平成 19 年度

ブシネスクモデルによる波浪変形計算に関する勉強会

勉強会資料

平成 20 年 2 月

独立行政法人 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研究室

目 次

1

2. NOWT-PARI の適用事例	
2.1 沖合人工島に設けた緩傾斜護岸前面の波浪変形と越波打上げの検討	2
株式会社 三洋コンサルタント 小野	貴也
2.2 久慈港半崎地区護岸被災波の検討	8 T I
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水上部 波浪研究室 春尾	和人
2.3 漁港における長周期波計算の適用事例	12
日本データサービス株式会社 葛西	- <u>-</u> 弘行
3. ブシネスクモデルの入射波の高精度化およびうねり性高波浪の近年の傾向	
3.1 JONSWAP および任意の方向スペクトルを用いた	
ブシネスクモデルの入射波の高精度化	17
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 波浪研究室 宮里	一郎
99 さわれ州古地泊の近年の傾向について	94
3.2 りねり性間波彼の近年の傾向について	Z4 涟沙
你我去և~~~ 奉伯	1010
4. 波浪推算とその活用	30
(独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海洋水理・高潮研究室 川口	浩二
5. GPS 波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性	37
(独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部長 永井	紀彦
	10
6. <i>まとの</i>	46
付録・動強会議事録	47
	-11

1. はじめに.....

1. はじめに

本勉強会は,独立行政法人 港湾空港技術研究所 波浪研究室による開催として平成14年度に年1 回を目標として始められ,今年度で6回目を迎えることができました.

現在, NOWT-PARI は, 全国の港湾計画または将来の拡張計画に使われるようになってきており ます.また,数年前から北海道開発局でもほぼ全ての港湾で長周期波対策に本モデルを用いて検討が 行われるようになってきております.さらに,昨年の西湘バイパスの崩落事故を受けて,河川局が管 理する海岸においてもブシネスクモデルを用いて波浪の検討を行うようになってきております.これ も一重に皆様のご支援の賜物であります.心よりお礼申し上げます.

昨年度までのブシネスク勉強会の主な議題は、プログラムの高精度化を主目的として行っておりま したが、皆様のご支援により NOWT-PARI を用いて砕波、遡上ならびに越流の計算が行えるように なってきました.また、近年のコンピューターの高速化に伴い、かなり細かいメッシュを用いた計算 も可能になってきており、計算精度はかなり高くなってきているものと考えております.

一方,もう一つの問題として,昨年度から長周期のうねりによると思われる護岸の被災が発生する ようになってきております.また,波浪推算および沖合の波浪観測データが蓄積されてきております. それらの波浪観測データを詳細に解析したところ,従来から良く用いられているブレットシュナイダ ーー光易型スペクトルに比べて,ピークの鋭いJONSWAP型の波浪や,うねりと風波が混在した双峰 型の方向スペクトルの観測例も報告されるようになってきております.

そのような中,各方面から観測データや被災時の波浪を NOWT-PARI の入力条件として設定でき るようにとの要望が寄せられており、今年度は NOWT-PARI の適用事例に加えて、入力条件の改良 さらには波浪推算や高精度の波浪観測手法の現状といった点を中心に議論を進めてまいりたいと思い ます.

本勉強会に出席された皆様方は、多くの難問に対してさまざまな解析手法を取り入れてご検討されているものと存じます.その際には当勉強会の成果が一助となり、ご活用いただければ真に幸いです.

2. NOWT-PARIの適用事例

2.1 沖合人工島に設けた緩傾斜護岸前面の波浪変 形と越波打上げの検討

2.1.1 はじめに

下関港(新港地区)の外郭施設前面では、毎年冬 季風浪が顕在化する季節に、大きな波の打上げを 起因とする越波や飛沫が恒常的に発生している. これは、物流機能の供用を開始した後に、荷役障 害や構造物劣化の要因となる可能性がある. さら に、本護岸は親水性を持たせた施設であるため、 越波に対して来島者の安全を確保する必要もある.

そこで,著者らは国土交通省九州地方整備局下 関港湾事務所発注による,下関港の外郭施設にお ける越波・飛沫の現地観測を行った.さらに,外 郭施設前面での波浪をブシネスクモデル(NOWT-PARI Ver.4.6β 改良版)を用いて再現し,背後の 護岸敷における越波流量の算出を行った.

本報告は、観測結果と計算結果から越波・飛沫 特性を述べるとともに、両者の比較検討を行いま とめたものである.さらに、越波流量の算出結果 を用いて、越波対策工法の検討を行ったものであ る.図-1に下関港(新港地区)の位置図を示す. 図-2は、緩傾斜護岸のモデル図である.





図−2 緩傾斜護岸のモデル図

2.1.2 現地観測

(1) 概要

本調査は、2006年12月から2007年2月まで実施 し、冬季風浪により発生する越波・飛沫状況を、 デジタルビデオカメラを使い撮影し、打上げ高と 発生頻度の画像解析を行ったものである.越波と 飛沫は、人工島内の背後域より、発生位置・発生 頻度(回数)・打上げ高さを測定した.このとき の打上げは、護岸天端を越える白い影(=水塊)を 越波・飛沫の区別なく打上げとした.

(2) 越波・飛沫観測

ビデオ撮影は、2006年12月17日と2007年2月14, 15日に行った.撮影は、図-3に示す工区を対象に A, B, C工区とD, E, F工区を1時間毎、交互に撮影し た.1台のビデオカメラで3工区分の打上げ高さを 撮影し、3台のビデオカメラでその工区の頻度を 撮影した.



図-3 観測工区分

打上げ高については,護岸天端を基準としてお り,打上げの最高到達点から鉛直下方の天端まで の距離を打上げ高とした.また,10分間毎の最大 打上げ高を代表値とし,これを前面護岸の打上げ 高とした.ビデオ映像記録から打上げ高と打上げ 回数を読み取る手順の概略は以下の通りである. ①撮影したビデオ映像をパソコンに取りこむ. ②映像内に同時に記録されている長さが既知の指 標物のピクセル数を読み取り,実際の長さと映 像内のピクセル数との対応を把握する.

③打上げ高のピクセル数を読み取る。

- ④ピクセル数を実際の高さに換算する.
- ⑤打上げ回数については、護岸天端を打ち越える 白い影を越波・飛沫の区別なく、打上げとする。



図-4 打上げ高の読み取りと基準高さの設定

(2) 観測結果

観測で求められた護岸工区毎の打上げ頻度と, ナウファスで波浪観測を行っている藍島の有義波 高の関係について,図-5に示すような相関図を作 成し,両者の関係を表-1のようにまとめた.



表-1 護岸工区毎の打上げ回数と藍島の有義波高の相関

i H	データ数	打上げ回]数	しきい値
ΤN	(個)	相関式	相関係数	藍島有義波高
AIN	14	14 Y=311.98X-468.75 0.830		1.51 m
B工区	14	Y=324.84X-485.36	0.862	1.50 m
C 니	14	Y=249.06X-358.24	0.836	1.44 m
DI区	15	Y=242. 28X-365. 05	0. 745	1.51 m
EIN	15	Y=212. 48X-318. 73	0.863	1.50 m
F工区	15	Y=134. 27X-214. 82	0.855	1.60 m
全工区	87	Y=254. 01X-383. 31	0. 768	1.51 m
		備去) V・打ト	ゴ回粉 V・	萨自右美油百

備考)Y:打上げ回数 X:藍島有義波福

表-1の相関式を利用して藍島の有義波高から各 工区の打上げ回数が推定できる.このときのしき い値は,藍島の有義波高がその値未満であれば, 打上げが発生しない限界値といえる.

打上げ高に関しては、C・E・F工区で最大打上 げ高を観測する傾向があることが確認された.

2.1.3 ブシネスク方程式による波浪場の再現

(1) 概要

波浪場の再現計算は,観測時と異常時の2通り について行った.観測時の計算は,観測を行った 昼間の中で,最大波高を観測した時刻(2006年12 月17日14時40分)の条件を用いた.異常時の計算 は,50年確率波を用いた.

これらの計算結果は、後述する越波流量の算出 に用いた.

(2) 計算条件

ブシネスク方程式の計算に用いる条件を,表-2 ~3に示す.波高と波向については,エネルギー 平衡方程式の計算結果より算定した.異常時の潮 位については,H.H.W.L.の値を用いた.

表-2 波浪条件

	波高(m)	周期(s)	波向	Smax	潮位(m)
観測時	1.59	6.6	N53.07°W	10	+0.64
異常時	4. 01	11.0	N51.80°W	10	+2.14

表-3 計算条件

	空間差分	時間差分	計算時間	計算領域
観測時	5. Om	T/200s	T×211s	1900m × 2400m
異常時	5. Om	T/400s	T × 124s	1900m × 2400m

(3) 対象地形

ブシネスク方程式の計算は,重複波と進行波を 対象とし,重複波の計算は波浪場再現に用い,進 行波の計算は越波流量算出のために行った.

重複波の場合は、図-6(左)に示すように人工島 を考慮した地形図となっている.進行波の場合は、 図-6(右)に示すように護岸を取り除きマウンドと 海底地形だけを考慮した地形図となっている.



図-6 重複波の地形図(左),進行波の地形図(右)

(4) 計算領域の設定

重複波の場合は、構造物での反射を表すために、 高次型スポンジ層を用いて反射率を設定した.図 -7に反射率設定図を示す.

また,開境界を無反射境界にするため,図-8に 示すように解析領域の周囲に300mのスポンジ層を 設置した.



図-7 反射率設定図



図-8 計算モデル図

(5) 計算結果

観測時と異常時の計算結果を,それぞれ図-9, 図-10に示す.



図-9 観測時計算結果



図-10 異常時計算結果

(6) 換算沖波波高

越波流量の算出には,進行波の計算結果より算 定した換算沖波波高を用いる必要がある.換算沖 波波高とは,屈折・回折による波高変化の影響を 考慮した仮想的な波である.

今回は,直接ブシネスク方程式の計算で得られ る結果と,次のチェックを行って得られる結果を 検討した. ブシネスク方程式で計算を行った場合,すべて の変形要素を考慮しているため,計算結果の波高 は(1)式で表す有義波高となる.

$$H_{1/3} = H_0 \times K_r \times K_d \times \begin{cases} K_b \\ K_s \end{cases}$$
(1)
ここで
$$H_0: 沖波波高 \\ K_r: 屈折係数 \\ K_d: 回折係数 \\ K_b: 砕波係数 \\ K_f: 浅水係数 \end{cases}$$

今回の波浪条件の中で、入射波高の波形勾配を 極端に小さくとった仮想的な波として1/10倍の波 高を用いて計算を行うと、周期依存の高い屈折と 回折は考慮されつつ、砕波の影響を無視できると 考えた.このとき、浅水係数は当該水深の関係で 1.0近くになるため、結果として波高は(2)式のよ うになる.

$$H_{1/3} = H_0 \times K_r \times K_d \times \begin{cases} K_b \\ K_s \end{cases}$$
$$\approx H_0 \times K_r \times K_d$$
(2)

得られた波高を作図する際に10倍することで, 今回の波浪条件で入射した場合の換算沖波波高相 当になっていると考えられる.

(1)式,(2)式の結果より,波高に大きな変化が 見られなかったため,換算沖波波高を設定する際, 有義波高≒換算沖波波高と考えた.

2.1.4 越波流量の算出

(1) 算出方法

越波流量の算出を行う際,護岸の状況及び換算 沖波波高と波長の関係より,図-11に示す直立護 岸の越波流量推定図を用いた.なお,換算沖波波 高は,各工区においてマウンドの影響を受けない 護岸前面の波高の平均値を用いた.図-12に,観 測時における換算沖波波高の算出例(E工区・F工 区)を示す.また,越波流量を算出する工区は, 天端高・マウンドの形状・護岸背後の形状の違い により,A~F工区をさらに細かく14工区に分類し た.





図-12 換算沖波波高の算出(観測時:E,Fエ区)

(2) 越波流量の分布

観測時および異常時における越波流量の算出結 果を,それぞれ表-4,表-5に示す.また,それぞ れの越波流量算出地点を図-13,図-14に示す.な お,観測時の越波流量を算出する際,潮位は +0.66m(観測時の潮位)と+1.55m(H.W.L.)の2 通りを用いた.

観測時については、計画完成時の護岸前面において、越波流量が許容越波流量を下回るため、護 岸背後の算出は行っていない.異常時については、 越波流量が許容越波流量を上回る工区があるため、 護岸パラペット天端の嵩上げを行うなどの対策工 法の提案を行った.

このとき用いた観測時,異常時の許容越波流量 を,それぞれ表-6,表-7に示す.

(3) 対策工法の検討

異常時における越波流量の算出結果より,計画 完成時において,護岸前面の天端高を5.5m以上に する必要があることが確認された.

表-4 観測時の越波流量

潮位·+0 64(観測時)

		現況	計画完成時		
	1	護岸前部	2	護岸前部	
	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	
A-1工区	4.00	1. 1E-07	4. 50	1. 3E-08	
A-2工区	4.00	1. 1E-07	6.00	2. 4E-11	
B-1工区	4.00	5. 1E-08	6.00	7. 7E-12	
B-2工区	4.00	5. 1E-08	6.00	7. 7E-12	
C-1工区	4.00	1. 2E-07	6.00	2. TE-11	
C-2工区	4.00	4. 2E-06	4. 50	8. 8E-07	
D-1工区	4.00	1. 6E-06	4. 50	2. 9E-07	
D-2工区	4.00	3. TE-08	6.00	4. 4E-12	
D-3工区	4.00	1. 6E-06	6.00	1. TE-09	
D-4工区	4.00	3. TE-08	6.00	4. 4E-12	
E-1工区	4.00	3. 6E-06	4. 50	7. OE-07	
E-2工区	4.00	9. 3E-08	4. 50	1. 2E-08	
E-3工区	4.00	3. 6E-06	4. 50	7. OE-07	
FI区	5.00	2. OE-10	6.00	1. 9E-12	

潮位:+1.55(H.W.L.)					
		現況	計	画完成時	
	1	護岸前部	2	護岸前部	
	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	
A-1エ区	4.00	4. 3E-06	4. 50	4. 2E-07	
A-2工区	4.00	4. 3E-06	6.00	5. 2E-10	
B-1工区	4.00	2. 8E-06	6.00	1. 9E-10	
B-2工区	4.00	2. 8E-06	6.00	1. 9E-10	
C-1工区	4.00	4. 8E-06	6.00	5. 7E-10	
C-2工区	4.00	3. 7E-05	4. 50	6. 5E-06	
D-1工区	4.00	1. 7E-05	4. 50	2. 7E-06	
D-2工区	4.00	2. 5E-06	6.00	1. 5E-10	
D-3工区	4.00	1. 7E-05	6.00	9. 8E-09	
D-4工区	4.00	2. 5E-06	6.00	1. 5E-10	
E-1工区	4.00	3. 3E-05	4. 50	5. 7E-06	
E-2工区	4.00	4. 3E-06	4. 50	4. 2E-07	
E-3工区	4.00	3. 3E-05	4. 50	5. 7E-06	
FI区	5.00	1. 4E-08	6.00	9. 6E-11	

※ 斜体太字
 は越波流量推定図からは読みとれないため、高山らによる近似式を用いた
 ※許容越波流量:q≤2×10⁻⁴ (m³/m/s) (歩行者50%安全度)
 ※許容越波流量:q≤3×10⁻⁵ (m³/m/s) (歩行者90%安全度)
 ※ ______: 該波流量≥2×10⁻⁴ (m³/m/s)

※ : 越波流量≥3×10⁻⁵ (m³/m/s)

※図-13,図-14は、現況のモデル図と、計画完成時および 対策工法を行った場合のモデル図を工区毎に表したも のである.図中の矢印は、越波流量の算出を行った地 点を表している.



表-5 異常時の越波流量算出地点

· 潮世: 〒2.	14III (II. II. II. E.)											
		現況	2 C	·画完成時			3	讨策工法			計	·画完成時
	1	護岸前部	(2	護岸前部	41	蒦岸嵩上げ	⑤パラペ・	ット後退(6.0m)	⑥パラペッ	ット後退(10.0m)	3	護岸後部
	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)	天端高(m)	越波流量(m ³ /m/s)
A-1工区	4.00	1. 7E-01	4.50	1. 2E-01	1	-	6.00	1.2E-02	6.00	7.2E-03	6.50	5. 2E-04
A-2工区	4.00	1.7E-01	6.00	3. 7E-02	-	-	6.00	1. 2E-02	6.00	7.2E-03	6.50	1. TE-03
B-1工区	4.00	1. 7E-01	6.00	3. 7E-02	-	-	6.00	9.9E-03	6.00	6.2E-03	6.50	1. 4E-03
B-2工区	4.00	1. 7E-01	6.00	3. 7E-02	I	-	6.00	9.9E-03	6.00	6.2E-03	6.50	1. 4E-03
C-1工区	4.00	1. 7E-01	6.00	3.8E-02	I	-	6.00	1. 2E-02	6.00	7.3E-03	6.50	1. 6E-03
C-2工区	4.00	3. 5E-01	4.50	2.9E-01	5.50	1.6E-01	6.00	5. 2E-02	6.00	3.8E-02	6.50	3. 5E-03
D-1工区	4.00	3. 5E-01	4.50	2. 9E-01	5.50	1.6E-01	6.00	5. 3E-02	6.00	3.8E-02	6.50	3. 5E-03
D-2工区	4.00	1.8E-01	6.00	3.8E-02	-	-	6.00	1. 2E-02	6.00	7.3E-03	6.50	1. TE-03
D-3工区	4.00	3. 5E-01	6.00	1. 2E-01	-	-	6.00	5. 3E-02	6.00	3.8E-02	6.50	9. 9E-03
D-4工区	4.00	1.8E-01	6.00	3.8E-02	I	-	6.00	1. 2E-02	6.00	7.3E-03	6.50	1. TE-03
E-1工区	4.00	3. 6E-01	4.50	3. 0E-01	5.50	1.7E-01	6.00	5. 3E-02	6.00	4. 2E-02	6.50	3. 6E-03
E-2工区	4.00	1.8E-01	4.50	1. 3E-01	-	-	6.00	1. 2E-02	6.00	8.0E-03	6.50	6. 5E-04
E-3工区	4.00	3. 6E-01	4.50	3. 0E-01	5.50	1.7E-01	6.00	5. 3E-02	6.00	4. 2E-02	6.50	2. 3E-03
FIR	5.00	5.4E-02	6.00	2.5E-02	-	-	-	-	-	-	-	-

※約体太子は越波流量推定図からは読みとれないため、高山らによる近似式を用いた ※許容越波流量:q≤0.2 (m³/m/s)
※ _____:越波流量≧0.2 (m³/m/s)



湖(六、土2、14m/日日WI)



表-6	背後地利用状況からみた許容越波流量				
利用者	堤防からの距離	越波流量(m ³ /m/s)			
步行者	直背後(50%安全度)	2×10^{-4}			
少门日	直背後(90%安全度)	3×10^{-5}			
	直 悲谷(50% 安全)	2×10^{-5}			

利用者	堤防からの距離	越波流量(m ³ /m/s)		
步行考	直背後(50%安全度)	2×10^{-4}		
少门有	直背後(90%安全度)	3×10^{-5}		
白動市	直背後(50%安全度)	2×10^{-5}		
日則早	直背後(90%安全度)	1×10^{-6}		
宏長	直背後(50%安全度)	7×10^{-5}		
豕座	直背後(90%安全度)	1×10^{-6}		

種別	被覆工	越波流量(m ³ /m/s)	
雄巴	背後舗装済み	0.2	
硬斤	背後舗装なし	0.05	
	コンクリート三面巻き	0.05	
堤防	天端舗装・裏法未施工	0.02	
	天端舗装なし	0.005以下	

表-7 被災限界の越波流量

2.1.5 観測結果と計算結果の比較

(1) 越波流量と打上げ

前項で算出した観測時の越波流量を用いて、観 測結果の打上げ高と比較検討を行った. 工区毎に 算出した観測時の越波流量(潮位:+0.64m,潮 位:+1.55m)を図-15に示す.

