内管回転偏心二重円管内における 非ニュートン流体の圧力流れ

(第2報) 実 験

奈良工業高等専門学校	森	教	安 (会員)
大阪大学工学部	矢 上	光	宏
〃	江 口	孝	彰
〃	中 村	喜 代 次 (〃)	
〃	堀 川	明 (〃)	

Pressure Flow of the Non-Newtonian Fluid in an Eccentric Tube with a Rotating Inner Cylinder. Part 2 : Experiments.

Noriyasu Mori*, Mitsuhiro Yagami**, Takaaki Eguchi**,

Kiyoji Nakamura** and Akira Horikawa*,

* Nara Technical College, Nara.

** Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Osaka.

Abstract

The authors consider experimentally the pressure flow of the non-Newtonian fluids in an eccentric double walled tube with a rotating inner cylinder. Experiments are carried out to measure the pressure gradient, the angle of the secondary flow region and the pressure distribution on the outer cylinder using aqueous solutions of hydroxy ethyle cellulose (HEC). Results are summarized as follows :

- 1) The flow rate was enhanced by the rotation of an inner cylinder. In the relation between the flow rates in the stationary (Q_s) and the rotational (Q_R) condition, the difference in Q_R by each eccentricity increased with effect of the rotation against the axial velocity.
- 2) The angle of the secondary flow region increased with decreasing number of rotations and increasing pressure gradient.
- 3) The pressure distribution on an outer cylinder was affected by the axial flow and varied in the different manner by the ratio of radius and the eccentricity.
- 4) Experimental values agree well with the numerical results. Consequently the reliability of the numerical method in the previous paper was confirmed.

(Received July 9, 1984)

摘 要

目的 内管が回転する偏心二重円管内における非ニュートン流体の圧力流れについて HEC 水溶液を用いて実験を行い、流れを解明するとともに、前報の数値計算結果の妥当性を確認する。

成果 1) 内管回転により、無回転時に比べて同一圧力勾配での流量が増加した。また、無回転時流量 Q_s と回転時流量 Q_R の関係において、軸方向流れに与える回転の効果が大きいほど偏心率による違いが顕著となった。

2) 二次流れ領域の角度は、回転数が低いほど、軸方向流れが大きいほど大きくなった。

3) 外管壁上の圧力差分布は軸方向流れにより変化した。

4) 圧力損失、二次流れ領域の角度および外管壁上の圧力差分布の測定結果は、数値計算結果と一致し、数値計算の妥当性が確認できた。

(昭和59年7月9日受理)

1. 緒 言

内管あるいは外管が回転する二重円管内流れに関する実験的研究は、ニュートン流体について山田ら¹⁻⁶⁾および中林ら⁷⁻⁹⁾による一連の報告が見受けられる。彼らは圧力分布の測定を行い理論値との比較をしている。また、テイラーうずや乱流域についても実験を行っており、軸方向流れが存在する場合の検討もしている。非ニュートン流体については、粘度が低く、非ニュートン粘性も弱い希薄な高分子溶液を用いて、同心二重円管におけるテイラーうずを調べた実験は行われている¹⁰⁻¹²⁾。ところが、本報のように比較的非ニュートン粘性も強い粘弾性流体で、慣性が無視できるような流れについて、さらに軸流が存在するような流れを扱った実験は現在まで行われていない。

一方、内管が回転する偏心二重円管内を非ニュートン流体が一定圧力勾配で流れる場合について、前報¹³⁾で変数係数の二次流体モデルを用い、差分法による数値計算を行った。その結果、内管の回転により無回転時の場合に比べて同一圧力勾配における流量が増加すること、軸方向流速と軸直角断面内流速が互いに影響を及ぼし速度分布を変化させること、および、軸流により外管壁上の圧力分布が変化することなどが明らかとなった。また、流体の弾性は流速にはほとんど影響を与えないが、弾性が大きくなると外管壁上の圧力分布は影響を受け非対称な分布となることがわかった。

そこで、本報では内管が回転する偏心二重円管内における非ニュートン流体の圧力流れについて、前報の数値計算結果の妥当性を確認するため、粘弾性流体である Hydroxy Ethyle Cellulose (HEC) 水溶液を用いて実験を行った。

