



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## クランク室圧縮2サイクル機関における段付型および円錐型排気管系の影響について

|       |  |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者: 室蘭工業大学<br>公開日: 2014-05-30<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 澤, 則弘<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="http://hdl.handle.net/10258/3201">http://hdl.handle.net/10258/3201</a>                          |

# クランク室圧縮2サイクル機関における段付型 および円錐型排気管系の影響について

沢 則 弘

## On the Effects of the Exhaust System with Stepped or Conical Pipe in a Crankcase-Compressed Two-Stroke Cycle Engine

Norihiro Sawa

### Abstract

It is a well-known fact that the scavenging of an internal combustion engine by utilizing the blow-down effects is promoted with a stepped or conical exhaust pipe system, but the achievements hitherto reached do not cover the whole problem.

This paper treats of the theoretical or experimental analysis of the optimum condition in such an exhaust pipe system as the crankcase-compressed two-stroke cycle engine.

### 1. 緒 言

内燃機関の排気管としては、必ずしも直管型である必要はなく、各種形状のものが使用可能である。とくに、排気管の先端に段付管または円錐管を取付けた排気管系は有用であることが知られており、後者の排気管系は広く利用されている。たとえば、空気模型機関による長尾教授の解析<sup>1)</sup>によると、排気孔から開口端方向にすすむ排気吹出し正圧波は、負圧波となって反射するが、そのエネルギー反射率は直管の場合に比べて、段付管では1.5倍、円錐管では2倍にも達することが示されている。しかし、実用機関では排気吹出し正圧波自体も段付管の寸度および機関回転数の影響を受けるので(たとえば図-5、図-6参照)、これら排気管系の最適寸度の決定に際し、一定の正圧波と仮定した長尾教授の結論を、そのまま実用機関に適用できるか否か不明である。かかる段付管管を2サイクル機関に用いた例はすくなく、僅かに W. Wilhelm<sup>2)</sup> が管径比 ( $d_{e2}/d_{e1}$ ) の比較的大きい場合 ( $d_{e2}/d_{e1}=5.5\sim 6$ ) について実験しているが、その段付管長さ ( $l_{e2}$ ) を全々考慮していない(図-1参照)。これに対し、円錐型排気管は広く利用されており、その効果について F. J. Wallace<sup>3)</sup> は入射排気エネルギーの大部分が連続した反射波となって戻るので、排気孔に振幅の大きい、しかも持続時間の長い負圧波が形成されるため掃気作用が助長されることを明らかにし、空気模型実験の結果、最適状態において85%の空気流量の増加<sup>4)</sup>を得たと報告している。またクランク室圧縮型2サイクル機関による W. Wilhelm<sup>2)</sup> の実

験では、直管型排気管に比べて10%内外の給気比増加を得ている(円錐角 $5^\circ$ )。このように円錐型排気管が極めて有効なことは明らかにされているが、最大の排気管効果を与える同調条件に関してはいずれの場合も明示されていない。ただ渡部<sup>5)</sup>は排気リードに正の残留脈動波が重なるとき給気比が増大するという、いわゆる脈動条件を誘導している。その際排気管のみを考え、インピーダンス理論から求めた等価管長を用いている。しかし排気吹出し効果に注目する場合には、クランク室やシリンダを含めた全管系についての考慮が必要であろう。

ここでは段付型および円錐型排気管の効果を系統的に調べ、それら管系の最適寸度の決定を目的として、管径比  $d_{e2}/d_{e1}=1.4, 2.0$  の段付管および円錐角  $\theta_h=2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$  (円錐管長  $l_h=21\sim 145$  cm) の円錐管(図-2 参照)と排気直管 ( $l_e=20\sim 100$  cm) とを組合せた管系について実験を行なった。その結果につき若干考察したので報告する。なお実験装置および実験方法は前報<sup>6)</sup>と全く同じであるが、供試機関としては機関 E-50 のみを使用した。

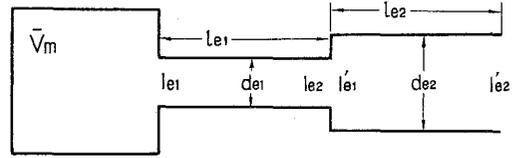


図-1 段付型排気管系の模型

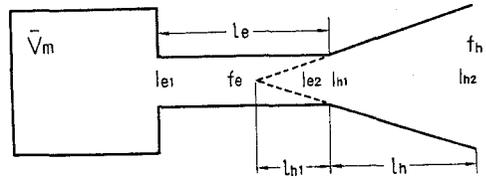


図-2 円錐型排気管系の模型

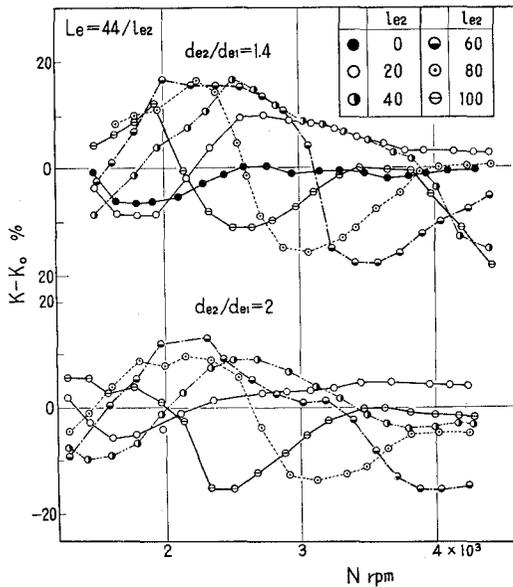


図-3 段付管長 ( $l_{e2}$ ) と排気管効果 ( $K-K_0$ )

