ディーゼル機関排気弁まわりの流れの研究*

(その2 三次元流における排気弁まわりの流れの研究)

高橋真太郎**・藤田 秀雄**

概 要

本論文は三次元排気弁まわりの流れの解析と可視化実験について取り扱ったものである。

著者らは二次元流線解析法の手法を三次元流に拡大し三次元における排気弁揚程 20mm, 弁前後の静圧差 50 mmAq における流線の状況と死水領域の形状を求めた。また、三次元流に対しても可視化可能な煙風洞装置を開発し、可視化を行なった結果、計算により得られた流線形状と死水領域の形状は二次元流における場合と同様に可視化による実験結果とよく一致することがわかった。

Investigation of Air Flow Through Exhaust Valve in Diesel Engine
(Part 2, Study on Air Flow Through Exhaust Valve as a Three Dimensional Flow)

By Shintaro Takahashi
Hideo Fujita

Abstract

This paper deals with three dimensional analytical investigation on the gas flow through exhaust valve and with the experimental study to prove it.

We have calculated the flow pattern and the shape of dead water region by extending two dimensional flux analysis method to three dimension for the exhaust valve with the lift of 20 mm, pressure drop of 50 mmAq, as an example.

We made tests by the stream line wind tunnel of three dimensional type and found that the flow pattern and dead water region in the three dimensional flow obtained from the analytical investigation have shown good coincidence to those from the experimental study same as in the two dimensional case.

1. ま え が き

排気ターボ過給機付ディーゼル機関の排気弁およびその周辺の流れは排気エネルギーの利用度、機関への供給空気量、また、排気弁部の汚れならびに耐久性等に影響を及ぼし重要な問題である。

この研究として著者らは二次元定常流における亜音速域での排気弁まわりの流れを可視化し、その場合の流量と流線との関連を明らかにし、その流れの状況と弁座後流部にできる死水領域の形状を計算により求める方法を報告¹⁾した。もし、この方法が三次元流に応用できれば、排気弁及びその周辺の形状と流れの状況との関連が排気弁等の設計に際してあらかじめ予想することを可能なら

しめよう。

著者らは二次元流の流線の解析に使用した流線解析法²⁾の手法を応用し、三次元流における流れの状況を求め、さらに弁座後流部の死水領域の形状を算出した。

一方、三次元煙風洞装置を開発し、排気弁まわりの流れを流線で捕え、実験結果と計算結果の比較を行ない、本計算方法が三次元流に対して適用可能であることを示した。また、流線と流量係数との関連を求め、同時に二次元流の場合との比較を行ない、排気弁まわりの流れの性質は二次元流の実験でも十分可能であることを示した。

2. 理論的考察

二次元流解析計算に用いた流線解析法を応用し、さらに、その際用いた実測値を利用し、三次元流における排気揚程 20mm, 弁前後の静圧差 50 mmAq における弁まわりの流線の形状と、弁座後流部の死水領域の形状を求

* 原稿受付 昭和50年2月12日

昭和49年秋季学術講演(昭和49年11月13日)

** 正会員 明治大学工学部(川崎市多摩区生田5158)

めた。

2.1 解析計算に用いる排気弁及び周辺部の形状

解析計算に用いる排気弁の形状を図1に、周辺部通路の形状を図2に示す。弁及び通路部の寸法は図示のごとくであり、その寸法は二次元流解析計算並びに可視化実験に使用したものを円筒状、三次元的に変換したものである。

2.2 三次元流における流線解析法の適用

三次元流に対しての流線解析法の基礎方程式は二次元流と同様なものを使用する。作図方法もほぼ同様であるが、二次元流でのポテンシャル線に沿った面積変化は、ポテンシャル線の長さに比例するが、三次元流における面積変化は対称軸を中心に回転した時にポテンシャル線が形成する表面積の変化となることを考慮に入れ計算を行なわねばならない。

図3は排気弁揚程20mm、揚程と弁直径との比 $h/d=0.167$ におけるポテンシャル流を求めた計算結果である。

本計算において使用した境界①, ②は二次元流計算時に使用した仮定をそのまま用い計算した。

計算方法は、まず、境界 $a-a$ 、境界 $b-b$ に近似させ幾本かの流線(図では3本)を適当に引く。これに直交する曲線を適当に描いて近似的な流線座標とする。

