積層格子の抵抗係数に関する研究*

林 農^{*1}, 吉野 章 男^{*1}

The Pressure Drop across a Tube-Bundle Flow Rectifier

Tsutomu HAYASHI and Fumio YOSHINO

The effects of the tube-bundle rectifier of two different arrangements, staggered and side-by-side, on pressure drop across the rectifier are studied experimentally. Although it was expected that the pressure drop coefficient K of the staggered matrix has a much larger value than that of the side-by-side matrix, a new phenomenon in which the coefficient K varies in accordance with not only their arrangement, but also Reynolds number and length of the tube was found.

Key Words: Fluid Dynamics, Pipe Flow, Turbulent Flow, Laminar Flow, Pressure Drop, Flow Rectifier

1. はじめに

整流格子はそれ自身の抵抗を利用して、流速の均一化ならびに脈流の沈静化、旋回流の除去の目的などに古くから用いられてきている。パイプを流れ方向に並行に積み重ねて作る積層格子は流路断面にわたって任意の大きさの抵抗を分布させることが容易にできるうえに、格子自身の整流効果が期待できるので、均質で大きな速度こう配を持つ流れ場を作成するのに適している^{(1)~(3)}。ところが、パイプを単純に積み重ねただけでは抵抗の一定した整流格子ができるわけではなく、実際には、整然とした並び方が実現されないために場所によって流動抵抗に差が生じ、得られる速度分布が一樣でなく、本来の目的の達成に支障をきたすことはしばしば経験するところである。また、この積層格子は蓄熱式熱交換器の蓄熱材や化学プラントの触媒構造として用いることも可能であり⁽⁴⁾、そのときには接触面積が広くかつ流動抵抗が小さいなどの条件を満たすことが望まれる。

パイプの積み重なり方には大別して、図1に示すよ

うに、安定な倭積みと不安定ではあるが整然と配列した碁盤目積みの2とおりが考えられる。これらは別の見方をすれば、パイプ間で形成されるすきまの幾何学的形状が、倭積み配列では三辺星形管であるのに対して、碁盤目積み配列の場合には四辺星形管であることの違いである。倭積みと碁盤目積みを比較したとき、おそらく、倭積みのほうが一定空間に詰められるパイプの本数は多く開口比は小さいのであるから、パイプの軸方向に流体を流した場合、金網などの抵抗係数から類推する限り、倭積みのほうが抵抗係数は大きくなることが予想される。しかし、これらの抵抗係数の違いを正確に求めた研究は、著者らの知る限り、まだ行われていない。

本研究では、第1段階として、パイプを積み重ねて

図1 積層格子の配列

* 平成2年3月30日 第67期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成2年4月25日。

^{*1} 正員、鳥取大学工学部 (〒680 鳥取市湖山町南4-101)。

作る積層格子の流動抵抗の基礎資料を得る目的で、俵積みと基盤目積みの2種類の配列に対する抵抗係数を実験によって求めた。

その結果、開口比の小さい俵積みの抵抗係数は必ずしも常に大きいわけではなく、パイプの長さとレイノルズ数に依存して、逆に基盤目積みの抵抗係数のほうが大きい場合もあるという興味ある現象を見いだした。考慮した因子は、積層格子のパイプ配列形状、パイプの内径、厚さ、長さおよびパイプの内径を代表寸法とするレイノルズ数である。

なお、供試積層格子のパイプとして使用した材料はポリプロピレン製のストローである。同様な材料を用いた整流装置が乱流制御の目的で研究された例⁽⁵⁾があるが、その積層格子の配列は俵積みと基盤目積みが混在した構造であり、その配列の違いを明確にしていない。また、従来から推奨されている整流装置のうち、管状式のものには俵積みと基盤目積みの組合せ配列から成り立っているものが多いにもかかわらず、それらは要素別には考慮されていない⁽⁶⁾。したがって、本研究結果は積層格子を用いた整流装置の構造を根本から考え直す資料を提供するものと考えられる。また、もう一つの整流装置の抵抗体として従来からよく知られている平織金網の抵抗係数と本研究の俵積みおよび基盤目積みの積層格子の配列の違いによる抵抗係数の変化の様相との比較についても考察したので報告する。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた装置の概略図を図2に示す。流路は外径130 mm、内径119 mmの亚克力パイプ製であり、全管路長は8069 mmである。流速の様なポテンシャルコア部分が格子前面のできるだけ広い範囲を占めるように、積層格子はノズルの先端から10D後方の位置に設置した。流量の測定は、ダクト内径を代表寸法とするレイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^5$ の範囲であ

