

樹脂を円筒形状に固めたタブレットを、加熱された金型のポットへ投入する、(2) 金型を閉じた後にプランジャを駆動し、樹脂を溶融させながらキャビティ内へと導く、(3) キャビティ内で硬化させるという工程からなっている。本成形法で使用される金型は、図2に示すように大きく2種類に分けられ、それぞれコンベンショナル金型(シングルプランジャ金型)、マルチプランジャ金型と呼ばれる。前者の金型は1組のポット・プランジャを有し、ランナを分岐させることで多数の成形品が得られるようになっている。またタブレットが相対的に大きいために、ポットへ投入される前に、高周波加熱機で予備加熱が行われる。後者のマルチプランジャ金型は、複数組のポット・プランジャを有する。また1つのポットに対するキャビティの数は、コンベンショナル金型よりもずっと少ないため、小型のタブレットが用いられる。この金型では、異なるキャビティにおけるパッケージの品質にばらつきが少ない。そこで高い信頼性が要求される半導体は、マルチプランジャ金型によってパッケージングが行われている。

金型に投入されたタブレットは溶融を開始し、一旦粘度は下がる。しかし更に熱を受けることで硬化反応は促進され、次第に粘度は上昇していき、最終的にはキャビティ内で硬化する。キャビティ内には、微細で変形しやすいワイヤ(金線)やリードフレームがある。したがって、樹脂粘度や注入圧力などの諸条件が適当でない場合、後述するような不良現象が容易に発生する。

半導体パッケージングにおける不良現象の例を図3に示す。特に樹脂流動に起因するものとして、(1) ワイヤスweepによるショートや断線、(2) 未充填やボイドの発生、(3) ダイパッドの移動によるチップの露出などが

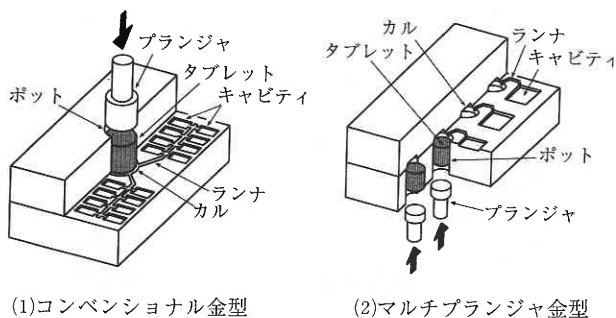


図2 トランスファ成形法と金型

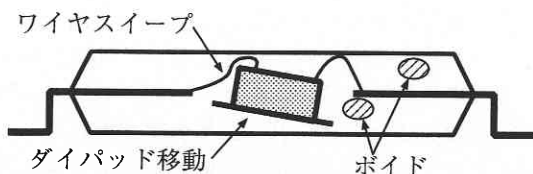


図3 主な不良現象

挙げられる。これらの不良現象に対して、従来は、成形現場の技術者が試行錯誤によって対応してきた。しかしチップ面積が増大する一方でパッケージサイズが小型化している現在では、成形現場のみでの不良対策に限界が生じてきている。そこで、系統的な研究に基づく不良対策や、不良現象の発生しにくい樹脂、あるいはリードフレーム・金型の開発が強く求められており、様々な研究が行われている。

以下では、金型内の基本的な樹脂挙動に関する研究と、個々の不良現象に関する研究について、順に紹介する。

3. 樹脂流動現象解析

3.1 ポット内溶融現象

粉末状の熱硬化性樹脂を円筒形状に固めて作ったタブレットは、金型内のポットに投入されて溶融を開始する。そしてプランジャを駆動することによって、溶けた樹脂はランナへと流動を開始する。

Laroche らは、加熱されたポットにタブレットを投入し、プランジャを動かさずにタブレット中央部の温度変化を熱電対で計測し、ポット壁面からの伝熱の様子を調べた⁷⁾。また併せてシミュレーションを行い、ポット内での伝熱モデルの検討を行った。そして図4に示す結果から、投入直後はタブレットとポット壁面が接触していないモデルでの計算結果と一致するが、次第に両者が接触しているモデルでの計算結果と一致するようになることを示した。

本研究は、樹脂の熱履歴を知るうえで重要な温度を計測し、タブレットとポットとの間の隙間にも注意を払う必要があることを示した点において、興味深いものである。しかしプランジャを駆動させた場合の影響が考慮されていないために、ポット内樹脂挙動の定性的な理解に止まっている。

