

10万倍以上の流量範囲を微調節可能にした 正三角形のスパイラル溝構造

〈新機構の流量調節弁：スーパーニードル〉

(株)フロント
前田 真人

H0811-08
0385-9894/09/¥500/論文/JCLS

〔製品技術情報〕

10万倍以上の流量範囲を微調節可能にした 正三角形のスパイラル溝構造

＜新機構の流量調節弁：スーパーニードル＞

(株)フロント 前田 真人
Masato Maeda

1. はじめに

従来の流量調節バルブに比べ、桁違いに広い範囲の流量を微調節出来るバルブを開発した。このバルブにより、例えば100 kPaの圧力で、純水の場合、数 μ L/min～約2.1 L/minまでの間の百万倍近い流量範囲で微調節することが可能である。(株)フロントから2007年秋に、オールテフロン仕様 (Oリングはバイトン、又はパーフロ)、2008年9月に廉価版のステンレスBODYタイプのもを発売した。また流量調節バルブのバルブ開度を正確に把握し、流量を設定するためのダイヤル指示付きのスーパーニードルも発売している。

本報では、この新しいバルブの構造・動作原理・理論・実測データなどにつき紹介する。

2. 従来のニードル弁

流量調節バルブと言えば、ニードル・バルブが広く使われている。オリフィスの穴にテーパ状になった軸を挿入し、リング状の隙間を少しずつ小さくすることにより、流量を調節するものである。

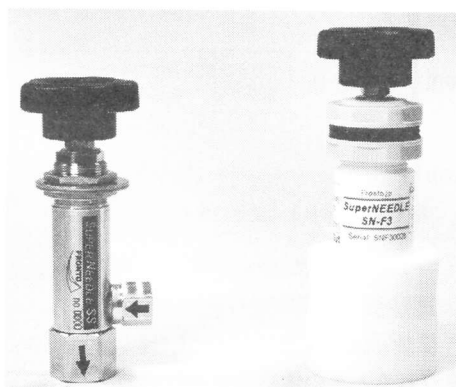
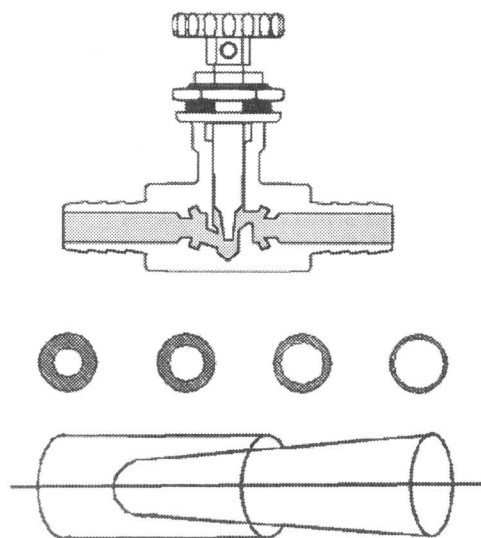


写真1 「スーパーニードル」の外観



第1図 従来のニードル弁の構造

〔従来のニードル弁の欠点〕

- ① テーパ軸と穴の芯が少しでも偏れると、微少流量領域では大きく流量が変化する。
- ② 微調節可能な最大流量と最小流量の比は10～100倍以内程度しか達成できない。
- ③ 従って調整したい流量範囲毎に異なるバルブを選定する必要がある。
- ④ テーパ軸は流量ゼロにしてゆく時、オリフィス穴の内径に押し付ける形になるので、材質の組み合わせにより、磨耗で流量がゼロにならなくなる場合がある。

各バルブメーカーからは、オリフィス径の異なる、10～20種類もの流量調節範囲の異なるバルブが販売されている。

3. 新しいバルブ構造の考案

筆者は、ニードル弁の流量微調節範囲をもっと広くする方法がないかを模索し、各種機構のものを試作テストしている中で新しい機構を考案した。

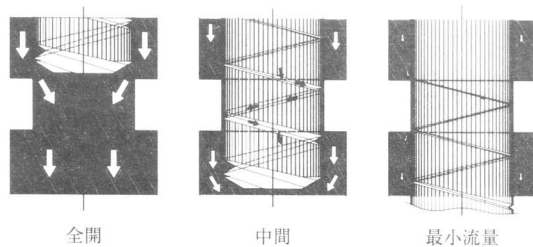
通常のニードルバルブはリング状の流路を持ち、そのリングの幅を限りなくゼロに近づけて行くことにより流量を小さくする。この場合、完全に軸と穴が同芯であることが必要になる。

