

防耐火性能に寄与する
発泡プラスチック断熱材の材料指標の構築

Study on material property of cellular plastic
insulation to estimate fire protective performance

地方独立行政法人北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所

Hokkaido Research Organization Northern Regional Building Research Institute

概 要 Abstract

防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の構築 Study on Material Property of Cellular Plastic Insulation to Estimate Fire Protective Performance

糸毛 治¹⁾
Osamu.Itoge*

キーワード : 材料指標、発泡プラスチック断熱材、燃焼性、防耐火性能
Keywords : *Material Property, Cellular Plastic Insulation, Combustion Property, Fire Protective Performance*

1. 研究概要

1) 研究の背景

防耐火構造の性能評価業務において、発泡プラスチック断熱材は、同じ材料規格であっても、メーカーにより材料組成が異なり、燃焼性状が一定ではない。また壁体に用いた場合に、断熱材に関する防火上の有利不利を判断するための材料が乏しい等の問題がある。当所ではこれまで、市場に流通するほぼすべての発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を把握し、また各種発泡プラスチック断熱材を用いた木造壁体の防耐火性能を実験的に検討してきた。これら発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を示すデータと断熱材の熱分解時の特徴を示す材料物性との間に相関性を示すことができれば、その材料指標により、断熱材の難燃性の程度を位置づけられると考えられる。また断熱材種類ごとの木造壁体の防耐火性能を示すデータと壁体内における断熱材の挙動との関係性から、防耐火性能に寄与する材料指標を明らかにできれば、木造壁体の防耐火性能を考える上で、発泡プラスチック断熱材について簡便で明確な判断ができるようになると考えられる。

2) 研究の目的

発泡プラスチック断熱材自体の難燃性の程度を位置づける材料指標を明らかにする。
壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標を明らかにする。

2. 研究内容

1) 発泡プラスチック断熱材単体の難燃性の程度を位置づける材料指標の検討 (H24~25年度)

- ・ねらい：発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関わる材料物性を挙げ、燃焼性状のデータと相関性を検討し、材料指標を特定する。
- ・試験項目等：熱物性に関わる各種材料分析

2) 壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の検討 (H25~26年度)

- ・ねらい：木造壁体の防耐火性能と断熱材の壁体内での挙動（熱分解や炭化、熔融）との関係性を分析して、防耐火性能に寄与する断熱材の材料物性を挙げ、相関性を検討し、材料指標を特定する。
- ・試験項目等：熱物性に関わる各種材料分析

3) 活用できる分析手法としての整理 (H26年度)

¹⁾環境研究部 環境グループ主査

¹⁾Chief of Building Environment Group

- ・ねらい：上記の分析手法について、性能評価機関にて活用するという視点から見直し、再現性の確認を含めその分析手法を確定させる。
- ・試験項目等：分析手法の簡素化、データ整理手法の検討

3. 研究成果

1) 発泡プラスチック断熱材単体の難燃性の程度を位置づける材料指標の検討 (H24~25年度)

- ・発泡プラスチック断熱材単体の難燃性（燃焼性）を①着火性、②発熱速度の一次ピーク値、③単位質量当たりの発熱量から捉え、それぞれに対応する発泡プラスチック断熱材の材料指標を明らかにした。

	①着火性	②発熱速度の一次ピーク値	③単位質量当たりの発熱量
熱可塑性樹脂 (XPS・EPS・PE)	酸素指数	断熱材密度	なし (材料ごとの固有値)
熱硬化性樹脂 (PUF・PF)	判別不可	一次質量減少量 (TG 分析)	PUF: 材料組成 (樹脂の種類ごとに変化) PF: なし (材料の固有値)

①着火性 (材料の燃焼のしやすさ)

- ・熱可塑性樹脂では、樹脂が熔融、熱分解、ガス化の過程を経た後で着火に至る場合であれば、酸素指数により着火性の違いを捉えられる。
- ・熱硬化性樹脂ではすべて 2 秒~4 秒で着火し、防火材料としての性能上、有意差を生じるとは言い難い。

②発熱速度の一次ピーク値 (着火後の急速な燃焼拡大の程度)

- ・熱可塑性樹脂では、断熱材密度との相関性が確認されたが、製品を判別できる精度は得られなかった。
- ・熱硬化性樹脂では TG-DTA 分析 (熱重量-示差熱分析) にて、発熱反応となる約 200℃~約 400℃までの一次質量減少量との相関性が確認された。ただし製品を判別できる精度は得られなかった。
- ・PUF の材料設計で難燃性の指標として用いられる「イソシアネート指数」は、ある 1 つの材料設計における難燃性を示す相対的な指標であり、固有の燃焼性状を示すものではないことが分かった。

③単位質量当たりの発熱量 (可燃物として発熱量の原単位)

- ・熱可塑性樹脂および PF では、断熱材の種類ごとに、ほぼ一定の値になる。
- ・PUF では、樹脂の種類 (フロン・ノンフロン品、汎用品・難燃仕様) ごとに、材料組成が異なり、値が変わる。

2) 壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の検討 (H25~26年度)

- ・発泡プラスチック断熱材が壁体の防耐火性能 (遮炎性・遮熱性) に及ぼす影響を、A. 熔融・熱分解により断熱性能を失う時間と B. 炭化物の生成状況の 2 つから捉え、それぞれに対応する材料指標を明らかにした。

	A. 熔融・熱分解により断熱性能を失う時間	B. 炭化物の生成状況
熱可塑性樹脂 (XPS・EPS・PE)	断熱材密度 (= 溶け抜け時間)	なし (炭化しない)
熱硬化性樹脂 (PUF・PF)	断熱材密度・一次質量減少時ピーク温度 (TG 分析)	残渣量 (TG 分析)

- ・熱可塑性樹脂では、TMA 解析 (熱機械解析) で得られる熱変形温度を断熱材の熔融温度とし、壁体内の断熱材がその熔融温度に達する時間を溶け抜け時間とすると、溶け抜け時間と断熱材密度の間に相関性を確認した。
- ・熱硬化性樹脂では、断熱材密度が高く、樹脂が熱分解しにくく、熱分解時に生成される炭化物が多いほど壁体の遮熱性が向上する。樹脂の熱分解挙動と炭化物の生成状況は、TG-DTA 分析により把握できた。

3) 活用できる分析手法としての整理 (H26年度)

- ・TG-DTA 分析により、材料指標である一次質量減少量や炭化物の生成量を得るための測定条件、試料の養生条件などの分析手法をまとめた。

4. 今後の見通し

全国の性能評価機関にてより合理的な性能評価業務の運用等に活用できるよう、本研究で得られた発泡プラスチック断熱材の材料指標を分析手法とあわせて提案する。

目 次

1.	背景と目的	1
2.	断熱材の燃焼性状を示すデータの概要	2
3.	断熱材の難燃性を示す材料指標の検討	4
4.	壁体の防耐火性能を示すデータの概要	8
5.	壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標の検討	13
6.	分析手法の検討	15
7.	まとめ	18

1. 背景と目的

(1) 背景

発泡プラスチック断熱材は、同じ材料規格であっても、メーカーにより樹脂の組成や発泡剤、難燃剤、などの原料組成が異なり、燃焼性状が一定ではない。発泡プラスチック断熱材を部材へ用いる場合、それらが防火材料や防耐火構造としての防火性能に影響を与える可能性がある。

発泡プラスチック断熱材を原料として購入し、防火材料や防耐火部材を製品化するメーカーは、これら断熱材の情報を十分に得られないため、簡易な方法でプラスチック断熱材の燃焼性状を把握できることが望ましい。また防耐火構造や防火材料の性能評価業務において、防火上最も不利となる試験体仕様を選定するにあたり、断熱材に関する防火上の有利不利を判断するための材料が乏しい等の問題がある。当所ではこれまで、市場に流通するほぼすべての発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を把握し、また各種発泡プラスチック断熱材を用いた木造壁体の防耐火性能を実験的に検討してきた^{1),2)}。

これら発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を示すデータと断熱材の熱分解時の特徴を示す材料物性との間に相関性を示すことができれば、その材料指標により、断熱材の難燃性の程度を位置づけられると考えられる。

また断熱材種類ごとの木造壁体の防耐火性能を示すデータと壁体内における断熱材の挙動との関係性から、防耐火性能に寄与する材料指標を明らかにできれば、木造壁体の防耐火性能を考える上で、発泡プラスチック断熱材について簡便で明確な判断ができるようになると考えられる。

(2) 目的

本研究では、発泡プラスチック断熱材自体の難燃性を示す材料指標および壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の2つを明らかにすることを目的とする。

(3) 研究内容

本研究では、次の1)～3)の内容で検討を進めていく。フロー図として示すと表1-1となる。

1) 発泡プラスチック断熱材単体の難燃性を示す材料指標の検討 (H24～25年度)

発泡プラスチック断熱材の燃焼性に関わる材料物性を挙げ、燃焼性状のデータと相関性を検討し、材

料指標を特定する。

2) 壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標の検討 (H25～26年度)

木造壁体の防耐火性能と断熱材の壁体内での挙動(熱分解や炭化、熔融の性状)との関係性を分析して、防耐火性能に寄与する断熱材の材料物性を挙げ、相関性を検討し、材料指標を特定する。

3) 活用できる分析手法としての整理 (H26年度)

1), 2)の分析手法について、性能評価機関にて活用するという視点から見直し、再現性の確認を含めその分析手法を確定させる。

(4) 発泡プラスチック断熱材の概要

本研究で取り扱う発泡プラスチック断熱材は、JIS A 9511 (2014年9月より JIS A 9521) に示される押出法ポリスチレンフォーム (以下、XPS)、ビーズ法ポリスチレンフォーム (以下、EPS)、ポリエチレンフォーム (以下、PE) とフェノールフォーム (以下、PF)、硬質ウレタンフォーム (以下、PUF) の計5種類とした。

本研究では、発泡プラスチック断熱材を熱可塑性樹脂(XPS, EPS, PE)と熱硬化性樹脂 (PUF, PF) の2つに分けて、検討を進める。

表1-1 検討フロー

	H24年度	H25年度	H26年度
①断熱材単体の難燃性の程度を示す材料指標			
1) 材料指標の検討			
3) 分析方法の検討			
②壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標			
2) 材料指標の検討			
3) 分析手法の検討			

表1-2 本報告書の構成

本報告書の構成	研究内容
1. 研究概要	
2. 断熱材の燃焼性状を示すデータの概要	1) 断熱材単体の難燃性の程度を示す材料指標
3. 断熱材の難燃性を示す材料指標の検討	
4. 壁体の防耐火性能を示すデータの概要	2) 壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標
5. 壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標の検討	
6. 活用できる分析手法としての整理	3) 活用できる分析手法としての整理
7. まとめ	

2. 断熱材の燃焼性状を示すデータの概要

断熱材単体の難燃性を示す材料指標を検討するにあたり、発泡プラスチック断熱材の燃焼性状を示すデータとして、既往研究¹⁾で実施したコーンカロリメータ試験のデータおよび酸素指数の測定値を用いた。

既往研究¹⁾におけるコーンカロリメータ試験および酸素指数のデータの概要について述べる。

(1) 試験方法・試験体

1) コーンカロリメータ試験

① 試験方法

コーンカロリメータ試験は IS05660-1 に従って、加熱強度は 50kW/m² とし、試験時間は試験体が燃え尽きるか、試験体からの発熱速度が測定されなくなるまで、5分おきにそれぞれ5分～30分までとして実施された。

② 試験体

試験体は、2008年時点で、建築用途向けに量産され、市場にて流通する断熱材（JIS品）を対象に、JISにて示される分類に沿って、断熱材種類ごとに日本国内で流通するほぼすべての断熱材を包括できるように選定された。

ただし、本研究では、樹脂の燃焼性を比較することを目的とするため、表面材がない樹脂のみを試験

表2-1 対象とする試験体

1. 熱可塑性樹脂

	JIS上の規格	メーカー
XPS	1種b, 2種b, 3種b	A社, B社, C社, D社
EPS	特号, 1号, 2号, 3号, 4号	E社
PE	1種2号	F社

