

富山新港における港外と港内のうねり性波浪の比較

大谷 咲季穂¹・河合 雅司²

A comparison between swells off and in Toyama New Port

Sakiho OTANI and Masashi KAWAI

Abstract

The big swells invade the Toyama Bay from October to March as usual, and cause wave disasters repeatedly since long ago on the coast of Toyama bay. Furthermore, LNG cargo handling is carried out regularly in Toyama New Port, and it is dangerous because, swells invaded the port give bad influence to the cargo handling. Therefore, it is important to investigate swells invaded the port. And so, we investigated swells in the Toyama New Port by the comparison of swells off and in the port. Summaries of obtained results are as follows.

- (1) The shapes of wave spectra in the port are different from those off the port.
- (2) The shapes of wave spectra in the port are almost the same, independently of shapes of wave spectra off the port.
- (3) Attenuation rates of swells with about 14 second, about 13 second and about 11 second period, which invaded Toyama New Port, are smaller than those of swells with other periods which invaded the port.

It was shown that wave height of long period wave with about 30 minute period, which invaded Toyama New Port, increases four times compared to the wave height before invading the port in another study. Furthermore, it was shown that attenuation rates of swells, which invaded the port, are different depending on those wave periods in this paper. The authors consider that the cause that the attenuation rates of swells are different depending on the wave periods, is that wave heights of swells with particular periods which invaded the port, increase at the end of the port. It is a future problem to make clear the generating mechanism of those phenomena.

Keywords : *Ocean engineers, Swells, Wave disaster prevention, Toyama New Port, Toyama Bay*

キーワード: 海洋工学, うねり性波浪, 波浪災害防止, 富山新港, 富山湾

1. はじめに

日本海沿岸中央部の富山湾に位置する伏木富山港は、1951年に伏木港と富山港が統合されてできた港であり、古くから日本海側の重要な港として栄えてきた。そして、1968年4月に新たに富山新港が開港し、伏木富山港は伏木地区、富山地区、新湊地区の3地区で構成されることとなった。さらに、1986年6月に特定重要港湾に指定され、2011年度からは国際拠点港湾に指定されて現在に至っている。しか

し、富山湾沿岸には、例年秋から春にかけて、Fig. 1に示す様な周期10秒以上、波高数m程度のうねり性波浪が押し寄せ、船舶の転覆・漂流等の波浪災害が繰り返し発生している⁽¹⁾。伏木富山港で発生した波浪災害をTable 1に示す。また、2018年11月から、伏木富山港新湊地区の富山新港で液化天然ガスによる発電所の運用が開始され、約10万屯のタンカーで運ばれてきた危険物(液化天然ガス)の荷役が定期的に港内で行われている。この様に伏木富山港におけ

¹ 学生会員 富山高等専門学校専攻科 (〒933-0293 射水市海老江練合 1-2)

² 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



Fig.1 Swells surged on the Ebie coast of Toyama Bay on 8 April 2013

Table 1 Wave disasters in Fushiki-Toyama Port

Date (Area)	Outline
08 Mar., 1989 (Toyama)	Tanker(999tons) was dragging anchor and grounded
20 Oct., 2004 (Toyama)	Sailing ship(2556tons) was dragging anchor and grounded
20 Oct., 2004 (Fushiki)	Cargo-passenger ship(4254tons) turned over at pier
24 Feb., 2008 (Fushiki)	North break water, Manyo Pier, etc. were damaged
07 Oct., 2009 (Shinminato)	Training ship(231tons) had damages to shell plating, etc.
23 Oct., 2017 (Toyama)	Cargo ship(1798tons) was drifted and grounded

る波浪災害を防止するための取り組みは益々重要になっている。

そこで、富山新港の港外と港内における周期 10 秒以上のうねり性波浪を比較し、防波堤等で波浪の侵入を防いでいる港内において、どの様にうねり性波浪が減衰しているのかについて調べた。そして、興味深い結果が得られたので報告する。

