

水平浅瀬域の固有振動と入射波のビート現象について

河合 雅司¹・永松 宏一²・後藤 佑介³

On the Proper oscillations and the Beat of the Invasion Waves in Horizontal Shallow Waters.

Masashi KAWAI, Koichi NAGAMATSU and Yusuke GOTOH

Abstract

It is considered that proper oscillations with several minute periods are driven in shallow water by swells which invade the shallow water, and the proper oscillations cause the swells to beat with the same periods as the proper oscillation periods. Furthermore, it is considered that these phenomena cause ship's dragging anchor and waves to invade over breakwater. The proper oscillations in shallow water and the beat phenomena of swells due to the proper oscillations were investigated by wave generating experiments, in order to prevent the wave disasters.

The results of the investigation are:

(1) Period of proper oscillation in horizontal shallow water depends on length and depth of the shallow water and period of wave invading the horizontal shallow water, but it is independent of horizontal shallow water width.

(2) Proper oscillation in horizontal shallow water is driven by swell with wave height more than half of horizontal shallow water depth.

(3) We showed that wave height increase about by four times at coast side end of horizontal shallow water, when waves with a specific period invade a specific horizontal shallow water.

Keywords : *Ocean engineers, proper oscillation, beat phenomenon, horizontal shallow water*

キーワード: 海洋工学, 固有振動, ビート現象, 水平浅瀬域

1. はじめに

富山湾沿岸では、例年 10 月から 3 月にかけて、周期 10 秒以上、波高数 m 程度のうねり性波浪が押し寄せ、錨泊中の船舶の走錨や越波現象等の波浪災害が繰り返し発生している。そして、このうねり性波浪は地域の住民から寄り回り波と呼ばれて警戒されており、波浪災害を防止するために多くの研究者が、様々な視点からこの波の研究に取り組んでいる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。その結果、沿岸の浅瀬域にうねり性波浪が侵入することにより、浅瀬域で長周期の固有振動が生じ、その固有振動と浅瀬域に侵入したうねり性波

浪が相互作用してうねり性波浪に固有振動と同じ周期のビート現象が生じること、および、沖合に突き出た 200m 四方、水深 16m の水平浅瀬域に周期約 15 秒、波高約 7m の波が侵入すると水平浅瀬域上の平均水位が場所によって変化し、岸側(防波堤直前)では平均水位が約 4m 増加し、波高が入射波高の 5~6 倍になること等が分かってきた⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これらの現象は、船舶の走錨や越波現象の主要な原因になっていると考えられる。しかし、どのような浅瀬域に、どのようなうねり性波浪が侵入すると、どのような固有振動が生じるのかについては不明であり、また、固有

¹ 正会員 富山高等専門学校商船学科 (〒933-0293 射水市海老江練合 1-2) mkawai@nc-toyama.ac.jp

² 非会員 (株)日本港湾コンサルタント (〒141-0031 品川区西五反田 8-3-6) koichi_nagamatsu@jportc.co.jp

³ 非会員 新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011 新潟市中央区入船町 4-3778) gotoh-y84qc@pa.hrr.mlit.go.jp

振動とうねり性波浪(入射波)が相互作用して入射波にビート現象が生じる機構等についてもよく分かっていない。そこで、これらを解明するために、本研究では3種類の水平浅瀬域模型(水平床)を造波水槽内に設置し、様々な波高、周期の規則波を入射して、どのような固有振動が生じるのかについて調べ、さらに、水平浅瀬域における固有振動と入射波のビート現象との関係についても調べた。これらの結果について以下に報告する。

2. 造波実験の概要

本研究では、新潟港湾空港技術調査事務所の平面水槽を用い、広さが異なる3種類の水平床を水槽内に設置し、その水平床に、波高や周期の異なる規則波を入射して実験を行った。実験に使用した平面水槽の外観をFig.1に、波高観測システムをFig.2に示す。また、平面水槽と造波装置の諸元をTable 1に示す。



Fig.1 Water tank for wave generating experiments



(a) Capacitance-type wave gauges



(b) Wave data recording devices

Fig.2 Wave generating experiment data recording system

Table 1 Specification of water tank and wave generating device

Water tank size (Length, Width, Height)		56.5m, 6.1m, 1.0m
Wave generating device	Type	Piston (Connection type)
	Length	6m (0.5m/Device × 12)
	Drive motor	AC servo motor (800W × 12)
Generating wave (Period, Max. height)		0.4~4.0s, 0.35m

