

三次元組物複合材料の作製技術 および装置の開発

京都工芸繊維大学 藤田章洋

(共同研究者) 同 濱田泰以

Development of Fabrication Techniques and Equipments for Manufacturing Three Dimensional Braided Composites

by

Akihiro Fujita, Hiroyuki Hamada

Faculty of Textile Science

Kyoto Institute of Technology

ABSTRACT

In this study, simulation program was developed for a new three dimensional braiding technique, and the braiding machine was made for fabricating tubular braiding fabrics with the through-the-thickness fibers ("Thick tubular braid"), which give multiple functions. The braiding technique developed is available for the fabrication of thick tubular component.

The bending properties of the composite tubes reinforced by tubular braids with through-the-thickness fibers were evaluated. The bending properties of thick tubular braided tubes was found to be more superior than that of the conventional multiple braided tubes without the through-the-thickness fibers, and it was also indicated that the through-the-thickness fibers were available for prohibiting interlamina delamination.

要 旨

本研究では、組織り機構シミュレーションプログラムを開発することにより、三次元複合材料の強化形態作製技術のひとつである、組物技術による複雑形状部材の作製技術、およびその装置の開発を行った。

開発したシミュレーションプログラムは、三次元組物の軌道において、得られる組物の織り構造の予測を行い、規則的な織り構造を組成するスピンドル配置の決定を行うことが可能であり、三次元組物技術の開発に有効である。

また、本研究で開発された多重丸打組物技術により、層間を強化する構造、リブ、ハニカム状断面を有する三次元組物の作製が可能となった。さらに、機能材料を挿入することによって、高性能な構造部材としての適用が可能となる。

また、多重丸打組物円筒は、層間での離が抑制され、積層された円筒よりも優れた曲げ特性を有していることが明らかとなった。

はじめに

高分子系材料をマトリックスとした繊維強化プラスチック (FRP : Fiber Reinforced Plastics) は、構造部材からスポーツ、レジャー用品まで、さまざまな分野で使用されている。とくに、スポーツ用品ではテニスラケット、ゴルフクラブのシャフト部分、スキー、釣竿、自転車部品と、多くの製品に用いられており、最近では複雑な形状を有する部品への使用が検討されている。しかしながら、FRPにおいて、複雑な形状を有する部品を成形する場合、従来の一方向材、織物などの二次元的な形状を有する強化材を用いると、成形段階で最終製品の形状に賦形しなければならず、成形には多くの人手が必要となる。力学的特性の面では、従来からの積層板の形態をとると、積層界面のはく離等により、材料の性能を十分に発揮で

きないという問題点がある。

これらの問題点を解決するために、製品形状に近い強化繊維を形作る技術として、三次元織物および組物技術がある。これらの技術を用いれば、成形の際の賦形の問題はなく、積層の必要性もなくなる。しかしながら、三次元織物は織機が複雑で大きくなるため、高価になる問題をかかえている。これに対して、組物技術は三次元織物のように、厚肉あるいは三次元形状を積層することなく作製することが可能であり、組機については三次元織機のような複雑な構造とはならず、安価に作製することができる。

すでに筆者らは、基本的な帯板および円筒形状を有する組物複合材料を作製し、その力学的特性について明らかにし、組物が複合材料の強化形態として有望であることを示してきた¹⁻⁸⁾。さらに、組織り機構のシミュレーションプログラムの開発を行い⁹⁻¹²⁾、三次元形状を有する組物作製技術を開発してきた^{13,14)}。平打組物を強化材とする複合材料帯板を作製し、その端部を切断して得られる織物帯板と比較すると、端部で繊維束が連続している平打組物帯板は、織物帯板より優れた引張特性、とくに引張強度は約1.5倍の値を有していることを確認している。

本研究では、三次元複合材料の作製技術のひとつである組物技術に注目し、組織り機構シミュレーションプログラムを開発することにより、複雑形状部材の作製技術およびその装置の開発を行った。さらにそれらの複合材料の力学的特性について評価した。

1. 組物について

組物は、平打と丸打の2種類に分類することができる。図1、図2に平打組物、および丸打組物のスピンドル軌道と組物構造の模式図を示す。平打組物の場合、軌道は1本であり、1つの軌道上を全スピンドルが通る構造となっている。丸打組

