

# 再生可能エネルギー大量導入に貢献する A E 法

## 風力発電設備および太陽光発電への A E 適用事例

株式会社SETLa 西本重人

Application of AE to wind turbine generator system and solar power.

SETLa Co.,Ltd., SHIGETO NISHIMOTO

Key Words : A E , アコースティックエミッション , 太陽光発電 , 風力発電 , ブレード , 軸受

### 1. はじめに

2021年10月に、政府から「第6次エネルギー基本計画」が発表され、そのテーマのひとつとして「S+3E（安全性+エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合）」という基本方針を前提にした取り組みが示されている。その中で、2050年を見据えた2030年に向けた政策対応の中心となるのが、再生可能エネルギーの大量導入であり、太陽光発電や風力発電に大きな注目が集まっている。このような背景のもとに、日本各地で風力発電設備等の導入が進められているが、発電コスト等の問題で導入が遅れているのも確かである。この一つの原因として、設備点検や設備故障に伴う発電停止による損失があげられる。例えば、洋上風力発電設備に落雷して再起動するまでを考えると、点検のために設備までアクセスするのに要する時間は大きく、再起動までの損失は莫大である。本論では、これらの問題を解決する手段として A E 法を取り上げ、風力発電設備と太陽光発電設備の健全性評価への取り組みについて、事例を挙げて報告する。

して 60kHz 共振型などの低い共振周波数をもったセンサのほうが適している。なお、比較的小さな設備でブレードの長さが短い場合には、図2のように主軸軸受のハウジングに A E センサを取り付けて、ブレード→軸→主軸軸受→ハウジングと伝搬してきた A E を検出して異常を評価した例がある。このような、主軸部での A E 検出可否については今後の課題となっている。

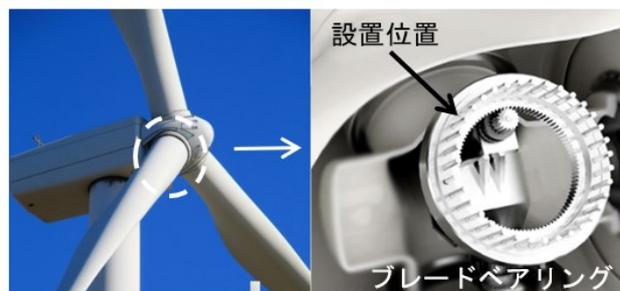


図1 A E センサ設置位置

### 2. 風力発電設備の健全性評価

風車のブレードは大きな風の応力を受ける。特に日本の風車は、通常の風だけでなく突風や台風、落雷など、大きな損傷が生じやすい環境にさらされていて、ブレードの損傷の発生頻度は他国と比べて多いと思われる。また、ブレードは高い位置にありアクセスが容易でないので、点検方法としては目視検査が一般的で、非破壊検査の実施はもちろん、常時監視することは非常に困難である。本項では、このブレードの損傷のオンライン監視技術として A E によるブレードの損傷検知の事例を紹介する。



図2 A E センサ設置位置（主軸軸受）

#### 2.1 A E センサの設置

ブレードの損傷を A E で検出する場合、減衰を考慮すると A E センサはブレードに直接取り付けるのが理想である。特に大型の風力発電設備ではブレードが 10m を超す場合もあり、減衰を考慮すると、A E センサはできるだけブレードに近い位置に取り付ける必要がある。しかし、ブレードに直接取り付けることは困難である場合も多く、そのような場合には、図1に示すようにハブ内のブレードの根元に存在するピッチ角度変更用のブレードベアリングに取り付けるのも一つの方法である。まだ、十分なデータは揃っていないが、目視で確認できる規模の損傷では発生する A E の振幅は大きく、上記のようなブレードの根元で検出できると思われる。この場合、使用する A E センサは、減衰を考慮

