繊維強化複合材料のミクロ構造に基づく樹脂透過性の3次元評価[†]

高 野 直 樹*, 寺 田 賢二郎** 座 古 勝*

Three-Dimensional Evaluation of Permeability of Fiber Reinforced Composite Materials Based on Their Microstructures

by

Naoki TAKANO*, Kenjiro TERADA** and Masaru ZAKO*

This paper proposes a novel computational method for the evaluation of the permeability of fiber reinforced composite materials with complex microstructures. The homogenization theory for solid-fluid mixture is employed to characterize the micro-macro coupling effects. A characteristic function associated with the flow velocity is derived, whose average is defined as the permeability tensor. The derived relation between the macroscopic velocity and pressure gradient coincides with the conventional Darcy's law. Therefore, the proposed method enables us to predict the permeability tensor numerically without any experimental work. Furthermore, the characteristic function provides useful information to understand the correlation between the microscopic architecture and the macroscopic permeability tensor. Once the permeability tensor is given, we can use a conventional process simulator under the realistic process conditions. The macroscopic pressure gradient is obtained, which leads to the analysis of the actual microscopic flow field in the microstructure. The proposed microstructure-based evaluation can be used as the pre/post-processing of the conventional macroscopic process simulation. Three-dimensional modeling and analysis are shown for textile composites with the help of finite element method.

Key words : Permeability, Composite material, Numerical analysis, Homogenization theory, Microstructure

1 緒 言

航空機や宇宙機器構造への先進複合材料の適用が盛んに検討されてきたが、近年、低コスト成形が最重要課題としてあげられ、各国で精力的な試みがなされている。この実現には、材料の低コスト化と製造技術の低コスト化が必要である。解決手段として有力視されているのが、RTM (Resin Transfer Molding) などドライプリフォームに未硬化の液体状の熱硬化性樹脂を含浸させた後、樹脂を硬化させるプロセスである。¹⁾このようなプロセスはLCM (Liquid Composite Molding) ともよばれる。プリフォームには織布などのテキスタイルが低コスト化と性能向上の点から注目されている。²⁾研究項目としては、実験的アプローチに加え、プロセスシミュレーション/モデリングも必要であると考えられている。^{1), 2)}

このような背景から、本研究は現存のLCMシミュレータのプリ・ポストプロセスとして使用できる新しい数値解析手法を提案するものである。本研究の必要性和新規性は2章で詳述する。第一の特徴は、プリフォームのミクロ構造を考慮した解析と評価を行う点にある。このため、ミクロマクロ連成問題の数値解析のための理論として近年注目されている均質化法を適用する。著者ら^{3), 4)}が開発した固液複合体の準静的問題に対する均質化法の定式化を用いた。

2 LCM プロセスシミュレーションの現状と本研究の目的

LCM プロセスシミュレーションに関する研究はこれまでに多数行われている。^{5), 6)}解析理論は、多孔質体中の粘性流体の浸透流を扱うダルシー則 (Darcy's law) に基づいている。これを式 (1) に示す。

$$V_i = -\frac{S_{ij}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (1)$$

ここに、 V_i は流速、 μ は粘性、 P は圧力であり、係数 S_{ij} は透過係数 (permeability tensor) とよばれる2階のテンソルである。

透過係数は、通常は実験により計測されるが、これでは、新材料の適用を考える際には透過係数の計測実験をまず行わなくてはならず、実験なしに予測できる手法の開発が要求されている。この実験装置は簡単なものであるが、装置の型の端部の影響 (edge flow effect)、含浸後の流れと含浸中の流れの違い (saturated or unsaturated flow)、型変形、という誤差要因があり、非常に注意深く実験を行わなければきわめて大きな誤差を生じるとの報告がある。⁷⁾このため、文献によりデータが異なるとの指摘もあり、⁸⁾データベース化も進んでいないのが現状である。

