225 抽気を有する超音速キャビティ流れと 斜め衝撃波の干渉

佐賀大 松尾繁[○], ツォイツィウス ミハエル, 瀬戸口俊明,
田中和彦, 金子賢二

Interaction between Oblique Shock Wave and Supersonic Cavity Flow with Mass Bleed

Shigeru MATSUO*, Michael ZEUTZIUS*, Toshiaki SETOGUCHI*,
Kazuhiko TANAKA* and Kenji KANEKO*

In recent years, research and development activities for next generation supersonic transport are being carried out actively by the world aeronautical communities. In a supersonic intake, a cavity plays an important role in the control of shock waves. The supersonic intake flow tends to be unstable due to the interaction of shear layer in the cavity with oblique shock waves generated by ramp and cowl on the forebody. In the present study, the effects of cavity/oblique shock wave interaction and bleeding on the pressure oscillation in the cavity were investigated experimentally by a schlieren optical method and pressure measurements in the case of the flow Mach number 1.74 at the cavity entrance.

1. はじめに

次世代超音速・極超音速輸送機の実現の重要な鍵は、エアブリージングエンジンの開発である。その構成要素であるインテークは、すべての作動条件で空気を効率的にエンジンへ供給する役割があり、衝撃波の安定化や圧力回復性能の改善をはかるためにスロート部にキャビティを設けて抽気する場合がある⁽¹⁾。この場合、機体前部のランプとカウルで発生する二つの斜め衝撃波やインテーク内部で生ずる衝撃波は、境界層やキャビティ上部に存在するせん断層と干渉し、圧力回復性能等に影響を及ぼすことが考えられる⁽²⁾。

本研究は、超音速流中に取り付けたキャビティ内の流れの振動特性を明らかにすることを目的とする。本論文では、キャビティ入口マッハ数を約 1.74 の一定とし、まずキャビティ前縁角部より生ずるせん断層と斜め衝撃波が干渉する場合の圧力変動を実験的に明らかにし、ウエーブレット変換⁽⁴⁾により、キャビティ内部を伝播する波の特性を調べた。さらに、キャビティ底部からの抽気がキャビティ内の振動へ与える影響について調べた。

2. 実験装置と方法

本研究で使用した超音速風洞と計測方法は、文献(3)と同じである。図1で示すキャビティ長さ L とキャビティの高さ D の比 L/D は1と1.5である。キャビティ前縁角部より生ずるせん断層と斜め衝撃波との干渉による振動への影響を調べるために、図中に示す形状のくさびを上壁に設置した。 X_i と α は、それぞれくさびから発生した斜め衝撃波のせん断層への入射位置(原点:キャビティ角部)とキャビティ前縁角部近傍に存在する衝撃波

* Faculty of Science and Engineering, Saga University, 1, Honjo, Saga-shi, Saga, 840, Japan.

の傾き角を示している。また、干渉による振動現象に及ぼす抽気の効果を明らかにするために、キャビティ底部に抽気孔を設け、これを測定部の近くに設置した真空タンクと直結した。なお、主流と抽気の質量流量比 ϕ は約 0.008~0.13 である。

3. 実験結果と考察

3.1 流れの可視化

図2は、 $L=20$ mmの場合に、斜め衝撃波のせん断層への入射位置(X_i)の変化が流れ場に及ぼす影響を示すシュリーレン写真である。図より、斜め衝撃波とせん断層との干渉により膨張波が生じ、その影響でせん断層は主流側へ向くのが観察される。

図3は、衝撃波の入射位置 X_i が10 mmで、キャビティ底部から抽気がある場合のシュリーレン写真である。図より、抽気量(ϕ)の増加とともに衝撃波角 α は僅かであるが減少することがわかる。これは、抽気により主流の質量流量の一部がキャビティに吸い込まれ、キャビティ内圧力が低下することによるものと考えられる。なお、 $L=30$ mmの場合においても図2、3とほぼ同様な結果が得られた。

3.2 斜め衝撃波が振動に及ぼす影響

図4は、 L が20 mmで斜め衝撃波の入射がない場合とキャビティ入り口角部から $X_i = 0, 10, 20$ mmの位置に斜め衝撃波が入射する場合に、センサーS1で測定した圧力の時間変動である。横軸は風洞の持続時間内の任意の範囲を、縦軸は絶対圧力 p を示している。図よりせん断層の成長開始点近傍に斜め衝撃波が入射する場合、すなわち $X_i = 0$ mmの場合には、図4(a)と比較して圧力変動の振幅が大きくなっているのがわかる。せん断層の成長開始点近傍に斜め衝撃波を入射させることは強い乱れを加えることを意味し、これにより振幅が大きくなるものと考えられる。 $X_i = 20$ mmの後縁角部に斜め衝撃波が入射する場合には、 $X_i = 0, 10$ mmの場合と比べて振幅は小さくなっ