#### 2.2 A E 計測装置

主軸部で A E を検出する場合には、ナセル内には電源もスペースもあるので計測装置の設置は比較的容易である。しかし、ブレードから直接 A E を検出する場合には、ハブ内に A E センサの設置が必要である。しかし、ハブは回転するためにケーブルによる配線ができないことから、無線でデータを伝送する必要がある。図3に、ハブ内で A E を計測する場合のシステム例を示す。ハブ内に処理の中心となる A E のパラメータを評価する装置が設置され、その結果はナセル内へ無線伝送される。無線伝送の方式としては、他の制御システムに影響がなく、消費電力が少なく、さらに

伝送間にある障害物の影響が少ない方式が要求される。図3の例では、ZigBeeによる無線伝送方式が使用されている。なお、無線伝送されたデータは、設備の通信網に直接接続して管理することが難しい場合が多く、AE装置内の記録媒体に記録される場合が多い。ただし、AEのデータを回収するにはナセル内に昇ってデータを回収する必要があるため、図3の例ではAEのデータをクラウド上に転送して管理している。

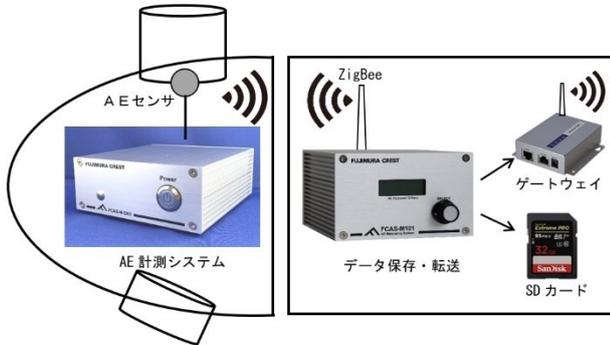


図3 AE計測システム

### 2.3 ブレード損傷時のAE挙動

ブレードにき裂やはく離が生じた場合のAE挙動を紹介する。本設備は、定期点検でブレードにはく離が認められ、その後約2週間使用されてブレードが新品に交換された。その後、再稼働したが、稼働後2週間後の点検で再びき裂が認められた。下記は、定期点検後から再稼働後にき裂が検出されるまで連続してAEを計測した結果を示す。

#### 2.3.1 計測条件および計測内容

計測した風車の仕様を表1に示し、類似設備の外観を図4に示す。ブレード長としては約7mで、比較的小型の風車である。

表1 計測対象設備の仕様

定格出力	19.8kW
受風面積	154m <sup>2</sup>
定格風速	10m/s
回転速度	50rpm
ハブ中心高さ	18000mm



図4 計測対象設備（類似設備）

計測条件を表2に示す。本計測におけるAEセンサの取り付けは、比較的小さな設備であるので、主軸軸受のハウジングにマグネットで固定した。AEセンサは、高周波数の減衰の影響を考慮して60kHz共振型を使用し、AEの計測は、センサ

をナセル内に設置しているため、無線によるデータ転送は使用しないで直接計測した。

計測期間が長期となるため、計測するAEのパラメータはき裂やはく離の評価に有効な最大振幅、エネルギー、RMSに絞り、さらに保存するデータは10msごとに集計した値とした。評価されたデータは、計測装置のSDカードに記録するとともに、クラウドに1秒ごとの最大振幅、積算エネルギー、RMSの平均値を転送し、傾向を管理した。

表2 計測条件

項目	特性
サンプリング周波数	10MHz
HPF	10kHz
LPF	1MHz
メインアンプ	26dB
プリアンプ	20dB（センサに内蔵）
AEセンサ	60kHz共振型

#### 2.3.2 結果

図5に、風速が上昇して回転を開始してから発生したAEの振幅の挙動を示す。き裂やはく離が生じたブレードは、風速上昇に伴うブレードの回転開始直後に振幅の大きなAEが発生する。特にはく離が生じたブレードは、振幅の大きなAEが連続して発生した。このような挙動の原因は、ブレードの回転が上昇する時にはブレードに加わる応力の変化量が大きく、損傷が進みやすくなるのが原因でないかと考えられる。

