

流量計測・制御機能付きバルブの開発

Development of Control Valve with Flow Measurement and Flow Control

株式会社 山武 古谷 元洋
ビルシステムカンパニー Motohiro Furuya

株式会社 山武 大谷 秀雄
ビルシステムカンパニー Hideo Otani

キーワード

流量計測, 流量制御, コントロールバルブ, エネルギー管理, 省エネ

主にビル空調において使用される冷温水制御弁に流量計測の機能を追加した製品を開発したので報告する。本製品により各空調機のエネルギーの使用効率をきめ細かく把握できるようになる。また、流量制御動作(従来は開度制御動作)が可能になり、過流量の抑制が図られ省エネルギーに貢献できる。さらに他の空調機の流量変化に影響を受けずに必要流量が維持されるため、居室空間の快適性向上が期待できるようになった。

This paper reports on the development of a product that incorporates flow measurement functions in the heating and cooling water control valves used mainly in building air-conditioning systems. This product can be used to obtain the energy usage efficiency in detail for each air-conditioning unit. It also allows flow rate control operations (previously, opening control operations) to reduce excessive flow rates for contributing to energy savings. In addition, the required flow rate is maintained without being affected by flow rate changes in other air-conditioning units for allowing improved comfort in living spaces.

1. はじめに

近年、低炭素社会の実現が急務とされる中、ビル・工場などの建物においても省エネ法の改正などエネルギー管理や省エネに対する要求が急速に高まっている。省エネ法ではエネルギーの管理基準を設定し、その状況を定期的に報告すること、エネルギーの使用に関する合理化の目標に関し、その達成のための中長期(3~5年)の計画を作成し提出することなどが義務付けられている⁽¹⁾。

空調エネルギーの省エネの施策を検討し、施策の実施効果の検証をするには各空調機の熱処理量を計測することが重要となる。また、空調機を流れる冷温水の流れすぎによる搬送エネルギーの無駄や、熱源設備の運転効率の低下を防止することが省エネの観点で重要となる。

このような状況において、冷温水制御弁に流量、温度計測の機能を追加することにより、新たに流量計、熱量計を追加することなく、上記の課題を解決することが可能となった。

本報告で紹介するインテリジェントコンポ アクティブ電動二方弁 流量計測制御機能付 形FVY51(以下FVY51)は従来製品(インテリジェントコンポ アクティブ電動二方弁 形VY51:以下VY51)をベースに流量計測/制御機能等を追加した構成となっている。

図1に製品の外観、図2に製品の構成を示す。



図1 FVY51製品外観

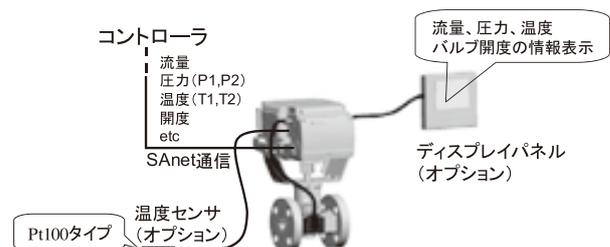


図2 製品の構成

バルブで計測される流量、圧力及び温度情報はSAnet通信⁽²⁾によりコントローラに送られる。その他オプションとして流量、圧力などの情報を表示するディスプレイパネルや、バルブの温度計測機能と合わせて空調機の出入り口温度を計測するための温度センサが用意されている。

2. 製品ラインナップと主な仕様

FVY51の製品ラインナップと主な仕様は以下の通りである。

2.1 製品ラインナップ

バルブサイズは口径15A～80Aの6サイズ、Cv値は1.0～125の10種類となっている。

2.2 主な仕様

2.2.1 VY51との共通仕様

- ・バルブ本体材質:FC200(ねずみ鉄)
- ・圧力定格:JIS 10K
- ・面間寸法:JIS B 2002 系列6
- ・電源電圧:AC24V
- ・開閉動作時間:63秒(50Hz)
- ・通信:SAnet (電圧伝送)

2.2.2 追加仕様

- ・流量計測
(精度±5%RD 最大設定流量の10～100%, 差圧範囲30kPa～300kPa)
- ・流体温度計測(精度±1℃ 0～80℃)
- ・流体圧力計測(基準精度±0.5%FS 0～1MPa)
- ・流量制御動作
- ・積算流量演算

