



外洋に面した海洋の波浪情報を用いた海洋構造物の安全かつ効率的な運用に関する一考察

竹内, 海智
笹, 健児

(Citation)

日本航海学会論文集, 148:18-26

(Issue Date)

2023-07-08

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

クリエイティブ・コモンズ [表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際]ライセンス

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490360>



外洋に面した海洋の波浪情報を用いた海洋構造物の安全かつ効率的な運用に関する一考察

竹内 海智¹・笹 健児²

A Consideration on Safe and Efficient Operation of Offshore Structures Using Ocean Wave Information Facing Open Seas

Kaichi TAKEUCHI and Kenji SASA

Abstract

During the maintenance and construction of offshore structures, it is necessary to ensure calmness in terms of safety and workability in the relevant sea area. In this study, we statistically analyzed the observation data of GPS wave gauges in open seas from the Japanese wave information network (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARborS: NOWPHAS), and clarified the occurrence of missing data and the number of consecutive days of calm conditions. Based on this, the number of calm conditions that last for three consecutive days or more, which is defined as the minimum required for construction, occurs only two to three times per month. For this reason, it became clear that the maintenance and construction of offshore structures are extremely difficult. Finally, the correlation analysis is conducted to know the relation among the occurrence of missing data, the number of consecutive days of calm conditions, and the statistical values of wave heights.

Keywords : *Ocean engineering, Marine information, Environment, Marine phenomenon*

キーワード: 海洋工学, 海洋情報, 環境, 海象,

1. はじめに

我が国は国土が狭く資源も少ない島国であるが、その一方で領海と排他的経済水域を合わせた面積は世界第6位を誇る海洋国家である。このため、昔から水産資源の活用や海上輸送等の海洋利用が積極的に行われてきた。近年では、洋上風力発電をはじめとした海洋再生可能エネルギー開発、海洋資源開発や海面養殖といった非常に多岐にわたる海洋開発も期待されており、このためには海洋情報の高精度な観測技術のさらなる向上が必要となる。上記に示す洋上風力の発電施設や海象観測を行う GPS 波浪計といった海洋構造物は、海洋上での長期間かつ連続的な運用が求められる。しかし、海洋構造物は風、

波や潮流といった不規則な外力に常に晒される上、船舶のように荒天避泊もできず、特に日本周辺の海域では毎年襲来する台風や低気圧への対策も必要不可欠となる。このため、海洋構造物の長期的かつ安定的な運用のためには、定期的な点検・メンテナンスが必須となる。しかし、海洋構造物の点検・メンテナンスは陸からある程度離れた沖合の設置点まで、技術者が1日から数日間必要とされる作業に赴かなければならない。洋上での作業ゆえ、あらかじめ天気予報や波浪予測をもとに点検・メンテナンスの作業計画を立てるが、作業当日に予測値よりも大きな波浪に遭遇し、海洋構造物での作業を断念せざるを得ない事例がしばしば発生する。このような事例で

¹ 正会員 神戸大学海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

takeuchi.k@hitachizosen.co.jp

² 正会員 神戸大学海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

sasa@maritime.kobe-u.ac.jp

は、海洋構造物へのアクセス船の費用、時間、人件費や旅費等といった必要経費が無駄になってしまう。また、洋上ウィンドファームの展開を考えると海洋構造物を設置するような洋上施工においても同様の問題が発生している。よって、海洋構造物の点検や施工等の洋上作業を計画通りに実施することは、波浪予測の精度上の問題から現状では非常に難しい課題の一つとなっている。さらに、津波の発生を予測する防災設備の一つである GPS 波浪計に何らかの不具合が生じ、取得データの欠測が発生した場合、迅速な原因究明と修理等の対応が求められる。しかし、上記のように海洋構造物へのアクセスを計画通りに行うことができなければ、それだけ取得データの欠測期間が長くなり、本来の機能を十分に発揮できなくなる。このため、海洋構造物の点検・メンテナンスおよび洋上施工を効率的に実施するためには、天気予報や波浪予測の精度に関する問題点を把握することが非常に重要と考えられる。特に、洋上作業に関しては、海洋土木の業界にて、3 日間連続で波浪が静穏（有義波高 1.5 m 未満）であることが一つの目安とされている⁽¹⁾。

上記の背景より本研究では、まず国土交通省港湾局の全国港湾海洋波浪情報網リアルタイムナウファス（NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours、以下ナウファスと呼称）⁽²⁾の GPS 波浪計にて取得される直近 5 年分のデータに対する統計処理をはじめとしたデータ処理を実施した。これより、欠測の発生状況や 3 日間連続で静穏状態となるような波浪状況の割合等を支配する要因を整理・分析した。

2. 波浪予測の研究事例と問題点

これまで非常に数多くの波浪予測に関する研究が実施されてきた⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本章では、波浪予測の先行研究を確認しつつ、どのような観点から波浪予測がなされてきたかを取りまとめる。

基本的に波浪予測は船舶の運航、港湾工事や海洋構造物の設置工事といったような、洋上に何らかの理由で人が赴く際に行うものである。当然ながら、この波浪予測はその目的に応じて予測期間や予測モデルが異なる。よって、波浪予測の先行研究は上記のように数多く存在するが、必要とされる波浪予測の目的に応じたモデルが必要不可欠となる。これまでの波浪予測に関して確認してきた結果を表 1 に簡単に比較した。

