

CFRP サンドイッチ製風車ブレードの最適構造設計

日大生産工 (院) ○倉石 宗一郎
日大生産工 邊 吾一, 坂田 憲泰

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は従来の金属材料に比べて、軽量で比剛性・比強度に優れており、現在では航空機部材に多く使用されている。近年では風力発電用ブレードの大型化に伴いFRP製ブレードに関する研究が多く行われ、従来使用されていたガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP) からCFRPへ移行されている。

風力発電施設の故障・事故の調査報告によると、日本では落電による被害が最も多く、全体の25.8%となっている。また、風車の総停止時間の比較では、ブレードの故障が最も長くなっており、風車の利用率を向上させるためには、雷撃を受けた後のブレードの振動特性と力学特性を把握しておく必要がある。そこで、先行研究¹⁾では、供試体に定格風速 12.5m/s (定格出力 10kW), カットアウト風速 25m/s, 定格回転数 200rpm, 最大回転数 1000rpm の小型風車用のCFRP サンドイッチ製ブレード (以下、CFRP 製ブレード) を用いて模擬雷撃実験を実施し、インパルス加振試験、曲げ試験を行った。その結果、比較的大きい 60kA の雷撃を受けても振動特性と力学特性にほとんど影響を与えないことを明らかにした。さらに、FEM 解析を行ったところ、各試験結果と良好な一致が得られ、解析モデルの妥当性を示した。

本研究では、応答曲面法と遺伝的アルゴリズムによる最適化手法を用いて、最大回転数 1000rpm における遠心力と風圧の規定荷重下で、CFRP 製ブレードの重量を最小にする最適構造設計を行った結果について報告する。

2. 最適設計

2.1 供試体

実験に用いたCFRP製ブレードをFig.1に示す。本CFRP製ブレードは、平織りCFクロス (東邦

テナックス: W-3101 3K, 三菱レイヨン: TRK101M 12K) とエポキシ樹脂, コア材にウレタンを使用し, VaRTMにて成形された翼長 2168 mm, 最大翼弦長 483 mm, ブレード中央翼厚 45 mm のサンドイッチ構造となっている。CFRP 層の繊維体積含有率は 60% で, 表面層の積層構成は位置によって異なり, ①では [3K((±45) / (0/90) / (0/90)) / 12K((±45) / (0/90) / (0/90) / (±45))], ②では [3K((±45) / (0/90) / (0/90)) / 12K((±45))], ③では [3K((±45) / (0/90) / (0/90))]となっている。

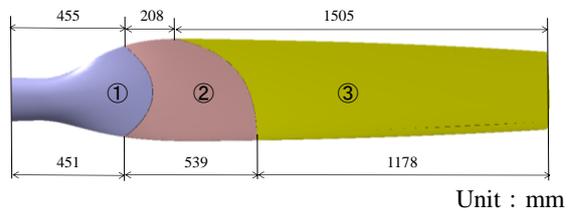
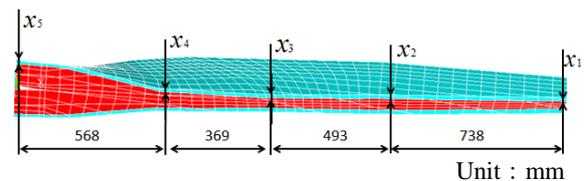


Fig. 1. CFRP sandwich wind turbine blade

2.2 最適化問題の定式化

CFRP 製ブレードの重量最小化問題を式(1)のように定式化した。本研究では[3K((0/90) / (±45) / (±45) / (0/90))]の疑似等方性積層を 1 組(0.8mm)とし、ブレードの先端部から根元部における 5 箇所のCFRPの板厚をそれぞれ $x_1 \sim x_5$ とした(Fig.2)。また、CFRP 製ブレードの安全率は実験に用いたCFRP 製ブレードと同様の 3 とし、許容応力は 243MPa とした。

$$\begin{aligned} & \text{Find } x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} \\ & \text{Minimize the weight, } W \\ & \text{Subject to } \begin{cases} 243 > \sigma [\text{MPa}] \\ 0.8 \leq x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \leq 6.4 [\text{mm}] \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 2. Positions from x_1 to x_5

2.3 FEM 解析

FEM 解析には汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver 15.0 を用いた。荷重は、JIS C 1400-2 (風車-第2部: 小型風車の設計要件) の荷重ケース E を参考に、本 CFRP 製ブレードの最大回転数の設計値である 1000rpm で回転した際の遠心力を負荷した。さらに、風圧分布図を参考に、風速 50m/s における分布荷重を CFRP 製ブレードの片側表面に負荷した。

