

## 射出成形における金型内繊維配向過程の実験解析法

Experimental Analysis Method of Fiber  
Orientation Process in Injection Mold Cavity

村 田 泰 彦\*・横 井 秀 俊\*

Yasuhiko MURATA and Hidetoshi YOKOI

射出成形の金型内における繊維強化熱可塑性プラスチックの繊維配向過程を解明するために、これまで行われてきた計測・評価方法についてその原理と事例、問題点を解説し、あわせて著者らの開発によるバックライト方式ガラスインサート金型を用いた繊維配向過程の解析法の新しい可能性を紹介した。

## 1. は じ め に

繊維強化プラスチックは、製品の軽量化、耐熱性の向上、コスト低減を目的として熱硬化性樹脂を母材に1940年代から生産されるようになった。そしてエンジニアリングプラスチックの出現により耐熱性が向上するに至って、成形時間が短く生産性のよいことを特長とする熱可塑性樹脂にも繊維が充填されるようになった。これが繊維強化熱可塑性プラスチック (FRTP) の始まりである。FRTPは、高強度、高剛性であるために、現在では自動車、家電製品等の構造部材として広く用いられている。樹脂に充填される繊維材質も、ガラスに始まり、カーボン、ボロン、アラミド、グラファイト、金属と多岐に渡っている。

熱硬化性樹脂の場合では、繊維は連続形状をとることが多いのに対して、主に射出・押し出し成形等により成形される熱可塑性樹脂では、スクリュ溝・キャビティ内において流動しやすいようにチョップドストランド繊維を用いる場合が多い。そのため、樹脂流動状態の変化により成形品内には、3次元の複雑な繊維配向構造が生成し、異方性が発現する。この異方性は、成形品のそり・変形等の不良現象および強度・剛性低下を引き起すために大きな問題となっている。ハンドレイアップ法、モールドイングコンパウンド法、フィラメントワインディング法等により成形される繊維強化熱硬化性樹脂では、繊維配向が人為的に操作できるために、異方性の制御が比較的容易であった。しかし、FRTPの場合では繊維配向が人間の手の届かない型内流動過程で起こるために、その制御がきわめて困難と考えられている。そこで、まず各種流動場における繊維配向メカニズムを把握し、つぎにその結果に基づいて配向制御方法を検討することが、FRTPの射出成形分野で最も重要な課題となっている。

本稿では、FRTPの繊維配向メカニズムを把握するた

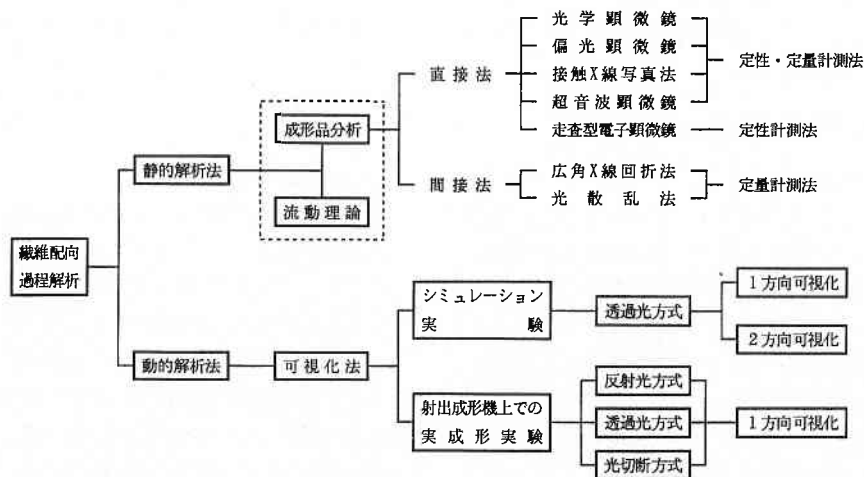


図1 繊維強化熱可塑性プラスチックにおける繊維配向過程解析法の分類

\*東京大学生産技術研究所 第2部

めの計測・評価方法に焦点を絞り、成形品の分析結果に基づく静的解析法から繊維流動過程の直接観察に基づく動的解析法までを分類して解説し、最後に著者らの開発によるバックライト方式ガラスインサート金型を用いた繊維配向過程の解析法の新しい可能性について紹介する。

## 2. 繊維配向解析法の分類

図1は、これまでに試みられてきたFRTPにおける繊維配向メカニズムの解析方法を分類して示したものである。静的解析法は、取り出された成形品内の各位置における繊維配向層構造を精密に計測し、その結果と既存の粘性流体の理論を関係づけながら繊維配向メカニズムを推察するという方法である。静的解析法的前提となる繊維配向層構造の計測方法は、各種顕微鏡により得られた画像に基づき直接繊維配向状況を抽出する直接法と、X線回折強度、または光散乱強度等と配向角との間に存在する関係から繊維配向角分布を抽出する間接法に分けることができる。前者は、画像から繊維配向状況を定性的に判断するものと、画像処理技術等を用いて繊維配向角・長さ等の情報までを抽出する定量解析法とに分けることができる。それに対して、後者は、すべて定量解析法である。