この時、二次元流ではポテンシャル線上の面積変化の関係で基準線を境界 $a-a$ 、境界 $b-b$ のどちらに選んでもよいが、三次元流ではポテンシャル線上の面積変化を計算せねばならず、基準線を対称軸 $x-x$ 側、すなわち、境界 $a-a$ に取らねばならない。

M点からN, O, P, Q点までの流線上の弧長(M点, O点では δ_{sa} , δ_s)を計り、うずなし条件式($u h_a = \text{一定}$, h_a : 座標の拡大率)を用いれば、これらの点での速度 u とM点での速度 u_a との速度比が次式より求まる。

$$\frac{u}{u_a} = \frac{\delta_{sa}}{\delta_s} \tag{1)^{1)}$$

δ_{sa} : M点における流線に沿った弧の長さ

δ_s : M点以外の各点における流線に沿った弧の長さ

次にM点から各点までの弧長(MN, MO, MP, MQ)

図1 排気弁の形状

図2 排気弁周辺部の形状

図3 弁揚程20mmにおけるポテンシャル流の計算

図4 速度比分布

より対称軸 ($x-x$ 軸) に対するポテンシャル線上の通路面積 F_b を図式計算により求め、無限上流での通路面積 F_1 との比 F_b/F_1 を求めれば、 u/u_∞ と F_b/F_1 の関係は図4のように示される。図4の面積OABCは u_∞ を基準とした場合のポテンシャル線MQを通過する流量 $\rho u_\infty F_b / \rho u_\infty F_1$ (u_∞ : 無限上流の流速) に相当する。この流量が無限上流部の流量と等しくなるべき条件、すなわち、 $\rho u_\infty F_b / \rho u_\infty F_1 = 1$ となるべき u_∞ を求め、その u_∞ を用い再度断面MQにおける流量計算を行ない、流線が配分すべき流量より断面面積 F_b を求めれば、これより弧長MN, MO, MPの修正値、すなわち、第1近似値が求められる。他の断面についても同様な計算を施し、それぞれの第1近似値を求め、これを曲線で結び、さらに、これに直交曲線を引き、前述と同様な計算を施せば第2近似値が得られる。以下同様な計算を継続すれば修正量がある値に収束し、最終的な流線形状を決定することができる。

2.3 弁まわりの流れの関係式 排気弁上流部、排気弁下流部の断面を、1, 2とし、さらに、死水領域による流管の最小断面積部を3とする。いま、圧力を p 、速度を u 、断面積を F とし、各断面におけるそれぞれを各断面の付号を添えて表わすことにする。

気流から排気弁及びその他に作用する抵抗力は圧力差、摩擦力よりなるが、排気弁では絞りの度合の大きいことから、ここでは圧力差によるものだけを考え、断面1, 3の間の抵抗力を D とし、断面1, 3の間に運動量の式、ベルヌイの式、また、断面1, 2, 3の間に連続方程式をたて、 D を求め、さらに標準管内 (1断面) の動圧と断面積との積で除せば、弁及びその他の抵抗係数 C_D が求められる。

$$C_D = 2 \frac{P_1}{\rho u_1^2} \left(1 - \frac{u_1}{u_2}\right) + \left(\frac{u_3}{u_1} - 1\right) \left(1 - 2 \frac{u_2}{u_1} + \frac{u_3}{u_1}\right) \frac{F_2}{F_1} \quad (2)$$

図5 弁に作用する圧力の抵抗成分

一方、気流から排気弁及びその他に及ぼす抵抗力 D' を図5の記号にしたがい求め、それより抵抗係数 C'_D を求めれば、

$$C'_D = \int \frac{p_f - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_f}{F_1}\right) + \int \frac{p_c - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_c}{F_1}\right) - \int \frac{p_b - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_b}{F_1}\right) + \int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_f}{F_1}\right) + \int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_c}{F_1}\right) - \int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_b}{F_1}\right) \quad (3)$$

作用、反作用の法則より $C_D = C'_D$ となる。

2.4 流線解析法による死水領域の決定 排気弁の任意の揚程におけるポテンシャル流が流線解析法により決定することができれば、その解を利用し、各部の圧力係数の分布は次式より決定することができる。

$$1 - \left(\frac{u}{u_1}\right)^2 = \frac{p - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} \quad (4)$$

