

5) 内田博士記念研究助成

5) - 1 木造家屋火災時における火の粉の発生に関する基礎的研究

Study on the Generation of Firebrands from Fire-involved Wooden Buildings

(研究期間 平成 26 年度)

防火研究グループ
Dept. of Fire Engineering樋本圭佑
Keisuke Himoto

Spotting of firebrands is considered as one of the major causes of fire spread between buildings in case of urban fires. Although it is empirically known that firebrands released from fire-involved wooden buildings generally gather around a corner of intersection of building members in the downwind, existing research focuses only on the ignition of 1D material. In this study, 2D heat conduction equation for an orthogonally intersected plates was modified and reduced to 1D equation by assuming a similar temperature profile in the depth-wise direction. In order to validate this model, an experimental apparatus which can be installed onto the ISO-standardized cone calorimeter was designed and built.

〔研究目的及び経過〕

延焼火災において、火の粉は主要な延焼拡大要因と考えられているが、どういった条件の下で着火が起こるのかについて定量的な知見が不足している。火の粉は大きなものであれば単体で着火をもたらす可能性があるが、ほとんどの火の粉は小さなものが多く、これらが集積して着火を起こしている場合が多いものと考えられる。また、建物周辺でこうした火の粉が集積するのは、平坦な部位というよりも、風の吹き溜まりとなる建物の隅角部が多いものと考えられるが、こうした条件の下での着火条件の分析例はほとんどない。そこで、建物の隅角部に火の粉が集積した場合に、隅角部周辺がどのような加熱状況となるのかを明らかにすることを目的とする。

〔研究内容〕

1) 集積した火の粉による部材温度上昇モデル

まず、火の粉による加熱強度と、可燃物の材種や厚みなどの条件を変数とする温度上昇予測モデルを作成する。本検討で扱う可燃物は、図 1 に示すような平板を 2 枚突き合わせたものとする。ここで、y 軸方向の温度分布は一様であるとし、簡単のため水分蒸発に伴う物性の変化などはないものと仮定すると、可燃物内の温度分布は 2 次元の熱伝導方程式として次のように表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

可燃物内部の温度変化は、式(1)を適当な初期条件、境界条件の解くことで求めることができるが、ここではこれを簡略化し、1次元問題に帰着させることを考える。まず、式(1)を x 方向に積分すると、

$$\frac{d}{dt} \int_0^\infty \Delta T dx = \frac{1}{\rho c} \left(\lim_{x \rightarrow \infty} \left(k \frac{d\Delta T}{dx} \right) + k \frac{d^2}{dz^2} \int_0^\infty \Delta T dx \right) \quad (2)$$

ここで、右辺第 1 項が、同じ z 軸上の温度上昇 ΔT_m に比例し、x 方向の温度浸透厚さ b に反比例すると考え、

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \left(k \frac{d\Delta T}{dx} \right) = -\beta k \frac{\Delta T_m}{b} \quad (3)$$

また、 ΔT が、

$$\Delta T = \Delta T_m \cdot \phi \left(\frac{x}{b} \right) \quad (4)$$

のように相似形を保っているとすれば、式(3)と式(4)を式(2)に代入し、定積分が定数になることに留意して、

$$\frac{d}{dt} (b \Delta T_m) = -\beta \alpha \frac{\Delta T_m}{b} + \alpha \frac{d^2}{dz^2} (b \Delta T_m) \quad (5)$$

これを z 方向に積分した上で、部材の z 方向の広がり l は x 方向に比べて小さいことを考慮すると、

$$\rho c \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\alpha t} \int_0^L \Delta T_m dz \right) = -\gamma \frac{k}{\sqrt{\alpha t}} \int_0^L \Delta T_m dz + \sqrt{\alpha t} \left(-k \frac{d\Delta T_m}{dz} \Big|_{z=0} - \left(-k \frac{d\Delta T_m}{dz} \Big|_{z=L} \right) \right) \quad (6)$$

炭化層の保存式についても未燃層と同じような手続きで保存式を導くことができるが、炭化の幅が火の粉の幅 D に一致するものと仮定して、次式を得る。

$$\rho c D \frac{d}{dt} \int_0^{\delta_C} \Delta T_m dz = \frac{-\beta k_C}{D} \int_0^{\delta_C} \Delta T_m dz + k_C D \left(-k \frac{d\Delta T_m}{dz} \Big|_{z=0} - \left(-k \frac{d\Delta T_m}{dz} \Big|_{z=\delta_C} \right) \right) \quad (7)$$

以上の基礎式にプロファイル法を適用することで、部材の温度上昇や炭化進行などの状態変化を予測する式を導く。まず、部材の炭化が始まるまでについては、部材内の温度分布に 2 次関数を仮定し、境界条件を当てはめることで次式を得る。

$$T_V = \frac{\dot{q}''}{2k_V \delta} (z - \delta)^2 + T_\infty \quad (8)$$

これを、未燃層の基礎式(6)に代入すると、

$$\frac{d\delta}{dt} = 3\alpha_V - \frac{1+2\gamma}{4} \frac{\delta}{t} \quad (9)$$

