

載荷条件の異なる乾式間仕切壁の耐火性能

-壁の温度予測に関する実験と数値シミュレーションによる検討-

Fire Resistance of drywall assemblies with different loading condition

-Experiment on temperature prediction within wall and consideration by using numerical simulation-

藤井 考平 (K110615)
Kouhei Fujii (K110615)

1. はじめに

耐火設計は、火災拡大を抑制するための区画設計と建築物の火災時における構造安定性を確保するための構造耐火設計からなり、火災室外への延焼防止、建築物の崩壊・倒壊防止を目標としている。^{1), 2)}

乾式間仕切壁の耐火性能を低減させる要因として、乾式間仕切壁の熱膨張に対して周辺架構が拘束することによって生じる熱応力(図 1a) や火災時に柱や梁に生じるたわみ等による強制変形(図 1b) が考えられ、これらが相互的に作用することで耐火性能を低減されると考えられる。

しかし、火災時の区画部材に生じる熱応力や架構の変形による強制変形が乾式間仕切壁の耐火性能に与える影響について、十分な知見が蓄積されていないのが現状である。³⁾

本研究では、火災時に区画部材に生じる熱応力や架構部材の熱変形より強制変形を受ける乾式間仕切壁を載荷加熱実験にて再現し、その条件下における乾式間仕切壁の耐火性能を明らかとするともに、実験より得られた知見から壁の温度推移について数値シミュレーションを用いて検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験条件

表 1 に試験体概要と実験条件を示す。本研究では、火災時の区画部材に生じる熱応力や架構部材の変形による強制変形の影響を把握するために、中型複合炉を用いての中規模壁体の加熱実験、模型区画火災及び大型壁炉を用いての実大規模壁体の載荷加熱実験を行った。試験体は強化せっこうボードを両面 1 枚縦張りにした乾式間仕切壁とした。

2.2 中規模加熱実験

中規模加熱実験(以下、中規模実験と称す)では、予備実験として熱応力と強制変形の影響を抑制した条件下の乾式間仕切壁の耐火性能を把握するため、載荷せず加熱実験のみを実施した。

2.3 実大規模載荷加熱実験

実大規模載荷加熱実験(以下、実大規模実験と称す)にあつては、本実験として、熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁の耐火性能を把握するため、熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁を載荷実験により再現した。

載荷方法として、試験体 S1,S2 では、火災時に熱

応力(図 2a))を受ける乾式間仕切壁を再現するため、載荷装置にて試験体の鉛直変形を拘束した条件で実験を行った。一方、試験体 S5 にあつては、火災時に熱応力に加えて強制変形を受ける乾式間仕切壁を再現するために、載荷装置にて試験体に強制的に鉛直変形を生じさせた。特に、試験体 S5 では火災時に梁・壁が高温状態になり、壁体内に大きな熱応力が生じるとともに、上部梁のたわみによる強制変形を受ける状況を再現するため、乾式間仕切壁のスタッドの温度が、300℃程度に達するまでは試験体の鉛直変形を拘束し、それ以降は、0.5mm/min のペースで試験体に強制的に鉛直変形を加えた。なお変形にあつては、図 2b)に示すように区画中央部(等分布変形)における強制変形とした。また、実験時の荷重及び変位の測定の安定化を図るために初期荷重として、試験体 S1,S2 に約 10kN、試験体 S5 に約 5kN の圧縮力を作用させた状態で加熱を開始した。

2.4 測定方法

測定項目については、加熱炉内温度および試験体温度とし、温度測定には K 型熱電対を使用した。図 3 に試験体の熱電対配置図、図 4 に試験体測定面の概略図を示す。図 4 に示すように、試験体温度は、

