

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.59 No.2 Sep 2020

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 珊瑚骨材を用いたコンクリートの海洋構造物への適用可能性に関する検討
西田 孝弘, 山路 徹, 与那嶺 一秀, 谷口 修, 田中 亮一, 竹中 寛, 清宮 理…………… 3
2. 波による地盤を含む護岸の不安定化に関する遠心模型実験
高橋 英紀……………31
3. カルシア改質土と異種材料との境界における摩擦特性
松村 聡, 水谷 崇亮, 森川 嘉之, 赤司 有三, 本田 秀樹, 清水 雅浩……………51
4. 非負制約最小二乗法による高精度な方向スペクトル推定手法および情報量規準に基づく
Spectral partitioning 手法の提案
藤木 峻, 川口 浩二…………… 84

多峰型方向スペクトルからの風波・うねり成分抽出に関する 高精細化手法の提案

藤木 峻*・川口 浩二**

要 旨

風波とうねりが共存するような複雑な海象条件下では、方向スペクトルが多峰型を示す場合がある。しかし、多峰型方向スペクトルに関しては、解析手法の技術的課題から十分な調査研究はなされていない。そこで本研究では、多峰型方向スペクトルにおける風波・うねり成分の高精度な観測に資することを目的として、方向スペクトル解析手法の高精細化を行った。まず、既存の手法を基に方向スペクトルをより高精度に推定する手法を、次いで多峰型方向スペクトル上の波浪成分を合理的に特定するためのSpectral partitioning手法を提案した。うねりの方向スペクトル推定および多峰型方向スペクトルの解析を想定した数値実験により、提案手法の有効性を確認した。

提案手法を用いて現地観測データの解析を行い、多峰型方向スペクトルから各波浪成分を特定し、その波高・周期・波向の抽出を行った。風波とうねりの分離の基準として波齢を用いて各波浪成分を風波またほうねりと判定することで、風波・うねりそれぞれに相当する波浪外力の評価が可能となった。また、波形勾配と方向集中度の関係の解析において、多峰性の有無を区別することで観測データの解釈が容易となることを示した。本研究で高度化した解析手法は、解析者の経験や試行錯誤に依存する閾値の設定を要しないため、波浪観測の現業運用への導入が容易であると期待される。

キーワード：非負制約最小二乗法，方向スペクトル推定，情報量規準，Spectral partitioning，風波，うねり

* 海象情報研究グループ 主任研究官

** 海象情報研究グループ グループ長

〒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：046-844-5048 Fax：046-844-5046 E-mail：fujiki-t@p.mpat.go.jp

Advanced Method for Identification of Windsea and Swell on the Multi-modal Directional Wave Spectrum

Takashi FUJIKI*
Koji KAWAGUCHI**

Synopsis

Though the directional wave spectrum can show multi-modal features under confused sea conditions with windsea and swell, there is not enough research about the windsea and swell on the multi-modal spectrum because of the difficulty in processing the multi-modal spectrum. This study proposed the advanced methods to identify windsea or swell on the multi-modal directional spectrum. We improved the inversion method for the directional spectrum and proposed a spectral partitioning method based on a statistical approach to identify each wave system from the multi-modal directional spectrum. We validated the proposed methods by the numerical test for the multi-modal spectrum.

We applied the proposed methods to identify each wave system from the in-situ multi-modal directional spectrum and evaluated their wave heights, periods, and directions. We classified each wave system into windsea or swell with wave age and evaluated wave forcing corresponding to each wave system. By classifying the data into the unimodal sea or multi-modal sea, we could more clearly interpret the results for the directional narrowness dependency on wave steepness. The proposed method is available for routine analysis on wave observation because it requires no trials by operators to determine the data processing criteria.

Key Words: non-negative least squares, directional spectrum inversion, information criteria, spectral partitioning, windsea, swell

* Senior Researcher, Marine Information Group

** Head of Group, Marine Information Group

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5048 Fax : +81-46-844-5046 E-mail : fujiki-t@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	84
1. まえがき	87
2. 非負制約最小二乗法による方向スペクトル推定手法の提案	87
2.1 既往の方向スペクトル解析手法の概要と課題	87
2.2 本研究で提案するベイズ法の改良	88
2.3 数値実験による精度検証	88
2.4 精度検証結果	89
2.5 考察と課題	93
2.6 まとめ	94
3. 情報量規準に基づくSpectral partitioning手法の提案	94
3.1 既往のSpectral partitioning手法の概要と課題	94
3.2 本研究で提案する手法	94
3.3 数値実験及び現地データへの適用	97
3.4 考察と課題	101
3.5 まとめ	101
4. 現地観測データへの適用	102
4.1 方向スペクトル解析対象データの概要	102
4.2 解析結果	103
4.3 考察と課題	106
4.4 まとめ	106
5. 結論	106
6. あとがき	107
謝辞	107
参考文献	107

1. まえがき

海岸構造物の設計や海岸過程の調査研究において、沿岸波浪は支配的な外力として考慮すべき重要な要素である。2000年代以降、設計波を超過しない波浪による被災事例¹⁾が注目されており、原因の一つに周期が長いうねりが考えられている。平成30年度の港湾基準の改訂²⁾により、うねりについても性能照査を行う必要が示されており、今後うねりを想定した港湾構造物の設計外力に関する検討事例が増えるものと考えられる。このような状況を受けて、被災事例の解析を始めとしたうねりの研究が現在精力的に行われている^{3,4)}。

現行の基準におけるうねりの定義としては、有義波の周期と波形勾配で判別する手法⁵⁾が、実務上簡便な手法として広く用いられている。しかし実海域においては、遠方から伝搬するうねりと局所的に発達した風波が重畳するような、風波とうねりが同時に存在する波浪場の出現も想定される。そのような複数の波浪成分が方向スペクトル上で同時に存在する多峰性波浪場に対して、有義波のみを参照して風波とうねりを判別した場合、本来存在していたはずの風波またはいずれを見逃す可能性がある。これを避けるためには、簡便な指標としての有義波のみを参照するのではなく、方向スペクトル上で風波とうねりそれぞれに対応する波浪成分を特定して波浪外力を抽出する必要がある。

方向スペクトル上で風波とうねりそれぞれに対応する波浪成分を抽出するためには、Spectral partitioningと呼ばれる処理が必要となる。既往研究では、画像処理に基づく手法で波浪成分の検出を行うWITS (Wave Identification and Tracking System)⁶⁾が数値波浪モデルに実装されて広く使われている。しかしWITSの適用においては、物理的に有意でない波浪成分の棄却や、近接する波浪成分の併合処理のための閾値の設定が必要であるが、これらの閾値は海象条件や波候に応じて試行錯誤的に設定する必要がある。現地観測データを対象とする場合には、想定すべき海象条件が観測地点・季節によって多様であるため、現地観測された方向スペクトルにWITSを適用するために適切に閾値を設定することは困難である。

方向スペクトルの推定において、特にうねりを対象とする場合はエネルギーが方向スペクトル上の狭い範囲の波向に集中すると考えられる。そのような方向集中度が高いうねりの方向スペクトルの推定には、高い分解能を持つ高精度な推定手法が必要となる。方向スペクトルの推定のために高精度な手法⁷⁾が近年提案されているものの、推定精度の面では課題が多く残されている。

上記の課題を解消することを目的とし、本研究では方向スペクトルの解析手法の高度化を行う。まず、うねりの方向スペクトルを高精度かつ安定して推定するために、従来よりも高精度な方向スペクトルの推定手法を提案する。次に、推定された方向スペクトル上の複数の波浪成分を特定するために、経験的な閾値の設定を必要としない統計的手法に基づいたSpectral partitioning手法を提案する。以上、新たに提案した方向スペクトルの解析手法を用いて、現地観測データの解析を行う。高度化した解析手法により、これまで定量的な評価が困難であった、多峰性波浪場が解析可能となること、風波とうねりそれぞれに対応する波浪成分を特定して波浪外力が抽出可能となることを示す。なお、本稿は藤木ら (2016)、藤木ら (2018) をもとに加筆および追加の検討を行ったものである。

2. 非負制約最小二乗法による方向スペクトル推定手法の提案

2.1 既往の方向スペクトル解析手法の概要と課題

一般的な方向スペクトル解析の概要について橋本ら⁷⁾に従い、以下に記述する。波浪観測において水位・流速などの複数の波動量を同時に観測する場合、微小振幅波理論を仮定すれば、任意の波動量はそれらの波動量間の伝達関数を用いて互いに変換可能である。水位変動と任意の波動量とを関係づける伝達関数を用いると、 M 個の波動量 $\xi_m (m = 1, \dots, M)$ から算出されるクロススペクトル $\Phi_{mn}(f)$ と、求める方向スペクトル $S(f, \theta)$ との間には式(2a)の積分方程式で表される関係がある⁷⁾。ただし、 f は周波数、 θ は波向である。

$$\Phi_{mn}(f) = \int_0^{2\pi} H_m(f, \theta) H_n^*(f, \theta) S(f, \theta) d\theta \quad (2a)$$

ここに、 $H_m(f, \theta)$ は、水位変動から波動量 ξ_m への伝達関数を、 $H_n^*(f, \theta)$ は $H_m(f, \theta)$ の複素共役を表す。波浪観測データ ξ_m に対応する方向スペクトルは、クロススペクトル $\Phi_{mn}(f)$ に対して式(2a)の連立積分方程式の解として推定される。

ベイズ法による方向スペクトル推定(BDM: Bayesian Directional Method)では、観測データと先験情報を組み合わせることでベイズ確率を計算することで方向スペクトルの推定を行うが、波高計アレイを用いた方向スペクトル推定手法として現在最も推定精度が高いことが示されている^{8,9)}。ベイズ法では、方向分布を式(2b)、(2c)のように離散一定値関数で表現する。

$$G(\theta|f) \approx \sum_{k=1}^K x_k(f) I_k(\theta) \quad (2b)$$

$$I_k(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } (k-1)\Delta\theta \leq \theta < k\Delta\theta \\ 0 & \text{if otherwise} \end{cases} \quad (2c)$$

ここで $G(\theta|f)$ は周波数 f における方向分布関数、 $I_k(\theta)$ は方向分布関数を離散化するために定義された区間一定値を取る関数、 K は方向分布関数の定義域 $0 \leq \theta < 2\pi$ を離散化する区間の数である。ベイズ法では、方向分布関数の推定値として $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_K)^t$ を推定する。 \mathbf{x} が空間的に滑らかであるという先験情報を用いて、さらに観測誤差に正規分布を仮定すれば \mathbf{x} のベイズ確率は式(2d)で表される正規分布となる。

$$p(\mathbf{x}|u, \sigma) = \frac{1}{Z_\pi} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(|\mathbf{A}\mathbf{x}-\mathbf{b}|^2 + u^2|\mathbf{D}\mathbf{x}|^2)\right\} \quad (2d)$$

ここで、 Z_π は $\int p(\mathbf{x}|u, \sigma) d\mathbf{x}=1$ を満たすための正規化係数、 σ は正規分布の分散、 \mathbf{A} は各波動量の伝達関数から構成される $(M \times K)$ 行列、 \mathbf{b} は観測波動量の組み合わせから計算されるクロススペクトルからなる M 次元列ベクトル、 \mathbf{D} は \mathbf{x} が空間的に滑らかであるという先験情報を反映させる $(K \times K)$ 行列である⁷⁾。ベイズ確率 $p(\mathbf{x}|u, \sigma)$ を最大化、すなわち式(2d)を最大化する $\mathbf{x}=(x_1, x_2, \dots, x_K)^t$ が、求める方向スペクトルの方向分布関数の推定値である。

式(2d)中の u は上位パラメータと呼ばれ、観測データに対する先験情報による平滑化の重み付けを規定する。ベイズ推定において最適な上位パラメータ u は、赤池ベイズ情報量規準(ABIC)の最小化によって選択できることが一般に知られている^{7,12)}。式(2d)が表すベイズモデルに対するABICを式(2e)に示す。

$$ABIC(u, \sigma) = -2 \ln \int p(\mathbf{x}; u, \sigma) d\mathbf{x} \quad (2e)$$

以上より、ベイズ法による方向スペクトルの推定は、式(2e)で表されるABICを最小化する上位パラメータ u に対して式(2d)を最小化する \mathbf{x} を求めることに帰着される。しかし波浪エネルギーの分布である方向スペクトルは負値を取り得ないために、 \mathbf{x} には非負制約条件を課す必要がある。橋本ら⁷⁾は \mathbf{x} の非負制約を満たしつつベイズ確率を最大化するために、式(2f)のように指数関数を用いた近似を行った。その際にNewton法による収束計算を導入して \mathbf{x} を求めているが、収束計算の導入による計算負荷の増大に加えて、収束計算の初期値依存性から推定値が不安定となる可能性が指摘されている¹⁰⁾。

$$p(\mathbf{x}|u, \sigma) = \frac{1}{Z_\pi} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2}(|\mathbf{A}\mathbf{F}(\mathbf{x})-\mathbf{b}|^2 + u^2|\mathbf{D}\mathbf{x}|^2)\right\} \quad (2f)$$

ただし、 $\mathbf{F}(\mathbf{x})=\{\exp(x_1), \exp(x_2), \dots, \exp(x_K)\}^t$ である。

2.2 本研究で提案するベイズ法の改良

本研究では式(2d)で表されるベイズ確率の評価および式(2e)を最小化する上位パラメータ u の探索において、方向スペクトル推定の高精度化のための改良を実施した。

まず、式(2d)で表されるベイズ確率の評価についての改良点を述べる。本研究では、式(2f)の近似を行わずに非負制約条件下で式(2d)を最大化するために、Lawsonら¹¹⁾によるNon-Negative Least Square method (以下、NNLS)を導入した。NNLSにより、式(2d)で表される厳密なベイズ確率の評価が可能となることで、方向スペクトル推定の高精度化につながることに加え、初期値に依存する収束計算を除去することで方向スペクトル推定における安定性が向上することが期待される。このときABICは、事後分布が正規分布となることを利用して以下の式(2g)で計算される¹²⁾。

$$ABIC(u) = 2 \log R(\mathbf{x}^*) - K \log(u^2) + \log |\mathbf{C}^{-1}| + Const. \quad (2g)$$

ここで、 $\mathbf{x}^* = \mathbf{C}\mathbf{A}'\mathbf{b}$ 、 $\mathbf{C}^{-1} = (\mathbf{A}'\mathbf{A} + u^2\mathbf{D}'\mathbf{D})$ である。