これに対して、軸と穴は摺動状態にしておき、軸か穴のどちらかに溝を切っておき、この溝の大きさを少しずつ小さくすれば、流量が調節できるのではないかと考えた。

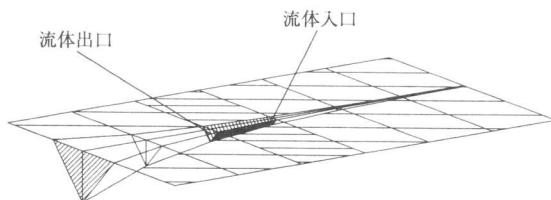
溝の形状を例えば半円形にしようすると、同一工具を深さ方向に送っただけでは加工出来ない。溝の形状は、相似形で同一の工具で加工出来ないと加工困難になる。従って、正方形の溝も良くない。

結論として、正三角形を選んだ。正三角形でなくても、例えば直角2等辺三角形でも良い。

スーパーニードルでは流体は正三角形の断面を持つスパイラル状の溝の中を流れる。バルブのノブを回して開いていくと、この正三角形溝の深さが、幾何級数的に変化するようになっている。溝の深さが10倍になると、層流状態で流量は、原理的に1万倍になる。従って第1図のような正三角形の溝の深さを1/10にすることにより、流量を1万分の1に小さくすることができるのである。



第2図 スーパーニードルの動作原理図



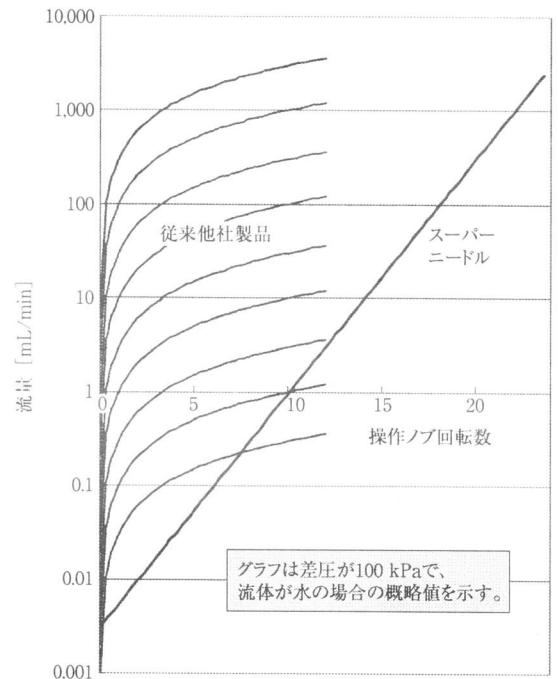
第3図 スーパーニードルの溝流路の形状

4. スーパーニードルと従来品の比較

従来のニードルバルブの操作ノブ回転数と流量の関係は、リニアに近いものから、流量の少ない領域で、微調節がし易くなるように傾きが小さくなったもの、逆に流量の大きい方で傾きが小さくなったもの（クイックオープン特性²⁾)など、色々な形のものがあるが、広い範囲で、回転数に対する流量変化率が一定になったものはなかった。従来のニードルバルブでは微調節できる流量範囲が狭いため、メーカーによって異なるが、スーパーニードルのカバーしている流量範囲で、1社の同一のシリーズだけで、15種類もの調整範囲の異なるものが販売されている。

これに対して、スーパーニードルは、流量比で10万倍以上の範囲で、操作ノブの回転数に対する流量変化率が、全域ではほぼ一定な特性を示し、全域で、ノブ約4回転で、流量が1桁変化するように設計している。

他社製品は、ノブ回転数は5回転から12回転であるが、スーパーニードルでは23回転になっている。



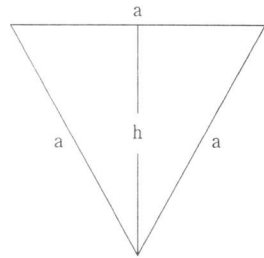
第4図 従来品との流量特性の比較 (対数目盛)

