A212 超音速ノズルにおける衝撃波の振動の微細機構の可視化

九大総理工 半田太郎[○], 益田光治, 河野隆修, 松尾一泰

Visualization of Fine Structure on Shock Oscillation in Supersonic Nozzle

Taro HANDA*, Mitsuharu MASUDA*,
Takanobu KAWANO* and Kazuyasu MATSUO*

To investigate shock oscillation mechanism in supersonic nozzle, high speed CCD camera is used with schlieren system. Power spectral density distributions of shock displacement and cross-correlation between shock displacement and light intensities at various points are obtained. As a result, it is clarified that shock oscillation mechanism consists of downstream moving large scale turbulent structure generated due to shock motion and disturbance propagating upstream in core flow region.

1. 序論

超音速ノズルや超音速ディフューザ, あるいはジェットエンジン空気取入れ口などの内部に発生する衝撃波は壁面に沿って発達する境界層と干渉する。その結果, 衝撃波の上流が時間的に変動しない定常流れであっても, 衝撃波はその定在位置の前後に振動し干渉領域およびその下流は時間的に変動する。このような衝撃波と境界層の干渉によって誘起される流れの振動については, 例えば, 超音速ディフューザ¹⁾, 超音速空気取入れ口²⁾などの内部流れや, 翼まわりや圧縮コーナ³⁾を過ぎる外部流れ, あるいは断面積一定の直管内に生じる擬似衝撃波⁴⁾などに関して, これまで多くの研究がなされてきた。

これらの研究により, 例えば外部流れにおける衝撃波のピーク周波数は数kHzの高周波数であるのに対し, 内部流れでは数百Hz程度の低周波数であることなどが明らかにされている。しかるに, 振動の原因については, 上流境界層におけるバースティング現象や上流境界層内部の乱れ, 衝撃波との干渉によって生じる境界層の

Fig.1 Experimental setup

* Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., Kasuga City 816.

はく離域内部の圧力変動やはく離域自体の大きさの変動,あるいは,はく離域からの渦の放出など,いろいろと推測されているが,現象が極めて複雑なため,十分な解明にはほど遠いのが現状である。

本研究はシュリーレン法により高速度カメラを用いて流れ場の振動の様子を連続的に撮像し,超音速ノズル内に発生する衝撃波の振動機構の解明を試みた。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の模式図をFig.1に示す。貯気槽に貯えられた高圧の乾燥空気はラバルノズルで超音速に加速され,後部集合洞を経て大気に放出される。ノズル入口からスロートまでおよびスロートからノズル出口までの長さはそれぞれ,80mmと175mmである。ノズルスロート高さおよび奥行き方向の長さはそれぞれ,10mmと32mmである。後部集合洞内の背圧 p_b は大気圧に近く,上流プレナム室内の圧力を p_0 とすると,実験は $p_0/p_b=1.30$ で行った。Fig.1の一点鎖線で囲まれた部分は光学ガラスとなっており,シュリーレン法による光学観察が可能となっている。得られるシュリーレン画像は高速度CCDカメラ(ナック社, KodakHS4540)により毎秒18000コマで連続的に撮像され,パーソナルコンピュータに取り込まれる。なお,撮像された画像の枚数は1024枚である。

3. 実験結果と考察

本実験で得られた連続シュリーレン画像をFig.2に示す。壁面静圧測定によって得られた衝撃波直前マッハ数は1.47であった。Fig.2において,衝撃波下流において大規模な構造を有する乱れ(上向き矢印)が下流に移動しているのが確認される。この乱れは衝撃波が振動することによって,生じたものと考えられる。この大規模な乱れが出現する周期は約0.91msecであった。また,衝撃波下流の比較的乱れの少ない主流領域に下流から上流に向かって擾乱(下向き矢印)が伝ばしているのが確認される。

衝撃波の振動,下流に移動する乱れおよび上流に伝ばする擾乱の様子を調べるため,高速度CCDカメラで得られたノズル中心軸上の画像の履歴をFig.3に示す。図の横軸はスロートからの距離,縦軸は時間を表す。 $x=30\text{mm}$ より下流の領域ではさまざまなスケールの構造を有する乱れが下流に向かって移動している様子が示されている。また, $x=$

Fig.2 Series of schlieren images, time step between two images is 0.0555ms($p_0/p_b=1.30$)

30mmより上流の領域では、擾乱が下流から上流に向かって伝ばし、この擾乱が衝撃波の振動に影響していると考えられる。Fig.3において上向き矢印で示すように光の強度が極小になる位置が存在するが、本研究ではこの位置を衝撃波の位置とした。衝撃波の振動のパワースペクトル密度関数をFig.4に示す。約1.1kHzのところに強いピークが存在しており、この周波数で流れが自励振動をしている。

つぎに、約1.1kHzの衝撃波の振動と上流に伝ばする擾乱や下流に移動する乱れとの相互関係を調べるため、衝撃波の変位とノズル中心軸上の各点の光の強度の相互相関関数を計算した。その結果をFig.5に示す。図の横軸はスロートからの距離、縦軸は遅れ時間であり、図中の濃淡は相互相関の大きさを表している。なお、相互相関関数を求める際に低周波成分のみの相関を求めるため、2.0kHz以上の周波数成分はローパスフィルターにより削除した。 $x=24\text{mm}$ より上流では相関の強い領域が矢印で示すように負の傾きを有して周期的に分布している。この周期は約0.91msecで周波数にすると約1.1kHzに相当し、この周波数の擾乱が下流から上流に向かって伝ばしていることを示している。擾乱の伝ば速度は約83m/sであった。また、 $x=24\text{mm}$ より下流では矢印で示すように相関の強い領域が正の傾きを有して周期的に存在している。この周波数は上流へ伝ばする擾乱と同様に約1.1kHzであり、この周波数のスケールの乱れが下流に移動している

ことを示している。この乱れが輸送される速度は約130m/sであり、上流のよどみ圧およびよどみ点温度、ならびに上述した衝撃波直前マッハ数から一次元理論を用いて計算した衝撃波直後の流速の0.55倍であった。

以上の実験結果から考察すると、衝撃波下流の領域では衝撃波の変位によって発生したスケールの大きい乱れが何らかの形で擾乱を発生させ、それが主流中を上流に向かって伝ばして新たに衝撃波を変位させると考えられる。Bogar¹⁾

Fig.3 History of line schlieren image

Fig.4 PSD distributions of shock displacement

らは擾乱の発生源を壁面から発達した境界層が合流する点(Bogarらは"merging point"と呼んでいる)と推測している. 本研究ではこの擾乱の発生源を明らかにすることはできなかったが, これまで実験的に確認されたことのなかった主流中を上流へ向かって伝ばする擾乱の存在とこの擾乱が衝撃波の振動に影響を与えていることを明らかにすることができた.

4. 結論

衝撃波の振動機構を解明するためシュリーレン法により, 超音速ノズル内の流れ場を高速CCDカメラで連続的に撮像した. その結果, 衝撃波の支配的な周波数成分の振動機構は衝撃波の変位によって生じるスケールの大きい乱れと主流中を上流に向かって伝ばする擾乱からなることが明らかになった.

Fig.5 Contour map of space-time correlation between shock displacement and light intensity

参考文献

- (1) Bogar, T.J., ほか2名, AIAA J., 21-9(1983), 1232.
- (2) Sajben, M., ほか2名, J. Propuls. Power, 1-2(1985), 109.
- (3) Andreopoulos, J. and Muck, K.C., J.Fluid Mech., 180(1987), 405.
- (4) 松尾・ほか3名, 機論, 57-541, B(1991), 3083.