

実用的な沖波諸元の設定方法に関する基礎的研究

平山 克也*・森谷 拓実**

要 旨

港湾施設や海岸保全施設などの設計波の算定に用いる設計沖波は、浅海変形が生じない深海域で設定するのが基本である。しかし、遠浅の海底地形や内湾に面する港湾等では、深海域が設計対象施設から遠く離れてしまい、設計沖波に設計対象施設沖の風場による波浪の発達が考慮されないことが懸念される。そこで、港湾・海岸保全施設設計の実務においてはこれまで、設計対象海域の風場による波浪の発達を考慮できるように、浅海域に設けた地点に対し深海条件とみなした波浪推算を実施して、設計沖波を（深海波として）疑似的に算定することも行われてきた。一方、近年では、計算機と波浪推算技術の発達により、浅海変形（海底地形）を考慮した高精度な波浪推算が広く実施されるようになってきている。このとき、設計対象施設沖の浅海域で出力される波浪推算結果は厳密には沖波ではない（深海条件を満たさない）ため、港湾・海岸保全施設における現在の設計体系に浅海波浪推算技術を適切に導入するための新たな解決方法の提案が急務となっている。

本研究では、浅海域のある地点において、浅海条件で得た推算結果を準沖波、浅海域を深海域とみなして疑似的に設定された沖波を疑似沖波と定義し、本来の定義に従う沖波と区別することを提案した。また、これらの新しい概念を導入することの妥当性や従来法との共通点・相違点について述べるとともに、準沖波を用いて堤前波を算定する波浪変形計算の方法や留意事項について具体的な事例をもとに示した。

一方、（確率）準沖波に対して港内施設の設計波を算定するためには、沖からの波浪変形を考慮できるよう同時に（確率）沖波を逆推定する必要がある。この際には方向集中度 S_{max} も適切に設定しなければならない。そこで、既存の確率準沖波諸元及びその算定に用いた波浪推算結果を用い、沖波地点及びNOWPHAS波浪観測地点における確率波諸元を逆推定するとともに、極値統計解析結果との比較を通じて、それらの妥当性を検証した。これらの結果、逆推定される沖波の S_{max} 値は沖波諸元だけでなく波浪変形計算により算定される設計波諸元にも影響を与え得るため、慎重に設定すべきことがわかった。さらに、これらの波浪変形計算を適切に実施するために重要となる沖波諸元の逆推定について、新たに作成した算定図を用い、初期値とする沖波諸元の概略値を簡易に推定する手法を提案した。

キーワード：準沖波，疑似沖波，設計沖波，深海域，浅海域，波浪変形計算，波浪推算

* 沿岸水工研究領域 波浪研究グループ長

** 沿岸水工研究領域 波浪研究グループ 依頼研修員（株式会社エコー）

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬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：046-844-5042 Fax：046-841-3888 E-mail：hirayama@p.mpat.go.jp

Fundamental Study on Practical Methods for Setting Parameters of Deepwater Wave

Katsuya HIRAYAMA*

Takumi MORIYA**

Synopsis

The design wave for a target facility is calculated with the offshore design wave in deep sea, simulating wave transformations in shallow water. However, for facilities on long gentle slopes, far from offshore, or in inland seas, wave generation and growth in the local wind field from offshore to the facilities may not be considered. In such cases, a virtual deepwater wave near the facilities in shallow water (which is called as “a pseudo-deepwater wave” in this study) is often estimated by wave hindcasting with the deep-sea condition. On the other hand, the wave hindcasting for shallow water waves has been advanced in applicability and calculation accuracy. However, while the waves estimated with this model in shallow water are not deepwater waves understandably, a suitable solution that incorporates shallow water wave simulation techniques into the current procedure to estimate design waves for port and coastal conservation facilities is urgently required.

Therefore, in this study, a concept of quasi-deepwater wave is newly proposed as same as one of pseudo-deepwater wave to define the offshore design waves in shallow water. Namely, a quasi-deepwater wave is estimated by wave hindcasting with the shallow water condition. Moreover, as a case study, specific examples of estimating design wave conditions at a target facility with the quasi-deepwater wave are introduced, along with important considerations.

The quasi-deepwater wave requires both the inverse estimation of a design deepwater wave with setting an appropriate directional spreading parameter and the calculation of design waves on harbor facilities, considering wave transformation in shallow water. This study verifies the validity of properties of deep and shallow water waves inversely estimated with the quasi-deepwater wave condition with the results of extreme value statistical analyses on existing wave hindcasting data, which is used for estimating the quasi-deepwater waves. The results highlight the importance of careful setting of the directional spreading parameter for the design deepwater wave, as it can influence both the properties of the design deepwater wave and the design wave of harbor facilities calculated with the design deepwater wave condition. Furthermore, we propose a simple method with newly created calculation charts to estimate approximate offshore wave properties, which are used as initial values for the inverse estimation through repeated calculations of wave transformation.

Key Words: quasi-deepwater wave, pseudo-deepwater wave, design deepwater wave, deep sea, shallow water, wave simulation, wave hindcasting

* Head of Wave Group, Coastal Hydraulic Engineering Department

** Research trainee, Wave Group, Coastal Hydraulic Engineering Department (Ecoh Corporation)

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 E-mail : hirayama@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	90
1. はじめに	93
2. 浅海域で設定する沖波の提案	93
2.1 準沖波及び疑似沖波の導入	93
2.2 深海モデル及び浅海モデルによる波浪推算例	94
2.3 準沖波に対する沖波及び設計波の算定例	97
3. 逆推定された確率沖波諸元の妥当性検討	100
3.1 極値統計解析による確率沖波諸元の推定	100
3.2 準沖波諸元に対する沖波諸元の逆推定	105
4. 準沖波に対する沖波の簡易逆推定手法の提案	107
4.1 簡易逆推定手法の提案	108
4.2 簡易逆推定手法の検証	112
4.3 簡易逆推定ツールの作成	114
5. おわりに	116
謝辞	117
参考文献	117
付録A 準沖波地点、沖波地点及びNOWPHAS波浪観測地点の位置	117
付録B 方向集中度 S_{max} 推定式に関する検討	121
付録C 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較	127

1. はじめに

2018年の台風21号(Jebi)や、2019年の台風15号(Faxai, 令和元年房総半島台風)などの例にみられるように、近年、大型台風によって多くの港湾等で高波による被災が発生した。また、気候変動の影響による今後の波高増大も懸念されており、令和2年(2019年)度には港湾施設や海岸保全施設等に対する設計波及び設計沖波の点検・見直し作業が全国的に行われた。なお、本研究では、「施設の設計外力としての施設前面の波浪条件」を設計波と定義し、「設計波を算定するための沖側地点での波浪条件」を設計沖波(確率沖波)と定義する。設計沖波は、波浪観測結果または波浪推算結果を極値統計解析して得られる波高の極値分布に対し、所定の再現期間を当てはめることなどによって算出する。また、設計波は、設計沖波に対する施設前面までの波浪変形計算によって算出するが、設計沖波をもたらす気象場は一般に不明なため、波浪変形計算に入力する必要がある設計沖波の方向スペクトルを波浪観測や波浪推算で直接得ることは、ほぼ不可能である。なお、本稿においては、「設計波」を含め、沖からの波浪変形を受けた施設前面の波浪諸元を総称して「堤前波」と呼ぶ。このうち、設計沖波に対する堤前波を特に「設計波」として表記していることに留意されたい。

ここで、港湾・海岸保全施設における現在の設計体系において、設計沖波は深海域($h/L_0 \geq 0.5$)で設定するのが基本である。しかしながら、遠浅の海底地形や内湾に面する港湾等では、深海域が設計対象施設から遠く離れてしまい、設計沖波に設計対象施設沖の風場による波浪の発達が考慮されないことが懸念される。とはいえ、これまで波浪推算モデルの機能的な制約等もあり、浅海域であっても深海域とみなした(海底地形を考慮しない)波浪推算によって設計対象施設沖の設計沖波を(深海波として)疑似的に算出できていたため、上記の問題は顕在化していなかった。一方、近年では、計算機と波浪推算技術の発達により、浅海変形(海底地形)を考慮した波浪推算が高精度に実施されるようになった。しかし、このとき設計対象施設沖の浅海域($h/L_0 < 0.5$)で出力される波浪推算結果は厳密には沖波ではない(深海条件を満たさない)。したがって、このような浅海波浪推算技術を現在の設計体系に適切に導入するための新たな解決方法の提案が急務となっている。

そこで、本研究では、設計対象施設沖の浅海域で設定される沖波に準じる波を準沖波、浅海域を深海域とみなして疑似的に設定された沖波を疑似沖波、とそれぞれ呼ぶことを提案し、これらの新しい概念を導入する妥当性と

従来法との共通点・相違点について述べる。また、準沖波に対して沖から浅海域までの波浪変形計算を行い、従来の沖波及び対象施設の堤前波を算定する上での留意事項等について、できるだけ多くの具体的な事例を交えて示す。さらに、これらの波浪変形計算を適切に実施するために重要となる沖波諸元の逆推定について、繰り返し計算に要する労力を大幅に削減することを目的として、初期値としての沖波諸元の簡易推定手法を提案する。なお、本稿は平山ら¹⁾²⁾及び森谷・平山³⁾をもとに加筆を行ったものである。

2. 浅海域で設定する沖波の提案

2.1 準沖波及び疑似沖波の導入

(1) 準沖波及び疑似沖波の定義と概念

本研究で提案する、浅海域で設定する沖波としての準沖波及び疑似沖波の定義を表-2.1に示す。また、これらの詳細を以降に述べる。

深海域($h/L_0 \geq 0.5$, h/L_0 は沖波波長に対する相対水深)において観測または推算された沖波波高、またはそれらの極値分布に従う確率沖波波高は、一般に H_0 と表記される⁴⁾。これに対し本研究で新たに定義する準沖波(quasi-deepwater wave)は、図-2.1に示すように $0.1 \leq h/L_0 < 0.5$ の比較的深い浅海域において観測または推算された波浪とし、準沖波の波高またはその確率準沖波波高を H_{q0} と表記した。ここで、浅海域のうち $0.1 \leq h/L_0$ とした理由は、海底地形の変化により生じる浅水変形を代表的な波浪推算モデルで扱える線形な範囲に限るためである。また、少なくともこの範囲では水深による波高変化が比較的緩やかなため、ある程度粗い計算格子を用いた波浪推算でも

表-2.1 沖波、準沖波及び疑似沖波の定義

項目	沖波	準沖波	疑似沖波
英語名	deepwater wave	quasi deepwater wave	pseudo deepwater wave
水深波長比	$0.5 \leq h/L_0$	$0.1 \leq h/L_0 < 0.5$	$h/L_0 < 0.1$
波浪変形の有無*	なし(深海条件)	浅水変形(碎波なし), 屈折	なし(深海条件)
波高の記号	H_0	H_{q0}	H_{p0}

*波浪推算で考慮される波浪変形を指す。

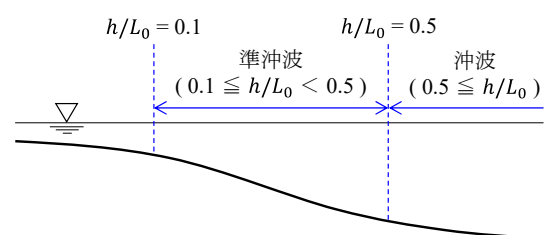


図-2.1 沖波と準沖波の位置関係

浅水変形が適切に算定できるものと期待される。なお、準沖波という名称は、「沖波」に準じる波として、沖波とは異なるものの同じく堤前波の算定に用いる波であることを明確に示すために用いた。

一方、港湾・海岸保全施設設計の実務においてはこれまで、波浪推算モデルの機能的な制約等により、浅海域であっても深海域とみなした（海底地形を考慮しない）波浪推算によって、設計沖波を疑似的に算定することが比較的多くみられた。本研究では、この方法で推算された沖波は疑似沖波（pseudo-deepwater wave）と呼ぶことを提案し、その波高または確率疑似沖波波高を H_{p0} と表記した。設計沖波の算定地点が実際には深海域でない場合、この定義によればこれらは疑似沖波に該当する。なお、開けた外洋では一般に、 H_{p0} は H_{q0} に対して逆推定された沖波波高にほぼ等しくなるものと思われる。

ところで、これらと同様に、堤前波の算定に用いる沖波として換算沖波波高 H_0' がよく知られている⁴⁾。この本来の定義は対象施設地点の屈折・回折係数を沖波波高 H_0 に乗じたものであるが、波浪変形計算などにより堤前波がすでに定まっている場合は、対象施設地点での浅水係数で堤前波高を除して得られる。このとき、換算沖波波高は一次元水路内の斜面上を伝播する前の仮想的な沖波として取り扱われ、沖波はもちろんのこと、平面波浪場を対象として堤前波を算定する準沖波や疑似沖波とは考え方が異なるため、注意されたい。

(2) 準沖波地点及び疑似沖波地点の要件

現在の設計体系において、設計波は設計沖波から浅海域での波浪変形を考慮して算出される⁵⁾。ここで、設計沖波は所定の再現期間（確率年）を有する確率沖波として想定される波浪諸元のみが与えられるため、その方向スペクトルを得るためにはある関数形を仮定しなければならない。我が国の港湾・海岸保全施設設計では一般に、周波数スペクトルにはブレットシュナイダー・光易型、方向関数には光易型が多く用いられている（以下、本研究では標準スペクトルと呼称）。また、方向集中度パラメータ S_{max} は、深海域では沖波波形勾配 H_0/L_0 に応じて設定される。したがって、設計沖波の設定地点はこれらの仮定が成り立つ海域に設けることが基本であり、一般に、表-2.2に示すような次の3つの要件を満たすことが求められる。すなわち、設定地点は「要件1：海底地形による屈折・浅水変形が生じない深海域に設けること」に加え、設定地点の波は「要件2：島や岬などの遮蔽物による回折・反射の影響を受けないこと」が求められる。また、設計で多く用いられる現行の波浪変形計算モデルでは対象施設までの伝播

表-2.2 設計沖波の設定地点が満たすべき要件

	要件	沖波	準沖波	疑似沖波
1	海底地形による屈折・浅水変形が生じない深海域に設けること	○	×	×
2	島や岬などの遮蔽物による回折・反射の影響を受けないこと	○	△	○
3	設定地点は対象施設のなるべく近傍の地点で設定されること	○	○	○

○：必要，△：任意，×：不要

過程で生じる風による波の発達は考慮されないため、「要件3：設定地点は対象施設のなるべく近傍の地点で設定されること」が望ましい。

ところが、遠浅地形や内湾に面する沿岸域では、港湾・海岸保全施設に対する設計沖波の設定においてこれらの3要件を完全に満足することは必ずしも容易ではない。そこで、（設計）沖波の設定では要件3の優先度を多少下げることもあり得ると考えられる。一方、（設計）疑似沖波では沿岸域を深海域とみなすことで要件1を除外している。この場合には、（設計）疑似沖波をもとに堤前波（設計波）を算定する浅海波浪変形計算は、（疑似沖波の設定地点からではなく）疑似沖波諸元を等価移動した深海域から開始される。これに対し、（設計）準沖波では浅海変形後の波浪をもとに堤前波（設計波）を算定することで要件1を除外する。この場合には、浅海波浪変形計算により（設計）準沖波から（設計）沖波が逆推定されるのと同時に堤前波（設計波）が算定される。また、この逆推定に回折等も考慮できる浅海波浪変形計算モデルを用いる場合には、遮蔽物の影響を受ける対象施設毎に準沖波の設定地点（準沖波地点）を設ける必要があるものの、準沖波では要件2を除外することも可能である。それゆえ、表-2.2中では△：任意としている。さらに、表-2.2に示す通り、疑似沖波の設定地点（疑似沖波地点）はそのまま準沖波地点とすることも可能である。

2.2 深海モデル及び浅海モデルによる波浪推算例

設計沖波（設計準沖波、設計疑似沖波）の設定に用いる波高の極値分布を（観測データによらず）得るためには、複数の代表擾乱に対する波浪推算で得た極値データを極値統計解析することが必要である。しかし、最適極値分布の推定では、極値データの抽出方法や censoring に用いる足切り値の設定方法などの影響を受ける。さらに、実在しない波浪であるために、確率波として得られた沖波、疑似沖波あるいは準沖波の波浪諸元を相互に比較し、それらの妥当性を定量的に議論するには未だ課題が多い。そこで、これらの検討は次章に譲ることとし、本節では、確率波ではなく実在した代表擾乱に対する沖波、疑似沖波

及び準沖波の波浪推算結果に着目して、これらの関係や観測結果に対する推算精度、及び算定結果の妥当性について考察した。

ここでは、2.1(1)で述べた定義に従い、深海域での観測波浪や深海モデル（及び浅海モデル）による深海域での波浪推算結果を沖波、浅海域での観測波浪や浅海モデルによる波浪推算結果を準沖波、及び、浅海域における深海モデルでの波浪推算結果を疑似沖波と呼ぶこととする。また、これらの検討には、令和2年度に国土交通省東北地方整備局により浅海モデルで算定された、日本海または太平洋に面する東北地方の14港湾域に対する波浪推算結果と準沖波諸元の算定結果⁶⁾を借用するとともに、一部の海域では深海モデルによる波浪推算結果を追加して用いた。具体的には、図-2.2に示す能代港を含む秋田県沖の海域を対象として、沖波、疑似沖波及び準沖波の波浪推算結果の関係及び波浪観測データによる検証結果を例示する。

(1) 波浪推算の概要

海上風は、陸上地形の影響を考慮することができる局地気象モデル WRF（Weather Research and Forecasting）を用いて算出されている。WRF の最小計算格子幅は 4.05km であり、初期値・境界条件には気象庁 GPV データ（JRA-55：気象庁 55 年長期再解析）に台風ボーガスを投入したものが使用されている。

波浪推算には、第三世代波浪推算モデルの WWIII（WAVEWATCH III）が適用されている。WWIIIは「港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成 30 年版」（以下、本

表-2.3 波浪推算の設定条件

項目	設定値	備考
周波数分割数	35	0.04118Hz(24.3s)～1.1573Hz(0.86s)
方向分割数	36	10°刻み
生成項	ST3	WAM Cycle4と同等のモデル
浅海条件	考慮	浅水変形と屈折が考慮される
地形性碎波	なし	碎波減衰は考慮しない
β_{max}	1.35	無次元発達係数(デフォルト値=1.20)

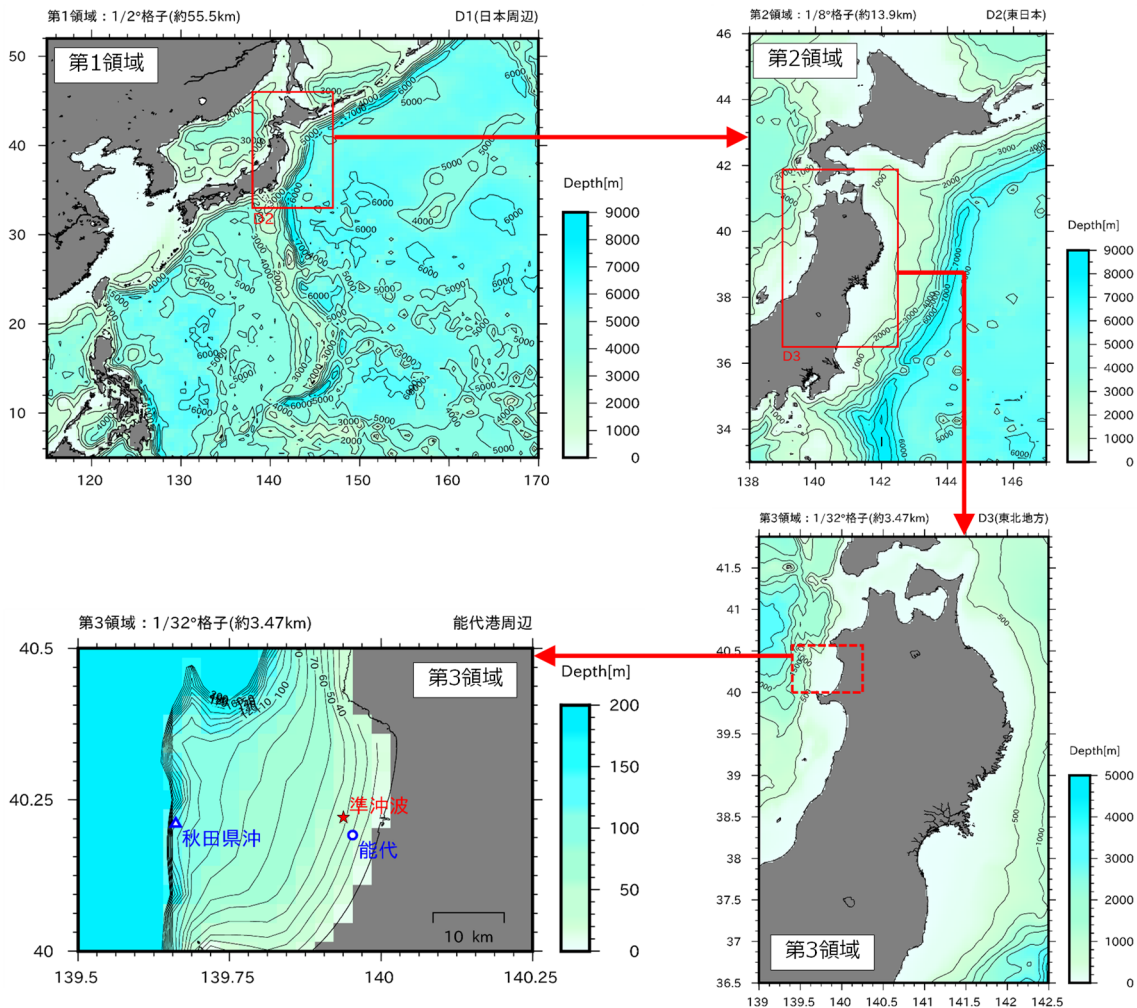


図-2.2 波浪推算の計算領域と能代港沖の波浪観測地点、及び準沖波または疑似沖波の設定地点

研究では技術基準と呼称)において周期やうねりの推算精度が高いモデルとして紹介されている⁷⁾。計算領域は図-2.2に示す3段階ネスティングで、第1領域(1/2°格子≒55.5km)は東経115~170°, 北緯5~52°, 第2領域(1/8°格子≒13.9km)は東経138~147°, 北緯33~46°, 及び第3領域(1/32°格子≒3.47km)は東経139~142.5°, 北緯36.5~41.875°の範囲である。計算条件は表-2.3に示す通り、周波数分割数は35(0.04118Hz(24.3s)~1.1573Hz(0.86s)), 方向分割数は36(10°刻み)とし、生成項モデルにはST3(デフォルト値)が採用された。また、浅海条件(浅水変形と屈折変形)が考慮され、地形性砕波なし、無次元発達係数 β_{max} は対象海域の最適値として1.35が設定された。これらの設定は第1~3領域で共通であるが、疑似沖波と比較するため深海条件(水深9999mで一定)でも推算を実施した。なお、本節で取り上げた対象擾乱は2011~2019年の9年間に秋田県沖で出現した代表11擾乱である。

(2) 代表擾乱での準沖波及び疑似沖波の推算結果

図-2.2に示す通り、能代港の準沖波(または疑似沖波)地点は能代港の沖合約5km地点(水深43m)に設定した。この場合、 $0.1 \leq h/L_0$ の範囲に該当する周期は16.6s未満となるが、代表11擾乱に対するこの地点での推算周期は最大で12.9sであるため、2.1(1)項で述べた準沖波の定義を満たしている。また、同じく図-2.2より、2.1(2)項で挙げた沖波地点の3つの要件のうち要件2, 3も満たすと判断されるため、浅海条件における推算結果は準沖波(または深海条件における推算結果は疑似沖波)とみなして差し支えない。これらの推算結果を図-2.3に示す。ここで、図中に示した切片ゼロの一次式の傾きは回帰係数を示し、 R は相関係数、 n はデータ数である。

(3) 代表擾乱に対する沖波及び準沖波の推算精度

図-2.2に示す秋田県沖及び能代にはそれぞれ、GPS波浪計(NOWPHAS:水深104m)及び海象計(水深27m)で取得された代表11擾乱に対する波浪観測データが存在する(ただし、能代では1擾乱で欠測)。そこで、これらの地点においてそれぞれ深海条件または浅海条件による波浪推算結果を出力し、観測波高及び周期と比較した。結果を図-2.4に示す。ここで、図中に示したRMSEは二乗平均誤差を示す。

浅海条件による推算値は秋田県沖及び能代で波高・周期ともに観測値と良く一致し、相関係数は0.95~0.99、観測値に対する推算値の回帰係数は0.97~1.04であった。また、これらを極値データとして捉えた場合には、観測値による推算値の補正は実務上必要ないレベルにあると言

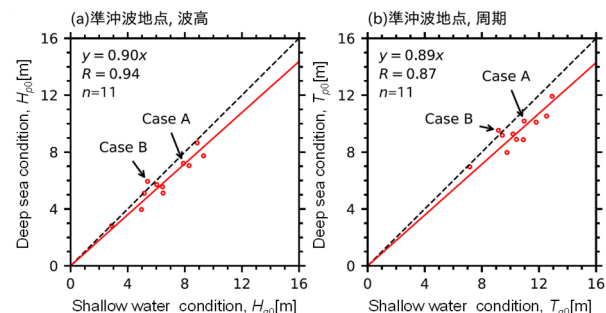


図-2.3 準沖波及び疑似沖波の推算結果(代表11擾乱)

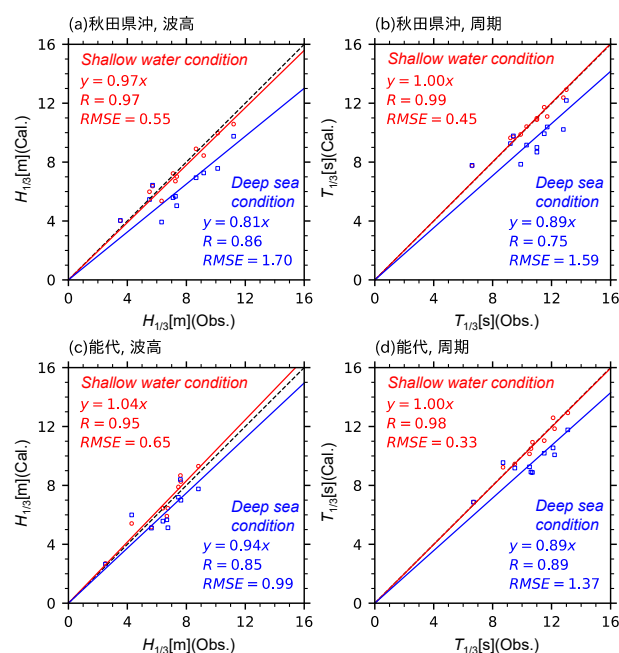


図-2.4 秋田県沖と能代における深海条件と浅海条件の波浪推算結果の検証(上段:秋田県沖, 下段:能代, 左側:波高, 右側:周期)(赤線は浅海条件, 青線は深海条件の回帰式)

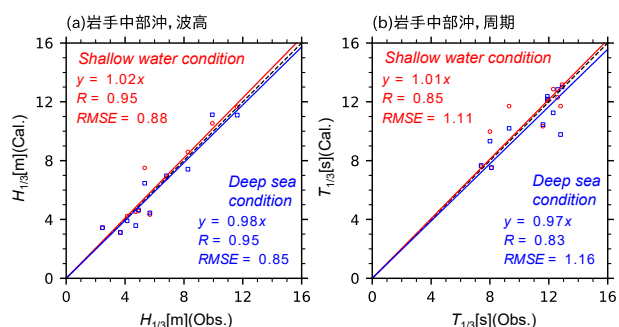


図-2.5 岩手中部沖における深海条件と浅海条件の波浪推算結果の検証(左側:波高, 右側:周期)(赤線は浅海条件, 青線は深海条件の回帰式)

える。一方、深海条件による推算値は波高・周期ともに観測値を過小評価し(回帰係数:0.81~0.94)、観測値との相

関係数 (0.75~0.89) も浅海条件に比べ低下した。このうち、少なくとも周期 6s 以上の波に対して浅海域となる能代での観測値に対し、深海条件による波浪推算精度が低下することは容易に理解できる。しかし、少なくとも 11s 未満の波に対して深海域となる秋田県沖で深海条件による波浪推算精度が低下することは想定外であった。この原因についてはいまのところ不明であるが、図-2.5 に例示するように、太平洋側の岩手中部沖ではそのような差は見られなかった。したがって、日本海側でこのような現象がみられた原因としては、例えば、日本海の海底地形が風による波の発達に寄与したこと等が考えられる。なお、松藤ら⁸⁾は、うねり性波浪を対象とした波浪推算では隣接する海域で生じた屈折変形が対象海域での推算結果に影響を与えることを例示し、浅海条件を考慮する必要性を指摘している。今回の検討結果は、風波についても浅海条件を考慮する必要性を示唆している点で大変興味深い。

2.3 準沖波に対する沖波及び設計波の算定例

準沖波に対する堤前波は、波浪変形計算を繰り返し行い、準沖波地点の波浪諸元を再現する入射波諸元 (深海域の沖波諸元) を逆推定すると同時に算定される。したがって、逆推定された沖波がその地点での波浪推算結果とよく似ていることは、同時に準沖波に対し算定された堤前波の妥当性を示している。ここでは、能代港沖での 2 つの代表擾乱を事例に、準沖波を用いて堤前波を算定する波浪変形計算の方法や留意事項について具体的に示す。

(1) 準沖波の波浪変形計算に用いる計算領域

図-2.6(a) に示す計算領域 (入射 1) は、浅海域における沖波の波浪変形計算において一般的に用いられる計算領域である。このとき、沖合の深海域に設定した入射境界には、深海域で観測または推算された方向スペクトル、あるいは沖波の有義波諸元に対する関数方向スペクトル (標準スペクトル) を一様に与え、岸に向かう波の伝播計算を実施する。一方、準沖波を対象とした波浪変形計算では、準沖波の方向スペクトルは深海域で定義される沖波の方向スペクトルが浅海域で変形した結果としてのみ得られ、かつその様子は沿岸方向に隣接した地点毎に異なるため、準沖波に対し従来の計算領域 (図-2.6(a) : 入射 1) をそのまま適用することはできない。

そこで、準沖波に対する波浪変形計算は、図-2.6(b) に示す計算領域 (入射 2) を用い、海底地形の影響をすでに受けた波浪であることを考慮して深海域から開始し、準沖波地点の波浪諸元を再現するように入射波諸元 (深海域での沖波諸元) を繰り返し計算により逆推定すること

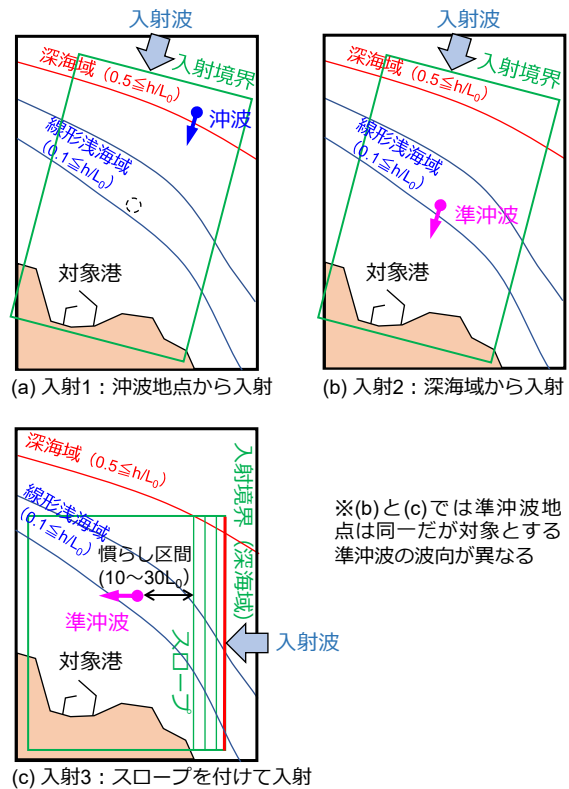


図-2.6 波浪変形計算に用いる計算領域の模式図

が基本である。さらに、図-2.6(c) に示す通り、準沖波の波向が沿岸地形に沿うような場合には、入射境界を実地形の深海域に設けて準沖波諸元を再現する入射波諸元を逆推定することが困難となる状況は想像に難くない。したがって、内湾に設定した準沖波なども含め、実地形の深海域から計算を開始すると適切な入射波諸元を逆推定できない場合には、図-2.6(c) に示す計算領域 (入射 3) のように、準沖波地点の沖に設けた入射境界が深海域となるよう水深を改変することもやむを得ない。この場合には、準沖波地点に至るまでの距離 (慣らし区間) に余裕を持たせて実地形への擦りつけスロープを設定し、深海域から準沖波地点に至る波浪変形を適切に想定する必要がある。具体的には、以降の検討結果を踏まえ、スロープ勾配は 1/10、慣らし区間距離は 10~30 L_0 が適当と思われる。

(2) 代表擾乱の準沖波に対する波浪変形計算

図-2.3 に示す準沖波の波浪推算結果のうち、表-2.4 に示す代表 2 擾乱の波浪変形計算を実施し、堤前波を算定した。図-2.7 に計算領域及び堤前波の算定地点を示す。

