三次元複合材料の強化材の組織り創成に関する研究*

(第2報, 異形断面を有する組物構造の場合)

横山 敦士^{*1}, 前川 善一郎^{*2}, 濱田 泰以^{*2}
岩崎 康彦^{*3}, 小林 秀光^{*3}

A Study on Flat and Cord Braiding Construction of Reinforcement in a Three-Dimensional Composite

(2nd Report, Tublar Composites with Constricted Part)

Atsushi YOKOYAMA, Zenichiro MAEKAWA, Hiroyuki HAMADA,
Yasuhiko IWASAKI, and Hideteru KOBAYASHI

We previously showed mechanism simulation techniques for basic flat braiding and basic cord braiding. In this paper, the simulation program of cord braiding has been developed as follows: (1) the drawing-up speed of the mandrel is estimated to obtain the required braiding angle in the case of a circular cylinder composite. (2) in the tublar composites, with changing the cross section to the longitudinal direction, the drawing-up speed of the mandrel must be varied to obtain the same braiding angle according to the shapes of cross section. (3) the maximum braiding angle is predicted taking the width of the yarn into consideration.

Key Words: Composite Material, Braiding Construction, Mechanism Simulation, Cord Braiding, Three Dimensional Fabric, Computer Aided Design

1. 緒 言

組物構造は組すい配列などの初期条件により、巻き角度、組物構造を変化させることができ、三次元複合材料の強化形態として注目を浴びている⁽¹⁾⁽²⁾。とくに長手方向に異なる断面を有する円筒形構造物に対して、この作成手法がしばしば用いられている。著者らはすでに組物構造を有する複合材料円筒の横圧縮、引張試験を行い、これら力学特性に巻き角度が大きな影響を与えることを明らかにしてきた^{(3)~(6)}。このため所定の特性の組物構造を得ようとすれば巻き角度の制御が重要となる。

前報において基本的な丸打・平打組物の組織工程で組すい配列などの初期条件と作成される組物の構造の関係をシミュレーションにより明らかにした。この結果は、実際に組まれた組物構造と良く一致しており、シミュレーションの妥当性を確認した⁽⁷⁾。

そこで本報においては、丸打組物を対象に巻き角度

の制御を目的として、あらかじめ設定された巻き角度の組物が得られる初期条件を算出するシミュレーション手法を開発した。また、応用として直径が一定でない長手方向異形断面円筒に均一巻き角度の組物を作成する際の条件を求めるシミュレーションを行った。さらに糸の太さを考慮し、限界巻き角度の予測を試みた。

2. シミュレーション手法

丸打の組織工程については、前報において詳しく述べた⁽⁸⁾。図1には、円筒形状のマンドレルを用いた場合の繊維束の状況を示す。本研究では巻き角度(Braiding angle)は、図1に示すような円筒の長手方向の軸と組まれている繊維の方向がなす角度を用いた。巻き角度の設定には種々の方法があるが、本研究では、組すいの移動速度(回転速度)を一定とし、マンドレルの引上げ速度を変化させることにより所定の巻き角度が得られる方式を採用した。図2にシミュレーションプログラムのフローチャートを示す。図2中の○で囲った数字によりシミュレーション手法を示す。

① 初期条件として組すい数、組すいの回転速度、各組すいの初期位置、組物の巻き角度などを入力する。

* 昭和63年3月18日 関西支部第63期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年9月24日。

^{*1} 正員、大阪府立産業技術総合研究所 (〒550 大阪市西区江之子島2-1-53)。

^{*2} 正員、京都工芸繊維大学 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

^{*3} 京都工芸繊維大学大学院。

② マンドレル (組物の心となるもの) の形状を入力する。

③ 画面上にマンドレルを図示する。

④ 巻き角度と組すいの回転速度, マンドレルの直径よりマンドレルの引上げ速度を算出する。

$$V(t) = \frac{D(t)}{2} \times \frac{\omega(t)}{\tan(\alpha)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで t は初期状態からの経過時間, $V(t)$ はマンドレルの引上げ速度, $D(t)$ は繊維束が組まれている箇所でのマンドレルの直径, $\omega(t)$ は組すいのマンドレ

ルの中心に対する角速度, α は巻き角度を示している。

⑤ マンドレル上の繊維束の座標 (X, Y, Z) を計算する。

$$X(t) = \frac{1}{2} D(t) \times \cos\left\{\pm \int \omega(t) dt + \theta_0\right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Y(t) = \frac{1}{2} D(t) \times \sin\left\{\pm \int \omega(t) dt + \theta_0\right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Z(t) = \int V(t) dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで θ_0 は初期状態でのマンドレルの中心からの組すいの角度を示している。 t は初期状態からの経過時間である。また $\omega(t)$ の前の符号は組すいの回転方向が時計回りの場合は+となり, 反時計回りの場合は-となる。

⑥ 繊維束の軌跡をマンドレル上に図示する。

⑦ 各繊維束が交差したかどうかを判断する。交差すれば⑧へ移行し, 交点座標を画面上およびプリンタに出力する。交差しない場合は⑨に移る。

⑨ 組物が設定された長さに達した場合は⑩に移り, 達していない場合は時間を進めて④へ移行する。

⑩ 下記に示す方法で, 繊維束が隣の繊維束と重なるかを判断する。

$$DF = \frac{E}{\cos(\alpha)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで, DF はマンドレルの円周方向に対する繊維束の幅を示し, E は繊維束の直径, α は巻き角度を示す。また D_{ij} は図1に示しているように, 同方向に巻かれている繊維束の距離である。

$DF < \min(D_{ij})$ の場合組物の作成は可能であり, $DF \geq \min(D_{ij})$ の場合不可能となる。

⑪ 引上げ速度の時間変化を図示しシミュレーションを終了する。

図1 丸打組物の構造

図2 シミュレーションプログラムのフローチャート

図3 丸打組物のシミュレーション結果 (巻き角度 25.8°)

