バスの座席の燃焼性に関する
実験的研究

東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻

辻本研究室

小　澤　竜　也

目　次

第一章　序論
1-1 実験背景、目的.....2
1-2 車両火災事故と法改正.....4
1-2-1 北陸トンネル火災事故.....4
1-2-2 JR 北海道石勝線火災事故.....12
1-3 難燃性について.....13
1-3-1 自動車の内装の基準.....13
1-3-2 建築物の居室.....15
1-3-3 鉄道車両の内装.....16

第二章　コーンカロリーメーター試験
2-1 座席概要.....20
2-2 実験概要.....21
2-3 実験結果.....23
2-3-1 着火時間.....23
2-3-2 発熱速度と総発熱量.....24
2-4 加熱強度と燃焼熱の関係.....28
2-5 加熱強度と着火時間の関係.....29

第三章　自由空間、ルームコーナー内における燃焼実験
3-1 実験概要.....38
3-2 実験結果.....43
3-2-1 重量変化.....43
3-2-2 直上温度.....45
3-2-3 放射量.....47
3-2-4 発熱速度.....49
3-3 燃焼実験での試験体の状態.....50
3-3-1 自由空間の実験の試験体の状態.....50
3-3-2 ルームコーナー内の実験の試験体の状態.....61
3-3-3 各燃焼実験の比較.....71

第四章　二層ゾーンモデルと煙層、火炎からの放射量の影響
4-1 二層ゾーンモデル.....74
4-1-1 計算条件.....74
4-1-2 計算結果.....75
4-2 煙層、火炎からの放射量.....76
4-2-1 計算条件.....76
4-2-2 計算結果.....79

第五章　総括
5-1 総括.....86

参考文献.....87

謝辞.....88

第一章　序論

1.序論

1-1. 実験背景、目的

鉄道車両、自動車、それぞれに乗客の利用する座席について、その燃焼性に関する法的規制が存在するが、車内の内装材料に関する燃焼実験の例が極めて少なく、火災に関する性能設計手法の開発とともに実験データの充実が急務である。

建築分野では、室内の可燃物の燃焼実験に関するデータの主なものは、椅子の燃焼実験[1)2)]、カーテンの燃焼実験[3)]、ゴミ箱等の燃焼実験[4)]、衣類等の燃焼実験[5)]などがある。

鉄道車両の火災対策の技術基準においては、過去の事故等を踏まえて様々な規定が設けられている)ところであるが、平成23年JR北海道石勝線においてディーゼル列車が脱線し、出火する事故が発生した。列車はトンネル内に停止し、6 両編成の最後尾の床から出火し、全焼した。この火災事故を契機に鉄道車両の耐火性が問われており、鉄道車両の床構造の耐火試験[16)]が行われている。個々の内装材料を、難燃化、不燃化しても全体がどう燃えるか、避難とどういう関係になるかが明らかになっていないのが現状である。

本論の実験では、幾つもある検討課題のうち、現在の車両内装材料の燃焼性能を把握することを目的とした。しかし、鉄道車両の座席を入手できなかったため、公開された情報で入手可能なバスの座席に着目した。

ネットオークションで入手したバスの座席を対象に、建材の燃焼試験で利用されているコーンカロリーメーター試験法により燃焼性能を把握し、車内と仮定したISO9705ルームコーナー試験で用いられる小規模区画（以下、ルームコーナー）内で燃焼させ、両者の関連性を分析することを目的とする。

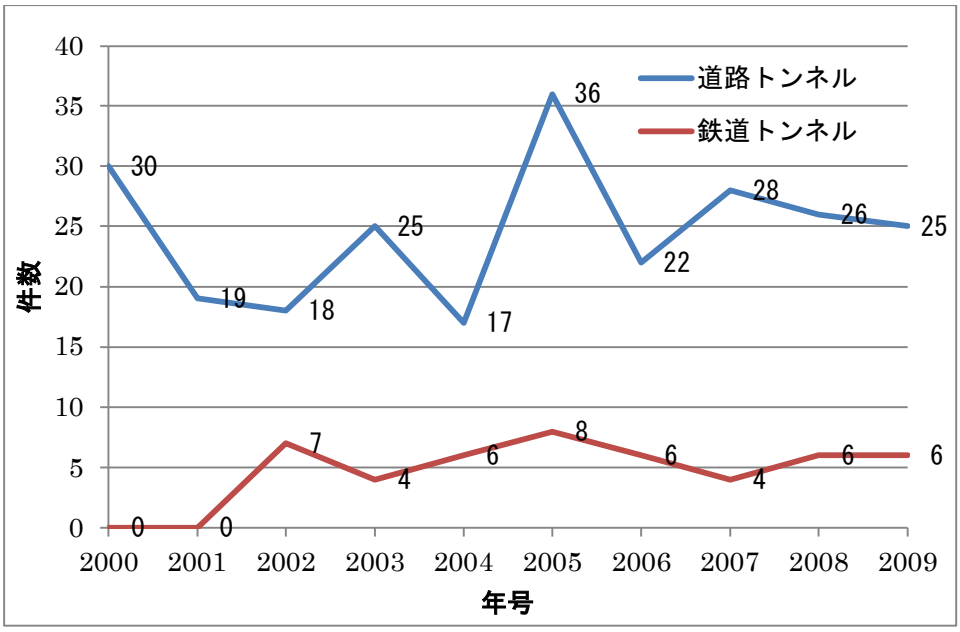

図 1-1 トンネル内車両・施設火災推移件数 18)19)

表 1-1 日本における鉄道事故統計 17)

年	鉄道							軌道							計
	列車衝突	列車脱線	列車火災	踏切障害	道路障害	鉄道人身障害	鉄道物損	車両衝突	車両脱線	車両火災	踏切障害	道路障害	人身障害	物損	
2011	0	9	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11
2010	0	6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	9
2009	0	5	1	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	11
2008	0	7	2	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	13
2007	0	12	2	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	19
2006	1	13	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	16
2005	2	20	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	24
2004	0	18	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	20
2003	1	20	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
2002	1	14	1	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	20
2001	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
合計	5	128	9	12	0	8	2	1	4	0	0	2	0	0	171

石勝線火災事故は 2011 年の列車脱線に含まれる。

1-2.車両火災事故と法改正

1-2-1.北陸トンネル火災事故

国内において最大とも言える鉄道火災事故となった北陸トンネルの火災事故の概要とその後の法改正について記述する。

下り急行「きたぐに」が北陸トンネル内(全長 13.87km)を走行中、食堂車の電気暖房装置がショートし出火した。火災発生直後、車掌が乗客から出火を知らされ、直ちに非常停止の手配を取り、約 3 分後、敦賀口から 5.3km のトンネル内で停止した。乗務員 2 名が消火器によって消火に努めたが火勢は衰えず、消火は困難と判断したため、火災を起こしている車両を切り離して脱出することとなった。

また火災の影響により下り線の架線が停電し、運転は不可能であった。そのため、長大トンネル内の乗客 760 名の避難誘導は困難を極めた。一部の乗客は、火災のためトンネル内に停車していた上り急行列車に乗り移り脱出した。一部の乗客は徒歩でトンネル内を避難。また一部の乗客はいったん車外に誘導させられたものの、煙がひどいため客車内に戻り待機させられた。

火災発生から約 1 時間 30 分後、救援列車が敦賀駅から現場に送り込んだが、煙がひどくて近寄れず、トンネル内を避難する乗客を乗せて引き返した。全員の救助が終わったのは火災発生から約 13 時間後であった。トンネル内に充満した煙のため、乗客 29 名と職員 1 名が死亡し、714 名が負傷した。犠牲者は焼死ではなく、一酸化炭素中毒死であった。

図 1-2　北陸トンネル火災事故 [20)]

上記の火災事故を受け、

(1)新造車両から難燃構造を採用。

(2)運転マニュアルを見直した。「トンネル内の火災は、トンネル抜けるまで停車しない」を追加。

(3)長大トンネルの火災対策として、救援用動力車、排煙設備、避難経路を発表。

という対策を取るように法改正されることとなった。車両不燃化に関する法改正について表 1-2 に示す。

表 1-2 車両不燃化に関する法改正一覧

契機となった事柄		法制度	概要
1872	鉄道開業		
1927	東京地下鉄開業		
1951	桜木町事故		
1956	南海鉄道高野線	電車の火災事故対策について（鉄運39号）	車両の部位別に使用可能材料の防火性能を通達
1957	大阪市営地下鉄御堂筋線	電車の火災事故対策に関する処理方について（鉄運5号）	
		電車の火災事故対策に関する処理方の一部改正について（鉄運136号）	A-A様式
1968	営団日比谷線		
1969		電車の鉄道火災事故対策について（鉄運81号）	A-A基準
1972	北陸トンネル火災事故		
1974		地下鉄道の火災対策の基準について	山岳トンネルを運転する車両に対する基準
		地下鉄道の火災対策の基準の取り扱いについて	地下駅及びトンネルの火災対策の検討。建造物の不燃化、防火管理室・二方向避難路等
1982		地下鉄道の火災対策の基準の取り扱いについて取り扱いの改正について	排煙設備の設計方法等
1987	国鉄分割民営化	普通鉄道構造規則	
		車両に係る普通鉄道構造規則及び特殊鉄道構造規則の運用等について	
2003	大邱地下鉄放火事件		
2004		鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準	各省令を一本化し、性能規定化

上記のように、鉄道車両の火災対策の基準は過去の事故等を踏まえて様々な規定が設けられている。しかし、2011 年 JR 北海道石勝線においては車両が脱線し、トンネル内で停車、火災に発展する事故が発生した。北陸トンネル火災事故を受け、「トンネル内の火災は、トンネル抜けるまで停車しない」と運転マニュアルが見直されたにも関わらず、走行不能となり、乗客は全長 685m のトンネル内を約 480m を避難することを余儀なくされた。

○A-A 基準（1969 年 5 月 15 日付通達）
国土交通省が定める、車両火災対策としての鉄道車両の難燃化基準。地下鉄車両、地下鉄乗り入れ車両はこの基準を満たしていなければならない。

表 1-3　A-A 基準

項目		要項
全般		１．構造、機能上やむをえないものを除き、不燃性の材料を使用すること。
		２．不燃性以外の材料は、できるだけその使用量を少なくするとともに、つとめて難燃性（不燃性、極難燃性を含む。以下同じ。）のものとすること。
車体構造	屋根	１．金属とし、架空線式のものは、その上を難燃性の電気絶縁材料で覆うこと。
		２．架空線式のものの露出金具は、車体と電気的に絶縁するか、または難燃性の電気絶縁材料で覆うこと。
	外板、天井及び内張り	金属等、不燃性のものとし、これに表面塗装をした場合も不燃性のものとする。
	床	１．金属とし、上敷物は難燃性のもの、その下に詰物を用いる場合は、これを極難燃性（不燃性を含む。以下同じ。）のものとし、これら各部材料の厚さ、電線管及び空気管の立上り部、雨水排出口などについては、室内に火気が侵入しないよう留意すること。
		２．床下面に表面塗装をしたものは、不燃性のものとすること。
	断熱材及び防音材	ガラス繊維、石綿等、不燃性のものとすること。
	座席	表地、詰物包及び詰物は、難燃性のものとすること。
	日除け及び幌	難燃性のものとすること。
貫通路		１．車両の前後端面に貫通路を設けること。ただし架空線式のもので、車体と建築定規との間隔が左右おのおの 400 ミリメートル以上のものにあっては、列車両端の貫通口は省略することができる。
		２．連結車両間の貫通路は、渡り板、幌灯によって旅客が安全に通行できるものとすること。
		３．貫通口及び貫通路の床免状の有効高さは 1800 ミリメートル以上、有効幅は 600 ミリメートル以上とすること。

	４．貫通口に扉を設ける場合は、これを引き戸式またはこれに準ずるものとすること。ただし、乗務員室側のものは、連結側となったときに開放したまま保持できる開き戸式とすることができる。
	５．列車両端の貫通口の扉は、その手前に客室との仕切りを設け、かつ非常の場合に旅客を安全に退避させることができるものであること。
非常措置の表示	１．非常の際、旅客が車両を停止させることのできる装置または旅客から乗務員に通報することのできる装置の取り付け位置及び取り扱い要項を表示すること。
	２．非常の場合は乗務員に通報し、みだりに車外へ出ることは危険であるので、乗務員の誘導に従って行動するよう表示すること。
	３．架空線式の車両で、地上の相当区間を運転するものｈには、扉開放コックの取り付け位置及び開放要項を表示すること。ただし、乗務員が常時その場で操作できるものはこの限りでない。
	４．架空線式以外の車両及び地下線専用の車両には、前項の表示をしないこと。

○鉄道に関する技術上の基準を定める解釈基準（2002 年 3 月 8 日付通達）
赤字は平成 15 年 2 月に発生したテグ地下鉄火災を受けて、平成 16 年 12 月 27 日に国土交通省から通達された火災対策関係の改正部分。

表 1-4　鉄道に関する技術上の基準を定める解釈基準

部位		一般旅客車	地下鉄等旅客車及び新幹線旅客車	特殊鉄道（備考 10）					
					モ	ア	ム	サ	フ
屋根	屋根（備考 1）	金属製又は、金属と同等以上の不燃性(備考 2)		不燃性	○	モ準			モ準
				金属製又は金属と同等以上の不燃性			○		
	屋根上面	難燃性の絶縁材料で覆われていること（架空電車線（特高圧の電車線を除く）区間を走行する旅客電車に限る）				○	○		
	屋根上面に取り付けられた機器及び金具類	取付部が車体に対して絶縁され、又は表面が難燃性の絶縁材料により覆われていること（架空電車線（特高圧の電車線を除く）区間を走行する旅客電車に限る）				○	○		
外板	妻部	難燃性表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。		不燃性表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。	○	モ準			モ準
	妻部以外	不燃性又は表面が不燃性の材料で覆われたもの(備考３)であり、		不燃性表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。	○	モ準			モ準

		表面の塗装(備考６)には不燃性の材料を使用すること。							
	天井	不燃性又は表面が不燃性の材料で覆われたもの(備考３)であり、表面の塗装(備考７)には不燃性の材料を使用すること。	不燃性放射熱に対する耐燃焼性を有し、かつ、耐溶融滴下性があること。（備考５）表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。	不燃性　表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。	地準	○（備考4）			地準
客室	内張	不燃性又は表面が不燃性の材料で覆われたもの(備考３)であり、表面の塗装(備考６)には不燃性の材料を使用すること。	不燃性　表面の塗装（備考６）には不燃性の材料を使用すること。		○	モ準			モ準
断熱材及び防音材			不燃性		○	モ準			モ準
床	床	煙及び炎が通過するおそれの少ない構造			○	モ準			モ準
	床の上敷物	難燃性			○	モ準			モ準
	床上敷物		極難燃性		○	モ準			モ準

	下の詰め物（備考７）							
	床板		金属製又は金属と同等以上の不燃性（備考２）	○	モ準			モ準
	床下面（備考８）	不燃性又は表面が金属で覆われたもの	不燃性又は表面が金属で覆われたもの、かつ表面の塗装（備考６）は不燃性 表面の塗装（備考６）は不燃性	○	モ準			モ準
床下の機器箱（備考９）			不燃性、ただし、絶縁の必要がありやむを得ない理由がある場合は難燃性	○	モ準			モ準
座席	表地	難燃性					○	
	詰め物		難燃性	○	モ準			モ準
	下方に電熱器を設けている場合		発熱体と座席の間に不燃性の防護板を設ける	○	モ準			モ準
日よけ	日よけ	難燃性		普準	普準	普準	普準	普準
ほろ	ほろ		難燃性	○	○			モ準

備考１　「屋根」とは、車体の上部構造のうち雨樋又は雨切りよりも上の部分をいうが、雨樋又は雨切りが車体中心線から車体最大幅の三分の一の距離より内側にある場合は、車体中心線からそれぞれ車体最大幅の三分の一の距離までの部分をいう。ただし、屋根の一部が妻部の外板と一体となっているものは、当該部分は⑵の表中「外板」中の「妻部」とする。

備考２　「屋根」及び「床」中の「同等以上の不燃性」とは、現在屋根及び床板に使用している金属と同等又はそれ以上の不燃性の性能を意味しており、鉄道車両用材料の燃焼性規格で規定する不燃性とは異なる。

備考３　「表面が不燃性の材料により覆われたもの」には、不燃性でない材料を金属等不燃性の材料によりだき合わせたものを含む。

備考４　案内軌条式鉄道のうち、地下式構造の鉄道及び長大なトンネルを有する鉄道に使用する車両の「天井」は、地下鉄旅客車等の規定によること。

備考５　「放射熱に対する耐燃焼性を有し、かつ、耐溶融滴下性があること」とする材料には、天井材のほか客室上部に設備されている空調吹き出し口等の主要な設備を含む。ただし、材料が小さい等の理由により延焼拡大に影響を及ぼさないものを除く。

備考６　「表面の塗装」とは、多重塗装の場合には最外層の塗装をいう。

備考７　「床上敷物下の詰め物」とは、キーストン構造の床に詰めるものをいうが、金属と金属の間又は金属と床敷物の間に挟まれたハードボード、耐水ベニヤ等もこの規定の詰め物に含まれる。

備考８　床下に設置した機器から発生する熱風が床下面に影響を与えないよう、床下面の下に金属板を取り付けた場合には、当該金属板を「床下面」とみなす。

備考９　「床下の機器箱」には、リレー等のカバーは含まない。

備考 10 (2)の表中、特殊鉄道欄の種類の略称は、次のとおりとする。

モ：懸垂式鉄道及び跨座式鉄道

ア：案内軌条式鉄道

ム：無軌条電車

サ：鋼索鉄道

フ：浮上式鉄道

1-2-2. JR 北海道石勝線火災事故

2011 年 5 月 27 日金曜日（21 時 55 分頃）、北海道勇払郡占冠村字ニニウ 2953 番地（図 1-3、図 1-4）、JR 石勝線・清風山信号場構内、第 1 ニニウトンネル内において、ディーゼル列車が脱線し、出火する事故が発生した。列車はトンネル内で緊急停車し、その直後、6 両編成の最後尾の車両の原動機より出火が確認された。火災は最終的に列車の内装を焼切るまで拡大したが、幸い 1 人も死者を出すことなく乗員・乗客全員が生還した。事故後の調査により列車の脱線原因や燃料タンクの損傷が明らかとなった。

図 1-3 地図 1

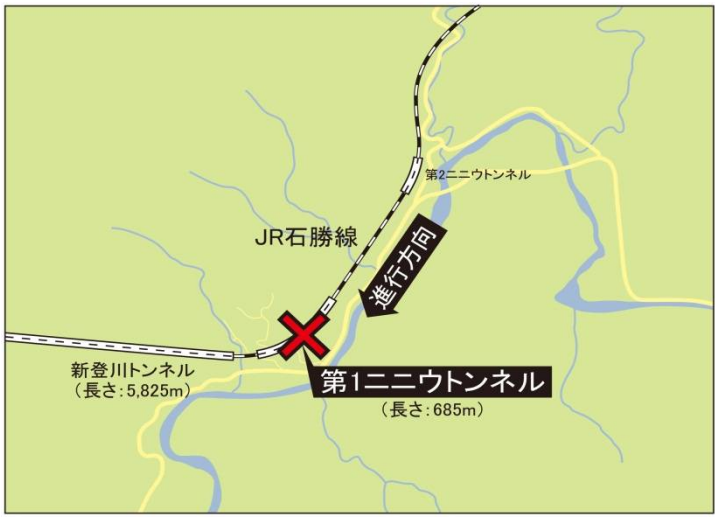

図 1-4 地図 2

図 1-5　事故後の車両

図 1-5 から事故が起きたときにフラッシュオーバーが発生したと考えられる。

1-3.難燃性について

　ここで、自動車の内装、建築物の居室、鉄道車両の内装の難燃性の基準についてそれぞれ記述する。

1-3-1.自動車の内装の基準

自動車に使われる内装は、燃えにくい材料を使用することが法律で定められている。

室内材料が非常に燃えやすいもので製作されていたとしたら、事故などによる火災時に早く燃え広がり、乗車している人間に生死にかかわる危険が及ぶ可能性からである。

道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 別添 27(内装材料の難燃性の技術基準)[10]には内装材料の基準が定められている。

