

交差管内の流況特性解析

梅田 眞三郎*・Wen-Jei Yang**

Analysis of Flow Phenomena in Intersecting Ducts

Shinzaburo UMEDA and Wen-Jei YANG

ABSTRACT

Three kinds of experiments are conducted to determine the mechanics of flow inside two intersecting square ducts: flow visualization by means of dye injection, velocity measurement using laser Doppler anemometry, and pressure measurement using a piezometer. The angle of intersection and Reynolds number are varied. The geometrical dividing line in the intersection zone of the two ducts forms a flow divider separating the flow network into two independent, symmetrical flow units. Each flow unit constitutes a curved passage with a "radius of curvature" whose magnitude varies with the angle of intersection. Hence, the secondary effects prevail in each unit, resulting in complete flow mixing. The mechanisms disclosed by the flow visualization and LDV methods are supported by the quantitative results from the piezometer measurements.

Keywords: flow visualization, intersecting ducts, flow divider

1. 序論

工学や医学の分野では、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。既に、単一の管路での流れや分流及び合流に伴う各種流況解析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、過去にはほとんどみられない。これは、可視化の困難さと流況の複雑さなどに原因していたと思われる。

交差管内の流れについては、工学の分野はもちろん、動脈瘤などの血流などに関連して、その解明が期待されている。またその流れは、ネットワーク流れの基礎的研究であるとともに、流体力学にもたいへん興味ある重要な研究でもあると思われる。最近、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),2)}が始めだされたところである。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³⁾を開始し、交差部での流線の新しい可視化⁴⁾やラム効果に伴う運動特性解析⁵⁾などを行ってきた。

本研究では、流線の新しい可視化結果⁶⁾を用いて実験解析をさらに発展させる試みを行なった。すなわち、ベルヌーイの定理から導いたパラメータなどにより、交差角の違いによる管内の損失や抵抗に関する流況特性解析を試みた。

2. 理論式⁷⁾

交差管内での流れを非圧縮性完全流体の定常流として、管路内では摩擦、曲がりや断面変化などによる各種の損失を考慮する。図-1の測定断面No. 1からNo. 11に示すような断面で、ベルヌーイの定理を適用し、比エネルギーの変化の関係を求めると以下ようになる。ただし、断面No. 1とNo. 11での流速をそれぞれ V_0 と V_n とし、断面と添字との関係については、断面No. 2から添字1で始まり、 $n+1$ 番目までの一般式の形で示している。

$$\begin{aligned} H_1 + V_0^2/2g &= p_1/\gamma + V_1^2/2g + \zeta_1 V_1^2/2g \\ &= p_2/\gamma + V_2^2/2g + \zeta_1 V_1^2/2g + \zeta_2 V_2^2/2g \\ &\dots\dots\dots \\ &= p_n/\gamma + V_n^2/2g + \zeta_1 V_1^2/2g + \dots\dots + \zeta_n V_n^2/2g \\ &= H_2 + V_0^2/2g + \zeta_1 V_1^2/2g + \dots\dots + \zeta_n V_n^2/2g + \zeta_0 V_n^2/2g \quad (1) \end{aligned}$$

ここでの γ は、液体の単位体積重量である。管路内の平均流速を V とし、

$$\alpha_i = (V_i / V)^2 \quad (2)$$

$$\xi_i = \alpha_i \zeta_i \quad (3)$$

$$\xi_{n+1} = \alpha_n \zeta_0 \quad (4)$$

とすると、(1)式は次のように書き直される。

$$\begin{aligned} H_1 + V_0^2/2g &= p_1/\gamma + (\alpha_1 + \xi_1)V^2/2g \\ &\dots\dots\dots \\ &= p_n/\gamma + (\alpha_n + \xi_1 + \dots\dots + \xi_n)V^2/2g \\ &= H_2 + V_0^2/2g + (\xi_1 + \dots\dots + \xi_n)V^2/2g + \xi_{n+1}V^2/2g \quad (5) \end{aligned}$$

次に、各点での圧力水頭差 ΔP_i を考えると、(5)式は次のようになる。

$$\Delta P_1 = H_1 + V_0^2/2g - p_1/\gamma = (\alpha_1 + \xi_1)V^2/2g$$

$$\Delta P_n = (p_{n-1} - p_n)/\gamma = (\alpha_n - \alpha_{n-1} + \xi_n)V^2/2g$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{n+1} &= p_n/\gamma - (H_2 + V_0^2/2g) \\ &= (-\alpha_n + \xi_{n+1})V^2/2g \quad (6) \end{aligned}$$

これらの両辺を加え合わせると

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \sum_{i=1}^{n+1} \Delta P_i = \Delta P_1 + \dots\dots + \Delta P_{n+1} \\ &= \{H_1 + V_0^2/2g\} - \{H_2 + \zeta_0 V^2/2g\} \\ &= \sum_{i=1}^{n+1} \xi_i V^2/2g \quad (7) \end{aligned}$$

となる。

以上の式における各損失係数 ζ_i 、 ξ_i や流速係数 α_i を整理し直すと、以下のように表される。

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \Delta P_1/h_1 - 1.0 \\ &= (\Delta P_1 + h_0)/h_1 - 1.0 \quad (h_0 = 0.0) \\ \zeta_2 &= (\Delta P_2 + h_1)/h_2 - 1.0 \\ &\dots\dots\dots \\ \zeta_n &= (\Delta P_n + h_{n-1})/h_n - 1.0 \\ \zeta_{n+1} &= \zeta_0 = (\Delta P_{n+1} + h_n)/h_{n+1} \quad (8) \end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned} \xi_1 &= (\Delta P_1 - h_1)/h \\ &\dots\dots\dots \\ \xi_n &= (\Delta P_n - h_n + h_{n-1})/h \\ \xi_{n+1} &= (\Delta P_{n+1} + h_n)/h \quad (9) \end{aligned}$$

ここで、

$$h = V^2/2g, \quad h_i = V_i^2/2g, \quad h_{n+1} = h_n \quad (10)$$

である。

$$Kv = \sum_{i=2}^{n+1} (h_{i-1}/h_i) = \sum_{i=2}^{n+1} (V_{i-1}/V_i)^2 \quad (11)$$

$$V_{n+1} = V_n \quad (12)$$

とおくと、管路全体における損失係数 Kz 及び Kq は、(8)及び(9)式より、

$$Kz = \sum_{i=1}^{n+1} \zeta_i = \sum_{i=1}^{n+1} \{ \Delta P_i / (V_i^2/2g) \} + Kv - n \quad (13)$$

$$Kq = \sum_{i=1}^{n+1} \xi_i = \sum_{i=1}^{n+1} \Delta P_i / (V^2/2g) = \Delta Pt / (V^2/2g) \quad (14)$$

