三次元複合材料の強化材の組織り創成に関する研究*

(第 1 報, 平打および丸打組物構造の場合)

横山 敦士^{*1}, 前川 善一郎^{*2}, 濱田 泰以^{*2}
山木 薫^{*3}, 岩崎 康彦^{*4}

Study on Flat and Cord Braiding Constructions of Reinforcement in Three Dimensional Composite (1st Report, Basic Braiding Construction)

Atsushi YOKOYAMA, Zenichiro MAEKAWA, Hiroyuki HAMADA,
Kaoru YAMAKI, and Yasuhiko IWASAKI

This study describes the design of braiding construction using computer simulation. Braiding construction is one of the reinforcement configuration in three dimensional fiber reinforced plastics. A simulation program for the braiding mechanism is prepared in this study. Simulation programs which predict the braiding construction through the thread movements are developed for the flat braiding and the cord braiding. Two kinds of simulation programs by micro-computer can realize the graphic animation of yarn and also estimate the braiding angle and the fiber content of the composite cylinder with braiding construction.

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

1. 緒 言

三次元構造を有する織物が複合材料の強化材として注目を集めている。この強化材を用いると複雑な形状の複合材料が作製でき、しかもその内部に層間が存在しない強度的に良好な性質をもった構造材とすることが可能である。

三次元織物の研究は 1980 年代に入って活発となり、福多が三次元織物を用いた立体格子状の多孔形構造の複合材料を作製し、強度や振動吸収性について検討を行っている⁽¹⁾。Ko は三次元織物で複雑な形状の部材を作製する研究を行っており、その際の繊維の動きについても検討を行っている⁽²⁾。その他、Florentine による Magnaweave の研究⁽³⁾、西村らによるステッチを施した多層積層板の研究⁽⁴⁾などが行われている。このように複合材料への応用に際して各種の特徴を有し、多数の研究がなされている三次元織物であるが、現在

それほど広く作られているとはいいがたい。その原因は三次元織物の作製技術が完成されておらず、その作製には非常に手間と時間がかかるなど、経済性についての障害があるためと考えられる。

それに対して同じ三次元構造を有する組物構造は、比較的簡単な機構で組物を組むことができ、組み方を少し変更させるだけで、その形状を大きく変更できるなど、三次元織物にはない特徴を有している。著者らは、すでに組織り構造を有する複合材料の円筒を作製し各種試験を行い、この複合材料の力学的特性を明らかにした^{(5)~(7)}。

組物構造は基本的な機構は単純であり、その組み方から組物自体の形状を予測することは重要である。このため、コンピュータを用いたシミュレーションを行うことの必要性は高い。しかし、作製工程をコンピュータによりシミュレーションすることはほとんど行われておらず従来からの各種図示法の応用で行われている場合が多い⁽⁸⁾。

そこで本研究においては、コンピュータを用いた組物構造の設計を目的として、平打組物および丸打組物の機構シミュレーションプログラムを作製し、各種組物構造のシミュレーションを行い、実際に作製した組物構造を有する複合材料とシミュレーション結果の比

* 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 6 月 26 日。

^{*1} 正員, 大阪府立工業技術研究所 (〒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} 日本組紐研究会 (〒606 京都市左京区鹿ヶ谷法然院西町 60)。

^{*4} 京都工芸繊維大学大学院。

較検討を行い、本プログラムの有効性を明らかにする。

2. 組物構造

織物は縦糸と横糸が明確に区別されていて、糸方向の負荷を受ければ縦糸か横糸かのどちらかで荷重を負担する構造となっている。これと違って、組物では縦糸と横糸の区別がなく、あらゆる糸は互いに交錯しながら斜めに走って組物を構成していく。このため負荷に対してすべての糸が荷重を負担することになる。図1に織物と組物の構造の模式図を示す。

組機の本質的運動は、水平方向および垂直方向の2方向の運動に分類できる。図2に一般的な組機の外観を示す。水平方向の運動は、糸巻(ボビン)の保持物である組錘(Spindle)が波状軌道(Course)に導かれて移動することによって行われ、組錘が交互に交差することにより組錘から出た糸は組まれていく。このようにして組まれた糸は巻取り装置により垂直方向に巻取られる。これら2方向の運動を合成することにより組物が形成される。図3に組機の中心部分である組錘の駆動部分の詳細図を示す。組錘の駆動装置は動力を伝える歯車(Gear)と、それに連結された羽車(Horn-gear)とから構成されており、それを軌道(Course)を設けた上板(Upper plate)と下板(Lower plate)で保持している。組錘の脚は軌道の下にある羽車に設

