

非ニュートン流体に関するオリフィスの流量係数について

伊地知和也・京 信一郎*・田中安彦

(受理 昭和50年5月30日)

ON THE DISCHARGE COEFFICIENT OF ORIFICES FOR PSEUDO-PLASTIC FLUIDS

Kazuya IJICHI, Shinichiro KYO and Yasuhiko TANAKA

The discharge coefficients of three orifices, that is, straight, quadrant-edged and sharp-edged orifice, in a commercial 1-in. gas pipe for pseudo-plastic fluid (carboxymethyl cellulose aqueous solution) were measured. The concentrations were 0.20, 0.35 and 0.49 in wt %, and the throat area ratios of these orifices were roughly 0.39. The results obtained were shown as follows:

- 1) For the laminar flow region, the log-log correlation of pipe friction factor and pseudo-plastic Reynolds number Re_{psu} coincided with that of Newtonian fluids.
- 2) Within the range investigated, the allowable limit of Reynolds number for each orifice did not depend on the concentrations.

In the region above the allowable limit of Reynolds number, the relation between the discharge coefficient for each orifice and Re_{psu} was independent of the concentrations.

緒 言

オリフィス流量計はその構造の簡単さと取扱いの容易さのため流量計測に広く利用されている。特に、シャープエッジオリフィスは標準オリフィスとして規格化され、その構造と流量係数などが ASME, DIN および JIS に与えられている。しかし、これらはニュートン流体に関するの数値であって、工業的に重要である高分子溶液のような非ニュートン流体の流量係数についての研究はきわめて少なく、わずかに伊藤¹⁾、長谷川²⁾、三石ら³⁾が行なっているにすぎない。よって、著者らは非ニュートン流体として C. M. C. (Carboxymethyl Cellulose) 水溶液を用いて、ストレートオリフィス、四分円オリフィスおよびシャープエッジオリフィスの流量係数に関する実験的研究を行なった。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。実験試料としては C. M. C. を約5昼夜にわたつてゆるやかに攪拌しながら水に溶解し、均一濃度としたものを使用した。こ

れをモノフレックスポンプ¹³⁾によってヘッドタンク¹⁾にあげ、オーバーフローさせることによってヘッドを一定に保ちながらテストセクション²⁾へ流下させ、タンク⁸⁾にもどし循環させる。大流量および高濃度の場合はヘッドタンクまであげずに直接テストセクションへ流す。液中に混入する気泡は、2個直列に配したタンクに仕切り板⁹⁾を取り付け、泡の滞在時間を長くして、できるかぎりこれを除去するように工夫した。テストセクション²⁾は1インチガス管(内径27.2mmφ)であり、オリフィス前後の直管部分の長さはそれぞれ $L/D=60$ 、および $L/D=10$ 以上とした。

封液として四塩化炭素、または水銀を用いた2種類のマノメータにより、直管部の圧力損失とオリフィス前後の差圧を測定した。低流量で差圧が10mm以下と微小の場合には読取顕微鏡を使用した。流量計測は小流量の場合にはメスシリンダーを、大流量の場合には26lの計量タンクを用いる体積法によつた。

実験は C. M. C. 水溶液の濃度が 0.49, 0.35, 0.20 wt % と水の場合について行なった。各濃度は実験前後に試料をタンクから採取し、蒸発乾固法により決定した。また、密度はピクノメータ法により求めた。その結果を表1に示す。

* 三菱化工機 K.K.

