

エンジンにおける燃焼衝撃音の発生機構に関する実験的研究

(第1報：単一爆発加振法)

小嶋直哉*・小林啓二*・椿 楢**・伊藤和美***

An Experimental Study on Generation Mechanism of Combustion Induced Engine Noise (1st Report : The Method of Single Explosion Excitation)

Naoya KOJIMA, Keiji KOBAYASHI, Minoru TSUBAKI and Kazumi ITOH

Abstract

The combustion impact energy acting to the inner wall of combustion chamber is transmitted through the engine structure and finally radiated from its surfaces as combustion noise. The frequency characteristics of engine structure response to the combustion impact were investigated by introducing a single explosion excitation to the non-running engine structures. The transmission-radiation coefficient of combustion noise was defined as a ratio of combustion noise power to the acoustic power exerted on the combustion chamber wall. This coefficient was compared for four different types of engines.

1. まえがき

エンジン騒音の主要な源として、燃焼による衝撃力が考えられる。燃焼室内で発生する急激な圧力上昇はエンジン構造各部を伝達し、壁面を振動させていわゆる燃焼衝撃音を発生する。しかし、発火運転中のエンジンにおいては燃焼衝撃に基づく騒音以外にも、主に機械的要因に基づく騒音も同時に発生しているため、燃焼衝撃音だけを直接測定し、解析することは困難である。したがって燃焼衝撃の発生を解明するためには、燃焼衝撃の影響を抽出して評価する手法が必要となる。

従来から燃焼室内の圧力経過により、構造各部にどのような振動応答が発生するかについていくつかの報

告がなされている。Priede⁽¹⁾Thien⁽²⁾らは、燃焼室内でLPG—酸素—空気混合気を爆発させて、エンジン構造に対する燃焼衝撃の応答を調査している。

本研究では、クランク軸を固定した静止エンジンの燃焼室内で、火薬点火具、爆竹あるいはLPG—酸素混合気を単一爆発させ、その衝撃でエンジン構造を加振した。これらの加振方法により、特にディーゼルエンジンにおいて大きな影響を与えると思われる燃焼衝撃と、それにより発生する燃焼衝撃音との関係を明らかにするための一段階として、燃焼衝撃音の伝達特性を求めることを試みた。

2. 実験装置および測定装置

2.1 実験装置

本研究においては4種類のエンジンを用いた。その主要諸元をTable 1に示す。空冷エンジンにおいては、エンジン壁面の振動を測定するために、シリンダヘッ

*機械工学科

**大学院機械工学専攻

***宇部興産(株)

Table 1 Main specifications of test engines

	Engine I	Engine II	Engine III	Engine IV
Type	Vertical water-cooled 4cycle Diesel	Horizontal water-cooled 4cycle Diesel	Air-cooled 4cycle spark ignition	Air-cooled 2cycle spark ignition
Bore×Stroke	85×90mm	102×106mm	72×63mm	56×50mm
Total displacement	536cc	866cc	266cc	123cc
Compression ratio	22.5	19.5	5.5	6.8
Maximum power	5.9kW/3000rpm	13kW/2400rpm	5.1kW/2000rpm	9.4kW/7000rpm
Engine height	666mm	690mm	297mm	265mm

ドおよびシリンダブロックの冷却フィンの一部を削除した。供試エンジンは各々防音無響室内の定盤に設置し、床面にはエンジン以外からの音の回り込みを防止し、エンジンから放射される騒音を半自由音場で測定するために、鋼板 ($h=1.6\text{mm}$) とベニア合板 ($h=8.2\text{mm}$) とからなるバッフルを設置した。

燃焼衝撃力によるクランクシャフトの回転を防止するために、クランクシャフトにフランジを取り付け、それを定盤に固定した支柱にボルト止めした。ピストンの位置は、発火運転時に急激な圧力上昇が生じる上死点に設置した。また、エンジンの状態を発火運転時の状態にできるだけ近づけるため、冷却水、エンジンオイルなどは適量注入して実験を行った。

シリンダ内で単一燃焼衝撃を生じさせる際には、火薬点火具、爆竹およびLPG—酸素混合気を用いた。火薬点火具の構造はFig. 1に示すように $\phi 7.5 \times 24\text{mm}$ の銅製の円筒容器、火薬（酸化鉛または過酸化バリウムを主とする火薬1g以下）および火薬を着火させるための点火玉からなり、約2Aの電流を通电することにより爆発燃焼させた。これらの装置では、安定した燃焼衝撃力が得られるが、爆発後燃焼室内に燃焼残留物が多くでき、それらの処理に多くの手間と時間を要するとともに、酸化物による燃焼室壁面の腐食等の問題点も多い。

