遠心力を受ける逆対称積層動翼のねじりに及ぼす
予ねじり角度の影響*陳 錦 祥^{*1}, 小 河 昭 紀^{*1}
橋 本 良 作^{*1}, 北 條 正 弘^{*1}Twist of Anti-symmetric Laminate Blades due to
Pre-twist Angle under Centrifugal ForceJinxiang CHEN^{*2}, Akinori OGAWA,
Ryosaku HASHIMOTO and Masahiro HOJO^{*2} Aeronautical Environment Technology Center, Japan Aerospace Exploration Agency,
7-44-1 Jindaiji, Chofu-shi, Tokyo, 182-8522 Japan

In order to establish some basic concepts on the development and design of smart blades of FRP, the influence of the pre-twist angle and the stacking sequence on the twist of anti-symmetric laminate blades under centrifugal force was analyzed by FEM (Finite Element Method). It was found that the twist direction of a blade depends only on the anti-symmetric stacking sequence and that the twist angle depends on the pre-twist. Two stacking sequences were investigated. It was shown that, for different sequences, to twist-backward is easy however to forward-twist is hard as the pre-twist angle increases. Furthermore, it was demonstrated that the twist angle of blade depends more on the coupling of the stacking sequence than it does on the pre-twist.

Key Words: Composite Material, Laminated Construction, Torsion, Anisotropy, Fiber Reinforced Metals

1. 緒 言

繊維強化複合材 (FRP) は軽くて強い特性を持ち、多くの分野で広く応用され^{(1),(2),(3)}, その“複合化”のメリットを活かして、機能性新素材として期待されている^{(4),(5)}. その機能の一例として、逆対称積層材は遠心力及び温度荷重を受けるとねじり変形が生じるというカップリング効果を有していることが挙げられる⁽¹⁾. これについて多数の報告が見られ、カップリング効果を強く生じる積層条件がいくつか見いだされた^{(6),(7),(8)}. 筆者らのグループはガスタービンエンジンについて、運転状態に応じて自動的に角度調整できる動翼を提案し^{(9),(10)}, 逆対称積層 FRP ファンブレードは実際の運転状況で翼先端が約10° ねじれることが有限要素法で解明された^{(10),(11)}. また、片持ちの逆対称積層板における製造過程の温度反り変形が少なく、かつ充分な“回転荷重-ねじり変形”カップリング効果を発揮できる積層方式を Rayleigh-Ritz 数式解析により検討した⁽¹¹⁾.

しかしながら、実際の動翼は平板ではなくて、予ねじり角度を有している。そのため、遠心力を受ける逆対称積層動翼の変形に及ぼす予ねじり角度の影響を明らかに

することが必要となる。一方、FRPには異方性と不均質性があるので、その力学挙動は複雑で^{(12),(13)}, 数値などの厳密な解析は煩雑・困難であり、実験も高額となる。そこで、実験を最小限に実施することを図って、本論では遠心力を受ける動翼のねじりに及ぼす予ねじり角度の影響について主に数値シミュレーション⁽¹²⁾により検討することにした。

2. 解析モデル及び解析条件

2.1 解析モデル

既報⁽¹⁴⁾で検討したモデルに基づき、用いた FRP 積層動翼のモデルは片方ねじり (図1 (a), (b), 以下、タイプ A と略称) と両側対称ねじり (図1 (c), タイプ B と略称) の二つで、各タイプとも先端での予ねじり角度 α を 0° から 36° まで等間隔を変化させた7ケースを用いて検討する。また、これらのモデルに対して、後述する二つの理由で、逆対称積層構成 L1 : [45(-30)₁₀/45 | -45(30)₁₀/45]^{(11),(14)}及びこれと上下逆順 L2 (図1 (a) に参照) の二つ積層構成 (以下、積層構成と略称) を用いて検討する。

2.2 解析条件

モデルの回転速度は 8000rpm, 回転軸は Z=0, X=-100mm とし、ルートを完全に拘束した。また、材料定数

* 原稿受付 2004 年 10 月 19 日。

^{*1} 正員, 宇宙航空研究開発機構航空環境技術開発センター (〒182-8522 調布市深大寺東町 7-44-1)。

E-mail: chen@chofu.jaxa.jp

は表 1 のカーボン繊維(T800H)強化エポキシ樹脂(#3631)プリプレグの機械的特性を使って積層要素を適用して解析を行った。解析ソフトは MSC Visual NASTRAN for Windows 2003 であり、タイプ A モデルの線形解析で得られた動翼先端の面外変形がモデル厚さより大きかったため、非線形解析⁽¹⁵⁾を行った。

