フィラメントワインディング技術による 複合材料の成形とその安全性評価*

川 原 正 言^{*1}

Technology and Safety Evaluation of Filament Winding

Masanori KAWAHARA

Key Words: Filament Winding, Fiber Reinforced Plastic (FRP), Safety Evaluation, Design Qualification Test, Non-axisymmetric Winding, Isotenoid

1. ま え が き

「フィラメントワインディング」とは、訳して言い替えると「糸巻き」である。糸巻きそのものは、我国でも古くから、手鞠や人形筆などの糸飾りとしてなじみ深い。この糸巻きの手法が繊維強化複合材料の工業的製造法として最初に応用されたのは、1947年(M. W. Kellog)⁽¹⁾あるいは、1948年(Hercules)⁽²⁾であるとされる。その後次々と開発された炭素繊維(1958年)、高強度のSガラス繊維(1960年)、高弾性炭素繊維(1961年)、アラミド繊維(1971年)などの高い強度性能を最大限に利用する技術として、この手法が注目され、特に1950年代以降米国のNASAにおいて、ロケットチャンバなど宇宙航空機器の製作技術として、大きく発展した。我国でも、1960年代よりロケットモータの開発で本格的研究が始まっている^{(3)~(5)}。また高圧パイプ、耐食パイプの製作に多く使用されるようになった⁽⁶⁾。

今日、フィラメントワインディング(以下「FW」と略す)は、パイプ、容器、シャフト、ロータ、プロペラ、その他各種シェルまたはフレーム構造に広く応用され、長繊維(連続繊維)複合材料成形の、一つの最も基本的な成形技術となっている。欧米では、多くの研究機関がそのマシンを持ち、基礎、応用ともにバラエティーに富む論文が発表されている。しかし我国では、ここ数年、この分野での研究発表は数少ない。また、ごく限られた機関からの発表しかなく、応用面の論文は数えるほどしかない。

ここでは、FW成形のソフト、ハード、設計、につい

ての概要を紹介し、また、成形体の安全性評価のポイント、ここ2、3年での研究開発の動向、並びに今後の発展について二、三の私見を述べることにしたい。浅学を顧みず、このような主題に挑んだが、複合材料の成形および安全性評価における、この技術の重要性について諸氏の参考に資するところがあれば幸いである。

2. FW 成形とは

FWは、回転する「巻き形」に「糸」を巻き付け、これを「つなぎ材」で固めて形をつくる複合材料の成形法である。それゆえ、FW成形体は、次の三つの素材で構成されることとなる。

- ①フィラメント：巻き付ける「糸」としての強化繊維
- ②マトリックス：糸を固める「つなぎ材」としての樹脂
- ③ライナー：糸の「巻き形」。ただし場合によっては、成形後に取り外す(マンドレル)。

FWは、長繊維(連続繊維)を使用する複合材料の製造法として次のような特徴を持つ。長所として、

- (1) 繊維の強度を最大限に生かし得る。
- (2) 再現性のある高速のレイダウン成形である。
- (3) 低コストの素材料が直接使える。高価で低温貯蔵の要るプリプレグを使わなくて良い。ただし、必要なら、プリプレグを巻いてもよい。
- (4) 成形マシンが安価である。オートクレーブや外圧装置がいらない。
- (5) 大寸法でも、成形体の回転さえできれば、比較的楽に成形できる。
- (6) 一体成形で部品数や組立の手間を少なくできる。

* 原稿受付 平成元年11月7日。

*¹ 正員、日本鋼管(株)中央研究所(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)。

しかし、短所として次のような制限があることに注意しなければならない。

- (7) 負の曲率の面（凹面）には糸を巻けない。
- (8) 非軸対称の複雑な形状は難しい。
- (9) 巻き付け1層内では繊維方向に制限がある。
- (10) 金属とのジョイントには特別な配慮・工夫が必要である。

