

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2報：燃焼衝撃音の伝達経路)

小嶋直哉*・小林啓二*・伊藤和美**・清水律治***

An Experimental Study on Generation Mechanism of Combustion Induced Engine Noise

(2nd Report : Transmission Paths of Combustion Impact Noise)

Naoya KOJIMA, Keiji KOBAYASHI, Kazumi ITOH and Ritsuharu SHIMIZU

Abstract

In the previous paper, the transmission-radiation coefficient of combustion noise was proposed in order to investigate the engine structure response from the viewpoint of combustion noise generation. In this paper, the coefficients were examined for both a non-running engine structure excited by single explosion and an operated one. Using the vibration isolation techniques, the characteristics of these coefficients were obtained for three transmission paths of the test engine structure. The experimental methods to clarify the generation mechanisms of combustion noise were also discussed.

1. まえがき

前報では、燃焼室壁面に作用する圧力変動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、算出方法などについて報告した。

ここでは、まず発火運転時の伝達放射特性と、静止エンジンを単一爆発加振させたときの伝達放射特性とを比較し、燃焼衝撃音の発生特性について調査した。

次に、燃焼室内壁面からエンジン外壁面に至る燃焼衝撃の伝達経路を、空気加振経路、ピストン・シリンダ経路、ピストン・駆動系経路の三つの主な経路に分けて考え、それぞれの伝達特性を明らかにする手法について述べた。また、これらの経路を経て放射される燃焼衝撃の寄与率についても考察した。

2. 実験装置および実験方法

本報における供試エンジンは、前報に示したエンジンI（船用縦型水冷単気筒ディーゼルエンジン）であり、その主要諸元は排気量536cc、最高出力5.9kW/3000rpmである。

発火運転実験では、回転数を800～2400rpmの範囲で200rpm間隔で変化させて運転した。各回転数において多様な燃焼経過を実現するために、負荷、燃料噴射時期、冷却水温度および燃料性状を変化させた。なおここで用いた燃料は、軽油および軽油とガソリンの混合油（体積比 7 : 3, 5 : 5）の3種類である。

単一爆発による衝撃力が燃焼室内壁およびピストン上面に作用し、エンジン外壁面に伝達され騒音として放射される。この経路を静止エンジンにおいて調査するために、従来のエンジン構造に加え図1に示す装置で実験を行った。