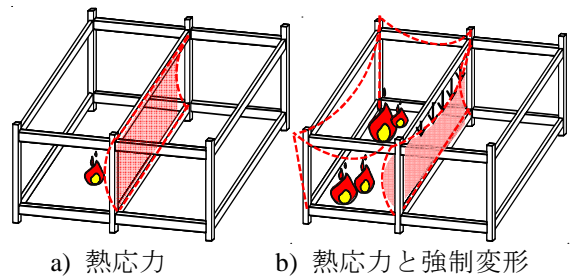


図 1 火災時の架構部材と区画部材の変形

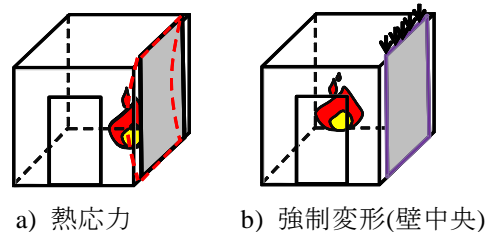


図 2 載荷条件

表 1 試験体概要および実験条件

試験体 番号	試験体概要						実験条件				
	強化せっこうボード(GB-F)			軽量鉄骨下地材(65形、非JIS製品)			加熱方法		載荷方法		
	寸法(W×H)[m]	厚さ[mm]	張り方	スタッド	ランナー	振れ止め	使用装置	設定α値	載荷条件	載荷開始時間	載荷ペース
S1	3.1×3.1	12.5	両面1枚 縦張り	65×45×10 t=0.6	67×40 t=0.6	25×10 t=1.0	模型区画 火災	690	熱応力 (鉛直変形の拘束)	-	-
S2		650									
S5	3.1×3.0	15					ガス炉	460	強制変形 (区画中央部・均等載荷)	試験開始 25分後	0.5mm/min (1%/hour)
SS2	1.5×1.5	12.5						460	-	-	-
SS3							690				
SS5							460				
SS6			650								

「-」は該当なしを示す

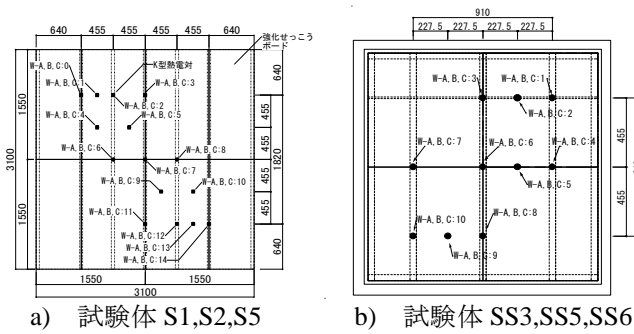


図3 熱電対配置図(単位:mm)

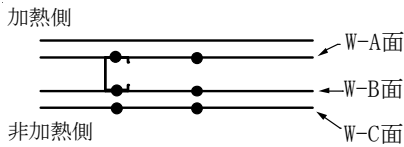


図4 試験体測定面概略図

加熱側ボード裏面(以下、WA面と称す)と非加熱側ボード表面(以下、WB面と称す)と非加熱側ボード裏面(以下、WC面と称す)の3面において温度を測定した。また、試験体非加熱面の温度上昇状況を把握するため、サーモカメラを用いて実験時の非加熱面の熱画像を撮影した。

3. 実験結果

3.1 観察結果

中規模実験の試験体 SS3, SS5, SS6 における観察結果を図5に示す。熱応力と強制変形を抑制した試験体においては、試験体 SS3 は着火約 17 分後、試験体 SS5 は着火約 55 分後、試験体 SS6 は着火約 26 分後に非加熱面の中央目地部に隙間が生じ、内部に赤熱を確認した。また、赤熱確認時の試験体非加熱面の熱画像において、目地部の隙間に沿って局部的な温度が上昇するのを確認した。さらに、実験後に試験体の加熱面と非加熱面の損傷状況を観察すると、非加熱面、加熱面ともに目地部に隙間が生じた。これは、ボードが高温状態になることで熱収縮が生じたためと考える。

