365 レーザ蛍光法による衝突噴流自励振動サイクルの可視化

(九州大学) 井上 雅弘、 益田 光治、 古川 雅人、 村石 隆、 清水 正彦 (院) ○

Visualization of Self-Sustained Oscillation in Impinging Jets by LIF

Masahiro Inoue Mituharu Masuda Masato Furukawa Takashi Muraishi Masahiko Shimizu

Abstract: Feedback mechanism of self-sustained oscillation in subsonic impinging jets is studied experimentally by using a laser-induced fluorescence (LIF) technique. Phase velocities of disturbances in the flow field are obtained from a time-dependent cross-correlation function between a pressure sensor signal at a reference point and the LIF signal. A feature of disturbance propagation can be visualized by drawing maps for the cross-correlation coefficients on a plane at successive delay-times and making an animation. There are two feedback loops: one is closed by a neutral wave propagating upstream inside the jet and another is achieved by sound wave propagating outside the jet. For a nozzle with a thin rim the former is dominant, while the latter loop is enhanced by a thick rim nozzle.

Key words: laser-induced fluorescence, subsonic jet, impinging jet, oscillation

1. 序論

ノズルから流出する噴流が、ノズル直径と同程度か直径の数倍の距離にある壁に垂直に衝突すると、衝突音 (impingement tone) と呼ばれる特定の周波数のノイズが発生することはよく知られている。これは、フィードバックループを伴う自励振動であることが、過去の研究により分かっているが、フィードバック波の伝播経路を噴流内部とする説[1-3]と外部とする説[4-6]に分かれている。

ところで、著者らは先に、LIF法と圧力センサを併用して高速気流中の温度変動の位相速度を計測する方法を開発し、超音速キャビティ流れにおける自励振動の位相変化のパターンが振動モードごとに異なることを明らかにした[7, 8]。そこで、本研究においても同じ実験解析手法を採用して、相互相関係数の位相変化により高速衝突噴流における自励振動サイクル形成メカニズムについての検討を行った。本報においてはノズル出口マッハ数が $M=0.8$ の場合について述べる。

2. 実験装置及び実験方法

本実験においては、Fig. 1に示すような出口直径 $D=6\text{mm}$ の円形断面先細ノズルを用いた。ノズル出口周辺の縁の厚さが剪断層の励起過程に及ぼす影響を調べるため、縁なしノズル(縁の厚さが1mm)と縁ありノズル(縁の外形が20mm四方の正方形)の2種類のノズルを用いた。噴流を衝突させる平板は一边が120mmの正方形とした。各ノズルに対して噴流の出口マッハ数を $M=0.8$ に設定し、平板に垂直に噴流を放出させた。また、ノズルと平板の距離を L とし、 $L/D=1\sim 8$ の範囲で実験を行った。

実験装置の概略図をFig. 2に示す。風洞は吸込み式で、真空ポンプ2台を並列運転させることにより定常運転が可能である。測定部は下流チャンバ(11)内に設けてあり、ゲートバルブ(13)の流路断面積を変化させることで背圧を変え、噴流のマッハ数を調整する。作動流体は常温の空気、ヨウ素セル(7)を通過することにより、蒸気圧に応じて昇華したヨウ素とともに測定部に流れ込

Fig. 1 Nozzle Configuration

Fig. 2 Experimental setup for measurement of pressure and temperature fluctuation

む。一方、励起光源にはアルゴンイオンレーザー(1)(スペクトラフィジックス社製、2017-04型、1.7W)を用い、波長514.5nmの広帯域モードで発振させた。直径0.5mmのレーザービームは全反射鏡(2)による位置調整の後、下流側から上流側に向けて測定部に入射する(下流チャンバ後部及び衝突平板には、レーザーの入射を妨げないよう光学ガラスが埋め込んである)。レーザーにより誘起された蛍光は、レーザービームに対して直角方向から、集光用レンズ及びシャープカットフィルタを介してフォトマルチプライヤ(3)(浜松ホトニクス社製、V-1366P型)により検出した。

