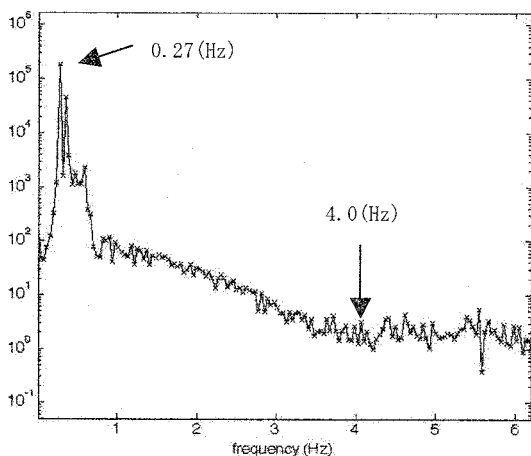


図-9 実験ケース A-5 における水位のパワースペクトル

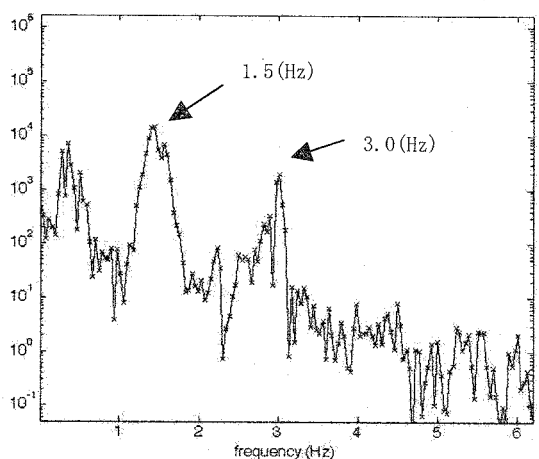


図-11 実験ケース A-13 における水位のパワースペクトル

(3) 振動台変位の時間関数が水面へ与える影響

a) 振動台が非周期関数で稼働する場合

水深が 1.5m 及び初期水面が静水状態の条件において、時間関数 Q-1 で振動台を稼働させたときの水位のパワースペクトルを図-8 に示す。水槽の固有振動数が大きく卓越しており、高周波成分になるにつれ徐々にスペクトルが弱くなっていく傾向を示した。また、高周波成分で大きなスペクトルはみられなかった。

次に先と同じ実験条件のもと、Q-1 より最終的な変位が小さくなる Q-2 で稼働した場合の水位のパワースペクトルを図-9 に示す。低周波成分での卓越は、振動台が Q-1 で稼働したときの解析結果（図-8）と同様である。しかし、Q-1 で稼働した場合は 2Hz から高周波成分のパワースペクトルが一定になっているのに対して、Q-2 では 4Hz からの高周波成分がほぼ一定になっていた。この傾向は他の非周期関数で振動台を稼働させた場合でもほぼ同様に現れていた。

また、非周期関数で振動台を稼働させた場合、振動台の変位を 1/4 周期とする表面波がパワースペクトルに現れると予想されるが、実際の実験結果には

見られなかった。例えば振動台が Q-1 で稼働した場合（図-8）は、0.31Hz の周波数が卓越すると考えられるが、その周波数帯での強い卓越は見られなかった。

b) 振動台が周期関数で稼働する場合

水深が 1.5m 及び初期水面が静水状態の条件において、振動台を時間関数 P-1 (2.0Hz) で 15 秒間稼働させた場合の解析結果を図-10 に示す。水槽の固有振動数と振動台の稼働した周波数が大きく卓越し、その間 (0.27Hz~2.0Hz) の低周波成分は若干大きなパワースペクトルが発生する結果を得た。

また、4.0Hz と 6.0Hz でパワースペクトルが微弱ながら卓越していた。このように振動台が稼働した周波数の 2 倍及び 3 倍の周波数が卓越する現象は、振動台を 1.5Hz で稼働させた場合でも同様に見られた。しかし、振動台が 3.0Hz で稼働した場合（図-11）ではこのような傾向は見られないため、振動台が低い周波数で稼働するほど発生しやすいと考えられる。

