

氏 名	齊 藤 芳 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 1 月 11 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 30 年 3 月 東北大学大学院工学研究科精密工学 専攻修士課程 修了
学 位 論 文 題 目	流路壁オリフィスに関する流体力学的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大場利三郎 東北大学教授 小林 陵二 東北大学教授 箱守京次郎 東北大学助教授 井小萩利明

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

流路にあけたスロットやオリフィス（以下流路オリフィスという）からの流れは、古くから機械工学、航空工学等の流体を取り扱う広い分野で応用されており、そのための研究も要請に応じて行われて来た。しかしながら、流路壁オリフィスマわりの流れは非常に複雑な三次元流れであり、理論的にもいまだ満足な解は得られていない。わが国においても古くから多孔円管から水を大気中に流出する場合の実験が数多くなされてきたが、この種の実験では表面張力の影響は避けられないこともあって、近寄り速度と流路壁オリフィスの流量係数との関係を精密に求めた例、または、複雑で実際的な流動特性を単純化した系統的解明も意外に少ない。また、流路壁オリフィスから分岐・合流する時の流量分配や流動特性の知識も不十分のようである。

次に、流路にノズルを設けた場合には、静水中と大気中に放出した場合では現象も応用分野も異なってくる。すなわち、前者はガスタービン燃焼器の二次空気導入ノズル等に、後者は小型ガスタービンの燃焼噴射やガソリン機関の燃料噴射等に関連し、いずれも小径の場合に限られているが、近寄り速度の影響も考慮すべきであろう。したがって、流路壁オリフィスまたはノズルから流出・流入する流れの諸特性の解明は上記応用分野における機器設計上極めて重要な今日的課題と言える。よって本論文では、このような流れの流量係数等の流体力学的諸特性を実験的に系統的に解明することを試みる。

第2章 流路標準オリフィスの水中放出特性

流路壁オリフィスの基準特性を得る目的で、正方形断面 ($h=60\text{mm}$) の流路に設けた孔径 d の標準オリフィスから同じ流体中 (水) に放出した実験を行った。流路壁の断面積 S 、近寄り速度 U_1 、オリフィス前後のヘッド差を H_0 、重力加速度 g 、オリフィスの速度係数 C_v 、収縮係数 C_c とすると、流量係数の次の関係 $C=C_v C_c$ により、理論流出速度 u_i 、実際の流出速度 u 、流出量 q は次のように表わされる。

$$u_i = (U_1^2 + 2gH_0)^{1/2} \quad (2.1)$$

$$u = C_v (U_1^2 + 2gH_0)^{1/2} \quad (2.2)$$

$$q = C S u_i \quad (2.3)$$

図2.1には、 $d=10\text{mm}$ および 20mm の場合の式 (2.3) で定義される流量係数 C を、 u_i を横軸に取り、 U_1 をパラメータとして表わしている。明らかに C は、 u_i の高い方の $U_2 = 0$ の曲線から、いずれの u_i 曲線も U_1 の減少に伴って低下し、 $u_i = U_1$ において $C = 0$ となる傾向を示す。図2.2には、大口径の場合のものを示す。曲線は点A~Dで $U_2 = 0$ となるため、 U_1 の各曲線は、これらの点から分岐している。なお、 $d=20\text{mm}$ では $u_i = 9.1\text{m/s}$ の点Aで初めて分岐している。

$d=6\text{mm}$ 、 10mm および 20mm の場合の流量係数 C を速度比 U_1/u_i について整理して示した図2.3では、 $U_1/u_i = 0$ で $C=0.6$ 、 $U_1/u_i = 1$ で $C=0$ の一本の曲線に表わされる。

しかし、更に開口比 (d/h) が大きい場合 (図2.4) には、 C のより高い曲線となる。そして、上記の実験結果に基づき、次の実験式を得た。

$$C = \{0.598 + 0.017(d/h)^2\} \{1 - (U_1/u_i)^{A(U_1/u_i)+2.4}\} \quad (2.4)$$

ここに、

$$A = 0.58 + 1.5(d/h)^{3.25} \quad (2.5)$$

図中の実線で示されたこの式はよく実測値と一致している。また、破線はこの開口比における流量係数の最大値を示している。このように、流量係数の基準値が得られたので、一般の円孔および二次元ポテンシャル理論との比較も行った。また、トレーサ可視化法によると、オリフィス径に比較して流出流深さは浅く広がり、流路壁近くのエネルギーの低い流れが流出していることも確認された。