実大規模実験の試験体 S1, S2, S5 における観察結果を図6に示す。熱応力と強制変形を受ける試験体において

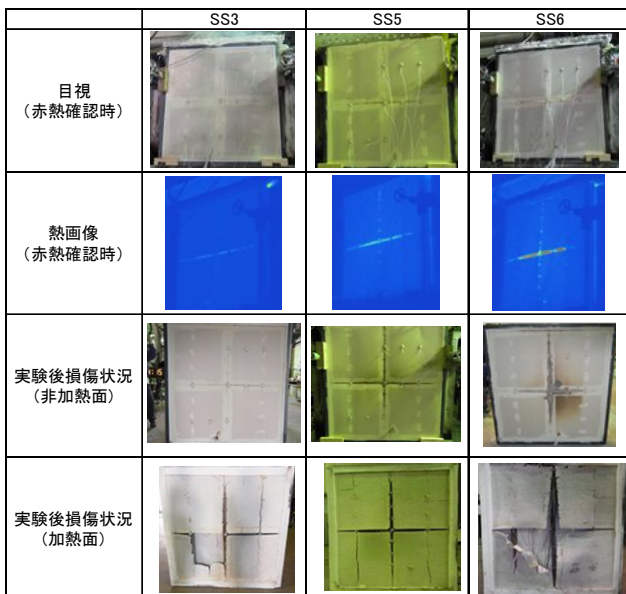


図5 観察結果(試験体 SS3, SS5, SS6)

は、面外方向に大きく変形するとともに、試験体 S1 は着火約 17 分後、試験体 S2 は着火約 20 分後、試験体 S5 においては着火約 40 分後に中央目地部に隙間が生じ、内部に赤熱を確認した。また、赤熱確認時の試験体非加熱面の熱画像において、目地部の隙間に沿って温度が局部的に上昇するのを確認した。

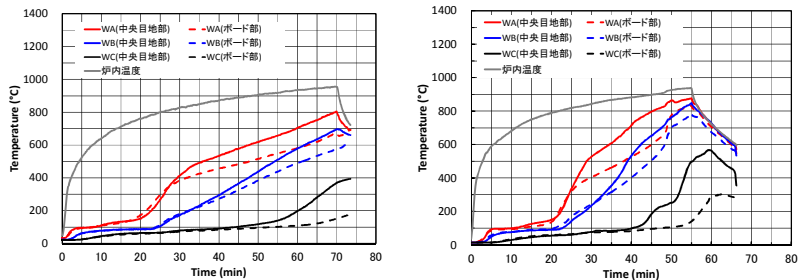
実験後の試験体の非加熱面をみると、目地部に隙間が生じるとともに、強制変形を受ける試験体 S5 においては、試験体左上にボード亀裂が生じた。一方、加熱面をみると、どの試験体においても加熱側ボードが脱落しているのを確認した。

3.2 測定結果

図7に試験体 SS5 と試験体 S5 の各測定面における目地部とボード部の温度推移の比較を示す。

観察結果より、加熱面と非加熱面において中央目地部に隙間が生じるのを確認したことから、試験体 SS5 においては、中央目地部(W-A, B, C:4, 5, 6, 7 の平均値)とボード部(W-A, B, C:1, 2, 9, 10 の平均値)に、試験体 S5 においては、中央目地部(W-A, B, C:6, 7, 8 の平均値)とボード部(W-A, B, C:1, 2, 4, 5, 9, 10, 12, 13 の平均値)に分けて測定結果を示す。

