

気柱振動流場における円柱周りの流れの可視化

鈴木 康太郎* 坂口 勝次**

Flow Visualization around a Circular Cylinder on the Flow Field of Oscillatory Air Column in the Closed Pipe

Kotaro SUZUKI* Katsuji SAKAGUCHI**

ABSTRACT

The experimental investigation of flow visualization around a circular cylinder in the oscillatory flow was carried out. The test cylinder was installed on the center of the passage in the closed pipe with the oscillatory air column. The oscillatory flow near the resonance of air column was produced by a pump which was composed of a crank and piston mechanism as an oscillator. The frequency of the oscillator was changed in the range of 10 to 22.5Hz, and the amplitude of the oscillator was 25mm. The velocity and pressure in the oscillatory flow were measured by the hot wire anemometer and the pressure transducer respectively. The flow visualization around the test cylinder in the oscillatory flow was carried out by using the laser light sheet method and the smoke wire method. The digital images for the flow visualization around the test cylinder were taken by a high speed camera.

As a result, it was proved that the convective heat transfer characteristics around the test cylinder were influenced by the velocity of the main flow and the behavior of vortices, which were formed, moved and then broken down, near the test cylinder in the oscillatory flow.

キーワード：振動流，管内流，共鳴，流れ可視化，円柱.

Keywords : Oscillatory flow, Pipe flow, Resonance, Flow visualization, Circular cylinder.

1. 緒言

近年，環境問題の深刻化に伴い，省エネルギー化の要求が高まっている。それに関連して熱エネルギー利用装置の伝熱性能の向上も要求され，より効果的な伝熱促進・制御技術の開発が望まれる。

特に，音響流れや流体の往復振動を利用した，物体表面上の対流熱伝達の性能向上を目的とした研究が報告されている[1-9]。一般に物体を熱風乾燥させる場合，送風機などを利用して一方向から熱風を供給するが，物体を回転させるか熱風の流動方向を変化させなければ物体を均一に乾燥させることは困難である。そこで，物体周りの流体を強制的に往復振動させることによって，物体表面全体にわたり対流熱伝達

性能の向上が予想され，閉管路内で流体（気柱）を往復振動させて，振動周波数を気柱の共鳴周波数に近づけることにより流体の粒子速度が飛躍的に向上することが考えられる。このように，往復流動場の利用は気柱共鳴現象との併用により対流熱伝達の促進と省エネルギー化が期待できる。

しかしながら，気柱振動流場では管路内の粒子速度が非常に大きく，流体が共鳴を伴った往復振動する複雑な流れのため，その流れのメカニズムは十分に解明されていない。

したがって，本研究では気柱振動流場に置かれた円柱周りの可視化を行うことによって，気柱振動流における流れの特徴および対流熱伝達性能に大きく影響を及ぼすと考えられる円柱周りの流れ場における渦形成から崩壊までのメカニズムを明らかにすることを目的としている。