我国で、FW といえば、宇宙航空機器用の難しい成形技術というイメージがある。しかし上記の(3)、(4)、(5)、(6)のような理由により、欧米では、むしろ、低コストの基本的な複合材料成形法と考えられ、多くの研究機関、アトリエ、工場で気軽に使用されている。

3. FW 成形技術

3・1 FW 成形の基本ソフト FW 成形における中心となるソフトは、「曲面上を滑らないように糸を巻く」ことである。これは基本的に、与えられた曲面の「測地線」、すなわち曲面上の2点を最短距離で結ぶ線、をたどることで達成される。

測地線は、球では大円、円筒では螺旋線となる。一般の曲面については、微分幾何学の教科書を見ると、クリストフェルの記号の入ったテンソル表示で、次のような方程式が記載されている。

$$\frac{d^2 u^i}{ds^2} + \sum_{j,k} \left\{ \begin{matrix} i \\ jk \end{matrix} \right\} \frac{du^j}{ds} \frac{du^k}{ds} = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

この方程式を詳細に説明するのは、必ずしも本稿の主旨でないので省略する。しかしここでは、糸のパス・ラインを決定するために行われる。次のような、いくつかのアプローチについて簡単に説明する。

(A) あくまでも微分幾何学の諸公式を使って、解析的あるいは数値的に測地線を求める。

(B) 完全な測地線ではないが、実用的にわかりやすい滑り難いパス・ラインを工学的に設定する。

(C) 曲面を区分し、測地線の求めやすい多面体に置き換える。この多面体の測地線を近似解として用いる。

軸対称曲面の場合は、(A)の立場で解析的に解くことができ、測地線を決定するための次のような式が求められている。

$$R \sin \theta = \text{一定} (= R_0) \cdots \cdots (2)$$

ここで、 θ は測地線と子午線との間の角度、 R は対称軸からの距離（または半径）である。式(2)を満足するような糸の巻き方を、「ヘリカル巻き」と呼ぶ。

二つのコーンを組み合わせた軸対称面の測地線の例を、図1に示す。

(B)のアプローチは、工学的に賢い方法で、いわゆる「インプレーン巻き」と呼ばれる容器の巻き方が、その代表的なものである。容器の円筒部については、しばしば「フープ巻き」と呼ばれる巻き方が適用される。一定ピッチであれば螺旋線で測地線となるが、実際には摩擦があるので途中で多少ピッチを変更しても、滑らないで巻くことができる。

容器についての、これら三つの巻き方の例を、図2に示す。

非軸対称曲面については、ここ数年、各地で測地線を求めるプログラムの開発が進められている。(A)の立場から(1)の方程式を数値的に解く試みが各地でな

図1 二つのコーンでできた成形体の測地線

(i) インプレーン巻き

(ii) フープ巻き

(iii) ヘリカル巻き

図2 容器についてのいろいろな糸の巻き方

されているが、近年、(C)のアプローチによるプログラムが、アーヘン大学⁽⁷⁾、ノッティンガム大学⁽⁸⁾、などで開発されている。測地線は、平面では直線であり、他の平面へ移るには境界線に対し入射角と反射角とが等しいという原理で逐次決定できる。

図3に、このような原理による、著者らの研究室でのパーソナルコンピュータによる多面体、曲面体の計算例⁽⁹⁾を示す。

これらの方法を合わせると今日、測地線のパスそのものは、パソコンレベルの計算機で、ほとんど問題なく計算できる。特に軸対称曲面については、得られたパスラインを基に、FWマシンにおけるフィードアイ(糸繰口)位置をはじめ、多くのマシン制御パラメータが、容易に計算できる。

