論文・報告

ジェネレーティブデザインを活用したディーゼルエンジンのギヤ構造最適化

Gear Structure Optimization of Diesel Engines Using Generative Design

山岸　誠弥*　Seiya Yamagishi
岡崎　一也*　Kazuya Okazaki
石川　泰裕*　Yasuhiro Ishikawa
山下　健一*　Kenichi Yamashita

要　旨

ジェネレーティブデザインをディーゼルエンジンの動力伝達用ギヤに適用し、ギヤラトル音低減とフリクション低減の両立を検討した。代用特性値を用いた感度評価で目標値を設定し、生成構造を試作して実機評価した結果、フリクションを悪化させず従来と同等の騒音性能が得られた。

Abstract

Generative design is an artificial intelligence technology that generates design candidates from criteria defined by the engineer. It was applied to a diesel engine gear structure to resolve the trade-off between gear noise reduction and friction reduction. Sensitivity studies using a gear train CAE model validated the input conditions. A prototype selected from the generated designs was evaluated in an engine test, and achieved noise performance equivalent to conventional parts without worsening friction.

1　はじめに

商用車では、内燃機関のさらなる性能向上と電動化対応の両輪で開発が推進されていることに加え、製造条件の多様化やサーキュラーエコノミーなどの環境因子により、検討すべき条件が複雑かつ広範化することで、設計検討のさらなる効率化が求められる。近年では、ChatGPTをはじめとした「ジェネレーティブAI(生成AI：Generative AI)」の活用による業務効率化を皮切りに、創造的な仕事にも生成AIを活用する動きが出始めている[(1)]。従来のAIは決められた行為の自動化を目的としていたのに対し、生成AIは新しいコンテンツを生成することを目的としており、日常業務から創造的業務への活用が進むことが予想される。また、全世界の生成AIに関連する市場規模は今後も急速に拡大し、2032年には1,519億ドル(約23兆円)に達するとの報告もある[(2)]。生成AIは各業界で活用が進められており、製造業においてはGD(Generative Design)と呼ばれる設計手法が提案されている[(3)-(5)]。GDの活用事例として、フレームなどの支持部品への適用例が報告されている一方で、摺動(しゅうどう)部を持ち、それ自体が駆動する部品に適用し、実機での性能評価結果を報告した事例はほとんど見られない。本報では、GDをディーゼルエンジン内の動力伝達用ギヤに適用して構造最適化を実施し、生成された構造を再現した試作品を実機エンジンに搭載して評価することで、GDを活用した構造検討の有効性を検証した結果を報告する。

2　ジェネレーティブデザインとは

GDは、設計者が設定した用途における材料、強度、コスト、性能などの制約条件をソフトウェアへ入力することで、多数の構造案を生成する手法である。本研究では、オートデスク製FusionのGD機能を用いて構造を生成した。本機能では、最適化手法にトポロジー最適化の一種であるレベルセット法(Level Set Method)を採用するとともに、複数の製造条件と材質を考慮可能とし、クラウドテクノロジーの活用による並列計算により多数の設計案を同時に生成する。レベルセット法は、対象構造に対して一つ次元を上げたレベルセット関数を導入することで、境界を判別する手法である。例として、2次元の2つの境界を分ける場合は、**図1**に示すようなレベルセット関数を用意する。ここで、各節点におけるレベルセット関数は、境界をΦ=0、構造の内側はΦ>0、

*(株)いすゞ中央研究所

Copyright© 2026 ISUZU MOTORS LIMITED.
All Rights Reserved. 無断転載・複製・配布禁止

構造の外側はΦ<0として構造境界を定義する。構造最適化では、各節点を境界からの符号付距離で初期化したあと、目的となる応力などを繰り返し計算しながら、荷重経路に垂直な方向に境界を移動させることで構造を最適化する。密度法などのほかのトポロジー最適化技術と比較してレベルセット法を用いる利点は、生成される構造の境界が明確かつ滑らかになることと、自然な形で境界の分離・結合が表現可能なことである[6]。また多くの場合、トポロジー最適化で得られた3次元構造に対して全体のバランスを崩さずに修正するのは困難であるが、構造の境界が明確かつ滑らかになることにより生成された構造に対する修正が少なくなり、構造生成から実機採用までの工程を短縮できる利点もある。

