

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.60 No.1 June 2021

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 波の遡上域における海浜地形変化に及ぼす潮汐変動の影響に関する検討
伴野 雅之・栗山 善昭
2. 2019年台風15号による横浜港に襲来したうねり性の波浪
田村 仁・川口 浩二・岩本 匠夢・藤木 峻
3. 富山湾・寄り回り波の力学機構
田村 仁・川口 浩二・藤木 峻
4. 仮設被覆工の耐波安定性について
鈴木 高二朗・久保田 博貴・田中 敦
5. パラペット後退型護岸に働く波圧に関する検討
鈴木 高二朗・久保田 博貴・鶴田 修己
6. プレート境界断層デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムに関する研究
杉山 友理・橋 伸也・森川 嘉之
7. MPM-剛体シミュレーションのための最小二乗法を用いた摩擦接触アルゴリズムの開発と開端杭の地盤への貫入挙動への適用
中村 圭太・松村 聡・水谷 崇亮

富山湾・寄り回り波の力学機構

田村 仁*・川口 浩二**・藤木 峻***

要 旨

富山湾沿岸部に襲来する「寄り回り波」は古くから知られたうねり性の高波であり、過去に何度も甚大な沿岸災害をもたらしてきた。今後起こりうる巨大波の襲来を事前に予測することは沿岸部の減災にとって極めて重要な課題である。しかしながら寄り回り波はなぜ巨大化するのか、といった根源的な問いへの答えが未だに見いだせていない。本研究ではNOWPHAS観測のデータ解析、波浪モデルによる過去再現計算と数値実験、および任意水深球面座標系でのRay方程式などいくつかの解析手法を用いて寄り回り波の力学機構の解明を試みた。NOWPHAS波浪観測記録(2007年から2016年までの10年間)から抽出された寄り回り波は全26ケースであり年平均で2, 3回程度、10月から4月にかけて発生していた。観測結果およびスペクトル波浪モデルから得られた寄り回り波解析の結果は下記の通りである。

- (1) 寄り回り波は有義波高の短時間変動と波群構造によって特徴づけられ、またこれらの出現はうねり周期に依存する。
- (2) 既往の研究結果と同様に第三世代波浪モデル(スペクトルモデル)では有義波高を再現できない。
- (3) 寄り回り波発生時には入射波として狭帯スペクトルが形成されている。
- (4) 寄り回り波が出現する沿岸部ではエネルギー収束帯に重合波浪場(双峰スペクトル)が形成される。

以上のことから寄り回り波は「準単色波の位相干渉機構」であると仮説を立て、これを位相分解モデルで確認した。多くの従来研究ではスペクトルモデルが前提とする「無数の成分波がランダムに重合」した波浪場という視点から寄り回り波現象の再現と解明を試みてきた。しかしながら本研究では、寄り回り波は「少数の成分波が特定の位相関係を持って干渉」する力学過程(coherent interference, 可干渉性)である可能性が極めて高いことを示した。このことは19世紀初頭に行われたヤングの「二重スリット」実験と力学的に相似であり、その対比からうねり性波浪の巨大化メカニズムが解釈できる。

キーワード：寄り回り波，富山湾，準単色波，可干渉性，位相平均・位相分解波浪モデル

* 海洋水理研究領域/海象情報研究グループ・主任研究官
** 海洋水理研究領域/海象情報研究グループ・グループ長
*** 元・海洋水理研究領域/海象情報研究グループ・主任研究官
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5048 Fax：046-842-5246 e-mail:htamura@p.mpati.go.jp

Dynamics of ocean swells in Toyama Bay

Hitoshi TAMURA*

Koji KAWAGUCHI**

Takashi FUJIKI***

Synopsis

The Yori-Mawari wave (YMwave), which strikes the coastal areas of Toyama Bay, is a swell-like storm wave that has been known for a long time. It has caused serious coastal disasters many times in the past. However, the cause of the huge swell has not been clarified yet. In this study, we attempted to elucidate the dynamic characteristics of YMwave by using several analytical methods, such as data analysis of NOWPHAS observations, hindcast and numerical experiments with wave models, and Ray tracing technique in arbitrary depth spherical coordinate system. A total of 26 cases of the YM wave were extracted from the NOWPHAS wave observation records (10 years from 2007 to 2016), and the average annual frequency of the YMwave was 2 or 3 times from October to April. The results from observation and the spectral wave model are as follows.

- (1) The YMwave is characterized by short-time variations in significant wave height and wave group structure, and their appearance depends on the swell period.
- (2) The third-generation wave model (spectral model) cannot reproduce the significant wave height as in the previous studies.
- (3) A narrow band spectrum is formed as an incident wave when the YMwave occurs.
- (4) A crossing sea (bimodal spectrum) is formed in the energy convergence zone in the coastal area where the YMwave appears.

We hypothesize that the YMwave is a coherent interference of quasi-monochromatic waves, and confirm this hypothesis with a phase-resolved model. Many previous studies have attempted to reproduce and elucidate the YMwave from the viewpoint of a wave field in which numerous component waves are randomly polymerized, which is the assumption of spectral models. In this study, however, it is shown that the YMwave is very likely to be a dynamic process in which a small number of component waves interfere with each other with a specific phase relationship (coherent interference). This is mechanically similar to Young's double-slit experiment conducted in the early 19th century, which can be used to interpret the mechanism of swell wave growth.

Key Words: YoriMawari-nami, Toyama Bay in Japan, quasi-monochromatic wave, coherent interference, phase-averaged and resolving models

* Senior Researcher, Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department

** Head of Group, Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department

*** Former affiliation: Senior Researcher, Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5048 Fax : +81-46-842-5246 e-mail:htamura@p.mpat.go.jp

Phone : +81-46-844-5048 Fax : +81-46-842-5246 E-mail : htamura@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 観測データと数値計算方法	8
2.1 NOWPHASによる現地観測データ	8
2.2 位相平均スペクトル波浪モデルによる数値計算	9
2.3 位相分解物理波浪モデルによる数値計算	10
3. 結果	11
3.1 観測データに基づく寄り回り波特性の把握	11
3.2 富山湾内および海底谷上へのうねりの伝搬	12
3.3 陸棚上での波線の屈折	14
3.4 寄り回り波の形成	15
4. 考察と議論	17
5. おわりに	18
謝辞	18
参考文献	18

1. はじめに

富山湾の「寄り回り波」は古くから知られたうねり性の異常波浪現象である。その歴史は江戸時代の古文書まで遡ることができ(河合, 2017), これまでに何度も富山湾沿岸域に甚大な被害をもたらしてきた(例えば国土交通省北陸地方整備局: <http://www.pa.hrr.mlit.go.jp/uneriinkai/uneriHP12.htm>)。なかでも2008年2月に襲来した寄り回り波は, 18名の死傷者と家屋被害が454棟にも及ぶ大規模な沿岸災害を引き起こした(富山県: http://www.pref.toyama.jp/cms_sec/1503/kj00015225-002-01.html)。今後起こりうる沿岸被害を減らすためには, 寄り回り波現象の実態を解明することが第一義的に重要である。さらに数値波浪モデルによりその襲来を高精度に予報することが必要不可欠となる。

2008年の事例は科学的な波浪観測記録が残されたなかで最悪の沿岸災害であったことから被災直後から現地調査や観測記録の解析が行われるとともに(例えば川崎ら2008; 永井ら2008; 泉宮ら2008), 第三世代波浪モデルによりその再現計算と発生メカニズムの解明を試みている(例えば, 間瀬ら2008; 太田ら2016; 津田ら2019)。しかしながら様々な波浪モデルやそれを駆動する海上風外力を用いて富山湾内沿岸域での寄り回り波過去再現計算を試してみても2008年の高波を過小評価し, その再現に成功した事例は(著者らの知る限り)存在しない。近年では数値モデルの高解像度化(例えば太田ら2016)やデータ同化手法の導入(水口ら2010), さらに人工知能や機械学習による予測システムの構築(斎藤ら2016; 増田ら2019)などが行われているものの, 力学メ

カニズム解明は全く進んでいないのが現状である。そのため被災以降10年以上を経た現在でもこの異常波浪の発生原因は未解明のままである。

寄り回り波の力学過程は発生から襲来まで”一般的”に次の通り説明される(図-1.1)。①急速に発達した温帯低気圧(爆弾低気圧)が日本海北部を東進した後, 北海道東方で停滞する。②間宮海峡から東北沿岸の沖合まで長時間強風が吹き続けることで風波が生成され, ③それがおよそ数百km離れた富山湾までうねりとして遠方伝播する。富山湾沿岸部は陸棚斜面が急峻で, しかもいくつもの海底谷が発達している。このため④海底地形による屈折作用で局所的なエネルギーの収斂(レンズ効果)が引き起こされ高波が発生し, ⑤これが寄り回り波となって沿岸域に襲来する。この説明で用いられる波浪力学過程は, 日々の波浪予報に用いられる第三世代波浪モデルで全て陽的に取り込まれている。しかしながら上記の通り異常波浪の再現に成功した研究例は存在せず, 一般的に極めて高い推算精度を有する第三世代波浪モデル性能と矛盾する。しかしながら本研究で明らかにするように, このことはスペクトル波浪モデル(=模型)の枠組みでは再現されない未解明の力学過程が, 実際の寄り回り波現象に内在されていることを示唆している。

本論文では「準単色波による位相干渉機構」が寄り回り波を異常波浪とする力学メカニズムであるという仮説を提示する。多くの従来研究では第三世代波浪モデル(スペクトルモデル)が前提とする「無数の成分波がランダムに重合」した波浪場という視点から寄り回り波現象の再現と解明を試みてきた。それに対し本研究では, 寄り回り波は「少数の成分波が特定の位相関係を持って干渉」

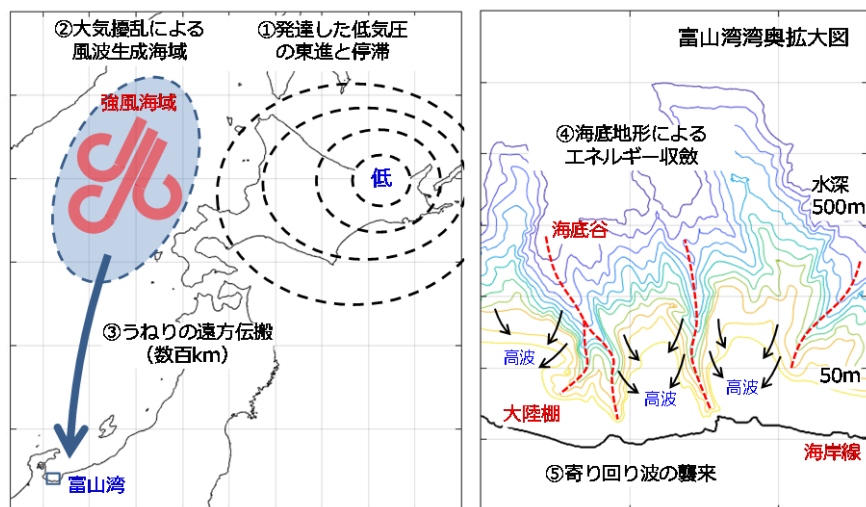


図-1.1 寄り回り波の発生から襲来までの力学過程の概念図

する力学過程 (coherent interference) である可能性が極めて高いことを示す。

寄り回り波に限らず、位相干渉が沿岸波浪にとって極めて重要な力学過程であることを示す研究がいくつか行われてきている。Smit and Janssen (2013)および Smit ら (2016) による一連の研究では、米国カリフォルニア州ラホヤ沖の海底谷上やオーシャンビーチのサンフランシスコカバー上で確認された時空間スケールの小さな波浪変動現象が準単色波の位相干渉効果によって説明できることを実証している。また沿岸波浪を対象とした位相干渉の理論的枠組みに関しても Smit and Janssen(2013)や Smit ら (2015)によって確立されてきている。

一般的に波浪場は時間 t および空間 \mathbf{x} の関数として N 個の成分波で構成されるものとして取り扱える (ただし線形論の枠組み)。成分波 n に対する水位変動 η_n は複素数 $\zeta_n = A_n e^{i\phi_n}$ を用いて $\eta_n(\mathbf{x}, t) = \text{Re}(\zeta_n(\mathbf{x}, t))$ で表される。ここに Re : 複素数の実部, A_n : 複素振幅, $\phi_n = \mathbf{k}_n \cdot \mathbf{x} - \omega(|\mathbf{k}_n|)t$: 成分波の位相, $\omega(\mathbf{k}_n)$: 角振動数, \mathbf{k}_n : 波数ベクトルである。角振動数と波数は線形分散式から関連付けられる。これらから N 成分波の合成波強度 I (包絡波振幅の自乗) は次の通り記述できる。

$$\begin{aligned} I(\mathbf{x}, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \zeta_n \zeta_m^* \\ &= \sum_{n=1}^N \zeta_n \zeta_n^* + \sum_{n=1}^N \sum_{m \neq n}^N \zeta_n \zeta_m^* \\ &= \sum_{n=1}^N A_n^2 + 2 \sum_{n=1}^N \sum_{m > n}^N A_n A_m \cos(\Delta \mathbf{k}_{nm} \cdot \mathbf{x} - \Delta \omega_{nm} t + \epsilon_{nm}) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに, $*$ は複素共役を表し, $\Delta \mathbf{k}_{nm} = \mathbf{k}_n - \mathbf{k}_m$ および $\Delta \omega_{nm} = \omega(|\mathbf{k}_n|) - \omega(|\mathbf{k}_m|)$, ϵ_{nm} : 初期ランダム位相である。

