

内燃機関の排気管内波動に関する基礎的研究

和 泉 晴 夫*・福 田 基 一*

Fundamental Study on Wave Phenomenon in the Exhaust Pipe of an Internal Combustion Engine

Haruo Izumi and Motokazu Fukuda

Abstract

It is assumed that the back pressure of an engine increases due to the frictional resistance of the gas flow when the length of the exhaust pipe is increased.

As a matter of fact, however, the values of the back pressure increase or decrease according to the increase of the pipe length.

The cause of the change of the back pressure resulting from the length of the exhaust pipe is presumed to be a wave interference. However, it is very difficult to pinpoint the wave phenomenon in an actual firing engine.

Therefore, an air model engine is used in the experiment so that the observation of only one arbitrary time is possible. The piston is devised so that it can be fixed at an arbitrary position and the cylinder volume is kept constant.

Compressed air is introduced into the cylinder from the top of the cylinder head, and the exhaust valve is processed so that the valve opening time and the valve clearance can be changed from outside of the engine.

By using this model engine, many interesting conclusions on the wave phenomenon are shown in this paper.

1. まえがき

内燃機関の吸・排気系における管内波動による動的効果に関する研究は、燃焼の機構、機関の諸元、運転の条件、吸排気管路形状、機関各部の温度分布の相違や、毎回の燃焼サイクルの変動・圧力波伝搬速度・ガス密度分布の変化などのために、圧力波発生因子が複雑で、波動の伝搬状況を正確に把握することは困難であり、理論的解析手法も多く試みられているが十分とはいえない。

われわれは、空気模型機関を用いて、排気管路系のシリンダ部、排気管入口部、管端部における基本的な圧力波の伝搬特性を調べるとともに、排気管に空どうをもつ管路系について種々の解析を試みた結果について報告する。

2. 実験装置・実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1 に空気模型機関実験装置を示す。モデルのエ

*機械工学科

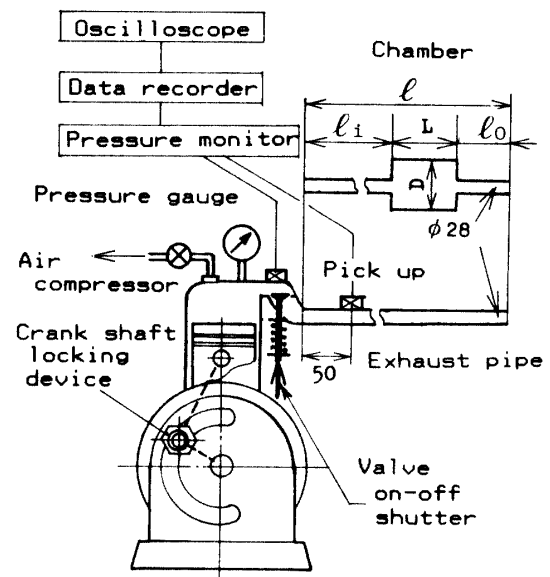


Fig. 1 Model engine equipment

ンジンは三輪自動車用の単シリンダエンジンを用いて、ピストンを任意の位置に固定できるように改造し、シリンダヘッド上部から圧縮空気を封入するようにしたもので、外部に設けた弁開閉装置によりきのこ形排

気弁の開閉時間や弁揚程などを変化させることができ、シリンダ内の空気は弁の開閉により1回だけ吐出される。

管内波形については、圧力ピックアップをシリンダヘッド上部中央および排気管内上に取り付け、データレコーダに同時記録するとともに、オシロスコープによって写真撮影をした。

排気管径はφ28で、吸気弁は閉じた状態で管路各部での空気の漏れがないよう特別な加工を施し、常温において実験を行った。

2.2 実験方法

空気模型機関のクランク軸角度を変化してシリンダ容積を固定した状態で、コンプレッサより空気を封入させ、シリンダ内圧の定常状態を確認した後に、弁開閉装置で弁を開き、排気管内に圧力波を誘起させてシリンダ内圧力の減衰状況や排気管内の圧力波動を観察した。また、シリンダ容積 V_c 、シリンダ内圧力 P_c 、排気管長 l 、圧力ピックアップ取付位置 l_p 、弁揚程 l 、管端絞り部径 d 、空どう長さ L 、空どう径 D などを変数として測定と解析を行った。

3. 直管排気系における圧力波の伝搬

シリンダからの空気が排気弁を通過した後の圧力波が、管路を通して大気中に放出される過程において空どう等が無く直管のみの排気系について圧力波の伝搬を解析する。

3.1 シリンダ内圧力と排気圧力

シリンダ内圧力 P_c と排気管入口部圧力 P_e との関係をFig.2に示す。図に示すように、排気管路の圧力変動は排気管の長さの影響を受け、シリンダ内へも影響を及ぼしている。とくに、排気弁の閉時期EC時に第2正圧波がある場合(排気管長1.15mなど)にはシリンダ内には正圧が残留し、弁閉直前に負圧波がある場合(同3.15mなど)には負圧が残留する。このことから、実際の機関の場合においては、ある管長でまえのサイクルの残留正圧や残留負圧がシリンダへの新気流入やシリンダからの排気ガスの流出に影響を及ぼし、体積効率に影響を与えることが推定される。そこで、以下にシリンダ部と管路に現象を分けて圧力波の伝搬について調べることにする。