第3章 流路壁オリフィスより空中放出される水噴流の特性

流路壁オリフィス水噴流を気体 (特に空気) 中に噴出する実例は多い。よって本章では、上記の場合の流量係数 C と、容易に測定できる流出角 θ の特性について考究する。流路壁オリフィスの空中噴出時の流量係数 C を U_1 と理論流出速度 u_i により整理すると、ほとんど水中放出の場合と類似の曲線が得られる。しかし、詳細に見ると、いずれの d においても今回の空中噴出時にはやや高い C を示している。これらの結果から流量係数 C を速度比 U_1/u_i について整理したものを図3.1~3.2に示す。明らかに、水中噴出の $d < 20\text{mm}$ の場合にはもちろん、 $d=50\text{mm}$ においても、1本の曲

線からはずれている。結局、流路壁オリフィス水噴流の空中噴出時の流量係数Cを表わす次式を得た。

$$C = \{0.598 + 0.017(d/h)^2\} \{1 - (U_1/u_i)^{A(U_1/u_i)+B}\} \quad (3.1)$$

ここに

$$A = 0.58 + 1.5(d/h)^{3.25}, \quad B = 2.2 + 20000We^{-0.2} Re^{-0.8} \quad (3.2)$$

式(3.2)のReはオリフィス上流側のレイノルズ数, $We = \rho du_i du_i^2 / \sigma$ はウェーバ数である。式(3.1)によって求めた実線は、実験結果と良く一致している。

運動量理論により粘性の影響を無視した場合の理論流出角は、次式により示される。

$$Q_i = \sin^{-1}(U_1/u_i - mC/2) \quad (3.3)$$

次に、流路壁オリフィス上流側と下流側のヘッド差を $H_{1,2}$ 、オリフィスよりの分岐本流損失係数 ζ とすると、 ζ とこれを考慮した流出角 θ_d は次のように与えられる。

$$\zeta = \{H_{1,2} - (U_1^2/2g) - (U_2^2/2g)\} (U_1^2/2g) \quad (3.4)$$

$$\theta_{d1} = \sin^{-1} \left[(U_1/U_2) / 2u_i + \zeta / \{2(u_i/U_1)(1 - U_2/U_1)\} \right] \quad (3.5)$$

図3.3には流出角の実測値 θ_m を示す。 θ_m は、 U_1 、 d によらない直線で示された θ_d とかなり近い値を示し、粘性や分岐本流を無視した理論式とはかなり相違することがわかる。

第4章 流路円孔オリフィスからの分岐・合流

オリフィスよりの流出によって流路内の分岐本流損失を生ずる。流路壁オリフィスのヘッド差を $H_{1,2}$ とすると、分岐本流損失係数 ζ_d は、次のようになる。

$$\zeta_d = \frac{1}{U_1^2/2g} \left(h_{1,2} + \frac{U_1^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} \right) \quad (4.1)$$

式(4.1)より、 ζ_d は動圧損失係数 A_d と圧力差係数 B_d の和として表わされるから、

$$\zeta_d = 1 - \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 + \frac{h_{1,2}}{U_1^2/2g} = A_d + B_d \quad (4.2)$$

ここに

$$A_d = 1 - (U_2/U_1)^2, \quad B_d = H_{1,2} / (U_1^2/2g) \quad (4.3)$$

図4.1には、孔径 d を種々に変えた場合の B_d と ζ_d を示す。すなわち ζ_d は U_2/U_1 に関する次の二次曲線で十分整理され得る。

$$\zeta_d = 0.506(U_2/U_1)^2 - 0.956(U_2/U_1) + 0.450 \quad (4.4)$$

図4.2に種々の断面形状の分岐・合流の対比した ζ_a を示す。分岐流の場合には、いずれの断面形状のものも U_1/U_2 に関する単一曲線で示されるが、孔径 d (開口比 m) によって著しく相違している。したがって、管の分岐・合流損失は傾向的には一致しているので、損失の原因も共通したところがあると言える。

