繊維強化樹脂製品における 繊維配向予測方法の提案と構造解析との連成

Proposition of Prediction Method for Fiber Orientation and Coupling with Structural Analysis in Fiber-Reinforced Plastics

大石 智子・三菱電機株式会社

坂本博夫・三菱電機株式会社

Satoko Oishi, Mitsubishi Electric Corporation

Hiroo Sakamoto, Mitsubishi Electric Corporation

Key Words: *fiber-reinforced plastics, resin flow, fiber orientation, thermal analysis, structural analysis, static analysis, modal analysis, fan, CAE, design, ANSYS*

1. 緒言

近年、低コスト化・高剛性化・高強度化のために、繊維を含有した樹脂（繊維強化樹脂）を材料とする製品が増加している。一般に、樹脂は流動方向で異方性を有するため、その流動方向（Mold Direction；以下、MD）とその垂直方向（Transverse Direction；以下、TD）において弾性率、強度等の機械的特性が異なる。とくに、繊維強化樹脂では、繊維配向が機械的特性に及ぼす影響が大きく、その傾向は顕著となる^[1]。よって、繊維強化樹脂を材料とする製品の構造設計の高度化のためには、樹脂の異方性を考慮した構造解析、強度評価が不可欠であり、繊維配向を予測する必要がある。このためには、樹脂の流動方向を把握する必要がある、流動解析を実施するのが一般的である。

しかし、流動解析と構造解析のソフトウェアが異なることから、流動解析結果を構造解析にマッピングする作業が必要になる。さらに、使用するメッシュが異なるため、新たなマッピングのソフトが必要になること、マッピング作業に時間が必要であることから、これまで樹脂の流動方向を考慮した構造解析はごく限られた例でしか実現されていなかった。そのため、樹脂が様な状態にあるとみなして構造解析を行っており、実機と解析結果に誤差が生じていた。そこで、本研究では、プロペラファンを対象に、構造解析との連成が容易な過渡熱解析で流動解析を代用し、繊維配向を考慮した構造解析手法について検討した。さらに、本手法を静解析および固有値解析に適用し、本手法の妥当性検証を行った。

2. プロペラファンの繊維配向予測と構造解析

2-1 繊維配向を考慮した構造解析フロー

図 1 に、熱解析による繊維配向予測方法と予測した繊維配向を構造解析に入力するフローを示す。まず、全体をある温度に設定し、ゲート位置にそれより高い温度を負荷する。次に、過渡熱解析を実施すると、熱流束分布を得る。その熱流速ベクトルを繊維配向と仮定する。過渡熱解析では、流動解析で考慮されている粘性による板厚方向のせん断応力を考慮していないが、ゲートが少なく、単純なモデルであれば、流動解析と熱解析は一致すると思われる。また、一般的に、流動方向に繊維が配向し、弾性率などが大きくなる。したがって、流動方向（MD）とその垂直方向（TD）に異なる物性値を入力することで、構造解析の精度が向上する。

Fig.1 Structural analysis flow that considers fiber orientation

2-2 プロペラファンの繊維配向予測

プロペラファンの繊維配向を予測するため、汎用 FEM 解析ソフト ANSYS^[2]を用いて過渡熱解析を実施した。解析モデルを図 2 に示す。要素はソリッド要素（87 番：四面体，10 節点）を用い、メッシュサイズは 3mm とした。境界条件として、全節点に温度 0 を、樹脂流動入口（ゲート部）に相当する節点に温度 1 を与えた。過渡熱解析は、汎用 FEM 解析ソフト ANSYS11.0 を用いた。解析時間は、Pentium4 のパソコンで約 1 分である。

(54,427nodes, 27,246elements)

Fig.2 FEM model

過渡熱解析により得られた熱流束ベクトル分布を図3に示す。熱流束ベクトルは、樹脂流動入口から放射状に広がり、ブレードにおいてはブレードの輪郭に沿うように広がる挙動を示している。ここで、過渡熱解析において、熱流束ベクトルの方向は、温度の伝わる方向を示す（フーリエの法則）が、別途、樹脂流動解析を実施し、樹脂の流動方向と定性的に一致していることを確認している。

Fig. 3 Distribution of heat flux vector

2-3 繊維配向観察と妥当性検証

2-1 節で得られた熱流束ベクトルと実機での繊維配向方向を比較し、過渡熱解析による繊維配向予測の妥当性を検証するため、X線CT装置（XVA-160CT:ユニハイトシステム社）を用いて、プロペラファンの透過撮影を実施した。図4に、撮影画像の一例を示す。ここで、撮影画像において複数観察される黒色の線状の物体が繊維である。図4に示す例の場合、樹脂流動入口が画像の右上方向にあるとすると、画像の右上から左下に向かって繊維が配向しているのが観察できる。

同様に、ファンのブレードにおいて、任意の箇所について繊維配向を観察し、図5に示す繊維配向の模式図を得た。得られた繊維配向模式図と2-2節で得られた熱流束ベクトル分布（図3）を比較すると、熱流束ベクトルと実機での繊維配向方向はほぼ一致しており、過渡熱解析による流動方向予測および繊維配向予測の妥当性を確認できた。

Fig.4 A picture by X-ray CT scanner

Fig.5 Schematic diagram of fiber orientation

3. 繊維配向を考慮した静解析と妥当性検証

3-1 解析方法

繊維配向を考慮した構造解析を行うため、2-2 節で予測した繊維配向を構造解析における材料定数に反映させた構造解析を実施した。ここで、解析モデルおよび過渡熱解析条件は、2-2 節で示した通りであり、あらかじめ定義した要素座標系（右手則の直交座標系:xyz）に基づき、各要素の主軸（x）方向を、過渡熱解析により得られた熱流束ベクトル方向に一致させた。これにより、構造解析において、繊維配向方向をMDとして定義し、MDおよびTDの弾性率を設定することが可能となる。ここでは、単純な変形解析（静解析）について検討する。

