

# 空気圧システムにおける結露対策

(現象、メカニズム、予測、防止策)

空気圧システムにおいて、  
配管条件や作動条件によっては  
温度低下により内部結露を生じて、  
グリースの劣化・流出による寿命低下  
や作動不良を招くことがあります。

本書は、その対策や事前処置の  
一助としてご活用ください。

# 目 次

---

	ページ
<b>1 結露現象</b> .....	1
空気圧システムの結露とは	
どんな障害があるか	
<b>2 結露のメカニズム</b> .....	2
2-1 断熱膨張について	
2-2 結露発生メカニズムについて	
<b>3 結露の判定</b> .....	5
3-1 結露判定線図	
3-2 結露判定プログラム	
<b>4 結露対策</b> .....	7
<b>5 付 録</b> .....	9
飽和水蒸気量	
湿度とその換算	
エアドライヤ除湿仕様	

この資料は、当社の研究に基づいて制作したものです。結露に影響する因子は、  
空気の質、回路構成、機器特性、作動条件、環境要素など多くが絡んでいます。  
そのため、結露判定、配管の限度長などは、ある程度の誤差を含んでいますの  
で、目安としてご使用ください。

# 1. 結露現象

## ●空気圧システムの結露とは

空気圧システムにおいて、配管の内部などに水滴が発生し、機器の作動や寿命に影響することがあります。このため、供給する圧縮空気をエアドライヤなどにより除湿した後にシステムに送るのが普通です。しかし、装置の小形化、高速化の要求に伴い、小形アクチュエータが使われる場合、除湿空気を使用しても結露し、故障が起こることがあります。写真1は配管内で結露した状況を示します。写真2はシリンダ内に浸入した結露水状況を示します。

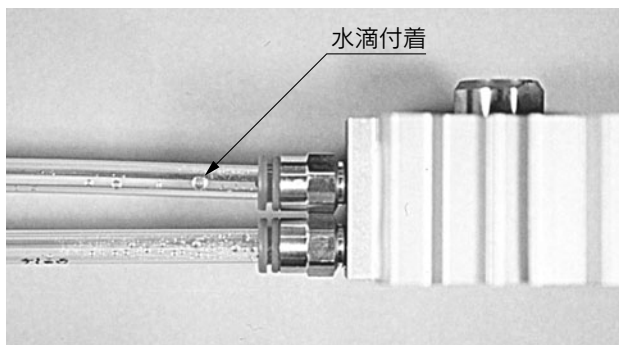


写真1 配管内結露状況

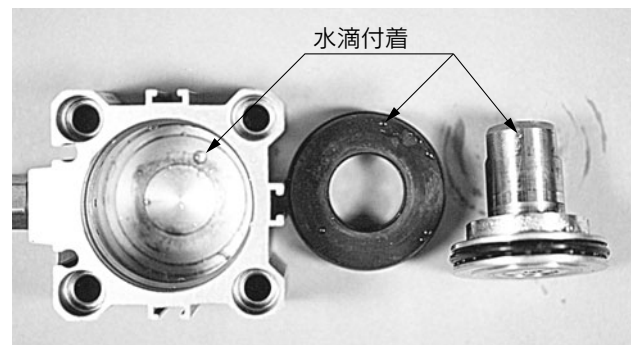
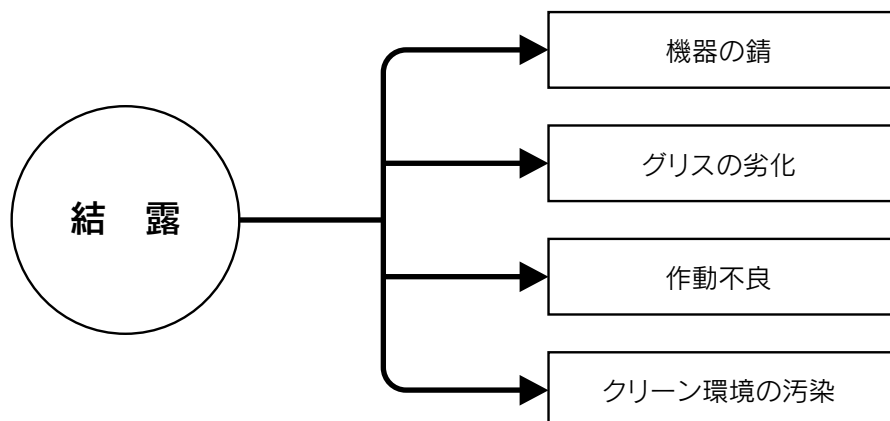