第5章 流路円筒ノズルを介する分流特性

正方形流路に設けた円筒ノズルの寸法を種々に変えて、水を空気中に放出した場合の結果について述べる。流量係数 C を速度比 U_1/u で整理すると、短い ($1 \geq L/d$) 円筒ノズルの場合には、流路壁オリフィスと同程度になり、十分長い ($4 \leq L/d$) とかなり大きな値を示す。上記の中間の L の場合 ($1 < L/d < 4$) には、図5.1に示すように、 U_1/u を増加させると、先ず②の状態になると、ノズルよりの噴流はらせん状の流れとなり、ノズル出口から小気泡を巻き込み、吐出しが頻繁に起こっている。この状態では、噴流は極端に短くちぎれる現象(破断)が認められ、これより U_1/u を増加させると、小気泡の巻き込みはノズル上流側の負圧の死水域に達し、したがって、流量係数 C はかなり低下する。この低下点の U_1/u の値は L/d の値の増大に伴って1に近づく。図5.3には、これらの現象が起る U_1/u の領域を L/d について示す。

第6章 回転円板上の円孔から空中放出される水噴流の流量係数

遠心ポンプの釣合い孔などの問題に関して、十分な大きい容器の底に設けた回転円板上のオリフィスまたは円孔の流量係数について述べる。複雑な二次流れがあるにもかかわらず流量係数は回転オリフィスの周速を流路の近寄り速度 U_1 と置き換えると、流路壁オリフィスや円筒ノズルのそれと同一の法則で規定されることが判明した。すなわち、1対の円孔間 (D_r) の影響は僅小で、内側にあけた方がより有利になることが分かった。流量係数 C は $L/d=0.8$ では標準オリフィスのものよりも少で、長径比 $L/d=2$ になると L/d の効果が現れる(図6.2~6.3)。さらに、孔に角度を付ければ C は増大し、一層の釣合い効果が期待できることも分かった。以上のことは、回転数 n の増加とともに C が減少する軸推力増加対策として有効と考えられる。

第7章 結 論

流路に設けた標準オリフィス、円孔、ノズルからの流出について実験し、次の結果を得た。

1. 流路壁オリフィス水流を水中に放出する実験より、流量係数の標準となる高精度の実験式を求めた。また、流路壁オリフィスからの流れの若干の知見も得た。
2. 流路壁オリフィス水流を空中に放出した場合の流量係数をレイノルズ数、ウェーバ数を考慮して高精度の実験式を得た。更に、流出角も分岐本流損失係数を導入してより実測値に近い式を導いた。
3. 流路壁オリフィスからの分岐・合流は、円管における分岐・合流と同様に、速度比 U_2/U_1 (または U_1/U_2) で整理される。分岐本流損失係数 ζ_a および圧力差係数 B_a とすると、分岐流の場合には、損失係数 ζ_a は簡単な二次曲線で表わせる。また、合流の場合の損失係数と円管の

場合のそれとを比較し、同様の傾向を認めた。

4. 正方形オリフィスから水を空气中に噴出した場合には、長径比 L/d が $1 < L/d < 4$ の場合には、流量係数の異常な不連続的低下が起こる。よって、この場合の噴流特性と流量係数の変化の原因等について解明した。
5. 十分大きな容器の底にある回転円板に1対のオリフィスを設けた場合にも、回転オリフィスの周速度を流路の近寄り速度 U_1 と置き換えると、流路壁オリフィスとこの回転オリフィスの流量係数 C は同一法則で規定されることが判明した。