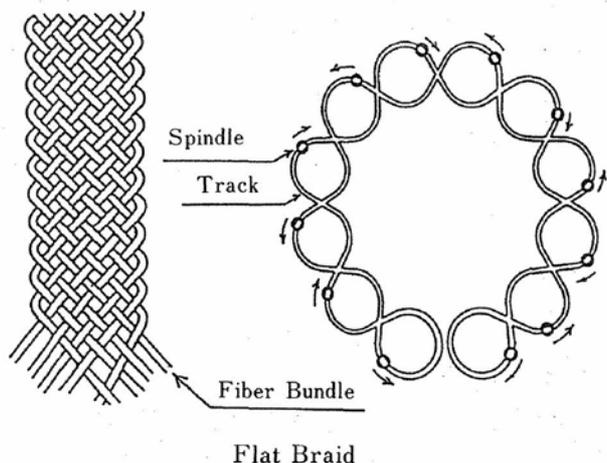


図1 平打組物と軌道形状

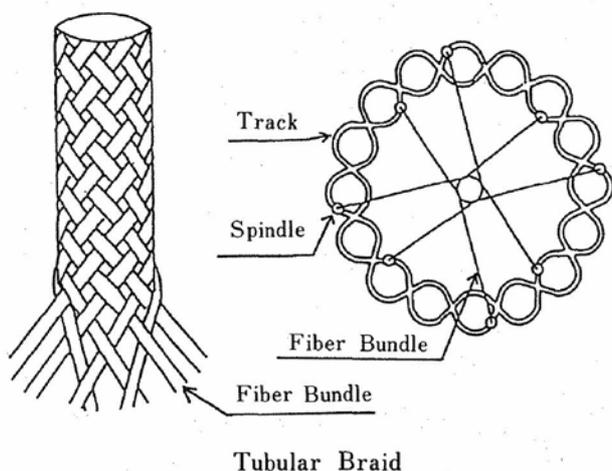


図2 丸打組物と軌道形状

物の場合、軌道は2本である。平打組物および丸打組物を作製する組機では、すべての繊維束は軌道中央部の上方に集められ、垂直方向に引き上げられながら組物を形成する。これら従来の組機によるスピンドルの動きは、円周上を移動する一次的なものである。

平打組物では、繊維束は長手方向に対し斜めに配向し、端部で折り返して切断されることなく連続し、その形状は板状となる。平打組物の寸法は、厚さが二本の繊維束の交差部の厚みにより決定され、幅は繊維束の本数や組目の密度によって決まる。丸打組物では、芯材であるマンドレル上に、繊維束が左巻きと右巻きに互いに交差して組物を形成する。このため丸打組物は、中空円筒形状と

なる。丸打組物の寸法は、厚さが平打組物と同様に2本の繊維束の交差部の厚みで決定されるが、円筒の内径はマンドレル径で決まる。

2. 三次元組物技術機構シミュレーション

2.1 多重丸打組物

本研究では、まず最初に上述のような、積層による層間にはく離の発生を防ぎ、材料の特性を生かす、三次元組物円筒を得るための組物技術の開発を行った。

図3に多重丸打組機の軌道図を示す。本軌道は3つの丸打組物の軌道により構成されている。それぞれの軌道は、図中ハッチで示した部分により連結されている。スピンドル移動は、各層を構成する軌道内を移動する3つのグループと、連結部分を通して、外層から中間層、中間層から内層と、すべての層の軌道を移動する、もう1つのグループの4つのグループに分けることができる。このような軌道による多重丸打組物が、作製可能となる組物機械および作製条件を得るために、機構シミュレーションプログラムを開発した。