次に、実験において平面水槽内に設置した3種類の水平床は、次の通りである。

実験1: 幅 5.6m、奥行 2.0m、水深 0.11m または 0.21m
(両側は閉じている)

実験2: 幅 5.6m、奥行 4.0m、水深 0.11m または 0.21m
(両側は閉じている)

実験3: 幅 4.0m、奥行 2.0m、水深 0.11m または 0.21m
(両側に 0.8m の空き領域を有する)

実験1~実験3における水槽内の平面図をFig.3~Fig.5に示す。実験1~実験3の各の水平床に、波高と周期を変えた規則波を入射して、水平床上で生じる固有振動と規則波のビート現象について調べた。実施した実験ケースをTable 2に示す。なお、本実験は1/100縮尺の模型実験であり、実海域での値に換算した波浪(波高, 周期)を角括弧[]で示した。本研究では以下同様に、実海域での値に換算した波浪(波高, 周期)を角括弧[]で示す。

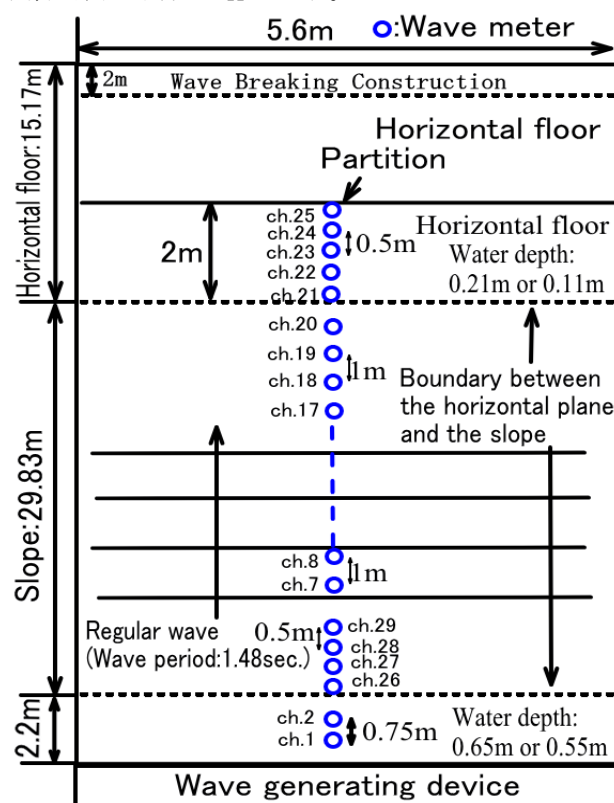


Fig.3 Floor plan of plane water tank in wave generating experiment 1

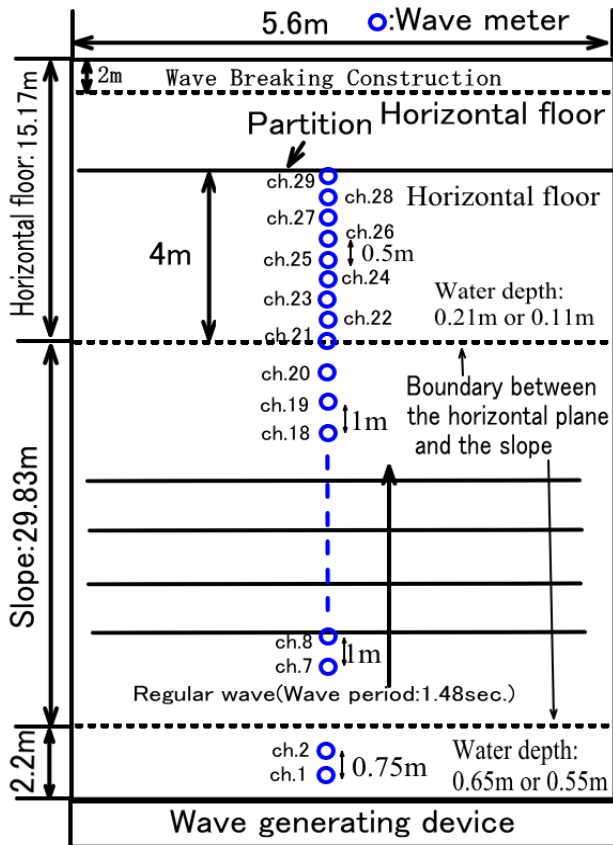


Fig.4 Floor plan of plane water tank in wave generating experiment 2

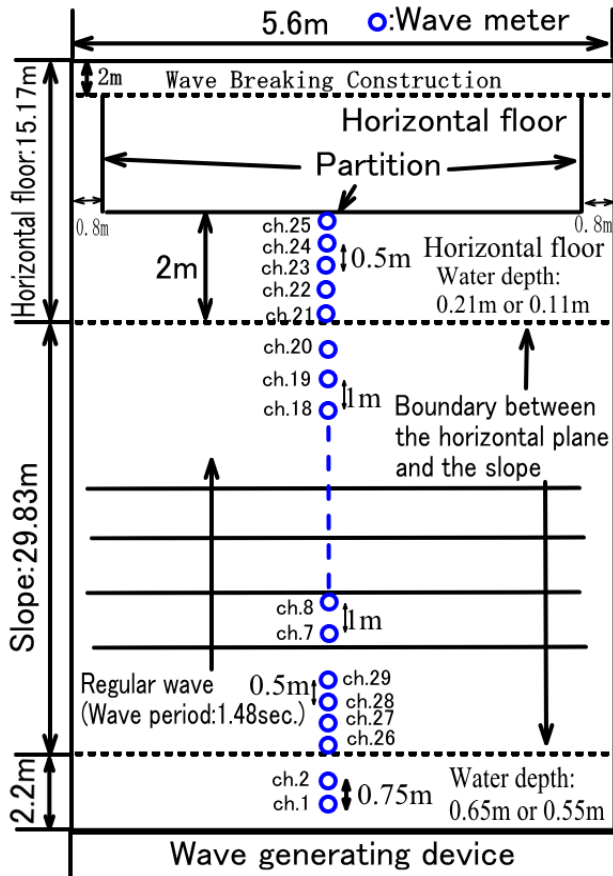


Fig.5 Floor plan of plane water tank in wave generating experiment 3

Table 2 Cases of wave generating experiments

(Values in brackets show waves in actual sea scale)

Case	Generated Wave (Height, Period)	Horizontal Floor (Length×Width×Depth)
Ex. 1-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	2.0m×5.6m×0.11m
Ex. 1-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2.0m×5.6m×0.11m
Ex. 1-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	2.0m×5.6m×0.21m
Ex. 1-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2.0m×5.6m×0.21m
Ex. 1-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	2.0m×5.6m×0.21m
Ex. 1-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2.0m×5.6m×0.21m
Ex. 2-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	4.0m×5.6m×0.11m