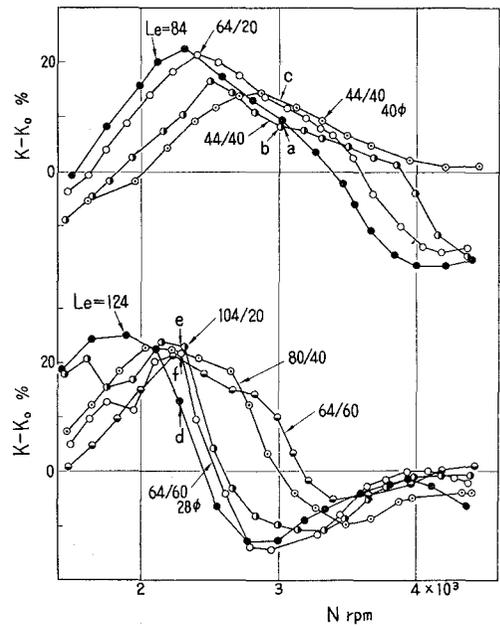


図-4 段付管と排気管効果 ( $K-K_0$ )  $L_e = \text{const.}$

2. 実験結果および考察

2.1 段付管効果について

段付型気管による実験結果の代表例として、 $d_{e1}=20\text{ mm}\phi$ 、 $l_{e1}=44\text{ cm}$ の排気直管に、 $d_{e2}=28, 40\text{ mm}\phi$ 、 $l_{e2}=20\sim 100\text{ cm}$ の段付管を取付けた場合の給気比( $K-K_0$ )曲線を図-3に、また全長 $L_e(=l_{e1}+l_{e2})$ を一定とし、その管長比( $l_{e1}/l_{e2}$ )を変えた実験結果を図-4に示す。両図において全長( $L_e$ )が短いほど、たとえ全長( $L_e$ )が一定の場合でも管長比( $l_{e2}/l_{e1}$ )および管径比( $d_{e2}/d_{e1}$ )が大きいくほど、最大給気比( $K-K_0$ ) $_M$ を与える回転数( $N_M$ )は順次高速側に移行している。また、この場合の排気吹出し圧力波の周期も図-5および図-6に示すように順次短かくなっており、段付排気管の等価管長( $L_e^*$ )は管径比( $d_{e2}/d_{e1}$ )、管長比( $l_{e2}/l_{e1}$ )に比例して短かくなることがわかる。

他方、排気孔直後で記録した圧力波形を詳細にみるに、段付部からの反射負圧波が排気吹出し正圧波の一部を削りとるので負圧波の周期は直管に比べて長くなる。(たとえば図-6のd、fの比較)その反面、振幅はかなり減衰するので、これらオシログラムからは段付管が直管に

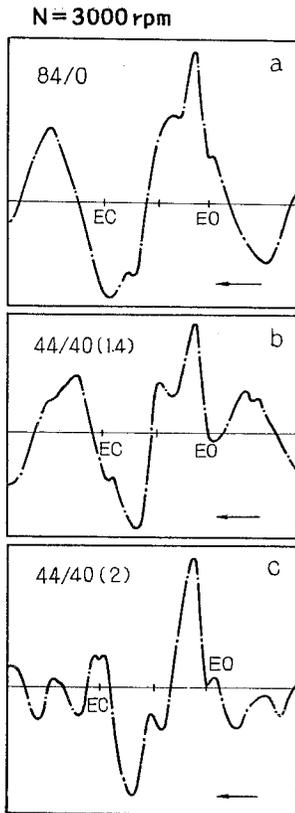


図-5 オシログラム ( $L_e=84\text{ cm}$ )

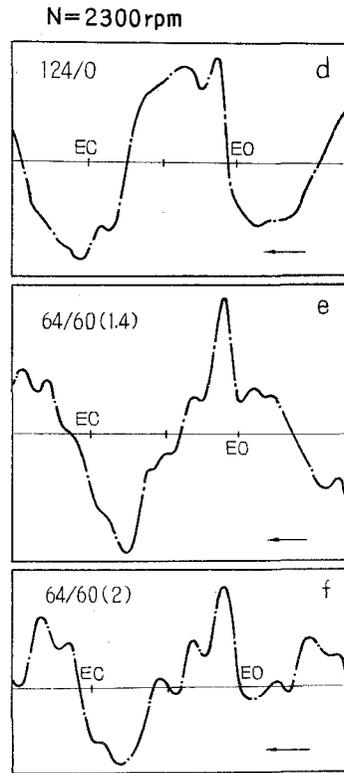


図-6 オシログラム ( $L_e=84\text{ cm}$ )

比べて有効であるか否か判然としない。そこで各種段付管を用いて求められた給気比曲線群の包絡線と直管型排気管で得られた給気比曲線群の包絡線 (S.P.) とを比較してみると 図-7 に示すように、段付管の方が直管に比べて約 5~15% 高い値を示すことがわかる。これを真管の場合の給気比増加  $(K_s - K_0)$  との比、すなわち効果割合  $(K - K_0)/(K_s - K_0)$  で表示すると表-1 に示すように  $(K - K_0)/(K_s - K_0) = 1.3 \sim 1.7$  にも達し、段付管効果はかなり大きいことがわかる。この値は長尾教授によるエネルギー反射率の値と、よく一致している。なお同図に併記した数字は段付管長 ( $l_{e2}$ ) を表わしているが本実験範囲においては、 $l_{e2} = 64 \sim 84$  cm, 管径比  $d_{e2}/d_{e1} \doteq 2$  程度がよいようである。

