

**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

## ギアボックス技術における生産性の向上

### はじめに

トランスミッション設計エンジニアにとって、マルチボディシミュレーション環境でギアボックスのモデルとパラメーターを作成する厄介な作業はお馴染みのものです。通常は、数日間かけてモデルを準備してから、非線形動力学を数値的にシミュレーションして、騒音・過渡・耐久性解析に使用する荷重データをシステムレベルで取得し、それぞれの属性を最適化します。

本ホワイトペーパーでは、Simcenter 3D Motion Transmission Builderを紹介し、これは、トランスミッションのマルチボディシミュレーション用モデルの設定にまつわるユーザー体験を革新的に改善しつつ、生産性を大幅に向上させる垂直型アプリケーションであり、エンジニアは初期設計からわずか1時間ほどで高精度のシミュレーションに進めます。

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアのマルチボディ研究チームは、数値的アプローチに基づいたドライブトレインのシミュレーションを再検討するため、多大な工数を費やしてきました。この新しいソルバーのアーキテクチャーは、マルチボディ動的シミュレーションに使用するギア接触の忠実度が3とおり提供されており、希望のコンピューター演算時間と予測精度に応じて任意のレベル（スタンダード、アナリティカル、アドバンスのいずれか）を選択できます。つまり、パフォーマンス性能の予測に必要なモデル精度を選択できる柔軟性が備わっています。今回は、産業事例を取り上げながらこのソルバーの機能を解説していきます。

# 目次

<b>エグゼクティブサマリー</b> .....	<b>3</b>
<b>背景: ギアボックス設計技術</b> .....	<b>4</b>
<b>Simcenter 3D Transmission Builder</b> .....	<b>5</b>
<b>トランスミッションシステムの解を得る</b> .....	<b>7</b>
スタンダードモード .....	7
アナリティカルモード.....	8
アドバンスモード.....	8
高度な経験ベース .....	8
高度なFEプリプロセッサ .....	8
<b>結果</b> .....	<b>9</b>
モーション解析手法: プロファイル変更解析.....	9
モーション解析手法: トランスミッション全体の動的解析.....	10
モーション解析のための高度なFEプリプロセッサ: 柔軟性、摩擦、経験的検証.....	11
<b>結論</b> .....	<b>12</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>13</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>13</b>

# エグゼクティブ・サマリー

近年、システムレベルのトランスミッション解析において、効率性、騒音、信頼性の性能を向上させるため、多くの取り組みがなされてきました。主要な課題は、高い詳細度と効率的なコンピューター演算処理を両立しながらシステムの非線形動力学を捉えることです。ギアボックスの設計エンジニアは、マルチボディシミュレーション手法に基づいてシステムの振る舞いを予測し、振動騒音、過渡、耐久性などを解析します。マルチボディシミュレーション用のモデルはつい最近まで手作業で作成されていたため、非常に煩雑で、ミスも発生しがちでした。比較的複雑なモデルの作成、パラメーター定義、反復作業は、経験豊富なユーザーであっても何日もかかります。

本ホワイトペーパーで紹介するSimcenter 3D Transmission Builderは、トランスミッション全体のマルチボディシミュレーション用モデルを効率よく作成する垂直型アプリケーションです。非常に使いやすいシミュレーションプロセスを通じて、ギアボックス固有の振る舞いを詳細に把握できます。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアのSimcenter™ポートフォリオに含まれるSimcenter 3D Motionソフトウェアでシミュレーションを使用すると、モデル構造の全体像を踏まえつつ、詳細な解析からシミュレーションまでを実行できます。Simcenter 3D Transmission Builderにはユーザーの専門知識がほとんど必要ありません。また、多くのモデルをわずか1時間以内に作成できるため、マルチボディシミュレーション用モデル設定の生産性が大幅に向上します。ワークフローを図1に示します。

Simcenter 3D Transmission Builderは新たにギア接触要素とのインターフェースも提供されています。Simcenter 3D Motionの革新的な新機能をいくつかここで紹介しましょう。接触検知手法が一新され、ギア歯面の微調整、位置ずれ、歯先接触、くさび止めなどの動的な影響を考慮する非線形有限要素 (FE) ソルバーで接触要素を正しく検出できます。ルーヴァン・カトリック大学 (ベルギー) およびカラブリア大学 (イタリア) と共同開発した新しいFEプロセッサを使用するアドバンスモードは、画期的な定式化に基づいて、柔軟性を誘発する現象 (軽量ギア、対流結合効果など) を考慮します。また次数削減モデル (MOR) にも対応しており、マルチボディの動的シミュレーション環境で軽量ギアとリングギアを効率的に解析できます。