式(2g)を最小化する上位パラメータ u の探索についての改良点を述べる。従来の橋本ら⁷⁾の提案手法においては、収束計算に起因する計算負荷上の問題から、ABICを最小化する上位パラメータの決定は限定的な格子探索により決定されていた。本研究ではより高精度に方向スペクトルの推定を行うために、上位パラメータの探索手法の改良を行った。まず、上位パラメータの探索範囲を十分広くとるために、 $u=1.8 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^8$ について格子探索法により式(2g)のABICを最小化する u_{est} を決定し、最適な上位パラメータ u の第一推定値とする。その後、 $0.5 \times u_{est} < u < 2.0 \times u_{est}$ の範囲を黄金分割探索法により探索することで、ABICを最小化する u を決定した。本研究では黄金分割探索法での探索は、 u の残差が0.0001以下になった段階で打ち切ることとした。格子探索法と黄金分割探索法を組み合わせることで、より広範囲を対象に最適な上位パラメータ u の効率的な探索を試みた。

2.3 数値実験による精度検証

本研究では、改良の効果の確認のために、入力した方向スペクトルから作成した模擬観測データから、入力した方向スペクトルを復元する数値実験を実施した。数値実

験における入力方向スペクトルの波浪諸元は表-2.1のように設定した。水位変動のパワースペクトルにBretschneider-光易スペクトル¹³⁾, 方向分布関数に光易型方向関数¹³⁾を用いている。光易型方向関数のパラメータである方向集中度 S_{max} の値として、現在の標準形で提案されている上限の75に加えて、それを超えるような集中度をもつうねり性波浪を想定した150の2ケースで設定した。表-2.1で設定した方向スペクトルにおいて、 $S_{max} = 75$ とした例を図-2.1に示す。

数値実験における観測機器として、十層流速を測定可能な海象計を想定した。海象計は海底に設置され、超音波によって波浪情報を観測する機器であり、水位変動の時系列と多層の水粒子速度を同時に計測可能である。数値実験の想定として、海象計の設置水深は26.5 m, 流速測定水深は 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0 m とした。入力した方向スペクトルをもとに線形波のシミュレーション¹³⁾を行い、サンプリング間隔0.5 s, サンプリング長さ1024 sとし、一様乱数を各周波数成分ごとの位相として与えて位相分解により模擬観測データを作成した。作成した模擬観測データには観測雑音を想定し、水位変動時系列には分散 $1.0 \times 10^{-3} m^2$, 流速変動時系列には分散 $1.0 \times 10^{-2} m^2 s^{-2}$ の白色雑音時系列を加算した。方向スペクトル推定値のばらつきを評価するために、模擬観測データに対して異なる白色雑音時系列を与えて100観測分のサンプルを作成した。作成した水位変動の模擬観測データの例を図-2.2に示す。

方向スペクトル推定手法による精度の比較のために、本研究でNNLSによって改良したベイズ法¹⁰⁾ (以下, BDM-NNLS) に加えて橋本ら⁷⁾のNewton法による収束計算を含むベイズ法 (以下, BDM-Newton), 磯部ら¹⁴⁾の拡張最尤法 (以下, EMLM) により、それぞれ方向スペクトルの推定を行った。推定された方向スペクトルと入力した方向スペクトルを比較し、各推定手法の精度を評価した。

2.4 精度検証結果

数値実験の結果として、まずピーク周波数での方向分布の比較を図-2.3に示す。方向スペクトルは波向で積分した結果が1になるよう正規化して方向分布として表示した。 $S_{max} = 75$, $S_{max} = 150$ のいずれのケースにおいても、BDM-NNLS, EMLMに比べてBDM-Newtonは推定された方向関数のばらつきが大きく、サンプルによっては入力した方向関数から大きく乖離した推定結果となっている事がわかる。

図-2.3に示した方向分布形の直接比較では、入力した方向スペクトルと推定された方向スペクトルの推定精度

表-2.1 数値実験で想定する海象条件

	$S_{max} = 75$	$S_{max} = 150$
有義波高 (m)	3.0	3.0
有義周期 (s)	12.0	15.0

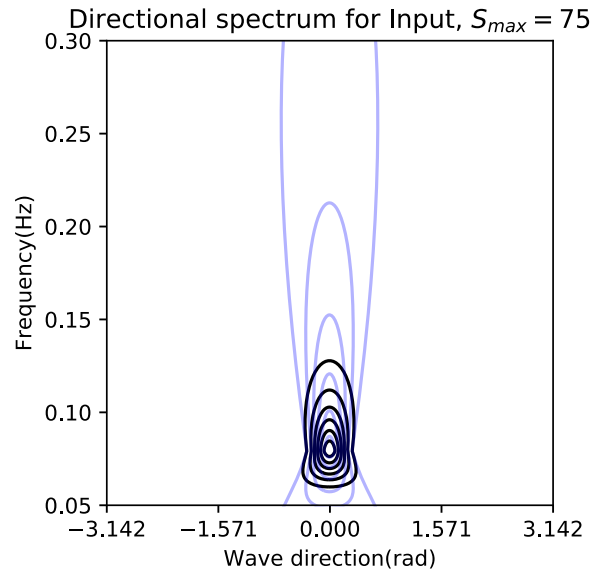


図-2.1 入力方向スペクトル ($S_{max} = 75$ の場合)

(黒線：方向スペクトル, 青線：方向分布関数)

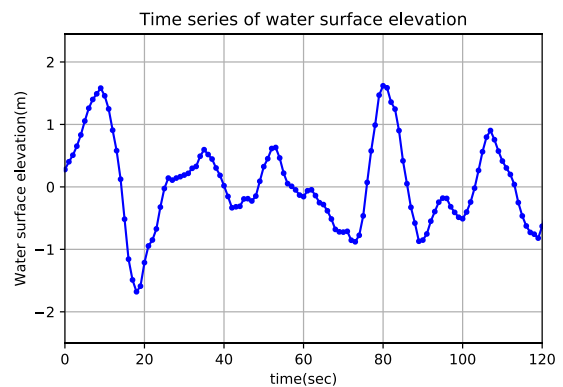


図-2.2 水位変動の模擬観測データの例

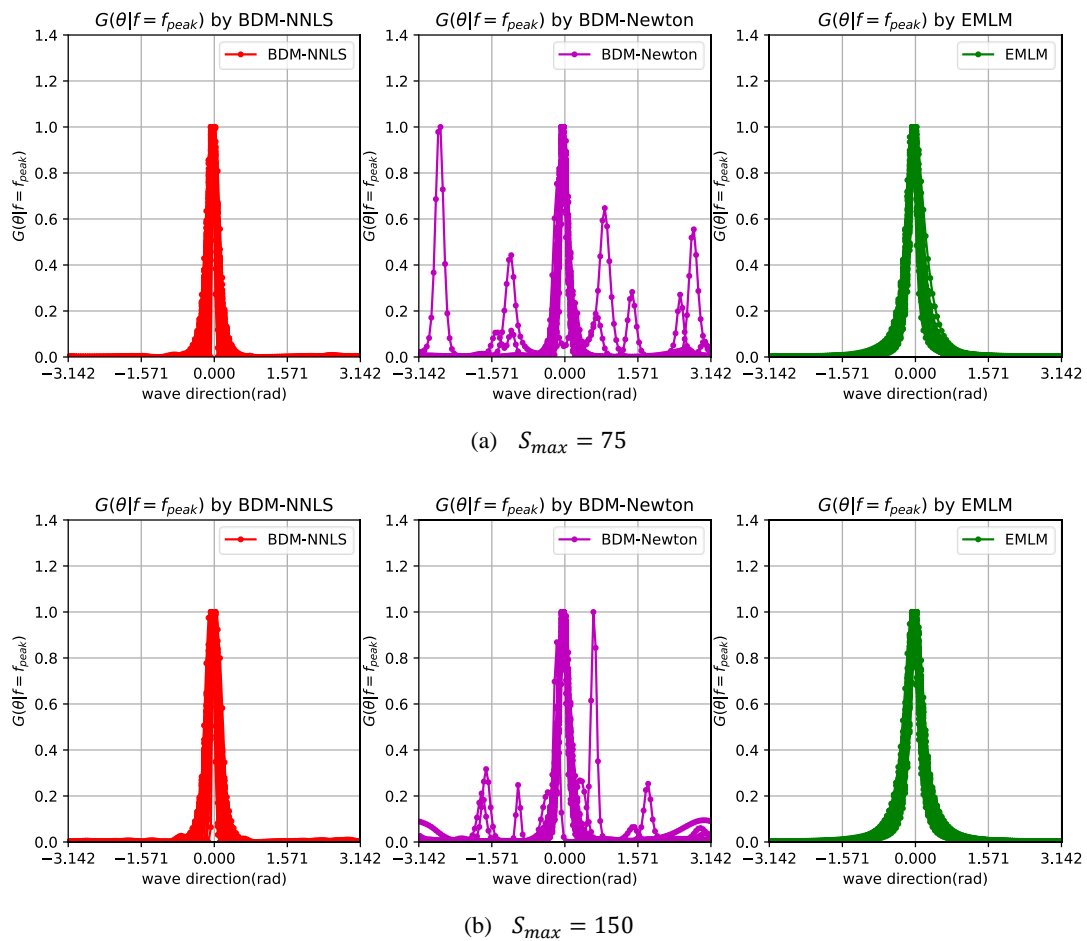


図-2.3 各式推定手法による方向分布（左より，BDM-NNLS，BDM-Newton，EMLM，100 サンプル全てを图示）

の定量的な比較が困難であるため，方向関数から分布の幅に相当するモーメント値を算出して比較することとした．本研究では，方向分布の幅に相当するモーメント値として，以下の式 (2h) (2i) (2j) で表される方向分散 σ_θ を用いて精度評価を行う．

$$\sigma_\theta = \left\{ 2 \left(1 - (a_1^2 + b_1^2)^{\frac{1}{2}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2h)$$

$$a_1 = \int \cos(\theta - \theta_0) G(\theta) d\theta \quad (2i)$$

$$b_1 = \int \sin(\theta - \theta_0) G(\theta) d\theta \quad (2j)$$

ここで， θ_0 は主波向， $G(\theta)$ は方向分布関数である．

方向分散 σ_θ は円周上の確率分布の分散に対応する量であり，方向集中度 S とは近似的に以下の式 (2k) の対応があることが知られている¹⁵⁾．

$$\sigma_\theta = \sqrt{2/(1+S)} \quad (2k)$$

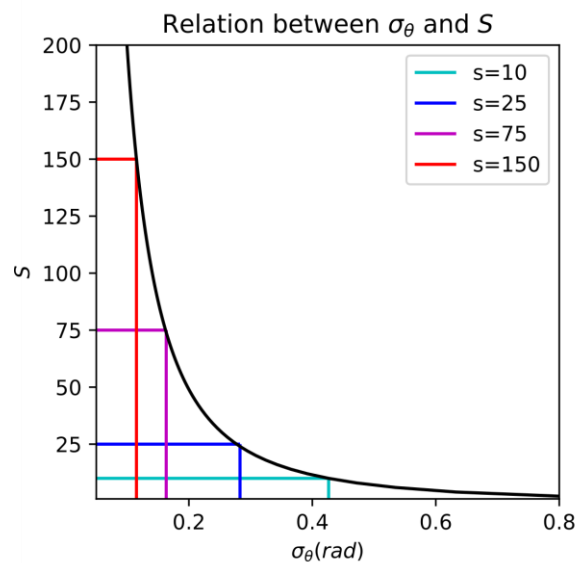


図-2.4 方向分散 σ_θ - 方向集中度 S

図-2.4に式(2k)による方向分散 σ_θ に対する方向集中度 S の関係を示す。図-2.4より、方向分散 σ_θ の増加に対して方向集中度 S は非線形に減少し、特に方向分散 σ_θ が小さく、0.2を下回る領域において方向集中度 S の変化は大きい。このことから、方向スペクトルの推定誤差に由来する方向集中度 S の推定誤差は、特に方向分散 σ_θ が小さい領域で大きく拡大される結果となることがわかる。そこで本研究では数値実験の精度評価の対象として、方向スペクトルから算出した際に誤差が大きく拡大される可能性がある方向集中度 S ではなく、方向集中度 S の増減に対して変化が相対的に緩やかな方向分散 σ_θ で行うこととした。推定した方向スペクトルから式(2h)により方向分散 σ_θ を算出した。

方向スペクトル推定の分解能を評価するために、周波数ごとの方向分散 σ_θ について100観測分の結果を図-2.5に示す。横軸には周波数を入力スペクトルのピーク周波数で除した無次元周波数を、縦軸には推定された方向スペクトルの方向分散 σ_θ を描画し、入力した方向スペクトル

の方向分散 σ_θ を黒線で示した。まず、EMLMの結果は入力に比べて方向分散 σ_θ を大きく評価していることが分かる。また、BDM-NNLS, EMLMに比べてBDM-Newtonでは推定された方向スペクトルのサンプルごとのばらつきが大きく、サンプルによっては入力した方向スペクトルから大きく乖離した推定結果となっていた。

100観測分のサンプルの平均を取って比較した結果を図-2.6に示す。平均で評価した場合は、BDM-NNLSとBDM-Newtonの間で系統的な差は見られないことが分かる。一方、EMLMでは、BDM-NNLSとBDM-Newtonに比べて方向分散 σ_θ を大きめに評価している傾向が図-2.5と同様に見られた。この傾向は、ピーク周波数に相当する無次元周波数 $f/f_p = 1$ 付近を含め、全周波数帯で共通していた。

方向スペクトル推定の安定性を評価するために無次元誤差の比較を図-2.7に示す。横軸には周波数を入力スペクトルのピーク周波数で除した無次元周波数を、縦軸には推定された方向スペクトルから算出した方向分散 σ_θ の無次元誤差NRMSEを描画した。無次元誤差NRMSEは、推

