

# 北太平洋波浪解析値を用いた沿岸海域における 設計波浪の算定システム

## Assessment of Coastal Design Wave utilizing North Pacific Wave Analysis Data

間瀬 肇<sup>1</sup>・森 信人<sup>2</sup>・安田誠宏<sup>3</sup>・作中淳一郎<sup>4</sup>・宇都宮智昭<sup>5</sup>

Hajime MASE, Nobuhito MORI, Tomohiro YASUDA  
Junichiro SAKUNAKA and Tomoaki UTSUNOMIYA

A system to determine a design wave was proposed for a site selection of floating type wind power farm by utilizing wave analysis data in the North Pacific for 54 years. The wave analysis database was made from WAM's output calculated using NCEP/NCAR wind data. Even for a site of floating type wind power farm, the wave analysis database is not able to be employed directly as an offshore design wave since the site is not so far from a coast and it has insufficient spatial resolution. A procedure how to utilize the wave analysis database was shown in this study. Following this procedure, a design wave is assessed in any offshore site for a short time.

### 1. はじめに

温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化問題が顕在化し、環境負荷の少ない石油代替エネルギーである新エネルギーの導入促進が叫ばれるようになってきた。新エネルギーの中でも、自然・再生可能な風力エネルギーは二酸化炭素、硫黄酸化物等の大気汚染物質の排出を伴わないクリーンなエネルギーであり、経済的にも有望であることから、その導入促進が進められている。しかし、人口密度が高く、平野が少ないため、大規模ウィンドファームの適地が少ないのが問題である。欧州の洋上風力発電はバルト海やアイルリッシュ海等の閉鎖性の海域や、北海においても波高の小さい沿岸に設置されている。わが国において洋上風力発電を円滑に導入するためには、大水深、高波浪、暴風、地震等の自然条件に対する安全性の確保が重要である。

DNV-OS-J101等の規格に従って海洋構造物を設計する場合、疲労のための年平均値と荷重として評価される最大値の両者が必要となる。風車の場合には第一に風速特性の把握が必須であり、洋上の場合にはこれに波浪の影響が加わる。この場合、風については年間の平均風速、乱れ強度および海面粗度とこれに加えて50年確率風速、乱れ強度が必要であり、波浪については、継続時間、年平均波高と周期、50年確率波高と周期の推定が必要である。さらに浮体構造物を対象とすると、年平均波高と周期は安定性と係留に深く関連するため特に重要となる。

一般に、風力発電の設計条件はヨーロッパの気候に対して決められた場合が多く、これをそのまま日本に適用すると不具合が生じる場合がある(NEDO, 2008)。夏季には台風が、冬季には日本海側に季節風が発達するわが国に合わせた基準や設計方法が必要である。本研究では特に波浪に的を絞って、日本近海の任意の地点(洋上風力発電サイト候補地点)における最大波高や平均波高を推定するための手法を提案する。

### 2. 北太平洋波浪解析値を用いる設計波算定システム

#### (1) 確率波の従来算定法

長期の波浪観測資料に基づいて対象海域の確率波高を算定することが望ましいが、対象海域の波浪観測資料がないのが通常である。それを補うために波浪推算が行われる。その際、対象海域に高波をもたらしたであろう気象攪乱を抽出し、気象データから海上風データを作成する。その風データを用いて波浪推算を実施し、その極大値資料を元に確率波高を算定する。この際に注意しなければならないことは、対象海域に高波をもたらす気象攪乱をできるだけ長期間にわたり多く取り上げること、その気象条件に対して精度の良い風データを作成すること、碎波や回折の影響を取り入れることにより、波浪推算の結果の精度を確かめることである。本研究では、従来算定法とは異なる方法を提案する。

#### (2) 北太平洋波浪解析値

波浪モデルはWAMモデル(WAMDI, 1988)を用いた。波浪モデルの計算座標には球面座標系を用い、北緯0度~65度、東経120度~西経110度を計算対象とした。格子間隔は0.5度、計算格子数281×131とした。