まず、船舶の運航に関する波浪予測について考察する。船舶の運航において波浪予測は、船舶の安全運航を実現するため、荒天との遭遇を回避することを目的としている。この波浪予測には気象力学を用いたモデルを使用することが多く、数多くのウェザールーティングに関する研究が行われてきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。気象力学を用いたモデルによる波浪予測は当然ながら海上風を予測することで波浪の予測を行っている。しかしながら、予測精度の問題上、海上風の予測期間は 96 時間程度が限界であるという課題も示されている⁽¹²⁾。よって、船舶の運航では、荒天を確実に回避するため、毎日のルーティングが必要不可欠である。

次に、港湾工事や海洋構造物の設置工事に関する波浪予測について考察する。洋上の工事作業には海への転落をはじめとした危険が数多く存在するため、洋上作業中の安全性の確保を目的とした波浪予測が実施される。この波浪予測には様々な統計処理を活用した統計モデルがしばしば用いられる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。例えば、過去の自己データから得られる説明変数を単一としたような簡易的な統計モデル等が挙げられる⁽¹⁵⁾。洋上作業において安全第一であるため、波浪予測により気象や海象条件が厳しい見通しである際は洋上作業を中止する判断を下している。なお、予測の精度に関しては、過去の自己データを説明変数としているため、波浪が卓越するタイミングで時刻ずれが生じてしまうという課題がある。

外洋に面した海域に設置される海洋構造物の修理・点検について考察する。外洋に設置された海洋構造物は船舶のように荒天を回避できず、係留により定点保持されているため、荒天の影響を強く受けながら長期の故障なく運用しなければならない。つまり、荒天による影響が避けられない中、何らかのアクシデントが発生した際にも復旧作業等を迅速に執り行う必要がある。このような観点に基づく波浪予測に関しては研究例が少ない。近年、波浪予測ではカルマンフィルタやニューラルネットワークを用いた多変量の時系列統計モデルによる予測が行われている⁽¹⁶⁾。しかし、多変量の変数の組み合わせによっては必ずしも精度が向上するとは言えない。変数の選び方等に課題がある。

以上の点を整理した結果、外洋に設置した海洋構造物を対象とした波浪予測の精度向上を考える場合、まずは海洋構造物の設置海域にて観測されているナウファス GPS 波浪計の稼働状態を調査分析する。

表 1 波浪予測の目的や予測手法等

項目	船舶の運航	港湾工事や海洋構造物の設置工事	外洋に設置された海洋構造物の修理・点検
予測の目的	荒天との遭遇回避	工事作業の安全性確保	洋上作業の安全性確保
予測モデル	気象モデル	一変量の時系列統計モデル	多変量の時系列統計モデル
問題点	海上風の予測精度の問題上、予測期間が 96 時間程度	過去の自己データを説明変数としているため、波浪の卓越するタイミングで時刻ずれが生じる	多変量の変数の組み合わせによっては、必ずしも精度が向上しない

3. ナウファスデータの処理

本研究にて調査対象とした GPS 波浪計の設置場所を表 2 に示す。また、表 2 に示す設置場所を日本地図上にプロットしたものを図 1 に示す⁽²⁾。図中の青丸が GPS 波浪計を表している。

なお、本研究では表 2 に示す 18 地点において 2015 年 1 月 1 日～2019 年 12 月 31 日までの 5 年間に於ける 20 分ごとに取得される有義波高のデータを処理した。

3.1 欠測状況の確認

ナウファスに収録される有義波高のデータを検証し、18 地点にて取得データの欠測がどの程度生じているのかを把握した。GPS 波浪計では線形な正弦波が前提となっているため、非線形な高波浪の場合、正弦波の形が崩れ、正しい値が計測できず欠測が生じることがある。しかし、このような装置に故障が生じない場合は波高の減少とともに数日以内で通常状態に復旧する。高波浪の影響にて波高計に何らかの故障が生じる場合、数週間以上の欠測が継続することとなり、技術者による現場での修復作業が必要となる。有義波高データの場合、何らかの理由で欠測値となっているとき、99.99 m と記録されている。よって、一か月あたりの 99.99 m と記録されている個数をカウントし、一か月の取得データ総数に対する割合にて月別の欠測発生率を定義した。月ごとの欠測発生率について、年ごとにまとめた結果を図 2～6 にそれぞれ示す。これらより、以下の傾向が

確認できる。

・1、2、9、10、12 月に欠測発生率が上昇しやすい傾向が明らかとなった。例えば、図 3 (2016 年) の No.13 は 2 月に 80 %程度の欠測発生率を示しており、9 月以降には 100 %の欠測発生率となっている。また、No.12 や No.17 は 9 月から 10 月にかけて欠測発生率の急激な上昇が確認される。これは、1、2、12 月には低気圧の発達、9、10 月には台風の接近が影響していると考えられる。つまり、低気圧や台風による波浪の卓越時にデータの欠測発生率が増加する可能性が考えられる。低気圧や台風の発生する期間では波浪が卓越するが、結果として複数地点の GPS 波浪計にて欠測発生率が同時に増加していることが明らかとなった。欠測発生率と波浪条件の間には何らかの相関傾向が窺え、後ほどこの点を分析する。

・欠測発生率が急激に増加した場合の数値が 90 %以下であれば、基本的には 1、2 か月で欠測発生率が低下する。一方で、一旦欠測発生率が 90 %以上になると、欠測発生率が 100 %を維持した状態で数か月継続する事例が見られた。例えば、図 6 (2019 年) の No.2 では 4 月に 90 %以上の欠測率を示したのち、5～8 月は 100 %の欠測率を示し続ける。つまり、欠測発生率が数十 %以上に上昇する場合、1～2 か月で落ち着くケースと長ければ 1 年以上の欠測が継続するケースに分類されることが明らかとなった。