3.2 シリンダ部が管路に及ぼす影響

排気管端に達した圧力波の圧射波の帰還が、排気弁

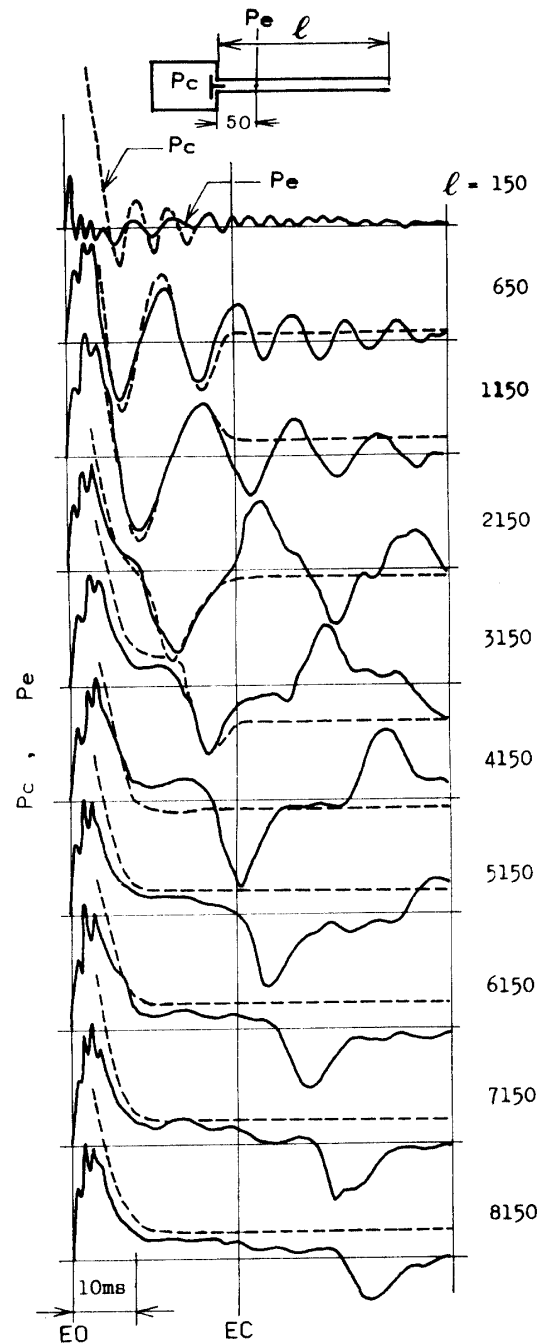


Fig. 2 Pressure waves in cylinder and entrance of exhaust pipe

閉時ECと接近しているFig.2の排気管長が5.15m付近より若干長い5.24mにおいて、シリンダ部が管路に及ぼす影響を、 V_c 及び P_c を変えて影響を調べた。

Fig.3にシリンダ容積 V_c を変化したときの排気管入口部での管内圧力波を示し、Fig.4にシリンダ内圧 P_c を変えた場合の影響を示す。これより、 V_c や P_c が大きいほど吹出し正圧波および負圧波の持続時間がいずれも長くなっていることがわかる。また、管長を変えた場合についてもほぼ同様の結果を得られる。

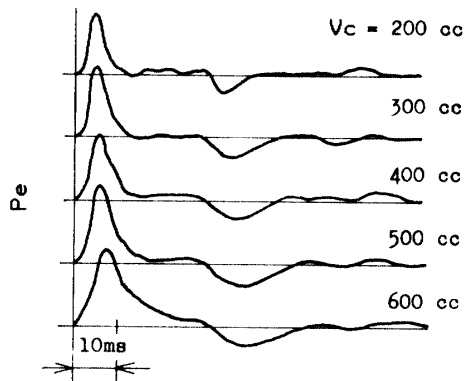


Fig. 3 Influence of cylinder volume V_c
($P_c = 1.0$ atg)

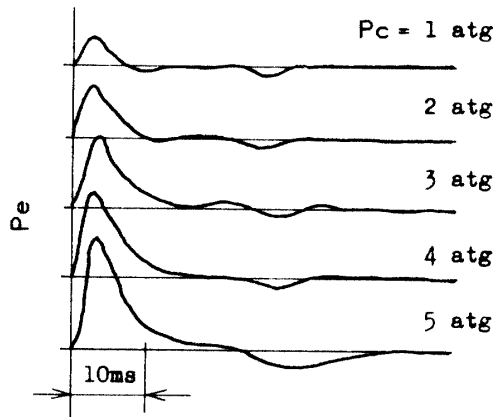


Fig. 4 Influence of cylinder pressure P_c
($V_c = 200$ cc)