写真2 シリンダ内に浸入した結露水状況

## ●どんな障害があるか



## 2. 結露のメカニズム

小形シリンダ駆動システムを例として、配管の内部が結露するメカニズムを以下に説明します。

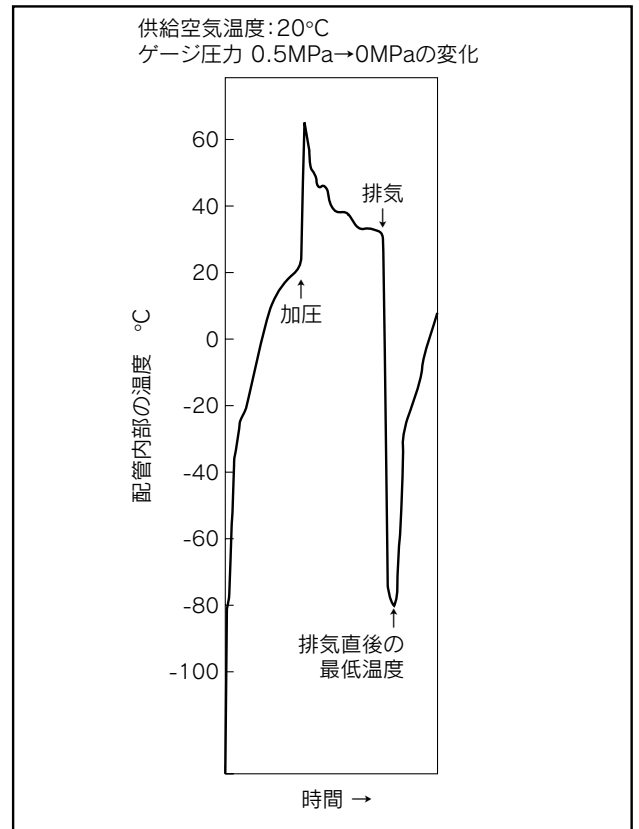
### 2-1 断熱膨張について

シリンダと電磁弁間の配管内の空気が排気される時に断熱膨張により温度が低下します。  
供給空気のゲージ圧力を $P_s$  [MPa]、温度を $T_s$  [°C] とすると、断熱膨張後の温度 $T_t$  [°C]は

$$T_t = (T_s + 273) \times \left( \frac{0.1}{P_s + 0.1} \right)^{0.286} - 273$$

となります。例えば、27°C、0.5MPa、の空気を大気圧まで断熱膨張させた場合、計算では-93°C近くまで温度は低下します。右図の配管内部の温度測定結果では約-80°Cの温度低下が測定されました。