2. 熱硬化性樹脂

	JIS上の規格	製品仕様	メーカー
PF	A種1種2号	27K品, 40K品	G社
		37K品, 42K品	H社
PUF	A種2種1号	汎用品	I社
	A種2種2号	汎用品	I社, J社
		難燃仕様	I社
	A種2種3号	汎用品	K社
	A種2種4号	汎用品	K社
		汎用品	J社
B種2種2号	汎用品	K社	
A種2種2号相当 ^{*1}	難燃仕様 ガラス繊維混入		L社

^{*1} PUF-9は樹脂中にガラス繊維が混入され、厳密に言えばJIS規格外の製品である。他の要件を照合するとA種2種2号に相当するため、「A種2種2号相当」とした。
^{*2} 製品として使われている樹脂であるが、製品に用いられる表面材がアルミ箔など不燃性面材に限られ、可燃性面材の製品が存在しない。そのため、表面材を剥がし、表面材なしの試験のみ実施した。

体とするデータのみを検討に用いた。用いる試験データの試験体一覧を表2-1に示す。

2) 酸素指数

① 試験方法

酸素指数は JIS K 7201-2 に定められた試験環境および試験方法に従って測定された。

② 試験体

コーンカロリメータ試験を実施した試験体におけるすべての断熱材樹脂を対象に測定された。試験体寸法は、JIS K 7201-2 中の発泡材料用である試験片Ⅱ形に従い、試験体の大きさを長さ80～150mm、幅10mm、厚さ10mmとし、切り出した発泡体をそのまま試験体とした。

(2) 燃焼性状

コーンカロリメータ試験および酸素指数の試験結果の一覧を表2-2に示す。

1) 熱可塑性樹脂

熱可塑性樹脂は加熱を受けると、いずれも加熱表面から溶けて、液化、熱分解、ガス化の過程をたどる中で着火して燃えあがる。厚さ25mmの試験体では、加熱開始後約35～50秒で一次ピークとなるが、加熱開始後約1分半前後には燃え尽きて燃焼が終わり、残渣はほとんど残らない（図2-1）。

2) 熱硬化性樹脂

熱硬化性樹脂は、加熱を受けると加熱開始後約2～4秒で加熱表面の樹脂に着火して、加熱面側から順次、熱分解しながら燃焼が進み、約15～25秒前後で一次ピークを迎える（図2-2）。

一次ピーク後の樹脂の燃焼は、PFでは、樹脂が炭化、変形しながら燃焼した後、緩やかに減衰しながら消火、赤熱の過程を経て、燃え尽きるまで燃焼が続く。一方、PUFは、一次ピーク後、炎をあげて燃焼が進み、燃焼の進行とともに炭化層が形成される。汎用品の場合は、炭化層が少なく樹脂の燃焼が一気に進んだ後、発熱速度が急激に小さくなり消火に至る。難燃仕様の場合は、炭化層が多く、炭化層の形成につれ、発熱速度が緩やかに減衰しながら燃焼し、燃え止まって消火に至る。

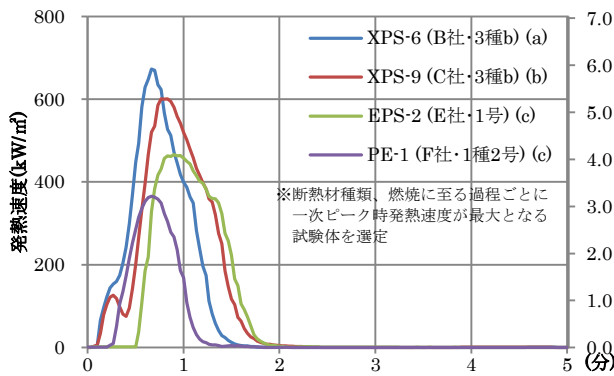


図 2-1 熱可塑性樹脂の発熱速度の推移

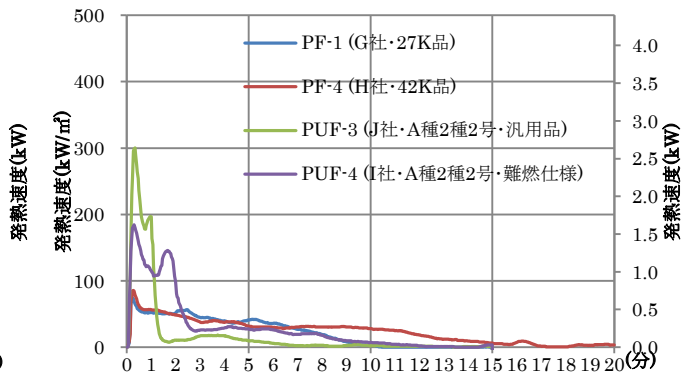


図 2-2 熱硬化性樹脂の発熱速度の推移

表 2-2 酸素指数、コーンカロリメータ試験結果のデータ

①熱可塑性樹脂																			
試験体			酸素指数	コーンカロリメータ試験 (試験体3体の平均値を示す。)															
No.	JIS 上の分類 (保温板・A種)	メーカー		試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m³)	発熱量 ^{*1}		質量減少量 (g)	発熱量/初期質量 (kJ/g)	発熱速度 ^{*1}		燃焼速度		溶融時着火時間 ^{*2} (秒)	液化時消火時間 ^{*2} (秒)	ガス化時着火時間 ^{*2} (秒)	燃焼終了消火時間 ^{*3} (秒)	
							(kJ)	(MJ/m²)			一次ピーク値 (kW)	時間 (秒)	最大値 (g/s)	時間 (秒)					
XPS-1	1種b	A社	26.9	5	6.6	26.2	181	20.6	6.6	27.7	3.86	438.4	45	0.139	34	4	10	20	92
XPS-2	2種b	A社	26.3	5	6.9	28.1	192	21.8	6.9	28.0	4.03	457.9	51	0.140	38	4	12	24	91
XPS-3	3種b	A社	26.6	5	7.6	31.0	216	24.5	7.6	28.5	4.04	459.5	45	0.144	34	2	12	20	100
XPS-4	1種b	B社	26.2	5	6.4	25.6	178	20.3	6.4	28.0	4.22	479.4	34	0.143	27	3	—	—	77
XPS-5	2種b	B社	26.2	5	6.2	25.6	175	19.9	6.2	28.2	4.66	529.1	34	0.151	26	3	—	—	70
XPS-6	3種b	B社	26.0	5	8.1	33.2	230	26.2	8.0	28.5	5.39	612.6	38	0.174	31	3	—	—	70
XPS-7	1種b	C社	26.5	5	7.8	31.8	223	25.3	7.8	28.5	4.06	461.2	53	0.140	37	3	14	22	96
XPS-8	2種b	C社	26.5	5	7.4	29.7	212	24.1	7.4	28.5	3.83	435.1	39	0.139	29	2,3 ^{*3}	—,14 ^{*3}	—,17 ^{*3}	95,109 ^{*3}
XPS-9	3種b	C社	26.0	5	9.1	36.5	255	28.9	9.0	27.9	5.10	579.5	49	0.175	38	3	16	21	98
XPS-10	1種b	D社	26.2	5	7.4	29.4	220	25.0	7.3	29.7	5.26	597.9	35	0.165	29	3	—	—	83
XPS-11	2種b	D社	26.1	5	7.5	29.7	216	24.5	7.5	28.8	4.67	531.1	35	0.151	28	3	—	—	93
XPS-12	3種b	D社	26.5	5	8.9	35.2	254	28.9	8.7	28.7	5.38	611.7	42	0.169	33	2,2 ^{*3}	—,14 ^{*3}	—,19 ^{*3}	98,108 ^{*3}
EPS-1	特号	E社	34.4	5	6.7	27.2	191	21.7	6.7	28.5	4.30	488.3	49	0.150	43	—	—	29	101
EPS-2	1号	E社	34.4	5	7.1	29.0	205	23.2	7.1	28.8	4.40	499.9	51	0.150	46	—	—	29	102
EPS-3	2号	E社	36.0	5	6.2	24.5	180	20.4	6.2	29.0	4.17	473.4	47	0.140	41	—	—	27	98
EPS-4	3号	E社	33.6	5	5.0	20.1	143	16.2	5.0	28.8	3.72	422.8	48	0.131	41	—	—	27	90
EPS-5	4号	E社	33.6	5	3.8	15.4	107	12.2	3.8	28.6	3.47	394.0	47	0.125	41	—	—	27	74
PE-1	1種2号	F社	18.3	5	2.9	11.1	107	12.1	2.8	37.1	3.06	347.9	42	0.084	31	—	—	11	64
②熱硬化性樹脂																			
試験体				酸素指数	コーンカロリメータ試験 (試験体3体の平均値を示す。)														
No.	JIS 上の分類 (保温板)	メーカー	製品仕様		試験時間 (分)	初期質量 (g)	実測密度 (kg/m³)	発熱量 ^{*1}		質量減少量 (g)	発熱量/初期質量 (kJ/g)	発熱速度 ^{*1}		燃焼速度		着火時間 ^{*4} (秒)	消火時間 ^{*4} (秒)		
								(kJ)	(MJ/m²)			一次ピーク値 (kW)	時間 (秒)	最大値 (g/s)	時間 (秒)				
PF-1	A種1種2号	G社	27K品	28.1	15	6.7	26.6	177	20.1	6.7	26.5	0.64	72.3	15	0.038	15	3	305	
PF-2	A種1種2号	G社	40K品	31.8	20	10.0	39.7	253	28.8	10.0	25.4	0.58	66.0	17	0.039	16	4	452	
PF-3	A種1種2号	H社	37K品	31.4	20	8.5	38.8	216	24.6	8.4	25.6	0.79	90.2	16	0.053	15	3	261	
PF-4	A種1種2号	H社	42K品	32.1	20	9.8	42.0	252	28.6	9.8	25.6	0.74	83.8	15	0.052	16	3	379	
PUF-1	A種2種1号	I社	汎用品	23.2	20	11.8	49.3	249	28.3	11.8	21.2	2.35	266.9	15	0.147	16	3	163	
PUF-2	A種2種2号	I社	汎用品	22.3	15	7.8	32.1	170	19.3	7.8	21.9	2.59	294.6	18	0.151	16	2	90	
PUF-3	A種2種2号	J社	汎用品	23.3	15	8.1	34.1	154	17.5	8.0	19.2	2.55	289.9	19	0.167	16	2	88	
PUF-4	A種2種2号	I社	難燃仕様	23.3	15	9.5	38.8	243	27.6	9.5	25.5	1.60	181.4	18	0.100	16	3	432	
PUF-5	A種2種3号	K社	汎用品	22.3	15	11.8	42.8	224	25.4	11.7	19.0	3.37	382.9	23	0.202	17	3	103	
PUF-6	A種2種4号	K社	汎用品	22.3	15	9.0	37.7	173	19.7	9.0	19.2	3.38	384.6	23	0.199	17	3	76	
PUF-7	A種2種2号	J社	汎用品	23.1	15	7.1	29.3	117	13.3	7.1	16.5	2.64	300.4	21	0.202	16	2	48	
PUF-8	A種2種2号	K社	汎用品	22.5	15	8.1	33.2	139	15.7	8.1	17.1	2.75	312.3	27	0.202	16	3	53	
PUF-9	A種2種2号相当 ^{*5}	L社	難燃仕様 ガラス繊維混入	21.1	20	9.1	35.4	199	22.6	8.4	21.8	1.11	125.8	16	0.064	16	2	415	

*1 コーンカロリメータ試験では、発熱速度や発熱量は、得られた値を試験体フォルダーの開口面積(0.0088 m²)で除して、単位面積あたりの値で示されることが多い。

ここでは発熱速度、発熱量については、得られた値(kW, kJ)とそれを開口面積(0.0088 m²)で除した値(kW/m², MJ/m²)の両方を併記する。

*2 継続時間 10 秒以下のフラッシュを含み、目視にて炎が確認できた状態を着火、消えたことを確認できた状態を消火とし、試験開始からの時間を測定した。

*3 試験体 3 体の中で着火へ至る過程が異なる試験体があり、表記の位置を対応させて着火へ至る過程ごとにそれぞれの着火時間、消火時間を示す。

*4 燃焼後、燃え尽き、最終的に消火した時間を示す。

*5 樹脂にガラス繊維が混入されているため、厳密には JIS 品には該当しないが、断熱材の物性は A 種 2 種 2 号を満たすため、A 種 2 種 2 号相当と表記した。

