

# コスト低減，開発期間短縮に貢献する 加工シミュレーション

Machining Simulation Contributing to Cost-cutting and Reduction of Development Period

河野 務 Tsutomu Kono

寺前 俊哉 Toshiya Teramac

小野塚 英明 Hideaki Onozuka

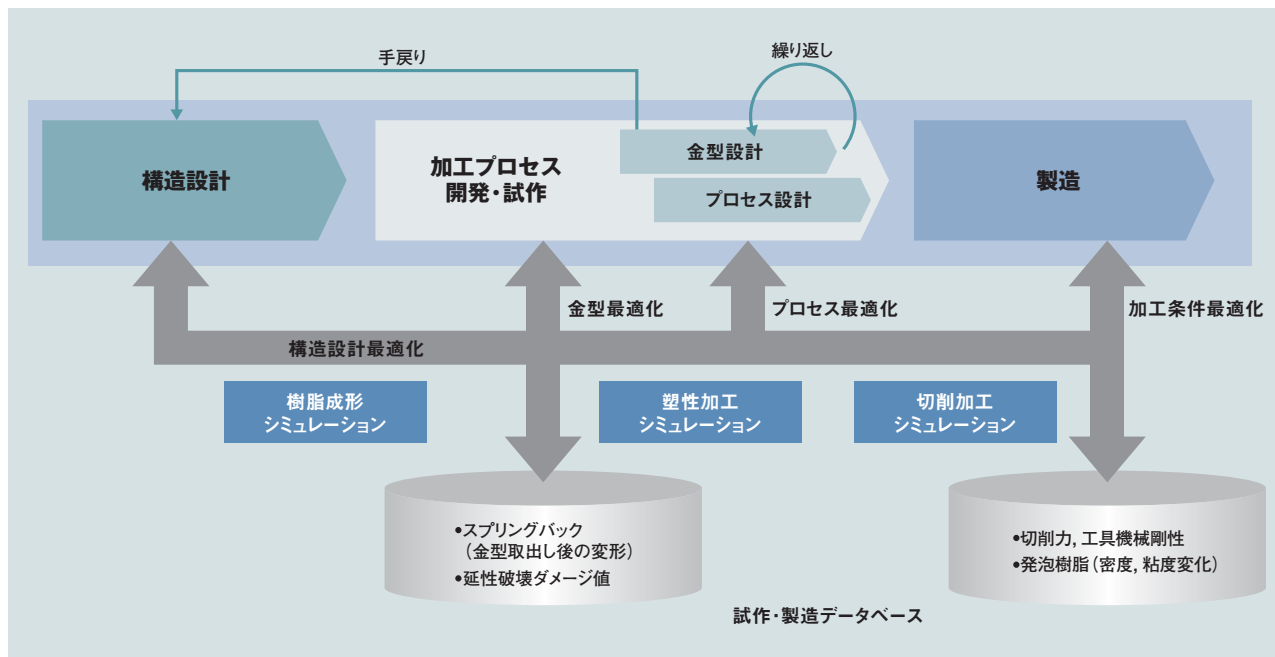


図1 設計手戻り，試作での繰り返し回数低減をねらいとした加工シミュレーション

試作および製造結果を基に構築したデータベースを活用する加工シミュレーションを用いて，加工性を考慮した構造設計，金型設計ならびにプロセス設計の最適化や製造での加工条件最適化に取り組んでいる。

材料コストの高騰など，昨今の厳しいモノづくり環境の中で市場競争を勝ち抜くためには，高品質化，コスト低減ならびに開発・製造期間の短縮が必須となっている。このため，上流設計段階でのシミュレーションを用いた検討により，寿命・信頼性をつくり込むとともに，設計手戻りや試作での繰り返し回数を低減する必要がある。しかし，部品加工の分野では，従来，シミュレーション手法が確立されていないため，加工プロセスの不具合は実際に試作しないとわからないという課題があった。したがって，加工シミュレーションの構築による加工性を考慮した構造設計，金型設計やプロセス設計，加工条件の最適化が急務である。

日立製作所は，これまでの試作・量産結果から得られたデータベースを活用した新たなシミュレーション技術の開発を進めている。

## 1. はじめに

日立製作所は，製品の品質向上，コスト低減，および開発・製造期間を短縮するために，部品加工の分野でのシミュレーション技術の開発・適用を進めている。従来は，実際に部品を試作してみるまでわからなかった加工プロセスの問題点をシミュレーションによって計算機上で事前に評価することにより，設計手戻りや試作での繰り返し回数低減が可能となる（図1参照）。例えば，樹脂成形での設計手戻りや試作での繰り返し回数を低減するためには，シミュレーションを用いて，試作の前段階で樹脂成形の金型，樹脂温度条件などのプロセスの最適化を行うだけでなく，樹脂の流動挙動を考慮した構造設計適正化を行う必要がある。

