糸を用いた交差管内の流れの可視化*

梅田眞三郎**, Wen-Jei YANG***

Flow Visualization Using String Method in Two Intersecting Ducts

Shinzaburo UMEDA and Wen-Jei YANG

ABSTRACT

The flow in the intersecting region of two streams inside an X-shaped flow network is complex due to combined consequence of the ramming phenomena and the centrifugal force induced by the flow passage geometry. The flow visualization study was conducted using a recirculating flow loop with an intersecting duct installed between two head tanks of different heads. In this study, both the symmetric and asymmetric flows are investigated by the string method to visualize flow oscillations of the shear layer in the intersecting region. The difference in flow branching from the intersecting region due to a change in the intersecting angle is disclosed. The variation of oscillation amplitudes is found to be small in 60° and 90° intersecting ducts. It is also found that the center position of oscillation amplitudes is at one side and the dispersion of flow oscillation is small in case of the asymmetric level at upper tanks.

Key words : Intersecting Ducts, String Method, Flow Oscillation, Shear Layer

1. まえがき

自然科学の分野では、血流などのようなネットワークを形成する流れが多く存在している。二つ以上の流れが断面変化などを伴った形で交差し、さらに分岐していくような交差管内の流れには、航空力学にみられるラム効果などの発生による複雑な流況が予想される。すでに、単一の管路での流れや分流および合流に伴う各種損失などの基本的な研究成果については成書に示されている。しかしながら、分・合流などの流れとは異なるところがある交差管内の流れに関する研究は、過去に

はほとんど見られない。これは、可視化の困難さと流況の複雑さなどが原因していたと思われる。

最近では、可視化技術も大きく向上し、熱流体の方面からのネットワーク流れの解析^{1)~3)}が始められたところである。筆者らは、X字型の交差管内の非圧縮性流体の流れの可視化実験⁴⁾を開始し、交差部での流線の新しい可視化^{5)~7)}やラム効果に伴う運動特性解析など^{8)~10)}を行うことができてい

る。交差管内の流れには、上流側左右からの流れが交差部で衝突するために、交差部での流れを分離する壁が存在する。すなわち、左右からの流れが混合しないような境界が存在する。その壁を形成するせん断層付近の流れは、ラム効果による圧力上昇などの影響を受け、大変複雑な流れとなっ

*原稿受付 1994年11月2日

**正会員 福山大学工学部

***正会員 ミシガン大学工学部

いる。それらの流れの状況を把握するために、本研究では糸を用いた交差部でのせん断層の振動特性などを把握するための可視化実験を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

前報^{6),7)}の実験に用いた交差管の交差長を60cmと延ばし、同じ $3 \times 3 \text{ cm}^2$ の正方形断面の交差管を用いて実験を行った。その実験装置の概要をFig.1に示す。以下での左右の管路とは、図中に示す矢印の流れの方向に向かって左および右の位置にある管路とする。下流側水位 H_2 は、 $H_2 = 2.5 \text{ cm}$ と一定とし、上流側水位 H_1 を、上流側水槽での右側水位 H_r と左側水位 H_l とが同じ場合とそうでない場合とで種々に水位を変化させた。それぞれに対して、交差角を 30° 、 60° および 90° に変化させて実験を行った。レーザ流速計(LDV)による上流側管路での平均流速を代表流速とし、正方形の一辺 a を代表長とする Re 数が $9.1 \times 10^3 \sim 5.8 \times 10^4$ の範囲内で実験を行った。交差部の流れは交差角により遠心力が異なるので、参考までに交差部中央断面での平均流速 V_c によるDean数($= a_c V_c \sqrt{a_c} /$

Table 1 Test runs

Angle	30°			60°			90°			
Run	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_l (cm)	11.0	19.0	29.0	40.5	11.0	11.0	11.0	19.0	19.0	29.0
H_r (cm)	11.0	19.0	29.0	40.5	19.0	29.0	40.5	29.0	40.5	40.5

($\nu \sqrt{R}$), a_c : 交差部中央断面幅, R : 曲率半径, ν : 動粘性係数)を示すと、 $4.8 \times 10^3 \sim 4.9 \times 10^4$ の範囲となっている。それらの実験条件を一覧にして示すとTable 1のようになる。