一方、理論解析による透過係数の予測は一方繊維強化材に限られ、それらは基本的に繊維体積含有率と繊維径の関数となっている。⁹⁾前述のような織物に代表される

[†] 原稿受理 平成 12 年 6 月 6 日 Received June 6, 2000

* 正 会 員 大阪大学工学研究科生産科学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Manufacturing Sci., Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

** 正 会 員 東北大学情報科学研究科人間社会情報科学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻, Dept. of Human-Social Information Sci., Tohoku Univ., Aoba-ku, Sendai, 980-8579

テキスタイルのプリフォーム材に適用が困難であることは自明である。

そこで本研究では、数値解析を採用することにした。また、複合材料はマイクロな不均質性を有する材料であるが、ダルシー則はマクロな速度と圧力勾配の間の関係式である。一方、織布の織り構造のような複雑なマイクロ構造を有するテキスタイルに対し、樹脂透過係数はマイクロ構造の影響を強く受ける。したがって、マイクロマクロの連成を数学的に厳密に記述できる均質化法を採用することにした。これまでの研究では、樹脂透過係数の上下界を与えるであろう数値解析がなされてきたのに対し、本研究ではマイクロマクロ連成を厳密に記述することにより、精度よい樹脂透過係数の予測を行えるようにする。

さらに、これまでの LCM プロセスシミュレーションは、何らかの手段で得られた透過係数とダルシー則を用いたマクロな解析であった。これに対し、均質化法を用いた本研究では、マイクロ構造中の流れ場も解析することができる。これまで、樹脂透過性は、透過係数によってのみ議論されてきたが、本研究ではマイクロな流れ場に基づき透過性を定量的に評価する手法を提案する。具体的な評価手法は4章に記述する。

なお、均質化法による固液複合体の準静的問題の定式化は既報^{3), 4)}に報告済みであるので、本論文における定式化の記述は結果を簡潔に要約する。

3 均質化法による定式化の概要

粘性流体で満たされた弾性多孔質体（領域 Ω ）を考える。Fig. 1 に示すように、マイクロ構造が周期的に配列しているとする。なお、テキスタイルでは実際に周期性の条件は満足される。¹⁰⁾ 多孔質体（マクロ構造）の代表寸法を L 、マイクロ構造の代表寸法を ℓ とし、マイクロマクロスケールのスケール比を

$$\varepsilon = \frac{\ell}{L} \quad (2)$$

とする。また、マクロ構造を記述するための通常の座標系（マクロ座標系） x と、マイクロ構造とマイクロ挙動を記述するためのマイクロ座標系 y を考えると、

$$y = \frac{x}{\varepsilon} \quad (3)$$

なる関係がある。場の変数はマイクロ構造の寸法の影響を

Fig. 1. Micro-macro coupled problem's setting.

受けるため、以後このことを表すためにスケール比 ε を各変数の上添字として附する。

この固液複合体の準静的な釣り合い式は、

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^\varepsilon}{\partial x_j} + \rho^\varepsilon f_i = 0 \quad \text{in } \Omega^\varepsilon \quad (4)$$

と表される。ここに、 σ_{ij}^ε は応力テンソルであり、 $\rho^\varepsilon f_i$ は ρ^ε を密度としたときの物体力である。境界条件として以下の2つの式を考える。

$$\left. \begin{aligned} u_i^\varepsilon &= \hat{u}_i & \text{on } \Gamma_u \\ \sigma_{ij}^\varepsilon n_j &= \hat{t}_i & \text{on } \Gamma_t \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 $\hat{u}_i$ 、 $\hat{t}_i$ は規定された変位と表面力である。固相は線形弾性体とし、液相は非圧縮性ニュートン流体とし、さらにストークス流れを仮定する。固相、液相の構成式は統一的に以下のように表される。

$$\sigma_{ij}^\varepsilon = b_{ijkh}^\varepsilon e_{kh}(\mathbf{u}^\varepsilon) + c_{ijkh}^\varepsilon e_{kh} \left(\frac{\partial \mathbf{u}^\varepsilon}{\partial t} \right) \quad (6)$$

