

実大規模によるふとん火災の燃焼性状に関する検証

原田 祐介*, 飯田 明彦*, 大滝 英一*

概 要

東京消防庁管内では、最近 10 年間に於ける住宅火災件数が減少傾向にある¹⁾。しかし、住宅火災の死者数（自損を除く）は住宅火災の件数の推移に比べ、わずかに減少する程度にとどまっている。その出火原因はたばこが最も多く、発火源がたばこの場合における着火物の 5 割以上をふとん類が占めている。

平成 25 年度の「各種詰物素材別によるふとん火災の燃焼性状に関する検証」において²⁾、綿や綿を含む混紡のふとんだけでなく、近年販売数量が増加している羽毛ふとんにおいても無炎燃焼を発生・継続し、一酸化炭素や二酸化炭素の他にもシアン化水素やアンモニアといった人体に有害なガスを発生させることが明らかになった。

本検証では実大規模のふとんにおいて無炎燃焼を発生・継続させ、各種発生ガスの濃度を測定し、人体への危険性について検証を行った。

1 はじめに

建築物の構造上の気密化、新建材の使用、室内家具の質的变化により、火災時には多種の有毒ガスが発生している。その危険性については、今まで様々な検証・研究が行われている。とりわけ、昭和 62 年 3 月に火災予防審議会人命安全対策部会からなされた答申を受け、設置された「火災による死因の生理学的検討研究会」の報告³⁾では、たばこがふとんに着火した火災では、たばこが火源となった火災全体と比較して、血中 CO-Hb 濃度が 1.5 倍、HCN 濃度が 2.0 倍となり、毒性倍率では 1.59 倍と高く、寝たばこ火災による火災死の高い危険性を裏付けたと報告されている。近年においても、死者の発生したたばこに起因する火災の着火物第 1 位はふとん等であり、寝たばこ等寝具上への火種の落下などにより、多くの死傷者が発生している。「ふとん等」、「たばこ」、「就寝中」の組み合わせで危険性が高まることから、寝たばこ火災の危険性を伝える更なる注意喚起が必要である。

2 目的

綿や綿を含む混紡、羽毛や羊毛等、多様な詰物素材が使用される昨今のふとんで無炎燃焼が発生した場合、実大規模のふとんから人体に有害なガスの発生状況を測定し、その危険性について把握することを目的とした。

3 実験方法

実験は区画内に掛ふとんと敷ふとんを設置し、無炎燃焼を発生・継続させ、各種発生ガスの濃度測定を行った。

(1) 実験区画

実験は内寸幅 3.30m×奥行 3.60m×高さ 2.10m（約 8 畳相当）の区画内で行った。この区画の換気回数は、開口部閉鎖時に約 0.52 回/時となり、居室に必要な換気回数である 0.5～0.7 回/時の範囲内にあるため、区画内を一般的な居室と同等とみなして実験を行った（図 1）。

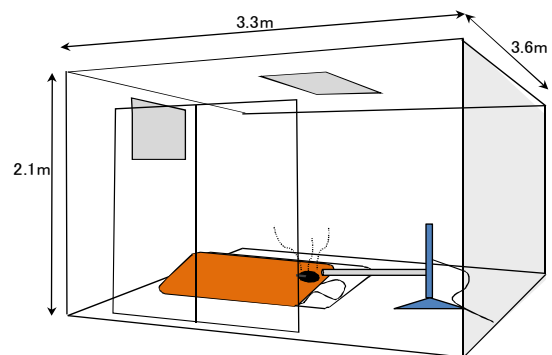


図 1 実験区画模式図

(2) 熱源の設定

無炎燃焼を安定して発生・継続させるため、熱源に電熱線（ニクロム線 100V・600W）を用いて敷ふとん上に設置し、上から掛ふとんを掛けた（図 2）。実験中は電源装置により 30V で印加し続けた。

