

密閉室内の燃焼性状に関する研究 (第2報)

Study on The Fire Behavior in The Closed Room (Series 2)

鳥 井 四 郎**
 武 田 松 男*
 新 川 光 俊*

In order to know the fire behaviour in a closed room, we experimented on the relations between burning rate and oxygen concentration and so on.

As a result, we obtained that relations. (Series 1)

In this report, we made a small burning room (880×730×740) and experimented on the variation of crib weight, gas concentration and atmospheric temperature in the room.

So we confirmed that the burning weight in the closed room had relation to that in the opened room and that the former was calculated by the latter with theoretical equation.

1. ま え が き

密閉された室内における自然鎮火の現象を把握し、自然鎮火の可能性の有無を判断する際の基礎資料とするため、第1報では、燃焼性試験により酸素濃度と燃焼速度との関係を求めた。

今回は、小型の燃焼室を作成し、クリブの燃焼実験を実施したので、その結果を報告する。

2. 実験目的

小型の燃焼室内でクリブの燃焼実験を実施し、密閉室内の燃焼性状について、主に、燃焼重量、室内温度及びガス濃度の点からその性状を把握すると共に、実火災における燃焼性状を予測することを目的とした。

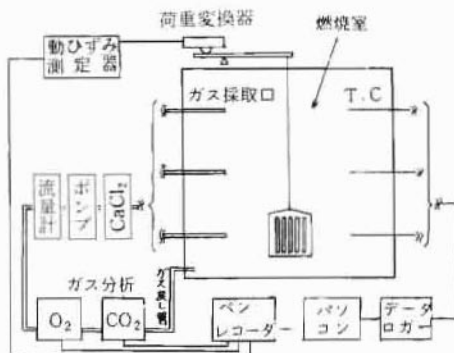


図1 実験装置の概略図

3. 実験装置及び方法

(1) 実験装置

実験装置の概略図を図1に示した。

燃焼室(写真1, 図2)は、間口880mm, 奥行730mm, 高さ740mm(内法)で、内面にアルミ板(厚さ3mm)をはった石こうボード(厚さ12mm)で作成した。前面中央部には、200mm×500mmの扉をつけ、側面には、200mm×200mmの観測用窓を取りつけた。底板及び側板の各継ぎ目には、シーリング剤を充填し、天井である蓋と側面との結合は、ゴム管を2本置いてパッキングとし、ボルト締めとした。また、扉は燃焼実験時にはテープでシールした。

無風下、密閉状態で、CO₂濃度減少速度から測定した換気率は表1のとおりであった。

(2) クリブ

クリブ構成材は、杉辺材を3mm×12mm×165mm

表1 模型燃焼室の換気率

換気率(回/分)	0.0025	0.012
室内温度(°C)	28.8	64.9
室外温度(°C)	22.1	23.5

※ 室内温度は、内部23点で測定したものの平均値

*第一研究室 **第四研究室

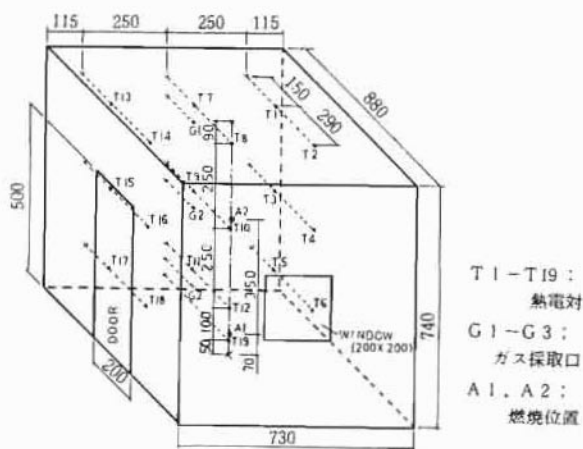


図2 模型燃焼室の概要

に成形後、真空中60°Cで24~48時間乾燥させ、絶乾状態（木材水分計で水分測定不能の状態）にしたものを使用した。

クリブは、約100gの構成材を1段に6本ずつ8~9段井桁状に積み上げたもの（以下「クリブ1」という。図3）と、1列に8本ずつ6列に吊り下げたもの（以下「クリブ2」という。図4）の2種類を用いた。

(3) 燃焼方法

クリブの燃焼位置は、クリブ下端が、床面から7cmと42cmの高さの2点とした。

点火は、クリブ下方約5cmの位置に30×50mmの石綿テープを置き、点火約30秒前に3ccのメタノールをしみ込ませた後、扉を閉鎖・密閉し、電気スパークにより点火した。

