

水分を含む壁の温度停滞時間の数値解析

正会員 ○水上点晴* 正会員 田中 孝義**

熱電対 含水率 温度停留

1. はじめに

筆者らは、既存土壁を生かした防火改修方法として土壁の塗り足し、および杉板又は石膏ボードを張り足した場合の効果を評価するため、ISO 標準加熱曲線を用いた耐火実験による検討を行なった⁽¹⁾。

通常、水分の含まれている壁を加熱すると100℃付近での温度停滞が見られる。停滞する長さは加熱表面においては短く、非加熱側に移るほど長くなる傾向がみられる。これは石膏ボードのような水分を水和物として持つ材料でもよく観察されることで⁽²⁾、我々の研究においても同様の傾向が見られた。

しかし理論上は、ある大きさを持たない無限小の点の温度停滞時間は一瞬のはずであり、厳密な1点ではなく、熱電対の大きさによって周囲の温度の影響を受けていると考えられた。そこで本研究では、実験においては無限に細くするわけにいかない熱電対の大きさについて、数値解析による検討を行い、壁体の分割を細かくすれば、停滞時間がなくなることを確認する。

2. 1次元熱伝達モデル

図1に示すような有限の幅 x を持つ壁を幅方向に分割して、点線で示すようなコントロールボリューム内の熱収支を考える。表面温度は与条件として与えられるので、端部のみは厚さを $\Delta x/2$ とする。

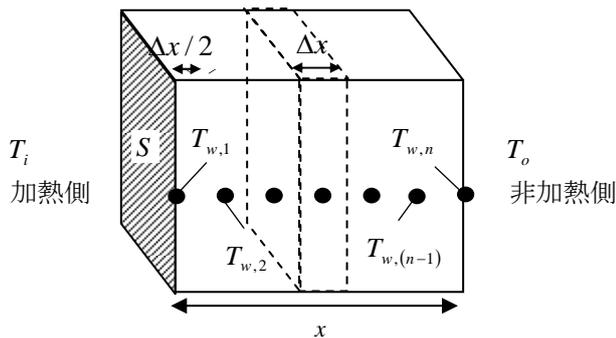


図2 1次元熱伝達モデル

まず熱エネルギーの保存から、壁体内(加熱側からI番目の点)について、以下の式が成り立つ。

$$\rho C_p \Delta x S \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda \frac{T_{w,(l-1)} - T_{w,l}}{\Delta x} - \lambda \frac{T_{w,l} - T_{w,(l+1)}}{\Delta x} \right) S - \phi \Delta x L_v \quad (1)$$

この式を基に、壁体内の温度を与える式が得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\Delta x^2 \rho C_p} \left(T_{w,(l-1)} - 2T_{w,l} + T_{w,(l+1)} - \frac{\phi L_v \Delta x^2}{\lambda} \right) \quad (2)$$

加熱側表面、非加熱側表面で対流と輻射による熱の流入、流出を考え、以下の式が成り立つ。

加熱側表面

$$\rho C_p \frac{\Delta x}{2} S \frac{\partial T}{\partial t} = h_i (T_i - T_{w,0}) S + \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{w,0}^4) S - \lambda \frac{T_{w,0} - T_{w,1}}{\Delta x} S - \phi \Delta x L_v \quad (3)$$

この式を基に加熱側表面の温度を与える式が得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2}{\Delta x \rho C_p} \left\{ \begin{array}{l} h_i (T_i - T_{w,0}) + \varepsilon_i \sigma (T_i^4 - T_{w,0}^4) \\ - \lambda \frac{T_{w,0} - T_{w,1}}{\Delta x} - \phi \Delta x L_v \end{array} \right\} \quad (4)$$

非加熱側表面

$$\rho C_p \frac{\Delta x}{2} S \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{T_{w,(n-1)} - T_{w,n}}{\Delta x} S - h_o (T_{w,n} - T_o) S - \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) S - \phi \Delta x L_v \quad (5)$$