自動車の内装材料とは以下のことを指す。(保安基準 別添 27 より抜粋)

「「運転者室等の内装材料」とは、座席、座席ベルト、シート組み込み式年少者用補助乗車装置、天井張り、コンバーチブルトップ、アームレスト、ドアトリム、フロントトリム、リアトリム、サイドトリム、リアパッケージトレイ、後部後傾抑止装置、カーペット、マット、サンバイザ、サンシェード、ホイールハウスカバー、エンジンコンパートメントカバー、マットレスカバー、インストルメントパネルパッド、乗員が衝突したときに衝撃を吸収するよう設計されたステアリングセンターパッド、エアバッグの膨張部分及びニーボルスタであって車体に固定されているものの構成材料をいう。ただし、寸法が２９３mm 又は幅２５mm に満たないものはのぞく。」

「鋼板、アルミ板、厚さ３mm 以上の木製の板（合板を含む)、及び天然の皮革は難燃性材料とみなす。」

以上の部位に使用されている布・繊維などの燃えにくさを試験によって調べるのが難燃性試験である。

試験手順は以下である。試験装置を図 1-6 に示す。

手順に従って 5 個の試験片について試験を行う。
試験片を室内側が下面になるよう、水平に固定。試験片短辺自由端中央下 19mm にガスバーナの出炎管の中心を置く。
試験片を少なくとも 15 秒間炎にさらす。
決められた領域での燃焼の進行により、試験片の燃焼速度を計算する。

判断基準は以下である。
５個の試験片は、それぞれ、次のいずれかの基準に適合すること。
(1)燃焼しないこと。
(2)試験片の燃焼速度の最大値が、100mm/分を超えないこと。
(3)試験片の燃焼が、A 標線に達してから 60 秒経過する前に停止し、かつ、A 標線に達した後の試験片の長さが 50mm 未満であること。
「鋼板、アルミ板、厚さ 3mm 以上の木製の板（合板を含む)、及び天然の皮革は難燃性材料とみなす。」

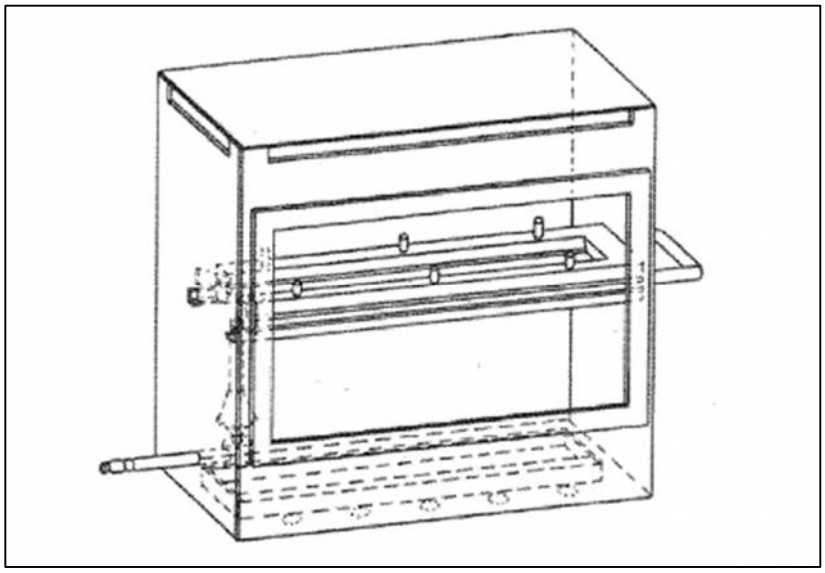

図 1-6　自動車の試験装置

1-3-2.建築物の居室

（指定された居室の）壁、天井の内装材についても、燃えにくい材料を使用することが法律で定められている。

「建築基準法施行令第 1 条の六、平成 12 年 建告第 1402 号　難燃材料を定める件」には難燃性に関する基準が定められている。

主たる試験は発熱性試験（ISO5660-1 に準拠）である。

発熱性試験とは、建築材料の表面側の燃焼性状を評価する試験法である。試験体（100mm×100mm）を水平に置き、その上方からコーン型の電気ヒーターにより 50kW/㎡の輻射加熱を与え、電気スパークの口火により着火させ、燃焼性を発熱量により判定する。

難燃性の判断基準は以下である。

5 分間の加熱に対して

・防火上有害な変形・溶融・亀裂その他の損傷を生じないこと。

・総発熱量が 8MJ/㎡以下であること。

・200kW/㎡を超える発熱速度が 10 秒以上継続しないこと。

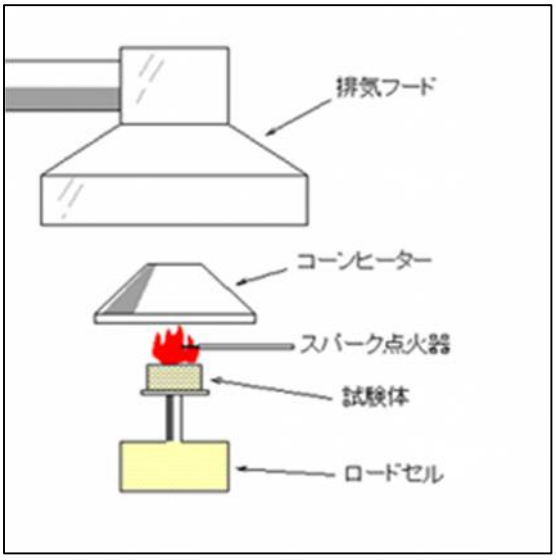

図 1-7　コーンカロリーメーター試験装置

1-3-3.鉄道車両の内装

鉄道車両の難燃性の基準については、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準　第五節　車両の火災対策等」で定められている。

対象は、一般旅客車、地下鉄等旅客車及び新幹線旅客車の内装材料である。

試験方法は、B5 板の供試材を 45°傾斜に保持し、燃料容器の底の中心が、供試材の下面中心の垂直下方 25.4mm のところにくるように、コルクのような熱伝導率の低い材質の台にのせ、純エチルアルコール 0.5cc を入れて着火し、燃料が燃え尽きるまで放置する。(A-A 基準と同様の試験)

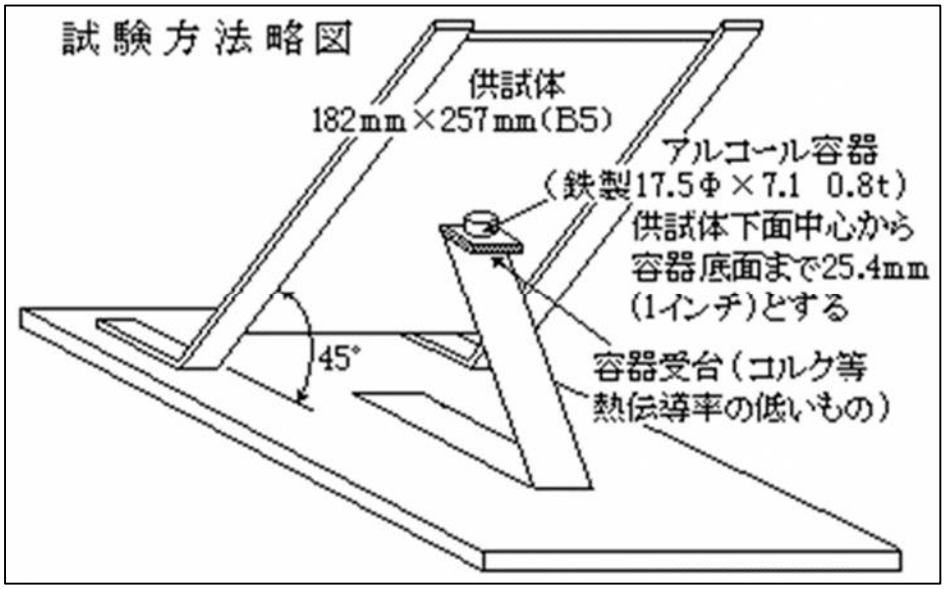

図 1-8　鉄道車両の試験装置

アルコール燃焼中と後で、着火の有無、煙の量、火の勢い、残炎、残じん、変形の様子から燃焼性能を判断する。

表 1-5　鉄道車両用材料の燃焼性規格 1

区分	アルコール燃焼中				アルコール燃焼後			
	着火	着炎	煙	火　勢	残炎	残じん	炭　化	変　形
不燃性	な し	な し	僅　少	－	－	－	100mm 以下の変色	100mm 以下の表面的変形
極難燃性	な し	な し	少ない	－	－	－	試験片の上端に達しない	150mm 以下の変形
	あ り	あ り	少ない	弱い	な し	な し	30mm 以下	
難燃性	あ り	あ り	普　通	炎が試験片の上端を超えない	な し	な し	試験片の上端に達する	縁に達する変形、局部的貫通孔

表 1-4 の鉄道に関する技術上の基準を定める解釈基準にある客室の天井について耐燃焼性が定められている。
耐燃焼性は、以下の鉄道車両用非金属材料の試験方法により、次表の規格による。

表 1-6　鉄道車両用材料の燃焼性規格 2

総発熱量[MJ/㎡]	着火時間[sec]	最大発熱速度[kW/㎡]
8 以下	－	300 以下
8 を超え 30 以下	60 以上	

コーンカロリーメーター試験装置を使用し（ISO5660-1 に準拠）、縦横約 100mm の正方形で厚さ 50mm までの大きさで表面が平坦な供試材とし、加熱強度 50kW/㎡で 10 分間行う。

試験は、供試材 3 枚の最大発熱速度の平均値と各供試材の最大発熱速度の差が 10%未満であることを確認し、10%未満の場合は当該 3 枚の供試材のデータを採用する。10%以上となる場合には、更に供試材 3 枚の試験を行い、これらの供試材 6 枚のうち、最大発熱速度の最大値と最小値を除く 4 枚の供試材のデータを採用する。燃焼判定は、試験時間中に計測された総発熱量[MJ/㎡]及び最大発熱速度[kW/㎡]並びに着火時間[sec]で行う。

着火時間[sec]は、試験片から炎が確認されてから 10 秒以上炎が存在した場合を着火とみなし、試験開始から最初に着火が確認されるまでの時間とする。

本論文は、以下のような構成である。第二章においてコーンコロリーメーターによる実験で燃焼性能を確認し、第三章において空間別に燃焼状況を確認することを目的としている。第四章では、第二章、第三章の実験の結果から二層ゾーンモデルを適用し火災推定を行い、また火炎、煙層からの放射量による試験体の影響を考察する。第五章で本実験の総括を述べる。

第二章　コーンカロリーメーター試験

2.コーンカロリーメーター試験

2-1. 座席概要

本実験で用いた座席（図 2-1）は、三菱ふそう U-MS729（平成 4 年式）呉羽架装のサロンシートである。ただし、この情報は座席の入手先（オークション出品者）からの情報であることに留意しなければならない。座席の状態は年式相応で、汚れ、へたりがある。また、図にあるヘッドカバーは付属していない。

表面はモケット生地、クッション材はポリウレタンウォーム（以下ウレタン）、である。

モケット生地とは、縦糸と横糸に綿糸や麻糸、リネン糸、化学繊維などを使い、ウールや化学繊維（ポリエステルなど）の糸を織り込んで多数のパイルを作る。様々な色の糸をパイルとして織り込むことにより模様をつける。肌触りが滑らかで、耐久性が高く長持ちするため、長期間にわたり使用される航空機・鉄道車両・バス・高級乗用車の座席の表地や、絨毯・椅子・ソファなどに使用される。

図 2-1　バス座席

2-2. 実験概要

実験方法は、コーンカロリーメーター装置(図 2-2)を使用し、ISO 5660-1 に準ずる方法によって行った。熱放射のある場での建築材料の着火性や発熱性を調べるための装置で、円錐形の電気ヒータの下に試験体を置き、ヒータから熱放射を加えつつ試験体表面上 10mm のところにパイロット炎を当てる。熱放射は 0～ 50kW/㎡までの範囲に設定でき、それぞれの熱放射での着火時間・発熱量を測定することができる。

図 2-2　コーンカロリーメーター装置

試験では、発熱速度や発熱量を「酸素消費法」と呼ばれる方法によって求めている。これは、燃焼によって生ずる発熱量は、燃焼する物質の重量当たりで考えると物質ごとに大きく異なるが、消費される酸素の重量で考えると、物質の種類によらずほぼ一定の数値を示すことを利用している。(酸素 1kg 当たり 13.1MJ)

○実験日程

2013 年 11 月 29 日(金)

○実験場所

東京理科大学・火災科学センター実験棟

室温 20 ℃、湿度 50 %、気圧 1013 hPa の室内で行った。

○実験条件

ヒータの加熱条件は、10、30、50　kW/㎡とした。

測定項目は以下である。

・総発熱量（THR）
・最大発熱速度（HRR）
・平均発熱速度（HRR）
・平均発熱速度 T60
・平均発熱速度 T180
・平均発熱速度 T300
・最終試験体質量
・試験体質量減少
・着火時間
・消煙時間
・燃焼時間
・200 k 超過断続時間
・200 k 超過総時間
・平均燃焼有効発熱量（HOC）
・平均質量減少率（MLR）
・デジタルカメラによる記録

試験体は、バス座席の座面部分から採取した。

試験体寸法は、ウレタン：10×10×3cm、モケット生地：10×10×0.3cm である。

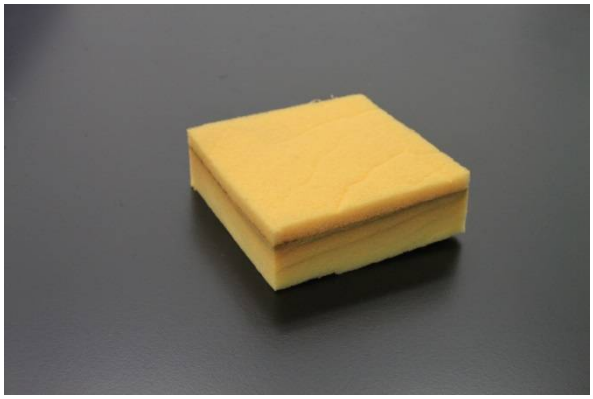

図 2-3　ウレタン

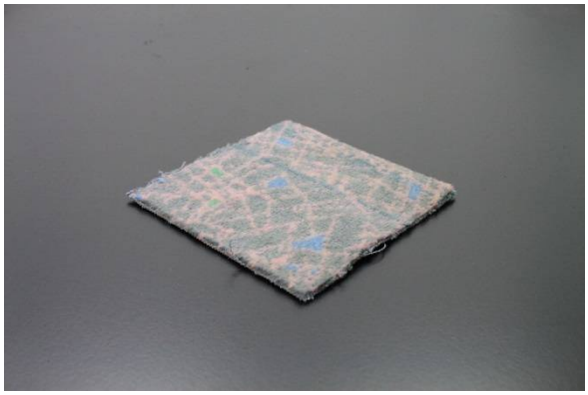

図 2-4　モケット生地

2-3. 実験結果

2-3-1.着火時間

各試料に対する加熱強度に対する着火時間の関係を表 2-1 に示す。ウレタン、モケット生地を比較すると、モケット生地の方が着火し難い。

10kW/㎡の加熱強度において、ウレタンは 30,50kW/㎡の加熱強度のときと比べて着火に時間を要した。対してモケット生地は着火しない試料があった。

加熱強度が高くなると着火時間も短くなる傾向を示し、50kW/㎡の加熱強度では、ウレタンにおいて 3 秒程度、モケット生地において 6, 7 秒程度であった。

各加熱強度の着火時間から着火の容易さをみると、モケット生地＜ウレタンとなった。着火しなかったモケット生地について表面の炭化が確認された。

表 2-1 加熱強度に対する着火時間と最大発熱速度

試料番号	試料名	加熱強度 [kW/㎡]	着火時間 [sec]	最大発熱速度 [kW/㎡]	総発熱量 [MJ/㎡]
1	ウレタン	50	3.6	588.522	34.46
2	ウレタン	50	3.1	579.342	34.58
3	ウレタン	50	3.1	572.522	34.45
4	ウレタン	30	5.6	462.104	36.70
5	ウレタン	30	4.9	410.620	39.14
6	ウレタン	10	199.9	201.777	31.73
7	ウレタン	10	56.5	390.736	39.04
8	ウレタン	10	41.1	387.160	38.49
9	モケット生地	50	7.3	443.777	18.32
10	モケット生地	50	5.9	421.973	18.85
11	モケット生地	50	6.1	441.084	18.77
12	モケット生地	30	56.1	243.105	15.76
13	モケット生地	30	18.2	223.901	16.17
14	モケット生地	10	260.3	127.489	8.89
15	モケット生地	10	不着火	－	－
16	モケット生地	10	不着火	－	－

2-3-2.発熱速度と総発熱量

各試料の発熱速度の時間変化を図 2-5～図 2-10 に示す。最大発熱速度の関係は表 2 右端に示す。

加熱強度 50kW/㎡の場合、試料 1-3 のウレタンの最大発熱速度は約 570～590kW であり、総発熱量は約 34MJ/㎡だった。試料 9-11 のモケット生地の最大発熱速度は約 420～440kW であり、総発熱量は約 18MJ/㎡だった。

加熱強度 30kW/㎡の場合、試料 4,5 のウレタンの最大発熱速度は約 410～460kW であり、総発熱量は約 36～39MJ/㎡だった。試料 12,13 のモケット生地の最大発熱速度は約 220～240kW であり、総発熱量は約 15～16MJ/㎡だった。

加熱強度 10kW/㎡の場合、試料 6-8 のウレタンの最大発熱速度は約 200～390kW であり、総発熱量は約 31～39MJ/㎡だった。試料 14 のモケット生地の最大発熱速度は約 130kW であり、総発熱量は約 9MJ/㎡だった。試料 15,16 のモケット生地については着火しなかったため発熱速度は測定できなかった。

最大発熱速度を記録した時間は加熱強度 50kW/㎡において約 50 秒前後であり、30kW/㎡において約 55 秒～1 分 20 秒の間であった。10kW/㎡では、加熱が小さかったため、最大発熱速度を記録した時間にばらつきがあったり、着火しない試料があった。

建築物の居室の難燃性の判断基準について、5 分間の加熱に対して

・防火上有害な変形・溶融・亀裂その他の損傷を生じないこと。

・総発熱量が 8MJ/㎡以下であること。

・200kW/㎡を超える発熱速度が 10 秒以上継続しないこと。

が基準となっているが、試料 1 から 14 まで 3 項目すべて満たしていないことがわかった。

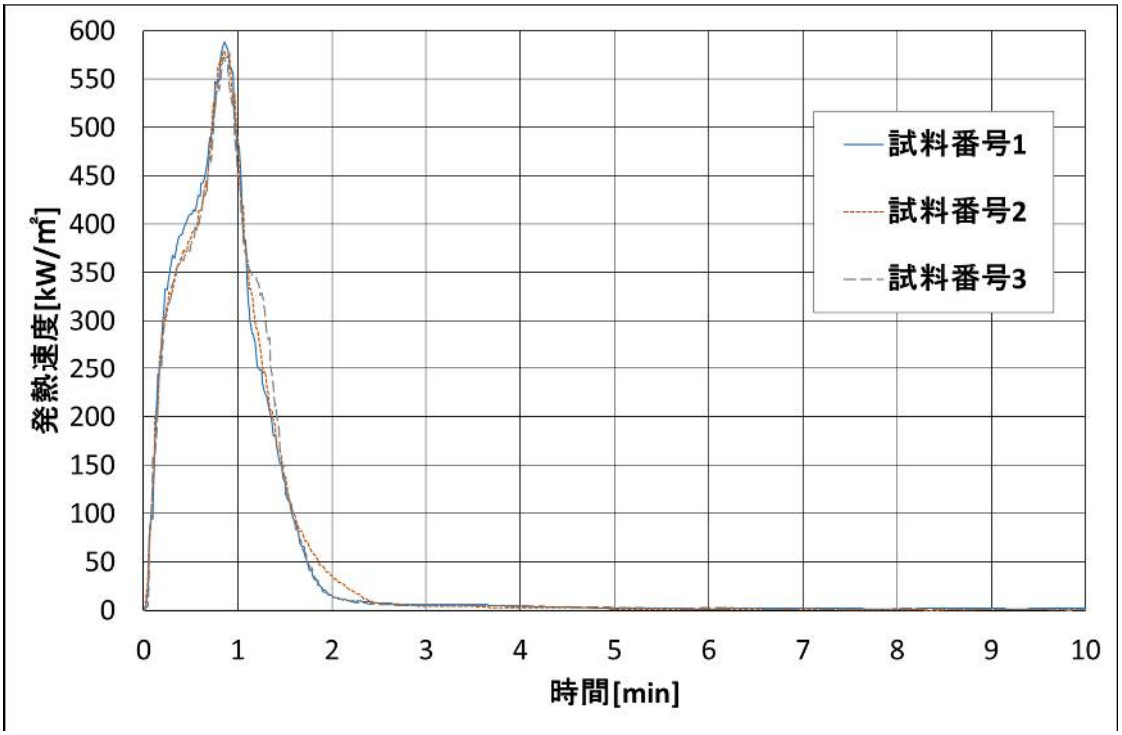

図 2-5 ウレタンの発熱速度の時間変化(加熱強度：50kW/㎡)