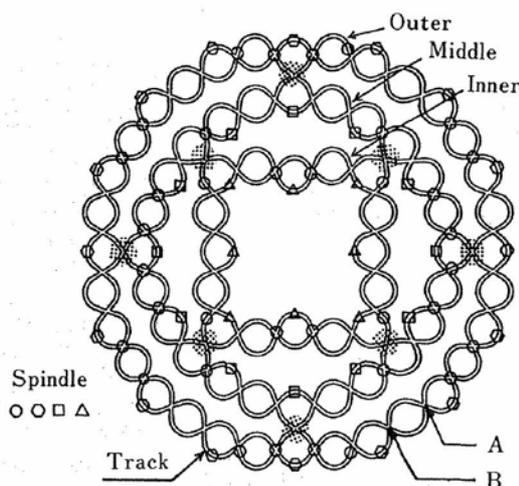


図3 多重丸打組機の軌道図

2.2 シミュレーション方法

図4に本シミュレーションプログラムのフローチャートを示す。本シミュレーションプログラムは、規則的な組物構造を有し、最もスピンドル数

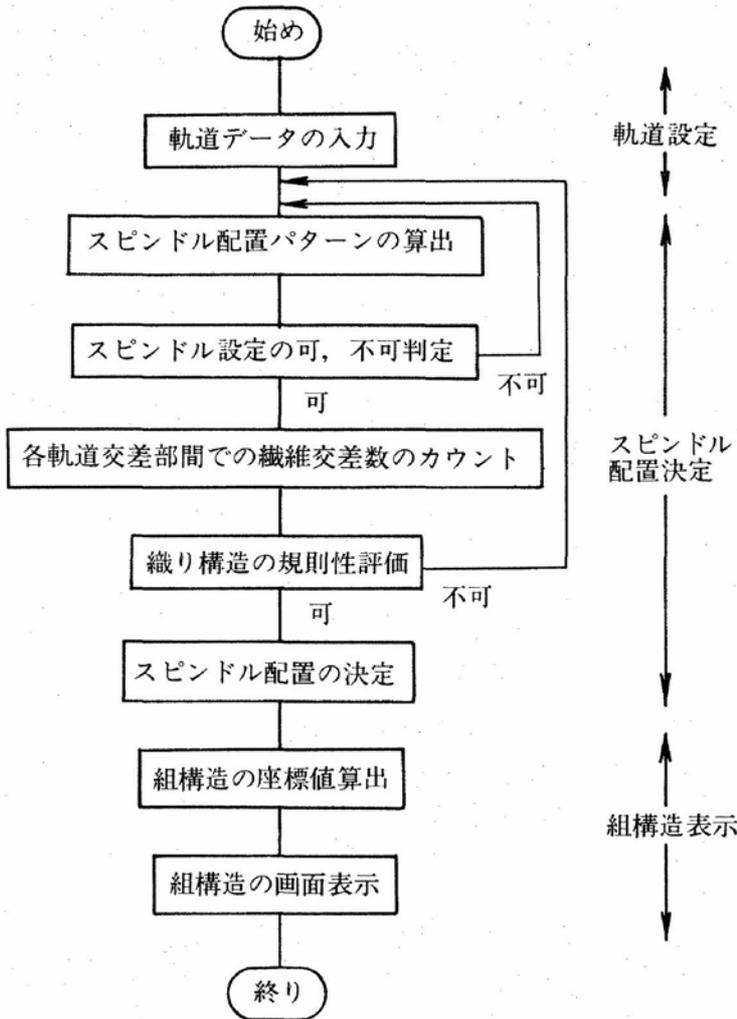


図4 シミュレーションプログラムのフローチャート

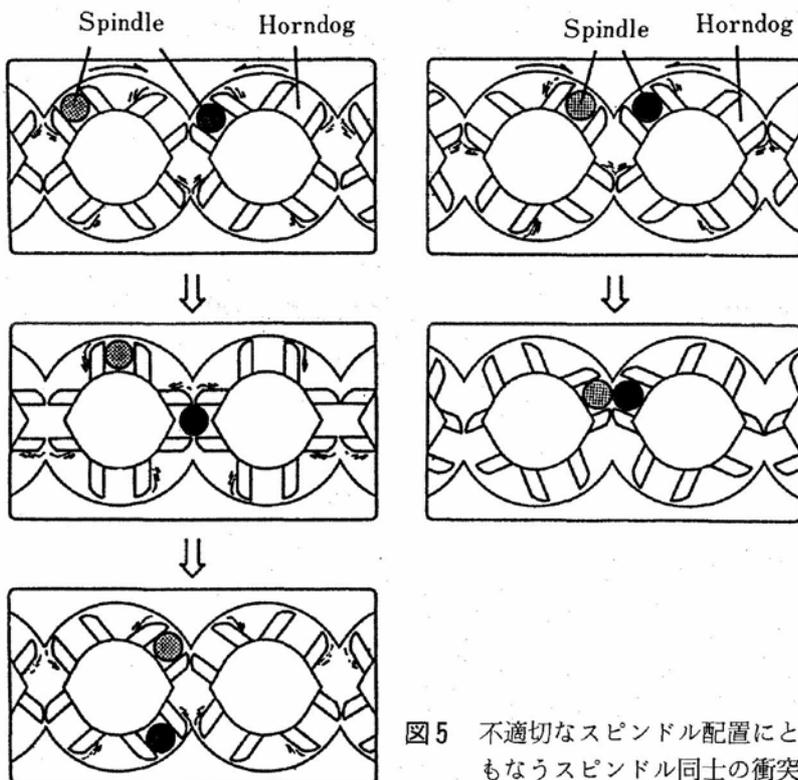


図5 不適切なスピンドル配置にもなうスピンドル同士の衝突

の多いスピンドル配置を得ることを目的とし、「軌道設定」「スピンドル配置決定」「組構造表示」の3つの段階から構成されている。

「軌道設定」では、作製する組物の断面形状にしたがって軌道を設計する。つぎに「スピンドル配置決定」では、さまざまなスピンドル配置を設定し、設定可能なスピンドル配置を算出する。さらに、そのスピンドル配置より得られる織り構造の規則性の評価を行う。

スピンドルの配置が不適切であると、図5に示すようにスピンドル同士が衝突し、組物の作製が不可能となる。また組機の機構上、最初のスピンドル配置によって組物の織り構造が決定される。組機を設計する際、スピンドル配置の決定は最も重要な工程である。

織り構造は、軌道交差部の間において、あるスピンドルが他のスピンドルとすれ違うことにより作られる。たとえば、図3に示す軌道交差部AからBへスピンドルが移動する間に、他の軌道上をBからAへ移動するスピンドル数を求めることで、AB間で生成される