*大学院機械工学専攻

**機械システム工学科

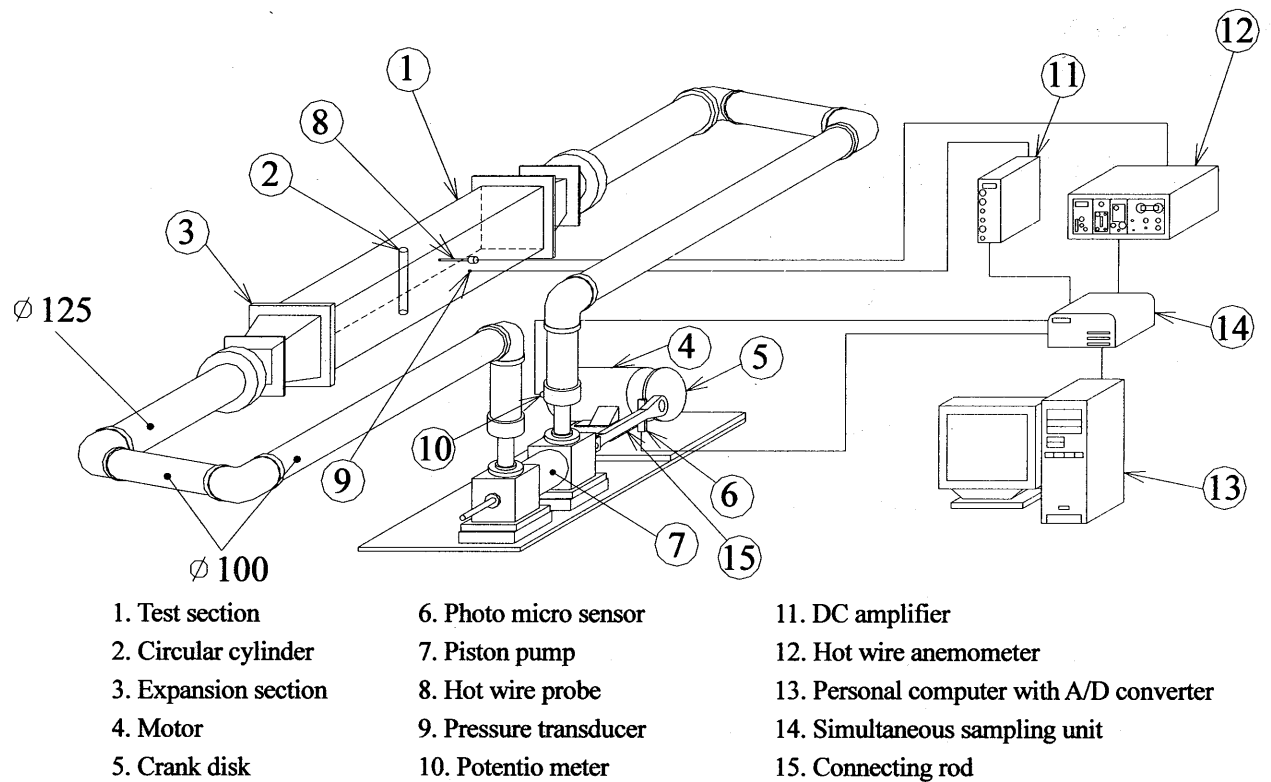


Fig.1 Experimental apparatus for velocity and pressure measurements.

