

ベッドマットレスの燃焼性状に関する研究

ポケットコイルタイプの燃焼拡大メカニズムの実験的検討

Study on Fire Behavior of Bed Mattress

Discussion about burning spread model of pocket spring mattress

木村 和貴 (K112606)

Kimura Kazutaka (K112606)

1. 研究背景

1.1. 火災発生件数と火災による死者数

2000～2009年の総務省消防庁による火災報告データを用いて、住宅火災の発生件数（以下、住宅火災件数）と住宅火災のうち居室で発生した火災の件数（以下、居室火災件数）と、その死者数（以下、居室火災死者数）と住宅火災全体の死者数（住宅火災死者数）を図1に示す。

図1より住宅火災件数、居室火災件数、住宅火災全体の死者数、居室火災死者数、の総数は N=183,055、69,740、13,244、9,790 件であった。図1より2000～2009年の各年の住宅火災発生件数約18000件のうち、居室火災件数は7,000件程度であるのに対し、住宅火災死者数約1200件のうち、居室火災死者数は1,000件近くに上ることから、居室における火災の危険度は高いと考えられる。

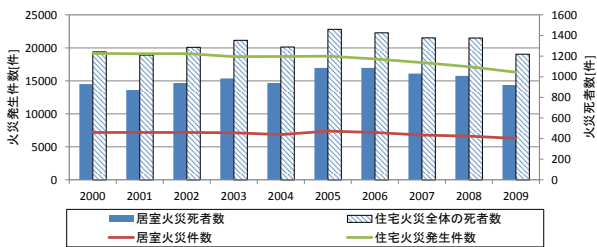


図1 居室火災発生件数と住宅火災・居室火災死者数

1.2. 着火物の種類別の占める割合

同様に2000～2009年の火災統計より、建築火災のうち居室で発生した居室火災件数と居室火災死者数ごとに、着火物の種類別の全体に占める割合を図2に示す。居室火災別、居室火災死者別の原因となる着火物は両者とも「ふとん・座ぶとん・寝具」の割合が最も多く、割合としては両者ともに全体の約1/5を占め、1.1.の項と合わせ、寝具類を着火物とした居室における火災の発生件数と犠牲者が最も多いことが分かる。

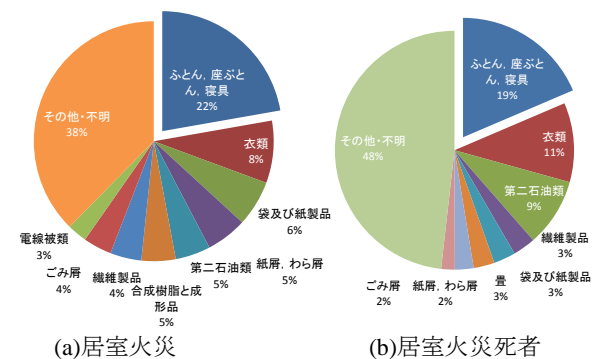


図2 住宅火災のうち居室火災における着火物種類別の割合

1.3. CFR1633 について

次に、アメリカのベッドマットレスの難燃化に関する規制について述べる。アメリカではアメリカ国立標準技術研究所、通称：NIST(National Institute of Standards and Technology)のベッドマットレスの燃焼実験データを用い、カリフォルニア州でTB603というベッドマットレスの難燃化の規制が施行された。2007年1月にはアメリカ全州において、CPSC(Consumer Product Safety Commission)の定める、TB603と同じくNISTのデータを用いて提案されたCFR1633⁽¹⁾という規制が施行された。この2種類のベッドマットレスに関する規制のクライテリアを表1に載せる。これらの基準は寝室等で火災が発生し、ベッドマットレスに火災が進展した際にベッドマットレスからの火災によって、フラッシュオーバーを起こさせない、またはF.O.が発生するまでの時間を稼ぎ在館者の避難時間を稼ぐ事を目的とした基準である。この試験法はのちに詳細を載せるがベッドマットレス上面と側面からのバーナーによる二点同時着火となっており、これはベツトクロスからの着火を模している。またISO12949のベッドマットレスの難燃性評価試験にも同じ試験法が使われている。

