

圧力損失の小さい連続エルボ

大阪大学教授 森 川 敬 信*

1. まえがき

連続エルボは俗にえびつぎとも称せられ、バンドよりも製作が容易であり、製作に要する経費も安く、特に管の内径が大きい場合には、この特長が著しく生かされるので、バンドよりも圧力損失が大きいにもかかわらず用いられることが多い。

連続エルボは普通の配管に用いられる以外に、粉粒体の空気輸送用管路の一部としても広く用いられている。このような事情のもとに、西ドイツにおいて、1949年ごろから連続エルボの工業規格を作るための予備作業が開始され、1955年に規格案として Normentwurf DIN 11700¹⁾ が発表され、その後この案が正式に DIN 11700 として制定された。この規格においては、全体の方向変化の角度が 45° および 90° 、円管の外径が比較的大きい $105\sim 630$ mm の場合が対象になっている。これらの連続エルボについて、その曲率半径 R と円管の内径 d との比 R/d の最小値として、粉粒体の空気輸送の場合には $R/d=6$ 、その他の場合には $R/d=3$ に選ぶように定められ、さらに管の厚さおよび補強についても定められている。

わが国にも粉粒体の空気輸送装置および送風機を輸出したことのある Hartmann AG., MIAG をはじめとして、西ドイツで空気輸送装置ならびに送風機を製造している十数社について、連続エルボの R/d に対してどのような値を用いているかという質問を出したのに対して、得られた回答をまとめると図1のような結果になる。横軸に R/d 、縦軸にその R/d の用いられている度数を表わしてあるが、 $R/d=2\sim 5$ の連続エルボが圧倒的に多く用いられていて、全体の約77%を占めていることがわかる。また多く用いられている R/d の値は、必ずしも上述の規格のとおりになっているとは考えられない。

上述の規格に規定されたこと以外については、連続エルボの構成要素を任意に選ぶことが許されているので、それらが連続エルボの損失に及ぼす影響を明らかにすることは、実用上からも必要である。

連続エルボの損失に関する研究は比較的少なく、かつ

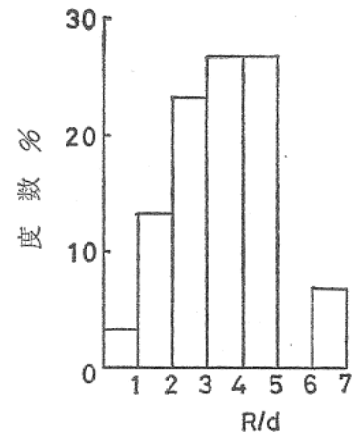


図1 使用されている R/d の度数

て H. Kirchbach²⁾ および W. Schubart³⁾ によって行なわれた研究が有名であって、便覧やハンドブックにはもっぱらその研究結果が載せられている。その研究では、いずれも内径 43 mm の黄銅管で作った連続エルボが用いられ、前者においては継目の数が2の場合、後者においては継目の数が2, 3, 4の場合が取扱われて、損失係数とレイノルズ数との関係が、実験に用いられた連続エルボごとに個別に図示されているが、それらを相互に比較検討して、総括的に述べるにはいたっていない。

筆者はさらに一步を進めて、個々の連続エルボの損失と、連続エルボの構成要素ならびにレイノルズ数との関係を相互に関連させるために、従来の研究におけるよりも継目の数を大きくした連続エルボをも実験に用いた。また従来は流体を対象として研究が行なわれ、粉粒体の空気輸送によって付加される連続エルボの損失については、ほとんど発表されていないので、このような場合をも取扱っている。円管の内径 d 、管内の流れの平均速度 v および流体の動粘性係数 ν によって定義したレイノルズ数 $Re=vd/\nu$ は、H. Kirchbach および W. Schubart が取扱った $Re=(1.8\sim 27.5)\times 10^4$ よりもやや範囲が広く、 $Re=(1\sim 30)\times 10^4$ である。

