

生研公開講演

## 「成形現象を視る」 —百考は一見に如かず— Visualization of Molding Phenomena

横 井 秀 俊\*

Hidetoshi YOKOI

### 1. は じ め に

私の講演題目「成形現象を視る —百考は一見に如かず—」は誤植ではないかと思われるかもしれません。通常は「百聞は一見に如かず」というところですが、ここではあえて「百考は……」とさせていただきました。現象が視えなかったために、あらゆる俗説がまかり通る世界でも、真実の加工現象はたった1つです。そういう意味では、ありのままを視ることがいかに大切であるかについて、具体例を通して以下に紹介させてもらいたいと思います。

### 2. 「成形現象を視る」ことの意味

金属やセラミックスなどの基本的な材料から、最終的にわれわれが欲しい成形品を実現する過程では、材料に形状と同時に機能を与えます。これが加工プロセスで、この加工のプロセスを扱う学問がモノづくりの工学といえます。このモノづくりの工学は、加工現象を具体的に解明する実験解析、さらにそれを理論的に体系化する理論解析、そして得られた知見をもとに高度の加工プロセス制御、予測技術、あるいは新しい加工技術の開発に結実させる応用技術から成り立っています（図1参照）。これがモノづくりの工学の体系と考えることができます。そのいずれの場合にも、常に中心に位置しているものが加工現象で、いかに正確に現象を把握するかが、モノづくりの工学の原点になります。

加工現象解明のためのステップは、まずありのままの現象をみようということから始まります。次に、見るだけではわからない物理量、たとえば温度、圧力、変形量などの定量的把握、すなわち計測が行われます。そして最後に、定量化したデータに基づいて、実際にその物理モデルを数式等に記述し、シミュレーション等を通してその現象の再現とモデルの検証を行っていきます。以上が一般的なプロセスと考えられます。

\*東京大学生産技術研究所 第2部

ここで最も重要なステップは、最初に位置している「現象を視る」ステップといえます。一言で「現象を視る」といっても、実際には大変難しい場合があります。たとえばプロセスが、表1のように外から直接見える開放空間で、加工温度・圧力は常温・常圧に近く、しかもゆっくりした定常の加工現象である場合ほど、一般に非常に観察しやすい現象となります。逆に、金型等の密閉空間、高温、高圧、さらに非常に速く、非定常の現象になればなるほど、ただ「現象を視る」だけの課題が大変難しくなってきます。

### 3. 射出成形現象を視る

この表1には、私どもの研究室で取り組んでいる代表的なプラスチック成形法の射出成形が例示されています。たとえば射出成形でいちばん重要な加工プロセスは、後述するように金型および加熱シリンダの中で行われます。場合によっては、圧力は1000気圧以上、温度も約350°C以上に上がります。現象そのものは数秒から数10秒の間欠的な非定常プロセスです。すなわち、表1の指標でいえば「現象を視る」上では最も困難な対象の一つであるということになります。そのために、このプラスチックの射出成形分野では実にいろんな俗説がこれまで氾濫しておりました。

ここで、プラスチック射出成形の一般的な加工プロセスを簡単に説明いたしましょう。まず、米粒のような形状をしたペレット（プラスチックの粒）を、原料として図2のホッパーに投入します。次にホッパーから落下したペレットが、回転するスクリュの溝と加熱シリンダとの隙間を通して、順次加熱・変形されながら前方へと送られていきます。スクリュは回転しながらホッパー側へと後退するため、スクリュの前方にはこの間に熔融した樹脂がたまり、この熔融樹脂が一定量に達すると、次にスクリュが急に前進し、樹脂は水鉄砲のようにノズルから射出されます。この熔融樹脂は、金型と呼ばれる金属ブロックの中につくられたキャビティ（成形品形状を反転した隙間）の中に流されて冷却固化します。こうして、成形品が冷えた後に金型

が開くと、初めてわれわれは成形品を目にすることができず。このようにホッパーにペレットを投入してから成形品を目にするまでには、「加熱シリンダ」と「金型」という目に見えない2つの大きな空間、すなわちブラックボックスがあり、その中で何が起きているかは、鋼鉄の壁にさえぎられてこれまで容易にはうかがい知ることができませんでした。

こうした中で「成形現象を視る」ということが、いよいよ大きな意味を持ててきます。もともと、見えないと思ってあきらめていたものを何とか見ることによって、初めて、これまで互いに矛盾した俗説等がいっぱい併存していたこの分野に、「百考は一見に如かず」がもたらされることになります。現象を正確に把握することが、この分野のモノづくり工学体系に新しい基礎を与えるための出発点となります。その意味で、私どもの研究室では、長い時間をかけて「ありのままの成形現象を視る」という研究に取り組んできました。その考え方の例を図3に示します。同図はホッパーから、加熱シリンダ、金型までの成形過程の模式図です。この過程で何が起きているかをみるためには、どうしても中を覗くための覗き穴をつくらなければならない。決して覗きの趣味があったわけではありませんが、まず徹底して覗くことを考えました。ここでは覗く方法として、観察したい箇所にガラスを埋め込むという実に単純明解でプリミティブな方法を基本にして行っており、これまでに同図で色づけをしていないノズルとスプルー部分を除いてほぼ全過程を動的に直接可視化することに成功しています。

さて、それでは材料の上流から順に、「百考は一見に如かず」の例を以下に具体的に紹介いたします。

#### 4. 加熱シリンダ編「百考は一見に如かず」の例

##### 一 ホッパーの入口ではペレットはどのように噛みこまれているか

前掲した図3のホッパー口噛み込み部分aを視るために、実際に石英ガラスをこの部分と同様の形状にくり抜いて製作しました(写真1(a)参照)。ここまでやるかなというほどの、床の間にでも飾っておきたいようなガラス工芸品です。写真2は実際にみた画像の例です。スクリュ溝内には、ペレットが自重で落下し、スクリュ回転につれて噛み込みと前進が始まります。基本的に壁面摩擦が支配する不安定な系で、場合によっては、落下口となるホッパー穴の上方にペレットがブリッジを形成して、相互に落下を阻害し合うことがあります。このペレットの動きをよく観察すると、いろいろ面白い現象がみえてきます。たとえば、ペレットの移動速度はスクリュ表面の速度に対してかなりの遅れを生成していました。一例としては約半分ぐらいの動きで滑りながら移動しています。スクリュの回転数を上げ