(3) 寝具

ア 組合せ

本検証で扱うふとんの組み合わせを表 1 に示す。この

* 装備安全課

うち「混紡」は綿 70%、ポリエステル 30%、「ダウン」はダウン 93%、フェザー 7%の「羽毛ふとん」を示す。

いずれも無炎燃焼の発生が確認されている素材であるが、ダウン素材の敷ふとんはほとんど流通していないことから、今回の実験では対象外とした。

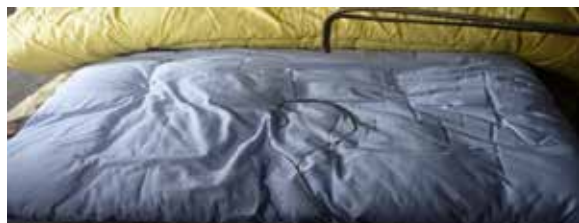


図2 電熱線設定状況

表1 対象とする無炎燃焼するふとんの組合せ

		掛ふとん		
		綿	混紡	ダウン
敷ふとん	綿	実験 1	実験 3	実験 5
	混紡	実験 4	実験 2	実験 6

イ サイズと質量

実験に使用したふとんの質量は表2のとおりである。掛ふとんは 1.50m×2.10m、敷ふとんは 1.00m×2.00m のシングルサイズで、側地が綿 100%のものをを使用した。

表2 ふとんの組み合わせの質量[kg]

	掛ふとん	敷ふとん	計
実験 1	綿 : 2.980	綿 : 4.845	7.825
実験 2	混紡 : 2.885	混紡 : 5.165	8.050
実験 3	混紡 : 3.100	綿 : 4.750	7.850
実験 4	綿 : 2.825	混紡 : 5.085	7.910
実験 5	ダウン : 2.135	綿 : 4.935	7.070
実験 6	ダウン : 2.060	混紡 : 5.015	7.075

(4) 測定方法

実験区画内の中央に掛ふとんと敷ふとんを敷き、ふとんの中心軸上の就寝中に人の口元に相当する箇所（床面から高さ 0.40m）を「口元付近」とした。またその直上高さ 1.85m を「天井付近」として、それぞれに測定ガスの吸引口を設定した（図3）。

それぞれの吸引口で酸素、二酸化炭素、一酸化炭素を測定し、口元付近についてはアンモニアとシアン化水素の測定も行った。

ア 酸素濃度、二酸化炭素濃度、一酸化炭素濃度

測定ガスの濃度は赤外線ガス分析計を使用した（表3、図4）。測定箇所銅管を設置し、ポリエチレンチューブを用いて、測定器まで吸引した。吸引口から測定器までの時間差は約 30 秒であり、実験ごとに補正した。

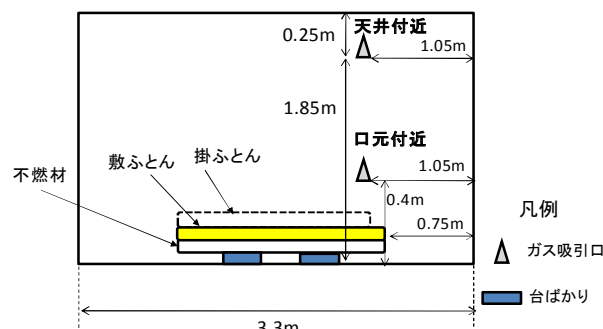


図3 実験区画の断面図

表3 赤外線ガス分析計の仕様

機種	富士電機製ガス分析計 ZKJ
計測ガス	CO ₂ 、CO、O ₂
測定範囲	CO ₂ : 最小レンジ 0-1vol% 最大レンジ 0-10vol%
	CO : 最小レンジ 0-1 vol% 最大レンジ 0-10vol%
	O ₂ : 最小レンジ 0-10vol% 最大レンジ 0-25vol%
測定原理	CO ₂ , CO : 非分散型赤外線方式 O ₂ : 磁気力式
再現性	±0.5% 以内
測定間隔	1.0秒間隔（データロガーにて測定値を記録。）
応答速度	ガス入口より90%応答60秒以下



図4 赤外線ガス分析計

イ アンモニア濃度、シアン化水素濃度

アンモニア濃度及びシアン化水素濃度は、実験開始から5分後及び10分後から10分ごとに実験終了まで、発生ガスを約2Lずつ採取した。その後これらのガスをガステック社製及びドレーゲル社製の直読式検知管で濃度を測定した（図5）。