2. 水位の観測

富山高等専門学校では、2015 年 3 月 18 日より富山新港内の臨海実習場検潮室 (36° 45.65' N, 137° 7.88' E) の室内で、水晶式水位計 (観測精度: 波高の 0.02%) の水圧センサを、水深 8m の地点で水面下約 3m に設置 (懸垂) して、1 秒毎に水位観測を行っている。その外観を Fig. 2 に示す。また、2015 年 12 月から 2016 年 2 月まで、および、2017 年 12 月～2018 年 3 月まで、射水市海老江沖 (C 点, 36° 46.31' N, 137° 09.56' E, 水深 10.5m) で、2018 年 12 月から 2019 年 3 月まで富山新港沖 (B 点, 36° 47.05782' N, 137° 06.70980' E, 水深 10m) に水圧式波浪計 (Fig. 3 参照) を設置して 0.5 秒毎に水位観測 (観測精度: 波高の 1%) を実施した。これらの観測地点を Fig. 4 に示す。



Fig.2 Tide station in the port



Fig.3 Wave meter

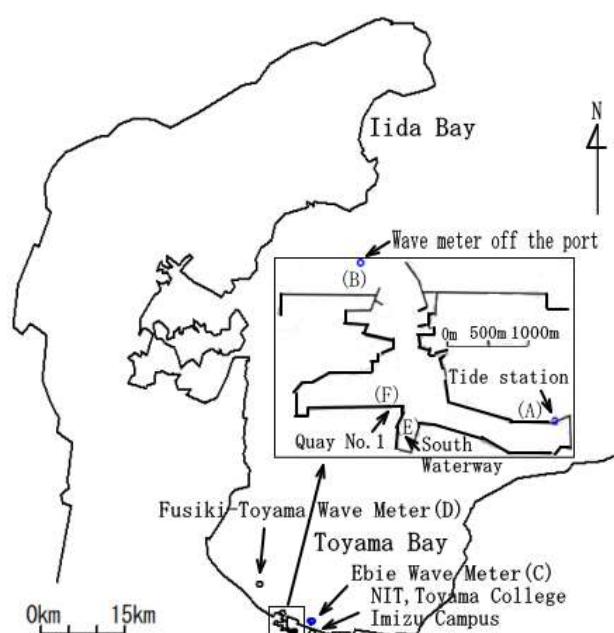


Fig.4 Wave observation points in Toyama Bay

3. 観測データの解析

本研究では、富山沿岸に周期 10 秒以上のうねり性波浪が押し寄せていたかどうかについて、港外 (Fig. 4(B))、または、海老江沖 (Fig. 4(C)) に設置した水圧式波浪計の観測データから得られた有義波により判断した。一例として、2018 年 1 月に海老江沖で観測された有義波を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、2018 年 1 月 24 日から 27 日にかけて、有義周期 10 秒以上、有義波高 2m 程度のうねり性波浪が押し寄せていたことが分かる。そして、沿岸に押し寄せたうねり性波浪が、防波堤により波の侵入を防いでいる港内でどの様に減衰しているのかについて調べるために、港外 (Fig. 4(B)) と海老江沖 (Fig. 4(C)) の水位スペクトルと港内 (Fig. 4(A)) の水位スペクトルを比較した。また、本研究では、気象庁のウェブサイトで公開されている富山の潮汐定数を用いて潮汐による水位変動を計算し、観測水位から潮汐による水位変動を除去して、水位のスペクトルを求めた。フーリエ変換とスペクトルを次式で定義する。ここでは、窓関数は高調波成分に歪みが生じる、波高の低い波の検出が困難等の問題はあがあるが、分解能の高い方形窓を用いた。(スペクトルの平滑化はしない。)

$$F(f) = \int_{-T/2}^{T/2} \eta(t) [\cos(2\pi ft) - i \cdot \sin(2\pi ft)] dt \quad (1)$$