ることから、伊藤ら⁽⁷⁾の長円ノズルの圧力差によるものとした。積層格子の構成要素であるパイプは内径6.53 mm、肉厚0.19 mmのポリプロピレン製ストローであり、長さは、15, 25, 50, 100, 200, 300, 400 mmの7種類である。俵積みおよび基盤目積み配列の積層格子は、図3に示すように、取替えが簡単なようにフランジと六角および八角の形枠にストローを詰め込んだ一体構造のカートリッジとした。これはまた、ダクト内壁面に接する場所においても形崩れなく、俵積みおよび基盤目積み配列を確実にするものである。

積層格子の流動抵抗は格子前後 $-1D$ および $+1D$ における圧力差を測定することにより求めた。流路に沿う静圧分布を図4のように仮定して、抵抗係数は次のように定義した。

$$K = \frac{\Delta P}{\rho u^2 / 2} = \frac{\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{\rho u^2 / 2} = K_1 + K_2 + K_3 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 u を積層格子への近寄り速度としてダクト内平均速度をとった。 K_1 および K_3 は積層格子直前および直後における圧力損失よりなる抵抗係数であって、 K_2 のみが積層格子のパイプ内壁面およびすきまの星形管壁面の管摩擦による圧力損失からなる抵抗係数を意味している。したがって、パイプの長さ L を短くして $L=t$ の極限においては金網の抵抗係数に相当すると考えることができるので、 $(K_1 + K_3) = K_s$ を金網相当抵抗係数と定義する。

図3 カートリッジ

図2 実験装置の概略図

図4 抵抗係数の定義

3. 実験結果および考察

3.1 抵抗係数 図5は実験によって得た俵積み配列および碁盤目積み配列の積層格子の抵抗係数 K とレイノルズ数 Re の関係を示す。ここでのレイノルズ数は近寄り速度 u を代表速度、パイプすなわちストローの内径 d を代表寸法とする $Re=ud/\nu$ である。

積層格子の抵抗係数はその配列の違いによって差が生じるとともに、長さおよびレイノルズ数によっても影響されることが明らかとなった。

パイプの長さが短く $L=15\sim 25\text{ mm}$ のときには、金網などの流動抵抗から類推されるように、開口比の小さい俵積みの抵抗係数のほうが碁盤目積みのそれより常に大きく、レイノルズ数の大きな領域でその差は顕著である。また、その抵抗係数は俵積みおよび碁盤目積みともにレイノルズ数の増加に対して単調に減少している。

とくに注目すべき点はレイノルズ数が $Re<4000$ と低く、積層格子の長さが $L\geq 100\text{ mm}$ の長い領域において、抵抗係数の大きさは逆転して、碁盤目積みの抵抗係数は俵積みのそれよりも大きくなっていることである。

すなわち、 $L=100\text{ mm}$ に至って、 $Re<4000$ の範囲では、碁盤目積みの抵抗係数は俵積みのそれより大きくなり、長さが $200, 300, 400\text{ mm}$ と増加するとその

傾向は助長され、俵積みの抵抗係数の変化は中だるみ曲線となり、 $Re=3000\sim 4000$ の範囲において現れる最小値は L の増加とともに Re の小さいほうへ移動していく。さらに、その最小点より小さいレイノルズ数の範囲では、俵積みの抵抗係数は小さく碁盤目積みの抵抗係数と大きな差を生じるようになる。