表 2 GPS 波浪計の設置場所

No.	設置場所
1	宮城中部沖(宮城金華山沖)
2	岩手南部沖(岩手釜石沖)
3	宮城北部沖(気仙沼広田湾沖)
4	岩手中部沖(岩手宮古沖)
5	青森東岸沖(青森八戸沖)
6	福島県沖(福島小名浜沖)
7	岩手北部沖(岩手久慈沖)
8	山形県沖(山形酒田沖)
9	秋田県沖(秋田男鹿沖)
10	青森西岸沖(青森深浦沖)
11	三重尾鷲沖(三重尾鷲沖)
12	静岡御前崎沖(静岡御前崎沖)
13	和歌山南西沖(和歌山白浜沖)
14	高知西部沖(高知足摺岬沖)
15	徳島海陽沖(徳島海陽沖)
16	伊勢湾口沖(伊勢湾口沖)
17	高知県東部沖(室戸岬沖)
18	宮崎県日向沖

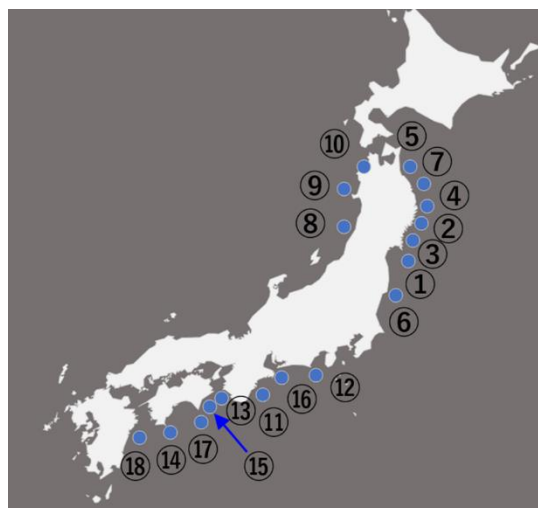


図1 GPS 波浪計の設置場所

現状、1年以上の長期間のデータ欠測については、作業限界を超える波浪状態のため、現場のGPS 波浪計へ赴いて修理作業を実施できない状態が継続している可能性、必要経費の面で予算が確保できず修理作業を実施できなかった可能性、あるいはその他の可能性等が考えられるが、ここではそれを確定することはできなかった。しかしながら、2017年3～8月や2017年11～8月にかけてはほとんどの地点のGPS 波浪計で欠測が発生していないことも明らかとなった。