同様に非加熱側表面の温度を与える式が得られる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{2}{\Delta x \rho C_p} \left\{ \begin{array}{l} \lambda \frac{T_{w,(n-1)} - T_{w,n}}{\Delta x} - h_o (T_{w,n} - T_o) \\ - \varepsilon_o \sigma (T_{w,n}^4 - T_o^4) - \phi \Delta x L_v \end{array} \right\} \quad (6)$$

ただし、水分の蒸発による吸熱は、コントロールボリュームが規定の温度(沸点または水和物の分解温度)に達した時点から、内部の水分量が0になるまで起こるものとする。

T: 温度 [K]

 C_p : 比熱 [kJ/kg·K]S: 表面積 [m²]h: 熱伝達率 [kW/m²·K] ε : 輻射伝達率 σ : ステファンボルツマン定数

n: 接点数

3. 境界条件と壁体の熱特性

実験で用いた標準加熱曲線 T_f は式7で表わされる。

$$T_f = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad t: \text{時間(分)} \quad (7)$$

熱伝達率、輻射伝達率は表1の値を用い、外気温度は20℃で一定とした。

表1 環境条件

	熱伝達[kW/m ² K]	輻射伝達率
加熱側	0.03	0.8
外気側	0.01	0.8

土壁の物性値を表2に示す。乾燥密度については実験サンプルによる実測値を用い、比熱と熱伝達率につ

いては実験より得られた熱拡散率より推定した。輻射率は一律 0.8 として与える。

表 2 物性値一覧

	乾燥密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kgK]	熱伝導率 × 10 ⁻³ [kW/m K]	含水率 [%]
土壁	1360	1.0	0.4	3.8

4. 計算条件

試験体 A-⑥(土壁総厚 70)⁽¹⁾ を計算モデルとして、壁体内の節点数を 8~64 に変化させる。節点数と節点距離の関係は以下の通りである。

表 3 節点距離

節点数	8	16	32	64
節点距離 Δx(mm)	10	4.7	2.3	1.1

5. 計算結果

図 3 (a)~(d) に各接点距離における壁体内の温度変化を示す。図に示す位置は実験で熱電対による測定を行った位置と対応している。

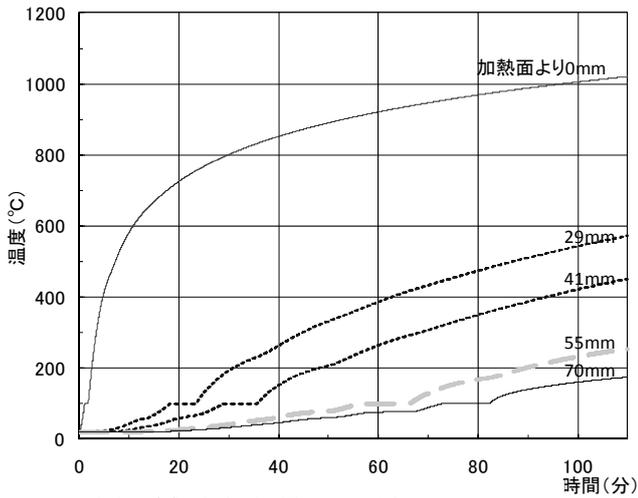


図 3 (a) 計算結果 (接点数 8、Δx=10)