3. 断熱材の難燃性を示す材料指標の検討

(1) 燃焼性の捉え方

発泡プラスチック断熱材の燃焼が建築材料や部材の火災時の挙動に与える影響を考えると、①着火性、②着火後の燃焼拡大特性、③単位質量あたりの発熱量の3つが着目すべき事象として挙げられる。

着火(断熱材への引火)は、加熱を受け、樹脂から熱分解された可燃性ガスと空気が混合した可燃範囲内の予混合気に、火花など着火源を与えられることにより起こる²⁾。コーンカロリメータ試験では、通風の影響を受けない相対湿度 20%~80%、温度 15℃~30℃の雰囲気中で、放射加熱を受け、電気スパークを着火源とした際の着火性状を示している。

着火後の断熱材の燃焼は、コーンカロリメータ試験ではいずれも急速に燃え上がって発熱速度が一次ピーク値を迎えた後、減衰していくことが確認された。従ってコーンカロリメータ試験における一次ピーク時発熱速度を、着火後の急速な燃焼拡大の程度を示す指標と見ることができる。

発熱量の原単位である単位質量あたりの発熱量については、コーンカロリメータ試験における発熱量を初期質量^{註1)}で除した値と見ることができる。

以上より、本章では熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂の2つに分けて、発泡プラスチック断熱材の燃焼性を①着火性、②一次ピーク時発熱速度(着火後の燃焼拡大特性)、③単位質量あたりの発熱量の3点から捉えることとする(図3-1)。そして、それぞれの項目ごとに、考察を行い、その特徴を最もよく示す材料指標を検討する。

(2) 着火時間

1) 熱可塑性樹脂(XPS、EPS、PE)

熔融時の着火でそのまま燃焼に至る場合を除くと、樹脂は熔融、熱分解、ガス化の過程を経た後で着火、燃焼に至る。着火時間はEPS、XPS、PEの順に遅くな

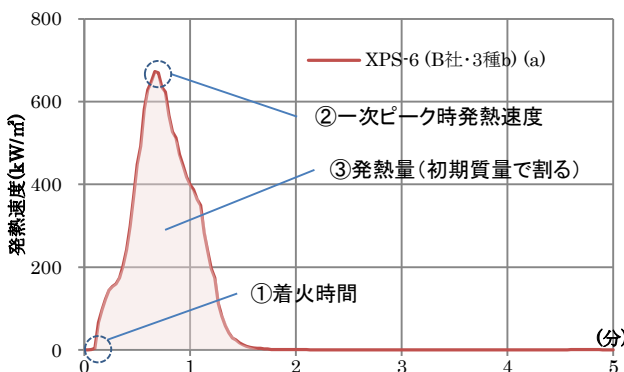


図3-1 燃焼性の捉え方

った。酸素指数も断熱材密度によらず、概ね断熱材種類ごとに値が分かれており、EPS (33.6~36.0)、XPS (26.0~26.9)、PE (18.3)の順に高く(図3-2)、酸素指数が示す耐着火性と着火時間に相関があることが確認された。

特にXPS、EPSはともに主成分が同じポリスチレンであり、着火時間、酸素指数の差は難燃剤による遅延効果の差に起因すると考えられる。従って、XPSとEPSの着火性状の違いは、酸素指数により、難燃剤による遅延効果の差として捉えることができたと考えられる。

樹脂の引火温度はポリエチレンで340℃³⁾、341℃^{4)、5)}、341-357℃⁶⁾、ポリスチレンで370℃³⁾、345-360℃^{4)、5)、6)}とあり、PEの主成分であるポリエチレンの方がポリスチレンよりほぼ同じか若干低い。またPEは難燃剤が配合されておらず、密度も低く、酸素指数も低い。これらの情報は、PEがXPSやEPSに比べ着火しやすい樹脂であることを示しており、この点も、着火性状と合致した。

熔融時の着火は、XPSのみで見られ、EPSやPEでは見られなかった。EPSではXPSに比べ耐着火性が高いこと、PEでは密度が小さく、加熱を受けてからの熔融による火源からの後退が早く、着火に至る熱量を受ける前に液化して熔融時の着火が起こらなかった可能性があることが、EPSやPEにて熔融時の着火が見られなかった要因の一部と考えられる。XPSにおける熔融時の着火の要因や着火性状の違いを明らかにするためには、さらに樹脂の化学的な組成の分析等化学的見地からの検討が必要である。

2) 熱可塑性樹脂(PF、PUF)

熱硬化性樹脂はすべて加熱開始後2秒~4秒とごく短時間で樹脂に着火し、着火時間にほとんど差が見られなかった。そのため、防火材料としての性能上の有意な差が生じるとは言い難い。

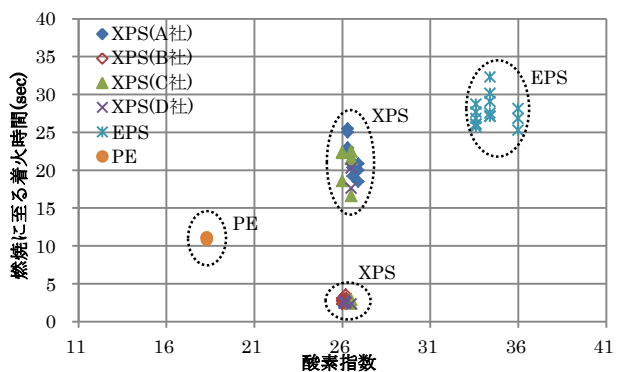


図3-2 酸素指数と着火時間

(3) 一次ピーク時発熱速度

1) 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE)

熱可塑性樹脂では、初期質量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度、最大燃焼速度は、概ね大きくなる傾向が見られた (図3-3、図3-4)。よって、断熱材厚さ 25 mmで行った今回のコーンカロリメータ試験では、熱可塑性樹脂はいずれも、着火後、樹脂の熱分解が急速に進み、存在する可燃物量が一気に燃え上がって、発熱速度が一次ピークを迎えていることが分かる。

今回、試験体の大きさはすべて揃えていることから、熱可塑性樹脂では、断熱材密度を比較することで、一次ピーク時発熱速度の大小関係をおおよそ捉えられることが分かった。

しかし XPS では、メーカーごとに見ると、この傾向が明確に見られない場合があった。メーカーごとの着火性状や原料組成の化学的な違いなどがその一因と考えられる。この点についても、前述の着火性状とあわせて、XPS における化学的見地からの検討が必要である。

2) 熱硬化性樹脂 (PF、PUF)

熱硬化性樹脂 (PF、PUF) では、熱可塑性樹脂とは異なり、初期質量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度、最大燃焼速度が大きくなる傾向は見られなかった (図3-5、図3-6)。

PF の一次ピーク時発熱速度は PUF よりも小さい。また PUF では、樹脂の種類や汎用品と難燃仕様により値が大きく異なった (図3-5)。

熱硬化性樹脂では、着火後、加熱面側から順次、樹脂が熱分解しながら燃焼が進むため、樹脂の熱分解量 (樹脂の燃焼速度) が大きくなると、発熱速度も大きくなると考えられる。従って、熱硬化性樹脂では、樹脂の特性として、熱分解しやすい樹脂ほど、一次ピーク時発熱速度も大きくなる傾向があると推

表3-1 TG-DTA 分析の測定条件

試料	断熱材の樹脂をくり抜いたもの
試験室	室温約 25°C に保たれた環境
雰囲気	流量 200mL/min の空気雰囲気下
測定温度	60°C ~ 800°C
昇温速度	20°C/min にて一定昇温
測定回数	分析装置の再現性を確認し、各 1 回

※樹脂が完全に分解する温度まで昇温させるため、最終的な質量減少量を 100% として TG を求めた。

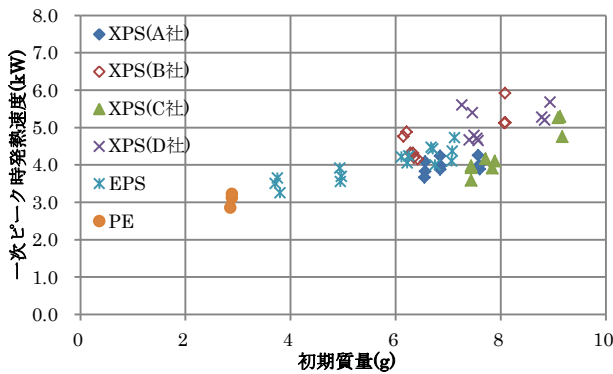


図3-3 初期質量と一次ピーク時発熱速度 (熱可塑性樹脂)

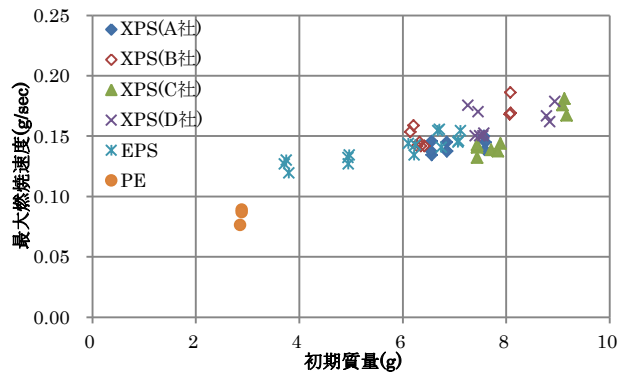


図3-4 初期質量と最大燃焼速度 (熱可塑性樹脂)

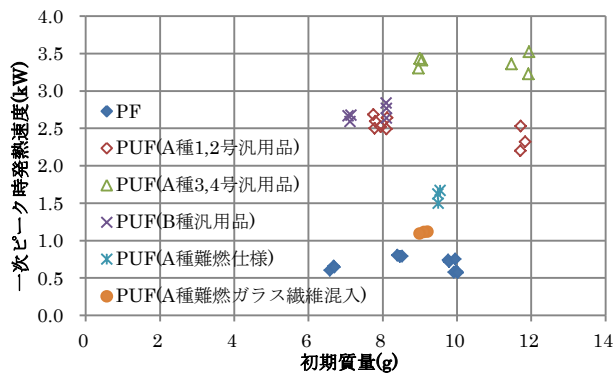


図3-5 初期質量と一次ピーク時発熱速度 (熱硬化性樹脂)

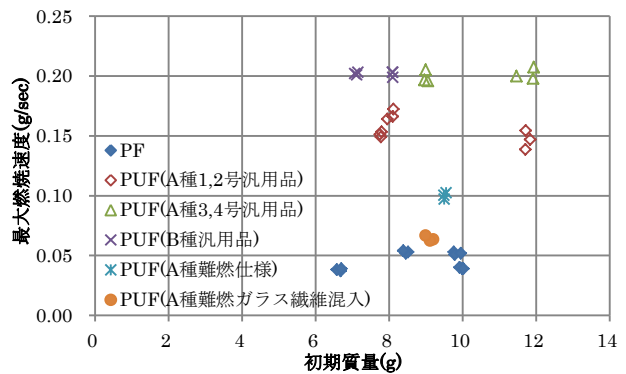


図3-6 初期質量と最大燃焼速度 (熱硬化性樹脂)

察される。

そこで、樹脂の熱分解の性状をより詳しく調べるため、熱硬化性樹脂 (PF、PUF) の樹脂部のみを対象に TG-DTA 分析を実施した。TG-DTA 分析の測定条件を表 3-1 に、PUF の TG-DTA 分析の結果を図 3-7 に、PF の TG-DTA 分析の結果を図 3-8 にそれぞれ示す。

PUF では 200°C 過ぎから 350°C 前後までで一次質量減少が、500°C から 600°C 前後までで二次質量減少が、それぞれ大きな発熱反応とともに起こり、発熱による樹脂分解が 2 段階で進んでいると考えられる。

コーンカロリメータ試験にて、加熱を受けて着火し、樹脂の温度が上昇する中で熱分解する過程を考えると、TG の一次質量減少時の低下量が、熱分解のしやすさに対応すると推測される。そのため、次に図 3-9 に示す手順で、すべての PUF の試験体を対象に、TG の一次質量減少量を求め、コーンカロリメータ試験で得られた一次ピーク時発熱速度との関係性を検討した。