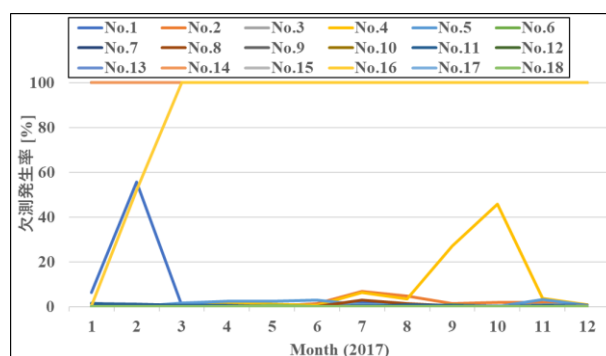


図4 2017年における月ごとの欠測発生率

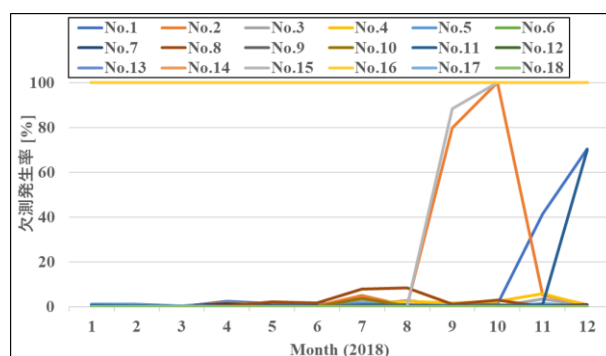


図5 2018年における月ごとの欠測発生率

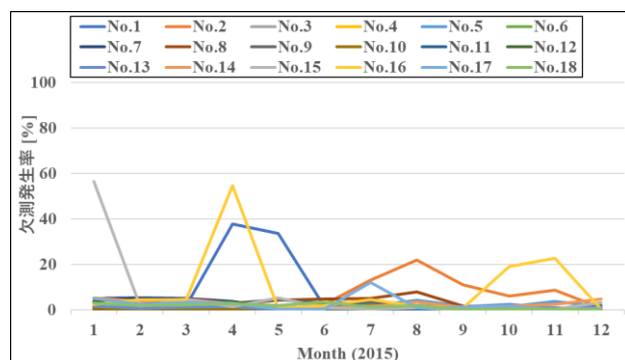


図2 2015年における月ごとの欠測発生率

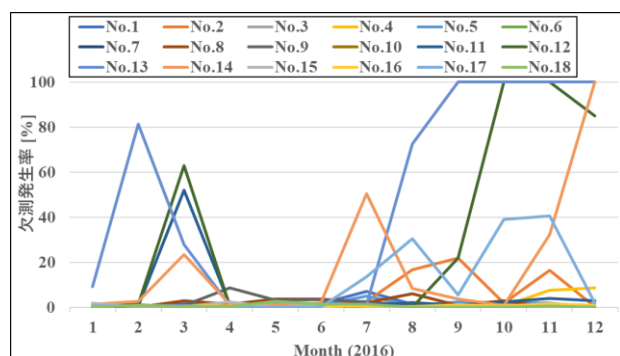


図3 2016年における月ごとの欠測発生率

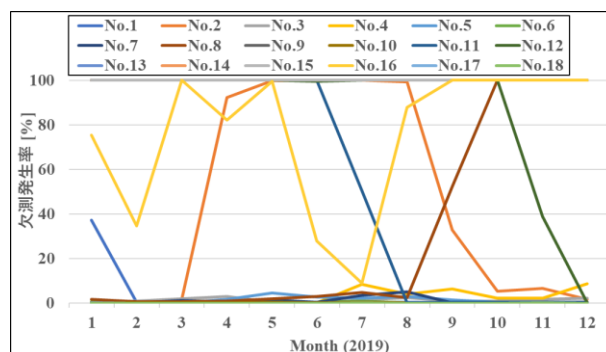


図6 2019年における月ごとの欠測発生率

次に、算出した2015～2019年の5年間における欠測発生率を設置場所ごとに図7に示す。ここで、18か所ある設置場所を大まかに日本海側（3地点）、東北地方付近（7地点）、中部～四国付近（8地点）の3つに大別する。これより、日本海側では欠測発生率が最大で7.6%となっており、比較的欠測の発生数が少ないことがわかる。東北地方付近でも1点のみ14.9%と比較的高い欠測発生率を示しているが、その点以外は6.0%を下回っており、こちらも総じて欠測の発生率は少ないと言える。一方で、中部～四国付近では50%を超える欠測発生率となっている地点が4つ存在している。中部～四国付近に設置

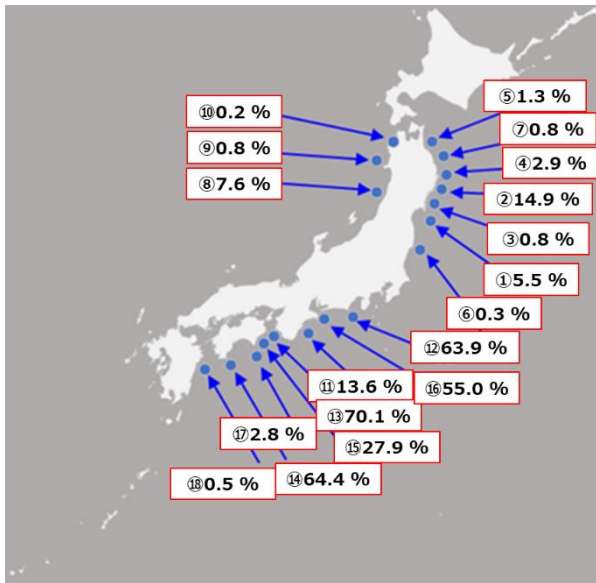


図7 GPS 波浪計の設置場所と欠測発生率

される GPS 波浪計のうち、実に半分が 5 年間の半分以上の期間で稼働していないことになる。前述した通り、長期欠測が生じる要因としては、波浪状況が厳しいだけではなく、修理スケジュールや技術者の出張コストがネックとなる場合も考えられる。

3.2 静穏状態の発生回数と連続時間

有義波高のデータより、静穏状態（波高が 1.5m 未満）となるカウント数とその連続時間を取りまとめる。ここで、静穏状態のカウントや連続時間の取り方について、図 8 を用いて説明する。図では横軸に日数、縦軸に有義波高をそれぞれ示しており、閾値となる有義波高 1.5 m には青色の横線を描く。ピンク色で描かれる有義波高の時系列データが 1.5 m 未満となったデータから、次に 1.5 m 以上となるまでを 1 ケース、つまり静穏状態の 1 カウントとする。また、この時間間隔を静穏状態の連続時間とする。

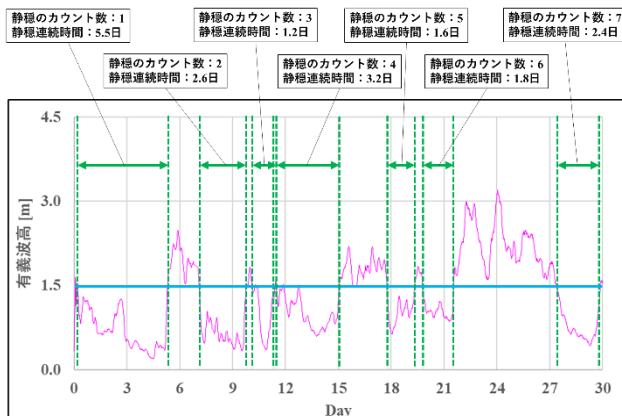


図8 静穏状態のカウント方法と連続時間の取り方

図 8 で説明した方法で、取得された 5 年間の有義波高データ（72 データ/日×365 日×5 年＝131,400 データ）に対して、静穏状態のカウントならびに連続時間を算出した。以下に、気象や海象が比較的異なると想定される東北付近、日本海側および中部～四国付近の 3 地点からそれぞれ 1 つに着目してデータの整理を行う。

宮城中部沖、秋田県沖ならびに高知県東部沖地点における整理結果（2015～2019 年の 5 年間）を図 9～11 にそれぞれ示す。図 9～11 では、横軸を静穏状態の発生回数、縦軸を静穏状態の連続日数としている。図中の赤色の横線は、3 日間連続で波浪が静穏と定義した閾値を示す。さらに、洋上作業が大規模なものとなれば、より長期間（7 日間以上）の静穏状態が確保されなければならないと定義した。これは、図中に示すオレンジ色の横線が閾値を表している。