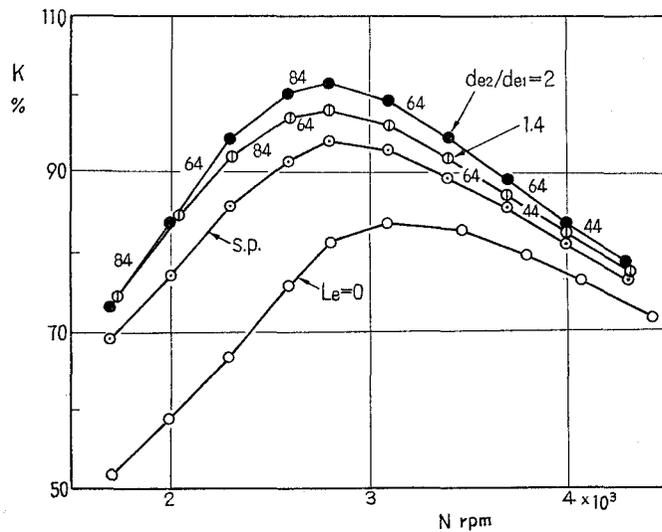


図-7 段付型排気管の効果 (最適条件)

表-1 段付型排気管の効果

| N rpm                   | 2000 |      | 3000 |     | 4000 |     |
|-------------------------|------|------|------|-----|------|-----|
| $d_{e2}/d_{e1}$         | 1.4  | 2.0  | 1.4  | 2.0 | 1.4  | 2.0 |
| $(K - K_0)/(K_s - K_0)$ | 1.35 | 1.35 | 1.4  | 1.7 | 1.43 | 1.7 |

### 2.2 円錐管効果について

円錐型排気管に関する実験結果の代表例として、 $l_e = 20, 60$  および  $100$  cm の排気直管に円錐管 ( $l_h = 20 \sim 145$  cm) を附加した場合の給気比曲線 ( $K - K_0$ ) を 図-8 および 図-9 に示す。図において最大の排気吹出し効果  $(K - K_0)_M$  を与える回転数 ( $N_M$ ) は排気直管の長さ ( $l_e$ )、円錐管長 ( $l_h$ ) が長くなるほど、また全管長 ( $L_e$ ) が同じでも円錐角 ( $\theta_h$ ) が小さいほど、順次低速に移動しており、これら各因子が排気吹出し効果に影響することがわかる。よって  $(K - K_0)$  曲線とオシログラムとを対比しつつ若干の考察を加えよう。

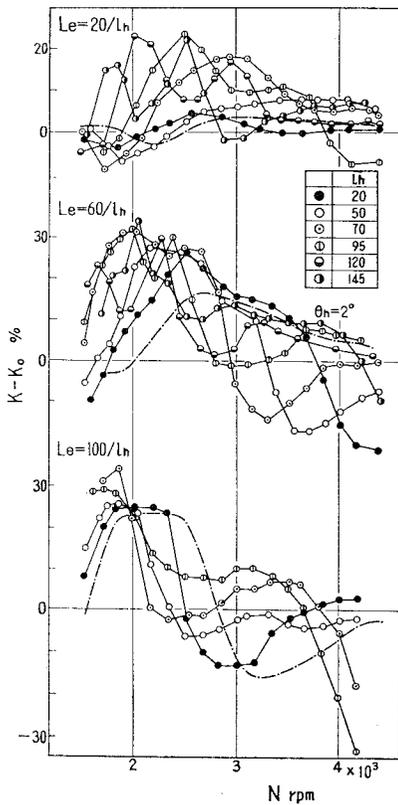


図-8 円錐管と排気管効果 ( $\theta_h=2^\circ$ )

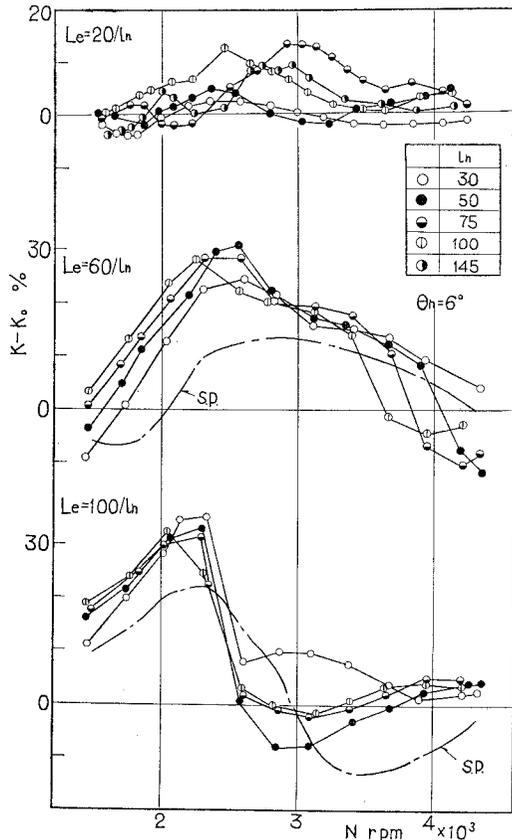


図-9 円錐管と排気管効果 ( $\theta_h=6^\circ$ )

(1) 円錐角 ( $\theta_h$ )

全長 ( $L_e$ ) を一定 ( $L_e=145$  cm) とし, 円錐角 ( $\theta_h$ ) を広げると 図-10 に示すように, 一般に, 最大給気比 ( $K-K_0$ ) $_M$  を与える回転数 ( $N_M$ ) は高速側に移行し, ( $K-K_0$ ) $_M$  の値も順次増大する。

これは同図上方に併記したオシログラムが示すように,  $\theta_h$  の増加に伴って排気吹出し負圧波の期間が長くなり, その振幅がかなり増大するためと考えられる。従って F. J. Wallace<sup>3)</sup> が指摘したように実用的円錐管 ( $\theta_h \leq 8^\circ$ ) においては, 円錐角 ( $\theta_h$ ) が大きいほど掃気作用に対して有効であることがわかる。

(2) 円錐管長 ( $L_h$ )