2. 圧力損失および管断面内二次流れ

2.1 実験装置および方法

内管回転偏心二重円管の実験装置の概略を図1に示す。溶液タンクに貯えられた溶液は、減圧弁により調整された空気圧により二重円管部に流れる。二重円管の外管には圧力損失を測定するために、十分な助走区間をとったのちに135.0 mmの間隔で測圧孔を設けた。そして、それぞれの測圧孔は差圧型変換器(豊田工機製, DD 101 K)に導かれており、圧力損失が測定される。内管および外管はオイルシールで軸封され、軸受により保持されている。内管の回転は低速回転の場合には変速モータを用いた

図1 実験装置概略図

ベルト駆動により行い、高速回転の場合にはインダクションモータの回転数をインバータにより制御して行った。実験に用いた二重円管の寸法は、外管半径 $R_o = 25.0$ mm であり、内管は半径 $R_i = 20.0$ mm, 24.0 mm の二種類とした。したがって、この場合半径比 $\kappa = R_i/R_o$ は0.80と0.96となる。

二重円管の偏心量については、その設定を容易にするために、内・外管ともにその内径に対して両端軸受部を2.5 mm 偏心させた二重偏心機構を用いた。この機構を用いると、外管を所定の角度だけ回転させることにより任意の偏心率が得られる。

つぎに、二次流れの観察であるが、実験装置は流れが見られるように外管をほぼ同径の透明アクリル管に変えたのみで、ほかは圧力損失の測定に用いたものと同じである。内管の回転により生じる二次流れを可視化するためにアルミ粉末を混入した溶液を用い、その流跡を観察することにより二次流れの大きさを求めた。

実験に用いた溶液は HEC 1.0%, 1.5% 水溶液である。この溶液は、せん断に強いために本実験のように内管回転により強いせん断を受ける流れにおいても物性値が変化せずに都合がよい。実験には主として HEC 1.5% 水溶液を用いたが、圧力損失の測定において一部 HEC 1.0% 水溶液も使用した。なお、HEC 1.5% 水溶液の粘度は、同心二重円管における流量と圧力勾配の関係から求めるとつぎのようになった。

$$\eta = 4.1 \left(\frac{\operatorname{arcsinh}(1.3 \gamma)}{1.3 \gamma} \right)^{0.7} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdots \cdots (1)$$

ただし、 γ (s^{-1}) は ずり速度である。

図2 流量と圧力勾配の関係

2.2 圧力損失の測定結果

図2に HEC 1.5%水溶液に対して得られた圧力勾配 $\bar{P}$ と流量 Q の関係を示す。ただし、半径比 $\kappa = 0.96$ 、偏心率は $e = 0.2, 0.5, 0.8$ である。図中の N は内管回転数で、内管回転により同一圧力勾配下での流量はどの偏心率の場合にも増加しており、圧力勾配の小さなところで流量増加の割合は大きく、圧力勾配が大きくなるほどその割合は小さくなっている。また、無回転時の測定値は偏心率にかかわらずその傾きに差はほとんどなく、ほぼ平行になっているが、回転が増すにつれて測定値は両対数上で直線的になり、その傾きも偏心率が小さいほど大きくなる傾向を示している。

つぎに、偏心率による流量増加の違いをさらに明らかにするために、無回転時の流量 Q_s とそれと同じ圧力勾配における回転時の流量 Q_R の関係を図3、図4に示す。半径比 $\kappa = 0.8$ では Q_s の小さい

図3 Q_s と Q_R の関係 ($\kappa = 0.8$) 図4 Q_s と Q_R の関係 ($\kappa = 0.96$)

ところで偏心率による違いが少しみられるが、流量が増えるに従ってその違いがなくなり、ほぼ一つの直線となるようである。また、図中の曲線は前報で示した差分法による数値計算結果である。ただし、計算には式(1)の粘度を用いた。また、本報で示す数値計算結果は弾性項を考慮していない。実験値と数