その結果、TG の一次質量減少量が大きいほど、一次ピーク時発熱速度が大きくなる傾向が確認された (図 3-10)。よって PUF では、TG-DTA 解析により 200°C 過ぎから 350°C 前後での一次質量減少量を比

較することで、一次ピーク時発熱速度の大小関係をおおよそ捉えられることが分かった。一方で、汎用品の中での製品ごとに、一次ピーク時発熱速度の大小関係を把握できるほどの精度は得られなかった。精度を高めるための分析手法の改良など、さらなる検討が必要である。

一方、PF では、200°C を超えると発熱反応がはじまり、約 400°C より急激に質量減少が進み、500°C を超えると、樹脂はほぼすべて熱分解してしまう (図 3-8)。一方で PUF にて一次質量減少が起きる 200°C 過ぎから 350°C 前後の温度帯では、あまり質量減少が進んでいない。この点が、コーンカロリメータ試験にて、PF が着火し樹脂の温度が上昇する中で、PUF に比べあまり熱分解が進まず、一次ピーク時発熱速度が小さくなった点と合致する。

以上より、熱硬化性樹脂では、TG-DTA 解析で、樹脂分解の始まる 200°C から 350°C 前後までの温度域で TG の減少量を調べることで、一次ピーク時発熱速度の大小関係をおおむね把握できることが分かった。

(4) 単位質量あたりの発熱量

熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂における断熱材種類ごとの初期質量と発熱量との関係をそれぞれ図 3-11、図 3-12 に示す。

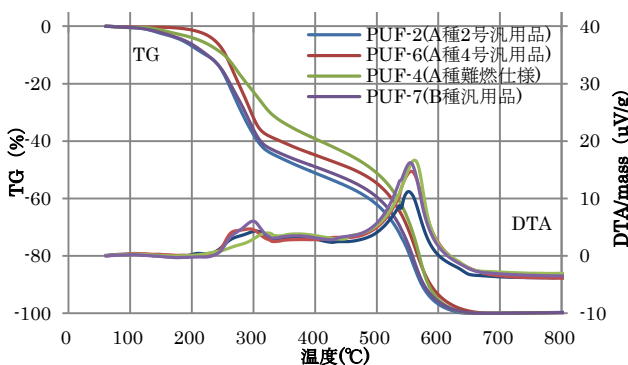


図 3-7 TG-DTA グラフ (PUF)

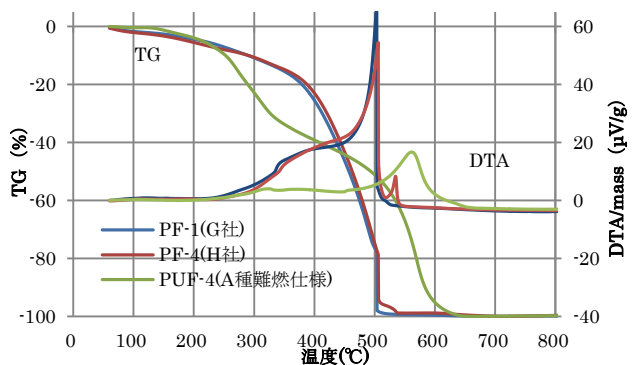


図 3-8 TG-DTA グラフ (PF)

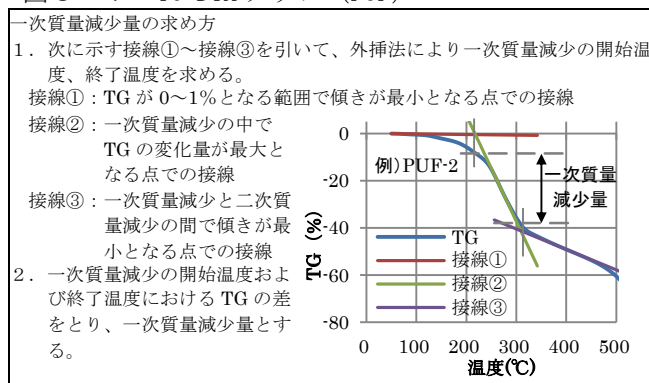


図 3-9 TG-DTA グラフの解析手法

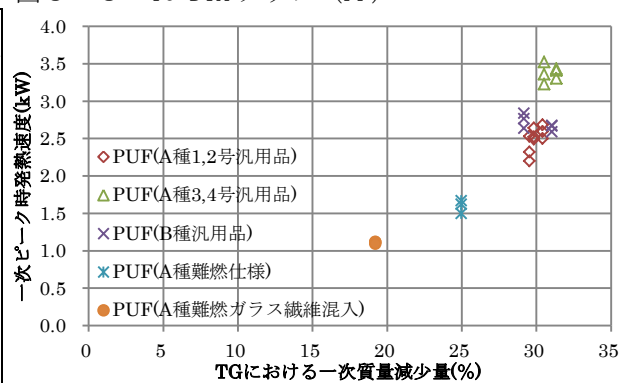


図 3-10 TG における質量減少量と一次ピーク時発熱速度

1) 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE)

XPS、EPS では、初期質量と発熱量の間に、非常に高い相関性が得られた (図3-11)。単位質量あたりの発熱量を求めると、XPS で28kJ/g、EPS で29kJ/g、PE で37kJ/g となり、既報⁷⁾や既往の報告⁸⁾と概ね同じ値となった。単位質量あたりの発熱量は、断熱材種類ごとにほぼ一定の値と見なせることが分かった。

2) 熱硬化性樹脂 (PF、PUF)

PF では、熱可塑性樹脂と同じく、質量と発熱量の間に非常に高い相関性が得られ、PF の単位質量あたりの発熱量は26kJ/g となった。

一方、PUF では樹脂の種類により、単位質量あたりの発熱量の値が異なった。これは樹脂の種類ごとに原料組成が異なるためと考えられる。今回試験を行った範囲で、平均値をとると、A種1,2号汎用品で19kJ/g、A種3,4号汎用品で21kJ/g、B種汎用品で17kJ/g、A種難燃仕様で26kJ/g、A種難燃仕様ガラス繊維混入で22kJ/g となった。

(5) まとめ

本章では、発泡プラスチック断熱材を熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂に分けて、難燃性 (燃焼性) を、①着火時間、②一次ピーク時発熱速度、③単位質量あたりの発熱量の3つから捉え、それぞれに対応する発泡プラスチック断熱材の材料指標を明らかにした (表3-2)。

①着火性 (材料の燃焼のしやすさ)

- 熱可塑性樹脂では、樹脂が熔融、熱分解、ガス化の過程を経た後で着火に至る場合であれば、酸素

指数により着火性の違いを捉えられる。

- 熱硬化性樹脂では、すべて2秒~4秒で着火し、防火材料としての性能上、有意な差を生じるとは言い難い。

②一次ピーク時発熱速度

(着火後の急速な燃焼拡大の程度)

- 熱可塑性樹脂では、断熱材密度との相関性が確認されたが、製品を判別できる精度は得られなかった。
- 熱硬化性樹脂では TG-DTA 分析 (熱重量-示差熱分析) にて、発熱反応となる約200℃~約400℃までの一次質量減少量との相関性が確認された。ただし製品を判別できる精度は得られなかった。

③単位質量当たりの発熱量

- 熱可塑性樹脂およびPFでは、断熱材種類ごとに、ほぼ一定の値になる。
- PUFでは、樹脂の種類ごとに材料組成が異なり、値が変わる。

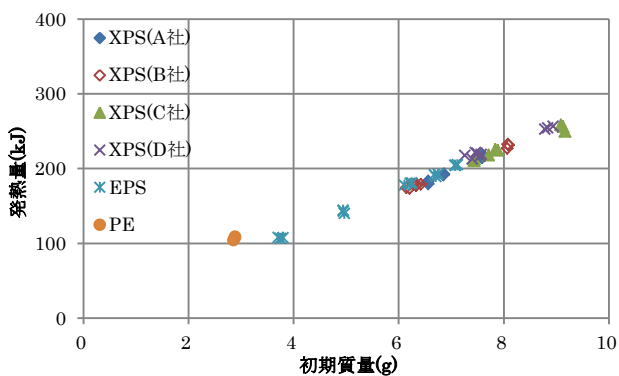


図3-11 初期質量と発熱量 (熱可塑性樹脂)

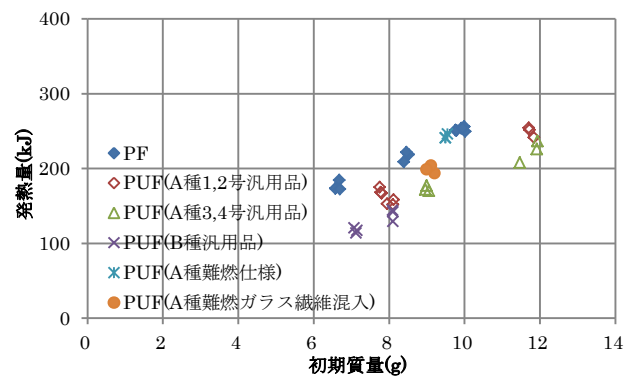


図3-12 初期質量と発熱量 (熱硬化性樹脂)

表3-2 断熱材の難燃性を示す材料指標 (まとめ)

	①着火性	②一次ピーク時発熱速度	③単位質量あたりの発熱量
熱可塑性樹脂 (XPS・EPS・PE)	酸素指数	断熱材密度	なし (材料ごとの一定の値)
熱硬化性樹脂 (PUF・PF)	判別不可	一次質量減少量 (TG 分析)	PUF: 材料組成 (樹脂の種類ごとに変化) PF: なし (一定の値)

4. 壁体の防耐火性能を示すデータの概要

壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標を検討するにあたり、各種発泡プラスチック断熱材を用いた木造壁体の防耐火性能を示すデータとして、既往研究²⁾で実施した小型試験体の試験データを用いた。具体的には、「①断熱材の壁体内における燃焼過程」、「②断熱材が防耐火性能（遮熱性）に与える影響」をそれぞれ検討する際に実施された試験データを指す。

「①断熱材の壁体内における燃焼過程」の検討では、試験体裏面に耐熱ガラスを用いて、壁体内を可視化した小型試験体にて、断熱材種類ごとに壁体内での発泡プラスチック断熱材の着炎燃焼の有無とその過程を把握した。

「②断熱材が防耐火性能（遮熱性）に与える影響」の検討では、①を踏まえ、断熱材の材料処方やメーカー、密度などの違いに着目して、壁体の防耐火性能（遮熱性）に及ぼす影響を把握した。

なお既往研究²⁾で実施した小型試験データには、上記の①、②の他に、「③各種断熱材・断熱工法が防耐火性能（非損傷性）に与える影響」を検討した試験データがある。

しかし、これは断熱材種類ごとに、断熱材単体の挙動に加えて、断熱工法による木柱と断熱材の位置関係から、壁体内の温度分布、木柱の損傷度（非損傷性）を把握したものである。断熱材仕様（材料処方や密度など）の違いによる断熱材単体の挙動は、

上記②で把握しており、本研究では③の試験データは用いないこととした。

よって、ここでは既往研究²⁾にて、「①断熱材の壁体内における燃焼過程」、「②断熱材が防耐火性能（遮熱性）に与える影響」の検討した際に実施した小型試験データの概要について述べる。

(1) 試験方法・試験体

1) 断熱材の壁体内における燃焼過程

① 試験方法

試験は北方建築総合研究所の小型加熱炉を用いて、非載荷で IS0834 標準加熱曲線に従って加熱し、試験体内部の様子に変化が見られなくなるまで行った。試験体内部の温度測定は、断熱材の加熱面側（以下、断熱材表面）と非加熱面側（以下、断熱材裏面）にて、K 熱電対により 30 秒間隔で測定した。

② 試験体

試験体は、試験体裏面側の内装材の代わりに耐熱強化ガラスを用いて壁体内の断熱材の挙動を試験体裏面から観察できるようにした（以下、可視化試験体）とした。試験体の詳細および温度測定位置を図 4-1～図 4-2 に示す。ここでは断熱材種類ごとの

