

ドローンブレードの簡便な設計方法の確立

Establishment of Simplified Design Method for Drone Blades

材料技術部 金属・物性科 太田悠翔 工藤弘行

応募企業はCFRP製ブレードの製造技術を有している。今後ブレードを製品化するために、現在流通しているブレードと同等以上の、高性能な空力性能を持つブレード形状設計案を模索している。本研究では、流体解析ソフト ANSYS Fluent を用いて流体解析を行うことで、ブレード形状毎の性能を評価した。ブレードの形状因子として、代表断面形状、ウィングレット形状及びピッチ角に着目し、各因子で高性能なブレードとなる条件を検討した。

Key words: ドローンブレード、炭素繊維強化プラスチック、流体解析、単一基準座標モデル

1. 緒言

応募企業のモデクボ合同会社は、CFRP製品の設計・製造を行う。また、ドローンブレードの設計・製造に関する技術を有し、国内産のブレードの普及を目指している企業である。実際に応募企業が製造したCFRP製ブレードを図1に示す。

現在、ブレードは海外製品が多くを占めており、国内産ブレードのシェアを高めるために、より高性能且つ安価なブレード製品を開発することが不可欠である。

応募企業が製造するCFRP製ブレードは積層構造を持つため、安価に製造できるブレード形状には制限がある。よって、積層で製造可能で高性能な形状を特定する必要があるが、試作品の製造や性能試験を行うためには時間とコストがかかり、実験のみで設計案を改良することは現実的ではない。

そのような中で、コンピュータシミュレーションを用いて流体解析を行うことで、設計したブレードの性能を製造前に確認することが可能であり、一つ一つ製造して性能試験を行うよりも安価に性能比較することが期待できる。

流体解析を用いて、無数に存在するブレード形状の中から、応募企業が安価に製造できる設計案を絞りこむにあたり、パラメータスタディに注目した。

パラメータスタディとは、解析対象の形状や物性などの評価項目を変更して総当たりの解析を繰り返すことで、より良い設計案を特定する手法である。本研究では、着目した1つの評価項目のみ条件を変化させ、他の条件を固定して解析を行うことで、評価項目毎に高性能となるブレードの特徴を調べた。

以上より、本研究では高性能なブレード設計案を得るために、応募企業から提案されたブレード形状及び解析条件を用いて流体解析した。ブレードの形状因子を、代表断面、ウィングレット、ピッチ角の3つの因子で整理して、高性能なブレードの特徴を因子ごとに調べた。解析は、流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent を用いて実施した。



図1 モデクボ合同会社が製造したCFRP製ブレード

2. 解析手法

2. 1. 共通する解析条件

表1に、共通する解析条件を示す。

回転速度はブレード全体モデル、風力は代表断面モデルで使用する数値である。空気密度及び空気粘度は、標準大気（気圧 101.3[kPa]、気温 15[°C]、高度 0[m]）における数値を用いた¹⁾。

表1 全解析で共通の解析条件

回転速度	314.16	[rad/s]
風力(代表断面)	78.76	[m/s ²]
ブレード半径	0.358	[m]
空気密度	1.225	[kg/m ³]
空気粘度	1.9874×10^{-5}	[Pa・s]

2. 2. 評価対象の形状因子

2. 2. 1. 形状因子について

代表断面形状、ウィングレット形状、ピッチ角の3つの形状因子に着目し、パラメータスタディを行った。図2に代表断面とウィングレットの位置を示す。また、代表断面モデル及びブレード全体モデルの形状例を図3に示す。

