

ベンド流量計の流量係数に及ぼす 二次流れの影響

小 栗 幸 正*

Effects of Secondary Flow on Discharge Coefficients of Bend Flowmeters

Yukimasa OGURI*

(Received May 8, 1989)

Discharge coefficients of bend flowmeters are affected by many influential factors. In our previous papers, some of these factors have been explored theoretically and experimentally. The effects of the secondary flow on discharge coefficients, however, have been not clarified enough. This investigation, therefore, aims to make evidence for the above effects by setting the fence which reduces the secondary flow, and also by using the flow visual technique.

When the above fence with a height of 6 mm is placed in the bend flowmeter, the discharge coefficients are almost constant within 0.5% error and the critical Reynolds number decreases about 56% from that of the general bend meters with no fence.

From these results we might tentatively conclude that the reduction of the secondary flow induces the stabilization of discharge coefficients and the enlargement of the reliable usage range in practice.

1. ま え が き

ベンド流量計は、管路の曲がり部の内外壁間に生じる圧力差を利用して、管内流量を測定する装置である。これに関する研究は、1911年に Jacobs & Sooy¹⁾によって最初に報告されて以来、Lansford²⁾, Addison³⁾, Murdockら⁴⁾などによって行われてきた。最近では辻・川島⁵⁾, 伊藤ら⁶⁻⁹⁾の研究がある。筆者らは、従来の研究においていまだ十分解明されていない問題、あるいは未着

手の課題の解決などを目標に研究を重ねてきた¹⁰⁻¹²⁾。しかし、上記の多くの研究において、曲がり部に生じる二次流れが、ベンド流量計の流量係数に対し、どのように影響を及ぼすかについては、筆者の知る限りにおいていまだ報告されていない。

本研究は、正方形断面の 90°ベンド流量計を用い、その管内の上下壁面に二次流れ減少用の隔板を取り付けて、内外壁の圧力分布・管軸方向速度分布や流量係数を実験的に求め、隔板のない場合の結果と比較して、二次流れの減少による影響を明確にした。さらに油膜法^{13,14)}によ

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

る二次流れの限界流線の可視化を試み、隔板の有無による流動状態の変化を明らかにした。

2. 記 号

- a : 正方形断面管の内辺長の半分
- C_d : 流量係数〔式(2)〕
- C_p : 圧力係数〔式(1)〕
- ΔC_p : 外壁の C_p と内壁の C_p との差
- d : 正方形断面管の内辺長 ($=2a$)
- H : 壁圧ヘッド
- h : 内外壁圧ヘッド差
- L : 管中心軸長さ
- Q : 流量
- R : 曲がり管中心軸の曲率半径
- R/a : 曲がり管の半径比
- Re : レイノルズ数 $= V_m d / \nu$, (ν : 動粘度)
- Re_d : 流量係数が一定になる限界レイノルズ数
- S : 曲がり管の流路断面積 $= d^2$
- V_m : 管内平均速度
- V_θ : 管軸方向速度
- V_ϕ : 二次流れ速度
- z : 隔板の高さ
- θ_i : 曲がり部入口よりの曲がり角度
- λ : 直管の管摩擦係数

3. 実験の装置と方法

3.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す、ポンプ①で貯水槽より上方のあふれタンク②に汲み上げられた水は、一定水位に保たれてから流量調整弁③を経て整流タンク④に入り、ついで上流側直管⑤、バンド流量計⑥、下流側直管⑦を通過して計量用タンクに流入する。水はここで流量測定されて再び貯水槽にもどされる。流量計前後の直管⑤、

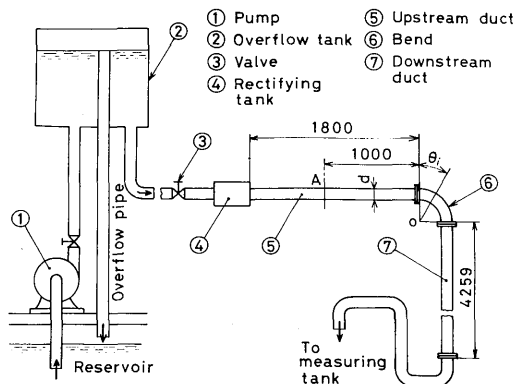


図1 実験装置の概要

⑦は、内辺長 $d=50.00$ mmの塩化ビニル製正方形断面管を用い、その内面は水力学的に十分なめらかである。図中に示す直管⑤の断面Aでは、その外周に4個の壁圧測定孔(孔径 1.2 mm)を等間隔に設けて平均圧力ヘッド H_A を測定し、これを基準値にして曲がり部内外壁面の圧力分布を求めた。

