

インサート成形時におけるインサートした金属板の大変形挙動に関する検討

山田 高光^{*1}・中野 亮^{*1}・岡部 沙也佳^{*2}・竹中 里穂^{*2}

1. 目的

近年、自動車では燃費向上と安全性向上と電子制御化が進められており、各種のセンサが用いられている。これらセンサはセンシング部の保護と防水・防油性付与のため樹脂で封止されることが多い。このとき生産性向上のため、しばしば熱可塑性樹脂を用い、センサを取り付けた金属端子をインサート成形法にて封止している。熱可塑性樹脂でのインサート成形の課題は、加工時の圧力やせん断力が高く、センシング部へのダメージや金属端子の変形が懸念されることである。金属端子の変形がCAEで事前に評価できれば、製品設計においても型設計においても有効に活用できる。本検討においては金属端子の変形予測技術を構築するため、インサートされた金属板の変形を可視化金型を用いて観察し、変形開始から金型接触後、充填完了時にいたる金属板の変形履歴を可視化した。また、その現象を解析可能とするメッシュの重ね合わせ法を採用し、金属板に大変形が発生する場合の解析手法を開発し、比較を行った。

2. 金属板の型内観察

2.1 可視化実験方法

本検討では、文献¹⁾などを参考にして、図1に示すガラ

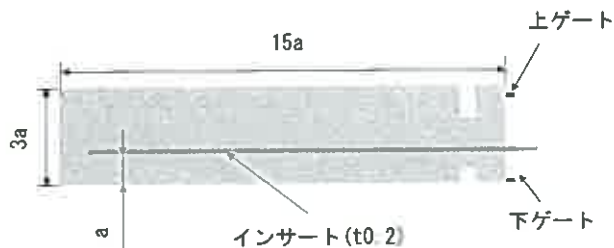


図1 テストピース型キャビティ概要

スインサート金型を製作し、テストピース型インサート成形品の金属板の変形挙動の可視化を行った。特に、変形を観察しやすくする工夫として、下記の点を考慮した。

- ① キャビティ幅と金属板の幅をほぼ同一にし、金属板の側方向からの流れ込みがなく、上下面からの樹脂圧力のみで変形する仕様とした。
- ② 2点ゲート間に金属板を設置し、ノズル部から、各キャビティ部の2点のゲートまでのランナー長を変更し、下側のキャビティに樹脂が早く到達できるようにした。また、金属板の変形を大きく取れるように、金属板はキャビティ高さ方向の中央位置からやや下にずらした位置(上下:2対1の割合)とし、金属板も片持ち支持とした。

表1に実験で使用した条件を示す。

2.2 可視化実験結果

図2に可視化した金属板の変形挙動を示す。高速ビデオで撮影した映像から作成した1成形サイクル内の連続画像である。①はキャビティに流入する前、②は樹脂がキャビティの30%ほどに充填した状態、③は60%ほどに充填した状態、④はほぼ充填が完了した状態を示している。

金属板下側に樹脂が先行して流入するため、上下に印加される樹脂圧力の差から、金属板が上側に変形する。②の段階では上側の金型壁面に接触するほど変形している。

②では下側の樹脂が先行していたが、③では上側の樹脂が追いつき、②で狭くなった流路を拡げようとするため上側から金属板に印加される圧力が高くなり、金属板は②に比べ下側に変形している(変形が戻っている)。

金型には圧力センサを設けており、その位置における圧力が立ち上がった時点を樹脂到達時間として、シミュレー

表1 可視化実験条件

使用樹脂	PC(三菱ガス化学製:S 3000 R)	
成形条件	樹脂温度	310℃
	金型温度	90℃
	充填時間	1.8 sec
インサート物性(りん青銅)	ヤング率	120 GPa
	ポアソン比	0.34
	板厚	0.2 mm

^{*1} Yamada, Takamitsu/Nakano, Ryo
東レエンジニアリング(株)
大津市園山 1-1-1 (〒520-0842)
takamitsu_yamada@toray-eng.co.jp