筆者の一部らは、3層に着色されたタブレットを用い、

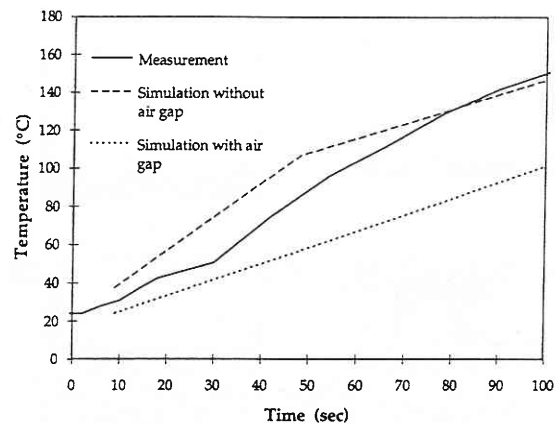


図4 ポット内温度計測結果とシミュレーション結果との比較⁷⁾

ポット、ランナ、キャビティにおける溶融樹脂挙動の、ショートショット法による静的な可視化観察を行った⁸⁾。図5は、ポット内に残されたタブレットの断面の例である。各時間のショートショットサンプルの断面を観察した結果、(1) タブレットは金属面と接触する上端および下端から溶融し、ランナ内へと流動すること、(2) 注入速度が速く、溶融が不十分な状態でプランジャを駆動させると、タブレットのクラック生成に起因すると推察される不安定現象が発生することなどを明らかにした。ここで得られた研究結果を、例えば温度等の計測結果と併せて定量化することで、ポット内での樹脂挙動に関する有益な情報が得られるものと考えられる。

3.2 ランナ内流動現象

ポットで溶融した樹脂は、ランナを通じてゲート、キャビティへと導かれる。狭い流路を通過する際に、樹脂は更に熱を受け、粘度、温度を変化させる。キャビティへ流入する際の樹脂粘度等を適切なものにするためには、ランナにおける流動現象を把握することも必要であると考えられる。

川村は、コンベンショナル金型において異なる着色を施したタブレットを用いて、静的に流動状況を調べた⁹⁾。その結果、先に流入する樹脂は壁づたいに流れ、後から来る樹脂は流路の中央部を流れていき、先に流入した樹脂を追い越していくことを確認した。

また筆者の一部らは、前述の着色タブレットを用いて、

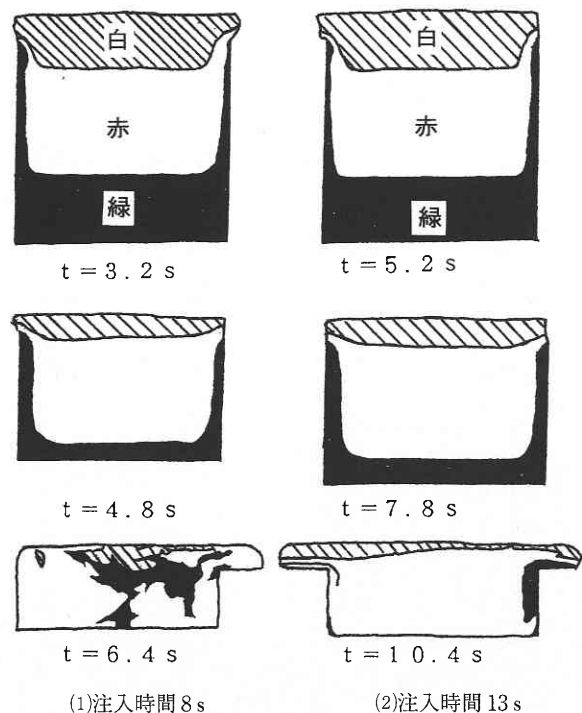


図5 カル切断面のスケッチ図⁸⁾

ランナにおける樹脂流動を調べた⁸⁾。そして、ポット内で先に溶融した樹脂が外側に存在し、中心部には後から溶融した樹脂が存在することを確認した。また中心部には気泡が存在しており、この気泡はタブレットとポットの間に存在した空気であると推察している。