図 9 より、宮城中部沖では静穏状態が 3 日間以上連続する回数は数十回ある。一方で、静穏状態が 7 日間以上連続となると 14 回しか発生していない。さらに、静穏状態が 14 日（2 週間）以上連続するような長期的に静穏となるケースは 5 年の間に 2 回しか発生していない。これは夏季に発生する台風や冬季に発達する低気圧の両方の影響を受けるため、長期的に静穏状態が継続しないことが原因であると推察される。

図 10 より、秋田県沖では静穏状態の発生回数は宮城中部沖のそれと比較しても少なく、約 1600 回であった。しかしながら、3 日間および 7 日間以上連続で静穏状態の連続時間は宮城中部沖と比較しても長い。特に、静穏状態が 14 日以上連続するケースも 7 回（毎年）発生している点が宮城中部沖と大きく異なる。日本海の場合はほぼ冬季にシベリア高気圧が張り出し、日本の東方海上に低気圧のある西高東低の気圧配置の影響で荒天が連続する⁽¹⁷⁾。その一

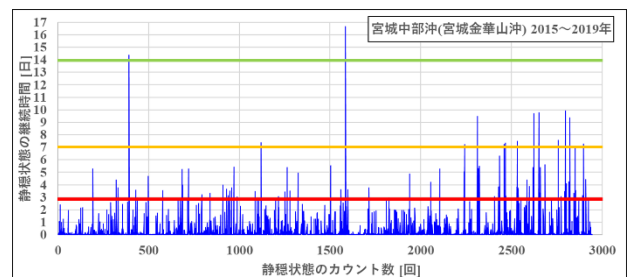


図9 静穏状態のカウント数と連続時間（①宮城中部沖）

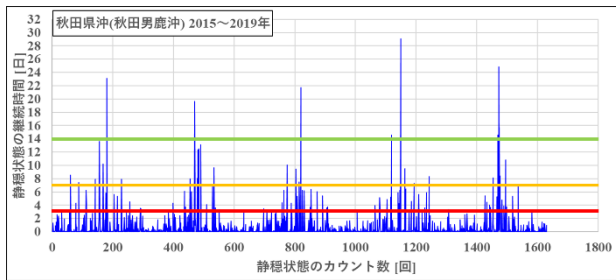


図 10 静穏状態のカウント数と連続時間 (⑨秋田県沖)

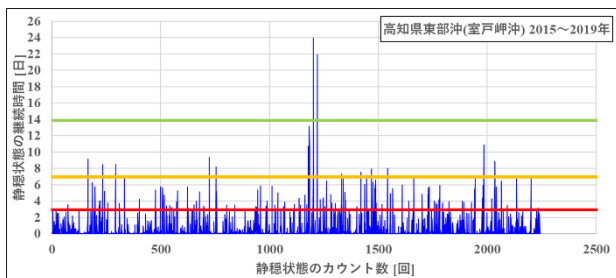


図 11 静穏状態のカウント数と連続時間 (⑰高知県東部沖)

方で、夏季を中心として静穏な状態が長期で連続して発生するためであると考えられる。

図 11 より、高知県東部沖では、静穏状態の発生回数は 2200 回程度であり、秋田県沖よりは多いが宮城中部沖よりは少ない。また、静穏状態が 3 日以上連続する回数は秋田県沖のそれより多いが、7 日間以上連続するケースは少ない。特に静穏状態が 14 日以上連続するケースは 5 年間で 2 回しか発生していない。これは、東シナ海方面から日本の南岸を北東に進みつつ発達する低気圧が、西日本ではまだ発達段階にあることが多い⁽¹⁸⁾ため、低気圧による影響は宮城中部沖よりも少なく、荒天の主要因は台風に起因するという特徴が表れていると考えられる。

また、ここで、2015～2019 年の 5 年間に於いて、GPS 波浪計の設置場所ごとに静穏状態の発生する総回数、静穏状態が 3 日間連続する回数および静穏状態が 7 日間連続する回数等を表 3 に示す通り求めた。表中では、静穏状態が 3 日間および 7 日間連続した回数に対する静穏状態の総回数の比率をそれぞれ 3 日連続比率および 7 日連続比率と定義した。この比率の算出方法は図 9 で示した宮城中部沖を例に挙げると以下のようにして求めることができる。宮城中部沖ける 3 日間以上の静穏状態が連続発生したのは 72 回であった。静穏状態となった総数が 2946 回であるため、その比率は $72 / 2946 \times 100 = 2.5 \%$ となる。

表 3 静穏状態の連続日数に関する処理結果

No.	静穏状態				
	総回数	3日連続	3日連続比率	7日連続	7日連続比率
	[回]	[回]	[%]	[回]	[%]
1	2946	72	2.4	14	0.5
2	2872	65	2.3	6	0.2
3	3223	85	2.6	15	0.5
4	3435	54	1.6	4	0.1
5	2656	78	2.9	16	0.6
6	3598	47	1.3	8	0.2
7	3184	41	1.3	6	0.2
8	1322	101	7.6	37	2.8
9	1631	99	6.1	30	1.8
10	1641	102	6.2	29	1.8
11	1560	134	8.6	45	2.9
12	799	15	1.9	4	0.5
13	755	26	3.4	4	0.5
14	945	26	2.8	3	0.3
15	1652	86	5.2	12	0.7
16	1119	76	6.8	15	1.3
17	2243	124	5.5	21	0.9
18	1862	160	8.6	57	3.1