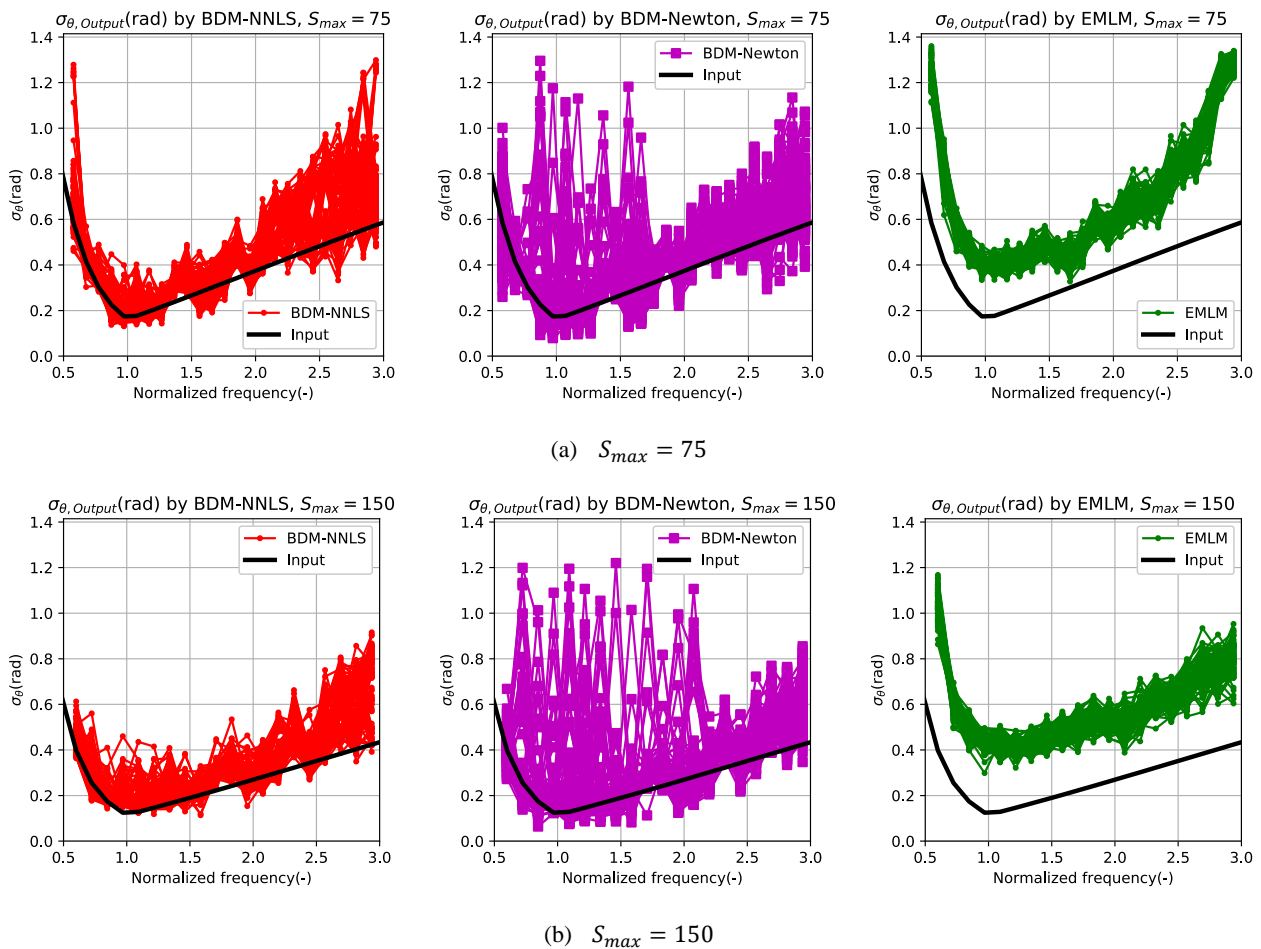


図-2.5 各推定手法による方向分散 σ_θ (左より、BDM-NNLS, BDM-Newton, EMLM, 100 サンプル全てを図示)

定値の標準偏差を平均値で除した量であり,以下の式(21)で評価した.ここで $\sigma_{\theta,out}(f)$ は推定された方向スペクトルの $\sigma_{\theta}(f)$ を, $\sigma_{\theta,in}(f)$ は入力された方向スペクトルの $\sigma_{\theta}(f)$ を, $\langle \cdot \rangle$ は数値実験の100サンプルの平均を表す.

$$\text{NRMSE}(f) = \frac{\sqrt{\langle (\sigma_{\theta,out}(f) - \sigma_{\theta,in}(f))^2 \rangle}}{\langle \sigma_{\theta,out}(f) \rangle} \quad (21)$$

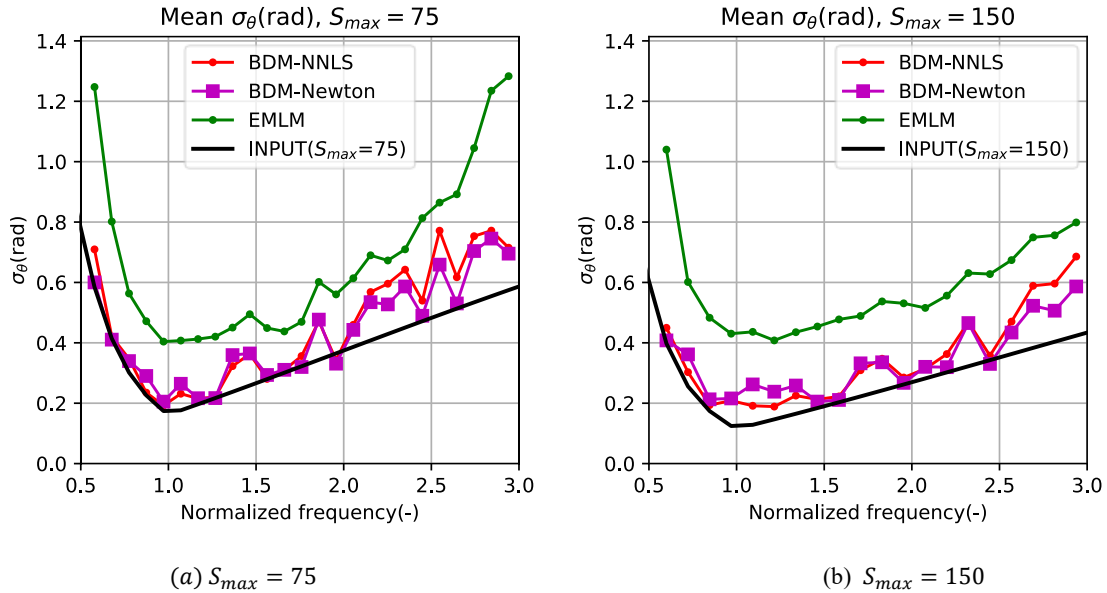


図-2.6 各推定手法による方向分散 σ_{θ} の推定精度の比較 (100 サンプルの平均を図示)

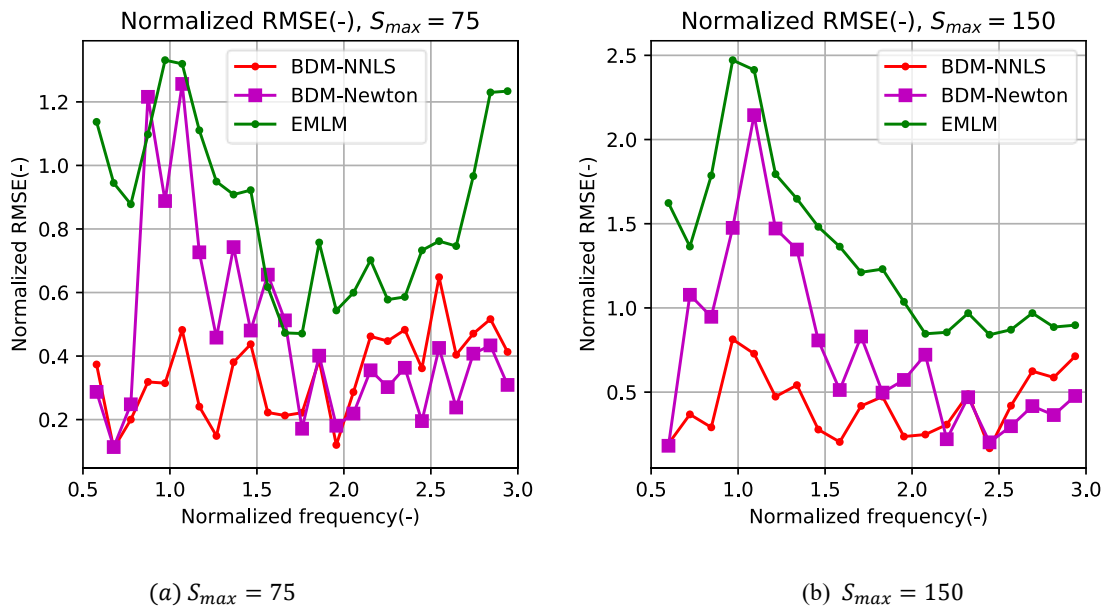


図-2.7 各推定手法による方向分散 σ_{θ} の推定精度の比較 (100 サンプルの正規化誤差を図示)

図-2.7より、無次元誤差NRMSEは概ねEMLM, BDN-Newtonで大きく、BDM-NNLSで小さく抑えられることがわかった。特に、ピーク周波数に相当する無次元周波数 $f/f_p = 1$ 近辺においては、EMLMおよびBDM-Newtonは無次元誤差NRMSEが大きくなる結果が得られた。

2.5 考察と課題

方向分散 σ_θ の平均を比較した図-2.6では、BDM-NewtonとBDM-NNLSの差は小さかった一方、無次元誤差を比較した図-2.7ではBDM-Newtonで無次元誤差が大きく、方向スペクトル推定が不安定となる結果を得た。BDM-Newtonにおいて無次元誤差が大きくなる理由として、式(2f)の近似に伴い導入された収束計算に起因する推定値の初期値依存性により、図-2.3に示すように推定された方向関数がサンプルによってばらつくと考えられる。一方、BDM-NNLSでは、非負制約最小二乗法の導入により収束計算を不要としており、初期値依存性を解消することで方向スペクトル推定の安定性が向上したと考えられる。

本研究で行った方向スペクトル推定手法の改良の効果として、EMLM, BDM-Newton, BDM-NNLSで得られる方向スペクトルを図-2.8にそれぞれ示す。EMLMおよびBDM-Newtonによる推定ではエネルギーピークから離れた位置にサイドローブが広がる一方、BDM-NNLSによる推定ではピークから離れた位置にはエネルギーが存在せず、したがってサイドローブが見られないことが分かる。海象計の観測データからEMLMで方向スペクトルを推定する場合、EMLMの分解能の低さに由来する広いサイドローブを示す傾向が指摘されている¹⁶⁾。BDM-NewtonとBDM-NNLSのサイドローブの違いについて、BDM-Newtonでは方向スペクトルの推定値がなめらかであるという先験情報は式(2f)が示すとおり、方向スペクトルの対数に対して課せられている。一方、BDM-NNLSにおいては、式(2d)が示すとおり方向スペクトルの推定値そのものに同様の先験情報が課せられており、この違いが推定される方向スペクトルのサイドローブの違いを生んでいると考えられる。

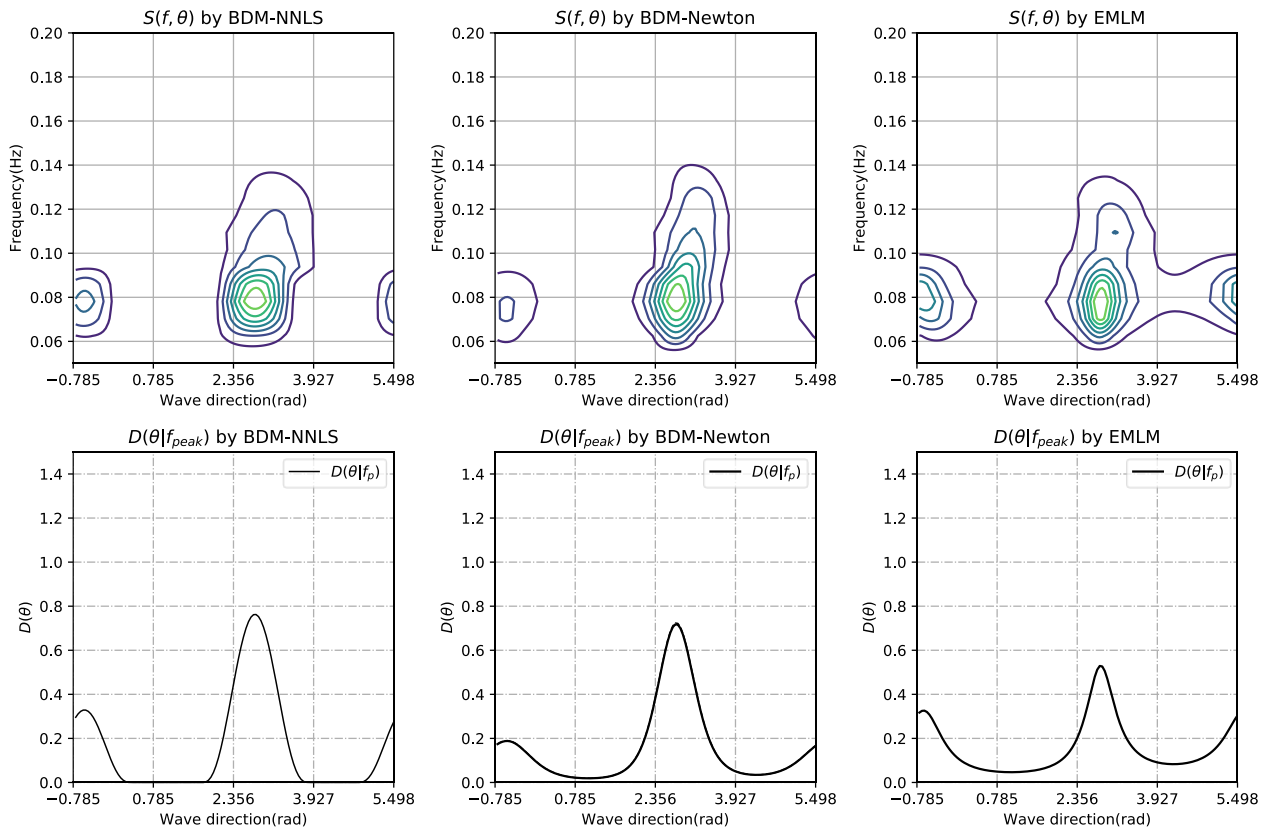


図-2.8 各推定手法による方向スペクトルの推定例

(上段：方向スペクトル，下段：ピーク方向分布．左より，BDM-NNLS, BDM-Newton, EMLM)

2.6 まとめ

本研究では橋本ら⁷⁾が提案したベイズ法の改良を行い、方向スペクトルの推定精度の向上を行った。従来のベイズ法に非負制約最小二乗法を導入し、収束計算を不要とすることで推定精度の向上を試みた。提案手法の効果を確認するために、方向スペクトルの推定精度を評価する数値実験を実施した。平均的な分解能に相当する方向分散 σ_θ の平均値の比較については、従来手法のBDM-Newtonと提案手法のBDM-NNLSでは大きな差は見られなかった。しかし、推定値のばらつきに相当する方向分散 σ_θ の無次元化誤差の比較においては、従来手法のBDM-Newtonでは初期値依存性によると思われる増大が見られた一方、提案手法のBDM-NNLSでは無次元化誤差も小さく安定しており、高分解能と安定性を両立した推定が可能になったことを確認した。現地観測データに適用して方向スペクトル解析を行ったところ、提案手法を用いることで従来手法に比べてサイドローブの影響がほぼ見られない分解能が高い方向スペクトルが得られた。

3. 情報量規準に基づく Spectral partitioning 手法の提案

3.1 既往の Spectral partitioning 手法の概要と課題

局地的な風波と外洋からのうねりの共存のような、複数の波浪成分が同時に存在する海象条件下では方向スペクトルは一般的に多峰性を示す。この多峰性を把握・評価することは、風波・うねり共存場のような複雑な海象条件における波浪外力評価や波浪モデルの精度検証において重要である。多峰性の評価の手法として、方向スペクトルに対して Spectral partitioning と呼ばれる処理を行うことで、各波浪成分が有する波高、周期、波向といった波浪統計値を方向スペクトルから抽出することができる。