ると、それに伴って一般にペレット移動速度はかなり正確に比例的に上昇して行きます。ところが、樹脂の種類、ペレット形状、壁面温度分布によっては、ペレットが定常的に前に送り込まれないような、非常に不安定な噛み込み不良現象が起きることも観察結果を通して具体的に明らかになっています。

##### 一 ペレットはどのように溶融するか

ホッパー下部で噛み込み開始した樹脂は、その後前方に送られる過程で溶かされます。しかし、金属に比べて2桁も熱伝導率が低く、ほとんど断熱材とも言える樹脂ペレットを、どのように溶かしていったらいいかがここでの大きな課題となります。これを担っているステージが加熱シリンダの中央部(図3b)です。一般には、樹脂圧が数百気圧にも達する条件下では、より小さなガラスを挿入する方が有利です。そこで、ここでは図4のように小さなガラスをシリンダの内側からはめ込むガラスインサート法を開発し、竹輪型の短い縦分割シリンダを3体連結させる方式により、側面部のスリット状の窓からシリンダ内部を一所懸命覗こうとしたわけです。

可視化窓の幅はわずか6mmで、3連結した各分割シリンダに一箇所ずつ組み込まれています。これにより、たとえば2台の高速ビデオカメラで同時計測して一つの画面上に画像合成するなどの方法により、各観察窓での溶融状況を総合的に把握し、加熱シリンダ内全体のペレット溶融過程を解析することが可能となります。ただし、上記のままでは依然として窓の幅はあまりにも狭いまです。そこで、こうした欠点を補う方法として、窓部の画像から横長のスリット状画像を一部切り出し、時間とともに縦方向に積み上げることとします。すると、写真3のように疑似的な展開画像が得られ、フライト部分、ソリッドベッド(未溶融ペレット領域)、メルトプール(溶融領域)の分布状況を一瞬にして展開画像的に読み取ることができるようになります。たとえば、同図のポリスチレンでは、ソリッドベッドとメルトプールは見事に分離して、ホッパー側から徐々に溶けていく様子が理解されます。ところが、アクリルでは、なぜか分離しないままに幅いっぱいペレットが広がり、ばらばらになったまま、あっという間にペレットが消えていってしまいます。まったく同じような条件下でも、こうした溶け方の違いがあることには驚かされます。これらは学術的にはそれぞれTadmorのモデルとLindtのモデルとして分類されますが、単にペレットが溶融する過程でも、その条件や材料によってこれまでさまざまな形態が提案されています。どのようなモデルに沿って溶けるかを、この方法で具体的に評価することができます。

溶融過程で注目されるポイントは、ソリッドベッドがどのように溶融して消失するかですが、特異な現象にソリッ

ドベッドのブレイクアップ現象があります。これは、読んで字のごとく、ソリッドベッドが途中で破れて分断され、破れた先が流れていってしまう現象です。写真4がその一例で、こうして破れてしまったシッポは、その後、ノズル側へと流される過程で熱伝導でじわっと溶けるしか方法はなく、樹脂温度の不均一を引き起こす好ましくない現象とされています。これまでは、なぜ起こるかが課題となっていました。観測画像に圧力変化等の計測結果も加えた総合解析により、今日では具体的な生成機構をかなり正確に解析することができるようになっていきます。

### ー リザーバ内の樹脂はどのように動くか

こうして溶けた樹脂は、つぎにスクリュ・ヘッドの前方とノズルとの間の樹脂溜まり部 (図3 c)、すなわちリザーバに溜ります。それでは、熔融樹脂はリザーバ内でのどのような流れをしているのでしょうか。たとえば、“スクリュが回転中にはリザーバ内の樹脂は部分的にも回転するのでしょうか” というような単純な質問にも、これまで、なかなか明確に答えられないのが実状でした。そこで、私どもはホッパー下の観察と同じように、加熱シリンダのリザーバ領域をガラスブロックをくり抜いて製作し、シリンダに装填しました (前掲写真1 (b) 参照)。その際、側面上方からは、軸方向に沿ってレーザーライトシートのスリット光をリザーバ内に打ち込める構造を組み込みました。それは、レーザーライトシートの薄い光切断面を、樹脂の回転にともなってマークが通過する際に、一瞬点滅する時間を測ることで回転速度を計測しようとしたためです。写真5は、こうして得られたリザーバ内観察画像 (上半分のイメージ) の一例です。スクリュ・ヘッドの周りの白い点が、レーザーライトシートにより光っているマークです。マーク点滅時間の計測によりわかった速度分布は非常に明解で、たとえば図5のようにスクリュの先端よりも前方 (ノズル側) では一切樹脂は動かないことが明らかになっています。当然ながら、スクリュ・ヘッドの近傍は非常に高速になるのですが、ヘッドから外周方向に遠ざかるに従って徐々に速度は低速になっていきます。射出時には、リザーバ内の樹脂は中心部ほど高速になり、一方壁面近傍では、場合によってはほとんど流動しない滞留域も確認されています。これらは、見てしまえばそれは当然という結果ですが、実は見る以前にはああだこうだという俗説が言われていたところでした。

### 5. 金型編「百考は一見に如かず」の例

#### ー どうやって金型の中を見るのか

さて、リザーバ内から射出された樹脂は、ノズルを介して、金型内のスプルー、ランナーを経ていよいよ金型キャビティ (成形品形状の隙間、図3 d) の中へ流れていきま

す。ノズルとスプルーの中には残念ながらまだ視てはいませんが、ランナーからキャビティについては、すでに可視化を行っています。たとえば私どもの例では、プリズムガラスを入れて片面からキャビティやランナーをながめるといってプリズムインサート金型を開発しています。金型の中をみようというこうした試みは、実は昔からかなり鋭意努力がなされてきました (図6 参照)。たとえば私の生まれる前の1950年ごろには、すでに、対向した2つのガラス面の後ろ側から光を当てて手前側から観察するという、光透過型の金型を開発した研究者がいました。アメリカの R. S. Spencer と G. D. Gilmore でした。これに続いて、片側のみにガラスを挿入する光反射型が、カナダ、日本でそれぞれ開発されています。さらに2面から同時に観察しようとする方式がドイツで開発されました。同図左端のレーザーライトシートによる光切断型は、私どもの研究室で初めて開発されたものといえます。