となる。このような Kz 、 Kq 及び Kv に対して、

$$Kc = \sum_{i=1}^{n+1} \Delta P_i (V/V_i)^2 / \Delta Pt \quad (15)$$

とおくと、

$$Kc = \sum_{i=1}^{n+1} (\Delta P_i / \alpha_i) / \Delta Pt \\ = Kz / Kq - (Kv - n) / Kq \quad (16)$$

の関係式が得られ、圧力降下 ΔP_i と流速係数 α_i 及び全水頭差 ΔPt によってあらわされる新しいパラメータを定義することができる。このような Kc は、圧力及び流速の変化特性を示すと考えられるので、ここで抵抗係数と名づけ、交差管内の流況特性の考察を以下で試みる。

3. 実験概要⁶⁾

(1) 実験装置

交差管の両側にヘッドタンクを設けた循環水路にて実験を行なった。実験装置の概要として、平面図及び正面図を図-1に示す。今回は、両ヘッドタンクに挟まれた区間長を30cmと統一し、交差角を30°、60°及び90°と変化させた。レーザーによる流速測定を考へ、アクリル樹脂板を用い、1.5cm角の正方形断面の対称の交差管を用いた。

上流側タンクに隣接した水位調節用タンク内の堰の高さ及び下流側タンクの水位とによって、管内の流速や圧力を変化させて実験を行なった。実験ケースを表-1にまとめて示す。

LDVを用いて各点の流速を、また管路の底に小さな穴をあけ、ピエゾメータを設けて圧力の変化をそれぞれ測定した。図-1の1から11の数字で示しているところがそれらの測定断面である。

(2) 注入トレーサ法による可視化実験

今回の実験では、下流側タンクの水位をほぼ一定にし、上流側タンクの水位を上昇させることによって交差管内の流速を増大させている。またタンク内の流速は、交差管入口付近を除いてほとんど零に近づいている。そのため比

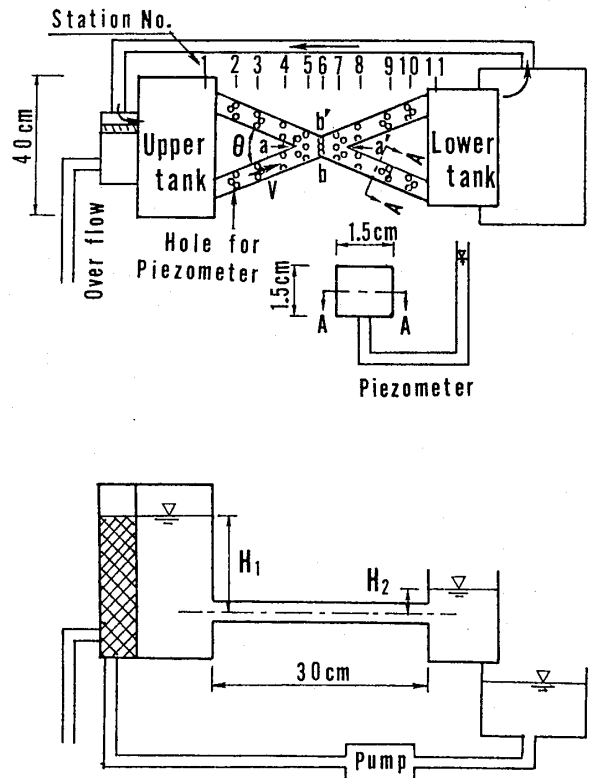


図-1 実験装置の概要

表-1 実験ケース

θ	Run	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	V (cm/s)	Re
30°	1	4.5	2.1	36.3	5440
	2	8.4	2.2	66.4	9950
	3	12.5	2.2	89.0	13350
	4	16.0	2.1	105.2	15780
60°	1	4.6	2.0	41.3	6190
	2	8.2	2.3	67.3	10090
	3	12.7	2.2	86.4	12960
	4	16.2	2.2	100.1	15020
90°	1	4.5	2.1	37.7	5650
	2	8.3	2.1	68.6	10290
	3	12.5	2.0	85.1	12760
	4	16.3	2.0	95.6	14340

較的軽いトレーサを用いると、交差管内にトレーサが思うようには行き渡らないことがある。また、さらに軽いトレーサを用い、たとえ交差管内へトレーサを挿入できても、交差部内の遠心力や圧力変化に追従できないこともある。さらに、染料をそのまま用いた場合には、交差管内ですぐに拡散し、流線などの可視化が不可能となる。このような問題を解決するために、次のようなトレーサを用いて交差管内の流線の可視化を行なった。

トレーサは、黒色の着色液に片栗粉を混ぜて固めたものを約1mmの金網でこして、大きさをほぼ均一にした。さらに攪拌棒で細かくした。トレーサの比重は1.65である。比重はやや大きい、管内の流速が速いことなどから管路全体にわたって浮遊した状態で流れている。このトレーサは、経済性や製作の簡便さなどの特徴を持っている。

注入トレーサ法から得られた交差部まわりの流線の可視化写真結果の中から、それぞれの交差角に対する一例を写真-1から3までに示す。また、流線の概要を図-2に示す。

上流側管路の中央と外壁側の中間位置を通る流線No.1は、交差部中央を過ぎてからは下流側のほぼ中央位置を通過している。また上流側管路の中央を通る流線No.2は、遠心力の影響により交差部でふくれ、下流側管路では内壁側に寄ったところを通っている。一方、上流側の管路の内壁側を経路とする流線No.3の場合は、交差部及び下流側ではそのま

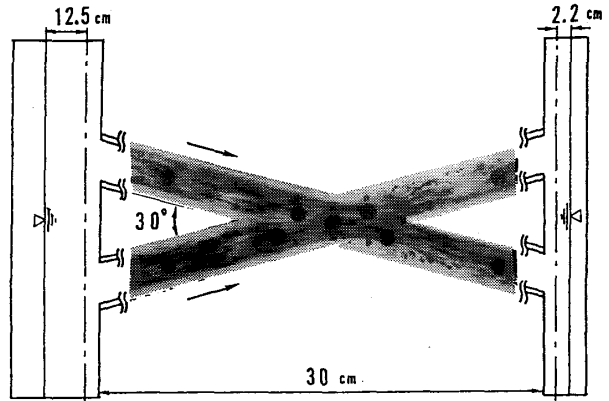


写真-1 交差部周辺の流況
($\theta = 30^\circ$ のRun-3の場合)

