

# 洋上風力発電設備設計のための有義波高の評価時間に関する研究

Effect of sampling time and disjunct sampling of significant wave height for the design of offshore wind farm

山口 敦\*\*

Atsushi YAMAGUCHI

石原 孟\*\*

Takeshi ISHIHARA

## 1. はじめに

洋上風力発電設備の設計に際し、波浪シミュレーションにより設計波浪を推定するハインドキャスト手法が提案されているが、気象シミュレーション等により求める境界条件としての風速場は1時間から3時間平均相当の風速であるため、求められた波浪場も1時間から3時間相当の評価時間を持つと考えられる。一方、我が国における過去の波浪観測は毎偶正時の評価時間20分の有義波高として行われており、波浪シミュレーションの検証のためには、これらの評価時間およびサンプリング時間の違いを変換する必要がある。また、洋上風力発電所の安全性に関する国際標準であるIEC61400-3<sup>1)</sup>においては波浪と強風の同時作用下で、観測データおよび波浪シミュレーションから得られた有義波高を評価時間1時間相当の有義波高に変換する必要がある。

IEC61400-3において、評価時間1時間と評価時間3時間の有義波高の関係が示されているが、その他の関係は不明である。また、風速に関してはLarsen and Mann<sup>2)</sup>や山口ら<sup>3)</sup>が10分平均風速の最大風速とより長い平均化時間に基づく最大風速との関係や、連続観測データから求めた10分平均風速の最大値との関係を求めているが、波浪に関してはこのような関係は明らかにされていない。

そこで本研究では日本近海における観測データを用いて評価時間20分の最大有義波高と、より長い評価時間の最大有義波高との関係を明らかにするとともに、両者の間の変換手法を提案する。

## 2. 評価時間の違いのモデル化

評価時間の違いが最大有義波高の違いに与える影響を明らかにするために、評価時間の違いによる有義波高の分布について検討する。観測データとして、2010年3月～2012年2月千葉県銚子沖のNEDOによる観測データを用い、評価時間20分の有義波高 $H_{1/3}^{20,i}$ から評価時間 $M$

分の有義波高( $M > 20$ )の時系列データを作成した。観測によって求めた統計的有義波高は、スペクトル有義波高と(1)式に示す関係がある。

$$H_{1/3} = 0.956H_s \quad (1)$$

$$H_s = 4 \sqrt{\int S(f)df} \quad (2)$$

またスペクトル有義波高は(2)式によって計算されるため、有義波高の評価時間の変換は、二乗平均をとればよく、 $M/20$ が偶数か奇数かによって異なる(3)～(5)式によって行うことが可能である。 $M/20$ が偶数である場合は

$$H_{1/3}^{M,i} = \left[ \frac{1}{2m} \left\{ \frac{1}{2} \left[ (H_s^{20,i-m})^2 + (H_s^{20,i+m})^2 \right] + \sum_{k=i-m+1}^{i+m-1} (H_{1/3}^{20,i})^2 \right\} \right]^{1/2} \\ m = \frac{1}{2} \cdot \frac{M}{20} \quad (3)$$

であり、 $M/20$ が奇数である場合は

$$H_{1/3}^{M,i} = \left\{ \frac{1}{2m+1} \sum_{k=i-m}^{i+m} (H_{1/3}^{20,i})^2 \right\}^{1/2} \\ m = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{M}{20} - 1 \right) \quad (4)$$

となる。

次に、各時系列データに対し評価時間 $M$ 分の有義波高 $H_{1/3}^{M,i}$ と評価時間20分の有義波高 $H_{1/3}^{20,i}$ との差 $\Delta H_{1/3}^{M,i}$ を求める。

$$\Delta H_{1/3}^{M,i} = H_{1/3}^{20,i} - H_{1/3}^{M,i} \quad (5)$$

\* 平成24年11月28日第34回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\* 会員 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