3.3 排気管内の圧力波伝搬

排気弁部より発生した圧力波が排気管中を伝搬する様子を Fig. 5 に示す。これは、排気管長を一定にして圧力ピックアップを管の各位置に移動させて観測したもので、見かけの反射負圧はシリンダに近いほど大きく、管端に近づくほど小さくなっていく。また、見かけの正圧波は管端に近いほど波頭は急になり、負圧では次第に緩やかになっていることが観測される。

これは、管端に近づくほど正圧波と負圧波が接近し相互に打ち消し合うためである。

Fig. 6 に排気管長を変化した場合の圧力波の伝搬の様子を示す。ここでは、合成負圧波が管長が長くなると正圧波と分離して次第に振幅も回復するが、かなり長い場合などは、管摩擦などに影響されて減衰することが推定される。

Fig. 7 に圧力波伝搬速度のインピーダンス理論、ヘルムホルツの計算式、閉管の式などの計算値と測定値の関係を示す。Fig. 5、Fig. 6 より負圧波の帰還時間を算

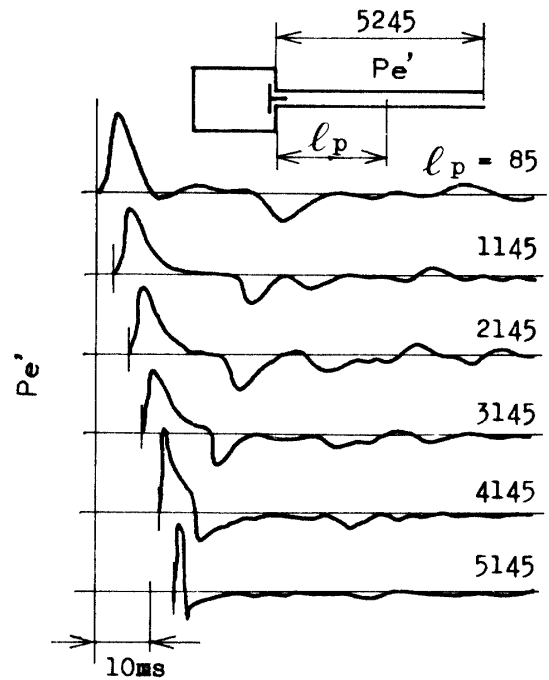


Fig. 5 Pressure waves in exhaust pipe
($l = 5245$ mm, $P_c = 1.0$ atg, $V_c = 200$ cc)

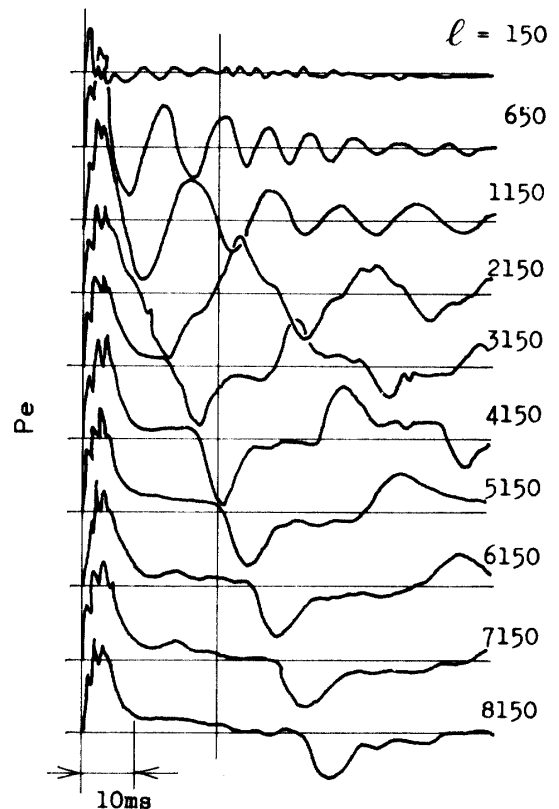


Fig. 6 Influence of the length of exhaust pipe
($P_c = 2.0$ atg)

出すると圧力波伝搬速度は弁部を閉管とし、管端を閉管として計算した値にかなりよく一致していることがわかる。

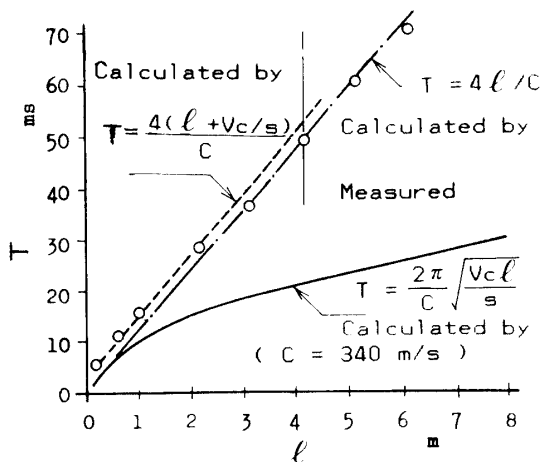


Fig. 7 Period of pressure waves

3.4 絞り が 反 射 波 に 及 ぼ す 影 響

排気管のみの場合、管端は開管として作用し、圧力波は管端で負圧として反射されるが、管端を絞ることにより反射条件は変化し、排気管内で圧力波伝搬速度の推移に影響を及ぼす。Fig. 8 は管端に絞りを設け、