配管内部の温度測定結果



### 2-2 結露発生メカニズムについて

#### ① 給気

【霧の発生なし】

電磁弁が開き、圧縮空気が低圧状態の配管内に一気に流入します。  
その際、もとの配管内空気は圧縮され温度が上昇し、霧が発生することはありません。



注)実際の配管においては、配管長が長く、シリンダ容積に対して、配管容積が大きい場合が多いので、シリンダに対して、配管を大きく図示しています。

## ②排気

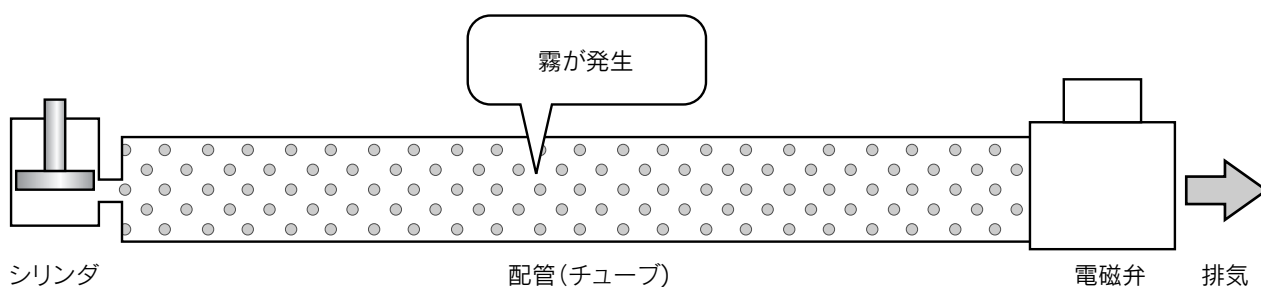
### 【温度低下→霧発生】

電磁弁が切り換わり、配管内の空気が一気に放出され、配管内の圧力は急激に低下（断熱膨張）し、温度が低下します。

供給空気の大気圧露点を $T_i$ (°C)とすると、断熱膨張後の低下した空気温度 $T_t$ (°C)がこれを下回ると、すなわち

$$T_t < T_i$$

になると、霧が発生します。



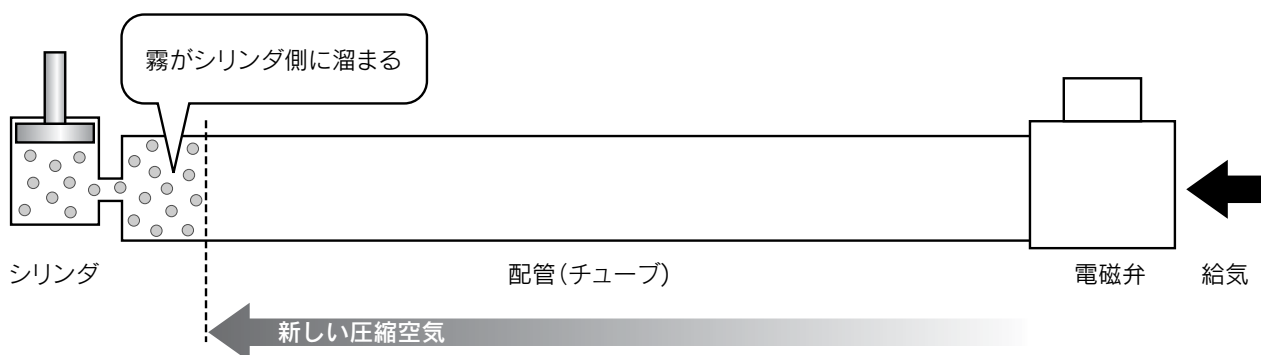
### 【霧の蒸発、一部残留】

発生した霧のほとんどは、周囲からの熱により、蒸発しながら排出されます。しかし、その一部は蒸発しきれず、配管内に残留します。



## ③給気

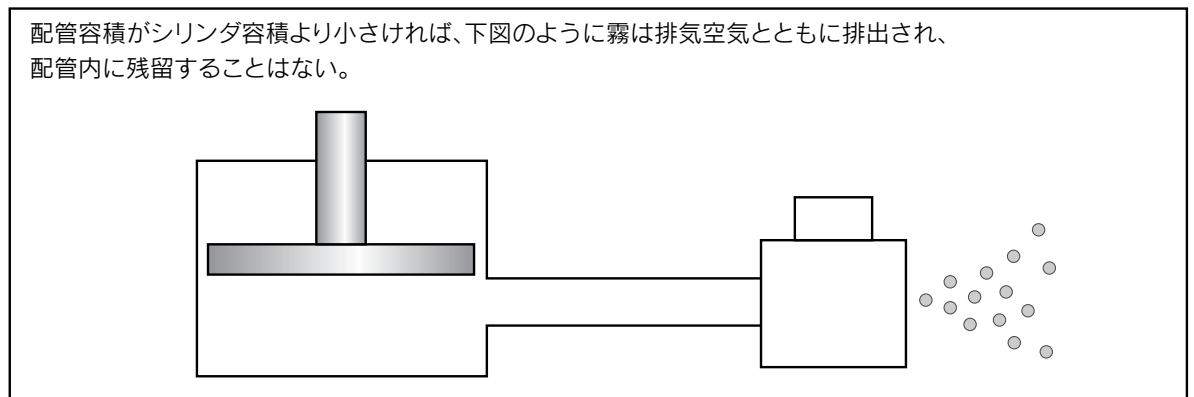
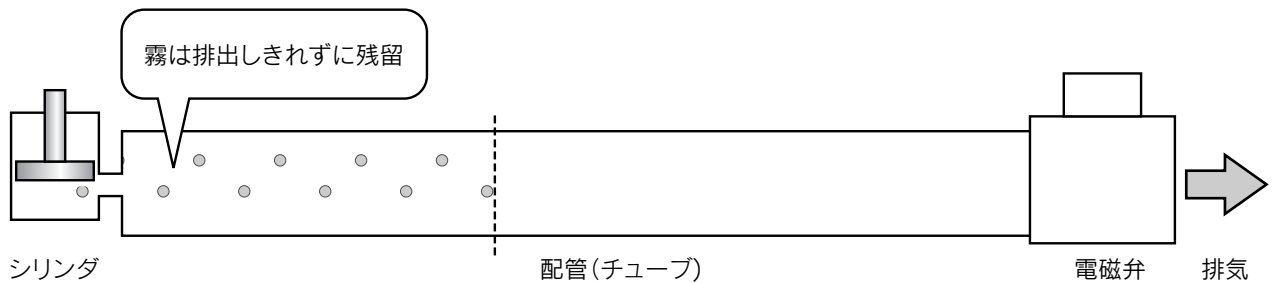
電磁弁が切り換わり、新しい圧縮空気が供給されることにより、②で残留した霧はシリンダ側に溜まります。



#### ④ 排気

##### 【配管容積が大きい(配管長さが長い)→霧の蓄積】

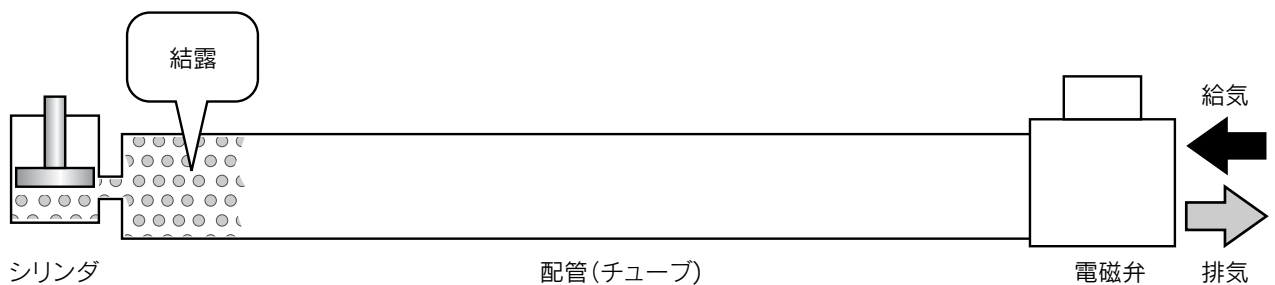
シリンダが小さく、配管が長い、すなわち配管容積がシリンダ容積より大きい場合、排気時にシリンダ内の空気が完全に配管内空気を押し出すことができず、霧は配管内にとどまります。



#### ⑤ 給気－排気の繰り返し

##### 【結露】

シリンダの繰り返し動作に伴い、シリンダ側に溜まっていく霧の量は多くなり、ついには、水滴になって結露します。



上述のメカニズムに関する考察から、結露するかどうかはシリンダ容積と配管容積に大きく影響されることが分かります。

次のように、配管容積とシリンダ内圧縮空気の大气圧換算体積との比を容積比 $Kv$ と定義します。

$$Kv = \frac{Vt}{Vc} \times \frac{0.1}{Ps+0.1}$$

$Vt$  : 配管の容積 [cm<sup>3</sup>]  
 $Vc$  : シリンダの容積 [cm<sup>3</sup>]  
 $Ps$  : 供給空気のゲージ圧力 [MPa]