静解析に使用した温度 20℃における材料定数を表1に示す。弾性率の実験的評価はJIS試験片を用いるが、その試験片の長手方向が流動方向になる。解析ケース1では、等方性材料物性としてJIS試験片の弾性率、解析ケース2では、異方性材料物性として、MDの弾性率 E_{MD} をJIS試験片の値とし、TDの弾性率 E_{TD} を式(2)に示す複合強化則（Ruess 則）を適用して算出した理論値とした。

$$\frac{1}{E_{TD}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \quad (2)$$

ここで、 V_f は繊維体積含有率、 E_f および E_m はそれぞれ繊維および樹脂の弾性率である。また、 V_f は、繊維重量含有率 W_f 、繊維の密度 d_f および複合材料の密度 d_c を用いて式(3)より求められる。

$$V_f = W_f \times \frac{d_c}{d_f} \quad (3)$$

Table 1 Material constants for static analysis

Case of analysis	modulus [GPa]		Poisson ratio [-]	density [kg/m ³]
	MD	TD		
1: isotropic	3.58		0.35	1040
2: anisotropic	3.58	1.75※		

※ $W_f = 0.2$, $d_f = 2700$ [kg/m³], $d_c = 1040$ [kg/m³],
 $E_f = 70$ [GPa], $E_m = 1.62$ [GPa]

要素はソリッド要素（187番：四面体，10節点）を用いた。負荷は、図6に示すように、ファン中央部円筒端面に強制変位1mmを与え、拘束条件は、ブレード先端（3節点）の軸方向(UZ)拘束、樹脂流動入口の面方向(UX, UY)拘束とした。静解析は、ANSYS11.0の静的解析（ANTYPE,0）により実施した。解析時間は、Pentium4のパソコンで、異方性材料物性定義および構造解析についてそれぞれ約1分である。

Fig.6 Boundary condition for static analysis

3-2 静解析結果の妥当性検証

図7に、3-1節の解析および同条件を模擬した圧縮試験から得られた荷重-変位線図を示す。実測結果は、繊維配向を考慮した解析ケース2の結果とほぼ同等であることが確認できる。一方、図7に示すように、繊維配向を考慮せず、等方性物性を用いた解析ケース1においては、実測結果と大きく異なっており、等方性物性による推定では、危険側の設計となる可能性がある。したがって、静解析において、繊維配向を考慮することにより、解析精度向上が確認できた。

(※解析ケース1の1mm変位時の荷重を1とした正規化値)
Fig.7 Comparison in load-displacement curves

4. 繊維配向を考慮した固有値解析と妥当性検証

4-1 解析方法

次に、繊維配向を考慮した固有値解析について検討する。静解析の場合と同様の手法で、伝熱-構造連成解析を実施した。固有値解析に使用した温度17℃の材料定数を表2に示す。また、要素は静解析と同様、ソリッド要素(187番:四面体, 10節点)を用い、固有値解析は、ANSYS11.0のモーダル解析(ANTYPE,2)により実施した。解析時間は、Pentium4のパソコンで、異方性材料物性定義および構造解析についてそれぞれ約1分である。

Table 2 Material constants for eigenvalue analysis

Case of analysis	modulus [GPa]		Poisson ratio [-]	density [kg/m ³]
	MD	TD		
1: isotropic	3.96		0.35	1040
2: anisotropic	3.96	1.93※		

※ $E_m = 1.79$ [GPa]

4-2 固有値解析結果の妥当性検証

図8に、解析により得られた固有値と振動試験により得られた実機(プロペラファン単体)固有値の関係を示す。ここで、理想値として、振動試験結果(実機固有値)が解析結果と一致した場合を●印と破線で示す。いずれのモードにおいても、繊維配向を考慮した解析ケース2の結果と実測結果はほぼ一致している。一方、繊維配向を考慮せず、等方性物性を用いた解析ケース1においては、実測結果と大きく異なっており、実測結果および繊維配向を考慮した解析結果で発現する4次のモードが存在しない。このように、固有値解析においても、繊維配向を考慮することにより、解析精度向上が確認できた。

(※解析ケース1の1次固有値を1とした正規化値)
Fig.8 Relationship between analysis and actual eigenvalues

5. 結言

繊維強化樹脂製のプロペラファンについて、構造解析との連成が容易な過渡熱解析で流動方向を簡易的に予測し、繊維配向を考慮した構造解析手法について検討した。さらに、本手法を静解析および固有値解析に適用し、本手法の妥当性検証を行い、下記の結論を得た。

- (1) 過渡熱解析で得られる熱流束方向と繊維配向方向がほぼ一致することを確認し、過渡熱解析・構造解析の連成により、繊維配向を考慮した構造解析技術を開発した。
- (2) 繊維配向を考慮した反力と変位の静解析において、繊維配向を考慮することにより、実測と解析の結果が良く一致した。
- (3) 繊維配向を考慮することにより、実測と解析の固有値が良く一致した。一方、繊維配向を考慮しない場合、解析と実測の誤差が生じる。

今後は、複雑なゲート配置や複雑な形状の製品に適用し、本手法の適用範囲を明確にする。

参考文献

- [1] 東郷敬一郎, 石井仁, 野林文彦, 日本機械学会論文集(A編), 59(557), 1993, pp.62-67
- [2] "Ansys11.0 online manual", Ansys, Inc, 2007