動的解析法は、1960年代後半から徐々に行われるようになった方法で、透明ガラスで構成された可視化流路を用いて、その中に繊維が充填された溶融樹脂または模擬流体を流し、流動過程における繊維配向挙動を動的に観察し、配向メカニズムを把握するものである。この方法は、キャピラリーレオメータ等の先端に可視化流路を取り付けたシミュレーション実験的なものから始まり、現在では、高速・高圧の実射出成形条件において観察が可能な可視化金型を用いるものへと発展している。また、シミュレーション実験では、撮影方法が透過光方式に限定されていたが、現在では、反射光・光切断方式も使用されるに至っている。

以下では、図1に示された各種解析法の概要および解析結果について順を追って紹介する。

## 3. 静的解析法

### 3.1 静的解析法の研究例

Brightらは、射出率を変化させた場合の成形品各位置での繊維配向層構造を計測し(図2)、繊維配向と伸張流、せん断流、プラグ流等の各種流動挙動とを関係づけながら配向メカニズムの推察を行った<sup>1)</sup>。またBrightとDarlingtonは、ガラス繊維充填ポリプロピレンとナイロン成形品内における繊維配向層構造を計測し、両材料における配向層構造の違いを抽出した(図3)。そして違いの原因を、熱伝導計算によって求められたスキン層厚みとキャピラリーレオメータデータから求められたメルトコアの速度分布を用いて解釈した<sup>2)</sup>。Goettlerは、ガラス繊維充填エポ

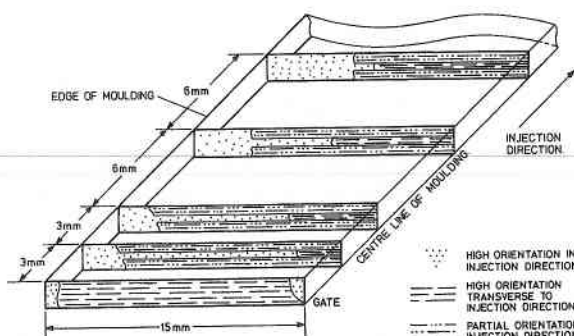


図2 矩形成形品の各位置における繊維配向層構造(ガラス繊維20Wt%充填ポリプロピレン、射出時間0.2秒[高射出率])<sup>1)</sup>

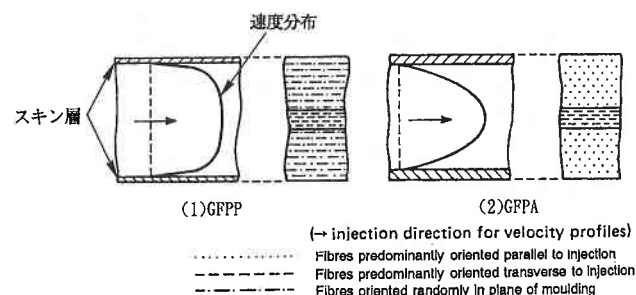


図3 成形品厚さ方向における繊維配向構造と速度分布の解析結果(射出速度13.6cm/s, GFPP:ガラス繊維20wt%充填ポリプロピレン, GFPA:ガラス繊維33wt%充填ナイロン)<sup>2)</sup>

キシ樹脂のトランスファ成形品に対して<sup>3)</sup>、また、竹田らは、各種キャビティ形状に対して配向層構造を計測し、配向メカニズムの考察を行っている<sup>4)</sup>。

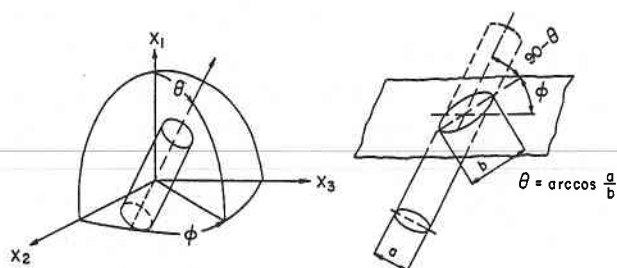
静的解析法においては、繊維配向メカニズムの推察方法が、ほとんど画一化されている。それに対して、推察的前提となる繊維配向構造の計測方法については、研究者によりさまざまであり、その計測方法の開発自体に力が注がれている場合も多い。ここで、現在までに用いられてきた配向構造計測方法について説明することとする。