なお 7 日間以上の静穏状態が連続発生した場合については、その回数が 14 回に減少し、発生確率は僅か 0.5 % となる。表 3 より、3 日連続比率は最大で 8.6 %、7 日連続比率は最大で 3.1 % であった。ここで、前者の回数は 160 回であり、1 年間あたりに換算すると $160 / 5 = 32$ 回/年となる。つまり 1 か月あたりの発生回数は 2～3 回程度と考えられる。最も比率の大きい場合でも 1 か月に 2～3 回程度の洋上作業しか実施する機会が得られないことを意味する。よって、この機会を正しく波浪予測できなければ、長期間にわたる欠測状態が継続する現状とおおむね一致する。

また、3 日連続比率と 7 日連続比率をそれぞれ図 12 に示す。両者を比較すると、3 日連続比率が大きい

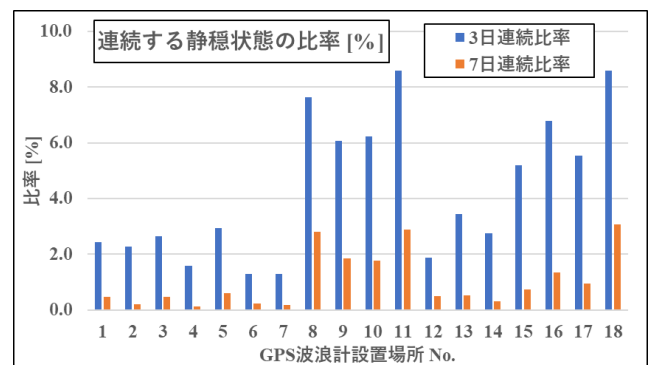


図 12 連続する静穏状態の比率

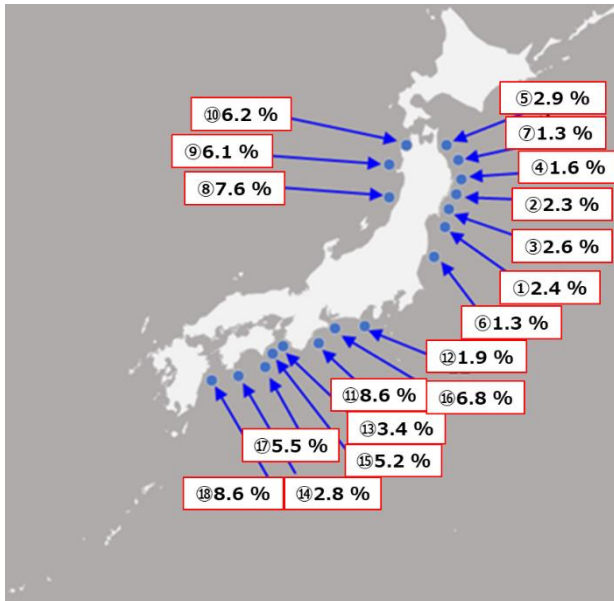


図 13 GPS 波浪計の設置場所と 3 日間連続比率

ければ 7 日連続比率も大きくなっている。一方、GPS 波浪計の設置場所（海域）ごとに数値のばらつきが大きい。ここで、GPS 波浪計の設置場所との関係性も確認する。GPS 波浪計の設置場所と 3 日間連続比率の関係を図 13 に示す。前章と同様に設置場所を日本海側、東北地方付近、中部～四国付近の 3 つに大別して考察する。日本海側の 3 点では静穏状態が 3 日間以上連続する 3 日連続比率は 6.0 %以上となっており、比較的高い比率であることがわかる。東北地方付近では、3 日連続比率がいずれも 3.0 %以下の比率となっており、静穏状態が少ないことを確認できる。中部～四国付近では、5.0 %を超えるような比較的高い 3 日連続比率が確認できる。なお、1.9 %、2.8 %、3.4 %と比較的低い比率が確認される個所も西日本太平洋側に 3 地点ある。

3.3 欠測と静穏状態の発生率の相関

これまでに確認してきた GPS 波浪計の設置場所における欠測状況や静穏状態の発生についてそれぞれのパラメータ間における相関関係を検証する。2015～2019 年の 5 年間における設置場所ごとの欠測発生率と 3 日連続比率の関係を図 14 に示す。なお、図 14 中の①～⑮は表 2 で示した GPS 波浪計の設置場所とそれぞれ対応している。

①～⑦の東北地方付近に設置されている GPS 波浪計は 3 日連続比率がいずれも 3.0 %以下と小さい一方で、欠測発生率も 20 %以下となっており小さい数値を示している。3 日連続比率が小さいという

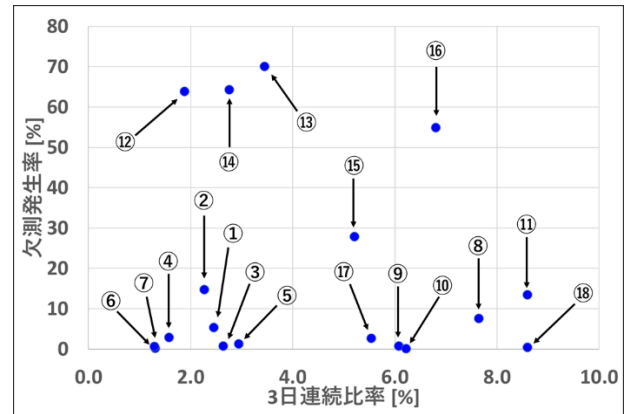


図 14 欠測発生率と 3 日連続比率の関係

ことは、海象条件は比較的厳しい割合が高いことを示しているが、欠測発生率が小さく落ち着いている。これは、そもそも故障が起こっておらず、通常の状態に復旧するのが早い、もしくは故障に対する修理・メンテナンス等を迅速に行っているためかと推察される。

