

洋上風力発電設備における波の設計条件に関する方位性の導入

Directional design concept for wave load on offshore wind turbines

本田 明弘*¹ 太田 真*² 石井 秀和*³
 Akihiro HONDA Makoto OHTA Hidekazu ISHII

*¹ Research Manager, Turbomachinery Lab., Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Co., Ltd.
 5-717-1 Fukahori-machi, Nagasaki-city, 851-0392, Japan
 Fax:+81-95-834-2385, E-mail: akihiro_honda@mhi.co.jp
 *² Senior Researcher, Fluid-dynamics Lab., Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Co., Ltd.
 *³ Researcher, Turbomachinery Lab., Nagasaki R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries, Co., Ltd.

Abstract

Recently, offshore wind turbines are focused as one of renewable energies, which are promoted all over the world. They are affected by wind and wave loads, however directional effects of wind and wave are not considered. In addition, asymmetric floats can have different responses for directional wave. In this paper, the design methodology for offshore wind turbine considering directional effects of wave and load response are proposed. The risk of exceeding probability about load effect is 0.02 in criteria, namely the return period is 50 years. The proposed design wave height model, which considers directional effects of wave and load response, proved to have sufficient reliability in terms of loads. Furthermore, this design methodology can easily estimate the wind turbine reliability.

キーワード：洋上風力発電，波荷重，方位特性，設計条件
 Key Words：Offshore Wind Turbine, Wave Load, Direction, Design concept

1. はじめに

近年では、電力設備の転換が急がれつつあり、中でも大型洋上風力発電設備に注目が集まっている。洋上風力発電設備においては、風荷重、波荷重が主たる荷重条件として重要な項目である。

従来、これらの荷重に関しては、地点により固有な設定は行っていたものの、方位特性（風速・風向、波高・波向）は考慮していない。しかしながら、地形条件や波浪の生成メカニズムを踏まえると、風・波には方位特性が存在すると考えられる。そのため、方位特性の概念を合理的に導入する事で過不足のない設計が可能と考えられる。

そこで、方位特性に関する風荷重と波荷重の今までの知見を以下に整理した。

1.1 風荷重に関する設計基準における方位特性

風荷重に関する設計基準として広く用いられている基準における方位特性の扱いに関して以下にまとめる。

(1) 建築分野の基準類 対象とする建造物の周辺の

環境（例えば、地表面粗度）などが風向により異なる場合には、地表面粗度および高度の補正を方位別に行う必要がある。

さらに、国内の荷重指針¹⁾においては、観測データのある気象官署の近傍に限り、風向による風速の低減が認められている。

また、海外の基準に目を移すと、BS²⁾では Direction Factor を基準風速に乗じる事で方位特性を考慮している。

(2) 橋梁の耐風設計 送電用鉄塔と同様に線状構造物である橋梁に関しては、風向により荷重応答が異なるため、特に地形の影響が大きい場合に方位特性を考慮して設計される場合⁵⁾がある。

(3) 送電用鉄塔の耐風設計 送電用鉄塔では、1991年に襲来した大型の台風被害を受けて、2005年に設計指針⁴⁾が発行され、荷重効果として十分な信頼性を持つように方位別の設計風速を定めている。

(4) 風力発電設備の国際規格 風力発電設備そのものは風向に応じてヨー角を制御する為、方位特性の考慮は不要であるが、地形の起伏による影響を考慮する場合には方位特性を考慮する事が合理的である。

国内の設計指針³⁾でも、台風シミュレーションと地形効果を考慮した設定方法が採用されており、風向の方位特性を反映したものとなっている。

*1 三菱重工業（株）長崎研究所 ターボ機械研究室
 主席研究員（〒851-0392 長崎市深堀町 5-717-1）
 E-mail: akihiro_honda@mhi.co.jp
 *2 三菱重工業（株）長崎研究所 流体研究室
 主任研究員（〒851-0392 長崎市深堀町 5-717-1）
 E-mail: makoto_ohta@mhi.co.jp
 *3 三菱重工業（株）長崎研究所 ターボ機械研究室
 研究員（〒851-0392 長崎市深堀町 5-717-1）
 E-mail: hidekazu_ishii@mhi.co.jp
 （原稿受付：2013年 4月 19日）

以上のように、風工学における風荷重の算定では、風速・風向の方位特性を適切に考慮している。

1.2 波荷重に関する設計基準における方位特性

2003年に発行された国土技術政策総合研究所資料 No.88⁷⁾において、日本全国の既存沖波データを整理して、日本各地の設計波高の概略値を算定している。しかしながら、実設計においては、その施設(設備)に最も大きな影響を与える波向き等の調査を実施し、改めて設計波高の算定をする必要があると言及している。