P 及び u は弁前面、弁座前面、弁後面部の圧力、速度の変数

式(4)を利用し、弁前面、弁座前面、弁後面部に沿う圧力係数の分布を求め図示し、図式積分を行えば式(3)の値が求まる。次に式(3)と式(2)を等値し、弁後流部ではがれた流管断面積 F_3 とそこでの流速 u_3 の第1近似値を求める。この第1近似値 F_3 をポテンシャル流の計算において、流線が弁棒、弁座に平行になる最初の位置に定め、弁座の当り面部より適宜な境界線を付し、弁上流部の流れは最初に仮定したポテンシャル流と仮定し、再び流線解析法を行ない断面積 F_3 、速度 u_3 の第2近似値を求める。以下同様な計算を繰り返せば断面積 F_3 、速度 u_3 はある値に収束し、同時に流れの境界も求められる。

弁前面の圧力係数の分布を求め図示すれば図6になる。これを $a_f \sim g_f$ で積分すれば弁前面の圧力係数の総和は

図6 弁前面の圧力係数の分布

$$\int_{a_f}^{g_f} \frac{p_f - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_f}{F_1}\right) = -0.568$$

同様に弁座面, 弁後面部の圧力係数の総和は

$$\int_{a_c}^{e_c} \frac{p_c - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_c}{F_1}\right) = -4.176$$

$$\int_{a_b}^{i_b} \frac{p_b - p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_b}{F_1}\right) = -3.453$$

これより式(3)の1項より3項は求め得ることはできたが, 4項以降は二次元解析時に用いた実測値(弁前後の静圧差50mmAqに相当する弁前面の静圧 $p_1 = 34.5$ mmAq, 動圧 $\rho u_1^2 / 2 = 1.1$ mmAq)を利用し式(3)の4項以降を計算すれば

$$\int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_f}{F_1}\right) + \int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_c}{F_1}\right) - \int \frac{p_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} d\left(\frac{F_b}{F_1}\right) = 23.253$$

したがって C_D' は

$C_D' = -0.568 - 4.176 + 3.435 + 23.252 = 21.943$
 $C_D = C_D'$ とし, $F_1 = (\pi/4) \times 0.2^2 = 0.0314 \text{ m}^2$, $F_2 = (\pi/4) \times (0.12^2 - 0.03^2) = 0.0106 \text{ m}^2$ を式(2)に代入すれば, (u_2/u_1) は次の2次式で表わされる。

$$\left(\frac{u_2}{u_1}\right)^2 - 5.926 \left(\frac{u_2}{u_1}\right) + 1.152 = 0$$

$$\therefore \frac{u_2}{u_1} = 5.724$$

$F_3 = 0.005486 \text{ m}^2$, すなわち $d = 88.815 \text{ mm}$ の直径の面積となる。この第1近似値を利用し, 前述の手法に従い幾度か計算を施せば $F_3 = 0.005385 \text{ m}^2$, $d = 88.097 \text{ mm}$ で収束した。

2.5 流線解析結果と考察

流線解析結果を図7に示す。図において実線は三次元流における流線, 破線は前報¹⁾において求めた二次元流の流線を示す。出発地点の流線がずれているのは, 三次元流においては後出の実験結果との対比を行なうためである。図によれば三次元流の死水領域の大きさは二次元流より小さい。これは面積変化の相違によるものと考察できる。すなわち, 弁前面の上流部の場合のように流線が境界と平行であり

図7 流線①②③の計算値

テンシヤル線が直線で表わされる場合において考えれば、二次元流での基準点からの面積変化はポテンシヤル線の長さに比例するのに対し、三次元流では対称軸からの半径の自乗に伴い変化を示す。したがって、計算で得られた死水領域の最大幅 F_3 の排気通路の占める面積の割合が同じであっても、本計算結果のように平面的に表わせば二次元流は大きくなる。