式(1)右辺の第1項は各成分波の自己相関項からの寄与を表すエネルギースペクトルに相当する量であり、これは第三世代波浪モデル (スペクトルモデル) が対象とする診断変数である。一方で、位相情報を含む第2項は相互相関項からの寄与を表し成分波間の位相干渉に相当する量である。多数の成分波がランダムな位相関係で重畳される場合、位相干渉は相殺されその寄与は無視できる (すなわちインコヒーレントな干渉)。これはスペクトルモデルが前提とする位相平均場の仮定であり、スペクトルモデルが対象とする波浪場はこの条件を満たさなければならない (例えば Smit & Janssen, 2013; Tolman, 2009)。非常に興味深いことに、寄り回り波はこの前提条件の範疇から外れてしまう現象となる。そのためスペクトルモ

デルでは寄り回り波現象を直接取り扱うことができない、というのが本論文で示す重要な結論の一つである。

本研究の目的は富山湾における寄り回り波イベントの特徴、特に陸棚や海底谷上においてうねりが異常波浪となり巨大波が発生するメカニズムを解明することにある。本研究では富山湾とその周辺海域での波浪観測データの解析、位相平均モデルと位相分解モデルを用いた過去再現計算と感度実験、および解析的 Ray トレーシング実験を行った。これらの解析ツールを組み合わせることで、寄り回り波の背景にある力学過程をよりよく理解し、寄り回り波イベントの潜在的な予測可能性を探ることを目的としている。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では用いる現場データセットとモデル実験および解析方法を説明する。第3章では特定の寄り回り波イベントに着目し、その観測データと過去再現計算結果を示す。次に第4章では位相分解モデルに基づいて寄り回り波の再現計算を行い、準単色波による位相干渉の文脈での寄り回り波の形成過程について考察する。最後に第5章において結論を述べる。

2. 観測データと数値計算方法

2.1 NOWPHAS による現地観測データ

国土交通省によって維持管理されるナウファス(全国港湾海洋波浪情報網 : NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS)の観測データを使用した。対象とした観測地点は日本海北部沿岸に設置された8地点 (表-2.1 : 瀬棚, 深浦, 酒田, 新潟, 直江津, 富山, 伏木富山, 輪島) で、それぞれ#1 から#8 として地点番号を割り当てた。対象期間は2007年から2016年までの10年間である。海面水位変動の時系列測定には、海象計 (海底設置型超音波計 : Sonic

表-2.1 解析対象とした NOWPHAS 波浪観測点

Loc. #	地点名	緯度	傾度	水深 (m)
1	瀬棚	42 26'39"	139 49'03"	52.9
2	深浦	40 39'34"	139 54'42"	51.0
3	酒田	39 00'31"	139 46'45"	45.9
4	新潟	38 00'17"	139 07'34"	34.5
5	直江津	37 14'09"	138 16'25"	32.7
6	富山	36 46'40"	137 12'18"	20.0
7	伏木富山	36 49'15"	137 04'29"	46.4
8	輪島	37 25'51"	136 54'08"	52.0

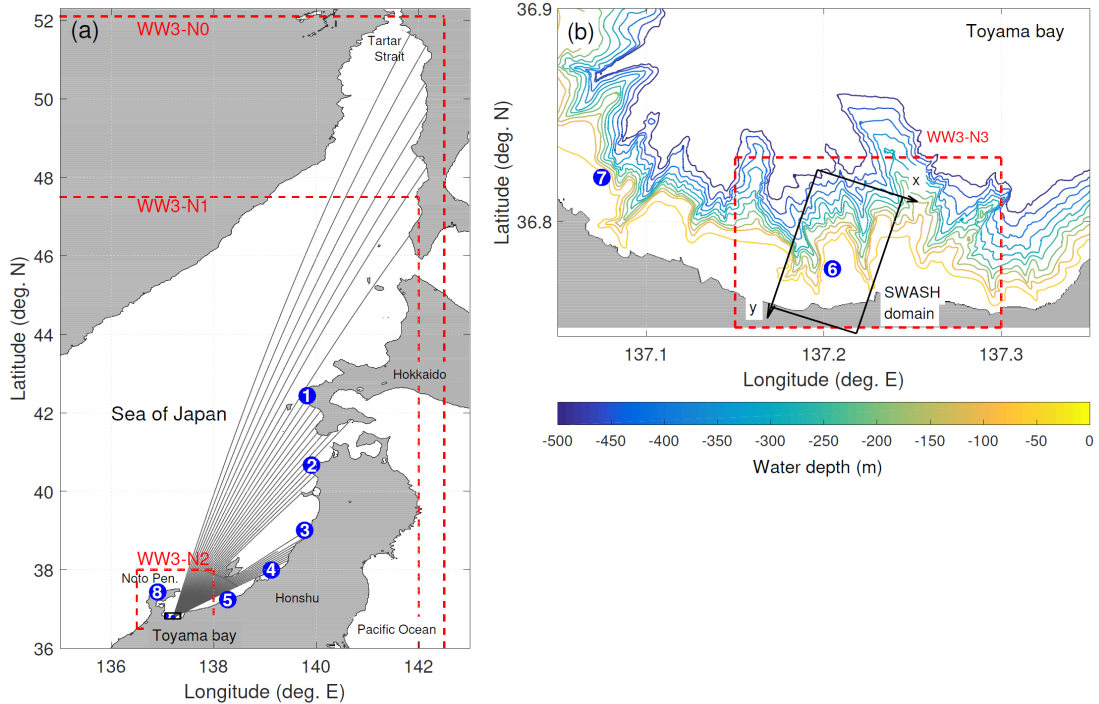


図-2.1 WW3 (WW3-N0 から N3) および SWASH の計算領域と NOWPHAS 波浪観測点 (#1 から#8)

Corporation USW-1000) が用いられており、サンプリングレート 2Hz、観測時間 20 分を 1 サンプル観測値として取り扱った。USW-1000 の電気信号の誤差は最大出力電圧に対して 1%以下である。生データに品質管理を適用し非現実的な信号はスペクトル解析の前にフィルタリングした。1 次元周波数波スペクトル $F(f)$ は 1Hz のナイキスト周波数までの高速フーリエ変換を用いて推定し、ノイズを除外するために高周波カットオフを 0.75Hz に設定した。波浪スペクトルから有義波高(Hs)やピーク周波数(fp)などの波浪統計量を算出した。

うねりは局所的に生成される風波と混在しているため、長期の観測記録から寄り回り波イベントを客観的に抽出するためには各スペクトル成分内で風波とうねりを明確に分離する必要がある。ここでは下記の方法を適用した。まず、風波とうねりの分離には Donelan ら (1985) と Young (2006) に倣って波齢基準を用いて分離周波数 f_c を定義する。

$$f_c = \frac{\alpha g}{2\pi u_{10}} \quad (2)$$

ここに、 α : 係数(=0.82), g : 重力加速度, u_{10} : 高度 10m における平均風速である。 u_{10} に関しては観測値が利用できる海域が制限されるため、全ての地点で気象庁大気解析値 (JMA/MSM) を海上風速として用いた。この風波とうねりの分離周波数を用いて、 f_c 以下の周波数帯の成

分波がうねりに対応すると考え、うねりのエネルギーを定義することができる。さらに、うねりのエネルギーとそれに対する全波浪エネルギーの比として Swell Index (SI) を定義することで、「うねり性」を計量化することが可能となる。詳細に関しては、田村 (2018), および田村ら (2019) に記載されている。

2.2 位相平均スペクトル波浪モデルによる数値計算

富山湾における寄り回り波イベントを調べるために、第三世代波浪モデル WAVEWATCH-III version 3.14 (WW3, Tolman, 2009)を用いて過去再現計算(ハインドキャスト)を実施した。3つの主要なエネルギーソース項に関しては全ての計算において同一の力学スキームを使用した。海上風外力項と碎波散逸項については, Bidlot ら(2007)のエネルギーソース項パッケージ(ST3 switch)を使用した。非線形相互作用項には離散相互作用近似法(DIA 法, Hasselmann et al., 1985)を採用した。浅水過程として底面摩擦および沿岸碎波によるエネルギー減衰に関してはそれぞれ Hasselmann ら (1973) と Battjes and Janssen (1978) を用いた。空間伝播とスペクトル伝播には平均化 ULTIMATE QUICKEST スキームを用いた(Tolman, 2009)。これらのスキーム内で用いられるパラメータには全てデフォルトの設定値を使用している。

日本海全域から富山湾沿岸部までを効率的に計算を行

表-2.2 WW3 各計算領域の詳細設定

WW3	N0	N1	N2	N3
計算領域	127.5-142.5E 32.5-52.1N	127.5-142.0E 32.5-47.5N	136.5-138.E 36.5-38.N	137.15-137.3E 36.75-36.8N
水平解像度	1/5 deg. (~20km)	1/16 deg. (~6km)	1/80 deg. (~1.2km)	1/1200 deg. (~80m)
スペクトル解像度	0.035-0.704 Hz, 40 grids			
	10 deg, 36 grids	2 deg, 180 grids	2 deg, 180 grids	1 deg, 360 grids
海上風外力	JMA/GSM	JMA/MSM	JMA/MSM	JMA/MSM
境界条件	-	Nest0 (hourly)	Nest1 (30 minutes)	Nest2 (30 minutes)
海底地形	ETOPO1	JTOPO30v2	JTOPO30v2	M7000

うこと、また内側領域の側方境界条件を適切に扱うことを目的として1方向ネスティング手法を適用した。用いた計算グリッドは、WW3-N0, WW3-N1, WW3-N2, WW3-N3の4重ネストした計算領域で、格子解像度はそれぞれ1/5°(≈20km), 1/16°(≈6km), 1/80°(≈1.2km), 1/1200°(≈80m)で設定した(図-2.1)。最も外側の計算領域WW3-N0は日本海全体を含み、寄り回り波の発生源となる可能性のある全ての海域をカバーしている。WW3-N1モデルとWW3-N2モデルは、寄り回り波の発生から富山湾内までのうねりの伝播を捉えるように設計されている。最後に最内側の計算領域WW3-N3では、富山湾沿岸の非常に狭い陸棚および海底谷をモデル内で適切に評価するために、水平分解能を80mまで落として高解像度化した。周波数領域は0.035から0.704 Hzまで対数的に間隔を配置した(相対周波数:8%, 格子数:40)。また方向スペクトル分布が非常に狭いうねりの特徴をモデル内で正確に再現するために可能な限り方向分解能を高く設定した(WW3-N1およびWW3-N2の方向分解能は2°, WW3-N3の方向分解能は1°)。

波浪モデルの外力には気象庁の全球大気モデルプロダクト(Global Spectral Model GSM: 1/2°×1/2°分解能で6時間間隔)およびメソスケールモデルプロダクト(Meso scale Model MSM: 1/20°×1/16°分解能で1時間間隔)を用いて駆動した。また水深データは3つの海底地形データベース(ETOPO1, JTOPO30v2, M7000)からそれぞれの海域のカバー範囲と解像度に応じて用いた。全ネストの計算設定の詳細に関しては表-2.2に示す。

2.3 位相分解物理波浪モデルによる数値計算

本研究では位相平均モデルの枠組みでは再現されない力学過程が実際の寄り回り波に内在することを示す。これを検証するためには、個々波の決定論的挙動を波浪モデル内で陽的に再現可能な位相分解モデルが必要となる。

ここではデルフト工科大学で開発が進められているSWASH (Simulating WAVes till SHore, Zijlemaら, 2011)を用いて数値実験を行った。SWASHは非線形浅水方程式に基づく非静水圧モデルであり現地観測や室内実験での沿岸波浪過程の検証に広く適用されている(例えばSmitら2014; Suzukiら2017)。

WW3による寄り回り波の過去再現計算の結果に基づいてSWASHモデルの構成を行い駆動した。SWASHの座標系にはデカルト座標系を用い、WW3-N2ハインドキャストから計算されたうねりの平均入射方向(図-2.1bに見られるように北から時計回りに18°)に回転して設定した。沖合境界条件にはWW3-N2によって得られた2次元スペクトルを用いて、各成分波に対してランダムに位相を割り当て水面変動と軌道流速を与えて駆動した。側方境界条件については、波の反射を避けるために幅500mのスポンジ層を配置した上で、境界上では開放条件とした。SWASHモデルの詳細な説明はZijlemaら(2011)にある。