要素には 8 節点構造ソリッド (SOLID185) を用い、固定条件は CFRP 製ブレードの取り付け部の節点を完全拘束した。その結果、節点数は 23848、要素数は 20781 となった。Table 1 に解析で用いた CFRP の材料定数を示すが、 x 軸と y 軸が面内方向、 z 軸が面外方向を示し、 E がヤング率、 G がせん断弾性率、 ν がポアソン比、 F が引張り強度を示す。また、ウレタンコアの材料定数にはカタログ値を用い、ヤング率 E を 0.025GPa、ポアソン比 ν を 0.25 とした。CFRP の破損則には、最大応力説を用いた。

Table 1 Material properties of CFRP

$E_x=E_y$	GPa	55.4
E_z	GPa	8.80
G_{xy}	GPa	3.44
$G_{yz}=G_{zx}$	GPa	2.66
ν_{xy}		0.06
$\nu_{yz}=\nu_{zx}$		0.32
$F_x=F_y$	MPa	792
F_{xy}	MPa	51.3

2.4 応答曲面法

応答曲面法 (Response Surface Method, RSM) は、入力に対する応答の近似関数を求めるための手法であり、その各項の係数は最小二乗法で決定される。本問題における応答は、設計変数 ($x_1 \sim x_5$) の入力に対して、CFRP の重量と発生応力とした。計算点はランダムに選んだ 1500 点とし、近似関数は一般的に用いられる 2 次の多項式で基底した。近似精度を向上するため、CFRP 製ブレードを 4 分割 (Area A~D) し、それぞれの領域で 5 変数 2 次多項式の近似関数を作成した。応答曲面法による発生応力と CFRP 重量の近似値と FEM 解析結果の誤差を Table 2 に示すが、両者の誤差は 8.4% 以下となった。

Table 2 Errors between RSM and FEM results

Stress				CFRP weight
Area A	Area B	Area C	Area D	
3.0 %	3.2 %	7.8 %	8.4 %	0.0 %

2.5 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) は、生物の進化のメカニズムを工学的にモデル化することによって効率的な最適解の探索を行うことができる方法である。本研究では、集団の大きさを 30 とし、交叉率を 60%、突然変異確率を 7% とした。

2.6 最適化結果

世代数に対する CFRP 製ブレードの CFRP の重量変化を Fig.3 に示す。世代数の増加とともに重量は減少していき、44 世代以降は一定値となった。

CFRP 製ブレードの CFRP の重量と $x_1 \sim x_5$ の最適化結果を Table 3 に示す。最適設計前の CFRP 製ブレードの CFRP の重量が 32.2N であったのに対し、最適解は 26.5N になり、17.7% の重量を削減することができた。また、FEM による最大応力は 196MPa となり、式(1)の制約条件を満足する結果となっていた。

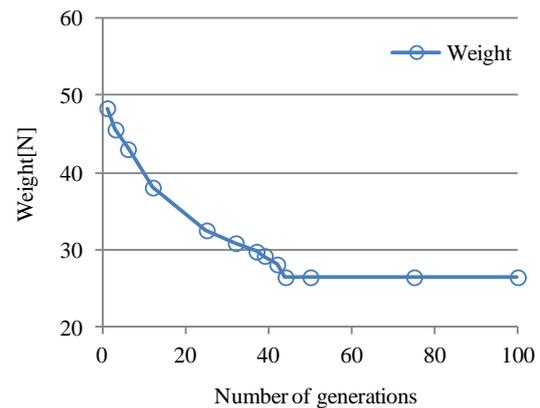


Fig. 3. Relationship between weight and number of generations

Table 3 Optimization results

Thickness [mm]					FEM	
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	σ [MPa]	Weight [N]
0.8	0.8	1.6	1.6	1.6	196	26.5

3. 結 言

応答曲面法と遺伝的アルゴリズムを用いて CFRP 製ブレードの重量最小化を行った結果、実験で用いた CFRP 製ブレードの CFRP より 17.7% の重量を削減することができた。

「参考文献」

- 1) 吳丹, 坂田憲泰, 邊吾一, 倉石宗一郎, 宮内貴史, 曾根原健夫: 日本複合材料学会誌, 40, 2, (2014), 55-61.