日本建築学会大会学術講演梗概集
（東海） 2012 年 9 月

一定加熱条件下における含湿壁の温度上昇簡易予測手法

正会員 ○水上点晴* 正会員 田中 哮義**

半無限固体 含水率 フーリエ数

1. はじめに

半無限固体の概念を適用すると x →∞での温度は常に初期温度に保たれることになり、非定常熱伝導の表面温度が瞬時に引き上げ保たれる場合の理論解が、以下のように与えられることが知られている [1]。

$$\frac{T(x,t)-T_0}{T_f-T_0}=1-erf\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)=erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (1)$$

t : 時間 (s) $T(x,t)$: ある点のある時間にお ける温度 (K)
x : 加熱面からの距離 (m) T_f : 加熱側表面温度 (K)
α : 熱拡散率 (m^2/s) T_0 : 初期温度 (K)

本研究ではこの理論に、水分を含む壁が火災加熱を受ける際の蒸発潜熱の影響を加えて、含湿壁の温度上昇を簡易に予測する手法について提案を行う。

水分蒸発について解析上は、水分蒸発はある 1 点（蒸発到達点）でのみ起きており、蒸発到達点が徐々に非加熱側へ移行していくと仮定する。また水蒸気は周囲の温度上昇に影響を与えず、拡散するものとする。

2. 含湿壁の非定常温度分布の数値解

まず前報 [2] で示した 1 次元熱伝導モデルを用いて、数値計算により含湿壁の非定常温度分布を求める。

2. 1計算条件

表 1 に示す壁の物性値を用いて、表面温度を 780℃で一定とした場合について、含水率 φ ＝0～16％で段階的に変化させたときの非定常温度分布を求める。初期温度を 20℃、蒸発温度を 100℃として非加熱側の境界条件は半無限固体近似とした。解析時間刻みを 1 秒として節点距離は 1mm で行った。

表 1 土壁の物性値

	乾燥密度 [kg/m³]	比熱 [kJ/kg K]	熱伝導率 ×10⁻³[kW/m K]
土壁	1360	0.88	0.4

2. 2計算結果

縦軸に無次元温度、横軸にフーリエ数 $1/2F_0^{1/2}$ を用いて、数値解を無次元化して図 1 に示す。

・上記の仮定に基づけば、含湿壁の非定常温度分布も一本の特性曲線に収束することが分かる。

・このとき、非定常温度分布は無次元温度 $\Delta T(x,t)/\Delta T_f=\Delta T_v/\Delta T_f$ となる蒸発到達点で、くの字に折れ曲がることが分かる。

・乾燥壁に比べて、同じ位置の同じ時間すなわち同じフーリエ数における含湿壁の温度上昇は、水分蒸発の影響により抑制され、その温度上昇差は蒸発到達点で最大値をとることが分かる。また含水率 φ が大きくなるにつれて、その差は増大していくことが分かる。

・横軸についていえば、含水率が大きくなるにつれて、蒸発到達点は小さい値をとることが分かる。

・また加熱面と蒸発到達点を結んだ温度勾配は、含水率が小さい時は余誤差関数に近い弧を描き、含水率が大きくなるに従って蒸発到達点 ξ_ϕ が小さい値をとるため、直線に近づくことがわかる。

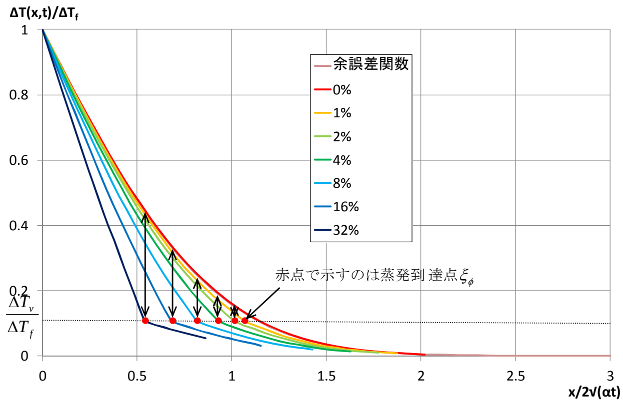


図 1 含湿壁の非定常温度分布（数値解）

3. 含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式

3. 1蒸発到達点での熱収支式

蒸発到達点における入射熱量が、初期温度から水分蒸発温度までの温度上昇と、水分蒸発に消費されるとすると次の熱収支式が成り立つ。

$$\dot{q}''\cdot dA\cdot dt=L_w\phi\rho\cdot dA\cdot dx+C_w\rho\cdot dA\cdot dx\cdot(T_v-T_0) \quad (2)$$