自励振動周波数は、衝突平板上において噴流の中心部から6mmの位置に設置した圧力センサ(5)(Kulite社製、XCQ-062-25D)により測定した。平板はステッピング

モータによる移動装置に直結されており、 $L=6\sim48\text{mm}$ ($L/D=1\sim8$)を 0.25mm 単位で調節した。

相互相関測定における測定部の詳細図をFig. 3に示す。座標系は、ノズル出口断面における噴流の中心部分を原点とし、原点より流れ方向にX軸、手前方向にY軸、垂直方向にZ軸をとっている。XZ断面に 1mm 単位でメッシュを切って測定点とし、LIF法による各測定点での蛍光強度変動と基準となる圧力変動を同時に取得した。卓越周波数の前後 1kHz にバンドパスフィルタをかけて相互相関係数を求め、同一遅れ時間ごとに測定メッシュに準じてプロットすれば、自励振動により生じる特定の周波数成分を持った擾乱のみの伝播挙動を動画により観察できる。なおこの測定においては、ヨウ素による腐食の防止と平板への光学ガラス埋設の必要性から、基準となる圧力センサの位置は噴流の中心部から 40mm とした。

Fig. 3 Detail of experimental setup for cross-correlation measurement

3. 実験結果及び考察

縁なしノズルの場合の L/D に対する自励振動周波数をFig. 4に示す。図は、 L/D を徐々に変化させて、衝突平板上に埋設した圧力センサの出力を周波数解析し、縦軸に周波数 $f[\text{Hz}]$ 、横軸に L/D を取った平面上に、スペクトル密度(PSD)の等高線をカラスケールで示すことにより、PSDの高い離散周波数を抽出したものである。なお、図の右側には、周波数をノズル出口直径とノズル出口流速 U で無次元化したストロハル数 $St=fD/U$ を記してある。

自励振動周波数は、フィードバックループ上に存在する擾乱の数が同一であれば、ノズル出口平板間距離 L の増加とともに低下するが、衝突噴流においては自励振動が起こりやすい周波数帯があり、 L/D の増加によりその周波数帯の下端に達すると、擾乱の数が増加して周波数が高い値へジャンプすると考えられている。このため図に示すように、ある周波数帯(23 kHz , 38 kHz , 46 kHz 近傍)に鋸歯状のPSDの高い離散周波数の列が複数存在する。周波数帯が限られる理由として、剪断層には刺激を受けやすい安定な周波数があるとする説が多いが、Tamら[3]は、一様速度の噴流に微小擾乱を重ねた線形理論解析によって噴流内に分散しにくい波数の固有の中立波があることを示し、このうち最も次数の低いモードの中立波が、上流へ伝播するフィードバックに関係すると述べている。彼の理論計算によると、半径方向モード1の軸対称中立波の平均ストロハル数は、 $M=0.8$ では 0.54 であ

Fig. 4 Self-sustaining oscillation frequency as a function of L/D (nozzle without rim, $M=0.8$)

り、Fig. 4においてPSDの高い周波数帯におけるストロハル数 0.53 とほぼ一致している。そこで本報告では、主として $L/D=1.5\sim5$ の広い範囲に存在する 23 kHz 前後の自励振動について考察する。

Fig. 5は、 $L/D=1.67, 2.33, 3.17, 3.83$ について、噴流中心断面での 23 kHz 前後の離散周波数に対するPSD分布を示したものである。PSDの高い領域は定在波の腹の部分に相当し、その数からそれぞれのモード数は、2、3、4、5であることがわかる。

Fig. 6には、 $L/D=1.67$, $f=22.9\text{ kHz}$ における擾乱の伝播形態を見るために、圧力変動と温度変動の相互相関係数の時間変化を示している。相互相関係数は正負が逆位相で交互に現れるため、正の値のみを段階表示することで簡素化してある。これを動画で観察することにより、次のことが分かる。

Fig. 5 Distribution of power spectral density for discrete frequency around 23 kHz

