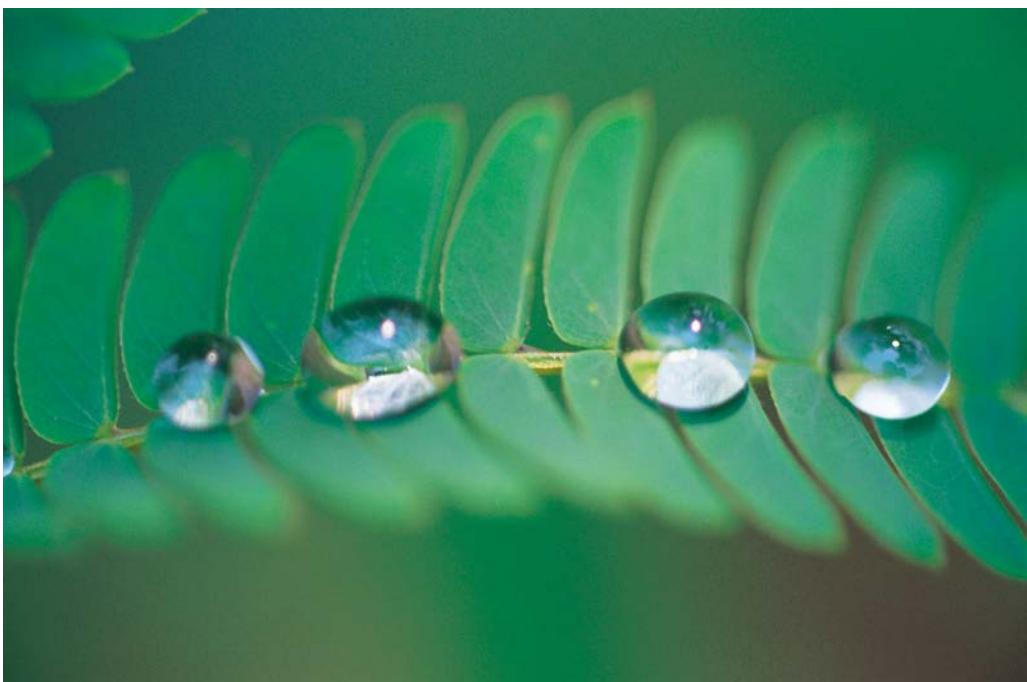


VAISALA

# 湿度計算の計算式集

湿度計算を分かりやすく理解するために



B210973JA-F

## 出版元

**Vaisala Oyj**  
**P.O. Box 26**  
**FI-00421 Helsinki**  
**Finland**

**Phone (int.): +358 9 8949 1**  
**Fax: +358 9 8949 2227**

**Visit our Internet pages at [www.vaisala.com](http://www.vaisala.com)**

**© Vaisala 2013**

**本カタログに掲載される情報は、ヴァイサラと協力会社の著作権法、各種条約  
及びその他の法律で保護されています。私的使用その他法律によって明示的に  
認められる範囲を超えて、これらの情報を使用（複製、送信、頒布、保管等を  
含む）をすることは、事前に当社の文書による許諾がないかぎり、禁止します。  
仕様は予告なく変更されることがあります。**

# 目次

1. 相対湿度の定義	4
2. 飽和水蒸気圧	5
3. 相対湿度から露点を計算する	8
3.1 異なる圧力での露点計算	9
3.2 周囲温度と露点から相対湿度を計算する	10
4. 乾湿計を使用する	11
5. 混合比	12
6. エンタルピー	13
7. 絶対湿度	14
8. 百万分率 (ppm)	15
9. 増大因子	17

## 1. 相対湿度の定義

相対湿度は、水蒸気分圧の飽和水蒸気圧に対する割合と定義される。

$$RH = P_w/P_{ws} \cdot 100\% \quad (1)$$

温度が 100 度以上の場合もこの定義に該当するが、水蒸気圧は 1013 hPa（通常の大気圧）より大きくなることはないので、加圧されていない環境では、相対湿度は 100% に達しない。

