複合材料の数値シミュレーション技術

4. テキスタイル複合材の数値モデリング†

中西康雅* 倉敷哲生**

Technique of Numerical Simulation for Composite Materials

IV : Numerical Modeling of Textile Composites

by

Yasumasa NAKANISHI* and Tetsusei KURASHIKI**

Key words: Textile, Composites, FRP, Finite element analysis, Multi-scale analysis

1 緒 言

地球温暖化や化石資源枯渇によるエネルギー問題の深刻化を受け、車輛・航空分野では高強度、軽量性に優れた繊維強化複合材を構造部材として積極的に用途展開を図ることが期待されている。また近年、構造物の使用環境はより複雑化し、ますます高度な性能要求されている。その要求される機能は、製品のマクロレベルでの挙動を通して評価されるが、構造物の機能はミクロレベルでの材料特性が支配要因となることもある。

繊維強化プラスチック(FRP)に当てはめると、例えば、繊維・母材を明確に区別できるスケールをミクロスケールとし、ミクロスケールから比べると巨視的で繊維束の強化構造が判別できるスケールをメゾスケール、実構造物レベルのスケールをマクロスケールと分類することができ、本稿ではそれぞれが有する構造をミクロ構造、メゾ構造、マクロ構造と称するとする。図1にFRPをマ

ルチスケールの概念で整理した図を示す。各スケールにおいて、異なる理論、数値解析、実験等の力学的特性評価手法が存在し、これらのスケールの総合的な評価を試みるマルチスケール解析に関する研究も盛んに行われている。

本稿では図1の中のメゾ構造に着目する。メゾ構造での設計を適切に行うことで、より優れた機能を持つ製品開発を支援するものと考え。テキスタイル複合材のメゾ構造としては、織り構造や組紐構造、編み構造など種々の形態が存在する。中でも、強化繊維を織物とした織り構造は、織布特有の柔軟性を有していることから複雑な形状に対する成形性にも優れている。織布技術を利用して、2次元強化材を積層後、追加工程で3次元化する縫合技術も開発されており、その技術は、一体成形が必要な他の強化形態に比べてコストが低く、汎用性も高いために注目されている。

図1 繊維強化複合材料のマルチスケール

† 原稿受理 平成26年12月8日 Received Dec. 8, 2014 ©2015 The Society of Materials Science Japan.

* 三重大学教育学部 〒514-8507 津市栗真町屋町1577, Faculty of Education, Mie Univ., Kurimamachiya-cho, Tsu, 514-8507

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 吹田市山田丘, Dep. of Eng., Osaka Univ., Suita, Osaka, 565-0871

一方で、これらのテキスタイル複合材料のメゾ構造には、繊維配向角や積層構成、基材の組合せ、繊維含有率といった様々な豊富な設計パラメータが存在する。これらの設計変数を最適に設定することができれば材料の機能発現に有効に作用するが、材料の改良・開発の度に特性評価をしなければならない問題もある。このことは、実スケールでの試験による信頼性評価を行わなければならない航空機や車両では、価格のみならず開発期間の長期化の問題を含んでいる。

そこで、コンピュータ援用による設計の自動化や高速化がこれらの課題解決策として考えられる。数値シミュレーションにおいて、複合材料の複雑な不均質性や局所的な応力評価等を解析するには、そのモデル化が必須条件である。

本稿では、テキスタイル複合材料の数値モデリングとして、幾何学的なモデリング手法とそのシステム化について概説する。なお、この分野に関連する教科書的文献としては S.V.Lomov が監修した文献¹⁾、P.Boisse が監修した文献²⁾などが挙げられ、ご清覧をお薦めする。

2 テキスタイル複合材料のモデリング手法

2.1 モザイクモデル

コンピュータの発展に伴い数値解析手法、特に有限要素法 (FEM) の急速な発達、安全性、信頼性の向上に大きく貢献してきた。FRP においては、強化形態や繊維配向角により、どのような力学的特性の変化をもたらすか、どの設計パラメータがどの特性に影響するかなどを調査する感度解析のために用いられてきた。そのために一般的に用いられている手法は、メゾ構造の有限要素モデルによるものである。メゾ構造の有限要素モデルは、一方向繊維強化複合材料の積層板の解析をはじめとして研究されている。織物複合材料や組物複合材料といった構造を持つ FRP に関しては様々なモデリング手法が検討され、例えば、石川・Chou らは図 2 に示すボクセル要素を基本としたモザイクモデルを提案している³⁾。