表1 ベツトマットレスの難燃性の基準

基準	CPSC.CFR1633	TB603
最大発熱速度	30分の試験時間内に発熱速度が200[kW]を超えないこと	
発熱性試験	10分間の総発熱量が15[MJ]を超えないこと	10分間の総発熱量が25[MJ]を超えないこと
試験時間	最大30分間とし、鎮火、又は燃え尽きた時点で終了	

2. 研究目的

1982年のホテルニュージャパンの火災を受け、ベッドマットレスなどの寝具類には防災製品としての基準が制定された。しかし、防災製品は法律によって義務化されているためではないため、普及率は低く、無処理のマットレスがほぼ大半を占める。そのため火災危険性が非常に大きいと考えられる。

本研究ではベッドマットレスの火災危険性の把握を目的として、ISO12949の試験法に則ったベッドマットレスの実大試験を行うことで、難燃性マットレスと無処理のマットレスの燃焼メカニズムを明らかにすることを目的とする。

3. 実験概要

3.1. 試験体概要

本実験に用いた試験体の一覧を表2に示す。なお、試験体として用いたマットレスのうち難燃性の製品をFR (Fire Retardant)、無処理の製品をNFR (Not Fire Retardant)と表記する。試験体には日本製・韓国製の無処理・難燃処理のポケットコイル式^(※1)マットレス、計4種類を用いた。また、日本製と韓国製それぞれの無処理・難燃処理のマットレスを J-NFR・J-FR、K-NFR・K-FR と表記する。

3.2. 試験方法

3.2.1. 試験時間

ISO12949 の実験手法⁽²⁾に基づき、試験時間はバーナー点火後から最大 30 分間とし、鎮火、又は燃え尽きた時点で終了とした。

3.2.2. 設置方法

図 3 に実験模型の概略を示す。試験に際し、ベッドマットレス下端から地面相当までの距離に 2 種類の高さを設定した。図 3 上図はベッドフレームとその下の架台の間に敷いてあるケイ酸カルシウム板までの距離 115mm、下図においてはベッドフレームを高さ 100mm の煉瓦 2 つをそれぞれ用いて嵩上げた状態での地面までの距離 315mm をそれぞれの設置高さとした。なお No.10,11 の試験のみ、ケイ酸カルシウム板の上にアルミ箔を敷いた。

3.2.3. 着火方法

ISO 12949 に示される着火方法を以下に示す。

ガスの種類 ; LPG (ISO 12949 ; プロパン 99%)

*トップバーナー : 12.9L/min (着火から 70 秒燃焼)

*サイドバーナー : 6.6L/min (着火から 50 秒燃焼)

図 4 に ISO12949 に定められる着火位置を示す。トップバーナーとサイドバーナーの中心が試験体中央部と重なるように設置し、両者の間隔は 250[mm]である。試験時には二つのバーナーから同時に着火し、トップバーナーは 18[kW]で 70 秒間、サイドバーナーは 9[kW]で 50 秒間着火し続け、その後鎮火する仕組みとなっている。

3.2.4. 試験場所

表 2 より、試験はそれぞれ燃焼熱量測定用フード下での実験、後者は 6×6×2.7m の実大区画内(散水設備対応)にて、前者は自由空間燃焼(以下 F.B.と表記する)、後者は区画内燃焼(以下 C.F.と表記する)とみなされる場所で実験を行った。なお、後者に関してはフラッシュオーバー(以後 F.O.と表記)の危険性から、煙層温度が 400℃に達した時点でスプリンクラーを作動させた。

3.3. 測定項目

表 3 に本実験における測定項目の一覧を示す。また、ベッドマットレスの表面・裏面における温度推移の定点観測時の熱電対の設置位置に関しては図 5 に示す。

本実験における着火手法はトップとサイドのバーナーによる 2 点同時着火となっている(3.2. 項に記載)。このため、マットレス短辺方向(Y 軸方向とする)に関してはマットレスの中心軸とし、長辺方向(X 軸方向とする)ではトップバーナーの長さ 30cm の半分の 15cm を通る軸の交点を燃焼の中心とみなし、そこから図 5 に示す 3 方向に一定間隔で熱電対を設置し、表面・裏面の温度推移を調べた。これは各点における熱電対に温度勾配が急激に上昇した時点をもって火炎がその点に到達したと考えられ、燃焼面積の特定に有効であると考えたためである。