波浪変形計算にはエネルギー平衡方程式法を使用し、方向分割数は 36、周波数分割数は 15 とした。いずれも深海域から入射する沖波のスペクトル形として標準スペクトルを仮定し、表-2.4 に示す擾乱の方向集中度パラメー

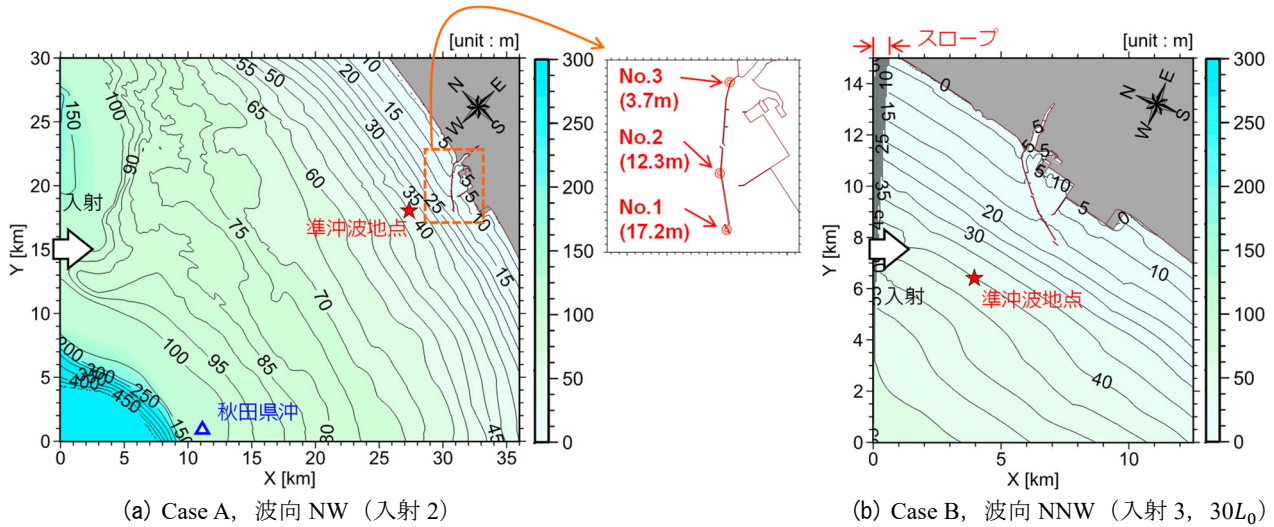


図-2.7 能代港の波浪変形計算領域

表-2.4 波浪変形計算の検討ケース

Case	準沖波地点 ^{※1} (波浪推算値)			沖波地点 (上: 逆推定, 下: 波浪推算値 ^{※2})		
	H_{q0} [m]	T_{q0} [s]	θ_{q0} ^{※3} [°]	H_0 [m]	T_0 [s]	θ_0 ^{※3} [°]
A	7.90	11.0	304.5 (NW)	8.74 (8.45)	11.3 (11.1)	307.5 (312.1)
B	5.39	9.2	329.0 (NNW)	5.71 (6.37)	9.3 (9.7)	330.9 (344.9)

※¹準沖波地点は能代港を指す。

※²波浪推算値の沖波地点は秋田県沖を指す。

※³波向は北を0°, 右回りを正とする。

タは沖波波形勾配を考慮し $S_{max}=10$ とした。また、施設前面の換算沖波波高 H_0' を算出するため、非碎波とした。

a) 入射境界を深海域に設けることが可能な場合

図-2.6(b)に示す計算領域(入射 2)は、準沖波地点と堤前波の算定地点をともに含むだけでなく、沖波の来襲経路に沿って実在する海底地形を沖へと辿り、入射境界がすべて深海域に含まれるように設定する。表-2.4に示す Case A の波浪諸元(特に、主波向の波向線と等深線の垂線が成す角度 α_p が 45° 未満($\alpha_p < 45^\circ$)で入射して岸へと伝播する場合)では、図-2.7(a)に示す計算領域が設定される。準沖波を対象とした波浪変形計算では、まずはこのような計算領域を設定できないか検討すべきである。

次に、深海域から入射する標準スペクトルの波浪諸元は準沖波諸元とは異なるため、計算領域内の準沖波地点で Case A の準沖波諸元が再現されるよう、繰り返し計算することで入射波(沖波)の波浪諸元を逆推定する。本研究では、このとき許容する準沖波地点での誤差を、各変数での有意な有効桁数を踏まえ、波高 0.01m 以内、周期 0.1s 以内、波向(卓越波向) 1° 以内と設定した。このように推定した沖波地点での周波数スペクトル及びピーク周波数

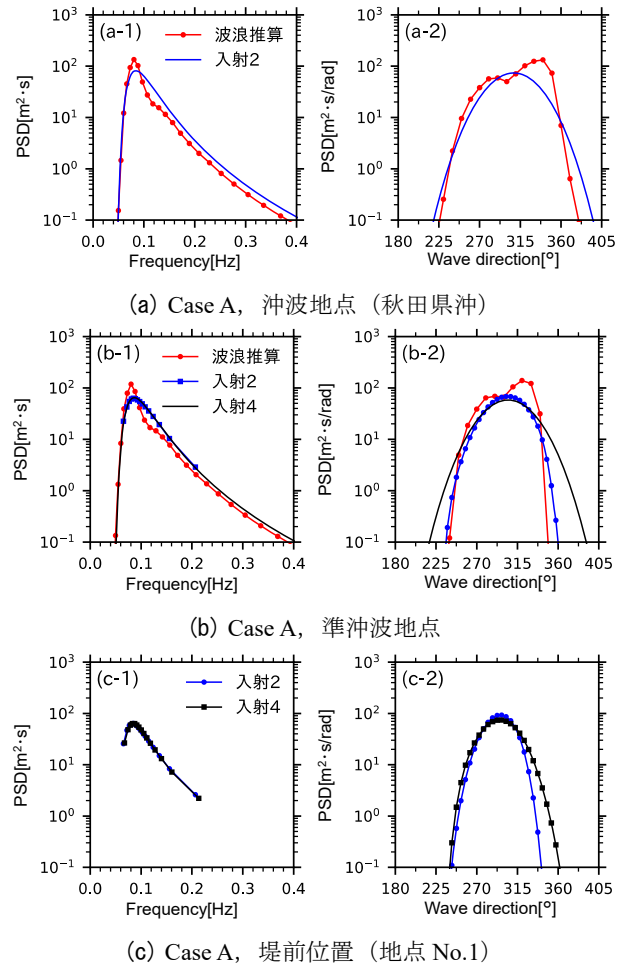


図-2.8 Case A の波浪推算結果と波浪変形算定結果の比較 (-1: 周波数スペクトル, -2: ピーク周波数の方向分布) (PSD: スペクトル密度)

での方向分布を、秋田沖での Case A の推算スペクトルと重ねて図-2.8(a)に示す。いずれも、準沖波から逆推定さ

れた沖波スペクトルは推算スペクトルに比較的良好一致している。また、これらの沖波諸元を示した表-2.4 (Case A)において、波高・周期は若干過大であるが両者は比較的良好一致していることから、逆推定された沖波諸元の妥当性が確認される。なお、検討ケースは限られるものの、波高と周期にみられる僅かな差は、沖波地点と準沖波地点間の波の発達による影響を含むものと考えられる。

また、沖波諸元の逆推定と同時に得られる準沖波地点、及び図-2.7(a)に示す堤前位置のうち地点 No.1 での算定スペクトルを、それぞれ図-2.8(b), (c)に示す。ここで、これらの図では比較のために、準沖波を仮に沖波とみなして得られる標準スペクトルとその変形計算結果（入射 4：沖波諸元の逆推定を行わず、準沖波地点近くの浅海域に設定した入射境界から準沖波を直接入射させた場合）を重ねて示した。準沖波地点の周波数スペクトル（図-2.8(b-1)）について、逆推定された沖波スペクトルに対する算定結果（入射 2）は、同じ波浪諸元を有する標準スペクトル（入射 4）とほぼ重なり、波浪推算結果とも比較的良好一致している。沖に島や岬などの遮蔽物のない能代港では、波向に応じ、うねりに対しては相対水深が比較的良好浅い海脚地形での屈折変形に注意を要するものの、深海域から準沖波地点に至る波浪変形において沖波周期の変化は比較的良好小さいことが想定される。一方、方向分布（図-2.8(b-2)）について、算定結果（入射 2）は波エネルギーが S(180°)側へ偏る傾向も含めて波浪推算結果と比較的良好一致するが、 $S_{max}=10$ とした標準スペクトル（入射 4）とは明確な違いがみられた。したがって、逆推定した沖波を用いることにより、準沖波地点（及びその近傍の浅海域）に対して深海域からの屈折変形（ S_{max} の変化）を適切に考慮できることが確認された。加えて、このとき同時に算定される堤前位置（地点 No.1）でのスペクトルの方向分布（図-2.8(c-2)）も準沖波の標準スペクトルに対する算定結果（入射 4）とはやや異なることから、堤前波の算定において、入射スペクトルの形状を正しく与えることの重要性が確認できる。なお、その他の地点を含む堤前波諸元の算定結果を表-2.5 (Case A)に示す。

b) 入射境界を深海域に設けることが困難な場合

入射 2 の計算方法において、入射境界を深海域に設けることが困難な地形（遠浅な海底地形や内湾域）または波向（主波向の波向線と等深線の垂線が成す角度 α_p が 45° 以上（ $\alpha_p \geq 45^\circ$ ）となり極端な屈折変形が想定される場合）では、図-2.6(c)に示す計算領域（入射 3）を設定する。すなわち、表-2.4 に示す Case B の波浪諸元では、図-2.7(b)の計算領域が設定される。ここで、深海域から実地形に擦りつけるスロープの勾配は、入射波の反射が生じ

表-2.5 堤前波の算定結果

Case	計算方法 (慣らし区間)	No.1		No.2		No.3	
		H_0' [m]	θ_{in}^* [°]	H_0' [m]	θ_{in} [°]	H_0' [m]	θ_{in} [°]
A	入射2	8.00	10.2	7.97	8.5	8.76	43.2
	入射4	7.95	10.4	8.03	7.5	8.93	42.0
B	入射2 (30 L_0)	5.12	26.1	5.09	5.3	5.03	35.5
	入射3	5.11	29.1	5.15	9.1	5.29	31.7
	入射4	5.32	31.2	5.47	12.1	5.53	27.5

*入射波向を表し、直交入射を 0° とする。

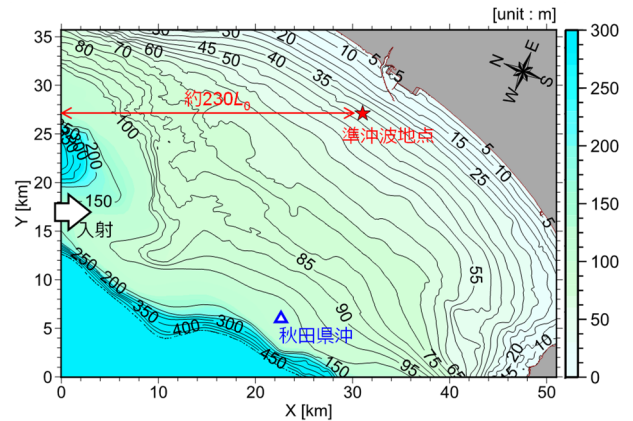


図-2.9 能代港の波浪変形計算領域 (Case B, 波向 NNW (入射 2))

ないようにブシネスクモデルで用いられる方法にならないよう $1/10$ に設定した。また、仮想的に設けたスロープにより生じる波浪変形を実地形上での現象へと移行させるために設ける慣らし区間の距離は、以下に述べる検討結果を踏まえ本研究では $30L_0$ とした。

まず、比較のために Case B の準沖波諸元に対し、Case A と同様に入射 2 の計算方法に対応した計算領域を図-2.9 に示すように設定し、波浪変形計算を実施して入射波（沖波）の波浪諸元を逆推定すると同時に、図-2.7(a)に示す位置で堤前波を算定した。ただし、入射 3 の慣らし区間に相当する入射境界から準沖波地点までの距離は約 $230L_0$ にもなり、入射 3 に比べ多大な計算労力を要した。

次に、図-2.10 に示すように慣らし区間距離を $10\sim 50L_0$ 毎に変えた計算領域 ($30L_0$: 図-2.7(b)を含む)を設定し、Case B の準沖波諸元に対し入射 3 の計算方法を適用して、入射 2 と同様に堤前波を算定した。入射 2 で算定された堤前波の換算沖波波高及び入射波向に対する、入射 3 での各算定結果との差をそれぞれ $\Delta H_0'$, $\Delta \theta_{in}$ と定義し、前者についてはさらに準沖波波高 H_{q0} で割り戻してパーセント表示したものを、図-2.11 に示す。図より、慣らし区間の距離が長くなるにつれて堤前波の算定誤差が減少する

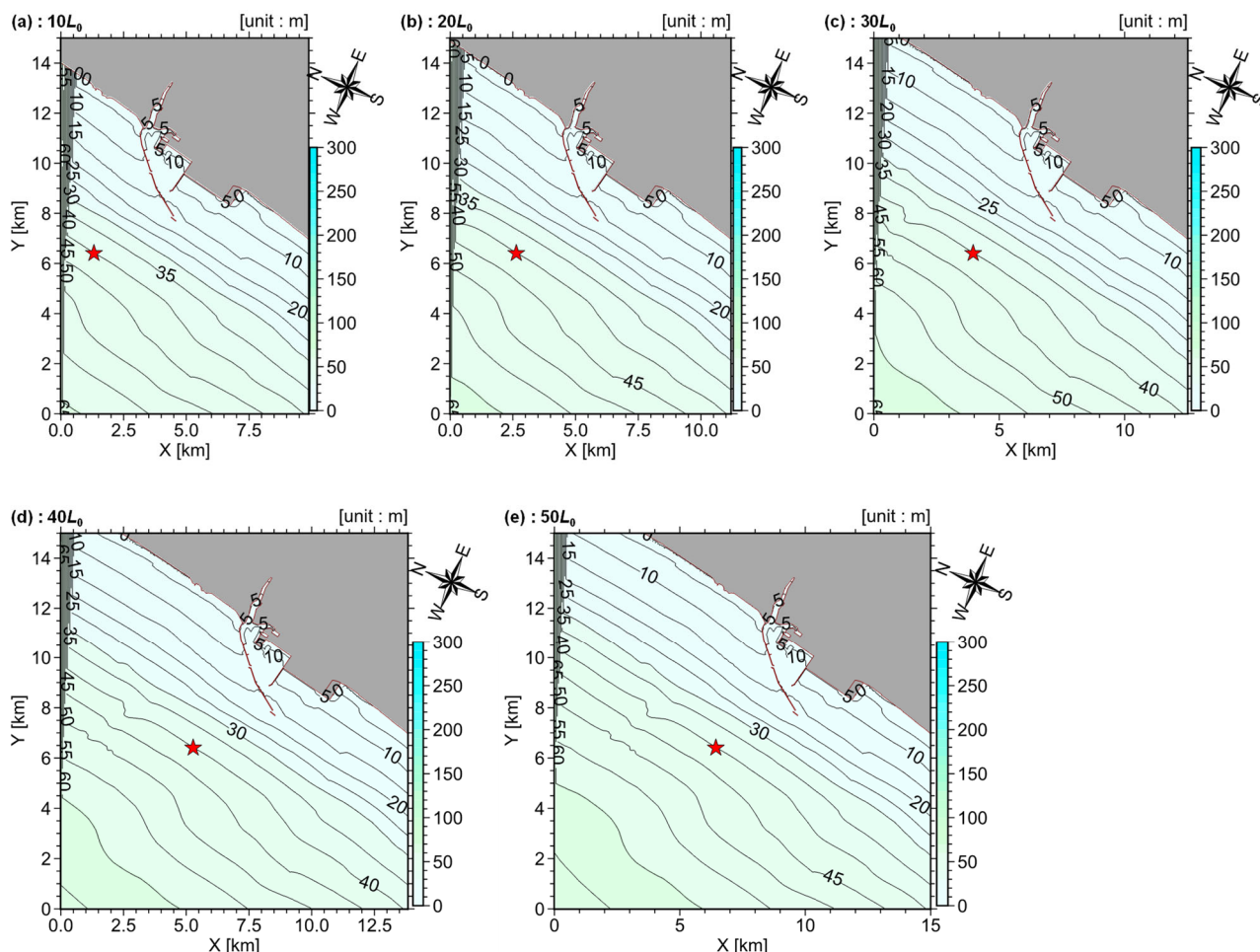
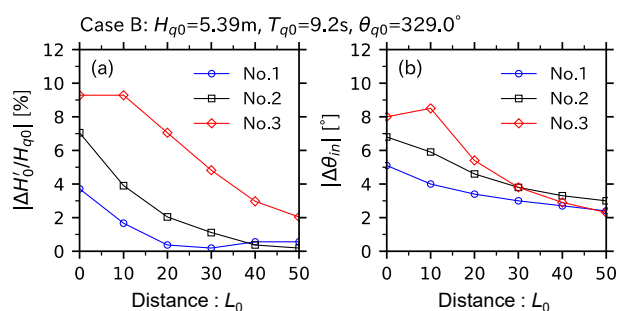

 図-2.10 Case B における慣らし区間距離 10~50 L_0 毎の波浪変形計算領域（入射 3）


図-2.11 Case B における慣らし区間距離と堤前波の算定誤差の関係（堤前波位置は図-2.7(a) 参照）

傾向が確認されるものの、波高の算定誤差を 5% 程度に抑えるために必要な距離は堤前波の算定位置によって異なり、0~30 L_0 程度であることがわかる。なお、慣らし区間の距離を 30 L_0 として入射 3 の計算方法により逆推定された沖波諸元を表-2.4 (Case B) に、堤前波の算定結果を入射 2 及び入射 4 の計算結果とともに表-2.5 (Case B) に示す。表-2.4 において、Case A に対して実施した入射 2 とは異なり、Case B に対して入射 3 で逆推定された沖波諸

元は推算値に比べ過小であった。しかし、表-2.5 より、深海域からの屈折変形を考慮することで、入射 3 による堤前波の算定結果は入射 2 と比較的良好に一致することが確認できる。

3. 逆推定された確率沖波諸元の妥当性検討

3.1 極値統計解析による確率沖波諸元の推定

準沖波地点の設定例として図-3.1 に、日本海に面する酒田港沖、及び太平洋に面する八戸港沖の準沖波地点を、周辺の海底地形とともに示す。いずれも準沖波地点は沿岸波浪計地点の近くか、若干沖に位置する地点を設定している。また、準沖波との関係を検討するために独自に設定した沖波地点は、準沖波地点から 20~40km 程度沖に位置している。したがって、沖波地点から準沖波地点まで伝播する間に風浪が発達する可能性は十分考えられる。なお、本研究で対象とした東北地方の 14 港湾域のうち残りの港湾域における準沖波地点、沖波地点の位置及び海底地形図は、まとめて付録 A に示す。

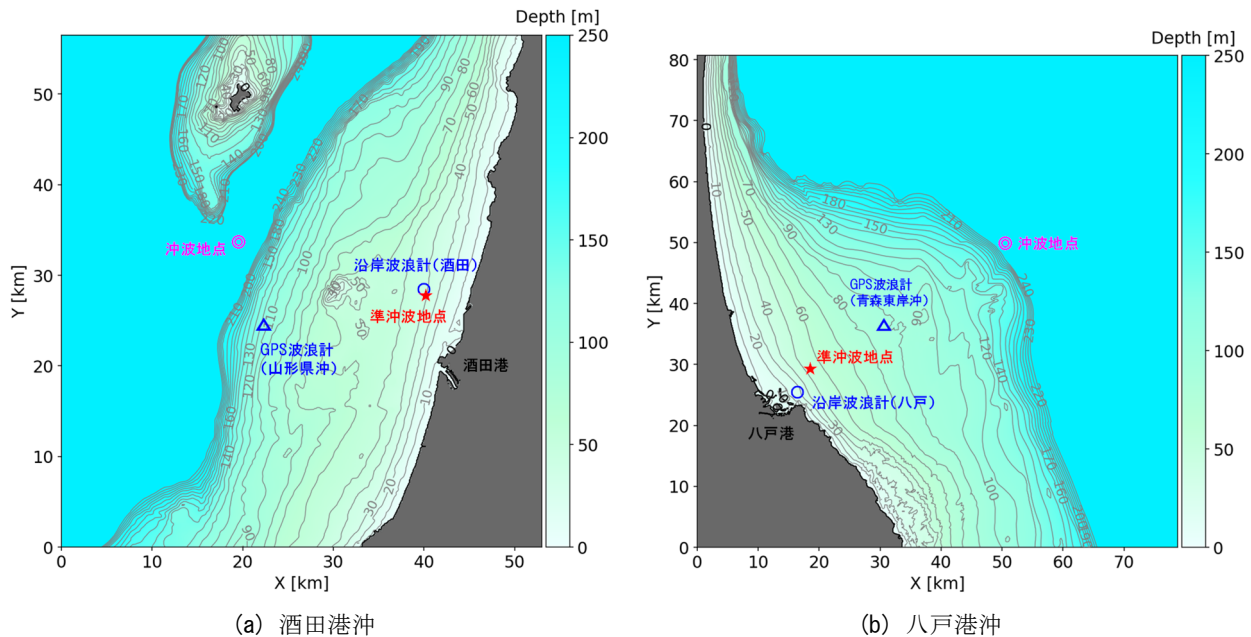


図-3.1 酒田港沖及び八戸港沖の陸地・海底地形と準沖波地点，沖波地点，GPS 波浪計地点，沿岸波浪計地点の位置関係

(1) 波浪推算結果の活用

2 章では実在した代表擾乱に対する準沖波の波浪推算結果に着目し，観測データと比較して沖波（及び疑似沖波）の推算精度を検証するとともに，準沖波に対して逆推定，算定された沖波及び堤前波の妥当性を検討した．これに対し本章では，確率波として得られた沖波及び準沖波の波浪諸元を比較し，それらの妥当性を検証する．また，沖波の逆推定と同時に算定される NOWPHAS 波浪観測地点（GPS 波浪計，沿岸波浪計）での確率波諸元に対しても同様の検証を行い，極値統計解析に用いた極値データの波浪推算精度を確認した．確率波を算定するうえで必要となる複数の代表擾乱に対する波浪推算結果には，2 章と同様，東北地方の 14 港湾域に対する準沖波諸元の推定結果及びこれらの推定に用いた波浪推算結果⁹⁾を借用した．なお，本章で取り上げる対象擾乱は 1970 年から 2019 年に東北地方に来襲した 520 擾乱である．

a) 極大値の抽出と波浪推算精度の検証

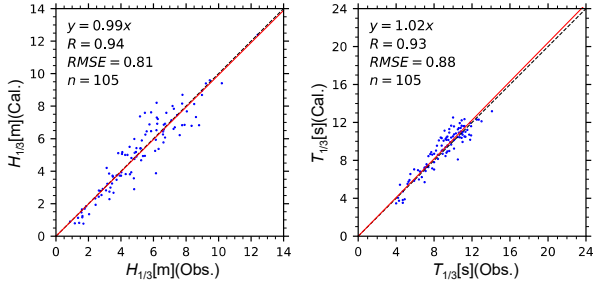
本研究では，対象とした 14 港湾域の準沖波地点にならない，沖波 13 地点（うち，1 地点は 2 港湾域で共通），沿岸波浪計 12 地点，GPS 波浪計 10 地点での波浪推算結果を 20 分毎に新たに出力して，波向毎に波高の極大値を抽出した．このとき，高波の抽出基準には，確率準沖波が推定されたときと同様に，足切り値による censoring を兼ねて波向別の波高の年最大値の最小値を用いた（したがって本研究では，抽出された高波擾乱の極大値資料はすべて極値統計解析に用いられるため，データ採択率は 1 である．一方，年数回程度発生すると思われる港湾域毎の高波

擾乱数は不明であるため，これらの極大値資料に対するデータ採択率は算定されないことに注意されたい）．

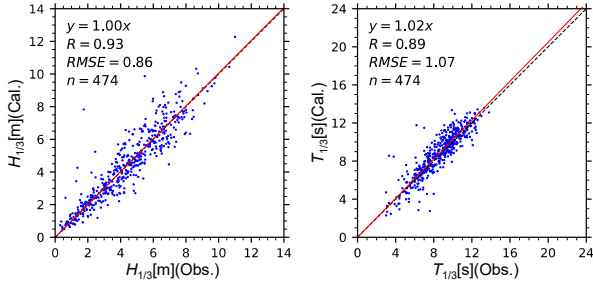
一方，酒田港沖及び八戸港沖では，沿岸波浪計による 20 分毎の連続波浪観測がともに 2006 年から，GPS 波浪計による観測は山形県沖では 2011 年，青森東岸沖では 2009 年からそれぞれ開始されている．そこで，波向に関係なく，各地点で観測された対象擾乱の極大値を波浪推算値と比較した結果をそれぞれ図-3.2 及び図-3.3 に示す．ここで，図中に示した切片ゼロの一次式の傾きは回帰係数を示し， R は相関係数， $RMSE$ は二乗平均誤差を示す．また， n はデータ数である．これらの図より，有義波高・周期ともに，海域や水深の違いによらず，推算結果は観測結果を非常によく再現していることが確認できる．したがって，これらの NOWPHAS 波浪観測地点はもちろん，対応する沖波地点及び準沖波地点の波浪推算結果をもとに推定される確率波諸元は，ともに信頼し得るものであると判断される．

b) 沖波地点における方向集中度 S_{max} の推定

沖波は多方向波として定義されるため，沖波諸元には波高，周期，波向に加え方向集中度パラメータ S_{max} も含まれる． S_{max} 値の設定は通常，表-3.1 に示す推奨値⁹⁾を用いることや，合田・鈴木⁹⁾による方向集中度と波形勾配の関係図から設定することが一般的である．しかし，これらの適用条件は，周辺地形の影響を受けない開けた海域において，海底地形の影響を受けない深海域を伝播する海洋波に限られると思われる．特に，沿岸地形に沿う波向や島や岬の遮蔽域，及び内湾域では成分波の波向が限定さ

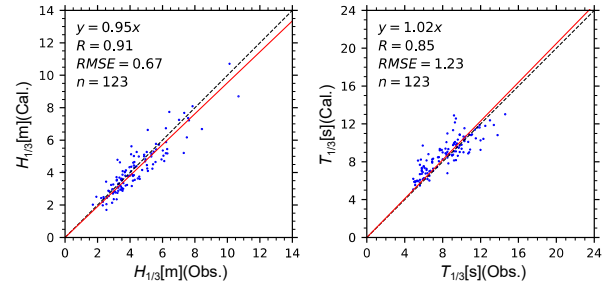


(a) GPS波浪計地点（左：有義波高，右：有義波周期）

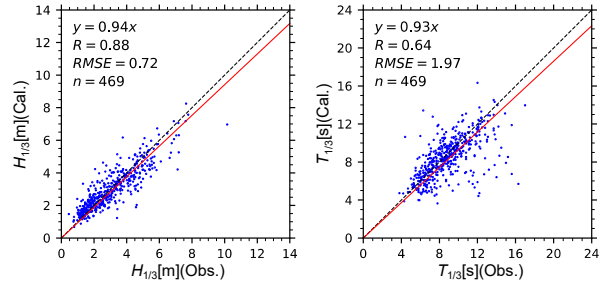


(b) 沿岸波浪計地点（左：有義波高，右：有義波周期）

図-3.2 酒田港沖での極大波の推算値と観測値の比較



(a) GPS波浪計地点（左：有義波高，右：有義波周期）



(b) 沿岸波浪計地点（左：有義波高，右：有義波周期）

図-3.3 八戸港沖での極大波の推算値と観測値の比較

 表-3.1 方向集中度パラメータ S_{max} の推奨値

風波	$S_{max}=10$
減衰距離の短いうねり(波形勾配が比較的大)	$S_{max}=25$
減衰距離の短いうねり(波形勾配が小)	$S_{max}=75$

れるため、 S_{max} 値が増大することが予想される。したがって、沖波地点の位置及び波向と沿岸地形の関係によっては、従来の推奨値では S_{max} を過小評価する恐れがあり、過小な S_{max} 値に対して逆算された沖波波高は異常に大きな値をとることがあるため、注意が必要である。

そこで、逆推定時に設定する S_{max} 値の参考とするために、擾乱時の極値データが得られた時刻を対象に方向スペクトルに基づく各時刻の S_{max} 値を算定し、同時刻の波形勾配 H_0/L_0 との関係から地点別・波向別の S_{max} 推定式を作成した。なお、方向スペクトルに基づく S_{max} 値はピーク周波数に対するスペクトルモーメントから算定した。具体的には Longuet-Higgins¹⁰⁾により定義された波の方向集中度あるいは波峯の長さ(long crestedness)の指標であるパラメータ γ を用いて以下の式より求まる。

$$\gamma = \left\{ \frac{(M_{20} + M_{02}) - \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}}{(M_{20} + M_{02}) + \sqrt{(M_{20} - M_{02})^2 + 4M_{11}^2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$M_{pq} = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) \cos^p \theta \sin^q \theta df d\theta \quad (2)$$

ここで、 γ : long crestedness パラメータ（波峰長パラメータ）、 M_{pq} : 方向スペクトルのモーメント

$$a = 1 \quad (3)$$

$$b = 1 - \frac{2}{\gamma^2} \quad (4)$$

$$c = 1 - \frac{1}{\gamma^2} \quad (5)$$

$$s1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (6)$$

$$s2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

$$S_{max} = \max(s1, s2) \quad (8)$$

酒田港沖及び八戸港沖における代表波向での結果を図-3.4に示す。ここで、プロットは×が風波を、○がうねり性波浪を表し、色分けはスペクトル形状パラメータ $\kappa(T_{01})$ ¹¹⁾の値に対応している。図中の R^2 は決定係数を示す。また、図中の緑色点線及び式(9)で表されるこれらの近似式の係数 a, b の値を港湾・波向別に表-3.2に示す。なお、図中に示す青色実線及び表中の H_0/L_0 は後述する極値統計解析により得られる確率沖波の波形勾配を表し、表中の S_{max} 値はこれを式(9)に代入して得たものである。

$$S_{max} = a \ln(H_0/L_0) + b \quad (9)$$

なお、本研究で対象とした東北地方の14港湾域のうち残りの港湾域における関係図及び係数 a, b の値は、まとめて付録Bに示す。

図中に灰色実線で示す従来の関係⁹⁾に比べ、式(9)では波形勾配がある程度大きくても S_{max} 値はさほど小さくな

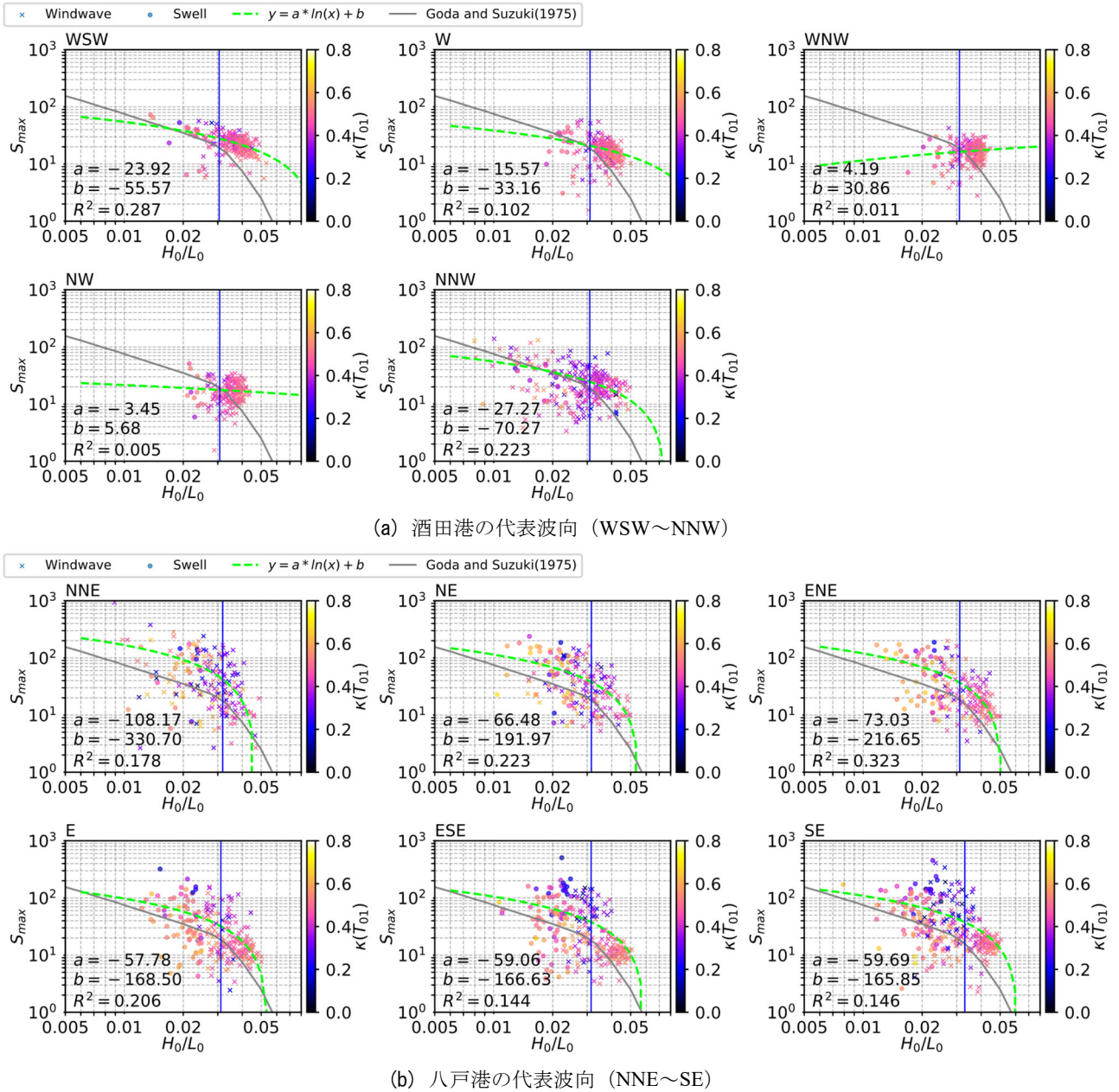

 図-3.4 酒田港及び八戸港沖波地点での波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係

表-3.2 酒田港沖及び八戸港沖で得られた近似式(1)の係数値

港湾	波向	a	b	H_0/L_0	S_{max}
酒田港 (沖波地点)	WSW	-23.9	-55.6	0.0305	28
	W	-15.6	-33.2	0.0310	21
	WNW	4.2	30.9	0.0310	16
	NW	-3.4	5.7	0.0307	18
	NNW	-27.3	-70.3	0.0309	25
八戸港 (沖波地点)	NNE	-108.2	-330.7	0.0318	42
	NE	-66.5	-192.0	0.0315	38
	ENE	-73.0	-216.6	0.0311	37
	E	-57.8	-168.5	0.0311	32
	ESE	-59.1	-166.6	0.0314	38
	SE	-59.7	-165.8	0.0330	38