2.2 糸によるせん断層の振動測定

片栗粉を用いたトレーサ法の可視化結果⁶⁾から、交差部での流れを分離する壁であるせん断層が、 Re 数の増大に伴って交差部下流側の分岐部周辺で振動しているのがみられた。そこで、前報^{6),7)}の剥離渦周辺の糸による振動の可視化と同様に、太さ 0.25 mm で、絹100%の材質の糸を針につけて、交差部上流端近くの底にあけた穴より挿入し、その振動を測定した。交差部の長さが交差角により異なるので、糸の長さはそれに応じて変化させた。30°の場合は10cm、60°の場合は5.0cm、90°の場合は3.4cmの長さとした。測定は交差管路の上面よりCCDカメラにて糸の動きを撮影し、ビデオデッキに入力した。得られた画像を画像処理器にとり込み、1コマ(1/30秒)ごとにその糸の変化を読み取り、約6~7秒間のデータにより振動解析を試みた。なお、可視化写真を撮影するにあたっては、交差部のその他にも糸のついた針を立てて同時に振動をとらえた。

3. 実験結果と考察

前述のような複雑な流況特性を示す交差管内の流れの状況を可視化するために、まず交差部に数本の針に糸をつけたものを挿入し、写真撮影を行った。それらの結果として、交差角が 30° の場合の上流側水位が対称および非対称のそれぞれの一例の可視化写真をFig.2と3に示す。Fig.2の上流側水位が対称の場合には、左右の糸はほぼ対称的な振動を示している。交差部中央縦断上やその隣接する糸および交差部左側の外壁近くの糸のそれぞれの先端の振動は、やや大きくなっている。しかし

(a) Top view

(b) Side view

Fig.1 A schematic of experimental setup

Fig.2 Visualization of flow oscillation in the intersecting region by the string method in case of top view for $\theta=30^\circ$, $H_r=H_l=40.5$ and $H_2=2.5$ cm

Fig.3 Visualization of flow oscillation in the intersecting region by the string method in case of top view for $\theta=30^\circ$, $H_r=40.5$, $H_l=11.0$ and $H_2=2.5$ cm

ながら、それら以外の糸は、流れ方向へ真っすぐ延びて、振動が小さくなっている。一方、Fig.3の上流側水位が非対称の場合には、交差部中央縦断上の糸の振動が大きくなり、下流側管路での左右の振動の状況が変化している。特に、交差部の左側外壁近くの糸の振動は、上流側水位が対称の場合とは異なっている。交差角が 60° や 90° の場合についても同様の振動を示しているが、その変位幅や位置が異なっている。またFig.3での交差部下流側の外壁側に近い糸の振動は、他の糸のものとは異なっている。この糸は、剥離渦の影響を受けて縦方向にも振動し、3次元的な振動を示していることを目視観測で確認している。

せん断層の振動を解析するために、交差部中央

縦断線上にだけ立てた糸の変位の測定を行った。それぞれの糸の先端の位置で、ビデオ画像の1コマごとにおける交差部中央縦断線上からの変位 η_i を画像処理により読み取り、その最大値による正規化から変位 $\eta_i/\eta_{\max}$ を求めた。なお変位は、交差部中央縦断線上から交差部の右側を正とし、左側は負とした。それぞれの交差角や上流側水位に対して、交差角が 30° の対称水位の場合と今回の実験ケースでの最大水位差となっている $H_r=40.5$ cmと $H_l=11.0$ cmの場合の結果をそれぞれFig. 4~7に示す。

まず、上流水位が対称の場合での交差角が 60° や 90° に対しては、ほぼ交差部中央縦断線を中心とする変位を示しているが、 30° の場合には中心が右側あるいは左側にずれた変位を示している。右側への一例をFig. 4に示す。一方、同じ水位のもの

Fig.4 Normalized flow oscillation in the intersecting region by the string method for the elapsed time with $\theta=30^\circ$, $H_r=H_l=11.0$ and $H_2=2.5$ cm

Fig.5 Normalized flow oscillation in the intersecting region by the string method for the elapsed time with $\theta=30^\circ$, $H_r=40.5$, $H_l=11.0$ and $H_2=2.5$ cm

Fig.6 Normalized flow oscillation in the intersecting region by the string method for the elapsed time with $\theta=60^\circ$, $H_r=40.5\text{cm}$, $H_l=11.0\text{cm}$, and $H_2=2.5\text{cm}$

Fig.7 Normalized flow oscillation in the intersecting region by the string method for the elapsed time with $\theta=90^\circ$, $H_r=40.5$, $H_l=11.0$ and $H_2=2.5\text{cm}$

