

# 蒸気弁の差圧比係数の検討及び バルブ選定用ソフトウェアの開発

## Study of Pressure Differential Ratio Factor of a Steam Control Valve, and Development of Valve Selection Software

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

野間口 謙雄  
Yoshio Nomaguchi

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

佐藤 慶大  
Keita Satou

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

新谷 知紀  
Tomonori Shintani

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

加藤 瑞樹  
Mizuki Katou

株式会社 山武  
ビルシステムカンパニー

大矢 公紀  
Cokey Oya

### キーワード

調節弁, サイジング, 差圧比係数, 圧縮性流体, バルブ選定用ソフトウェア (AVALS)

蒸気などの圧縮性流体を扱う調節弁のサイジングを精度良く行うためには弁固有の差圧比係数が必要であり、サイジング計算も煩雑となる。差圧比係数を求めるためには、空気を高差圧で大量に流せる試験設備が必要となる。そこで今回、数値流体解析を用いて差圧比係数を求め、そのうち小口径バルブについては社内実験室に実流量試験設備を設置して試験を行い、値の確からしさを確認した。また、この差圧比係数を用いて精度の高いサイジング計算ができるソフトウェアを開発したので、その内容について報告する。

For high-precision sizing of a control valve for compressible fluid such as steam, a valve-specific differential pressure ratio factor is necessary and sizing calculations become complex. Test facilities capable of flowing a large amount of air with a high pressure difference are also needed to calculate differential pressure ratio factors. We calculated differential pressure ratio factors using computational fluid dynamics, and verified the accuracy of such factors for small-bore valves using test facilities for actual flow rate measurements which we have newly installed in our on-site laboratory. We also developed software that enables high-precision sizing calculation using the differential pressure ratio factor. This paper describes the study and development mentioned above.

## 1. はじめに

調節弁とは、流体(水や蒸気など)の流量を連続的に変更(制御)するための機器である。

空調制御において、調節弁は空調機の制御や熱源系の制御に多く用いられ、重要な位置を占めている。したがって、計装・制御機器の特性・環境条件や流量、圧力条件を考慮した最適な調節弁を選定することが非常に重要である。必要な弁容量よりも小さな調節弁を使用した場合には流量不足が発生し、また、過大な弁容量の調節弁を使用した場合にはハンチングを起こすなど、制御性の悪化を招くことになる。使用時の流量、圧力などの条件から最適な弁容量の調節弁を選定する必要がある。

これまで蒸気などの圧縮性流体における調節弁のサ

イジング式は、FCI (Fluid Controls Institute Inc.)<sup>(1)</sup>によるものとIEC<sup>(2)</sup>(IEC 60534-2-1)又はANSI/ISA<sup>(3)</sup>により規格化されたものが存在したが、JIS B 2005-2-1 (2005)<sup>(4)</sup>では、IECにより規格化された精度の高いサイジング式が定義された。このIEC式では弁固有の差圧比係数を用いることによりサイジングを行う。

本稿では、CFD (Computational Fluid Dynamics, 数値流体解析)と実流試験により蒸気弁の差圧比係数を求めた結果について報告するとともに、IECのサイジングを容易に行うことができるバルブ選定用ソフトウェアを開発したので、その内容について報告する。

## 2. 圧縮性流体のサイジング式

圧縮性流体のサイジングでは、(1)、(2)式により  $C_v$  値を計算する<sup>(2)、(4)</sup>。

$x < F_\gamma x_T$  のとき

$$C_v = \frac{W}{2.73 \times \left(1 - \frac{x}{3F_\gamma x_T}\right) \sqrt{x \times p_1 \times \rho_1}} \quad (1)$$

$x > F_\gamma x_T$  のとき

$$C_v = \frac{W}{2.73 \times 0.667 \sqrt{F_\gamma x_T \times p_1 \times \rho_1}} \quad (2)$$

ただし、 $W$  : 質量流量 [kg/h]

$x$  : 差圧比  $= \Delta p / p_1$

$\Delta p$  : 弁前後差圧 [kPa]

$p_1$  : 弁1次側絶対圧力 [kPa]

$F_\gamma$  : 比熱比係数

$F_\gamma = \gamma / 1.40$ ,  $\gamma$  : 流体の比熱比  
空気では、 $F_\gamma = 1$

$x_T$  : 差圧比係数

$\rho_1$  :  $p_1$  における流体の密度 [kg/m<sup>3</sup>]