らないことがわかる。特に、図-3.4(b)に示す八戸港の波向 NNE において、一部の波向成分が沿岸地形による遮蔽の影響を受け易いことから、概ね $H_0/L_0=0.04$ 以下の S_{max} 値は、従来の関係または表-3.2の係数とともに式(9)から得られる同港の他の波向のものに比べ、全体的に大きいことを確認した。一方、少なくともこれらの例では $\kappa(T_{01})$ 値と S_{max} 値との間に明瞭な関係は認められない。しかし、日本海側の酒田港に比べ太平洋側の八戸港ではスペクトルの尖り具合のばらつきが目立つようになり、かつ H_0/L_0 が小さいほど $\kappa(T_{01})$ 値が1に近く尖り易いことがわかる。これは、八戸港などの太平洋側の各港湾では、波浪スペクトルにうねり成分がより多く含まれるためと考えられる。

(2) 準沖波諸元に対する沖波諸元の極値統計解析

波浪推算結果に対する 14 港湾域の準沖波諸元はすで
 に得られているため、新たに推定する各沖波地点の波浪諸
 元においては、妥当な確率沖波を得ることよりもこれら
 との整合を極力図ることを最優先に考え、極値統計解析
 に用いる極大値資料はそれぞれ次のように作成した。ま
 た、準沖波諸元と同様、極値統計解析手法は合田法（修正
 PA 法）¹²⁾を用い、確率波高に対する周期は波向別の極大
 値資料を代表する平均的な沖波波形勾配に対して、 S_{max}
 値は図-3.4 及び式(9)に例示した関係式を平均的な沖波波
 形勾配に適用して、それぞれ設定した。

a) 沖波地点における極大波高の波向の取り扱い

波向毎に得られた準沖波諸元との比較を容易にするた
 め、沖波地点、GPS 波浪計地点、及び沿岸波浪計地点にお
 いてそれぞれ波高が足切り値を超える時刻の波向は、各
 地点での波向毎にそれぞれ整理される通常の方法とは異
 なり、準沖波地点における同時刻の波向と同じとみなせ
 るものと仮定した。ただし、準沖波地点との波向差が±1
 波向以内にある極大波高の生起時刻に有意な差が認めら
 れる場合には、その波向における波高（・周期）の生起時
 刻を全期間にわたり 20 分単位で一律にずらすこととした。

例として、酒田港沖の沖波地点における極大波高の生
 起時刻差の出現頻度を図-3.5 に示す。ここで、図中に示
 す ΔT_{mode} は最頻値、 ΔT_{ave} は平均値、 ΔT_{std} は標準偏差をそ
 れぞれ示す。また、 n はデータ数である。さらに、 ΔT は極
 大波高の生起時刻差（B:準沖波-A:沖波）を示す。なお、
 波高の生起時刻をずらした波向では、その波向の極大波
 高が擾乱の初期または末期に生じた場合に、その直前ま

たは直後の時刻に生じた波高を極大波高とすることにな
 るが、これによる確率波高の変化は高々 4cm 程度であつ
 た。また、14 港湾域のうち実際に生起時刻差を考慮した
 地点・波向は 100 ケース中 22 ケースであった。

b) 波向別の極大値資料の作成及び極値統計解析

設計沖波を波向毎に得る場合、設計上安全側となるよ
 う波向差が±1 波向を含む 3 波向のなかから各擾乱の極
 大波高を抽出することがよく行われる。既存の準沖波諸
 元の推定に用いた波向別の極大値資料もこのように作成
 された⁶⁾。便宜上、本研究ではこの方法を 3 波向処理と呼
 ぶ。一方、波浪推算精度の向上に伴い、極大波高の推算波
 向のブレもかなり改善していることが予想され、この場
 合には対象とする 1 波向のなかから各擾乱の極大波高を
 抽出することもあり得ると思われる。同様に、本研究では
 これを 1 波向処理と呼ぶ。そこで、NOWPHAS 波浪観測
 地点における極大値資料は 3 波向処理により作成したが、
 沖波地点では 3 波向処理に加え、1 波向処理による極大値
 資料も併せて作成し、これらを対象とした極値統計解析
 により各地点の確率波諸元を推定した。なお、次項に述べる
 波向処理による違いを除き、これらの結果は、次節で述
 べる確率波諸元の逆推定結果との比較において併せて示
 すこととする。

c) 波向処理による極値統計解析結果の違い

酒田港及び八戸港の沖波地点において、3 波向処理で作
 成した極大値資料から推定された確率波高・周期に対し、
 1 波向処理によるそれらの結果を比で表したものを、両港
 まとめて図-3.6 に示す。波高比、周期比ともに、酒田港
 の波向 W、八戸港の波向 NE でほぼ 1 となるほかは、両

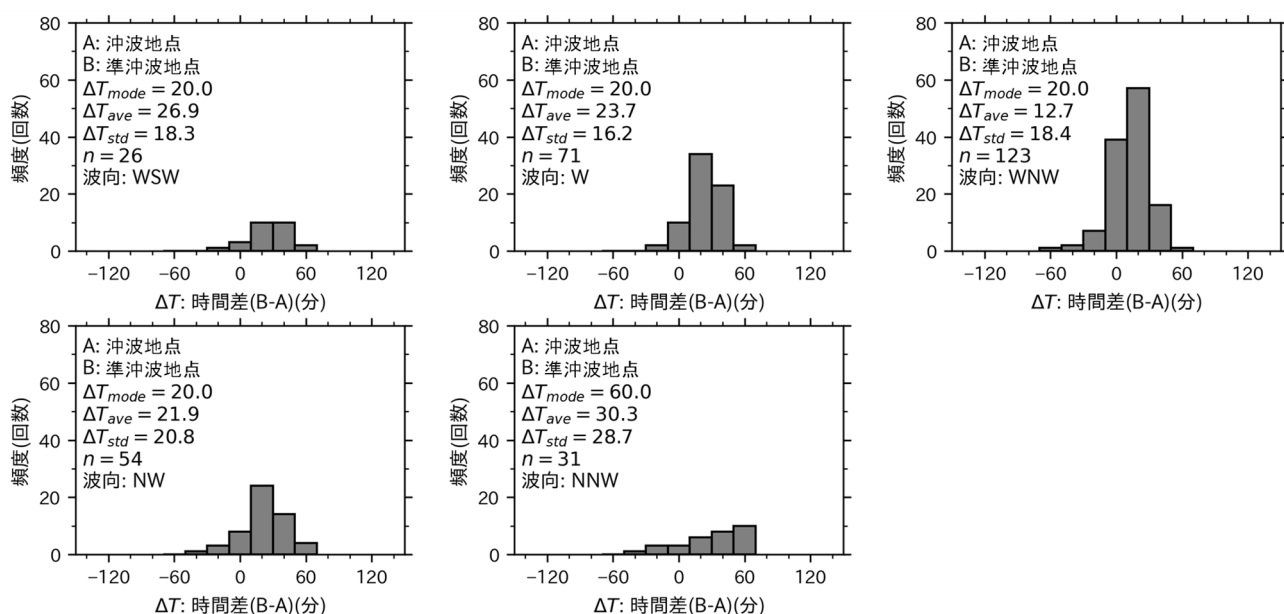


図-3.5 酒田港沖の沖波地点での極大波高の生起時刻差の頻度分布

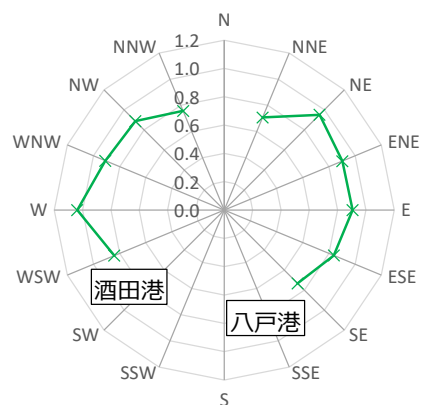
港のいずれの波向とも波高比, 周期比はそれぞれ 1 を下回った. したがって, 3 波向処理は 1 波向処理に比べ, 沖波諸元を設計上安全側に見積もることが改めて確認された. なお, 本研究で対象とした東北地方の 14 港湾域のうち残りの港湾における波高比, 周期比の図は, まとめて付録 C に示す.

3.2 準沖波諸元に対する沖波諸元の逆推定

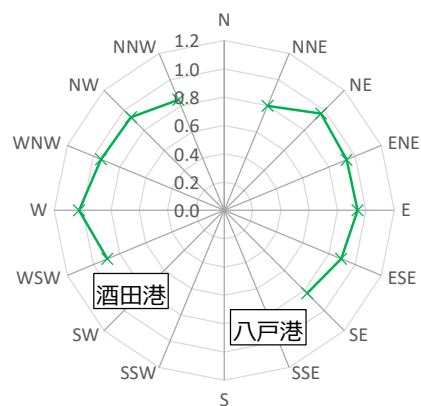
波浪変形計算により逆推定された S_{max} 値を含む沖波諸元を, 同時に算定される NOWPHAS 波浪観測 (GPS 波浪計, 沿岸波浪計) 地点における波浪諸元とともに 3.1 節で実施した極値統計解析結果と比較し, 妥当性を検討する.

(1) 確率沖波諸元に対する波浪変形計算

ここでは, 3.1 節と同様に酒田港及び八戸港に着目して, 図-3.7 に示した各波向の計算領域を用いてエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算を繰り返し行い, 確率準沖波諸元に対する確率沖波諸元を逆推定した. ここで, 酒



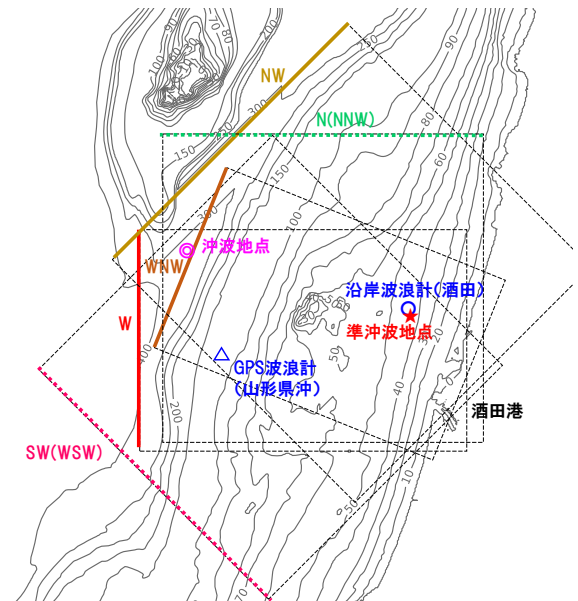
(a) 波高比 (=1波向処理/3波向処理)



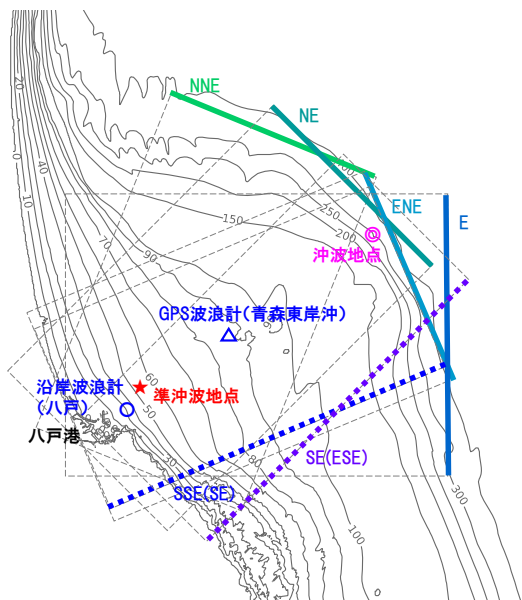
(b) 周期比 (=1波向処理/3波向処理)

図-3.6 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

田港の波向 WSW と NNW, 八戸港の波向 ESE と SE では, 逆推定された沖波の波向に合わせて, 波向 SW と N, 波向 SE と SSE の計算領域をそれぞれ用いた. また, 同時に算定される NOWPHAS 波浪観測 (GPS 波浪計, 沿岸波浪計) 地点における波浪諸元とともに 3.1 節で実施した極値統計解析結果と比較し, 波浪変形計算により逆推定された S_{max} 値を含むこれらの沖波諸元の妥当性を検討した.



(a) 酒田港沖



(b) 八戸港沖

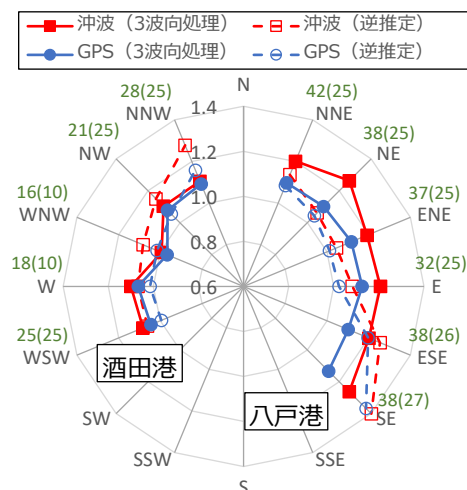
図-3.7 酒田港沖及び八戸港沖の陸地・海底地形と準沖波地点, 沖波地点, GPS 波浪計地点, 沿岸波浪計地点の位置関係, 四角枠はエネルギー平衡方程式法の計算領域 (太線は入射境界を表し, 実線: 入射 2, 点線: 入射 3)

準沖波諸元に対する沖波諸元の逆推定では、沖波地点を入射境界とした波浪変形計算を繰り返し行い、準沖波地点での波浪諸元を再現する入射波諸元を沖波諸元とした。なお、準沖波地点での波浪諸元の許容誤差は、2章での検討と同様に、波高 0.01m 以内、周期 0.1s 以内、波向（卓越波向）1°以内とした。ただし、沖波地点が入射境界上に位置しない場合には、NOWPHAS 波浪観測（GPS 波浪計、沿岸波浪計）地点と同様、沖波地点で算定された波浪諸元を抽出した。ここで、繰り返し計算に用いる沖波諸元の初期値には準沖波諸元を用い、 S_{max} 値には H_0/L_0 に対し式(9)及び表-3.2 を用いて算定される値を参考に、合田・鈴木⁹⁾により提案された推奨値： $S_{max}=10, 25, 75$ のうちいずれかを用いることとした。なお、本研究では表-3.2 以外にも東北地方沿岸の港湾・波向に対する係数 a, b を算出済みである（付録B 参照）、一方、もしこれら以外の港湾・波向に対しても同様に S_{max} 値を設定する場合には、必

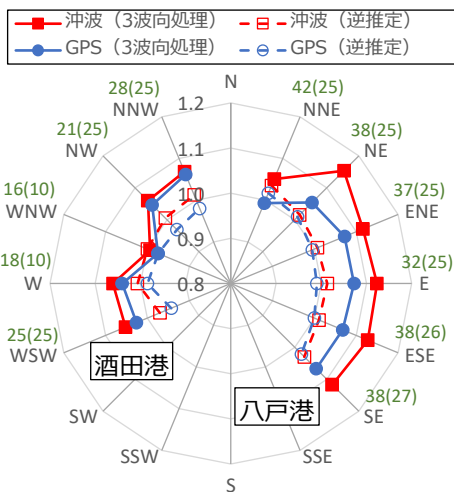
要に応じ本研究と同様に波浪推算スペクトルから H_0/L_0 と S_{max} の関係式を求めて用いるか、周辺地形の影響を加味し従来との関係図⁹⁾を参照することになるであろう。

(2) 逆推定した確率波諸元の妥当性の検討

酒田港及び八戸港のそれぞれにおいて、準沖波諸元に対して逆推定された沖波地点及び GPS 波浪計地点で算定された波浪諸元を、両地点での波浪推算結果に基づく極値統計解析結果とともに、図-3.8 に示す。ただし、これらは準沖波諸元に対する波高比・周期比として整理した。また同様に、沿岸波浪計地点で算定された波浪諸元と極値統計解析結果との比較を、図-3.9 に示す。ここで、図-3.8 の各方位の上部に示した各数値は沖波の S_{max} 値を表し、括弧無しの数値は式(9)及び表-3.2 による H_0/L_0 に対する算定値、括弧付きの数値は波浪変形計算に用いた合

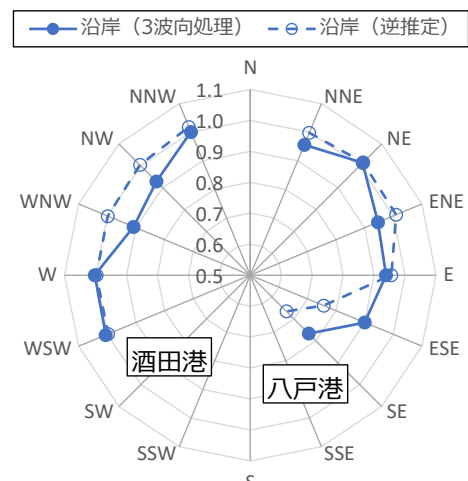


(a) 波高比（＝沖波波高／準沖波波高）

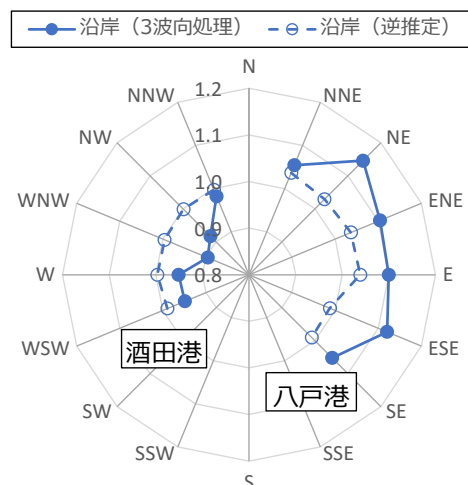


(b) 周期比（＝沖波周期／準沖波周期）

図-3.8 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較



(a) 波高比（＝沿岸波高／準沖波波高）



(b) 周期比（＝沿岸周期／準沖波周期）

図-3.9 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

田・鈴木⁹⁾による推奨値を示す(なお、括弧付き数値が推奨値と僅かに異なるのは沖波地点での算定値を抽出したためである)。なお、本研究で対象とした東北地方の14港湾域の港湾における波高比、周期比の図は、まとめて付録Cに示す。

a) 沖波地点

図-3.8(a)より、逆推定された沖波の波高比は酒田港、八戸港におけるどの波向も1以上となり、両港で設定された準沖波諸元はそれぞれ浅海変形を受けていることがわかる。また、これらのうち酒田港の波向NNW~WNW、八戸港の波向ESE~SEでは逆推定結果が極値統計解析結果よりも大きい。しかし、これらの波向における沖波地点の波浪推算結果は島や岬による遮蔽の影響を受けるのに対し、逆推定に用いた準沖波諸元ではこれらの影響が相対的に小さく、かつ浅海域で発生・発達した風波成分も含まれるため、方向集中度を $S_{max}=10$ または25とした沖波諸元の逆推定結果はまず妥当と考えられる。一方、酒田港の波向W~WSW、八戸港のNNE~Eにおいて、逆推定結果が極値統計解析結果よりも小さくなる原因としては、これらの波向では沖波地点で実際に推算された高波浪時の波向が準沖波地点とは異なる等により、準沖波地点に到達しなかった可能性も否定できない。もし、(一部の成分波が島や岬による遮蔽の影響を受けたり、そもそも岸向きでない等の)準沖波地点に伝播しない波向を有する沖波の極値データが多く推算されていた場合には、その影響を受けた沖波の極値統計解析結果を準沖波から適切に逆推定することはできないと考えられる。この詳細な検討は今後の課題である。

図-3.8(b)より、逆推定された沖波の周期比は酒田港、八戸港におけるどの波向も1前後であるのに対し、極値統計解析結果に基づく周期比は酒田港の波向WNWを除き1.1前後となっている。これらの結果は、対象とした港湾・波向毎に島や岬、海底地形による遮蔽の有無を確認し、必要に応じ周期変化も考慮して逆推定すべきであることを示唆している。ただし、上述した通り、逆推定された波高比も過小な場合には、準沖波地点に伝播しない沖波の極値データが周期比に与える影響にも留意すべきである。

b) GPS波浪計地点

図-3.8のうちGPS波浪計地点での波浪諸元に着目すると、酒田港において、精度の高い波浪推算結果(図-3.2(a))に基づく極値統計解析結果の波高比・周期比が、沖波地点の極値統計解析結果、及びGPS波浪計地点の逆推定結果のそれらと互いによく一致することは、GPS波浪計が沖波を観測できることを定量的に示すとともに、沖波諸元の逆推定が適切であることを示唆している。これに対し、

逆推定された波高比・周期比が沖波・GPS波浪計地点間で有意に異なることは、準沖波地点までの風波の発生・発達を加味した沖波は伝播過程で変化し得ることを示している。一方、八戸港において、逆推定された波高比・周期比が沖波地点のそれらと互いによく一致することは、GPS波浪計地点までに沖波の伝播過程での変化はほぼ生じていないことを示している。これに対し、精度の高い波浪推算結果(図-3.3(a))に基づく極値統計解析結果の波高比・周期比が沖波地点の極値統計解析結果、及びGPS波浪計地点の逆推定結果のそれらと有意に異なることは、沖波地点で推算された波成分の一部がGPS波浪計地点及び準沖波地点に到達していない可能性を追認している。

c) 沿岸波浪計地点

図-3.9より、準沖波地点に隣接した酒田港の沿岸波浪計地点において、逆推定された波高比・周期比がほぼ1となることは当然であるが、八戸港の波向E~SEでは、準沖波地点より陸側に位置する沿岸波浪計地点が岬に遮蔽されるほど、波高比が減少する。また、精度の高い波浪推算結果(図-3.2(b)、図-3.3(b))に基づく極値統計解析結果の波高比・周期比は、酒田港では波向NW~WNW、八戸港では波向ESE~SEにおいて、逆推定されたそれらと特に大きく異なっている。前者(酒田港)では、波浪推算結果において(波高比が0.9程度であることからわかるように)沿岸波浪計地点で(逆推定では適切に補われた)島による遮蔽の影響が準沖波地点に比べより顕著に現れたものと推測される。また、後者(八戸港)でも、沿岸波浪計地点は準沖波地点に比べ岬による遮蔽の影響をより強く受けると考えられる。そのため、逆推定時に設定した沖波の S_{max} 値と波浪推算による沖波地点の S_{max} 値との違いが、沿岸波浪計地点での波高比・周期比の違いとして現れたものと推測される。

4. 準沖波に対する沖波の簡易逆推定手法の提案

準沖波に対する設計波は、準沖波地点の波浪諸元を再現する入射波諸元(深海域の沖波諸元)を波浪変形計算の繰り返しにより逆推定すると同時に算定される。3章では沖波諸元の逆推定の事例として、波浪変形計算に用いる沖波諸元の初期値には準沖波諸元を、 S_{max} 値には H_0/L_0 に対し式(9)を用いて算定される値を参考に推奨値⁹⁾を設定して計算を行った。すなわち、準沖波地点での波浪諸元を再現するため、許容誤差を満足するまで入射波諸元を見直しつつ繰り返し計算を行い、最終的に得られた入射波諸元を沖波諸元の逆推定結果として採用した。ここで、対象とした確率準沖波諸元のうち、酒田港の波向WSWと

NNW, 八戸港の波向 ESE と SE では, 準沖波の波向に合わせて設定した計算領域を用いた場合には, 繰り返し計算の過程で入射境界に与える入射波向の角度が次第に大きくなったため, 最終的にそれぞれ波向 SW と N, 波向 SE と SSE の計算領域を設定し直して繰り返し計算をやり直す必要があった. このように, 準沖波地点の設定位置や対象波向によっては繰り返し計算に多くの手間を要することが懸念される. また, 入射波の S_{max} 値の見積もりが適切でない場合には沖波波高を過大に推定することもあり得る. したがって, 計算実施前に準沖波諸元に対する沖波諸元の概略を推定できれば, これを波浪変形計算の初期値として利用することが可能となり, 適切な計算領域を予め設定することを含め, 繰り返し計算の省力化・効率化に繋がることと期待される.

そこで, 本章では準沖波諸元に対する沖波諸元の逆推定をより効率的に実施できるよう, 新たに作成した算定図を用いる沖波諸元の簡易逆推定手法を提案した. 具体的には, 準沖波波高・波向とその水深・位置から複数の算定図を読み取り, 沖波波高・波向の概略値を簡易に算定す

るものである. ただし, 同じ条件での算定図の読み取りを可能とするため, 沖波と準沖波で周期は変化しないものと仮定している.

4.1 簡易逆推定手法の提案

(1) 海底地形による影響を考慮した逆推定

a) 浅水・屈折係数の逆数の算定図

水深変化による波の変形には, 屈折, 浅水変形, 砕波が挙げられる. しかし, 逆推定の対象とする準沖波は $0.1 \leq h/L_0$ の浅海域で定義されるため, ここでは砕波は考慮しない. また, $0.1 \leq h/L_0$ の浅海域で生じる浅水変形については, 微小振幅波理論を用いて波高変化を計算できる. さらに, 屈折については, 沖に遮蔽物のない直線状平行等深線海岸を仮定すると, Snell の法則に従い解析的に求めることができる⁹⁾¹³⁾. したがって, 準沖波地点における浅水係数を K_s , 屈折係数を K_r とすると, 確率沖波波高 H_0 と確率準沖波波高 H_{q0} の関係は $H_{q0} = H_0 K_s K_r$ と表されるため, 準沖波地点の浅水・屈折係数の逆数 $(K_s \cdot K_r)^{-1}$ が算定できれば, 確率沖波波高を逆推定することができる.

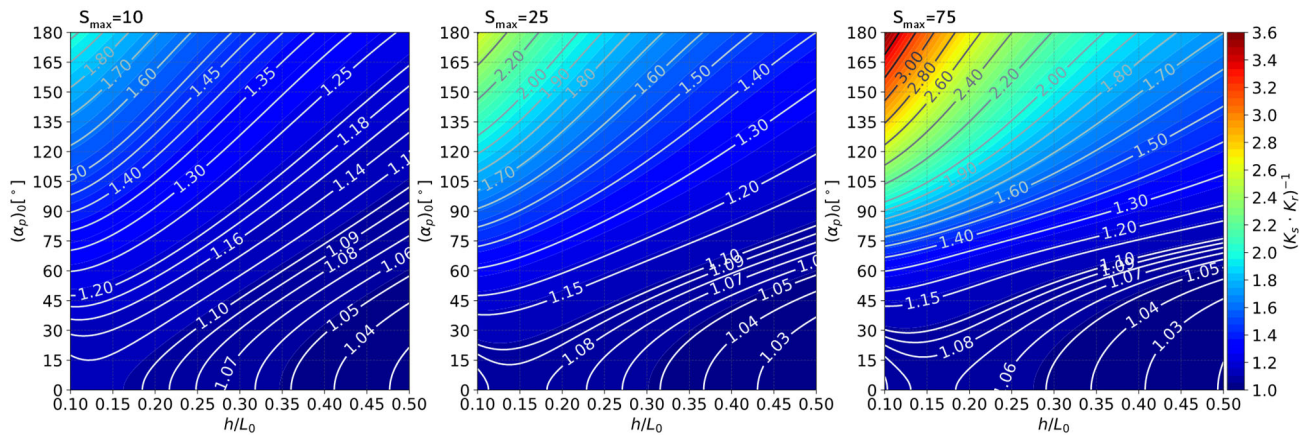


図-4.1 浅海域における $(K_s \cdot K_r)^{-1}$ の算定図 ($(\alpha_p)_0$: 平行等深線の垂線と沖波の卓越波向が成す角度)

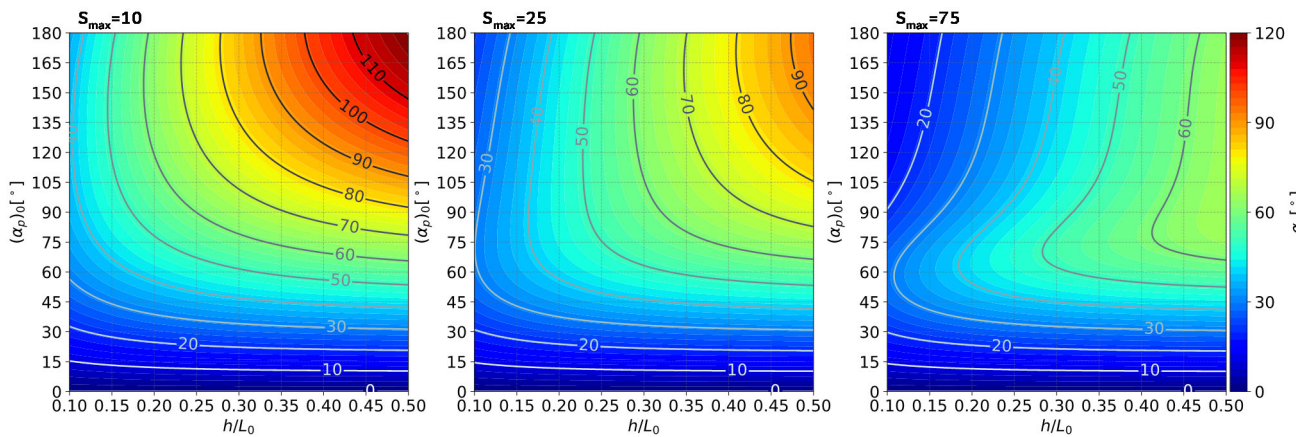


図-4.2 屈折による卓越波向 α_p の変化図 ($(\alpha_p)_0$: 平行等深線の垂線と沖波の卓越波向が成す角度)

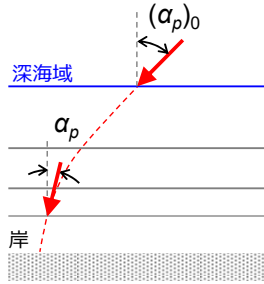


図-4.3 平行直線状等深線海岸における屈折

そこで、確率沖波波高 H_0 の方向スペクトルが標準スペクトル（修正ブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルと光易型の方向関数）で表されると仮定し、図-4.1に示す浅海域における浅水・屈折係数の逆数 $(K_s \cdot K_r)^{-1}$ の算定図を作成した。算定図は $S_{max}=10, 25, 75$ ごとに作成し、横軸は準沖波地点の水深と周期から算定される相対水深 h/L_0 、縦軸は多方向不規則波の屈折係数と屈折角の算定図³⁾と同様に、平行等深線の垂線と沖波の卓越波向が成す角度 $(\alpha_p)_0$ を意味している。

b) 屈折による卓越波向の変化図

図-4.2に屈折による卓越波向の変化図を示す。図-4.3に示すように不規則波の一般的な性質として沖波の卓越波向 $(\alpha_p)_0$ が 0° のとき、すなわち等深線海岸に波が直入射する時は水深が浅くなくても卓越波向 α_p は $\alpha_p=0^\circ$ のままであるが、 $(\alpha_p)_0 > 0^\circ$ のときは α_p は 0° に近づく¹³⁾。図-4.2は、図-4.1と同様に直線状平行等深線海岸を仮定して、沖波の卓越波向 $(\alpha_p)_0$ と準沖波地点の相対水深 h/L_0 から準沖波の卓越波向 α_p を読み取ることができる。ただし、横軸の h/L_0 値とコンターライン上の α_p 値に対して縦軸の $(\alpha_p)_0$ 値が2つ得られる場合がある。このとき、逆推定した沖波の卓越波向としてどちらの値を採用するかは、波向と周辺の地形の関係等を考慮して判断する必要がある。また、縦軸の $(\alpha_p)_0$ について、図-4.3からも分かるように $(\alpha_p)_0 \geq 90^\circ$ の場合は沖（深海）方向へ向かう波と定義されるため、準沖波（浅海）に対する沖波としては不適切なように思われる。にもかかわらず、このような範囲まで算定図を描画した理由は、後述する簡易逆推定手法のフローにおいて、回折により波向が変化した後の準沖波から沖波を逆推定する際、回折変形を無視し浅水・屈折変形のみを考慮して仮の沖波諸元を逆推定するための条件によっては、 $(\alpha_p)_0 \geq 90^\circ$ の読み取り範囲が必要となるからである。

c) エネルギー平衡方程式法における卓越波向の取り扱い

永井¹³⁾は、方向スペクトルをもつ不規則波の卓越波向 θ_p について、“方向スペクトルの周波数に関する積分値の方向的なエネルギー分布が最大となる波向”と定義して