$$G(f) = 2 \frac{|F(f)|^2}{T} \quad (T \rightarrow \infty) \quad (2)$$

ここで、 $\eta(t)$: 時刻 t の水位、 f : 波の周波数、 $G(f)$: スペクトル、 T : データ解析時間

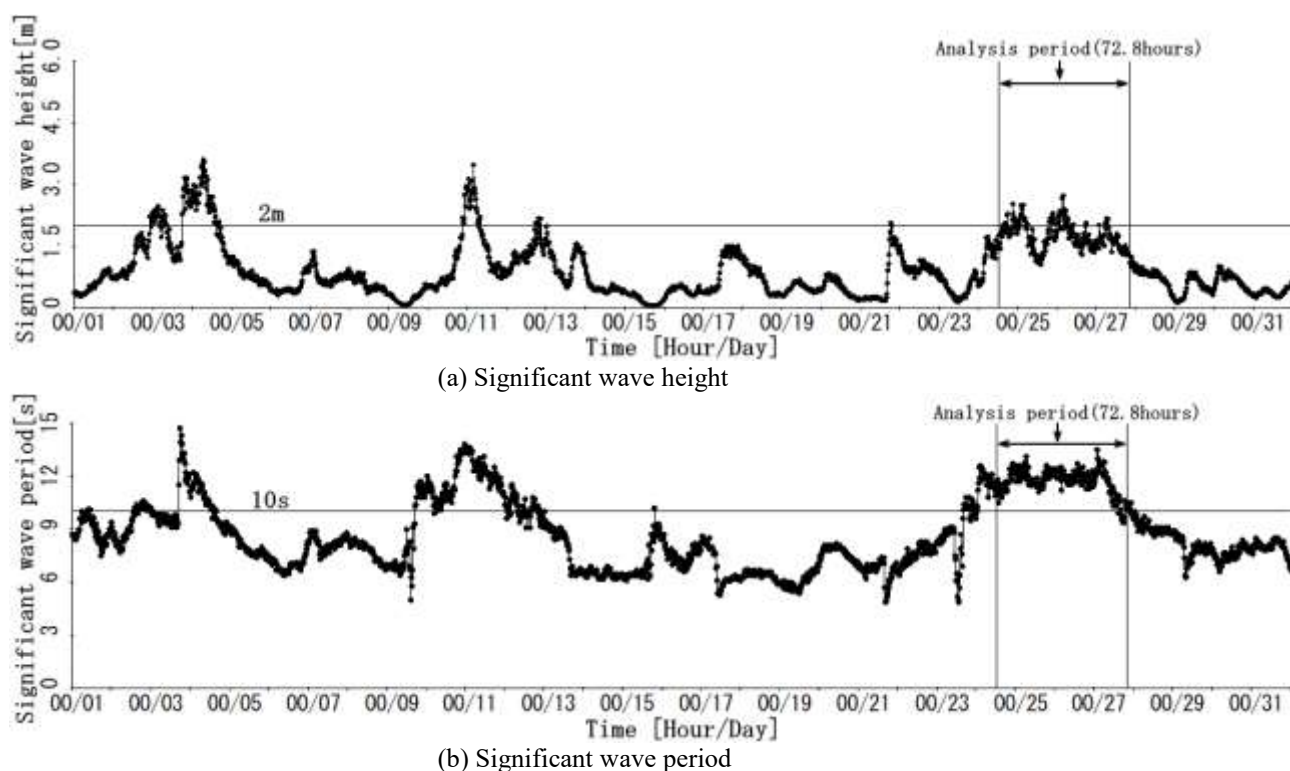


Fig.5 Significant wave observed off Ebie (Fig.4(C)) in January, 2018

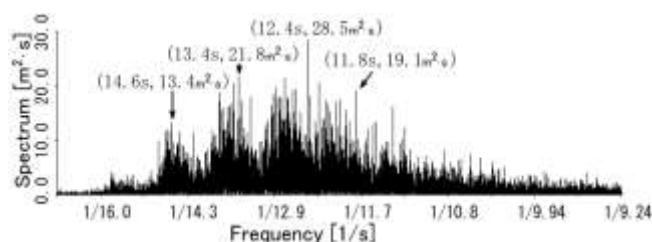


Fig.6 Spectra of water level fluctuation which was observed off Ebie at point C in Fig.4 for about 72.8 hours after 12:10 on January 24, 2018

