低レイノルズ数オリフィス流れの圧力回復特性
に関する実験的考察*鷲尾 誠一**, 小西 忠孝**, 岡村 卓***
角谷 繁明†, 飯田 晃也††, 山本 浩†††Experimental Study on Pressure Recovery in Orifice Flows
of Low Reynolds Numberby Seiichi WASHIO, Tadataka KONISHI, Takashi OKAMURA,
Shigeaki KAKUTANI, Kohya IIDA, and Hiroshi YAMAMOTO

The present paper deals with an experimental review of orifice flows in oil hydraulic lines. Pressure differences were measured between two separated points on a tube wall downstream of an orifice. Unexpectedly an abrupt vanishment of pressure recovery was observed under a specified rate of flow. Measurement of continuous pressure recovery profiles revealed that this 'vanishment' resulted from an unknown phenomenon which characterizes orifice flows of low Reynolds number; the pressure recovery region starts to remove downstream when Reynolds number falls below a critical value, and it drifts away farther from the orifice as Reynolds number decreases. The critical Reynolds number becomes smaller for a greater enlargement ratio of an orifice. Perplexingly it also varies with the line pressure.

Key Words: Orifice Flow, Pressure Recovery, Pressure Profile, Coefficient of Recovery, Oil Hydraulic Line

1. 緒 言

管路内のオリフィスを通じた流れにおいては、管壁に沿う流れ方向の圧力分布が、オリフィスを出た所でいったん降下した後上昇を始め、オリフィスから管直径の4~6倍下流の点で最大値に達し、その後管壁摩擦によって漸減していくという形をとると考えられている。こうした圧力回復の図式は、その発生メカニズムがよく分かっていない点を除けば、それ自体は水や空気を用いた測定によって実証されており、現在水力学の常識ともいえるべき定説となっている^{(1)~(4)}。

しかるに著者らは、以前に油圧管路で、流れの方向に沿ってオリフィス下流管壁に若干の測定孔を開け圧力を同時に測った際、予期したような測定孔間の圧力差を確認できなかった経験をもつ⁽⁵⁾。従来の定説に立てば、この結果はもちろん、当然存在するはずの差圧を検出し得なかっただけの、測定精度の欠陥を示す

ものにすぎない。しかし一方では、簡単にそう断定してしまうことにもちゅうちょがあった。

この研究は、あいまいのまま残してあったこの問題に決着をつけることを目的に、油圧管路内オリフィス下流において、壁面圧力を正確かつ詳細に測定することを試みたものである。実験を通じて見出された事実は思いがけないものであり、前回の経験の正当性と、その原因としての圧力回復域に生ずる特異な現象が判明し、従来の定説もその一部を修正すべき結果を得たので、ここに報告する。

2. オリフィス下流管壁における2点間差圧

2.1 測定装置 最初に、オリフィス下流管壁に若干の圧力測定孔を開けた、図1のような試験管路を使用する。これは内径 $D=16$ mm の管内に、直径 $d_0=2$ mm、長さ $l_0=2$ mm の円筒オリフィスを置いたもので、その下流側管壁に、オリフィス直後を始めとして軸方向に互いに D または $2D$ 隔たった、七つの測定孔 ($\phi 1$ mm) $p_2 \sim p_8$ を設けてある。圧力回復を検出し得なかった以前の測定の真偽を明らかにする目的から、各測定孔にそれぞれ圧力変換器をつけて圧力分布を求める代わりに、ここでは専ら異なる2点間での圧力差の有無を、微差圧計を使って検出する。

* 昭和60年4月1日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年10月1日。

** 正員、岡山大学工学部 (〒700 岡山市津島中 3-1-1)。

*** 日本板硝子(株) (〒541 大阪市東区道修町 4-8)。

† エプソン(株) (〒399-07 塩尻市広丘原新田 80)。

†† リコー(株) (〒107 東京都港区南青山 1-15-5)。

††† 三洋電機(株) (〒675-23 加西市北条町北条 323)。

この試験管路の両側に、十分長く真っすぐな内径の等しい鋼管を接続したうえで、図2のような油圧回路に組み込む。実験流体としてはVG 56の作動油（動粘度 $0.92 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、密度 859 kg/m^3 @ 30°C ）を用い、脈動の少ないスクリュポンプとリリーフ弁による定圧源から、温度補償形流量制御弁を介してオリフィスに一定油流を与える。その流量はあらかじめ検定したオリフィス流量計を使って求め、油温は試験管路およびオリフィス流量計の下流で、サーミスタデジタル温度計にて検出する。なお良好な流量測定精度（1%以内）を保証するため、水冷式オイルクーラを調節して、流量にかかわらずオリフィス流量計出口温度を 0.1°C の精度で一定に保つ⁽⁶⁾。