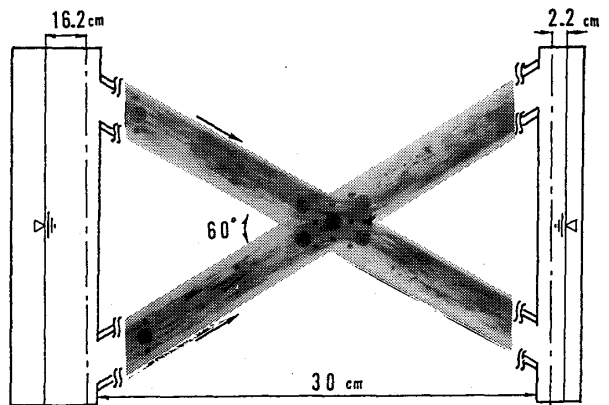


写真-2 交差部周辺の流況
($\theta = 60^\circ$ のRun-4の場合)

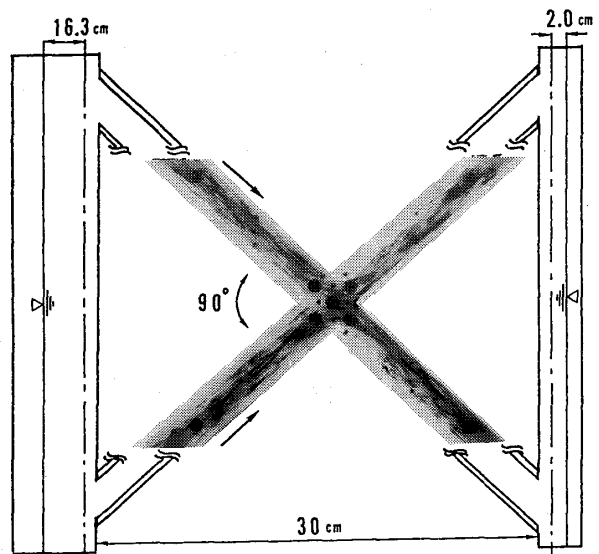


写真-3 交差部周辺の流況
($\theta = 90^\circ$ のRun-4の場合)

ま内壁側を通っている。また交差角の違いや上流側水位上昇に対して、交差部中央を過ぎた外壁側に形成される渦の形が異なっていることが可視化写真からわかる。ただし、 30° の場合にはその変化が小さい。それに対して、交差角や上流側水位の違いによっては、交差部中央を過ぎてからの流線が多少異なるようである。

今回のような対称の流れでは、交差部中央の縦断方向に流れを分離するような壁が形成されているのが可視化写真結果より明らかとなっている。

(3) LDVによる流速測定

測定対象とする管路は、側方及び上方からも透過である正方形断面となっているので、今回は測定の比較的容易である上方からの測定を行なった。測定断面での鉛直方向の流速を調べてみると、ほとんどの中央断面では、例えば図-3のような流速分布を示していた。これらの結果から、管路中央部での流速がその鉛直断面での平均流速を表していると考え、流速測定にあたっては、管路の鉛直方向の中央断面位置で水平方向の各点の流速を測定することにした。交差角と流速とを変化させた各実験ケースの数値を表-1に示している。なお平均流速Vは、右の管の上流側の平均流速とした。

測定断面No.1からNo.11での流速ベクトルの一例として、交差角が 60° のRun-4の場合を図-4に示す。

交差部内では、可視化写真でみられた中央部の流れを分離するような“壁”が形成される付近の流速が小さくなっている。交差角の違いによって、交差部中央及びそれを過ぎた断面での流速分布が異なっている。また、交差部中央を過ぎたところでは、外壁側付近の流速がかなり小さくなっており、可視化写真でみられたような渦の発生領域と一致し、流速測定によっても確認することができたと思われる。

(4) ピエゾメータによる圧力水頭の測定

左右管路の各断面の中央部及び左右の壁寄りの点の底に小さな穴をあけ、ピエゾメータによる圧力水頭の測定を行なった。

各Runごとの圧力水頭の変化をしてみると、上・下流側の水位差が大きくなるにつれて、交差部中央付近で圧力水頭が大きく変動しだしている。それらの状況は以下の解析での動水勾配線として示しており、詳しい考察は後述する。

4. 考察

(1) 交差管内でのエネルギー、動水勾配、圧力降下、損失水頭や流速比の変化

各流線に対してエネルギー線、動水勾配線、各断面での圧力降下、損失水頭 $h_i = \zeta i V^2 / 2g$ や平均流速と各点の流速との比 $(V/V_i)^2$ などの変化を調べた。ここでのエネルギー線は、動水勾配に速度水頭を加えたものである。それ

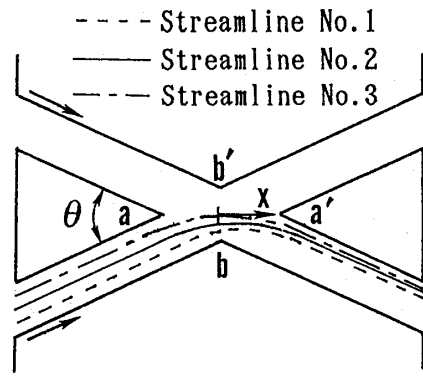


図-2 交差管内の流線

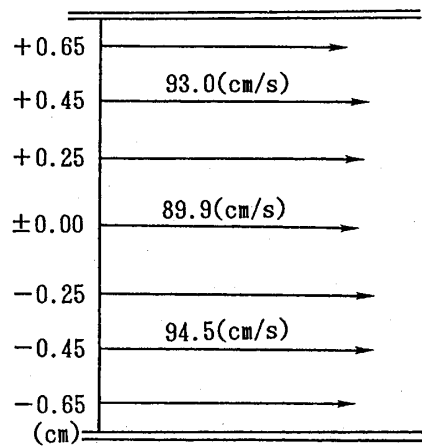


図-3 鉛直方向の流速分布図

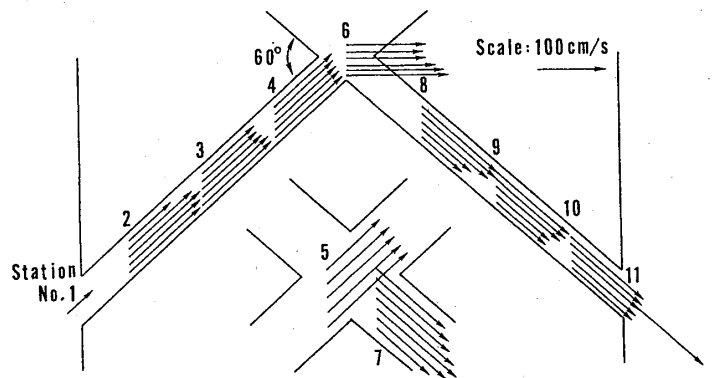


図-4 流速ベクトル ($\theta = 60^\circ$ のRun-4の場合)