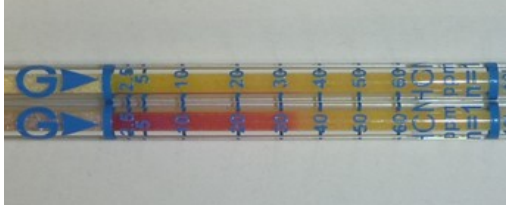


図5 吸引器と検知管

ウ 質量変化

無炎燃焼時の燃焼速度を把握するため、燃焼中の質量減少を測定した。電子式の台はかり（図6、株式会社エー・アンド・デー製、型番 SE-30KBM）を2台並べ、その上に不燃材のボードを設置し、更にもその上に試験体であるふとんを設定した（図6）。



図6 台はかりと設定状況

4 実験結果

実験終了の目安は有炎燃焼が生じた場合、もしくは一酸化炭素濃度が0.1600%以上に達した場合とした。これは人が連続して吸引した場合に、死に至る可能性があるとする濃度である⁴⁾。

(1) 燃焼状況

実験1から実験6まですべての実験で燃焼状況は似たような傾向を示した。各実験の変化を次の①から⑤の項目に分類し発生した時間を表4で示す。また、燃焼状態を図7から図12に示す。各図上段が掛けふとん開放前、下段が掛けふとん開放後である。

- ① 電熱線設置個所、掛ふとんの隆起
- ② 電熱線設置個所、白煙の発生
- ③ 電熱線設置個所、変色
- ④ 頭部側の掛ふとんと敷ふとんの間から白煙発生
- ⑤ 区画内の白煙充満、視界不良

表4 燃焼状態の推移

	①	②	③	④	⑤
実験1	7:26	9:12	9:50	16:42	33:00
実験2	4:30	13:53	18:35	24:51	54:00
実験3	5:30	11:17	18:18	27:00	48:00
実験4	9:07	26:00	22:37	31:08	39:10
実験5	13:39	13:39	18:10	27:20	30:47
実験6	7:10	11:04	11:04	16:54	25:43



図7 実験1の燃焼状況



図8 実験2の燃焼状況



図9 実験3の燃焼状況



図10 実験4の燃焼状況



有炎燃烧前



有炎燃烧時

図 11 実験 5 の燃烧状況



図 12 実験 6 の燃烧状況

(2) 酸素、二酸化炭素、一酸化炭素の濃度変化
ア 実験 1

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.49%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 10 分 00 秒から上昇が認められ、約 62 分 37 秒まで上昇し、最大値約 0.5760%に達した。

一酸化炭素もほぼ同様の变化を示した。最大値は、約 0.1563%であった (図 13)。

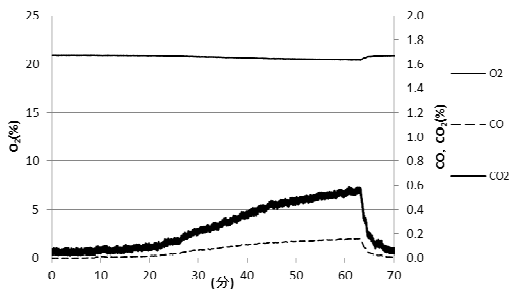


図 13 実験 1 発生ガスの濃度変化 (天井付近)

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約

20.49%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 8 分 50 秒後から急上昇し、約 0.4980%まで上昇した。その後約 0.154%まで低下したが、再度上昇を示し、約 0.9740%の最大値に達した。

一酸化炭素濃度は、約 8 分 50 秒後から急上昇し、約 0.1870%まで上昇した。その後約 0.0361%まで低下したが、再度上昇を示し、約 0.2840%の最大値に達した (図 14)。

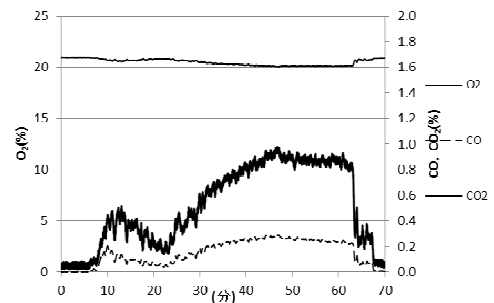


図 14 実験 1 発生ガスの濃度変化 (口元付近)

イ 実験 2

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.32%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 10 分 00 秒から上昇が認められた。約 47 分 10 秒後からさらに上昇し、最大値として約 0.8440%に達した。

一酸化炭素濃度は、約 47 分 10 秒後から上昇率が大きくなり、最大値として約 0.3025%に達した (図 15)。

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかに低下を示し、約 20.42%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 4 分 29 秒後から上昇を始め、約 0.3640%に達した後、濃度上昇は緩やかになった。その後上昇・下降を繰り返しながら、約 56 分 53 秒後に、最大値として約 0.8800%に達した後、低下傾向を示し約 0.7540%まで低下した。