次に本計算結果より得られた抵抗係数の値について検討を加えてみる。三次元流の気流から弁及びその他に及ぼす抵抗係数を C_{D3} 、二次元流のそれらを C_{D2} とし、それぞれの弁前面、弁座前面、弁後面の値を順次示せば

$$C_{D3} = 13.765 + 20.072 - 10.585 = 23.252$$

$$C_{D2} = 20.778 + 12.544 - 14.114 = 19.208^{(1)}$$

となる。これは気流が弁及びその他に及ぼす抵抗係数であるが、作用、反作用の法則より弁及びその他が気流に及ぼす抵抗係数と考えてよい。したがって、三次元流では二次元流より抵抗が大きいと判断できる。

いま、弁前面の抵抗係数の値を比較するに、三次元流では 13.765、二次元流では 20.778 となり、三次元流は二次元流より小さい。ゆえに、気流は図 7 に示すように二次元流より弁前面に接近するものと考えられる。また、弁座前面では三次元流より二次元流がより弁座前面に接近するものと考察できる。同様に弁後面部では三次元流は二次元流より、より弁後面部から遠ざけられることが考察できる。このため、本計算では弁後面部に流れが沿って流れるものとして求めたが、三次元流での流れは弁後面部に沿わず、はがれる可能性もあり得ることも予想できる。

弁前面の静圧 p_1 、動圧 $\rho u_1^2/2$ の変化が死水領域の流管断面積 F_3 、ならびに、この面積に相当する半径 r_3 に及ぼす影響を検討する。いま、式(3)、式(2) 弁前面、弁座前面、弁後面の管軸方向への投影面積、弁上流部、下流部の断面積、 $F_f = 0.1325^2 \pi/4 \text{ m}^2$ 、 $F_c = (0.2^2 - 0.12^2) \pi/4 \text{ m}^2$ 、 $F_b = (0.12^2 - 0.03^2) \pi/4 \text{ m}^2$ 、 $F_1 = 0.2^2 \pi/4 \text{ m}^2$ 、 $F_2 = (0.12^2 - 0.03^2) \pi/4 \text{ m}^2$ のそれぞれを代入し式(2)、式(3)を等値すれば u_3/u_1 、 F_1/F_3 は次の二次式で示される。

$$\left(\frac{u_3}{u_1}\right) - 5.926 \left(\frac{u_3}{u_1}\right) + 8.484 - 0.234 \frac{P_1}{\frac{1}{2} \rho u_1^2} = 0$$

$$P_1 / \frac{1}{2} \rho u_1^2 = x \text{ とおき } u_3/u_1 \text{ を求めれば}$$

$$\frac{u_3}{u_1} = \frac{1}{2} \{ 5.926 + \sqrt{1.179 + 0.936 x} \}$$

x が 20% 誤差が生じた場合の u_3/u_1 の相対誤差 σ を求めれば

$$\sigma = \frac{\frac{\partial(u_3/u_1)}{\partial x}}{\frac{u_3}{u_1}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{0.936}{\sqrt{1.179 + 0.936 x}} \times 0.2 x}{\frac{1}{2} \{ 5.926 + \sqrt{1.179 + 0.936 x} \}}$$

x に静圧 P_1 、動圧 $\rho u_1^2/2$ の実測値、 $P_1 = 34.5 \text{ mm Aq}$ 、

$\rho u_1^2/2 = 1.1 \text{ mm Aq}$ を代入すれば相対誤差 $\sigma = 0.093$ 、すなわち、 F_3 は 9.3% の誤差となる。また、 F_3 の面積に相当する半径 r に対する相対誤差を同様に計算すれば 4.1% となりこの程度の誤差では計算精度は十分である。

3. 実験的考察

前章において二次元流線解析法の手法を拡大し、三次元排気弁まわりの流動状況が計算可能なことを示した。解析計算方法は実験的にその流動現象を捕え得て、始めてその適否が証明されよう。

三次元排気弁まわりの流れの可視化の研究はいまだ報告はない。著者らは二次元煙風洞装置に改良を加え三次元軸対称流における流動現象を流線の形で観察可能な三次元煙風洞装置を開発し、三次元排気弁まわりの流れを可視化可能なものとした。

3.1 実験装置 二次元煙風洞装置の三次元煙風洞装置への変換は可視化結果より、ただちに、二次元流、三次元流の相違の判断が可能となるよう、二次元のシリンドラ、排気弁、弁座等の主要寸法をそのまま用いた。

