

Swell Index によるうねり性波浪の定量化と 日本沿岸波浪場解析

田村 仁*・藤木 峻**・川口 浩二***

要 旨

富山湾の寄り回り波に代表されるように設計波で想定している以上の周期を有するうねりの襲来およびそれに伴う沿岸被害が近年多発しており、うねり性波浪の予測と監視は海岸工学分野における重要研究課題の1つとなっている。うねりの発生は大気擾乱に起因する。つまり、成分波間の非線形相互作用によるピーク周波数のダウンシフティングにより、低周波成分の風波エネルギーが生成され、それらが生成海域を離れうねりとして遠方まで伝搬する。実海域でのうねりの発生や伝搬といった力学過程を理解するには、まず風波とうねりをスペクトル空間内で定量的に分離することが重要なポイントとなる。しかしながら実務等で一般的に用いられる波形勾配を指標とする分離手法では、ある海象場がうねりかそうでないかの識別として用いられ「うねり性」の計量化には適用できない。

本研究では海洋波の成長率に着目することで風波とうねりをスペクトル空間内で分離し、それに基づいて全波浪エネルギーに対するうねりエネルギーの比として Swell Index (SI) を導入した。データ解析には NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS)による2007年から2016年までの波浪観測値を用いた。その結果、SIを用いることで風波とうねりを明確に分離することができ、富山湾における波浪特性に関して物理的な解釈が可能となった。また、日本沿岸のうねり性波浪の海域特性とその季節変動を解釈することが可能となった。日本沿岸では概ね3つの海域(1. 日本海沿岸:北陸から中国地方, 2. 太平洋沿岸:東北地方, 3. 太平洋沿岸:四国から九州地方)でうねりによる高波が高頻度に発生し、それらが日本近海の大気擾乱と関連していることが示唆された。

キーワード: うねり性波浪, Swell Index, NOWPHAS, 寄り回り波, 日本沿岸うねり特性

* 海象情報研究グループ 研究官

** 海象情報研究グループ 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: 046-842-5246

E-mail: htamura@p.mpat.go.jp

An Analysis of Ocean Waves along the Japanese Coast Based on Swell Index

Hitoshi TAMURA*

Takashi FUJIKI**

Koji KAWAGUCHI***

Synopsis

Coastal disasters induced by low frequency swells with massive energy are a serious problem along Japanese coasts and have been frequently occurring in recent years such as those reported in Toyama bay (the so-called Yorimawari-waves). Prediction and monitoring of these swells is a pressing task for the coastal engineering community. Swells originate from the evolution of windseas of distant weather systems. Due to the spectral downshifting by resonant interactions, wind waves transfer spectral energy to the lower frequency bands. They travel long distance with less attenuation, far away from where the wind waves are actually generated. To understand these physical processes, it is first necessary to clearly separate windsea and swell from the viewpoint of spectral components, because it is quite common for windsea and swell to coexist in the ocean. Next we need to investigate the impact of swell energy in terms of coastal disasters. Wave steepness (H/L), which is defined by a set of wave heights and periods, has been widely used for practical applications because of its relative simplicity. However, this parameter is limited in its applicability to distinguish between windsea and swell since it does not provide the degree of swell energy inside the total wave energy. Instead, H/L just represents whether the sea state is windsea or swell.

In this study, we propose a Swell Index (SI) based on the wave growth rate in order to decompose the measured wave spectra into windsea and swell components. Then we investigate historical ocean wave data from 2007 to 2016 observed by the NOWPHAS observation network. Based on analysis of the wave fields in Toyama bay, we show that the SI can clearly separate swell energy from total energy and that the use of SI successfully explains the characteristic wave fields in the bay. We also discuss swell properties along the Japanese coast and their seasonality in relation to the atmospheric forcing. We conclude that SI is a useful metric to quantify swells for practical purposes because of their simplicity and robustness.

Key Words: Ocean swells, Swell Index, NOWPHAS, Yorimawari-wave, Swell properties along the Japanese coast

* Researcher, Marine Information Group

** 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 : +81-46-842-5246 E-mail : htamura@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	29
1. はじめに	33
2. 解析手法および現地観測データ	33
2.1 風波とうねりの分離手法	33
2.2 波形勾配と波齢およびSIに関して	33
2.3 NOWPHASによる現地波浪観測データ	34
3. 結果	35
3.1 富山湾の波浪場解析	35
3.2 日本沿岸におけるうねり性波浪の特性	37
4. 考察	39
5. おわりに	40
謝辞	41
参考文献	41

1. はじめに

富山湾の「寄り回り波」に代表されるように、設計波で想定している以上の周期を有するうねりの襲来およびそれに伴う沿岸被害が近年多発しており、うねり性波浪の予測と監視は海岸工学分野における重要研究課題の1つとなっている^{1), 2), 3)}。うねりの発生は中緯度のストームトラックにおける低気圧の発達や低緯度における台風といった大気擾乱に起因する⁴⁾。つまり、成分波間の非線形相互作用によるピーク周波数のダウンシフティングにより、低周波成分の風波エネルギーが生成され、それらが生成海域を離れうねりとして遠方まで伝搬する。波浪モデルによる精度の高いうねり性波浪の監視と予測には、まず実海域データにおいて風波とうねりを定量的に分離し、上記のようなうねりの発生・伝搬といった物理過程を解明することが重要なポイントとなる。

一般的に海洋波には風波成分とうねり成分が同時に混在するため、「うねり性」はそれらの度合いを示すメトリックである。これまで海岸工学分野では有義波高と波長（線形分散を仮定し周期から推定）から波形勾配を定義し指標とする分離手法⁵⁾が実務等で一般的に用いられてきている。しかしながら寄り回り波のように波高が特異的に増大する現象を考えると、その波形勾配も大きくなるため、うねり性波浪の判別自体に問題が残る。またこの指標は、ある時間平均の海象場が風波かうねりかの識別として用いられ、スペクトル帯に内在する「うねり性」の計量化には適用できない。これは得られる水位の時系列データから有義波高や有義波周期といったグロスな波浪統計量に基づいて解析が行われることに起因する。

本研究では海洋波の成長率に着目することで風波とうねりをスペクトル空間内で分離し、それに基づいて全波浪エネルギーに対するうねりエネルギーの比として Swell Index (SI) を導入する。SI を用いることで、これまで定性的にしか扱われてこなかったうねり性波浪を定量的かつ実務的な観点からも汎用的に評価可能であることを本研究で明らかにする。データ解析には NOWPHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS) の過去 10 年間の現地波浪観測データを用い、まず初めに「寄り回り波」として知られるうねり性波浪が顕著な富山湾を対象に波浪場の解析を行い SI の有用性を示す。続いて日本沿岸のうねり性波浪特性に関して、発生頻度や既往最大波高の観点からそのホットスポットを示すとともに、それらを引き起こす大気擾乱との関連を議論する。

