

長周期うねりのスペクトルと波群特性 に関する考察

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF LONG PERIOD SWELL SPECTRUM AND ITS GROUPING

平山克也¹・加島寛章²・仲井圭二³
Katsuya HIRAYAMA, Hiroaki KASHIMA, Keiji NAKAI

¹正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 理修 (株) エコー防災・水工部 (〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4 (上野竹内ビル))

Long period swells grow up under heavy storms in the Pacific Ocean and these have been observed by the NOWPHAS wave observation system. For example, the 16.1-s swell was observed at Ashikajima station in Kurihama bay facing to the mouth of the Tokyo bay. Their spectra are banded in narrow range on frequency and their profiles have the beat. These swell groups can be concentrated due to both nonlinear shoaling and refraction in relatively deeper water. In this paper, the characteristics of the observed long period swells are investigated with some parameters on their spectra, considering their storm histories, and the offshore wave condition which can reproduce the observed spectrum is estimated. Then, the characteristics of spectra and wave trains in shallow water reproduced by using a Boussinesq-type wave transformation model are discussed with their verification.

Key Words : Long period swell, JONSWAP spectrum, wave group, Boussinesq model

1. はじめに

沖で発生した周期 14s 程度の周期の長いうねり(長周期うねり)が浅海域に到達すると、比較的水深の深い海域から屈折や浅水変形が生じ、沿岸域では高波浪となって、突然の越波災害や小型船舶の転覆事故等を引き起こす恐れがある。例えば、東京湾口に面した久里浜湾では、台風 0402 号が関東地方のはるか沖を通過した後、静天時にもかかわらず急に高波が来襲し、漁船が転覆する事故が発生した(図-1)。また、太平洋に面した北日本の港湾や海岸では、台風 0612 号および 2006 年 10 月の発達した低気圧に伴う周期の長い波が観測され、防波堤や護岸、海岸突堤の被災が生じた。本研究では、これ

らをケーススタディとして、このような長周期うねりが発生した気象・海象条件を整理するとともに、沖で観測された水面波形やスペクトルの特性、及び、これらをブシネスモデルに入力して計算された長周期うねりの伝播特性とその再現性について、考察を行った。なお本稿では、紙面の都合上、長周期うねりを観測した事例として台風 0612 号及び台風 0402 号を取り上げることとし、さらに、それらの再現計算結果に対する考察は、台風 0402 号による長周期うねりが来襲した久里浜湾に対して行った。

2. 観測した長周期うねりと気象・海象条件

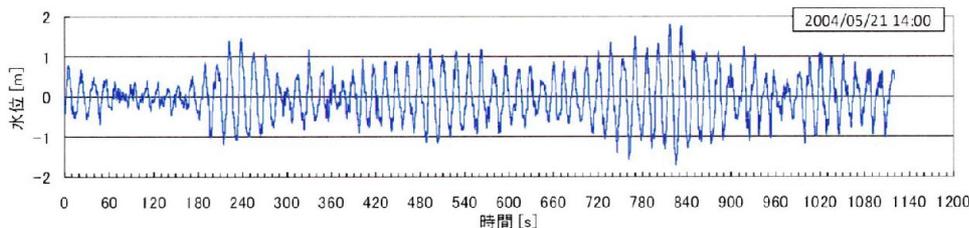


図-1 久里浜湾(アシカ島)で観測された長周期うねりの水面波形(左)と海岸近傍の波浪来襲状況(右)

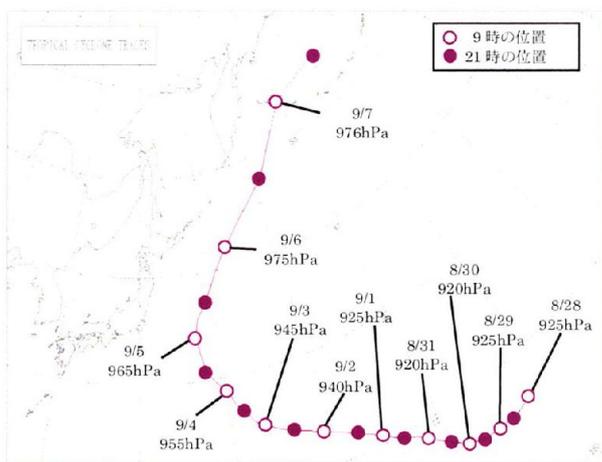
対象擾乱とした台風 0612 号及び 0402 号の経路を図-2 に示す。また、これらの通過に伴い各地点で観測された周期帯別波高の時系列変化を図-3 に示す。さらに、ピーク時付近に観測された水面波形を解析し、波の連なりやスペクトル形状の特性を表すパラメータを得た結果を、対応する JONSWAP 型スペクトル(細線)と合わせて、図-4 に示す。以下では、これらを用いて、長周期うねりが各地点に来襲したときの状況を整理するとともに、観測されたうねり性波浪の特異性や類似性について考察した。