海底地形は米国地球物理データセンター(NGDC)の

1 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所  
2 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所  
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所  
4 京都大学大学院 工学研究科  
5 正会員 工博 京都大学准教授 工学研究科

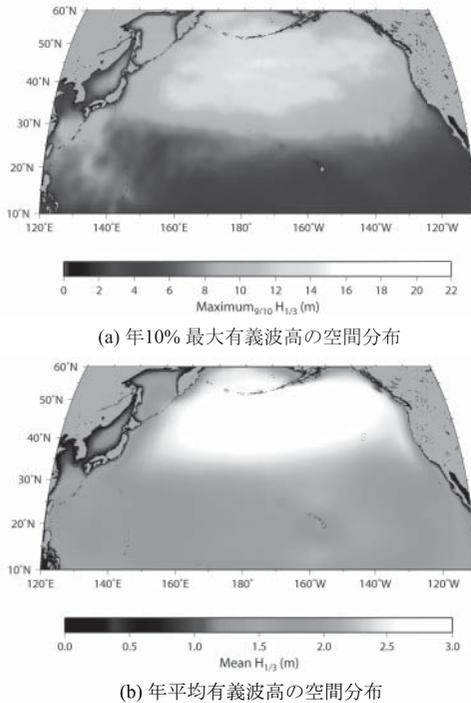


図-1 北太平洋波浪解析値

デジタル地勢データETOPO5を用い、300m以深は深海条件として計算した。方向スペクトルの周波数分割数は25、方向分割数は12(30度刻み)とした。

海上風データは、NCEP/NCARの6時間間隔海上風解析値資料(NCEP風資料と略記)の内、1948-2001年までの54年間分を使用した。NCEP風資料の海上風の空間解像度は、約 $2.5^\circ$ とECMWFによる6時間間隔ECMWF風資料の空間解像度に比べて低く、衛星データを取り込んでいない1979年以前の品質に問題があるもの(畑田ら、2002)、現在利用可能な気象の再解析データとしては最も長期間を対象としており、今回はこれをそのまま利用することにした。詳しい計算条件と精度検証結果については森ら(2009)を参考にされたい。

この方法による利点は、波浪モデルと海上風解析値の精度に依存するものの、50年間分の波高の時系列を計算領域全域で得ることができることである。波浪推算結果とブイ観測値と比較を行った結果、NCEP/NCARの海上風データを用いて推算された波高と観測値の相関係数は0.72、バイアス0.2m、8割程度低めに見積もる傾向があることが報告されている(森ら、2009)。

以上のような北太平洋波浪解析値のデータベースを用いることにより、回折・浅水変形を含んだ任意対象海域の確率波高を求めることとする。図-1はデータベースから各1年の有義波高の大きなものから10%を取り出して平均した年10%最大有義波高および年平均有義波高を示

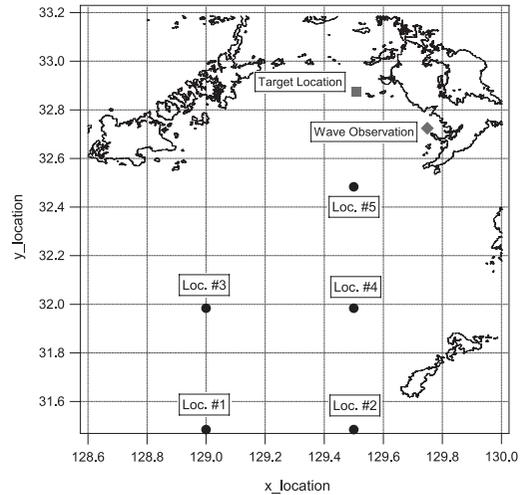


図-2 解析対象海域

したものである。北部海域で波高が大きくなっていることがみられる。日本沿岸では、空間解像度の制限から、海・陸が混在する海域にそのまま波浪解析値を用いることができない。そこで、以下に示すように具体的な海域を取り上げて、設計波浪を算定する手順を説明する。

