3次元射出成形 CAE システムの開発

中野 亮^{*1}・坂場 克哉^{*1}・澤田 聡^{*2}
結城 高志^{*1}・須賀 康雄^{*3}

1. はじめに

近年、IT 技術の著しい進歩に呼応して、樹脂製品設計や金型設計の分野でもデジタルエンジニアリングの活用が急速に進んでいる。特に韓国や台湾、中国において見られるように、3次元CAD/CAM/CAE技術を基本とした製品開発の仕組みを構築することによって競争力の源とし、短期間で品質の良い製品を低コストで開発・生産する企業が台頭してきている。国内においても自動車、電機、雑貨などあらゆる分野で3次元データをベースにした製品開発が定着してきた。3次元情報をいかに有効活用して、高品質な製品や金型の効率的な設計開発につなげていけるか、という点が大きな課題となっている。

射出成形CAEは1970年代から実用が始まった。当初は樹脂の流路をあらかじめ予測し、2次元に展開して充填の進行や圧力を求める展開法が用いられていたが、やがて有限要素法などの数値離散化手法が取り入れられ、シェル構造モデルによって複雑な形状が解析できるようになった。シェル構造による形状表現は、肉厚変更やリブ追加といった検討が簡単に行えるメリットがある反面、解析用の形状モデルを設計に用いるCADデータと別個に作成しなければならないという課題があった。このため、とすれば

CAE解析は設計の流れから分離しがちとなり、解析担当者が懸命にモデルを作成してもすでに開発が進み、形状変更されていたという事態も見られた。

今回報告する技術は、射出成形品の設計開発において3次元CADと密接に連携し、3次元形状を薄肉シェルに変換することなく、3次元形状のまま手間をかけずに解析することを可能にした技術である。以下、技術開発の狙いと技術内容、ならびに社内外での活用事例について報告する。

2. 開発の狙い

射出成形CAEは図1に示すように2次元から3次元へ開発が進められてきた。われわれは2次元シェル構造モデルによる充填～収縮・そり解析システムの開発から取り組み、3次元システムへの拡張を行った。ここで3次元へ拡張した主な狙いは以下の3点である。

- 1) 形状モデル二重化の解消による効率化
- 2) 3次元形状表現による解析精度の向上
- 3) 3次元形状の設計検討による製品品質の向上

1) は3次元化の最も大きなドライブフォースとなった点である。前述のとおり設計開発の流れに乗るためには、どうしてもボトルネックとなる形状モデル作成の手間をなくすことが必要となる。

2) は3次元化のもう一つのメリットである。図2に示すように、薄肉シェル構造では表現できない段差部や厚肉部、コーナー部、分岐部などの3次元形状をそのまま表現できることから、蓄熱や収縮の局所的なふるまいを正確に再現することが可能になる。

また、3) は2) と関連する。例えばコーナー部のR（アール）形状や肉厚方向のゲート位置など、3次元解析によって3次元的な形状設計検討が可能になる。

筆者らは特に1) の狙いに注目し、3次元CADデータの品質に関わらず、特別なノウハウも必要とせず形状データをほぼ全自動にて作成できる技術の開発を行った。

*1 東レ(株)CAEソフト事業部
大津氏園山 3-3-1 (〒520-0842)

*2 東レ(株)エンジニアリング開発センター

*3 東レ(株)ACM事業プロジェクト
2003.7.9 受理

*1 Nakano, Ryo

*1 Sakaba, Katsuya

*2 Sawada, Satoshi

*1 Yuki, Takashi

*3 Suga, Yasuo

図1 射出成形CAEの変遷

段差を有する機構部品

厚肉部を有するギア部品

図2 3次元解析を要する形状の例

また、2)、3) に関しては、3次元解析を行う際に解析実行者の熟練度や知識に負う所が少なく、誰が解析しても安定して精度の良い解が得られるロバストな技術の開発を行うことを狙ってソルバーの開発を行った。以下、開発してきた技術内容を述べる。

3. メッシュ作成技術

3次元解析を実用化するためには、3次元CADとリンクして確実にメッシュを生成しなければならない。3次元CADデータを利用した数多くの3次元自動メッシュソフトが開発されているが、メッシュ生成手法としては図3のように大別できる。