3.2 供試流量計

本研究に用いた正方形断面の90°バンド流量計を図2に示す。図はすでに隔板を管内に取り付けた状態を示しているが、実験は最初に隔板のない状態で行った。すなわち、流量計入口よりの曲がり角 θ_i が 22.5, 33.75, 45.0, 56.25, 67.5°の5測定断面(図中の a, b, c, d, e 断面)をとり、各断面の中心と内外壁面高さの中央とを結ぶ x-x 軸の内壁側と外壁側とに壁圧測定孔(孔径 1.2 mm)を設け、それぞれの圧力ヘッドを測定した。ついで、上記の測圧孔位置に円筒形三孔ピト管(管径 2.52 mm, 孔径 0.3 mm)を挿入して、各断面における管軸方向速度 V_θ および上壁と下壁の曲率半径を結ぶ y-y 軸を横切り、内壁と外壁の方向に流れる二次流れ速度 V_ϕ を測定した。

次に同図に示すように、曲がり部の上壁と下壁に対し、曲率半径の円弧に沿って巾 1 mm の溝を掘り、黄銅製の隔板(厚さ 1 mm)を取り付け、その前縁はくさび状に鋭く仕上げてある。板の高さは 6 mm と 12 mm にした。その理由は 4.2 で述べる。

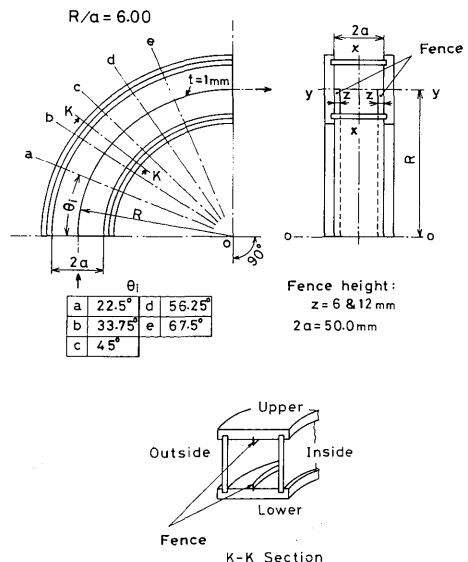


図2 隔板付き90°バンド流量計

3.3 油膜法による可視化

油膜法による可視化は、流体の流動状態をほとんど乱すことなく把握することができる。しかし、これは物体表面近くの流れしか観測できないので、壁面近傍を流れる二次流れの状態を調べるには、有効な方法であるといえよう。

実験にさきだち流動パラフィン、カーボン粉末、オレイン酸を、重量比 45 : 4 : 1 の割合で混合した黒色液体をつくり、これを曲がり管の下側壁面に均一で十分薄い層に塗布した。なお、混合液を塗る前に、面の限界流線が明確に観測されるように、あらかじめ白色塗装してなめらか仕上げておいた。次に管内に水を静止状態で充満させた後、弁を規定の開度まで急速に開いて水を流したが、流速は開弁操作後 2 ~ 3 秒で規定速度の 2 m/s に達していた。この状態を 5 分間保持し、その間に限界流線の観察と写真撮影を行った。油膜は時間の経過とともにしだいに洗い流され、開弁後約 2 分で限界流線は最も明瞭になる。それ以後流線は多少薄くなるが、その形状は最後まで変わらなかった。

4. 実験結果と考察

4.1 圧力分布と二次流れの影響

曲がり部内外壁の圧力分布を表すため、次式で定義される圧力係数 C_p を用いた。

$$C_p = \lambda \frac{L_i}{d} - \frac{H_A - H_i}{V_m^2 / (2g)} \quad (1)$$

ここで、 L_i は図 1 の断面 A から、図 2 の曲がり部壁圧測定断面 a, b, …… , e までの管中心軸長さ、 H_A は断面 A における平均壁圧ヘッド、 H_i は L_i の距離の測定断面における内壁または外壁の壁圧ヘッド、 V_m は管軸方向の管内平均速度、 λ は直管の管摩擦係数である。