排気直管長さ  $l_e=20$  cm とし, 円錐管長 ( $l_h$ ) のみを順次長くすると 図-11 のように ( $K-K_0$ ) $_M$  を与える回転数 ( $N_M$ ) は低速側に移行するが, ( $K-K_0$ ) $_M$  の値は円錐管長  $l_h=75$  cm の場合が最も高く,  $l_h=147$  cm ではむしろ低下している。これは同図上方のオシログラムによると  $l_h$  が長くなるにつれて接合部および開口端からの両反射負圧波 (たとえば  $l_h=147$  cm にお

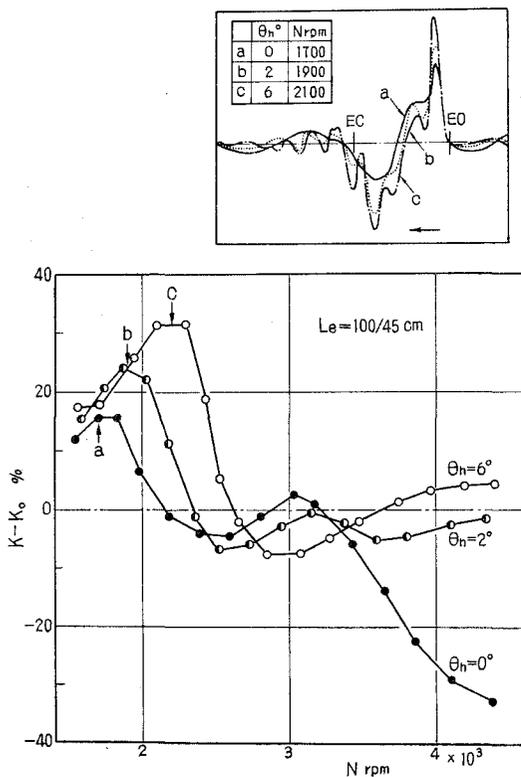


図-10 円錐角の影響

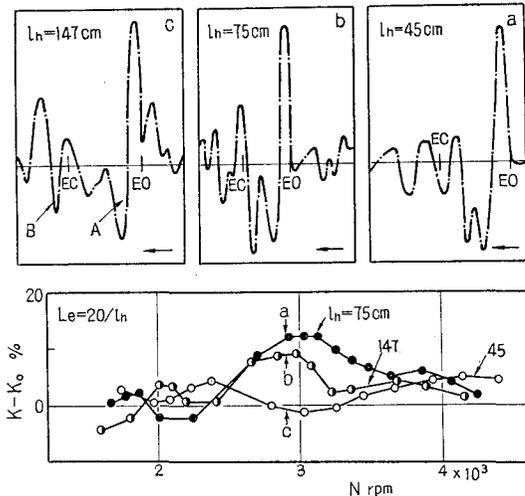


図-11 円錐管長の影響

$l_e = 20 \text{ cm}, \theta_h = 6^\circ$

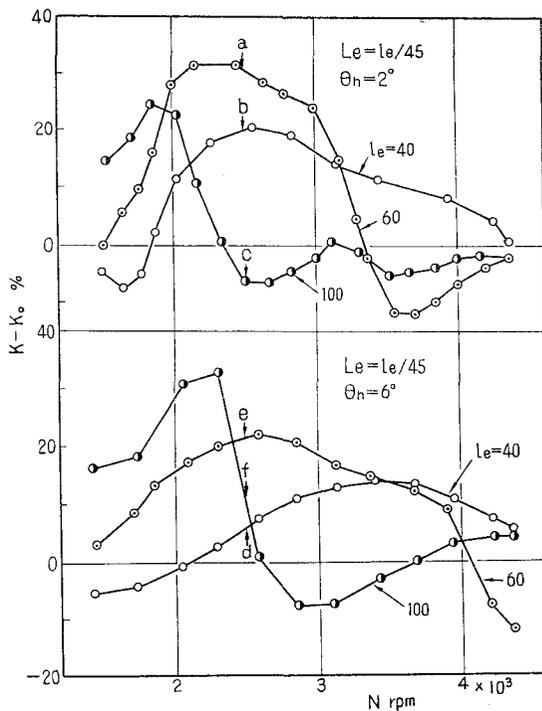


図-12 排気直管長さの影響

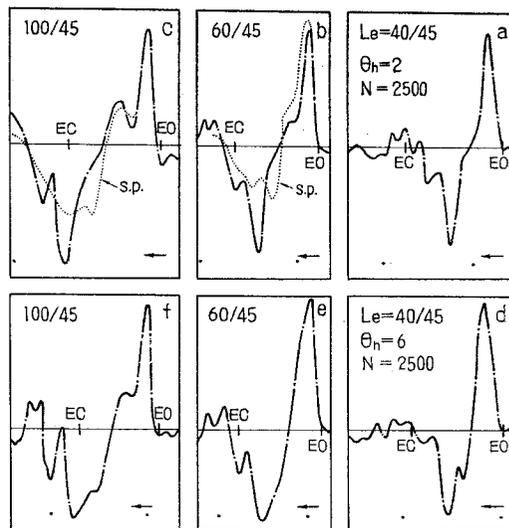


図-13 オシログラム ( $l_e$ の影響)

る負圧波 A と B) が, その到来時刻の差違のため分離してしまい排気吹出し負圧波の効果が減殺されるためと考えられる。さらに, かかる場合の  $(K-K_0)$  曲線は, いわゆる排気脈動効果が重畳するため烈しい起伏を示すので円錐管長 ( $l_h$ ) を極端に長くすることは避けるべきであろう。

(3) 排気直管長さ ( $l_e$ )

円錐管長さ ( $l_h$ ) を一定 ( $l_h=45\text{ cm}$ ) とし, 排気直管長さ ( $l_e$ ) のみを変えた場合の給気比  $(K-K_0)$  曲線を図-12 に, 図中 a, b, c …… に対応するオシログラムを図-13 に示す。