(1) 台風 0612 号

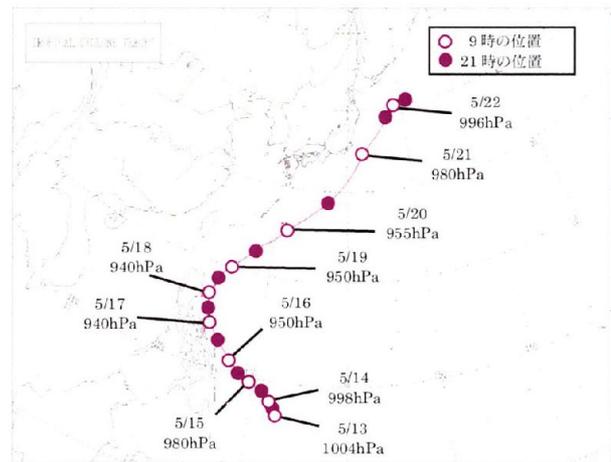
8 月 20 日に太平洋中央付近で発生したハリケーンは、太平洋を横断して日付変更線を越え、27 日に台風 0612 号と命名された非常に稀な台風であつた。

この間、中心気圧 925~945hPa と非常に強い勢力をもちながらゆっくりと日本に近づいたため、西北西に向かう波浪の発達と台風の進行とが重なり、太平洋沿岸には非常に発達した顕著な周期の長いうねりが長期間にわたって来襲した(図-2(a))。このため、常陸那珂港に隣接する阿字ヶ浦海岸では、施工中であった海岸突堤の被覆ブロックの一部が飛散する被害が生じた。

台風 0612 号による長周期うねりが来襲した太平洋沿岸のうち、常陸那珂港では、ピークを迎えた 9/5 8 時より 2 日以上も前から、周期 16.0s 以上の波高が徐々に増加している(図-3(a))。このとき観測された波形記録を解析すると、有義波高 4.83m、有義波周期 16.8s、平均波向 114°(北から時計回りを正)であった。しかし、常陸那珂で波高がピー

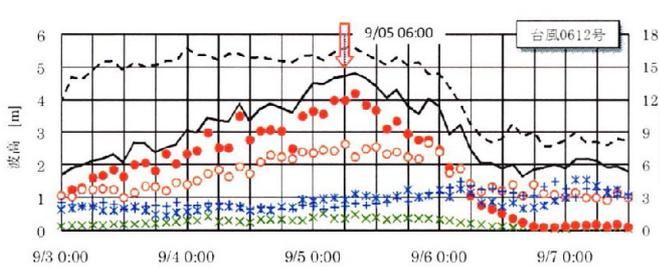


(a) 台風0612号

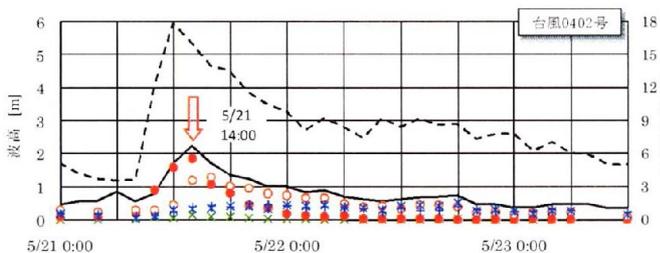


(b) 台風0402号

図-2 各地で長周期うねりを観測したときの気象条件(気象庁HPより引用したものを加工して掲載)

