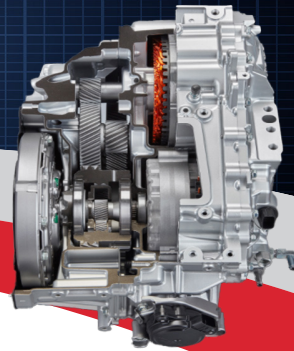


トヨタ自動車株式会社 様

# TRANSVALOR MATERIAL FORMINGを 活用したモータコイル成形、切削加工の検討



「お客様の笑顔のために期待を超えて、もっといいクルマづくりを通じ社会に貢献していこう」というビジョンのもと、早期からMBDを設計開発活動に採用し、自動車業界の技術革新をリードしてきたトヨタ自動車株式会社様は、生産技術にも積極的にDXを取り入れ、設計と生産双方の製造基盤技術の強化を推進されています。今回は、工法MBDという考え方のもと、モータコイル成形と切削加工においてTRANSVALOR MATERIAL FORMINGを活用した事例をご紹介します。

## 導入前の課題

- 成形加工の実機評価の削減とリードタイム短縮のためにCAEを活用したい。
- 加工の速い動きの慣性も考慮した動的な成形予測を行いたい。
- 大規模問題や大変形に対応できるシミュレーションソフトウェアを選びたい。

## 使用CAEソフトウェア

- 成形加工・熱処理シミュレーション  
TRANSVALOR MATERIAL FORMING



## 【取材先ユーザー様】

トヨタ自動車株式会社

パワートレーン製造基盤技術部 DX技術・戦略室

主任 伊佐次 詩乃 様

## ご所属部門やご業務について紹介ください。

パワートレーン製造基盤技術部は、HEVやBEVの構成ユニットの中で、主にクルマの動力源となるエンジンやモータなどのパワートレーンユニットの心臓部の製造技術を担当しており、リアルとデジタルを駆使したエンジニアリング力で製品と工場の競争力向上を図っています。私は2003年にトヨタ自動車に入社し、駆動・シャシー生技部で駆動部品の機械加工・組付に関する設備開発や評価を実機に近いところで行っていました。2008年頃から機械加工分野のCAEに従事し始め、構造解析から熱流体解析、機構・公差解析などに取り組んできました。近年では、モータ工法の予測精度向上や切削現象の可視化・予測技術に取り組んでいます。デジタル技術を推進する立場として、製品性能と同時に生産性もデジタル技術により確認し、最小限の実機試作で済ませることを目指しています。これを工法MBDと呼んでおり、その基本となる加工点の現象理解やモデル化のために、評価したい工法のメカニズムを整理し、必要な機能を備えたCAEソフトウェアの選定や活用を進めています。

## 工法MBDについてご説明いただけますか。

従来の新製品開発においては、設計が製品性能確認のための試作を行い、その後生産技術が生産性確認のための試作を実施していました。ここにMBD(Model-Based-Development)を適用して、製品性能と生産性の両方をつくり込んだモデルで試作を行い、実際のモノによる試作回数を減らすことで、開発期間短縮を目指しています。

この工法MBDに重要なのが機能ブロック図です。システムの機能(動き)

を表すブロックと、入力と出力、制御因子、誤差因子を表す矢印で作成するチャートであり、機能のブロックを組み合わせることで全体の複雑なメカニズムを整理することで、デジタル検討がよりスムーズになります。

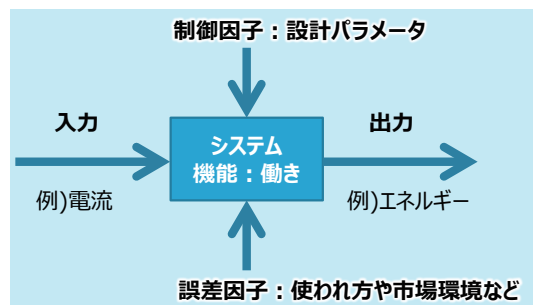


図2 機能ブロック図=基本機能の見える化ツール

## TRANSVALOR MATERIAL FORMINGの活用事例をご紹介します。

一つ目は、モータコイルの成形予測についてご紹介します。モータ部品のステータに使われるコイルは、上下のはみ出し部が大きくなるとユニット自体も大きくなり最終的に車両搭載性へも影響を与えてしまうため、その形状を早く確実に決定することが重要です。そこで、まず機能ブロック図を用いて、最終的な出力を成形後の寸法精度や必要な成形荷重としてメカニズムを整理すると、それらを決めるのがコイル(導体と被膜の組合せ)の特性の他に、コイルが前工程で受けた影響、着目している成形の条件などであることを明確にできました。

