

性能的防火設計のためのコーンカロリー計の活用 Practical use of Cone Calorimeter Measurements for Performance-Based Design

高橋 晃一郎 Koichiro Takahashi
堀 長生 Nagao Hori

1. はじめに

2000年の建築基準法の大改正以降、耐火や避難の分野では耐火性能検証法や避難安全検証法による性能検証法が確立され、既に実物件の設計に多く生かされている。

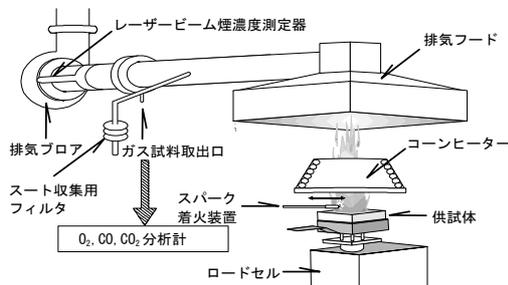
一方、出火防止及び初期火災拡大防止に重要な役割を持つ内装防火設計については旧建設省総合技術開発プロジェクト「防・耐火性能評価技術の開発」（通称、防・耐火総プロ）において、内装防火設計の性能規定化を目的として研究を行い、様々な課題が抽出されたが未解決な部分も多い。

また、建築基準法の改正により導入されたコーンカロリー計試験は防火材料の大臣認定取得のための性能評価試験機として定着し、これまでに新素材を含む多くの建築材料に関する膨大な燃焼データが蓄積されてきている。コーンカロリー計試験から得られた材料固有の燃焼特性データは防火性能の評価だけでなく、内装防火設計や室火災拡大予測モデルのための基礎データとして利用価値が高いと期待されている。

本稿では室火災拡大予測、及び内装防火設計に対するコーンカロリー計による燃焼試験データの活用事例を示すとともに、性能的防火設計への有用性について述べる。

2. コーンカロリー計試験の概要

従来の内装材料の燃焼試験装置では、各材料固有の発熱量を直接計測することが困難であったため、試験炉の温度や排気ガスの温度などの代替性能値を測定してその防火性能を判断していた。しかし、建築基準法の改正により、ISO5660-1に沿った世界標準の試験方法としてFig. 1 に示すコーンカロリー計が取り入れられ、国際的な調和がはかられた。



ISO 5660 Rate of heat release from building products
建築材料の受放射加熱状況下での燃焼性を求める。
加熱強度は、フラッシュオーバー時の放射強度に近い50kW/m²とする。
総発熱量と最高発熱速度により燃焼性を判定する。
試験体 100×100mm

Fig. 1 コーンカロリー計試験装置
Cone Calorimeter

1982年にアメリカで開発されたコーンカロリー計は、材料が燃焼する際に、材料の化学組成にかかわらず、酸素消費1kgあたり13.1MJの熱が発生するという「酸素消費理論」に基づき、燃焼ガス中の酸素濃度を測定することによって材料固有の発熱速度や発熱量等の燃焼特性値を測定する試験装置である。

この試験装置では僅か100mm角の小さな試験体にて工学的な燃焼特性データが得られ、データは世界共通であるため海外の研究者や研究機関とのデータの交換が可能となり、火災拡大予測などの研究もグローバルに進められるようになった。

3. 室火災拡大予測モデルへの活用例

3.1 カールソンモデルの概要

室火災の拡大予測にはFig. 2に示すようなルームコーナー試験 (ISO9705にて規定) による実大火災実験が行われている。一方で計算による室火災拡大予測モデルの研究も進められており、ルンド大学のカールソン博士らが開発したモデル (以下、カールソンモデルと称す) は、コーンカロリー計試験により得られた燃焼特性データを用いることによりルームコーナー試験の火災拡大性状を予測するものである。

モデルの火災シナリオは大きく4つのフェーズに分けられ、加熱開始から10分までの火災シナリオは、フェーズ1: バーナーのみの燃焼 → フェーズ2: バーナー背面の壁面着火および燃焼 → フェーズ3: 天井面着火→天井面燃焼拡大となっており、10分以降のシナリオはフェーズ4: バーナーの燃焼 → 天井面着火 → 天井面燃焼拡大となっている。

