

段付き HS チューブ内波動現象および熱効果*

(第3報, 振動モードと熱効果との関係)

川橋正昭**, 老孝明***, 鈴木 允**

Wave Motions and Thermal Effects in Stepped HS Tube

(3rd Report, Relations between Oscillation Modes and Thermal Effects)

by Masaaki KAWAHASHI, Yoshiaki OHI, and Makoto SUZUKI

Typical thermal effects produced by the Hartmann-Sprenger (HS) tube are rapid heating of the gas near the closed end of the tube and large amplitude periodical fluctuation of the gas temperature in steady state. In the higher modes of the oscillation in the HS tube having a sudden area contraction (stepped tube), experimental results on the wall temperature distributions along the tube axis suggest amplification of the heating effect and trapping hot gas into the downstream cavity of the step. The calculated results of flow configurations in two-dimensional model of the stepped HS tube by FLIC method support the experimental results.

Key Words: Compressible Flow, Unsteady Flow, Fluid Vibration, Thermal Engineering Equipment, Numerical Analysis.

1. ま え が き

Hartmann-Sprenger (HS)チューブが示す熱効果の特徴は、チューブ閉端部付近での急激な気体温度の初期上昇、および最終到達状態での周期的な大振幅気体温度変動にある⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、このような現象の物理化学的な応用を考える場合、チューブ内高温気体(内在気体)と、流入してくる低温気体(外部噴流)との接触面における混合による、熱効果の抑制が問題になる⁽³⁾。直管状のチューブを用いた場合、接触面は全長の60~70%の位置にまで到達するため⁽⁴⁾、接触面をはさんでの混合拡散の影響は、ほぼチューブ閉端にまでおよぶ。しかし、チューブ軸方向の適当な位置に断面積不連続縮小部を有する段付きチューブを用いると、チューブ内気体の振動モードが変化して、音響的な高次の波動モードに相当する振動状態が得られ⁽⁵⁾、このようなモードのもとでは、接触面での混合拡散の影響が変化して、高温気体を段部下流側に封じ込められる可能性がある。

本報では、チューブ形状と振動モードとの関係、および各モードでの壁温度分布の実測値と、各振動モードにおけるチューブ内流動状態の二次元的数値解析結果との比較検討を行う。その結果より、チューブ内気体の振動モードと、熱効果との関係について調べる。

2. 実 験 結 果

図1に、本実験で用いた段付き HS チューブの概略図が示されている。チューブ内気体は、超音速ノズル⁽⁶⁾より流出する適正膨張に近い超音速噴流によって励振される。

チューブ形状は、段部上流側内径 D_1 が 6 mm、長さ L_1 が 60 mm で、下流側内径 D_2 が 3 mm、長さ L_2 が 0~350 mm の可変長のもの、数種類の固定長のものであり、壁厚さは 0.5 mm である。またチューブ

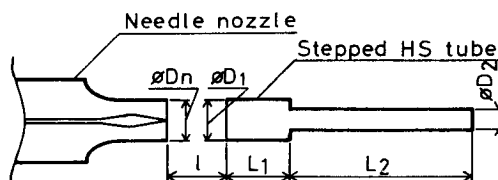


図1 段付き HS チューブ概略図

* 昭和59年8月29日 第927回講演会において講演、原稿受付 昭和59年2月27日。

** 正員、埼玉大学工学部 (〒338 浦和市下大久保255)。

*** 学生員、埼玉大学大学院。

材質はステンレススチールである。このようなチューブを用いて、 L_2 を変化させたときの、チューブ内気体振動周波数 f 、チューブ閉端内壁温度、および外壁温度 T_w の軸方向分布を測定する。振動周波数は、開口端より放射される音の基本周波数により定め、壁温度は、線径 0.15 mm のクロメル・アルメル熱電対により検出する。また段部上流側でチューブ内変動圧力を測定し、解析結果との比較を行う。この測定される変動圧力履歴は、ノズル・チューブ間流れの可視化を行う場合の、タイミング信号としても用いられる。

本実験で用いたニードルノズルは、設計噴流マッハ数 M_j が 1.4 および 1.6 であるが、シュリーレン法による自由噴流の可視化の結果、適正膨張となるマッハ数はやや低めであった。以下に実験結果について述べる。

はじめに、段部下流側長さが可変長であるチューブを用いたときの、 L_2 の変化による振動周波数実測値を、後述する数値解析による結果とともに、図 2 に示す。周波数実測値は、段部上流側長さを 1/4 波長とする周波数の、70~90% の値の範囲で変化し、 $L_2/L_1 \approx 2$ 、および 5 付近で不連続的に変化する。この周波数実測値を、チューブ全長 $L_1 + L_2$ を 1/4 波長とする周波数 f_0 で無次元化すれば、図 2 に示すように、振動モードの変化が明確になる。なお図 2 中の実線は、同一形状段付き管内の、音響的固有周波数を、線形音響理論によりもとめた値を示す⁽⁶⁾。段付き HS チューブ内気体の振動周波数は、ほぼ線形理論による計算値に近いが、高次モードになるほど、差が大きくなる。