温度が 0°C 以下の場合もこの定義が該当する。0°C 以下の飽和水蒸気圧には「過冷却の水の飽和水蒸気圧」と「氷の飽和水蒸気圧」があるが、相対湿度の定義は 0°C 以下でも「過冷却の水の飽和水蒸気圧」を基に計算される。実際には過冷却水ではなく氷（霜）が発生する場合がほとんどのため、氷の飽和水蒸気圧以上に水蒸気圧が上がることはない。「過冷却水の飽和水蒸気圧」 > 「氷の飽和水蒸気圧」のため、過冷却状態にならない限り、相対湿度が 100% に達することはない。

## 2. 飽和水蒸気圧

次の計算式は 0°Cから 373°Cにおける飽和水蒸気圧の計算式である。 ( W. Wagner and A. Pruß: "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use ", Journal of Physical and Chemical Reference Data, June 2002 ,Volume 31, Issue 2, pp. 387535):

$$\vartheta = 1 - \frac{T}{T_c} \quad (2)$$

$$\ln\left(\frac{P_{ws}}{P_c}\right) = \frac{T_c}{T} \left( C_1 \vartheta + C_2 \vartheta^{1.5} + C_3 \vartheta^3 + C_4 \vartheta^{3.5} + C_5 \vartheta^4 + C_6 \vartheta^{7.5} \right) \quad (3)$$

T = 絶対温度[K]

P<sub>ws</sub> = 飽和水蒸気圧 [hPa]

T<sub>c</sub> = 臨界温度 647.096 K

P<sub>c</sub> = 臨界圧力 220 640 hPa

C<sub>i</sub> = 係数

C<sub>1</sub> = -7.85951783

C<sub>2</sub> = 1.84408259

C<sub>3</sub> = -11.7866497

C<sub>4</sub> = 22.6807411

C<sub>5</sub> = -15.9618719

C<sub>6</sub> = 1.80122502

**氷の飽和水蒸気圧において、-100 と 0.01°C では次のように計算される：**

$$\theta = \frac{T}{T_n} \quad (4)$$

$$\ln\left(\frac{P_{wi}}{P_n}\right) = a_0\left(1 - \theta^{-1.5}\right) + a_1\left(1 - \theta^{-1.25}\right) \quad (5)$$

**T = 絶対温度[K]**

**P<sub>n</sub> = 三重点温度における水蒸気圧 6.11657 hPa**

**T<sub>n</sub> = 三重点温度 273.16 K**

**P<sub>wi</sub> = 氷の飽和水蒸気圧 [hPa]**

**a<sub>i</sub> = 係数**

**a<sub>0</sub> = -13.928169**

**a<sub>1</sub> = 34.707823**

低い精度、または限定的な温度範囲が許容される場合は、水（または氷）に対する飽和水蒸気圧の計算には、より平易な計算式を用いることも可能である。

$$P_{ws} = A \cdot 10^{\left(\frac{m \cdot T}{T + T_n}\right)} \quad [\text{hPa}] \quad (6)$$

**定数 A、m、T<sub>n</sub> は表 1 参照のこと**

**T = 温度[°C]**

	A	m	T <sub>n</sub>	最大誤差	温度範囲[°C]
水 および 過冷却水	<b>6.116441</b>	<b>7.591386</b>	<b>240.7263</b>	<b>0.083%</b>	<b>-20 ~ +50°C</b>
	<b>6.004918</b>	<b>7.337936</b>	<b>229.3975</b>	<b>0.017%</b>	<b>+50 ~ +100°C</b>
	<b>5.856548</b>	<b>7.27731</b>	<b>225.1033</b>	<b>0.003%</b>	<b>+100 ~ +150°C</b>
	<b>6.002859</b>	<b>7.290361</b>	<b>227.1704</b>	<b>0.007%</b>	<b>+150 ~ +200°C</b>
	<b>9.980622</b>	<b>7.388931</b>	<b>263.1239</b>	<b>0.395%</b>	<b>+200 ~ +350°C</b>
	<b>6.089613</b>	<b>7.33502</b>	<b>230.3921</b>	<b>0.368%</b>	<b>0 ~ +200°C</b>
氷	<b>6.114742</b>	<b>9.778707</b>	<b>273.1466</b>	<b>0.052%</b>	<b>-70 ~ 0°C</b>