Ex. 2-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	4.0m×5.6m×0.11m
Ex. 2-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	4.0m×5.6m×0.21m
Ex. 2-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	4.0m×5.6m×0.21m
Ex. 2-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	4.0m×5.6m×0.21m
Ex. 2-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	4.0m×5.6m×0.21m
Ex. 3-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	2.0m×4.0m×0.11m
Ex. 3-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2.0m×4.0m×0.11m
Ex. 3-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	2.0m×4.0m×0.21m
Ex. 3-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2.0m×4.0m×0.21m
Ex. 3-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	2.0m×4.0m×0.21m
Ex. 3-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2.0m×4.0m×0.21m

以上の実験において、造波装置は、16 分 39 秒間動かし、容量式波高計を用いて造波開始後 39 秒～18 分 39 秒までの 18 分間の水位データを 0.05 秒毎に記録した。そして、スペクトル解析は造波開始後 140.8 秒～960 秒までの 819.2 秒間の水位データ (16384 個) を用いて行った。

3. 解析結果 1 (固有振動)

Table 2 に示す実験ケースにおいて、固有振動が生じた場合を Table 3 に示す。ここで、丸括弧 () で示された固有振動周期は、その固有振動が仕切板の前面のみで生じたことを示している。

実験 1 (幅 5.6m、奥行 2m の水平床) においては、水深 0.11m [11m] の Ex. 1-2 で、10.6 秒 [106 秒] の固有振動が生じた。また、水深 0.21m の Ex. 1-3 と Ex. 1-4 では、18.2 秒 [182 秒] 周期の固有振動が生じた。ただし、Ex. 1-3 の場合の固有振動は非常に小さかった。さらに、Ex. 1-5 の場合、固有振動は生じなかったが、Ex. 1-6 の場合は、仕切板の前面 (ch. 25) においてのみ、周期 7.4 秒 [74 秒] の固有振動が生じた。これらの固有振動のスペクトルを Fig. 6 に示す。