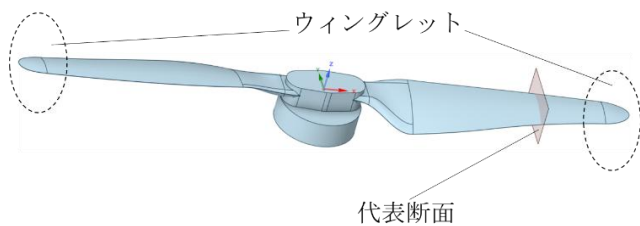


図2 ブレードの部位名称

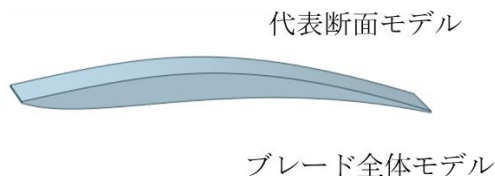


図3 代表断面モデルとブレード全体モデル

2. 2. 2. 代表断面形状

図1で示した代表断面は、設計の際に基準として設定している面であり、ブレードの中心から端までの70[%]の位置における断面と定義する。通常、平面の解析を行う際は、計算時間の早い2次元モデルで解析を行う。しかし、本研究ではブレード全体で解析した結果との整合性を取ることが容易になるため、あえて 4.0×10^{-3} [m]の厚みを持たせた3次元モデルで代表断面の解析を実施した。図4に代表断面の例を示す。

M03及びM04はブレードのモデル番号である。M01は欠番である。M03の、赤丸で囲った数値を 30° で設計した形状をM02とした。M04から、青丸で囲った 15° の部分をも 10° 、 5° としたものをそれぞれM05、M06とした。また、詳細は割愛するが、3章の代表断面における解析結果から、M03を改良したモデルをM07とした。

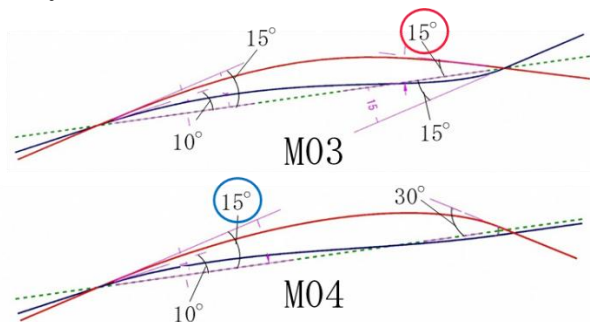


図4 ブレードの代表断面形状

2. 2. 3. ウィングレット形状

図5に、本研究で考慮するウィングレット形状を示す。楕円形状及び後退角を付けた形状それぞれに関して、ウィングレットの向きが上向き、水平及び下向きの条件で結果を比較した。以後、例えば楕円形状かつ

水平の組合せは、「中-A形状」と表現する。

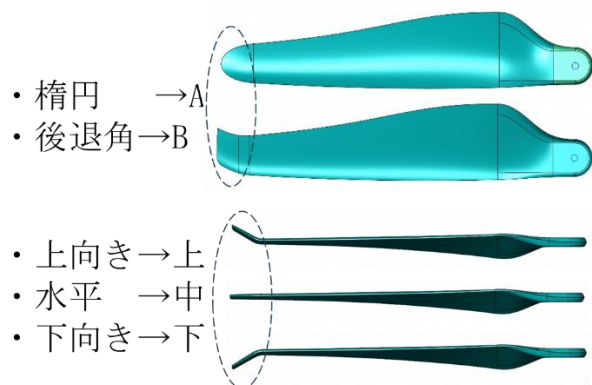


図5 評価対象のウィングレット形状

2. 2. 4. ピッチ角

ピッチ角は、代表断面の位置における迎え角の値を示す。本研究では、 9.0° 、 8.5° 、 8.0° 、 7.5° 、 7.0° の形状で解析した。

2. 2. 5. 評価指標

解析結果を数値的に比較するために、代表断面モデルでは式(1)に示す揚抗比 N を用いる。

$$N = \frac{L}{D} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $L[N]$ は揚力、 $D[N]$ は抗力である。

