

音響信号を利用した風力発電装置翼損傷探知技術 と検知装置について

不動技研工業株式会社 中村 博史
 長崎総合科学大学大学院 工学研究科 本田 巖
 NPO法人長崎海洋産業クラスター形成推進協議会 松浦 正己
 ジャパン・リニューアブル・エナジー株式会社 松田 祐作

1. はじめに

自然エネルギーへの関心の高まりから風力発電装置の導入が進んでいるが、風力発電装置の課題の一つに落雷等による損傷の発生・稼働率の低下がある。H16～H19年度にNEDOが調査した3618基の故障・事故発生状況のまとめ¹⁾では、

「故障・事故発生要因の約35%が自然現象であり、25%は落雷であり、特に翼損傷の80%は落雷が原因」となっている。

風力発電装置における翼損傷の主要因である雷撃は、翼の破損、亀裂が発生する1次被害と、翼損傷部の飛散による被害拡大の2次被害とし重大事故に発展するリスクがあると共に翼交換には膨大な費用が発生するため、翼損傷を早期に検知し、迅速な補修等の対応が求められている。

風力発電に限らず稼働率向上には定期メンテナンスは不可欠であり、これを補助するための種々の状態監視技術が開発されているが、風力発電装置の主要部品である翼の点検、メンテナンスでは現状ではロープワークで点検員が直接翼にアクセスして行われている。一方、熟練した検査員は翼損傷を翼発生音で認識しており、これをシステムティックに検知、判断するシステムを構築することによって経験の浅い検査員でも判断が可能となる。また、アクセスが困難な洋上風車を含め常時遠隔監視することによって翼損傷の早期の発見、補修に結び付けることが可能となる。

2. 機側騒音による翼損傷検知結果

2.1 音響信号を利用した翼損傷検知の考え方

風力発電装置において、雷撃等による翼損傷が発生した場合、損傷翼は他の健全翼が発生する音響とは異なる音が発生する。

本技術では全ての翼が健全である場合、音響特性は主軸1回転あたり3回の頻度で変化するのに対して、翼に損傷がある場合には、異音成分が主軸1回転あたり1回の頻度で発生する事から異常を検知している。すなわち健全翼の音響特性と損傷翼の音響特性を比較しているわけではなく、「健全翼の音響特性」と云う教科書を必要としない方法であり、リアルタイムに損傷を検知できる簡便な翼損傷探知方法である。

2.2 大型風力発電装置への適応

大型風力発電設備(出力:2MW, 翼径:80m, ハブ高さ:60m)の機側音をコンデンサーマイクロホンとリニアPCMレコーダー(サンプリング周波数はFs=44.1kHz)を用いて録音し、損傷検知を行った。

録音した機側音は以下の手順で解析した。

- 第1ステップ : spectrogram解析を行い、周波数ごとのレベル変動から発生頻度マップを作成
- 第2ステップ : 発生頻度累積値のピークを検出し、ピークが3回/主軸1回転となる主軸回転数を推定
- 第3ステップ : 発生頻度を1/3 Oct. Bandで積分表示

Fig.1に健全と判断される大型風力発電装置の解析結果を示す。

それぞれ左上図が横軸時間の音響の生データ、左下図が横軸時間、縦軸周波数のspectrogram解析結果、右側下は各周波数のレベル変化を1/3 Oct Band分析した結果、右側上は1/3 Oct. Band分析結果を積分表示したものである。レベル変化が主軸回転数1回転中に何回発生するかを示したものを発生頻度マップと呼ぶこととする。発生頻度マップで全翼が健全な場合は3N成分のみが観測され、翼に損傷がある場合は3N成分に加え、1N成分が観測される。

Fig.1では3N成分のみが観測されており、全翼が健全であることを示している。

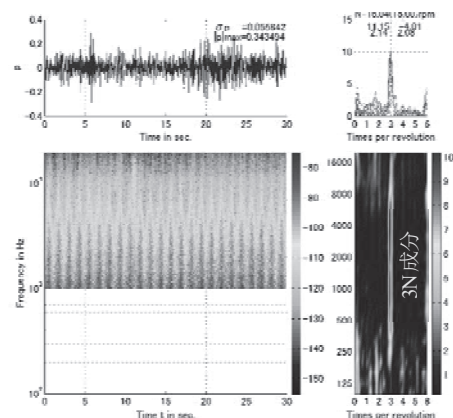


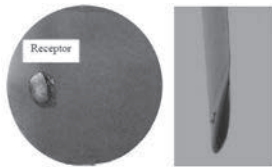
Fig.1 正常翼の解析結果

2.3 ブレード損傷検出の事例1(レセプター損傷)