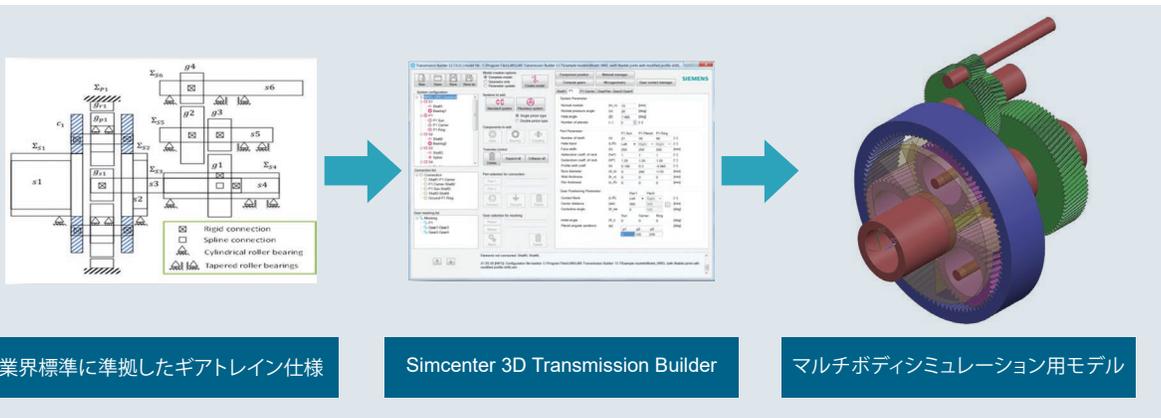


図1: ワークフロー – Simcenter 3D Transmission Builderを使用して、ギア設計仕様書からトランスミッションの高精度レイアウトを素早く定義し、マルチボディシミュレーション用モデルを生成

## 背景: ギアボックス設計技術

環境意識の高まりを受けて、エネルギー効率と排出の目標が厳格化しています。メーカーは、(高い性能を求める) 顧客要件と (効率性を高める) 規制とのバランスを取りながら設計を改善することを余儀なくされています。自動車や風力発電に用いられる機械式トランスミッションは多くのエネルギーを損失します (全消費エネルギーの6-8%を占める) が、最近では、エネルギー損失を50%ほど削減できるとする調査研究<sup>1,2</sup>もあります。自動車業界全体として930万トンにのぼるCO<sub>2</sub>の削減可能性が示されていますが、この数値には損失現象と重要な性能属性 (耐久性や騒音など) が含まれていません。ここで最適なバランスを見極める鍵は、トランスミッション設計プロセスにおいてシステムレベルの動力学を予測できるか否かにかかっています。

トランスミッションシステムは基本的に、ギア、ベアリング、シャフト、支持構造で構成されています。これらはすべて相互接続されており、支持構造はベアリング接触やトランスミッションエラーに関連するギアメッシュにも大きく影響します。エネルギー損失の内訳をみると、ギアトレインが7割、ベアリングが3割です。