また、ブレード全体モデルでは、式(2)に示す気流に与える力 P_a と式(3)に示す回転に必要な力 P_r の比で算出される、式(4)のホバリング時におけるブレード回転効率 M で評価した²⁾。

$$P_a = F \sqrt{\frac{F}{2\rho S}} \dots \dots \dots (2)$$

$$P_r = \Omega T \dots \dots \dots (3)$$

$$M = \frac{P_a}{P_r} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $F[N]$ は推力、 $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$ は空気密度、 $S[\text{m}^2]$ はプロペラディスクの面積、 $T[\text{N}\cdot\text{m}]$ はトルク、 $\Omega[\text{rad}/\text{s}]$ はブレードの角速度である。プロペラディスクの面積とは、ブレードが回転する時にブレード端が描く、軌跡の面積である。

2. 3. 流体解析の技術

2. 3. 1. 境界層

境界層とは、流体と固体との境界付近で、流体の粘性によって速度勾配が発生する領域である。流体解析においても境界層の影響は無視できないため、正確な解析を行うために境界層の要素分割を他の領域と区別して設定することが一般的である。

2. 3. 2. 要素分割

構造解析においては、CADデータに対して要素分割を行い解析する。それに対して流体解析は、流体領域の設定をすると元々描かれているブレードの形状を抜き取った形状となる。以上より、流体領域を要素分割して、ブレードの形状を抜き取った部分の境界を、壁として設定することで解析できる。図6にブレード全体で解析を行うときに要素分割した状態を示す。また、図7に図6の白枠部分を拡大した図を示す。図7から、ブレードと空気の領域との境界部は、他の流体領域と区別して、メッシュ形状を層状に設定していることがわかる。

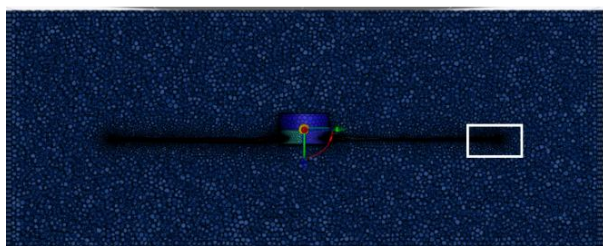


図6 ブレード周辺の要素分割

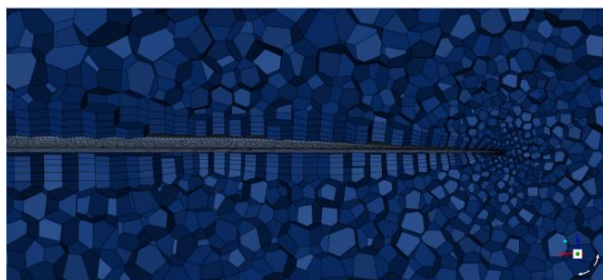


図7 ブレードと空気の境界拡大図(図5の白円部)

2. 3. 3. 単一基準座標モデル

ブレードのような回転体モデルの解析手法として、定常解析に用いる単一基準座標モデル(SRF)や複数基準座標モデル(MRF)、非定常解析に用いるスライディングメッシュ手法(SMM)などがある。SMMはメッシュを動かして解析する手法である。

SRFやMRFは、メッシュを回転させずに指定の領域に回転に相当する力を加える手法である。回転領域とバッフルに十分な距離がある場合や、バッフルがない場合は、静止領域の影響を無視できるため、SRFが適する。

以上より、本研究ではバッフルが無い解析を行うため、SRFを用いた。

3. 解析結果

3. 1. 代表断面

図8に、M07の代表断面で解析した結果の圧力コンター図を示す。位置毎の圧力の大小関係のみ示すために、数値は省略した。ブレードより上側と下側で空気

圧に差が生じていることがわかる。これによりブレードに揚力が発生し、ドローンが飛行できる。

図9に、各代表断面における、抗力・揚力及び揚抗比の解析結果の比較を示す。比較対象のT社製の結果を赤色で示す。

M02の形状は、抗力を抑えられている代わりに揚力も小さく、他の設計案よりも揚抗比が劣っていた。また、M03はM04、M05及びM06よりも高い揚抗比となった。以上を踏まえてM03から改良を加えたM07で解析したところ、設計案の中では最も高い揚抗比となった。