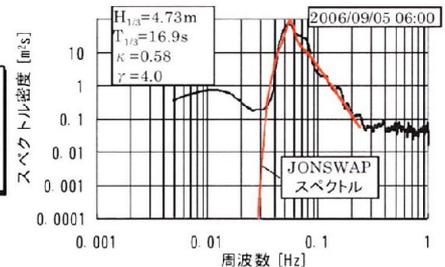


(a) 常陸那珂(阿字ヶ浦海岸)(台風0612号)

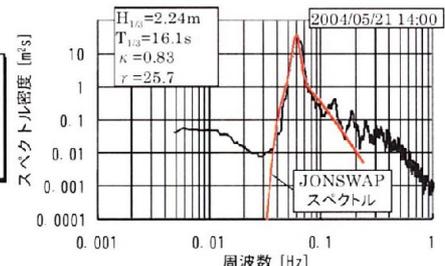


(b) アシカ島(久里浜湾)(台風0402号)

図-3 観測された波高・周期の時系列変化(図中の矢印は解析対象時刻)



(a) 常陸那珂(阿字ヶ浦海岸)



(b) アシカ島(久里浜湾)

図-4 解析対象時刻の観測スペクトル

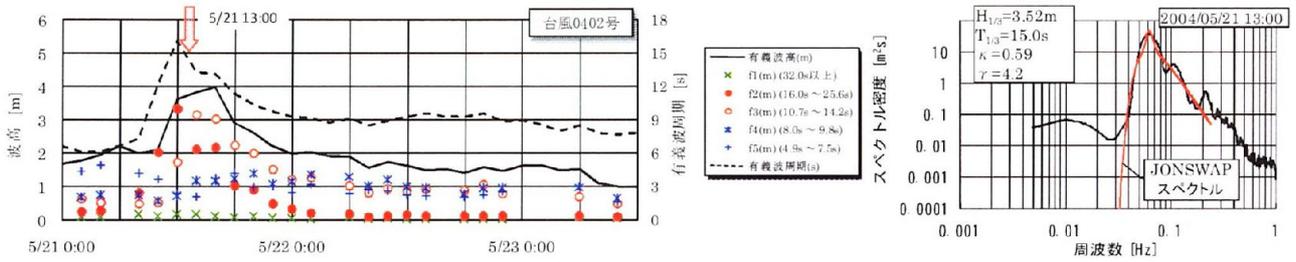


図-5 波浮で観測された波高・周期の時系列変化（図中の矢印は解析対象時刻）及び解析対象時刻の観測スペクトル

表-1 観測及び推定された長周期うねりのスペクトル諸元の一覧

(a) 台風0612号

	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	θ [deg]	κ	γ	S_{max}	h [m]
観測スペクトル (変更前)	4.83	16.8	114	-	-	-	30.3
(常陸那珂) (変更後)	4.73	16.9	114	0.58	4.0	71	
推定された沖波スペクトル	5.05	16.7	115	0.47	1.9	160	$L_0/2$
算出された境界スペクトル	4.57	17.0	112.5	0.48	2.0	92	26.6

(b) 台風0402号

	$H_{1/3}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	θ [deg]	κ	γ	S_{max}	h [m]
観測スペクトル (波浮)	3.52	15.0	177	0.59	4.2	31	48.7
(アシカ島)	2.24	16.1	-	0.83	25.7	-	21.7
推定された沖波スペクトル	7.07	16.5	170	0.67	7.2	25	$L_0/2$
算出された境界スペクトル	2.23	16.14	165	0.73	11.6	111	32.2

クを迎えた5日8時には、方向スペクトルは欠測であった。そこで以降の検討では、ピーク時と同程度の波高が観測され、かつ方向スペクトルを取得できた5日6時をピーク時とみなし、この時刻における方向スペクトルの再現性の検討を行うこととした。このとき観測された波浪諸元は、有義波高 4.73m、有義波周期 16.9s、平均波向 114° であった。