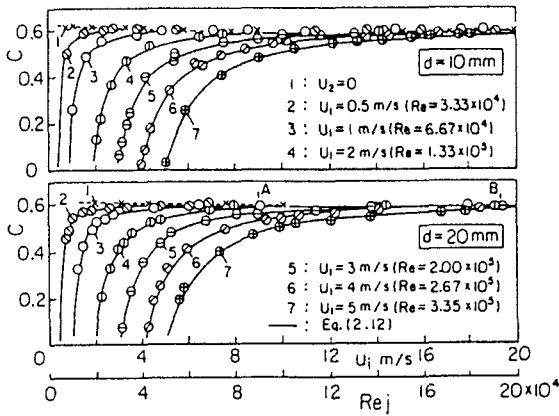


図 2.1 標準オリフィスの流量係数 ($d=10\text{mm}, 20\text{mm}$)
(ジェットレイノルズ数 Re_j は $d=10\text{mm}$ の場合を示す)

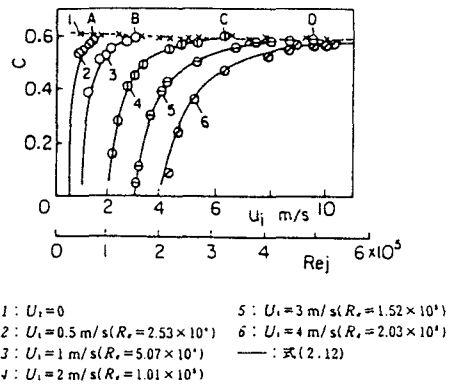


図 2.2 標準オリフィスの流量係数 ($d=50\text{mm}$)

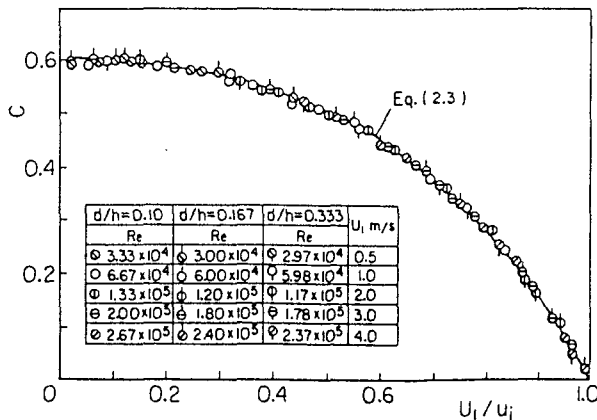


図 2.3 標準オリフィスの流量係数 C の速度比 U_1/u_i による変化 ($d=6\text{mm}, 10\text{mm}$ および 20mm)

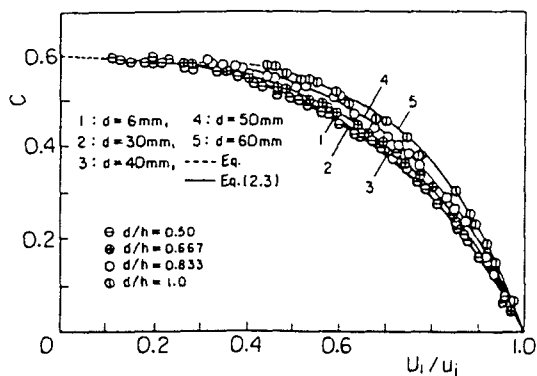


図 2.4 流量係数Cの開口比 d/h による変化

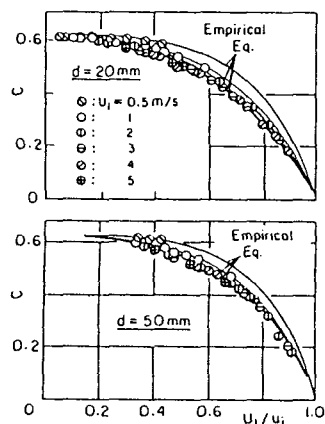


図 3.1 流量係数Cの速度比 U_1/u_i による変化 ($d=20\text{mm}$, 50mm の場合)

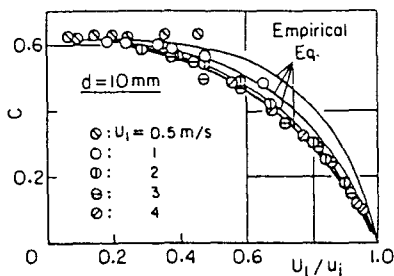


図 3.2 流量係数Cの速度比 U_1/u_i による変化 ($d=10\text{mm}$ の場合)