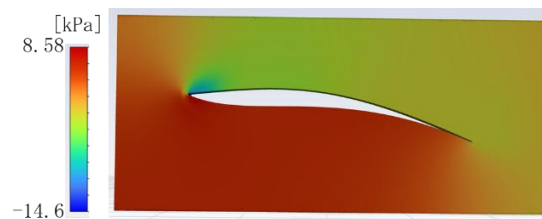


図8 ブレード周辺の圧力コンター図

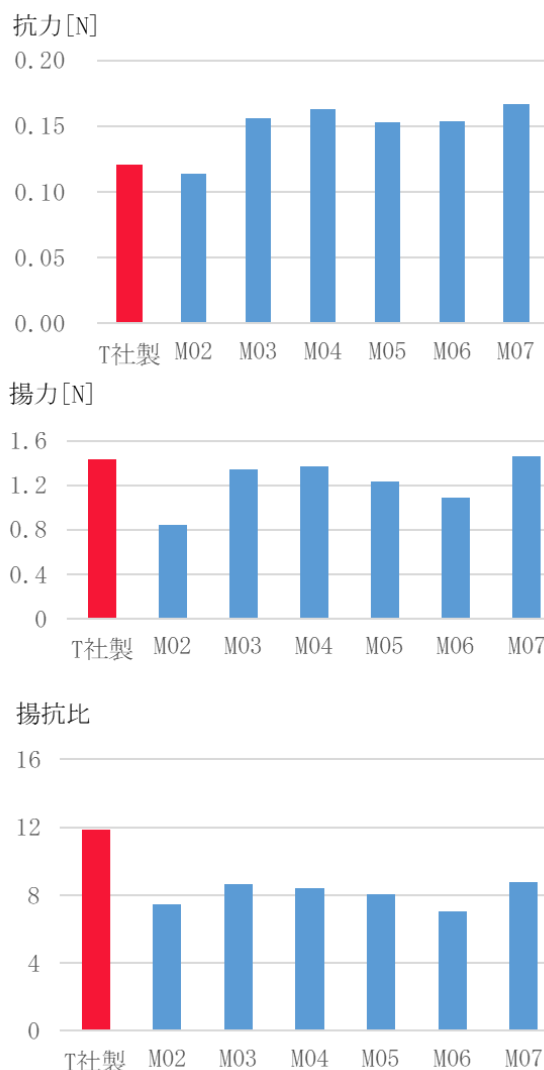


図9 代表断面の解析結果における揚力・抗力及び揚抗比

3. 2. ウィングレット

図10に、M03におけるウィングレット形状毎の効率を示す。A形状における向きの結果を比較することで、ウィングレットの向きは下向きがよいことがわかった。また、下-B形状において解析を行うと、A形状よりもB形状の方がよいことが分かった。また、上-B形状においては、効率が0.7を下回り、他の設計案よりも明らかに性能が落ちた。

