

## クランク軸と歯車軸系のガタ打ちを考慮したエンジン振動騒音の研究

池田, 幸一郎

<https://doi.org/10.15017/1806978>

---

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済



氏 名 : 池田 幸一郎

論 文 名 : クランク軸と歯車軸系のガタ打ちを考慮したエンジン振動騒音の研究

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

産業用ディーゼルエンジンは連続的な高負荷運転を強いられるため、燃料噴射ポンプや動弁系の駆動トルクをクランク軸から伝達するために歯車列が使用されることが多い。このような歯車列を有するディーゼルエンジンの歯車噛合い力はクランク軸に作用するトルク変動によって増大し、歯車列の軸受部を介しエンジンプロックやギヤケーシングに伝搬する。特にアイドリング時などの低負荷時においては歯車軸系に作用する負荷トルクが低下するのに伴い、歯面分離による歯車のガタ打ちが頻繁に発生し衝撃的な噛合い力が発生することが知られている。本研究ではクランク軸からの動力伝達に歯車列が用いられるディーゼルエンジン特有の現象である歯車列の衝突振動に着目し、歯面分離に伴い発生する衝突現象をシミュレートする歯面衝突モデルを提案した。それをガス爆發力、ピストンスラップ力、燃料噴射圧力や動弁系駆動力等のエンジン起振力を考慮したエンジン全体の振動応答解析法に組み込み、歯車列の衝突振動に起因するエンジン放射騒音の増大メカニズムを明らかにすると共に歯車衝突振動抑制による騒音低減対策について検討を行った。

以下に本論文の内容を要約して示す。

第1章では、本研究の背景や従来用いられてきた騒音低減対策について述べ、歯車軸系や歯車噛合い部のモデル化及びエンジン放射騒音の解析に関する過去の研究例を示した。これまでの研究における歯車噛合い部の衝突モデルでは、歯面間距離に対し非線形性を持つばねとダッシュポットを並列結合したシンプルなモデルが提案されている。様々な衝突モデルを調査して、歯面剛性の有無、油膜の非線形性を考慮した剛性および減衰の有無、表面粗さの考慮といった点について整理した結果、油膜の減衰と歯面の衝突剛性が直列に結合された衝突モデルに関する研究例はみられなかった。また、エンジン全体の放射騒音の予測手法についての調査では、歯車列の衝突振動がエンジン全体の放射騒音に及ぼす影響について定量的に検討した研究例は少なく、本研究で歯車列の衝突振動とエンジン放射騒音の関係を明らかにすることの重要性を示した。

第2章では、本研究の検討に用いたエンジン連成振動応答解析プログラムに油膜の介在を考慮した歯車のガタ打ちモデルを組み込む方法を提案した。エンジン全体構造の解析モデルについて述べた後、エンジン軸系、エンジン起振力、軸受部、歯車ガタ打ちのモデル化について詳細に検討した。本研究では歯車ガタ打ちを油膜が介在する歯面同士の衝突現象と捉え、歯面衝突剛性と油膜減衰の直列結合モデルを検討した。歯面衝突剛性は円筒同士の衝突を仮定し、Hertz 接触理論から変位と荷重の関係を求め衝突ばね定数を導出した。油膜減衰は噛合い部に形成される油膜形状を仮定し、流体潤滑理論に基づき数値解析により求めた油膜負荷容量と歯面接近速度の関係から減衰係数を決定した。また、モデル化の妥当性検証のため、油膜無し/有りの2ケースについて半球面と平面の衝突シミュレーション計算を実施し、振り子を用いた衝突試験で取得した油膜無し/有りの衝突力

波形と比較した。本モデルを実機へ適用するにあたり、油膜減衰と歯面剛性の直列結合モデルでは計算時間が膨大になるので、等価な非線形減衰と非線形剛性の並列結合からなる新たな歯面衝突モデルをエンジン連成振動応答解析手法に組み込んだ。

第3章では、エンジン全体連成振動応答解析プログラムで求めたエンジン表面の振動速度情報を境界条件として入力し、境界要素法 (Boundary Element Method) により任意の評価点における騒音レベルを予測する手法について纏めた。また本研究では簡易的な方法としてエンジンブロックの固有振動モード毎の音響放射効率  $\sigma$  を用いてエンジン騒音の音響放射パワー  $W$  を評価する手法も提案した。更にエンジン放射音の音質評価も可能とするため周波数スペクトルから時刻歴波形に変換して、スピーカで騒音波形を再生するシステムの開発を行った。

第4章では、第2章、第3章で開発した、クランク軸・中間歯車・噴射ポンプ軸・動弁系駆動軸からなる回転軸系とエンジンブロックの連成振動解析法並びに境界要素法を用いたエンジン放射騒音解析法を用い、アイドリング (無負荷) 状態において歯車列のバックラッシュ量を変化させた場合のエンジン騒音変化を検討した。その結果、クランク軸の剛体運動に伴う回転変動成分が支配的であるエンジンの低回転域(ローアイドル状態)ではバックラッシュ量減少による騒音低減効果が期待できるが、クランク軸の振り振幅が小さくなる高回転域 (ハイアイドル状態) ではエンジン騒音はほとんど変化しないとの予測結果が得られ、実測結果と概ね一致することを確認した。

第5章では、第4章で考察した低回転時と高回転時の歯車列の振動応答の差異についてクランク軸の振動特性を踏まえその要因を検討し、クランク軸の振り振動が歯車列の衝突振動に及ぼす影響を明らかにした。エンジン回転数が 2500rpm 程度に上昇すると、400Hz 近傍に存在するクランク軸の振り振動モードが励起されるようになり、特に#1, 2気筒爆発後に大きな振り振動が生じる。これにより歯車噛み合い部での衝突振動が激しくなり、騒音レベルも増大する。この解析結果を踏まえて、クランク軸振り振動の低減対策として歯車列の位置を振り振幅の小さいフライホイール側に変更することを提案した。この対策により歯車列の衝突振動が弱まり、エンジンブロック前面からの放射騒音を低減できる見通しが得られた。また、ねじり振動を低減するための曲げ/振りダンパーをプーリー側に取り付けた場合について検討し、振り危険速度が存在する  $N_E=2000\sim 3000\text{rpm}$  の高回転数域で騒音低減効果が得られる見通しを得た。ただし、振り振動に対する最適減衰を付加しない場合では、一部の回転数で低減効果が得られない可能性があることを明らかにした。

第6章では本論文を総括した。