値計算結果の一致は定量的にも良好で数値計算が妥当であることがわかる。図4の $\kappa=0.96$ の場合には、回転数が20 rpmでは $\kappa=0.8$ と同様に偏心率による違いは少ないが、100 rpmでは偏心率が小さいほど Q_R は大きくなっている。流量が同じなら回転数が大きいほど流れに与える回転の効果は当然大きいと考えられるので、実験結果から、軸方向流れに対して回転の効果が高いほど偏心率による違いが顕著になっているといえる。そして、偏心率が小さいほど軸方向流れに与える回転の効果が高いことがわかる。さらに、流量が増加して回転の効果が相対的に小さくなると偏心率による違いも少なくなっている。また、 $\kappa=0.8$ と同様に数値計算結果との一致も良好である。

図5に HEC 1.0%における Q_S と Q_R の関係を示す。内管回転数が1 500 rpmと高速回転まで測定し

図5 Q_S と Q_R の関係 (HEC 1.0%, $\kappa=0.96$)

たが、定性的には HEC 1.5%で得られた結果と同様で、回転の効果が大きくなるほど偏心率による違いが顕著となっている。

図6に HEC 1.0%溶液に対して圧力勾配が一定の場合における回転数と流量増加率 I_R の関係を示す。ただし、流量増加率は次式で与える。

$$I_R = \frac{Q_R - Q_S}{Q_S} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

測定値をみると、回転数が大きくなると流量増加率と回転数の関係は両対数上で直線的になってお

図6 流量増加率 (HEC 1.0%, $\kappa=0.96$)

り、その傾きは偏心率にかかわらず一定となっているように思われる。また、偏心率が同じ場合には、圧力勾配が小さいときには回転数が小さいところまで直線的であるが、圧力勾配が大きくなると回転数の小さいところで直線からずれて傾きが急になっている。これらの傾向は HEC 1.5%の粘度を用いて行った前報の数値計算結果と一致している。

2.3 二次流れ領域の大きさ

非ニュートン流体では管路断面内に生じる二次流れの領域がニュートン流体に比べて小さく、さらに回転数や軸方向流れにより二次流れの大きさが変化することを前報の数値計算で示した。ここでは、二次流れ領域の角度を測定することにより、それらのことを検証した。

図7にアルミ粉末の流跡のスケッチを示す。すきまの狭い部分では軸方向流れが小さいため、周方向に沿う流跡がみられるが、すきまの広い部分に来るに従い軸方向に向かうようになる。さらに、二次流れ領域では流跡が上下で交叉してみえる。また二次

図7 アルミ粉末流跡の模式図

流れのでき始めるはく離点付近では流跡の周方向への移動はほとんどなくなりアルミ粉末が停滞してみえる。ここでは、その角度(図8)を測定し、二次流れ領域の角度とした。その結果を表1に示す。

表1 二次流れ領域の角度の測定値

κ	e	$N(\text{rpm})$	$\bar{P}(\text{kPa/m})$	測定値(度)	$\bar{P}(\text{kPa/m})$	計算値(度)	理論値 N.F.(度)
0.96	0.8	100	7.99	230 ↔ 251	0	204	276.4
			58.1	239 ↔ 258	65	228	
	20		14.5	237 ↔ 256	0	226	
			62.4	248 ↔ 265	65	238	
	0.5	100	5.44	0 ↔ 8	0	0	180.0
			58.1	0 ↔ 12	65	16	
0.8	0.8	20	1.49	255 ↔ 273	0	242	281.4
			3.99	256 ↔ 275	1.5	243	
			9.95	256 ↔ 276	10	250	
	0.5	20	2.18	86 ↔ 107	0	74	183.4
			5.23	97 ↔ 117	1.5	86	
			11.1	113 ↔ 134	10	98

図8 二次流れ領域の角度

測定値に幅があるのは、はく離点付近でアルミ粉末が若干の幅を持って停滞するためである。測定値をみると、回転数が低いほど、軸方向流れが大きいほど二次流れ領域は大きくなっていることがわかる。また、どの場合も慣性項を無視したニュートン流体(N.F.)の理論値¹⁴⁾に比べてかなり小さくなっていることが確認される。数値計算結果と比較すると定量的には少し違いがある場合もみられるが、定性的にはよく一致している。

