

円管内旋回流場での温度分離効果に与える音響現象の影響*

(第1報, 実験)

鈴木 允**, 川橋正昭**, 吉沢敦朋***

Effects of Whistling on Temperature Separation in a Swirling Flow-Field (1st Report: Experiments)

by Makoto SUZUKI, Masaaki KAWAHASHI, and Atsutomo YOSHIZAWA

The total temperature separation of gas is produced by a swirling flow-field in a circular tube. This device is called the vortex-tube or the Ranque-Hilsch tube. When whistling is produced within the swirling flow in the vortex-tube, the tangential velocity distribution in the radial direction is deformed toward the forced vortex type in the whole region. This is caused by the acoustic streaming induced by the whistling. The whistling in the vortex-tube of a counter-flow type is produced by the area contraction having a rectifier effect on the hot-gas flow near the tube wall. As a result, the efficiency of temperature separation by the vortex-tube improves. However, the complex flow configuration induced by the contraction also affects the temperature separation.

Key Words: Swirling Flow, Vortex-tube, Whistling, Acoustic Streaming, Temperature Separation

1. 緒 言

円管内に、円周上接線方向に開けられたノズルより高速気流を流入して旋回流場を形成すると、半径方向に全温度分離現象を生じる。この効果を積極的に利用した装置は、ボルテックスチューブ（あるいは、Ranque-Hilsch チューブ）と呼ばれている。

この全温度分離現象については、装置の形態、作動条件、幾何形状などが分離効率に与える影響についての実験的研究や^{(1)~(3)}、実測された流速、圧力および静温度分布などに基づく理論解析^{(4)~(5)}がある。同時に、実用化を目的として温度分離（特に、冷却）効率の向上をもたらすさまざまな工夫がなされてきており、外壁冷却や内部への整流子、振動子などの挿入による冷却効率の向上例が報告されている^{(6)~(8)}。しかし、旋回流場での温度分離効果の基本的メカニズムについて、十分な説明がなされていなかったため、理論的うらづけのある方法は示されなかった。

最近になって、ガスタービン内の旋回流不安定現象

がもたらす異常振動現象に伴って生じる熱的現象と、ボルテックスチューブによる温度分離効果との関連が調べられ、この現象の基本的メカニズムが論じられた^{(9)~(10)}。その中で、管内定常旋回流場での周期的じょう乱（ら旋状波）によって誘起される音響流が、旋回流周速度成分の半径方向分布をランキンウズ状から強制ウズ状に変え、その結果温度分離現象が生じることを示し、この周速度の強制ウズ分布が、ボルテックスチューブ内での温度分離効果に直接関係するとしている。同時に、実験的に周期的じょう乱を減衰させることにより、急激な分離効果の低下が起こることを示している。しかし、この実験は単流形ボルテックスチューブについて調べられており、反転流形チューブでの通常の作動条件において、付加される音響流の効果が温度分離現象にどのように影響するかは、調べられていない。

一方、上記の旋回流中に生じる周期的じょう乱は、ボルテックスホイッスリングとして知られており、音の発生現象として解析が進められてきたが^{(4)~(11)}、温度分離との関連についての研究は少ない⁽¹²⁾。

本研究では、反転流形ボルテックスチューブ内に安定なホイッスリングを積極的に発生させることを試み、全温度分離効果に及ぼす影響について調べた。そ

* 昭和60年8月28日 第933回講演会において講演、原稿受付 昭和60年2月18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。

の結果、管内壁付近の軸方向流に対して整流作用をもつ絞りを挿入することにより、従来から得られている $\xi=1$ の場合に限らず広い範囲の分配率のもとで安定なホイッスリングが得られること、および特定の絞り部位置でホイッスリングが不安定になること、などが明らかになった。さらに、ホイッスリング発生時における、周速度半径方向分布の変化、温度分離効率の著しい向上などが確認された。

2. 主な記号

- D: ボルテックスチューブ内径 mm
- d: 絞りの径 mm
- D_c : 冷氣オリフィス径 mm
- L: チューブ長さ mm
- l: 絞り部長さ mm
- p: 圧力 kPa
- r: 半径方向座標
- T: 温度 K
- v: 周方向速度 m
- z: 軸方向座標
- ξ : 冷氣分配率 (= 冷氣流量/全流量)