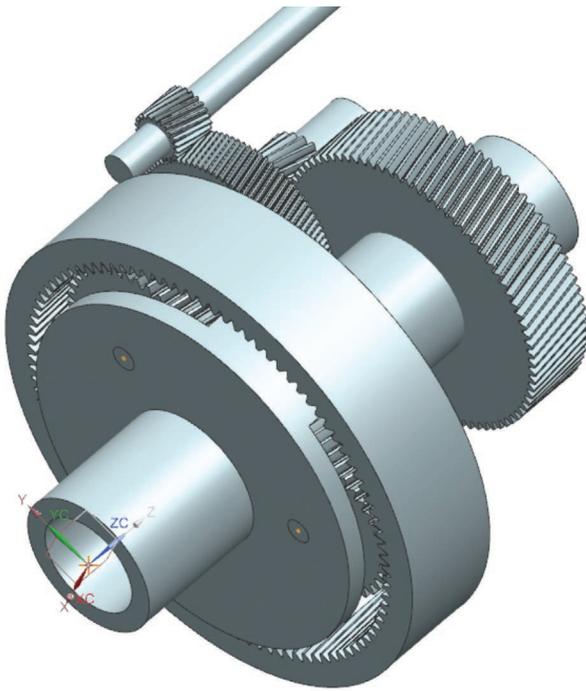


図2: 風力発電機のトランスミッション例 - 一段遊星構造と二段ヘリカル構造で構成された3段ギアボックス

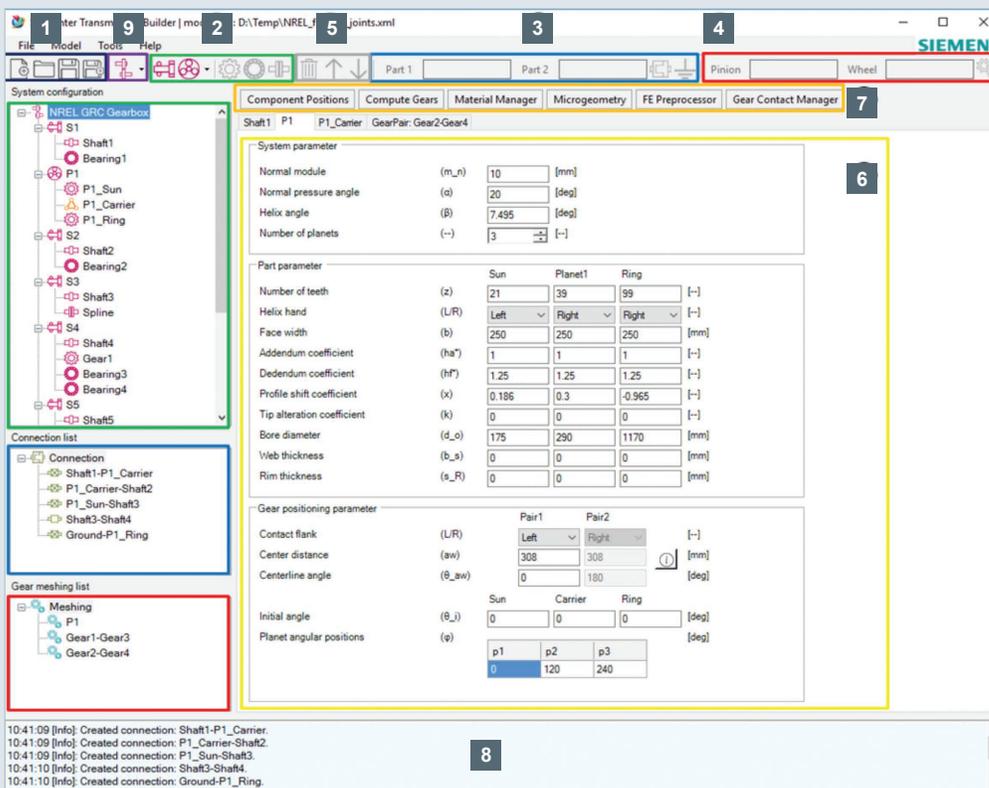
このため、自動車 (乗用車、トラック、バス) から風力発電システム、ヘリコプターにいたる幅広いアプリケーション開発にとってギアボックスの設計においては多くの課題を克服しなければなりません。まず第一に、高い詳細度と効率的なコンピュータ演算処理を両立しながらシステムの非線形動力学を捉えることが求められます。ここで、トランスミッションの設計とシミュレーションをサポートするソフトウェアの選択肢は2つあります。1つはギアボックスを設計するためのツールです。ギアボックスの設計に役立つ独自のノウハウが実装されていますが、システムレベル動力学をはじめとするシミュレーション機能は含まれていません。もう1つは、汎用的なマルチボディシミュレーションツール (Simcenter 3D Motionなど) です。この場合、シミュレーション固有の要素 (結合部、軸、ボディ、力など) を含めてドライブトレインの形状を作成する必要があります。後者は、非線形動力学、騒音振動性能、耐久性を現実的な時間軸で高精度に予測できる唯一の環境です。最近まで、マルチボディシミュレーションツールで使用する完全トランスミッションモデルの構築は、非常に厄介でミスが起こりやすい手作業に依存していました。比較的複雑なモデルの作成、パラメーター定義、反復作業は、経験豊富なユーザーであっても何日もかかります。本稿で紹介するツールのアドバンスモードを使用すると、マルチボディシミュレーション環境で効率的にモデルを設定し、高精度なシミュレーションに基づいて設計案を効果的に予測し、最適化できます。

図2は、750 kWの風力発電用ギアボックスであり、増速器の役割を果たします。Simcenter 3D Transmission Builderを使用したところ、このモデルはわずか数分で完成しました。

# Simcenter 3D Transmission Builder

Simcenter 3D Transmission Builderには、複雑なトランスミッションシステムを作成するSimcenter 3D Motionとの使いやすいインターフェースが用意されています。ソルバーおよびFEプリプロセッサとの直接接続が確保されており、基本形状とトポロジーの位相を自動で調整します。このため、Simcenter 3D Transmission Builderを使用すると、非常に短時間でモデルを作成できます。

Simcenter 3D Transmission Builderのメイン画面を図3に示します。



- 1 主要I/O: 新規作成、保存、別名で保存、システム構成ファイルを開く
- 2 システム構成: システムとコンポーネントの追加と管理
- 3 接続: 部品間の接続を定義
- 4 メッシュ処理: ギア対のメッシュを定義
- 5 制御: 各ツリービューで追加ノード、接続、メッシュの移動または削除
- 6 部品の仕様: システムと部品のプロパティを管理
- 7 計算: ギアブランクとギアの仕様に基づいて部品位置を計算し、材料属性、ギア歯面調整、FE前処理、ギア接触を管理
- 8 ログ画面: ユーザー操作の内容、警告/エラーメッセージ
- 9 Simcenter 3D Motionとの連携: Simcenter 3D Motionでモデルを作成/更新

図3: Simcenter 3D Transmission Builderのメイン画面

Simcenter 3D Transmission Builderは、ギアボックス設計工程に即した設計になっており、解析とシミュレーションの過程でユーザーの意思決定を適切にガイドします。ユーザーはまずトランスミッションのレイアウトを設計します。シャフト、ギア、ベアリングなどを配置し、平歯車、はすば歯車、遊星歯車のギアメッシュ条件を定義します。次にISO 21771標準<sup>4</sup>に基づいてトランスミッション設計パラメーターを算出し、ギア形状を生成します。その後、Simcenter 3D Transmission BuilderでSimcenter 3D Motionを使用して3D形状モデルを作成します。続いてギア歯を微調整します。クリックするだけで(図4参照)、プロファイルと歯すじの修正、対の変更、ギア接触要素モデルの入力ファイルの生成などが可能です。

最後にSimcenter 3D Transmission Builderで初期条件と境界条件を定義します。定義する条件としては、部品の初期角度、自動ギア段切り替え、ジョイント部(ベアリングと結合部)、拘束条件などがあります。ギア接触要素モデルとのインターフェースが提供されているため、ユーザーは通常1時間以内でトランスミッションシステムの最適解に到達できます。