表 4-1 検討に用いる断熱材（抜粋）

断熱材	メーカー	JIS 上の規格	表面材	厚さ
XPS	A 社	A 種 3 種 b	なし	75 mm
PUF	G 社	A 種 1 種 2 号	クラフト紙	50 mm
PF	I 社	A 種 2 種 2 号	PET 不織布	25 mm

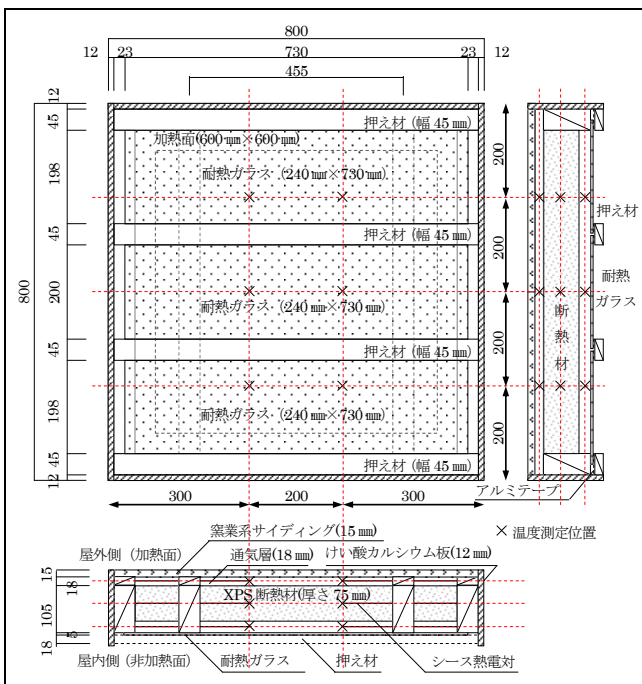


図 4-1 可視化試験体・試験体図 (XPS)

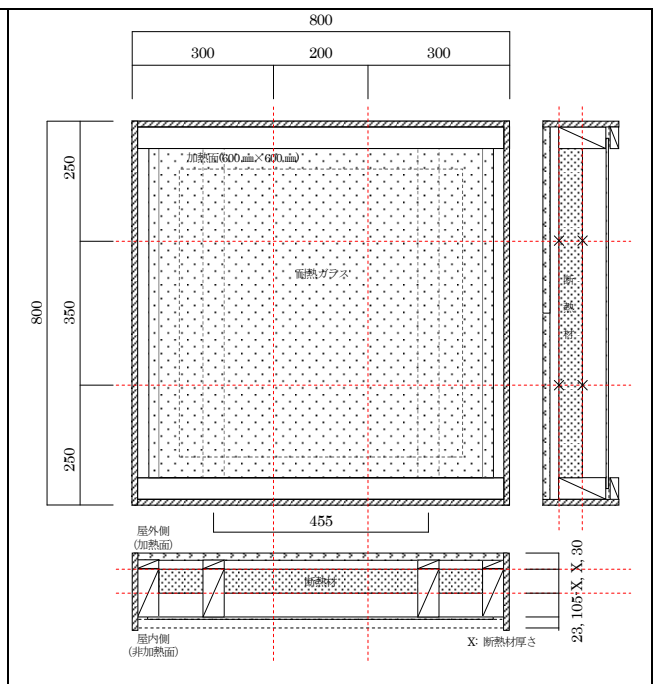


図 4-2 可視化試験体・試験体図 (PUF・PF)

壁体内での断熱材の挙動を把握することを目的とするため、対象とする断熱材は断熱材種類ごとに代表的な一仕様を選定した。本研究で検討に用いる断熱材のみ抜粋して表4-1に示す。

2) 断熱材が防耐火性能（遮熱性）に与える影響

①試験方法

試験は1)と同様に、北方建築総合研究所の小型加熱炉を用いて、屋外加熱で非载荷としIS0834標準加熱曲線に従って、60分間加熱した。温度測定は、試験体の非加熱面側表面（以下、試験体裏面）と、試験体内部の断熱材表面と断熱材裏面にて、K熱電対により30秒間隔で測定した。

なお、この試験では、試験体2体を左右に並べて同時に行うため、事前に炉の左右で試験結果にばらつきが生じないことを確認した上で実施した。

②試験体

試験体図を図4-3および図4-4に示す。試験体の大きさは、外寸で幅400mm×高さ800mmとした。試験体構成は、乾式外装材による通気工法の木造充てん壁体とし、外装材に飛び火試験に用いられる厚さ12mmの標準板（けい酸カルシウム板）を用いた。さらに通気層を18mm、木造軸組部は木柱を設置せず枠材により厚さ105mmをとり、そこに断熱材を屋外側に寄せて充てんさせ、内装材としてせっこうボード9.5mmを用いた。

試験は27回実施され、試験体54仕様の試験データを得ているが、本研究で検討に用いる断熱材仕様のみ抜粋して表4-2に示す。

(2) 検討結果

1) 断熱材の壁体内における燃焼過程

XPS、PUF、PFの可視化試験体の試験結果を表4-3に示す。

熱可塑性樹脂(XPS)では、断熱材は加熱を受けて、樹脂が熔融して溶け抜け、一方、熱硬化性樹脂(PF、PUF)では、断熱材が加熱を受けて、加熱面側より断熱材樹脂の熱分解が進んで、燃え抜けた。

また熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂を問わず、壁体内での断熱材の着火、着火燃焼は見られなかったが、加熱炉の観察窓から外装材の亀裂および目地部より、炎の吹き出しが確認された。

この検討より、断熱材より加熱面側に不燃性の面材（内外装材）が脱落せず保持され、火炎の侵入を防ぐことができれば、壁体内部にある発泡プラスチック断熱材への着火、着火燃焼を防げることが分か

表4-2 対象とする試験体

1. 熱可塑性樹脂

	JIS上の規格	メーカー
XPS	3種b	A社, B社, C社
EPS	特号, 4号	E社
PE	1種2号	F社

2. 熱硬化性樹脂

	JIS上の規格	製品仕様	表面材	メーカー
PF	A種 1種2号	27K品, 40K品	PET不織布	G社
		40K品	不燃紙	H社
PUF	A種 2種2号	汎用品	クラフト紙	I社, K社
		難燃仕様	クラフト紙 アルミクラフト紙	I社
	A種2種 2号相当	難燃仕様 ガラス繊維混入	アルミ箔	L社

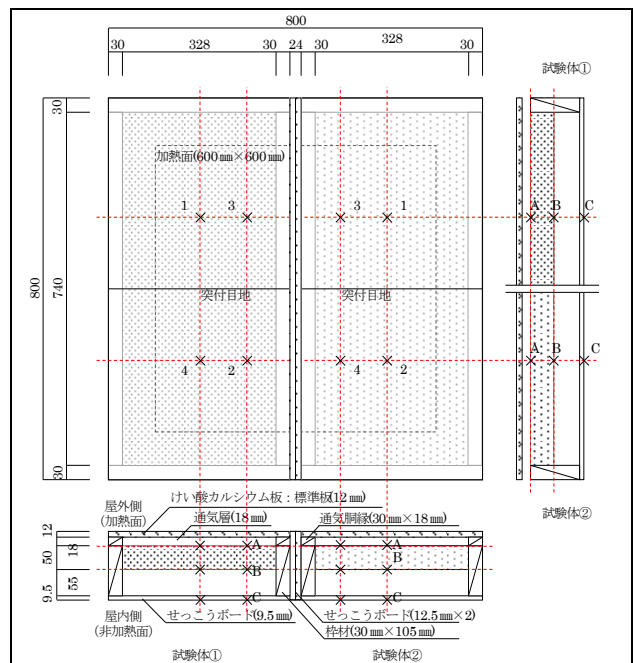


図4-3 小型試験体図（非加熱面：室内側）

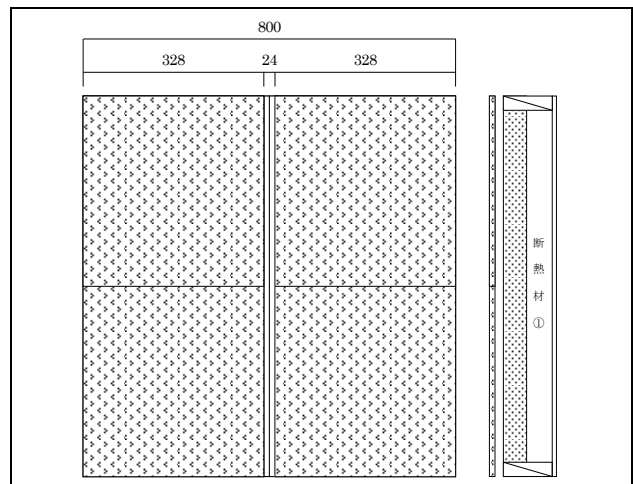


図4-4 小型試験体図（加熱面：屋外側）

表 4 - 3 可視化実験結果

1. XPS75 mm (A社)	2. PF25 mm (G社)	3. PUF50 mm (I社)
<p>温度(°C)</p> <p>炉内温度</p> <p>断熱材表面側</p> <p>断熱材裏面側</p> <p>※42分にて加熱終了</p> <p>(分)</p>	<p>温度(°C)</p> <p>炉内温度</p> <p>断熱材表面</p> <p>断熱材裏面</p> <p>※60分にて加熱終了</p> <p>(分)</p>	<p>温度(°C)</p> <p>炉内温度</p> <p>断熱材表面</p> <p>断熱材裏面</p> <p>※40分にて加熱終了</p> <p>(分)</p>
<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 XPS75 mm(断熱材) 平成25年11月7日</p>	<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PF25 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>	<p>試験体 4 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PUF50 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>
<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 XPS75 mm(断熱材) 平成25年11月7日</p>	<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PF25 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>	<p>試験体 4 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PUF50 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>
<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 XPS75 mm(断熱材) 平成25年11月7日</p>	<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PF25 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>	<p>試験体 4 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PUF50 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>
<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 XPS75 mm(断熱材) 平成25年11月7日</p>	<p>試験体 3 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PF25 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>	<p>試験体 4 [屋外加熱] 断熱材内の断熱材の劣化状態の可視化実験 PUF50 mm(断熱材) 平成25年11月8日</p>

った。この検討で得られた断熱材の壁体内における燃焼過程を図4-5および図4-6に示す。

2) 断熱材が防耐火性能（遮熱性）に与える影響

① 熱可塑性樹脂（XPS、EPS、PE）

試験結果を表4-4に、断熱材部の温度推移を図4-7および図4-8に示す。

熱可塑性樹脂では、厚さ50mmの場合、断熱材の種類を問わず、試験開始10分～15分で溶け抜け、壁体は断熱性を失う。

断熱材部の温度は、断熱材が溶け抜けるまでは、

断熱材表面では温度が上がり、断熱材裏面では温度上昇が抑えられるが、その後の温度推移は、無断熱とほぼ同じ傾向となった。

30分、45分における試験体の裏面温度は、せっこうボードの100℃帯にあたり、断熱材仕様による温度上昇度の差は概ね数K以内となった。また60分では、すべての試験体で裏面温度上昇度が、規定値である平均140Kを超えて、壁体は遮熱性を失った。