添字

- 0: ノズル前
- c: 冷氣
- h: 暖気
- s: 絞り

3. 実験装置

本実験では、温度分離に適しているとされている反転流形ボルテックスチューブを基本装置とする。実験装置の概略が図1に示されている。圧縮機で圧縮された空気は、貯気槽、フィルタ類、ヒータ、流量計、流量調整バルブなどを経て、図1(a)に示す円周上接線方

向に開けられたノズルよりチューブ内に流入し、高速旋回流場が形成される。その結果管内の半径方向に全温度分離を生じ、内壁付近の暖気は暖気バルブより流出し、中心付近の冷氣は冷氣オリフィスより流出する。冷氣分配率 ξ (以後、単に分配率)は、暖気側バルブの開閉によって調整される。本実験では、分離効率がほぼ最大となる $\xi=0.5$ 付近を中心に現象を調べる。ボルテックスチューブの幾何形状は、従来より著者らによって調べられてきた最適形状、 $L/D=12$ ($D=27.6$ mm)、 $D_c=12$ mm を基準とし、さらに長さの影響を調べるために $L/D=6$ のチューブを用いる。またノズルは、旋回流の軸対称性を保つために円周上6箇所設けられており、その出口径 D_n は3 mmである。

ホイッスリングを起こす素子としては、Vonnegut や Suzuki によるボルテックスホイッスル⁽¹⁾⁽⁴⁾にみられるように、管断面の縮小部(絞り)を用いる。その形状は、図1(c)に示すような、単純な絞り(絞りA)と外周部に整流部を有するもの(絞りB)とし、絞り部長さ、内径比などによる現象の変化を調べる。

冷氣および暖気温度は、冷氣オリフィスおよび暖気バルブの下流側に挿入される整流子後方で、銅・コンスタンタン熱電対により測定され、さらにその後方でそれぞれの流量がオリフィス流量計によって測定される。ホイッスリングによる管内圧力変動は、管側壁に設けられた測定孔において半導体圧力変換器で検出され、信号分析器によりその周波数およびレベルがもとめられる。また管内旋回流場の速度プロファイルは、軸方向および周方向速度成分について、単孔円筒形ピトー管による風向角および総圧、静圧の測定、L形熱電対による総温度の測定によってもとめられる。さらに半径方向の速度成分は、軸対称を仮定して連続式から計算によってもとめられる。しかし、ピトー管挿入

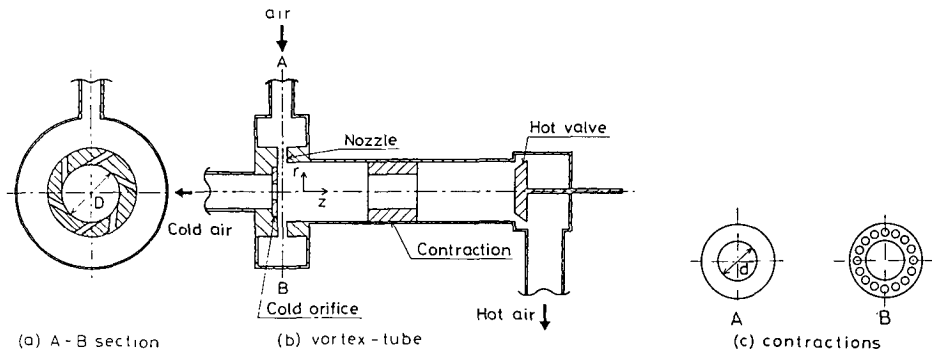


図1 実験装置概略図

による速度場の変化などのために、厳密な速度測定はできない。とくにホイッスリング発生時の測定では、時間平均的な値となる。用いた円筒形ピトー管は、外径0.8 mmのステンレスチューブの側壁に、0.1 mmの穴を開けたものである。

4. 実験結果

4.1 ホイッスリング 絞りの挿入されていないボルテックスチューブでは、 $\xi=1$ 付近を除いてホイッスリングは生じない。すなわち、チューブ内の圧力じょう乱は、図2に示される周波数分析結果から気流音、冷氣オリフィスでのエッジ音などによる騒音成分のみをもち、明確に区別される周波数成分は存在しない。このときの作動条件は、 $p_0=202.7$ kPa、 $\xi=0.5$ である。