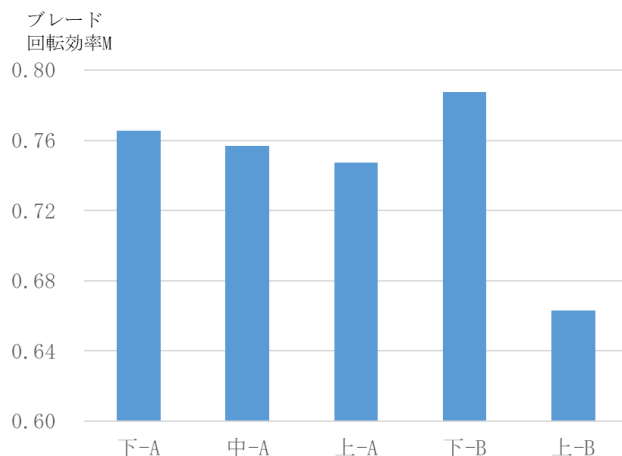


図10 ウィングレット形状の違いによる効率Mの比較

3. 3. ピッチ角

図11に、M07モデルにおいてピッチ角を変えた場合の効率の比較を示す。同図の点線はT社製の効率を示す。いずれの設計案も、効率が0.77~0.79程度であった。ピッチ角が7.0[°]の場合まで解析をしたが、7.0[°]まではピッチ角が小さいほど効率が高かった。また、7.5[°]及び7.0[°]ではT社製の効率を上回った。

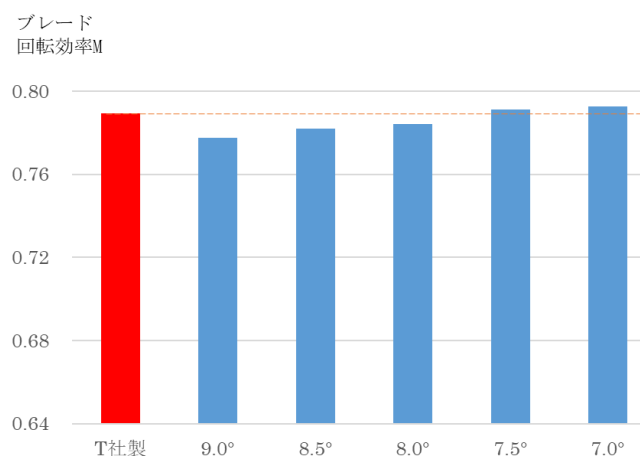


図11 ピッチ角の違いによる効率Mの比較

4. 考察

4. 1. パラメータスタディの効果

一つの評価項目に着目したパラメータスタディを行

うことで、明示的に一因子の影響を知ることができた。また、各因子で高性能な結果を得られた特徴を組み合わせることで、比較対象のT社製ブレードの性能に近づけることができた。本研究で評価した因子や評価指標以外においても解析を行うことで、より高性能なブレード設計案を効率的に選出することが期待できる。

4. 2. 形状因子が揚力と抗力に与える影響

図10、図11から、ピッチ角と比較してウィングレット形状の違いによる影響が大きいことがわかった。

代表断面での揚力や抗力に着目すると、揚力は比較対象のT社製ブレードと同等以上の性能を出すことができた。一方、抗力に関してはT社製の数値を下回ることができなかった。そのような中で、ウィングレット形状やピッチ角を工夫することで、T社製ブレードの性能に迫ることができた。よって、揚力を大きく落とさずに抗力を抑えられる代表断面形状を特定できれば、ウィングレット形状やピッチ角の結果と合わせて、更に高性能なブレード形状を設計することが期待できる。

5. 結言

本事業では、応募企業が提案したブレード形状に関する流体解析を行った。その結果から、より性能が高くなると考えられるブレード形状について検討を行うことを繰り返し、以下の知見を得た。

- 1) パラメータスタディによって、簡便に設計案を改良できることがわかった。
- 2) ウィングレット形状の影響が大きいことがわかった。
- 3) ピッチ角を変えることで、揚力及びブレードに加わるトルクの性能を調整できることがわかった。

パラメータスタディは、ドローンブレードの解析以外でも、解析条件の違いによる比較を行う解析であれば応用することが可能である。特に、本研究の様に設計案を模索する目的には効果的な手法であることがわかった。

参考文献

- 1) NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. "Defining Constants and Equations", U.S. STANDARD ATMOSPHERE.1976, US government printing office, 1976, p.1-20
- 2) 小池勝. 機械系教科書シリーズ 24 流体機械工学. 初版, コロナ社, 2009, 573p