表 2 試験体一覧

No.	生産国	試験体	設置高さ	実験場所	試行数
[-]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[回]
1	JAPAN	NFR	115	自由燃焼	1
2			315		1
3			115		区画内燃焼
4	315	1			
5,6	JAPAN	FR	115	自由燃焼	2
6	KOREA	NFR	115	自由燃焼	1
7~9			315		3
10,11			115		1
12	KOREA	FR	315		2

表 3 測定項目一覧

測定項目	単位	計測手法	対象
発熱速度	[kW]	燃焼生成ガスのO ₂ 濃度(酸素消費法)	全て
総発熱量	[kJ]		
表面・裏面温度	[°C]	k型熱電対による定点観測	
火炎高さ	[m]	ビデオ画像からの画像解析	
区画内煙層温度	[°C]	k型熱電対による定点観測	No.3,4のみ

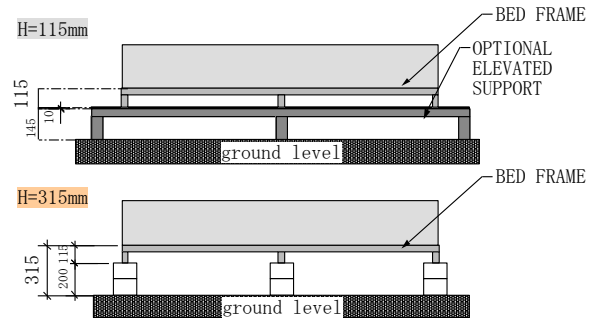


図 3 ベッドマットレス設置高さ

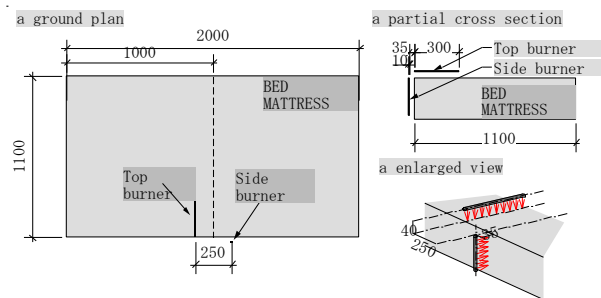


図 4 バーナー点火位置

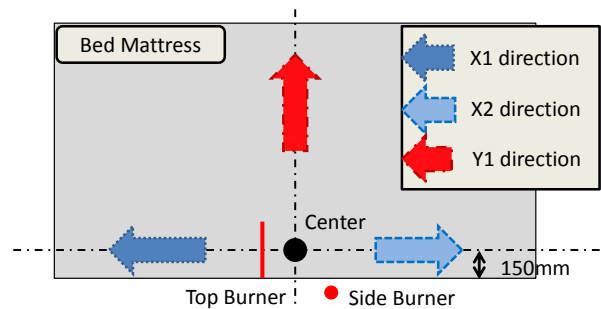


図 5 熱電対の設置位置

4. 実験結果

4.1. 発熱速度

図 6,7,8 にそれぞれ J-NFR マットレス、K-NFR マットレス、そして J-FR 及び K-FR マットレスの発熱速度の時刻歴データを載せる。なお、図 6 の破線はスプリンクラーが作動した後の発熱速度を表す。

図 6 の J-NFR マットレスの発熱速度の結果を見ると総じて着火後 250 秒で 1MW に達している。また、それぞれ高さ方向と区画内外の火災成長の比較をみると、高さが H=315 と、区画内の方がピークに至るまで早い結果となった。

次に図 7 より、K-NFR マットレスの発熱速度の結果を見ると、H=315 の No.7-9 は着火後 200~250 秒で最大発熱速度が 3MW を超えるのに対して、H=115 の No.6 は 300 秒を超えたあたりで発熱速度が約 1.4MW となった。