⑧～⑩の日本海側の GPS 波浪計は 3 日連続比率が 6.0 %以上と大きく、欠測発生率が 10 %以下と小さな数値を示している。これは、比較的静穏な海象条件が多く、それに伴い欠測の発生する確率が小さくなったためと推察される。

⑪～⑮の中部～四国付近の GPS 波浪計については、3 日連続比率と欠測発生率のばらつきが大きい。ここで、⑫～⑭および⑮は 5 年間の欠測発生率が 50 %を超えており、非常に長期間に渡り欠測が続いていることが把握できる。これは、前述した修理スケジュールや技術者のコスト面の問題、つまり海象条件以外の要因により修理が遅れている可能性もある。よって、3 日間連続比率と欠測発生率との相関関係は低く、その結果としてばらつきが大きくなったと考えられる。

上記の通り、それぞれの GPS 波浪計の設置場所ごとの欠測と静穏状態の相関を正確に検証するには、欠測やその後の復旧に至る要因を正確に把握する必要がある。

3.4 欠測・静穏の発生確率と波高統計値の相関関係

前述の通り、各海域とも 3 日連続比率が 10 %以下となっているように、沖合での作業を実施できる機会は限られている。よって、静穏となる機会を確実に把握するため、将来の研究にて AI を用いた高度な波浪予測法の構築を目指し、これに向けたパラメ

一タ間の相関関係を整理する。しかしながら、AIを用いる際の説明変数は多ければ良いというわけではないため、説明変数の選択は非常に難しい。そこで、欠測発生率や静穏状態と相関のあるパラメータを選定するため、まずは波高の統計値との関係性を把握する。

3日連続比率や欠測発生率とGPS波浪計の設置場所における5年間の波高に関する統計値について関係性を確認する。波高の統計値については、5年間の最大値、平均値および標準偏差を用いる。それぞれの発生確率と波高統計値の相関を図15に示す。図15の左列のグラフは横軸に3日連続比率、縦軸に波高の統計値をそれぞれプロットしている。右列の横軸は欠測発生率、縦軸は波高のそれぞれの統計値を表している。また、図中には回帰直線、相関係数 R_{XY} および決定係数 R_{XY}^2 をそれぞれ示している。

まず、3日間連続比率と波高の統計値について確認する。3日間連続比率と波高の最大値については、相関係数が0.148であり、ほとんど相関関係がない。しかし、3日連続比率が4.0%以下の部分では波高の最大値10m付近に分布している。一方、3日連続比

率が4.0%以上の部分では回帰直線からのばらつきが非常に大きいものとなっている。3日間連続比率と波高の平均値では、相関係数が-0.856となっており、負の相関関係がかなりあることを確認できる。3日連続比率と波高の標準偏差については、相関係数が0.299となっており、やや相関関係がある。一方、3日連続比率が6.0%以下の部分に着目してみると、波高の標準偏差0.8付近に多く分布が確認される。以上より、3日連続比率と最も相関関係のある波高の統計値は平均値であるため、3日連続比率を評価する際には波高の平均値を用いるのが望ましい。

次に、欠測発生率と波高の統計値について確認する。欠測発生率と波高の最大値に関しては、相関係数が-0.378となっており、やや負の相関関係がある。回帰直線とのばらつきがあるが、波高の最大値が12mを超えるものを除去すると相関関係がやや上昇するようにも見受けられる。欠測発生率と波高の平均値については、回帰直線とのばらつきも大きく、相関係数が-0.113となっていることから、ほとんど相関がないことがわかる。一方、欠測発生率と波高の標準偏差に関しては、相関係数が-0.302となっており、ある程度相関関係が認められる。さらに、波高の標準偏差が1.0m以上の3点を除去すると、より相関関係がより上昇すると考えられる。以上より、欠測発生率と最も相関関係のあった波高の統計値は最大値であった。よって、欠測の発生率を評価する際には波高の最大値を考慮するのが望ましいと言える。

4. 結論と今後の課題

本論の結論として以下の知見が得られた。

- (1) 1、2、12月には低気圧の発達、9、10月には台風の接近の影響により波浪が卓越することで、欠測発生率が高まると推察される。
- (2) 欠測発生率が急激な上昇を示した際には、1、2か月で落ち着き、良好な計測に戻るケースと長ければ1年以上の欠測が発生するケースに分類される。
- (3) 過去5年間のGPS波浪計のデータより、3日間連続で静穏状態となるのは、最も多いケースでも1か月に2~3回程度である。
- (4) 3日連続比率をGPS波浪計の設置場所と比較すると、以下の通り3つの傾向に大別できる。