また, 越波流量が比較的多い工区と, 観測時に 最大打上げが発生している工区の関係を図-16に 示す.

この結果より、最大打上げが発生している地点 で越波流量が多くなる傾向があることが確認され た. また,水深が浅い緩傾斜護岸の地点で,最大 打上げが発生していると考えられる. F工区で最 大打上げ高が発生している地点は、ビデオ観測の 結果より, E工区に近い緩傾斜護岸付近であった.





(2) 護岸前面波高と打上げ

観測時における重複波の計算結果を用いて,観 測結果の打上げ回数と比較検討を行った.

まず, 表-1の相関式を用いて各工区の打上げ回 数を算定した.このときの藍島のナウファス観測 地点における有義波高は、観測時の2.36mである.

次に,護岸前面の波高を計算結果より求めた. このとき、スポンジ層のすぐ外側で出現する最大 波高地点とその両隣の3地点の平均値を、その工 区における護岸前面波高とした. なお, C・D・E 工区については、水深が浅い緩傾斜護岸の有無に より、2通りの護岸前面波高を求めた. 図-17に護 岸前面波高の算出例(C工区)を示す.



図-17 護岸前面波高の算出(観測時:Cエ区)

以上の結果より,護岸前面波高(計算値)・藍 島波高(しきい値)・打上げ回数の関係を表-4お よび図-18に示す.

この結果より, 護岸前面波高が高いほど, 打上 げ回数が多くなる傾向があると考えられる.また, 打上げ回数は, 藍島の波高よりも護岸前面波高と

の関係が大きいことが確認された.なお,F工区 は天端高が他の工区よりも1m高いため、打上げ回 数が少なくなっていると考えられる.

表-4 護岸前面波高,藍島波高,打上げ回数の関係

		計算	筸値	観浿	結果
エ区 天端高		前面波高 前面波高 (緩傾斜護岸) (藍島波高 (しきい値)	打ち上げ回数 (推定値)
AI区	4.0 (m)	1.63 (m)	-	1.51 (m)	268 (回)
B工区	4.0 (m)	1.47 (m)	-	1.50 (m)	281 (回)
CI区	4.0 (m)	1.51 (m)	1.43 (m)	1.44 (m)	230 (回)
DI区	4.0 (m)	1.20 (m)	1.31 (m)	1.51 (m)	207 (回)
EI区	4.0 (m)	1.18 (m)	1.10 (m)	1.50 (m)	183 (回)
F工区	5.0 (m)	1.20 (m)	-	1.60 (m)	102 (回)



2.1.6 まとめ

ブシネスク方程式を用いて藻場を有する緩傾斜 護岸および外周護岸の各前面の地形を深浅測量や マウンドの出来型より詳細に再現し、波浪場の再 現を行った. さらに、昨年度実施された観測結果 と今回の計算結果を比較することにより、水深が 浅い緩傾斜護岸で最大打上げ(高)が発生し,越 波流量が多くなることを確認した.また、昨年度 の観測結果では、打上げ回数と藍島の波浪の相関 は顕著でなかったが、今回の検討で護岸前面波高 が高いほど打上げ回数が多くなることが確認でき た. 次に越波流量の検討に関しては, 異常時の計 算結果より、越波流量が許容越波流量を上回る工 区で護岸天端高を5.5m以上にする必要があること を確認した.

参考文献

- 1) 下関港(新港地区)海象特性検討調査報告書, 平成19 年3月,国土交通省九州地方整備局下関港湾事務所
- 2) 下関港(新港地区)波浪会席業務 報告書, 平成19年3月, 国土交通省九州地方整備局下関港湾事務所
- 3) 港湾の施設の技術上の基準・同解説改定版, 平成11年 4月,(社)日本港湾協会

2.2 久慈港半崎地区護岸被災波の検討

2.2.1 はじめに

平成18年10月4日から5日にかけ、台風第15号及び 第17号の北上に伴って、本州南岸に停滞した前線に 向かって台風周辺の暖かく湿った空気が流れ込み、 前線の活動が活発となった.

前線上に発生した低気圧が5日に本州南岸を北東 に進み、7日朝にかけて急速に発達しながら関東の 東海上に進んだ. その後, 三陸沖に進み, 8日には 北海道の東方海上に進んだ.

このため、関東地方から北海道地方にかけての太 平洋側で平均風速25m/sを超える暴風となり、また、 海上では波の高さ9mを超える猛烈なしけ、沿岸で は高潮となった.

また、関東地方、東北地方の太平洋側、及び北海 道のオホーツク海側で降り始めからの総雨量が250 ■を超える大雨となった.特に,北海道網走支庁で は総雨量が10月の月間平均雨量の4倍を超える大雨 となった所があった.

暴風、高波、高潮、大雨により関東地方から北海 道地方にかけて,住家損壊,浸水害,土砂災害が発 生した. 東北地方から北海道では、水稲等の冠水、 果樹の落果、農業・水産施設の損壊等の被害が発生 した. また, 強風害, 海難, 山岳遭難により, 合わ せて死者29名,行方不明者19名となった(消防庁, 海上保安庁, 警察庁調べ)

一方,発達した低気圧に起因した波浪擾乱により, 久慈港では半崎地区南部の護岸が上部工の損壊・剥 離、消波工の損失等の被災を受けた。その後、海水 が北日本造船(株)内に流入し、操業に支障をきたす 結果となったほか、湾口防波堤北の一部も被害を受 けた. (写真-1)



写真-1 被災した護岸

久慈港半崎地区前面には岩礁による浅場があり、 複雑な波浪外力が作用したと考えられる. そこで, 本稿では、透水層を用いた任意反射境界処理法に加 え、乱れ生成項に段波によるエネルギー損失を適用 した乱流モデルに基づく砕波減衰計算法、ならびに

砕波・ 遡上モデルを導入した最新のNOWT -PARI (Ver. 5.2)を用いて, 久慈港におけるピーク波 浪時の波浪変形計算を実施し,半崎地区南部の護岸 に作用した波浪外力の推定を試みた.

2.2.2 被災時の海象状況

東北地方整備局釜石港湾事務所が久慈市長内町に 設置した潮位計では、10月8日3:45に最大潮位 1.77mを観測した.また、同時刻における天文潮位 との比較(八戸、宮古ともに0.45m)から,久慈港 沿岸における最大高潮偏差は0.45m程度であったと 考えられる.一方,波浪状況に関しては,全国港湾 海洋波浪情報網(NOWPHAS)で、久慈港では沖合2.7km で波浪観測が行われているが、被災の前後で欠測が 発生した. そのため被災波浪は, 波浪観測値が測得 されている近隣の島の越漁港、および八戸の観測値 から推定することとする. 推算方法は、先ず、エネ ルギー平衡方程式を用いて、久慈港、八戸港および 島の越漁港の各波浪観測地点における沖合からの波 浪変形計算を行い,それぞれの沖合から観測地点ま での波浪変形係数を算定する.次に地点間どうしの 波浪相関を検討する. その後, 被災時の八戸港, 島 の越漁港の波浪観測データを用いて久慈港の波浪観 測地点の波浪を算定する,沖波を算定した結果,波 高8.65m, 周期12.4秒, 波向Eとなった. それぞれの 観測地点を図-1に示す.



久慈港周辺の波浪観測地点

2.2.3 最新のNOWT-PARIによる久慈港波浪変形計算 (1) 最新NOWT-PARIの概要

被災時における久慈港周辺の波浪場を詳細に再現 するために、複雑な海底地形による波の屈折・反射 変形を同時に算定でき、かつ、それらの波浪伝播の 様子をアニメーションで確認することができる港空 研版ブシネスクモデル(NOWT-PARI)(平山ら, 1998) を用いて波浪変形計算を実施した. とくに、消波ブ ロック被覆堤による任意の波反射を客観的に算定す

るとともに、砕波に対する計算精度を向上させ、低 天端の防波堤上の越波とその背後での伝達波の発生 をも取り扱えるよう,最新のNOWT-PARI (Ver.5.2) を使用した. すなわち本計算で使用した計算モデル は、すでに港湾設計の実務において豊富な適用実績 を有するNOWT-PARI(Ver.4.6β) (平山ら、2002)に 対して,①消波工構造を客観的にモデル化し入射波 に応じて自動的に適切な反射波を算定できる透水層 モデル(平山・平石, 2001)と、②砕波による乱れエ ネルギーの生成量の評価に時間発展型のBoreモデル を適用した乱流モデルに基づく砕波モデル(修正疑 (以段波モデル) (平山・平石, 2004a), および, ③ 波の遡上による汀線移動や海底面の露出を許容する 遡上モデル(平山・平石, 2004a, 2004b)を加えたも のである.とくに②③は、斜面上の波の遡上変形は もちろん、護岸を越波した水塊による背後地の浸水 状況や,防波堤・護岸前面の重複波や浅瀬やリーフ 地形に来襲する高波浪による海底面の干上がり現象 なども安定かつ適切な算定を可能とすることが期待 できる.

(2) 計算条件の設定

計算対象とした久慈港とその周辺海域の地形と計 算領域を図-2に示す. 久慈湾の海底地形は湾形に ほぼ平行に等深線を描いているが, 湾の両端部は急 峻な地形で, とくに, 北部の半崎~麦生の沖合は複 雑な地形となっている. 海底勾配は湾中心部で概ね1 /120, 両端部1/40である. また, 久慈港湾口防波 堤は計画延長3,800m(北堤2,700m, 南堤1,100m)から なっており,入出港船舶の安全および泊地の静穏を 図るとともに, 久慈沿岸が地理的, 地形的に津波被 害を受けやすい状況にあり, 過去幾度となく多くの 人命, 財産が失われているため, 背後地域の津波の 被害から防護することを目的とされている. しかし, 平成2年から建設着手しているものの, 被災時は北 堤325m, 南堤125mしかできていないため, 沖波が直 接護岸へ来襲する恐れがある.



入射波の波浪諸元を表-1に示す. NOWT-PARIに

よる計算対象領域はちょうど図-2で示した岸沖 (W-E)方向:3.8km×沿岸(N-S)方向:7.5kmの範囲 である.また,計算格子の大きさは5m×5mとした. ここで,沖側境界の位置は,久慈港波浪観測地点近 傍で,かつ海底地形による波浪変形があまり生じな い入射水深となるように設定した.その他の計算条 件を表-2に示す.

表一1 入射波条件

項目	設定値
有義波高:H1/3[m]	8.12
有義波周期 : T1/3[s]	12.4
主波向:Dir	E (北から78°)
方向集中度:Smax	10
成分波数:N	512
入射水深:h1[m]	37.0
潮位 D.L.[m]	1.61
入射波スペクトル	合田修正型BSスペクトル

表-2 そのほかの計算条件

(a) 砕波,底面摩擦,最低水深

項目	設 定 値
砕波モデル	修正擬似段波モデル(1方程式乱流
	モデルに基づく)
砕波判定方法	水表面での鉛直圧力勾配および砕波
	限界波高の下限値
砕波指標	鉛直圧力勾配0.5
底面摩擦係数	0.02
最低水深	遡上計算が可能(海浜および陸上部
	分もデータ化)
最大水深	周期別の造波水深と同じ
遡上モデル	越流公式による遡上・流下フラック
	スを算定

 (b) タイムステップ,データサンプ。リング間隔,緩造波時間, データサンプ。リング開始時刻,計算終了時刻

項目	設定値
タイムステップ。: DT [s]	0.031
データサンプリング間隔:TDEL [s]	0.775
緩造波時間:TTIN [s]	124.0
データサンプリング開始時刻:TSVE [s]	1400.0
計算終了時刻:TEND [s]	2989.2

(c)アニメーション用データ設定時刻

項目	設定値
データサンプリング開始時刻:AVSST [s]	1400.0
データサンプリング終了時刻:AVSED [s]	1476.0
データサンプリング間隔:AVSDT [s]	0.775

次に, 消波構造等の反射面の設定として, 本検討 で用いる透水層を採用したNOWT-PARI(Ver.5.2)では, 消波工(消波ブロック)の法面勾配(設置幅)や空 隙率等の諸元を基に, 透水層データを作成すること により,入射波周期に応じて自動的に適切な反射波 が発生する計算を行うことができる. そのため目標 とする反射率の設定は行わず,代わりに例として図 -3に示すような護岸や防波堤等各施設の標準断面 図を参考に、消波工の諸元を詳細に設定およびデー タ化し,透水層モデルによる任意反射境界を設定し た. (表-3)



図-3 久慈港半崎地区護岸標準断面図

		トン数	体積∨	代表径d	層流抵抗係数	乱流抵抗係数	空隙率
ブロック名	積み方	[t]	[m3]	[m]	α 0	β0	λ0
クリンガー	乱積	4	1.73	1.20	2100	2.2	0.53
シェークフ・ロック	乱積	10	4.35	1.63	2100	2.2	0.56
六脚ブロック	乱積	0.95	5.00	1.71	5000	3.5	0.56
六脚ブロック	乱積	7.7	3.30	1.49	5000	3.5	0.56
テトラ	乱積	16	6.30	1.85	2100	2.2	0.5
テトラ	乱積	20	8.00	2.00	2100	2.2	0.5
テトラ	乱積	32	12.50	2.32	2100	2.2	0.5
テトラ	乱積	50	20.00	2.71	2100	2.2	0.5
テトラ	乱積	64	25.60	2.95	2100	2.2	0.5
N#/ //>-	+/77 1	1 1 1	>		11.0+	a THILL	2

表-3 透水層パラメータの設定

※ 代表径dがわからない場合は,体積の3乗根とした.

直立消波構造については、高次スポンジ層による 反射境界を設定した.直立消波構造に透水層を適用 しなかった理由は、消波工のように実際に幅を持っ た消波帯をモデル化しているのに対し、直立消波構 造では岸壁自体が消波構造となっており, 前面に幅 をもっていないためである. 直立消波構造のスポン ジ層による反射境界の設定値を表-4に示す.なお, 入射波周期別の反射率は, 遊水室をもつスリット ケーソンの反射率を準用した.

評価の対象施設である半崎地区-5.0m岸壁,およ び周辺の直立消波構造を対象として,水深,直立消 波部幅(遊水室幅とみなした)を設定した.

なお,その他の構造物や海浜等の反射の設定は表 -5に示す通りである.ここで本検討に用いた NOWT-PARI (Ver. 5.2) には、砕波モデルおよび遡上 モデルが組み込まれているため、例えば海浜で波が 砕波・遡上することによる波浪減衰および反射率の 低減は、消波境界等でとくに別途考慮しなくても、 水深データ値により計算モデル内で自動的に計算さ れることを付記しておく.

表-4 直立消波構造のスポンジ層の設定値

dx=5m時の					
メッシュ数					
2					
反射率は「港湾構造物の耐波設計」p.71図-4.35によった					

直立消波部幅(遊水室幅とみなした):3.0m

No.	区分	境界処理法
1	消波ブロック被覆工	透水層モデル
2	直立消波構造	スポンジ層
3	直立壁、自然崖	完全反射境界
4	海浜 (自然)	砕波、遡上モデル
5	その他(不明)	完全反射境界

表-5 NOWT-PARI (Ver.5.2) における反射境界の設定

(3) 久慈港周辺の波浪伝播特性

最新のNOWT-PARI (Ver. 5.2)を用いて計算された被 災時の久慈港周辺の有義波高分布を図-4に示す. 主波向E(図左:E,下:N)の多方向波が来襲する場 合,湾口防波堤が完成していないものの遮蔽効果が 確認できる.湾口防波堤が延長されると半崎地区護 岸および岸壁へ伝播する来襲波は減少すると考えら れる.また、北側の浅瀬では、来襲波の一部が屈 折・砕波し、南側の地形に比べ減衰してるいことが わかる.



2.2.4 久慈港半崎地区護岸被災に関する考察

全長250mのうち約200mで被災を生じた久慈港半崎 地区護岸前面の海域では、被災時の主波向Eの沖波 が来襲した場合、北側の浅瀬や前面の浅瀬の影響に より、沖波8.65mが2割程度減衰し前面では6.91mと なっている.護岸前面の波高分布を図-5に示す.



図-5 護岸前面波高分布



図-6 進行波の護岸前面波高分布(護岸形状なし)

本計算では、波の遡上による汀線移動や海底面の 露出を許容する遡上モデルを加えた最新のNOWT-PARI (Ver.5.2)を使用しているため、護岸を越波 した水塊による背後地の浸水状況を確認できる.

また、被災時護岸前面の進行波の波高分布を図-6に示す.護岸の設計波については,護岸設計当時, 湾口防波堤計画がスタートしており建設期間が向こ う20年と予定されていた.湾口防波堤完成時には, 波高は減衰すると考えられていたため,通常の50年 確率波を20年確率波に落として設計されている. 護岸設計波高が4.3mに対し,護岸前面波高は,約 5.3mとなったため,設計波を上回る波高が来襲し, 被災したと推測される.

一方,護岸被災箇所を図-7に示す.この図と図 -5を比較すると,越波箇所と被災箇所がある程度 一致していることがわかる.



2.2.5 まとめ

本稿では、平成18年10月に発生した低気圧による 高波で全長の8割以上にあたる約200mに渡って被災 した久慈港半崎地区護岸を対象として、砕波・遡上 モデルを導入した最新のNOWT-PARI (Ver.5.2)を用 いて,久慈港におけるピーク波浪時の波浪変形計算 を実施し、護岸に作用した波浪外力の推定を試みた. その結果、設計波に対し1.23倍の波浪が作用したた め被災したと推測される.また、護岸沿いの波高分 布と背後地の被害状況を比較したところ、波高の高 いところで被災の程度が大きいことが判った.

これらの検討の結果,岩礁などの浅瀬をもつ複雑 な海底地形での波浪変形計算および護岸の越波状況 をNOWT-PARI (Ver.5.2)を用いて確認できることが 判った.

参考文献

- 平山克也・上原功・永松宏一・平石哲也:珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性,海岸工学論文集,第45巻, pp.161-165,1998.
- 平山克也・上原功:消波構造物に作用する波浪の消波 機構を考慮した港内波浪変形計算,海岸工学論文集,第 49巻,pp.671-675,2002
- 3) 平山克也・平石哲也: ブシネスクモデルにおける透水 層を用いた任意反射境界処理法の開発,港湾技術研究 所報告,第40巻,第1号, pp. 3-30, 2001.
- 4) 平山克也・平石哲也:ブシネスクモデルに適した砕波 減衰モデル導入のための一考察,海洋開発論文集,第 20巻, pp. 851-856, 2004a.
- 5) 平山克也・平石哲也: ブシネスクモデルによる砕波・ 遡上計算法とその適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 11-15, 2004b.