2. 解析手法および現地観測データ

2.1 風波とうねりの分離手法

まず初めに海洋波の生成発達に第一義的に重要となる海上風との関連から風波成分とうねり成分の分離手法を考察する。一般的に風波はその場の風応力により発達する波浪と定義され、その時間発展は、

$$\partial_t F(\omega, \theta) = \beta F(\omega, \theta) \quad (2.1)$$

で表される。ここで $F(\omega, \theta)$ は波浪の周波数 ω と方向 θ (ここでは風向と波向きとの角度差で定義) の二次元スペクトル、 β はスペクトルの成長率である。 $\beta > 0$ の場合、風波エネルギーは指数関数的に時間発展する (Miles 機構)。一方で、うねりは風波の生成海域から離れその伝搬過程で減衰する波浪と定義される。つまりうねりから大気側へのエネルギー輸送が引き起こされることからその成長率は $\beta < 0$ となる^{6), 7)}。このような観点から、風波とうねりはそれぞれのスペクトル成分に対する成長率の正負によりスペクトル空間内で分離することが可能となる。

Plant⁸⁾ は風波成長率に関する過去の観測結果を多数まとめることで風波成長率の一般形、

$$\beta = c_\beta \omega \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{u_*}{c} \right)^2 \cos\theta \quad (2.2)$$

を提案し、現在では現業波浪予測で使用される第三世代波浪モデルの海上風外力項の基礎となっている⁹⁾。一方で、Donelan ら¹⁰⁾ は現地観測結果および室内実験結果を基に成長率が次式で表されることを示している。

$$\beta = c_\beta \omega \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{u_{\lambda/2} \cos\theta}{c} - 1 \right) \left| \frac{u_{\lambda/2} \cos\theta}{c} - 1 \right| \quad (2.3)$$

ここで、 u_* : 摩擦速度、 c_β : シェルタリング係数、 ρ_a : 大気密度、 ρ_w : 海水密度、 $u_{\lambda/2}$: 半波長を基準高さとした風速、 c : 成分波の位相速度である。式(2.2)と式(2.3)による成長率モデルの決定的な相違は式(2.3)においては、大気-波浪間の運動量交換に関して上向き・下向きの両方のフラックスを表現できる形となっていることにある。これは Hanley and Belcher¹¹⁾ によって指摘された風駆動による波 (Wind driven waves) および波駆動による風 (Wave driven winds) に対応する。つまり成長率の正負は 2 次元スペクトル空間内での各成分波で定義される波齢の逆数を表す $u_{\lambda/2} \cos\theta / c$ により一意的に決まり、これから得られる区分周波数-方向を用いて風波成分とうねり成分に分離することが可能となる。

図-2.1a は風波成分とうねり成分を 2 次元スペクトル空間内で分解した模式図を示している。一点鎖線で分離された内側の領域が式(2.3)による成長率に関して正の値となる風波成分に対応し、それ以外の領域がうねり成分

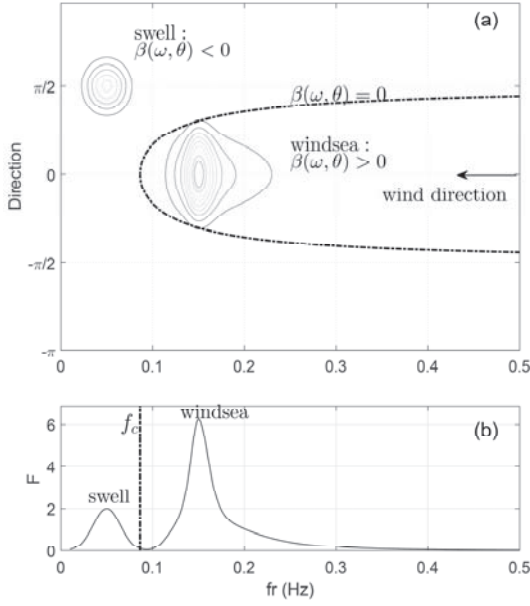


図-2.1 風波とうねりの分離手法に関する概念図

と判別される．一方でより実務的な観点から2次元スペクトルデータが得られない，もしくはスペクトル算定精度の妥当性に疑義が残る場合がある．その場合として1次元周波数スペクトルのみが得られていれば風向きと波向きが同一の方向であるという前提条件 ($\cos\theta = 1$) のもと，低周波数側の区分周波数 ω_c は $U\cos\theta/c = U\omega_c/g = \alpha$ より，

$$\omega_c = \alpha g U^{-1} \quad (2.4)$$

として得られる (図-2.1b)．ここで U は高度 10m での風速，また α は風波とうねりを分離する定数で，Donelan ら¹²⁾に基づき 0.83 とすることで完全発達した風波 (fully developed sea) がうねり性波浪の発生初期として解釈できる．成分波の位相速度 c は deep water の線形分散関係を仮定して見積もる．この風波とうねりの区分周波数 $\omega_c (= 2\pi f_c)$ を用いて，それ以下の成分波がうねりに対応すると考え，次のようにうねりのエネルギー m_0^s および換算有義波高 H_s^{swell} を求めることが可能となる．

$$m_0^s = \int_0^{\omega_c} F(\omega) d\omega \quad (2.5)$$

$$H_s^{swell} = 4\sqrt{m_0^s} \quad (2.6)$$

さらにそれに対する全波浪エネルギー m_0 の比として Swell Index (SI) を

$$SI = m_0^s/m_0 \quad (2.7)$$

の通り定義することで，「うねり性」を計量化 ($SI \in [0, 1]$) することが可能となる^{13), 14)}．

既往の研究や実務等ではうねりの区分周期を一定値と定め (例えば平山ら³⁾では 8 秒)，うねり性波浪の判別

に使用されることがあるが，代表値となるうねりの周期は各海域によって大きく異なる．これは上述したように大気擾乱による風波の発達とピーク周波数のダウンシフティングの程度が海上風速やフェッチによって異なるためである．また，第三世代波浪モデル SWAN¹⁵⁾では本研究と同等の換算うねり波高が出力パラメータとして提示されているが，このパラメータも区分周波数を一定値 (任意に設定可能，デフォルト値: 0.1Hz) として算出していることからその力学的根拠は乏しい．一方で，本研究では海上風と波浪スペクトルの発達段階との関連でうねり性波浪が判別されることになる．海洋波の力学的な観点から，周期の短い波でも風域を脱した波浪はうねりとして判別されることは合理的である．ただし，その伝搬速度が遅いこと，またエネルギー減衰が大きいことから遠方への影響は極めて小さい．