らの結果のうち、各交差角でのRe数の最も大きい場合の流線No.2の結果を図-5(a)~(c)に示す。図に示さなかった結果も含めて、交差管内でのそれぞれの変化の特徴的な部分の考察を以下に示す。

a) エネルギー

いずれの流線でも交差角が 30° の場合には、交差部中央を過ぎた点でエネルギーがわずかながら上昇し、エネルギー線は全体的になだらかな減少の形を示している。それに対して 60° や 90° の場合には、交差部中央で急激な変化を示している。流線No.1では、交差部中央でエネルギーが上昇し、その後交差部を過ぎた点で大きく減少している。一方、流線No.2やNo.3では、交差部中央での上昇がわずかか、あるいはほとんどなくなり、その後は大きく減少し、交差部を過ぎた下流側では、再び上昇している。また、流線No.3の 60° や 90° の場合の上流側でのエネルギー上昇がみられる。

b) 動水勾配

交差角が 30° のいずれの流線の場合も、交差部中央で圧力水頭が負圧になるまで大きく落ち込み、交差部を過ぎて再び上昇するようなV字型の動水勾配線を示している。それに対して 60° や 90° の場合には、交差部中央での落ち込みは小さく、交差部の出口前後で低い圧力水頭を示し、下流側で再び上昇している。その場合、流線No.1の変化は小さいが、流線No.2やNo.3の交差部出口前後での圧力低下は大きくなっている。

c) 圧力降下

いずれの流線でも、 30° の場合の圧力降下が最も大きくなっている。逆に交差部中央を過ぎると、圧力が上昇するため圧力降下は小さくなり、負の圧力降下も示されている。 60° の場合には、流線No.1やNo.2での入口付近で圧力降下が大きいが、その他のところでは 30° に比べ変化が小さい。また 90° の場合には、入口付近及び交差部を出た最初の点で大きな圧力降下がみられ、流線No.1とNo.2でのそのような圧力降下が顕著である。

d) 損失水頭 h_1

いずれの交差角及び流線の場合とも、交差部中央を過ぎた交差部出口前後での損失水頭が大きくなっている。また 60° や 90° の場合には、交差部中央を過ぎた点で大きな損失水頭を示している。さらに、出口での損失も大きい。そのほか、流線No.2とNo.3での 60° や 90° の場合には、交差部を出た点での損失水頭は小さくなっている。

e) 流速比 $(V/V_i)^2$

30° の場合の流速比は、全体的に1.0より小さい値の変化を示し、特に交差部ではかなり小さくなり、流速 V_i が大きくなっていることがわかる。一方、 60° や 90° の流速比は、全体的に変化が小さく、交差部も中央部のみ小さな値となっている。これらの結果は、いずれの流線でも同じと

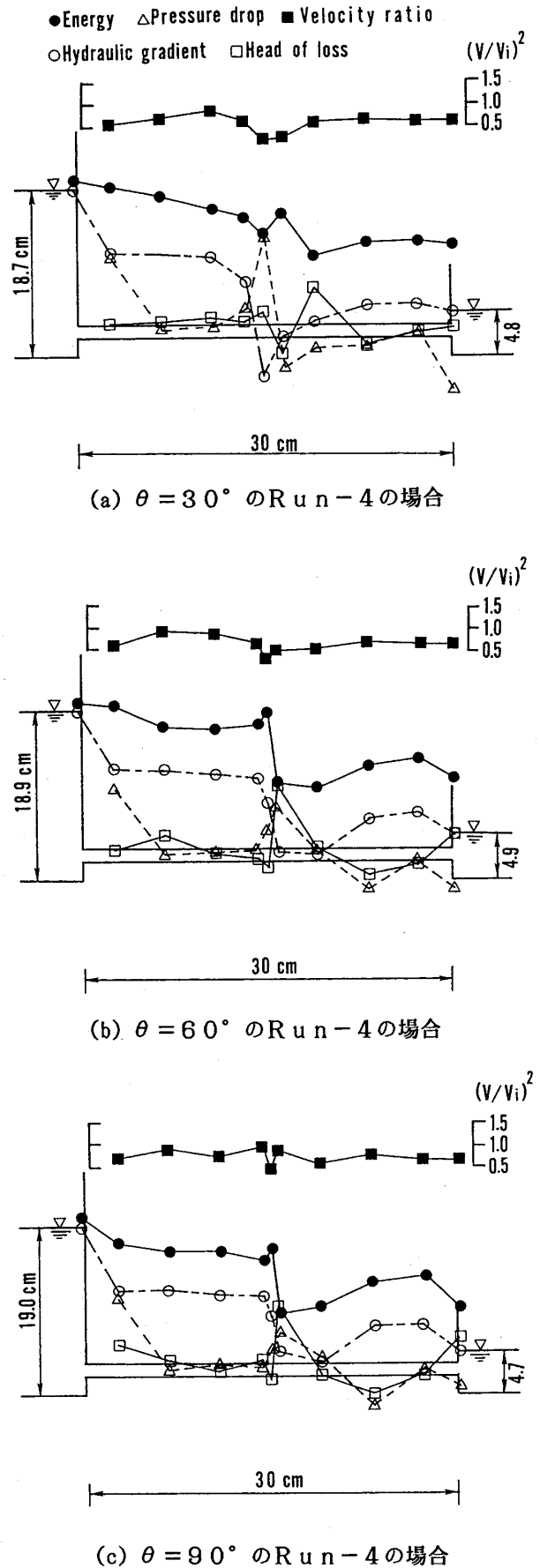


図-5 エネルギー、動水勾配、圧力降下、損失水頭や流速比の変化(流線No.2の場合)

