

## 論文の内容の要旨

**論文題目： Behavior of Flames Spreading over Napped Fabrics**  
(起毛生地の上に沿った燃え拡がり現象)

氏名 CHARUCHINDA Sireerat  
(チャルチンダ シリラット)

### 1. まえがき

火災は現代社会においても重大な災害であり、日本国内で1年間に2000人以上の尊い生命が奪われ、7000人以上の人が負傷している。火災の防止や被害の抑制のためには、火災現象を的確に理解する必要がある。特に、可燃性固体に沿った燃え拡がり現象は、火災の拡大に直接関わる重要な現象であり十分な解明が必要である。繊維製品では、肌触りや保温性を向上させるため、表面を毛羽立てて使用することがしばしばおこなわれる。このような毛羽立った生地（これを起毛生地と称す）では、条件により表面の起毛繊維に沿って火災が非常に高速に燃え拡がる表面フラッシュと呼ばれる現象が発生することが知られている。これは、着衣に燃え移った火が高速に拡がるなどの危険な状況を引き起こす重大な現象であるにもかかわらず、あまり研究されておらず、その発生機構等は明らかになっていない。

そこで本研究では、表面フラッシュの発生機構を明らかにするために、起毛生地の表面に沿った下方燃え拡がり現象の挙動を調べ、起毛生地に沿って下方に燃え拡がる火炎先端付近の温度分布を詳細に測定し、火災の熱的構造を明らかにし、表面フラッシュの燃え拡がり機構について考察する。

## 2. 起毛の程度の評価

起毛の程度を定量的に評価するために、Image Processing Technique を用いた新しい評価手法を開発した。起毛処理前後の生地断面の画像を処理し、繊維の存在分布を表す binary images を作成した。生地中心面に平行な面内での繊維の存在する比率である bright pixel ratio を、生地中心面からの距離  $Y$  を変えながら測定し、その分布を調べた。この分布は起毛の密度分布に相当している。図1に、起毛処理前後の生地の density distribution profiles を示す。

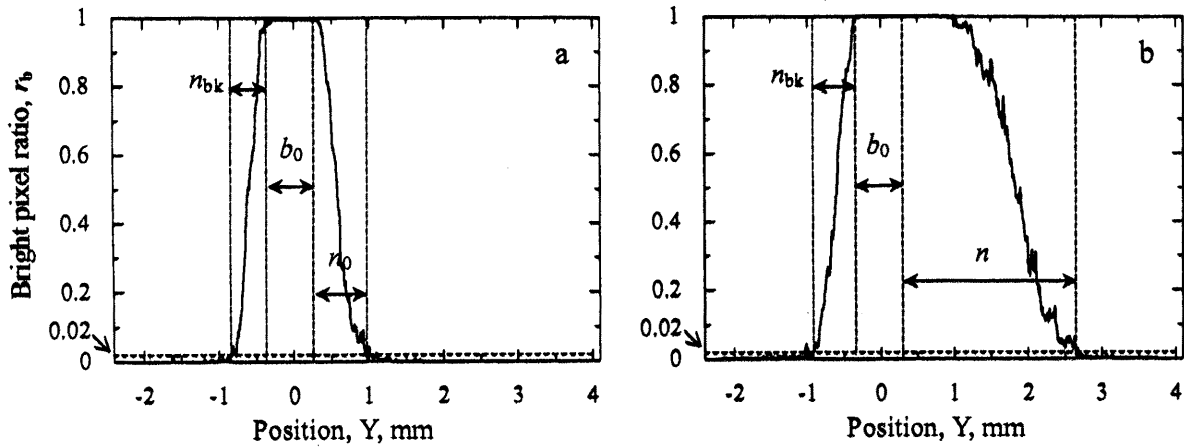


図1 Density distribution profiles (a) 起毛処理前の生地 (b) 起毛処理後の生地

図1に示したように、起毛状態を表すために、以下の値を導入した。

- $b_0$  起毛処理前の生地基部厚さ
- $n_0$  起毛処理前の生地の起毛層の厚さ
- $n$  起毛処理後の生地の起毛層の厚さ

特に、 $n$  は起毛の程度を表す特性値であり、「起毛層厚さ」と呼ぶこととした。

## 3. 起毛生地の表面に沿った燃え拡がり現象

### 3.1 起毛生地の表面に沿った燃え拡がり挙動

起毛生地の表面に沿った鉛直下方燃え拡がり現象について、図2に、起毛層厚さを変化させた場合の燃え拡がり挙動の変化の測定結果を示す。図2に示すように、3種類の燃え拡がり挙動が観察された。すなわち、生地を起毛処理し、起毛層厚さを増大させていくと、燃え拡がりには、「表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり」、「断続的の表面フラッシュを伴う燃え拡がり」、「持続する表面フラッシュ」の3種類の異なる様相に変

