C A E

下 舞 健*

1. はじめに

エンジニアリングプラスチックが、その優れた性能のために構造材料や精密部品等にも大量に消費されるようになり、それらの成形技術も著しく向上している。プラスチック成形加工業界において、CAEは合理性（製品の品質向上、製造コストの低減、製品開発リードタイムの短縮等）追求の手段として活用されている。そのなかでも特に射出成形品の反り量を事前に知ることは、開発期間の短縮や品質の高い成形品をつくる上で最も重要であり、予測技術の精度向上は、設計者や成形技術者から強く要求されている。ここでは射出成形CAE、特に反り解析について紹介する。

2. 2次元解析

熔融樹脂流動は熱の移動を伴う非圧縮性流体の非定常挙動であり、連続の式、運動方程式、エネルギー式を、メルトフロントの進展を考慮しながら解き続ける。従来、樹脂流動解析はHele-Shaw流れを基礎にした解析が一般的であった。これは樹脂流れを2次元化して支配方程式を単純化し、圧力のラプラス式を解く手法である。

この2次元化によって、当時の計算機でも短時間でメルトフロントの進展を予測できるようになった。また、計算

モデルにはシェル要素を用いるので肉厚変更や設計変更にも簡単に対応できた。しかしながら、2次元化したため次のような問題も生じていた（図1）。

- 1) 段差形状などは正確にモデル化できない。
- 2) 厚肉成形品の3次元樹脂流れを表現できない。
- 3) 反り解析で、コーナー部倒れ込みを表現できない。

3. 3次元解析

3次元計算は膨大な計算量が必要になるが、最近の計算機の急速な進歩によって実用的な時間で処理が可能となってきた。これに加えCADの3次元化、低価格化も進み、製品設計を3次元CADで行うケースも多くなってきた。設計用3次元モデルと従来必要だった計算用2次元モデルを別個に作成しなくて良い点からも3次元解析に対する期待は高い。

計算モデルとしてヘキサ要素を利用する場合、メッシュ生成手法としてはボクセル分割が有力である。これは3次元直交格子により形状をギザギザに近似する手法で、境界が階段状になる問題があったが、最近では節点をCADデータ表面に移動させ、形状近似精度を向上させるメッシュ作成技術が開発されている¹⁾。テトラ要素の場合は、アドバンシングフロント法が有力である。これは領域の境界から内部に向けて要素を生成させる手法で、ほとんど手間をかけずにテトラ要素が得られる。アドバンシングフロント法では、メッシュ生成を2段階に分けられるのも利点である。

図1 2次元化で発生する問題

図2 ソリッドメッシュ

* Shimomai, Ken
三菱エンジニアリングプラスチック(株) 技術センター製品技術室
平塚市東八幡 5-6-2 (〒254-0016)
2004.5.10 受理

図3 計算モデル
 大きさ：10 cm×5 cm×1 cm. 樹脂注入位置を矢印で示す。射出速度：40 cc/s

まず形状表面に表面メッシュを生成し、続いて内部に向けてテトラ要素を発生させる。表面メッシュさえ発生できれば、極めて複雑な形状でもテトラ要素を作成できる(図2)。

実際の計算では、モデルに1層の部分が存在すると問題が生じる。1層部分の節点は、そのすべてが金型壁面と接するため、圧力勾配が存在しても流速は常にゼロであり、温度も金型温度と等しくなってしまう。この問題に対し、メッシュを細分化することなく自動的にシェル要素として取り扱う技術も開発されている¹⁾。温度計算においても、肉厚方向に温度計算点を多数配置して伝熱計算精度を向上させる工夫もなされている¹⁾。

当社でもSIMPLE法による3次元流動解析用ソルバーを開発した経験がある²⁾。平板の流動解析結果を図3、図4に示す。3次元流れが再現され厚み方向に流速が存在している。充填1.25秒後の温度分布を見ると、平板厚さ方向

図5 収縮異方性の表現

に温度分布があり、メルトフロント先端には高温部が存在している。これらは2次元計算では得られない結果である。

最近の計算機は著しく高速化した。最近の3次元流動解析が数分で終了する程ではない。3次元解析でも、圧力のラプラス式を解くことで計算速度を向上させる方法もある³⁾。また、計算機をクラスター化し並列計算によって高速化する研究も行われている。

4. 熱応力解析(収縮解析)

流動解析の結果、キャビティ内の樹脂流速、圧力、温度が得られる。この結果を利用し熱応力解析を実施して収縮量(反り、ひけ)を計算する。これは市販の反り解析ソフトウェアに共通する手順であるが、流動解析結果を利用する部分にソフトウェア開発各社の工夫が盛り込まれている。

0.1秒後の流速ベクトル

1.25秒後の温度分布

図4 計算結果

図6 反り計算結果と実測値の比較

様である。例えば、ASU-MOLD（反り解析ソフトウェア—(株)先端力学シミュレーション研究所発売）では、収縮異方性を考慮して反り計算を行っている。流動解析結果から得られた収縮異方性を図5に示す。要素ごとに収縮異方性が直交異方性により定義されている。最終的な反り解析結果と実測値は良い一致をすることが確認されている⁴⁾(図6)。

5. 樹脂データベース

流動解析を行うためには、樹脂粘度、比熱、熱伝導率、密度など様々な物性データが必要になる。通常、樹脂粘度は細管粘度計により測定され、バグレイ補正など様々な補

正の後に、粘度パラメータに変換されて利用される。しかしながら、こうして得られたパラメータを使用しても、細管粘度計の実験結果すら正確に再現できないのが現状である。最近、最適化手法を用いて、実験結果に合う様に樹脂データを逆算する方法が提案されている⁵⁾。

熱応力解析でも、PVTデータ、線膨張係数、弾性率などの物性データが必要になる。実成形では、成形品内部で流動や冷却の状態が一定ではないため、結晶化や分子配向度に分布が生じ、線膨張係数などの物性値も一定値とはならない。ミクロトーム等により表面に対し平行方向に薄片を切り出して試験片とし、結晶化度、線膨張係数を測定してそり予測精度を向上させる研究も行われている⁶⁾。

6. おわりに

3次元流動解析が急速に進化し、反り予測技術は格段の進歩を遂げている。これまで不可能であった複雑な成形品に対しても、かなりの精度で変形を予測可能になりつつある。結晶化や繊維配向の問題、伝熱の取り扱いなど残された課題も多いが、解析精度の検証をしながら、これらの問題の解明が進むことを期待する。

参考文献

- 1) 中野, 坂場, 澤田, 結城, 須賀: 成形加工, **15**(6), 550 (2003)
- 2) 奈良崎: 加工プロセスシミュレーションシリーズ4 流動解析—プラスチック成形, コロナ出版(出版準備中)
- 3) 特開平 8-99341
- 4) 則包: プラスチックス (掲載準備中)
- 5) 青木, 佐藤: 成形加工' 03, 333 (2003)
- 6) 瀬戸, 寺倉, 佐々木, 山部: 成形加工, **15** (2), 148 (2003)