

着床式洋上風車のための波高算定式の提案*

Proposal of Wave Height Estimation for a Nearshore Offshore Wind Turbine

嶋田 健司** 石原 孟***

Kenji Shimada Takeshi Ishihara

1. はじめに

現在, IEC61400-3 Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines^[1] (以下, IEC 基準) と土木学会の風力発電設備支持物構造設計指針・同解説^[2] (以下, 土木学会指針) の改訂が進められている。砕波帯内の波高は, 浅水変形と砕波による減衰を伴うが, これらの基準および指針では最高波高の規定とモデルが異なっている。本稿では, 国内で用いられている合田モデルに基づいて, IEC61400-3 の規定に整合する波高評価式を示す。

2. 波高算定式について

2.1 合田モデル

土木学会指針の砕波帯内の波高は, 合田^[3]による一様勾配斜面における不規則波の砕波変形モデル (以下, 合田モデル) に基づいている。合田モデルの特長は, 選択的砕波モデルに砕波帯内の平均水位の変化 (wave setup と wave setdown) と, サーフビートによる水位変動を取り入れている点である。

合田モデルは水深変化を表す微分方程式は数値的に解く必要がある。また波高の確率分布から各種の波高統計値を算出するにあたっては積分計算が必要になる。したがって, 実際の設計の便宜を図って, 近似式が示されている。

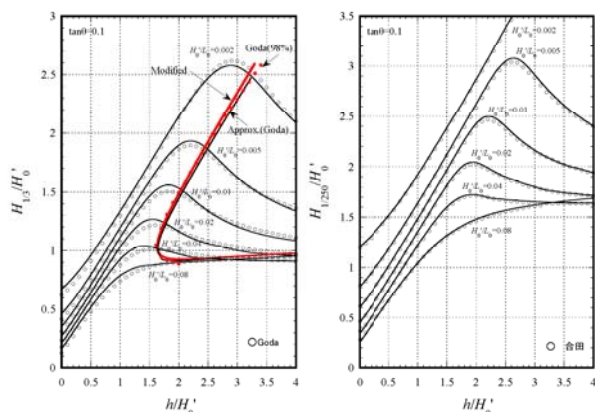
後述する IEC 基準のための波高近似式の係数を求めるために, まず合田モデルの再現について示す。図 1 には合田モデルによる砕波帯内の波高の例を, 海底勾配が $\tan \theta = 1/10$ と $\tan \theta = 1/100$ について有義波高 $H_{1/3}$ と最高波高 $H_{\max}$ について示す。合田モデルから算出される結果は $1/N$ 最大波であり, 最高波高 $H_{\max}$ には $1/250$ 最大波 $H_{1/250}$ を代用している^{[3][4]}。図 2 には砕波帯内の水深変化について文献^[3]と本計算結果を示す。

2.2 初期砕波水深

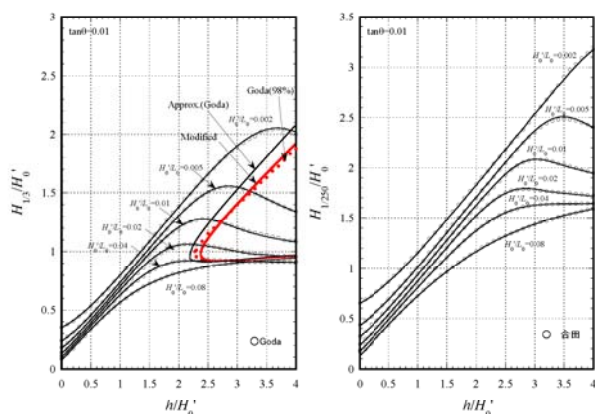
衝撃砕波力を考慮しなければならない水深に関してこれまでのところ定説はない。したがって当座の対策として, 有義波としての初期砕波水深^{[3][4]}より浅い水深域では衝撃砕波力を考慮することが考えら

れる。初期砕波水深は次式によって求められる^[4]。

$$h_{\text{incipient}} = -\frac{L_0}{1.5\pi(1 + K \tan^{4/3} \theta)} \ln \left[1 - \frac{K_S H_0' / L_0}{A} \right] \quad (1)$$