SWASHのモデル領域はNOWPHAS観測サイト(富山#6)を中心とした富山湾・湾奥部の沿岸海域であり岸沖方向7.5 km, 沿岸方向4.5kmの海域として設定した(図-2.1b)。水平分解能は岸沖方向に10m, 沿岸方向に15mとし751×301点の水平格子点で構成した。SWASHは十分な数の鉛直層を持つことで分散性波動の伝播に重要な非静水圧場を表現することができる。水面波の分散特性は無次元深度(kh, ここにk:波数, h:水深)によって決定され、本計算においてはその最大値は8程度である。Zijlemaら(2011)に基づいてモデル中での鉛直層には3グリッドを用いて計算を行った。1ランの計算時間(30分間)にかかる経過時間はIntel Xeon Gold 5122 CPU @ 3.60GHzを30コア用いて1時間程度である。なおこれには出力ファイル作成のポスト処理時間も含まれている。

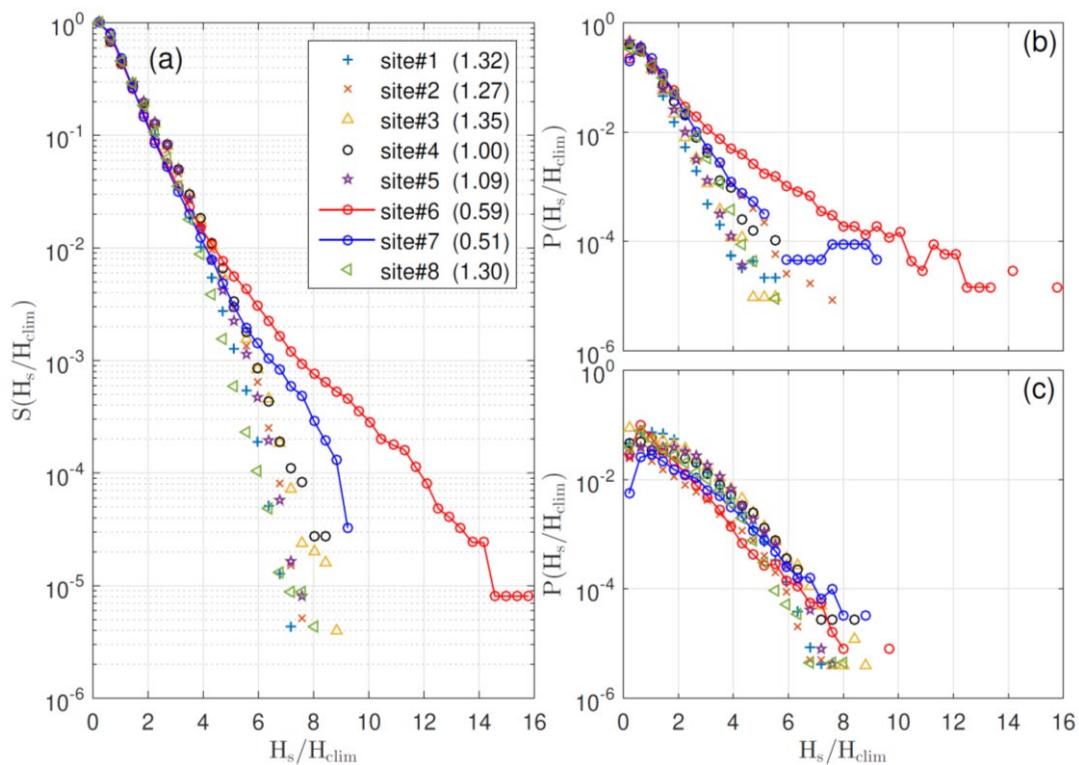


図-3.1 NOWPHAS 観測地点 8 か所における(a) H_s の超過確率, (b) うねり性波浪 H_s の確率密度関数, (c) 風波 H_s の確率密度関数 (観測結果)

3. 結果

3.1 観測データに基づく寄り回り波特性の把握

2007 年から 2016 年までの日本海沿岸 8 地点の NOWPHAS 波浪観測データを対象に解析を行った。図-3.1a は各観測地点における H_s の超過確率を示しており、10 年間平均値 (気候値, H_{clim}) の x 倍を超える H_s の割合を表している。 H_s/H_{clim} が 4 未満の場合には、各地点のプロファイル全ては一つの曲線に収まる傾向があるが、富山湾内 (#6, #7) の高波 (例えば $H_s/H_{clim} > 7$) の超過確率は湾外の場合に比べて約 10 倍に達する。また湾内観測地点の超過確率分布のテールは長く、NOWPHAS 富山 (#6) では最大で 16 倍に、NOWPHAS 伏木富山 (#7) では最大で 9 倍にまで達している。図-3.1b (図-3.1c) は観測データから SI を指標としてそれらが 0.9 以上 (0.5 以下) のうねり成分 (風波成分) が支配的な条件の場合の H_s の確率分布関数 (PDF) を示したものである。風波が卓越する場合 (図-3.1c), 全ての海域での H_s の PDF は同様のパターンを示している。一方で、うねりが支配的な条件下の場合 (図-3.1b), #6 と #7 では他の観測点と比較して H_s の PDF が高く、また分布形状がロングテールとなっている。これは富山湾内における高波がうねり

性波浪によって引き起こされていることを意味している。

以上の結果を踏まえ、本研究では $SI > 0.9$ および $H_s/H_{clim} > 5$ の 2 つの基準を用いて寄り回り波イベントを抽出した。これらの基準を用いることで 2007 年から 2016 年までの 10 年間で NOWPHAS 富山では合計 26 回の寄り回り波イベントが抽出され、各イベントに対応する海象場統計量および H_s 時系列は付録に示した (付表-1, 付図-1)。寄り回り波イベントは通常 10 月から翌年の 4 月の間に発生し平均すると年 2, 3 回程度の頻度で発生することがわかる。各事象の発生期間は 0.5-2 日間程度であり、平均風速は 3-6m/s, 平均波高は 1.5-4.5m, 平均波周期は 10-14s の範囲であった。波向きは北から $\pm 15^\circ$ 前後の間で変動している。

寄り回り波襲来時の非常に興味深い現象として、期間中の H_s の時系列に短時間の大きな変動がみられることが挙げられる。以下では、それが非常に顕著であった寄り回り波イベントとして 2013 年 3 月の事例 (付表-1 中の case #16) を対象に解析を進める。気象条件と波浪条件を図-3.2 に示す (NOWPHAS 富山 #6)。寄り回り波イベントの 2 日前 (2013 年 YD : 60.2-61) には海上風速 (図-3.2a) が 10m/s を超え、風向は北西風であった (ここでは図示していない)。この期間、図-3.2b に示した

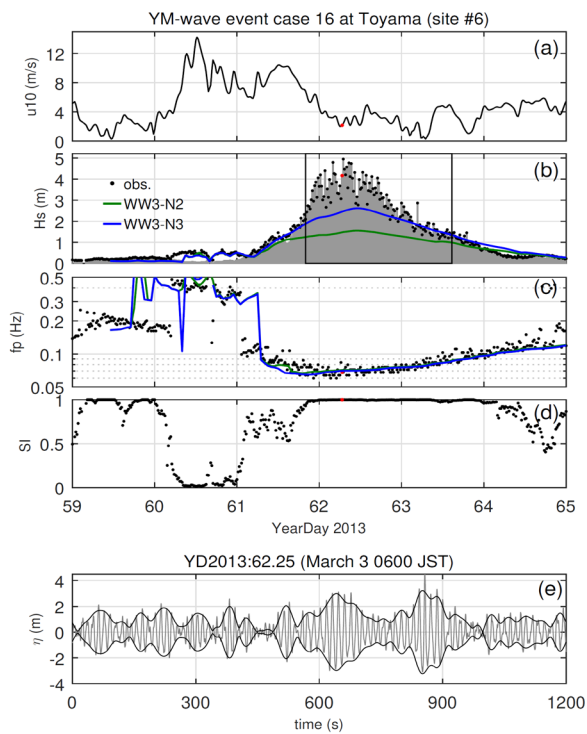


図-3.2 寄り回り波事例 (#16) 期間中の海上風および波浪特性 (観測結果)

Hs の時間変動には高風速との対応関係は明瞭に見られない。これは能登半島による北西風に対するフェッチ制限下での波浪発達の影響であると考えられる。観測されたピーク周波数 f_p の値は 0.40Hz 前後 (図-3.2c), SI は 0.1 以下 (図-3.2d) であり波浪場は風波が支配的であったことを示している。YD : 61-62 では波浪場が風波からうねりとの混成場へと変化し SI は 0 付近から 1 付近へと急速に変化している。YD62 以降は SI が 1 に近い値で一定に推移し、さらに Hs は約 4m ($H_s/H_{clim} > 6.8$) までに達していたことから寄り回り波イベントに対応する (図-3.2b の黒枠。2013 年 YD: 61.8-63.6)。イベント期間中の f_p の時間履歴は 0.06 Hz から 0.1Hz まで単調増加を示しており、より速くて波長の長い波がより遅くて短い波に先行して到着する分散性波動に伴う伝播パターンに関連していることがわかる(Munk et al., 1963)。

寄り回り波イベント前半 (YD : 62-62.5) の Hs の時系列は、3-5m のレンジで 1 観測サンプル毎 (20 分間隔) に大きな変動を示していることが確認できる (図-3.2b)。この期間のうねりの周期は 16 秒から 12 秒程度まで遷移する。他の事例についても確認すると (付図-1)、これは寄り回り波イベントで一貫して見られる特徴であることがわかる。この原因を確認するために水位変動の時系列を 図-3.2e に示す。図-3.2e は寄り回り波現象のピーク付

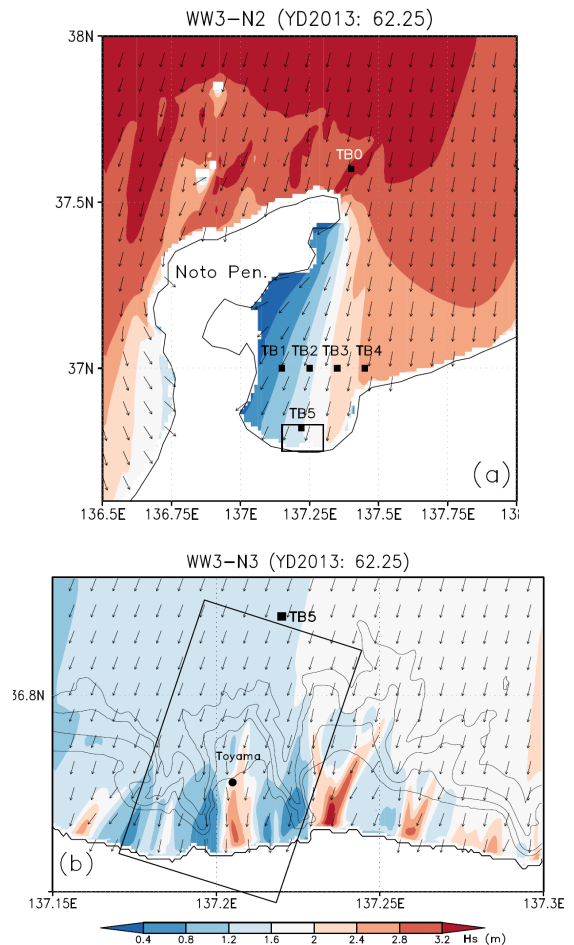


図-3.3 寄り回り波襲来時の有義波高およびピーク波向き (WW3 計算結果)

近の YD62.25 (図-3.2a のから図-3.2d までの赤点) を対象に、水位変動とその包絡波形の 20 分間時系列の一例を示している。波群構造と包絡線の変調をはっきりと見てとることができる。これらは他の寄り回り波イベントでも確認されるロバストな特徴である。

3.2 富山湾内および海底谷上へのうねりの伝搬

寄り回り波現象の空間特性を把握する観点から、ここでは第三代波浪モデルによる過去再現計算結果 (WW3-N2 および WW3-N3) の解析を行う。図-3.3a は寄り回り波襲来時の能登半島周辺における波高分布およびピーク波向きである。北北東からうねりが伝播するパターンが確認でき、また湾内での Hs の空間分布は東側で高く西に向かって減少することが確認できる。これは日本海から富山湾内へ入射するうねりが能登半島の遮蔽効果により一部遮られるためであり、富山湾内には相対的にエネルギーレベルの低いシャドーズーンが形成され