3. ブシネスクモデルの入射波の高精度化および うねり性高波浪の近年の傾向について

3.1 JONSWAP および任意の方向スペクトルを用いたブ シネスクモデルの入射波の高精度化

3.1.1 はじめに

現行の NOWT - PARI (Ver.4.6) は、標準スペクトル としてブレットシュナイダーー光易型、方向分布関数と して合田ら¹⁰が改良した光易型の方向関数を用いて入射 波形の作成を行っている.

しかし、短い吹送距離で強風によって急速に発達した 風波の場合は、鋭く尖ったピークを持つことが多い.また、現地観測手法の高度化や方向スペクトルの推定精度 の向上に伴って、ピーク周波数や主波向の互いに異なる 双峰型の方向スペクトルの観測例が報告されるようになってきた.

以上のことから、これまで入射波の作成に用いられて いるブレットシュナイダーー光易型の標準スペクトルに 加えて、スペクトルのピーク度が調整可能なJONSWAP 型スペクトルおよび任意の周波数・方向スペクトルを用 いた入力波形の作成プログラムを新たに作成するととも に、NOWT-PARI (Ver.4.6)を用いてプログラムの検 証を行った.

3.1.2 シングルサンメーションによる入射波形の作成 (1) 基本式

入射波の代表量である有義波高,有義波周期,主波向 ならびに方向集中度が分かっている場合には、スペクト ル形状と方向分布関数を仮定し、周波数および方向に分 割された成分波の重ね合わせによって入射波の時間波形 を作成する.

ここで、入射波の時間波形の作成方法は、シングルサ ンメーションとダブルサンメーションの2通りの方法が ある.ダブルサンメーションに比べてシングルサンメー ションは、目標とする多方向不規則波を生成するための 成分波数を少なくすることができるため、計算時間を短 くすることが可能である.そのため、NOWT-PARIで は、式(1)に示すシングルサンメーションが採用されてい る.

$$\eta = \sum_{n=1}^{N_s} a_n \cos(k_n x \cos\theta_n + k_n y \sin\theta_n - 2\pi f_n t + \varepsilon_n)$$
(1)

ここで、添字のnはn番目の成分波の値であることを 示し、 k_n (=2 π/L_n ; L_n はn番目の成分波の波長), f_n ならびに θ_n はそれぞれ、n番目の成分波の波数、周波数 ならびに波向を示している. また、 N_s は成分波の総数、 tは時間であり、n番目の成分波の振幅 a_n は式(2)から計 算される.

$$a_n = \sqrt{2S(f_n)df_n} \tag{2}$$

ここで, $S(f_n)$ よび df_n はそれぞれ,n番目の周波数スペクトルとスペクトル幅を表す.

また、 ε_n はn番目の成分波の位相差で、 $0\sim 2\pi$ の値を とる一様乱数として与えられる.

今回,標準スペクトルとしてスペクトルのピーク値や 尖鋭度の合わせ込みが行える JONSWAP 型のスペクト ルを用いた(式(3)参照). このスペクトルは,ピークの 鋭さを表すパラメータ(γ)を導入しているのが特徴で あり, γ 値が増大するにつれてスペクトルのピークが鋭 くなるといった性質を有している.

$$S(f) = \beta_J H_{1/3} T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}]$$

$$\times \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / 2\sigma]} \tag{3}$$

$$\beta_{J} \stackrel{i}{=} \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336 \,\gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}}$$

 $\times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma]$ (4)

$$T_p = T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}]$$
(5)

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & f \le f_p \\ 0.09 & f \ge f_p \end{cases}$$
(6)

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期、fは周波数、 f_p はピーク周波数である.

一方,方向関数は光易ら²⁰が現地観測結果から導いた 式を合田ら¹¹が改良した式(7)を用いた.

$$G(f;\theta) = G_0 \cos^{2S}\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{7}$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S} \left(\frac{\theta}{2} \right) d\theta \right]^{-1}$$
(8)

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & f \le f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & f \ge f_p \end{cases}$$
(9)

(2)入射波形の作成方法

入射波形を作成する方法は、振幅 a_n の与え方、周波数 f_n および方向角 θ_n の決め方、成分波の個数 N_s の選定方 法によって幾つかの手法に分けられる.特に、不規則波 形を作成する場合には、周波数スペクトルを成分波に分 割する際の分割方法によって成分波の与え方が異なる. 今回は、次の分割手法を用いて検討を行った.

- A. 周波数等分割
- B. エネルギー等分割
- C. 等分割の小区間内で一様乱数を用いて選定

このうち、Aの周波数等分割は、与えられた周波数スペクトルを成分波の個数に応じて等分割する手法である. なお、各区間の代表周波数は、その区間の中央としている.この方法によるシミュレーション波形は、有限フー リェ級数の性質から波形が2N_s個の周期で繰り返される.そのため、長い不規則波形が必要なときは、その長 さに比例して成分波の個数N_sを増やさなければならないことに注意が必要である.

Bのエネルギー等分割は、比較的少ない個数の成分波 で長時間にわたる不規則波形を作成するためのもので、 各周波数が互いに整数比を構成しないように工夫したも のである. NOWT-PARI (Ver.4.6)では、標準スペク トルを成分波に分割する際にエネルギー等分割を採用し ている. ここで、ブレットシュナイダーー光易型スペク トルをエネルギー等分割する際の代表周期は式(10)によ り算出される

$$f_m = \frac{1.007}{T_{1/3}} \left[\ln \left(\frac{2N_s}{2n-1} \right) \right]^{-1/4} \tag{10}$$

式(10)に示す代表周期の算出式は、ブレットシュナイ ダーー光易型以外のスペクトル形には適用できない難点 がある.特に今回は、JONSWAP型および任意形状の スペクトルにも対応できるよう入力波作成プログラムの 改良行うため、与えられたスペクトルからエネルギーが 等分割となるようにプログラム上で周波数を分割後、そ のエネルギー等分割された区間の断面二次モーメントが 0となる周波数を代表周期として選択するようにした.

Cの周波数等分割+乱数選択は、合田³にならい周波 数等分割の周期性を回避するために周波数等分割した区 間内の代表周期を区間[0,1]の一様乱数により決定し、各 周波数が互いに整数比とならないよう工夫した手法であ る.この手法は、周波数等分割した後の代表周期を算出 する際に、一様乱数を与えて代表周期を決める手法であ る.

以上,入力波形を作成する際の周波数分割方法につい て述べた,なお,今回作成した入射波作成プログラムは, 標準スペクトルとして式(3)に示すJONSWAP型のスペ クトルを採用した.そのため,修正ブレットシュナイダ ーー光易型の周波数スペクトルを入射波として用いる場 合には、γ=1.0として入力スペクトルの作成を行う必要 がある.また,NOWPHASなどの現地観測結果から得 られた任意のスペクトルにも対応できるよう,方向スペ クトルおよび周波数スペクトルの解析結果を直接入力デ ータとして与えることで,先に述べた3法式の周波数分 割方法で入射波の作成が行えるようにプログラムを作成 した.

次に各成分波の波向の決定方法について述べる.シン グルサンメーションによる入射波形の作成は、異なった 周波数の成分波はそれぞれ異なった波向を持つ成分波の 線型重ね合わせとして算出される.

図-1は、n番目の成分波の波向の求めた方の一例を 示した図である.図に示すように各成分波の波向は、方 向関数 $G(\theta)$ の累積値を確率密度分布関数として作成し、 その関数に対して[0,1]の一様乱数 ε'_{n} を発生させて決定 する.

なお、今回作成したプログラムでは、現地観測結果から周波数スペクトルのみが与えられる場合、周波数スペクトルを A~C に示した方法により分割した後、式(7)を用いて各成分波の波向を決定している.

一方,方向スペクトルが得られている場合には、方向スペクトルから各成分波の方向分布関数の累積値を求め、その累積値に一様乱数 ε'_{n} を当てはめることで各成分波の波向を決定している.



図-1 シングルサンメーションによる波向の決定方法の一例

3.1.3 周波数分割手法の違いに関する検討

入射波形の作成方法で述べたように、入射波を作成す る際の周波数分割方法として、周波数等分割、エネルギ 一等分割ならびに周波数等分割+乱数選択の3手法で入



射波の作成が行えるようプログラムの作成を行った.

図-2は、各周波数分割手法による入射波形の作成結果である.なお、図に示す波形の入力条件は、 $H_{_{1/3}}$ =1.0m、 $T_{_{1/3}}$ =10.0s、 γ =3.3 である.また、周波数分割数は各分割方法ともに N_s =500 とした.

図より,作成された波形を見ると,周波数等分割については,約180s毎に波形の大小が生じている.これは,入射波形の作成方法で述べたように,有限フーリェ級数の性質による波形の繰り返しによるものと判断される.本検討には示していないが,詳細に波形を調べた結果,周波数分割数の約2倍に対応する周期で波形が繰り返されていることがわかった.

一方,エネルギー等分割および周波数等分割+乱数選 択について見ると,周波数等分割と異なり波形の繰り返 しが見られない.

以上のことから,周波数等分割を採用する場合,計算 時間に応じて成分波の個数を増やす必要があるものと判 断される.しかし,成分波の個数を増やすと計算時間も それに比例して増大することから,計算時間や周波数分 割数に応じて最適な分割手法を選択することが望ましい ものと判断される.

3.1.4 NOWT-PARIによる検証

NOWT-PARI (Ver.4.6) による検証は、図-3 に示 す沖側一辺に入射境界を設けた岸沖方向 500m,沿岸方 向 1000m の計算領域(水深は一定)を用いて行った. なお、図に示すように、一方向不規則波については波の 進行方向前後に 300m 幅のエネルギー吸収帯を設置し計 算を行った.一方、多方向不規則波については、計算領 域の周囲に 300m 幅のエネルギー吸収帯を設置し計算を 行った.表-1 に計算条件の一覧を示す.

3.1.5 計算および検証結果

(1) JONSWAP 型スペクトルによる検証

JONSWAP 型スペクトルについて検討を行った.入 射波条件は、 $H_{_{1/3}}$ =2.0m、 $T_{_{1/3}}$ =10.0s、 γ =3.3 とした. 図-4 に周波数スペクトルを示す.

試計算は、図-4に示した周波数スペクトルからエネ

条件	設定値		
	ブシネスク方程式		
基礎力性式	(プログラム: NOWT-PARI Ver.4.6 β)		
入力スペクトル	JONSWAP, 任意スペクトル		
計算符合式	$500 \times 1000 \mathrm{m}$		
訂昇限以	(周囲 300m にスポンジ層を設置)		
格子幅	$\Delta x = \Delta y = 5.0 \mathrm{m}$		
時間ステップ	extstyle t = L/400		
計算波数	約 250 波*		

表-1 計算条件

※ 100 波経過後の計算時間

ルギー等分割により入射波形を作成し、その入射波形を 用いて図-3に示す計算領域に対して計算を行った.検

多方向不規則波



図-3 計算領域

証は、図-3に示すポイントで水位変動データを抽出し、 その抽出した水位変動データを用いてスペクトル解析を 行い入力スペクトルとの比較を行った. 図-5に試計算 により得られたスペクトルの計算結果を示す. なお、図 中の Cal.は NOWT-PARI (Ver.4.6)の計算結果から 求めたスペクトル解析結果であり、Exp.は入射波の作成 に用いた入力スペクトルを示している.

計算結果を見ると、各ポイントともに入力スペクトル と計算結果から得られたスペクトル形状が良く一致して おり、JONSWAP型スペクトルのエネルギー等分割に よる入射波作成プログラムの有効性が確認された.

次に、JONSWAP 型スペクトルの多方向不規則波に ついて検証を行う.ここで、多方向不規則波の検証に用 いる周波数スペクトルは、図ー4に示したスペクトル形 とし、方向分布関数は式(7)より算出した.なお、 $S_{max}=25$ とした.

図-6に試計算により得られた方向スペクトルの計算 結果を示す.ここで、図中のCal.はNOWT-PARI

(Ver.4.6)の計算結果から求めた方向スペクトル解析結 果であり, Exp.は入射波の作成に用いた方向スペクトル を示している. なお, 図-6に示す方向スペクトルは, 式(11)に示すように方向スペクトルを周波数に関して積 分したものである.





 $G_2(\theta) = \int_0^\infty G(f;\theta) S(f) df \tag{11}$

図より、計算結果から得られた方向スペクトルを見る と、入射波境界および領域のセンターラインである P1 ~P10 は理論値と計算値がよく一致しており、入射波作 成プログラムの有効性が確認された.

一方,入射波境界から最も遠い P11~P15 について見ると, P12~P14 については理論値と計算値はよく一致しているものの, P11 についてはプラス側, P15 についてはマイナス側のエネルギーが理論値に比べて小さくなっている.

平石ら ∜および平山 ^か ^ℓ は、デュアルサーペント水槽 および NOWT-PARI を用いて、多方向不規則波の有効 造波領域について検討を行っている. それによると、あ る有限な領域に対して多方向不規則波を作用させた場合、 S_{max}の違いにより有効造波領域が変化し、入射領域から離れるに従い有効造波領域が狭くなっていく.

図-7は、今回の試計算で得られた有義波高の分布図である. なお、同図の右側には幾何学的な検討により求めた、 S_{max} =25の有効造波領域を示す. 図より、計算で得られた有義波高の分布を見ると、入射波境界から離れるにしたがって、有義波高 2.0mの範囲が狭まっている. また、有効造波領域図と比較すると、今回の計算で得られた分布は、入射波高の 9割(波エネルギーで 80%)である $H_{1/3}$ =1.9mのラインが幾何学的に求めたラインよりも側方側に若干広くなっているものの、有効造波領域の形状は類似している. これらのことから、JONSWAP型についても、幾何学的な検討により有効造波領域が設定可能であるものと判断される.

(2) 任意の方向スペクトルによる検証

任意の周波数および方向スペクトルによる入射波の計 算手法確認のための試計算を行った.



図-7 有義波高分布および有効造波領域

今回検討に用いた方向スペクトルは、図-8 に示す 長崎県伊王島の NOWPHAS 観測データ (2002/12/12) から得られたものである. なお、この時の $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は、2.81m、7.7s であった.

図-9に試計算に用いた方向スペクトルを示す. 今 回用いた方向スペクトルは,周期 12.0s と 7.0s にピー クがある双峰型の方向スペクトルである. なお, NOWPHAS の観測結果から得られた方向スペクトルは, 周波数分割数が 49,方向分割数が 88 となっている.

ここで、シングルサンメーションにより多方向不規則 波を作成する場合、周波数分割数は200以上、方向分割 数は30以上がよいとされている。今回の方向スペクト ルを見ると、方向分割数は上記の条件を満足しているも のの、周波数分割数については条件を満足していない。

そのため、現地観測データから得られた方向スペクト ルを入力スペクトルとして設定する際には、3次のスプ ライン補完を用いて任意の周波数分割が得られるように した.

まず,任意の周波数スペクトルの再現性を確認するため,双峰型のスペクトルを用いて一方向不規則波の計算 を行った.計算はJONSWAP型の一方向不規則波の検 証と同様,図-3に示す一方向不規則波の計算領域に対 しシングルサンメーションにより作成した入射波を用い てNOWT-PARI (Ver.4.6)により計算を行った.その 後,図-3に示すポイントで時間波形を抽出し,その抽 出した時間波形をスペクトル解析することで確認を行った.

図-10は、図-3に示すポイントで抽出した時間波形 のスペクトル解析結果である.ここで、図中の Cal.は NOWT-PARI (Ver.4.6)の計算結果から求めたスペク トル解析結果であり、Exp.は入射波の作成に用いた入力 スペクトルを示している.



図-8 波浪観測地点(伊王島)



図-9 方向スペクトル (伊王島, 2002 12/12)

図より,周波数スペクトルの解析結果を見ると,各ポ イントともに計算結果から得られた周波数スペクトルと 入力値として与えたスペクトル形状が良く一致している ことがわかる.

次に、多方向不規則波について検討を行う.ここで、 任意の方向スペクトルが得られた場合の波向の決定方法 としては、まず、エネルギー等分割された区間の代表周 期に対して図-1に示した方向関数の累加曲線を作成す る.その後、入射波形の作成でも述べたようにその分布 形状に一様乱数 ε_n' を当てはめることで代表周期ごとの 波向を決定した.代表例として、図-11に周期 12.0s(周 波数 0.08Hz)と周期 7.0s(周波数 0.14Hz)の方向関数 の累加曲線を示す.

任意の方向スペクトルを用いた多方向不規則波の試計 算は、一方向不規則波と同様な条件で行った. 図-12 に 方向スペクトル解析結果を示す. ここで、図中の Cal.は NOWT-PARI (Ver.4.6)の計算結果から求めた方向ス







ペクトル解析結果であり, Exp.は入射波の作成に用いた 方向スペクトルを示している. なお, 図-12 に示す方向 スペクトルは, JONSWAP 型の多方向不規則波の検証 と同様,式(11)により方向スペクトルを周波数に関して 積分したものである.

図より、計算結果と現地観測結果から方向スペクトルを比較すると、入射波境界近くのP1~P5およびP7~ P9については、若干分布形状に違いはあるものの概ね理 論値と計算結果が一致している.なお、図-13には、計 算領域のセンターに位置するP3、P8ならびにP13の周 波数スペクトルの解析結果を示す.図より、周波数スペ クトルについても入射波境界に近いP3およびP8につい ては、理論値と計算値が非常によく一致していることが わかる.

一方, 側方境界近くのポイントについてみると, P6 および P11 についてはプラス側, P10 および P15 につ

いてはマイナス側のエネルギーが小さくなっている.こ れは、JONSWAP型の検証でも述べたように、入射波





図-14 有義波高分布

境界から離れるに従って側方の境界付近では、有効造波 領域外となるためどちらか一方の波のエネルギーが小さ くなったものと判断される.

図-14は、今回の試計算で得られた有義波高の分布図である.図より、有義波高の分布からも入射波境界から離れるにしたがって有義波高 2.0m以上の有効造波領域が狭くなっていることがわかる.また、有義波高 2.0m以下の範囲は、波の進行方向左側に比べて右側で領域が広くなっている.今回試計算に用いた方向スペクトルは、一山目の波向が波の進行方向に対して反時計回りに約25°傾いているため、波の進行方向右側の領域に比べ左側の領域で有効造波領域が広がったものと判断される.

以上,NOWT-PARI (Ver.4.6)を用いて,任意の方 向スペクトルによる入射波作成プログラムについて検証 を行った.検証の結果,有効造波領域内では,周波数ス ペクトルおよび方向スペクトルともに計算結果と入力ス ペクトルは概ね一致しており,プログラムの有効性が確 認された.なお,有義波高の分布からわかるように,波 向が異なる双峰型スペクトルを用いる場合,有効造波領 域の範囲が左右異なる.そのため,双峰型のスペクトル を用いた計算を行う場合には,あらかじめ試計算により 有効造波領域の範囲を確認し,計算領域を設定すること が重要である. 効性について検証を行った.検証の結果,プログラムの 有効性が確認された.

今後は、JONSWAP型や任意の周波数・方向スペクトルを入射波スペクトルして設定することで、これまで ブレットシュナイダーの標準形に当てはまらないスペクトル形に対してもNOWT-PARIによる波浪変形計算 が実施できるようになり、更に現地に近い波浪条件下での検討が実施可能になるものと期待される.