①	ヘッドタンク	⑨	仕切板
②	テストセクション	⑩	ヒーター
③④	マンومتر	⑪	冷却パイプ
⑤	オリフィス部	⑫	バイパス
⑥	計量タンク	⑬	モノフレックスポンプ
⑦	液面計	⑭⑮	圧力タップ
⑧	メインタンク		

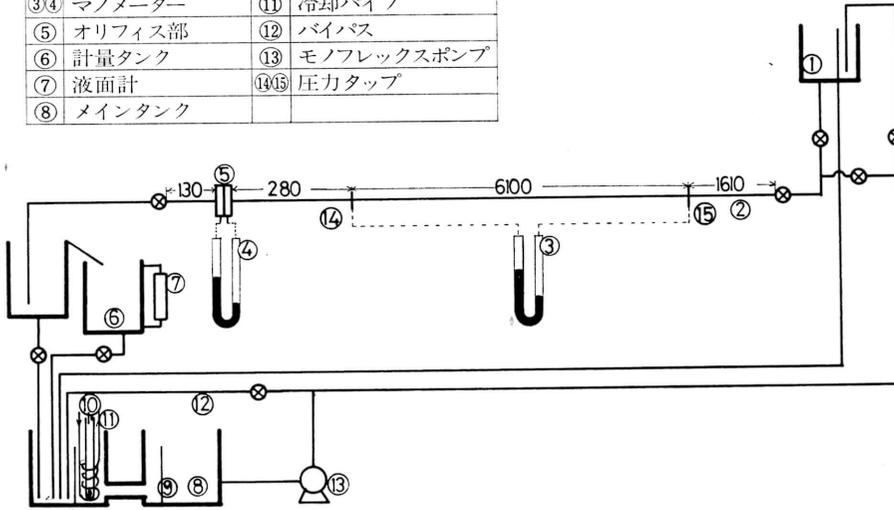


図1 実験装置のフローシート

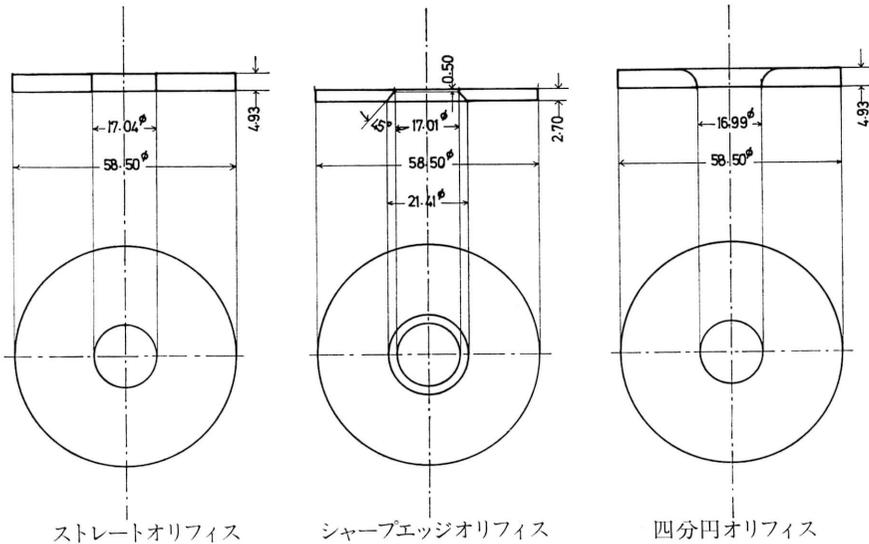


図2 オリフィスの形状寸法

表1 各濃度におけるレオロジー定数と密度

試料濃度 wt%	n	η_{psu}	ρ
水	—	—	0.9978
0.20	1.013	0.0539	0.9988
0.35	1.034	0.1322	0.9995
0.49	1.108	0.3674	1.0002

本実験に使用した各オリフィスの開口比はほぼ一定

の0.39であり、その形状寸法を図2に示す。

3. レイノルズ数, 管摩擦係数および流量係数

ニュートン流体は剪断応力と剪断速度が線形関係にあるが、非ニュートン流体はこの関係が非線形であるため解析が容易でない。それゆえ、非ニュートン流体(擬塑性)の場合にはしばしばこの関係を Power law model と呼ばれる次式でモデル化される。

$$(\tau_w g_c)^n = \eta_{psu} \left(-\frac{du}{dr} \right) \quad (1)$$

ここで η_{psu} は擬塑性粘度と呼ばれ, $[g^n/cm^n \text{sec}^{2n-1}]$ の次元をもつ.