一方、スペクトル形状パラメータは $\kappa=0.58$ と推定され、これを JONSWAP 型スペクトルの γ 値に換算すると 4.0 であった (図-4 (a))。これは、ピーク周期こそ違うものの、北海等で観測される標準的なスペクトル形 ($\gamma=3.3$) をやや上回る程度であった。しかし、我が国沿岸で観測される一般的なスペクトル形は $\gamma=1.0$ として表わされることから、特徴的なスペクトル形状であったことがわかる。さらに、JONSWAP 型スペクトルに対する光易型方向関数の方向集中度は $S_{max}=71$ (プレットシュナイダー・光易型スペクトルに対しては $S_{max}=92$) と推定され、少なくとも常陸那珂観測点 (水深 30.3m) で観測された波は、遠方から来襲するうねり成分が卓越した一方向性の強い波であったことが伺える。

後述する推定値と合わせて、これらのスペクトル諸元を表-1 (a) に示す。

(2) 台風 0402 号

台風 0402 号は5月14日にミンダナオ島の東海上で発生した。19日朝には中心気圧 950hPa で、石垣島の南海上で北東に進路を変え、本州の南海上へ向かった。20日朝には中心気圧 955hPa と若干勢力が弱まり、南大東島の南東海上を通り、夜には更に勢力を弱めながら八丈島の南海上で北東に抜け、21日午後には東北地方の東海上で温帯低気圧となった。日本列島に最も接近したのは関東沖を通過した21日午前9時頃であった (図-2 (b))。

台風 0402 号の通過後、突然高波が来襲した久里浜湾では、その湾口に位置するアシカ島で観測された周期帯別波高の時系列変化において、21日12時

を境に、周期 10.7s 以上および周期 16.0s 以上の波高が急激に増加している (図-3 (b))。この原因としては、沖合の波浮で観測された方向スペクトルの時間変化から、一方向性の高いうねりの波向きが台風の進行とともに徐々に変化し、ちょうど真南となったときに久里浜湾に入射したことが推測された。また、図-1 に示すアシカ島 (水深 21.7m) での波形記録からも、この突然の高波が周期 17s 程度の長周期うねりの来襲によるものであることがわかる。なお、これと同様な波形記録は、ある時間差を伴って、波浮及び太平洋沿岸の御前崎、潮岬等でも観測されていたことが報告されている (加島ほか¹⁾)。

このピーク時 (21日14時) に観測された波形を解析したところ、有義波高 2.24m、有義波周期 16.1s であった。また、スペクトル形状パラメータは $\kappa=0.83$ と推定され、これを JONSWAP 型スペクトルの γ 値に換算すると実に 25.7 であった (図-4 (b))。このように非常に特異な狭帯域スペクトルが現れた原因については、後述する久里浜湾を対象に実施した長周期うねりの伝播・変形計算によって考察できる。したがって、ここでは、東京湾沖に位置する大島の波浮で観測された波高・周期の時系列変化とピーク時の観測スペクトルを図-5 に示す。

波浮におけるピーク波高発生時刻は21日16時であったが、周期 17s のうねりの伝播速度を考慮すると、アシカ島のピーク波高に影響を及ぼしたと考えられる波浪は、波浮では21日13時頃に観測されたであろうと推測された (図-5 左)。このときの波浪諸元は、有義波高 3.52m、有義波周期 15.0s、平均波向 177° であった。また、スペクトル形状パラメータは $\kappa=0.59$ と推定され、これを JONSWAP 型スペクトルの γ 値に換算すると 4.2 であった (図-5 右)。さらに、JONSWAP 型スペクトルに対する光易型方向関数の方向集中度は $S_{max}=31$ (プレットシュナイダー・光易型スペクトルに対しては $S_{max}=35$) と推定された。したがって、遠方から長時間にわたって方向集中度の高いうねりが来襲した台風

0612号のケースに比べ、波浮（水深48.3m）で観測されたうねりの減衰距離は比較的短いことが伺えるが、周波数スペクトル形状はよく似ていたことがわかる。つまり、この2つの事例からは、少なくとも外洋で観測される長周期うねりのスペクトル形状は、その伝播距離が長いほど一方向性が増すことは十分想定されるが、それだけで極端に狭帯域化することは考えづらいであろうことが示唆された。