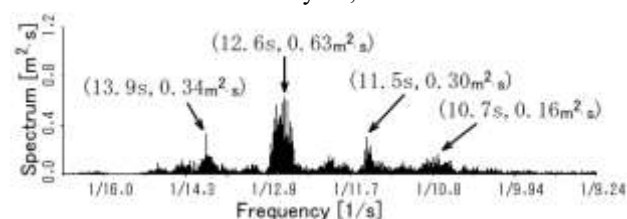


Fig.7 Spectra of water level fluctuation which was observed at point A in Fig.4 for about 72.8 hours after 12:10 on January 24, 2018

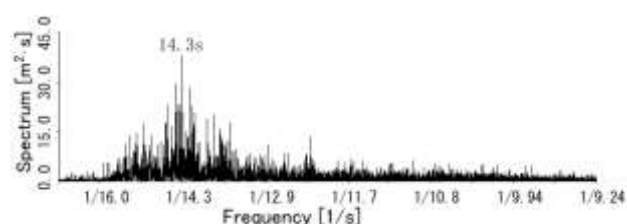


Fig.8 Spectra of water level fluctuation which was observed off Ebie at point C in Fig.4 for about 72.8 hours after 00:15 on March 1, 2016

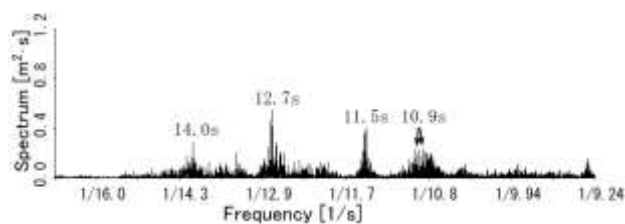


Fig.9 Spectra of water level fluctuation which was observed at point A in Fig.4 for about 72.8 hours after 00:15 on March 1, 2016

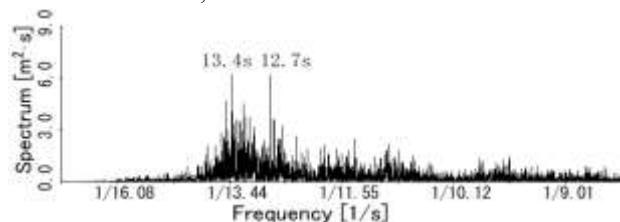


Fig.10 Spectra of water level fluctuation which was observed at point B in Fig.4 for about 18.2 hours after 06:10 on December 31, 2018

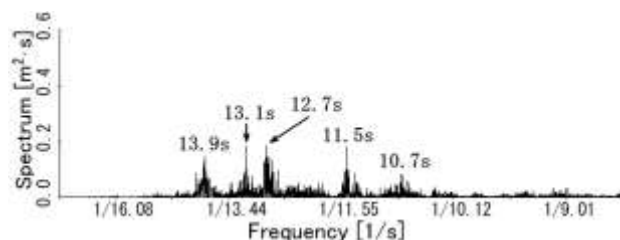


Fig.11 Spectra of water level fluctuation which was observed at point A in Fig.4 for about 18.2 hours after 06:10 on December 31, 2018

一例として、2018年1月24日12時10分から約72.8時間分の海老江沖 (Fig. 4(C)) と富山新港内 (Fig. 4(A)) で観測された水位のスペクトルを Fig. 6 と Fig. 7 に示す。Fig. 6 と Fig. 7 から、富山新港の港外と港内ではスペクトルの形が大きく異なっており、周期約10秒から約16秒のうねり性波浪は、防波堤等によって同じように減衰するのではなく、周期によってその減衰率に違いがあることが分かる。また、海老江沖 (Fig. 4(C)) と富山新港内のスペクトル値を比較すると、港外のピーク値は $13 \sim 29 \text{ m}^2\text{s}$ 、港内奥のピーク値は $0.2 \sim 0.6 \text{ m}^2\text{s}$ である。 $(0.6/29)^{0.5} \approx 0.14$ であり、港内奥の波高は港外の約0.14倍に減衰している。次に、2016年3月1日0時15分から約72.8時間分の海老江沖 (Fig. 4(C)) と富山新港内 (Fig. 4(A)) で観測された水位のスペクトルを Fig. 8 と Fig. 9 に示す。さらに、2018年12月31日6時10分から約18.2時間の水位の富山新港沖 (Fig. 4(B)) と富山新港内 (Fig. 4(A)) におけるスペクトルを Fig. 10 と Fig. 11 に示す。ただし、2018年～2019年3月にかけては、周期10秒以上のうねり性波浪が1日以上に渡り押し寄せたことがなかったので解析時間を約18.2時間とした。これらの図から、港外のうねり性波浪のスペクトルの形は異なっている、港内のうねり性波浪のスペクトルの形はほぼ同じであることが分かる。