Table 1 UD T800H/#3631 Prepreg Data

E _L (GPa)	E _T (GPa)	G _{LT} (GPa)	V _{LT}	ρ (kg/m ³)
152.98	9.02	4.61	0.35	1600

3. 解析結果及び検討

3.1 解析結果の有効性について

筆者らのグループはタイプ A モデルについて本論と同様なサイズを有する予ねじり角度 $\alpha = 10^\circ$ 、積層構成 L1 場合の逆対称積層動翼を製作し、動翼サーフェス上のひずみ及び先端のねじり角度を測定した。その結果が FEM 解析結果とよく一致した⁽¹⁴⁾。これは積層構成 L1 (L2) を用いる一番目の理由にもある。また、タイプ B

モデルに対して、実験を実施してなかったため、すでに実験結果により検証した Rayleigh-Ritz 数式解析方法⁽¹¹⁾を用いて、 $\alpha = 0^\circ$ のケースを例として本論での解析結果と比較・検証を行う。

まず、開発された Rayleigh-Ritz 法⁽⁸⁾の概要について簡単に述べる。 $\alpha = 0^\circ$ の場合、モデルの中立面内変形関数を $u(x, y)$, $v(x, y)$ と $w(x, y)$ とすると、以下の多項式に展開できる：

$$u(x, y) = x(a_1x^5 + a_2x^3y^2 + a_3x^4 + a_4x^2y^2 + a_5x^3 + a_6xy^2 + a_7x^2 + a_8y^2 + a_9x + a_{10}) \quad (1)$$

$$v(x, y) = xy(b_1x^4 + b_2x^3 + b_3x^2 + b_4x + b_5)$$

$$w(x, y) = x^2y(c_1x^3 + c_2x^2 + c_3x + c_4)$$

ここで a_i , b_i 及び c_i は計 19 個の未知定数である。

中立面内の非線形ひずみの成分は式 (2) で表される：

$$e_{11}^0 = \frac{\partial u}{\partial x}, e_{22}^0 = \frac{\partial v}{\partial y}, e_{12}^0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2)$$

積層板が曲げ変形状態での内部ひずみの分布は、

$$e_{11} = e_{11}^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, e_{22} = e_{22}^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3)$$

$$e_{12} = e_{12}^0 - z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

系全体のポテンシャル W は式(4)で計算する。

$$W = \int_{x=0}^{L_y} \int_{y=-L_y/2}^{L_y/2} \int_{z=-h/2}^{h/2} \Psi dx dy dz \quad (4)$$

ここで Ψ は系のポテンシャル密度で 2 項に分けられる。

$$\Psi = \Psi_e + \Psi_\omega \quad (5)$$

Ψ_e , Ψ_ω はそれぞれ板の内部変形、遠心力荷重によるポテンシャル密度で、式(6)で計算される。

$$\Psi_e = (Q_{11}e_{11}^2 + Q_{22}e_{22}^2)/2 + Q_{12}e_{11}e_{22} + 2(Q_{66}e_{12}^2 + Q_{16}e_{11}e_{12} + Q_{26}e_{22}e_{12}) \quad (6)$$

$$\Psi_\omega = -\rho\omega^2(r_0 + x)u$$

ここで Q_{ij} は積層板を構成する単層の剛性常数、 ρ は積層板の密度である。式(1)で仮定された変位関数を式(4)に代入し、系のポテンシャル W が最小になる条件で、各未知定数 a_i , b_i 及び c_i が計算される。 $\alpha = 0^\circ$ 、積層構成

Fig. 1 Analysis models of the blade and different twist-types.

Fig. 2 Deformation in Z-direction of blade with stacking sequence L2, $\alpha=0^\circ$ analyzed by (a) Rayleigh-Ritz and (b) FEM.

L2 のケースについて、Rayleigh-Ritz 数式解析及び FEM 解析により得られた面外変形結果をそれぞれ図 2 (a), (b) に示す。これらの図から二つの方法で得られた面外変形はかなり類似しており、最大値はそれぞれ 0.262mm と 0.268mm であり、よく一致することがわかった。