3.2 入力データ

カールソンモデルによる室火災拡大の予測計算に必要な材料データの一覧をTable 1に示す。熱慣性および着火温度はLIFT試験から算定しているが、これらの材料特性は、コーンカロリー計試験などによって、火災環境に見合う何段階かの放射熱に材料表面を暴露させて、着火に至る時間と外部加熱強度を測定することによって予測することが可能である。発熱速度の時間的推移は、コーンカロリー計試験において、対象とする材料に外部加熱強度50kW/m²を与えた場合の発熱速度データを用いる。

Table 1 入力データ
Input Data

データ	単位
k _{pc} : 熱慣性	kW ² s/m ⁴ K ²
T _{ig} : 着火温度	℃
Q ^o c(t): 発熱速度	kW/m ²

3.3 計算結果の例

実際に化粧せっこうボード（厚さ13.5mm、単位面積当たり質量9.47kg/m²、着火温度412℃、熱慣性0.57kW²s/m²K²）を例に計算した結果を以下に示す。

Fig. 3 はコーンカロリ計試験から得られた化粧せっこうボードの発熱速度データである。カールソンモデルでは当該材料がルームコーナー試験における小区画内の壁面と天井面に取り付けられた状態を想定し、室火災拡大を計算し、フラッシュオーバーに至るまでの時間を予測している。Fig. 4 は区画火災全体の発熱速度の時間的推移を示したものであり、これを基に火災の進展状況を解説すると以下のようになる。

- 30秒 : バーナー(100kW)の燃焼
- 30, 75秒 : バーナー(100kW)+バーナー背面側壁面の燃焼
- 75~165秒 : バーナー(100kW)+バーナー背面側壁面+天井面の燃焼拡大
- 165~420秒 : バーナー(100kW)+天井面の燃焼 (天井面の燃焼領域の拡大は停止)
- 420~600秒 : バーナー(100kW)の燃焼 (バーナー背面側壁面、およびバーナーの燃焼とバーナー背面側壁面の燃焼の影響を受ける天井面の燃焼は終了)
- 600~615秒 : バーナー(300kW)の燃焼
- 615秒~ : バーナー(300kW)+天井未燃部分の燃焼拡大、フラッシュオーバー

カールソンモデルではこのようにルームコーナー試験装置のような小区画において、壁と天井が単一材料で施工された場合について火災拡大予測が可能である。

内装防火設計ではフラッシュオーバー(発熱速度が1MWを超過すること)の発生の有無や発生するまでの時間が安全性の判定基準となる。そのため、コーンカロリ計から得られた各種材料の燃焼データを入力することによりフラッシュオーバーまでの時間がどのように変化するかを検証することで、ルームコーナー試験のような実大規模の実験を行わないでも火災性状予測が行え、合理的な性能的防火設計への適用が期待できる。

ただし、現時点ではカールソンモデルはルームコーナー試験よりも大きな区画の場合や、壁と天井がそれぞれ異なる材料で施工された場合は予測が困難であるため、実火災との整合性の確認やモデルの更なる改良がいち早く進められることが待ち望まれている。

