

繊維強化樹脂の流動方向予測と構造解析

坂本博夫*
馬場智子**
青木普道***

Prediction of Flow Direction by Thermal Analysis and Coupling with Structural Analysis in FRP

Hiroo Sakamoto, Satoko Baba, Hiromichi Aoki

要旨

設計期間の短縮や信頼性向上のために、構造解析、構造最適化が多くの分野で使われるようになった。しかし、電機製品分野では、個々の製品が多品種、多機能で、評価する項目が多いこと、開発コストが限られていることや開発期間が短いこと等の課題があり、それに対応した構造解析手法が必要である⁽¹⁾。

一方、低コスト化・高剛性化・高強度化のために、繊維を含有した繊維強化樹脂 (Fiber Reinforced Plastics : FRP) を材料とする製品が増加している。しかし、繊維強化樹脂は、その流動方向によって弾性率や強度などの機械的特性が変化するため、これまでは、変形量や固有値で、解析と実測の誤差が生じていた。この繊維強化樹脂製品の構造設計、信頼性設計のためには、短時間での流動方向を考慮した構造解析が不可欠である。

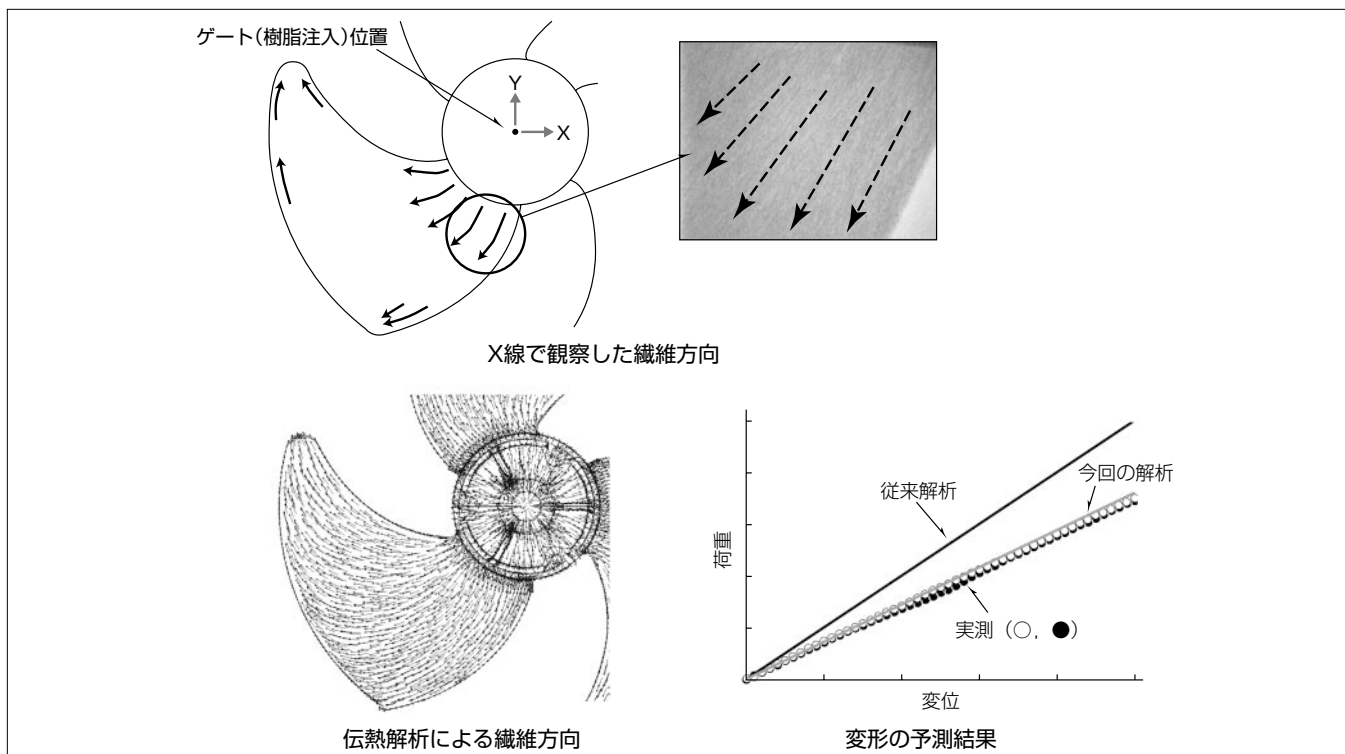
そこで、繊維強化樹脂に対して、汎用構造解析ソフトウェアで解析可能な伝熱解析で樹脂の流動方向を簡易的に予

