

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*

A study of anomaly detection of tower top bolts by strain measurement

菊地由佳**

Yuka KIKUCHI

石原孟**

Takeshi ISHIHARA

1. 序論

2013年3月12日、太鼓山風力発電所3号機の風車支持物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。実際に、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。

太鼓山風力発電所のタワートップボルトの点検では、合いマークによる目視点検および任意に選定された3~6本のボルトに対するトルク確認が実施されていたが、事故前の点検では異常は発見されなかった。短期で疲労破壊に至った今回の事故を受けて、早期のタワートップボルトの異常検出および軸力評価が求められる。

従来のタワートップボルトの軸力の評価手法は、超音波ボルト軸力計を用いる軸力計測およびトルクレンチを用いたトルク計測による軸力評価が一般的であるが、現地計測が必要となり早期の異常検出は難しい。また、ひずみゲージ埋込ボルトを用いた軸ひずみ計測による軸力評価が可能だが、全てのボルトに導入することは経済性がない。

そこで、本研究では、タワートップボルト直下におけるひずみを計測することにより、タワートップボルトの異常を検出する。まず、太鼓山風力発電所において現地観測を実施し、タワートップボルト直下におけるひずみを計測することにより、異常検出が可能か明らかにする。次に、得られたひずみを基にパターン認識技術を用いて、タワートップボルトの異常検知アルゴリズムを構築する。最後に、予測技術を用いて、ひずみの計測値からボルトの残存軸力を予測する手法を提案する。

2. 現地観測

2.1 ひずみ計測の概要

ひずみを用いたタワートップボルトの異常検出アルゴリズムを構築するため、2015年2月2日から5日の4日間、太鼓山風力発電所1号機を対象に、タワートップボルト直下におけるひずみを計測した。対象風車はLagaway社製750kWダイレクトドライブ形式のピッチ制御型風車であり、タワー頂部のフランジには高力ボルトが60本用いられている。本研究では、図1に示すように、タワー梯子の位置を基準に、ボルトにNo.1からNo.60まで番号を振った。3号機のボルト損傷は、主風向（西風）の正対側である東側のNo.23ボルト付近に生じたため、本研究では、主風向の発生頻度が高い冬季を対象とし、損傷が発生したNo.23ボルトを中心にNo.21からNo.25までの5本のボルトを観測対象とした。ひずみゲージのボルトからの設置距離とひずみ計測値の関係を明らかにするために、図2に示すように、フランジ下20mm、40mm、100mmの3層にひずみゲージを設置した。

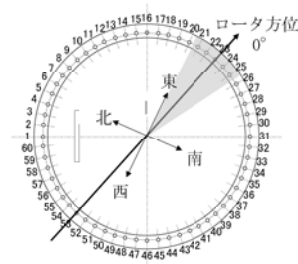


図1 ボルト配置図

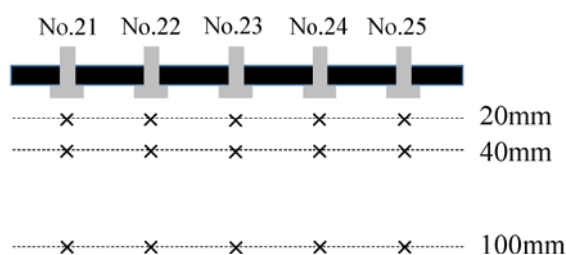


図2 ひずみゲージ設置位置

* 平成27年11月27日第36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

2.2 ひずみ計測の結果

ひずみ計測は、ひずみとボルトの軸力変化との関係を明らかにするため、3 ケースを実施した。軸力について、本研究では、軸力とトルクとの関係が明らかであるため、トルクレンチを用いてトルクを計測した。

Case1 では、全ボルト健全時に、ロータ方位をタワー一周方向に 16 方位刻みに回転させ、各方位にて 1 分間停止し、ひずみを計測した。得られたひずみの平均により、ひずみゲージの初期補正値を算出した。

Case2 では、No.23 ボルトを抜いた状態で、ロータ方位をタワー一周方向に 16 方位刻みに回転させ、各方位にて 2 分間停止し、ひずみを計測した。

Case3 では、ロータ方位を 180 度の位置に設定し、No.23 ボルトのトルクを変化させ、ひずみを計測した。風車メーカー指定の基準値である締付トルク 850Nm に対して 80%, 50%, 20%, 15%, 10%となる 650Nm, 420Nm, 170Nm, 120Nm, 80Nm のトルクを与え、ひずみを計測した。

図 3 および図 4 には、Case1 および 2 で計測されたヨー回転に伴うひずみの変化を示す。ロータ方位が 180°のとき、ロータ重心の偏心による引張力が発生し、ひずみが最大値を示している。図 5 には、トルクに対するひずみの変化量を示す。トルクに対してほぼ線形にひずみ量が増加していることが分かる。