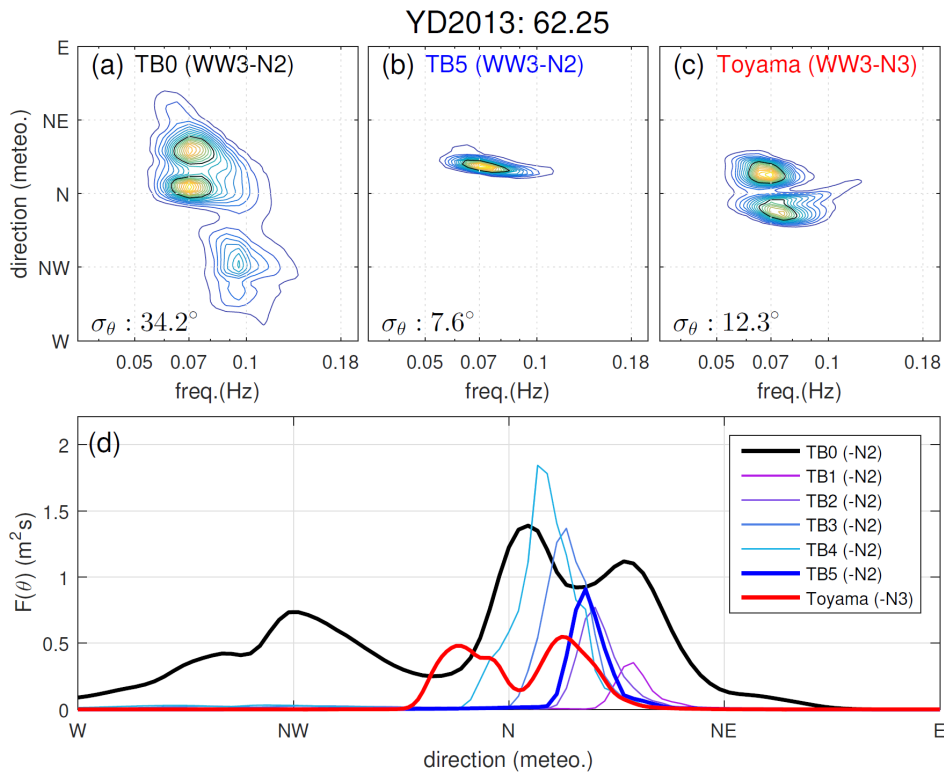


図-3.4 寄り回り波襲来時のスペクトル特性 (WW3 計算結果)

ている。図-3.4a と図-3.4b は図-3.3a に示した湾外 (TB0) と湾内 (TB5) の地点での 2 次元波浪スペクトルを示したものである (ここではエネルギー密度の最大値で規格化している)。両地点とも周波数領域の波浪エネルギーは 0.06–0.08Hz 帯に集中しており 0.07Hz 付近にスペクトルのピークが確認できる。またエネルギーが分布する周波数帯域は著しく狭く、これは分散性波動としての海洋波が遠方伝播した結果と解釈できる。

湾外 (図-3.4a) と湾内 (図-3.4b) の 2 次元波浪スペクトルの比較で最も顕著な違いは方向分散の度合いである。湾外 (TB0) では北から北東寄りの 45°以内の間に 2 つのうねり成分が混在し構成されているのに対して、湾内 (TB5) では北北東からの 1 つのピークを有する非常に狭帯化した方向スペクトルとなっている。波浪スペクトルの方向分散度に関しては、Kuik ら(1988)が提案した指標 σ_θ によって定量化することができる。これはスペクトル成分波が混在した海域では 50°以上 (例えば Tamura ら, 2009, 2010)、純粋なうねり条件下では 10°を最小値とする値となる (例えば Ewans 2002)。寄り回り波の襲来時、富山湾内ではその値が 7.6°まで低下している。これは国内海岸工学分野で一般的に用いられる S_{max} パラメータに換算すると 560 程度の値となり、波形勾配の小さいうねりを対象とした値 ($S_{max}=75$) と比較しても方向

分散が著しく小さいことがわかる。

図-3.4d に各海域における方向スペクトル形状の変化を示す。方向分布は湾外 (TB0) と湾内 (TB5) に加えて北緯 37 度線の湾内中央部の 4 箇所 (図-3.3a の TB1–TB4) も示している。能登半島の遮蔽効果によって北寄りのスペクトル成分がフィルタリングされているため、方向分布は東 (TB4) から西 (TB1) へと狭くなっている。その結果、富山湾内の陸棚沖合の波浪場 (つまり寄り回り波の入射波条件) は周波数、方向分散ともに狭帯化した準単色スペクトルが形成される。

空間解像度を最も細かくした WW3-N3 (空間解像度: 80m) によって得られた湾沿岸部の H_s の空間分布 (2013 年 YD62.25) を図-3.3b に示す。これを見ると H_s の極大値が海底谷に対応して陸棚上に存在していることが確認できる。これは海底地形上で屈折した波のエネルギーの収束と発散によるものである (図-1.1 に示した力学過程 ④に対応)。この図から確認できるように NOWPHAS 富山観測点は波浪エネルギーの収束帯の一つに位置している。実際に波浪モデル計算によって得られた NOWPHAS 富山での 2 次元波浪スペクトル (図-3.4c) は NNW および NNE にピークを持つ双峰分布となっている。

続いて WW3 によるモデル結果 (波浪統計量の時系列) を NOWPHAS 観測値と比較する (図-3.2b, c)。スペクト

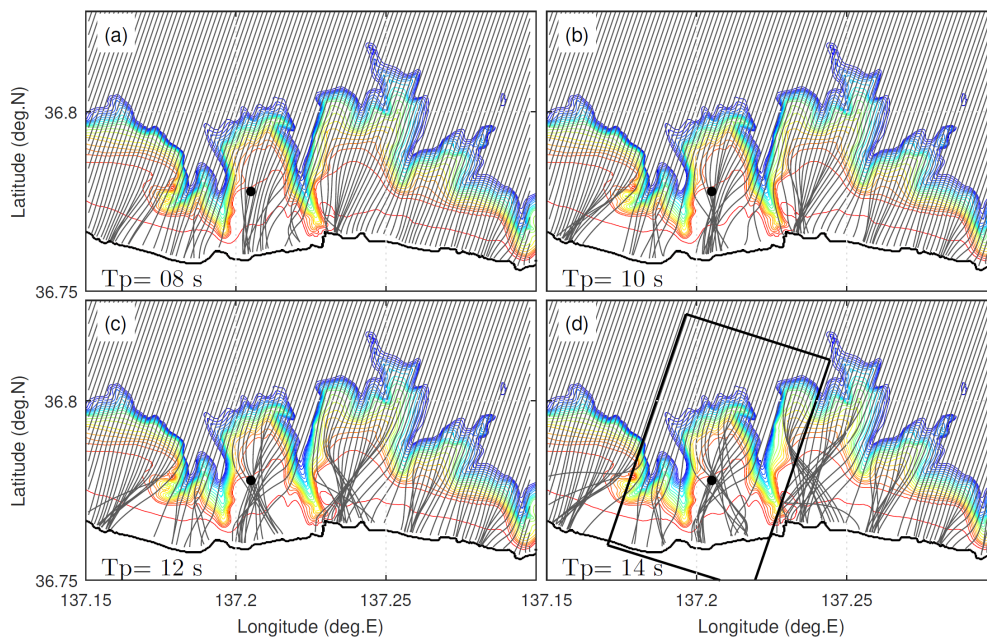


図-3.5 富山湾沿岸部の陸棚上における波線の屈折特性 (Ray 方程式による結果)

ルモデルは寄り回り波イベント中のピーク周波数 f_p の変化を精度よく再現することに成功しているものの (図-3.2c), H_s の特徴的な変動を再現することはできていない (図-3.2b). WW3-N2 (空間解像度: 1.2 km) と比較して WW3-N3 (空間解像度: 80 m) による H_s の計算値は観測値に近い結果となっている. しかしながら YD61.8 から 63 までのイベント前半ではモデル値は観測値を著しく過小評価しており, さらに観測値に現れる短時間変動は全く再現されていない. これは本ケース (2013年3月ケース#16) のみに限らず, 他の寄り回り波事例でも再現されない一貫したスペクトルモデルの欠陥である. より空間解像度を高めた数値実験でもこの欠点は改良されなかったことを確認している.

3.3 陸棚上での波線の屈折

続いて Ray トレーシング実験により陸棚上でのうねりの伝搬経路に関して検討する. ここでは Gallet and Young (2014)による球面座標における Ray 方程式を浅海域に拡張して用いた. 図-3.5 は入射波周期を 8 秒から 14 秒まで 2 秒間隔で変えた場合の波線の軌跡をそれぞれ示したものである. 入射波方向は図-3.4b で示された沖波スペクトル (WW3-N2 モデル結果) に対応する NNE として固定している. 波線は急峻な海底斜面 (海底谷) で強く湾曲しており入射波周期が長くなるのに対応して陸棚上に収束点 (発散) が出現する. これは短周期のうねりでは海底谷

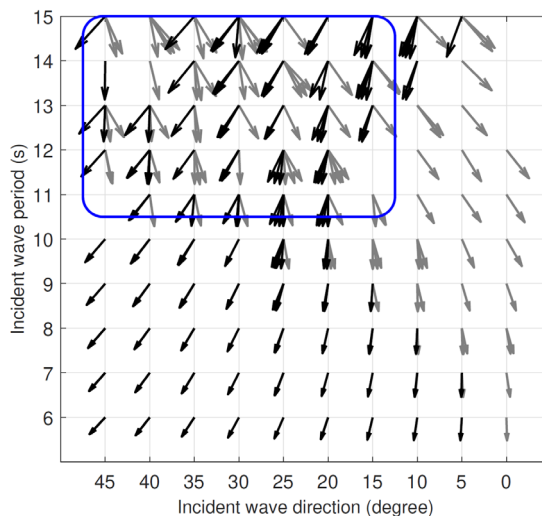


図-3.6 入射波に対する NOWPHAS 富山での波数ベクトル (Ray 方程式による結果)

の影響を受けることなく沿岸付近まで伝搬するためである. WW3 による過去再現計算では寄り回り波発生時の入射波条件が入射波周期: 14 秒, 入射波方向: NNE であった. Ray トレーシング実験でも入射波周期を 14 秒とした場合 (図-3.5d), 入射波条件は同様になる. そのため波線密度の空間パターンを WW3 による H_s 空間パターン (図-3.3b) と比較すると波線の収束 (発散) 領域と H_s が高い (低い) 領域に対応していることが確認できる.

Ray トレーシング実験結果は WW3 過去再現計算結果や NOWPHAS 観測結果とも整合的である。WW3 によって得られた結果からは、寄り回り波発生時において NOWPHAS 富山 (#6) の波のスペクトルが周期 14 秒前後にピークを持つ双峰分布を示していた (図-3.4c)。また観測結果からは、寄り回り波イベントの重要な特徴である H_s の短時間変動はイベントの前半で周期が 12 秒以上の時に明瞭に観測されている (図-3.2b, c)。これらの結果から、寄り回り波イベントはより周期の長いうねりとそれによる重合波浪場 (crossing sea) の形成に関連する現象であると推測される。したがって寄り回り波イベントを発生させるためにはその入射波条件が鍵となると考えられる。ここでは入射波の周期と方向を変えて実験を繰り返し行い、観測点近傍 (半径 50m の円内部) を通過する波線との対応関係を解析した。図-3.6 は各入射波方向 (横軸) と入射波周期 (縦軸) に対して、観測点近傍での波数ベクトルを示したものである。黒 (灰色) の矢印が東 (西) からのうねり成分波に対応している。入射波条件が北東方向 ($15-45^\circ$) かつ周期 11 秒以上の際に、NOWPHAS 富山では重合波浪場 crossing sea が形成されることが確認される。

3.4 寄り回り波の形成

これまでの結果をまとめると寄り回り波事象に関して主に 4 つの事実が確認された。

- (1) 寄り回り波は長周期のうねり条件下 (周期 12 秒程度以上) で顕著な波群構造を伴い発生し、統計量である有義波高が数十分の時間スケールで大きく変動する。
- (2) 第三世代波浪モデル (スペクトルモデル) はうねり周期の変化を精度よく再現できるものの、有義波高の特徴的な短時間変動を全く再現することができない。
- (3) 分散性波動特性および能登半島の遮蔽効果により、湾内では周波数帯および方向分散度ともに狭帯化したスペクトル (準単色波) が形成され、それが寄り回り波の入射波条件となっている。
- (4) 入射するうねりが海底谷による屈折作用を受け、寄り回り波が襲来する陸棚上および沿岸域では重合波浪場 (crossing sea) が形成されている。

これらの事実を説明する力学メカニズムとして、本研究では「準単色波による位相干渉機構」が寄り回り波を異常波浪とするという仮説を提示する。第 1 章でも言及した通り、多くの従来研究ではスペクトルモデルが前提とする「無数の成分波がランダムに重合」した波浪場という視点から寄り回り波現象の再現と解明を試みてきた。