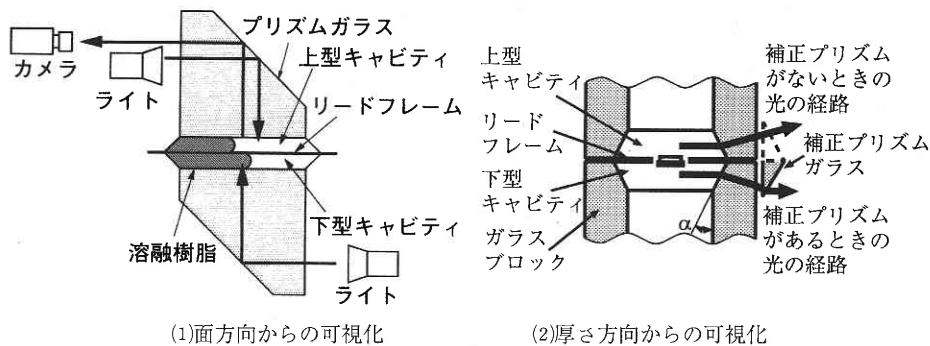
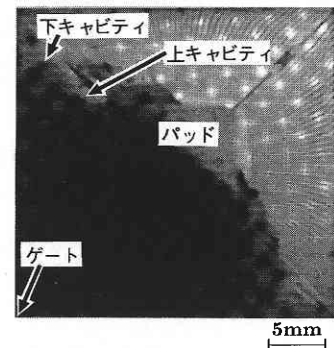
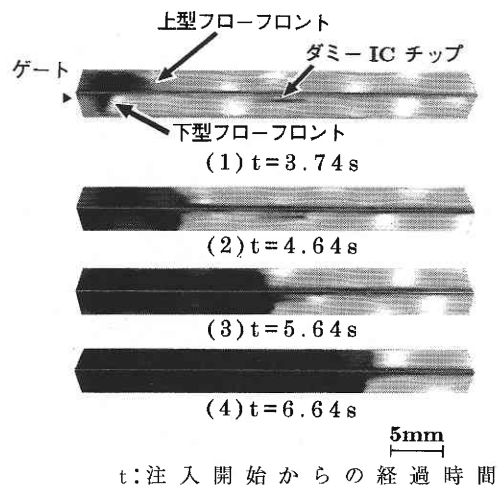
ランナにおける流動現象に関する研究は、未だ定性的なものに止まっており、今後の詳細な解析が期待される。

3.3 キャビティ内流動現象

キャビティ内の樹脂流動は、パッケージの不良現象に直接影響を与えるので、多くの研究が行われている。その中でも、特に計算機シミュレーションに関する研究が多い¹⁰⁻¹²⁾。これは、(1) 熱可塑性樹脂による射出成形などの計算機シミュレーションに関する研究成果を応用できる、(2) 計算機シミュレーション技術が確立すれば、異なる樹脂、成形条件、キャビティ形状における樹脂流動挙動を、比較的短時間で把握することができる、などの理由が考えられる。しかし現在の計算機シミュレーションには、(1) 樹脂流動に対する仮定（金属と接触した樹脂の取り扱い¹²⁾、リードフレームを介した反対側の樹脂の影響⁷⁾など）の根拠が不明確、(2) リードフレームなどの微細な形状のモデル化が困難¹²⁾、(3) 熱硬化性樹脂の適切な評価方法が未確立¹³⁾、などの問題点が指摘されている。そこで実験解析によって実際の樹脂流動を把握していくとともに、上述した計算機シミュレーションの問題点を補っていく必要があると考えられる。

筆者らは、射出成形分野で開発したガラスインサート金型¹⁴⁾を応用して、キャビティにおける樹脂流動を面方向、厚さ方向からそれぞれ観察可能な可視化金型を開発した¹⁵⁻¹⁷⁾。それぞれの計測原理を図6に示す。面方向観察用の可視化金型においては、2つのプリズムガラスでキャビティを挟む構造としており、リードフレームによって区切られた上下キャビティ内の樹脂流動を、1台のカメラで同時に撮影できるような構造とした。図7は、高速ビデオカメラによって得られた画像の一例である。得られた画像を画像処理を用いて解析した結果、(1) ゲートを設けてある下キャビティの樹脂流動が先行するが、このときの上下キャビティ間の流動遅れ量は、流動過程において一定に保たれること、(2) 注入時間が長い場合には、流動過程において樹脂の硬化が促進され、充填後期に鋸状のフロント形状を呈することなどを明らかにした。

一方、厚さ方向観察用の可視化金型では、キャビティ側壁面部にガラスブロックを配置し、さらにガラスブロック部で屈折する光を平行に戻すために、外側に補正プリズムガラスを置く構造となっている。図8は、側面方向からの観察によって得られた画像の例である。このようにキャビティの側面、および正面から観察実験を行った結果、(1) ほとんどの時刻において溶融樹脂は、キャ

図6 可視化金型の計測原理^{16,18)}図7 面方向からの観察画像¹⁵⁾図8 側面方向からの観察画像 (注入時間8s)¹⁶⁾

ビティ面、リードフレーム面に対して滑りながらキャビティを充填していくこと、(2) フローフロント部表面の樹脂は、充填初期段階においてはキャビティ面側からリードフレーム面側へと巻き込まれるように流れるが、ダイパッド部を通過する頃から、この表面部の速度が0に近づくことなどを明らかにした。

可視化金型を用いる実験解析手法は、基本的な樹脂流動現象（充填パターン、金属面との接触状況など）を明らかにすることができるという点において、非常に有効な手法であるといえる。しかし一般的に半導体パッケージング材料は不透明であるために、不良現象と密接な関係にあると考えられる、内部の樹脂流動を観察することができないという課題を残している。

