繊維強化樹脂の伝熱解析を用いた 流動方向予測と構造解析との連成*

大石 智子^{*1}, 坂本 博夫^{*2}, 青木 普道^{*3}

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

Satoko OISHI, Hiroo SAKAMOTO^{*4} and Hiromichi AOKI

^{*4} Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation,
8-1-1 Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-8661 Japan

Recently, the number of products made from fiber-reinforced plastics (FRP) has been increasing due to their low cost, high rigidity, and high strength. Generally, injection molded FRP parts are known to be anisotropic, i.e. mechanical properties are different in the flow and transverse directions. Therefore, it is important to consider the flow direction during structural analysis and design for FRP products. In this study, a new method for structural analysis with consideration of flow direction is proposed. In this method, the flow analysis component was substituted with thermal analysis, whereby the flow direction was simply predicted on the basis of the direction of heat flux. Furthermore, it is easier to couple the thermal and structural analysis components and incorporate them into conventional software for structural analysis. In order to verify the prediction of flow direction by means of thermal analysis, fiber orientation was observed by X-ray CT. Verification was also conducted by performing static and modal analysis for a propeller fan. It was confirmed by means of fiber orientation observation that the heat flux direction was comparable to the resin flow direction. The results from both static and modal analysis with consideration of flow direction also agreed well with that of the actual product.

Key Words: Fiber-reinforced Plastics, Resin Flow, Fiber Orientation, Thermal Analysis, Structural Analysis, Static Analysis, Modal Analysis, Structural Design, Fan, CAE

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。一般に、樹脂は異方性を有するため、射出成形においてその流動方向(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、流動方向が機械的特性に及ぼす影響が大きく^{(1)~(4)}、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^{(5)~(8)}。

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が必要になること、マッピング作業に時間が必要になり、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⁽⁹⁾。また、流動方向が一様な状態にある等方性材料とみなした構造解析においては、実機と解析結果に大きな誤差が生じていた。

そこで、本研究では、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、伝熱解析により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。

伝熱解析による流動方向予測の検証のため、X線CTで繊維方向を観察した。さらに、本手法をプロペラファンの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. 流動方向予測と構造解析との連成

2・1 伝熱解析による流動方向予測 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。

* 原稿受付 2009年1月20日。

^{*1} 三菱電機(株)住環境研究開発センター(☎247-8501 鎌倉市大船5-1-1)。

^{*2} 正員, 三菱電機(株)先端技術総合研究所(☎661-8661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

^{*3} 三菱電機(株)中津川製作所(☎508-8666 中津川市駒場町1-3)。

E-mail: Sakamoto.Hiroo@aj.MitsubishiElectric.co.jp

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

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/m^3
 c : 比熱 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$
 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 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$

P : 圧力 Pa

τ : セン断応力 Pa

Q : 単位体積あたりの内部発熱量 W/m^3

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た熱伝導の支配微分方程式は、式(2)のように表される。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ &= K_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

なお、モデル形状が薄肉の場合、板厚方向の流速成分 V_z および面方向の熱伝導率 K_x, K_y は無視できるため、式(3)に簡略化される。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

同様に、射出成形 CAE における流動解析では、式(4)に簡略化される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

$$\begin{aligned} & \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \tau_{xz} \frac{\partial V_x}{\partial z} \\ & + \tau_{yz} \frac{\partial V_y}{\partial z} + Q \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

式(3)と式(4)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

Fig.1 Structural analysis flow that considers fiber orientation

ち、せん断応力を決定する粘度およ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、温度およ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において有効といえる。

汎用構造解析ソフト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り、熱の流れ方向が得られるため、得られた熱の流れ方向を流動方向におきかえ、2・2 項に示す構造解析を実施することにより、流動方向を考慮した構造解析が可能となる。