図において, 排気直管 (S.P.) のみの場合の波形をも併記してあるが, 円錐管を取付けても排

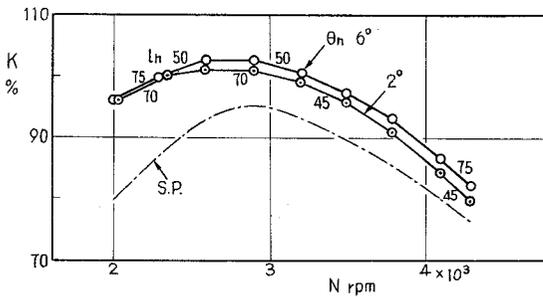


図-14 円錐型排気管の効果  
S.P.: 直管型排気管

気吹出し正圧波の振幅および周期はほとんど変わっていない。しかし負圧波の振幅は, たしかに大きくなっており, しかも排気直管 ( $l_e$ ) が長いほど, この傾向は益々助長されている。このように円錐型排気管においては, その排気直管長さ ( $l_e$ ) が極めて重要な影響をもつことが圧力波形からも推察され, 同じことは図-8, 図-9 の実験結果にも明らかに示されている。

以上の考察を確認するため, 段付管の場合と同様に最適の円錐管寸度を用いて得られる最大給気比曲線を求めると図-14 の通りである。

同図には最適の円錐管長 ( $l_h$ ) を曲線上に併記してあるが, いずれも  $l_h=44\sim 75\text{ cm}$  となり, 円錐管長 ( $l_h$ ) をいたずらに長くしても無意味なことが, これらからもわかる。なお本実験では直管 (S.P.) に比べて約 15~8% 程度の給気比向上にとどまり, F. J. Wallace の空気模型機関による 85% の増加には, ほど遠い。しかし, これを効果割合  $(K-K_0)/(K_s-K_0)$  で表わすと, 表-2 に示すように段付型

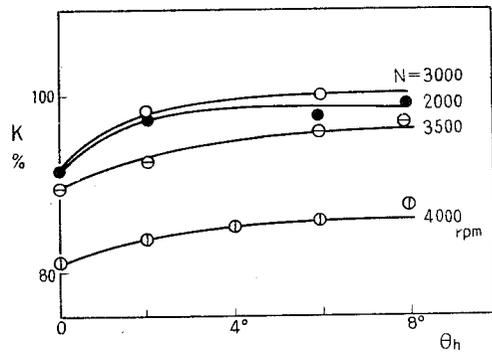


図-15 円錐角の効果 (最適条件)

表-2 円錐型排気管の効果

| N rpm           | 2000       |            | 3000       |            | 4000       |            |
|-----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                 | $\theta_n$ | $\theta_n$ | $\theta_n$ | $\theta_n$ | $\theta_n$ | $\theta_n$ |
|                 | 2°         | 6°         | 2°         | 2°         | 2°         | 6°         |
| $K-K_0/K_s-K_0$ | 1.8        | 1.8        | 1.46       | 1.58       | 2.1        | 2.5        |

排気管よりも有効であり、 $(K-K_0)/(K_s-K_0)=1.4\sim 2.5$  にも達している。この場合円錐角  $(\theta_h)$  は大きいほどよいが、その効果は 図-15 の如く定常化する傾向がある。従って、實際上  $\theta_h=4\sim 8^\circ$  程度を採用すればよいだろう。

次に実用的な円錐型排気管として、円錐管長  $l_h \leq 100$  cm の場合につき、最大給気比  $(K-K_0)_M$  を与える回転数  $(N_M)$  附近におけるオシログラムを列挙すると 図-16 となる。図によると排気吹出し圧力波の約 3/4 サイクルが有効掃排気期間  $(\theta_{es}^*)$  に一致するとき最大の給気比増加  $(K-K_0)_M$  が与えられることがわかる。

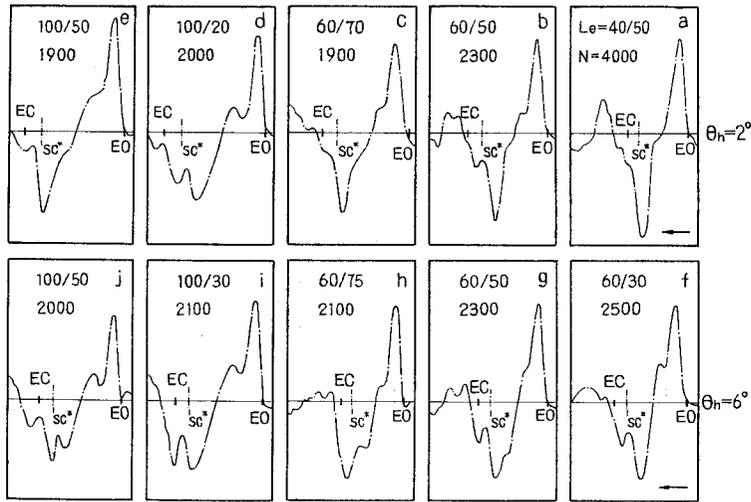


図-16 オシログラム (最適条件)

以上、2.1~2.2 節の考察により、もし段付型および円錐型排気管系の等価管長  $(L_e^*)$  が与えられるならば、直管型排気管について提唱した排気吹出し効果の同調条件式

$$Z_e (\equiv \omega L_e^*/a_e) = (4/3) \cdot (\theta_{es}^*/360) \tag{1}$$

は、そのまま適用できるものと考えられる。

### 2.3 排気吹出し効果の同調条件

段付型および円錐型排気管による排気吹出し効果の同調条件に注目し、先に示した実験結果について検討を加える。

まず、図-1 の如き段付型排気管系にインピーダンス理論を適用し、直管型排気管系の場合と同一手法を用いると排気孔出口のインピーダンス  $(I_{e1})$  は

$$I_{e1} = -\rho \cdot a^2 / \bar{V}_m \tag{2}$$

段付前のインピーダンス  $(I_{e2})$  は管前後におけるインピーダンスの関係式から

$$I_{e2} = (\beta/f_{e1}) \{ I_{e1} + (\beta/f_{e1}) \cdot \tan(l_{e1}/L_e^*) \} / \{ -I_{e1} \cdot \tan(l_{e1}/L_e^*) + \beta/f_{e1} \} \tag{3}$$

