

2. 厚板壁・厚板床の防火被覆の炭化抑制効果に関する実験

2. 1 防火被覆の炭化抑制効果と厚板種類による炭化性状に関する実験 (KF-1~2)

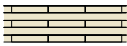











2. 1. 1 実験概要

防火被覆による炭化抑制効果の検討に当たり、まず基材となる木質パネル単体の炭化速度の把握を行った (KF-1: 素地)。次に代表的な被覆に対して、目地や脱落の影響が少なくなるような留め付け方法で実験を行い、炭化開始時間と炭化速度を把握した (KF-1: ガルバリウム鋼板 0.35mm 厚被覆、KF-2: せっこうボード 12.5 mm厚および 15 mm厚被覆)。

2. 1. 2 試験体概要

試験体は表 2. 1. 2-1 および図 2. 1. 2-1~7 に示すとおりとした。

表 2. 1. 2-1 試験体表

部材種類	試験体No.	仕様 (mm)	含水率 (%)	比重		
				気乾	全乾	
小型床 (比較実験)	KF-1	 CLT(スギ)150厚 素地	10.72	0.41	0.37	
		 LVL(スギ)150厚 素地	13.76	0.49	0.43	
		 集成材(スギ)150厚 素地	10.24	0.39	0.35	
		 CLT(スギ)150厚 被覆材: ガルバ0.35厚 (留め間隔:300)	11.17	0.44	0.40	
		 LVL(スギ)150厚 被覆材: ガルバ0.35厚 (留め間隔:300)	13.33	0.48	0.42	
		 集成材(スギ)150厚 被覆材: ガルバ0.35厚 (留め間隔:300)	10.33	0.35	0.32	
	KF-2	A-3	 CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚 (留め間隔:200)	10.97	0.40	0.36
			 LVL(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚 (留め間隔:200)	13.75	0.49	0.43
			 集成材(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚 (留め間隔:200)	9.04	0.35	0.32
		A-4	 CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚 (留め間隔:200)	10.72	0.40	0.36
			 LVL(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚 (留め間隔:200)	12.77	0.48	0.43
			 集成材(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚 (留め間隔:200)	11.18	0.35	0.32

小型パネル試験体(せっこうボード15厚被覆 目地なし)

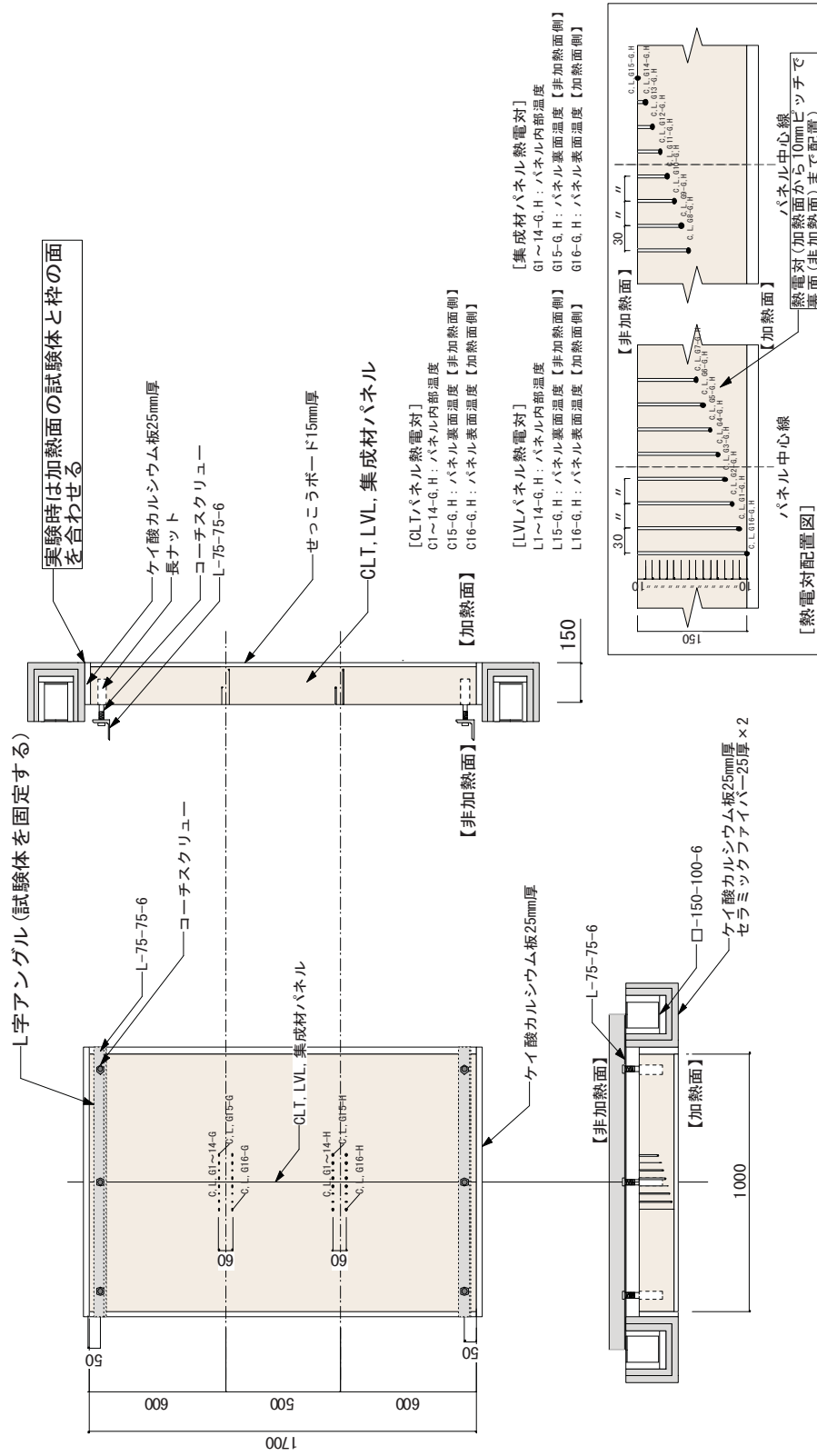


図 2.1.2-4 KF-2 試験体図 2

小型パネル試験体(ガルバリウム鋼板0.35mm厚(平板)被覆 目地なし)

小型パネル試験体(せっこうボード被覆直張り共通)

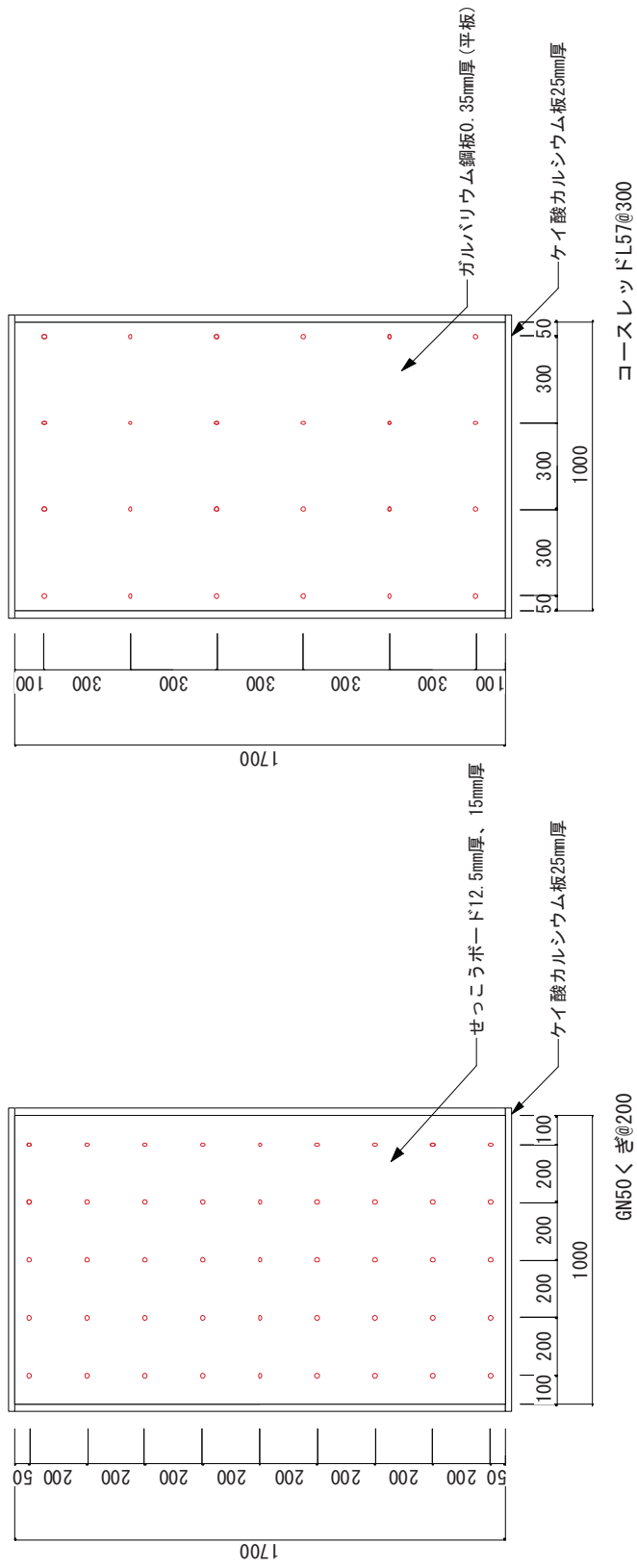


図 2.1.2-5 被覆割り付け図

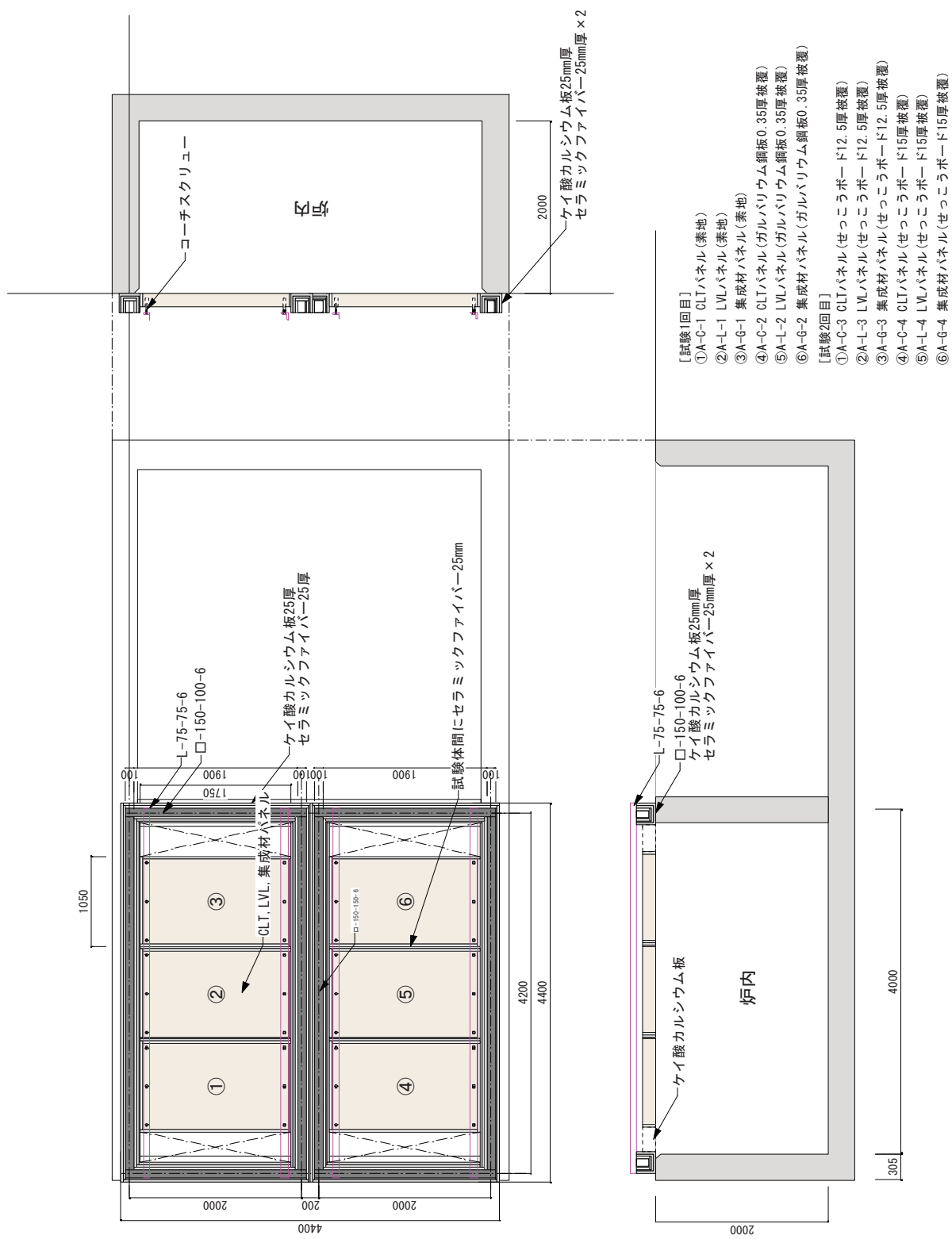


図 2.1.2-7 試験体配置図

2. 1. 3 実験方法

耐火試験は、国立研究開発法人 建築研究所の水平炉（図 2.1.3-1）を使用し、性能評価機関の定める「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準拠した加熱実験より求めた。

（1）加熱方法

IS0834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行い、以下の場合に試験を中止する事とした。

- ・ 試験体非加熱面より 30mm 内部に設置した熱電対が 200℃に達するまでを目途とする。

（2）載荷方法

実験は非載荷で行った。

（3）測定項目

①試験体内部温度

K 熱電対（0.32mm 径）を深さ方向に 10mm ピッチで設置し、内部温度の変化を 15 秒間隔で測定した。

②炉内温度

シース型 K 熱電対を試験体の加熱面から約 10cm 離れた位置に 12 点配置し、試験中の耐火炉内温度を 15 秒間隔で測定した。

③炭化速度

試験体内部に配した熱電対の温度上昇履歴より、木材の着火温度とされる 260℃に達するまでに要した時間から炭化速度を求めることとした。ただし、後に示す温度上昇履歴をみると分かるように、260℃付近で温度停滞を示す傾向が見られたため、200℃到達時間から求めた炭化速度も併記した。炭化速度の算定には、木質パネル表面における温度到達時間の平均値を通る 1 次式を想定し、各断面における温度到達時間を対象として、最小二乗法により傾きを求めた。

④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した。

⑤含水率

試験体に使用した CLT パネルと同時期に作成されたサンプルを、試験体と同条件下で養生し、105℃の絶乾状態に設定した恒温恒湿器を用いて 5 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率の計算式を以下に示す。

$$\text{含水率 (\%)} = \{ (\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) / \text{絶乾後の重量} \} \times 100$$

⑥その他

試験体加熱面及び非加熱面の目視観察、VTR 撮影、写真撮影、試験体非加熱面の熱映像

2. 1. 4 実験結果及び考察

(1) 素地、(2) ガルバリウム鋼板 0.35mm 厚被覆、(3) せっこうボード 12.5 mm厚被覆、(4) せっこうボード 15 mm厚被覆の際のA. 試験写真、B. 加熱温度、C. 試験体内部温度、D. 各断面の炭化温度到達時間と炭化速度、E. 炭化状況を示す。(1)と(2)、(3)と(4)は同時に加熱しているため加熱温度は同じである。

(1) 素地

A. 試験写真



写真 2. 1. 4. (1)-1 試験体 A-1(加熱前)



写真 2. 1. 4. (1)-2 試験体 A-1(加熱後)

B. 加熱温度

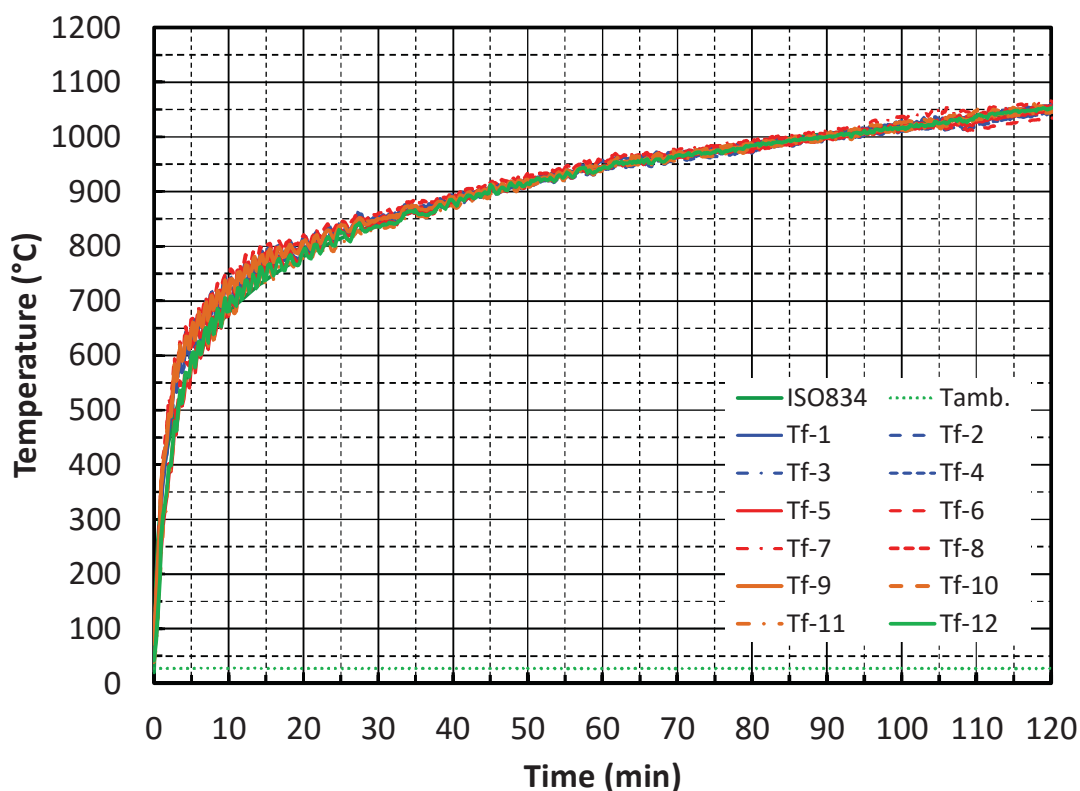


図 2. 1. 4. (1)-1 加熱温度

C. 試験体内部温度

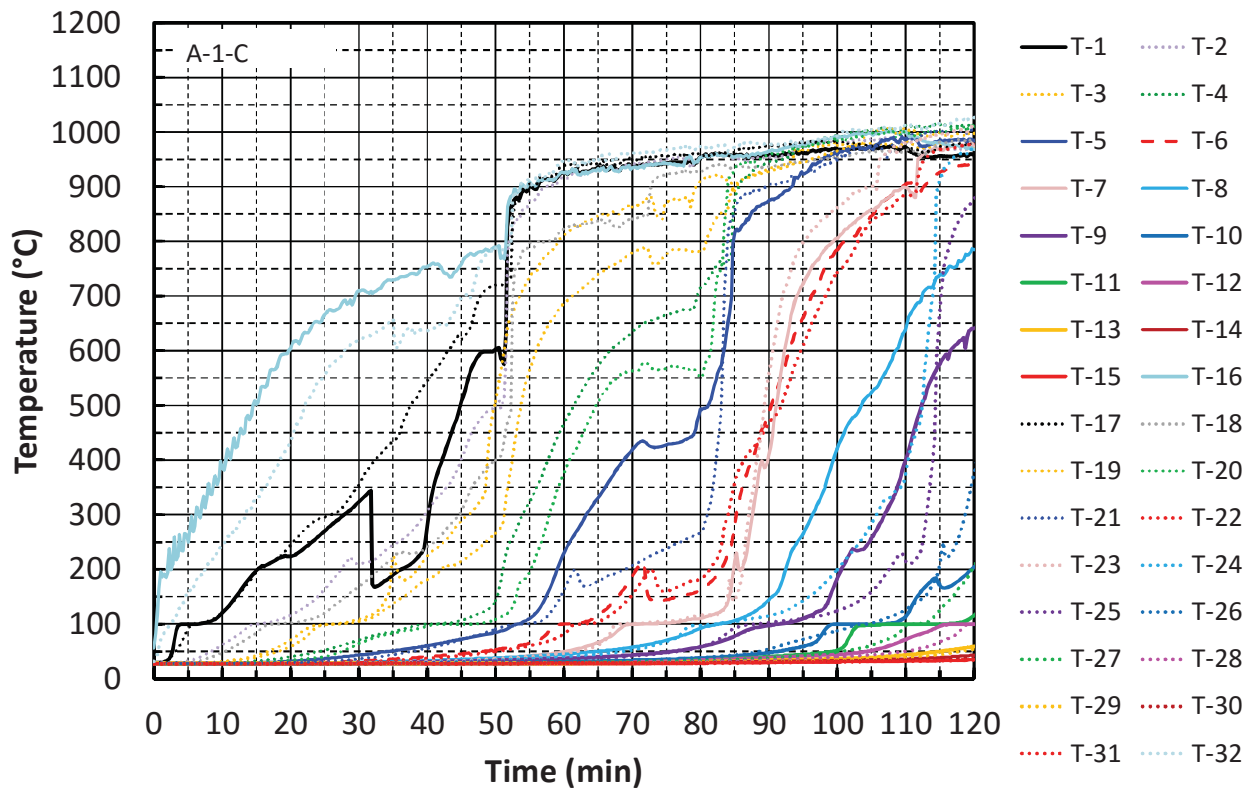


図 2.1.4. (1)-2 A-1 (素地) -CLT パネル厚 150mm

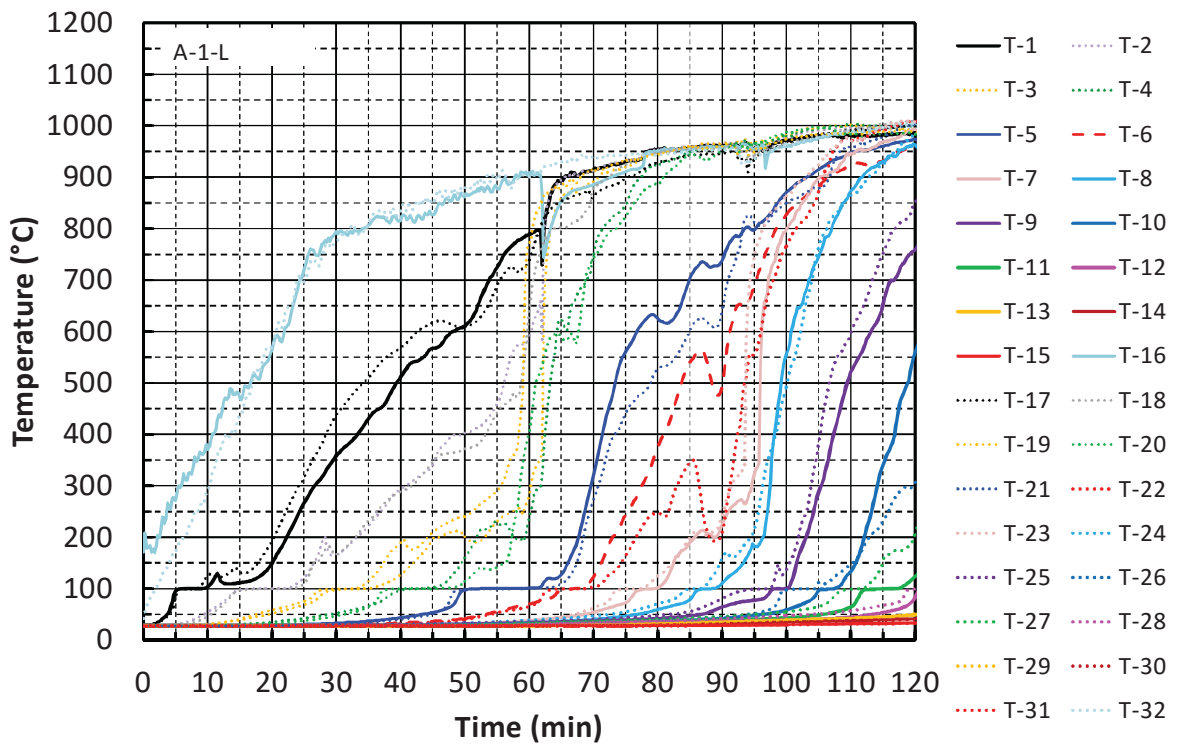


図 2.1.4. (1)-3 A-1 (素地) -LVL パネル厚 150mm

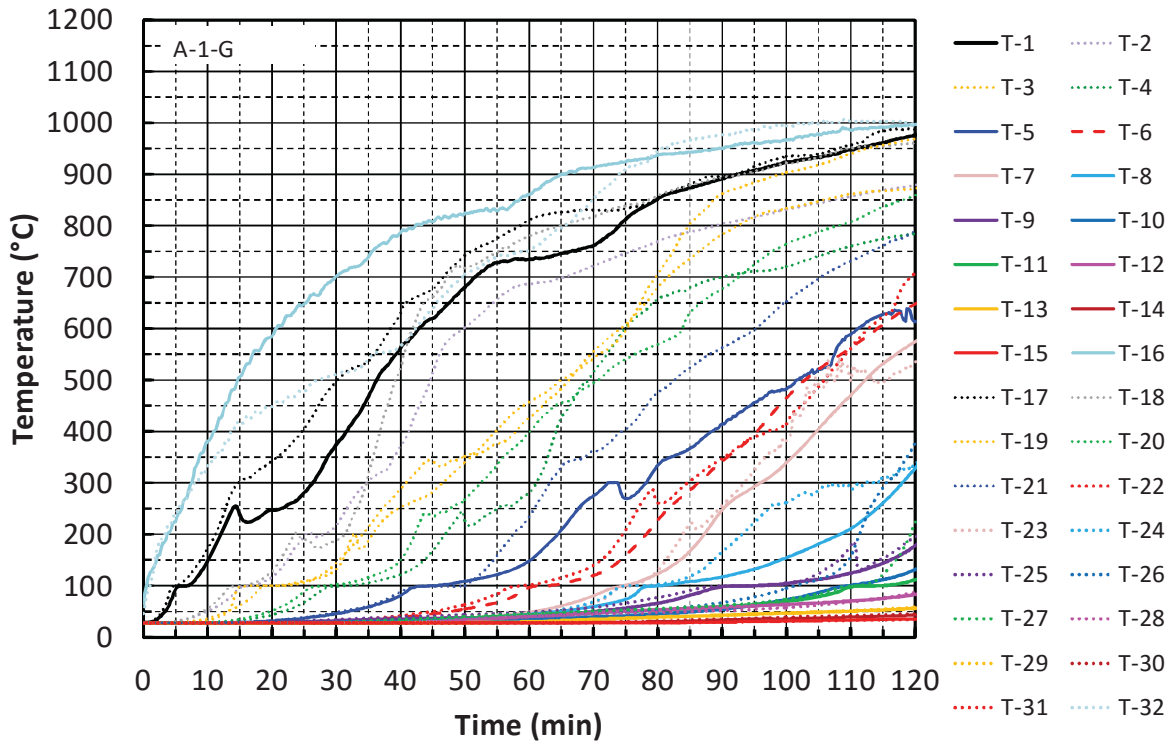


図 2.1.4. (1)-4 A-1 (素地) -集成材 パネル厚 150mm

D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、記号で示すのはC:CLT パネル、L:LVL パネル、G:集成材パネルの略である。また各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。

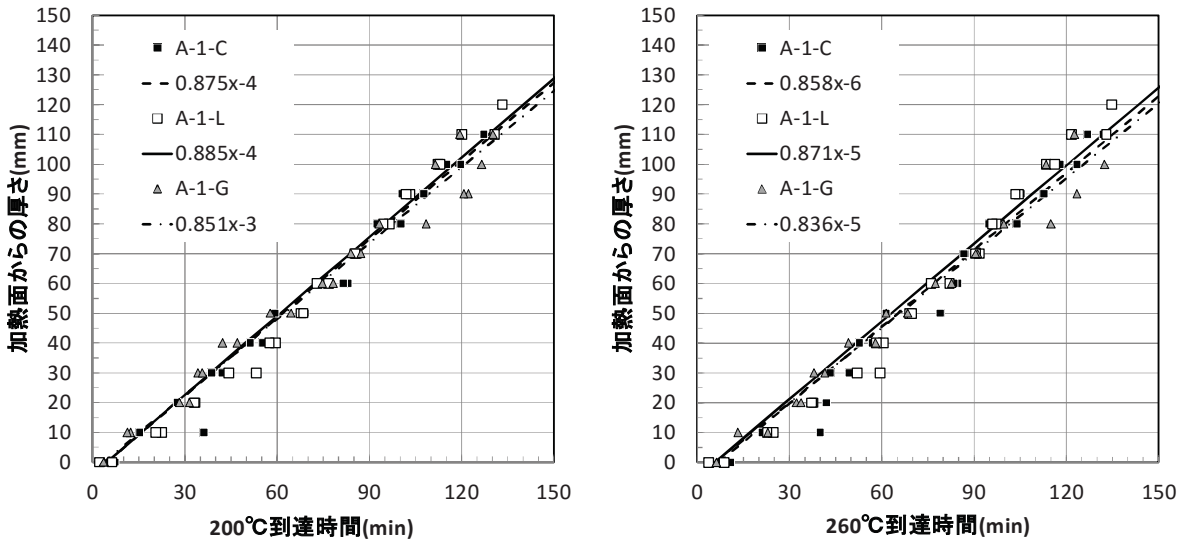


図 2.1.4. (1)-5 温度到達時間 A-1 (素地)

E. 炭化状况

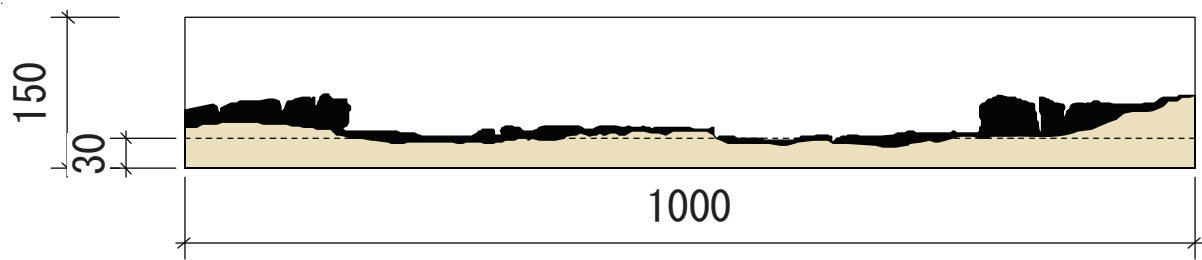


图 2.1.4.(1)-6 A-1 (素地) -CLT 炭化图

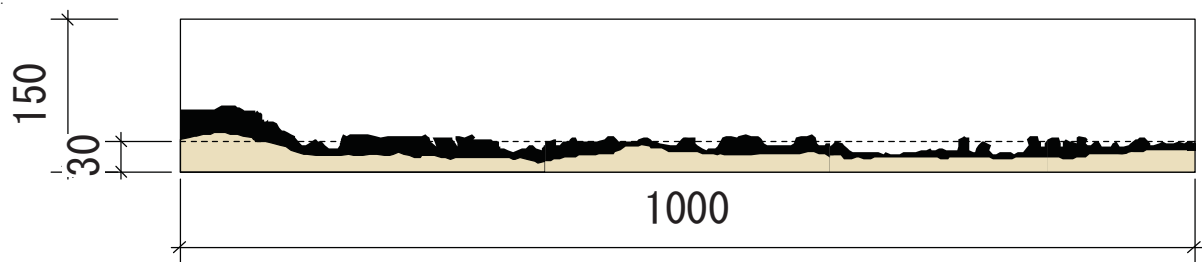


图 2.1.4.(1)-7 A-1 (素地) -LVL 炭化图

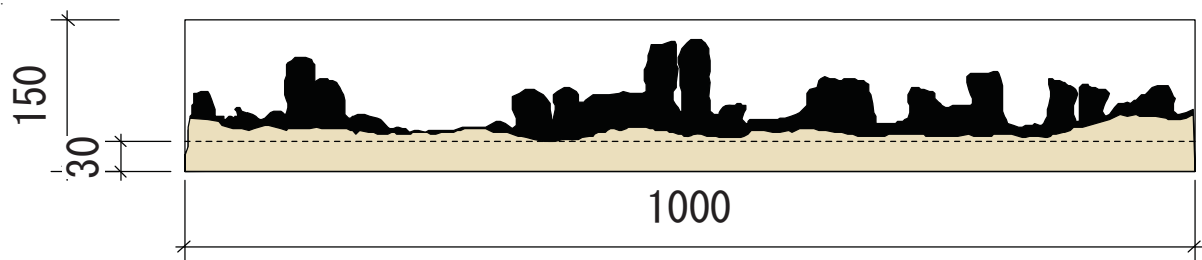


图 2.1.4.(1)-8 A-1 (素地) -集成材 炭化图

(2) ガルバリウム鋼板 0.35mm 厚被覆

A. 試験写真



写真 2.1.4.(2)-3 試験体 A-2 (加熱前)

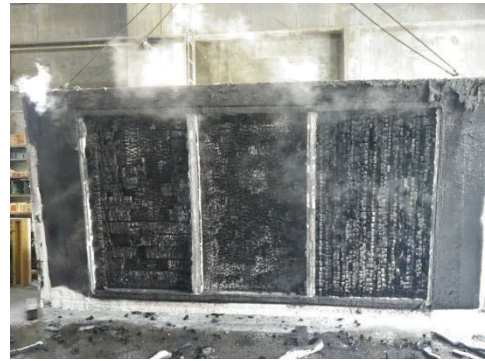


写真 2.1.4.(2)-4 試験体 A-2 (加熱後)

B. 加熱温度

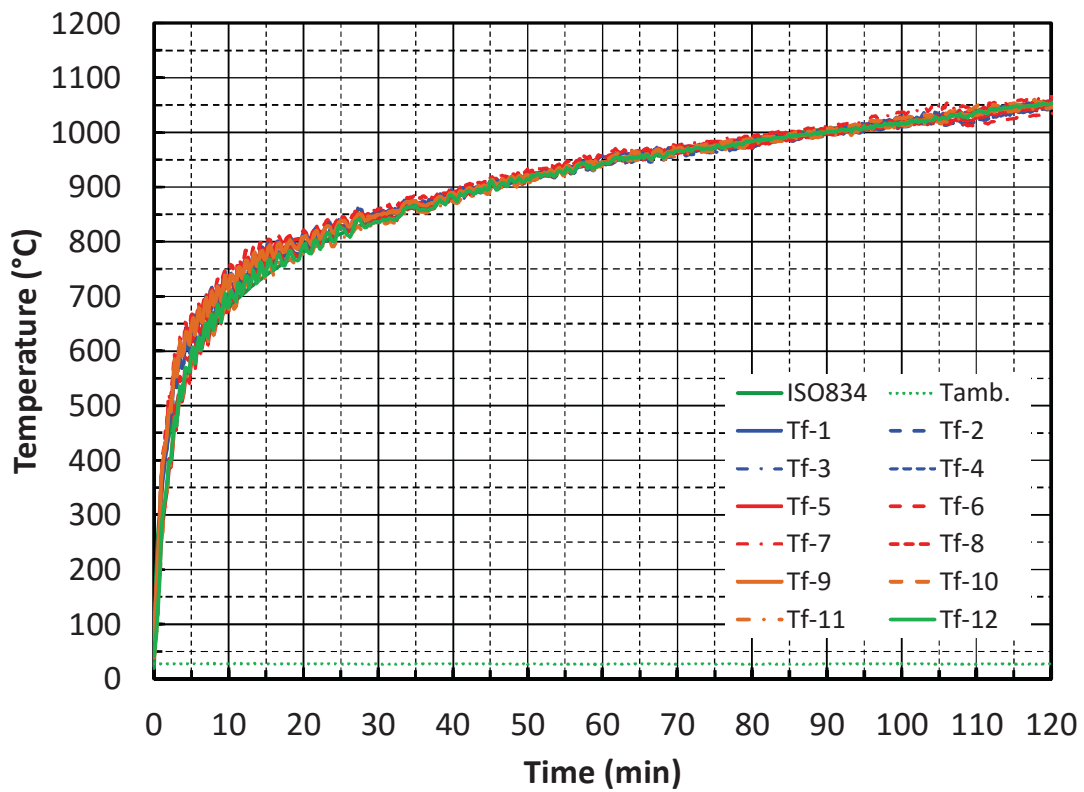


図 2.1.4.(2)-1 加熱温度

C. 試験体内部温度

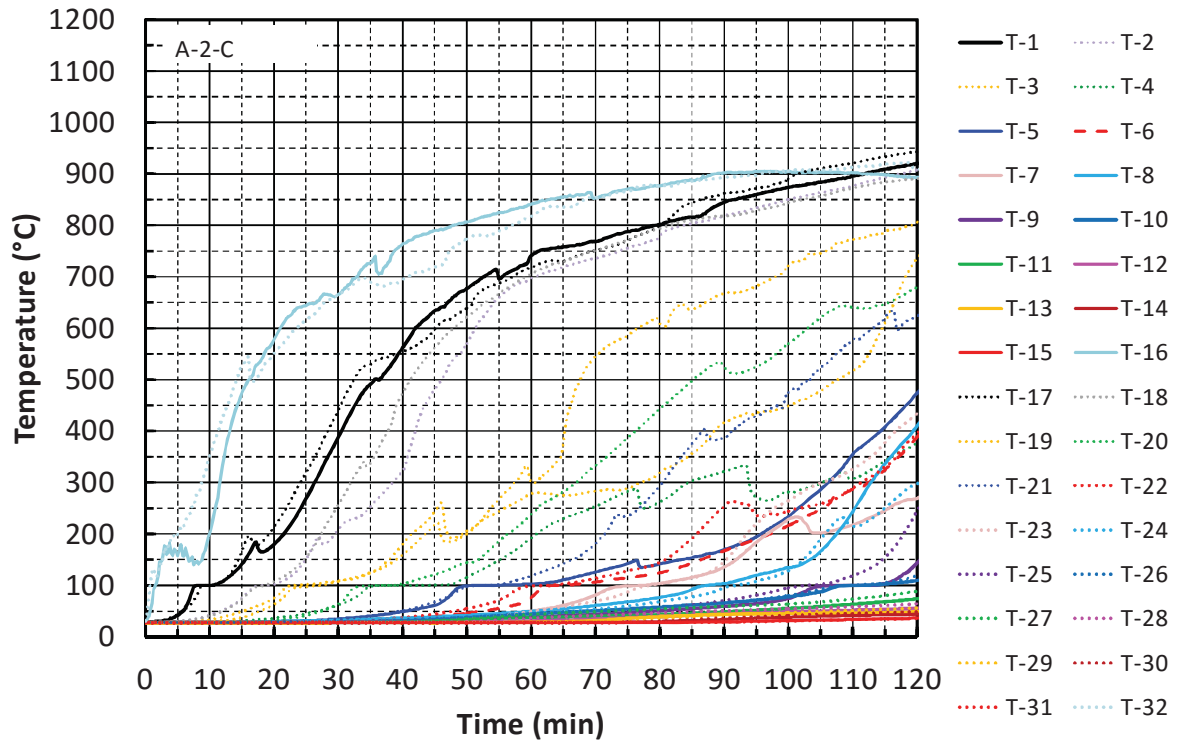


図 2.1.4.(2)-2 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -CLT パネル厚 150mm

