

# 建築物理学講座

## 第4講「水蒸気の移動」

田中 辰明

柚本 玲

(お茶の水女子大学名誉教授・工博) (お茶の水女子大学田中研究室・博士(生活科学))



### 1. 定常状態における壁内の湿気分布

湿気は水蒸気圧差に比例して移動し、湿度の圧力の高い方から低い方に移動する。壁内に湿気が入り込み、壁内の湿気が多いときは、その部分の温度の飽和水蒸気量を超えることがある。そういった場合は壁内に結露が生じる場合がある。これを内部結露と呼ぶ。この湿気が飽和水蒸気量に達するかそれ以下に保つか壁内の圧力分布図をつくれれば内部結露の有無が明らかになる。

例えばFig.1に示すような壁があり、室内温度20℃、相対湿度60%RH(1399.7Pa)で外気温度0℃、相対湿度90%RH(546.6Pa)で一定(定常)のときに、壁内に結露するか否かを調べる。壁内各部分の温度と湿度を算出し、湿り空気線図や第1講<sup>2)</sup>で紹介した換算式等により、温度分布線(イ)、水蒸気分圧分布線(ハ)(式(4)参照)、各部分の温度に対応する飽和水蒸気圧分布線(ロ)を描く。水蒸気分圧分布線(ハ)はこの場合の壁内の湿気を示すものであるから、これが飽和水蒸気圧(ロ)を示す線以上になれば、その部分は結露していることになる。つまり、図中の斜線部分は結露しており、グラスウールの一部とコンクリート部分が結露していることになる<sup>1)</sup>。

しかし実際の現象ではグラスウールなどの建材が湿潤になれば、熱伝導率も大きくなり、さらに結露を促進させることになる。定常計算においてはこのようなことは考慮されていない。

### 2. 水蒸気拡散の計算

建築物の水蒸気拡散の計算についてドイツ工業規格DIN4108-5「建築物の断熱」の方法に基づき解説を行う。変数は後に一覧で示す、水蒸気拡散抵抗係数 $\mu$ 及びSd値については第7項で詳述する)

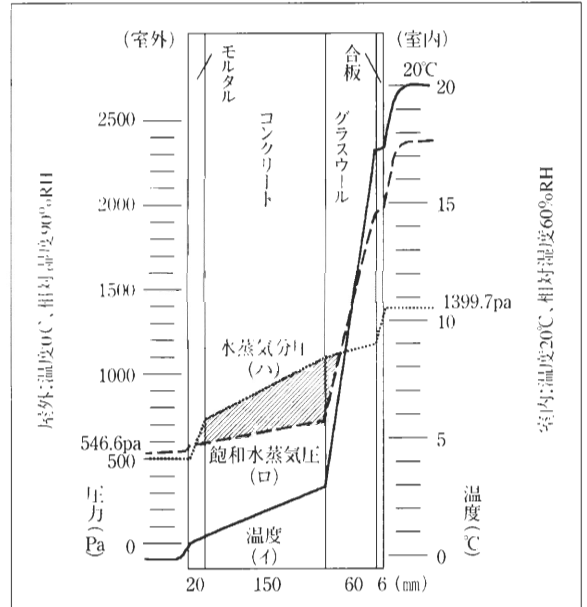


Fig.1 壁内の温度、水蒸気圧分布

#### (1) 水蒸気拡散の防止

ある建築材料の層の水蒸気拡散通過抵抗 $1/\Delta$ は10℃で、つぎのように計算される。

$$\frac{1}{\Delta} = 1.5 \cdot 10^6 \cdot \mu \cdot s \quad (1)$$

多層壁の水蒸気拡散通過抵抗 $1/\Delta$ は、各層の暑さ $s_1, s_2, \dots, s_n$ とその水蒸気拡散抵抗係数(建材が空気何倍の水蒸気を通しにくい)  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  から次式で計算される。

$$\frac{1}{\Delta} = 1.5 \cdot 10^6 (\mu_1 \cdot s_1 + \mu_2 \cdot s_2 + \dots + \mu_n \cdot s_n) \quad (2)$$