非軸対称曲面については、単に測地線を求めるだけでなく、実際の成形体に存在する摩擦を考慮に入れ、測地線からずれたパスのFWがどこまで許されるか

を確認し、応力分布や機能上の条件を考慮に入れてフィラメントパスをより大きな自由度をもって選ぶ、新しいソフトが今後必要となる。

3.2 FW成形のプロセスと基本ハード FW成形のプロセスは大きく分けて、次のようなステップで構成される。

- ①原材料の準備
- ②FW
- ③樹脂硬化の熱処理
- ④後処理

①では、主材料としての強化繊維と樹脂、並びに、巻き形となるライナまたはマンドレルを準備する。容器や高圧パイプの場合は、しばしば、気密性を持つライナをつくるための金属または樹脂のシェルを加工する技術が重要な開発の道具となる。

②は、FW成形の中心工程であるが、基本ソフトのほか、繊維の樹脂含浸、糸の張力コントロール、糸切

図3 非軸対称成形体の測地線の解の例

れの監視をいかに確実に行うかが、工業生産における重要なポイントとなる。

③で、成形体に巻き付けられた糸に含浸した樹脂が硬化される。この熱処理は多くの場合、樹脂のゼリー化と、完全硬化との二つの段階に分けられる。硬化の能率を高めるため、紫外線による樹脂硬化を併用することもある。

④は、成形体の種類、機能などにより、いろいろに異なるが、例えば、マンドレルの取り外し、ライナの塑性変形処理、表面塗装、等の工程がこれに分類される。できた成形体の各部各層の残留応力、ボイドの含有量、表面状況、等が重要な管理項目となる。

FW 成形の中心となるハードは、糸の巻き付けを行う FW マシンである。FW マシンは基本的に、次の四つのメカ部分で構成される。

- ①成形体を回転する軸とその駆動メカ
- ②糸繰り口を移動させるスライド
- ③①②の両者を同期して動かす制御系
- ④糸の樹脂含浸・供給ライン

最低限のマシンは、①②として、古旋盤を改良し、③は、今日広く出回っているパーソナルコンピュータと NC 制御盤を使用し、④の樹脂含浸槽と糸の張力コントロールをなんとか手作りで間に合わせることで実現される。

図 4 に FW マシンの構成を図式的に示す。

市販のマシン、特に高級な輸入マシンは、複雑な形状の成形のために糸繰り口移動および成形体回転の制御軸数を増やし、高速運転のために制御精度を高め、樹脂含浸度や糸の張力をチェック・監視し、製造に関わる諸パラメータのデータロギングを行い、その他多くの成形ノウハウが含まれるため、数千万円以上の

高価なものとなる。高価なマシンには、高価なマシンの役割と機能がある。特に、大量生産に適用するには、コスト、生産能率、メンテナンスを考えた専用機の使用が推奨される。しかし研究開発や試作には、単純なマシンでも、それなりの目的が達せられる。

4. FW の設計

4.1 材料特性 FW による成形体の設計には、まず、使用する各素材の材料特性・性能が問題となる。表 1 に、FW 成形体の材料として使用されることの多い諸材料の強度、剛性、密度などのデータの例を示す。

表 1 に見られるように、強化繊維材料は、金属に比べ、十倍から数十倍の極めて高い比強度 σ_B/ρ 、比剛性 E/ρ の値を持つ。ただし、強度が高いのは一方向のみであるから、構造によっては、2 方向あるいは 3 方向に繊維を配向しなければならない。しかし、それだけ割引いても、なお、重量当たりの強度の極めて高い成形体を作ることができる。

4.2 応力解析 このようにして作られる複合材料については、繊維方向を考慮に入れ、異方性材料としての複雑な応力解析を行う必要がある。厳密な解析では、直交異方性積層要素（軸対称の場合）あるいは、三次元要素による FEM 計算を行なう。

しかし、成形体の最適形状を求めるための設計計算では、次のような仮設による簡易理論解析がもっぱら行われている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

- A. 膜理論：肉厚が十分小さいものとして、面外曲げを無視する。
- B. 編目理論：負荷外力を強化繊維の引張応力のみに分担するものとする。
- C. 積層理論：一方向繊維強化材料の力学特性を