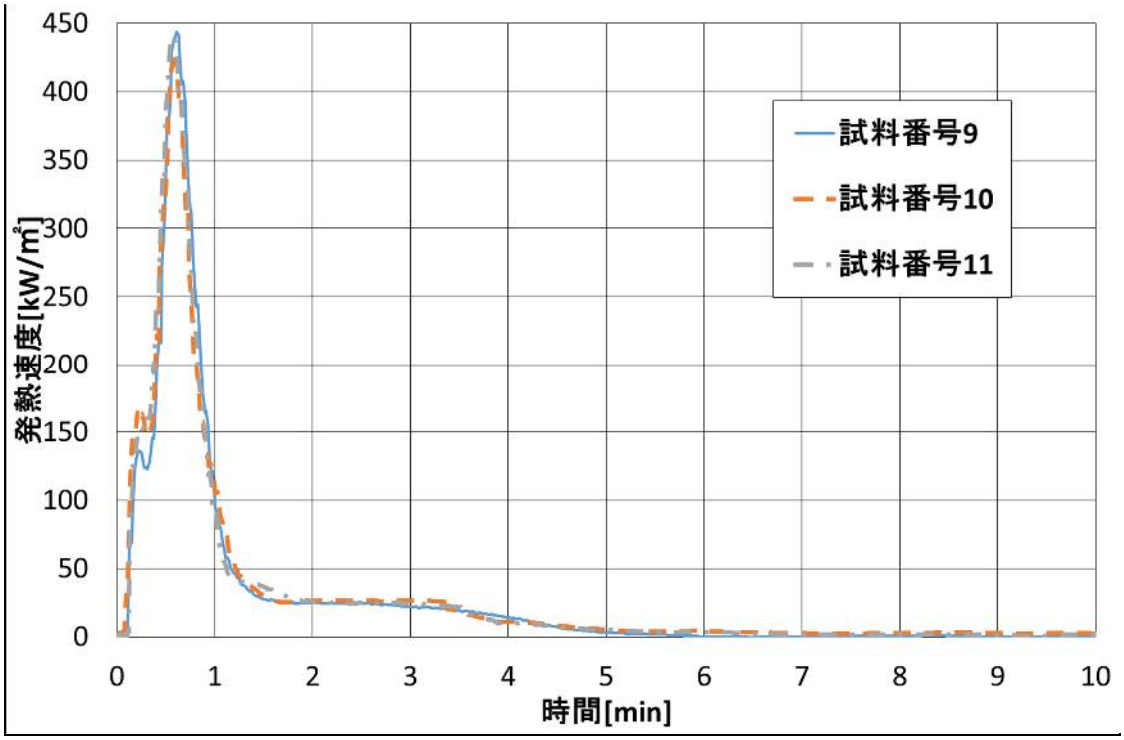

図 2-6 モケット生地の発熱速度の時間変化(加熱強度：50kW/㎡)

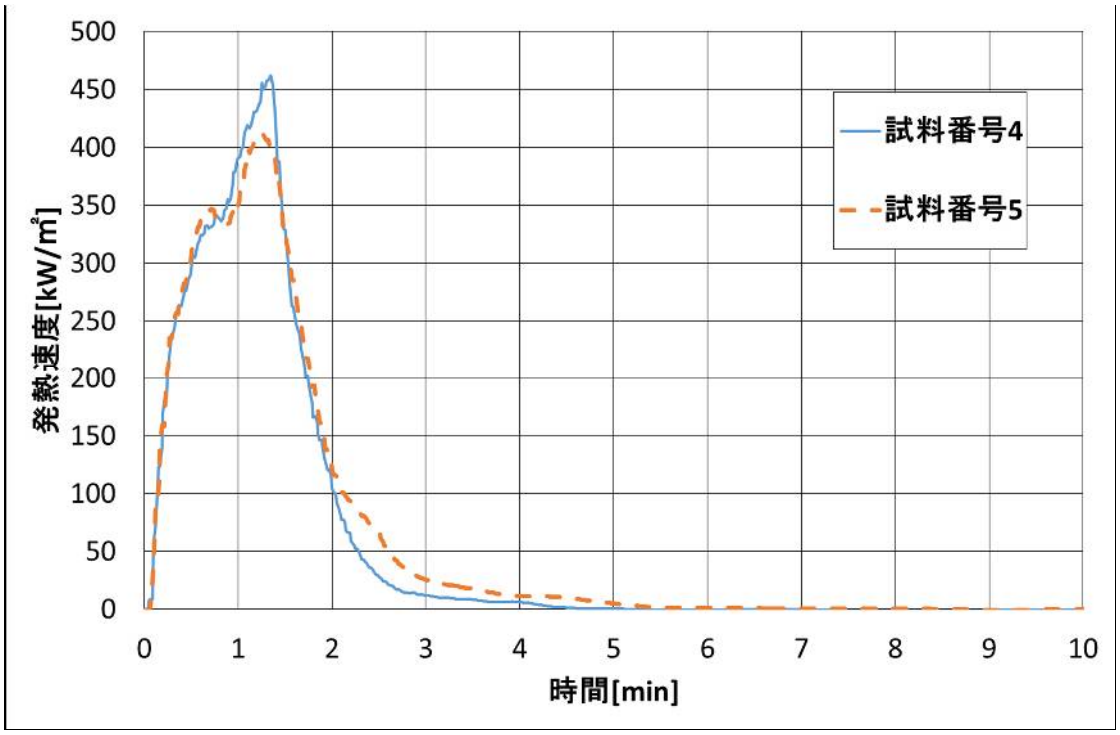

図 2-7 ウレタンの発熱速度の時間変化(加熱強度：30kW/㎡)

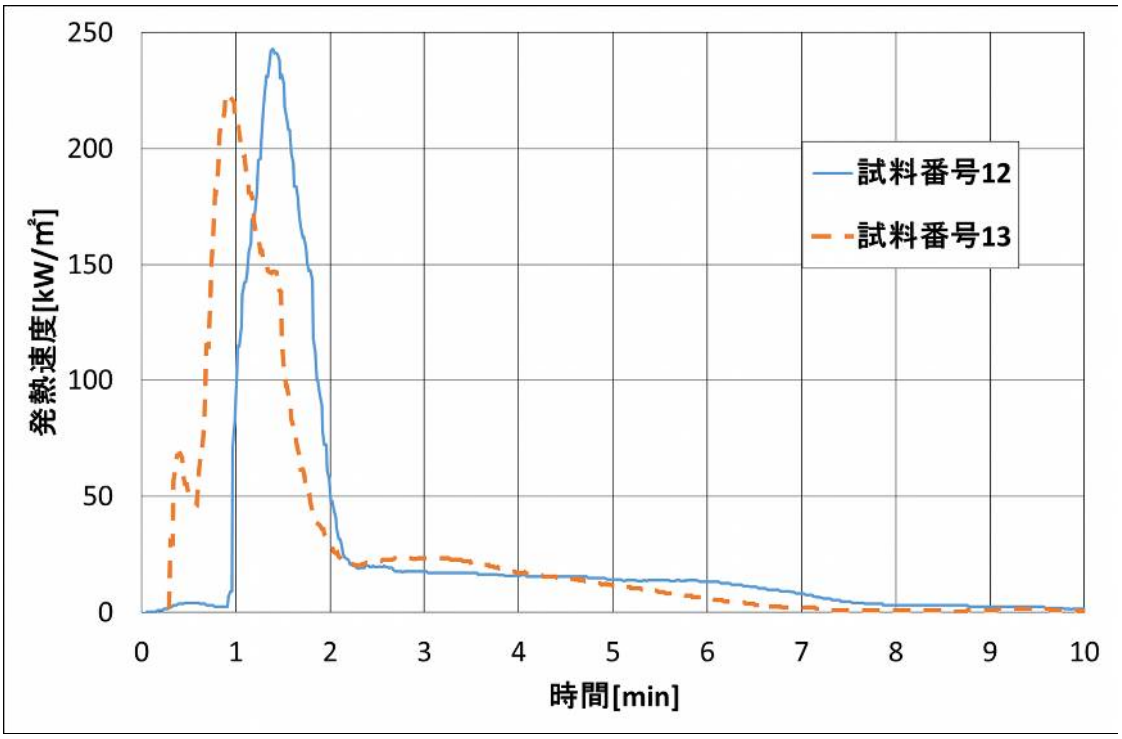

図 2-8 モケット生地の発熱速度の時間変化(加熱強度：30kW/㎡)

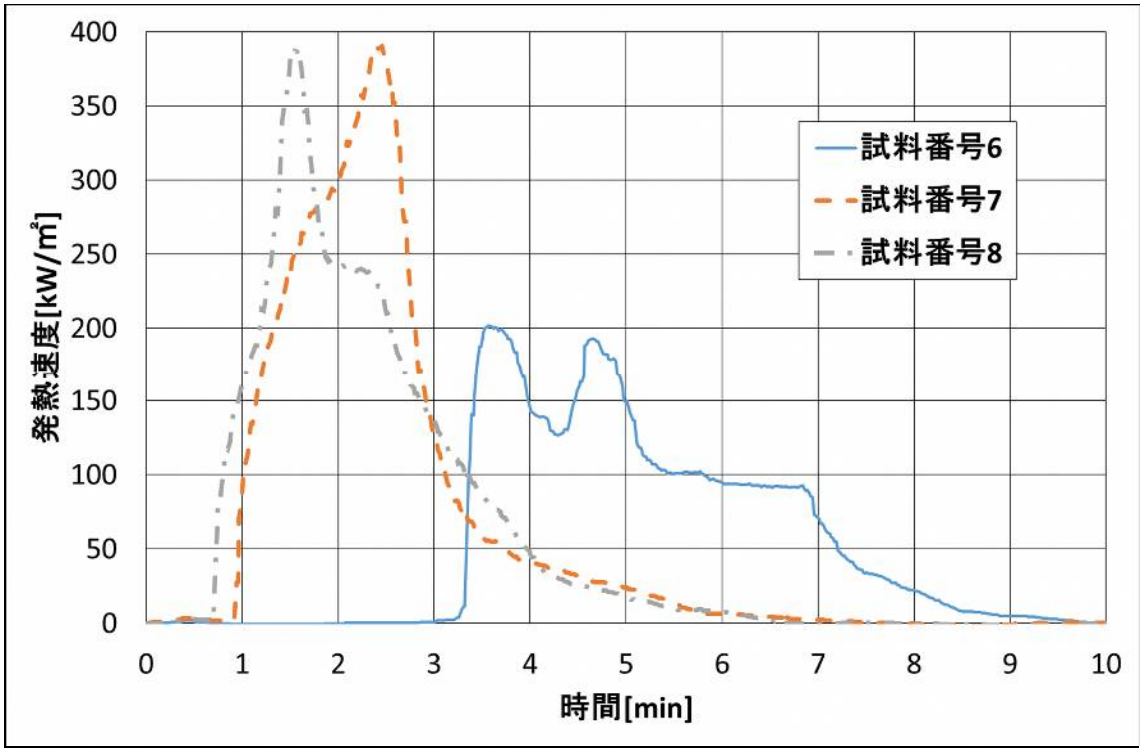

図 2-9 ウレタンの発熱速度の時間変化(加熱強度：10kW/㎡)

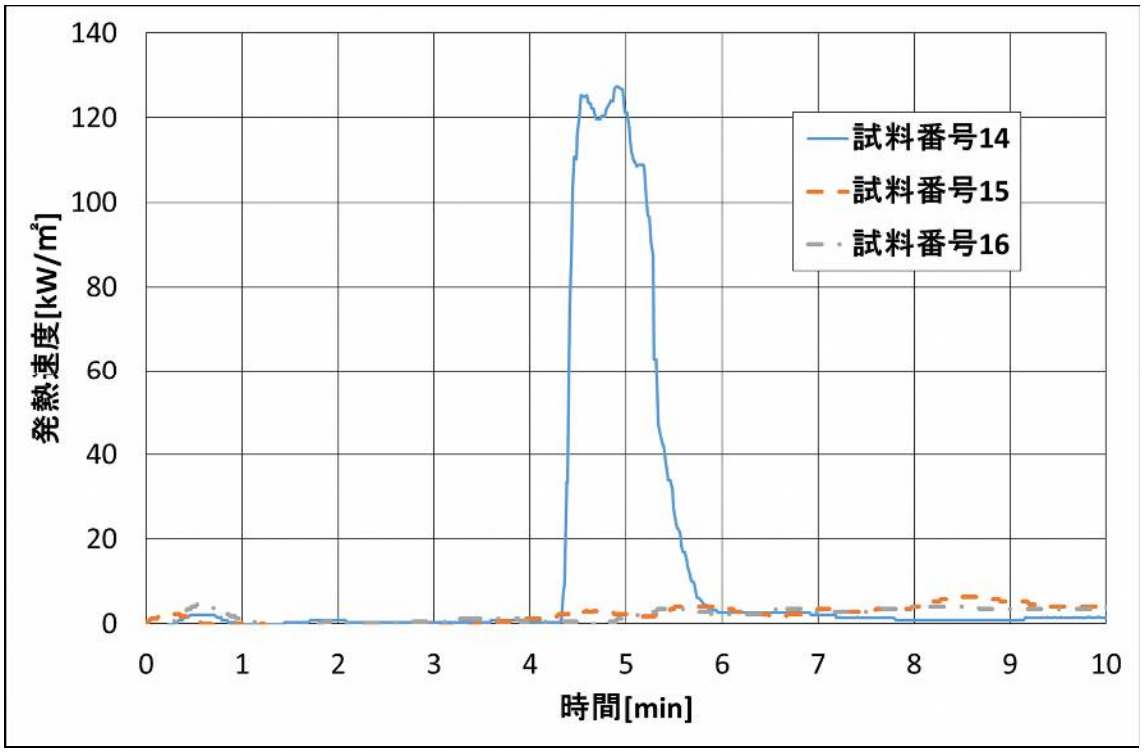

図 2-10 モケット生地の発熱速度の時間変化(加熱強度：10kW/㎡)

2-4. 加熱強度と燃焼熱の関係

図 2-11 に加熱強度と燃焼熱の関係を示す。燃焼熱は式(1)により算出した。

$$\Delta H = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{M}} \cdots (1)$$

ΔH：燃焼熱[MJ/kg]、Q：総発熱量[MJ/㎡]、M：試験体重量減少値[kg]

加熱強度が増加しても、ウレタンもモケット生地も燃焼熱は概ね一定の値を取ることが確認された。これはどの試験体も密度が一様であり、加熱強度が変化しても燃焼率は変化しなかったためであると考えられる。

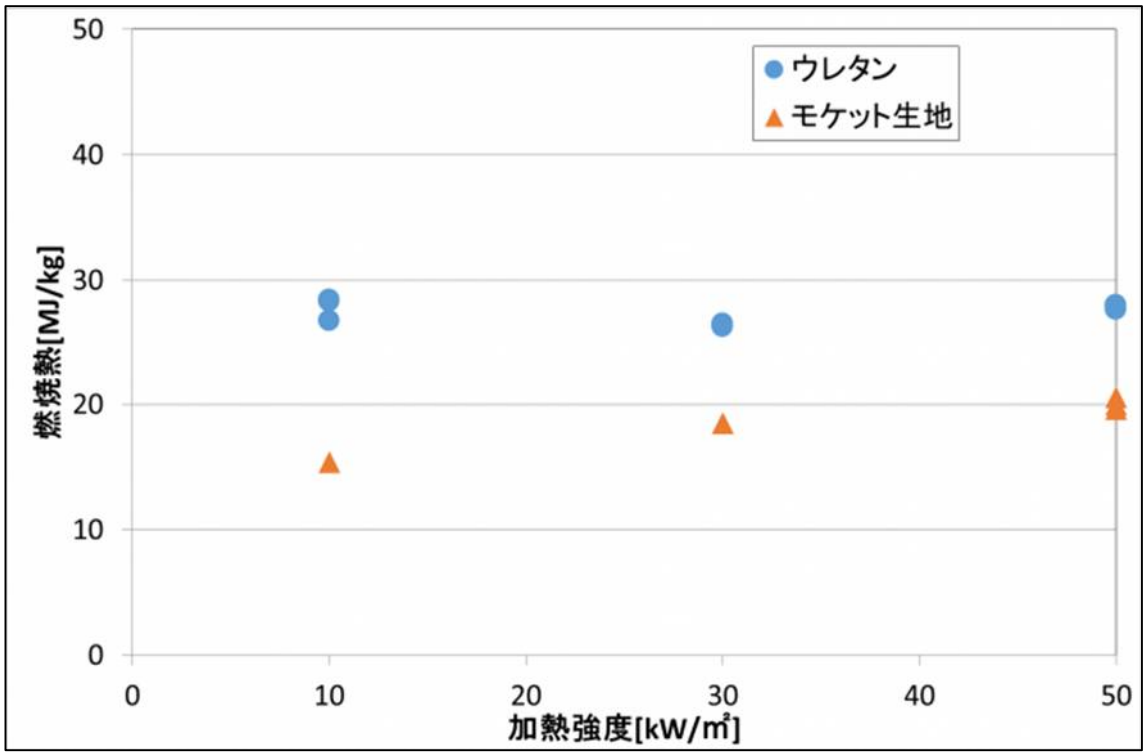

図 2-11　加熱強度と燃焼熱の関係

2-5.加熱強度と着火時間

コーンカロリーメーター試験の結果から加熱強度と着火時間の関係を、ウレタンについて図 2-12、モケット生地について図 2-13 に示す。

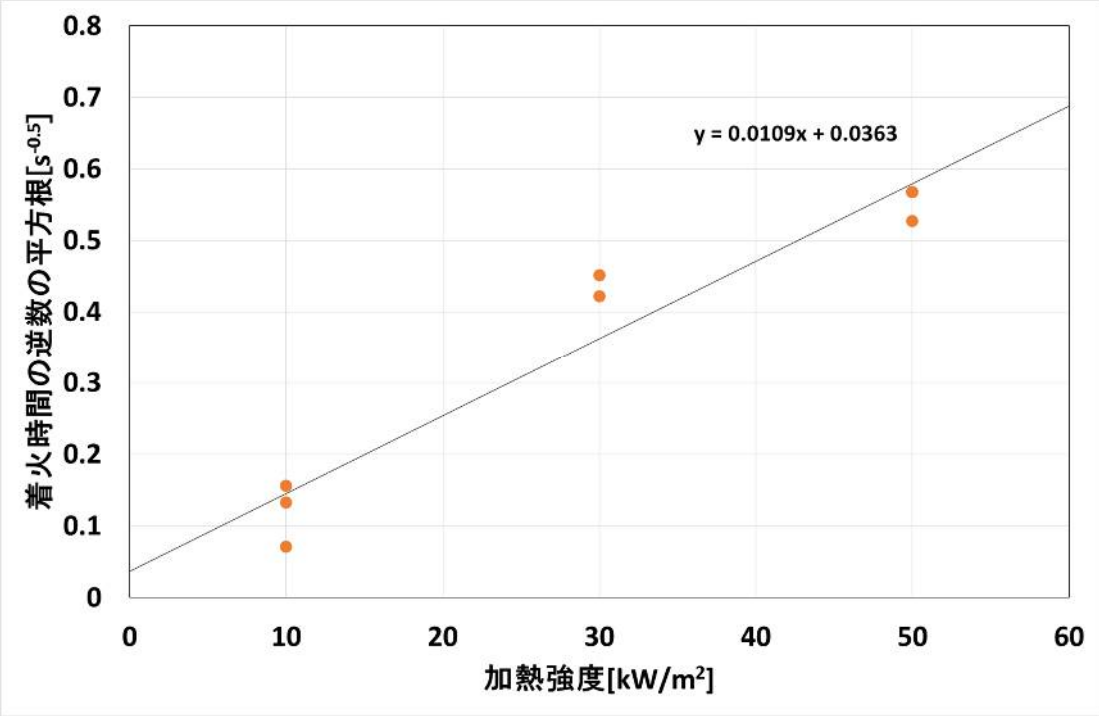

図 2-12 加熱強度と着火時間(ウレタン)