同一条件のもとで、チューブ内に絞りを挿入するとチューブ内に周期的じょう乱が生じ、絞りの形状、挿入位置(z_s)によって、そのレベルおよび周波数が増加する。用いた絞りの形状は、A、B いずれも $d=16$ mm、 $l=20$ mmであり、絞りBの外周部には3.5 mm径の穴が軸方向に16個開けられている。

絞りAおよび絞りBともに、その位置を暖気バルブ側からノズルに近づけていくと、じょう乱のレベル

および周波数は増加していく。しかし、絞りAで生じるじょう乱のレベルは低く、図3に示す周波数分析例のように明確でない。絞りBでは明らかに発生音が観測され、ホイッスリング状態にある。その周波数分析結果では、明確に区別される高いレベルの周波数成分があり、高次高調波成分を含む。絞り挿入位置をノズルに近づけていくと二次の高調波レベルが増加し、 $z_s/L=0.2$ 付近で一次と同レベルになる。そして、 $z_s/L=0.19$ 付近でホイッスリングが不安定になり、現象が不連続的に変化して、高い周波数に跳ぶとともに高調波成分をもたなくなる。このようなホイッスリング現象の周波数分析例が、 $z_s/L=0.188$ における跳びの前後について、図4(a)および図4(b)にそれぞれ示されている。この現象を、絞りBの位置と、ホイッスリングによる管内圧力変動の基本周波数および一次、二次のレベルとの関係で示すと、図5(a)および図5(b)のようになり、 $z_s/L=0.19$ 付近の不安定現象は、ヒステリシス現象を示すことが分かる。

また、 $z_s/L=0.18\sim 0.25$ の範囲では、分配率の変化に対しても同様にヒステリシス現象が現れる。絞りBの位置を固定($z_s/L=0.21$)し、分配率を変えたときの周波数変化が図6に示されている。この場合、絞りをノズルに近づけると、ヒステリシスループは ξ の

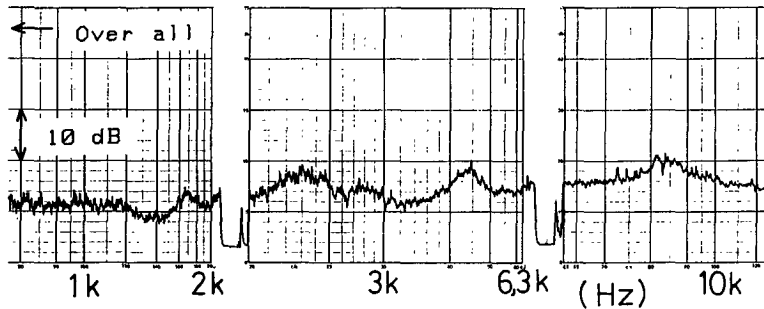


図2 管内圧力じょう乱周波数分析
(絞りのない場合)

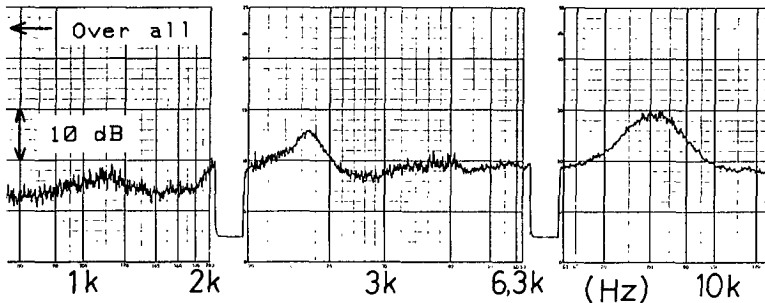


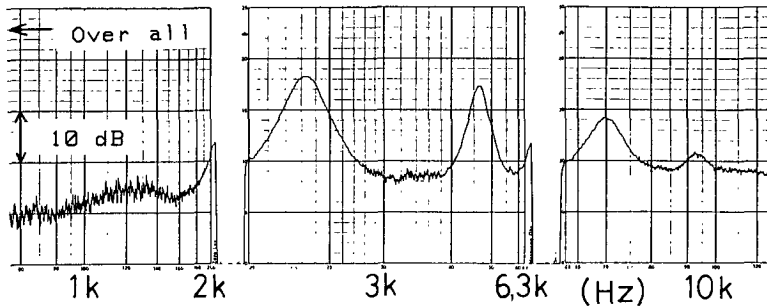
図3 管内圧力じょう乱周波数分析
(絞りA)