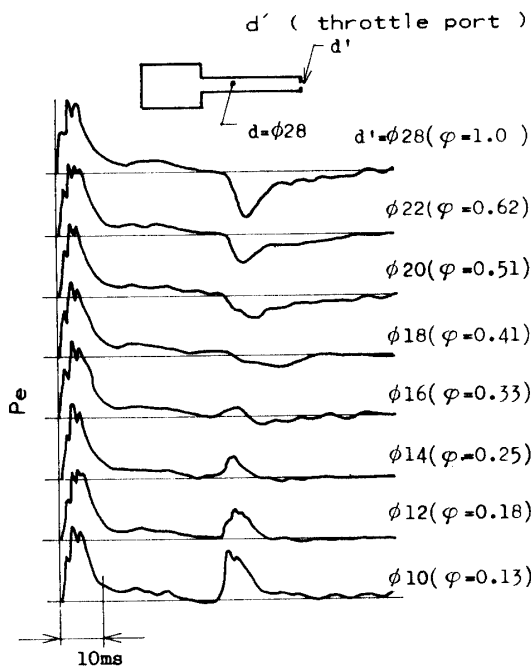


Fig. 8 Influence of throttle at the end of pipe (l = 7150, P_r = 2.0 atg, V_r = 200 cc)

絞り面積(開口比φ)を変化させた場合の排気管入口部の圧力波の様子を示す。

また、Fig. 9 には、Fig. 8 により求めた反射負圧波の圧力時間面積と開口比の関係を示す。この実験から開口比0.3以下では正圧を示し閉管としての効果を表すことが認められる。

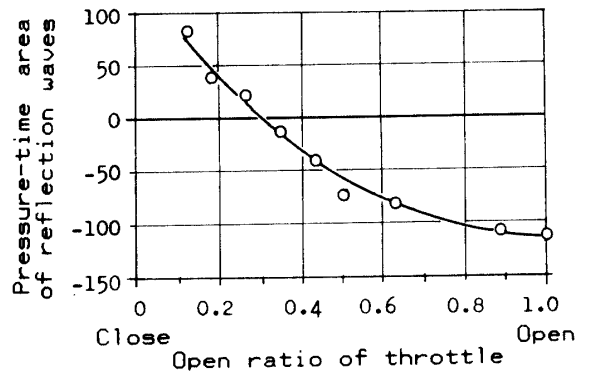


Fig. 9 Influence of the open ratio of throttle at the end of pipe (l = 7150)

これらのことから、弁部の絞りもこれと同様に考えられ、きのこ弁による開口比はかなり小さく、かつ一般に弁座部の付近は曲折した管路形状をもつことから、波動はほとんど閉管として作用することが推定される。

次に、排気弁部の影響を調べるために、空気模型機関の排気管先端に、実用小形機関(三菱メイキ287 cc)の排気弁部マニホールドを直接に接続し、実験装置により正圧波を強制的に送り込み、空気模型機関の排気弁直後の圧力波の測定を行った。Fig. 10 はこの結果を示している。この図で弁を全開しても、反射負圧の発生は認められず、ほとんど閉管として作用していることが確かめられた。

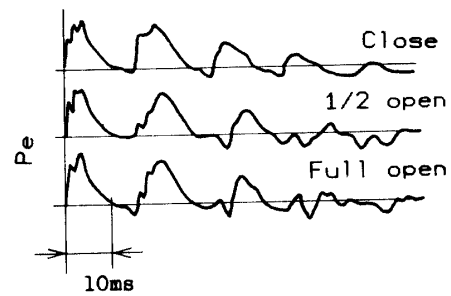


Fig. 10 Influence of exhaust valve (valve lift: 7 mm)

4. 空 だ ょ う 付 き 排 気 系 の 圧 力 波 の 伝 搬

実用エンジンの吸・排気管路は消音装置などが付いており複雑な形状を呈している。そこで、前述の直管排気管の途中に空どう部を設けて定性的に圧力波の伝搬の推移を、単純化した構造で調べることにした。

実験装置は同じものを用い、空どう部までの排気管

長 l_1 を Fig. 2 から排気弁閉 EC 時に管端より反射波が到達している 5.15 m にし、空どう部の長さ L での反射波、尾管部の長さ l_0 での反射波形成の要因を分離させて観測を行った。

4.1 空どう径の影響

Fig. 11 に空どう付き管路各部の圧力波反射のモデルを示し、Fig. 12 に空どう径を変化させたときの空どう前後の管内圧力変動の伝搬（測定位置 50, 100 で P_e, P_e^* ）の測定結果を反射波別に分けて表した。