Fig. 6 Propagation of disturbances (nozzle without rim, $M = 0.8$, $L/D = 1.67$, $f = 22.9$ kHz)

まず(a)において、ノズル出口近傍に高相関領域が確認される。この擾乱により剪断層が刺激を受けて新たな渦が発生し、剪断層部の流れに乗って下流へと伝播していく。(b)では $x=4\text{mm}$ 、 $z=\pm 3\text{mm}$ の部分で相関値が高く、発生した渦はリング状であると推測される。その後そのリングボルテックスは、先発のリングボルテックスによって生成されたフィードバック波と干渉し((c))、定在波を形成するため、その腹にあたる $x=5\text{mm}$ 付近で相関値が高くなる((d),(e))。干渉後には更に下流へと対流して平板に衝突し((f),(g))、そこでウォールジェット成分への推移を経た後((h),(a))、平板に沿ってリングの直径を広げるように外側へと伝播していく((b)~)。このとき噴流内の平板近傍において、フィードバック波に対応していると思われる擾乱が発生している((b))。フィードバック擾乱は噴流内をさかのぼり、後発のリングボルテックスと干渉する((d),(e))。その後、噴流内を上流へと伝播し続けることでついにはノズル出口に達し((g))、剪断層に刺激を加えることで新たな擾乱を誘発する((h))。

上述のようにフィードバック波は主として噴流の内側を上流に伝播しているようである。このことは次の図によりさらに明確に示される。Fig. 7は、横軸に噴流方向(x 方向)、縦軸に位相遅れ時間 t をとって正の相互相関係数値の等高線をグレースケールで表示した x - t 線図であり、縞模様の間隔が自励振動の周期、傾きが擾乱の位相速度に対応する。縞模様の傾きから、噴流外縁付近($z=3\text{mm}$)においては擾乱は下流に向かうが、噴流の中心軸($z=0\text{mm}$)においては上流へ向かうことがわかる。一方、Fig. 8は、中立波以外の離散周波数を持つ $L/D = 3.50$, $f = 16.9$ kHzの噴流の中心軸($z=0\text{mm}$)および噴流外縁付近($z=3\text{mm}$)における x - t 線図である。この場合、噴流中心にはモード3の定在波の存在を示す階段状の高相関の分布が

Fig. 7 x-t diagram at $z = 0$ mm and 3 mm (without rim, $L/D = 1.67$, $f = 22.9$ kHz)

Fig. 8 x-t diagram at $z = 0$ mm and 3 mm (without rim, $L/D = 3.5$, $f = 16.9$ kHz)

見られるのみで、上流へ伝播する擾乱は見あたらない。

Fig. 6およびFig. 7に示した擾乱の伝播形態は、Fig. 5におけるモード3 ($L/D=2.33$, 23.4kHz)、モード4 ($L/D=3.17$, 22.7kHz)、モード5 ($L/D=3.83$, 23.1kHz)においても同様に観察された(図は省略)。このことから、Tamらの提唱する中立波の周波数を持つ場合には、フィードバック波は噴流の内側を上流に伝播することがわかる。

次に、縁ありノズルを用いた場合の自励振動周波数をFig. 9に示す。縁なしノズルでは $St=0.53$ 付近に離散周波数が集中していたが、縁ありノズルではその傾向は見られず、 L/D に対して単調減少する離散周波数が15kHz程度の低い周波数にまで確認できる。特に $L/D=1.7\sim 2.8$ では20~26kHzに加え、15~20kHzの自励振動が新たに存在している。これに関して、ここでは $L/D=2.33$ についてPSDの高い2つの離散周波数における相互相関測定結果に基づき、周波数の違いによる自励振動機構の変化を検討する。

まず、22.8kHzの擾乱伝播形態(Fig. 10)を動画で観察すれば、縁なしノズルのモード3($L/D=2.33$, 23.4kHz)の形態(図は省略)と同様にフィードバック擾乱は噴流の内側を上流に伝播しており、その際に定在波の腹を2つ形成