### 3.2 直接法

#### 3.2.1 光学顕微鏡

直接法の中で最もよく用いられるのが光学顕微鏡による計測法である。本手法は、簡便法であるために多くの研究者によって用いられてきたが、研究の重点は、撮影自体よりもむしろ画像の定量解析法の工夫に注がれている。

Fakirovら<sup>5)</sup>、あるいはVaxmanら<sup>6)</sup>は、図4に示すように1つの成形品断面から3次元の繊維配向を抽出する方法を提案した。これは、 $X_1$ 軸に垂直な断面における繊維の断面形状を計測し、図中の式等により $\theta, \phi$ を計算するもので、成形品を3方向に切断して観察する方法<sup>7)</sup>に比べて精度は低いものの、面倒な切断・研磨作業を省力化でき

図4 成形品内における3次元配向角の計測原理<sup>6)</sup>

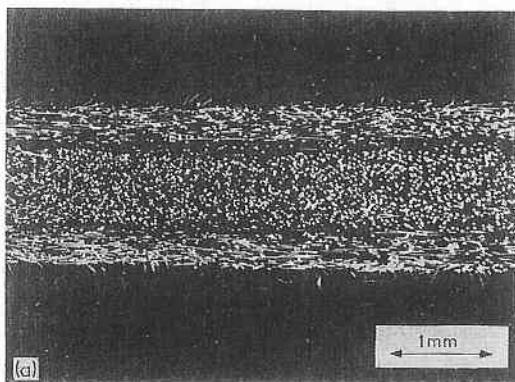
る点で優れた方法と言える。充填率が小さく(1wt%以下)かつ透明樹脂の場合には、非破壊で成形品外部から配向角・長さ分布を抽出できる。Nicolaisらは、ポリスチレン押出成形品内部の繊維に顕微鏡の焦点を合わせ、焦点位置から繊維の厚さ方向位置を抽出し、板厚方向の繊維配向・長さ分布を導出した(光学計測では、合焦点法と呼ばれる)<sup>8)</sup>。その他、偏光顕微鏡も配向分布状況の計測に用いられている<sup>9)-11)</sup>。

### 3.2.2 接触X線写真法

接触X線写真法は、薄くスライスされた試料(50~150 μm)を感光フィルムの上に設置し、試料の上方からX線を照射しフィルム上にX線透過画像を得る方法である。

Darlingtonらは、同一試料において本手法によって得られた画像と光学顕微鏡画像とを比較して、本手法の方が解像度が優れていることを示した<sup>12)</sup>。Brightらは、本手法を用いて、図5に示すような矩形成形品中央部における断面観察写真を得ている<sup>1)</sup>。低射出率では、スキン層繊維がランダムな配向を示し、コア層繊維が流動方向に配向すること(図5)、一方、高射出率では、スキン層繊維が流動方向に配向し、コア層繊維が垂直な配向を呈することを示した。

本方法は、(1) 試料研磨の必要がないこと、(2) 繊維

図5 接触X線写真法によって撮影された成形品の流動方向に垂直な断面(ガラス繊維20wt%充填ポリプロピレン、射出時間11秒[低射出率])<sup>1)</sup>

材質の制限がないこと、(3) 画像分解能が最大0.2 μmと高いこと、(4) 数百倍の拡大倍率が得られることを特長としている。一方、装置が特殊で簡便法ではないという問題も有している。

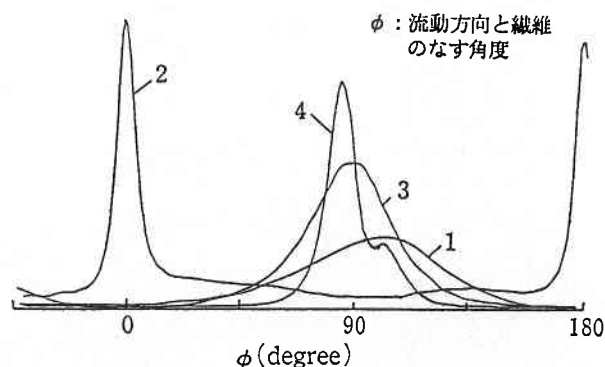
### 3.2.3 その他の計測法

走査型電子顕微鏡 SEM は、定量解析にはあまり適用されず、大きな拡大倍率を生かして、成形品強度試験における破断面の繊維配向状況観察等に用いられている<sup>13),14)</sup>。また、最近では、技術的課題を残すものの超音波顕微鏡によって成形品内部の繊維配向を非破壊で画像検出する試みが行われている<sup>11),15)</sup>。