LPG—酸素の混合気を使用した場合には、Fig. 2に示すような供給装置を作製し、LPG、酸素および空気を吸入弁から順次封入してスパークプラグにより火花点火した。各ガスの封入量は圧力制御弁で調節した。燃焼室内の気密性を保持するため、ピストンとシリンダライナの上部隙間にシリコン系のボンドを充填した。この装置を火薬点火具や爆竹を使用した装置と比較すると、燃焼衝撃力の安定性は爆竹や火薬点火具に比べるとやや劣るものの、LPGと酸素の供給圧力比を制御弁で一定にし、それらの押し込む空気の供給圧力を変化させることによって燃焼衝撃力の大きさを幾分変化させることができるという長所を持っている。

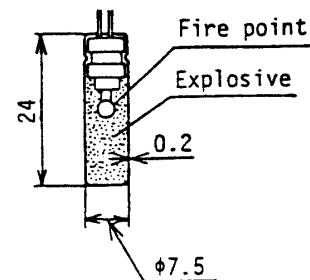


Fig. 1 Electric igniter with explosive

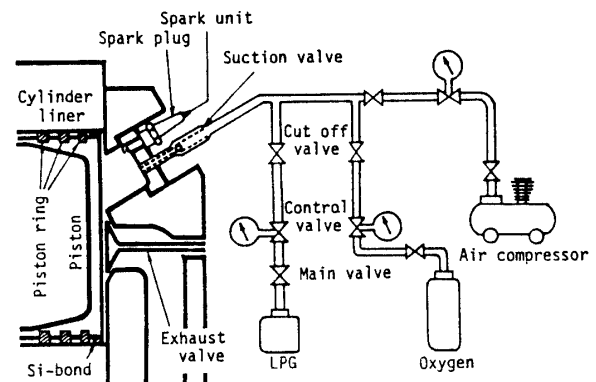


Fig. 2 Schematic arrangement of single explosion excitation rig

2.2 測定装置

本実験で用いた主な測定装置及び解析装置のブロック線図をFig. 3に示す。エンジンから放射される騒音の測定は、エンジン中心から半径1.2mの半球面上の5点で、無指向性のコンデンサマイクロホン (B & K Type 4145, など) を用いて行った。音圧レベルはピストンホン (B & K Type 4236) による1.0kHzの正弦波 (rms 94 dB, re. $20\mu\text{Pa}$) によりその較正を行った。

エンジン外壁面各部の振動の測定は、超小形で軽量 (1.2g) の圧電型加速度ピックアップ (Rion PV-90

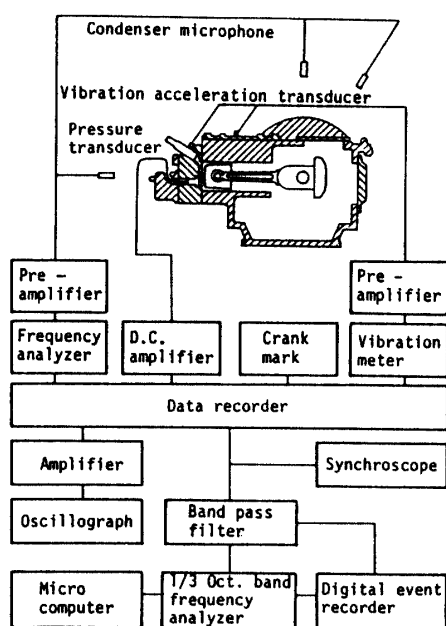


Fig. 3 Block diagram of measuring and analyzing apparatus

B)を両面接着テープで取り付けて、各箇所振動加速度を検出し、前置増幅器 (Rion PV-26) およびチャージ増幅器 (Rion VM-27) により増幅した。振動加速度レベルの較正は、振動加速度較正器 (B & K Type 1606) を用いて63 Hzの正弦波 (r.m.s. 117dB, re.10 μ m/s²) により行った。

