沿岸におけるうねり性波浪による水位変動の検証

河合 雅司¹・後藤 佑介²・北村 康司³・川口 清司⁴

Verification of Water Level Fluctuations Off the Coast by Swells

Masashi KAWAI, Yusuke GOTOH, Yasushi KITAMURA

and Kiyoshi KAWAGUCHI

Abstract

Wave disasters caused by large swells have occurred on the coast of Toyama Wan, and these swells have been studied by many researchers. As a result of the studies, it is known that water level fluctuations with periods of several minutes occur off the coast of the Toyama Wan, when large swells invade the Toyama Wan. But generation mechanism of the water level fluctuations does not become clear.

And so, the generation mechanism was investigated by wave observations off the coast of Toyama Wan and wave generating experiments using water tank. As the results, they became clear that the water level fluctuations with periods of several minutes are proper oscillations in horizontal shallow water off coast, and mean water level in a horizontal shallow water jutting out from a coast rises several meters due to swells invading the horizontal shallow water.

Keywords : oceanography, swell, proper oscillation, water level fluctuation, Toyama Wan

キーワード: 海象, うねり性波浪, 固有振動, 水位変動, 富山湾

1. はじめに

富山湾沿岸では、例年 10 月から 3 月にかけて押し寄せるうねり性波浪(寄り回り波)により、たびたび波浪災害が発生している。このため、富山高等専門学校では、船舶の安全運航等の視点からこの波の研究に取り組んでおり、吉田(1987)は、1981 年 12 月 16 日に富山湾に押し寄せた寄り回り波を航空機から観測していた時に、魚津から富山へかけての沖合で寄り回り波よりもはるかに周期の長い沿岸から沖合へ向かう波が、沿岸部に存在していることを発見した⁽¹⁾。この波は、うねり性波浪の侵入に伴い生じた長周期波であると思われる⁽²⁾。数分周期の長周期波の発生原因については、うねり性波群が沿岸部

で変形、砕波することにより、うねり性波群に拘束された長周期波成分が解放されることにより生じると考えられているが⁽³⁾⁽⁴⁾、必ずしも明確には分かっていない。

富山高等専門学校は、気象海象機器メーカーである(株)ソニックと波浪災害を防止するために、富山湾におけるうねり性波浪に関する共同研究を行っており、また、新潟港湾空港技術調査事務所では、港湾構造物の効率のかつ効果的な整備・維持管理を目的として富山湾のうねり性波浪の研究を進めている。そして、うねり性波浪が富山湾に侵入することにより生じる長周期波は、船の係留や港湾の構造物に影響を及ぼすと考えられる。そこで、うねり性波浪に

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 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

³ 非会員 株式会社ソニック海象機器部 (〒190-0012 立川市曙町 1-18-2) yasushi-kitamura@u-sonic.co.jp

⁴ 非会員 富山大学大学院理工学研究部 (〒930-0887 富山市五福 3190) kawaguti@eng.u-toyama.ac.jp

伴い沿岸部で発生する数分周期の水位変動(長周期波)の発生メカニズムについて詳しく調べるために、新潟港湾空港技術調査事務所および(株)ソニックとの共同研究として、富山湾沿岸部での波浪(水位)観測の実施、および、造波実験を行った。これらの結果について、以下に報告する。

2. 富山湾沿岸における水位観測

本研究では、2014年12月から2015年1月までの、四方沖合のNOWPHAS 富山波浪計による水位データ、岩瀬浜沖の水位データを用いて、うねり性波浪に伴う沿岸域の水位変動について調べた。本研究で用いたNOWPHAS 富山波浪計データは、国土交通省港湾局によって観測され、港湾空港技術研究所で処理されたものである。

四方沖のNOWPHAS 富山波浪計($36^{\circ}46'51''N$, $137^{\circ}12'06''E$, 水深 20m)と岩瀬浜沖の波浪計($36^{\circ}46'18''N$, $137^{\circ}15'00''E$, 水深 11m)は、0.5秒毎に水圧を測定して海面までの距離を観測している。富山波浪計は海底谷の斜面の上、岩瀬浜沖の波浪計はなだらかな水平浅瀬域に設置されている。富山湾における富山波浪計、および岩瀬浜沖の波浪計の位置をFig.1に示す。

Fig.1 The map of wave observation points in Toyama Wan

3. 観測水位の解析

観測された水位データについては、気象庁が公開している富山の潮汐定数を用いて、天文潮汐による水位変動を除去した。約 145.6 時間分の観測データをスペクトル解析することにより、数分周期の水位変動とうねり性波浪の関係について調べた結果、次のことが確認できた。