試験体 SS5、試験体 S5 どちらにおいても、100℃の温度停滞域を超えるまでは、目地部とボード部は同様の温度推移を示すが、それ以降は、目地部が先行して温度が上昇し、各測定面において同様の傾向が見られた。特に熱応力と強制変形を受ける試験体 S5 では目地部とボード部の温度推移に顕著な差が見られ、WA面とWB面においては、炉内温度近くまで温度が上昇した。これは、観察結果より試験体 S5 は加熱側ボードの脱落が確認できたことから、ボードの脱落によって、炉内の高温空気が壁体中間層



a) 試験体 SS5

b) 試験体 S5

図7 目地部とボード部の温度推移の比較

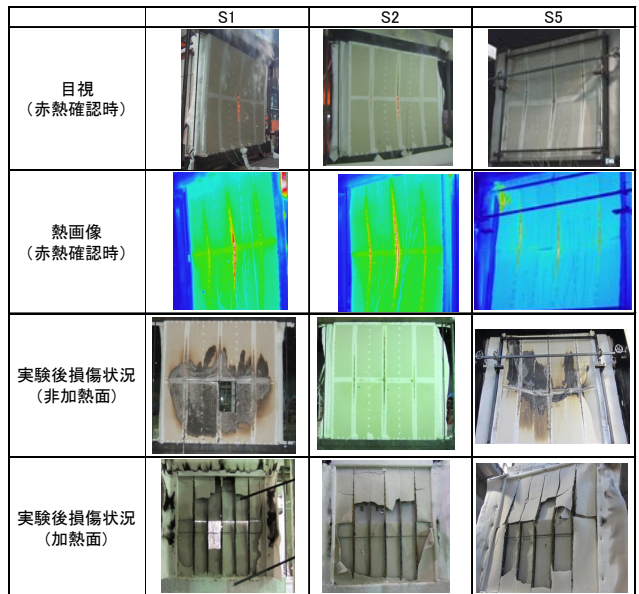


図6 観察結果(試験体 S1, S2, S5)

に流入したものと考えられる。また熱応力や強制変形を受けることで、目地部の開きが助長されるとともに、ボードに亀裂が生じたことから、熱応力と強制変形を抑制した条件下の試験体 SS5 よりも温度上昇が大きくなったものと考えられる。

次に熱応力と強制変形による温度推移の影響を把握するため、中規模実験と実大規模実験において、加熱条件が同様になった試験体を比較する。図 8 に試験体 S1 と試験体 SS3 を、試験体 S2 と試験体 SS6 を、試験体 S5 と試験体 SS5 の温度推移をそれぞれ比較した結果を示す。

どの比較においても、100°Cの温度停滞域を超えて以降は、熱応力と強制変形を受ける試験体の方が、先行して温度が上昇する傾向となった。特に試験体 S1,S2 においては、それぞれ着火約 17 分後、着火約 21 分後に WA 面と WB 面の温度がともに炉内温度にまで瞬時に温度が急上昇していることから、早期に加熱側ボードが脱落したことが試験体温度推移から顕著に傾向として見られた。また WA 面の温度が 600~700°C に達したときにボード脱落が起きる傾向が見られる。

以上より、熱応力と強制変形を受けることで、乾式間仕切壁により大きな目地の開きやボードの亀裂を生じさせ、最悪の場合は、早期ボードの脱落によって壁体の温度上昇が加速され、設計上、確かめられた保有耐火時間よりも早く、耐火性能が失われる可能性がある。

4. 有限要素法による数値シミュレーション

実験結果より、熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁は目地の開きやボードの脱落、亀裂が生じることで、壁体の温度推移に変化が見られたことから、熱応力と強制変形を受けることで壁体の伝熱性状が大きく変化することが考えられる。そこで、乾式間仕切壁の伝熱性状を把握するため、実験結果より得られた知見をもとに有限要素法による数値シミュレーションを用いて、壁の温度予測を行った。解析にあつては、汎用解析ソフト ABAQUS を用いて実施した。

4.1 解析モデル

図 9 に解析モデルの概要図を示す。モデルにあつては、非定常 1 次元熱伝導解析とし、1 辺 2.5mm の

要素で分割した。また、加熱面と非加熱面においては対流熱伝達と放射熱による伝熱があるとし、表 4 に示す物理定数と雰囲気温度を境界条件として設定した。壁体にあつては、せっこうボードとスタッド・空気層から構成される中間層に分けて、熱伝導による伝熱があると設定した。熱物性値については、せっこうボードは文献¹⁾に基づいて設定し、中間層は、せっこうボードが加熱されることで、内部に含まれる水分が水蒸気として中間層に充満することを想定して設定した。図 10 にせっこうボードと水蒸気の水蒸気熱伝導率を示す。各層の熱物性値は温度依存性を考慮して設定した。