$Kv > 1$  の場合は結露する可能性が大きい。

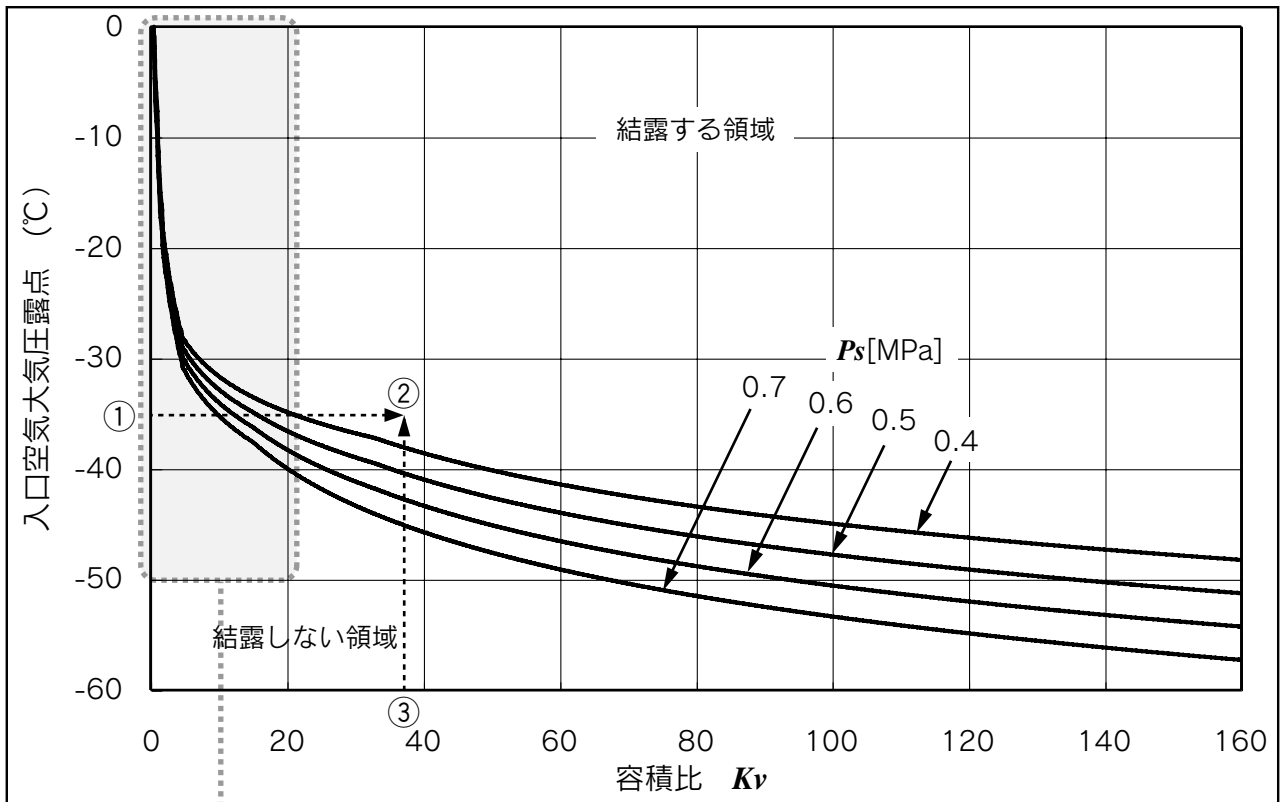
配管長を短くするなどして $Vt$ を小さくすれば、結露する可能性が小さくなります。

### 3. 結露の判定

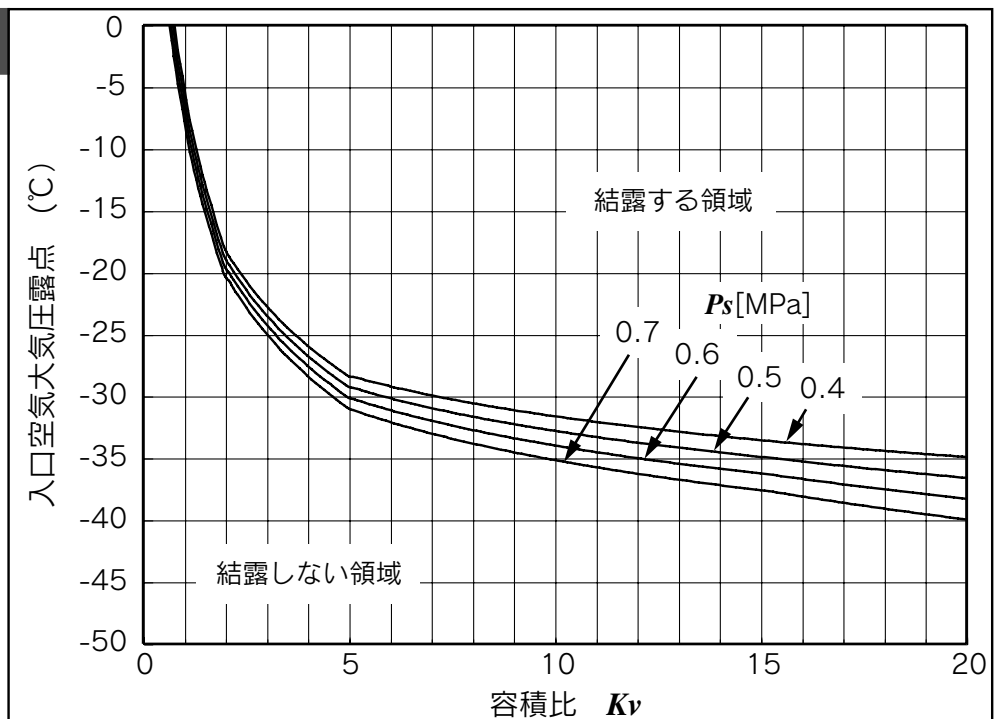
結露するかどうかは主に容積比、供給空気の湿度および圧力などに影響されます。以下の判定線図あるいは判定プログラムにより概略判定が行えます。