測し、流動方向に基づいて異方性物性として設定する構造解析手法を提案し、その妥当性について検討した。

対象製品は、ガラス繊維強化樹脂のプロペラファンとし、X線CT (Computed Tomography) で繊維配向を観察した。次に、ゲート位置に単位温度を与えた過渡熱解析を実施し、熱の流れ方向を計算し、X線CTの繊維方向と比較し、一致することを確認した。

熱解析で得られた熱の流れ方向をもとに異方性物性として構造解析に入力する自動化プログラムを開発し、プロペラファンの静解析及び固有値解析に適用した。その結果、従来の異方性を考慮しない解析では実測と誤差があったが、異方性を考慮したこの解析では、変形及び固有値とも良く一致した。

この手法によって繊維強化樹脂の構造解析精度が向上し、ゲート位置の最適化や構造最適化によって、軽量・高剛性・高強度化、設計期間短縮、信頼性向上が可能になった。



プロペラファンの繊維方向及び変形のシミュレーション

X線CTで観察した繊維方向は、左下を向いており、伝熱解析の結果での熱の流れによる繊維方向とよく一致している。右下のグラフは繊維強化樹脂のプロペラファンの静解析結果で、繊維配向を考慮しない従来の解析では、実測と誤差があるが、繊維配向を考慮した今回の解析では実測とよく一致している。

1. ま え が き

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持つため、その流動方向(Mold Direction: MD)とその垂直方向(Transverse Direction: TD)で弾性率、強度等の機械的特性が異なる。とくに、繊維強化樹脂では、流動方向が機械的特性に及ぼす影響が大きく⁽²⁾、繊維強化樹脂製品の構造設計のためには、流動方向を考慮した構造解析が不可欠である。その流動状態を把握するためには、流動解析を実施するのが一般的である⁽³⁾。

しかし、流動解析と構造解析のソフトウェアや使用するメッシュが異なることから、流動解析結果の流動方向を構造解析にマッピングする作業が必要になる。このため、新たなマッピングのソフトウェアが必要になり、マッピング作業に時間が必要になることから、これまで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⁽⁴⁾。また、流動方向が一樣な状態にある等方性材料とみなした構造解析では、実機と解析結果に大きな誤差が生じていた。

そこで、本稿では、構造解析との連成が容易な伝熱解析で流動解析を代用し、伝熱解析によって得られる熱の流れ方向から樹脂の流動方向を簡易的に予測し、流動方向に基づいた異方性物性として設定する構造解析手法を提案する。なお、伝熱解析と構造解析の連成は、汎用構造解析ソフトウェアで容易に実現できるが、このような実設計に有用な手法はこれまで提案されていない。今回提案する伝熱解析による流動方向予測の検証のために、X線CTで繊維方向を観察した。さらに、この手法をプロペラファンの静解析及び固有値解析に適用し、この手法の妥当性の検証を行った。

2. 流動方向予測と構造解析との連成

基本となるエネルギー方程式は、直交表座標系で式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & = \left(K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ & - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ & + \left(\tau_{xx} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial V_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \\ & + \left\{ \begin{aligned} & \tau_{xy} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) \\ & + \tau_{yz} \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \\ & + Q \end{aligned} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、x, y, zは、x-y平面を平板面に、z軸を板厚方向にとった局所座標系である。