ここに、 $e_{kh}(\bullet)$ はひずみを与える微分演算子を表し、

$$b_{ijkh}^\varepsilon = \begin{cases} E_{ijkh} & \text{in } \Omega^{s^\varepsilon} \\ 0 & \text{in } \Omega^{f^\varepsilon} \end{cases} \quad (7)$$

$$c_{ijkh}^\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{in } \Omega^{s^\varepsilon} \\ 2\mu^{*s} \left(\delta_{ik}\delta_{jh} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\delta_{kh} \right) & \text{in } \Omega^{f^\varepsilon} \end{cases} \quad (8)$$

である。上添字の s, f は固相、液相を意味する。 E_{ijkh} は固相の弾性テンソル、 δ はクロネッカーのデルタである。 μ^{*s} はマクロな立場で粘性を記述したものであり、粘性のマイクロマクロの相関は次元解析により $\mu^{*s} \approx \varepsilon^2 \mu$ で表されることが知られている。^{3), 11)}

以上の支配方程式を弱形式で表し、変位、圧力、速度に関する漸近展開式を代入して変形する。

$$u_i^\varepsilon(x, y, t) \approx u_i^0(x, t) + \varepsilon u_i^1(x, y, t) \quad (9)$$

$$p^\varepsilon(x, y, t) \approx p^0(x, t) + \varepsilon p^1(x, y, t) \quad (10)$$

$$v_i^\varepsilon(x, y, t) \approx v_i^0(x, t) + \varepsilon v_i^1(x, y, t) \quad (11)$$

ここに t は時間を表す。数学的に均質化の作業は $\varepsilon \rightarrow 0$ の極限をとることに対応する。この極限操作により、マイクロおよびマクロな境界値問題が固相、液相についてそれぞれ導かれる。本研究では、透過性評価に関連する液相のマイクロ方程式のみ使用するため、それらの最終結果をまとめる。

まず、液相について解くべきマイクロ方程式は、マイクロ構造中の液相領域を Y_f とすると、

$$\mu \int_{Y_f} D \frac{\partial \kappa_i^k}{\partial y_j} \frac{\partial W_i}{\partial y_j} dY_f = \int_{Y_f} W_k dY_f \quad \forall W_i \quad (12)$$

となる。ここで $D: \dot{e}_{ij} \rightarrow \dot{e}_{ij} - (1/3) \dot{e}_{pp} \delta_{ij}$ は液相の構成式より導出される係数項をまとめて表記した演算子である。 W_i は単位マイクロ構造内で発散が零となるような周期関数である。これらの詳細は文献³⁾を参照されたい。式(12)を周期境界条件の下に解いて得られる κ_i^k は、マイクロ構造中の流れ場を特徴づける流速に関する特性関数 (characteristic function) である。特性関数を用いて、流速は次式で記述される。

$$v_i^0(x, y, t) = \frac{\partial u_i^0(x, t)}{\partial t} + \left(\rho^f f_k - \frac{\partial p^0(x, t)}{\partial x_k} \right) \kappa_i^k(y) \quad (13)$$

これは式 (11) の漸近展開式の第一項であるが, ミクロ構造の影響を反映したものとなっていることがわかる. 式 (13) をミクロ構造内で体積平均をとることにより, マクロな平均流速が

$$V_i(x, t) = \langle v_i^0 \rangle = \frac{\partial u_i^0(x, t)}{\partial t} - \langle \kappa_i^k \rangle \frac{\partial P}{\partial x_k} \quad (14)$$

のように定義される. $\langle \cdot \rangle$ は体積平均を表す演算子である. ただし, マクロな圧力勾配と物体力を合わせた項をまとめて

$$\frac{\partial P}{\partial x_k} \equiv - \left(\rho^f f_k - \frac{\partial p^0(x, t)}{\partial x_k} \right) \quad (15)$$

と定義した. 式 (14) は流れ場が固相の変形の影響も受けることを考慮し, 強化繊維の幾何的配置といったミクロ構造の情報を反映した一般化されたダルシー則となっており, 特性関数の体積平均を透過係数 (permeability tensor) と定義できる.

$$K_{ik} = \langle \kappa_i^k \rangle \quad (16)$$

ここで, 式 (1) と比べると粘性を式 (12) に含んで定式化したため透過係数テンソルの記号を変えているが, 実質的な違いはない. すなわち, 上式で定義された透過係数は強化形態という幾何的情報を反映したものであり, 粘性の影響はその本質でないことを意味している.