図 4 FW マシンの基本構成

ベースとし、積層する各層がすべて、中立面にあるものとして、次のように考える。

- (i) 各層に生じるひずみは等しい。
- (ii) 各層の分担負荷の合計が全負荷に等しい。

4.3 最適設計 最適設計では、これらの理論で求められる応力・ひずみ分布をもとに、最大の外力負荷に耐えるよう、あるいは最大の性能、機能を発揮するよう、最適の積層構成、形状などを求める。設定する材料破壊条件に対応し、次のような考え方・アプローチがある。

①アイソテンソイドの考え方⁽¹⁰⁾

「繊維に働く引張応力 σ_L が、繊維の引張強さに達するとその成形体が破壊する」と考える。繊維の応力は編目理論で解く。この場合、最適形状は、成形体のあら

ゆる部分で繊維の引張応力 σ_L が同時に引張強さに達するような形状、すなわち、 σ_L が、どこでも一定となる形状「アイソテンソイド」(isotenoid)であるということになる。

図5に、圧力容器、すなわち負荷として内圧のみ働く成形体のアイソテンソイドの例⁽¹²⁾を示す。

②積層理論による最適化

積層される各層の一方向繊維強化材料としての力学特性に注目し、積層理論で応力を評価しつつ、成形体の最適な形状や積層構成を求める。材料破壊条件としては、「繊維の破断条件」に注目することが多い。現在金属ライナのFW容器の設計基準に採り入れられている。

③マトリックスの破壊条件による最適化

表 1 材料の強度、剛性、密度のデータの例

	引張強さ σ_B (kgf/mm ²)	縦弾性係数 E (kgf/mm ²)	密度 ρ (g/cm ³)	[比較パラメータ] *		
				σ_B / ρ ①	E / ρ ②	σ_B / E ③
[繊維]						
Eガラス	250	7,700	2.51	100	3,070	0.033
Sガラス	370	7,200	2.49	149	2,890	0.052
炭素 高強度 (PAN)	360	24,000	1.76	205	13,640	0.015
高弾性	250	50,000	1.91	131	26,180	0.0050
アラミド	280	13,300	1.45	193	9,170	0.021
[樹脂]						
エポキシ樹脂	5-7	350	1.15-1.35	~5	~280	0.017
PEEK	16	400	1.30	12	308	0.039
[金属]						
鋼	40-80	21,000	7.8	5-10	2,690	0.0019
Al合金	25	7,300	2.7	9	2,700	0.0033

* ①比強度: $\times 10^3 \text{kgf} \cdot \text{mm}$
 ②比剛性: $\times 10^3 \text{kgf} \cdot \text{mm}$
 ③公称伸びに対応するパラメータ

図 5 アイソテンソイドの例：内圧に対する最適シェル形状

材料破壊条件としては、一方向繊維強化材料のマトリックス（樹脂部分）におこる破壊発生に注目し、それができるだけ成形体のどの部分にも起こらないような、もし起こるとすれば、すべての部分で同時に起こるような最適条件をもとめる。

圧力容器の最適設計のいろいろなアプローチについては、植村⁽¹⁰⁾による解説がある。また編目理論による最適化と積層理論による最適化の解の比較が福永⁽¹⁴⁾により論じられている。

5. FW 成形体の安全性評価

5.1 破壊の条件 FW 成形体に起こる破壊は、大きく分けて三つがある。

①繊維そのものの破断・損傷

②繊維以外の FRP 部分におこる損傷

◇繊維間の樹脂の損傷・破断

◇繊維・樹脂境界部のはく離

◇層間のはく離、ほか

③ FRP 以外の構成部材におこる損傷

①に挙げた繊維破断が起こると、成形体は構造強度を損ない、急速に最終的破壊に至る。しかし、多くの場合、それに先だって、②に挙げた繊維以外の FRP 部分、例えば繊維間の樹脂、繊維・樹脂境界部などに、さまざまな破壊が起こる。実際の製品では、③に挙げた、FRP 以外の構成材料、あるいは他部材接続部分の損傷が問題となることも少なくない。