3. シミュレーション結果

3.1 巻き角度設定シミュレーション 円筒マンドレルを用いた場合のシミュレーションの結果を図3に示す。画面には組物の状況と繊維束の交点、マンドレルの引上げ速度、繊維長が出力されている。この場合は、巻き角度が 25.8° である。図4~6には、巻き角度がそれぞれ 32.5° 、 42.5° 、 60.7° の条件でシミュレーションを行った場合の組物の状況を示す。表1には、各巻き角度を得るためのマンドレル引上げ速度を示す。これらの結果より巻き角度が大きくなるに従って、マンドレルの引上げ速度を小さくすることが必要であり、またマンドレル上の組物の密度が大きくなってきていることがわかる。本研究ではシミュレーション結果の検討をするために、ガラス繊維を用いた実際の組織り工程実験を行った。ここで実験に使用した繊維束はマ

図4 丸打組物のシミュレーション結果
(巻き角度 32.5°)

図5 丸打組物のシミュレーション結果
(巻き角度 42.5°)

図6 丸打組物のシミュレーション結果
(巻き角度 60.7°)

イクログラスローピング、繊維本数1600本、繊維束の太さは4mmである。実際の組織で各巻き角度の組物を作成する際のマンドレルの引上げ速度を表1に示す。実験とシミュレーション結果は良い一致がみられ、本シミュレーション手法が実用可能であることを示している。

3.2 異形組物円筒シミュレーション 円筒の半径が長手方向に変化する異形円筒形状の丸打組物に本シミュレーションを適用した。異形円筒においては組織工程でマンドレルの直径が変化するため、初期条件のままで組織りを行うと巻き角度が大きく変化する。このため異形円筒の組物で、しかも巻き角度の均一な組物を得ようとすれば逐次マンドレルの引上げ速度を

表1 丸打組物の巻き角度と引上げ速度の関係

Braiding angle (deg.)		25.8	32.5	42.5	60.7
Drawing up speed (cm/s)	Experiment	1.45	1.08	0.76	0.38 ±
	Simulation	1.42	1.08	0.75	0.39

(a) 円すい形

(b) 多段つづみ形

(c) 二段つづみ形

図7 シミュレーション結果 (巻き角度が一定の場合)

図8 シミュレーション結果
(引上げ速度が一定の場合)

変化させることが必要となる。ここでは、円すい形、多段つづみ形および二段つづみ形の異形円筒を対象にしてシミュレーションを行った。

図7に巻き角度を一定としたシミュレーション結果を示す。図7中のグラフはマンドレルの引上げ速度の変化の状態を示す。また、比較のため引上げ速度を一定として、二段つづみマンドレルの組織り工程を行った場合のシミュレーション結果を図8に示す。引上げ速度が一定の場合には断面直径の変化により巻き角度は異なり、繊維束が乱れている。巻き角度を一定とした場合には、規則正しい組物となっていることがわかる。このシミュレーション結果に従ってマンドレルの引上げ速度を制御することにより、巻き角度が一定な異形円筒組物が作成できる。

3.3 限界巻き角度判定シミュレーション 表1の*は、巻き角度が60.7°の場合は、本研究で行った組織り工程実験において、実際の組物は作成できず、作成できた巻き角度は56.8°が最大であったことを示している。この原因は繊維束がある太さを持っており、巻き角度が大きくなると隣の繊維束と重なりあうためである。このような組物の作成における限界をあらかじめ予測しておくことは重要であり、とくに異形円筒における組物作成の可能性の判断には必要である。

表2に各巻き角度での実験とシミュレーションの組物の作成の可能性について示す。ここでシミュレーションにおいて繊維束の太さとしては、実験で用いたガラス繊維と同じ4mmを入力した。巻き角度が60.7°

表2 丸打組物の最大巻き角度

Braiding angle (deg.)	25.8	32.5	42.5	60.7	Maximum braiding angle (deg.)
Experiment	○	○	○	×	56.8
Simulation	○	○	○	×	54.4

の場合においては、作成不可能の結果が得られており実際の組織り実験結果と一致していることがわかる。また、シミュレーションで得られたこの条件での最大巻き角度は54.4°であり、これは実験で得られた最大巻き角度56.8°とほぼ一致している。以上の結果より、本プログラムが実際の巻き角度の限界を精度良く表すことが明らかとなった。

4. 結 言

- (1) 所定の巻き角度を持った組物円筒を作成できる初期条件を算出するシミュレーション手法が開発された。
- (2) 巻き角度が一定の異形円筒組物を作成するためのマンドレルの引上げ速度が算出できた。
- (3) 組物の巻き角度の限界が算出できることが明らかとなった。

文 献

- (1) Ko, F. K. *Proc. ICCM IV, Tokyo, Japan*, (1982), 1609-1616.
- (2) Lee, W. A., *Composite Structure*, 4 (1987), 1342-1356, Elsevier Applied Science.
- (3) Maekawa, Z., Hamada, H., Horino, T., Yokoyama, A. and Iwasaki, Y., *Composite Structure*, 4 (1987), 2192-2209, Elsevier Applied Science.
- (4) 前川・堀野, 第35回高分子学会年次大会予稿集, 35-4 (1986), 1185.
- (5) 前川・濱田・堀野・岩崎, 第30回材料研究連合講演会予稿集, 23 (昭61).
- (6) 前川・濱田・堀野・横山・岩崎, 複合材料シンポジウム予稿集, 54 (昭61).
- (7) 横山・前川・濱田・山木・岩崎, 機械学会論文集投稿中.
- (8) 山木, 組物及び組物機械, (1957), 44-79, 技報堂.