図 3 (a) はレイノルズ数 $Re = 8 \times 10^4$ において、隔板の有無による C_p の変化を、曲がり角 θ_i に対応して示したものである。また、外壁の C_p と内壁の C_p との差を ΔC_p とし、その結果を同図 (b) に示す。

同図より隔板の有無による C_p 曲線を比較すると、外壁側ではほぼ類似の傾向を示すのに対して、内壁側では隔板を設けた場合、 C_p 曲線はほぼ水平になり、隔板のない場合より C_p の変化は少なくなる。一方、外壁と内壁の圧力係数の差を示す ΔC_p 曲線では、隔板を設けた場合 ΔC_p の値はこれのない場合より約 5 % 大きくなり、これは隔板設置による二次流れ減少の影響の現れで、内外壁圧ヘッド差の増加を意味し、流量計の測定精度を向上させることになる。

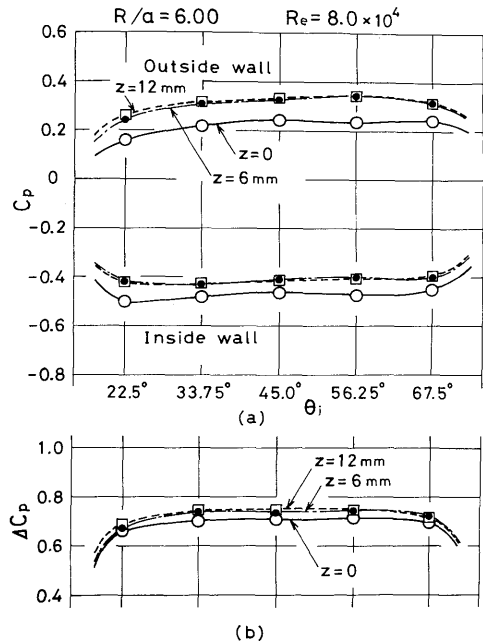


図 3 曲がり部内外壁の圧力分布と ΔC_p 分布

4.2 速度分布と二次流れの影響

まず曲がり部に隔板のない場合に対し、3.2 で述べた y-y 軸 (図 2 参照) を横切って、内壁側と外壁側の方向に流れる二次流れ速度 V_ϕ を、各測定断面ごとに求め、これらを管内平均速度 V_m で無次元化して図 4 に示す。同図で中央部の正の領域と、上下両壁面近傍の負の領域とに二分されているが、正の領域は曲がり部の内壁側より外壁側に流れる二次流れを、負の領域は外壁側より上下の壁面に沿って内壁側に流れる二次流れを示す。そして図中の破線は、二次流れの流れ方向が逆転する位置を結んだ線で、壁面から破線までの距離を δ とする。 δ は曲がり角 $\theta_i = 45.0 \sim 56.25^\circ$ で最大となり、約 12 mm であった。したがって、3.2 で述べた隔板の高さ z は 12 mm とその半分の 6 mm の 2 種類に設定した。

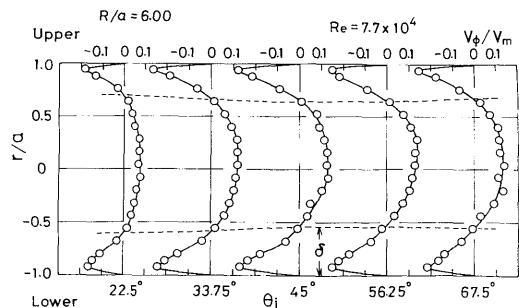


図 4 曲がり部の二次流れ速度分布

次に隔板を前述の図2に示すように取り付け、レイノルズ数 $Re=8.0 \times 10^4$ で実験を行った。図5は曲がり部各断面における管軸方向速度 V_θ を、管内平均速度 V_m で無次元化した速度分布を示したもので、比較のため隔板のない場合の管軸方向速度分布を併記してある。

図より隔板を設けた場合の速度分布は、隔板の高さ z の大小にかかわらずほぼ同様の变化を示す。隔板の有無による影響をみると、 $\theta_i=22.5 \sim 33.75^\circ$ では影響がわずかであるが、 $\theta_i=45^\circ$ より下流の断面では隔板の影響が顕著である。分布曲線は二次流れの減少によって内壁側の遅速領域がなくなり、最大速度位置も中心付近に移行して、全体が弓状のなめらかな曲線に変化する。

