

小型ディーゼルエンジンにおける騒音低減技術の開発

Development of Noise Reduction Technique in Small Diesel Engine

相模原製作所 井元浩二*¹ 坪田利光*²
 片山晋*³
 技術本部 太田和秀*⁴

小型ディーゼルエンジンが搭載される農業機械・建設機械・産業機械の市場では、作業環境やオペレータへの配慮から低騒音化が進められている。また、建設機械については税法上も低騒音認定機械の優遇処置が採られていることから、エンジンに対する低騒音化の要求は非常に強い。当社では、この要求にこたえるため、燃焼から騒音放射までエンジン全体のシステムとしての騒音発生メカニズムを解析し、騒音低減を図っている。本報では、まず当社独自の燃焼システムによる騒音低減技術について報告する。次に、エンジン構造の振動特性解析技術及び騒音低減手法を述べる。

Small Mitsubishi diesel engines are installed in construction and industrial machines. These engines must be quiet, and they must also give high performance and clean exhaust gas emission. Since machinery that is quiet gets tax advantages under the law, quietness is one of the main concerns of both manufactures and users. To meet the new stringent noise requirements, MHI has developed theoretical and experimental procedures for combustion control and reduction of noise. This paper presents MHI's original conception of a combustion chamber built to reduce combustion noise. The validity of the analytical method for evaluating the vibrating and acoustic characteristics of the engine is also demonstrated.

1. ま え が き

当社は、1～63 600 PS という幅広い出力レンジのエンジンを製造している世界的に見てもユニークなエンジンメーカーである。相模原製作所ではその内、7～5 000 PS のディーゼルエンジンを製造しており、小型エンジンと呼ばれる150 PS 以下のエンジンは、農業トラクタ・コンバイン・フォークリフト・油圧ショベル・発電機などに使われ、私たちの生活に欠かせない存在になっている。また、その反面、生活に密着しているため、作業性や環境保護に対する要求は非常に強い。特に、農業機械・建設機械の市場は、地域住民やオペレータの作業環境に配慮し低騒音化を積極的に進めていることと、建設機械については税法上も低騒音認定機械の優遇処置が採られていることから、エンジンに対する低騒音化の要求は非常に強い。

当社では、このエンジンに対する低騒音化の要求にこたえるため、燃焼・構造の両面を総合的に評価・検証し低騒音化を進めてきた。

また、当社の小型ディーゼルエンジン開発においては、コスト・軽量小型化の観点からエンクロージャに頼らないエンジン本体での低騒音化を目標とし、またそれを特徴にしている。これにより、エンジンから冷却水への放熱量を最小限に抑制することが可能になり、車両はより小さいラジエータを使用できるようになる。そのためエンジンのコストだけでなく、車両自体のコスト低減・小型化も達成でき、最終製品自体の商品力向上にもつながる。

本報では、当社独自の渦流室形状を用いた燃焼システムの開発による低騒音燃焼制御の実現、並びに騒音発生メカニズムの解析・予測による低騒音構造創出について述べる。

2. 騒音発生メカニズムと低騒音化手法

エンジンの騒音発生メカニズムを図1に示す。まず、シリンダ内の爆発力により、ピストンがシリンダ壁に衝突するピストンス

ラップや、クランク軸が主軸受に衝突するベアリングインパクト等の起振力が発生する。これらの起振力がクランクケース等のエンジン構造部品を振動させ、最終的にエンジン表面から騒音として放射される。

したがって、エンジンの騒音低減のためには、以下の燃焼・構造両面に関する対策が必要になってくる。

- 燃焼改善による爆発力（シリンダ内圧力）の制御
- ピストンスラップやベアリングインパクト等の起振力低減
- クランクケースやクランク軸等の振動伝達特性改善
- クランクケース、オイルパン、カバー類の音響放射特性改善
- タイミングギヤ、動弁系等の機械音低減

以下に、上記対策項目に関する燃焼・構造両面からの低騒音化について述べる。

3. 燃焼制御による低騒音化

図2に示す副室式ディーゼルエンジンの低騒音燃焼について述べる。副室式ディーゼルエンジンの場合、エンジンの爆発は次のような形態をとる。まず、主室内及び副室内の空気が、ピストンの上昇とともに圧縮され温度が上昇する。

