三次元複合材料の強化材の組織り創成に関する研究*

(第4報, I形断面部材の場合)

前川 善一郎^{*1}, 濱田 泰以^{*1}, 横山 敦士^{*1}
小林 秀光^{*2}, 藤田 章洋^{*3}, 魚住 忠司^{*4}

Flat and Cord Braiding Construction of Reinforcement in Three-Dimensional Composites

(4th Report, I-Shape Integrated Beam)

Zenichiro MAEKAWA, Hiroyuki HAMADA, Atsushi YOKOYAMA,
Hideteru KOBAYASHI, Akihiro FUJITA and Tadashi UOZUMI

Near-net-shape fiber preforms will be the major focus of advanced composite materials which are capable of cutting processing costs and obtaining structures with better properties. Braiding is one of these technologies. We have proposed that modification of conventional braiding machines can fabricate braiding construction with various complex shapes. It is difficult to decide the initial spindle setting pattern on the track with the various complex configurations. We previously showed the mechanism simulation techniques for basic flat braiding and basic cord braiding. In this paper, a new program based on simulation of the basic flat braid is developed to apply to three-dimensional configuration. Moreover, regularity of braiding construction is appraised by use of fiber crossing.

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

1. 緒 言

二次的強度部材としての利用が主であった繊維強化複合材料は, その高性能化に伴い一次構造部材への要求が高まり, 比強度・比剛性の大きな三次元構造を成す構造部材の必要性が高まってきている。一般に, 接着により組立てられたものでは, 接着はがれや層間はく離を生じやすいことが欠点として指摘されている。

近年, 長繊維を立体に製品形状の状態に織り上げた強化形態(Near-net-shape)の作製技術の研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。立体構造を有する組物構造は, この技術の一つであり, 強化形態に用いることで繊維が切断されることなく連続し, 一体成形が可能である。

著者らは, すでに既存の組機を改良して複数の組機を組合せることにより, 複雑な立体形状を有する組物を作製できる機構を考案し, 立体形状を有する複合材料の基材作製が, 可能であることを明らかにしている⁽³⁾。前報までにおいて, 基本的な平打・丸打組物のス

ピンドル配置などの初期条件より組物の組構造の予測を行うシミュレーション・プログラムの開発を行っている^{(4)~(6)}。

そこで本研究においては, このシミュレーション・プログラムを応用して複雑断面を有する組物のスピンドル配置の決定, および組構造の予測を行うシミュレーション・プログラムの開発を行った。さらに, 組構造の規則性の評価法を提案しその有効性について検討を行った。

2. 三次元組物構造

組物構造は前報に示したように平打組物と丸打組物に大別される。図1に基本的な平打組物と丸打組物の模式図を示す。平打組物は平板形状であり, 丸打組物は丸棒または円柱形状である。これらの組物構造においての糸供給部であるスピンドルの動きは多少の波動運動はあるものの基本的には平打組物では往復運動であり, 丸打組物では円運動である。

これに対して三次元組物構造ではスピンドルの動きが一次的でなく二次元的な動きをする必要がある。スピンドルの二次元的な動きに糸を引き上げる運動を加えることにより立体的な組物を作製することができ, 図1に示す平打や丸打組物を作製する組機を応用

* 原稿受付 平成2年7月3日。

^{*1} 京都工芸繊維大学 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

^{*2} 住友精密工業(株) (〒660 尼崎市西長洲本通2-6)。

^{*3} 京都工芸繊維大学大学院 [現, (株)神戸製鋼所]。

^{*4} 京都工芸繊維大学大学院。

し組合せることで、図2のような立体構造を有する組物の作製が可能である。しかしながら、立体構造を有する組物を作製する軌道では平打や丸打組機の軌道とは異なり、その形状が複雑となる。そのため複雑な形状の軌道に対して適切なスピンドル配置をあらかじめ求めることは非常に困難である。

平打組機のような簡単な軌道においても、スピンドル配置が不適切であると、組物の作製は、スピンドルが波状軌道上を他のスピンドルと交錯しながら移動することで行われるため、組物の作製が不可能となる。

