環状衝突噴流の非定常特性*

牧 博 司^{*1}, 小 川 信 夫^{*1}
栗 原 充^{*2}, 矢 部 彰^{*3}

Studies on Unsteady Characteristics of the Annular Impinging Jet

Hiroshi MAKI, Nobuo OGAWA,
Mitsuru KURIHARA, and Akira YABE

The purpose of this study is to investigate unsteady characteristics of the annular impinging jet. Water and air were employed as working fluids. Two pressure transducers made of a semiconductor were installed, one being at the center of the disk placed downstream end of an inner tube and the other on an impinged flat plate. Cross-spectrum and cross-correlation functions of pressures were measured by varying a distance H between the annular nozzle and the impinged flat plate. It was found that there were four types of distinguishable frequencies for pressure, according to a value of H . It was ascertained that fluctuations with the large scale of the annular impinging jet had essentially two modes and the frequencies of these changed linearly with an issuing velocity alone of the annular jet. Some discussion of a cause of their generation took place.

Key Words: Fluid Mechanics, Unsteady Flow, Fluid Vibration Annular Impinging Jet, Flow Visualization

1. 結 言

環状衝突噴流の流れ場は、エアカーテン、空気マイクローメータ、物体の浮上などへの応用や、溶断火炎、EHD (Electro-hydro Dynamics) 伝熱促進⁽¹⁾の解析の基礎として解明が待たれている。これまでの研究では、時間平均的な特性について報告し⁽²⁾、環状ノズルと衝突板との距離を H とするとき、流れの様子が激変する臨界距離 H_{c1} の存在を見だし、 H_{c1} に影響を及ぼす因子、 H_{c1} の物理的意味をあきらかにした。

しかし、環状衝突噴流の流れ場は本質的に非定常であり、この非定常性を解明しない限り不明な部分も多いと考えられる。

本研究では、環状ノズル中心と衝突板上に半導体圧力変換器を設置し、圧力変動のスペクトル、相互相関関数などを求め、さらに作動流体が水の場合には色素流脈法によって流れを可視化し、第2の臨界距離 H_{c2} の存在をあきらかにするとともに環状衝突噴流の流れ場に特有な低周波数の大規模変動の存在とその起因を

あきらかにする。

2. 実験装置と実験方法

作動流体は水と空気を使用した。環状ノズルと衝突板は同じなので水の場合の実験装置を図1(a)に示す。回流水槽のヘッドタンクよりの水は、流量調節弁、浮子面積式流量計をへて定水頭水槽内に設置してある内径270 mm、長さ330 mmのサージタンクに入り、環状ノズルより噴出し衝突板に衝突する。図1(b)に示した環状ノズルは、内管外径 $d=60$ mm、外管内径 D との比 $d/D=0.88$ 長さ200 mmである。内管下流端は円板でふさがれており、その円板の中心と衝突板上に図1(b)に示したように半導体圧力変換器を設置した。これらの圧力変換器の出力は、図1(b)に示したように、それぞれローパスフィルタを通り同時サンプリングA-Dコンバータによりコンピュータに取り込み、機械語のFFTプログラムを利用して⁽³⁾⁽⁴⁾圧力変動のスペクトル、クロススペクトル、相互相関関数を求めた。また、色素流脈法による可視化では35 mmカメラまたは8 mmシネカメラで撮影し、圧力変動も同時に記録した。

なお、サンプリング周波数は実験目的に応じて10~200 Hzまで変化させ、サンプリング点数は512

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月18日。

^{*1} 正員、東京理科大学理工学部 (〒278 野田市山崎2641)。

^{*2} 学生員、東京理科大学大学院。

^{*3} 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)。

点あるいは1024点とした。測定は通常8回のアンサンプル平均をおこなった。

座標は図1(a)に示したように環状ノズル下流端の中心を原点とし、衝突板の方向に z 、これと垂直方向を r とした。環状ノズルを図1(a)に示したレールによって z 方向に移動し H を変え、衝突板はトラバース装置によって r 方向に移動した。これらの移動の精度は、それぞれ1/20, 2/100 mmである。

作動流体が空気の場合には、ヘッドタンクの代わりにターボプロアを用い、そのほかはすべて同じである。ただし、流量計はオリフィス流量計を用い、サンプリング周波数512 Hz、サンプリング点数512点、64回のアンサンプル平均とした。