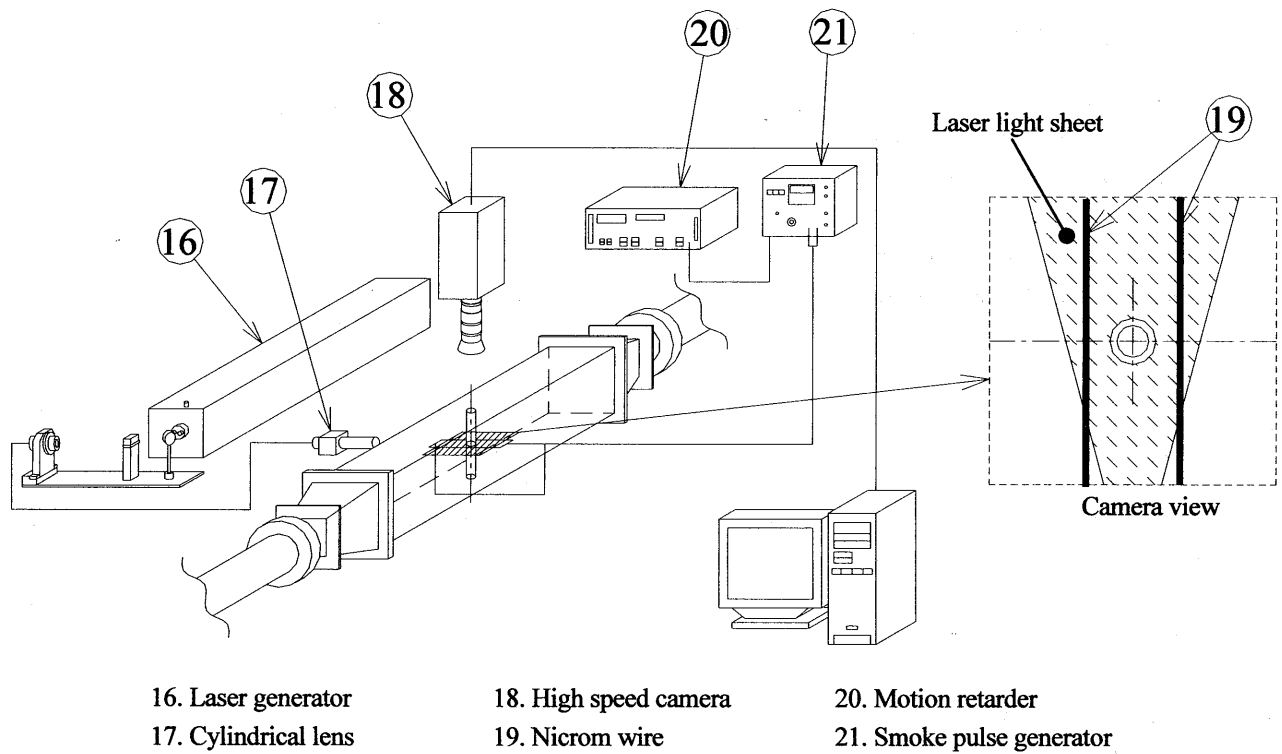


Fig.2 Experimental apparatus for flow visualization.

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

本実験で使用する装置の概略図を Fig.1 に示す。実験装置は、ループ状の閉管路を形成する鋼管および測定部:1、その管路内の気柱を振動させるピストン式ポンプ:7および駆動用モータ:4 から構成される。

一般に、管路内における気流の振動減衰がない場合、閉管路内の空気(気柱)の1次モードにおける固有振動数 f [Hz]は次式で表される。

$$f = \frac{c}{2L_p} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 c は空気中の音速[m/s]、 L_p は管路長さ[m]である。

本研究では、閉管路内の空気固有振動数を超低周波上限である $f=20$ [Hz]と定め、閉管路長さを $L_p=8.5$ [m]とした。

測定部は、長さ 1200mm、一辺 200mm の矩形流路断面で透明アクリル樹脂製ダクトである。

供試円柱:2 は外径 $d=32$ [mm]、長さ 200mm の透明アクリル樹脂製パイプであり、測定中央に振動流方向に対して直角に設置されている。

ポンプのピストンはコンロッド:15 によって駆動用モータの回転軸に固定された鋼製のクランク円盤:5 と接続され、ピストンクランク機構を形成している。また、クランク円盤(ピストン)の死点はフォトマイクロセンサ:6、位相は無接触角度センサ:10 によって測定した。

振動方式は、Fig.3(a)のような片側に振動源が設置してあり、もう一方が閉じられているか、または開放されている方式が一般的である。本実験装置では Fig.3(b)のように両側に振動源を備え、同位相で振動し、体積一定の気柱を左右に揺動させることに相当する。この場合、本実験装置における気柱共鳴領域の振動流速が片側の振動源の場合と比べて大きいことが実験的に明らかにされており[8]、流速が大きく支配する対流熱伝達性能の向上には、本実験装置の振動方式がより有効な手段と考えられる。

2.2 流速・圧力計測

Fig.1 の測定部中央における供試円柱:2 から主流方向 $6d$ の位置にI型熱線プローブ:8 を固定して熱線風速計:12 を用いて流速測定した。また、圧力トランスデューサ:9 を熱線プローブの挿入位置付近にダクト内壁面に設置し、直流アンプ:11 にて静圧(ゲージ圧)を測定した。熱線風速計および直流アンプはサンプリングユニット:14 に接続され、A/D 変換器(16bit)を内蔵したパーソナルコンピュータ:13 で両出力信号をクランク円盤の死点および位相信号とともに同時計測した。実験条件は、振動源(ピストン)の振動振幅を 25mm 一定とし、振動周波数 f を 10.0~22.5Hz の範囲で変化させた。