いる。本研究では、芹沢ら¹⁴⁾により式(2)で定義される方向スペクトルのモーメント M_{pq} を用いて以下の式で定義される卓越波向 θ_p を用いる。

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (10)$$

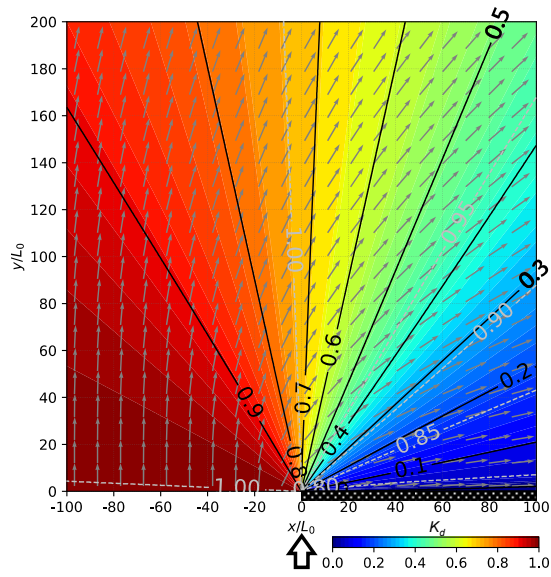
(2) 周辺地形による影響を考慮した逆推定

a) 回折係数の逆数の算定図

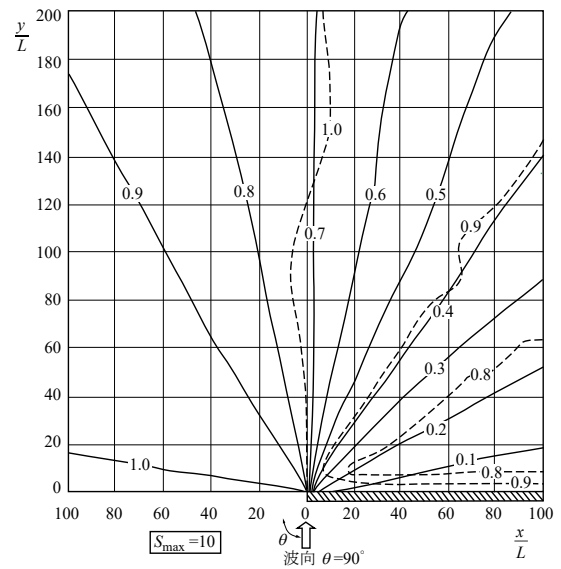
準沖波地点と沖波地点との間に島や岬地形がある場合、波の回折の影響を考慮する必要がある。なお、“回折”現象は本来、防波堤等で遮蔽された領域へも波が回り込む現象をいう。しかし、本研究では、（波長より十分大きな幅を有する）島や岬地形に多方向不規則波の一部の波向成分が幾何学的に遮蔽される一方、遮蔽されなかった残りの波向成分が背後領域に入射する様子を回折変形として扱う。回折の影響が見込まれる場合、前述の確率準沖波波高 H_{q0} を表す式は、回折係数 K_d を用いて $H_{q0} = H_0 K_s K_r K_d$ と表される。そこで、準沖波地点に到達する回折波が生じた回折点での入射波諸元の逆推定に用いるため、回折係数の逆数 K_d^{-1} の算定図を作成した。

算定図はエネルギー平衡方程式法を用いた半無限堤に対する波浪変形計算結果から作成した。深海条件の一樣水深場に半無限堤を設定して、入射角 θ_i は防波堤への直入射を 0° として $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を 5° 間隔、波高は1m、周期は8s、 $S_{max}=10, 25, 75$ ごとに標準スペクトルの入射波を設定した。その他の計算条件は、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算において一般的に用いられる設定値を参考に、周波数分割数 $M=15$ 、方向分割数 $N=36$ とし、計算格子幅は0.1波長とした。計算結果の一例として、半無限堤に $S_{max}=10$ 、入射角 $\theta_i=0^\circ$ の不規則波を入射して得られた回折係数及び卓越波向分布図を図-4.4(a)に示す。図-4.4(a)より、方向分散の効果で遮蔽されずに到達した波エネルギーより回折係数が得られ、その分布は図-4.4(b)に示す技術基準に示される半無限堤による不規則波の回折図¹⁵⁾と比較的良く一致している。ただし、波の回り込みの影響が大きい防波堤の先端付近及び直背後では、図-4.4(a)による回折係数は図-4.4(b)に比べ過小となる。

図-4.5に、これらの計算結果から作成したエネルギー平衡方程式法による半無限堤の回折係数の逆数 K_d^{-1} の算定図を示す。横軸は半無限堤に対する波の入射角 θ_i 、縦軸は防波堤先端から見た方向角 θ を意味する。なお、図面右下の白抜き部分は、主波向 θ_i の入射波における S_{max} に応じた方向分布に対し、成分波が到達しないために回折係数が2%未満となる範囲に対応する。なお、算定図は回折点から100波長離れた地点の値を抽出して作成している。



(a) エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算結果



(b) 半無限堤による回折図¹⁵⁾

図-4.4 半無限防波による不規則波の回折図 ($S_{max}=10$, 波向 $\theta=90^\circ$, 実線は回折係数, 破線は周期比)

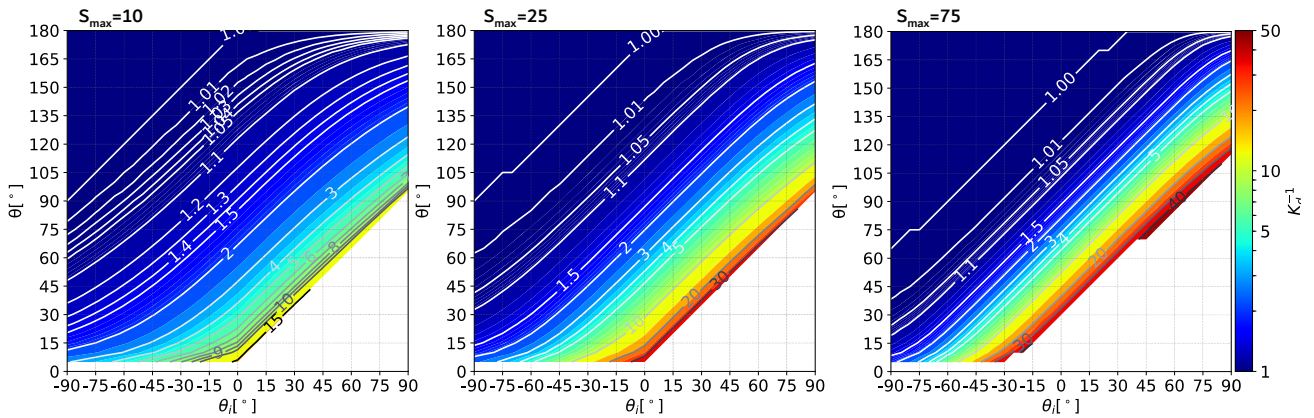


図-4.5 エネルギー平衡方程式法による半無限防波堤の回折係数の逆数 K_d^{-1} の算定図 (θ_i : 防波堤への入射角, θ : 防波堤先端から見た方向角)

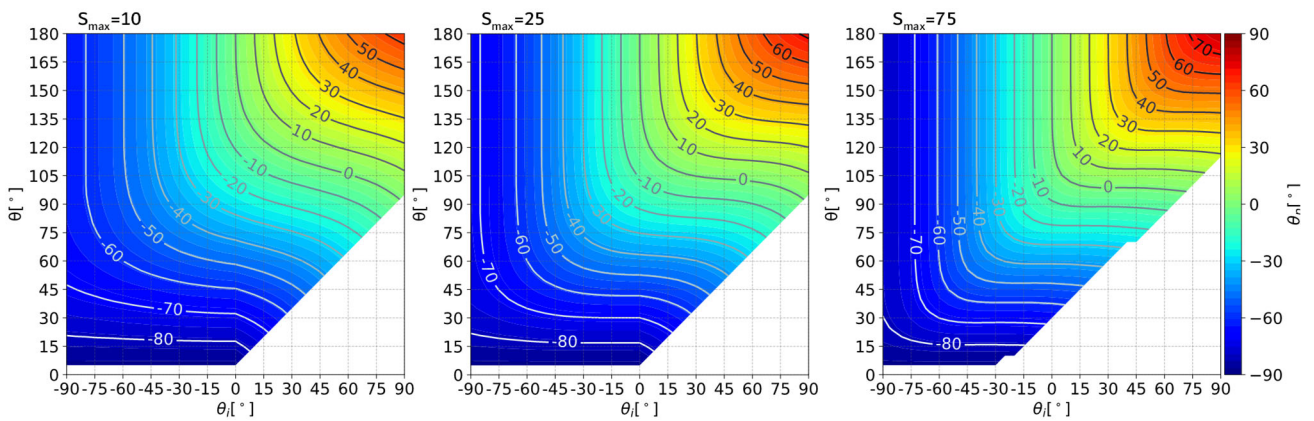


図-4.6 エネルギー平衡方程式法による半無限防波堤の回折領域の卓越波向 θ_p の変化図 (θ_i : 防波堤への入射角, θ : 防波堤先端から見た方向角)

b) 回折領域の卓越波向の変化図

回折係数の逆数 K_d^{-1} の算定図の使用に際し、縦軸の方向角 θ は準沖波地点と遮蔽物の回折点との幾何学的な位置関係から設定できるが、横軸の入射角 θ_i は準沖波地点の

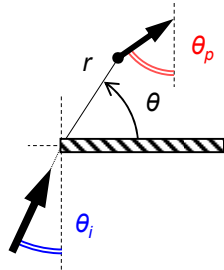


図-4.7 半無限堤への入射角と回折後の卓越波向の関係

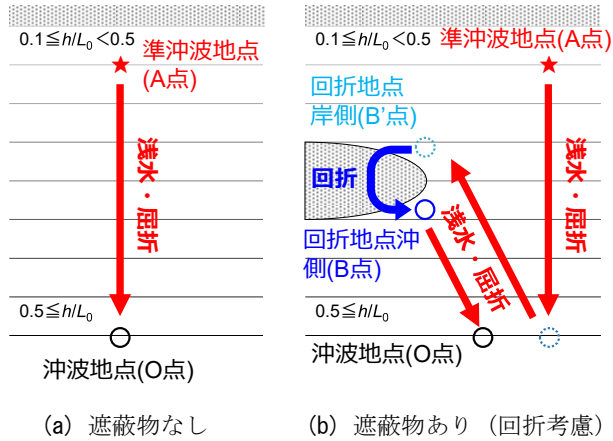


図-4.8 沖波の逆推定手法の概念図

卓越波向 θ_p から推定する必要がある。準沖波地点の卓越波向 θ_p は、遮蔽物への入射角 θ_i が回折により変化した波向であり、回折域での屈折変形を無視すれば、図-4.5と同様にエネルギー平衡方程式法による半無限堤に対する波浪変形計算結果から作成できる。

図-4.6に、エネルギー平衡方程式法による半無限堤の回折領域の卓越波向 θ_p の変化図を示す。なお、図面右下の白抜き部分は図-4.5の白抜き範囲と一致しており、回折係数が2%未満となる範囲である。また、図-4.7に示すポンチ絵は、入射角 θ_i と回折点からの距離 r 、防波堤先端から見た方向角 θ の位置における卓越波向 θ_p の幾何学的な位置関係を表している。

(3) 算定図を用いた逆推定手法のフロー

図-4.8及び図-4.9に算定図を用いた簡易逆推定手法の概念図と算定フローを示す。本手法では、周期は一定として、準沖波地点より沖に遮蔽物がない場合は、図-4.8(a)に示すように浅水・屈折変形を考慮して準沖波諸元から沖波諸元を逆推定する。準沖波地点より沖に遮蔽物があり、回折変形の影響を考慮する場合には、図-4.8(b)に示すように、まずは浅水・屈折変形のみを考慮して逆推定した仮想的な沖波諸元を求める（A点→O'点）。次に、仮想的な沖波諸元から浅水・屈折変形を考慮して回折地点岸側での波浪諸元を算定する（O'点→B'点）。さらに、回折変形の影響を考慮するため、回折地点岸側での波浪諸元から回折変形の算定図を用いて回折地点沖側での波浪諸

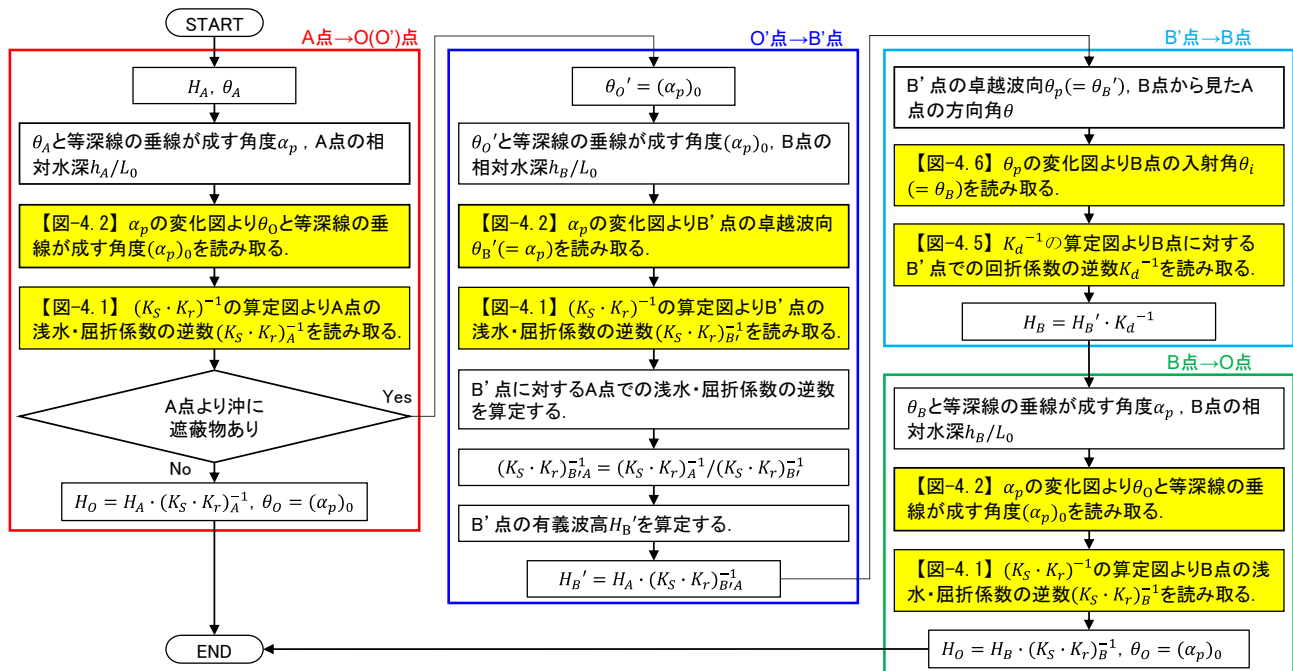


図-4.9 沖波の逆推定手法の算定フロー

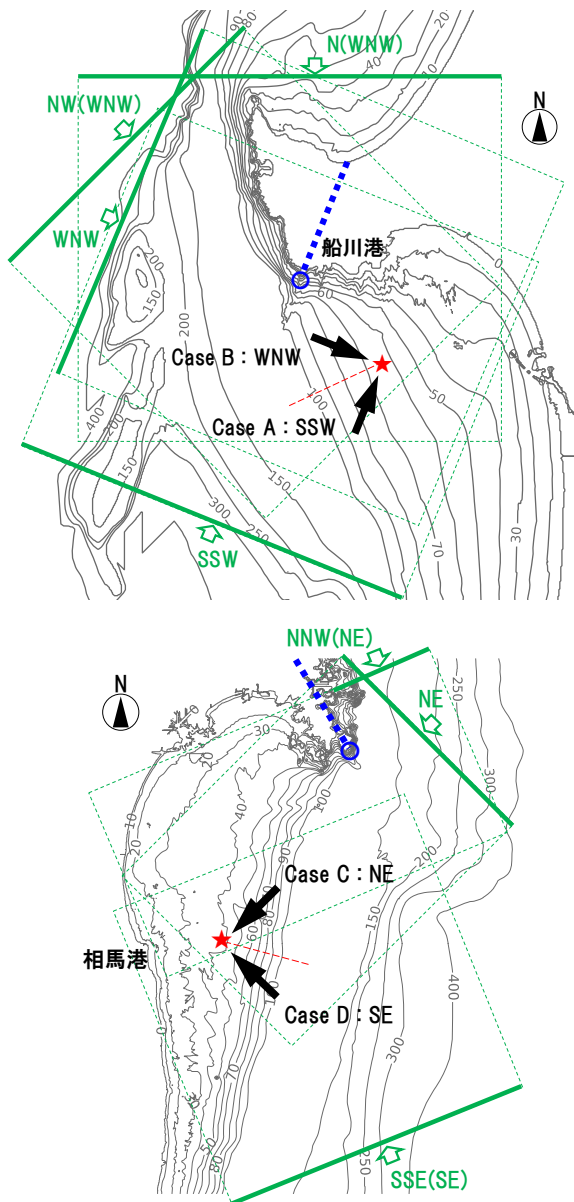


図-4.12 船川港及び相馬港周辺の海底地形，準沖波地点及びエネルギー平衡方程式法の計算領域

図-4.10 中に★印で示した準沖波地点A1～A5に対して沖波の逆推定を行った結果を表-4.1及び図-4.11に示す。なお、岬背後のA4、A5地点は回折の影響を強く受けることが予め想定されるため、本来、準沖波地点として選定する位置としてはあまり相応しくないが、ここでは推定精度を確認するために抽出した。表-4.1は図-4.9のフローに従い、算定図の具体的な読み取り値とともに準沖波諸元から沖波諸元を逆推定した過程を示したものである。なお、計算条件に従い、読み取りには $S_{max}=10$ の算定図を用いた。図-4.11において○印で示した沖波諸元の逆推定結果より、岬背後のA4、A5地点を除いたA1～A3地点では、沖波波高 H_0 の推定精度は高く、入射角 θ_0 も誤差 $\pm 5^\circ$ 程

度で推定できていることがわかる。一方、岬背後のように回折の影響を強く受ける位置では多方向不規則波の周期も変化するため、周期一定を仮定する本研究の逆推定手法では推定精度が低下すると考えられる。

(2) 実海域における簡易逆推定手法の適用性

実海域における本手法の推定精度の検証は、令和2年度に国土交通省東北地方整備局により実海域で設定された準沖波諸元⁹⁾を借用して、次のように実施した。まず、準沖波諸元が設定された海域地形を対象に、簡易逆推定手法を用いて沖波を逆推定した。次に、逆推定された沖波諸元を入射波諸元としてエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算を一度だけ実施し、準沖波地点で算定された波浪諸元を出力した。この波浪諸元が元の準沖波諸元と一致すれば、簡易逆推定手法はエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算と同等な精度を有することが確認される。

図-4.12に対象海域とした船川港と相馬港の海底地形及び準沖波地点(★印)を示す。図中、準沖波地点から沖に向かって伸びる赤色点線は、簡易逆推定手法の適用に際し設定した等深線の垂線を表し、青色○印は設定した回折点の位置を、回折点から陸側に伸びる青色太点線は岬地形を半無限堤と仮定した際の法線方向を表している。準沖波地点を指している矢印は簡易逆推定の基本となる確率準沖波の波向を表しており、それぞれ船川港のCase A(波向SSW)、Case B(波向WNW)及び相馬港のCase C(波向NE)、Case D(波向SE)を意味する。緑点線の枠線はエネルギー平衡方程式法の波向別の計算領域を表し、太実線の辺が入射境界を、方位を併記した矢印が入射方向を表している。ここで、船川港の波向WNW、及び相馬港の波向NEとSEでは、 S_{max} 値毎に逆推定された沖波の波向に合わせて、これらの波向に対する計算領域の他に、船川港の波向N、NW、及び相馬港の波向NNWとSSEの計算領域もそれぞれ用いた。

a) 簡易逆推定手法による沖波諸元の逆推定

表-4.2の左側に、本手法により準沖波諸元(H_{q0} , T_{q0} , θ_{q0})から逆推定された沖波諸元(H_0 , T_0 , θ_0)を示す。これらは、設定した S_{max} 値毎に、準沖波諸元に対する沖波諸元の波高比及び周期比として整理している。また、波高比を図-4.13の灰色棒グラフに示す。準沖波地点の沖に遮蔽物がなく回折の影響が小さいCase A、Dでは、推定された沖波向は S_{max} 値によらず全て同じ波向となり、準沖波向からの波向変化も1波向以内に収まっている。また、 S_{max} 値による波高比の違いもほとんどみられなかった。なお、当然ながら周期比は全て1である。一方、半島による回折の影響を強く受けるCase B、Cでは、 S_{max} 値が小さ

いほど、推定される沖波向は準沖波向から大きく変化し、その分、準沖波諸元に対する沖波諸元の波高比も大きくなることを確認できる。これは、沖波の S_{max} 値が小さいほど回折点に入射する波の方向分散が顕著となり、回折による波向変化と波高減衰が大きくなるためであると考えられる。

b) 波浪変形計算による準沖波諸元の再現性

沖波諸元から準沖波諸元を算定するために実施する波浪変形計算の計算領域は、図-4.12に示すように、 S_{max} 値毎に推定された沖波向の方位に応じて選択して用い、入射境界は深海域に設定した。ただし、回折の影響を考慮するため半島の地形を含むよう設定した計算領域では、入射境界を深海域に設定することができない。この場合には、入射境界に垂直な方向に沿って1/10勾配斜面を仮想的に設け、深海条件を満たす水深に入射境界を設けた。波浪変形計算に用いたエネルギー平衡方程式法のエネルギー分割数は同様に、周波数分割数 $M=15$ 、方向分割数 $N=36$ とし、計算格子幅は0.1~0.2波長程度とした。

表-4.2の右側に、逆推定された沖波諸元を入射境界に与え、エネルギー平衡方程式法により算定された準沖波諸元(H_q , T_q , θ_q)を、元の準沖波諸元に対する波高比、周期比、及び波向角差として示す。また、波高比を図-4.13の赤色棒グラフに示す。回折の影響が小さいCase A, Dでは、 S_{max} 値によらず波高比はほぼ1.0に近く、波向角差も概ね $\pm 5^\circ$ 以内となり、元の準沖波諸元に対する再現性は良好である。一方、半島による回折の影響を強く受けるCase B, Cでは、 $S_{max}=25, 75$ における準沖波諸元の再現性は比較的高いものの、半島を回り込む波が計算される $S_{max}=10$ における準沖波諸元の波高比は0.5未満、周期比は0.9未満となり、波浪変形計算による再現性は低い。したがって、この場合には入射境界においてより大きな沖波波高とより長い沖波周期を与える必要があり、モデル地形による検証結果と同様、回折の影響を強く受ける準沖波諸元に対しては、沖波諸元の簡易逆推定手法の推定精度は低いと言わざるを得ない。しかしながら、実際には、沿岸地形に沿うこのような波向に対する方向集中度が $S_{max}=10$ であることは少々考え難い。したがって、回折の影響を強く受ける準沖波諸元に対する沖波の逆推定では、設定した S_{max} 値の妥当性に特に留意する必要があることが判明した。一方、沖波波高が準沖波波高の数倍にも達するなど、逆推定した沖波諸元が想定した再現期間において実際には発生し得ないと推測される場合には、その波向に対して想定した入射境界(沖波地点)の妥当性について検討を要するものと思われる。

表-4.2 簡易逆推定された沖波諸元及びエネルギー平衡方程式法による計算結果(確率準沖波諸元に対する波高比、周期比及び波向角差)

Case		沖波地点 (簡易逆推定結果)				準沖波地点 (エネルギー平衡方程式法計算結果)		
		S_{max}	H_0/H_{q0} [-]	T_0/T_{q0} [-]	θ_0 [°]	H_q/H_{q0} [-]	T_q/T_{q0} [-]	$\theta_q-\theta_{q0}$ [°]
船川港	A (202.5°, SSW)	10	1.14	1.00	191.5 (SSW)	1.02	0.96	-1.5
		25	1.14	1.00	191.5 (SSW)	1.02	0.96	-3.7
		75	1.12	1.00	193.5 (SSW)	1.01	0.96	-3.5
	B (292.5°, WNW)	10	1.72	1.00	10.5 (N)	0.43	0.89	5.0
		25	1.26	1.00	315.5 (NW)	0.81	0.97	-1.5
		75	1.04	1.00	291.5 (WNW)	0.93	0.98	-7.4
相馬港	C (45.0°, NE)	10	1.89	1.00	339.4 (NNW)	0.46	0.89	8.9
		25	1.40	1.00	34.4 (NE)	0.94	1.00	18.2
		75	1.21	1.00	53.4 (NE)	1.05	1.00	20.8
	D (135.0°, SE)	10	1.18	1.00	150.4 (SSE)	0.98	0.97	-6.3
		25	1.17	1.00	149.4 (SSE)	1.00	0.98	-2.3
		75	1.14	1.00	147.4 (SSE)	1.00	0.97	-0.1

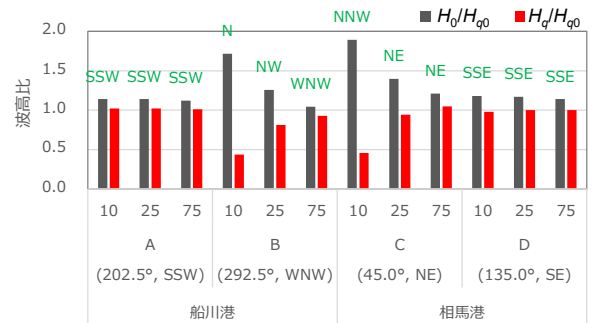


図-4.13 準沖波波高に対する沖波波高の比と計算結果による準沖波波高の比

4.3 簡易逆推定ツールの作成

本研究で提案した簡易逆推定手法は、波浪変形計算を繰り返し実施することに比べれば省力化されるものの、水深情報の取得や等深線の垂線の設定、3種類の S_{max} 値毎に算定図を読み取る作業等はやや煩雑である。そこで、既存の等深線データや電子海図を利用した視覚的なインターフェース上で準沖波の位置や諸元などを入力することにより、3種類の S_{max} 値毎に、指定した沖波地点における波浪諸元を瞬時に逆推定して表示するWindows版ツールを作成した。

図-4.14に沖波簡易推定システム(以下、システムと称す)の処理フローを、図-4.15にシステムの表示例を示す。本システムは水深データとして(旧)港湾空港技術研究所プログラムライブラリの水深データベース(港湾コンター、20万分の1海図、5万分の1海図)または(財)日本水路協会が販売している電子海図(M7000シリーズ)を読み取り、海底地形コンターを表示できる。表示された海底地形コンターに対して任意地点をマウスでクリックす

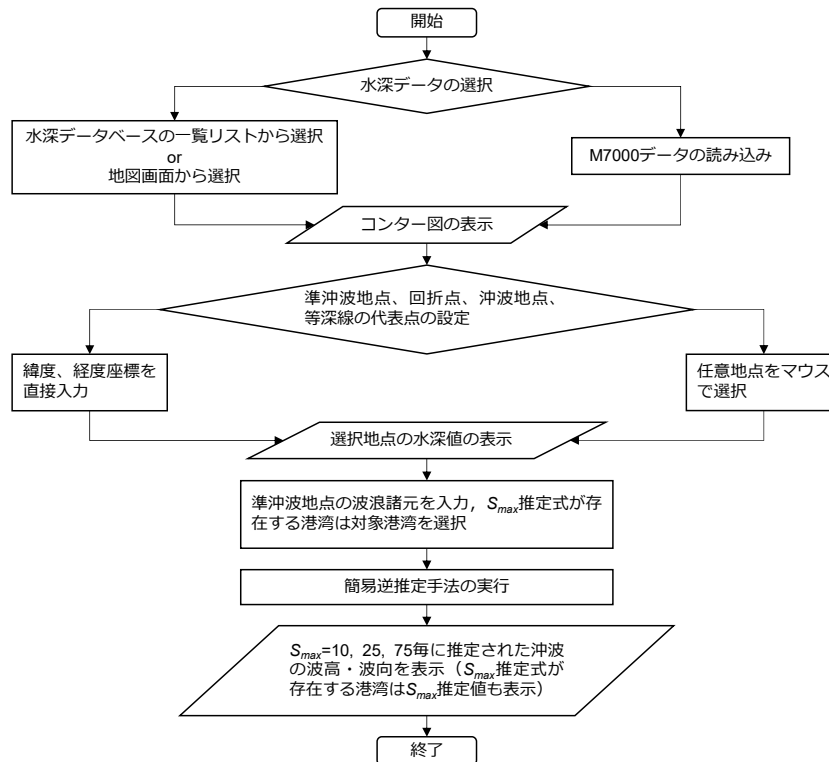


図-4.14 沖波簡易推定システムの処理フロー

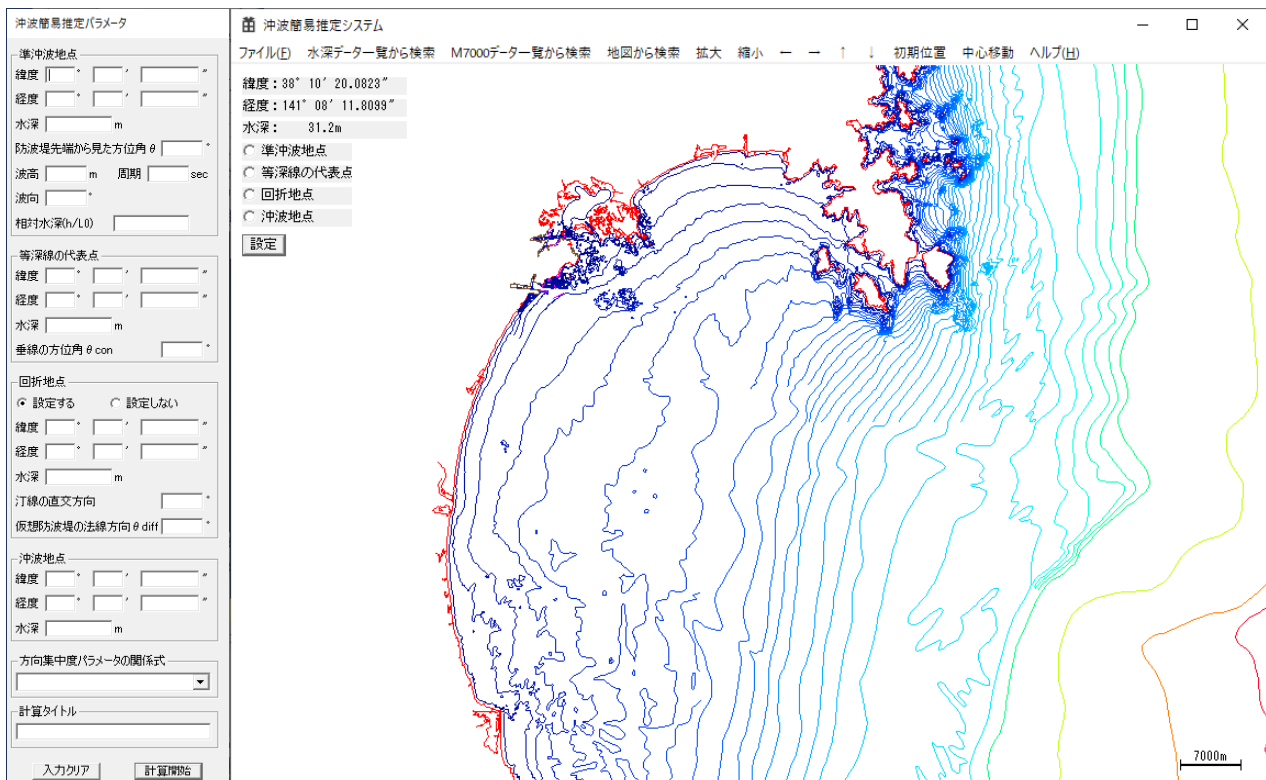


図-4.15 沖波簡易推定システムの表示例

ること、各地点の緯度、経度、水深値を読み取り画面上に表示するとともに、準沖波地点、回折地点、沖波地点をそれぞれ地図上に設定できる。なお、これらの地点の設定は緯度、経度座標の直接入力でも行える。準沖波地点では逆推定時に参照する有義波高、有義波周期、波向の入力が必要である。また、沖波地点の指定では、準沖波の周期から算定される深海波の波長に対して深海条件を満たさない場合には注意が表示される。また、沖波地点で推定すべき S_{max} に関して、表-3.2及び式(9)で示される S_{max} 推定式が用意されている港湾に対しては、これらを参照して S_{max} の推定値を得ることができる。