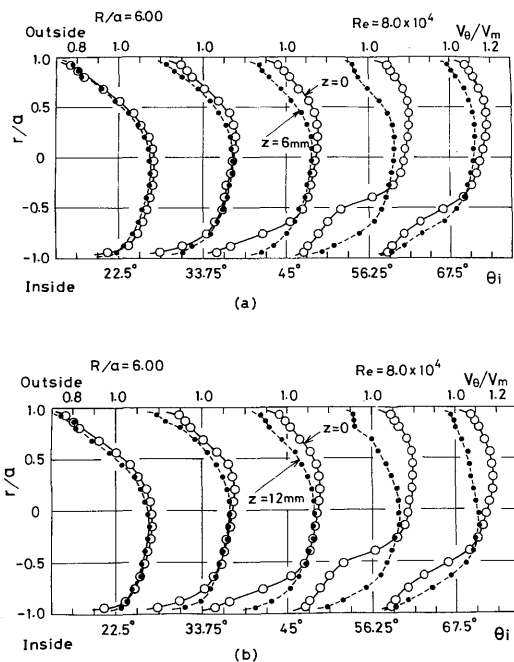


図5 曲がり部の管軸方向速度分布

4.3 流量係数

ベンド流量計の流量係数には、自由渦理論^{2,3)}、強制渦理論²⁾によるものと、絞り流量計に与える式と類似の形によるもの⁶⁾の3種類がある。本論文では筆者が従来用いた強制渦理論に基づく次式の流量係数 C_d を使用する。

$$C_d = 2Q / (\sqrt{2gh} \cdot S \cdot \sqrt{R/a}) \quad (2)$$

ここで、 Q は流量、 h は内外壁圧ヘッド差、 S は曲がり部の流路断面積、 R/a は曲がり管の半径比である。

曲がり部の $\theta_i=45^\circ$ 断面における内外壁圧ヘッド差 h に基づいて、式(2)より流量係数 C_d を求め、これをレイノルズ数 Re と隔板の有無に対応して図6の結果を得た。

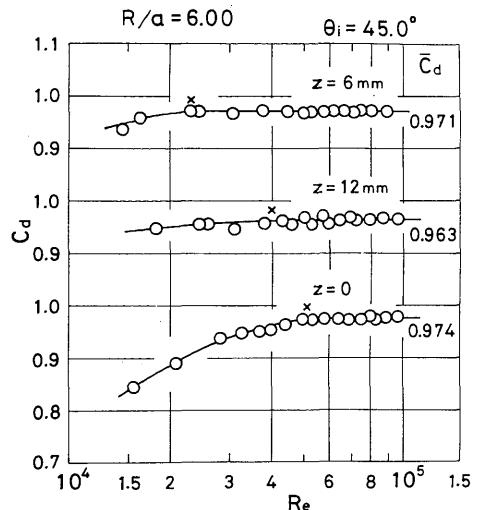


図6 流量係数 C_d とレイノルズ数 Re の関係

図より各 C_d 曲線は、 Re の増加に伴って上昇し、図中の×印付近よりほぼ水平となり、それ以上の Re 範囲で C_d はそれぞれ一定値となる。この×印点の Re を流量係数に関する限界レイノルズ数 Re_d という。各 C_d 曲線の右端にこの Re_d 以上のレイノルズ数における C_d の平均値、すなわち平均流量係数 $\bar{C}_d$ を示す。各 C_d 曲線は隔板の有無による差異が現れ、二次流れの減少による流量係数への影響が明確になった。限界レイノルズ数 Re_d をみると、隔板のない場合 ($z=0$) $Re_d=5.2 \times 10^4$ であるが、隔板を設置して二次流れを減少させると、 $z=6$ mm の場合 $Re_d=2.3 \times 10^4$ と約 56 % 減少し、 $z=12$ mm では 4.0×10^4 と約 23 % 減少し、レイノルズ数の広い範囲で使用できるといえる。また、各流量係数のばらつき状態をみると、 $z=6$ mm の場合ばらつきは 0.5 % 以内と最も安定し、流量計の測定精度は向上する。しかし $z=12$ mm の場合では逆にばらつきが多くなる。この結果より、ベンド流量計において高さ z が 6 mm の隔板を設けた場合、流量係数のばらつきは 0.5 % 以内と少なく、限界レイノルズ数 Re_d も小さくなり、流量計として測定精度が良く、 Re の広い範囲で使用できることが明確になった。