(2), (3) 式から

$$I_{e2} = (\beta/f_{e1}) \{(\bar{V}_m/f_e L_e^*) \cdot \tan(l_{e1}/L_e^*) - 1\} / \{\tan(l_{e1}/L_e^*) + \bar{V}_m/(f_e L_e^*)\} \quad (4)$$

但し  $\beta = \rho \cdot a_e / L_e^*$  である。他方開口端におけるインピーダンス ( $I_{e2}$ ) は  $I_{e2} \doteq 0$  と近似できるから

$$I_{e1}' = -(\beta/f_{e2}) \cdot \tan(l_{e2}/L_e^*) \quad (5)$$

で与えられる。次に段前後には体積流，音圧の連続条件が適用できるから

$$1/I_{e2} = 1/I_{e1} \quad (6)$$

従って (4), (5), (6) 式から段付型排気管系の等価管長 ( $L_e^*$ ) を算出する式が与えられる。

$$\cot(l_{e2}/L_e^*) = \frac{f_{e1}}{f_{e2}} \cdot \frac{\tan(l_{e1}/L_e^*) + \bar{V}_m/(f_{e1} L_e^*)}{1 - \bar{V}_m/(f_{e1} L_e^*) \cdot \tan(l_{e1}/L_e^*)} \quad (7)$$

ここに， $f$ : 管断面積， $L$ : 管長， $\bar{V}_m$ : シリンダとクランク室からなる平均容積であり，添字  $e_1$  は段付部前， $e_2$  は段付部後の管系を表わす。

次に 図-2 の如き円錐型排気管系においても段付型排気管系の場合と同様に

$$I_{e2} = (\beta/f_e) \{(\bar{V}_m/f_e L_e^*) \cdot \tan(l_e/L_e^*) - 1\} / \{\tan(l_e/L_e^*) + \bar{V}_m/(f_e L_e^*)\} \quad (8)$$

他方，円錐管前後のインピーダンス  $I_{h1}$ ， $I_{h2}$  の間の関係は，円錐管内における球面波の方程式の解から近似的には (但し  $\tau_1 = l_{h1}$ ， $l' = l_h$  と近似)

$$I_{h1} = -(\beta/f_e) \cdot (l_{h1}/L_e^*) / \{1 + (l_{h1}/L_e^*) \cdot \cot(l_h/L_e^*)\} \quad (9)$$

従って円錐型排気管系に対する等価管長 ( $L_e^*$ ) の算出式は

$$\cot(l_h/L_e^*) + 1/(l_{h1}/L_e^*) = \frac{\tan(l_e/L_e^*) + \bar{V}_m/(f_e L_e^*)}{1 - \bar{V}_m/(f_e L_e^*) \cdot \tan(l_e/L_e^*)} \quad (11)$$

となる。ここに  $l_e$ : 排気直管長さ， $f_e$ : 排気直管断面積， $l_{h1}$  (図-2 参照): 円錐角 ( $\theta_h$ ) と断面積 ( $f_e$ ) とから規定される寸度であり， $\theta_h$  が小さい場合には円錐管長 ( $l_h$ ) に近似できる (図-2 参照)

上式の図式解 (図-17, (11) 式の図式解法) から段付型 (図-18) および円錐型排気管 (図-19) の等価管長 ( $L_e^*$ ) が算出でき，これから排気管寸度の等価管長 ( $L_e^*$ ) に及ぼす影響を知ることができる。すなわち段付型排気管では，管長  $l_{e1}$ ， $l_{e2}$  が短かく，断面積比  $f_{e1}/f_{e2}$  (または  $d_{e1}/d_{e2}$ ) が小さいほど等価管長 ( $L_e^*$ ) は短かく，円錐型排気管では円錐角 ( $\theta_h$ ) が大きいほど  $L_e^*$  は短かくなり，円錐管長 ( $l_h$ ) が長くなるにつれて，その増加は小さくなる傾向を示している。

図-17 および 図-18 を用い，各種排気管系寸度に対する等価管長 ( $L_e^*$ ) を求め，その  $L_e^*$  を用いた排気吹出し特性数 ( $Z_e$ ) で段付型排気管の実験結果 (図-3 および 図-4) を整理すると 図-20 および 図-21 となり，円錐型排気管の実験結果 (図-8, 図-9) を整理すると 図-22 および 図-

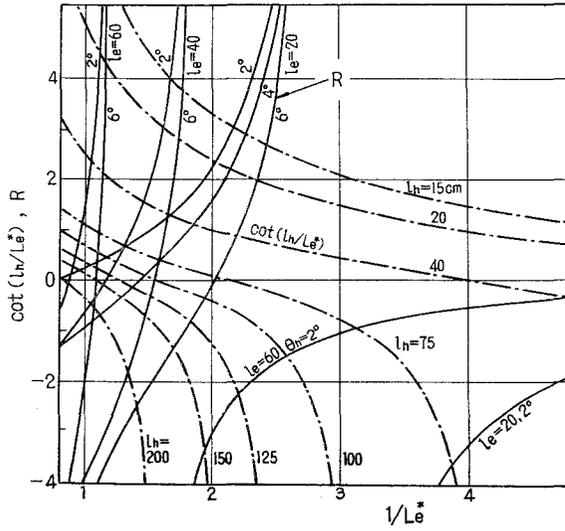


図-17 図式解法 (11)式の解)  $R = \frac{\tan(L_e/L_e^*) + \bar{V}_m/(f_e L_e^*)}{1 - \bar{V}_m/(f_e L_e^*) \cdot \tan(L_e/L_e^*)} - 1/(l_h/L_e^*)$