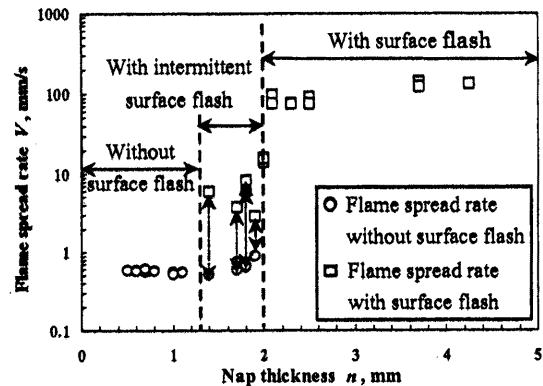


図2 火炎燃え拡がり速度と起毛層厚さの関係

化することが分かった。この生地については、2 mm が表面フラッシュの発生する限界の起毛層厚さであることが分かった。また、表面フラッシュの燃え拡がり速度は、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がりの速度の 100 倍以上になることも分かった。現象が不連続的に変化し、燃え拡がり速度の変化も激しいことから、表面フラッシュの燃え拡がり機構は、固相の熱分解の進行とともに進む通常の燃え拡がりとは大きく異なっていることが推定される。

### 3.2 表面フラッシュ通過前後の生地断面変化

表面フラッシュ通過前後の生地断面の画像からそれぞれの density distribution profiles を作成し、起毛層の厚さを測定した。特に表面フラッシュ通過後の生地の起毛層の厚さを  $n_u$  とした。これは燃え残った起毛の厚さに相当する。表面フラッシュ通過前の起毛層厚さ  $n$  と表面フラッシュ通過後の燃え残った起毛層厚さ  $n_u$  と  $n - n_u$  の関係を図 3 に示す。

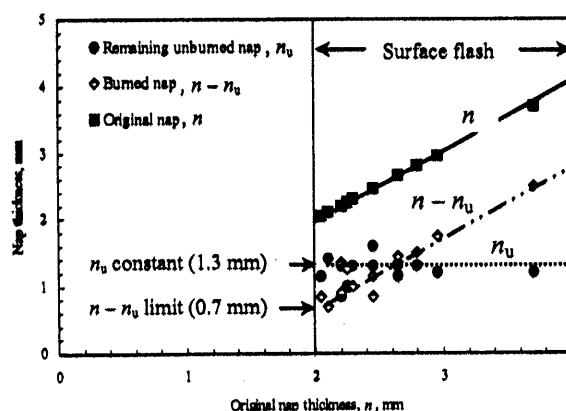


図 3 表面フラッシュ通過前後の起毛層の厚さ  $n$ 、 $n_u$  及び  $n - n_u$  の関係。

図 3 より、表面フラッシュ通過時に消費された起毛層の厚さ  $n - n_u$  は  $n$  と平行な直線となること、すなわち燃え残る起

毛層厚さ  $n_u$  はほぼ一定 (1.3 mm) であることが分かった。この 1.3 mm は火炎が生地表面に近付ける限界距離である standoff distance に相当すると考えられる。これらより表面フラッシュが発生する条件を  $n > (d_{st} + n_{min})$  と表現することができる。ここで、 $d_{st}$  は standoff distance (本研究では 1.3 mm)、 $n_{min}$  は表面フラッシュの維持に必要な最少の起毛層の厚さ ( $n - n_u$  の最小値、本研究では 0.7 mm) である。