VY51とバルブの基本仕様を共通にしたことで、これまでと同じようにバルブを選定できる。既設の設備に対しても配管工事なしに従来製品と本製品の置換えができるなど採用時の費用負担の低減に配慮している。

3. 流量計測の技術要素

バルブでの流量計測では一般の流量計と異なり、バルブ開度によってバルブ内の流速や圧力分布が大きく変化する。またバルブの直前にエルボ(曲がり配管)やレデューサ、手動弁などが置かれ十分な直管長がとれない場合も多い。このような使用条件において幅広いバルブ開度、差圧、及び流量範囲で±5%RDの流量計測精度を実現しなければならない。以下に上記の要求仕様を実現するために開発した技術要素を述べる。

3.1 流量計測方式

流量を計測するには電磁式、超音波式、渦式、差圧式など様々な方式がある。バルブのように内部流れが非対称かつ開度によって流れの様子が大きく変化する機器では、バルブ内部の絞り機構部(バルブプラグ)で発生する差圧を利

用した差圧式流量計測方式が最適である。図3にバルブを通過する流れの圧力分布を示す。

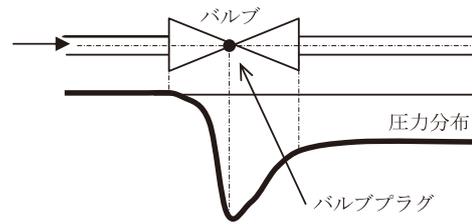


図3 バルブを通過する流れの圧力分布

一般に配管内に置かれたバルブの前後差圧と、そこを流れる流量との間には式(1)の関係が成り立つ。⁽³⁾

$$Cv=11.57 \times Q \times \sqrt{\frac{\rho}{\rho_w} \frac{1}{\Delta P}} \quad \text{式(1)}$$

Q:流体の体積流量(m³/h)

Cv:容量係数

ΔP:バルブ前後の差圧(kPa)

ρ:流体の密度(kg/m³)

ρ_w:水の密度(kg/m³)

一般的にCv値はバルブの開度によって異なった値をとる。図4にバルブ開度と相対容量係数の関係の一例を示す。このCv値の特性はバルブによって異なる固有特性である。ここで相対容量係数はバルブ開度100%の容量係数Cv_{100%}に対する割合である。