2.2 波形勾配と波齢および SI に関して

ここでは，これまで主に実務の観点から風波とうねりの分離に使用されている波形勾配と本研究で新たに提案する SI (およびそれに関連する波齢) に関して検討を行う．議論の前提として外洋において一般的にその妥当性が示されている Toba スペクトル¹⁶⁾を風波の周波数スペクトルとして仮定する．

$$F(\omega) = \alpha_4 g u_* \omega^{-4} \quad (2.8)$$

ここで， g : 重力加速度である．波形勾配として平均二乗勾配 (Mean squared slope, MSS) を代表的な物理パラメータとして用いると

$$\overline{(\nabla\eta)^2} = \int k^2 F(k) dk = g^{-2} \int \omega^4 F(\omega) d\omega = \alpha_4 \frac{\delta\omega u_*}{\omega_p c_p} \quad (2.9)$$

が得られる．ここで， $\nabla\eta$: 水位の波形勾配ベクトル， $\delta\omega$: スペクトルバンド幅， c_p : ピーク周波数成分波の位相速度である．このことから MSS は波齢の逆数 (Inverse wave age) に比例することがわかる．MSS や波齢は実務的な観点から容易に観測可能な波浪データを用いて代表されるバルクパラメータを用いて一般的に下記が適用される．

$$|\overline{\nabla\eta}| \simeq H_s/L \quad (2.10)$$

$$u_*/c_p \simeq 2\pi g^{-1} U f_p \quad (2.11)$$

一方で，本研究で提案する SI は周波数帯におけるスペクトルエネルギー分布を風波の成長率に着目しその物理過程を考慮した波浪統計量となる．しかも通常の波浪観測で得られる1次元スペクトルおよび大気再解析による海上風速といった物理変動量から容易に推定できることから実務的観点からも有用であると考えられる．

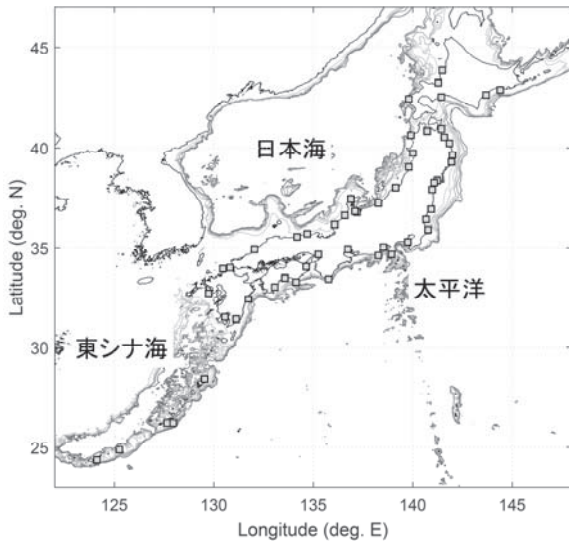


図-2.2 日本近海の海底地形と解析対象とした NOWPHAS 観測地点 (全 53 地点)

2.3 NOWPHAS による現地波浪観測データ

2007 年から 2016 年までの 10 年間分の NOWPHAS 観測データを用いて解析を行った。対象とした観測データは海底設置型の超音波波高計 (USW) および海象計で計測されたもので、データの均質性が比較的継続している地点から選出した。対象地点は日本海沿岸の 19 地点 (留萌, 石狩新港, 瀬棚, 青森, 深浦, 秋田, 酒田, 新潟沖, 直江津, 富山, 伏木富山, 輪島, 金沢, 福井, 柴山, 鳥取, 浜田, 藍島, 玄界灘), 東シナ海沿岸の 5 地点 (伊王島, 名瀬, 那覇, 平良沖, 石垣沖), 太平洋沿岸の 29 地点 (釧路, 十勝, 苫小牧, むつ小河原, 八戸, 久慈, 宮古, 釜石, 石巻, 仙台新港, 相馬, 小名浜, 常陸那珂, 鹿島, 第二海堡, 下田, 清水, 御前崎, 伊勢湾, 潮岬, 神戸, 小松島, 室津, 高知, 上川口, 細島, 志布志湾, 鹿児島, 中城湾) の計 53 地点である (図-2.2)。計測されたサンプリング周波数 2Hz および 20 分間を 1run とする水位変動の時系列生データからノイズおよびトレンド除去をし、最大周波数 0.7Hz までの 1 次元周波数スペクトルを FFT により推定し各種波浪統計量を算出した。なお NOWPHAS 波浪台帳では、超音波波高計のデータ欠測を海底水圧計からの補正で補うが、本解析ではそのまま欠測値として扱っている。また SI の推定で重要となる海上風には気象庁 GPV プロダクトである MSM 再解析値を用いた。またその妥当性に関しては伏木富山観測地点の海上観測タワーに設置されたプロペラ式風向風速計 (海上 14m) との比較から、また野中ら¹⁶⁾、山口ら¹⁷⁾でも観測結果との比較から海上風速の再現精度の妥当性が確

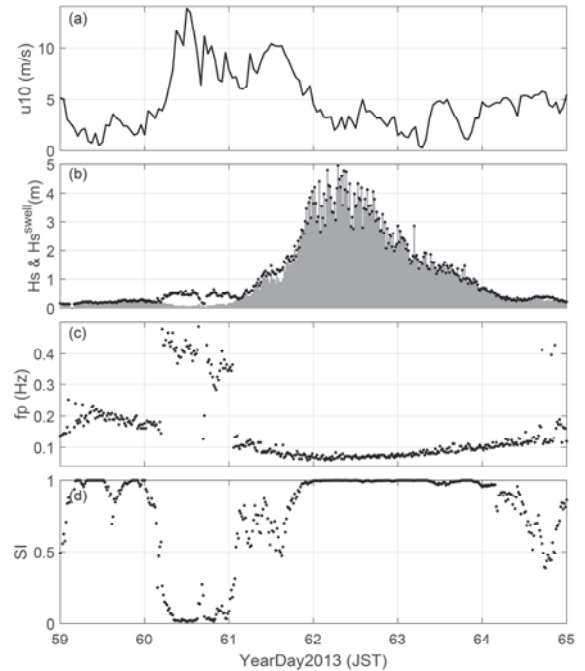


図-3.1 2013 年富山で観測された寄り回り波事例 (海上風速, 波高, ピーク周波数, SI の時間変動)

認されている。

3. 結果

3.1 富山湾の波浪場解析

うねり性の高波 (例えば富山地方気象台「寄り回り波を知る」) が顕著な富山湾 (富山および伏木富山における NOWPHAS 観測データ) を対象に SI に基づく波浪場解析を行った。図-3.1 は 2013 年 3 月に富山で観測された寄り回り波 (Year Day (YD): 62-63) 前後の各物理パラメータの時系列変動を示したもので、a: 海上風速 (JMA/MSM), b: 波高 (黒丸: 有義波高, 灰色棒グラフ: うねり波高), c: ピーク周波数, および d: SI となっている。YD: 60-61 の期間には、海上風が 10m/s 程度に達し、それともなう湾内での風波の発達により、有義波高に対してうねり波高が占める割合は小さく (つまり風波成分が卓越), またピーク周波数は風波の発達に伴いおよそ 0.4 から 0.1 (Hz) 程度までダウンシフティングしていることが確認できる。さらにそれに対応して SI は低い値を示す。一方、YD: 62 までには海上風速は 5m/s 程度まで弱まるものの、寄り回り波の襲来により有義波高は 4m 程度までに達し、うねり波高が有義波高の大部分を占めている。これとともに分散性波動の特徴としてピーク周波数は緩やかにアップシフティング (YD: 62.5 か