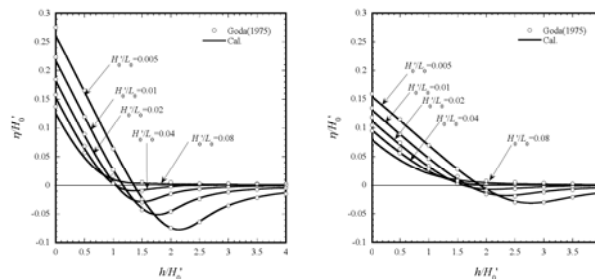


(a) $H_{1/3} (\tan \theta = 1/10)$ (b) $H_{1/250} (\tan \theta = 1/10)$



(c) $H_{1/3} (\tan \theta = 1/100)$ (d) $H_{1/250} (\tan \theta = 1/100)$

図 1 砕波帯内の波浪変形の本計算と文献^[3]の比較



(a) $\tan \theta = 1/10$ (b) $\tan \theta = 1/100$

図 2 砕波帯内の平均水深の本計算と文献^[3]の比較

*平成 27 年 11 月 27 日 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

**会員 清水建設 (株) 技術研究所 〒135-8530 江東区越中島 3-4-17

***会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻・教授

ここに、 H'_0 : 換算沖波波高、 L_0 : 沖波の波長、 K_S : 浅水係数である。 K_S も水深の関数であるため、この式は反復収束計算が必要である^[4]。また、倍精度で計算しないと波形勾配 H'_0/L_0 が大きくなると収束しない点に注意が必要である。

係数 K は当初は $K=15$ が用いられていたが、その後 $K=11$ に修正されている^[5]。ここでは文献^[3]の図に合わせるために $K=15$ とする。係数 A は、初期砕波水深を求める場合には $A=0.11$ とされている。図 1 には $A=0.11$ として計算した結果を示すが、 $\tan \theta = 1/10$ の場合には文献^[3]とよく一致するものの、 $\tan \theta = 1/100$ の場合は水深を過小評価している。したがって、係数 A については調整を行った。同図には $A=0.101$ とした結果を示すが、両方の海底勾配で文献^[3]と概ね一致している。

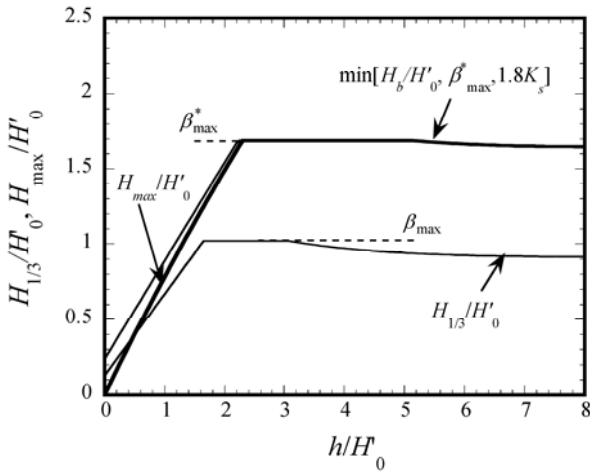


図 3 有義波高と最高波高の近似式 ($H'_0/L_0 = 0.02$, $\tan \theta = 1/100$)

2.3 制約付き波浪法における極値波高

新しい IEC 基準で、極値波高を用いるシミュレーションが必要な DLC1.6 および DLC6.1, DLC6.2 では非線形性を考慮した波の運動を用いることが要求されており、制約付き波浪法を用いることが推奨されている。制約付き波浪法では、極値波高として非線形波をバックグラウンドの不規則波に埋め込むことにより便宜的に非線形性を考慮する^[6]。非線形波としては最も制約が少ない手法として流れ関数法を用いることが一般的であると考えられる。流れ関数法は式(2)で示す砕波限界波高までは再現できるが、合田モデルでは wave setup による平均水位の変化、サーフビートによる水位動揺の効果が含まれているため、その最高波高までは再現できない。

$$H_B = 0.17L_0 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} \left(1 + 11 \tan^{4/3} \theta \right) \right\} \right] \quad (2)$$

したがって、制約付き波浪法を用いる場合には、合田の $H_{\max}$ のピークより水深が浅い部分で、右上がりの直線で近似される部分 ($\beta_0^* H'_0 + \beta_1^* h$) を H_B で置き換えた次式で便宜的に最高波高、したがって極値波高を規定するとよいと思われる。

$$H_{\max} = \min[H_B, \beta_{\max}^* H'_0, 1.8K_S H'_0] \quad (3)$$

2.4 IEC 基準に対応する極値波高の近似式

波高の確率分布がレーリー分布の場合、 $1/N$ 最大波とゼロアップ法で定義した波数 N_0 中の最高波高の有義波高に対する比率は次式で表される^{[3][7]}。

$$\frac{H_{1/N}}{H_{1/3}} = \frac{\sqrt{\ln N} + \frac{N\sqrt{\pi}}{2} \{1 - \operatorname{erf}(\sqrt{\ln N})\}}{1.416} \quad (4)$$

$$\frac{H_{\max(N_0)}}{H_{1/3}} = \frac{\sqrt{\ln N_0} + \frac{0.5772}{2\sqrt{\ln N_0}}}{1.416} \quad (5)$$