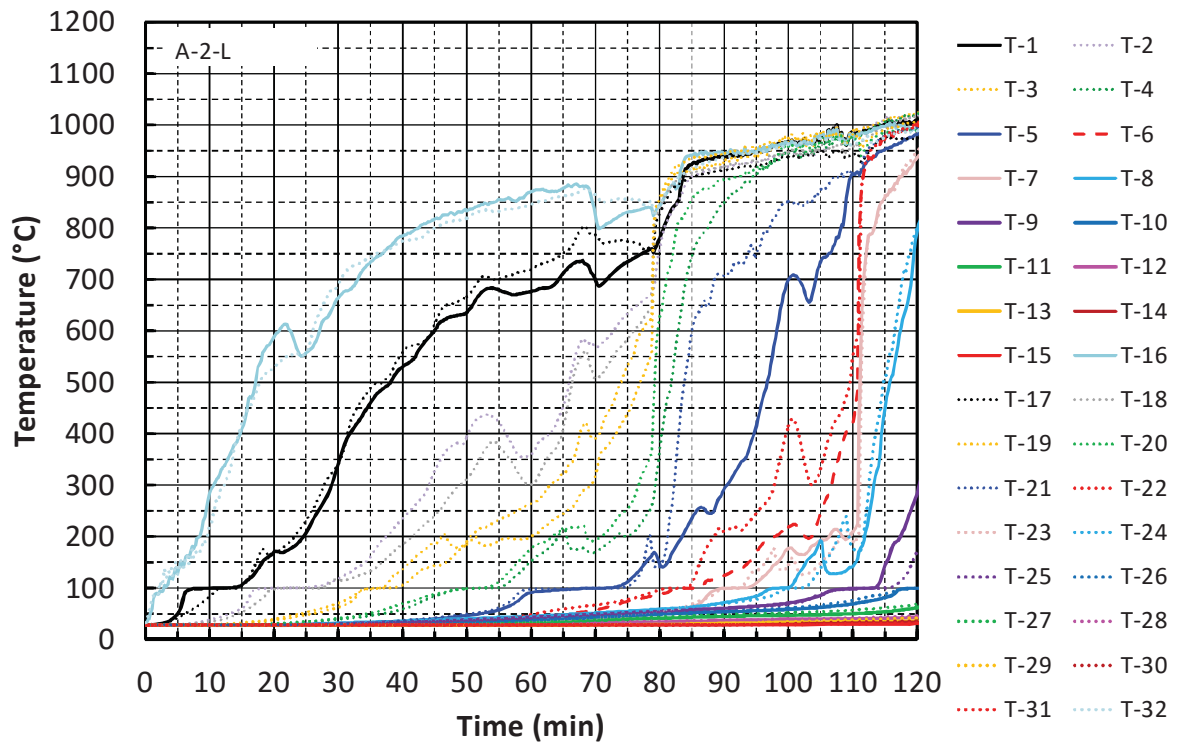


図 2.1.4.(2)-3 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -LVL パネル厚 150mm

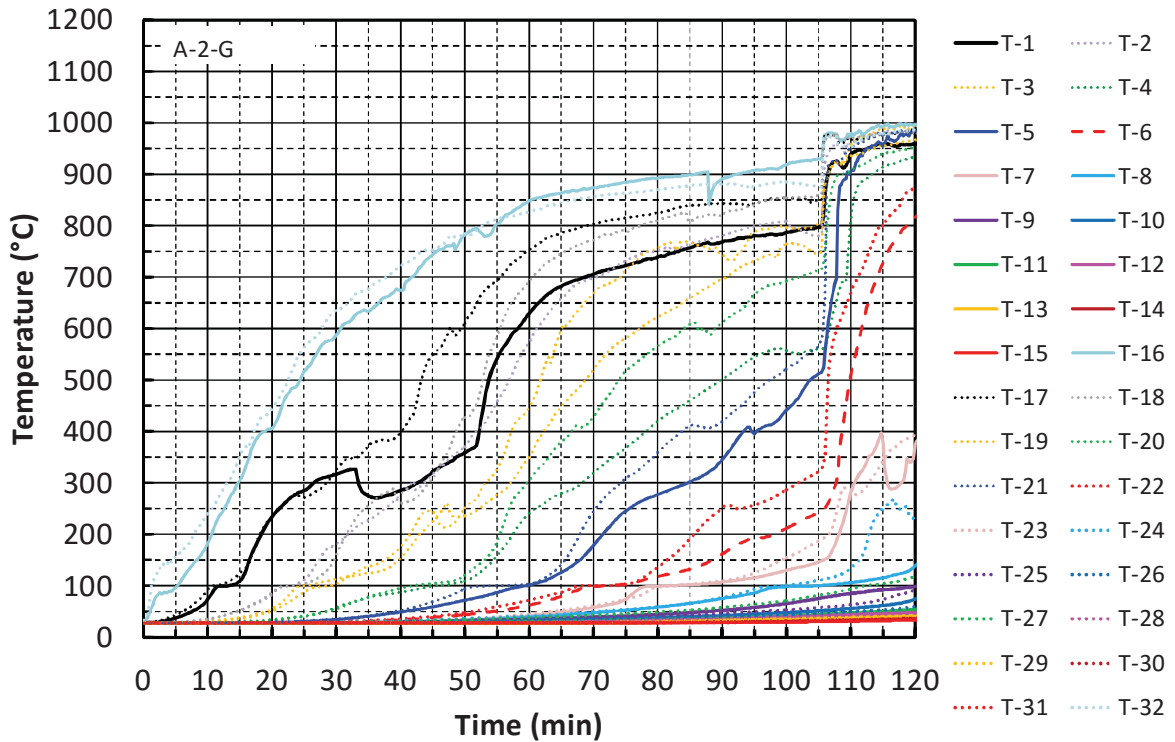


図 2.1.4. (2)-4 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -集成材 パネル厚 150mm

D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、記号で示すのはC:CLT パネル、L:LVL パネル、G:集成材パネルの略である。また各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。

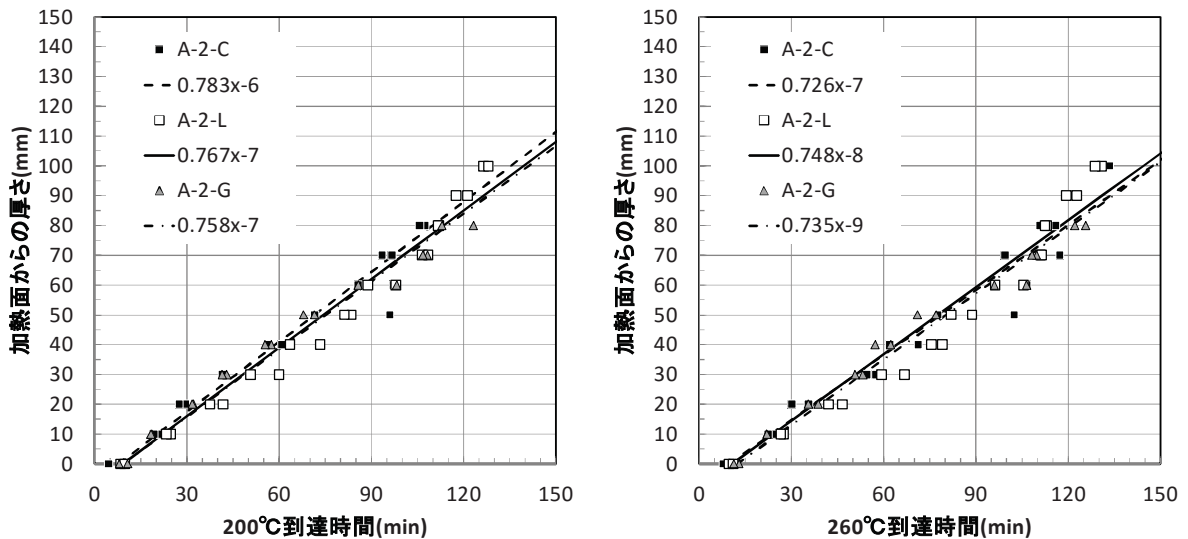


図 2.1.4. (2)-5 温度到達時間 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆)

E. 炭化状況

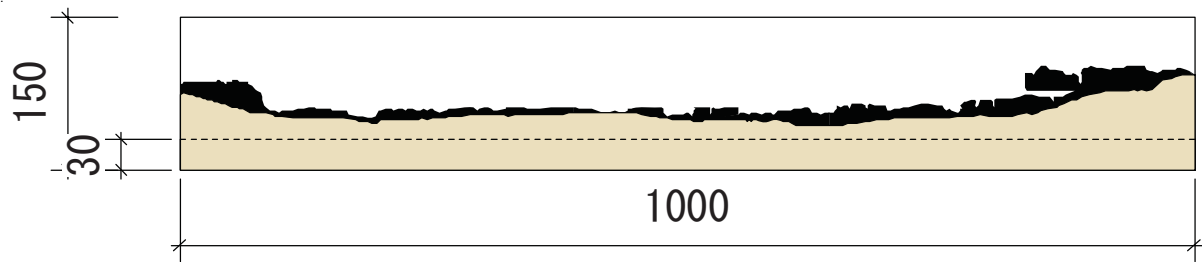


図 2.1.4.(2)-6 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -CLT 炭化図

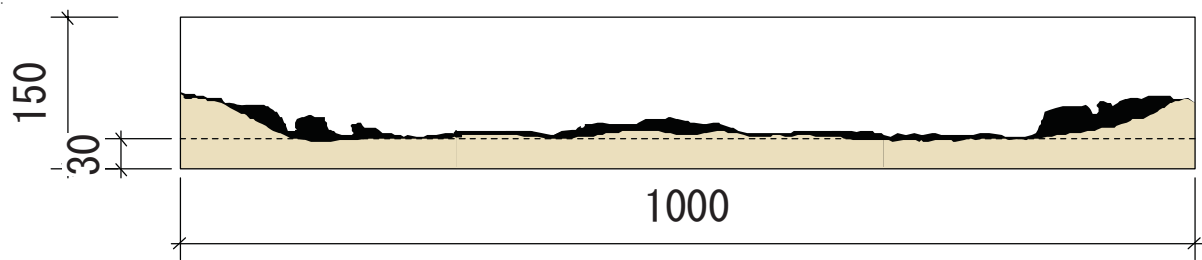


図 2.1.4.(2)-7 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -LVL 炭化図

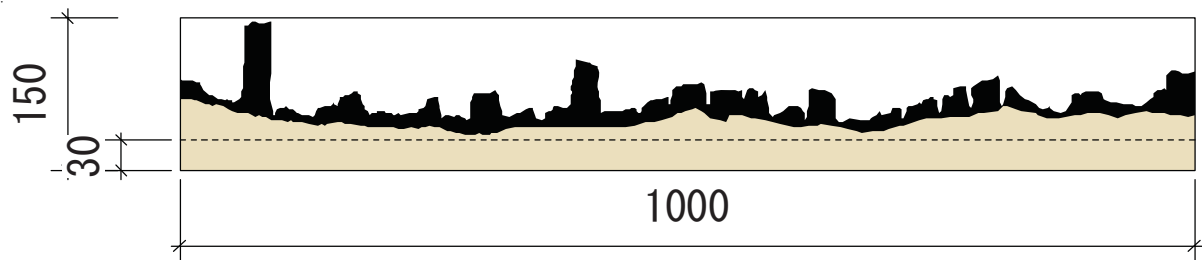


図 2.1.4.(2)-8 A-2 (ガルバリウム鋼板被覆) -集成材 炭化図

(3) せっこうボード 12.5 mm厚被覆

A. 試験写真



写真 2. 1. 4. (3)-5 試験体 A-3 (加熱前)



写真 2. 1. 4. (3)-6 試験体 A-3 (加熱後)

B. 加熱温度

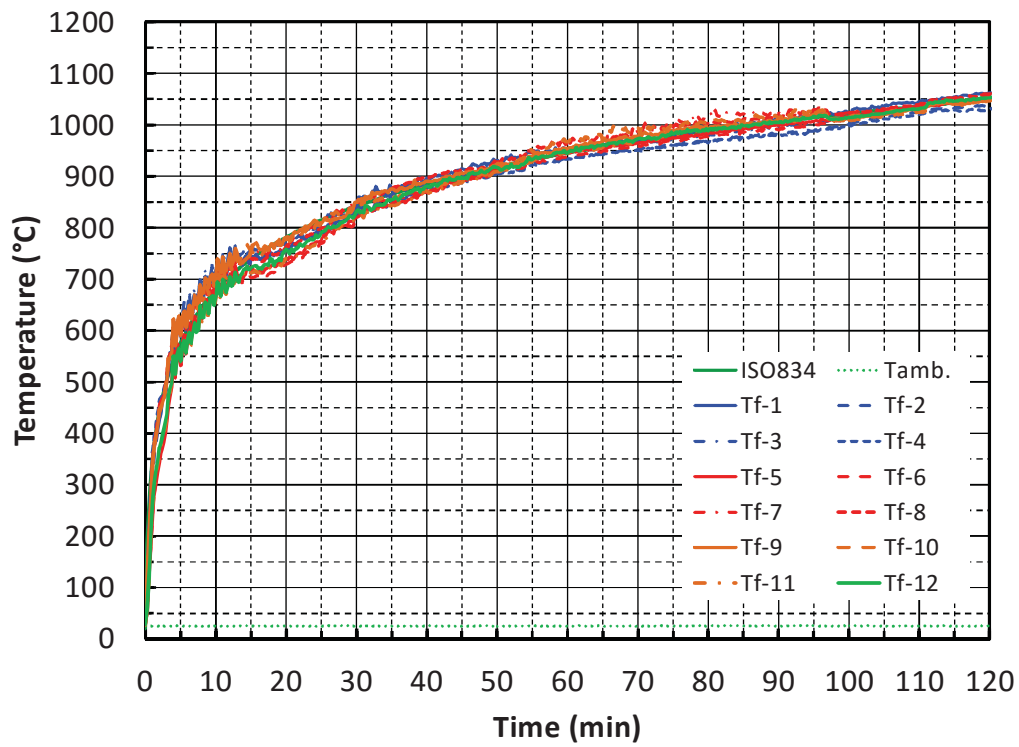


図 2. 1. 4. (3)-1 加熱温度

C. 試験体内部温度

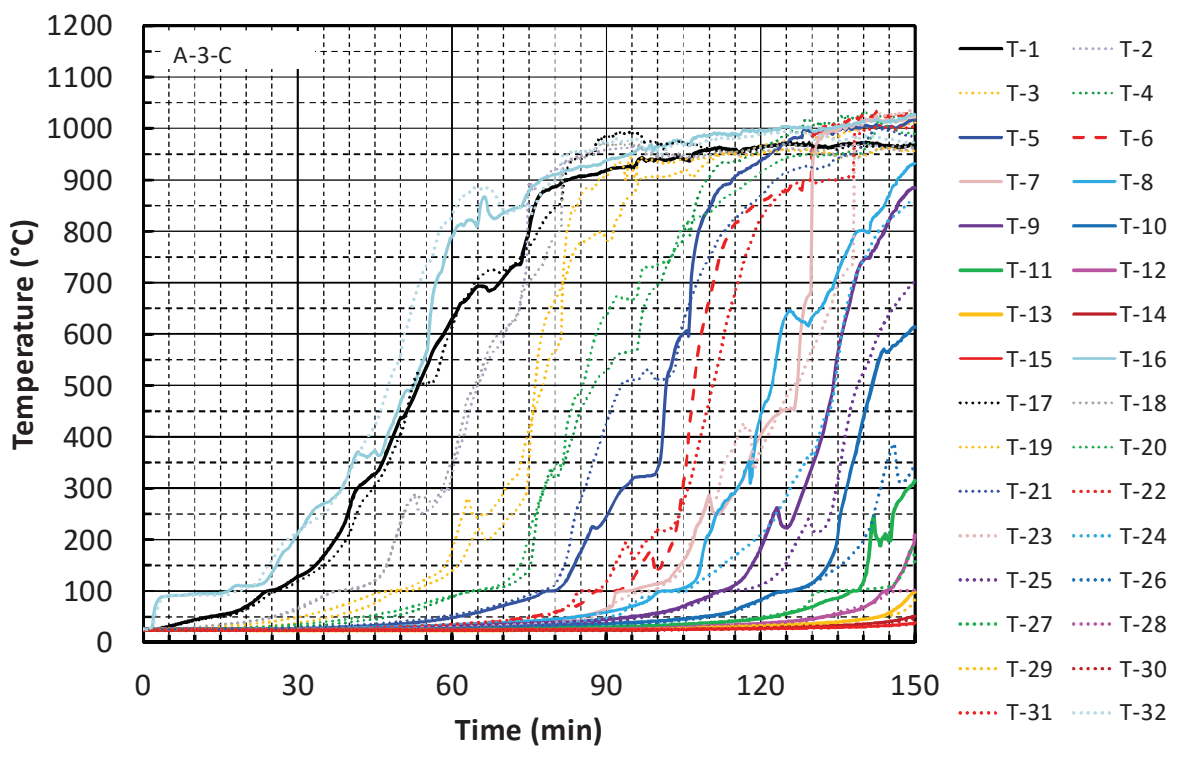


図 2.1.4. (3)-2 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -CLT パネル厚 150mm

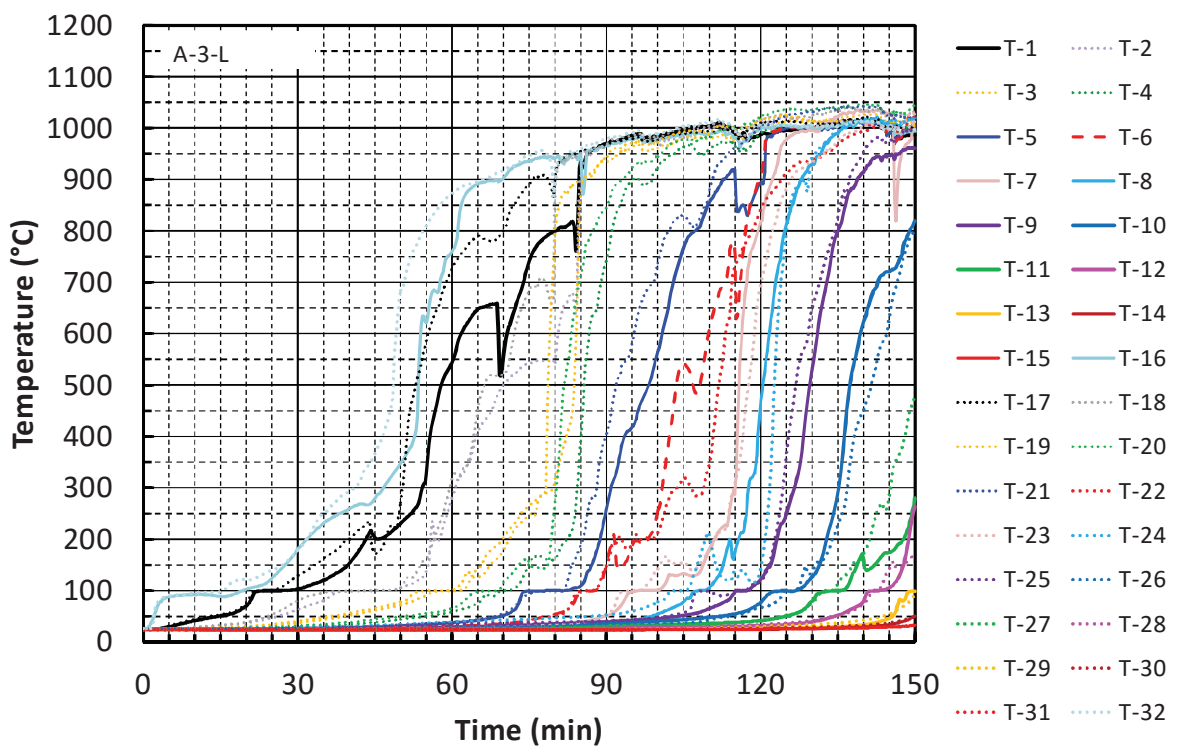


図 2.1.4. (3)-3 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -LVL パネル厚 150mm

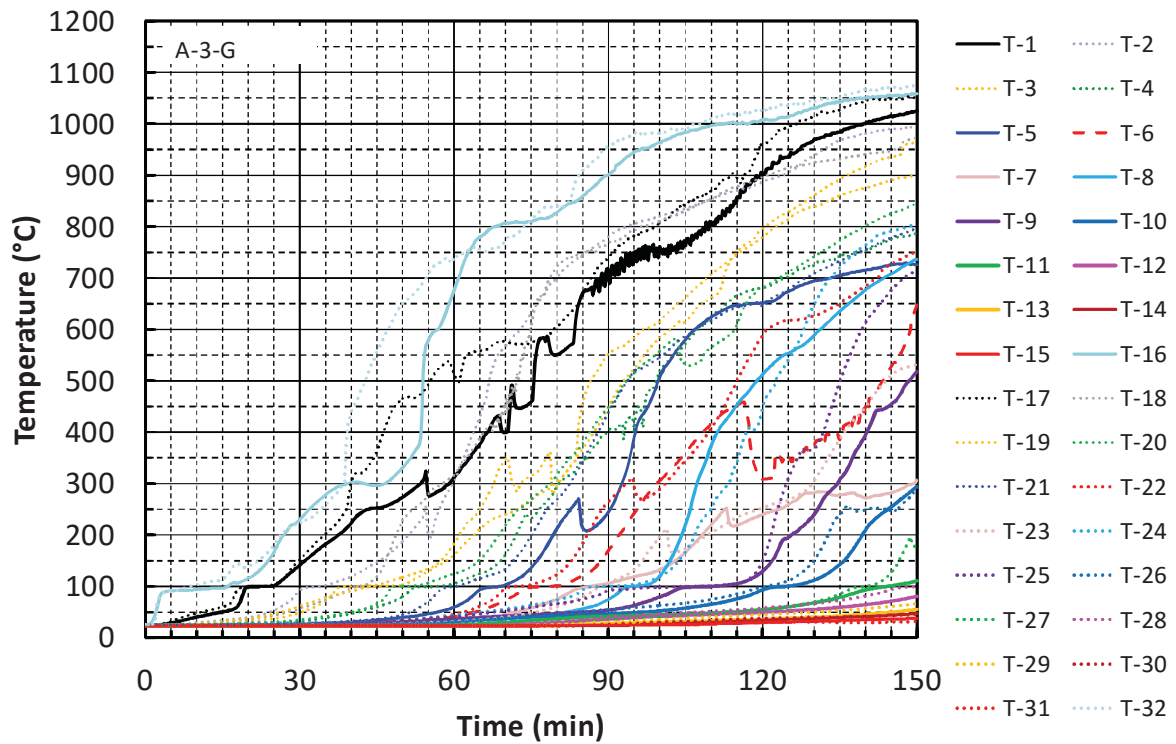


図 2. 1. 4. (3)-4 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -集成材 パネル厚 150mm

D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、記号で示すのはC:CLT パネル、L:LVL パネル、G:集成材パネルの略である。また各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。

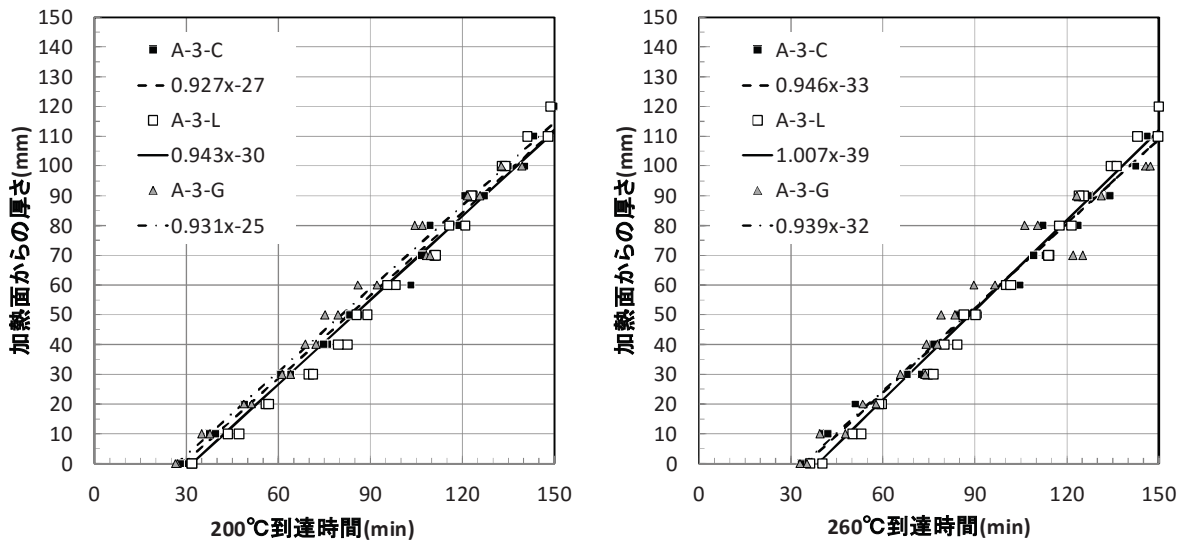
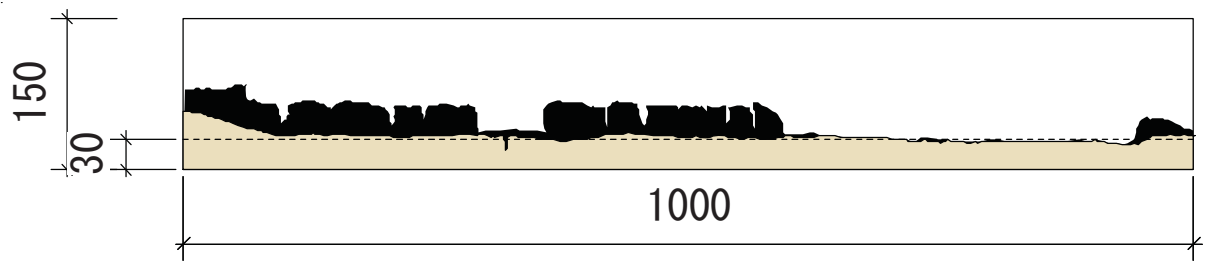
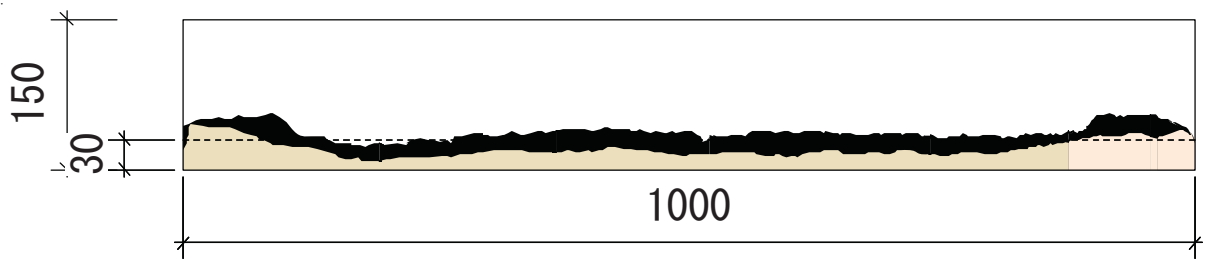


図 2. 1. 4. (3)-5 温度到達時間 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆)

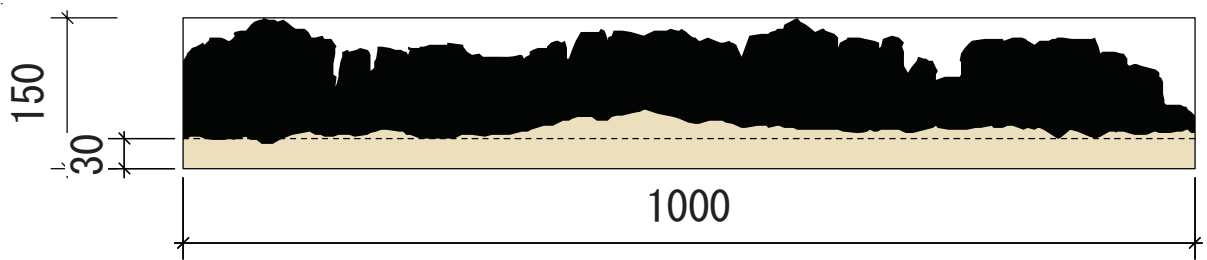
E. 炭化状況



2.1.4.(3)-6 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -CLT 炭化図



2.1.4.(3)-7 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -LVL 炭化図



2.1.4.(3)-8 A-3 (せっこうボード 12.5 mm厚被覆) -集成材 炭化図

(4) せっこうボード 15 mm厚被覆

A. 試験写真



写真 2. 1. 4. (4)-7 試験体 A-4 (加熱前)

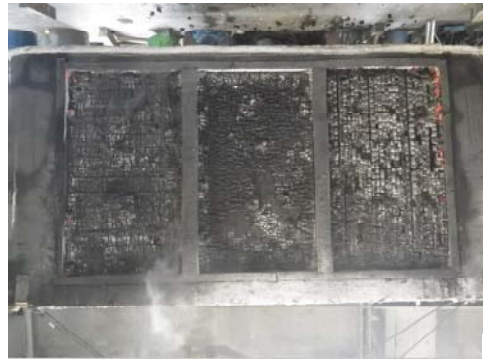


写真 2. 1. 4. (4)-8 試験体 A-4 (加熱後)

B. 加熱温度

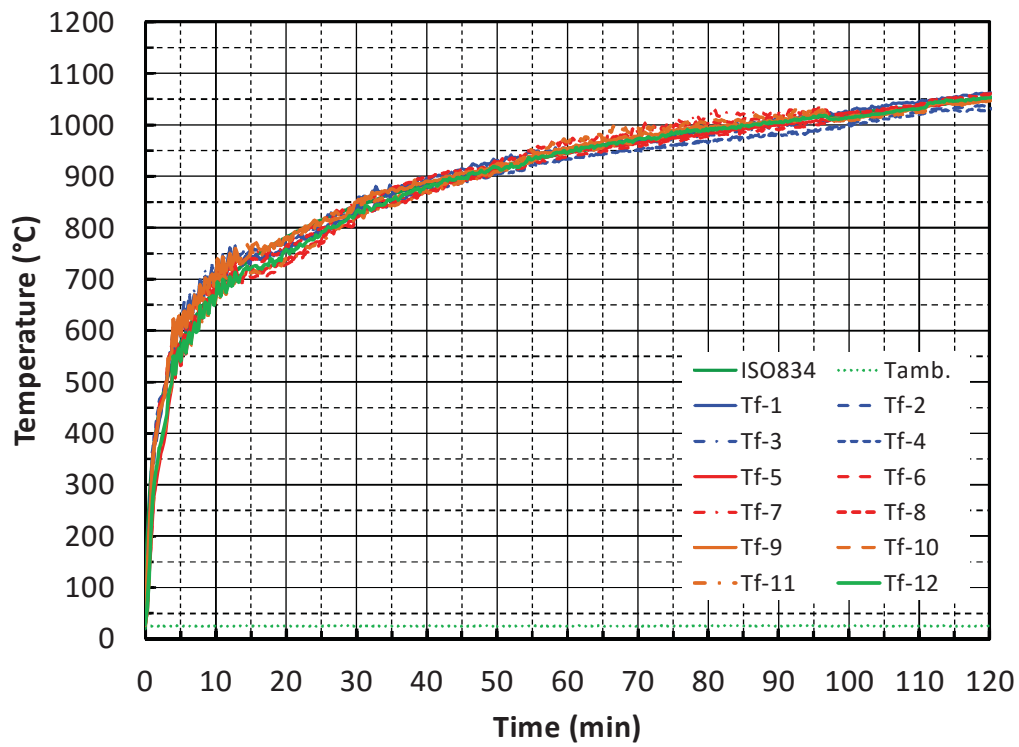


図 2. 1. 4. (4)-1 加熱温度

C. 試験体内部温度

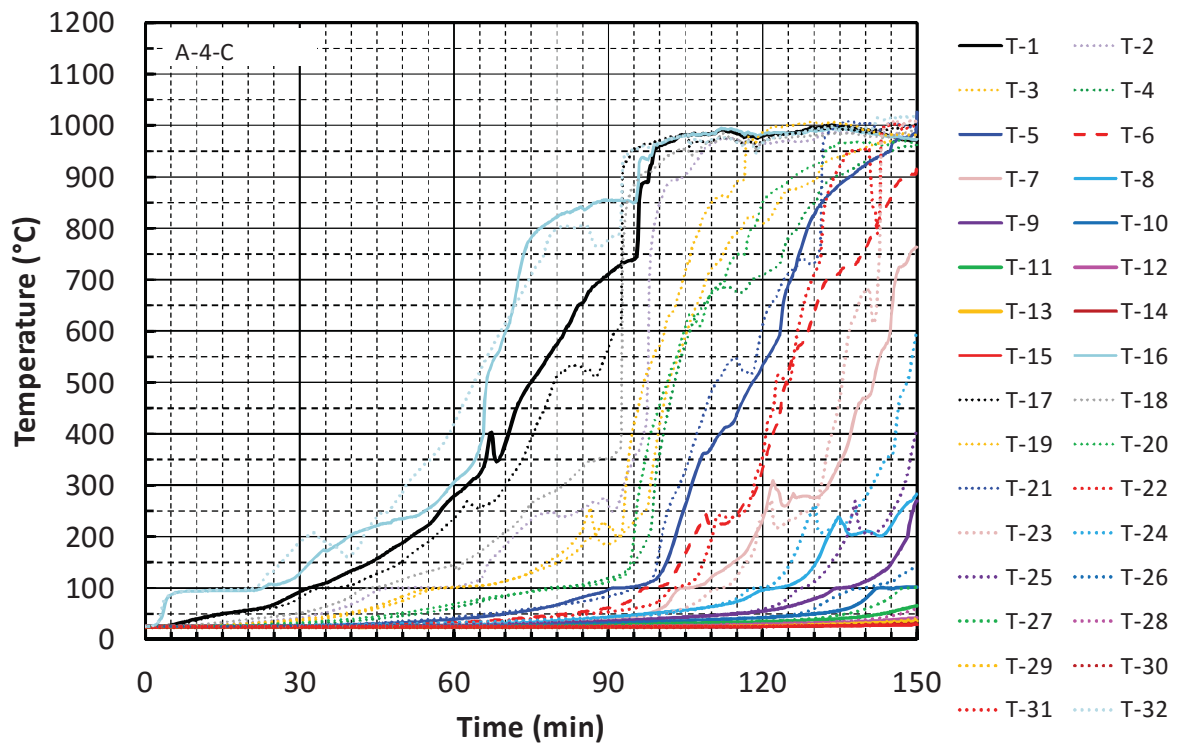


図 2.1.4. (4)-2 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -CLT パネル厚 150mm