2.3 可視化実験

可視化実験での概略図を Fig.2 に示す。流れの可視化はスモークワイヤ法とレーザーライトシート法を併用した。ここで、ニクロム線(直径 0.2mm):19 を供試円柱から測定部主流両方向 $1d$ の位置に水平に設置して流動パラフィン塗布し、スモークワイヤ発生装置:21 に接続し発煙させた。また、光源としてアルゴンイオンレーザー(Innova70, Coherent, Inc.製):16 を使用し、レーザー光はシリンドリカルレンズ:17 によって扇状に広げ、ニクロム線に重なるように水平に照射した。ここでレーザーライトシートの厚みは約 2mm である。また、ハイスピードカメラ(FASTCAM-PCI, フォトロン製):18 を供試円柱軸線上方に設置し、撮影画像をパーソナルコンピュータで記録した。撮影条件は、500 フレーム/s、解像度 256×240 ピクセル、シャッター速度 1/5000s~1/3000s である。撮影開始および発煙開始は、クランク円盤の死点信号をトリガとして利用した。ここで、発煙のタイミングは、発煙の遅れ時間を考慮し、モーションリターダ:20 で微調節した。

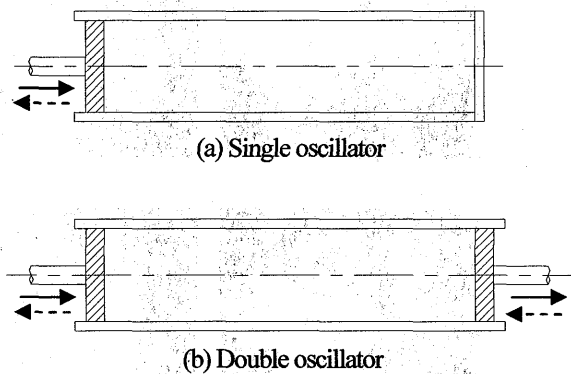


Fig.3 Oscillators

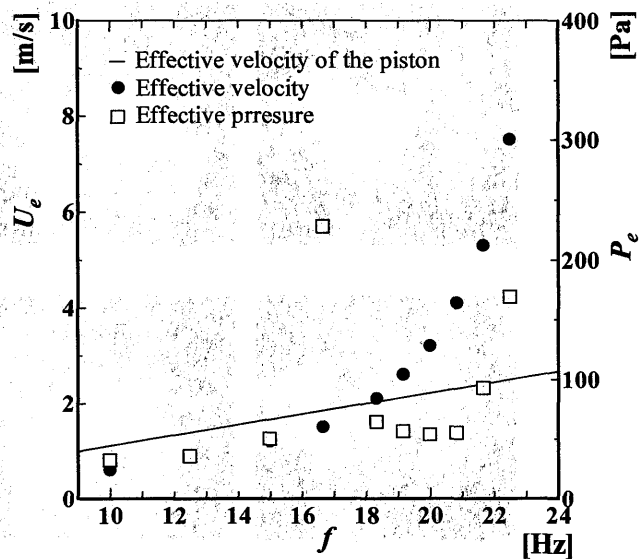


Fig.4 Effective velocity and effective pressure.