(a) ボクセルモデル (b) 朱子織り構造への適用
図 2 石川・Chou らのモデル

2.2 はり構造モデル

濱田らは、図 3 に示すような対となるはり要素を中間要素で結合して繊維束を表現したモデル化法を提案しており⁴⁾、梁構造モデルと称されている。このモデルの特徴は、繊維束同士の交差部に樹脂を表現し、界面特性を考慮可能にしている点である。幾何形状を反映した 3 次元フレーム構造を有限要素分割するもので、この手法により組物複合材料・編物複合材料・平織及び 3 軸織物複合材料などのモデル作成も可能である。

図 3 はり構造モデル

2.3 織り構造の幾何形状モデル

Whitcomb らは、図 4 に示す織物複合材料の幾何形状をモデル化した有限要素モデルを作成している⁵⁾。繊維束の 3 次元のなうねり形状を正弦曲線や余弦曲線などの近似曲線により、また、繊維束断面をレンズ形状などの任意形状により表現し、有限要素モデリングする方法である。しかし、繊維束交差部の余分樹脂により形成される層を設けておらず、交差する繊維束同士が連続体としてモデル化されてしまう問題点が指摘されている。この点は、織物複合材料の変形挙動に対する解析結果の精度の点に疑問を残すもので、現在では改善されるべき点であると考えられている。

図 4 Whitcomb らの幾何形状モデル

2.4 近年のモデリング手法

その他のモデリング手法として、X 線 CT 画像を用いた数値モデリングの例が挙げられる。試験片断面の CT 画像を複数枚撮像し、これらの CT 画像それぞれについて、数ピクセル四方ごとに画像の濃淡を平均化し、モザイク化処理した画像から有限要素モデルを生成するものである。例として、S. Jacques らは織物複合材料を対象に、CT 画像を基にモデル化を行い、メゾ構造の周期境界条件等の検討を行っている⁶⁾。また、P.Romet らは、試験片を観察したデジタル画像を基に、バイナリデータを用いて汎用 FEM コード ABAQUS により織物複合材料の力学的挙動解析を行っている⁷⁾。

上記以外にも、メッシュフリー法を用いた織り構造のモデリング手法⁸⁾や、ボクセル要素モデルに基づく 3 次元織り構造のメッシュ生成手法⁹⁾、組物複合材料のモデリング¹⁰⁾、繊維束間の影響を考慮したモデルの提案^{11), 12)}や、MATLAB を用いた有限要素モデリング手法の研究¹³⁾など、数値モデリングに関する数多くの研究が精力的になされているのが現状である。

また、こうしたモデル化に基づく設計支援システム (ソフトウェア) について、A.C.Long ら英国 Nottingham 大学のグループは、織り構造の幾何学的モデリングを可能とするソフトウェア TexGen を開発し公開している^{14), 15)}。これに基づき、織物複合材料の樹脂含浸率の検討¹⁶⁾や、3 次元織物などへの適用が報告されている¹⁷⁾。

S.V.Lomov らベルギーLeuven 大学のグループはテキスタイル複合材料のモデリングツールとして WiseTex が開発されている^{18),19)}。2D, 3D 織り構造のみならず, 組紐構造, 編み構造, NCF(Non crimp fabric)や, これらの積層材のメゾ構造としての幾何学的モデルの生成を可能とし, 力学的特性や樹脂流動の評価, ミクロ-マクロのマルチスケール解析への応用などを目的している。

3 織り構造の設計支援システムへの取り組み

3.1 設計支援システムの概要

本章では, 著者らが取り組んでいる織り構造の設計支援システムについて紹介する¹⁸⁾。織物複合材料が有する多くの設計因子を対象とした設計支援システムについて図 5 に示す。本システムでは, 織り構造の幾何形状モデルの作成機能, 有限要素モデルの作成機能と等価物性値の算出機能を自動化している。また, 等価物性値を用いたマクロ構造の応力解析やマルチスケール連成解析を用いてマクロ構造とミクロ構造の両方の評価を実施可能である。以下に各部の概要を説明する。