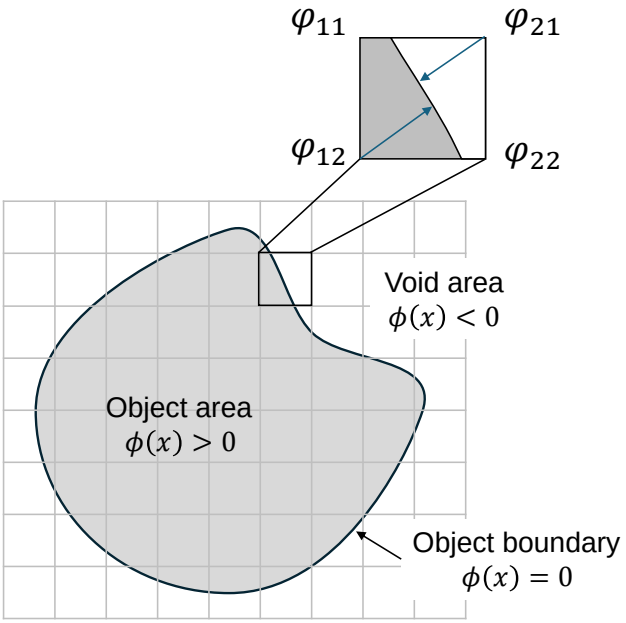


図1　レベルセット法によるトポロジー最適化の懸念

構造生成のための要件定義として、モデル定義、荷重と拘束条件の設定、目標値、材質、製造条件の定義を行う。モデル定義では、保持領域と障害物領域を設定する。保持領域には、最終形状として残す部位を指定し、荷重と拘束条件を設定する。障害物領域には、ほかの部品との干渉などを防ぐための制約を設定する。

構造のどの部位を保持領域とするかは、対象物を要素に分解したうえで、他部品との接続や機能維持を考慮して設定する。更に、質量最小化または剛性最大化などの目標値の設定と応力に対する安全率、候補となる材質及び切削加工、鋳造、3Dプリンティングなどの製造条件を定義する。各要件定義の組み合わせの数だけクラウド上で並列計算することで、多数の設計案が生成される。GDによる構造生成はソフトウェアにより自動化されている一方で、構造生成の前処理としてソフトウェアに適切な境界条件と設計パラメータを入力し、GDにより生成された構造を評価及び修正して採用判断する工程は人の手で行うため、全てが自動化されているわけではない。

3　構造最適化手法のギヤ適用

商用車用ディーゼルエンジンでは、クランクからカムシャフトへのトルク伝達をギヤトレインにより行っており、騒音寄与に占めるギヤラトル音の寄与率が比較的大きい。既報[7]では、実稼働TPA(Transfer Path Analysis)と呼ばれる騒音寄与分析手法を、**表1**に諸元を示す直列4気筒ディーゼルエンジンに適用し、加速走行騒音試験での最大音圧発生条件に近いエンジン回転数2,000rpm全負荷のエンジン騒音の寄与を分析した。寄与分析の結果、エンジン騒音のうち19%がギヤラトル音であることが判明した。そのため本エンジンでは、ギヤラトル音の騒音源対策としてシザーズギヤを採用したが、トルク付与によりかみ合い点がピッチ円上からずれることなどを原因とするフリクション増大が生じ、燃費悪化が課題となった。燃費の悪化を招くシザーズギヤに対して、構造変更によるギヤラトル音の低減が可能であれば、燃費向上と騒音低減の両立が可能になると考えられる。そこで、背反が解消可能な目標値検討のため、ギヤ構造の代用特性値を用いたパラメータスタディを実施した。また、その目標値を実現する構造をGDによって生成し、燃費向上と騒音低減の両立が可能なギヤ構造を検討した。

表1　供試エンジンの諸元

Engine type	Water-cooled 4 cyle DI-diesel engine
Number of cylinders	In-line 4 cylinders
Total displacement	2,999 cm^3
Bore × Stroke	95.4 × 104.9 mm
Maximum torque	430 Nm / 1450 ~ 2860 rpm
Air-charging system	Inter cooled turbocharger
Timing train	All gear

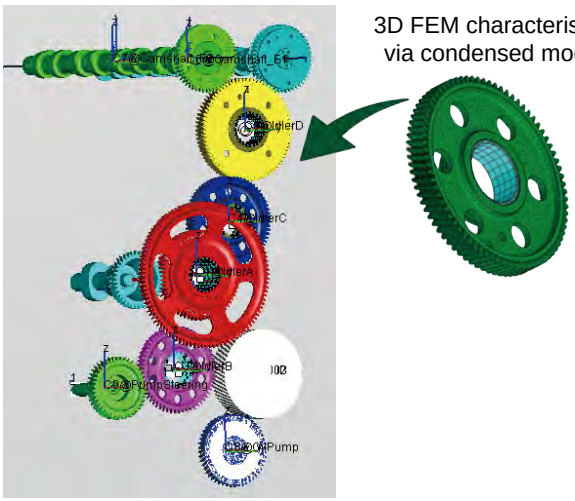


図2　弾性ギヤ本体を考慮したギヤトレインモデル

3.1 代用特性値による目標値の検討

燃費向上と騒音低減の背反解消が可能な構造を検討するため、ギヤ構造の代用特性値である重量と剛性の変更による感度調査を、AVL製EXCITE Power Unitで作成したギヤトレインモデルを用いて実施した。**図2**に示すように、各ギヤ構造の情報としてFEMモデルから作成された縮退モデルが適用されており、FEMモデルの密度とヤング率を変更して一連の解析を実行することで、重量と剛性に対する感度評価が可能である。また、ギヤかみ合い要素にギヤ本体の変形によるかみ合い影響を考慮可能なACYG (Advanced Cylindrical Gear Mesh)ギヤ接触モデルを採用することで、代用特性値に対する感度調査だけでなく、GDにより生成されたギヤ構造の弾性変形による歯の傾きを考慮することも可能である。