一酸化炭素濃度は、約 4 分 29 秒後から上昇を始め、約 0.1219%に達し、上昇は緩やかになった。その後 54 分 24 秒後に最大値として約 0.3060%に達した後、0.2227%まで低下した (図 16)。

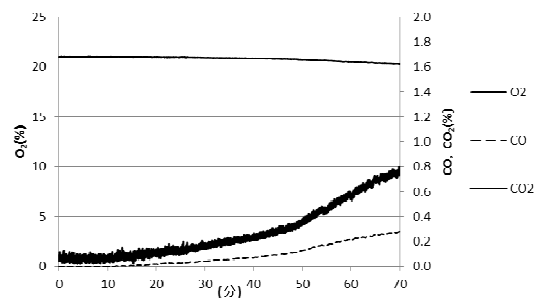


図 15 実験 2 発生ガスの濃度変化 (天井付近)

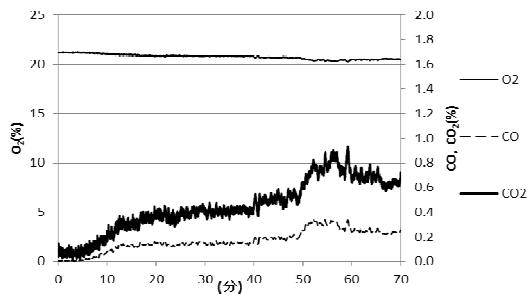


図 16 実験 2 発生ガスの濃度変化（口元付近）

ウ 実験 3

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 19.89%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 10 分 19 秒から上昇が認められた。約 50 分 00 秒後から急上昇を示し、最大値として約 1.0340%に達した。

一酸化炭素濃度は約 10 分 17 秒から上昇が認められた。約 50 分 00 秒後から急上昇を示し、最大値として約 0.3760%に達した（図 17）。

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかに低下を示し、約 19.14%まで低下した。その後上昇率が大きくなり、約 19.83%まで上昇した。

二酸化炭素濃度は、約 9 分 51 秒後から上昇を示し、約 0.650%に達した。その後急上昇率が大きくなり、最大値として約 1.7100%に達した。その後は約 0.7780%から約 1.1040%の間で推移した。

一酸化炭素濃度は、約 10 分 22 秒後から上昇を示し、約 0.2641%に達した。その後上昇率が大きくなり、最大値として約 0.4740%に達した。その後は約 0.2830%から約 0.3959%の間で推移した（図 18）。

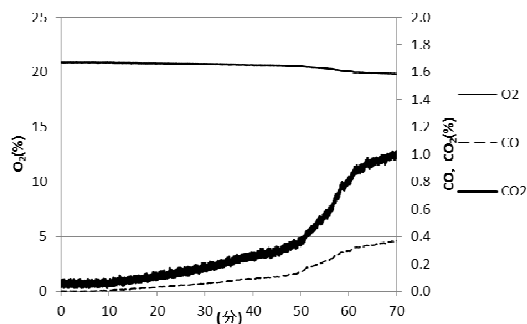


図 17 実験 3 発生ガスの濃度変化（天井付近）

エ 実験 4

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.49%にまで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 20 分 00 秒から上昇が認められた。約 24 分 21 秒後から勾配がやや急になり、最大値と