図 8 は三次元煙風洞装置を示す。本装置はディフューザ部、整流部は二次元煙風洞装置と同一であるが、それ以後の各部品に対し三次元流に対しても流線の状態で可視化が可能であるよう特別の考慮をはかった。

三次元煙風洞装置で最も問題の部分は流線を出すくし形ノズルをどの位置に取り付けるかである。著者らは実験的にいろいろ検討の結果、図示のように整流部直後に二次元絞りを設け、その内部にくし形ノズルを置いた。二次元絞りは長さ 600 mm とし、この間で断面積 $300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ の面積を $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ に絞り、途中の形状は二次元煙風洞を利用し煙を流して煙が最もよく追従する形状のものを採用した。

くし形ノズルに使用する翼形は長さ 200 mm の NACA 0015 対称翼を採用した。

ノズルは外径 4 mm、内径 3 mm の市販真ちゅうパイプ用い、37.5 mm 間隔に 7 本挿入くし形ノズルとした。

三次元絞りは長さ 400 mm の間で面積 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ の正方形より 200 mm 直径の円形断面に絞った。この絞りは中心線に対し、上下、左右ともほぼ対称に製作せねば観察部にて 7 本すべての流線が対称軸平面にて一致を見ることはない。本研究では実験的に流線観察を行ないながら三次元絞りに修正を加え、流線を対称軸平面に対しほぼ一致させ得ることに成功した。

観察室の寸法は直径 200 mm の円形断面とし、材質は可視化可能な透明アクリル樹脂を使用した。弁座及び排気管の材質も透明アクリル樹脂を使用した。

排気弁棒の取り付け方法は図 9 に示す構造とした。すなわち、排気管終了部より 230 mm 間隔に 2 個排気弁案内を取り付け、排気弁棒をガイドした。また、この排気弁棒案内の抵抗を除去するよう、図示のように弁棒案内前と 2 個の案内の間に直径 12 mm の穴を 120 個程度あけ、

図8 三次元煙風洞

図9 排気弁の取付け方法

図10 計測位置

弁棒案内の抵抗が上流部気流に及ぼす影響をできるだけ小さにした。

排気弁揚程は弁棒終了部をねじで押し付け、変化させる構造とし、弁揚程はねじの回転より求めた。

3.2 供試弁の形状 供試弁の形状は図1の解析計算に用いた形状をそのまま用いた。

3.3 計測方法及び計算式 弁揚程と流量ならびに静圧差の関係、弁揚程と流量係数の関係を求めるための排気弁前後の静圧は前報¹⁾の二次元流の計測位置を参考にし、さらに、可視化実験による排気弁揚程の変化に伴う流線の流動状況をも参考にして、排気弁前後の計測位置を図10に示す位置に選定し、それぞれの静圧をベッツ形マノメータを用い1/10mmの精度で計測した。

排気弁を通過流量は弁座上流部200mmの位置における断面の流速分布を計測し変化のないことを確認し、ここにピトー管を設置し、ベッツ形マノメータで動圧を計

測し風速を求め、流路の通路断面を乗じて得られる値をもって流量とした。計算に使用する大気の温度、圧力は実験室内の温度、圧力を使用した。

しかし、上記の流量決定方法は厳密には動圧計測位置における境界層の厚さを考慮せねばならない。本実験では動圧計測位置における境界層の厚さをできるだけ薄くさせ得よう観察部と三次元絞りとの間に約0.1~0.2mm程度のすきまを設け、観察部以前の境界層を除去する方法をとった。したがって、計測位置における境界層の厚さはきわめて薄く、約1mm~2mm程度となる。ここでは流量そのものの議論ではなく、弁揚程と流量、弁揚程と流量係数と流れの状況の議論であるので、単純に速度に断面積を乗じた値を流量とした。

計算式は管内圧力、速度が低いので非圧縮性として計算する。

動圧計測位置における動圧を H mmAq, 排気弁上流部の通路断面積及び幾何学的弁通路面積を F_1 , F_v m²/s, 排気弁上流部, 下流部の静圧を p_1 , p_2 kg/cm², 密度