4.2 解析結果および考察

(1) せっこうボードの含水率および中間層の熱伝導率の検討

まず、せっこうボードの含水率について検討する。乾式間仕切壁に構成されるせっこうボードは、含水性の部材であることから、加熱された時の温度推移において 100°C の温度停滞域が生じる。その領域の長さは、含水率による影響が大きい。そこで、解析上で設定する含水率をパラメータとして実験値と比較することで、今回の実験におけるボードの含水率について検討を行った。

さらに、中間層における鋼製スタッドによるヒートブリッジやボードの隙間からの対流熱等を考慮した中間層の見かけ上の熱伝導率を把握するため、解析上で中間層に設定する熱伝導率をパラメータとして実験値と比較することで、今回の実験における中間層の見かけ上の熱伝導率を定量的に把握する。

なお、実験値にあつては、熱応力と強制変形を抑制し、比較的壁体の損傷が小さい試験体 SS2,SS5 の実験結果を用いた。また、本研究では、壁体内の温度分布の解析値と実験値が良好に一致するよう含水率と中間層の見かけ上の熱伝導率を試行錯誤法によって計算し求めた。

図 11a) にせっこうボードの含水率をパラメータに解析した結果を示す。せっこうボードの含水率は、文献¹⁾によると 10~30% とされているが、図に示すように、どの試験体においても、WA 面の温度推移に着目すると、含水率が高くなれば、温度停滞域は長くなり、本試験体においては、含水率 30% とした

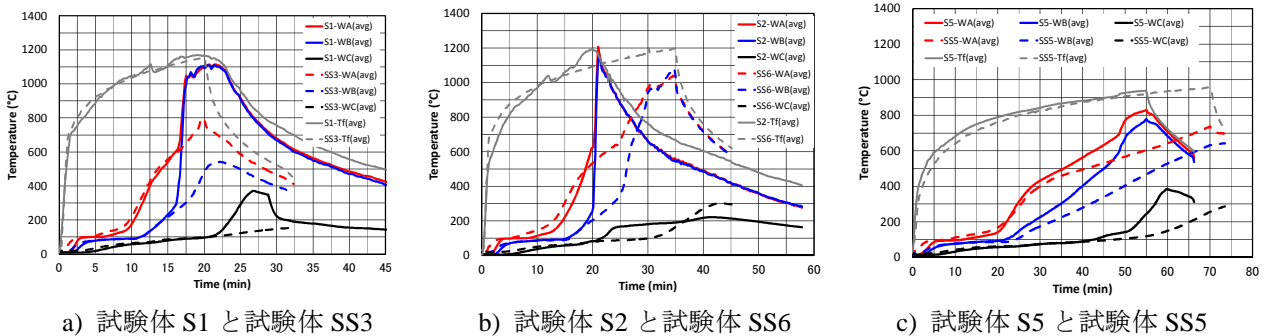


図 8 熱応力と強制変形による温度推移への影響

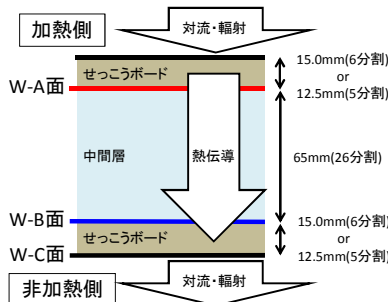


図 9 解析モデル概要図

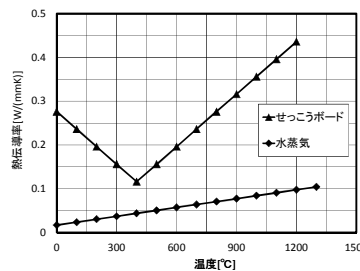


図 10 熱伝導率の設定値

表 2 物理定数と雰囲気温度の設定値

ステファンボルツマン定数		5.67×10 ⁻⁸
[W/(m ² K ⁴)]		
対流熱伝達率	加熱面	23.2
	非加熱面	5.8
輻射率	炉内ガス	1.0
	せっこうボード	0.9
雰囲気温度	加熱面	T _{at} ^{1/6} +20
	非加熱面	20