して約 0.5460%に達した。

一酸化炭素濃度は、約 20 分 00 秒から上昇が認められた。終始緩やかに上昇し、最大値は約 0.1588%であった（図 19）。

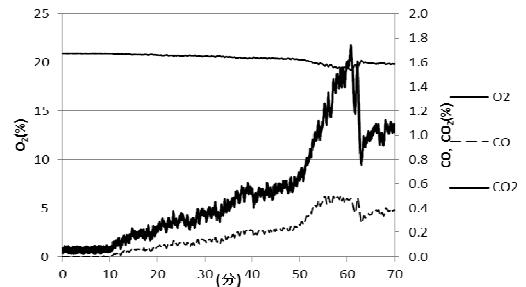


図 18 実験 3 発生ガスの濃度変化（口元付近）

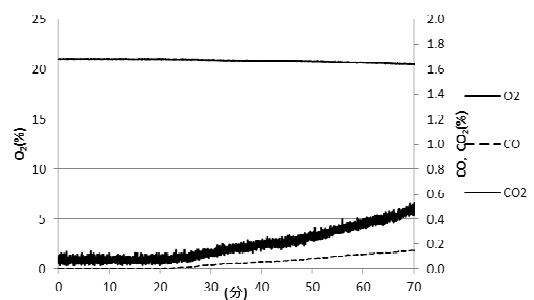


図 19 実験 4 発生ガスの濃度変化（天井付近）

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.33%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 20 分 00 秒後から上昇が認められた。約 0.6360%に達した後に約 0.2600%まで低下したが、再度上昇し、最大値として約 0.7040%に達した。

一酸化炭素濃度は、約 20 分 00 秒後から上昇が認められた。約 0.2363%に達した後に約 0.0927%まで低下したが、再度上昇し、最大値として約 0.2260%に達した（図 20）。

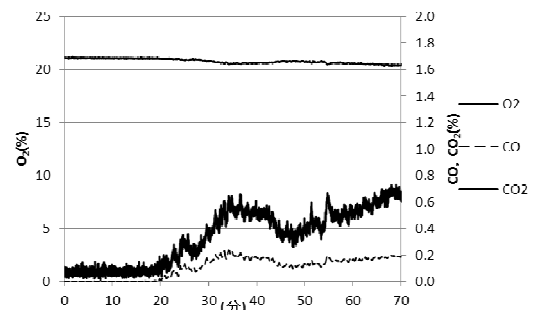


図 20 発生ガスの濃度変化（口元付近）

オ 実験 5

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、有炎

燃焼直前は、約 20.35%であった。有炎燃焼後は約 17.73%まで低下した。

二酸化炭素濃度は実験開始から緩やかに上昇し、有炎燃焼直前は約 0.1780%に達した。有炎燃焼後は約 2.9500%に達した。

一酸化炭素濃度は実験開始から緩やかに上昇し、有炎燃焼直前は約 0.0575%に達した。有炎燃焼後は約 0.1925%に達した (図 21)。

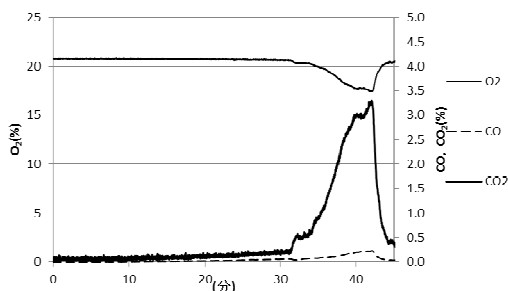


図 21 実験 5 発生ガスの濃度変化 (天井付近)

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、有炎燃焼直前で約 19.40%まで低下した。有炎燃焼後は約 17.25%まで低下した。

二酸化炭素濃度は、約 8 分 50 秒後から緩やかに上昇し、有炎燃焼直前は約 0.3460%に達した。有炎燃焼後に急上昇し、約 3.2740%に達した。

一酸化炭素濃度は、約 8 分 50 秒後から緩やかに上昇し、有炎燃焼直前は約 0.0606%に達した。有炎燃焼後に急上昇し、約 0.2301%に達した (図 22)。

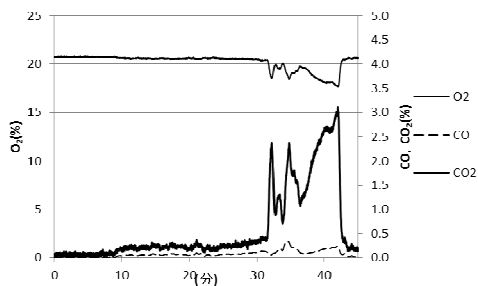


図 22 実験 5 発生ガスの濃度変化 (口元付近)

