

タワー筒身のひずみ計測による高力ボルトの異常検知に関する研究*

A study of anomaly detection of high tension bolts by strain measurements of tower shell

菊地由佳**

守屋邦昭***

石原孟**

Yuka KIKUCHI

Kuniaki MORIYA

Takeshi ISHIHARA

1. はじめに

2013年3月12日、太鼓山風力発電所3号機の風車タワー頂部において、フランジ直下のタワー筒身の疲労破壊による風車ナセル落下事故が発生した。事故調査において、疲労破壊の原因は、タワー頂部フランジに設置されているタワートップボルトの損傷によるタワー筒身への応力集中であることが明らかになった。倒壊した事故機の損傷ボルト周囲のボルトの軸力は、初期導入軸力の0%~70%であった。

再発を防止するために、タワートップの高力ボルトの常時監視が考えられるが、従来のひずみ埋め込みボルトの導入は経済性及び耐久性の問題がある。そこで、筆者らは、停止時の実風車のタワートップボルト直下におけるひずみ計測による異常検知手法を提案した²⁾。しかし、異常検知のために風車を停止させることは発電の損失をもたらすため、発電時におけるボルトの異常検知手法の開発が望まれる。

発電時のひずみを異常検知に用いる場合、風速に応じてスラスト荷重が変化するとともに、風向に応じてロータ位置が変化することにより、ボルトに作用する荷重が変化し、異常を判定するひずみの閾値が変動する。スラスト荷重およびロータ位置とひずみとの関係を明らかにし、荷重を考慮した異常検知手法を提案する必要がある。しかし、実機において発電時にボルトの損傷を模擬するためのボルト導入軸力を低減させることは安全上困難である。

そこで、本研究では、1/4縮尺タワー模型による室内実験および数値タワーモデルを用いたFEM解析を実施し、発電時のタワートップボルトの異常検知手法を開発する。まず、FEMの解析結果と室内実験の測定結果と比較することにより数値モデルの妥当性を検証する。次に、数値タワーモデルを用いてスラスト荷重およびロータ位置を変化させた時のタワー筒身のひずみを評価する。最後に、得られたひずみデータに機械学習の手法を適用し、スラスト荷重およびロータ位置の変化を考慮した異常検知のための閾値の評価手法を提案する。

2. 室内実験と数値タワーモデルの概要

2.1 室内実験模型の概要

数値タワーモデルを検証するため、本研究では、縮尺1/4タワー模型を製作し、室内模型によるタワートップのひずみ計測を実施した。図1に室内試験装置の外観を示す。図中の左側に設置されたウェイトはロータ・ナセル部の重量を再現している。ナセル部とタワー一部はタワートップフランジにて20本のボルトで連結されている。ボルトの規定トルクは11.60kNであり、本論文では、規定トルクが入っている状態を健全時、トルクが0となっている状態を損傷時と定義した。ひずみゲージは20本のボルト直下5mmの位置にそれぞれ設置した。図2にボルト番号を示す。ウェイトの正反対がNo.11ボルトである。右側に設置されたアクチュエータによって水平荷重を加える事で、実機における最大スラスト荷重まで再現する事が可能である。