一方で、本研究では、寄り回り波は「少数の成分波が特定の位相関係を持って干渉」する力学過程 (coherent interference) である可能性が極めて高いことを示す。つまり、富山湾に入射した準単色波列は急峻な海底谷により陸棚外縁で一度分割され、陸棚上で再び重合することで位相干渉を起こしエネルギー収束帯ではコヒーレントな干渉 (可干渉性が高い) を介して振幅変調が増大するというものである。

この仮説を検証するためには成分波間の位相情報である式 (1) 右辺第 2 項をモデル内で直接取り扱う必要がある。ここでは物理空間における位相分解モデル SWASH を用いて 2013 年 YD61.71 から YD63.71 まで過去再現計算を行った。計算では WW3-N2 によって得られた 1 時間ごとの沖合入射波スペクトルを境界条件として与え波浪変形計算を実施した。すなわち 2 日間の再現計算で合計 49 回の計算を実施している。

このうちの 1 事例として YD62.25 を対象とした計算結果を図-3.7 に示す。これらの結果からは海底谷上でのうねりの伝搬特性が確認されるとともに、これまで示した観測結果 (図-3.2e) やスペクトルモデル結果 (図-3.3, 図-3.4) との整合性も確認される。図-3.7a は NOWPHAS 富山における水位の時系列変動を、また図-3.7b は包絡波形の空間分布スナップショットを示している。観測結果 (図-3.2e) および SWASH 計算結果 (図-3.7a) の両方で寄り回り波襲来時の時間変動に明確な波群構造が確認される。図-3.7b の包絡線波形のスナップショットは、陸棚上での振幅変調の典型的な空間パターンを示している。この特徴的な波群構造の時空間発展はアニメーション (付録動画-3.1) でより明確に確認できる。

SWASH によって計算された H_s の空間分布を図-3.7c に示す。これは WW3-N3 の結果 (図-3.3b) と同時刻の計算結果であり、これらから決定論的モデル (SWASH) と確率論的モデル (WW3) の違いを直接比較することが可能となる。SWASH によって推定された H_s は WW3 のそれを大きく上回り、その最大値は 4 m に達しており空間分布に関しても変動が大きい特徴を有している。このような空間的特徴 (干渉縞) は位相情報を含まないスペクトルモデルでは再現されていない (図-3.3b)。しかも NOWPHAS 富山観測点はちょうど干渉縞の中央部付近に位置しており H_s の空間的変動が最も顕著な海域となっていることが確認できる。

図-3.8 は SWASH による H_s の時系列 (赤線) を、NOWPHAS 観測結果 (黒線) および WW3 (緑線および青線) と比較している。SWASH による計算値では YD62, 62.16, 63.29 付近で H_s の時間的なズレが生じていること

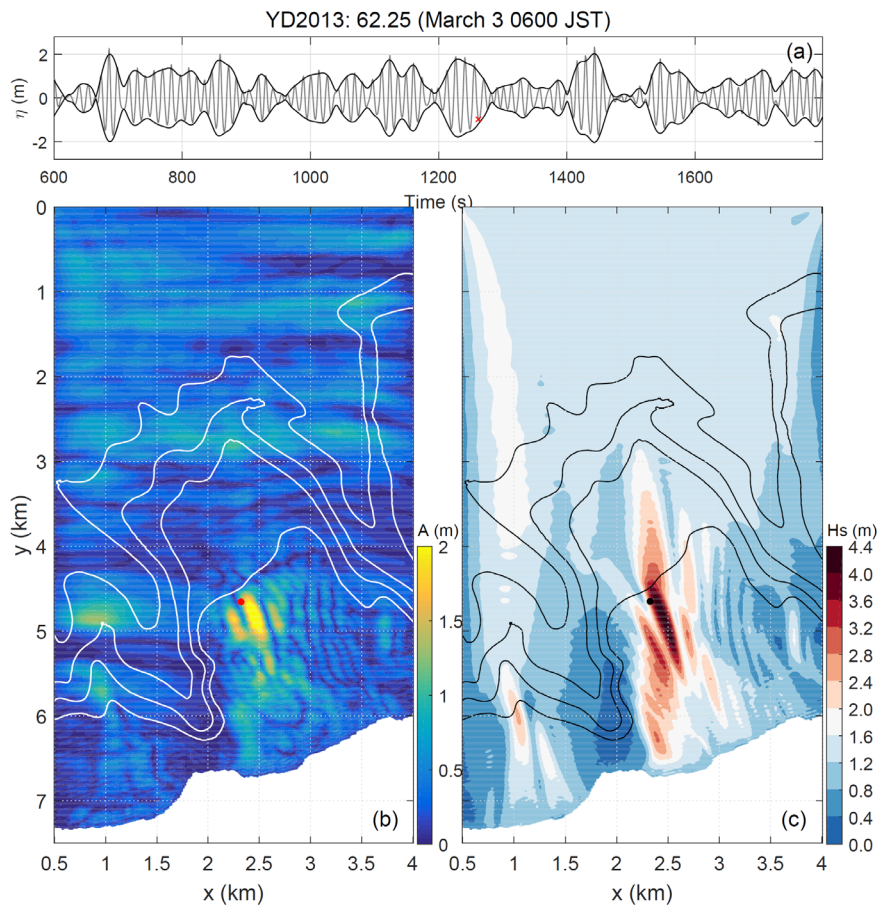


図-3.7 位相干渉による寄り回り波特性 (SWASH 計算結果)

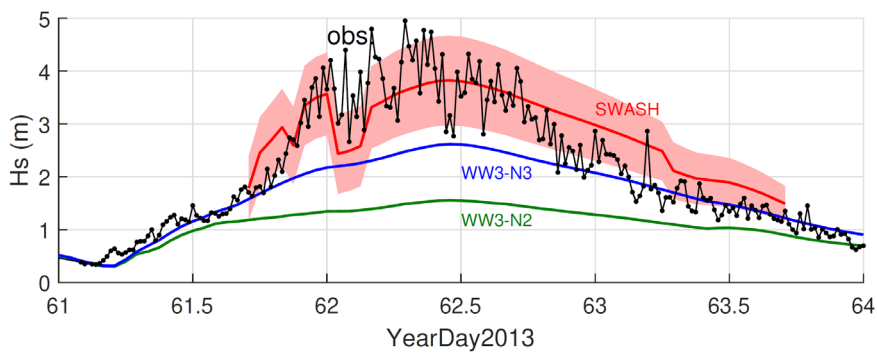


図-3.8 各波浪モデルによる有義波高の観測値との比較

が確認できる。これは WW3 による入射波スペクトル方向のわずかな変動に応じてエネルギー収束帯内での干渉縞パターンが空間的にシフトしていることに関係している。しかしながらそれ以外の期間では SWASH による H_s の時間変動は安定的であり観測結果と比較すると変動幅は極めて小さい。これは WW3 で推定された入射波スペクトルがある種のアンサンブル平均化された波浪場を再

現しているためであり、いわゆる「自然のゆらぎ」の影響が再現できていないためであると考えられる。しかしながら干渉縞の空間スケールに対応する距離 $\lambda = 2\pi|\Delta\mathbf{k}_{12}|^{-1}$ に対して H_s の 1 標準偏差を示したのが 図-3.8 中の赤網掛け部であり、SWASH から推定される H_s の変動範囲 (1 標準偏差) は観測値のそれに対応していることがわかる。このことは位相平均モデルおよび位

ヤングの干渉実験：位相干渉による干渉縞（光の明暗）

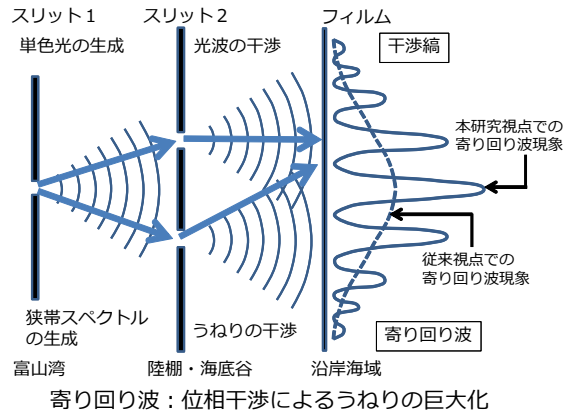


図-4.1 ヤングの干渉実験と寄り回り波の力学的相似性に関する概念図

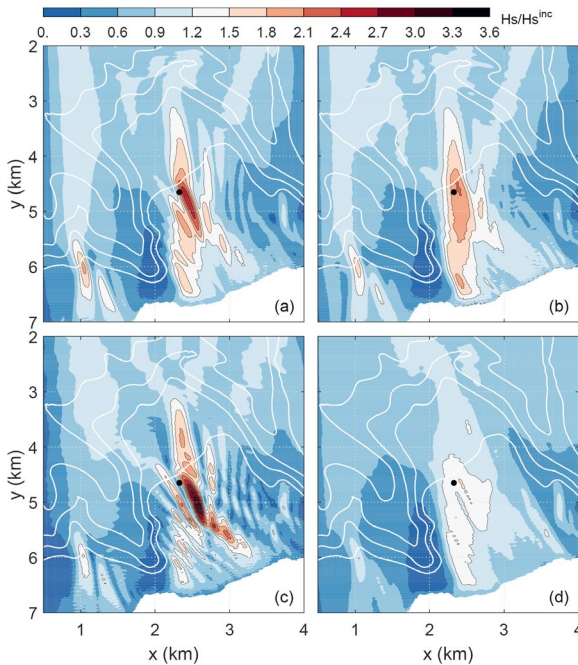


図-4.2 入射波スペクトル形状に対する波高分布特性

相分解モデルの結合による寄り回り波による最大有義波高の潜在的な予測可能性を支持している。

4. 考察と議論

富山湾の寄り回り波現象は、ヤングの二重スリット干渉実験の類似性からも解釈できる (図-4.1)。ヤング (1807)は可干渉性が高い光源から発光する2つの光波が干渉し合いフィルム上に明暗の帯状構造 (干渉縞) が生じることを実証した。一方で白色光のような広帯域スペクトルが光源となる場合には干渉縞は現れない。寄り回

り波もこれとまったく同様の力学メカニズムで解釈できる。入射波スペクトルに関して周波数領域には分散性波動の伝播効果、方向分散に関しては能登半島の遮蔽効果により、富山湾内では準単色波 (狭帯スペクトル) が生成される。準単色波は海底谷による屈折作用によりスペクトル的に分岐され、コヒーレントな成分波が陸棚上で位相干渉する。そのため沿岸域ではうねりが異常波浪化するというものである。

このため寄り回り波発生の有無は入射波源のスペクトル形状に依存した特性を示すはずである。ここでは SWASH による4つの追加実験によりそのことを示す。実験では波浪統計量である有義波高、ピーク周期、および平均波向きは各実験で一定とし、入射波スペクトル形状のみを変化させて、(a)WW3-N2によるハインドキャストから得られる波浪スペクトルを用いた場合 (図-3.4b)、(b)WW3-N2の設定に対して方向分解度のみを 10° に落とした低分解能スペクトルの場合、(c)単色波の場合 (線スペクトル)、(d)標準的な JONSWAP 周波数スペクトルおよび $\cos^8\theta$ の方向分散関数を与えた場合 (広帯域スペクトル) である。

図-4.2 は各入射波スペクトル条件で計算された有義波高の空間分布で、入射波波高で無次元化して示している。上記の通り入射波スペクトルの帯域幅に依存して、沿岸部陸棚上での波高分布は全く異なることが確認できる。有義波高の空間変動は入射波が単色であった場合に最も強化されており最大で入射波高の3.5倍にも達する (図-4.2c)。一方で、入射波スペクトルが広帯域である場合、干渉縞は平滑化され最大有義波高は入射波の高々1.5倍程度に留まる (図-4.2d)。またこの場合、位相平均モデルによる結果と類似した波高分布となることも確認できる (図-3.3b)。一般的な現業波浪モデルでは方向解像度を 10° 程度として用いて問題となることはない。しかしながら寄り回り波計算の入射波スペクトル推定は例外である。実際、方向解像度を 10° とした場合 (図-4.2b) は本研究で用いた解像度 2° による結果 (図-4.2a) と比較して空間変動パターンが滑らかで干渉縞が不明瞭になり、得られる最大有義波高大きく異なる。

以上のことから寄り回り波を数値波浪モデルで再現するためにはいくつかの重要なポイントがあることがわかる。まずこれまでにも上述した通り、寄り回り波は「少数の成分波が特定の位相関係を持って干渉」する力学過程 (coherent interference) であるため、位相干渉を陽的に再現できる位相分解モデル (SWASH モデルやブシネスクモデルなど) が必要不可欠である。さらに一般的に位相分解モデルの境界条件には位相平均モデル (WW3 や