管壁測定孔からは二つを選び、両者の圧力を高圧ゴムホースを介して定格 50 kPa のひずみゲージ式差圧計へと導く。その時ゴムホースおよび差圧計内の気泡は十分な注意をもって除去し、更に他の使用しない測定孔は気泡を追いついた後閉止する。

2.2 測定結果 まず始めに、オリフィス直後の孔 p_2 と、それより $2D$ 離れた孔 p_4 をとり、流量を変えて2点間の差圧 $p_4 - p_2$ を測定した結果を、横軸にオリフィス穴を基準とするレイノルズ数 $Re = 4q/(\pi \nu d_0)$ (q : 流量, ν : 動粘度) をとってプロットすれば、図3のようになる。これを見ると、 Re の大きい所で存在した p_2 と p_4 の間での圧力回復が、 $Re = 800$ 付近を境に、それ以下のレイノルズ数では観測されなくなっている。この差圧の消滅は、明らかに突然、不連続的に現れており、決してレイノルズ数の低下につれて徐々に減少する圧力回復量が、やがて測定できなく

図1 試験オリフィス部と測定孔配置

図2 測定油圧回路

なったという類のものではない。したがってこの結果より、著者らの以前の体験が真実として裏づけられ、オリフィス下流の圧力回復を生ずべき所にそれが見られない現象が正しく事実であることが分かる。

一方オリフィス直後とそれより D 下流の2点間差圧 $p_3 - p_2$ を測定した結果を、同様なやり方で示せば図4のようになる。 p_2 と p_3 の間では、圧力回復ではなく圧力降下が起こり、その大きさが流量の減少とともに小さくなるが、図3と同様 Re がおよそ 800 を下まわると、その圧力降下も突然消滅する。

次に、こうした圧力回復の消滅現象が、通常の圧力回復領域を過ぎた下流では、どのように現れるかを調べる。そのために、オリフィスより $4D$ 下流の孔を始めとして、互いに下流側へ $2D$ ずつ隔たった四つの孔 $p_5 \sim p_8$ について、隣り合う2点間の差圧を流量を変えて測定してみたところ、図5のような結果を得た。ここには、本来ほとんど差圧を検出しないはずの2点間に、ある狭いレイノルズ数範囲だけ、かなり大きな差圧が鋭いピークを形づくるように生ずるという、予想しなかった現象が現れている。この狭いレイノルズ数

図3 圧力回復見込域内の2点間差圧

図4 圧力降下見込域内の2点間差圧

範囲は、いずれの場合も図3, 4の差圧消滅の起こるレイノズル数よりも小さく、また下流の2点間ほどそれが Re の小さい側にずれ、低い差圧ピーク値が対応している。

以上図3～5の結果より、オリフィス下流の管壁圧力分布が、レイノズル数のある臨界値以下ではもはや定説の形をとらず、しかもその変化は、定説の圧力回復域を越えてはるかに下流にまで影響を及ぼすことが判明する。しかし本節の測定だけをもって、この特異な結果の原因、すなわち変化を受けた圧力分布の全貌を推量しようとしても、かつかさうよう(隔靴搔痒)の感は免れず、是非とも圧力の軸方向分布の形を知ることが必要となる。

3. 連続圧力分布

3.1 測定装置 油圧管路内オリフィス流れでは、ライン圧力に比べて圧力回復量が小さいから、下流圧力分布を水や空気の場合のように、管壁に開けた多数の測定孔による圧力の同時測定という手段で見い出そうとすることは、個別圧力ピックアップの零点誤差ならびに分解能の限界から、精度の面で問題が多い。ここでは、微小な回復圧力を正確に測るためには上と同様の差圧計を利用し、その分布曲線を求めるためには、一つの管壁測定孔を軸方向に移動させればよいという着想を実現した、図6に示すようなオリフィス下流管壁圧力の連続分布測定装置を用いる。

この装置は、先端をおよそ210 mm隔てて同軸上に向かい合って取り付けられた、直径20 mmのピストンアーム状のオリフィス部および流出部に、中央に測定孔($\phi 0.5$ mm)をもち内面をホーニング仕上げした、