(1) 岩瀬浜沖における 2015 年 1 月 7 日～12 日と 1 月 13 日～18 日の波を比較すると、Fig.2 と Fig.3 に示すようにうねり性波浪のスペクトルの形が異なっている。Fig.4 と Fig.5 に示すように数分周期の波のスペクトルの形はほぼ同じである。

(2) 周期 10～20 秒のスペクトル値の合計を SA とし、Fig.2 の SA を、Fig.3 の SA で割った平方根は 2.1 となる。また、周期 60～340.9 秒のスペクトル値の合計を SB とし、Fig.4 の SB を、Fig.5 の SB で割った平方根は 2.7 となる。つまり、周期 10 数秒のうねり性波浪の波高と周期数分の波の波高は、ほぼ比例している。(うねり性波浪の波高が 2.1 倍になると、周期数分の波の波高は 2.7 倍になる。)

(3) 4.4km 離れた四方沖(B 点)と岩瀬浜沖(A 点)において、うねり性波浪のスペクトル値は B 点の方が大きい(Fig.6, Fig.7 参照)、数分周期の波のスペクトル値は A 点の方が大きい(Fig.8, Fig.9 参照)。

(4) 四方沖(B 点)と岩瀬浜沖(A 点)の数分周期の波のスペクトルの形は異なっている(Fig.8, Fig.9 参照)。

これらの結果から、沿岸部における数分周期の波は、うねり性波浪が沿岸部のなだらかな水平浅瀬域に侵入し変形、碎波する過程で、浅瀬域に生じた固有振動であると考えることができる。

Fig.2 Spectrum of swells with periods of 10 sec.

to 20 sec. observed off Iwasehama from Jan. 7 to 12, 2015

Fig.3 Spectrum of swells with periods of 10 sec.

to 20 sec. observed off Iwasehama from Jan. 13 to 18, 2015

Fig.4 Spectrum of waves with several minute periods observed off Iwasehama from Jan. 7 to 12, 2015

Fig.8 Spectrum of waves with several minute periods observed off Yokata from Dec. 15 to 20, 2014

Fig.5 Spectrum of waves with several minute periods observed off Iwasehama from Jan. 13 to 18, 2015

Fig.9 Spectrum of waves with several minute periods observed off Iwasehama from Dec. 15 to 20, 2014

Fig.6 Spectrum of swells with periods of 10 sec. to 20 sec. observed off Yokata from Dec. 15 to 20, 2014

Fig.7 Spectrum of swells with periods of 10 sec. to 20 sec. observed off Iwasehama from Dec. 15 to 20, 2014

次に、数分周期の波の波高について考える。2014年12月15日～20日にかけて、岩瀬浜沖の数分周期の波のスペクトル値が大きくなっており、最大で約 $5 \text{ m}^2/\text{s}$ である (Fig. 9 参照)。この時、岩瀬浜沖には最大で平均波高 2.6m のうねり性波浪が押し寄せていた。Fig. 7 より、この時のうねり性波浪のスペクトル値は、最大で約 $35 \text{ m}^2/\text{s}$ であり、Fig. 9 より数分周期のスペクトル値は最大で約 $5 \text{ m}^2/\text{s}$ である。従って、

$$2.6 (\text{m}^2/\text{s}) / [35 (\text{m}^2/\text{s}) / 5 (\text{m}^2/\text{s})]^{1/2} = 1.0 \text{ m} \quad (1)$$

となり、この時の数分周期の波の波高は最大で 1m 程度であったと考えられる。

4. 水路による造波実験

沿岸部における数分周期の波が水平浅瀬域における固有振動であることを確かめるために行った造波実験について、次に紹介する。2014年8月11日から15日にかけて、港湾空港技術研究所の水路 (長さ 35m、幅 0.6m) を使用して造波実験を行った。富山湾沿岸は一般に急深地形となっており、これをモデル化して水路端に急斜面 (勾配 1/3.8) を持つ水平浅瀬域 (長さ 2m、幅 0.6m、深さ 0.2m) を作り規則波を入射した。実験の概要図を Fig. 10 に示す。なお、本実験で想定する縮尺は 1/100 である。

Fig.10 The description of wave making experiment

水路内に造波装置を使用して、沖(ch1)で周期 0.8 秒～1.51 秒(波長 1m～3m)、波高 3cm～9cm の 6 種類の規則波を 10 分間発生させ、4 台の波高計(波高計(ch1):沖合, 波高計(ch2):入口, 波高計(ch3):中央, 波高計(ch4):奥)で、0.05 秒毎に 10 分間水位観測を実施し、一つの波高計につき 12000 個のデータを得た。そして、スペクトル解析では $2^{13}=8192$ 個(409.6 秒間)のデータを使用し、次の時間について行った。