## 3.3 間接法

### 3.3.1 広角X線回折法

広角X線回折法は、回折X線の相対強度と回折角が繊維の配向に依存することを利用して繊維配向を抽出するものである(原理については、参考文献<sup>16)</sup>を参照されたい)<sup>4)</sup>。竹田らは、本手法を用いて得られた極点図に基づき、コンピュータ計算により図6に示すような配向分布を得ている<sup>4)</sup>。同図は、矩形成形品の中央部断面における結果を示しており、成形品表面から中央部(1から4)にかけて配向角ピークの異なる4つの配向層が形成されていることを示している。本方法は、(1) 画像から繊維配向角・長さ等を測定する煩雑な作業を行わずに定量的データを得ることができること、(2) 微細な繊維および高充填率の場合の計測に適用できることを特長としている。ただし、(1) カーボン、ケブラー繊維等の結晶性繊維にしか適用できないこと、(2) 装置が特殊で簡便法ではないことが欠点となっている。

図6 広角X線回折法によって得られた矩形キャビティ中央部における繊維配向角分布(チタン酸カリウム繊維20wt%充填ポリプロピレン、キャビティ寸法: 50×100×2mm, 射出率25cm<sup>3</sup>/s)<sup>4)</sup>

### 3.3.2 光散乱法

竹田らは、繊維に光が照射された際の散乱パターンと繊維配向状態との間に密接な関係があることを利用して、図7に示すような測定装置を提案した<sup>18)</sup>。レーザ光源1から成形品4に向けてビームを照射し、試料からの散乱光をフォトマル9で測定する。フォトマルの出力信号から計算により配向度が求められる。本方法は、(1) 広角X線回折法と同様に、迅速に定量データを得ることができること、(2) ガラス等の非晶性繊維にも利用できることを特長としている。一方、繊維充填率が大きくなると(厚さ1mmの成形品において5wt%以上)、繊維同士の間で多重散乱が起こるために測定精度が低下することが問題点となっている。

## 4. シミュレーション実験に基づく動的解析法

### 4.1 円管内における繊維配向過程の解析

透明ガラス製の可視化流路を用いた動的解析法においては、流路を挟んで一方向から照明を行いそれに対向する方向から撮影を行う透過光方式が従来から用いられてきた。本手法は、ステンレス、あるいはカーボン製の不透明繊維

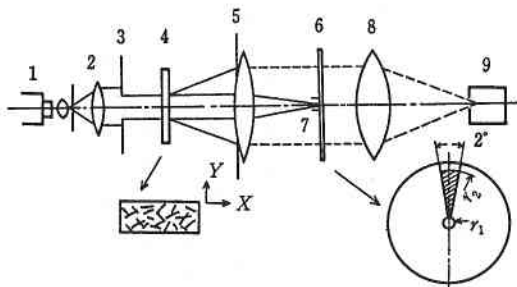
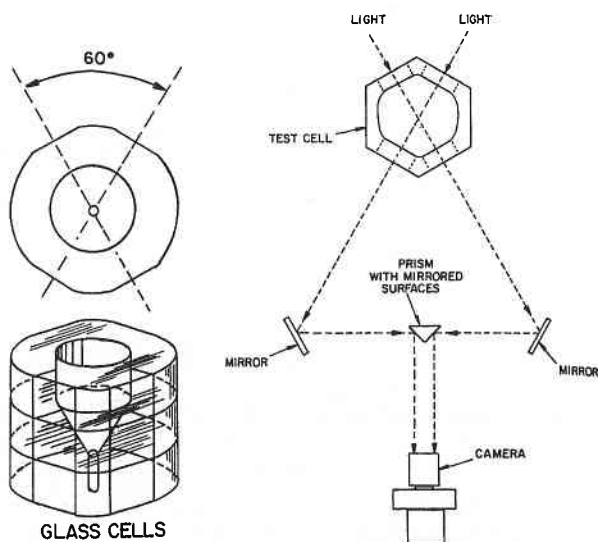


図7 光散乱法による繊維配向角測定装置<sup>18)</sup>



(1)可視化ガラスの外観 (2)2方向同時可視化の原理

図8 縮小部を有する円管内における繊維配向挙動の動的可視化方法<sup>20)</sup>

をトレーサとして樹脂に少量混入して、トレーサ繊維の陰影を観察するものである。通常の高繊維充填率の場合における観察では、トレーサ繊維を透明ガラス繊維の中に少量混入して、トレーサ繊維の挙動より全体の繊維挙動を把握する方法が用いられている。

Bell<sup>19)</sup>、あるいはLeeら<sup>20)</sup>は、透明ガラスで構成された縮小部を有する円管流路を用いて、その中における繊維配向挙動の解析を行った。Leeらは、従来の円筒ガラスにおいて観察上問題となっていた画像ひずみを低減するために図8(1)に示すような六角形構造のガラス流路を用いている<sup>20)</sup>。繊維配向メカニズムの把握には、円管の半径方向に形成される繊維配向層構造とその配向を惹起する織

