

# 耐熱性が高い建材で構成された木造高断熱外壁の 防火性能の数値予測モデルの構築

## Construction of the Numerical Calculation Model that Predicts Fire Performance of High Insulated External Wooden Walls Made of Materials with High Heat Resistance

糸毛 治<sup>1)</sup>、月館 司<sup>2)</sup>、遠藤 卓<sup>3)</sup>

Osamu.Itoge<sup>1)</sup>, Tsukasa.Tsukidate<sup>2)</sup>, Suguru.Endo<sup>3)</sup>

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／建築性能試験センター

Northern Regional Building Research Institute

Building Research Department

Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

---

<sup>1)</sup>北方建築総合研究所建築研究部建築システムグループ主査 <sup>2)</sup>同地域研究部環境防災グループ専門研究員 <sup>3)</sup>建築性能試験センター安全性能部評価試験課研究主任

<sup>1)</sup> Chief of Building System Group, Building Research Division, <sup>2)</sup> Researcher of Prevention and Environment Group, Regional Research Division, Northern Regional Building Research Institute (all of the above), <sup>3)</sup> Researcher of Performance Testing and Evaluation Section, Building Safety Performance Division, Building Performance Testing Center



## 概要 Abstract

# 耐熱性が高い建材で構成された木造高断熱外壁の防火性能の数値予測モデルの構築 Construction of the Numerical Calculation Model that Predicts Fire Performance of High Insulated External Wooden Walls Made of Materials with High Heat Resistance

糸毛 治<sup>1)</sup>、月館 司<sup>2)</sup>、遠藤 卓<sup>3)</sup>  
Osamu.Itoge<sup>1)</sup>, Tsukasa Tsukidate<sup>2)</sup>, Suguru Endo<sup>3)</sup>

キーワード : 木造外壁、高断熱、防火性能、数値計算、予測  
Keywords : *External Wooden Wall, High Insulation, Fire Protection Performance, Numerical Calculation, Predict*

## 1. 研究概要

### 1) 研究の背景

- ・省エネルギー基準への適合のため、北海道では高断熱化が必須であり付加断熱工法が主流になっている。
- ・木造断熱外壁の防火性能は断熱工法・断熱材との関係性が明らかではないため、仕様ごと個別に実大試験による性能評価を実施せざるを得ず、壁体開発に要する試験体数、時間、費用の負担は膨大となっている。
- ・これまで道総研では木造断熱外壁内の断熱材の位置・種類・厚さが防火性能に及ぼす影響を実験的に明らかにし、性能評価機関への情報提供、評価手法の提案を通じて、壁体開発・評価の負担軽減に努めてきた。
- ・伝熱工学に基づく数値計算により、木造断熱外壁の防火性能の予測が可能となれば、実大試験の実施は最終的な性能確認のみとなり、壁体開発の負担をさらに軽減できる。
- ・但し、防火性能の数値予測に向けては高温時の物性値が既知である建材は限られ、火災加熱時に熔融、燃焼する建材に対する見かけの熱伝導率等の設定や中空層での伝熱モデルの構築等、今後、解決されるべき課題が数多く存在する。

### 2) 研究の目的

耐熱性が高く高温時の物性値が既知である建材を用いた木造付加断熱外壁を対象に、壁体の温度推移予測、柱の炭化性状予測・非損傷性予測で構成される外壁の防火性能の数値予測モデルを構築する。

## 2. 研究内容

### 1) 外壁各層の温度推移予測に関する検討 (H31年度)

- ・ねらい : 非定常熱伝導計算により、外壁の構成部材各層表面、壁内柱の表面および試験体裏面(遮熱性の判定指標)における火災加熱時の温度推移を算出できる温度推移予測モデルを構築する。
- ・試験項目等 : 熱流量の測定、温度推移予測モデルの検討