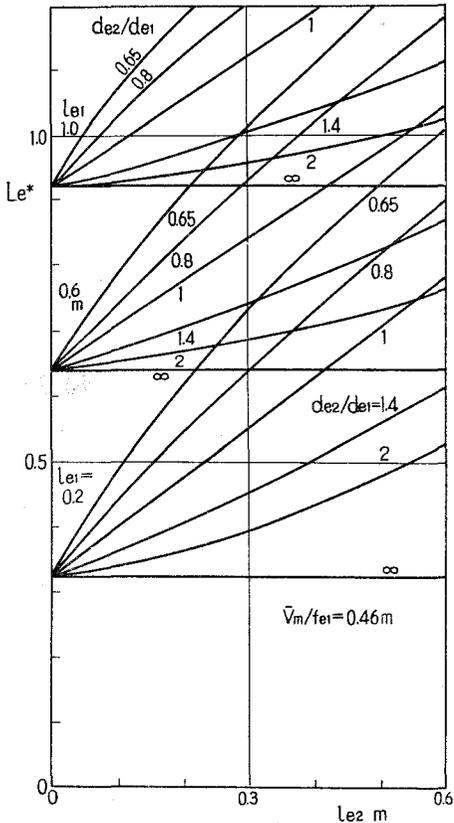


図-18 等価管長 (段付管)

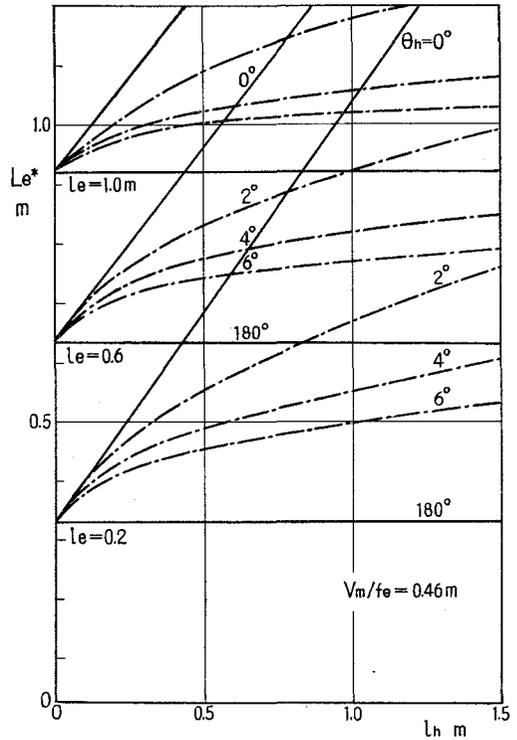


図-19 等価管長 (円錐管)

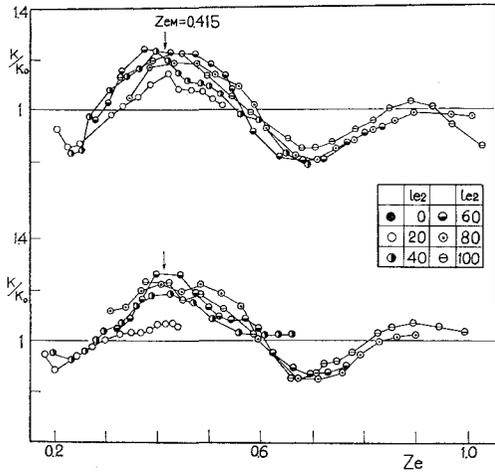


図-20  $K/K_0$  と  $Z_e$  (段付管,  $l_{e1}=44$ )

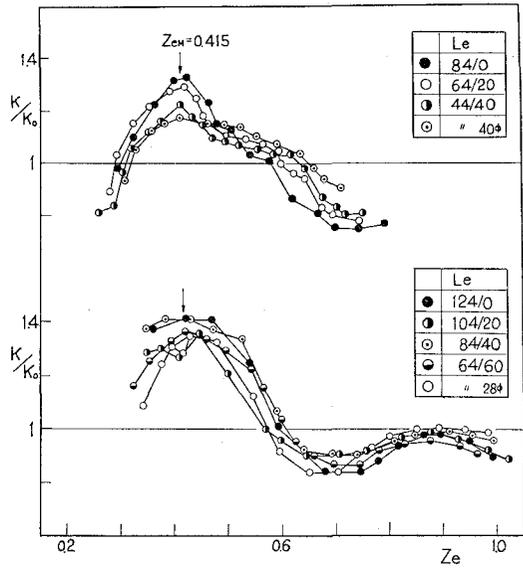


図-21  $K/K_0$  と  $Z_e$  (段付管,  $L_e = \text{const}$ )

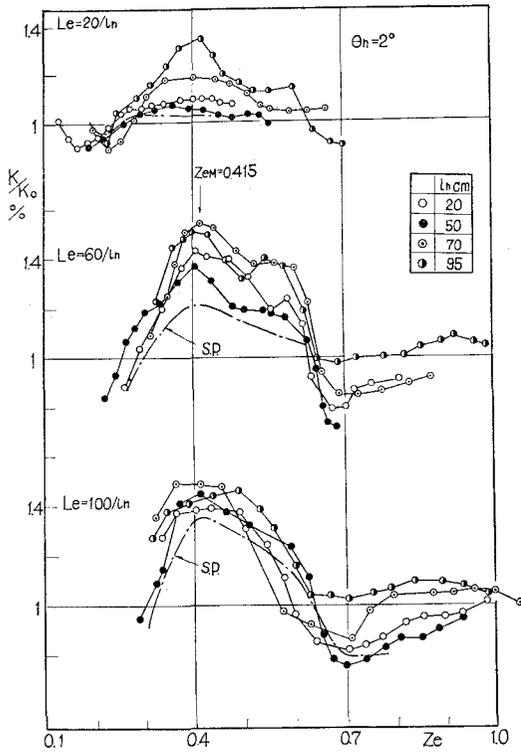


図-22  $K/K_0$  と  $Z_e$  (円錐管,  $\theta_n = 2^\circ$ )