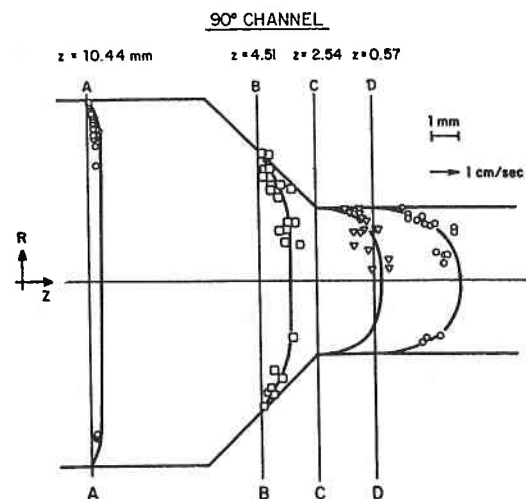


図9 Leeらの可視化シミュレーション実験によって得られた円管内の半径方向速度分布<sup>20)</sup>

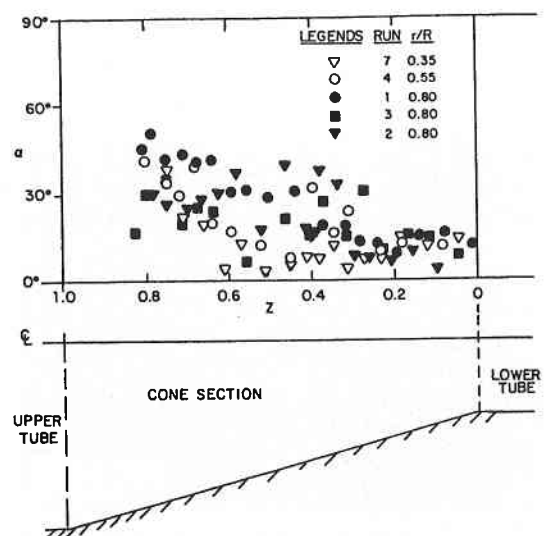


図10 Leeらの可視化シミュレーション実験によって得られた円管縮小部内における繊維配向挙動<sup>20)</sup>

維速度分布を知ることが重要と考えられる。そのためには、まず円管内における繊維の流動位置の抽出が必要となる。Lee らは、2 方向からの画像をミラーとプリズムを介して 1 台のビデオカメラで記録し、両画像から繊維の流動位置を計測し、それに基づいて円管半径方向の繊維配向角・速度分布を得ることに成功した。図 9、図 10 は、押出装置を用いて、ステンレス製トレーサ繊維（直径  $180\mu\text{m}$ 、長さ  $900\mu\text{m}$ ）とガラス繊維（直径  $13\mu\text{m}$ 、充填率 30wt%）が充填されたエポキシ樹脂を低速で流して計測した円管半径方向の繊維速度分布と軸方向の配向角変化をそれぞれ示している。縮小部の前後において速度分布がプラグフロー状から放物線状に変化する様子、そして縮小部における伸張流の影響で、半径方向のほとんどすべての位置において繊維が流動方向（ $\alpha \cong 50^\circ$  から  $\alpha \cong 0^\circ$ ）に回転する様子を捉えている。

本方法は、繊維配向過程を直接観察できる点に大きな長があり、また、撮影方法、トレーサ技術の手本を示したものである。しかし、(1) ガラス強度への配慮から実成形条件とは異なるきわめて低速の流動条件でしか使用できないこと、(2) 透明度の高い樹脂の観察に限られること、(3) 繊維充填率が高くなると、樹脂とガラスの屈折率の差によりトレーサ繊維の陰影が観察できなくなること、(4) 撮影倍率の都合上、ガラス繊維よりもトレーサ繊維の寸法を大きくしなければならないこと、またトレーサ繊維の物性（剛性、比重等）がガラス繊維と異なること、(5) ガラスキャビティ面の影響（金属キャビティとの熱伝導率、ぬれ性の違い）等の問題点を残していた。

#### 4.2 矩形キャビティ内における繊維配向過程の解析

矩形キャビティ内における繊維挙動解析を対象とした研究にも透過光方式が用いられている。

Crowson らは、Chan と White らの 2 枚の平行ガラス板で構成された可視化装置<sup>21)</sup>を改良し、図 11 に示すようなキャピラリー内でも可視化できる装置を製作した<sup>22)</sup>。そして本装置を用いて、スチール製トレーサ繊維（直径  $100\mu\text{m}$ 、長さ 2mm）が少量充填された（1wt% 以下）ポリプロピレンの、流路拡大・縮小部における繊維挙動観察を行った。上部キャピラリー内で流動方向に配向した繊維がキャビティへ流入した直後において  $90^\circ$  回転し、その後、各繊維が複雑パターンの配向挙動を呈しながら、下部キャピラリー内に入って再び流動方向に平行に配向する様子を捉えた。