次に、この高温になった空気が流動している副室内に、噴射ノズルから燃料が噴射され、着火に至り予混合燃焼が始まる（初期燃焼）。そして、この副室内の燃焼ガスが主室内に流出し、更に拡散燃焼が進行する（後期燃焼）。

一般に、エンジン騒音は爆発によるシリンダ内最大圧力上昇率 $dP/d\theta_{max}$ （クランク角度に対するシリンダ内圧力上昇の最大値）と相関が非常に大きいことが知られている⁽¹⁾。このシリンダ内最大圧力上昇率を低減するためには、燃料噴射タイミングの遅延が最も容易で有効である。しかしながらエンジン性能の悪化を招くため、大幅な燃料噴射タイミングの遅延はできず、騒音と性能のバランスを考慮する必要がある。また、初期燃焼を抑制し緩やかな燃焼モードにするのも有効であるが、性能を考慮すると燃焼後期

*1 エンジン技術部主査 工博

*3 エンジン技術部小型エンジン開発グループ

三菱重工技報 Vol. 34 No. 4 (1997-7)

*2 エンジン技術部小型エンジン開発グループ主務

*4 長崎研究所振動研究室長 工博

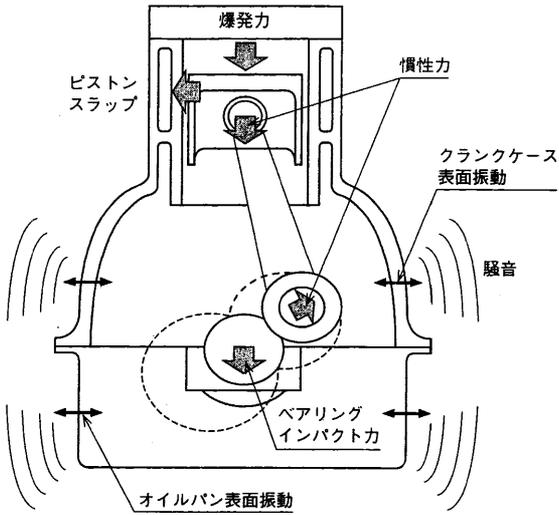
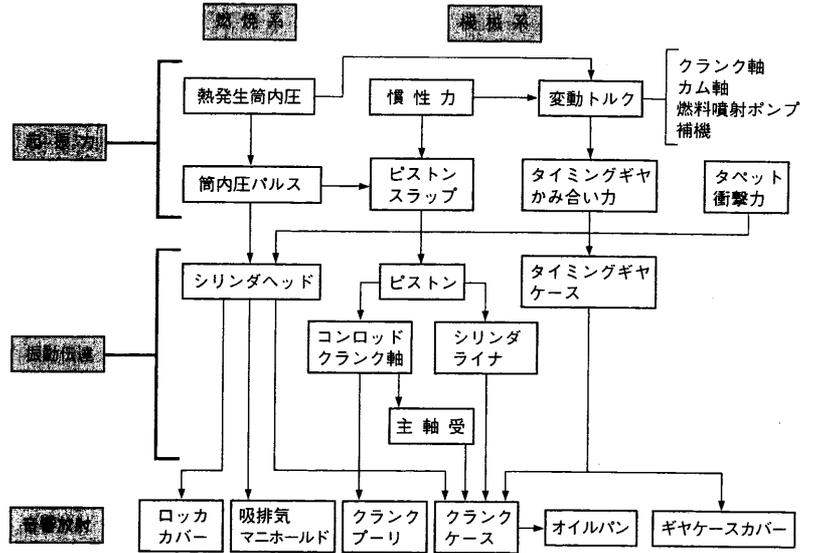


図1 エンジン騒音発生メカニズム



騒音低減のためには、起振力・振動伝達・音響放射それぞれの対策が必要である。
Generation mechanism of engine noise

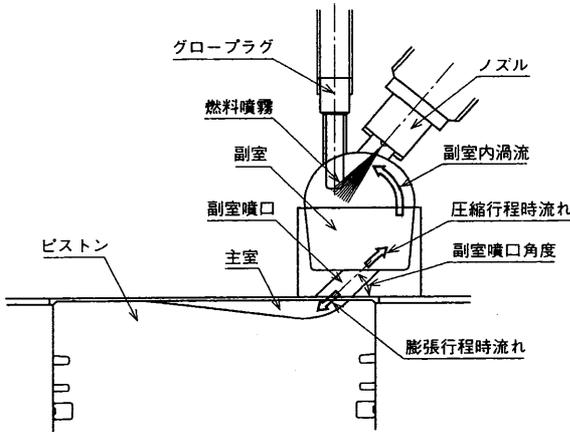


図2 副室式ディーゼルエンジンの燃焼室システム 副室内へ噴射した燃料が着火し、主室へ燃焼ガスが流出する。
Combustion system of pre-chamber diesel engine