- ρ : 密度 (kg/m³)
- c : 比熱 (J/(kg · K))
- T : 温度 (K)
- t : 時間 (s)
- V_x, V_y, V_z : 伝導媒体中の熱の速度 (m/s)
- K_x, K_y, K_z : 熱伝導率 (W/(m · K))
- P : 圧力 (Pa)
- τ : せん断応力 (Pa)
- Q : 単位体積あたりの内部発熱量 (W/m³)

式(1)の右辺第1項～第5項はそれぞれ、熱伝導、圧縮による内部エネルギー、法線応力による仕事、せん断応力による仕事、内部発熱を表す。式(1)から伝熱解析に関連する項を取り出し、モデル形状が薄肉として簡略化した熱伝導の支配微分方程式は、式(2)のように表される。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \dots\dots\dots(2)$$

同様に、射出成形CAE(Computer Aided Engineering)における流動解析では、式(3)のように簡略化される⁽⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ & = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \tau_{xz} \frac{\partial V_x}{\partial z} + \tau_{yz} \frac{\partial V_y}{\partial z} + Q \end{aligned} \dots\dots\dots(3)$$

式(2)と式(3)を比較すると、伝熱解析では、流動解析における板厚方向の速度勾配(こうばい)成分のせん断応力の影響が含まれていないことがわかる。

したがって、せん断応力を無視できる場合、すなわち、せん断応力を決定する粘度及びせん断速度を無視できる場合に、流動解析を伝熱解析で簡易的に近似できる。ここで、粘度は、せん断速度、温度及び圧力の関数で表されるため、これらが大きく変化しない単純な形状、例えば樹脂流動入り口(ゲート)数が少ない、板厚の増減が少ない形状、流動先端から離れた領域や金型壁面から遠い成形品内部等に対しては、流動の方向つまりV_xとV_yの比を得るための手段として伝熱解析を用いることは実設計で有効といえる。

汎用構造解析ソフトウェアの伝熱解析で流動方向を予測するには、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過渡熱解析を行うことによって、熱の流れ方向が得られる。得られた熱の流れ方向を流動方向におきかえ、流動方向にMD、その垂直方向にTDの機械物性値を設定し、構造解析を実施することによって、流動方向を考慮した構造解析が可能となる。

3. プロペラファンにおける流動方向予測と検証

3.1 プロペラファンにおける流動方向予測

プロペラファンの流動方向を予測するため、汎用FEM

(Finite Element Method)解析ソフトウェアANSYS11.0^(注1)を用いて過渡熱解析を実施した。解析モデルを図1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，ゲート位置に相当する節点に温度1を与えた。解析時間は，Pentium4^(注2) 3.2GHzのパソコンで約1分である。

過渡熱解析によって得られた熱流速ベクトル分布を図2に示す。熱の流れ方向は，ゲート位置から放射状に広がる挙動を示している。なお，汎用樹脂流動解析ソフトウェアMold Plastics Insight 5.1を用いて得られた樹脂の流動方向と本結果はほぼ一致していることを確認している。

(注1) ANSYSは，SAS IP, Inc. の登録商標である。
(注2) Pentiumは，Intel Corp. の登録商標である。

3.2 流動方向予測の妥当性検証

予測した流動方向と実機の流動方向を比較し，妥当性を検証する。繊維配向と樹脂流動の方向はおおむね一致することから⁽⁶⁾，実機の流動方向の観察は，X線CT装置(XVA-160CT：ユニハイトシステム社製)を用いて，プロペラファンの繊維配向状態を透過撮影で観察し，図3に示す繊維配向方向の模式図を得た。得られた繊維配向方向の模式図と図2に示す熱の流れ方向を比較すると，実機での繊維配向方向と熱の流れ方向はほぼ一致しており，伝熱解析による流動方向予測の妥当性を確認できた。

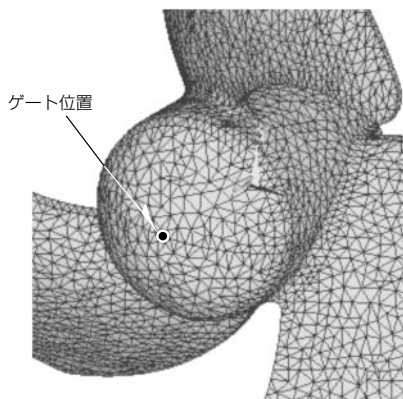


図1. FEM解析モデル(54,427 nodes, 27,246 elements)