この既往研究²⁾の検討では、断熱材仕様による30分、45分における遮熱性への影響は、明確に顕在化

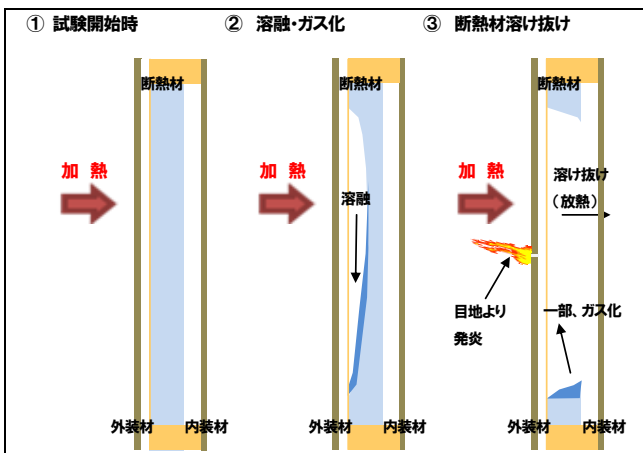


図4-5 壁体内の挙動（熱可塑性樹脂）

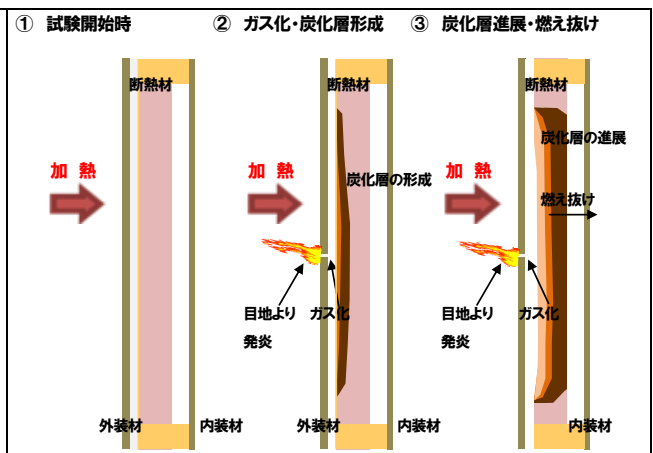


図4-6 壁体内の挙動（熱硬化性樹脂）

表4-4 熱可塑性樹脂における小型試験結果（XPS・EPS）

試験体 No.	断熱材仕様（メーカー）	厚さ (mm)	密度		初期 (°C)	遮熱性・裏面温度上昇度(K)					
			ボード (kg/m³)	フォーム (kg/m³)		防火 30分		準耐火 45分		準耐火 60分	
						平均	最高	平均	最高	平均	最高
1	XPS III種 b (A社)	50	36.3	36.3	16.7	84	87	94	97	170	208
2	XPS III種 b (B社)	50	29.9	29.9	10.5	88	93	100	105	176	220
3	XPS III種 b (C社)	50	31.0	31.0	10.3	85	90	97	102	155	193
4	EPS 特号 一般品 (E社)	50	30.2	30.2	12.6	81	89	96	98	161	195
5	EPS 4号 一般品 (E社)	50	16.2	16.2	12.9	88	91	98	102	171	213
6	PE HD (F社)	50	11.3	11.3	8.6	88	90	101	103	169	203
※	無断熱	—	—	—	9.6	90	93	102	107	184	219

※熱間収縮温度：JISA9501「保温保冷工事施工基準」に定められている各種断熱材が形状を保持できる耐熱温度

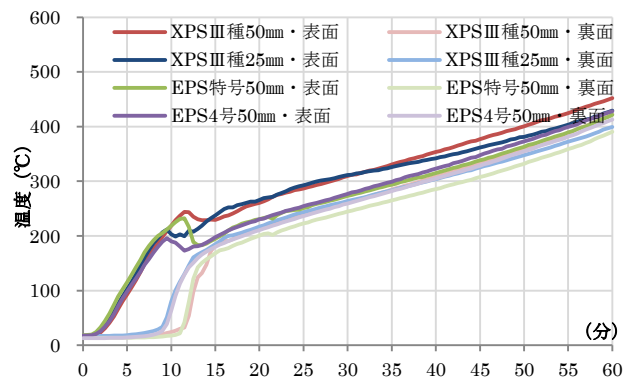


図4-7 断熱材部の平均温度推移（熱可塑性樹脂）

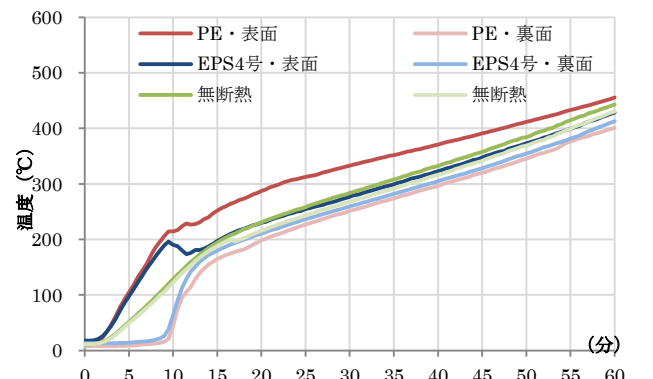


図4-8 断熱材部の平均温度推移（熱可塑性樹脂）

しなかったが、断熱材仕様により断熱材が溶け抜けるまでの時間には差が確認された。

②熱硬化性樹脂 (PF、PUF)

試験結果を表4-5に、断熱材部の温度推移を図4-9～図4-10に示す。

PFでは、すべての試験体にて断熱材は燃え抜けず30分、45分、60分での裏面温度上昇度は、メーカーによる差は見られず、密度が大きい方が小さく、壁体の遮熱性は有利になる。

PUFでは、断熱材表面の温度は、試験開始20分過ぎまでは上昇し、その後、ほぼ一定となった。断熱材裏面では、試験開始後20～30分の間に温度が上昇し壁体が断熱性能を失ったと考えられる。

特に難燃仕様は、汎用品に比べ断熱材裏面の温度上昇が緩やかになり、壁体が断熱性能を失うまでの時間が遅延された。難燃仕様の方が、燃焼時に残存する炭化物が多くその炭化物が断熱材裏面側への温度の移動を妨げたためと考えられ、樹脂の熱分解挙動が影響していると考えられる。

30分、45分、60分での裏面温度上昇度は、メーカーによる差はあまり見られず、樹脂が熱分解しづ

らく炭化物量が多い難燃仕様の方が、また密度が大きい方が、上昇度が小さく、壁体の遮熱性は有利になる。

表4-5 熱硬化性樹脂における小型試験結果 (PF・PUF)

試験体 No.	断熱材仕様 (メーカー)				厚さ (mm)	密度		裏面温度上昇度 (K)						
						ボード (kg/m ³)	フォーム (kg/m ³)	初期 (°C)	防火 30分		準耐火 45分		準耐火 60分	
									平均	最高	平均	最高	平均	最高
7	PF	27K	PET不織布	(G社)	25	30.8	29.2	7.6	42	46	72	85	89	99
8	PF	40K	PET不織布	(G社)	25	40.6	37.9	14.7	32	36	63	79	78	85
9	PF	40K	難燃紙	(H社)	25	46.4	35.0	15.8	32	37	58	70	78	83
10	PUF	汎用品	クラフト紙	(I社)	50	37.9	30.8	16.9	52	66	81	89	93	103
11	PUF	難燃仕様	クラフト紙	(I社)	50	42.2	35.8	13.1	26	30	73	86	89	96
12	PUF	汎用品	クラフト紙	(K社)	50	38.5	33.2	10.5	60	69	84	93	96	107
13	PUF	難燃仕様	アルミクラフト紙	(I社)	50	43.4	36.1	11.2	20	26	67	83	83	92
14	PUF	難燃仕様 ガラス繊維混入	アルミ箔	(L社)	50	37.9	34.2	10.2	32	34	67	84	79	94

※熱間収縮温度：JISA9501「保温保冷工事施工基準」に定められている各種断熱材が形状を保持できる耐熱温度

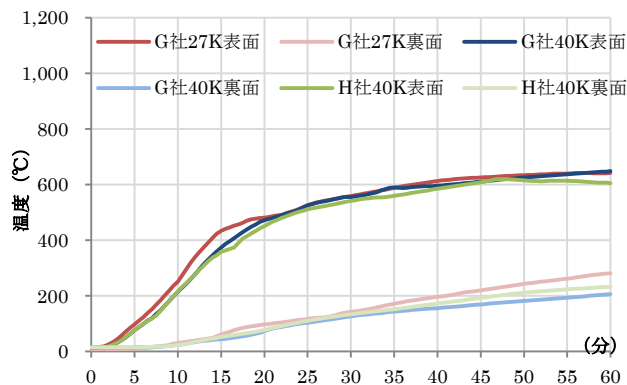


図4-9 断熱材部の平均温度推移 (PF)

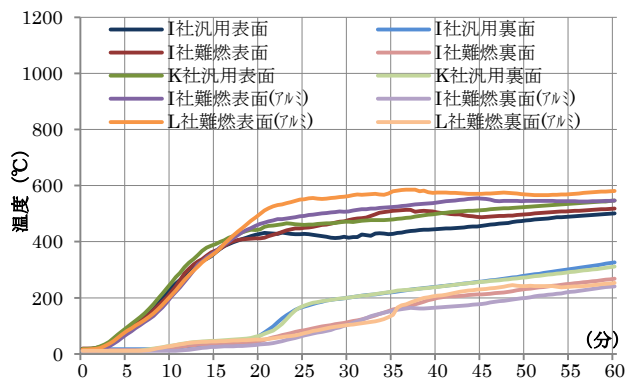


図4-10 断熱材部の平均温度推移 (PUF)

5. 壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標の検討

(1) 検討の方針・着眼点

1) 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE)

熱可塑性樹脂では、断熱材仕様による壁体の遮熱性への影響は、壁体の層構成による影響を含むため、明確に顕在化しなかったが、断熱材仕様により断熱材が溶け抜けるまでの時間には差が確認された。

そこで熱可塑性樹脂については、「①溶融・熱分解により断熱性能を失う時間」(=熱可塑性樹脂が溶融する時間)に着目して検討する。

2) 熱硬化性樹脂 (PF、PUF)

PF では密度が高く熱分解しづらい樹脂ほど、PUF では、密度が高く、熱分解しづらく炭化物量が多い樹脂ほど、壁体の遮熱性が向上すると考えられる。

そこで、熱硬化性樹脂については、「①溶融・熱分解により断熱性能を失う時間」(=熱硬化性樹脂が最も熱分解が進む温度)と「②炭化物の生成状況(=熱硬化性樹脂の残渣量)」に着目して検討する。

(2) 溶融・熱分解により断熱性能を失う時間

1) 熱可塑性樹脂 (XPS、EPS、PE)

熱可塑性樹脂が壁体内で溶融し、溶け抜ける時間を、ここでは壁体内の断熱材裏面における温度が、断熱材の熱変形温度に達する時間とする。

まず、断熱材の熱変形温度を求めるにあたり、TMA 解析(熱機械分析)を行った。TMA 解析の測定条件を表5-1に、熱変形温度の求め方を図5-1にそれぞれ示す。


断熱材種類ごとに測定した熱変形温度から、断熱材裏面温度がその熱変形温度に達する時間(溶け抜け時間)を求めた(表5-2)。その結果、断熱材密度が大きくなるほど、溶け抜け時間は僅かであるが遅くなる傾向が確認された。

よって、熱可塑性樹脂が溶融する時間は断熱材密度に依存すると言える。すなわち、断熱材密度が大きくなると、溶け抜け時間は僅かに遅くなり、その分、遮熱性は向上する。

2) 熱硬化性樹脂 (PUF、PF)

熱硬化性樹脂の壁体内での熱分解挙動を詳細に把握するため、小型試験における壁体内の環境下をできる限り、再現した環境下で、TG 分析を行った。壁体内は、断熱材が着火、燃焼しないことから、可燃性ガスに満ち、空気不足の状態であると考えられる。そこで、TG 分析では窒素雰囲気中で測定を行い、温

表5-1 TMA 解析の測定条件

試料の大きさ	直径7mm、高さ6mm ※右写真	
温度範囲	40℃～200℃	
昇温速度	5℃/minにて一定昇温	
圧縮力	1mm N	

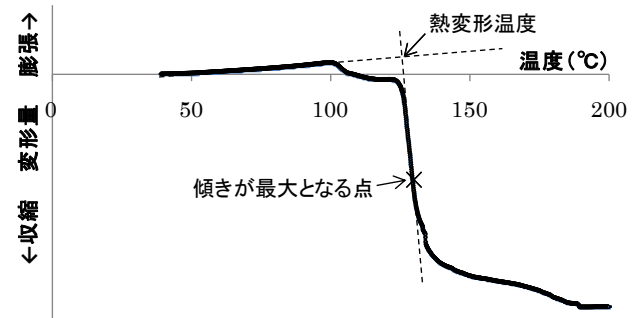


図5-1 熱変形温度の求め方

表5-2 断熱材密度、溶け抜け時間、熱変形温度

	断熱材密度 (kg/m ³)	断熱材裏面が熱変形温度に達する時間(分) (≒溶け抜け時間)	熱変形温度 (℃) (≒溶融温度)
XPS3種b	36.3	13.0	124.4
EPS特号	30.2	12.6	124.6
EPS4号	16.2	11.3	122.6
PE	11.3	10.6	119.8