既往研究では、画像処理に基づく手法である Wave Identification and Tracking System⁹⁾ (以下、WITS) が提案されている。WITSは画像処理に基づく Partitioning 手法であり、分水嶺法により方向スペクトルを複数の区分に境界分けした後、予め設定した閾値に従って有意な波浪成分のみを抽出する手法である。WITSはWW3やSWAN等の波浪モデルに実装されて広く使われており、限定的ではあるが観測方向スペクトルへの適用例も報告されている¹⁷⁾。しかし現時点でWITSには以下の2つの問題点があると考えられる。

1) 画像処理に基づき幾何学的な処理を行うため、波浪スペクトルが高周波数側で冪乗則に従って減衰する力学的な構造を考慮していない。また、分水嶺法で平面的に境界

分けを行うため、複数の波浪成分が近接しスペクトルの裾を共有する場合には分離が妥当に行われない。

2) 方向スペクトル上のスパイクノイズの除去や、近接する波浪成分の併合処理のための閾値の設定が感度分析により必要となるが、妥当な閾値の設定は解析者の経験に基づき試行錯誤的に決定される。特に、常時観測データを対象に Spectral partitioning を行う場合には、想定すべき海象条件が観測地点・季節によって多様となる。このため、各海象条件に対して適切な閾値を試行錯誤的に設定することは解析者の労力上の観点からも非常な困難が伴う。

例として、ナウファス久慈で観測された多峰型方向スペクトルに対して WITS を適用した結果を図-3.1に示す。ここで、WITSで設定が必要な各種の閾値は、Hansonら⁶⁾に従った。この期間の海象条件は、例として図-3.2の周波数スペクトルおよび方向スペクトルのスナップショットに示すように、異なる方向から同時に到来する2つの波浪成分が期間を通して現れていた。しかし、WITSによって検出される波浪成分の数は図-3.1で示したように細かく変動し、時刻によっては波浪成分が一つも検出されない例も見られた。波浪成分を最低でも一つ検出するように、波浪成分の検出数を制御する閾値を調整することも考えられるが、この調整によって観測雑音などに由来する見かけ上の波浪成分が棄却されづらくなり、結果として検出される波浪成分の数が不自然に増加するという問題がある。また、適切な閾値の選択には解析者の経験や試行錯誤が反映されるため、閾値決定の根拠や一般性の保証の面で困難が伴うと言える。

以上より、方向スペクトルの Partitioning においては、波浪スペクトルの構造を反映し、かつ抽出される波浪成分の数の決定に解析者の経験や試行錯誤が反映されない合理的な手法が必要と考えられる。そこで本研究では新たに、混合分布モデルを用いた統計的手法による Spectral partitioning¹⁸⁾ を提案する。具体的には、観測された方向スペクトルが、パラメトリックな関数の混合で表現されると仮定して Spectral partitioning を行う。パラメトリックな関数に波浪の標準形スペクトルを用いることで、方向スペクトルの力学的な構造を考慮した処理が可能となる。さらに、統計的手法でデータから最適なモデルを推定することで、試行錯誤による閾値の設定が不要になる。

3.2 本研究で提案する手法

本研究では、クラスタリングに用いられる混合分布モデル(以下、Mixture)による方向スペクトルの Spectral partitioning を提案する。Mixtureはk-means法を一般化した手法であり、得られたデータが混合正規分布に従って生

成されたと仮定してクラスタリングを行う¹⁹⁾。本研究で用いる混合分布を式 (3a), (3b) に示す。

$$P(x, \mathbf{y} | \mu_m, \sigma_m, \kappa_m, \mu_m (m = 1, \dots, M)) = \sum_{m=1}^M \alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x, \mathbf{y} | \mu_m, \sigma_m, \kappa_m, \mathbf{v}_m) \quad (3a)$$

$$P_{Mix}^{(m)}(x, \mathbf{y} | \mu_m, \sigma_m, \kappa_m, \mathbf{v}_m) = P_{Mix, Gaussian}^{(m)}(x | \mu_m, \sigma_m) \times P_{Mix, vM}^{(m)}(\mathbf{y} | \kappa_m, \mathbf{v}_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_m^2}(x - \mu_m)^2\right\} C_p(\kappa_m) \exp(\kappa_m \mathbf{v}_m^T \cdot \mathbf{y}) \quad (3b)$$

M : 混合分布の要素数, $P_{Mix}^{(m)}(x, \mathbf{y} | \mu_m, \sigma_m, \kappa_m, \mathbf{v}_m)$: 混合分布の要素となる確率分布, $P_{Mix, Gaussian}^{(m)}(x | \mu_m, \sigma_m)$: 周波数上の正規分布, $P_{Mix, vM}^{(m)}(\mathbf{y} | \kappa_m, \mathbf{v}_m)$: 円周上の正規分布に対応する von Mises 分布である。さらに, α_m : 各波浪成分のエネルギー混合比, σ_m : 周波数幅(Hz), x : 周波数(Hz), μ_m : ピーク周波数(Hz), \mathbf{y} : 単位波向ベクトル, \mathbf{v}_m : ピーク波向ベクトル, κ_m : 集中度, C_p : 規格化定数である。

本研究で用いる混合分布モデルでは, 式 (3b) の $P_{Mix, Gaussian}^{(m)}(x | \mu_m, \sigma_m)$ で見られるように周波数上で左右対称な正規分布を仮定している。しかし, 一般に波浪の周波数スペクトルはその力学的構造を反映して高周波側に裾を持つ左右非対称な歪んだ形状を示す。そこで, 本研究では式 (3c) に示す Box-Cox 変換によって, 周波数スペクトルを左右対称な形状に変換する前処理を行うことで, 式 (3a), (3b) の混合分布モデルを適用することを試みる。

$$x \rightarrow x^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \log x, & \lambda = 0 \end{cases} \quad (3c)$$

ここで, Box-Cox 変換のパラメータ λ はデータの分布が正規分布に近づくように設定する必要がある。本研究では周波数スペクトルが式 (3d) で表される Bretschneider-光易スペクトル¹³⁾ (以下, BM スペクトル) で表現されると仮定し, このときに分布の三次モーメントである歪度が 0 となるように Box-Cox 変換を行うことで正規分布に近い左右対称の分布形へ変換することとした。

$$P_{BM}(f) = \alpha (H_{sig})^2 (T_{sig} \cdot f)^{-5} \exp\{-\beta (T_{sig} \cdot f)^{-4}\} \quad (3d)$$

ここで, f : 周波数(Hz), α, β : 観測により定まる定数, H_{sig} : 有義波高(m), T_{sig} : 有義周期(s)である。様々な有義波高・有義周期を与えて検討した結果, $\lambda = -1.19$ とした場合に歪度がほぼ 0 となることがわかった。 $\lambda = -1.19$ とした BM スペクトルを Box-Cox 変換した結果を図-3.3 に示

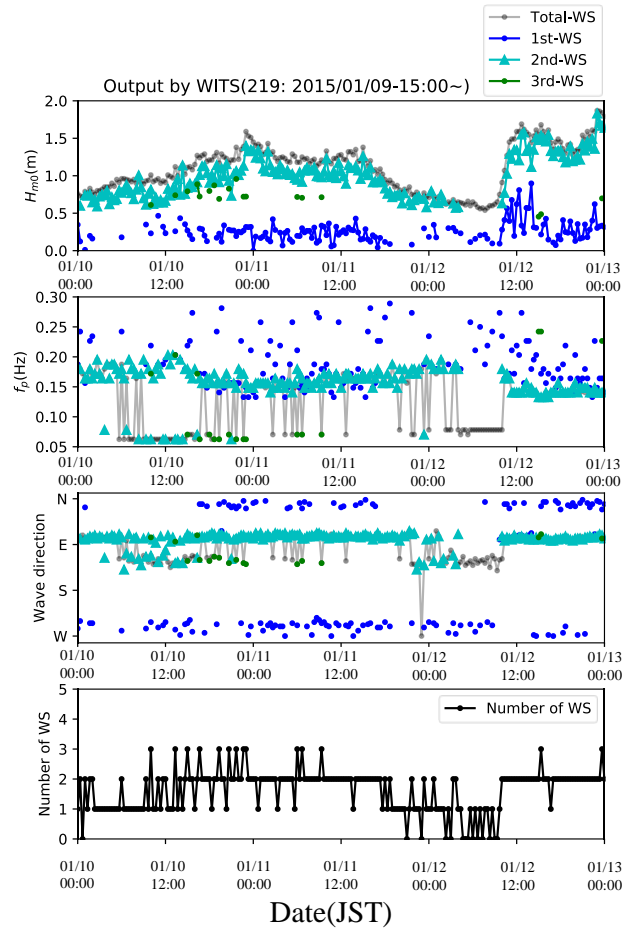


図-3.1 観測方向スペクトルに WITS を適用した結果 (上段より, 波高, ピーク周波数, 波向, 波浪成分の数)

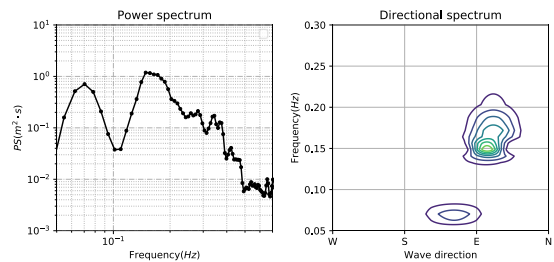


図-3.2 久慈の観測方向スペクトルの例

(左より, 周波数スペクトル, 方向スペクトル)

(2015/01/11-12:00[JST]観測)

す。この λ の値は, 波浪スペクトルの相似性により有義波高・有義周期には依存しなかったため, 様々な海象条件に対して同じパラメータを用いての前処理が可能となる。以上より, $\lambda = -1.19$ とした Box-Cox 変換によって, 波浪ス

ベクトルの形状としてBMスペクトルを仮定して混合分布モデルを適用するための前処理を行うこととした。

本研究では、Box-Cox変換した方向スペクトルを正規化し、確率分布として取り扱うことでMixtureを方向スペクトルのPartitioningに適用する。周波数方向の分割数を I 、波向方向の分割数を J とする離散化を行った方向スペクトル $S_n(n = 1, \dots, N | N = I \times J)$ について、正規化した方向スペクトル S_n^* を式 (3e) のように定義する。

$$S_n^* = \frac{S_n}{\sum_{n=1}^N S_n \Delta f \Delta \theta} \quad (3e)$$

データ $\mathbf{d} = \{x_n, y_n, S_n^* | n = 1, \dots, N\}$ が与えられた時の混合分布モデルの対数尤度は式 (3f) で表される。

$$\begin{aligned} \ln L(\boldsymbol{\theta}_M | \mathbf{d}) &= \ln \prod_{n=1}^N \{P(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_M)\}^{S_n^*} \\ &= \sum_{n=1}^N S_n^* \ln \sum_{m=1}^M \alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m) \end{aligned} \quad (3f)$$

ここで、 $\boldsymbol{\theta}_m = \{\mu_m, \sigma_m, \kappa_m, \mathbf{v}_m\}$ とし、 $5M$ 個のパラメータをまとめて $\boldsymbol{\theta}_M = \{\alpha_m, \boldsymbol{\theta}_m | m = 1, \dots, M\}$ と表記した。

混合分布のパラメータ推定は対数尤度の最大化により行うが、式 (3f) を最大化する $\boldsymbol{\theta}_M$ を解析的に求めることはできない。そこで本研究では、対数尤度の近似とパラメータ推定値の更新を交互に行って式 (3f) を最大化するEMアルゴリズム¹⁹⁾により、数値的にパラメータ推定を行う。具体的には、以下のE-stepおよびM-stepを対数尤度が収束するまで交互に繰り返すことで、対数尤度を最大化する

パラメータを推定する。

E-step: 対数尤度の下界を以下の式 (3g) で近似する。

$$\begin{aligned} \ln L(\boldsymbol{\theta}_M | \mathbf{d}) &= \sum_{n=1}^N S_n^* \ln \sum_{m=1}^M \alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m) \\ &\geq \sum_{n=1}^N S_n^* \sum_{m=1}^M r(z_{n,m}) \ln \frac{\alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m)}{r(z_{n,m})} \end{aligned} \quad (3g)$$

ただし、 $r(z_{n,m})$ は以下の式 (3h) で計算される。

$$r(z_{n,m}) = \frac{\alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m)}{\sum_{m=1}^M \alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m)} \quad (3h)$$

M-step: 近似した対数尤度の下界を最大化する $\boldsymbol{\theta}_M$ を以下の式 (3i) を満たすように求める。

$$\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}_M} \left\{ \sum_{n=1}^N S_n^* \sum_{m=1}^M r(z_{n,m}) \ln \frac{\alpha_m P_{Mix}^{(m)}(x_n, y_n | \boldsymbol{\theta}_m)}{r(z_{n,m})} \right\} = 0 \quad (3i)$$

M-stepで行うモデルパラメータの推定はDhillonら²⁰⁾を参考に行った。EMアルゴリズムにおいてE-stepとM-stepを繰り返し、対数尤度の増加が 10^{-3} より小さくなった場合に収束したと判定して計算を終了した。推定されたパラメータは、 m 番目の波浪成分に対して混合比 α_m がエネルギー、 μ_m がピーク周波数、 \mathbf{v}_m がピーク波向に対応する。ただし、 μ_m はBox-Cox変換後のピーク周波数であるため、

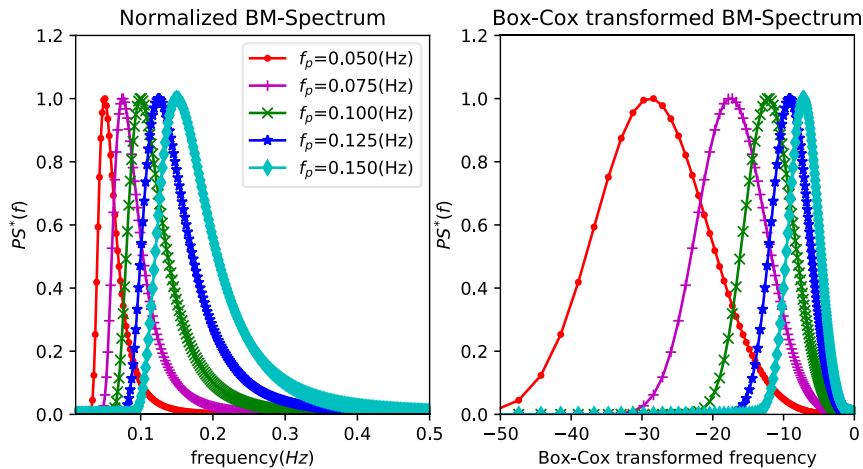


図-3.3 BM スペクトルの Box-Cox 変換の例

(左より、Box-Cox 変換前、後の BM スペクトル)