$\dot{q}''$: 単位時間当たりの蒸発 到達点への伝導熱流束 (kW/m^2s)
ϕ : 部材乾燥質量に対する 含水率 (kg/kg)
L_w : 蒸発潜熱 (kJ/kg) ρ : 材料の密度 (kg/m^3)
C_w : 材料の比熱 (kJ/kgK) T_v : 蒸発温度 (K)

蒸発到達点への伝導熱流束は、加熱表面温度と蒸発温度の差を、加熱面からの距離で割った温度勾配に比例すると考え、比例定数 D を用いて次式で表わす。

$$\dot{q}''=D\times\lambda\frac{T_f-T_v}{x} \quad (3)$$

λ : 熱伝導率 (kW/mK)

Simple equation for thermal resistance of moisture containing wall Tensei Mizukami, Takeyoshi Tanaka

ここで、式１で示される乾燥壁内の非定常温度分布が、フーリエ数の余誤差関数として、１本の特性曲線で表わされることを利用して、比例定数Ｄを導く。

３．２比例定数

簡単のため、$\xi=1/2F_0^{1/2}=x/2(\alpha t)^{1/2}$とおいて、あるフーリエ数ξにおける比例定数を考える。図２に示すように、比例定数Ｄは加熱表面での無次元温度と、フーリエ数ξでの無次元温度を直線で結んだ温度勾配θ_2に対する、フーリエ数ξでの接線で表わされる温度上昇過渡期の温度勾配θ_1の比であることから、比例定数をフーリエ数の関数として以下のように示すことができる。

$$D=\frac{\theta_1}{\theta_2}=\frac{erfc'(\xi)}{\left(\dfrac{1-erfc(\xi)}{\xi}\right)}=\frac{\dfrac{2}{\pi}\exp\left(-\xi^2\right)}{\left(\dfrac{erf(\xi)}{\xi}\right)}=\frac{2\xi\cdot\exp\left(-\xi^2\right)}{\pi\cdot erf(\xi)} \quad (4)$$

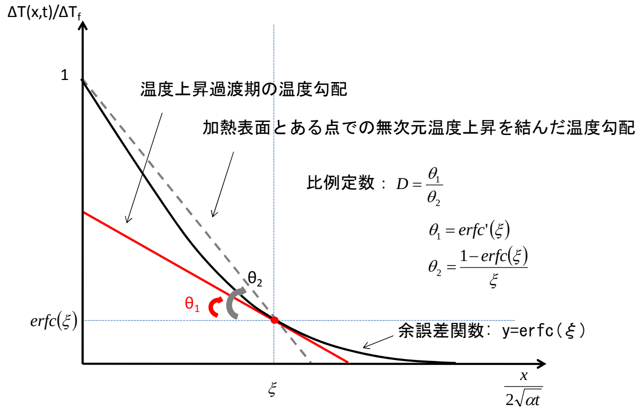


図２　比例定数Ｄの算出

３．３蒸発到達点

式２、３、４を用いて、蒸発到達点を水分量の関数として表わす。式２に式３を代入して両辺を整理すると、

$$dt=\frac{1}{D}\frac{L_w\phi+C_w\left(T_v-T_0\right)}{C_w\left(T_f-T_v\right)}\frac{1}{\alpha}\cdot xdx \quad (5)$$