4.4 油膜法による可視化

油膜法で可視化された曲がり部の限界流線の写真と、曲がり角度 $\theta_i=22.2, 45.0, 67.5^\circ$ の各断面における限界流線の傾斜角を図7～9に示す。これらの写真と図より隔板の有無による限界流線傾き角の大小が確かめられ、図8, 9にみられる流線の傾斜角の減少は、隔板の設置による二次流れ減少の影響に起因すると考えられる。

油膜の限界流線が生成される機構は、いろいろの説

が、あって、いまだ明確な説明はされていないようである。本研究の流れの場合、曲がり管内の壁面近くでは流れが大きくねじれていて、厳密に壁面限界流線とは一致しない

と考えられるが、図5の管軸方向速度分布の結果を考慮すれば、上記の限界流線の傾斜角の大小は、二次流れの増減とほぼ対応していると推測できる。

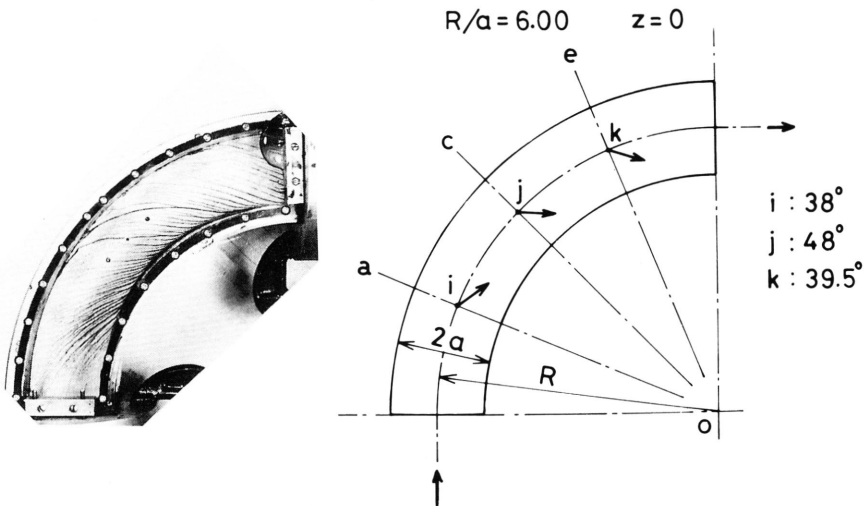


図7 曲がり部の二次流れ限界流線($z=0$)

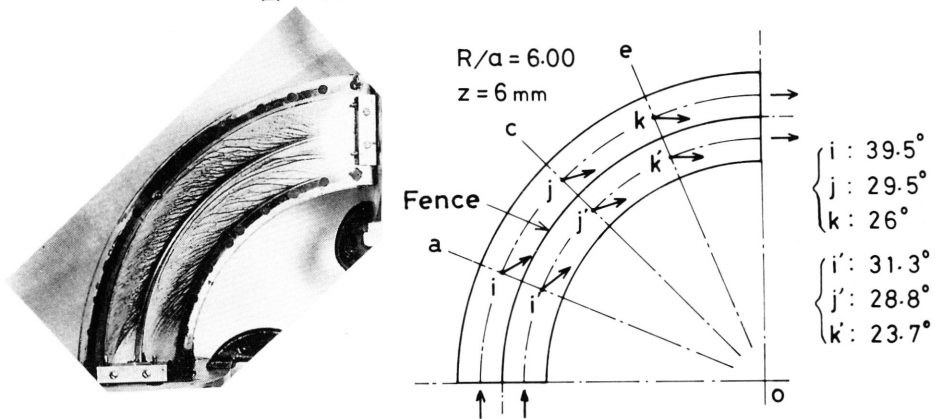


図8 曲がり部の二次流れ限界流線($z=6\text{mm}$)

