

圧縮流れに対する厚いオリフィスの縮流係数*

平原裕行^{*1}, 中野直広^{*2}
青木俊之^{*3}, 松尾一泰^{*3}

Contraction Coefficient of a Thick Orifice for Compressible Flows

Hiroyuki HIRAHARA, Naohiro NAKANO
Toshiyuki AOKI and Kazuyasu MATSUO

The purpose of the present paper is to report a contraction coefficient of a two-dimensional thick orifice for compressible flows. An experimental investigation was performed using a shock tunnel, and the orifice flow was visualized by a color schlieren method. The experimental results show that the compressible flows through an orifice can be classified into three patterns and the contraction coefficient of a thick orifice increases with increase in the length-height ratios.

Key Words: Orifice, Compressible Flow, Contraction Coefficient, Supercritical Flow, Shock Wave

1. まえがき

オリフィスは構造が簡単な上、安価なため、他の流量計に比べ多くの優れた利点を持ち、各種プラントに多数用いられている。また、最近では、超高压の排ガス処理装置としてオリフィスによる圧力の減少を積極的に利用しようとするシステムもある⁽¹⁾。このような高压装置では強度の面から、通常のオリフィスより厚いオリフィスを用いる必要がある。

一方、圧縮性流体のオリフィスを通る流量は、非圧縮性の流量計算式と膨張補正係数により計算されるが⁽²⁾、その適用範囲は、オリフィスの前後の圧力比が0.75以上の場合と限られている。すなわち、膨張補正係数の適用は、亜臨界圧力比領域においては保証されるが、臨界及び超臨界圧力比においては保証されていない。圧縮性の影響が重要となる臨界あるいは超臨界圧力比領域におけるオリフィス流れに関して、従来よりいくつかの報告があるが^{(3)~(5)}、実用に供するためには、まだ多くの検討すべき課題が残されている。例えば、臨界圧力比領域の近傍で、厚いオリフィスに対して、流量係数にヒステリシスが存在すると報告されているが⁽⁵⁾、その理由は明らかでない。また、超臨界圧力比

領域では、衝撃波と自由せん断層や管壁との干渉により、振動や騒音が生じる^{(6)・(7)}。さらに、厚いオリフィスを過ぎる圧縮流れに対する縮流係数についての定量的資料は乏しく、このような流れにおける衝撃波や膨張波などの発生状況についてはほとんどわかっていない。

本研究では、特に超臨界圧力比領域に関する厚いオリフィスを過ぎる流れを光学的に観察し、広範囲の圧力比にわたって厚いオリフィスの縮流係数についての定量的資料を求め、その流動特性を解明した。

2. 実験装置と方法

実験に用いた風洞は、長さ1.5m、内径85mmの高圧室と、長さ約6.9m、断面60x60mmの低圧室を持つ衝撃波風洞で、低圧室末端に測定部が設けられている。その詳細を図1に示す。オリフィスの上流には断面60x20mmの長方形管が設けられており、伝ば衝撃波がオリフィスで反射し、反射衝撃波背後の気体はこの長方形管で一度よどみ状態になった後、オリフィスを通して膨張する。オリフィス下流には断面300x20mm、長さ400mmの長方形管とダンブタンクが設けられており、測定部の側壁は流れを観察するための光学窓となっている。

実験で用いた4種類のオリフィスの先端形状と寸法を図2に示す。オリフィスはいずれも奥行き20mmの二次元形状で、絞り面積比(オリフィス開口面積と上流断面積の比)は $6/60=0.1$ である。オリフィスSは先端が

* 平成元年4月4日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年10月11日。

^{*1} 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

^{*2} 正員、三菱電機(株)神戸製作所 (〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1-2)。

^{*3} 正員、九州大学総合理工学研究所 (〒816 春日市春日公園6-1)。

鋭いシャープエッジオリフィス、T-1~T-3はオリフィスの先端の厚さ l とオリフィスの開口高さ d の比 l/d がそれぞれ、0.30, 0.50, 0.83の厚いオリフィスである。実験では、オリフィス下流の圧力 p_b と上流のよみ点圧力 p_a を測定するとともに、Xeフラッシュランプを光源とするカラーシュリーレン法による光学観察を行った。試験気体として空気を用い、圧力比 p_b/p_a が 0.02~0.7の範囲で実験を行った。