^{*2} Okabe, Sayaka/Takenaka, Riho
(株)デンソー
刈谷市昭和町 1-1 (〒448-8661)
2013.5.9 受理

ション結果との比較に使用する。

なお、可視化実験では、保圧・冷却工程中の金属板変形挙動も観察したが、充填完了時点から金属板の位置はほとんど変化しなかった。その理由として、保圧工程中は、すでに金属板全域が樹脂で満たされており、キャビティ形状の特徴からわかるように、キャビティ全体の保圧の効きが良いと考えられ、金属板上下面に働く圧力荷重の差が小さいためと推察した。

3. 数値解析手法

3.1 基礎方程式

樹脂部（非等温非ニュートン粘性流体）の基礎式

樹脂部の基礎式は、質量保存則、運動量保存則およびエネルギー保存則となる。3次元の場合を式1~3にそれぞれ示す。粘度式は、式4のCross-WLF式を用いた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla p = \mu \Delta \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + C_1 (\dot{\gamma}_0 \dot{\gamma})^{c_2}} \cdot \eta_0 = C_3 \exp \left(\frac{-C_4 (T - T_{ref})}{C_5 + (T - T_{ref})} \right) \quad (4)$$

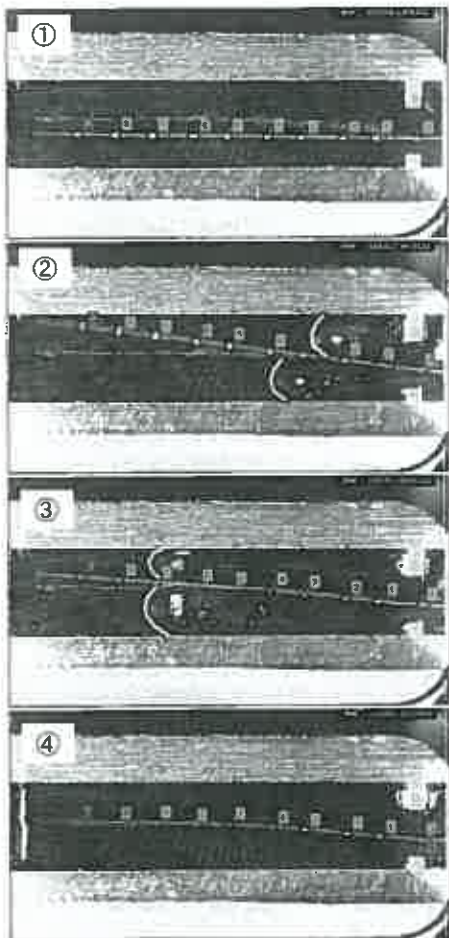


図2 インサート変形観察写真

v: 流速, ρ: 密度, t: 時間

C_v: 比熱, T: 温度, k: 熱伝導率, x, y, z: x, y, z のそれぞれの方向

η: 粘度, γ̇: せん断速度, C₁: C₂: C₃: C₄: 係数, T_{ref}: 参照温度

金属板部（線形弾性体）の構成方程式

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (5)$$

σ: 応力, E: 弾性率, ε: 歪

3.2 解析手順

解析手順について図3のフローチャートを元に説明する。

(ステップ1) 充填進行～圧力計算

Nステップ目の充填済み領域内において、式3に示すエネルギー保存則を解いて温度分布を算出し、その分布を元に式4から粘度分布を算出する。次に式2から圧力分布を求め、金属板に掛かる圧力荷重を算出する。

(ステップ2) 金属板変形解析～金型との接触判定

金属板の構造解析を行い、N+1ステップ目の金属板の状態を予測する。この時、金属板と金型外壁との内外判定を行い、金属板が金型を突き抜けていると判断されたときは、金属板に強制変位を付与して、金型内に押し戻す。

(ステップ3) 流路更新

N+1ステップ時の金属板の予測形状からNステップ時のキャビティ部のメッシュを更新し、流路更新を行う。

次に、ステップ1に戻り、さらにフローフロントを進めながら、充填完了までを実行する。

解析の効率面から考えると、金属板の変形量が微小であれば、流路更新は無視して、必要な時間での充填解析の途中結果から、金属板の構造解析を行い、変形量を評価する方が効率的である。