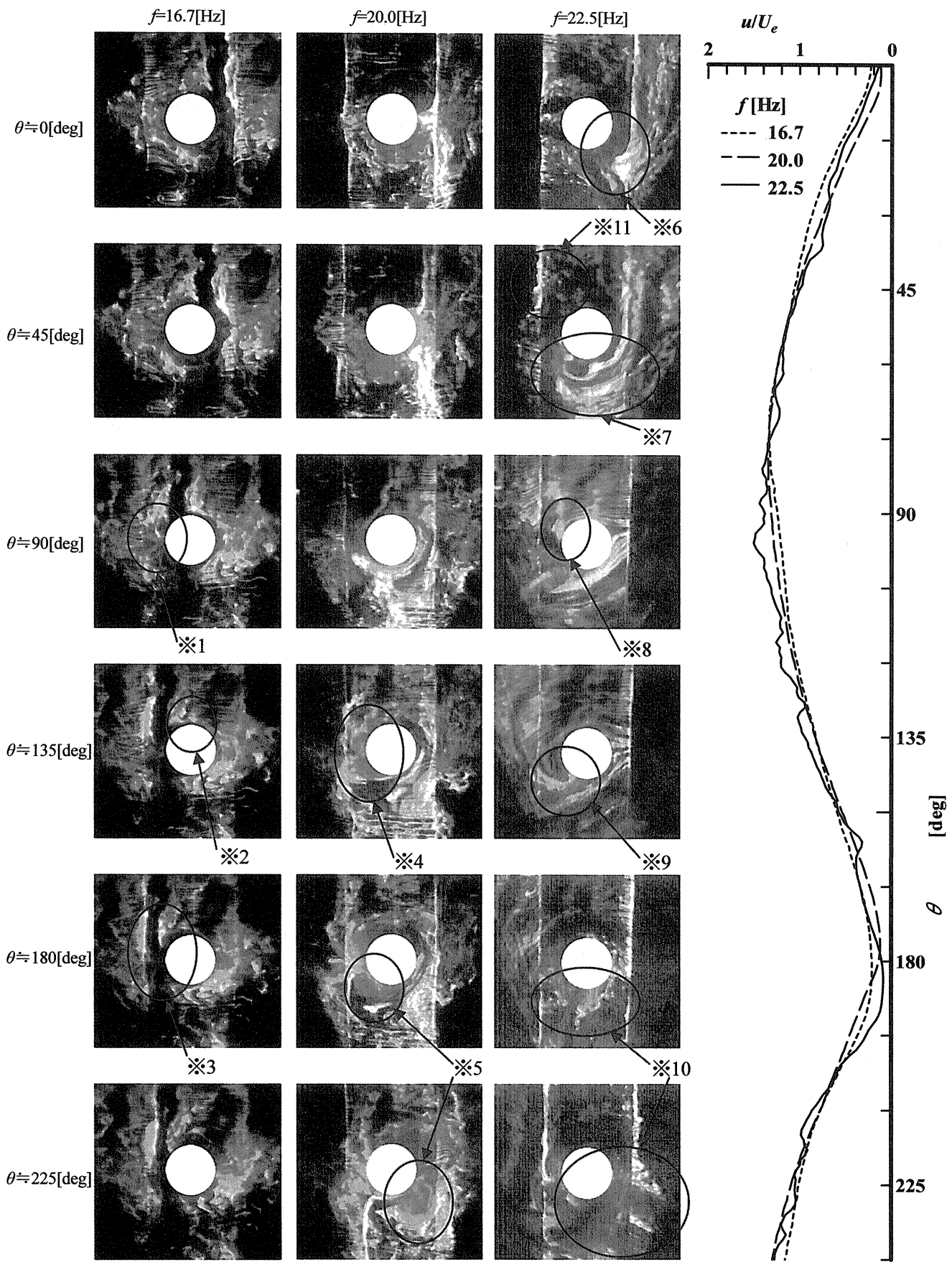


Fig.5 Digital images of flow visualization around a circular cylinder with velocity wave of oscillating flow.