実験 2 (幅 5.6m、奥行 4m の水平床) においては、入射波の周期が 1.48 秒 [148 秒] の場合、水深 0.11m [11m] では周期 22.8 秒 [228 秒]、水深 0.21m [21m] では周期 19.5 秒 [195 秒] の固有振動が生じた。また、入射波の周期が 1.30 秒 [13.0 秒] で水

深が 0.21m[21m]の場合は、周期 45.5 秒[455 秒]となり入射波周期の 35 倍の固有振動が生じた。この固有振動については、岸側(ch. 25)と沖側(ch. 1)の位相が約 180° ずれて逆位相になっており、長さ約 36m の水槽全体が振動していることが分かる。これらの固有振動のスペクトルを Fig. 7 に示す。

実験 3 は、実験 1 とほぼ同じ水平床であるが、両側を開放した点のみが異なっている。実験 1 の場合と同じ周期の固有振動が生じており、両側を開放した場合は、両側を閉じた場合に比べて生じる固有振動の波高は小さくなるが、同じ固有振動が生じることを確認した。その結果を Fig. 8 に示す。

Table 3 から水平浅瀬域の水深の約 1/2 以上の波高の波が侵入した場合に水平浅瀬域上で固有振動が生じるが、侵入波の波高が水深の約 1/2 以上であっても水平浅瀬域上での固有振動が生じない場合もあることが分かる。さらに、実海域での波と対応できるように、時間については造波周期、水位については造波波高で正規化(無次元化)したスペクトルを Fig. 9 に示す。また、本実験で生じた固有振動の腹と節の概略位置についても調べた。その例を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。

Table 3 Wave generating experiment cases in which proper oscillations were driven

(Brackets show waves in actual sea scale and parenthesis show oscillations occurred at the front of partitions only)

Case	Generated Wave (Height, Peri.)	Horizontal Floor (L. × W. × Depth)	Period of prop. oscilla.
Ex. 1-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2.0m × 5.6m × 0.11m	10.6s, 8.8s [106s, 88s]
Ex. 1-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2.0m × 5.6m × 0.21m	18.2s, 9.0s [182s, 90s]
Ex. 1-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2.0m × 5.6m × 0.21m	(7.4s) [(74s)]
Ex. 2-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	4.0m × 5.6m × 0.11m	22.8s [228s]
Ex. 2-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	4.0m × 5.6m × 0.21m	19.5s, 9.8s [195s, 98s]
Ex. 2-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	4.0m × 5.6m × 0.21m	45.5s [455s]
Ex. 3-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2.0m × 4.0m × 0.11m	10.6s [106s]
Ex. 3-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2.0m × 4.0m × 0.21m	18.2s [182s]
Ex. 3-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2.0m × 4.0m × 0.21m	(7.2s) [(72s)]