入力条件の設定を終えて簡易逆推定を実行すると、図-4.14のフローに基づき算定図の読み取りと波高比及び波向変化の計算が行われ、 $S_{max}=10, 25, 75$ に応じた沖波諸元（有義波高、波向及び S_{max} 推定式が存在する港湾においては S_{max} の推定値）の推定結果が瞬時に表示される。画面表示された推定結果は CSV ファイル形式で出力できる。なお、本システムは Windows10(64bit/32bit 対応)で動作する構成である。

5. おわりに

本研究では、波浪推算技術の発展を踏まえ、浅海域で得られる有益な波浪情報を沖波に反映させるために新たに準沖波という概念を導入し、波浪変形計算に用いる方法

を具体的に示した。また、従来は浅海域を深海域と見なしで算定していた沖波を疑似沖波と称し、本来の定義に従う沖波と区別することとした。その上で、設計波（堤前波）の算定に用いる設計沖波の設定地点として準沖波地点及び疑似沖波地点が満たすべき要件を整理した。また、東北地方を例に実在した代表擾乱に対する沖波、疑似沖波及び準沖波の波浪推算結果に着目し、これらの関係や推算精度の検証結果について考察した。

続いて、確率波として得られる沖波と準沖波の波浪諸元を比較し、それらの妥当性を検証するため、準沖波諸元に対する沖波諸元の極値統計解析を実施した。同時に、沖波の方向集中度 S_{max} の推定を行い、港湾毎に波向別の S_{max} 推定式を作成した。その結果、 S_{max} は沖波地点の位置と波向によっては沿岸地形による遮蔽の影響を受け易いことから、従来推奨された波形勾配に対する S_{max} 値よりも大きくなることを確認した。

準沖波に対する堤前波を算定するには、波浪変形計算を繰り返し行うことで、準沖波に対する沖波も同時に逆推定される。東北地方の日本海沿岸及び太平洋沿岸で設定された（確率）準沖波に対し、逆推定された（確率）沖波がその地点での波浪推算結果（に基づく極値統計解析結果）とよく似ていることは、同時に（確率）準沖波に対し算定された堤前波（設計波）の妥当性を示している。

繰り返し計算による沖波諸元の逆推定作業を省力化・効率化するため、準沖波に対する沖波を簡易に逆推定す

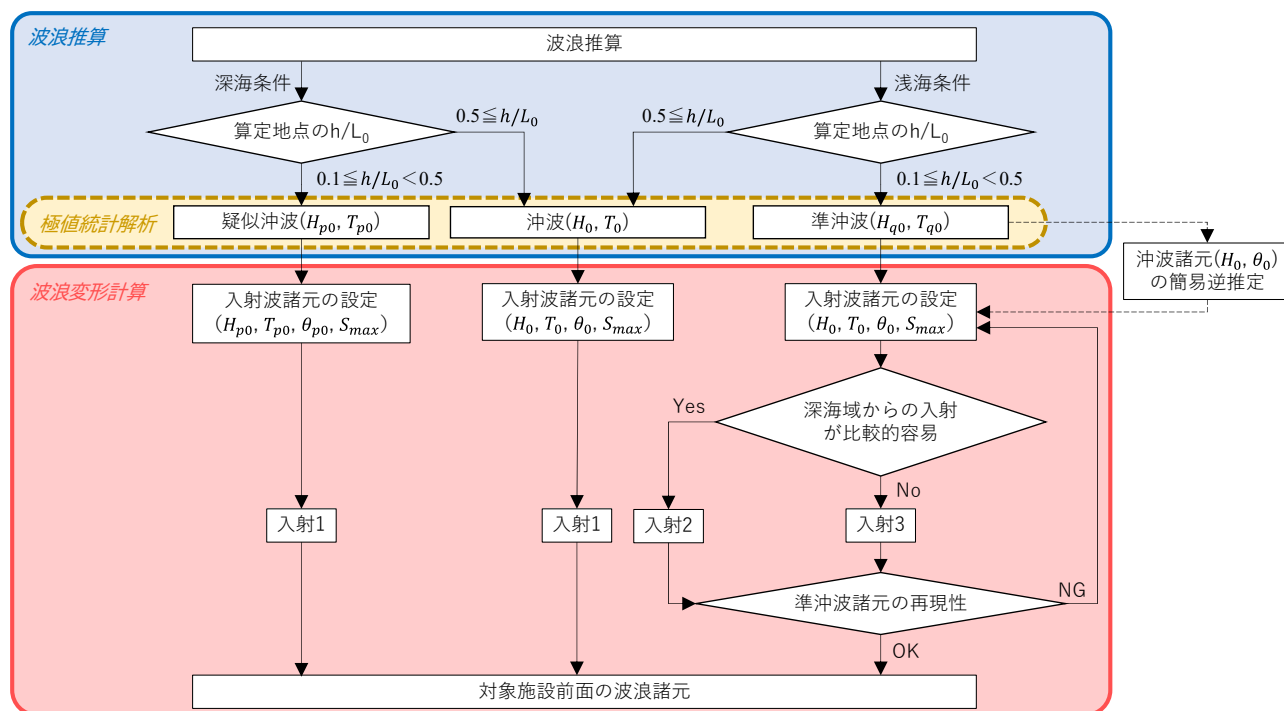


図-5.1 設計波に対する波浪変形計算方法の選定フロー

る手法を算定図とともに提案した。沖波諸元の逆推定では、波向と周辺地形との関係も考慮して沖波の方向集中度 S_{max} を適切に想定する必要がある。そこで、簡易逆推定手法に用いる単純地形での屈折図・回折図は、数値計算結果に基づき $S_{max}=10, 25, 75$ に対してそれぞれ作成した。なお、Windows 版システムでは各 S_{max} 値に対する逆推定結果がすべて表示される。

最後に、本研究の成果として、図-5.1 に堤前波（設計波）を得るための波浪変形計算方法の選定フローを示す。

(2023年8月3日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、国土交通省東北地方整備局のご協力を得ている。ここに記して謝意を表します。

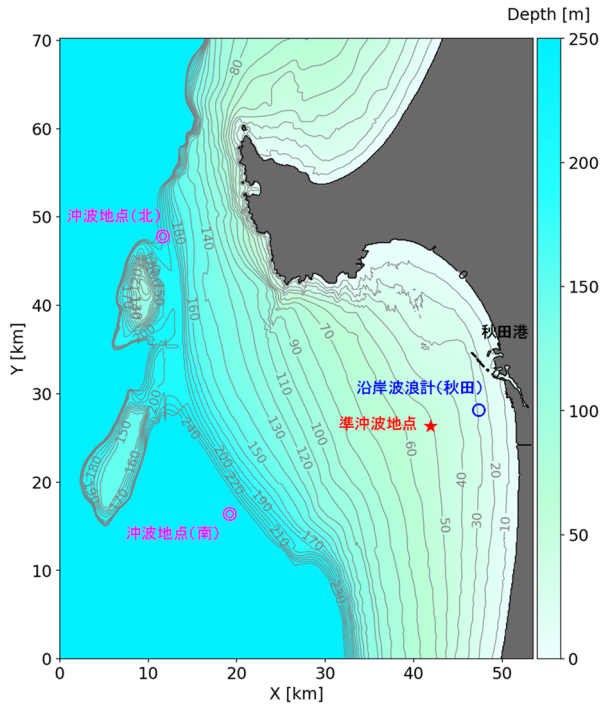
参考文献

- 1) 平山克也, 川口浩二, 田中陽二, 樋口直人, 田所篤博, 金子大介, 伊藤裕哉, 佐々木誠: 浅海域で設定する新しい沖波（準沖波）の提案, 土木学会論文集 (B3海洋開発), Vol. 77, No. 2, pp. I_727-I_732, 2021.
- 2) 平山克也, 森谷拓実, 濱野有貴, 田中陽二: 東北地方沿岸の確率準沖波諸元から逆推定される確率沖波諸元の妥当性に関する検討, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 79, 2023. (印刷中)
- 3) 森谷拓実, 平山克也: 準沖波に対する沖波の簡易逆推定手法の見直しと実海域における適用性の検証, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.79, 2023. (印刷中)
- 4) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 日本港湾協会, p.152, 2018.
- 5) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 日本港湾協会, p.130, 2018.
- 6) 令和2年度東北管内設計波浪検討業務報告書, 国土交通省東北地方整備局, 2021.3.
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 日本港湾協会, pp.143-145, 2018.
- 8) 松藤絵理子, 橋本典明, 川口浩二, 宇都宮好博: NOWPHAS 観測値を用いたうねりの特性解析及びうねりの推算精度向上に向けた検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_43-I_48, 2020.
- 9) 合田良実, 鈴木康正: 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, pp.12-18, 1975.

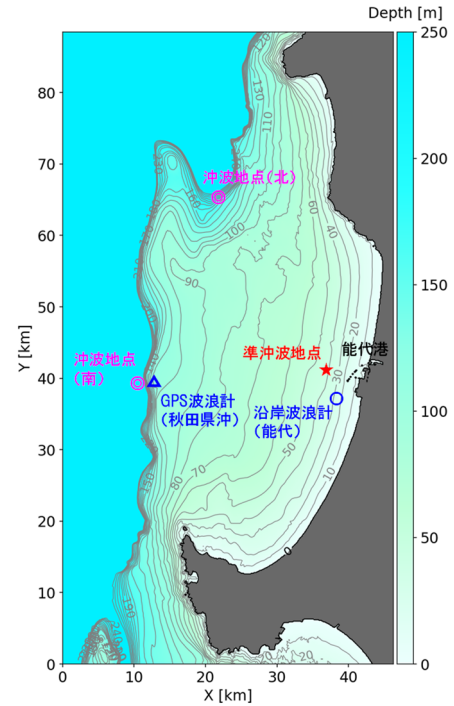
- 10) Longuet-Higgins: The statistical analysis of a random, moving surface, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A* Vol. 249, pp.321-387, 1957.
- 11) Goda, Y. and M. Kudaka: On the role of spectral width and shape parameters in control of individual wave height distribution, *Coastal Engineering Journal*, Vol. 49, No. 3, pp. 311-335, 2007.
- 12) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 日本港湾協会, pp.124-128, 2018.
- 13) 永井康平: 不規則な海の波の屈折および回折の計算, 港湾空港技術研究所報告, Vol.11, No.2, pp.59-71, 1972.
- 14) 芹沢真澄, Abdelaziz Rabie, 三波俊郎, 五味久昭: 回折領域の不規則波浪場の簡単な計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.76-80, 1993.
- 15) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下巻), 日本港湾協会, p.2118, 2018.

付録 A 準沖波地点, 沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点の位置

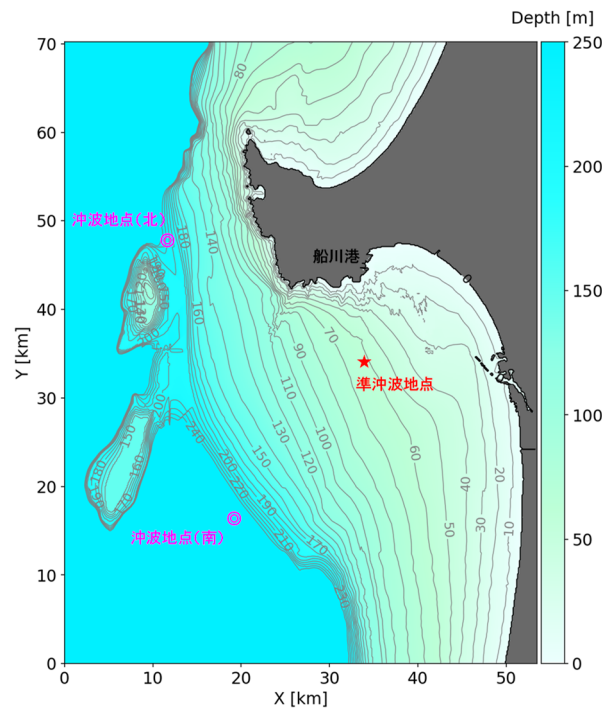
本研究で対象とした東北管内14港湾のうち、酒田港、八戸港を除く12港湾の沖波地点、準沖波地点及びNOWPHAS波浪観測（沿岸波浪計、GPS波浪計）地点の位置を周辺海域の水深図とともに付図A-1～付図A-12に示す。なお、準沖波地点は令和2年度に国土交通省東北地方整備局により設定された⁶⁾地点であり、沖波地点は本研究において独自に設定した地点である。



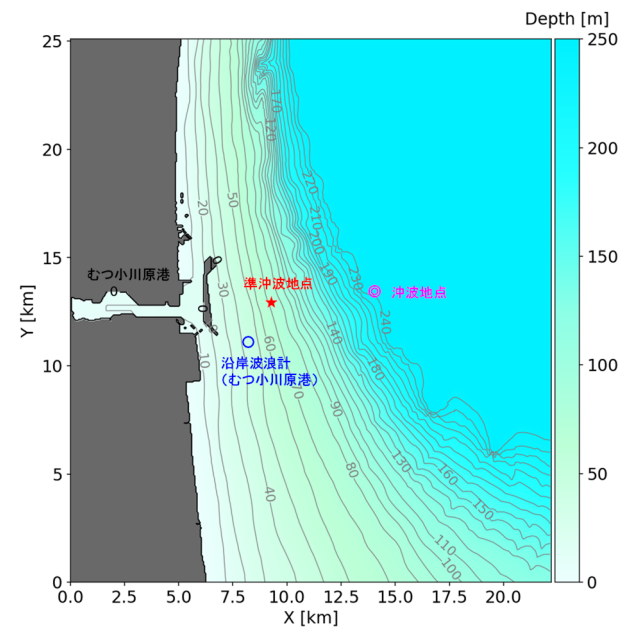
付図 A-1 秋田港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図 (○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点)



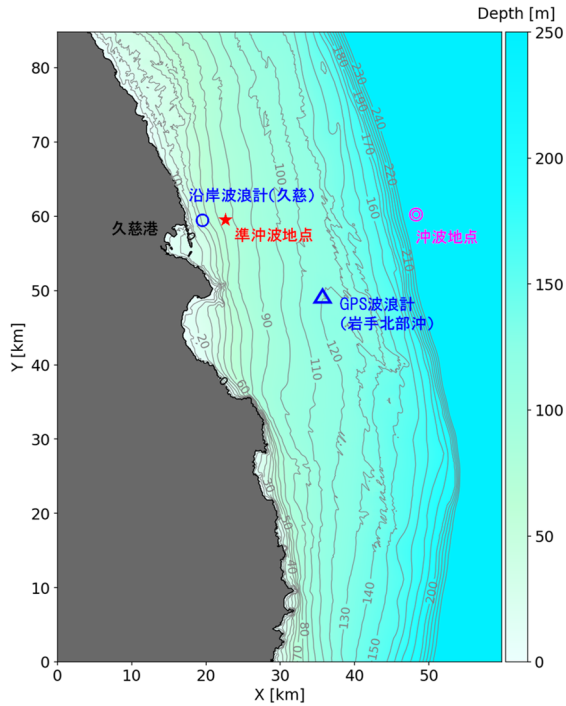
付図 A-3 能代周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図 (○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点，△：GPS 波浪計地点)



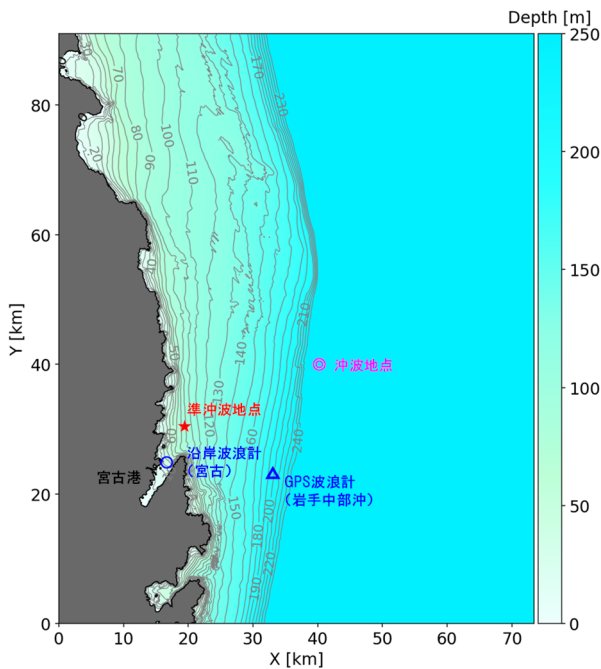
付図 A-2 船川港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図 (○：沖波地点，★：準沖波地点)



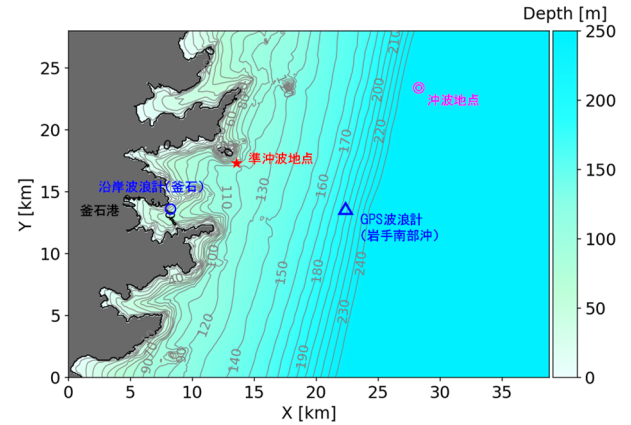
付図 A-4 むつ小川原港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図 (○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点)



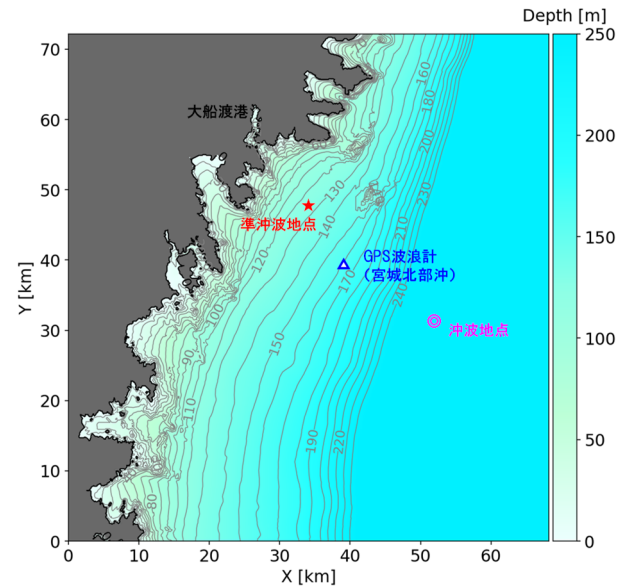
付図 A-5 久慈港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点，△：GPS 波浪計地点）



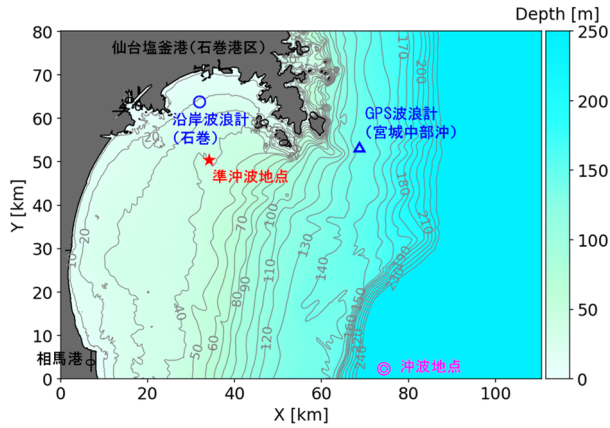
付図 A-6 宮古港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点，△：GPS 波浪計地点）



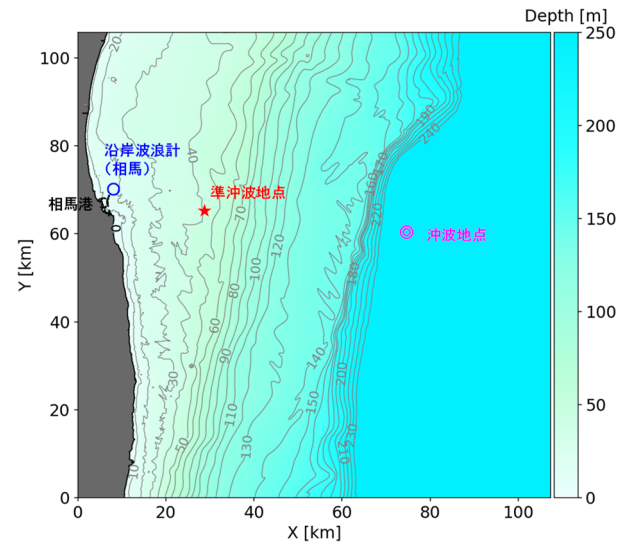
付図 A-7 釜石港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点，△：GPS 波浪計地点）



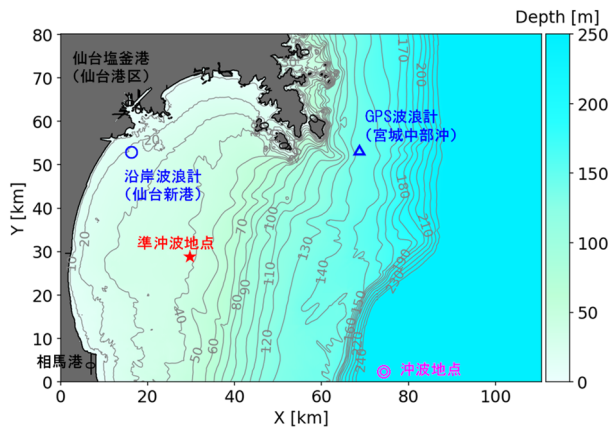
付図 A-8 大船渡港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，△：GPS 波浪計地点）



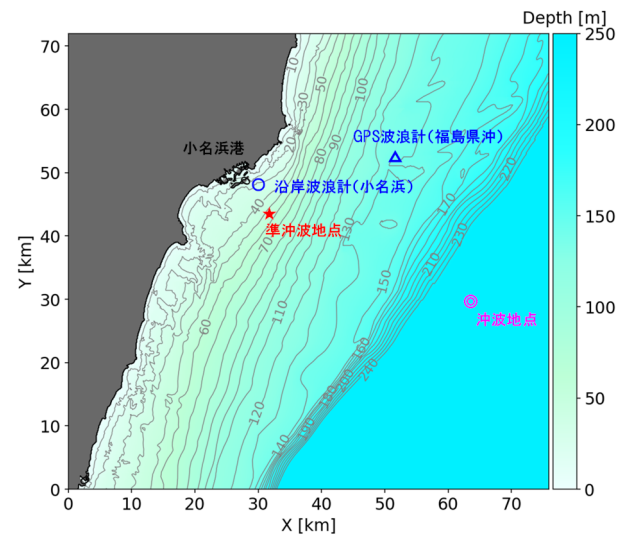
付図 A-9 仙台塩釜港（石巻港区）周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沿岸波浪計地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点）



付図 A-11 相馬港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沿岸波浪計地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点）



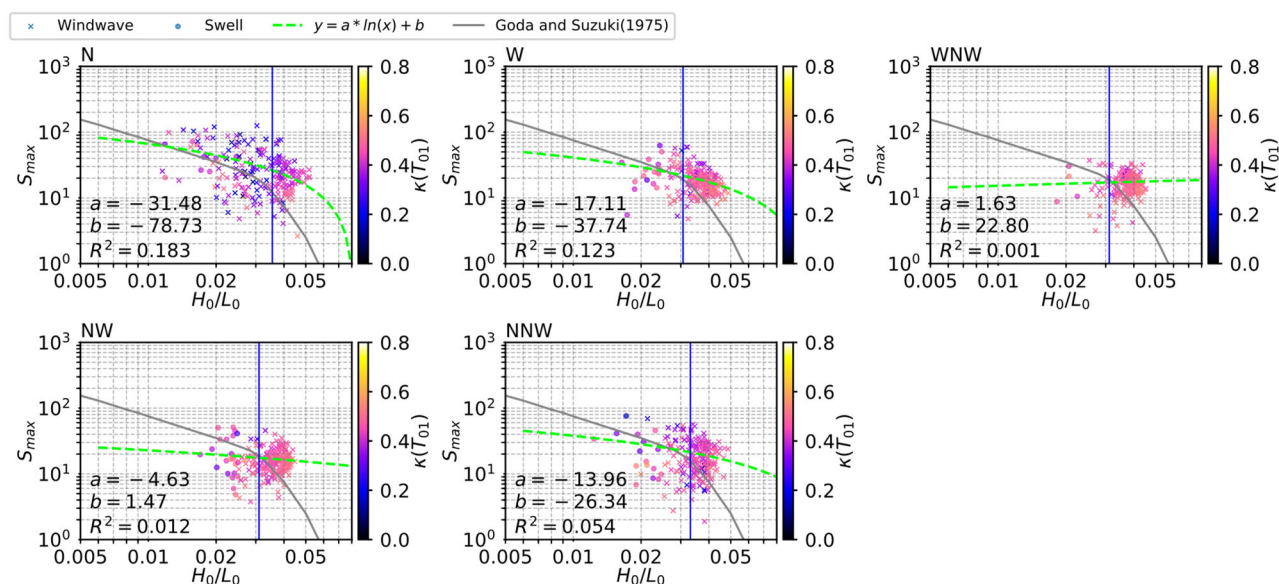
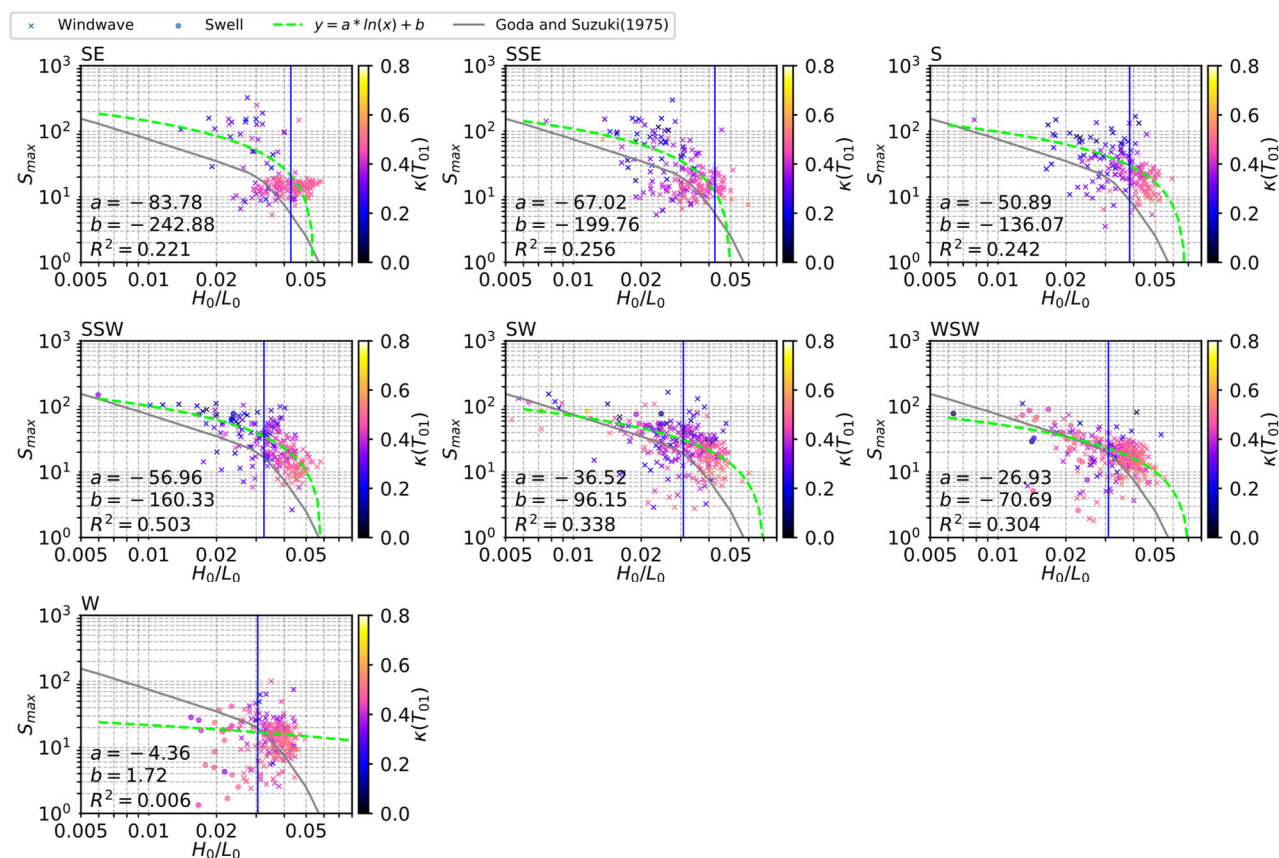
付図 A-10 仙台塩釜港（仙台区）周辺の沖波地点，準沖波地点及びNOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点）

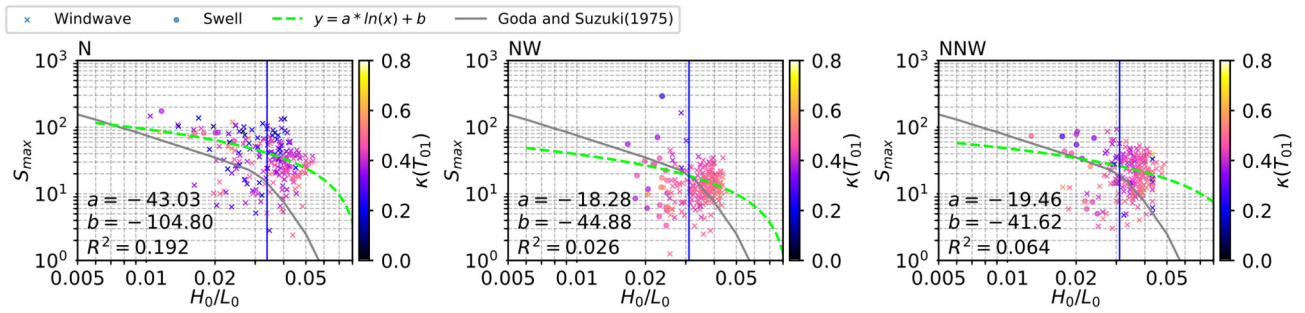


付図 A-12 小名浜港周辺の沖波地点，準沖波地点及び NOWPHAS 波浪観測地点位置図（○：沖波地点，★：準沖波地点，○：沿岸波浪計地点，△：GPS 波浪計地点）