SWAN) から得られる波浪スペクトルを物理空間の変数に変換して入力条件とする。図-4.2 で確認した通り入射波スペクトル形状(帯域幅)に依存して干渉縞の生成が決まるので、十分なスペクトル解像度を設定したスペクトルモデルでの過去再現計算が必要となる。

5. おわりに

本研究では NOWPHAS 観測のデータ解析、波浪モデルによる過去再現計算と数値実験、および任意水深球面座標系での Ray 方程式などいくつかの解析手法を用いて寄り回り波の力学機構の解明を試みた。観測結果およびスペクトル波浪モデルから得られた寄り回り波解析の結果は下記の通りである。(1) 寄り回り波は有義波高の短時間変動と波群構造によって特徴づけられ、またこれらの出現はうねり周期に依存する。(2) 既往の研究結果と同様に第三世代波浪モデル(スペクトルモデル)では有義波高を再現できない。(3) 寄り回り波発生時には入射波として狭帯スペクトルが形成されている。(4) 寄り回り波が出現する沿岸部ではエネルギー収束帯に重合波浪場(双峰スペクトル)が形成される。以上のことから寄り回り波は「準単色波の位相干渉機構」であると仮説を立て、これを位相分解モデルで確認した。本研究では、寄り回り波は「少数の成分波が特定の位相関係を持って干渉増幅」する力学過程(coherent interference, 可干渉性)である可能性が極めて高いことを示した。このことは19世紀初頭に行われたヤングの「二重スリット」実験と力学的に相似であり、その対比からうねり性波浪の巨大化メカニズムが解釈できる。

(2021年6月4日受付)

謝辞

本研究で使用した位相分解モデル・SWASHの導入のきっかけを与えて下さった株式会社エコー・樋口直人氏、またモデル運用に関して多大なご助力を頂いたフランダース水理研究所/デルフト工科大学・鈴木智浩博士の両名に感謝の意を表します。NOWPHAS波浪観測データは国土交通省港湾局および北陸地方整備局からご提供いただき、また使用に際してはNOWPHASデータ処理班からご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

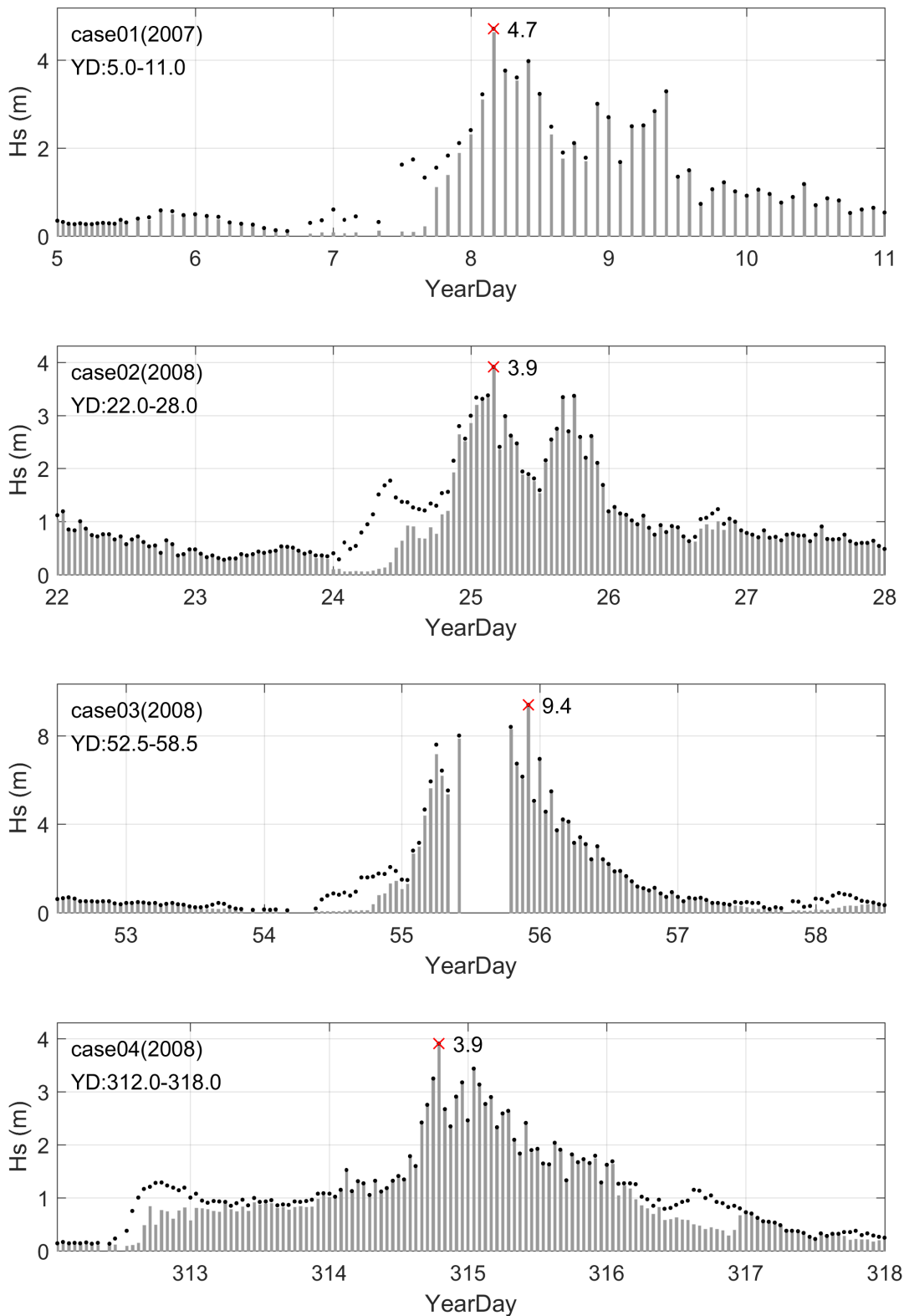
- 泉宮尊司, 白晃栄, 石橋邦彦: 2008年2月24日新潟・富山高波災害の気象・海象からの要因分析, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.181-185., 2008
- 太田俊紀, 松浦知徳, 村上智一, 下川信也: 地形効果による寄り回り波の波浪特性, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol. 72, No.2, I_289-I_294, 2016
- 河合雅司: 寄り回り波と周期的水位変動の発生機構に関する新しい解釈, 富山大学学位論文, 2017
- 川崎浩司, 水谷法美, 岩田好一朗, 小林智尚, 由比政年, 斎藤武久, 北野利一, 鷺見浩一, 間瀬肇, 安田誠宏: 富山県東部海岸における2008年2月高波による被害調査, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp.151-155., 2008
- 斎藤武久, 小久保元貴, 間瀬肇: ニューラルネットワークを用いた日本海沿岸域でのうねり性高波浪の予測に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol72, pp.175-180., 2016
- 田村仁: Swell Indexによるうねり性波浪の計量化と寄り回り波解析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol74, pp.109-114., 2018
- 田村仁, 藤木峻, 川口浩二: Swell Indexによるうねり性波浪の計量化と日本沿岸波浪場解析, 港湾空港技術研究所報告57-4-2, 2019
- 津田直樹, 呉修一: 富山湾における寄り回り波の特性とその予測に向けた数値モデルの適用, 富山県立大学紀要第29巻, 2019
- 永井紀彦, 平石哲也, 河合弘泰, 川口浩二, 吉永宙司, 大釜達夫: 浪観測網が捉えた2008年2月24日の日本海沿岸高波の特性, 海岸工学論文集, Vol.55, pp.146-150., 2008
- 増田和輝, 二宮順一, 斎藤武久: 寄り回り波を予測するニューラルネットワークの感度解析による過去事例の分析, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol75, pp.127-132., 2019
- 間瀬肇, 安田誠宏, Tracey H. TOM, 辻尾大樹: 富山湾沿岸に災害をもたらした2008年2月冬季風浪の予測と追算シミュレーション, 海岸工学論文集, Vol55, pp.156-160., 2008
- 水口幸司, 大下善幸, 室善一朗, 高山知司, 岡田弘三, 宇都宮好博: 「うねり性波浪」予測・監視モデルの可能性と的確性について, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol66, pp.146-150., 2010
- Battjes, J., & Janssen, J.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves. Proceedings of 16th

- Conference on Coastal Engineering. doi: <https://doi.org/10.9753/icce.v16.%25p>, 1978
- Bidlot, J. R., Janssen, P. A. E. M., & Abdalla, S.: A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. ECMWF Technical Memoranda 509, 2007
- Donelan, M. A., Hamilton, J., & Hui, W. H.: Directional spectra of wind-generated ocean waves. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, 315 (1534). doi: <http://doi.org/10.1098/rsta.1985.0054>, 1985
- Gallet, B., & Young, W. R.: Refraction of swell by surface currents. Journal of Marine Research, 72 (2), 2014.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., & Bouws, E.: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP), 1973.
- Hasselmann, S., Hasselmann, K., Allender, J. H., & Barnett, T. P.: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. Journal of Physical Oceanography, 15(11), 1378–1391, 1985.
- Smit, P. B., Bland, R., Janssen, T. T., & Laughlin, B.: Remote sensing of nearshore wave interference. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121 (5), 3409-3421. doi: [10.1002/2016JC011705](https://doi.org/10.1002/2016JC011705), 2016
- Smit, P. B., & Janssen, T. T.: The evolution of inhomogeneous wave statistics through a variable medium. Journal of Physical Oceanography, 43 (8), 1741-1758. doi: [10.1175/JPO-D-13-046.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-046.1), 2013
- Smit, P. B., Janssen, T. T., & Herbers, T. H. C.: Stochastic modeling of coherent wave fields over variable depth. Journal of Physical Oceanography, 45 (4), 1139-1154. doi: [10.1175/JPO-D-14-0219.1](https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0219.1), 2015
- Smit, P. B., Janssen, T. T., Holthuijsen, L., & Smith, J.: Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics. Coastal Engineering, 83, 36-48. doi:<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.09.005>, 2014
- Tolman, H. L.: User manual and system documentation of WAVEWATCH-III™ version 3.14. Natl. Cent. for Environ. Predict., Natl. Weather Serv., NOAA, Camp Springs, Md., 2009
- Young, I. R.: Directional spectra of hurricane wind waves. Journal of Geophysical Research: Oceans, 111 (C8). doi: <https://doi.org/10.1029/2006JC003540>, 2006
- Young, T.: A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts. (Vol. 1). London: Printed for J. Johnson., doi: [doi:10.5962/bhl.title.22458](https://doi.org/10.5962/bhl.title.22458), 1807
- Suzuki, T., Altomare, C., Veale, W., Verwaest, T., Trouw, K., Troch, P., & Zijlema, M.: Efficient and robust wave overtopping estimation for impermeable coastal structures in shallow foreshores using swash. Coastal Engineering, 122, 108-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.009>, 2017
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P.: Swash: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coastal Engineering, 58 (10), 992-1012. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>, 2011

