

# 風力発電設備支持物に作用する発電時の最大荷重推定手法の提案

Maximum load estimation on a wind turbine support structure during power production

山口 敦<sup>1)</sup> 石原 孟<sup>2)</sup>

Atsushi YAMAGUCHI<sup>1)</sup> Takeshi ISHIHARA<sup>2)</sup>

## ABSTRACT

In this study, dynamic load calculation of a wind turbine was carried out to estimate the maximum load during power production. Based on the results, an empirical formula for the estimation of maximum load during power production was proposed. Proposed formula for the estimation of the moment on the rotor shows good agreement with the simulations. A model to estimate the maximum tower moment was proposed by combining conventional model for the tower moment induced by thrust force and the proposed model of rotator moment. It was shown that proposed model shows good agreement with the simulation. A new convergence criterion for load extrapolation was proposed. By applying the proposed criteria, the coefficient of variation of the estimated design load was reduced from 8.9% to 5.6%. An universal extrapolation coefficient was proposed by subtracting the mean value from both design load and mean of the maximum load and it was shown the proposed coefficient can be applied to any height of the tower.

Key Words: Wind turbine support structure, Maximum load estimation, Empirical formula

## 1. はじめに

風力発電設備支持物の設計においては、IEC61400-1<sup>1)</sup>に示す荷重組み合わせ(荷重ケース)に対して照査を行う必要があり、発電時の荷重は最も重要な荷重ケースの一つである。定格風速より高い風速域において風車は発電出力を一定にするためのピッチ制御を行うが、風車に作用する荷重は制御に依存し、最大風速時に必ずしも最大荷重とはならないという特性があるため、設計時に考慮する発電時最大荷重としては、50年再現期待値を用いることが規定されている。

通常、発電時最大荷重の50年再現期待値を求めるためには統計的外挿(Statistical load extrapolation)という手法が用いられる<sup>1)</sup>。統計的外挿では、まず、各風速別に同一の乱流統計量を持つ異なる乱流風速場を流入風として使用した計算を行い、各風速別の最大荷重の非超過確率を推定する。次に、風速別の最大荷重の非超過確率を、風速出現頻度分布で重みづけることにより、発電時最大荷重の非超過確率を求め、50年再現期待値を求める。しかしながら、この手法は複雑な計算を要するのに加え、結果が安定しないことから、風力発電設備支持物設計の際には、より簡便な手法が必要とされる。IEC61400-1<sup>1)</sup>では、統計的外挿を行わずに簡便に設計荷重を設定する手法として、風速別に異なる乱流風速場を使用して計算した最大荷重の平均値を求め、その最大値に外挿係数として1.5を乗じる手法が認められているが、この外挿係数はタワー基部モーメントの場合、大幅に安全側の結果となることが示されている<sup>2)</sup>。また、石原、石井<sup>2)</sup>は、風車のスラスト係数に基づきタワー基部の平均最大モーメントを推定する手法を提

1) 東京大学大学院工学系研究科総合研究機構 特任講師(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

2) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授

案するとともに、タワー基部に対する外挿係数を経験的に年平均風速と乱れ強度の関数として提案した。しかし、この手法はタワー基部にしか適用することができない。例えば、Moriarty<sup>3)</sup>によると、5MW標準風車モデルを用いて荷重シミュレーションを行い、風車タワー基部、ブレード基部、ローターシャフト等の発電時の荷重特性を検討した結果、風方向・風直角方向のタワー基部における荷重特性と風車ロータに作用する荷重特性が全く異なることを示した。このため、風車タワーにおいても高さ別に異なる外挿係数を用いる必要があると考えられるが、タワーの部位を考慮した外挿係数は提案されていない。

本研究では、銚子沖2.4MW風車を対象とした動解析結果<sup>4)</sup>に基づき、風車発電時に風車タワーに作用する最大モーメントを求める経験式を提案する。また、より安定な統計的外挿を行うための新たな収束条件を提案するとともに、タワー基部以外にも適用可能な新たな外挿係数を提案する。

## 2. タワー各高度に作用する最大モーメントの平均値のモデル化

本研究では、銚子沖洋上風力発電設備(図1)での荷重を用いて著者らは、銚子沖洋上風力発電設備を対象に風車モデルを作成するとともに、動解析を実施し、タワーの各高度において平均モーメントおよび最大モーメントの解析結果が実測とよく一致することを示した<sup>4)</sup>。本研究ではこのシミュレーション結果を用いて発電時最大荷重の推定手法を構築する。シミュレーションの詳細については文献<sup>4)</sup>を参照されたい。