次に、港内のスペクトル値 (Fig. 7、Fig. 9、Fig. 11 のスペクトル値) を港外のスペクトル値 (Fig. 6、Fig. 8、Fig. 10 のスペクトル値) で割った、港外の波に対する港内の波のスペクトル比を Fig. 12～Fig. 14 に示す。ただし、スペクトル比を計算するにあたり、約72.8時間の水位を解析した Fig. 12 と Fig. 13 については港外の波のスペクトル値が $2.0 \text{ m}^2\text{s}$ 以下の場合、約18.2時間の水位を解析した Fig. 14 についてはスペクトル値が $1.0 \text{ m}^2\text{s}$ 以下の場合にスペクトル比を0とした。

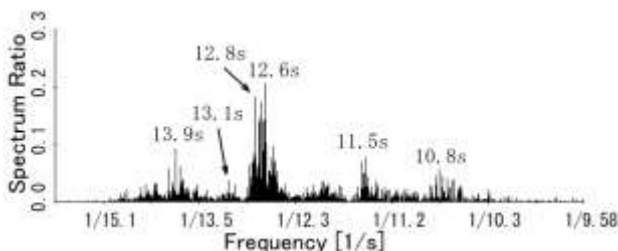


Fig.12 Ratio of the wave spectra shown in Fig.7 to the wave spectra shown in Fig.6

(Ratios were set to zero in case wave spectra shown in Fig.6 are less than or equal $2.0 \text{ m}^2\text{s}$)

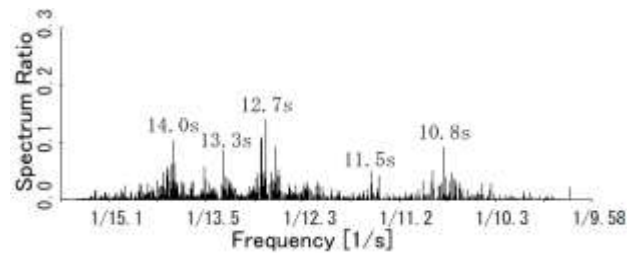


Fig.13 Ratio of the wave spectra shown in Fig.9 to the wave spectra shown in Fig.8

(Ratios were set to zero in case wave spectra shown in Fig.8 are less than or equal $2.0 \text{ m}^2\text{s}$)

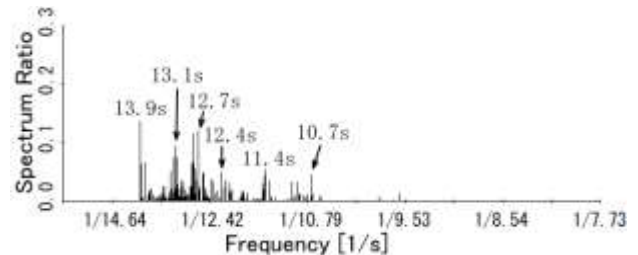


Fig.14 Ratio of the wave spectra shown in Fig.11 to the wave spectra shown in Fig.10

(Ratios were set to zero in case wave spectra shown in Fig.10 are less than or equal $1.0 \text{ m}^2\text{s}$)

これらの図から、富山新港における港外に対する港内の波のスペクトル比は、約10.8秒、約11.5秒、約12.7秒、約14秒等の周期にピークがあり、港外 (Fig. 4(B), (C)) と港内奥 (Fig. 4(A)) のうねり性波浪の減衰率は周期によって異なっていることが分かる。