表5-3 TG 分析の測定条件

試料	断熱材の樹脂をくり抜いたもの
試験室	室温約25℃に保たれた環境
雰囲気	流量200mL/minの窒素雰囲気下
測定温度	PF: 30℃～700℃、PUF: 30℃～500℃
昇温速度	図5-2および図5-3中に示す。
測定回数	分析装置の再現性を確認し、各1回

※樹脂が完全に分解する温度まで昇温させるため、最終的な質量減少量を100%としてTGを求めた。

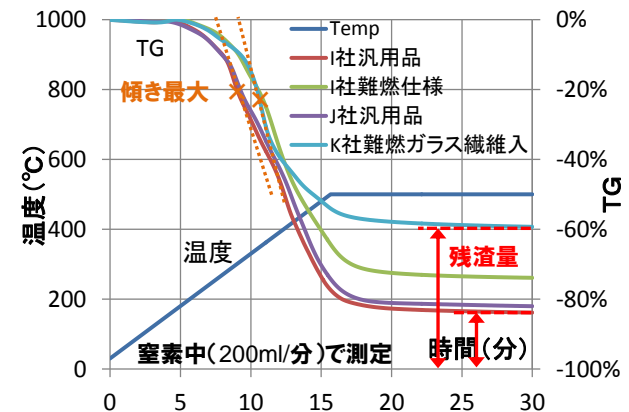


図5-2 TG 分析による解析 (PUF)

度の昇温条件は、おおよそ、壁体内の断熱材表面における温度推移を再現するように設定した。

PUFにおけるTG分析の解析結果を図5-2に、PFにおけるTG分析の解析結果を図5-3にそれぞれ示す。

PUFでは200℃から400℃過ぎまでの間で、一次質量減少が最も進み、500℃になった時点で温度を一定に保つと、TGはほぼ一定の値になるように収束した。

壁体内における熱硬化性樹脂の熱分解を考えると、熱分解が進みづらい樹脂ほど、耐熱性があると考えられる。そこで200℃から400℃過ぎまでの間で、最も樹脂の熱分解が進むTGの減少幅が最大となる点、つまりTG曲線における接線の傾きが最大となる点を求め、その時点の温度を一次質量減少時のピーク温度とした(図5-2)。この一次質量減少時のピーク温度は、PUFの汎用品と難燃仕様の二つで大きく異なり、壁体の遮熱性が高い難燃仕様の方が汎用品に比べ、時間が遅く、温度は高くなることが分かった。

一方、PFでは、壁体内の断熱材表面における温度推移から、500℃まで30℃/分、500℃~700℃まで10℃/分の昇温速度で測定したが、すべてのPFで同じTG曲線となり、一次質量減少時ピーク温度もほとんど差が見られなかった(図5-3)。

また500℃時点での樹脂の分解量(TGの減少量)を見ると、PUFではすべて50%以上であるに対し、PFではいずれも40%より小さい。この点は、PFがPUFに比べ熱分解が進まず、壁体の遮熱性が向上した点と合致する。

以上より、壁体内における熱硬化性樹脂の熱分解の進みづらさの程度は、一次質量減少時ピーク温度で見ることができると言える。ただし、一次質量減少時のピーク温度により、相対的な傾向は把握できるが、定量的な相関関係が得られるまでには至らなかった。

(3)炭化物の生成状況

熱硬化性樹脂(PUF、PF)についてのみ検討する。壁体内における熱硬化性樹脂の炭化物の生成状況は、壁体内での加熱状況を考えると、PUF、PFともに、

(1)で実施したTG分析における最終的な残渣量とみなすことができる。

TG解析の結果より、残渣量を見ると、樹脂の熱分解が進みづらいPF、PUF難燃仕様、PUF汎用品の順に多くなり、壁体の遮熱性が高い順と合致した。ただし、一次質量減少時のピーク温度と同じく、残渣量は相対的な傾向は把握できるが、定量的な相関関係が得られるまでには至らなかった。

(4)まとめ

発泡プラスチック断熱材が壁体の防耐火性能(遮炎性・遮熱性)に及ぼす影響を、「①溶融・熱分解により断熱性能を失う時間」と「②炭化物の生成状況」の2つから捉え、それぞれに対応する材料指標を明らかにした。(表5-4)

- ・熱可塑性樹脂では、TMA解析(熱機械解析)で得られる熱変形温度を断熱材の溶融温度とし、壁体内の断熱材がその溶融温度に達する時間を溶け抜け時間とすると、溶け抜け時間と断熱材密度の間に相関性を確認した。
- ・熱硬化性樹脂では、断熱材密度が高く、樹脂が熱分解しにくく、熱分解時に生成される炭化物が多いほど壁体の遮熱性が向上する。樹脂の熱分解挙動と炭化物の生成状況は、TG分析における一次質量減少時ピーク温度と残渣量に対応するが、定量的な相関関係が得られるまでには至らなかった。

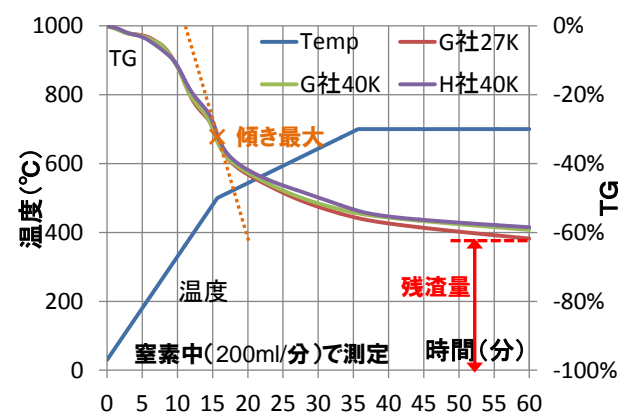


図5-3 TG分析による解析(PF)

表5-4 壁体の防耐火性能に寄与する断熱材の材料指標(まとめ)

	①溶融・熱分解により断熱性能を失う時間	②炭化物の生成状況
熱可塑性樹脂 (XPS・EPS・PE)	断熱材密度(=溶け抜け時間)	なし(炭化しない)
熱硬化性樹脂 (PUF・PF)	断熱材密度・一次質量減少時ピーク温度(TG分析)	残渣量(TG分析)

6. 分析手法の検討

(1) 検討対象の選定

ここでは、研究成果の活用、普及を目的に、第3章および第5章で検討してきた材料指標を求める分析手法について、測定条件や解析方法を見直し、精度を高めることを目的とする。

これまでの検討より、断熱材の難燃性や防耐火性能に寄与する材料指標を求めるために、用いられる分析手法には、断熱材密度の測定、酸素指数の測定、TG分析の3つが挙げられる。

そのうち断熱材密度や酸素指数の2つは、すでに測定方法はJIS等で規定されており、これに従い測定を行えばよい。

またTG分析による求められる材料指標には、熱硬化性樹脂を対象に表6-1に示される3つがある。そのうち、「②溶融・熱分解により断熱性能を失う時間」と「③炭化物の生成状況」の2つは、TG分析により「一次質量減少のピーク時温度」と「残渣量」を比較することで相対的な傾向は把握できるが、定量的な相関関係は得られていない。

一方、コーンカロリメータ試験で得られる「①一次ピーク時発熱速度」は、TG分析における「一次

質量減少量」の間に、相関関係が確認されており、定量的に検討できる。一方で、汎用品の中での製品を判別できる精度はなく、分析手法の改良、精度向上が課題となった。

以上より、本章では、断熱材に着火した後の燃焼拡大特性を示す「①一次ピーク時発熱速度」とこれに対応して求められるTG分析の「一次質量減少量」との関係性に対象を絞り、TG分析の測定条件や解析方法を見直し、精度を高めるための検討を行う。

(2) TG分析の手法改善

1) 改善に向けた着眼点

PUFをTG-DTA分析を行うと、DTA解析結果から、一次質量減少が始まる200℃あたりから発熱反応が確認される。一方、TG解析結果を見ると、TG曲線は200℃に達する手前の100℃過ぎから減少が始まっている。これは樹脂の熱分解による質量減少ではなく、樹脂中に残存する発泡剤等の揮発分が抜けることで質量が減少したと考えられる。そのため、解析手法を定めるにあたっては、TG曲線に接線を引いて、100℃～200℃における揮発分を取り除く形で、一次質量減少を求めている。以上より、事前に試料を養生して、樹脂中に残存する揮発分を取り除いた上で

表6-1 TG分析により求められる材料指標（熱硬化性樹脂）

着眼点	難燃性に寄与する材料指標		壁体の防耐火性能に寄与する材料指標	
	①一次ピーク時発熱速度 (コーンカロリメータ試験)	②溶融・熱分解により断熱性能を失う時間	③炭化物の生成状況	
TGで求める指標	一次質量減少量	一次質量減少のピーク時間(温度)	残渣量	
測定条件	試料	断熱材の樹脂をくり抜いたもの	断熱材の樹脂をくり抜いたもの	
	試験室	室温約25℃に保たれた環境	室温約25℃に保たれた環境	
	雰囲気	流量200mL/minの空気雰囲気下	流量200mL/minの窒素雰囲気下	
	測定温度	60℃～800℃	PUF:30℃～500℃, PF:30℃～700℃	
	昇温速度	20℃/minにて一定昇温	PUF:30℃～500℃ 30℃/min, 500℃超 一定 PF:30℃～500℃ 30℃/min, 500℃～700℃ 10℃/min, 700℃超 一定	
	測定回数	各1回(装置の再現性の確認後)		各1回(装置の再現性の確認後)

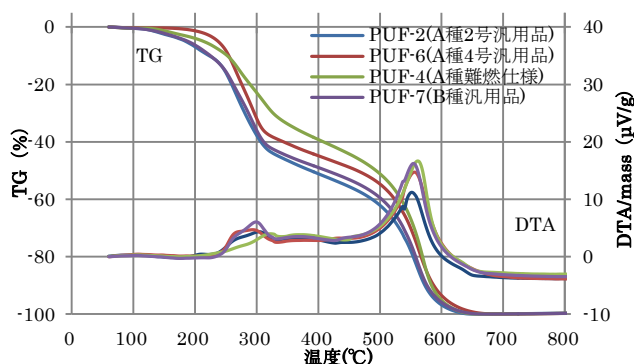


図6-1 TG-DTA グラフ (PUF) [図3-7]

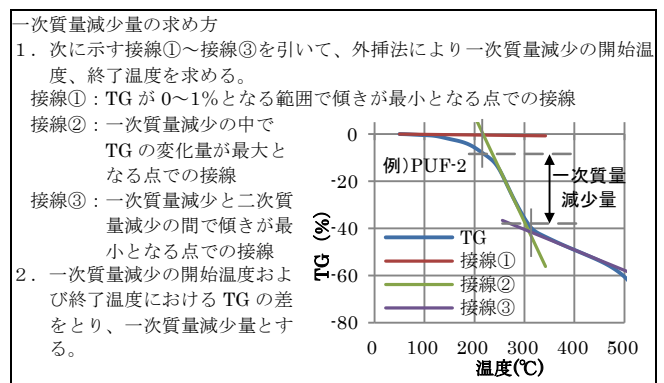


図6-2 TG-DTA グラフの解析手法 [図3-9]

TG 分析を行えば、誤差となる外乱要因も取り除くことができ、さらに分析手法もより簡素にできると考えられる。

2) 改善手法の検討

試料の養生条件を検討した。熱を加えて揮発分を取り除き、かつ PUF 樹脂自体が熱により変質しない条件として養生温度を 140℃ に設定した。養生時間は、揮発分の除去にあたり、十分な時間を見込んで 24 時間とした。

さらに分析手法も、図 6-4 に示すように、一次質量減少の中で TG の変化量が最大となる点における接線と一次質量減少と二次質量減少の間で傾き最小となる接線を設けて交点を求め、その TG の値を一次質量減少量とした。