(4) 重量測定

天井板中央にあけた孔からクリブを吊り下げ

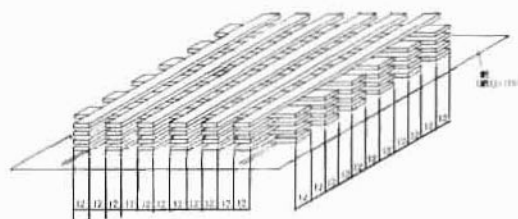


図3 クリブ1



写真1 模型燃焼室

た針金を通し、アームを介して荷重変換器により測定、ペンレコーダーで記録した。

なお、天上板の孔は、ゲル化した高吸水性樹脂で塞いだ。

(5) 温度分布

図2のT₁~T₁₉に示すように、燃焼室内に合計19本の熱電対（K線、φ0.8mm）を取り付け、点火時から4秒毎に測定した。

(6) ガス濃度

図2のG₁~G₃に示す位置に合計3本の銅パイプを設置し、ポンプの吸引（約2ℓ/min）によりガスを採取し、測定器に導入した。測定後のガスは、再度燃焼室内へ戻した。測定は、O₂、CO₂、COの3種類について各採取口毎に2~3回実施し、鎮火後濃度が一定になるまで行った。

4. 結果及び考察

(1) クリブの形状及び燃焼位置の影響

表2にクリブの燃焼実験結果を示した。図5

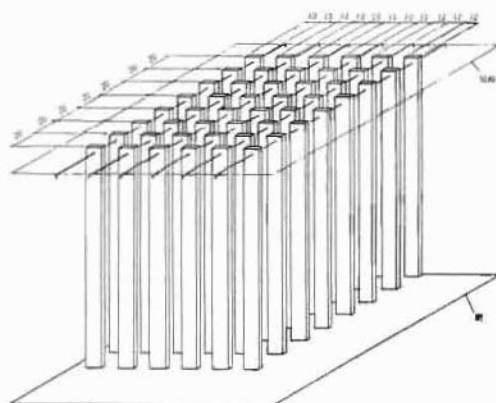


図4 クリブ2

表2 クリブの燃焼実験結果 (平均値)

燃焼位置	クリブの種類	扉開放条件	クリブ重量 (g)	消炎時間	燃焼量 (g)			最終ガス濃度 (%)				クリブ1g当たりの酸素消費量 (% / g)
					消炎時	鎮火時	無炎燃焼量	採取位置	O ₂	CO ₂	CO	
上	クリブ1	開放	99.5	3'10"	93.2	98.6	6.4	—	—	—	—	0.137
		密閉	99.4	2'22"	58.1	66.5	8.4	上	11.2	8.2	1.3	
			中	11.8	7.9	1.2						
	クリブ2	開放	100.0	1'45"	85.6	90.1	4.5	—	—	—	—	0.133
		密閉	99.4	1'13"	59.2	60.3	1.1	上	11.7	6.6	1.6	
								中	12.5	5.6	1.4	
下	下	13.0	5.7	1.5								
下	クリブ1	開放	99.0	—	—	98.0	—	—	—	—	0.135	
		密閉	99.7	2'31"	34.9	39.3	4.4	上	14.5	5.6		0.2
								中	15.7	5.5		0.3
	下	15.1	5.7	0.2								
	クリブ2	開放	100.1	—	—	98.1	—	—	—	—	—	
		密閉	99.4	1'5"	36.6	57.1	0.5	上	—	—		—
中								—	—	—		
下	—	—	—									

* 燃焼位置下クリブ2は、吸引ポンプ不良のためガス採取できなかった。

* クリブ1g当たりの酸素消費量は、鎮火時の燃焼量に対するもの。(メタノール3ccの酸素消費量は、2.5L (0.5%) であるから酸素消費量のうち0.5%は、メタノールによるものとして計算した。)