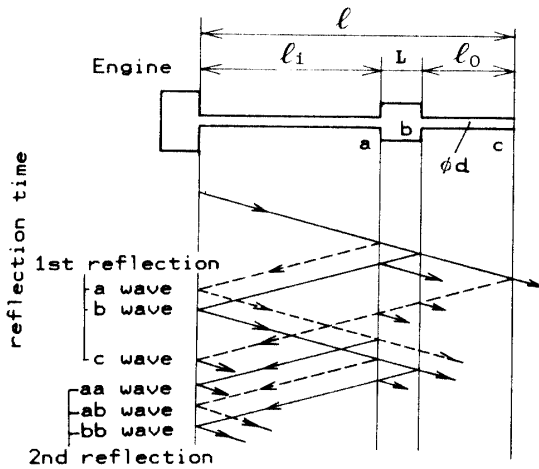


Fig. 11 Analysis of reflection waves

Fig. 12 に示されるように、空どう前での管内圧力波形は空どう径に大きく左右され、また、空どう後部（尾管部）の圧力波のピーク値も空どう径の増大とともに減衰していることが認められる。Fig. 12 はシリンダ内圧がゲージ圧力 0.2 MPa であるが、シリンダ内圧を増大しても圧力波伝搬の傾向は類似したものが観測され、a, b, c 各波の合成波形であることが認められる。なお、図中の a, b, c は l_1, L, l_0 部での反射波を示している。

Fig. 13 は Fig. 12 の空どう通過後の圧力波のピーク値を空どうの無い直管の場合と比較して整理したもので、圧力波のピーク値も空どう径の増大とともに減衰していることがわかる。

4.2 空どう長さの影響

Fig. 14 に空どう部の長さを空どう径 $\phi 80$ について、管路全体の長さを一定（13 m）にして変化、圧力波伝搬の影響を調べた結果を示す。全長 l を一定にしたのは管端での反射（c 波）の条件を同じにするため、図中の破線は空どう後 100 mm における圧力波形 P_e^* を示している。この結果から空どう長さが大きくなる