増加方向へ移動する。しかし、 $z_s/L > 0.25$ では分配率の全範囲でホイッスリングは安定であり、ヒステリシス現象はなくなる。

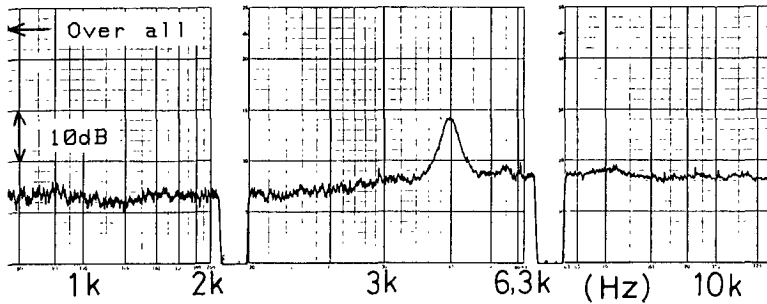
絞り B が暖気バルブ付近にあって、安定なホイッスリングが生じているときは、その周波数はノズル通過流量と線形関係にある。その例が、図7に示されている。

4・2 温度分離 つぎに、絞りを挿入したときの

温度分離特性について以下に示す。初めに、 ρ_0 および T_0 を一定とし、 $\xi=0.5$ としたときの絞り位置に対する冷気および暖気温度の変化を、絞り A および絞り B についてそれぞれ図8(a), (b)に示す。なお、図8の縦軸は冷気および暖気温度と T_0 との差を示し、破線は絞りのない場合の $\xi=0.5$ で得られる冷気および暖気温度を示す。この結果、絞り A では温度分離効果の向上は得られないが、絞り B では、挿入位置を暖

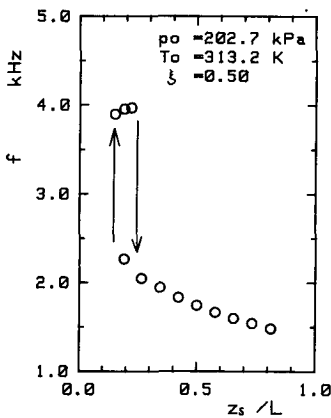


(a) 跳びの前

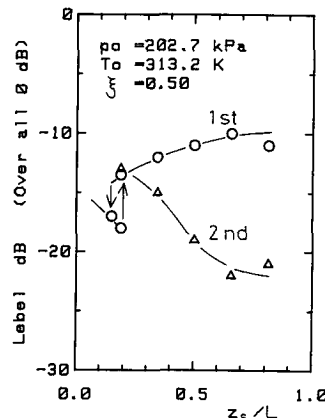


(b) 跳び後

図4 管内圧力じょう乱周波数分析 (絞り B: $z_s/L=0.188$)



(a) 絞り位置による周波数変化



(b) 絞り位置によるレベル変化

図5

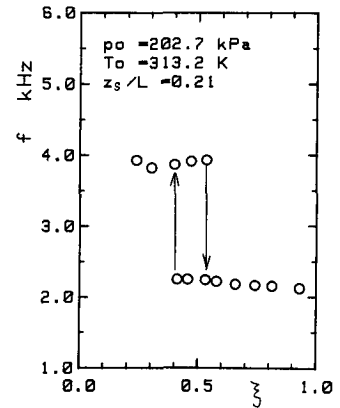


図6 分配率による周波数変化

気バルブ側からノズル方向へ近づけていくと、 $z_s/L=0.18$ 付近で著しく分離効果が高まることになる。しかし、さらにノズルに近づけると、図5に示した周波数の不連続変化とともに、温度分離効果は急激に低下