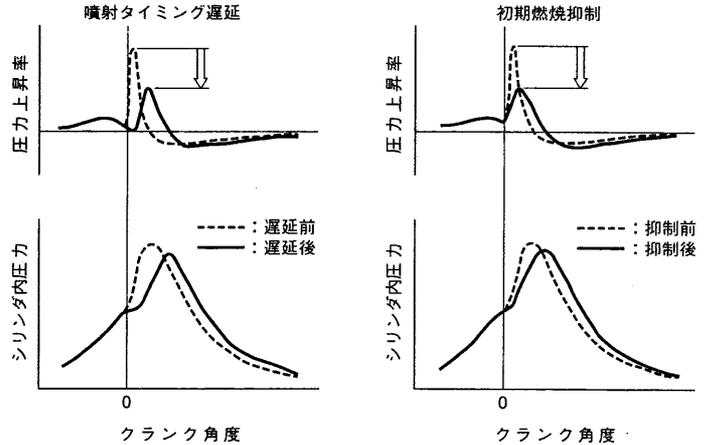


図3 燃焼制御によるシリンダ内圧波形の変化 噴射タイミングの遅延・初期燃焼抑制により圧力の急激な上昇を抑制できる。
Changes of cylinder pressure by combustion control

での拡散燃焼を促進させる必要がある⁽¹⁾。図3に燃料噴射タイミングを遅延させた場合、並びに初期燃焼を抑制させた場合のシリンダ内圧力及び圧力上昇率を示す。

低騒音化のためには、上記のように、噴射タイミングを遅延させるとともに、初期燃焼を抑制しシリンダ内圧力上昇率を低減しなければならないが、性能を確保するために後期の拡散燃焼を促進させる必要がある。以下に、具体的な実現手法を示す。

3.1 初期燃焼抑制

初期燃焼を抑制し、緩やかな燃焼を実現するためには、副室内の燃料と空気の子混合量を抑制する必要がある。そのためには、以下の対策が考えられる。

- 着火遅れ短縮
- 初期噴射率制御
- 初期混合気形成速度抑制

燃料を噴射してから着火に至るまでの着火遅れを短縮することにより、着火遅れ期間中の燃料噴射量を抑制し、燃焼初期の子混合燃焼を抑制することができる。その一つの手法として、高圧縮比化が考えられる。ただし、高圧縮比化に伴い、相対的に燃焼室容積が小さくなるため、ある程度以上に圧縮比を増大すると性能

が悪化する。

燃料の初期噴射率の抑制により、空気との子混合量が抑制できる。副室式エンジンに使用されるスロットルノズルでは、ノズル噴口面積が2段階で変化するダブルスロットルノズル等が有効である。これにより噴射初めの燃料噴射量を抑制することができる。また、2段階で燃料を噴射するパイロット噴射なども一つの手法である。

また、噴射初期の燃料と空気との混合気を形成する速度を抑制することにより、初期燃焼を緩やかにできる。その手法として、一つには、燃料の噴射方向を副室の中心から偏心させる方法がある。これは、燃料噴霧を副室壁面に近づけることにより、燃料噴霧内への空気導入が抑制されるためである。ただし、性能の悪化を伴うので、ある値以上にはできない。また、副室噴口形状も初期混合気形成速度に影響を及ぼす。例えば、副室噴口面積を大きくすることにより、副室内の空気渦流速度を小さくすると、混合気形成速度を抑制できる。ただし、これも性能の悪化を招く。

以上のように、低騒音化のため初期燃焼を抑制すると、燃焼後期の拡散燃焼まで不活発になり、性能が悪化する傾向にある。そのため、次に示す燃焼後期の拡散燃焼促進が必要になる。