長さ520 mmの鋼管をはめたものである。オリフィス部ピストンの先端面には、図7に拡大して示したように、測定孔($\phi 0.5$ mm)が開けてあり、その圧力をアームに沿って取付けた細い導管によって外部へと導き、これを差圧計の基準圧力とする。流出部アームに切ったおねじと、管端ハンドル部のめねじとのかみあいにより、ハンドルを回転させれば管壁だけが軸方向にスライドして、流れの状態を乱すことなく、管壁測定孔をオリフィス直後から直径の10倍強の下流まで連続的に移動できる。オリフィス径は、 $d_0=1, 2, 4, 8$, mmの4種類を用意する。

図5 圧力回復域下流見込域での2点間差圧

図6 オリフィス下流連続圧力分布測定装置

この測定部を図2と同様な油圧回路に組み込み、そこに一定流量の油を供給する。また先の実験と同様、オイルクーラを調節して測定部下流温度を一定に保つ。その上で、ハンドルをゆるやかに回して管壁測定孔をオリフィス直後から徐々に後退させ、直線式ポテンシオメータで検出した測定孔移動距離と、ひずみゲージ式差圧計のストレインメータ出力とから、X-Yレコーダ上に直接連続圧力分布曲線を描かせる。描き終わったところで制御弁設定流量を変えてレイノルズ数を変化させるが、その時生ずるライン圧の変化は、オリフィス流量計下流に置いた可変絞りで補償し、流量の大小に関係なく測定部ライン圧力が一定となるようにする。

3・2 測定結果

3・2・1 圧力分布曲線 VG 56 の油を用い、定格 50 kPa の差圧計を使って、4 種類のオリフィスにつきその下流管壁圧力の連続分布曲線を描かせてみたところ、それぞれ図8(a)~(d)のような結果を得た。こ

れらの図では、いずれもレイノルズ数が大きい時には、通説のように圧力はオリフィスを出た所でいったん減少し、その後回復して最高点（圧力回復点）に達し、以後はわずかな減少を示しつつもほぼ一定となっている。ところがレイノルズ数が下がってある臨界値より小さくなると、それまで同じ位置にあった圧力回復部分が下流方向へ移動し始め、その後レイノルズ数の減少に応じてオリフィスから遠ざかるとともに、回

図7 ピストンアーム状オリフィス部の詳細

(a) $d_o = 1$ mm

(b) $d_o = 2$ mm

(c) $d_o = 4$ mm

(d) $d_o = 8$ mm

図8 オリフィス下流管壁の連続圧力分布曲線 (VG 56 油)

復前に現れる圧力降下も小さくなりやがて消滅する。

3・1節の2点間差圧測定に現れた不可解な結果も、ここで観察された圧力分布曲線の変化によって完全に説明される。すなわち図3、4で、ある値以下のレイノルズ数範囲において差圧が観測されなかったのは、圧力回復が消滅したのではなく、圧力回復点の下流に移動して測定2点間(p_2-p_4 または p_2-p_3)の外に出たためである。また図5は、レイノルズ数の減少とともに下流へと遷移していく圧力回復点が、 $p_5 \sim p_8$ の4点の間を順次通過する時に生ずる圧力差の痕跡を示している。

こうしてオリフィス下流においては、臨界レイノルズ数を境として、圧力回復点の下流方向遷移という予想し得なかった特性が存在することが見い出される。この特異な現象がこれまでに報告された例は見当たらないが、それはおそらく、従来のオリフィス流れの測定の大部分が水や空気を用いたものであったため、臨界レイノルズ数付近での圧力回復量が計測にかからないほど微小となることも一因であろう。したがってこの発見は、レイノルズ数に比べて大きな動圧の得られる油圧管内流れを使って、初めて可能となるべきものであったと言える。

ここではまた、油をVG 56から幾分低粘性のVG 10(動粘度 $0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$, 密度 857 kg/m^3 @ 30°C)に変え、定格 10 kPa の差圧計を用いて同様の測定を行っている。紙面の都合上 $d_0=2 \text{ mm}$ の例だけを図9に示すが、いずれの径のオリフィスについてもVG 56の油の場合と同様な遷移現象が観察されている。

なお回復点遷移が始まる以前の、定説の圧力分布については、今回の結果で見るとかぎり圧力回復点がオリフィスより $3.5D \sim 4.5D$ の間にあって、オリフィス径が小さいほどオリフィスに近づく傾向を示す。また