けられた切欠きの部分(羽)によって捕えられており、羽車が回転することにより軌道上を移動する。そして組錘は軌道の交差点までくると隣の羽車に移される。このように組錘は次々に隣の羽車に受けわたされながら移動していく。このため、最初にどの羽に組錘を置くか(組錘配列)で組み方が決定され、この組錘配列が不適切であると組錘が受けわたし部分で重なって組物を作製するのが不可能となる。

組物の構造は、平打と丸打の2種類に分類することができる。図4に平打組物の組錘の軌道と組物の構造の模式図を示す。平打組物の場合は軌道は1本であり、一つの軌道上を全組錘がとおる構造となっている。図5に丸打組物の組錘の軌道と組物の構造の模式図を示す。丸打組物の場合は軌道は2本であり、それぞれ別々の二つの糸群を有することになる。平打組物では糸が組物の表面をジグザグに走っているのに対して、丸打組物では糸はネジ状にそれぞれ左右回転しながら互いに交差して組物を形成する。このため平打組物では組物が板状の二次元形状となるが、丸打組物では三次元的な中空円筒形状となる。このように平打組物と丸打組物とは機構が大きく違うため、シミュレーションに際しては、それぞれ独立したプログラムを作製した。

図1 織物と組物の構造

図2 組機の外観

図3 組錘駆動装置

図4 平打組物の構造と軌道

図5 丸打組物の構造と軌道

3. 平打組物の組織り機構 シミュレーション

図6に平打組物の基本となる心臓形組物の模式図を示す。これは、羽車数(車数)2個の普通組機によって作製されるもので組機は最も簡単な構造となる。この組物は組錘数は3個、組錘配列は1錘1空である。組錘配列が1錘1空とはある羽(A)に組錘を配した場合(1錘)に隣の羽(BおよびC)には組錘を配しない(1空)組錘配列である。図4に示す平打組物は車数4個、組錘数は5個、組錘配列は1錘1空である。この2種類の平打組物では、繊維の織り構造は1本の繊維が他の2本の繊維に対して1回浮き1回沈む関係にある。このような組物組織を1本組といい、同様に2回浮き2回沈む組織を2本組、3回の場合を3本組という⁽⁸⁾。

ここで平打組物において配列、組織、羽車の羽の数の間には次のような関係がある。ここで配列とは組錘配列の1循環の羽数の和のことで、1錘1空では2となる。端車数2、中間車数2の車数4個の平打組物の場合、各車上の組織(n 本組)を n_1, n_2, n_3, n_4 (図4の組物の場合、各羽車とも組物組織は1本組のため $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1$ となる)、配列を H とし、各車の羽数を M_1, M_2, M_3, M_4 とすると、各数値の関係は次式となる⁽⁸⁾。

$$\left. \begin{array}{l} \text{I} \quad a_1 = M_1 - n_1 \times H \\ \text{II} \quad a_2 = M_2 + a_1 - n_2 \times H \\ \text{III} \quad a_3 = M_3 + a_2 - n_3 \times H \\ \text{IV} \quad M_4 = n_4 \times H + H - a_3 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 a_1, a_2, a_3 は正の整数をとり、組物作製が可能かどうかを示す指標であり、零となると組錘が衝突して組物が作製できなくなる。例えば、図4の組物の場合 $M_1 = M_4 = 3, M_2 = M_3 = 2, H = 2, n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1$ となるから、式(1)を用いて $a_1 \sim a_3$ を計算すると

図6 心臓形組物の構造と軌道

$a_1 = a_2 = a_3 = 1$ となる。 $a_1 \sim a_3$ が零ではないため、この組錘配列で組物が作製可能であることがわかる。上式を応用して、組機の初期設定すなわち車数(羽車数)、組錘配列、組物組織を決定し、この条件と組物の引上げ速度、組錘回転速度などから羽数、組錘位置などを算出し、組物の機構シミュレーションを行った。