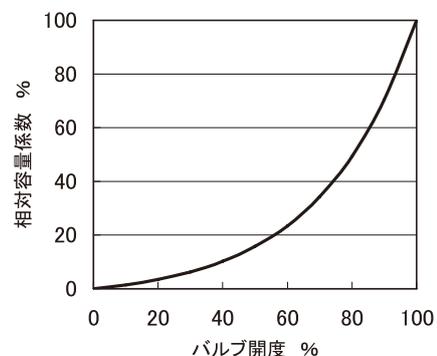


図4 Cv値の特性

また、式(1)における差圧ΔPはバルブの1次側2D、2次側6D離れた位置の圧力差と定義されている(図5)⁽⁴⁾。

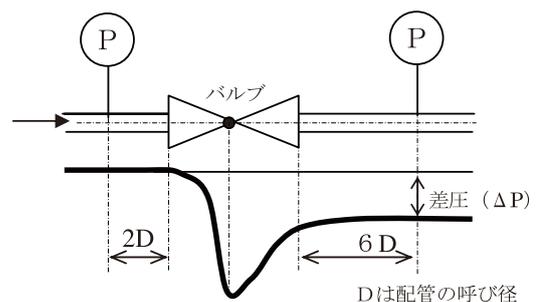


図5 容量係数計測試験条件

本開発でFVY51に採用した流量計測のアルゴリズムを図6に示す。

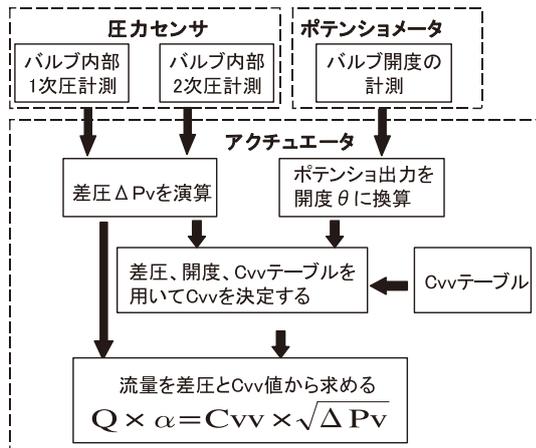


図6 流量計測アルゴリズム

上記アルゴリズムを元に流量計測は以下の手順で行われる。

- 1) バルブ内で圧力を計測し、差圧を求める。
- 2) バルブ開度を計測する。
- 3) バルブ開度と差圧からCvv値を決定する。
- 4) 決定したCv値と差圧を(1)式に代入して流量を演算から求める。

3.2 圧力の計測

バルブ面間寸法を変えずに限られたスペースで安定した差圧を計測すること、差圧を高い状態で計測することが流量精度を高くする点で重要となる。

3.2.1 1次側圧力の計測

1次側圧力の計測に求められる条件は以下の通りとなる。

- 1) バルブのすぐ手前にエルボ配管(曲がり配管)や手動弁などが置かれた場合など、流れの圧力分布が非対称な状態でも安定した圧力を計測する。
- 2) 高い差圧を得るため、バルブ入口側で流量が絞られていない状態の圧力を計測する。

エルボがバルブの手前に置かれた場合のバルブ入口付近断面の圧力分布を、CFD (Computational Fluid Dynamics)解析を使って計算した。その結果、断面上に非対称な圧力分布(最大で4kPa程度の圧力差)を生じることが確認できた(図7)。圧力差4kPaを流量精度に換算すると約6.5%と非常に大きな影響を及ぼす。

図7の(a)は計算の領域、(b)は等圧線図、(c)はバルブ入口断面の等圧線図である。入口断面の左右で圧力分布が非対称になっていることが分かる。

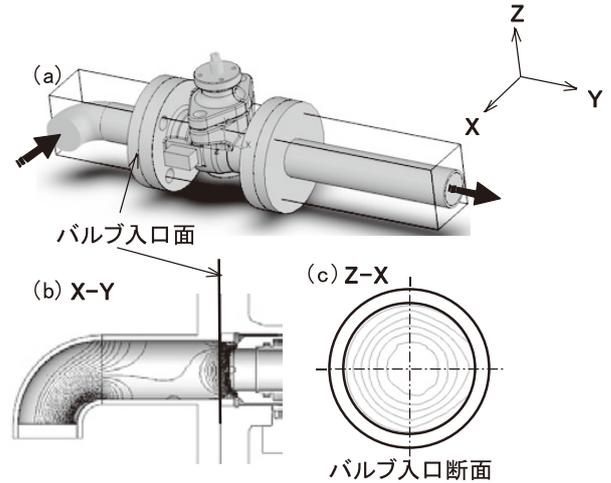


図7 バルブ入口付近のCFD解析結果

このような状態でも安定した1次圧を計測する方法を検討した結果、バルブ入口部の周囲4箇所圧力ポートを設け内部で圧力を平均化する構造を考案した(図8)(特許出願済み)。合わせて圧力ポートをバルブ入口側フランジ部に設けたことで1次圧を高い状態で計測することができた(図9)。

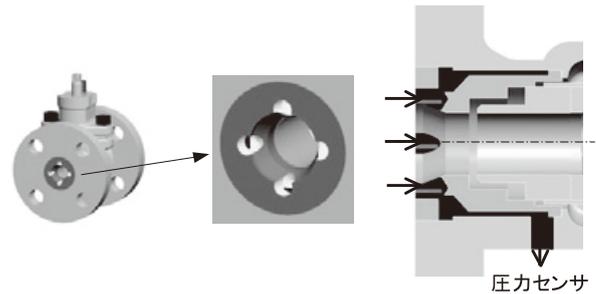


図8 1次側圧力計測部の構造

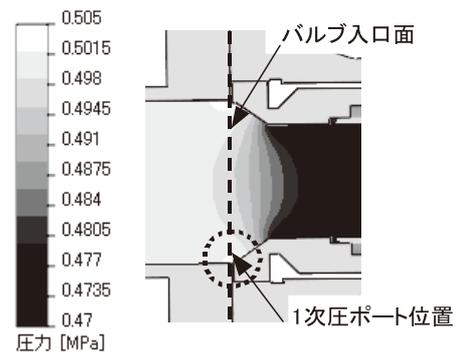


図9 バルブ入口付近の圧力分布

本構造の効果をバルブの手前側がストレート配管の場合とエルボ配管の場合について、実流量試験で確認した。その結果、バルブ手前にエルボがあってもその影響を本構造にて十分低減していることが確認できた(図10)。