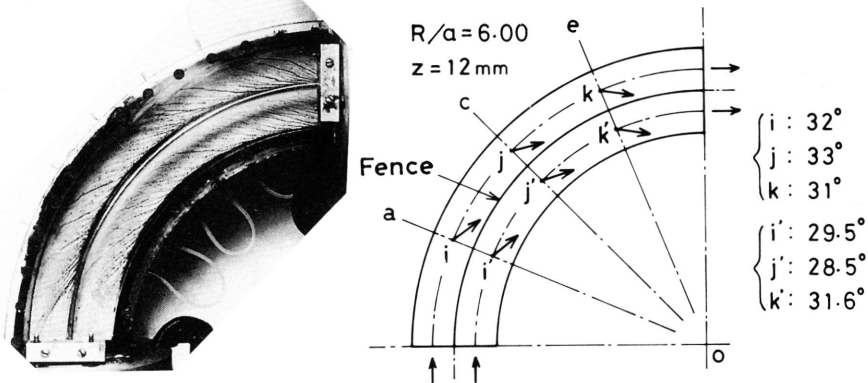


図9 曲がり部の二次流れ限界流線($z=12\text{mm}$)

5. 結 論

曲がり半径比 $R/a=6.00$ の正方形断面 90° ベンド流量計を用い、曲がり部の上壁と下壁の二次流れ減少用の隔板を設け、その高さを 12 mm と 6 mm にして実験を行い、隔板のない場合と比較して、二次流れの増減による影響を調べ、次の結論を得た。

- (1) 隔板の設置により、曲がり部の内外壁圧差は大きくなり、レイノルズ数 $Re=8 \times 10^4$ において、 5% 増加する。
- (2) 隔板による二次流れ減少の管軸方向速度への影響は、曲がり角 45° 断面より下流で顕著に現れ、速度分布は弓状のなめらかな曲線になる。また、流量係数への影響をみると、隔板の高さ z が 6 mm の場合、係数のばらつきはほとんどなくなり、 0.5% 以下の誤差で精度よく測定可能になる。さらに限界レイノルズ数 Re_d の値は、約 56% 減少して使用範囲が広がる。 $z=12\text{ mm}$ の場合では、係数のばらつきが大きくなるが、 Re_d の値は約 23% 減少する。
- (3) 油膜法によると二次流れの可視化の結果、限界流線の傾斜角の大小と二次流れの増減とは、ほぼ対応する関係にあると考えられる。

文 献

- 1) Jacobs, G.S. and Sooy, F.A., New Method of Water Measurement by Use of Elbows in Pipe Line, *J. Electricity, Power and Gas*, **27** (1911), 72.
- 2) Lansford, W.N., The Use of an Elbow in a Pipe-line for Determining the Rate of Flow in the Pipe, *Univ. Illinois, Engng. Exp. Station, Bull.*, No.289 (1936), 1.
- 3) Addison, H., The Use of Pipe Bends as Flow Meters, *Engineering*, **145-2** (1938), 227.
- 4) Murdock, J.W. ほか 2 名, Performance Characteristics of Elbow Flowmeters, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, **86-4** (1964), 498.
- 5) 辻・川島, 360° ベンド流量計における流量係数, 機論, **31-228** (昭 40-8), 1209.
- 6) 伊藤・宮川, 360° ベンド流量計の流量係数, 機論, **43-376** (昭 52-12), 4562.
- 7) 伊藤・ほか 2 名, 180° ベンド流量計の流量係数, 東北大学高速力学研究所報告, **47-409** (1981), 1.
- 8) 伊藤・ほか 4 名, 90° ベンド流量計の流量係数, 東北大学高速力学研究所報告, **50-432** (1983), 61.
- 9) 伊藤・ほか 2 名, 90° ベンド流量計の使用基準に関する一寄与, 東北大学高速力学研究所報告, **59-480** (1988), 17.
- 10) 小栗, 90° エルボ流量計, 中部工業大学紀要, **11-A** (昭 50-1), 23.
- 11) 村上・ほか 3 名, エルボ流量計の研究 (曲り管の形状精度と流量係数について), 機論, **43-372** (昭 52-8), 3037.
- 12) 小栗, 180° ベンド流量計 (最適な流量測定断面について), 機論, **53-496, B** (昭 62-12), 3655.
- 13) 村井, 油膜法とその応用, 機械の研究, **23-1** (1971), 268.
- 14) 妹尾, 流れの観察における諸問題, 機械の研究, **23-1** (1971), 261.