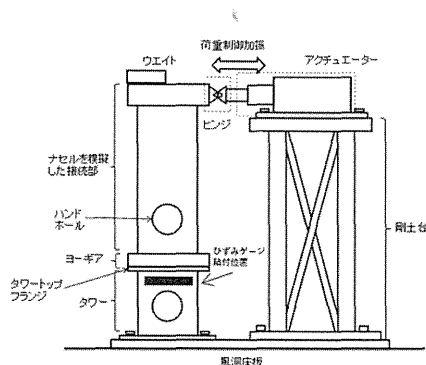


図1 縮尺1/4のタワー模型の概観

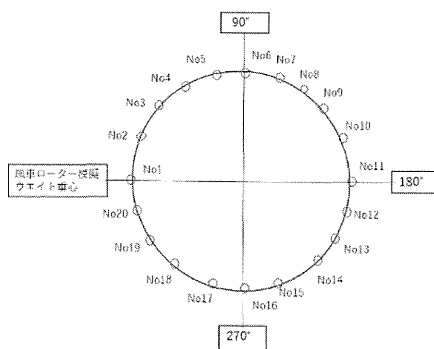


図2 タワー模型におけるボルト位置

* 平成28年12月1日第38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社会基盤学専攻

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

*** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻

2.2 数値タワーモデルの構築

ボルト直下のひずみを FEM 解析によって評価するため、室内実験モデルの数値タワーモデルを作成した。FEM 解析には ABAQUS を用いた。作成した解析モデルを図 3 と図 4 に示す。タワー全周をトップフランジ下部はソリッド要素を用い、ボルトはビーム要素を用いて再現した。フランジ側面は自由端とし、ボルト対称軸断面上には対称条件を設定した。ひずみゲージの位置に対応した要素分割とし、ゲージの周辺要素は同じサイズと形状の要素とし、不均一な要素分割が計算結果に影響を与えないようにした。

実験モデルを製造する際には、トップフランジ面とヨーベアリング面に各々 0.1mm の不整が許容されている。そこで、不整の影響を考慮するため、図 5 に示すように、No.11 ボルト周辺のタワー内側、外側、全面に許容値の 10% である 0.01mm の不整を仮定した 3 つのモデルを作成した。

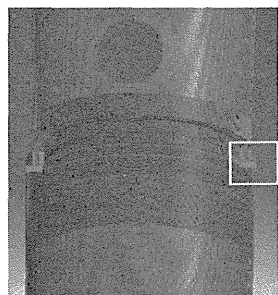


図 3 トップフランジ下の部分の要素分割

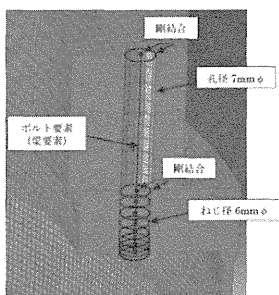
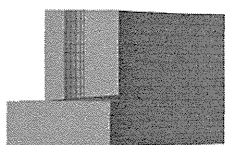
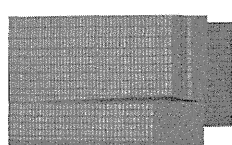


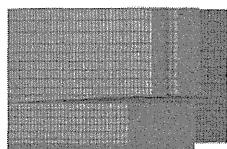
図 4 ボルト部分の解析モデル



(a) 内側不整



(b) 外側不整



(c) 貫通不整

図 5 フランジ接合部の不整モデル (200 倍拡大)

2.3 数値タワーモデルの検証

水平荷重作用時の解析結果の妥当性を検証するために、まず全ボルト健全時に水平荷重を作用させ、無荷重時からのひずみ変化量を評価した。各水平荷重作用時と無荷重時とのひずみ変化量の解析値と観測値を図 6 に示す。予測は実験を概ね再現しているが、値が若干過小評価されている。これは、ひずみゲージを

室内試験機に貼り付ける際にタワー内面を研磨したことにより、板厚が約 0.1mm 程度減少した影響によるものと考えられる。

次に、ボルト損傷時の解析の妥当性を検証するために、No.11 ボルト損傷時と全ボルト健全時とのひずみ変化量を評価した。不整の異なるフランジモデルについて、ボルト損傷時と健全時とのひずみ値変化量の予測値と測定値を図 7 に示す。不整を考慮しない場合、予測値は測定値を約 50% 過小評価した。一方、不整を考慮した場合は精度が向上し、全面に不整が生じている場合に最も予測精度が高いことが分かる。