次に、P-1 (2.0Hz) で 22.5 秒間稼働した場合の解析結果を図-12 に示す。卓越する周波数は図-10 とほぼ同様だが、周波数による変化が小さくなる傾

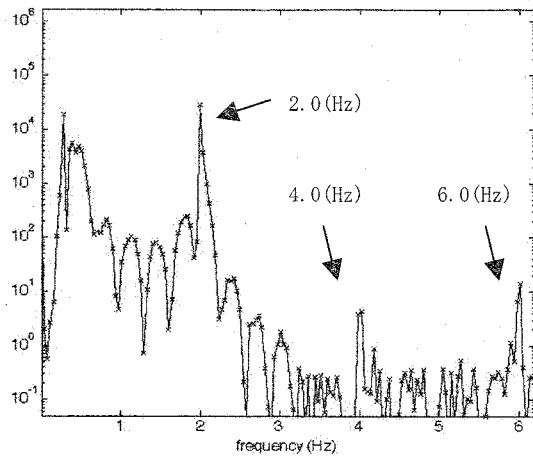


図-12 実験ケース A-11 における水位のパワースペクトル

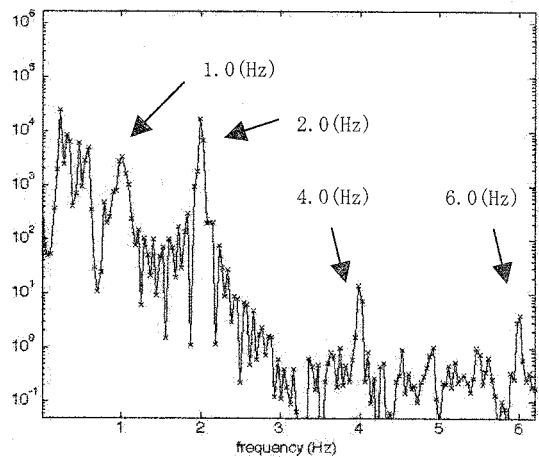


図-14 実験ケース C-3 における水位のパワースペクトル

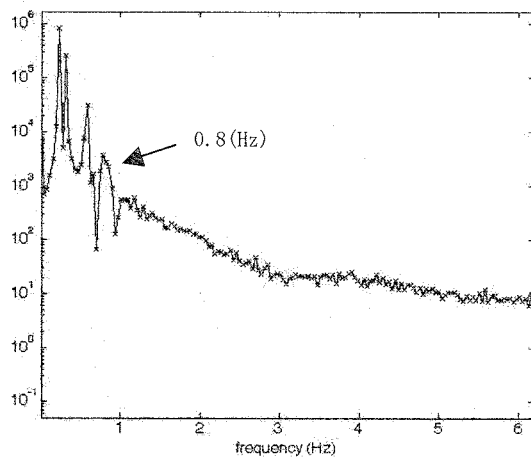


図-13 実験ケース C-2 における水位のパワースペクトル

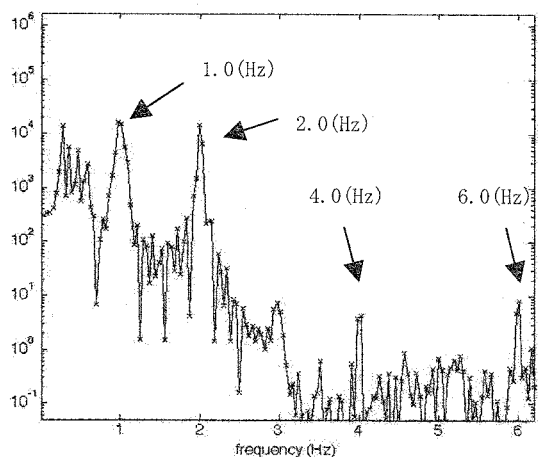


図-15 実験ケース E-3 における水位のパワースペクトル

向を示した。さらに加振していけばパラメトリック励振が発生すると考えられる。

(4) 水深の影響

水深が 1.0m 及び初期水面が静水状態の条件において、振動台を非周期関数 S-1 で稼働させたときの解析結果を図-13 に示す。水深が 1.5m の結果（図-5）と比較すると 0.8Hz で若干大きなスペクトルが見られるが、全体的な傾向はほぼ同様であった。その他の水深のみを変化させた非周期関数の実験ケースにおいても同様の傾向となり、非周期関数においては水深の影響が小さいことがわかった。

次に、水深が 1.0m 及び初期水面が静水状態の条件において、振動台を周期関数で稼働させると、振動台の稼働周波数の 1/2 倍でスペクトルが卓越する結果を得た。一例として、振動台が P-1 (2.0Hz) で稼働したときの解析結果を図-14 に示す。これはパラメトリック励振であり、振動台の稼働がさらに継続するとファラデー共鳴に達すると考えられる。この現象は水深が 1.5m の場合では発生しておらず（図-10、図-12）、水深が小さいほど発生しやすいことがわかる。しかし、図-11 に示すように、振動