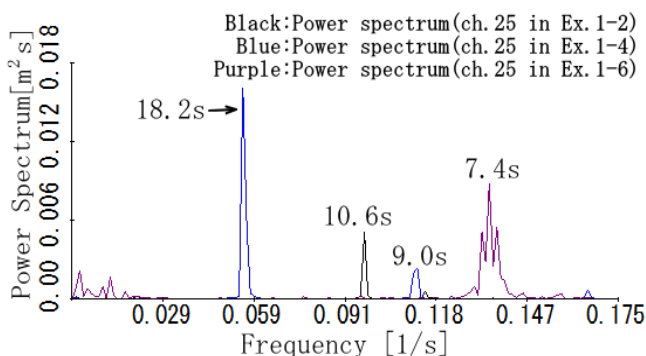


Fig.6 Power spectra of water levels in experiment 1

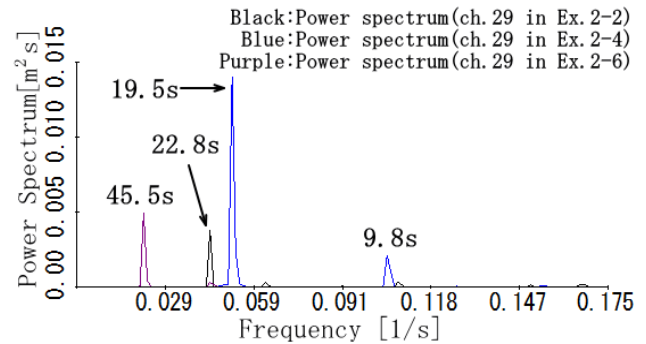


Fig.7 Power spectra of water levels in experiment 2

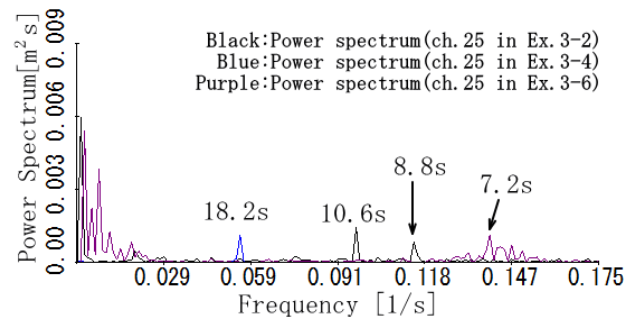


Fig.8 Power spectra of water levels in experiment 3

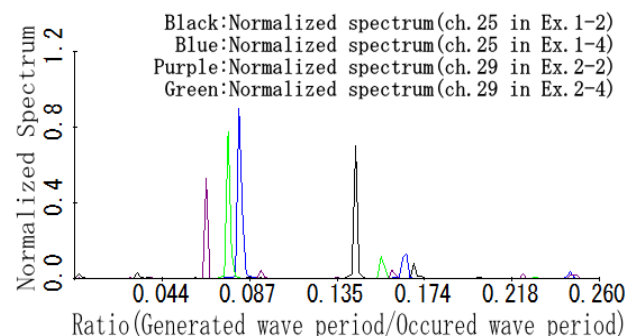


Fig.9 Spectra of water levels normalized by generated wave heights and period 1.48s.

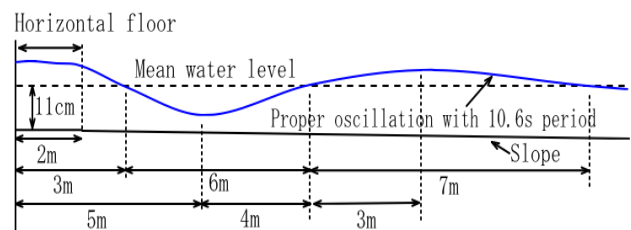


Fig.10 Node and antinode positions of the proper oscillation in Ex.1-2

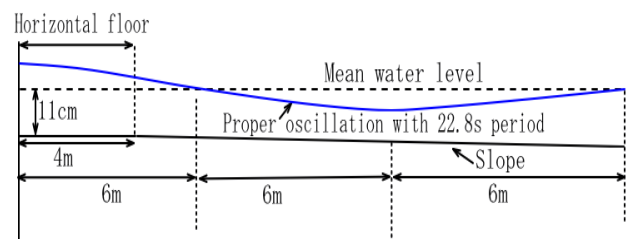


Fig.11 Node and antinode positions of the proper oscillation in Ex.2-2

4. 解析結果 2(ビート現象)

Table 2 に示された造波実験において、水平床上で固有振動が観測された全ての場合において、入射波が固有振動の周期と同じ周期でビートしていることが確認された。ビートする入射波とそのスペクトルの例を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。Fig. 12 は、周期 1.48 秒[14.8 秒]、波高 7cm[7m]の規則波を造波して、長さ 2m[200m]、幅 5.6m[560m]、深さ 11cm[11m]の水平床に入射した場合の ch. 17(Fig. 3 参照)における水位であり、ビートすることにより波高が約 2 倍になっていることが分かる。そして、ch. 17 の水位データ(819.2 秒間)のスペクトルが、Fig. 13 である。この図より、10.6 秒[106 秒]周期の波に加えて、1.72 秒[17.2 秒]と 1.3 秒[13 秒]周期の波がたに生じていることが分かる。2つの波のビート周期は(1)式で与えられる。

$$T_B = (T_1 \times T_2) / (T_2 - T_1) \quad (1)$$

T_B : 周期 T_1, T_2 の波のビート周期

T_1, T_2 : 2つの波の周期

1.48 秒[14.8 秒]と 1.3 秒[13 秒]および 1.48 秒[14.8 秒]と 1.72 秒[17.2 秒]を(1)式に入れると、ビート周期 10.6 秒[106 秒]を得る。造波した波(周期 1.48 秒[14.8 秒])が、固有振動(周期 10.6 秒[106 秒])の流れの影響を受けることにより、固有振動の周期と同じ周期でビートする。そして、そのビート現象は、造波した波(入射波)の進行方向と固有振動の流れの方向が逆の時は入射波の波高が増大し波長は短くなり、それらの方向が同じ時は入射波の波高が低くなり波長は長くなることによって生じていると考えられる。