後述する推定値と合わせて、アシカ島及び波浮で得られたスペクトル諸元を表-1(b)に示す。

3. うねり性高波浪の再現計算

常陸那珂及びアシカ島で観測された長周期うねりのスペクトルは、観測波浪の波長に対して観測水深が浅く、局所的な海底地形の影響を受けやすいため、それぞれの海域で出現した長周期うねりの特性を必ずしも代表していないことも想定される。そこで、まず、これらを再現対象として、エネルギー平衡方程式法を用いた逆解析により沖波スペクトルを推定し、次に、求めた沖波に対して順解析（波浪変形計算）を行い、沿岸域に別途設定した計算領域沖側の境界上代表地点で算出される方向スペクトルを出力した。さらに、ブシネスクモデルを用いた再現計算では、このような任意形状スペクトルから多方向不規則波を造波する平山・宮里²⁾の手法を用いて、長

周期うねりの波群伝播過程をシミュレートすることを試みた。これらの計算手順を図-6に示す。

(2) 観測スペクトルに対する沖波の推定

a) 阿字ヶ浦海岸

手順に従い、観測スペクトルに対して推定された沖波スペクトル諸元は、 $\gamma=1.9$ 、 $S_{max}=160$ であった。ここで、方向集中度が観測スペクトルよりも高く推定された原因は、常陸那珂観測地点の沖側に存在する浅瀬により、少しずつ周期の異なる長い波がそれぞれ屈折し、観測地点では局所的に方向分散性が増していたことが想定される。すなわち、常陸那珂港に実際に来襲したうねり性高波浪は、観測波形から推定されたものよりもさらに一方向性が高かったことが推測される。実際、沿岸域における計算領域沖側の境界上代表地点（水深26.6m）で算出された方向スペクトルは、 $\gamma=2.0$ 、 $S_{max}=92$ と推定され、観測スペクトルに比べ γ 値は小さいものの、方向集中度は観測結果を上回る値が算出された。これらの詳細は、すでに表-1(a)に示したとおりである。

b) 久里浜湾

アシカ島では波向観測が実施されていない。そこで、手順のうち再現性の検討は、次に示す2段階で行った。すなわち、アシカ島では21日14時に観測された周波数スペクトルのみを対象とし、波向き及び方向集中度の再現性は、周期17sのうねりの伝播速度を考慮し、その1時間前の21日13時に波浮で観測された方向スペクトルに対して行うものとした。

この結果、これらの観測スペクトルに対して推定された沖波スペクトルの諸元は、 $\gamma=7.2$ 、 $S_{max}=25$ であった。さらに、ブシネスクモデルによる再現計算時の入射条件として、計算領域沖側の境界上代表地点（水深32.2m）で抽出した接続方向スペクトルの諸元は、 $\gamma=11.6$ 、 $S_{max}=111$ と推定された。これらの詳細は、すでに表-1(b)に示したとおりである。また、アシカ島波浪観測地点及びブシネスク計算における接続境界上の代表地点の位置を図-7(a)に示す。

なお、ここまでの波浪変形計算においても、東京湾口の複雑な海底地形（水深150mの断崖等）の影響によるスペクトルの尖鋭化、及び方向集中過程が再現されているが、アシカ島で観測された $\gamma=25.7$ を説明するまでには至っていない。そこで、方向スペクトルの更なる変形は、次に行うブシネスクモデルによる再現計算において確認することとした。

(3) 長周期うねりの伝播・変形計算

ここでは、台風0402号による長周期うねりが来襲した久里浜湾を例に、図-6に示す手順に従い算出された、ピーク時に観測されたであろう入射境界上の接続方向スペクトルをそのまま用いて、長周期うねり波形を造波し、ブシネスクモデルによるうねり性高波浪の伝播・変形状況の再現、及びそれらの結果の考察を行った。久里浜湾内で算定される水面