弁の1次側圧力を一定に保ちながら2次側圧力を徐々に下げていくと、差圧比  $x$  がある限界値で弁内の最縮流部で流れが音速に達し、さらに下流側圧力を下げても質量流量が増加しない閉そく流（チョークフロー）となる（図1）。この非閉そく流から閉そく流になる限界の差圧比は弁の形状によって異なる弁固有の係数である差圧比係数  $x_T$  と比熱比係数  $F_\gamma$  の積で表される。

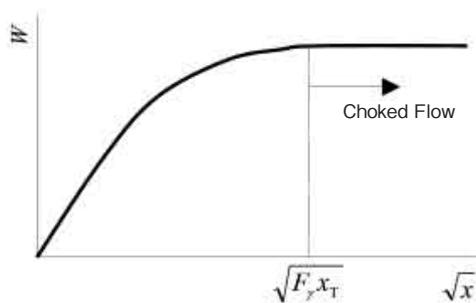


図1.  $\sqrt{x}$  と質量流量  $W$  の関係 ( $p_1 = \text{一定}$ )

比熱比係数は比熱比 1.40 である空気を基準にした係数である  $x_T$  を補正するための係数である。(1)、(2)式で  $C_v$  値を精度良く求めるためには、弁固有の係数である  $x_T$  を精度良く求めることが重要となる。

## 3. 差圧比係数の検討

### 3.1 CFD による差圧比係数の検討

差圧比係数  $x_T$  を実験で求めるには、ある程度高い上流側圧力の空気を、供試弁に対して高い弁前後差圧で流す必要があり、その装置は大掛かりなものとなる<sup>(5)</sup>。そこでまず最初に、CFD により  $x_T$  を求めた。

使用した解析モデルを図2に、解析条件を表1に示す。解析モデルは上流側に長さ  $2d$  ( $d$ : 配管呼び径) の配管、下流側に長さ  $6d$  の配管を取り付けたモデルとした。境界条件として1次側圧力  $p_1$  と2次側圧力  $p_2$  を与え、計算で求めた1次側境界断面における平均流速と平均密度と境界断面積を用いて求めた体積流量 (normal: 0°C - 1気圧)  $Q$  [m<sup>3</sup>/h] を求めた。

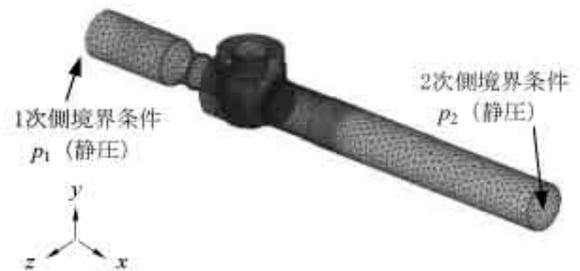


図2. 解析モデル

表1. 解析条件

ソフトウェア	SCRUYU/Tetra V7 (株式会社ソフトウェア クレイドル)
計算格子	非構造格子
解析方法	有限体積法, 定常解析
乱流モデル	標準 $k-\epsilon$ モデル
流体	空気
基準温度	293.15 [K]
1次側境界条件 $p_1$	300 [kPa]

アクティブル™ 電動二方弁の 25A (定格  $C_v10$ ) について計算した結果を以下に示す。

$YC$  を (3) 式で求める。

$$YC = \frac{Q}{21.2 p_1} \sqrt{\frac{MT_1 Z}{x}} \quad (3)$$

ただし、 $Y$  : 膨張係数

$$Y = 1 - \frac{x}{3F_\gamma x_T} \quad (4)$$

$C$  : 容量係数 (=  $C_v$ )

$Q$  : 体積流量 (normal) [m<sup>3</sup>/h]

$M$  : 流体のモル質量

空気では  $M = 28.97$  [kg/kmol]

$T_1$  : 上流側流体温度 [K]