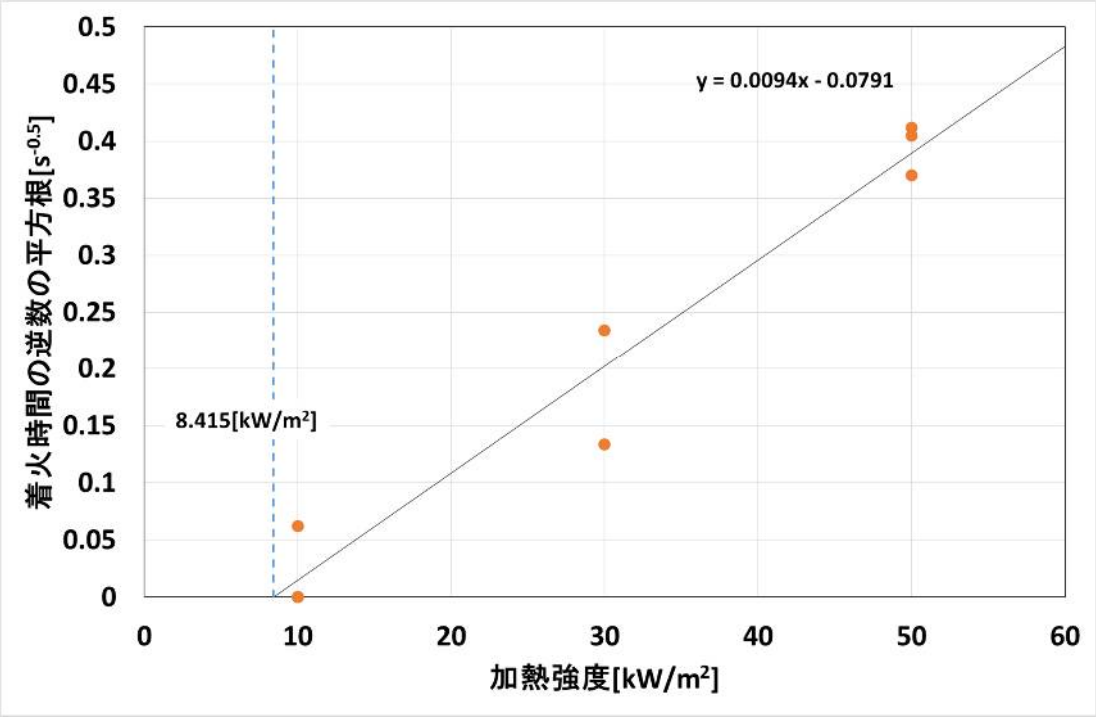

図 2-13 加熱強度と着火時間(モケット生地)

モケット生地は、プロット点に基づく近似直線から算定した限界着火熱流束が 8.415kW/㎡となった。加熱実験において 10kW/㎡で着火したため、実際の限界着火熱流束は 8～10kW/㎡であると思われる。

ウレタンは、プロット点に基づく近似直線から加熱強度が小さくてもすぐに着火すると考えられる。

以下測定値を記載する。平均発熱速度 T60 は計測開始から 60 秒までの発熱速度の平均である。平均発熱速度 T180、T300 についても同様である。200k 超過継続時間は 200kW/㎡を超える発熱速度の継続時間、200k 超過総時間は計測時間中 200kW/㎡を超える発熱速度の合計時間である。

表 2-2 試験結果(ウレタン 1～3)

試料番号		1	2	3
試験結果	総発熱量(THR)	34.46 MJ/㎡	34.58 MJ/㎡	34.45 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	588.52 kW/㎡ at 51.70 sec	579.34 kW/㎡ at 51.30 sec	572.52 kW/㎡ at 51.10 sec
	平均発熱速度(HRR)	57.19 kW/㎡	57.47 kW/㎡	57.51 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	412.79 kW/㎡	398.42 kW/㎡	388.83 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	185.13 kW/㎡	187.68 kW/㎡	184.31 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	112.80 kW/㎡	113.89 kW/㎡	112.66 kW/㎡
	最終試験体質量	0.00 g	0.00 g	0.00 g
	試験体質量減少	12.36 g	12.51 g	12.32 g
	着火時間	3.6 sec	3.1 sec	3.1 sec
	着火時試験体質量	12.31 g	12.39 g	12.25 g
	消炎時間	604.7 sec	603.3 sec	601.1 sec
	燃焼時間	601.1 sec	600.2 sec	598.0 sec
	200k 超過継続時間	73.1 sec	75.0 sec	76.5 sec
	200k 超過総時間	73.1 sec	75.0 sec	76.5 sec
	平均燃焼有効発熱量 (HOC)	23.53 MJ/kg	23.44 MJ/kg	23.91 MJ/kg
	平均質量減少率	16.863 g/s･㎡	15.937 g/s･㎡	16.993 g/s･㎡

表 2-3 試験結果(ウレタン 4,5)

試料番号		4	5
試験結果	総発熱量(THR)	36.70 MJ/㎡	39.14 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	462.10 kW/㎡ at 81.10 sec	410.62 kW/㎡ at 76.40 sec
	平均発熱速度(HRR)	60.92 kW/㎡	65.56 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	292.47 kW/㎡	286.08 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	200.64 kW/㎡	208.02 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	122.25 kW/㎡	129.86 kW/㎡
	最終試験体質量	0.06 g	0.01 g
	試験体質量減少	13.95 g	14.76 g
	着火時間	5.6 sec	4.9 sec
	着火時試験体質量	13.85 g	14.61 g
	消炎時間	607.1 sec	601.4 sec
	燃焼時間	601.5 sec	596.5 sec
	200k 超過継続時間	89.6 sec	91.9 sec
	200k 超過総時間	89.6 sec	91.9 sec
	平均燃焼有効発熱量(HOC)	23.26 MJ/kg	23.43 MJ/kg
	平均質量減少率	14.036 g/s･㎡	12.053 g/s･㎡

表 2-4 試験結果(ウレタン 6～8)

試料番号		6	7	8
試験結果	総発熱量(THR)	31.73 MJ/㎡	39.04 MJ/㎡	38.49 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	201.78 kW/㎡ at 214.40 sec	390.74 kW/㎡ at 147.30 sec	387.16 kW/㎡ at 93.10 sec
	平均発熱速度(HRR)	45.05 kW/㎡	46.09 kW/㎡	68.51 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	162.70 kW/㎡	213.13 kW/㎡	223.61 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	137.89 kW/㎡	197.09 kW/㎡	192.26 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	103.69 kW/㎡	127.82 kW/㎡	126.50 kW/㎡
	最終試験体質量	0.81 g	1.07 g	0.12 g
	試験体質量減少	11.85 g	13.79 g	13.53 g
	着火時間	199.9 sec	56.5 sec	41.1 sec
	着火時試験体質量	11.22 g	14.49 g	13.42 g
	消炎時間	900.4 sec	900.3 sec	601.1 sec
	燃焼時間	700.5 sec	843.8 sec	560.0 sec
	200k 超過継続時間	7.7 sec	87.5 sec	81.9 sec
	200k 超過総時間	7.7 sec	87.5 sec	81.9 sec
	平均燃焼有効発熱量 (HOC)	23.67 MJ/kg	25.04 MJ/kg	25.15 MJ/kg
	平均質量減少率	5.082 g/s・㎡	10.887 g/s・㎡	8.728 g/s・㎡

表 2-5 試験結果(モケット生地 1～3)

試料番号		1	2	3
試験結果	総発熱量(THR)	18.32 MJ/㎡	18.85 MJ/㎡	18.77 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	443.78 kW/㎡ at 36.70 sec	421.97 kW/㎡ at 35.60 sec	441.08 kW/㎡ at 34.90 sec
	平均発熱速度(HRR)	15.30 kW/㎡	31.56 kW/㎡	31.47 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	217.87 kW/㎡	214.50 kW/㎡	219.41 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	90.61 kW/㎡	91.59 kW/㎡	92.53 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	59.24 kW/㎡	59.94 kW/㎡	60.32 kW/㎡
	最終試験体質量	0.00 g	0.26 g	0.00 g
	試験体質量減少	9.34 g	9.43 g	9.13 g
	着火時間	7.3 sec	5.9 sec	6.1 sec
	着火時試験体質量	9.13 g	9.57 g	9.01 g
	消炎時間	1202.7 sec	601.6 sec	601.9 sec
	燃焼時間	1195.4 sec	595.7 sec	595.8 sec
	200k 超過継続時間	27.0 sec	25.0 sec	26.5 sec
	200k 超過総時間	27.0 sec	25.0 sec	26.5 sec
	平均燃焼有効発熱量 (HOC)	16.29 MJ/kg	17.67 MJ/kg	18.17 MJ/kg
	平均質量減少率	4.704 g/s･㎡	5.870 g/s･㎡	6.211 g/s･㎡

表 2-6 試験結果(モケット生地 4,5)

試料番号		4	5
試験結果	総発熱量(THR)	15.76 MJ/㎡	16.17 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	243.11 kW/㎡ at 83.30 sec	223.90 kW/㎡ at 54.60 sec
	平均発熱速度(HRR)	25.81 kW/㎡	25.54 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	166.08 kW/㎡	137.13 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	69.29 kW/㎡	74.85 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	47.40 kW/㎡	51.32 kW/㎡
	最終試験体質量	1.11 g	0.55 g
	試験体質量減少	8.52 g	8.76 g
	着火時間	56.1 sec	18.2 sec
	着火時試験体質量	8.49 g	8.96 g
	消炎時間	660.3 sec	650.6 sec
	燃焼時間	604.2 sec	632.4 sec
	200k 超過継続時間	19.2 sec	14.5 sec
	200k 超過総時間	19.2 sec	14.5 sec
	平均燃焼有効発熱量(HOC)	16.34 MJ/kg	16.33 MJ/kg
	平均質量減少率	3.259 g/s･㎡	1.323 g/s･㎡

表 2-7 試験結果(モケット生地 6～8)

試料番号		6	7	8
試験結果	総発熱量(THR)	8.89 MJ/㎡	2.39 MJ/㎡	1.70 MJ/㎡
	最大発熱速度(HRR)	127.49 kW/㎡ at 294.60 sec	6.41 kW/㎡ at 513.80 sec	4.64 kW/㎡ at 34.60 sec
	平均発熱速度(HRR)	12.10 kW/㎡	1.99 kW/㎡	1.44 kW/㎡
	平均発熱速度 T60	106.24 kW/㎡	0.85 kW/㎡	2.21 kW/㎡
	平均発熱速度 T180	40.15 kW/㎡	0.29 kW/㎡	0.94 kW/㎡
	平均発熱速度 T300	24.53 kW/㎡	0.71 kW/㎡	0.94 kW/㎡
	最終試験体質量	4.26 g	5.12 g	4.62 g
	試験体質量減少	5.12 g	3.98 g	3.96 g
	着火時間	260.3 sec	----	----
	着火時試験体質量	8.19 g	----	----
	消炎時間	900.6 sec	----	----
	燃焼時間	640.3 sec	0.0 sec	0.0 sec
	200k 超過継続時間	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
	200k 超過総時間	0.0 sec	0.0 sec	0.0 sec
	平均燃焼有効発熱量(HOC)	13.62 MJ/kg	5.32 MJ/kg	3.81 MJ/kg
	平均質量減少率	5.948 g/s･㎡	0.711 g/s･㎡	0.736 g/s･㎡

第三章　自由空間、ルームコーナー内における燃焼実験

3.自由空間、ルームコーナー内における燃焼実験

3-1. 実験概要

集煙フード(図 3-1)を使用し、自由空間及びルームコーナー(図 3-2）内にて燃焼実験を実施し、燃焼性能を確認する。

図 3-1　集煙フード

図 3-2　ルームコーナー試験装置

ルームコーナーは、幅 2.4m×奥行き 3.6m×高さ 2.4m(約 6 畳）の空間に、幅 0.8m×高さ 2m の開口を設けた装置である。

試験では、発熱速度や発熱量を「酸素消費法」と呼ばれる方法によって求めている。これは、燃焼によって生ずる発熱量は、燃焼する物質の重量当たりで考えると物質ごとに大きく異なるが、消費される酸素の重量で考えると、物質の種類によらずほぼ一定の数値を示すことを利用している。(酸素 1kg 当たり 13.1MJ)

○実験日程

2013 年 10 月 21 日(月)～10 月 29 日(火)

10 月 23 日(水)：自由空間における 2 人掛け 1 脚の燃焼実験

10 月 29 日(火)：ルームコーナー内における 2 人掛け 4 脚の燃焼実験

○実験場所

東京理科大学・火災科学センター実験棟

10 月 23 日(水)：気温 16.1°、相対湿度 75% （気象庁から。館野、9 時の計測値）

10 月 29 日(火)：気温 12.6°、相対湿度 82% （気象庁から。館野、9 時の計測値）

○実験条件

着火は昭和 48 年に狩勝実験線で行われた列車火災実験のビデオ映像をもとに行う。次回の鉄道車両の座席の燃焼性との比較を見越して昔の鉄道の実験で用いた着火方法に準ずる形をとった。

<u>着火材</u>

新聞紙：1 日（40 ページ）分、エタノール 400cc、（着火棒）

<u>着火手順</u>

①座席に新聞紙を立てかける。新聞紙の立て方は、新聞紙を三つ折りにした状態（長辺：約 28cm、短辺：約 21cm）で長辺を座面に接触させて立てかける。

②エタノール 400cc を座面及び新聞紙にかける（手順①から 1 分後）。エタノールのかけ方は、新聞紙上部の座席背もたれからかけ始め、新聞紙、座面とまんべんなくかける。

③新聞紙に着火棒を用いて着火する（手順②から 1 分後）。

測定項目は以下である。

・燃焼に伴う重量変化

・酸素消費法に基づく発熱量

・着火点の直上温度、ルームコーナー内温度

・放射量

・デジタルビデオカメラおよびデジタルカメラによる記録

重量変化は、ビーム型ロードセル LUB-30KB、LUB-50KB（共和電業製）（図 3-3 左)により測定した。

着火点の直上温度、ルームコーナー内温度は、K 熱電対(図 3-3 中央)により測定した。

放射量は、水冷式ガードン型熱流計(MEDTHERM 社製）（図 3-3 右)により測定した。

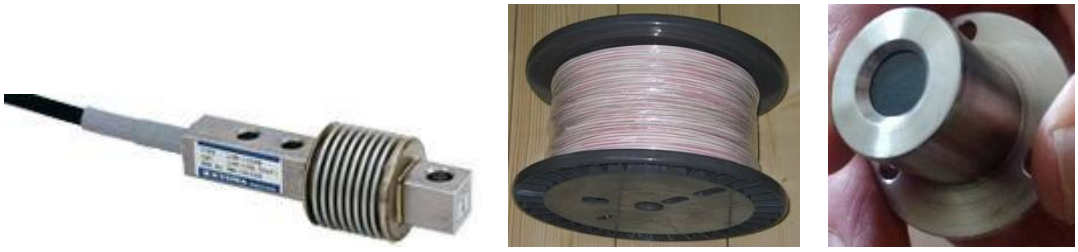

図 3-3 各実験計測機器

各測定機器の配置図を 10 月 23 日（水）に実施した「自由空間における 2 人掛け 1 脚の燃焼実験」10 月 29 日（火）に実施した「ルームコーナー内における 2 人掛け 4 脚の燃焼実験」の順に次頁、図 3-4～3-7 から示す。

自由空間では集煙フードの中央下に座席を設置した。座席をロードセル台に載せ、座面から直上に 400mm 間隔で 5 点熱電対を設置した。また、熱流計を着火点から水平方向に 1m、鉛直方向に座席の基準面（ケイ酸カルシウム板上面）から 0.5m の位置と、着火点から水平方向に 1.5m、鉛直方向に座席の基準面から 1m の位置の二か所に設置した。

ルームコーナー内では、開口部が集煙フードの中に入るようにし煙を逃さないようにした。着火させる座席とその前方の座席をロードセル台に載せる。熱電対を着火点の直上に座面から 200mm 間隔に 8 点、ルームコーナーの隅に基準面から 200mm 間隔に 11 点に設置した。熱流計を開口部中心から外部に 500mm 離れた位置に、基準面から 0.5m と 1m の位置で測定した。