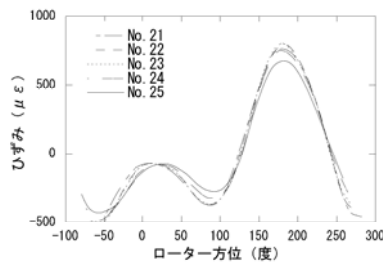


図 3 ボルト正常時のひずみとロータ方位の関係

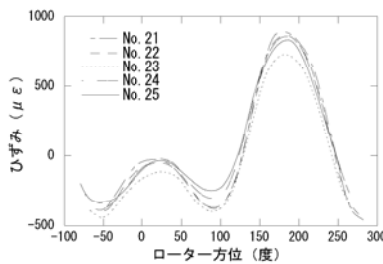


図 4 No.23 ボルト抜け時のひずみとロータ方位の関係

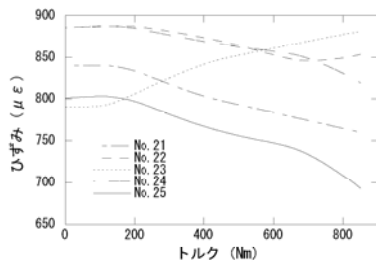


図 5 ひずみとトルクとの関係

2.3 ひずみのパターン認識

ボルト直下のひずみ計測による異常検出の可能性を明らかにするために、Case1 と Case3 の結果から、5 本のボルトに対して、ロータの方向が 180 度の時、軸力抜け時と正常時のひずみの変化量、変化量の 1 階微分量、変化量の 2 階微分量を求め、図 6 左列に示した。値 x は、次式により、無次元化した。

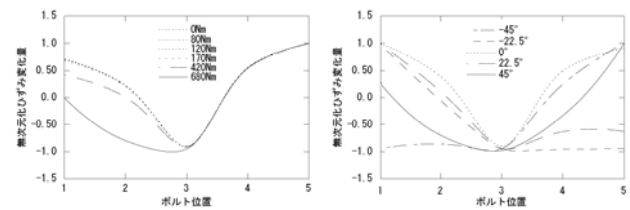
$$y = x - x_{\min} \quad (1)$$

$$z = -1 + 2 \times \frac{y}{y_{\max}} \quad (2)$$

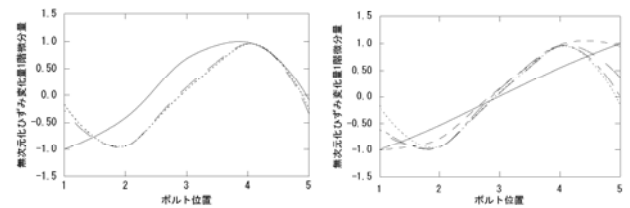
トルクが半分以下の 420Nm となると、異常ボルト周囲のボルト直下のひずみが引張を生じ、ひずみの変化量、1 階微分量、2 階微分量全てにおいてひずみのパターンが類似する。

また、Case1 と Case2 の結果から、ロータの方向とひずみの変化量、1 階微分量、2 階微分量の関係を求め、図 6 右列に示した。ひずみの変化量および 1 階微分量はロータの方向によってパターンが大きく変化するのに対して、ひずみの 2 階微分量はほとんど変化しない。

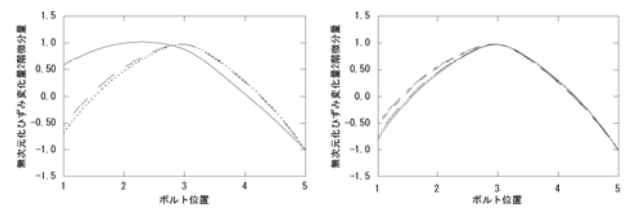
以上より、ひずみ変化量の 2 階微分量のパターンを評価することで、異常ボルトを検出するとともに、ロータ位置の方向に対する予測精度を確保できる。



(a) 無次元化ひずみ変化量



(b) 無次元化ひずみ 1 階微分量



(c) 無次元化ひずみ 2 階微分量

図 6 無次元化ひずみ変化量、1 階微分量、2 階微分量 (右: トルクの変化, 左: ロータ方位の変化)

3. MT システムを用いたボルト異常検出手法の提案

3.1 T 法(3)による異常ボルト検出手法

パターン認識について、品質工学の分野では、MT システム (Maharobis-Taguchi) が広く用いられている。MT システムは、パターン認識技術、予測技術の体系であり、多変量解析手法の一種である²⁾。

MT システム T 法(3)は、パターンの特徴を多変数で表し、その多変数を比例定数 β と標準 SN 比 η を用いた 2 変数 Y_{i1} と Y_{i2} に情報圧縮することによりパターン認識を行う。均質なデータセットを単位空間とし、診断したいデータセットを信号空間とし、マハラノビスの距離を用いて異常・正常を判断する。