3.4 キャビティ内硬化現象

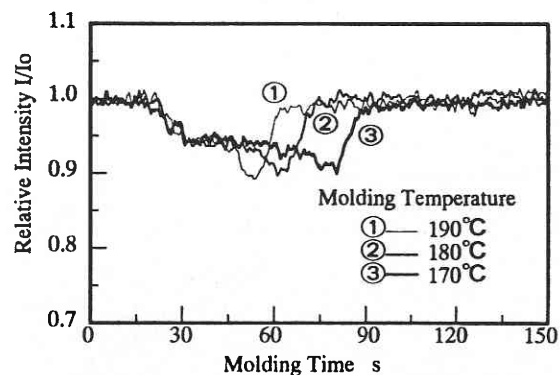
キャビティを充填した溶融樹脂は、更に金型から熱を受けて硬化する。この際に、キャビティ形状や成形品の温度分布が不適切な場合、成形品に反りや残留応力が発生する。そしてそれらによって、パッケージ内部にクラックが生じ、そこから素子（配線）が腐食していく可能

性がある。

済木らは、キャビティ内における樹脂の凝固の様子を、熱電対による温度計測^{19,20)}、および超音波計測²¹⁾を用いて解析した。温度計測による解析において、示差走査熱量計（DSC）から得られたデータを基にした温度シミュレーション結果と温度計測結果とが一致しない理由は、プランジャからの圧力により硬化反応が促進されるためであるとし、反応を加速させる因子を導入してシミュレーションを行った。この結果から、(1) 成形圧が異なると反応率も異なること、(2) 上下の金型に温度差があるときには凝固は高温側から低温側へと進むが、低温側では反応速度が遅くなること、(3) 凝固進展様態と成形品の反りには相関があることなどを明らかにした。

一方、超音波計測を用いた研究では、キャビティにおいて超音波の反射波を連続的に計測することで、樹脂の硬化反応の様子や離型する時刻を測定するという試みが行われている。金型温度やプランジャ圧力を変化させると、それに応じて反射波の強度が変化し、成形制御に有用な資料を得ることができるとしている。図9は、金型温度を変化させたときの反射波強度の様子である。また併せて樹脂とキャビティ面との接触率を計算し、全工程において接触率は高々0.55にすぎないと推定している。

超音波の反射波強度は、反応率や密度、接触率などが

図9 金型温度の相対反射強度への影響²¹⁾

複合的に影響している。したがって、これらの影響を分離し、如何に個々の影響を評価していくかが今後の課題になると考えられる。

4. 不良現象解析

4.1 ワイヤスweep

ワイヤスweepに関する研究は、計算機によってワイヤスweepをシミュレートするために行われているものが多い。

Nguyenらは、透明な型、樹脂を用いてワイヤスweepを可視化計測し、樹脂の流速と粘度、ワイヤの長さやヤング率などと、ワイヤスweep量との関係を考察した²²⁾。そしてそれらの値から算出される無次元数を提示し、その無次元数がワイヤスweep量と密接な関係があると述べた。しかしこの無次元数は、実際の半導体パッケージにおけるワイヤスweepと合わず、これは、実際の金型における温度計測およびそこから得られる粘度の推定値が不正確であるためとしている。

王らも同様に、透明な型、樹脂を用いて、樹脂流動およびワイヤスweepの可視化計測を行った²³⁾。そして、コンベンショナル金型においては、ポットに近い上流側のキャビティが充填完了するにつれて下流での流動速度が速くなるために、下流側のキャビティほどワイヤスweep量が大きくなっていることを観察した。

Hanらは、半導体パッケージング材料に70 wt %程度含まれているフィラーの影響を調べるために、透明な型、樹脂を用いた可視化実験を行った²⁴⁾。図10は、実験装置の概要である。しかし可視化実験においては、フィラー量が5 wt %を越えるとワイヤが見えなくなる。そこでワイヤの伸びに起因する抵抗値変化を計測することによって、高含有率の樹脂におけるワイヤスweepを求めた。その結果、フィラー量による粘度変化の影響に比べて、

ワイヤとフィラーとの衝突の影響は無視できるほどに小さいことを明らかにし、フィラーを含む流体であっても一様な流体であると仮定して良いとした。またHanらは別の報告でワイヤスweepとボイドとの関係に言及し、ボイドの大きさがキャビティの厚さ程度まで大きくなる時や、粘度が極めて高い場合のみ、ボイドがワイヤスweepに影響を与えると考察している²⁵⁾。

これらの研究においては、実際の熱硬化性樹脂とは異なり、一定粘度の流体が使用されている。したがってNguyenら²²⁾が述べているように、ここで得られた結果を、粘度が変化する実際のパッケージング材料の場合にそのまま適用するのは難しい。また後述するようにダイパッドやリードの移動もワイヤに影響を与える²⁶⁾。そのため、それらを考慮した複合的な解析への展開が望まれる。