文献<sup>4)</sup>でも示した通り、タワー各高度に作用するモーメントは、主に風車ロータに作用するスラスト力に起因する成分 $M_T$ と、風車ロータに作用するモーメントに起因する成分 $M_M$ に分類することができる。図2に示すように、高さ $z$ の位置のタワーに作用するモーメント $M_{total}$ は、ロータに作用するモーメントに起因する成分 $M_M$ とロータに作用するスラスト力およびタワーに作用する抗力に起因する成分 $M_T$ の和として表すことができる。

$$M_{total} = M_M + M_T \quad (1)$$

また、ロータに作用するスラスト力に起因する成分 $M_T$ とモーメントに起因する成分 $M_M$ はそれぞれ、以下のように表すことができる。

$$M_M = M_R \quad (2)$$

$$M_T = T_R(H - z) \quad (3)$$

ここで、 $M_R$ はロータに作用するモーメントを、 $T_R$ はロータに作用するスラスト力を、 $H$ はハブ高さを、 $z$ はモーメントを計算する高さを表す。ロータに作用するモーメントに起因する成分は高さ方向に変化しないが、スラスト力に起因する成分は高さごとに異なり、タワー基部に近くなるに従い増大する。図3はカットアウト風速時のシミュレーション結

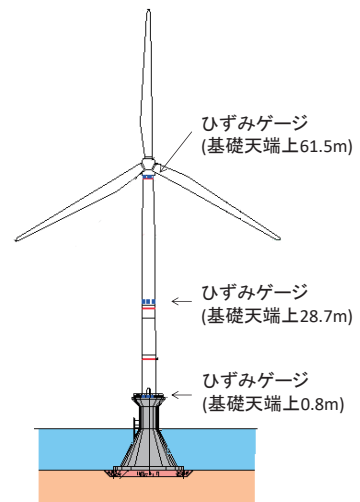


図1 本研究で対象とした風車

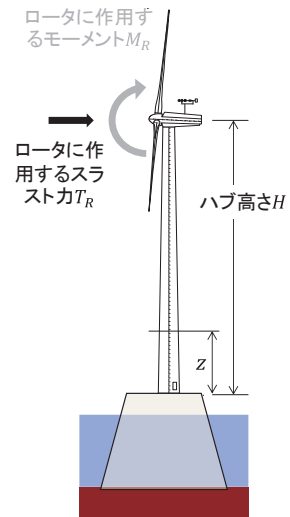


図2 ロータに作用するモーメントとスラスト力

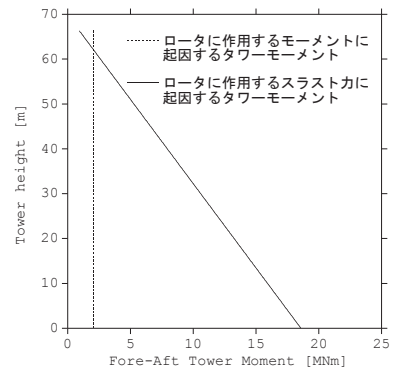


図3 カットアウト風速時のタワー各高度におけるモーメントの成分<sup>4)</sup>

果から、タワー各高度における各成分の寄与を示しているが<sup>3)</sup>、タワー基部ではロータに作用するスラスト力に起因するモーメントが支配的であるのに対し、タワー頂部ではロータに作用するモーメントに起因する成分が支配的であることがわかる。

タワー基部においては、風車ロータに作用するスラスト力がタワーモーメントの主な成分であるため、石原・石井<sup>2)</sup>は風車のスラスト力を用いてタワー基部モーメントを推定する経験式を提案した。しかしながら、タワー頂部においては風車ロータに作用するモーメントに起因する成分が支配的になるため、この手法をそのまま用いることはできない。本節では、風車ロータに作用するモーメントに起因するモーメントの平均成分と変動成分をモデル化することにより、風車タワーに作用する最大モーメントのモデルを新たに提案する。