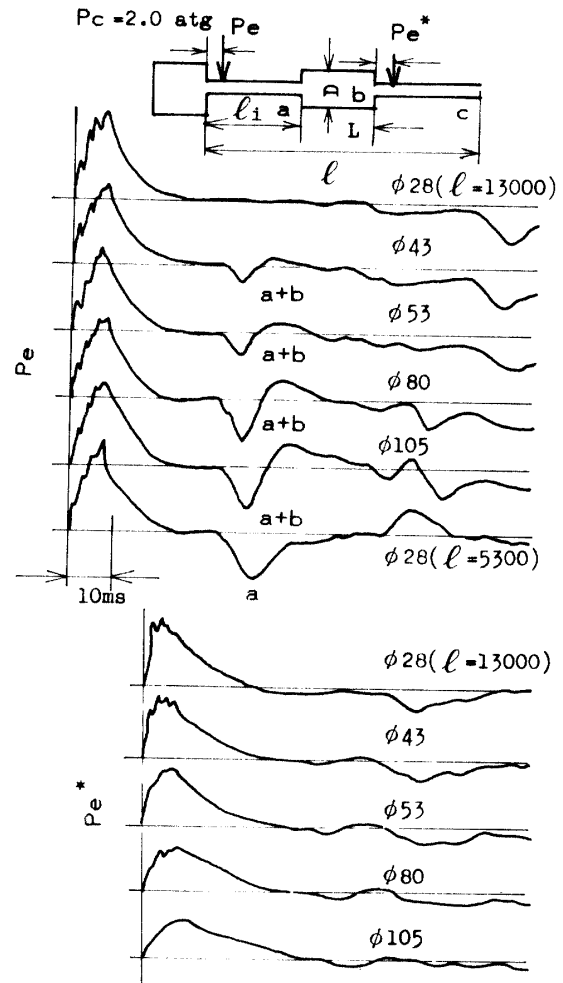


Fig. 12 Influence of D

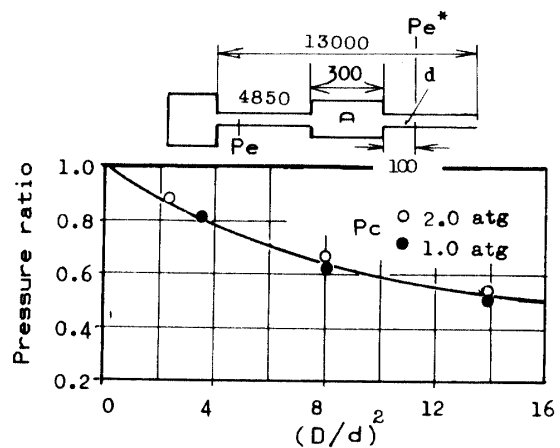


Fig. 13 Pressure ratio P_e/P_e^* regulated by $(D/d)^2$

につれて空どう部での反射波の大きさが増していることがわかる。

Fig. 15 に示すように観測する圧力波形は a 波、b 波の合成波形であるから、空どう長さが変化すること

により空どう出口部での反射波 b 波の時間が変化し、合成波の観測時間 τ'_p も L の増大とともに大きくなる。

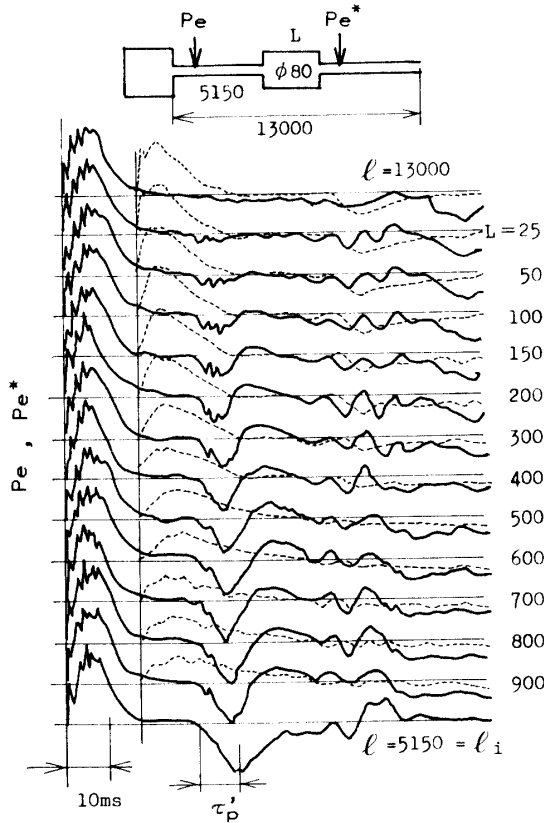


Fig. 14 Influence of L (solid line: P_e , dotted line: P_e^*)

Fig. 16 は、空どう通過後の圧力波の減衰について Fig. 13 と同様に整理したもので、シリンダ内圧力の大きさによって圧力比に変化が表れており、空どう部の容積が影響しているためと推定される。

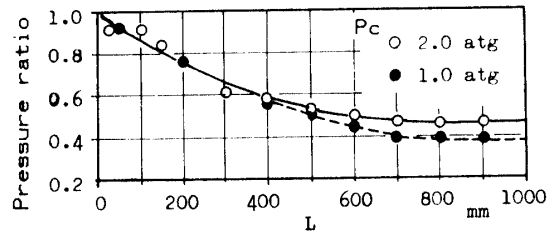


Fig. 16 Pressure ratio P_c/P_c^* regulated by L ($D: \phi 80$ mm, solid line: 2.0 atg, dotted line: 1.0 atg)

4.3 空どう容積の影響

空どう径変化と空どう長さ変化の実験結果 (Fig. 12, Fig. 13) から圧力比を空どう部容積で整理してみると、Fig. 17 のように比較的よく整理されることがわかる。

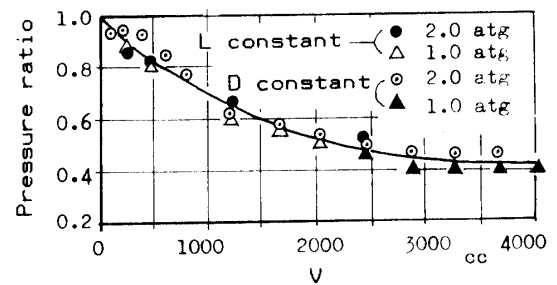


Fig. 17 Pressure ratio P_c/P_c^* regulated by V

図はシリンダ内圧力を 2 種類変化したものを示しているが、シリンダ内圧力が高い方が減衰が僅かに少なく、容積が大きくなるにつれて次第に減衰が低下する傾向がみられる。

4.4 尾管部が入口管部の圧力波形に及ぼす影響

空どう通過後の尾管部の圧力波形に空どう部が影響を及ぼすことは前述の通り明らかにされたが、尾管部が入口管部圧力波形へどのように影響を与えるかについて調べることにする。

Fig. 18 に L を変化したときの排気管入口直後の圧力変動 P_e の波形を示す。この実験は入口管長での反射波 (a 波) の影響を少なくするため、その長さ l_0 を極力短かくし、全長一定にして空どう長さを変化させて推移を観測した。すなわち、 L が大きいほど l_0 は小になる。図から明らかなように、空どうの長さが小さいときはほとんど直管に近づき、大きいときは空どう部の反射波 (b 波) が尾管部の反射波 (c 波) より影響が大きく表れることが認められる。