ここに erf は次式に示す誤差関数である。

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad (6)$$

表 1 には代表的な N と N_0 についてその結果を示す。

表 1 $1/N$ 最大波と最高波高の有義波高との比率

N	$H_{1/N}/H_{1/3}$	N_0	$H_{\max}(\text{最頻値})/H_{1/3}$
250	1.80	250	1.66
400	1.86	400	1.73
1000	1.98	1000	1.86

ところで、IEC 基準は T 年の極値波高 H_T を次式で定義している。

$$H_T = 1.86H_{sT} \quad (7)$$

ここに H_{sT} はスペクトル有義波高の T 年再現期待値である。スペクトル有義波高と有義波高の間には $H_{1/3} = 0.956H_s$ の関係がある。したがって、 $1.86H_{sT} \cong 1.95H_{1/3}$ であり、 $H_{1/N} \rightarrow H_N (N \rightarrow \infty)$ と表 1 とから、 $H_T \cong H_{1000} \cong H_{1/1000}$ と考えられる。

一方、Appendix C.2 では次式で超過確率 0.1% の波高 $H_{0.1\%}$ (以下本稿では H_{1000} と記す) を示している。

$$H_{1000} = 1.86H_{m0} \quad (8)$$

ここに H_{m0} は有義波高の測定値 (水面変動の標準偏

差の4倍 $=H_{1/3}$)である。左辺は H_{1000} となっているが、 $1.86H_{m0}=1.86H_{1/3}$ であるから、表1からは1000波中の最高波高の最頻値に等しくなる。また、これに相当する $1/N$ 最大波は $N=400$ である。したがって、IEC基準の極値波高は $N=400$ として合田モデルを用いればよいとも考えられる。また、 $N=N_0$ の場合、 $H_{1/N} \geq H_{\max}$ の関係がある^[8]。したがって最高波高は $N=N_0$ とした $1/N$ 最大波で評価すれば安全側になると考えられる。

しかしいずれにしても、文献^[3]では $N=250$ についてしか与えられていない。したがって、以下では $N=400$ および $N=1000$ として計算を行い、その結果をもとにそれぞれの場合の波高近似式の係数を同定した。図4には例として $N=1000$ の同定結果を示す。係数の同定は文献^[3]にならい、波形勾配と海底勾配はそれぞれ、 $0.005 \leq H'_0/L_0 \leq 0.06$ 、 $1/100 \leq \tan\theta \leq 1/10$ の範囲で行った。図5には近似式による波高算定の例を示す。両図中には、 $N=250$ の β_0^* と $\beta_{\max}^*$ を単に $1.98/1.8=1.1$ 倍した結果も示す。この例では、厳密に同定した場合と大差ないように見えるが、図4(a)と図4(c)を見ると波形勾配が大きくなると β_0^* と $\beta_{\max}^*$ にはかなりの差が見られる。

以上の結果から $H_{1/1000}$ として求めたIEC基準に対応する極値波高は式(7)のようになる。

$$H_{\max} \begin{cases} = 1.78K_s H'_{s0} & : h/L_0 \geq 0.2 \\ = \min \left[\beta_0^* H'_{s0} + \beta_1^* h, \beta_{\max}^* H'_{s0}, 1.78K_s H'_{s0} \right] & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_0^* = 0.067 (H'_{s0}/L_0)^{-0.26} \exp(9.3 \tan^{1.1} \theta)$$

$$\beta_1^* = 0.63 \exp(3.8 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max}^* = \max [1.63, 0.62 (H'_{s0}/L_0)^{-0.26} \exp(1.9 \tan \theta)]$$

また、 $H_{1/400}$ として評価した場合は次式となる。

$$H_{\max} \begin{cases} = 1.89K_s H'_{s0} & : h/L_0 \geq 0.2 \\ = \min \left[\beta_0^* H'_{s0} + \beta_1^* h, \beta_{\max}^* H'_{s0}, 1.89K_s H'_{s0} \right] & : h/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_0^* = 0.064 (H'_{s0}/L_0)^{-0.31} \exp(21 \tan^{1.48} \theta)$$

$$\beta_1^* = 0.64 \exp(3.4 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max}^* = \max [1.74, 0.68 (H'_{s0}/L_0)^{-0.25} \exp(1.8 \tan \theta)]$$