繊維交差状態を確認することができる。このように、おのおのの軌道交差部間ですれ違うスピンドルの数を求めることによって、組物の織り構造を予測する。その規則性の評価を行い、スピンドル配置を決定する。最後に「組構造表示」では、得られたスピンドル配置より作製される、組物の組み上がり状態を表示し、確認することができる。

2.3 シミュレーション結果

本シミュレーション結果より得られたスピンドル配置を図6の軌道図中に示す。図中○、□、△印で示したスピンドルは、それぞれ外層、中間層、内層と、各層を構成する軌道内を移動す

る。図中●印で示したスピンドルは、連結部分を通じて、外層から中間層、中間層から内層と、すべての層の軌道を移動する。このグループが層間を移動することにより、厚さ方向に繊維（接結繊維、Through-the-thickness fiber）が配向される。

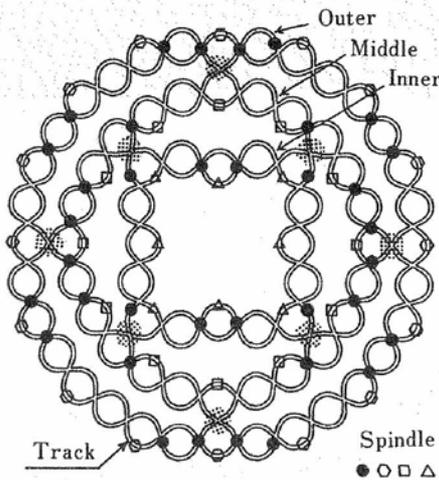


図6 シミュレーション結果より得られた多重丸打組物のスピンドル配置

本軌道には72個のスピンドルが、おのこの軌道上に等分に配置されている。このスピンドル配置より、得られる組物の織り構造の規則性の評価を行った結果、得られる組物は、図7に示す規則的な1本組の織り構造で構成されていることがわかった。また、全体的な組物の構造を図8に示す。このように、組物の組み上がり状態を確認することができる。この軌道では、隣り合う層の軌道が接していることで、層間部を強化する構造を有する厚肉の円筒を得られる。