図7に平打組物の組織り機構シミュレーションプログラムのフローチャートを示す。図中の○で囲った数字により流れを示す。

① 初期条件として、車数、組錘配列、各車上での組物組織、端車(1)の直径および回転速度、組物の引上げ速度などを入力する。

② 設定した各条件から各車の羽数 M_i を式(1)を用いて計算する。また各羽車の直径 D_i と回転速度 W_i を端車の、直径 D_1 と回転速度 W_1 より次式を用いて算出する。

$$D_i = D_1 \times \frac{M_i}{M_1} \dots\dots\dots (2)$$

$$W_i = W_1 \times \frac{D_1}{D_i} \dots\dots\dots (3)$$

③ 各車羽数から各羽の位置(座標 x, y)を次式で計算する。

$$x = x_0 + \frac{1}{2}D \times \cos(W \times t + \theta_0) \dots\dots\dots (4)$$

$$y = y_0 + \frac{1}{2}D \times \sin(W \times t + \theta_0) \dots\dots\dots (5)$$

ここで x_0, y_0 は初期状態での羽の座標であり、 θ_0 は初期状態での羽車の中心からの羽の角度を示している。また、 D および W はそれぞれ羽車の直径、回転速度を示している。 t は初期状態からの経過時間である。

図7 平打組物のフローチャート

- ④ 組錘配列から組錘が存在している位置を決定する。
- ⑤ 画面上に各車を円で描き、各羽を各車の中心から放射状の線で示す。また、④で決定された羽上に小円を描き組錘の存在を示す。
- ⑥ 現在の組物の長さ L を引き上げ速度 V より次式で算出する。

$$L = V \times t \dots\dots\dots (6)$$

ここで t は初期状態からの経過時間である。

この組物の長さと組錘の位置により画面上にそのときの糸の軌道を示す。この際、交差部の糸の上下を区別するため、下になった糸は中抜きの帯で示す。

- ⑦ 組物が設定された長さに達したら終了する。達していない場合は画面を一度消去し時間を進めて③に戻る。

次に本シミュレーションの結果を図8～13に示す。

図中白の帯は手前に浮いている糸を表し、黒い帯は沈んでいる糸を表している。図8は平打組物の基本となる心臓形組物のシミュレーション結果である。条件は車数2、組錘配列1錘1空とした。糸が1回浮き1回沈む構造の組物となっており、1本組の組物であることがわかる。また組錘数が3本であることも示されている。次に車数6、1錘1空として1本組のシミュレーション結果を図9に、2本組の結果を図10に、3本組の結果を図11に示す。組織に対応する糸の浮き沈みの状態や組織が増加すると羽数および組錘数すなわち糸の本数が増加することがわかる。次に車数6、2錘2空、2本組すなわち2本網代組のシミュレーション結果を図12に、3本網代組の結果を図13に示す。網代組は織物の斜子織のような組織のもので普通2本～3本の糸が並列となり組織されている。

以上のように本シミュレーションによって組錘の動

図 8 心臓形組物のシミュレーション結果

図 11 平打3本組組物のシミュレーション結果

図 9 平打1本組組物のシミュレーション結果

図 12 平打2本網代組組物のシミュレーション結果

図 10 平打2本組組物のシミュレーション結果

図 13 平打3本網代組組物のシミュレーション結果

きと組物の状態の関係を視覚的に理解することができる。また、それぞれの糸の色をかえることにより、完成組物の外観を知ることができる。

4. 丸打組物の組織り機構 シミュレーション

図14に丸打組物の組織り機構シミュレーションプログラムのフローチャートを示す。図中、○で囲った数字により流れを示す。

- ① 初期条件として組錘数、組物の引上げ速度、組錘の回転速度、各組錘の初期位置などを入力する。
- ② 画面上にマンドレル(組物の芯となるものである)を図示する。
- ③ マンドレル上の繊維束の座標 (x, y, z) を計算する。

$$x = \frac{1}{2}D \times \cos(\pm W \times t + \theta_0) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$y = \frac{1}{2}D \times \sin(\pm W \times t + \theta_0) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$z = V \times t \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで θ_0 は初期状態でのマンドレルの中心からの組錘の角度であり、 D および W はそれぞれマンドレルの直径、組錘の回転速度を示している。 V はマンドレルの引上げ速度であり、 t は初期状態からの経過時間である。また W の前の符号は組錘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。