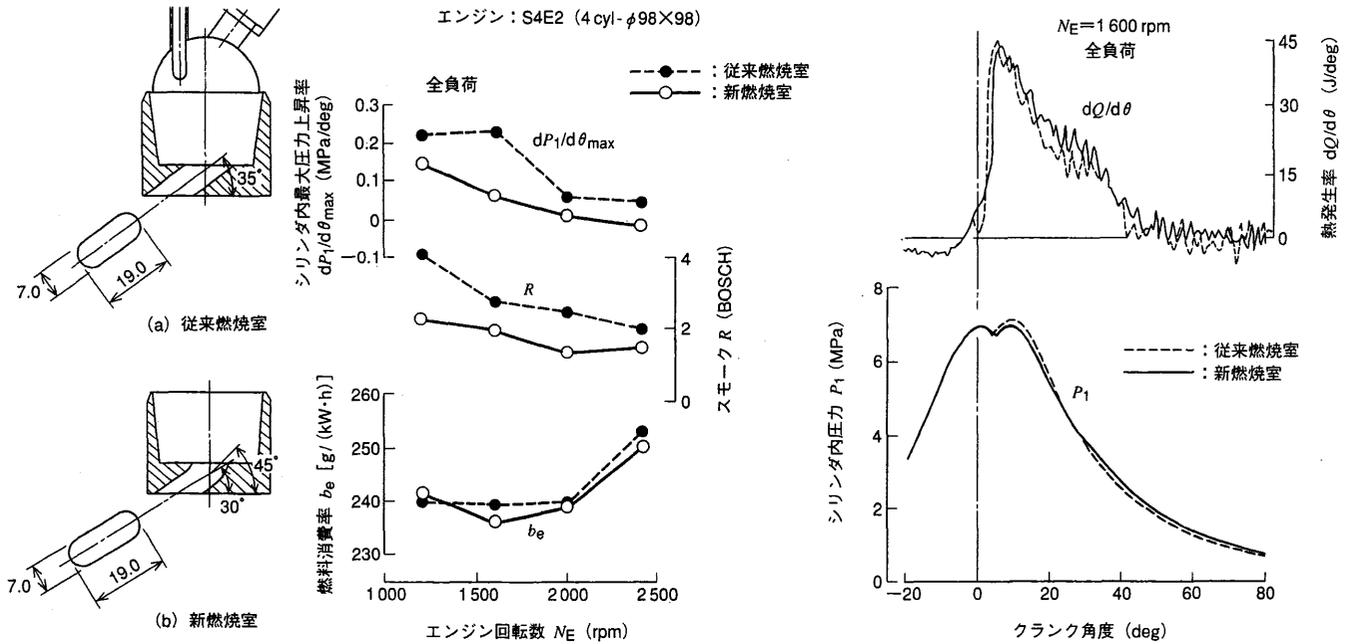


図4 湾曲型噴口による性能向上 湾曲型噴口の新燃焼室はシリンダ内圧力上昇率・燃料消費率・吐煙で改善が見れる。
Improvement of engine performance with new combustion system

3.2 燃焼後期の拡散燃焼促進

燃焼後期の拡散燃焼を促進するためには、シリンダ内の混合気形成を促進する必要がある。そのためには、副室から主室内へのガス噴流特性を改善し、噴流エネルギーを増大させなければならない。ただし、噴流エネルギーを増大させるため副室噴口を絞ると、絞り損失が増大するとともに、噴流速度が増大することにより熱損失につながり、したがって熱効率の低下に至る。

この主室内へのガス噴流特性（ペネトレーション・噴流分散）は、副室噴口角度によっても変化する。副室噴口角度を小さくすると、主室内の噴流分散角度が小さくなり、噴流ペネトレーションは向上する。

当社では、この副室噴口角度が噴流特性に及ぼす影響に着目し、以下の新燃焼システムを開発した⁽²⁾。

3.3 新燃焼システム

副室噴口角度を小さくすると、主室内の噴流ペネトレーションは向上するが、副室噴口流量係数は減少する。逆に、副室噴口角度を大きくすると、副室噴口流量係数は大きくなるが、噴流ペネトレーションは低下する。そこで、副室噴口流量係数を大きくすると同時に、噴流ペネトレーション向上を図るために副室噴口角度を2段にし、副室側角度>シリンダ側角度として湾曲させた新燃焼室を考案した。

湾曲型噴口形状を実機に適用し比較試験を行った。全負荷時のエンジン性能、燃焼特性の比較を図4に示す。新燃焼室は燃料消費率、スモーク、シリンダ内最大圧力上昇率共に良好で、初期燃焼が抑制され、後期拡散燃焼が促進される傾向がある。

