

風力発電用風車ブレードの強度試験

三上 隆男 *

Mikami Takao

川井 弘志 ***

Kawai Hiroshi

出口 啓 **

Deguchi Akira

近年、風力エネルギーは再生可能エネルギーとして大いに注目を浴びており、その供給源である風車の普及が世界各地で進んでいる。風車は自然の風力を動力源としている。日本は台風が多いので、定格運転時だけでなく強風時の風車の強度を適切な試験により確認する必要がある。IICは株式会社きんでん殿からの委託により、風車の最も重要な構成部品である複合材料製ブレードについて各種の強度試験および解析を実施した。本稿ではその概要について報告する。

キーワード：風車、ブレード、複合材料、GFRP、曲げ強度試験、材料試験、たわみ

1. はじめに

風力エネルギーは再生可能エネルギーのひとつであり、地球環境の保全（低炭素社会の構築）、エネルギーセキュリティの確保、経済成長の維持を同時に実現可能なエネルギー源として注目され、その供給源である風車の普及が世界各地で進んでいる。

日本では安定した風力（平均風速 6m/s 以上）が得られる北海道、青森、秋田などの海岸部や沖縄の島々などで多くの風車が稼働している。（写真1参照）

しかし、日本には毎年、台風が来襲する。風車の最も重要な構成部品である複合材料製ブレードは定格運転時のみならず、台風などの強風時にも十分な強度を有していることが必須である。また、

ブレードは外皮（シェル）と桁を接着した構造であり、構造強度的にはバラツキが大きいと考えられる。したがって、ブレードの構造健全性を適切な試験により確認することが必要である。^{(1)~(5)}

このような背景の下、IICは株式会社きんでん殿からの委託により、1,500KW級GFRP製ブレー



写真1 風車

* 技師長 博士（工学）、技術士（機械部門）、環境計量士（騒音・振動関係）、一般計量士

** 株式会社 きんでん 技術本部 新エネルギーシステム部 技術支援チーム 技術士（電気電子部門）

*** 株式会社 きんでん 技術本部 新エネルギーシステム部 プロジェクト支援チーム 技術士（電気電子部門）

ド(長さ:約37m)を対象として、空中たわみ試験、地上たわみ試験、地上曲げ破壊試験、材料強度試験、AE計測ならびにFEM構造解析を実施した。本稿ではこれらの試験や解析の概要について報告する。

なお、AE計測については、別報で詳細に報告する。

2. 試験

2.1 空中たわみ試験

この試験はブレードをハブから取り外すことなく、空中にセットされた状態でブレードに適度な曲げ荷重を与えてたわみ量を計測するものであり、この試験によりブレードの曲げおよび振り剛性を評価する。

ブレード先端近傍の1箇所に引張治具を取付け、ワイヤ、滑車を介してウインチにより水平方向荷重を段階的に負荷した。荷重値は引張治具の荷重負荷ワイヤに設置したロードセルで計測した。

図1に示すようにブレード表面の前縁部と後縁部に多数のプリズムターゲットを設置し、荷重

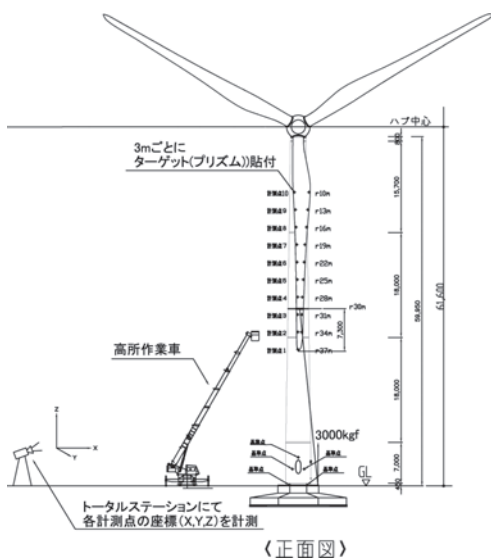


図1 計測状況

負荷によるこれらの位置変化をトータルステーション(写真2参照)により3次元的に計測し、この計測結果から、たわみ量や振れを解析した。

写真3に空中たわみ試験の様子を示す。

本試験結果とFEMによるたわみ量解析結果から、ブレードが所定の曲げおよび振り剛性を有していることを確認した。

また、ブレードに設置した加速度センサで微振動を検知し、これをFFT解析することにより1次曲げ固有振動数を計測した。測定された固有振動数と設計値を比較し、ブレードが所定の全体剛性を有していることを確認した。