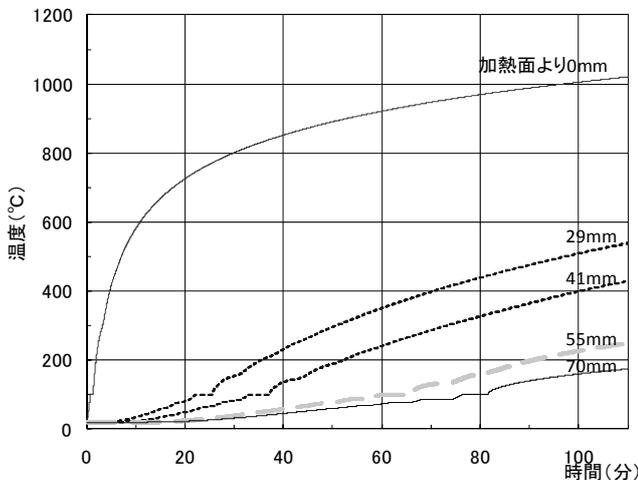


図 3 (b) 計算結果 (接点数 16、

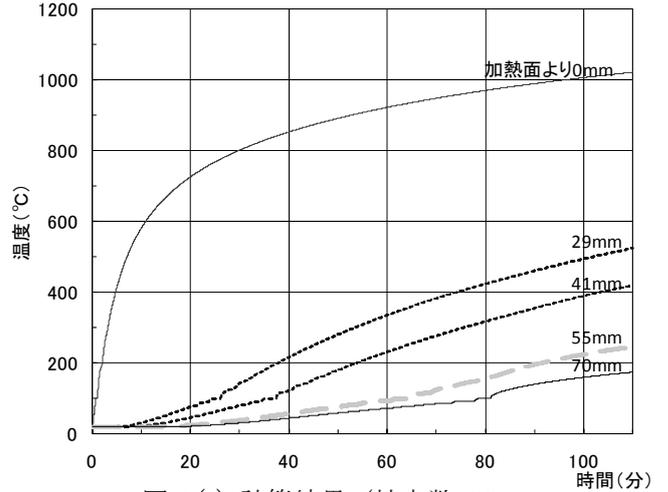


図 3 (c) 計算結果 (接点数 32、

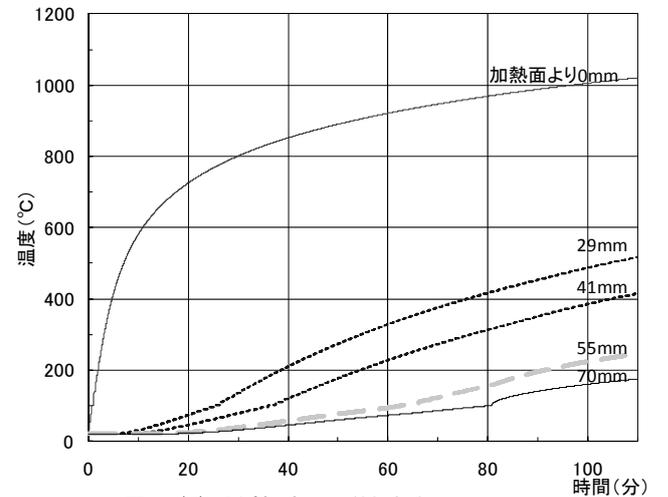


図 3 (d) 計算結果 (接点数 64、

節点数を増やすにつれ温度停留が見られなくなる。実験で観測された停留は図 3 (a) に近い。内部温度は、JIS C 1605 に規定するクラス 2 の性能を持つ線径 0.65mm の K 熱電対で測定しており、水分蒸発に関して熱電対自体の大きさに加え、温度が高い方からの水分の移動の影響も考えられる。

6. まとめ

1 次元熱伝達モデルを作成し、実験で観測された現象について数値解析による検討を行い、実験で観測される温度停留は、微視的にみれば存在せず、熱電対自体の大きさや水分移動が影響していると考えられた。

参考文献

- 1) 水上, 北後, 田中: 既存土壁を生かした防火改修方法の実験的検討, 建築学会環境系論文集, 2011. 2
- 2) Samuel Manzello, Tensei Mizukami: Measurement of Thermal Properties of Gypsum Board at Elevated Temperature, 5th International Conference on Structures in Fire, 2008

* ベターリビング
** 京都大学防災研究所

* Center for Better Living
** Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University