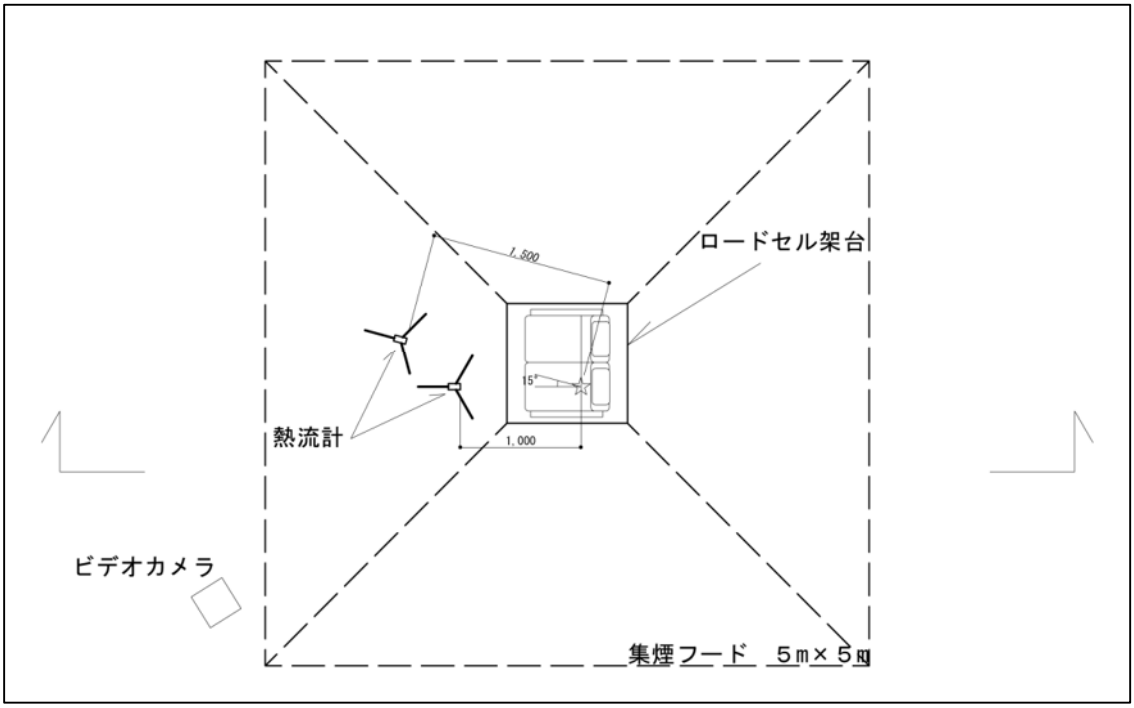

図 3-4　自由空間平面図

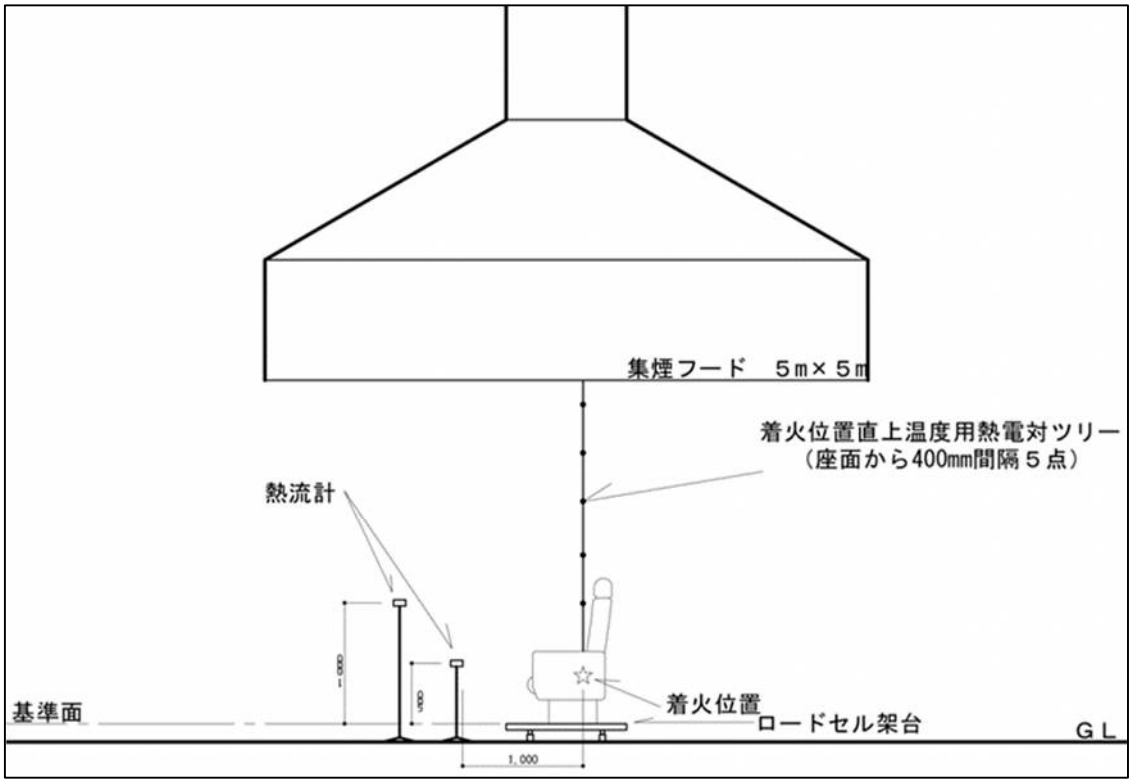

図 3-5　自由空間断面図

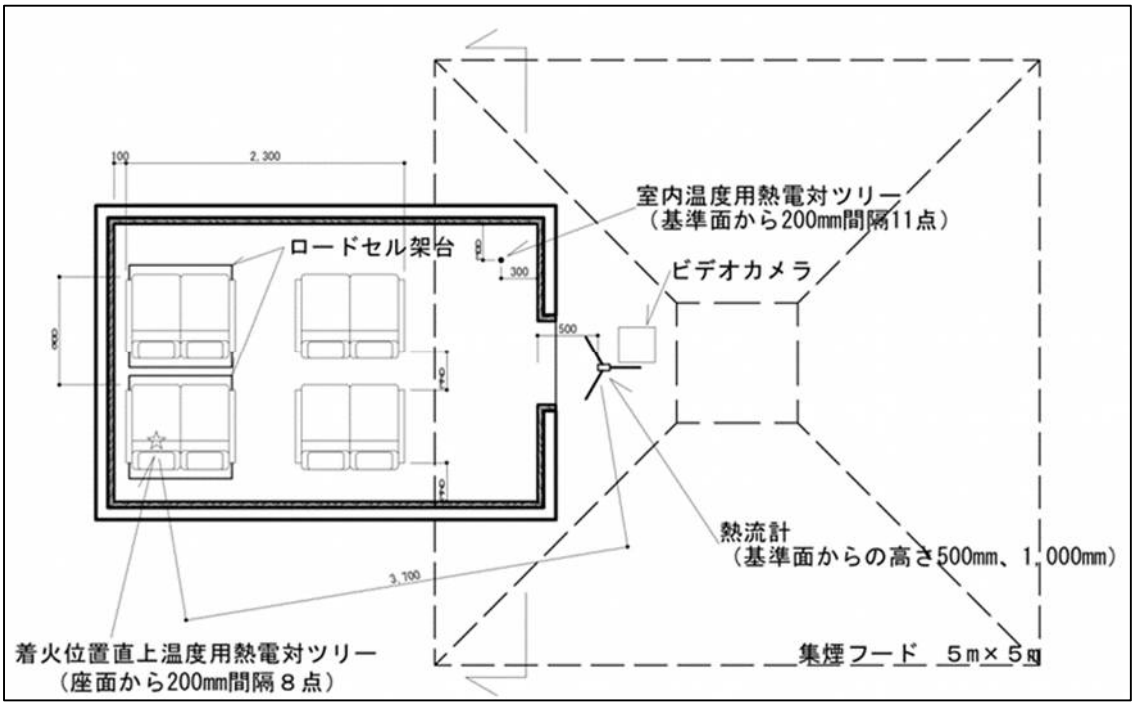

図 3-6　ルームコーナー平面図

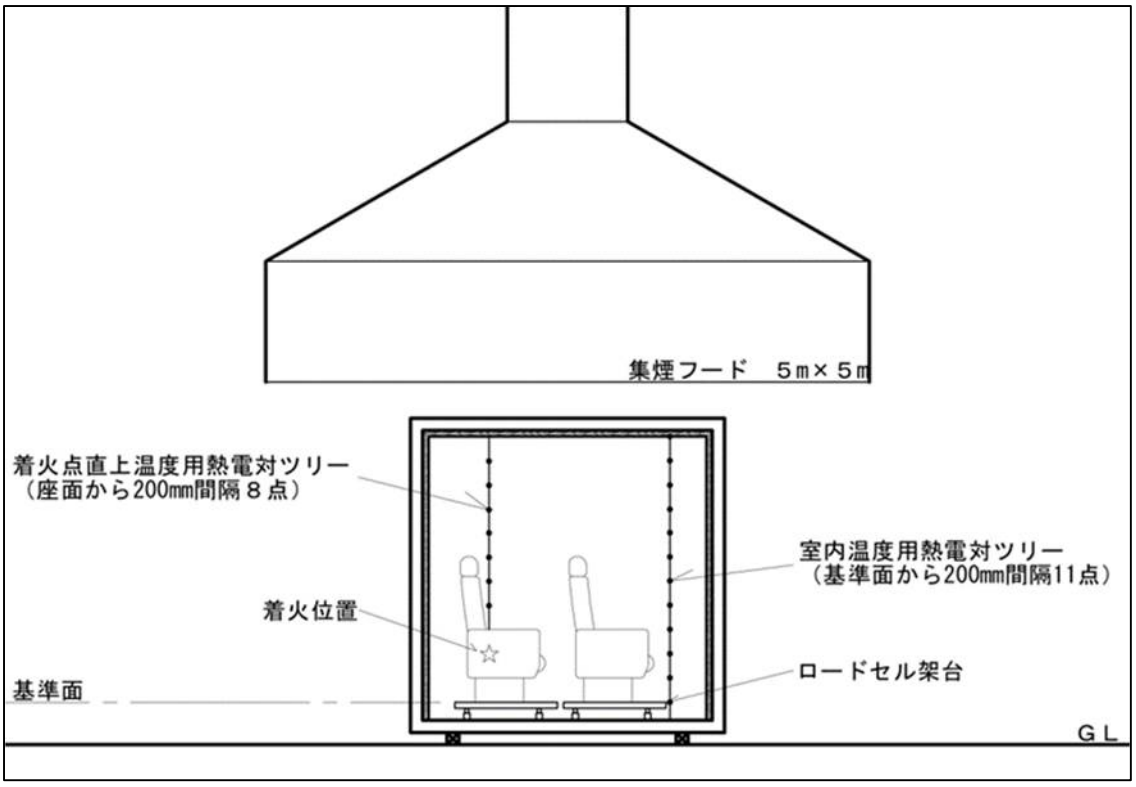

図 3-7　ルームコーナー断面図

3-2. 実験結果

ルームコーナー内の実験中にフラッシュオーバーが発生したため、安全を考慮し燃焼途中で実験を中断し消火作業にあたった。

計測データは、消火作業の影響のない着火後から 20 分までを使用した。

3-2-1.重量変化

自由空間、ルームコーナー内で測定した重量変化を図 3-8、3-9 に示す。

自由空間の燃焼では、着火後、エタノールをかけた 1 人分の座席の部分だけで燃焼をしていた。約 10 分後にクッションの中のウレタンが燃え出し座席全体に燃え広がり、重量減少が加速した。重量は約 1 時間で 13.12kg 減少した。

ルームコーナー内での燃焼では、着火後、約 13 分までは自由空間同じ燃焼であったが、約 14 分後にフラッシュオーバーが起こり、急に燃焼が加速され、周辺の 3 脚が同時に燃えだした。

重量は約 20 分で、着火源の座席が 6.11kg、その前方の座席が 3.71kg 減少した。フラッシュオーバーが起きた 14 分後に重量減少速度が速くなり、傾きが急になっていることがわかる。

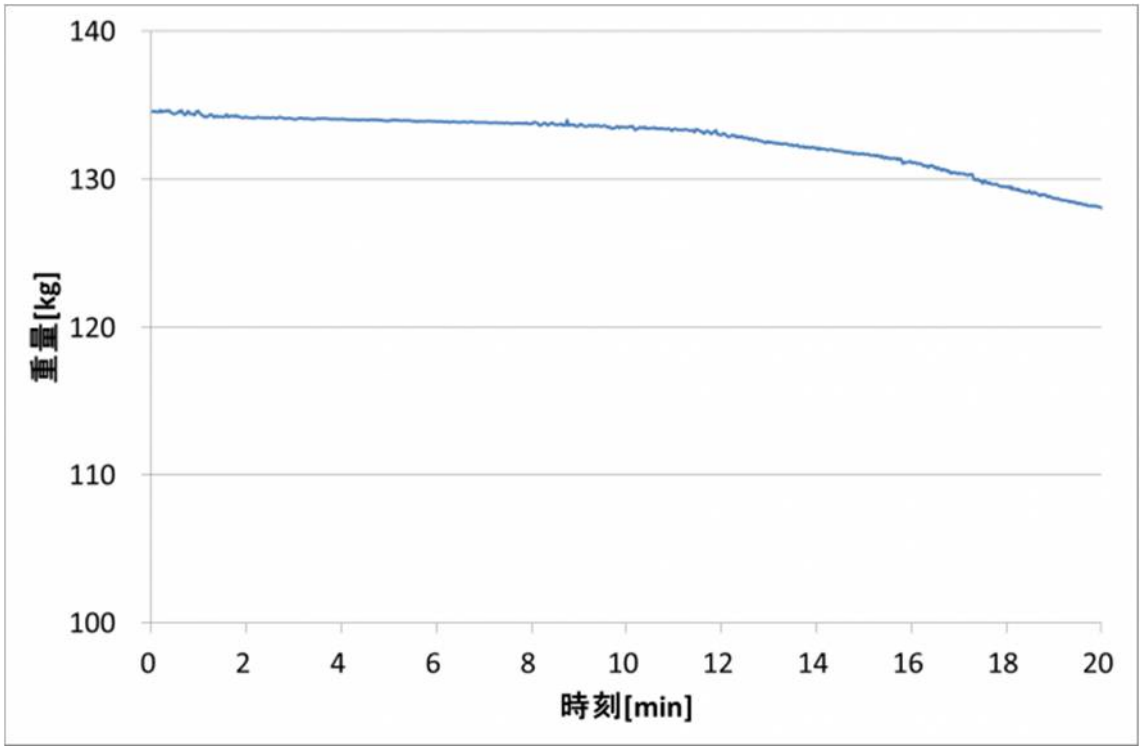

図 3-8 自由空間における重量変化

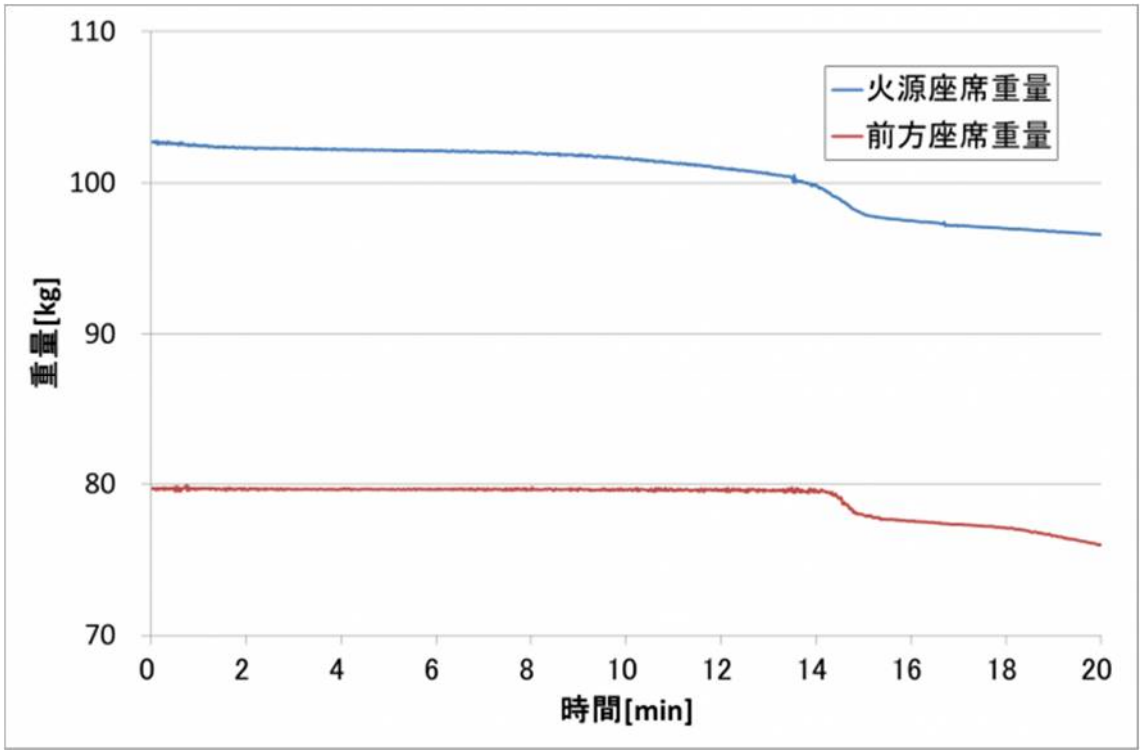

図 3-9 ルームコーナー内における重量変化

3-2-2.直上温度

自由空間の着火地点からの直上温度を図 3-10 に示し、ルームコーナー内の着火地点からの直上温度を図 3-11、角に設置した室内温度を図 3-12 に示す。

自由空間において、直上温度は座面から 400mm、800mm、1200mm、1600mm、2000mm の位置で測定を行った。着火後 12 分後と 16 分後において燃焼が大きかったことがわかる。

400mm の地点では、火に近い、または触れていたため他の地点よりも変動が激しい。

着火直後の山は主にエタノールの燃焼によって生じている。12 分付近でみられる山は、着火側の背もたれ内のウレタンが燃焼したことで生じ、16 分付近でみられる山は、背もたれ 2 人分が燃焼したことで生じている。

ルームコーナー内において、直上温度は座面から 400mm、800mm、1200mm、1600mm の位置で測定を行った。着火後 10 分が経過した段階でどの地点においても急激に温度が上昇していることがわかる。フラッシュオーバーが起きた 14 分後に更に温度の上昇が見られた。

着火後 14 分が経過した段階でどの地点においても急激に温度が上昇し、800℃を超える値を示した。「1200mm から下の点」と「1400mm から上の点」できれいにグループに分かれているため、1400mm 付近に煙層が降りていると推定される。