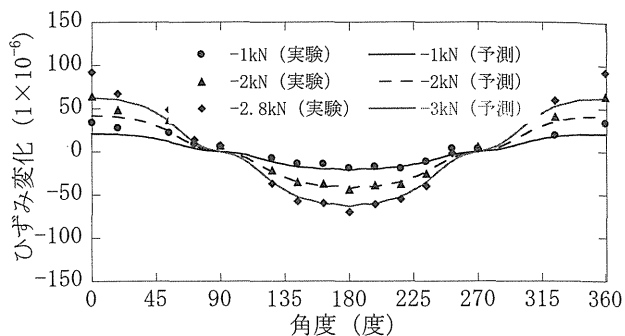


図 6 水平荷重作用時ひずみ変化量の予測値と測定値

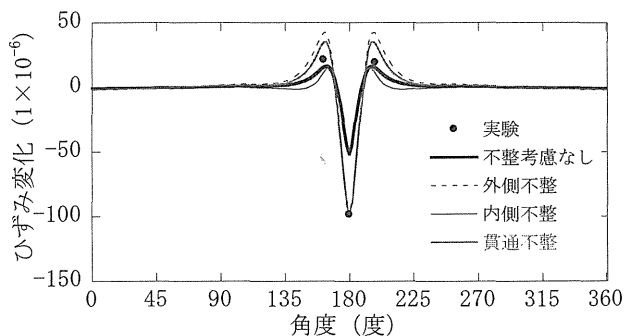


図 7 ボルト損傷時のひずみ変化量の予測値と測定値

3. 数値タワーモデルによるひずみ変化量の評価

3.1 スラスト荷重とひずみ変化量との関係

本研究では、水平荷重 (スラスト荷重) F が作用している時、アクチュエータから角度 α に位置する損傷ボルト直下のひずみを ε' とし、同荷重が作用している同位置での健全時のひずみを ε とした時、 ε' と ε の差をひずみ変化量 $\Delta\varepsilon$ と定義し、次式により表す。

$$\Delta\varepsilon(F, \alpha) = \varepsilon'(F, \alpha) - \varepsilon(F, \alpha) \quad (1)$$

水平荷重とひずみ変化量の線形性を確認するために、実機で定格風速 14m/s 時にあたる -2kN の静的荷重下および平均成分 -2kN、変動成分 0.3kN の変動荷重下における No.11 ボルト損傷時のひずみ変化量を評価した。静的荷重作用時のひずみ値と変動荷重を作用させ

た際のひずみ値の平均値は一致し、線形性が確認されたため、以降、静的荷重により検討を行う。

水平荷重とひずみ変化量との関係を明らかにするため、表1に示す解析ケースを設定し、ボルト損傷時と全ボルト健全時との変化量を評価した。図8にはNo.11ボルト損傷時と全ボルト健全時とのひずみ変化量の円周方向変化を示す。No.11ボルト直下のひずみ変化量が最大になっていることが分かる。図9には損傷ボルトの直下および左右の2本のボルトにおける水平荷重とひずみ変化量との関係を示す。ロータ・ナセル自重に起因するモーメントによって、No.11ボルト位置に引張力が働く。従って、スラスト荷重が増加するにつれ、モーメントが減少するため、引張力が低下し、ひずみの変化量も減少していることが分かる。

表1 水平荷重作用時の解析条件

解析ケース	ボルト状態	水平荷重
Case1-1	正常時	0kN
Case1-2		-1kN
Case1-3		-2kN
Case1-4		-3kN
Case2-1	No.11 損傷時	0kN
Case2-2		-1kN
Case2-3		-2kN
Case2-4		-3kN