重量と剛性の影響をエンジン騒音レベルに換算して評価するため、実稼働TPA (伝達経路解析：Transfer Path Analysis)とを組み合わせて評価を実施した。まず、ギヤトレインモデルにより算出したアイドルギヤ軸芯加速度レベルの変化量をゲインとするフィルタを作成し、実稼働TPAの対応する参照信号に適用した。次に、フィルタ適用後の信号と伝達率からエンジン騒音を再合成することで、代用特性値の変更に対するエンジン騒音レベルの変化量を算出した。**図3**は重量変更に対する騒音レベル変化量の推定結果である。ギヤイナーシャが低減することで歯打ちの衝撃力が低減し、騒音レベルの低減効果が得られた。ギヤCとギヤDの感度が比較的高い一方で、ギヤDに設置され0.4dBの低減効果が得られるシザーズギヤの代替として十分な騒音低減効果を得るには大幅な重量低減が必要である。**図4**は剛性変更に対する騒音レベルの変化である。剛性低下により騒音レベルが増加する傾向が確認されたものの、重量変更に比べると変化が小さい。また、フリクションに対しても同様の感度調査を実施したが、変化は非常に小さかった。重量と剛性変更による調査結果から、ギヤCとギヤDの大幅な重量低減によりフリクションの悪化なく騒音低減効果が得られることが判明したため、GDを用いて大幅な重量低減が実現可能なギヤ構造を検討した。

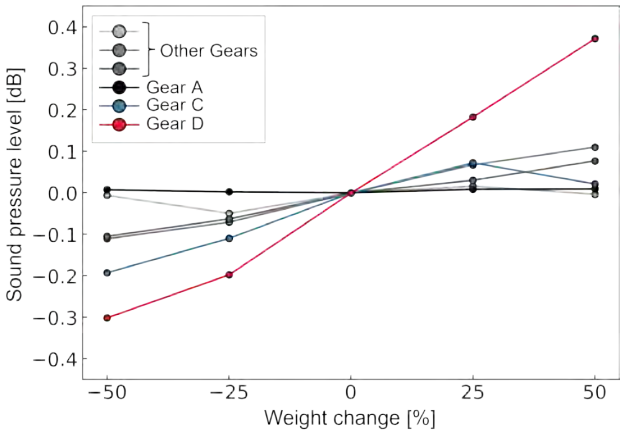


図3　ギヤ重量変更に対する騒音レベル変化

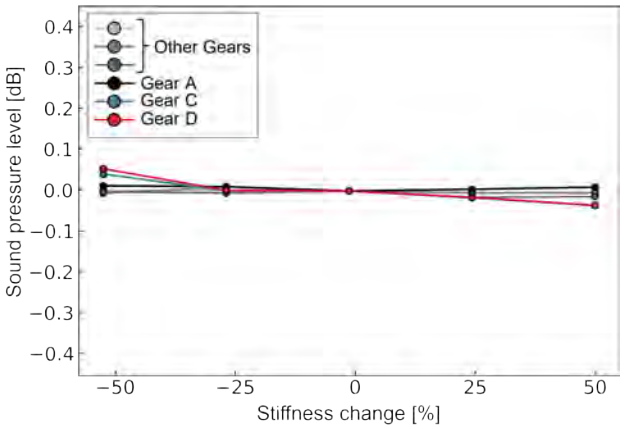


図4　ギヤ剛性変更に対する騒音レベル変化

3.2 制約条件の検討

GDによる構造生成のため、モデル定義、荷重と拘束条件の設定、目標値、製造条件を設定した。モデル定義では、ギヤを構成する要素に分解し、最終形状に残して荷重と拘束条件の設定を行うための保持領域と構造を生成する領域の切り分けを実施した。ギヤ構造を構成要素に分解すると、①荷重を受けて動力伝達を行う歯、②歯を支持する外周部、③回転摺動する軸受部、④外周部と軸受部を接続するギヤ本体に分けられる。①歯と③軸受部は、他部品との接続部であるため保持領域とした。残る④ギヤ本体をGDによる構造生成の対象とした。