マップトメッシュ法：メッシュ対象物を4角形または6面体に分割し、各辺に分割数を定義して節点・要素を生成する。

アドバンシングフロント法：境界上を分割し、その後内部に向かって節点・要素を生成する。

ボクセルメッシュ法：対象物を包含する領域中にXYZ軸に平行な走査線を走らせ、格子状のセルを定義し、セルが対象物に含まれる場合に要素とする。

アドバンシングフロント法は、CADデータがあれば要素1辺の平均的な大きさを入力するだけで、表面近似精度の良い4面体要素を作成することができる。手間という面から考えると、もっとも簡単なメッシュ生成方法であるが、歪んだ要素が生成されたり、4面体要素の作成に関しては、要素数の制御が困難となる。さらに、対象形状が少し複雑(肉厚変化が急激な部分を有するなど)になると、内部に向かって要素を発生させていく段階で生成不能となることが多く、安定したメッシュ作成が難しい。また、CADデータの品質にも大きく影響されるという課題がある。

マップトメッシュ法は、表面近似精度、要素品質に関して最も優れているが、そのために対象物を6面体で分割定義するといった膨大な手間がかかる。

ボクセルメッシュ法は、走査線のピッチ間隔を定義するだけで簡単に要素が作成できるが、対象物の表面が階段状になり、形状の近似精度に課題がある。

著者らは設計・生産の現場で使える射出成形CAEシステムという視点から、多少の不具合がある3次元CADデータからでも高速にメッシュが作成でき、かつ振れのない要素が実現されるボクセル法を採用した。

さらに図4に示すように形状近似精度の悪さに対応する

	マップトメッシュ法	アドバンシングフロント法	ボクセル法
タフさ	○	×	○
手間	×	○	○
メッシュ制御	○	×	○
精度	○	○	×

図3 メッシュ生成方法

図4 「3D TIMON」のメッシュ生成方法

図5 メッシュ分割例

ため、最外節点をCADデータの表面に移動させる工夫を施したメッシュ生成技術を開発した。内部節点はラプラシアンスムージング法により移動し、要素のつぶれを緩和している。

2次元ではモデル化が困難な自動車形状製品、偏肉部を有するコネクタ、携帯電話外装部品に対して開発した自動メッシュモジュールを適用した例を図5に示す。形状が複雑であるため、シェルでモデル化した場合は数日の工数を必要とする自動車部品に対しても約6分でメッシュ作成が終了し、実際の解析に取り掛かるまでの工数の大幅な短縮が実現した。

4. 3次元ソルバー開発

3次元射出成形CAEでは、樹脂が溶けて・流れて・冷

却されて・収縮変形する過程をソリッド要素で計算していく。今回開発したシステムでは、射出成形プロセスで樹脂が受ける現象を定常粘性流動，エネルギー保存則，3次元繊維配向方程式，材料物性複合則などに基づき，コントロールボリューム法などを用いて式(1)～(7)のように定式化されている^{1), 2)}。

充填解析では，非圧縮・非ニュートン粘性流れを仮定し，ダルシー則に従うポテンシャル流れ（流速の各成分が，その方向の圧力勾配に比例する）を用いた。このとき，式(4)により求めた流動コンダクタンス分布を用いる形式に拡張した。

保圧冷却解析は，式(3)をもとに圧縮性を考慮した流体方程式に拡張し，PVT 状態式を新たに加えた系で，温度・圧力・比容積を計算する。強化繊維の配向解析には，Tucker 式を採用した³⁾。
ダルシー則

$$u_i = -S \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

粘性流動

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

連続の式（非圧縮性）

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

ここに u_i は流速成分， p は圧力， μ は粘度である。 S は流動コンダクタンスであり次式より定める。

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x_j \partial x_j} = f(\mu, x_k) \quad (4)$$