シリンダ内の圧力振動の測定には、抵抗線歪計式ピックアップ (共和電業PE-100KSA42, PE-50KP) を用い、それぞれシリンダヘッド内壁面にフラッシュマウントして、正確な周波数特性が得られるよう考慮した。圧力ピックアップからの出力は、直流増幅器 (共和電業DA-110A, BSP-100A) により増幅した。圧力ピックアップは、基準重錘形圧力計 (長野計器P2) を用いて静圧にて較正した。また、シリンダ圧力レベルの較正には、周波数発振器 (B&K Type1022) を併用した。

以上の各応答波形は、それぞれの場合において全てデータレコーダ (共和電業RTP-160A) で同時記録した。各現象の時間経過の観察には、電磁オシログラフ (共和電業540A) を用いた。また、単一衝撃信号はデジタルイベントレコーダ (B&K Type7502) に記録後、繰り返し出力し、連続信号の解析と同様に1/3オクターブ周波数分析器 (Rion SA-25) により周波数解析を行った。

3. 解析方法

3.1 燃焼衝撃および放射騒音のパワーの算出方法

燃焼衝撃と放射騒音との関係をそれぞれのパワーでとらえ、その変換特性を定量的に表示することを試みた。以下に、その算出方法について示す。

3.1.1 燃焼室壁面に作用する燃焼衝撃のパワー

開空間において、音波の拡散面積 S [m²] 上での音の強さを I [W/m²] とすると、 S を通過する音のパワー W [W] は、次式で示される。

$$W = I \cdot S \tag{1}$$

燃焼室壁面に作用する燃焼衝撃のパワーを考える場合、燃焼室内は密閉空間であるため(1)式を用いて燃焼衝撃の全パワーを算出することはできない。

一方、燃焼室内壁に実際に作用する圧力振動は、壁面に設置した圧力ピックアップにより実測することができる。そこで本研究では、この圧力振動により全燃焼室壁面が受けるパワー W_c を、燃焼衝撃による加振パワーとして採用した。

$$W_c = I_c \cdot A_c \tag{2}$$

ただし、 I_c は圧力の強さ、 A_c は燃焼室内表面積を示す。これより燃焼衝撃のパワーレベル L_{wc} は次式で示される。

$$L_{wc} = L_{cp} + 10 \log A_c \tag{3}$$

ここで、 L_{cp} はシリンダ圧力レベルである。

3.1.2 放射騒音のパワー

エンジンから放射される騒音のパワー W_s は、音波の拡散面積 A_s 上の微小面積 dA を通過する音の強さを I_s 、音圧を p 、粒子速度を u とすると、次式で表される。

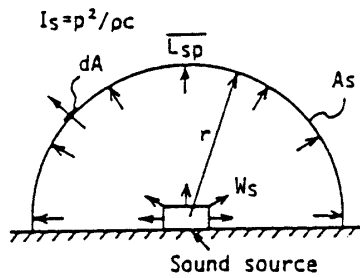
$$W_s = \int_{A_s} I_s dA = \int_{A_s} p \cdot u dA = \int_{A_s} (p^2 / \rho \cdot c) dA \tag{4}$$

従って、拡散面積 A_s 上での音圧レベルのパワー平均値 $\overline{L_{sp}}$ を用いれば、放射騒音のパワーレベル L_{ws} は、次式で示される。

$$L_{ws} = \overline{L_{sp}} + 10 \log A_s \tag{5}$$

Fig. 4に示すようにエンジンが点音源として扱えるような位置で騒音を測定すれば、音波は半自由音場では半球面上に伝搬するので、 $A_s = 2\pi r^2$ (r : 空間半径) である。

なお、燃焼衝撃によって放射される騒音の音圧レベル、パワーレベルは、特に、 L_{bp} 、 L_{wb} で表示する。



さてここで、騒音の測定位置によって放射騒音のパワーレベルの値が異ってくるのが予想される。Table 2は、エンジンIIにおいて、一定条件で運転した時の騒音のパワーと測定空間半径との関係を示したものである。表より、160Hz、1.0kHzおよび、2.5kHzについては、測定空間半径が0.6m以上となればほぼ一定の値に落ちているが、250Hzおよび500Hzでは、かなり変化していることがわかる。しかしいずれの周波数においても、エンジンから1m以上離れた仮想半球面上で算出した放射パワーの値は、ほぼ一定値に収束している。従って、エンジンIIにおいては、エンジンから1m以上離れた空間では、騒音は半球面上に伝搬しているとみなしてもさしつかえないことがわかる。