(1)時間 1(Time 1): 25 秒～434.55 秒

(2)時間 2(Time 2): 190.45 秒～600 秒

スペクトル解析した結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 において、黒は沖合(ch1)、青は入口(ch2)、紫は中央(ch3)、緑は奥(ch4)のスペクトルを示しており、上図は時間 1、下図は時間 2 のスペクトルである。Fig. 11 より、波高 9cm、周期 1.51 秒の波を水平床に侵入させた場合、水深 0.2m の水平床で、周期 6.7 秒の水位変動が生じ、その振幅は水平床上(ch2～ch4)で大きく、沖合(ch1)で小さい。さらに、固有振動の位相を調べた結果、水平床上的水位は、水平床中央付近に節(Node)があり、水平床の奥と入口を腹(Anti-node)として振動しており、さらに、そのスペクトル値は時間とともに成長していることが確認できた。

Fig.11 Power spectra of water levels at ch1, ch2, ch3 and ch4

Fig.12 The cross section of plane water tank for wave generating experiment

5. 平面水槽による造波実験

2015 年 6 月と 9 月に新潟港湾空港技術調査事務所の平面水槽(56.5m×6.3m)を用いて、造波実験を行った。この平面水槽には、緩勾配(1/50 と 1/100)の斜面を有する水平浅瀬域が設置されており、さらに側

面は消波構造になっている。岩瀬浜沖(Fig. 1 の A 点参照)は緩勾配の地形であり、この平面水槽の地形は、これに相当している。そして、水深 0.21m の水平浅瀬域に規則波を入射し、浅瀬域で固有振動が生じるかどうか検証した。使用した平面水槽の断面図を

Fig. 12 に示す。規則波(沖(ch3, ch4)で周期 1.48 秒(波長 3m)、波高 5cm、7cm、9cm、11cm、13cm、15cm)を 16 分間造波し、0.05 秒毎に波高計で水位を観測した。解析は、造波装置を動かした 16 分間(960 秒間)19200 個のデータのうち、 $2^{14}=16384$ 個(819.2 秒間)のデータを使用した。データ解析は、次の時間について行った。

(a)時間 A(Time A) : 30~849.2 秒まで

(b)時間 B(Time B) : 85~904.2 秒まで

(c)時間 C(Time C) : 140.8~960 秒まで

なお、これらの実験に使用した平面水槽と水位観測システムを Fig. 13 に示す。

Fig.13 The plane water tank and wave level observation system in wave generating experiments

5.1 造波実験 1

造波実験 1 は、平面水槽内に仕切りを設け、幅 5.6m、長さ 2m、水深 0.21m の水平床を設置し、規則波(周期 1.48 秒、波高 5cm~15cm)を水平床に入射した。この波の水平床上の波長は 1.99m となる。また、本実験で想定する縮尺は 1/100 であり、造波実験 1 における水槽内の仕切と波高計設置位置を Fig. 14 に示す。

周期 1.48 秒、波高 11cm の規則波を水平床に入射して得られた水位データをスペクトル解析した結果を Fig. 16 に示す。Fig. 16 は、ch16 の時間 A(青)、時間 B(黒)、時間 C(紫)の水位データのスペクトル

であり、18.2 秒および 9.1 秒周期の固有振動が存在していることが分かる。また、時間 C のスペクトルは時間 A のスペクトルよりピーク値が増大しており、固有振動が時間とともに成長していることが確認できた。なお、固有振動の位相も調べることにより、18.2 秒周期の波の波高は 14mm で、2m の水平床上で全体が上下に振動していることが分かった。

Fig.14 Floor plan of plane water tank in wave generating experiment 1

Fig.15 Proper oscillation with period of 9.1 sec. and 3 mm amplitude on the horizontal floor

Fig.16 Power spectra of water level of channel 16 in wave generating experiment 1

この波は、勾配 1/100 の斜面上での固有振動と思われるが、斜面上の水位データがないため詳細には分からない。また、9.1 秒周期の波については、波高 6mm 程度で、Fig. 15 に示す様にほぼ水平床上で振動していることが分かった。さらにこの場合、水位に約 18 秒周期のビート現象 (Fig. 18 参照) が生じている。このビート現象は、1.48 秒周期の波と 1.61 秒、1.37 秒周期の波 (Fig. 19 参照) の相互作用である。1.61 秒と 1.37 秒周期の波は、1.48 秒周期の波と 18.2 秒周期の固有振動の相互作用により生じたと思われる。