| 開度 % | バルブ 上流配管 | 差圧 kPa | 精度差異 |
|------|----------|--------|-------|
| 54 | ストレート | 33 | -0.1% |
| | エルボ | 32 | |
| 79 | ストレート | 30 | -0.3% |
| | エルボ | 33 | |
| 37 | ストレート | 100 | -0.1% |
| | エルボ | 104 | |
| 54 | ストレート | 107 | 0.7% |
| | エルボ | 106 | |
| 79 | ストレート | 105 | -0.6% |
| | エルボ | 101 | |

図10 バルブ上流配管の流量精度への影響

3.2.2 2次側圧力の計測

バルブ内部の流れの様子はバルブ開度によって大きく変化する。図11(a)は速度コンター図、図11(b)は圧力コンター図を示す。図3に示したようにバルブ内部の圧力はバルブプラグを通過した直後に急激に圧力低下し、その直後緩やかに圧力回復する。このような状況で2次側圧力の計測に求められる条件は、以下の通りとなる。

- 1) 動圧の影響を受けない位置で計測する。
 - 2) 圧力分布の差がない位置で計測する。
- 上記1), 2)を全てのバルブ開度で実現する。

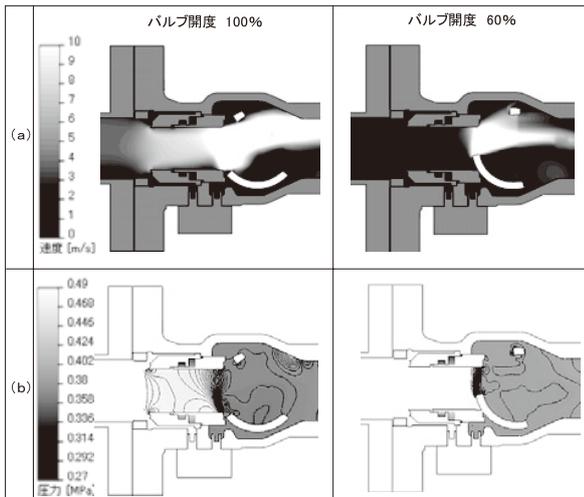


図11 バルブ内の流速分布, 圧力分布

前記条件を満たすため、CFD解析を用いてバルブボディの内側形状の設計を行った。その結果、全てのバルブ開度において安定して2次圧を計測することができる、バルブプラグとバルブボディに挟まれた空間を形成することができた。この位置に2次側圧力ポートを設けることで前記課題を解決した(特許出願済み)。図12(a)は2次圧計測部付近の流速のコンター図及びベクトル図、(b)は等圧線図を示す。

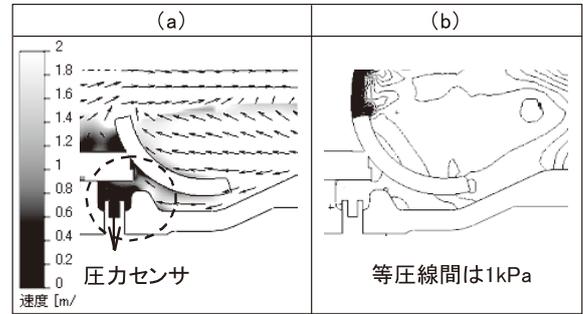


図12 2次側圧力計測部の構造

3.3 圧力センサ

FVY51用のセンサに要求される機能は圧力、温度、及び差圧を限られたスペース内で計測することである。

市販のセンサで上記要求を満足させることは困難なため、新たに圧力センサの開発を行った。概要は圧力センサ2個と温度センサ1個を、エンジニアリングプラスチックのケース内にパッケージしたハイブリットセンサである(特許出願済み)。差圧は1次側、2次側の圧力値から演算で求める方式とした。特徴としては小形化のため圧力センサエレメントはオイル封止を必要としない、ステンレス製ダイヤフラム構造のセンサエレメントを採用している(図13)。