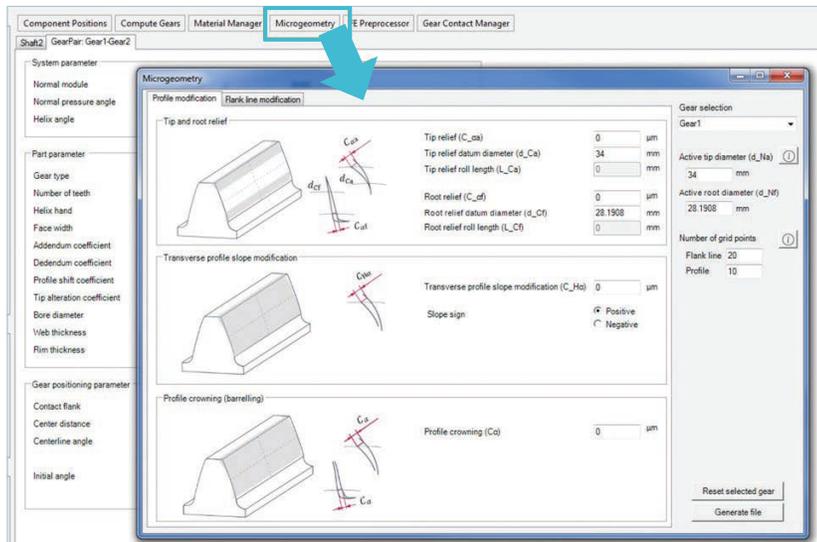


図4: ギア歯面の調整

# トランスミッションシステムの解を得る

新しいギア接触要素を用いる主なタスクには、接触要素の検知、変形量の計算、変形量の荷重変換があります。マルチボディソルバーは正確なギア接触力を考慮してシステムレベルの荷重を計算し、そこから振動騒音、耐久性を導きます。最も重要と思われる形状効果を新しいギア接触要素で動的に捕捉したものを図5に示します。

変形量を荷重に変換する方法には次の3つのモードがあります。

- ・スタンダード (ISO標準に基づく。ユーザー入力は任意)
- ・アナリティカル (ISO + Cai)
- ・アドバンス (経験的またはFEプリプロセッサ)

これらの3つのモードは、Simcenter 3D Motionソルバー付属の最新オブジェクト指向フレームワークに実装されています。現在、類似のフレームワークでベアリング、斜角ギア、ハイブリッドギア、スプライン接続をサポートするための機能拡張を進めています。

## スタンダードモード

このモードは、ドライブトレイン全体の振る舞いが重要である場合に使用します。剛性は一定とし、ISO方程式<sup>5</sup>を使用し、算出します。このモードで計算したギア対メッシュ剛性は、正確な解析結果に対する定性的な近似値です。複雑なドライブトレインの減衰解析や初期の反復解析など、ギアボディの柔軟性を重視しない解析には十分です。歯毎の接触が定義されておらず、ギア対全体の接触のみをモデル化しているため、ギア歯の微調整や歯先接触には対応していません。ある程度の配置ずれを含みます。剛性は荷重に依存しないので、荷重増加時の非線形剛性の影響は考慮されません。

接触部の剛性値とトランスミッションエラー (TE) の測定値のいずれかまたは両方が既知であると、精度が上がります。このモードの大きな利点は、使いやすさと計算速度です。

接触要素のモデリング = 接触部の検出 ⇒ 必要な変形量を計算 ⇒ 変形量を荷重に変換						
処理内容	プレーン内の相対変換 	軸相対変換 	回転のずれ 	プロファイルの修正 / エラー 	フランクの修正 / エラー 	メッシュ位相調整 
関連要素	反発荷重 偏心による周波数 サイドバンド	ギアのラトル音 (はすば歯車)	システムレベル 動力学 ギア鳴り 歯荷重 ⇒ 耐久性	ギア鳴り エラーによる周波 数サイドバンド ゴースト障害	ギア鳴り 歯荷重 ⇒ 耐久性	遊星トランスミ ッション 複数メッシュ
ギア要素	✓	✓	✓	✓	✓	✓

図5 動力学、騒音、耐久性など、システムレベルのトランスミッションの振る舞い予測に影響するギア接触要素

### アナリティカルモード

このモードは、歯車仕上げから位置ずれ、ギア歯の微調整、バルクギアの定性的な振動騒音調査（方程式で暗示的に求める剛性変数からギア鳴りを把握）、システムレベルの現象に対する動的評価まで幅広い領域に適用されます。このモードは、バルク剛性を持つギアを定量的に正しく計算できますが、（軽量ギアなどの）ギア内部の動力学は考慮しません。

一方、標準モードと比較してより多くの設定が可能です。このモードで使用する剛性関数は、ISOの歯対剛性<sup>5</sup>と、平歯車とはすば歯車の歯対曲げ剛性を求める方程式<sup>6,7</sup>とを組み合わせたものです。このモードを使用すると、接触要素の検知精度が大幅に改善します。特に、新しい接触検知手法とスライスの併用により、動的な位置ずれを高精度に解析できます。クーロン摩擦を考慮するオプションもあります。スライス処理では、瞬間的に重なり合う軸のスライス分割数をユーザーが指定できます。歯面の微調整、瞬間的な位置ずれ、潜在的なくさびを考慮して、それぞれのスライス面に対する接触領域を非常に効率的に検知します。