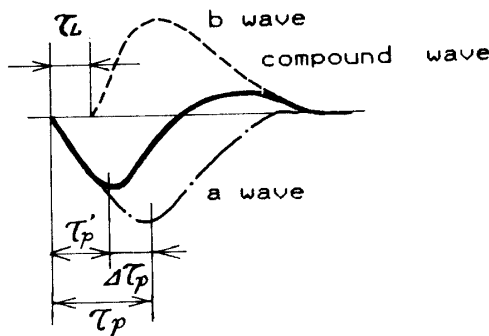


Fig. 15 Analysis of a compound wave

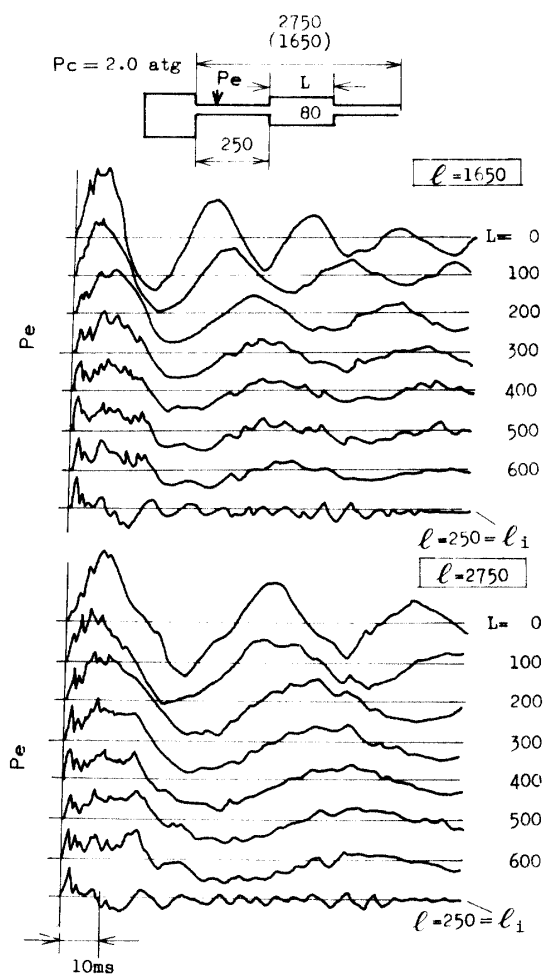


Fig. 18 Comparison of pressure waves at P_e

5. 圧力波動の挙動の考察

空どう付き排気管の圧力波のオシログラムより、反射波の発生する位置と反射波の形成の傾向を把握することができたが、総合的な挙動を調べるために次の検討を行った。

5.1 空どう部での圧力波の減衰

Fig. 19 に全長 5.75 m 一定にし、入口管長さを 3.25 m で空どう長さを 0.2~2.4 m まで 7 種類変化したときの、排気管入口部圧力と空どう部圧力の比較を示す。この図より空どう長さが 0.4 m を越えると空どう内圧力の減衰が大きく、これは、空どう部の反射波 (b 波) の影響によるものと考えられる。

Fig. 11 の空どう付き排気系の反射モデルにおいて示されるように、吹出波と a 波、b 波、c 波との重合により複雑な減衰の傾向が管摩擦の影響を受けながら生じることから、オシログラムより管内圧力波動の定性的な生成機構をさらに詳しく解析するために、各反

射波の帰還時間を計算した。

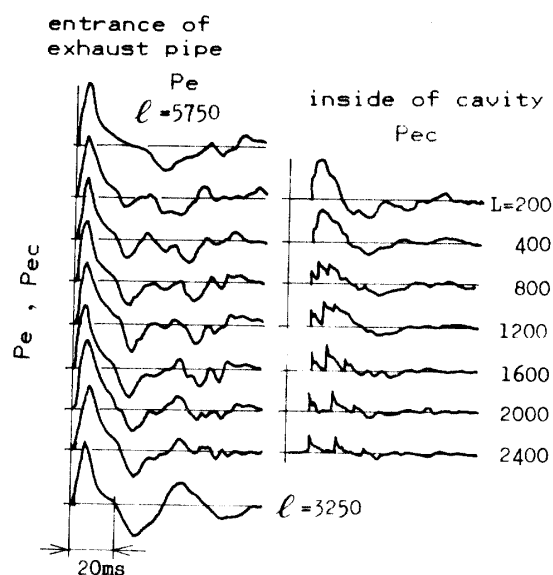


Fig. 19 Comparison of pressure waves at different position ($l = 5750, l_i = 3250$)

5.2 反射波の帰還時間

排気弁が開いて吹出波が吹出し a 点で反射して排気管入口に戻ってくるまでの時間を a 波の帰還時間 T_a とすると $T_a = 2l_i^*/C$ で求められる。ここで l_i^* は a 点において開口端補正をした l_i の等価管長、C は波動伝搬速度である。同様にして T_b, T_c など求められる。

2 次反射波の帰還時間 T_{aa}, T_{bb} などは、排気弁部を閉管とみなして計算した。

単位 ms	T_a	T_b	T_c	T_{aa}	T_{ab}	T_{bb}	T_{cc}
帰還時間 値	L=400 (19.0)	21.5 (22.6)	33.8	38.2	40.6	43.0	67.6
	L=800 (19.0)	23.8 (24.6)	33.8	38.2	42.9	47.6	67.6
	L=1600 (19.0)	28.5 (28.5)	33.8	38.2	47.6	57.0	67.6