また、浮体式の滑走路に関する検討⁸⁾では、既存の観測データを基に、極値統計解析によって方位別の有義波高を算出し、波荷重算定に使用している。

以上のように、波荷重に関しては、方位特性を考慮した設計波高を使用しているものの、荷重効果としての評価には至っていない。

1.3 本検討の目的

これらのことを踏まえ、本検討では浮体式洋上風力発電設備を対象とし、まず極値統計解析手法を用いて方位別に波高を算出する手法を述べる。そして、従来の荷重算出手法と比較することで、方位別に設計波高を定めることのメリットを述べる。最後に、終局荷重の荷重効果として十分な信頼性を持つような方位別設計波高の設定手法について述べる。

2. 波高の極値統計解析による方位別波高の導出

本検討では具体的な観測データを用いて、波の方位特性を考慮した極値統計解析を実施した。

2.1 波高データの仕様

以下の仕様に基づき、波高データの統計解析を実施した。得られた観測データを波高・波向別に整理した結果を表1に示す。

- データ長：10年間(いわき沖 NOWPHAS：1986～

1996)

- データ間隔：2時間のデータ
- データ個数：10年×365日/年×12個/日=43,800個
- 極値統計解析方法：合田の方法⁹⁾

2.2 全方位有義波高の極値統計解析

本節では、NOWPHASの波高データを波高別に整理し、極値分布に当てはめることで全方位における有義波高の超過確率分布を得た。本検討で用いた極値分布(Weibull型)の式を以下に示す。

$$P(H_S) = \exp\left\{-\left(\frac{H_S - b}{a}\right)^k\right\} \quad (1)$$

ここで、 P ：超過確率、 H_S ：有義波高、 a ：尺度パラメ



図1 NOWPHASの位置および検討対象地点¹⁰⁾

表1 方位別の波高頻度表

有義波高(m)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	全方位	累積	
8.01 ~ 8.50					2			1									3	3	
7.51 ~ 8.00					2			2									4	7	
7.01 ~ 7.50			2		4	2		3									11	18	
6.51 ~ 7.00		1	1	5	7	1		3	4	1							23	41	
6.01 ~ 6.50		7	6	4	6	4		2	6	4	2						41	82	
5.51 ~ 6.00		8	18	7	21	3	7	6	3								73	155	
5.01 ~ 5.50		14	14	13	24	14	9	21	7								116	271	
4.51 ~ 5.00		13	19	21	48	18	15	19	11	3							167	438	
4.01 ~ 4.50		49	43	47	70	24	25	51	39	1							349	787	
3.51 ~ 4.00	6	48	71	52	105	42	61	89	58	5							531	1,318	
3.01 ~ 3.50	16	129	144	161	209	78	100	141	136	14			3	7	2	5	1,145	2,463	
2.51 ~ 3.00	62	198	337	359	408	185	221	255	282	14			2	14	12	7	32	2,388	4,851
2.01 ~ 2.50	238	452	748	604	755	367	363	477	596	61	2		17	39	15	22	137	4,893	9,744
1.76 ~ 2.00	287	294	541	470	582	356	316	371	514	67	5		18	54	12	18	144	4,049	13,793
1.51 ~ 1.75	398	383	684	631	851	536	394	474	657	67	20		48	55	17	28	178	5,411	19,204
1.26 ~ 1.50	565	532	813	667	907	666	569	561	766	108	23		44	54	21	36	188	6,520	25,724
1.01 ~ 1.25	550	680	863	679	925	707	780	625	844	194	50		40	51	19	36	156	7,199	32,923
0.76 ~ 1.00	255	589	601	447	854	554	771	595	577	113	23		15	16	21	67	5,521	38,444	
0.51 ~ 0.75	29	148	113	108	285	156	254	170	127	14	4		0	1	0	2	12	1,423	39,867
0.26 ~ 0.50	0	4	2	0	5	3	8	3	6	0	0		0	0	0	0	1	32	39,899
合計	2,406	3,549	5,020	4,275	6,070	3,716	3,899	3,867	4,628	663	127	187	286	119	172	915	39,899		
出現頻度 d	0.060	0.089	0.126	0.107	0.152	0.093	0.098	0.097	0.116	0.017	0.003	0.005	0.007	0.003	0.004	0.023	1.000		
再現期間50年の方位別有義波高 [m]	4.6	7.7	8.3	8.4	9.5	8.2	9.1	9.0	7.2	7.0	2.5	3.2	4.2	4.3	3.7	4.0	9.9		

ータ, b : 位置パラメータ, k : 形状パラメータである。

全方位の有義波高の頻度分布に対して、合田の方法により極値統計解析を実施した。各波高階級の中央値が、各階級内のデータの中央値と一致すると仮定し、Weibull 分布において、 $k=0.75, 0.85, 1.0, 1.1, 1.25, 1.5, 2.0$ と置いた 7 種類の分布関数をあてはめ、高波高でのフィッティングが良好なパラメータ a, b, k の値を採用した。なお、 a, b は最小二乗法により推定した。その結果、パラメータは $a=1.284, b=0.371, k=1.25$ を採用した。得られた極値分布と観測値のプロットを図 2 に示す。