#### 3-1 結露判定線図

条件  
 電磁弁切換間隔: ON 1秒、OFF 1秒  
 配管チューブ材質: ポリウレタン



拡大図



## 線図の見方 (5ページ参照)

(1) 入口空気の大気圧露点①を求めます

入口空気の湿度が相対湿度または圧力露点などとして分かる場合、付録『湿度とその換算』(P.10)の湿度換算線図から大気圧露点を求めることができます。

(2) 容積比 $K_v$ ③を求めます

次の容積比の定義式から $K_v$ を求めます。

$$K_v = \frac{V_t}{V_c} \times \frac{0.1}{P_s + 0.1}$$

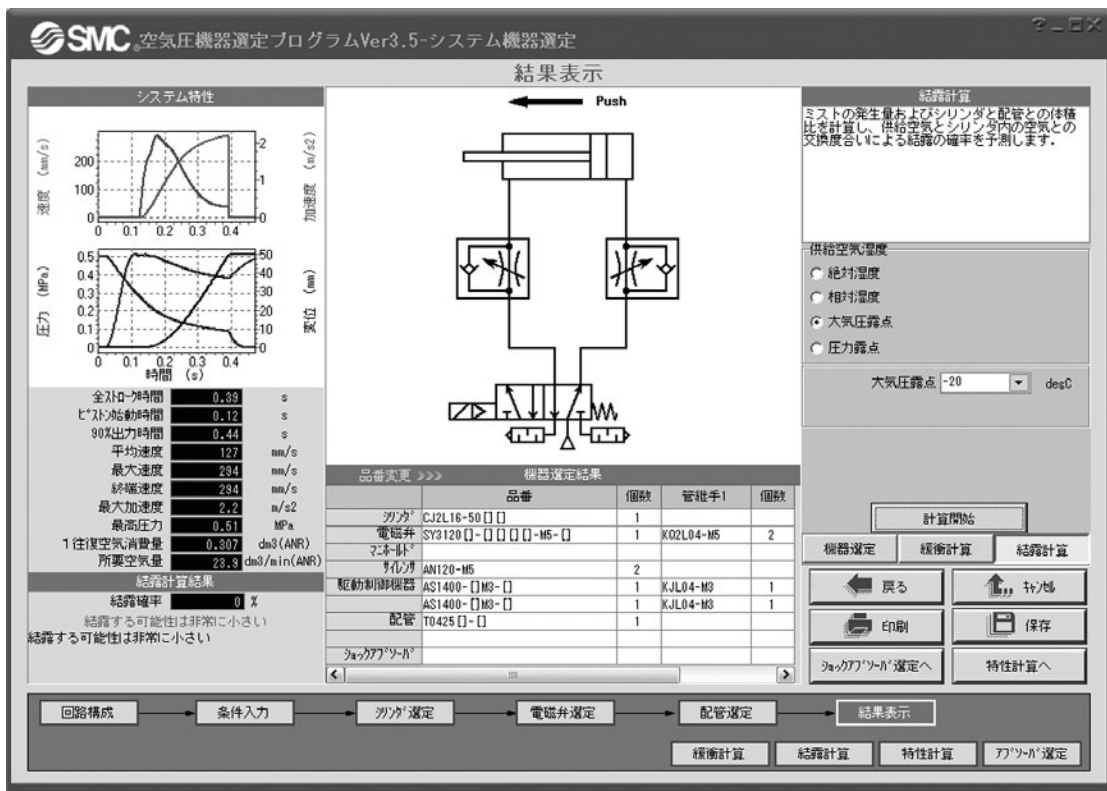
$V_t$  : 配管の容積[cm<sup>3</sup>]  
 $V_c$  : シリンダの容積[cm<sup>3</sup>]  
 $P_s$  : 供給空気のゲージ圧力[MPa]

(3) 結露を判定します

①→②および③→②のように、交点②を求め、交点②が該当する領域によって、結露するかしないかを判断します。

## 3-2 結露判定プログラム

弊社の“空気圧機器選定プログラムVer.3.5”以上のものに結露判定が組み込まれています。機器選定および特性計算の結果画面で結露計算を実行すると、空気湿度を入力することで結露確率が表示されます。





## 4. 結露対策

前述の結露発生メカニズムを踏まえて、つぎのような防止策を取ることができます。

### ● 空気の質対策

水分を多く含んだ圧縮空気は、結露し易く空気圧機器の作動不良の原因となります。そのため、結露判定線図または空気圧機器選定プログラムの結果に基づいてエアドライヤを空気圧機器の前に取付けることをお奨めします。エアドライヤの選定については、空気圧システム省エネプログラムをご活用ください。

### ● 配管容積対策

給排気弁とアクチュエータ間の配管長さを短くし、配管径も検討して配管容積を極力減らします。(最も細い内径2mmまでのチューブを用意しています。)

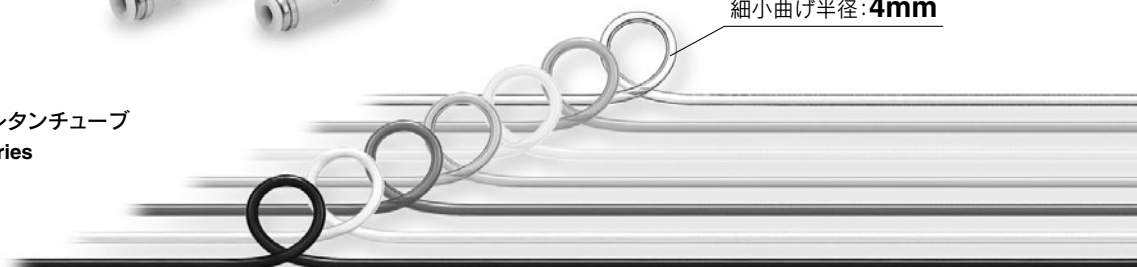
ø2ファンタッチ管継手  
KJ Series



ø2ミニチュア管継手  
M Series



ø2ポリウレタンチューブ  
TU Series



### ● 配管材料対策

内部結露は、断熱膨張による断熱冷却により発生するため、配管材料は、銅管など熱伝導の良い材料を選定する。

### ● 使用圧力対策

内部結露は、配管容積が大きく、使用圧力が高いほど発生し易いため、使用圧力を極力下げてください。ただし、Kv値が小さく、線図が立ち上がっている領域では、逆転する可能性がありますので、実際の使用条件で算出し、線図上で領域を確認してください。