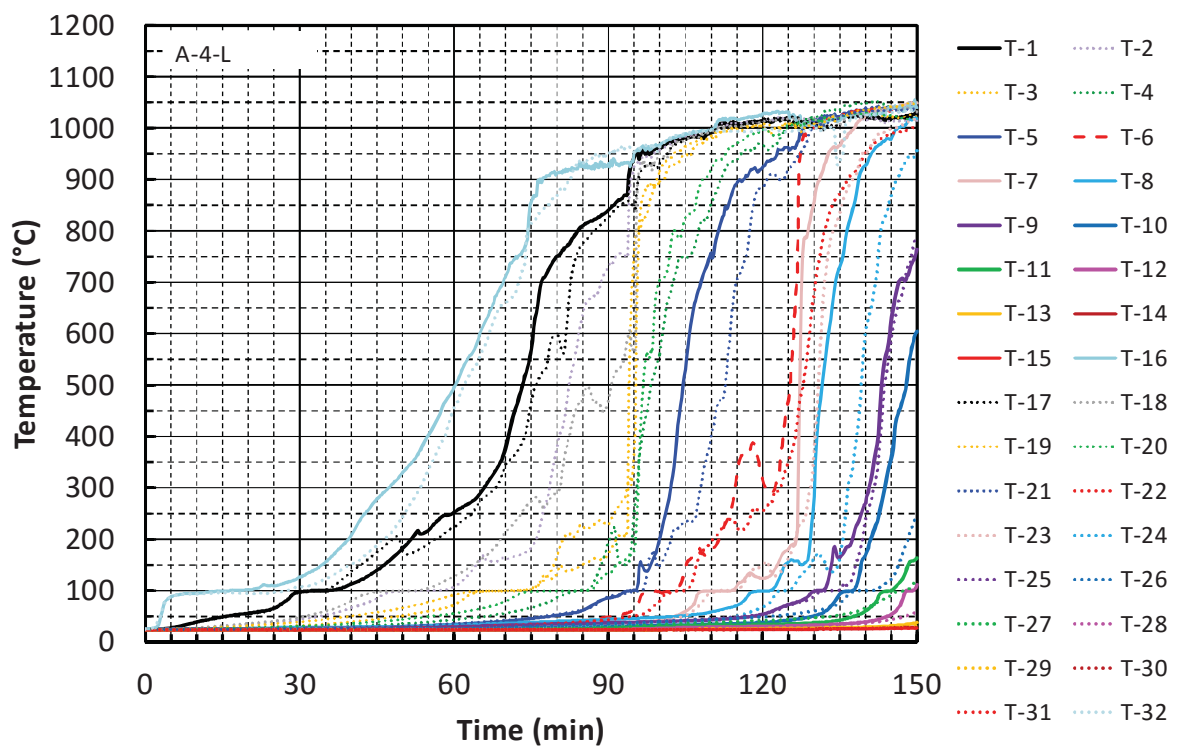


図 2.1.4. (4)-3 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -LVL パネル厚 150mm

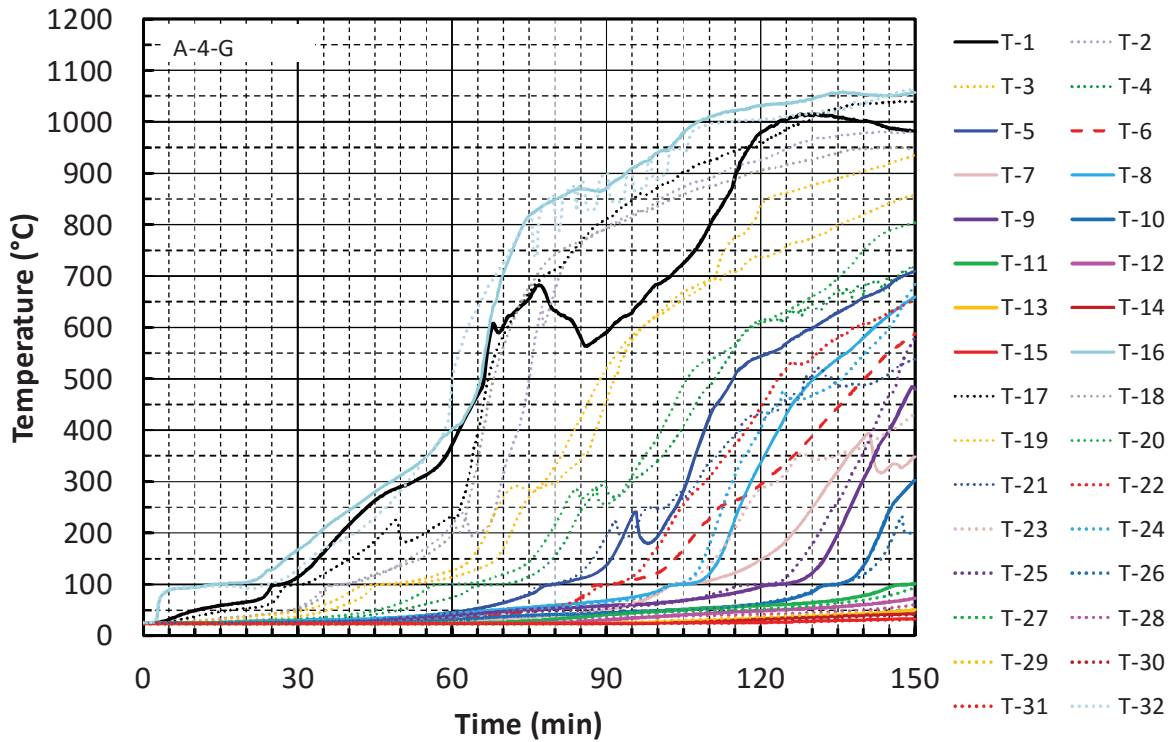


図 2.1.4. (4)-4 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -集成材 パネル厚 150mm

D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、記号で示すのは C : CLT パネル、L : LVL パネル、G : 集成材パネルの略である。また各々の炭化速度 (mm/min) を直線の傾きとして示す。変数 'x' は到達時間 (min) の意である。

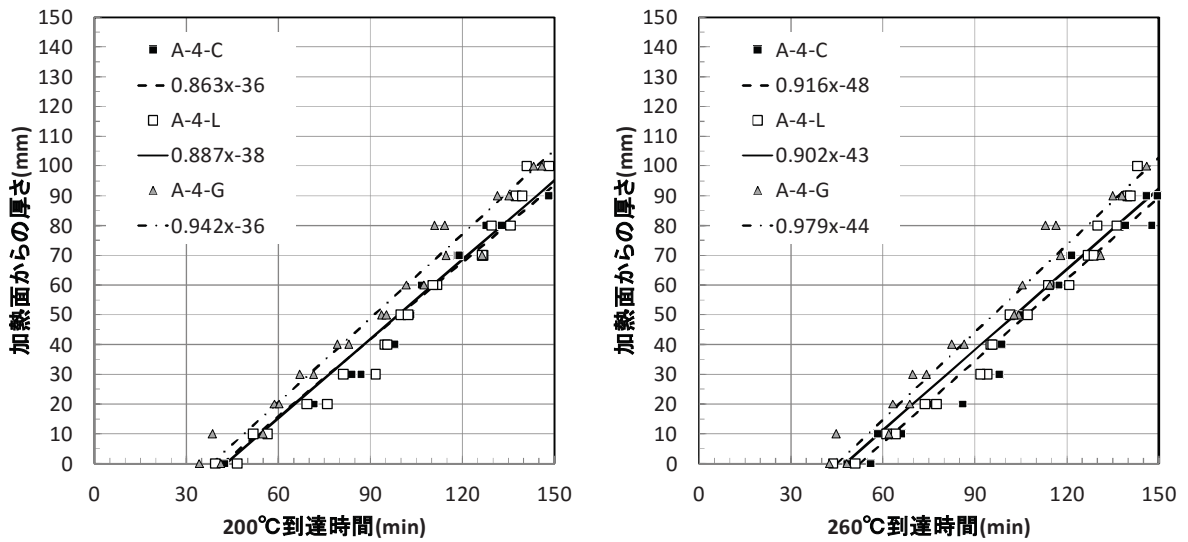
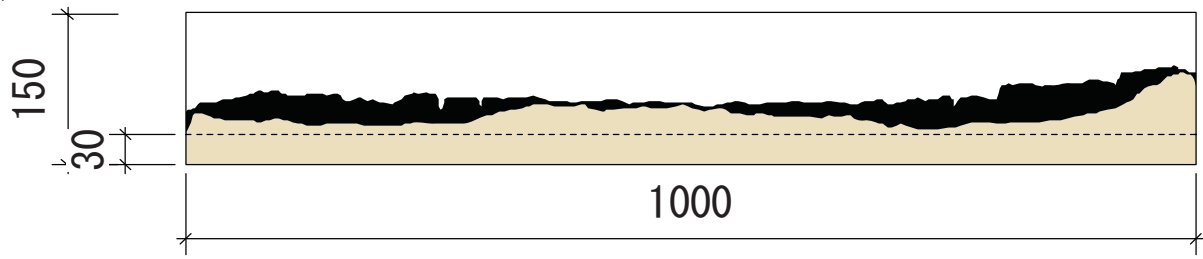
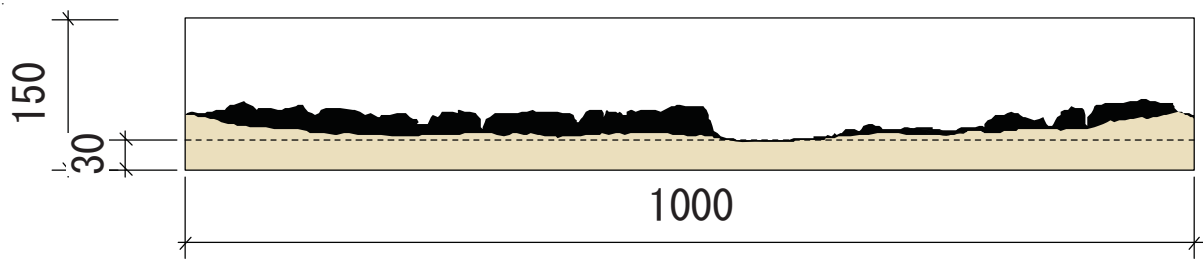


図 2.1.4. (4)-5 温度到達時間 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆)

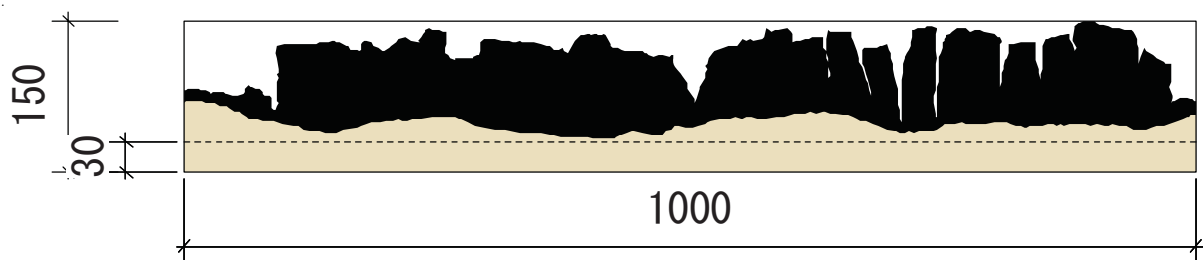
E. 炭化状況



2.1.4.(4)-6 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -CLT 炭化図



2.1.4.(4)-7 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -LVL 炭化図

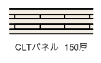
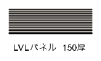
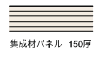

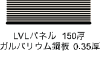
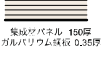

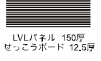
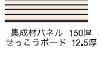
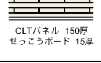
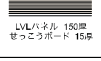
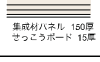


2.1.4.(4)-8 A-4 (せっこうボード 15 mm厚被覆) -集成材 炭化図

表 2.1.5-1、図 2.1.5-1 に木質パネル面材ごとの防火被覆による炭化抑制効果をまとめて示す。表 2.1.5-1 より、防火被覆により木質パネル表面の炭化開始時間に遅れを生じることが分かる。260°C到達時間を基準に素地と比べた場合、その差はガルバリウム鋼板 0.35mm 厚で約 4 分と短い、せっこうボード 12.5 mm 厚で約 29 分、15 mm 厚では約 41 分と長い。これは 60 分時の燃えしろ寸法においても同じ傾向が見られ、仕上材のせっこうボードの厚みを増すことで、燃えしろ寸法を小さく抑えられることが分かる。また図 2.1.5-1 より、ガルバリウム鋼板は炭化速度が素地に比べて低く抑えられている一方、せっこうボード被覆の場合は炭化速度に与える影響が少ないことが分かる。これは鋼板は脱落せずに残るため、木質パネル表面が直接火に曝されないためであると考えられる。

基材としての木質パネル面材の種類が炭化抑制効果に与える影響については、今回の実験で用いた被覆材に限り、大きな違いは見られなかった。ただし炭化後の断面観察より炭化層の落ちにくさは被覆材の落ちにくさにも影響することが推測されたため、今後の留め付け方法や載荷方法が炭化速度に与える影響の検討には、加熱面に対して直角の接着面を持つ集成材と、平行の接着面を持つパネルとしては CLT を代表として検討することとした。

表 2. 1. 5-1 防火被覆による炭化抑制効果一覧表

試験体No.	仕様		載荷荷重	加熱時間	結果(200°C到達時間)			結果(260°C到達時間)		
					炭化開始時間	炭化速度(mm/分)	60分時燃えしろ寸法	炭化開始時間	炭化速度	60分時燃えしろ寸法
KF-1	 CLT150厚素地	—	135分	4.75分	0.833	49mm	7.25分	0.798	45mm	
	 LVL150厚素地	—		4.25分	0.844	49mm	6.25分	0.822	47mm	
	 集成材150厚素地	—		3.625分	0.818	48mm	6.25分	0.782	45mm	
	 CLT150厚ガルバ0.35厚被覆ビスL57@300	—		7.375分	0.717	41mm	9.5分	0.656	37mm	
	 L150パネルガルバ0.35厚被覆ビスL57@300	—		9.125分	0.699	39mm	10.375分	0.674	37mm	
	 G150パネルガルバ0.35厚被覆ビスL57@300	—		9.375分	0.673	38mm	12.125分	0.634	35mm	
KF-2	 C150パネルせっこうボード12.5厚GN50@200被覆	—	150分	28.75分	0.927	29mm	34.75分	0.946	24mm	
	 L150パネルせっこうボード12.5厚GN50@200被覆	—		31.75分	0.943	27mm	38.25分	1.007	21mm	
	 G150パネルせっこうボード12.5厚GN50@200被覆	—		26.75分	0.931	31mm	34.125分	0.939	24mm	
	 C150パネルせっこうボード15厚GN50@200被覆	—		41.125分	0.863	16mm	52.125分	0.916	7mm	
	 L150パネルせっこうボード15厚GN50@200被覆	—		43分	0.887	15mm	47.375分	0.902	11mm	
	 G150パネルせっこうボード15厚GN50@200被覆	—		37.75分	0.942	21mm	45.375分	0.979	15mm	

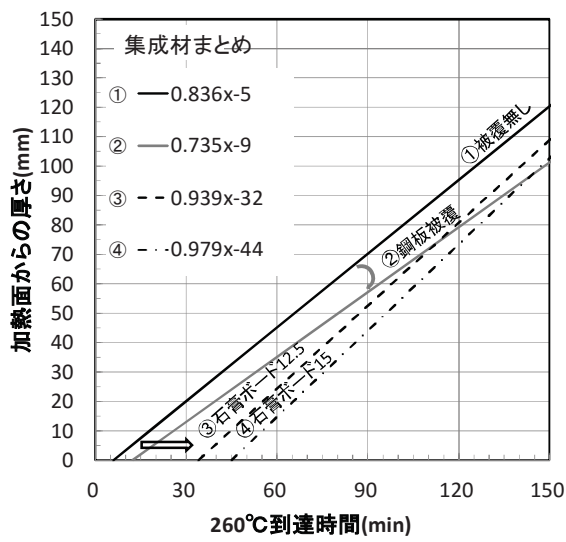
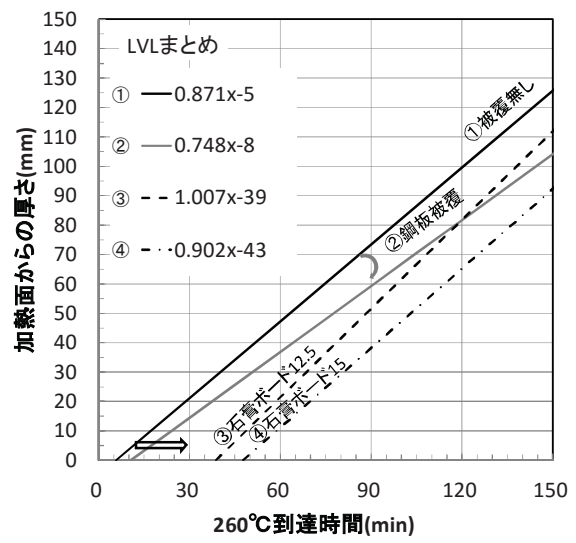
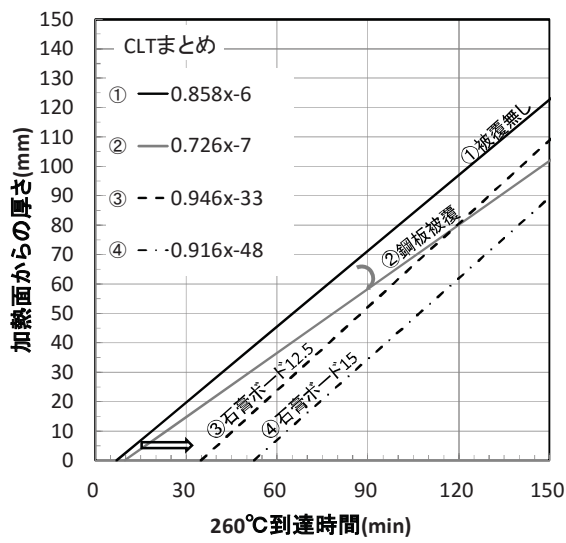


図 2.1.5-1 温度到達時間まとめ (左上: CLT、右上: LVL、左下: 集成材)

2. 2 防火被覆の炭化抑制効果と留め付け方法の影響に関する実験 (KF-3)

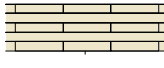
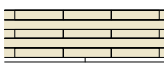
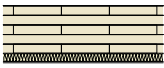
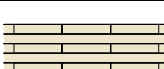
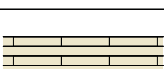
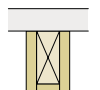
2. 2. 1 実験概要

防火被覆の留め付け方法が炭化抑制効果に与える影響を把握するため、厚さの異なる2種類のせっこうボード(9.5mmおよび15mm厚)を対象に、中央に目地を設けた上で、胴縁を介して留めつけ間隔(幅方向)を500ピッチに変更する等の現実的な施工方法を考慮して実験を行い、炭化開始時間と炭化速度を把握した。また代表的な仕上材の種類として断熱材(GW25mm厚)を裏打ちしたガルバリウム鋼板0.35mm厚およびせっこうボード被覆や、木質材料の仕上材として構造用合板で被覆した場合の炭化開始時間と炭化速度を把握した。さらに3章で取り上げる、はりの防火被覆の炭化抑制効果の予備実験として、木材45厚で被覆したはりの荷重支持部材表面における炭化温度到達時間を把握した。

2. 2. 2 試験体概要

試験体は表2.2.2-1および図2.2.2-1~に示すとおりとした。

表2.2.2-1 試験体表(比重・含水率)

部材種類	試験体No.	仕様(mm)	含水率(%)	比重	
				気乾	全乾
小型床 (比較実験)	KF-3	①  CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード9.5厚 (留め間隔:455)	10.96	0.39	0.35
		②  CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚 (留め間隔:455)	11.16	0.39	0.35
		③  CLT(スギ)150厚 被覆材: ガルバ0.35厚 (留め間隔:300) +GW32K25厚	10.70	0.44	0.40
		④  CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚 (留め間隔:455) +GW32K25厚	10.12	0.44	0.40
		⑤  CLT(スギ)150厚 被覆材: 構造用合板15厚 (留め間隔:455)	11.03	0.39	0.35
		⑥  はり: スギ集成材(異等級構成 構造用集成材)105×240 被覆材: 木材(スギ)45厚 (留め間隔:455)	10.42	0.31	0.28

実施工小型パネル試験体(せっこうボード9.5厚被覆 中央目地)

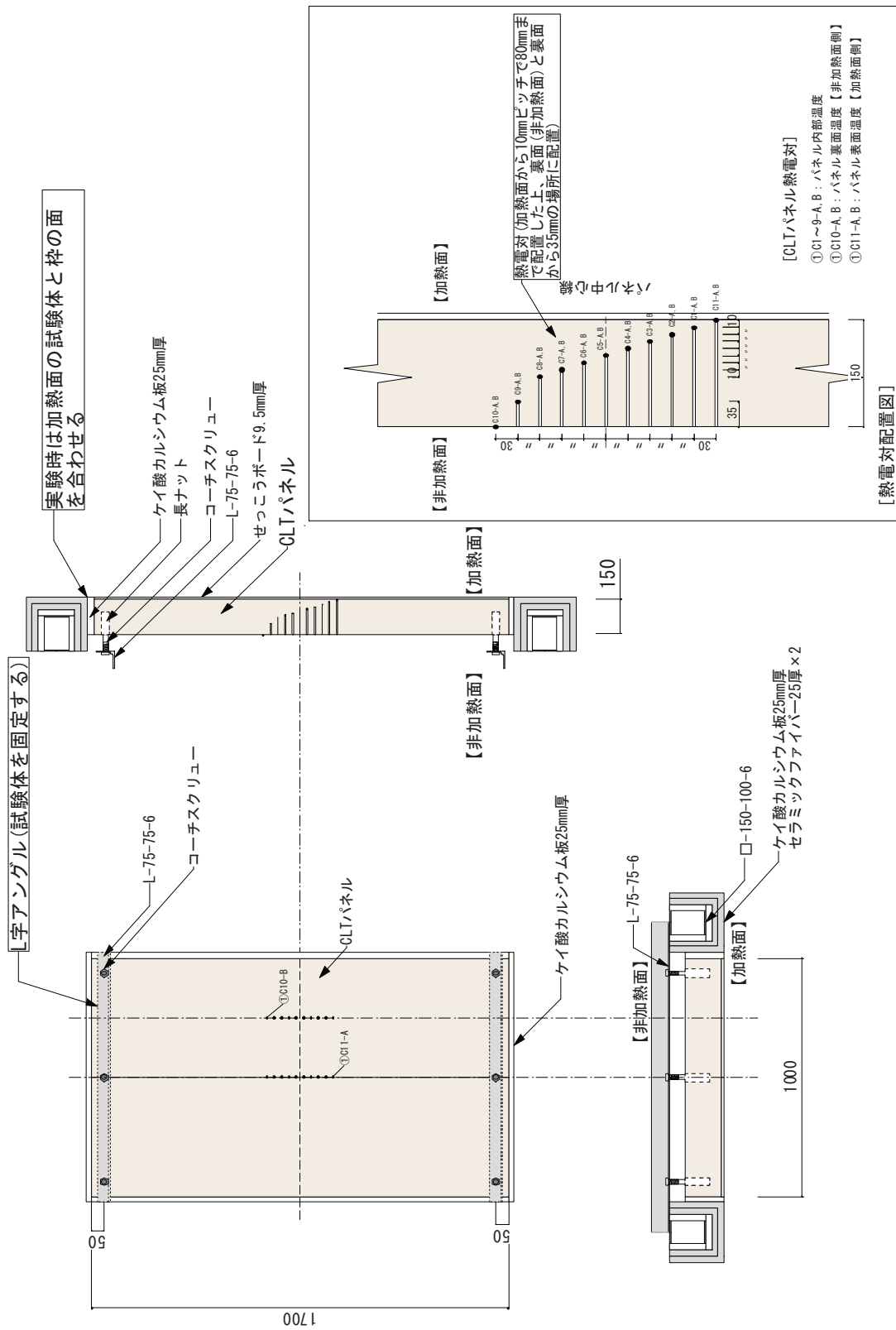
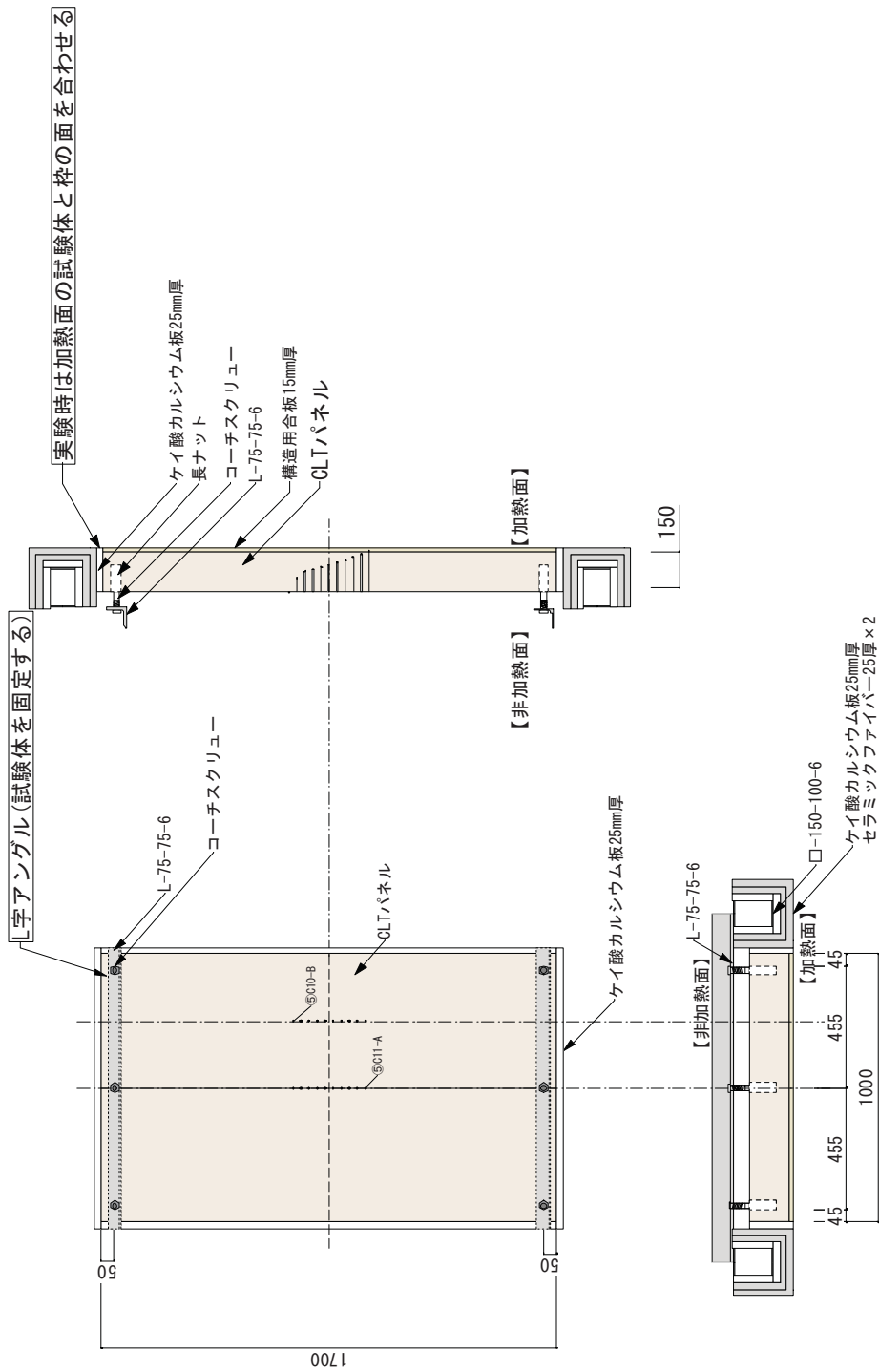


図 2.2.2-1 KF-3 試験体図 1

【実施工小型パネル試験体(木材15厚被覆 中央目地)】

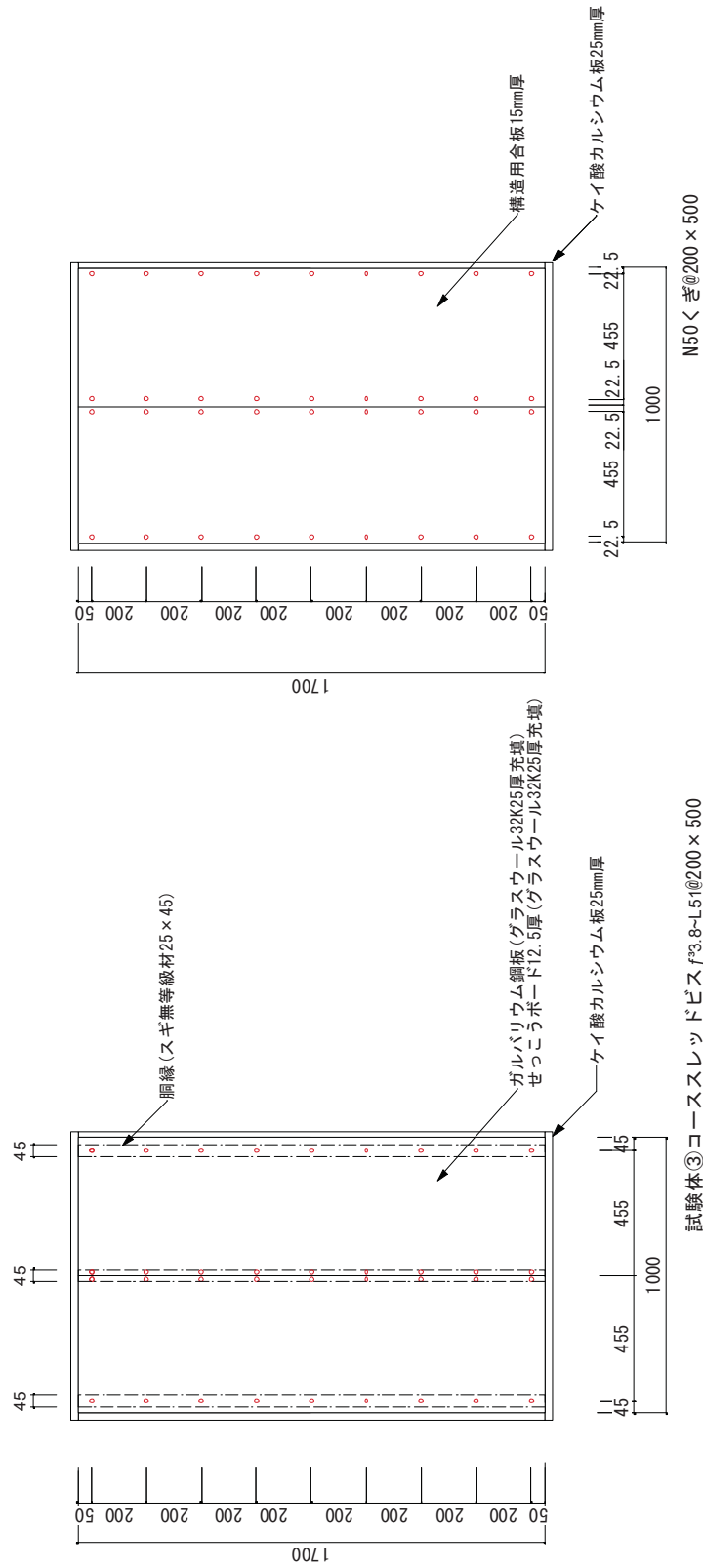


【熱電対配置図】

図 2.2.2-5 KF-3 試験体図 5

KF-3試験体③
 (金属板被覆(ガラスウール32K25厚充填)胴縁、中央目地)
 KF-3試験体④
 (せっこうボード12.5厚被覆(ガラスウール32K25厚充填)胴縁、中央目地)

KF-3試験体⑤(木材15厚被覆 中央目地)



試験体③コーススレットビスf3.8-L1.5@200×500
 試験体④コーススレットビスf3.8-L1.65@200×500

図 2.2.2-8 KF-3 被覆割り付け図 2

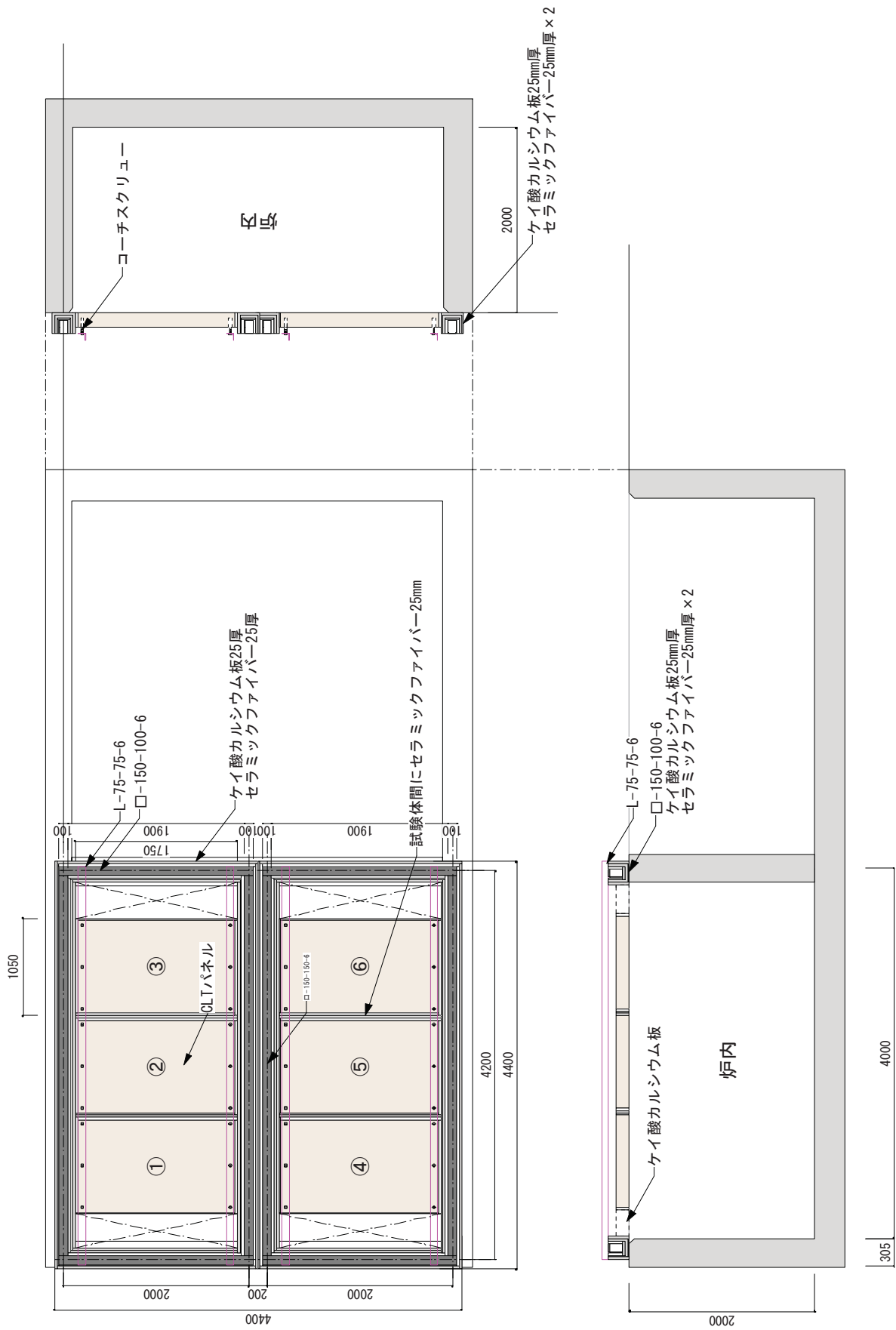


図 2.2.2-9 KF-3 配置図

2. 2. 3 実験方法

耐火試験は、国立研究開発法人 建築研究所の水平炉（図 2. 2. 3-1）を使用し、「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準拠した加熱実験より求めた。

（1）加熱方法

IS0834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行い、以下の場合に試験を中止する事とした。

- ・ 試験体非加熱面より 30mm 内部に設置した熱電対が 200℃に達するまでを目途とする。

（2）載荷方法

実験は非載荷で行った。

（3）測定項目

①試験体内部温度

K 熱電対（0. 32mm 径）を深さ方向に 10mm ピッチで設置し（ただし、はりの予備実験については、はりの表面に 11 点および 10mm 内側に 4 点の計 15 点配置し）、内部温度の変化を 15 秒間隔で測定した。

②炉内温度

シース型 K 熱電対を試験体の加熱面から約 10cm 離れた位置に 12 点配置し、試験中の耐火炉内温度を 15 秒間隔で測定した。

③炭化速度

試験体内部に配した熱電対の温度上昇履歴より、木材の着火温度とされる 260℃に達するまでに要した時間から炭化速度を求めることとした。ただし、後に示す温度上昇履歴をみると分かるように、稀に 260℃付近で温度停滞を示す傾向が見られたため、200℃到達時間から求めた炭化速度も併記することとした。炭化速度の算定には、木質パネル表面における温度到達時間のうち、目地部で観測された早い方の温度到達時間を基準として 1 次式を想定し、最小二乗法により傾きを求めた。

④炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した。

⑤含水率

試験体に使用した CLT パネルと同時期に作成されたサンプルを、試験体と同条件下で養生し、105℃の絶乾状態に設定した恒温恒湿器を用いて 5 日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率の計算式を以下に示す。