光反射型の流れを汲む私どものプリズムインサート金型は、図7のようにプリズムというブロック状ガラスを入れることで耐圧を500気圧まで上げることに成功し、これにより金型そのものとして成形できるような可視化金型を実現することができました。これが、私どもの研究のポイントでした。写真6は、通常の射出成形機に金型として取り付けられたプリズムインサート金型で、同図のように外部から高速ビデオカメラにより実成形現象を直接観察することが可能となっています。一方で、キャビティの側面部に潜望鏡式にもう一つのプリズムを入れることによって、2台のカメラにより内部を同時観察することができる2面同時光反射型へと早変わりさせることができます。また、プリズムの対向面側のキャビティに、同様にしてもう一つのプリズムを入れることで、前述の Spencer らによる光透過型の可視化金型と同じ構造が実現されます。レーザーライトシート法は、リザーバ内の観察と同様に、シート状になったレーザー光をスリットガラスを介して金型キャビティ面に垂直に打ち込むもので、これにより板厚方向の光切断面の情報を直接可視化することができます。

これらの動的可視化法の仲間とは違うのですが、私どもの研究室で近年開発された新しい静的な可視化解析手法にゲート着磁法があります。この方法は、樹脂のなかに磁粉を少し練り込んだ材料を流すときに、ゲート (キャビティの入口) 部分に埋設された着磁ユニット (コイルと鉄心部分) により着磁しようとする方法です。任意のパルスパターンによるコイル通電でゲート部に磁界が発生し、このときゲートを通過する磁粉が着磁して金型キャビティに広がります。成形品内部の着磁領域を任意の切断面上で現像すると、着磁のパターンが見事に読み取れます。いわばテープレコーダを金型のなかに組み入れたような考え方で

以上のようなさまざまな可視化手法を駆使して、金型内部の成形現象を観察するなかで明らかになった「百考は一見に如かず」の例を、以下に述べてみたいと思います。

### 一金型のランナー分岐部では樹脂はどのように飛び出すか

プラモデルでは外枠にパーツがぶら下がってくっついていきます。この外枠は実はパーツを固定するための役割ではなく、もともとは樹脂をパーツのキャビティへと導く流路、すなわちランナー部分にほかなりません。ここでは、こうしたランナーが分岐しているところの樹脂の流れ方が課題になります。

たとえば、写真7のように下方から流れてきたランナーが3方向に分岐する場合を考えてみます。下方から高速で流れてきた樹脂は、分岐部で主にどちらへ優先的に流入していくのでしょうか。実は、その答えは流入側ランナーに最も近い左下方向のランナーです。樹脂の慣性項を考えると、一見直進方向が正しいように感じますが、流入速度を100倍上げてもこの流れ方は変わりません。以上の結果は、試してみて初めて明らかになったことで、樹脂の慣性項はほとんどきかず、分岐部流入パターンは、速度だけではなくて樹脂の種類にもよらずほぼ一定であることが示されています。ところが、流入パターンに影響を及ぼすものも実は存在していました。たとえばガラス繊維やタルクなどの充填材を入れると、図8のようにどんどん直進する方向に流入パターンが変化していきます。それによって、最終的に、3つのランナー先端に位置する各キャビティへの到達時間に差が生じ、各キャビティ間の成形条件に微妙な差異をもたらすこととなります。

### 一ランナーバランスはなぜ崩れるか

これもやはりランナーの話です。同じキャビティ形状を2個、4個、8個というように同時に一つの金型で成形しようとする、プラモデルの例のように、各キャビティをランナーで次々につないでいきます。このとき、各キャビティが同じ成形条件になるように、キャビティへの樹脂到達時間、キャビティ内の充填時間などができる限り同じになるようなランナー形状等の設計を行っています。これが、ランナーバランスの設計です。

写真8はT字型の分岐ランナーが2つ組み合わせられた例で、左右のキャビティへの充填状況を観察したものです。こうしたランナーの場合には、ランナー流入側に近いキャビティ（右側）に、より速く充填が進むことが経験的に知られていました。“材料には記憶効果があって、はじめのT字路で右側に曲がったために、曲がりぐせがついて次のT字路でも思わず右側に曲がってしまったのだ”という冗談ともつかぬ面白い説明も耳にしたことがありました。ほ

んとか？ 高分子ってそんな性質あったかな？ といひながら、直接可視化を試みるようになったわけです。その結果、低速で射出した場合には、実は右側よりも左側への充填が進み、高速で射出しますと、経験的に知られているように右側への充填が多くなることが明らかとなりました。同じ金型で、同じように射出しても、速度の違いによってまったく逆の現象が得られるわけです。

これは何を意味しているかと、よくよく樹脂の流れを追跡してみると、実はランナーの中もキャビティと同じように樹脂は流れながら冷却・固化することが原因であったことがわかりました。すなわち、ゆっくりした流れでは、主として写真8のT字路滞留域aおよびランナー側壁bの領域に、固化層が流動過程で生成し、これが障害物になって樹脂は左側方向に次第に入りやすくなります。一方、速く流れますと、bに固化層が成長しないうちに充填が終了してしまいますので、流動距離がより短く流動圧力損失の小さい右側に必然的に入りやすくなります。通常成形では、これほど遅い速度で射出することは少ないために、左側キャビティが充填しやすい今回のような例があまり知られていなかったものと想像できます。上述のように、実は両方の場合があり得るということが、これにより明らかになったわけで、これも意外な結果となりました。

### 一ウェルドラインはどのようにして消えていくか

2つのゲートからキャビティへ流入した写真9の樹脂のように、2つの流れのフローフロントがぶつかったところには、フロント同士が接合した痕跡としてウェルドライン（溶接線）が生成します。同じように、キャビティの中で流動をさまたげる、ピンやブロックなどの障害物の後ろ側にも、一度分断された2つの流れが再び会合して、やはりウェルドラインができます。ウェルドラインは代表的な外観不良の一種に数えられています。ところが、一般にVノッチ状の表面欠陥として残留するウェルドラインは、ときとして、ある長さのところまでで自然に消失してしまいます。そこで、なぜ消えるのか、どこで消えるのかが、大きな課題となっていました。