する。この現象は、絞り位置に対する周波数変化の場合と同様に、ヒステリシスを示す。

また図6に示した、分配率を変えたときの周波数変化に対応して、温度分離もヒステリシスを伴って変化

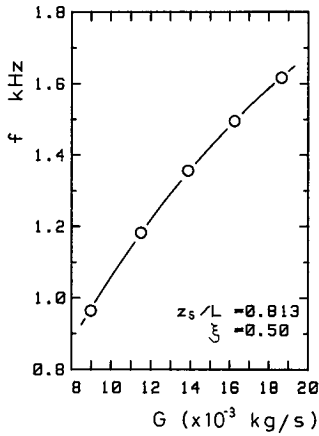


図7 ノズル流量と周波数の関係

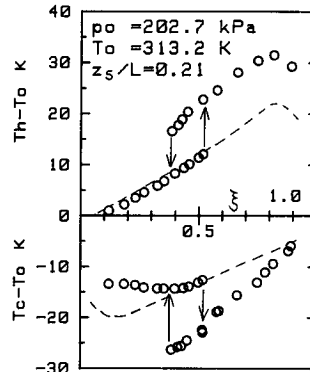
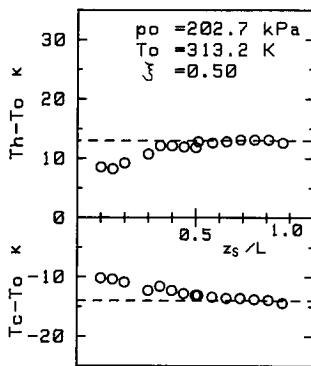


図9 分配率による温度分離特性



(a) 絞り A

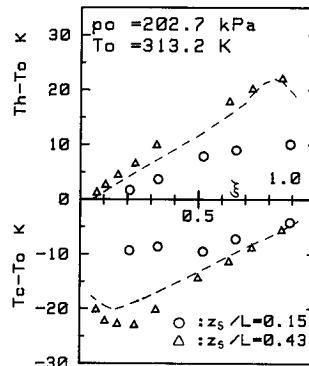
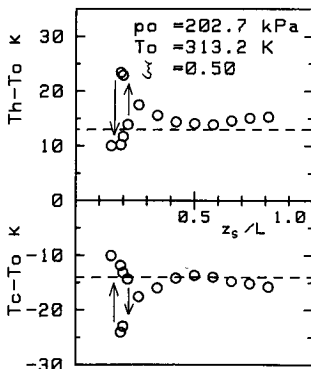


図10 分配率による温度分離特性



(b) 絞り B

図8 絞り位置による温度分離特性

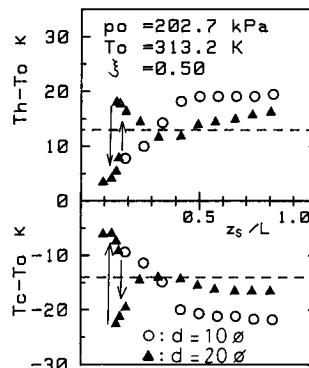


図11 絞り径による温度分離特性の変化

する。その結果が図9に示されている。さらに、 $z_s/L = 0.15$ および 0.43 での、異なったホイッスリング状態における分配率に対する温度分離特性の変化を図10に示す。なお図9, 10中の破線は、絞りのない場合に得られる分離特性である。

以上の結果から、ホイッスリングと温度分離現象とは、密接な関係にあることが明らかである。しかし、絞りを挿入したときの温度分離特性は、ホイッスリング現象の変化に対して必ずしも単調ではない。

4・3 絞り形状の影響 上述の現象は、絞り部径および長さによって変化する。ここでは、明確なホイッスリングが生じる絞り B を用いて、その形状変化によるホイッスリングおよび温度分離現象の変化を調べる。

作動条件 p_0, T_0 を一定に保ち、 $\xi = 0.5$ として、絞り径 d の値を $10 \sim 20$ mm の範囲で変化させると、絞り挿入位置を変えて得られる冷気と暖気の温度差は、 $d = 16$ mm で最大となる。この値は、絞りのない場合に $\xi = 0.5$ で得られる軸方向反転流領域の直径にほぼ等しい。絞り径を大きくしていくと、定性的には図8(b)の結果と同じ傾向を示すが、ヒステリシスループ前後での温度差が減少していく。逆に、絞り径を小さくしていくと、ヒステリシスループは小さくなり、 $d = 10$ mm になると、 z_s/L の増加とともにホイッスリングのレベルが低下して、温度の不連続変化はなくなる。さらに、冷気と暖気の温度差の最大値は、絞り位置が暖気バルブに近いところで得られる。これらの絞り径による現象の変化が、図11に示されている。