4.2 ボイド

パッケージ内部に空気が存在すると、そこに水分が凝集し、腐食の原因となったり、あるいは基板実装時の熱により気化して膨張し、パッケージを破壊するポップコーン現象²⁷⁾を引き起こすこともある。

市村らは、流動中に樹脂が空気を巻き込むことに起因するボイドに着目した。そして、充填中の平均圧力が高いほど、また使用する樹脂の低ずり速度域における粘度が高いほど、ボイド数が少なくなることを示した²⁸⁾。そしてこの理由として、粘度の高い熔融樹脂は金型壁面に沿って流れやすいので、巻き込む空気の量が少ないためであるとしている。

田中らは、実験によるボイド測定結果と、シミュレーションから得られた樹脂流動パラメータとの比較を行った²⁹⁾。そして、(1)ランナ入口での樹脂注入圧力を高めることがボイド減少に効果的であること、また(2)ランナ入口での圧力を高めるには、動的粘度のせん断速度依存性が小さいこと、広い温度範囲で粘度が高いことが重要であることなどを明らかにした。

熔融樹脂内に取り込まれるボイドの量を減らすということは、ボイドを減少させるための手段の1つであり、上述の2つの研究はその方針に沿ってなされたものであると言える。しかし、充填終了後にキャビティ内の圧力(保圧)を高く保つことによってもボイドの減少は可能であり、上述の研究にはその視点が欠落している。

河野らは、充填後に十分な保圧をかけるためには、(1)キャビティ流入時の樹脂温度を十分に高く保つこと、(2)樹脂粘度を十分に低い状態で注入することの2点が重要であると述べ、カル部に突起を設けて表面積を増やすことで、樹脂の熔融促進を図った³⁰⁾。図11は、河野らが開発したカルと、その効果である。そしてこのカルを用いると、通常金型を使用した場合よりも、ボイドが減少することを確認している。しかし本研究においては、成

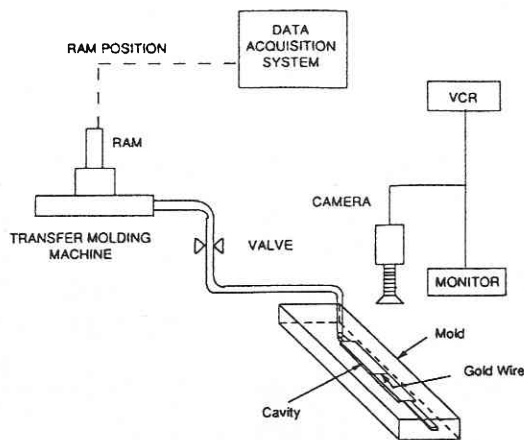


図10 可視化実験装置²⁴⁾

形条件などの他の要因とボイドとの関係には触れられていない。

筆者らは、超音波探査映像装置によるボイドの観察と画像処理技術に基づき、大量のサンプルのボイドの位置、数量を正確に把握できる測定方法を提案し、成形条件の違いによるボイドの発生状況と、型内圧力との関係を検討した³¹⁾。図12にボイドの計測例を示す。解析結果から、(1) 充填終了後のプランジャの保持圧力が高いほどボイドが少ないこと、(2) 多くのボイドは、ゲート反対側に扇状に広がるが、この領域は流動中にフローフロントを形成していた部分であると考えられることなどを明らかにした。

本研究においてはボイドの数ばかりではなく、その分布にも着目している。しかし、そのような分布をとる理由に関しては、十分に考察が行われていない。またボイドと圧力との関係を述べているが、河野ら³⁰⁾が指摘しているように、圧力がかかる際の樹脂粘度も大きな影響を与えるものと考えられる。今後の研究においては、これらの点を総合的に解析していくことが期待される。

4.3 ダイパッド移動

チップ面積が小さく、厚いパッケージを使用する場合には、ダイパッドが多少移動しても問題とはならなかった。しかし今日のチップの大型化、パッケージの薄肉化によって、ダイパッド移動によるチップの露出などの不