5. 理論説明⁽¹⁾

粘性係数 μ の非圧縮性流体が、半径 r 、長さ L の円管内を流れるときの体積流量 Q は次のハーゲン・ポアズイユの式で記述される。

$$Q = \frac{\pi r^4 (P_1 - P_2)}{8 \mu L} \quad \dots(1)$$

ここで、 P_1 は入口での圧力、 P_2 は出口での圧力である。



第5図 正三角形溝

流路形状が円管でなく、一片の長さが a の正三角形の場合、ハーゲン・ポアズイユの式は

$$Q = \frac{\sqrt{3} h^4 (P_1 - P_2)}{180 \mu L} \quad \dots(2)$$

ただし、 h は正三角形の高さであり、

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} a \quad \dots(3)$$

となる⁽³⁾。(2)式より、流路の抵抗を R とすると、

$$R = \frac{180 \mu L}{\sqrt{3} h^4} \quad \dots(4)$$

である。

ニードルバルブの流量特性の「理想特性」は、バルブ開度の位置に関わらず、操作ノブの操作回転角度に対する流量変化率が一定なこと、すなわち、「イーコール・パーセント特性⁽²⁾」であり、これを実現するためには、溝の深さを、指数関数で変化させれば良いことが予測される。

そこで、溝の深さ h が

$$h(x) = \alpha e^{-\beta x} \quad \dots(5)$$

の指数関数で変化する場合につき計算する。このとき微小区間での抵抗は、(4)、(5)より、

$$\frac{dR}{dx} = \frac{180 \mu (1 + 4 \beta x)}{\sqrt{3} \alpha^4} e^{4 \beta x} \quad \dots(6)$$

長手方向に、区間「 $x-L$ 」から「 x 」までの抵抗は、上式を積分して、(7)式が得られる。

$$R = \int_{x-L}^x \frac{dR}{dx} = \int_{x-L}^x \frac{180 \mu (1 + 4 \beta x)}{\sqrt{3} \alpha^4} e^{4 \beta x} dx \quad \dots(7)$$

$$= \frac{180 \mu}{\sqrt{3} \alpha^4} \{ x e^{4 \beta x} - (x-L) e^{4 \beta (x-L)} \}$$

(7)式を実際にエクセルで数値計算してみると、ほぼ

ログリニアな特性になることがわかり、理想特性のイーコール・パーセント特性のバルブが実現できることが予測された。

本バルブの溝加工は日本の高い加工技術と近年のNC加工機の進歩により、簡単に加工していただけたと考えていた。しかし実際には、指数関数で溝の深さを变化させた正三角形の溝を加工することは困難であった。当社のような無名の業者の依頼であったためか、何社にも加工見積もり依頼をしたが、辞退されてしまった。その後やっと「スパイラル状でかつ深さが指数関数で深くなる正三角形溝を持った軸」を加工していただく業者を見つけることが出来、製品化することが出来た。

この製品開発は、以上の通り、始めに理論解析を行い、「論理の強制力」により、最終特性を予測し、実際の形状を設計するという形で進めたのである。

6. ダイヤル付きスーパーニードル

スーパーニードルは従来のニードルバルブと違い、軸は穴にピッタリとしたハメアイの状態になっているため、繰り返し再現性に優れている。

正確に同じ位置に回転させれば、同じ流量が得られる。

そこで、市販の回転数ダイヤル表示器をスーパーニードルに直結させ、締切りからの回転数位置を正確に再現できるようにした。

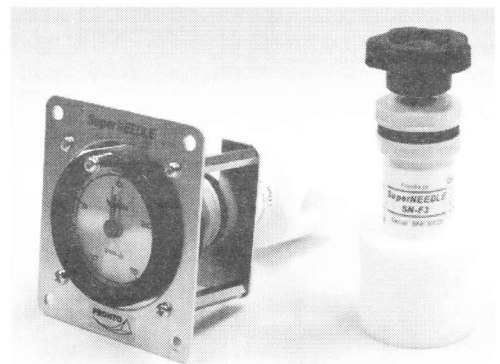


写真2 ダイヤル付きスーパーニードル外観

7. 流量設定のソフト

スーパーニードルはハーゲンポアズイユの式から導かれる理論式に近い特性を示す。

流れが、層流であれば、ある条件で実測した特性から、圧力、粘性係数を変えた時の流量は、計算可能である。逆に、バルブの操作軸回転数と流量を実測した

10万倍以上の流量範囲を微調節可能にした正三角形のスパイラル溝構造…(4)