2・2 流動方向を考慮した構造解析 本構造解析では、得られた流動方向に基づき異方性物性として設定する。構造解析におけるそれぞれの要素ごとに、流動方向に MD の物性値、その垂直方向に TD の物性値を設定する。繊維含有率の高い樹脂においては、MD と TD の弾性率が数倍異なることから、このように異方性物性として設定することで、構造解析の精度が向上する。図 1 に、伝熱解析と構造解析のこれらのフローをまとめて示す。

3. プロペラファンの流動方向予測と検証

3・1 プロペラファンの流動方向予測 プロペラファンの流動方向を予測するため、汎用 FEM 解析ソフト ANSYS 11.0⁽¹²⁾ 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 3

(54,427 nodes, 27,246 elements)

Fig. 2 FEM model

Fig. 3 Distribution of heat flux vector

mmとした。境界条件として、全節点に温度0を、ゲート部に相当する節点に温度1を与えた。解析時間は、Pentium4 3.2 GHz のパソコンで約1分である。

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 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。

3・2 流動方向の妥当性検証 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⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾ことから、実機の流動方向の観察は、X線CT装置(XVA-160 CT:ユニハイトシステム社)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た。図4に、撮影画像の一例として、図3のA部における拡大写真を示す。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

Fig. 4 A picture by X-ray CT scanner

Fig. 5 Schematic diagram of fiber orientation

の場合、ゲート位置が画像の右上方向にあるため、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、プロペラファンのプレードの任意の箇所について繊維の配向方向を観察し、図5に示す繊維配向方向の模式図を得た。得られた繊維配向模式図と図3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。

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、伝熱解析により得られた熱の流れ方向に一致させた。これにより、構造解析において、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°Cにおける材料定数を表1に示す。なお、弾性率の実験的評価にはJIS試験片を

Table 1 Material constants for static analysis

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

※ $W_f=0.2$, $d_f=2700$, $d_c=1040$, $E_f=70$, $E_m=1.62$

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 E_{MD} をJIS試験片の値とし、TDの弾性率 E_{TD} を式(5)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。複合則では、通常ポアソン比も変化するが、簡単のためここでは均一材の値を用いた。

$$\frac{1}{E_{TD}} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m} \quad (5)$$

ここで、

V_f : 繊維体積含有率

E_f : 繊維の弾性率 GPa

E_m : 樹脂の弾性率 GPa

また、 V_f は、式(6)より求められる。

$$V_f = W_f \times \frac{d_c}{d_f} \quad (6)$$

ここで、

W_f : 繊維重量含有率

d_f : 繊維の密度 kg/m³

d_c : 複合材料の密度 kg/m³

なお、異方性材料物性におけるせん断弾性係数 G_{xy} , G_{yz} , G_{zx} についても本来は異方性を考慮する必要があるが、簡単のためここでは弾性率とせん断弾性係数との関係が等方性材料と等価と仮定し、ポアソン比 ν を用いて式(7), (8)により算出した。

$$G_{xy} = \frac{E_{MD}}{2(1+\nu)} \quad (7)$$

$$G_{yz} = G_{zx} = \frac{E_{TD}}{2(1+\nu)} \quad (8)$$

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

図7に、解析結果および同条件を模擬した圧縮試験

Fig. 6 Boundary condition for static analysis

※ Normalized value;
the load when 1mm displaced in Case 1 is 1

Fig. 7 Comparison in load-displacement curves

Table 2 Material constants for modal analysis

Case of analysis	Elastic modulus [GPa]		Poisson's 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]

から得られた荷重-変位線図を示す。図中の黒丸および白丸は、同一サンプルを2回測定した実測点であり、実線は、前項までに述べた条件で線形解析を実施した結果である。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、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。固有値解析に使用した温度17°Cの材料定数を表2に示す。また、解析モデルは静解析と同様であり、Ansys 11.0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、