しかし，材料の変形や除去を伴う加工現象は複雑であるため，理論式だけでは加工シミュレーション技術の確立が困難であった。そこで，これまで培った試作や製造結果から得られたデータベースを活用した新たなシミュレーション技術を開発し，設計手戻りや試作での繰り返し回数低減，加工条件

の最適化を図っている。

ここでは、樹脂成形、塑性加工、切削加工のシミュレーション技術の開発、および、その適用事例について述べる。

## 2. 樹脂成形シミュレーション

樹脂成形は、溶融した樹脂材料を金型内に流し込み、冷却、固化する加工方法である。冷蔵庫断熱層や自動車用のインストルメントパネルなどに用いられているポリウレタン樹脂の発泡成形工程では、樹脂自体の発熱反応によって、樹脂温度、密度、粘度が相互に影響し、それらが大きく変化する複雑な挙動を示す。また、冷蔵庫の発泡成形工程における主な課題は、金型内の空気や樹脂から発生するガスを金型から逃がすためのガス抜き位置の適正化であり、ガス抜き位置を樹脂の最終充填（てん）場所に設置しないと、樹脂の未充填であるボイドが発生する。

寸法が大きな冷蔵庫において、試作成形を繰り返し、設計を変更してガス抜き位置を適正化することは、コストが高く、開発期間が長期化する問題があった。試作成形に先立ち、設計段階においてシミュレーションを適用し、樹脂の発泡挙動を考慮して、ガス抜き位置が適正化できれば、コスト低減、開発期間短縮を実現できると考えられる。

### 2.1 発泡成形工程のシミュレーション技術

発泡成形工程では、発熱反応によって密度や粘度が同時に大きく変化するので、発熱速度、密度、粘度を個別に測定しても、これらの相関関係を明確化できない。さらに、発泡に伴って変化する密度、粘度は理論式が確立されていないため、発泡成形工程の発熱反応を伴うシミュレーション技術の開発事例は報告されていない。そこで、日立アプライアンス株式会社と共同で発熱反応による樹脂の温度上昇と、体積、圧力変化を同時に測定できる可視化実験装置を新規に開発し、物性値を測定した<sup>1)</sup>。また、可視化実験装置を用いた測定結果から、樹脂の発熱速度に伴って変化する密度、粘度などを独自に定式化<sup>2)</sup>することによって、材料物性データベース

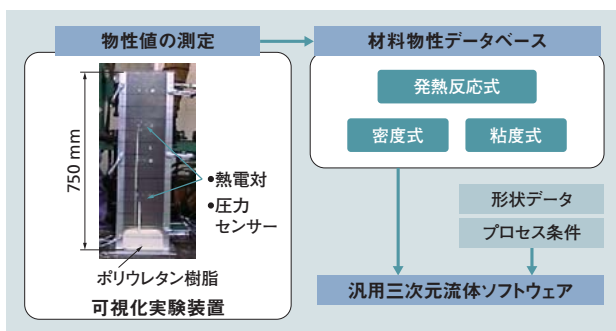


図2 発泡成形工程のシミュレーション技術

物性値の測定結果から構築した発熱反応式などの材料物性データベースを、汎用三次元流体ソフトウェアに組み込むことによってシミュレーション技術を開発した。

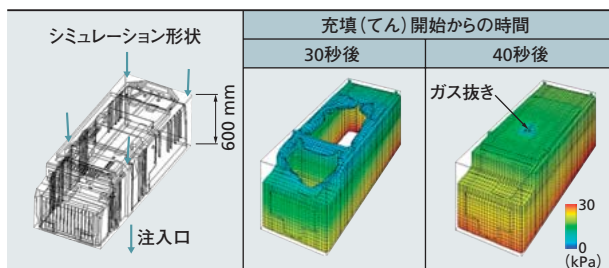


図3 冷蔵庫断熱層への解析適用

冷蔵庫断熱層の発泡流動過程への解析適用により、ガス抜き位置を設計段階で最適化することができる。

スを構築した。なお、発熱速度は樹脂の温度変化から算出し、密度は可視化による体積変化から、粘度は圧力変化から算出した。このデータベースを汎用三次元流体ソフトウェアへ組み込み、形状データとプロセス条件を入力する手法により、発泡流動挙動を予測できる新たなシミュレーション技術を他社に先駆けて開発した（図2参照）。