堀川らは、カーボン繊維（直径  $10\mu\text{m}$ 、長さ 1mm）が 0.1vol% 充填された擬似流体（水溶性ポリエチレンオキサイド）と図 12 に示す可視化装置を用いて、スリット内繊維配向挙動を解析した<sup>23)</sup>。図 13 は、スリット内において実線で示された各円周内部の撮影写真から求められた主配向方向（繊維配向頻度の最も高い方向）に対する標準偏差  $\sigma$

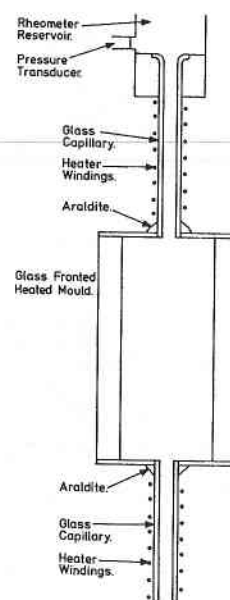


図 11 キャピラリーおよび矩形キャビティ内における繊維配向挙動の動的可視化実験装置<sup>22)</sup>

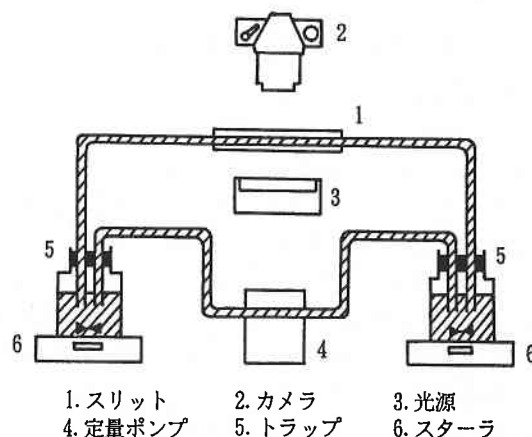


図 12 スリット内繊維配向観察のための動的可視化実験装置<sup>23)</sup>

と繊維本数割合  $W_f$  を示している。流路幅が増加する部分（5mm から 30mm）以降において、これまで主配向方向に強く配向していた繊維がややランダムな配向へと変化する様子を示している。この方法は、シミュレーション実験であるが、通常ガラス繊維とはほぼ同じ寸法の微細カーボン繊維を、スリット内各位置においてスポットで拡大観察し、その結果を定量化し、流動方向に沿った繊維配向変化として整理した点に特長がある。しかし、上述の 2 つの方法すべてに言えることであるが、透過光方式を矩形キャビティに適用した場合、4.1 項で述べた問題点以外に、1 方向からの観察であるがために繊維流動位置等のキャビティ厚さ方向の情報を得ることができないという大きな問題点が生じている。Lee らの観察では、流路が円筒・円錐形状であったために 2 方向からの撮影が比較的容易であったのに



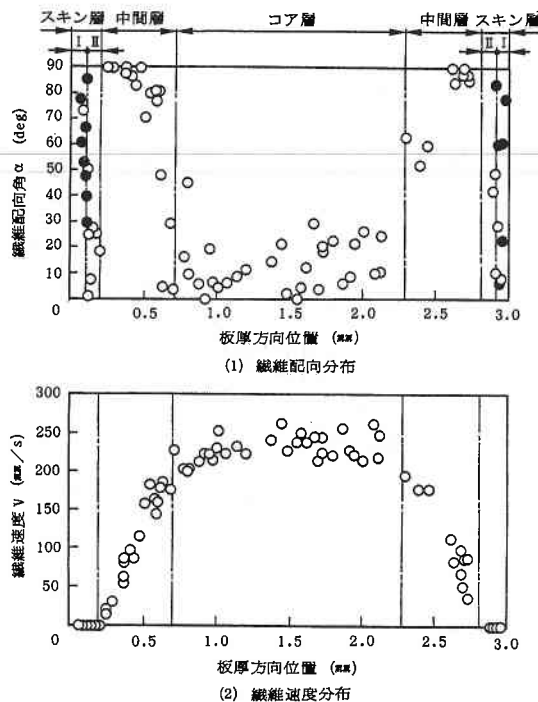


図16 キャビティ厚さ方向における繊維配向分布(ガラス繊維径  $\phi 60 \mu\text{m}$ , 繊維含有率0.2wt%, 射出率 $19.7 \text{ cm}^3/\text{s}$ )<sup>26)</sup>

ニズムを把握するためには、ゲートからキャビティ末端に至る繊維の全流動過程を観察することの必要性に気付いた。ゲートからキャビティ末端までが視野に収まるように撮影倍率を小さく設定した場合、繊維が微細であるために観察ができなくなる。著者らは、撮影倍率を下げることなくゲートからキャビティ末端までを観察するために、単軸ロボットに高速ビデオカメラを搭載した繊維追跡撮影装置を開発した<sup>27)</sup>。本装置を用いて、キャビティ内に流入したコア部の繊維が、ゲート近傍における拡散流の影響で流動に対して平行から垂直な方向に回転し、その後、速度変化の平坦な平行流領域を配向角を変化させずに流動する様子等を捉えた。また、フローフロントにおける繊維挙動観察を行い、スキン層形成メカニズムを明らかにした。