次に、再現期間 R 年の全方位有義波高を導出した。式(1)を変換すると、超過確率 P と全方位有義波高 H_S との関係は下式で表される。

$$H_S = a \{-\ln(P)\}^{\frac{1}{k}} + b \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{R \times 365 \times 12}$$

式(2)および図 2 より、例えば再現期間 50 年（超過確率 $1/50/365/12=4.6 \times 10^{-6}$ 、年超過確率 $1/50=0.02$ ）の全方位有義波高 H_S は 9.9m となる。

2.3 方位別有義波高の極値統計解析

本節では、NOWPHAS の波高データを波高・波向別に整理し、極値分布に当てはめることで方位別有義波高の超過確率分布を得た。

ここでは方位別の有義波高の頻度分布に対して、2.2 節と同様にして極値統計解析を実施した。方位 i での波高の超過確率分布は Weibull 分布を用いて以下のように表される。なお、この確率分布は式(1)と異なり、方位 i のもとでの条件付き確率である。

$$P(H_{Si}) = \exp \left\{ - \left(\frac{H_{Si} - b_i}{a_i} \right)^{k_i} \right\} \quad (3)$$

再現期間を R 年とした場合、再現期間 R 年の方位別有義波高 H_{Si} は式(4)により表せる。方位別の超過確率 P_i が条件付き確率であることを踏まえて、方位 i の出現頻度 d_i が考慮されている。

$$H_{Si} = a_i \{-\ln(P_i)\}^{\frac{1}{k_i}} + b_i \quad (4)$$

$$P_i = \frac{1}{R \times 365 \times 12} \times \frac{1}{d_i}$$

例として再現期間 50 年の方位別有義波高を導出し

た。得られた方位別の極値分布を図 2 に示し、算出した再現期間 50 年の方位別有義波高 H_{Si} を図 3 に示す。図 3 より、有義波高は西側（陸側）の方位で低いが、東側（太平洋側）の方位では高く、方位 E で最大となる。また、図 4 に示す各方位の出現頻度より、西側（陸側）の方位では極端に頻度が少ない。

このように、波には方位特性が存在し、方位別の極値波高および出現頻度を考慮することで、設計の合理化が期待できる。

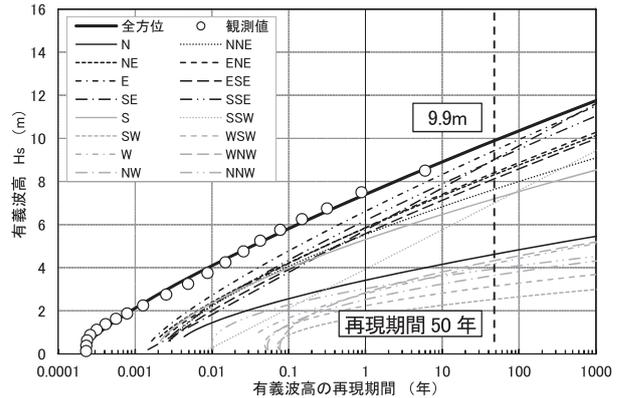


図 2 有義波高（全方位，方位別）の超過確率分布と観測値

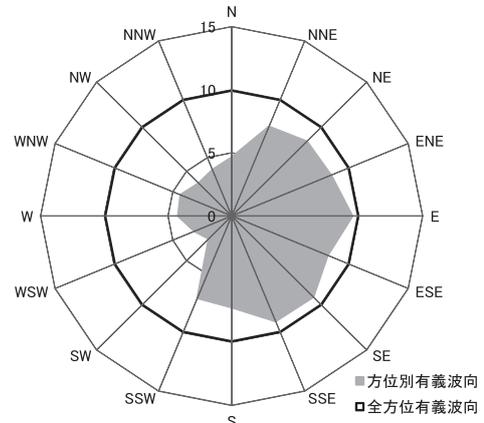


図 3 再現期間 50 年の全方位有義波高 $H_S=9.9$ と方位別有義波高 H_{Si} (m)