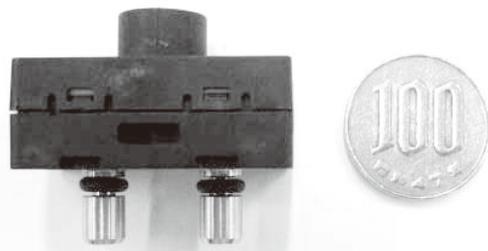


図13 圧力センサ外観

3.4 バルブ開度計測

バルブ開度はアクチュエータ出力軸の開度計測用ポテンシオメータで計測する。図14に構造を示す。バルブ開度を高い精度で計測するために、直線性の高いポテンシオメータを用い、組立て方法の工夫によりポテンシオメータのギヤとアクチュエータ出力軸のギヤ部に発生するバックラッシを低減させた。またバルブボディとアクチュエータを組立てる際に発生するバルブ回転方向の位置ずれの影響をなくすために、バルブアクチュエータ組付後に調整を行いポテンシオメータ出力の補正を行っている(特許出願済み)。

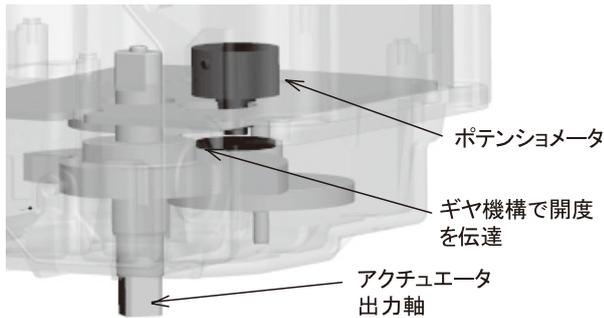


図14 バルブ開度計測部の構造

3.5 容量係数C_vv

一般に図5の試験条件から求められるC_v値は差圧の影響を受けない。したがってバルブ開度によって一義的に決まる。しかし、本製品のようにバルブ内部の差圧と容量係数の関係を確認すると、2次側圧力を圧力回復の途上で計測しているため差圧によって一定の傾向で変化することが分かった(図15)。図5の試験条件と区別するため、バルブ内の差圧から求める容量係数をC_vv、バルブ内の差圧を ΔP_v と定義する。この図における相対容量係数は、差圧 $\Delta P_v=100\text{kPa}$ における値を基準とした。特に差圧100kPa以下の範囲で容量係数C_vv値の落ち込みが大きい。したがって広い差圧範囲で流量計測を行うためには、容量係数C_vvをバルブ開度とバルブ内の差圧の関数として取り扱う必要がある。