(a) 織り構造モデルの作成

織り構造の組織図や繊維束の力学的特性値および形状定義から幾何形状モデリングを行う。

(b) 有限要素モデル作成

幾何形状モデルから有限要素モデルを構築する。

(c) 等価物性値の算出

有限要素モデルから単位構造 (ユニットセル) の等価物性値を求める。

(d) 応力解析

等価物性値を用いたマクロ構造の応力解析やスケール連成解析を用いてマクロ構造とミクロ構造の両方の評価を行う。

図 5 織り構造解析システム

3.2 織り構造モデルの作成

織物複合材料においては一方向材 (UD 材) の繊維配向角や積層構成の設計と同様に, 織り構造が材料特性に大きな影響を及ぼすという観点から, その幾何学的構造を考慮して材料特性や力学的特性を評価することが非常に重要である。例えば, 織物組織を変化させることにより繊維束に発生するうねりを制御し, 剛性や強度を設計することが可能である。また, 構成する繊維束を扁平化することで織り角度を制御し, その剛性や強度を向上させるなどの材料設計が行われている。しかし, 組織図や織物規格のみから織物の立体構造を把握することは

困難であり, 必要とされる立体構造を持つ織物を設計するには, 相当の経験と知識を要するのが現状である。そのため, 与えられた織物組織図から織物を構成している繊維束の形状を立体的に表現する実用的なモデリング手法が望まれる。

そこで, 本システムでは, S.V.Lomov らが開発した WiseTex^{18), 19)}を導入している。WiseTex では, 繊維の物性値や織り構造等の条件を設定すると織物の幾何学的構造を算出し, 3 次元イメージで可視化する機能を有している。幾何学形状の算出には曲げエネルギー最小となる安定状態での繊維束の軌跡を計算している。また, 織り構造として平織や朱子織, 綾織などの 2 次元織物はもちろんのこと, 3 次元織物や編物にまで対応している。図 6, 7 に適用例を示す。図 6(a)は設計者が入力する組織図であり, それを用いて作成した 3 次元イメージが図 6(b)である。また, 3 次元織物の場合には, 図 7(a)のように入力すると図 7(b)に示すような 3 次元織物のモデル化を行うことができる。図 7(b)より, 織り構造は縦繊維束が 5 本, 横繊維束が 6 本と板厚方向に交互に積層され, それを Z 繊維束で固定するという構造であることが容易に判る。

	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6

(a)組織図

(b)綾織りの表示例

図 6 WiseTex による織物モデリング事例

	1	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	3	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
1	0	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5
2	6	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5

(a)組織図

(b)3 次元織物の表示例

図 7 WiseTex による 3 次元織物モデリング事例

3.3 有限要素モデルの作成

有限要素解析において, 有限要素の自動生成は必須の技術である。一般的に自動要素分割アルゴリズムが確立している 4 面体要素での有限要素作成には, 繊維束の立体構造が複雑なことや, マトリックス部の空間が非常に複雑となることから要素生成は容易ではない。しかも, 3 次元織物などの複雑な織り構造に対することは尚更問題がある。このようなことから, WiseTex の幾何学的な繊維強化構造データをもとに均等な格子 (サブセル) に分割する, 簡便なモデル作成手法が提案されている²⁰⁾。しかし, 本システムでは損傷進展解析などの高精度化を視野に入れ, 織物の繊維束形状を忠実にモデル化した。

そこで, 図 8 に示すように WiseTex から得られる断面を四角形要素分割により要素を生成し, 各断面要素の隣り合う断面同士を結合し, 最小領域長 (基本長) の繊維束要素を生成する。織り構造の全繊維束に上述の工程を適用し, 織り構造の有限要素モデルを生成している。

次に, マトリックス要素の生成は繊維束要素が生成された後に行う。織り構造を構成する繊維束要素を一本分

ずつ抽出し、その繊維束要素の外周に1層のマトリックス要素を生成する。その後、マトリックス要素が生成された状態で織り構造に戻す。図9(a)に示す交差部および繊維束周りのマトリックスが生成される。