表-3.1 数値実験の与条件

Case	波浪成分数	混合比 α	ピーク周波数 f_{peak} (Hz)	ピーク波向 d_{peak} (rad)	方向集中度 S_{max}
1	2	0.6, 0.4	0.15, 0.06	0.0	10, 25
2	"	0.7, 0.3	"	"	"
3	"	0.8, 0.2	"	"	"
4	3	0.4, 0.35, 0.25	0.08, 0.35, 0.25	$0.75\pi, 0.55\pi, 0.0$	25, 10, 15

Box-Cox変換の逆変換 $f_{peak,m} = (\lambda\mu_m + 1)^{1/\lambda}$ によりピーク周波数 $f_{peak,m}$ を算出した。

混合分布モデルを用いたクラスタリングにおいては式(3a)中の要素数 M を何らかの規準によって決定する必要がある。混合分布モデルでは、観測データから計算される情報量規準AIC(Akaike Information Criteria)の最小化によって、最適な要素数 M を決定可能であることが一般に知られている¹⁹⁾。情報量規準AICは以下の式(3j)で評価される。

$$AIC(M) = -2 \max\{\ln L(\theta_M | \mathbf{d})\} + 2K \quad (3j)$$

ここで、 $\max\{\ln L(\theta_M | \mathbf{d})\}$ ：最大対数尤度、 K ：自由パラメータ数である。本研究で用いた混合分布では自由パラメータ数は $K = 5M - 1$ となる。

本研究では、パラメトリックな関数の線形重ね合わせで方向スペクトルが表現可能であると仮定してSpectral partitioningを行うことから、線形波が卓越する周波数領域のみを解析対象とした。周波数領域では、およそ0.3(Hz)が海象計の方向スペクトルが解像可能な上限にあたり、また0.05(Hz)以下は拘束波由来の長周期波が卓越する可能性があるため、観測方向スペクトルの解析対象周波数は0.05~0.3(Hz)に限定した。

3.3 数値実験及び現地データへの適用

提案手法の妥当性を検証するために数値実験による精度検証を行った。式(3d)で表されるBMスペクトルおよび式(3k)、(3l)で表される光易型方向関数¹³⁾を用いて方向スペクトルデータを作成した。

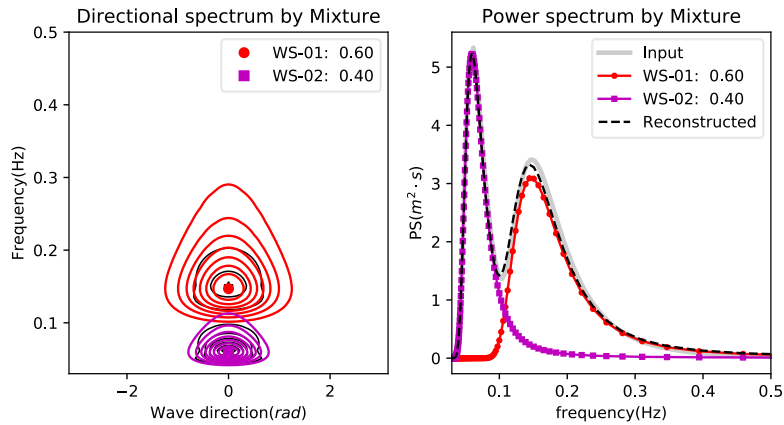
$$G(\theta | f^*) = G_0 \cos^{2S(f^*)} \left(\frac{\theta - \theta_m}{2} \right) \quad (3k)$$

$$S(f^*) = \begin{cases} S_{max}(f^*)^{-5}, & f^* < 1 \\ S_{max}(f^*)^{-2.5}, & f^* \geq 1 \end{cases} \quad (3l)$$

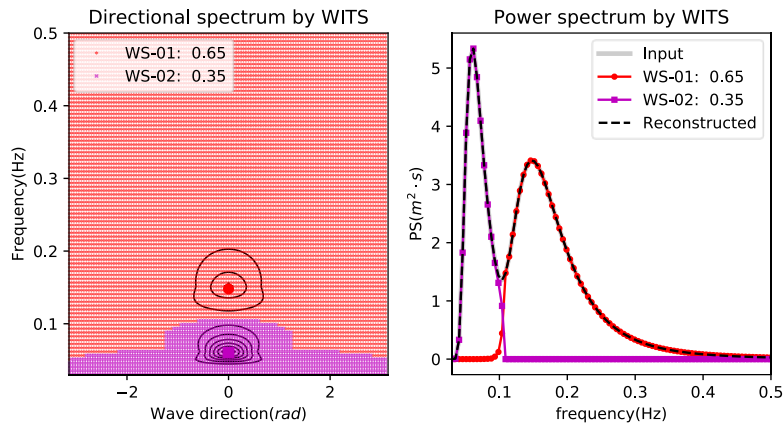
ここで、 θ ：波向(rad)、 f^* ：無次元周波数、 G_0 ：規格化定数、 θ_m ：平均波向(rad)、 S_{max} ：方向集中度である。

表-3.1で波浪諸元を設定した多峰型方向スペクトルを対象にWITS, MixtureそれぞれによるSpectral partitioningを行い、あらかじめ設定した真値と比較を行った。WITSで用いる閾値の設定は、Hansonら⁹⁾がWAMの推算方向スペクトルの処理で用いたものを採用した。

数値実験の例を図-3.4(a), (b)に示す。図-3.4(a), (b)左の方向スペクトル図で示すとおり、ピーク周波数及びピーク波向については、WITSとMixtureでほぼ同じ位置を検出しており明確な違いは見られない。一方、図-3.4(a), (b)右の周波数スペクトル図で確認すると、Mixtureでは2つのエネルギーピークを持つ入力したエネルギー分布を、各エネルギーピークの両サイドに裾を引くような単峰型のエネルギー分布が2つ重なるように分離できているのに対し、WITSでは周波数0.1(Hz)付近のエネルギー分布の分水嶺付近において、低周波数側に位置する波浪成分に相当するスペクトルのtailの形状を無視するような不自然な2つの分布に分離されていることがわかる。表-3.1に示す4ケース全ての各波浪成分の検出結果について、有するエネルギーの割合、ピーク周波数、ピーク波向を入力値と比較したものを図-3.5に示す。各波浪成分が有するエネルギーの推定精度については、方向スペクトルの分水嶺上を直線的に区分してPartitioningを行うWITSよりも、複数のスペクトルのtailの重なりを考慮してPartitioningを行うMixtureの方が優れることが図-3.5より示された。これらの数値実験より、Mixtureでは予め設定した波浪成分のピーク周波数およびピーク波向はWITSと同様に検出可能であり、さらに各波浪成分が有するエネルギーの割合についてはWITSよりも精度良く推定可能であることを確認した。



(a) Mixture による波浪成分の検出



(b) WITS による波浪成分の検出

図-3.4 数値実験における波浪成分の検出結果の例 (Case-1)

(左より, 方向スペクトル, 周波数スペクトル. 凡例中には推定された混合比を示す)

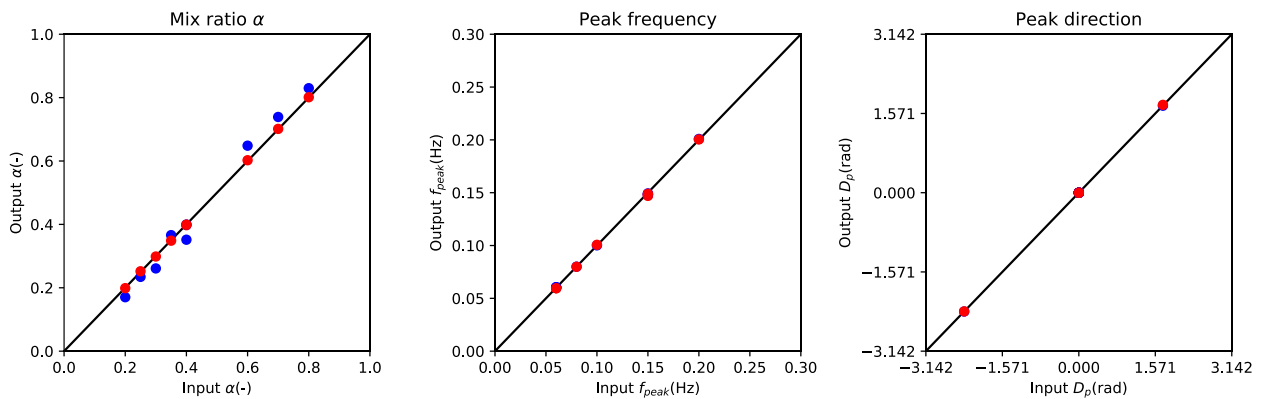


図-3.5 数値実験における波浪成分の検出結果 (赤: Mixture, 青: WITS)

(左より, 各波浪成分が有するエネルギーの比, ピーク周波数, ピーク波向)

次に、多峰性を示す観測方向スペクトルを対象に提案手法を適用し、波浪成分の抽出結果の妥当性について検討を行った。図-3.6に示す2つの地点において2015年に海象計で観測された3層の流速データからBDM-NNLSに従って方向スペクトルを算出し、Mixtureによって各波浪成分に対応する波高・ピーク波向・ピーク周期を抽出した。本章では、特に多峰性が顕著であった期間の方向スペクトルの解析事例を以下に示す。

(1) 異なる方向から到来する2つの波浪成分の検出例

図-3.6に示すナウファス久慈において、異なる2方向から同時に到来する波浪成分を観測した事例を図-3.7(a), (b)に示す。図-3.7(a)には、抽出したそれぞれの波浪成分についての波高・ピーク周期・ピーク波向および抽出した波浪成分の数を示す。ピーク周期・ピーク波向・抽出した波浪成分の数の時系列から、東からの周期10秒

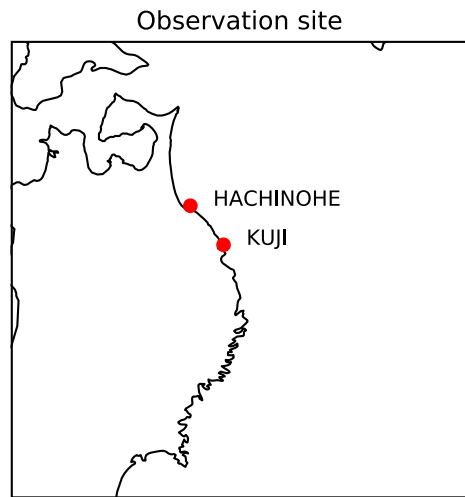
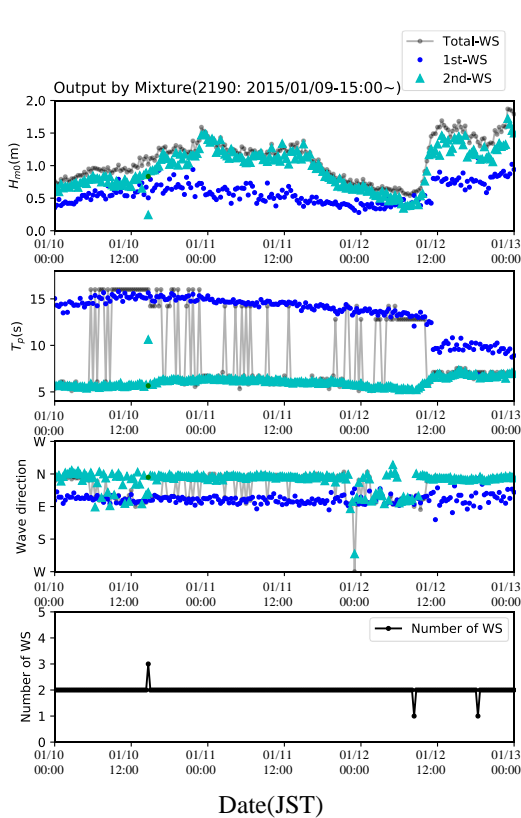
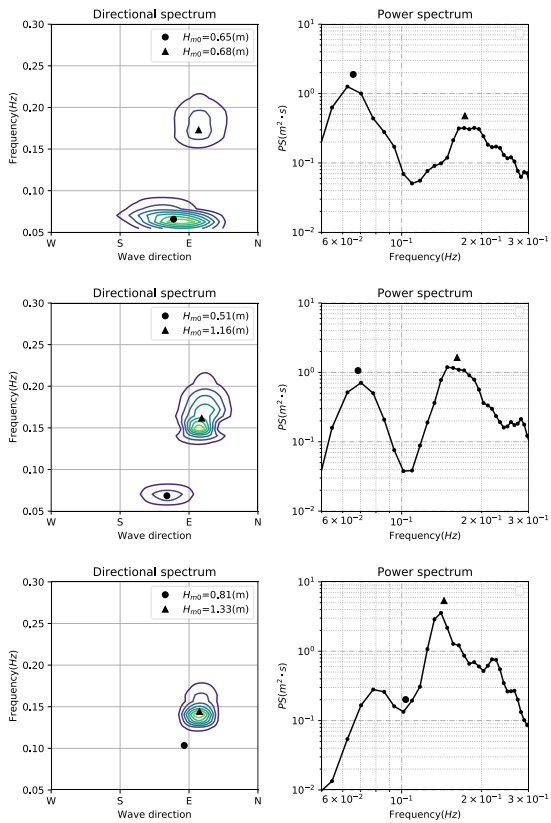


図-3.6 Mixture で解析した多峰型スペクトルの観測地点



(a) 検出した各波浪成分の時系列

(上段より、波高、周期、波向、波浪成分の数)



(b) 方向スペクトル上での波浪成分の検出

(左より、方向スペクトル、周波数スペクトル)

(上より、1/10-12:00, 1/11-12:00, 1/12-12:00, 時刻は JST)