なお、本研究に使用した環状ノズルの H_{c1} は77 mmであり、レイノルズ数 Re の代表長さは流路幅 $b=(D-d)/2$ とし、代表速度はノズル出口平均流速 $\bar{u}_0$ とした。

3. 実験結果と考察

3.1 第2臨界距離の新定義 $H < H_{c1}$ なる領域における時間平均的な物理量の測定において、衝突板上の圧力分布、 $r=0, z=H/2$ における逆流速度、衝突

(a) 全実験装置

(b) 環状ノズルおよび圧力測定装置

図1 実験装置概略図

板上 $r=0$ の逆よどみ点の熱伝達率などがだいたい $H_{c1}/2$ の H において同時に激変することをすでに報告し⁽⁵⁾、この距離 H を第2臨界距離 H_{c2} と定義してある。たとえば $d=47.4$ mm, $d/D=0.88$ なる環状ノズルでは $H_{c1}=67$ mm, $H_{c2}/H_{c1}=0.6$ であり、 $d=1634$ mm, $d/D=0.90$ では $H_{c1}=205$ mm, $H_{c2}/H_{c1}=0.45$ である。また、本研究で使用した環状ノズルでは $H_{c2}/H_{c1}=0.49$ である。

したがって、代表的な例として $Re=2000$ 、衝突板上の圧力変換器を $r=0$ とした場合の $H/H_{c1}=0.39$ におけるクロススペクトルと相互相関関数 R を図2に、 $H/H_{c1}=0.65$ におけるそれらを図3に示す。図2, 3において p_n は環状ノズル中心部の圧力、 p_i は衝突板上の圧力であり、 ρ は作動流体の密度、 f は周波数、 τ は遅れ時間である。なお、 τ の基準は p_n である。

図2よりあきらかなごとく、クロススペクトルは通常の乱流の波形である。しかるに図3では明確な山が認められ最大の山は約1.8 Hz、次の山は約3.7 Hz、最小の山は約5.6 Hzである。この約1.8 Hzの圧力変動の周波数は、可視化による噴流の r 方向振動の周波数と一致している。これら三つの卓越周波数の比は約1:2:3であることより最大の圧力変動を基本波とし、その変動によって生じる第二、三次の高調波であると考えられる。また、相互相関関数は $\tau=-120$ msに山が存在し、衝突板上の圧力変動の位相が進んでいることがわかる。以上、図2, 3より環状衝突噴流の流れ場

(a) クロススペクトル

(b) 相互相関関数

図2 $H/H_{c1}=0.39$ の場合の代表例

(a) クロススペクトル

(b) 相互相関関数

図3 $H/H_{c1}=0.65$ の場合の代表例

は、 H_{c2} を境として大規模変動の有無によっても分類できることがあきらかになった。

環状噴流に限らず円形噴流でも二次元噴流でも周囲の流体の引込みに起因する大規模変動の存在が噴流の発達領域において確認されている⁽⁶⁾。

一方、衝突噴流の流れ場は、ノズルと衝突板の距離が充分大なときは初期、発達、衝突領域に分類(せん移領域を加える場合もある)され、その距離を減少させてゆくと発達領域のみが減少してゆき、ついに発達領域が消滅する⁽²⁾。いま、環状衝突噴流の初期領域、衝突領域の長さをそれぞれ l_1 、 l_2 とすれば $l_1 + l_2 = H_{c2}$ [文献(2)では H_d] である。

すなわち、発達領域において確認されている大規模変動は、発達領域が存在しない流れ場では存在し得ないと考えられるから、 $H < H_{c2}$ において本研究の大規模変動が消滅したものと推定し得る。

3.2 大規模変動の周波数 図3に示した第三次の高調波は大規模とはみなせないの、以下、基本波の周波数を f_1 、第二次の高調波の周波数を f_{II} とし、 f_1 、 f_{II} について調べる。

H/H_{c1} を図3に示した0.65よりさらに大にしてゆくと f_1 より小なる卓越周波数が突然出現する。図4はこのような場合の $H/H_{c1}=0.88$ の場合のクロススペクトルと相互相関関数を示したもので、 H/H_{c1} をさらに大に($H/H_{c1} < 1$) すると f_1 、 f_{II} は消滅しこの突然出現した大規模変動のみとなる。以下、この周波数を f_{III} とする。