軌道交差部でのスピンドル移動の一連の様子を図3(a)に示す。スピンドルの脚を捕えている羽が回転することでスピンドルが軌道形状に従って移動を行う。スピンドルが軌道交差部まで移動すると、他方の羽と出会い、スピンドルの受渡しが行われる。

組機の機構上、最初にどの羽にスピンドルが置かれるかによって、組構造が決定される。また、最初のスピ

ンドルの配置が不適切であると、図3(b)に示すように、双方からスピンドルが軌道交差部に同時にきてしまい、スピンドル同士が衝突し、組物の作製が不可能となる。

組物の作製において、スピンドル配置の決定は極めて重要である。

3. シミュレーション手法

複雑な軌道になると、スピンドル同志の衝突の起こらないスピンドル配置を得ることが非常に困難となる。そこで、さまざまな軌道に対して、スピンドル配置を決定しその配置より得られる組物の組構造を示すシミュレーション・プログラムの開発を行った。

3.1 方法 図4(a)に示す簡単な軌道を例にス

図1 平打組物および丸打組物と組織り機構

図2 立体構造を有する組物の形状

図3 スピンドルの受渡し機構

図4 軌道形状と衝突を起こすスピンドル位置

スピンドル配置の決定手法について説明する。この図は、軌道交差部において羽同志が出会っている状態で、それぞれの羽の位置にスピンドルの移動に対応して、番号(以下、羽番号とする)を設定したものである。この軌道では、1～14番までの番号を設定した。スピンドルは一定時間で次の番号へ進み、14番の次は1番へと進む。スピンドルが次の番号の位置まで進むことを1ステップと呼ぶことにする。

スピンドル同志の衝突は軌道交差部で起こる。つまり、5番と14番、あるいは12番と7番に同時にスピンドルが移動してきたとき衝突が生じる。例えば、一つのスピンドルが1番に設定されているとき、次に設定するスピンドルが先のスピンドルと衝突するための条件は、一方のスピンドルが5, 7, 12, 14番に来たとき、他方のスピンドルがそれぞれ14, 12, 7, 5番に同時に来る場合だけである。図4(b)に示すように、1番に設定されたスピンドルAが4ステップ進んだ5番で衝突するのは、スピンドルBが14番より4ステップ戻った10番に設定されたときである。他の場合についても同様に考えることで1番に設定されたスピンドルAと衝突を起こすすべてのスピンドル配置の番号を知ることができる。

スピンドルAと衝突するスピンドルBを設置する羽番号 S_B は、次の式より求めることができる。

$$\begin{cases} W_A < W_B \text{ のとき,} \\ S_B = \{W_B - (W_A - S_A)\} \bmod H \\ W_A > W_B \text{ のとき,} \\ S_B = \{(H + W_B) - (W_A - S_A)\} \bmod H \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

S_A : スピンドルAが設置されている羽番号

W_A : 衝突するときのスピンドルAの羽番号

W_B : 衝突するときのスピンドルBの羽番号

H : 羽の総数

上の式(1)を用いて、1番に設定されたスピンドルAと衝突を起こすスピンドルBを設置する羽番号 S_B を求めた結果を表1に示す。この結果より1番に設定されたスピンドルは、6番あるいは10番に設置されるスピンドルと衝突を起こすことがわかる。それら以外の所へスピンドルを設置する必要がある。さらに、スピンドルAが2, 3, ..., 14番に設置された場合についても同様に行う。それぞれの結果を1, 0を用いて、表2に示す14×14のマトリックス(以下、スピンドル配置マトリックスと呼ぶ)に表すことができる。1はスピンドルの設定が可能であること、0は不可能であることを表している。例えば、第6行めでは第1, 6, 11列が0であり、6番にスピンドルが設定されているとき、1番と11番にスピンドルを設定することが不可能であることを意味している。

表1 スピンドルAと衝突を起こすスピンドル位置

Step number	Spindle A		Spindle B	
	SA	WA	WB	SB
4	1	5	14	10
6	1	7	12	6
11	1	12	7	10
13	1	14	5	6