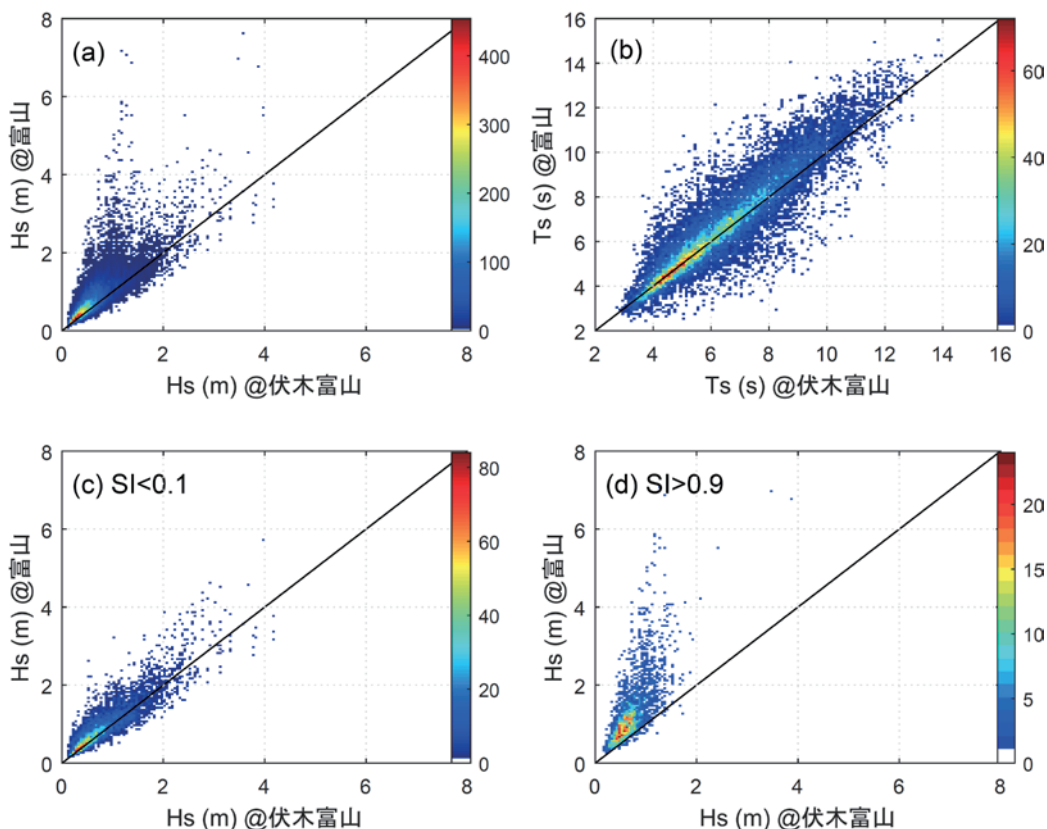


図-3.2 富山および伏木富山における有義波高および有義波周期の結合頻度分布（カラー：頻度）

ら 64 にかけて 0.07 から 0.1 Hz まで変化) する。YD: 62 以降で SI はほぼ 1 付近の値となり、その後は約 2 日間 (YD: 64 まで) うねり性波浪が卓越していたことがわかる。また SI の時間変動からおよそ YD:61-62 の 24 時間で波浪場が風波からうねりに移行したことが確認できる。このように SI を指標とすることで風波の発達とうねりの伝搬が明瞭に識別できることがわかる。またここでは示していないが、特徴的な現象として寄り回り波の伝搬に伴い波向きは時間とともに北西寄りから北寄りに変化する様子が確認されている。

次に、富山湾での波浪特性を考察する。図-3.2 は解析対象期間で得られた富山および伏木富山における有義波高 (図-3.2a) および有義波周期 (図-3.2b) に関して同時刻の結合頻度分布を示している。対象とした 2 地点は 15km 程度の距離しか離れていないものの有義波高の海域特性が大きいことそれらの分散は大きい (図-3.2a)。

一方、有義波周期に関しては、波数保存則に対して定常場を仮定した場合、周期は空間的に一樣となることから推察されるように、2 地点間の相関が高いことが確認できる (図-3.2b)。図-3.2c および d は、それぞれ図-3.2a と同一のデータセットに対して、SI を用いて風波

(SI<0.1) とうねり (SI>0.9) に区分して抽出した有義波高の結合確率密度を示したものである。一般的に大気擾乱の空間スケールに支配される風波は富山湾内でほぼ一樣となると考えられるが、それを支持するように 2 地点における有義波高の相関は高く明瞭に 1:1 対応の直線上に分布していることが確認できる (図-3.2c)。その一方で、うねりは富山湾沿岸の複雑なキャニオン地形による屈折効果に伴い、その空間スケールが海底地形に支配される。そのため 2 地点における有義波高の分散が大きく、しかも水深が浅くエネルギーの収束海域となる富山では伏木富山に対して大きな値となると考えられる (図-3.2d)。以上のように SI を用いて風波とうねりを分離することで富山湾における風波およびうねり性波浪特性の物理的解釈が可能となる。

本研究で解析対象とした 10 年間で寄り回り波はどの程度発生しているのか？ここでも寄り回り波を「うねり性の高波」と定義し、うねり性基準に関しては SI>0.9 また高波基準に関しては有義波高が期間平均有義波高 (H_{clim}) の 5 倍以上と定め抽出を行った。図-3.3 は富山における有義波高の経年変動を示しており、黒丸が上記の基準で判別された寄り回り波、灰色棒グラフは有義波