エネルギー保存則

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)^2 \quad (5)$$

ここに T は温度， k は熱伝導率， C_v は定積比熱， t は時間である。

強化短繊維の配向解析では次の Advani and Tucker の式⁴⁾を用いて配向関数の分布を求める。

$$\frac{Da_{ij}}{Dt} = F(\omega, \gamma, C_i) \quad (6)$$

$$a_{ij} = \int P_i P_j \Psi(P) dP \quad (7)$$

ここに a_{ij} は配向テンソル， ω は渦度， γ は変形速度， C_i は干渉係数， P_i は繊維方向余弦， $\Psi(P)$ は配向確率密度関数である。

3次元化を実用化する上の課題は，解析時間の増大と計算の安定性である。本技術ではこの課題に対して式(1)，

図6 節点数と解析時間 (PentiumIV 1.7 GHz, メモリ 1 GB)

図7 肉厚方向1層ソリッド分割の例

式(4)で表される一般化ダルシー則を開発して適用した。この技術は日・米・欧他で特許化されており，2次元に比べて自由度が増大する3次元解析における高速化と安定性を実現している。図6にPentiumIV 1.7 GB/メモリ 1 GBでの節点数に対する解析時間を示す。

さらに，本解析技術の特徴として，図7に示すように肉厚方向に1層に分割された3次元メッシュ分割に対しても，メッシュを細分割することなく計算可能とした点があげられる。通常，射出成形では温度や粘度など肉厚方向に大きな変化が生じるため，肉厚方向に多くの計算点を設ける必要がある。本解析技術によれば，厚さ方向に1層分割が生じた場合，自動的にシェル要素と同等のコンダクタンスを与え，肉厚方向に層分割した1次元熱伝導解析³⁾を行うことによりシェル要素と同等の解析が可能となった。

以上の解析理論に基づき，金型冷却⁵⁾，充填から収縮・そり変形までを3次元で解析可能な射出成形CAEシステム「3D TIMON」を開発した。図8に開発したシステムの構成とI/O関係を示す。

5. 適用事例と効果

5.1 樹脂ユーザーへの製品開発支援

当社は樹脂メーカーとしてナイロン，PBT，PPS，POM，LCPといった各種エンブラおよびABS樹脂を製造，販売しているが，樹脂ユーザーと共同で製品開発を推進するために，1983年よりCAEを活用した製品設計，金型設計，成形条件，材料選択の最適化，提案をおこなっている。最近では年間250件以上のCAE解析を実施しているが，そのうち約半数が本技術により開発した3次元射出成形CAEシステム「3D TIMON」を使用した解析である。

主な解析内容は，ウエルド位置，射出圧力，必要型締め力，充填バランス，そり変形等を適正化するための製品設

図8 「3 D TIMON」システム構成とデータ I/O

図9 パワーモジュールの解析モデル

計（肉厚，リブ等）と金型設計（ゲート，ランナー，冷却管等）の検討である。また，「3 D TIMON」単体でなく，構造解析など必要なソフトウェアと組み合わせて，ガラス繊維配向による機械的物性の異方性を考慮した成形品の熱変形・熱応力の検討や，インサート成形品のそり変形の検討もおこなっている。

本3D射出CAEでソリッド要素を使って解析するメリットとして，メッシュ作成時間の短縮と厚肉形状の忠実なモデル化による解析精度向上が挙げられる。筆者らは本3D射出CAEを用いて解析する場合，使用する要素（シェル要素，ソリッド要素）は製品形状，解析内容によって適宜使い分けている。最近では，開発のスピードアップ，製品の複雑化・高機能化に対応するため，半数以上の解析でソリッド要素を用いている。

また，製品の形状設計データの大半は3D CADデータで受け渡しされ，ソリッド要素の利用が増える一因となっている。本3D射出CAEではCADデータとしてSTL形式ファイルを利用するため，製品設計に対応した様々なCADシステムを受け手側で準備しなくても，CADデータの授受がスムーズにできるというメリットもある。

「3 D TIMON」の適用事例として，パワーモジュールのそり解析を示す。図9に概略の解析モデルを示す。パワーモジュールは比較的厚肉の金属部品をインサート成形している。このようなインサート成形品では，樹脂と金属の線膨脹差によってそり変形が発生する。