なお、本実験装置で得られる定常流れの持続時間は4~10msで、オリフィスを通る定常な流れを光学観察するには十分な時間である。なお、オリフィスを過ぎる圧縮流れの次元解析⁽⁵⁾によれば、縮流係数は、絞り面積比、 l/d 、 p_b/p_a とレイノルズ数(代表長さとして速度は、それぞれオリフィスの等価直径と平均流速)の関数である。本実験では絞り面積比は0.1の一定であるから、その影響はない。また、レイノルズ数が4000以上のオリフィスでは、エッジからの自由せん断流は乱流に遷移し、本実験のレイノルズ数($10^4 \sim 10^6$)の範囲では流量特性に対するレイノルズ数の影響はないと考えられる。従って、以下の議論では、縮流係数に対する l/d と p_b/p_a の影響のみを考える。

3. 実験結果と考察

3.1 光学観察 本実験で得られた流れの代表的シュリーレン写真を、図3(a)~(d)に示す。可視化はカラーシュリーレン法で、原写真においては、密度の均一な領域が緑、流れ方向に密度が正の勾配の領域が赤、負の勾配の領域が青で表されているが、図3はこれらのフィルムを白黒写真に転写したものである。写真におけ

るオリフィスの高さはいずれも6mmで実験でのオリフィスの前後圧力比 p_b/p_a は 図中に示してある。図3(a)と(b)はシャープエッジの場合で、オリフィスのエッジからの流れは、縮流により加速され最小断面積部を過ぎると超音速となる。図3(a)では、周囲の圧力とつり合うために流れに垂直な衝撃波が生じ、エッジからの自由せん断層との干渉により、その後に多数の衝撃波が観察される。図3(b)は、圧力比 p_b/p_a がかなり小さい場合で、流れの中の衝撃波はX形状となりかなり下流に位置する。図3(c)は $l/d=0.30$ の厚いオリフィスの場合で、オリフィス前面のエッジからの流れは内面に再附着せず、流れは図3(a)のシャープエッジからの流れに類似している。図3(d)は $l/d=0.83$ の場合で、エッジの前面からの流れは再附着し、再附着点から斜め衝撃波が発生し、それらの衝撃波は、中心線上でX形状に交差する。写真には、周囲の圧力との調節のための垂直衝撃波も見られ、それらが複雑に干渉しているのが観察される。なお、これらの写真より求めたオリフィスの縮流係数 C_c の値を図3に記入している。

3.2 シャープエッジオリフィスの縮流係数 本実験の光学観察より得られた縮流係数の値の妥当性を調べるため、シャープエッジオリフィスの縮流係数のオリフィス前後の圧力比 p_b/p_a に対する変化を、従来の実験結果と比較したのが 図4である。図のPerry⁽⁴⁾とDeckerら⁽⁵⁾の実験値は円形オリフィスに対する値で、

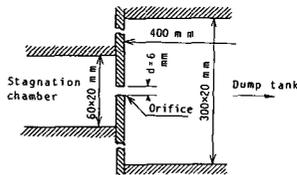


図1 測定部の詳細

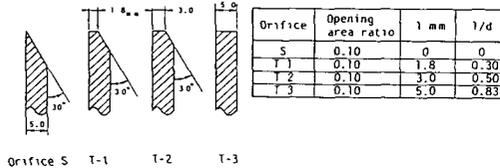
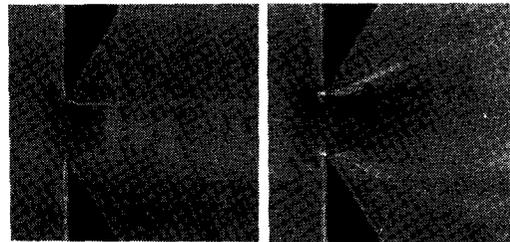
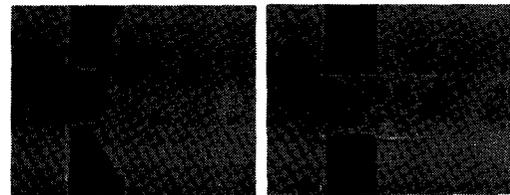