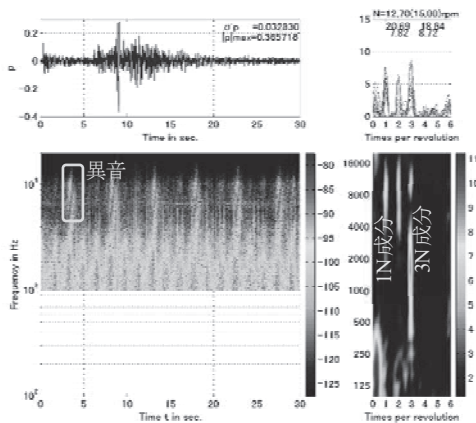
落雷を受けて、レセプターが損傷した直後の写真(a)、損傷した直後の解析結果(b)、補修後の解析結果(c)をFig.2に示す。

F=5~12kHz 帯域に特定翼から異音が発生していることがわかるとともに、発生頻度マップにおける同周波数帯域では損傷由来と考えられる1N成分とその高調波が観測される。一方、 $f \geq 3.15\text{kHz}$ の周波数帯域では3N成分のみが観測されている。

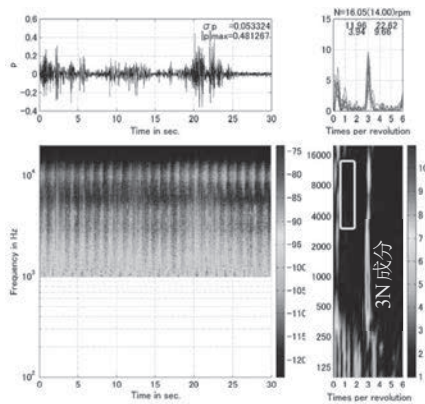
加えて、補修後の解析結果では、3N成分のみが観測され、1N成分が消失していることから損傷直後に観測された異音はレセプターの変形由来であったことが確認され、音響で損傷検出が可能であることが示された。



(a) 損傷翼写真



(b) 損傷した直後の解析結果



(c) 損傷を補修後の解析結果

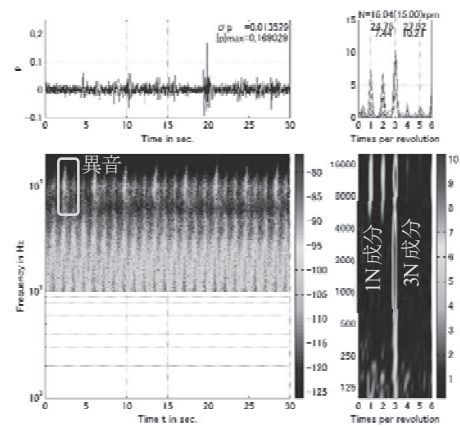
Fig.2 落雷により損傷したレセプターと補修前後の解析結果

2.4 ブレード損傷検出の事例2 (後縁部開口)

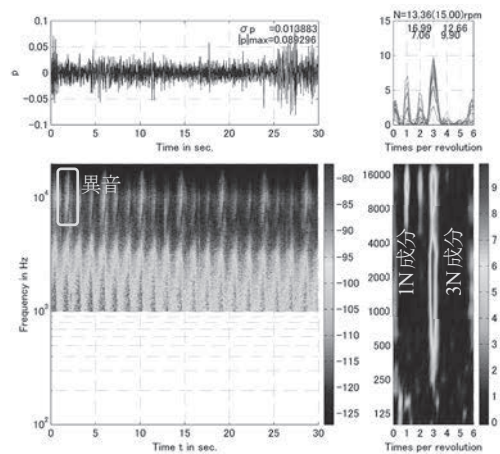
後縁部開口による異音の発生とその解析結果をFig.3に示す。この損傷は5月末に初めて点検員が異音を認識し、後のロープワークによる点検の際に損傷が確認されたものである。解析結果においてF=5~16kHz帯域に1N成分が検知されている。(Fig.3 a)

さらに5月の時点から遡って解析を行うと1月末より1N成分が検知され(Fig.3 b)、損傷の懸念を示していた。5月末の解析結果と1月末の解析結果を比較すると、1月末はspectrogram解析結果、及び発生頻度マップの異音由来の信号強度が弱く、異音が認識しにくかったことが予想される。風況等により後縁部開口の程度に違いがあったため点検員が認識しなかったと考えられる。