$Z$  : 圧縮係数, 空気では  $Z = 1$

差圧比  $x$  に対する  $YC$  の計算値を求めたものを図3に示す。

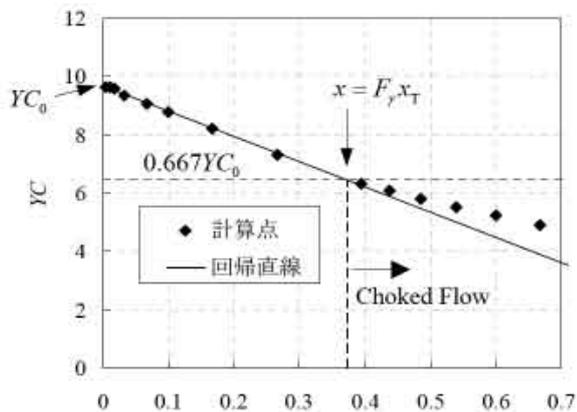


図3.  $x$ - $YC$  の関係 (CFD による計算値)

計算で求めた  $YC$ - $x$  の関係(計算点)から回帰直線をあてはめる。 $YC_0$  は  $x = 0$  のときの  $YC$  であり、 $YC = 0.667YC_0$  となる  $x = F_\gamma x_T$  から  $x_T = 0.37$  が得られた。

また、 $x \approx F_\gamma x_T$  における弁内のマッハ数のコンター図を図4に示す。図4より、弁内絞り部での最大流速が音速に達し、チョークフローを起こしていることがわかる。

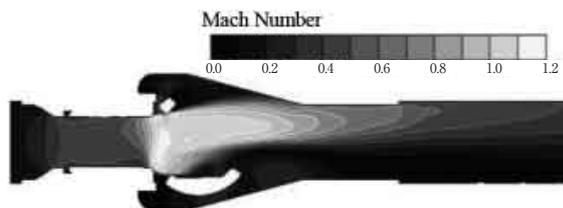


図4.  $x \approx F_\gamma x_T$  における弁内のマッハ数コンター図

### 3.2 差圧比係数の実流試験による確認

実流試験の概要を図5～7に示す。



図6. 試験設備 (エアタンク)

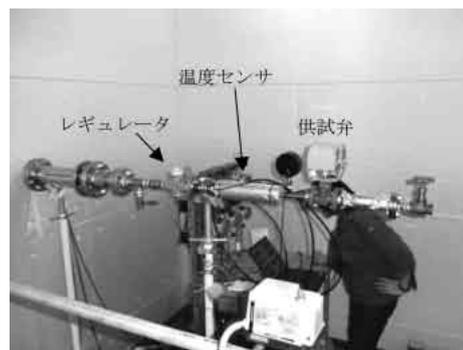


図7. 試験設備 (供試弁まわり)

エアタンクに工場空気 (最大 0.6 [MPa]) を貯めたあと、上流側の手動弁を開放し、所定の  $p_1$ ,  $\Delta p (=p_1 - p_2)$  になるようにレギュレータと2次調節弁を調整し、その時の圧力、流体温度、流量を連続して計測した。また、圧力は JIS B 2005-2-3<sup>6)</sup> で規程する位置にて計測した。

CFD と同様、アクティブ電動二方弁の 25A (定格  $Cv10$ ) について、(3)式により  $YC$  を求め、差圧比  $x$  に対する  $YC$  の関係を求めたものを図8に示す。

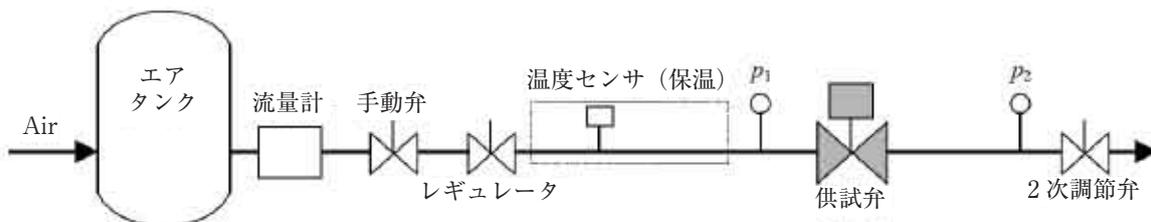


図5. 実流試験装置の概要

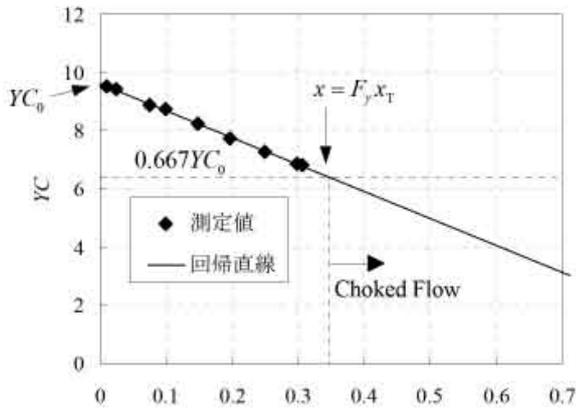


図 8.  $x_T$ - $YC$  の関係 (実流試験結果)