2. 実験装置

実験に用いた連続エルボは、内面のなめらかな内径50 mm のアクリル樹脂管および内径 156mm の鋼管から作

* 工博, 工学部産業機械工学科

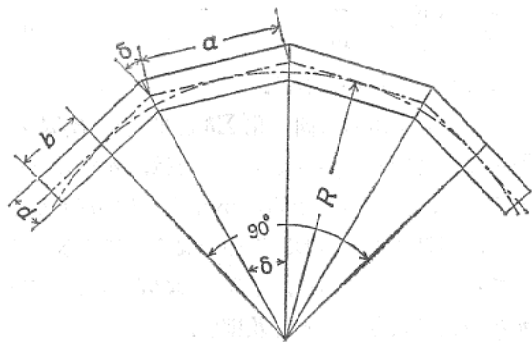


図2 連続エルボの記号

られている。いま図2のように記号をつけると、上記の2種類の材料から作られた連続エルボは、おのおの表1に示した8組から成っている。エルボの継目は、前者においては接着剤によって接合され、後者においては管の外側が入念に溶接されていて、内面にはほとんど段がついていないので、継目の不手際による付加損失は生じない。

表1 実験に用いた連続エルボ

番号	半径比 R/d	継目の数 n	角 δ°	全体の方角変化 $\sum \delta^\circ$	a/d
1	2.08	5	18	90	0.660
2	3.17	6	15		0.833
3	3.17	3	30		1.70
4	4.55	7	12.8		1.02
5	6.19	4	22.5		2.46
6	6.19	8	11.25		1.22
7	8.01	3	30		4.29
8	10.00	5	18		3.17

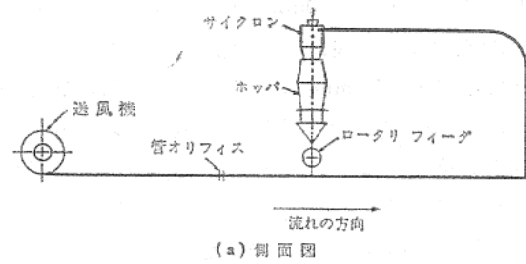
実験装置を内径 156mm の連続エルボの場合について、図3のとおりである。連続エルボを取替えるときに、装置のその他の部分を移動しないですむように、各連続エルボについて図2の b の長さが定められている。①および⑥の断面の圧力を測定するには、Debro 形および Betz 形の精密圧力計を用いた。

粒体の輸送実験をする場合には、粒体をロータリフィーダを経て管路に供給し、管路の終端に設けたサイクロンで空気と分離させ、循環して管路に供給するようにした。粒体としてポリスチロール・ペレットおよび小麦を用いた。それらの特性は表2に示すとおりである。

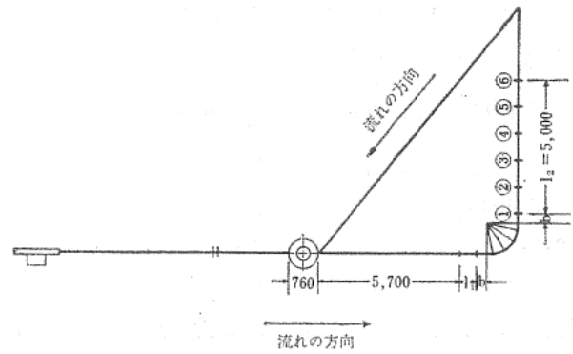
3. 実験結果および考察

3.1 流体だけの場合

図3の装置において、断面①および⑥の圧力 p_1 およ



(a) 断面図



(b) 平面図

図3 実験装置

表2 実験に用いた粒体

物質	比重量 kg/m^3	平均直径 mm
ポリスチロール	1080	2.67
ポリスチロール	1025	1.71
小麦	1220	4.10

び p_6 の差 ($p_1 - p_6$) から、断面①と⑥の間の ($l_1 + 2b + l_2$) という直管部分の圧力損失 $\{\lambda(l_1 + 2b + l_2)/d\} \times (\rho v^2/2)$ を差し引いて、

$$\Delta p_L = p_1 - p_6 - \lambda \frac{l_1 + 2b + l_2}{d} \frac{\rho}{2} v^2 \quad (1)$$

によって連続エルボの損失を表わし、

$$\zeta_L = \Delta p_L / (\rho v^2/2) \quad (2)$$

によって連続エルボの損失係数を定義する。上式の ρ は流体密度である。

式(1)によって連続エルボの損失を正しく求めるには、断面①および⑥に連続エルボの影響のないことが必要である。従来の研究によって、エルボの上流側では、エルボの最初の継目の位置から $(1.7 \sim 2.25)d$ の上流において²⁾、あるいはエルボの入口から $1.14d$ の上流において³⁾、エルボの影響のなくなることが示されていて、図3の ($l_1 + b$) の大きさはその条件を満たしている。またエルボの下流側において、エルボの影響のなくなる位置は一般にはエルボの出口から $50d$ であるとされてい