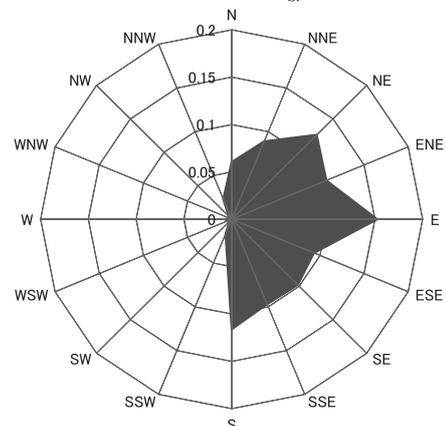


図 4 方位別出現頻度 d_i

2.4 極値統計解析の不確からしさ

極値統計解析手法には不確からしさが存在するため、10年間の観測データの方位別最大値と、極値解析によって算出した再現期間10年の方位別有義波高を図5に比較して示す。表1に示す観測データは方位別の波高階級の生起頻度であり、具体的な最大値は不明であるため、最大の波高階級における上限値をその方位における有義波高の最大値とし、比較を行った。

図5を見ると、観測値と極値統計解析で推定した方位別有義波高の傾向は概ね一致しているものの、その比率(観測値÷推定値)は0.92~1.13と推定値には「不確からしさ」が存在する。特にSEとSSWでは比率がそれぞれ1.10、1.13となっており推定値が過小評価になる傾向がある。このように、極値統計解析には不確からしさが存在する事を念頭に置き、結果を評価する必要はある。

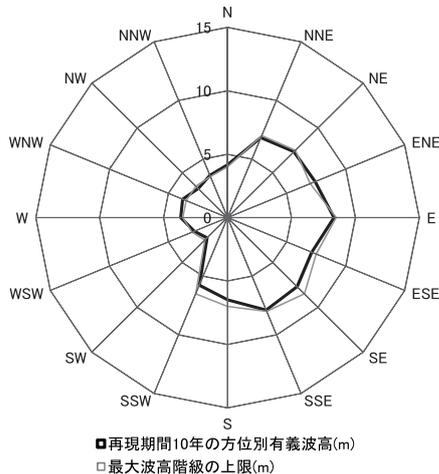


図5 再現期間10年の方位別有義波高と観測データの最大値の比較

3. 荷重効果の評価

前述のように、従来の手法では全方位一律の設計波高を使用し荷重効果の評価することが一般的であるが、本節では方位別に設計波高を設定し、荷重効果の評価することのメリットを述べる。

なお、ここで荷重効果としては、浮体風車のタワー基部に発生する曲げモーメントに着目し、有義波高に後述する浮体の荷重応答倍率を乗じることで簡易的に荷重効果の評価した。

3.1 浮体の荷重応答倍率

浮体式洋上風力発電設備(以下、浮体式風車)の荷重効果は、有義波高など周囲の海象条件に依存するほか、浮体の荷重応答特性にも依存する。本検討では図6に示すV字型浮体に搭載した風車を考える。



図6 当社7MW浮体式風車(イメージ)

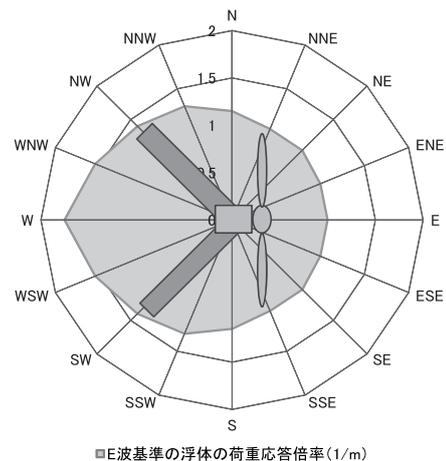


図7 方位別荷重応答倍率のモデル α_i

円柱のように軸対称の浮体においては、各方位から同じ波高の波を受けた時の荷重応答は等しいが、図6に示すV字型浮体は非対称であり、各方位から同じ波高の波を受けた時の荷重応答は方位によって異なる。V字型浮体に対して実施した水槽試験の結果をもとに、各方位の波に対する荷重応答倍率を算出し、単純化した結果を図7に示す。荷重応答倍率は、各方位から同じ波高の波を作用させた時のタワー基部曲げモーメントを、頂点の方向からの波(E波)時の値を基準とした比率で表し、V字の頂点(東)からの波に比べて、反対側(西)からの波に対する荷重応答は約75%大きい。この荷重応答倍率の次元はモーメントの比率を波高で除した L^{-1} であり、以下では波高と荷重が比例関係にあるという想定の下で、有義波高に荷重応答倍率を乗じることで荷重効果を無次元量で評価している。

3.2 全方位有義波高を用いた荷重効果の評価法

本節では従来の手法に習い、全方位有義波高を用いた荷重効果の評価を行った。

再現期間50年の全方位有義波高に方位別の荷重応答倍率 α_i の最大値 α_{max} を乗じることで、設計荷重効果、ここではタワー基部曲げモーメント(対E比率)

を算定し M_d とする。すなわち、以下の式で算出される。

$$M_d = \alpha_{\max} \times H_S, \quad \alpha_{\max} = \max(\alpha_i) \quad (5)$$