このほかに, 固相についてのミクロ方程式と, 固相・液相についてのマクロ方程式 (質量保存則を含む) が得られるが, それらについては既報^{3), 4)}を参照されたい. なお, 上の偏微分方程式は有限要素法により離散化して解くことができる.

4 均質化法による樹脂透過性評価手法の提案

均質化法の定式化を複雑かつ任意の強化形態の基材に適用し, 透過性を評価するために, 以下の3手法が可能となる.

- (a) マクロな透過係数テンソルの評価.
- (b) ミクロな流速に関する特性関数の評価.
- (c) マクロな圧力勾配が与えられたときにミクロな流れ場の評価.

解析の手順は以下のとおりである. まず, 式 (12) のミクロ方程式を, 単位ミクロ構造に対して周期境界条件のもとで解き, 特性関数を求める. 用意するデータは素材の特性だけである. 次に, 式 (16) の体積平均により透過係数テンソルを求める. これらを実行することにより, 強化形態により決まる固有の流れ場の特性を評価することができる.

予備実験を行うことなくマクロな透過係数が求まった後は, 既存の LCM プロセスシミュレータを用いたマクロな解析が可能である. この結果得られるマクロな圧力勾配を用いて, 式 (13) よりミクロな流れ場を知ることができる. 特に, 3章の定式化では固相の変形による影響も考慮したが, 微小変形としてこの影響が無視できる場合には, 式 (13) は式 (15) を考慮して次式のように簡略化される.

$$v_i^0 = - \left(\kappa_i^1 \frac{\partial P}{\partial x_1} + \kappa_i^2 \frac{\partial P}{\partial x_2} + \kappa_i^3 \frac{\partial P}{\partial x_3} \right) \quad (17)$$

ここではわかりやすく総和規約を用いずに示した. 式 (17) よりわかる通り, 特性関数は, マクロな単位圧力勾配のもとでのミクロ構造中の流速を与えるものであることがわかる. この時, 下添字 $i=1, 2, 3$ からわかるとおり, ある一方向のみにマクロな単位圧力勾配が与えられても, ミクロ構造中の流れ場は3次元的である. 複雑な強化形態をとるテキスタイルでは, 繊維束のうねりがあるためミクロな流れ場は当然3次元的であると予想される. 実験による3次元的なミクロ流れ場の計測は困難であるが, 上述の解析によれば容易に予測することができる.

以上の透過性評価の流れを Fig. 2 にまとめる. 均質化法によるミクロな評価は, 既存の LCM プロセスシミュレーションのプリ・ポストプロセスとして用いるものとなる. また, 透過係数だけによる評価に加え, 特性関数や実際の境界条件 (プロセス条件) 下でのミクロ流れ場を評価するものである.

5 テキスタイル複合材料の透過性評価例

5.1 解析対象と有限要素モデル

本研究では, 解析例として織布と組布¹²⁾をとりあげる. ただしここで組布というのは, 強化繊維がストレートに配向し, 交叉部は接着されている基材であり, 二軸から四軸の組布が製作できる. 織布のような繊維束の物理的絡みがないため織り工程がないばかりか, 樹脂の含浸も容易であり, 成形性にすぐれている. ロービングクロスと四軸組布とでウェットアウト時間を比較すると約半分であったとの報告がなされている.¹²⁾そこで, 提案する透過性評価手法の適用の一例として, 織布と組布の比較を行うこととした.