表3 スピンドル配置の決定過程(一つめの場合)

Horndog number set up spindle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
Horndog number to be able to set up next spindle	2	3	4	5		7	8	9		11	12	13	14	

表4 スピンドル配置の決定過程(二つめの場合)

Horndog number set up spindle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
Horndog number to be able to set up next spindle	2		4	5		7		9		11		13	14	

表5 スピンドル配置の決定過程(最後の場合)

Horndog number set up spindle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
7	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
9	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
11	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
13	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
Horndog number to be able to set up next spindle	Nothing													

表2 スピンドル配置マトリックス

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
2	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
3	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1
4	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
5	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
6	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
7	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
8	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
9	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
10	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1
11	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
12	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
13	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
14	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0

次に、スピンドル配置を決定していく過程をスピンドル配置マトリックスより得られる表3～5に示す。まず一つめのスピンドルを1番に設定すると、表2のスピンドル配置マトリックスの第1行を抜き出し、表3を得る。次にスピンドルを設置できる羽番号は1である列の羽番号となる。そこで次のスピンドルを設定する羽番号に3番を選ぶと、スピンドル配置マトリックスの第3行を抜き出し表4に示すように1番に並べて表示する。それぞれの列についてすべて1(論理積が1)である羽番号が、次にスピンドルを設置できる羽番号である。同様にしてスピンドルを設定して行き、表5に示すように次にスピンドルを設置できる羽番号がなくなったとき、それ以上のスピンドルの設定は不可能となる。この表より羽番号1, 3, 5, 7, 9, 11,

13, 15番のスピンドル配置が得られたことがわかる。

上記の手法によりさまざまな軌道の形状に対して、衝突の起こらないスピンドル配置を得ることができる。しかしながら一つの軌道の形状からいく通りものスピンドル配置が得られる。そこで、偏りのないスピンドル配置を得る複雑断面組物シミュレーション・プログラムのフローチャートを図5に示す。このシミュレーション・プログラムでは、偏りのないスピンドル配置を求めることを目的として、等間隔に羽番号を抜き出し、それらの番号についてスピンドルの設定が可能かどうかの判定を行う。可能であった羽番号がスピンドル配置となる。さらに得られたスピンドル配置より作製される組物の組上がり状態を図示する。

図中○で囲った数字により流れを示す。

- ①軌道の形状および羽数を入力する。
- ②画面上に軌道の模式図および羽を描く。
- ③スピンドルの移動順序に従って、すべての羽の位置に羽番号を設定する。
- ④羽の総数、軌道交差部の数およびスピンドル同志が衝突を起こすところの(軌道交差部にある)羽番号を求める。
- ⑤④で求めた値を用いて式(1)によって、衝突の起こるスピンドル配置を算出する。
- ⑥⑤の結果をスピンドル配置マトリックス $A(i, j)$, $i, j = 1, 2, \dots, H$ に納める (H は羽の総数)。
- ⑦スピンドルの設定が可能であるかどうかの検討を行う羽番号の個数 N_H を算出する。

$$N_H = H/N_p \dots \dots \dots (2)$$

ここで N_p とは、等間隔に抜き出す羽番号の間隔の値。

⑧次の(あるいは、一つめの)スピンドルを設定する羽番号 I_s を算出する。

$$I_s = N_p(m-1) + 1 \dots \dots \dots (3)$$

⑨⑧により算出された羽番号 I_s にスピンドルの設定が可能か判定を行う。不可能ならば⑧へ、可能ならば⑩へ進む。

⑩求められたスピンドル配置より得られる組物の組上がり状態を図示する。

⑪⑩の結果より得られる組物の組上がり状態が一樣なものであるか評価を行う。良い組上がり状態でないとき、等間隔に抜き出す羽番号の間隔を一つ増し⑦へ進む。所定の組上がり状態であるとき、シミュレーションを終了する。