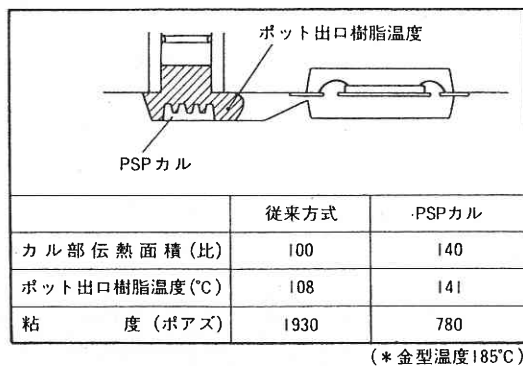


図11 突起を有するカル³⁰⁾

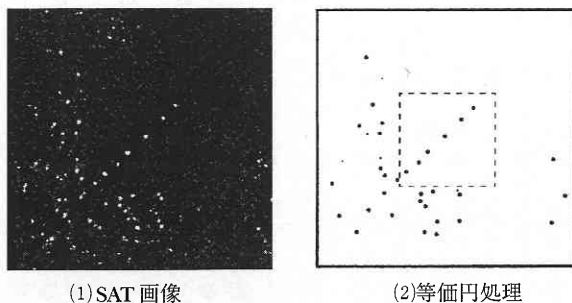


図12 超音波探査映像装置によるボイドの計測例³¹⁾

良現象が、以前よりも生じやすい状況にある。

図13³²⁾は、2種類の樹脂を使用したときのダイパッド移動の様子を、ショートショット法で計測したものである。樹脂の充填によりダイパッドは徐々に移動していくが、特に樹脂Aでは、充填の最終段階で更に大きく移動しているのがわかる。この結果からダイパッド移動は、樹脂の特性やキャビティ内流動現象と密接な関係があるといえる。

安原らは、各部の寸法を比例的に拡大させた金型内に渦電流方式の非接触変位計を組み込み、樹脂流動中のダイパッド移動の様子を動的に計測する手法を提案した³³⁾。図14は実験装置、および金型の概略だが、本金型には圧力センサなども組み込まれており、ダイパッド移動との相関関係を調べることが可能である。しかし比例拡大されたことによる樹脂流動への影響については言及されておらず、したがって通常の大きさのキャビティにおける

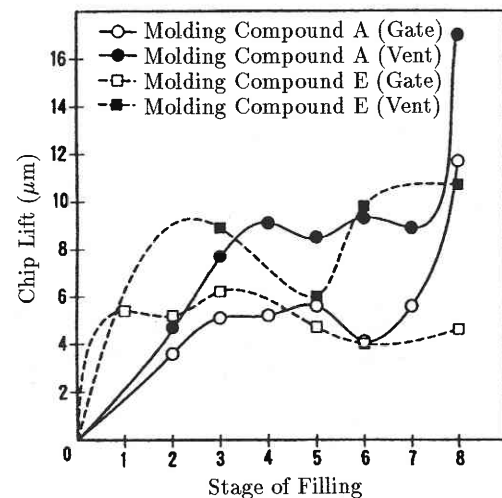


図13 ショートショット法によるダイパッド移動計測結果³²⁾

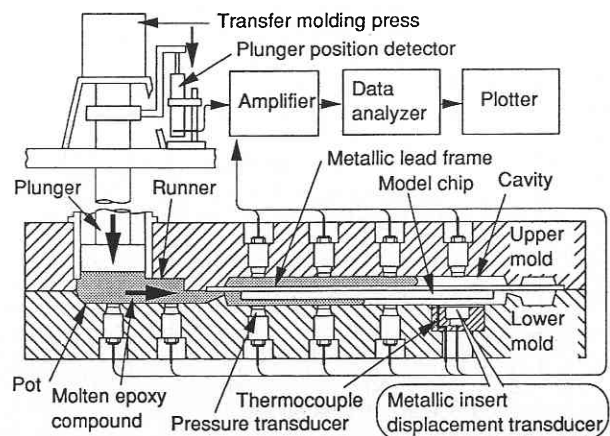


図14 渦電流式非接触変位計を用いたダイパッド移動計測金型³³⁾

ダイパッド移動との関係が不明確である。

吉田らは、樹脂流動中のキャビティ内圧力を、シミュレーションによって計算した³⁴⁾。その結果、(1) 樹脂充填途中では、上下キャビティにおいて圧力差はほとんどないこと、(2) 充填完了直前では充填が先に完了した上側キャビティと下側キャビティでの圧力の差が非常に大きくなっていることを明らかにした。そのために、この圧力差に起因してダイパッドが移動するとしているが、本解析ではリードフレームを介した樹脂移動が考慮されていないために、実際よりも大きな圧力差が計算されている可能性がある。

Downey らは、チップの高さ方向の位置とダイパッド移動との関係を調べた³⁵⁾。そしてチップの高さ方向の位置は、成形条件やゲート形状よりも、ダイパッド移動に対して大きな影響を及ぼすとしている。

以上のようにダイパッド移動には、様々な要素が影響しているが、個々の要素を検討し、ダイパッド移動のメカニズムについて考察を行った研究は見られない。そこで筆者らは、実成形条件下でダイパッド移動を計測するために、永久磁石とホール素子とを用いた新しい計測手法を提案した³⁶⁾。計測原理を図 15 に示す。チップの代わりに同形状の永久磁石をリードフレームに搭載し、金型内部に配置したホール素子で磁束密度の変化を計測する