### ● 給排気による対策

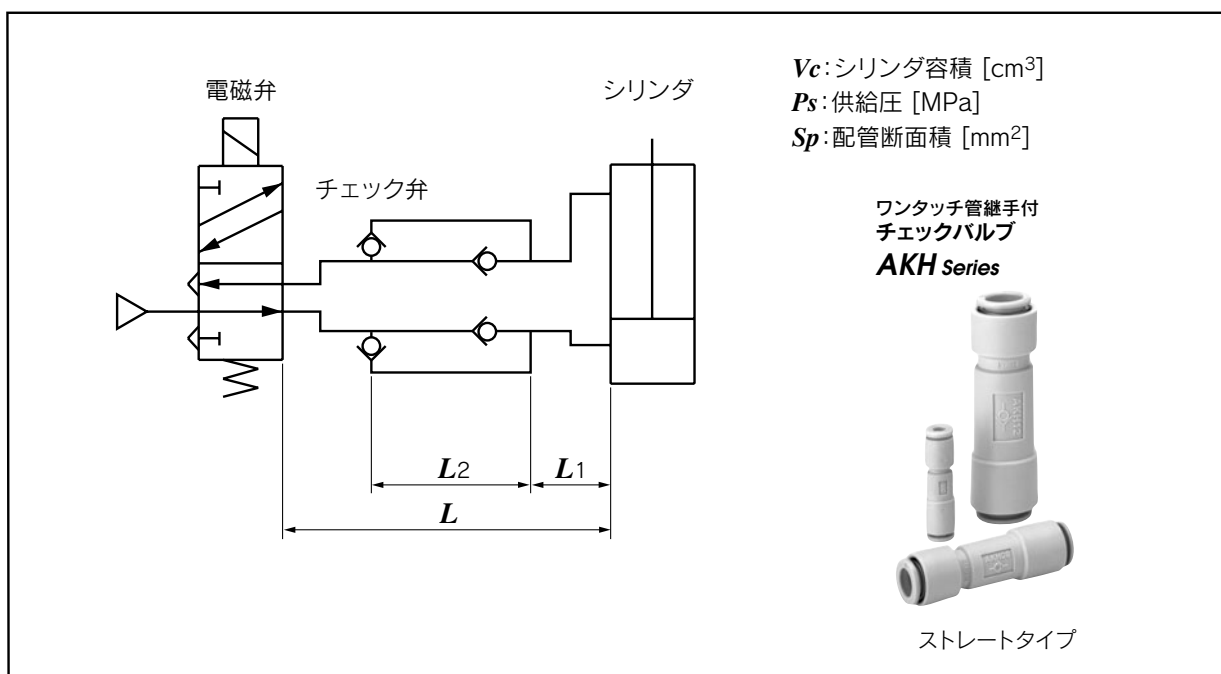
給排気通路を個別にしたり、配管中の排気速度を上げたりすると効果がある場合があります。代表的な事例を次に示します。

## ① バイパス配管法

チェック弁とバイパス管を使って、給気と排気を一方通行させることにより、空気の交換は十分に行われます。

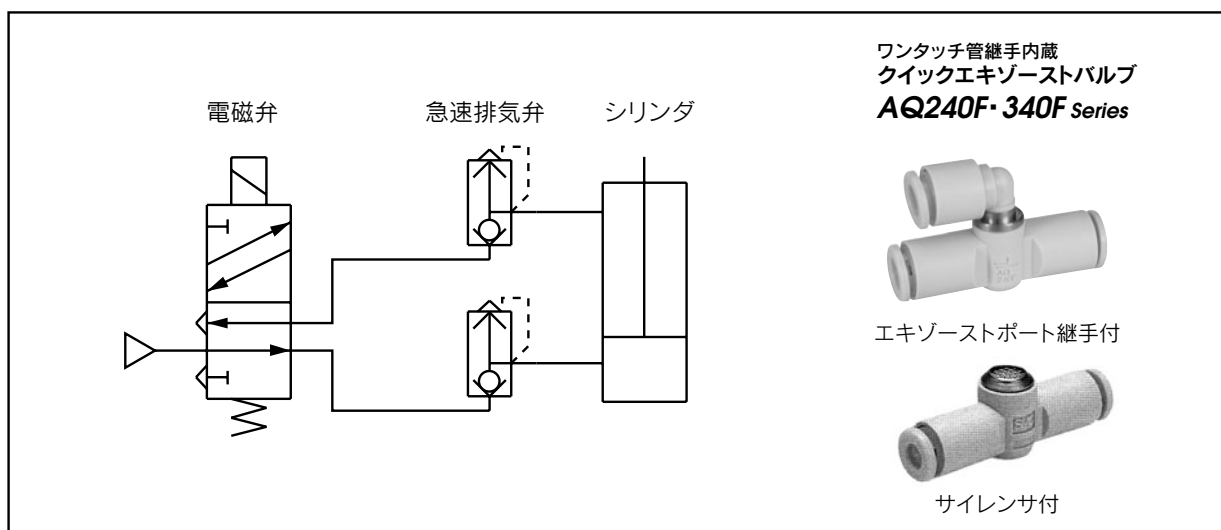
バイパス管設置位置  $L1: \frac{Vc}{Sp} \times \frac{Ps+0.1}{0.1}$  より小さく、なるべくシリンダ側に設置

バイパス管の長さ  $L2$ : 全長 $L$ の約20%



## ② 急速排気弁法

急速排気弁をシリンダの近くに設置して、シリンダ内の空気を大気へ直接排出します。



# 5. 付録

## ●飽和水蒸気量

空気には少量の水分が水蒸気の形で含まれています。その含有量は空気の温度により上限があります。それ以上になると、過剰な水蒸気が水滴として凝縮します。この含有量の上限を飽和水蒸気量といい、下表のように、1m<sup>3</sup>の空気中の水蒸気の量をgで表します。

飽和水蒸気量表(単位g/m<sup>3</sup>)