を $\rho \text{ kg s}^{-2} / \text{m}^4$ とすれば、実際流量 Q_{real} は

$$Q_{\text{real}} = F_1 \sqrt{\frac{2H}{\rho}} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (5)$$

理論流量 Q_{th} は

$$Q_{\text{th}} = F_v \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \{1 - (\frac{F_v}{F_1})^2\}}} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (6)$$

流量係数 α は次のようになる。

$$\alpha = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{th}}} \quad (7)$$

α は $p_2 = p_v$ (p_v : 弁通路の静圧 kg/cm^2) としたので見かけの流量係数となる。

幾何学的弁通路面積 F_v は可視化による弁通路部付近の流線の状況から判断し、図 11 のように設定した。

図 11 幾何学通路面積

3.4 結果と考察 弁前後の静圧差を 50 mm Aq と一定とし、三次元流風洞による流れの状況の代表例を図 12 に、それぞれの弁揚程に対し、弁前後の静圧差を 50 mm Aq , 75 mm Aq と一定とし、式(5)より算出した流量と弁揚程の関係、弁前後の静圧差 50 mm Aq における式(7)より求めた弁揚程と流量係数の関係、ならびに、弁揚程と幾何学的通路面積との関係を図 13 に示す。なお、二次元流との比較が可能なように流量及び幾何学的通路面積は上流部の通路断面積 F_1 (三次元流では $F_1 = \pi \times 0.2^2 / 4 = 0.0314 \text{ m}^2$ 、二次元流では $F_1 = 0.05 \times 0.2 = 0.01 \text{ m}^2$) で除し、単位面積当たりの通過流量、弁開度で表わし、図 13 に二次元流のデータも記入した。

図 12 によれば流れは図 14 に示す A. 弁フェースに沿う流れ、B. 弁フェースよりはがれる流れ、の 2 個のフローパターンに大別できる。二次元流における A のフローパターンでは流れは弁後面部に沿って流れる¹⁾ が、三次元流では弁後面部よりはがれるのが大きな相違である。

A より B へのフローパターンの変換は弁揚程 $20 \sim 22 \text{ mm}$ 程度で行なわれる。流線から判断するに A のフローパターンに属する弁揚程 $20 \sim 22 \text{ mm}$ 程度までは弁揚程

の増大につれて弁通路面積も比例的に増大する。B のフローパターンでは弁揚程が増せば、弁フェースの境界層の厚さが増し、弁通路面積の増加は鈍る。ゆえに、弁揚程と流量の関係は弁揚程 $20 \sim 22 \text{ mm}$ 程度までは比例的に増大し、それ以降はややゆるやかに増大するものと予想できる。

図 13 を見るに弁揚程と流量との関係は弁前後の静圧差に関係なく、弁揚程 22 mm , $h/d = 0.183$ (揚程 h と弁直径 d の比) でこう配を異にする、ほぼ、2 本の直線で示され、弁揚程 22 mm 近傍で流れの状況が変化することを示し気流写真の結果と一致する。また、曲線全般の傾向も気流写真の考察とよく一致する。

次に流れの状況と流量係数との関連につき考察する。実際流量は流れの状況が変化を見せる弁揚程 22 mm 程度までは、ほぼ比例的に変化する。一方、幾何学的通路面積もほぼ比例的な変化を示す。しかし、気流写真には写し出されていないが流れは弁座の当り面に沿わない。したがって、弁揚程の増大に対する実際の弁通路面積の増加の割合は、幾何学的通路面積の増加の割合より小さい。ゆえに、弁揚程 22 mm 程度までの弁揚程と流量係数の関係は弁揚程の増大につれて流量係数は下降する。弁揚程が 22 mm 程度を越え、図 14 に示す B のフローパターンになれば弁揚程を増しても弁フェースの境界層が増すだけで実際の通路面積はそれほどの増加を見ず、幾何学的通路面積と割合とに著しい差を生じる。ゆえに、弁揚程 22 mm 程度以降では以前より急激に下降する。すなわち、全弁揚程に対する流量係数の関係は図 13 に示す傾向となる。

次に気流写真より弁の汚れについて考えてみるに、弁揚程の小なる弁後面部のはがれが小さい場合には、汚れにはほとんど影響がないと考察できる。弁揚程が増大し、特に図 14 の B のフローパターンになれば弁後面部でははがれが増大し、うずも大きくなり汚れが生じるものと思われる。すなわち、B のフローパターンが汚れに大きく影響する。