3. 実験結果および考察

3.1 実効流速および実効圧力

振動周波数 f と実効流速 U_e および実効圧力 P_e の関係を Fig.3 に示す。それぞれの実効値は、次式で求められる。

$$U_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 T はサンプリング時間、 u は振動流の流速、 p は気柱圧力である。

図中の実線は参考として振動源の実効振動速度を示す。図より、振動周波数が気柱の共鳴周波数に近づくにつれ実効流速が指数関数的に増大していることがわかる。実効圧力も同様に共鳴周波数に近づくにつれ増加するが、 $f=16.7$ [Hz]付近で局所的に増加し、流速とは異なる傾向を示している。本実験装置では気柱の共鳴周波数は 20Hz に設定しているが、予備実験の結果、 $f=25.5$ [Hz]付近にシフトしていることがわかった。これは、本実験装置の閉管路はループ構造で、拡大管:3 やエルボなどを有しているため、共鳴周波数がシフトしたものと考えられる。

さらに、 $f=18$ [Hz]では、振動源の実効振動速度よりも気柱の実効流速が大きいことは明らかであり、気柱共鳴領域であることがわかる。

3.2 可視化実験結果および考察

可視化実験の結果、得られた画像の代表的なものを Fig.5 に示す。これらの画像は、横配列に振動周波数を変化させ、縦配列に流速の位相を変化させて並べたものである。また、参考として流速の位相 θ と流速 u を実効流速 U_e で無次元化した値 u/U_e との関係も示す。ここで、流速測定でI型プローブを用いたため、往復振動する主流の値はすべて正の値を得る。

参考のため、気柱振動流場に置かれた水平円柱表面周りの時間平均局所熱伝達特性について文献[8,9]で報告されている局所ヌセルト数分布を Fig.6 に示す。ここで、局所ヌセルト数は Nu_d 、実効流速レイノルズ数は Re_d である。図中の実線は定常流の場合の円柱前面における値[10]である。さらに水平円柱表面周りの時間空間平均ヌセルト数 Nu_m と実効流速レイノルズ数 Re_d の関係[8,9]も Fig.7 に示す。図中の実線は次式で表される[8,9]。

$$Nu_m = 0.563 Re_d^{0.555} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、図中の点線と一点鎖線はそれぞれ定常流の場合の実験式である[10]。伝熱特性とも関連付けて代表的な振動周波数の条件下における可視化画像から気柱振動流中に置かれた円柱周りの流れについて考察する。

3.2.1 $f=16.7$ [Hz]の場合

主流が加速し始めると、円柱表面付近の後流では※1 に小さな渦が確認できる。そして主流が減速を始めると、※2 のように煙が円柱表面からはがれている。その後、※3 のように煙は円柱後方に巻き込み始めるが、途中で主流が折り返してしまう。このことから、円柱上の渦形成が発達する前に主流が折り返してしまうため、円柱に形成された小規模な渦は、円柱表面上に沿って移動する。また、連続画像からは減速過程後半から加速過程初期にわたって、円柱表面の流れが主流よりも早く折り返す現象も確認した。

したがって $f=16.7$ [Hz]の場合、円柱周りの小規模な渦形成と気柱振動流の主流速度が小さいため、Fig.6 に示すように局所ヌセルト数の値が、特に円柱両よみ点近傍では $f=20.0$,

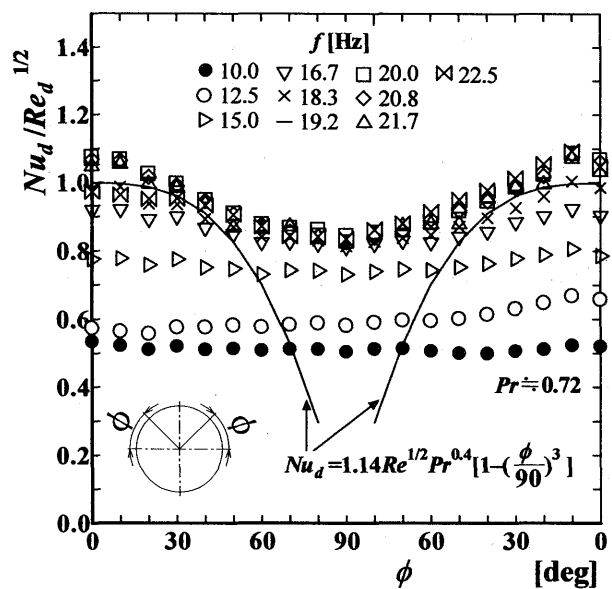


Fig.6 The distribution of the local Nusselt number [9].