FRP の破壊については、表 2 に示すような、繊維強

化複合材料の破損強度則が適用できる。実際の FW 製品の設計では、最大応力説あるいは最大ひずみ説を採ることが多い。Hill 則は、Von Mises の降伏条件を異方性材料に拡張転用したもので、FRP 部分の破損条件としてよく用いられる。しかし、ミクロな立場から複合材料に起こるさまざまな形式の損傷の条件を表すのは容易でない。多くの研究者による、いろいろな破損条件式の提案がある⁽¹⁵⁾。

FW 成形体の構造強度のみが問題となる場合は、最大応力説、最大ひずみ説、または繊維の破断にのみ注目する編目理論の立場で、設計と安全性評価の目的がほぼ達せられる。

しかし、ライナなしの FRP 圧力パイプのように、成形体の機能が層間せん断、層間はく離のようなひび割れて大きく損失される場合、また長期の使用における破損の蓄積・経過を詳細に検討する場合に、樹脂部分を含めたより一般的な割れの条件式が必要となる。

成形体が気密性保持のための金属層または樹脂層を含む場合、それらの材料の破損が問題となる。またシャフトや構造用パイプの場合は、共振や座屈が問題となる場合は、それぞれの現象に対応した条件式が必要となる。

5.2 FW 成形体の評価試験 FW 成形体について、繊維強化複合材料としての強度評価には、他の FRP 材と同様に、一方向強化の板または棒材の引張り、圧縮、あるいはせん断試験の結果が基本データとして用いられる。これについては、JIS あるいは

表 2 繊維強化複合材料の破損強度則

	繊維方向の 引張または圧縮	横方向(繊維直交)の 引張または圧縮	縦せん断 (繊維に沿うせん断)
最大応力説	$-F_L' \leq \sigma_L \leq F_L$	$-F_T' \leq \sigma_T \leq F_T$	$-F_{LT} \leq \tau_{LT} \leq F_{LT}$
最大歪説	$-e_L' \leq \varepsilon_L \leq e_L$	$-e_T' \leq \varepsilon_T \leq e_T$	$-e_{LT} \leq \gamma_{LT} \leq e_{LT}$
Tsi-Hill則 (Hill則)	$(\sigma_L/F_L)^2 - \sigma_L \sigma_T / F_L^2 + (\sigma_T/F_T)^2 + (\tau_{LT}/F_{LT})^2 \leq 1$		
Hashin則	$-F_L' \leq \sigma_L \leq F_L$	$(\sigma_T/F_T)^2 + (\tau_{LT}/F_{LT})^2 \leq 1 : \text{when } \sigma_T > 0$ $(\sigma_T/F_T')^2 + (\tau_{LT}/F_{LT})^2 \leq 1 : \text{when } \sigma_T < 0$	
Tsi-Wu 則 Hoffman則 Chamis 則	形式: $\sum_{i,j} C_{ij} \sigma_i \sigma_j + \sum_i C_i \sigma_i \leq 1$ C_{ij}, C_i がそれぞれに与えられている。		

σ_L : 繊維方向引張応力, σ_T : 横方向引張応力, τ_{LT} : 縦せん断応力
 ε_L : 繊維方向引張歪, ε_T : 横方向引張歪, γ_{LT} : 縦せん断歪
 F_L : 繊維方向引張強度, F_T : 横方向引張強度, F_{LT} : 縦せん断強度
 e_L : 繊維方向引張限界歪, e_T : 横方向引張限界歪, e_{LT} : 縦せん断限界歪
 F_L' : 繊維方向圧縮強度, F_T' : 横方向圧縮強度,
 e_L' : 繊維方向圧縮限界歪, e_T' : 横方向圧縮限界歪