ここに $H'_{s0} = K_r K_d H_{s0}$ 、 H_{s0} ：沖波のスペクトル有義波高、 K_r ：屈折係数、 K_d ：回折係数である。また、初期碎波水深の係数 A はIEC基準では $A=0.1056$ となり、式(3)は次式のようにになる。

$$H_{\max} = \min [H_B, \beta_{\max}^* H'_{s0}, 1.78K_s H'_{s0}] \quad (9)$$

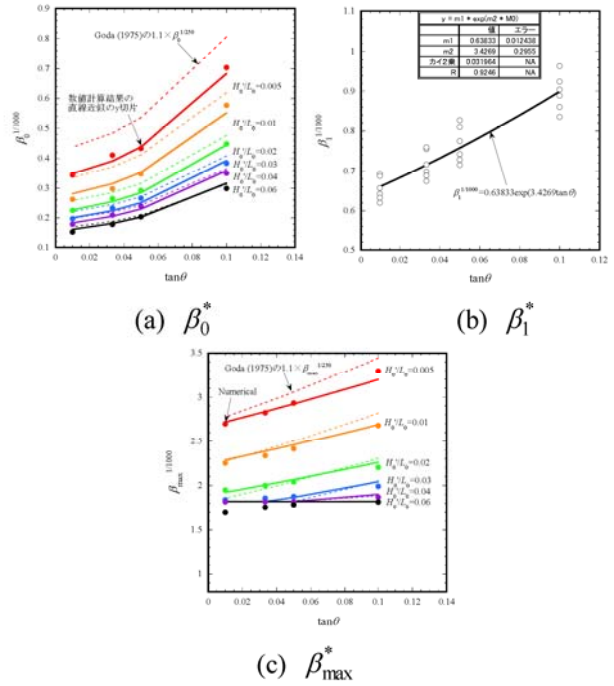
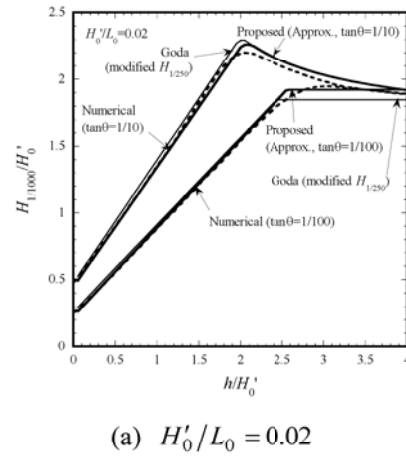
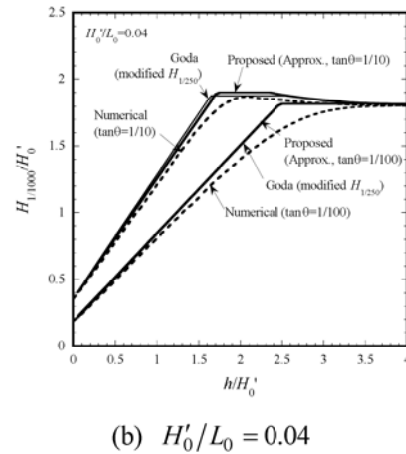


図4 極値波高の近似式の係数 ($N=1000$)



(a) $H'_0/L_0 = 0.02$



(b) $H'_0/L_0 = 0.04$

図5 極値波高の近似式 ($N=1000$)

3. 波高算定式の比較

IEC 基準では Appendix で Battjes & Groenendijk モデル^[9] (以下 BG モデル) が示されている。このモデルは一定勾配の砕波帯内の波高の非超過確率を次式のような混合ワイブル分布によって表して $1/N$ 最大波高 $H_{1/N}$ を求めている。

$$F(H) \equiv \Pr\{H \leq H\} = \begin{cases} F_1(H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H}{H_1}\right)^2\right] & H \leq H_{tr} \\ F_2(H) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H}{H_2}\right)^{3.6}\right] & H \geq H_{tr} \end{cases} \quad (10)$$

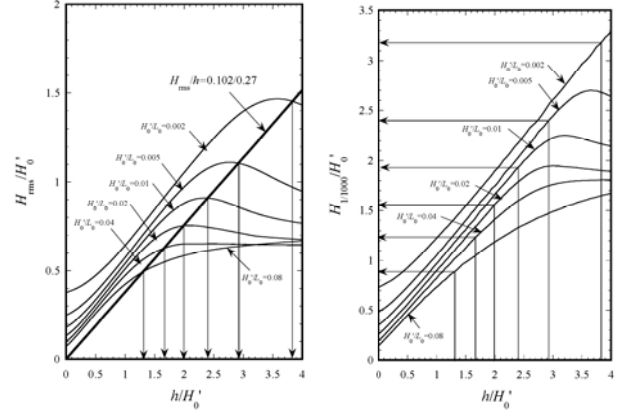
ここに、 H_{tr} : 波高の確率分布が切り替わる遷移波高、 H_1 、 H_2 : スケールパラメータである。分布の指数は H_{tr} より低い波高に対しては 2、 H_{tr} より大きな波高に対しては 3.6 としている。評価対象地点の水深 h 、海底勾配 $\tan \alpha$ 、水面変動の分散 m_0 に対して、遷移波高 H_{tr} と rms 波高 H_{rms} を次式のように近似し、種々の H_{tr}/H_{rms} に対して、極値波高が H_N/H_{rms} の形で数表として与えられている。