#### (2) Sd値

ある建材層のSd値(水蒸気拡散抵抗相当空気厚さ)は、

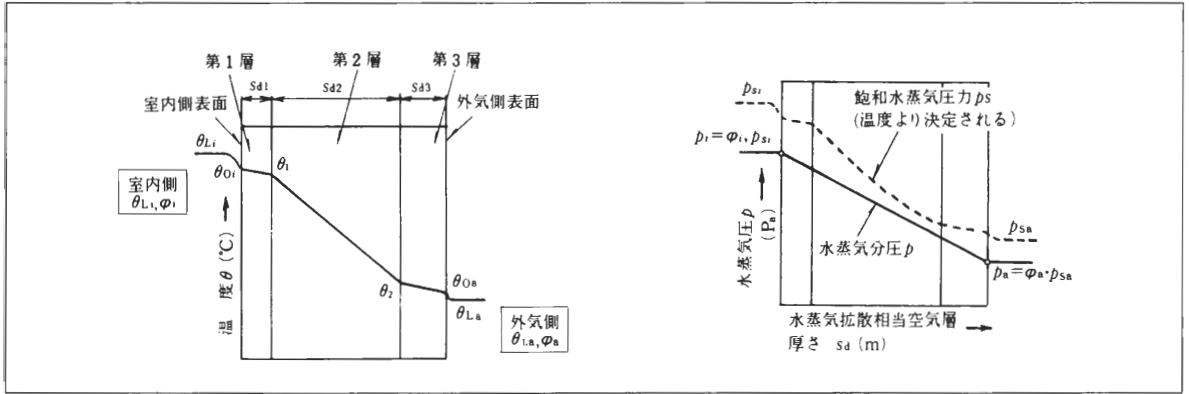


Fig.2 多層壁断面の結露判定のための温度分布、飽和水蒸気圧、水蒸気分圧線図（この例では断面に結露は生じない）

その建材の厚さ  $s$  とその水蒸気拡散抵抗係数  $\mu$  からつぎのように計算される

$$Sd = \mu \cdot s \quad (3)$$

### (3) 水蒸気分圧

水蒸気分圧  $p$  は、相対湿度  $\phi$  とその温度  $\theta$  の飽和水蒸気圧  $p_s$  からつぎのように計算される

$$p = \phi \cdot p_s \quad (4)$$

なお、相対湿度  $\phi$  は少数として算出され、その数に100を乗ずることで%の単位となる。

### (4) 水蒸気拡散流量密度

水蒸気拡散流量密度  $i$  は次式により計算される。

$$i = \frac{p_i - p_a}{l/d} \quad (5)$$

式(5)は結露が生じないことを前提とした水蒸気拡散流量を示している。

## 3. 計算方法

### (1) 結露水の生成の計算

水蒸気拡散通過抵抗  $1/\Delta$  の建材の一方の空気層の水蒸気分圧が  $p_i$ 、他方の空気層の水蒸気分圧が  $p_a$  であると水蒸気拡散流れが始まる。建材の中で水蒸気分圧  $p$  が飽和水蒸気圧  $p_s$  に接すると結露が始まる。計算はつぎの方法による。

Fig.2は結露水の生成について示すものである。建築部位構成を水蒸気拡散相当空気厚さである  $Sd$  値 (m) で示し、これに水蒸気分圧  $p$  を描き、建築部位断面に計算で求められる温度分布とそれに対応する飽和水蒸気圧分布 (点線) を示している。建築部位構成内の水蒸気分圧は、建築部位の両側の空気の水蒸気分圧  $p_i$  と  $p_a$  を表面の水蒸気分圧としてこれを直線で結ぶことで求まる (Fig.2右の実線)。

飽和水蒸気圧の曲線に水蒸気分圧の直線が接しない場合は結露は生じない (Fig.3 (a) 参照)。この直線 (実線) が飽和水蒸気圧線図 (点線) を越えると、圧力  $p_i$  と  $p_a$  を結ぶ直線に変えて飽和水蒸気圧の曲線への接線を描く。これは水蒸気分圧のほうが飽和水蒸気圧よりも高くなることはありえないということによる (Fig.3 (b), (c), (d) 参照)。飽和水蒸気圧の曲線に水蒸気分圧の直線が接している部分では建築構成部材中での結露の発生がある (Fig.3 (d) 参照)。結露水の量は単位時間、単位面積あたりに拡散してくる水蒸気量と放出していく水蒸気量の差 (水蒸気拡散流量密度の差) から生じる。接線の傾斜はそれぞれの水蒸気拡散流量密度  $i$  の大きさになる (式 (5) 参照)

結露期間に外壁に生じる結露量は、Fig.3 (b) から (d) の例で式 (6) ~ 式 (16) で求められる。

### (2) 蒸発の計算

前述の外壁の結露計算の場合、結露面または結露範囲では飽和水蒸気圧に達している。水蒸気の拡散により結露域から室内または外気側へ蒸発していく水量は近似的に前項に記述した方法により拡散の線図 (Fig.4の (b), (c), (d)) を使用して計算できる。乾燥期間中の結露は、

計算では考慮する必要がない。

変数一覧 (既出の変数は省いた)