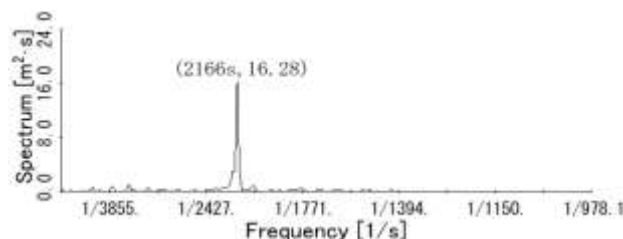
4. 考察

Fig. 6～Fig. 11 に示した様に、富山新港の港外と港内のうねり性波浪のスペクトルは全く異なっており、港内のうねり性波浪は約14.0秒周期、12.6～12.8秒周期、11.5秒周期等のスペクトル値が大きくになっている。富山新港内の水深は、10m～15m程度であるが、これらの周期の波は他の周期の波と比べてあまり減衰していない。以前に実施した造波実験において、長さ2m、水深21cmの水平浅瀬域に、周期1.3秒・波高11cmの波 (規則波) を入射すると、岸直前で波高が入射波 (造波した波) の波高の約4倍になるが、同じ条件で波の周期だけを1.48秒にすると岸直前の波高の増大率は2倍であり、波の周期によって岸直前で波の波高の増大率が大きく異なることが分かっている⁽²⁾。そして、造波実験のみならず実際の波においても、富山新港に侵入した約30分周期の長周期波の波高が、富山新港の最奥部 (Fig. 4(A)) で富山新港沖 (Fig. 4(B)) の波高の約4倍に増大し、

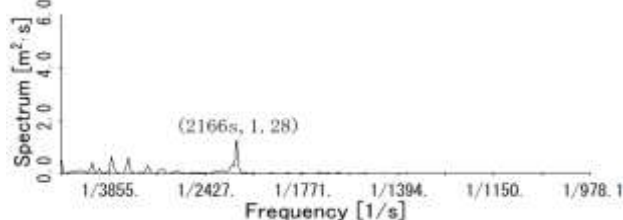
その波の位相が約 40° ずれることが報告されている⁽³⁾。また、この波は飯田湾や海老江沖でよく観測される波で、飯田湾と海老江沖で位相が約 180° ずれている⁽⁴⁾。そして、富山新港に侵入することによる波高の増大は約 30 分周期の波(富山沿岸と飯田湾間のほぼ南北方向の波)で顕著であり、他の周期の波では顕著な波高の増大は観測されていない(参考文献(2)参照)。

港の奥で波の波高が増大する一例として、2018 年 12 月 31 日 0 時 10 分から約 72.8 時間分の水位の富山新港内(Fig. 4 の A 点)と富山新港沖(Fig. 4(B))のスペクトル値とその比を、Fig. 15 と Fig. 16 に示す。2166 秒周期の波の港内(Fig. 4(A))のスペクトル値は $16.28\text{m}^2\text{s}$ 、港外(Fig. 4(B))のスペクトル値は $1.28\text{m}^2\text{s}$ であり、スペクトル比の平方根は $(16.28/1.28)^{0.5} \approx 3.57$ となり、A 点での波高は B 点での波高の約 4 倍になっていることが分かる。本研究での港内の波の観測地点(Fig. 4(A))は、富山新港の最奥部であり、造波実験における岸直前の地点に対応していると考えられる。

うねり性波浪は、富山湾に北北東～北東の方向から侵入するので、うねり性波浪が富山新港内に直接侵入することはない、屈折や回折等により港内(水深 10m～15m 程度)に侵入し、最奥部(岸直前)でその波高が増大していると考えられる。この時、うねり性波浪の周期によって最奥部における波高の増大率が異なり、約 14.0 秒周期、12.6～12.8 秒周期、約 11.5