当社SSディーゼルエンジンは、この湾曲型副室噴口を導入するとともに、高圧縮比化・初期混合気形成速度の抑制を図った副室形状を採用し、併せてダブルスロットルノズルにより初期噴射率抑制を実施し、燃焼システムの最適化によるエンジンの低騒音化を図り、従来エンジンに対し約2～3 dB(A)騒音を低減した。

4. 振動伝達制御による低騒音化

当社では、図1に示す騒音発生メカニズムの、爆発力から騒音

の放射に至る間の、起振力、クラックケース等の振動応答特性、音響放射特性を解析し、騒音予測・騒音低減対策を検討・開発している。また、騒音予測の精度向上は、開発期間の短縮・開発コストの低減を可能とし、製品自体の軽量化・コスト低減にもつながる。

以下に、騒音予測手法及び構造変更による低騒音化検討事例について述べる。

4.1 騒音予測手法

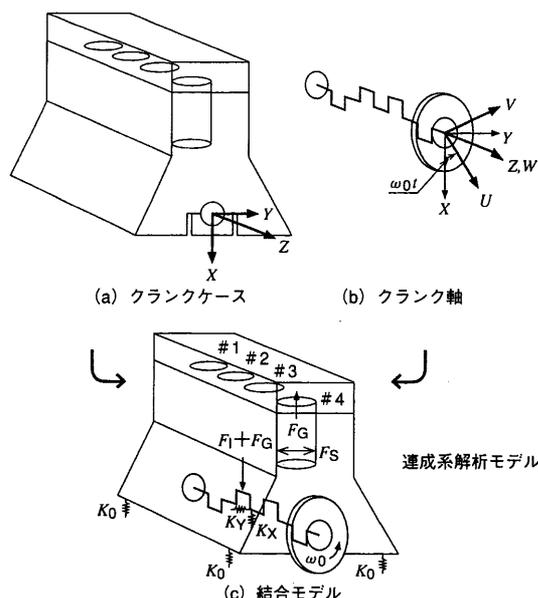
エンジン騒音を予測する上で、最も重要かつ困難な点は、機械起振力の評価と運動部を含むエンジン構造の振動応答の精密な解析である。当社では、回転するクラック軸とクラックケースの連成効果を考慮できる騒音解析手法を開発し、振動騒音解析の精度向上を図っている⁽³⁾。

計算法の概要を図5に示す。

まず、クラック軸・クラックケース単体の固有振動特性をFEM解析又は実験的に求める。次に、クラック軸とクラックケースを結合するが、その際、結合剛性は主軸受油膜剛性（クラック軸の回転振動による軸心位置変化を考慮）と主軸受部局部剛性から求める。起振力は、シリンダ内圧・慣性力・ピストンスラップ力を考慮する。主軸受からクラックケースへの伝達力（ベアリングインパクト力）は、計算の中で自動的に考慮されている。そして、クラック軸とクラックケースが主軸受部を介して連成する振動方程式の時刻歴積分により、クラックケース各点の振動応答を計算する。

求めた振動応答から各FEM要素の法線方向速度成分を計算し、全表面で自乗積分することにより自乗平均速度を求める。そして、空気の固有音響インピーダンス・音響放射効率を考慮し、クラックケース表面からの音響放射パワーを求める。なお、低騒音構造の評価には、この音響放射パワーを用いる。また、機側1m点での音圧レベルは観測面の面積を考慮して求めることができる。

図6に本騒音予測手法による計算結果と実測結果を示す。計算と実測が良い一致を示しており、本予測手法が有効であることが分かる。



① クランクケース全表面の自乗平均速度 $\langle v^2 \rangle$

$$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{N_e} |v_i|^2 \Delta S_i$$

v_i : 要素 i の要素法線方向の速度応答
 ΔS_i : 要素 i の面積
 S : 全放射面積
 N_e : 放射面構成要素数

② クランクケース表面からの音響放射パワー W

$$W = \rho c \sigma \langle v^2 \rangle S$$

ρc : 空気の固有音響インピーダンス

ρ : 空気の密度
 c : 空気中の音速

σ : 音響放射効率

③ 音響パワーレベル

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{-12}}$$

④ 観測面における音圧レベル

$$L_p = L_w - 10 \log S'$$

S' : 観測面面積

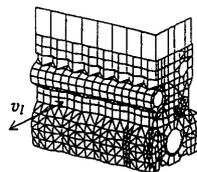


図5 騒音解析手法 クランク軸とクランクケースの連成効果を考慮し、振動応答特性を解析する。
 Calculation procedure

本予測法の適用事例を以下に示す。

4.2 低騒音構造検討事例

本手法により、クランクケースの主軸受部とスカート部の一体構造（ラダーフレーム）について、必要な剛性を検討し設計を実施した。これは、主軸受部とスカート部の結合を強くすることにより、主軸受部の前後方向振動数上昇とスカート部の振動応答低減をねらうのが目的である。