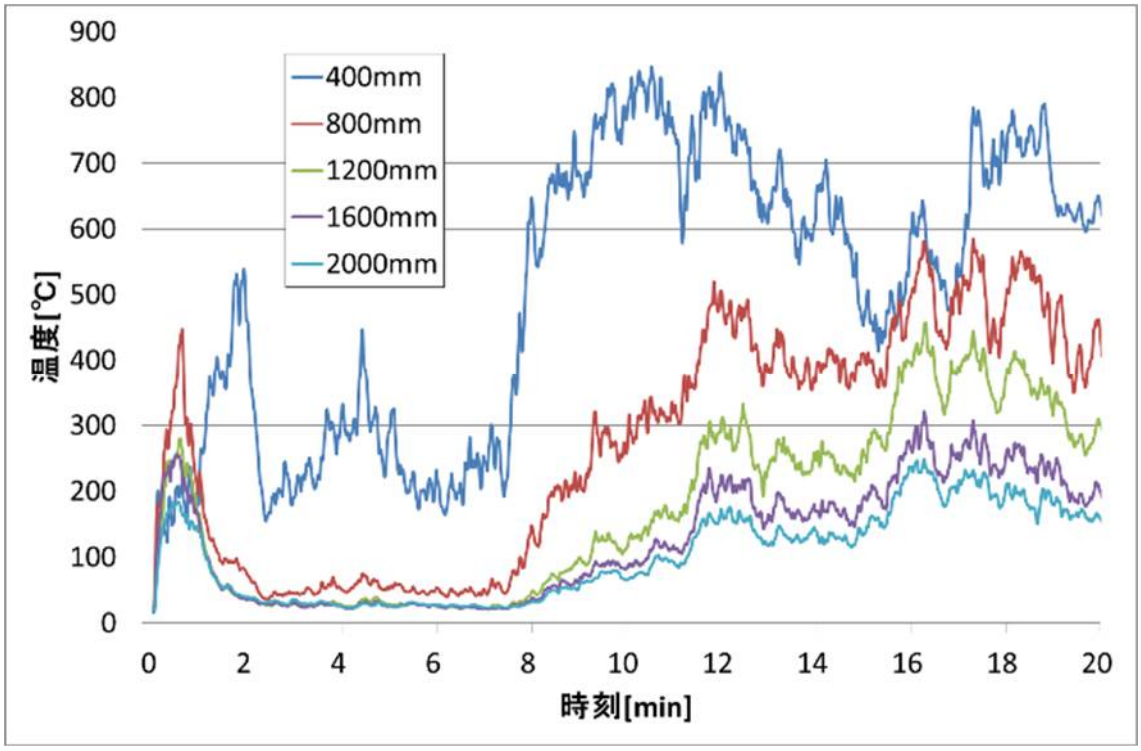

図 3-10 自由空間における直上温度

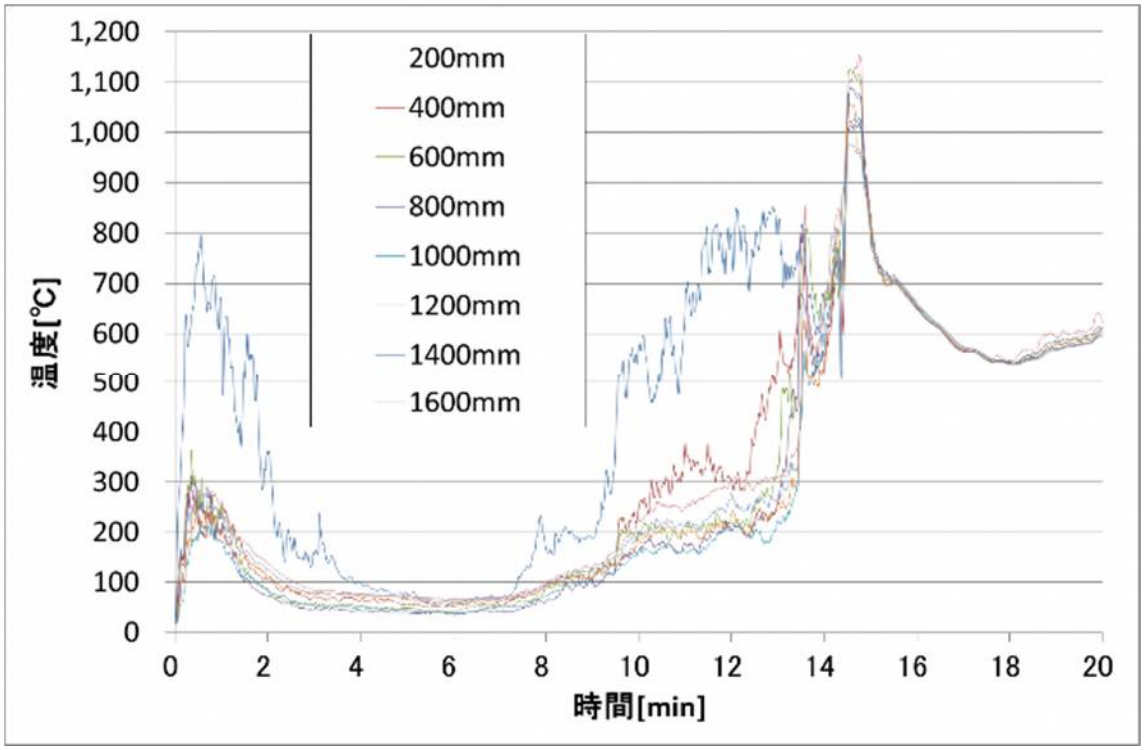

図 3-11 ルームコーナー内における直上温度

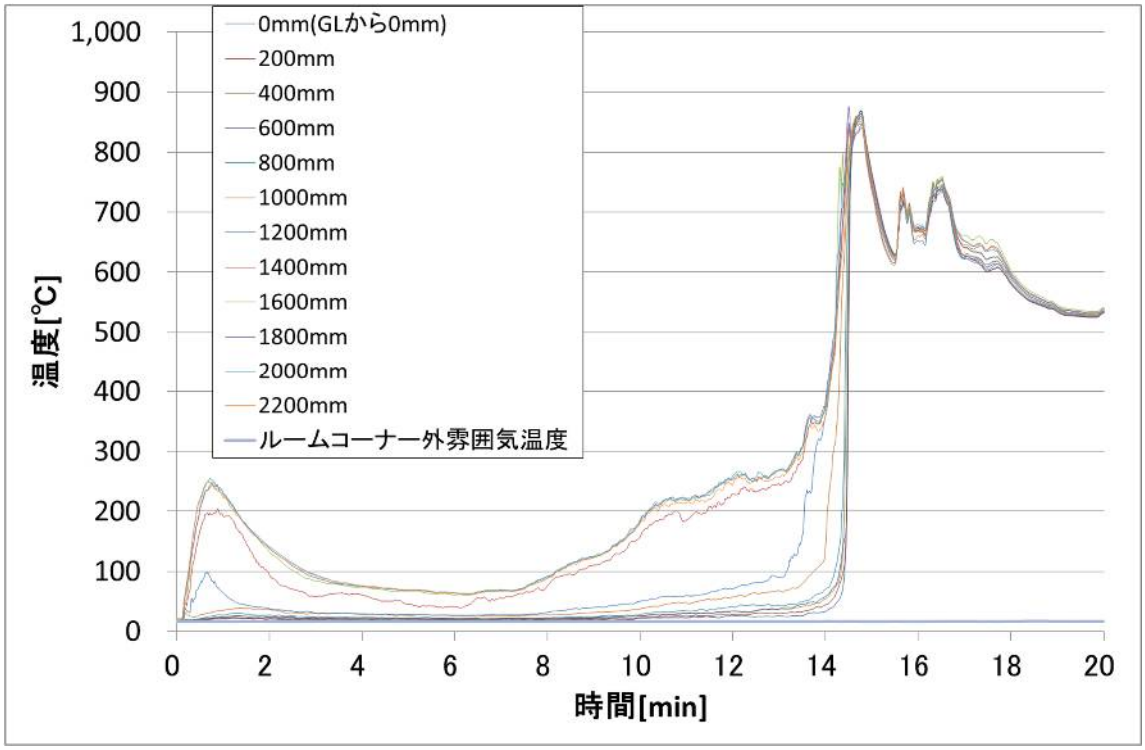

図 3-12　ルームコーナー内温度

3-2-3.放射量

座席の燃焼に伴って生じる放射量は、自由空間では、着火点から水平方向に 1m、鉛直方向は座席の基準面（ケイ酸カルシウム板上面）から 0.5m の位置と、着火点から水平方向に 1.5m、鉛直方向は座席の基準面（ケイ酸カルシウム板上面）から 1m の位置の二か所で、ルームコーナーでは、開口部中心から外部に 500mm 離れた位置に、基準面から 0.5m と 1m の位置で測定した。

自由空間における放射量の時間変化を図 3-13、ルームコーナー開口部付近における放射量の時間変化を図 3-14 に示す。

自由空間では、着火 16 分時点で放射量は最大となり、0.5m 地点で 4.14 kW/㎡、1m 地点で 10.83kW/㎡となった。着火直後の山は主にエタノールの燃焼によって生じている。12 分付近でみられる山は、着火側の背もたれ内のウレタンが燃焼したことで生じ、16 分付近でみられる山は、背もたれ 2 人分が燃焼したことで生じている。

ルームコーナー開口部付近では、着火 14 分時点で放射量は最大となり、0.5m 地点で 23.84 kW/㎡、1m 地点で 46.48 kW/㎡となった。1m 地点の放射量が高い値を示すのは、フラッシュオーバーの発生により開口部から煙が大量に排出され、煙からの放射熱の影響を強く受けたためであると考えられる。

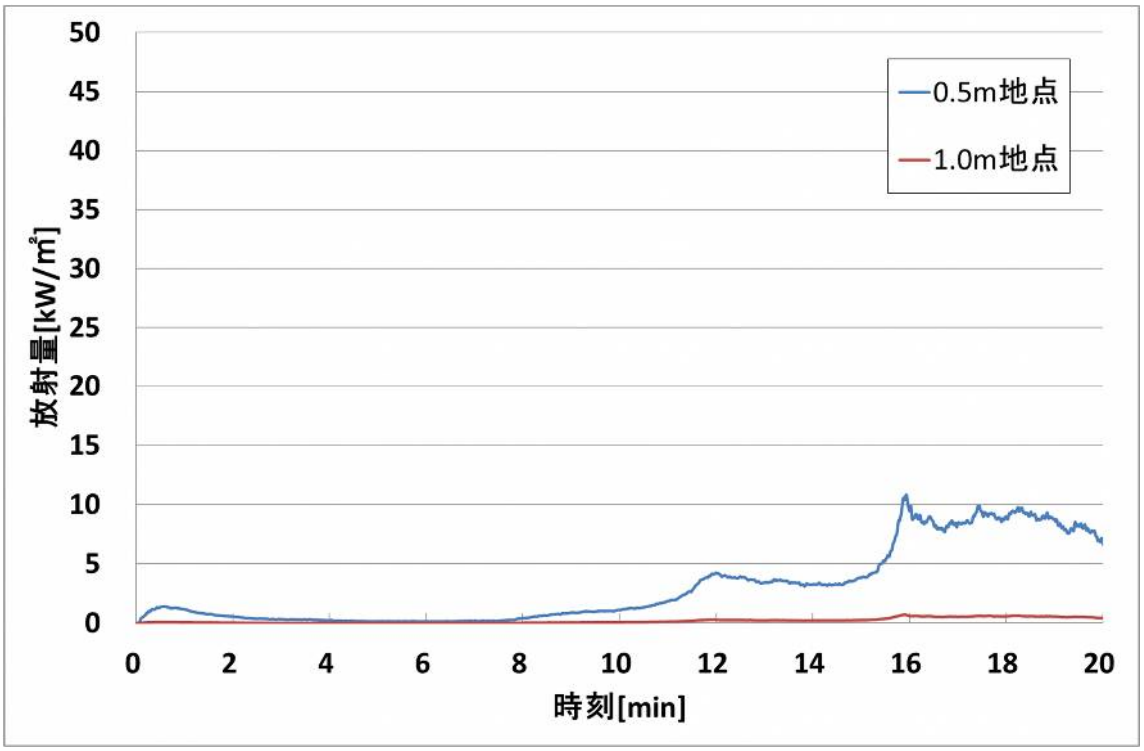

図 3-13　自由空間における放射量の時間変化

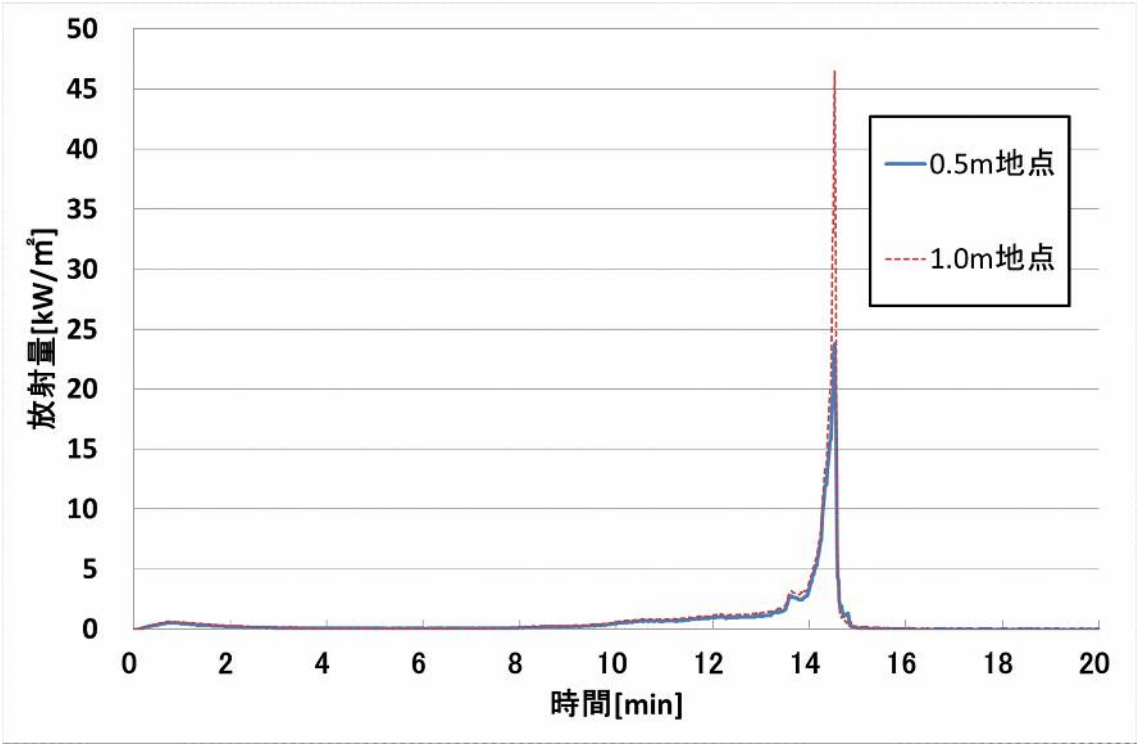

図 3-14　ルームコーナー開口部付近における放射量の時間変化

3-2-4.発熱速度

自由空間、ルームコーナー内の発熱速度の時間変化を図 3-15 に示す。酸素消費法による計測値は、20 秒から 30 程度時間遅れが生じるため、各実験の着火時が同じになるように時間軸を補正したものである。

自由空間において、着火後、約 1 時間で鎮火した。最大発熱速度は着火後 16 分にて 359kW となった。

1 分付近でみられる発熱速度の第一の山は、着火材の新聞紙およびエタノール（主にエタノール）が燃焼したことで生じている。13 分付近でみられる発熱速度の第二の山は、着火側の背もたれ内のウレタンが燃焼したことで生じ、16 分付近でみられる発熱速度の第三の山は、背もたれ 2 人分が燃焼したことで生じている。

ルームコーナー内において、着火後、約 14 分後にフラッシュオーバーが起こり、安全を考慮し消火作業を行った。最大発熱速度は、着火後 15 分後にて 2567kW となった。

1 分付近でみられる発熱速度の第一の山は、自由空間のときと同様、着火材の新聞紙およびエタノール（主にエタノール）が燃焼したことで生じている。

14 分付近でみられる発熱速度の第二の山は、フラッシュオーバーが起きたため、急激に発熱速度が上昇している。燃焼していなかった他の 3 脚が座席上部から一気に発火した様子がビデオカメラで確認できた。

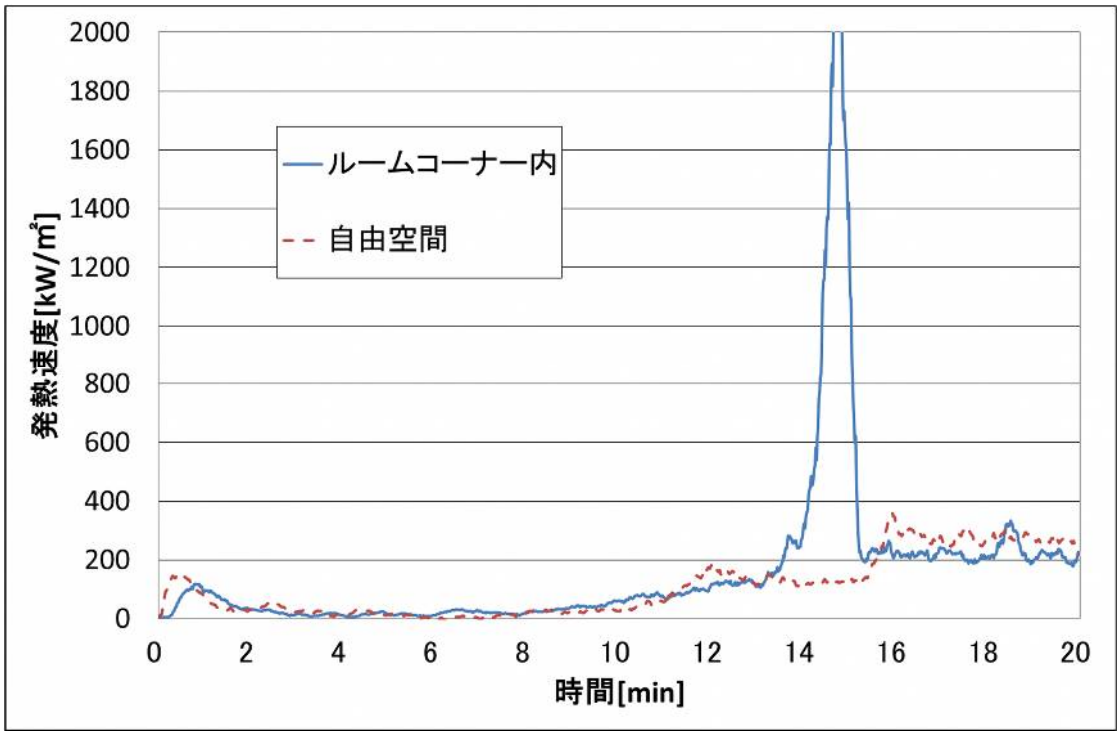

図 3-15 発熱速度の時間変化

3-3.燃焼実験での試験体の状態

自由空間の実験の試験体の状態を図 3-16～3-35、ルームコーナー内の実験の試験体の状態を図 3-36～3-53 に示す。

3-3-1.自由空間の実験の試験体の状態

図 3-16

燃焼実験前の座席。

図 3-17～3-28

燃焼実験中の様子。着火 1,2 分後までは着火材の新聞紙およびエタノールが燃焼し、その後燃焼が落ち着いた。着火から 8 分後に燃焼が拡大した。中のウレタンが燃え出したと思われる。着火から 15 分後、着火させた座席が 1 人分の燃焼から 2 人分の燃焼に拡大した。着火から 25 分後には、背もたれの大部分が燃焼し、その後は燃焼の勢いが減衰していった。着火から 58 分後鎮火した。

図 3-29～3-32

燃焼実験後の座席。側面の燃え残り以外は、表面のモケット生地とクッションのウレタンフォームは燃えていた。骨組みに鋼材の他に木材が使用されていた。木材は表面が炭化していて、骨組みから落下していた。

図 3-33

足を乗せる部分。燃焼し損傷が激しいことがわかる。

図 3-34

頭部分。表面のモケット生地は燃え、薄いアルミ板が露出した状態だった。

図 3-35

座面部分。表面のモケット生地とクッションのウレタンフォームは燃え、着火に使用した新聞紙の燃えカスが残っていた。

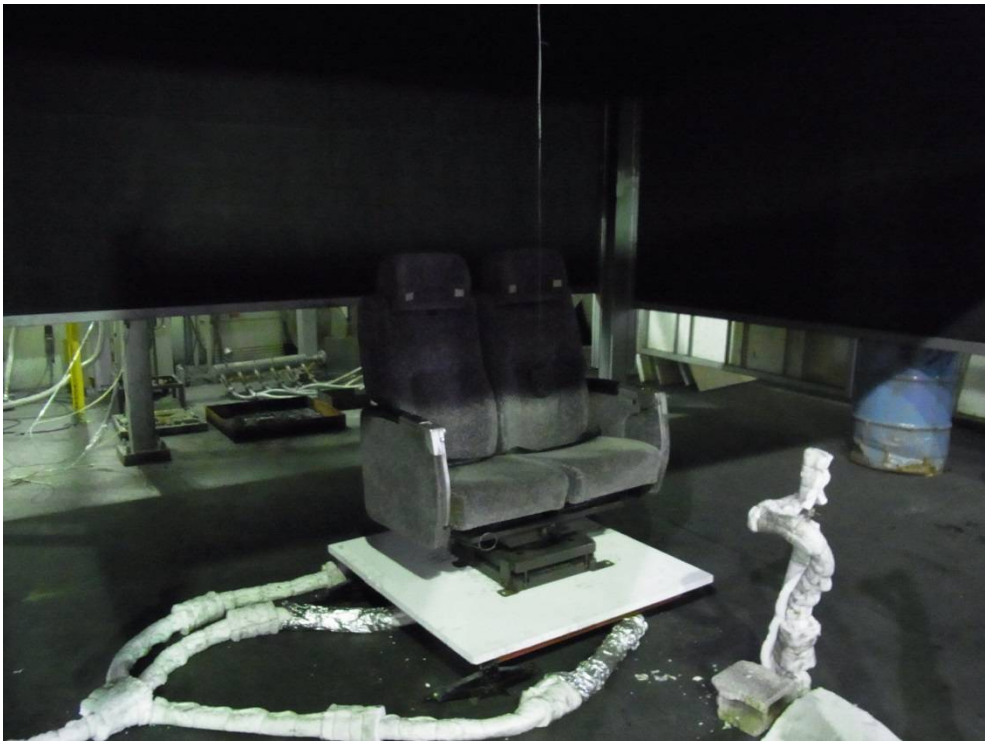

図 3-16　実験前

図 3-17　着火直後

図 3-18　着火から 1 分後

図 3-19　着火から 4 分後

図 3-20　着火から 8 分後

図 3-21　着火から 12 分後

図 3-22　着火から 15 分後

図 3-23　着火から 20 分後

図 3-24　着火から 25 分後

図 3-25　着火から 28 分後

図 3-26　着火から 33 分後

図 3-27　着火から 40 分後

図 3-28　着火から 58 分

図 3-29　実験後　前方

図 3-30　実験後　後方①

図 3-31　実験後　後方②

図 3-32　実験後　側面

図 3-33　実験後　足を乗せる部分

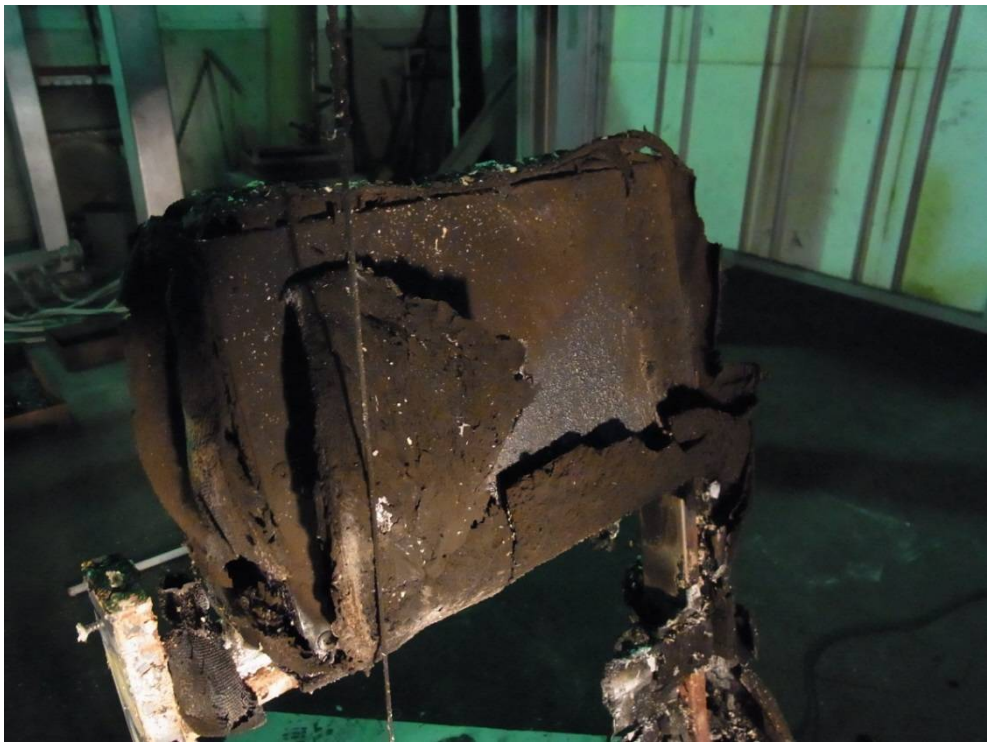

図 3-34　実験後　頭部分

図 3-35　実験後　座面部分

3-3-2.ルームコーナー内の実験の試験体の状態

図 3-36 、3-37

燃焼実験前の座席。

図 3-38～3-45

燃焼実験中の様子。自由空間の燃焼実験と同じく、着火 1,2 分後までは着火材の新聞紙およびエタノールが燃焼し、その後燃焼が落ち着いた。着火から 8 分後に燃焼が拡大した。中のウレタンが燃え出したと思われ、煙層が座席の上面から 30cm 付近まで下降した。