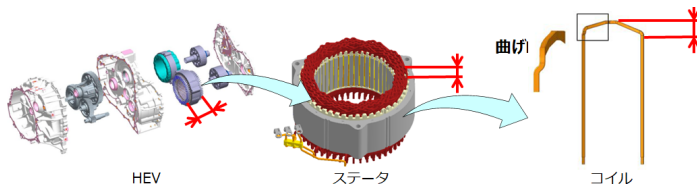


図3 モータコイルの成形による車両搭載性への影響

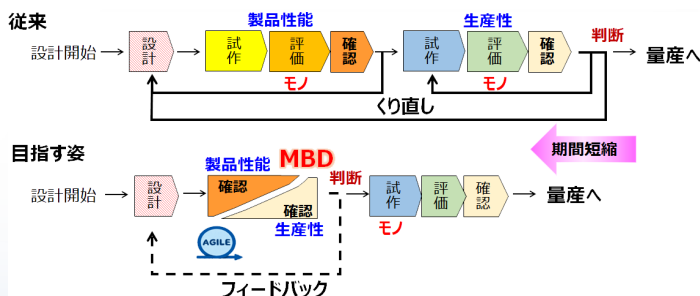


図1 工法MBDを取り入れた新工法検討

この工程をCAEで評価するために、導体と被膜の特性や形状によって変化すると考えたコイルの応力歪み特性については、線種による特性の違いを実験で確認しました。また、工程によっては型の動きが非常に速いため、速度によって応力歪み特性が変わることも考慮しています。更に、前工程のCAEで得られた応力や予ひずみも引き継ぎました。このように、基礎実験をしっかり行った上で、量産ラインのデータとも突き合わせ、物理モデルとして正しいことを確認しながら進めています。CAEの計算には、これらの物理モデルを考慮できるTRANSVALOR MATERIAL FORMINGを選定しました。このコイル成形に関して言えば、非常に速く動く工程に対応できるよう、慣性を考慮した動的な計算を行えるソフトウェアが良いということの

他に、複数コイルを同時に成形する工程もあるため、大規模に対応したいというニーズがあります。また、リメッシュして成形の大変形にも耐えられるものということで、これらを満たすツールということが決め手になりました。

TRANSVALOR MATERIAL FORMINGは、コイルを曲げて歪みが集中する部位などを自動で細かくリメッシュしてくれるので、ユーザーが予め危険部位を予測してメッシュサイズを細かく指示する必要がなく、メッシュ作成時間自体を短縮できるメリットを実感しています。全体の要素数も少なく済ませられるので、計算時間も短縮できます。また、形状が変わっても同じ手順で誰でも同等の結果が得られるので、作業者のスキルに頼る必要がありません。図4の計算結果は、最も時間をかけてしまった時の事例との比較になっていますので、少し大げさですが、効果としては計算時間を短縮できること、計算精度も実測と比べて十分使えることを確認できました。

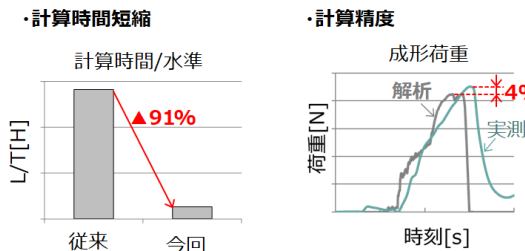


図4 従来ソフトウェアとの計算結果比較と、実測値と解析結果比較

二つ目の事例として、切削現象の可視化を紹介します。トランスアクスルの構成部品の多くは、旋削、フライス、穴明け、歯切りと多岐にわたる切削加工を施しています。工法によっては切粉が巻き付き、取付時の位置ずれや製品精度悪化などの原因になるため対策が必要ですが、速度が非常に速い現象である上に切粉が邪魔になって加工点の観察が難しいといった課題があります。現象が複雑で考察も難しいことから、デジタルで可視化し予測する効果が大いと考えて、検討・考察できる手段の確立に取り組んでいます。