変位比の変動を比べると、 60° の場合が最も大きくなっている。

つぎに、上流水位が非対称の交差角や 60° や 90° の場合には、水位の低い左側へ大きく片寄った変位を示している。そのため変位比の値が大きな負の値を示し、 90° の場合が -1.0 の値に最も近くなっている。一方、 30° の場合には、変位比の変動の中心は上流水位の違いによって異なっている。すなわち、必ずしも水位の低い左側へのみ片寄るのではなく、右へ片寄ることもある。また同じ上流側水位条件の他の交差角の場合と比べると、変位比の変動が大きくなっている。

以上のような振動の特性を解析するために、それぞれの変位の平均からの乱れを取り出して、分散やパワースペクトルなどを調べた。いずれの結果も特定周波数に対する顕著なパワースペクトル

はみられず、どの周波数に対しても同じようなパワースペクトルとなり、白色雑音的なスペクトル特性を示している。ただし、非対称水位のパワースペクトルを比べると、交差角が 30° のときが最も大きく、角度が大きくなるにつれてパワースペクトルは小さくなっている。

それぞれの系の振動の中心がどのようなところに位置しているのかを調べるために、上流側水位比 H_l/H_r に対しての $\eta_i/\eta_{\max}$ の平均値 μ の変化をFig.8に示した。なお図に示す N は、各変位 η_i のデータ総数であり、図中の○印の中に示す番号は、Table 1のRun番号である。対称水位の場合には、交差角が 60° や 90° の μ が零近くの値になっている。また非対称水位に対しては、 H_l/H_r の減少とともに μ の絶対値が大きくなり、糸が水位の低い左側へ片寄っていることが示されている。特に 90° の場合には、 μ の絶対値が小さくなっていることから片寄りが大きくなっていることが示されている。一方、交差角が 30° の場合には、対称および非対称水位に対しての μ はバラツキがみられる。 30° の場合の流線の可視化を試みたときには、上流側水位が対称にもかかわらず、片方の交差部に剥離渦などの形成がみられ、流況の非対称性が多くみられた。ただし、交差部の流速が速くなる上流側水位の最も高い $H_r=H_l=40.5\text{cm}$ (Run-4)の場合には、かなり剥離渦は小さくなっていた。糸の振動もこのような流況に関係していると思われる。上流側水位が $H_r=H_l=40.5\text{cm}$ と $H_r=40.5\text{cm}$, $H_l=11.0\text{cm}$ (Run-7)のそれぞれの場合には、やや右側への片寄りをして示しているが、 μ は最も零に近くなっている。また $H_r=H_l=11.0\text{cm}$ (Run-1)と $H_r=19.0$

Fig.8 Mean normalized flow oscillation versus H_l/H_r

cm, $H_l=11.0$ cm (Run-5) のそれぞれの場合も右側への片寄りを示している。それ以外の19cmや29cm (Run-6, 8, 9, 10) に関係した上流側水位のものは、すべて左側へ片寄っている。特に, $H_r=H_l=19.0$ cm (Run-2) と $H_r=H_l=29.0$ cm (Run-3) の場合には、対称水位にもかかわらず、30°のものなかで最も左側への片寄りを示している。これらの左側への片寄りは、上流側水位に対する交差部での流速と圧力が複雑に変化しているためではないかと思われるが、今後の明らかにすべき課題と思われる。

つぎに、平均値 μ から変位比 $\eta_i/\eta_{\max}$ の変動の大きさを調べるため分散 σ を求めた。その結果を Fig.9 に示す。全体的には、交差角が大きくなるにつれて分散の値は小さくなっている。また交差角が60°や90°の場合には、対称水位のものと非対称水位のものとの差が少しみられる。これは、非対称水位の場合、一方へ大きく片寄り、外壁側の影響を受けて振動が抑制されているためと思われる。

今回の実験では、交差角の違いにより使用した糸の長さも変化させた。そのため糸の振動の広がりやの程度が異なるのではないかと考え、それぞれの糸の振動での左右の最も片寄ったときの中央縦断線上からのそれぞれの角度の和を求めた。すなわち、左右に振動している広がり角度 β の最大のものを求め、上流側水位比に対する変化を Fig.10 に示した。対称水位に対しては、交差角が大きくなるにつれて、また水位の上昇に対しても広がり角度が大きくなっている。しかしながら、非対称水位の水位差が大きい場合には、逆に交差角が小さい方の広がり角が大きくなっている。上流側水位の変化に対しての90°の場合の広がり角は、対称および非対称で大きく異なっている。また60°の場合には、対称および非対称水位の差が小さいときの広がり角はあまり差がないが、水位差が大きくなると急激に広がり角が小さくなっている。一方、30°の場合には、 $H_r=H_l=11.0$ cm の最も水位の低い場合を除くと、全体的に広がり角度は大きい、水位の変化に対しての広がり角の差が比較的小さくなっている。