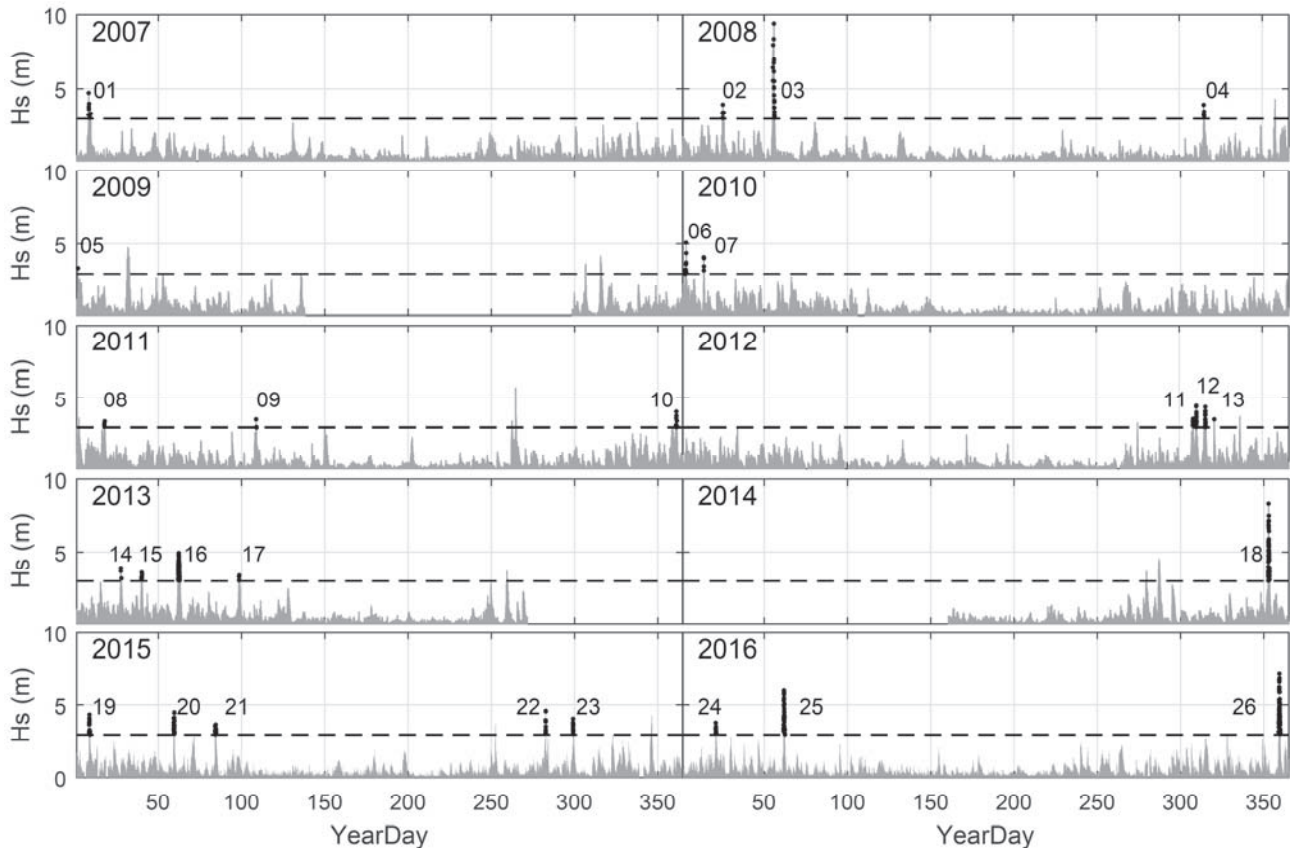


図-3.3 2007年から2016年までに観測された寄り回り波事例（富山）

高、点線は高波基準（2.96m）である。2007年から2016年までの10年間で計測された寄り回り波はイベント回数として26回である（図-3.3中の数値#01-#26に対応）。また、各年でデータの欠損期間や欠損率が異なるため一概には言及が難しいものの年平均でおよそ2-3回の寄り回り波が発生しており、年最大発生回数は2015年の5回（#19-#23）となっている。また既往最大の寄り回り波は2008年2月に発生した#03による9.3m（有義波高）である。寄り回り波を引き起こす大気擾乱は秋季から春季にかけて日本海において発達する「日本海ポーラーロー」（Yanase ら¹⁸⁾）が主原因であると考えられるが、例えば2015年10月の#22の寄り回り波は、JMA/MSMの大気再解析データ海上風の時空間変動から判別すると、超大型の台風23号（Choi-wan）によって引き起こされたと考えられる。

3.2 日本沿岸におけるうねり性波浪の特性

続いて上記に記した日本沿岸におけるNOWPHAS観測53地点を対象に日本沿岸におけるうねり性波浪の特性を解析する。ここで用いるデータは有義波高50cm以上を対象としている。これは工学的な観点から有意な波

浪が存在する海象条件のみを対象とすること、また有義波高50cm以下では特定のスペクトル周波数帯に顕著なノイズが一部の観測点に含まれるため観測データの均質性を保つことを2つの理由による。

図-3.4は対象とした期間および地点におけるSIの頻度分布を、各地点での最大頻度で規格化（つまり最大頻度を1）して示している（図-3.4a：日本海-東シナ海沿岸、図-3.4b：太平洋沿岸）。この図からわかるように一般的に日本海-東シナ海沿岸では風波とうねりが、太平洋沿岸では主にうねりが卓越していることがわかる。また、閉鎖性内湾として青森（陸奥湾）、第二海堡（東京湾）、伊勢湾、神戸（大阪湾）、鹿児島（鹿児島湾）では風波のみが卓越する頻度分布となっている。全期間（常時波浪および高波条件を含む）でのSIの頻度分布は南西諸島（那覇、平良沖、石垣沖、中城湾）を除いて概ね0付近（風波）と1付近（うねり）に発生頻度のピークが出現する2値化する結果となっている。日本沿岸の波浪特性から概観すると上記の様な認識となる。しかしながら、例えば九州南岸の同緯度帯に位置する志布志湾と鹿児島湾でのSI頻度分布を比較すると、それぞれうねり（SI>0.9）と風波（SI<0.1）の出現頻度にピークがあり、

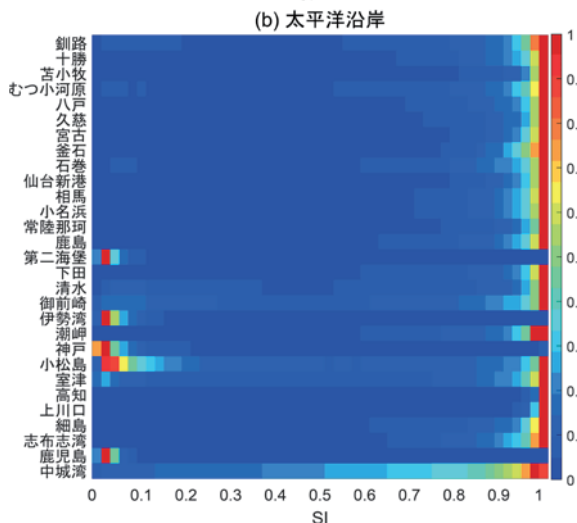
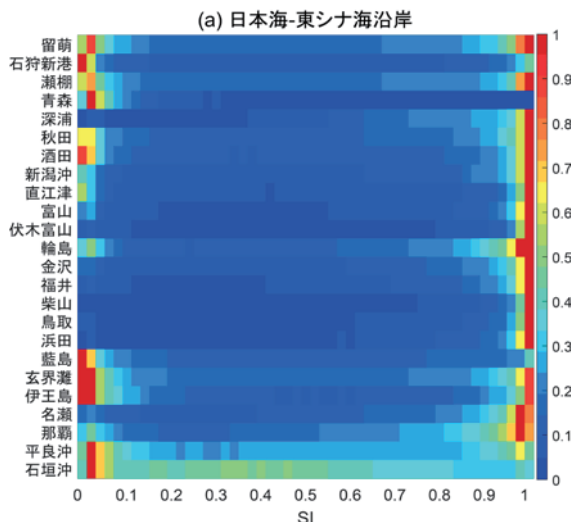


