

いすゞ中央研究所が ギヤ構造の最適化を目指す ディーゼルエンジンのさらなる進化

ジェネレーティブ デザインで軽量化した
新たなギヤがシザースギヤの背反を解消

Fusion のジェネレーティブ デザインは、検討段階での検討できる数がかなり大きく、人間が思いつかないような形状まで含めて、その数にはかなりの優位性があると考えています。

株式会社いすゞ中央研究所
研究第一部 第二グループ
主任研究員
山岸 誠弥 氏



ジェネレーティブ デザインで大幅な軽量化を実現したギヤ部品 (右) を持つ、いすゞ中央研究所の山岸 誠弥 氏

物流の分野ではトラックが世界的に高い割合を占め、日本では約92%が依存していると言われています。トラックなどの商用車には、熱効率の高さや燃費の良さ、低回転域からの力強いトルク、シンプルな構造と耐久性の高さなどからディーゼルエンジンが選ばれてきました。かつて問題とされた有害物質や騒音・振動の発生も現在では大幅に抑制されていますが、自動車による環境負荷の低減という世界的潮流のもと、さまざまな規制がさらに厳格なものとなりつつあります。

騒音規制への対応に向けた ギヤ構造の最適化

130年の歴史を持ち、既に高度な発展を遂げているディーゼルエンジンに、さらなるブレイクスルーの余地はあるのでしょうか？ 世界的な自動車メーカー「いすゞ自動車」が10年後の未来に必要な技術を開発する「いすゞ中央研究所」は、その研究の一環として、さまざまな社会的要請を受け検討項目が増え続ける自動車部品の設

計自動化に取り組んでいます。従来はシザースギヤで対応していたギヤの騒音低減に対しても、ジェネレーティブ デザインにより大幅に軽量化したギヤを新たに開発する先進的なアプローチを試行。ギヤ構造のさらなる最適化に臨みました。

同研究所の山岸 誠弥 主任研究員は、「商用車のディーゼルエンジンでは、ピストンの往復運動を回転に変えるクランクシャフトと、その回転をバルブの動きに変換することで開閉を制御するカムシャフトへのトルク伝達に、ベルトやチェーンより耐久性の高いギヤが使われています」と説明します。このギヤから発生する騒音は想像以上に大きなもので、同研究所のテストによると、トルク変動を起点とするギヤ同士の衝突で発生するギヤラトル音（歯面の意図的な隙間で生じるガタガタという音）は、エンジン騒音の19%（エンジン回転数2000rpm、全負荷の分析）に寄与しているということです。

いすゞ自動車の主力商品である小型トラック「エルフ」の4JZ1エンジンでは、このギヤラトル音の



株式会社いすゞ中央研究所
研究第一部 第二グループ 主任研究員
山岸 誠弥 氏

ギヤ構造の最適化で目指すディーゼルエンジンのさらなる進化

騒音源対策としてギヤトレイン（複数枚のギヤを並べた伝達・変換機構）内にシザーズギヤが組み込まれています。シザーズギヤは、ばねを介して接続した2枚重ねのギヤで、相手側のギヤを挟み込むことでギヤ間の相対運動を抑制。ギヤラトル音を低減できるメリットを持つ一方、部品点数や設置に必要な構造の増加により製造コストが上がり、摩擦の増加による燃費の悪化や摩耗などの背反も避けられません。

「これまでギヤの歯自体の形状を工夫して噛み合いの面積を稼いだり、厚みの検討や肉抜きなどで軽量化を図ったりしてきましたが、スペースの都合でどうしても限界がありました」と、山岸氏は語ります。このシザーズギヤを、より軽量のギヤで代替できれば騒音低減効果が得られる一方で、「発生する騒音の音量をCAEで計算してみたところ、シザーズギヤと同レベルの効果を得るには、30-40%というレベルでの軽量化が必要であることが分かってきました」という山岸氏は、この新たな課題への対応方法を探る中で、Autodesk Fusionに搭載されたジェネレーティブ デザインの手法に着目します。