台が P-4 (3.0Hz) で稼働した場合、水深が 1.5m の条件でもパラメトリック励振が発生していた。よって、振動台が高い周波数で稼働するほど発生しやすいと考えられる。

(5) 初期水面の影響

a) 擾乱状態

初期水面の擾乱の有無による表面波の発生の相違を調べるため、まず S-1 または S-2 で振動台を稼働させ、その 5 分後に別の時間関数で振動台を再度稼働する実験を行った。例として、まず時間関数 S-1 を用いて初期水面を擾乱状態にした後、時間関数 P-1 で振動台を稼働させた場合の解析結果を図-15 に示す。初期水面が静水状態では水深が 1.0m の場合でのみパラメトリック励振が発生（図-14）したが、初期水面が擾乱状態であれば水深が 1.5m でもパラメトリック励振が発生する結果を得た。P-1 以外の周期関数においても、初期水面が擾乱状態（実験グループ E）であれば全て同様に発生していた。よって、初期水面に擾乱がある場合は、静水状態よりも低い周波数の振動でパラメトリック励振が発生していることが分かる。

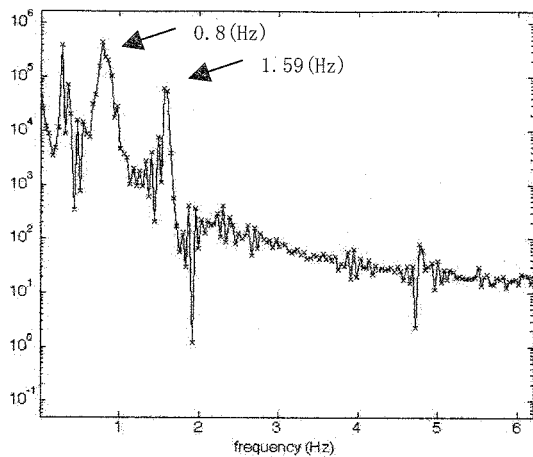


図-16 実験ケース A-12 における水位のパワースペクトル

また、振動台が稼働した周波数の 2 倍及び 3 倍のスペクトルは、初期水面が静水状態の条件での実験と同様に、振動台が P-2 (1.5Hz) と P-3 (2.0Hz) で稼働した場合のみ発生していた。

b) 主稼働直前の非周期関数の影響

水深が 1.5m 及び初期水面が静水状態の条件において、振動台を非周期関数 S-2 で稼働させ、さらに継続して 1.59Hz の周波数で稼働させた場合の解析結果を図-16 に示す。初期水面が静水状態の条件では、振動台をより高い周波数 (3.0Hz) で稼働させた場合のみパラメトリック励振が発生していた (図-11) が、主稼働の直前に非周期関数を与えることによって 1.59Hz と低い周波数の振動でもパラメトリック励振が発生した。これは直前の非周期関数により初期水面が擾乱状態になったためと考えられる。