Fig. 9 Self-sustained oscillation frequency as a function of L/D (nozzle with rim)

している((b)の $x=10\text{mm}$ 、(d)の $x=5\text{mm}$)。すなわち、 $M=0.8$ では中立波による自励振動は緑の有無の影響を受けない。

次に、中立波より低い周波数 16.3kHz の自励振動における擾乱の伝播形態(Fig. 11)の特徴は、緑なしノズルの $L/D = 3.50$ 、 $f = 16.9\text{kHz}$ の場合と同様に、噴流内を戻る擾乱が存在しないことが挙げられる。(d)では定在波の腹における相関値が高くなっているが、その後リングボルトテックスは下流へ移動して行くのに対し、フィードバック擾乱は噴流内の密度変動により分散が進むため、(e)では完全に消滅している。逆に噴流の外側を戻る擾乱はかなり強く((e),(f))、ノズル出口に到達したときには擾乱は $z=-12\sim 12\text{mm}$ と緑全域に及んでおり((f))、しかも $z=\pm 3\text{mm}$ の剪断層部分で最も強くなっている((f),(a))。すなわち、緑があることによって外周部をX軸の負の方向へ伝播する擾乱を集積することができ、剪断層を外側から刺激することでフィードバックが成立可能になったと考えられる。

このように $M=0.8$ では、同一の L/D においてもその振動周波数により、噴流の内側からのフィードバック機構と外側からのフィードバック機構が共存するという、興味深い結果が得られた。なお、 $L/D=3.50$ 、 $f=17.1\text{kHz}$ の場合には、Fig. 10と同じモード3であるが、中立波が存在しないため、緑なしノズルの $L/D = 3.50$ 、 $f = 16.9\text{kHz}$ の場合と同様に噴流内を戻る擾乱は存在せず、外部を上流へ伝播する擾乱が観察された(図は省略)。

4. 結論

LIF法と圧力センサを併用した非定常計測システムにより、ノズル出口マッハ数 $M=0.8$ の高速衝突噴流におけ

る自励振動サイクルの解明を行った。その結果、緑なしノズルにおいては、自励振動は主としてTamらが提唱する軸対称中立波に対応した振動周波数を持ち、またそのフィードバック波は噴流の内側を上流に伝播することが分かった。また、 L/D のある領域では噴流の外側を伝播するフィードバック波による自励振動も現れた。緑ありノズルでは噴流の外側からのフィードバックが強くなるため、緑なしノズルには見られなかった領域でも自励振動が現れた。 $M=0.8$ では、同一の L/D において噴流の内側からと外側からの2つのフィードバック機構が存在した。また、中立波の伝播形態は緑の有無によらず同一であった。

参考文献

- (1) Wagner, F. R., NASA Technical Translation, F-13,942, 1971.
- (2) Neuwerth, G., NASA Technical Translation, F-15,719, 1974.
- (3) Tam, C. K. W. & Ahuja, K. K., Journal of Fluid Mechanics, Vol.214, pp.67-87, 1990.
- (4) Ho, C. M. & Nosseir, N. S., Journal of Fluid Mechanics, Vol.105, pp.119-142, 1981.
- (5) Umeda, Y., Maeda, H. & Ishii, R., Physics of Fluids, Vol.30, No.8, pp.2380-2388, 1987.
- (6) Powell, A., Journal of Acoustical Society of America, Vol.83, No.2, pp.515-533, 1988.
- (7) 井上ほか4名, 機論(B編), 65巻631号, pp.948-954, 1999.
- (8) 井上ほか5名, 可視化情報, Vol.18, Supple., No.1, pp.169-172.

Fig. 10 Propagation of disturbances (nozzle with rim, $M = 0.8$, $L/D = 2.33$, $f = 22.8\text{kHz}$)

Fig. 11 Propagation of disturbances (nozzle with rim, $M = 0.8$, $L/D = 2.33$, $f = 16.3\text{kHz}$)