しかし、今回の実験結果からわかるように、金属板の変形量が大きくなると、樹脂の流路が初期状態から時々刻々と大きく変化し、流路変化を無視できないことから、ステップ3で流路更新を行うこととした。

インサート成形CAEにおいて、金属板に発生する歪が微小であっても、本金型のように金属板が薄くて片持ち支持の場合は金属板先端の変位は大きくなる。金属板が金型と接触し、金型内で金属板が変形する場合は、特に接触を

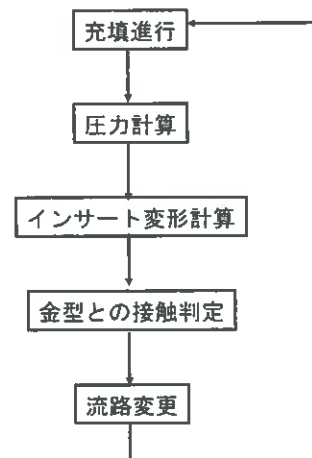


図3 解析フローチャート

考慮した大変形解析が必要となる。

3.3 メッシュ重ね合わせによる流路定義

流路変更方法として、メッシュ重ね合わせ手法を採用した経緯を説明する。開発初期段階では、まず図4に示すようにR法（節点移動法）による流路更新システムを構築した。この方法によれば、NステップからN+1ステップ間での金属板の変形量を金属板部のメッシュへ強制変位として与えて構造解析した後のキャビティメッシュの節点情報を利用すればよい。この方法の利点としては、メッシュ形状が変形しても、要素一節点の構成情報は変化しないため、解析条件の再利用が可能である。ただし、図5に示すように、節点移動を伴うことから、金属板の移動が大きくなると、要素の変形が大きくなりすぎ、計算が破綻し、解析が続行できなくなった。

別の流路変更方法として、テトラ要素によるリメッシュ

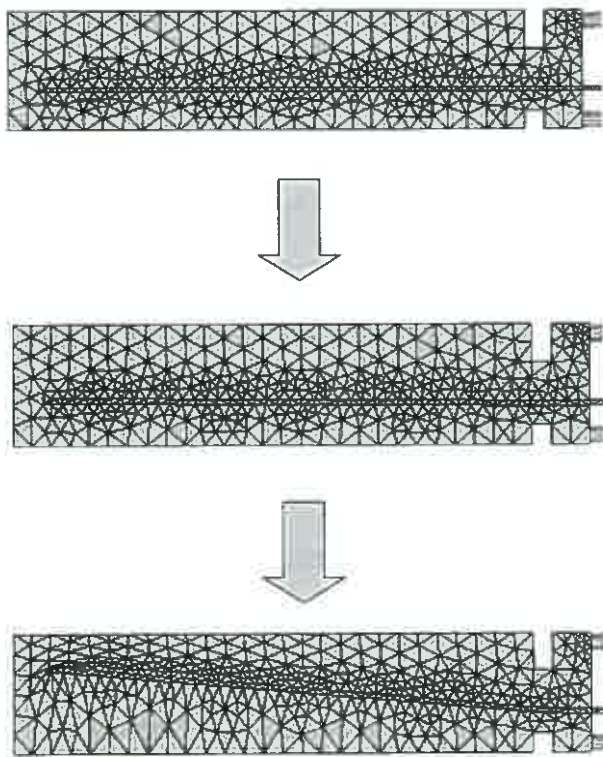
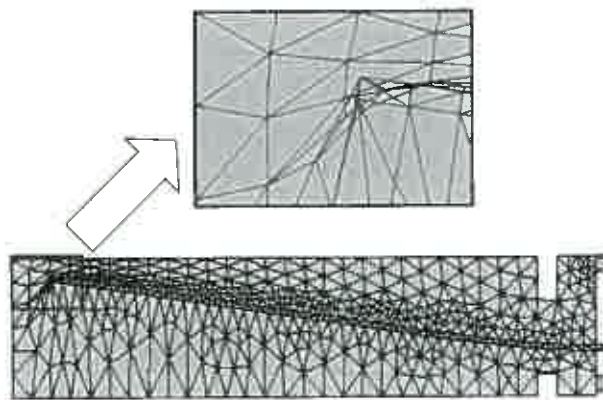