る³⁾。実験に用いた内径 50mm の連続エルボにおいては、断面⑥は連続エルボの出口から 50 d 以上の位置にあって、問題はない。内径 156mm の連続エルボの場合には、実験室の広さの制限を受け、断面⑥は連続エルボの出口から約 46 d の位置にあって、50 d に達しないが、管路に沿って圧力分布を測定し、断面⑥において連続エルボの影響が消滅していることを確かめた。

式 (1) の λ は直管の管摩擦係数であって、実験に用いた円管に対する λ の値は

$$1/\sqrt{\lambda} = 2.0 \log(R_e \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (3)$$

による値とよく合い、測定値は式 (3) による値よりも、最大 7.6% 大きいだけである。

3.1.1 損失係数 ζ_L 式 (1) および (2) を用いて測定値から損失係数 ζ_L を求めると、図 4 のような結果が得られる。この結果によれば、 ζ_L の値は表 1 の a/d の小さいものほど小さく、またレイノルズ数が大きくなるにつれて初めは著しく減少するが、 $R_e = 1 \times 10^5$ 程度より大きい範囲では、 ζ_L はいずれの連続エルボにおいてもレイノルズ数に無関係にほぼ一定になっている。このことから表 1 の連続エルボのうち、番号 1, 2, 4, 6 のものが損失の小さいことが知られる。

図 2 から R/d と a/d との間に

$$\frac{a}{d} = 2 \frac{R}{d} \tan \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

の関係がある。用いた連続エルボは全体の方向変化が 90° であって、 $n\delta = \pi/2$ であるから、式 (4) は

$$\frac{a}{d} = 2 \frac{R}{d} \tan \frac{\pi}{4n} \quad (5)$$

のように表わすことができる。

連続エルボの全体の方向変化 $\Sigma\delta$ と半径比 R/d を一定に保ったままで δ を小さくすることは、 n を大きくすることであり、式 (5) からわかるように a/d が小さくなって、連続エルボの形は半径比ならびに曲がり角が同じであるベンドに近づき、半径比 R/d のほかに継目の数 n が損失に大きな影響を及ぼす。

ここで縦軸に $\zeta_L \sqrt{d/a}$ をとり、横軸に $R_e \sqrt{a/d}$ をとって、図 4 の損失係数を表わすと図 5 が得られる。図 4 において連続エルボごとに別個の曲線で表わされていた ζ_L は、図 5 の $R_e \sqrt{a/d} \leq 10^5$ の範囲では一つの直線にまとめられ、 $R_e \sqrt{a/d} \geq 10^5$ の範囲では、測定値はある幅にひろがっているが、用いた連続エルボに対しては、この場合にも一つの直線で近似させることができるようである。したがって図 5 の関係から、連続エルボを構成する要素 R/d , n , a/d , δ とレイノルズ数 R_e によ