Fig. 1(b)は、ピストンリングに替えてゴムのOリングを装着し、ピストンとライナとの間の振動伝達を遮断した構造を示している。図1(c)は、ピストンおよび

*機械工学科

**宇部興産㈱

***大学院機械工学専攻

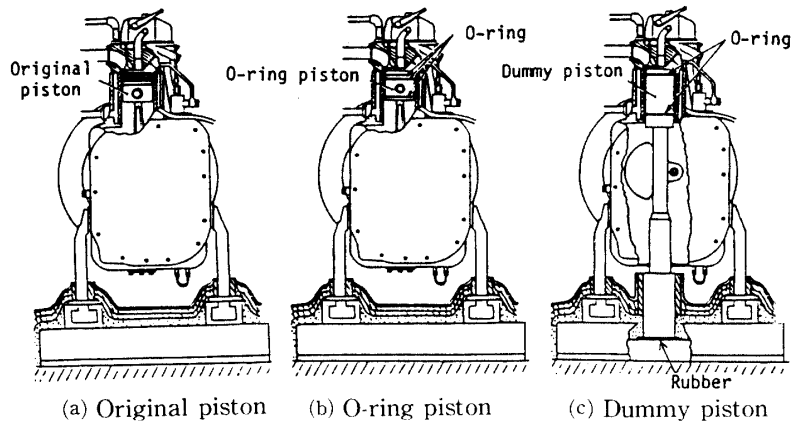


Fig. 1 Schematic setup

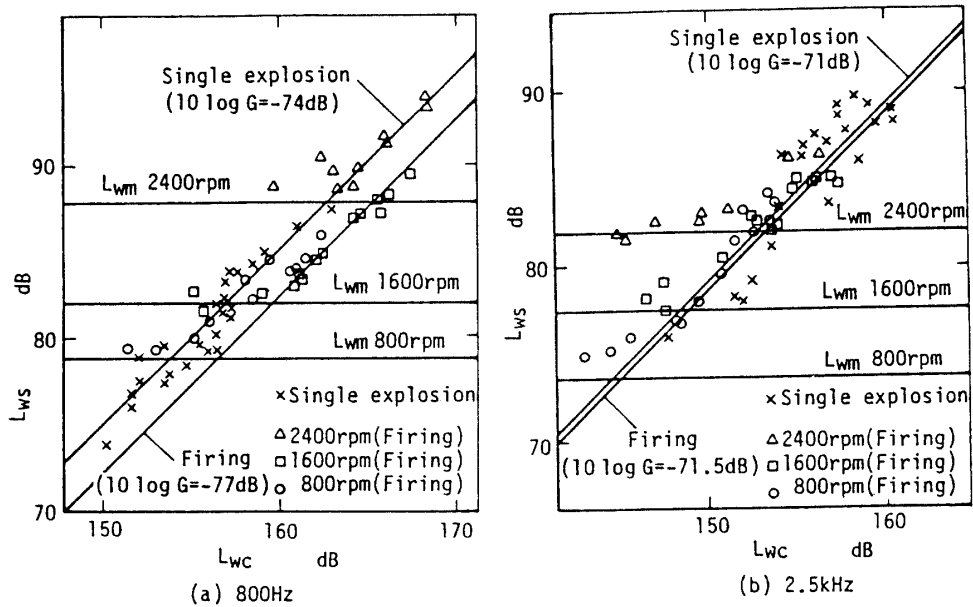


Fig. 2 Relationship between L_{wc} , L_{ws} and L_{wm}

コンロッドを除去し、エンジン外部の定盤で支持した仮ピストンを挿入した装置である。この際、仮ピストンとシリンダライナの気密性を保つためにOリングを用いるとともに、衝撃が定盤を介してエンジン構造に伝達されるのを防ぐために、仮ピストンの下にゴムマットを挿入した。

その他の実験条件、測定装置および解析方法は、前報と同じである。

3. 燃焼衝撃の伝達放射特性

3.1 伝達放射係数の算出方法

前報において、燃焼室内壁面に作用する音響パワー W_c に対するエンジン外壁面から放射される燃焼衝撃音

のパワー W_b の比を、伝達放射係数 G として定義した。すなわち、

$$W_b = G \cdot W_c \tag{1}$$

発火運転時において放射騒音のパワー W_s は燃焼室内壁面に作用する燃焼衝撃のパワー W_c に比例して増大する騒音（以下、燃焼衝撃音とする）のパワー W_b と、それ以外の騒音（以下、その他の騒音とする）のパワー W_m との和と考えられる。ここで、燃焼衝撃音のパワー W_b と燃焼室内壁面に作用する燃焼衝撃のパワー W_c との間に比例関係が成立すると考えれば、これらの関係は次式で示される。

$$W_s = W_b + W_m = G \cdot W_c + W_m \tag{2}$$

ここで、その他の騒音 W_m を同一回転数で変化しないものと考え、(2)式において同一回転数のもとで燃

燃焼過程をさまざまに変化させ、二つの異なる運転条件における W_b と W_s の組み合わせから得られる二元一次連立方程式を解くことにより、 G および W_m を求めることができる。燃焼衝撃のパワーを算出する際、発火運転時には燃焼室内の表面積 A_c が時間的に変化する。しかし、燃焼による急激な圧力変化が発生するのは上死点前後 5°CA 付近までであり、この間におけるシリンダ内表面積 A_c の変化はごくわずかであるので、本実験では A_c として上死点での値を採用した。

Fig. 2は、発火運転時と単一爆発加振時の燃焼衝撃のパワー W_c に対する放射騒音のパワー W_s 、燃焼衝撃音のパワー W_b およびその他の騒音のパワー W_m の関係を、それぞれパワーレベル L_{wc} , L_{ws} , L_{wb} , L_{wm} (re. 1.0pW)により、800Hzおよび2.5kHzの1/3オクターブ帯域周波数成分について示したものである。

図において、単一爆発加振時および燃焼衝撃が激しい発火運転時において、燃焼衝撃のパワーレベルの値はほぼ 45° の直線近傍に分布し、燃焼衝撃のパワーと燃焼衝撃音のパワーとの間に(1)式が成立していることがわかる。このことは、エンジン構造が燃焼衝撃のエネルギー発生に関して、ある程度線形な系とみなし得ることを示している。

一方、その他の騒音のパワーは回転数の上昇とともに大幅に増加している。このことが、現場技術者によって一般に言われている“ディーゼルエンジンはガソリンエンジンとの比較において、低速運転時には燃焼衝撃音のために騒音が大きい、高速運転時にはあまり大差が認められなくなる。”ことの一因であると言えよう。