位置ずれや歯面の微調整が解析に影響する場合にはスライス数を増やした方が良いことが経験則から明らかです。とはいえ、通常はコンピューター計算速度に影響を与えない5~20の間で十分です。

### アドバンスモード

さらに高い精度を発揮します。アドバンスモードには、高度な経験ベースと高度なFEプリプロセッサの2つのタイプがあります。

#### 高度な経験ベース

広く知られている手法<sup>8,10</sup>であり、新しいギア接触要素はこちらの手法を採用しています。平歯車とはすば歯車の粗いFEモデルに基づいてバルク剛性曲線<sup>9</sup>を作成し、ボディーと歯の柔軟性をより正確に考慮します。非線形解析方程式<sup>9</sup>を使用することで、局所的な接触コンプライアンスを含めることができます。この手法は、ギアのシステムレベルシミュレーションを目的としたものであり、ここでは荷重に対する歯の曲がりや非線形剛性が重要です。ギアボディの柔軟性に起因するギア鳴りを調査するための感度解析や定性調査に適していますが、軽量ギアやリングギアには不向きです。インポリュートプロファイルと歯幅の変化が剛性に与える影響を捉えることもできます。たとえば、ギアの片側の接触がギア中心部よりも「やわらかい」といったことを把握します。このモードのコンピューター計算負荷はアナリティカルモードと同等です。

#### 高度なFEプリプロセッサ

軽量ギア、柔軟性を持つリングギア、バルク変形ギアのように、ブランク加工の穴が原因で動的トランスミッションエラー（DTE）によるサイドバンドが発生するといった場合にはより高い忠実度が必要ですが、それに対応できるのがこの高度FEプリプロセッサ手法です。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアの技術調査開発（RTD）チームは、信頼性の高い理論研究<sup>8,9,10</sup>から得た着想と低次元モデル<sup>11,12,13</sup>による高度な数値手法とを組み合わせることで、この画期的な独自の手法を実装することに成功しました。ユーザーは、背後にある高度な数値アルゴリズムを気にすることなく、この高度な手法を簡単に使いこなすことができます。FEプリプロセッサ機能を提供するSimcenter Nastran® FEの威力を活用したこのツールは、使いやすいインターフェースからアクセスできます。平歯車とはすば歯車のパラメトリックFEメッシュのほか、マルチボディソルバーの計算に必要な剛性データもここで作成します。FEベースの剛性データを使用して、軽量ギア、リングギア、非線形の接触コンプライアンスなどを含め、ギアボディの変形を詳細に考慮できる非常に強力な手法です。スライスと歯の対流結合関係は自動的に考慮されます。平歯車、はすば歯車、内歯車、外歯車といった円筒形状から、軽量ギア、変形ギアなど、あらゆる種類をシミュレーションします。MORを効果的に実装することで、使用メモリの削減を図ります。同等レベルの詳細度を実現する他の手法と比べて、コンピューター計算の負荷を桁違いに抑えます。FEメッシュとスライス数によってはコンピューター計算の負荷が高くなる場合がありますが、通常は比較的粗いメッシュを指定し、スライス数を限定することで、精度とコンピューター計算負荷のバランスを最適化できます。

# 結果

ここでは、今回の考察結果と新しいギア接触検知の各種機能について説明します。具体的には、高荷重時の歯面微調整の影響評価と風力発電用ギアボックスの動的解析を例に挙げてアナリティカルモードの機能を紹介し、妥当性評価試験の例を使ってアドバンスモードの潜在的な可能性を探ります。

## モーション解析手法: プロファイル変更解析

システム動作条件が最適化されるように歯面微調整を行ってギアボックスを設計することが重要ですが、これはアナリティカルモードで実行します。Simcenter 3D Transmission Builderを使用すると、2つの同一のほぼ歯車モデルの作成と微調整が非常に容易です。このギアは50の歯があり、標準モジュールが2.71、ほぼ角度が25.2度です。微調整として最大10 $\mu$ mの歯先 / 歯元調整、4 $\mu$ mの歯すじクラウニングを施し、両方のギアに適用しました。また、ギア鳴りを最小

化するため、名目トルク時の静的トランスミッションエラー (STE) を最小限に抑えるように調整します。図6に示すとおり、スライス数をわずかに8にしたアナリティカルモードでは、この影響を非常に明確に確認できました。2つの歯車のうちの1つが静的トルクで駆動しており、もう1つは、10 rpmの回転速度を保つため粘性減衰要素による抵抗力を受けています。回転数をさまざまに変化させたときのSTEを図6にまとめました。少ない回転数ではプロファイル調整による標準的な波形が描かれ、回転数が20NmのときのSTEが最小になる一方、ほぼ歯車に良く見られる典型的な準正弦波形で表される高い回転数では、STEも高くなります。