Fig. 3 ~ Fig. 5 に, 単位ミクロ構造の有限要素モデルを示す. 織布の場合には, 繊維束の交叉部において樹脂の流動が十分にある場合とまったくない場合の2通りを考えることとし, それぞれ Fig. 3, Fig. 4 にそのモデルを示した. 以後, 交叉部に隙間を考えるものを織布モデル

Fig. 2. Schematic flow of the micro-macro analysis and evaluation of permeability.

Fig. 3. Microstructure model of woven cloth 1 with gap.

Fig. 4. Microstructure model of woven cloth 2 without gap.

Fig. 5. Microstructure model of "Kumi" cloth.

ル1, 隙間がないとしたモデルを織布モデル2とよぶ. 3つのモデルの比較は, 繊維体積含有率と繊維束の断面積が等しいという条件下で行った. これは, 一方向繊維強化材の透過係数が両パラメータの関数で表現できるという成果を反映して決めた. なお, 図の固相は繊維束をモデル化したものであり, 繊維体積含有率(固相の体積分率)は18%である. 定式化は粘性流体で満たされた弾性多孔質体に対するものであり, いわゆる含浸後の saturated flow を考えるため, 繊維束内の流動はそのスケールオーダーの観点から無視した. 要素分割は8節点六面体要素を用い, 各モデルの要素数は, 織布モデル1が20480, 織布モデル2が15360, 組布モデルが16384であり, 要素寸法や形状といった離散化による差がないように留意した. 液相の粘性は $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ とした. なお, 式(12)の解である特性関数 κ_i^k は粘性に反比例するだけであり, 粘性の設定値は後の議論に影響を及ぼすものではない.

4章で述べた3つの評価手法(a)~(c)にしたがい, 結果を以下に述べる.

5・2 透過係数テンソルと特性関数の評価

透過係数テンソルを計算した結果, Fig. 3~Fig. 5のミクロ座標系において y_1 - y_2 の面内等方性を有することが確認されたため, 面内成分 (y_1) と面外成分 (y_3) について Table I にまとめて示す. これより, 面内成分の差は小さいが, 織布モデル1, 組布モデル, 織布モデル2の順に透過性にすぐれることを示唆している. また, 面外成分はモデルによる差が著しく, 特に織布モデル1は劣る結果となっている.

面外成分に大きな差が生じた理由を解明するために, 特性関数を調査した. 特性関数はマクロな仮想的な単位圧力勾配あたりの流速である. y_3 方向の特性関数を流線表示したものが Fig. 6 である. 織布モデル2や組布モデルと比較し, 繊維束交叉部に隙間を設けた織布モデル1では流線が蛇行し, 複雑な流れ場となることがわかる. 織布モデル1の特性関数をより詳細に調べるために, パーティクルトレース表示を行ったのが Fig. 7 である. これより明らかに遅い流れが隙間に流れ込む様子がわかる. 特性関数の体積平均が透過係数テンソルであるため, Table I のように織布モデル1の面外成分の値が低くなったことが理解できる. このように, 体積平均をとることにより失われる情報があっても, 均質化法により定義される特性関数を評価すれば, 有益な知見を得ることができる. また, 上記の考察は3次元解析を行うことによりはじめて可能になるといえる.

Table I. Calculated permeability tensor.

	Woven 1	Woven 2	"Kumi"
y_1	2.91×10^{-1}	2.78×10^{-1}	2.84×10^{-1}
y_3	3.64×10^{-1}	7.85×10^{-1}	6.33×10^{-1}

(unit : $\text{m}^2/\text{Pa} \cdot \text{s}$)

Fig. 6. Flow lines of characteristic function in y_3 -direction.

Fig. 7. Particle trace display of characteristic function.