#### 6. 表 1. 計算式(6)に使用される定数

注：ヴァイサラでは表 1 の定数を、飽和水蒸気圧の計算式(3)と氷の飽和水蒸気圧の計算式(5)に、それぞれ当てはめている。

### 3. 相対湿度から露点を計算する

計算式 (3) または (6) を用いて  $P_{ws}$  を計算し、下記式から  $P_w$  を計算する

$$P_w = P_{ws} \cdot RH/100 \text{ [hPa]}$$

計算式 (7) を用いて露点を計算する：

$$Td = \frac{T_n}{\left[ \frac{m}{10 \log\left(\frac{P_w}{A}\right)} - 1 \right]} \quad (7)$$

計算式 (7) の定数は計算式 (6) と同じである

例

周囲温度が 40°C で相対湿度 RH が 50% の場合の露点  $T_d$  を計算する：

$$P_w = P_{ws}(40^\circ\text{C}) \cdot 50/100 = 36.88 \text{ hPa}$$

$$T_d = 240.7263 / (7.591386 / 10 \log(36.88 / 6.116441) - 1) = \underline{\underline{27.6^\circ\text{C}}}$$

## 3.1 異なる圧力で露点を計算する

1. 計算式 (3) と (6) を用いて  $P_{ws}$  を計算する

2. 計測圧力における水蒸気圧を計算する

$$P_{w_{meas}} = P_{ws} \cdot \frac{RH}{100} \quad (8)$$

3. 圧力比を乗じる:

$$P_{w_{pres}} = \frac{P_{pres}}{P_{meas}} \cdot P_{w_{meas}} \quad (9)$$

4. プロセス圧力の露点を計算する:

$$Td_{pres} = \left[ \frac{T_n}{\frac{m}{10 \log \left( \frac{P_{w_{pres}}}{A} \right)} - 1} \right] \quad (10)$$

## 3.2 露点と周囲温度から相対湿度を計算する

$$RH = 100\% \cdot \frac{P_{ws}(Td)}{P_{ws}(T_{ambient})} \quad (11)$$

$P_{ws}$  は、計算式 (3) と (6) を用いて求められる。簡易化された計算式 (6) が相対湿度の値として使用される場合は、下記のようにさらに簡易化される

$$RH = 100\% \cdot 10^m \left[ \frac{Td}{Td+Tn} - \frac{T_{ambient}}{T_{ambient}+Tn} \right] \quad (12)$$

各温度範囲における定数  $M$  と  $T_n$  の値は表 1 を参照のこと

## 4. 乾湿計を使用する

乾球温度  $T_{dry}$  と湿球温度  $T_{wet}$  は計算式 (13) を用いて水蒸気圧  $P_w$  に変換できる

$$P_w = P_{ws} \cdot (T_{wet}) - P_{tot} \cdot K \cdot (T_{dry} - T_{wet}) \quad (13)$$

$P_{ws}$  = 計算式 (6) から求められた飽和水蒸気圧

$P_{tot}$  = 全圧

$K$  = 乾湿計係数  $0.000662^{\circ}\text{C}^{-1}$

水蒸気圧  $P_w$  が分かっている場合、相対湿度 RH は計算式 (1) から計算できる、または露点  $T_d$  は計算式 (7) を用いて計算できる。

例

湿球温度  $T_{wet}$  が  $38.5^{\circ}\text{C}$ 、乾球温度  $T_{dry}$  が  $40.0^{\circ}\text{C}$ 、全圧  $P_{tot}$  が  $1013\text{hPa}$  のとき相対湿度と露点は下記のように計算される

$$P_{ws}(38.5^{\circ}\text{C}) = 68.05 \text{ hPa}$$

$$P_{ws}(40.0^{\circ}\text{C}) = 73.75 \text{ hPa}$$

$$P_w = 68.05 - 1013 \cdot 0.000662 \cdot (40.0 - 38.5) = 67.04 \text{ [hPa]}$$

$$RH = 67.04 / 73.75 \cdot 100 = 90.9\%$$

$$T_d = 240.7263 / (7.591386 / 10 \log(67.04 / 6.116441) - 1) = \underline{\underline{38.21^{\circ}\text{C}}}$$