つぎに、各振動モードについて、可変長チューブの

閉端内壁温度が最高となるチューブ形状 L_2/L_1 を定め、同一形状の固定長チューブについて、外壁表面温度の軸方向分布を測定する。その結果が、断面一定のチューブについての結果とともに、図 3 に示されている。なお壁温度は、ノズル入口圧力 p_{in} と外気圧 p_{∞} より定まる、断熱温度落差 ΔT_{ad} を用いた無次元化温度 $\beta_w = 1 + (T_w - T_{in}) / \Delta T_{ad}$ で示されている。また横軸 X は、チューブ軸方向位置 x を、チューブ全長で無次元化した値である。一次のモードでは、壁温度分布は、断面一定のチューブと同様の傾向を示しているが、全長にわたって温度が著しく上昇しており、段付きチューブにおける熱効果助長作用を示している。一方高次のモードでは、温度分布の形状が著しく変化し、段部下流側で、ほぼ一様な高温状態となる。

3. 計算結果

前報⁽⁷⁾において、段付き HS チューブ内流れでは、段部付近で複雑な流動状態となるため、二次元的解析が必要であることを示した。そこで本報においても、ひきつづき FLIC 法を適用した、二次元解析を行う。また本報では、特にチューブ内の、エントロピ分布に着目し、高エントロピ気体であるチューブ内在気体と、低エントロピ気体である励振噴流との、混合の様子を調べ、さらに本計算に導入される、人工粘性項による見かけ上のエントロピ生成、およびその蓄積効果から、高次モードにおける特異な熱効果現象を検討する。なお本計算では、実験に用いた超音速ニードルノ

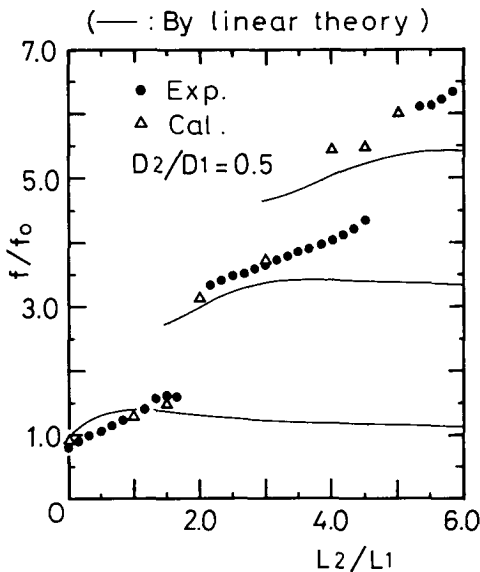


図 2 段付き HS チューブ内気体の振動周波数

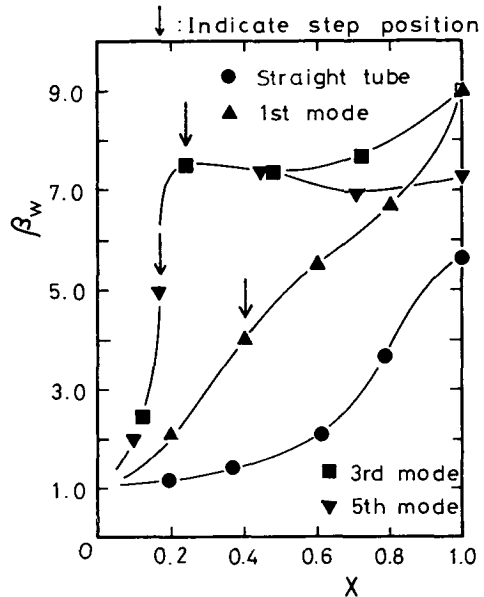


図 3 各振動モードにおける壁温度分布

ズルからの噴流による励振条件に合わせて、境界条件を設定し、 $M_j=1.2\sim 2.0$ について計算する。

計算で得られた、段付き HS チューブ内の基本的波動特性は、 M_j によらないが、 M_j の増加とともに、高次モードで不安定になる場合がある。

$M_j=1.4$ の、 L_2/L_1 による振動周波数変化の計算結果が、図2中に△印で示されている。これらの値は、ほぼ実測値と一致しているが、三次から五次のモードへの変化部で、やや異なっている。図4には、チューブ閉端での圧力変動、および平均圧力が示されている。なお縦軸は無次元化圧力 $P=p/p_m$ である。平均圧力の値は、モードによらず、ほぼノズル入口圧力に等しいが、変動圧力振幅は、振動モードおよび L_2/L_1 の値によって異なる。各モードにおいて、最大圧力振幅が得られる形状は、実験において、閉端壁温度が最高となる形状とほぼ一致する。図4に示されている変動圧力振幅、および平均圧力と、閉端壁温度実測値より、閉端付近での、気体の温度変動振幅を、予測することができる⁽²⁾。