式(1)、式(2)、式(3)では

$\frac{1}{d}$ : 建材層の水蒸気拡散通過抵抗 ( $m^2 hPa/kg$ )、  
 $\mu$ : 水蒸気拡散抵抗係数(-)、 $s$ : 厚さ(m)、

$R \frac{T}{D} \equiv 1.5 \cdot 10^6$ : 定数 ( $mhPa/kg$ )、 $Sd$ : 水蒸気

拡散抵抗相当空気厚さ(m)

式(4)では

$p$ : 水蒸気分圧(Pa)、 $\phi$ : 相対湿度(-)、 $p_s$ : 飽和水蒸気圧(Pa)

式(5)

$i$ : 水蒸気拡散流量密度 ( $kg \cdot m^2 \cdot h$ )、 $p_i$ : 室内側水蒸気圧(Pa)、 $p_a$ : 屋外側水蒸気圧(Pa)

Fig.3式(6)から式(16)では

$t_T$ : 結露期間(h)

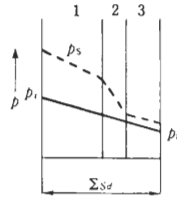
$p_{sw}$ : 飽和水蒸気圧(Pa)、(b)では  $p_{sw}$ : 結露面(Pa)、(c)では  $p_{sw1}, p_{sw2}$ : 第1結露面、第2結露面(Pa)、(d)では  $p_{sw1}, p_{sw2}$ : 結露域の始めの部分と終わりの部分(Pa)

$\frac{1}{d}$ : 建材層の水蒸気拡散通過抵抗 ( $m^2 hPa/kg$ )、(b)では  $\frac{1}{\Delta_i}$ : 室内側表面と結露面間 ( $m^2 hPa/kg$ )、 $\frac{1}{\Delta_a}$ : 結露面と外表面間 ( $m^2 hPa/kg$ )、(c)では  $\frac{1}{\Delta_i}$ : 室内側表面と第1結露面間 ( $m^2 hPa/kg$ )、 $\frac{1}{\Delta_1}$ : 第1結露面と第2結露面間 ( $m^2 hPa/kg$ )、 $\frac{1}{\Delta_a}$ : 第2結露面と外表面の間 ( $m^2 hPa/kg$ )、(d)では  $\frac{1}{\Delta_i}$ : 室内側表面と結露域の始めの点間 ( $m^2 hPa/kg$ )、 $\frac{1}{\Delta_a}$ : 結露域の終わりの点と外側表面間 ( $m^2 hPa/kg$ )、 $W_T$ : 結露面での結露水量 ( $kg/m^2$ )、(c)では  $W_{T1}, W_{T2}$ : 第1結露面及び第2結露面結露水量 ( $kg/m^2$ )

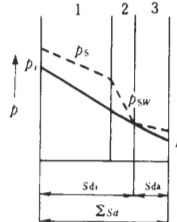
式(17)から式(25) (Fig.4)

$t_v$ : 乾燥期間(h)、 $W_v$ : 建材から外部へ蒸発していく水量 ( $kg/m^2$ )、 $i_i, i_a$ : 結露面から室内、結露面から外気への水蒸気拡散流量密度 ( $kg/m^2 h$ )、 $\frac{1}{d}$ : 建材層の水蒸気拡散通過抵抗 ( $m^2 hPa/kg$ )、(b)では  $\frac{1}{\Delta_i}$ : 室内側表面と結露面間、 $\frac{1}{\Delta_a}$ : 外部表面と結露面間、 $\frac{1}{\Delta_z}$ : 結露域 ( $m^2 hPa/kg$ )

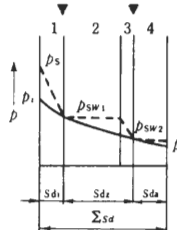
(a) 建材部分に結露の生じない水蒸気拡散



(b) 建材部分の1層(この場合2層と3層の間)で結露が生じる水蒸気拡散



(c) 建材部分の2層(1層と2層の間、3層と4層の間)で結露が生じる水蒸気拡散



室内側から建築部材への結露面への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{\frac{1}{\Delta_i}} \quad (6)$$

結露面から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a$

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{\frac{1}{\Delta_a}} \quad (7)$$

結露期間に結露面で生じる結露水量  $W_T$  は次式

$$W_T = t_T \cdot (i_i - i_a) \quad (8)$$

室内から建材部分の第1結露面への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw}}{\frac{1}{\Delta_i}} \quad (9)$$

第1結露面と第2結露面の間での水蒸気拡散流量密度  $i_z$

$$i_z = \frac{p_{sw1} - p_{sw2}}{\frac{1}{\Delta_z}} \quad (10)$$

第2結露面から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a$

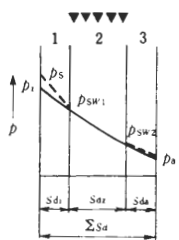
$$i_a = \frac{p_{sw2} - p_a}{\frac{1}{\Delta_a}} \quad (11)$$