全方位有義波高の極値分布は式(1)により表せるので、式(5)を用いると、荷重効果 M の極値分布に変換できる。

$$P = \exp \left\{ - \left(\frac{M/\alpha_{\max} - b}{a} \right)^k \right\} \quad (6)$$

この極値分布を図9に図示する。再現期間50年の場合、設計荷重は $M_d=17.4$ となる。

3.3 方位別有義波高を用いた荷重効果の評価法

図3、図4に示すように、波高・頻度には方位特性が存在し、西側では波高が低く、出現頻度も少ないので、西側の設計波高を東側と同程度に定めることは過剰である。そこで本節では方位別有義波高を用い、設計荷重の低減を試みた。

波高・頻度の方位特性を考慮した検討を実施するに当たり、送電用鉄塔の検討事例¹¹⁾を参考に検討を実施した。この文献では、荷重応答の方位特性がある送電用鉄塔に対して、荷重効果の超過確率を基にして方位別の設計風速を算定している。

本節では、図8に示すように、送電用鉄塔の検討事例¹¹⁾における検討フローにおいて風を波に置き換え、このフローに従い荷重効果の再現期間が50年相当の方位別設計波高を算定した。なお、有義波高の再現期間 R の初期値を50年とした。

- ① 再現期間 $R=50$ 年の方位別有義波高を2.3節の手順に従い算出する。
- ② 算出した方位別有義波高 H_{Si} に荷重応答倍率 α_i を乗じることで、各方位の荷重効果を算定し M_i とする。

$$M_i = \alpha_i \times H_{Si} \quad (7)$$

- ③ 全方位中最大となる荷重効果を、再現期間 $R=50$ 年の方位別有義波高における荷重効果 M_{\max} とする。

$$M_{\max} = \max(M_i) \quad (8)$$

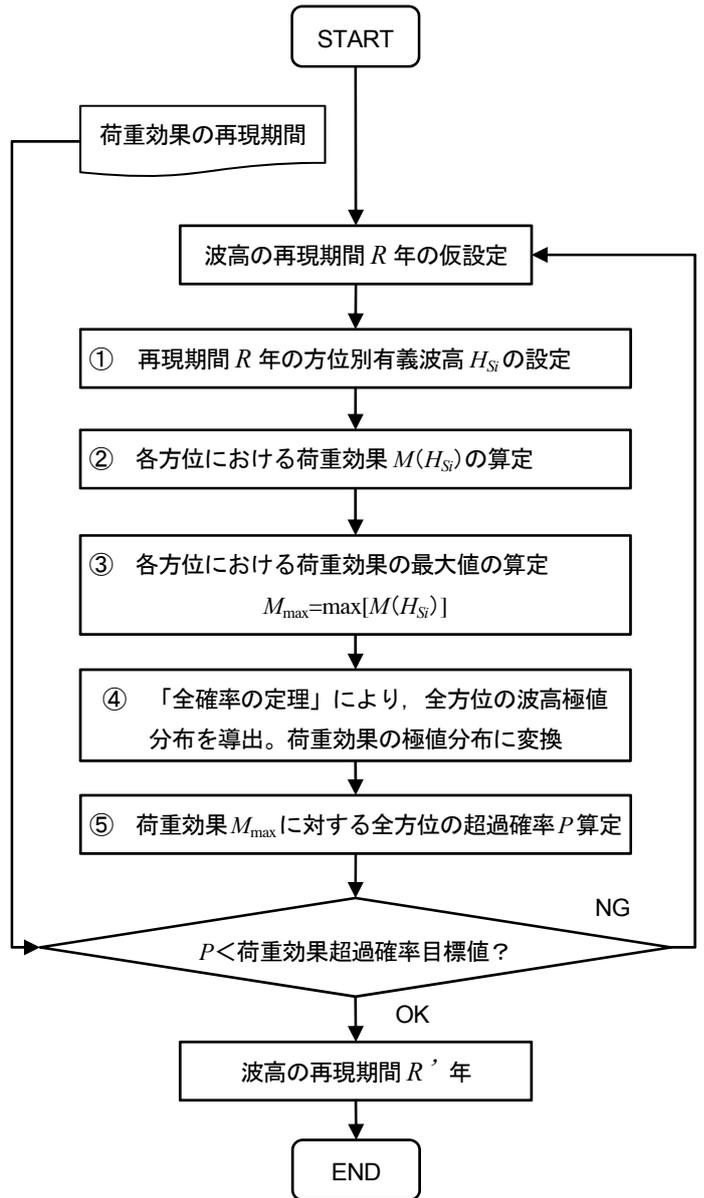


図8 再現期間検討フロー

- ④ 3.2節に示した手法で、全方位の荷重効果の極値分布を算定する。式(3)で表される各方位の波高極値分布が方位 i での条件付き確率であることを踏まえると、全方位の波高極値分布は、「各波向における超過確率の合計に等しい：全確率の定理」により以下の式で表される。

$$P = \sum_i P_i \times d_i = \sum_i \left[\exp \left\{ - \left(\frac{H_{Si} - b_i}{a_i} \right)^{k_i} \right\} \times d_i \right] \quad (9)$$