### 4. 起毛生地表面に沿って燃え拡がる火炎の熱的構造

ここでは、起毛生地に沿って下方に燃え拡がる火炎先端付近の温度分布を詳細に測定し、火炎の熱的構造を明らかにし、表面フラッシュの燃え拡がり機構について考察した。

下方に燃え拡がる表面フラッシュ火炎近傍の温度分布を熱電対を用いて測定し、通常の燃え拡がり時との比較をおこなった。図 4 に、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時と、表面フラッシュ発生時の温度変化を示す。いずれも  $y = 2.0$  mm ( $y$  は生地表面からの距離) に設置した熱電対で測定した温度変化をプロットした。火炎先端が、配置した熱電対を含む水平面に達した時刻を  $t = 0$  とした。これらの温度変化を比較すると、表面フラッシュ発生時には、通常の燃え拡がり時に比べかなり高速に温度が変化することが分かる。これは双方の燃え拡がり速度の違いに起因していると考えられる。

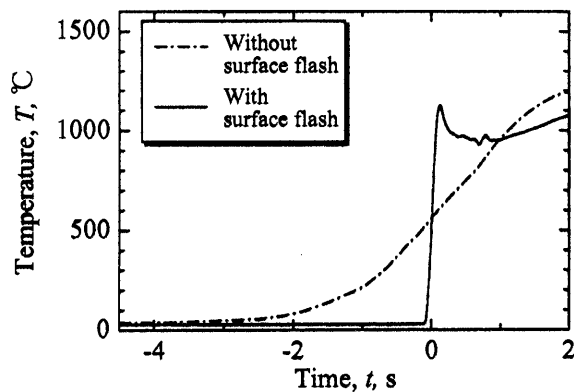


図4 温度のT-t図形 ---表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時  
 ——表面フラッシュ発生時 (y=2 mm)

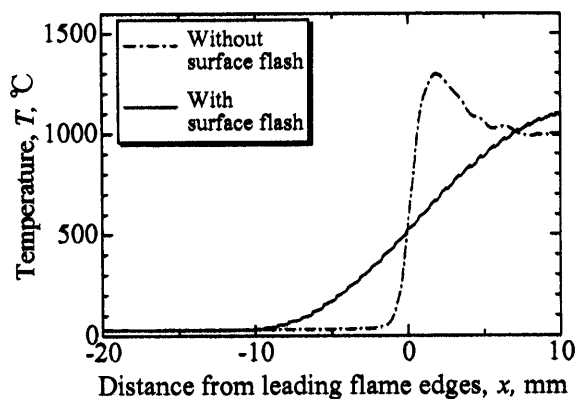


図5 温度の空間分布 ---表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時  
 ——表面フラッシュ発生時 (y=2 mm)

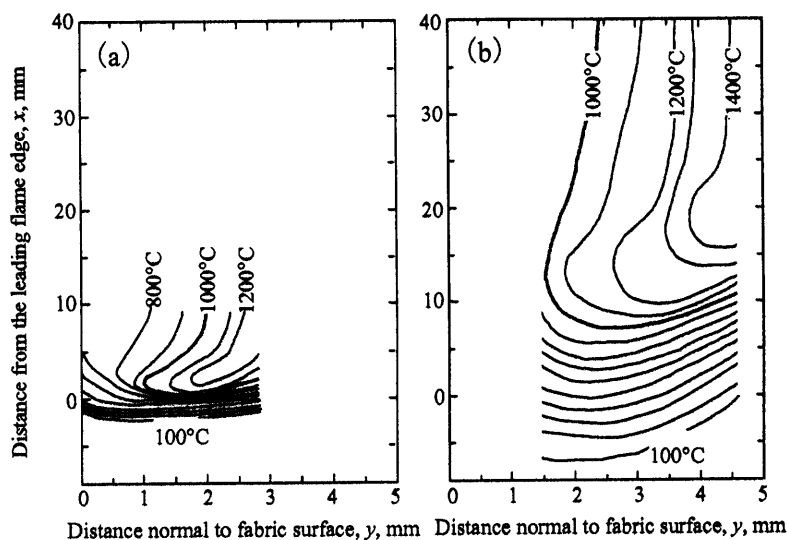


図6 等温線で表した温度分布 (a) 表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時 (b) 表面フラッシュ発生時

燃え拡がり現象は準定常現象であるので、燃え拡がり速度を用いて温度の時間変化を空間分布に換算した。図5に、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時の温度分布と、表面フラッシュ発生時の温度分布を示す。これらの温度分布を比較すると、通常の燃え拡がり時には、表面フラッシュ発生時に比べかなり急激な温度変化を火炎付近で伴うことが分かる。温度の時間変化では表面フラッシュ発生時の方が急激な温度変化を示したが、空間分布に換算して見ると、逆に表面フラッシュ発生時の方が変化が穏やかであることが明らかになった。