含水率 (%) = { (絶乾前の重量 - 絶乾後の重量) / 絶乾後の重量 } × 100

⑥その他

試験体加熱面及び非加熱面の目視観察、VTR 撮影、写真撮影、試験体非加熱面の熱映像撮影等を行った。

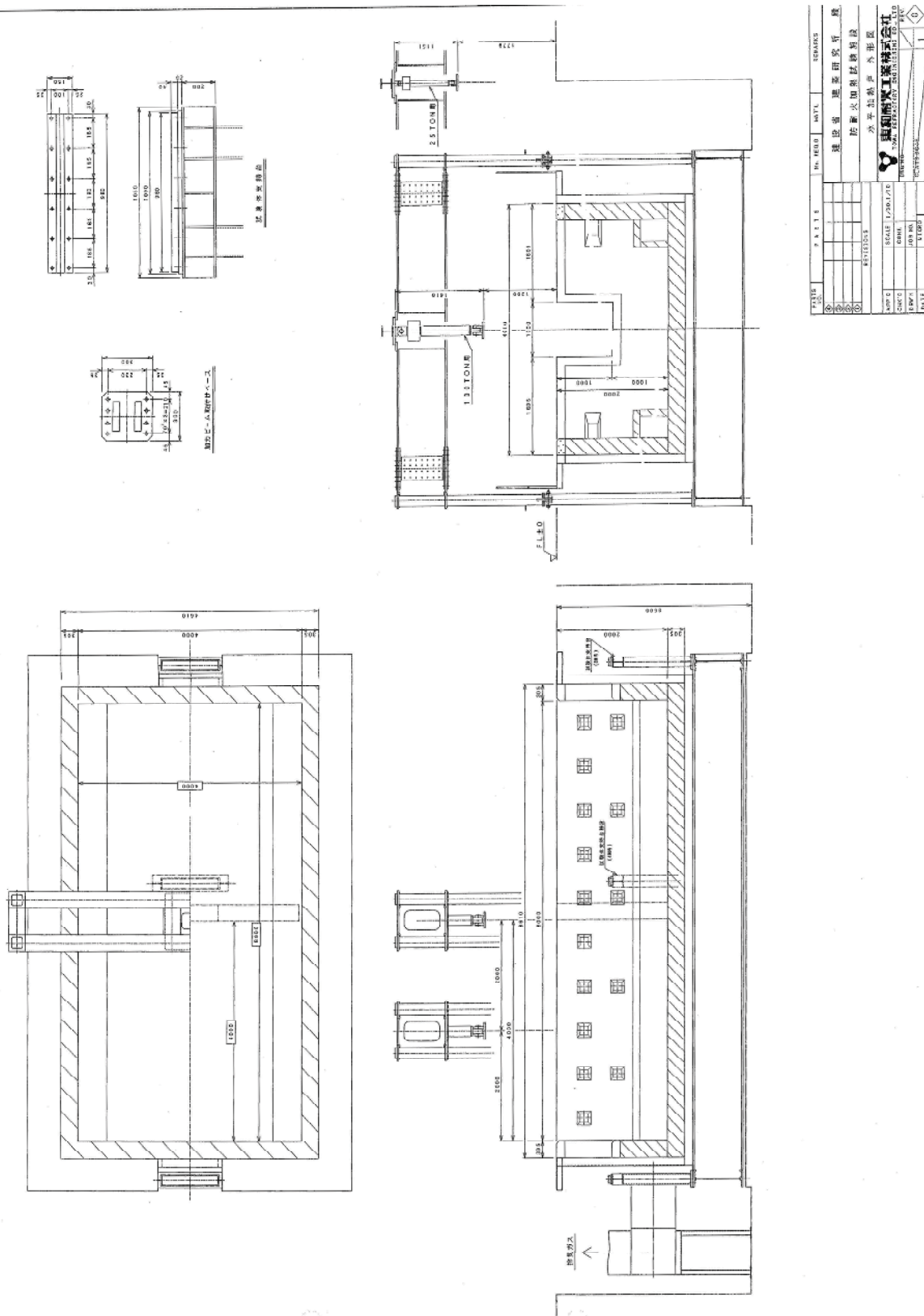


図 2.2.3-1 水平炉図面

FIG. NO.	1
DATE	
REV.	
SCALE	1/200
PROJECT	防衛省 防衛研究所 防衛研究所 防衛研究所
DESIGNER	防衛研究所 防衛研究所
CHECKER	防衛研究所 防衛研究所
APPROVED	防衛研究所 防衛研究所
DATE	
SCALE	1/200
PROJECT	防衛省 防衛研究所 防衛研究所 防衛研究所
DESIGNER	防衛研究所 防衛研究所
CHECKER	防衛研究所 防衛研究所
APPROVED	防衛研究所 防衛研究所
DATE	

2. 2. 4 実験結果及び考察

A. 試験写真、B. 加熱温度、C. 試験体内部温度、D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度、E. 炭化状況を示す。

A. 試験写真



写真 2. 2. 4-1 試験体 KF-3 (加熱前)



写真 2. 2. 4-2 試験体 KF-3 (加熱後)

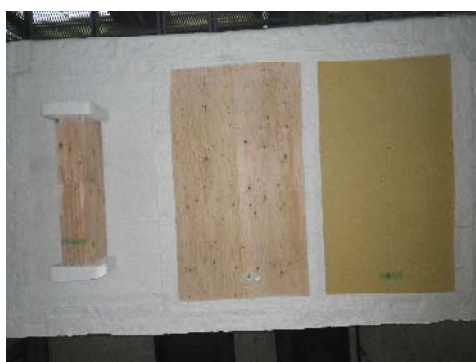


写真 2. 2. 4-3 試験体 KF-3 (加熱前)



写真 2. 2. 4-4 試験体 KF-3 (加熱後)

B. 加熱温度

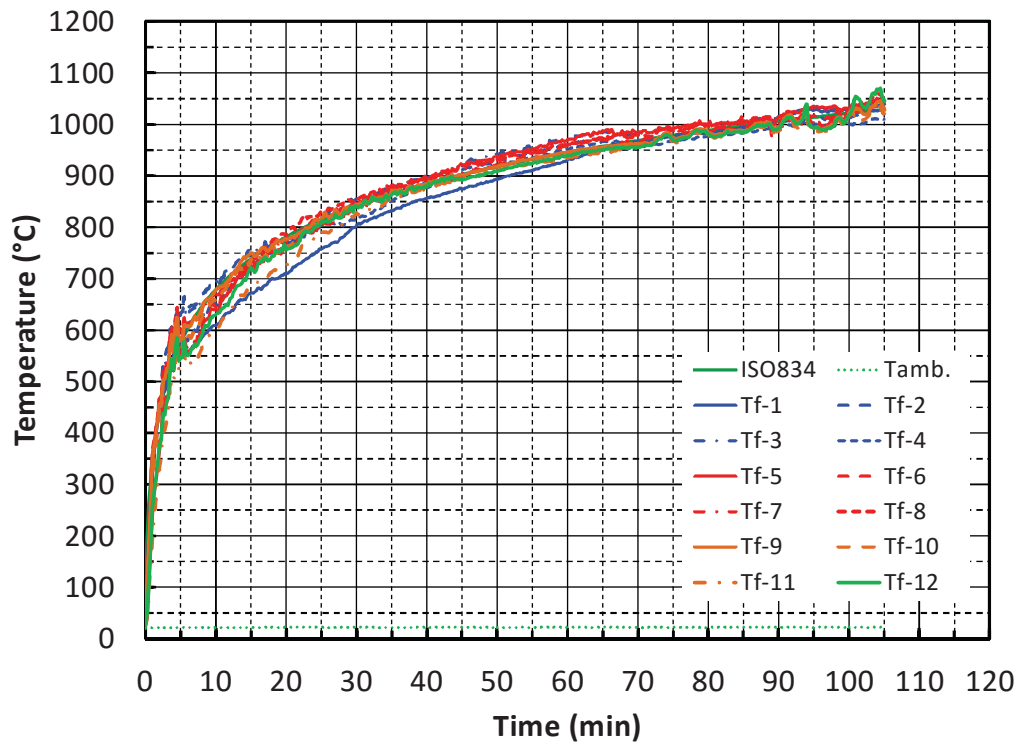


図 2. 2. 4-1 加熱温度

C. 試験体内部温度

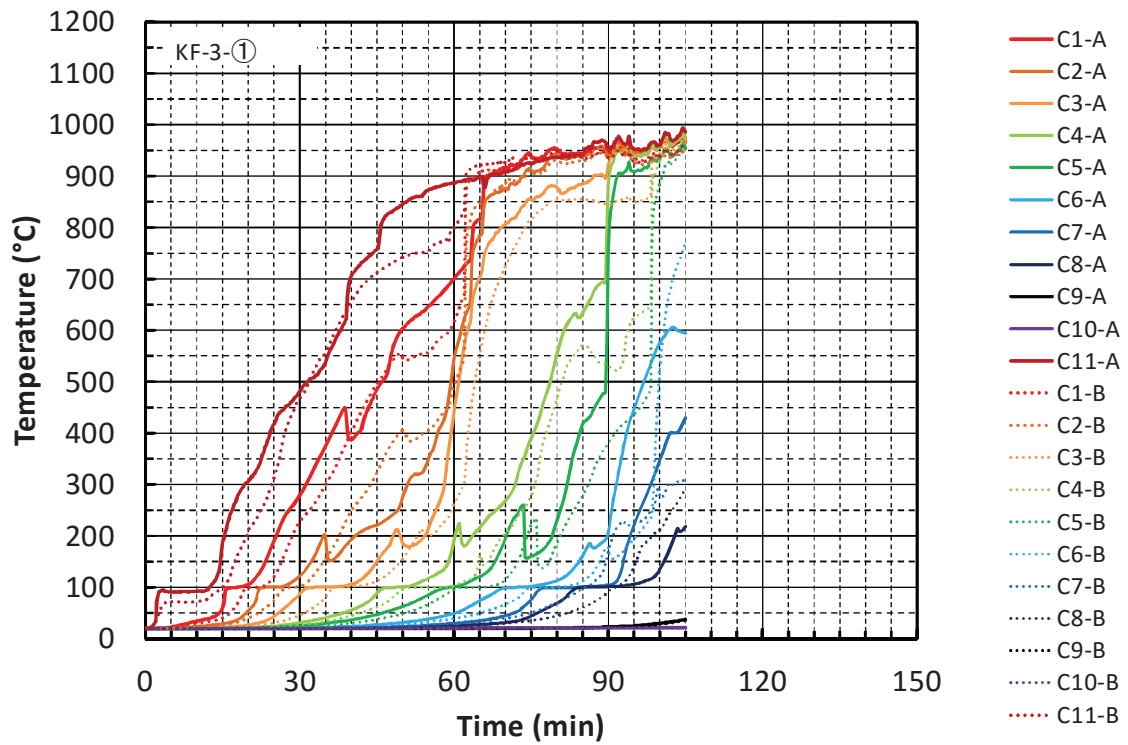


図 2. 2. 4-2 KF-3-① (せっこうボード 9.5mm) -CLT パネル厚 150mm

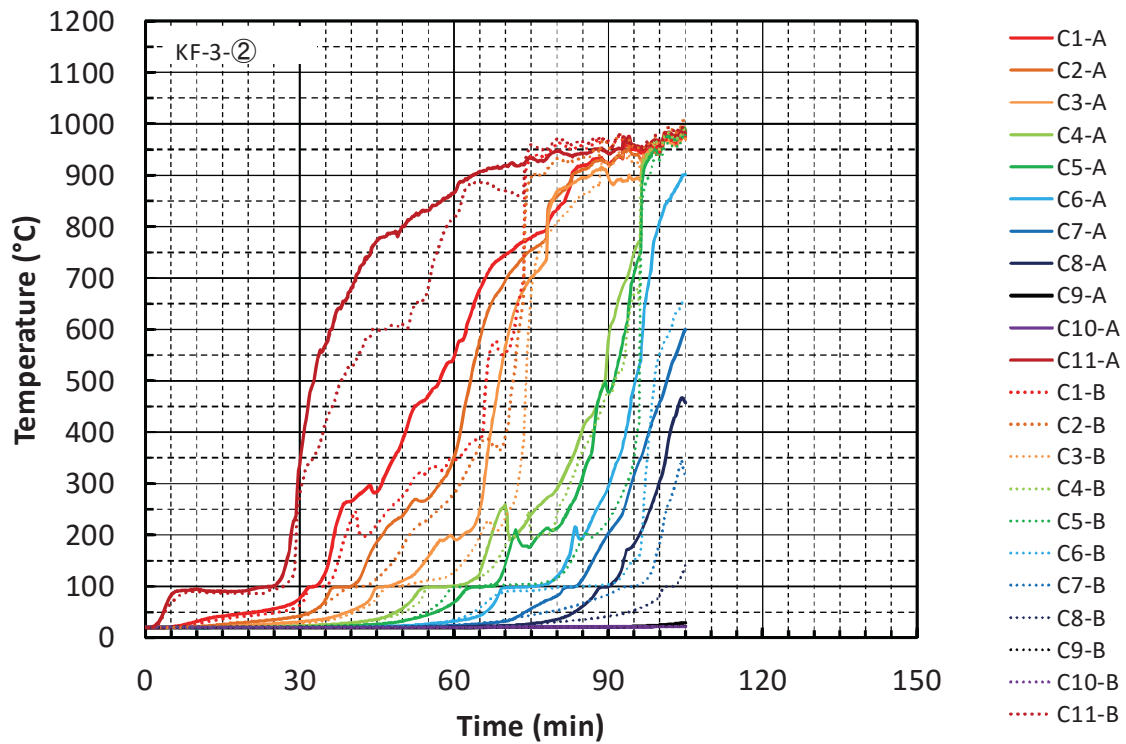


図 2. 2. 4-3 KF-3-② (せっこうボード 15mm) -CLT パネル厚 150mm

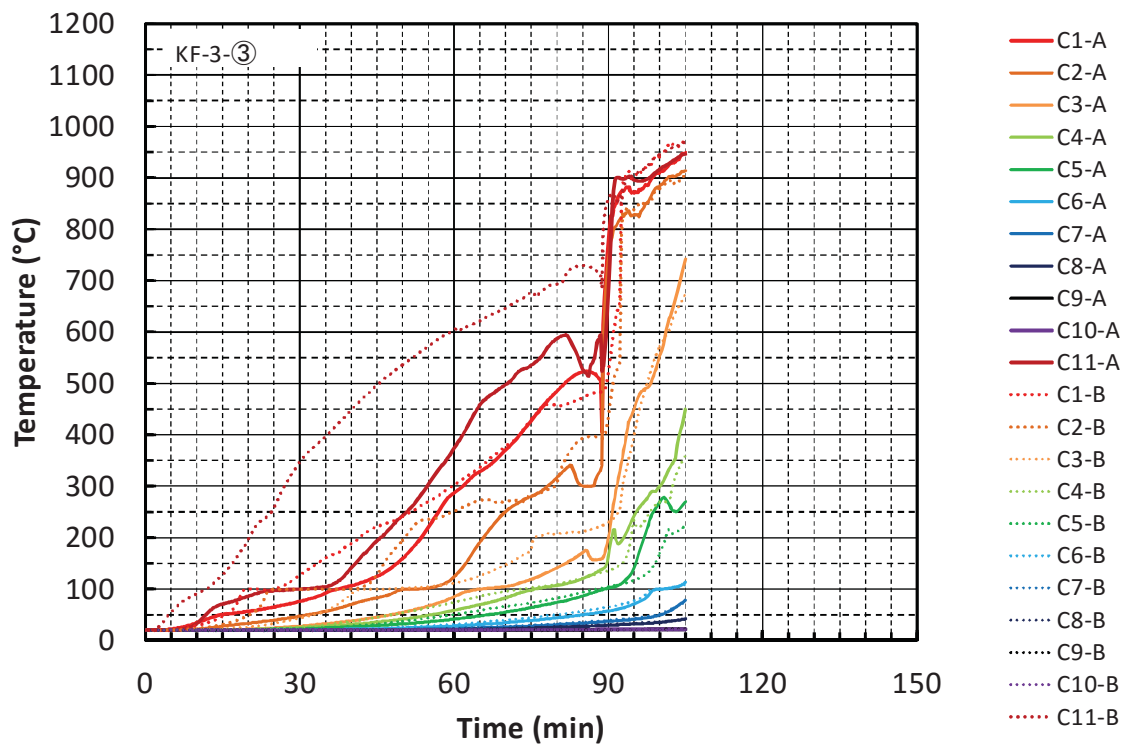


図 2. 2. 4-4 KF-3-③ (ガルバリウム鋼板被覆 GW32K25mm) -CLT パネル厚 150mm

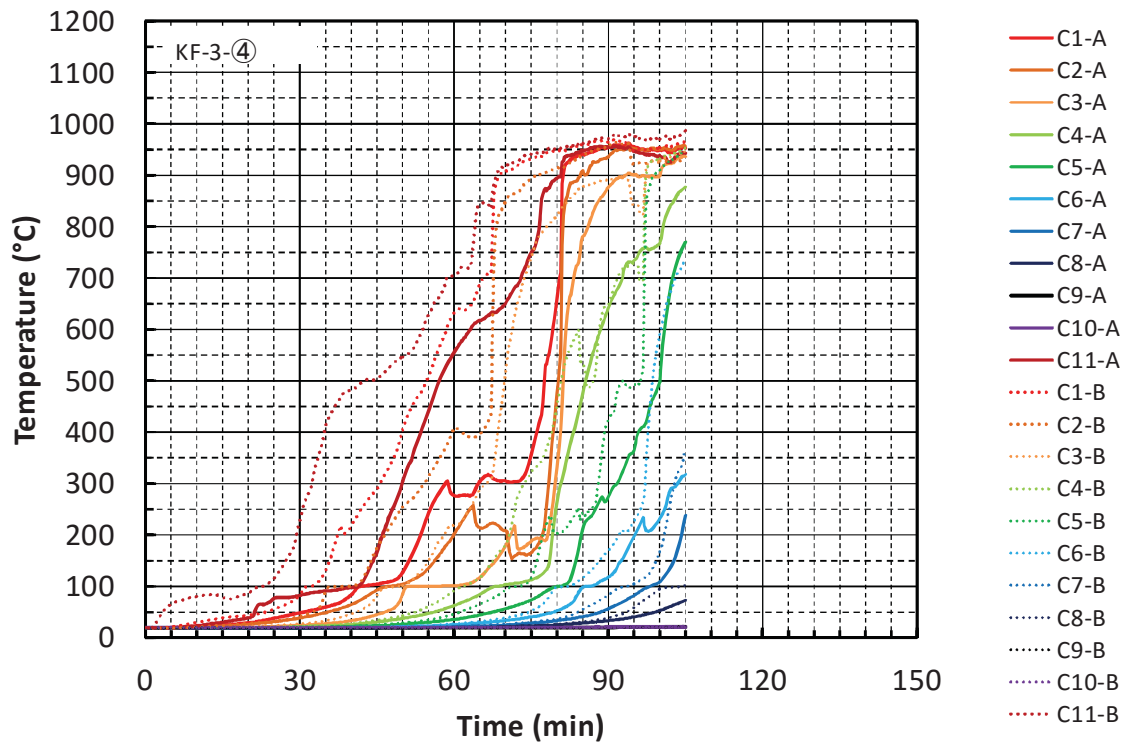


図 2.2.4-5 KF-3-④ (せっこうボード 12.5 mm + GW32K25mm) -CLT パネル厚 150mm

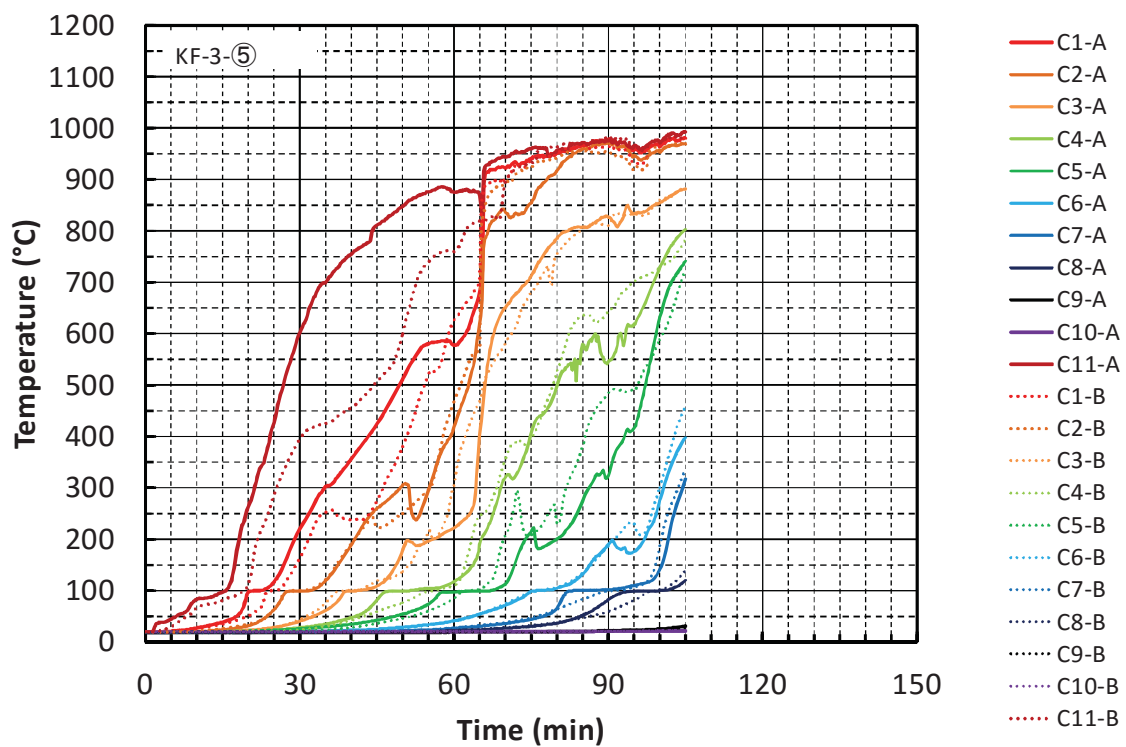


図 2.2.4-6 KF-3-⑤ (木材 15mm) -CLT パネル厚 150mm

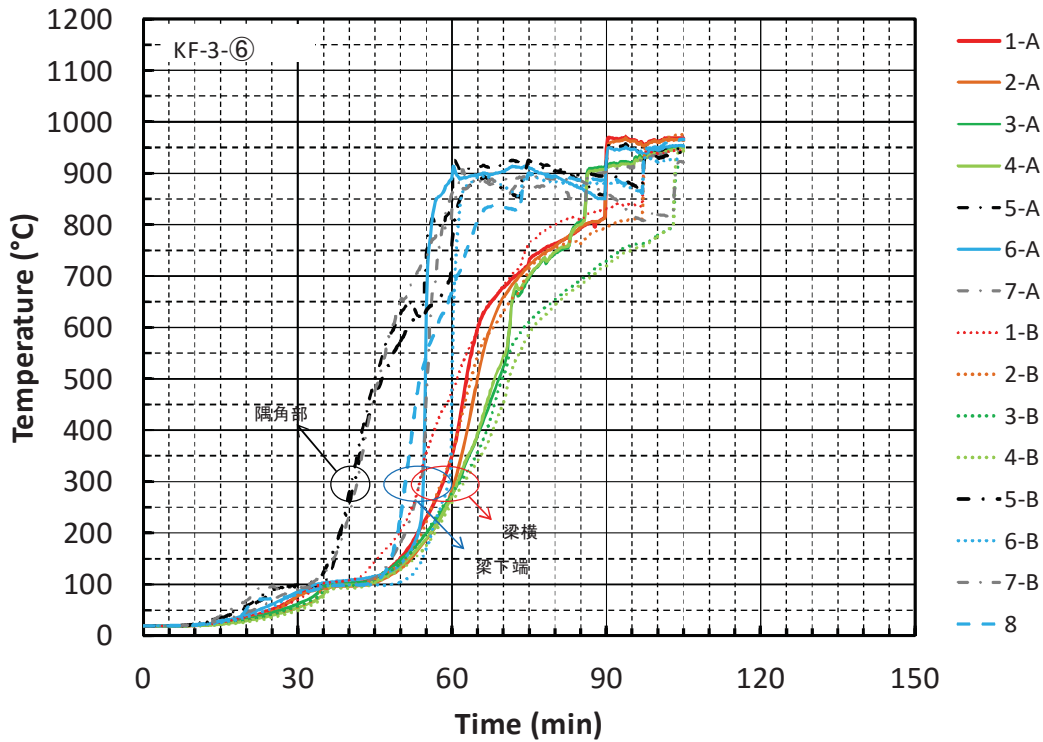


図 2.2.4-7 KF-3-⑥ (木材 45mm) 集成材はり 105×240mm

D. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度 (mm/min) を直線の傾きとして示す。変数 'x' は到達時間 (min) の意である。

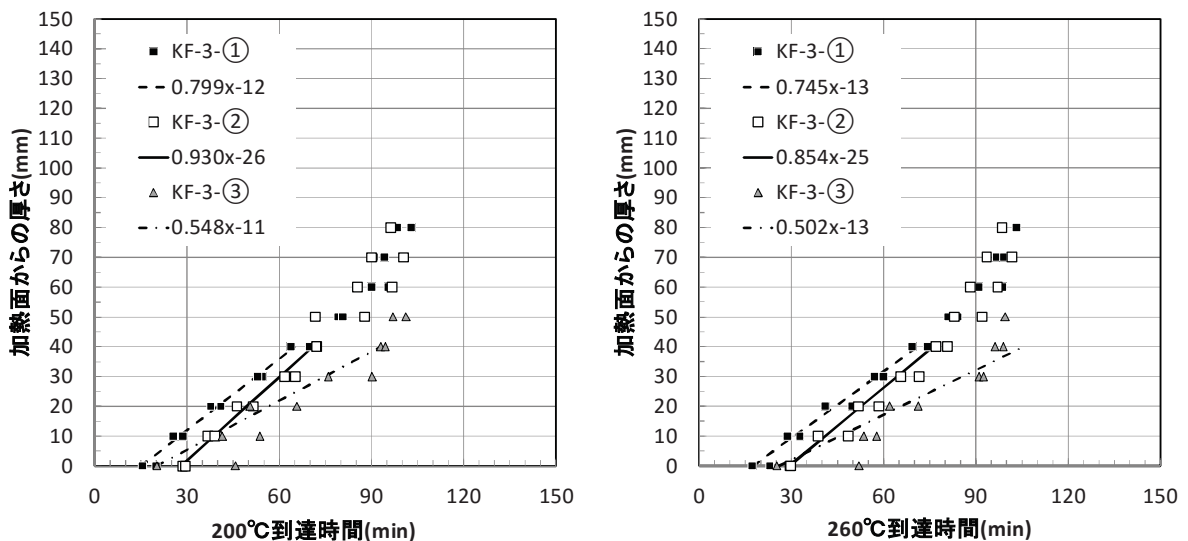


図 2.2.4-8 温度到達時間 KF-3-①～③

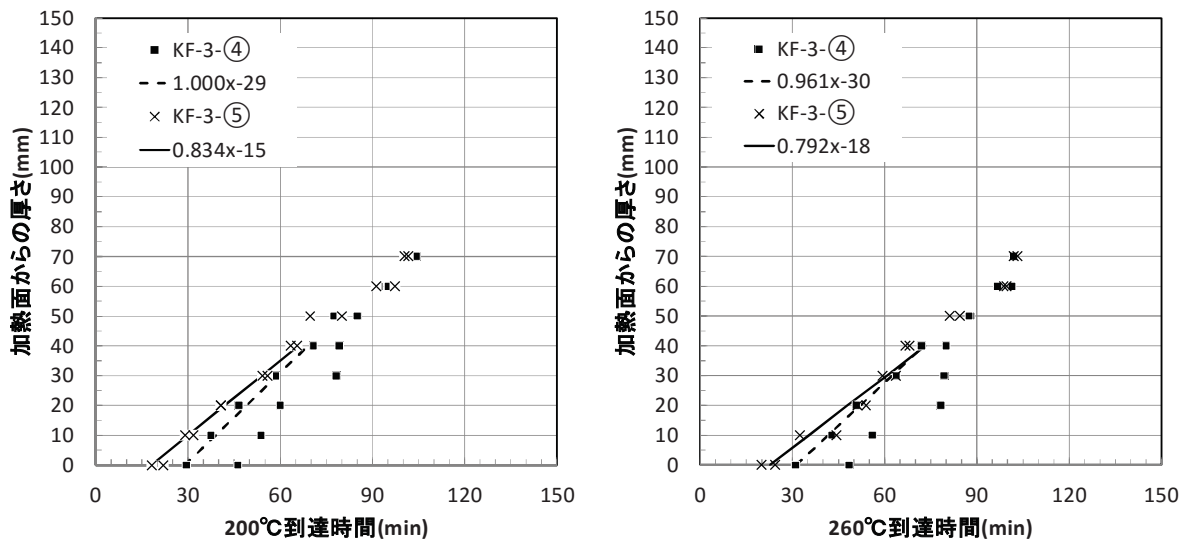


図 2.2.4-9 温度到達時間 KF-3-④、⑤

E. 炭化状況

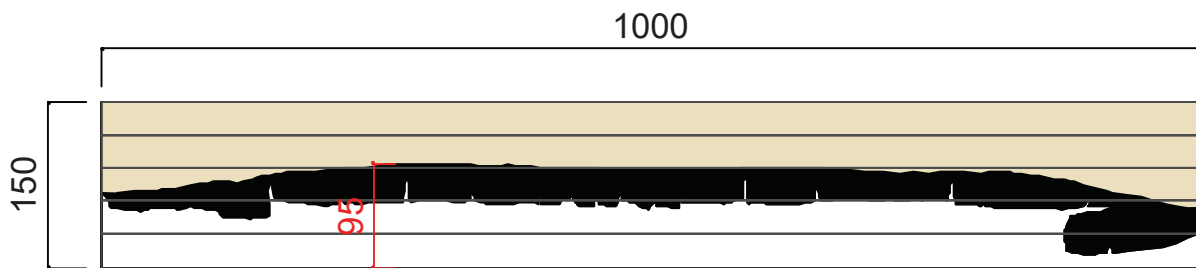


図 2.2.4-10 KF-3-①炭化図

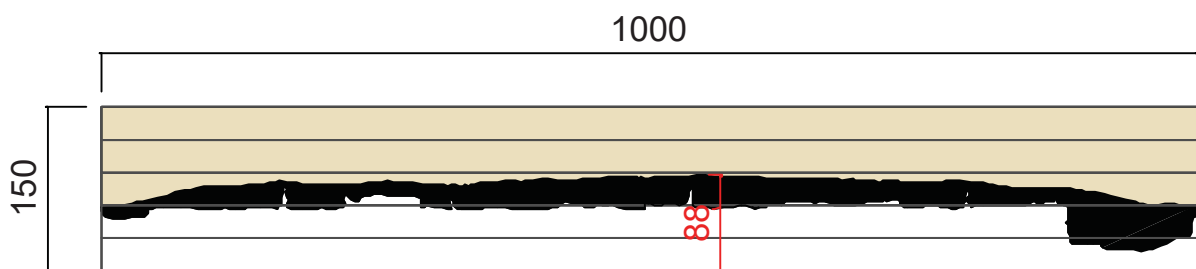


図 2.2.4-11 KF-3-②炭化図

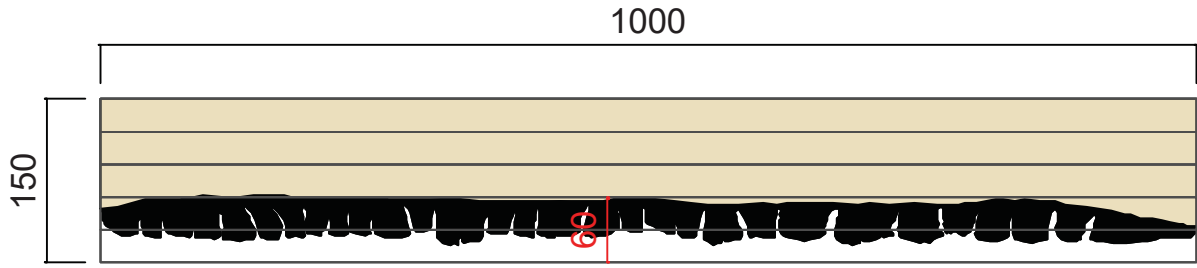


图 2.2.4-12 KF-3-③炭化图

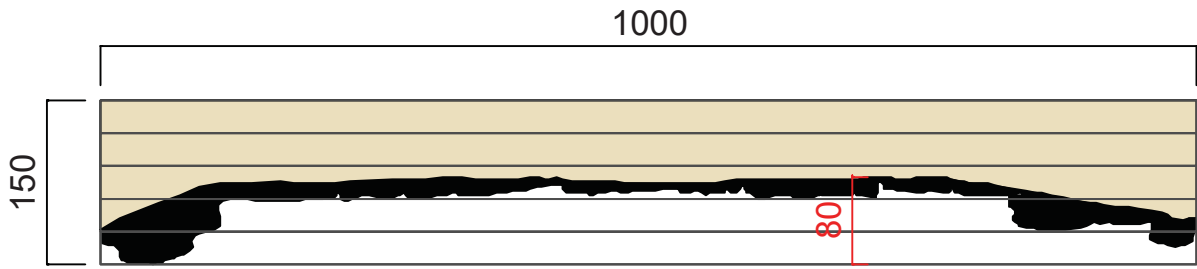


图 2.2.4-13 KF-3-④炭化图

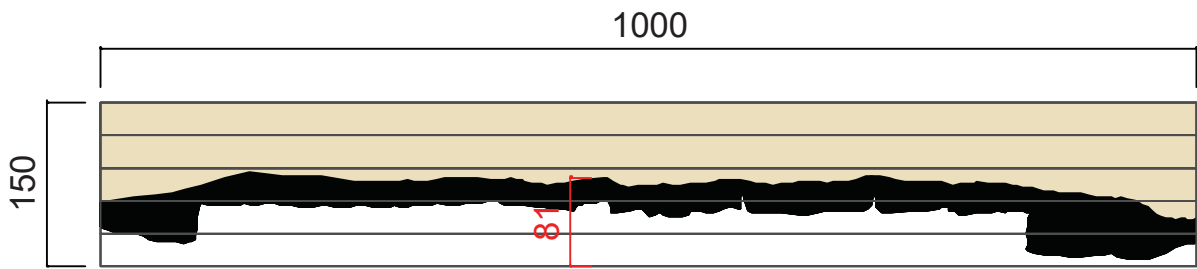


图 2.2.4-14 KF-3-⑤炭化图

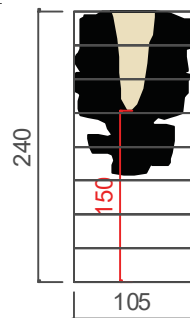


图 2.2.4-15 KF-3-⑥炭化图

表 2.2.5-1 に留め付け方法を変化させた場合の防火被覆による炭化抑制効果をまとめて示す。今回の実験では中央目地を設けた影響で、目地部と一般部で温度到達時間に開きが見られた。そのため炭化速度の算定には、目地部で観測された早い方の温度到達時間を基準として、木質パネル表面での温度到達時間を通る 1 次式を想定し、最小二乗法により傾きを求めた。また炭化速度を示す傾きが断面内部で変化する傾向が見られたため、変曲点の見られる前の加熱面からの厚さ 40mm までの温度到達時間より炭化速度を求めている。







目地を設けず細かい留めつけ間隔で行った実験結果（表 2.1.5-1）と比較すると、同じせっこうボード 15 mm 厚被覆の場合（KF-3-②）で、炭化開始時間が約 23 分早くなっていることが分かり、目地を設けた影響が見られる。また留め付け材に用いた GN40 の釘先端部を支持しているラミナ層（加熱面より約 30mm 内側）の炭化後に、炭化速度が上昇する傾向が見られており、留め付け方法の違いにより、炭化速度にも違いが生じることが分かる。

断熱材（GW25 mm 厚）を裏打ちした仕様（KF-3-③、④）では、同断面での温度到達時間にばらつきが大きいですが、こちらも留め付け材（③ビス L51 および④ビス L65）を支持しているラミナ層（加熱面より約 30mm 内側）の炭化後に被覆材が脱落するとみられ、温度到達時間のばらつきが解消されるとともに、炭化速度も上昇することが分かる。またガルバリウム鋼板に断熱材を裏打ちした場合は、木質パネル表面の炭化開始時間が 9.5 分→25.25 分と大幅に遅らせることができることが分かる。せっこうボードに断熱材を裏打ちした場合は、熱的に薄い金属板と比べてせっこうボード単体にある程度炭化抑制効果が期待できるため、断熱材の裏打ちによる効果の上昇率はそれほど大きくはない。

構造用合板 15 mm 厚で被覆した仕様（KF-3-⑤）では、木質パネル表面の炭化開始時間が約 22 分と、素地の場合（6.5 分）と比べ約 15 分程度遅らせることができることが分かった。防火被覆を基材と同質の木質材料で構成する場合は、炭化速度を約 1mm/分と考えて基材に必要な燃えしろ分から差し引くことが可能と考えられる。

ただしはりの予備実験結果では、はり側面とはり下面では 45mm 厚の被覆木材が炭化に要した時間が 54.4 分および 56.9 分と、炭化速度に換算して 1mm/分以下で炭化が進んでいることが分かるが、隅角部においては 43.4 分と 1mm/分以上の炭化速度が観測されており、壁や床のように 1 次元での熱の伝わりを対象とする場合に比べ、柱や梁のように 2 次元での熱の伝わりを想定する場合は、木材被覆分の炭化速度を若干割増す必要があると考えられる。