図2 供試オリフィスの先端形状と寸法



(a)シャープエッジオリフィス $p_b/p_a=0.521, C_c=0.76$
 (b)シャープエッジオリフィス $p_b/p_a=0.138, C_c=0.90$



(c)厚いオリフィス, $l/d=0.30$ $p_b/p_a=0.489, C_c=0.81$
 (d)厚いオリフィス, $l/d=0.83$ $p_b/p_a=0.398, C_c=0.90$

図3 オリフィス流れのシュリーレン写真

Bensonら⁽⁹⁾の実験値は、本実験と同じ二次元のオリフィスに対する値である。また、Bensonら⁽⁹⁾による二次元オリフィスに対する理論解と、Benedict⁽¹⁰⁾による近似解（非圧縮流れに対する縮流係数を0.65と仮定した場合）も図中に示してある。図より、本実験値の全体的傾向は他の実験値や理論値と一致するが、 p_b/p_0 の小さい領域でわずかに縮流係数が大きく見積もられているのがわかる。これは他の縮流係数が流量の実測値より計算されているのに対し、本方法では光学観察より求めたため、本実験値に速度係数を0.97と仮定して乗ずれば⁽¹¹⁾、Bensonらの二次元オリフィスの実験値と良く一致する。

3.3 厚いオリフィスの縮流係数 Ward-Smith⁽¹²⁾はオリフィスを過ぎる非圧縮流れを五つのパターンに分類しているが、本節では、まず前節の光学観察の結果に基づいて、オリフィスを過ぎる超臨界圧力比領域における圧縮流れを図5に示す三つに分類する。すなわち、図5(a)はシャープエッジオリフィスからの流れを示し、これを自由噴流流れと呼ぶことにする。この場合、流れは縮流により、最小断面部を形成した後、周囲との圧力調節のための圧縮波、及び垂直衝撃波を生じる。流れの周囲との境界は乱流混合層になっていると思われる。図5(b)は厚いオリフィスを過ぎる流れを示し、流れはオリフィスの前面のエッジよりはく離し再付着しない場合で、これをはく離流れと呼ぶことにする。はく離流れは、オリフィスが厚いことを除けば定性的には図5(a)の自由噴流流れと同じであるが、コアンダ効果のため、縮流の程度はオリフィスが厚いほど小さくなる。図5(c)は、図5(b)より厚いオリフィスを過ぎる流れを示し、流れはオリフィスに再付着する。これを再付着流れと呼ぶことにする。再付着流れでは、オリフィス内部の流れははく離泡によって超音速に加速され、再付着点より斜め衝撃波が発生する。実験によれば、はく離泡後方におけるオリフィス内の流れのマッハ数は1.3~1.5で、再付着流れにおけるオリフィスの出口の流れは、超音速噴流になっている。この定義に従い図3の流れを分類すれば、図3(a)、(b)は自由噴流流れ、図3(c)ははく離流れ、図3(d)は再付着流れである。

次に、本実験結果より得られた厚いオリフィスの縮流係数とオリフィス前後の圧力比 p_b/p_0 の関係を図6に示す。図6(a)は $l/d=0.30$ の場合で、縮流係数は p_b/p_0 の減少とともに大きくなり、 $p_b/p_0 < 0.3$ ではほぼ一定値となる。図6(b)は $l/d=0.5$ の場合で、図には、Deckkerら⁽⁵⁾の円形オリフィスに対する実験値も示している。図より、縮流係数は $p_b/p_0 < 0.4$ ではほぼ一定値となるが、図に示すように、Deckkerらによれば、圧力の履歴によるヒステリシスが存在する。本実験の実験装置は衝撃波風洞であるため p_b/p_0 を連続的に増減させることは不可能で、ヒステリシスの確認はできなかった。図6(c)は $l/d=0.83$ の実験結果で図にはDeckkerらによる円形オリフィスの $l/d=1.0$ の実験値も示している。本実験値は、 $p_b/p_0 < 0.5$ ではほぼ一定値となるのに対し、Deckkerらの実験値は少し値が小さい。これは、 l/d の違いというより、オリフィス内の二次元的境界層の影響が大きいのではないと思われる。図6(d)は、オリフィス前後の圧力比 p_b/p_0 をパラメータとして、縮流係数 C_c と l/d の関係を示したもので、前述の三つの流れパターンの領域も示してある。図より、 p_b/p_0 が一定の場合、流れはシャープエッジ($l/d=0$)における自由噴流流れを出発点として、 l/d が増加するとはく離流れとなり、この領域では、縮流係数 C_c は l/d の増加とともに増加する。この C_c の増加は、前述したようにコアンダ効果による。 l/d が更に大きくなると、流れは再付着流れとなり、この領域では C_c はわずかに増加した後約0.9の一