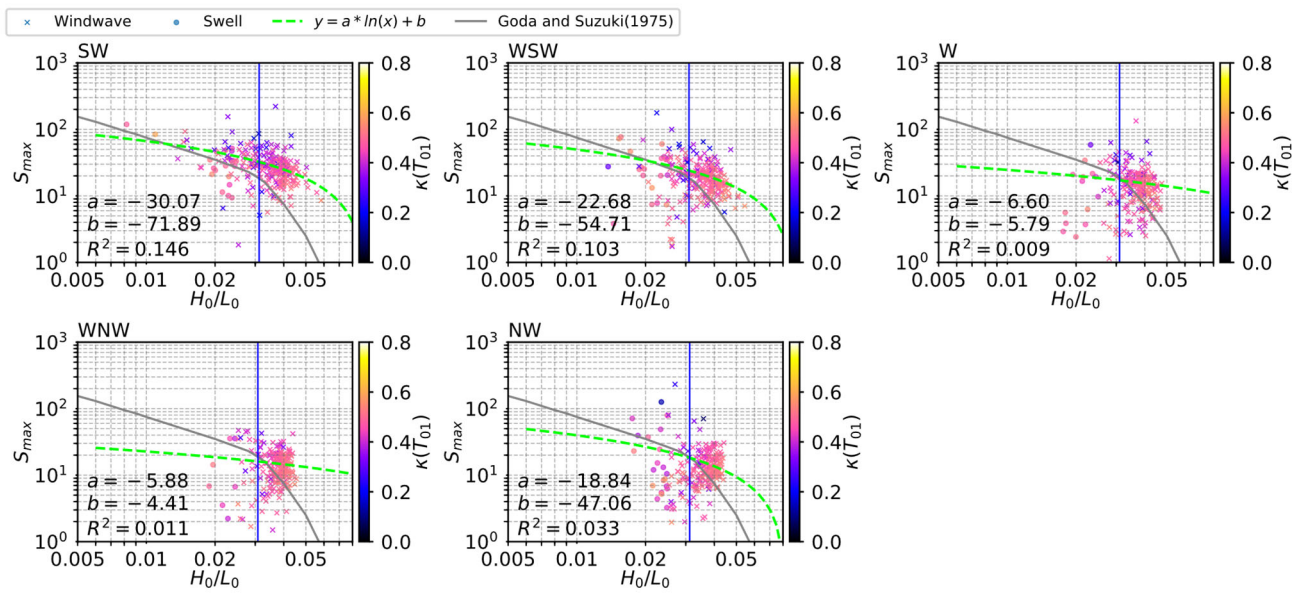
付録 B 方向集中度 S_{max} 推定式に関する検討

B-1. 波形勾配と方向集中度の関係図

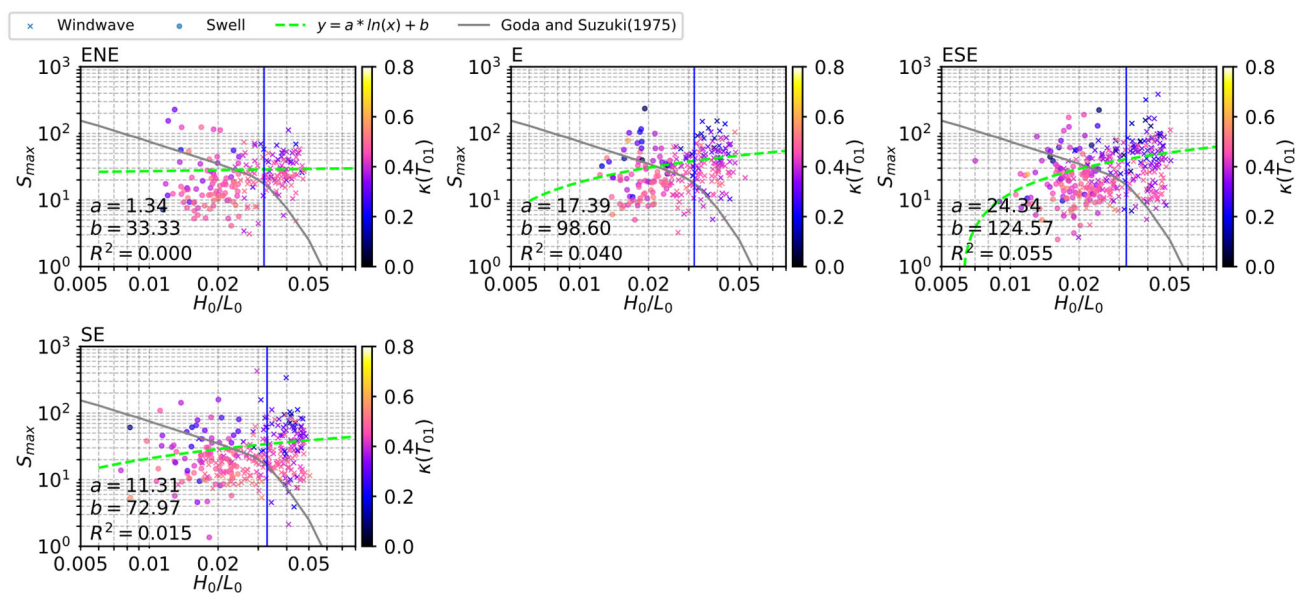

 付図 B-1.1 秋田港沖波地点（北）における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係

 付図 B-1.2 秋田港沖波地点（南）における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



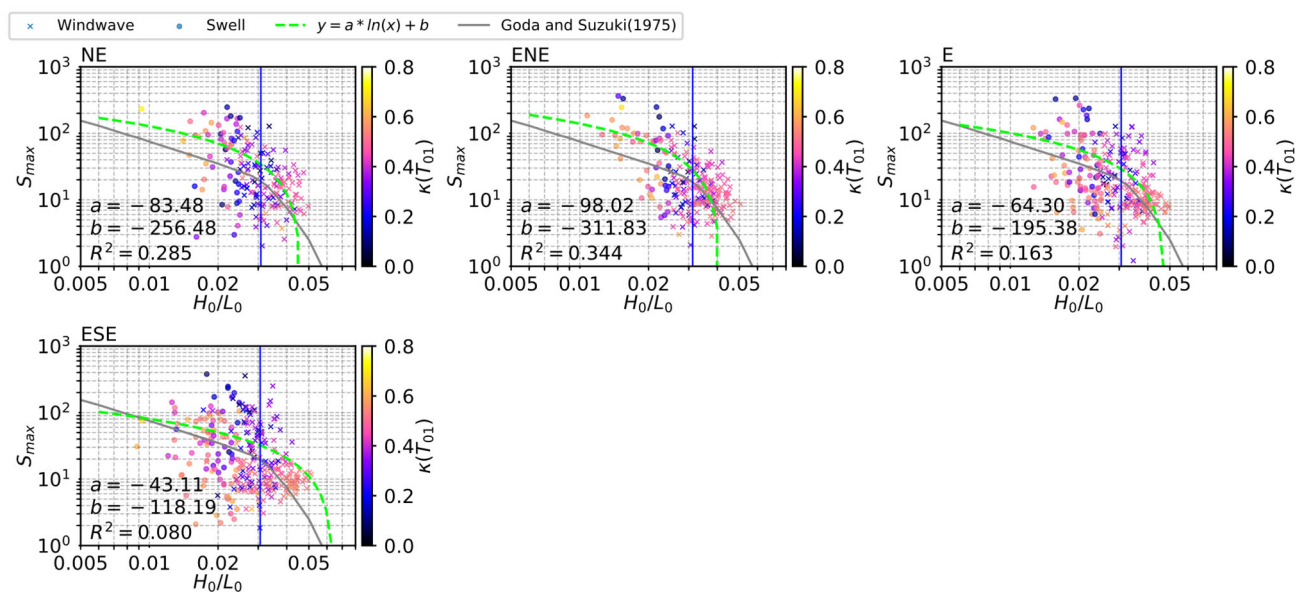
付図 B-1.3 能代港沖波地点（北）における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



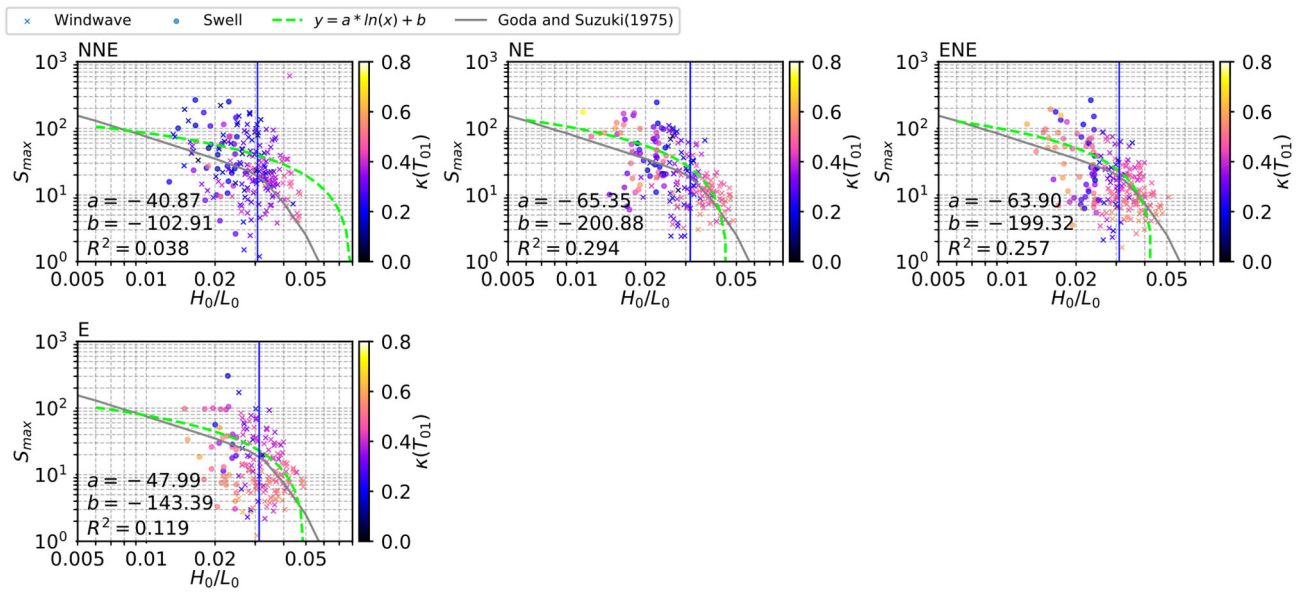
付図 B-1.4 能代港沖波地点（南）における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



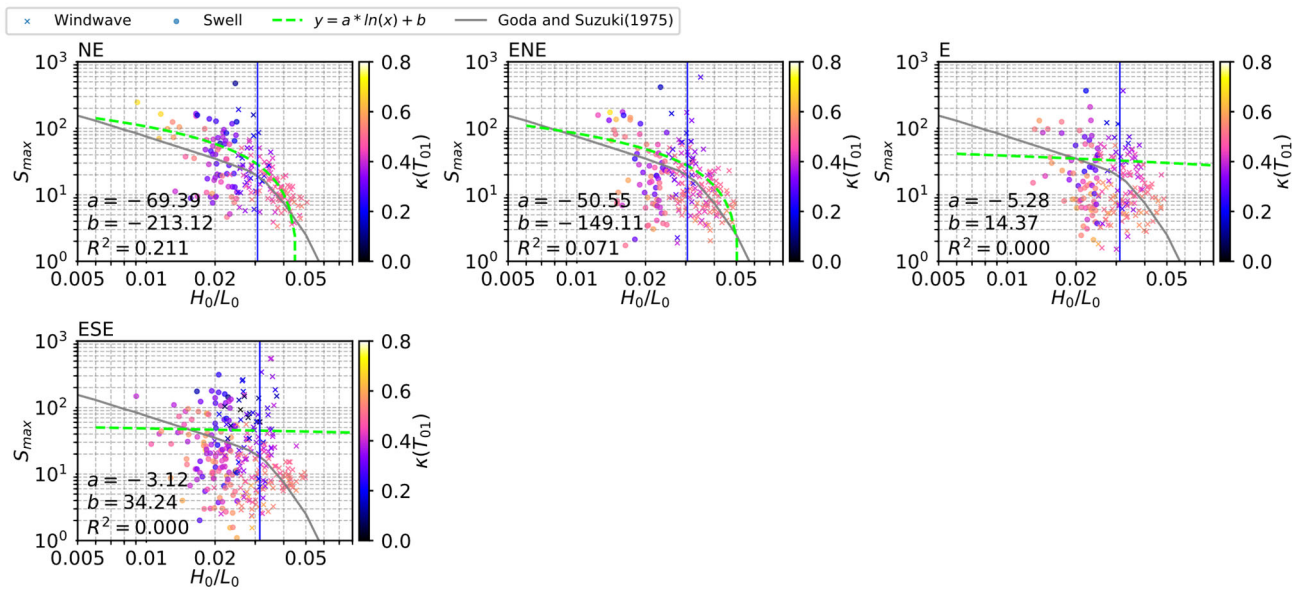
付図 B-1.5 むつ小川原港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



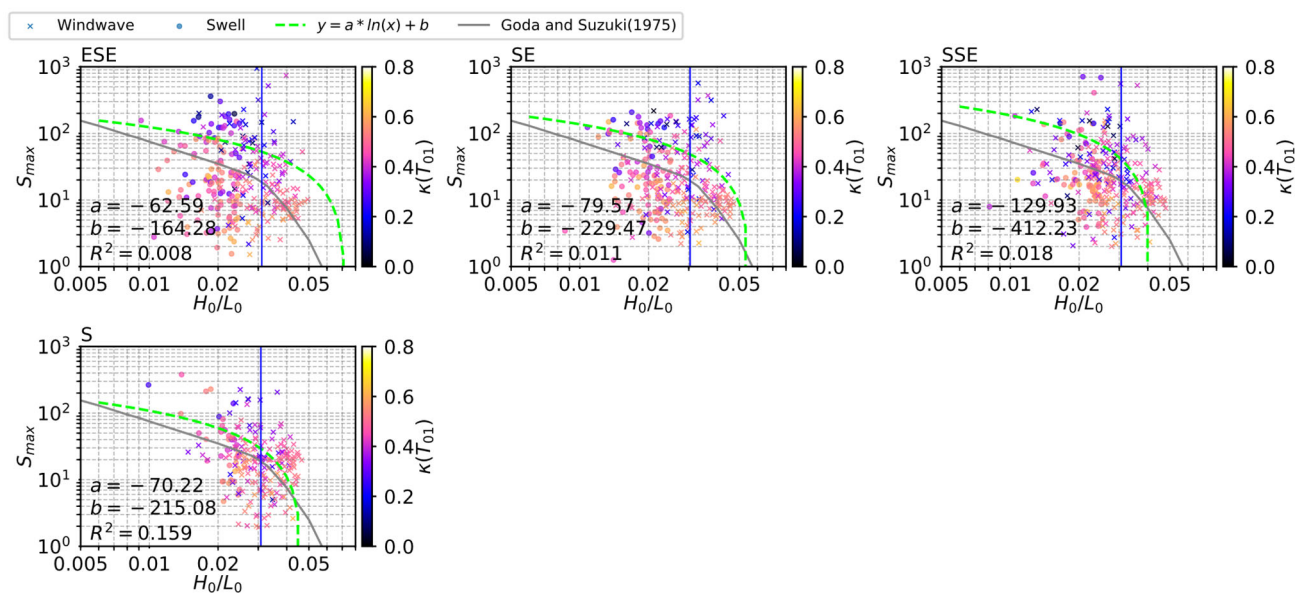
付図 B-1.6 久慈港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



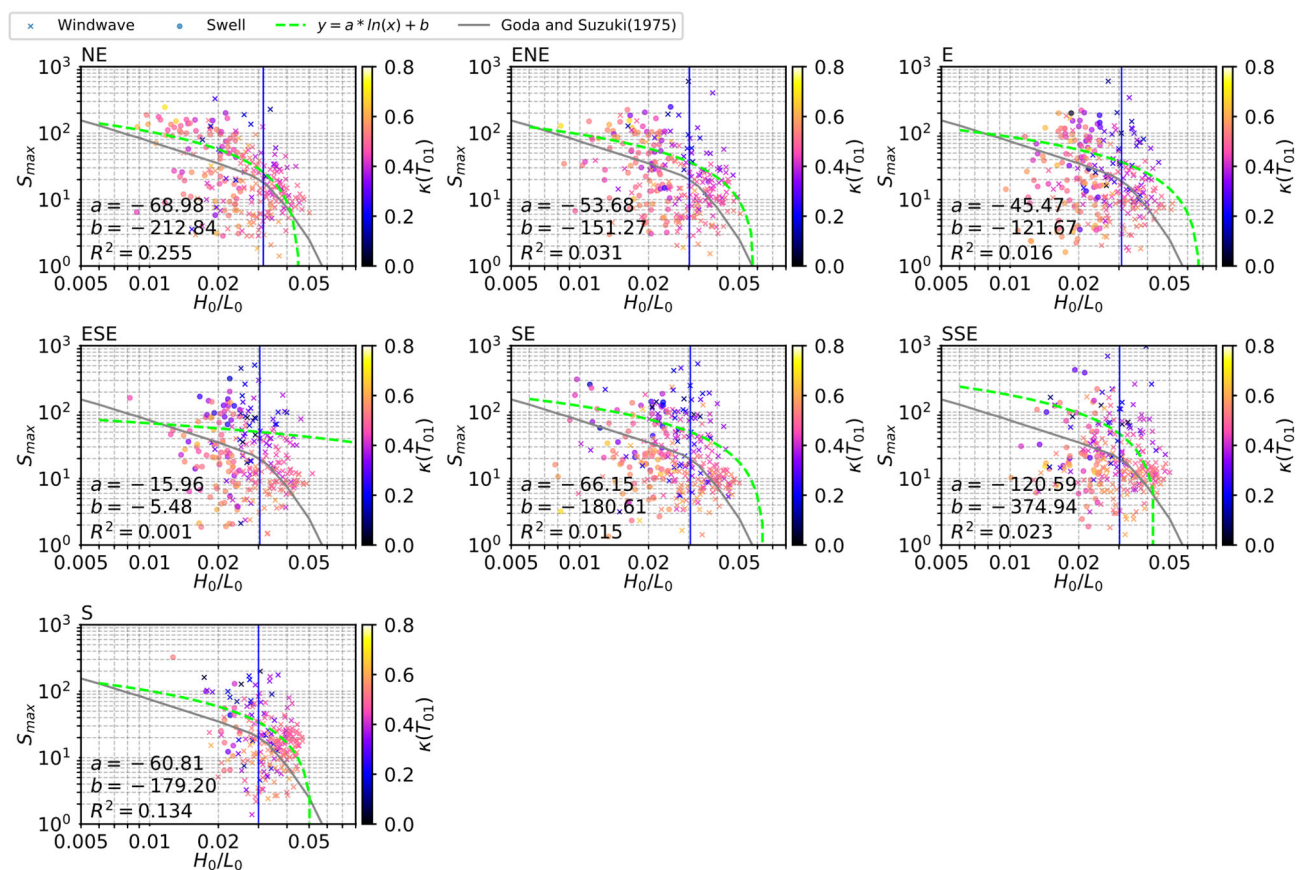
付図 B-1.7 宮古港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



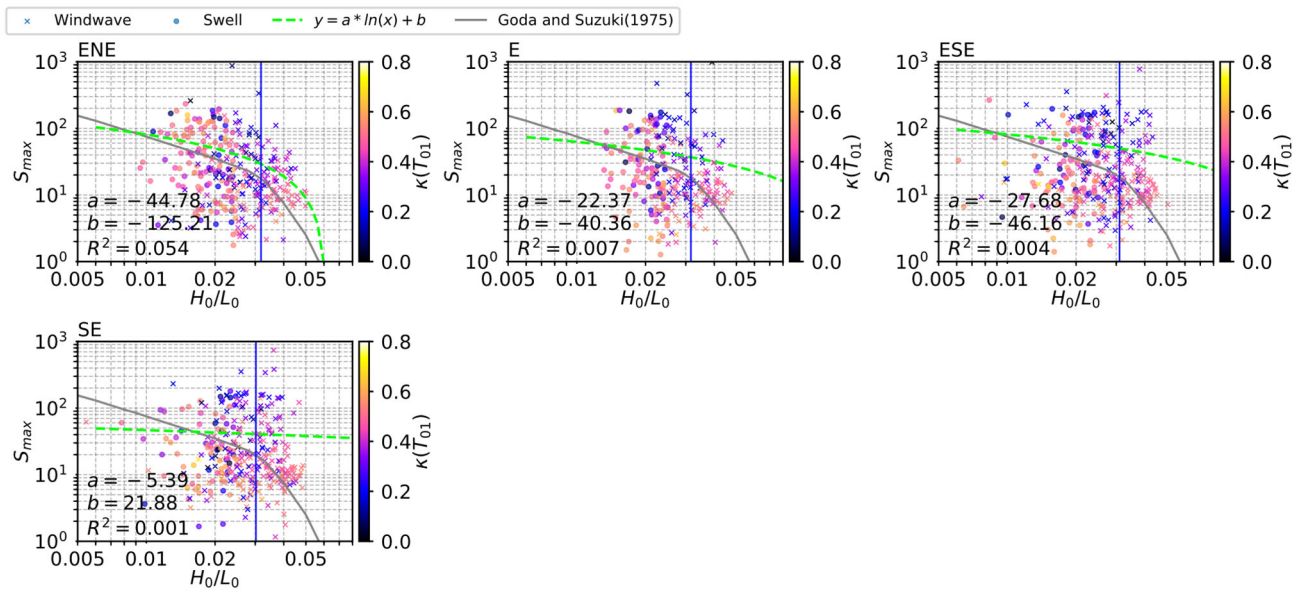
付図 B-1.8 釜石港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



付図 B-1.9 大船渡港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



付図 B-1.10 相馬港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係



付図 B-1.11 小名浜港沖波地点における代表波向の波形勾配 H_0/L_0 と方向集中度 S_{max} の関係

B-2. 方向集中度 S_{max} 推定式の係数値

付表 B-2.1 に各港湾の沖波地点における式(9)の S_{max} 推定式の係数 a , b の値と、極値統計解析により得られた確率沖波の波形勾配、およびそれに対して推定式より算定した S_{max} 値を示す。なお、確率沖波の波形勾配は付図 B-1.1～付図 B-1.11 の図中に示す青色実線と対応している。

付表 B-2.1 各港湾の沖波地点における S_{max} 推定式の係数 a, b の値(波形勾配は確率沖波諸元, S_{max} 値は推定式による算定値)

港湾	波向	a	b	H_0/L_0	S_{max}
秋田港, 船川港 (沖波地点(北))	W	-17.1	-37.7	0.0307	22
	WNW	1.6	22.8	0.0311	17
	NW	-4.6	1.5	0.0310	18
	NNW	-14.0	-26.3	0.0331	21
秋田港, 船川港 (沖波地点(南))	N	-31.5	-78.7	0.0355	26
	SE	-83.8	-242.9	0.0428	21
	SSE	-67.0	-199.8	0.0425	12
	S	-50.9	-136.1	0.0384	30
	SSW	-57.0	-160.3	0.0325	35
	SW	-36.5	-96.1	0.0308	31
	WSW	-26.9	-70.7	0.0309	23
能代港 (沖波地点(北))	W	-4.4	1.7	0.0305	17
	NW	-18.3	-44.9	0.0310	19
	NNW	-19.5	-41.6	0.0310	26
	N	-43.0	-104.8	0.0338	41
能代港 (沖波地点(南))	SW	-30.1	-71.9	0.0312	32
	WSW	-22.7	-54.7	0.0310	24
	W	-6.6	-5.8	0.0310	17
	WNW	-5.9	-4.4	0.0308	16
	NW	-18.8	-47.1	0.0312	18
むつ小川原 (沖波地点)	ENE	1.3	33.3	0.0318	29
	E	17.4	98.6	0.0317	39
	ESE	24.3	124.6	0.0322	41
	SE	11.3	73.0	0.0328	34
久慈 (沖波地点)	NE	-83.5	-256.5	0.0308	34
	ENE	-98.0	-311.8	0.0312	28
	E	-64.3	-195.4	0.0306	29
	ESE	-43.1	-118.2	0.0306	32
宮古 (沖波地点)	NNE	-40.9	-102.9	0.0307	40
	NE	-65.4	-200.9	0.0314	25
	ENE	-63.9	-199.3	0.0309	23
	E	-48.0	-143.4	0.0312	23
釜石 (沖波地点)	NE	-69.4	-213.1	0.0307	28
	ENE	-50.5	-149.1	0.0305	27
	E	-5.3	14.4	0.0311	33
	ESE	-3.1	34.2	0.0314	45
大船渡港 (沖波地点)	ESE	-62.6	-164.3	0.0311	53
	SE	-79.6	-229.5	0.0304	49
	SSE	-129.9	-412.2	0.0306	41
	S	-70.2	-215.1	0.0308	29
仙台塩釜港, 相馬港 (沖波地点)	NE	-69.0	-212.8	0.0315	26
	ENE	-53.7	-151.3	0.0302	37
	E	-45.5	-121.7	0.0308	37
	ESE	-16.0	-5.5	0.0304	50
	SE	-66.1	-180.6	0.0305	50
	SSE	-120.6	-374.9	0.0302	47
	S	-60.8	-179.2	0.0300	34
小名浜港 (沖波地点)	ENE	-44.8	-125.2	0.0318	29
	E	-22.4	-40.4	0.0316	37
	ESE	-27.7	-46.2	0.0310	50
	SE	-5.4	21.9	0.0302	41

付録 C 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

本研究で対象とした東北管内14港湾のそれぞれにおいて、準沖波諸元に対して逆推定された沖波地点及びGPS波浪計地点で算定された波浪諸元を、両地点での波浪推算結果に基づく極値統計解析結果とともに、付図C-1.1～付図C-14.3に示す。ただし、これらは準沖波諸元に対する波高比・周期比として整理した。なお、各方位の上部に示した各数値は沖波の S_{max} 値を表し、括弧無しの数値は式(9)及び付表B-2.1による H_0/L_0 に対する算定値、括弧付きの数値は波浪変形計算に用いた合田・鈴木⁹⁾による推奨値を示す(なお、括弧付き数値が推奨値と僅かに異なるのは沖波地点での算定値を抽出したためである)。また、3波向処理および1波向処理で作成した極大値資料から推定された確率沖波波高・沖波周期の比と、沿岸波浪計地点で算定された波浪諸元と極値統計解析結果との波高比・周期比を併せて示す。

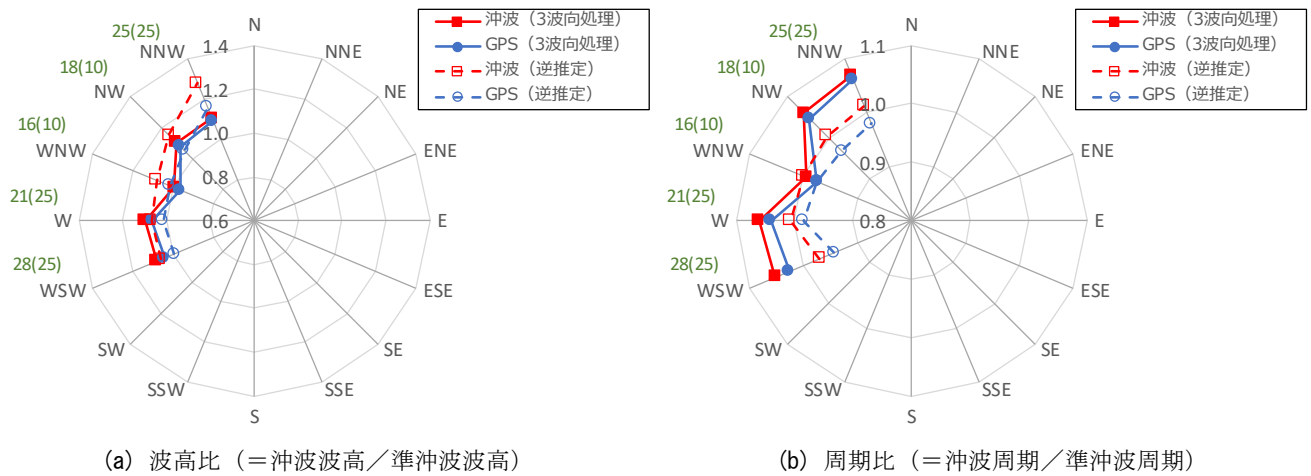
ここで、各港湾域における極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元を比較した各図において、逆推定された沖波諸元のプロット(白抜き四角)の横に※1を添えたものは、沖波地点を含まない計算領域を用いて逆推定された結果であることを示す。このとき、波高比・周期比の算定に用いる沖波諸元には入射波諸元を用いている。また、同様に、※2を添えたものは、沖波地点を含む計算領域を用いて逆推定された結果であるものの、島や岬、海底地形などの周辺地形による何らかの影響を受けているために、深海条件を満たす任意地点を想定する簡易逆推定手法においてこの影響を考慮せずに推定された沖波諸元とは、必ずしも一致しない結果であることを示す。

さらに、※1を添えたものは、沖波地点を含む計算領域を設定することが困難という状況からいずれも周辺地形の影響を強く受けるため、※2と同様に、簡易逆推定手法により推定される沖波諸元とは必ずしも一致しない。以下に、※1, ※2を添えた各港湾・各波向を具体的に記す。

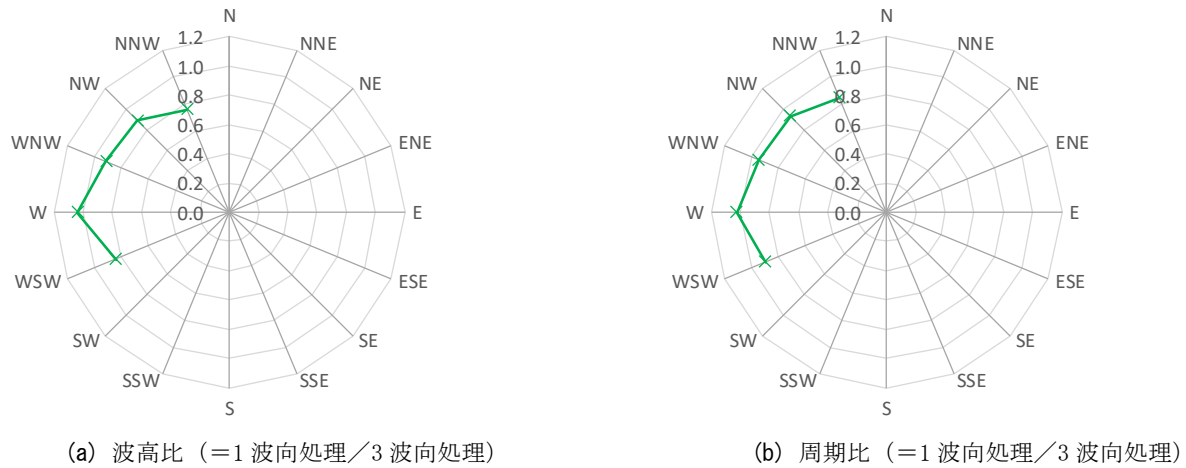
※1: 秋田港(波向WNW, NW, NNW, N), 船川港(波向WNW, NW), 能代港(波向NNW, N)

※2: 能代港(波向SW, WSW, NW), 相馬港(波向NE)

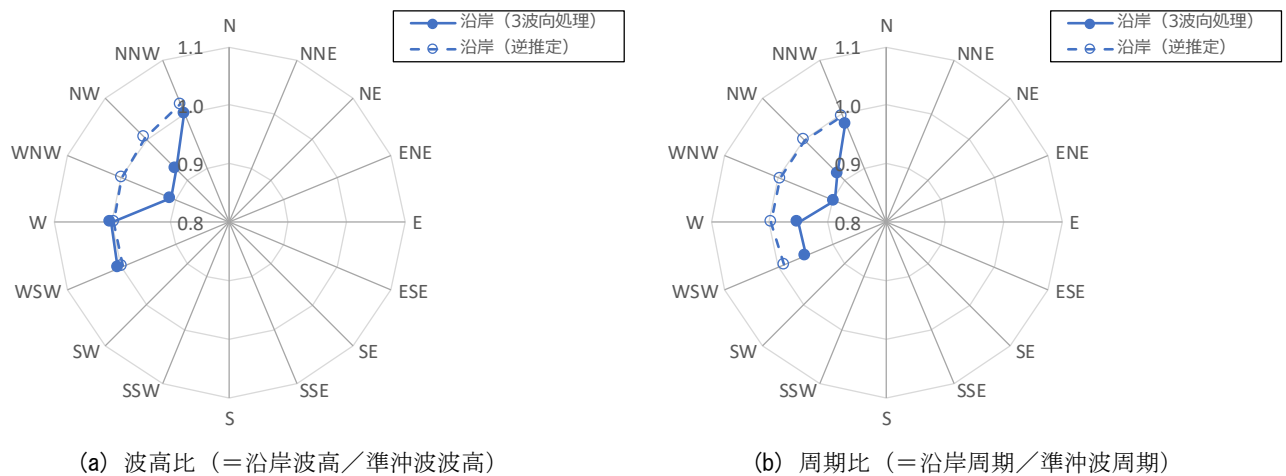
C-1. 酒田港



付図 C-1.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

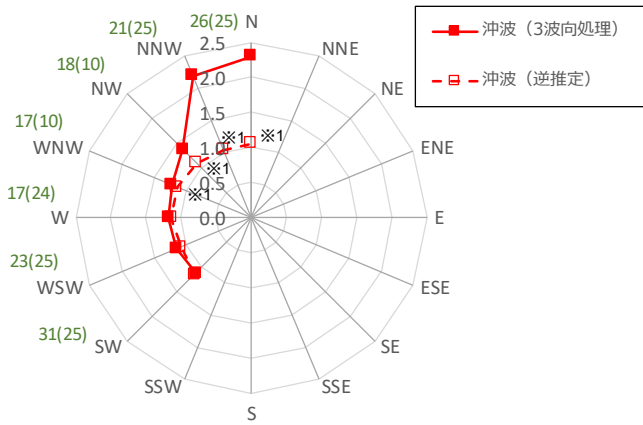


付図 C-1.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

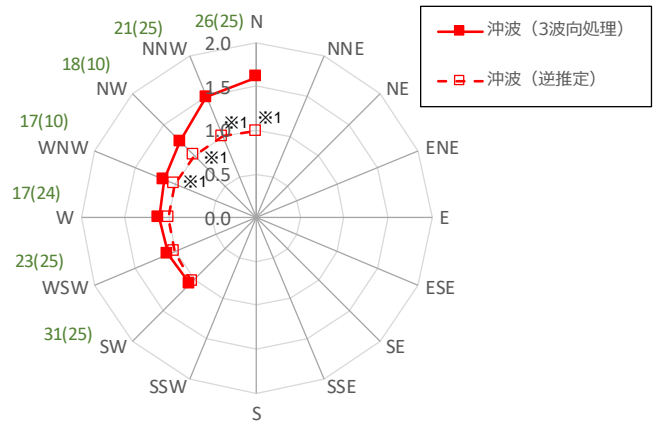


付図 C-1.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

C-2. 秋田港

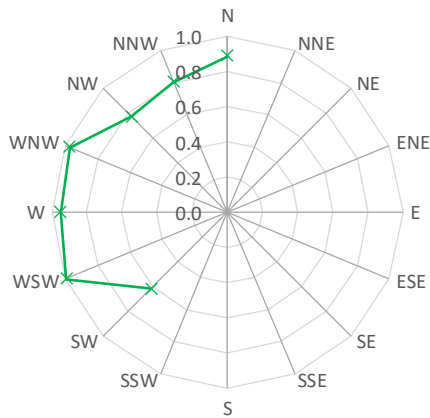


(a) 波高比 (= 沖波波高 / 準沖波波高)