図9はウェルドライン形成過程を示すフローパターンで、2つの流れが会合してできる会合角 $\alpha$ が、この場合大きな意味をもつことが明らかになっています。すなわち、この会合角 $\alpha$ がある角度 $\beta$ より小さいと、実はウェルドラインが表面に残留し、 $\beta$ より大きくなるとVノッチ状のウェルドラインは消失してしまいます。この消失角 $\beta$ は材料に固有の値で、成形条件や金型のキャビティ形状にはよらないという、実用上有益な基本特性も明らかにされています。この消失角理論によれば、キャビティ充填の数値シミュレーション結果にもとづき、どこからウェルドラインが見えなくなるかを明確に予測することができるようになりま

す。そのために、すでに型内流動解析シミュレータの中に組み込まれ広く世の中で活用されている基本ルールになっています。なぜ、こうした消失角が存在するかの解析もなされていますが、ここではあまりにも専門的な議論となるため、あえて省略させていただきます。

### 一 フローマークはなぜ生成するのか

フローマークは流れに伴って生成する代表的な成形品の表面欠陥の総称です。しかしながら、一言でフローマークと言っても、淡いパターンから粗面状の激しいものまで、また生成位置もまちまちで明確な定義や分類がないのが実状です。共通する点は、いずれも流れに起因したものと考えられる表面欠陥で、これが生成することによって成形品品質が著しく低下し、ひどい場合にはまったく使い物にならなくなるという点です。大半のフローマークはなぜ起こるかよくわからないので、一所懸命に成形条件を変えて、まさしく経験的に試行錯誤でこれを消そうと努力しているのが現状でしょう。

そこで私どもは、フローマークはなぜ生成するかを解析するために、フローマークをまず図10のようにいくつかの基本パターンに分類することといたしました。すなわち、ゲートの近くにできたり、キャビティ終端部にできやすい波打っているようなフローマーク、これを(1)レコード縞状のフローマークと呼ぶことにしました。2つ目は、曇っている面の裏側はよく曇っていて、光っている面の裏側はよく光っているようなフローマークです。このフローマークは上下面で光沢と曇りが同じ位相ですから、(2)上下同位相フローマークと呼ぶことにしました。最後は、曇っている面の裏側は必ず光っていて、逆に光っている面の裏側は必ず曇っているという、完全に千鳥のフローマークです。これを(3)上下異位相(千鳥状)フローマークと呼んでいます。これらは、いずれもなぜできるかが未解明となっており、かねてより大きな問題にされていました。ここでは、この難問に挑戦した可視化解析例を順次紹介します。

#### (1) レコード縞状フローマーク

規則的な波打ち形状がなぜできるかを明らかにするために、流動過程のどこで生成しているかをよく観察してみました。その結果、写真10のように、すでにフローフロントの先端のところで波を打ちながら流動している様子が確認され、以下の生成モデルがもたらされました。図11はフローフロントの板厚方向半断面のイメージです。同図において樹脂が右方向に流動する過程で、樹脂は金型表面から冷却されます。このとき、ある速度以下になると、樹脂が冷える速度とフローフロントが前に進む速度のバランスが崩れて、フローフロントの型表面との接触開始部分で固化層成長スピードが相対的に大きくなってしまいます。その

結果、樹脂はこの成長した固化層(あるいは非流動層)を乗り越えながら、次に金型に接触して冷え、再び乗り越えることを繰り返すこととなります。これが波打ち形状をもたらします。これは乗り越え現象と私どもが呼んでいるもので、フローマークができる大きな原因です。その原理から、ある速度範囲以下で起こる現象であると理解され、実験的にもすでにこの特性は検証されています。

#### (2) 上下同位相フローマーク

上下同じような位置に曇り面や光沢面が生成するというのはなぜでしょうか。結果は明解で、実はゲートが断続的に詰まっていたというわけです。実際にそんなことが起こるのか、という疑問は当然です。写真11の観察画像には、ランナー上流から粘度の大きい不透明な材料が流れてきて、ゲートの入口をふさぐ様子が明瞭に映し出されています。この際、ゲート部の流動抵抗は著しく大きくなり、一時的にゲートからキャビティへの流入量が低下するか、まったく流れなくなります。結果として、フローフロントがキャビティ内で一時的にびたっと止まったり、減速したりします。次の瞬間、ゲート部の圧力は急激に上昇してこの高粘度の樹脂をキャビティ内に吹き飛ばすため、フローフロントは急に流動を再開します。こうしてフローフロントは、きわめて不規則に断続的な速度変動を繰り返すこととなります(図12参照)。こうしたキャビティ内流動は、ヘジテーション流れと呼ばれているものと同等と考えられます。説明するまでもなく、フロント速度の変動は金型表面の転写効率の変動をもたらす、上下同じ位置に曇り面や光沢面を生成させるわけです。

#### (3) 上下異位相(千鳥状)フローマーク

このフローマーク生成機構の解明は非常に難解なテーマでした。まず、ゲート着磁による可視化解析でわかったことは、写真12のように板厚方向の流動中心が常に曇り面側に向かうということでした。普通は上下対称のファウンテンフロー(噴水流れ)により板厚中心から両側の型表面に向かって樹脂が湧きだすのですが、フローマーク生成時には流動の中心が曇り面側に向かう非対称な流れを示しています。曇り面が上下に交互に遷移するにつれて流動中心も上に下にと変化しています。もしこうした流れが正しいとしたら、板厚の側面方向からこのフロント近傍の樹脂挙動を動的に観察すると、一体何が視えるのでしょうか。この課題に、レーザライトシート金型で挑戦してみることにいたしました。写真13は、レーザライトシート金型で得られた板厚方向のフローフロント挙動観察画像です。樹脂は上から下方向に流れています。まず片側から剝離が生成して、樹脂はこの剝離側から湧き出します。そして剝離した樹脂がフローフロント先端をはるばる乗り越えて反対側の面まで到達すると、次の瞬間に到達面側が剝がれて、湧き出し口は新たな剝離面側に移行することになります。こうして