## 2.1 ロータに作用する最大モーメントのモデル化

風車ロータに作用する平均モーメントは主に風速の鉛直シアに起因する。またモーメントの大きさはロータ直径にも依存する。本研究では、風速 $u$ 、風速の鉛直プロファイルのべき指数 $\alpha$ 、ロータ直径 $D$ の関数としてモデル化し、異なるべき指数、異なる風速でのシミュレーション結果に基づき、(4)式のようにモデル化した。

$$\overline{M}_M [\text{MNm}] = (1.81 \times 10^{-5}) \alpha u D^3 \quad (4)$$

なお、平均モーメントは風速の乱れ強度には依存しない。図4に銚子沖2.4MW風車で異なる風速・べき指数でのシミュレーション結果と本モデルの比較を示すが、提案したモデルは風車のピッチ制御が始まり、発電時最大荷重において重要となる高風速域で実際のロータモーメントをよく再現している。

風車ロータに作用するモーメントの標準偏差 $\sigma_{MM}$ はモーメントのRMS値( $M_{RMS}$ )と(4)で求めた平均値から求める。

$$\sigma_{MM} = \sqrt{(M_{M,RMS})^2 - \overline{M}_M^2} \quad (5)$$

また、モーメントのRMS値 $M_{M,RMS}$ は、ロータ直径、乱流強度 $I_{ref}$ 、風速 $u$ 、ロータ直径の関数として、次式によりモデル化した。

$$M_{M,RMS} [\text{MNm}] = [(1.92 \times 10^{-4})\alpha + 9.05 \times 10^{-5}] 0.5 I_{ref} + 0.03 u^{0.7} D^2 \quad (6)$$

図5に銚子沖2.4MW風車でシミュレーション結果と本モデルとの比較を示すが、本モデルはシミュレーション結果をよく再現していることがわかる。

ピークファクタ $p_{MM}$ は、標準偏差 $\sigma_{MM}$ と変動成分の最大値との比を示す無次元量であり、ピークファクタを用いると、最大モーメント $M_{M,max}$ は以下のように表すことができる。

$$M_{M,max} = \overline{M}_M + p_{MM} \sigma_{MM} \quad (7)$$

本研究では、ピークファクタは風速・乱れ強度・べき指数・ロータ直径にかかわらず、一定の値でモデル化した。このピークファクタによってシミュレーション結果が再現できることがわかる(図6)。

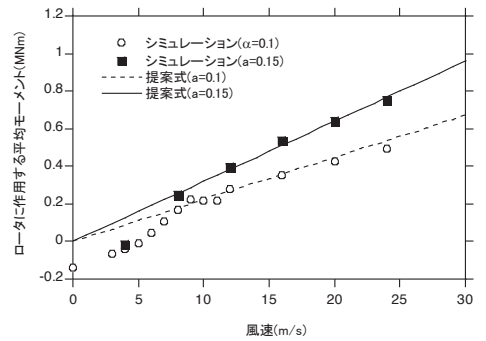


図4 風車ロータに作用する平均モーメント

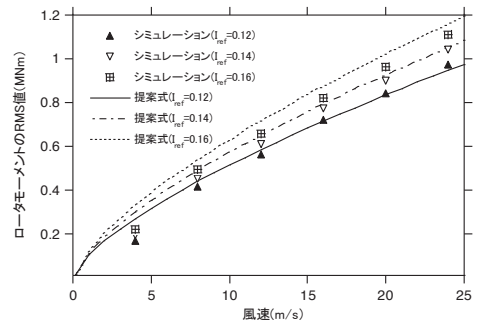


図5 風車ロータに作用するモーメントのRMS値

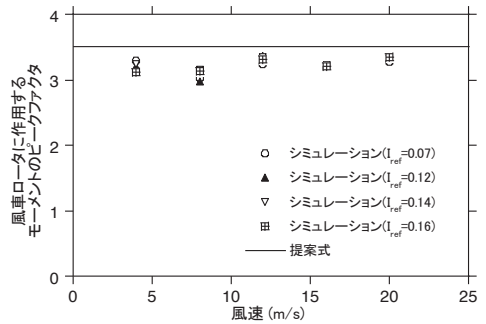


図6 風車ロータに作用するモーメントのピークファクタ

$$p_{MM} = 3.5 \quad (8)$$

以上提案したモデルに基づき、風車ロータに作用する最大モーメントを求め、シミュレーション結果と比較したものを図7に示す。全ての風速・乱れ強度において、提案したモデルは実測値をやや上回っており、安全側の評価となっていることがわかる。