なっている。

以上のような交差管内での各種損失の変化で考察を示したが、交差部内での各点の圧力や流速の変化を追ってみると注目すべき現象を発見することができた。すなわち、交差部の横断方向に圧力の変化を追ってみると、外壁側から内側に向かって圧力が高くなり、中央部の流れを分離する“壁”付近で圧力が最高になる大きな圧力勾配が生じている。特に、交差角が30°の場合にそれが顕著に現れている。これは、交差部内での断面縮小からの流速の増大によるラム効果²⁾によるもので、交差管内の流況の特徴を示す現象の一つと思われる。

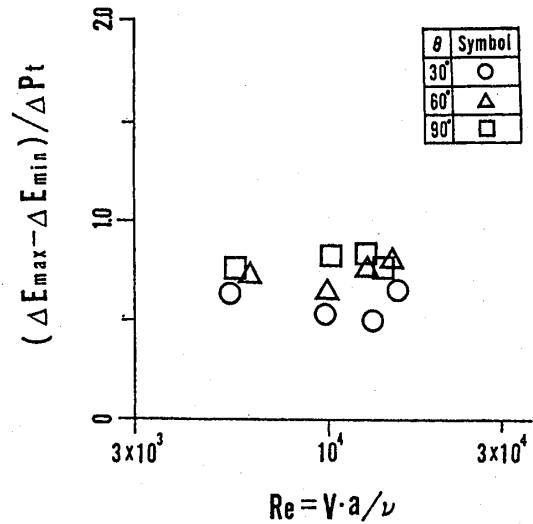
(2) エネルギー損失について

交差管内での速度水頭、圧力水頭及び位置水頭（基準線を交差管中央水平断面とするので今回は零である）の和である比エネルギーが、最大あるいは最小になる断面を調べてみた。交差角が30°の場合には、最大となるところが上流側の水槽内のNo.1断面となっている。逆に、最小となるところは交差部を過ぎたNo.8の断面か、あるいは交差管出口を過ぎた下流側水槽内のNo.11断面となっている。60°の場合には、すべてが交差部中央のNo.6断面で最大となり、最小はNo.8か、あるいはNo.11断面となっている。また90°の場合には、Re数の一番小さいものに対してはNo.1断面で最大となっているが、その他の大きなRe数に対してはNo.6断面となっている。逆に、最小となるところは、他の場合と同様にNo.8あるいはNo.11となっている。

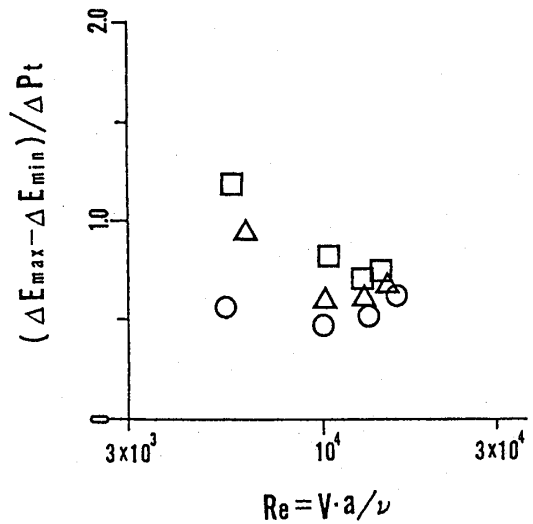
最大から最小への断面間でのそれぞれのエネルギー ΔE_{max} と ΔE_{min} に対して、その差であるエネルギー損失 $\Delta E = \Delta E_{max} - \Delta E_{min}$ を調べると、各流線でのRe数に対する $(\Delta E_{max} - \Delta E_{min}) / \Delta P t$ の変化は、図-6(a)~(c)のようになった。流線の違いによりエネルギー損失が異なってきている。すなわち、最も交差管の内壁側の流線であるNo.3の場合が最も大きくなっている。また交差角が大きくなるにつれて、損失も大きくなっている。流線No.2とNo.3の交差角が60°及び90°の場合では、Re数が増加するにつれてエネルギー損失は減少している。しかし、Re数が小さい場合のエネルギー損失は、全水頭差の割合に比べて大きくなっている。

一方、流線No.1の場合やその他の流線での交差角が30°の場合には、Re数に対するエネルギー損失と全水頭差の比の変化が小さくなっており、しかもその値も小さくなっている。このことから流線No.1や交差角が30°の場合には、エネルギー損失が他の場合に比べて小さく、Re数の増加に対してもエネルギー損失が同程度に増加していると思われる。

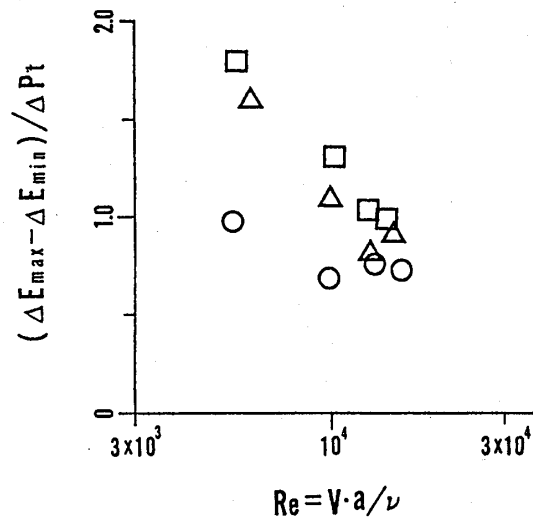
前述の各断面でのエネルギー線の変化やエネルギー損失の変化から、交差管内でのエネルギーの変化をまとめると以下のとおりとなる。



(a) 流線No. 1の場合



(b) 流線No. 2の場合



(c) 流線No. 3の場合

図-6 Re数に対する $(\Delta E_{max} - \Delta E_{min}) / \Delta P t$ の変化

交差部周辺では、交差角が大きくなると、交差部中央より前面でエネルギー上昇が大きく、逆に交差部中央を過ぎると、大きなエネルギー損失となっているのがわかる。一方、交差角の小さい 30° の場合には、交差部中央より前面でエネルギー損失を生じるが、交差部中央を過ぎるとその損失が小さくなり、エネルギー上昇も生じていると思われる。

交差管全体では、交差角が大きくなるにつれてエネルギー損失差も大きくなっている。また、交差管の内壁に近い流線の方がエネルギー損失差も大きくなっており、さらに、 Re 数の小さい場合も全水頭差が小さいにもかかわらず、エネルギー損失が大きくなっている。

