レーザ蛍光法による超音速矩形衝突噴流自励振動サイクルの可視化

(九州大学) 村石 隆、大野 和彦(院)〇、馬場隆太郎(院)、井上 雅弘、益田 光治、古川 雅人

Visualization of Self-Sustained Oscillation in an Impinging Supersonic Rectangular Jet by LIF

Takashi Muraishi Kazuhiko Ohno Ryuutarou Baba Masahiro Inoue Mituharu Masuda Masato Furukawa

Abstract: Feedback mechanism of self-sustained oscillation in supersonic 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. The discrete frequencies appeared near the neutral wave frequencies proposed by Tam and symmetric and asymmetric modes of the neutral wave were observed corresponding to his theory.

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

1. 序論

ノズルから高速で放出する噴流が、ノズル直径の数倍の距離に位置する平板に垂直に衝突すると、フィードバックループを伴う自励振動により衝突音(impingement tone)と呼ばれる離散周波数を持ったノイズが放射される[1-2]。

先に著者らは、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実験解析手法を用いて相互相関係数の位相変化により渦の挙動やフィードバック波の伝播経路を調査し、出口マッハ数 $M=1.31$ の高速円形衝突噴流における自励振動サイクル形成メカニズムを明らかにした[4]。そこで、本研究では同じ手法を用いて出口マッハ数 $M=1.51$ の超音速矩形衝突噴流における自励振動サイクル形成メカニズムの検討を行った。

2. 実験装置及び実験方法

本実験においてはFig.1に示すようなスロート幅6mm、出口幅 $H=8\text{mm}$ の矩形断面ラバルノズルを用いた。ノズル全域で奥行き幅は10mmとなっている。そのノズルを使用してノズル出口マッハ数 $M=1.51$ の適正膨張噴流を平板に垂直に放出させた。噴流を衝突させる平板は一辺120mm四方の正方形である。またノズルと平板の距離と L とし、 $L/H=1\sim10$ ($L=8\sim80\text{mm}$)の範囲で実験を行った。

実験装置は過去の研究[4]で用いたものと同じであり、吸い込み式風洞により発生させた超音速流れにヨウ素を混入し、アルゴンイオンレーザーを用いたLIF法により可視化している(本実験条件においては蛍光強度は流れ場の温度のみの関数となる[5])。

自励振動周波数測定は、衝突平板上において噴流の中心部から6.6mmの位置に設置した圧力センサにより行った。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、 $L=8\sim80\text{mm}$ ($L/H=1\sim10$)を0.25mm単位で調節し、 L/H の

微小変化ごとに平板上の圧力センサの信号を周波

Fig.1 Nozzle configuration

数解析した。

相互相関測定における測定部の詳細図をFig.2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軸をとった。XZ、YZの各断面に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、圧力センサ位置は噴流の中心部から40mm上方とした。

3. 実験結果及び考察

自励振動周波数測定結果をFig.3に示す。この図では、縦軸に周波数 $f[\text{kHz}]$ 、横軸は L/H をとった平面上にスペクトル密度(PSD)の等高線を階調スケールで示すことにより、卓越周波数の存在を示している。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で無次元化したストロハル数 $St=fH/U$ を記している。

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～平板間の距離 L の増加に伴い減少するが、自励振動

の起こりやすい周波数帯が存在するため、 L/H の増加に伴い周波数がその周波数帯の下端に達すると、擾乱の数が不意に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。Fig.3において13kHz、16kHz、23kHz付近において鋸歯状の周波数分布がみられるのはこのためである。周波数帯に限られる理由として、Tamら[3]は一様流れと仮定した噴流に微小擾乱を重ねた線形理論解析によって噴流内外に分散しにくい波数を持つ、噴流固有のニュートラル波が複数あることを示し、このニュートラル波が上流に伝播するフィードバックに関係するからであると述べている。先の著者らの研究[4]により、Tamらの理論解析は円形噴流においては非常に良い一致を見せており、自励振動周波数やそのメカニズムの予測に非常に有効であることが示されている。彼らの2次元噴流に対する理論計算によると、 $M=1.51$ における幅方向モード1非対称ニュートラル波の平均ストロハル数は0.16~0.27であり、これは13kHz付近の周波数帯を含む範囲である。また $M=1.29$ における幅方向モード2対称ニュートラル波の平均ストロハル数は0.42~0.49であり、23kHz付近の周波数帯と非常に近い値である。このことからこれら2つの周波数帯の自励振動はそれぞれのニュートラル波に対応していると考えられる。しかし、16kHz付近の周波数帯には、対応するストロハル数のニュートラル波が存在しなかった。このことから、この周波数帯の自励振動は他の2つの周波数帯の自励振動とは異なるメカニズムをもっていると考えられる。そこで、これらの周波数帯における自励振動サイクルを解明するため、Fig.3に矢印で示す3地点において擾乱の伝播形態を調べた。

Fig.4には、 $L/H=2.88$ 、 $f=12.4\text{kHz}$ における擾乱の伝播形態を観察す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、正の値のみを階調表示することで簡素化してある。

まずどの図においても、噴流中心軸に対して上下の剪断層を対流する渦が交互に現れており、渦構造が非対称であることが分かる。また(d)~(f)においてフィードバック波が見られるが、噴流外を遡る擾乱に加えて噴流内を同期して遡る擾乱が確認できる。しかし、主流が超音速であることや、円形超音速噴流においては噴流外の擾乱がフィードバックメカニズムの主な役割を担っていたことから、矩形噴流においても噴流外の擾乱によるフィードバックメカニズムが支配的であると考えられる。(f)~(h)においてフィードバック波によって $z=4\text{mm}$ の剪断層が刺激され、 $x=5\text{mm}$ 付近に渦が誘起されている(h)。一方、 $z=-4\text{mm}$ 付近の剪断層については(a)~(d)において刺激され、(d)の $x=5\text{mm}$ 付近に渦が