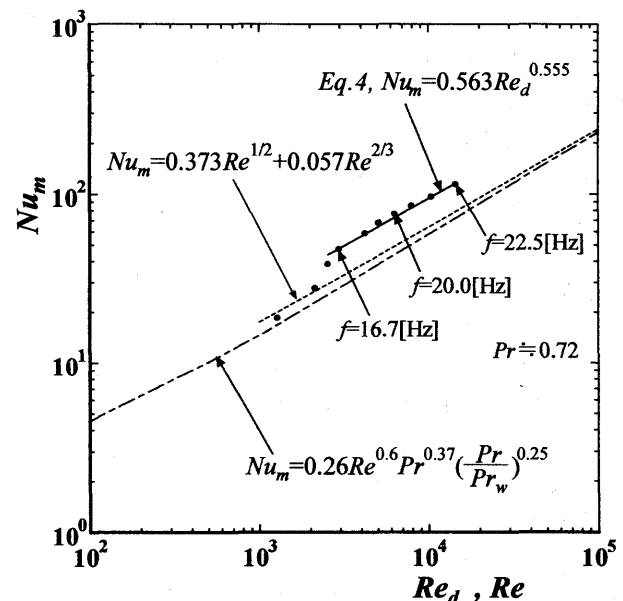


Fig.7 The mean Nusselt number [9].

22.5[Hz]の場合と傾向が異なる。また、Fig.6において $\phi=90[\text{deg}]$ での局所ヌセルト数が著しく低下しないのは、※2のように円柱表面上の小規模な渦の移動現象が寄与しているためと思われる。したがって、Fig.7における時間空間平均ヌセルト数でも、 $f=16.7[\text{Hz}]$ において定常流の値から式(4)に遷移しており、円柱 $\phi=90[\text{deg}]$ 付近の渦によるヌセルト数の低下抑制が大きく影響しているものと考えられる。

3. 2. 2 $f=20.0[\text{Hz}]$ の場合

円柱表面の流れは、 $f=16.7[\text{Hz}]$ の場合よりも流速が大きくなっている。主流が加速し、減速を始めたとき($\theta=135[\text{deg}]$)、※4のようにはく離して渦が比較的円柱近傍に確認される。これは、流れが安定した直後に主流の減速が始まるために、円柱近傍に発生したものと考えられる。また、主流の減速が進み、主流がほぼ停止した状態($\theta=180[\text{deg}]$)になると※4で形成された渦に向かって周りから流れができる。そして、※5のようにその渦は形を保ったまま、主流よりも早く折り返しを開始して円柱表面に沿って流れる。この主流よりも速い円柱に沿った流れは、 $f=16.7[\text{Hz}]$ の場合より明確に確認した。

また、Fig.6の局所ヌセルト数は、定常流の場合と比較すると、特に円柱両よどみ点近傍で高い値を示し、 $\phi=90[\text{deg}]$ 付近で著しい低下がなく、時間空間平均ヌセルト数では定常流の場合よりも値の大きい式(4)で表される。これは、気柱共鳴現象による流速増加および円柱周りの渦形成と円柱表面上の渦の移動による乱れが大きく寄与しているものと考えられる。