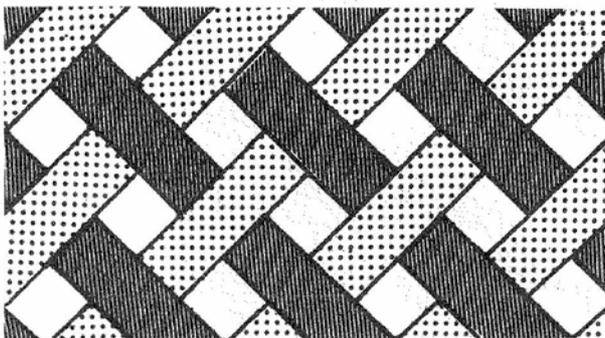


図7 織り構造シミュレーション結果

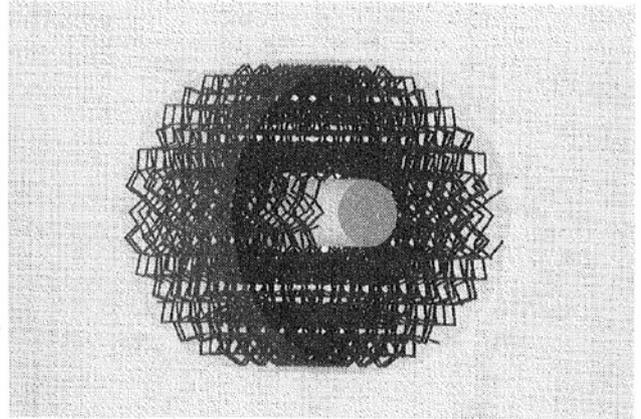


図8 シミュレーションによる多重丸打組物

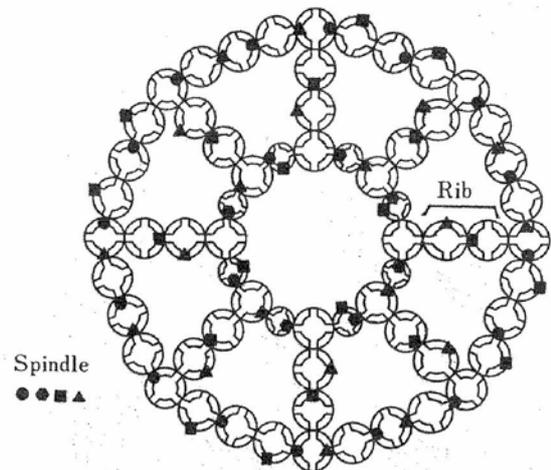


図9 リブを有する多重丸打組物のスピンドル配置

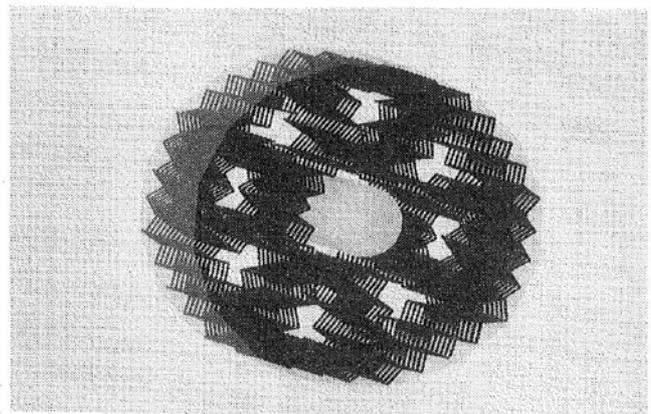


図10 シミュレーションによるリブを有する多重丸打組物

また、この技術に応用し、層間に連結軌道を設けることで、層間にリブを持つ円筒を得ることができる。本シミュレーションプログラムを用いると、図9に示すようなスピンドル配置と、また、図10に示すような組み上がり状態を得ることが