- ④ ③および引上げ速度から繊維束の軌跡をマンドレル上に図示する。
- ⑤ 各繊維束が交差したかどうかを判断する。交差し

たと判断すると⑥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⑦に移る。

⑦ 組物が設定された長さに達したらシミュレーションを終了する。達していない場合は時間を進めて③へ移行する。

次に本シミュレーションの結果を図15、16に示す。図15に車数16の組機を基本とした場合の組錘数16のシミュレーション結果を示す。また図16に同様に組錘数32としたときの結果を示す。本シミュレーションでは丸打組物において初期の組錘位置から組物組織を視覚的に知ることができ、図15の場合は1本組、図16の場合は2本組となることがわかる。また、繊維束の巻き角度、1本のロービング長、ロービングの交点の座標などを知ることができる。

5. シミュレーション結果の考察

本シミュレーションプログラムを実際の組物構造をもつ複合材料に適用して、その有効性を検討した。組物構造を有する複合材料としては図2に示す組機を用いてマンドレル上に組物を作製し、樹脂を含浸した複合材料円筒を用いた。繊維の種類は炭素繊維、樹脂はエポキシ樹脂である。この複合材料の組物の構造は丸打組物、羽車数16、組錘数16、組錘配列1錘3空、1本組である。

図17にマンドレルの引上げ速度の違う3種類の複合材料円筒の外観と同じ条件で計算したシミュレーション結果を示す。複合材料円筒の繊維の構造とシミュレーション結果とは良い一致を示している。表1に複

図14 丸打組物のフローチャート

図15 丸打1本組組物のシミュレーション結果

図16 丸打2本組組物のシミュレーション結果

表 1 複合材料円筒の巻き角度および繊維含有率

Braiding Angle (deg.)	Experiment	26.0	34.0	42.5	56.8
	Simulation	25.8	32.5	42.5	60.7
Fiber Volume Fraction (%)	Experiment	49.3	46.7	43.6	48.0
	Simulation	47.4	44.8	39.9	41.3

合材料円筒より測定した組物の巻き角度とシミュレーションプログラムで算出した巻き角度およびシミュレーション結果をもとにして次式より算出した複合材料の繊維含有率 V_f を示す。

$$V_f = \frac{4 \times n \times L_f \times V_u}{\pi \times (D_o - D_i) \times L} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで n は繊維束の本数, L_f はシミュレーションより算出した円筒内の繊維の長さ, V_u は繊維の単位長さ当たりの体積, D_o および D_i は円筒の外径および内径, L は円筒の長さである。

計算で求めた含有率が実験結果より小さい原因はシミュレーションが繊維のクリンプを考慮していないためである。

巻き角度では巻き角度が 56.8 度の場合を除いて両者は良い一致を示しており, このプログラムが巻き角度の予測に有効であることがわかる。また, 繊維含有率も実測値と巻き角度 56.8 度の場合を除いて良く一致している。巻き角度が 56.8 度の場合に実際の巻き角度がシミュレーション結果よりも小さくなったのは, マンドレルの引上げ速度がおそくマンドレル上に繊維が密になりすぎ, 所定の巻き角度が得られなくなっているためである。このように本プログラムが実際の組物構造を精度良く表すことが明らかとなり, また組織による組物構造作製の限界を知るうえで有効であると考えられる。

6. 結 言

- (1) 組物の構造を組錘の運動より推測することが

図 17 複合材料円筒とシミュレーション結果の比較

できるコンピュータシミュレーションが比較的簡単なプログラムで可能となった。

- (2) 本シミュレーションプログラムにより組物構造をもつ複合材料の巻き角度, 繊維含有率の予測が可能となった。

本シミュレーションプログラムを使用することにより組物の組錘配列, 羽車の数などの組物の初期条件の最適化が可能となり, 組物構造をもつ複合材料設計支援のための有用な手段になるものと考えられる。

文 献

- (1) 福多, 高分子, 28-10 (昭 54), 706.
- (2) Ko, F. K., *ICCM IV, Tokyo, Japan*, (1982), 1609.
- (3) Florentine, R. A., *13th National SAMPE Technical Conf.*, (1981), 625.
- (4) Nishimura, A., Ueda, N. and Matsuda, S., *28th National SAMPE Symposium*, (1983), 71.
- (5) 前川・堀野, 第 35 回高分子学会年次大会予稿集 35-4 (昭 61), 1185.
- (6) 前川・濱田・堀野・岩崎, 第 30 回材料研究連合講演会予稿集, (昭 61), 23.
- (7) 前川・濱田・堀野・横山・岩崎, 複合材料シンポジウム予稿集, (昭 61), 54.
- (8) 山木, 組物及び組物機械, (1957), 技報堂, 44.