		1°C単位における温度 °C									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10 °C 単 位 に お け る 温 度	90	420.1	433.6	446.5	464.3	480.8	496.6	414.3	532.0	550.3	569.7
	80	290.8	301.7	313.3	325.3	337.2	349.9	362.5	375.9	389.7	404.9
	70	197.0	204.9	213.4	222.1	231.1	240.2	249.6	259.4	269.7	280.0
	60	129.8	135.6	141.5	147.6	153.9	160.5	167.3	174.2	181.6	189.0
	50	82.9	86.9	90.9	96.2	99.6	104.2	108.9	114.0	119.1	124.4
	40	51.0	53.6	56.4	59.2	62.2	65.3	68.5	71.8	75.3	78.9
	30	30.3	32.0	33.8	35.6	37.5	39.5	41.6	43.6	46.1	48.5
	20	17.3	18.3	19.4	20.6	21.8	23.0	24.3	25.7	27.2	28.7
	10	9.40	10.0	10.6	11.3	12.1	12.8	13.6	14.5	15.4	16.3
	0	4.85	5.19	5.66	5.95	6.35	6.80	7.26	7.75	8.27	8.82
	-0	4.85	4.52	4.22	3.93	3.66	3.40	3.16	2.94	2.73	2.54
	-10	2.25	2.18	2.02	1.87	1.73	1.60	1.48	1.36	1.26	1.16
	-20	1.067	0.982	0.903	0.829	0.761	0.696	0.640	0.556	0.536	0.490
-30	0.448	0.409	0.373	0.340	0.309	0.261	0.255	0.232	0.210	0.190	
-40	0.172	0.156	0.141	0.127	0.114	0.103	0.093	0.063	0.075	0.067	
-50	0.060	0.064	0.049	0.043	0.038	0.034	0.030	0.027	0.024	0.021	
-60	0.019	0.017	0.015	0.013	0.011	0.0099	0.0087	0.0076	0.0067	0.0058	

### 飽和水蒸気量表の見方

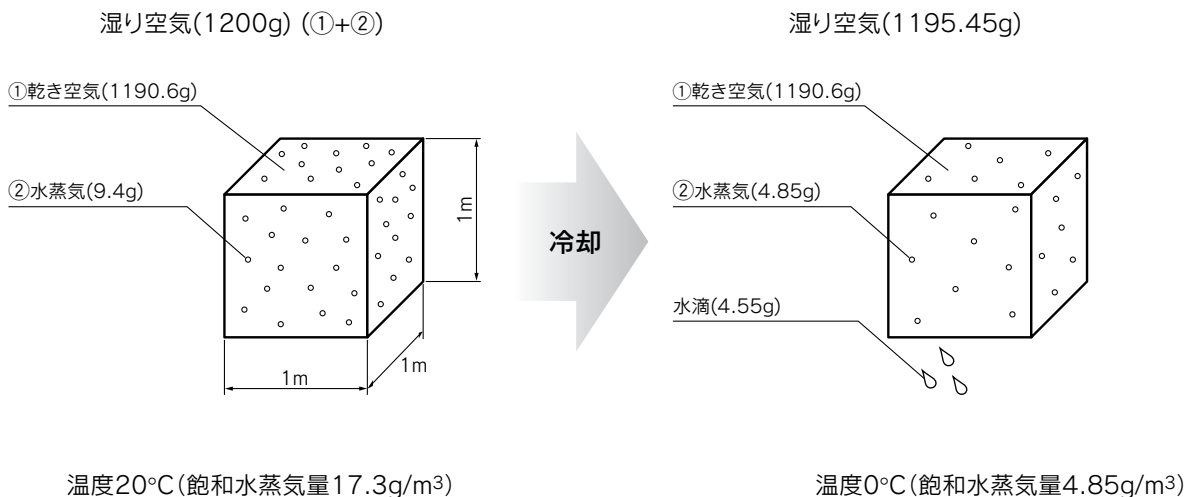
表の見方は縦列に10°C単位の温度、横列に1°C単位の温度で区別する。

【例】32°Cのときの飽和蒸気圧気量を求める。

例 32°C		1°C単位における温度 °C				
		0	1	2	3	
10 °C 単 位 に お け る 温 度	40					
	30			33.8		
	20					
	0					

上記表の見方より33.8g/m<sup>3</sup>が選べる。

例えば、1m<sup>3</sup>の空気に9.4gの水蒸気が含まれているとすると、温度20°Cのとき、飽和水蒸気量が17.3g/m<sup>3</sup>なので、水蒸気形で存在します。温度を0°Cまで冷却した場合、飽和水蒸気量が4.85g/m<sup>3</sup>になるので、余剰の(9.4g-4.85g)=4.55gの水蒸気は凝縮します。