図-3.4 SIの頻度分布（有義波高50cm以上を対象とし各観測点の最大頻度で規格化）

うねり性波浪の卓越性の観点からは全く異なる海象場となる。これは有効フェッチおよび海岸地形の遮蔽効果の違いにより、波浪特性の局所性が高いことを示している。実際、その周辺海域と波浪特性が大幅に異なる海域は、上述した湾以外でも、例えば石狩湾（石狩新港）、響灘（藍島）、紀伊水道（細島）でも確認できる。

図-3.5は図-3.4と同様のSIの規格化頻度分布を示したもので、工学的に重要となる高波イベントのみを対象としている。ここではその高波基準を有義波高の気候値（10年間の期間平均波高： H_{clim} ）の3倍を超える高波条件（ $H_s > 3H_{clim}$ ）とした。この図から日本沿岸における高波が風波、うねり、もしくはそれらの混合場等のい

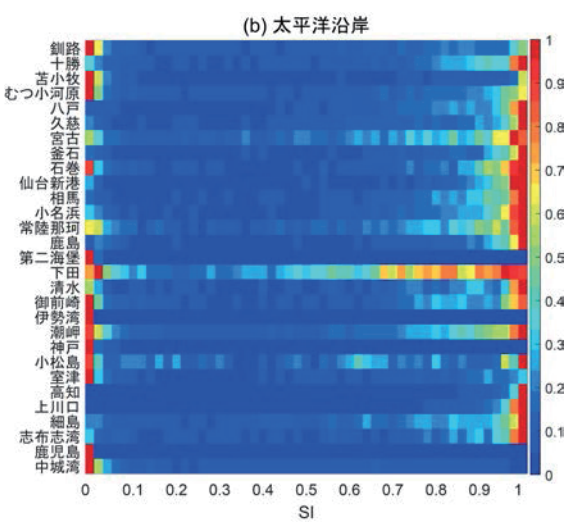
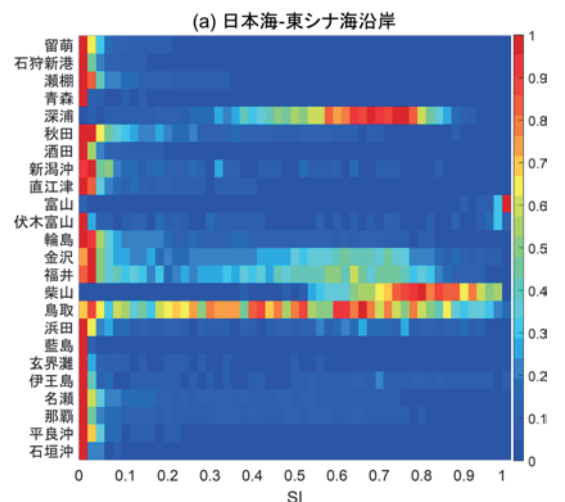


図-3.5 SIの頻度分布（気候値の3倍以上の有義波高を対象とし各観測点の最大頻度で規格化）

れ海象条件の時に発生しているかを解釈することが可能となる。図-3.5から日本海では風波による高波が一般的であるものの、東北地方の一部（深浦）、北陸地方南側—山陰地方（福井、柴山、鳥取）にかけては風波とうねりが混在する条件（SI-0.6-0.8）で高波が発生していることがわかる。また、富山湾内でも、富山では前述の通りうねり性波浪による高波が顕著であるが、伏木富山では風波による高波が顕著な発生頻度の結果となっている。一方、太平洋沿岸海域では閉鎖性内湾を除く東北地方—関東地方（八戸から鹿島まで）、四国—九州（高知から志布志湾）においてうねり性波浪による高波の発生頻度が高く、それ以外は風波と混在した発生分布となる。

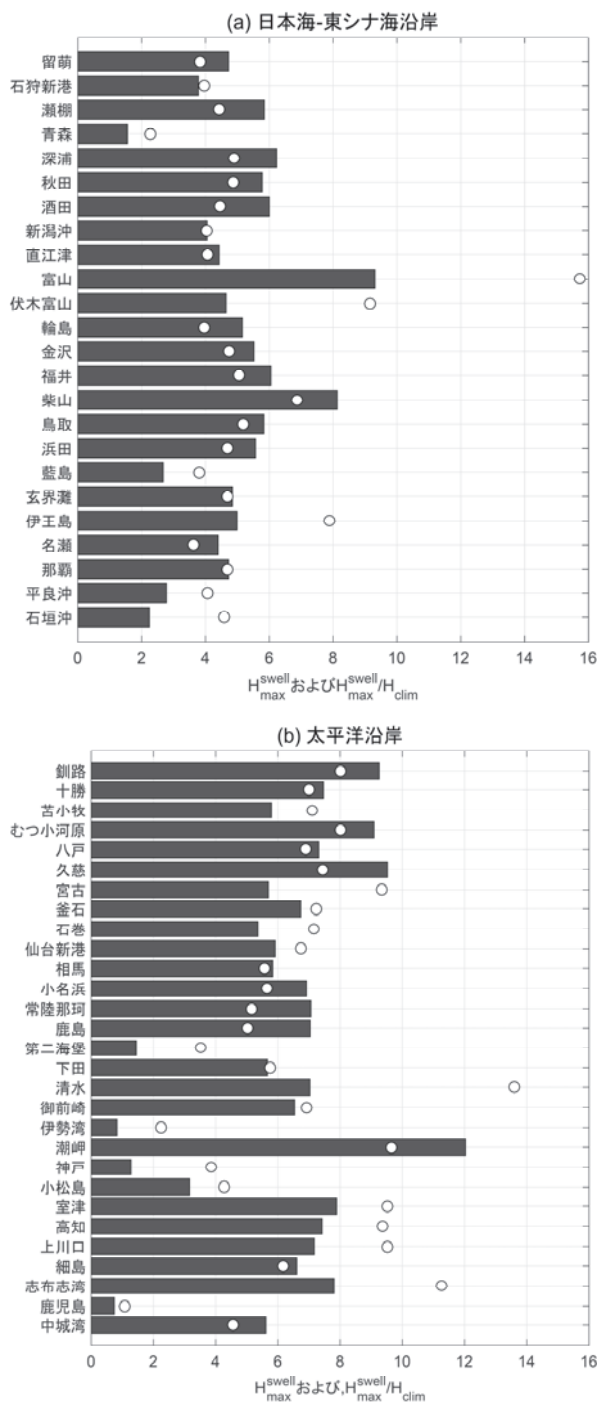


図-3.6 既往最大うねり波高と気候値に対する比

図-3.6は日本沿岸におけるうねり (SI>0.9, pure swell condition) の既往最大波高: H_{max}^{swell} (棒グラフ), およびそれらの H_{clim} に対する比: H_{max}^{swell}/H_{clim} (丸印) であり, 後者は 2007 年から 2016 年までに発生したうねり性波浪の既往最大波高がどの程度まれな現象であったかを示している. 日本海から東シナ海沿岸においては富山における 9.3m (2008 年 2 月の寄り回り波) が既往最大波