したがって本論での FEM 解析結果が有効であると考えられる。

3.2 動翼ねじりに及ぼす予ねじり角度 α の影響

図 3 (a), (b) はタイプ A モデル、積層構成 L1 及び L2 について、予ねじり角度 18° ケースの面外変形を示す。積層構成 L1 の場合、Trailing edge の面外変形が Leading edge よりマイナス方向で (図 3 (a))、動翼のねじり方向は反時計であり、ねじり戻し (図 1 (a) を参照) となった。これと逆に、積層構成 L2 ではねじり進みとなった (図 3 (b))。この動翼先端 (Tip) の面外変形データから求めた各ケースのねじり角度 $\Delta\alpha$ を図 4 (a) に示す。ここで、反時計回りをマイナス、時計回りをプラスで表す。図 4 (a) から遠心力を受ける動翼ねじりの方向はモデルタイプ及び α には依存せず、積層構成だけにより支配されていることが示された。つまり、 α は動翼のねじり方向には影響しない。ただし、どのモデルタイプでも、 α の増加につれ、積層構成 L1 のねじり戻し角度は大きく、積層構成 L2 のねじり進み角度が小さくなる (図 4 (a))。また、図 4 (b) には積層構成 L2 のねじり進み角度と積層構成 L1 のねじり戻し角度の割合 η (絶対値)

$$\eta = |\Delta\alpha_{L2} / \Delta\alpha_{L1}| \quad (7)$$

を示す。ここで、添字 L1 と L2 はそれぞれ積層構成 L1 と L2 を表している (以下、同様)。この図から予ねじり角の増加につれ、 η が単調減少している。つまり、予ねじり角度が大きいくほど、ねじり戻り易く、またねじり進みにくくなっていることが示された。

Fig. 3 Deformation (mm) in Z-direction of blade with $\alpha=18^\circ$ and different stacking sequences.

Fig. 4 Relationships between parameter: (a) $\Delta\alpha$, (b) η and α for different model types and stacking sequences.

3.3 動翼ねじり角度 $\Delta\alpha$ に及ぼす予ねじり角度 α 及び積層構成の影響力

ここで、図4(a)に示す動翼ねじり角度 $\Delta\alpha$ に対して、2次多項式(8)でフィットを行い、その結果を表2に示す。

$$\Delta\alpha = B_0 + B_1\alpha + B_2\alpha^2 \quad (8)$$

式(8)の B_0 , B_1 , B_2 は回帰係数である。

表2からどのタイプのモデルと積層構成にとっても相関係数が0.999と高く、式(8)で $\Delta\alpha$ をよく近似できることがわかった。次に式(8)の構成について考察する。式(8)右辺の第二項と第三項は予ねじり角度 α に依存するので、 α に起因するねじり、つまり等方性材にも生じるねじり戻しに相当する部分 $\Delta\alpha_A$ であると考えられる。また、 B_0 は α に依存しないので、積層構成のカップリング効果で捻った角度 $\Delta\alpha_L$ と考えられる。そこで、式(8)は式(9)に書き換えることができる。

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta\alpha_L + \Delta\alpha_A \\ \Delta\alpha_L &= B_0 \\ \Delta\alpha_A &= B_1\alpha + B_2\alpha^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Table 2 Fit results for B_0 , B_1 and B_2

	B_0	B_1	B_2	R
Sin L1	-0.793	-0.01048	-4.63E-5	-0.999
Sin L2	0.791	-0.01326	1.65E-5	-0.999
Sym L1	-0.791	-0.01208	1.29E-4	-0.999
Sym L2	0.793	-0.01357	0.00E-5	-0.999

表2及び式(9)により得られたタイプAとタイプBモデルの $\Delta\alpha_L$ と $\Delta\alpha_A$ の結果をそれぞれ図5(a), (b)に示す。図5からどのタイプに対しても予ねじり角度 α が増加するにつれ、 $\Delta\alpha_L$ は変化しない。 $\Delta\alpha_{AL2}$ と $\Delta\alpha_{AL1}$ の絶対値は単調に増加していくが、 α が 36° になっても、 $\Delta\alpha_A$ の値は $|\Delta\alpha_L|$ の50%以下となり、動翼のねじりへの影響力は積層構成のほうが α より強くなることが示された。この積層構成L1(L2)は既報⁽¹⁾, Ozbay氏ら及びMakeev氏らの論文^(6,7)で検討した十数種類の積層方式に比べてカップリング効果が弱い積層構成である。そこで、その他の積層方式を使えば、動翼のねじり影響力は α と比較して積層構成のほうがより強く、上記の影響力に関する結論は一般性があることは理解しやすい。これは積層構成L1(L2)を用いる二番目の理由である。

また、 $\Delta\alpha_{AL2}$ と $\Delta\alpha_{AL1}$ の大きさについて、(1)どのタイプのモデルとも $\Delta\alpha_{AL2}$ が $\Delta\alpha_{AL1}$ より(絶対値)大きく

Fig. 5 The twist angles $\Delta\alpha_A$ compared with $\Delta\alpha_L$ for different model types. The indices L1 and L2 denote stacking sequence L1 and L2, respectively.