俵積みの抵抗係数 K の Re に対する変化の傾向は、遷移領域が $Re=3000\sim 4000$ と、通常の管内流の遷移レイノルズ数と比較して、やや高い値であることを除いて、円管摩擦係数に関する Nikuradse の実験結果⁽⁸⁾にならうような変化を示す。これはパイプの長さが長くなるほど、積層格子の全抵抗に対してパイプ内壁面の管摩擦による圧力損失が支配的になることを意味している。また、この管摩擦損失の変化の傾向は碁盤目積みよりも俵積みのほうが顕著である。この原因としては、総断面積に対する円管断面積の占める割合は俵積みが 81% であるのに対して、碁盤目積みは 70% と小さいので、パイプ内壁面による圧力損失が俵積みのほうがより支配的になることによるものと考えられる。これらはまた、式(1)で定義した抵抗係数 K のうちの積層格子のパイプ内壁面およびすまの星形管壁面の管摩擦による圧力損失のみからなる抵抗係数 K_2 を後述の方法によって、 $K_2=K-K_s$ から求めて、 $K_2(d/L)$ をプロットした曲線が、 L の大きくなるほど Nikuradse の滑らかな円管の摩擦係数 λ の曲線に近

図5 積層格子の抵抗係数

づくことから確認できる。

また、 $L \geq 100$, $Re < 4000$ の範囲において基盤目積みの抵抗係数の大きい理由の一つとしては、基盤目積みのすきまを形成する四辺星形管内の流れも俵積みと同様このとき層流であり、ほぼ目詰まり状態に陥っていると考えられるので、俵積み比べて星形管断面の占める割合の大きい基盤目積みは、 L の長いときに抵抗係数が大きくなるものと推定できる。なお、全断面積に対する星形管流路断面の占める割合は、俵積みで 9.3%，基盤目積みでは 21.5% である。

3.2 金網相当抵抗係数 図 6 は積層格子の長さに対する抵抗係数の変化の様子を示す。配列の違いにかかわらず、抵抗係数の増加割合は $Re = 4000 \sim 5000$ を境に大きく変わることを示している。

俵積み、基盤目積みのいずれの配列でも、 $Re \geq 6000$ の管内乱流の領域では、積層格子の抵抗係数 K は長さ L に正比例して増加する。一方、 $Re \leq 3000$ の領域では、直線的に増加するけれども、 $L = 50 \sim 80$ において K の L に対する増加割合が急に变化する長さが存在し、短い場合の K の増加割合は長い場合のそれよりも大きい。この K の増加率の変化点はパイプ入口からの一様速度分布のコア領域消滅点に相当することが予想されるが、その詳細な機構はまだ解明していない。

図 6 において、 K の値を外挿して $L \rightarrow t$ または近似的には $L \rightarrow 0$ における仮想極限値を求めれば、 $K_s = (K_1 + K_3)$ の金網相当抵抗係数を得ることができる。このようにして求めた K_s の値は図 5 の中に実線で示した。

3.3 平織金網との比較 整流の目的で用いられ

図 6 抵抗係数の長さ依存

る市販の金網の流動抵抗に関しては比較的多くの研究結果が報告されている⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。そこで、金網相当抵抗係数 K_s と既存の平織金網の抵抗係数の値を比較検討する。

大坂らは⁽⁹⁾、平織金網の抵抗係数は線径レイノルズ数 $Re_t = ut/\nu$ と開口比 β の関数として

$$K = A_1/Re_t + B_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$A_1 = 9.67\beta^{-2.4}, B_1 = 0.16\beta^{-2.8}$$