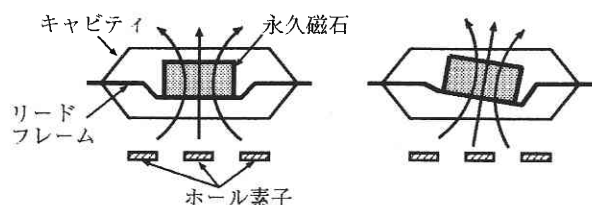


図 15 ダイパッド移動の計測原理³⁶⁾

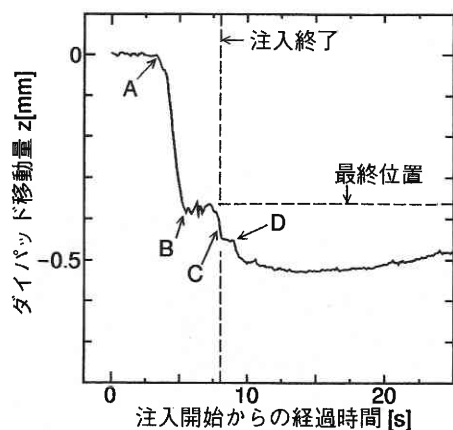


図 16 ダイパッド移動計測例³⁷⁾

ことによって、ダイパッド移動の計測を可能にしている。試作した金型を用いて行った計測実験結果の例を、図 16 に示す。注入時間および型内圧力を変化させて実験を行った結果、(1) 注入時間が長いほど、ダイパッドの移動量が大きいこと、(2) 型内圧力のダイパッド移動量への影響は小さいこと、(3) ダイパッド移動は、樹脂流動に対応する 4 段階によって構成されることなどを明らかにした³⁷⁾。しかし本計測手法には、(1) ダイパッドの厚さ方向の移動は計測可能であるが、傾きの計測は行えない、(2) 金型よりも温度が低い溶融樹脂に永久磁石が覆われることによって、永久磁石の特性が変化し、計測誤差が生じるという問題点がある。これらの問題点を克服し、詳細なダイパッド移動のメカニズムを解明していくことが、今後の課題と言える。

5. お わ り に

多くの半導体製品が溢れている今日の状況は、半導体、特に組み立て工程においては、既に安定した大量生産技術が確立しているという錯覚を与える。とりわけパッケージング工程は、中の半導体素子が違っても、ほとんどの場合は矩形キャビティによって行われる。解析対象としては、これほど単純なものはない。

しかしパッケージングを行う現場では、未だに多くの不良現象に悩まされている。現在のパッケージング技術における課題を、本稿で採り上げなかったものを含めて表 1 に示す。このように多くの課題が未解決のまま残されているのは、半導体素子を十分に機能させるためにパッケージングが行われるという、本分野の特殊性が原因している。例えばパッケージング材料と IC チップ、リードフレームの熱膨張率が大きく異なると、パッケージング後の冷却過程において内部に残留応力が発生する。この残留応力は、クラック発生というパッケージとしての

表 1 半導体パッケージングの各技術分野における研究課題

技術分野	研究課題
材 料	<ul style="list-style-type: none"> ● 適切な評価方法の確立 ● 成形現場・計算機シミュレーションのそれぞれで有用な特性値の計測手法の確立 ● 材料データベースの構築
樹脂流動	<ul style="list-style-type: none"> ● 金型との接触状況、伝熱様態の解析 ● 溶融樹脂の粘度評価技術の確立 ● リードフレーム・ワイヤ近傍における、内部の溶融樹脂流動の解析 ● 内部の樹脂流動が不良現象に与える影響の解析 ● 樹脂流動の積極的な制御手法の確立
成形品評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 各種不良（ボイド、残留応力など）と素子特性との関係 ● 素子側から見た、不良現象の許容範囲の提示

不良の原因となるばかりではなく、ピエゾ抵抗効果によって素子の特性を変化させるという、電気的な不良の原因にもなりうる³⁸⁾。したがってパッケージングを行うことによる素子の影響をも考慮する必要がある、そのことが現象を複雑にしている。

また第2の特殊性の例として、リードフレームやワイヤの存在が挙げられる。このような微細な構造により、内部の樹脂流動は、外側からは容易に窺い知ることのできないものになっていることが予想される。またこの内部の樹脂流動が、本稿で述べたような不良現象と密接な関係を持つことから、今後は樹脂内部の流動現象解析が、実験解析と計算機シミュレーションの双方において重要になってくるとと思われる。

パッケージ形状の推移は図1に前掲した通りであるが、素子によっては更に小型のパッケージが考案され、一部は実用化されている³⁹⁾。また最近ではタブレットの空気含有率を極限まで小さくしたもの⁴⁰⁾や、ボイドが多いとして敬遠されてきた直径数mmの顆粒樹脂をタブレットの代わりに用いる成形法⁴¹⁾が研究されている。これらは、半導体パッケージング技術が未だ流動的であり、今後の更なる研究が切望されていることを示唆するものである。筆者らの解説が、半導体パッケージングにおける樹脂流動や不良現象の解明の一助となれば幸いである。