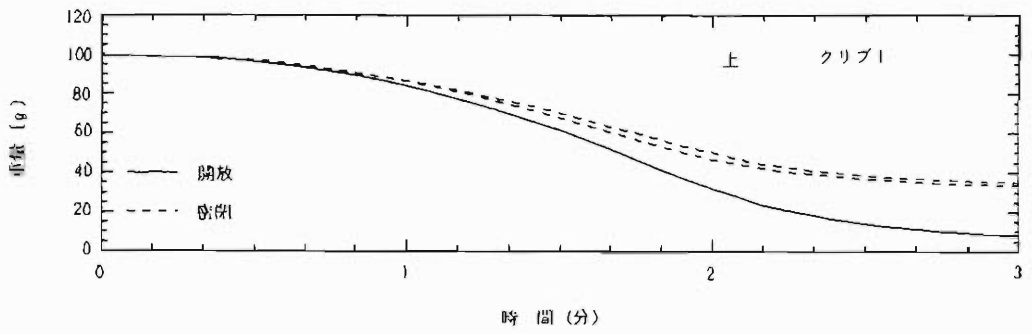


図5-1 クリブの重量変化

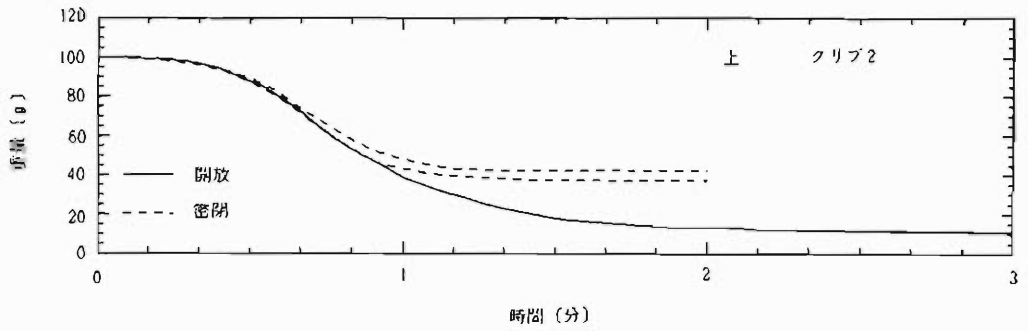


図5-2 クリブの重量変化

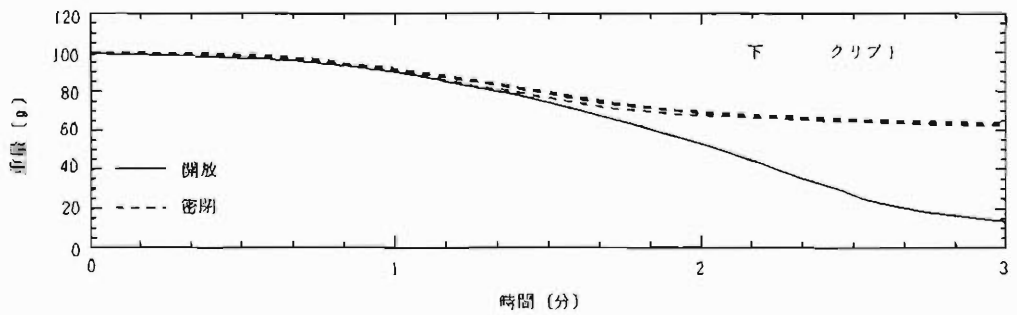


図5-3 クリブの重量変化

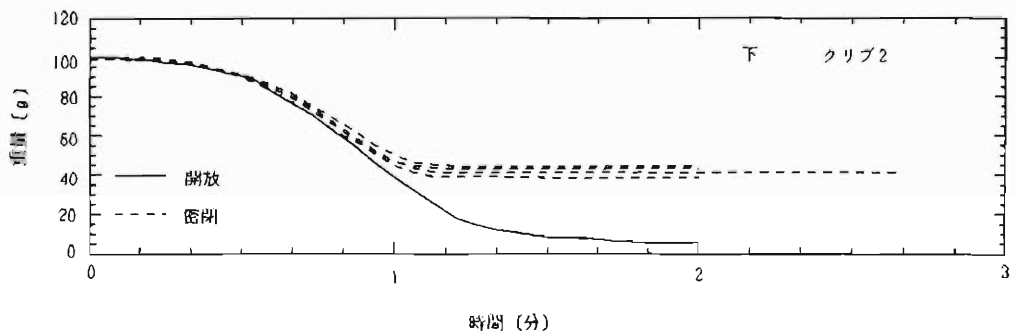


図5-4 クリブの重量変化

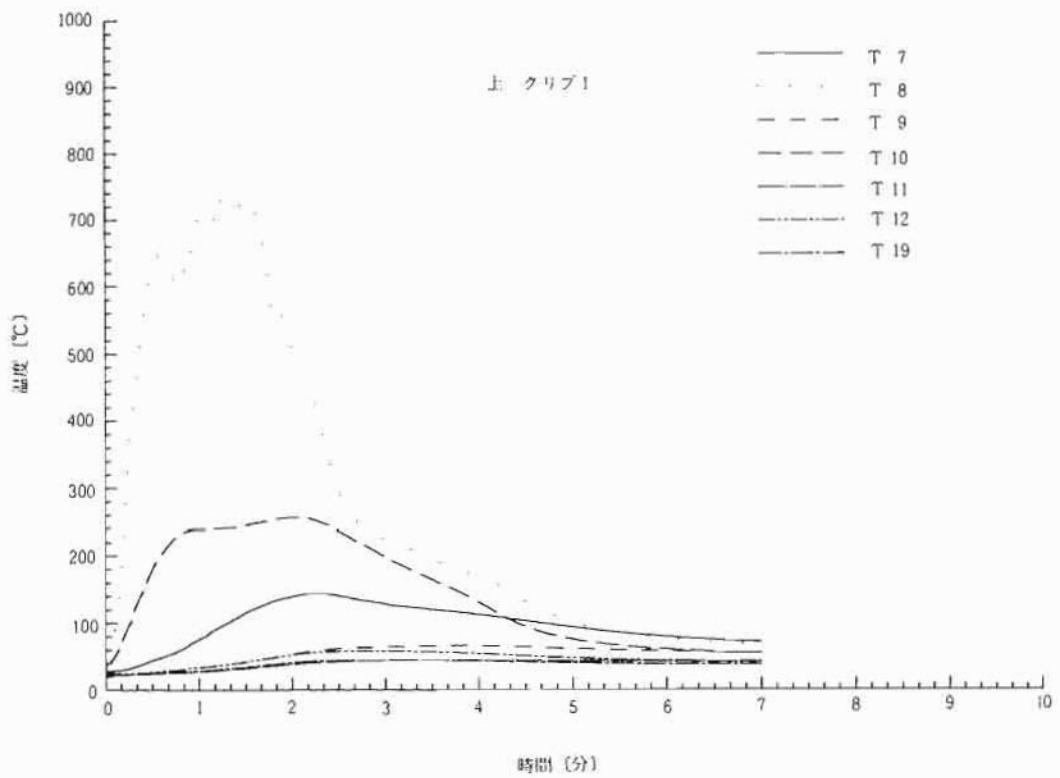