3.2 単一爆発加振時と発火運転時の伝達放射特性の比較

Fig. 3は、単一爆発加振時と発火運転時のエンジンについて、それぞれ求めた燃焼衝撃音の伝達係数を比較して示したものである。それぞれの周波数帯域における伝達放射係数 G の値は単一爆発加振は58点の、また発火運転時は9段階の回転数について算出した合計200余点の、それぞれのパワー平均で表示している。

Fig. 3に示されるように発火運転時および単一爆発加振時の伝達放射係数には大きな差異が認められない。このことは、(1)式、(2)式で示した伝達放射係数を同一のものとして示している。従って単一爆発加振によって求めたエンジンの伝達放射特性は、発火運転時の燃焼騒音を予測、評価するうえで有用であり、燃焼衝撃音の発生機構の解明に対し、有効な手段の一つを与えるものであると思われる。

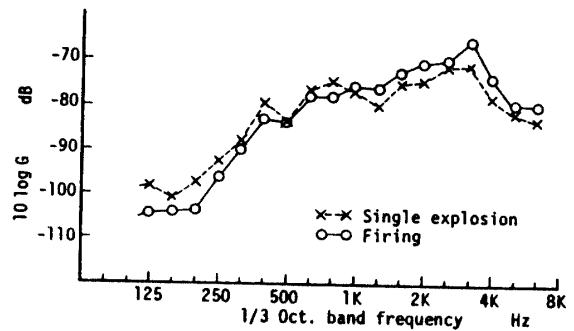


Fig. 3 Comparison of transmission-radiation coefficients obtained in single explosion excitation and in firing operation

4. 燃焼衝撃の伝達経路の解明

4.1 燃焼衝撃の伝達経路

燃焼室内ガスの急激な圧力上昇によって発生する衝撃は、Fig. 4に示すように、シリンダヘッド・シリンダライナおよびピストン上面に直接作用し、各伝達経路を経てエンジン各部の表面に伝達され燃焼衝撃音を放射する。

また、エンジン全体から放射される騒音のパワーは、各伝達経路を経てエンジン外壁から放射される騒音のパワーの和と考えられるので、次式が成り立つ。

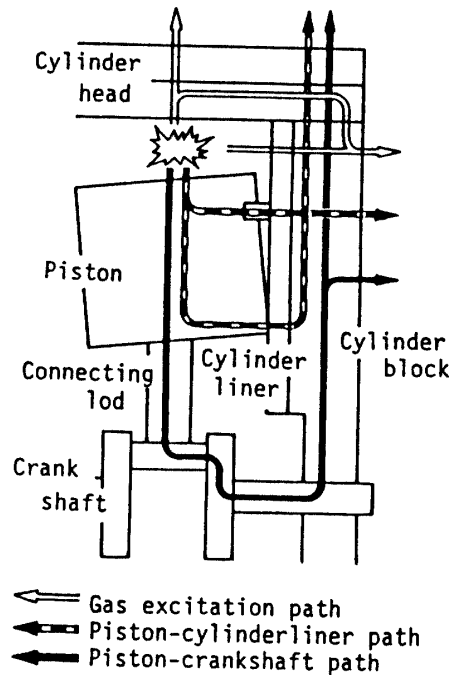


Fig. 4 Transmission paths of combustion impact through engine structure

$$G = \sum_i G_i \quad (3)$$

ここで、添字 i は各伝達経路を表わす。

そこで、それぞれの経路の影響について実験により調査するために、通常エンジン構造に加えFig. 1に示した装置を併用して解析を行い、以下の方法により各経路の伝達放射係数を算出した。

ここでは、燃焼室壁面に作用する燃焼衝撃のパワーが、エンジン各外壁面に到達するまでの経路として、次の三つの主要な経路を考えた。すなわち、

(I) 空気加振経路：燃焼衝撃が直接シリンダヘッドおよびシリンダライナに作用し、エンジン各部の表面に伝達される経路

(II) ピストン・シリンダ経路：ピストン上面に作用した燃焼衝撃が、ピストンリングおよびピストン側面からライナを経てエンジン各部に伝達される経路

(III) ピストン・駆動系経路：ピストン・コンロッド・クランク軸を経てエンジン各部に伝達される経路

(I) の空気加振経路については、図1(c)に示したように仮ピストンを装着した実験装置を用いた。この装置によれば、燃焼衝撃がエンジン構造に作用する部分は、燃焼室壁面のうち、シリンダヘッドおよびシリンダライナのみとなりピストンに作用する衝撃は直接的にはエンジン各部の構造に伝達されず、その影響を除外して伝達放射係数を求めることができる。