※弊社の“省エネプログラム”を利用すると、上例のような凝縮水量の計算は簡単に行えます。

## ●湿度とその換算

空気中の水分の含有量は湿度または露点で表します。

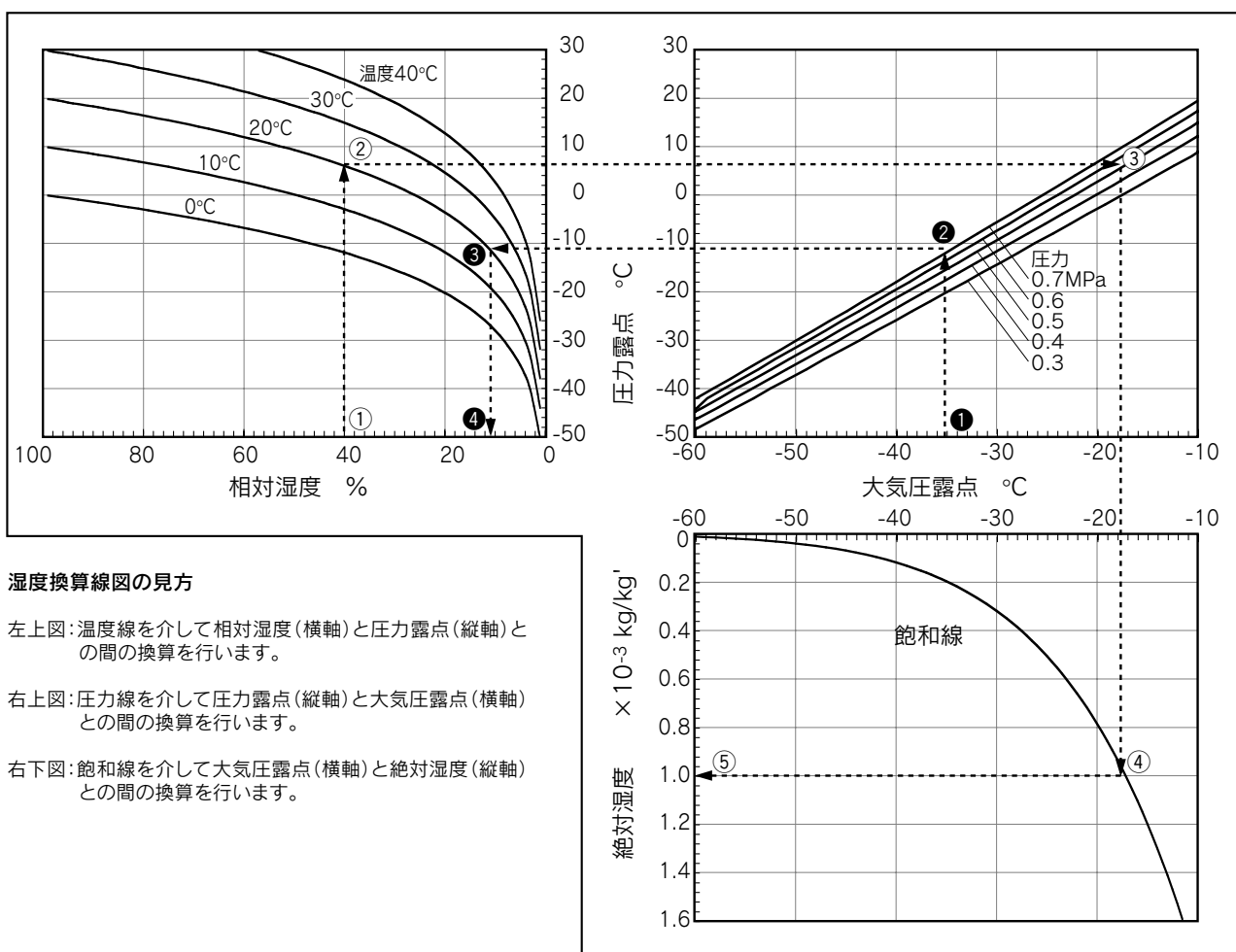
絶対湿度: 乾き空気質量に対する水蒸気質量率。

相対湿度: 飽和水蒸気量に対する水蒸気質量率。

大気圧露点: 大気圧下で冷却すると水蒸気が飽和し始める温度。

圧力露点: 一定の圧力下で冷却すると水蒸気が飽和し始める温度。

### 湿度換算線図



#### 湿度換算線図の見方

左上図: 温度線を介して相対湿度(横軸)と圧力露点(縦軸)との間の換算を行います。

右上図: 圧力線を介して圧力露点(縦軸)と大気圧露点(横軸)との間の換算を行います。

右下図: 飽和線を介して大気圧露点(横軸)と絶対湿度(縦軸)との間の換算を行います。

【例1】圧力0.5MPa、温度20°C、相対湿度40%の圧縮空気の絶対湿度は①→②→③→④→⑤のように0.001kg/kgと求まります。

【例2】圧力0.7MPa、温度20°C、大気圧露点-35°Cの圧縮空気の相対湿度は①→②→③→④のように11%と求まります。

※弊社の“省エネプログラム”を利用すると、上例のような湿度と露点の間の換算を簡単に行えます。

## ●エアドライヤ除湿仕様

製品名	シリーズ	出口空気の大気圧露点[°C] 注)
冷凍式エアドライヤ	IDUシリーズ	-17
	IDFシリーズ	-17
ヒートレス式エアドライヤ	IDシリーズ	-30
	IDシリーズ(準標準:低露点)	-50
メンブレンエアドライヤ	IDGシリーズ(-20°C仕様)	-20
	IDGシリーズ(-15°C仕様)	-15
	IDGシリーズ(-40°C仕様)	-40
	IDGシリーズ(-60°C仕様)	-60

注)出口空気の大気圧露点は定格時の値です。

### 冷凍式エアドライヤ

#### IDFシリーズ

標準入気タイプ  
定格入口空気温度: 35, 40°C



#### IDUシリーズ

高温入気タイプ  
定格入口空気温度: 50, 55°C



### ヒートレス式エアドライヤ

#### IDシリーズ

出口空気流量: 80~780ℓ/min(ANR)



### メンブレンエアドライヤ

#### IDGシリーズ

出口空気流量: 10~1000ℓ/min(ANR)





**SMC株式会社** URL <http://www.smcworld.com>

本社 / 〒101-0021 東京都千代田区外神田4-14-1 秋葉原UDX15階  
東京営業所 TEL.03-5207-8271 名古屋営業所 TEL.052-461-3400 大阪営業所 TEL.06-6459-5160

⑨ このカタログの内容は予告なしに変更する場合がありますのであらかじめご了承ください。  
©2007 SMC Corporation All Rights Reserved

代理  
店

D-IDEO

初版GO 印刷LU 30200K

このカタログは地球環境保護のため再生紙を使用しています。