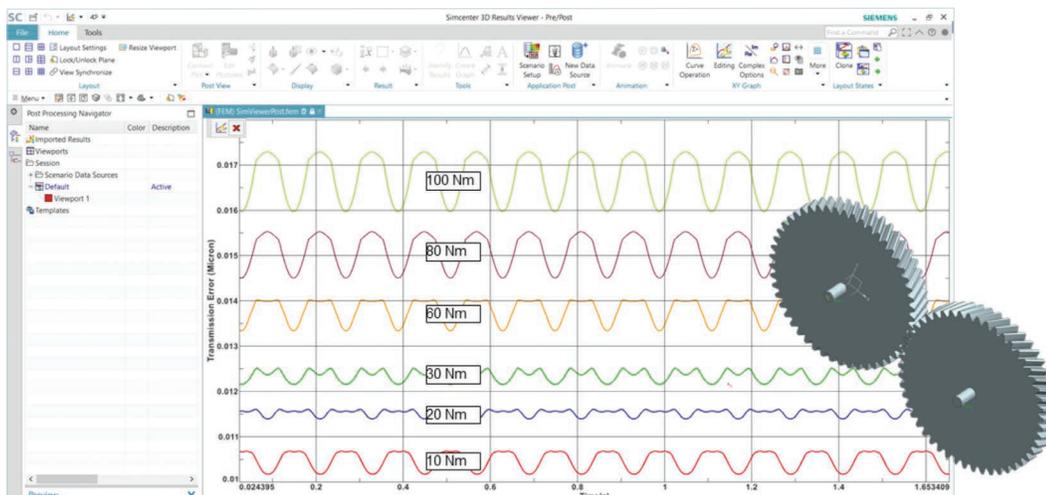


図6: 荷重を上げてプロファイルと歯先を調整したときのほぼ歯車の準静的トランスミッションエラー

**モーション解析手法: トランスミッション全体の動的解析**

ギア力のシミュレーションを実行すると、ギアからの減衰に対するシステム動力学応答の周波数を評価できます。2つ目の例として、Simcenter 3D Transmission Builderを使用して2段自動トランスミッションを作成しました。入力回転数を350 Nmまで上げながらこのモデルをSimcenter 3D Motionでシミュレーションします。シミュレーション時間を20秒とし、出力速度を0~2,500 RPMとしました。

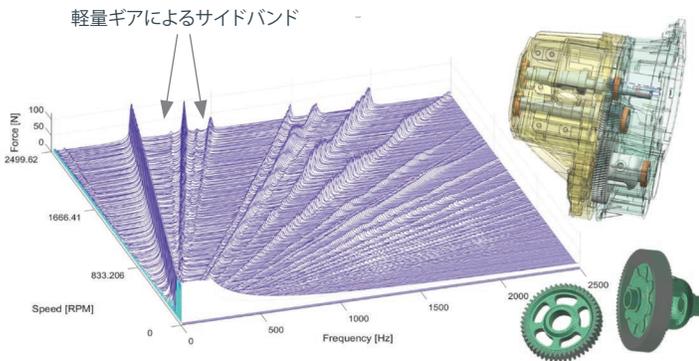


図7: 2段トランスミッションのランアップシミュレーションから得られたベアリング力の周波数スペクトラム

一方のベアリングの動力応答を図7に示します。得られた結果を周波数ドメインで後処理し、次元化しました。2つの主要メッシュ次元と2段ギアに対応する複数のメッシュ周波数を表したこのグラフは予想通りの結果になっています。これらの次元では高調波のときに振幅のピークが小さくなります。

図7の下部に示したギアは軽量化のために肉抜きしたものです。Simcenter 3D Motionソルバーを使用すると、薄い中空構造や肉抜き構造がギア起振力に与える影響を評価できます。図7のウォーターフォール図はギア接触部からベアリングまでの伝播応答を示しており、典型的なサイドバンドがはっきりと分かります。手法の妥当性評価については後述します。

Simcenter 3D環境で実行したマルチボディ過渡解析の結果をシームレスに音響解析アプリケーションにインポートできます。こうして、図8に示すようなエンドツーエンドのワークフローが実現します。このプロセスを使用して、トランスミッション筐体付近のマイクロフォンの音圧レベルのようなファンダメンタル指標に与える設計変更の影響(歯面の微調整など)を解析します。

この方法は、音源(ギア力)から音伝達経路(ベアリング、柔軟性のある筐体構造)を經由してレシーバー(マイクロフォンアレイ)にいたる全体の経路をサポートします。いずれかのサブシステムに加えた変更を簡単に解析して、設計案を最適化するとともに、ラトル音やギア鳴りなどの振動騒音を低減します。