また、これまで双峰型のスペクトル形については、二 つの周波数を用いてそれぞれ別途計算を行い、その結果 から得られた有義波高をエネルギー合成することで波高 分布を算出していた.今後は、任意の方向スペクトル直 接入射波条件として用いることで、計算時間の短縮、さ らにブシネスク方程式が本来持つ非線形性・分散性によ り、波高のエネルギー合成と異なる波浪伝播特性が得ら れることも期待される.

なお、今回は入射波作成プログラムの検証のため、構 造物がない一様水深の計算領域で検証を行った.また、 任意スペクトルによる計算も1ケースのみしか示してい ない.したがって、今後は様々な条件下で計算を実施す ることで、計算事例の蓄積を進めていきたいと考えてい る.

参考文献

- 合田良実・鈴木康正(1975): 光易型方向スペクトルによる不 規則波の屈折・回折計算,港湾技研資料,No.230,45p
- Mitsuyasu, H. et al. (1983) : Observation of the directional spectra of long-travelled swell, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.22, No.1, pp.3-41
- 合田良実(1985): 波浪の統計的性質に関する二,三の数値的 検討,港湾技術研究所報告,第24巻,第4号, pp.65-102
- 4) Hiraishi,T.,K.,Hirayama and H.,Maruyama(1998) : Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator, Rept. of Port and Harbour Res . Inst., Vol.37, No.4, pp.3 -35
- 5) 平山克也(2002):非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾 設計への活用に関する研究,港湾技研資料, No.1036, 162p
- (2003): NOWT-PARI による多方向波の計算精 度の検証と効率的な計算手法の開発,港湾技研資料, No.1046,26p

3.1.6 まとめ

今回, JONSWAP 型および任意の周波数・方向スペ クトルを用いた入射波形の作成プログラムを新たに作成 し, NOWT-PARI (Ver.4.6)を用いてプログラムの有

3.2 うねり性高波浪の近年の傾向について

3.2.1 はじめに

台風や低気圧の来襲による海岸および港湾構造物 の被災は、現在においても数多く報告されている. その中でも、設計波高まで達していないが、10~ 20s程度の長い周期の波浪(以下、うねり性波浪と 称す)が来襲し、構造物の破損や海難事故等が発生 していることがある.

例えば、2004年5月に発生した台風0402号は、太 平洋沿岸の沖合を北上した台風であり、南関東では 顕著な高波は観測されていなかったが、台風一過に よる比較的穏やかな気象状況であった久里浜湾にお いて、湾内の波浪が短時間の内に急激に増大し、う ねり性波浪と思われる高波浪の状況が2~3時間継続 した.このときの高波により漁船の転覆事故が発生 し、漁業関係者1人が犠牲となった.

本検討では、風域外から伝播するうねり性波浪に 対して、その発生起源と伝播特性を明らかにするこ とを目的とし、うねり性と思われる3つの気象擾乱 を対象に、NOWPHAS観測データを基に、その時の 空間的な伝播傾向、およびピーク時の波浪特性につ いて解析を行ったものである.

3.2.2 対象擾乱

本検討で対象とした気象擾乱は2004年および2006 年に来襲した以下の3擾乱である.

●擾乱1	台風0616,0617号崩れの低気圧			
	(北関東~=	化海道の太平洋側で被災)		
●擾乱2	台風0612号	(阿字ヶ浦で被災)		
●擾乱3	台風0402号	(久里浜で被災)		

3.2.3 気象海象状況

(1) 擾乱1(台風0616,0617号崩れの低気圧)

台風0616号と0617号崩れの低気圧は、前線を伴っ た別の低気圧とあいまって,太平洋北東岸で強い温 帯低気圧となり、太平洋北東岸で記録的な高波が観 測された. 10月6~9日の天気図を図-1に示す. 10月 6日未明から、日本の南海上にあった台風0616号と 0617号および秋雨前線上の低気圧が一つになって急 速な発達を始め, その中心が本州太平洋沿岸に平行 に南西から北東に移動していった。 低気圧の中心は、 6日9時には関東地方の南海上に位置しており、中心 気圧は984hPaであったが、7日9時には関東地方の東 海上に北上し中心気圧は970hPaに発達した.8日9時 には北海道地方の東海上に北上し、中心気圧は 968hPaに発達した. こうした台風並みに発達した低 気圧によって、関東地方から北海道沿岸にかけての 海域で,記録的な高波が発達し,北関東から北海道 にかけての港湾において防波堤や護岸の一部が破損 する被害が生じた.



図-1 擾乱1 2006年10月6日~9日の天気図

(2) 擾乱2(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 は勢力を徐々に増し、27日に台風0612号と命名され た.台風の経路図を図-2に示す.9月5日9時には、 房総半島の東沖合約600km付近にあり、中心気圧 965hPaであった.その後、進路を北北西から北北東 に変え、東北地方の太平洋側の海岸線にほぼ平行に 北上し、翌9月6日9時には、北海道根室半島の東約 600kmを975hPaの中心気圧に維持したまま通過し、 さらに北北東の海上に進んだ.

台風0612号は、長期間にわたって太平洋沖合で強い勢力を保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、 日本の太平洋沿岸には非常に発達した周期15sを超 える顕著な周期の長いうねりが長期間にわたって来 襲することとなった.

阿字ヶ浦海岸では、この台風0612号に伴ううねり 性波浪により、工事中であった突堤の被覆ブロック および捨石の一部が飛散する被害が生じた. 当該地 区には、5日16:10に約50世帯に対し避難勧告が発令 され、同日18:45に解除された.



図-2 擾乱2 台風0612号の経路図

(3) 擾乱3(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.台風0402号の経路図を図-3に示す.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,夜にはさらに勢力を弱めながら八丈 島の南海上を北東に抜け,21日午後に東北地方の東 海上で温帯低気圧となった.温帯低気圧に変わって からは勢力を保ったままゆっくり北北東に進み,22 日朝に北海道の南東海上に達して急激に衰えた.こ のとき,久里浜湾では台風0402号に伴ううねりの来 襲により,漁船が転覆する事故が起きた.



3.2.4 うねり波浪の伝播特性

NOWPHAS周期帯別波高より,周期帯f2および f3(周波数10.7s~25.6s)の2つの成分波高を合成した ものをうねり成分波高として用いた.対象地点は, 御前崎〜釧路にかけての東日本太平洋側地点として, 基準地点を鹿島に設定とした.対象地点のうねり波 高の経時変化を図-4~6に示す.これらの波高デー タを基に,相互相関解析によってうねり波浪の伝播 特性を解析した.

伝播特性把握のため,基準地点と対象地点の波高 に対して,観測時間間隔が2時間の観測データをm観 測(ラグ)ずつ遷移させたときの相互相関係数を (1),(2)式により算定した.

$$C_{XY}(m) = \frac{\sum_{n=0}^{N-m-1} [X(n+m) - X_{mean}] [Y(m) - Y_{mean}]}{N - |m|}$$
(1)

$$C_{XY}^{norm}(m) = \frac{C_{XY}(m)}{\sigma_X \sigma_Y}$$
ここで、 X_{mean}, Y_{mean} ; X, Yの平均値
 $C_{XY}(m)$; X, Yに対する共分散

σ_X, σ_Y; X, Yの標準偏差
 C^{norm}_{XY}(m); X, Yに対する相互相関係数
 N;解析区間の全データ数

これにより,相互相関係数が最大となるときのラ グ数(ピークラグ数)を求め,これを鹿島のうねり 波浪到達時刻に対する,各地点の波浪到達時間差と



図-6 擾乱3:うねり(10.7~25.6s成分)経時変化図

した. 解析条件の詳細を以下にまとめる.

- 鹿島-他地点という組み合わせで相互相関解析 を行った。
- ② 2地点の波高時系列の時間をずらして組み合わせた場合に、どちらかの地点に欠測がある場合、その時刻のデータは解析対象外とし、存在するデータのみを用いて解析を行った.ラグの解析範囲を-20~20(-40時間~40時間)とした. なお、以下の場合にはピークラグ数を「-」とした.
 - 相関係数が0.5未満の場合(相関係数の95% 信頼区間を考慮して,0.5程度以上の相関係 数がないと有意な相関があると判定できないものとする。)
 - ピークラグ数が±20となる場合



図-7 相互相関係数(擾乱2:周期10.7~25.6s) (上:釜石,中:仙台新港,下:小名浜)

図-7は擾乱2の場合に、基準点を鹿島とし釜石、 仙台新港、小名浜の各地点におけるラグ数と相互相 関係数の解析結果である.図中には最大相関係数、 ピークラグ数、欠測数も示した.これらの結果から、

鹿島に対する小名浜のピークラグ数は2,仙台新 港で3,釜石で6となり,北方への台風経路と,ピー クラグ数の増加が対応していることがわかる.

同様に全地点に対して3擾乱のピークラグ数をま とめたものが表-1である.擾乱1では,基準とした 鹿島をはじめ,複数地点において長期の欠測がある ため,擾乱1ではピークラグ数の分布に規則性がな く,ほとんどうねりの伝播は見られない.擾乱2で は,鹿島以北の地点については,南から北にうねり の伝播している傾向が見られる.擾乱3では,第二 海堡より西ではうねりの伝播は顕著ではなく,北側 においては,ほぼ同時にピークが発生している.こ れは,第二海堡より西では,鹿島との変化傾向がか なり異なっているため,基準地点を西日本の別の地 点に変えて解析するなどの検討が必要であると考え られる.

これらの結果から、ピークラグ数を用いることで

うねり性波浪の伝播特性を把握することは可能であ るが、必ずしも台風経路とピークラグ数が対応して いるとは限らず、基準地点の選定や、欠測の有無等 により、大きく影響を受けるものと考えられる.

表-1 うねり波高(10.7~25.6秒)の 相互相関解析の整理結果(ピークラグ数)

擾乱1		擾乱2		擾乱3	
基準地点: 周	冟島	基準地点: 唐	巨島	基準地点	: 鹿島
地点	ピーク	地点	ピーク	地点	ピーク
釧路	5	釧路	6	十勝	1
十勝	1	十勝	6	苫小牧	2
苫小牧	0	苫小牧	6	八戸	0
むつ小川原	6	むつ小川原	3	久慈	0
八戸	7	八戸	0	釜石	0
釜石	3	釜石	6	仙台新港	0
石巻	-8	石巻	1	相馬	0
仙台新港	-7	仙台新港	3	小名浜	1
相馬	-1	相馬	0	常陸那珂	2
小名浜	-2	小名浜	2	第二海堡	18
常陸那珂	-1	常陸那珂	-1	アシカ島	-19
第二海堡	-5	第二海堡	-	波浮	—
アシカ島	-1	アシカ島	0	下田	-19
波浮	-1	波浮	0	清水	—
下田	-16	下田	4	御前崎	-
清水	-18	清水	-9		•
御前崎	-18	御前崎	0		

3.2.5 うねり波浪のピーク時波浪特性

NOWPHASによる波形データからピーク時刻におけ る波浪特性を解析した.対象地点は、八戸、常陸那 珂、鹿島、波浮、アシカ島の計5地点としたが、本 論では被害が生じた以下の地点を中心に述べる.

擾乱1:鹿島 擾乱2:常陸那珂 擾乱3:アシカ島(波浮)

なお、以下に示す経時変化図は擾乱期間中の観測 データであり、表記項目は有義波(波高,周期,平 均波向),周期帯別波(波高,波向),周期帯別波 高f2とf3成分の合成波高,潮位,各対象地点の波高 ピーク時刻に観測された20分間の水位変動である. また、スペクトルおよび、ひずみ度、尖鋭度は、 ピーク時刻における水位変動データによるものであ り、波の連なり度(スペクトルピークの尖鋭度)を 示すパラメータQpは、スペクトルから(3)式により 求めた値である.

$$Qp = \frac{1}{m_0^2} \int_0^\infty f S^2(f) df$$
ここで, m_0 ; スペクトルの0次モーメント
 f ; 周波数
 $S(f)$; 周波数スペクトル

(1) 擾乱1 鹿島

擾乱1の観測データを図-8に示す.対象とした鹿島では、停電のためピーク付近では欠測となっているが、図-9に示す常陸那珂の観測から高波高であった様子が窺える.また、台風が北関東沿岸を通過したことから、最大1m程度の大きな潮位偏差が発生していた.



図-10に示す鹿島のピーク付近時刻(10/7 16:00)の 方向スペクトルから、1つ山のエネルギー分布と なっていることが分かる.これを修正BS型および JONSWAP型の理論スペクトルと比較したものが図-11であり、ピーク周波数の付近でのスペクトルの尖 り方は、BS型よりもJONSWAP型に近いように思え る.ここで図-12に示すJONSWAP型の方向関数と比 較すると、Smax=25のときとほぼ一致した.

また,波形の非線形性を示すひずみ度,尖鋭度, また波の連なり度Qpを代表5地点に対して解析した 結果が表-3である.ひずみ度,尖鋭度については, 強い非線形性は現れず,波の連なり度Qpは2~3の値 を示した.

(2) 擾乱2 常陸那珂

図-13~16に,常陸那珂の波浪データおよびスペ クトル解析結果を示す.

台風接近時では、太平洋沿岸では約2日間に渡っ て周期15s以上の長い周期の波が来襲している.波 高はその間に徐々に増大し、台風が観測地点に対し て最接近する付近で波高はピークを迎え、通過と共 に波高,周期共に急激に減少する.また,波向については,擾乱期間を通して平均波向は変化せず,周期帯別に見ても,周期10s以上に当たるf2,f3は,平均波向とほぼ一致していることがわかる.また,潮位については台風が沿岸から離れた沖合を通過しているため,大きな潮位偏差は発生しておらず,常陸那珂周辺では最大20cm程度の偏差であった.



図-11 周波数スペクトル(擾乱1: 鹿島)



図-12 方向関数(擾乱1: 鹿島)

主 ?		
রহ−১	波形 付注胜 们 施禾	

#4 년	擾乱1				
地点	ひずみ度	尖鋭度	Q_P	T _p (s)	
波浮	0.03	2.29	1.39	10.0	
アシカ島	-0.04	2.77	1.08	3.8	
鹿島	0.22	2.85	1.56	15.1	
常陸那珂	-0.13	2.64	1.84	12.0	
八戸	-0.06	2.67	1.31	13.8	



図-14に示すピーク時の方向スペクトルは非常に エネルギーが集中しており、図-15の周波数スペク トルを見ても非常に裾野が狭く、狭帯域にエネル ギーが集中している.また、図-16の方向関数で見 た場合もSamx=75とほぼ一致しており、強い方向集 中度を示している.

そして,波形の非線形性を示すひずみ度,尖鋭度 は,強い非線形性は現れておらず,波の連なり度Qp は2~4の値を示した.

(3) 擾乱3 アシカ島(波浮)

図-17~20に、アシカ島および波浮の波浪データ およびスペクトル解析結果を示す.

擾乱3では、台風が北東に向かって関東沖合を通 過した擾乱である.北関東では、顕著な高波は観測 されておらず、東北沿岸では4m以上の高波が継続的 に1日程度続いていた.波浮・アシカ島では、約半 日の間に波高・周期が急激に増大・減少をしている. このとき波浮における波向はSであり、東京湾口に 位置するアシカ島に対しては沖合からの波が直接伝 播する波向であった.しかしながら、波浮で最大有 義波高4.01mが観測された5月21日16時および、アシ カ島で最大有義波高2.24mが観測された5月21日14時 には、台風は犬吠埼の沖合に位置しているため、台 風が関東の南沖合に位置していた時に発生したうね り性の波浪が,遅れて波浮,アシカ島に伝播してき ていたと思われる.



図-14 方向スペクトル(擾乱2:常陸那珂)



図-15 周波数スペクトル (擾乱2:常陸那珂)



図-16 方向関数(擾乱2:常陸那珂)

表-4 波形特性解析結果(擾乱2)

	擾乱2				
地点	ひずみ度	尖鋭度	\mathbf{Q}_{P}	T _p (s)	
波浮	0.1	2.5	2.65	18.0	
アシカ島	0.1	3.46	0.95	17.7	
鹿島	0.25	3.13	2.76	17.7	
常陸那珂	0.17	2.78	3.21	16.8	
八戸	0.14	3.27	4.05	17.7	



図-17 経時変化図 (擾乱3:波浮)

図-18に示す波浮の方向スペクトルから,波向Sに 非常にエネルギーが集中しており,これがアシカ島 に伝播していったものと思われる.したがって,図 -19に示す観測後のアシカ島の周波数スペクトルで は、非常に裾野が狭く、エネルギーが狭帯域に集中 している.また、図-20に示す波浮における方向関 数ではSamx=50とほぼ一致していた.

また,この波形の非線形性を示すひずみ度,尖鋭 度,また,波の連なり度を示すQpを代表5地点に対 して解析した結果が表-5である.ひずみ度,尖鋭度 については,強い非線形性は現れず,波の連なり度 Qpはアシカ島で5以上の大きな値を示したのに対し, 他の地点では1程度となった.これは久里浜湾にお いて発生した高波の特異性を示すものと考えられる.

3.2.6 まとめ

本論では、NOWPHAS波浪観測データを用いて、 うねり性波浪特性についての検討を行った.検討結 果を以下にまとめる.

- ・うねり性波浪の擾乱時は、比較的高波浪の状態が 1~3日程度の長い時間継続する.
- ・波浪のピーク時のスペクトル解析結果から、 JONSWAP型のようなエネルギーが狭帯域に集中するようなスペクトル特性となる。
- ・波の方向集中度も高く、Smaxが50~75以上となる場合もあった。
- ・波の連なり度を示すQpは、うねり性波浪に対して 3~5程度の値を示した.



図-19 周波数スペクトル (擾乱3:波浮)



図-20 方向関数(擾乱3:波浮)

表-5 波形特性解析結果(擾乱3)

		擾	钆3	
地点	ひずみ度	尖鋭度	\mathbf{Q}_{P}	T _p (s)
波浮	0.09	3.19	1.58	15.5
アシカ島	0.11	2.71	5.29	16.0
鹿島	0.24	3.44	1.77	9.8
常陸那珂	0.06	2.99	1.45	10.1
八戸	0.26	3.55	1.92	11.3

参考文献

- 1) 永 井 紀 彦, 里 見 茂: 全 国 港 湾 海 洋 波 浪 観 測 年 報 (NOWPHAS2004),港湾空港技術研究所資料,No.1118,2006.
- 清水勝義,佐々木誠,永井紀彦:全国港湾海洋波浪観測年報 (NOWPHAS2006 特別号),港湾空港技術研究所資料,No.1160,2007.
- 3) 合田良実:増補改訂 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会

4. 波浪推算とその活用について

4.1 はじめに

海洋や海岸、沿岸域や港湾域などの開発・利用・ 防災にあたって、波浪は最も重要かつ支配的な自然 条件である. そのため、対象とする海域の波浪特性 を正確に把握することは実務上重要である. 波浪特 性の把握には長期間に渡る波浪情報が必要不可欠で あるが、それら波浪情報の入手には、観測による方 法と数値的な方法(波浪推算)がある.前者につい ては、1970年代に当時の運輸省(現在の国土交通 省)港湾局を中心に日本沿岸における波浪の定常観 測(NOWPHAS)が開始されて以降,次第に波浪観測 地点数も増え,現在は日本沿岸全海域でほぼリアル タイムでの波浪情報の取得が可能となり、Webサイ ト上でも公開されている. NOWPHASでは単なる有義 波諸元だけに留まらず、スペクトル情報、周期帯別 波高などの情報も提供されており, さらに近年, GPS波浪計による大水深海域での波浪・風観測も始 まっている.一方,後者は,不規則な海の波を「有 義波」という統計的な概念で捉えた有義波をベース にした有義波法 (SMB^{1) 2)}など),「スペクトル」と いう概念をベースにしたスペクトル法に大別され、 現在は、スペクトル法が主流となっている.