つぎに、各モードで、最適な形状の、段付きチューブ内中心軸上エントロピ分布を、図5に示す。図中の実線は、外部気体(励振噴流)が、チューブ内に、もっとも深く入り込んだ状態であり、破線は、外部気体が、排出された状態を示している。一次のモードでは、閉端部を除いて、内在気体のエントロピ値は、初期値に等しく、エントロピ蓄積効果は顕著ではない。一方、高次のモードでは、段部下流側でエントロピが増加し、特に五次のモードでは、段部下流側でのエントロ

ピ増が著しい。なお、図5の縦軸は、ノズル入口状態を零としたときのエントロピの、無次元量 $S=s/R$ を示す。図6に、チューブ内の等エントロピ線図を示す。図中の各モードについての、(a)および(c)は、それぞれ図5中の実線および破線の状態に相当し、(b)はその中間の状態である。一次のモードでは、流出時に、段部下流側より、高エントロピ気体が噴流状に流出し、中心軸付近にトラップされて、チューブ外に流出している。一方、高次のモードでは、段部で流速変動の節に近い状態となるため、高エントロピ気体の流出は減少する。しかし、段部は完全な流速変動の節にはならないため、高エントロピ気体は一部流出する。その影響で、三次モードでの段部下流側、および五次モードでの段部から、下流側中央部までの領域で、エントロピこう配をもつ。しかし、五次モードでは、下流