上記の過程が再び繰り返され、フローフロントの樹脂はあたかも両側から波を打つかのように揺動していきます。その結果、図13のように湧き出し口側が常に曇り面、その反対面側が光沢面になって、それらが互い違いに両面に現れることが明らかになりました。なぜこのような現象が継続して起こるかということも、これとは別に解析が行われていて、私どもの研究室では一種のメルトフラクチャーによるものとの説を唱えています。すでにそのための検証実験も行われており、ある臨界せん断応力値を上回る型表面応力に達すると、剝離または破れ現象が起こるであろうということも実験解析的には解かれています。

### 一 繊維はどのように配向するか

さて、次は繊維配向の問題です。主として機械的特性改善を目的として、樹脂にガラス繊維、タルク等のフィラー(充填材)を混ぜて使用することは、実際によく用いられています。特に繊維のように長さを持つものは、流動によって容易に回転することができるため、金型充填過程で繊維は顕著に配向します。そこで、どのように配向するかが、ここでの大きな課題になるわけです。写真14は、光透過方式で観察した繊維配向過程の画像です。ゲートから入った繊維は、ゲートから飛び出した直後に広がる扇状の拡散流領域でくると回転するものと、まったく回転しないでゲートから放射状に流線方向に沿ってずっと流れていくものがあります。これは、その繊維が板厚方向にどの深さを流動しているかによって決まるものです。この繊維一本一本を拡大して、ロボットでカメラを動かしながら追跡することによって、どの段階でどちら方向に繊維が回転するかについても視ることができるわけです。

結論から言いますと、ガラス繊維は、何も考えずに流動させると図14のような7層の配向構造を示すことになります。板厚3mmの速度分布では、中心部がいちばん速度が大きく、壁面はゼロになります。これに対応した成形品の繊維配向は、中心部が配向角 $0^\circ$ (流動に直行)となります。一方、その両側に広がる速度勾配が最も大きい領域では、流れのより速い領域に位置する繊維末端部側に繊維全体が引っ張られる形となるため、配向角 $90^\circ$ (流動方向)へと配向します。その外側の最外層には速度ゼロのスキン層があるのですが、そのスキン層内部の配向をよくよくながめてみると、さらに配向が2層に分かれていることに気づきます。その理由は、レーザライトシート法で横方向から配向過程を観察して明らかになりました。中心部を流れてきた流動に直交配向した繊維は、フロントに近づくと図15のように2種類の流動パターンを描きます。その一つはフローフロントにまで到達してフロント部分でのファウンテンフローにより繊維配向を $90^\circ$ 変化させられるもので、フロント表面近くを流れて流動方向に配向したスキン層の最

外層を形成します。もう一つは、流動と直交のままフローフロント内を内廻りし、スキン層の内層部分に到達するもので、これは流動と直交した配向のままとなります。こうして、スキン層内部は直交する2層が形成されることがわかりました。その結果、生成される繊維配向は、原理的には図14のように互いに直交する7層構造となることが理解されます。ただし、条件によっては中央の層が消失したりスキン層の配向が交錯したりする結果、5層となったり3層となったりすることもあります。これも視てしまえば当たり前になりますが、視る前には何が何だかよくわからない不思議な現象とされていたものです。

### 一 型表面の微小段差は流動に影響するか

型表面に小さな段差がある場合に、その反対側の成形品表面には曇りが生成する例が知られています。これはどういうことでしょうか。ゲート着磁法で調べたところ、図16のように、わずか $70\mu\text{m}$ の段差を通過した直後、樹脂は非常に大きな非対称流動を引き起こすことがわかりました。すなわち、段差部分で剝離が起きて、瞬時に段差方向にいったんもぐり込んでから上昇するような流動パターンを示し、これによる速度および型表面圧力の不均一の生成が、段差後の反対面に転写むらをもたらしものと考えられています。“成形品の裏側のキャビティ面だから少しぐらい段差が残ってもいい”と思ったら大間違いで、裏側も手抜きをしないでしっかりと仕上げておかないと成形品の表側にも影響が出てしまうということを、こうした流れの可視化結果は明解に教えてくれています。

### 一 型内で成形品はいつどのように離型するか

最後の課題は、成形品とキャビティ表面が金型の中でいつどのように剝離を引き起こすかという問題です。こうした剝離が生成すると、そこでの隙間が断熱層として働き、それ以後樹脂は冷えにくくなります。したがって、金型の中での離型現象について、それがいつどの範囲にできるかを知ることが、成形品の特性を制御する上で非常に大きな意味をもつこととなります。ところが、この離型タイミングあるいは離型の広がり方を、これまで正確に知ることができませんでした。実際、これを計測しないかぎり、成形品がどのように反ったり、どのように引けたりするかを正確にシミュレーションすることは難しいものと考えられます。

そこで、私どもでは人間の体内の様子をみるための医療用超音波プローブを金型内に装填し、キャビティ表面での剝離現象を診断しようと試みています。ここでは、剝離領域での超音波の反射率は非常に大きくなりますが、剝離が起こっていないければその反射率は小さくなる原理を活用しています。この原理そのものは、超音波探傷法などで広く

活用されているものですが、リニアスキャンのプロープを用いますと、型表面の直線上での剝離状況をリアルタイムでモニターすることができます。この方法を使って、実際に剝離はいつ起こるかを定量化した事例が写真15で、同写真の縦方向は時間軸、横方向はキャビティ内の樹脂流動方向です。この例は、中央部にリブがあるキャビティについて、リブ対向面の剝離状況を調べた結果です。はじめは全域が密着していたわけですが、ある瞬間から右側、左側から剝離が生成して中央のリブ方向へと伝播し、最後にリブの裏面が剝離して全面離型が完了します。この画像計測の前までは、最も体積収縮の起こりやすいリブの裏面から剝離が始まると私どもも信じていたのですが、結果は期待に反して(?)、両サイドから剝離が開始し、リブの裏面は逆に最後まで密着したまま残ることがわかったわけです。これまでの「常識」とは大きく違う結果が得られた実例です。