なっている。これはカップリング効果の影響で $(\alpha + \Delta\alpha_{LL2})$ が $(\alpha + \Delta\alpha_{LL1})$ より大きいから、前者の場合、ねじり戻しが大きくなるからである。(2)タイプAモデルではほぼ同程度であり(図5(a))、タイプBモデルについて、 α の増大につれ、 $\Delta\alpha_{AL2}$ と $\Delta\alpha_{AL1}$ にある程度の差が存在していることが観察された(図5(b))。これは積層構成L1の場合、ねじり戻しが緩和され(図4(a)に参照)、タイプBモデルの形状上の対称性により、 $\Delta\alpha_{AL1}$ に及ぼす積層構成のカップリング効果と予ねじり角度が相互に影響を及ぼしていると考えられるが、詳細なメカニズムは今後の検討課題である。

3.4 動翼のねじりに及ぼす予ねじり角度 α 及び積層構成の影響に関する要因

本解析のモデルは積層(板状)要素であり、遠心力はX軸(動翼の半径)方向に掛かるため、動翼のねじりは主にX軸方向のひずみにより支配される⁽¹⁾。そこで、X軸方向のひずみ分布の特徴から、動翼のねじりに及ぼす予ねじり角度及び積層構成の影響を検討してみる。

3.4.1 積層構成と動翼ねじりの方向 まず、積層構成L2、予ねじり角度の影響がない $\alpha = 0^\circ$ のケースにおい

て、各層の繊維配向によるカップリング効果の方向性と X 軸方向ひずみ分布の特徴との依存性を考察する。このケースの Suction Surface (SS) と Pressure Surface (PS) における X 軸ひずみコンター図を図 6 (a), (b) に示す。逆対称の積層構造で図 6 (a) と (b) に示すように X 軸に対して鏡面对称であるため、同図 (c) ~ (f) には 24 番目から 13 番目までの代表的な 4 層の結果を表した。

図 6 (c) ~ (f) より動翼翼根では大きなひずみを生じており、ひずみ勾配方向 (白い矢印→) はその層の積層繊維配向 (⇒, 矢印) とほぼ一致することが観察された。ただし、図より隣接している層の繊維方向及び積層構成番の位置にも相互に影響を及ぼしていることがわかった。例えば、積層繊維の方向が 45° となる 13 番目の層について、12 層目が -45° 、14 層目が -30° の繊維方向の影響を受けたため、 -45° と -30° 方向 (図 6 (f) ▼ 辺り) でもひずみが比較的に大きくなっていたことが観察された。同様な現象は図 6 (c) の 24 番目の層においても見られるが、この層について第 14 層目から 23 層目までの 10 層の繊維配向がすべて -30° であるため、図 6 (c) ▼ で示すように受けた影響も強くなった。また、これらの相互影響の結果は SS のひずみコンター図に反映されるべきである。本モデルは SS 側には -30° の積層が 10 枚で、 $+45^\circ$ の積層が 2 枚だけからなったので、最終には図 6 (a) 白い矢印の方向で示すようにひずみ勾配方向はほぼ -30° 方向にそって分布している。つまり、Leading edge 根元の SS 側の X 軸方向のひずみが大きく、

PS 側ではひずみが低くなった (図 6 (a), (b))。積層構成 L2 の場合、動翼の面外変形は Leading Edge ではマイナス、Trailing Edge ではプラスとなり、ねじり進みになった。同様な理由で積層構成 L1 の動翼はねじり戻しになることが容易に理解される

次に予ねじり角度 α を考慮して、X 軸方向ひずみ分布の特徴と動翼ねじりとの関係について検討する。

3.4.2 動翼ねじりに及ぼす予ねじり角度 α 及び積層構成の総合影響 通常、遠心力を受ける等方性材の動翼はカップリング効果が生じないため、予ねじり角度 α による面外変形にはねじり戻しの影響しかないが、逆対称積層材に対してはカップリング効果の方向性を考慮しなければならない。積層構成 L1 では、カップリング効果はねじり戻しとなるため、動翼がねじり戻ししかない。積層構成 L2 では、カップリング効果によるねじり方向は、 α に起因するねじり戻しとは異なったため、動翼のねじり方向がその二つのねじり角度の大きさにより決まる。図 7 は例として $\alpha = 18^\circ$ 、各 L2 積層ケースの SS 及び PS の X 軸方向のひずみのコンター図を示す。図 7 (a) からタイプ A モデルの場合、SS のコンター図は X 軸に対してほぼ対称である。根元で大きなひずみが生じたので、動翼の面外変形がほとんどマイナス (図 3) となったが、ねじり方向には影響しないと考えられる。一方、図 7 (b) タイプ A の PS におけるひずみコンター図は 0° のケース (図 6 (b)) とほぼ同様な分布 (白い矢印の方向) をしており、ねじり方向は 0° のケースと同様であると考

Fig. 6 Strains in X-direction for L2 and $\alpha = 0^\circ$.