結露期間中の第1面と第2面での結露水量  $W_{T1}$  と  $W_{T2}$

$$W_{T1} = t_T \cdot (i_i - i_z) \quad (12)$$

$$W_{T2} = t_T \cdot (i_z - i_a) \quad (13)$$

(d) 建材部分の内部で結露が生じる場合の水蒸気拡散



室内から結露域の始めの部分への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_i - p_{sw1}}{1/\Delta_i} \quad (14)$$

結露域の終わりの部分から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a$

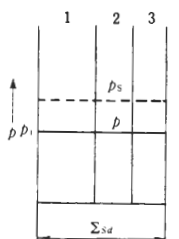
$$i_a = \frac{p_{sw2} - p_a}{1/\Delta_a} \quad (15)$$

結露期間中に結露する質量  $W_T$

$$W_T = t_T \cdot (i_i - i_a) \quad (16)$$

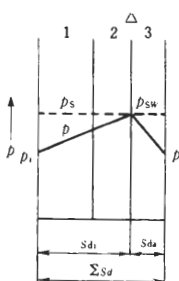
Fig.3 外壁での結露期間中の水蒸気拡散線図計算式

(a) 蒸発について検討する必要がある。



どの部分でも  $p = p_s$  とならないので結露は生じない例。

(b) 建材部分の一面で結露の後蒸発の水蒸気拡散がある場合



結露面から室内への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i} \quad (17)$$

結露面から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a$

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a} \quad (18)$$

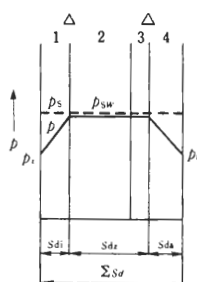
乾燥期間中に建材部分から外部へ蒸発される水量  $W_V$

$$W_V = t_V \cdot (i_i - i_a) \quad (19)$$

(c) 建材部分の2層で結露が生じた後、蒸発が起こる場合の水蒸気拡散

第1結露面  $p_{sw}$  から室内への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_i} \quad (20)$$



第2結露面  $p_{sw}$  から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a^*$

$$i_a^* = \frac{p_{sw} - p_a}{1/\Delta_a} \quad (21)$$

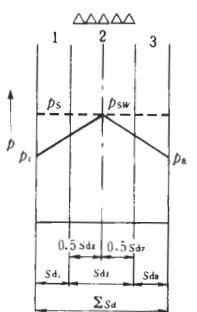
乾燥期間中に建材部分から蒸発していく水量  $W_V$

$$W_V = t_V \cdot (i_i - i_a) \quad (22)$$

\* 蒸発の水蒸気拡散流量密度  $i_a^*$  が第二面で生じる結露水量に対して十分でない場合、例えば陸屋根で水蒸気通過抵抗の大きい屋根防水層が用いられている場合、結露の生じている第一面からの蒸発の後、第二面から室内へ蒸発する水量もあり、つぎのように計算される。

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i + 1/\Delta_z} \quad (21a)$$

(d) 建材部分内部で結露が生じた後、蒸発が起こる場合の水蒸気拡散



結露部分の中央から室内への水蒸気拡散流量密度  $i_i$

$$i_i = \frac{p_{sw} - p_i}{1/\Delta_i + 0.5 \cdot 1/\Delta_z} \quad (23)$$

結露部分の中央から外部への水蒸気拡散流量密度  $i_a$

$$i_a = \frac{p_{sw} - p_a}{0.5 \cdot 1/\Delta_z + 1/\Delta_a} \quad (24)$$

乾燥期間中に建材部分から外部へ蒸発していく水量  $W_V$

$$W_V = t_V \cdot (i_i + i_a) \quad (25)$$

Fig.4 外壁での乾燥期間中の水蒸気拡散線図計算式 (Fig.3と対応)

<文献>

- 1) 木村幸一郎; 建築計画原論; 共立出版株式会社 (1997)
- 2) 田中辰明, 柚本玲; 建築物理学講座「湿り空気と湿り空気線図」; 建築仕上技術; Vol.32, No.381 (2007/4) p.148-149
- 3) 田中辰明; 防寒構造と暖房; 理工図書 (1997)
- 4) H.Recknagel, E.Sprenger und E.R.Schramek; Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik; Oldenbourg Industrierlag (2006)
- 5) E.Schild, H.F.Casselmann und G.Dahmen, Pohlenz; Bauphysik, Planung und Anwendung; Vieweg (1990)