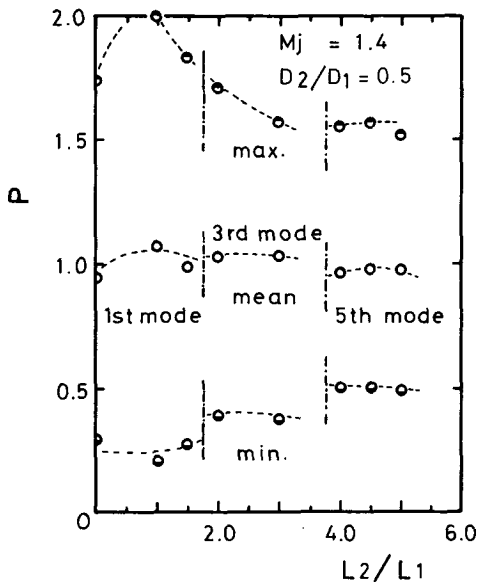


図4 チューブ閉端圧力の極大値、平均値、極小値

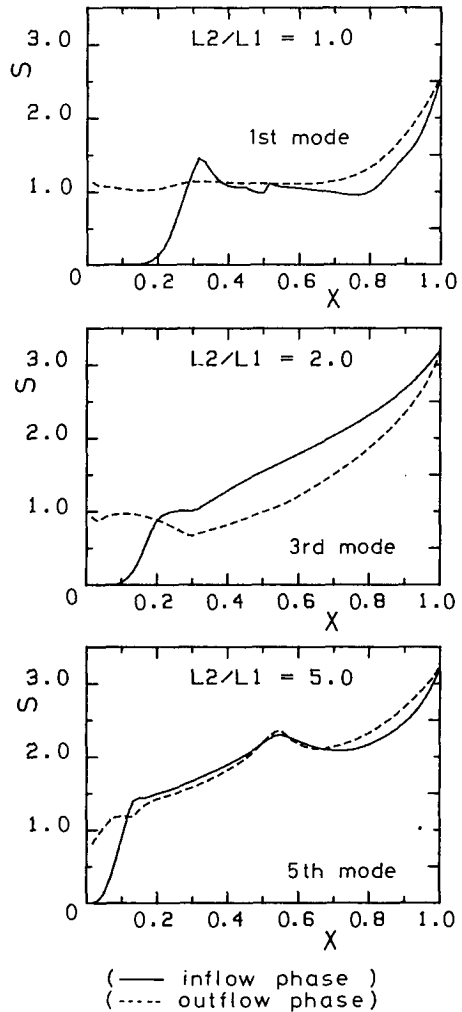


図5 各モードでの中心軸上エントロピ分布

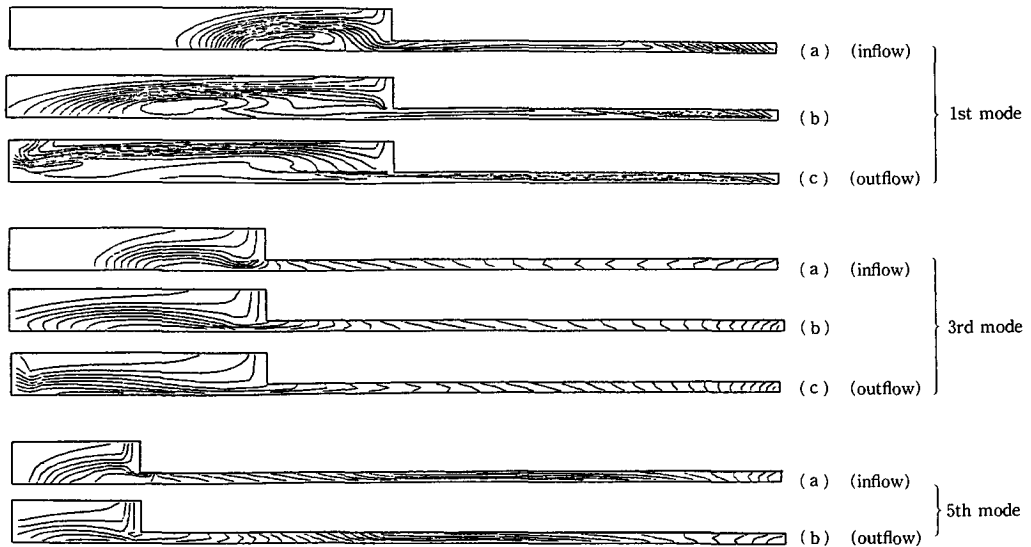


図6 各モードでのチューブ内等エントロピ線図

側中央部から閉端部までの領域で、高エントロピ気体が封じ込められ、エントロピの蓄積効果により、一様な高エントロピ状態となる。

以上の結果から、段付き HS チューブの熱効果では、その抑制要因となる。高エントロピ気体と低エントロピ気体の混合は、段部の対流による影響が支配的である。したがって、段部が流速変動の節の状態に近くなる高次の振動モードでは、混合による熱損失を減少させることが可能であると思われる。しかし、五次モードでは、 M_2 の増加とともに、振動状態が不安定になる問題点がある。五次モードの波動状態を、等圧線図により図7に示す。縦軸は、無次元時間 $\tau = t \cdot a_m / L$ である。このような高次の波動現象が安定である条件は、入射衝撃波の段部反射波と、閉端反射衝撃波が、段部で重なることである。しかし段部下流側では衝撃波伝ば速度が、温度上昇とともに変化するため、二つの衝撃波が重なるタイミングがずれてくる。このずれの、振動周期に対する割合は、振動モードの次数が高いほど大きくなり、振動を不安定にする要因となる。

4. あとがき

段付き HS チューブ内気体の振動モードと、熱効果の関係性を調べた結果、一次モードにおける、チューブ閉端壁温度の、著しい上昇効果、および五次モードにおける高温気体封じ込め効果が、明らかになった。しかし、後者では、安定な振動モードを得るための、幾何形状許容範囲がせまく、今後の問題である。

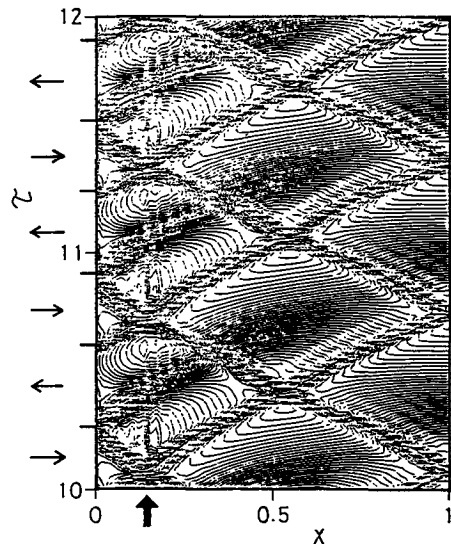


図7 五次モードの等圧線図

文 献

- (1) Marchese, V. P., ほか2名, *J. Spacecr.*, 10-11 (1973), 731.
- (2) 川橋・鈴木, 機論, 44-385(昭53), 3100.
- (3) Brocher, E. and Maresca, C., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 16 (1973), 529.
- (4) 川橋・ほか3名, 機論, 40-332(昭49), 965.
- (5) Kawahashi, M., ほか2名, *J. Acoust. Soc. Am.*, 75-3 (1984), 780.
- (6) Brocher, E., *Proc. 12th Int. Symp. Shock Tubes Waves*, (1980), 161.
- (7) 川橋・ほか2名, 機論, 49-442, B(昭58), 1224.