表 2.2.5-1 留め付け方法の違いによる炭化抑制効果一覧表

試験体No.	仕様	載荷荷重	加熱時間	結果(200°C到達時間)			結果(260°C到達時間)			
				炭化開始時間	炭化速度(mm/分)	60分時燃えしろ寸法	炭化開始時間	炭化速度	60分時燃えしろ寸法	
KF-3	 CLTパネル 150厚 せっこうボード 9.5厚	C150パネル せっこうボード9.5厚中央目地 GN40@200x500被覆	—	104分30秒	15.5分	0.799	36mm	17.25分	0.745	32mm
	 CLTパネル 150厚 せっこうボード 15厚	C150パネル せっこうボード15厚中央目地 GN40@200x500被覆	—		28.5分	0.930	30mm	29.5分	0.854	24mm
	 CLTパネル 150厚 せっこうボード 12.5厚 GW32x25厚	C150パネル ガルバ0.35厚 ビスL51@200x500被覆 +GW25厚	—		20.25分	0.548	22mm	25.25分	0.502	17mm
	 CLTパネル 150厚 ガルバリウム鋼板 0.35厚 GW32x25厚	C150パネル 石膏ボード12.5厚 ビスL65@200x500被覆 +GW25厚	—		29.5分	1.000	31mm	31分	0.961	28mm
	 CLTパネル 150厚 構造用合板 15厚	C150パネル 構造用合板15厚 N50@200x500被覆	—		18.25分	0.834	35mm	22.125分	0.792	30mm
	仕様		載荷荷重		結果(260°C到達時間)					
				隅角部			梁下端		梁横	
 G梁 木材45厚被覆		—		43.4分		54.4分		56.9分		

2. 3 防火被覆の炭化抑制効果を考慮した厚板床の載荷加熱実験 (F-1~4)

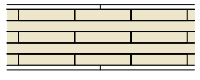
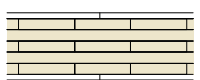
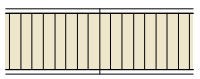
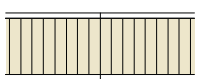
2. 3. 1 実験概要

小型試験体で確認した 60 分時の燃えしろ寸法あるいは燃え残り断面 (実測値) を基に燃えしろ設計を行った実大の試験体に対して載荷加熱実験を行い、燃えしろ設計の成立可否と、載荷加熱条件下での炭化速度を把握した。

2. 3. 2 試験体概要

試験体は表 2. 3. 2-1 および図 2. 3. 2-1~5 に示すとおりとした。

表 2. 3. 2-1 試験体表 (比重・含水率)

部材種類	試験体 No.	仕様 (mm)	含水率 (%)	比重	
				気乾	全乾
床	F-1	 CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚	9.41	0.42	0.38
	F-2	 CLT(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚			
	F-3	 集成材(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード12.5厚	11.15	0.42	0.38
	F-4	 集成材(スギ)150厚 被覆材: せっこうボード15厚			

CLT 及び集成材パネルの縦振動法による実測のヤング係数 (kN/mm^2) は、F-1 [CLT:5.22、4.75]、F-2 [CLT:6.19、6.06]、F-3 [集成材:8.75、8.08]、F-4 [集成材:8.59、7.60] であった。

CLT床実大試験体(せっこうボード12.5厚被覆)

使用接着剤：API接着剤
 CLTパネル仕様：ラミナ厚30mm、5層、パネル厚150mm
 ばばぎ接着：なし

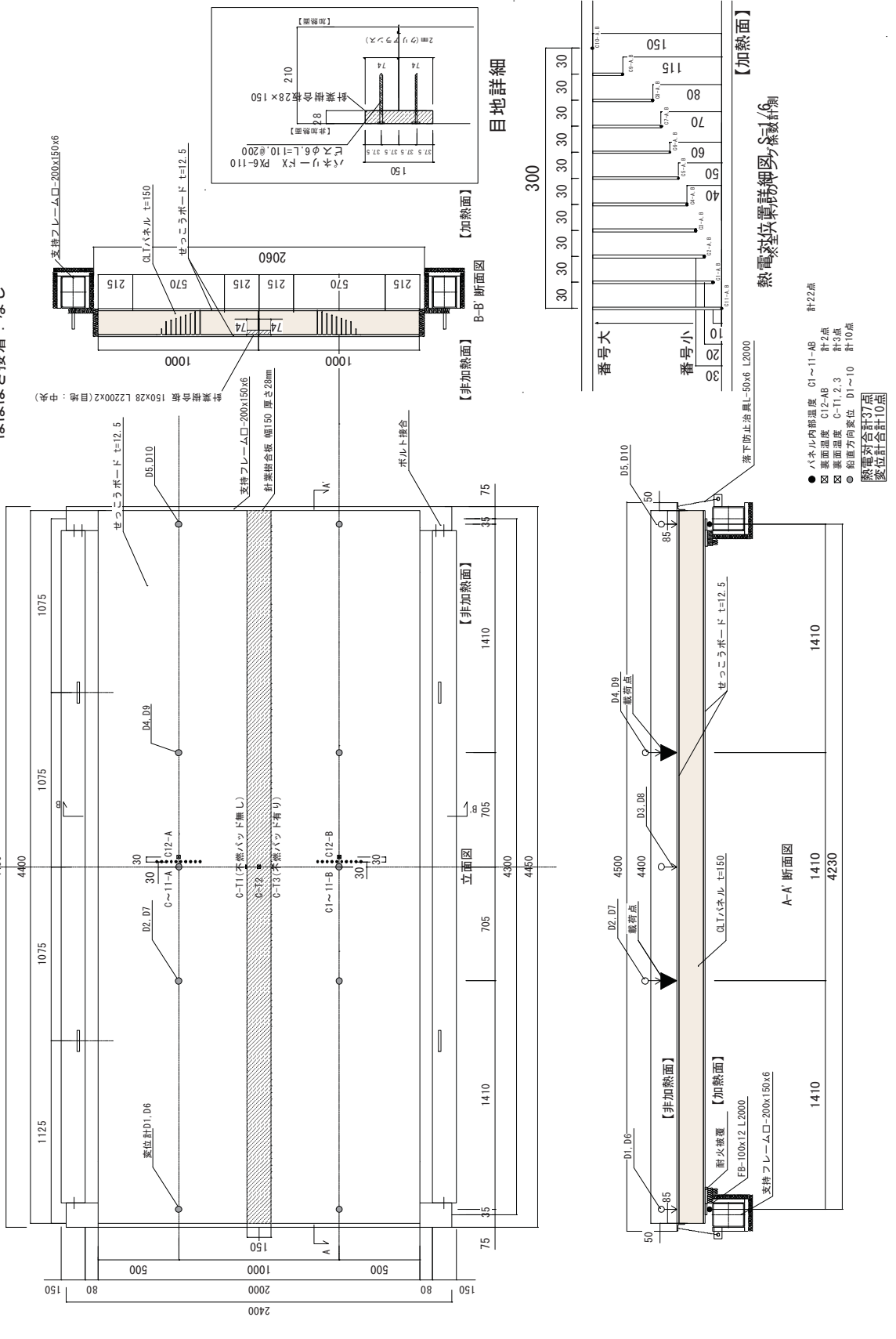


図 2.3.2-1 F-1 試験体図

集成材床パネル試験体(せっこうボード15厚被覆)

使用接着剤：API接着剤
集成材パネル仕様：パネル厚150mm

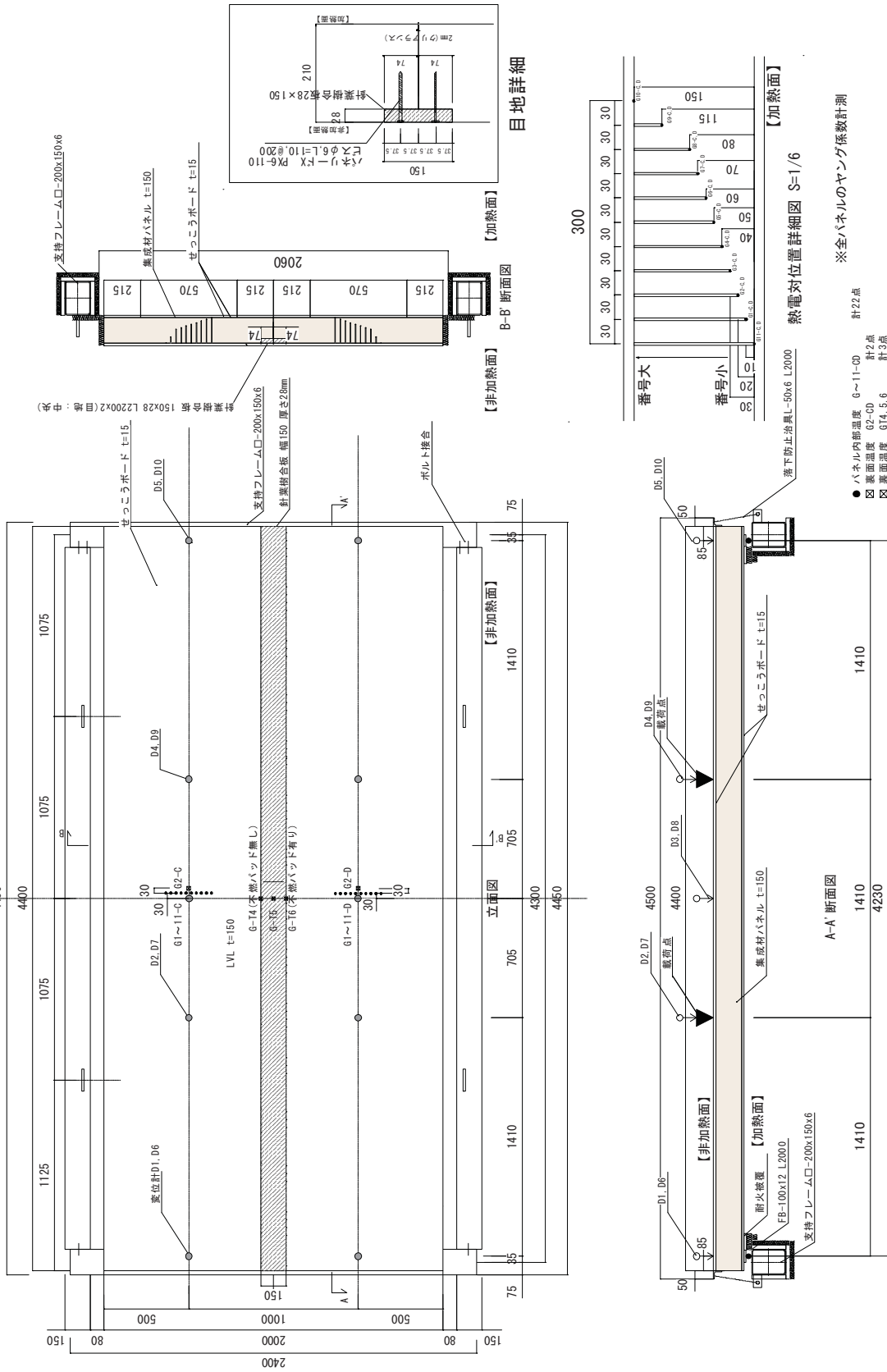


図 2.3.2-4 F-4 試験体図及び測定点

CLT, 集成材床パネル試験体割付(せこうボード12.5厚, 15厚被覆共通)

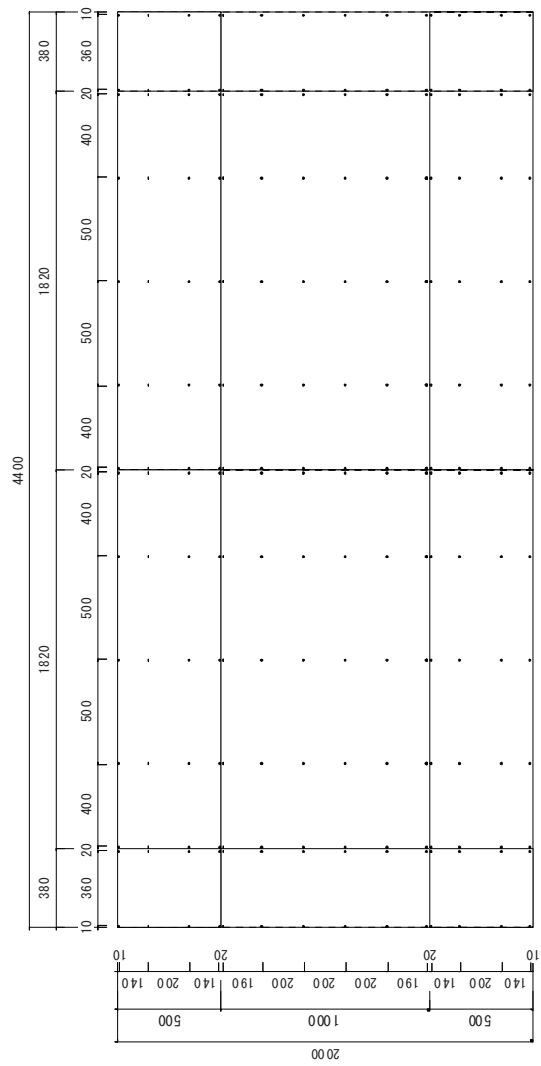


図 2.3.2-5 被覆材割り付け図

2. 3. 3 実験方法

耐火試験は、国立研究開発法人 建築研究所の水平炉（図 2.3.3-1）を使用し、「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準拠した加熱実験より求めた。

（1）加熱方法

IS0834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行い、以下の場合に試験を中止する事とした。

- ・ 試験体非加熱面への火炎貫通により実験の継続が困難となった場合。
- ・ 床の座屈による変形が進み、載荷の継続が困難となった場合。
- ・ 上記以外で安全上問題があるとした場合。

（2）載荷方法

加熱される試験体に油圧ジャッキを用いて荷重を加えた。各試験体の載荷荷重の設定方法は試験体ごとに次項の実験目的および載荷荷重に記す。

（3）測定項目

①試験体内部温度

K 熱電対（0.32mm 径）を深さ方向に 10mm ピッチで設置し、内部温度の変化を 15 秒間隔で測定した。

②炉内温度

シー型 K 熱電対を試験体の加熱面から約 10cm 離れた位置に 12 点配置し、試験中の耐火炉内温度を 15 秒間隔で測定した。

③変位量

試験体非加熱面に巻き取り式変位計を設置し、変位量を 15 秒間隔で測定した。

④炭化速度

試験体内部に配した熱電対の温度上昇履歴より、木材の着火温度とされる 260℃に達するまでに要した時間から炭化速度を求めることとした。ただし、後に示す温度上昇履歴をみると分かるように、稀に 260℃付近で温度停滞を示す傾向が見られたため、200℃到達時間から求めた炭化速度も併記することとした。炭化速度の算定には、木質パネル表面における温度到達時間の平均値を通る 1 次式を想定し、最小二乗法により傾きを求めた。

⑤炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した。

⑥含水率

試験体に使用した CLT パネルと同時期に作成されたサンプルを、試験体と同条件下で養

生し、105℃の絶乾状態に設定した恒温恒湿器を用いて5日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率の計算式を以下に示す。

$$\text{含水率(\%)} = \{ (\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) / \text{絶乾後の重量} \} \times 100$$

⑦その他

試験体加熱面及び非加熱面の目視観察、VTR撮影、写真撮影、試験体非加熱面の熱映像撮影等を行った。

2. 3. 4 実験結果及び考察

耐火試験は合計4回行った。各回ごとにA. 実験目的および載荷荷重、B. 試験写真、C. 加熱温度、D. 試験体内部温度、E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度、F. 変位量と載荷荷重、G. 炭化状況を示す。

(1) 床載荷加熱試験：F-1

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、ラミナ積層数が30mm・5層5ply（総厚150mm）、幅はぎ接着なしのCLTパネルに、せっこうボード12.5mm厚を被覆して構成した床に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、加熱60分時の燃えしろ寸法を小型試験の結果より27mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重(曲げ耐力に安全率2/3を乗じた荷重)を設定した。

表 2.3.4.(1)-1 Mx60-5-5 積載荷重

		0mm燃えしろ	27mm燃えしろ
層構成		5-5	5-5
ラミナ強度		Mx60A	Mx60A
b	mm	2000	2000
		150	150
D	mm	150	123
最外層ラミナヤング	N/mm ²	6000	6000
図心(上端からの距離)	mm	75	69.6
E _{eff}	Nmm ²	2.6595E+12	1.22E+12
I _{all}	mm ⁴	562,500,000	310,144,500
E _{eff}	N/mm ²	4728	3921
E _{eff} /E ₁		0.79	0.65
ラミナ基準強度f _b (平均値)	N/mm ²	27.00	27.00
CLT 基準強度f _{eff} (平均値)	N/mm ²	21.28	17.64
①f _b eff*.65	調整係数	13.83	11.47
基準強度下限値(ばらつき15%)	②*.0.75	10.4	8.6
短期	*2/3	6.91	5.73
基準強度時M(kNm)=σ b*Z _{eff}		77.78	38.32
短期時M(kNm)=σ b*Z _{eff} *2/3	0.666667	51.85	25.55
長期時M(kNm)=σ b*Z _{eff} *1.1/3	0.366667	28.52	14.05
スパンL		4.23	4.23
L/3		1.41	1.41
短期			
P/2		36.77	18.12
P		73.55	36.24
長期用			
P/2		20.23	9.97
P		40.45	19.93

B. 試験写真



写真 2. 3. 4. (1)-1 試験体 F-1 (加熱前)



写真 2. 3. 4. (1)-2 試験体 F-1 (加熱後)

C. 加熱温度

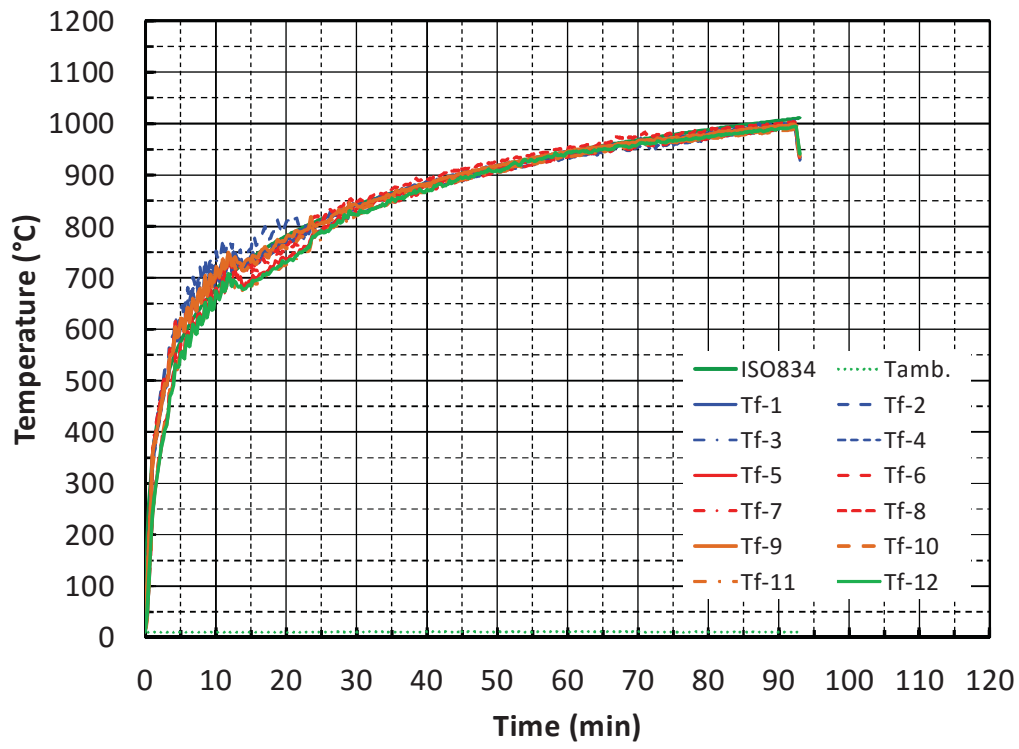


図 2. 3. 4. (1)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

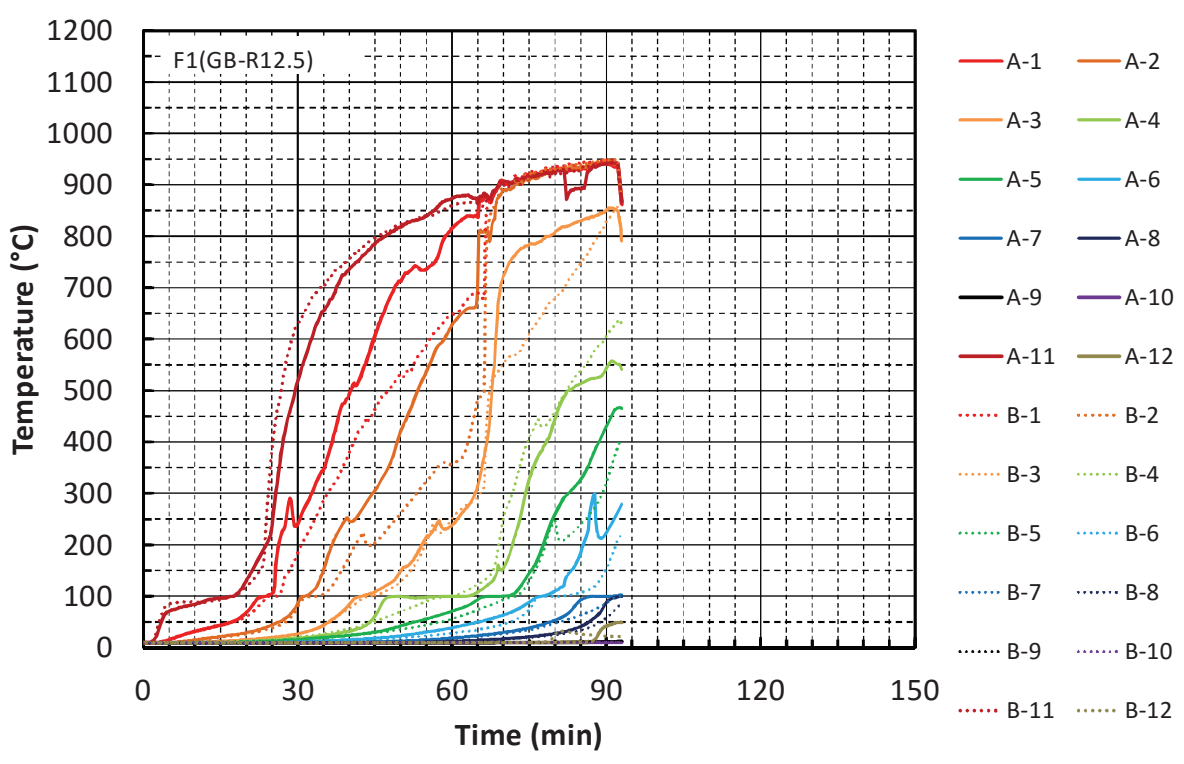


図 2.3.4. (1)-2 F-1 (せっこうボード 12.5mm) -CLT パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同種、同厚の被覆材を用い、基材となる木質系パネルの種類が異なる F-3 の実験結果を並べて示す。(F-1:CLT、F-3:集成材)

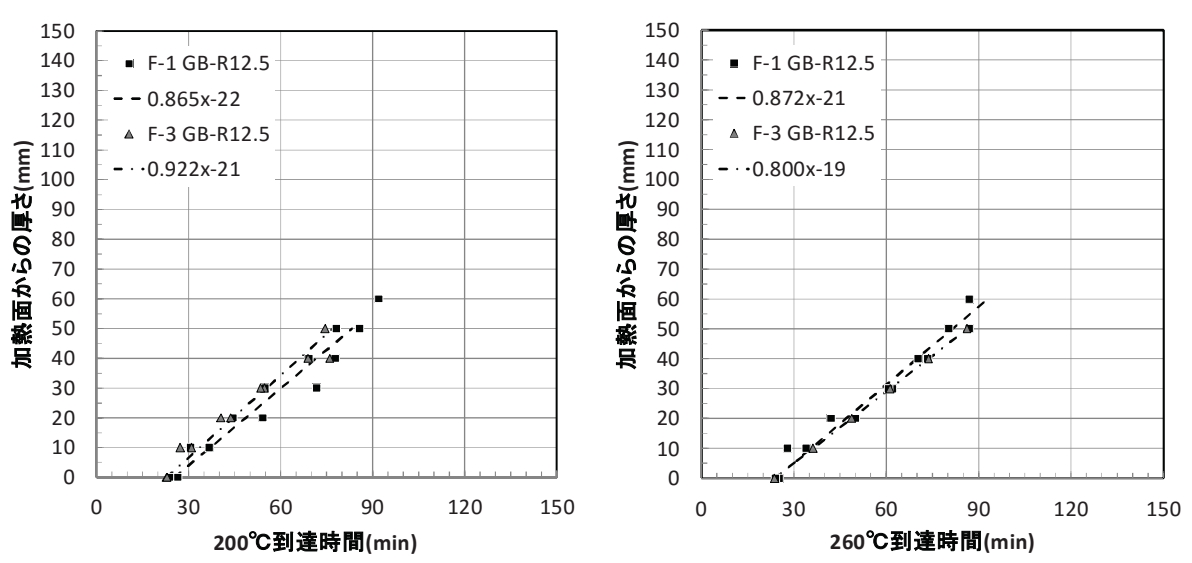


図 2.3.4. (1)-3 温度到達時間 F-1 35.25kN F. 変位量と載荷荷重

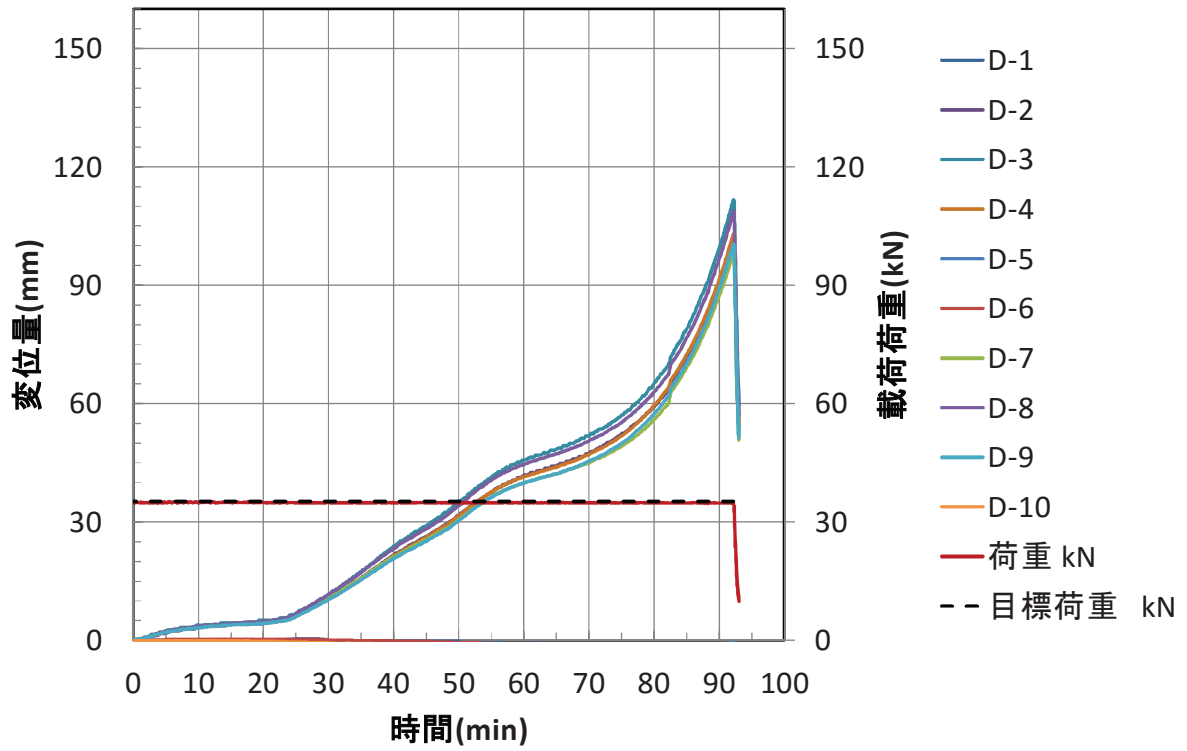


図 2.3.4.(1)-4 載荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

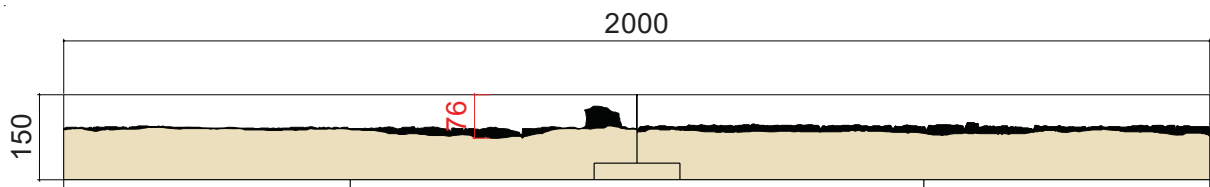


図 2.3.4.(1)-5 F-1 炭化図 (中心目地位置)

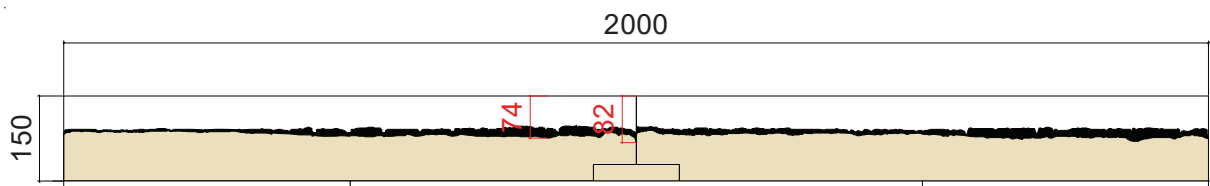


図 2.3.4.(1)-6 F-1 炭化図 (載荷点)

(2) 床載荷加熱試験：F-2

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、ラミナ積層数が30mm・5層5ply（総厚150mm）、幅はぎ接着なしのCLTパネルに、せっこうボード15mm厚を被覆して構成した床に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、F-1の実験で燃えしろ設計が成り立つことが既に確認できているため、今回は加熱前全断面に長期許容応力度が作用する荷重（曲げ耐力に安全率1.1/3を乗じた荷重）を設定した。但し、表2.3.4.(2)-1を見れば分かるようにこの荷重は、加熱60分時の燃えしろ寸法を24mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重とほぼ等しい。

表 2.3.4(2)-1 Mx60-5-5 積載荷重

		0mm燃えしろ	24mm燃えしろ
層構成		5-5	5-5
ラミナ強度		Mx60A	Mx60A
b	mm	2000	2000
		150	150
D	mm	150	126
最外層ラミナヤング	N/mm ²	6000	6000
図心(上端からの距離)	mm	75	70.2
E _{eff}	Nmm ²	2.6595E+12	1.34E+12
I _{all}	mm ⁴	562,500,000	333,396,000
E _{eff}	N/mm ²	4728	4027
E _{eff} /E _l		0.79	0.67
ラミナ基準強度f _b (平均値)	N/mm ²	27.00	27.00
CLT 基準強度f _{eff} (平均値)	N/mm ²	21.28	18.12
①f _b eff*.65	調整係数	13.83	11.78
基準強度下限値(ばらつき15%)	②*0.75	10.4	8.8
短期	*2/3	6.91	5.89
基準強度時M(kNm)=σ _b *Z _{eff}		77.78	41.94
短期時M(kNm)=σ _b *Z _{eff} *2/3	0.666667	51.85	27.96
長期時M(kNm)=σ _b *Z _{eff} *1.1/3	0.366667	28.52	15.38
スパンL		4.23	4.23
L/3		1.41	1.41
短期			
P/2		36.77	19.83
P		73.55	39.66
長期用			
P/2		20.23	10.91
P		40.45	21.81

B. 試験写真



写真 2.3.4.(2)-1 試験体 F-2 (加熱前)



写真 2.3.4.(2)-2 試験体 F-2(加熱後)

C. 加熱温度

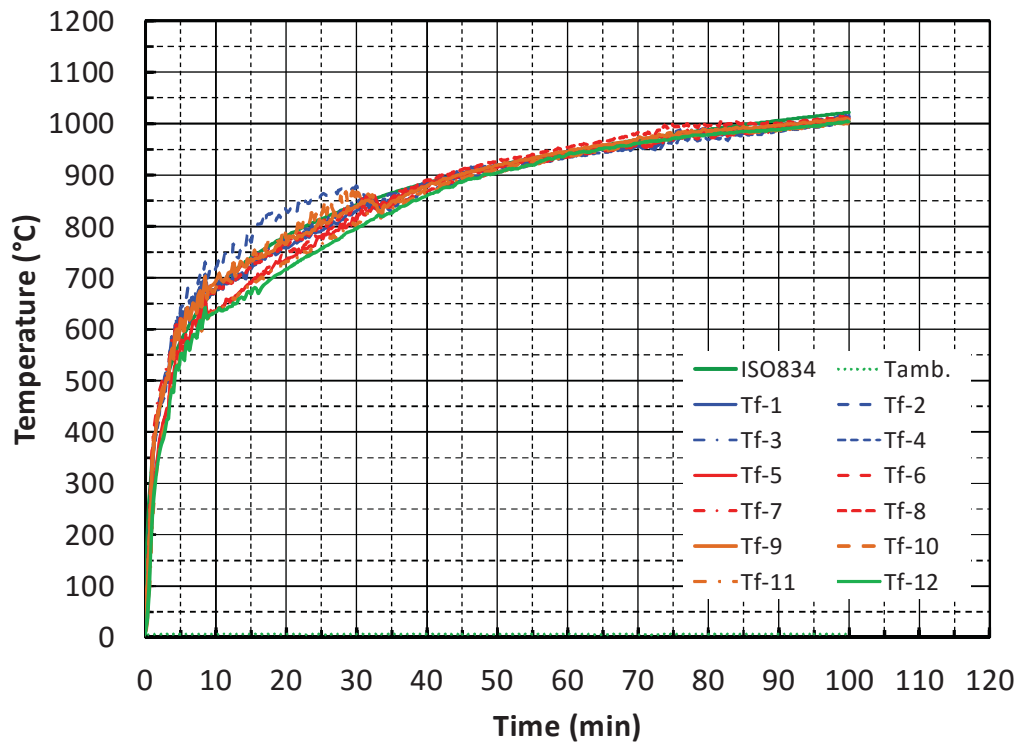


図 2.3.4.(2)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

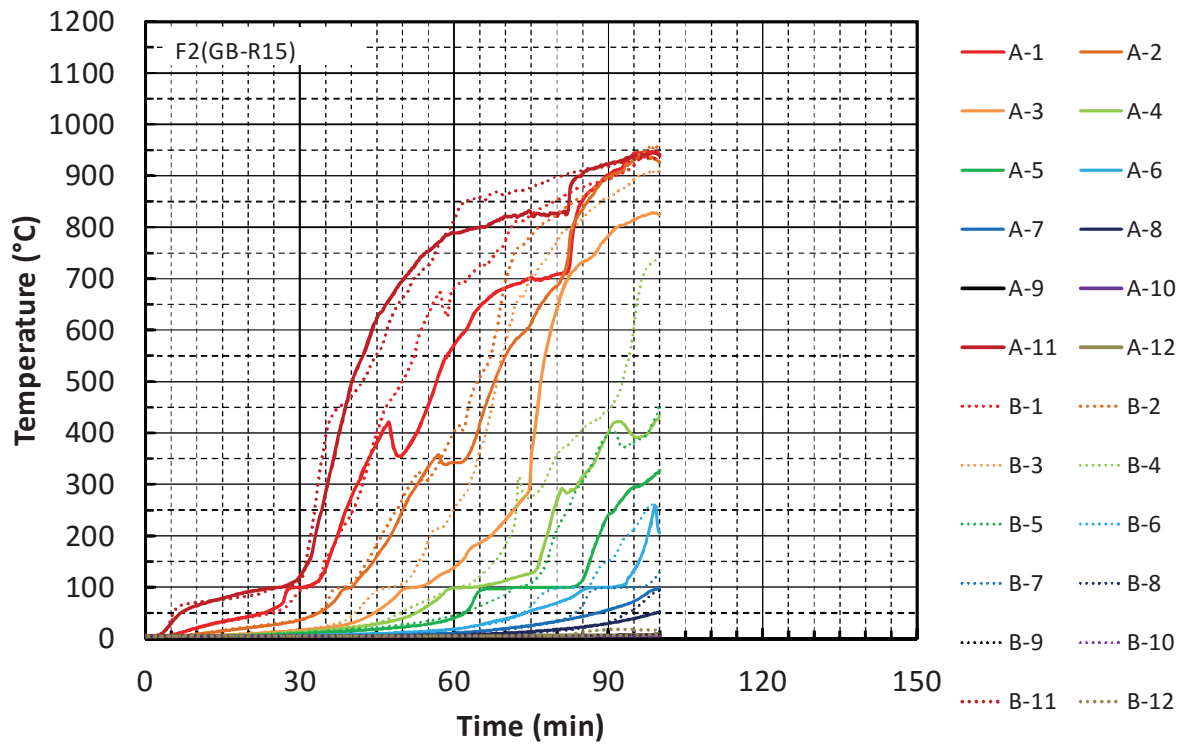


図 2.3.4. (2)-2 F-2 (せっこうボード 15mm) -CLT パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同種、同厚の被覆材を用い、基材となる木質系パネルの種類が異なる F-4 の実験結果を並べて示す。(F-2:CLT、F-4:集成材)