図 13 より二次元流と三次元流の相違について考える。まず、弁揚程と流量との関係を見るに三次元流では図の下部に示した弁開度が大きいにもかかわらず、弁揚程 20 mm , $h/d = 0.167$ まで流量が小さい。これは前章にて考察した弁及びその他の形状が気流に及ぼす抵抗係数が大きいことによる理由と考えられる。

弁揚程が 20 mm , $h/d = 0.167$ 以上になると二次元流では弁揚程を増しても弁フェースの境界層の厚さが増すだけで流量の頭打ちとなる。しかし、三次元流では前章に示したように弁座前面の抵抗係数が大きく、この影響を受けて三次元流では二次元流より流れは弁フェース側による。このため三次元流では二次元流より、より高い揚程 (弁揚程 22 mm , $h/d = 0.183$ 程度) まで弁フェースに沿う流れが継続する。また、弁フェースから流れがはがれても三次元流では二次元流より弁フェース側によ

弁揚程 10mm

弁揚程 14mm

弁揚程 18mm

弁揚程 20mm

弁揚程 22mm

弁揚程 24mm

弁揚程 26mm

弁揚程 30mm

図12 気流写真(三次元)

図13 弁揚程と流量, 流量係数ならびに弁開度との関係

図14 弁まわりのフローパターン

るので、弁フェースでの境界層の発達は二次元流より阻害され、この結果、弁揚程の増大に対し幾分なりとも弁通路面積が増大し、図13に示すように流量が逆転するものと考えられる。

三次元流と二次元流の流量係数の比較を行なってみる。二次元流の流量の大きい弁揚程20mm程度までは二次元流の流量係数が高いのは当然のことであるが、弁揚程が20mm程度以降でも高いのは幾何学的通路面積が三次元流では二次元流より相当大くなる理由による。

最後に弁開度について考えてみる。図13では三次元流は二次元流より弁開度が大きい。ゆえに、三次元流では二次元流より流れの変動がゆるやかであるといえる。

4. 実験値と計算値の比較

図15は計算結果と実験結果の比較を示す。図において実線は計算結果を、破線は気流写真より求めた実際の流線を示す。図に見るように計算値は実験値とよく一致する。したがって、二次元流線解析法を拡張した本解析計算方法を利用すれば、実験を行わずとも流れの状況の推定ならびに死水領域の形状の推定が可能となる。な

図15 流線①②③の計算値と実験値

お、実際の機関においては死水領域に相当する部分には内部にふくらみを付しているが、本計算方法を応用すればこの形状の算定も可能となる。

5. あとがき

本論文での結果を要約すれば次のようになる。

1. 二次元流線解析法の手法を応用すれば実験を行わずとも三次元流における弁まわりの流れの状況の推定が可能となり、同時に死水領域の形状の算定も可能となる。

2. 三次元流においても弁まわりの流れの可視化が可能であり、その流れはA. 弁フェースに沿う流れ、B. 弁フェースよりはがれる2種に大別でき、三次元流ではBのフローパターンであっても、流量は頭打ちとはならない。また、排気弁の汚れはBのフローパターンに影響する。

3. 三次元流では二次元流より弁開度が大きく、流れの変動はゆるやかである。

今回は非圧縮性として取り扱ったが、圧縮性、音速を越える流れについての研究への発展が必要なことは論をまたない。

終りに、本研究は名古屋大学工学部内田茂男教授の助言によるところが大きい。ここに深く感謝の意を表す。また、実験装置の作成、ならびに実験に協力された本工学部学生、内山貴典、草薙秀樹の諸氏に深く感謝する。

文 献

- 1) 高橋真太郎, 勝田秀雄: ディーゼル機関排気弁まわりの流れの研究, (その1, 二次元流れとしての流線と流量との関連ならびに流線の解析について), 日本船用機関学会誌, 1974, 12.
- 2) 内田茂男: 流体力学(I~N), 内燃機関, 1967, 4~7.