結局、それぞれの交差角に対する糸の振動をまとめると、交差角が30°の場合には、振動の中心が

Fig.9 Dispersion of normalized flow oscillation versus H_l/H_r

Fig.10 Dispersion angle of flow oscillation versus H_l/H_r

不安定で広がり角度も大きくなっている。それに対して60°の場合には、上流側水位の変化に応じての振動の中心位置が片方により、分散も小さくなっている。また水位差が大きいときには広がり角度も急激に小さくなり、片方に安定した状態での振動特性を示している。一方、90°の対称水位の場合には、糸が交差部中央付近で振動し、大きな広がり角度となっている。また非対称水位になった場合には、大きく片方へ寄って、しかも広がり角度や変位の分散が小さくなっている。

以上のような振動特性を考慮すると、それぞれの交差角に対する下流側への流量配分特性を推定することができるとと思われる。すなわち、交差角が30°の場合には、対称および非対称水位でも下流側への流量配分に片寄りが生じやすいと思われる。それに対して60°や90°の対称水位の場合には、左右への流量配分は比較的安定していると思われる。

一方、非対称水位の90°の場合には、極端に片寄った流量配分となるが、60°の場合には上流側水位の変化に関係すると思われる。

4. 結 論

新しい試みである糸による交差部内の流れの可視化実験結果からそれぞれの交差角に対する糸の振動をまとめると、

- (1) 30°の場合には、振動の中心が不安定で広がり角度も大きくなっている。
- (2) 60°の場合は、上流側水位差に応じて振動の中心位置が片方により、分散も小さくなっている。また水位差が大きいときには広がり角度も急激に小さくなり、片方に安定した状態での振動特性を示している。
- (3) 90°の対称水位の場合には、糸が交差部中央付近で振動し、大きな広がり角度となっている。また非対称水位になった場合には、大きく片方へ寄って、しかも広がり角度や変位の分散が小さくなっている。

以上のような糸の振動特性から交差部でのせん断層付近の流れを明らかにすることができ、これによって交差角に対する下流側への流量配分特性を推定することができると思われる。

参 考 文 献

- 1) Zhang, N., Yang, W.-J., Xu, Y. and Lee, C. P.: An Application of Hydrogen Bubble Method to Flow Networks, Flow Visualization VI (edited by Y. Tanida and H. Miyashiro) (1992) 399-403, Springer-Verlag.
- 2) Zhang, N., Yang, W.-J. and Lee, C. P.: Local Convective Heat Transfer in Flow Networks, Transport Phenomena Science and Technology (edited by B. X. Wang) (1992) 296-301, Higher Education Press.
- 3) Zhang, N., Yang, W.-J., Xu, Y. and Lee, C. P.: Flow Characteristics in Flow Networks, Experiments in Fluids, Vol. 14, No.1/2 (1993) 25-32.
- 4) Yang, W.-J., Zhang, N. and Umeda, S.: Thermal and Hydrodynamic Behavior in Flow Networks, Jour. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 7, No. 4 (1993) 734-736.
- 5) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: 交差管内の流れの可視化－流線の可視化－, 可視化情報, 13-Suppl. No.1 (1993) 127-130.
- 6) Umeda, S. and Yang, W.-J.: Flow Visualization Methods in Intersecting Ducts, Jour. of Flow Visualization and Image Processing, Vol. 1, No.3 (1993) 159-170.
- 7) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: 交差管内の流況, 可視化情報, 13-Suppl. No.2 (1993) 47-52.
- 8) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: 交差管内の流れの可視化－交差部内の運動特性－, 可視化情報, 13-Suppl. No.1 (1993) 131-134.
- 9) Umeda, S., Yang, W.-J. and Tanaka, T.: Mechanics and Correlations of Flow Phenomena in Intersecting Ducts, Experiments in Fluids, Vol.17, No.5 (1994) 323-329.
- 10) 梅田眞三郎, Wen-Jei YANG: 交差管内の流れの可視化と計測, 流れの計測, Vol.11, No.15 (1993) 107-119.