着火から 10 分後に燃焼が更に拡大し始めた。着火から 14 分 20 秒後、着火座席以外の上面が着火する。この時点で煙層は座席の上面のところまで下降していた。このときにフラッシュオーバーが発生したと言える。着火から 14 分 40 秒後には、一気に煙が開口部から排出された。ここで実験を中断し、開口部を閉じ消火作業をおこなった。

図 3-46～3-50

燃焼実験後の座席。フラッシュオーバーの発生により、室内全体に炎が燃え広がり 4 脚すべての燃焼が確認された。

図 3-51

着火させた座席の座面部分。表面のモケット生地とクッションのウレタンフォームは燃え、モケット生地が炭化しているところがあった。

図 3-52

着火させた座席の頭部分。表面のモケット生地は燃え、頭部分を覆う薄いアルミ板が焼失している箇所があり、内部の鋼材が露出していた。

図 3-53

着火させた座席の側面。側面まで燃焼しており、座席全体が火炎に包まれたことがわかる。

図 3-36　実験前　着火位置

図 3-37　実験前

図 3-38　着火直後

図 3-39　着火から 1 分後

図 3-40　着火から 8 分後

図 3-41　着火から 10 分後

図 3-42　着火から 12 分後

図 3-43　着火から 14 分後

図 3-44　着火から 14 分 20 秒後

図 3-45　着火から 14 分 40 秒後

図 3-46　実験後①

図 3-47　実験後②

図 3-48　実験後　側面

図 3-49　実験後　前面（着火座席）

図 3-50　背面（着火座席）

図 3-51　座面部分（着火座席）

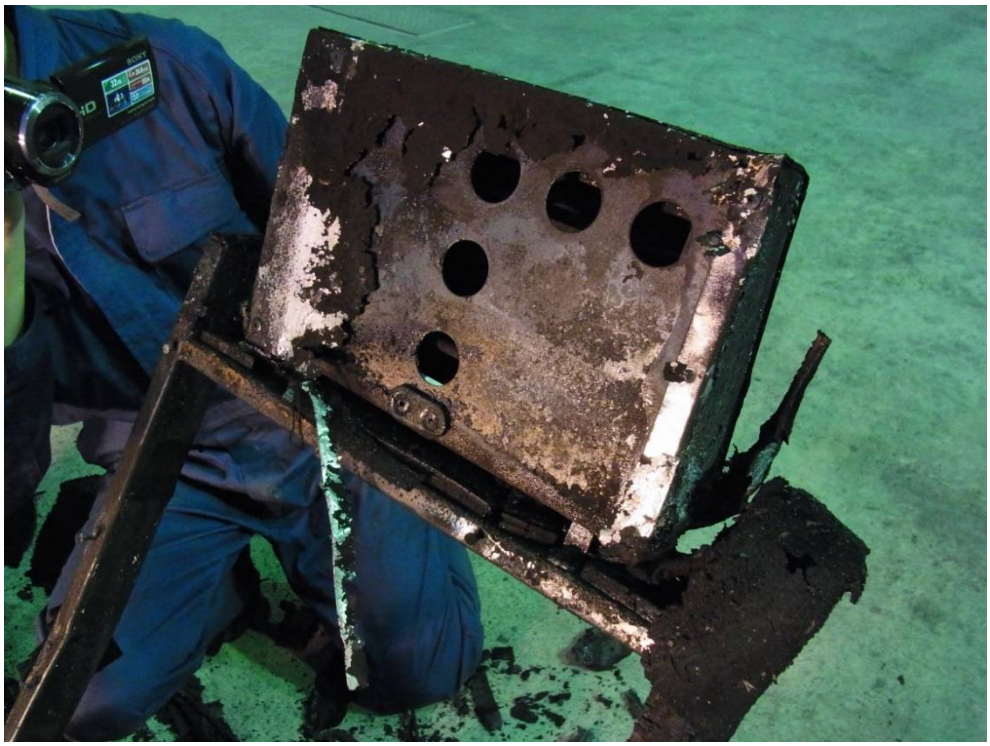

図 3-52　頭部分（着火座席）

図 3-53　側面（着火座席）

3-3-3.各燃焼実験の比較

〇図 3-29、3-32 と図 3-49、3-50、3-53 の比較

自由空間での実験後、表面のモケット生地が残っているところがあったが、ルームコーナー内での実験後では、着火位置の座席を含め 4 脚全ての表面のモケット生地は燃え尽きていた。フラッシュオーバーによって拡大された燃焼が激しかったことがみて取れる。

〇図 3-34 と図 3-47、3-49、3-52 の頭部分の比較

頭部分について、図 3−47、3-49 の着火位置の座席のみ 1 枚のアルミ板の大部分が燃えていることが確認できた。その他の座席についての損傷は確認されなかった。着火させた座席付近の火炎の温度が他の箇所よりも高かったと推定される。

〇図 3-31、3-35 と図 3-47、3-50、3-51 の背もたれと座面の比較

座面よりも上部分での燃焼だったため、背もたれ部分はほとんど焼け落ちることが確認された。座面部分は中まで燃えていたが形を保っているところがあった。また、図 3-47 では、着火位置から離れていた 2 脚の損傷具合は他の 2 脚と比べて被害が少なかった。

第四章　二層ゾーンモデルと火炎、煙層からの放射量の影響

4.二層ゾーンモデルと煙層からの放射量の影響

4-1. 二層ゾーンモデル

二層ゾーンモデル BRI2002[8)]を使用し、ルームコーナー内の煙層温度と煙層高さを計算し、考察する。

二層ゾーンモデルは，火災時の建物内空間の上部を煙層，下部は空気層に明確に分け，各層内は均一な性状と仮定して，温度や濃度などの物理的性状を解析する方法である。解析結果が非常に短い時間で得られるなど，長所も多いが，階段室のような複雑な空間内の煙流動や，自然排煙における外気風の影響といった煙の乱れは再現できない。

4-1-1.計算条件

モデルは、ルームコーナー試験装置(幅 2.4m×奥行き 3.6m×高さ 2.4m の空間、幅 0.8m×高さ 2m の開口)とする。

壁をケイ酸カルシウム板とし、

- 厚さ　0.15[m]
- 熱伝導率　0.024[kW/m/K]
- 比熱　0.25[kJ/kg/K]
- 密度　140[kg/m^3]

とした。

発熱速度は、図 3-15 の自由空間の燃焼実験で得られた結果を用いた。

4-1-2.計算結果

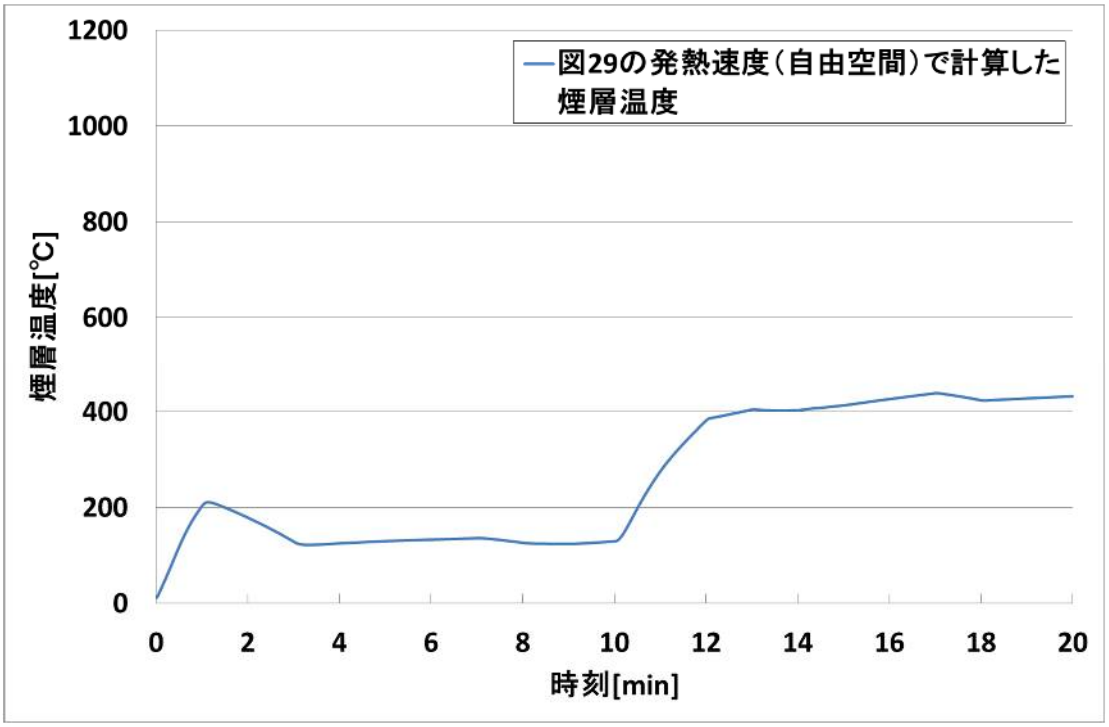

図 4-1　二層ゾーンモデルで求めた煙層温度

二層ゾーンモデルで求めた煙層温度を図 4-1 に示す。

煙層の下端は 1500mm と推定され、最高温度は 439℃と推定された。煙層の高さについて、実験での測定値とほぼ一致した。煙層温度について、フラッシュオーバーの条件である 600℃近辺に達しなかったが、図 3-12 の区画内温度 1400mm から上の点と比較すると、着火後 14 分までのフラッシュオーバーに至る時刻までは似た挙動を示した。

4-2.火炎と煙層の放射熱と対流熱伝達

ルームコーナー内で行った実験結果と 2 層ゾーンモデルによる計算結果から、煙層と火炎からの放射熱による、着火させた座席の前方の座席表面のモケット生地の影響を考察する。

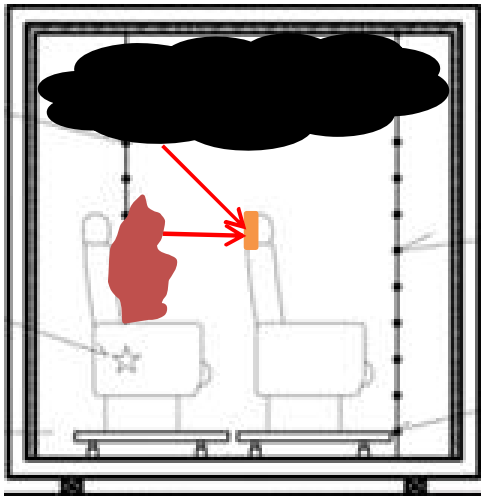

図 4-2 放射熱による影響

4-2-1. 計算条件

煙層、火炎からの放射熱は、次式のステファン-ボルツマンの法則により算出した。

$$E = \varphi\varepsilon\sigma T^4 \ [\mathrm{kW/m^2}] \cdots (2)$$

E：放射量[$\mathrm{kW/m^2}$]

φ：形態係数($0 \leq \varphi \leq 1$)

ε: 放射率(黒体の放射率 = 1)

σ：黒体の放射定数　5.67×10^{-11} [$\mathrm{kW/m^2K^4}$]

T：火炎温度 [K]

算出において、煙層の温度は 2 層ゾーンモデルによる計算結果から使用し、形態係数を 1 とし、黒体と仮定して放射率には 1 を使用した。火炎は黒体と仮定して放射率には 1 を使用した。形態係数は火炎中心から水平距離 0.9m の位置で受ける放射熱の算出には、火源を円筒形と仮定して形態係数φを次式より算出した。温度は 800℃とした。

$$\varphi = \frac{1}{\pi n}\tan^{-1}\left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}}\right) + \frac{m}{\pi}\left[\frac{A-2n}{n\sqrt{AB}}\tan^{-1}\left(\frac{A\sqrt{n-1}}{B\sqrt{n+1}}\right) - \frac{1}{n}\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{n-1}}{\sqrt{n+1}}\right)\right] \cdots (3)$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ただし、

H：火炎高さ　、R：火源半径　、L：火炎底面の中心から受熱面までの距離（0.9m）

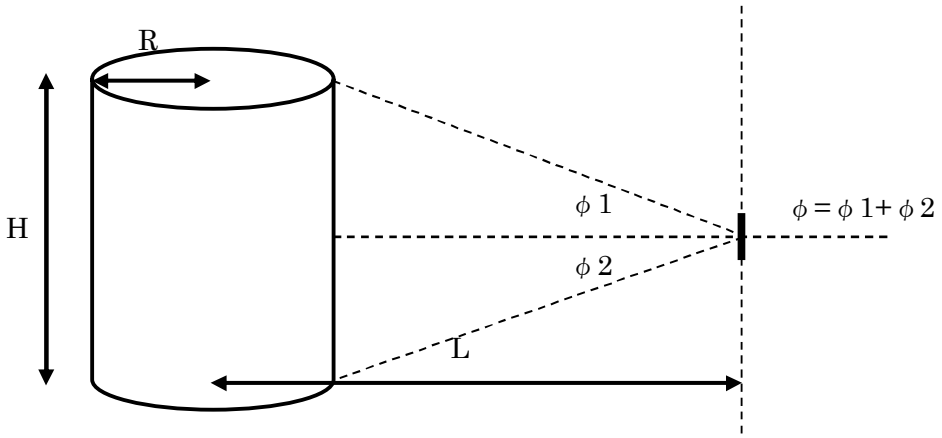

図 4-3　円筒形火炎と受熱面の位置関係

火炎の直径と火炎の高さは、自由空間の実験で得られた発熱速度を使用し、図 4-4 から H/D と $Q/D^{5/2}$ の関係式をつくり算出した。

$$H/D = 0.1(Q/D^{\frac{5}{2}})^{\frac{1}{2}} \cdots (4)$$

H:火炎高さ[m]

D:火源直径[m]

Q: 発熱速度[kW]

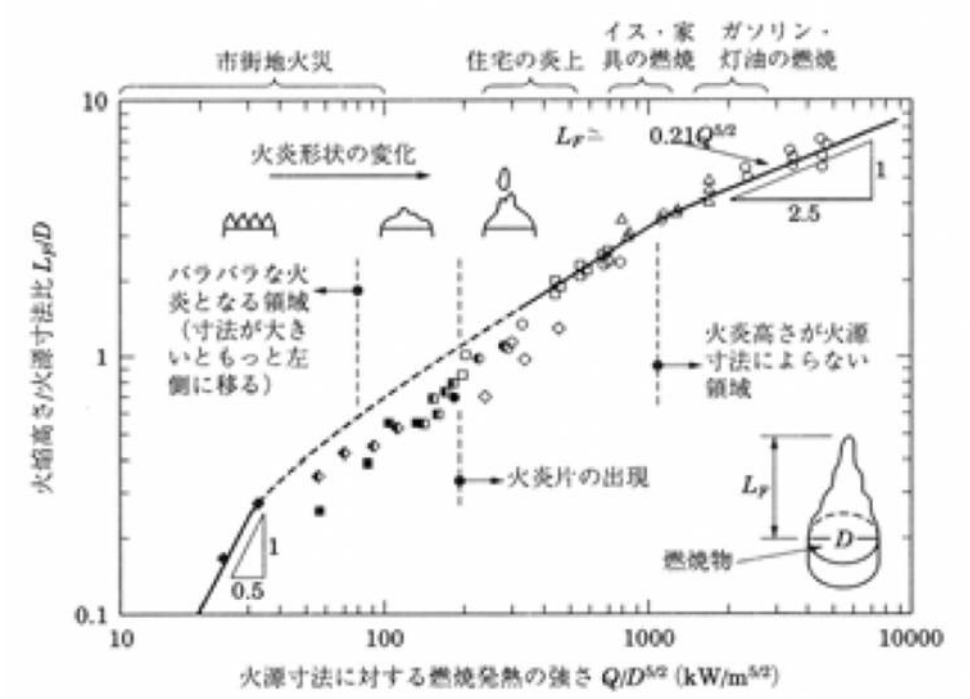

図 4-4 $Q/D^{5/2}$ と火炎高さの関係 [13)]

この算出した火炎高さの値を(3)式に代入して時間変化の形態係数を求め、放射量を計算する。

座席周辺の空気による対流熱伝達については、ルームコーナー内の実験での隅の温度を使って、1 秒毎の温度の上昇速度[℃/sec]と熱伝達率 20[W/㎡・K]で時間変化を参考値として算出する。

$$Q = h(T_2 - T_1) \cdots (5)$$

Q:対流熱伝達[kW/㎡]

h:熱伝達率[W/㎡ K]

T_2-T_1: 1 秒毎の温度の上昇速度[℃/sec]