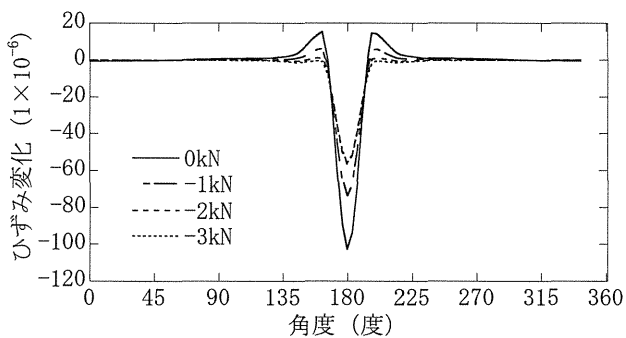


図8 各水平荷重時のひずみ変化量の円周方向変化

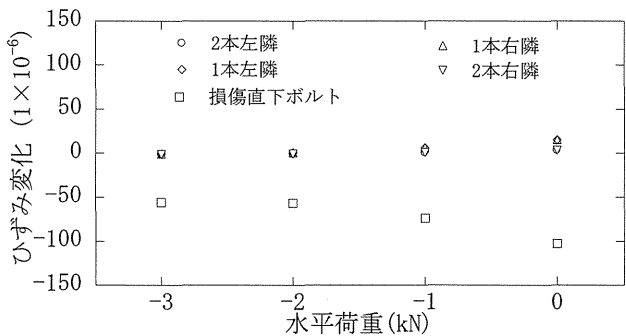


図9 水平荷重と各ボルトのひずみ変化量との関係

3.2 ロータ方位とひずみ変化量との関係

ロータ方位とひずみ変化量との関係を明らかにするため、表2に示す解析条件を設定し、1本ボルト損傷時と全ボルト健全時とのひずみ変化量を評価した。室内試験機はロータ位置を変えることができないため、ロータ位置を変化させる代わりに損傷ボルト位置を変化させることにより、ロータと損傷ボルトとの相対角度 α を再現した。No.6ボルト損傷時は α が90度、No.1ボルト損傷時は α が0度に相当する。

図10には各ロータ位置におけるボルト損傷時と健全時とのひずみ変化量を示す。また図11には損傷ボルト直下および左右2本のボルトにおけるロータ方位とひずみ変化量との関係を示す。ロータと損傷ボルトのなす角度 α が180°の場合に対し、90°、0°の場合のひずみ変化量は小さくなる。これは、ロータ位置と損傷ボルトとの関係から、ロータ側では-90度の範囲は圧縮力を受けるためである。

表2 ボルト損傷時の解析条件

解析ケース	α	水平荷重
Case3-1	90度 (No.6 損傷時)	0kN
Case3-2	0度 (No.1 損傷時)	

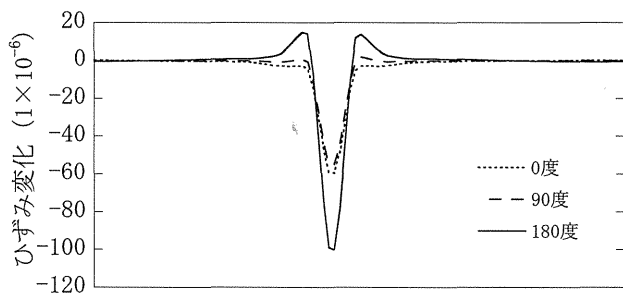


図10 ロータ位置とひずみ変化量の関係

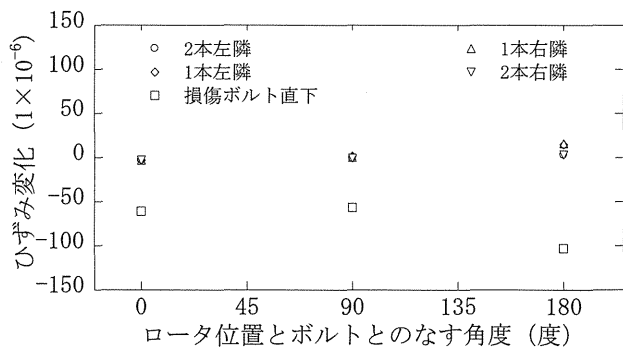


図11 角度 α と各ボルトのひずみ変化量との関係

4. 損傷検知アルゴリズムの構築

第3章で各水平荷重作用時、各ロータ位置においてひずみ変化量が変わることが分かった。本章では、機械学習の理論を用いて、水平荷重・ロータ位置とひず

み変化量との相関関係を考慮することにより閾値を評価する手法を提案する。

異常検知において、観測値 x' の異常度は、観測値 x のデータセット D から得られた予測分布を $p(x|D)$ とするとき、負の対数尤度として次のように評価される。

$$a(x') = -\ln p(x'|D) \quad (2)$$

本研究では、まず、ひずみ変化量、水平荷重、ロータ方位の3次元の観測値を N 個取得し、観測値のセット D を作成する。

$$D = \{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(N)}\} \quad (3)$$

ここで、ひずみ変化量 x は式(1)を用いて評価する。次に、データの標本平均($\hat{\mu}$)及び標本共分散行列($\hat{\Sigma}$)を次式により評価する。