図5に示すギヤ歯を支持する外周部高さは、イナーシャを減少させる観点ではできるだけ小さくする必要がある一方で、小さすぎると歯の傾き増大によりかみ合いが悪化する。そこで、隣接するギヤの一方を固定し、もう一方に荷重を付与して変位を計算し、隣接するギヤ間の相対コンプライアンスを評価した。外周部高さに対する隣接する歯間の相対コンプライアンスの変化を**図6**に示す。この結果から相対コンプライアンスを大きく悪化させずに、できるだけイナーシャが小さくなるような外周部高さを設定した。次に、設定した保持領域に対して荷重条件の設定を行った。**図7**に示すように、ギヤ歯にはギヤトレインモデルを用いて算出した最大荷重をギヤ歯面と垂直方向に与え、軸受内周部には拘束条件を設定した。このギヤはほかのギヤと3箇所でかみ合うため、3箇所それぞれの荷重と拘束条件を一つの荷重ケースとして設定し、同様の荷重ケースをギヤ全周77歯分設定した。また、目的関数は重量低減のために質量最小化を設定し、製造条件は出力される構造案の検討の幅を広げるために切削加工や鋳造などの複数条件を設定した。

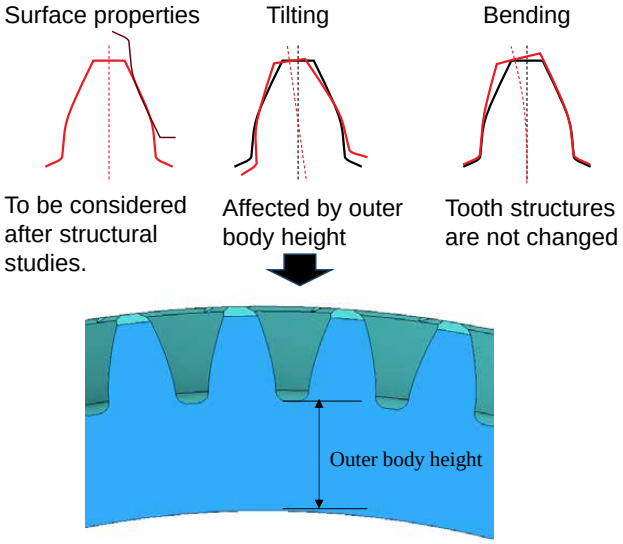


図5　ギヤかみ合い力に影響する因子及び構造変更の影響

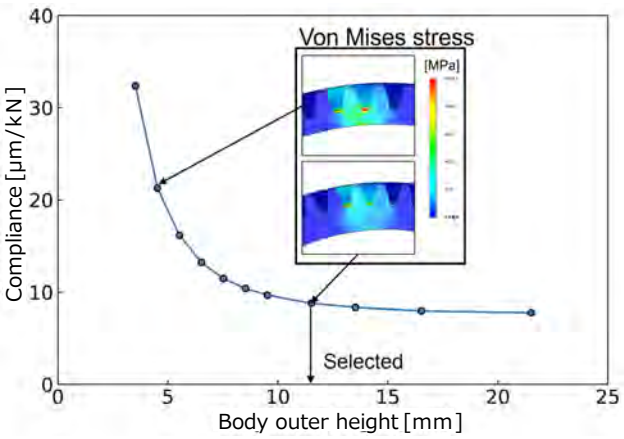


図6　ギヤ本体外周高さに対する歯部コンプライアンス

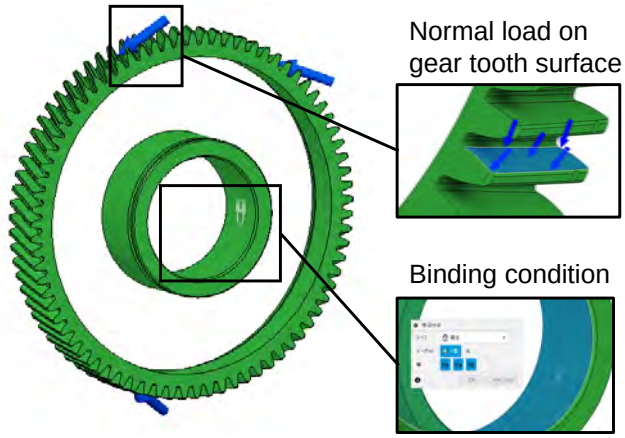


図7　保持領域及び荷重条件の設定

4　GDによる構造生成結果

GDによる構造最適化では、荷重ケースごとの応力計算が行われ、各部位における応力最大値をもとに構造が最適化される。構造生成結果は、設定した条件の組み合わせごとに多数生成され、その中からデザイン性や実際の製造のしやすさなどを加味して選択する。**図8**にギヤCについて出力された生成結果の一部を示す。同じ荷重条件でありながら、そのほかの要件定義の組み合わせの違いから、さまざまな構造が生成された。ほとんどの構造でギヤ本体は10本の支柱で支持する構造であり、外周部が枝分かれした構造も存在する。また、3次元で最適化されているため、荷重が負荷されるギヤ歯面に対して垂直方向に厚みがある。ギヤの歯数77歯に対して本体は10本の支柱構造であるため、一本一本が支える荷重に応じて形状が少しずつ異なっているにもかかわらず、ギヤ全周で均等な荷重を支持するため、結果的