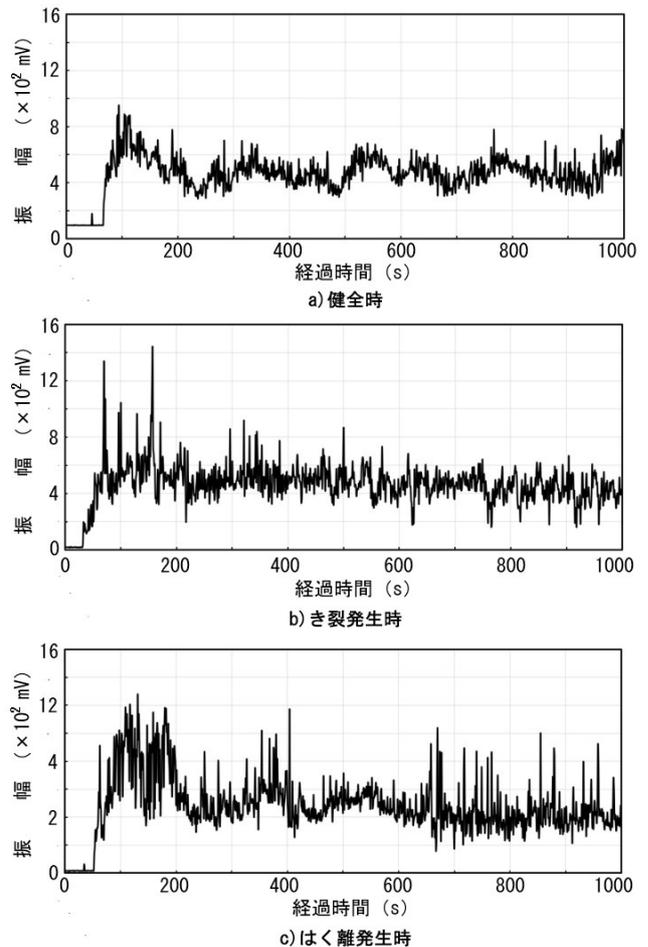


図5 振幅の挙動

図6に、回転上昇時に発生したAEの平均振幅の変化を示す。はく離したブレードを新品のブレードに交換した直後には振幅は低下し、欠陥の存在とAEの振幅の傾向が一致した。また、ブレードを新品に交換してしばらく使用した後に、再びAEの振幅が上昇するのが認められた。この結果と一致して、定期点検時にブレードにき裂が確認された。

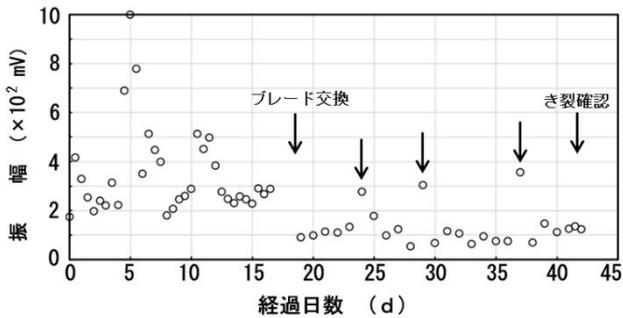


図6 計測期間中の平均振幅の変化

図7に、上述した図5のデータに対応したエネルギーの挙動を示す。はく離の発生したブレードでは、回転が上昇するタイミングだけでなく、上昇後もエネルギーの増加が観察される。この原因として、はく離が発生すると、はく離面に応力の変化によって摩擦現象が生じるようになり、これが連続型のAEを発生させてエネルギーの上昇として観察されるのではないかと考えられる<sup>1)</sup>。