写真2 トータルステーションなど



写真3 空中たわみ試験

2.2 地上たわみ試験

この試験はブレードをハブから取り外し、地上に置かれた反力壁にブレードを設置し、設計曲げ荷重を数箇所に分けて与え、たわみ量などを計測するものである。この方法によれば、実際の風圧分布による荷重を模擬した試験ができるとともに、空中試験のように高所で作業をする必要がなく、また、100%設計荷重まで試験が可能である。ただし、長さ37mのブレードのたわみ試験を実施できる反力壁が日本国内にないため、専用の反力壁を設計製作して試験を行った。

試験の様子を写真4に示す。荷重は図2に示すようにブレードのスパン方向4箇所に引張治具を取付け、ワイヤ、滑車を介してウインチにより荷重を負荷した。荷重方向は横方向負荷試験では



写真4 地上たわみ試験

プレッシャー側からサクシオン側に向かう方向とし、縦方向負荷試験ではリーディングエッジ側からトレーリングエッジ側に向かう方向とした。荷重値は引張治具の荷重負荷ワイヤに設置したロードセルで計測した。

各荷重段階でトータルステーションだけでなく、レーザー変位計によりたわみ量を計測した。

また、たわみ試験に先立って、加速度センサと光ファイバ変位センサ（SOFO）をブレード表面に設置し、ブレードをロープで励振することにより、自由減衰振動を発生させ、固有振動数を計測した。この方法により多数の振動モード（4次のFlapwiseモードまで）を計測することができた。

これらの試験により、ブレードが所定の曲げ剛性と全体剛性を有することを確認した。

2.3 地上曲げ破壊試験

この試験は曲げによりブレードを破壊に至らしめ、その終局強度を確認することが主目的である。地上たわみ試験と同様に反力壁が必要であるが、設計荷重をはるかに越える荷重を負荷することになるため、剛性の高い反力壁を設計製作した。破壊時にはブレードや計測センサの飛散、引張治具の脱落、床の損傷などが予想されるため、試験場所は安全面で特別な配慮が必要である。そこで、

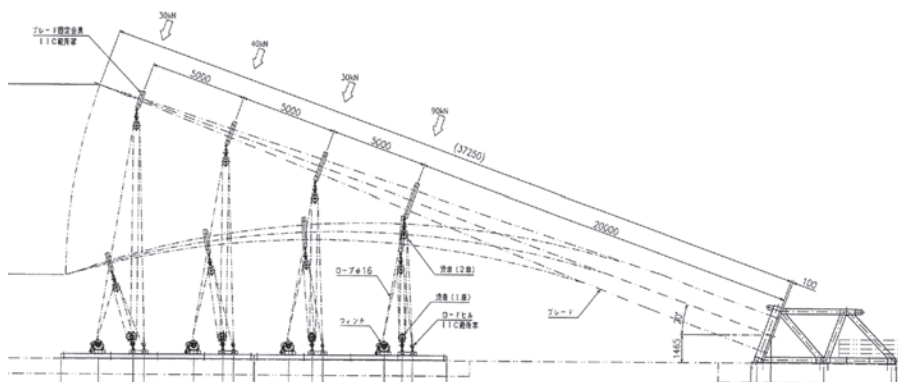


図2 荷重負荷方法

岸壁に係留した3,000ton 台船上で試験を実施した。

試験の様子を**写真5**に示す。荷重は地上たわみ試験と同様に、ブレードのスパン方向4箇所に引張治具を取付け、ワイヤ、滑車を介してウインチにより荷重を負荷した。荷重方向はプレッシャー側からサクシオン側に向かう方向とした。荷重値は引張治具の荷重負荷ワイヤに設置したロードセルで計測した。