高となる. また, 図-3.5 で確認されたように山陰地方の一部ではうねりの影響が大きい高波が高頻度で発生するが, それと同様の傾向として柴山 (8.1m) に局所的なピークを持ち北陸地方南側-山陰地方に広がる既往最大波高の沿岸分布が確認できる. 太平洋沿岸においては潮岬で 12.0m が最大となりこれが 2007 年から 2016 年までの日本沿岸で観測された最大のうねり性波高となる. 閉鎖性内湾 (東京湾, 伊勢湾, 大阪湾, 鹿児島湾) ではうねり性波浪の発生頻度がそもそも小さく, また既往最大波高も 1-2m 程度である. H_{max}^{swell}/H_{clim} を確認すると富山で最大 16 程度にまで達していることから, 「寄り回り波」は日本沿岸においても極めて特異な波浪現象であると言える. また, 四国 (室津, 高知, 上川口) から九州 (志布志湾) にかけての沿岸一帯は H_{max}^{swell}/H_{clim} 値で 10 前後の値となる特異な海域となっている.

4. 考察

上述の通りうねりのソースは大気擾乱によって生成される風波の低周波成分であることから, 日本沿岸におけるうねり性波浪特性を考える場合, この大気擾乱 (特にうねり性波浪の観点からは移動性擾乱) が重要となる. Toba (1972) は摩擦速度で無次元化された海洋波の波高と周期に $3/2$ 乗則 (Toba's Law) が成り立つことを見出した. また Sahlée ら (2012) による現地観測結果からも示されるように風波のピーク周波数と海上風速とは逆相関の関係にあるため, うねりによる高波性のみならず長周期性の観点からもある一定以上の高風速条件での大気擾乱が重要となる.

このようにうねり性波浪の発生・伝搬が大気擾乱と密接に関わっていると考えると, 日本沿岸に襲来するうねりにも季節変動が存在するのではないかと容易に想像される. 図-4.1 は各月において $H_g^{swell} > 3H_{clim}$ の高波基準を満たすうねり性波浪がどれくらいの頻度で発生しているかを示したものである. 図-3.4, 図-3.5 では各地点での発生頻度の最大値で規格化して図示していたが, ここでは各海域での絶対値を比較するため発生頻度をそのまま示している. 実際, 10 年間の月別平均で見た場合, 各海域における季節特性は明瞭であり, 日本海沿岸では冬季, 太平洋沿岸では北海道から関東にかけて夏季を除く全期間, および東海から沖縄にかけては夏季で発生頻度が高まる. 日本沿岸でうねり性高波が最も高頻度で発生するのは高知の 7-8 月でおよそ 4% 程度, 日本海側では富山の 3 月で 2.5% 程度となっている.

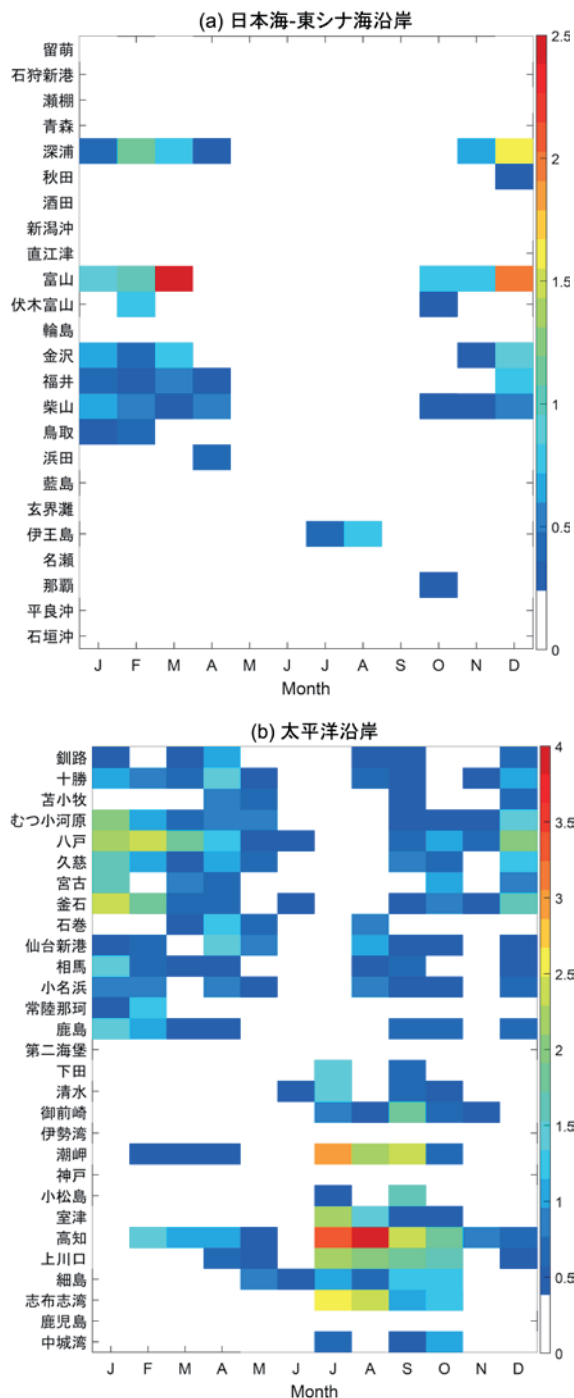


図-4.1 月別平均のうねり性高波発生頻度 (カラーバー：パーセント)

また図-4.1 から湾や海岸地形以上の空間スケールで、有意なうねり性波浪が生じる海域・季節が確認でき、それらは概ね3つに特定できる。1つ目は北陸から山陰地方(金沢-鳥取)にかけての日本海沿岸・冬季、2つ目は東北地方(むつ小河原-釜石)の太平洋沿岸・冬季、および3つ目は近畿(潮岬)から九州(志布志湾)にかけての太平洋沿岸・夏季である。これらの3つの海域(図-4.2中の赤枠)は、その季節性からもそれぞれ日本海が