図 6-1 燃焼室内の温度変化

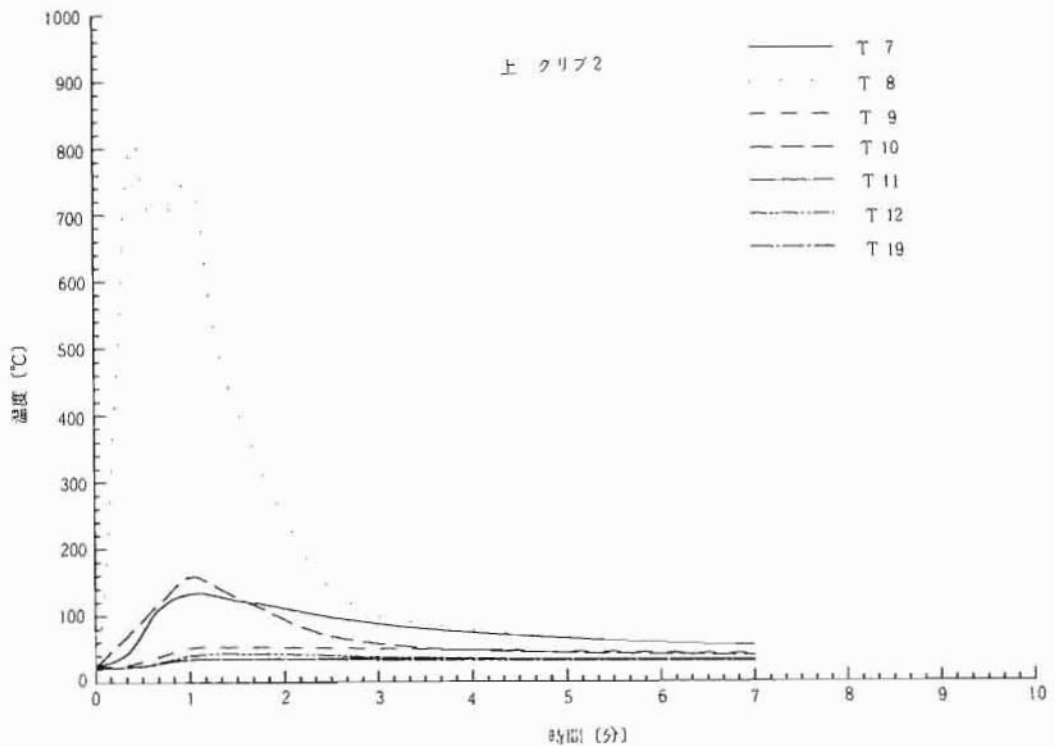


図 6-2 燃焼室内の温度変化

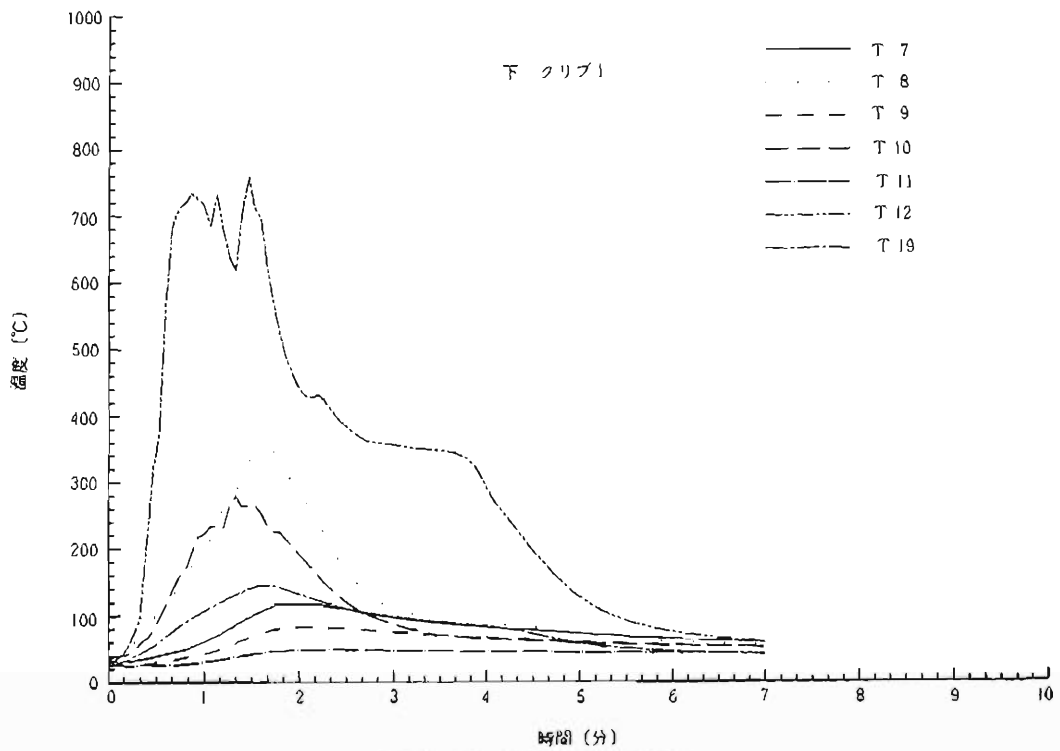


図 6 - 3 燃焼室内の温度変化

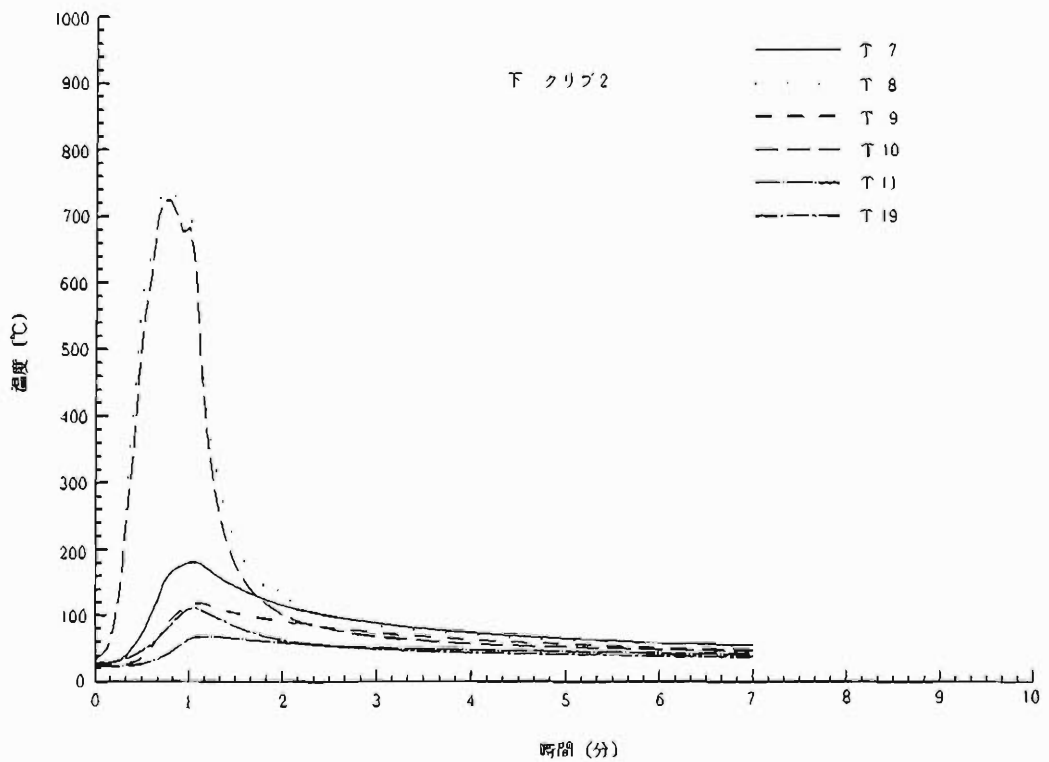


図 6 - 4 燃焼室内の温度変化

には、各燃焼条件毎のクリブの重量変化の様子を示した。図中、実線が扉を開放した場合、破線が密閉した場合のものである。また、図6には内部温度を示した。これらは中央横方向の垂直断面のものである。

密閉燃焼した時の有炎燃焼終了時間（以下、「消炎時間」という）は、クリブ2の場合、燃焼位置下段で1分5秒、上段で1分13秒、クリブ1の場合、下段で2分31秒、上段で2分22秒と燃焼位置よりもクリブの形状に大きく影響されていた。

鎮火時における全燃焼量は、上段クリブ1が66.5g、上段クリブ2が60.3g、下段クリブ2が57.1gであるのに対し、下段クリブ1のみが39.3gと他の約2/3の量であり、クリブの形状ばかりでなく、燃焼位置により大きな差が見られた。