図4 R法による流路更新



変形量大になると要素品質が悪化

図5 R法の問題点

法も検討したが、車載用の電子部品は小型で複雑形状であり、金属端子同士の間隔が短い場合が多く、金型と金属端子が接触した状態に至った場合、メッシュ生成が困難であると判断し、今回は採用を見送った。

ここで、図6の模式図でメッシュ重ね合わせ法について説明する。まず、キャビティ空間全体と金属板、それぞれでメッシュ生成を行っておく。

1) 充填解析に使用するNステップ目のキャビティ部の流路形状算出にあたり、Nステップ目の金属板の計算モデルと、キャビティ空間全体モデルとで、要素の位置関係を調べ、重なっている領域は金属板が存在している領域と判断し、キャビティ全体モデルから、該当部の要素を取り除くことでキャビティ部計算モデルを生成する。N-1ステップまでに得た充填解析結果を元に、フローフロントを進めて、圧力計算を行う。

2) 1) で得た樹脂圧力を元に、金属板計算モデルの構造解析を行い、N+1ステップ目の変形状態を予測する。

3) 2) で得た金属板の変形量をNステップ目のキャビティ計算モデルに付与して、キャビティ部計算モデルの変形状態を計算する。この作業は、図7に示すように、金属板の動作によりキャビティ計算モデル内で質量を保存させるために必要な付加流量を計算するために必要である。この付加流量を考慮する/しないかで、充填後期には誤差が約15%増加することがわかった。

4) キャビティ全体モデルをN+1ステップ目の金属板計算モデルから、N+1ステップ目のキャビティ部計算モデルを求める。次に、Nステップ目の結果をマッピングし(付加流量も考慮)、次ステップへ移る。

3.4 収束性改善検討

本連成手法は流動と金属板変形計算を交互に行う弱連成であるため、すでに文献¹⁴⁾で指摘されているように、計算手法自体に不安定性がある。本検討においても、金属板が金型と接触するあたりから、図8に示すように金属板計算モデルが大きく振動する現象が発生した。

この不安定性を改善するため試行錯誤を実施したが、最終的にN+1ステップ目の金属板の変形量を確定するにあたり、既存の充填済み領域内で、金属板変形量とキャビティの圧力分布が収束するよう反復したり、圧力荷重の増分方

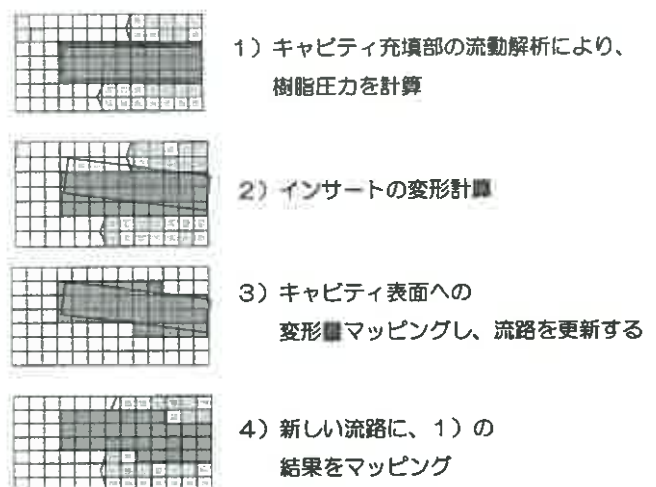


図6 メッシュ重ね合わせ法

法を工夫することで対処した。

4. 実験結果との比較

4.1 シミュレーション結果

図9に、金属板が金型に接触する直前の変形量を解析結果との比較したものを示す。実機の金属板変形およびフローフロントの位置が実験とも一致している。図10に、金属板先端の変形量の時系列結果を示している。数値は実験で得られた最大値で規格化している。