Fig. 7 Strains in X-direction for L2 and $\alpha = 18^\circ$.

えられる。この結果は予ねじり角度 α を有するタイプBモデルに対しても同様に得られる(図7(c)と図6(a))。そこで、モデルタイプに関わらず、動翼の変化の方向は積層構成により決まることがコンター図から明らかになった。

このように、FEM解析により、動翼のねじりに及ぼす予ねじり角度及び積層構成の影響が容易に把握できるため、逆対称積層からなるスマート動翼の設計にあたって、FEM解析により、高価なFRP実験がより効果的かつ能率的に進めることが可能であることが期待される。また、本論では動翼の遠心荷重のみを負荷して解析を行ったが、実際では流体の圧力、温度により動翼のフラッタ性能にも及ぼす流体・熱と構造の連成問題として検討すべきであるが、今後の課題として検討したい。

4. 結言

本研究ではスマートFRP材のブレードの開発・設計の知見を得るために、遠心力を受けている動翼のねじりに及ぼす予ねじり角度 α 及び逆対称積層動翼の積層構成の影響についてFEM解析で検討し、次の知見を得た。

(1) 動翼のねじり方向は α とは関係なく、逆対称の積層構成により一意的に決められることがわかった。

(2) 動翼は予ねじり角度 α が大きいほど、積層構成によってねじり戻り易くなったり、ねじり進みにくくなったりすることを明らかにした。

(3) 動翼のねじり角度は積層構成及び α に起因する二つ部分に分けられる。前者は α に依存しない定数であり、後者は遠心力によるねじり戻しである。 α が大きいほど、ねじり戻しが大きくなるが、動翼のねじりに及ぼす影響は、積層構成のカップリング効果のほうが予ねじり角度 α よりも大きいことがわかった。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、京都工芸繊維大学の倪慶清氏

及び荏原総合研究所の郭士傑氏から有益な助言を頂きました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 福田博, 邊吾一著, 複合材料の力学序説, 古今書院, (1988), pp. 23-133.
- (2) 村上理一, 野口新二, 秋園幸一, 日本機械学会論文集 A 編, 54-501, (1988), pp. 917-924.
- (3) 福永久雄, 植村益次, 材料, 28-315 (1979), pp. 1146-1152
- (4) 例えば, 田中基博, 元木信弥, 福田武人, 大神田佳平, 第31回FRPシンポジウム講演会, (2002), pp. 17-18.
- (5) 例えば, 浜田賢一, 河野文昭, 浅岡, 憲三, 器械, 22 - 5, (2003), pp. 415.
- (6) 例えば, Ozbay, S. and Armanios, E. A., 11th US-Japan conference on composite materials, pp. Aero 4-1-4-4, (2004.09, yamagata, Japan).
- (7) 例えば, Makeev, W. and Armanios, E., International Journal of solid and structures, Vol. 36 pp.1081-1098 (1997)
- (8) Zhou, F. Ogawa, A., and Hashimoto, R., *Composite Structures*, 51 (2001), p. 335-344.
- (9) 小川昭紀, 橋本良作, 周風華, 特願1999-258044
- (10) Ogawa, A., Hashimoto, R. and Zhou, F., Proc. 2nd CanSmart Workshop on Smart Materials and Structures, (1999), pp. 149-155.
- (11) 周風華, 小川昭紀, 橋本良作, 第15回ガスタービン秋季講演会論文集, (2000), p. 19-24.
- (12) 影山和郎, 強化プラスチック, 47(2001), pp. 171.
- (13) 座古勝, 松本金矢, 複合材料の挙動解析, 東京, 朝倉書店, 1998, 1-9.
- (14) 小川昭紀, 橋本良作, 周風華, 第16回ガスタービン秋季講演会論文集, (2001), p. 123-127.
- (15) 酒井信介, 泉聡志, 強化プラスチック, 47-6, (2001), pp. 28.