以上は、低繊維充填率の場合の解析結果であるが、照明・撮影方法の改善、ガラスに近い屈折率を有する樹脂の選定、カップリング剤の除去により、透明ガラス繊維と同じ寸法のトレーサ繊維においても充填率27wt%までの観察を可能としている<sup>28)</sup>。また、4.項で問題となっていたガラスキャビティ面の繊維配向挙動に与える影響についても検討を行い、ガラスキャビティ面での繊維配向構造が金属キャビティ面のそれと等価であることを確認した<sup>28)</sup>。

本方法は、(1) 高速・高圧の実成形条件下における観察を可能としたこと、(2) 従来の金属・カーボン繊維を用いたトレーサ法で問題となっていたガラス繊維との物性・寸法の違いを、薄いNiめっきコーティングを用いる

ことにより低減したこと、(3) 矩形キャビティにおける厚さ方向の繊維配向・速度分布の抽出を可能としたことが大きな特長と言える。一方、結晶性樹脂等の不透明材料、および30wt%以上の繊維充填率の場合への適用を可能とすることが本手法の応用範囲を広げる上で今後の課題と言える。

## 5.2 光切断法

著者の一部らは、光切断法を利用したレーザライトシート可視化金型により、キャビティ厚さ方向における繊維挙動の直接観察を試みている(レーザ可視化法の原理については、参考文献<sup>29)</sup>を参照されたい)<sup>30)</sup>。図17は、レーザ可視化法による繊維配向計測の原理を示している。まず、画像より計測された見かけの繊維長 $L_d$ と成形品から計測された平均繊維長 $\Sigma$ からXY平面における繊維配向角 $\theta$ を計算する。つぎに、画像より直接観察された繊維のキャビティ厚さ方向の流動位置から、キャビティ厚さ方向の繊維配向・速度分布を得る。本手法の場合、平均繊維長を用いて配向角を計算しているため、バックライト方式ガラスインサート金型によって得られた結果に比べて精度が落ちるものの、図16と同じ7層繊維配向構造を確認している。

本手法は、薄いキャビティ厚さ方向から繊維挙動を観察できることを大きな特長としている。一方、高繊維充填率の場合では、光切断面よりカメラ側に存在する繊維の干渉により光切断面が観察できない点が問題となっている。

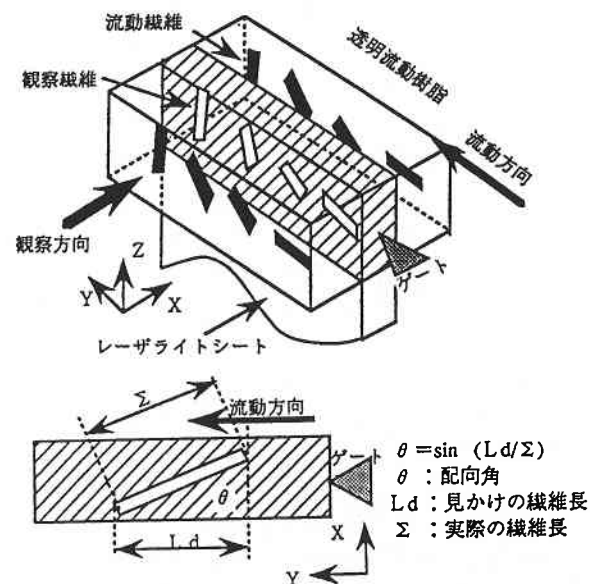


図17 レーザ可視化法によるキャビティ厚さ方向繊維配向の計測原理<sup>30)</sup>



## 6. お わ り に

本解説を終えるにあたり、まとめとして以上の繊維配向メカニズム解析法の比較を表1に掲げる。

これまでに、FRTPの射出成形に関する研究に取り組んできた研究者の興味は、①繊維充填樹脂がキャビティ内流動過程においていかなるメカニズムで配向層を形成するか、そして②形成された繊維配向層構造が、強度・剛性等の成形品物性およびそり・変形等いかに影響を与えるか、さらに①②の検討結果に基づき、③成形プロセスの中で繊維配向、最終的には強度・剛性等をいかに制御すればよいかの3点に集約されていると言える。静的解析法は、②の検討を主眼とする研究者らによって用いられてきたために、配向メカニズムの検討よりもむしろ強度・剛性検討のパラメータとなる繊維配向層構造を精度よく計測することに力が注がれてきた。また、静的解析法の中で行われている配向メカニズムの推察に用いられた理論は、繊維充填率が小さく、単純流動場においてのみ適用できるものであるため、繊維充填率が高く繊維間相互作用の影響がある場合、またキャビティ形状がさらに複雑になった場合にどう対処すればよいかが具体的に明らかにされていないのが実状である。