Fig. 8 Relationship between analysis and examination of natural frequencies

Pentium4 3.2 GHz のパソコンで、約5分である。

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。いずれのモードにおいても、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においては、実測結果と大きく異なっており、さらに、実測結果およ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り、構造解析の精度向上が確認できた。本手法は、汎用構造解析ソフト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、本手法の適用範囲を明確にする。

5. 結 言

繊維強化樹脂製品に対して、汎用構造解析ソフト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。さらに、本手法をプロペラファンの静解析および固有値解析に適用し、以下の結論を得た。

(1) X線CTによる繊維方向観察により、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。

(2) プロペラファンの静解析に適用し、流動方向

を考慮した静解析結果と実機荷重試験の結果が良く一致した。同様に、プロペラファンの固有値解析においても、流動方向を考慮した固有値解析結果と実機固有値が良く一致した。

文 献

- (1) Tohgo, K., Ishii, H. and Nobayashi, F., *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 59, No. 557 (1993), pp. 62-67.
- (2) Yasuhara, T., Araki, Y., Aihara, H., Ito, H., Saito, T., Marukami, H. and Ohtake, N., *Mechanical Properties of Carbon Nanofiber Reinforced Composites and Fiber Orientation Behavior in Thin-Wall Injection Molding, Proceeding of the Korea-Japan Plastics Processing Joint Seminar 2006*, Vol. 1, No. 1 (2006-9), pp. 25-28.
- (3) Oka, H., Narita, R., Akiniwa, Y. and Tanaka, K., *Low-Cycle-Fatigue Characteristics of Short Glass Fiber Reinforced Polybutyleneterephthalate*, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 56, No. 5 (2007), pp. 406-413.
- (4) Gupta, M. and Wang, K. K., *Fiber orientation and mechanical properties of short-fiber-reinforced injection-molded composites: Simulated and experimental results*, *Polymer Composites*, Vol. 14, No. 5 (1993), pp. 367-382.
- (5) Uzawa, K., *Composites Science/Technology and New Challenges for Tomorrow's Applications 1: Present and Future State of FRP Processing*, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 55, No. 1 (2006), pp. 131-137.
- (6) Takano, N., Asai, M., Oyama, T. and Ogawa, T., *Composites Science/Technology and New Challenges for Tomorrow's Applications 2: Simulation-Based Design of Composite Materials and Structures*, *Polymer Composites*, Vol. 55, No. 2 (2006), pp. 237-242.
- (7) De Frahan, H. H., Verleye, V., Dupret, F. and Crochet, M. J., *Numerical prediction of fiber orientation in injection molding*, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 32, No. 4 (1992), pp. 254-266.
- (8) Chung, S. T. and Kwon, T. H., *Numerical simulation of fiber orientation in injection molding of short-fiber-reinforced thermoplastics*, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 35, No. 7 (1995), pp. 604-618.
- (9) Foss, P. T., *Coupling of flow simulation and structural analysis for glass-filled thermoplastics*, *Polymer Composites*, Vol. 25, No. 4 (2004), pp. 343-354.
- (10) Hele-Shaw, H. S., *Transactions, Institute of Architecture*, Vol. 11, No. 25 (1989).
- (11) Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 6th ed., (1968), McGraw-Hill, New York.
- (12) *Ansys 11.0 online manual*, (2007), Ansys, Inc.
- (13) Nakano, R., Shiota, T., Hirakimoto, A., Taki, K., Takashio, H. and Chean, Y.-S., *Fiber Orientation Observation by X-ray CT and Simulation*, *Journal of the Japan Society of Polymer Processing*, Vol. 20, No. 4 (2008), pp. 237-241.
- (14) Fujita, A., Baba, F., Ishida, H., Nakai, A. and Hamada, H., *Estimation of Mechanical Properties of Injection Molded CF/LCP Thin Plates Using Fiber Orientation Distributions*, *Journal of the Japan Society of Polymer Processing*, Vol. 13, No. 10 (2001), pp. 700-703.