キャビティ全体モデルは、直交ボクセルでモデル化して

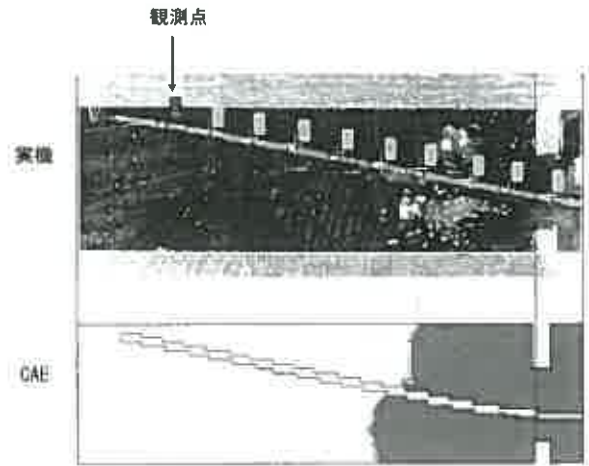
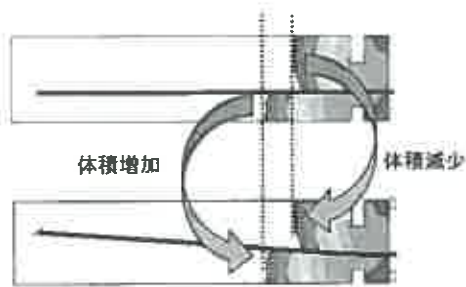


図9 実機とシミュレーション比較



流路が広がる: 充填体積が増加
 流路が狭まる: 充填体積が減少
 付加流量の算出方法
 インサートの変形分をキャビティメッシュに付与し、各要素の体積変化を算出

図7 流路変更に伴う付加流量

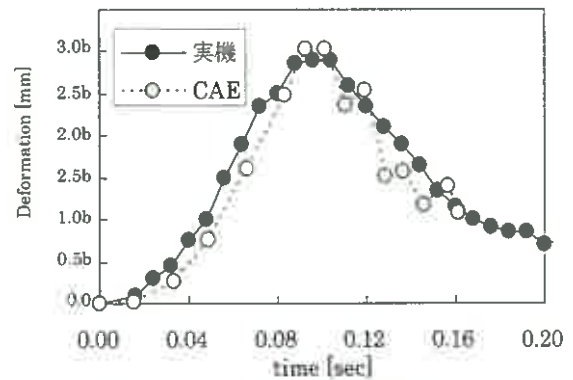
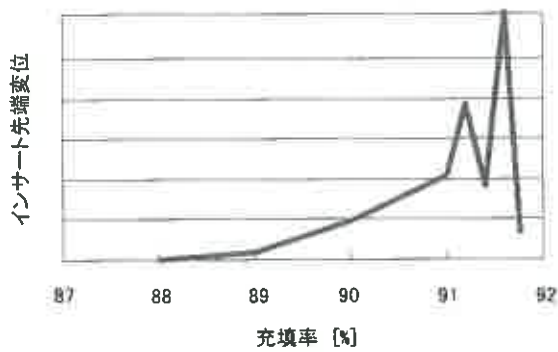