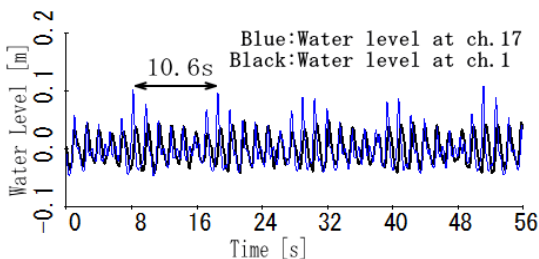


Fig. 12 Water levels of ch. 17 and ch. 1 in Ex. 1-2 since 880s after experiment start

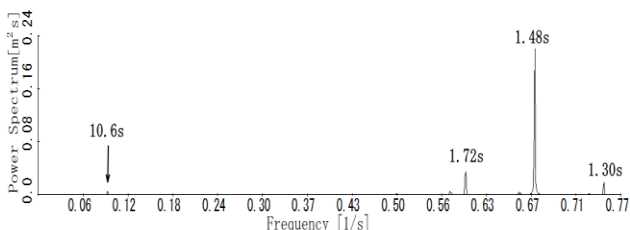


Fig. 13 Power spectra of water level of ch. 17 in Ex. 1-2

5. 解析結果 3(特異現象)

本実験において、長さ 2m[200m]、水深 21cm[21m]の水平床に波高 11cm[11m]、周期 1.3 秒[13 秒]の規則波を入射した場合(Ex. 1-6)、仕切板直前(ch. 25)の水位だけが 7.4 秒[74 秒]周期で振動し、波高が最大で入射波の約 4 倍になる特異現象が生じた。実験 Ex. 1-6 における ch. 25 のデータ記録開始後 880 秒～936 秒までの水位を Fig. 14 に示す。そして、これと同じ水平床に波高 11cm[11m]、周期 1.48 秒[14.8 秒]の規則波を入射した場合(Ex. 1-4)、および、長さ 4m[400m]の水平床に波高 11cm[11m]、周期 1.48 秒[14.8 秒]の規則波を入射した場合(Ex. 2-4)と波高 11cm[11m]、周期 1.3 秒[13 秒]の規則波を入射した

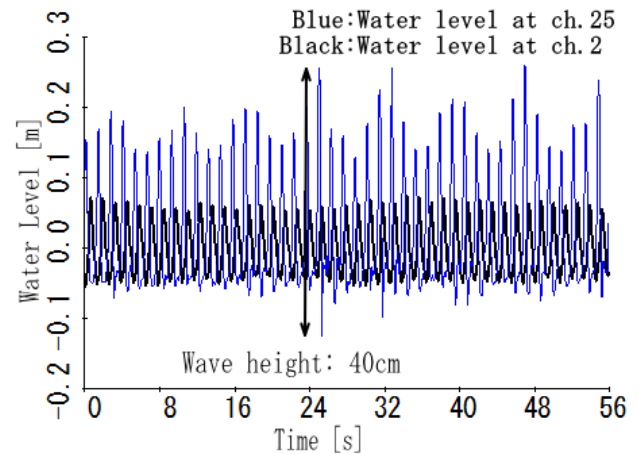


Fig. 14 Water levels of ch. 25 and ch. 2 in Ex. 1-6 since 880s after experiment start

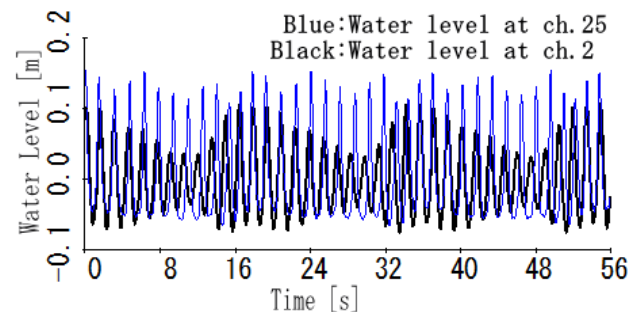


Fig. 15 Water levels of ch. 25 and ch. 2 in Ex. 1-4 since 880s after experiment start