図 8 の J-FR と K-FR の 2 種類の難燃化マットレスの発熱速度を比較すると、No.6,12 の最大発熱速度はそれぞれ 32[kW],55[kW] であるのに対し、No.5,10,11 は 480[kW], 1180[kW], 1374[kW] となった。

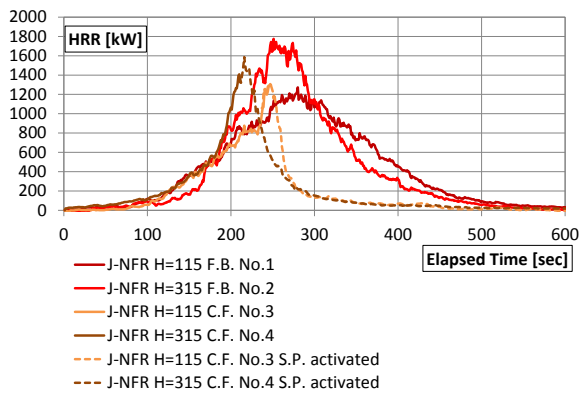


図 6 No1~4 の J-NFR マットレスの発熱速度

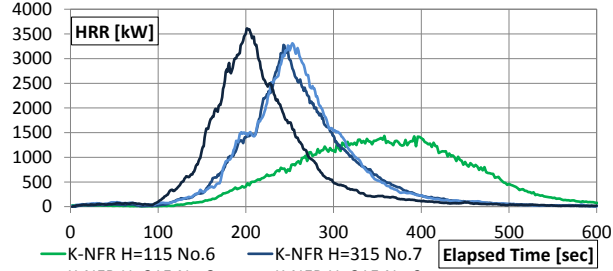


図 7 No.6~9 の K-NFR マットレスの発熱速度

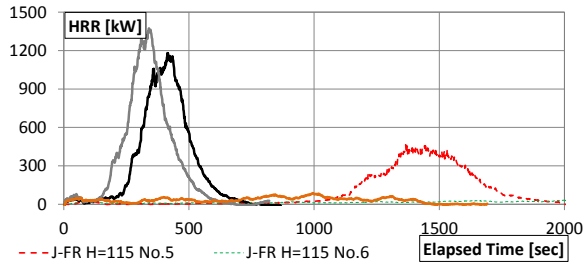


図 8 No5,6,10,11,12 の発熱速度

4.2. 表面・裏面の温度推移と燃焼面積

熱電対による温度推移の計測結果の一例として、No.6 K-NFR H=115 試験体の X1 方向の温度推移を図 9 に示す。熱電対は 10cm ごとに設置した。一般的にウレタンの引火温度が 288℃^(※2)である事から、300℃を超えた時点で表面材が着火したとみなした。

No.1,2,3,4,6,7 の J-NFR 及び K-NFR の無処理のマットレスの表面に設置した熱電対のデータを基に燃焼面積の拡大速度を求めた結果を図 10 に示す。図 10 より、NFR マットレスの表面における燃焼面積拡大速度は、マットレスの種類・設置高さ・区画内外に関わらずほぼ同じであることが分かる。また燃焼面積が大きくなるにつれ拡大速度が徐々に大きくなっていることもわかる。