に重心位置がギヤ中心に位置し、バランスの取れた構造となった。本研究では、ギヤラトルの低減に十分な重量低減が可能で、試作品製作のために従来品に対する追加工により製作可能な構造を選定した。

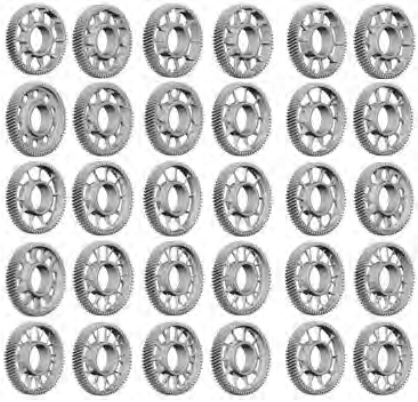


図8　GDによる構造生成結果

選定した構造データを縮退モデルに変換し、ギヤトレインモデルに反映することで騒音レベルの低減量を評価した。**図9**にギヤCとギヤDの重量変更時の結果に加えて、選定した構造を反映して算出した騒音レベルの結果を示す。選定した構造の結果は、重量変更による感度評価の傾向とほぼ一致しており、構造変更だけでギヤラトル音の低減が可能な構造が得られた。一方で、剛性低下により固有振動数と振動モードには大きな変化が確認された。例として、ギヤCの従来構造と生成された構造の6,000Hz以下の固有振動数を**図10**に示す。従来構造では、ギヤ外周部と本体及び軸受部が連成する振動モードがあるのに対し、生成された構造では本体の剛性が著しく低下したことで、外周部のみが振動して軸受部との連成が確認されない振動モード(1次、5次)、本体の変形が主体で外周部の変形を伴わない振動モード(2次、3次)、及び構造全体が連成する振動モード(4次)が現れた。これらの重量低減と固有振動数の変化が振動騒音とフリクションに与える影響を調査するため、試作ギヤを製作して実機エンジンでの評価を実施した。

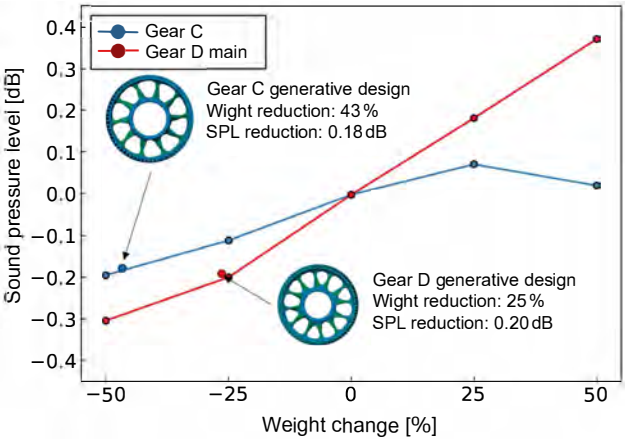


図9　重量変更時及びGDギヤモデルの騒音レベル

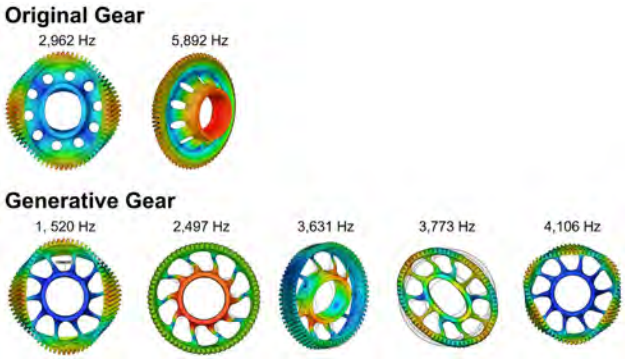


図10　従来ギヤ及びGDギヤの6,000Hz以下の固有振動数

5　実験結果

GDにより生成された構造をもとに試作したギヤを**図11**に示す。本研究では、検証のため生成された構造をそのまま切削加工により再現した。試作ギヤを実機エンジンに設置し、エンジン騒音、ギヤ回転速度、アイドルギヤ軸芯振動を同時計測した(**図12**)。エンジン騒音は、エンジン周囲4方向(左右前上)1mに設置したマイクロホン音圧を平均して評価した。ギヤ回転速度は、各ギヤに設置した電磁式回転検出器のパルス波形出力をヒルベルト変換して得られる解析信号からかみ合いギヤ間の相対周速度を算出した。