- ・日本海側の3点では6.0%以上の比較的高い比率を示している。

- ・東北地方付近ではいずれも3.0%以下の比率とな

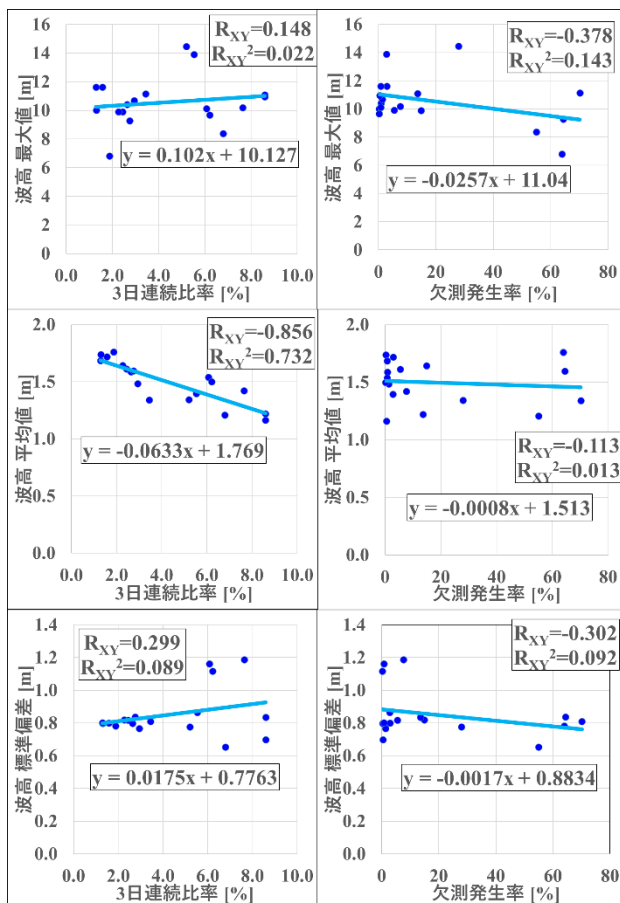


図15 各発生確率と波高の統計値の相関

っており静穏状態となる機会が少ないことがわかる。

・極端に静穏状態となる総回数が少ない3点を除いた場合、中部～四国付近では、5.0%を超えるような比較的高い比率が確認される

(5) 3日以上連続する静穏状態の機会を確実に把握する必要がある、現状の波浪予測の精度では迅速な修復を実現できない状況になり得る可能性がデータ整理より明らかとなった。

(6) 3日連続比率と最も相関関係のある波高の統計値は平均値であるため、3日連続比率を評価するには波高の平均値を用いるのが望ましい。

(7) 欠測発生率と最も相関関係のあった波高の統計値は最大値であったため、欠測の発生率を評価するには波高の最大値を考慮するのが望ましい。

また、今後の取り組み方針としては、AIを用いた高度な波浪予測手法の確立を目指す。AIを用いるうえで必要となる説明変数を決定するために、欠測発生率や静穏状態と相関の高いパラメータを選定する。

参考文献

- (1) 野口哲史：洋上風力建設のための拠点港湾のあり方について、洋上風力官民協議会資料 4-2, 2020.
- (2) 国土交通省：全国港湾海洋波浪情報網ナウファース, <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/index.html>, 2023.3.31.
- (3) 小舟浩治・橋本典明・亀山豊：統計モデルを用いた波浪予測手法の適正地に関する検討，港湾技研資料, No.673, 1990.
- (4) 井島武士・田淵幹修：数値計算による台風域内の波の分布について（II）－実際の台風による検討－，第17回海岸工学講演会論文集, pp. 27-33.
- (5) 笹健児・久保雅義・高橋倫也・白石悟・永井紀彦：台風時における港内係留船舶の係留限界予測に関する研究，海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1351-1355, 2001.
- (6) 斎藤武久・小久保元貴・間瀬肇：ニューラルネットワークを用いた日本海沿岸域でのうねり性高波浪の予測に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.72, pp. I_175-I180, 2016.
- (7) 影本浩：大洋を航行する船舶に搭載された AI（人工知能）による出会波の予測可能性について，日本船舶海洋工学会講演会論文集, 28号, pp. 161-163, 2019.
- (8) 庄司りり：船舶のウェザールーティング（最適航路選定）における要素技術，オペレーションズリサーチ, pp. 599-605, 2013.
- (9) Sasa, K., Chen, C., Fujimatsu, T., Shoji, R., and Maki, A., “Speed loss analysis and rough wave avoidance algorithms for optimal ship routing simulation of 28,000-DWT bulk carrier”, *Ocean Engineering*, Vol.228, 108800, 2021.
- (10) Tanaka, J., Sasa, K., Maki, A., and Chen, C., “Multiple analysis for optimal ship routing simulation of 28,000-DWT carrier in the Southern Hemisphere”, *Trends in Maritime Technology and Engineering*, Vol.1, pp.461-468, 2022.
- (11) Chen, C., Sasa, K., Ohsawa, T., Kashiwagi, M., Prpić-Oršić, J., and Mizojiri, T., “Comparative assessment of NCEP and ECMWF global datasets and numerical approaches on rough sea ship navigation based on numerical simulation and shipboard measurements”, *Applied Ocean Research*, Vol.101, 102219, 2020.
- (12) 種本純・大澤輝夫・香西克俊・塩谷茂明：中東・北太平洋航路における全球数値予報モデルの海上風予測精度検証，日本航海学会論文集、第131号, pp. 48-56, 2015.
- (13) 久保雅義・小宗多恵・斎藤勝彦・笹健児：日本海に面した港湾での高波高の発生予測に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，第97号, pp. 73-83, 1997.
- (14) 青野利夫・後藤智明・佐藤典之：沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測，海岸工学論文集，第40巻, pp. 156-160, 1993.
- (15) 永井紀彦・橋本典明・浅井正・戸引勲・伊藤一教・東江隆夫・小林昭男・柴田孝雄：現地データに基づく港内係留船舶の動揺に及ぼす港外長周期波，海岸工学論文集，第41巻, pp. 931-935, 1994.
- (16) 坂谷知明・岩前伸幸・新保裕美：畳み込みニューラルネットワークを用いた波浪予測手法の開発，鹿島技術研究所年報，第67号, pp. 137-142, 2019.
- (17) 福地章：海洋気象講座，成山堂書店出版，12訂版, pp. 229, 2019.
- (18) 日本気象協会：わかりやすい天気図の話，クライム気象図書出版, pp. 94, 2014.