カ 実験 6

(ア) 天井付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.46%に低下した。

二酸化炭素濃度は、約 10 分 00 秒から上昇が認められた。約 40 分 41 秒後から上昇率が大きくなり、最大値として約 0.5880%に達した。

一酸化炭素は、実験開始から緩やかな上昇を示した。約 40 分 48 秒後から勾配がやや急になり、最大値として約 0.1941%に達した (図 23)。

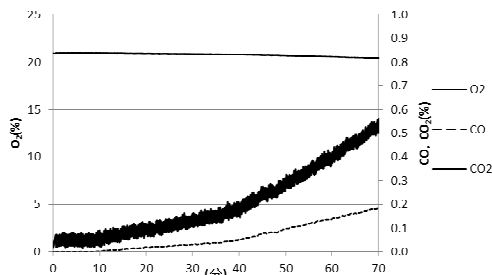


図 23 実験 6 発生ガスの濃度変化 (天井付近)

(イ) 口元付近の濃度

酸素濃度は、実験開始から緩やかな低下を示し、約 20.62%に低下した。

二酸化炭素濃度は、約 8 分 11 秒後から上昇が認められた。約 0.3740%まで上昇した後、約 0.1800%まで低下した。その後、再度上昇を示し、最大値として約 0.5140%に達した。

一酸化炭素濃度は、約 8 分 11 秒後から上昇が認められた。約 0.0941%まで上昇した後、約 0.0500%まで低下した。その後、再度上昇を示し、最大値として約 0.1790%に達した (図 24)。

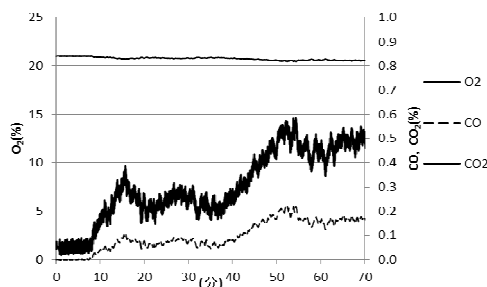


図 24 実験 6 発生ガスの濃度変化 (口元付近)

(3) アンモニア、シアン化水素の濃度変化

ア 実験 1、実験 2、実験 3、実験 4

各時間経過における吸引サンプルについて、それぞれのガス濃度を検知管で測定した結果を図 25 から図 28 に示す。実験 1 から実験 4 において、アンモニア、シアン化水素ともに検出されなかった。

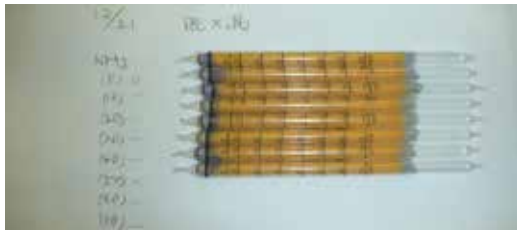


アンモニア



シアン化水素

図 25 実験 1 アンモニア、シアン化水素の濃度



アンモニア



シアン化水素

図 26 実験 2 アンモニア、シアン化水素の濃度

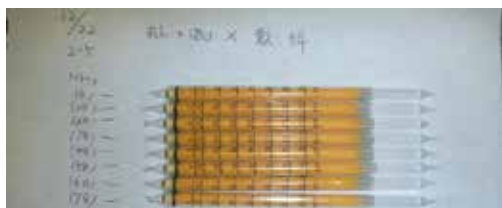


アンモニア



シアン化水素

図 27 実験 3 アンモニア、シアン化水素の濃度



アンモニア



シアン化水素

図 28 実験 4 アンモニア、シアン化水素の濃度

イ 実験 5

各時間経過における吸引サンプルについて、それぞれのガス濃度を検知管で測定した結果を、表 4 及び図 29 に

示す。アンモニアは実験中検出されず、シアン化水素は実験開始約 3 分 39 秒後から検出され、時間経過に伴い、増加した。無炎燃焼中最大値は 28 分 39 秒後に 30ppm に達し、有炎燃焼を生じた後の約 38 分 39 秒後には約 90ppm に達した。

表 4 実験 5 アンモニア・シアン化水素濃度 (ppm)

時間	アンモニア	シアン化水素
3分39秒	—	7
8分39秒	—	15
18分39秒	—	23
28分39秒	—	30
38分39秒	—	90



アンモニア



シアン化水素

図 29 実験 5 アンモニア、シアン化水素の濃度

ウ 実験 6

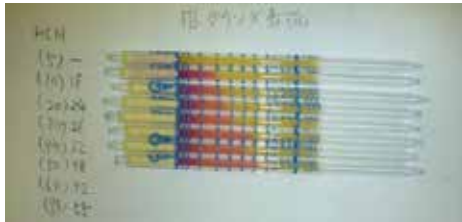
各時間経過におけるガス濃度を検知管で測定した結果は、表 5 及び図 30 に示す。アンモニアは実験開始から約 18 分 39 秒後に約 7ppm 検出され、約 48 分 39 秒以降は低下していった。シアン化水素は、約 8 分 39 秒後から濃度上昇がみられ、約 68 分 39 秒後には、約 55ppm に達した。