ASTM に詳しい規格が定められている。

しかしさらに、試験治具や自由端による拘束状況、樹脂硬化状況、等をできるだけ揃える意味で、FW による円筒試験体も用いられる。90° 巻き円筒試験体は、内圧をかけて繊維方向引張り、外圧をかけて圧縮、パイプの軸方向引張り・圧縮で繊維直交方向引張り・圧縮、パイプのねじりで面内縦せん断、などの特性が調べられる。±45° 巻き円筒試験体も面内縦せん断特性を調べるのに用いることができる。

FW 成形体そのものについての安全性評価および品質保証のためには、次のような三つのタイプの試験が行われる。

①プロトタイプ設計確認試験

②製作プロセスでの品質保証試験

③ある使用期間後のフォローアップ試験

ここで、①は試作したプロトタイプの成形体が設計どおりの強度、耐用性、性能を有するかどうかの試験である。②は、製作される製品1体ごと、あるいはロットごとの品質保証のための試験である。③は、使用される各製品について、その損傷状況を調べ、引き続き予定される期間の使用に耐えるかどうかを判断するための試験である。

いろいろな、FW 製品について行われる、プロトタイプ設計確認試験の項目の例を、表3に示す。

5・3 ガス容器への応用例 FW 成形の一般応用

例として、可搬形軽量ガス容器が挙げられる。FRP 製ガス容器の一般使用は、米国運輸省 (DOT) により、1976 年世界で最初に認可された⁽¹⁶⁾。我国では通産省が、1982 年消防用空気容器の特認を下している⁽¹⁷⁾。1985 年からは、通産省の委託で高压ガス保安協会にて、LPG 流通合理化の一環で「軽量容器の開発研究」⁽¹⁸⁾が行われている。

表 3 プロトタイプ設計確認試験の項目の例

製品	試験の項目
圧力容器	内圧バースト 内圧繰返し/常温、環境、温度 耐火焰/安全弁動作 耐衝撃 耐衝撃 (ライナーのガス透過性)
高压パイプ	内圧バースト 内圧繰返し 高温塩水中の長期耐用強度 ジョイントのリークと寿命
荷重伝達用 シャフト	ねじり/ねじり疲労 曲げ/曲げ疲労 共振周波数 金属部品とのジョイントの性能・寿命
構造用 角パイプ	引張り/引張り疲労 曲げ/曲げ疲労 坐屈 格点部ジョイントの性能・寿命

表 4 FRP 製ガス容器の仕様と性能確認試験結果の一例

[容 器 仕 様]

容器形式	: 5L×300k	常用使用圧力 p	: 300 kgf/cm ²
内容積 V	: 5.1 litre	耐圧試験圧力	: 500 kgf/cm ²
重量 W	: 4.9 kg	最小破壊圧力	: 900 kgf/cm ²
外径×長さ	: 156mm×515mm	使用温度範囲	: -51~60°C
充填ガス	: 空気、不活性ガス	湿度範囲	: 0~100%
性能係数 pV/W	: 312	耐用年数	: 15年

[性能確認試験結果]

項目	試験方法	バースト圧力(kgf/cm ²)
バージン	<< 合格基準 : 900 kgf/cm ² >>	1,140
常温での 圧力繰返し	0→300 kgf/cm ² 常温で 10,000 回 0→500 kgf/cm ² 常温で 30 回	990
高低温での 圧力繰返し	0→300 kgf/cm ² 60°C で 5,000 回 0→300 kgf/cm ² -51°C で 5,000 回 0→500 kgf/cm ² 常温で 30 回	995
温度繰返し	0→300 kgf/cm ² 常温で 10,000 回 0→300 kgf/cm ² 常温で 10,000 回 -51°C(10分保持)→94°C(10分保持) 20回 [移動1-3分]	1,050
火炎暴露	容器を火源(ガソリン)液面上10cmに保持、容器は300kgf/cm ² にN ₂ ガスを充填、容器安全弁よりガス放出完了まで火炎暴露。	