次に、周期 1.48 秒、波高 9cm の規則波を水平床に入射して得られた水位データをスペクトル解析した結果を Fig. 17 に示す。Fig. 17 より、波高 9cm の規則波の場合、固有振動は非常に小さく、18.2 秒と 12.2 秒周期の固有振動は時間とともに減衰していたが、9.3 秒周期の固有振動は、いったん時間とともに減衰した後、再び成長していた。これは、波高 7cm、周期 1.48 秒の規則波を入射した

場合も同様であった。18.2 秒周期の波は斜面上、9.3 秒周期の波は水平床上の固有振動であると考えられるが、初期 (時間 A) に存在してやがて減衰して消滅する 12.2 秒周期の波については、どのような波なのかよく分からない。

さらに、Fig. 16 と Fig. 17 から入射する規則波の波高が浅瀬域の水深の 1/2 以下になると浅瀬域における固有振動が急に小さくなることが分かる。これは、浅瀬域における固有振動は、うねり性波浪の波高の 2 倍程度より浅い領域で生じていることを示していると考えられる。

5.2 造波実験 2

造波実験 2 は、水平浅瀬域が沖合に突き出た地形を想定したものであり、Fig. 20 に示す様に、幅 2m、長さ 2m、水深 0.16m の水平床を設置し、この水平床に周期 1.48 秒、波高 5cm~11cm の規則波を

Fig.21 Fluctuation of mean water level on horizontal floor

Table 1 Mean water level on horizontal floor in Time C

Wave height		ch16	ch15	ch14	ch13	ch12
	5cm	11mm	-3mm	3mm	-3mm	2mm
	7cm	43mm	-6mm	7mm	-4mm	2mm
	9cm	23mm	6mm	7mm	-5mm	2mm
	11cm	27mm	-2mm	6mm	-5mm	3mm

入射させた。この波の水平床上の長さは約 1.8m となる。また、本実験で想定する縮尺は 1/100 である。水平床上および沖合の波浪計設置位置を Fig. 20 に示す。造波実験 2 では、水平床上の固有振動は確認できなかったが、水深 0.16m の水平床上の平均水位が、Fig. 21 に示すように場所によって変化していることが明らかになった。平均床上の時間 C における平均水位を Table 1 に示す。

水平床上の波長は約 1.8m であり、ch16、ch14 では、入射波と反射波がほぼ同位相となって波高が増大し、ch15 と ch13 では逆に打ち消しあうと思われる。それらの例として、ch12 と ch13 の水位を Fig. 22 と Fig. 23 に示す。また、水平床上では、屈折により波が集まってくるために波高が増大している。Fig. 24 に示すように ch16 における波高は、40cm 程度(入射波高の 5、6 倍)に増大している。これは、周囲から波が集まり、さらに、入射波と反射波が重なった結果であると考えられる。

この水平床上における平均水位の場所による変化は、波高 7cm の規則波を入射した場合が最も大きく、ch16 で+43mm、ch15 で-6mm、ch14 で 7mm、ch13 で-4mm、ch12 で 2mm であった。また、岸側

Fig.22 Water level of channel 12 in wave generating experiment 2

Fig.23 Water level of channel 13 in wave generating experiment 2

Fig.24 Water level of channel 16 in wave generating experiment 2

(ch16)の波高も波高 7cm の規則波を入射した場合が最も大きかった。波高 7cm の場合、ch16 の水位は 43mm となっており、これは沖合に突き出た長さ 200m 四方、水深 16m の水平浅瀬域に波長 300m、波高 7m の波が侵入した場合、岸側の平均水位が約 4m 上昇することを意味している。

平均水位の変化については、合田による一様斜面上の水位変化図⁽⁵⁾や、高山・神山・菊地によるリーフ上の波高算定式⁽⁶⁾等があるが、いずれも数 cm の平均水位上昇を説明することはできない。本実験における平均水位の上昇を説明するためには、新しい平均水位上昇計算式を提案する必要がある。

6. おわりに

本研究では、富山湾沿岸部における水位観測、および造波水槽を用いた実験により、うねり性波浪の侵入に伴い沿岸部で生じる数分周期の水位変動について調べた。そして、4.4km 離れた海底地形の異なる 2 地点(水深約 20m と約 10m)における水位観測より、次のことが分かった。