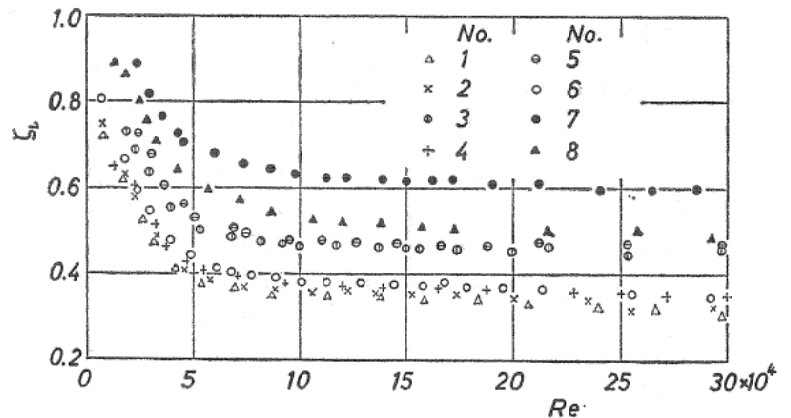


図 4 損失係数 ζ_L とレイノルズ数 R_e との関係

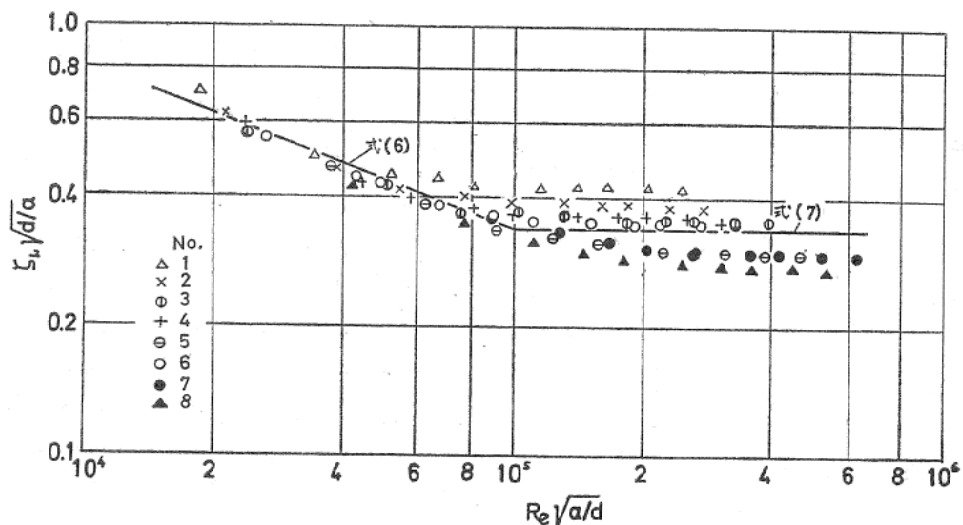


図 5 $\zeta_L \sqrt{d/a}$ と $R_e \sqrt{a/d}$ との関係

て、 ζ_L を与える実験式を求めると、

$Re\sqrt{a/d} \leq 10^5$ に対して

$$\left. \begin{aligned} \zeta_L &= 38.70 Re^{-0.394} \left(\frac{R}{d} \tan \frac{\delta}{2} \right)^{0.303} \\ &= 38.70 Re^{-0.394} \left(\frac{R}{d} \tan \frac{\delta}{4n} \right)^{0.303} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$Re\sqrt{a/d} \geq 10^5$ に対して

$$\left. \begin{aligned} \zeta_L &= 0.476 \sqrt{\frac{R}{d} \tan \frac{\delta}{2}} \\ &= 0.476 \sqrt{\frac{R}{d} \tan \frac{\pi}{4n}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が得られる。これらの式による値は図5に記入されていて、 $Re\sqrt{a/d} \leq 10^5$ に対する式(6)は測定値とよく合、 $Re\sqrt{a/d} \geq 10^5$ に対する式(7)は場合によっては、20%程度の誤差をとまうことがわかる。

3.1.2 相当長さ l_e 直管以外の形の損失を表わすのに

$$\zeta_L = \frac{\Delta p_L}{\rho v^2/2} = \frac{\lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho}{2} v^2}{\rho v^2/2} = \lambda \frac{l_e}{d} \quad (8)$$

から得られる相当長さ l_e を用いることがあるので、図4および図5に得られている損失係数 ζ_L を、式(8)から得られる相当長さ

$$l_e = \zeta_L (d/\lambda) \quad (9)$$

で表わすと図6の結果が得られる。図6からそれぞれの連続エルボの損失が直管のそれに比べてどの程度の大きさになるかを知ることができる。図6の l_e/d の値はレイノルズ数の増加とともに、少しずつ大きくなる上がわかる。損失係数 ζ_L の小さい番号 1, 2, 4, 6 の連続エルボでは、図からわかるように、実験を行なったレイノルズ数の範囲内では、いずれも

$$l_e/d = 20 \sim 25$$

の値になっている。

3.1.3 ベンドの損失との比較

連続エルボの損失はベンドの損失よりも大きいといわれているので、その損失の大きさを比較してみよう。式(1)および(2)と同じ方法でベンドの損失を定義すれば、ベンド

の損失係数 ζ は

$$\left. \begin{aligned} Re(r/R)^2 < 91 \text{ の場合} \\ \zeta &= 0.00873 \alpha \lambda_0 \theta (R/r), \\ Re(r/R)^2 > 91 \text{ の場合} \\ \zeta &= 0.00241 \alpha \theta Re^{-0.17} (R/r)^{0.84} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

で与えられている⁴⁾。rは円管の半径、 θ はベンドの曲がり角を度で表わしたものである。上式の λ_0 は

$$\lambda_0 \left(\frac{R}{r} \right)^{1/2} = \frac{0.316}{\{Re(r/R)^2\}^{1/5}} \quad (11)$$