の関係で表せるとしている。ここで、平織金網の線径 t は積層格子のパイプの肉厚 t に等しいことを仮定し、さらにパイプ長さ L が短くなって極限值 $L = t$ に達したとき、積層格子の抵抗係数は同じ開口比 β の金網のそれに等価になることを仮定した。さらに、パイプの内径 d を代表寸法とするレイノルズ数 $Re = ud/\nu$ に変換すれば式(2)は

$$K = A_1(d/t)/Re + B_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

とすることができる。俵積みと基盤目積みの違いは係数 A_1, B_1 中に開口比 β の違いとして含まれている。この関係は図 5 中に破線によって示した。それによれば、俵積み形状 ($\beta = 0.903$) の抵抗係数は基盤目積み形状 ($\beta = 0.916$) の抵抗係数よりわずかに大きい。積層格子の金網相当抵抗係数の配列の違いによるほどの差はなくかつ全体的に大きめの値であることがわかる。

また、大坂らは⁽⁹⁾、平織金網の目開きレイノルズ数 $Re_1 = ul/\nu$ を用いて抵抗係数を表示したが、目開き l の代わりにパイプの直径 d を用いれば

$$K = A_2/Re + B_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A_2 = 71.4/\beta, B_2 = 0.229/\beta^2$$

となる。これらの関係は図 5 中一点鎖線で示した。これもまた積層格子の配列の違いによる金網相当抵抗係数ほどの差はないことと全体的に大きめの値であることを示している。

積層格子の金網相当抵抗係数と平織金網の抵抗係数が完全に一致しない原因としては次の事柄が考えられる。

(1) 平織金網の網目パターンは四角格子であるのに対して、積層格子の俵積み配列および基盤目積み配列は網目パターンが異なるので、単に開口比のみで表現するのは適当でない。

(2) 平織金網は波形鉄線より成る立体構造を持っているので比較の対象としては最適でなく、厳密には積層格子と同じ網目パターンを持つ多孔平板の抵抗係数と比較する必要がある。

(3) 大坂らの実験は $\beta = 0.35 \sim 0.71$ の範囲の平織金網で行われたものであるのに対して、この結果を $\beta > 0.9$ の積層格子の場合に適用したものである。これほ

ど大きい開口比を持つ金網は実際のところ流動抵抗に関する分野では用いられていないようである。

以上の三つの原因とこれらの値はすべて仮想した値であることを考え併せれば、平織金網の抵抗係数は積層格子の金網相当抵抗係数をよく近似していると見ることができる。したがって、積層格子の抵抗係数の $L \rightarrow 0$ または $L \rightarrow t$ の仮想極限值は同じ網目パターンの金網または平板の抵抗係数に等しくなる可能性があるといえることができる。また、これらの結果は逆に金網の抵抗は開口比のみで決まるものではなく網目模様によって差が生じるに違いないことを示唆している。

4. ま と め

積層格子の倭積みと碁盤目積みの2種類の配列の違いによる抵抗係数の差を実験によって明らかにすることを試みて、開口比の小さい倭積みの抵抗係数は必ずしも常に大きいわけではなく、パイプの長さレイノルズ数に依存して、逆に碁盤目積みの抵抗係数のほう

が大きい場合もあるという興味ある現象を見いだし、これについて若干の考察を加えた。

また、積層格子の長さを短くして $L=t$ の仮想極限值である金網相当抵抗係数は、従来からよく知られている平織金網の抵抗係数によって近似できることを示した。

文 献

- (1) 林・ほか3名, 機論, 55-515, B (1989), 1896.
- (2) Kotansky, D. R., *AIAA J.*, 4-8 (1966), 1490.
- (3) 林・ほか1名, 機論, 56-522, B (1990), 289.
- (4) 森・宮崎, 機論, 33-250 (1967), 956.
- (5) Loehrke, R. I. and Nagib, H. M., *Trans. ASME, Ser. I*, 98 (1976), 342.
- (6) 日本機械学会, 管路・ダクトの流体抵抗, (1979), 109.
- (7) 伊藤・渡部, 機論, 45-398, B (1979), 1599.
- (8) Nikuradse, J., *VDI-Forschungsh.*, 361 (1933), 1.
- (9) 大坂・ほか3名, 機論, 52-473, B (1986), 312.
- (10) 浜口・ほか2名, 機論, 48-435, B (1982), 2207.
- (11) Taylor, G. I. and Davies, R. M., *ARC R&M*, 2237 (1944), 163.