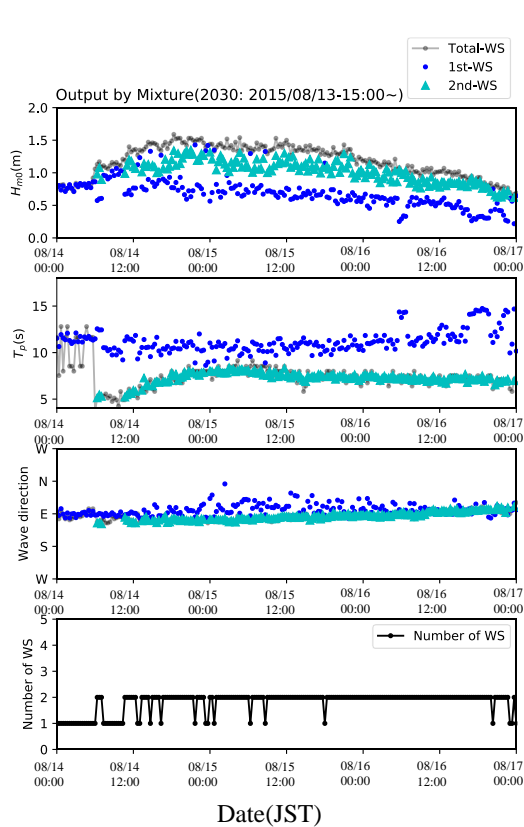
図-3.7 異なる方向から到来する2つの波浪成分

長の第1成分と北からの周期6秒程度の第2成分の重畳をおおむね安定して捉えていることが分かる。各波浪成分の波高に関しては、長周期側に位置する第1成分の波高が0.5 m前後で期間を通して安定していたのに比べて、第2成分の波高は0.5 m~1.5 mと比較的大きな変動が見られた。各波浪成分のピーク周期に関しては、およそその期間で長周期側に位置する第1成分、短周期側に位置する第2成分の自然な推移を検出していたが、01/12-12:00付近で、第1成分のピーク周期がステップ状に変化する不自然な挙動が見られた。各波浪成分のピーク波向に関しては、およそその期間で東からの波浪に対応する第1成分、北からの波浪に対応する第2成分の自然な推移を検出していたが、01/10-12:00付近を始めとする複数の期間で、第2成分のピーク波向が東から急変する不自然な挙動が見られた。図-3.7(b)には、方向スペクトルおよび波浪スペクトル上での波浪成分の検出結果の例を示す。いずれの時刻におい

ても、異なる方向から異なる周期をもって到来する2つの波浪成分が確認できる。また、1/12-12:00時点の周波数スペクトルおよび方向スペクトルでは、低周波数側の波浪成分のピーク周期の検出位置が目視によるピーク周期とは一致しない事例が見られた。

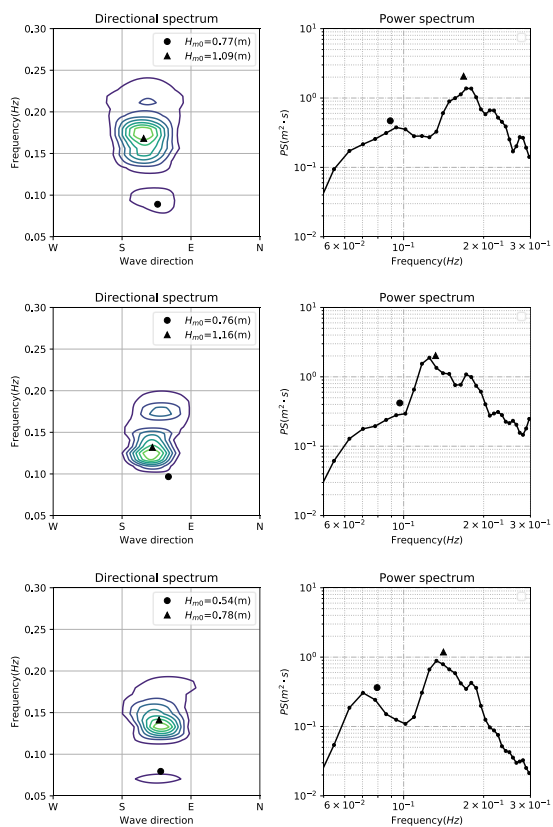
(2)ほぼ同一方向から到来する2つの波浪成分の検出例

図-3.6に示すナウファス八戸において、ほぼ同一方向から同時に到来する2つの波浪成分を観測した事例を図-3.8(a), (b)に示す。図-3.8(a)には、ピーク周期・ピーク波向および抽出した波浪成分の数を示す。ピーク周期・ピーク波向・抽出した波浪成分の数の時系列から、東からの周期10秒長の第1成分と、同じく東からの周期5~8秒程度の第2成分の重畳をおおむね安定して捉えていることが分かる。各波浪成分の波高に関しては、長周期側に位置する第1成分の波高で0.5 m前後、第2成分の波高で1.0 m前後



(a) 検出した各波浪成分の時系列

(上段より、波高、周期、波向、波浪成分の数)



(b) 方向スペクトル上での波浪成分の検出

(左より、方向スペクトル、周波数スペクトル)

(上より、8/14-12:00, 8/15-12:00, 8/16-12:00, 時刻は JST)

図-3.8 ほぼ同一方向から到来する2つの波浪成分

と比較的安定していた。各波浪成分のピーク周期に関しては、おおよその期間で長周期側に位置する第1成分、短周期側に位置する第2成分の自然な推移を検出していた。各波浪成分のピーク波向に関しては、おおよその期間で東からの波浪に対応する第1,2成分の自然な推移を検出していたが、長周期側に位置する第1成分のピーク波向が、08/15-00:00~08/16-00:00付近でばらつく様子が見られた。図-3.8(b)には、方向スペクトルおよび波浪スペクトル上での波浪成分の検出結果の例を示す。いずれの時刻においても、ほぼ同一方向から異なる周期をもって到来する2つの波浪成分が確認できる。また、08/15-12:00時点の周波数スペクトルおよび方向スペクトルでは低周波数側の波浪成分が高周波数側の波浪成分と重畳する形となり、目視結果からはピーク周波数およびピーク波向がはっきりしなかったが、提案手法を適用した結果2つの波浪成分が抽出されていた。

3.4 考察と課題

図-3.5に結果を示す数値実験で確認したように、特に各波浪成分のエネルギーの混合比に関してWITSよりもMixtureの方が精度の高いPartitioningが可能であった。WITSは画像処理に基づく分水嶺法で平面的にPartitioningを行うため、波浪成分が方向スペクトル上で近接する場合には各波浪成分に対応するスペクトルの裾が重複し、各波浪成分が有するエネルギーが正しく評価されない可能性がある。このような場合に、混合分布で立体的にPartitioningを行うMixtureの優位が現れたと考えられる。

図-3.7, 3.8に示す現地観測データへの適用において、方向スペクトルのスナップショットから確認されるような、多峰型方向スペクトルに対して各波浪成分を抽出することが可能となった。この各波浪成分の抽出において、パラメータの推定および方向スペクトルの各スナップショットに含まれる波浪成分の数の決定は式(3g), (3h), (3i)のEMアルゴリズムおよび式(3j)のAICの最小化により自動的に行われており、WITSのような閾値の試行錯誤的な調整を要せずに安定した抽出結果が得られていることが分かる。従来のWITSでは閾値の設定を解析者の経験に基づいてデータセットごとに行う必要があり、閾値選択の一貫性の確保に困難があった。一方、本手法では情報量規準によるモデル選択が抽出される波浪成分の数の決定に相当するため、解析者の経験に依存しないSpectral partitioningが可能となっている。

各波浪成分のピーク周期の抽出において、スペクトルの形状によっては、目視で確認できるスペクトルピークから離れた場所に波浪成分が検出される事例が見られた

(例えば図-3.7(b))。これは、提案手法で方向スペクトルを分解する際にBMスペクトルを仮定したことに起因する可能性がある。本研究で提案するSpectral partitioning手法は、波浪スペクトルがBMスペクトルの混合であると仮定して各成分に分解することに相当するため、観測方向スペクトルの形状がBMスペクトルから大きく乖離する場合は、抽出される波浪成分の数や波浪成分の位置の推定結果が不自然となっている可能性がある。しかし、本研究で解析対象としたデータでは概ね、多峰型スペクトルが有する各波浪成分を安定して抽出することができたため、この仮定はある程度妥当性であったと考えられる。

本研究で提案するSpectral partitioning手法における課題としては波浪成分の番号付けの問題が挙げられる。本研究ではピーク周波数について降順で各ピークに番号付けを行う単純な手法を採用した。しかし、複数の波浪成分のピーク周波数が近接している場合は、1つの波浪成分を時系列上で追跡していく際に他の波浪成分との入れ替わりが頻繁に生じる可能性がある。時系列上でこのような入れ替わりが生じると、波浪推算の精度検証等を行う波浪成分同士の時系列比較が困難となる。波浪成分の位置の時間変化に制約を設けて番号付けを行う発展的な方法²¹⁾も提案されているが、適切な制約を試行錯誤的に設定する必要が新たに生じる。一方Ailliotら²²⁾は番号付けも統計モデルに含める手法として、ランダムウォークを基にした時系列モデルを用いる手法を提案している。本研究で提案したMixtureにおいても今後、波浪成分の位置の時間発展を記述可能な形に拡張することが必要であると考えられる。

本研究で提案するSpectral partitioning手法の適用限界として、方向スペクトルの推定およびSpectral partitioningは方向スペクトルが解析可能な周波数帯に限られることから、おおよそ周期3秒未満の波浪成分は解析対象から除外されている。図-3.9に示すように弱い風波に相当する波浪成分の存在が無視されることで、本来は風波・うねり共存場であるデータが、うねりのみからなる海象条件と判定されている可能性がある。今後の課題として、周期3秒未満の波浪成分の存在の有無を風速等の補助的なデータから間接的に推定することで、方向スペクトルの周波数限界による情報の欠落を補完することが考えられる。

3.5 まとめ

Mixtureを応用してSpectral partitioning手法を新たに提案した。提案手法に対して数値実験による精度検証を行い、既存手法のWITSと同等以上の精度で方向スペクトルのPartitioningが可能であることを確認した。また、Mixtureを用い

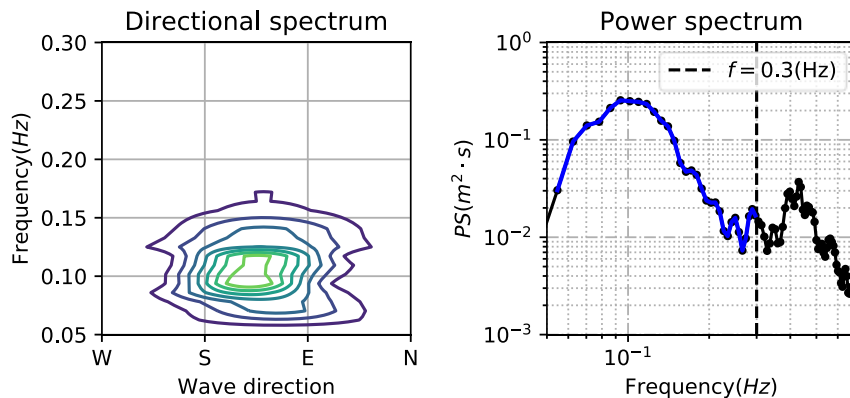


図-3.9 周期が短い波浪成分が検出されない例
(左より, 方向スペクトル, 周波数スペクトル)

て観測方向スペクトルから波高・周期・波向の時系列を抽出し、複数の波浪成分が重畳する様子を明確に捉えることができた。以上より、Mixtureを応用することで試行錯誤的な閾値設定が不要で観測データに適用可能なPartitioning手法を新たに提案した。提案手法は解析者の経験や試行錯誤を必要としないことから、様々な海象条件下のデータの処理を行う必要がある現業運用への導入も容易であると期待される。

4. 現地観測データへの適用

4.1 方向スペクトル解析対象データの概要

2, 3章で提案した手法により、高精度に推定した方向スペクトルから複数の波浪成分を合理的に抽出することが可能になった。本章では現地観測データを対象に、上記の手法により抽出した複数の波浪成分に対してそれぞれ風波・うねりの判別を行った上で、海象条件による波浪特性の違いを分析する。従来の風波やうねりといった海象条件に加えて、方向スペクトルの多峰性の有無を考慮することで、従来は特定が困難であった風波・うねり共存場のような多峰性波浪場に着眼した分析が可能となる。

図-3.6に示したナウファス久慈において海象計で取得されたデータを解析対象とした。ナウファス久慈を対象とした理由として、年間を通じて入射する太平洋からのうねりに加えて、冬期の北寄りの風による風波が重畳することで、風波・うねり共存場による多峰性波浪場の出現が期待されることが挙げられる。海象計は海底設置型の観測機器であり、沿岸波浪の観測を目的として日本各地の港湾域に設置されている。海底設置型の利点として、海上設置型の機器では難しい荒天時の波浪観測が可能とな

っている。海象計では超音波により水位変動の時系列と多層の水粒子速度を計測することで、方向スペクトルを高分解能に観測することが可能である。観測されたデータは全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)で海岸防災・開発に関連した各種事業および調査研究に幅広く活用されている²³⁾。

2015年の1年間に観測された海象計の3層流速データを用い、2章で述べたBDM-NNLSにより方向スペクトルを推定した。海底設置型の観測機器である海象計で周期が短い波浪を観測する場合、波浪に伴う水粒子の軌道流速が水深方向に指数的に減衰することにより、方向スペクトルの推定精度が低下する問題がある。そこで、本研究では周波数スペクトルのピーク周波数が0.3(Hz)よりも高周波数側に位置する観測データは解析対象から除外した。

3章で述べた混合分布モデルを用いたSpectral partitioningにより、各時刻の方向スペクトル上の波浪成分の数を決定し、各波浪成分に対応する波高・周期・波向を抽出した。抽出した波浪成分ごとに、気象庁の予測MSMの風速データ²⁴⁾を併用して波齢をそれぞれ算出し、Hansonら⁹⁾の波齢の基準値1.5により風波かうねりを判別した。最終的に各波浪成分の波齢と方向スペクトルの多峰性の有無を考慮して、単峰性の風波(Windsea)、単峰性のうねり(Swell)、風波・うねり共存場(Mixed sea)、その他の多峰性波浪場(Other multi-modal sea)の4種類の海象条件に分類を行った。

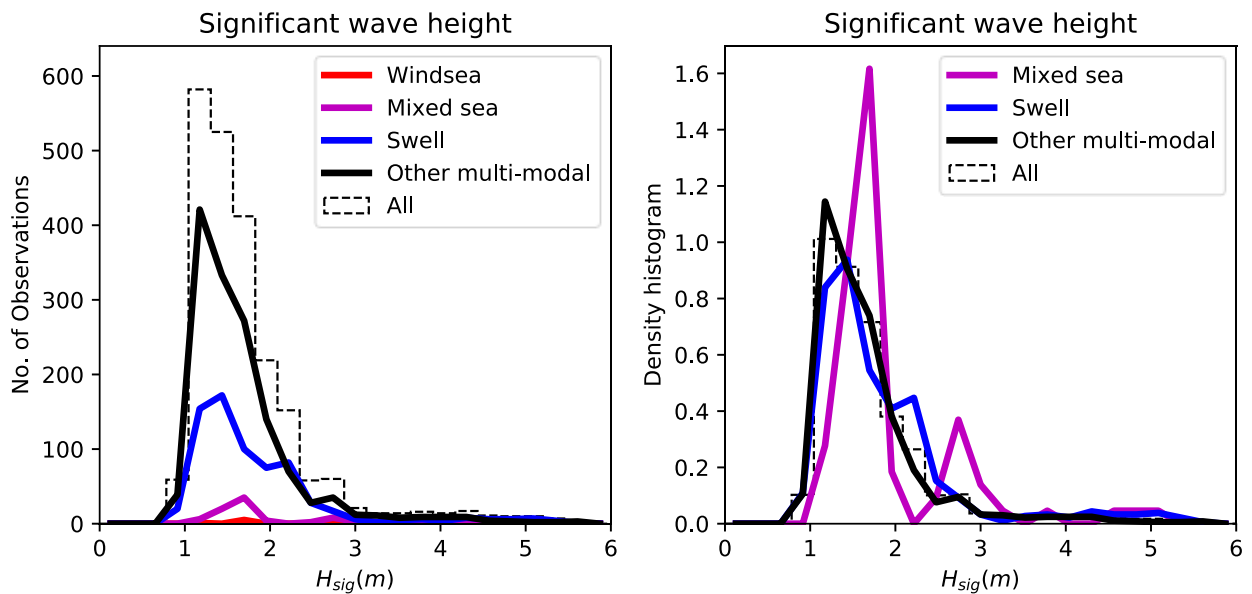
方向スペクトルの方向集中度 S_{max} 度と波形勾配との関係を検討するために、推定された方向スペクトルから方向集中度 S_{max} を算出した。方向集中度 S_{max} の算出には複数の方法があるが、本研究では、以下の式(4a)により、方向分散 σ_θ から方向集中度 S を算定する方法¹⁵⁾を採用した。