FW 成形で製作されるガス容器の仕様および容器性能試験の一例を表 4 に示す。また、FEM による応力解析結果の一例を図 6 に示す⁽¹⁹⁾。

この容器は、塑性変形処理（過大圧力負荷）により、アルミ合金ライナに無負荷時に圧縮となるよう残留応力コントロールを行う。現在、米国および我国で認可されている金属ライナ FRP 容器は、すべてこのような処理で金属ライナに圧縮残留応力をのこし、繰返し負荷に対する金属ライナの寿命と耐用性を高め、FRP と金属ライナの両方で強度を分け合う設計となっている。

5・4 安全性を高めるための技術ポイント FW

で成形される製品の性能と安全性を高めるために、次のような項目についての配慮が必要である。

- (1) 形状と繊維方向の設計
- (2) 原素材およびプロセスの品質・工程管理
- (3) 繊維の張力のコントロール
- (4) 残留応力分布のコントロール
- (5) 破壊形態のコントロール
- (6) FRP 以外の部材との接続

(1)、(2)は、FW 成形の設計・製作技術のベースとなるものである。

(3)は、糸の応力分担を均一化し、強度のバラツキを小さくする上で非常に重要である。成形工程の中で最も力をいれるべき点の一つである。

(4)は、製品の強度評価の上で重要な項目である。特に製品が金属殻との複合体である場合、金属殻に圧縮残留応力が残るような残留応力のコントロールが行われる。

(5)は、成形物が破壊するときに破片が飛び散りさらに二次的損壊を起こすようなことがないように、設計上配慮する。例えば容器において、破裂はしても、全体がつねに 1 ピースで、破片が飛ばないように、各構成材料の材質、糸の巻き方などを設計する。

(6)の FRP 以外の部材として、特に金属が問題となる。金属は、一般に FRP と物理的性質が大きく異なるため、両者をどのように接続するかが設計および安全性評価の上で極めて重要となる。

これらの諸配慮は、製品開発でのノウハウとして、各製品ごとに技術の蓄積が行われている。また、これらのポイントで、新しい優れた工夫を行うことが、製品開発に重要である。

6. FW 技術の新しい動向

FW 技術について欧米では、基礎・応用の両面で多くの研究発表がなされている。出席できたシンポジウ

図 6 FW 成形容器の FEM 解析例

ムあるいは入手できた論文集の限られた範囲ではあるが、近年の動きについて簡単に紹介する。

①非軸対称 FW 成形

FW 成形のソフトについては、非軸対称 FW が各地で研究されている。西独の Aachen 大⁽⁷⁾、英国の Nottingham 大⁽⁸⁾、Harwell 研究所⁽²⁰⁾、米国の Morton Thiokol 社(米)⁽²¹⁾、等が論文を出している。

②熱可塑性樹脂を用いた FW

熱可塑性樹脂を用いた FW は、現在各社で開発されつつあり、ポリイミドについて Du Pont 社⁽²²⁾、PEEK について ICI Composite 社⁽²³⁾から報告がなされている。

③FW 成形体の試験

FW 成形体の試験に関連して、熱可塑性樹脂 FW パイプの圧壊およびねじりについて Du Pont 社⁽²⁴⁾より、FW パイプの衝撃ねじりについて西独宇宙航空研⁽²⁵⁾より、FW 成形体の機械試験の標準化について米陸軍⁽²⁶⁾、表面に切欠きのある円筒の強度について Virginia P. I.⁽²⁷⁾より報告がなされている。

④製品開発

FW による製品開発としては、SCI 社より宇宙機器用圧力容器⁽²⁸⁾、および低温容器 (SCI 社)⁽²⁹⁾、Advanced Composites 社よりスポーツ用品⁽³⁰⁾、Addax 社より動力伝達シャフト⁽³¹⁾、その他軽自動車の車体フレーム⁽³²⁾、など、多数の発表がある。

欧米の研究者・技術者の研究発表を聞くと、彼らは FW 成形を、陶器の「ろくろ」のように考え、これを使って気軽にいろいろなものをこしらえているように思う。またマシンを、自分の気の済むように、使いやすく作り変えている。