〔質 疑 応 答〕

〔討論〕 東京工大 一色尙次

弁まわりの三次元流れのように、複雑な流れを解析さ

れた努力に敬意を表し、つぎの質問をしたい。

1. 流量係数は最狭部断面積(幾何学的)を基準としての縮流係数と圧力回復係数に分離できると思われるが、それに対する見解はいかがか。

2. 圧縮性の影響はどれくらいか。

3. 抵抗係数 C_D の工学的意味はいかがか。

また、 F_c へ加わる力はどういう工学的意味をもつか。

4. $1/2\rho u_1^2$ 基準ではなく、在来のような $1/2\rho u_3^2$ 基準の抵抗係数にはどのようにして変換すればよいか。

5. 前報にも関連するが、剝離部分以後の物体表面の圧力分布のきめ方はどうされたか。

6. 弁棒部分の背圧はどうきめたか。

〔討論回答〕

1. 気流観察および流線解析結果より流量係数 α は縮流と圧力回復に影響されると考えております。現状ではこれらを分離してそれぞれの値について求めておりません。圧力の計測位置などを考慮し、今後ご指摘の問題について検討を加えたいと思っております。

2. 圧力比の大きい場合、弁上流部の低速領域での流線の状況は非圧縮性のものと比較して変化が小さいと考えられますが、弁通路部より高速領域になるにつれ、流速が急激に増大するものと考えられます。

圧力比が大きく圧縮性の影響があるような場合に対しての流線を求める風洞実験は困難であります。本論文の計算方法に圧縮性を考慮すれば圧縮性についても計算が可能となり、縮流の状態もは握できると考えますので、今後、その方面に研究を進展させることにいたしております。

3. 抵抗係数 C_D は弁及び弁座が気流に作用する抵抗力を上流部の断面積 F_1 と、そこにおける動圧 $\rho u_1^2/2$ の積で除した値であります。これは作用、反作用の関係より、気流が弁及び弁座に及ぼす式(3)に示す低抗係数 C_D' と等しくなります。なお、 C_D' は上流から下流の方向に弁部 F_f 及び弁座 F_c に働く推力を下流から上流に向う弁後面 F_b との差を上流部の面積 F_1 と、そこでの動圧 $\rho u_1^2/2$ で除した値であります。

付図1 弁を通る流れ

面積 F_c 部へ加わる力は流れに直接影響を及ぼします。これが大きいと抵抗係数も大きくなり流線にも影響が及びます。本論文では二次元(文献1), 三次元につきその影響を調べたものであります。

4. 断面3は最終的に求められるものでありますので, 計算の基準としては上流部の安定した流れの位置, 断面1を基準といたしました。

$1/2\rho u_3^2$ 基準とし, $1/2\rho u_1^2$ 基準と同様な計算を行えば次式のようになります。

$$C_D = \frac{P_3}{\rho u_3^2} + \left(1 - \frac{u_1^2}{u_3^2}\right) + \left(1 - \frac{u_1}{u_3}\right) \left(\frac{u_1}{u_2} + \frac{u_3}{u_2} - 2\right)$$

5. 死水領域内の物体表面の設定についてのご質問と申われますので, この件につき回答申し上げます。

本論文では, 付図1に示す断面3を死水領域の代表と選び, 死水域SQにおける圧力はSSでの圧力 p_3 と等しいと考え, 式(2), (3)を用い速度比 u_3/u_1 , 断面3にお

ける断面積 F_3 を求めます。次に断面3の位置をポテンシャル流の計算において, 流線が弁棒, 弁座に平行になる最初の位置に設定し, Sを通る適宜な境界線 RST を引き, これを境界として再度, 流線解析法を行ない流線を求め, 式(2), (3)を使って断面SSの修正値を求めます。以下, 同様な計算を解が収束するまで繰返えせば流れの境界線, 任意位置における流線の位置もおのずからきまります。

6. 流れが弁棒に平行となる部分の圧力は計算に考慮しておりません。弁の背圧に関係のある弁後面の部分はポテンシャルフローとしての圧力分布を利用し, 前問5に示した方法で断面 F_3 の第1近似値を求め, その F_3 を用い, 前問の計算で流線を求め, 流線より弁後面部の圧力分布を, 以下同様にして最終的な圧力分布を定める。なお, 流線より圧力分布を求める計算は式(4)を用いました。