近年,波浪推算モデルや波浪推算に必要な気象 データ(海上風データ)の高度化・高精度化,計算 機の計算能力向上などに伴い,手軽に波浪推算が実 施できる環境が整ってきている.波浪推算で得られ る波浪情報は,気象(海上風)データが与えられる という前提はあるものの,①データ欠測がない,② 過去(追算)から未来(予測)に渡って任意の期 間・時間間隔の波浪情報が短期間で得られる,③空 間的に広範囲かつ高分解能な波浪情報が得られる, ④コスト的に相当有利である...などの長所がある. このため波浪推算で得られる波浪情報の質と量,昨 今の社会経済情勢等を踏まえれば,今後,波浪推算 は波浪情報を得る手段として一層有益な手法となる と考えられる.ここでは波浪推算の活用(可能性) について紹介したい.

4.2 第3世代波浪推算モデル

現在,波浪の不規則性をより直接的に表現したス ペクトルの概念を導入したスペクトル法と呼ばれる 波浪推算法が主に用いられ,特に波浪の非線形効果 (非線形相互作用)を出来るだけ正確に取り入れて 波浪推算を行う第3世代のスペクトル法へと移行し ている.第3世代モデルの代表にWAMと呼ばれる波 浪推算モデルがある.WAMはドイツのHasselmannや オランダのKomenらが中心になって世界各国の波浪 を研究している研究者らを集めて結成したWAMDIグ ループ³⁾⁴⁾によって開発された.WAMでは,波浪の発 生・発達・減衰を表すエネルギーソース関数として, 風から波へのエネルギー輸送,4波共鳴非線形相互 作用による成分波間でのエネルギー輸送,白波砕波

によるエネルギー散逸,海底摩擦によるエネルギー 散逸などが考慮されている. WAMを始めとした第3 世代波浪推算モデルの計算精度については、橋本ら ⁵⁾⁶⁾,間瀬ら⁷⁾,土木学会海岸工学委員会研究現況レ ビュー小委員会⁸⁾が検討している.橋本ら⁵⁾は、WAM は第1世代モデルMRIよりも推算精度が高く、特に 周期の精度が改善されていると報告している.また、 MRIでは精度良く推算できなかった風波とうねりが 混在する複雑な波浪場の方向スペクトルも精度良く 推算可能であると報告している. 図-1は1998年1月 の1ヶ月間の長崎県福江島における波浪観測値と WAMによる推算値の時系列比較図の一例である.図-2は福島県いわき沖で観測された観測値と推算値の 方向スペクトル比較した一例である. これらの図に 見られるように、WAMによる波浪推算は有義波高・ 周期などのパラメータのみならず、方向スペクトル も精度良く推算できることが分かる.なお、WAMの 詳細は、WAMDIグループ³⁾⁴⁾,橋本ら⁵⁾などを参照さ れたい.



4.3 波浪推算の実務的利用

波浪は海難や災害を引き起こす要因の1つとなる ため,海の利用や海での様々な人間活動(漁業,船 舶航行,港湾荷役,海洋レクリエーション等)に とって必要かつ重要な情報である. 前述のように日 本周辺海域では、NOWPHASによる波浪の定常観測が 行われ,波浪データが日々蓄積されている.これら の波浪情報は、港湾・海岸・空港事業の計画・設 計・施工など様々な沿岸域の開発・利用・防災に活 用されているが、その観測点は沿岸域に集中してお り、しかも、観測期間が一番長い地点でもせいぜい 40年程度である、したがって、台風域内の波浪分布、 広い海洋全域における波浪の性質,特定海域におけ る波浪の極値あるいは設計波(設計沖波)などを明 らかにするには、必ずしも観測データだけでは十分 でない. そのため, 波浪推算に基づく波浪情報も同 時に用いて検討せざるを得ない.

現在,実務で用いられる波浪情報は観測によるも のが中心であるが,波浪観測の実施・維持には多額 の費用が必要であり、しかも,対象海域における波 浪の出現特性を波浪観測データのみで検討するには かなりの観測期間を要する.一方,波浪推算は波浪 観測に無い多くの長所を有しており,波浪推算で得 られる波浪情報を実務で活用する意義は非常に大き い.しかし,実務における波浪推算は,主に高波を 対象とした特定の気象擾乱に対して限定的に用いら れるのみに留まっており,波浪推算の持つポテン シャルを活かし切れていないのが現状である.ここ では,波浪推算で得られる波浪情報の実務的利用と いう観点から述べるとともに,波浪推算結果の実務 的利用を念頭において開発した日本沿岸波浪推算処 理解析システムについて紹介する.

4.3.1 日本沿岸波浪推算処理解析システム

波浪推算で得られる波浪情報を実務で利用する際, その都度,波浪推算を実施していては効率が悪い. そのため,観測データを日々蓄積するように,波浪 推算結果もデータベースとして蓄積して整備してお けば,検討を行う際にデータベースから必要な情報 を取り出して活用できる.このような考えから波浪 推算データベースを構築した.さらに,実際に実務 担当者が波浪推算データベースを活用する際,適切 なGUI (Graphical User Interface)があれば波浪推 算や波浪に関する各種統計解析に関して経験の浅い 技術者にとっても非常に便利である.このような波 浪推算結果の実務的利用を踏まえ,日本沿岸波浪推 算処理解析システム(以下では,本解析システムと 記す)を開発した.

(1) 日本沿岸波浪推算処理解析システムの構成

本解析システムは、最先端の波浪推算技術を波浪 推算の専門知識を持たない実務担当者にも操作し易 いように、GUIを通じて利用できるように開発した システムであり、以下に示す3つのシステムで構成 される(図-3参照).

(a) 海上風推算システム

波浪推算を行う際に必要な海上風の推算を行うシ ステムの総称である. 傾度風モデル,台風モデル, ハイブリッドモデルおよび局地気象モデルなどによ る風推算が可能である. 波浪推算の精度は波浪推算 に用いる海上風の精度に大きく依存することから, 外洋(沿岸域)の波浪推算では,気象庁, ECMWFや NECPなどから提供される海上風を直接与えて実施す ることも可能であるが,陸上地形の影響を大きく受 ける内湾域を対象に波浪推算を実施する際には精度 が十分ではない. そのため,本システムによって,精 度の高い海上風の推算を行う.

(b) 高精度波浪推算システム

気象庁等から提供されている海上風や上記(a)で 得られた海上風等を用いて,波浪推算を実施するシ ステムである.

本システムの基本は第3世代モデルWAMであるが, 各種の改良を施している.特に,内湾域を対象とし た波浪推算では,波浪スペクトルの周波数範囲を高 周波数側に拡張するなどの改良を行っている.その



図-3 日本沿岸波浪推算処理解析システムの構成

結果,深海域から内湾域において高波浪時はもちろん低波浪も含めた常時波浪に関しても精度の高い推算が可能となった.

(c) 波浪推算データベース解析表示システム

上記(b)で得られた波浪推算結果を波浪推算デー タベースとして蓄積・整備し、これを基に各種統計 処理や表示機能を持たせたシステムである.後述の ように、現システムでは対象海域全域における各種 波浪パラメータの空間分布の時系列変化、対象海域 の特定地点における波浪推算値および方向スペクト ル(ただし、波浪推算実施時に方向スペクトルデー タを保存した地点に限定)の時系列、各種波浪統計 処理機能及び統計表の表示機能を有している.

通常の実務では、上記機能を利用すれば実用上は ほぼ問題ないと考えられるが、今後、ユーザからの 要望等があれば機能拡張を図り、より便利なシステ ムに改良していくことは可能である.

なお、本システムは、波浪推算結果を便利なGUI を通じて利用するためのシステムであるが、将来的 には、推算結果を利用するのみならず、海上風の推 算や波浪推算そのものも共通のGUI上で実行できれ ばより便利であると考えられる.

(2) 日本沿岸波浪推算処理解析システムの表示例

波浪推算データベースを基に本解析システムの処理・解析の出力結果の一例を示す.本解析システム を実行する際には、メイン画面(図-4参照)で対象 海域を指定し、

①対象地点

②対象期間(出力時間間隔)

③処理内容

をユーザが指定する必要がある.本解析システムでは、解析結果を画面表示・印刷するだけでなく、同時に処理結果を別途ファイルにも保存される.





(a) 有義波諸元の平面分布および時系列変化

本解析システム上で対象海域・対象地点および対 象期間・出力時間間隔をユーザ指定することにより, 対象海域全域や対象地点での有義波諸元(有義波高, 有義波周期および平均波向)の表示が可能(図-5 および6).また,WAMにより風波とうねりを分離し た計算を実施すれば風波とうねりについても同様の 表示が可能.

(b) 方向スペクトルの時系列変化

本解析システム上で対象地点および対象期間(出 力時間間隔)をユーザ指定することにより,対象地 点における方向スペクトルの時系列変化の表示が可 能(図-7).ただし,本表示を行う場合,予め方向 スペクトルの結果を表示させたい地点を指定して波 浪推算を実施し,出力ファイル(波浪推算データ ベース)に結果を保存しておく必要がある.

(c) 有義波年統計&各種出現頻度表

本解析システム上で対象地点および対象期間を ユーザが指定することにより,対象地点における有 義波年統計(最大および平均有義波諸元と発生日時 等),各種出現頻度表の処理・解析および表示が可 能の処理・解析および表示が可能(図-8).



図-5 出力例(波高・波向の平面分布図)



出力地点:北緯 35.1333度 東経139.6833度

- E-58





8.11		я	1	1	3		1	. 1	7	. 8	8	- 10	1	15	年間
	1112	(m)	0.99	1.18	Lff	1.6	6.41	35.00	0.62	0.44	0.02	1.12	1.85	1.10	1.21
# .t.	72/	EGT.	8.8	4.5	:17	1,1	2,8	8.1	12.8	\$.9.	\$.8	3.1	3635	1.9	3,8
1000	统	10	176	758	338	341	:130	====	22.8	519	- 84	- 46	343	36	346
	1019	(31.00)	10.14	9-41	11-11	11-6T	18-11	9-1	31-1	11-12	11-11	10	19-21	15-13	11-25-1
	12	7158	0.30	9.00	1.10	1.17	0.23	0,22	0.18	0.18	0.38	0.10	1.11	0.75	1,19
2.10	hú.	10942	0.16	0.10	1.18	1.39	0.15	0.09	0.11	0.04	0.11	1.11	1.18	0.17	1.14
* 10 *###	10.33	1010	3.8	1.1	1.1	4.1	3,8	3.0	3.0	1,8,	2.0	34	1.1	1.1	3,1
	(4)	-	34.0	0.52	0.10	1.23	1.20	0.54	0.46	0.45	0.45	0.30	1.40	3.45	8.44



(a) 有義波年統計図表 **図-8** 出力例(対象地点での各種頻度表;次頁に続く)



BITHER : HAR TO TORONY MARINE HOUSE

1		1.08	Т		40					1.8	10		100	1	-10	- 岸 .	神	++
4.8	11.10	8.4		11.10	tion	000	10.41	0.41	toot	311.6	18.40	10.01	8.11	14.10	16-30	8.10	11.00	44
15	0.0	163	4	die.	10.51	du	100	0.00	0.41	Net	16.42	10.00	1011	101	u'sc	11.20	18.30	lof.
	8.0	10.8	1	100	1004	(004)	100	iour.	601	1641	14.40	10.01	10.00	HAR.	16.00	4.0	16.00	lab
18.	14.0	1.0	4	ы́к.	30,01	0.0	300.	0.0	0.41	JOI.	160	8.01	R.H.	8.00	10,00.	1.00	19,00	10 ju
12	11.40	1a)	4	nie.	0.01	0,01	8.0	ian'	1941	991	nie.	BN.	hir.	6,62	12.00	1.00	hije.	146
11	11.0	144	4	nie.	12.41	1001	201	0.81	0.41	hật.	R.R.	BAL.	hit.	8.0	18,10	RE	18,10	100
	0-0	0.0	4	8.0	0.41	0.41	3.41	0.01	0.41	201	No.	8.41	Het:	10.00	10.00	10.00	n _i o	160
	10,00	$\pm a_{2}$	4	вju.	0.0	0,01	2.11	au.	aju.	18/11	Line.	an.	30.00	8,6	10.00	ax.	1.0,0	103
I.	0.0	10.0	4	10.00	19.01	0.01	8.41	9.0	201	19-11	Mit.	10.41	160	NH	10.01	8.00	10.00	100
	100	140	4	nhi.	1991	600	100	10.0	6.1	LIQL.	MR.	10.00	M.	R.H.	10.0	19.00	l n n	144
-	0.0	1-92	4	цю.	0.01	000	201	1000	201	161	101	1000	10.01	6.0	19.91	30.	11/10	193
	0:10	1014	2 ÌI	(0,0)	0.001	0.0	10.0	10.0	10.41	1641	10 IF	10-11	19-11	tiên	111-42	10.00	TTE 4	Jole -



(c) 波高と波向の出現頻度表図表
 図-8 出力例(対象地点での各種頻度表;続き)

4.3.2 波浪推算結果の活用可能性

本解析システムは、最先端の波浪推算技術を波浪 推算の専門知識を持たない実務担当者にも操作し易 いように、GUIを通じて利用できるようにしたシス テムである.本解析システムは、波浪観測データが 不十分な海域でも精度の良い波浪情報が提供でき、 海岸・港湾の整備計画の立案、施工の管理など、今 後の海岸・港湾事業における有用な波浪情報の収集 手段になると考えられ、各種事業の省力化、効率化 に大きく寄与するものと期待される.その適用範囲 は数多く考えられるが、その活用事例および今後の 活用(可能性)について以下に述べる.

(1) 設計波の算定

例えば管内の海岸・港湾構造物等の設計条件の見 直しを行う場合,各港湾整備事務所あるいは各調査 事務所等の担当者は,本解析システムを利用するこ とで,設計波算定に必要な高波発生事象を抽出する ことが可能となる.また,抽出された高波発生時の 気象擾乱に対し,高精度波浪推算システムにより波 浪推算を実施すれば設計波の算定が可能である.な お,設計波の算定には基礎資料として観測資料を用 いることが望まれるが,殆どの場合,観測資料に替 えて波浪推算による値が用いられるのが一般的であ る.

(2)静穏度調査

港湾域の稼働率を算定する場合には、高波浪のみ ならず低波浪も含む連続的な波浪データを統計処理 する必要がある.大きな港湾域周辺では波浪観測 データは比較的よく整備・蓄積されているが、小さ な港湾や漁港などでは必ずしも十分な観測データが 整備・蓄積されているとは限らない、このような場 合,港湾工事に携わる担当者や港湾の利用に関する 調査に携わる担当者が、本解析システムを利用する ことにより、当該海域の波浪の出現特性を調査する ことが可能となる.また,防波堤の計画・設計にお いて防波堤の法線を決定する場合、既往の波浪観測 資料に基づいて波浪条件を設定し、その設定された 波浪条件で港内静穏度計算等を行い、適切な防波堤 の法線方向や配置を決定するが、波浪観測資料が十 分でない場合,どのような波浪条件を設定するのが 妥当であるか不明であることが多い. このような場 合にも、担当者は本解析システムを利用して、対象 海域の港内静穏度計算のための適切な波浪条件を設 定することが出来る.

実際,波浪観測データが全くない南大東島におい て岸壁整備の方策を検討する際,本解析システム (波浪推算データベース)が用いられた.具体的に は,南大東島付近の常時波浪推算結果を基に波浪出 現頻度表を作成,岸壁整備前後における荷役稼働率 の算定を行い,岸壁整備に伴って想定される便益と 建設コストのB/Cの算定(費用便益分析)に用いら れた(内閣府沖縄総合事務局開発建設部⁹⁾).

(3) 漂砂調査

新海岸法の下で作成された海岸保全基本方針に よって、全国約70の広域海岸毎に海岸保全基本計画 を作成することが求められることになった.海岸保 全基本計画の作成にあたっては、広域の土砂移動特 性を出来るだけ定量的に把握しておくことが望まし く、そのためには数十~百数十kmの延長をもった領 域の土砂移動特性を定量的に示す広域土砂収支図の 作成が望まれている.このような土砂移動の主要な 原因は、言うまでもなく沿岸波浪である.したがっ て、調査対象域の土砂移動の原因や特性を検討する ためには、長期間にわたる連続的かつ広域の波浪情 報が必要不可欠である.しかし、このような調査に 利用できる十分な波浪観測データが整備・蓄積され ている沿岸海域は殆ど無い.

黒岩ら¹⁰, 宇多ら¹¹⁾は, 3次元の海浜変形予測計 算をしているが, その入射波浪条件として, 時々 刻々と変化する波浪場を与える必要があるとしなが らも, 高波浪時に著しい海浜変形が起こるという仮 定や,計算時間や計算機資源等の制約から一定の波 高・周期・波向を与えているに留まっている.また, 加藤・山下¹²⁾は, 波浪の観測値を基に入力波条件を 時間的な変動成分とした計算をしているものの, 極 限られた狭い計算領域の沖側境界の条件として与え るに留まっており, 今後は入射波条件の与え方の検 討が必要としている.このような当該海域の波浪の 出現特性を調査し,広域土砂移動や汀線変化などの 調査研究に利用できる.

(4) 波浪災害の原因究明

船舶や海岸・港湾構造物などが高波によって被災 した場合,どのような波浪条件で被災したのか調査 する必要がある.当該海域周辺に波浪観測データが ある場合には,そのデータを用いて被災メカニズム の検討などを行う.しかし,我が国では超音波式波 高計を用いて波浪観測を行っている場合が多く,特 に砕波を伴う高波時には波浪観測が欠測することが 多い.このような場合に,災害原因の究明を担当す る者は,本解析システムにより,有義波諸元のみな らず,方向スペクトルなどの高度かつ詳細な波浪情 報を入手することができ,波浪災害の原因究明に利 用できる.なお,高潮による災害を調査する場合で も、多くの場合その被災は高潮に伴う高波によって 発生している場合が多く,そのような場合にも本解 析システムを利用できる.

(5) 限界状態設計法における利用

高精度波浪推算法の長所は、有義波諸元に加えて 方向スペクトルも精度良く推算可能な点にあり,方 向スペクトルを用いれば種々の応用が可能である. その1つの応用例に限界状態設計法への利用がある. 「港湾の施設の技術上の基準・同解説」では、鉄筋 コンクリート構造物の部材の安全性の検討は限界状 熊設計法によることが標準とされている.限界状態 設計法による部材の安全性の検討は、終局限界状態, 使用限界状態および疲労限界状態について行うが, 疲労限界状態の検討は、波高と周期の頻度表の全て の波高階級について,疲労寿命を評価し,階級毎の 疲労寿命の総和が200万回を越えないことを確認す る. すなわち, 疲労限界状態の検討を行う場合には, 供用期間に来襲する全ての波に対する波高と周期の 頻度表が必要になる.このような検討を行う場合, 波浪観測データが必要不可欠である.しかし,波浪 観測データは観測期間が短いという問題があり、ま た、近くに波浪観測点がない場合にはこのような検 討は困難である.