$\Delta H_{1/3}^{M,i}$ の大きさは有義波高に依存すると考えられるため、一例とし $\Delta H_{1/3}^{180,i}$ を評価時間180分(3時間)の有義波高 $H_{1/3}^{180,i}$ の関数としてプロットしたのが図1である。 $\Delta H_{1/3}^{180,i}$ の平均値は波高に依存せずに常にほぼ0であるが、ばらつきは評価時間180分の有義波高 $H_{1/3}^{180,i}$ が大きくなるに従って大きくなる。またそのばらつきは台風時と非台風時で大きく変わらないことがわかる。

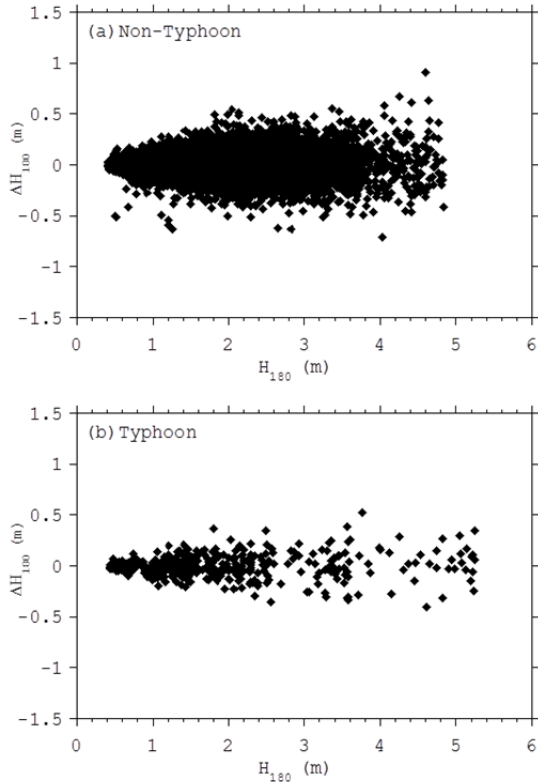


図1 評価時間3時間(180分)と20分の有義波高の差:  
(a)非台風時; (b)台風時

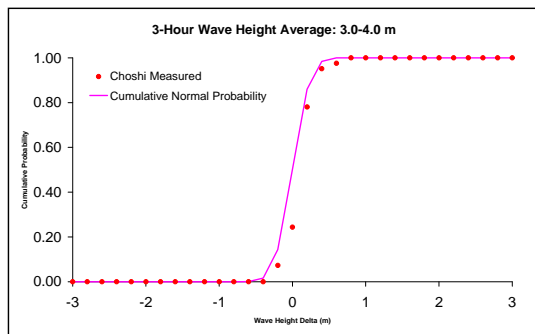


図2 台風時の評価時間3時間の有義波高が3mから4mの時の評価時間20分の有義波高との差の累積頻度分布

このことをもう少し詳しく見るために、評価時間180分の有義波高を非台風時のデータについては0.5mごとに、台風時にはデータ数が少ないため1mごとのビンに分解し、ビン内での $\Delta H_{1/3}^{180,i}$ の分布を調べる。台風時の評価