## 2.2 タワーに作用する最大モーメントのモデル化

以上構築したモデルを用いて、タワー各高度の最大モーメントをモデル化した。2で示したように、タワーに作用するモーメントはロータに作用するモーメントに起因する成分と、スラスト力に起因する成分の和として表すことができる。平均値については両者の単純和をとればよいが、変動成分については、両者の変動成分の間には相関はないと仮定できるため、(9)式のようにモデル化した。

$$M_{\max} = \overline{M}_M + \overline{M}_T + \sqrt{(p_{MM}\sigma_{MM})^2 + (p_{MT}\sigma_{MT})^2} \quad (9)$$

ここで、ロータに作用するスラスト力に起因する成分の平均値 $\overline{M}_T$ 、標準偏差 $\sigma_{MT}$ 、ピークファクタ $p_{MT}$ は、石原・石井<sup>2)</sup>で提案されているものを用いた。

このモデルで推定した風速別のタワー各高度の最大モーメントを図8に示す。また、参考のために、石原・石井<sup>2)</sup>によって提案されたモデルによって求めた最大モーメントも併せて記載する。タワー基部では、ロータに作用するモーメントに起因する成分の寄与は小さいため、両者のモデルはほとんど同じ値を示し、どちらのモデルも適用可能であるが、タワー頂部ではロータに作用するモーメントに起因する成分が相対的に大きいため、従来のモデルは適用できず、本研究によって提案したモデルによって予測誤差が小さくなっていることがわかる。なお、定格風速付近でモーメントが極大を示すのは定格風速付近でブレードのピッチ制御が始まるためである。

以上のように求めた最大モーメントは、あくまで最大モーメントの平均値であり、設計荷重を推定するためには、統計的外挿により、50年再現期待値を求める必要がある。この点については次節で詳細に説明する。

## 3. 発電時最大荷重の50年再現期待値の推定

1節でも述べたように、風車発電時の設計荷重は50年再現期待値であり、統計的外挿を行う必要がある。統計的外挿を行う際には、使用する乱流シードによって結果が大きく異なるという問題点が指摘されているのに加え、従来提案され

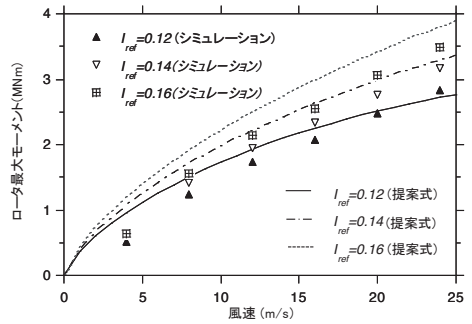


図7 風車ロータに作用する最大モーメント

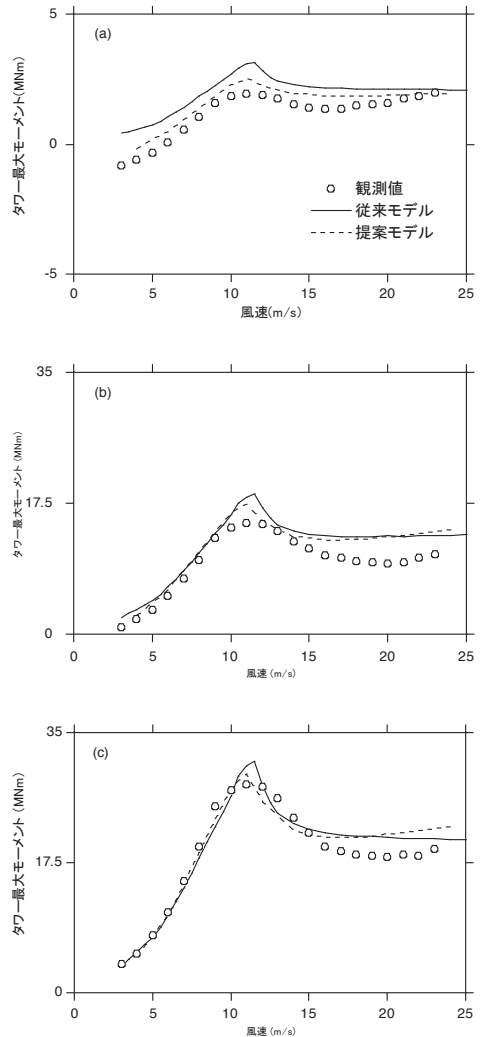


図8 タワー各部位における風速別最大モーメント  
(a)z=61.5m, (b) z=28.7m, (c) z=0.8m

た簡易手法はタワー基部にしか適用できないという問題点があった。そこで本節では、統計的外挿のための新しい収束条件を提案し、タワー頂上にも適用可能な簡易手法を提案する。