なお、本章では推定した方向スペクトルのピーク周波数における方向分散 σ_θ から算出した方向集中度 S を、方向集中度 S_{max} として取り扱った。

$$S = \frac{2}{\sigma_\theta^2} - 1 \quad (4a)$$

4.2 解析結果

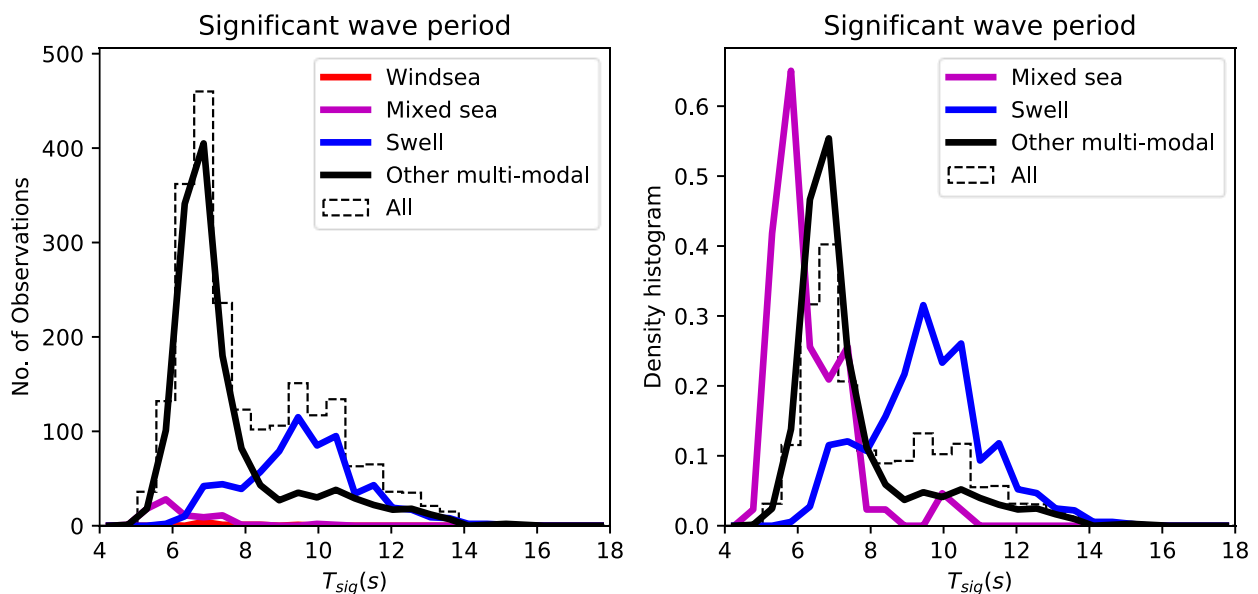
有義波高・有義周期・1/波齢・波形勾配・方向集中度の頻度分布を図-4.1~4.5に示す。図中には、海象条件を区別しないで算出した頻度分布(黒点線ヒストグラム)に加え、単峰性の風波(赤実線)、単峰性のうねり(青実線)、風波・うねり共存場(紫実線)、その他の多峰性波浪場(黒実線)の4つの海象条件による頻度分布をそれぞれ折れ線



(a) 絶対出現頻度

(b) 相対出現頻度

図-4.1 有義波高の頻度分布



(a) 絶対出現頻度

(b) 相対出現頻度

図-4.2 有義周期の頻度分布

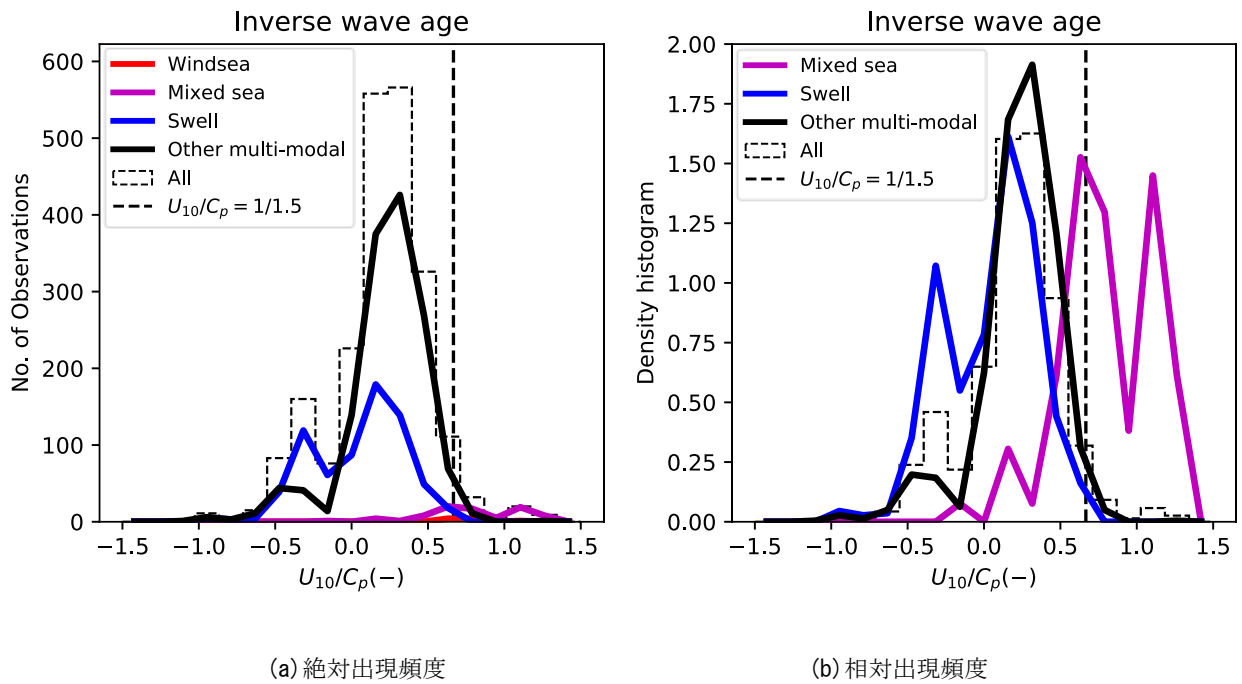


図-4.3 1/波齢の頻度分布

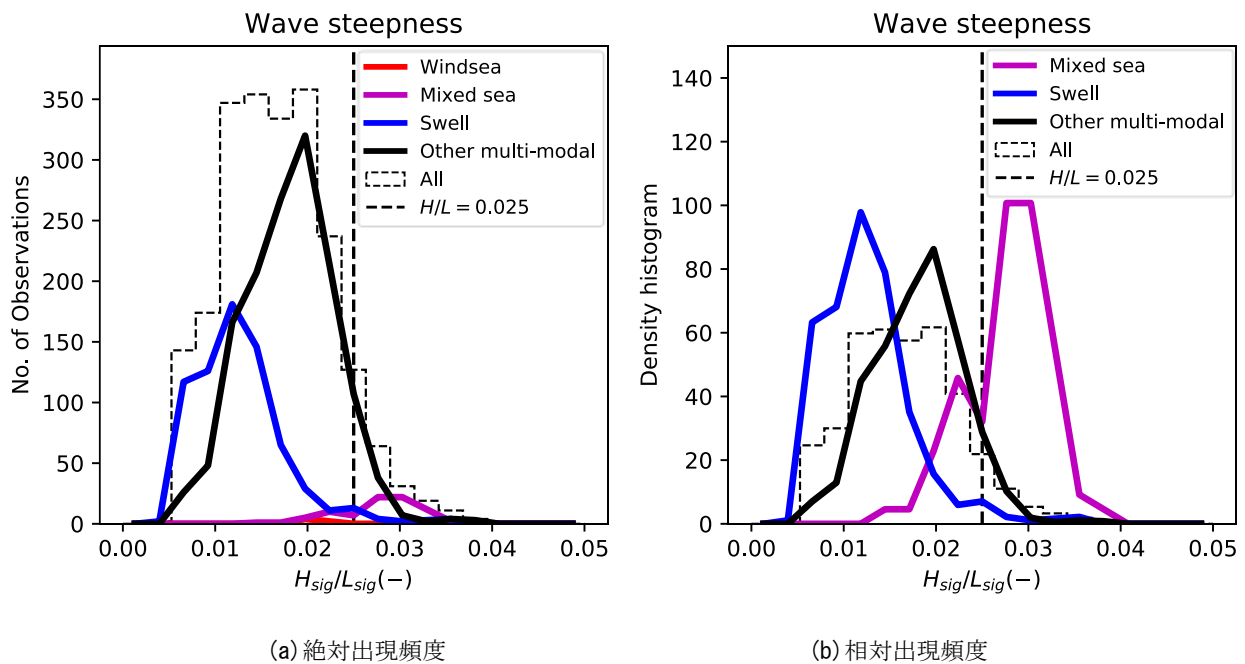
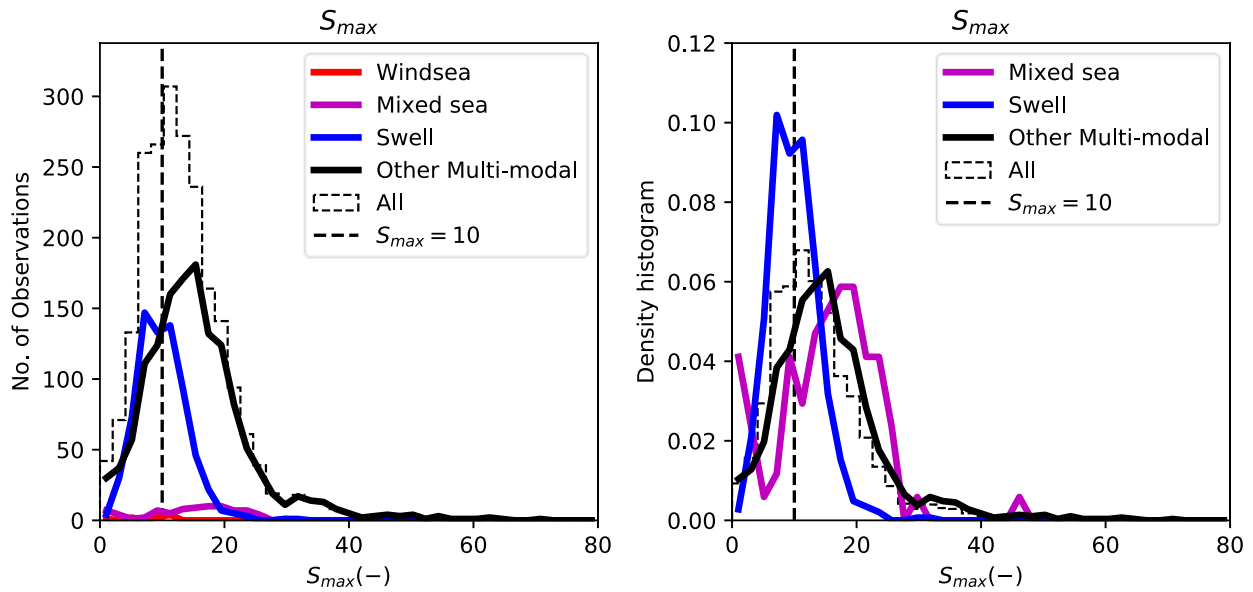


図-4.4 波形勾配の頻度分布

で示した。図-4.1~4.5においては、各海象条件で得られるサンプル数および頻度分布の形状を把握するために、サンプル数を絶対数で表示した絶対出現頻度（図中の(a)）、および正規化して表示した相対出現頻度（図中の(b)）で表示を行った。なお、4つの海象条件のうち単峰性の風波は、全サンプル数が100未満と少なく頻度分布形状

の変動が特に激しかったため、相対出現頻度（図中の(b)）の描画は行わなかった。図-4.1~4.5の絶対出現頻度で示すように、本章で対象とした地点では単峰性の風波が極端に少なく、単峰性のうねりおよびその他の多峰性波浪場が殆どを占める結果となった。

図-4.1に示す有義波高の頻度分布では、波高1.0~2.0 m



(a) 絶対出現頻度

(b) 相対出現頻度

図-4.5 方向集中度の頻度分布

にデータが集中する傾向が見られた。海象条件ごとの特徴としては、単峰性のうねりおよびその他の多峰性波浪場で波高1.0~1.5 mにデータが集中する傾向が見られた一方で、風波・うねり共存場ではやや大きく、波高1.5~2.0 m周辺で出現頻度が高くなる傾向があった。図-4.2に示す有義周期の頻度分布では、周期6.0~8.0 sにデータが集中する傾向が見られた。海象条件ごとの特徴としては、単峰性のうねりでは周期8.0~10.0 sに、その他の多峰性波浪では周期6.0~8.0 sに、風波・うねり共存場では周期6.0 s周辺で出現頻度が高くなる傾向があった。

図-4.3に示す1/波齢の頻度分布では、特に1/波齢が0.0~0.5の範囲にデータが集中する傾向が見られた。また、波齢が負を示す場合は逆風下にあるうねりを含むデータに相当するが、波齢が-0.3周辺にも出現頻度が高くなる傾向が見られた。海象条件ごとの特徴としては、単峰性のうねりとその他の多峰性波浪場で大きな違いは見られなかった。

図-4.4に示す波形勾配の頻度分布では、特に0.01~0.02周辺にデータが集中する傾向が見られた。海象条件ごとの特徴としては、単峰性のうねりでは波形勾配0.01周辺で出現頻度が高くなるのに対し、その他の多峰性波浪場では0.02、風波・うねり共存場では0.03周辺で出現頻度が高くなる傾向を示した。