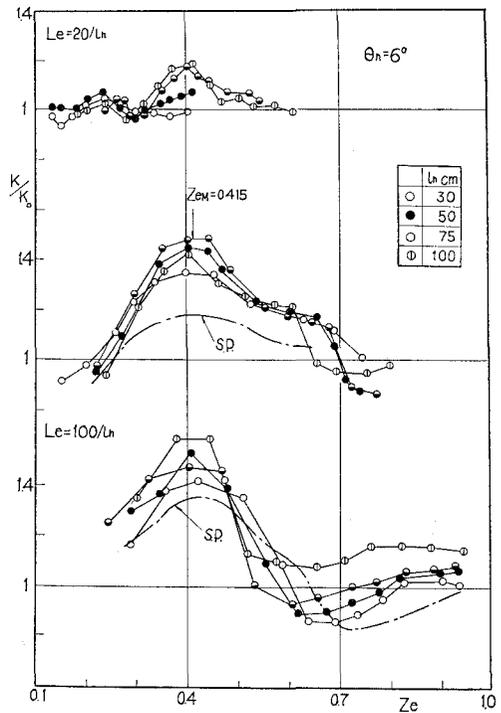


図-23  $K/K_0$  と  $Z_e$  (円錐管,  $\theta_n = 6^\circ$ )

23となる。図において、最大給気比  $(K/K_0)_M$  は直管型排気管の場合と同様に、排気吹出し効果の同調条件式(1)から求めた計算値  $Z_{eM} \doteq 0.415$  附近でよく揃っている。従って、等価管長  $(L_e^*)$  の算出式(7)および(11)が妥当であり、直管型排気管の結論から推論した条件式(1)が段付型および円錐型排気管の場合にも充分適用できることがわかった。

以上の解析から、インピーダンス理論による等価管長  $(L_e^*)$  を用いる場合、直管型排気管の場合と全く同様に、最適の段付型排気管寸度 ( $d_{e2}/d_{e1} \doteq 2$ ,  $l_{e2} = 64 \sim 84$  cm に選定) および円錐型排気管寸度 ( $\theta_h = 4^\circ \sim 8^\circ$ ,  $l_h = 44 \sim 75$  cm に設定) の設計が可能であると云えるだろう。

### 3. 結 言

以上、段付型および円錐型排気管による動的効果について述べたが、これを要約すると次の通りである。

(1) 給気比の向上に関して、直管型排気管の代りに段付型排気管を用いると、かなり有効であり、それぞれ最適の排気管寸度を用いて得られる両者の最大給気比曲線を比較すると、その効果割合は  $(K - K_0)/(K_s - K_0) = 1.3 \sim 1.7$  にも達する。なお本実験範囲では段付管径比 ( $d_{e2}/d_{e1}$ ) は比較的大きい  $d_{e2}/d_{e1} = 2$  程度がよいようである。

(2) 円錐型排気管は直管型や段付型排気管よりも、さらに有効であり、直管型との効果割合は  $(K - K_0)/(K_s - K_0) \doteq 1.4 \sim 2.8$  と極めて大きい。この場合、直管部長さ ( $l_e$ ) はとくに重要な因子であり、これが余り短かいと如何なる円錐管長さ ( $l_h$ ) を用いても排気吹出し効果は小さい。また本実験範囲では、円錐角 ( $\theta_h$ ) は  $\theta_h = 4^\circ \sim 8^\circ$  がよく、円錐管長 ( $l_h$ ) にも最適値 ( $l_h = 45 \sim 75$  cm) が存在する。

(3) 段付型および円錐型排気管系の等価管長  $(L_e^*)$  は、いずれもインピーダンス理論から算出できる((7), (11)式)。かくして求めた等価管長  $(L_e^*)$  を用いた排気吹出し特性数  $(Z_e)$  でそれぞれの実験結果を整理すると最大の給気比  $(K/K_0)_M$  は、条件式(1)による計算値  $(Z_{eM})$  附近でよく揃う。従って各種排気管系寸度の排気吹出し効果に及ぼす影響は、すべて条件式(1)と、それぞれの等価管長  $(L_e^*)$  の算出式とから知ることができる。

終りにのぞみ、御指導、御鞭撻を賜わった東京大学浅沼強教授、北海道大学黒岩保教授、実験遂行に対し熱心に協力された群馬大学工学部熱工学研究室の各位および卒業研究学生、日頃御世話戴だっている本学、千谷茂教授、林重信講師、福島和俊助手、早川友吉氏、三田村ナミ子嬢および関係各位に深甚の謝意を表する。

### 文 献

- 1) 長尾：機械学会論文集, 24, 148 (昭33-12), 1019.
- 2) W. Wilhelm: Forsch Landes Nordrhein-Westfalen, 982 (1961).
- 3) F. J. Wallace: I.M.E. Proc. 168, 18 (1954), 515.

- 4) F. J. Wallace: I.M.E. Proc. 170, 39 (1956), 1131.
- 5) 渡部: 機械学会論文集, 26, 162 (昭 35-2), 363.  
渡部: 機械学会論文集, 26, 171 (昭 35-11), 1683.
- 6) 沢: 室工大研報, 4, 2,