### 3.1 統計的外挿のための収束条件の提案

統計的外挿では、まず風速別に最低 35 個の乱流シードを用いた計算を行い、それぞれの最大値を昇順に並べ、3 パラメータワイブル分布をフィッティングさせ、非超過確率分布を推定する。次に、求めた風速別の非超過確率に風速の出現頻度の重みをかけ、全風速域での非超過確率分布を推定し、50 年再現期待値を推定する。図 9(a)は銚子沖 2.4MW 風車を対象に平均風速 15m/s での 35 種類の異なる乱流シードを用いた計算結果を昇順に並べ、3 パラメータワイブル分布をフィッティングさせた例である。35 ケースの最大値付近で、推定した分布が大きく外れていることがわかる。このような場合、使用する乱流シードセットによるばらつきが大きく、結果的に設計値である 50 年再現期待値のばらつきも大きくなる。図 10 にこの場合の 50 年再現期待値の変動係数を示すが、9%近い値となっており、IEC61400-1 で採用されている荷重の部分安全係数の設定根拠である、変動係数 5%を大きく超えている。

本研究では、3 パラメータワイブル分布をフィッティングする際に付加的な収束条件として、(10)式に示す条件を提案した。

$$\epsilon = \frac{\frac{\epsilon}{s_{ave}} < 0.01}{\sqrt{\sum_{j=1}^N \frac{(s_{sim-j} - s_{fit-j})^2}{N}}} \quad (10)$$

ここで、 $s_{ave}$ は最大モーメントの平均値、 $s_{sim-j}$ はシミュレーションによって求めた最大モーメントを昇順に並べた際の  $j$  番目のデータ、 $s_{fit-j}$  は対応するフィッティング結果である。この条件を満足しない場合には、条件が満足されるまで乱流シード数を増やすこととする。

この条件を満足するように乱流シード数を増やした結果を図 9(b)に示す。最大値付近でもフィッティング結果とシミュレーション結果が近くなっていることがわかる。この条件を満足するように異なる乱流シードを使った計算した 50 年再現期待値のばらつきを図 10 に示す。変動係数は 5.6%にまでに低減されていることがわかる。

### 3.2 新しい外挿係数の提案

1 節で述べたように、従来提案された外挿係数  $\alpha$  はタワー頂上に適用することができない。図 11 は従来の外挿係数をタワー基部と頂上に適用した結果を示す。タワー頂上では、シミュレーションから求めた 50 年再現期待値と最大値の平均値の比を外挿係数が大きく下回っていることがわかる。そこで本研究では、50 年再現期待値と最大値の平均値からそれぞれ平均値を引いた値の比として新しい外挿係数  $P_{ext}$  を式(11)に示すように提案した。