今、単位空間として k 個の項目 j を持つ n 個のメンバー x_{ij} が得られたとする。ここで、 $i=1, \dots, n$ および $j=1, \dots, k$ である。単位空間のマハラノビスの距離 D_i は次式により求まる。

$$D_i^2 = \frac{1}{2} [V_{22}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)^2 - V_{21}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2) - V_{12}(Y_{i1} - \bar{Y}_1)(Y_{i2} - \bar{Y}_2) + V_{11}(Y_{i2} - \bar{Y}_2)^2] \quad (3)$$

ここで、 $\bar{Y}_1$ と $\bar{Y}_2$ は Y_{i1} と Y_{i2} の平均値であり、単位空間の中心を表す。 Y_{i1} と Y_{i2} は単位空間のメンバーごとに求まる比例定数 β_i と標準 SN 比 η_i を、次式により変換した値である。

$$Y_{i1} = \beta_i \quad (4)$$

$$Y_{i2} = \frac{1}{\sqrt{\eta_i}} \quad (5)$$

V は Y_{i1} と Y_{i2} の分散共分散行列である。

単位空間の比例定数 β_i と標準 SN 比 η_i は次式により求まる。

$$\beta_i = \frac{L_i}{r} \quad (6)$$

$$\eta_i = \frac{1}{V_{ei}} \quad (7)$$

ここで、

$$L_i = \bar{x}_1 x_{i1} + \bar{x}_2 x_{i2} + \dots + \bar{x}_k x_{ik} \quad (8)$$

$$r = \bar{x}_1^2 + \bar{x}_2^2 + \dots + \bar{x}_k^2 \quad (9)$$

$\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_k$ は、単位空間 n 個のメンバーから、項目 j ごとに求めた平均値である。

$$V_{ei} = \frac{S_{ei} - 1}{k - 1} \quad (10)$$

$$S_{ei} = S_{\bar{n}} - S_{\beta} \quad (11)$$

$$S_{\bar{n}} = x_{i1}^2 + x_{i2}^2 + \dots + x_{ik}^2 \quad (12)$$

$$S_{\beta} = \frac{L_i^2}{r} \quad (13)$$

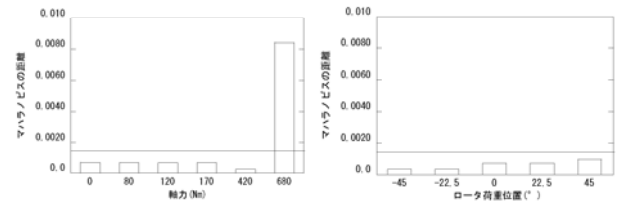
単位空間と同様に、信号空間の比例定数 β'_i と標準 SN 比率 η'_i から Y'_{i1} 、 Y'_{i2} を求め、単位空間の中心からのマハラノビスの距離を次式のように求める。

$$D_i'^2 = \frac{1}{2} [V_{22}(Y'_{i1} - \bar{Y}'_1)^2 - V_{21}(Y'_{i1} - \bar{Y}'_1)(Y'_{i2} - \bar{Y}'_2) - V_{12}(Y'_{i1} - \bar{Y}'_1)(Y'_{i2} - \bar{Y}'_2) + V_{11}(Y'_{i2} - \bar{Y}'_2)^2] \quad (14)$$

図 6(c) に示すひずみ変化量の 2 階微分量のパターンから、変化量と存在量を求め、特徴量とする。標本線を 20 本とし、40 個の特徴量としてパターンを数値化した。パターン数値化の詳細については参考文献 2) を参照されたい。

トルク 0~170Nm を単位空間として、表 1 に示すように各トルクおよび各ロータ方位における β_i と η_i を評価し、マハラノビスの距離を算出した結果を図 7 に示す。異常のしきい値は、単位空間メンバーのマハラノビスの距離の標準偏差を σ としたときに、 2σ 以下とした。

トルクが半分以下のときはマハラノビスの距離が 0.002 以下であるのに対して、680Nm の時は 0.080 となりしきい値以上となり、ボルトの異常・正常を判断することができた。また、 -45° から 45° のロータ方位の変化に対しても、判断の精度が確保できることが分かった。



(a) トルク変化 (b) ロータ方位

図 7 マハラノビス距離による損傷検知

3.2 T 法(1)による軸力予測

予測式について、MT システム T 法(1)が用いられる。T 法(1)は、多変量からある出力値を予測推定するための理論である。重回帰分析と類似するが、計算プロセスの中に相関行列やその逆行列を求めるプロセスをなくすことで、情報を最大限に利用するという特徴がある。