レオロジー定数 η_{psu} , n は Waele-Ostwald³⁾ の方法に従つて以下のように求められる. すなわち, 時間依存性のない流体の円管内流動における管壁での剪断応力と剪断速度との関係は次の Rabinowitch⁷⁾ の式で表わされる.

$$\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \frac{3}{4} \left(\frac{8\bar{u}}{D} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{8\bar{u}}{D} \right) \frac{d \ln(8\bar{u}/D)}{d \ln(\tau_w g_c)} \quad (2)$$

ここで

$$n' = \frac{d \ln(8\bar{u}/D)}{d \ln(\tau_w g_c)} \quad (3)$$

とおくと (2) 式は次のようになる

$$\left(-\frac{du}{dr} \right)_w = \left(\frac{8\bar{u}}{D} \right) \left(\frac{3+n'}{4} \right) \quad (4)$$

$(8\bar{u}/D)$ と $(\tau_w g_c)$ を両対数方眼紙上に点綴し直線となった場合, その勾配を n' , 切片を K とすると (3) 式より

$$(\tau_w g_c)^{n'} = \frac{1}{K} \frac{8\bar{u}}{D} \quad (5)$$

となる

(1) と (4) 式より

$$(\tau_w g_c)^n = \eta_{psu} \left(\frac{3+n'}{4} \right) \left(\frac{8\bar{u}}{D} \right) \quad (6)$$

また, (5) と (6) 式より

$$n' = n \quad (7)$$

$$\frac{1}{K} = \eta_{psu} \left(\frac{3+n'}{4} \right) \quad (8)$$

従つて, Power law model が成立する非ニュートン流体 (擬塑性) では, $(8\bar{u}/D)$ 対 $(\tau_w g_c)$ の点綴が両対数方眼紙上では直線となり, その勾配 n' と切片 K の値が定まるので, 式 (7) および (8) より n と η_{psu} が求まる.

円管内を流れる非ニュートン流体の Re 数として Metzner⁷⁾ の一般化 Re 数, みかけ粘度を用いる表示, 大山ら⁹⁾ の提唱した比栓半径の関数である無次元項を含む表示, などがあるが, 著者らは伊藤⁹⁾ により提案された代表剪断応力を含む Re 数を用いた. すなわち

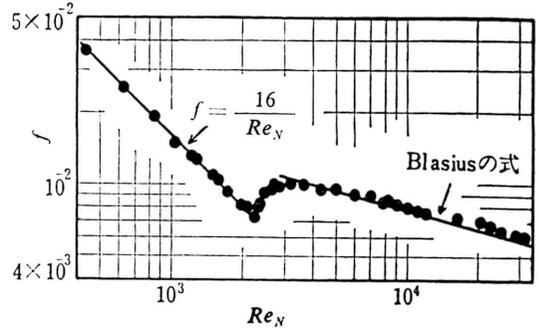


図3 管摩擦係数対 Re 数 (水)

$$Re = \frac{16(\text{密度})(\text{代表長さ})(\text{加速度の代表的量})}{(\text{代表長さ})^2 (\text{剪断応力の代表的量})}$$

ここで代表長さとして管半径 R , 加速度の代表的量として (\bar{u}^2/D) , 剪断応力の代表的量として $(\tau_w g_c)$ をとると擬塑性流体のレイノルズ数 Re_{psu} は次式で求められる.

$$Re_{psu} = \frac{8D^{1/n} \bar{u}^{(2-1/n)} \rho}{(2(n+3)\eta_{psu})^{1/n}} \quad (9)$$

管摩擦係数 f は次式で定義される.

$$f = \frac{DJPg_c}{2L\rho\bar{u}^2} \quad (10)$$

また, 流量係数 C は次式により与えられる.

$$C = \frac{u_0}{\sqrt{2g_c 4P/\rho}} \quad (11)$$

4. 実験結果と考察

4.1. C. M. C. 水溶液の流動特性

直管部圧力損失測定の妥当性を確かめるために, まず水を用いて実験を行ない, f 対 Re_N の関係を求めた. 得られた結果を図3に示す. 図から明らかなように, 層流域では実験値が理論線 $f=16/Re_N$ と一致することから圧力損失の測定は妥当であると判断した. なお乱流域における実験では平滑管に関する Blasius の式よりも少し大きい f を与えるが, これは管内面の粗さの影響によるものと思われる.