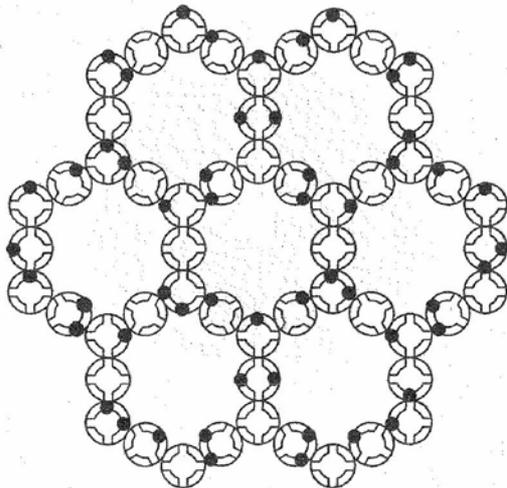


図11 ハニカム状断面を有する
多重丸打組物のスピンドル配置

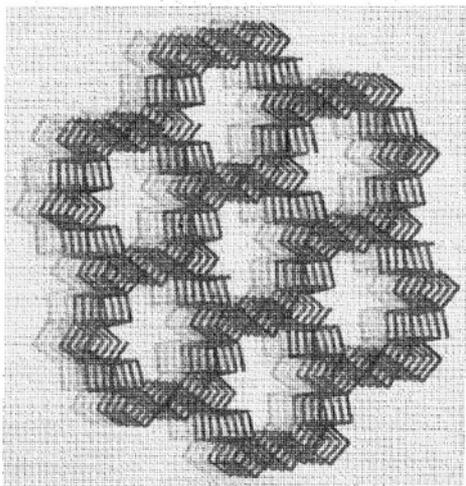


図12 シミュレーションによるハニカム状断面を
有する多重丸打組物

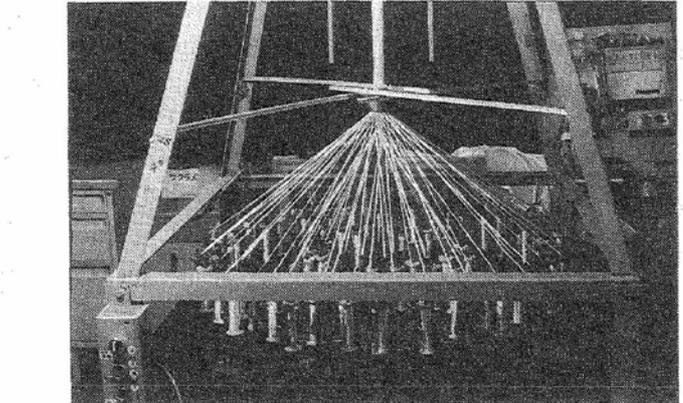
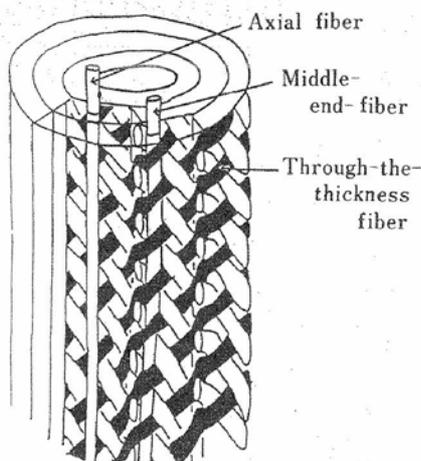


図13 多重丸打組物機械

できた。さらに、図11に示すような軌道についても、本シミュレーションプログラムにより、図中のようなスピンドル配置が得られる。組物は、図12に示すようなハニカム状の断面となり、組物構造により区分化された構造となる。

以上のように、本シミュレーションプログラムは、複数軌道により構成され、二次元的に広がりのある形状の軌道に対応可能である。

3. 三次元組物機械および組物複合材料の作製

3.1 三次元組物機械

図13に本研究において試作した、多重丸打組物を作製する組機の外観を示す。また、図14に本研究で開発した組機により作製した、多重丸打組物およびその模式図を示す。層間を強化している繊維は、図中右上から左下へ配向しているすべての繊維である。この組物は3層構造であるが、層間が強化されているため、単層構造と見なすこと

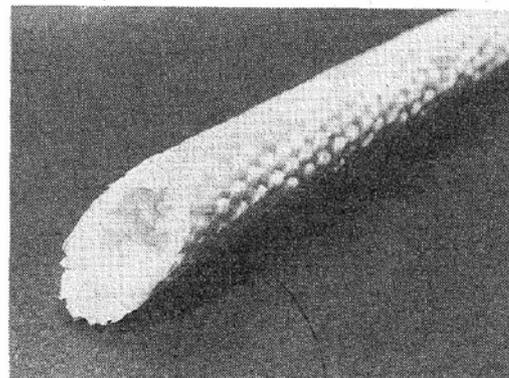


図14 多重丸打組物およびその模式図

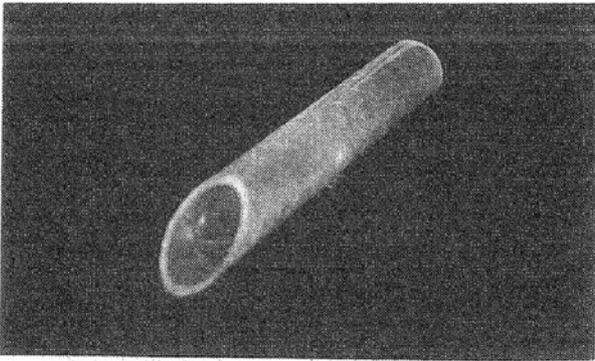


図 15 多重組物複合材料円筒

ができる。

3.2 三次元組物複合材料の作製

本研究では、円筒形状の試験片作製のため、円筒の芯となるマンドレル上に多重丸打組物を組成した。作製された組物に樹脂を真空含浸し、50°C、8時間の硬化を行った後、マンドレルを引き抜き、図 15 に示すような、多重丸打組物円筒の試験片を作製した。強化繊維にはガラス繊維 (DWR 1150 F-165 日本電気硝子株)、マトリックスに