FVY51においては予め実験から求めたC_vv値テーブル(図16)を用いて、任意のバルブ開度と差圧におけるC_vv値を決定している(特許出願済み)。

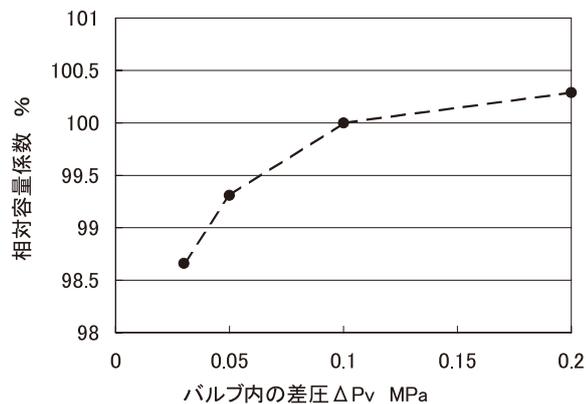


図15 バルブ内差圧と容量係数C_vvの関係

| 開度 % | 列番 | 30kPa | 100kPa | 200kPa |
|--------|----|-------|--------|--------|
| 15.26 | 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 19.47 | 2 | 0.121 | 0.121 | 0.121 |
| 32.63 | 3 | 0.944 | 0.978 | 1.000 |
| 34.74 | 4 | 1.081 | 1.117 | 1.138 |
| 36.84 | 5 | 1.249 | 1.283 | 1.300 |
| 38.95 | 6 | 1.439 | 1.480 | 1.498 |
| 41.05 | 7 | 1.629 | 1.688 | 1.728 |
| 43.16 | 8 | 1.819 | 1.857 | 1.907 |
| 45.26 | 9 | 2.009 | 2.046 | 2.105 |
| 47.37 | 10 | 2.199 | 2.235 | 2.293 |
| 49.47 | 11 | 2.389 | 2.424 | 2.481 |
| 51.58 | 12 | 2.579 | 2.613 | 2.670 |
| 53.68 | 13 | 2.769 | 2.802 | 2.859 |
| 55.79 | 14 | 2.959 | 2.991 | 3.048 |
| 57.89 | 15 | 3.149 | 3.180 | 3.237 |
| 59.99 | 16 | 3.339 | 3.369 | 3.426 |
| 62.10 | 17 | 3.529 | 3.558 | 3.615 |
| 64.20 | 18 | 3.719 | 3.747 | 3.804 |
| 66.31 | 19 | 3.909 | 3.936 | 3.993 |
| 68.41 | 20 | 4.099 | 4.125 | 4.182 |
| 70.52 | 21 | 4.289 | 4.314 | 4.371 |
| 72.62 | 22 | 4.479 | 4.503 | 4.560 |
| 74.74 | 23 | 4.669 | 4.692 | 4.749 |
| 76.84 | 24 | 4.859 | 4.881 | 4.938 |
| 78.95 | 25 | 5.049 | 5.070 | 5.127 |
| 81.05 | 26 | 5.239 | 5.259 | 5.316 |
| 83.16 | 27 | 5.429 | 5.448 | 5.505 |
| 85.26 | 28 | 5.619 | 5.637 | 5.694 |
| 87.37 | 29 | 5.809 | 5.826 | 5.883 |
| 89.47 | 30 | 5.999 | 6.015 | 6.072 |
| 91.58 | 31 | 6.189 | 6.204 | 6.261 |
| 93.68 | 32 | 6.379 | 6.393 | 6.450 |
| 95.79 | 33 | 6.569 | 6.582 | 6.639 |
| 97.89 | 34 | 6.759 | 6.771 | 6.838 |
| 99.99 | 35 | 6.949 | 6.960 | 7.017 |
| 101.00 | 36 | 7.139 | 7.149 | 7.206 |
| 101.01 | 37 | 7.329 | 7.338 | 7.397 |

図16 C_vv値テーブル

3.6 流量計測精度の向上施策

バルブ内で流量計測するための技術要素について述べてきた。実際の流量計測精度については各部品の個体差、組合せ、及び製品組立て作業などのバラツキが流量計測精度に影響をする。その中でもC_vv値の特性を決めるバルブプラグ(図17)の個体差とバルブ開度のバラツキが流量精度に大きな影響を与える。

C_vv値の特性を決定するバルブプラグのポート部は、必要な流量特性を得るために複雑な3次元形状となる。FVY51では寸法精度を考慮してロストワックス鋳造で製作されているが、機械加工に比べ寸法のバラツキが大きくなる。また、バルブ開度は関連する部品点数が多いため開度のずれを0にすることは困難である。

FVY51では安定した高い流量計測精度を確保するため、実流量試験により流量に対するバルブ開度の補正を行っている。

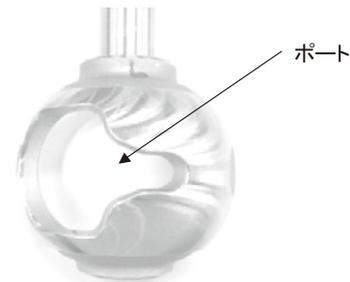


図17 バルブプラグ

3.6.1 流量演算の補正方法

具体的な補正方法は以下の手順で行われている。

- 1) 複数のバルブ開度で実際に流れている流量を基準流量計で計測し C_{vv} 値を求める。
- 2) 製品の容量係数テーブルから各バルブ開度における C_{vv} 値を求める。
- 3) 各バルブ開度での C_{vv} 値と C_{vv}' 値の誤差を求め、その誤差の分布幅が最小になるよう容量係数テーブルの開度に一定のオフセット量を加える。図18に概念図を示す。