3. 外管壁上の圧力差分布

3.1 実験装置および方法

実験装置は圧力損失測定用のものとはほぼ同一のものであるが、異なるのは圧力損失測定用の2つの測定孔の中間地点に圧力分布を測定するために測圧孔を設けたことである。なお、圧力の測定には半導体小型圧力変換器(豊田工機製, PD 104 K)を用いた。測定は流れが安定したのちに、すきまが最大の位置から始め、30度ごとに行った。

3.2 圧力分布の測定結果

図9に半径比 $\kappa=0.8$ 、内管回転数 $N=20\text{ rpm}$ の各偏心率に対する測定結果を示す。ただし、縦軸はすきまが最大の位置における値 P_r との差で、横軸はすきまが最大の位置から へかった角度である。比較のために、図中には HEC 1.5% 水溶液に対する

(a) $e=0.2$

(b) $e=0.5$

図9 外管壁上の圧力差分布 ($\kappa = 0.8$)

(a) $N = 20$ rpm

(b) $N = 100$ rpm

図10 外管壁上の圧力差分布 ($\kappa = 0.96$)

る数値計算結果を示してある。前報では、非ニュートン流体の場合に軸方向流れにより圧力差分布は影響を受け、さらに、半径比や偏心率により影響の現

われ方が異なることを示した。そこで、測定値を検討してみると、図9 (a) の偏心率 $e = 0.2$ では圧力勾配が大きいほど圧力差の変化は大きくなっている。(b) の $e = 0.5$ では分布にやや違いがあるように思われるが、その傾向はあまり明確ではない。さらに、(c) の $e = 0.8$ になると $e = 0.2$ の場合とは逆に圧力勾配が大きいほど圧力差の変化は小さくなっているようである。今回の実験では溶液タンクの容量の都合で、流量が大きい場合の測定をすることができず軸方向流れの影響を顕著に示すことができなかったが、本実験範囲内でも $\kappa = 0.8$ の場合に得られた測定値は、各偏心率に対する数値計算結果と定性的に一致しているといえる。また、軸方向流れがないときの測定値をみると数値計算結果と定量的にもかなり良く一致しており、数値計算が妥当であることが確認できる。

つぎに、図10に半径比 $\kappa = 0.96$ 、回転数 20 rpm、100 rpm の測定値を示す。圧力勾配が大きいほど圧力差の変化が大きくなっており、この傾向も前報の数値計算結果と一致している。

4. 結 言

前報では、内管が回転している偏心二重円管を非ニュートン流体が一定圧力勾配で流れる場合について、数値計算により流れ場および外管壁上の圧力差分布を解明した。本報では、数値計算の妥当性を確認するために HEC 水溶液を用い実験を行ったが、その結果、測定値は弾性項を無視した場合の数値計算結果と比較的によく一致し、数値計算が妥当であることがわかった。

参考文献

- 1) 山田豊; 日本機械学会論文集, **27**, 1267 (1961)
- 2) 山田豊; 日本機械学会論文集, **28**, 117 (1962)
- 3) 山田豊, 中林功一; 日本機械学会論文集, **33**, 1609 (1967)
- 4) 山田豊, 中林功一, 鈴木義久; 日本機械学会論文集, **35**, 89 (1969)
- 5) 山田豊, 中林功一; 日本機械学会論文集, **35**, 1036 (1969)
- 6) 山田豊, 渡辺智; 日本機械学会論文集, **38**, 1773 (1972)
- 7) 中林功一, 山田豊, 水原修平, 平岡克英; 日本機械学会論文集, **38**, 2075 (1972)
- 8) 中林功一, 山田豊, 瀬尾要; 日本機械学会論文集, **40**, 975 (1974)
- 9) 中林功一, 山田豊; 日本機械学会論文集, **42**, 3240 (1976)
- 10) M. M. Denn, J. J. Roisjan; AICL E Journal, **15**, 454 (1969)
- 11) Zu-Shung Sun, M. M. Denn; AICL E Journal, **18**, 1010 (1972)
- 12) W. M. Jones et al; Rheol. Acta, **13**, 798 (1974)
- 13) 森教安, 江口孝彰, 中村喜代次, 堀川明; 繊維機械学会論文集投稿中
- 14) B. Y. Ballal, R. S. Rivlin; Trans. Soc. Rheol., **20**, 65 (1976)