### 3. 沿岸海域における設計波浪算定システム

#### (1) 対象海域

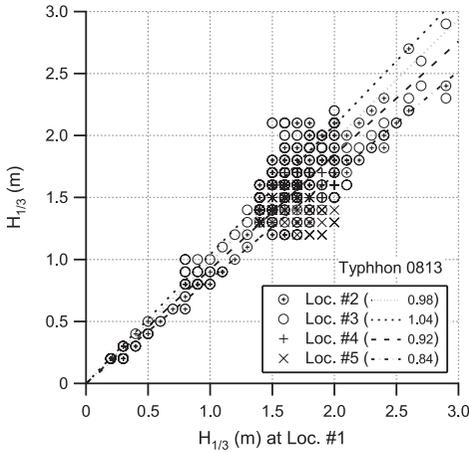
図-2は対象海域の地図であり、図中のTarget Locationと示した地点の設計波浪を求めたい。この海域には、ナウファスの観測地点があるので、これをWave Observationとして示してある。対象地点の北、東、西は島や陸地がある。南西方向には島はない。

この対象地点に近く、陸の影響を受けていないと思われる波浪解析値が得られている地点をLoc. #1～#5として図-2に示してある。海底地形は0.5度間隔のデータを用いているので、これら5地点の計算結果に海・陸の格子設定に関連する誤差(陸と海の区別や水深の影響)が入っている可能性がある。

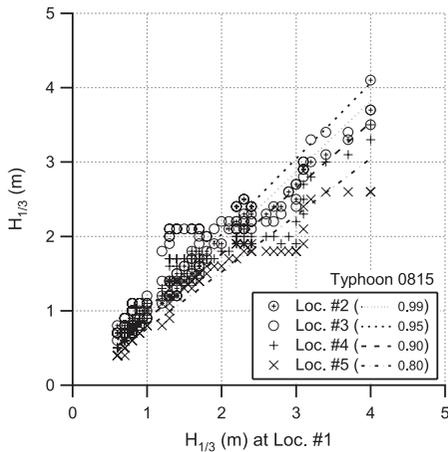
#### (2) 設計波浪算定に用いる波浪解析値の選定

対象地点と同じ地点に波浪解析値があることが理想であるが、通常の場合は対象地点と波浪解析値の存在地点は異なり、あったとしても海・陸の影響がないことが必要である。したがって、まず、用いるべき波浪解析値のある地点を選定しなければならない。

本研究では、候補地点としてLoc. #1～#5の5地点を取り上げる。これらの地点で得られている波浪解析値に陸域の影響が入っていないかを、より解像度の高い波浪予測モデルを用いて確かめる。そのため、Traceyら(2008)の、計算格子間隔が $0.02^\circ$ の波浪推算モデルを用いて、2008年の台風0813号と0815号によって発生した



(a) 台風 0813 号



(b) 台風 0815 号

図-3 台風0813号および台風0815号による5地点の有義波高の関係

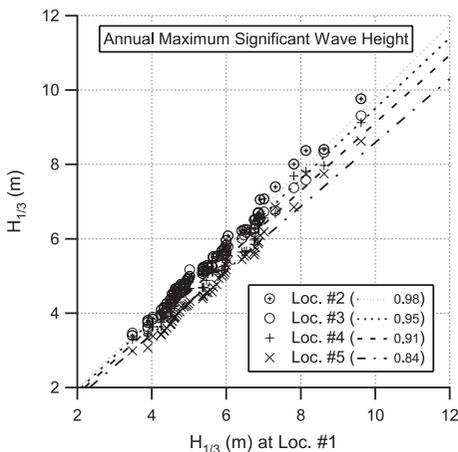


図-4 北太平洋波浪解析値データにおける5地点の年最大有義波高の関係

波浪について Loc. #1~#5 の波高の関係について調べた。図-3 (a) および (b) は、横軸を Loc. #1 の波高をとり、縦軸に Loc. #2~#5の波高をプロットしたものである。この図から波高間を知ることができ、Loc. #5 での波高は Loc. #1 の波高に比べて約0.8倍であることがわかる。