4. 内装防火設計への活用例

耐火性能検証法では、居室の火災室温度を推定するためには、当該居室の発熱量の設定が必要である。

火災室の総発熱量は以下の3種類の発熱量の合計値として求められる。

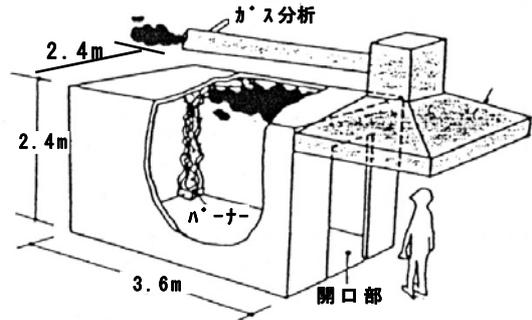


Fig. 2 ルームコーナー試験装置
Room Corner Experimental apparatus

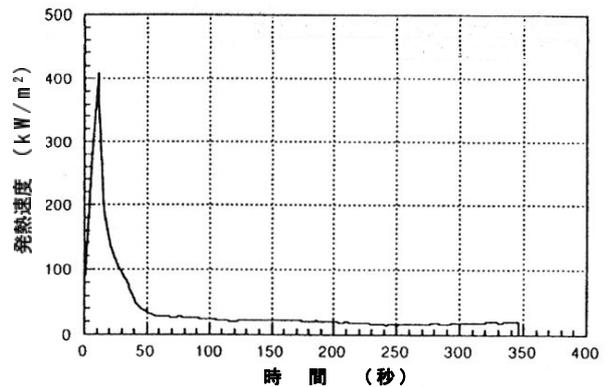


Fig. 3 コーンカロリ計試験結果
(化粧せっこうボード13.5mm)
Result of Cone Calorimeter Test
(Gypsum board 13.5mm thickness)

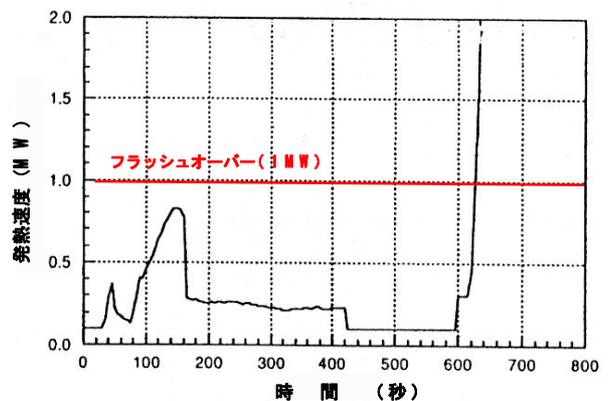


Fig. 4 カールソンモデル計算結果
(化粧せっこうボード13.5mm)
Result of Calculation by Karlsson Model
(Gypsum board 13.5mm thickness)

Table 2 内装用建築材料の単位発熱量
Calorific Value of Unit of Interior Materials

内装用建築材料	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)
不燃材料	0.8
準不燃材料	1.6
難燃材料	3.2
木材その他これに類するもの	8

Table 3 内装仕様と総発熱量 (事務室) Interior specification and calorific value (Office)

(事務室部分)			ケース1			ケース2			コーンカロリー計による実測値	
部位	内装の仕様	見付け面積 (m ²)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	測定値 (MJ/m ²)	発熱量 (MJ)
天井	岩綿吸音板(塗装仕上げ)(不燃)	245.8	15.0	0.8	2,940	1.0	0.8	197	9.11	2,239
壁1	石膏ボード12.5+9.5mm+ビニル壁紙0.6mm(準不燃)	59.6	10.5	1.6	1,001	1.0	1.6	95	12.81	763
			12.5	0.8	596					
壁2	石膏ボード12.5mm+ビニル壁紙1.0mm(難燃)	81.0	1.0	3.2	259	1.0	3.2	259	11.32	917
			12.5	0.8	810					
床	カーペット9mm(木材その他)	245.8	9.0	8.0	17,698	9.0	8.0	17,698	44.50	10,938
事務室の内装用建築材料の総発熱量(MJ)			23,304(76%)			18,249(97%)			14,857(74%)	

()内は、床発熱量が全体に占める割合を示す。

Table 4 内装仕様と総発熱量 (会議室) Interior specification and calorific value (Conference room)

(会議室部分)			ケース1			ケース2			コーンカロリー計による実測値	
部位	内装の仕様	見付け面積 (m ²)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	測定値 (MJ/m ²)	発熱量 (MJ)
天井	岩綿吸音板(塗装仕上げ)(不燃)	81.9	15.0	0.8	983	1.0	0.8	66	9.11	746
壁1	石膏ボード12.5+9.5mm+ビニル壁紙0.6mm(準不燃)	94.4	10.5	1.6	1,586	1.0	1.6	151	12.81	1,209
			12.5	0.8	944					
床	カーペット9mm(木材その他)	81.9	9.0	8.0	5,897	9.0	8.0	5,897	44.50	3,645
会議室の内装用建築材料の総発熱量(MJ)			9,410(63%)			6,114(96%)			5,600(65%)	