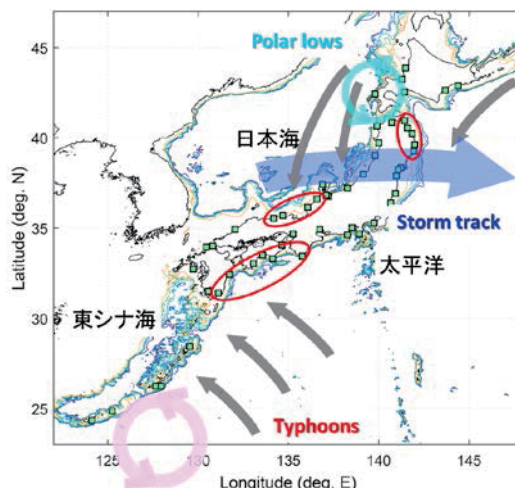


図-4.2 日本沿岸のうねり性波浪の「ホットスポット」(赤枠)と大気の移動性擾乱との関係

うねり性波浪の成長率に着目することで風波とうねりをスペクトル空間内で分離し、それに基づいて全波浪エネルギーに対するうねりエネルギーの比として Swell Index (SI)を導入した。本研究で提案したメトリックを用いることで、うねり性波浪を定量的に判別し解析することが可能となった。それに基づいて富山湾における「寄り回り波」を含むうねり性波浪および日本沿岸における波浪場を対象とした現地観測データの解析を行った。その結果、SIを用いることで風波とうねりを明確に分離することができ、富山と伏木富山における波浪特性の違いに関して物理的な解釈が可能となった。また、日本沿岸のうねり性波浪の海域特性とその季節変動を解釈することが可能となった。日本沿岸では概ね3つの海域

5. おわりに

本研究では海洋波の成長率に着目することで風波とうねりをスペクトル空間内で分離し、それに基づいて全波浪エネルギーに対するうねりエネルギーの比として Swell Index (SI)を導入した。本研究で提案したメトリックを用いることで、うねり性波浪を定量的に判別し解析することが可能となった。それに基づいて富山湾における「寄り回り波」を含むうねり性波浪および日本沿岸における波浪場を対象とした現地観測データの解析を行った。その結果、SIを用いることで風波とうねりを明確に分離することができ、富山と伏木富山における波浪特性の違いに関して物理的な解釈が可能となった。また、日本沿岸のうねり性波浪の海域特性とその季節変動を解釈することが可能となった。日本沿岸では概ね3つの海域 (1. 日本海沿岸：北陸から中国地方, 2. 太平洋沿岸：東北地方, 3. 太平洋沿岸：四国から九州地方) でうねりによる高波が高頻度に発生し、それらの季節変動特性から日本海ポーラーロー、偏西風帯の渦運動、および台風による大気移動性擾乱によって引き起こされるものと推察される。

本研究では、実務的な側面を重視して一般的に取得可

能な1次元周波数スペクトルを基にSIを提案し、うねり性波浪の解析を行った。ただし、より厳密に海洋波の力学過程を理解するには2次元スペクトル内での風波とうねりの分離手法が必要となるが、これは例えば藤木ら¹⁹⁾によって現在研究が進められている。

(2018年10月25日受付)

謝辞

本研究の実施にあたっては、NOWPHASデータ処理班の関係各位に多大なるご支援、ご助言をいただいた。また、NOWPHASデータは国土交通省港湾局から提供頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省北陸地方整備局：富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会報告書，50p，2008.
- 2) 水口幸司・大下善幸・室善一郎・高山知司・岡田弘三・宇都宮好博：「うねり性波浪」予測・監視モデルの可能性と的確性について，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，p. 146-150，2010.
- 3) 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，I_85-I_90，2015.
- 4) Tamura H, Waseda T, Miyazawa Y : Impact of nonlinear energy transfer on the wave field in Pacific hindcast experiments, *J Geophys Res* 115:C12036.<https://doi.org/10.1029/2009JC006014>, 2010.
- 5) 高嶋宏・坪川将丈・遠藤敏雄・高橋康弘・宇都宮好博・松藤絵理子：うねり性波浪を考慮した設計沖波算定手法について，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 71，No. 2，I_91-I_96，2015.
- 6) Drennan WM, Kahma KK, Donelan MA : On momentum flux and velocity spectra over waves, *Boundary-Layer Meteorol* 92:489-515, 1999.
- 7) Grachev AA, Fairall CW : Upward momentum transfer in the marine boundary layer, *J Phys Oceanogr*, 31:1698-1711, 2001.
- 8) Plant WJ: A relationship between wind stress and wave slope, *J Geophys Res* 87:1961-1967, 1982.
- 9) Tolman, H. L., and D. V. Chalikov : Source terms in a third-generation wind wave model, *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2497-2518, 1996.
- 10) Donelan MA, Babanin AV, Young IR, Banner ML: Wave-follower field measurements of the wind-input spectral function. Part II: parameterization of the wind input. *J Phys Oceanogr* 36:1672-1689, 2006.
- 11) Hanley KE, Belcher SE: Wave-driven wind jets in the marine atmospheric boundary layer. *J Atmos Sci* 65:2646-2660, 2008.
- 12) Donelan MA, Hamilton J, Hui WH (1985): Directional spectra of wind-generated waves. *Philos Trans R Soc Lond A315*: 509-562. <https://doi.org/10.1098/rsta.1985.0054>, 1985.
- 13) Smedman, A., X. G. Larsén, and U. Högström : Effect of sea state on the momentum exchange over the sea during neutral conditions, *J. Geophys. Res.*, 108(C11), 3367, doi:10.1029/2002JC001526, 2003.
- 14) Sahlée E, Drennan WM, Potter H, Rebozo MA : Waves and air-sea fluxes from a drifting ASIS buoy during the Southern Ocean Gas Exchange experiment. *J Geophys Res.* <https://doi.org/10.1029/2012JC008032>, 2012.
- 15) The SWAN team: SWAN USER MANUAL, SWAN Cycle III version 41.20A, 2018.
- 16) 野中浩一・山口正隆・井内国光・宇都宮好博・日野幹雄・畑田佳男：気象庁MSM風資料の精度評価，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 72，No. 2，I_336-I_341，2016.
- 17) 山口正隆・野中浩一・井内国光・日野幹雄・畑田佳男：太平洋岸沖合のブイ観測風資料を用いた気象庁MSM風資料の精度評価，Vol. 72，No. 2，I_157-I_162，2016.
- 18) Yanase, W., H. Niino, S. I. I. Watanabe, K. Hodges, M. Zahn, T. Spengler, and I. A. Gurvich: Climatology of polar lows over the Sea of Japan using the JRA-55 reanalysis. *J. Climate*, 29, 419-437, 2016.
- 19) 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，I_103-I_108，2018.