図4に示した相互相関関数より、ノズル側と衝突板上の圧力変動が図3に示した圧力変動の逆位相となっていることがわかる。この f_{III} による衝突板上の圧力変動が、すでに形成されているドーナツ状の渦の逆流部によって環状噴流の上流部にフィードバックされ、このフィードバックされた圧力変動によって衝突板上の圧力変動が誘起されていると考えられる。

さらに、この圧力変動のフィードバックにより環状衝突噴流の流れ場全体が自動的に振動し、この振動の周波数が f_1 であると考えることができる。すなわち、

図4 $H/H_{c1}=0.88$ の場合の代表例

この自励振動の発生の機構は環状衝突噴流の流れ場の一つの特徴と考えることができる。

これら f_1 、 f_{II} 、 f_{III} に影響を及ぼす因子を調べるために、 Re を一定に保ち、水の温度を変え動粘性係数を変えた場合を図5に示す。図5より $f_1 \sim f_{III}$ は $\bar{u}_0$ のみの関数でありかつ比例関係にあることがわかる。

図6は、 f_1 、 f_{III} につき、空気を作動流体とした場合と比較したもので、 f_1 、 f_{III} は図5と同様に $\bar{u}_0$ のみの関数であることがわかる。

図5、6より、 f_1 ならびに f_{III} が $\bar{u}_0$ のみの関数でかつ比例関係にあることは、環状衝突噴流の流れ場に存在する大規模変動は H が一定ならば噴流がノズル出口から衝突板に到達する時間のみでそれらの周波数が定まることを示している。

図7は、 f_1 、 f_{III} の位相差 θ を示したもので、 Re によらず、 $\bar{u}_0$ が変化しても一定の値をとることがわかる。

図8は、 $H/H_{c1}=1.17$ の場合のクロススペクトルと相互相関関数を示したもので、 $H/H_{c1} > 1$ なる領域には1種類の大規模変動が存在していることがわかる。以下、この周波数を f_{IV} とする。

以上定義した f_{III} 、 f_{IV} の周波数は、シネカメラによる可視化の周波数と一致している。

図5 f_n と $\bar{u}_0$ の関係

図6 作動流体が異なる場合の f_n と $\bar{u}_0$ の関係

3.3 H の変化による現象の変化 3.2 節で各領域内に存在する大規模変動の分類をおこなったので、つぎに H を変化させて整理をこころみた。3.2 節に示した実験結果より、 f_I と f_{III} は噴流がノズル出口から衝突板に到達する時間で定まると考察したので、この時間の代表値として $H/\bar{u}_0$ を考え、この逆数と f_n ($n=I, II, III, IV$) との比 $f_n/(\bar{u}_0/H) = f_n^*$ で実験値を整理した。

図 9 に f_n^* 、図 10 に位相差 θ を示す。図 9 より f_I, f_{II} は H の増加とともにわずかに増加する傾向が認められるが、ほぼ一定の値となることがわかる。なお、 f_{II} のちらばりが多いのは、 f_{II} は f_I の第二次の高調波のため識別がやや困難なためである。

また、 $H/H_{c1} > 1$ なる範囲では、環状ノズル内管の下流端に形成される渦の大きさは H により変化しないので⁽²⁾、 f_{IV} は H にかかわらずほぼ一定の値 (約 1 Hz) となるが、図 9 の縦軸で採用した無次元数を用いた整

図 7 θ と $\bar{u}_0$ の関係

(a) クロススペクトル (b) 相互相関関数

図 8 $H/H_{c1} = 1.17$ の場合の代表例

図 9 f_n^* と H/H_{c1} の関係

理方法では一定とはならない。さらに、図 10 に示した各大規模変動の位相差が H によらずほぼ一定ということは、 H の変化に応じて f_n が変化しても、それぞれの振動様式は変化しないためであると考えられる。

3.4 衝突板上の変動圧力分布 3.3 節までに示した実験結果より、環状衝突噴流の流れ場には、 $H_{c1} < H < H_{c2}$ なる範囲に H の値に応じて f_I と f_{III} の周波数を持つ大規模変動が存在することがあきらかになったが、本節では、それらの軸対称な大規模変動の衝突板上の変動圧力分布について調べた。このため、それぞれの大規模変動が顕著に存在する $H/H_{c1} = 0.65$ と 0.88 の場合を取り上げる。