図 8 より,  $x_T = 0.35$  が得られた。

### 3.3 差圧比係数の検討結果まとめ

蒸気用途の調節弁であるアクティブ電動二方弁 (形 VY51) の差圧比係数  $x_T$  値の一覧を表 2 に示す。40A (定格  $Cv25$ ) 以下において, 差圧比係数  $x_T$  値の実流試験結果は CFD による計算値と良く一致することがわかった。15A ~ 80A まで弁内構造は類似形状であることから, 設備の能力上, 実流試験が困難な 40A (定格  $Cv40$ ) 以上の口径については CFD により  $x_T$  値を決定した。

表 2. 形 VY51 の差圧比係数  $x_T$  値の一覧

口径	定格 $Cv$	差圧比係数 $x_T$	
		CFD 結果	実流試験結果
15A	1	0.62	0.61
	1.6	0.53	0.50
	2.5	0.46	0.42
	4	0.42	0.43
	6	0.42	0.40
25A	10	0.37	0.35
	16	0.33	0.29
40A	25	0.38	0.38
	40	0.29	-
50A	65	0.25	-
65A	95	0.31	-
80A	125	0.34	-

## 4. バルブ選定用ソフトウェア (AVALS™) の開発

### 4.1 ソフトウェアのコンセプト

バルブ選定用ソフトウェア (AVALS) は, 自動制御を円滑に行うために, 空調機の制御や熱源系の制御などの計装アプリケーションに最適な調節弁を選定する機能を提供する。

ソフトウェアのコンセプトをまとめると以下の通りである。

- ① 製品の特性・環境条件に応じた最適な調節弁の形番を検索することが可能。
- ② 操作が簡単で形番検索時間を大幅に削減。
- ③ 選択された形番のアクチュエータ, バルブの主な仕様, オプションの確認が可能。
- ④ 仕様取扱説明書にリンクしているので, スピーディーに詳細な仕様確認を実現。
- ⑤ 計算が複雑な蒸気弁のサイジング ( $Cv$  計算) が可能。

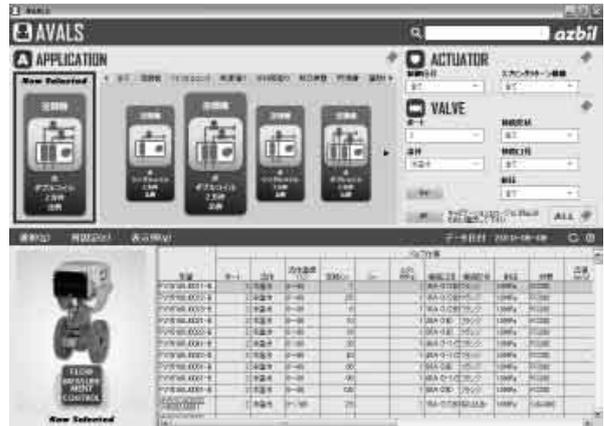


図 9. バルブ選定用ソフトウェア画面例

### 4.2 調節弁選定の流れ

調節弁の選定は, 一般に以下のような手順で行う。

第 1 に, 調節弁の形式を決定する。

調節弁には, 大型のもの, 高差圧に耐えられるもの, リーク量が少ないもの, フェールセーフ機能を有するものなど, 多くの形式のものがある。

調節弁の形式を決定するためには, 適用する計装アプリケーションの目的にあった形式の調節弁を選定する必要がある。

バルブ選定用ソフトウェアでは, 適用する計装アプリケーションを選択する機能を有しており, 計装アプリケーションを選択することで目的にあった形式の調節弁に絞り込むことができる。図 10 に計装アプリケーションの選択画面を示す。