図6に、火炎付近の2次元温度分布を示す図を作成した。火炎前方の等温線の分布を見ると、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時の方が、特に火炎先端前方付近でのx方向(鉛直方向)の等温線の間隔が密になって勾配が険しくなっていることが分かる。

これは、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時には、高温の燃焼ガスが浮力で上昇するため生じる火炎近傍での上昇気流が十分に発達しているためと考えられ、一方表面フラッシュ時には、燃え拡がり速度が速いため上昇気流は十分に発達できないためと考えられる。また、ほぼ火炎の外周であると考えられる1000°Cの等温線的位置を見ると、火炎先端の位置の違い

いが分かる。すなわち、通常の燃え拡がり時の火炎先端部分は生地表面から約 1.0 mm 離れた位置に存在するのに対し、表面フラッシュ発生時の火炎先端部分は生地表面から約 1.5 mm 程度離れていることが分かる。これより、表面フラッシュを伴う通常の燃え拡がり時と表面フラッシュ発生時の火炎の熱的構造が異なっていることが分かる。表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がりの場合には、火炎前方の未反応固体（生地）への熱移動で燃え拡がり挙動が支配されると考えられる。可燃性気体の大部分は、生地の熱分解により供給され、毛羽の熱分解により供給される可燃性気体は燃え拡がりにほとんど影響を与えないと考えられる。一方表面フラッシュ時の燃え拡がりの場合には、前方の未反応固体（生地）への熱移動の燃え拡がりへの寄与は小さいと思われる。この場合は、可燃性気体の大部分は毛羽の熱分解により供給されると考えられる。

## 5. 起毛生地の上に沿った燃え拡がり機構

起毛生地の上に沿った燃え拡がり現象を記述するためのモデルを作成し、燃え拡がり機構について考察した。

### 5.1 表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時

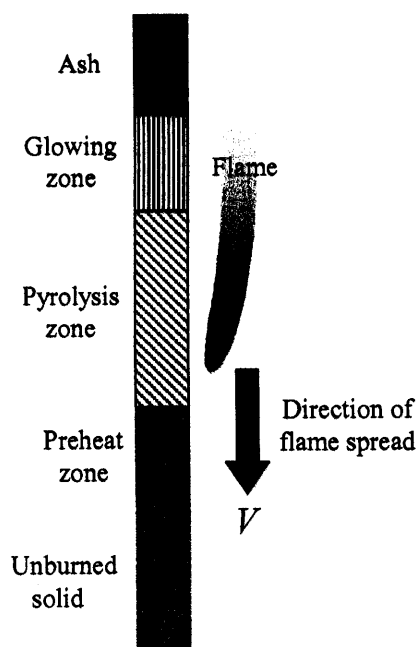


図 7. 表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時のモデル。

表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時の現象には、生地表面への熱移動が現象を支配する薄い固体に沿った燃え拡がりのモデルが適用可能であると考えられる。モデルは図 7 のようになり、以下の式 (1) が得られる。

$$V = \frac{l}{t_p} = l \cdot \frac{\lambda_g (T_f - T_0)}{d} \cdot \frac{2}{\rho_s c_p \delta (T_p - T_0)} \quad (1)$$

起毛の存在の影響としては、火炎先端と生地表面との間の空間の熱伝導度  $\lambda_g$  の変化と、起毛から可燃性ガスが発生することである。起毛層中での起毛の密度を測定したところ。密度は  $0.003 \text{ g/m}^3$  程度であり、発生する可燃性ガスは生地基部から発生する可燃性ガス量に比べてほとんど無視でき、また  $\lambda_g$  の変化も 2% 程度でほぼ無視できることが分かった。

つまり、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり時には以下の点が明らかになった。

- (a) 試料表面への熱移動が現象を支配している。
- (b) 毛羽は試料表面への熱移動や可燃性ガスの供給にほとんど影響を及ぼさない。
- (c) モデルより、燃え拡がり速度は  $n$  にほとんど依存しない。