(II) のピストン・シリンダ経路については、エンジン原形構造の実験装置(a)とピストンリングをOリングで置き換えた実験装置(b)において、それぞれ求めた

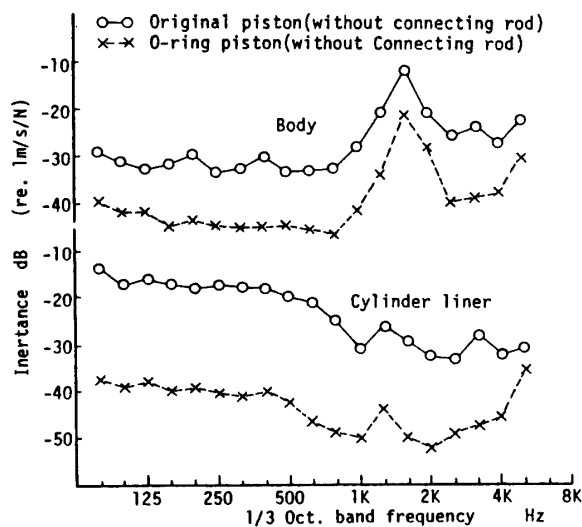


Fig. 5 Vibration isolation effects between piston and cylinder (impulse hammer excitation without main bearings)

伝達放射係数のエネルギーにより求めることができる。

このさい、実験装置(b)のOリングによる振動遮断効果が大きい必要がある。そこでピストン上面をインパルスハンマで加振することにより振動遮断効果を調べ、加振力 L_f (re. $10\mu\text{N}$) に対する各部の振動加速度 L_v (re. $10\mu\text{m/s}^2$) の比を、各部のイナータンスとして表わした結果をFig. 5に示す。図よりOリング装着により、十分な遮断効果が期待できピストン・シリンダ経路の伝達放射係数が精度よく求められることがわかる。

(III) のピストン・駆動系経路を経る燃焼衝撃音については、空気加振経路とピストン・駆動系経路とを燃焼衝撃が伝達される実験装置(b)と、空気加振経路のみ伝達される実験装置(c)とを用いた結果から、それぞれの場合の伝達放射係数のエネルギー差によりこの経路の伝達放射係数を求めることができる。

4.2 各経路の伝達放射特性

Fig. 1における実験装置(a), (b), (c)を使用して、単一爆発加振を行った場合のそれぞれの伝達放射特性をFig. 6に示す。この結果より各伝達経路について求めた伝達放射特性の計算結果をFig. 7に示す。図に示されるように各周波数帯域において支配的な伝達経路が異なることがわかるが、各経路ともに伝達放射特性が複雑に入っていて、それぞれの特徴を一見して比較することは困難である。

そこで各経路を相対的に評価するために、各帯域における各経路の寄与率を求めFig. 8に示す。図より、ピストン・駆動系経路の寄与率が高周波数域で大きく、特に1.6kHz以上においては、50%を越える燃焼衝撃がこの経路を経て放射されていることがわかる。空気加振経路では、500Hzを中心として315Hzから630Hzにかけて大きな値を示しており特に500Hzにおいて寄与率は

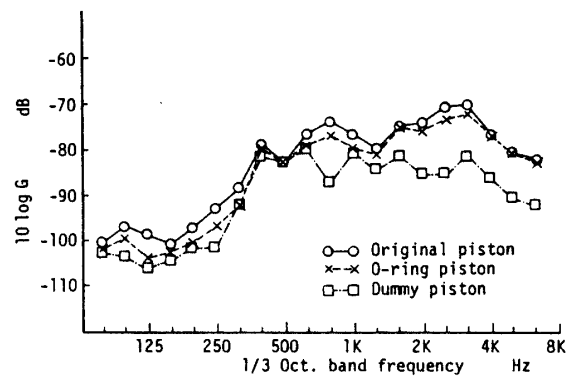


Fig. 6 Transmission-radiation coefficients obtained each test apparatus on combustion noise