一方、消炎時点における燃焼量は、上段クリブ1で58.1g、クリブ2で59.2g、下段クリブ2で56.6g、クリブ1で34.9gと下段クリブ1を除いて燃焼位置やクリブの形状及び燃焼速度にはほとんど影響されていなかった。

また、有炎燃焼終了後の無炎燃焼量は、上下段ともクリブ1では全燃焼量の10%以上にもなるのに対し、クリブ2ではほとんどなく、クリブ形状（燃焼方向の相違）による影響が著しかった。

有炎燃焼の場合、気相反応によって発生した熱が未燃焼部分へ伝えられ、熱分解ガスが発生し、燃焼が継続される。またその際の熱の伝達は、対流熱伝達及び火炎からの熱輻射が支配的とされている。

ここで、クリブの形状に注目してみると、吊り下げ方式のクリブ2の場合、火炎伝播方向と空気の流れ方向（火炎の方向）が同一であり、未燃焼部分が火炎の中に入るため、流入空気による冷却作用も少なく、対流熱伝達が効率的に行われる。一方、井桁状に組んだクリブ1の場合には、火炎伝播方向と空気の流れ方向が異なるため周囲から流入する空気による冷却損失が大きく、未燃焼部分への伝熱効率が悪くなる。

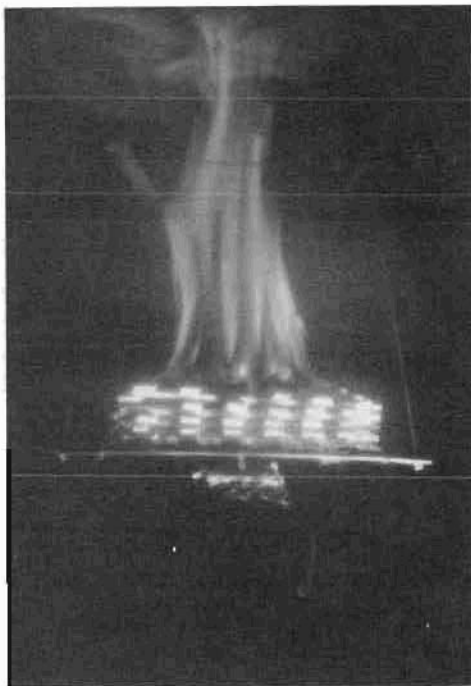
下段クリブ1の場合、このような理由から、元々燃焼速度が遅いところに、燃焼の継続により酸素濃度が減少し、更に燃焼速度が遅くなる

ため、より高い酸素濃度で燃焼に必要な熱の供給ができなくなり少ない燃焼量で消炎したものと考えられる。

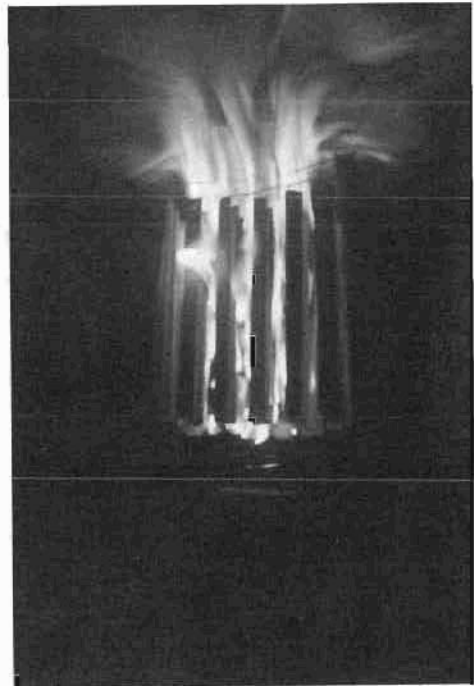
一方、上段クリブ1の場合、写真2からもわかるように、天井面に当たった炎が天井面に沿って広がり、そのため、前述のように有炎燃焼を支配する一因である炎からの熱輻射が増大したことが主因となり、また、図6からもわかるように上段の方が、クリブ周囲の雰囲気温度が高く、流入空気の冷却による熱損失が少なくなったこともその一因となって燃焼速度が増加した。また、この燃焼速度の増加が、酸素濃度の減少に伴う燃焼速度の減少を補完したために、より低い酸素濃度に至るまで有炎燃焼が継続し、燃焼量も増加したものと考えられる。そのため、過去の実験結果で、一般に下方で燃焼させた場合の方が、燃焼速度が速く、燃焼量も多いとされていたことに反した結果となった。

クリブ2の場合、前述の下段クリブ1の場合で述べた理由と反対の理由により、燃焼速度は速くなり、燃焼量も増加した。しかし、クリブ1と異なり、上段の場合でも、燃焼速度、燃焼量の増加が僅かであったのは、輻射による伝熱が、輻射面と受熱面の表面間の幾何学的位置関係と表面の形状を重要な因子とすることから、天井面をほう炎とクリブが平行となったクリブ1では、燃焼速度、燃焼量とも大幅に増加したのに対し、直角となったクリブ2では僅かの増加に留まったものと考えられる。