加速走行騒音試験での最大音圧発生条件に近いエンジン回転数2,000rpm全負荷のエンジン騒音評価結果を**図13**に示す。従来仕様はギヤDにシザーズギヤが設置された仕様である。まず、ギヤDは変更せずにギヤCを試作ギヤに変更したところ、0.2dBの低減が確認された。次に、ギヤDのシザーズギヤを外すと0.4dBの増加となり、最後にギヤDを試作ギヤに変更すると0.2dBの低減となった。結果として

ギヤCとギヤDを試作ギヤに変更することで、従来仕様の騒音レベルと同程度となった。また、フリクション評価では、シザーズギヤを取り外したことで0.5%の燃費低減効果が得られた。この結果から、試作ギヤによって従来の課題であった燃費向上と騒音低減の背反解消が可能な構造が得られたといえる。

図11　試作したGDギヤ

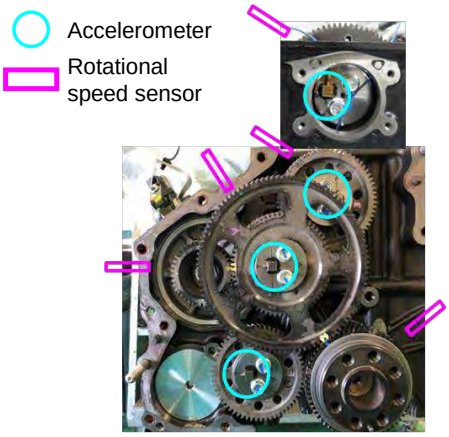


図12　ギヤラトル測定用センサ配置

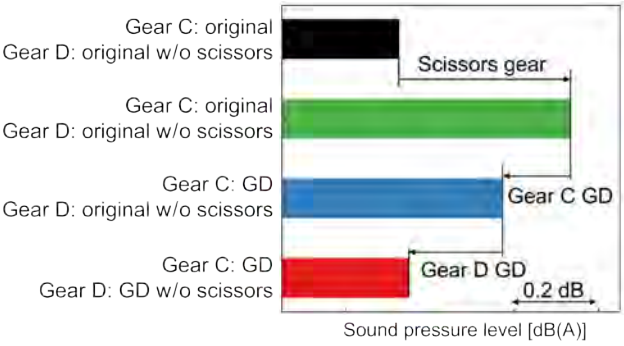


図13　2,000rpm全負荷でのGDギヤ及び
シザーズギヤのエンジン騒音評価結果

次に、ギヤラトル音の低減効果を詳細調査するため、ギヤC-ギヤD間の相対周速度とギヤCのギヤ軸芯加速度を測定した結果を**図14**に示す。ギヤC-ギヤD間の相対周速度はギヤトレイン上部の排気バルブの閉弁に伴うカムトルク変動を起点として、駆動側より被動側の速度が速く相対周速度が負になってバックラッシュ間でギヤ間が離れたあとに、相対周速度が反転してギヤCがギヤDに衝突するタイミングでギヤラトルによる振動が発生する。ギヤの回転変動の振幅にはほとんど変化が確認されないものの、イナーシャの低減により衝撃力が低下したことで、ギヤラトルにより生じる振動が低減した。

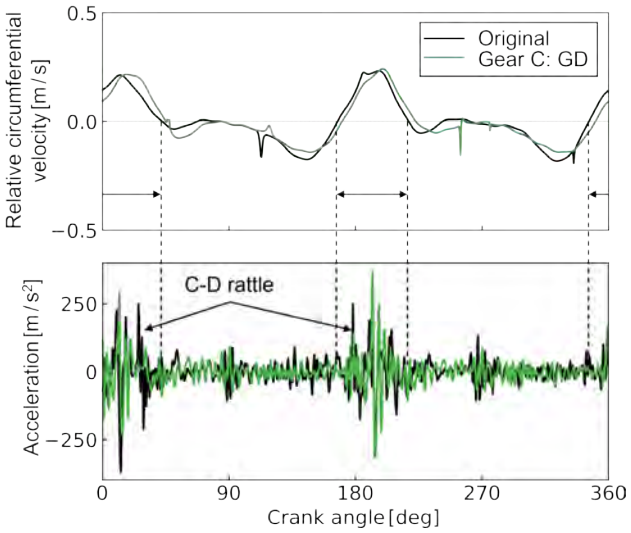


図14　ギヤC-D間の相対周速度及び
ギヤC軸芯加速度

また、**図10**に示したようにギヤ本体部の剛性低下により固有振動数と振動モードが大きく変化したことによる影響を調査した。**図15**に従来仕様及びギヤCとギヤDを試作品に変更した際のモータリング加速運転時のギヤC軸の振動レベルを示す。ギヤラトルは衝撃加振であるため加振周波数成分は低周波数から高周波数まで一様であるのに対し、試作ギヤを適用した場合では、1,500Hzと4,000Hz付近では振動レベルが低下し、2,000Hzから3,500Hzの範囲では増加が確認された。振動レベルの低下が確認された周波数には、**図10**で示したようにギヤ構造の外周部のみが振動し、外周部と軸受部の連成が確認されない振動モードが存在するため、ギヤ歯が励起されたとしても軸芯には振動エネルギーが伝達されず、振動低減効果が表れたと考えられる。一方で、振動レベルが増加した周波数では、本体の変形を主として外周部の変形を伴わない振動モードと構造全体が連成する振動モードが存在するため、ギヤ歯から軸芯