C. M. C. 水溶液の非ニュートン流体 (擬塑性) としての流動特性の検討は各オリフィスごとにその流量係数の測定と並行して行なわれた. 図4に各濃度における $(8\bar{u}/D)$ 対 τ_w の関係を示す. 図から明らかなように, 結果にオリフィスによる差が認められず, 本実験の測定時間内では時間の経過に伴う粘度の低下¹⁰⁾ は無視できることがわかる. 図4の結果から定められ

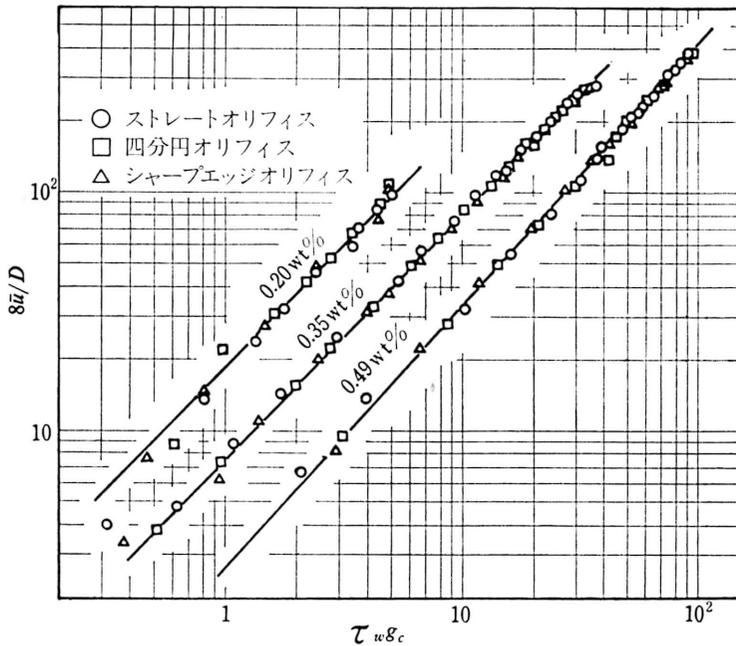
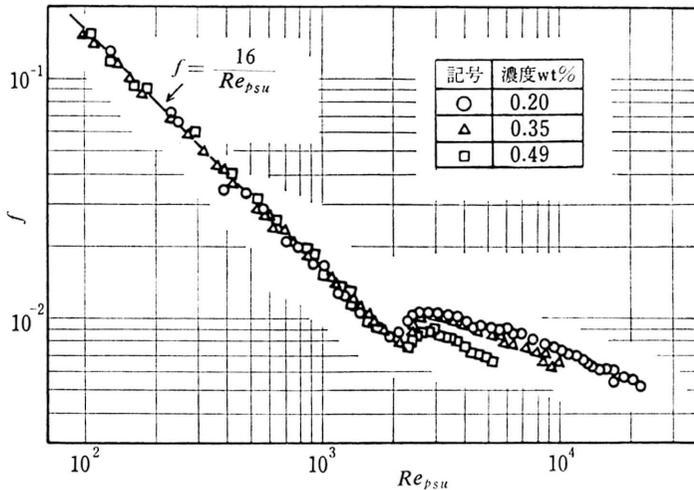


図4 各 C. M. C. 水溶液の流動特性曲線

図5 管摩擦係数対 Re 数 (C. M. C. 水溶液)