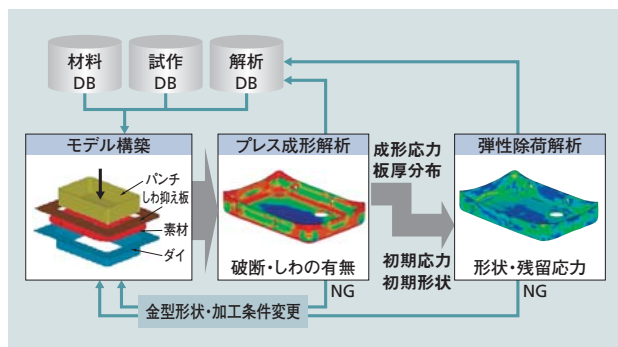
### 2.2 冷蔵庫断熱層へのシミュレーション適用

冷蔵庫断熱層の発泡成形では、発泡前の部品を金型内へ挿入した後、注入口から金型内へポリウレタン樹脂を充填し、樹脂で金型内の部品を一体化して成形する。シミュレーションに用いた冷蔵庫形状と、樹脂の充填開始から30秒後と40秒後の樹脂圧力の分布を図3に示す。このように、設計段階において、シミュレーションで樹脂の発泡挙動を考慮したガス抜き位置の予測が可能であり、実験値との検証の結果、必要な樹脂注入量を5%以下の誤差で予測できることを明らかにした。

## 3. 塑性加工シミュレーション

塑性加工は、金属材料を金型などによって外力を負荷することで設計形状に変形させる加工方法で、エレクトロニクス分野から電力分野まで幅広く適用されている。近年、プロセス開発や加工条件の適正化のために、塑性加工シミュレーションが積極的に導入されている。このシミュレーションは成形時の応力や形状の評価は容易であるが、成形時に生じる破断や製品形状である除荷後の形状ならびに残留応力の予測が困難であるという課題がある。そこで、塑性加工シミュレーションを構築した（図4参照）。成形時の破断については、成形解析結果の応力とひずみから算出される延性破壊ダメージ値により、破断発生有無の評価を可能とした。除荷後の形状ならびに残留応力の予測については、成形解析と弾性除荷解析を連成させる手法を確立した。また、材料、試作ならびに解析データベースを活用してモデルを構築することにより、解析精度の向上を図った。

ここでは、図4のモデル構築に示すようなダイ上に置かれた



注：略語説明 DB(Database)

図4 塑性加工シミュレーションの概要

成形解析と弾性除荷解析の連成、成形時の破断評価によって高機能化を図り、各種データベースを活用することで高精度化を実現した。

素材をしわ抑え板で挟み込んだ状態でパンチをダイ内に押し込むことによって、角形状製品を成形するプレス成形を対象に、破断予測および形状予測について述べる。

### 3.1 破断予測

塑性加工における破断予測には、これまで薄板プレス成形を対象に実験データに基づく成形限界線図が用いられてきた。しかし、変形におけるひずみ履歴が異なる多工程成形や低延性材、複合材および厚板材には適用できないという課題があった。そこで近年、破断そのものを評価する手法として延性破壊条件式<sup>3)</sup>の適用が注目されている。この式を組み込んだシミュレーションにより、変形履歴や被加工材に依存しない破断予測を可能とした。

$$I = \frac{1}{b} \int_0^{\epsilon_f} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma} + a \right) d\epsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma_m$ は静水圧応力、 $\sigma$ は相当応力、 $\epsilon_f$ は破断ひずみ、 $a$ および $b$ は材料定数であり、あらかじめ被加工材の単軸引張試験と平面ひずみ引張試験によって求める。

成形シミュレーション中の各ステップにおいて、モデルの要素ごとに得られる $\sigma_m$ 、 $\sigma$ および $d\epsilon$ から延性破壊ダメージ値 $I$ を算出し、このダメージ値 $I$ が1を越えた要素で破断が発生したと評価する。この状態でさらに成形を進めることにより、破断が進展する様子をシミュレートできる。この方式の適用事例を図5(a)に示す。これにより、プレス成形の角部に生じる破断を再現できていることがわかる。さらに、この方式により、破断に対する余裕度の評価も可能である。