## 5. 混合比

混合比（水蒸気質量/乾燥気体質量）は計算式（14）を用いて計算される

$$X = B \cdot P_w / (P_{\text{tot}} - P_w) \quad [\text{g/kg}] \quad (14)$$

$$B = 621.9907 \text{ g/kg}$$

定数 B は気体により決まる。空気の場合は 621.9907g/kg となる。

一般的に定数 B は次の計算式（15）を使用して計算される

$$B = M(H_2O) / M(\text{gas}) \cdot 1000 \quad [\text{g/kg}] \quad (15)$$

$M(H_2O)$  = 水の分子量

$M(\text{gas})$  = 気体の分子量

例えば、水素の場合の定数 B は下記のように計算される

$$B = 18.015 / 2.016 \cdot 1000 = 8936 \text{ g/kg}$$

例

露点  $T_d$  が 40°C で、全圧  $P_{\text{tot}}$  が 998 hPa の場合の混合比は下記のように計算される

$$P_w = P_{ws}(40^\circ\text{C}) = 73.75 \text{ hPa}$$

$$X = 621.9907 \cdot 73.75 / (998 - 73.75) = \underline{49.63 \text{ g/kg}}$$

## 6. エンタルピー

エンタルピー $h$ は計算式 (16) を用いて、混合比から計算できる

$$h = T \cdot (1.01 + 0.00189X) + 2.5X \quad (\text{kJ/kg}) \quad (16)$$

$T$  = 溫度 [°C]

$X$  = 混合比 [g/kg]

例

周囲温度  $T$  が 20°C で相対湿度 RH が 50% の時のエンタルピー $h$ を計算する

$$P_w = P_{ws}(20^\circ\text{C}) \cdot 50/100 = 11.69 \text{ hPa}$$

$$X = 621.9907 \cdot 11.69 / (1013 - 11.69) = 7.26 \text{ g/kg}$$

$$h = 20 \cdot (1.01 + 0.00189 \cdot 7.26) + 2.5 \cdot 7.26 = \underline{\underline{38.62 \text{ kJ/kg}}}$$

## 7. 絶対湿度

絶対湿度とはある体積の気体中における水蒸気質量として定義される。

気体を理想気体とみなした場合は、絶対湿度は下記 (17) 式のように計算される：

$$A = C \cdot P_w/T \quad [g/m^3] \quad (17)$$

$C$  = 係数 2.16679 gK/J

$P_w$  = 水蒸気圧[Pa]

$T$  = 絶対温度[K]

例

周囲温度が 20°C で相対湿度が 80% のとき、絶対湿度 A を計算する

$$P_w = P_{ws}(20^\circ\text{C}) \cdot 80/100 = 1870 \text{ Pa}$$

$$A = 2.16679 \cdot 1870/(273.15+20) = \underline{13.82 \text{ g/m}^3}$$

## 8. 百万分率(ppm)

百万分率 (ppm) は通常、乾燥空気に対する比率として用いられる:

PPM<sub>v</sub>(dry) 乾燥空気に対する体積比:

$$PPM_v = \frac{P_w}{P_{tot} - P_w} 10^6 \quad (18)$$

P<sub>w</sub> = 水蒸気圧

P<sub>tot</sub> = 全圧

PPM<sub>w</sub>(dry) 乾燥空気に対する重量比:

$$PPM_w = \frac{M_w P_w}{M_d (P_{tot} - P_w)} 10^6$$
$$\frac{M_w}{M_d} = 0.62199 \quad (19)$$

P<sub>w</sub> = 水蒸気圧

P<sub>tot</sub> = 全圧

M<sub>w</sub> = 水の分子量

M<sub>d</sub> = 乾燥空気の分子量

PPM<sub>v</sub>(wet) 湿り空気に対する体積比:

$$PPM_v = \frac{P_w}{P_{tot}} 10^6 \quad (20)$$

**PPM<sub>w</sub>(wet) 湿り空気に対する重量比：**

$$PPM_w = \frac{M_w P_w}{M_d P_{tot}} 10^6$$

$$\frac{M_w}{M_d} = 0.62199 \quad (21)$$

**例**

**露点が 7°Cで全圧が 998 hPa の場合の PPM<sub>v</sub>(dry)を計算する**

**露点温度を当てはめた計算式 (6) 、  $P_w = P_{ws}(T_d)$ を用いると  $P_{ws}(7^{\circ} C) = 10.02 \text{ hPa}$  と  
計算される**

$$PPM_v = \frac{10.02}{(998 - 10.02)} 10^6 = 10142$$

## 9. 増大因子

2章で記述された飽和水蒸気圧は正確には真空状態時（気体中に水蒸気しか存在しない場合）のときのみに当てはまる。もし他の気体が存在する場合、真の飽和蒸気圧  $P_{ws}$  は増大する。大気圧下もしくは大気圧以下ではこの影響は無視できる。しかし、大気圧より明らかに気圧が高い場合は、考慮する必要がある。増大因子は下記の通り定義される。