まず、全メンバーを単位空間のメンバー n 個と信号データのメンバー l 個に分ける。単位空間を用いて、次式より信号データおよび出力値を基準化する。

$$X_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j \quad (15)$$

$$M_i = y_i - \bar{y} \quad (16)$$

次に、基準化した信号データ X_{ij} と出力値 M_i を用いて、項目ごとに比例定数 β_j と SN 比 η_j を算出する。これは原点を通る単回帰式 $X_{ij} = \beta_j M_i$ の比例定数と比例式からのばらつきに相当する。信号の各メンバー

について、項目ごとの出力の推定値 $\hat{M}_i = X_{ij} / \beta_j$ を求め、SN 比 η_j で重み付けして総合推定値 $\hat{M}_i$ を求める。

$$\hat{M}_i = \frac{\eta_1 \times \frac{X_{i1}}{\beta_1} + \eta_2 \times \frac{X_{i2}}{\beta_2} + \dots + \eta_k \times \frac{X_{ik}}{\beta_k}}{\eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_k} \quad (17)$$

T 法(1)を用いて、タワートップボルトのトルク予測式を提案する。ひずみの変化量、1 階微分量、2 階微分量の 3 項目から、項目ごとに β_j と η_j を求め、タワートップボルトトルクの総合推定値を評価する。表 2 に示すように 850Nm のデータを単位空間とし、表 3 に示すように 170Nm と 680Nm のデータを信号空間とした。図 8 には表 2、3 に示したトルクによる基準化した各項目の変化を示す。線形回帰式の傾きが β_j 、ばらつきが η_j を示す。計算した β_j と η_j を表 4 に示す。1 階微分量の η_j が小さく、総合推定値への寄与率が低いことが分かる。式(17)により予測したトルクを予測した結果を図 9 に示す。予測したトルクは観測値とよく一致し、その妥当性を示した。

表 2 単位空間データ

トルク	変化量	1 階微分量	2 階微分量	基準化トルク
850Nm	0	0	0	0

表 3 信号空間データ

トルク	変化量	1 階微分量	2 階微分量	基準化トルク
120Nm	-90.91	17.45	93.47	-730
680Nm	-13.66	20.43	22.27	-170

表 4 比例定数 β_j と標準 SN 比 η_j

	変化量	1 階微分量	2 階微分量
β_j	0.12	-0.03	-0.13
η_j	2.77E-04	1.50E-06	7.00E-02

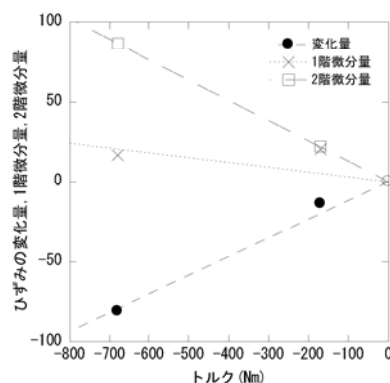


図 8 基準化したトルクと各項目の散布図

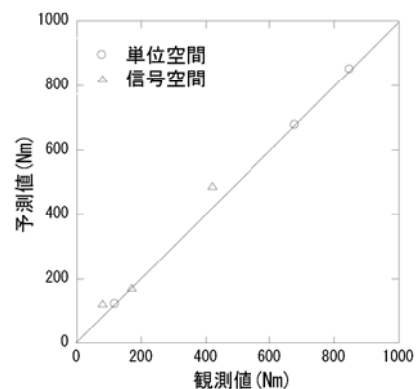


図 9 トルクの観測値と予測値の比較

5. まとめ

本研究では、タワートップボルト直下におけるひずみを計測することによって、ボルトの異常検知とトルク予測を行い、以下の結論を得た。

- 1) 太鼓山風力発電所 1 号機のタワートップボルト直下でのひずみ計測を実施し、ひずみパターンからボルトの異常検出が可能であることを明らかにした。
- 2) ひずみの変化量の 2 階微分量を用いて、パターン認識技術を適用することにより、タワーボルト異常の検知手法を提案した。提案手法はロータ荷重の位置変化に対して精度を持つことを示した。
- 3) ひずみの変化量、1 階微分量、2 階微分量を用いてタワートップボルトのトルク予測式を提案し、予測したトルクと観測値とはよく一致したを示した。トルクと軸力の関係式より軸力を予測することが可能となる。

なお、本研究ではタワートップボルト直下 20mm におけるひずみデータを用いたが、今後 40mm、100mm の位置のひずみの適用性について検討する。

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。また、現地観測の実施にあたり京都府にご協力を頂いた。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。
http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/hoan/denryoku_anzen/newenergy_hatsuden_wg/pdf/001_03_02.pdf
- 2) 立林和夫編、手島昌一、長谷川良子著、入門 MT システム、日科技連、2008。