ただし、温度浸透厚さが裏面に到達した場合については、境界条件が異なることから、部材内の温度分布は、

$$T_V = \frac{\dot{q}''}{2k_V L} (z - L)^2 + T_B \quad (10)$$

これを、未燃層の保存式(7)に代入することで、

$$\frac{dT_B}{dt} = \frac{\dot{q}''}{\rho_V c_V L} \left\{ 1 - \frac{L}{12\alpha_V t} (1+2\gamma) \right\} - \frac{T_B - T_\infty}{t} \left(\frac{1+2\gamma}{2} \right) \quad (11)$$

を得る。炭化層の形成が始まって以降についても同様の手続きを採用することで部材内の状態変化を予測することができる。

2) モデル検証のための実験装置の設計・製作

上に示した計算手続きの妥当性を確認するにあたり、図 1 に示すようなコーンカロリメーターに設置可能な模型を製作した。ここでは厚さ 10mm のケイ酸カルシウム板 2 枚を突き合わせ、裏面に厚さ 25mm のセラミックボードを重ね合わせている。隅角部に沿うように火の粉を配置した場合の部材内部の伝熱過程を確認できるよう、表面が滑らかになるように熱流計（1 点）と熱電対（表面 12 点、裏面 11 点）を埋め込んである。

使用する火の粉は、立方体の木片をガスバーナーで加熱して作成した。材種は代表的な建築材料である杉とし、寸法は 2 種類（一辺が 1cm と 2cm）を検討する。燃焼条件を一定に保つには、火の粉の作成手順を規格化する必要がある。ここでは、鉄製網に木片を入れて、直径 26mm の円形卓上バーナーにより一定時間加熱する。加熱時間が短ければ途中で燃え止まり、長ければ短時間で燃え尽きてしまうことから、その後の燃焼状況を考慮しながら一辺 1cm の木片を 30s、一辺 2cm の木片を 60s 加熱した。

一辺 2cm の燃焼木片 3 つを隅角部に設置した場合の温度測定値を図 2、3 に示す。火の粉を設置してから 1 分では、火の粉の上方に火炎が形成され、部材鉛直面に沿って温度上昇が顕著となった。ただし、本検討では、実験手続きの簡便さを考慮して一辺 2cm と比較的大きな木片を使用したため、炭化による凹凸の形成によって部材との接触面積が減り、最奥部の O 点の温度上昇は最も低くなった。この傾向は一辺 1cm の木片でも同じであった。設置してから 6 分では、火の粉は消炎し、火の粉の上方の温度上昇は低下した。これに対し、火の粉が接触する部位（-a3、-a2、a2、a3 の各点）の温度は、

設置 1 分後と同じかそれより高い値となった。また、この段階になると、部材表面と裏面で温度が相似形に近づいており、式(4)で導入した仮定が妥当であることが示された。

今後、さらに検討を進めて、飛び火による延焼発生過程を明らかにしていく。

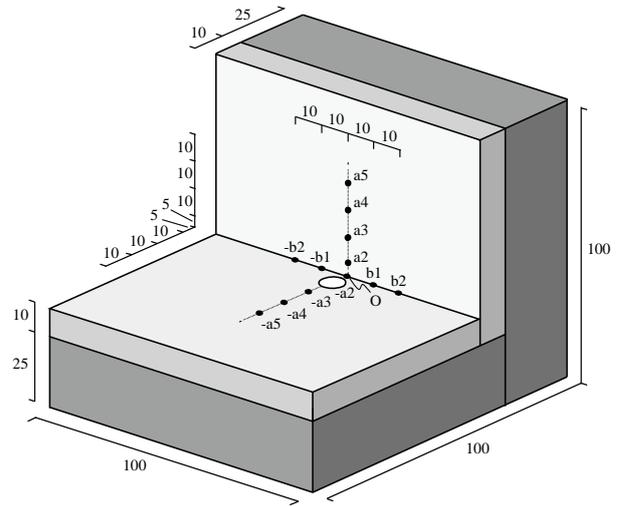


図 1 火の粉の着火性試験装置

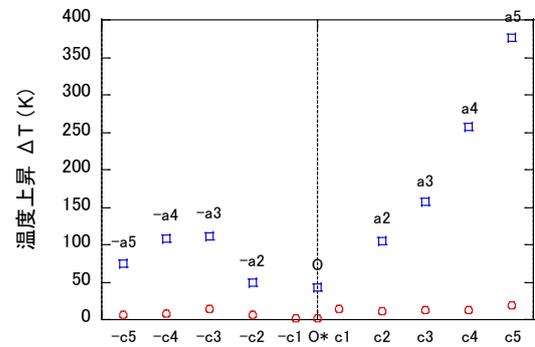


図 2 部材表裏面の温度上昇（設置から 1 分後）

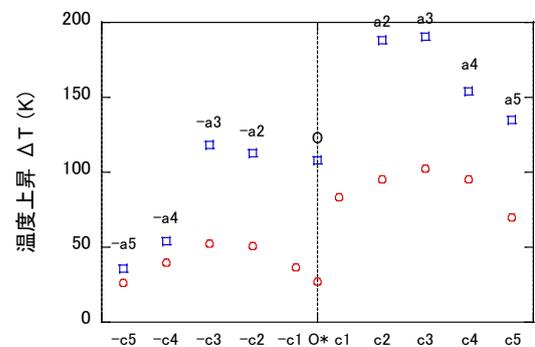


図 3 部材表裏面の温度上昇（設置から 6 分後）