時、温度停滞域を抜けて温度が再び上昇する時間が実験値に近い結果となった。

図 11b)に中間層の見かけ上の熱伝導率をパラメータに解析した結果を示す。中間層の見かけ上の熱伝導率は、 $2.0[\text{W/mK}]$ とした時がもっとも実験値の温度推移に近づいた。文献⁴⁾によれば、常温から高温時において水蒸気の熱伝導率は約 $0.02\sim 0.1[\text{W/mK}]$ 、鉄の熱伝導率は約 $20\sim 80[\text{W/mK}]$ となり、今回の見かけ上の値はその中間値となる。

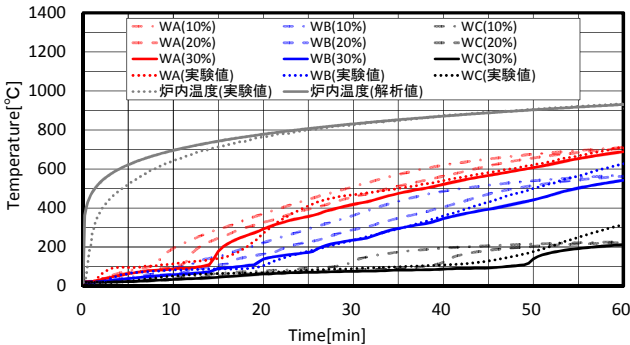
(2) 熱応力と強制変形の影響についての検討

(1)で検討した値を用いて熱応力と強制変形を与えた試験体 S1,S2,S5 の実験値と解析値を比較する。解析では、比較する試験体の加熱条件に合わせて、加熱温度を設定した。図 12 に比較結果を示す。図 12a),b)に示すように、熱応力のみを与えた試験体 S1,S2 においては、加熱側ボードが脱落して、WA 面と WB 面の温度が急上昇するまでの試験体温度の推移は、(1)で求めた値を用いることにより、良好に一致する結果が得られた。一方、熱応力と強制変形を与えた試験体 S5 においては、 100°C の温度停滞域を越えてからの温度推移にあっては、実験結果の方が解析値より高い推移を示した。これは、強制変形を受けることによって生ずるボードの亀裂や目地の過度の開きによる壁体内の伝熱性状の変化に対して、解析上設定した熱物性値が追従できていないことに起因するものと考えられる。今後さらに、強制変形を考慮した検討を行う必要がある。

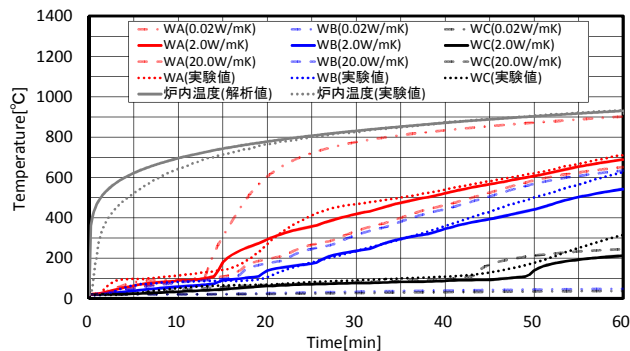
5. まとめ

熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁の耐火性能の実態を把握するために異なる载荷条件のもとで加熱実験等を行い、また乾式壁の温度予測を検討するため、有限要素法による数値シミュレーションを行い、以下の知見を得た。