時間180分の有義波高が3.0m~4.0mのビン内における $\Delta H_{1/3}^{180,i}$ の累積頻度分布を例として図2に示す。

この分布は正規分布によりモデル化できる。図2には標準偏差が一致すると仮定した正規分布をあわせて示すが、累積分布関数は正規分布によりモデル化できることがわかる。

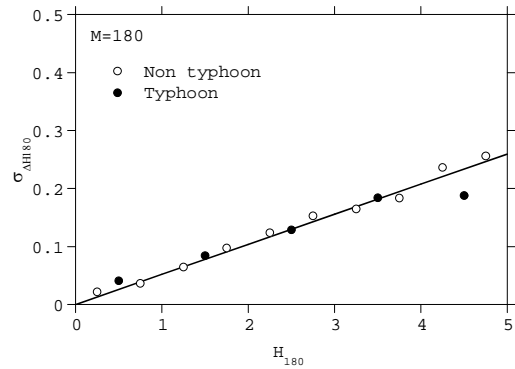


図3 評価時間3時間(180分)と20分の有義波高の差の標準偏差

正規分布は標準偏差によって特徴付けられるため、 $\Delta H_{1/3}^{M,i}$ の標準偏差 $\sigma_M$ を評価時間 $M$ 分の有義波高 $H_{1/3}^{M,i}$ の関数としてプロットしたものを図3に示す。平均化時間が長くなるにつれて $\Delta H_{1/3}^{M,i}$ の標準偏差が大きくなる傾向があるが、その傾向は台風と非台風で同じであることがわかる。標準偏差 $\sigma_M$ は、評価時間 $M$ 分の有義波高に比例する形で(6)式のようにモデル化した。

$$\sigma_M = a(M) \cdot H_{1/3}^M \quad (6)$$

ただし、比例係数 $a(M)$ は評価時間の関数である。本研究では比例係数 $a(M)$ をデータ数の重みをつけた最小二乗法により同定した。同定したパラメータを表1に示すとともに、このパラメータを用いたモデルを図3にあわせて示す。このモデルにより、観測値がよく再現されていることがわかる。

表1 評価時間M分の有義波高の差の標準偏差のモデルパラメータ

平均化時間 $M$ (分)	$a(M)$
60 (1時間)	0.042
120 (2時間)	0.048
180 (3時間)	0.052

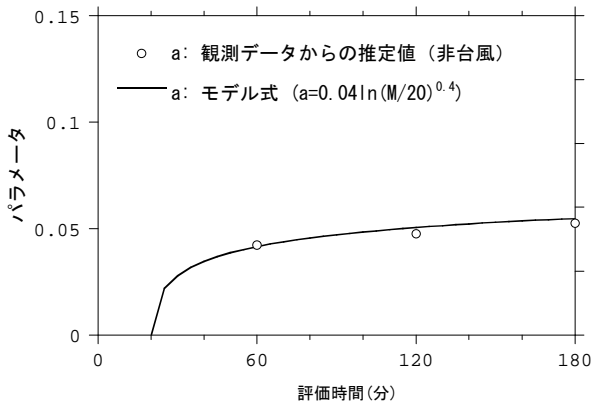


図4 評価時間 20 分の有義波高と評価時間  $M$  分の有義波高との差の標準偏差

次に、これらのパラメータを任意の評価時間に拡張する。表 1 に示した、パラメータを平均化時間  $M$  の関数としてプロットしたのが図 4 である。全てのパラメータは平均化時間が長くなるにしたがって大きくなっていることがわかる。そこで、本研究ではこれらのパラメータを(7)式に示す対数関数を用いて一般化した。

$$a = 0.04 \ln \left( \frac{M}{20} \right)^{0.4} \quad (7)$$

これらのモデル式により評価時間  $M$  の関数として推定したパラメータ  $a$  の値を図 4 にあわせて示す。このモデルを用いると、観測データから推定した値を再現することができ、任意の評価時間に適用できることがわかる。

次に、これらの関係を用いて評価時間  $M$  分の有義波高の最大値を求める。前節で見たように、評価時間  $M$  分と 20 分の有義波高の差は正規分布に従い、その平均値は 0 であり、標準偏差は(6)式で与えられることから、その性質を満たす正規分布に従う乱数  $\Delta H_{1/3}^{M,i}$  を発生させ、(8)式に示すように、評価時間  $M$  分の有義波高  $H_{1/3}^{M,i}$  に加えることにより、評価時間 20 分の有義波高の時系列データ  $\hat{H}_{1/3}^{20,i}$  を擬似的に生成することが可能である。

$$\hat{H}_{1/3}^{20,i} = H_{1/3}^{M,i} + \Delta H_{1/3}^{M,i} \quad (8)$$

以上述べた方法により、評価時間  $M$  分の有義波高から評価時間 20 分の有義波高の時系列を推定し、最大値を求めることにより評価時間 20 分の有義波高の最大値を推定することは可能であるが、20 分平均波高の最大値と  $M$  分平均波高の最大値との間の関係を直接モデル化でき