はエポキシ樹脂 (Epomik R 140 三井石油化学工業株) を用いた。

また、連続成形については、形成された組物が水平方向に送られる、横型の組物機械に引き抜き成形装置を連動させることにより可能となる。

4. 力学的特性

4.1 試験片形状および曲げ試験方法

図 16 に、試験片形状および実験方法を示す。円筒の内径は 17.5 mm、長さは 160 mm である。外径は試験片の種類により異なり 20 ~ 21 mm である。また、繊維束の長手方向に対する配向角度 (α : 組み角度) は 20°, 30° および 40° の 3 種類とした。比較試験片として、おのおのの層での繊維束数を、多重組物の場合と同じにした組物を積層し、層間の強化されていない多層円筒を作製した。曲げ試験は、図に示すような 4 点曲げ試験を採用した。支点間距離を 240 mm、圧子間距離を

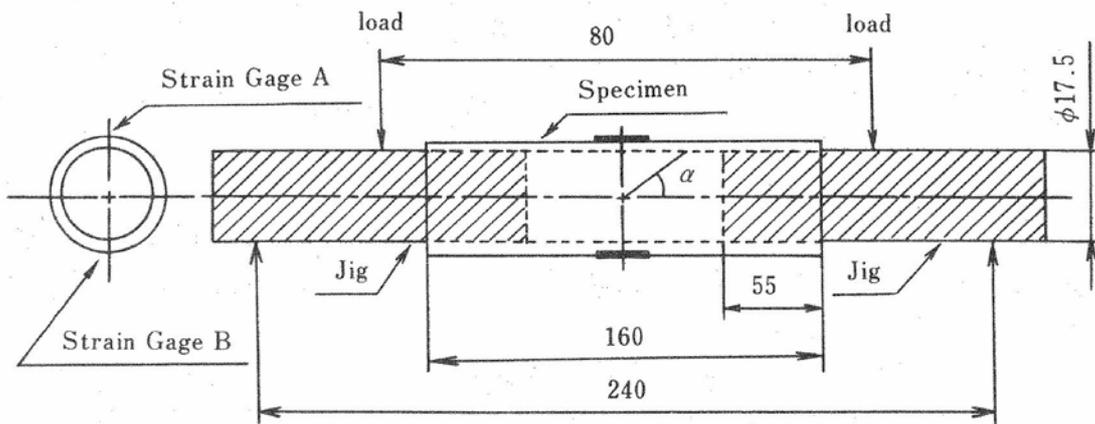


図 16 曲げ試験片形状および実験方法

表 1 多重丸打組物の曲げ特性

	Thick Braided Tube			Multiple Layer Braided Tube		
	20	30	40	20	30	40
Braiding Angle (deg.)	20	30	40	20	30	40
Bending Modulus (GPa)	22.3	12.8	14.5	22.7	10.9	9.75
Bending Strength (MPa)	407	280	293	413	237	205
Ratio of Modulus*	0.98	1.17	1.49	—	—	—
Ratio of Strength*	0.99	1.18	1.43	—	—	—

*Ratio : Thick Braided Tube/Multiple Layer Braided Tube

80 mm とした。圧子部分での試験片の破壊や変形を避けるため、外形がパイプの内径と同じ径の鋼製の丸棒（治具）を挿入し、支点は治具を直接支持する。圧子は治具が挿入されている試験片部分に負荷を与えている。

4.2 曲げ試験結果

表1に多重および多層丸打組物円筒の曲げ弾性率、および曲げ強さを示す。弾性率と強度の比は、それぞれ多重丸打組物の値を、多層丸打組物の値で割った値である。組み角度 20°では、多重丸打組物の曲げ弾性率と曲げ強度は、多層丸打組物の値と等しい。しかしながら、組み角度 30° および 40° では、多重丸打組物の方が、多層丸打組物よりも高い値となった。弾性率と強度の比は、組み角度の増加に伴って増加している。

また、破壊については、いずれの試験片においても、最終破壊は圧縮側で生じた。破壊した部分の断面において、多層丸打組物の場合、層間はく離が観察されたが、多重丸打組物の場合、はく離は観察されなかった。これは、多重丸打組物では接結繊維により、層間はく離の発生が抑制されたものと考えられる。