Table 2 Relationship between power level of radiated noise and microphone position

Space radius r (m)	Sound power level (dB)				
	160Hz	250Hz	500Hz	1.0KHz	2.5KHz
0.4	70.2	71.0	80.6	90.7	87.4
0.6	69.6	71.2	75.7	96.2	88.3
0.8	71.5	72.6	76.4	97.2	86.8
1.0	70.8	74.6	74.3	96.5	88.4
1.2	71.0	73.8	75.0	96.1	89.0

3.2 単一衝撃信号の周波数分析方法

従来の振動あるいは騒音の研究においては、応答波形の周波数分析は、主に1/3オクターブリアルタイム周波数分析器などを使用した定常的な処理を行っている場合が多い。しかし、単一爆発加振やインパルスハンマ加振の実験において得られる応答波形は衝撃性の強い信号でその継続時間は短い。従って、通常の定常的な取り扱いによってその周波数特性を求めることはできない。本節では、このような単一信号の分析方法について述べる。

定常応答に対する信号の強さは通常次式のような実効値で表される。

$$x_{rms} = \sqrt{(1/T) \cdot \int_0^T x^2(t) dt} \tag{6}$$

しかし、単一衝撃信号の場合にはこの表示方法は使えないので、Fig. 5に示すように衝撃信号の持つエネルギーEを基準時間T₀の矩形エネルギーパルスに置き換えて、その高さWを衝撃信号の強さと定義する。これをレベルで表示すると次式のようになり、衝撃信号を定量的に表現することができる。

$$L = 10 \log(W/W_0) = 10 \log \left(\int_0^\infty x^2(t) dt / (T_0 \cdot W_0) \right) \tag{7}$$

ここで、W₀は基準値、T₀は基準時間で、T₀としては1秒を使用する場合が多いので⁽⁵⁾、本報においてもこの値を採用する。

これを周波数領域の関数に変換すると、次式のように表される。

$$L = 10 \log \int_0^\infty 2 |X(f)|^2 df / (T_0 \cdot W_0) \tag{8}$$

本研究では、このような単一信号を周波数分析する方法として、Fig. 6に示すように、衝撃信号を周期T

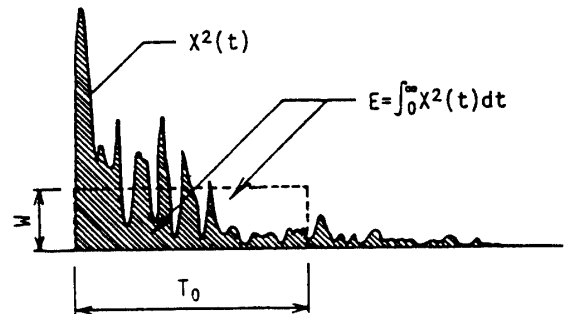


Fig. 5 Description of intensity for impact signal

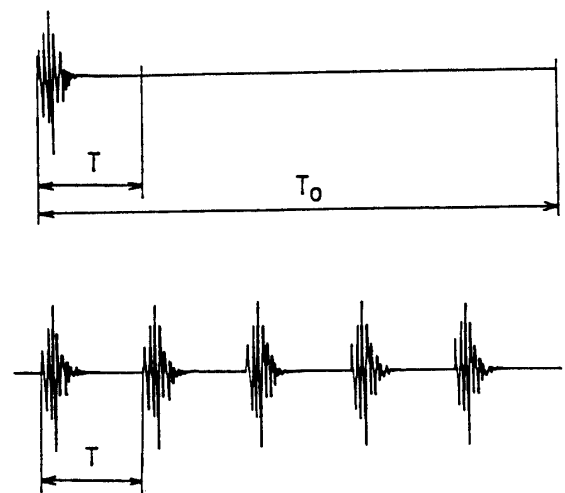


Fig. 6 Repetition of single impact signal

でサンプリングして繰り返し再生し、周期 T の連続信号として処理する周期信号化法を用いた。この場合、基準時間 T_0 秒間に含まれる信号の持つエネルギー E_{cyc} は、実際に単一衝撃信号が持つエネルギー E の T_0/T 倍になる。

$$= 10 \log [E_{cyc}/(T_0/T)] / (T_0 \cdot W_0)$$

$$L = 10 \log (W_{cyc}/W_0) + 10 \log (T/T_0) \quad (9)$$

ただし、

$$W_{cyc} = E_{cyc}/T_0$$

従って、周期信号化法においては、周波数分析結果に $10 \log T/T_0$ の補正を行うことによって、単一衝撃信号の周波数時性を求めることができる。しかし、周期信号化すると、周波数分析結果は離散スペクトルとなるので、単一衝撃信号のサンプリング期間 T は、スペクトルの間隔と周波数分析の帯域幅との関係を考慮に入れて決定する必要がある。さらに、解析過程におけるS/N比などの影響を考慮して、本研究ではサンプリング期間 T を0.1秒とした。