本試験ではブレード各部に発生するひずみ量の把握が重要な課題であり、シェルと桁の表面に合計約100枚の3方向ひずみゲージを接着し、曲げ破壊試験中のひずみ量を計測した。

試験中、各荷重段階で地上たわみ試験と同様にトータルステーションとレーザー変位計によりたわみ量を計測した。また、30CHのAEシステム

を用いて試験中にAE波をモニタリングした。曲げ破壊試験後のブレードの損傷状況を**写真6**に示す。

また、曲げ破壊試験に先立って、地上たわみ試験と同様に加速度センサと光ファイバ変位センサをブレード表面に設置し、ブレードをロープで励振することにより、自由減衰振動を発生させ、固有振動数を計測した。

これらの試験により、ブレードの終局強度を把握するとともに、所定の曲げ剛性と全体剛性を有することを確認した。

2.4 材料強度試験

ブレードに発生する応力や変位をFEMで解析する場合、材料データ（ E 、 ν 、 ρ など）が必要不可欠である。また、ブレードの強度を評価する際には、引張強度やせん断強度が必要である。ブレードはGFRP、バルサ、接着剤で構成される複雑構造体で、異方性もあるので、実体から試験片を切り出して試験を実施しなければならない。そのため、ブレードを代表する部位から多数の試験片を切り出し、これらについて引張試験を行い、各部位の引張強度と E 、 ν を測定した。また、せん断試験用にもいくつかの試験片を切り出し、せん断強度を測定した。**写真7**にせん断試験の様子を示す。



写真5 地上曲げ破壊試験



写真6 破壊後の状況



写真7 せん断試験

3.FEM 構造解析

空中たわみ試験、地上たわみ試験、地上曲げ破壊試験時の変位（たわみ量）、ひずみ量、固有振動数などをFEM解析でシミュレーションした。FEMによるひずみ解析結果の一例を図3に示す。ブレードは構造が複雑なため、モデル化（形状、物性値、要素など）は容易ではない。FEM解析結果と実測値との比較により、モデルを改良した。



図3 ブレードのひずみ解析結果例

4. おわりに

風車ブレードの強度試験方法などについて概要を報告した。風車ブレードは大型化が進んでおり、ますます、強度試験やFEM構造解析による構造

強度の確認が重要になってきている。IICは風車の健全性を実証するために必要なこれらの試験および解析技術をお客様に提供して行く所存である。

参考文献

- 1) IEC TS 61400-23 TECHNICAL SPECIFICATION
Wind turbine generator systems- Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades
- 2) IEC TS 61400-13 TECHNICAL SPECIFICATION
Wind turbine generator systems- Part 13: Measurement of mechanical loads
- 3) Mark A. Rumsey, Joshua A. Paquette, et al,
“Experimental Results of Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades”, American Institute of Aeronautics and Astronautics
- 4) Mark A. Rumsey, Joshua A. Paquette, “Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades”, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185
- 5) 新藤 健太郎、川節 望、黒岩 隆夫、田北 勝彦：“風力発電装置用大型FRPブレードの製造技術”、KANRIN 日本船舶海洋工学会誌 第26号（平成21年9月）、pp.33~37

技師長 博士（工学） 技術士（機械部門）
環境計量士（騒音・振動関係） 一般計量士
三上 隆男
TEL. 03-3778-7965
FAX. 03-3778-7968

株式会社 きんでん 技術本部
新エネルギーシステム部 技術支援チーム
技術士（電気電子部門）
出口 啓
TEL. 06-6375-6161
FAX. 06-6375-6376

株式会社 きんでん 技術本部
新エネルギーシステム部 プロジェクト支援チーム
技術士（電気電子部門）
川井 弘志
TEL. 06-6375-6225
FAX. 06-6375-6376