ギヤの43%軽量化で騒音と燃費を低減

ジェネレーティブ デザインは、材料や製造方法、パフォーマンス要件などを定義したパラメーターをもとに、AIとクラウドコンピューティングを使って幅広い設計案を素早く生成する機能で、人間では思いつかないような独特な形状や新たな解決策を提示します。ギヤの場合も、歯面への荷重を設定することで形状生成が可能であると判明。そのモデルは、荷重を受けて動力伝達を行う歯、歯を支持する外周部、回転 摺動する軸受部、外周部と軸受部を接続するギヤ本体の4分割した形で定義され、他部品との接続部は保持領域として、ギヤ本体がジェネレーティブ デザインによる構造生成の対象とされました。

「当初は、どれくらい新規性を持った軽量化ができるのかが不安でした。もともと人間の手で、ある程度は削って軽量化されていたため、これ以上削るところはないのではないかとも思いました」と語る山岸氏の心配をよそに、2カ月ほどの構造の検討を経てジェネレーティブ デザインから実際に生成された形状は、想像以上に大幅な軽量化を実現していました。

斬新な形状のため、当初は山岸氏自身だけでなく実験担当者も不安になったと言います。「重量

がとんでもなく軽くなったことには驚かされました。斜め方向には厚みがあるものの、荷重がかからない方向から見ると本当に薄い。計算上は正しうに見えても、入力に何か見落としはなかったのかと不安になりました」と、山岸氏は当時を思い起こします。「タイヤのホイールに適用した画像などは見ていたので、ある程度は滑らかな形状が出てくるとは思っていたのですが、それでも削られ過ぎてるように見えました」。

その後、試作品が完成。生成された多数のデザインの中から、43%の軽量化を実現したモデルが採用されました。「5軸の切削加工や鋳造などを製造条件にすると、足の部分が二股になったり、もっと細かく分かれたりするような複雑な形状も出てきました。そうした形状でも重量的にはさらに数%軽くなる程度だったので、今回は試作品として切削加工をしやすいものを選択しました。このモデルは3軸の切削加工の設定ですが、これでも十分に軽いですね」。