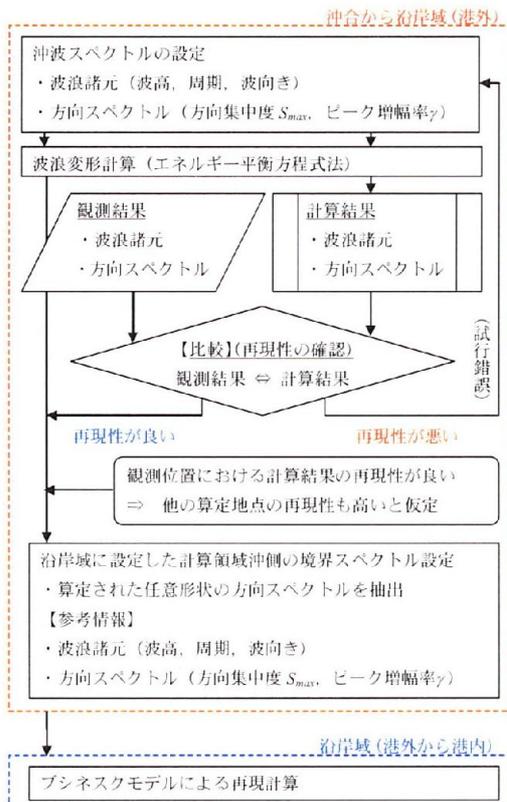


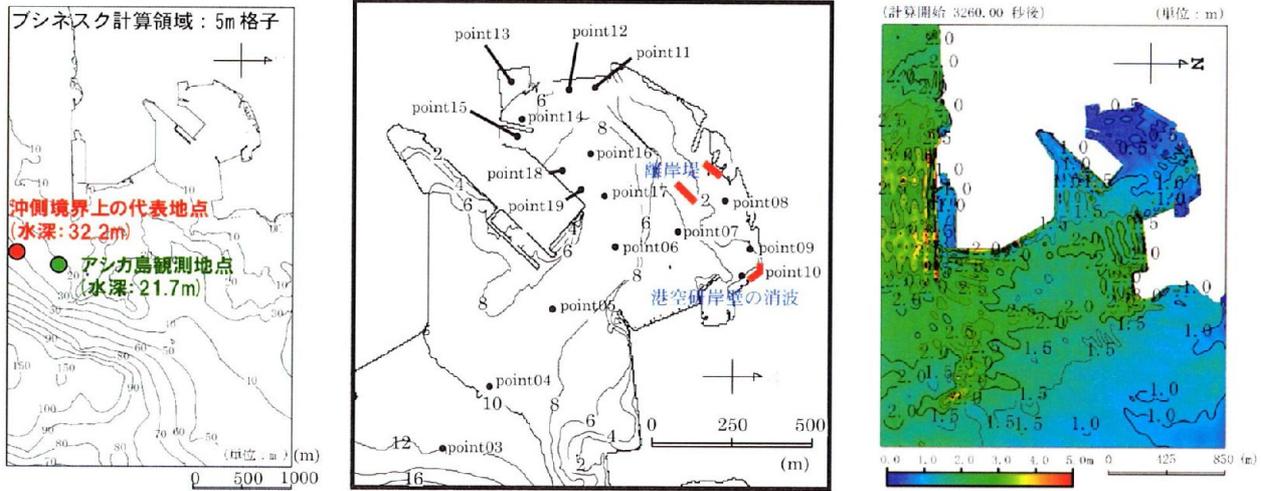
図-6 うねり性高波浪の再現計算の手順

波形等を出力する代表点の位置を図-7(b)に示す。

久里浜湾内に設定した代表出力点のうち、Point1(アシカ島)、Point8(港外を見通せる岩礁帯)及びPoint14(遮蔽域にあるフェリー岸壁)で算定された周波数スペクトルを図-8に、水面波形を図-9に示す。ここで、図-8のうち細線は、沖側境界に入力した境界スペクトルである。

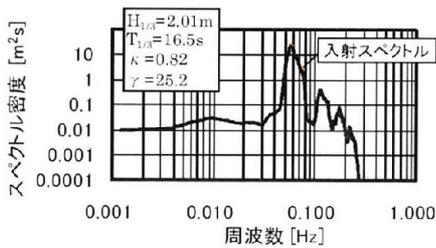
まず、図-8(a)に示すPoint1で算定されたスペク

トル形状から、 $\gamma=25.2$ と推定され、波高、周期と合わせて、アシカ島で観測されたピーク時のスペクトル形状を非常によく再現できていることがわかる。このとき、急峻な地形を有する久里浜湾口のアシカ島付近では、屈折による波の取れんと浅水変形により、顕著な波高増大が生じている(図-7(a)、図-7(c))。すなわち、特異な狭帯域スペクトルを観測したアシカ島では、屈折変形により来襲波が選別さ