(1997年6月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 佐伯：成形加工，2，392 (1990)。
- 2) Pecht, M., Agarwal, R. and Quearry, D.: IEEE Transactions on Reliability, 42, 513 (1993)。
- 3) Kuah, T.H., Yeung, P.H., Vath III, C.J. and Hung, K.Y.: Solid State Technology, Nov, 83 (1995)。
- 4) Comdra, L., O'Rear, S., Freedman, T., Flancia, L., Pecht, M. and Barker, D.: IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 15, 640 (1992)。
- 5) ハイブリッドマイクロエレクトロニクス協会 (編)：エレクトロニクス実装技術基礎講座 第4巻，工業調査会 (1994)。
- 6) 松原，安井，小林，森重：NEC 技報，42, 208 (1989)。
- 7) Laroche, D., Nguyen, K.T., Boutin, L. and Bellefleur, E.: Advances in Computer-Aided Engineering (CAE) of Polymer Processing, MD-49, 209 (1994)。
- 8) 山口，横井：成形加工シンポジウム'96，163 (1996)。
- 9) 川村：成形加工'90，151 (1990)。
- 10) Nguyen, L. T.: Proceedings of 43rd Electronic Components & Technology Conference, 375 (1993)。
- 11) 佐伯，杉野，安原，西，金田：成形加工，6，450 (1994)。
- 12) Han, S. and Wang, K.K.: Advances in Electronic Packaging (ASME), EEP 10-1, 73 (1995)。
- 13) 佐伯，金田：高分子論文集，45，691 (1988)。
- 14) 横井，林，平岡：生産研究，39，306 (1987)。
- 15) 横井，村田，山口：成形加工'95，175 (1995)。
- 16) 佐藤，山口，横井：成形加工'96，103 (1996)。
- 17) 佐藤，横井：成形加工シンポジウム'96，159 (1996)。
- 18) 横井，佐藤，山口，村田：型技術，11 (8)，29 (1996)。
- 19) 済木，西竹：精密工学会誌，55，1097 (1989)。
- 20) 済木，西竹，丸茂，坂本：日本機械学会論文集 (A 編)，56, 1311 (1990)。
- 21) 済木，詹，丸茂，宮原，諸岡：日本機械学会論文集 (C 編)，62，353 (1996)。
- 22) Nguyen, L.T. and Lim, F.J.: Proceedings of 40th Electronic Components & Technology Conference, 777 (1990)。
- 23) 王，田中，藤野，秋山：可視化情報，14，107 (1994)。
- 24) Han, S. and Wang, K.K.: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, 18, 744 (1995)。
- 25) Han, S. and Wang, K. K.: Journal of Electronic Packaging, 117, 178 (1995)。
- 26) Manzione, L. T.: Proceedings of 41st Annual Technical Conference ANTEC'83, 77 (1983)。
- 27) Gallo, A.A. and Munamarty, R.: IEEE Transactions on Reliability, 44, 362 (1995)。
- 28) Ichimura, S., Kinashi, K. and Urano, T.: Proceedings of 40th Electronic Components & Technology Conference, 641 (1990)。
- 29) Tanaka, A., Asano, T., Oizumi, S., Niwa, K. and Nishioka, T.: Proceedings of 44th Electronic Components & Technology Conference, 134 (1994)。
- 30) 河野，阿部：型技術，9 (12)，93 (1994)。
- 31) 山口，佐藤，横井：成形加工'96，425 (1996)。
- 32) Omu, S., Maruyama, T., Ishio, T., Narai, A., Sota, Y., Toyosawa, K., Fujita, K. and Maeda, T.: IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part B, 18, 471 (1995)。
- 33) 安原，佐伯，角田，大路：成形加工'95，83 (1995)。
- 34) 吉田，田畑，田中：成形加工'96，429 (1996)。
- 35) Downey, S., Hagen, D., Lim, M.L., Ibrahim, R., Anuar, K. and Malik, U.: IEEE/CPMT 19th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, 262 (1996)。
- 36) 佐藤，横井：成形加工'97，231 (1997)。
- 37) 佐藤，横井：成形加工'97，423 (1997)。
- 38) 三浦，西村：日本機械学会論文集 (A 編)，61，1957 (1995)。
- 39) 日経マイクロデバイス，4月号，44 (1997)。
- 40) Saito, K., Ohno, H., Taruno, T. and Nishioka, T.: Proceedings of 45th Electronic Packaging and Technology Conference, 1230 (1995)。
- 41) Ise, H. and Azuma, K.: NEC Research & Development, 37, 325 (1996)。