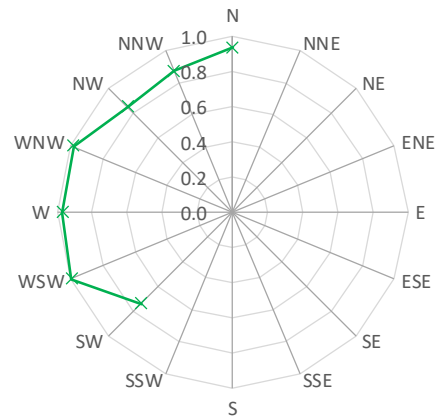


(b) 周期比 (= 沖波周期 / 準沖波周期)

付図 C-2.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

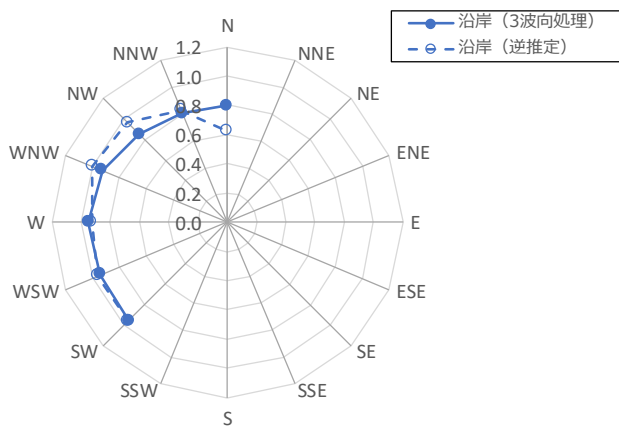


(a) 波高比 (= 1 波向処理 / 3 波向処理)

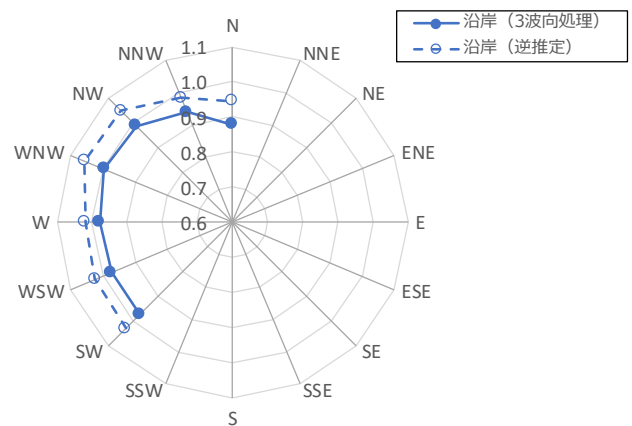


(b) 周期比 (= 1 波向処理 / 3 波向処理)

付図 C-2.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較



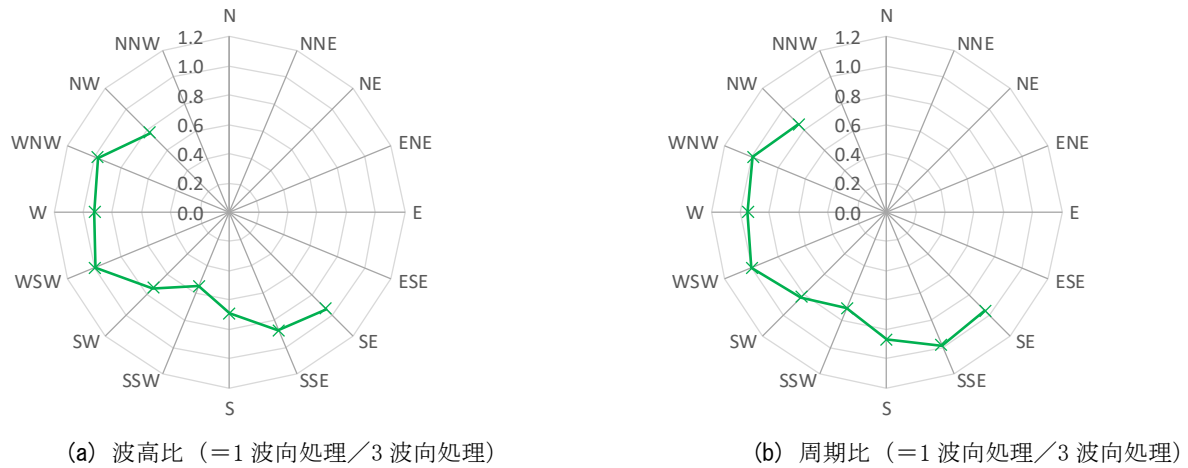
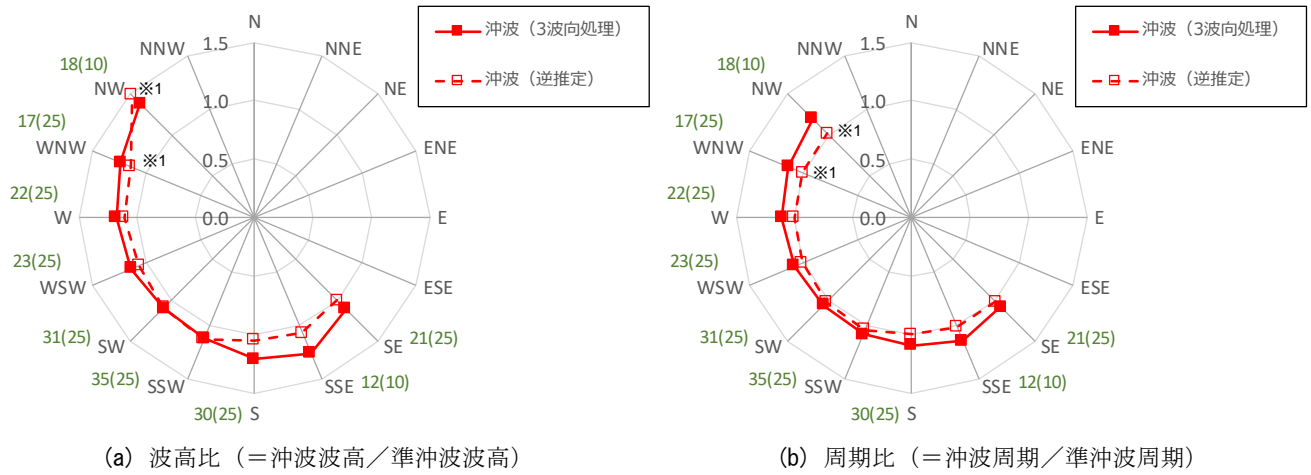
(a) 波高比 (= 沿岸波高 / 準沖波波高)



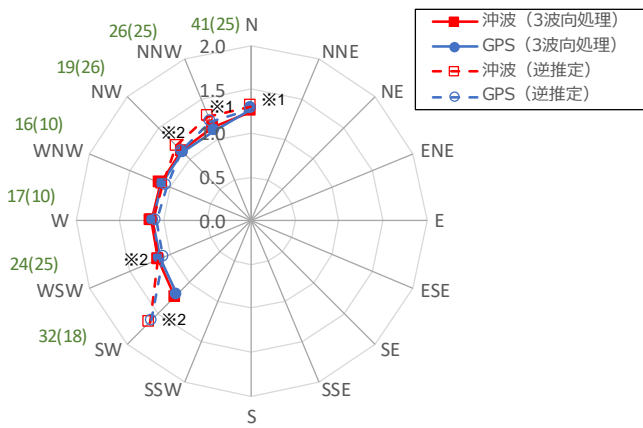
(b) 周期比 (= 沿岸周期 / 準沖波周期)

付図 C-2.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

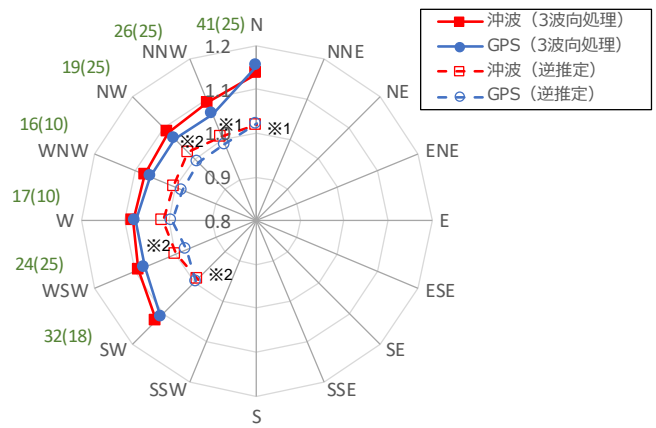
C-3. 船川港



C-4. 能代港

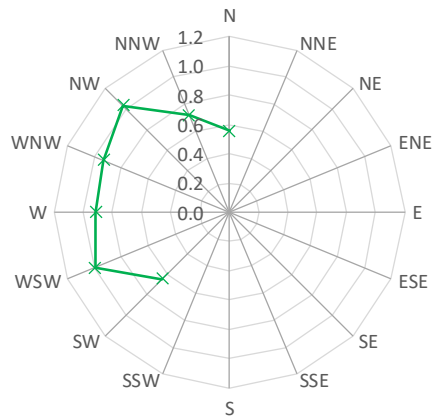


(a) 波高比 (= 沖波波高 / 準沖波波高)

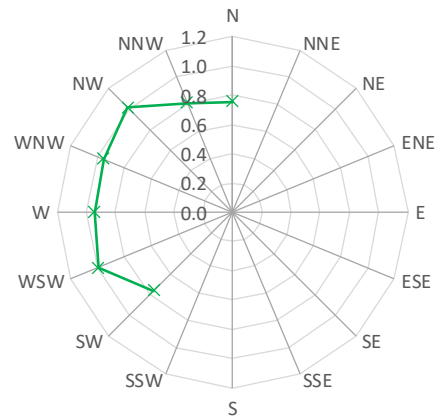


(b) 周期比 (= 沖波周期 / 準沖波周期)

付図 C-4.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

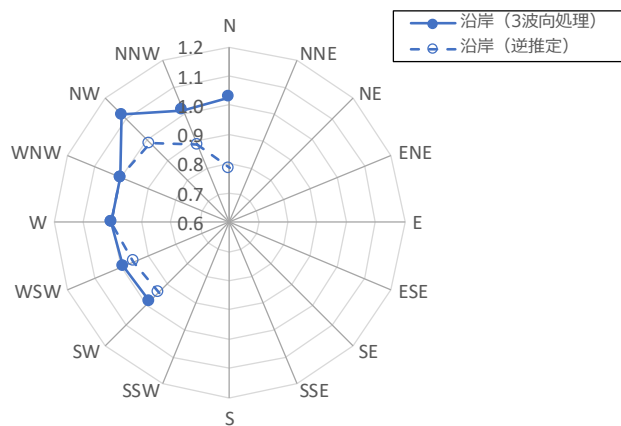


(a) 波高比 (= 1 波向処理 / 3 波向処理)

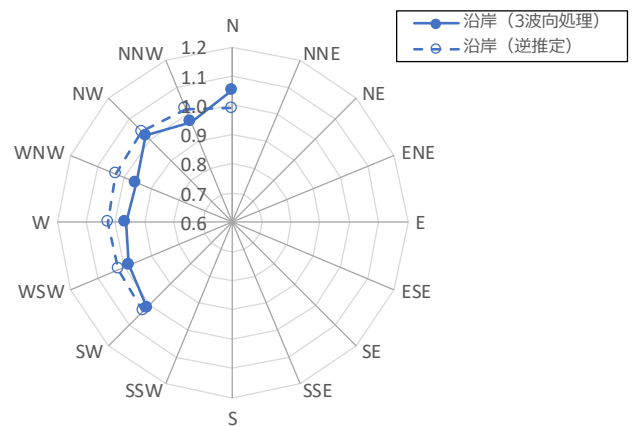


(b) 周期比 (= 1 波向処理 / 3 波向処理)

付図 C-4.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較



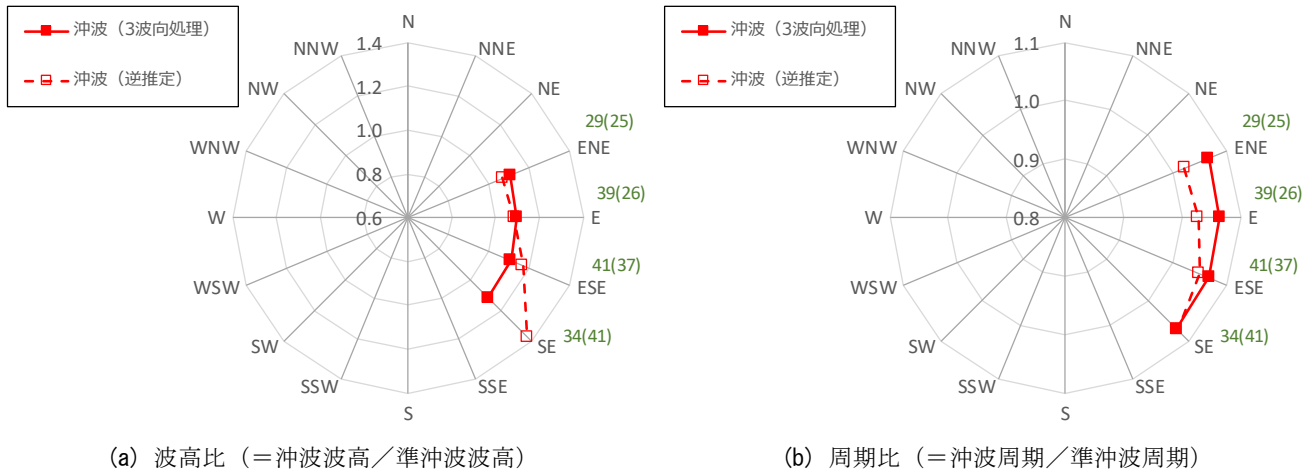
(a) 波高比 (= 沿岸波高 / 準沖波波高)



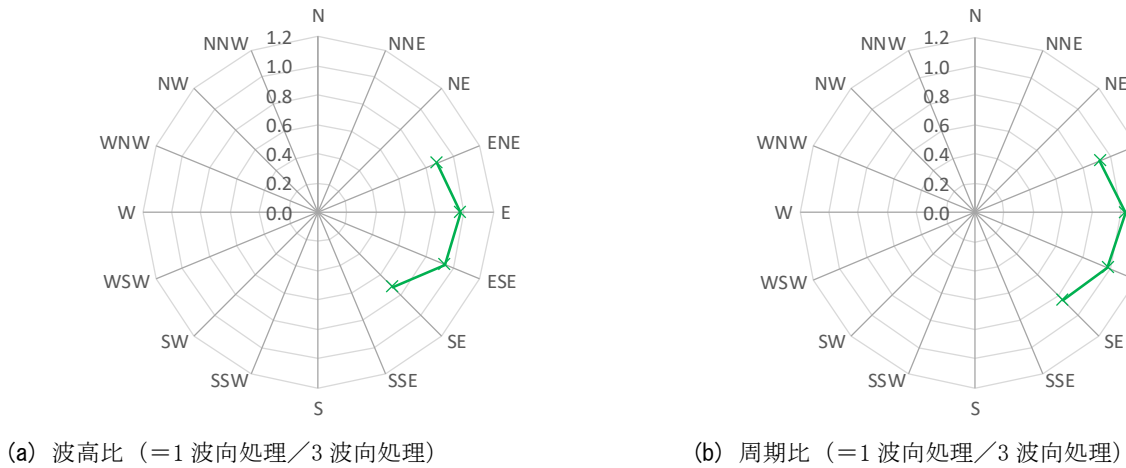
(b) 周期比 (= 沿岸周期 / 準沖波周期)