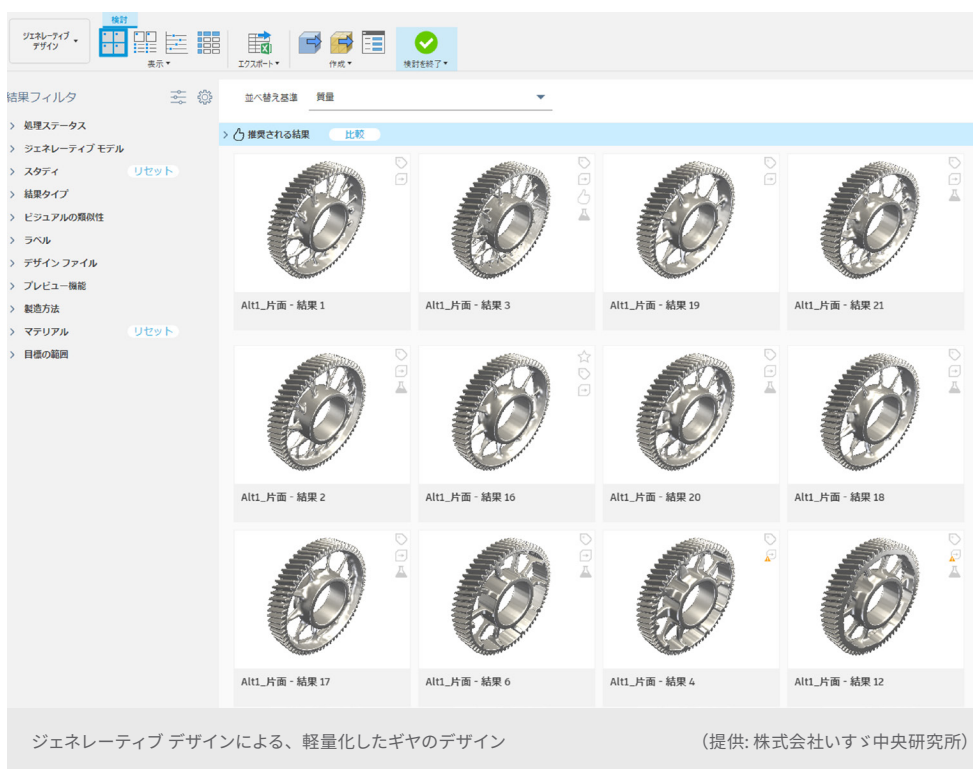
シザーズギヤに匹敵する騒音低減の効果を確認

この試作品をもとにモータリング試験での実機評価が実施されますが、その時点ではエンジンに

載せてテストすることも躊躇われたと言います。「まずは外部にモーターをつないだ状態で、エンジンは燃焼させずにテストを行いました。その後、テストベッドから取り外して検証を行い、さらに実機試験による騒音、フリクションの計測が行われました」。

こうした計測結果を従来のギヤトレインとも比較した結果、2つのギヤを試作ギヤと入れ替えることでシザーズギヤと同程度の騒音低減が実現する一方、0.5%の燃費低減の効果が得られることも判明します。「このテストで、シザーズギヤの背反が完全に解消されるような結果が得られました」と、山岸氏。

「駆け足で検討を行いました。検討から実際に作成可能な形状が出来上がるまで、非常に短時間で進めることができました。試作品は、歯のところまで作り込んでいる量産部品を開始形状として、そこからCADデータに基づいた切削加工を行っています。試作品での試験では切削加工で製作可能な形状が出来上がることが重要だったので、製造性まで考慮できることのメリットも大きなものでした。外から見える部品ではないのでデザイン性は特に検討せず、作成された形状をそのまま採用できたことも、期間を短縮できた要因でし



(提供: 株式会社いすゞ中央研究所)

ギヤ構造の最適化で目指すディーゼルエンジンのさらなる進化

た」。

ジェネレーティブ デザインにより生み出された形状は、山岸氏に3次元設計への取り組み方を再考させるものにもなったようです。「ギヤには斜めに荷重がかかりますが、それを一番強い形で受け止める構造が提案されていました。人間も3D CADソフトを使うことで、画面の中では3次元で扱っています。しかし実際には3次元的に考えられていないというか、設計思想が2Dの部分もあって、空間認識して設計するということの難しさを感じました」。

量産化に向けた今後の取り組み

「実機試験により問題がないことが確認できたため、今後は量産化に向けて進めていきたいと考えています」と、山岸氏は続けます。「商用車はかなり長期間使われるもので、ずっとエンジンを回し続けるような大掛かりな試験が必要なので、そうした耐久試験に載せたいと考えています。荷重が面にしかかからないギヤは検討しやすい部類に入りますが、より複雑な形状の検討も始めてはしています」。