図-4.5に示す方向集中度 S_{max} の頻度分布では、方向集中度 S_{max} が10前後で出現頻度が高くなる傾向が見られた。

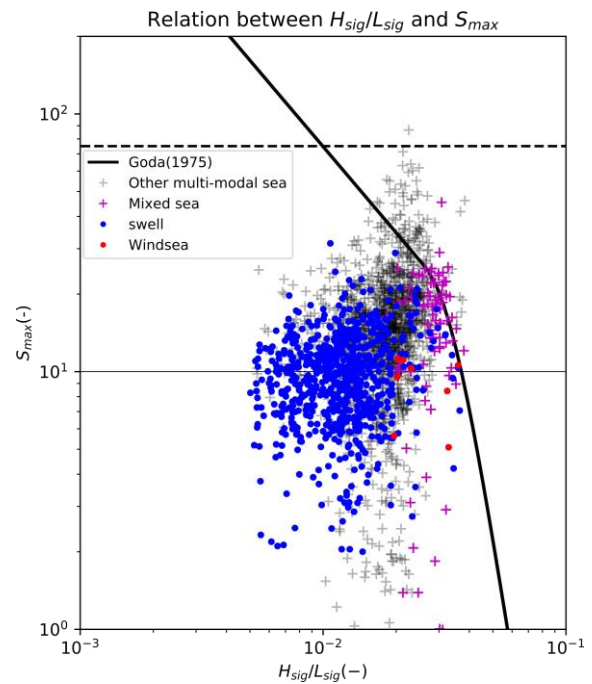


図-4.6 波形勾配 - 方向集中度

海象条件ごとの特徴としては、単峰性のうねりに比較して、風波・うねり共存場およびその他の多峰性波浪場において方向集中度 S_{max} が大きい値の出現頻度が高くなる傾向が見られた。

方向集中度 S_{max} と、波形勾配との対応を図-4.6に示す。図-4.6には、Mitsuyasuら²⁵⁾のデータをもとに合田ら¹⁹⁾が波形勾配による表示に書き換えた提案式を黒線で示す。単

峰性のうねりについては、方向集中度 S_{max} のデータの散乱が大きいものの、既往の提案式に比べて概ね低い値を示し、観測データの上限は既往の提案式によってほぼ抑えられていた。一方、風波・うねり共存場および多峰性波浪場については、波形勾配が0.02~0.03をとる領域で、既往の提案式を大きく超える S_{max} の出現が見られた。特に、その他の多峰性波浪場においては、合田ら¹³⁾が提案した方向集中度 S_{max} の参考値の最大値である75(図-4.6中、黒破線)を超える事例も見られた。

4.3 考察と課題

図-4.1~4.4で示すように、本研究の対象とした地点では単峰性のうねりが多く抽出される結果となった。これは解析対象地点が位置する東北太平洋沿岸の波浪特性を反映していると考えられる。風波や風波・うねり共存場を十分に含めて検討する場合には、冬季風浪が卓越する日本海側や、台風が接近する日本南岸などを解析対象地点に含める必要がある。

本研究では、大部分のデータがうねりと判定される結果となった。図-4.3中にはHansonら⁶⁾が風波とうねりの分離に用いた波齢の基準値を、図-4.4中には平山ら⁵⁾が風波とうねりの分離に用いた波形勾配の基準値をそれぞれ黒点線で示す。本研究で波齢によって単峰性のうねりと判定されたデータの大部分では、平山らの基準値⁵⁾となる波形勾配を下回る値を示していた。よって、今回の検討で波齢によって単峰性のうねりと判定されたデータに関しては、波形勾配を用いた場合も概ね同様にうねりと判定されたと考えられる。一方、風波に関してはデータが少なかつたため、結果の比較について明白な検討はできなかった。

図-4.6で示すように、単峰性波浪場に比べて、多峰性波浪場において方向集中度 S_{max} のばらつきが見られた。これは様々な発達段階にある複数の波浪成分が同時に存在する多峰性波浪場を、単一の波形勾配で記述することの困難に由来すると考えられる。方向スペクトルの多峰性の有無を区別し、単峰性波浪場のみ抽出して解析することで方向集中度 S_{max} のばらつきを低減できたことから、本研究で高度化した方向スペクトル解析手法は、方向スペクトルの方向集中度の標準形の検討にも有用であると考えられる。

4.4 まとめ

新たに提案した方向スペクトルの解析手法を現地観測データの解析に適用し、海象条件ごとに波浪特性の分析を行った。従来の風波やうねりといった海象条件に加え

て、方向スペクトルの多峰性の有無を考慮することで、従来は分析が困難であった風波・うねり共存場のような多峰性波浪場に着眼した検討を実施した。有義波高を始めとした波浪統計値の出現頻度分布が海象条件ごとに特徴的な形状を示すことを確認したが、これは海象条件ごとに異なる波浪特性を反映した結果である可能性がある。

多峰性波浪場と単峰性波浪場を区別して既往の波形勾配と方向集中度 S_{max} に関する提案式との対応を確認したところ、単峰性のうねりでは既往の提案式よりも概ね低い S_{max} を示していた。さらに、多峰性波浪場では既往の提案式よりも高い方向集中度 S_{max} を示す場合があることがわかった。単峰性波浪場に着眼して波形勾配と方向集中度 S_{max} との関係を検討することで、波形勾配に対する方向集中度 S_{max} のばらつきを低減することに一定の効果が見られた。

5. 結論

本研究では、多峰型方向スペクトルから風波・うねり成分をそれぞれ抽出することを目的として、方向スペクトルの解析手法の高度化を行った。まず、既往の手法を改良することで従来よりも高精度な方向スペクトル推定手法を提案した。従来のベイズ法に非負制約最小二乗法を導入することで、既存手法の課題となっていた収束計算を不要とし、推定精度の向上を試みた。方向スペクトルの推定精度を評価する数値実験を実施し、従来の推定手法に比べて高精度な推定が提案手法により可能になったことを確認した。

次に、多峰型方向スペクトルの多峰性を解析するためのSpectral partitioning手法として、混合分布モデルを応用する手法を提案した。多峰型方向スペクトルから各波浪成分を抽出する数値実験を実施し、既存手法のWITSと同等以上の精度のSpectral Partitioningが提案手法を用いて可能なことを確認した。現地観測された多峰型方向スペクトルに提案手法を適用して各波浪成分に対応する波高・周期・波向の時系列を抽出し、複数の波浪成分が重畳する様子を明確に捉えることができた。提案手法は解析者の経験や試行錯誤を必要としないことから、様々な海象条件下のデータを対象に処理を行う必要がある現業運用への導入も容易であると期待される。

以上の高度化した方向スペクトルの解析手法を現地観測データの解析に適用し、海象条件ごとに波浪特性の分析を行った。従来の風波やうねりといった海象条件に加えて、風波・うねり共存場のような多峰性波浪場に着眼した分析も実施し、有義波高を始めとした波浪統計値の出

現頻度が海象条件ごとに異なる出現特性を持つことを示した。さらに、波形勾配と方向集中度 S_{max} に関する既往の提案式と観測データとの対応を確認したところ、単峰性のうねりでは概ね既往の提案式よりも低い S_{max} を示す一方で、多峰性波浪場では既往の提案式よりも高い方向集中度 S_{max} を示す場合があった。また、単峰性の波浪場のみを抽出して解析することで、波形勾配に対する方向集中度 S_{max} のばらつきの低減に効果があることを確認した。

6. あとがき

本研究により、方向スペクトルから風波とうねりに対応する波浪外力を抽出可能となることで、設計外力として今後重要となるうねりの実態評価が進むと期待される。また、従来の波浪観測データは、有義波に関してのみ波高・周期・波向などの波浪統計値が観測資料として蓄積されてきた。本手法により、方向スペクトルから風波とうねりそれぞれに関して波浪統計値を抽出して記録することで、従来よりも高度な情報を持つ波浪観測資料の蓄積が可能になると考えられる。今後、本手法の現地観測データ解析への適用事例の蓄積を通じて、波浪データ解析の現業運用への導入を検討する予定である。

今後の研究課題として、多峰性波浪場を想定した設計外力の設定手法の検討が挙げられる。多峰性波浪場は、複数の波高・周期・波向等を持つ状態と言えるため、波浪外力としての取り扱いが単峰性の場合と比べて複雑となることが予想される。多峰型スペクトルを単峰型スペクトルに近似して取り扱うことも考えられるが、浅海域の波浪変形などの複雑な波浪変形を示す現象に対して、近似の妥当性を事前に評価することは一般的には困難である。よって今後は、設計外力の設定において多峰性波浪場を想定する場合、複数の波浪成分を有する状態を取り扱う手法が本質的に必要になると考えられる。

沿岸波浪の方向スペクトルの方向集中度について、我が国では、Mitsuyasuら²⁵⁾の結果をもとにした合田ら¹³⁾の提案式により、想定する波浪条件に対応する波形勾配から方向集中度 S_{max} を算定し、性能照査や海岸過程の調査研究を長年行ってきた。今後は本研究で挙げた課題に対応しつつ観測データをもとにMitsuyasuら²⁵⁾の提案式の妥当性の検証を行い、必要であればより妥当な関係式を提案し、海岸構造物の性能照査や沿岸域の調査・研究に適用していくことが必要であると考えられる。

(2020年9月11日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、海洋情報・津波研究領域の各位からは、多大なるご支援、ご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

また、本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号: 20H02259, 16H04416)の助成を受けて実施したものであり、本稿のとりまとめは該当する課題研究での議論を踏まえて行った。橋本典明教授(九州大学)、森信人教授(京都大学)をはじめ、関係各位に対して、ここに記して心からの謝意を表する。

参考文献

- 1) 平山克也, 加島寛章: うねり性波浪による越波災害の発生過程の推定とその対策, 港湾技研資料, No.1270, 2013.
- 2) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), pp.133-134, 2018.
- 3) 平山 克也, 加島 寛章, 下新川海岸に來襲した長周期うねりによる越波発生機構の解明とその対策, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 67 巻, 2 号, p. I_106-I_110, 2011.
- 4) 深瀬 祐太郎, Suminda Ranasinghe, 田島 芳満, 佐藤 慎司, 下新川海岸におけるうねり性巨大波浪の変形機構, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 65 巻, 1 号, p. 1411-1415, 2009.
- 5) 平山 克也, 加島 寛章, 伍井 稔, 成毛 辰徳: うねりによる高波の発生確率とその地域特性に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_85-I_90, 2015.
- 6) Hanson, J. L. and Phillips, O. M.: Automated Analysis of Ocean Surface Directional Wave Spectra, *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 18, pp.277-293, 2001.
- 7) 橋本 典明: ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 海岸工学講演会論文集, 34 巻, p.126-130, 1987.
- 8) 三井正雄, 橋本典明, 河合弘泰, 横田雅紀, 北村康司: 高度化した海象計による海洋波の方向スペクトル推定精度向上に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 66, No.1, pp.I_1446-I_1450, 2010.
- 9) Benoit, M.: Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data, *In Proc. 2nd Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis*, pp. 740-754, 1993.
- 10) 藤木 峻, 橋本 典明, 川口 浩二, 櫻庭 敏: うねり性波浪の実態解明に向けた方向スペクトル推定手法の高精度化に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, No.2, pp.I_115-I_120, 2016.
- 11) Lawson C., Hanson R.J.: *Solving Least Squares Problems*, SIAM, pp.158-162., 1995
- 12) Yabuki, T. and Matsu'ura, M.: Geodetic data inversion using a Bayesian information criterion for spatial distribution of fault slip, *Geophysical Journal*

- International*, Vol.109, Issue. 2, pp.363-375, 1992.
- 13) 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, 1975.
 - 14) 磯部雅彦, 近藤浩右, 堀川清司: 方向スペクトルの推定におけるMLMの拡張, 第31回海岸工学論文集, pp.173-177, 1984.
 - 15) Kuik, A. J., G. P. van Vledder, and L. H. Holthuijsen.: A Method for the Routine Analysis of Pitch-and-Roll Buoy Wave Data. *J. Phys. Oceanogr.*, 18, 1020–1034, 1988.
 - 16) 橋本 典明, 三井 正雄, 川口 浩二, 横田 雅紀, 小田 圭祐, 濱野 有貴, 高精度な方向スペクトルの観測と解析に向けた数値実験と現地観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71 巻, 2 号, p. I_79-I_84, 2015.
 - 17) Portilla, J., Ocampo-Torres, F. and Monbaliu, J.: Spectral Partitioning and Identification of Wind Sea and Swell, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.26, pp.107_122, 2009.
 - 18) 藤木 峻, 森 信人, 川口 浩二, 末廣 文一: 混合分布モデルを用いた波浪方向スペクトル Partitioning に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_103-I_108, 2018.
 - 19) Bishop, C.M.: パターン認識と機械学習 (下), 丸善, 146p., 2012.
 - 20) Dhillon, S. I. and Suvrit, S.: Modeling Data Using Directional Distributions, *University of Texas Computer Science Technical Report*, TR-03-06, pp.3-7, 2003.
 - 21) Tracy, B., Devaliere, E., Hanson, J., Nicolini, T. and Tolman, H.: Wind Sea and Swell Delineation for Numerical Wave Modeling, *Proc. 10th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and Coastal Hazard Symposium*, Oahu, 2007.
 - 22) Ailliot, P., Maisondieu, C. and Monbet, V.: Dynamical Partitioning of Directional Ocean Wave Spectra, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.33, pp.95-102, 2013.
 - 23) 川口浩二, 櫻庭 敏, 藤木 峻, 田村 仁: 全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS2015), 港湾空港技術研究所資料, No.1333, pp.4-7, 2017.
 - 24) 京都大学生存圏研究所: 解析値を中心に再構成した NetCDF データ (MSM,RSM), <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/gpv-netcdf.html>, 参照 2020-08-02.
 - 25) Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda, and K. Rikiishi: Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 750–760, 1975.

港湾空港技術研究所報告 第59巻 第2号

2020.9

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 © (2020) 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. Investigation of Applicability of Coral Based Aggregate on Marine Concrete Structures Takahiro NISHIDA, Toru YAMAJI, Kazuhide YONAMINE, Osamu TANIGUCHI, Ryoichi TANAKA, Hiroshi TAKENAKA, Osamu KIYOMIYA.....	3
2. Centrifuge Model Tests for Investigation of Instability of Seawall Ground Due to Ocean Waves Hidenori TAKAHASHI.....	31
3. Interface shear properties between steel-slag-mixed dredged soils and different materials Satoshi MATSUMURA, Takaaki MIZUTANI, Yoshiyuki MORIKAWA, Yuzo AKASHI, Hideki HONDA, Masahiro SHIMIZU.....	51
4. Advanced Method for Identification of Windsea and Swell on the Multi-modal Directional Wave Spectrum Takashi FUJIKI, Koji KAWAGUCHI.....	84