図7に検討結果を示す。現構造に比較して1.5 dBの騒音レベルの低下が見込まれる。

以上のごとく、当社ではエンジンの開発・設計段階で、騒音の予測並びに低騒音構造の検討を実施し、低騒音化を図っている。

5. ま と め

エンジン騒音発生メカニズムに基づいた、燃焼・構造両面からの総合的な検討・評価により、以下の低騒音化技術を構築した。

●当社独自の湾曲型副室噴口を用いた燃焼室形状の最適化・高圧

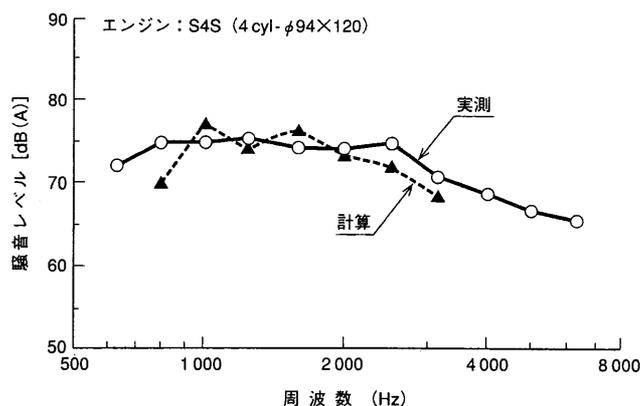


図6 エンジン騒音スペクトルの計算と実測比較 計算と実測の良好一致が見られる。
 Calculated and measured engine noise spectrum

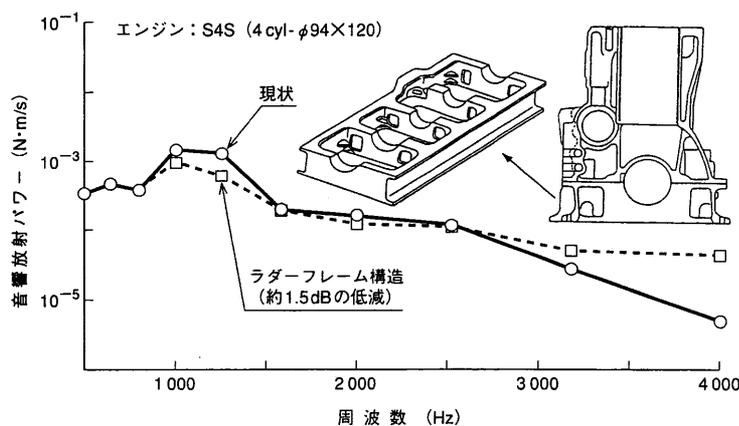


図7 構造変更による音響放射パワーの変化 ラダーフレーム構造により騒音低減が見込める。
 Changes of sound power level by structure modification

縮比化・初期噴射量の制御による初期燃焼抑制・後期拡散燃焼促進燃焼システム

●クランク軸とクランクケースの連成振動を考慮した精度良い騒音解析手法及び低騒音構造評価手法

また、今後は以下の項目を課題とし、更なるエンジンの低騒音化を図っていく。

- (1) 低騒音のみでなく、低公害（低NOx・低排煙）・低燃費を両立する燃焼システムの構築
- (2) エンジン補機類を考慮した、より精度の高い騒音予測手法の確立による最適構造・最適燃焼モードの評価・検証
- (3) 音質を考慮した低騒音技術の構築

参 考 文 献

- (1) 井元浩二ほか、副室式ディーゼル機関の低騒音燃焼研究、日本機械学会論文集 63-605 B (1997-1) p.329~335
- (2) 井元浩二、副室式ディーゼル機関の新燃焼システムの研究、日本機械学会論文集 62-602 (1996-10) p.207~213
- (3) 太田和秀ほか、回転クランク軸とクランクケースの連成振動及び放射騒音の予測、日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-95-07 (1995-2)