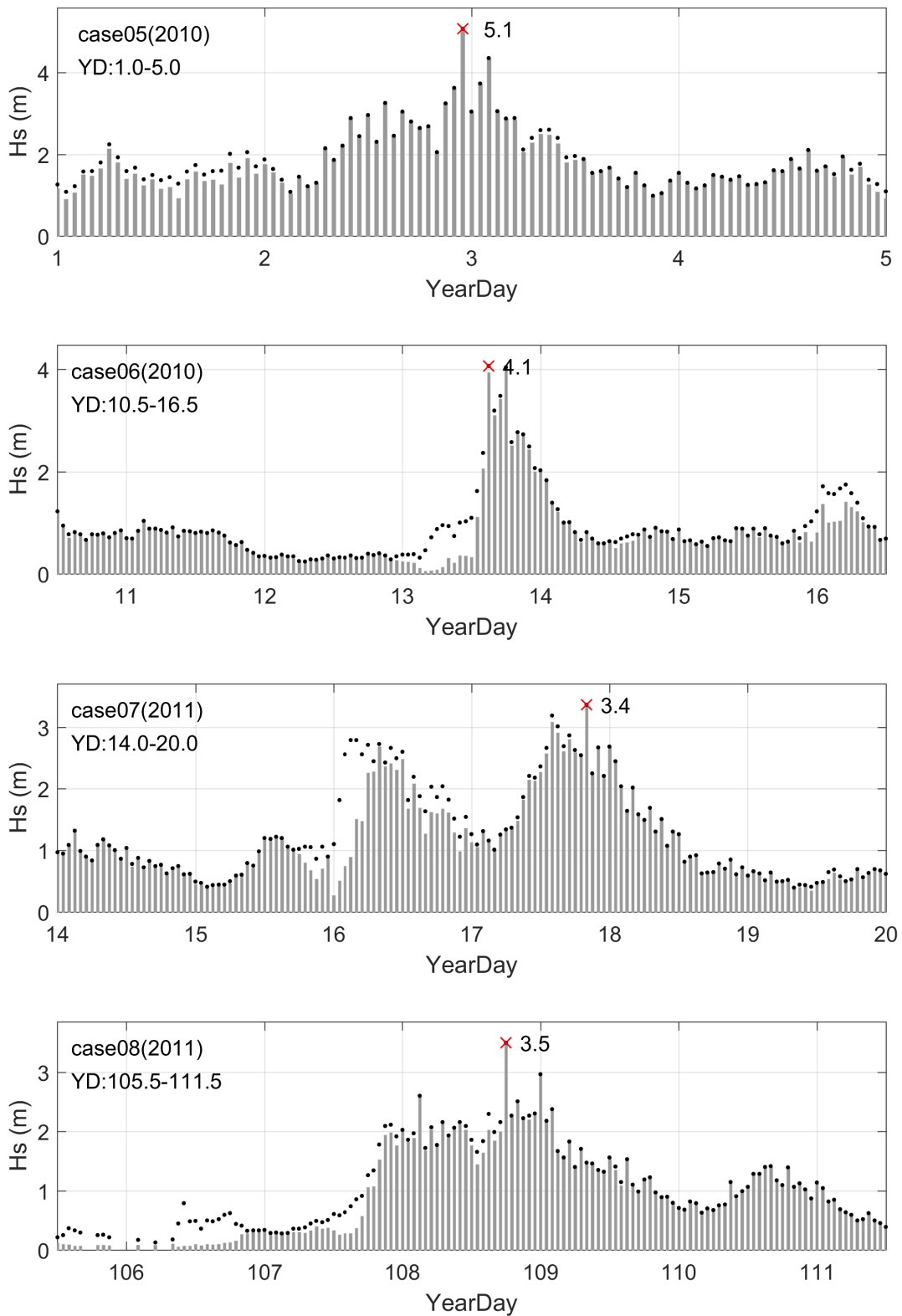
付録：2007年から2016年までの寄り回り波事例

付表-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例（2007年から2016年）

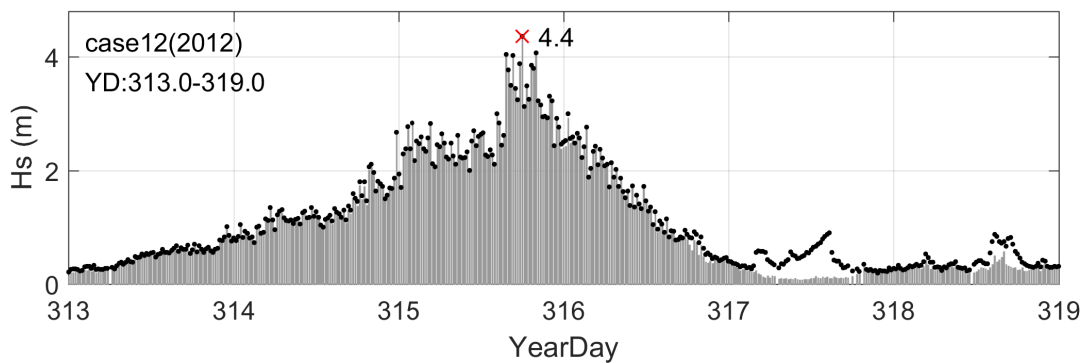
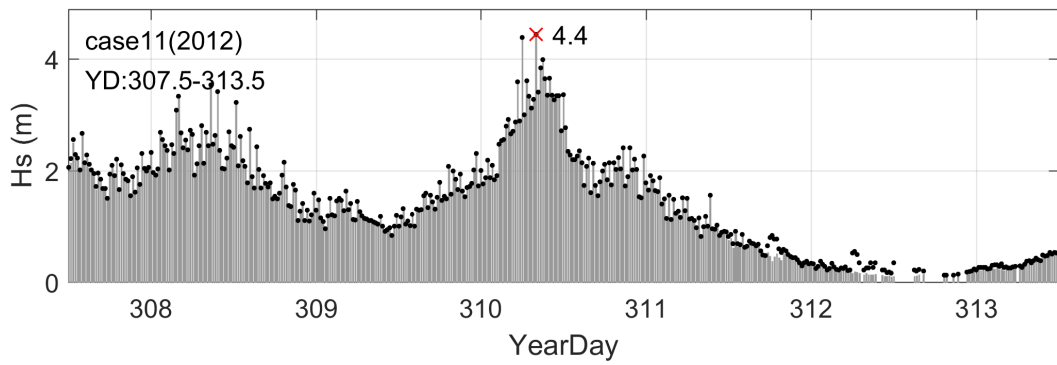
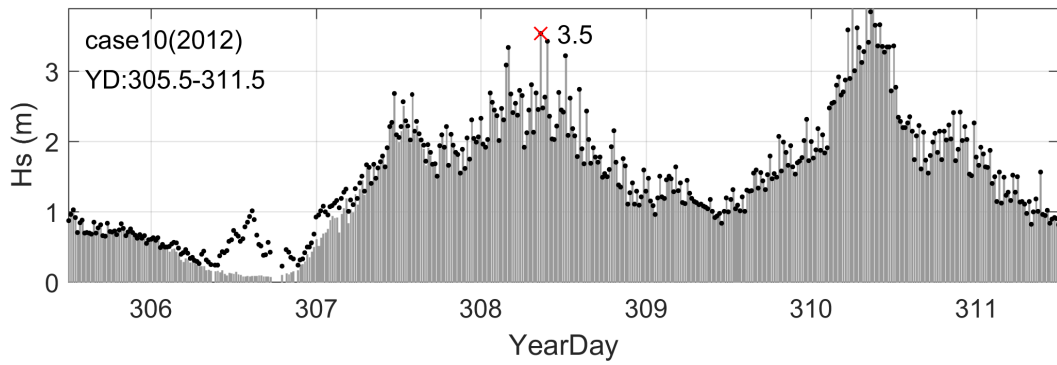
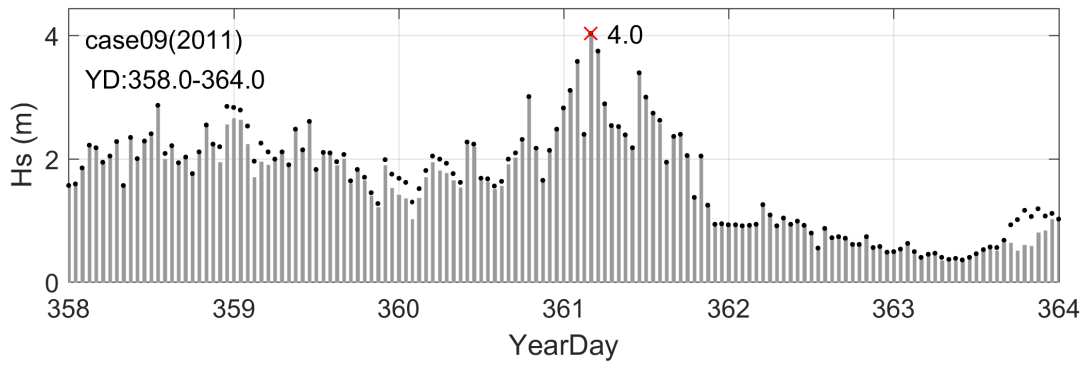
Case #	Starting time/date (JST)	Period (hours)	Mean wind speed (m/s)	Mean Hs (m)	Scatter Index of Hs	Mean Tp (s)	Mean direction
01	00:00 08-Jan-2007	36.0	5.60	2.79	0.31	13.5	N/A
02	23:00 24-Jan-2008	23.0	5.69	2.65	0.22	12.5	-14.5
03	02:00 24-Feb-2008	38.0	5.52	4.51	0.49	12.9	1.9
04	14:00 09-Nov-2008	28.0	3.24	2.40	0.26	13.8	-3.9
05	14:00 01-Jan-2009	8.0	4.05	1.58	0.50	12.8	-6.6
06	08:00 02-Jan-2010	35.0	4.82	2.57	0.32	13.4	-4.5
07	14:00 13-Jan-2010	11.0	6.46	2.80	0.27	11.3	4.7
08	09:00 17-Jan-2011	21.0	5.92	2.39	0.21	12.2	-0.7
09	02:00 18-Apr-2011	29.0	4.62	2.10	0.20	12.6	5.6
10	17:00 26-Dec-2011	28.0	4.64	2.52	0.26	13.5	4.0
11	07:40 02-Nov-2012	92.7	3.90	1.97	0.34	11.3	7.9
12	01:20 10-Nov-2012	36.0	3.75	2.47	0.27	11.2	7.6
13	22:20 15-Nov-2012	22.0	2.86	1.75	0.31	10.2	13.2
14	08:00 27-Jan-2013	26.0	3.20	2.00	0.30	13.2	-12.8
15	17:00 08-Feb-2013	34.0	3.60	1.84	0.41	12.4	-15.0
16	20:00 02-Mar-2013	42.3	3.26	2.84	0.36	13.5	-6.1
17	04:20 08-Apr-2013	27.7	4.86	2.09	0.23	12.8	-12.4
18	13:40 18-Dec-2014	28.7	4.17	3.94	0.43	13.4	8.7
19	07:40 08-Jan-2015	20.7	4.87	2.63	0.26	13.9	9.2
20	04:40 28-Feb-2015	24.3	3.61	2.36	0.41	12.5	-6.4
21	00:00 25-Mar-2015	36.3	3.11	2.17	0.36	11.6	12.4
22	07:00 09-Oct-2015	48.7	3.84	1.74	0.46	12.2	-2.8
23	00:00 26-Oct-2015	31.3	3.76	1.87	0.42	11.9	-2.5
24	17:40 20-Jan-2016	17.3	4.16	2.50	0.22	12.4	-3.0
25	10:40 01-Mar-2016	30.3	5.03	3.09	0.44	12.9	-0.8
26	18:00 23-Dec-2016	37.3	4.58	3.49	0.44	12.3	-2.2



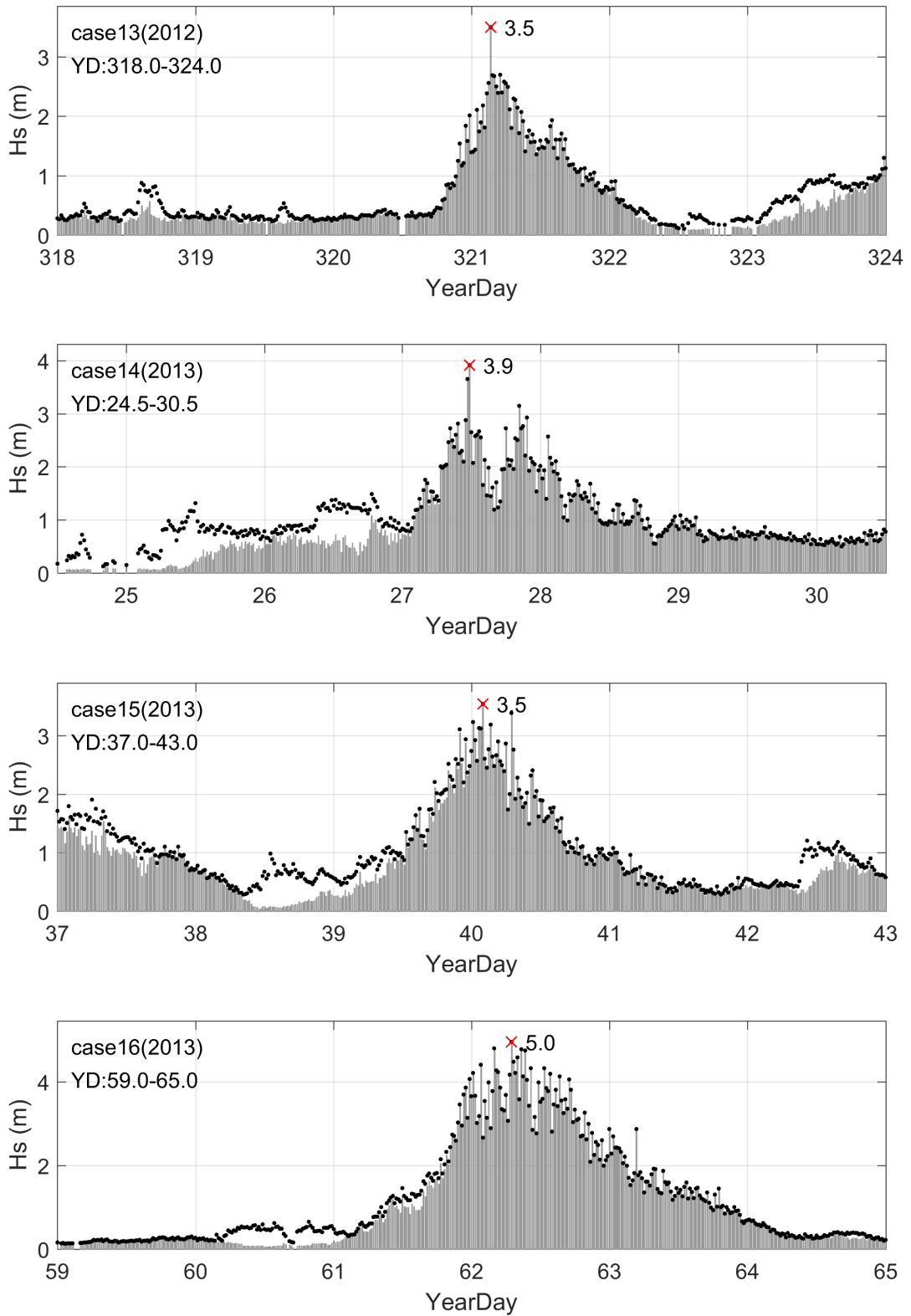
付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#01-04). 黒点 : Hs 観測値, 灰色バー : うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