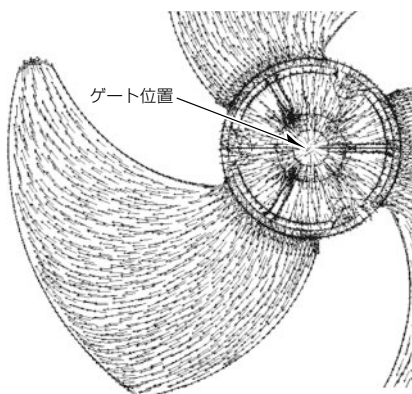


図2. 熱流速ベクトル分布

4. プロペラファンの構造解析と検証

4.1 静解析と妥当性検証

流動方向を考慮した構造解析を行うため，3.1節で予測した流動方向を構造解析における材料定数に反映させる。ここで，解析モデル形状は3.1節と同じであり，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，伝熱解析によって得られた熱の流れ方向に一致させた。これによって，構造解析で，流動方向の弾性率をMDの弾性率として設定することが可能となる。

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。なお，弾性率の実験の評価にはJIS試験片を用いるが，その試験片の長手方向を流動方向にすることが多く，その場合，弾性率はMDの値になる。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の弾性率をJIS試験片の値とし，TDの弾性率を複合強化則(Reuss則)で算出した理論値とした。

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4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(z)拘束，モデル中央であるゲート部の面方向(x, y)拘束とした。解析時間は，Pentium4 3.2GHzのパソコンで，異方性材料物性設定及び構造解析についてそれぞれ約1分である。

図5に，解析結果及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，流動方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，流動方向を考慮せず，等方性物性を用いた解析ケース1では，実測結果と大きく異なっており，従来の

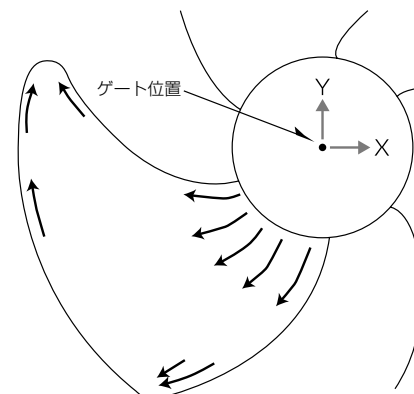


図3. 繊維配向方向の模式図

表1. 材料定数

解析ケース	弾性率(GPa)		ポアソン比	密度(kg/m ³)
	MD	TD		
1: 等方性	3.58		0.35	1.040
2: 異方性	3.58	1.75		

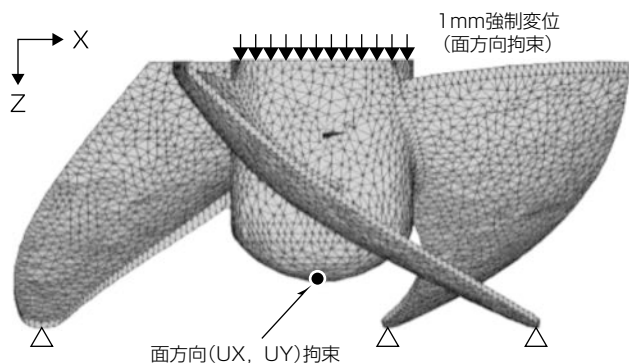


図4. 境界条件

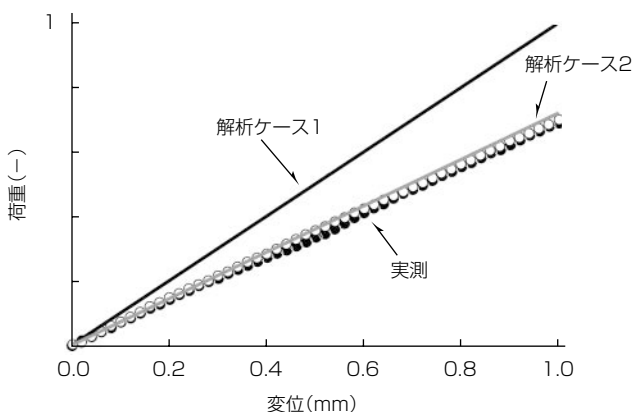


図5. 荷重変位線の比較(荷重はケース1の最大荷重で無次元化)