我国に設置されている FW マシンは、立派な数値制御のものが多く、メーカーであれば、高能率生産のため、高価なマシンが有用であろうが、複合材料の研究そのものについては、最低限の仕様のマシンでも、多様な試作・実験が可能である。

今日、我国における FW の新しい技術開発に関する研究発表活動は、ほとんど沈黙している感がある。し

かし、FW は、さまざまな実用形状の成形体をつくる安価な手段であり、今後はもっと多くの複合材料研究者が、自分のマシンで、気軽に FW 技術を論じるようになるべきであろう。そうなる初めて、この分野の新しい技術の進展が起こるものと思う。

複合材料についてはまだ浅学の著者であるが、FW の、楽しさ、興味深さをぜひとも伝えたい一心で、本稿を書くこととした。諸氏の参考に資するところが、わずかにでもあれば幸いである。

文 献

- (1) Ford, R. A., *1st Intern. Conf. on Automated Composites*, (1986-9), 4/1, Nottingham, England.
- (2) Wilson, B. A., *34th Intern. SAMPE Symposium and Exhibition*, (1989-5), 2429, Reno, U. S. A.
- (3) 山脇・植村, 東京大学宇宙航空研究所報告, 7-2, A(1971), 315.
- (4) 林編, “複合材料工学”, (1971), 756-797, 日科技連.
- (5) 植村・井山・福永・守田, 東京大学宇宙航空研究所報告, 15-4(1979), 821.
- (6) 北条, 高圧ガス, 6-1(1972), 426.
- (7) Kirberg, K. W. and Menges, G., *Proc. of Intern. Conf. on CAD in Composite Material Technology*, (1988-4), 157, Southampton, England.
- (8) Middleton, V., Owen, M. J., Ellimen, D. C. and Shearing, M., *2nd Intern. Conf. on Automated Composites*, 88, (1988-9), 10/1, Noordwijkerhout, Netherlands.
- (9) 川原・ほか4名, NKK 社内ソフト, (1988), 未発表.
- (10) 植村, 日本複合材料学会誌, 13-1(1987), 10.
- (11) 福永・植村, 日本航空宇宙学会誌, 29-331(1981), 432.
- (12) 川原, 第12回複合材料シンポジウム講演要旨集, (1987-10), 27.
- (13) 米国運輸省基準案, DOT FRP-1 Standard, (1981).
- (14) 福永, 日本複合材料学会誌, 13-5(1987), 217.
- (15) 石川, 文献(10)の2ページ.
- (16) 米国運輸省, DOT E-7277, (1976).
- (17) 片岡, 「FRP 製高圧ガス容器(FW 容器)」, 高圧ガス, 22-10(1985), 491.
- (18) 竹花, 「軽量容器の開発」, 高圧ガス保安協会液化石油ガス研究所報告, (1988-11), .
- (19) 加藤・川原・石原・平瀬・崎山・田村, NKK 技報, 127(1989), 69.
- (20) Lloyd-Thomas, D. G., ほか2名, 文献(8)の12/1ページ.
- (21) Vogt, J. C., ほか1名, 文献(2)の1538 ページ.
- (22) Egerton, M. W., ほか2名, 文献(2)の950 ページ.
- (23) Leach, D., ほか1名, 文献(2)の1269 ページ.
- (24) Egerton, M. W., ほか1名, 文献(2)の159 ページ.
- (25) Wurzel, D. P., 文献(2)の1099 ページ.
- (26) Price, R., ほか1名, 文献(2)の1099 ページ.
- (27) Morris, D. H., ほか1名, 文献(2)の1120 ページ.
- (28) Morris, E. E., ほか1名, 文献(2)の1545 ページ.
- (29) Morris, V. L., 文献(2)の1867 ページ.
- (30) Philpot, R. J., 文献(2)の2217 ページ.
- (31) Spencer, B. E., 文献(2)の1108 ページ.
- (32) Capella, F., 文献(8)の28/1 ページ.