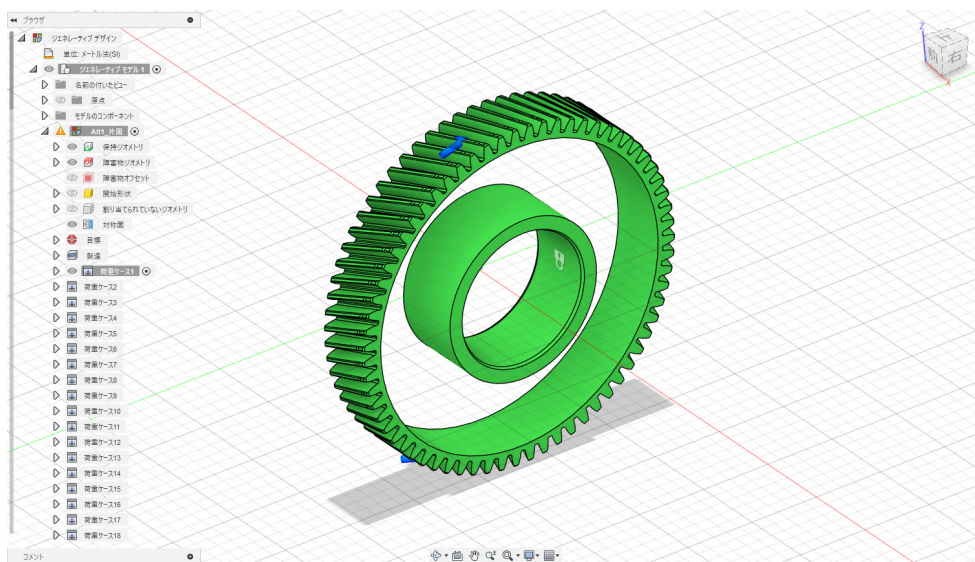
ジェネレーティブ デザインの活用のためAutodesk Fusionを使い始めた山岸氏は、「Fusionは、使いやすいソフトウェアという印象で、また計算が完全にクラウド上で行われるというのも、私にとっては新しい経験でした」と述べています。「解析をワークステーション側で行うソフトが多い中で、Fusionであればいろいろな作業を同時並行で進められというのは、かなり強い部分だと思います。形状が出てきた後の計算をかけるところは最近か

なりスピードアップしたようなイメージですし、開発のスピードも速いし、かなり統合が進んでいると思います」。

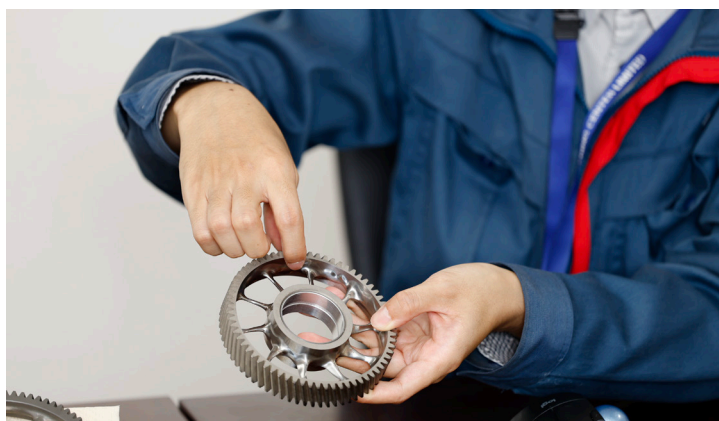
「Fusionのジェネレーティブ デザインは、検討段階での検討できる数がかかなり大きく、人間が思いつかないような形状まで含めて、その数にはかなりの優位性があると考えています。また、今回の試作を受けて周囲の人たちも興味を持ち、別の部署でもブラケットの形状を検討することなどにも、徐々に使われ始めるようになりました。人手不足の問題もある中、リサイクル、ELV規制を含めた先進的な検討項目が今後追加されてくると、

もう人の手では設計が追いつかない時代が来ると思っています」。

その強力なサポートとなるジェネレーティブ デザインについて、山岸氏は「まずは取り組んでやってみるところが大切」だと語ります。「従来の方法の図面を描くのとは考え方がかなり違い、物ありきで考えるより計算によって出すというところがある。シミュレーションの場合は、荷重を与えて、それによって応答がどう変わるのかを計算で求めることが多いので、そういうシミュレーション的な考え方、気の持ち方で取り組むことが重要だと感じています」。



Autodesk Fusionでジェネレーティブ デザインを活用した新たなギヤの構造を検討 (提供: 株式会社いすゞ中央研究所)



力のかかる方向で厚みは大きく異なっている



ジェネレーティブ デザインにより43%の軽量化を実現した試作品(右)と従来のギヤ部品