3.3 燃焼衝撃における伝達放射特性

3.3.1 単一爆発加振における燃焼衝撃の伝達放射特性

エンジンを一つの系と考え、燃焼経過によって振動騒音の伝達および発生機構は変化しないものと仮定する。従って、燃焼衝撃の伝達放射特性を推定することにより、燃焼衝撃と放射騒音の関係を明らかにできると考えられる。

燃焼衝撃によってエンジンから放射される騒音のパワー W_b は、燃焼室内壁面に作用する燃焼衝撃のパワー W_c に比例すると考えると、両者の間の比例定数を G と置くことにより、次式が得られる。

$$W_b = G \cdot W_c \quad (10)$$

レベルで表示すると、

$$L_{wb} = L_{wc} + 10 \log G \quad (11)$$

式(3)より、

$$L_{wb} = L_{cp} + 10 \log A_c + 10 \log G \quad (12)$$

上式において、右式の第3項は、エンジンの材質、構造等によって決定されるエンジン固有の値を示すものである。本研究では、第3項を燃焼衝撃の伝達放射係数 G と呼ぶことにする。

従って、式(5)、式(11)より、伝達放射特性は次式のよう表される。

$$10 \log G = L_{wb} - (L_{cp} + 10 \log A_c) \quad (13)$$

$$= \overline{L_{bp}} - L_{cp} + 10 \log (A_s/A_c)$$

3.3.2 燃焼衝撃加振力の検討

Fig. 7はエンジンIIIを火薬点火具および爆竹で単一

爆発加振した場合のシリンダ圧力の時間経過と、その周波数特性を示したものである。

図の(a)に示すように火薬点火具を用いた場合、シリンダ内ガスの最高圧力および最大圧力上昇率は、それぞれ $P_{max} = 1.0 \text{ MPa}$, $dP/dt = 11.6 \text{ MPa/ms}$ となっており、爆竹によるそれぞれの値 ($P_{max} = 0.32 \text{ MPa}$, $dP/dt = 3.87 \text{ MPa/ms}$) の3倍程度の値となっていることがわかる。

図の(b)において、両衝撃力の間には約10dBのレベル差は認められるが、その周波数特性には、大幅な差異はないことが知られる。また周波数特性は2.5kHz付近にピークを示すが、周波数が増加するに伴いレベルが低下する傾向が認められる。

Fig. 8は両衝撃力による燃焼衝撃と放射騒音との関係を、エンジンの伝達放射係数により比較して示したものである。図において両結果は、Fig. 7(a)に示すようにシリンダ圧力経過が、異っているにもかかわらず、良好な一致を示している。このことにより、エンジンにおいて燃焼衝撃の伝達機構は、シリンダ圧力経過によって大幅には変化しないことが確かめられた。

3.4 各種エンジンの伝達放射特性

Fig. 9は、Table. 1に示した4種類のエンジンについて単一爆発加振により求めた伝達放射係数 G を比較して示したものである。図より各種エンジンとも共通して、高周波数域になるにつれて、伝達放射特性は高くなる傾向が認められる。特にエンジンIII, IVは、空冷エンジンのためフィンが多数設けられていることと、ピストンからシリンダライナを経て伝達する燃焼衝撃は、直接シリンダブロックを加振して外壁面から騒音として放射され易いためと考えられる。

逆に中・低周波数域では、エンジンI・IIの伝達放射特性が高くなっているが、これはエンジンI・IIが他に比較して大きく、低周波数域の騒音を放射し易いためと思われる。また、エンジンIIはエンジンIと比較して寸法が幾分大きく、低域の騒音を放射し易いことが予想されたが、実際はエンジンIが面積の大きなボディと平板のギヤケースカバを持っており、ここから低周波数の騒音が放射され易いことが強く影響しているものと考えられる。