ここで、有義波高と荷重効果の関係により、上式

を荷重効果 M の極値分布に変換できる。

$$P = \sum_i \left[\exp \left\{ - \left(\frac{M/\alpha_i - b_i}{a_i} \right)^{k_i} \right\} \times d_i \right] \quad (10)$$

- ⑤ 算定した極値分布において、 $M=M_{\max}$ としたとき、左辺 P が荷重効果 M_{\max} に対する全方位の超過確率である。

荷重効果としての再現期間の目標レベルが 50 年の場合、超過確率の目標値は $1/50/365/12=4.6 \times 10^{-6}$ となる。算出した超過確率 P が目標値を下回るまで、波高の再現期間 R を再設定しなおす。その結果、「荷重効果の再現期間が 50 年となる波高の再現期間： R' 」が得られる。

3.4 波の方位特性を考慮した荷重効果の算定

以上の方法を、以下の 3 通りのケースで算定した。

- ・ケース A：設計有義波高として、2.2 節に示す全方位の 9.9m を考慮し、浮体の荷重応答倍率としては 1.0 の一定値として、方位性は考慮しない。
- ・ケース B：設計有義波高として上記 A と同様全方位の 9.9m を考慮するが、浮体の荷重応答倍率には図 7 に示す方位特性を考慮する。
- ・ケース C：設計有義波高には 2.3 節に示す方位特性を考慮し、荷重応答倍率としては図 7 の方位特性を考慮する。

その結果を図 9 に示すが、ケース A では荷重効果 9.9 に対応する波高の再現期間 50 年が荷重効果の再現期間 50 年に一致する。また、浮体の荷重倍率の方位特性を考慮したケース B では荷重効果が 75% 増大するも

の再現期間は変わらない。一方、ケース C では波高の再現期間に対して荷重効果の再現期間は小さく、波高の再現期間 50 年に相当する荷重効果の再現期間は 12 年となり (C-1)、再現期間 50 年の荷重効果 10.6 に相当する、波高の再現期間 R は 186 年となる。(C-2)

これは、荷重効果の再現期間を求める際の非超過確率として、すべての方位の非超過確率を合計するために、再現期待値が最大値に比べて小さい方位では、波高としては大きな再現期間が必要になる事が原因と考えられる。

以上の最終状態 (ケース B および C-2) の荷重効果の方位特性を図 10 に示すが、B では荷重応答倍率が最大となる W において最大値 17.4 を示すのに対し、ケース C-2 では特に西側の荷重効果が減じられて最大となるのは南東 (SE) の 10.6 に減少し、約 4 割低減する結果となる。