図10 インサート変形経時変化



インサート先端が大きく振動

図8 弱連成解析の問題点

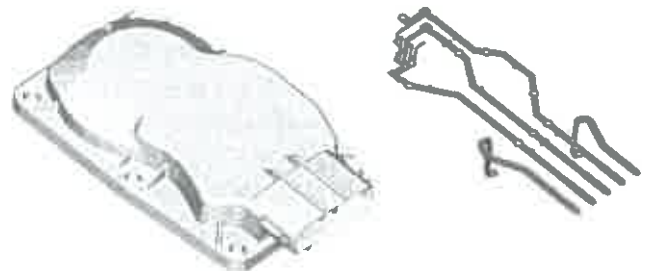


図11 製品外観とインサートターミナル

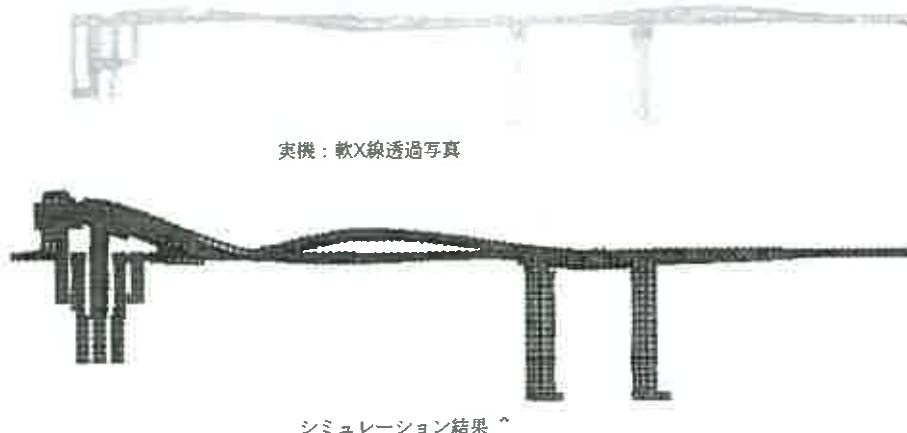


図12 実製品での検証結果

いるため、金属板の変形が大きくなるほど金属板の計算モデルとキャビティ全体モデルとのなす角度が大きくなる。これに伴って樹脂圧を金属板へ付与する時や、Nステップ目の充填解析結果を次ステップの充填領域計算モデルへ結果マッピングした時の誤差も大きくなるため、計算結果が不安定になる。図10にて金属板の変形が増加する時よりも減少する時の方が計算の振動が増大しているのは、この誤差を蓄積しているためと考えられる。

5. 実機における精度比較

開発したインサート成形解析手法を図11に示す実際のセンサカバーに適用した。図12に、X線透過により金属端子の変形を可視化した写真と、解析による変形予測結果との比較を示す。定性的な傾向は一致しているものの、部分的に変形モードが一致していない箇所がみられる。実機金型においては、成形プロセス中での金属端子の動作を観察していないが、考えられる要因として下記が挙げられる。

- (1) 金属端子の金型内での拘束状態が解析と異なっている
- (2) 保圧力および熱収縮による金属端子の変形を考慮していない。

6. ま と め

今回、インサートした金属板変形の可視化実験とシミュレーション方法を開発し、下記のことがわかった。

- (1) 可視化実験では、充填初期から充填完了までの金属板変形をビデオカメラで撮影し、時々刻々と変化する金属板

変形の定量化に成功した。

- (2) 本金型においては、金属板の変形は金属板上下面に加わる圧力荷重の差で決まり、金属板が金型に接触後、上部のフローフロントが下部に追いつくことから圧力差が小さくなることによって金属板の変形が減少することが観察できた。保圧工程中はほぼキャビティ内における保圧の効きが良いことから、金属板の変形に変化はほとんど見られなかった。

- (3) 金属板の変形に伴い、逐次流路を更新する手法により、実験結果と良好な一致を得ることができた。

- (4) 実機型との比較においては、保圧力や熱収縮による誤差要因も考えられることから、今後一層の精度改善に努めていく。

参 考 文 献

- 1) 横井秀俊, 村田泰彦, 坂本一郎: 成形加工, 6(5), 349 (1994)
- 2) 須賀康雄, 中野亮, 多田和美, 奈良崎則雄, 吉川秀雄: 流動解析—プラスチック成形 (日本塑性加工学会編), コロナ社, 52(2004)
- 3) 張群, 久田俊明: 流体・構造連成有限要素法における連成手法に関する検討, 日本機械学会論文集 (A編), 67巻, 662号(2001)
- 4) 岡本真史, 河合浩志, 吉村忍: 流体構造弱連成解析における流体の不安定性について, 計算力学講演会講演論文集 2004(17), 479(2004)