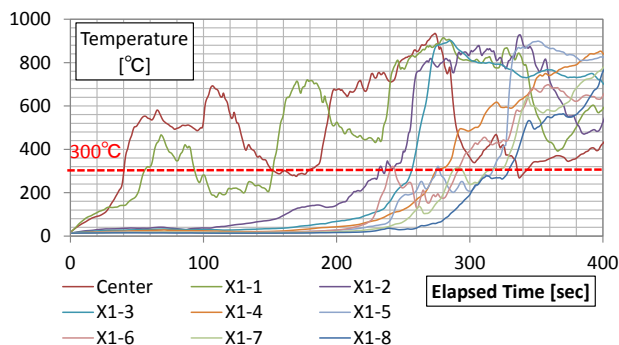


図 9 No.6 K-NFR H=115 試験体の X1 方向の温度推移

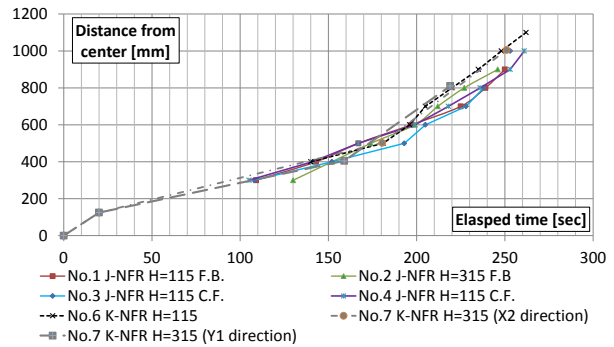


図 10 No.1~4 の J-NFR 及び No.6~9 の K-NFR マットレスの表面における燃焼面積の拡大速度

5. N.F.R. マットレスの燃焼性状分析

5.1. 火炎高さの分析

No.6,7 の実験時の画像データより、火炎の存在比率が 50%となる高さを平均火炎高さとして導出した。この結果の妥当性の検証のため、既往の火炎高さ予測式のうち Zukoski の実験式⁽³⁾を用いて、式(1),(2a),(2b)を用いて発熱速度から算出した計算値と比較した結果を図 11 に示す。

図 11 より、No.6 の実験値と計算値は良好な一致を示している。No.7 の実験値も 160 秒までは計算値と一致しているが、180 秒以降ではズレが生じている。これは実験時に生じた大量の煙により火炎の先端が明瞭に観察できなかつたため実験値が低く見積もられた可能性が考えられ、実際の火炎高さは計算値に近かつた可能性がある。

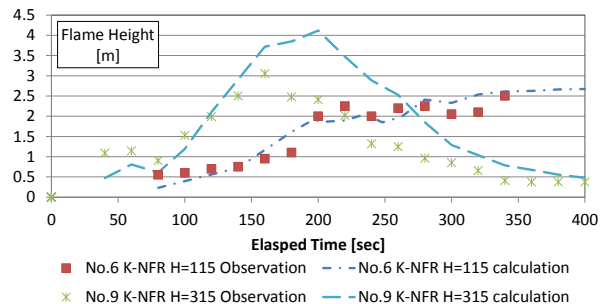


図 11 実験データより導出した平均火炎高さと Zukoski の式を用いた計算値の比較

$$Q^* = Q / (1116 \times D^{5/2}) \quad \dots \text{式(1)}$$

$$L_f / D = 3.3 \times Q^{*2/3} \quad (Q^* < 1) \quad \dots \text{式(2a)}$$

$$L_f / D = 3.3 \times Q^{*2/5} \quad (Q^* > 1) \quad \dots \text{式(2b)}$$

5.2. 燃焼面積拡大メカニズムの分析

ウレタンを用いた既往の実験⁽⁴⁾では発熱速度の予測のため、燃焼面積を求める際に、Quintiere の表面における火炎の水平伝播速度 v [m/s]の式(3)⁽⁵⁾を用いたが、燃焼面から滴下した材料がベッドマットレスの下で継続して燃焼し、燃えぬけ部分の断面に、火炎からの放射熱の他に対流による熱流が加わることで、断面部分のウレタンが滴下し燃焼面積が拡大すると考えられ既往式の適応は難しいと考えた。そこで、対流熱も加味した燃焼面積の拡大メカニズムを考案し、図 12 に模式図を示す。

式(3)において、燃焼面に入射する正味の熱流束 q_f [kW/m²]を放射熱流束のみではなく式(4)として考えると、式(4)を構成する放射と対流の 2 種類の熱流束を求める式はそれぞれ式(5),(6)で表される。式(5)に用いられる放射率 ϵ は式(7)で表され、 $k=2$ [m²]、行路長 L_m は火炎を球体として捉えた際の式である $0.66D$ [m]とした。図 12 右上に概念図を示す。

次に対流による熱流束を求める式(6)に用いられる対流熱伝達率 h [kW/m²K] は式(8)で表される。このとき λ [kW/mK] は空気熱伝導率、 L [m] は代表長さを示し、平均ヌセルト数 N_{u} [-] は式(9)で表せる。これは地面からの火炎は燃えぬけ部分の断面に対し平行な流れであり、この対流は強制対流であるとみなされるため、平均ヌセルト数を求める式は平板に沿う流れのモデル⁽⁶⁾を適応した。図 12 右下にその概念図を示す。