いずれにしてもエネルギー損失に対しては、交差角が 30° の場合が最も小さいと思われる。

(3) 最大または最小のエネルギー、圧力降下や損失水頭

交差管全体でのエネルギー、圧力降下や損失水頭などの変化から、それぞれの最大あるいは最小、または逆に負の最大となる点での値を求め、全水頭差との比で Re 数に対する変化を調べた。その結果の一例として、流線No.3の場合を図-7(a)~(c)に示す。図を省略しているその他の流線に対する結果も含め、以下に考察を示す。

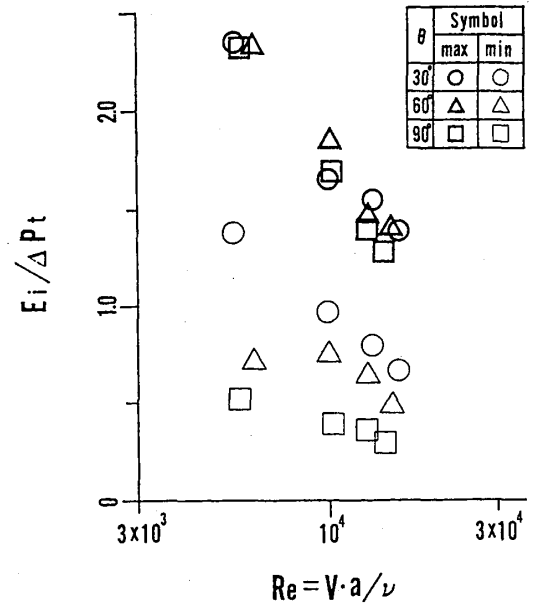
a) エネルギー変化 (図-7(a))

いずれの流線でも、最大のエネルギーは交差角による違いが小さく、 Re 数の増加とともに全水頭差とエネルギーの最大値の比も小さくなっている。一方、エネルギーの最小については、流線により異なっている。流線No.1については、交差角による差は小さいが、流線No.2及びNo.3では、 Re 数に対する全水頭差と最小エネルギーとの比は、交差角により異なっている。交差角が 30° の Re 数が小さい方の場合には、全水頭差の割には最小エネルギーが大きくなっている。一方、交差角が 60° 及び 90° の場合には、その最小エネルギーはそれほど大きくなっていない。また、交差角が 90° の場合には、最小エネルギーの値が最も小さくなっている。従って、最小と最大のエネルギー差は、 90° の場合が最も大きくなっている。

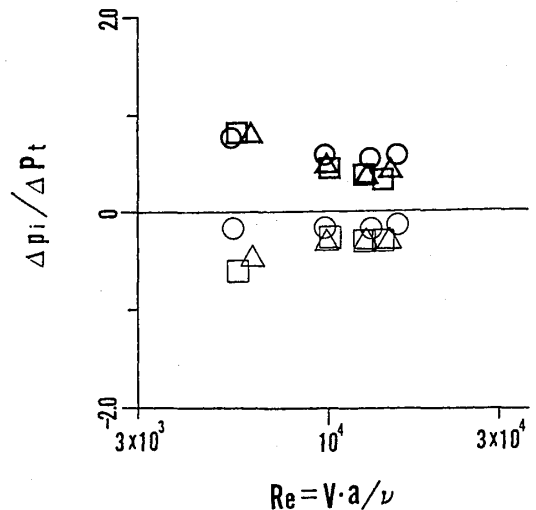
b) 圧力降下の変化 (図-7(b))

流線の違いで最大圧力降下が多少異なっている。流線No.1では、どの Re 数に対しても、交差角が 30° の場合に最も大きな圧力降下を示している。逆に、 60° の場合が最も小さな圧力降下となっている。流線No.2や流線No.3では、交差角による違いが小さくなっている。

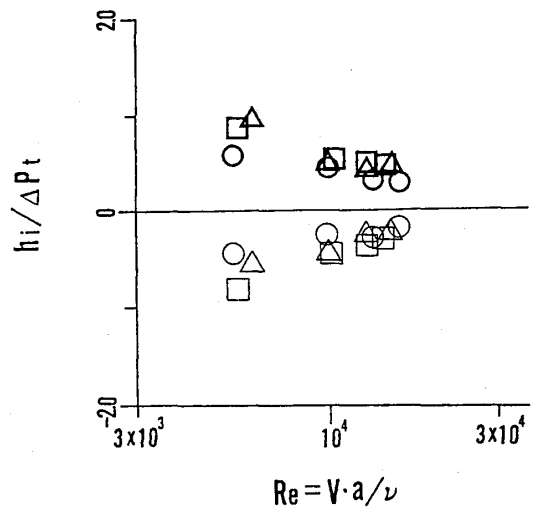
一方、圧力降下が負、すなわち圧力上昇のもっとも大きい場合の結果は、図では負の位置に示され、いずれの流線にもみられる点に注目すべきと思われる。交差角による違いや Re 数に対しても、全水頭差に対する圧力上昇の比の変化は小さくなっている。結局、圧力降下と圧力上昇の変化を比べると、交差角が 30° の場合はその差が大きく、特



(a) $E_i/\Delta Pt$ - Re との関係



(b) $\Delta p_i/\Delta Pt$ - Re との関係



(c) $h_i/\Delta Pt$ - Re との関係

図-7 Re 数に対するエネルギー、圧力及び損失の変化 (流線No.3の場合)

に流線No.1のRe数が大きくなった場合に、圧力降下と圧力上昇との差が最も大きくなっており、圧力変動が大きくなっていると思われる。

c) 損失水頭の変化 (図-7(c))

全水頭差に対する損失水頭比は、交差角が 30° の場合の結果が他の角度に比べ小さくなっている。しかもRe数に対するその変化も比較的小さい。それに対して、流線No.2の 60° や 90° のRe数の小さい場合の結果などは、全水頭差の割には大きな損失水頭差となっている。

一方、損失水頭が最も大きな負を示す点、すなわちエネルギーが供給されると考えられる点については、その値が図中には負の値のところに示されている。流線No.1やNo.2では、その値はほとんどの交差角に対して零に近いところに位置している。すなわち、エネルギー供給はそれほど大きくないと思われる。しかし、流線No.3の場合やNo.2の一部では、エネルギー供給も増え、特にRe数の小さいときの交差角が 90° の場合などでは大きくなっている。

このように損失水頭やエネルギーについては、交差角の大きい 60° や 90° の場合の方が大きな値を示すとともに、それぞれの値の差も大きくなっている。

(4) 交差管内の損失特性

理論式で定義してきた交差管内での損失や抵抗特性を表わすそれぞれの係数のRe数に対する変化を求めた結果、流線No.3の場合には、図-8(a)~(f)のようになった。図を省略した他の流線の場合については、Re数に対する変化はほとんど同じであるが、それぞれの係数の絶対値が多少異なるものもみられる。以下にそれらの流線も含めた考察を示す。

a) 損失係数 K_z 及び全水頭差 ΔP_t との比 $\Delta P_t/K_z$ (図-8(a),(b))