3. 2. 3 $f=22.5[\text{Hz}]$ の場合

$f=20.0[\text{Hz}]$ の場合よりもさらに流速が増加し、それによって円柱周りの乱れも非常に激しくなり、上下非対称の流れを形成している。折り返し過程($\theta=0[\text{deg}]$)において、円柱後流部の巻き込みが※6のように片側に集中して起こり、その影響から、加速過程初期における流れの加速も※7のように片側に集中して開始される。最大流速($\theta=90[\text{deg}]$)から、※8のように円柱表面に沿って円柱後方の死水域に流入する流れが観測され、その直後に減速が始まるために※9では大規模な巻き込みが起こっている。そして※6、10のように上下非対称の巻き込みを保ちながら主流が折り返す。また、折り返し過程直後($\theta=45[\text{deg}]$)では、折り返しの遅れと思われる一時的な逆流を※11に確認した。

これらのことから、 $f=22.5[\text{Hz}]$ の場合、円柱周りの流れの大規模な巻き込みの影響が広範囲に及び、乱れも非常に強いと考えられる。しかしながら、 $f=20.0[\text{Hz}]$ の場合と比較すると、流れの様相が時間的に大きく変化しているものの、Fig.6の時間平均局所ヌセルト数から、円柱全面にわたって同じ傾向であり、Fig.7の時間空間平均ヌセルト数の値も同様に式(4)で表されることから、時間空間平均的には気柱振動流の実効流速が最も対流熱伝達特性への影響が大きいものと考えられる。

4. 結 言

本研究では気柱振動流場における円柱周りの流れの可視化をすることによりその流れ場が対流伝熱に与える影響を実験的に明らかにすることを目的として研究を行った。

- (1) 閉管路内の気柱に振動を与え、その気柱の共鳴周波数近傍では、実効流速が指数関数的に増大し、推算した振動源の実効振動速度よりも著しく大きくなる。
- (2) 気柱振動流場における円柱周りの主流が加減速および折り返すために、円柱周りで渦が形成し、移動する。また、主流の折り返しから加速初期において主流よりも速い円柱表面に沿う流れが存在する。
- (3) 円柱 $\phi=90[\text{deg}]$ 付近での時間平均局所ヌセルト数の著しい低下が現れないのは、円柱上で形成された渦の円柱表面を移動する現象が影響している。また、時間空間平均ヌセルト数が定常流の場合よりも増大するのは、気柱共鳴現象による流速増加および円柱周りの渦形成とその移動による乱れが大きく寄与している。

参考文献

- [1] 森田光宣・安沢典男, 音響流による冷却伝熱促進, *Thermal Science Eng.*, **9**, pp. 31-43, (2001)
- [2] T. S. Zhao・P. Cheng, Experimental studies on the onset of turbulent and frictional loss in an oscillatory turbulent pipe, *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **17**, pp. 356-362, (1996).
- [3] N-G. Malmgren, Recent development in controlled cooling systems for wire rod-Infrasonic cooling, *Iron and Steel Eng.*, **Jan**, pp. 45-47, (1991).
- [4] J. M. Preston・W. S. Johnson, Acoustic Enhancement of the Rate of Heat Transfer Over a Flat Plate-An Experiment Investigation, *Trans. ASME., J. Energy Resour. Technol.*, **119**, pp. 257-264, (1997).
- [5] 則本隆敏, 往復共振流動場における対流伝熱に関する研究, 福山大学修士論文, (1998)
- [6] 坂口勝次・則本隆敏・南山龍緒, 往復流動場における平板上の対流熱伝達, 福山大学工学部紀要, **24**, pp. 89-94, (2000).
- [7] 坂口勝次・森岡誠, 超低周波流れ場におかれた平板上の対流熱伝達, 第39回日本伝熱シンポジウム講演, pp. 649-650, (2002-6).
- [8] 森岡誠, 往復共振流動場における加熱平板および加熱円柱表面の対流伝熱に関する研究, 福山大学修士論文, (2002).
- [9] 坂口勝次・森岡誠, 超低周波流れ場に置かれた加熱水平円柱表面からの対流熱伝達, 第40回日本伝熱シンポジウム講演, pp. 69-70, (2003-5).
- [10] 日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第4版, pp.60-62, 丸善, (1986).