$$f = \frac{X_w \cdot P}{P_{ws}} \quad (22)$$

$X_w$  = 気相中での水蒸気のモル分率

$P$  = 全圧

$P_{ws}$  = 飽和水蒸気圧（2章を参照）

二酸化炭素がない空気では、次の式が提示されている。（Greenspan: J. of Research of the NBS vol 80A, No. 1 p 41-44）

$$f = e^{\left[ \alpha \left( 1 - \frac{P_{ws}}{P} \right) + \beta \left( \frac{P}{P_{ws}} - 1 \right) \right]} \quad (23)$$

パラメータ  $\alpha$  と  $\beta$  は次の通り温度によって異なる：

$$\alpha = \sum_{i=1}^4 A_i t^{(i-1)} \quad (24)$$

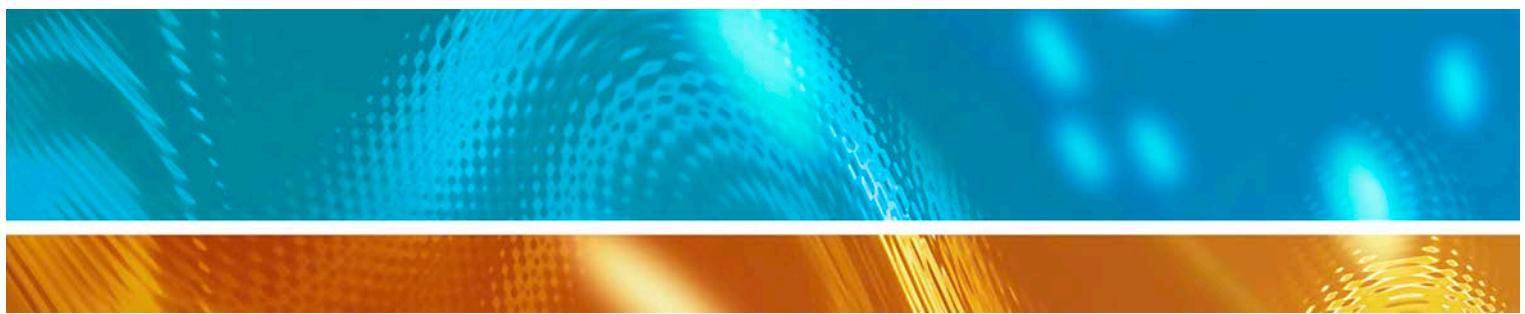
$$\beta = e^{\sum_{i=1}^4 B_i t^{(i-1)}} \quad (25)$$

$T$  = 溫度[°C]

パラメータ  $A_i$  と  $B_i$  は下記を参照のこと:

	過冷却水 -50 ~ 0°C	水 0 ~ 100°C	氷 -100 ~ 0°C
A1	$3.62183 \cdot 10^{-4}$	$3.53624 \cdot 10^{-4}$	$3.64449 \cdot 10^{-4}$
A2	$2.60553 \cdot 10^{-5}$	$2.93228 \cdot 10^{-5}$	$2.93631 \cdot 10^{-5}$
A3	$3.86501 \cdot 10^{-7}$	$2.61474 \cdot 10^{-7}$	$4.88635 \cdot 10^{-7}$
A4	$3.82449 \cdot 10^{-9}$	$8.57538 \cdot 10^{-9}$	$4.36543 \cdot 10^{-9}$
B1	-10.7604	-10.7588	-10.7271
B2	$6.39725 \cdot 10^{-2}$	$6.32529 \cdot 10^{-2}$	$7.61989 \cdot 10^{-2}$
B3	$-2.63416 \cdot 10^{-4}$	$-2.53591 \cdot 10^{-4}$	$-1.74771 \cdot 10^{-4}$
B4	$1.67254 \cdot 10^{-6}$	$6.33784 \cdot 10^{-7}$	$2.46721 \cdot 10^{-6}$

上記の計算式は 1 ~ 20 気圧の環境において適用できる。例えば、20°C、10 気圧における  $f$  は 1.031 である。



**www.vaisala.co.jp**