図 10. 計装アプリケーション選択例

第 2 に, 調節弁のサイズを選定する。

バルブ選定用ソフトウェアでは, 流体条件 (水/蒸気, 流量, 差圧など) を入力することにより最適な大きさの調節弁を選定することができる。

第3に、選定した調節弁に関して、耐圧・クローズオフレイティングなどのチェックを行う。

調節弁の1次側にかかる圧力によって、調節弁の圧力定格を選定する必要がある。

バルブ選定用ソフトウェアでは、調節弁の仕様の入力に耐圧を選択する項目を用意しており、圧力条件に合った調節弁を選定することができる。



図 11. 調節弁の仕様入力項目

また、調節弁の一次圧が低く、差圧が大きい場合は、キャビテーションエロージョンの発生が懸念される。キャビテーションの発生状態は(5)式に示す JIS B 2005-8-2 (IEC 60534-8-2<sup>(8)</sup>)で規定されている圧力比  $x_F$  で表すことができるため、(5)式を用いて圧力条件を確認し、選定した調節弁の採用の可否を判断できる機能も用意している。

$$x_F = \frac{\Delta p}{p_1 - p_v} \quad (5)$$

ただし、 $\Delta p$  : 弁前後差圧 [kPa]  
 $p_1$  : 弁1次側側絶対圧力 [kPa]  
 $p_v$  : 流体の飽和蒸気圧 (絶対圧) [kPa]

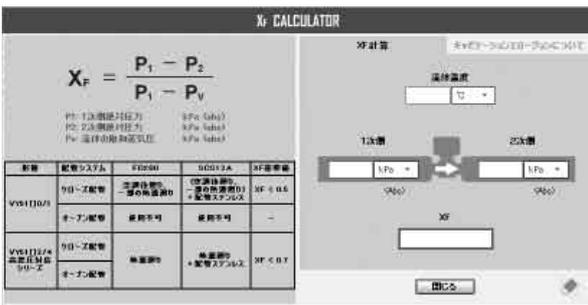


図 12. 圧力比  $x_F$  の確認

### 4.3 Cv 値計算 (水/蒸気)

調節弁の容量は一般に Cv 値で表され、形番(接続口径、定格 Cv 値)を決めるには与えられた流体条件から必要 Cv 値を計算して選ぶことになる。

(1) 通過する流体が水の場合

水の Cv 計算式を(6)式に示す。

$$C_v = \frac{0.7 \times Q}{\sqrt{\Delta p}} \quad (6)$$

ただし、 $Q$  : 体積流量 [L/min]  
 $\Delta p$  : 弁前後差圧 [kPa]

水の Cv 値計算画面を図 13 に示す。流量、差圧を入力して水の Cv 値計算を行う。空調機や熱交換器などのコイル廻りであれば、熱量、温度差から(7)式により流量に自動的に換算して、Cv 値を算出する。

$$Q = \frac{60000 \times P}{\rho \times c \times \Delta T} \quad (7)$$

ただし、 $Q$  : 体積流量 [L/min]  
 $P$  : 熱量 [W]  
 $\rho$  : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c$  : 水の比熱 [J/kg·K]  
 $\Delta T$  : 温度差 [K]

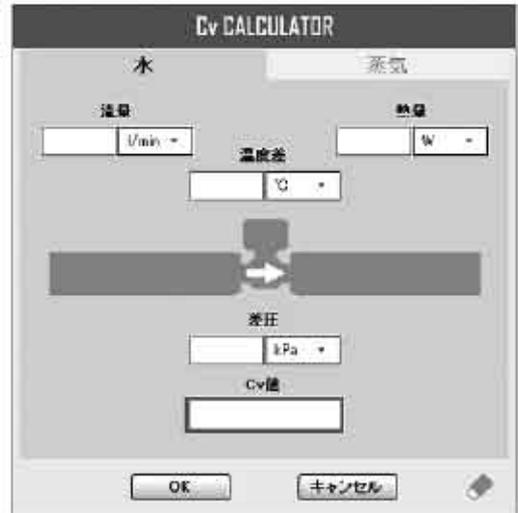


図 13. Cv 値計算画面例 (水の場合)

(2) 通過する流体が蒸気の場合

(1)、(2)式で示した蒸気の Cv 値計算式は、計算をする前に調節弁固有の値である  $x_T$  値を定義しなければならない。そのため、計算する前に流体条件や配管サイズから弁サイズ、定格 Cv 値を想定する必要があるが、これは非常に困難である。ある定格 Cv 値の調節弁の  $x_T$  値を想定し Cv 計算を行ったあと、Cv 値が大きすぎる又は不足した場合には、その前後の定格 Cv 値の調節弁の  $x_T$  値を用いて繰り返し Cv 計算を行う必要があるため非効率である。