### 3.2 形状予測

プレス成形後のパンチや、しわ抑え板を取り除いた状態での形状ならびに残留応力を高精度に評価するために、プレス成形解析後の成形応力や成形形状を初期応力および初期形状に変換し、新たに解析モデルを構築、弾性除荷解析を実行し、除荷後の形状ならびに残留応力を評価する手法を

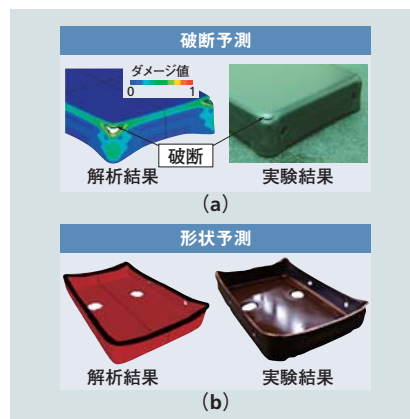


図5 破断評価と形状予測

延性破壊条件式の成形解析への適用による破断予測を(a)に、成形解析後の応力ならびに形状を考慮した弾性除荷解析による形状予測を(b)に示す。

確立した(図4参照)。この手法を用いて成形品形状を比較した結果を図5(b)に示す。解析結果と実験結果がよく一致していることがわかる。この手法を適用することで、事前に成形後の形状や残留応力を評価できることはもちろん、設計形状を得るための最適プロセスの検討が可能である。

## 4. 切削加工シミュレーション

切削加工は、被削材料または工具を回転させながら一方を移動させて材料を削る加工方法であり、一般に高い能率で比較的良好な加工精度を実現することができる。しかし、被削材料や工具に作用する力が大きい場合や、これらを支持する装置の剛性が低い場合、加工中に「びびり振動」と呼ばれる現象が発生する。このびびり振動により、加工精度の悪化や工具の破損などが生じるため、加工現場ではノウハウや試行錯誤によって加工条件の選定を行っている。そこで、加工条件選定の支援を目的として、被削材料に対する切削力と被削材、工具の機械剛性のデータを用いたびびり振動発生限界予測シミュレーション(図6参照)の適用が切削加工プロセス開発の分野で進められている<sup>4)</sup>。しかし、従来のシミュレーションでは、切削力は工具が被削材料を切り取る厚さに比例する単純なモデルであるため、回転数が低い領域では、びびり振動発生限界の予測誤差が大きいという課題があった。

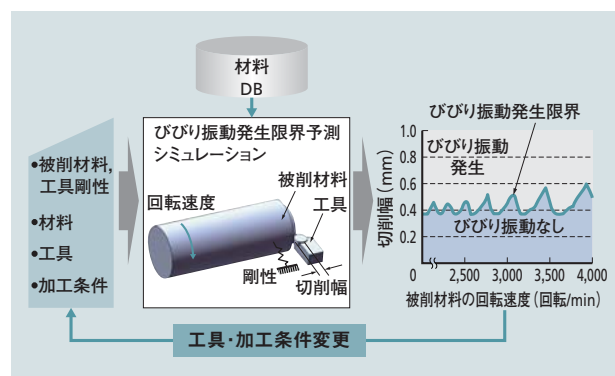


図6 加工条件選定を支援するびびり振動発生限界予測シミュレーション  
被削材料や工具の剛性、加工条件などを入力値として、びびり振動の発生しない切削幅と回転数を予測する。



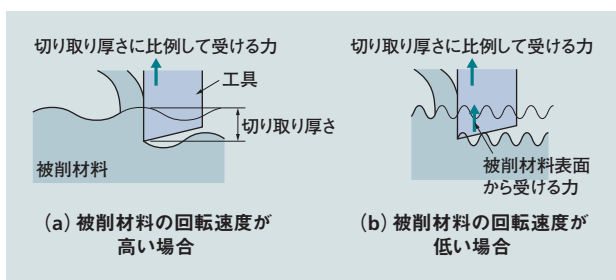


図7 開発したびびり振動発生限界予測シミュレーションでの切削力のモデル

被削材料の回転速度が高い場合(a)、工具には切削厚さに比例した力が作用するのに対し、回転速度が低い場合(b)、加工表面に形成される波面から工具に作用する力の影響が大きくなる。