までの振動伝達が増加したと考えられる。**図16**は、かみ合い次数であるエンジン回転65次の加速度レベルを抽出した結果である。2,700rpm以下では振動レベルの悪化は確認されない。一方で、2,700rpm以上の回転数では悪化が確認されるものの、エンジン騒音に対する寄与が高回転側では低下してほかの騒音成分にマスキングされるため、実用上はかみ合い音の悪化が確認されなかった。

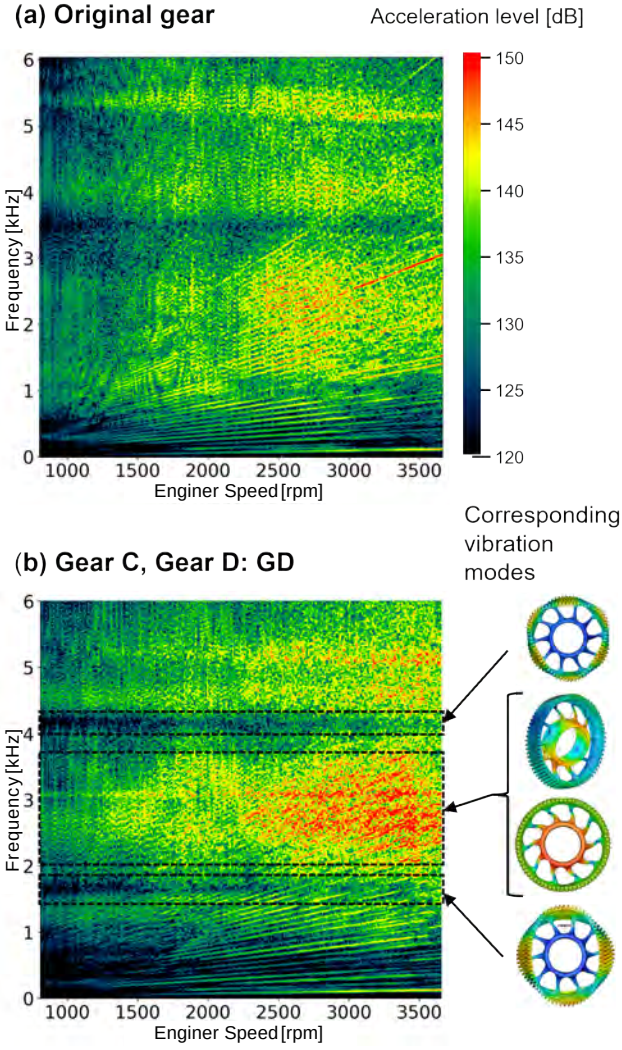


図15　従来ギヤ及びGDギヤのギヤ軸芯加速度レベル

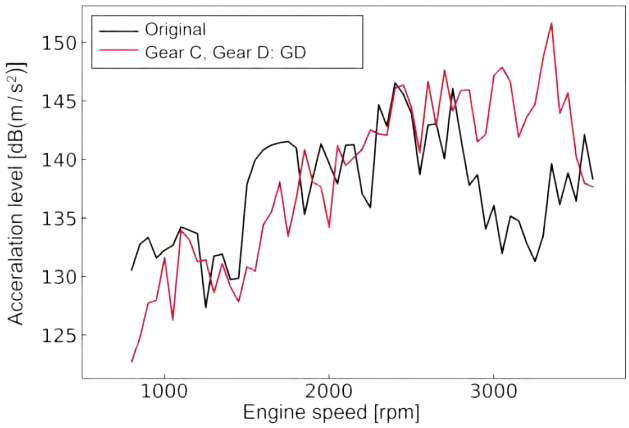


図16　モータリング加速時のエンジン回転数に対する65次加速度レベル

6　おわりに

商用車用ディーゼルエンジンのギヤ構造を対象にGDによる構造生成と検証を実施した結果、構造最適化とクラウドテクノロジーの活用による並列計算により多数の設計案を生成する本手法の有効性が示された。GDを適用した構造最適化に加えて試作品の実機適用と性能の詳細分析を実施した点が本報告の新規性である。本研究により得られた結果を次に示す。