一方,不規則な波浪の性質はスペクトル特性から 色々導くことができる.特に不規則波の挙動をやや 具体的に追求するには,表面波形や水粒子速度の データ等の情報が必要になる.このため,与えられ た波浪スペクトルに対応する波運動の空間・時間波 形を電子計算機上で作成する数値シミュレーション 手法が利用される.図-9は推算値(方向スペクト ル)を基に1時間分の水位変動の時系列を求めたも のであり,表-1は図-9で得られた水位変動に対して 波別解析法により求めた波高と周期の結合頻度表で ある.このように高精度波浪推算法では波浪スペク トルを精度良く推算できることから,これに基づい て表面波形や水粒子速度等をシミュレートすること もでき,限界状態設計法における波浪条件の検討に 利用できる.



図-9 波浪推算結果から合成された水位変動の時系 列の例

表-1 波別解析による波高と周期の結合頻度表(上 図の波形の結果より)

WA (a)	01.	4.18.	5.11.	78.	911	11+-12+	11. 11.	18	Tutal
0.010.5	1	11	1	17	1	0		6	14
0.5+1.0	0.1	18	14	1	1	- 2	1	0	42
1.0-1.5	0	1	41	14	1			0	12
1.5-2.0	0	1	28	18	14	11	1.1	0	11
1,0-1,1	0	1	1	12	18	3.8	1	- 8	3.6
1.8-1.9	0.0	1	12	11.	14.	4	1	0	10
8.0-8.8	0.0	1	1	11	10	1	1	0	40
3.5-4.3		1	1	111	1	0		0	2.8
4.0-4.3		1	1	+	1	0.	1	0	1.0
4.5-3.0	0	1		1	1	.0	1	0	1
5.0-5.5	0.0	1		1		0		0	1
1.5-	9	1	9	1	1	9		0	1
Total	1	34	124	170	1112	18	1	0	47.9

(6) 環境要素と波浪条件の関連調査

海域環境を支配する要因の一つに波浪条件がある. しかし、多くの場合、波浪観測データが十分ではな く、波浪と種々の環境要素との因果関係は十分に検 討されているとは言い難い.例えば、クラゲの異常 発生と波浪条件との関係、アマモ場分布と波浪との 関係、あるいは干潟の安定と波浪条件、海底の底質 と波浪条件などである.とりわけ、アマモに関して は、島谷ら¹³⁾、金澤ら¹⁴は、適切な波浪条件に基づ く波浪統計量がアマモ場の適地選定において重要で あるとしている.また、島谷ら¹⁵⁾はコアマモの生育 に適した物理環境を検討した結果、コアマモは平常 時においても適度な擾乱(波高)がある領域に好ん で生息していることを示している.このように環境 要素と波浪条件に関する調査研究においても本解析 システムの利用が可能である.

以上(1)~(6)は、本解析システムの活用の一例で ある.この他にも、例えば、造船関係では、船舶設 計の基礎資料として外洋波浪のスペクトル的性質を 知らなければならないが観測値は殆ど存在しない. そのため、これに替わるものとして、本解析システ ムによる波浪推算結果を利用することも可能である. また、日本周辺海域の波浪特性は外洋を航行する船 舶にとっては有益な情報である.さらに、近年、港 内波浪変形計算や構造物の破壊シミュレーションな ど、高度な数値シミュレーションによって様々な現 象を再現することが試みられているが、これらを実 施する際の初期条件や境界条件としての活用も期待 できる.

多くの数値シミュレーションシステムは,所与の 条件下で対象とする現象を再現するものであり,本 解析システム(波浪推算)も所与の条件として気象 情報に基づいて波浪現象を再現するという意味では 同様である.しかしながら,本解析システムで推算 される結果は,仮想的な条件下の結果ではなく,実 際の波浪現象を再現するものであり,この意味では 波浪観測に替わる波浪情報を提供する点に特徴があ

る. すなわち, 種々の実務において, 波浪観測情報 を必要とするあらゆる場面での利用が可能なはずで ある.これまで、このようなシステムや波浪情報が 無かったために, 現時点では本解析システムの利用 も限られた範囲に留まっているが、今後は多くの場 面で,本解析システムの利用が図られると期待しつ つ,その普及に努める予定である.なお,気象庁に おいても波浪予報を行っているが、気象庁の波浪予 報は、1週間先程度の短期的な予報が中心である. 我々のような港湾技術者が対象としている港湾・海 岸構造物の設計や静穏度計算あるいは汀線変化など の検討では、そのような短期的な予報ではなく、数 年~数十年先までの予測が必要である.しかし、こ のような超長期の予測は現時点では不可能であるこ とから、過去数十年間に起こった現象を調べ、今後 数十年間に起こる可能性がある現象の予測を行う. 本解析システムは、こうした既往の波浪データを利 用して種々の調査に利用できるものと期待される.

4.4 波浪推算の精度向上に対する最近の試み

最後に波浪推算の精度向上に関する最近の試みを 紹介したい. 波浪の推算精度は波浪推算モデル自体 の精度に加え、波浪推算で用いる気象場(海上風) の推算精度に大きく依存するため、海上風の精度向 上も引き続き取り組むべき課題である. とりわけ, 我が国において高波をもたらす気象擾乱は台風であ り、台風時の海上風の推算精度を向上させることが 重要である.これまで実務における風場は2次元台 風モデルによって地形の影響を受けない上空(自由 大気)での風場を推算して補正をかけ、必要に応じ てマスコンモデルによって地形の影響を考慮した風 場の推算を行ってきた.しかし,近年,気象の客観 解析値(気象GPVと記す)を与条件とし、気象学的 視点から3次元的な気象場そのものを数値的に解く 気象モデル(図-10)が工学分野にも応用されるよ うになってきた.しかし、気象GPVで表現されてい る台風は、気象GPV自体の時間・空間解像度が十分 でないため、その強度や位置が必ずしも精度良く再 現されているとは限らない. そのため気象モデルに よって台風時の気象場を精度良く計算するには、気 象GPVにおける台風を少しでも確からしく表現する ことが重要である.

その1つの答えとして台風ボーガスがある.台風 ボーガスは人工的に台風の3次元構造を気象GPVに 埋め込む手法であり,台風域を明確に表現すること ができる,いわば3次元台風モデルである.図-11 は,気象庁から提供されている気象庁GPV(領域客観 解析値;RANAL)に対し,台風ボーガス投入前後の台 風の気圧および風速分布を示したものである.気象 GPVでは台風のような局所的に強い風場が平滑化さ れ過小評価してしまう特性があるが,台風ボーガス を投入することで,台風域内で風速が大きく,台風 の気圧深度も深い,シャープな台風構造を表現でき ることがわかる. 図-12は、台風9918号を対象に、気象庁GPVに対し て台風ボーガスを投入したものを入力気象場とし、 気象モデルで計算された苅田港で風の推算結果であ る.図中の黒丸(OBS)、赤線(MM5)、黒線(PRM)およ び青線(MAS)は、それぞれ観測値、気象モデル、2 次元台風モデルおよびマスコンモデルによる推算結 果である。図から気象モデルの結果が最も観測値に 近いことがわかる.さらに台風通過前に風速のピー クが観測されているが、そのような結果を示したの は気象モデルの結果のみである。このように、気象 モデルによる風場の推算精度が高いことがわかる.



図-10 気象モデルによる気象場の計算例(T0416)



(左:投入前,右:投入後)



図-12 観測値と推算手法毎の風向・風速の時系列図 (OBS:観測値, MM5:気象モデル, PRM:2次元 台風モデル, MAS:マスコンモデル)

4.5 おわりに

波浪推算(結果)の活用(可能性)に関して紹介 したが、本稿で紹介した日本沿岸波浪推算処理解析 システムは、既に信頼性の高い実用的システムの域 に達している.今後は、本解析システムが防災・環 境などの種々の分野で有効に活用されることを期待 しつつ、引き続き波浪推算の精度向上および関連技 術の普及に努めたいと考えている.

参考文献

- 1) Bretschneider, C. L.: The generation and decay of wind waves in deep water, Trans. A. G. U., 33(3), pp.381-389, 1952.
- Bretschneider, C. L.: Revision in wave forecasting; deep and shallow water, Proc. 6th Conf. Coastal Eng., pp. 30-67, 1958.
- The WAMDI Group: The WAM model-A third generation ocean wave prediction model, J.Phys. Oceanogr., 18, pp.1378-1391, 1988.
- 4) Komen, G. J. and 5 authors: Dynamics and Modelling of Ocean, Cambridge University Press, 532p, 1994.
- 5) 橋本典明,川口浩二,真期俊行,永井紀彦:第三世代 波浪推算法(WAM)の推算精度に関する検討,港湾技術研 究所報告,第38巻,第4号,47p,1999.
- 6)橋本典明,杉本 彰,川口浩二,宇都宮好博:局地気象 モデルと第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への 適用,海岸工学論文集,第49巻, pp.201-205, 2002.
- 7) 間瀬 肇, 平尾博樹, 国富将嗣, 高山知司: SWANを用い た日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検討, 海

岸工学論文集, 第49巻, pp.236-240, 2000.

- 8) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会: 新しい波浪推算法とこれからの海域施設の設計法,土 木学会,256p,2001.
- 9) 内閣府沖縄総合事務局開発建設部:平成13年度 台風及 び冬季風浪時における船舶の避泊を中心とした航行の 安全に関する調査 報告書, 206p, 2003.
- 10)黒岩正光,口石孝幸,加藤憲一,松原雄平,野田英明:他方向不規則波浪場における準3次元海浜流場と 海浜変形予測に関する研究,海岸工学論文集,第49巻, pp. 491-495, 2002.
- 11)宇多高明,西隆一郎,山口慶一郎,古池鋼,堀口敬 洋:等深線変化モデルによる波の遮蔽域周辺における 3次元海浜変形予測,海岸工学論文集,第51巻, pp.431-435,2004.
- 12)加藤 茂,山下隆男:広域海浜流・漂砂モデルによる 冬季日本海沿岸での海浜変形シミュレーション,海岸 工学論文集,第51巻, pp. 511-515, 2004.
- 13)島谷 学,河本 武,中瀬浩太,月舘真理雄:アマモの 実生株の生存条件に関する研究,海岸工学論文集,第 50巻,pp.1096-1100,2003.
- 14)金澤剛,森鐘一:現地アマモ場造成試験と適地評価 に関する研究,海岸工学論文集,第50巻,pp.1266-1270,2000.
- 15) 島谷 学, 佐藤喜一郎, 中瀬浩太, 桑江朝比呂, 中村 由行: コアマモの生育に適した物理環境について, 海 岸工学論文集, 第51巻, pp. 1031-1035, 2004.

GPS波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性

5.1 はじめに

波浪観測機器は、ブイ式と海底設置式に大別され る。前者は、設置やメンテナンスにあたって海底で の作業が必要ないため、設置水深に制約がなく大水 深海域における沖波の観測が可能である長所を有し ているものの、これまでは加速度計測によって得ら れた観測情報をもとに海面変動を推定する方式で あったため、周期20秒以上の長周期成分の観測がで きず、津波や長周期波およびきわめて周期の長いう ねりなどを十分な信頼性をもって観測することがで きなかった(合田,2001)。

このため、全国港湾海洋波浪情報網(ナウファ ス)では、もっぱら、後者の海底設置式の波浪計が 採用されてきた。1950年代に開発された運研式波高 計などの水圧式波高計(PW)、1960年代に開発さ れた超音波式波高計(USW)、1970年代に開発さ れた超音波式流速計型波向計(CWD)、1990年代 に開発された海象計(DWDM)(高山ら,1992:橋 本ら,1995)などは、ナウファスによる波浪観測機 器開発の成果であり、これらの海底設置式波浪観測 機器が国土交通省港湾局の指導の下、全国沿岸に展 開され、我が国沿岸における波浪観測が実施されて いる(清水ら,2007a)。

海象計を主体としたナウファス波浪観測網は、我 が国沿岸の波浪観測統計の確立に大きな役割を果た すとともに、台風等による高波や津波などの異常海 象の観測もリアルタイムで行われ、その観測情報は 気象庁や一般に広く活用されている。しかし、これ らの海底設置式波浪計は、設置やメンテナンスにあ たって海底作業が不可欠となるため、実用的な作業 限界とみなされている水深50m以下の、比較的浅い 海域に設置しなければならなかった。

波浪工学では、通常、沖波とは水深波長比が1/2 以上の波として定義され、それより浅い海域の波浪 は、局所的な海底地形による浅水変形や屈折の影響 を受けている浅海波として位置づけられる。言うま でもなく、港湾設計においては、海域を代表する沖 波の設定が不可欠であり、沖波を直接観測する必要 は、以前から指摘されていた。

他方、近年、台風によって非常に大きな発達を遂 げた、周期の長い波(15s以上)が、我が国沿岸で 多く観測されるようになっている。こうした事象が、 地球温暖化による台風の強大化と直接つながるかど うかは、まだ十分に解明されていないが、今後の波 浪モニタリングの重要性が強く認識されている(清 水ら,2006a:清水ら,2007b)。しかし、海底設置式 波浪計では、海底のセンサーを定期的に清掃するな どのメンテナンスが必要となるため、水深50mより 大水深の波浪観測は困難であった。水深50mでは、 周期8s以下の比較的波長の短い波でなければ沖波と は言えない。周期が2倍になると波長は4倍となるた め、沖波の観測には4倍の水深が必要になる。この ため、水深100m以上、可能であれば200m程度の、 沖合波浪観測網の構築が、長年望まれていた。

大水深海域における沖波観測としては、水深 154mのいわき沖天然ガス採掘用プラットフォーム を活用したステップ式波高計アレーによる観測事例 (1986-1995)があるものの、当時は、データ伝 送・処理システムの制約から、切れ目のない連続観 測は行われていなかった(永井ら,1993:清水 ら,1996)。また、こうしたプラットフォームのあ る場所にしか設置できないため、こうした方式で大 水深全国沿岸波浪観測網を構築することは、プラッ トフォームの構築経費まで考慮すると、莫大な経費 がかかるので、現実的なものではなかった。

21世紀になり開発・改良されたGPS技術を応用す れば、ブイによる海面変動の直接計測が可能になる。 こうした背景で生まれたのが、RTK-GPS技術を応 用したGPS波浪計である(永井ら,2003)。

国土交通省港湾局では、平成16-17年度に、基本 的な検討を実施し、平成18年度からGPS波浪計の全 国配置に着手した(永井ら,2004:永井ら,2005:永 井,2006)。本稿では、東北沿岸に新たに設置され た2基のGPS波浪計によって観測された大水深沖合 における海象特性を、浅海域に設置されている既設 のナウファス海底設置式波浪計(釜石・石巻)との 比較の上で検討する。検討対象期間としては、0709 号に伴う高波が観測された9月7日を含む2007年4月 から9月までの半年間とした。

5.2 GPS波浪計の設置と観測データの概要

図-1は、GPS波浪計の原理を示したものである. 洋上ブイの鉛直および水平2成分の毎秒ごとの瞬時 の位置をcmオーダの精度で正確に把握するため、 近傍の陸上固定点で同時並行観測を行っている。観 測データは陸上基地局を経て、港湾空港技術研究所 にリアルタイムで伝送され、処理解析が行われてい る。



図-1 GPS波浪計の原理

国土交通省港湾局によるGPS波浪計の全国配置は、 東北地方整備局管内の太平洋沿岸から始められた。 設置水深144mの宮城県中部沖観測点には2007年3 月22日に、設置水深204mの岩手県南部沖には2007 年4月6日に、それぞれブイが設置され、現在に至る まで大水深波浪観測が継続されており、観測データ の蓄積が進められている。

図・2および図・3に、2基のGPS波浪計の設置位置 を示す。本稿では、近傍のナウファス海底設置式波 浪計(石巻港沖海象計および釜石港沖超音波式波高 計)、および検潮所(石巻港内および釜石港内)の 観測記録とともに、2007年4月から9月までの半年 間のデータ解析を通じて、大水深海域の海象出現特 性を考察した。



図-2 2基のGPS波浪計と海底設置式波浪計の設置位置



図-3 GPS波浪計の設置位置 (1)宮城県中部沖, (2)岩手県南部沖

図-4は、宮城県中部沖GPS波浪計(水深144m)、 石巻港沖海象計(水深20m)、岩手県南部沖GPS波 浪計(水深204m)および釜石港沖超音波式波高計 (水深50m)の各観測点で得られた半年間の有義波 高(H1/3)と有義波周期(T1/3)の経時変化を示 したものである。GPS波浪計では1.0s間隔で、海底 設置式波浪計では0.5s間隔で、それぞれ観測された 海面上下変動記録を20分間毎に区切って、ゼロアッ プクロス解析(合田,2001)を行い、20分毎の有義 波の算定を行った。

図からわかるように、各観測点では欠測がほとん ど見られず、台風0704号や0709号通過に伴う高波 浪時を含めてデータの測得状況は良好であった。

半 年間(183日間)の観測数は欠測がなければ13176 観測であるが、測得された有義波観測数は、宮城県 中部沖GPS波浪計で12874観測(測得率97.7%) 石巻港沖海象計で12964観測(測得率98.4%)、岩 手県南部沖GPS 波浪計で12513 観測(測得率 95.0%)および釜石港沖超音波式波高計で13174観 測(測得率100.0%)であった。ただし、また、岩 手県南部沖GPS波浪計の観測開始は4月6日14:00の 観測からであるため、観測開始前の期間を除外した 実質的な測得率は97.9%である。ここで、測得率は 小数点以下1位までの四捨五入としている。わずか に見られた欠測の原因は、海底設置式波浪計では海 面付近気泡の混入や電気的ノイズの混入によるもの であり、GPS波浪計では電波状況の悪化によって FIX解が得られなかったケースであった。

5.3 波候統計の比較

図-5は、4観測点の月平均有義波高と有義波周期 を示したものである。2観測点の大水深GPS波浪計 の月平均有義波はきわめてよく一致している。有義 波高についてみると、大水深GPS波浪計は、もっと





図-4 各波浪観測点で観測された有義波の経時変化図(2007.4.-9.)