(a) Spectra of water level fluctuation which was observed at point A in Fig.4



(b) Spectra of water level fluctuation which was observed at point B in Fig.4

Fig.15 Spectra of water level fluctuation without ocean tide which was observed for about 72.8 hours after 00:10 on December 31,2018

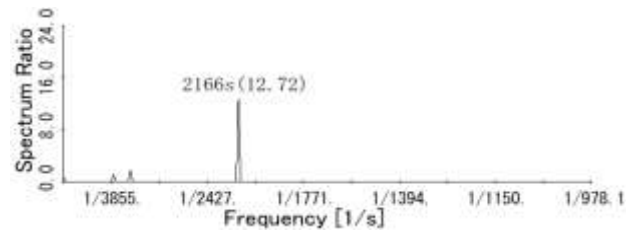


Fig.16 Ratio of the spectra shown in Fig.15(a) to the spectra shown in Fig.15(b)

(Ratios were set to zero in case that the spectra shown in Fig.15(b) are less than or equal $0.5\text{m}^2\text{s}$)



Fig.17 The caissons of offshore breakwater in Fushiki-Toyama Port were moved a few meters to 12 meters by swells which were invaded Toyama Bay on February 24, 2008

Table 2 Significant waves in and off Toyama New Port (H1/3:Signifi. wave height, T1/3:signifi. wave period)

Date in 2019	Daily mean in the port		Daily mean off the port		Ratio [a/b]
	H1/3[a]	T1/3	H1/3[b]	T1/3	
18 Jan.	0.14m	7.57s	0.63m	9.70s	0.22
19 Jan.	0.12m	7.69s	0.55m	9.32s	0.22
20 Jan.	0.06m	7.52s	0.25m	7.96s	0.24
21 Jan.	0.09m	7.03s	0.31m	8.43s	0.29
22 Jan.	0.09m	7.63s	0.42m	8.54s	0.21
23 Jan.	0.04m	7.50s	0.17m	7.65s	0.23
24 Jan.	0.09m	6.97s	0.37m	8.13s	0.24
25 Jan.	0.17m	8.09s	0.79m	9.98s	0.22
26 Jan.	0.13m	6.00s	0.49m	7.30s	0.27
27 Jan.	0.10m	7.42s	0.54m	8.18s	0.19
28 Jan.	0.03m	9.65s	0.11m	8.17s	0.27
29 Jan.	0.14m	7.24s	0.71m	9.03s	0.20
30 Jan.	0.12m	7.68s	0.57m	8.75s	0.21
31 Jan.	0.10m	9.67s	0.25m	6.87s	0.40

秒、約 10.8 秒周期の波の波高の増大率が大きいために、港内最奥部におけるうねり性波浪のスペクトルが、Fig. 7、Fig. 9、および Fig. 11 の様になっていると考えられる。

また、1973 年に作成された富山新港港湾計画⁽⁵⁾では、屈折・回折図を用いて富山新港沖の波高に対する 1 号岸壁前面(Fig. 4(F))の減衰係数を 0.2876、南水路(Fig. 4(E))の減衰係数を 0.1294 としているが、臨海実習場検潮室(Fig. 4(A))前面の減衰係数は不明である。そこで、富山新港沖(Fig. 4(B))と臨海実習場検潮室で 2019 年 1 月に観測された水位を 20 分間毎に分割し、そのデータから最小二乗法によりトレンド(2 次式)を除去して有義波高と有義周期を 20 分毎に計算した。例として、2019 年 1 月 18 日～1 月末日までの有義波高と有義周期を 1 日毎に平均し

た値と減衰係数([港内の有義波高]/[港外の有義波高])をTable 2に示す。富山新港沖に対する臨海実習場検潮室前面の有義波高の減衰係数は0.2~0.4であり、1号岸壁前面の減衰係数と同程度であった。

本研究の結果は、波の入射条件によっては港湾計画で検討された結果と大きく異なる現象が発生していることを意味し、2008年2月に発生したうねり性波浪による伏木富山港伏木地区北防波堤のケーソン滑動(Fig. 17 参照)や富山新港内で係留中の船舶損傷等のメカニズム解明にも寄与するものと思われる。