一方、波高解析値の年最大値について、Loc. #1~#5 における関係を調べた結果が、図-4 である。これらの波高の大小関係は、図-3 によるそれとほぼ同じである。このことは、対象地点に最も近い Loc. #5 における波高解析値には海・陸の地形データによる誤差は少ないことを意味している。

以上のように解析値を用いることにより、0.5~1度離れた沖側の波浪解析値を選定することができる。

(3) 波浪解析値のバイアス補正

得られている波浪解析値が正確かどうか、あるいは、どのぐらい実際の値とずれているかを知らなければならぬ。そのために、対象地点に最も近いナウファス (全国港湾海洋波浪情報網: NOWPHAS - Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HarbourS) の観測地点のデータを利用する。用いた波浪観測データは23年分である。この観測地点から直接対象地点での設計波浪を算定するには、2地点間の波高の関係を知らなければならないが、周辺地形が複雑で精度よく2地点間の関係を求めることが難しい力学的な問題、さらに23年間のデータから50年確率波浪を算定する統計的推定精度の問題がある。ここでは、データベース化されている波浪解析値を用いる。

まず、Loc. #5 の地点の波高と、対象地点および波浪観測地点での波高の関係を、回折を考慮したエネルギー平衡方程式 (間瀬ら, 1999) を用いた波浪変形計算により

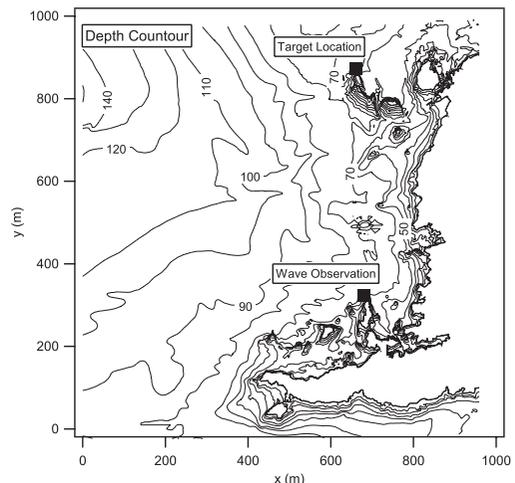


図-5 海底地形と波浪観測点, 対象地点の位置関係

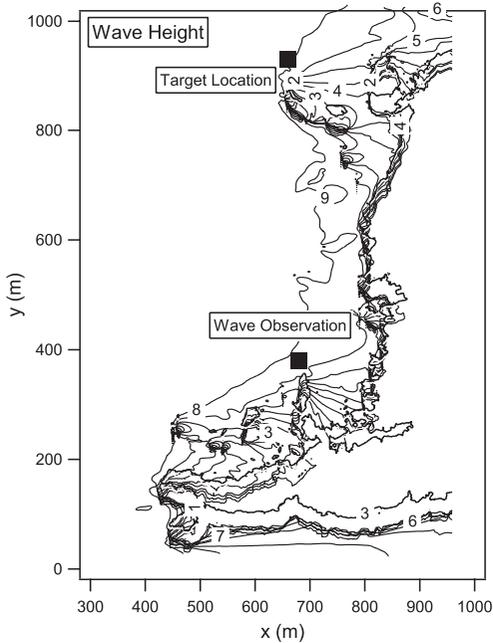


図-6 波浪変形計算の例 ( $H_{1/3}=10\text{m}$ ,  $T_{1/3}=12.7\text{s}$ )

調べる。図-5は海底地形および波浪観測地点、対象地点の位置関係を示したものである。対象地点および波浪観測地点で大きな波高が生じるのは、地図から判断して南からの入射によるものである。実際、波浪観測地点で高波浪が観測されているのはSW方向の波である。そこで、南寄りに入射する波浪を対象として、入射有義波高を4m, 6m, 8mおよび10m, 入射波向をS, SSWおよびSWとした。また、十分に発達した波を想定し、有義波周期は、沖波波形勾配が約0.04となるように設定した。図-5の  $x=0\text{m}$  線上に Loc. #5 がある。