5. 多重丸打組物技術の応用性

表2に適用の可能性に関する一覧を示す。多重

丸打組物では、組物技術における中心糸の代わりに、光ファイバーのような機能材料を挿入することによって、高性能な構造部材としての適用が考えられる。また、厚肉かつ軽量の丸打組物複合材料が、ウレタンなどの発泡材を、コア材料として用いることによって得られる。

さらに、図10に示したように、多重丸打組物技術を応用することで、隣り合う層を連結する、リブを有する多重丸打組物が得られ、これは厚肉円筒複合材料の軽量化をはかることができる。リブ構造を有する多重丸打組物、あるいは図12に示したような、ハニカム状断面を有する組物を輸送管として用いることによって、熱交換円筒や断熱円筒など、さまざまな機能を有する円筒を同時に得ることができる。すなわち、この輸送管は、リブによって分けられた空間を使って、同時に数種類の流体を運ぶことができる。このように、本研究で得られた多重丸打組物は、その多機能性のため、さまざまな分野に適用可能であると考えられる。

6. おわりに

本研究において開発した、シミュレーションプログラムを用いることにより、三次元組物の軌道において、得られる組物の織り構造の予測を行

表2 多重丸打組物の応用性

		Inside of Inner Layer	Between Layers	Application
Thick Traid Tube	Without Ribs	Axial fiber	Axial fiber	High modulus and strength rod
		Optical fiber	Optical fiber	Optical communication cable
		—	Axial fiber	High strength bended tube
		—	Axial fiber	High strength joint element for truss construction
	With Ribs	—	Ulethane	Light-weight tube
		Fluid	Fluid	Transportation tube with multiple functions
Fluid		Fluid coolant	Heat exchanger	
		Heat insulating Material	Heat insulating tube	

い、規則的な織り構造を組成する、スピンドル配置の決定を行うことが可能となった。本シミュレーションプログラムは、三次元組物機械の軌道設計に有効である。

また、本研究で得られた三次元組物技術は、スポーツ用品に限らず、土木、建築材料などの構造物として、FRPを使用する分野でも有用となる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、多くのご助言を賜りました、京都工芸繊維大学繊維学部 前川善一郎教授、実験等の援助をしていただいた、京都工芸繊維大学学部生の仲井朝美氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 前川, 濱田, 横山, 上田; 日本機械学会論文集 A 編, **54**, 503, 1424 (1988)
- 2) 横山, 小林, 濱田, 前川; 日本機械学会論文集 A 編, **55**, 516, 1942 (1989)

- 3) 濱田, 横山, 前川, 藤田; 日本機械学会論文集 A 編, **57**, 536, 915 (1991)
- 4) 横山, 前川, 濱田, 岩崎; 日本繊維機械学会誌, **41**, 1, 103 (1988)
- 5) 横山, 前川, 濱田, 上田, 岩崎, 小林; 日本繊維機械学会誌, **41**, 1, 57 (1988)
- 6) 横山, 前川, 濱田, 堀野, 上田; 日本繊維機械学会誌, **41**, 6, 45 (1988)
- 7) 濱田, 前川, 横山, 藤田; 日本複合材料学会誌, **16**, 4, 155 (1990)
- 8) 濱田, 前川, 藤田, 魚住; 日本複合材料学会誌, **18**, 6, 239 (1992)
- 9) 横山, 前川, 濱田, 山木, 岩崎; 日本機械学会論文集 A 編, **54**, 502, 1181 (1988)
- 10) 横山, 前川, 濱田, 岩崎, 小林; 日本機械学会論文集 A 編, **54**, 502, 1187 (1988)
- 11) 横山, 前川, 濱田, 岩崎, 小林; 日本機械学会論文集 A 編, **55**, 516, 1942 (1989)
- 12) 前川, 濱田, 横山, 小林, 藤田, 魚住; 日本機械学会論文集 A 編, **57**, 535, 563 (1991)
- 13) Yokoyama, A., Fujita, A., Kobayashi, H., Hamada, H., Maekawa, Z.; *Proc. 10th Int. Euro. Conf. SAMPE*, **87** (1989)
- 14) Kobayashi, H., Nakama, N., Maekawa, Z., Hamada, H., Fujita, A., Uozumi, T.; *37th Int. SAMPE Symp.*, **37**, 1089 (1992)