#### 4.1 びびり振動発生限界予測シミュレーション

従来の方法による、びびり振動発生限界の予測精度を向上するため、University of British ColumbiaのY. Altintas教授らと共同で、低回転数領域における、びびり振動発生限界予測シミュレーション方法の研究を行っている。これまで用いられてきた従来のびびり振動シミュレーションでは、切削過程での工具や被削材料の振動変位によって変化する切削厚さに比例して作用する切削力のみを考慮したモデルとなっていた〔図7(a)参照〕。しかし、低回転数領域では振動によって被削材料表面に形成される波形状の密度が高くなるため、被削材料表面から工具に作用する力の影響が大きくなる〔図7(b)参照〕。この力が振動を減衰させ、びびり振動発生限界を増加させることを実験により見いだし<sup>5)</sup>、これらを考慮した材料データベースの構築とシミュレーション技術の開発を行った。

#### 4.2 低回転数領域におけるびびり振動発生限界予測

従来のモデルでは低回転数の領域で、びびり振動発生限界の予測精度が低く、シミュレーションによって求めた限界切削幅よりも大きな切削幅での加工が可能であった。例えば、1,000回転/minにおけるびびり振動発生限界の予測結果は0.4 mm程度であるのに対し、実切削では0.8 mmまで切削幅を増加してもびびり振動を発生しない。開発したシミュレーションモデルでは、実切削のびびり振動発生限界の切削幅をさら

#### 執筆者紹介



**河野 務**  
1991年日立製作所入社、生産技術研究所 生産システム第二研究部 所属  
現在、樹脂材料の成形加工技術の研究開発に従事  
工学博士  
プラスチック成形加工学会会員



**寺前 俊哉**  
1994年日立製作所入社、生産技術研究所 生産システム第二研究部 所属  
現在、板金プレス製品の加工技術の研究開発に従事  
日本塑性加工学会会員

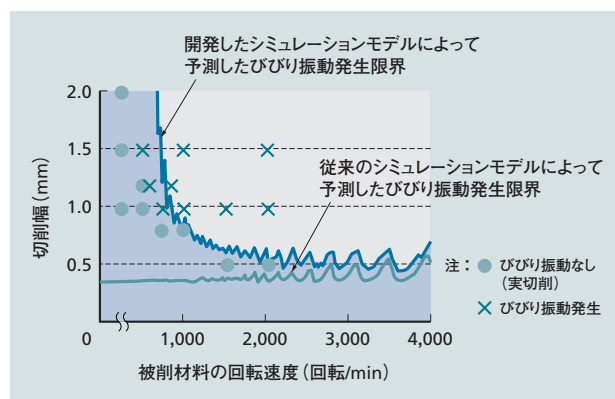


図8 開発したモデルと従来のモデルによるびびり振動発生限界予測結果の比較

びびり振動発生限界の切削幅を予測した結果を示している。従来のモデルでは、1,000回転/minでのびびり振動発生限界は0.4 mm程度であるのに対し、実切削では0.8 mmまで切削幅を増加してもびびり振動を発生しない。開発したシミュレーションモデルにより、実切削のびびり振動発生限界の切削幅をさらに精度よく予測している。

に精度よく予測しており、最適な加工条件の決定を支援することができる(図8参照)。

#### 5. おわりに

ここでは、樹脂成形、塑性加工、切削加工のシミュレーション技術の開発、および、その適用事例について述べた。

加工シミュレーションを適用することにより、コスト低減ばかりでなく、開発・製造期間の短縮が可能となる。日立製作所は、今後も試作や製造データの反映によるデータベースの充実、新たなモデルの構築によって、予測精度を向上し、加工シミュレーション技術の適用分野を拡大していく考えである。

#### 参考文献

- 1) 河野, 外:ポリウレタン樹脂の発泡流動解析, 成形加工, プラスチック成形加工学会誌, 17, 6, 407~418(2005.6)
- 2) T. Kono, et al.:Foaming Flow Analysis with Reaction of Heat Generation for Polyurethane Resin, 21st ANNUAL MEETING OF THE POLYMER PROCESSING SOCIETY, 270(2005.6)
- 3) 大矢根:延性破壊の条件式について, 日本機械学会誌, 75, 639, 596~601(1972.4)
- 4) Y. Altintas, et al.:Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding, CIRP Annals-Manufacturing Technology 53, pp.619-642(2004)
- 5) Y. Altintas, et al.:Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, CIRP Annals-Manufacturing Technology 57, pp.371-374(2008)



**小野塚 英明**  
1993年日立製作所入社、生産技術研究所 茨城分室 所属  
現在、加工技術の研究開発に従事  
日本機械学会会員