付図 C-4.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

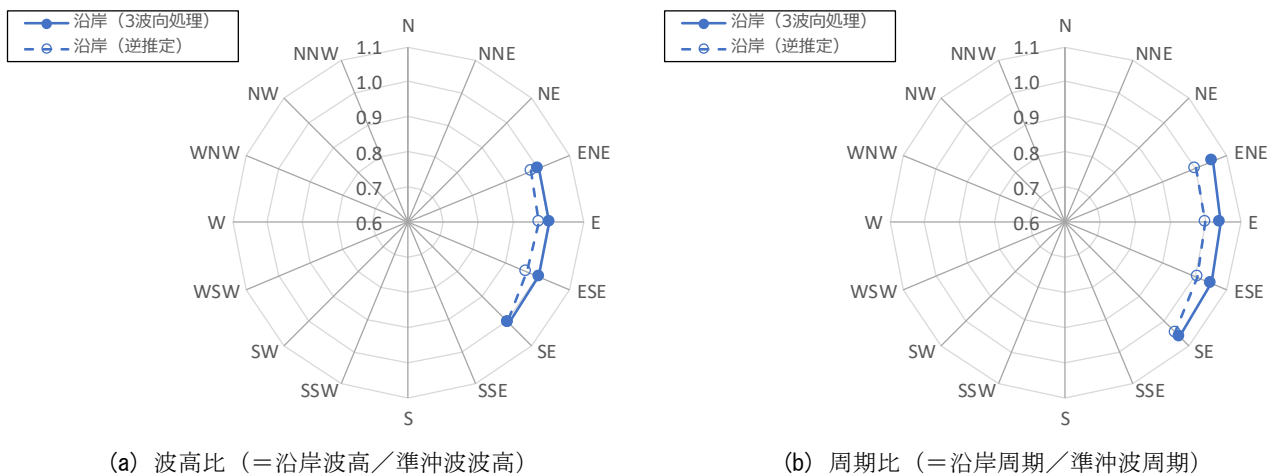
C-5. むつ小川原港



付図 C-5.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

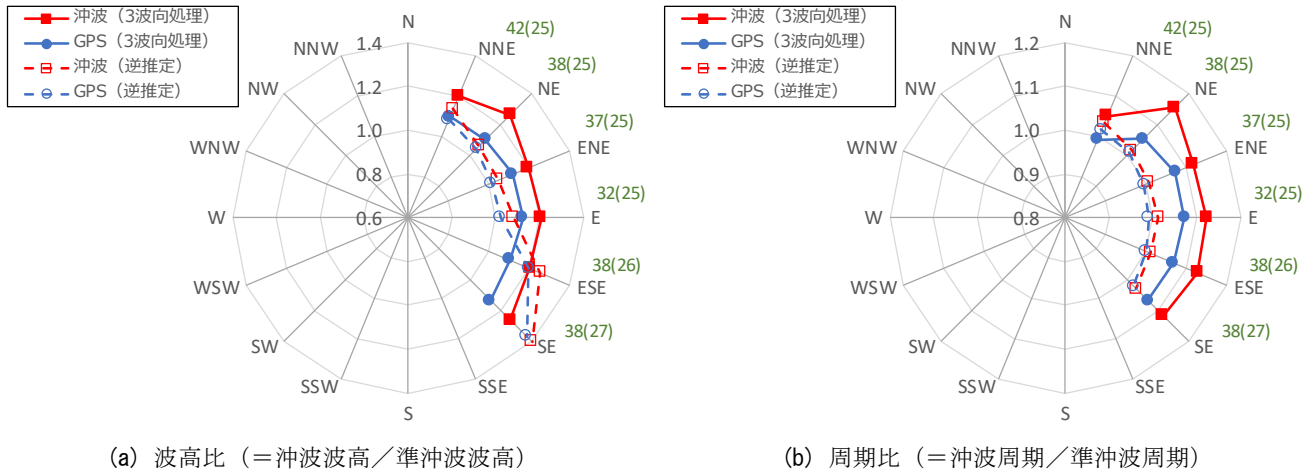


付図 C-5.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

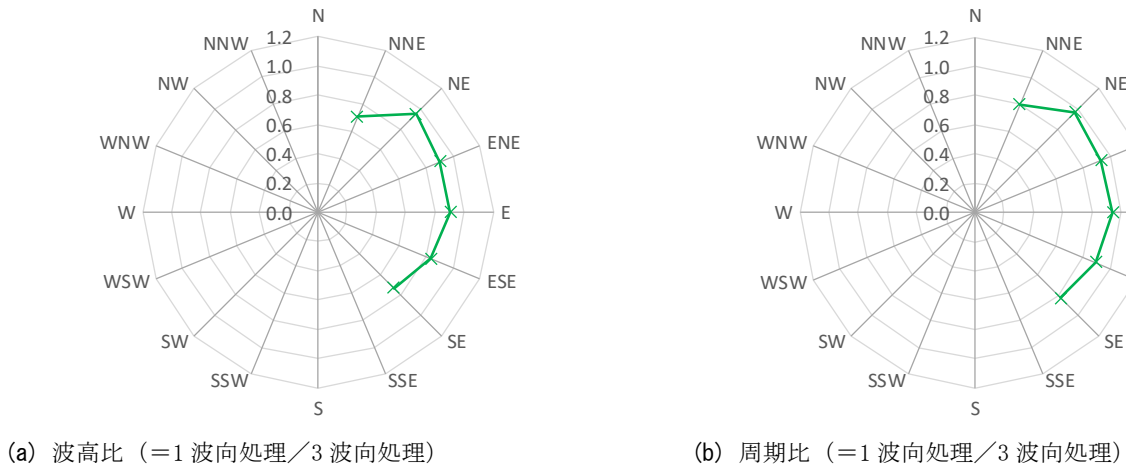


付図 C-5.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

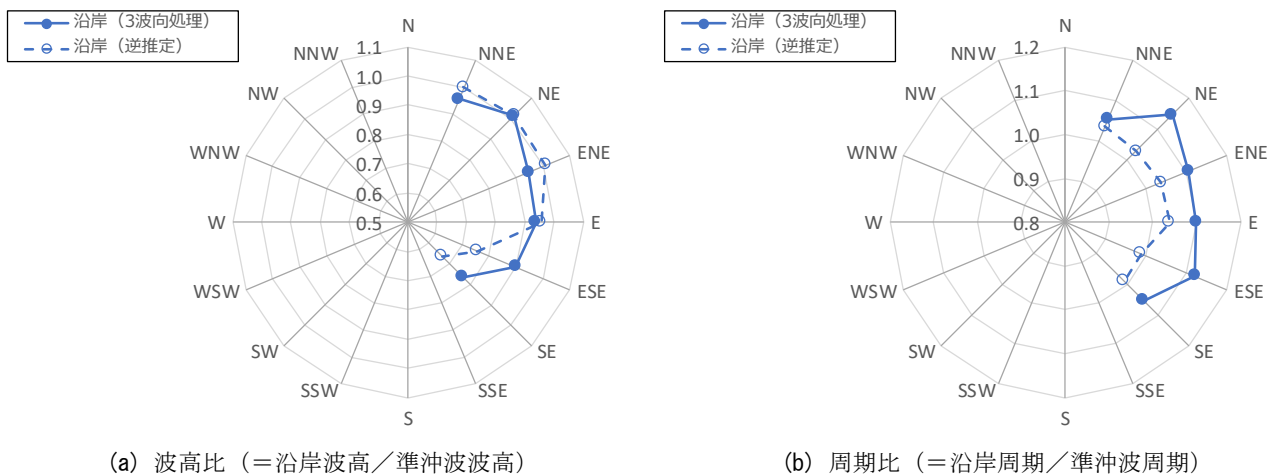
C-6. 八戸港



付図 C-6.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

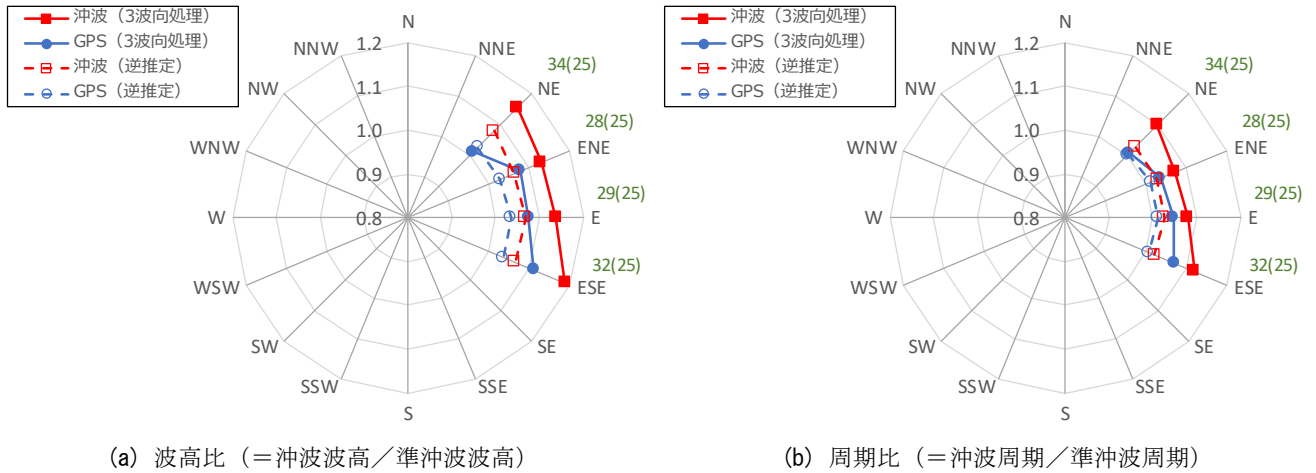


付図 C-6.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

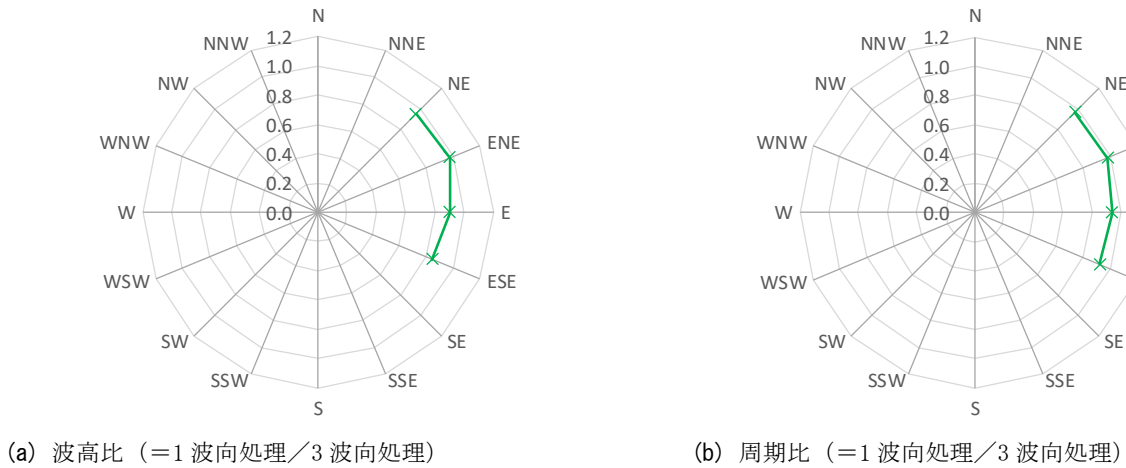


付図 C-6.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

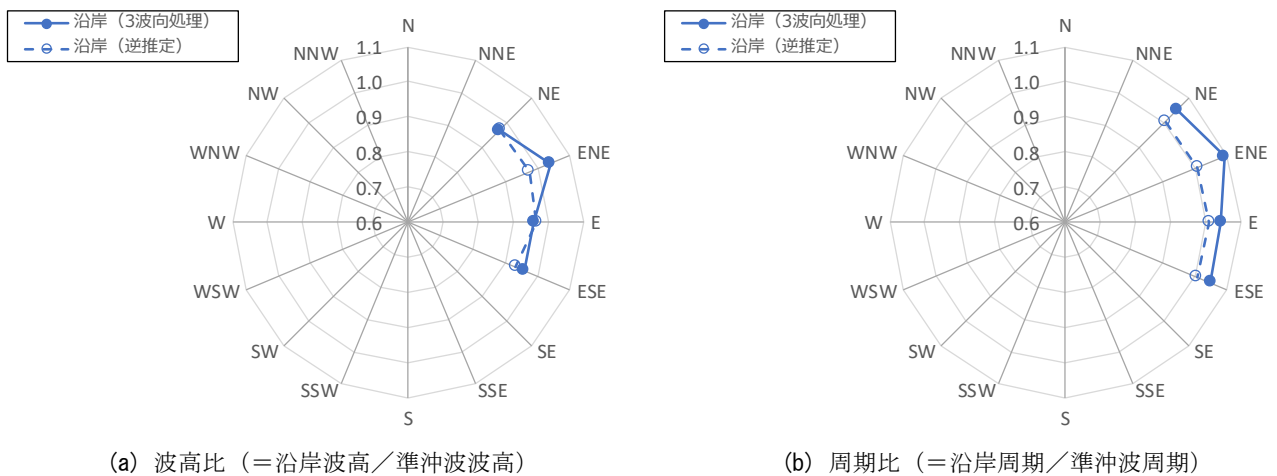
C-7. 久慈港



付図 C-7.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

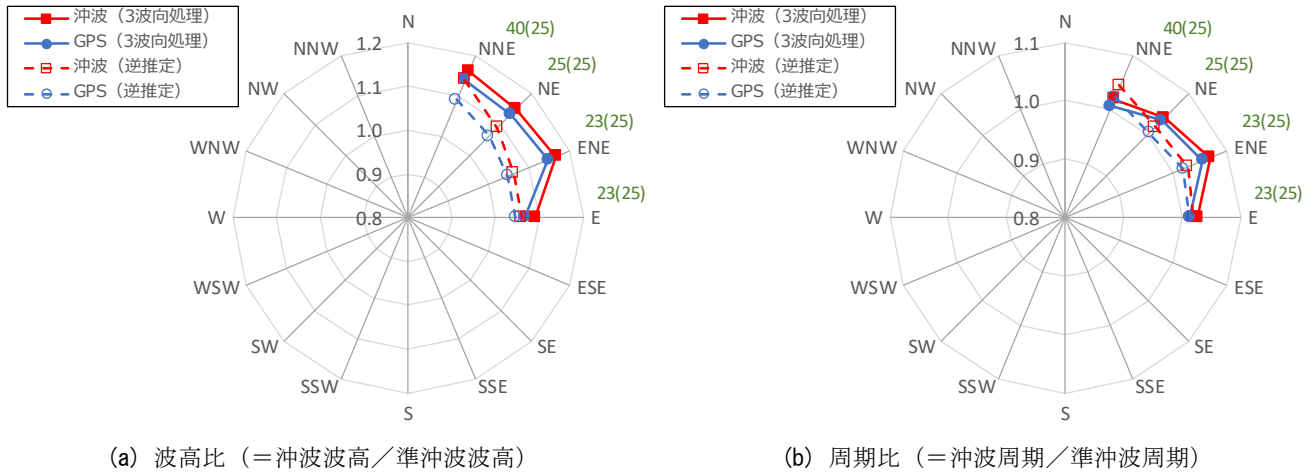


付図 C-7.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

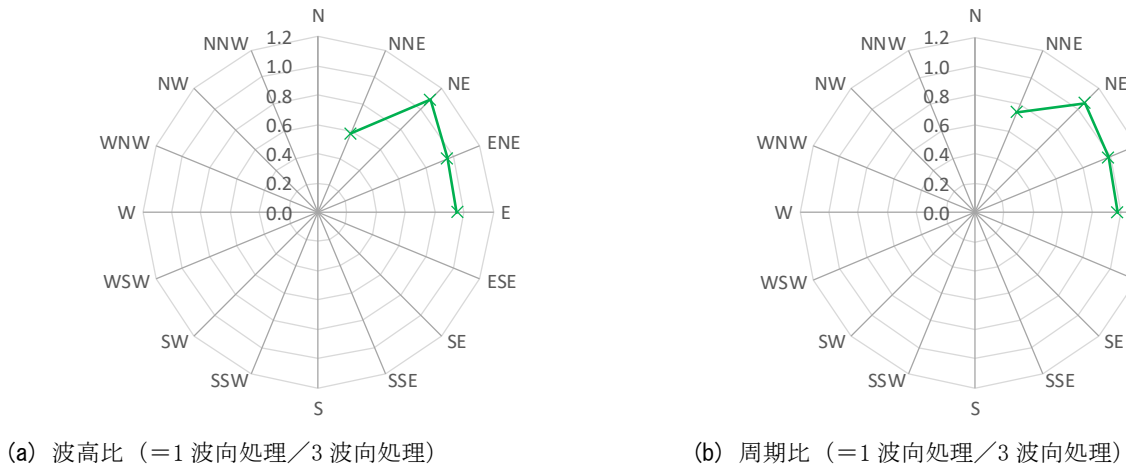


付図 C-7.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

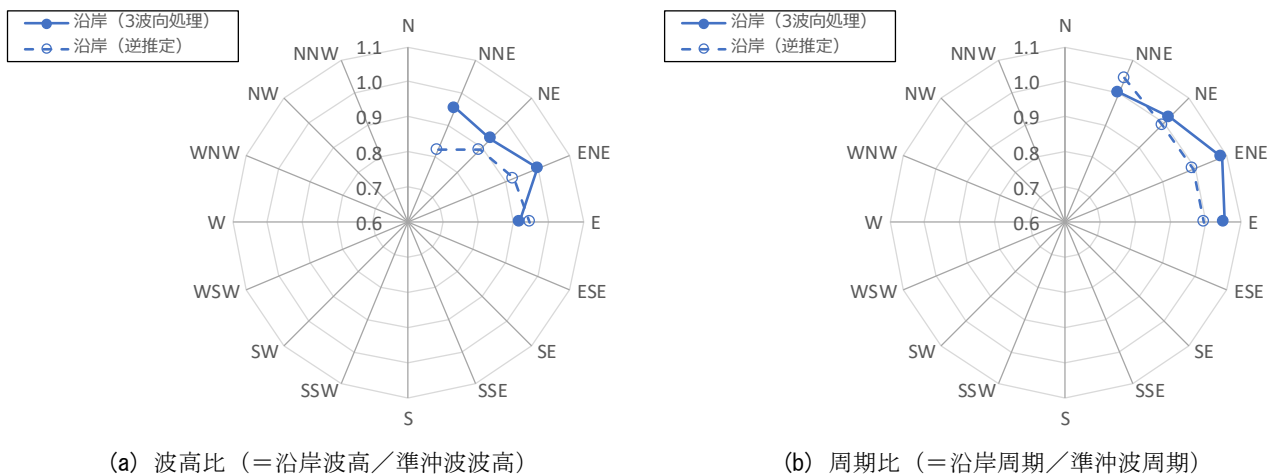
C-8. 宮古港



付図 C-8.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

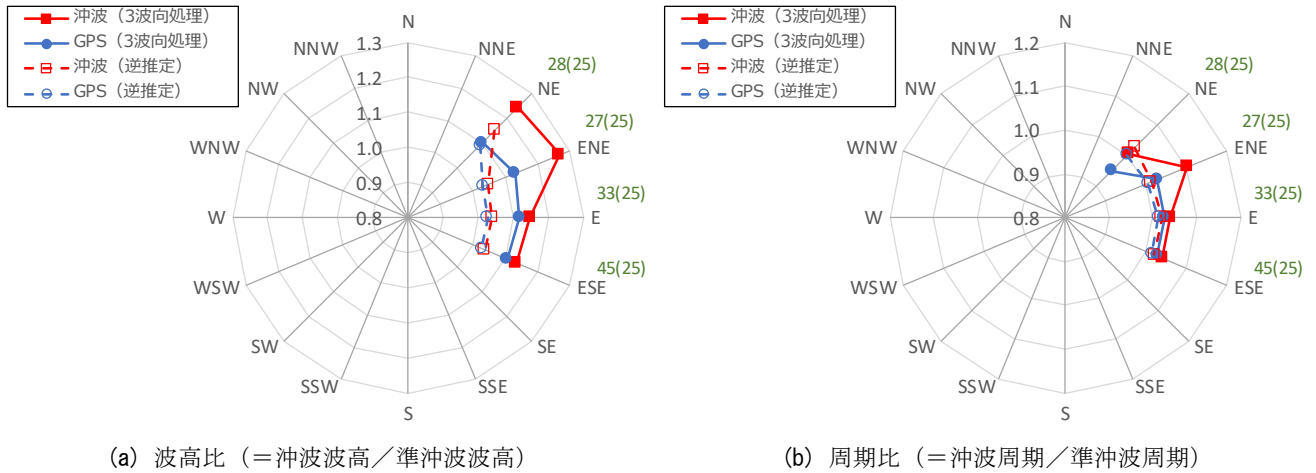


付図 C-8.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

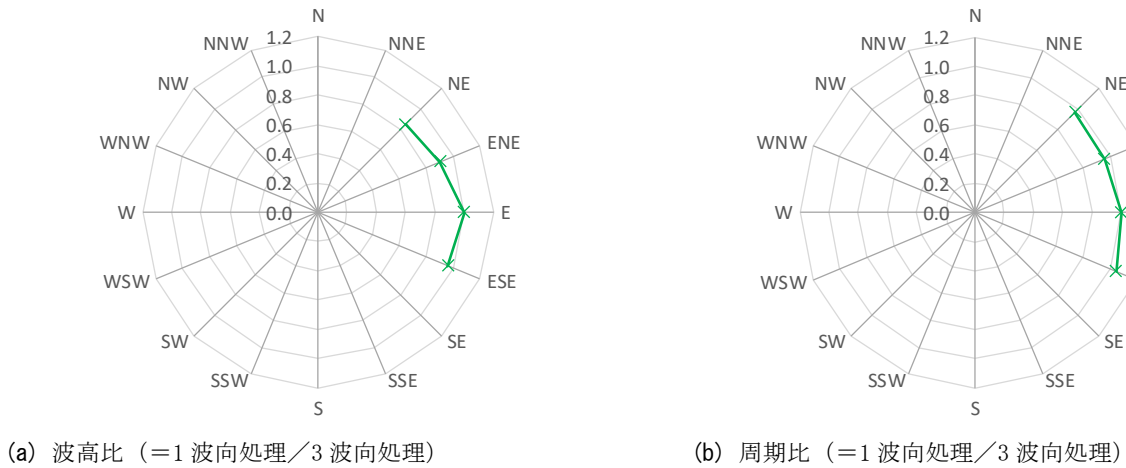


付図 C-8.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

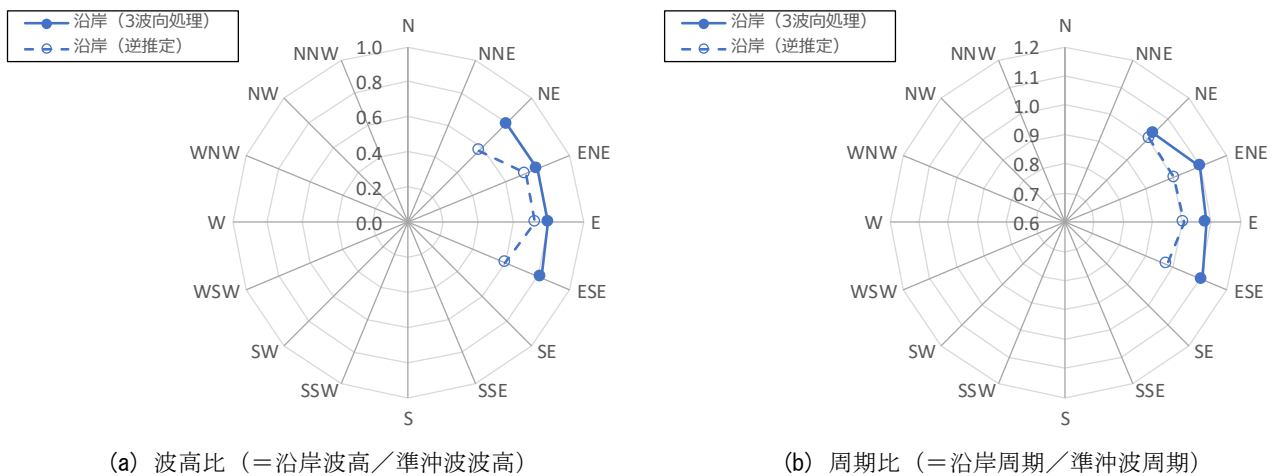
C-9. 釜石港



付図 C-9.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

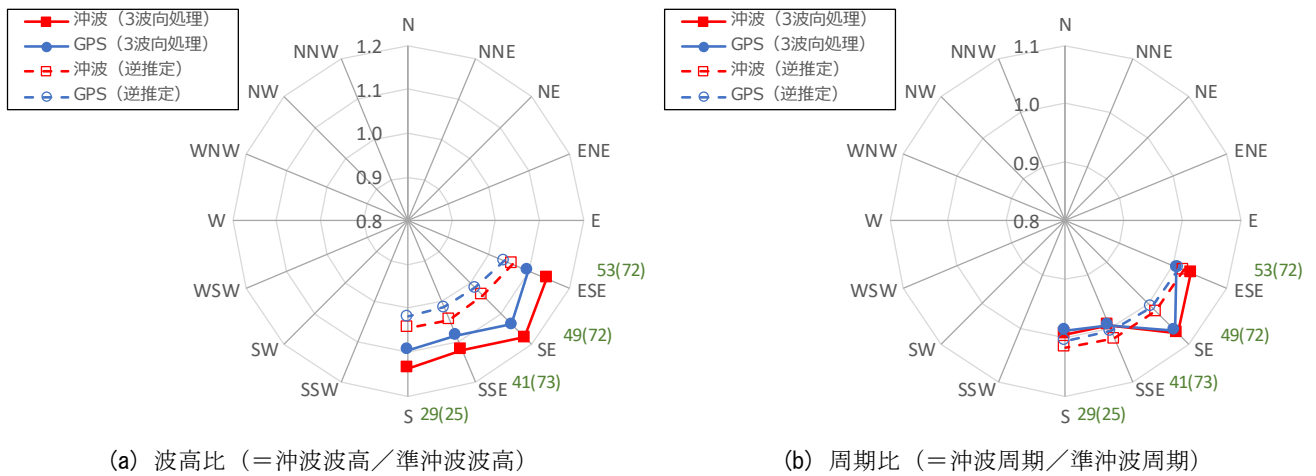


付図 C-9.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

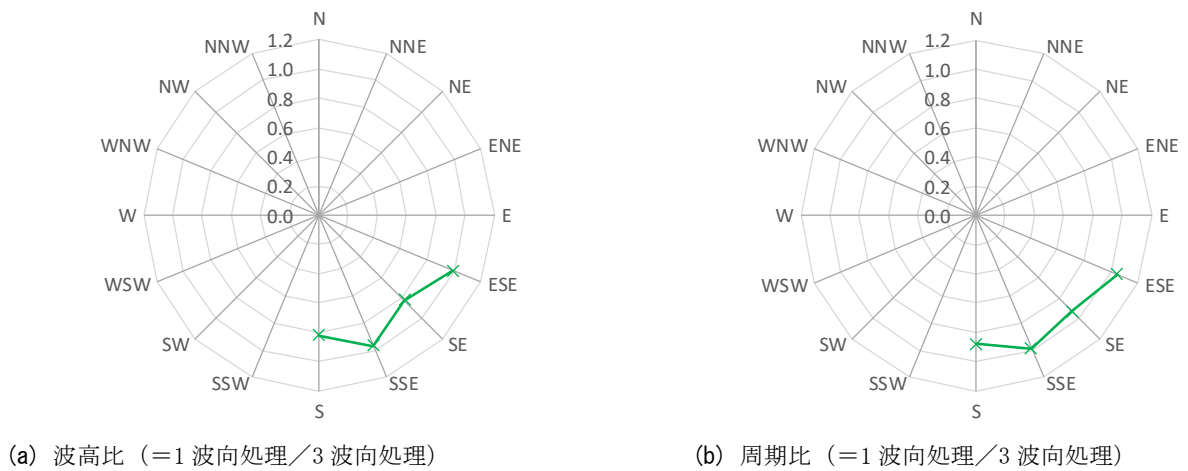


付図 C-9.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

C-10. 大船渡港

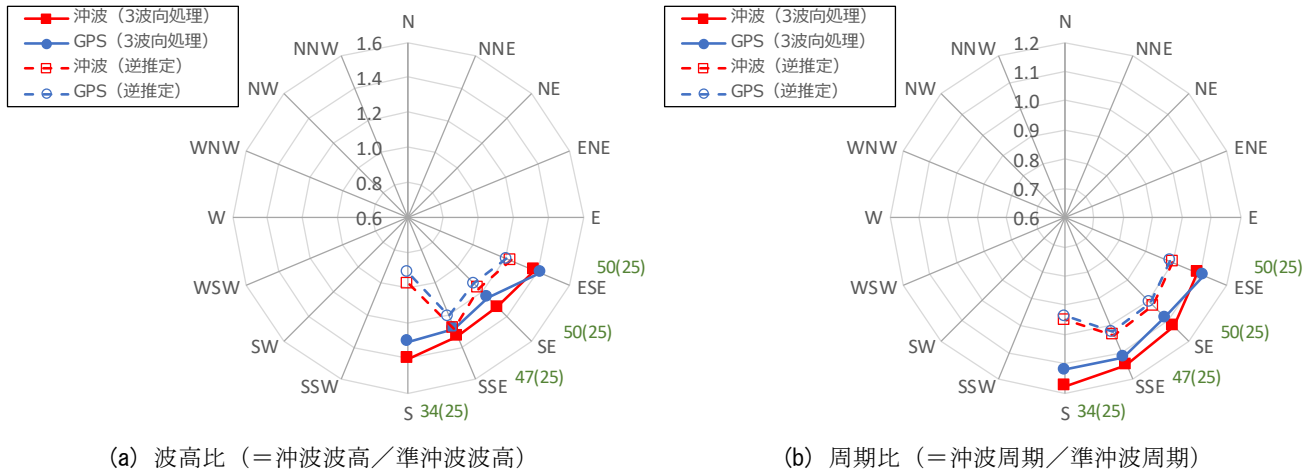


付図 C-10.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

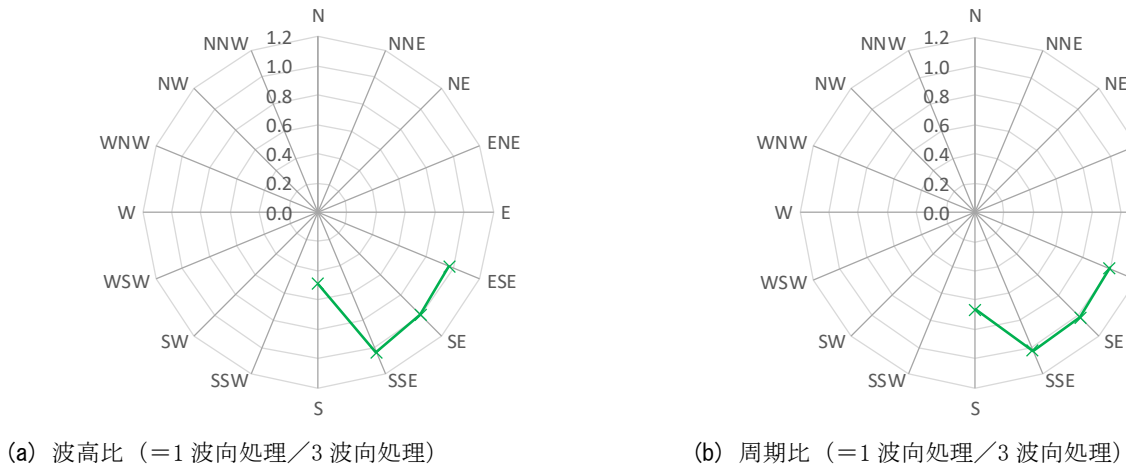


付図 C-10.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

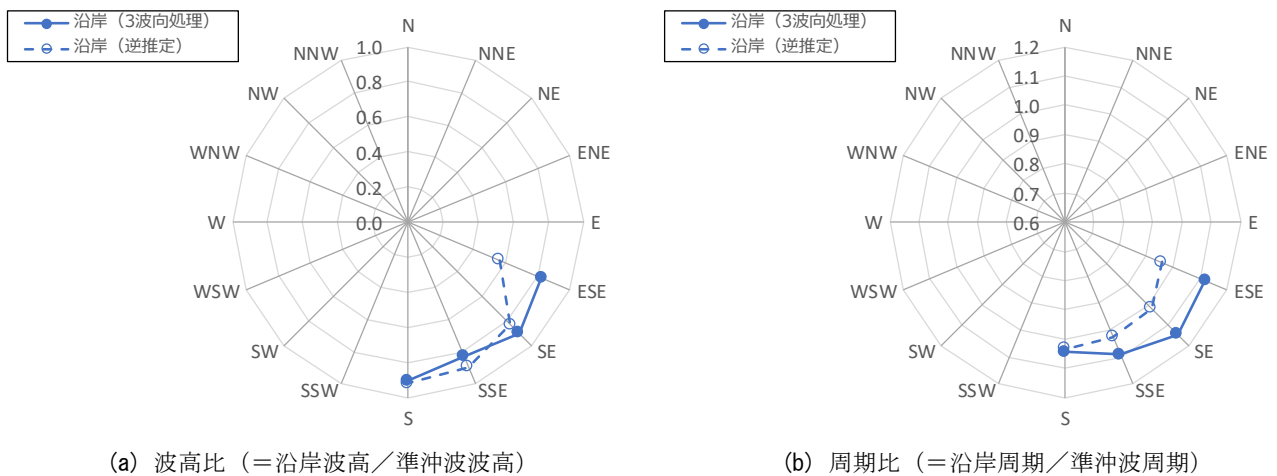
C-11. 仙台塩釜港（石巻港区）



付図 C-11.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

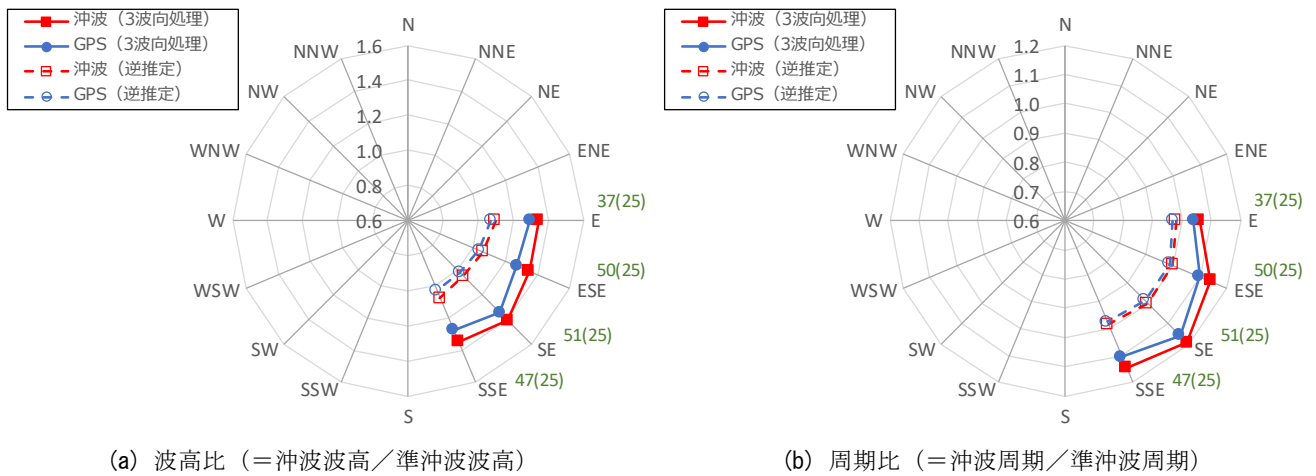


付図 C-11.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

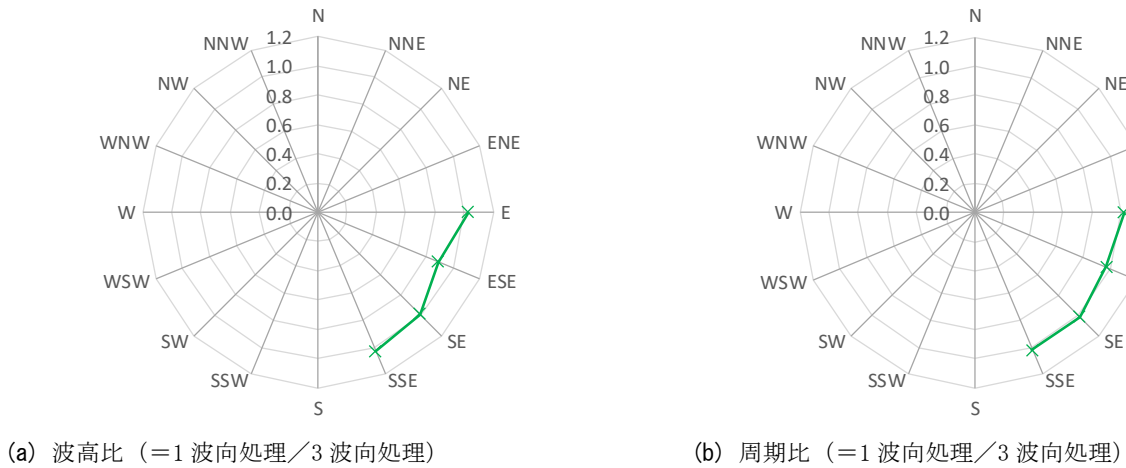


付図 C-11.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

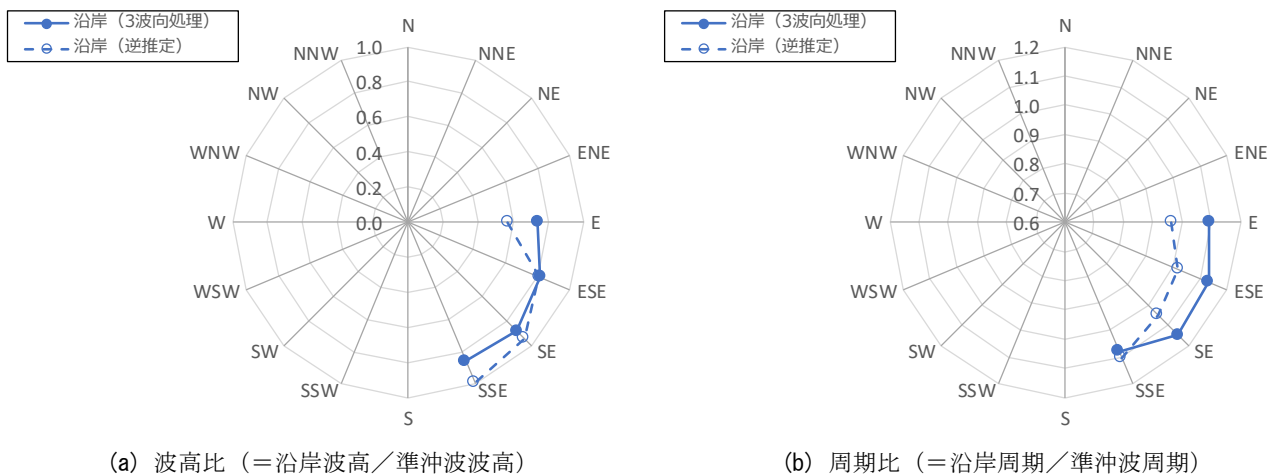
C-12. 仙台塩釜港（仙台港区）



付図 C-12.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

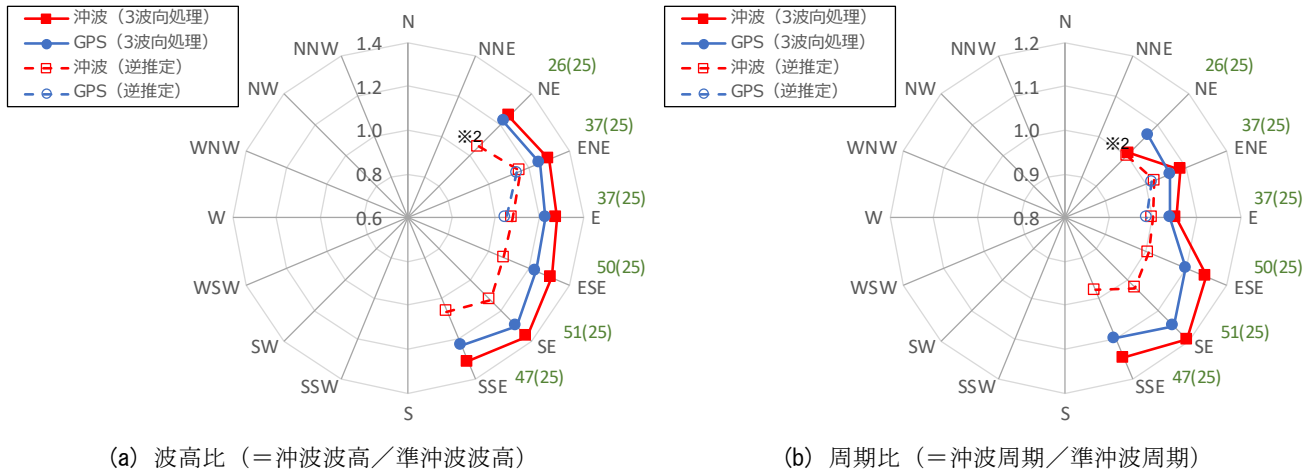


付図 C-12.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

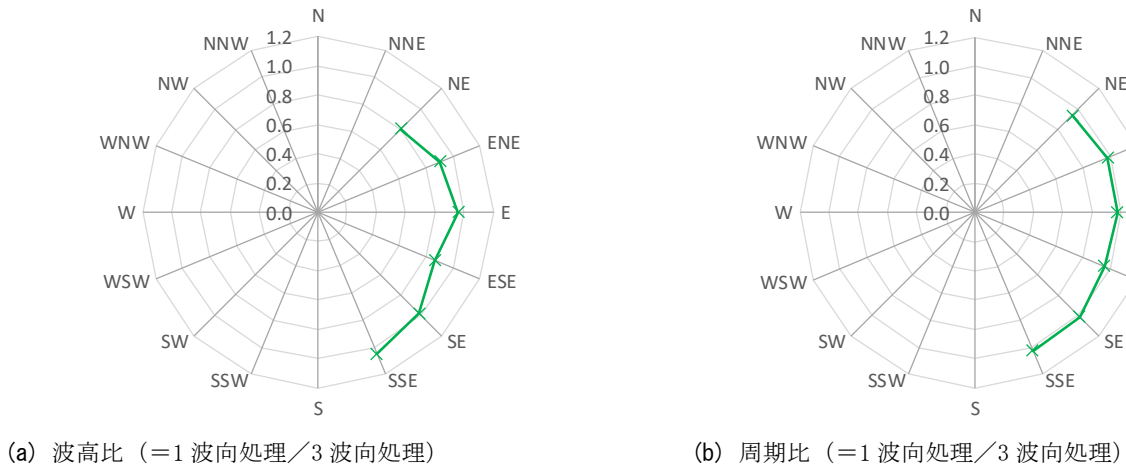


付図 C-12.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

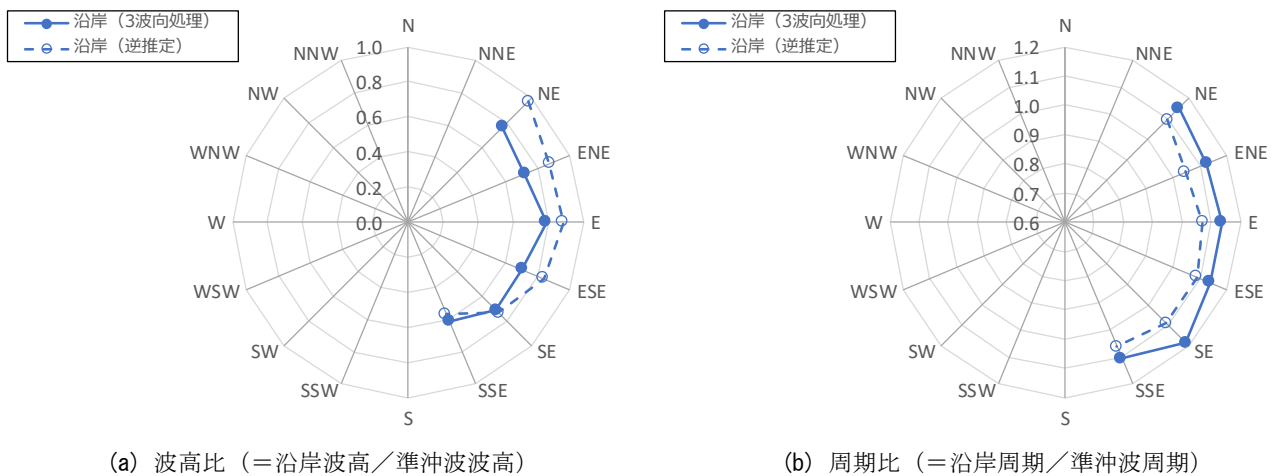
C-13. 相馬港



付図 C-13.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較

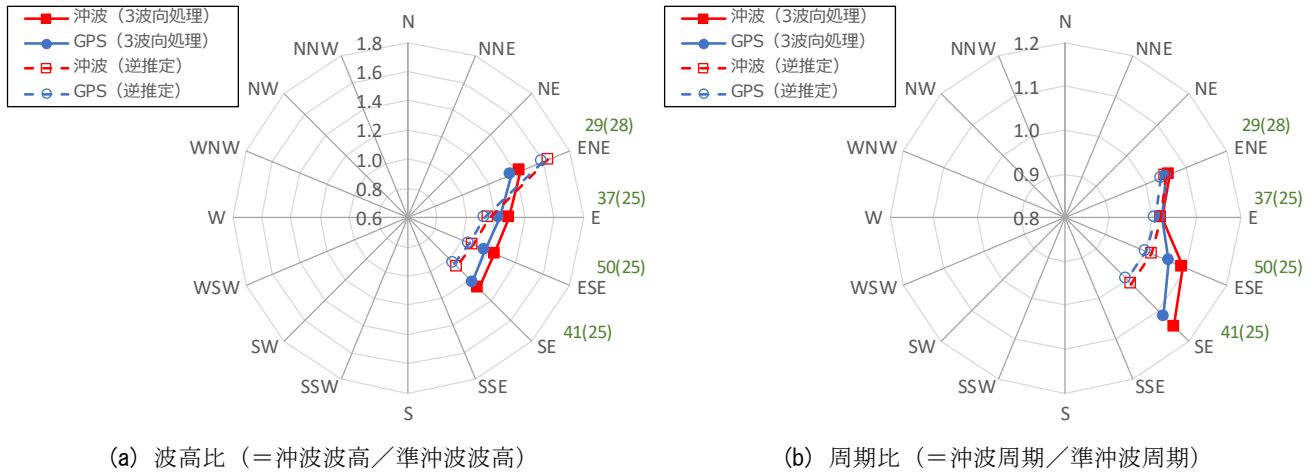


付図 C-13.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較

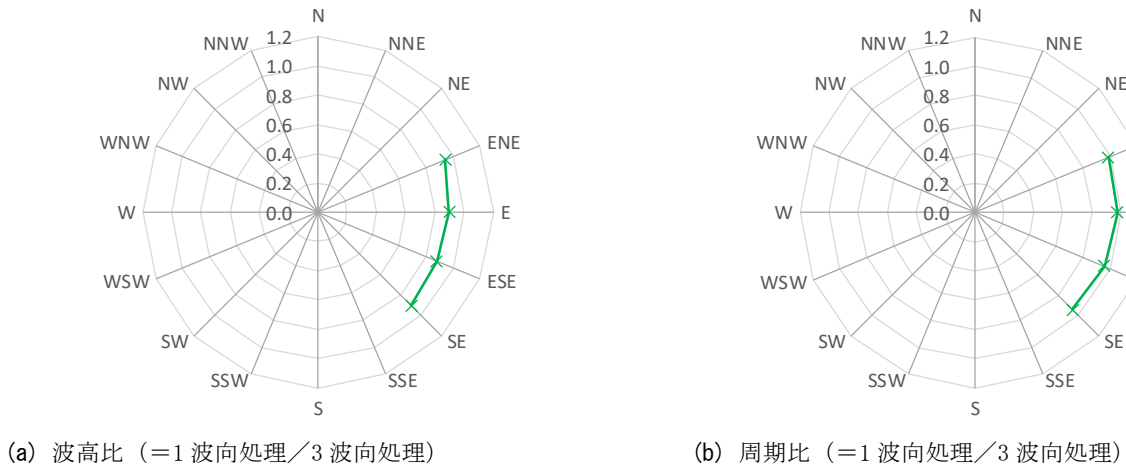


付図 C-13.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較

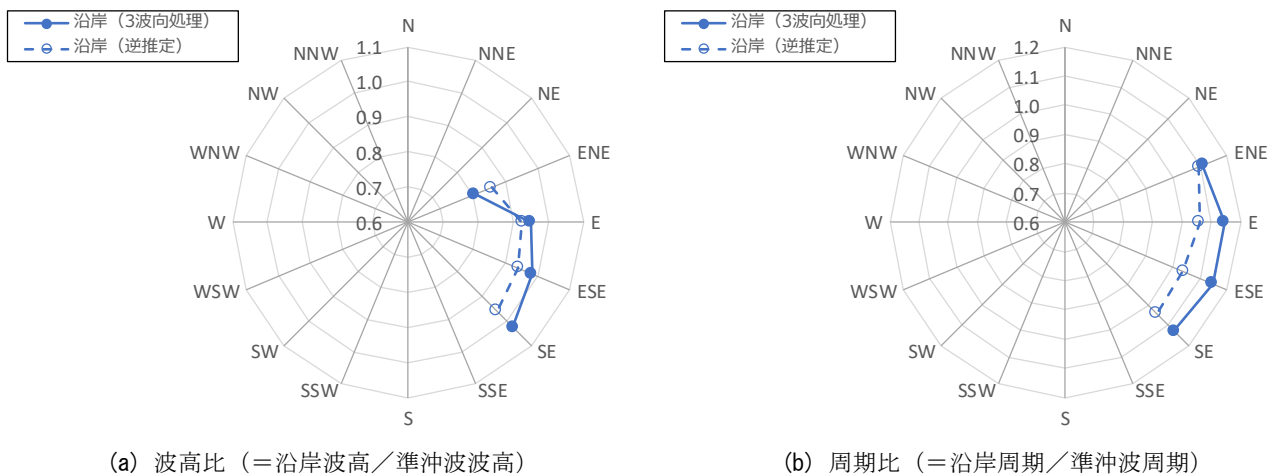
C-14. 小名浜港



付図 C-14.1 極値統計解析及び逆推定による確率沖波諸元の比較



付図 C-14.2 3 波向処理に対する 1 波向処理による確率沖波諸元の比較



付図 C-14.3 極値統計解析及び逆推定による確率波諸元の比較