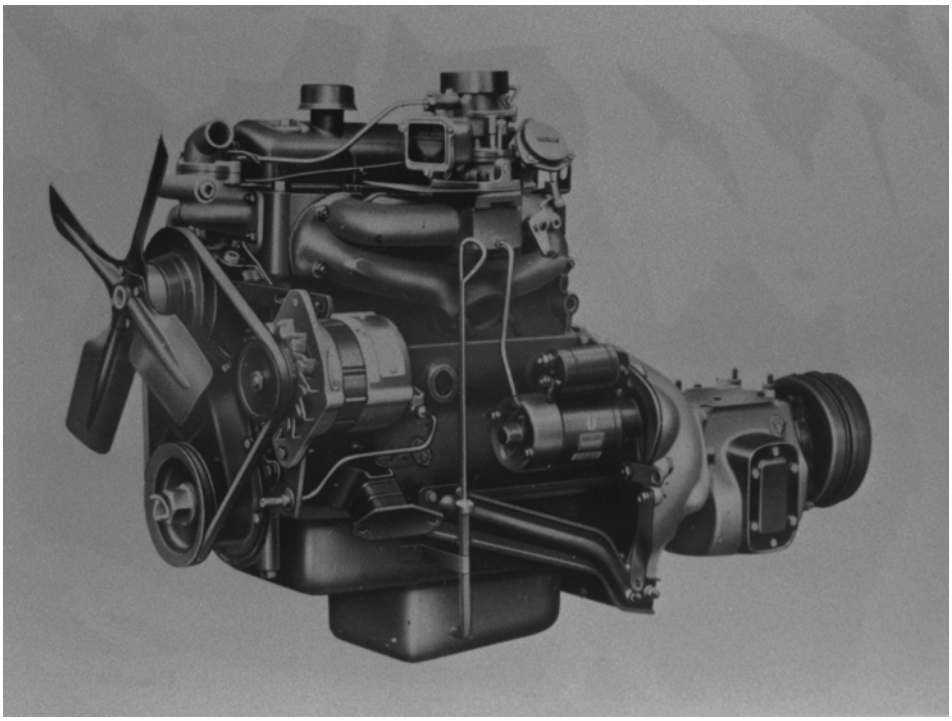
1) 構造最適化に必要な事前検討のため、ギヤトレインモデルを用いてギヤ構造の代用特性値である重量と剛性を変更してエンジン騒音への感度評価を実施した結果、アイドルギヤの大幅な重量低減によりギヤラトル音の低減が可能であることが明らかになった。
2) GDによるギヤ構造の生成を行い、生成された構造データに基づき試作品を製作して実機エンジンで振動騒音とフリクション評価を実施した。エンジン回転数2,000rpm全負荷ではフリクションの悪化なしでシザーズギヤと同等の騒音低減効果が確認され、燃費向上と騒音低減の背反解消が可能な構造が得られた。
3) ギヤ本体剛性の低下により、従来ギヤの1次の振動モードが、ギヤ歯で生じた振動がギヤ内周部に伝達されにくい振動モードに変化した。これにより、ギヤ音の騒音寄与が大きいエンジン低回転数では、かみ合い次数振動がギヤ軸を介してシリンダブロックへ伝達する振動が抑制され、かみ合い音の悪化につながらなかった。

本文献は2024年10月23日自動車技術会秋季学術講演会において発表した原稿を加筆修正したものである。

参考文献

(1) 塩崎潤一：生成AIで変わる未来の風景，NRI 未来創発センター研究レポート，Vol.10(2023)，p.2-5，https://www.nri.com/jp/knowledge/report/lst/2023/souhatsu/1201，(参照日：2024.07.26)
(2) Market.us：Generative AI Market Size, 2024-5, https://market.us/report/generative-ai-market/#overview, (参照日：2024.07.26)
(3) Prasad Umakant Bhad：Multiple Novel Generative Design Solutions for Various Mechanical Engineering Related Products Using Autodesk Fusion 360 Software, International Journal of Design Engineering, Vol.11, No.1(2022), p.1-26
(4) J. A. Sethian, et al.：Structural Boundary Design via Level-Set and Immersed Interface Methods Journal of Computational Physics, Vol.163, No.2(2000), p.489-528
(5) Francesco Buonamici：Generative Design: An Explorative Study, Computer-Aided Design and Applications, Vol.18, No.1(2021), p.144-155
(6) 倉爪亮：レベルセット法とその実装法について，情報処理学会研究報告，Vol.115(2006)，p.133-145
(7) 山岸誠弥 ほか：改良指針検討のための実稼働TPAによるエンジン騒音寄与分析，自動車技術会論文集，Vol.53，No.6(2022)，p.1227-1232

◇いすゞ歴史の一こま



GL201エンジン(エルフ用)（1966年ごろ）