(1) 沿岸部における数分周期の水位変動(長周期波)は、うねり性波浪が沿岸部のなだらかな水平浅瀬域に侵入し変形、砕波する過程で、水平浅瀬域において生じた固有振動であると考えられる。

また、造波実験より次のことを確認した。

(1) 勾配 1/3.8 の斜面に続く、長さ 2m、水深 0.2m

の水平床に、周期 1.51 秒(波長 3m)、波高 9cm の規則波を入射させることにより、水平床上で周期 6.7 秒の水位変動(固有振動)が生じる。これは、勾配 1/3.8 の斜面に続く、長さ 200m、水深 20m の水平浅瀬域に波長 300m、波高 9m のうねりが侵入することにより周期 67 秒の水位変動が生じることを意味している。

(2) 勾配 1/100 長さ 19.8m に続く長さ 2m、深さ 0.21m の水平床に周期 1.48 秒(波長 3m)の規則波を入射させることにより、水平床上で周期約 9 秒と周期約 18 秒の水位変動(固有振動)が生じた。周期約 9 秒の水位変動は、水平床上で岸側を腹(Anti-node)、水平床と斜面の境界付近を節(Node)として変動していた。周期約 18 秒の水位変動は、水平床上で上下に振動しており、これは斜面上での固有振動と考えられるが、斜面上では水位観測をしていなかったため詳細は不明である。

(3) 水深 0.16m、広さ 2m 四方の水平床に波長 3m、波高 5cm~11cm の規則波を入射すると、水平床上の平均水位が岸側、中央、および水平床と斜面の境界上で上昇した。平均水位の上昇は、波高 7cm の規則波(波高が水深の約 1/2)を入射した時が最も大きく、岸側で 4.3cm 上昇していた。さらに、岸側において、波高が入射波高の 5、6 倍になっていた。これは、水深 16m、200m 四方の水平浅瀬域に波長 300m、波高 7m のうねり性波浪が侵入すると、岸側の平均水位が約 4m 上昇し、波高が約 40m になることを意味している。

富山湾沿岸に押し寄せるうねり性波浪の有義波高は一般に 5m 程度であり、うねり性波浪の侵入により水深 10m 程度以下の水平浅瀬域で、数分周期の固有振動が生じていると思われる。そして、この水平浅瀬域にうねり性波浪が侵入することにより生じる数分周期の固有振動は、船舶の走錨に重要な影響を及ぼしていると思われる。さらに、富山湾沿岸ではうねり性波浪による越波発生機構の解明とその対策が重要である⁽⁷⁾。富山湾沿岸では、水橋、滑川、芦崎等の沿岸で水深 10m 程度の浅瀬域が数 100m 程度沖合に突き出た地形になっており、これらの沿岸に波高 5~7m のうねり性波浪が押し寄せた場合、平均水位が数 m 上昇している可能性がある。越波対策を考える場合に、沖合に突き出た形状の浅瀬域にうねり性波浪が侵入することによる沿岸での平均水位の上昇を考慮することが重要であると思われる。

水平床(水平浅瀬域)に規則波を侵入させることにより生じる水位変動(固有振動)、平均水位の場所による変化、岸側における波高の増大、およびビート現象について、水平床の長さや水深、侵入させる規則波の波長や波高等を変えて詳しく調べること、さらに移動性低気圧による水位変動に伴う富山湾沿岸部の長周期水位変動について詳しく調べることは、今後の課題である。

謝辞

本研究において重要な役割を果たした港湾空港技術研究所の 35m 水路での造波実験を実施して頂いた、港湾空港技術研究所海洋研究領域波浪研究チームの平山克也博士、加島寛章博士、長沼淳也研究官および同研究チームの皆様、さらに、平面水槽での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松田茂所長をはじめとする調査事務所の皆様、および(株)日本港湾コンサルタントの永松宏一部長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) 河合雅司・門村英城：寄り回り波・津波の予報に関する基礎研究，日本航海学会論文集，第 125 号，pp. 129-135，2011. 9.
- (3) M.J.Tucker: Surf Beats: Sea Waves of 1 to 5 Min. Period, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol.202, No.1071, pp. 565-573, 1950.8.
- (4) 関本恒浩・森屋陽一・水口優：自由長周期波の発生とその定量的評価に関する理論的考察，海岸工学論文集，第 47 巻，pp. 236-240，2000.
- (5) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 3 号，pp. 59-106，1975.
- (6) 高山知司・神山豊・菊地治：リーフ上の波の変形に関する研究，港研技研資料，No. 278，1977.
- (7) 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.