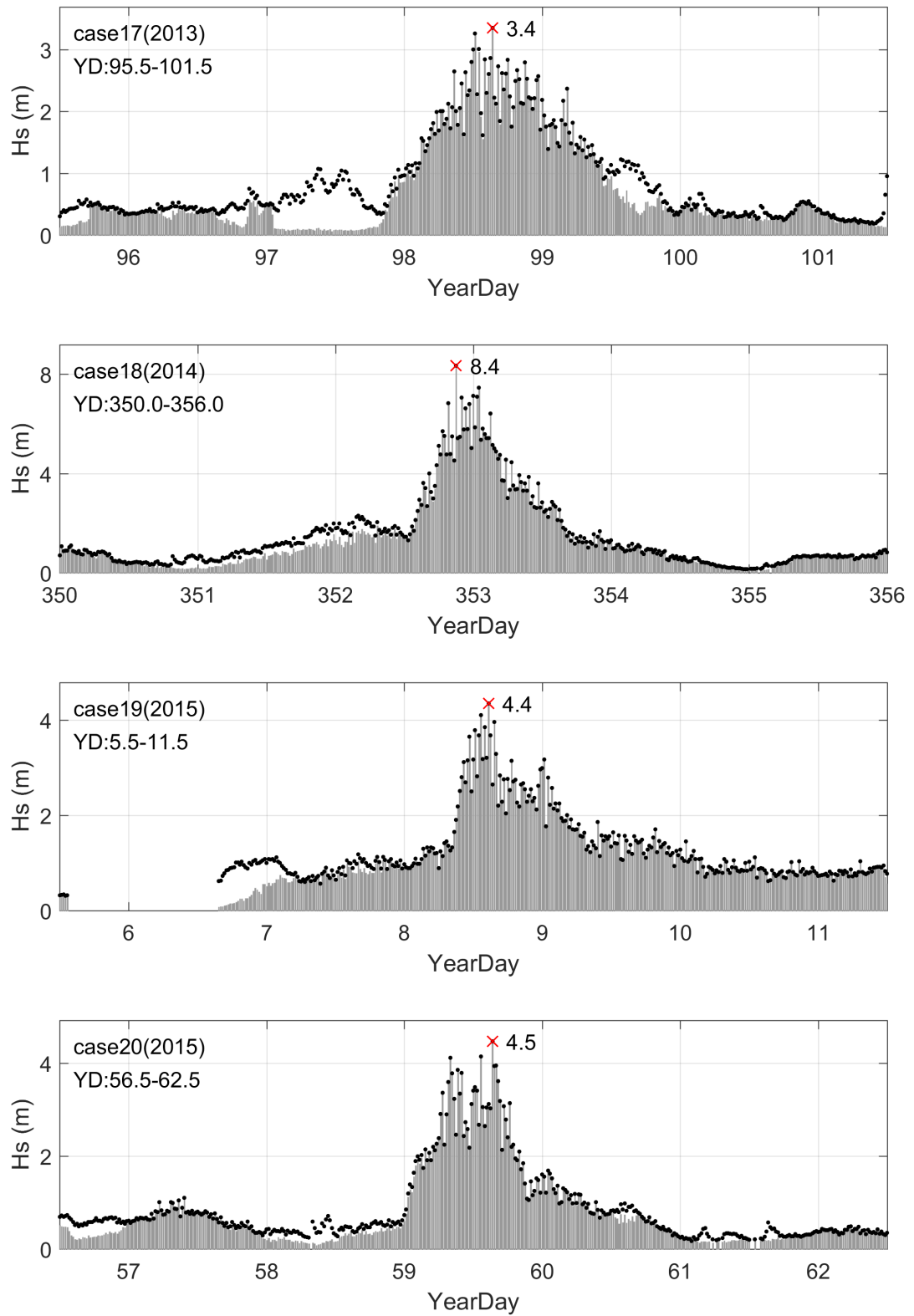
付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#05-08). 黒点: Hs 観測値, 灰色バー: うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



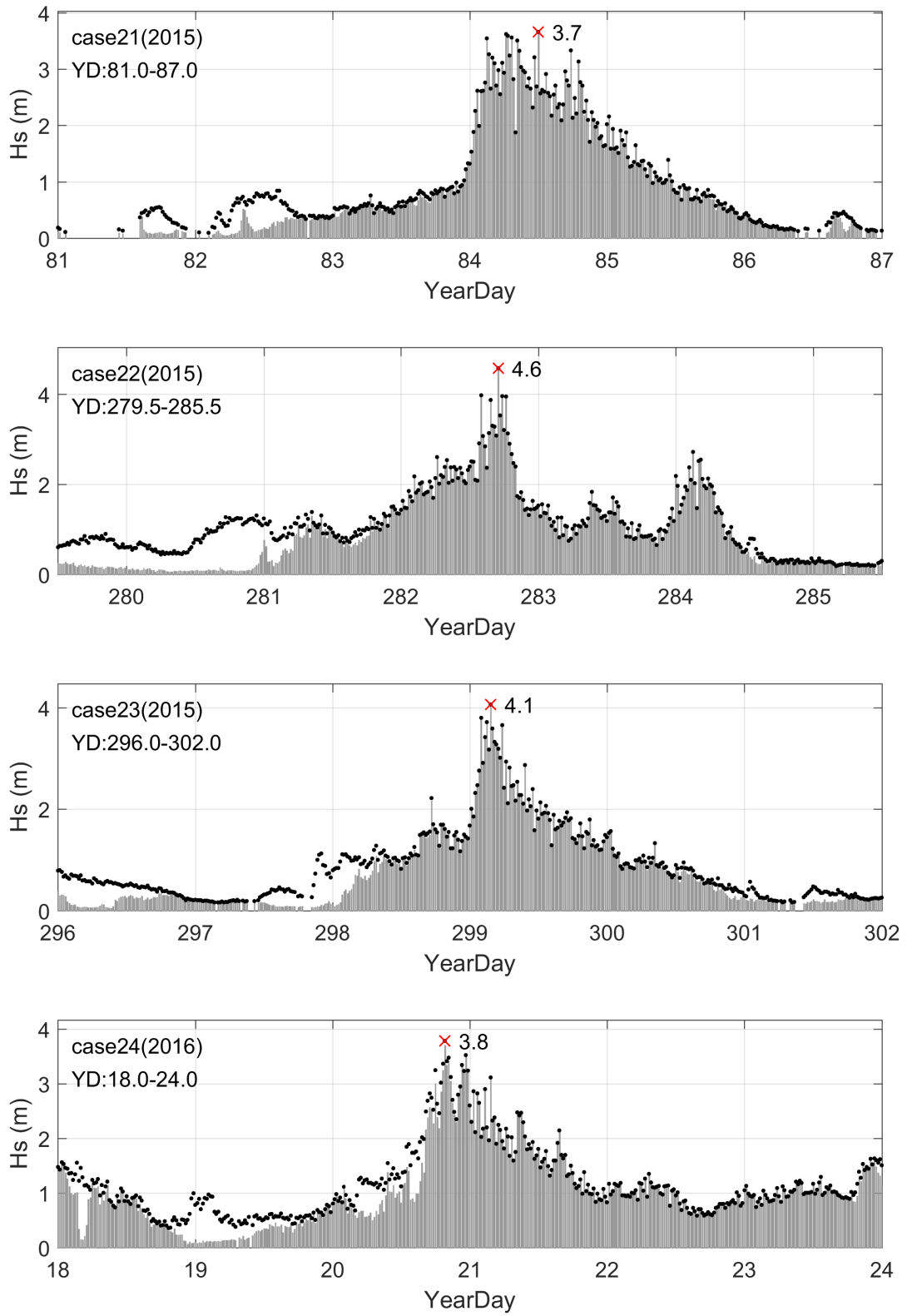
付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#09-12). 黒点 : Hs 観測値, 灰色バー : うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



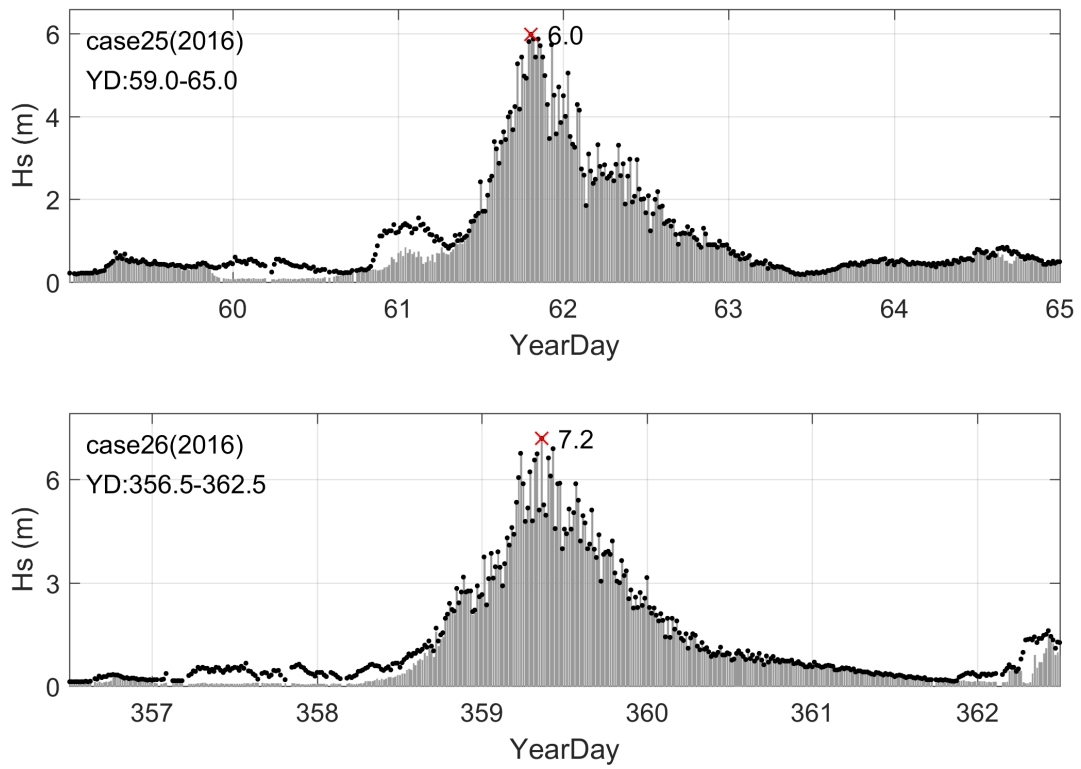
付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#13-16). 黒点: Hs 観測値, 灰色バー: うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#17-20). 黒点: Hs 観測値, 灰色バー: うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#21-24). 黒点: Hs 観測値, 灰色バー: うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs



付図-1 NOWPHAS 富山における寄り回り波事例の有義波高 (case#25-26). 黒点: Hs 観測値, 灰色バー: うねり成分波の換算 Hs, 赤十字 (数値) は期間最大 Hs

港湾空港技術研究所報告 第60巻 第1号

2021.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Cyclic Beach Morphological Changes in the Swash Zone
due to Tidal Range Fluctuations
Masayuki BANNŌ · Yoshiaki KURIYAMA
2. Ocean swells induced by the Typhoon Faxai hit Port of Yokohama in 2019
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takumu IWAMOTO · Takashi FUJIKI
3. Dynamics of ocean swells in Toyama Bay
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takashi FUJIKI
4. Study on Stability of Temporary Armor Units against Waves
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Tsutomu TANAKA
5. Study on Wave Pressure acting on Receding Parapet type Seawall
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Naoki TSURUTA
6. Study of slow slip mechanism on plate boundary fault decollement zone
Yuri SUGIYAMA · Shinya TACHIBANA · Yoshiyuki MORIKAWA
7. Development of frictional contact algorithm using weighted least squares for MPM-rigid body
simulation and its application to behavior of open-ended pile driven into the ground
Keita NAKAMURA · Satoshi MATSUMURA · Takaaki MIZUTANI