式(10)は層流域でのレイノルズ数 R_e [-] を求める式である。このときのプラントル数 $P_r=0.72$ [-] であり、動粘性係数 ν [kgf·s/m²] は、絶対温度より求められる。流速 u_{∞} [m/s] に関しては、燃焼面積に対して求める流速の位置が低いため火炎軸上の流速を代用している。このときの代表長さ L [m] はマットレス上部層の厚みとした。

発熱速度の時刻歴データと $t=80$ [s] 時点での燃焼半径 $r=200$ [mm] を代入して、式(3)~(10)の考え方を基に求めた燃焼面積拡大速度の再現結果と、放射のみで考えた再現結果、そして図 10 に示した実験値との比較を行った。結果をそれぞれ図 13, 14 に示す。

図 13, 14 にそれぞれ No.1, 2 と No.6, 7 の比較結果を示す。図 13, 14 共に、対流熱を加味した燃焼面積拡大速度の結果は、実験結果をよく再現しているのに対し、放射熱のみを正味の熱流束とした場合の燃焼面積の再現では差が生じている。このため本実験で用いたベッドマットレスのように、滴下する材料が用いられる可燃物の燃焼メカニズムを考えるためには、正味の熱流束として放射熱と対流熱を考慮しなければいけないと考えられる。

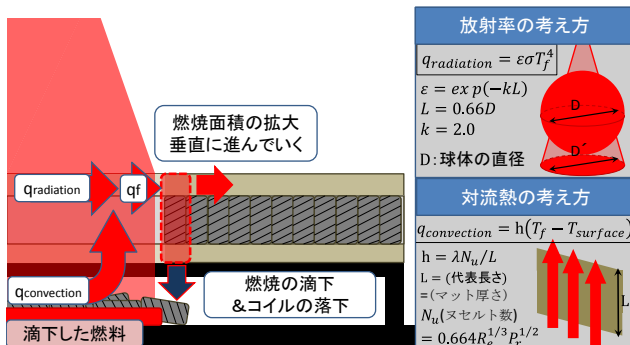


図 12 燃焼拡大メカニズムの概念図

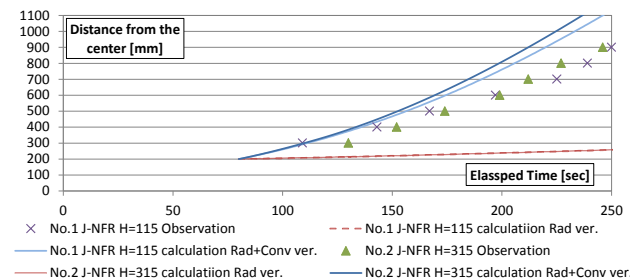


図 13 No.1,2 の試験体における燃焼面積拡大速度比較

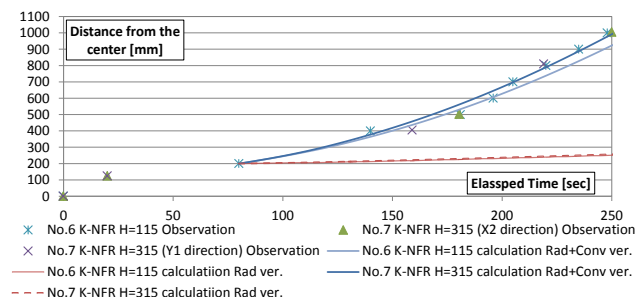


図 14 No.3,4 の試験体における燃焼面積拡大速度比較

$$v = \left[\frac{4\delta}{\pi k \rho c (T_{ig} - T_{\infty})^2} \right] q_f^2 \text{ m/s} \quad \dots \text{式(3)}$$

$$q_f = q_{radiation} + q_{convection} \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad \dots \text{式(4)}$$

$$q_{radiation} = \varepsilon \sigma T_f^4 \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad \dots \text{式(5)}$$