交差管内の各点での損失係数 ζ_i の和である K_z については、各交差角のRe数に対する変化がどの流線でも比較的よく似ている。交差角が大きくなるにつれて、 K_z の値は大きくなっている。Re数に対する変化は、交差角が 30° や 60° の場合には比較的小さいが、 90° の場合はやや大きくなっている。この 90° の流線No.2とNo.3のRun-3の場合には、 K_z が最小となって、Re数の増加に対して K_z が再び大きくなっている。

次に、 $\Delta P_t/K_z$ のRe数に対する変化をみると、Re数の増加に対して、いずれの交差角の $\Delta P_t/K_z$ も増大していっている。特に 60° 及び 90° の場合は、直線的に増大していっている。 $\Delta P_t/K_z$ の値は、交差角の小さい方がやや大きな値となっている。 $\Delta P_t/K_z$ は、交差管内全体でのエネルギーの変化の影響を表わすと考えられるので、これらの結果から、同じRe数に対しては、交差角が小さい方がエネルギーの変化の影響を受けやすいと考えられる。また、流線No.3の 30° のRe数の小さい場合も同様に、その変化の影響を受けやすいと思われる。

b) 損失係数 K_q 及び全水頭差 ΔP_t との比 $\Delta P_t/K_q$ (図-8(c),(d))

交差管内での各点での平均流速に対する流速比 α_i と前述の損失係数 ζ_i との積の和である K_q は、Re数に対する流線による違いはほとんどなく、また交差角の違いによるRe数の変化は非常によく似ている。すなわち K_q は、どの流線及び交差角ともにRe数に対して減少していき、Re数が 10^4 を越えるとやや増加していく形となっている。やはりこの場合も、交差角が 30° の場合の K_q の値が最も小さく、交差角が大きくなるにつれてその値は上昇している。

次に、 $\Delta P_t/K_q$ のRe数に対する変化をみると、Re数の増加に対して $\Delta P_t/K_q$ は、いずれの流線のどの交差角に対しても直線的に増大していっている。 $\Delta P_t/K_q$ は、物理的には交差管内全体の平均流速を水頭で表わしたものと考えられ、今回の実験での全水頭差による流速の変化が、正方形管路の一辺 a を代表長さとしたRe数と関係している結果を示していると思われる。

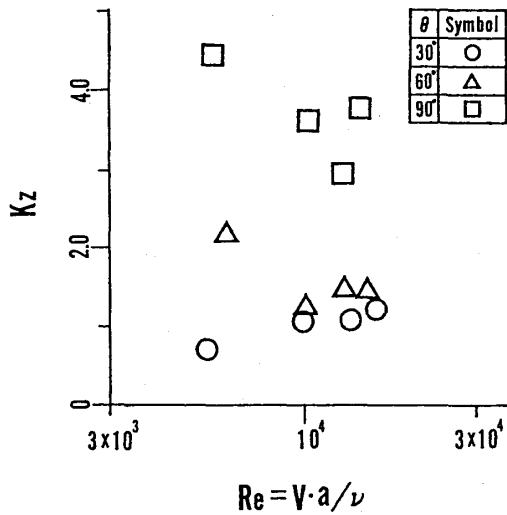
c) 流速比の2乗平均 K_α (図-8(e))

平均流速 V と各点の流速 V_i との比の2乗したものの平均である K_α については、どの流線もRe数に対する変化はよく似ている。

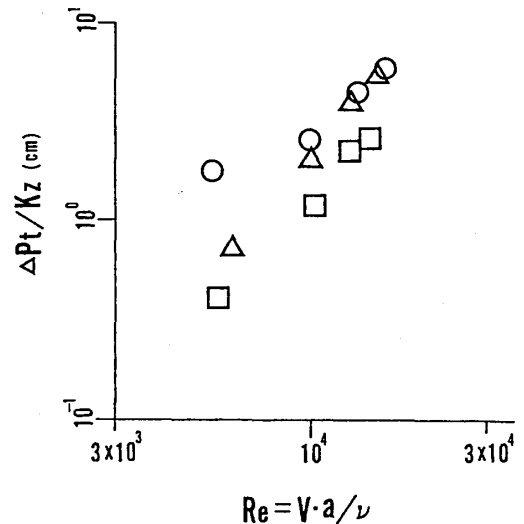
交差角が 60° の場合は、Re数に対する変化が比較的小さく、ほぼ一定の値となっている。また、交差角が 30° と 90° の場合には、 60° を対称軸とした相対する変化を示している。さらにRe数が増加していくと、どの交差角もある K_α の値に収束するような変化を示している。特に流線No.1とNo.2でその傾向がみられる。

d) 交差管内の抵抗係数 K_c (図-8(f))

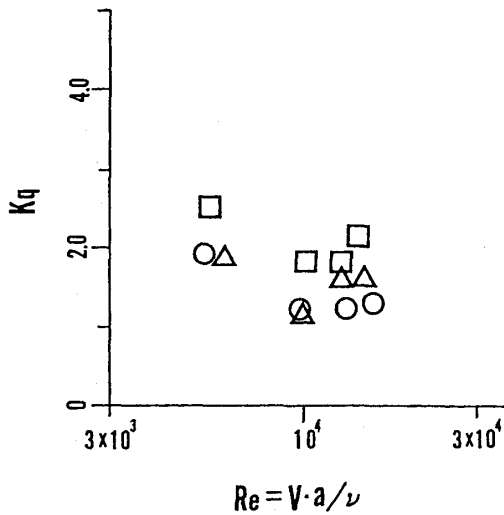
理論式で導いた交差管における新しい無次元パラメータである抵抗係数 K_c については、交差角ごとにRe数に対する変化が異なっている。また、流線が異なると K_c の値も違っている。しかしながら、いずれの流線の場合もRe数に対する K_c の変化は、比較的よく似た形となっている。交差角が 30° の場合には、今回のRe数の範囲では、Run-2のRe数が 10^4 付近で K_c の値はピークとなる変化を示し、全体の K_c の値は、他の交差角に比べ小さい値となっている。