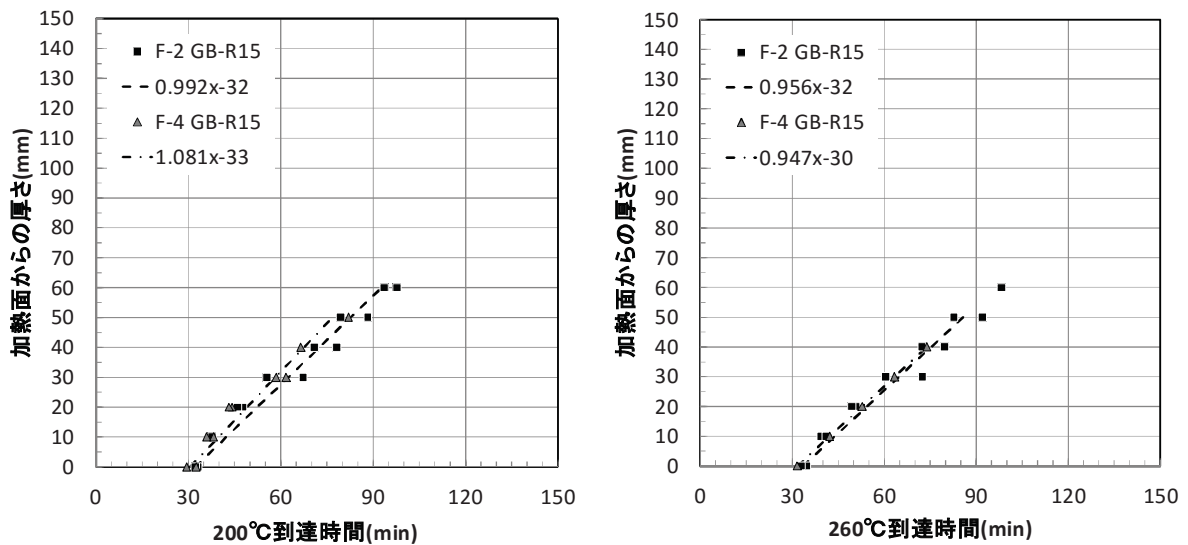


図 2.3.4. (2)-3 温度到達時間 F-2 40.45kN

F. 変位量と載荷荷重

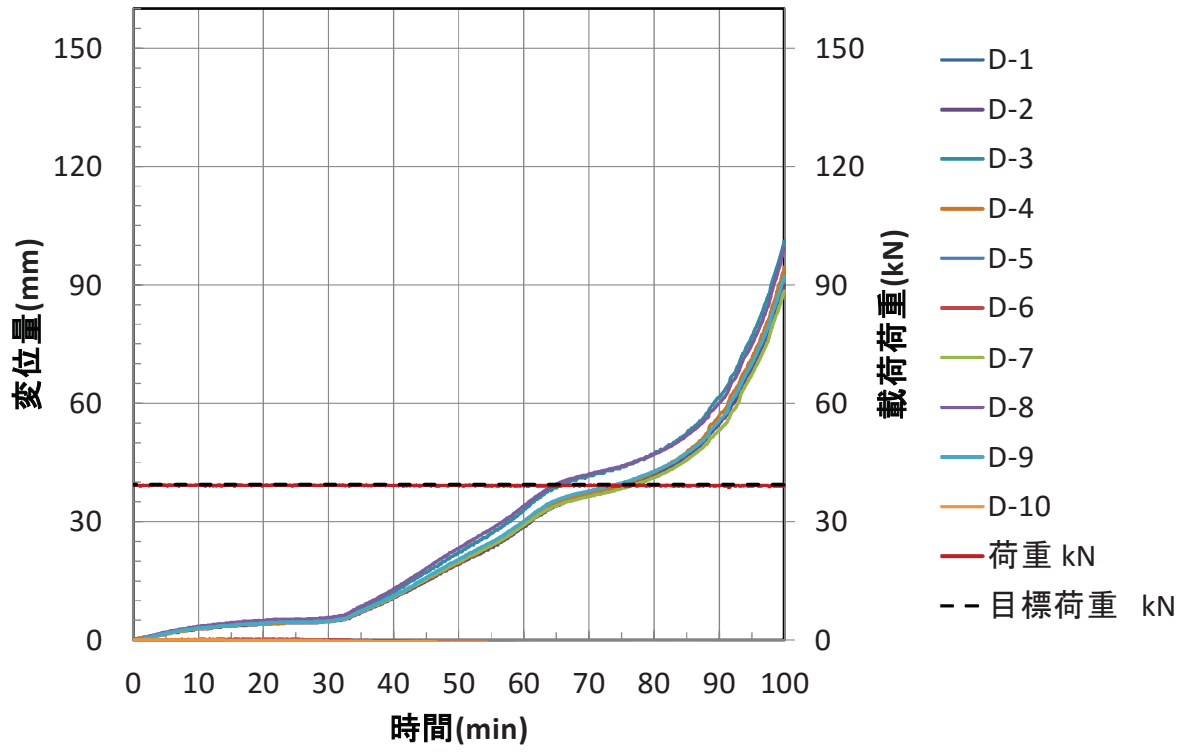


図 2.3.4.(2)-4 載荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

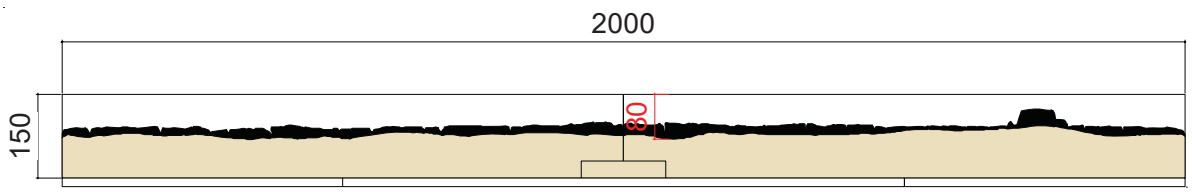


図 2.3.4.(2)-5 F-2 炭化図 (中心目地位置)

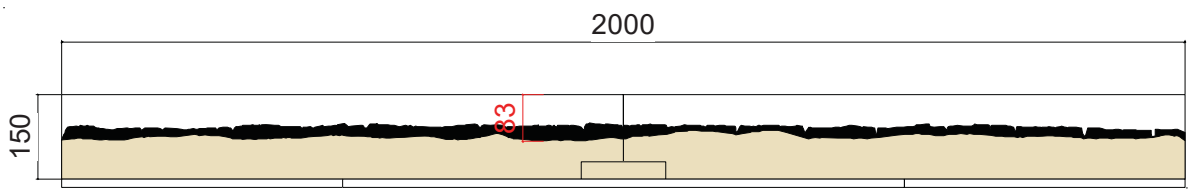


図 2.3.4.(2)-6 F-2 炭化図 (載荷点)

(3) 床載荷加熱試験：F-3

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、総厚150mmの集成材パネルに、せっこうボード12.5mm厚を被覆して構成した床に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、加熱60分時の燃えしろ寸法を小型試験の結果より27mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重(曲げ耐力に安全率2/3を乗じた荷重)を設定した。

表 2.3.4. (3)-1 集成材 150mm 積載荷重

集成材 150mm	載荷加熱試験体		GB-R 12.5mm	
			有効面計算	
	載荷加熱試験体		0mm炭化	27mm炭化
試験体厚さ	D	mm	150	150
パネル幅	b	mm	1,000	1,000
試験体幅	B	mm	2,000	2,000
残存厚さ	h-dchar	mm	150	123
断面係数	Zeff	mm ³	7,500,000	5,043,000
燃えしろ寸法	dchar	mm	0	27
曲げ強度	F B ave	N/mm ²	25.92	25.92
曲げ耐力	Mu ave	kN.m	194.4	130.71456
支点間距離	L	m	4.23	4.23
破壊荷重	Pu	kN	275.7	185.4
		ton	28.1	18.9
長期安全係数	1.1/3	-	0.367	0.367
短期安全係数	2/3	-	0.667	0.667
長期相当	F Bx1.1/3	N/mm ²	9.50	9.50
短期相当 σ_{b1}	F Bx2/3	N/mm ²	17.28	17.28
長期相当	Mb ave	kN.m	71.3	
短期相当	Mb ave	kN.m		87.1
載荷荷重	2P	kN	101.1	123.6

B. 試験写真



写真 2.3.4.(3)-1 試験体 F-3 (加熱前)



写真 2.3.4.(3)-2 試験体 F-3 (加熱後)

C. 加熱温度

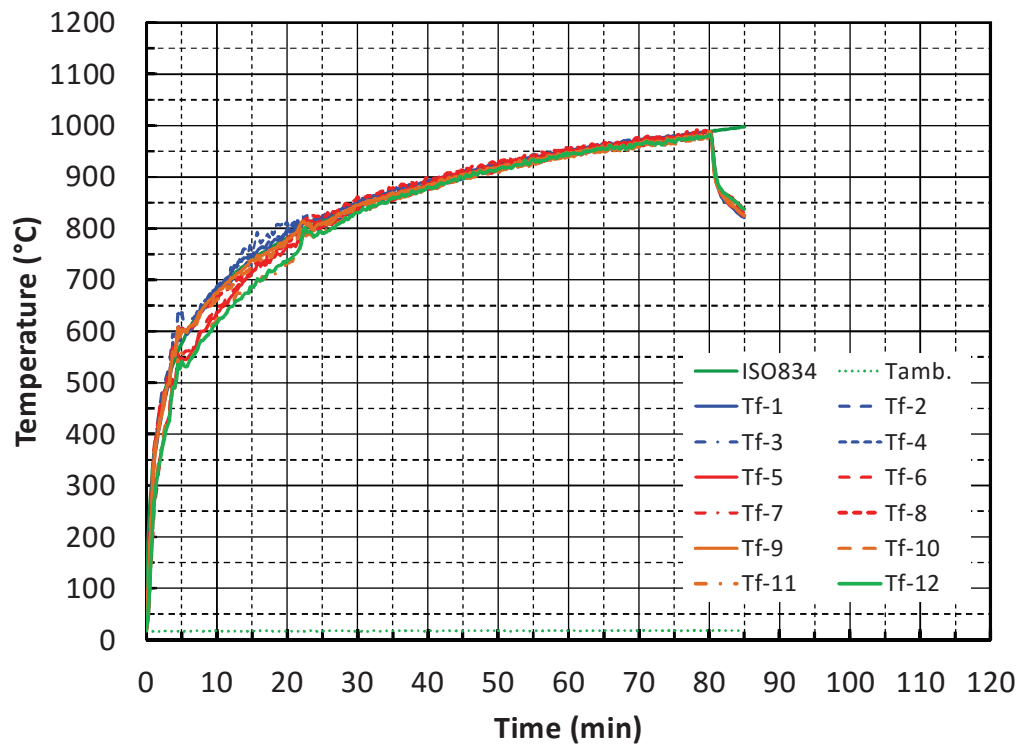


図 2.3.4.(3)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

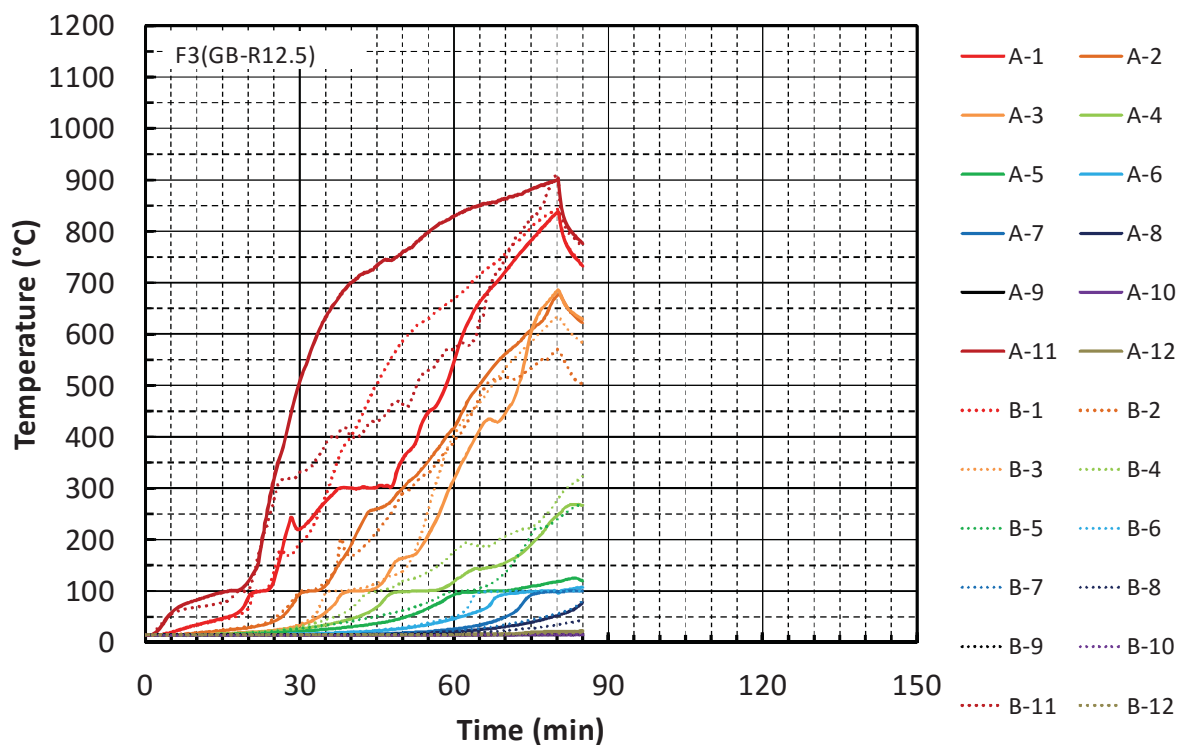


図 2.3.4. (3)-2 F-3 (せっこうボード 12.5mm) -集成材 パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。

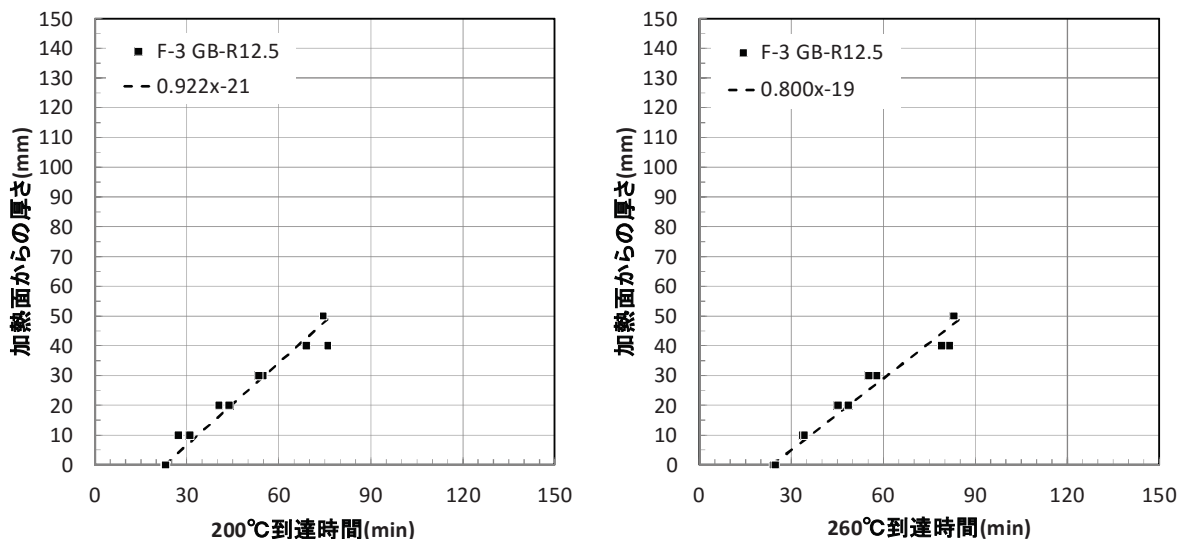


図 2.3.4. (3)-3 温度到達時間 F-3 123.6kN

F. 変位量と載荷荷重

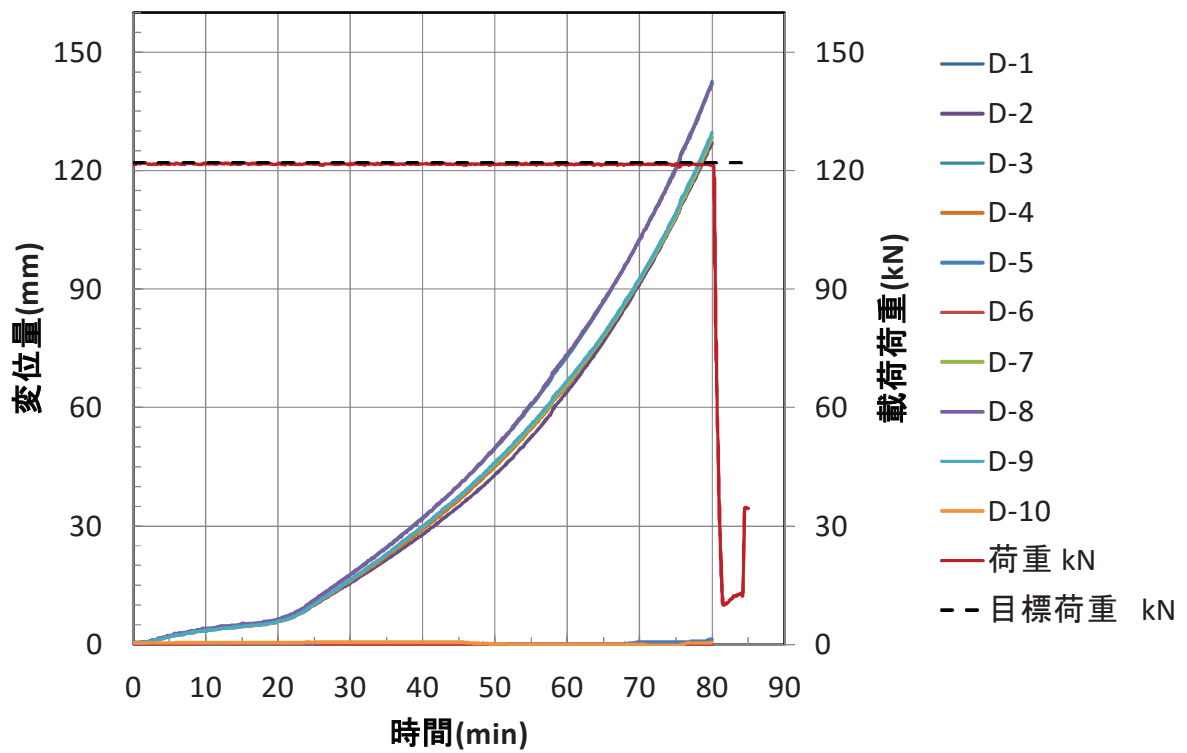


図 2.3.4.(3)-4 載荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

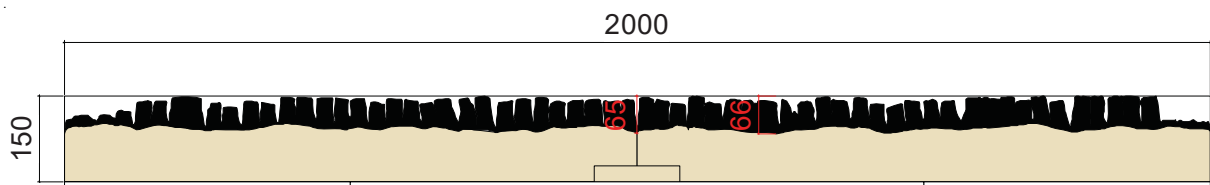


図 2.3.4.(3)-5 F-3 炭化図 (中心目地位置)

※載荷点データなし

(4) 床載荷加熱試験：F-4

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、総厚150mmの集成材パネルに、せっこうボード15mm厚を被覆して構成した床に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、F-3の実験で燃えしろ設計が成り立つことが既に確認できているが、加熱60分時の燃えしろ寸法を小型試験の結果より24mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重（曲げ耐力に安全率2/3を乗じた荷重）と、加熱前全断面に長期許容応力度が作用する荷重（曲げ耐力に安全率1.1/3を乗じた荷重）を比較した結果、前者が後者を上回ることを確認したため、60分時の残存断面に短期許容応力度が作用する荷重を設定した。

表 2.3.4. (4)-1 集成材 150mm 積載荷重

集成材 150mm	載荷加熱試験体			GB-R 15mm 有効面計算
	載荷加熱試験体		0mm炭化	24mm炭化
試験体厚さ	D	mm	150	150
パネル幅	b	mm	1,000	1,000
試験体幅	B	mm	2,000	2,000
残存厚さ	h-dchar	mm	150	126
断面係数	Zeff	mm ³	7,500,000	5,292,000
燃えしろ寸法	dchar	mm	0	24
曲げ強度	F B ave	N/mm ²	25.92	25.92
曲げ耐力	Mu ave	kN.m	194.4	137.16864
支点間距離	L	m	4.23	4.23
破壊荷重	Pu	kN	275.7	194.6
		ton	28.1	19.9
長期安全係数	1.1/3	-	0.367	0.367
短期安全係数	2/3	-	0.667	0.667
長期相当	F Bx1.1/3	N/mm ²	9.50	9.50
短期相当 σ_{b1}	F Bx2/3	N/mm ²	17.28	17.28
長期相当	Mb ave	kN.m	71.3	
短期相当	Mb ave	kN.m		91.4
載荷荷重	2P	kN	101.1	129.7

B. 試験写真



写真 2. 3. 4. (4)-3 試験体 F-4 (加熱前)



写真 2. 3. 4. (4)-4 試験体 F-4(加熱後)

C. 加熱温度

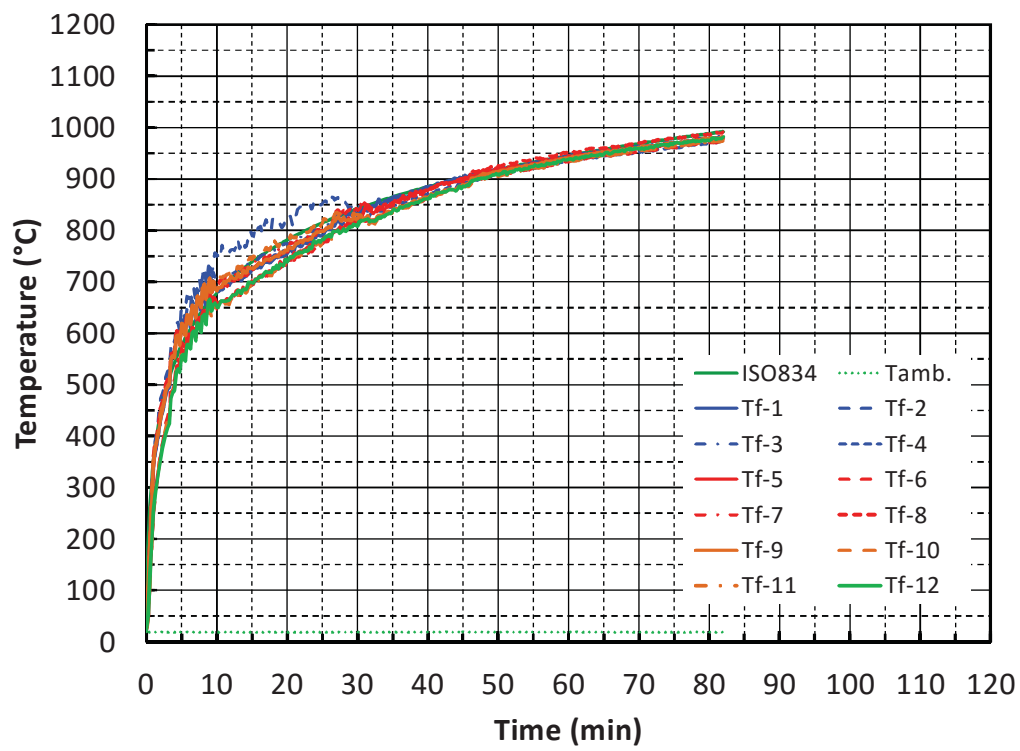


図 2. 3. 4. (4)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

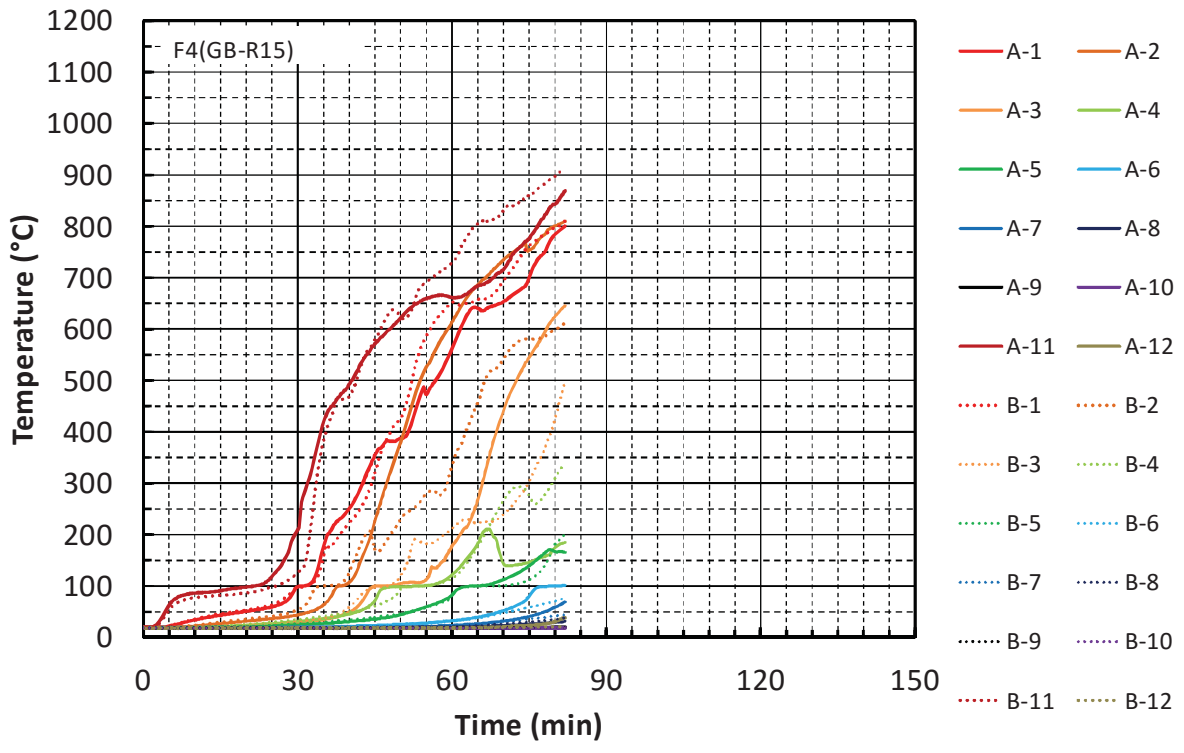


図 2.3.4. (4)-2 F-4 (せっこうボード 15mm) -集成材 パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同じ集成材パネルを基材として、被覆材の厚みが異なる F-3 の実験結果を並べて示す。(F-3:せっこうボード 12.5mm 厚、F-4:せっこうボード 15mm 厚)

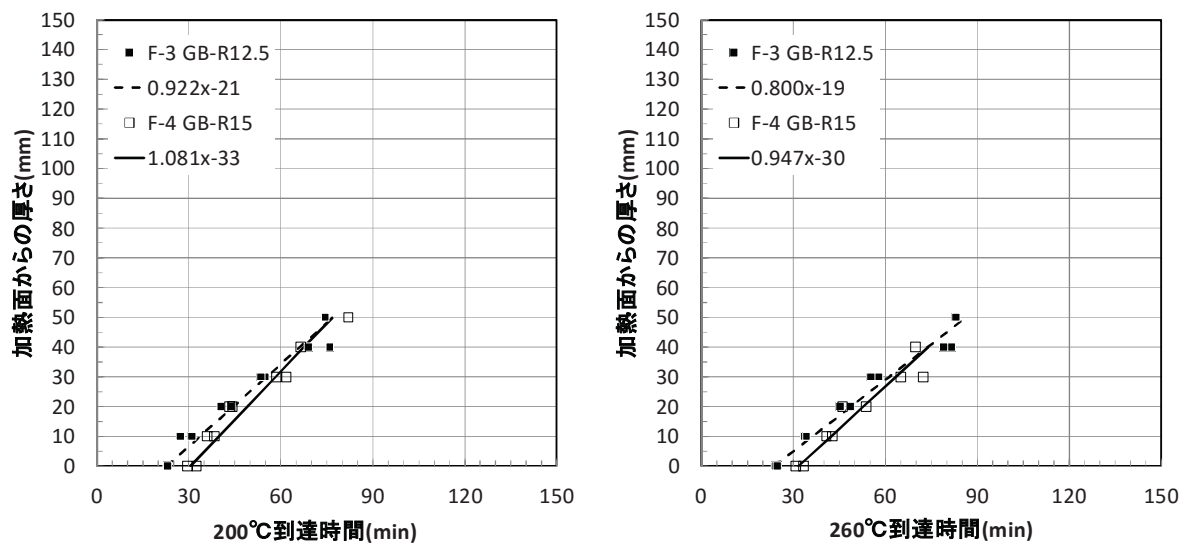


図 2.3.4. (4)-3 温度到達時間 F-4 129.7kN

F. 変位量と載荷荷重

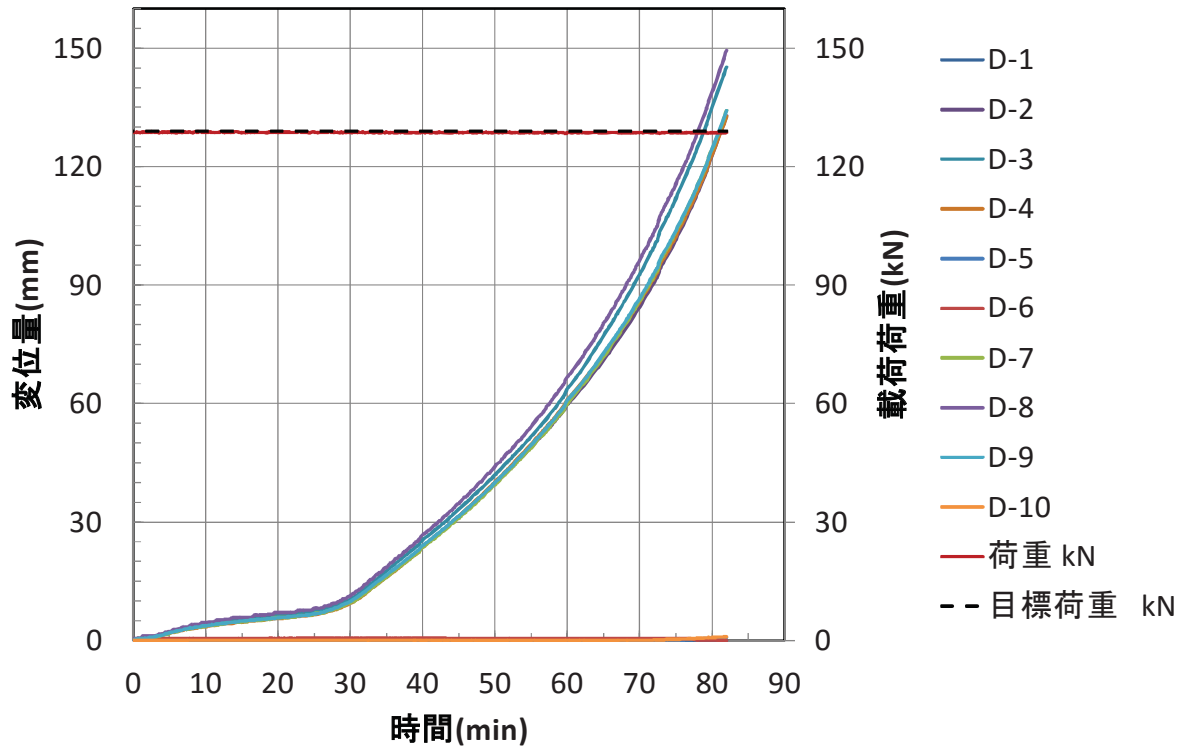


図 2.3.4. (4)-4 載荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

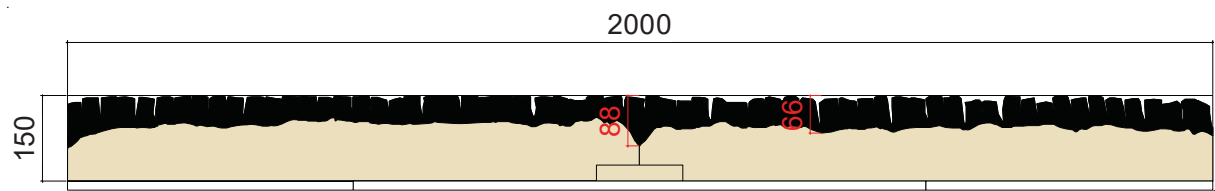


図 2.3.4. (4)-5 F-4 炭化図 (中心目地位置)

※載荷点データなし

表 2.3.5-1 に载荷加熱実験による保有耐火時間をまとめて示す。CLT、集成材ともにせっこうボード 12.5mm 厚の被覆を考慮して 60 分の燃えしろ設計を行った F-1、F-3 の試験体で、目標を上回る耐火性能が得られた。これにより 60 分の燃えしろ寸法は、被覆による炭化抑制効果を加味して、通常の 60mm から 27mm に削減できることが分かった。

次にせっこうボード 15mm 厚を被覆した F-2、F-4 の試験体では、炭化前の全断面に長期許容荷重を载荷して実験を行い、この場合も 60 分を超える耐火性能が得られた。これにより木質パネル 150 mm 厚+せっこうボード 15mm 厚を準耐火 60 分の例示仕様として位置づけることも可能であることが分かった。

図 2.3.4. (1)-3、図 2.3.4. (2)-3 に示す温度到達時間について、CLT と集成材で大きな違いはなく、小型試験体（図 2.3.5-1）と比較しても炭化開始時間は大きな違いはないことが分かった。凡例のうち建研 H24GB-R12.5 とあるものは、同種の被覆材を同じ留め付け方法で施工した既往研究における実験結果である。

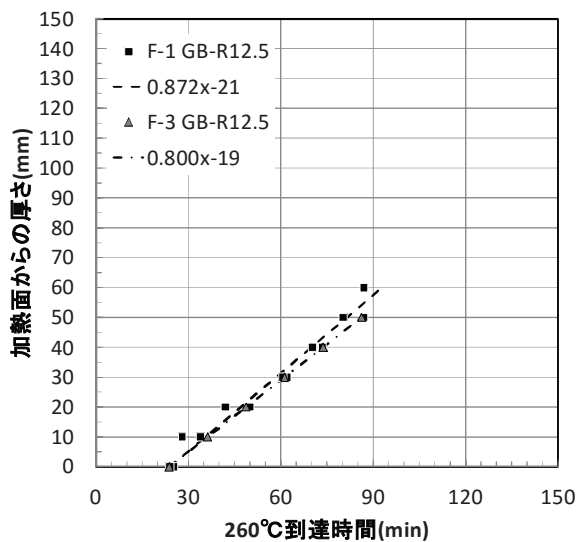


図 2.3.4. (1)-3 温度到達時間

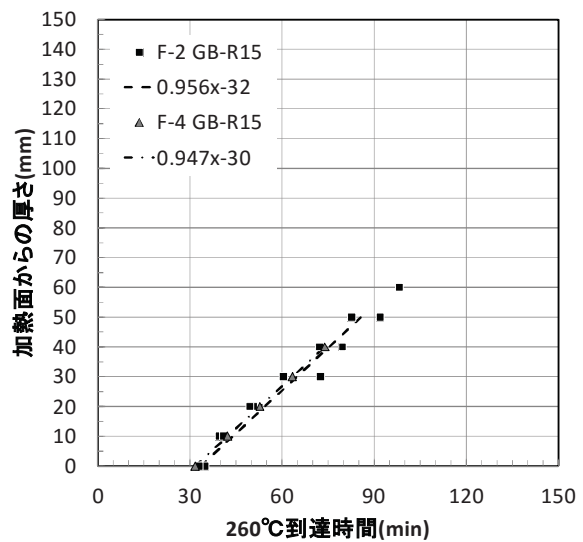


図 2.3.4. (2)-3 温度到達時間

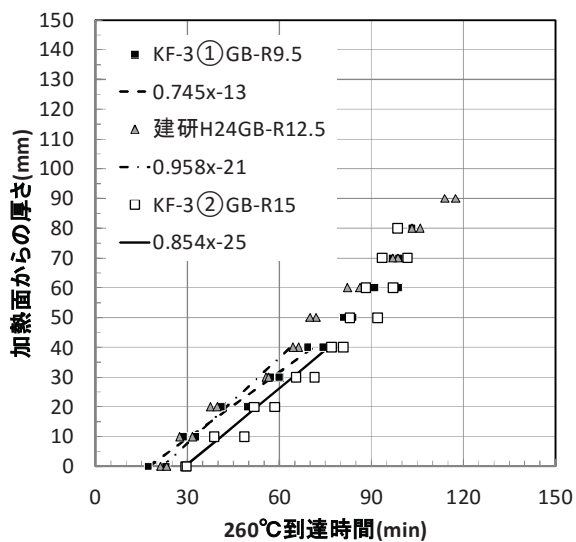


図 2.3.5-1 温度到達時間（小型試験体）

表 2.3.5-1 荷重加熱実験による保有耐火時間一覧表

部材種類	試験体No.	仕様	載荷荷重	加熱時間	結果			防耐火時間 (目標性能時間)
					非損傷性	遮熱性	遮炎性	
床	F-1	 C150 せっこうボード12.5厚被覆	60分時残存断面に短期 36.24kN	92分	92分	-	-	92分 (60分)
	F-2	 C150 せっこうボード15厚被覆	炭化前全断面に長期 40.45kN	100分	100分	-	-	100分 (-)
	F-3	 G150 せっこうボード12.5厚被覆	60分時残存断面に短期 123.6kN	80分	80分	-	-	80分 (60分)
	F-4	 G150 せっこうボード15厚被覆	60分時残存断面に短期 129.7kN	82分	82分	-	-	82分 (60分)