動的解析法は、①の検討に重点を置いた研究者らによって用いられてきた。従来の動的解析法は、単純化された各種流動場を作り上げ、その流動場における繊維の基本的動作を可視化して把握・整理することを目的とするものであった。しかし、ガラス製のキャビティ、実成形からかけ離れた成形条件、ガラス繊維と物性を異にするトレーサ繊維を使用するために、この実験が実際に金型内で起こっている繊維配向過程を再現できているのかどうかという疑問が常に存在していた。実際の成形条件下において観察を行いたいという願望がますます高まり、その中から生まれてきたのが、著者らのバックライト方式ガラスインサート金型と言える。本金型を用いた解析法は、繊維追跡撮影、動的解析法と静的解析法とを融合したキャビティ厚さ方向の情報抽出等の新しい機能を備えており、実用的な計測手法

として今後が期待される。動的解析法は、可視化法であるがために樹脂種類、繊維充填率の制約を受けるものの、今後、動的解析法と静的解析法とが互いの弱点を補完し合いながら発展し、最終的に③に示される繊維配向制御の達成につながることを期待したい。著者らの解説が繊維配向メカニズムの解明のための一助となれば幸いである。

(1994年9月22日受理)

## 参 考 文 献

- Bright, P.F., Crowson, R.J., Folkes, M.J.: J. Mater. Sci., 13, 2497 (1978)
- Bright, P.F., and Darlington, M.W.: Plast. Rubber Process. Appl., 1, 139 (1981)
- Goettler, L.A.: Mod. Plast., 140 (1970)
- 竹田, 情野: 成形加工, 1, 197 (1989)
- Fakirov, S., and Fakirova, C.: Polym. Compos., 6, 41 (1985)
- Vaxman, A., and Narkis, M.: Polym. Compos., 10, 84 (1989)
- 大柳, 山口, 北川, 寺尾, 望月: 高分子論文集, 38, 285 (1981)
- Nicolais, L., Nicodemo, L., Masi, P., and DiBenedetto, T.: Polym. Eng. Sci., 19, 1046 (1979)
- 泊, 原田, 殿谷, 濱田, 前川: SPE The 6th Regional Technical Conference, Technical Paper, 56 (1988)
- 大久保: 成形加工'89, 267 (1989)
- 竹田, 小山: 成形加工'89, 271 (1989)
- Darlington, M.W., and McGinley, P.L.: J. Mater. Sci., 10, 906 (1975)
- Darlington, M.W., Smith, G.R.: Polymer, 16, 459 (1975)
- 泊, 濱田, 前川: 成形加工, 1, 71 (1989)
- 木天, 阿部, 児玉, 稲葉: 成形加工, 5, 741 (1993)
- 桜井: X線結晶解析の手引き, 裳華房, (1983)
- 吉田, Budiman, G., 岡山, 北尾: 繊維学会誌, 32, T335 (1975)
- 竹田: 繊維学会誌, 47, 52 (1989)
- Bell, J.P.: J. Compos. Mater., 3, 244 (1969)
- Lee, W.K., and George, H.H.: Polym. Eng. Sci., 18, 146 (1978)
- Chan, Y., White, J.L., and Oyanagi, Y.: Polym. Eng. Sci., 18, 268 (1978)
- Crowson, R.J., Folkes, M.J., and Bright, P.F.: Polym. Eng. Sci., 20, 925 (1980)
- 堀川, 寺岡, 木村: 繊維機械学会誌, 36, 97 (1983)
- 横井, 林, 平岡: 生産研究, 39, 306 (1987)
- 横井, 中野, 渡辺, 村田: 成形加工'90, 17 (1990)
- 村田, 西, 横井: 成形加工'92, 199 (1992)
- 村田, 長谷, 原田, 横井: 成形加工'93, 231 (1993)
- 横井, 河村, 村田: 成形加工'94, 163 (1994)
- 横井, 稲垣, 中西: 成形加工'90, 143 (1990)
- 稲垣, 原田, 西, 横井: 成形加工'93, 235 (1993)

表1 各種解析法の評価

繊維配向過程の解析法	繊維配向メカニズムの検討方法	実成形条件との等価性	適用可能樹脂	適用可能な繊維充填率
静的解析法	理論解析 (数値シミュレーションを含む)	あり	ほとんどの樹脂	制限なし
動的解析法	シミュレーション実験	なし	透明樹脂	30wt%まで
	ガラスインサート金型	あり	透明材料	30wt%まで