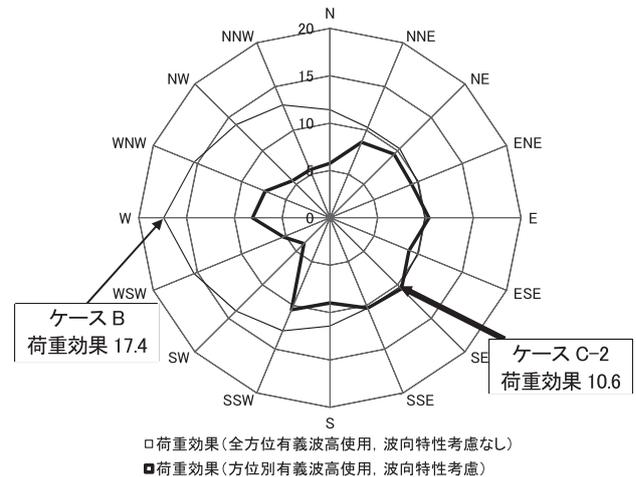


図 10 方位別荷重効果の比較

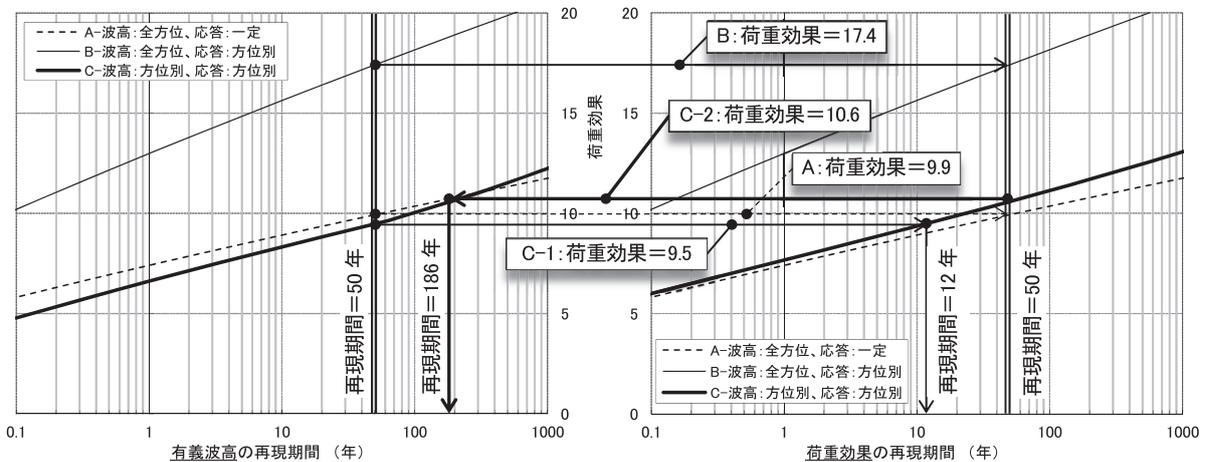


図 9 荷重効果の超過確率分布

4. 方位別設計波高のモデル化

3章で算定した方位別有義波高は、方位によっては再現期間 50 年の全方位有義波高 9.9m を超える。荷重効果としての再現期間のレベルは従来手法に比べ減少しているものの、方位によっては従来手法より大きな設計波高を用いるという点に矛盾が生じている。また、2.4 節にて述べたように極値統計解析によって算出した方位別有義波高の値には、「不確からしさ」が含まれる。これらに対応するため、既往の研究¹²⁾と同様、全方位有義波高 9.9m を方位別有義波高の上限値とした。

以上を考慮して、全方位有義波高 9.9m に対し陸地からの波向に相当する SW~N の方位については波高を 0.6 倍したモデルを設計波高とした。

考案した設計波高モデルと、3.3 節で算定した方位別有義波高に上限値 9.9m を設けたものをあわせて図 11 に示す。設計波高モデルは、荷重効果の再現期間 50 年相当の方位別有義波高+上限値 9.9m の値を上回り、荷重効果で評価した場合の荷重効果としての再現期間のレベルは 200 年を超える。従ってこの波高モデルを当面の設計波高とし、方位性を考慮したモデルとして設計を進める事とした。

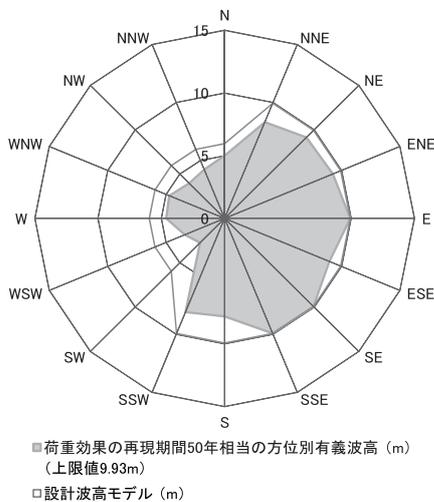


図 11 方位別設計波高モデル

5. 浮体の向きによる安全性への影響

以上の検討は、図 7 に示すように、浮体の頂点を東 (E) に向けた状態を想定している。本章では浮体の向きが変化した場合の、荷重効果の再現期間レベルの変化を検討した。

図 12 における設計波高モデルは変化せず、図 7 に示す方位別荷重応答倍率を回転させて荷重効果の再現期間を評価した結果、図 12 のようになる。

この図に示すように、浮体の頂点が西側 (大陸側)

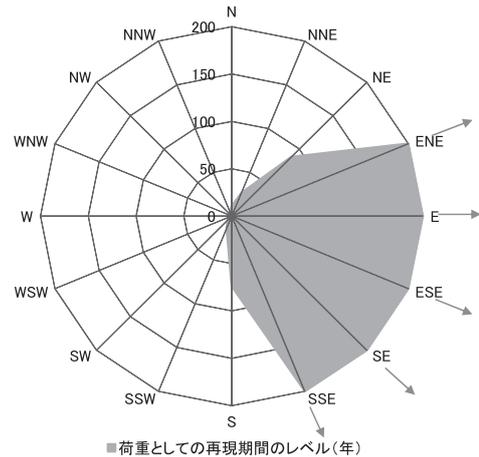


図 12 浮体の頂点方向と荷重としての再現期間のレベルの関係 (200 年以上は省略)

を向いている場合、荷重効果としての再現期間のレベルが 50 年を下回るものの、V 字の頂点が NE~S の範囲にあるときには荷重効果の再現期間は 50 年を超える事が判る。