$$H_{tr} = (0.35 + 5.8 \tan \alpha)h \quad (11)$$

$$H_{rms} = (2.69 + 3.24 \sqrt{m_0/h})\sqrt{m_0} \quad (12)$$

一方、合田モデルの入力パラメータは水深と換算沖波波高 H'_0 であり、両者は直接比較ができない。比較のためには m_0 と H'_0 の対応付けが必要になる。

図 6 と図 7 には文献^[8]の例題 ($m_0 = 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $h = 0.27 \text{ m}$) についての両者の比較を示す。 m_0 と H'_0 の対応付けは図 6(a) のように行った。すなわち、合田モデルで縦軸を H_{rms}/H'_0 とした曲線群を計算し、式(12)を仮定して H_{rms} を求め、傾き H_{rms}/h の直線とその曲線との交点を求めると、その横軸の値 x_{m_0} が、BG モデルの計算条件に対応する水深換算沖波比となり、換算沖波波高は $H'_0 = h/x_{m_0}$ として求まる。合田モデルは波形勾配を考慮しているの、 $0.002 \leq H'_0/L_0 \leq 0.08$ の範囲について求めた。図 6(b) にはこのようにして求めた合田モデルの $1/1000$ 最大波 $H_{1/1000}$ を示す。図 7 にはプロットで両モデルの $1/N$ 最大波高 $H_{1/N}$ の比較を示す。また同図には実線で BG モデルの超過確率 $1/N$ の波高 H_N も示すが、 $H_{1/N} \rightarrow H_N (N \rightarrow \infty)$ の関係が確認できる。プロット同士を比較すると両モデルの大小関係は、この例題では全体的に、BG モデルは合田モデルに比べ相対的に波高を過小評価する傾向にある。



(a) 水深換算沖波比の求め方 (b) $1/1000$ 最大波高

図 6 最大波の求め方 ($m_0 = 1.1 \times 10^{-3} \text{ m}$, $h = 0.27 \text{ m}$)

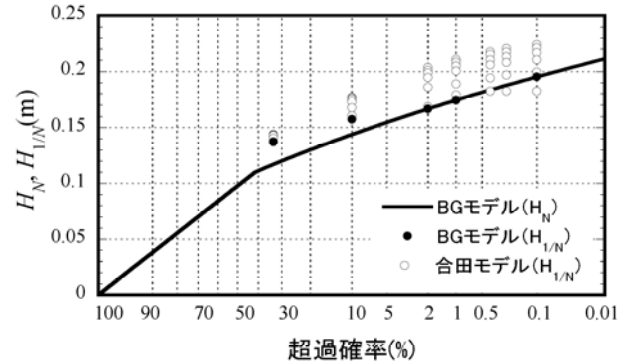


図 7 $1/N$ 最大波高の比較

4. まとめ

合田モデルに基づいて、IEC61400-3 に対応する極値波高の近似式、初期砕波水深を示した。また、Battjes & Groenendijk モデルとの比較方法について示した。本稿に示した式および図表は改良に伴って今後、変更の可能性があることを付記しておく。

参考文献

- [1] IEC61400-3 Wind turbines – Part 3: Design requirements for offshore wind turbines
- [2] 土木学会, 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説
- [3] 合田良実, 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, 59-106, 1975
- [4] 合田良実, 耐波工学, 鹿島出版会
- [5] 合田良実, 工学的応用のための砕波統計量の再整理, 海岸工学論文集, 第 54 巻, 81-85, 2007
- [6] 嶋田健司, 洋上風力発電の環境条件の評価—制約付き波浪法による洋上風車下部構造のための水粒子運動の評価について—, 土木学会平成 26 年度全国大会研究討論会, 研—25 資料, 17-20, 2014
- [7] 堀川清司, 海岸工学, 東京大学出版会
- [8] 元良誠三他, 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂
- [9] Battjes, J.A. and Groenendijk, H.W., Wave height distributions on shallow foreshores, Coastal Engineering 40, 161-182, 2000