から求めることができ、係数 α は曲がり角 $\theta = 90^\circ$ に対して、

$$\left. \begin{aligned} R/r < 19.7 \text{ の場合} \\ \alpha &= 0.95 + 17.2 (R/r)^{-1.96} \\ R/r > 19.7 \text{ の場合} \\ \alpha &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

である⁴⁾。実験に用いた連続エルボと半径比が同じであるベンドの損失を式(10)～(12)によって計算し、連続エルボの損失と比較すれば、図7のように

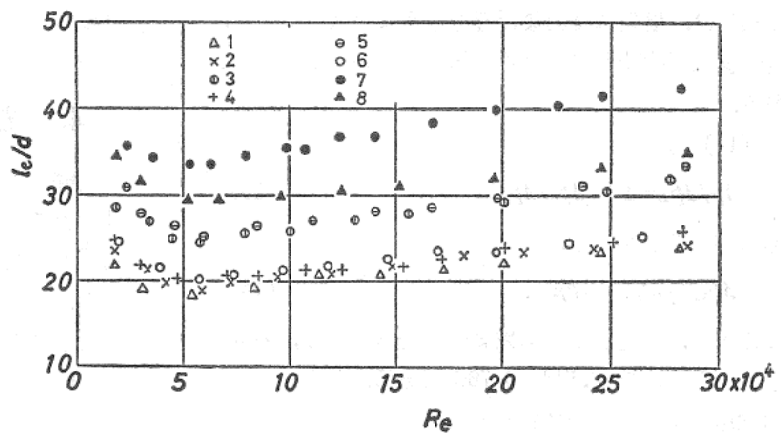


図6 連続エルボの損失に対する相当長さ

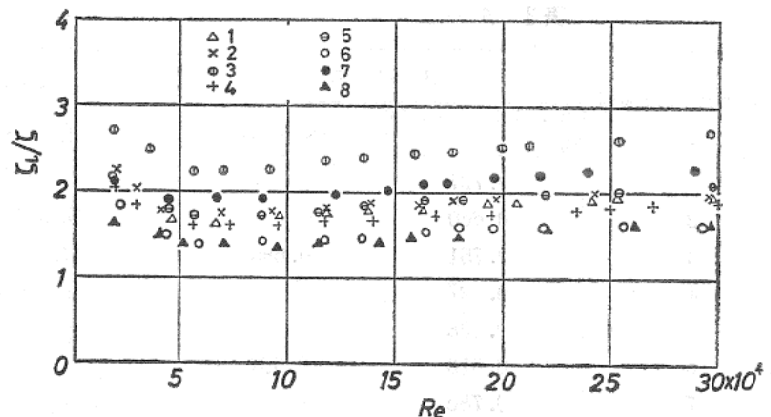


図7 連続エルボの損失 ζ_L とベンドの損失との比較

$$\zeta_L = (1.35 \sim 2.7)\zeta \quad (13)$$

となり、継目の数の影響も含めて、連続エルボの損失はベンドの損失の(1.35~2.7)倍になることがわかる。

3-2 粒体を輸送する場合の損失

管内の流体によって粒体を輸送する場合には、式(1)による損失に、さらに粒体の輸送によって Δp_L だけの損失が付加され、全体の圧力損失 Δp は

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_s \quad (14)$$

である。いま流体として空気を考え、空気輸送の測定値から、 $\Delta p/\Delta p_L$ と混合比 μ との関係は図8のようになり、粒体の輸送によって付加される損失は、直管あるいはベンドの場合の付加損失と全く同じように⁹⁾、粒体の輸送量の増加とともに大きくなっている。図8にはさきに損失係数の小さいということのわかった番号1, 2, 4, 6の連続エルボについての結果が示されているが、その他の連続エルボについても、付加損失の増加の傾向は全く同様である。また測定結果によれば、表2に示した粒体の相違は、損失に特別な影響を与えないようである。混合比 μ は単位時間における粒体と空気の重量流量の比である。

式(14)は

$$\Delta p/\Delta p_L = 1 + (\Delta p_s/\Delta p_L) \quad (15)$$

の形に書くことができ、

$$\Delta p_s/(\rho v^2/2) = \beta \mu \quad (16)$$

とおくとき、測定値から係数 β の値を求めると、表3に示したように、 $\beta = 0.514 \sim 0.786$ である。したがって粒体の輸送によって付加される損失は

$$\Delta p_s = (0.514 \sim 0.786)\mu(\rho v^2/2) \quad (17)$$

表3 β の値

連続エルボの番号	β の 値	
	ポリスチロールの輸送	小麦の輸送
1	0.727	
2	0.660	
3	0.751	0.680
4	0.627	
5	0.608	
6	0.613	0.654
7	0.786	
8	0.514	