Fig.1 Details of test section

Fig. 3 Schlieren photographs ($X_i = 10$ mm, $L = 20$ mm)

Fig. 2 Schlieren photographs ($\phi = 0, L = 20$ mm)

ているが、これは斜め衝撃波が後縁角部で生ずる衝撃波と干渉し、直接せん断層に影響を及ぼさないためと考えられる。

図5は、図4の圧力波形を基にして得られたパワースペクトル分布を示している。横軸は周波数 f を、縦軸はパワースペクトル S である。図5(a)の干渉がない場合は、約7kHzと21kHz付近にピークが観察される。約7kHzの周波数は、キャビティ長さ $2L$ を音波が伝ばすると仮定した場合に得られる周波数とほぼ一致しており、さらに約21kHzの周波数はキャビティ前縁からの渦放出によるものと思われる。一方、 $X_i = 0$ mmの場合には、くさびからの入射衝撃波とキャビティ前縁角部から発生する衝撃波の干渉に起因すると思われる振動が、約20kHz付近に観察される。しかし、 $X_i = 10$ mm以上ではそれは観察されない。これは、斜め衝撃波とせん断層の干渉の効果のために、キャビティ前縁からの渦放出による振動現象が抑制されるためであると思われる。なお、 $L = 30$ mmの場合においても図4、5とほぼ同様な傾向が得られた。

図6(a)、(b)は、それぞれ図2(a)、(b)に対応する場合の連続ウェーブレット変換（マザーウェーブレット：Morletのウェーブレット）より得られたウェーブレット係数（ W ）の値を色の明暗で示した図である。図中において色が濃い箇所が、 W の値が大きいことを表している。なお、縦軸はスケールパラ

Fig. 4 Pressure time histories
($\phi = 0$, $L = 20$ mm)

Fig. 5 Power spectrum density distributions
($\phi = 0$, $L = 20$ mm)

(a) No wedge, $L = 20$ mm

(b) $X_i = 10$ mm, $L = 20$ mm

Fig. 6 Wavelet transform of pressure oscillation

メータ a を、横軸は経過時間 b を示す。また、 $\Delta t (=0.02 \text{ msec})$ は、圧力変動の離散化の時間間隔である。両図より、 W が大きい値は同じスケールの位置においてのみ生じるのではなく、点線で示すように時間の経過とともに小さなスケールから大きなスケールへと連続的に変化しているのがわかる（もしくは、大きなスケールから小さなスケールへの変化）。また、衝撃波との干渉により W は大きな値を示しているのがわかる（図 6 (b)）。これらの結果は、 $L=30 \text{ mm}$ 、および X_i が 10, 20 mm の場合においてもほぼ同様な傾向が得られた。

3.3 キャビティ抽気が振動に及ぼす影響

図 7 は、 L が 20 mm の場合で、キャビティ底部より抽気がある場合の圧力の時間変化を示している。なお、計測はキャビティ前縁から 10 mm、深さ 20 mm の位置の側壁で行った。抽気行くと、図 4 (c) と比べると振動の振幅は小さくなるのがわかる。

図 8 は、 L が 20 mm の場合のスペクトル分布図を示している。図 8 (a) の抽気量が小さい場合には、図 5 (c) と同様な高周波成分（約 18 kHz）が存在しているが、抽気量が大きくなるとともに高周波成分は小さくなり低周波成分が増加しているのがわかる。なお、図は示していないが、 $L=30 \text{ mm}$ の場合においても図 7、8 とほぼ同様な傾向が得られた。これらより、抽気は振動の振幅および高周波成分の低減に効果的であることがわかる。

4. まとめ

超音速キャビティ流れと斜め衝撃波の干渉がキャビティ内の振動現象に及ぼす効果を、キャビティ底部からの抽気の有無に対して実験的に調べた。その結果、せん断層に衝撃波を干渉させると、その入射位置によって圧力変動の振幅は大きく変化し、特にせん断層の成長開始点近傍に斜め衝撃波が入射する場合には圧力変動に大きな変化が見られた。また、キャビティ底部からの抽気は、高周波成分及び振動の振幅低減に効果があることを示した。さらに、ウェーブレット解析の結果から、キャビティ内部にはスケールの大きい波と小さい波が連続的に伝播していることが明らかになった。

参考文献

- (1) Seddon, J. and Goldsmith, E. L., Intake Aerodynamics, (1985), AIAA education series.
- (2) 村上・ほか6名、第28回飛行機シンポジウム、(1990)、480.
- (3) 松尾・ほか4名、可視化情報、15-Suppl.-1 (1995)、197.
- (4) Farge, M., Ann. Rev. Fluid Mech., 24(1992), 357.

Fig. 7 Pressure time histories
($X_i = 10 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$)

Fig. 8 Power spectrum density
distributions
($X_i = 10 \text{ mm}$, $L = 20 \text{ mm}$)