生成されたマトリックス要素の分割位置と等しく残りのマトリックス部断面の位置を設定する。各断面を上下の要素数を指定して断面の要素を生成し、対応する断面の四角形要素を結合することで図9(b)に示す織物複合材料としての有限要素モデルが生成できる。

(a) WiseTex の繊維束データ

(b) WiseTex データに基づいて算出した繊維束モデル

(c) 織り構造モデル

図8 繊維束の有限要素モデル化

(a) 繊維束表面に樹脂を生成した状態

(b) 樹脂要素をモデル全体に生成した最終モデル

図9 織物複合材料の有限要素モデル化

3.4 等価物性値の算出

材料特性を評価したい場合には、図9に示した有限要素モデルを用いて有限要素解析を実施すればよい。一方で、図9に示した織り構造モデルを構造物全体に適用して解析することは、計算機の容量や解析時間から問題がある。そこで、図9のモデルを一つの均質体とみなした等価物性値を算出し、これを用いて構造物全体の解析を行うことで、計算機のメモリ容量と解析時間を低減することができ、工学的手法として有効と考える。

図9の有限要素モデルを用いて、その境界の周期性を考慮し、等価物性値を算出する。一般に、板状の織物複合材料を解析する際、周期境界条件を付与することで等価物性値（弾性係数、ポアソン比等）の算出を可能とし

ている。

4 モデリングシステムの適用例

4.1 織物複合材料の応力解析

前章で説明した織物複合材料の設計支援システムを用いて応力解析を行った。

織物複合材料は局所的に不均質な箇所から破壊が発生することから、織物の繊維強化構造をモデル化した応力解析を行う必要がある。綾織、3次元織物やインターロック織物に対し応力解析を実施した例を示す。図10～12に本システムより生成した各織り構造の有限要素モデルとX方向の引張解析により得られたX方向の応力分布図および変形図を示す。各応力分布図より、X方向に配された繊維束に高い応力が発生していることが確認できる。また図13に示すように、単位織り構造の等価物性値を算出し、表示することも可能となっている。

また、マルチスケール解析手法を適用することで、構造全体（マクロスケール）と織り構造（メゾスケール）の力学的特性を連成させ、同時に評価することができる。織物複合材料のように、繊維の強化構造が構造物の力学的特性に大きな影響を及ぼす材料を用いた構造物の力学的特性を評価する際には、マルチスケール解析が有効である。マルチスケール解析手法としては、ズームング法、均質化法、重合メッシュ法などが代表的な手法であり、これらは応力解析や熱伝導解析、流体解析等に用いられている。例えば本システムでは、3.4節で述べた等価物性値によりマクロ構造を解析し、重合メッシュ法によりミクロ構造の応力、ひずみ等を評価することが可能である。

図10 綾織物複合材料のX方向応力分布

図11 3次元織物複合材料のX方向応力分布

図12 インターロック織物複合材料のX方向応力分布

Homogenized Property									
D Matrix									
	X	Y	Z	XY	YZ	ZX			
X	[2909.9442]	[180.068601532]	[3044.46749]	[-2.6586605E-8]	[8.2786332E-7]	[0.00054350919]			
Y	[180.06866]	[2909.9061]	[3044.40328]	[9.04225707E-8]	[3.35867739E-6]	[-0.00092352593]			
Z	[3044.46749]	[3044.40328]	[6777.0112]	[-1.47340903E-7]	[-1.3713375E-6]	[-0.00069043941]			
XY	[-2.65866052E-8]	[9.04225744E-8]	[-1.47340904E-7]	[2048.91045]	[0.00019782939]	[-1.4502107E-8]			
YZ	[-8.27863302E-7]	[3.3586773E-6]	[-1.37133733E-6]	[0.00019782939]	[1.731.02436]	[-2.40230596E-7]			
ZX	[0.00054350919]	[-0.00092352593]	[0.00069043941]	[-4.14501954E-8]	[-2.40230596E-7]	[1.731.02876]			
Young's Module									
	X	Y	Z						
	[11257.6684]	[11257.59]	[6024.9143429415]						
Shear Module									
	XY	YZ	ZX						
	[2098.91045]	[1.731.02436]	[1.731.02876]						
Poisson's Ratios									
	XY	YZ	ZX	YX	ZY	XZ			
	[0.15702553167]	[0.37868426202]	[0.18921550727]	[0.15702443831]	[0.18921159264]	[0.37869473305]			