インサート成形品のそり変形を解析によって予測するためには，ソリッド要素によってインサート金属と樹脂を正確にモデル化することと，インサート金属の変形も考慮し

図10 底面そり変形量の比較

図11 筐体のゲート位置最適化による型締め力低減

てそり解析を実行することが必要である。これは本3D射出CAEを用いることによって実現された機能である。

図10に底面そり変形量の解析結果と実測結果の比較例を示す。本3D射出CAEを用いてインサート金属を考慮したそり変形解析をおこなうことによって，そり変形量の予測値は実測結果とほぼ一致した。また，そり対策案を本3D射出CAEで検討して，ゲート点数や成形品形状を変更することにより，そり変形量スペックを満足することができた。

また，図11は電子機器筐体に対して型締め力の低減を目的としてゲート位置の最適化を行った例である。最適化計算エンジンとしては「iSIGHT」を用い，本3D射出CAEと組み合わせて図12に示す最適化システムを構築した。ゲート位置は図11の網ふせ部分の範囲で変更したが，当該範囲内のFEMメッシュ上の既存節点をゲートとすることとした。したがって設計変数が離散値となることから，最適化手法として遺伝的アルゴリズムを用いた。自動最適化計算には43時間を要し，結果として型締め力を約1/2に低減するゲート位置最適解が得られた。このような最適化計算はそり量低減やウエルド位置制御等にも活用している。

5.2 社外ユーザーによる活用状況

現在，本3D射出CAEソフトウェアのユーザーの分野としては，自動車，家電OA，電気電子部品，その他に大別され，国内約120社においてライセンスが稼働している。主な利用者の業務と活用内容について，表1に示す。

表1に示すように，研究，生産技術，型設計，製品設計とそれぞれ活用するシチュエーションに応じて活用の目的と内容が異なってくる。CAEをエンジニアリングツールとして活用し成果を上げていくために，それぞれの目的に応じた使いこなし（例えば入力データの品質管理や出力の解釈など）が工夫されている。

図 12 ゲート位置最適化システムの構成

このように、製品設計や生産技術などそれぞれの利用者が検討、検証を実施することによって、例えば表2に示すような効果を上げることが期待できる。

具体的な活用事例を表3に示す。CAE と他の対策を組

図 13 3次元モデリングをベースとした製品開発システム例(山形カシオ株式会社, 型技術, '02, 5月号より)

み合わせた結果、サイクルタイムの短縮などにより、大幅なコストダウン効果が得られている。

図13に3次元CADで作成されたSTL データをベースとした製品開発システムの構築例を示す⁵⁾。この例では、STL データをもとにラピッドプロトタイピングによる形状確認と、CAE 解析による成形性の確認を同時に行っている。さらにこれらの3次元データを用いることにより、

表 1 「3 D TIMON」の活用ユーザーと活用内容

CAE の活用ユーザー	目的	活用内容
生産技術研究者 (金型内可視化ツール)	不良原因の究明 新規成形法の研究	そり、ヒケ不良原因と対策立案 射出圧縮、インサート成形などの可能性検討
生産技術者 (品質管理・改善支援ツール)	金型方案の初期検討 生産コスト見積り 金型手配チェック 成形不良対策	ショートショット、ウェルドライン、ゲート位置 成形機サイズ（型締め力予測）、サイクルタイム推定 充填不良、ガス焼け、ウェルドライン、バリ ウェルドライン、ヒケ、そり
金型設計者 (金型設計支援ツール)	冷却配管の検討 多数個取り検討 成形不良の予測	金型温度分布の予測及び制御、熱溜まりの有無 ランナーバランス、キャビティ配置 ガスベント位置、ヒケに関するチェック、そり傾向の把握
製品設計者 (形状決定支援ツール)	製品形状の検証 他の FEM 連携	充填圧力と肉厚の相関関係、リブ厚み、配置とそり変形 繊維配向、そり、初期歪みを想定した解析