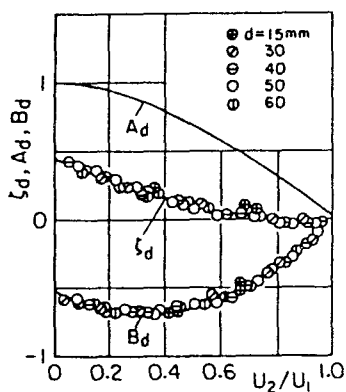


図 4.1 孔径 d を変えた場合の圧力差係数 B_d と分岐本流損失係数 ζ_d

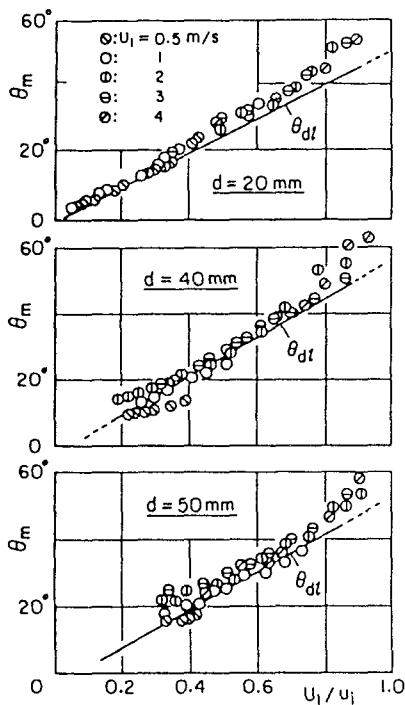


図 3.3 流出角 θ_m の実測値

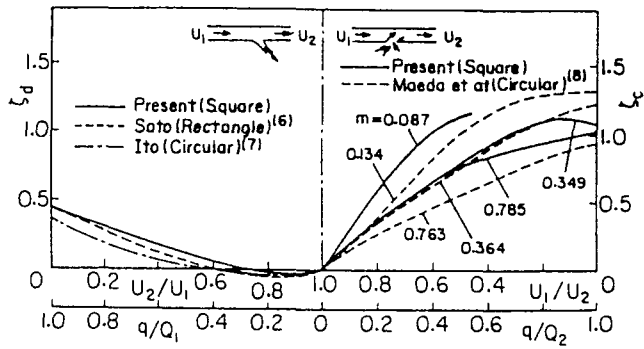


図 4.2 種々の断面形状の分岐・合流管の損失係数の対比

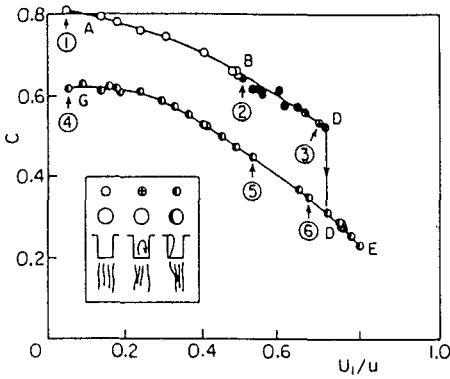


図 5.1 円筒ノズルの流量係数Cの異常な変化

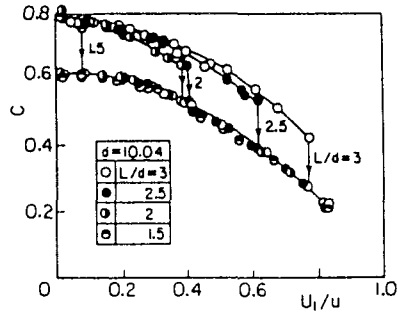


図 5.2 円筒ノズル長さとの流量係数Cの関係

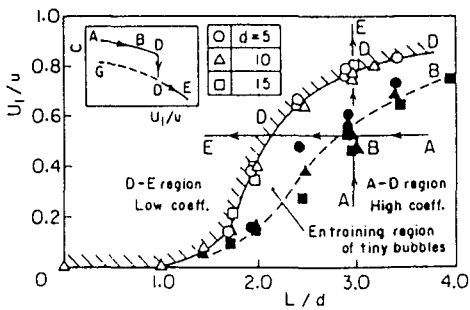


図 5.3 L/d と流量係数の低下点との関係

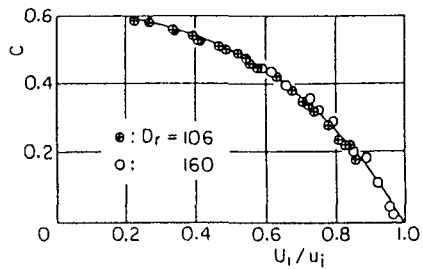


図 6.1 オリフィスの位置 D_r の影響

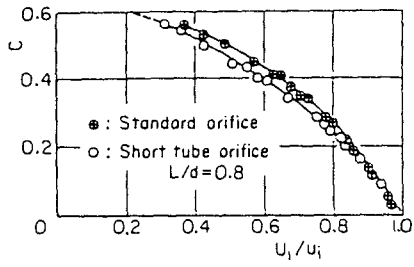


図6.2 標準オリフィスと円筒オリフィスの流量係数 C の差

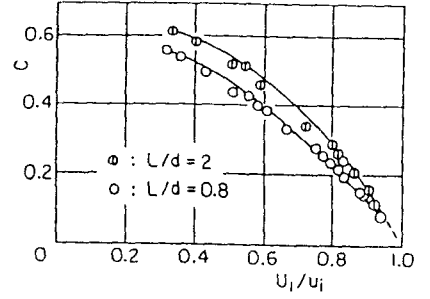


図6.3 円筒オリフィスの長径比 L/d の影響

審査結果の要旨

複雑な三次元流れの様相を呈している流路壁面にあけられたオリフィス（以下流路壁オリフィスという）まわりの流れは、ガスタービン、流体機械等の広い応用分野があるにもかかわらずほとんど解明されていない。本論文は、このような流路壁オリフィスマわりの流れの流量係数等の流体工学的諸特性を実験的に系統的に解明し、比較的簡単な法則性を見出したもので、全編7章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、正方形流路に設けられた標準オリフィスから、水噴流が水中に噴出する際の流量係数を系統的に実験的に解明し、オリフィスの開口比、オリフィス上流側の流路平均速度と、オリフィスマわりの流れパターンも解明した。