上記のように、ブレードにき裂が発生した場合には、回転上昇時にAEの振幅が上昇し、はく離に成長すると振幅だけでなくエネルギーも増加すると考えられる。

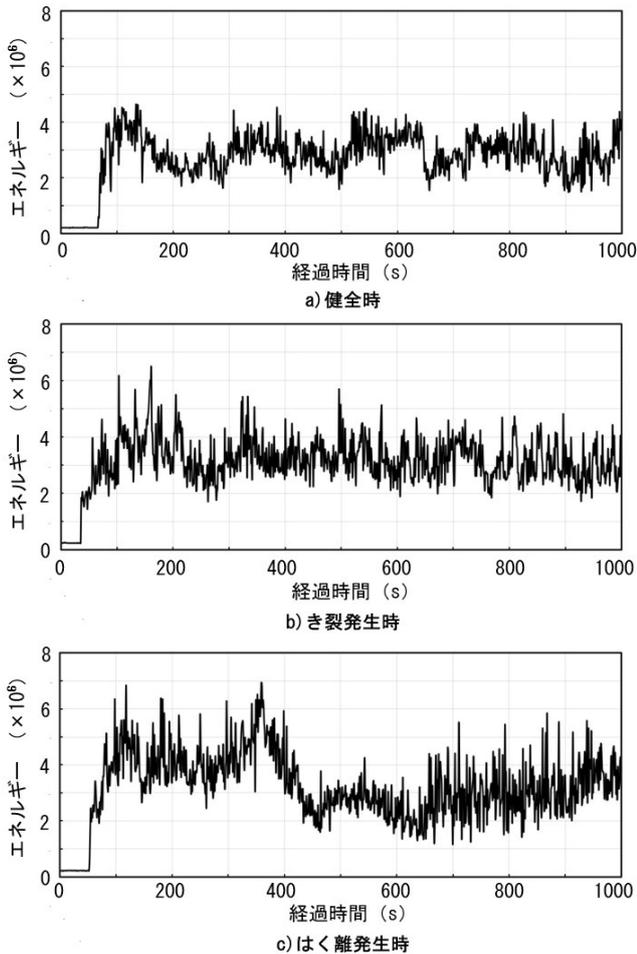


図7 エネルギーの挙動

## 2.4 軸受・ギヤの損傷

上記のように、ブレードの損傷評価について解説してきたが、風車の保全を考えると軸受、ギヤの診断は基本となるので、診断事例を紹介する。風車の設備診断の対象としては、電気系統の設備を除くと、主軸軸受、増速機、発電機の診断が重要である。典型的な損傷である摩耗やはく離は、風車であるからといって特別な診断方法が必要でなく、従来から発表されているAEの診断方法が適用できる<sup>2) 3)</sup>。本論では、紹介事例の少ない発電機の軸受のクリープの診断と増速機の異物かみ込みについて紹介する。

### 2.4.1 発電機軸受のクリープの評価

風車の損傷として、発電機に関するトラブルは少ないが、昨今、クリープが増しているため、クリープの診断事例を紹介する。

発電機の軸受を診断する場合には、AEセンサは軸受のできるだけ近くに設置する。図8に事例を紹介するが、軸受近傍の増速機本体にマグネットで取り付けている。AEの計測は長期の計測となるので、この事例では、15s間の最大振幅とエネルギーを計測し、クラウドに転送して管理している。図9に、クリープの発生している発電機で検出されたAEの挙動を示す。回転上昇直後に、エネルギーの大きなAEの発生が観察される。クリープは摩擦現象であるので、クリープが発生すると持続性の長いAEが発生すると考えられ、持続性と相関のあるエネルギーの大きなAEが発生すると考えられる。この現象は、クリープの発生した実績のないモーターや、点検でクリープが検出されなかった軸受では観察されない。

上記のように、クリープの評価は、AEのエネルギー値を管理するだけで容易に判断することができる。なお、クリープ量が増加すると、AEのエネルギーが増加することは明らかで、絶対量の判断は困難であるが、クリープの進行の判断の目安となる。