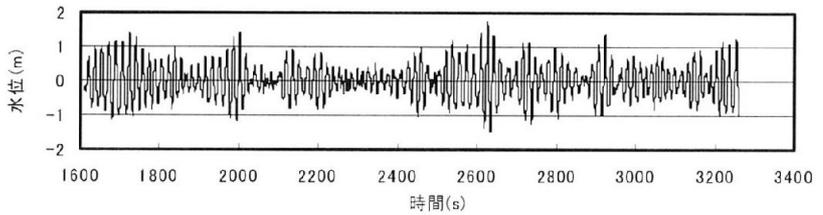


(a) 接続代表地点の位置 (b) 代表出力点の位置 (c) 有義波高分布

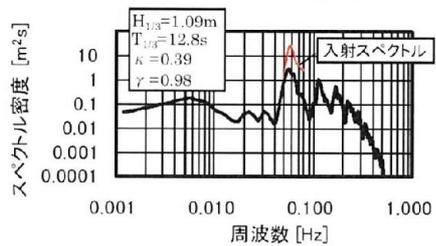
図-7 久里浜湾を対象としたブシネスクモデル計算における計算領域



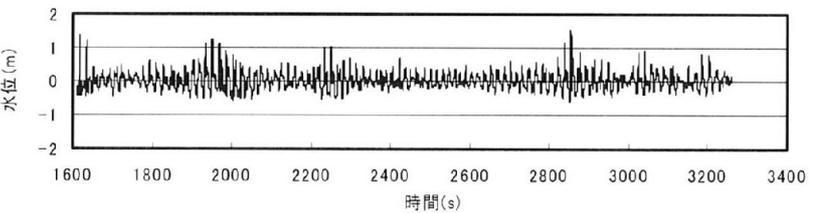
(a) Point1(アシカ島観測地点)



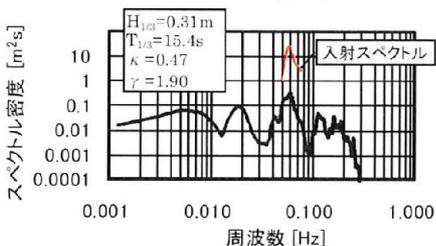
(a) Point1(アシカ島観測地点)



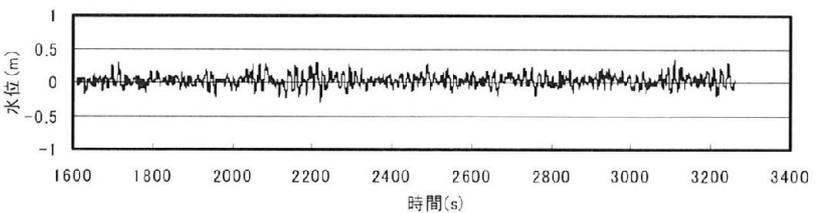
(b) Point8(岩礁帯)



(b) Point8(岩礁帯)



(c) Point14(フェリー岸壁)



(c) Point14(フェリー岸壁)

図-8 うねり性波浪の周波数スペクトル

図-9 うねり性波浪の水面波形

れて入射したことが推測された。また、図-9 (a) に示す水面波形は、当時の観測波形 (図-1 左) と同様な波群特性 (顕著な包絡波形を伴う高波の連なり) を有することが確認できる。

次に、Point3 より岸側の港内に伝播したうねりのスペクトル形状をみると、基本波の2倍、3倍周波数付近の短周期成分、及び長周期成分のエネルギー増大が次第に顕著となり、特に図-8 (b) に示す岩礁帯上に位置する Point8 では、これらがかなり顕著に表れている。また、図-9 (b) に示す水面波形は、高波の連なりとともに波形が上下非対称となる非線形化が進み、砕波も生じている。これはちょうど、図-1 右に示した波浪状況をよく説明している。なお、ゼロアップクロス解析によって得られるこれらの代表周期は、短周期成分の影響により次第に短く算定され、Point8 では4s弱程度短くなっている。

さらに、図-8 (c) に示す Point14 をはじめとする港奥の遮蔽域では、短周期成分のエネルギーが減衰し、周期50s及び200s程度の長周期成分のエネルギーが相対的に増大している。これらの原因としては、港形に依存する固有周期や波群に拘束された長周期波との関係が疑われる。また、図-9 (c) に示す水面波形でも包絡波形は確認されるが、これらの振幅はかなり小さくなっている。