Table 1 Return times of various waves

Table 1 は空どう長さがそれぞれ 0.4, 0.8, 1.6 m のときの各反射波の帰還時間を計算したもので、 T_a, T_b についてはオシログラムから読みとれる実測値をカッコ内に付した。

Table 1 の計算値と実際の波形との対比を行うために、実際のオシログラムを Fig. 20 に、これを拡大し重ねたものを Fig. 21 に示す。

Fig. 22 は Table 1 の数値を弁開後の時間軸上に示したものである。Fig. 22 から Fig. 21 に示す反射波群の生成波がわかる。空どう長が長くなると a 波群および aa 波群が大きくなり ab 波群が小さくなるが、これは

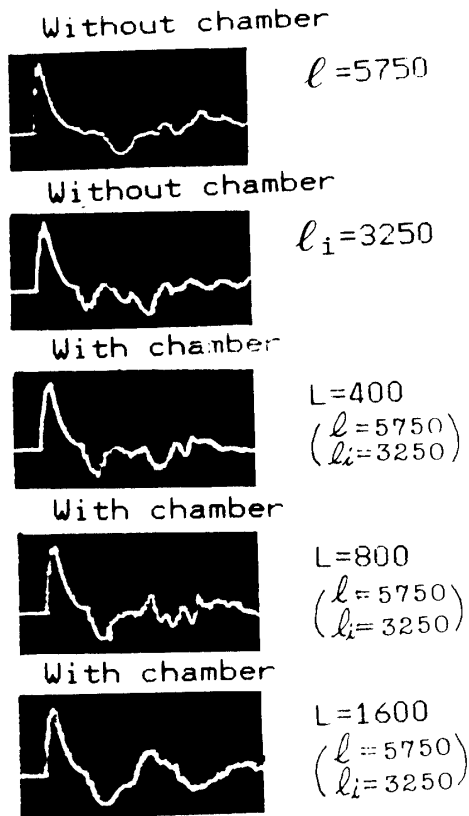


Fig. 20 Photographs of pressure wave at P_c

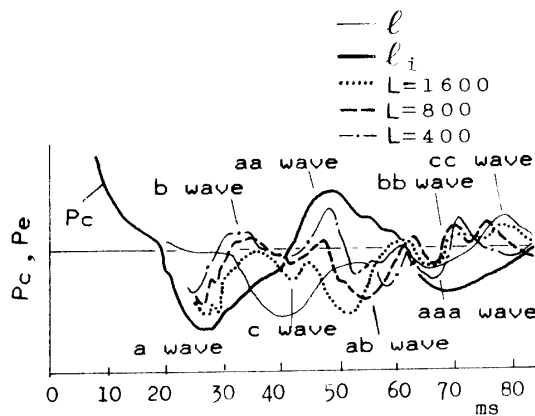


Fig. 21 Analysis of waves of Fig. 20
($l = 5750, l_i = 3250, D = \phi 80$)

空どうが長くなるにつれてb波の帰還時間が遅れて、a波やaa波がb波と分離されてくるからである。また、空どうが長くなるとFig. 19からも明らかなように空どう内の圧力波減衰が大きくなり、a波と分離して大きくなるはずのb波群がむしろ小さくなっていくのが確認できる。

これらのことから、空どう付き排気系では、a波の大きさは空どう径によって変化し、a波の反射の程度によってb波やc波の大きさも変化し、また、空どう

長が変化すると、 T_b が変化し管圧の状態が変わり、また、空どうが長いほど空どう内の圧力波の減衰は大きくなるということが認められる。

6. 結 言

本研究においては、空気模型機関実験装置を用いて排気管内の圧力波伝搬に関する定性的な傾向を把握することにより、実際のエンジンの排気系や複雑な排気管路形状の解析の手がかりを得ることができた。以下に本研究の結論を要約する。

- (1) 小形機関の場合に、弁部による管路の絞りはほとんど閉管として取扱うことができる。
- (2) 空どう付き排気系において、空どう径が小さく長さも短い場合はほとんど直管として作用するが、空どう容積の増大に伴ない、入口管部・尾管部波形に及ぼす影響が増大する。
- (3) 空どう付き排気系の入口管内圧力変動は、尾管部より空どう部の影響を大きく受ける。
- (4) 空どう内部圧力と入口管内圧力変動から、排気管系全体の圧力波反射機構の分析、及び定性的な圧力伝搬速度を求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 福田, 和泉, 永久: 内燃機関排気系の管内波動に関する模型実験 (第1報), 機講論, 718-3 (1971)
- 2) 福田, 和泉: 同上 (第2報), 機講論, 720-14 (1972)
- 3) 和泉, 福田, 渡辺: 同上 (第3報), 機講論, 738-1 (1973)
- 4) 福田, 和泉, 永久, 国広: 内燃機関の背圧および軸出力に及ぼす排気管長の影響, 機論, 307 (1975)

(昭和60年4月11日受理)