以上、可視化結果の要点をかいつまんで説明してきましたが、長々とした私の話を聞くよりは、最上流のホッパーから最下流の金型内離型までビデオ画像を順次紹介することの方が、まさに「百聞は一見に如かず」の好例といえるでしょう(注)。

## 6. お わ り に

以上の結果は、主にガラスインサート法による直接観察

を中心に得られたもので、その意味ではいかにも簡単そうに見えるわけですが、このように大量の観察実験とビデオ撮影を行うためには実に多くの人たちのいろいろな苦勞話がありました。これらは、私どもの研究室スタッフである村田泰彦助手と増田範通技術官をはじめ、大学院生4人、'89年からの延べ4年間にわたる文部省の「民間等との共同研究」で本研究に携わった延べ50人近い派遣研究員による全ての研究成果の集大成といえます。またあわせて、マルチクライアントのプロジェクトとして本研究に参加した延べ22社の会社の御協力をいただいていたもので、この場を借りてお礼を述べさせていただきたいと思います。

「百聞は一見に如かず」は、英語の“Seeing is believing”に対応しています。「百考は一見に如かず」も、英語に訳しますとまったく同じ言葉になり、いずれも視ることの重要性を表現したものと言えましょう。現象をありのままに視ることは、工学に限らずあらゆる科学の原点ともなる一番重要なステップと考えられます。本日、紹介しました画像は、すでに視えないと思ってあきらめていたものについても、あきらめないでさまざまな方法で視る努力を積み重ねることによって、非常に大きなインパクトのある結果を導き出すことができることを、限られたテーマの範囲ながら例示したものと思います。そういう意味で、この講演のなかから、何か参考になるところが少しでもございましたら望外の喜びです。本日は、どうもありがとうございました。

表1 「加工現象を視る」ことの難易性

易	難	(射出成形の例)
開放空間	密閉空間	(金型・シリンダ)
低温	高温	( $\sim 350^{\circ}\text{C}$ )
低圧(大気圧)	高圧	( $\sim 1000\text{atm}$ )
低速	高速	(数秒間)
定常	非定常	(間欠的)

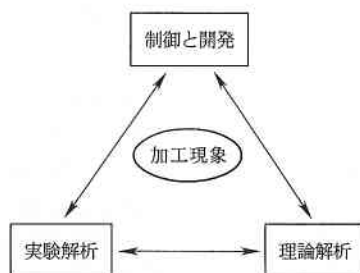


図1 モノづくりの工学体系

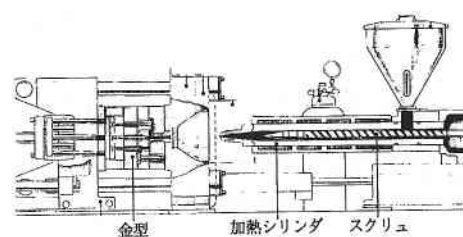


図2 射出成形工程の2つのブラックボックス

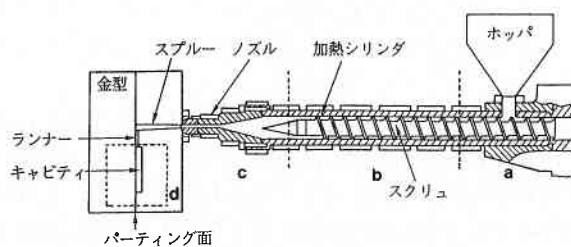


図3 ガラスインサート法による射出成形プロセスの可視化ゾーン

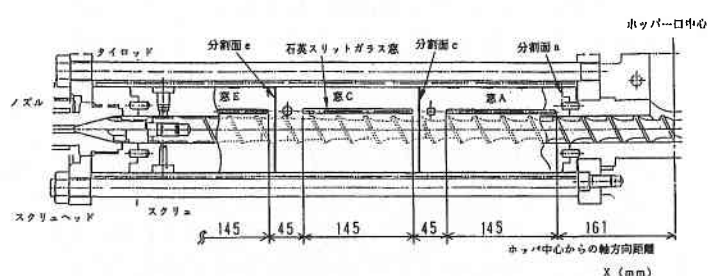


図4 可視化加熱シリンダ



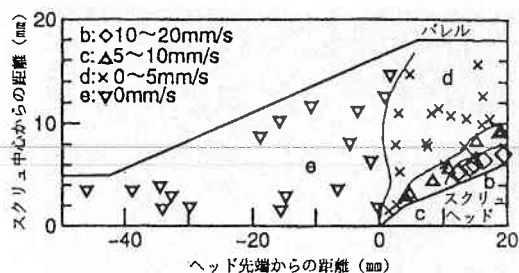


図5 リザーバ内の回転方向速度分布計測例 (スクリュ回転速度: 30rpm, 樹脂: ポリプロピレン)