この切削加工についても機能ブロック図で物理現象を整理すると、高速で大変形し瞬時に発熱して高温になること、最終的には破壊まで至ることなど、現象として非常に複雑であることを改めて理解できました。これをCAEで検討するため、複数候補のソフトウェアを検討しました。例えば有限要素法では、まず工具が微小時間分移動することでワークに食い込む干渉量が計算され、それに応じて歪みや応力を求めます。ワークの塑性変形や工具との摩擦により発生する熱の伝わりも計算が必要です。更にその瞬間での工具やワークの形状を更新し、歪みが大きければ要素をリメッシュする、これらを微小時間ごとに繰り返し計算することになります。この計算に対応できるソフトウェアはいくつかありましたが、メカニズムに基づいて結果を考察するために入力の自由度が高いTRANSVALOR

MATERIAL FORMING を活用することにしました。今回は切粉の評価ということから形状表現で優位な有限要素法を選択しましたが、有限体積法や粒子法といった他の手法も調査しており、それぞれ一長一短がありますので、上手く使い分けて評価しようと考えています。

実際の計算は、機能ブロック図から必要な入力を洗い出すところから実施しました。影響が大きいと判断した歪み速度や温度による応力ひずみ特性の変化は、材料試験により可能な限り取得しましたが、影響が小さいと予想される入力は文献値を参照したり、取得が難しいものは基礎試験で合わせ込んだりしています。2次元に置換えられる円筒端面を削る切削加工を基礎試験として行い、チップのすくい角やコーティングを変化させて3ケースの条件でシミュレーションしました。CAEで予測した切粉の厚みは基礎試験に対して誤差21%、工具が進む進行方向の主分力は誤差9%程度と、予測精度は上がってきているというのが現段階です。

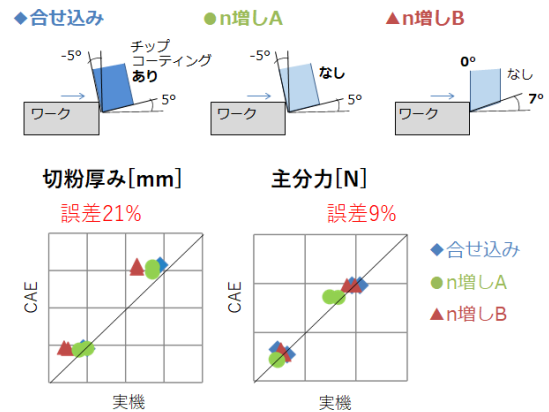


図5 基礎試験での実測とシミュレーション結果の比較

今後の活用についてお聞かせください。

現在、材料の破壊を表現するのに使用している要素消去法では、工具背面にあたるワークの体積自体が減るという懸念があるため、今後はTRANSVALOR MATERIAL FORMINGに採用されるCIPFARアルゴリズム(フェーズフィールド法)も活用したいと考えています。こちらは要素が消去されることなく、亀裂界面で節点を分離して延性破壊現象を再現する計算手法のため、ワークの体積が変化しづらく、背分力の表現向上やバリの評価もできるのではないかと考えています。この手法について、パラメータの考え方など実用事例があればどんどん紹介いただきたいですし、今後の機能開発・改良にも期待しています。

SCSKとしても新機能や活用方法を含め一層の技術サポートをさせていただきます。この度はご協力下さり誠にありがとうございました。

お客様紹介

**トヨタ自動車株式会社**

創立：1937年8月

事業概要：自動車の生産・販売および関連事業。グループ全体の2022年の販売台数1,048万台。2023年3月期売上高37兆1542億円。

HPへ ▶

SCSK TRANSVALOR で検索 🔍

記事制作(取材日:2023年11月16日)  
SCSK株式会社 デジタルエンジニアリング事業本部 本郷春樹、川畑誠、近藤晶子