表 5 実験 5 アンモニア・シアン化水素濃度 (ppm)

時間	アンモニア	シアン化水素
3分39秒	—	—
8分39秒	—	18
18分39秒	7	24
28分39秒	6	26
38分39秒	7	32
48分39秒	5	48
58分39秒	3	42
68分39秒	2	55



アンモニア



シアン化水素

図 30 実験 5 アンモニア、シアン化水素の濃度

(4) 質量減少

ア 実験 1 から実験 4 及び実験 6

実験開始約 10 分以降から 0.005 kg/分以上の値が確認できるようになった。約 20~30 分では約 0.010kg/分となり、更に時間が経過すると約 0.015~0.030 kg/分と増加した。約 60 分以降、質量の減少が一定値を示した後、減少した。実験 1 から実験 4、実験 6 の経過を図 31 から図 35 に示す。

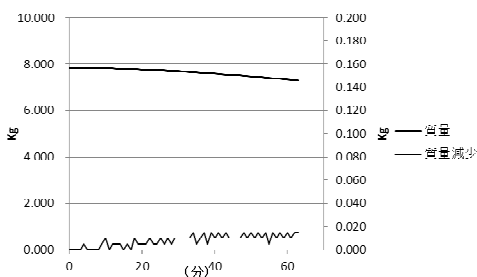


図 31 実験 1 重量減少

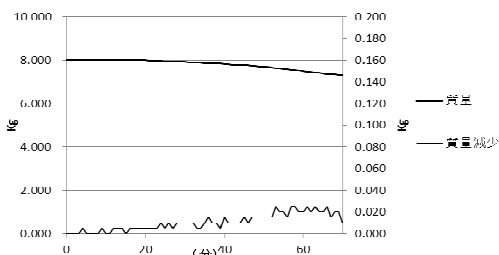


図 32 実験 2 重量減少

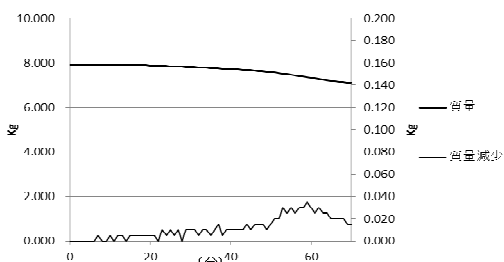


図 33 実験 3 重量減少

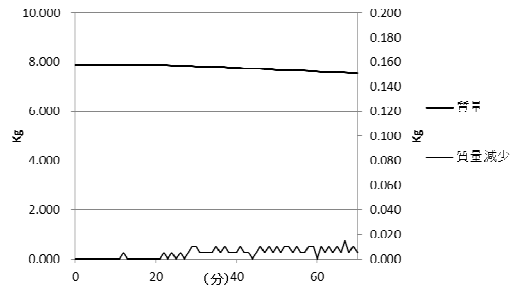


図 34 実験 4 重量減少

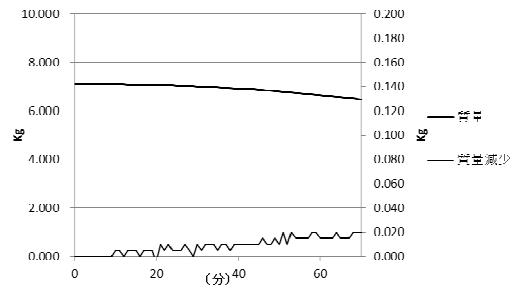


図 35 実験 6 重量減少

イ 実験 5

実験開始から約 31 分までは他の実験と同じ傾向を示していたが、その後有炎燃焼に移行したため、燃焼速度が著しく増加した (図 36)。

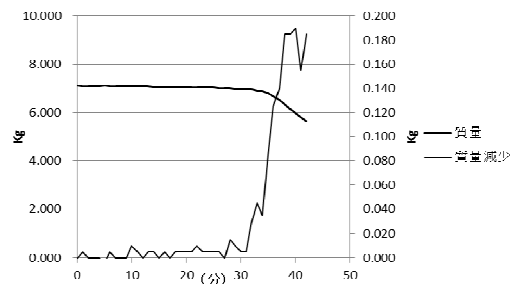


図 36 実験 5 重量減少

5 考察

(1) 燃焼状況

全ての実験において、実験開始から熱源直上部分のふとんの隆起、白煙発生、熱源部分の変色、区画内の白煙充満という同じような経過となった。また、熱源を中心に同心円状に無炎燃焼が進行した。