有炎燃焼では、熱分解により発生した可燃性ガスが、空気中の酸素と混合し、部分的に可燃性混合気が形成され、この混合気が燃焼する。混合気の燃焼速度は、温度・組成など外部条件によって定まる混合気固有の定数で酸素濃度が減少すると低下し、ある酸素濃度において零でない有限な値をとり、燃焼限界となる。ここで、密閉室内の酸素濃度は、後述するように（4）、(2)燃焼速度及び燃焼量について、(2)式)燃焼量の関数で表わされる。そのため、有炎燃焼の燃焼限界における燃焼量は、前述のようにクリブの形状や燃焼速度に関係なくほぼ一定の値をとる。また、混合気の燃焼速度は、温度の上昇により増加するため、雰囲気温度の高い上段の方が、燃焼限界における酸素濃度はより低い値を



上段 クリブ1
(0'50'')



上段 クリブ2
(0'30'')



下段 クリブ1
(0'45'')



下段 クリブ2
(0'30'')

写真2 クリブの燃焼状況

とり、そのため燃焼量は増加すると考えられるが、表2からもわかるように、この影響は少ない。

無炎燃焼の場合は、有炎燃焼と異なり、燃え広がりが固体内の熱伝導に支配される。そのため、井桁状に積んだクリブ1では消炎後も無炎燃焼を継続したのに対し、吊り下げた形状のクリブ2ではほとんど無炎燃焼をしなかったと考えられる。

(2) 燃焼速度及び燃焼量について

容器に入った液体が燃焼する場合、同一酸素濃度では、燃焼速度はほぼ一定の値となる。そのため、燃焼に伴う室内の酸素濃度や燃焼量を直接理論的計算により求めることが可能となる。

しかし、固体燃焼物の場合、同一酸素濃度でも時間の経過と共に燃焼面は拡大し、燃焼速度は増加して行く。また、同一材料の物でも形状により燃焼速度が変わるため、直接燃焼室内の酸素濃度や燃焼量を求めることは困難となる。そこで、第1報で求めた燃焼速度が酸素濃度に比例するという関係を利用し、同一物の開放空間における燃焼量から密閉空間における燃焼量を間接的に求めることを試みた。

なお、この過程において、模型燃焼室の換気率が極めて小さいので換気量をゼロとして以下考察する。

時刻 t における開放時及び密閉時の燃焼量をそれぞれ $W(t)$ 、 $w(t)$ とすると、同時刻における燃焼速度は、それぞれ時間 t で微分して $\dot{W}(t)$ 、 $\dot{w}(t)$ となる。

ここで、開放時の燃焼位置における酸素濃度は常に外気の酸素濃度 O_0 (0.21) に等しく、また、密閉燃焼時の時刻 t における室内酸素濃度を $O(t)$ とすると、燃焼速度は酸素濃度に比例するから、

$$\frac{\dot{W}(t)}{\dot{w}(t)} = \frac{O_0}{O(t)} \dots\dots\dots(1)$$

の関係が得られる。

ここで、クリブの燃焼による酸素消費量は、酸素濃度に関係なく一定と仮定すると、 $O(t)$ は、

$$O(t) = \frac{O_0 \cdot V - k \cdot w(t)}{V} \dots\dots\dots(2)$$

V ：燃焼室容積

k ：可燃物単位重量当りの酸素消費量

となる。(2)式を(1)式に代入し、 $w(t)$ について整理すると、

$$\dot{w}(t) + \frac{k}{O_0 V} \dot{W}(t) w(t) - \dot{W}(t) = 0 \dots\dots(3)$$

の関係が得られる。(3)式を $w(t)$ について解くと

$$w(t) = \frac{O_0 V}{k} + C \exp \left[-\frac{k}{O_0 V} W(t) \right]$$

.....(4)

(C ：積分定数)

が求められる。

ここで、 $t = 0$ において $W(t) = 0$ 、 $w(t) = 0$ であるから、

$$C = -\frac{O_0 V}{k}$$

したがって、(3)式の解は

$$w(t) = \frac{O_0 V}{k} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{k}{O_0 V} W(t) \right] \right\}$$

.....(5)

が得られる。

(5)式から開放燃焼時の燃焼量 $W(t)$ を知ることにより、同一物の密閉燃焼時の燃焼量 $w(t)$ が求められることがわかる。(燃焼速度 $\dot{w}(t)$ は(5)式を微分することにより、酸素濃度 $O(t)$ は(5)式を(2)式に代入することにより求められる。)但し、実際に(5)式が成立するのは、有炎燃焼が継続している時で、前述のように有炎燃焼終了時の限界燃焼量は約60g (燃焼室の単位容積当りでは約0.12g/ℓ)であったので、 $w(t) = 0.12 V$ となるまでの間となる。