このように、燃焼衝撃から放射騒音への変換割合である伝達放射係数は各エンジンの構造上の特徴を定量的にとらえるものであり、これにより燃焼衝撃音の発生特性をある程度明らかにすることができる。

Fig. 9よりエンジンIII, IVともに高域になるにつれて伝達放射係数 G の値が高くなっている。この一原因

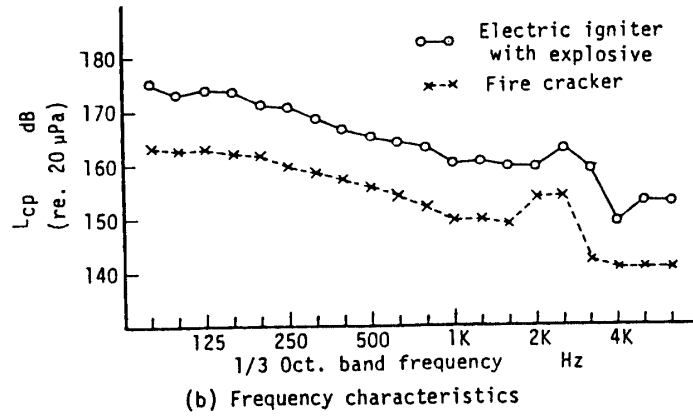
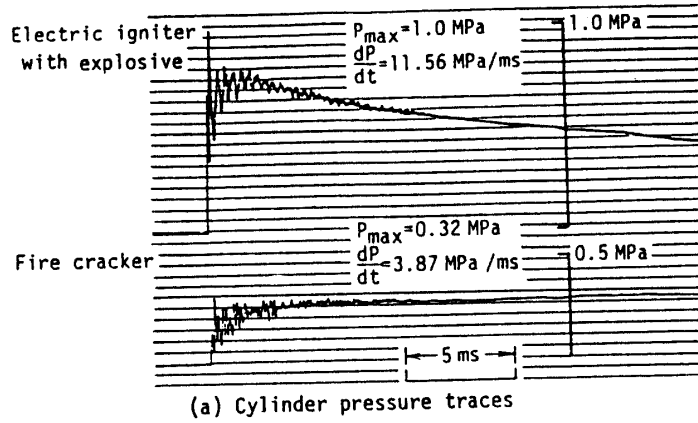


Fig. 7 Cylinder pressure signals generated by single explosion (Effect of explosion substances)

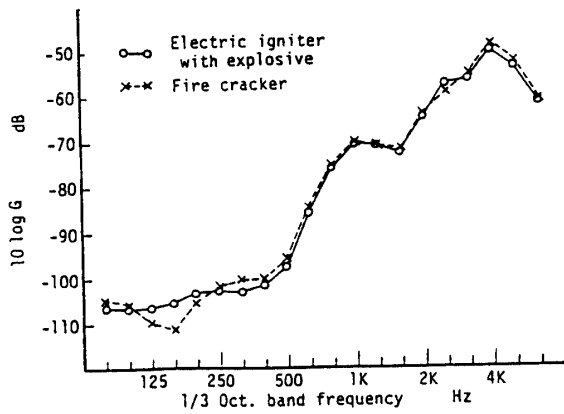


Fig. 8 Comparison of transmission-radiation coefficients between different sources of explosion excitation

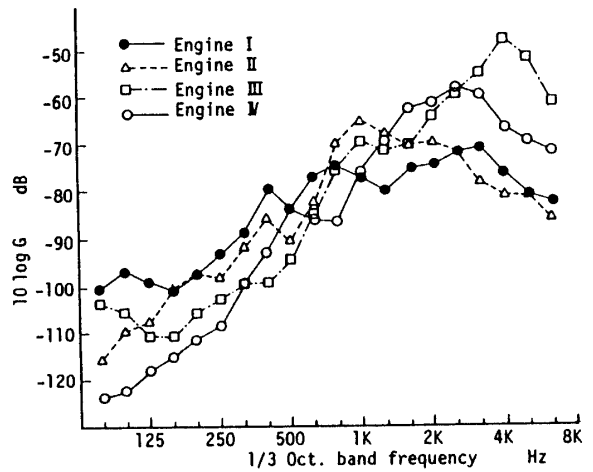


Fig. 9 Comparison of transmission-radiation coefficients between four test engines