データから、補間計算することにより、流体の粘性係数、と出入り口の圧力が解れば、目標流量を与えるバルブの操作回転位置が計算できる。

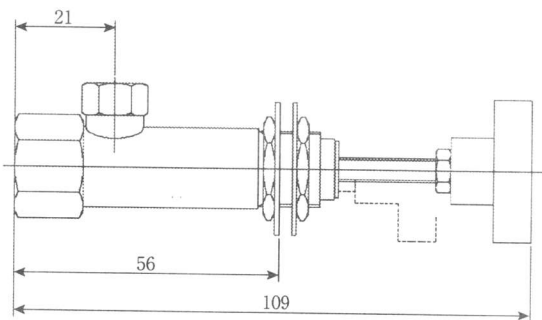
(株)フロントでは、現在バルブを購入していただいたお客さまに、そのバルブの校正データのファイルをメールの添付ファイルで供給させて頂いている。

従って、このソフトの中に入っている代表的な流体であればそのまま、それ以外の流体では粘性係数を入力すれば、ダイヤル付きスーパーニードルは流量設定器として使うことが可能である。

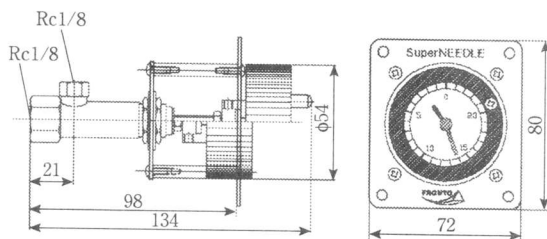
8. スーパーニードルの機種構成

スーパーニードルはボディー材質、内部使用部品、操作軸の回転数表示用ダイヤルの有無など全部で16種類の組み合わせの中から選択していただいている。

- ① ボディー材質
PTFE (テフロン) またはSUS304
- ② 内部機構の材質
PTCFE + PTFE、またはPTFEのみ
- ③ O-リング
バイトン (FKM) またはパーフロ (FFKM)
- ④ 操作軸の回転数表示用ダイヤルの有無



第6図 SUSボディースーパーニードルの外形寸法



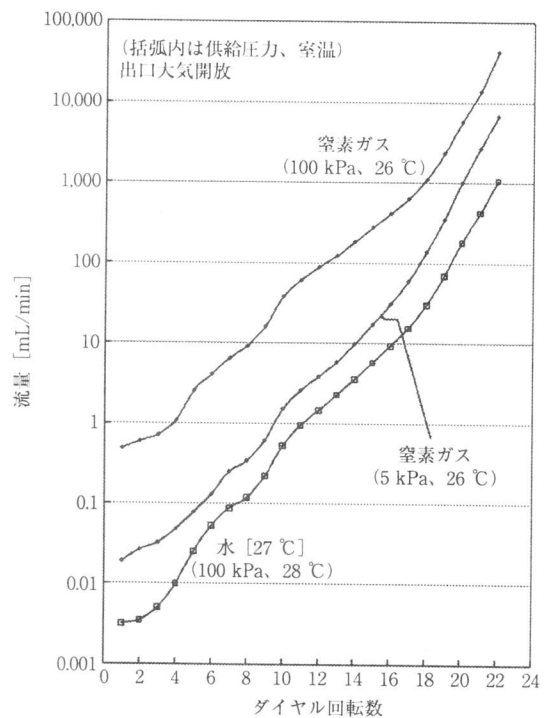
第7図 ダイヤル付きの外形寸法

9. 実測データ

次に、スーパーニードルの実測データを示す。

9-1 全領域の流量特性

流量の測定には気体の場合には堀場製作所製の石鹼膜式流量計を用い、純水の場合には、精密天秤とストップウォッチを用いている。石鹼膜流量計は、ガラス管の中に石鹼膜を作り、ガラス管の上下に目盛があってこの間を石鹼膜が測定するガスで持ち上げられて、通過する時間を測定するものである。ガラス管の体積と、時間だけで流量が決まるため、非常に信頼性が高い流量測定法である。



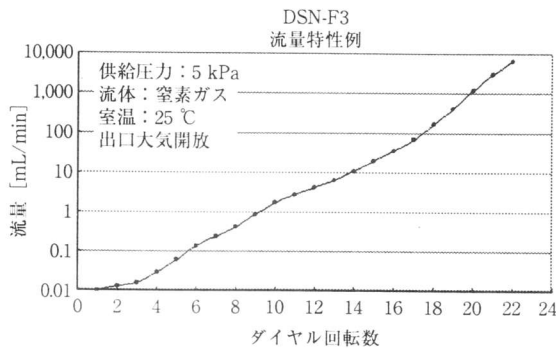
第8図 スーパーニードルの流量特性例

第8図はスーパーニードルのノブ (ダイヤル) 回転数と流量の実測データである。元圧100 kPaで、出口大気解放で測定している。流体が空気の場合では、最大流量と最小流量の比は10万倍以上、純水の場合には100万倍以上になっている。