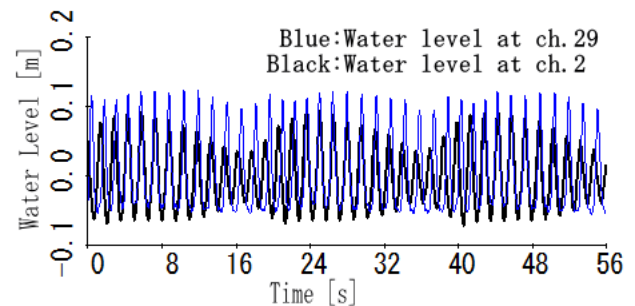


Fig. 16 Water levels of ch. 29 and ch. 2 in Ex. 2-4 since 880s after experiment start

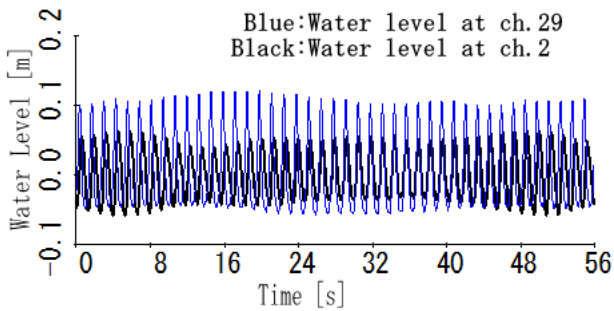


Fig.17 Water levels of ch.29 and ch.2 in Ex.2-6 since 880s after experiment start

Table 4 Ratio of max wave height(B) of ch.25 or ch.29 to generated wave height(A)

Case	Generated Wave Height(A), Period	Horizontal Floor Length, Depth	Max Wave Height(B), Period	Ratio (B/A)
Ex. 1-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	2m, 11cm [200m, 11m]	9cm, 1.5s [9m, 15s]	1.8
Ex. 1-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2m, 11cm [200m, 11m]	23cm, 1.1s [23m, 11s]	3.3
Ex. 1-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	2m, 21cm [200m, 21m]	15cm, 1.5s [15m, 15s]	1.7
Ex. 1-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2m, 21cm [200m, 21m]	22cm, 1.4s [22m, 14s]	2.0
Ex. 1-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	2m, 21cm [200m, 21m]	27cm, 1.3s [27m, 13s]	3.1
Ex. 1-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2m, 21cm [200m, 21m]	45cm, 0.9s [45m, 9s]	4.1
Ex. 2-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	4m, 11cm [400m, 11m]	9cm, 1.5s [9m, 15s]	1.8
Ex. 2-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	4m, 11cm [400m, 11m]	14cm, 1.4s [14m, 14s]	2.0
Ex. 2-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	4m, 21cm [400m, 21m]	13cm, 1.5s [13m, 15s]	1.5
Ex. 2-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	4m, 21cm [400m, 21m]	18cm, 1.5s [18m, 15s]	1.6
Ex. 2-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	4m, 21cm [400m, 21m]	13cm, 1.3s [13m, 13s]	1.4
Ex. 2-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	4m, 21cm [400m, 21m]	18cm, 1.4s [18m, 14s]	1.6
Ex. 3-1	5cm, 1.48s [5m, 14.8s]	2m, 11cm [200m, 11m]	10cm, 1.5s [10m, 15s]	1.9
Ex. 3-2	7cm, 1.48s [7m, 14.8s]	2m, 11cm [200m, 11m]	29cm, 1.0s [29m, 10s]	4.1
Ex. 3-3	9cm, 1.48s [9m, 14.8s]	2m, 21cm [200m, 21m]	14cm, 1.5s [14m, 15s]	1.6
Ex. 3-4	11cm, 1.48s [11m, 14.8s]	2m, 21cm [200m, 21m]	20cm, 1.5s [20m, 15s]	1.8
Ex. 3-5	9cm, 1.30s [9m, 13.0s]	2m, 21cm [200m, 21m]	27cm, 1.3s [27m, 13s]	3.0
Ex. 3-6	11cm, 1.30s [11m, 13.0s]	2m, 21cm [200m, 21m]	39cm, 0.9s [39m, 9s]	3.6

場合(Ex. 2-6)における、仕切板直前の水位を Fig. 15～Fig. 17 に示す。さらに、全ての実験における仕切板直前(ch. 25 又は ch. 29)での最大波高(B)の造波波高(A)に対する比(B/A)を Table 4 に示す。