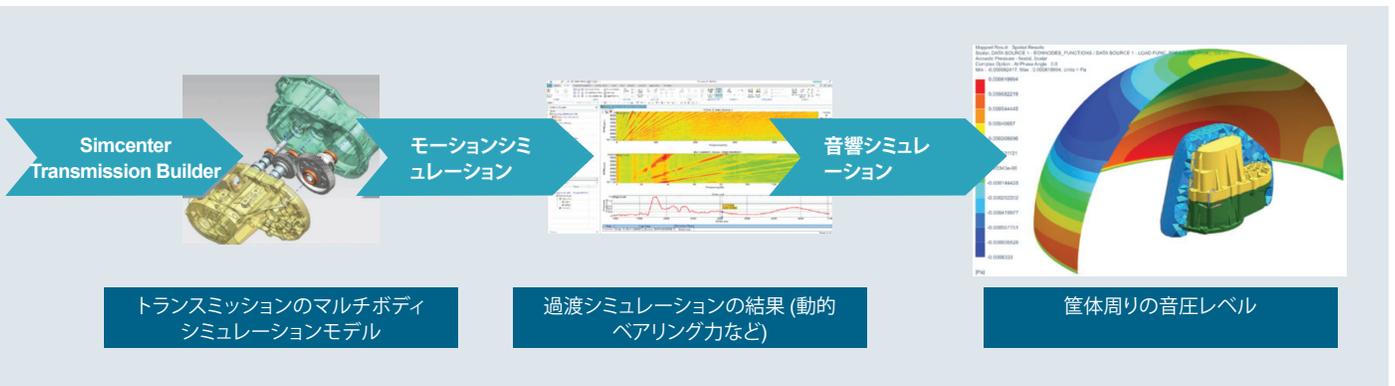


図8: ギアボックスの音響反射を評価する一般的なワークフロー

**モーション解析のための高度なFEプリプロセッサ: 柔軟性、摩擦、経験的検証**

試験データと個々の歯との高い相関性を確保するためには、ギア設計のシミュレーションにおいて柔軟性と摩擦の影響を考慮することが非常に重要です。3つ目の例で示すように、新しい高度なFEプリプロセッサ手法であればそれが可能です。高度なFEプリプロセッサ手法とそれを可能にするFEプリプロセッサはいずれもシーメンスの技術調査開発 (RTD) チームがルーヴァン・カトリック大学およびカラブリア大学と共同で開発したものです。図9は、平歯車対の荷重を増加させたときのトランスミッションエラーのばらつきを示します。被試験歯車は、開発した数値モデルの妥当性評価のために内製した歯車試験装置<sup>14, 15</sup>に物理的に取り付けます。被試験歯車は57歯あり、標準モジュールは2.6、中心距離は150 mmです。それぞれ、5 $\mu$ mと10 $\mu$ mの歯筋調整を行っています。

うち1つには3つの溝があるため、外環構造の強度が大幅に下がっています。このため、肉抜き構造と歯の相対位置によっては、トランスミッションエラー曲線のばらつきがさらに大きくなります。

図9は、完全に回転させたときのトランスミッションエラーです。外環設計に起因するばらつきの影響がはっきりと示されています。新しい高度FEプリプロセッサ手法を使用すると、ギアの柔軟性、軽量構造、摩擦効果、歯面調整など相互に影響しあう複雑な現象をシームレスに捉えることができます。

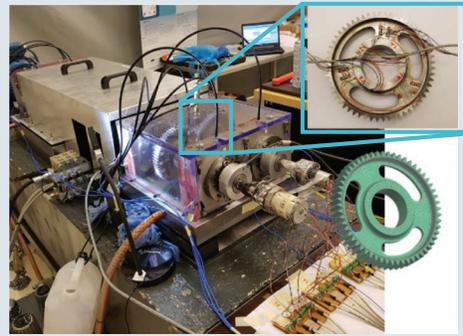
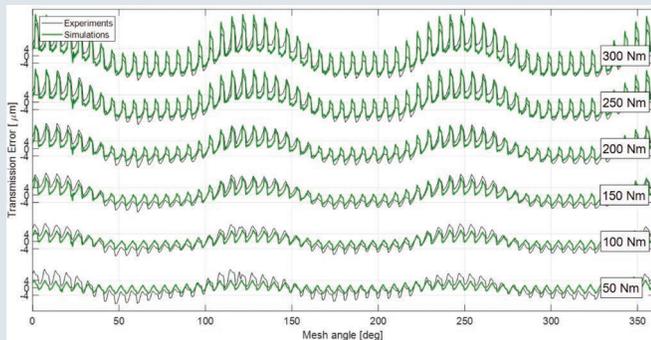


図9: トランスミッションエラーの経験的検証とSimcenter 3D MotionのアドバンスFEプリプロセッサ手法- 荷重を増加させたときの歯面微調整と摩擦に対する影響

## まとめ

シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアは、ギアボックス設計技術に幅広いシミュレーションを適用する次の一手を担うパイオニアです。Simcenter 3D Motion Transmission Builderを使用すると簡単にモデルを作成できます。また、産業用アプリケーションならではの複雑性に対処できる包括的な接触検知手法を活用することで、生産性を高めます。いくつかの産業事例で考察しました。FEプリプロセッサを使用してメッシュを生成できること、高度なFEプリプロセッサ手法の比類ない機能を使用すると、非常に優れたコンピューター計算性能を発揮して、高い精度で振動騒音（ギア鳴り、ラトル音）と耐久性の解析が可能であることを説明しました。斜角ギアとハイポイドギア、ベアリング、油圧システム、スプライン、リングギアの楕円化については引き続き、研究と開発を進めています。