()内は、床発熱量が全体に占める割合を示す。

Table 5 内装仕様と総発熱量 (役員室) Interior specification and calorific value (VIP room)

(役員室部分)			ケース1			ケース2			コーンカロリー計による実測値	
部位	内装の仕様	見付け面積 (m ²)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	測定値 (MJ/m ²)	発熱量 (MJ)
天井	不燃木材24mmあらわし(不燃)	41.0	24.0	0.8	787	24.0	0.8	787	2.47	101
壁1	不燃木材24mmあらわし(不燃)	62.0	24.0	0.8	1,190	24.0	1.6	1,190	2.47	153
床	カーペット15mm(木材その他)	41.0	15.0	8.0	4,920	15.0	8.0	4,920	64.30	2,636
役員室の内装用建築材料の総発熱量(MJ)			6,897(71%)			6,897(71%)			2,890(91%)	

()内は、床発熱量が全体に占める割合を示す。

Table 6 内装仕様と総発熱量 (廊下) Interior specification and calorific value (Passage)

(廊下部分)			ケース1			ケース2			コーンカロリー計による実測値	
部位	内装の仕様	見付け面積 (m ²)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	厚さ (mm)	単位発熱量 (MJ/m ² ・mm)	発熱量 (MJ)	測定値 (MJ/m ²)	発熱量 (MJ)
天井	岩綿吸音板(塗装仕上げ)(不燃)	122.9	15.0	0.8	1,475	1.0	0.8	197	9.11	1,120
壁1	石膏ボード12.5+9.5mm+ビニル壁紙0.6mm(準不燃)	115.3	10.5	1.6	1,937	1.0	1.6	184	12.81	1,477
			12.5	0.8	1,153					
床	コンクリートスラブ(ウレタン樹脂2mm(木材その他))	122.9	2.0	8.0	1,966	2.0	8.0	1,966	47.95	5,893
廊下の内装用建築材料の総発熱量(MJ)			6,531(30%)			2,347(84%)			8,490(69%)	

()内は、床発熱量が全体に占める割合を示す。

Table 7 法定不燃材料一覧 Nonflammable Materials Provided in Notification

国土交通省告示第1400号で定められている不燃材料	コンクリート、れんが、瓦、陶磁器質タイル、繊維強化セメント板、厚さが3mm以上のガラス繊維混入セメント板、厚さが5mm以上の繊維混入ケイ酸カルシウム板、鉄鋼、アルミニウム、金属板、ガラス、モルタル、しっくい、石、ロックウール、グラスウール板、厚さが12mm以上のせっこうボード(ボード用原紙の厚さが0.6mm以下のものに限る)
---------------------------	---