- (1) 熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁の温度上昇を促進させる要因として加熱側ボードの脱落や亀裂、目地の開き等が考えられる。
- (2) 今回の実験において、乾式壁のスタッドと空気



a) せっこうボードの含水率



b) 中間層の見かけ上の熱伝導率

図 11 解析による熱物性値の検討(試験体 SS2)

層で構成される中間層の見かけ上の熱伝導率にあっては、スタッドのヒートブリッジや目地部の開きから流入する対流熱等の複合的影響を考慮すると、 $2.0[\text{W/mK}]$ となった。

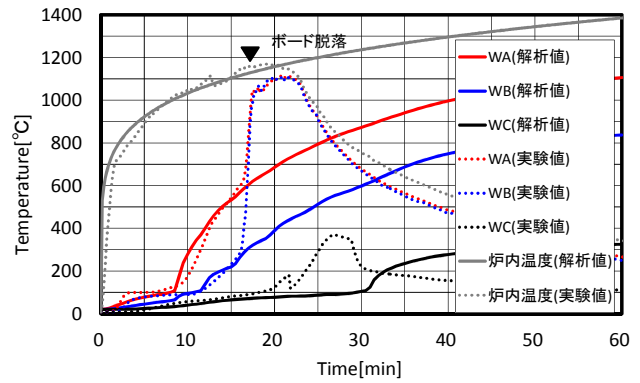
- (3) 熱応力と強制変形を受ける乾式間仕切壁を温度予測するには、乾式壁の損傷挙動を反映した熱物性値の設定を考慮する必要があることを本研究により明らかにした。

<記号>

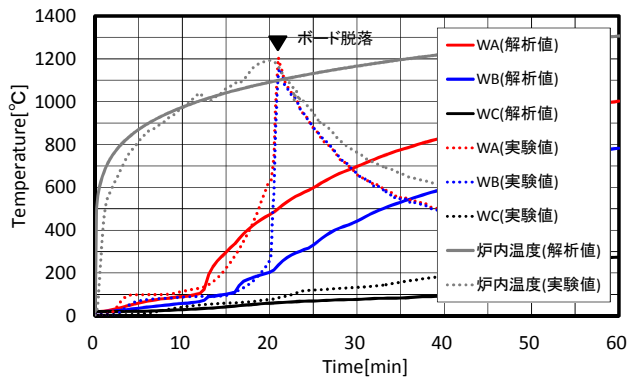
T_f : 火災温度 $[\text{°C}]$, α : 火災温度上昇係数 $[\text{°C}/\text{min}^{1/6}]$,
 t : 時間 $[\text{min}]$

<参考文献>

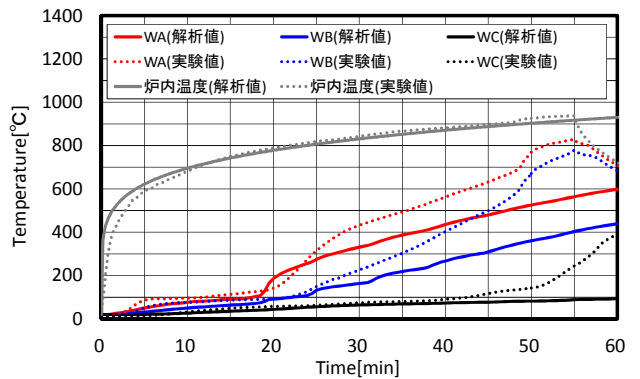
- 1) 鋼構造耐火設計指針, 日本建築学会, 2008
- 2) 耐火性能検証法の解説及び計算例とその解説, 井上書院, 2001
- 3) 火災時における非耐力耐火間仕切壁の変形性能に関する実験的検討, 森田武, 日本建築学会学術講演梗概集, 防火 2001, p.33-34
- 4) 伝熱工学資料 改訂第 4 版



a) 試験体 S1



b) 試験体 S2



c) 試験体 S5

図 12 実験値と解析値の比較