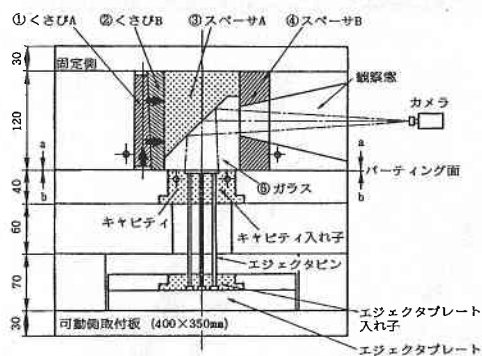


図7 プリズムインサート金型の基本構造

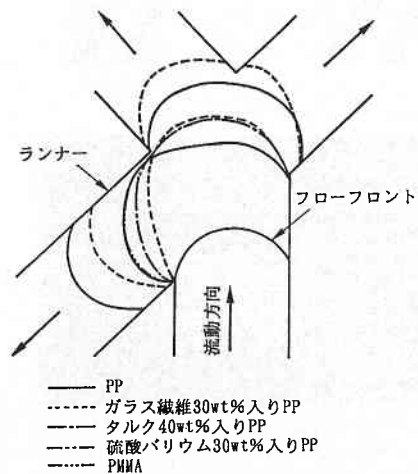


図8 ランナー分岐部の充填パターン

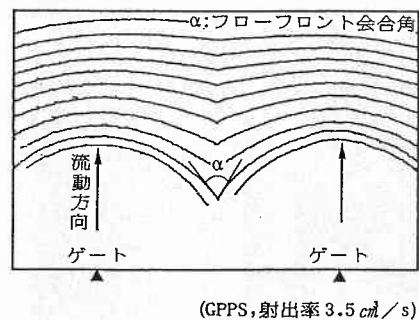


図9 ウェルドライン形成パターン

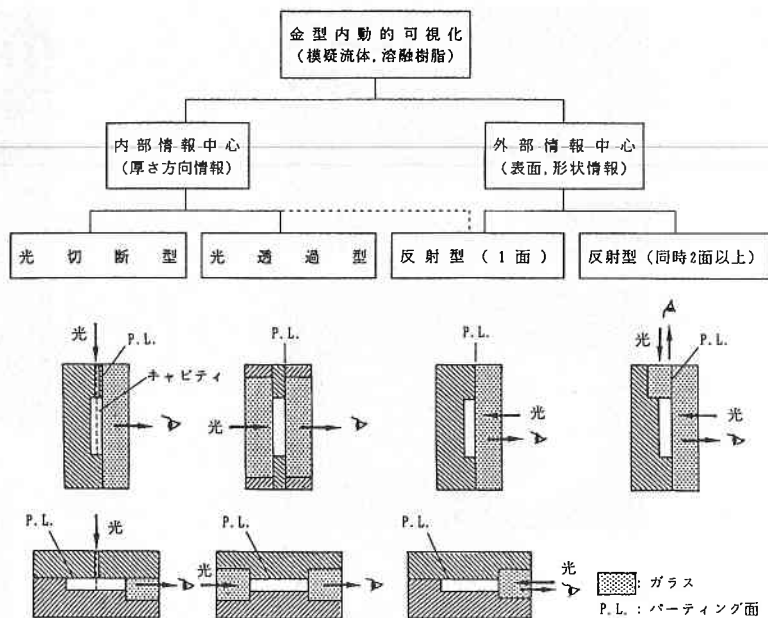
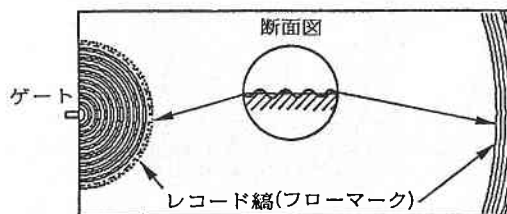
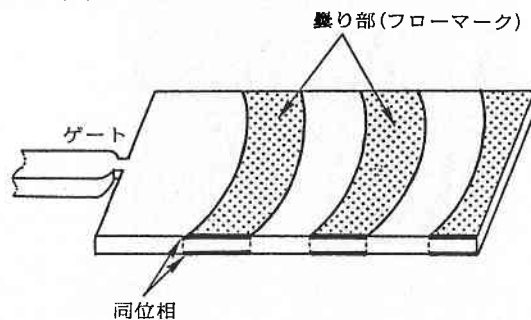


図6 金型内の動的可視化手法

#### (1) レコード縞状フローマーク



#### (2) 上下同位相フローマーク



#### (3) 上下異位相フローマーク

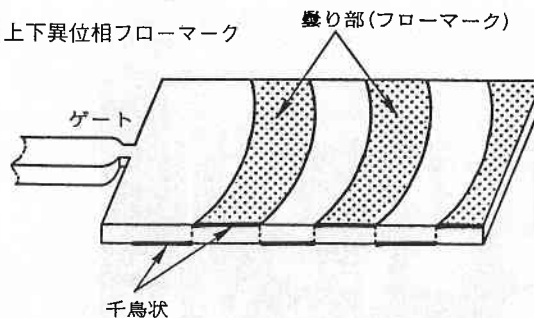
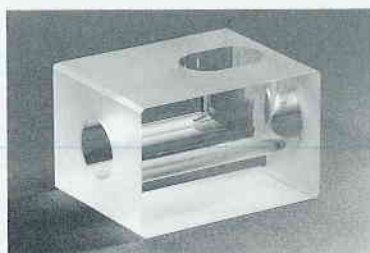


図10 各種フローマーク生成形態の分類

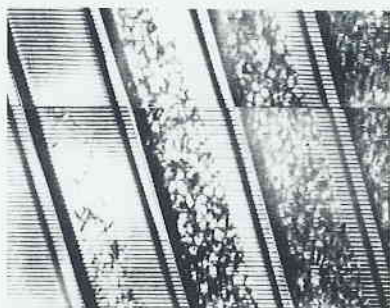




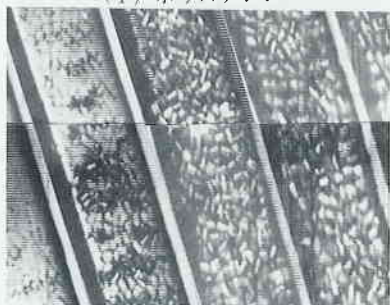
(1) ホッパー下部観察用



(2) リザーバ内観察用

写真1 石英ガラスブロックの外観  
(撮影：映像技術室)

(1) ポリスチレン



(2) アクリル

写真3 ベレット溶融過程の疑似展開画像



写真6 プリズムインサート金型と高速ビデオシステム



写真2 ベレット噛み込み状況 (樹脂：ポリプロピレン)

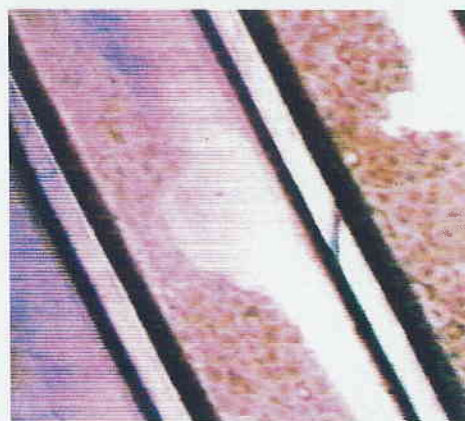
写真4 ソリッドベッドのブレイクアップ現象  
(樹脂：ポリプロピレン)写真5 リザーバ内樹脂挙動のレーザ可視化 (白い点：  
マーカ、樹脂：ポリプロピレン)