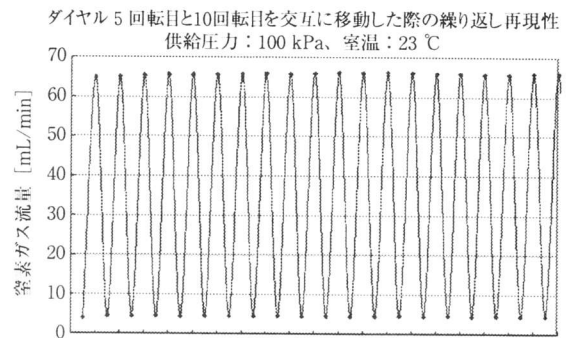
9-2 部分的な微調節性のデータ

第9図は流量が少ない領域でどの程度の調節が出来るかを示す。第10図～第12図は、全領域の中間部分での測定結果である。これらの図から、広い流量範囲で、微調節が可能なが解る。

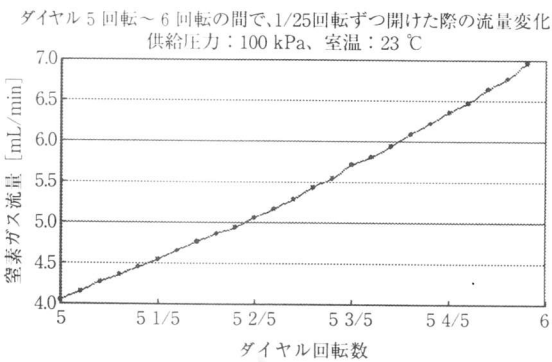
第13図は、繰り返し再現性を示している。



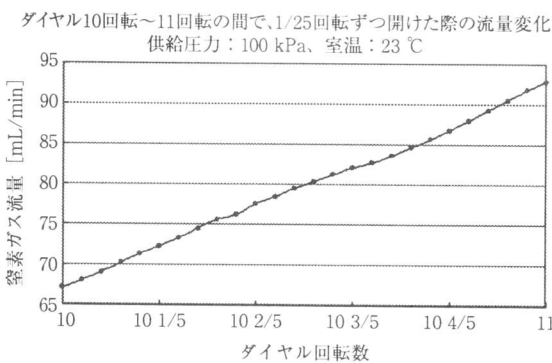
第9図 微小流量域での測定例



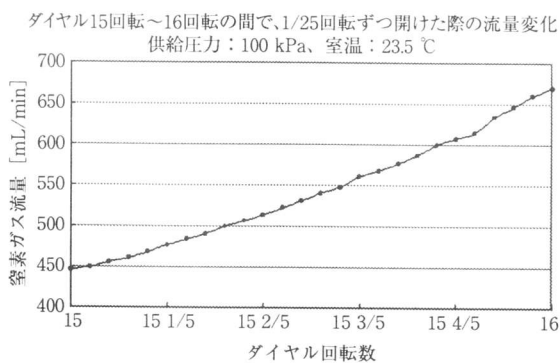
第13図 繰り返し再現性のデータ



第10図 スーパーニードルの中間域での測定(1)



第11図 スーパーニードルの中間域での測定(2)



第12図 スーパーニードルの中間域での測定(3)

10. おわりに

従来のニードル弁が、100倍以内程度の調整範囲なのに比べ、10万倍以上の微調節範囲を持つ流量調節弁を開発した。

2008年秋にはオールテフロンタイプとSUSボディタイプのラインアップが揃った。

スーパーニードルは、これまでハイテクの大手企業の研究開発部門の方々からご購入いただいて、好評を頂いている。今後、決定的な新しい需要が出てくることを期待している。

<参考文献>

- (1) 株式会社フロント ホームページの理論説明
<http://www.fronto.jp/>
- (2) 株式会社エム・システム技研：計装マガジン，計装豆知識，2000年5月号p.18（同社ホームページに公開されています）
- (3) Henric Bruus, Theoretical Microfluidics, Lecture notes, fall 2005

【筆者紹介】

前田真人

(株)フロント

〒186-0002 東京都国立市東4-27-9 A102

TEL：042-574-5163

E-Mail：masato@fronto.com