$$q_{convection} = h(T_f - T_{surface}) \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad \dots \text{式(6)}$$

$$\varepsilon = 1 - \exp(-kL) \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad \dots \text{式(7)}$$

$$h = \lambda N_{u} / L \text{ [kW/m}^2\text{K]} \quad \dots \text{式(8)}$$

$$N_{u} = 0.664 R_e^{1/3} P_r^{1/2} \text{ (} R_e < 30000 \text{) [-]} \quad \dots \text{式(9)}$$

$$R_e = u_{\infty} L / \nu \text{ [-]} \quad \dots \text{式(10)}$$

6. F.R. マットレスの燃焼性状分析

J-FR のマットレスの難燃化手法はマットレスの表面の層に LOI 値が約 33 の FR レーヨンなどの難燃繊維を用い、熱を受けた際にその層が炭化して残ることで、酸素の侵入を防ぐバリアの役目を果たし、燃焼の継続を防ぐ仕組みとなっている。図 8 の赤い破線で示される No.5 の発熱速度が 1100 秒後より発熱速度が上昇しているが、これはポケットコイルが落下した際に炭化層のバリアが破れたためである。そのため、今回の試験体のように内部のウレタンが無処理の場合、何らかの外力が加わり炭化層が破れると燃焼が継続する可能性がある。

図 8 より、K-FR マットレスの発熱速度を見てみると、H=115 と 315 で大きく発熱速度が変化する。これは、H=115 の高さでは、燃えぬけにより滴下した材料が地面で燃焼を継続し、滴下面(プール火災のような状態)から裏面へ熱が入射したことに加え、ケイカル板の上に敷いたアルミ箔からの再放射も合わさり、裏面部分の燃焼が促進した可能性が考えられる。H=315 では滴下した燃料は燃焼を継続できず落下中に消炎した。K-FR のマットレスの難燃化手法は主な材料であるウレタンの不燃化によるもので、今回の実験のようにある程度大きな火災外力が加わると燃焼が促進してしまう可能性がある。

7. 総括

本研究では ISO12949 の試験手法を基にポケットコイル式マットレスの燃焼実験を行い、以下の知見を得た。

- ・発熱速度・表面と裏面の温度推移・火炎の高さ・燃焼面積拡大速度等の実験結果を得ると共に、結果それぞれの関係性について考察を行った。
- ・無処理のマットレスについては、燃えぬけ現象に伴い滴下した材料からの火炎によって、燃えぬけ部分の断面に入射する、火炎からの放射と対流の熱流束両方を考慮したモデルによるシミュレーションを行うことで燃焼面積の拡大を再現し、燃焼性状のメカニズムを明らかにした。
- ・難燃性マットレスの難燃化メカニズムに関して、マットレス材料であるウレタンの不燃化によるものと、表材が炭化することによって酸素に対するバリアを作り燃焼促進を抑制できる、2種類の難燃化メカニズムが存在することを確認した。

(※1)ポケットコイル式マットレスとは、マットレス内部のコイルが一つ一つ分離しているため、就寝時の人間の体の曲線にフィットする仕組みとなっている。そのため、コイルが連結されているボンネルコイル式のマットレスより快適であるといった理由から、ポケットコイル式のマットレスが主流となってきている。

(※2)軟質ウレタンフォームの引火点温度：日本ウレタン工業協会の H.P. (www.urethane-jp.org/qa/nanshitsu/bouka/post_68.html)より抜粋。2014年1月26日確認

(参考文献)

- 1) 16 CFR Part 1633, Standard for the Flammability (Open Flame) of mattress sets, 2006
- 2) Standard test Method for measuring the heat release rate for flammability mattresses and mattress sets, 2011
- 3) Zukoski 他, Entrainment in Fire Plume, Fire Safety Journal, Vol. 3, 107-121, 1980/1981
- 4) 原田 和典他, ウレタンブロックの三次元燃焼における発熱速度予測, 2009, 建築学会
- 5) 田中 晴義, 改訂版建築火災安全工学入門 p.298~307
- 6) 田中 晴義, 改訂版建築火災安全工学入門 p.64