図8 AEセンサ取付け状況

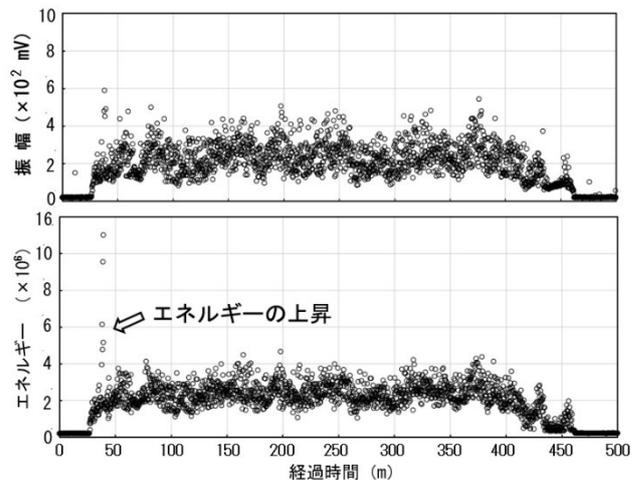


図9 AE挙動

### 2.4.2 増速機ギヤーの損傷

風速変動が大きい日本の風の環境では、風車の増速機のトラブルは非常に多く、風車の発電コストを押し上げる原因の大きな要因になっている。本項では、増速機の異物かみ込みによるギヤーの表面損傷をAEで評価した例を紹介する。

図10に、評価した増速機の構造とAEセンサの取り付け位置を示す。遊星ギヤーを使用した増速機で、全てのギヤーと接触点をもっとも多いと考えられる入力側軸受の近傍にマグネットを取り付けた。なお、回転数等の条件については秘密保持契約の関係で省略する。

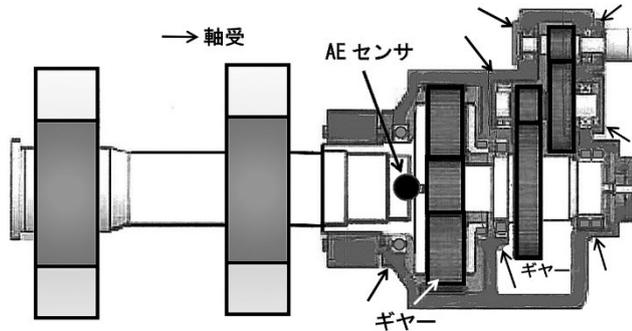


図10 AEセンサ設置位置

図11に、検出されたAEの振幅の挙動を示す。本計測では計測のしきい値を設定し、しきい値を超えたAEのパラメータを算出するイベント方式の計測装置を使用した。図中の点で示すのが、しきい値を超えたAEの発生1個の振幅を示している。特徴として、まず、図中点線と矢印で示すように、①信号が大きく2つに分離されて観察されている。このような現象は、2つの事象が生じていることを示す。典型的なのがギヤー部で、ギヤーの噛み合いにより発生したAEと、軸受の部分から発生したAEが重なってこのような傾向を示す。また、②発生にT1とT2の周期性が観察される。T1は入力軸の回転周期で、T2は遊星ギヤーの噛み合い周期に一致した。また、図中の下部の信号に矢印で示すように、③入力回転周期で、連続的な変動が観察された。

上記の①と②より、ギヤーの損傷が発生していると思われる。③より、連続的にAE発生している原因は、ギヤー各部からのAEが重なって観察されている場合と、軸受の転走面に荒れて生じている場合が考えられる。①～③を総合して判断すると、ギヤーに損傷が発生している可能性が高いと考えられる。点検の結果、異物によると思われる圧痕が観察され、さらに異物破損に伴い、破片をかみ込んでギヤーの表面に小さな荒れが観察された。

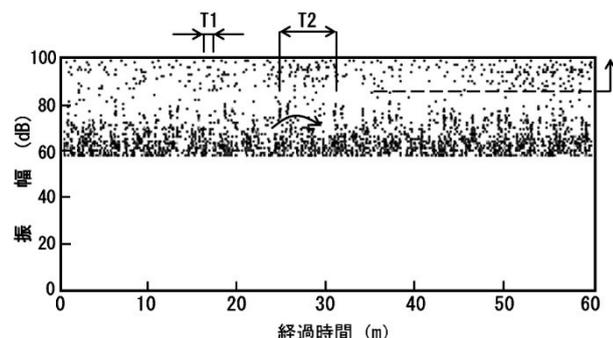


図11 異物かみ込みによるAE挙動

### 3. 太陽光発電への応用<sup>4)</sup>

太陽光発電は、シリコン半導体などに光が当たると電気が発生する現象を利用し、太陽の光エネルギーを太陽電池（ソーラーパネル）により直接電気に変換する。日本における太陽光発電の導入数は、再生可能エネルギーの中でも着実な伸びを示しているが、普及のネックとなっているのが設備コス