5・3 ミクロマクロ連成下での透過性評価

特性関数によるミクロな評価も、透過係数テンソルによるマクロな評価も、強化形態により決まる基材に固有の特性であるが、実際のプロセス条件下での流れ場との対応について調査する必要がある。つまり、マクロな圧力勾配が種々の方向を持つとき、式 (17) からわかるとおり、複数の特性関数の重み付け算術和により実際の流れ場が生じるため、単一の特性関数による評価では不十分といえる。

本来ならば Fig. 2 の手順にしたがい、実際のプロセスシミュレーションを行うべきであるが、本論文では仮想的なプロセス条件として以下の 2 ケースを考えた。

$$\text{Case 1 : } \frac{\partial P}{\partial x_1} = \frac{\partial P}{\partial x_2} = \frac{-1}{\sqrt{2}}, \frac{\partial P}{\partial x_3} = 0 \quad (18)$$

$$\text{Case 2 : } \frac{\partial P}{\partial x_1} = \frac{-\sqrt{3}}{2}, \frac{\partial P}{\partial x_2} = \frac{-1}{2}, \frac{\partial P}{\partial x_3} = 0 \quad (19)$$

ここで、面内の圧力勾配のみを考えた理由は、従来から行われている透過係数計測実験との対応を考えたことと、Table I でわずかな差があった面内の透過係数テンソルの値との対応を考察するためである。値はベクトルの大きさが 1 となるようにしているため、架空の値であるが、式 (17) の線形性から議論の一般性は失われない。ケース 1 は繊維束から 45° 方向、ケース 2 は 30° 方向の単位圧力勾配を考えている。

Fig. 8. Actual flow field for woven cloth 1.

Fig. 9. Actual flow field for woven cloth 2.

Fig. 10. Actual flow field for "Kumi" cloth.

織布モデル1, 2 および組布モデルに対し, 上記の2ケースのマクロな条件下での実際のミクロな流れ場を Fig. 8 ~ Fig. 10 に示す. ミクロ構造中の流れ場は複雑であり, 各モデルとも速度と方向に分布があることがわかる. また, 同じ基材であっても, ケース1とケース2では流れ場に違いがあることが定性的に判断される. しかし, 基材の選定やプロセス条件の決定のためには, より明確な透過性の定量的指標が必要である.

そこで, Fig. 8 ~ Fig. 10 の流速ベクトルが節点で計算されていることから, 節点での速度 (流速の大きさというスカラー値) を求め, ミクロ構造中の速度の分布を調査した. まず, 速度の分布をヒストグラムにして表したのが Fig. 11 ~ Fig. 13 である. 横軸の速度は, 式 (18), (19) のとおりマクロな圧力勾配を単位大きさとしたので, 表示のような値となっている. 縦軸は総節点数で除した割合を示している. これより, 明らかに織布モデル1が他の2つのモデルと異なる傾向を示していることがわかる. 織布モデル2と組布モデルでは定性的には似通った分布となっている. また, ケース1とケース2で異なる傾向を示すこともわかる. これより, プロセス条件が異なれば, 透過性も異なり, 強化形態に固有の透過係数テンソルのみによる評価では不十分であることがわかる.

さらに, ヒストグラムの情報から, 流速の最大値, 最小値, 最大値と最小値の差 (速度分布の幅), 頻度の高い速度, 平均および分散を計算した. 結果を Table II にまとめる. 表には前述の透過係数テンソルもあわせて示す. このうち, 頻度の高い速度 (表中の peak) と平均値は高いほど透過性がよいと考えられ, 一方, 分散は小さ

Fig. 11. Distribution of microscopic flow velocity for woven cloth 1.

Fig. 12. Distribution of microscopic flow velocity for woven cloth 2.

Fig. 13. Distribution of microscopic flow velocity for "Kumi" cloth.

いほど均一な流れ場となり透過性がよいと考えられる. この観点から Table II に基づき評価すると, 織布モデル1はいずれの項目でも透過性に劣ると判断される. 最も透過性にすぐれていると判断されるのは, 組布モデルの

Table II. Quantification of the distribution of microscopic flow velocity.