図 11 に $H/H_{c1} = 0.65$ と 0.88 の場合に半導体圧力変換器を r 方向に移動させたときの相互相関関数より求めた位相差を示す。図 11 の $r/r_0 \approx 1$ の付近の位相差がどちらも約 180° 異なっているのは、それらの位置で噴流が r 方向に振動していることを示している。さらに、 $H/H_{c1} = 0.65$ の場合では、 $r/r_0 \approx 0.4$ において位相差が約 180° 異なっていることより、約 $0.4 > r/r_0$ なる領域に逆よどみ領域が形成されていることがわかる。また、 $H/H_{c1} = 0.65$ の場合の $r/r_0 > 1$ なる領域で r の増加とともに位相差が減少していることより、 f_I の

図 10 θ と H/H_{c1} の関係

図 11 θ と r/r_0 の関係

大規模変動が壁噴流の領域に流れ去ることを示している。一方、 $H/H_{c1}=0.88$ の場合の $r/r_0 > 1$ なる領域で r の増加にかかわらず位相差に変化が認められないのは、壁噴流領域も含めた流れ場全体が f_{in} の周波数で r 方向に振動していることを示している。

図 12 に $H/H_{c1}=0.65$ と 0.88 の場合の衝突板上の変動圧力の r 方向分布を示す。図 12 より、 $H/H_{c1}=0.65$ の場合に山が二つ認められるのは、環状噴流のみが $r/r_0 \approx 1$ の内側と外側に交互に振動しているためであり、 $H/H_{c1}=0.88$ の場合に山が一つなのは、図 11 の位相差の場合の考察と同様に、流れ場全体が振動しているためだと考えられる。

3.5 流れの可視化 色素流脈法で色素を環状ノズル内に注入したときの流れの模様を 8 mm シネカメラで撮影するとともに、 p_n , $p_i(r=0)$ も同時に記録した。

図 13 は 1 例として $H/H_{c1}=0.65$, $Re=2000$ で、撮影は 23.3 こま/s, シャッター速度 1/216 s の場合を示している。図 13 の中には、 $p_i(r=0)$ が最大値となる時間を基準として、時間 T で時間 t を表してある。ここで、

図 12 衝突板上の変動圧力分布

T は 1 回の圧力変動ごとに微妙に変化するので各 $1/2$ 周期ごとに決定している。この可視化の結果とこのときの p_i の変化を時間を追って詳しく調べることにする。

$t=0T$ のとき(1)では噴流は曲げられずに噴出し、衝突板に衝突しており、このときの衝突板上の圧力は図 11 に示した位相差を参照して、逆よどみ領域とだいたい $1.0 < r/r_0 < 1.2$ の領域の圧力が最も高くなり、だいたい $0.4 < r/r_0 < 0.8$ の領域の圧力は最も低くなる。したがって、環状噴流が衝突する r の位置を境として、この r の外側と内側の領域の圧力差は最高になる。この圧力差の影響で、噴流は衝突板付近で内側へ曲げられる(2, 3)。内側へ曲げられた噴流は衝突板に衝突した後、環状衝突噴流の渦領域を逆流し、衝突板からノズルにまで達する大きなサイズの渦⁽⁷⁾を構成する(4)。この大きな渦は環状ノズル出口付近にも影響を及ぼし、環状噴流を外側に曲げるような作用をする(5)。そして、噴流はふたたび衝突板にほぼ垂直に噴出するようになる(6)。しかし、このときの衝突板上の圧力は逆よどみ領域と上述の $1.0 < r/r_0 < 1.2$ の領域の圧力が最も低くなり、 $0.4 < r/r_0 < 0.8$ の領域の圧力は最も高くなるため、今度はこの圧力差の影響で噴流は外側へ曲げられる(8, 9)。その後噴流が外側へ曲げられることにより、 $1.0 < r/r_0 < 1.2$ の領域の圧力は上昇し、逆に $0.4 < r/r_0 < 0.8$ の領域の圧力は減少してゆき、この圧力差がある程度大きくなると噴流の外側への曲がり小さくなり(11)、一つの周期が終わる。

つぎに、図 14 に $H/H_{c1}=0.88$, $Re=2000$ で、撮影は 17 こま/s, シャッター速度 1/160 s の場合を示している。図 14 の中には、図 13 とは逆に $p_i(r=0)$ が最小値となる時間を基準として、周期 T で時間 t を表して

図 13 可視化連続写真 ($H/H_{c1}=0.65$)

図 14 可視化連続写真 ($H/H_{c1}=0.88$)