これにより今回実験を行ったふとんの詰め物の素材による無炎燃焼の進行度合に大きな差異は生じないと考えられる。

(2) ガス濃度

ア 天井付近の酸素、二酸化炭素、一酸化炭素の濃度

無炎燃焼が継続する場合、ガス濃度はゆるやかに変化する。酸素は減少し、二酸化炭素と一酸化炭素は増加した。天井付近のガス濃度変化は燃焼の進行に伴って生成ガスが蓄積したのと考えられる。

イ 口元付近の酸素、二酸化炭素、一酸化炭素の濃度

酸素濃度と二酸化炭素濃度はともに天井付近よりも早く変化があらわれるが、人体に危険のある濃度には達しなかった。しかし、一酸化炭素はわずか10分から30分程度で人間が死に至る危険性のある濃度に達した。また、ピーク値から一度濃度が低下する傾向が見られた。これは実験開始時、火源から発生したガスを直上で吸引した際に高濃度を示し、燃焼が継続したことでガスの発生源が移動したためと考えられる。再度上昇を示したのは実験区画内全体に生成ガスが充満したためと考えられる。

ウ ロ元付近のアンモニア、シアン化水素の濃度

実験6のみアンモニアが発生したがその濃度は低く、人体への影響は少ないと考えられる。シアン化水素は実験5、実験6において発生し、約8分の時点で軽度の中毒症状を引き起こす可能性のある濃度に達している。よって同様の条件で一酸化炭素中毒となる前に、シアン化水素による影響を受ける可能性が考えられる。

(3) 質量減少

実験開始後、質量減少は時間経過に伴い増加した後には停滞、または低下傾向を示した。これは燃焼面積の拡大に伴って質量の減少量が増加し、ふとんの末端部分に達した時点で燃焼面積の拡大が鈍化するためと考えられる。

6 おわりに

綿及び混紡のふとんの組み合わせで無炎燃焼させた場合、約60分間で継続して吸引した際に人が死に至る可能性のある一酸化炭素濃度に達する。

ダウンのふとんが無炎燃焼した場合、一酸化炭素よりも早い段階で人体に影響を与える濃度のシアン化水素が発生する。一酸化炭素との相乗効果により、人命危険が高まるため、寝たばこ火災に対する更なる注意喚起が必要である。

[参考文献]

- 1) 東京消防庁編：「住宅火災・放火火災の実態」、2016年
- 2) 東ほか：「各種詰物素材別によるふとん火災の燃焼性状に関する検証」、pp101-108、消防技術安全所報第51号、2014年9月
- 3) 東京消防庁編：「火災による死因の生理学的検討結果報告書」、1993年
- 4) 日本火災学会編：「火災便覧 第3版」、1997年

Study on the Combustion Characteristics of Futon Fires Using an Actual-Size Model

Yuusuke HARADA*, Akihiko IIDA*, Hidekazu OTAKI*

Abstract

The number of residential fires within the Tokyo Fire Department's jurisdiction has gone down over the past ten years. However, the number of residential fire fatalities—other than those self-inflicted—has declined only slightly compared to the numbers of residential fires. Cigarettes are the usual reason fires break out. When the ignition source is a cigarette, futons and other bedding account for more than 50 percent of what was ignited by cigarette to cause a fire.

The 2013 study of bedding fire behaviors with different types of padding materials made it clear that flameless combustion occurs and continues not only in the bedding of cotton or fiber mixtures that contain cotton, but also with the down quilts. The sales volume of the latter has increased in recent years, and when they burn they generate physically harmful gases such as hydrogen cyanide and ammonia along with carbon monoxide and carbon dioxide.

During this study, we instigated flameless combustion and maintained it using actual-size bedding, measuring the concentrations of various gases and assessing the risks they pose to the human body.

*Equipment Safety Section