等方性物性による推定では、実機より剛性を高く予測することになる。

4.2 固有値解析と妥当性検証

次に、流動方向を考慮した固有値解析について検討する。解析モデルは静解析と同様であり、ANSYS11.0のブロックランチェス法を用いて固有値を求めた。解析時間は、Pentium4 3.2GHzのパソコンで、約5分である。

図6に、解析によって得られた固有値と振動試験によって得られた実機の固有値の関係を示す。破線は、実機と解析の固有値が一致する線である。いずれのモードでも、流動方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、流動方向を考慮せず、等方性物性を用いた解析ケース1では、実測結果と大きく異なっており、さらに、実測結果及び流動方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、静解析、固有値解析ともに、流動方向を考慮することによって、構造解析の精度向上が確認できた。この方法は、汎用構造解析ソフトウェアで容易に解析可能なため、幅広い製品に適用できる。今後は、複雑なゲート配置や複雑な形状の製品に適用し、この方法の適用範囲を明確にする。

5. む す び

繊維強化樹脂製品に対して、汎用構造解析ソフトウェア

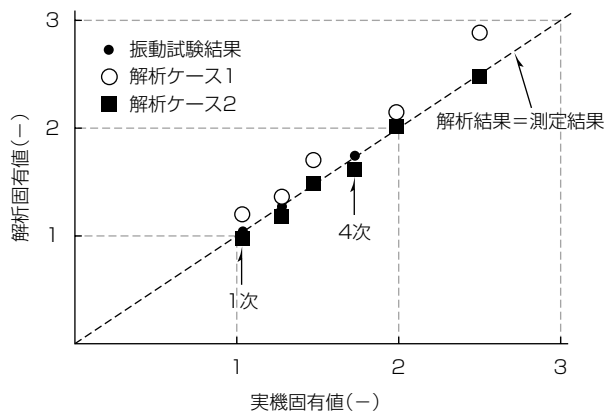


図6. 固有値の比較(1次固有値で無次元化)

で解析可能な伝熱解析で流動方向を簡易的に予測し、流動方向を異方性物性として設定する構造解析手法を提案し、その妥当性について検討した。その結果、X線CTによる繊維方向観察によって、伝熱解析で得られる熱の流れ方向と流動方向がほぼ一致することを確認した。さらに、この方法をプロペラファンの静解析及び固有値解析に適用し、流動方向を考慮した解析結果と実機試験の結果がよく一致した。この方法によって繊維強化樹脂の構造解析精度が向上し、ゲート位置の最適化や構造最適化によって、軽量・高剛性・高強度化、設計期間短縮、信頼性向上が可能になった。

参 考 文 献

- (1) Sakamoto, H., et al.: Systematic Identification Methodology of Specification and Approach for structural Design Optimization, Trans. of JSME, Series A, **76**, No.762, 241~250 (2010)
- (2) Tohgo, K., et al.: Influence of Fiber Orientation and Content on Fatigue Crack Growth Behavior in Short-Glass-Fiber-Reinforced Polycarbonate, Trans. of JSME, Series A, **59**, No.557, 62~67 (1993)
- (3) Chung, S.T., et al.: Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics, SPE, **35**, No.7, 604~618 (1995)
- (4) Foss, P. H.: Coupling of flow simulation and structural analysis for glass-filled thermoplastics, Polymer Composites, **25**, No.4, 343~354 (2004)
- (5) H.S. Hele-Shaw, The flow of water, Nature 58, No.1489, 33~36 (1898)
- (6) Nakano, R., et al.: Fiber Orientation Observation by X-ray CT and Simulation, J. of JSPP, **20**, No.4, 237~241 (2008)