次に、本実験結果より得られた厚いオリフィスの縮流係数とオリフィス前後の圧力比 p_b/p_0 の関係を図6に示す。図6(a)は $l/d=0.30$ の場合で、縮流係数は p_b/p_0 の減少とともに大きくなり、 $p_b/p_0 < 0.3$ ではほぼ一定値となる。図6(b)は $l/d=0.5$ の場合で、図には、Deckkerら⁽⁵⁾の円形オリフィスに対する実験値も示している。図より、縮流係数は $p_b/p_0 < 0.4$ ではほぼ一定値となるが、図に示すように、Deckkerらによれば、圧力の履歴によるヒステリシスが存在する。本実験の実験装置は衝撃波風洞であるため p_b/p_0 を連続的に増減させることは不可能で、ヒステリシスの確認はできなかった。図6(c)は $l/d=0.83$ の実験結果で図にはDeckkerらによる円形オリフィスの $l/d=1.0$ の実験値も示している。本実験値は、 $p_b/p_0 < 0.5$ ではほぼ一定値となるのに対し、Deckkerらの実験値は少し値が小さい。これは、 l/d の違いというより、オリフィス内の二次元的境界層の影響が大きいのではないと思われる。図6(d)は、オリフィス前後の圧力比 p_b/p_0 をパラメータとして、縮流係数 C_c と l/d の関係を示したもので、前述の三つの流れパターンの領域も示してある。図より、 p_b/p_0 が一定の場合、流れはシャープエッジ($l/d=0$)における自由噴流流れを出発点として、 l/d が増加するとはく離流れとなり、この領域では、縮流係数 C_c は l/d の増加とともに増加する。この C_c の増加は、前述したようにコアンダ効果による。 l/d が更に大きくなると、流れは再付着流れとなり、この領域では C_c はわずかに増加した後約0.9の一

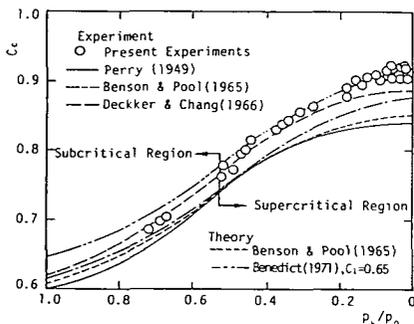


図4 シャープエッジオリフィスの縮流係数

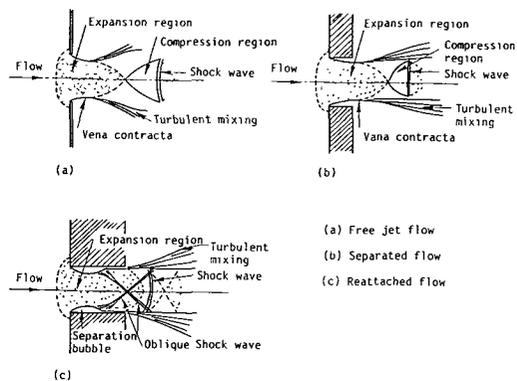


図5 オリフィスを過ぎる圧縮流れの模式図

定値となる。しかし、 $p_b/p_a=0.1$ の場合のように、 p_b/p_a が極めて小さいときには縮流係数は l/d の値には無関係に約0.9の一定値となる。また、オリフィスのはく離流れは、 p_b/p_a が一定の場合、 l/d が大きくなると再付着流れに遷移し、遷移するときの l/d の値は p_b/p_a が小さいほど小さい。