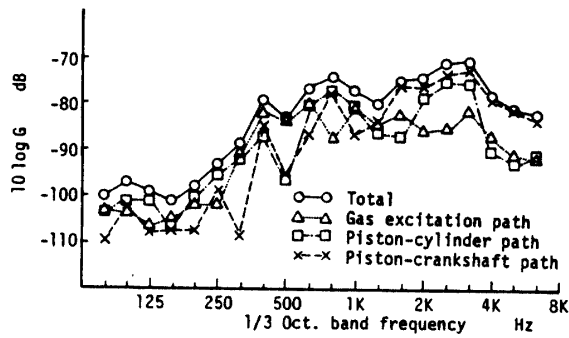


Fig. 7 Effects of transmission path on combustion noise

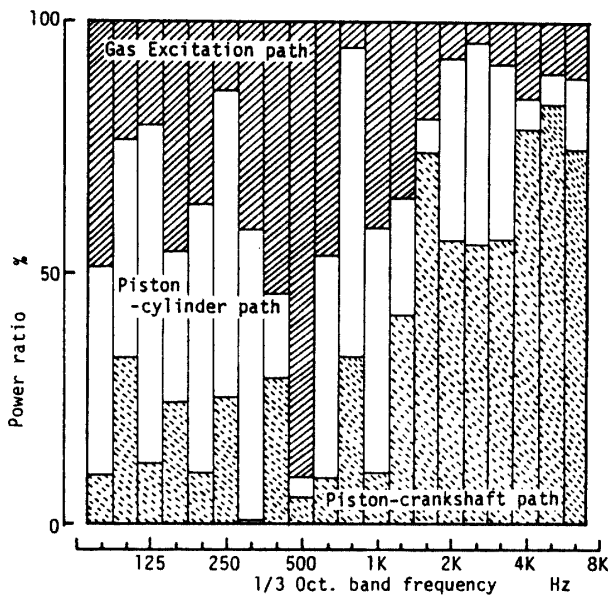


Fig. 8 Contribution of each path

90%にも達している。また315Hz以下の低周波数域においては、35~60%の燃焼衝撃音がピストン・シリンダ経路を経て伝達され、騒音として放射されていること等が明らかになった。

4.3 クランク角度変化

LPG-酸素の混合気を用いてクランク角度の違いが、伝達放射係数に及ぼす影響について検討を行った。

Fig. 9は、クランク角度を上死点から上死点后45°CAまで変化させた場合について、伝達放射特性を求めたものである。図より、TDCの伝達放射特性と比較して5°CA、15°CAの伝達放射特性にはあまり変化が認められないが、30°CA、45°CAの伝達放射特性は幾分変化がみられる。しかし、エンジン運転時における燃焼衝撃の発生時期はTDCから最大でも10°CAまでの間である

ため、クランク角度の変化が伝達放射特性に及ぼす影響はほとんどないものと考えられる。クランク角度が大幅に増加するに伴い2.0kHz以上の高周波数域においては、伝達放射特性は少し減少し、逆に250Hz以下の低周波数域では増加する傾向があることが知られる。

ここで、4.2節で求めた各伝達経路の特徴と結び付けて考えると、次のことが推測される。250Hz以下の低周波数域ではピストン・シリンダ経路の影響を強く受けている。この経路においてピストンがシリンダライナを押す力 F_s は、Fig. 10に示すようにクランク角度がTDCから大きくずれると急激に増加している。従って伝達放射係数の250Hzにおける帯域成分はクランク角度が大幅な変化をする場合には増加することがわかる。400Hz、630Hzの周波数帯域では空気加振経路の影響を強く受けるが、クランク角度に関係なく伝達放射特性はあまり変化していない。この原因を調べるためにクランク角度と燃焼室の壁面積の関係を算出し、Table 1に示す。ピストンが降下することによる燃焼室面積の