つぎに、 $d = 16$ mm として、絞り部長さを短くすると、 $z_s/L = 0.2$ 付近におけるホイッスリングの不安定度が増し、 $l = 4.5$ mm の絞りでは図12に示すように、二重の不連続変化が生じる。

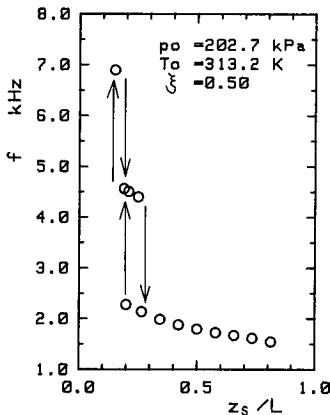


図12 短い絞りでの位置による周波数変化

5. 考 察

はじめに、絞りの挿入による温度分離効果の変化、および絞り形状の影響を、管内の速度プロファイルから考察する。

分配率 $\xi = 0.5$ 一定として、絞りを挿入 ($z_s/L = 0.813$) したときの、測定位置 $z/L = 0.14$ における周速度の半径方向分布が図13に示されている。図中の破線は、絞りのないときの速度分布を示しており、横軸はチューブ半径 a で無次元化されている。絞り A では、絞りのない場合の速度分布とほぼ一致し、強制うず領域は中心付近に限定される。この結果は、温度分離においても同様の特性をもたらすものと考えられ、図8(a)の結果を裏付けている。一方、絞り B を挿入すると、周速度分布が絞りのない場合と比較して著しく変化し、強制うず状の分布を示す領域が $r/a = 0.5 \sim 0.6$ まで拡大する。このような周速度分布の傾向は、絞り位置をノズルに近づけるほど顕著になる。この傾向は、音響流の存在を示すホイッスリングの二次高調波レベルの増加と一致しており、さらに、その結果もたらされる強制うず領域の広がりと、冷気と暖気の温度差の増加傾向とが一致している。これらの結果は、ホイッスリングによって誘起される音響流が、周速度分布を強制うず状に変化させること、およびその結果得られる強制うずが、温度分離効果をもたらす基本的メカニズムであるとしている Kurosaka の解析⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ によって、説明される。

つぎに、 $z_s/L = 0.18$ 付近で生じるホイッスリング現象の不連続変化について考察する。図5および図12に示されている高い周波数への跳びの現象は、周方向二次あるいは三次モードのホイッスリング現象への遷移と考えられる。高い周波数への跳びが起こると、図

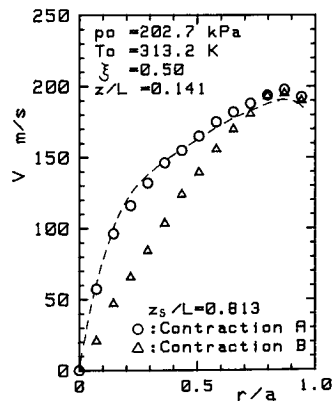


図13 半径方向周速度分布

4 (b)に示すように二次高調波成分がなくなるが、このことは高次のモードになるにつれて、音響流が弱まる⁽¹⁰⁾ことで説明され、その結果強制うず領域は広がらず、温度分離効果も低下する。また、油膜法およびタフト法による流れの可視化によれば、遷移後はうず心が絞り直前で管壁に付着してふれまわっており、そのときの絞り前方の平均周速度分布をもとめると図14のようになる。ピトー管挿入の影響を考慮する必要はあるが、この結果は、中心付近のみに強制うず領域がある旋回流のふれまわりによる周速度分布の傾向を示していると考えられる。このことから、前述の旋回流場の状態が説明される。しかし、現象の不連続変化をもたらす、不安定性の要因については、明らかではない。

一方、 $z_s/L=0.5$ 付近では十分な強さのホイッスリングが生じており、二次のレベルも高く、広い強制うず領域が存在するが、高い分離効果はえられていない。その要因は、タフト法による可視化から予測される絞り部前後の軸方向流のパターンによって説明される。図15にその概略を示す。絞り外周部の整流孔を通過した暖気は、管断面全体に広がって暖気バルブ方向へ流れるが、その一部は絞り直後で反転し、中心孔を通過して上流側へ流れ、冷気と混合する。この反転流の速度は、高次モードのホイッスリング発生時に増加する。このことも、前述した遷移後の分離効果の低下と関連がある。このように、絞りは、ホイッスリング発