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^{(i)} \quad (4)$$

$$\hat{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x^{(i)} - \hat{\mu})(x^{(i)} - \hat{\mu})^T \quad (5)$$

このとき、(2)式に示す観測値の異常度は次式のように評価される。

$$a(x') = (x' - \hat{\mu})^T \hat{\Sigma}^{-1} (x' - \hat{\mu}) \quad (6)$$

次に、異常判定の閾値を評価する。本研究では、機械学習において最も古典的なホテリング T^2 理論を適用する。ホテリング T^2 理論では、 M 次元正規分布からの N 個の独立標本に基づき、標本平均および標本共分散を定義する。 N からの独立標本を新たに観測したとき、 $N \gg M$ の場合は、 $a(x')$ は近似的に自由度 M 、スケール因子 1 のカイ二乗分布に従う。本研究では 1% の水準を閾値とし、次式により評価した。

$$1 - \alpha = \int_0^{a_0} du \chi^2(u|M, 1) \quad (7)$$

ここで、 M はひずみ変化量、水平荷重、ロータ方位であり、3 となる。

第3章で得られた各水平荷重とロータ位置におけるひずみ変化量を観測データセットとし、式(4)、式(5)を用いて標本平均および標本共分散行列を評価した。それらを用いて、再度各観測点の異常度を、式(6)を用いて計算した結果を図 11 に示す。図中の点線は式(7)で評価したカイ二乗分布による 1% 水準の閾値を示す。評価した閾値を用いて、損傷ボルトは正しく評価されていることが分かる。

以上により、発電時にひずみ観測をし、観測データセットを学習データに用いることにより、水平荷重とボルト位置の違いを考慮してボルト損傷を検知できることを示した。

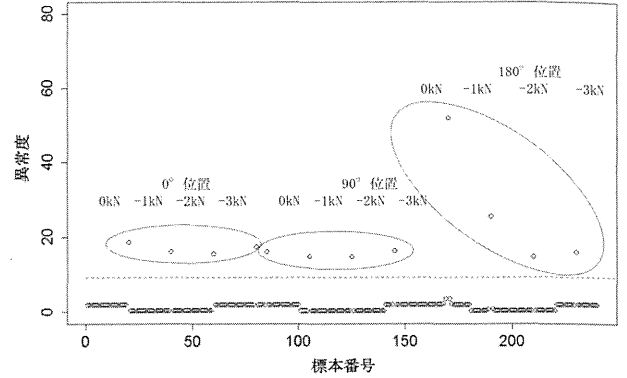


図 12 水平荷重およびロータ位置と異常度との関係

5. まとめ

本研究では、室内試験および数値タワーモデルを用いて、発電時におけるタワートップボルトの異常検出方法を開発し、以下の結論を得た。

- 1) タワートップフランジの初期不整とひずみゲージ貼り付け時のタワー内面の研磨による影響を考慮することにより、数値タワーモデルによる解析値は室内模型の測定値とよく一致した。
- 2) 水平荷重が大きくなるに従い、ひずみ変化量は小さくなる。また、ロータ位置と損傷ボルト位置のなす角度が小さくなるに従い、ひずみ変化量は小さくなるという特性を明らかにした。
- 3) 観測値にホテリング T^2 理論に適用することにより、水平荷重およびロータ方位によるひずみ変化量の違いを考慮したボルトの異常検出の手法を提案し、その有効性を数値タワーモデルにより検証した。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・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る。

参考文献

- 1) 京都府、京都府太鼓山風力発電所 3 号機ナセル落下事故報告書, 2013.
- 2) 菊地由佳, 石原孟, ひずみ計測によるタワートップボルトの異常検出に関する研究, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.209-212, 2015.
- 3) 石原孟, 難波治之, 太鼓山風力発電所における風車ナセルとタワートップフランジ接合部の FEM 解析に関する研究, 第 37 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.213-216, 2015.
- 4) 井出剛, 入門機械学習による異常検知, 2015.