も平均有義波が小さい8月においても1.0m程度であ り他の月は1.5-2.0m程度の値を示している。この値 は、浅海の2観測点の1.5-2.0倍であり、大水深海域 の波高は、統計的に見て、浅海域よりもはるかに高 いことがわかる。これに対して、有義波周期は、各 観測点で波高ほど顕著な相違は見られず、いずれの 月でもいずれの観測点でも6.0-8.0sの範囲に収まっ ている。すなわち、大水深域の波浪は、統計的に浅 海域の波浪と比較して、波高は高いものの周期は比 較的近い値となっていることが示された。

表-1は、有義波高と周期の結合出現頻度表を示したものであるが、図-5で示された大水深域と浅海域との統計的な波浪の相違が、より顕著に示されている。すなわち、有義波周期の出現分布は4観測点でそれほど顕著な相違は見られないのに対して、有義波高の出現状況は、大水深域と浅海域とできわめて異なった分布となっている。すなわち、有義波高

1.0m以下となる低波浪状態の出現率は、宮城県中 部沖および岩手県南部沖のGPS波浪計でそれぞれ 24.1%と21.7%であるのに対して、石巻港沖および 釜石港沖の海底設置式波浪計ではそれぞれ82.5%と 69.7%となっており、有義波高が3.0m以上となる高 波浪状態について見ても、宮城県中部沖および岩手 県南部沖のGPS波浪計でそれぞれ5.6%と6.0%であ るのに対して、石巻港沖および釜石港沖の海底設置 式波浪計ではそれぞれ0.2%と0.4%となっている。 このように、大水深域と浅海域との間には、きわめ て顕著な波高の出現状況の相違が確認された。

図-6は、4 観測点のスペクトル解析に基づく周期 帯別の月平均有義波高と有義波周期を示したもので ある。ここに、周期帯の区分は、ナウファスによる データ処理に倣って、①15s以上(ナウファスのf1 およびf2の合成値),②10-15s(ナウファスのf3), ③8-10s(ナウファスのf4),④8s以下(ナウファ スのf5およびf6の合成値)とした(清水ら,2006b)。

各周期帯に共通して、2観測点の大水深GPS波浪 計の月平均周期帯波高はきわめてよく一致している。 浅海域観測点と比較すると、すべての周期帯で大水 深域の方が浅海域より換算波高が大きいものの、こ の相違は短周期の周期帯で顕著であるが、周期の長 い周期帯ほど相違は小さく、特に周期15s以上の長 周期領域では、大水深域と浅海域とは同程度の換算 波高となっている。すなわち、大水深域の方が波高 が高いのは、周期10sあるいは15s以下の成分の相違 であり、周期15s以上の周期が長い成分波について は、大水深域の波浪エネルギーが、そのまま、ある いは増幅して浅海域に伝わっていることを示唆して いる。

図・7は、波向観測が行われていない釜石港沖超音 波式波港高計を除く3観測点の周期帯別の波向出現 分布を示したものであり、各観測点について、10-15s(ナウファスのf3)および8-10s(ナウファスの f4)の2周期帯について表示を行ったものである。 ここで、GPS波浪計では波向の範囲を片側±90度か

表-1 有義波高と周期の結合出現頻度表

地点: 宮城	也点:宮城県中部沖 単位:							1	旨手 勇	*南部泙					1位:%
周期	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	158~	合計	未超過	波高	周	期 /	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	15s~	合計	未超過
5m ~		0.0	0.3		0.3	100.0	5m	~		- ANNE AND	0.0	0.3	-	0.3	100.0
4m ~ 5m	0.0	0.6	0.2		0.9	99.7	4m	~	5m	0.1	0.3	0.3		0.6	99.7
3m ~ 4m	1.1	2.2	1.2		4.4	98.8	3m	~	4m	0.4	2.6	2.1		5.0	99.1
2m ~ 3m	7.5	8.5	2.1		18.0	94.4	2m	~	3m	6.4	9.5	1.8		17.7	94.0
1m ~ 2m	39.0	12.5	0.7		52.2	76.4	1m	~	2m	38.8	15.3	0.5		54.6	76.3
~ 1m	18.3	5.7	0, 1		24.1	24.1		~	1m	17.8	3.9	0.0		21.7	21.7
合 計	65.9	29.5	4.6		100.0		1		H I	63.4	31.6	5.0		100.0	
未超過	65.9	95.4	100.0	100.0			7	、超	8	63.4	95.0	100.0	100.0	3	1

地点	: 1	石巻					ti di	单位:%	地点:	釜石					1	单位:%
波高	周	期	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	158~	合計	未超過	波高	周期	~ 8s	8s~ 10s	10s~ 15s	15s~	合計	未超過
5m	~			0,0	0.0		0,0	100.0	5m ~	-	()		1			100.0
4m	~	5m		0.1	0.0		0.1	100.0	4m ~	- 5m						100.0
3m	~	4m		0.1			0.1	99.9	3m ~	~ 4m		0.3	0.1		0.4	100.0
2m	~	3m	0.2	0.9	0.9		2.1	99.8	2m ~	~ 3m	0.5	2.5	1.9		4.9	99.6
1m	~	2m	7.1	6.3	1.8		15.2	97.7	1m ~	~ 2m	10.0	13.6	1.3		24.9	94.7
1	~	1m	68.9	12.3	1.4	1	82.5	82.5	-	- 1m	59.9	9.8	0.1		69.7	69.7
4		計	76.2	19.7	4.1		100.0		合	計	70.3	26.2	3.5		100.0	
未	(超)	過	76.2	95.9	100.0	100.0			未起	日過	70.3	96.5	100.0	100.0		1

らの来襲を仮定したデータ処理システムが構築され ているため、反対方向からの波の来襲の可能性があ る方向からの波浪成分は図から除外することとし、 来襲波向きが、NEからSEにかけての波浪について だけ、図示している(清水ら,2006b)。全方位から の波浪の来襲に対応する周期帯波向解析方式への改 良(清水ら,2007c)が、今後のGPS波浪計データ処 理解析システムの課題となっている。これに対して、 石巻港沖海象計に来襲する波浪は、地形による遮蔽 条件によって、SEからSの範囲に限定されている。

両周期帯に共通して、2観測点の大水深GPS波浪 計の波向出現特性はきわめてよく一致しており、と もに、NEからSEにかけて、まんべんなく波浪のエ ネルギーが来襲していることがわかる。これに対し て、浅海域観測点である石巻港沖では、地形による 遮蔽条件によって、SEからSの範囲に限定されるば かりでなく、両周期帯で、SSEとSEの波向出現割 合が異なっており、周期10s以上ではSEとSSEが同 程度であるのに対して、周期10s以下ではSEより SSEの方が出現頻度が大きくなっている。これは、 周期の長い周期帯ほど屈折の影響を強く受けるため、 石巻港沖付近の等深線直角方向であるSE波向の出 現が多くなるものと考えられる。浅海域波浪観測点 では、地形による遮蔽や波浪の屈折の影響を強く受 けた局所的な波浪の波向が観測されていることが、 大水深波浪観測との比較から、改めて確認されたこ とになる。

表-2は、周期帯波浪解析に基づく周期30s以上の 長周期成分波高の出現状況を、ナウファス波浪観測 年報(清水ら,2007a)と同様の様式で4観測点につ いてとりまとめたものである.2時間単位でスペク トル計算を行っているため、2時間中に16データ (16sに相当)以上の海面変位データの欠測がある 場合は欠測扱いとしたため、1/3程度までのデータ 欠落は許容しゼロアップクロス解析が可能であると 判断された観測についてすべて集計した表-1に比べ



%

図-6 周期帯別の月平均有義波高の比較

表-2 長周期波の出現統計

四视生	100 FP		0.01/	4~ 07.	.9		
波雨	5階級	4√ m 0	30-60	4√ m01	,60-300	4√ m0]	.30-
(2m)	觀測数	出現率	観測数	出現率	觀測数	出現率
	- 1	0	0.0	0	0.0	0	0.0
1	- 5	1796	81.8	1684	76.7	394	17.9
5	-10	83	3.8	181	8.2	1357	61.8
10	-20	0	0.0	14	0.6	124	5.6
20	-50	0	0.0	0	0.0	3	0.1
50	-	0	0.0	.0	0.0	1	0,0
欠	润明					317	14.4
全律	観測					2196	
372.1	均值		2.5		3.2		6.7

A SHOW NO W

石巻		期目	8:'07/	4~'07/9							
波高陸	并承陵	4√ m 0]	30-60	4√ m01	,60-300	4√ m0	4√ m01.30-				
(cm))	觀測数	出现率	觀測数	出現率	觀測数	出現率				
	1	0	0.0	0	0.0	0	0.0				
1 -	5	1924	87.6	1592	72.5	430	19.6				
5 -	10	174	7, 9	395	18.0	1459	66.4				
10 -:	20	- 4	0.2	113	5.1	203	9.2				
20 -1	50	0	0,0	2	0.1	10	0.5				
50 -		0	0.0	.0	0.0	0	0.0				
欠 ;	測					94	4.3				
全観	润川					2196					
平均	値		3.3		4.6	100000	6.9				



宫城県中部沖(8~10秒) 宮城県中部沖(10~15秒)





ると、長周期成分波の測得率は、若干、低くなっている。

表-2では、大水深GPS波浪計2基の長周期成分波の出現特性は、浅海域の2観測点に比べ大きく異な

岩手南部沖	與律	8:'07/	4~'07.	/ 9		
波高階級	4√ m 0]	30-60	4√ m0	,60-300	4√ m0]	.30-
(cm)	觀測数	出現率	観測数	出現率	觀測数	出現率
- 1	1	0.0	0	0.0	0	0.0
1 - 5	1795	81.7	1686	76.8	294	13.4
5 -10	69	3.1	175	8.0	1416	64.5
10 - 20	0	0.0	4	0.2	154	7.0
20 - 50	0	0,0	0	0.0	1	0.0
50 -	0	0.0	0	0.0	0	0,0
欠 測					331	15.1
全観測					2196	
平均值		2.5		3.3	10000	6.9

釜石		期間	8:'07/	4~'07/ 9							
波雨	6 時 級	4√ m 0	,30-60	4√ m0	60-300	4√ m0	,30-				
(-m)	載測数	出現率	観測数	出現率	觀測数	出現率				
	- 1	0	0.0	0	0.0	0	0.0				
1	- 5	1967	89.6	283	12.9	0	0.0				
5	-10	225	10.2	1907	86.8	2014	91.7				
10	-20	0	0.0	2	0.1	178	8.1				
20	-50	0	0.0	0	0,0	0	0.0				
50	-	.0	0,0	.0	0.0	0	0,0				
欠	測					4	0.2				
全行	観測					2196					
372.3	均值		4.1		5.7		8.1				



ることが示されている。すなわち、GPS波浪計は、 浅海域に比べて、換算波高10cm以上の階級の出現 頻度がともに小さい。これは、高波浪時おいて顕 著になると考えられる自由進行長周期波は、理論 的に浅海域ほど高さを増大させること(永井 ら,1999)によるものであると考えられる。

5.4 異常時波浪の比較

5.4.1 台風0709号

図-8は、2007年9月7日に東北太平洋沿岸を通過した台風0709号による高波期間中の、4観測点における有義波高と有義波周期の経時変化を示したもので



図-9 周波数スペクトルの比較



ある。極大有義波を見ると、宮城県中部沖GPS波浪 計では9月7日11:20の観測で有義波高9.15m、有義 波周期11.5s、石巻港沖海象計では9月7日12:00の観 測で有義波高5.77m、有義波周期8.9s、岩手県南部 沖GPS波浪計では9月7日14:20の観測で有義波高 8.11m有義波周期11.6s、釜石港沖超音波式波高計で は9月7日13:20の観測で有義波高2.11m、有義波周 期6.7sであった。このような高波浪条件において、 2基のGPS波浪計が、2基の海底設置式波浪計ととも に欠測なく高波の観測に成功したことは、観測シス テムの信頼性の高さを示した結果でもある。

釜石港沖超音波式波高計の観測波が他の観測点に 比較して極端に低いのは、釜石港沖観測点は周辺地 形による遮蔽の影響が強く、E方向から来襲する波 浪エネルギーだけを捉えているためであると推定さ れる。これに対して、石巻港沖海象計の有義波の時 間変動傾向と極大時刻が、沖合の宮城県中部沖GPS 波浪計とほぼ一致したのは、台風が関東沿岸から NNE方向に進行したため、極大波に至るまでの波 向がSEあるいはSSE方向であったと推定され、石 巻港の外洋への開口方向と来襲波の波向が、ほぼ一 致していたためであると考えられる。

図-8から明らかであるように、異常波浪時におい ても、大水深GPS波浪計が観測する波浪は、浅海域 波浪計による観測結果よりも大きく、外洋における 波浪は、地形による遮蔽の影響を受ける浅海観測点 とは大きく異なっていることが、改めて示された。 こうした結果は、過去に実施された台風通過時にお けるいわき沖大水深観測結果(清水ら,1996)の解 析結果とも一致し、台風通過時における外洋波の方 向分散性は大きく、台風通過前後における風況変動 が大きい際には、外洋ではさまざまな方向から波浪 エネルギーの来襲があることを意味している。

前章で示した波候統計上は、直線距離で100km強 の間隔を持つ2基の大水深GPS波浪計の観測結果に は顕著な相違は見られなかったが、図-8で示される ように個別の気象擾乱中の観測波浪は、その時系列 変化においても最大波に関しても、2基のGPS波浪 計は、異なる観測結果を示していることには注意を 要する。こうした相違は台風経路や進行速度による

				振幅					遅 角		
地点	定数	GPS 波浪計 (cm)	検潮所 との比	超音波 波高計 (cm)	検潮所 との比	検潮所 (cm)	GPS 波浪計 ([°])	検潮所 との差 (分)	超音波 波高計 ([°])	検潮所 との差 (分)	検潮所 ([°])
	M2	30.8	0.93	33.2	1.00	33.1	101.2	-3.0	102.6	-0.1	102.6
宮城県中部沖	S2	14.1	0.91	15.6	1.01	15.5	137.7	-0.9	137.9	-0.6	138.2
	K1	23.3	0.96	24.3	1.00	24.3	163.4	-2.7	163.4	-2.4	164.0
および 石巻	01	18.6	0.95	19.6	1.00	19.6	146.6	-1.4	147.2	1.2	146.9
	Z0	86.8	0.94	92.6	1.00	92.5		(-2.2)		(-0.5)	
	M2	29.8	0.98	30.1	0.99	30.3	96.0	-2.8	95.6	-3.5	97.3
岩手県南部沖	S2	14.0	1.00	13.7	0.98	13.9	134.5	0.5	134.3	0.0	134.3
	K1	23.2	1.01	23.1	1.01	23.0	160.0	-5.3	162.9	6.3	161.3
および 釜石	01	18.5	0.98	18.7	1.00	18.8	144.0	-5.8	144.0	-5.7	145.3
	Z0	85.4	0.99	85.6	1.00	86.0		(-3.6)		(-0.8)	

表-3 主要4分潮の振幅と位相

ものであるが、図-8は、今後の大水深波浪観測網の 構築にあたって、観測点の合理的配置を検討するた めの一つのめやすになるものである。

なお、ここで宮城県中部沖GPS波浪が観測した有 義波高9.15mは、東北地方太平洋沿岸で観測された ナウファス既往最大波高である9.56m(水深44mの むつ小川原港沖超音波式波高計が1991年2月17日 0:00の観測で記録)に次ぐものである。また石巻港 沖波浪観測点における有義波高5.77mは、1995年以 降の観測記録の中で2002年10月2日2:00の5.66m (台風0221号)を凌ぐ既往最大観測波であった。

図-9は、高波浪時である9月7日8:00, 12:00およ び16:00における4観測点の波浪の周波数スペクトル を示したものである。波高の相違に伴って、大水深 GPS波浪計と浅海の海底設置式波浪計では、波浪エ ネルギーの絶対値が異なる。宮城県中部沖GPS波浪 計と石巻港沖海象計の周波数スペクトルを比較する と、GPS波浪計では各時刻に共通して0.08Hz(周 期12.5s)付近にピークが見られるのに対して、海 象計では8:00および12:00のピークは0.1Hz(周期 10s)付近にピークが見られ、若干、ピーク周期が 短くなっている。しかし、有義波高のピークを終え た16:00では、石巻港沖海象計の周波数スペクトル ピークも0.9Hz(周期11s)と若干低周波側に変化 している。これに対し、岩手県南部沖GPS波浪計と 釜石港沖超音波式波高計の周波数スペクトルを比較 すると、より顕著な波浪エネルギーの絶対値の相違 が見られるとともに、超音波式波高計の周波数スペ クトルピークは、より高周波側の1.4Hz(周期7s) 付近に見られる。ただし、有義波高が極大値を過ぎ た16:00以降は、0.8Hz(周期12.5s)付近にももう 一つのピークが見られ、ようやくうねりの来襲が確 認されている。浅海域の観測点では、地形条件によ り来襲波の方向が限られ、遮蔽される方向からの波 浪エネルギーが届きにくいため、こうしたスペクト ル形状の違いが現れているのであろう。

5.4.2 ペルー沖地震津波の観測

図-10は、8月17日に我が国太平洋沿岸に来襲した、 前日のペルー沖地震津波来襲時における長周期水面 変動記録を、岩手県南部沖GPS波浪計、釜石高沖超 音波式波高計および海上保安庁の釜石港内検潮所に ついて、比較表示したものである。周期の短い波浪 による水面変動や周期のより長い天文潮汐による水 面変動は、清水ら(2006c)による数値フィルター によって取り除いた。

気象庁によると、数値計算によって推定された津 波来襲時刻は日本時間8月17日午前4:00頃と発表さ れた。釜石港沖超音波式波高計と港内検潮所では、 遅くとも6:00以降の波形記録は4:00以前の波形記録 とは大きく異なっており、最大両振幅が、それぞれ 15cmおよび20cm程度の弱い津波を明確に観測して いる。

しかし、岩手県南部沖GPS波浪計の長周期海面変 動は、4:00以前と以後とで明確な波形の相違は確認 できず、津波を識別することが困難であった。これ は、GPS波浪計の測位誤差は、電離層の変化等の気 象変動による電波環境のゆらぎによって生ずるもの と考えられているため、数分から数十分程度の時間 スケールでゆっくりと現れるためである。このこと は、前述した表・2にも現れているように、数cm程度 の見かけ上の長周期波が、GPS測位誤差の影響で GPS波浪計観測記録中に常に混入していると考えら れ、このような、大水深海域では両振幅10cm以下 と想定される小さな津波波形を捉えることが困難で あったものと考えられる。

なお、こうした傾向は、宮城県中部海域でも同様 であったが、たまたまこの時は、石巻検潮所の観測 記録が欠測であったため、本稿では岩手県南部沖で 観測された津波波形記録だけを紹介した。

5.5 潮位観測

表・3は、永井ら(2003)の手法に従って、半年間の水面変動記録の長周期成分を28分潮で調和解析し、 主要4分潮の振幅と位相を比較したものである。検 討対象観測点としては、宮城県中部海域ではGPS波 浪計・石巻港沖海象計および東北地方整備局石巻港 検潮所の3観測点であり、岩手県南部海域ではGPS 波浪計・釜石港沖超音波式波高計および海上保安庁 釜石港検潮所の3観測点である。

いずれの観測点においても主要4分潮の振幅の和 として示されるZOの値は85cm程度の一定値となっ ており、天文潮汐の変動の大きさは、ほぼ一定であ ることがわかる。細かく見れば、表の右側に示す港 内検潮所のZOを基準とした比に示されるように、水 深の深い沖合観測点ほどわずかに天文潮汐の振幅が 小さくなっているようであるが、その相違はきわめ て小さい。空間的なスケールがきわめて大きい天文 潮汐であるため、各海域内ではその変動の大きさは、 ほぼ一定値とみなすことができることが、改めて確 認された。

同様に、港内検潮所を基準とした位相角度につい ての両海域の比較を、表の右側で比較を試みた。こ こで、時間差とは、位相角度の差を分潮ごとの周期 を考慮して時間差に変換した分単位の値である。時 間差は、分潮毎に異なった値であるが、総じた観測 点ごとの比較を行うため、各分潮の振幅で重みつき 平均を行った時間差を表の下段に表示した。両海域 に共通して、大水深GPS波浪計・浅海域波浪計・港 内検潮所の順に時間差が現れており、各海域内の潮 汐変動は沖側ほど位相が進んでいる(満潮や干潮の 時刻がわずかに早い)ようであり、天文潮汐が地球 全体の海水の流動であることを考えると、妥当な観 測結果であるものと考えられる。