## 5.2 表面フラッシュ発生時

表面フラッシュ発生時には、起毛層の表面部分のみしか消費されないこと及び燃え拡がり速度が非常に大きいことより、gas phase flame propagation に類似した機構により燃え拡がりが進行していると考えられる。そこで、火炎前方の起毛層が熱分解し、発生した可燃性ガスが燃焼反応帯で燃焼する図 8 に示すモデルを作成した。定常燃え拡がりを仮定し、燃焼による発熱と温度上昇及び熱分解に必要な熱量のバランスから燃え拡がり速度  $V$  が式 (2) で表されることを導いた。

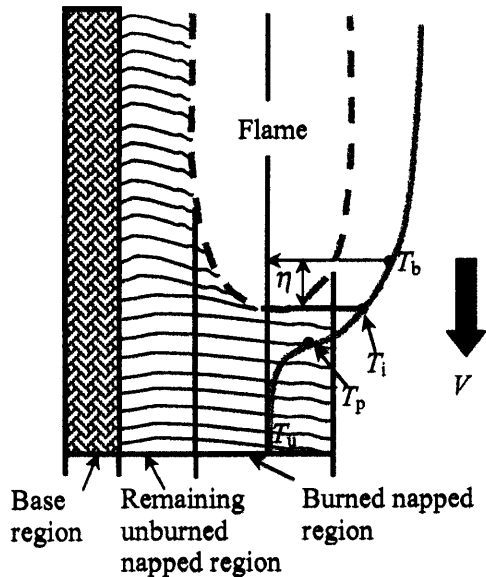


図 8. 表面フラッシュ発生時のモデル。

$$V = \sqrt{\frac{w\bar{\lambda}(T_b - T_i)}{\bar{\rho}_n^2(\Delta h_p + \bar{c}_p(T_b - T_p))}} \quad (2)$$

ここに、 $\rho_n$  は起毛密度、 $\Delta h_p$  は起毛の熱分解に必要な熱量、 $w$  は燃焼反応速度である。この式に加えて、生地基部への熱損失を standoff distance により表すことにより表面フラッシュの発生限界について説明することが出来る。

これらより、表面フラッシュ発生時には、起毛密度、起毛の熱分解に必要な熱量、燃焼反応速度及び standoff distance が現象を支配する重要な要因であることが分かった。

## 6. 結論

本研究では、起毛生地（毛羽立った生地）の表面に沿った燃え拡がり現象の解明を目的として、起毛の状態と燃え拡がり挙動の関係及び燃え拡がり機構について実験を中心に検討し、以下の結果を得た。

- ・生地断面を拡大観察し Image Processing Technique を用いることで起毛層の状態を定量化する手法を開発した。起毛層厚さ  $n$  が起毛層の状態を表す指数となる。
- ・起毛層厚さが厚くなるとともに燃え拡がり挙動は、表面フラッシュを伴わない通常の燃え拡がり・断続的表面フラッシュを伴う燃え拡がり・持続する表面フラッシュの 3 種類に変化する。燃え拡がり速度は不連続的に変化し、表面フラッシュ時の燃え拡がり速度は、表面フラッシュを伴わない場合に比べて 100 倍以上大きくなる。

- ・表面フラッシュ通過後の生地に残存起毛長さがほぼ一定値であることから、表面フラッシュが発生し得る限界の起毛層厚さは、火炎が生地基部に接近出来る限界である standoff distance に表面フラッシュを維持するために必要な最小の起毛層厚さを足したものになると考えられる。
- ・燃え広がる火炎近傍の温度分布の測定結果から、表面フラッシュを伴わない通常の燃え広がり時と表面フラッシュ時では火炎近傍の熱的構造の差異があることが明らかになった。通常の燃え広がり時には生地基部への熱移動が燃え広がりに大きな影響を与えるのに対し、表面フラッシュ時にはむしろ火炎が移動する前方の起毛層への熱移動が重要となる。
- ・表面フラッシュが発生しない場合には、固体表面に沿った燃え広がりの既存のモデルが適用でき、この場合には起毛層の存在が燃え広がり速度にほとんど影響を与えないことが示された。表面フラッシュ時については、起毛層への熱移動、熱分解及び生地基部への熱損失を考慮した新しいモデルを提案した。モデルにより表面フラッシュの発生限界が説明でき、起毛層密度、熱分解に必要な熱量、燃焼反応速度及び standoff distance が重要な支配因子となることが示された。