2. 4 防火被覆の炭化抑制効果を考慮した厚板壁の載荷加熱実験 (W-1~4)

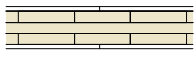
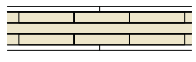
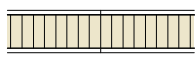
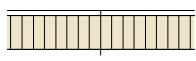
2. 4. 1 実験概要

小型試験体で確認した 60 分時の燃えしろ寸法あるいは燃え残り断面 (実測値) を基に燃えしろ設計を行った実大の試験体に対して載荷加熱実験を行い、燃えしろ設計の成立可否と、載荷加熱条件下での炭化速度を把握した。

2. 4. 2 試験体概要

試験体は表 2. 4. 2-1 および図 2. 4. 2-1~4 に示すとおりとした。

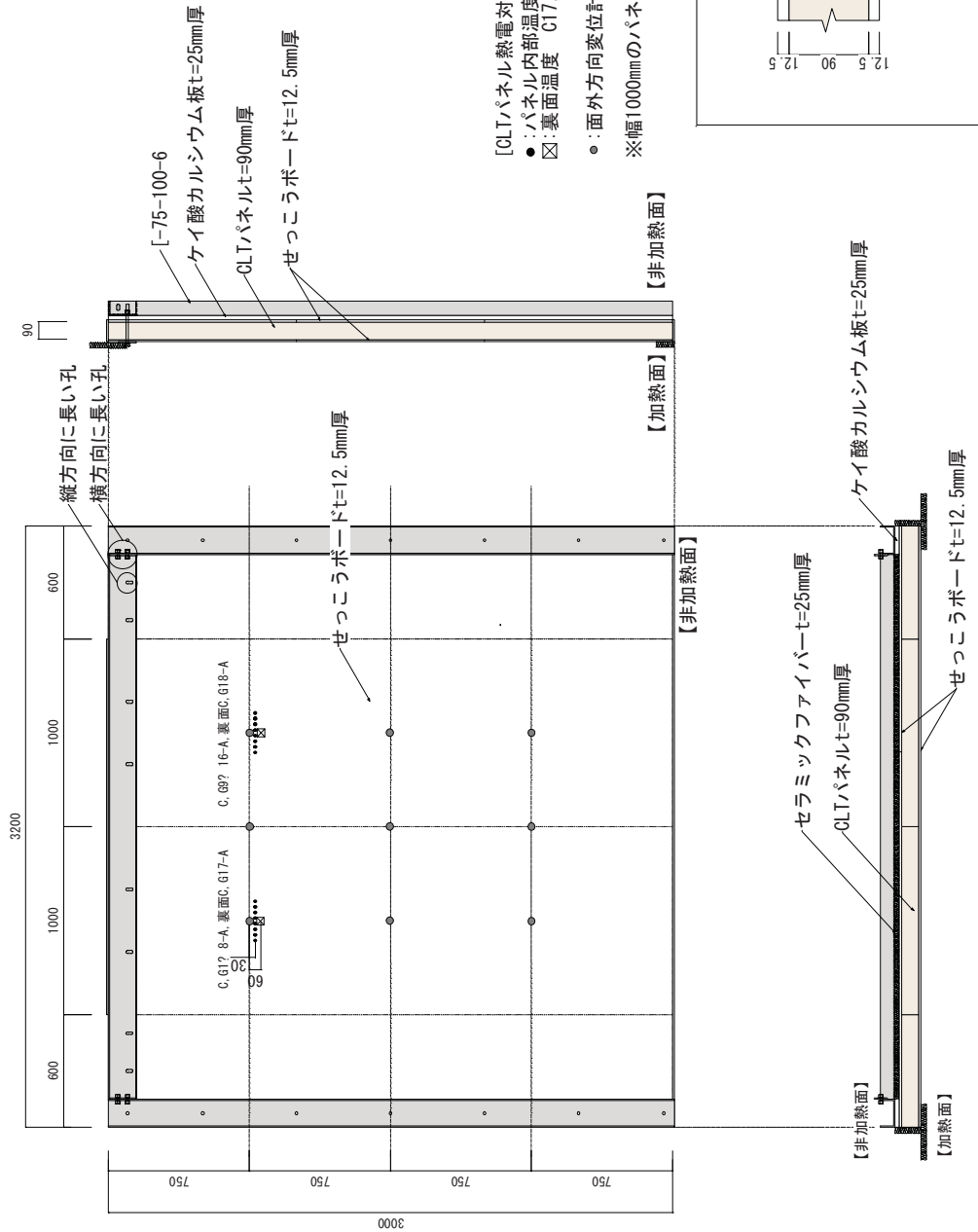
表 2. 4. 2-1 試験体表 (比重・含水率)

部材種類	試験体 No.	仕様 (mm)	含水率 (%)	比重	
				気乾	全乾
壁	W-1	 CLT(スギ)90厚 被覆材: せっこうボード12.5厚	9.63	0.48	0.45
	W-2	 CLT(スギ)90厚 被覆材: せっこうボード15厚			
	W-3	 集成材(スギ)90厚 被覆材: せっこうボード12.5厚	12.55	0.42	0.37
	W-4	 集成材(スギ)90厚 被覆材: せっこうボード15厚			

試験体中央部の載荷される CLT 及び集成材パネルの縦振動法による実測のヤング係数 (kN/mm^2) は、W-1 [CLT:6.01、5.87]、F-2 [CLT:5.73、6.05]、F-3 [集成材:7.70、7.80]、F-4 [集成材:7.84、7.37] であった。

CLT壁実大試験体(せっこうボード12.5厚被覆)

使用接着剤：API接着剤
 CLTハネル仕様：ラミナ厚30mm、3層、ハネル厚90mm
 幅はぎ接着：なし



- 【CLTハネル熱電対】
- ：ハネル内部温度計測点 C1~16-A 計18点
 - ☒：裏面温度 C17, 18
 - ：面外方向変位計測点 計9点
- ※幅1000mmのハネルはヤング係数計測

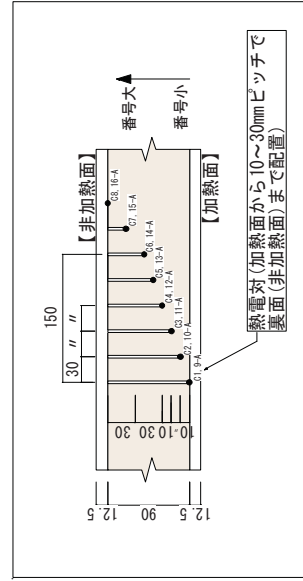
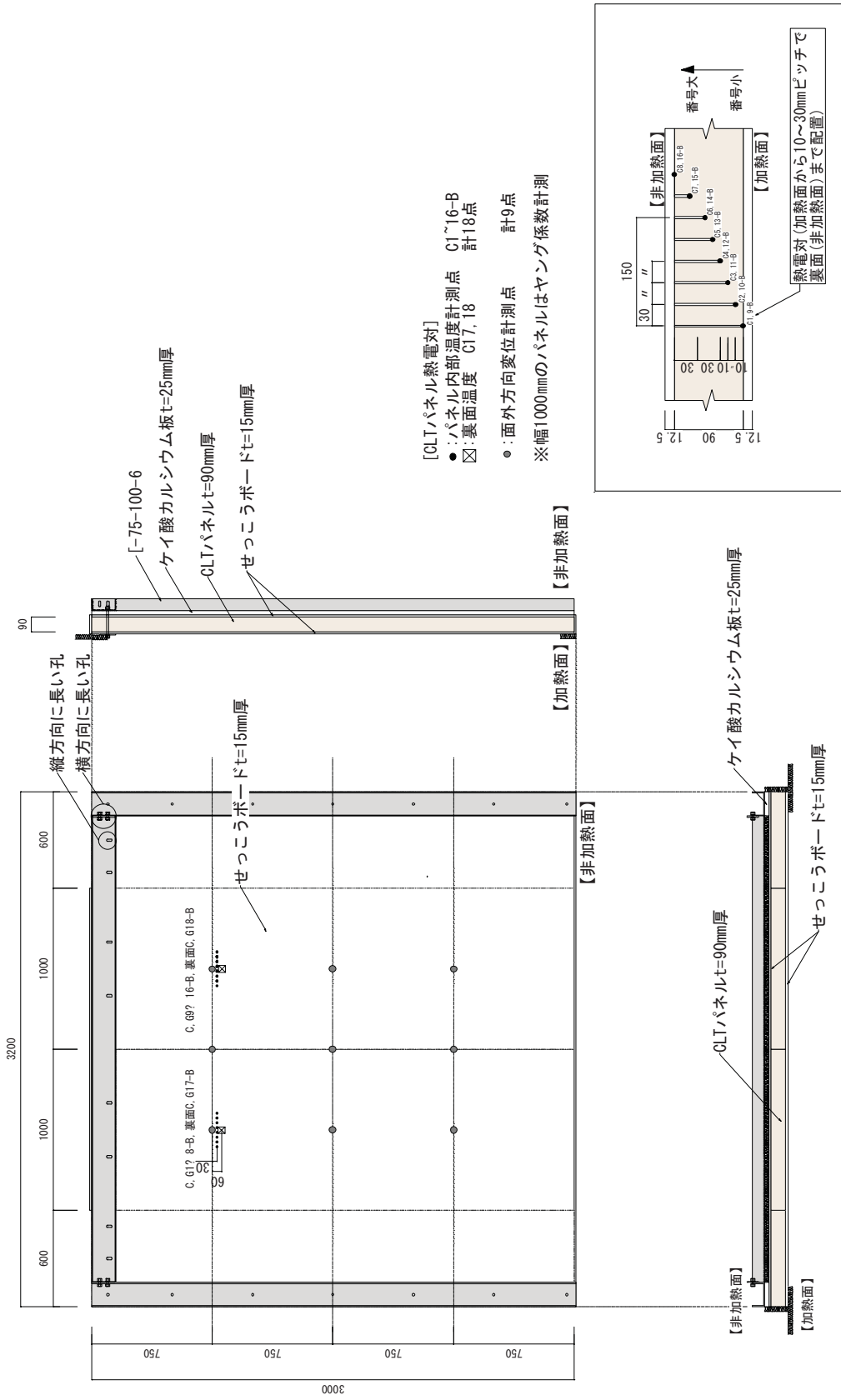


図 2.4.2-1 W-1 試験体図及び測定点

CLT壁実大試験体(せっこうボード15mm厚被覆)

使用接着剤：API接着剤
 CLTパネル仕様：ラミナ厚30mm、3層、パネル厚90mm
 幅はぎ接着：なし



- 【CLTパネル熱電対】
- ：パネル内部温度計測点 C1~16-B 計18点
 - ☒：裏面温度 C17,18
 - ：面外方向変位計測点 計9点
- ※幅1000mmのパネルはヤング係数計測

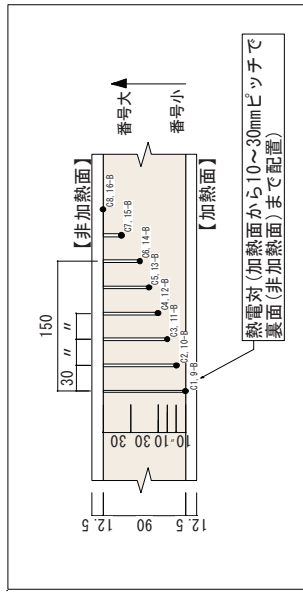


図 2.4.2-2 W-2 試験体図及び測定点

2. 4. 3 実験方法

耐火試験は、国立研究開発法人 建築研究所の壁炉（図 2. 4. 3-1）を使用し、「防耐火性能試験・評価業務方法書」に準拠した加熱実験より求めた。

（1）加熱方法

IS0834 に規定する標準加熱曲線に準拠した加熱を行い、以下の場合に試験を中止する事とした。

- ・ 試験体非加熱面への火炎貫通により実験の継続が困難となった場合。
- ・ 壁の座屈による変形が進み、载荷の継続が困難となった場合。
- ・ 上記以外で安全上問題があるとした場合。

（2）载荷方法

加熱される試験体に油圧ジャッキを用いて鉛直荷重を加えた。各試験体の载荷荷重の設定方法は試験体ごとに次項の実験目的および载荷荷重に記す。

（3）測定項目

①試験体内部温度

K 熱電対（0.32mm 径）を深さ方向に 10mm ピッチで設置し、内部温度の変化を 15 秒間隔で測定した。

②炉内温度

シー型 K 熱電対を試験体の加熱面から約 10cm 離れた位置に 20 点配置し、試験中の耐火炉内温度を 15 秒間隔で測定した。

③鉛直変位および面外たわみ量

試験体下部に摺り式変位計を設置し、鉛直変位を 15 秒間隔で測定した。

試験体非加熱面に巻き取り式変位計を設置し、水平変位を 15 秒間隔で測定した。

④炭化速度

試験体内部に配した熱電対の温度上昇履歴より、木材の着火温度とされる 260℃に達するまでに要した時間から炭化速度を求めることとした。ただし、後に示す温度上昇履歴をみると分かるように、稀に 260℃付近で温度停滞を示す傾向が見られたため、200℃到達時間から求めた炭化速度も併記することとした。炭化速度の算定には、木質パネル表面における温度到達時間の平均値を通る 1 次式を想定し、最小二乗法により傾きを求めた。

⑤炭化状況

試験終了後、試験体各部を切断し、加熱後の炭化深さ及び残存断面を測定した。

⑥含水率

試験体に使用した CLT パネルと同時期に作成されたサンプルを、試験体と同条件下で養生し、105℃の絶乾状態に設定した恒温恒湿器を用いて5日間養生した後、重量減少を測定して、含水率を測定した。含水率の計算式を以下に示す。

$$\text{含水率 (\%)} = \{ (\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) / \text{絶乾後の重量} \} \times 100$$

⑦その他

試験体加熱面及び非加熱面の目視観察、VTR 撮影、写真撮影、試験体非加熱面の熱映像撮影等を行った。

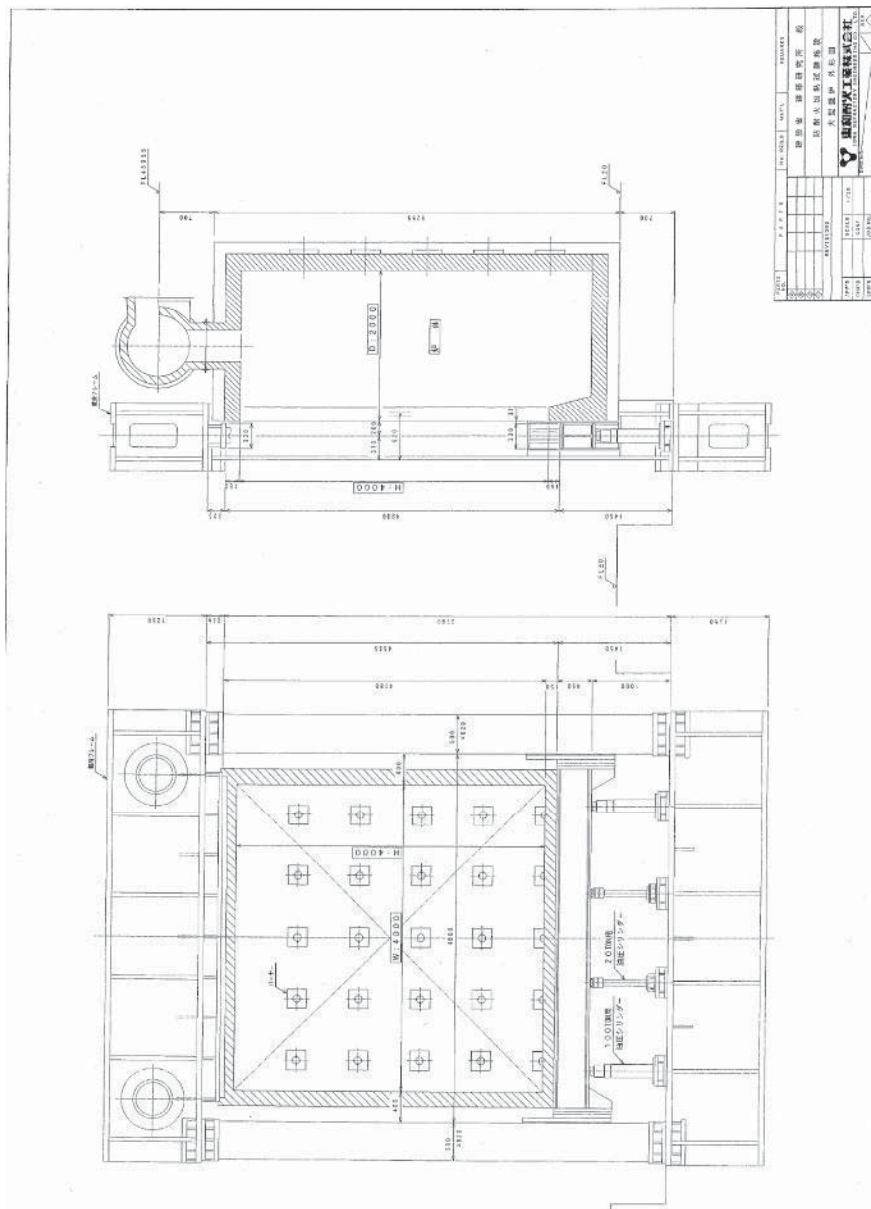


図 2. 2. 3-1 壁炉図面

2. 4. 4 実験結果及び考察

耐火試験は合計4回行った。各回ごとにA. 実験目的および載荷荷重、B. 試験写真、C. 加熱温度、D. 試験体内部温度、E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度、F. 鉛直及び面外変位量、G. 炭化状況を示す。

(1) 壁載荷加熱試験：W-1

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、ラミナ積層数が30mm・3層3ply（総厚90mm）、幅はぎ接着なしのCLTパネルに、せっこうボード12.5mm厚を被覆して構成した壁に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、加熱60分時の燃えしろ寸法を小型試験の結果より27mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重(曲げ耐力に安全率2/3を乗じた荷重)を設定した。

表 2. 4. 4. (1)-1 Mx60-3-3 積載荷重

			炭化前	27mm炭化
			Mx60-3-3	Mx60-3-3
炭化厚		mm	0	27
幅	B	mm	2000	2000
厚さ	D	mm	90	63
座屈長	Lk	mm	3000	3000
断面2次モーメント	$D \cdot B^3 / 12$	mm ⁴	121500000	41674500
断面積	$A = B \cdot D$	mm ²	180000	126000
断面2次半径	i	mm	26.0	18.2
細長比	$\lambda = Lk / i$		115.5	165.0
JASヤング係数	N/mm ²		5200.0	3142.9
Euler座屈応力度	σ_{er}	N/mm ²	3.8	1.1
Euler座屈応力度	($\lambda = 100$)	N/mm ²	-	-
短柱の圧縮強度	f_c	N/mm ²	10.8	8.5
座屈応力度	f_k	N/mm ²	3.8	1.1
座屈荷重	$P_{cr} = f_k \cdot A$	kN	692.8	143.6
長期許容耐力	$1.1 f_k A / 3$	kN	254.0	52.7
短期許容耐力	$2 f_k A / 3$	kN	461.9	95.8

B. 試験写真

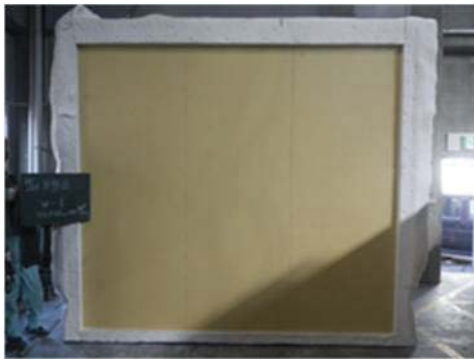


写真 2.4.4.(1)-1 試験体 W-1(加熱前)



写真 2.4.4.(1)-2 試験体 W-1(加熱後)

C. 加熱温度

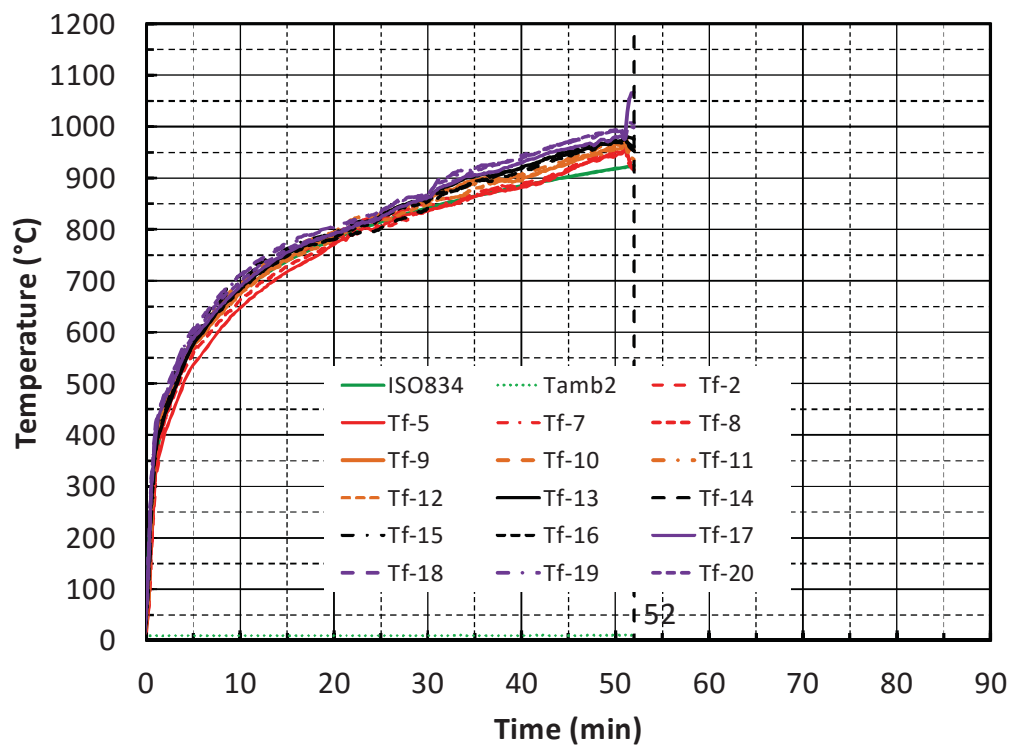


図 2.4.4.(1)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

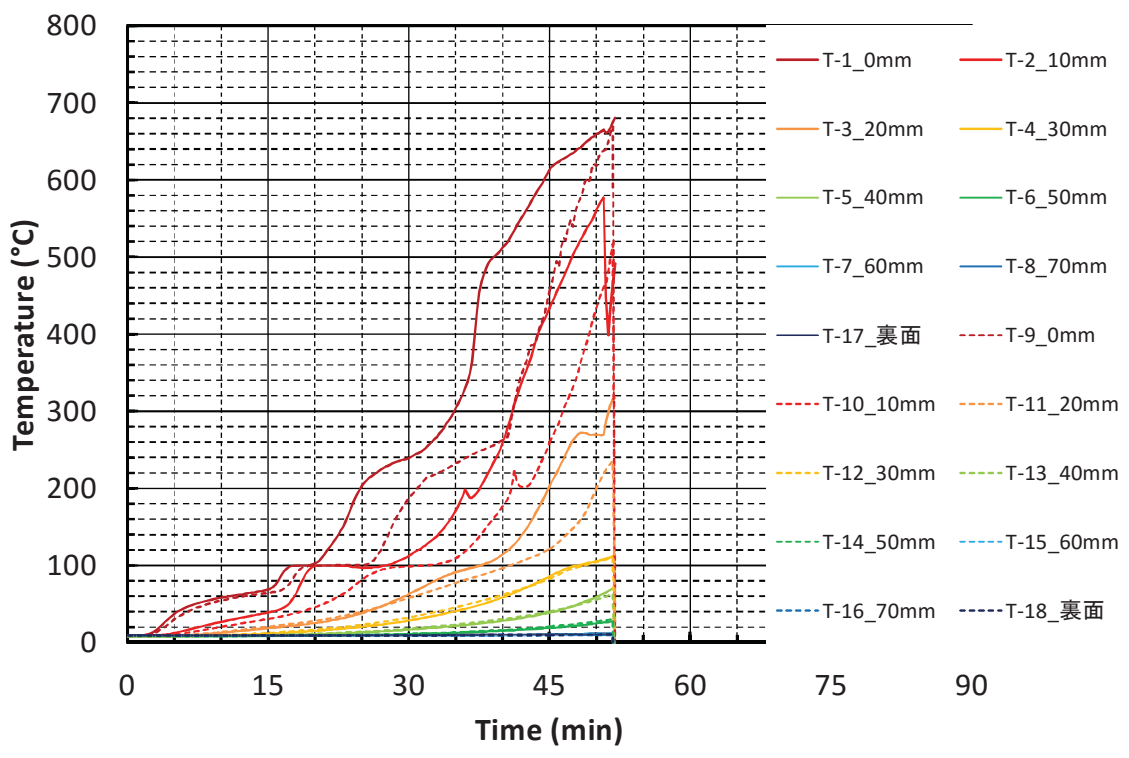


図 2.4.4. (1)-2 W-1 (せっこうボード 12.5mm) -CLT パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同じCLTパネルを基材として、同種、同厚の被覆材を用いながら、壁と床という設置方法の異なる実験結果 (F-1:床、建研 H24GB-R12.5 : 小型床 (非载荷)、W-1:壁) を並べて示す。建研 H24GB-R12.5 は、同種の被覆材を同じ留め付け方法で施工した既往研究における実験結果である。

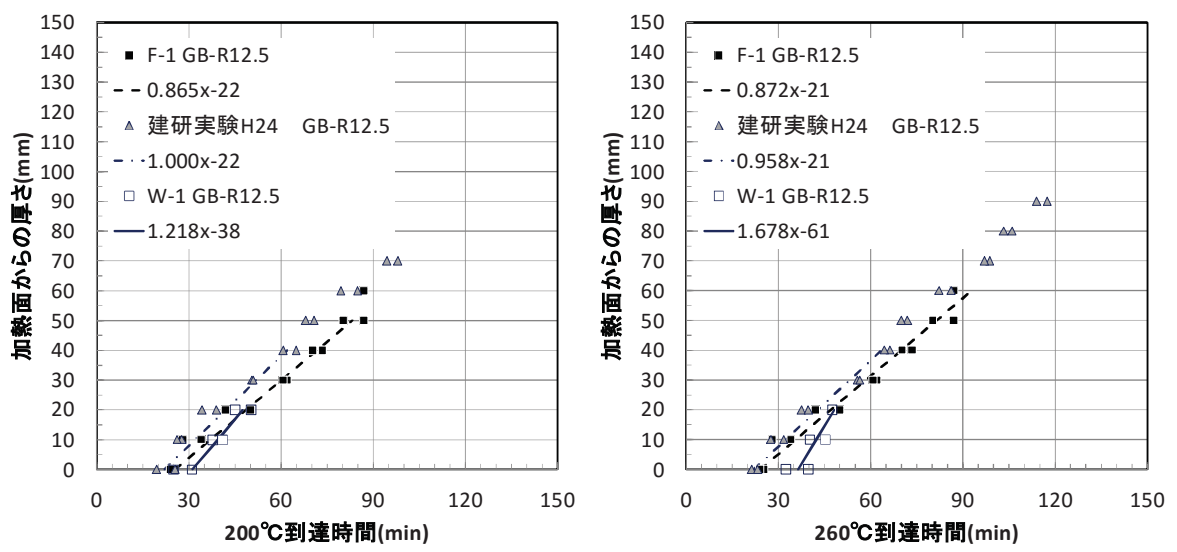


図 2.4.4. (1)-3 温度到達時間 W-1 95kN

F. 鉛直および面外変位量

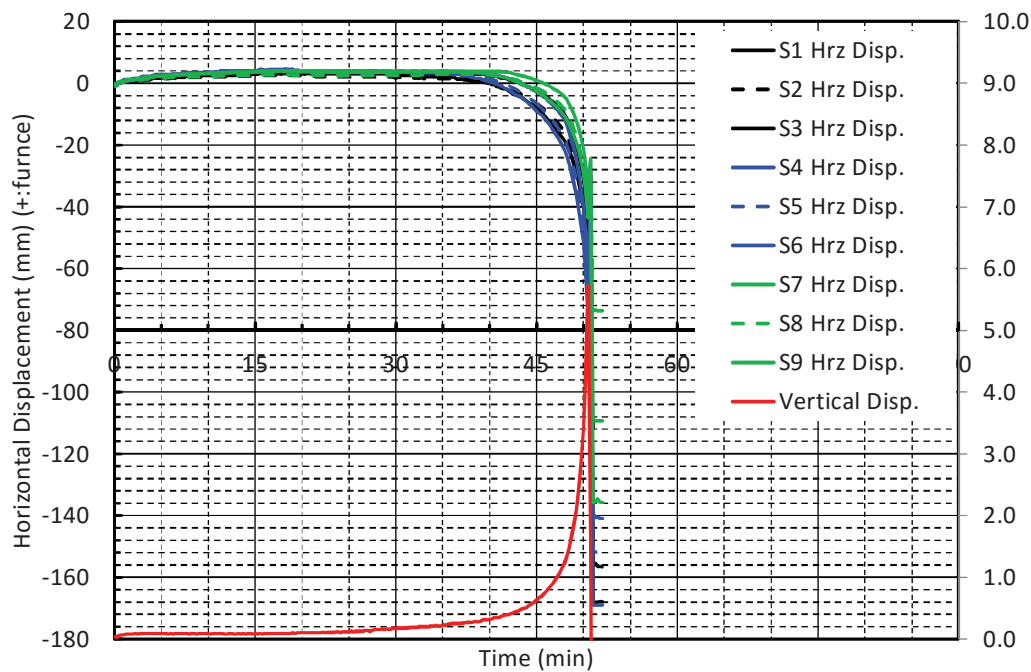


図 2.4.4. (1)-4 载荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

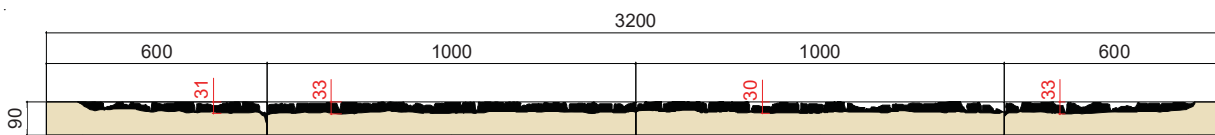


図 2.4.4. (1)-5 W-1 炭化図 (被覆材目地位置)

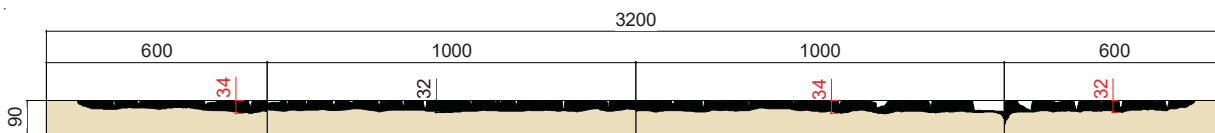


図 2.4.4. (1)-6 W-1 炭化図 (電対位置)

(2) 壁載荷加熱試験：W-2

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、ラミナ積層数が30mm・3層3ply（総厚90mm）、幅はぎ接着なしのCLTパネルに、せっこうボード15mm厚を被覆して構成した壁に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、W-1の実験で偏心の影響を考慮しないままでは、燃えしろ設計が成立しないことが分かっているため、せっこうボード15mmの防火被覆で45分準耐火構造とする既存の告示仕様の成否について確認することとし、今回は加熱前全断面に長期許容応力度が作用する荷重（曲げ耐力に安全率1.1/3を乗じた荷重）を設定した。

表 2.4.4.(2)-1 Mx60-3-3 積載荷重

			炭化前	27mm炭化
			Mx60-3-3	Mx60-3-3
炭化厚		mm	0	27
幅	B	mm	2000	2000
厚さ	D	mm	90	63
座屈長	Lk	mm	3000	3000
断面2次モーメント	$D \cdot B^3 / 12$	mm ⁴	121500000	41674500
断面積	$A = B \cdot D$	mm ²	180000	126000
断面2次半径	i	mm	26.0	18.2
細長比	$\lambda = Lk / i$		115.5	165.0
JASヤング係数	N/mm ²		5200.0	3142.9
Euler座屈応力度	σ_{er}	N/mm ²	3.8	1.1
Euler座屈応力度	($\lambda = 100$)	N/mm ²	-	-
短柱の圧縮強度	f_c	N/mm ²	10.8	8.5
座屈応力度	f_k	N/mm ²	3.8	1.1
座屈荷重	$P_{cr} = f_k \cdot A$	kN	692.8	143.6
長期許容耐力	$1.1 f_k A / 3$	kN	254.0	52.7
短期許容耐力	$2 f_k A / 3$	kN	461.9	95.8

B. 試験写真



写真 2.4.4.(2)-1 試験体 W-2 (加熱前)



写真 2.4.4.(2)-2 試験体 W-2 (加熱後)

C. 加熱温度

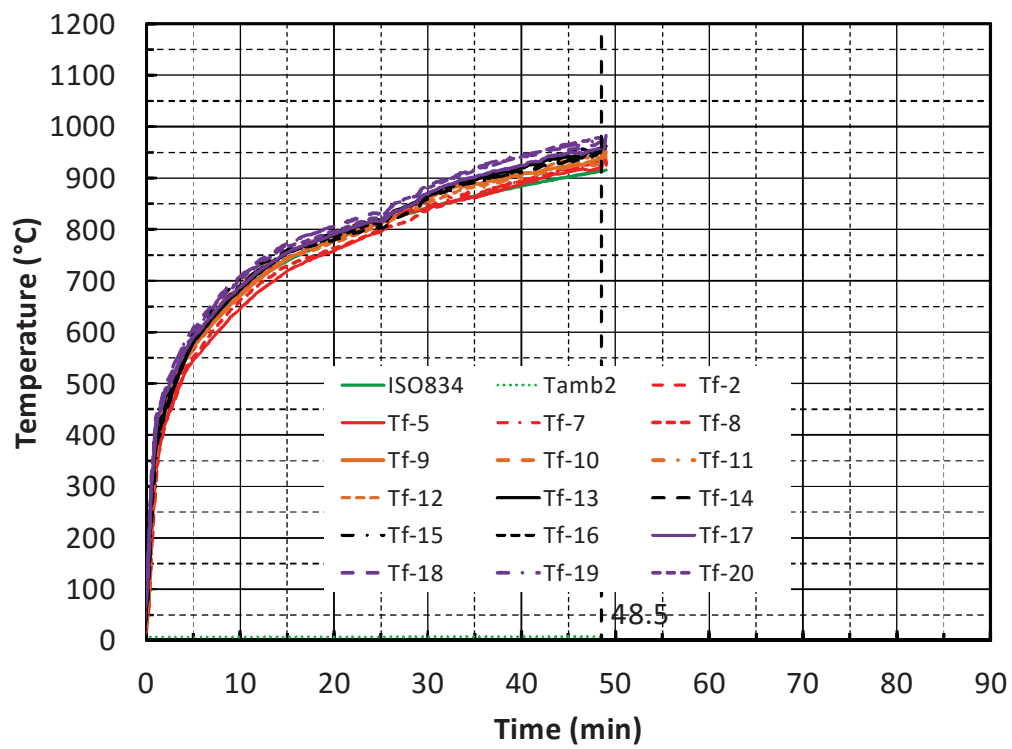


図 2.4.4.(2)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

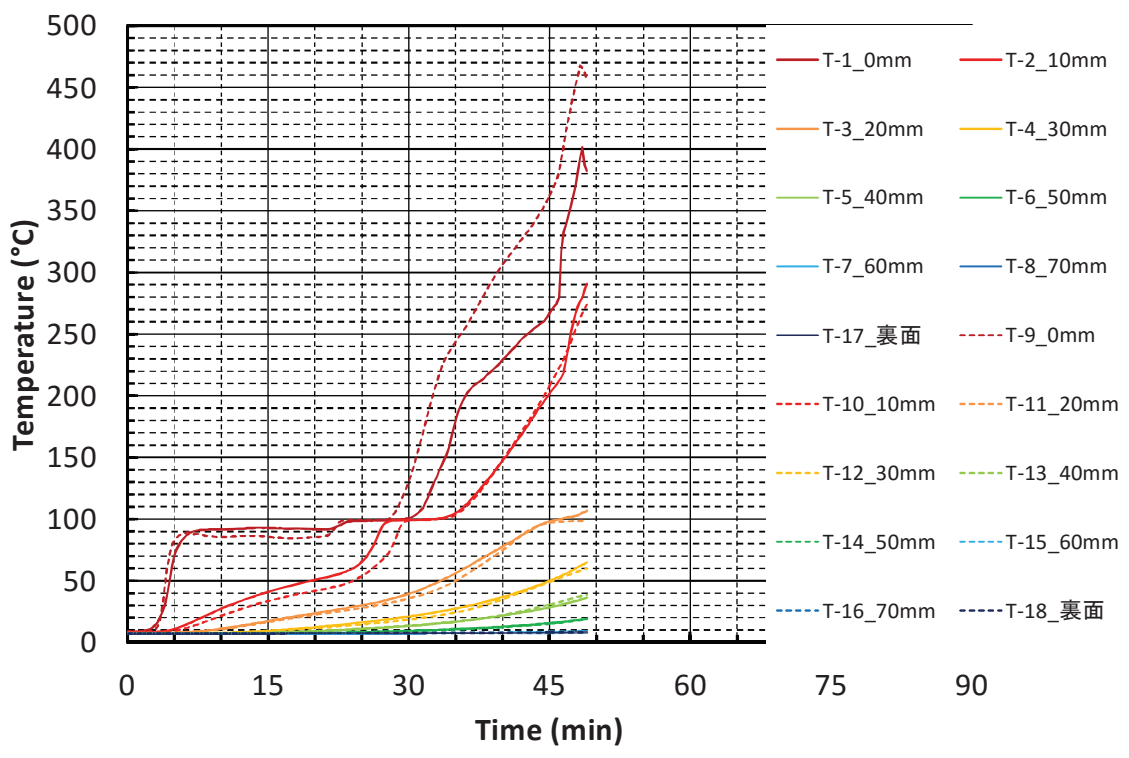


図 2.4.4. (2)-2 W-2 (せっこうボード 15mm) -CLT パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同じCLTパネルを基材として、同種、同厚の被覆材を用いながら、壁と床という設置方法の異なる実験結果 (F-2:床、KF-3-②: 小型床 (非载荷)、W-2:壁) を並べて示す。