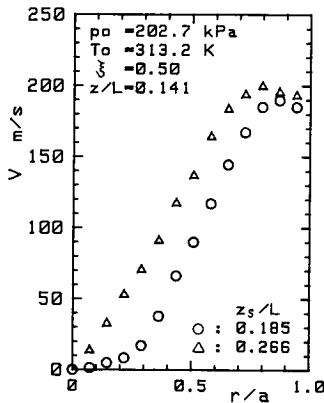


図14 半径方向周速度分布

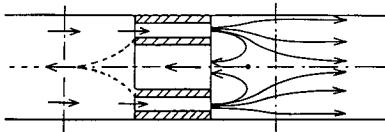


図15 絞り付近の軸方向流れ

生のプラスの効果と、分離した暖気と冷気の混合をもたらすマイナスの効果を合わせもつと考えられる。

さらに、絞りが暖気バルブ付近にあるときの分離効果の向上についても、別の要因を考える必要がある。Metenin⁽⁷⁾は、チューブ内に整流子を挿入することによる分離効果の向上、および挿入位置の影響について調べている。そこで、整流子挿入時の温度分離特性をもとめ、図16に示す。用いた整流子は長さ20mmであり、その断面には、3.5mm径の穴が様に24個開けられている。この結果、挿入位置 $z_s/L < 0.5$ では逆に分離効果の低下をもたらすが、 $z_s/L > 0.5$ では分離効果が向上することを確認した。したがって、絞りが暖気バルブ付近にあるときの高い温度分離効果は、整流子としての効果によるものと考えられる。また図16の傾向は、図11の $d=10$ mmの場合とよく一致しており、絞り中心孔の径を小さくすることは、絞りがむしろ整流子として作用することを示している。

最後に、チューブ長さの影響について考える。流速測定およびタフト法による流れの可視化より、絞りの

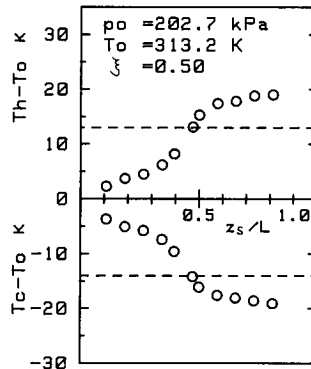


図16 整流子位置による温度分離特性

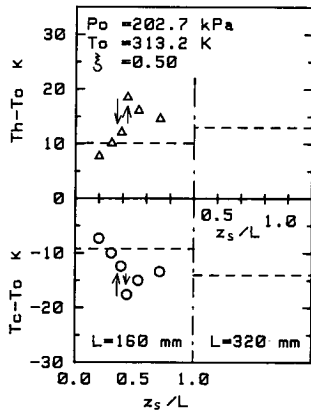


図17 短い管での温度分離特性

下流側では旋回流はほとんど減衰しており、軸速度成分にも反転流が存在しないことが明らかになった。したがって、絞り下流側部分は温度分離になんら寄与しないと考えられるため、チューブ長さを短くしたときの温度分離特性を調べ、図17に示す。この結果、短いチューブでも同様な分離特性が得られることが明らかになり、ボルテックスチューブの小形化が計られる可能性を示した。

6. 結 言

反転流型ボルテックスチューブ内に挿入された、整流作用をもつ絞りの効果で発生するホイッスリング現象、およびそれに伴って得られる特異な温度分離特性について調べ、以下の結果を得た。

(1) 軸方向反転流を伴う旋回流中での、ホイッスリングの発生による強制うず領域の広がり、温度分離効果向上との関係が実験的に明らかにされた。

(2) 絞りは、その挿入位置により旋回流場に複雑な変化をもたらすため、全体の温度分離特性は、ホイッスリング現象の効果とともにチューブ内の三次元的流れ場を考慮して解析する必要がある。