両辺を積分して$x/2(\alpha t)^{1/2}$で整理すると、

$$\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}=\left(\frac{1}{D}\cdot\frac{1}{2}\frac{C_w\left(T_f-T_v\right)}{L_w\phi+C_w\left(T_v-T_0\right)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

左辺は蒸発到達点であり、また式４から蒸発到達点での比例定数を求めて、式６に代入すると、

$$\xi_\phi=\left(\frac{2\xi_\phi\cdot\exp\left(-\xi_\phi{}^2\right)}{\pi\cdot erf\left(\xi_\phi\right)}\cdot\frac{1}{2}\frac{C_w\left(T_f-T_v\right)}{L_w\phi+C_w\left(T_v-T_0\right)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

蒸発到達点ξ_ϕについて解くと以下のようになる。

$$\frac{\pi}{2}\cdot\frac{\xi_\phi\cdot erf\left(\xi_\phi\right)}{\exp\left(-\xi_\phi{}^2\right)}=\frac{1}{2}\frac{C_w\left(T_f-T_v\right)}{L_w\phi+C_w\left(T_v-T_0\right)} \quad (8)$$

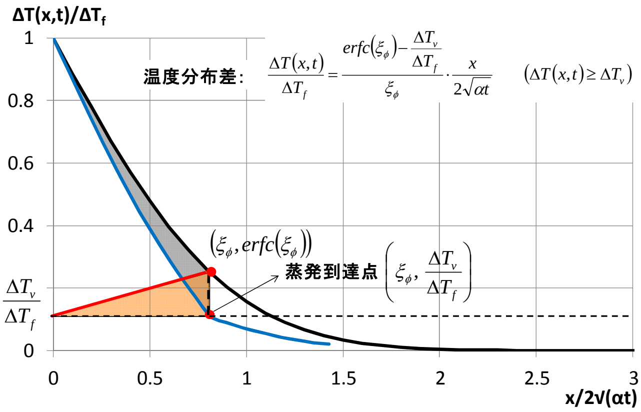
式８は少し複雑なようにも見えるが、右辺は定数であり、それに応じた蒸発到達点ξ_ϕが一意に求められることになる。

３．４含湿壁の非定常温度分布

蒸発到達点を用いて、蒸発完了後の非定常温度分布を求める。図３に示すように、乾燥壁の非定常温度分布と含湿壁の非定常温度分布で囲まれる部分の面積が、（0，$\Delta T_v/\Delta T_f$）と（ξ_ϕ，erfc(ξ_ϕ)）および（ξ_ϕ，$\Delta T_v/\Delta T_f$）の３点を結んだ三角形の面積と等しいと近似すると、乾燥壁と含湿壁の温度上昇差は、０とerfc(ξ_ϕ)を結ぶ直線で示される。

$$\frac{\Delta T(x,t)}{\Delta T_f}=\frac{erfc\left(\xi_\phi\right)-\dfrac{\Delta T_v}{\Delta T_f}}{\xi_\phi}\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad \left(\Delta T(x,t)\geq\Delta T_v\right) \quad (9)$$

そこで乾燥壁の非定常温度分布から、この温度上昇差を差し引いて、含湿壁の非定常温度分布の簡易予測式を求めることができる。



$$\frac{\Delta T_{wet}(x,t)}{\Delta T_f}=\frac{\Delta T_{dw}(x,t)}{\Delta T_f}-\frac{erfc\left(\xi_\phi\right)-\dfrac{\Delta T_v}{\Delta T_f}}{\xi_\phi}\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (10)$$

建築空間における壁を想定した場合、半無限固体の概念を、現実の意味で適用できるわけではない。しかし、安全側の条件設定について配慮すれば実務的な問題に応用することは十分に可能であり、このような簡易予測式は、どんな物理量がどの程度温度上昇に関連しているかを洞察する上で有益である。

参考文献

1) 田中：建築火災安全工学入門，日本建築センター，2002

2)水上，田中：水分を含む壁の温度停滞時間の数値解析，建築学会大会，2011

*　ベターリビング　　　*　Center for Better Living

**　京都大学名誉教授　　　**　Professor Emeritus at the Kyoto University