Fig.2 Detail of experimental setup for cross-correlation measurement

Fig.3 Self-sustaining oscillation frequency as a function of L/H

誘起される。以降同様の剪断層への刺激が交互に繰り返され、位相差を持った渦が下流に対流していく。下流へ対流した渦はそれぞれ平板に衝突し、ウォールジェット成分へ推移する。その後、フィードバック波が発生し、ノズル出口へと伝播していく。

このように、フィードバック波は噴流中心軸に対して交互に現れており、非対称性を有していることが分かった。

次に $L/H=2.88$ 、 $f=19.0\text{kHz}$ における擾乱の伝播形態を動画で観察する(Fig.5)。(b)~(d)において、噴流の外側からノズル出口部分に向かう擾乱により剪断層が刺激を受けて渦が発生し、剪断層に沿って下流へと伝播していく。(e)では $x=7\text{mm}$ 、 $z=\pm 4\text{mm}$ の部分で相関値が高く、発生した渦は対称性を持っていると思われる。その渦は、噴流外を遡るフィードバック波と干渉した後(a)、噴流内を遡るフィードバック波と干渉し $x=7\text{mm}$ 付近の噴流内に相関の高い領域を形成する(b)。以降、渦は噴流内外を遡るフィードバック波と交互に干渉を繰り返しながら伝播を続け(b)~(d)、平板に衝突する(e)。そこでウォールジェット成分への推移を経た後、平板に沿って外側へと伝播していく過程((a)~(b))で、噴流外にフィードバック波

が発生している (c)。そのフィードバック波は下流へ対流する渦と干渉を続け、噴流外を上流へ伝播し続けることでノズル出口に達し((c)~(e)~(b))、剪断層を刺激することで新たな渦を誘発する((c)~)。また、(c)から12ms遅れた(d)において、 $x=15\text{mm}$ の噴流内部にフィードバック波が発生している。こちらは噴流内を伝播してノズル出口に達しても、剪断層を刺激して新たな渦を誘発することはないようである。

上述のようにフィードバック波は噴流内外に存在し、それらは位相差を持って交互に上流に向かって伝播していることが分かった。

Fig.6には、 $L/H=2.00$ 、 $f=24.1\text{kHz}$ における擾乱の伝播形態を示している。全ての図から、剪断層部を伝播する渦は噴流中心に対して対称であることが分かる。(a)~(b)にかけて剪断層付近の噴流内外に存在するフィードバック波がノズル出口に向かって伝播し、(c)において $z=\pm 4\text{mm}$ 付近に渦が発生する。渦は剪断層に沿って下流へと伝播していき (d)、やがて剪断層付近を遡ってきたフィードバック波と干渉する (e)。渦は更に伝播を続け (a)~(b)、再びフィードバック波と干渉した後、更に下流へと対流して、平板に衝突する((c))。フィードバック波は剪断層付近の噴流内外に同時に発生し、ノズル出口に向かって伝播する((d))。また(a)~(b)に注目すると、剪断層周辺を遡るフィードバック波に加えて、噴流中を位相差を持って上流へ遡るフィードバック波が確認できる。この擾

乱はノズル出口に達しても、剪断層を刺激して新たな渦を誘発することはないようである。

以上のことからフィードバック波は剪断層付近と噴流中心に存在し、それらは位相差を持って交互に上流に向かって伝播していることが分かった。また、この擾乱の挙動はFig.6に示したものと非常に近いものであった。

Fig.5とFig.6に示した擾乱の伝播形態は非常に近いものであった。これらの違いをYZ断面の相関マップを用いて検討した。Fig.7は $L/H=2.88 \cdot f=19.0\text{kHz}$ の自励振動と、 $L/H=2.00 \cdot f=24.1\text{kHz}$ の自励振動のある遅れ時間における平板付近のYZ断面相関マップである。これによると $L/H=2.88 \cdot f=19.0\text{kHz}$ の自励振動の方の相関マップではほぼ同心円状に高相関領域が分布しており、ウォールジェットはほぼ円形であることが分かった。一方、 $L/H=2.00 \cdot f=24.1\text{kHz}$ の自励振動においては $z=\pm 4\text{mm}$ 付近に高い相関領域が存在し、ウォールジェットは z 軸方向に強い二次元性を有していることが確認された。

以上のことから、対応するニュートラル波が存在しなかった $L/H=2.88 \cdot f=19.0\text{kHz}$ の自励振動は、矩形噴流でありながら軸対称性の強い振動モード有していることが分かった。

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、 $M=1.51$ の超音速矩形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、自

Fig.4 Propagation of disturbances ($L/H=2.88, f=12.4\text{kHz}$)

Fig.5 Propagation of disturbances ($L/H=2.88, f=19.0\text{kHz}$)

励振動はTamらの提唱するニュートラル波に対応した振動周波数を持つことが分かった。それらの自励振動メカニズムにおいて、フィードバック波は噴流外だけではなく噴流内にも存在し得るが、主に外側からのフィードバックの方が支配的であった。また、ニュートラル波に対応しなかった $f=19.0\text{kHz}$ の自励振動は、三次元性の強いフィードバックメカニズムを持つことが分かった。

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. & Norum. T. D., AIAA Journal, Vol.30, No.2 February 1992, pp.304-311
- [4] 井上ほか5名, 可視化情報, Vol.20, Supple., No.1, pp.487-490.
- [5] Inoue, et al., FED-Vol.218, Experimental and Numerical Flow Visualization, ASME, 1995.

Fig.6 Propagation of disturbances ($L/H=2.00, f=24.1\text{kHz}$)

Fig.7 Comparison of wall jet (yz-plane)