写真7 ランナー分岐部流れ (樹脂：ポリスチレン)

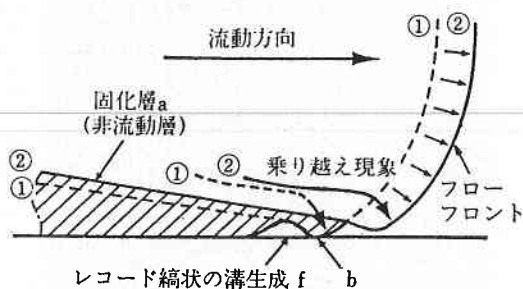


図11 レコード縞状フローマークの生成機構

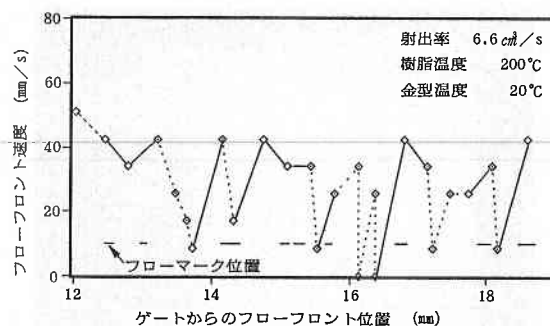


図12 上下同位相フローマーク生成時のフローフロント速度変化  
(樹脂：ポリプロピレン)

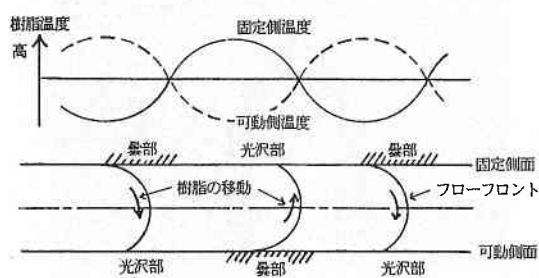


図13 上下異位相フローマークの生成過程モデル

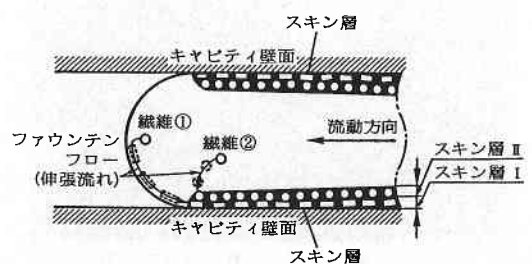


図15 スキン層の繊維配向過程モデル

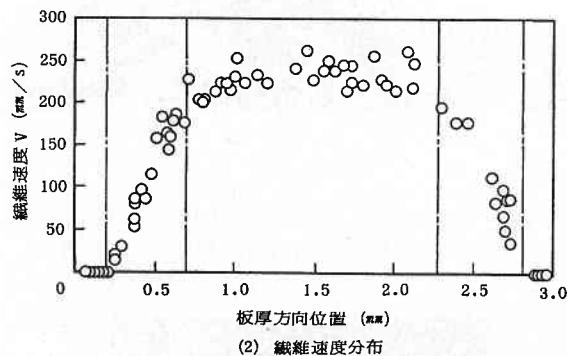
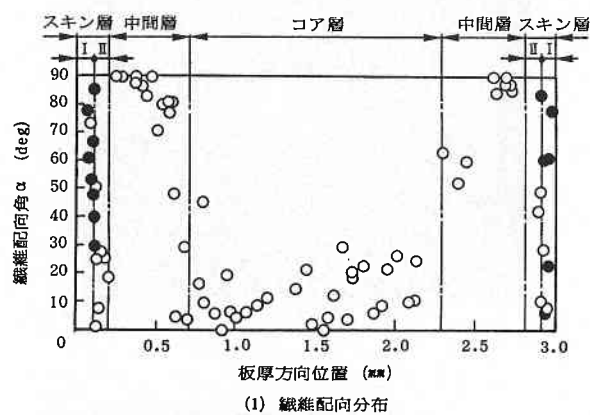


図14 ガラス繊維の流動速度分布と配向分布との関係  
(樹脂：ポリスチレン、ガラス繊維： $\phi 60\mu\text{m}$ 、射出率：19.7 cm³/s)

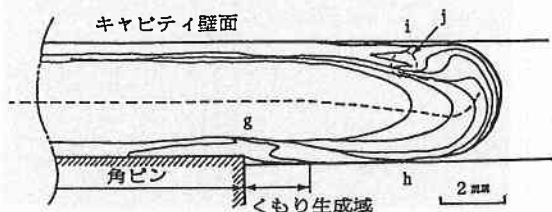


図16 ゲート着磁法による微小段差通過後の非対称流動パターンの観察  
(樹脂：ポリスチレン、磁粉：20wt%含有)



写真8 ランナーバランスの変化 (樹脂: ポリスチレン)



写真10 レコード縞状フローマークの生成 (樹脂: ポリスチレン)



↑ 全面曇部

写真12 上下異位相フローマークの生成過程におけるフローフロント内部の非対称流動 (板厚: 4mm, 樹脂: ポリプロピレン/タルク, ゲート着磁金型)



▲ ゲート

写真14 ゲート近傍での繊維配向 (樹脂: ポリスチレン, ガラス繊維:  $\phi 60\mu\text{m}$ )

(注) 講演では, 成形現象をビデオにより22分間にわたって紹介したが, 本稿ではその内容説明を省略した。  
(1994年 6 月 2 日講演分)



写真9 2点ゲートによるウェルドラインの生成 (樹脂: ポリスチレン)



写真11 ゲート部に流入する高粘度の不均一樹脂 (樹脂: ポリプロピレン)



写真13 キャビティ厚さ方向に揺動する非対称なファウンテンフロー現象 (樹脂: 低密度ポリエチレン, レーザライトシート金型)



↑ 型  
↓ 型

← キャビティ位置 →

← リブ部 →

写真15 超音波イメージスキャナによる型内離型プロセスの画像計測 (樹脂: ポリプロピレン, 線が見える部分は離型が完了したことを意味する)