図-6は、一例として入射有義波高10m, 周期12.7s, 波向きSWの条件の有義波高の空間分布を示したものである。このような一連の波浪変形計算を行い、Loc. #5, 浮体式洋上風力施設設置対象地点, 波浪観測地点における波高比を示したものが表-1である。この表によると、波向きがSWの場合が最も大きな波高比を示すこと、また、波高比は入射有義波高に依存することがわかった。これは、碎波減衰や回折効果が波高に関して線形でないことによる。

表-1 波浪変形計算による波高比

$H_{1/3}$	Wave Obs. Loc.			Target Loc.		
	S	SSW	SW	S	SSW	SW
4m	0.44	0.70	0.89	0.93	0.99	0.99
6m	0.41	0.68	0.87	0.90	0.96	0.98
8m	0.40	0.64	0.85	0.86	0.94	0.95
10m	0.40	0.64	0.84	0.82	0.90	0.92

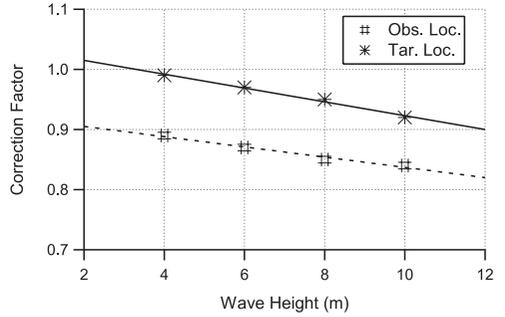


図-7 Loc. #5 を基準とした、波浪観測地点および設置対象地点における波高の関係 (SW方向)

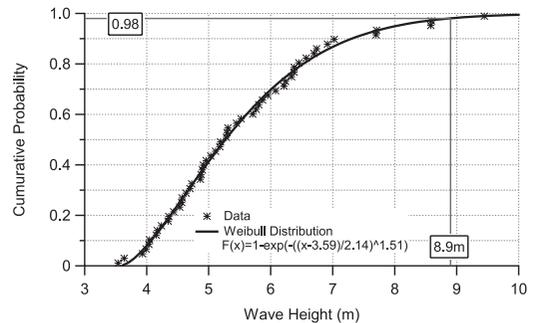


図-8 対象地点における50年再現確率波高の算定

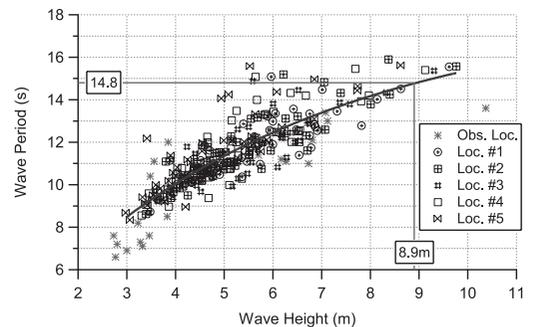


図-9 50年再現確率波高に対する周期の算定

図-7は Loc. #5 の波高に対する対象地点および波浪観測地点における波高の関係を示したものである。ただし、波向きはSWのケースである。また、波浪観測地点における年最大有義波高はほとんどSW方向の波であることから、図-7に示される Loc. #5 の波高と波浪観測地点での波高比を用いて、波浪観測地点の波高を以下のように算定する。

- 1) 波浪観測地点における23年分の年最大有義波高から Loc. #5 における年最大有義波高を求める。その平均有義波高は、5.69mであった。
- 2) Loc. #5 における波浪解析値(年最大有義波高)の平均値は、4.78mであった。したがって、波浪解析値の