- Part A, 60 (579), pp.2485-2491, (1994).
- 5) X.Tang, J.D.Whitcomb, "Progressive Failure Behaviors of 2D Woven Composites", *Journal of Composite Materials*, 37(14), pp1239-1259, (2003).
 - 6) S. Jacques, I. De Baere and W. Van Paepegem, "Application of periodic boundary conditions on multiple part finite element meshes for the meso-scale homogenization of textile fabric composites", *Composites Science and Technology*, 92, pp.41-54, (2014).
 - 7) P. Romelt and P.R. Cunningham, "A multi-scale finite element approach for modelling damage progression in woven composite structures", *Composite Structures*, 94, pp.977-986, (2012).
 - 8) L.Y. Li, P.H. Wen and M.H. Aliabadi, "Mesh free modeling and homogenization of 3D orthogonal woven composites", *Composites Science and Technology*, 71, pp.1777-1788, (2011).
 - 9) E. Potter, S.T. Pinho, P. Robinson, L. Iannucci and A.J. McMillan, "Mesh generation and geometrical modelling of 3D woven composites with variable tow cross-sections", *Computational Materials Science*, 51, pp.103-111, (2012).
 - 10) C. Zhang, W. K. Binienda, R. K. Goldberg and L. W. Kohlman, "Meso-scale failure modeling of single layer triaxial braided composite using finite element method", *Composite Part A*, 58, pp.36-46, (2014).
 - 11) G. Grail, M. Hirsekorn, A. Wendling, G. Hivet and R. Hambli, "Consistent Finite Element mesh generation for meso-scale modeling of textile composites with preformed and compacted reinforcements", *Composite Part A*, 55, pp.143-151, (2013).
 - 12) S. Gatouillat, A. Bareggi, E. Vidal-Salle and P. Boisse, "Meso modelling for composite preform shaping – Simulation of the loss of cohesion of the woven fibre network", *Composite Part A*, 54, pp.135-144, (2013).
 - 13) A. Drach, B. Drach and I. Tsukrov, "Processing of fiber architecture data for finite element modeling of 3D woven composites", *Advances in Engineering Software*, 72, pp.18-27, (2014).
 - 14) A. C. Long and L. P. Brown, "Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen." In: Boisse, editor. *Composite reinforcements for optimum performance*. Cambridge: Woodhead Publishing; pp. 239–64 (2011).
 - 15) TexGen (Version 3.7.0). University of Nottingham; 2014. <http://texgen.sourceforge.net> [viewed 07.12.2014].
 - 16) X. Zeng, L. P. Brown, A. Endruweit, M. Matveev and A. C. Long, "Geometrical modelling of 3D woven reinforcements for polymer composites: Prediction of fabric permeability and composite mechanical properties", *Composite Part A*, 56, pp.150-160, (2014).
 - 17) S.D. Green, M.Y. Matveev, A.C. Long, D. Ivanov and S.R. Hallett, "Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry", *Composite Structures*, 118, pp.284-293, (2014).
 - 18) S.V.Lomov, D.S.Ivanov, I.Verpoest, M.Zako, T.Kurashiki, H. Nakai, et al., "Meso-FE modelling of textile composites: Road map, data flow and algorithms", *Compos Sci Technol*, 67(9):pp.1870–91, (2007).
 - 19) I.Verpoest and S.V.Lomov, "Virtual textile composites software WiseTex: integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis", *Compos Sci Technol*, 65(15–16), pp.2563–74, (2005).
 - 20) T.Tsujikami, T.Horikawa, S.Hirosawa and M.Zako, "Approach to Analysis of Mechanical Behavior of Textile Composites by Inclusion Element Method", *JSME international journal. Series A, Solid mechanics and material engineering* 49(3), pp.418-425, (2006).
 - 21) Y. Nakanishi, K. Matsumoto, T. Kurashiki and M. Zako, "Identification Method of Material Damping Parameters for Textile Composites", *Proc. of 10th International Conference on Textile Composites*, pp.256-262, (2010).