これらの結果から、水平床(水平浅瀬域)の長さが長い(4m[400m])場合は、岸直前(防波堤直前)における最大波高(B)の造波波高(A)に対する比(B/A)は小さい(1.4～2.0)が、短い(2m[200m])場合は、比(B/A)は 1.6～4.1 であり非常に大きい波が発生する場合があることが分かる。また、水平床(水平浅瀬域)の長さが短い(2m[200m])場合において、水深が深い(21cm[21m])場合、周期 1.48 秒[14.8 秒]の波を入射した時の比(B/A)は 1.6～2.0 であったが、周期 1.3 秒[13 秒]の波を入射した場合の比(B/A)は 3.0～4.1

であり、周期 1.48 秒[14.8 秒]の波を入射した場合に比べて約 2 倍になっている。このことから、周期 1.3 秒[13 秒]の波が長さ 2m[200m]の水平床(水平浅瀬域)に侵入すると、周期 1.48 秒[14.8 秒]の波が侵入した場合と比べて、岸直前(防波堤直前)で波高が大きく増大することが分かる。

6. おわりに

本研究では、水平浅瀬域(水平床)の長さ(奥行)と水深、および、入射波の波高と周期を変え、さらに、水平浅瀬域(水平床)の両側が閉じた場合と開放された場合について実験を行い、水平浅瀬域上で生じる固有振動や入射波のビート現象等について調べた。そして、その結果次のことが分かった。

- (1) うねり性波浪の侵入により水平浅瀬域上で生じる固有振動の周期は、水平浅瀬域の長さ(奥行)と水深に依存しており、水平浅瀬域の両端が開放されているか閉じているかは関係がない。
- (2) 固有振動の周期は、水平浅瀬域の長さ、水深、および、入射波の周期に依存している。(Table 3 参照)
- (3) 水平浅瀬域の水深の約 1/2 以上の波高の波を入射した場合に水平浅瀬域上で固有振動が生じた。ただし、入射波の波高が水深の約 1/2 以上であっても水平浅瀬域上で固有振動が生じない場合もある。
- (4) うねり性波浪のビート現象は、うねり性波浪の進行方向と固有振動の流れ(周期的流れ)の方向が逆の場合うねり性波浪の波高は増大し、その方向が同じ場合は波高は低くなることにより生じる。そして、ビート現象によりうねり性波浪の波高は、最大で約 2 倍になる。

(5) ある特定の周期の波がある特定の水平浅瀬域に侵入した場合、水平浅瀬域上での固有振動は生じずに岸直前(防波堤直前)の水域で特異現象(長周期の振動と波高の異常増大)が生じ、その水域における波高が最大で侵入波の約 4 倍になる場合がある。

本研究では、水平浅瀬域の長さ(奥行)と水深、および入射波の周期と波高、そして、それにより生じる固有振動の周期と波高との関係を解明することはできなかった。また、長さ 2m、水深 21cm の水平床に、波高 11cm、周期 1.3 秒の規則波を入射すると仕切板直前の地点で特異現象(7.4 秒周期で振動し波高が最大で造波波高の約 4 倍)が生じたメカニズムについても不明である。これらの問題を解明するために、過去の湾水振動に関する研究成果等を参考にして、水平浅瀬域(水平床)上で生じる固有振動についてさ

らに詳しく調べ、理論的考察を深めることは今後の課題である。

謝辞

本研究において、造波実験の場を提供して頂いた新潟港湾空港技術調査事務所の笹昭二所長をはじめとする皆様に心から感謝の意を表する。

本研究は、JSPS 科研費 15K12497 の助成を受けたものである。

参考文献

- (1) 吉田清三：富山湾の海難と寄り回り波，海難防止資料，pp. 34-38，1987. 8.
- (2) 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所：富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会報告書，2008. 8.
- (3) 平山克也・加島寛章：下新川海岸に來襲した長周期うねりによる越波発生機構の解明とその対策，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 67，No. 2，pp. I_106-I_110，2011. 11.
- (4) 河合雅司・平山克也・北村康司・川口清司：うねり性波浪に伴う富山湾沿岸の水位変動について，日本航海学会論文集，第 132 巻，pp. 28-35，2015. 7.
- (5) 河合雅司・後藤佑介・北村康司・川口清司：沿岸におけるうねり性波浪による水位変動の検証，日本航海学会論文集，第 134 巻，pp. 44-51，2016. 7.