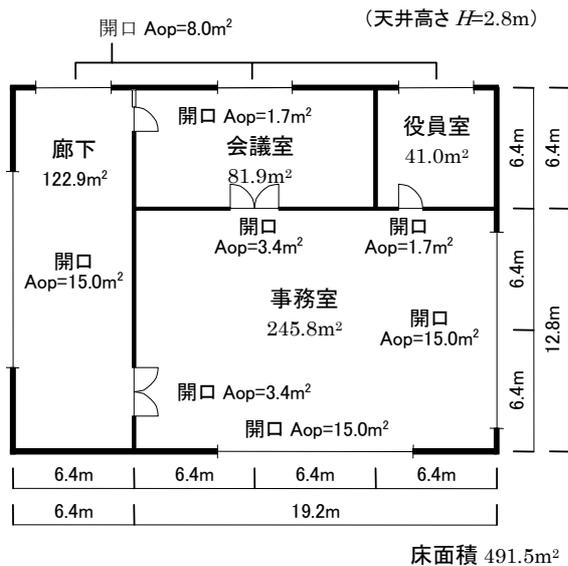


Fig. 5 発熱量算定に用いた室モデル
Model for Calculation of Calorific Value

- * 収納可燃物の発熱量
- * 内装用建築材料の発熱量
- * 隣接室からの侵入熱量

このうち、内装用建築材料の発熱量が内装防火設計の実務でどの様に扱われているのか、また解決すべき問題点について以下に検討する。

内装用建築材料の発熱量は、国土交通省告示第1433号によってTable 2のように定められている。

一方、実建物で適用されている内装用建築材料について、実際の発熱量を知るためにコーンカロリー計試験を実施した。一般的に防火材料の性能評価は、不燃材料では、20分間の試験時間で実施されているが、今回は火災時に内装用建築材料から発生する発熱量を把握することが目的であったため、外部加熱強度50kW/m²で発熱速度がゼロになるまで試験を継続し、試験継続中の累積発熱量を総発熱量とした。

Fig. 5に示す平面の各居室について、Table 3～Table 6に示すように内装の仕様と見付け面積に応じてその総発熱量を算定した。ここでケース1と2の計算結果は、国土交通省告示第1433号に示す方法で算定したものである。ケース1は、すべての内装材料に対して告示に示された単位発熱量を用いて算定したもので、ケース2は、Table 7に示す国土交通省告示第1400号で例示された法定不燃材料の発熱量をゼロとして算定したものである。

実務上は、ケース1またはケース2の算定結果により運用されており、算定方法について明確な基準はない。このケーススタディでは、比較のためコーンカロリー計試験による実測値から算定した内装用建築材料の発熱量の結果についても示した。

この結果によると、一般的な事務室では、告示による算定方法の方が、実測値に比べて内装用建築材料の発熱量が大きく見積もられることがわかった。その理由として、居室（事務室・会議室・役員室）ではコーンカロリー計による実測値に基づく発熱量の方が小さく、告示の値を使って算出した発熱量の方が大きくなっている（安全側の値をとっている）が、廊下についてはこの関係が逆転しており、コーンカロリーの実測値に基づく発熱量の方が告示の値を使って算出した発熱量に比べて大きくなっている。この理由として床材料は、仕様規定で内装制限を受けないために防火材料の指定を受けているものがない。そのため、告示による算定結果、及び実測値による算定結果では共に、内装用建築材料の発熱量の内、床が占める割合は、60～90%を占め、床の発熱量が大半を占めることが明らかとなった。そして、床材料の発熱量は種類によって大きな差があり、特にウレタン樹脂のような塗り床仕上げの仕様では、告示による算定結果に比べて実測値の方が発熱量が大きく実態と異なることによるものである。

しかし、一般的には居室においては告示による発熱速度の規定値はかなり安全側に設定されているので、コーンカロリー計試験による発熱量の実測値を活用することにより、より実態に近い火災性状予測を行うことができ、つまりこの性能に見合った合理的な予測により性能的防火設計が可能になるものと期待できる。

5. まとめ

カールソンモデルは、コーンカロリー計試験により小型の試験体から得られる燃焼特性データを入力することで、ルームコーナー試験のような実大規模試験を実際に行わないで火災拡大性状予測が可能であり、合理的な性能的防火設計を行うためにも有用であると考えられる。今回の検討でも仕上げ材料の種類が単一で、ルームコーナー試験装置のような小区画であれば実火災との整合性が高いことが確認された。

また、内装防火設計において各種建築材料のコーンカロリー計試験機によるデータを適用することで、告示に示されるような発熱量を使用した場合に比べ、居室の総発熱量を低減することが可能であった。このような実際の内装材料の発熱量を直接測定することで合理的な性能的防火設計を可能にするものと期待される。

参考文献

- 1) 長谷見雄二：建物火災と材料の燃焼性状評価、建築防災6. 10、(財)日本建築防災協会、平成8年10月
- 2) Karlsson, B., : Mode I Fire Growth on Combustible Lining Materials in Enclosures, Report TVBB-1009, Department of Fire Safety Engineering Lund University, 1992