4-2-2. 計算結果

火炎と煙層からの放射熱と座席周辺の空気による対流熱伝達の時間変化を図 4-5 に示す。

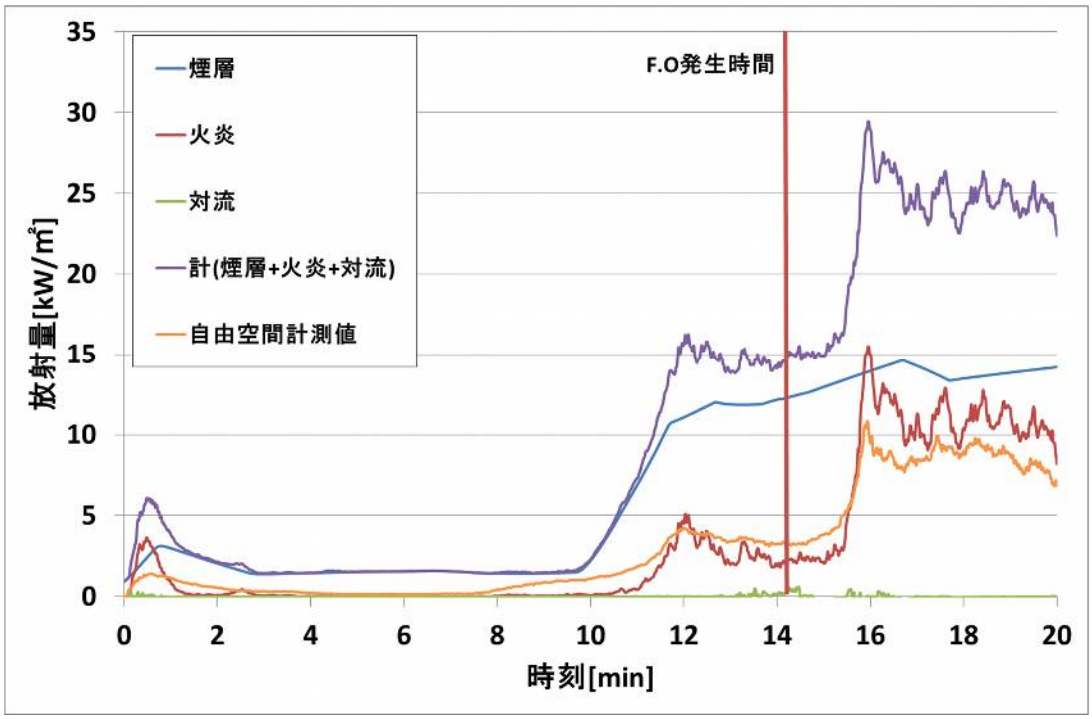

図 4-5 火炎と煙層からの放射熱と座席周辺の空気による対流熱伝達の時間変化

火炎と煙層からの放射熱が増加しはじめる 10 分後から座席表面が受ける放射量が急増していることがわかる。火炎よりも煙層からの放射量の方が大きいため、座席表面は着火に至るまで煙層による放射熱の影響が大きいと考えられる。

12 分後には約 15kW/㎡の放射量となり、14 分 20 秒後に着火したとすると、座席表面の着火限界の放射量は 15kW/㎡前後と推定される。

次に火炎形状比「火炎高さ H/火炎直径 D」を固定した場合の火炎からの放射熱を図 4-6 に示す。H/D を固定し、自由空間の実験から測定した発熱速度を使用する。(4)式から D を算出し、H を求めた。算出した各値を(3)式に代入し形態係数を求め、放射量を計算した。また、算出した火炎高さと発熱速度の関係を図 4-7 に示す。

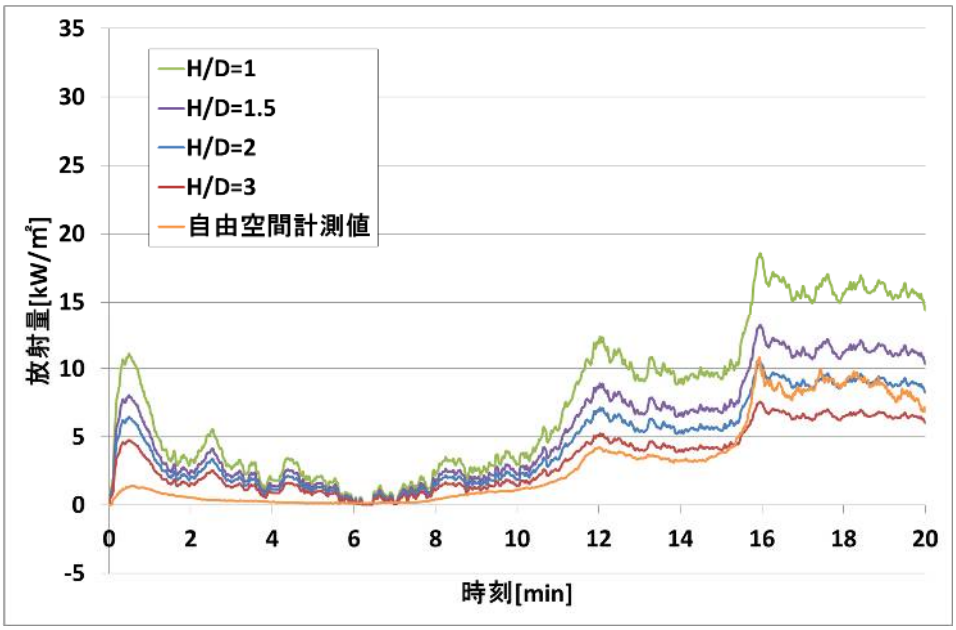

図 4-6 火炎形状比「火炎高さ H/火炎直径 D」を固定した場合の火炎からの放射熱

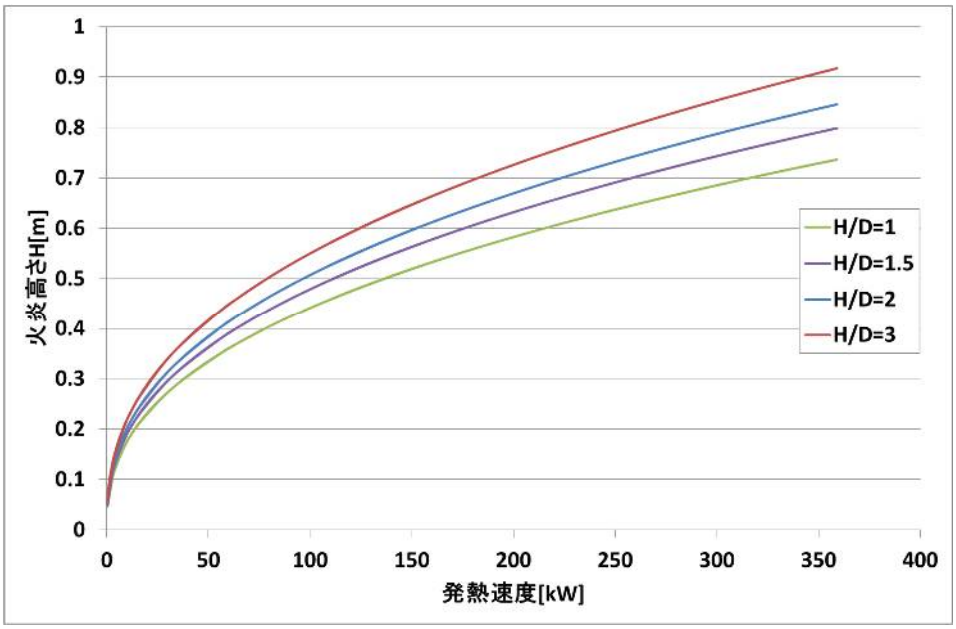

図 4-7 火炎高さ H と発熱速度の関係

自由空間の燃焼で計測された火炎からの放射熱と H/D=2～3 での火炎からの放射熱の挙動が類似していることから本実験での火炎は H/D=2～3 になるような形状をしていると推定される。

図 4-7 の結果から 150kW と 300kW のときのそれぞれの火炎形状の関係を図 4-8 に示す。

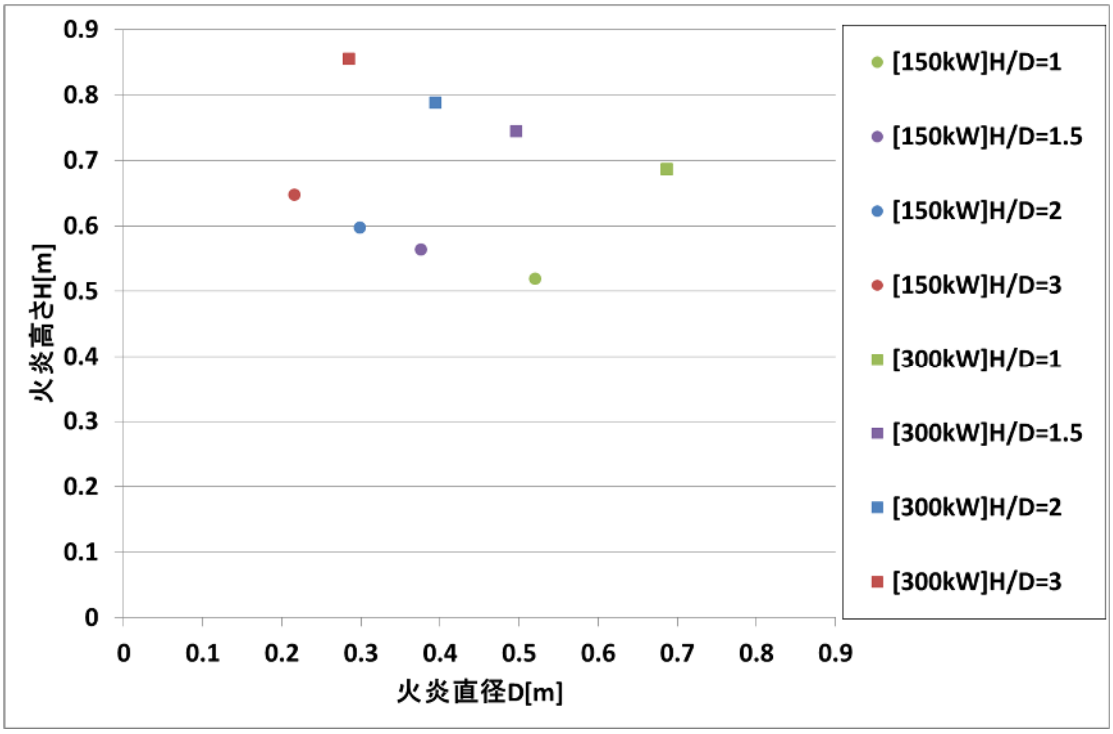

図 4-8 発熱速度 150kW と 300kW のときの火炎形状の関係

また、図 4-8 の発熱速度 150kW と 300kW のときの火炎形状の関係から火炎の見ためを図 4-9 に示す。

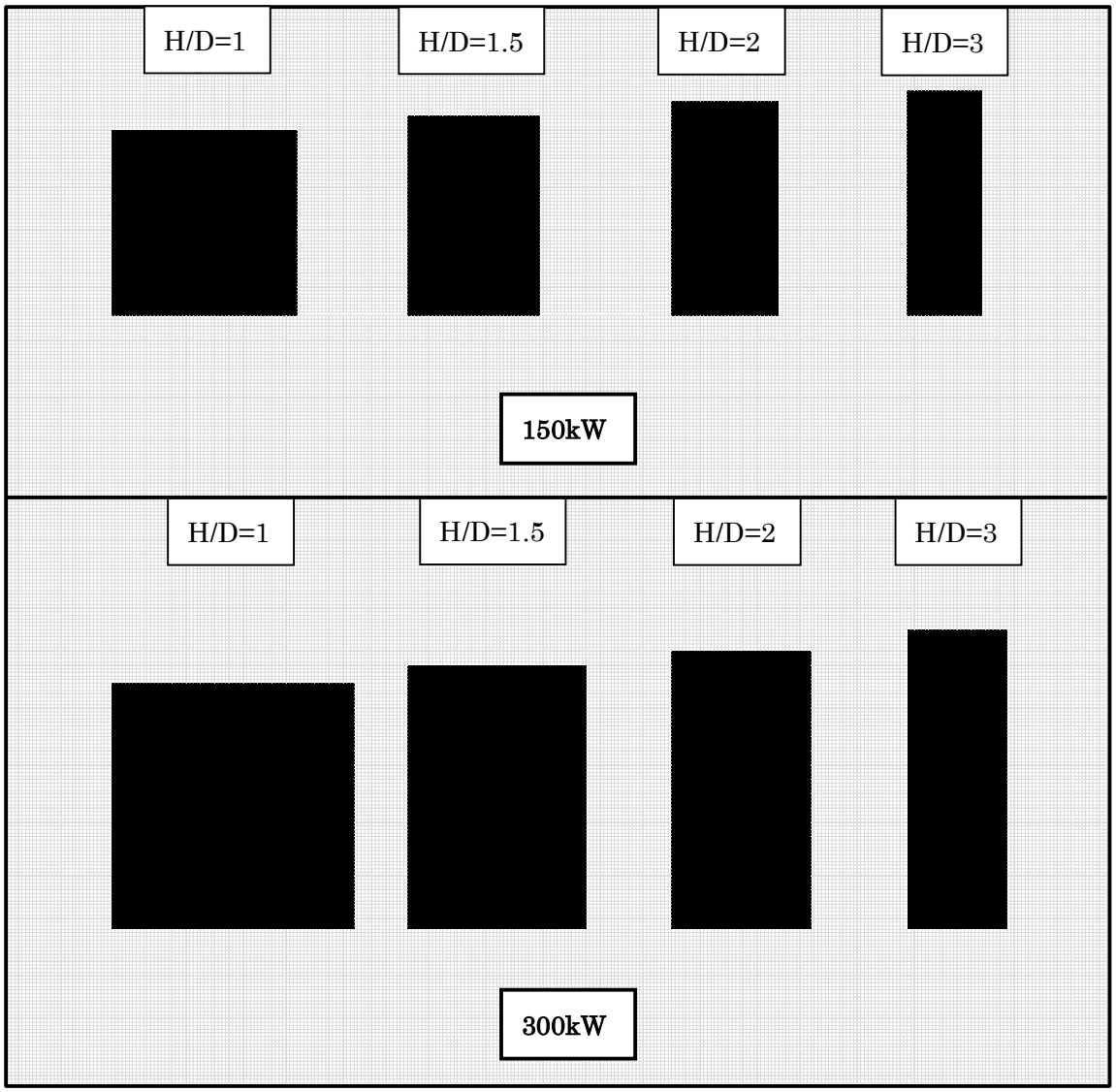

図 4-9 火炎形状

この火炎形状と実験での火炎形状を比較する。

実験で記録した実際の火炎形状を読み取る。発熱速度が 150kW と 300kW のときの映像を抽出し図 4-10 に示す。

図 4-10 自由空間の燃焼での発熱速度 150kW(左)と 300kW(右)のときの火炎形状

自由空間の燃焼実験中の発熱速度 150kW のときの実際の火炎形状は、映像から読み取ると直径が約 0.4m、高さが約 0.8m であり、H/D は約 2 であった。発熱速度 300kW のときの実際の火炎形状は直径が約 0.8m、高さが約 1.1m であり、H/D は約 1.4 であった。

放射量の計算から発熱速度 150kW のときは H/D=3、300kW のときは H/D=2 の形状と考えられ、実際の火炎形状と多少の誤差が生じたが、概ね一致していると言える。

第五章　総括

5.総括

バスの座席の燃焼実験を実施し発熱速度等の計測を実施した。

コーンカロリーメーター試験の結果から、ほとんどの試料について 5 分間の加熱において総発熱量が 8MJ を上回る数値を示し、200kW/㎡を超える発熱速度が 10 秒以上継続したことから、建築物の内装材料の難燃性の基準を満たしていないことがわかった。ウレタンとモケット生地の燃焼熱は、加熱強度によらずほぼ一定の値をとり、それぞれ約 27MJ/kg、約 18 MJ/kg であった。

モケット生地は、プロット点に基づく近似直線から算定した限界着火熱流束が 8.415kW/㎡となり、加熱実験において 10kW/㎡で着火したため、実際の限界着火熱流束は約 8～10kW/㎡であると思われる。ウレタンは、加熱強度が小さくてもすぐに着火すると考えられる。

集煙フードを使用し、自由空間及びルームコーナー内にて燃焼実験を行った。

自由空間の単体燃焼では、重量減少、発熱速度の時間変化はゆるやかであった。対してルームコーナー内の複数体燃焼では、ピーク時に重量減少、発熱速度共に勾配が急であった。

ルームコーナー内で燃焼させた場合、燃焼対象物の量を考慮しても自由空間に比べ発熱速度が大きくなることを確認した。これは、高温の煙層や壁からの熱放射を受けたためだと考えられる。

二層ゾーンモデルにより煙層の高さと温度を推定し、火炎と煙層からの放射量の影響について考察した。火炎と煙層からの放射熱が増加しはじめる 10 分後から座席表面が受ける放射量が急増していることがわかり、12 分後には約 15kW/㎡の放射量となり、14 分 20 秒後に着火したとすると、座席表面の着火限界の放射量は 15kW/㎡前後と推定された。コーンカロリーメーター試験の結果を加味すると、座席表面のモケット生地の限界着火熱流束は約 8～15kW/㎡と考えられる。

ルームコーナー内で燃焼がピークに達する時、800℃を超える高温の環境となる。フラッシュオーバーが発生し燃焼が拡大したことからフラッシュオーバーに対する対策が必要だと考えられる。既存の燃焼性の判断基準は、閉鎖空間における部材の燃焼はあまり考慮されていないため実際の火災に近い閉鎖空間での部材の燃焼を考慮する必要がある。

今後火災に関する性能設計を発展させるために、このような実験の燃焼データを更に充実していく必要がある。

参考文献

1)水野智之、山田人司他、「椅子の燃焼性状に関する実験的研究　その 1～2」、日本建築学会大会、1998
2)水野智之、他、「初期火災時における家具類の燃焼性状に関する実験的研究　その 1～2」、日本建築学会論文報告集、1986
3)山田常圭、他、「防炎加工繊維製品の実大スケールでの燃焼実験」、日本建築学会大会、1999
4)吉田正志、「収納可燃物の燃焼性状」、日本建築学会大会、2000
5)東京消防庁、「蔵前国技館火災実験報告」、1984
6)鉄道火災対策技術委員会、「鉄道火災対策技術委員会報告書」、1975
7)Wikipedia、http://ja.wikipedia.org/
8)社団法人建築研究振興協会，BRI2002 : 二層ゾーン建築内煙流動モデルと予測計算プログラム，2003
9) 建築基準法施行令第 1 条の六、建告第 1402 号　難燃材料を定める件、2000
10)道路運送車両の保安基準の細目を定める告示 別添 27(内装材料の難燃性の技術基準)、2005
11)鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準　第五節　車両の火災対策等、2004
12 総務省消防庁 http://www.fdma.go.jp/
13)日本火災学会 編、「火災と建築」共立出版株式会社、2008
14)James G. Quintiere、大宮喜文・若月薫 訳「基礎　火災現象原論」 共立出版株式会社、2009
15)原田和典、「建築火災のメカニズムと火災安全設計」、財団法人 日本建築センター、2007
16)大場正直、「鉄道車両の床構造の耐火試験」、2012
17)国土交通省運輸安全委員会「鉄道事故に関する統計」、2011
18)消防庁編「消防白書 平成 16 年版」株式会社ぎょうせい、2004
19)消防庁編「消防白書 平成 22 年版」佐伯印刷、2010
20)朝日新聞 2003 年 2 月 19 日朝刊

謝辞

辻本先生、西田先生。大変お世話になりました。未完ながら論文を書きあげることができましたのは、先生方の手厚い指導のおかげです。本当にありがとうございました。

副査の倉渕先生、坂牛先生。本研究に関してご指導ご鞭撻を頂き心より感謝致します。

松山先生には実験のご相談をお願いし、貴重なご意見を頂きました。また本研究に関してご指導ご鞭撻を頂き心より感謝致します。

長谷川さん、姫野さんにも大変お世話になりました。研究室にあまり顔を出さない自分にあたたかい心遣いありがとうございました。

亀岡さんには実験の手伝いから修士論文の手伝いまで色々なサポートをして下さり大変お世話になりました。本当にありがとうございました。

実験を手伝って頂いた田坂さん、本当にありがとうございます。田坂さんのおかげで実験を無事に終えることが出来ました。

ここまで私を支えて下さった皆様に改めて感謝を致します。本当にありがとうございました。

4112607　小澤竜也

付録