3・2 結果 次に先ほどの図4(a)に示した簡単な軌道を用いて行った本シミュレーションの結果を図6(a), (b)に示す。スピンドルの設定されている羽

図5 シミュレーションプログラムのフローチャート

番号は等間隔で、その間隔は2である。設定されているスピンドル数は12である。またそのスピンドル配置より得られる組物の組み構造は下の図に示すように一

様で、規則的であることがわかる。

4. I形断面組物構造

4.1 シミュレーション結果 本シミュレーション・プログラムはさまざまな軌道の形状に対応可能である。そこで三次元組物構造の一つとして、I形断面を有する組物に本シミュレーション・プログラムを応用した。シミュレーション結果より得られたスピンドル配置と組物の組構造をそれぞれ図7(a)、(b)に示す。スピンドル配置はある羽にスピンドルを設定し、次の三つの羽にスピンドルを設定しない、これを連続させた1垂3空のスピンドル配置である。設定されているスピンドル数は31である。図7(b)より組構造が一様であることがわかる。31本の繊維はI-Beamのフランジ部分からウェブ部分へ、さらに他方のフランジ部分へと途中切断されことなく連続して配向していることがわかる。I形断面を有する組物を複合材料の強化形態に用いることで強度的に有効な構造部材を期待することができる。

次に、図5のシミュレーション・プログラムのフローチャートに基づかず、不規則にスピンドルの配置の決定を行った場合のシミュレーション結果より得られ

図6 シミュレーション結果

図7 シミュレーション結果(規則的な場合)

図8 シミュレーション結果(不規則な場合)

図9 繊維の交差のできる様子

たスピンドル配置と組物の組構造を図8(a), (b)に示す, このようにして得られたスピンドル配置は37個のスピンドルを設定することができたが, スピンドルの配置に大きな偏りが存在し, 組物の組構造に繊維の粗密が現れている。

4.2 考察 本シミュレーションにより得られた結果の評価は, 組構造の規則性により判断することができる。組構造の規則性を組物を組んでいる繊維同志の交差点により評価することを試みた。図9に繊維の交差のできる様子を示す。繊維の交差は, 軌道交差部の間において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。ある一つの軌道交差間に着目し, 組織り開始からの繊維の交差数を累積しこの値のばらつきによって規則性の評価を行った。図7の規則的な構造の場合と, 図8の不規則な構造の場合のそれぞれのシミュレーション結果について1ステップごとに繊維の交差の発生する数を求め, 繊維の交差の発生したステップに発生数を累積しプロットしたものを図10, 11に示す。これらの図の相関係数を求めると, 図10については1.0を得た。図11では1.0以下の値であった。相関係数が1に近いほど組構造の規則性の高いことを示している。相関係数1とは規則的な組構造であることを示している。同様の評価を測定可能なすべての軌道交差部間について行った結果, 規則的な構造の場合では, すべてにおいて相関係数は1.0であった。このようにして, 繊維の交差数より相関係数を求め組構造の規則性の評価を行うことができる。

5. 結 言

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, さまざまな形状の軌道にお

図10 ステップ数と交差数の関係(規則的な場合)

図11 ステップ数と交差数の関係(不規則な場合)

いてスピンドル配置の決定を行い, さらに組構造の確認を行うことが可能となった。

また, 組物の組構造の規則性の評価を繊維の交差数を用いて, 行えることが明らかとなった。

文 献

- (1) Tsu-Wei Chou and Frank, K. Ko., TEXTILE STRUCTURAL COMPOSITES, *Composite Materials Ser. 3*, (1989).
- (2) 村山・八田, 日本複合材料学会誌, 15-1(1989), 10-17.
- (3) Yokoyama, A., Fujita, A., Kobayashi, H., Hamada, H. and Maekawa, Z., *Proc. 10th Int. Conf. SAMPE*, (1989), 87-99.
- (4) 横山・前川・濱田・岩崎・小林, 機論, 54-502, A(1988), 1181-1186.
- (5) 横山・前川・濱田・山本・岩崎, 文献(4)の1187-1190ページ.
- (6) 横山・前川・濱田・岩崎・小林, 機論, 54-506, A(1988), 1921-1924.