このことから、点検員が聴感で認識できる前に1N成分の異音が検知できており、人による聴感よりも検出感度が高い可能性を示している。



(a) 後縁部開口の解析結果(@5月末, 異音を認識)



(b) 後縁部開口の解析結果(@1月末, 異音を認識せず)

Fig.3 後縁部開口の解析結果

2.5 損傷位置検出の例

本技術で損傷の位置を検出した例をFig. 4に示す。すべての事例で損傷位置検出ができるわけではないが、笛のような異音聞こえ、風車の回転に従って異音の周波数が変動する場合には位置の予測が可能である。Fig. 4(左下図)の spectrogram のグラフに赤色線で囲った部分にドップラーシフトによる周波数の周期的な変動が見られる。この周波数の変動量とブレードの回転数から式(1)、(2)を用いて損傷位置を推定することが可能である。

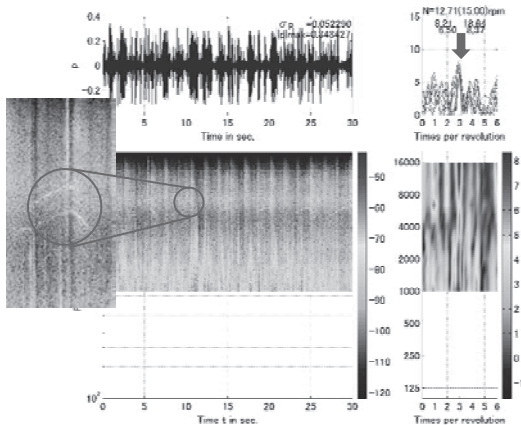


Fig. 4 笛のような異音が発生し、損傷位置が検出可能な解析結果の例

$$V = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\max} + f_{\min}} c \quad (1)$$

$$R = \frac{V}{2\pi N / 60} = \frac{(f_{\max} - f_{\min}) / (f_{\max} + f_{\min}) c}{2\pi N / 60} \quad (2)$$

R : 音源位置, V : 音源の速度, c : 音速, N : 回転数,
 f_{\max} , f_{\min} : 異音の最大, 最小周波数

Fig. 4 には 2 種類のドップラーシフトが観測されているため、(2)式より推定されるハブ中央からの欠陥位置は以下の 2 つが求められる。

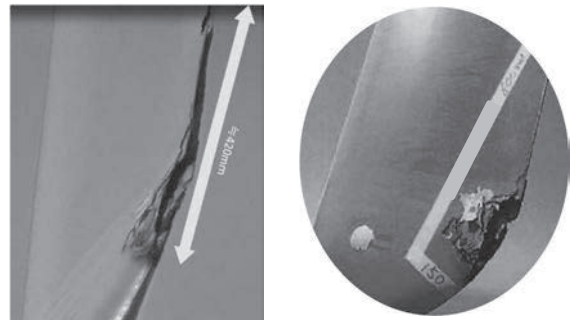
$$R_1=23.2\text{m}, R_2=30.7\text{m}$$

2.6 損傷の経時変化検出の可能性

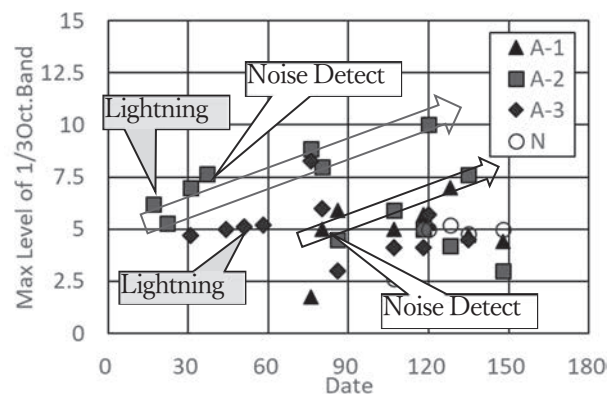
落雷等により損傷が生じた風力発電装置の 1N 成分のレベル変化と点検員が異音を認識した直後と 4 ヶ月後の損傷状況を Fig. 5 に示す。翼後縁が開いた A-1 号機では、この 4 か月の間に開口部が 420mm から 600mm まで進展していた。Fig. 6(a) 参照