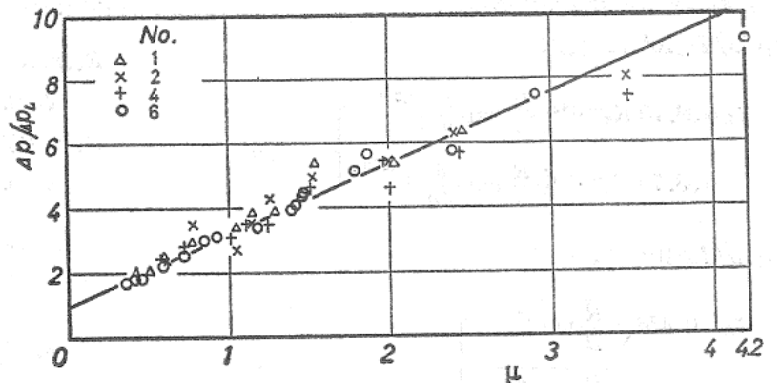


図8 粒体の輸送による損失の増加

で表わされる。またこのときの全体の圧力損失 Δp は、上の β を用い

$$\Delta p = (\zeta_L + \beta\mu)(\rho v^2/2) \quad (18)$$

のように表わされる。

流体だけの場合には、図4からわかるように、番号2, 4, 6の連続エルボの損失係数の値は相互に比較的近い値をとり、しかもその他の連続エルボの損失係数の値よりも小さい。このことと粒体を輸送する場合の表3の β の値とをあわせて考慮すると、上記4種類の連続エルボを用いるのが、粒体を輸送する場合にも全体の圧力損失の点から有利であると考えられる。

4. むすび

連続エルボの損失に影響を与える因子は多くて、以上述べたことによって、連続エルボの特性を論じつくすにはいたっていない。しかし従来の研究によって得られていた結果に、あらたにその特性を追加することができた。それを要約すれば次のようになる。

(1) 取扱ったレイノルズ数の範囲内では、いずれの連続エルボの損失係数も、初めはレイノルズ数の増加とともに著しく減少するが、 $Re = 1 \times 10^5$ 程度より大きいレイノルズ数の範囲においてはほぼ一定になる。しかも損失係数の値は、同じレイノルズ数に対しては、 a/d の小さいものほど小さくなっている。

またこれらの損失を相当長さで表わし、あるいは同じ半径比を持つベンドの損失と比較して、連続エルボの損失がどの程度の大きさになっているかを示した。

従来は連続エルボの損失を求めるための式が示されていなかったが、実験結果を用いて、連続エルボの構成要素とレイノルズ数によって、損失係数を求める実験式を導くことが試みられた。

(2) 粒体を輸送する場合に付加される損失は、粒体の輸送量の増加とともに大きくなり、その大きさの程度が明らかにされた。

(3) 実験に用いた8種類の連続エルボのうちでは、番号1, 2, 4, 6のものは損失が小さい。したがって連続エルボを設置する場所に応じて、これら4種類のうちの適切なものに、半径比 R/d および方向変化の角 δ を合わせて、所要の連続エルボを定めることができる。

(4) R/d だけを用いて連続エルボを規定している DIN 11700 は、その中でこの規格の不完全なことを認めてはいるが、上述のことからも明らかなように、圧力損失という観点から、さらに連続エルボの R/d 以外の構成要素をも考慮して、改訂していくことが望ましいと考えられる。

文 献

- 1) Normentwurf DIN 11700, Gebläserohre-Landmaschinen.
- 2) H. Kirchbach, Mitt. Hydraul. Inst. TH München, 3 (1929), 68.
- 3) W. Schubart, Mitt Hydraul. Inst. TH München, 3 (1929), 121.
- 4) 伊藤, 機械学会誌, 62-490 (昭34-11), 1634.
- 5) 植松, 森川, 機械学会論文集, 26-171 (昭35-11), 1528.
- 6) 植松, 森川他4名, 機械学会論文集, 30-219 (昭39-11), 1317.
- 7) Y. Morikawa, Grundl. Landtechn., 16-2 (1966), 65.
- 8) 森川, 機械学会論文集, 33-254 (昭42-10), 1633.