ここで、表2からクリブ1g当りの酸素濃度減少量は、平均0.135%/gであるので、クリブ1g当りの酸素消費量 k の値は0.64ℓ/gが求められる。図7にクリブ1を上段で燃焼させた場合の開放時、密閉時及び(5)式により開放時の値から求めた燃焼量を示したが、計算値が密閉時のものとかなり良く一致していることがわかる。また、これにより、これまで概念的にしか

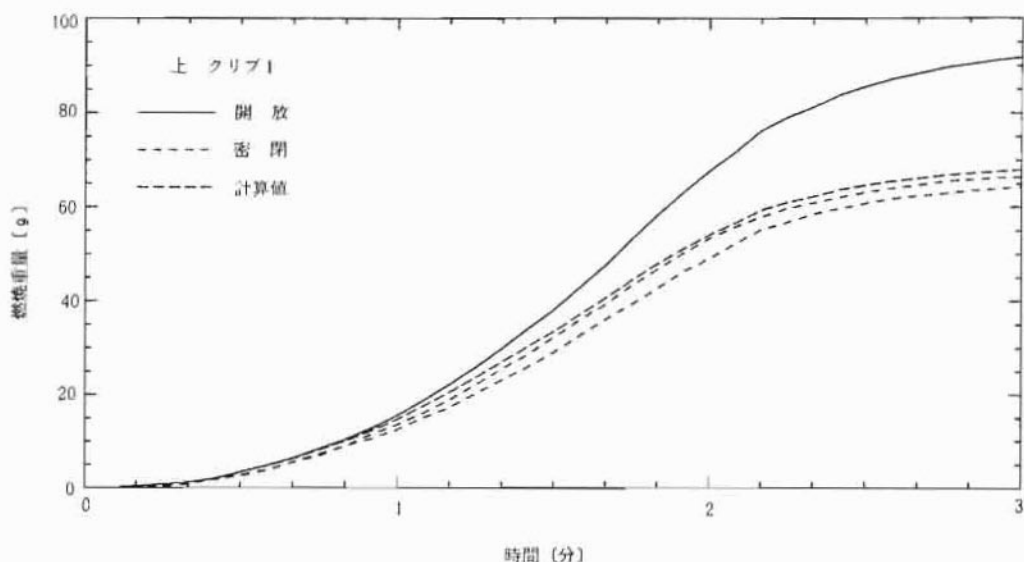


図7 クリブの燃焼重量の比較

捉えられていなかった、「密閉室内では、燃焼が遅くなる。」ということが理論的にも明らかになった。

実際の建物内の室では、締め切った場合でもある程度の換気があるため、換気量ゼロとした前述の考察結果をそのまま適用することには不合理な点もあると思われる。しかし、最近の建築物は、防火造・耐火造の増加や、アルミサッシの普及等により気密性能が大きく向上している。そのため、気密性能が良い住宅では、換気回数が約0.05回/hしかなく、また、気密性能が悪い住宅でも約0.3回/h(共に風速0.5m/sで外気が静穏な場合)程度であり、燃焼時間がわずかに数分～10数分程度であることを勘案すると、換気量は、無視でき(5)式はほぼそのまま、あるいは、 k の値を補正する程度で適用できるものと思われる。

5. まとめ

模型燃焼室における燃焼実験を通して、密閉室内の燃焼性状について検討してきたが、以上の結果を要約すると次のことがいえる。

(1) 密閉室内の燃焼について、有炎燃焼終了時点での燃焼量は、クリブの形状、燃焼位置によらずほぼ一定となる。但し、燃焼が緩慢で室内への熱の蓄積が十分でない場合には、それ以前に消炎する。

(2) 今まで低位置よりも高位置での燃焼の方が燃焼速度、燃焼量ともに小さくするとされていたが、高位置でも、火炎が天井をはうような場合には、その輻射熱により、高位置の方が大きくなる。

(3) 燃焼速度が酸素濃度に比例するという関係から、密閉室内での燃焼量、燃焼速度及び室内酸素濃度は、同一物を開放空間で燃焼した場合の同時刻における燃焼量から求まる。

6. あとがき

杉クリブの燃焼実験から、これまで概念的にしか捉えられなかった密閉室内の燃焼が、部分的にはあるが理論的に明らかになってきた。

しかし、クリブ1を低位置で燃焼させた場合や、無炎燃焼の継続の可否の問題については、本研究のようなマクロ的な考察では解明できず、伝熱機構を含めた詳細な解析が必要となり、今後の課題となる。

参考文献

- (1) 疋田, 秋田: 燃焼概論, コロナ社
- (2) 碓井: 「出火の可能性に関する研究」, 火災の研究(II)
- (3) 鳥井, 三好: 「密閉室内の燃焼性状と窒息消火の実験結果について」, 所報17号
- (4) 鳥井, 千葉他: 「密閉室内の燃焼性状に関する

研究（第1報）」、所報22号

爆発事故について」、火災 Vol.31, No.3

(5) 村上、田中：「建物の気密性能と酸欠・中毒・