れば、より簡単に評価時間 20 分平均値の最大値を推定することができる。以下、その手法について述べる。

まず、乱数による影響を最小限にするために、乱数のシードを 100 通りに変化させ、上記の方法により年間の評価時間 20 分の有義波高の時系列を発生させ、評価時間 20 分に相当する有義波高の年最大値を 100 通り求めた。次にこの 100 通りの評価時間 20 分の平均年最大有義波高の平均を求め、評価時間  $M$  分の有義波高との比を求め、その結果を図 5 に示す。

本研究では、評価時間 20 分と  $M$  分の有義波高の比のモデルとして、(14)式に示すモデルを提案した。

$$\frac{H_{1/3}^M}{H_{1/3}^{20}} = 1 - 0.05 \left( \frac{M - 20}{60} \right)^{0.3} \quad (9)$$

このモデルを図 5 内に実線で示すが、上記で説明した方法により求めた比とよく一致していることがわかる。

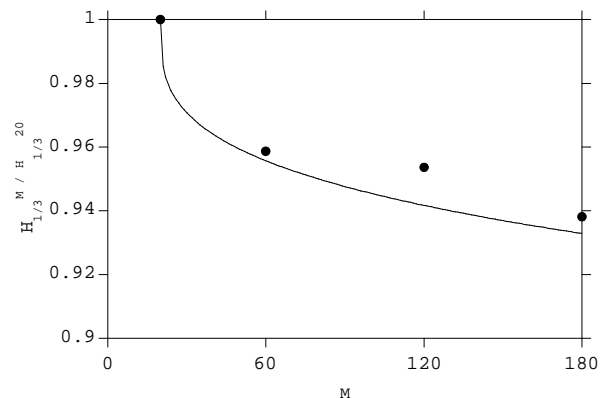


図5 評価時間  $M$  分の最大有義波高と評価時間 20 分の最大有義波高の比

このモデルにより、台風時においても評価時間  $M$  分の有義波高の最大値から、評価時間 20 分の有義波高の最大値を推定することが可能となった。

IEC61400-3 には評価時間 1 時間の最大有義波高と 3 時間の最大有義波高の比として、レイリー分布を仮定して求めた 0.95 が規定されているが、本研究の結果はこの値より小さくなる。これは、本モデル構築に用いた観測データは、千葉県銚子沖の浅海域で観測されたものであり、砕波の影響を受けているためであると考えられる。

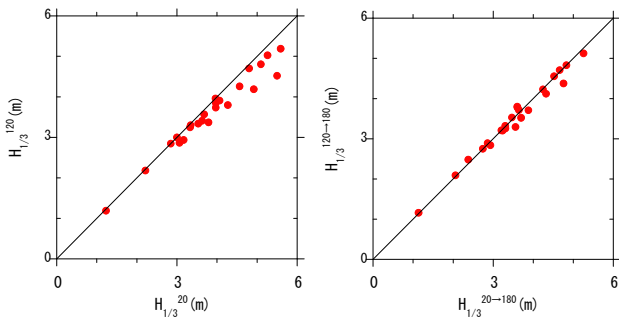
### 3. 毎偶正時データと連続データとの比較

わが国においては、毎偶正時における評価時間 20 分の有義波高が観測データとして蓄積されてきた。しかしながら、毎偶正時の評価時間 20 分の有義波高では高波浪

時のピーク値を捉えることができず、最大波高を過小評価する恐れがある。

本研究では、銚子沖における観測データを用い、毎偶正時における評価時間 20 分の有義波高と連続データを比較することにより、毎偶正時データを極値の推定に用いる際の問題点を明らかにするとともに、毎偶正時の有義波高から連続データの最大有義波高に相当する波高を推定する手法を提案する。