解析結果を経時で比較すると、1N 成分は風況によるレベルの増減はあるもののいずれも増加傾向にあり、

損傷の進行を示していると考えられる。将来的に同様のデータを数多く収集し、統計的な解析を行えば損傷の経時変化の検出も可能と考える。



(a) A-1 号機の損傷直後と 4 か月後の写真



(b) 1N 成分の音響レベルのトレンド
A-1, 2, 3: 損傷したブレード,
N: 損傷していないブレード

Fig.5 損傷したブレードの経時変化

3. Android™ 端末上で動作するアプリ開発

風力発電設備そばにてリアルタイムに解析ができるよう Android 端末上で動作するアプリケーションを開発した。データの流れ、アプリケーションの動作を Fig. 6 に示す。

第 1 ステップ: 風車音響の収録 (60 秒程度)

第 2 ステップ: 解析を行う音響データの選択

録音した音響の再生、録音した音響データ名を変更することが可能

第 3 ステップ: データ解析

1/3 Oct. Band の積分値が閾値を越えた場合、異常ありの判定を自動で実施

解析条件を変更することが可能

第 4 ステップ: 解析結果の表示

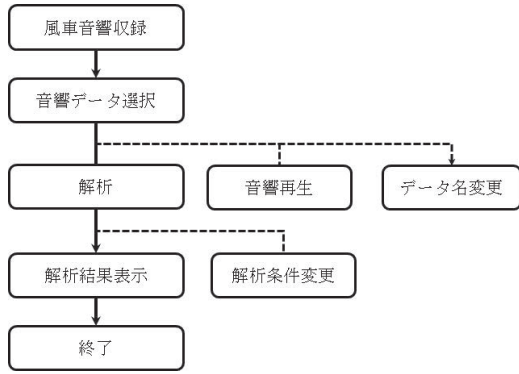


Fig. 6 データ解析のダイアグラム

開発したアプリの画面、及びデバイスの構成を Fig. 7 に示す。デバイスはアプリをインストールしたスマートフォンとマイクから構成されている。



ホーム画面 音響収録 解析結果表示
(a) アプリ画面の例



(b) デバイスの構成例

Fig. 7 アプリ画面とデバイスの構成例

本アプリケーションで解析を行った結果を Fig. 8 に示す。発生頻度マップを表示するとともに、予め設定した閾値を越えた場合、1/3 Oct. Band 積分結果の上方に判定結果を表示する。30 秒の音響データの解析に必要な時間はオウガ・ジャパン社製スマートフォン OPPO A54 (2021.05 発売) を用いた場合、約 20 秒であった。

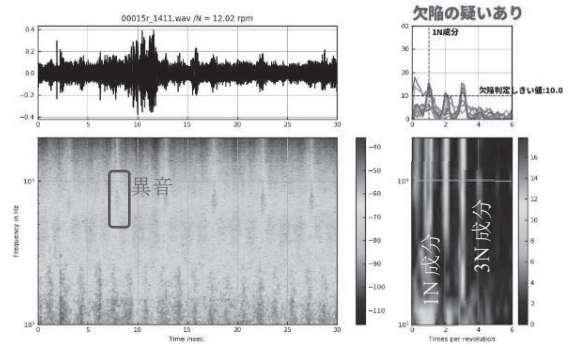


Fig. 8 アプリでの解析結果の例

4. まとめ、今後の方針

風力発電装置において、雷撃等による翼損傷が発生した場合、熟練した点検員はその発生音で認知しており、我々は発生音の時間的变化に着目した損傷翼検知法を検討した。本技術では翼放射音の時間周波数分析結果から各周波数のレベル変動を求め、主軸回転数に同期した 1N 成分を抽出することで損傷翼の有無を判断しており、「健全翼の音響特性」といった教科書を必要としない方法である。

大型風力発電装置の翼放射音を長期監視した結果、健全な風力発電装置では 1N 成分が観測されず、損傷号機にてのみ 1N 成分が観測された。今回の計測では、落雷によるレセプター変形にて異音を確認した。損傷直後、補修後の解析結果を比較し、異音がレセプターの変形由来であることを明らかにすることで、本技術を用いた音響による欠陥検出が可能であることを示した。次に、後縁開口による異音の検知では、点検員が聴感で認識する前の段階から損傷の兆候をとらえることができ本手法の有効性を確認することができた。

また、Android 上で動作するアプリケーションを開発し、現場でリアルタイムに解析を行い、経験の浅い点検員でも判断が可能であることを示した。

今後は風力発電装置近傍に常時設置し、定期的に解析を行い、異常があった際に監視者へアラームを送信する常設型の異常監視システムの開発を行っていきたいと考えている。

参考文献

1) 中尾, 風力発電施設の故障・事故の現状—主に NEDO 利用率向上調査結果のまとめ—, 日本風力発電協会・特集, 2008/7

Android™ は Google LLC の商標です。