5. おわりに

一般に、港内は防波堤等で波浪の侵入を防いでおり静穏で安全な海面になっているが、波が港内に侵入することにより減衰するのではなく、逆に波高が増大する場合がある等、港内に侵入した波の特性については不明な点が多い。そこで、本研究では富山新港の港外と港内でうねり性波浪の観測を行い、港外と港内の波の特性について調べた。その結果、次のことが分かった。

(1) 富山新港の港外でのうねり性波浪のスペクトルの形が異なっているが、港内におけるうねり性波浪のスペクトルの形はほぼ同じである。

(2) 富山新港の港外の波に対する港内の波のスペクトル比は、周期約14秒、約12.7秒、約11.5秒、約10.8秒の波で大きい。例えば、周期約15秒の波のスペクトル比はこれらの波よりも小さく、一般に理解されている波の性質とは異なっている。

(3) 造波実験や長周期波の観測で、浅瀬域や港内に侵入したある特定周期の波の波高が、岸側や港内最奥部で他の周期の波よりも大きく増大することが分かっている。富山新港の場合、屈折や回折等で港内に侵入したうねり性波浪のうち、周期約14秒、約12.7秒、約11.5秒、約10.8秒等の波の波高が港内最奥部で増大し、結果的にこれらの周期の波の減衰率が小さくなっていると考えられる。

富山新港の場合、周期約14秒、約12.7秒、約11.5秒、約10.8秒等のうねり性波浪の港内での減衰率が小さく、係留中の船舶にとってこれらの周期の波は危険であることが分かる。このことは、波の単位面積あたりのエネルギーが波高の二乗に比例するにも係わらず、有義波高6.53m、有義周期8.4秒の波ではびくともしなかった伏木富山港伏木地区北防波堤を構成する重さ約4200吨のケーソンが、有義波高4.22m、有義周期14.2秒(平均波高2.61m、平均周期

10.9秒)の波で滑動したことから明らかである。

浅瀬域に侵入したある特定周期のうねり性波浪や約30分周期等のある特定周期の長周期波の波高が、港内最奥部や岸直前(防波堤直前)で数倍に増大する現象については、他の港においても同様の現象が生じている可能性があり、検証が必要である。

ここでは、富山新港の港外と港内におけるうねり性波浪について議論し、数分周期の波については、うねり性波浪が港内に侵入することにより生じる港内の固有振動と考えているために議論しなかった。しかし、他の港における数分周期の波の港外に対する港内の波高の比については過去に報告⁽⁶⁾されており、うねり性波浪だけでなく長周期の波についても港外と港内において比較し、ある特定周期の波の波高が港内奥や岸壁直前で大きく増大するメカニズムを解明することは、今後の課題である。

謝辞

本研究では、2015年度以降に実施された株式会社ソニックとの共同研究で得た観測データを使用しており、株式会社ソニック海象機器部の田村政彦氏に心から感謝の意を表します。また、本研究では2004年10月20日と2008年2月24日の有義波等の観測データを使用しました。これらのデータを観測、処理して頂いた国土交通省港湾局、および、港湾空港技術研究所に対しても心から感謝の意を表します。

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・永松宏一・後藤佑介：水平浅瀬域の固有振動と入射波のビート現象について，日本航海学会論文集，第137巻，pp. 59-65，2017. 12.
- (3) 河合雅司・田村政彦・門村英城：富山湾沿岸における長周期波に関する一考察，日本航海学会講演予稿集，Vol. 8(No. 1)，k147-2，pp. 28-31，2020
- (4) 河合雅司・北村康司・後藤佑介・川口清司：富山湾沿岸における長周期水位変動について，日本航海学会論文集，第135巻，pp. 19-26，2016. 12.
- (5) 伏木富山港港湾管理者：伏木富山港港湾計画資料-改訂-，港湾審議会第57回計画部会資料，pp. 199-200，1973. 10.
- (6) 久保雅義・榊原繁樹：湾水振動を考慮した港内係留船舶の時系列解析，日本航海学会論文集，第100巻，pp. 121-130，1999. 03.