図9 連続圧力分布曲線 (VG 10 油)

圧力降下量の回復量に対する割合は、 $d_0=1 \text{ mm}$ の場合だけが目立って大きくなっている。

3・2・2 臨界レイノルズ数 図8をみると、遷移現象が始まった時、圧力回復点はオリフィス径が小さいほどわずかなレイノルズ数の減少で大きく後退するという性質があることに気がつく。更に同じオリフィス $d_0=2 \text{ mm}$ の図8(b)と図9を比較すれば明らかに、こうしたレイノルズ数変化に対する回復点移動の割合は、低粘性のVG 10の油の方がゆっくりしたものとなっている。このことは、小さな拡大比のオリフィスほど、また粘性の低い流体ほど、臨界レイノルズ数の正確な値を見つけることが難しいことを意味する。

図8からは臨界レイノルズ数の概略の値を知ることができ、それがオリフィスの拡大比が大きいほど小さな値をとることが分かる。一方もう少し正確に臨界レイノルズ数を定めることを期待して、VG 56の油を用い、 $d_0=2 \text{ mm}$ のオリフィスの $x=70 \text{ mm}$ の位置に測定孔を固定し、ライン圧力をパラメータにとって、レイノルズ数を減少させていった時の圧力回復量を測定してみたところ、図10のような結果となった。しかしこの結果では、回復圧力の消滅がレイノルズ数の減少に対して思ったほど鋭い形で現れておらず、必ずしもこの方法が臨界レイノルズ数を定めるのに適しているとは言えない。それよりも図10から見い出される意外な結果は、臨界レイノルズ数がライン圧力が変化すると異なる値をとるように見える点である。

この点を確認するために、同じオリフィス、同じ油で、レイノルズ数を臨界値付近の一定値に固定し、ライン圧力を変えるたびに圧力分布曲線を描いてみれば、図11のようになる。図10、11のような臨界レイノルズ数のライン圧力依存性を示すデータは、 $d_0=1 \text{ mm}$, VG 56の場合においてあきらかに認められるが、

図10 臨界レイノルズ数の決定を目的とした圧力回復消滅の測定

図 11 ライン圧力変化による圧力回復曲線の移動

図 12 圧力回復係数

それ以外の場合は、遷移後の回復点の後退がゆっくりしたもののはっきりとは見い出せなくなる。

したがって、臨界レイノルズ数には確かにライン圧力が変われば異なる値をとる性質があるが、その依存性は不規則的であり、しかも特定の条件下で顕著であるというように選択的である。

3・2・3 圧力回復係数 圧力回復量と流量の関係を知るため、測定孔を $x=180$ mm に固定し、流量を変えて差圧を測ってみると、圧力回復点が測定孔より下流に遷移するまでは、両者の関係はほぼ二次曲線上に乗る。したがって圧力回復点の遷移の有無にかかわらず、圧力回復量は平均流速の二乗に比例すると考えられるから、オリフィス内平均流速を u_0 とした時、通例のように静圧回復量を動圧からの変化分として $(1/2) \times \zeta_r \rho u_0^2$ の形で評価する。

4 種類のオリフィスにつき、VG 56 および VG 10 の油を使って得た流量、差圧のデータからこの圧力回復係数 ζ_r を求め、横軸にレイノルズ数 Re を対数でとって示せば、図 12 のようになる。これを見ると、拡大比が小さいほど ζ_r は大きく、オリフィス噴流でのエネルギー損失が小さいことが分かる。レイノルズ数 Re に対しては、その増加につれて ζ_r がやや減少する傾向が見られるものの、測定範囲内ではほぼ一定値をとっている。

4. 結 言

油圧管路内オリフィスの下流管壁において、流れ方向の 2 点間差圧および連続圧力分布を測定した結果、これまでに知られていない「圧力回復点の遷移現象」を見出した。これはレイノルズ数がある臨界値を下まわると、従来固定的にとらえられていた圧力分布形状が変容し、圧力回復部分がレイノルズ数の減少とともにいくらかでも下流に移動していく現象である。その臨界レイノルズ数は、オリフィス拡大比のほか、下流のライン圧力レベルによっても変化することが観察されたが、その大きさは水や空気のオリフィス流れの通常のレイノルズ数に比べてかなり小さいものとなる。したがってこの現象は、オリフィス流れの低レイノルズ特性として位置づけられるものであり、それ故に油圧管路において一般的かつ典型的に現れる。現在この遷移現象の発生原理を説明することは難しく今後の研究に待たねばならないが、それはおそらくオリフィス噴流がつくる局所的乱流の本質に係るものとなると考えられる。