表 2 「3 D TIMON」の適用効果

CAE 適用効果	内 容
製品設計上のミス防止 (設計変更チェック)	充填不良、ウェルド位置、ヒケ発生の予測と改善
製品コストの削減 (サイクル短縮、成形機ダウンサイジング)	熱溜り予測、製品肉厚やランナ径の適正化の実施 ゲート位置、フローリーダの検討による射出圧力低減
金型コストの削減 (設計・製作ノウハウの確立)	ヒケ、外観不良などの事前予測などの実施 ゲート位置、径の検討、金型ダウンサイジング
開発期間短縮 (トライ回数の削減)	設計変更、金型改造、修正などの回数を低減 成形条件などの技術ノウハウの共有
エンドユーザーの説得ツール	形状変更の必要性などのプレゼン・ツール

表 3 「3 D TIMON」の適用例

製 品	目 的	内 容	効 果
携帯電話筐体	成形サイクル短縮	肉厚、ゲート配置、ランナー径適正化	サイクル 40% 減
クリーナ筐体	成形サイクル短縮	熱溜り予測による冷却管配置見直し	サイクル 30% 減
自動車カウルグリル	型締め力低減	ファミリー取りのランナーバランス改善	型締め 35% 減
ハウジング部品	製品、金型コストの低減	ゲート数削減	3 プレート 5 点ゲート→ 2 プレート 1 点ゲート
一般	平均トライ回数削減	新規製品への「3 D TIMON」適用	平均トライ回数を 1/3 へ

上流側顧客と事前に詳細な設計検討を行うことが可能となり、手戻りの少ない効率的な製品開発を実現している。

6. 今後の開発方針

以上、筆者らの開発してきた3次元射出成形CAEシステムの技術内容と活用事例を報告した。今後の開発方針として、筆者らはさらに以下のような展開を検討している。

- 1) 収縮・そり解析精度の向上
- 2) より簡便・高速なシステムへの進化
- 3) 評価ノウハウ組込みによる実用性の向上

1) 射出成形CAEの精度は3次元化によって一つのステップを上げることはできたが、計算容量の限界からくる解像度の問題などのため、常に十分な実用精度が得られるとは言い難い。特に収縮・そり解析に関して定性的評価の域を出ないことが多く、解析アルゴリズムだけでなく、樹脂データの取扱い、形状モデル、射出条件の入力方法なども含め、精度向上を検討していく。

一方で、2) 簡便化、高速化の要求はとどまるところを知らない。特に設計検討を行う場合、短い開発期間の間に多数の条件変更を解析するためにもっと早く、もっと簡単に間違いなく解析できることが要求され、絶え間ない技術開発が必要となっている。3次元化による解析自由度数の増加と、自動最適化計算などによる解析ケース数の増加が今後も課題になるものと考えられる。

3) はCAE解析結果からいかにして成形不良を事前に察知し、的確な対策を打つかという技術であり、CAE導入の効果を出せるか否かがここにかかっている。個々の問

題解決に対する蓄積を進め、システムとして具現化することを今後検討したい。

7. ま と め

3次元CADデータを基本とする3次元設計の普及を背景として、筆者らは3次元データを活用して効率的、かつ高精度に設計検討を行うことができる3次元CAE技術を開発した。

本稿にて報告した3次元射出成形CAEシステムは「3D TIMON」として市販され、約120社で日々の設計開発業務に活用されている。また、筆者ら自身も年間100件以上の製品開発に社内活用し、成形不良低減のための金型設計検討などを実施して効果を上げている。

このように、3次元CAEの活用は今後も進んでいくものと考えられる。今後、さらに収縮・そり解析精度の改善や簡便性・高速化の追求、実用性の向上を図り、樹脂製品設計、金型設計の競争力強化への一助となることを願っている。

参 考 文 献

- 1) 坂場, 中野, 田中: 成形加工, **10**(5) (1998)
- 2) Nakano, R. and Tanaka, T.: PPS-14, 321 (1998)
- 3) 岡田, 速水, 中野: 成形加工シンポジア, 75 (2002)
- 4) Advani, G. and Tucker III, L.: *J. Rheology*, **31**(8), 751 (1987)
- 5) 大井: 成形加工, **14**(9), 566 (2002)
- 6) 高谷: 型技術, **16**(6), 55 (2001)