た C. M. C. 水溶液のレオロジー定数 n および η_{psu} の値を表1にまとめて示す。

4.2. 管摩擦係数

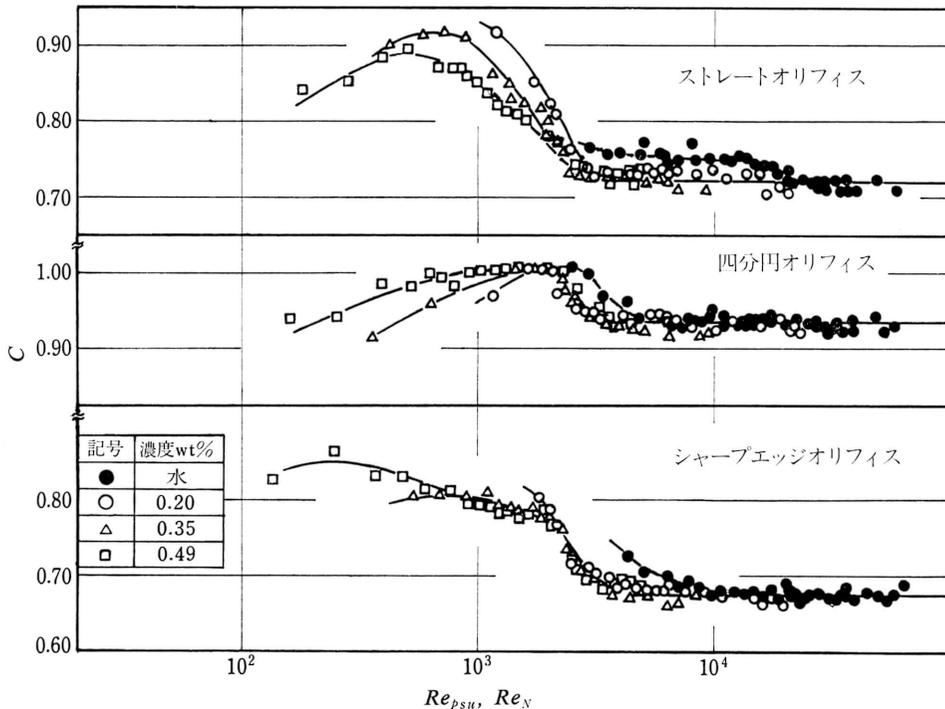
図5に各濃度における f と Re_{psu} との関係を示す。これより層流部においてはニュートン流体の場合と同じく

$$f = \frac{D \Delta P g_c}{2L \rho \bar{u}^2} = \frac{16}{Re_{psu}}$$

の関係が満足されている。また、乱流域においては f は Re_{psu} の関数であるとともに n の関数でもあることがわかり、 n が大となるほど f は小さい値を示す傾向がある。

4.3. 流量係数

流量係数 C と擬塑性流体のレイノルズ数 Re_{psu} の関係を示したのが図6である。三石ら⁸⁾は、シャープエッジオリフィスとノズルに関する裕度限界 Re 数

図 6 流量係数対 Re 数

は C.M.C. 水溶液の濃度が増すと Re 数の小さい方へ移動する傾向があり、また、開口比の小さいオリフィスの場合には、濃度がある値以上になると、 C と Re 数の関係は一本の線でよく近似できると述べている。図 6 の結果では、ストレートオリフィスを除くと、彼らの開口比の小さいオリフィスの場合の結果と同じく、 Re_{psu} がある値以上では濃度に無関係にほぼ一本の線で近似されている。また、長谷川²⁾ は泥漿が高濃度になるほど裕度限界 Re 数以下の C の立ちあがりの度合いがゆるやかになり、流量係数の最大値 C_{max} の値を示す Re 数が小さい部分であらわれると述べているが、図 6 では、ストレートオリフィスの場合のみその傾向が明確にあらわれており、その他のオリフィスの場合にはほとんど認められない。これらの結果は C.M.C. 水溶液の粘弾性効果¹⁾ も考慮して更に検討がなされるべきであろう。