文 献

- (1) 藤本, 水力学概論, (昭 25), 129, 養賢堂.
- (2) 池森, 水力学, (昭 32), 236, コロナ社.
- (3) 古屋・ほか 2 名, 流体工学, (昭 42), 68, 朝倉書店.
- (4) 中山, 機論, 26-171 (昭 35), 1485.
- (5) 鷺尾・ほか 2 名, 機講論, No. 754-9 (昭 50-6), 4.
- (6) 鷺尾・ほか 2 名, 機講論, No. 840-14 (昭 59-10), 279.

討 論

〔質問〕 菊 山 功 嗣 (名古屋大学工学部)

(1) オリフィス出口後の流れにははく離領域が存在し、その再付着位置もとくに低いレイノルズ数の場合には変化することは知られており〔例えば二次元の広がり流路に対しては文献(付 1) 参考〕, 貴結論で述べ

られているように圧力分布形状は必ずしも固定的にとらえられていないと思われる。むしろこの圧力分布の変化に関係し、管内の再付着位置の変化を明らかにし

(付 1) 末松・ほか 3 名, 機論, 39-321 (昭和 48), 1599.

ていただきたい。この点につきご意見をお聞かせ願いたい。

(2) ライン圧力によって臨界レイノルズ数が変化しているが、このことは流れが全く定常であれば実際には不可能であると思われる。管路系が閉回路であり、ポンプからの微小な脈動が影響するのではないか。また圧力の時間的变化があればそれはどの程度か。

〔回答〕 (1) オリフィス噴流の再付着点の測定で、本論文の遷移現象に関連すると思われるものは、質問者の示された伊藤らのほか、近江らの例(付2)が見られる。前者は二次元広がり流路の偏流(円管内オリフィス噴流では対称流(付3))の場合なので、比較の対象としては必ずしも適当でないかもしれないが、後者は円管の場合であり、レイノルズ数の増加に対して再付着点が上流側に動く傾向が示されている。しかしこれらの研究は、本論文と関心の所在を異にするものであり、そこには圧力測定はおろか、回復点遷移を予測する何らかの言及も認められない。したがって、少なくともこれまでに、オリフィス下流の圧力分布について、遷移現象の存在が指摘されたことはないと考え

る。もちろん質問者も言われるように、遷移状態において圧力回復位置と噴流の再付着位置の間に、一定の関係を予測することは可能であり、それを知ることは興

味ある問題である。しかし臨界レイノルズ数より上では、時間的に変動する再付着点を順流率50%の平均位値で求めた、DeRossett ら(付4)あるいは仲條ら(付5)の測定例があるものの、遷移状態における両者の位置関係については今のところ何も分かっておらず、また本論文も圧力測定に限定したものである以上、残念ながらご質問の点についてここで明らかにできることはないように思われる。

(2) 油圧回路の圧力脈動を臨界レイノルズ数のライン圧力依存の原因とした場合、その理屈は、ライン圧力を変える時の絞りの調節が波動の境界条件を変えて、脈動波形が変わるためと考えられる。しかし更に可能性の高い原因として、油に顕著なオリフィス噴流でのキャビテーション(付6)が挙げられる。下流ライン圧力を変えるといわゆるキャビテーション係数が直接変化を受けるから、噴流にキャビテーションがあれば流れの様相が変わることになる。そしてこの要因のほうは、流れが全く定常(脈動なし)でも影響する。ただしいずれの原因にせよ、なぜそれが圧力回復点の移動に結びつくかが問題である。なお本実験回路の圧力脈動は、測定データはわずかであるが、例えばライン圧力500 kPa で振幅1~2 kPa、数10+Hz 程度である。

(付4) Benedict, R. P. ほか, *Trans ASME*, Ser. A, (1976), 327. Discussion.

(付5) 仲條・本阿弥, 機論, 50-460, B(昭59), 3159.

(付6) 例えば, 山口・鈴木, 油圧と空気圧, 9-2(昭53), 55.

(付2) 近江ほか3名, 機論, 50-453, B(昭59), 1231.

(付3) 武藤・ほか2名, 機論, 48-430, B(昭57), 1032.