また、初期水面が擾乱状態の条件における同様の実験での解析結果を図-17 に示す。初期水面が静水状態でも、主稼働の直前に振動台が非周期関数で稼働すれば、擾乱状態での実験と同様のパラメトリック励振が発生していることが分かる。

4. おわりに

リモートセンシングによる津波観測では検知指標が重要となるが、その一つとして津波波源上で増大する表面波が有効と考えられている。そこで、水中振動台を用いて、急激な底面変動によって水面に発生する表面波を調べた。実験の再現性及び対称性を確認した上で、以下のような解析結果を得た。

振動台が非周期関数で稼働した場合、稼働した変位を 1/4 周期とする表面波が卓越すると予想されるが、実際には有意なスペクトルとして現れないことが分かった。

振動台が周期関数で稼働した場合、初期水面の状態や水深に依存せず、振動台の稼働周波数に対応したスペクトルが大きく卓越した。また 1.5Hz と 2Hz

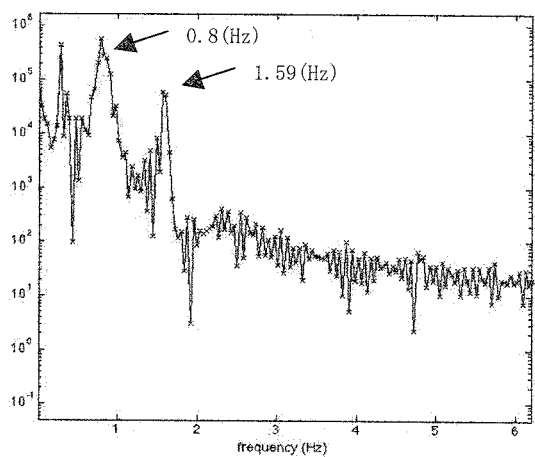


図-17 実験ケース E-5 における水位のパワースペクトル

の周期関数で稼働させた場合、2 倍及び 3 倍の周波数が卓越する結果を得た。

振動台を高い周波数で稼働するほど、また水深が小さいほどパラメトリック励振が発生しやすいことが分かった。また、初期水面が擾乱状態にある場合、低い周波数による稼働や大きな水深でもパラメトリック励振が発生しやすいことが分かった。ただし、パラメトリック励振が実際の地震でどの程度発生し得るかは今後検討していく必要がある。

本研究では、振動台の稼働が水面にどのように反映されているかを調べた。今後は、本実験で確認されたパラメトリック励振や振動台の稼働周期の 2 倍及び 3 倍のスペクトルがどのようなメカニズムで発生しているのかを明らかにするため、数値解析を行うことが必要である。

謝辞：本実験を行うにあたり、(独) 港湾空港技術研究所の枝秀紀氏から多大なご協力を得ました。また、(独) 情報通信研究機構の児島正一郎氏から有益な助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 館畑秀衛：津波数値計算技術の津波予報への応用，月刊海洋，号外 No. 15，pp. 23-30，1998.
- 2) 高橋智幸，小沼知弘：2004 年インド洋大津波が示した現在の津波警報システムの問題点，海岸工学論文集，第 54 巻，投稿中，2007.
- 3) T. Takahashi: Concept of tsunami detecting system using remote sensing, Proceedings of the 2nd International Workshop on Coastal Disaster Prevention, pp.127-132, 2006.
- 4) 小沼知弘，高橋智幸：Landsat 衛星画像を用いた津波観測の可能性に関する検討，平成 18 年度土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，CD-ROM，2006.
- 5) 高橋心平・高橋智幸・児島正一郎・小沼知弘：後方散乱強度を指標とした遠距離海洋レーダによる津波検知に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第 54 巻，投稿中，2007.