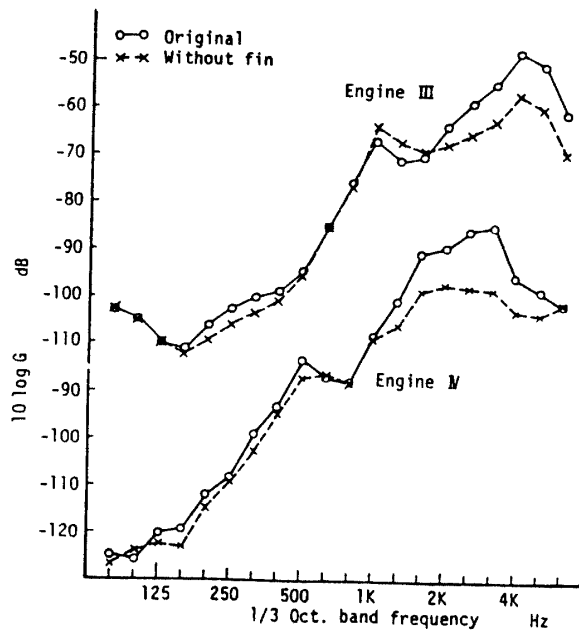


Fig. 10 Effect of fins on combustion noise

であると思われる空冷用フィンの影響について調べてみたのがFig. 10である。それぞれの原形とフィンを除去したものととの伝達放射特性を比較して示した。

図からわかるように、エンジンIIIは2.0kHz以上、エンジンIVは、1.25kHz以上の高周波数域においてフィンを除去することによって、伝達放射特性が大きく減少している。このことにより、空冷エンジンにおけるフィンが高周波数域の燃焼衝撃音に大きく影響していることを明らかにすることができた。

4. まとめ

本研究では、燃焼室壁面に作用する燃焼衝撃のパワーと燃焼衝撃音のパワーとの間に線形関係が成り立つと考え、その伝達放射係数を定義した。燃焼衝撃音の発生特性を調べる手法として静止エンジンの燃焼室壁を、火薬点火具・爆竹・LPG-酸素混合気を用いて単一爆発加振する方法について述べ、さらにこの伝達放射係数により、燃焼衝撃音の発生傾向を定量的にとらえることを試みた。

本実験を進めるにあたり火薬の取扱いについて多大

なるご指導、ご援助をいただいた、日本火薬(株)坂本佐氏に深く感謝するとともに、本研究は文部省科学研究費(昭和61・62年度 一般研究(C) 小嶋直哉)による研究の一部であることを記し、感謝の意を表する。

付録：本論文で用いた主な記号

W_c ：燃焼衝撃のパワー (W)

W_s ：エンジンから放射される騒音のパワー (W)

W_b ：燃焼衝撃音のパワー (W)

I_s ：放射騒音の音の強さ (W/m²)

A_c ：燃焼室の表面積 (m²)

A_s ：音波の拡散面積 (m²)

L_{wc} ：燃焼衝撃音パワーレベル (dB：re.1.0pW)

L_{cp} ：シリンダ圧力レベル (dB：re.20μPa)

L_{ws} ：エンジンから放射される騒音のパワーレベル (dB：re.1.0pW)

L_{bp} ：燃焼衝撃音の音圧レベル (dB：re.20μPa)

L_{wb} ：燃焼衝撃音のパワーレベル (dB：re.1.0pW)

G：伝達放射係数

参考文献

- 1) Priede, T., et al., SAE Paper, 690450, (1969).
- 2) Thine, G., and Nowotny, B., Motor Tech. 32-6 (1971), 185
- 3) 福田基一, “騒音防止工学”, 日刊工業新聞社
- 4) 矢野, 橘, 音響技術, No.31, 1980-6
- 5) 小嶋ほか2名, 機論集 (B編), 51-471 (1985), 3623
- 6) 日本音響材料協会編, “騒音対策ハンドブック”, 技報堂
- 7) 小嶋ほか2名, 第3回内燃機関合同シンポジウム, (1982), 199
- 8) B. J. Challen and D. M. Creoker, SAE Paper, 820517, 1982
- 9) 小嶋ほか2名, 機論集 (B編), 52-475 (1986), 1425
- 10) 小嶋ほか2名, 機論集 (B編), 52-475 (1986), 1425

(昭和62年10月15日受理)