従って、設計波高が高くなる東側に、応答倍率の小さい浮体の頂点側を向けて設置する設計は、荷重効果の安全性で評価すると合理的な設計であり、比較的広い角度の範囲で安全性を保持できる。

一方で、国土交通省海事局は浮体式洋上風車特有の技術課題として係留関連の問題を挙げ、非常時に係留索が破断しても安全性が確保できるようガイドライン¹¹⁾に記載されているため、上記の結果は係留破断時の回転角度に関するクライテリアとして用いることができる。

6. まとめおよび今後の課題

以上の検討結果をまとめると以下の通りである。

- ・ 福島沖 NOWPHAS の 10 年間のデータから、全方位での再現期間 50 年の有義波高は 9.9m となる。また再現期間 50 年の 16 方位別有義波高を求めると、西 (陸地) からの波の波高は東 (太平洋) から到達する波の波高と比べて約 6 割程度と低く、方位特性は明らかである。
- ・ V 字型浮体式洋上風車は、浮体の頂点からの波向に対しては応答が小さく、反対方向からの波高に対しては応答が大きい、という特徴を有している。
- ・ 従来通り再現期間 50 年の全方位有義波高を用い、波向の方位特性を考慮せずに設計荷重効果の信頼性レベルを評価すると過剰設計であることが分か

った。これは、波高が低く出現頻度が低い西側においても波高の高い東側と同じ設計波高を使用しているためであり、方位別に妥当な設計波高を定め、波向の方位特性を考慮することで、設計荷重効果が低減できることが分かった。

- ・ 波高・頻度の方位特性を考慮すると、再現期間 50 年の荷重応答量に相当する際の有義波高の再現期間は、186 年に相当する事が分かった。これは、送電線鉄塔での検討結果¹²⁾150 年とほぼ同等である。
- ・ 極値統計解析には不確からしさが存在することを考慮し、今回実施した検討において、上限値を再現期間 50 年の全方位有義波高 9.9m と設定し、波高を SW~N の方位については 0.6 倍した波高を設計波高モデルとした。この設計波高モデルは設計荷重効果の信頼性レベルが再現期間 200 年以上でありこの方位別設計波高モデルとして妥当と考える。
- ・ 本検討で提案した検討手法は簡便であり、風車設置場所が異なっても、その場所の波高データを用いて風車の安全性を評価することが出来る。特に波の特性に方位性があると考えられる沿岸部においては、経済性が求められる浮体形式との組み合わせを行うことで、洋上風力発電の推進に寄与できると期待するものである。

また、以下の課題に関しては今後の検討を要し、都度更新を行って評価する必要があるものとする。

- ・ NOWPHAS 観測データ (2 時間毎, 20 分) の離散化による影響度。(時間間隔, 方位, 波高の階級分類など)
- ・ 極値統計解析手法自体が持つ不確かさ。
- ・ 福島沖以外の沖合での観測データによる信頼性確認。
- ・ 浮体の詳細な応答特性の反映。
- ・ 係留, 浮体, 風車の部位に作用する方位特性の確認。
- ・ 風データとの組合せに関する設計方法の合理化。

なお、今回は波について検討を加えたが、浮体風車の荷重には風も寄与するため、今後は風についての条件付き確率の概念も導入して合理化する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり、ご指導頂いた東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻・石原孟教授、ならびに(財)電力中央研究所・石川智巳氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 建築学会：建築物荷重指針 同解説(2004), 2004
- 2) British Standard : Loading for Buildings Part2 Code of practice for wind load, BS 6399-2, 1997
- 3) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2010 年版], 構造工学シリーズ 20, 2011
- 4) 大熊, 中村, 石川, 本郷：風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究—「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の骨子—, 日本風工学会論文集, No.98, 2004
- 5) 本田, 宮崎, 石岡, 坂庭：複雑地形における風環境と耐風設計に関する研究, 第13 回風工学シンポジウム, 1994
- 6) 白石, 松本, 白土, 長田, 泉, 築山：橋梁の強風下における安全性評価に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第30号, 1987
- 7) 高田, 諸星, 平石, 永井, 竹村：我が国沿岸の波浪外力の分布(海象外力検討調査), 国土技術政策総合研究所資料, No.88, 2003
- 8) T.Fukuoka, S.Miyajima, C.Sato, M.Ohta : Assessment of structural safety and functionality of a floating airport model, *Proceedings of International Symposium on Ocean Space Utilization Technology*, 2003
- 9) 社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007
- 10) 永井：全国港湾海洋波浪観測 30 か年統計 (NOWPHAS1970—1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, 2002
- 11) http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000017.html
- 12) 山崎, 石川, 大熊, 田村, 北嶋, 中村, 加藤：送電用鉄塔の耐風設計のための風向別基本風速に関する検討, 日本風工学会論文集, Vol.29, No.3, 2004