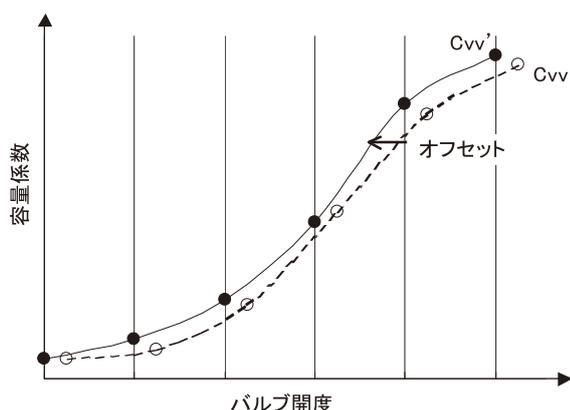


図18 テーブル補正

3.6.2 流量計測精度の検査方法

FVY51では出荷検査工程にてバルブ開度10ポイントで流量計測を行い、 C_{vv} 値テーブルのオフセット値を決定し、製品のマイコンに記憶させる。その後、バルブ開度と差圧の組合せ5ポイントで製品の流量精度を確認し合否判定を行う。上記検査行程により製品の流量精度を保証している。図19に製品組立てラインの隣に併設された検査設備の概要を示す。

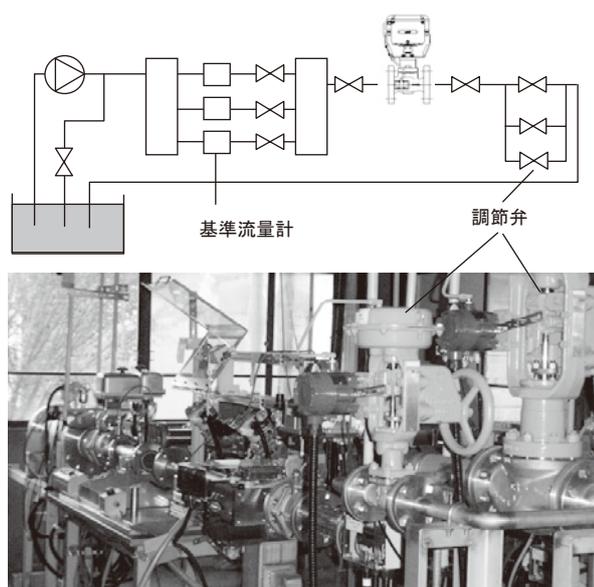


図19 検査設備 概要

3.7 流量精度

これまでに述べてきた技術要素により、本製品の流量精度仕様は最大設定流の10~100%、バルブプラグの前後差圧30~300kPaの範囲に於いて $\pm 5\%RD$ を達成した(図20)。(低流量範囲では $\pm 1\%FS$)

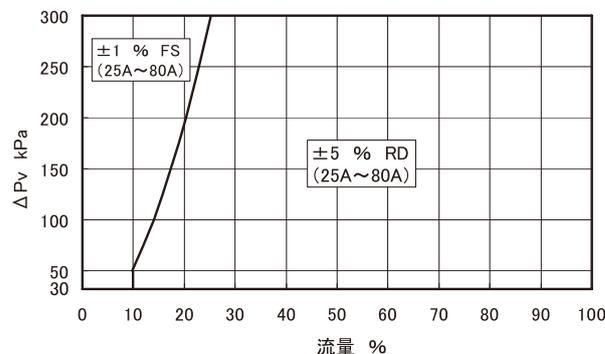


図20 流量計測精度仕様

4. 省エネルギーへの貢献

これまでは主にエネルギー管理で重要な情報となる流量計測機能について述べてきたが、ここで本製品のもう1つの大きな特徴となる流量制御動作の省エネルギーへの貢献について述べる。