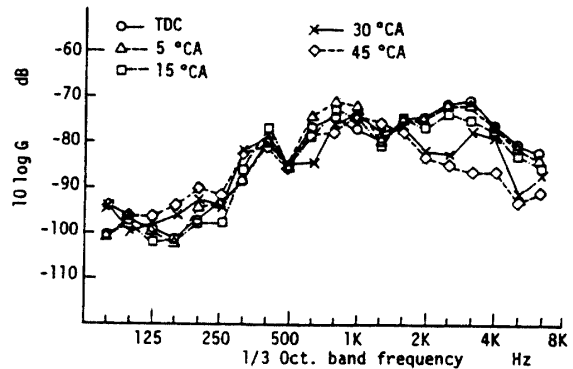


Fig. 9 Effects of crank angle on combustion noise

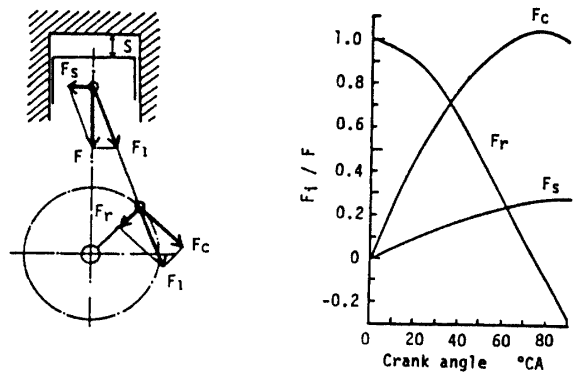


Fig. 10 Effect of crank angle on forces affecting to piston-crank mechanism

Table 1 Estimated effects of combustion chamber area on combustion noise

Crank angle (CA)	TDC	5	15	30	45
Distance between TDC and Piston S (mm)	0	0.22	1.93	7.56	16.8
Quantity of increase in surface of combustion chamber (cm ²)	0	0.58	5.16	20.08	43.2
Rate of increase in surface of combustion chamber (%)	0	0.4	3.4	13.4	28.8
Rate of increase in level (dB)	0	0.02	0.15	0.55	1.10

Area of combustion chamber at TDC=150 cm²

増加は、壁面が受ける燃焼衝撃のパワーの増加をもたらすが、このことによるパワーレベルの増加量は、クランク角度がTDCから45°CA変化した場合でも高々1.1 dBでありその影響は小さいといえる。これより空気加振経路においては、クランク角度変化による伝達特性の変化はほとんどないことがわかる。

ピストン・シリンダ経路においてはFig. 10に示すようにクランク角度がTDCから変化する場合、ピストンがシリンダライナに押し付けられる力 F_s が増加している。このためピストン・シリンダ経路は、クランク角度がTDCから変化する場合、伝達特性が増加することがわかる。また、2kHz以上の周波数帯域においてはピストン・駆動系経路の影響を強く受けている。ピストン・駆動系経路の伝達特性は、Fig. 10に示す Fr と Fc に密接な関係をもつものと考えられる。 Fr はクランク軸を曲げる力であり、 Fc はクランク軸をねじる力である。TDCからのクランク角度増加では、 Fr は減少し Fc は増加している。軸のねじり力のみではエンジン外壁に騒音を発生させる力は作用せず、これが軸受けおよび減速歯車に影響を及ぼす場合には騒音の原因となることがある。本実験で用いたエンジンが単気筒エンジンであることとクランク軸を回転方向に固定していることなどのため、この影響が現れなかったものと考えられる。これらの結果、ピストン・駆動系経路では、クランク角度がTDCから増加する場合、伝達放射特性は減少したものと推察される。

5. まとめ

(1)発火運転時において求めた伝達放射係数と静止エンジンにおいて単一爆発加振することにより求めた伝達放射係数との間には、良好な一致が認められた。これより単一爆発加振が燃焼衝撃を評価、解析するのに

有効な手段であることがわかった。

(2)燃焼室内で発生した衝撃が、エンジン外壁面に伝達される経路を、空気加振、ピストン・シリンダ、ピストン・駆動系の3つに大別し、それぞれを個別に求める実験手法とその有効性の検証を行った。

(3)今回用いたエンジンは、高周波数域ではピストン・駆動系経路が、また低周波数域では、ピストン・シリンダ経路が燃焼衝撃音を放射し易いことが明らかになった。

(4)本供試エンジンのクランク角度を大幅に変化させた場合には、2.0kHz以上の高周波数域においては、伝達放射特性は幾分減少し、逆に250Hz以下の低周波数域では増加する傾向が認められた。しかし実際において燃焼衝撃が発生するクランク角度の範囲においては、伝達放射特性に大きな変化はないことがわかった。

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。

参考文献

- 1) A. E. W. Austen, and T. Pride, SAE Trans., 650165 (1965), 719
- 2) G. Thien, and B. Nowotheny, MTZ, 32 (6), 1971.
- 3) T. Priede, P. I. M. E. (A. D.) No. 1, 1960-1961, 64.
- 4) Alcock, J. F., Proc. IMS Symp. Engne Suppress., 1958, 54.
- 5) M. F. Russell, SAE Paper, 820238, 1982.
- 6) J. Dixon, E. C. Grover, and T. Priede, SAE Paper, 820364, 1982.

(昭和62年10月15日受理)