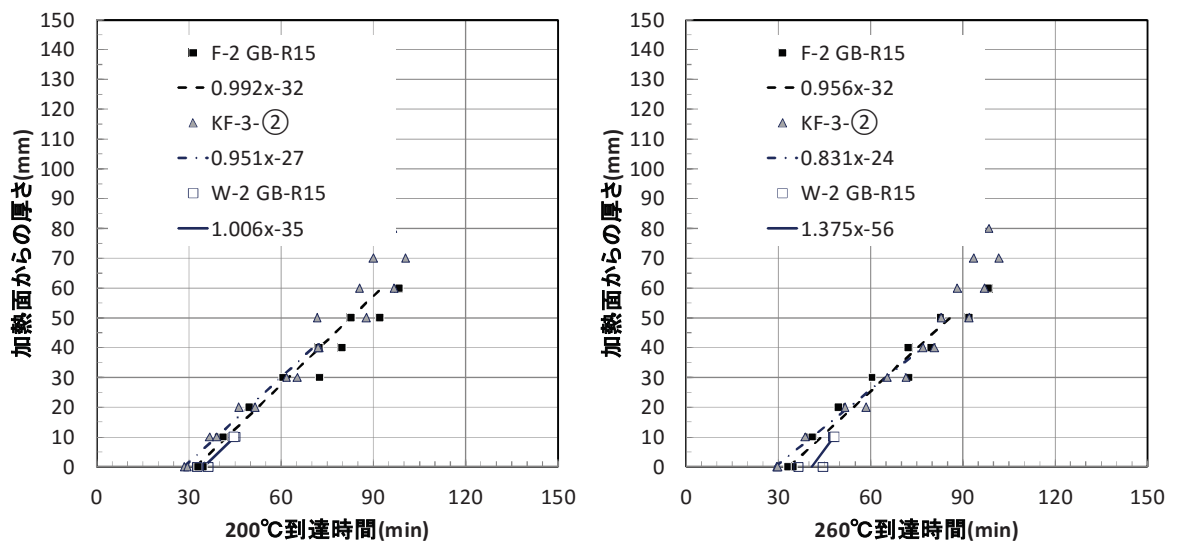


図 2.4.4. (2)-3 温度到達時間 W-2 254kN

F. 鉛直および面外変位量

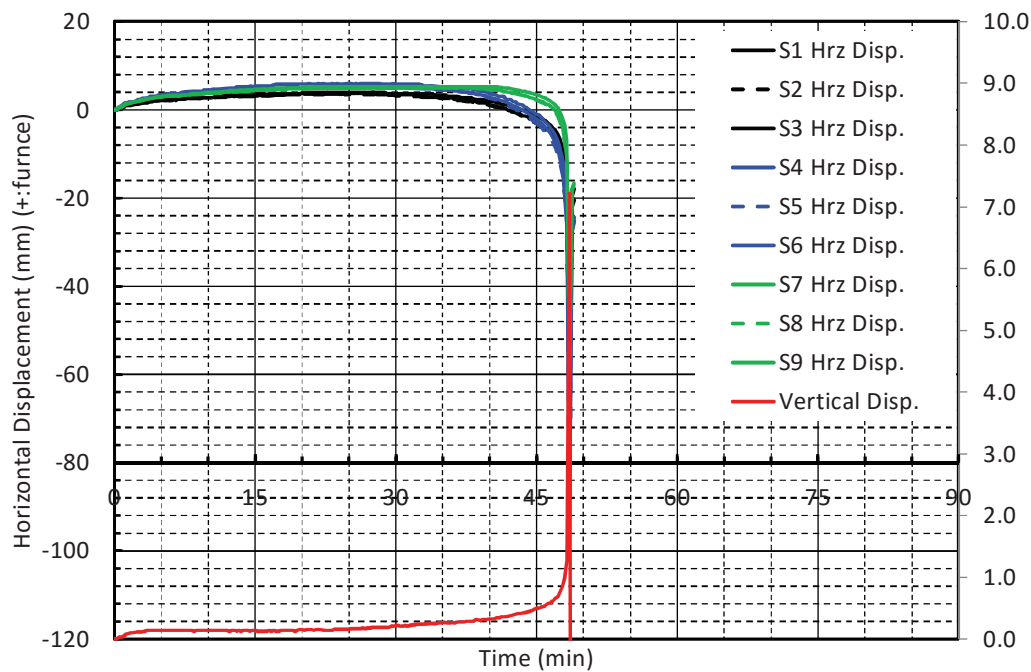


図 2.4.4.(2)-4 载荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

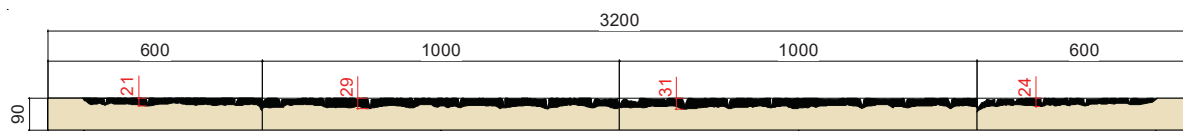


図 2.4.4.(2)-5 W-2 炭化図 (被覆材目地位置)

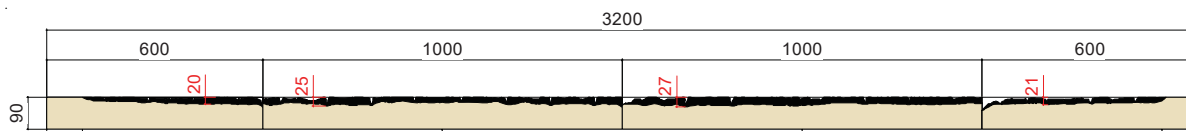


図 2.4.4.(2)-6 W-2 炭化図 (電対位置)

(3) 壁載荷加熱試験：W-3

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、総厚90mmの集成材パネルに、せっこうボード12.5mm厚を被覆して構成した壁に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、加熱60分時の燃えしろ寸法を小型試験の結果より27mmと仮定して、残存断面に短期許容応力度が作用する荷重(曲げ耐力に安全率2/3を乗じた荷重)を設定した。

表 2.4.4.(3)-1 積載荷重

90mm GLT			0mm炭化	GB-R 12.5mm 有効面計算 27mm炭化
載荷加熱試験体	H	mm	90	90
パネル幅	b	mm	1,000	1,000
試験体幅	B	mm	2,000	2,000
残存厚さ	D non charred	mm	90	63
断面係数	Z _{eff}	mm ³	2,700,000	1,323,000
燃えしろ寸法	d _{char}	mm	0	27
全断面	I	mm ⁴	121,500,000	41,674,500
断面積	A non charred	mm ²	180,000	126,000
回転半径	i	mm	26	18
試験体長さ	L	mm	3000	3000
有効細長比	λ	-	115.5	165.0
許容応力	f _c	N/mm ²	5.02	2.46
長期安全係数	1.1/3	-	0.367	
短期安全係数	2/3			0.667
長期許容応力	f _{c_L}	N/mm ²	1.84	
短期許容応力	f _{c_S}	N/mm ²		1.64
載荷荷重	P _u	kN	903	310
	P	kN	331	207

B. 試験写真



写真 2. 4. 4. (3)-1 試験体 W-3 (加熱前)



写真 2. 4. 4. (3)-2 試験体 W-3 (加熱後)

C. 加熱温度

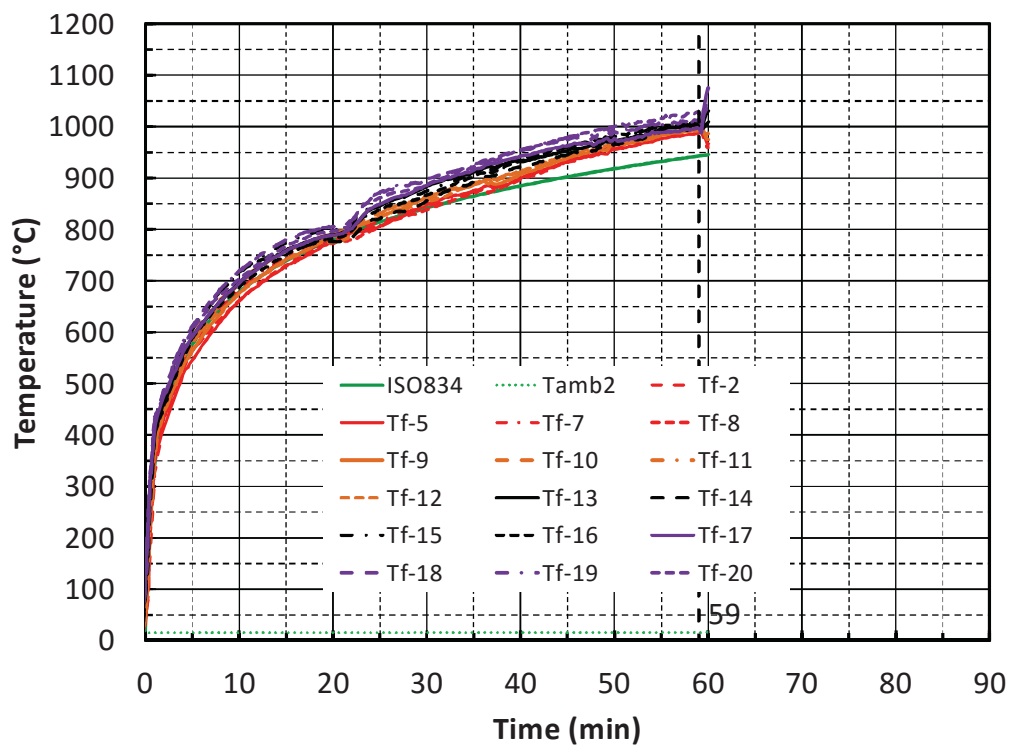


図 2. 4. 4. (3)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

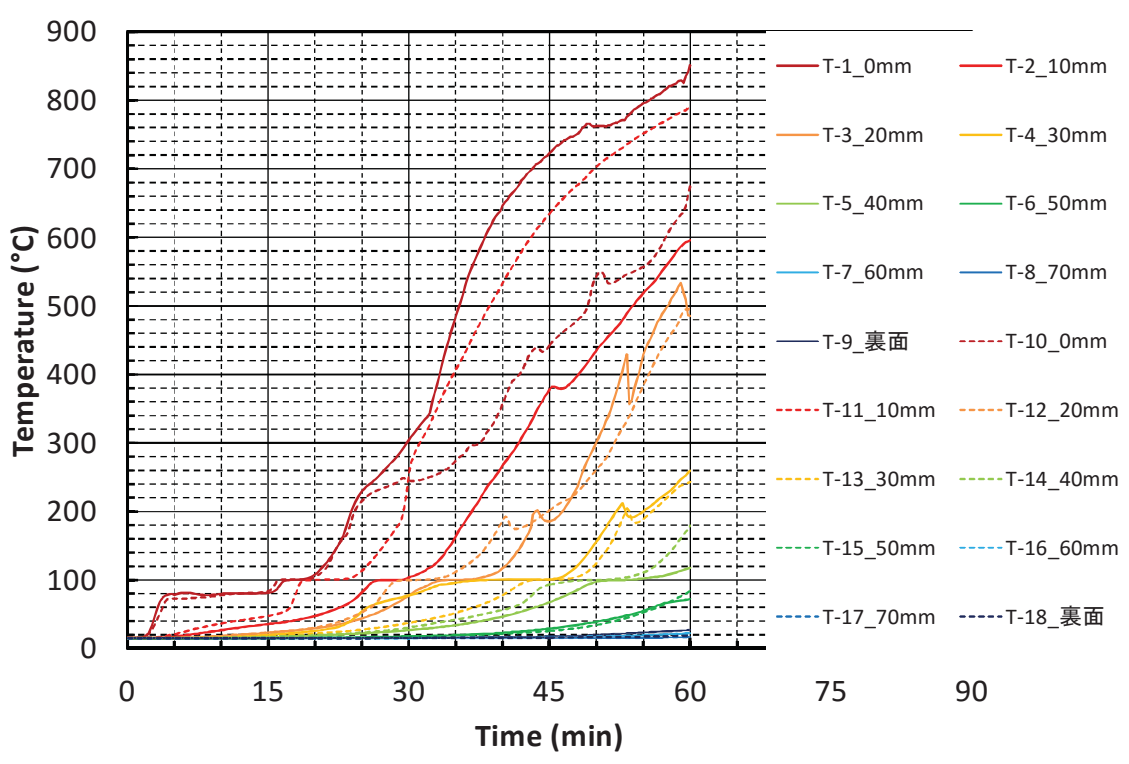


図 2.4.4. (3)-2 W-3 (せっこうボード 12.5mm) -集成材 パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同種、同厚の被覆材を用いながら、壁と床という設置方法の異なる実験結果 (F-3:床、建研 H24GB-R12.5 : 小型床 (非載荷)、W-3:壁) を並べて示す。建研 H24GB-R12.5 は、同種の被覆材を同じ留め付け方法で施工した既往研究における実験結果である。

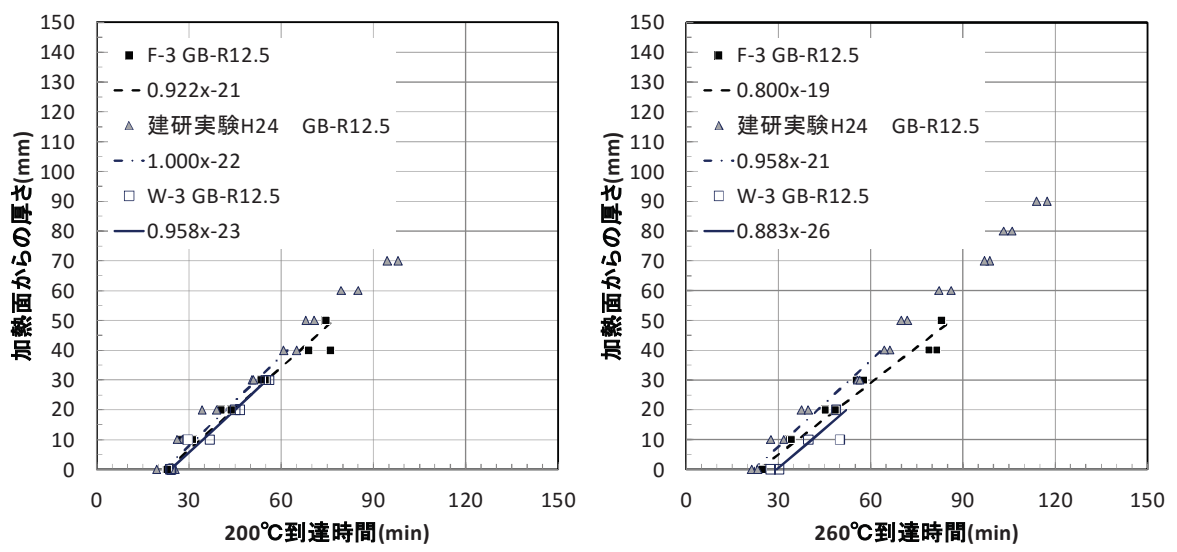


図 2.4.4. (3)-3 温度到達時間 W-3 206kN

F. 鉛直および面外変位量

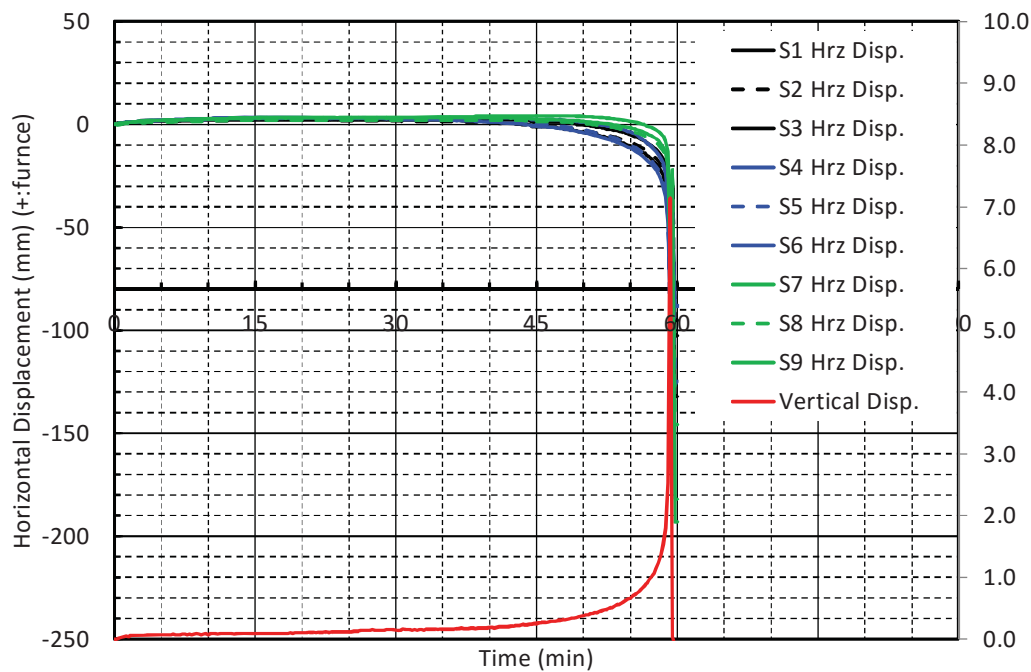


図 2.4.4.(3)-4 载荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

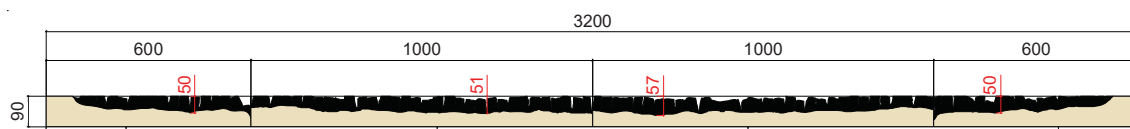


図 2.4.4.(3)-5 W-2 炭化図 (被覆材目地位置)

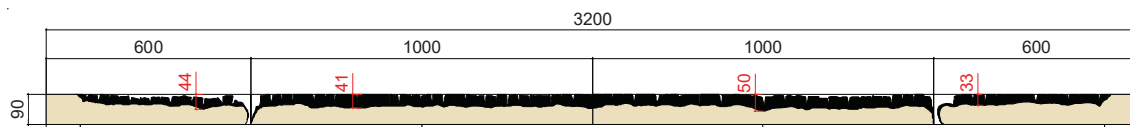


図 2.4.4.(3)-6 W-2 炭化図 (電対位置)

(4) 壁載荷加熱試験：W-4

A. 実験目的および載荷荷重

樹種がスギ、接着剤がAPI、総厚 90mm の集成材パネルに、せっこうボード 12.5mm 厚を被覆して構成した壁に対して、載荷加熱実験を行い、荷重支持能力が失われる時間を測定する。

載荷荷重は、W-3 の実験で偏心の影響を考慮しないままでは、燃えしろ設計が成立しないことが分かっているため、せっこうボード 15mm の防火被覆で 45 分準耐火構造とする既存の告示仕様の成否について確認することとし、今回は加熱前全断面に長期許容応力度が作用する荷重（曲げ耐力に安全率 1.1/3 を乗じた荷重）を設定した。

表 2.4.4.(4)-1 積載荷重

			0mm炭化	GB-R 15mm 有効面計算 24mm炭化
90mm GLT				
載荷加熱試験体	H	mm	90	90
パネル幅	b	mm	1,000	1,000
試験体幅	B	mm	2,000	2,000
残存厚さ	D_non charred	mm	90	66
断面係数	Z _{eff}	mm ³	2,700,000	1,452,000
燃えしろ寸法	d _{char}	mm	0	24
全断面	I	mm ⁴	121,500,000	47,916,000
断面積	A_non charred	mm ²	180,000	132,000
回転半径	i	mm	26	19
試験体長さ	L	mm	3000	3000
有効細長比	λ	-	115.5	157.5
許容応力	f _c	N/mm ²	5.02	2.70
長期安全係数	1.1/3	-	0.367	
短期安全係数	2/3			0.667
長期許容応力	f _{c_L}	N/mm ²	1.84	
短期許容応力	f _{c_S}	N/mm ²		1.80
	P _u	kN	903	356
載荷荷重	P	kN	331	237

B. 試験写真



写真 2. 4. 4. (4)-1 試験体 W-4(加熱前)



写真 2. 4. 4. (4)-2 試験体 W-4(加熱後)

C. 加熱温度

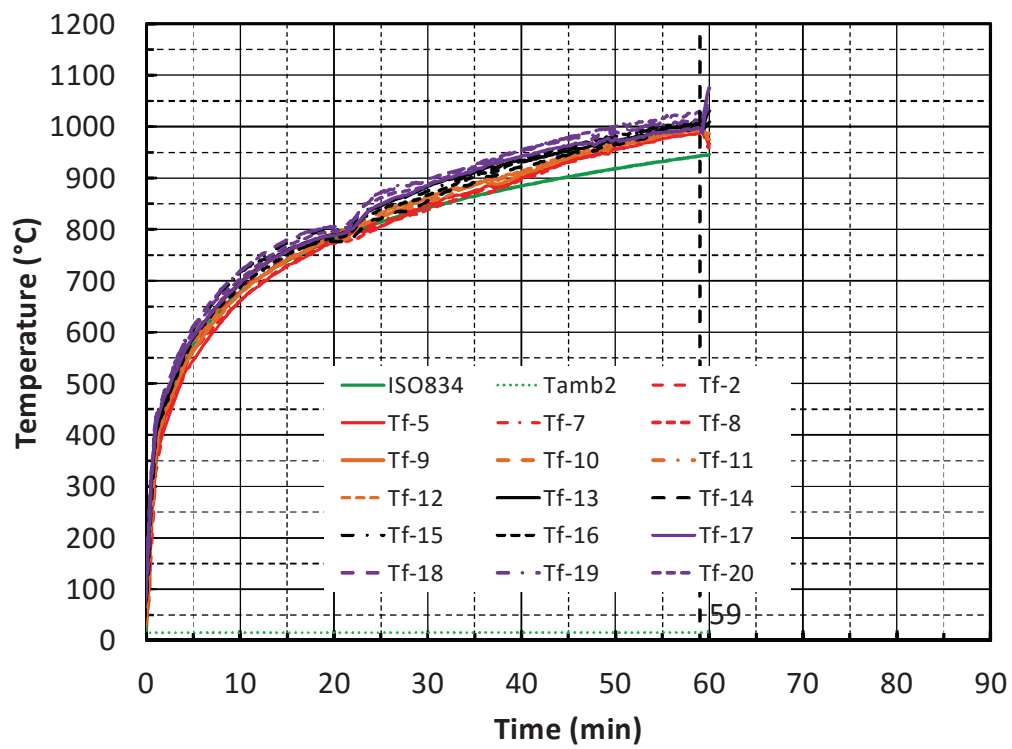


図 2. 4. 4. (4)-1 加熱温度

D. 試験体内部温度

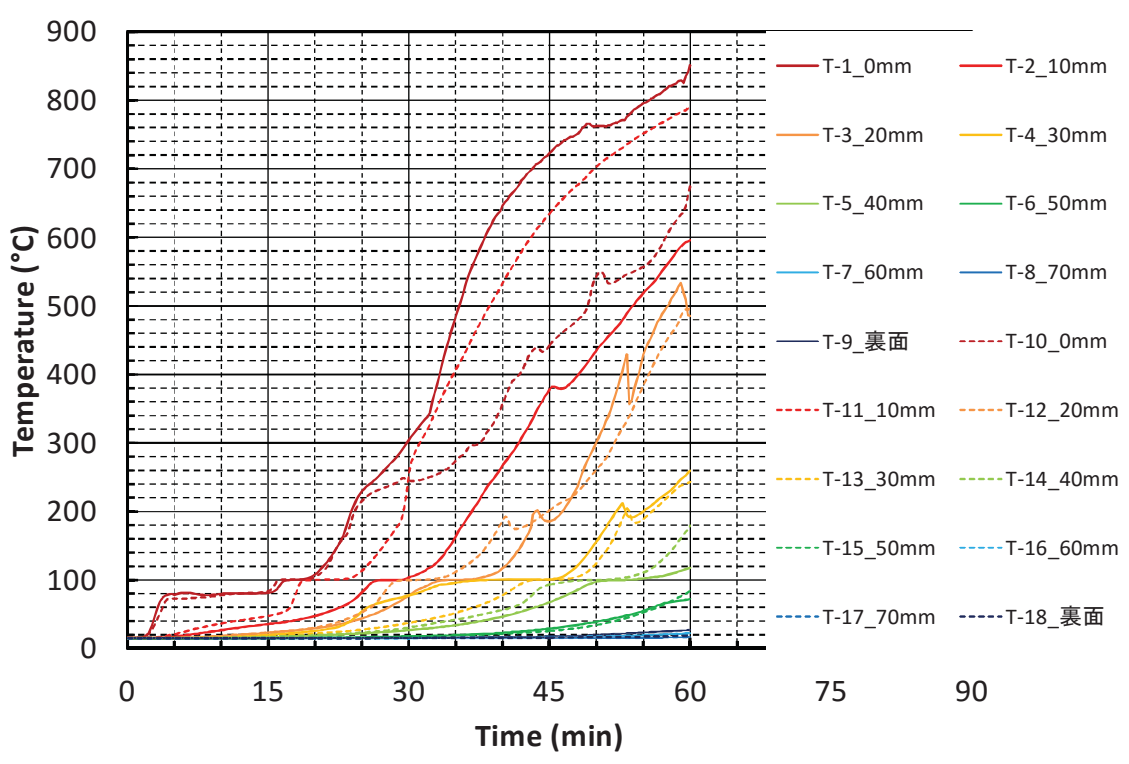


図 2.4.4. (4)-2 W-4 (せっこうボード 15mm) -集成材 パネル厚 150mm

E. 各断面ごとの炭化温度到達時間と炭化速度

凡例のうち、実験で得られた値を記号で示し、各々の炭化速度(mm/min)を直線の傾きとして示す。変数'x'は到達時間(min)の意である。また比較のため、同種、同厚の被覆材を用いながら、壁と床という設置方法の異なる実験結果(F-4:床、KF-3-GB-R15:小型床(非載荷)、W-1:壁)を並べて示す。

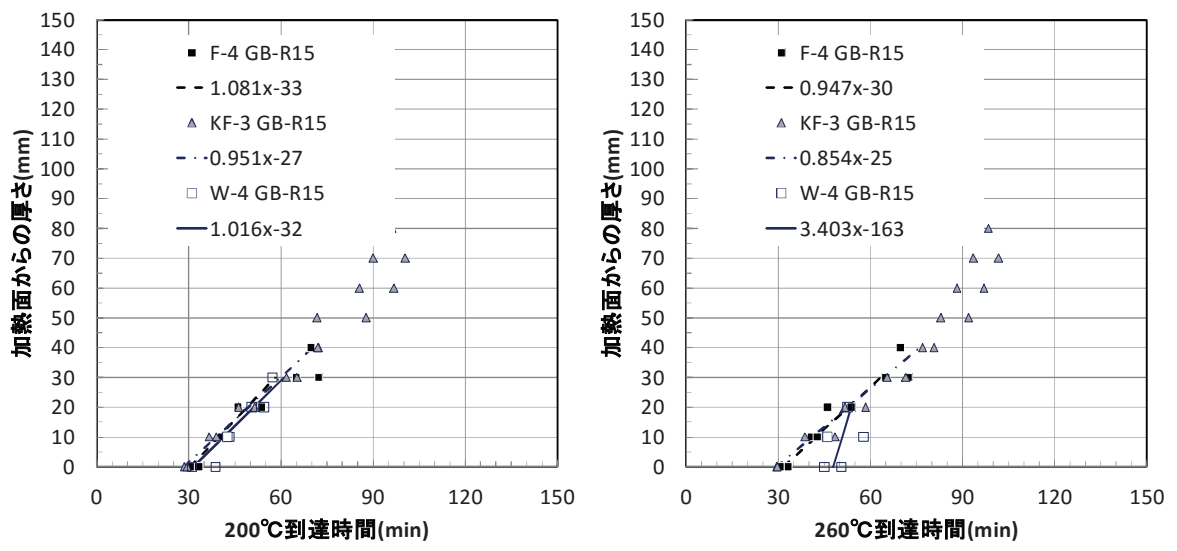


図 2.4.4. (4)-3 温度到達時間 W-4 331kN

F. 鉛直および面外変位量

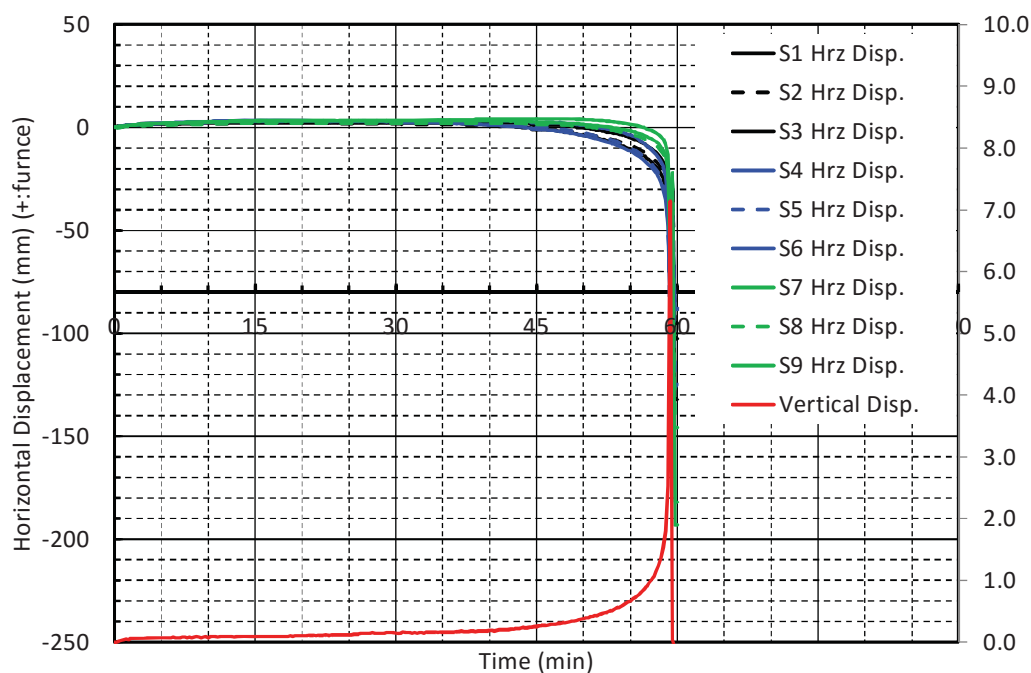


図 2.4.4.(4)-4 载荷荷重及び変位量

G. 炭化状況

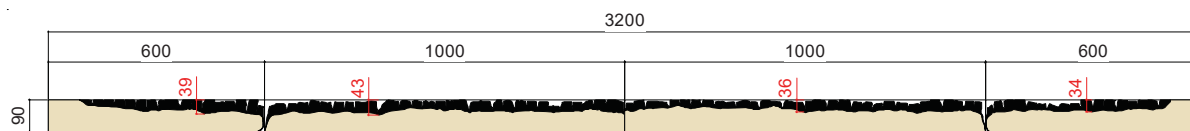


図 2.4.4.(4)-5 炭化図（被覆材目地位置）

※電対位置データなし

表 2.4.5-1 に荷重加熱実験による保有耐火時間をまとめて示す。CLT、集成材ともにせっこうボード12.5mm厚の被覆を考慮して60分の燃えしろ設計を行ったW-1、W-3の試験体で、目標耐火性能に至る前に座屈が確認された。図 2.4.4.(1)-3、図 2.4.4.(3)-3 に示す温度到達時間からは、小型試験体および実大の厚板床試験体と比較して、木質パネル表面の炭化開始時間がばらつくとともに多少遅れる傾向にあるが、この影響はどちらかといえば座屈を遅らせる効果があるため、燃えしろ設計の不成立は燃えしろ寸法の設定（床の場合と同じく27mmに設定）に問題があったとはいえず、むしろ片面加熱で生じる偏芯による曲げ荷重が作用していたと考えられる。

木質パネル表面の炭化開始時間が遅れる要因としては、垂直設置によりボードの脱落が抑制される点が挙げられるが、この影響は木質パネル表面からの厚さが深くなるにつれ小さくなり、20mm内側の地点の炭化時間では大きな差が見られなくなることが分かった。

次にせっこうボード15mm厚を被覆したW-2、W-4の試験体では、炭化前の全断面に長期許容荷重を荷重して実験を行い、せっこうボード15mm厚の防火被覆で45分準耐火構造とする既存の告示仕様が成立することを確認した。

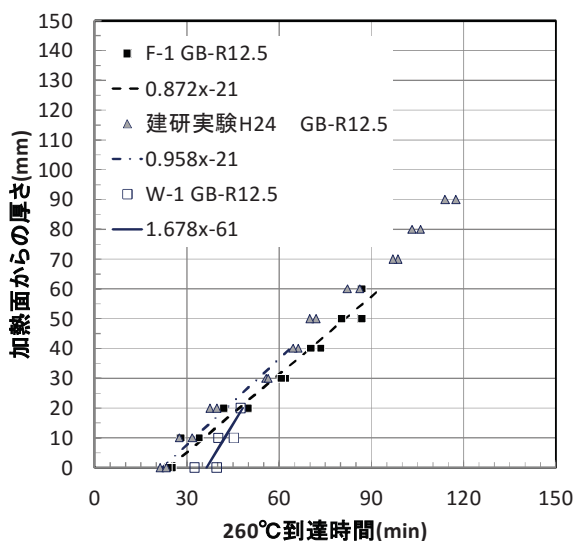


図 2.4.4.(1)-3 温度到達時間

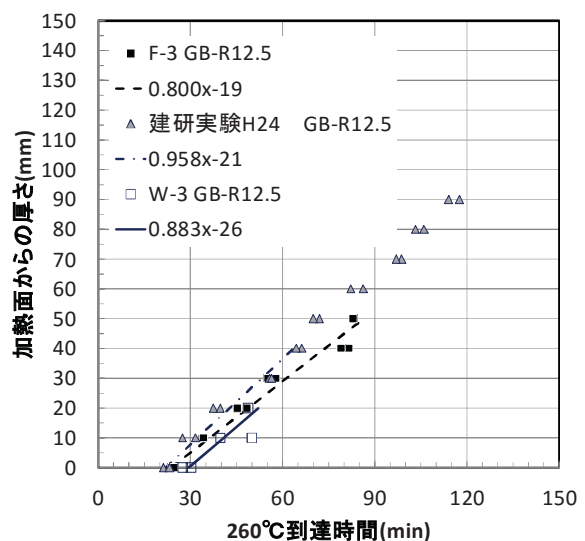






図 2.4.4.(3)-3 温度到達時間

表 2.4.5-1 荷重加熱実験による保有耐火時間一覧表

部材種類	試験体No.	仕様	載荷荷重	加熱時間	結果			耐火時間 (目標性能時間)	実験主旨	実験場所	実験日程
					非損傷性	遮熱性	遮炎性				
壁	W-1	 C90 せっこうボード12.5厚被覆	60分時残存断面に短期 95.8kN	52分	52分	-	-	52分 (60分)	イ	建研	12月21日
	W-2	 C90 せっこうボード15厚被覆	炭化前全断面に長期 254kN	48分30秒	48分30秒	-	-	48分30秒 (45分: 例示仕様)	イ	建研	1月18日
	W-3	 G90 せっこうボード12.5厚被覆	60分時残存断面に短期 207kN	59分	59分	-	-	59分 (60分)	イ	建研	11月13日
	W-4	 G90 せっこうボード15厚被覆	炭化前全断面に長期 331kN	57分30秒	57分30秒	-	-	57分30秒 (45分: 例示仕様)	イ	建研	11月20日