4.1 流量制御動作

FVY51は従来のバルブ開度制御動作ではなく流量制御動作を行う。従来の冷温水制御弁ではコントローラからの出力値に対応したバルブ開度になるまで開閉動作する(開度制御動作)。たとえば、コントローラから100%の設定値が出力されると、バルブは100%開度まで動作する。このときの流量は、一般に空調機的设计流量よりもかなり多くなる。これはバルブも冷温水を搬送するポンプも流量不足による空調能力の不足を避けるために、設計値と同等以上のものを選定する傾向があるためである。一方で空調機の熱交換量は設計流量以上の流量が流れてもあまり増加しない。従ってバルブ開度が100%の場合、空調機的设计流量よりも多くの冷温水が流れるが、設定温度への到達時間は設計流量が流れた場合とあまり変わらない。ここで冷温水の流しすぎによる搬送エネルギーの無駄が発生している。

FVY51では流量を計測しているので、コントローラからの出力値に対応した流量になるように開閉動作する流量制御動作が可能となった。これによりバルブの最大設定流量を空調機的设计流量に合わせることで、流量が最大設定流量に一致するように開閉動作を行う(設定値100%の場合)ので流れすぎが発生しない。

4.2 流量制御動作による省エネルギー効果

当社藤沢テクノセンターの7F建てオフィスビルの空調用冷温水系統に約100台のFVY51を設置し、流量制御動作と開度制御動作での空調に関わるエネルギーの差異を評価

するためのデータを収集している。

流量制御動作で運用した日と開度制御動作で運用した日の中から、天気や気温など熱負荷がほぼ同じ日の冷温水の搬送エネルギーを比較した結果、約7%の省エネルギー効果が確認された。

図21に評価した日の空調のデータを示す。開度制御動作の場合、朝の空調立ち上がり時に空調機的设计流量以上の流量が流れている。これに対し、流量制御動作の場合は空調機的设计流量におさえられており、これが省エネルギー大きく寄与している事が分かる。

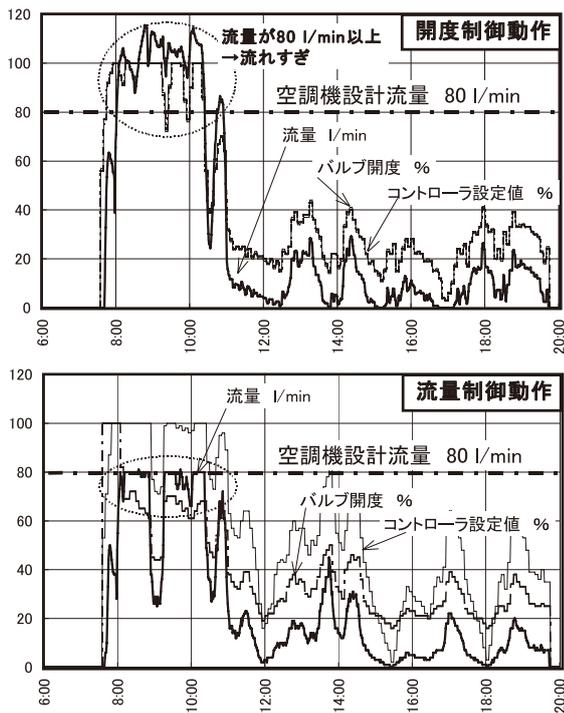


図21 1日の空調データ

5. おわりに

FVY51は本稿で紹介した流量計測の技術、またその流量情報を利用した流量制御動作により今後、低炭素社会に向けてさらに重要となるエネルギー管理、省エネに貢献する製品である。

今回、流量計測機能を追加した機種はアクティブシリーズ全体の一部である。順次流量計測機能を追加した機種を充実させ、建物空調のあらゆる場面に対応することで低炭素社会の実現に貢献していきたい。

参考文献

- (1) エネルギーの使用の合理化に関する法律、「法第14条」及び「法第15条」
- (2) 沖田、久保田、関根:現場保全作業を効率化するセンサ/アクチュエータの開発, azbil Technical Review (2008)
- (3) 「工業用プロセス弁-第1部:調節弁用語及び一般的必要条件」, JIS B 2005-1:2004
- (4) 「工業用プロセス弁-第2部:流れの容量-第3節:試験手順」, JIS B 2005-2-3:2004

商標

インテリジェントコンポTMは、株式会社 山武の登録商標です。

著者所属

| | |
|-------|-------------------------|
| 古谷 元洋 | ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部 |
| 大谷 秀雄 | ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部 |