4. 結 論

シャープエッジオリフィスと厚いオリフィスについて、超臨界圧力比領域におけるオリフィス近傍の流動状態を光学観察し、観察結果より、オリフィスの縮流係数を求めた。得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1)オリフィスを過ぎる圧縮流れをオリフィスの厚さの違いにより三つに分類し、それらを自由噴流流れ、はく離流れ、再付着流れと名付け、その流動状態を明らかにした。

(2)厚いオリフィスでは、オリフィスの前後の圧力比 p_b/p_a (p_b はオリフィス下流の、 p_a は上流のよどみ点圧力)が一定の場合、 l/d (オリフィスの厚さと高さの比)を増加すると自由噴流流れ、はく離流れ、再付着流れの順に流れのパターンが変化する。はく離流れの領域では、縮流係数 C_c は l/d が大きいにほど大きい。これは流れのコアンダ効果による。再付着流れの領域では、ある l/d 以上で、 C_c は約0.9の一定値となる。

(3)厚いオリフィスにおいて、 l/d が一定の場合 p_b/p_a が小さいほど C_c は大きくなり、ある p_b/p_a より小さくなると C_c は p_b/p_a によらず約0.9の一定値となる。その限界の p_b/p_a の値は l/d が小さいほど小さい。

文 献

(1)松尾、ほか5名、九大総理工報告、9-1(昭62)、43。
 (2)たとえば、JIS規格、Z 8762。
 (3)鳥住、ほか2名、機論、48-430、B(昭57)、1008。
 (4)Perry, J. A., Trans. ASME, 71(1949), 757。
 (5)Deckker, B. E. L. and Chang, Y. F., PIME, 180, part. 3J (1965-66), 312。
 (6)Nagal, R. T.、ほか2名、AIAA J., 21-11(1983), 1541。
 (7)Meier, G. E. A., ほか3名、AIAA J., 18-4(1979)。
 (8)Benson, R. S. and Pool, D. E., Int. J. Mech. Sci., 7(1965), 337。
 (9)Benson, R. S. and Pool, D. E., Int. J. Mech. Sci., 7(1965), 315。
 (10)Benedict, R. P., Trans. ASME, Ser. D, 93-2(1971), 99。

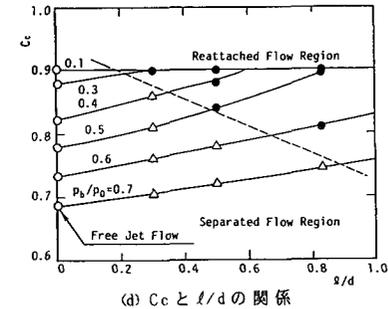
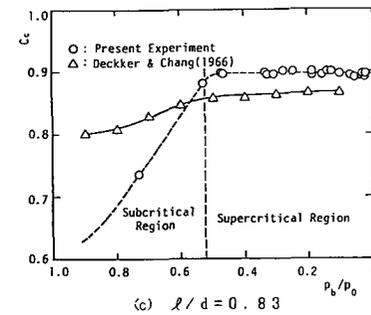
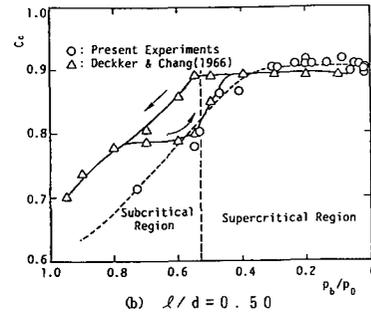
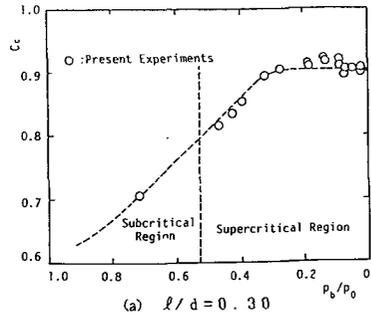


図6 厚いオリフィスの縮流係数

(11)鳥住、ほか2名、機論、48-425、B(昭57)、997。
 (12)Ward-Smith, A. J., Pressure Losses in Ducted Flows, Oxford Univ. Press, 141。