4. 長周期うねりを考慮した設計への検討

これまでの考察及び平石ほか³⁾の研究などにより、長周期うねりは、周期14-17s程度の狭帯域スペクトルとして、 γ 値を適切に設定したJONSWAP型スペクトルで近似できると考えられる。

以下では、このような特徴を有する長周期うねりに関する、発生要因、統計的性質や波群特性、及び波浪変形特性を考察し、今後の長周期うねりを考慮した設計に向けて、考え方の整理を試みる。

(1) 長周期うねりの発生要因

例えば、関東沿岸に來襲するうねりの発生要因は、主に、太平洋沿岸を北上する台風および発達した低気圧である。特に、周期14~17s程度の長周期うねりは、十分に長いフェッチ上で長時間にわたり、強風によるエネルギーが供給された場合に発生すると考えられる。しかし、このような気象・海象条件が整う危険性を確率的に予測することは、観測事例の少ない現在の段階では未だ困難であろう。そこで、このような長周期うねりは偶発的に発生すると仮定し、偶発波浪荷重の1つとして、構造物の重要性等の必要に応じ、設計に取り入れるべきかを判断することが望ましいと考えられる。

(2) 長周期うねりスペクトルの波高統計量

不規則波の代表波高 (最大波 H_{max} , $1/3$ 有義波 $H_{1/3}$,

平均波 H_{mean} など) 間の関係は、波高の相対度数分布がレーリー分布で表されると、 $H_{1/3}=1.597H_{mean}$ などの関係が成り立つ。長周期うねりの特徴である狭帯域スペクトルの波高分布は、むしろレーリー分布に近いので、より広帯域 ($\gamma=1$ 程度) な通常の風波と比較すると、例えば、護岸天端高を上回る波高頻度が異なる場合、同じ代表波浪諸元を有する不規則波の越波量に違いが生じることが想定される。

(3) 長周期うねりの波浪変形・波群特性

周期の長いうねりは、通常の風波に比べ、より深い水深の海底地形による波浪変形の影響を受ける。例えば、周期16sの長周期うねりは、水深150m程度で浅の斜面や丘陵によって屈折や浅水変形が生じる。したがって、特に、比較的緩やかな海底勾配を有する海域では、より沖合の海底地形の状況にも留意する必要があると考えられる (加島ほか⁴⁾)。

一方、このような狭帯域スペクトルを有する水面波形は、顕著な包絡波形を伴う高波の連なり現象が明瞭に現れる。これは、互いに僅かに異なる周期の波が同じ方向に進行することにより、“うなり”が発生するためであるが、このような波浪は、係留船舶の長周期動揺、海岸の汀線近傍のサーフビート、消波ブロックの安定性、及び護岸越波量などに影響を及ぼすことが指摘されている (合田⁵⁾)。

5. おわりに

本研究では、関東沿岸において長周期うねりが観測された台風0612号及び0402号來襲時の気象・海象条件を整理するとともに、このとき得られたスペクトル形状はいずれもJONSWAP型で近似できることを示した。また、主に久里浜湾を対象として沖波スペクトルの推定及び観測スペクトルの再現計算を行い、観察された $\gamma=25$ を超える狭帯域スペクトルや波形の波群特性なども再現できることを示した。最後に、これらの結果をもとに、長周期うねりを考慮した設計に向けた考え方の整理を試みた。

参考文献

- 1) 加島寛章・平山克也・峯村浩治・平石哲也：全国波浪観測データを活用したうねり性波浪の伝播特性について、海岸工学論文集、第55巻、pp.171-175、2008。
- 2) 平山克也・宮里一郎：任意形状スペクトルによる多方向不規則波の造波法の提案、港空研報告、第48巻、第2号、2009 (印刷中)。
- 3) 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎：偶発波浪荷重による被害例とその特性、海岸工学論文集、第55巻、pp.981-985、2008。
- 4) 加島寛章・平山克也・平石哲也：長周期うねりの來襲特性に関する現地調査とその考察、海洋開発論文集、Vol. 25、2009 (印刷中)。
- 5) 合田良実：耐波工学、鹿島出版会、p224、2008。