トと発電効率の問題である。特に、ソーラーパネルのセルの価格がコストに大きく影響し、また、セルの製造時に欠陥が生じると、施工後にこの欠陥を起点として故障が発生しやすくなる。本論では、この太陽光発電のソーラーパネルのコストと寿命に大きな影響を与える、セルの欠陥検出方法について解説する。

#### 3.1 ソーラーパネルの品質管理

ソーラーパネルのセルの製造過程において、その性能はパネルに組み上げた後の最終検査で確認される。このセルの製造過程で、あるいはセルの素材製造時に微小な裂などの欠陥が発生すると、パネルとして組み上げたあとに定められた性能が得られないで不良となる場合がある。この場合には、欠陥のあるセルだけ交換することはできないので、パネル1枚分を廃棄することになってしまう。これは大きなコストアップにつながり、ソーラーパネルのコスト高の要因のひとつとなっている。また、パネルに組み上げて使用を開始した後に欠陥が進行すると、最悪は発電ができなくなってしまい、パネルの費用だけでなく交換費用や工事中に失われる発電費用など、莫大な損失が発生する。このように、セルの品質は、太陽光発電のコストに直結することから、セルの欠陥検査は、コストに直結して非常に重要である。現在、セルの欠陥検出方法としては、打音検査等が実施されているが、感応検査であることや、抜き取り検査であることなど、欠陥を十分に検査できていないのが現状である。

#### 3.2 検出原理と方法

材料にき裂が発生して破面が形成された場合、この部分に応力の変化を与えると、破面間に生じる摩擦などによりAEが発生することは知られている。この現象を利用して、セルに応力を付加して欠陥部でAEを発生させて欠陥の有無を判断する。

上記の方法では、検査対象のセルに応力の変化を与える必要がある。図12に、セルに応力変化を与える一つの方法を示す。セルを2つのバーではさむ形で拘束して一定応力を与え、さらに一つのバーを揺動運動させて欠陥に曲げ応力を与える。この場合、与える応力の大きさは、セルの強度に対して十分に小さい値とする。

AEの検出方法であるが、AEセンサを直接取り付けるとセルが変形して動くので、そのままでは検出面で摩擦が発生して正常にAEを検出することができない。そこで、セルが変形してもAEが検出できるように、AEセンサの検出面に板バネを接続し、この板ばねをセルに接触する構造としている。セルが変形しても板バネが動きを吸収して安定に接触し、AEはこの板ばねをウェーブガイドとして伝搬する。

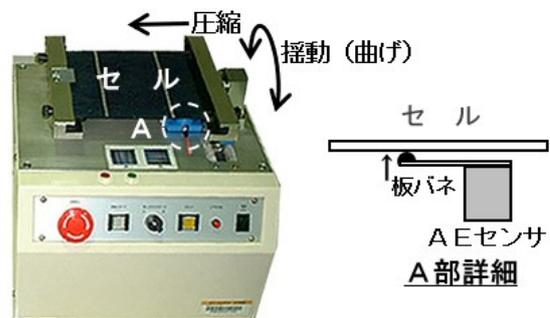


図12 ソーラーパネル検査治具

#### 3.3 セルの欠陥評価

図13に、図12の検査治具で圧縮と曲げ応力を与えられて発生したAEの発生数とエネルギーの相関を示す。良否については、他の非破壊検査の適用が困難であるので、従来から実施されている打音検査により判断した。図中の記号が打音による検査結果を示している。結果は大きく2つに分類することができ、図中の点線で示す境界で良品、不良品を区別する

ことができる。本方法によれば、検査する人の技量の影響を受けないで、さらに全数を検査することができる。なお、セルの欠陥は、シリコンの切り出しから運搬時に発生することが多い。したがって、本検査は、受け入れ検査とソーラーパネルに組み込む前の2回実施される場合が多い。