## 謝辞

今回の調査にあたり、150394プロジェクト「ECOパワートレイン」(エネルギー効率の優れたパワートレイン設計のための画期的なNVH試験とシミュレーション)のFlanders Innovation and Entrepreneurship (VLAIO) および欧州委員会第7次研究開発枠組計画FP7/2007-2013 (REA合意書番号 324336 DEMETRA: “Design of Mechanical Transmissions: Efficiency, Noise and Durability Optimization”に基づく)のPeople Programme (Marie Curie Actions)より資金提供を受けています。DEMETRAは、産業界(シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア)と学术界(ルーヴァン・カトリック大学およびカラブリア大学)が共同で進めるナレッジ移転と人的交換プログラムです。DEMETRAのR&Dネットワークの一環として、機械式トランスミッションの設計技術のための画期的な手法とワークフローを開発しました。詳しくは<http://www.fp7demetra.eu>を参照してください。

## 参考文献

1. F. Joachim et al., “How to Minimize Power Losses in Transmissions, Axles and Steering Systems,” VDI International Conference on Gears, 2011.
2. A. Grunwald, “Systematic Optimization of Gear Boxes for Hybrid and Electric Vehicles In Terms of Efficiency, NVH and Durability,” 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2011.
3. NREL, NREL Data Catalog, <http://www.nrel.gov/>.
4. International Organization for Standardization, “ISO 21771. Gears – Cylindrical involute gears and gear pairs – Concepts and geometry,” 2007.
5. International Organization for Standardization, “ISO 6336-1. Calculation of load capacity of spur and helical gears – Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors,” 2006.
6. Y. Cai, T. Hayashi, “The Linear Approximated Equation of Vibration for a Pair of Spur Gears (Theory and Experiment),” *Journal of Mechanical Design* 116.2 (1994): 558-564.
7. Y. Cai, “Simulation on the Rotational Vibration of Helical Gears in Consideration of the Tooth Separation phenomenon (a New Stiffness Function of Helical Involute Tooth Pair),” *Journal of Mechanical Design* 117.3 (1995): 460-469.
8. L. Vedmar, “On the Design of External Involute Helical Gears,” Ph.D. thesis, Lund Technical University, 1981.
9. C. Weber, K. Banaschek, G. Niemann, Formänderung und Profilrücknahme bei gerad- und schrägverzahnten Rädern, F. Vieweg, 1955.
10. A. Andersson, L. Vedmar, “A Dynamic Model to Determine Vibrations in Involute Helical Gears,” *Journal of Sound and Vibration* 260.2 (2003): 195-212.
11. T. Tamarozzi, G.H.K. Heirman, W. Desmet, “An On-line Time Dependent Parametric Model Order Reduction Scheme with Focus on Dynamic Stress Recovery,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 268 (2014): 336-358.
12. N. Cappellini, T. Tamarozzi, B. Blockmans, J. Fiszer, F. Cosco, W. Desmet, “Semi-analytic Contact Technique in a Non-linear Parametric Model Order Reduction Method for Gear Simulations,” *Meccanica - An International Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017.
13. T. Tamarozzi, P. Jiranek, A. Rezayat, and S. Shweiki, “An efficient hybrid approach to gear contact simulation in multibody systems leveraging reduced order models,” 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6) – 15 June 2018, Glasgow, UK
14. A. Palermo, A. Toso, G. Heirman, R. Cedra, M. Gulinelli, D. Mundo, W. Desmet, “Structural Coupling and Non-linear Effects in the Experimental Modal Analysis of a Precision Gear Test Rig,” *Proceedings of the International Gear Conference*, 2014.
15. A. Dabizzi, G. Heirman, A. Palermo, S. Manzato, E. Di Lorenzo, S. Shweiki, A. Toso, “Multibody Modeling of a High Precision Gear Test Rig and Correlation to Experiments,” *International Conference on Noise and Vibration Engineering (ISMA)*, 2016.

## シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア

### 本社

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 972 987 3000

### アメリカ

Granite Park One  
5800 Granite Parkway  
Suite 600  
Plano, TX 75024  
USA  
+1 314 264 8499

### ヨーロッパ

Stephenson House  
Sir William Siemens Square  
Frimley, Camberley  
Surrey, GU16 8QD  
+44 (0) 1276 413200

### アジア / 太平洋

Unit 901-902, 9/F  
Tower B, Manulife Financial Centre  
223-231 Wai Yip Street, Kwun Tong  
Kowloon, Hong Kong  
+852 2230 3333

## シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアについて

エンジニアリング、製造、そしてエレクトロニクス設計を未来につなげるデジタル・エンタープライズ。それを実現するのがシーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアが進めている変革です。弊社ソリューションによって、あらゆる規模の企業の皆さまがデジタル・ツインを作成、活用し、新たな知見と機会を開拓し、より高いレベルの自動化を実現できるため、イノベーションが推進されます。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェアの製品とサービスについての詳細は、[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)をご覧ください。または、[LinkedIn](#)、[Twitter](#)、[Facebook](#)、[Instagram](#)をフォローして情報をご確認ください。シーメンスデジタルインダストリーズソフトウェア – Where today meets tomorrow.

[siemens.com/software](https://www.siemens.com/software)

© 2019 Siemens. 関連するシーメンスの商標は[こちら](#)に記載されています。その他の商標はそれぞれの所有者に帰属します。

76896-82383-C6-JA 9/20 LOC