この方法で求めた TG における質量減少量と一次ピーク時発熱速度の関係を図 6-5 に示す。従前の図 3-10 と同じ傾向が確認された。

(3) 改善手法の適用検証

改善手法の適用例として、イソシアネート指数に基づく PUF の燃焼性評価を実施した。

1) イソシアネート指数の概要

PUF は、ポリオール(OH 基)とイソシアネート(NCO

基)を縮合重合反応させる際に、発泡剤を添加し発泡させて製造される。

PUF の難燃性を高めるにあたっては、添加する難燃剤の量を増やす方法と、イソシアネートの配合割合をポリオール割合より高めて、NCO 基による三量体を生成させて、樹脂自体を熱分解しづらくし、難燃化する方法がある。

この樹脂の難燃化は、製造時、ポリオール(OH 基)とイソシアネート(NCO 基)の混合比率で制御される。この混合比率をイソシアネート指数(またはヌレート指数ともいう。以下、Index)と呼ぶ。

Index は NCO 基と OH 基の当量比率を指し、OH 基の量を 100 とした時の NCO 基の量で示され、この値が大きくなるにつれ、難燃性が高まるとされる。

2) 検討内容

これまで、コーンカロリメータ試験にて、Index に基づき燃焼性状を比較したところ、Index が大きくなるにつれ、着火後、燃え上がって迎える一次ピーク時の発熱速度が小さくなることを確認している⁹⁾。ここでは、コーンカロリメータ試験と TG 分析を実施して、一次ピーク時発熱速度と TG 分析における一次質量減少量との相関性を検討する。

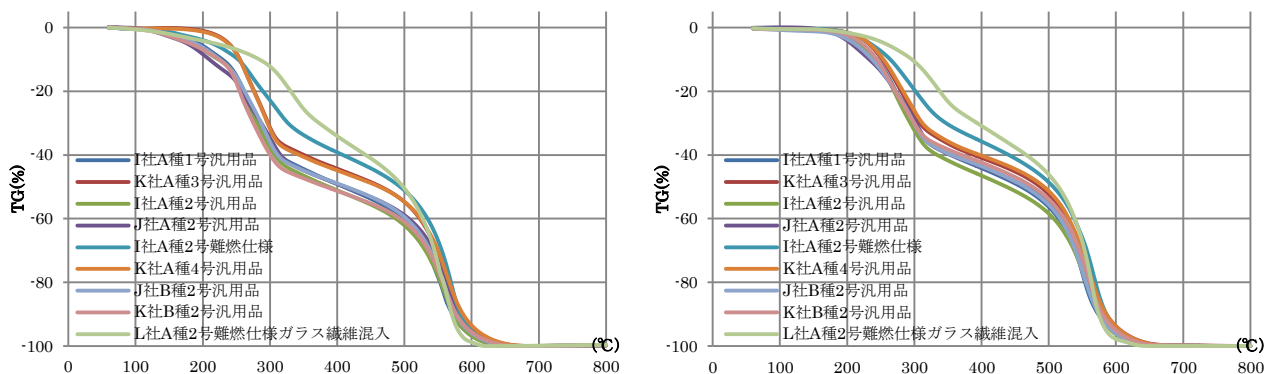


図 6-3 TG 分析の結果 (左図：従前の手法・右図：改善手法)

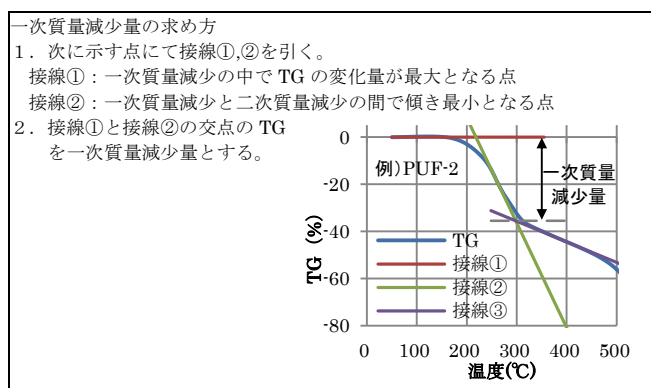


図 6-4 TG-DTA グラフの解析手法 (改善手法適用後)

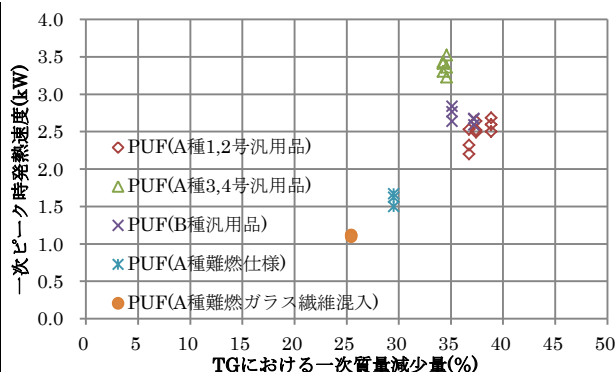


図 6-5 TG における質量減少量と一次ピーク時発熱速度 (改善手法適用後)

3) 試験体仕様

試験体は Index がそれぞれ 110、150、230、300 となるようにポリオールとイソシアネートを配合し発泡させて、厚さ 25 mm の板状のフォームを作成した。

(Index にあわせて試験体をそれぞれ Index110, Index150, Index230, Index300 とする。)

4) 検討結果

コーンカロリメータ試験における発熱速度の推移を図 6-6 に、TG 分析の測定結果を図 6-7 にそれぞれ示す。

Index が大きくなるにつれ、コーンカロリメータ試験では、一次ピーク時発熱速度が低い値となり、TG 分析では、一次質量減少が占める割合が小さくなった。TG 分析の結果から、本章で検討した改善手法に従い、一次質量減少量を求めた上で、この TG の一次質量減少量とコーンカロリメータ試験で得られた一次ピーク時発熱速度との関係性を見ると、強い相関が確認された (図 6-8)。

よって、本章で改善した分析手法については、このイソシアネート指数に基づく検討でも、その有効性が確認できた。

今後もデータを積み重ね、この手法の有効性を見極めていくとともに適用範囲を見定める必要がある。

(4) まとめ

本章では、断熱材に着火した後の燃焼拡大特性を示す「一次ピーク時発熱速度」と相関性が高い材料指標である「一次質量減少量」を求めるための TG 分析手法について検討を行った。

事前に試料を養生して、樹脂中に残存する揮発分を取り除いた上で TG 分析を行うことで、分析精度を高め、分析手法もより簡素にできることを示した。そして、この改善手法の適用例として、イソシアネート指数に基づく PUF の燃焼性評価を実施し、分析手法の有効性を確認した。

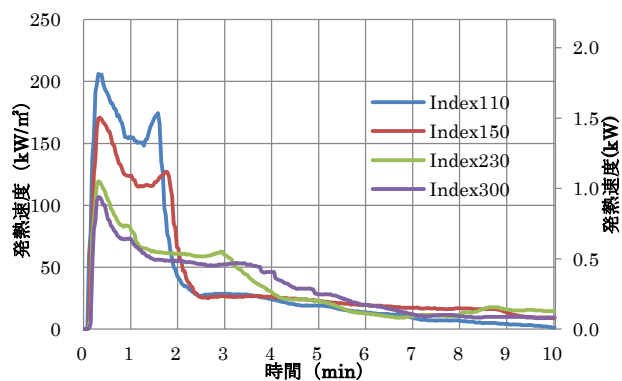


図 6-6 発熱速度の推移

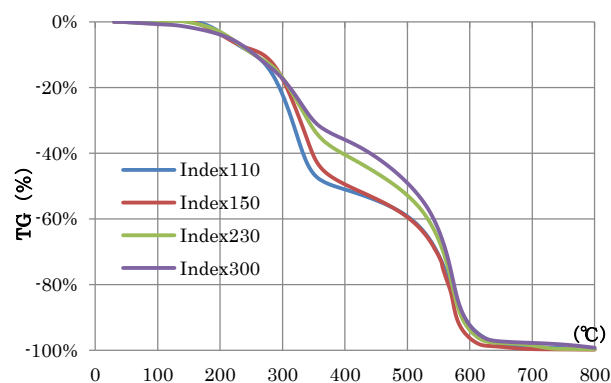


図 6-7 TG の測定結果

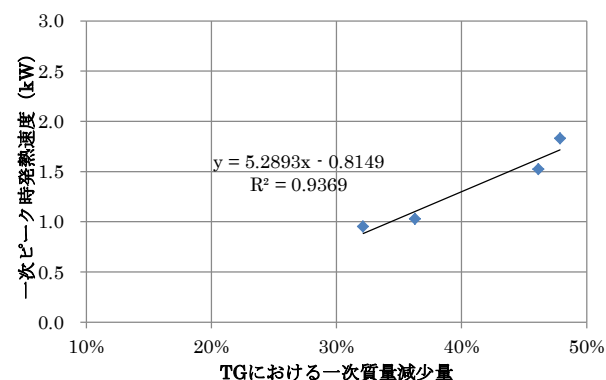


図 6-8 TG の一次質量減少量と一次ピーク時発熱速度

7. まとめ

本研究では、発泡プラスチック断熱材自体の難燃性の程度を位置づける材料指標、壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標およびそれらの分析手法について検討した。

発泡プラスチック断熱材自体の難燃性の程度を位置づける材料指標については、難燃性（燃焼性）を①着火性、②発熱速度の一次ピーク値、③単位質量当たりの発熱量の3つから捉え、それぞれに対応する断熱材の材料指標を明らかにした。

特に PUF において発熱速度の一次ピーク値と相関性を示す TG 分析にて得られる一次質量減少量については、その測定条件、養生条件等の分析手法をまとめた。さらに PUF の材料設計で用いられるイソシアネート指数と燃焼性との相関性をこの手法により確認した。

壁体の防耐火性能に寄与する発泡プラスチック断熱材の材料指標については、断熱材が壁体の防耐火性能（遮炎性・遮熱性）に及ぼす影響を、①溶融・熱分解により断熱性能を失う時間と②炭化物の生成状況の2つから捉え、それぞれに対応する材料指標を明らかにした。

今後、本研究で得られた成果は、全国の性能評価機関にてより合理的な性能評価業務の運用等に活用できるように提案していく予定である。

[参考文献]

- 1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所：発泡プラスチック断熱材の燃焼性状と評価技術に関する研究，平成 21 年度 年報・調査研究報告集 (CD-ROW)，2010. 3
- 2) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構 建築研究本部 北方建築総合研究所：発泡プラスチック断熱材を用いた木造壁体の断熱工法と防火性能に関する研究，平成 25 年度 年報・調査研究報告集 (CD-ROW)，2014. 3
- 3) 日本火災学会編：火災便覧第 3 版，共立出版，1997. 5
- 4) 旭化成アミダス株式会社「プラスチック」編集部編：プラスチック・データブック，工業調査会，1999. 12
- 5) 英一太：プラスチックの難燃化－低発煙化と有害性燃焼ガス対策－，日刊工業新聞社，1978. 6
- 6) 西沢仁，武田邦彦編：難燃材料活用便覧＝難燃化の課題と実際技術＝，テクノネット社，2002. 5
- 7) 糸毛治，入江雄司，鈴木大隆，小浦孝次，安藤達夫，堤拓哉，南慎一：発泡プラスチック断熱材の燃焼性状に関する基礎的研究 コーンカロリメータ試験による燃焼性状と材料組成に関する考察，日本建築学会環境系論文集，第 647 号，pp1-8，2010. 1
- 8) 吉岡英樹，吉田正志，荻原一郎，五頭辰紀，成瀬友宏，野口貴文，崔国臣：湿式外断熱工法の材料の燃焼特性に関する基礎的研究，その 1 コーンカロリメータ試験による発熱量の把握，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2 分冊，pp. 165～166，2008. 8
- 9) 糸毛治，入江雄司，鈴木大隆，小浦孝次，安藤達夫，堤拓哉，南慎一：発泡プラスチック断熱材の燃焼性状に関する基礎的研究 コーンカロリメータ試験による燃焼性状と材料組成に関する考察，日本建築学会環境系論文集，第 647 号，pp1-8，2010. 1