2010 年～2011 年の銚子沖において連続データから得られた月最大波高と毎偶正時のデータから得られたものを比較したのが図 6(a)である。毎偶正時のデータから得られた月最大波高は連続データから求めたものを過小評価していることがわかる。この過小評価は平均的に 6% である。このことから、毎偶正時の観測データを用いて最大波高の極値推定に用いるには問題があることがわかる。



(a) 評価時間 20 分 (b) 評価時間 3 時間  
図 6 毎偶正時の観測データと連続データから求めた月最大有義波高の比較

前節で評価時間 3 時間の有義波高から評価時間 20 分の有義波高の最大値に変換する手法を提案したため、毎偶正時の評価時間 20 分の有義波高から評価時間 3 時間の有義波高を推定することができれば、毎偶正時に計測された有義波高から連続データの最大値に相当する有義波高を推定することができる。そこで、本研究では次式により毎偶正時の評価時間 20 分の有義波高  $\hat{H}_{1/3}^{20,i}$  から評価時間 3 時間の有義波高  $H_{1/3}^{180,j}$  を推定した。

$$H_{1/3}^{180,i} = \sqrt{\frac{1}{6} \left[ \left( \hat{H}_{1/3}^{20,i-1} \right)^2 + 4 \left( \hat{H}_{1/3}^{20,i} \right)^2 + \left( \hat{H}_{1/3}^{20,i+1} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

このようにして毎偶正時の観測データから求めた評価時間 3 時間の有義波高の月最大値を真値(連続観測データから求めた評価時間 3 時間の有義波高の最大値)と比

較したものを図 6(b)に示す。図に見られた過小評価が改善されていることがわかる。このようにして求めた評価時間 3 時間の有義波高から 2 節に示した手法を用いて評価時間 20 分の連続データの有義波高に対応する波高を推定することができる。

#### 4. まとめ

本研究では、千葉県銚子沖における波浪観測データを解析することにより、評価時間  $M$  分の有義波高から評価時間 20 分の有義波高の最大値を推定する手法を提案するとともに、毎偶正時に観測された有義波高データと連続観測データとの比較を行い、以下の結論を得た。

- 1) 評価時間 20 分の有義波高と評価時間  $M$  分の有義波高との差  $\Delta H_{1/3}^M$  の標準偏差  $\sigma_M$  をモデル化した。このモデルは台風時、非台風時に関係なく適用可能である。
- 2) モデル化した評価時間 20 分の有義波高と評価時間  $M$  分の有義波高との差  $\Delta H_{1/3}^M$  の標準偏差  $\sigma_M$  を利用して、評価時間  $M$  分の有義波高から 20 分の有義波高および最大波高を推定する手法を提案した。
- 3) 評価時間 20 分の有義波高の最大値と評価時間  $M$  分の有義波高との比を求めた。本観測海域は浅海域のため、レイリー分布を仮定した IEC61400-3 に規定された値を下回ることがわかった。
- 4) 毎偶正時に観測された評価時間 20 分の有義波高から求めた月最大波高は連続データから求めた最大波高を過小評価するが、毎偶正時の観測データから推定した評価時間 3 時間の最大有義波高は連続データから求めたものとほぼ等しくなる。

#### 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務で得られた研究成果である。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) IEC61400-3, Wind Turbine – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- 2) Larsen, X. G. and Mann, J.: The effect of disjunct sampling and averaging time on maximum mean wind speeds, *J. Wind Eng. Indist. Aerodyn.*, Vol.94, pp.581-602, 2006.
- 3) 山口敦, メルヴィン ブランコ ソロモン, 石原孟: 極値風速予測のための風速の平均化時間に関する研究, 第 33 回風力エネルギー利用シンポジウム, 2011.