終わりに、本実験に協力された、本学学生 鈴木潤太郎君に謝意を表します。

文 献

- (1) 大野・谷口, 機論, 17-62 (昭26), 89.
- (2) Westley, R., *The College Aeronaut. Tech. Note*, 30 (1955), 1.
- (3) 高浜, 機論, 30-219 (昭39), 1419.
- (4) Suzuki, M., *Sci. Papers I. P. C. R.*, 54 (1960), 43.
- (5) Deissler, R. G. and Perlmutter, M., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1-2-3 (1960), 173.
- (6) Otten, E. H., *Engineering*, 186-4824 (1958), 154.
- (7) Metenin, V. I., *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 5 (1961), 1025.
- (8) Korneev, N. M. and Kililov, B. V., *Vestnik Mashinostroeniya*, 60-3 (1980), 31.
- (9) Kurosaka, M., *AIAA Paper*, 81-0121 (1981), 1.
- (10) Kurosaka, M., *J. Fluid Mech.*, 124 (1982), 139.
- (11) Vonnegut, B., *J. Acoust. Soc. Am.*, 26-1 (1954), 18.
- (12) McDuffie, N. G., *ASME Paper*, No. 79-HT-16 (1979-80), 1.

討 論

〔質問〕 岩本 順二郎〔東京電機大学工学部〕

絞り挿入により、分離効果が改善されるという貴論文を、大変興味深く拝見致した。

貴論文で、絞り挿入による熱分離効果の向上は、全体的には強制うずになることがその主な理由であることを述べておられる。また、絞りが暖気バルブに近いところでは、さらに整流効果により改善され、 $z_s/L \approx 0.5$ では、整流孔からの反転流により効果が損なわれ、絞りが無い場合とほぼ同性能になるというご説明であるが、以下の点、論文中に触れておられないようなのでお伺いしたい。

(1) 絞りを挿入することで強制うずの領域が拡大される理由、および強制うずにすることがなぜ分離効果を改善することになるのかご説明頂きたい。

(2) 図15で、整流孔からの反転流が、特に $z_s/L \approx 0.5$ のみ生ずるのはどういう理由か。

(3) 絞りが暖気バルブ近辺にあるとき、整流子としての効果として分離効果が向上すると述べられておられるが、これを流れの速度を軸方向成分のみにすることにより向上すると解釈してよろしいのか。また、そうであればその理由もお教え願いたい。

(4) ヒステリシス現象発生のメカニズムについて、お考えがあればお伺いしたい。

〔回答〕 (1) 絞りを挿入すると旋回流中心がふれまわりを起こし、周期的じょう乱(ホイッスリング)が生じる。このじょう乱が音響流(二次流れ)を誘起し、その定常分が旋回流に重畳する。その結果中心部で周速度成分が減少し、外周部で増加して、見掛け上旋回流場での強制うず領域が拡大する〔図13および文献(9)参照〕。

一方、ボルテックスチューブ内での温度分離メカニズムは、おもにノズル近傍、すなわち広い強制うず領域が存在する範囲での断熱温度偏差に比例する乱流熱拡散によるものと考えられている。したがって、強制うず状速度分布が軸方向に広い範囲で得られれば、温度分離効果が向上すると考えられる。

(2) 絞り中心孔における反転流は、 z_s/L の値によらず常に存在する。とくに $z_s/L \approx 0.5$ 付近では、音響流の効果と反転流の存在による混合効果が相殺し、分離特性が絞りのない場合にほぼ等しくなると考えられる。

(3) ご指摘のように整流子の挿入によりその下流側で旋回流は消滅し、ほぼ一様な軸方向流となる。その結果一義的には暖気と冷気との混合の影響を低減し、分離効果を向上させると考えられる。

(4) ヒステリシス現象解析は今後の課題である

が、旋回流中心の付着現象もその要因の一つであると考えられる。 z_s/L が大きい範囲ではうず心は絞り中心孔内壁に付着し安定である。絞りがノズルに近づくにしたがって、同一入口圧のもとでノズル流量が増加するため周速度およびふれまわり回転数が増加し、偏

心量も増加してうず心の付着点が、絞り前縁のチューブ内壁に不連続的に移動する。 $z_s/L=0.19$ 付近はこれらの状態の遷移領域に相当し、付着状態によって異なった旋回流場が生じると考えられる。