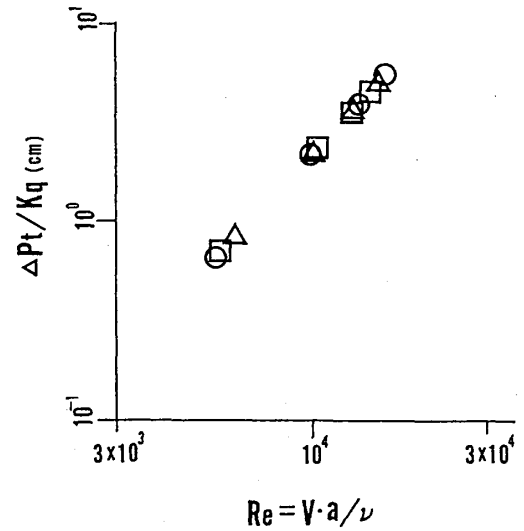
(a) $K_z - Re$ との関係



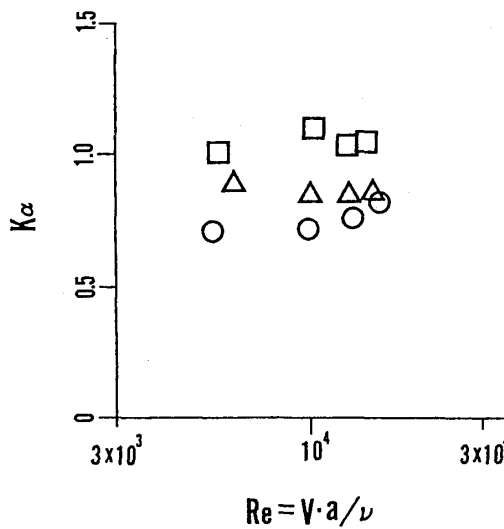
(b) $\Delta P_t / K_z - Re$ との関係



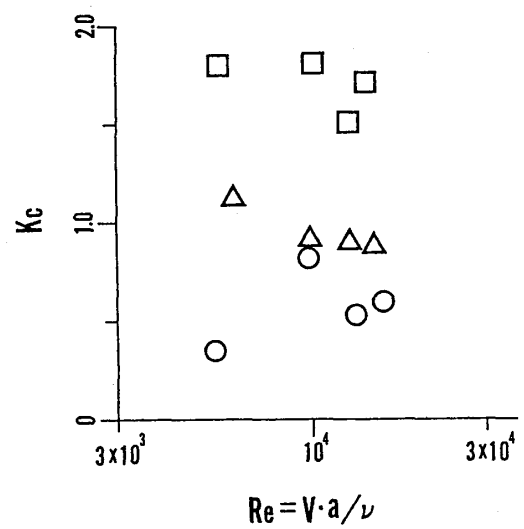
(c) $K_q - Re$ との関係



(d) $\Delta P_t / K_q - Re$ との関係



(e) $K_\alpha - Re$ との関係



(f) $K_c - Re$ との関係

図-8 Re数に対する損失、流速及び抵抗のそれぞれの係数の変化 (流線No. 3の場合)

交差角が 60° の場合には、 Re 数に対する Kc の変化は、最も小さくなっている。交差角が 90° の場合には、 Kc の値が最も大きくなり、各流線ともに損失水頭が減少しているRun-3の場合に多少変化がみられる。この 90° の流線No.2や 60° の流線No.3の場合には、 Kc の値が1.0に近いものとなっている。これらのことから、交差管内の各点において、平均流速と同じ様な流速や圧力降下が小さい場合の流線に対しては、 Kc の値が1.0に近づくと考えられる。

一方、図-8(f)に示すように、流線No.3の 90° の場合には、 Kc の値が最も大きくなっている。これは、前述の図-7(a)に示した最大及び最小のエネルギー差が大きくなったものによると思われる。逆に 30° の場合には、平均流速 V に対して交差部の流速 V_i が大きくなり、 $(V/V_i)^2$ は小さくなる。さらに、最大及び最小のエネルギーの差や損失水頭も小さいので、 Kc の値は小さくなっている。

以上のような圧力及び流速によるエネルギーの変化に関する無次元パラメータ Kc は、交差管内の全体の抵抗特性を表していると思われる。

5. 結論

非圧縮性流体の定常流れに対する交差管内の流れの特性を解明するために、流れの可視化実験を試みてきた。その結果、注入トレーサ法により交差管内での流線や渦の発生領域を明らかにすることができた。また、LDVによる流速測定やピエゾメータによる圧力水頭の測定からも流況の特性を明らかにすることができた。結論を簡潔にまとめると次のとおりとなる。

交差部内での可視化結果より、

- 1) 交差部中央の縦断方向に流れを分離する“壁”が存在することを明らかにすることができた。
- 2) 交差角の違いにより遠心力の影響が異なることがわかった。
- 3) 交差部内にラム効果による圧力変化が生じることを発見することができた。

交差管内でのエネルギー、圧力降下や損失水頭については、

- 4) 30° のように交差角が小さい場合には、エネルギー損失が小さい。しかし、圧力降下は 30° の場合が大きい。
- 5) 交差角が大きくなるにつれて、損失水頭は大きくなる。同時にエネルギー供給も増えている。

ということがわかった。さらに、

- 6) 新しいパラメータ Kc によって交差管内での流れの抵抗特性を把握することができた。

以上のように、流線の新しい可視化手法の適用により交差管内の流れを把握することができ、かつてはブラックボックス的な処理に終わっていた交差部内の流れの解析を大いに発展させることができた。

【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 VT (edited by Y. Tanida and H. Miyashiro), Springer-Verlag, Berlin, pp.399-403, 1992.
- 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), Higher Education Press, Beijing, pp.296-301, 1992.
- 3) Zhang, N., Yang, W.-J., Xu, Y. and Lee, C. P. : Flow Characteristics in Flow Networks, Experiments in Fluids, Vol.14, pp.25-32, 1993.
- 4) 梅田眞三郎、尾島勝、W-J Yang : 交差管内の流れの可視化(第1報)、可視化情報、Vol.12, Suppl. No.1, pp.231-234, 1992.
- 5) 梅田眞三郎、W-J Yang : 交差管内の流れの可視化—流線の可視化—、可視化情報、Vol.13, Suppl. No.1, pp.127-130, 1993.
- 6) 梅田眞三郎、W-J 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、Vol.13, Suppl. No.1, pp.131-134, 1993.
- 7) Umeda, S., Yang, W.-J. and Tanaka, T.: Mechanics and Correlations of Flow Phenomena in Intersecting Ducts, Experiments in Fluids, Vol.17, No.5, pp.323-329, 1994.