バイアス補正として, 1.19倍 (= 5.69/4.78) を用いる。

- 3) バイアス補正した波浪解析値から, 図-7で示される関係式を用いて, 浮体式洋上風力発電施設設置対象地点での年最大有義波高を算定する。

図-8は, 以上のように求めた対象地点での年最大有義波高の累積確率を示したものである。この図から50年再現確率波高が8.9mとして求められる。

図-9は, 波浪解析値がある5地点および波浪観測地点の有義波高と周期を示したものである。この図のデータはバイアス補正を施していないデータであり, 波高と周期がどのように分布しているかを示している。この図によれば, 異なる地点毎のデータに固有の偏りは見られない。図中の曲線はすべてのデータ点の傾向を表すように引いた指数関数である。この曲線をもとにすれば, 有義波高8.9mに対応する周期は14.8sとなる。

#### 4. 北太平洋波浪解析値を用いる設計波浪の算定システムのまとめ

ここで, 北太平洋波浪解析値を用いる設計波浪の算定システムをまとめる。3.の具体例を示した後の方が, 理解しやすいと考えたからである。

- 1) 設計対象地点に近い波浪解析値を沖側の条件として選定する。この際, 陸の影響を受けていない波浪解析値を選ぶが, まず, 対象地点の地図を元に判断する。
- 2) 波浪解析値が海・陸の区別といった解像度の影響を受けているかの検討は, より詳細な解像度を持つ波浪推算結果をもとに判定する。
- 3) 用いる波浪解析値の地点が確定した後は, 周辺に波浪観測地点があればその観測データを利用して, バイアス補正を行う。波浪観測地点がない場合には, 高解像度波浪推算結果を利用する。(ただし, 3.の具体例においては, この方法は示していない。) バイアス補正に当たっては, 波浪解析値のある地点および波浪観測地点における波高の関係を, 別途, 波浪予測モデルにより求める。
- 4) バイアス補正された波浪解析値から対象地点での年最大有義波高を算定し(2地点における波高の関係をj用いて), 累積分布から50年再現確率波高を求める。また, 波高と周期の散布図から, 50年再現確率波高に対応する有義波周期を求める。

## 5. おわりに

本研究では洋上風力発電サイトを選定する際に重要な設計波浪の算定に関して, 北太平洋波浪解析値を日本近海の任意の地点で利用する算定システムを提案したものである。この算定システムの利点は, 50年間分の波高の時系列を計算領域全域で用いることができるという点である。現在計画されている対象海域に対する具体的な算定方法は3.で示した。ここでは, 年最大有義波についてのみ示したが, 年平均有義波も同様に算定することができる。

従来の方法では, 対象海域に高波をもたらしたであろう気象攪乱を抽出し, 気象データから海上風データを作成して波浪推算を実施し, それらの極大値資料を元に極値解析により確率波高を算定する。この方法では年平均有義波高は求めることができない。

本算定システムにおいては, 北太平洋での波浪解析値がデータベース化されているので, 解像度による海・陸の影響やバイアス補正, また, 浅水・砕波・回折効果を考慮して50年再現確率波や年平均有義波高を, 図-8および図-9のように, 従来方法より短時間で得ることができる。

本研究は, 科学研究費補助金基盤研究(B)「浮体式洋上風力発電施設の動的応答と成定性評価に関する研究」(代表: 宇都宮智昭)の研究の一部であることを付記し, 謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 畑田佳男・山口正隆・大福 学・野中浩一・李 敏杰 (2002): わが国沿岸での長期波浪推算資料に基づく波高の傾向変動の解析, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.1346-1350.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋 (1999): 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第628号, II-48, pp.177-187.
- 森 信人・安田誠宏・間瀬 肇 (2009): NCEP/NCAR再解析値を用いた北太平洋候の解析, 京大防災研究所年報, 第52号 (印刷中).
- NEDO (2008): 地球温暖化対策技術移転ハンドブック2008年<改訂版>, 347p.
- Tracey, H. Tom, 間瀬 肇・安田誠宏 (2008): 毎時大気解析GPVを用いたリアルタイム波浪予測システムの開発とその検証, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.186-190.
- WAMDI (1988): The WAM Model - A third generation ocean wave prediction model, Jour. Phys. Oceanogr., Vol.18, pp.1775-1810.