バルブ選定用ソフトウェアでは、図 14 に示すとおり流体条件である流量、1次側絶対圧力、2次側絶対圧力を入力するだけで  $x_T$  値を意識せずに複雑な蒸気の Cv 値計算を効率的に行うことができる。

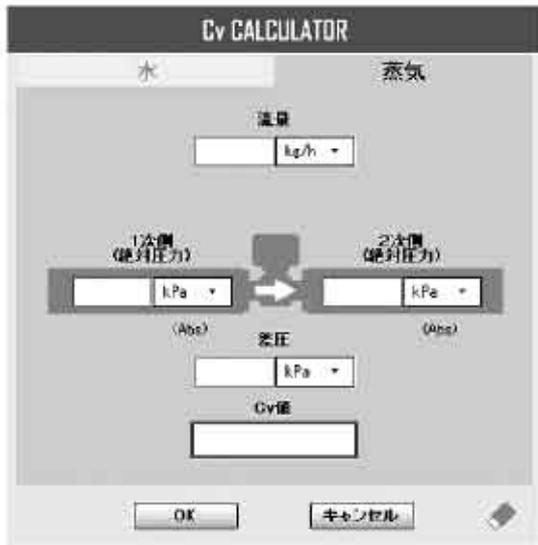


図 14. Cv 値計算画面例 (蒸気の場合)

#### 4.4 検索結果

図 15 に計装アプリケーション、アクチュエータ仕様及びバルブ仕様の各項目を入力し、検索した画面結果を示す。破線枠で囲った部分が調節弁の機種を絞り込んだ結果である。絞り込んだバルブ及びアクチュエータの詳細な仕様が表示される。グレー表示にて選択している形番を明示し、写真で製品イメージを表示する。

#### 5. おわりに

(1) 差圧比係数について、CFD と実流試験の結果が良く一致することがわかった。その結果、実流試験が困難な口径の調節弁においても、CFD により差圧比係数を求めることができた。

(2) バルブ選定用ソフトウェア(AVALS)により、使われる用途に応じて、難解な計算式を意識せずに、当社でラインナップしている調節弁の中から最適なものを選択することができる。

このため、設計や現場などで調節弁を選定する際の強力な味方になり、選定や仕様確認のための時間を大幅に削減する。

当社の調節弁を選定する際には、是非ともご活用いただきたい。



図 15. 検索結果画面例

<参考文献>

- (1) Fluid Controls Institute Inc. : Recommended voluntary standard formulas for sizing control valves, FCI 62-1(1962)
- (2) Industrial-process control valves – Part 2-1:Flow capacity – Sizing equations for fluid flow under installed conditions, IEC 60534-2-1(1998)
- (3) Flow Equations for Sizing Control Valves, ANSI/ISA-S75.01(1985)
- (4) 工業プロセス用調節弁 – 第2部：流れの容量 – 第1節：取付け状態における流れのサイジング式, JIS B 2005-2-1(2005)
- (5) 石塚：調節弁の流路形状と差圧比係数, Savemation Review(1983), Vol.1, No.2, pp.48-56, 株式会社 山武
- (6) 工業プロセス用調節弁 – 第2部：流れの容量 – 第3節：試験手順, JIS B 2005-2-3(2004)
- (7) 工業プロセス用調節弁 – 第8部：騒音 – 第2節：調節弁の液体流動騒音の実験室における測定, JIS B 2005-8-2(2008)
- (8) Industrial-process control valves – Part 8:Noise considerations – Section 2:Laboratory measurement of noise generated by hydrodynamic flow through control valves, IEC 60534-8-2(1991)

<商標>

SCRUYU/Tetra は、株式会社ソフトウェアアクレイドルの商標です。

AVALS は、株式会社 山武の商標です。

アクティバルは、株式会社 山武の商標です。

<著者所属>

野間口 謙雄	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
佐藤 慶大	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 プロダクトマーケティング部
新谷 知紀	ビルシステムカンパニー 開発本部開発2部
加藤 瑞樹	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 国際マーケティング部
大矢 公紀	ビルシステムカンパニー マーケティング本部 国際マーケティング部