ある。

図 14 より噴流が $r/r_0 \approx 1$ の内側に入り込んだときには、図 13 の $H/H_{c1}=0.65$ のときのような衝突板からノズルにまで達する大きな渦はできていないことがわかる。時間を追ってみると、 $p_t(r=0)$ が最も低い $t=0T$ のとき(1)は環状噴流はひろがっていて、図 11 を参照すると $1 < r/r_0$ なる領域では圧力は最も高くなり、 p_n も高くなる。その後環状噴流は $r/r_0 \approx 1$ の内側に曲げられ、 $t=0.5T$ (11)になると今度は逆に $1 > r/r_0$ なる領域の圧力が高くなり $1 < r/r_0$ なる領域の圧力が低くなり、このときの p_n は負圧になっている。それから再び噴流は $r/r_0 \approx 1$ の外側にひろがってゆき、一つの周期が終わる。

以上のように連続的な可視化の結果からも $H/H_{c1}=0.65$ で見られる f_1 の周波数の大規模変動と、 f_{III} の周波数の大規模変動とは異なることがわかる。すなわち $H/H_{c1}=0.88$ で見られる f_{III} の周波数の大規模変動では、 $H/H_{c1}=0.65$ で見られる f_1 の周波数の大規模変動のときのように、大きな渦が発達して流れに影響を及ぼすようなことはないことがあきらかになった。

4. 結 論

(1) 環状衝突噴流の流れ場には、環状ノズルと衝突板との距離 H に応じて大規模変動の 4 種類の卓越周波数 $f_1, f_{II}, f_{III}, f_{IV}$ が存在する。

(2) 流れの様子が激変する既報の臨界距離 H_{c1}

のほかに、大規模変動が消滅する第 2 の臨界距離 $H_{c2}(< H_{c1})$ の存在を見いだした。したがって、大規模変動は $H > H_{c2}$ の領域にのみ存在する。

(3) f_{II} は f_1 を基本波とする第二次の高調波なので f_1 のみに注目すれば、 f_1 は $H_{c2} < H < H_{c1}$ なる範囲の H_{c1} に近い領域を除いた H の範囲に存在し、 f_{III} は上で除いた H_{c1} に近い領域に存在する。また f_{IV} は $H > H_{c1}$ なる範囲に存在する。

(4) f_1 は、 f_{III} の大規模変動が、環状ノズルと衝突板との間に形成されるドーナツ状の渦領域を逆流するフィードバック機構に起因する自励的な振動で、環状衝突噴流の流れ場独特の現象であることをあきらかにした。

(5) f_1 は環状噴流のみの振動であり、 f_{III} は流れ場全体の振動である。また、 f_1 が存在する H の領域にのみ衝突板上に逆よどみ領域が形成される。

文 献

- (1) Yabe, A. and Maki, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 31-2 (1988).
- (2) 牧・相田・秋元, 機論, 46-410, B (昭 55), 1959.
- (3) 南, 科学計測のための波形データ処理, (昭 61), CQ 出版.
- (4) 日野, スペクトル解析, (昭 52), 朝倉書店.
- (5) Maki, H. and Yabe, A., *Int. J. Exp. Heat Trans.*, 投稿中.
- (6) 高曾・ほか 3 名, 九州支部第 41 期総会・学術講演会講演概要集, No. 888-1 (昭 63-3).
- (7) 高城・ほか 3 名, 機論, 53-491, B (昭 62), 1931.

討 論

〔質問〕 藤田重隆〔徳山工業高等専門学校〕

詳細な研究を行っておられることに敬意を表す。以下の点についてご教示願いたい。

(1) 作動流体が空気の場合に、サンプリング周波数を 512 Hz としておられるが、どのような判断のもとに 512 Hz とされたのか。

(2) 図 2 のクロススペクトルと相互関関数 R の結果は、 $H/H_{c1}=0.39$ におけるものだが、代表として 0.39 を選ばれた根拠は何か。

以上の点ご教示願いたい。

〔回答〕 (1) 図 6 に示したように、作動流体が空気の場合、大規模変動の周波数は数 Hz から数十 Hz であるために、周波数レンジを 200 Hz と設定し、周波数分解能に端数が出ないようにサンプリング周波数は周波数レンジの 2.56 倍とした。

(2) 本研究で使用した環状ノズルでは $H_{c2}/H_{c1}=0.49$ であり、これより小さい H/H_{c1} での代表例として単に $H/H_{c1}=0.39$ を図に示した。