	Woven cloth 1		Woven cloth 2		“Kumi” cloth	
Permeability (m ² /Pa·s) in-plane out-plane	2.91 × 10 ⁻¹ 3.64 × 10 ⁻¹		2.78 × 10 ⁻¹ 7.85 × 10 ⁻¹		2.84 × 10 ⁻¹ 6.33 × 10 ⁻¹	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
max (m/s)	0.777	0.944	0.693	0.844	0.718	0.874
min (m/s)	0.0127	0.0077	0.0516	0.0325	0.0586	0.0419
max-min (m/s)	0.764	0.937	0.641	0.811	0.659	0.832
peak (m/s)	0.346	0.203	0.461	0.468	0.506	0.406
average (m/s)	0.375	0.370	0.391	0.384	0.404	0.397
variance (m ² /s ²)	0.0391	0.0433	0.0218	0.0266	0.0209	0.0261

ケース1の結果である。組布モデルは最小値、速度分布の幅においてもすぐれており、最大値は相対的に低いものの、均一な流れ場が形成されていると判断される。組布が成形性にすぐれるという報告¹²⁾と対応しており、本評価法が妥当なものと考えられる。一方、透過係数テンソルの面内成分の値の比較とは相反する結果である。したがって、透過係数テンソルだけで評価するのではなく、4章で述べた3つの評価手法に基づく総合的な判断が必要であり、最終的には実際のミクロな流れ場による評価が重要であると考えられる。このようなミクロな流れ場の詳細な評価は、実験観察による手法では困難であり、本論文で提案する均質化法と数値解析によるアプローチが有効である。

6 結 言

均質化法によるミクロ解析により、RTM成形に代表されるLCMプロセスにおける樹脂透過性を評価するための新しい手法を提案し、織布、組布の簡単なモデルによりその有用性を示した。提案手法は、既存のLCMプロセスシミュレーションのプリ・ポストプロセスとして容易に使用することができるものである。今後は、市販のマクロなRTM解析ソフトなどとリンクし、実際のRTM成形時の良／不良のデータと、本論文で提案したミクロな流れ場の定量化の手法との対応についての検討を行いたい。その結果、ミクロな流れ場の定量的評価手法が確立されれば、逆解析などにより最適プロセス条件やプリフォーム配置の決定に有力な手段となるものと期待される。

なお、本研究の一部は科学研究費基盤研究(C)(11650069)の助成を受けて実施したものであることを記

し謝意を表する。また、本論文を執筆するにあたり吉岡智美氏の多大なる協力を得たので感謝する。

参 考 文 献

- 1) 坂本 昭, 日本繊維機械学会第52回年次大会講演要旨集, 172 (1999).
- 2) 山口泰弘, 吉田幹根, 日本複合材料学会誌, **25**, 45 (1999).
- 3) K. Terada, T. Ito and N. Kikuchi, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., **153**, 223 (1998).
- 4) 高野直樹, 寺田賢二郎, 座古 勝, 吉岡智美, 日本複合材料学会誌, **26**, 171 (2000).
- 5) T. G. Gutowski, “Advanced Composites Manufacturing” (1997) John Wiley & Sons.
- 6) C. -H. Shih and L. J. Lee, Polymer Composites, **19**, 626 (1998).
- 7) R. S. Parnas, K. M. Flynn and M. E. Dal-Favero, Polymer Composites, **18**, 623 (1997).
- 8) R. Gauvin and F. Trochu, Polymer Composites, **19**, 233 (1998).
- 9) B. R. Gebart, J. Composite Mater., **26**, 1110 (1992).
- 10) N. Takano, Y. Ohnishi, M. Zako and K. Nishiyabu, Int. J. Solids Struct., **37**, 6517 (2000).
- 11) U. Hornung, “Homogenization and Porous Media” (1997) Springer-Verlag, New York.
- 12) 藤井幹也, 山口茂男, 南条尚志, 平山紀夫, 織田政信, 強化プラスチック協会 43rd FRP CON-EX 講演会前刷集, 111 (1998).