第3章では、同様の流路壁オリフィスからの水噴流が空气中に噴出する場合の流量係数等の流出特性を系統的に実験的に解明し、簡単な見通しの良い関係式を求めた。明らかにこの空气中噴出の場合には、水中噴出時の支配パラメータの開口比、速度比およびレイノルズ数のほかにウェーバ数も支配的に関与していること、すなわち、空中噴出と水中噴出とは質的に大差がある事実を明らかにした。これは重要な知見である。また、流路オリフィスからの水噴流に伴う分岐本流損失を算定し、水噴流の流出角に及ぼす影響も明らかにした。

第4章では、流路オリフィスから分岐・合流する流れの損失係数 ζ を、オリフィス上下流の流路平均速度比 U_2/U_1 について系統的に実測し、分岐流れの場合には、 ζ が U_2/U_1 の簡単な二次式で十分表示できることを明らかにした。これは有用な知見である。なお、合流の場合の ζ は U_2/U_1 のほかに孔径にもかなり依存することも明らかにした。

第5章では、流路オリフィスの流出特性に対するオリフィス形状の影響がかなり著しい事実を明らかにしている。特に、ノズルから空中噴出する場合には、ノズルへの複雑な空気巻き込みもあって、不安定な遷移現象が発生することも示した。

第6章では、回転円板上にあけられたオリフィス（回転円板オリフィス）の流出特性が意外にも流路オリフィスのそれに同一となる事実を明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、流路壁オリフィスの流出特性ならびに流れにパターンを詳細に解明し、比較的簡単な流量係数の式、水中および空中噴出の著しい差異、オリフィス形状の影響、回転円板オリフィスが流路壁オリフィスと同一特性を示すことなどを明らかにしたもので、流体工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。