図 6 の結果から水および C.M.C. 水溶液に対する裕度限界 Re 数は大略次のように与えられる。

	水	C.M.C. 水溶液
ストレートオリフィス	2.7×10^4	3.0×10^3
四分円オリフィス	5.0×10^3	3.5×10^3

シャープエッジオリフィス 1.5×10^4 4.5×10^3
 三種のオリフィスの中で四分円オリフィスは水に対しては裕度限界 Re 数が小さく最も有利にみえるが、C.M.C. 水溶液に対しては他のオリフィスの裕度限界 Re 数の低減の度合いが大きく、有利とはいえないようである。

裕度限界 Re 数より大きい領域での各オリフィスの流量係数の値 C_{const} は濃度に関係なく次のように与えられる。

ストレートオリフィス	$C_{const} = 0.718$
四分円オリフィス	$C_{const} = 0.935$
シャープエッジオリフィス	$C_{const} = 0.675$

5. 結 言

開口比 0.39 の 3 種のオリフィス、すなわちストレートオリフィス、四分円オリフィスおよびシャープエッジオリフィスについて水および濃度 0.20, 0.35, 0.49 wt% の C.M.C. 水溶液の流動実験を行なった結果

(1) 層流域では非ニュートン流体（擬塑性）の代表剪断応力を含むレイノルズ数 Re_{psu} と管摩擦係数 f との間にニュートン流体の場合と同じく

$$f = \frac{16}{Re_{psu}}$$

の関係が成立することが確かめられた。

(2) 図6に示すように、本実験範囲では各オリフィスについての裕度限界 Re 数の濃度依存性は認められなかった。また、流量係数については裕度限界 Re 数以上では濃度依存性はみられず、一本の線で近似される。

おわりに、有益な助言を賜わつた吉福功美助教授、ならびに、実験に協力していただいた田中一郎、山元良一両君に感謝致します。

使用記号

C : 流量係数	[—]
C_{const} : 裕度限界レイノルズ数以上で一定値となる流量係数	[—]
C_{max} : 流量係数の最大値	[—]
D : 管径	[cm]
f : 管摩擦係数	[—]
g_c : 重力換算係数	[g·cm/G·sec ²]
K : (5) 式で定義される定数	[cm ^{n'} ·sec ^{2$n'-1$} /g ^{n'}]
L : 測定区間距離	[cm]
n : レオロジー定数	[—]
n' : (3) 式で定義される定数	[—]
Q : 流量	[cm ³ /sec]

ΔP : 圧力損失	[G/cm ²]
R : 管半径	[cm]
r : 管中心からの距離	[cm]
Re_N : ニュートン流体のレイノルズ数	[—]
Re_{psu} : 擬塑性流体のレイノルズ数	[—]
n : 管内流速	[cm/sec]
\bar{u} : 管内平均流速	[cm/sec]
η_{psu} : 擬塑性粘度	[g ^{n} /cm ^{n} ·sec ^{2$n-1$}]
ρ : 流体密度	[g/cm ³]
τ : 剪断応力	[G/cm ²]

添字

w : 管壁
o : オリフィス部

引用文献

- 1) Dodge, D.W., and A.B. Metzner : *A.I. Ch. E. J.*, **5**, 189 (1959)
- 2) 長谷川 : 化学工学, **19**, 58 (1955)
- 3) 長谷川, 平井 : 化学工学, **20**, 15 (1956)
- 4) 伊藤 : 化学工学, **18**, 374 (1954)
- 5) 伊藤 : 化学工学, **25**, 375 (1961)
- 6) Krieger, I.M., and S.H. Maron : *J. Appl. Phxs.*, **23**, 17 (1952)
- 7) Metzner, A.B., and J.C. Reed : *A.I. Ch. E. J.*, **1**, 434 (1955)
- 8) 三石, 宮武 : 九大工学集報, **38**, 111 (1966)
- 9) 大山, 伊藤 : 化学工学, **14**, 96 (1950)
- 10) 佐藤 : 化学工学, **30**, 35 (1966)