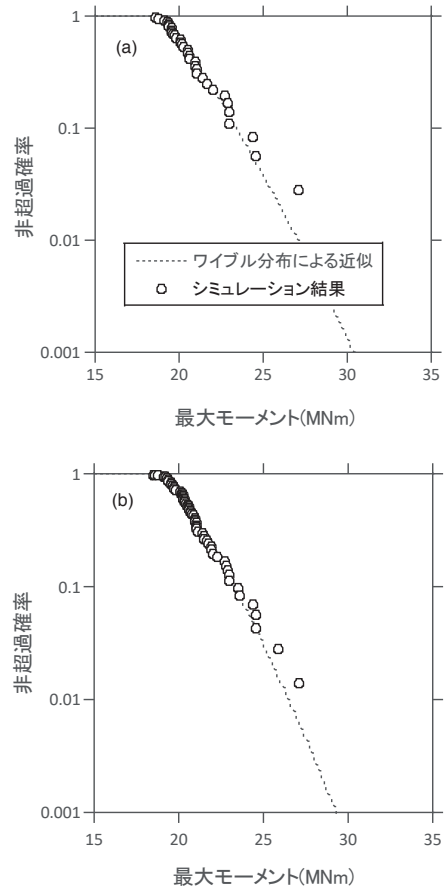


図9 平均風速 15m/s 時にタワー基礎に作用するモーメントの非超過確率(a)従来の収束条件、(b)提案した収束条件

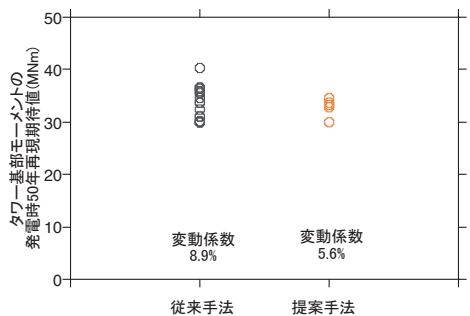


図 10 50 年再現期待値のばらつき

$$P_{ext} = \frac{M_{50} - \bar{M}}{\bar{M}_{max} - \bar{M}} \quad (11)$$

ここで、 $M_{50}$ は50年再現期待値、 $\bar{M}_{max}$ は最大値の平均値、 $\bar{M}$ は平均値である。このようにして定義した外挿係数と数値シミュレーション結果の比較を図12に示す。外挿係数はタワーの部位によらず、また乱流強度や平均風速によらず、ほぼ一定の値である、約1.5を示すことがわかる。

#### 4.まとめ

本研究では、銚子沖洋上風力発電設備を対象として、荷重シミュレーションを行い、発電時最大荷重を推定するとともに、タワーの各部位に適用可能な発電時最大荷重を推定する経験式を提案した。以下の結論が得られた。

- 1) 風車ロータに作用するモーメントの平均値と最大値を推定する経験式を提案した。提案した経験式は、異なるべき指数、風速、乱れ強度、風車ロータサイズに適用可能であり、数値シミュレーション結果とよく一致した。
- 2) 風車ロータに作用するモーメントの経験式と、従来のスラスト力に起因するモーメントの経験式を組み合わせることにより、タワー各部位に作用する最大モーメントを推定するモデルを提案した。提案したモデルは数値シミュレーション結果とよく一致した。
- 3) 統計的外挿のための新しい収束条件を提案した。提案した条件によって求めた50年再現期待値の変動係数は従来8.9%から5.6%にまで低減された。
- 4) 50年再現期待値と最大値の平均値から平均値を引くことにより、より一般的な外挿係数を提案した。提案した外挿係数は平均風速や、乱れ強度、タワー部位には依存しない。

#### 謝辞

本研究は、NEDO 新エネルギー・産業技術総合開発機構の委託研究の一部として実施したものである。また、風車観測に当たっては、東京電力(株)および鹿島建設(株)に協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) IEC61400-1 Edition 3, Wind turbines - Part 1: Design requirements, 2005.
- 2) 石原孟, 石井秀和, 風車タワーに作用する発電時最大風荷重の予測, 第21回風工学シンポジウム論文集, 375-380, 2010.
- 3) P. Moriarty, Database for Validation of Design Load Extrapolation Techniques, *Wind Energy*, 11, 559-576, 2008.
- 4) 山口敦, プラサランティ ウィディヤシ サリ, 石原孟: 風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp. 133-138, 2014.

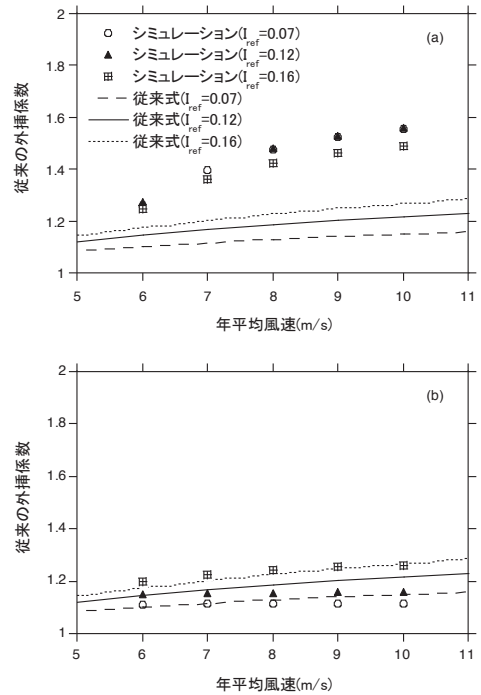


図 11 従来の外挿係数と従来の経験式(a)タワー頂部, (b)タワー基部

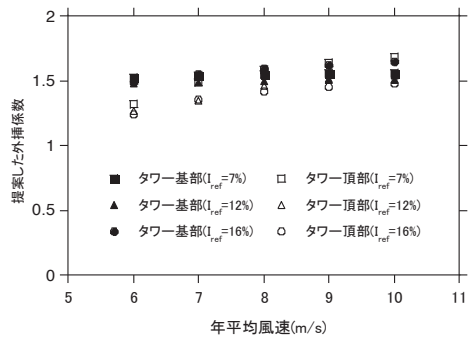


図 12 提案した外挿係数