すなわち、GPS波浪計や海底設置式波浪計は、適切なデータ処理を行うことによって、津波よりもさらに周期の長い沖における天文潮汐も妥当に検出できることが、示されたものと考えられる。

5.6 まとめ

本稿では、東北沿岸に新たに設置された2基の GPS波浪計による海象観結果を、浅海域に設置され ている既設のナウファス海底設置式波浪計(釜石・ 石巻)等との比較検討し、大水深海域における海象 特性を考察したものである。以下に、本稿の主要な 結論を示す。

- ・半年間の検討対象期間を通じて、各観測点では欠 測がほとんど見られず、台風0709号通過に伴う高 波浪時を含めてデータの測得状況は良好であった。
- ・2観測点の大水深GPS波浪計の月平均有義波はき わめてよく一致した。2観測点のGPS波浪計の月 平均有義波高は浅海2観測点の1.5-2.0倍であった が、有義波周期の相違は顕著ではなかった。
- ・有義波高と周期の結合出現頻度表から、有義波高の出現状況は大水深域と浅海域とできわめて異なった分布となり、有義波高1.0m以下となる低波浪状態の出現率は、宮城県中部沖および岩手県南部沖のGPS波浪計でそれぞれ24.1%と21.7%であるのに対して、石巻港沖および釜石港沖の海底設置式波浪計ではそれぞれ82.5%と69.7%であった。
- スペクトル解析に基づく周期帯別の月平均有義波 高と有義波周期を求めた結果、各周期帯に共通し て2観測点の大水深GPS波浪計の月平均周期帯波 高はきわめてよく一致した。また、すべての周期 帯で大水深域の方が浅海域より換算波高が大きい

ものの、この相違は短周期の周期帯で顕著であり、 周期の長い周期帯ほど相違は小さかった。特に周 期15s以上の長周期成分については大水深域の波 浪エネルギーが減衰せず浅海域に伝わっているこ とが示唆された。

- ・周期帯別の波向出現分布を検討した結果、2観測 点の大水深GPS波浪計の波向出現特性は各周期帯 できわめてよく一致し、NEからSEにかけて、ま んべんなく波浪のエネルギーが来襲していること が示された。反面、浅海域波浪観測点では、地形 による遮蔽や波浪の屈折の影響を強く受けた局所 的な波浪の波向が観測されていることが、改めて 確認された。
- ・大水深GPS波浪計2基の長周期成分波の出現特性 は、浅海域に比べて、換算波高5cm以下の階級お よび換算波高20cm以上の階級の出現頻度がとも に小さく、5-20cmの範囲に長周期波高の出現が より顕著に集中する。これは、GPS波浪計による 鉛直測位誤差の出現は、周期数分程度のゆっくり した変動として現れやすいことと、高波浪時おい て顕著になると考えられる自由進行長周期波は浅 海域ほど高さを増大させること、によるものであ ると考えられる。
- ・台風0709号による高波期間中の、4観測点における有義波高と有義波周期の経時変化を比較した。
 異常波浪時においても、大水深GPS波浪計が観測する波浪は、浅海域波浪計による観測結果よりも大きく、外洋における波浪は、地形による遮蔽の影響を受ける浅海観測点とは大きく異なっていることが、改めて示された。2基のGPS波浪計は、
 台風の経路や進行速度の影響の結果、最大有義波高やその起時が異なる観測結果を示した。
- ・2007年8月17日に我が国太平洋沿岸に来襲した、 前日のペルー沖地震津波来襲時における長周期水 面変動記録から、釜石港沖超音波式波高計と港内 検潮所では、最大両振幅がそれぞれ15cmおよび 20cm程度の弱い津波を明確に観測した。しかし、 岩手県南部沖GPS波浪計の長周期海面変動は、常 時の測位誤差のため、両振幅数cm程度の微小な 津波を識別することは困難であった。
- GPS波浪計や海底設置式波浪計は、適切なデータ 処理を行うことによって、津波よりもさらに周期 の長い沖における天文潮汐も妥当に検出できることが、調和分解解析の結果として示された。

謝辞

ナウファス海底設置式波浪計や港内検潮所におけ る観測維持に日常から努力を払われるとともに、 GPS波浪計の全国沿岸へのネットワーク整備に最初 に着手され、本稿で紹介したような貴重な大水深波 浪観測データの取得に成功された、東北地方整備局 のご担当の数多くの方々に、改めて謝意を表する。 参考文献

合田良實監修・海象観測データの解析・活用に関する 研究会編集(2001):波を測る(沿岸波浪観測の手引 き), (財)沿岸技術研究センター, 212p.

社団法人日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説(上,下),1485p.

清水勝義・永井紀彦・橋本典明(1996):沖波の方向 スペクトルの出現特性(第2報)ーいわき沖における7か 年方向スペクトル統計,港研報告第35巻第1号, pp.65-89.

清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・冨田雄一郎 ・ 久高将信・額田恭史(2006a):長期波浪観測値と気象デ ータに基づく波候の変動解析,土木学会,海岸工学論文集 第53巻, pp.131-135, 2006.

清水勝義・永井紀彦・里見茂・李在炯・久高将信・藤 田孝(2006b):ブイ動揺特性を考慮した大水深波浪観測 データ処理システムの構築,土木学会,海岸工学論文集 第53巻, pp.1406-1410, 2006.

清水勝義・永井紀彦・李在炯・泉裕明・岩崎峯夫・藤 田孝(2006c):沖合水面変動記録を用いた津波成分即時 抽出法に関する研究,土木学会,海洋開発論文集 第22巻, pp.523-528.

清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2007a):全国港湾海 洋波浪観測年報(NOWPHAS 2005),港空研資料№1161, 92p.(波浪観測年報は,1970年版以降毎年刊行)

清水勝義・佐々木誠・永井紀彦(2007b):2006年の台 風等による高波の観測結果(NOWPHAS 2006特別号), 港湾空港技術研究所資料 No.1160,42p.

清水勝義・永井紀彦・橋本典明・岩崎峯夫・安立重昭 ・奥勇一郎(2007c):GPSブイ式波浪計を対象とした複 合的な波向計算手法の提案,土木学会,海洋開発論文集 第23巻, pp.231-236.

高山知司・橋本典明・永井紀彦・高橋智晴・佐々木弘 (1992):水中ドップラー式波向計(海底設置式波浪計)の 開発について,海岸工学論文集第39巻,土木学会, pp.176-180.

永井紀彦(2006):波浪観測網の強化による海の安全の確保-GPS波浪計2006年度より配備開始!-,土木学会,土木学会誌第91巻第9号(2006.9.号),pp.78-79.

永井紀彦・橋本典明・浅井正(1993):沖波の方向スペクトルの出現特性(第1報)ーいわき沖の観測結果 ー,港研報告第32巻第2号, pp.45-113.

永井紀彦・橋本典明・川口浩二・佐藤和敏・菅原一晃 (1999):ナウファスの連続観測化による我国沿岸の長 周期波の観測,港湾空港技術研究所報告 第38巻第1号, pp.29-69.

永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信
 (2003): GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観
 測、土木学会、海岸工学論文集 第50巻、pp.1411-1415.

永井紀彦・小川英明・額田恭史・久高将信(2004): 波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築 と運用,土木学会,海洋開発論文集第20巻, pp.173-178.

永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・ 三井正雄(2005):沖合・沿岸・オンサイト観測を組み 合わせた津波観測網に関する提言,土木学会,海洋開発論 文集 第21巻, pp.61-66.

橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄 ・磯部憲雄・鈴木敏夫(1995):水中超音波のドップラ ー効果を応用した海象計の開発,土木学会,海岸工学論文 集 第42巻, pp.1081-1085.

6. まとめ

NOWT-PARI Ver.4.6 β がリリースされてから 9 年が経過し,平成 18 年度には Ver.4.6c5a が新たに リリースされました.本バージョンでは,勉強会メンバーの皆様からの多くの指摘事項の精査や議論 を重ねた結果,演算の安定性や計算精度の向上に寄与するプログラムの修正がなされ,エネルギー平 衡方程式による波浪変形計算と共に色々な場面で活用されるようになってきました.

今後も、多くの場で NOWT-PARI を活用していただき、新たに得られた知見や活用法などを本勉強 会でご報告いただけると幸いです.

以下に,平成19年度ブシネスク勉強会においてご報告のあった主な結論を示し,まとめに代えさせていただきます.

- ブシネスク方程式を用いて、藻場を有する緩傾斜護岸の越波・飛沫特性に関する検討結果について報告された。
- ② 久慈港半崎地区護岸を対象として、砕波・遡上モデルを導入した最新の NOWT-PARI (Ver.5.2)の計算事例が紹介された.最新のブシネスクモデルでは、越波・越流の状況が再現でき、越波・ 越流対策への適用の可能性が示された.
- ③ NOWT-PARI を用いて,漁港の港内擾乱要因および漁船の船体動揺計算についての報告がなさ れた.それによると,適切な計算条件を設定することで,実測値に対しても良好な再現性が得 られることが示された.また,漁港に対する長周期対策の評価手法の提案がなされた.
- ④ JONSWAP 型および任意の周波数・方向スペクトルを用いた入力波形の作成方法および NOWT-PARI による検証結果について報告がなされた.検証の結果,プログラムの有効性が確 認された.今後は、ブレットシュナイダーの標準形にあてはまらないスペクトル形に対して波 浪変形計算が実施できるようになり、更に現地に近い波浪条件下での検討が実施可能になるこ とが示された.
- ⑤ うねり性高波浪の近年の傾向について報告された.報告によると、うねり性波浪の擾乱時は、 比較的高波浪の状態が 1~3 日程度の長い時間継続し、JONSWAP 型のようなエネルギーが狭 帯域に集中するようなスペクトル特性となることが示された.
- ⑥ 最新の話題として,新たな波浪推算手法および GPS を利用した大水深海域の波浪観測ブイについての紹介がなされた.

付 録:勉強会議事録

2. NOWT-PARIの適用事例

2.1 沖合人工島に設けた緩傾斜護岸前面の波浪変形と越波打ち上げの検討

- 平山:図5に示す越波回数の観測データは打ち上げ回数を示していると思うが、この図に示すデー タの観測期間はどの位か?
- 小野: プロットー個のデータは、10分間の観測データとなっている. 観測期間は、12月17日に行い、観測時間は全体で約5~6時間である.
- 平山:そうすると観測している間に波向が変わっていることもあるのか?また,護岸の場所に関係 なくデータをプロットしているのか?
- 小野:区間に関係なくA~E護岸全体の越波観測結果をプロットしている.
- 平山:その場合には、時間帯や護岸工区の違いによって打ち上げ回数が変わるため、データにバラ ツキが生じているものと考えられる.
- 石井: 今回の対象地区では,冬季風浪が発達し波向は N~NW となる,特に強く吹くと W 方向の波 向が主となる.また,対象地区では,屈折の影響により護岸に対して直角の波向となる.そ のため,時間帯が変化しても波向は殆ど変わらない.また,波の打ち上げに関しては,ビデ オ撮影から解析を行っているため,打ち上げと越波・越流関係なく解析を行っている.今回 の検討は,ブシネスクにより護岸前面の波高と越波・越流の関係を確認した結果となってい る.

2.2 久慈港半崎地区護岸被災波の検討

- 松島:結果を見ると,護岸前面の波高が 5.0m となっているが,反射波の影響は入っているのか? 防波堤の設計では,反射波を含んだ波でなく進行波で計算を行うのではないか?
- 平石:設計では,進行波を設計波として用いる.計算は反射波を含んでいるので,計算結果よりは 設計波は小さくなる.
- 近藤:図5に示す越波・越流の範囲・量は、現地の状況と比較してどの程度信頼できるものなのか?
- 春尾:今回の計算は,護岸が被災していない状況での計算結果となっている.今回は,高波浪時に 岸が被災したため,実際は計算結果に比べて越波・越流が広範囲かつ大量に生じていた.計 算は護岸なしでも可能であるが,今回の検討ではそこまで行っていない.
- 平山: NOWT-PARI, Ver.5.2 で得られた越波・越流量は、ある程度の目安でしかない. 越波・越 流量を計算する際、越流公式から越流量を求めているが、Ver.5.2 では、開水路の理論式から 越流係数を 0.6 として与えている. 実際には、護岸前面の波高との関係から、越流係数をそ の都度変えないといけない. 昨年度に実験で護岸前面の波高と越波流量から越流係数の関係 式を算出しており、最新のモデルでは波高に応じて越流係数が変化するモデルとなっている. そのため、今回の計算結果は、現地のものに比べて少し小さめな値を示しているものと考え ている.

2.3 漁港における長周期波計算の適用事例

- 西井:今回の検討では、長周期として 50s 程度を対象にしている.対象船舶 10~20t 程度の小型船 を対象とした場合、規模から考えてサージングが本当に起こっているのかが疑問である.ま た、港の形状を見ると長軸と短軸の距離の関係から、スペクトル解析結果に見られるような 50s のファーストモードではなく、サードモードで反応して船舶の動揺が発生し、係留ロー プの切断が生じているのではないかと感じた.それをブシネスクモデルで検証しようと思う と、平石室長が提案されている長周期の矩形スペクトルを用いて、どの周期帯でピークが生 じるかを調べた方がよいのではないか?
- 葛西:今回,周期 50s を用いて検討した理由としては、19t 型程度の小型船舶の固有周期が 50s 程度であったため、その周期帯の波によりロープが切れたのではないかと判断した.別の港についても同様な検討を行っているが、静穏時でもかなり船の動揺が生じており、流れによる影響もあるものと考えている.しかし、今回の検討では、流れの影響までは考慮していない.
- 松島: 50s 周期の波を入れた根拠として、3 地点の波浪観測データから得られたスペクトル解析結 果を基にしていると思う. 観測ポイント別に見ると、50s あたりにピークが出ているのは、 St.2, St.3 となっている. しかし、沖の St.1 を見ると、低周波数帯ではフラットなスペクト ルになっている. このような状況下では、入力条件として St.1 のフラットなスペクトルを用 い、港内に波が侵入した際の港の固有周期により、船の動揺にどのように影響を及ぼすか検 討する必要があるのではないか?
- 葛西:ご指摘の通りだと思う.しかし、今回の検討では、50sのモードの影響を検討するために、 50sの周期帯にピークがあるスペクトルを用いて検討を行った.
- 田中:現地観測している時に長周期波高 25cm の時の有義波高がどの程度か?また,入力スペクト ルの標準形は何を使っているか?
- 葛西:有義波高としては 30cm 程度だと思われる.スペクトルの分布形については,現地調査結果 を参考に周期 50.0s 付近にピークを持つスペクトルの分布形を作成し入射波条件とした.
- 平石:漁船の規模やロープの太さを考慮すると、周十秒の周期帯で漁船が動揺し、ロープの破断が 生じたものと考えている.また、対象漁港は、1次モードが 50s 程度である.漁港の規模を 考えた場合、2次、3次モードは出にくいため、小さな漁港では1次モードが長周期波の波 と共振して、船の動揺が大きくなっているものと考えられる.

3. ブシネスクモデルの入射波の高精度化およびうねり性高波浪の近年の傾向について

3.1 JONSWAP および任意の方向スペクトルを用いたブシネスクモデルの入射波の高精度化

- 三上:これまでの経験から合成波を作成する際に、同調周期を考慮する必要があるものと考えている.NOWT-PARIは非線形方程式であるため、どの程度影響があるかわからないが、少なくともそれらの影響について検討する必要があるものと考えられる.
- 平石:NOWT-PARIでは、成分波に分割する際に分割数を多めに取るようにし、そのような影響 が無いように注意している.しかし、ご指摘されたことも考慮する必要があるものと考えら れることから、今後の課題としたい.
- 成毛: JONSWAP 型のスペクトルが使えるようにとの要望が多数寄せられている. 今後の要望とし

て、平面波浪場の波高分布を求める際にスペクトルの入力と同時に有義波高を算出する際の 係数についても適宜変更されるよう対応していただきたい.

- 宮里:特に任意のスペクトル形を用いる場合には、有義波高を算出する際の係数が問題となる.今後、要望に応えられるよう改良を続けていきたい.
- 平山: 今回, JONSWAP 型のスペクトルを用いている. 従来のブレットシュナイダー-光易型との 比較・検証という意味で,今回のモデルでγ=1.0 とした場合の比較検証を行って頂きたい. 宮里: 今後の検討課題としたい.

3.2 うねり性高波浪の近年の傾向について

- 平山:久里浜湾で発生した被害時の状況としては、空は晴れていて波だけが来ている状態だった. そういう状況下で風波を前提としたスペクトルを当てはめることに若干の検討の余地があ る.また、その時の波形を見ると波が"うなって"いるように感じている.今後は、波の"う なり"についても検討する必要があるものと考えている.
- 平石:この研究は、約2年前から続けている.昨年度の西湘バイパスの崩落事故の時の波形を解析 した結果、"うなり"性の波が捉えられており、海岸構造物の被災の原因の一つと考えてい る.

3. 波浪推算とその活用

- 宮里:波浪推算モデルの向上により,波浪の推算精度の向上も期待される.これら波浪推算モデル を用いることで,設計波によく用いられる 50 年確率波などの極値波高をより精度よく算定 できるようになるのか?
- 川口:実務で波浪推算用いる際,観測データと推算データの相関から推算データの補正を行ってい ると思われる.今回紹介した波浪推算モデルは,風のデータから波浪の推算精度を上げるこ とを目的としており,極値波高を求めるといったモデルとはなっていない.
- 平山:今後は,NOWT-PARIを使ってスペクトルピークが尖ったうねり性の波浪場の検討を行っ ていきたい.現在の波浪推算モデル(第3世代モデル)では,スペクトルピークが尖ったう ねり性の波浪が推算可能かどうか教えて欲しい.
- 川口:計算結果を詳細に検証していないのでわからないが、風波とは明らかに違う方向からの波が 計算結果として得られている.定量的な評価は行っていないので、それが"うねり"性の波 浪かどうかは判断できていない.この点については、今後の検討課題としたい.

5. GPS 波浪計観測網が捉えた大水深域における海象特性

- 平山:これまでブシネスクによる波浪変形計算を行う際には、沿岸域の NOWPHAS の観測データ を基に沖波をトライアンドエラーで求めてきた. GPS 波浪観測計が設置されたことにより、 本来の沖波を用いることが可能となる.そのため、GPS 波浪計は大いに期待される.その一 方、現状のブシネスクモデルは、計算領域を広く取ることが困難であるため、GPS 波浪計ブ イの観測域からの計算をどのように設定していくか今後課題である.
- 永井:これまでは、NOWPHASの観測データを用いて沖波を推定してきたが、GPS 波浪計ブイの 設置により、沿岸域の波浪観測データから沖波を推定するという手法がどこまで正しいかと

いう信頼性の評価ができるものと思われる.また,GPS 波浪計ブイは沖合 10km~20km の 地点に設置されるため,沿岸域に到達する間にも風により波がさらに発達することも予想さ れる.幸い,今回のGPS 波浪計ブイの設置により,NOWPHAS の観測網として沖合と浅海 域の2点間のデータが同時に取得されることとなった.そのため,若手技術者には,このデ ータを活用することで,新たな研究成果が得られるようしていただきたいと思う.