### 2) 壁内柱の温度分布、炭化性状予測に関する検討 (H31~R2年度)

- ・ねらい : 1) で算出される壁内柱表面の温度分布と推移を与条件に、既往の木材の燃焼・炭化進行モデ

<sup>1)</sup> 建築研究部建築システムグループ主査 <sup>2)</sup> 地域研究部環境防災グループ専門研究員 <sup>3)</sup> 建築性能試験センター安全性能部評価試験課研究主任

<sup>1)</sup> Chief of Building System Group, Building Research Division, <sup>2)</sup> Researcher of Prevention and Environment Group, Regional Research Division, Northern Regional Building Research Institute (all of the above), <sup>3)</sup> Researcher of Performance Testing and Evaluation Section, Building Safety Performance Division, Building Performance Testing Center

ルを基に、壁内柱内部の温度分布と推移、並びに壁内柱の欠損状況を把握できる炭化性状予測モデルを構築して、1)の温度推移予測モデルに組み込む。

- ・試験項目等：炭化性状予測モデルの検討、温度推移予測モデルへの組み込み

### 3) 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討 (R2 年度)

- ・ねらい：2)で算出される壁内柱内部の温度分布、炭化による柱の残存断面を与条件に、木材の温度に応じて低減されたヤング係数を用いて壁内柱の曲げ剛性を算定し、柱の座屈の有無を判定できる非損傷性予測モデルを構築する。
- ・試験項目等：非損傷性予測モデルの検討

## 3. 研究成果

- ・本研究では、耐熱性が高い建材で構成された付加断熱工法の木造高断熱外壁（以下、対象外壁とする）を対象に、1)外壁各層の温度推移予測、2)壁内柱の温度分布・炭化性状予測、3)壁内柱の非損傷性予測の3点が可能な数値予測モデルを構築した。
- ・これにより、対象外壁において火災加熱を受けた場合の外壁各部温度、柱内部温度、柱の残存断面および柱の残存耐力の推定が可能となり、外壁仕様から防火性能の見通しが得られるようになった。
- ・以下、研究項目ごとの研究成果を示す。

### 1) 外壁各層の温度推移予測に関する検討 (H31 年度)

- ・相変化を考慮した非定常熱伝導計算および熱・水分移動計算の2つの手法を開発し、これにより火災加熱を受ける対象外壁内各部の温度推移を推定できるようになり、外壁仕様の違いによる相対比較が可能となった。
- ・非定常熱伝導計算では外壁内で発生する水蒸気の移動に伴う熱輸送を直接計算しないが、次の①～③に示す条件設定により、外壁内各部の温度推移について既往の実験結果に近い値が得られることがわかった。
  - ①各構成部材が持つ含水は、各構成部材が90℃～110℃の温度域において気化する。
  - ②①の気化熱(水蒸気潜熱)は、屋外側加熱時は内装材表面に屋内側加熱時は外装材表面に付与される。
  - ③内部結晶水を有し含水量が多いせっこうボードでは、ボード内の水蒸気移動を考慮して、その含水量をせっこうボードの非加熱側に集中的に配置するよう設定する。
- ・計算の予測精度をさらに向上させるためには、各種建材の高温時における物性値の精度向上が不可欠であり、また燃焼に伴い建材から発生する発熱量の与え方に検討の余地があることがわかった。

### 2) 壁内柱の温度分布・炭化性状予測 (H31～R2 年度)

- ・壁内柱の温度分布や炭化性状は、1)の温度推移予測モデルに柱内部の温度推移を組み込むことで、数値計算により求められるようになった。
- ・数値計算結果に対し、柱内各部において250℃を超えた部分を炭化部、250℃以下の部分を健全部とすると、既往の実験結果に近い残存断面が得られることがわかった。

### 3) 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討 (R2 年度)

- ・2)の壁内柱の温度分布・炭化性状予測から得られた柱の残存断面に対し、温度上昇に伴うヤング係数の低減量、断面欠損による柱の偏心量(中立軸の移動量)およびSecant式に基づき座屈に対する柱の残存耐力を求められるEXCELシートを作成した。
- ・柱の残存断面から柱の保有耐力を推定できるようになり非損傷性の面から防火性能の予測を可能とした。

< 具体的データ >

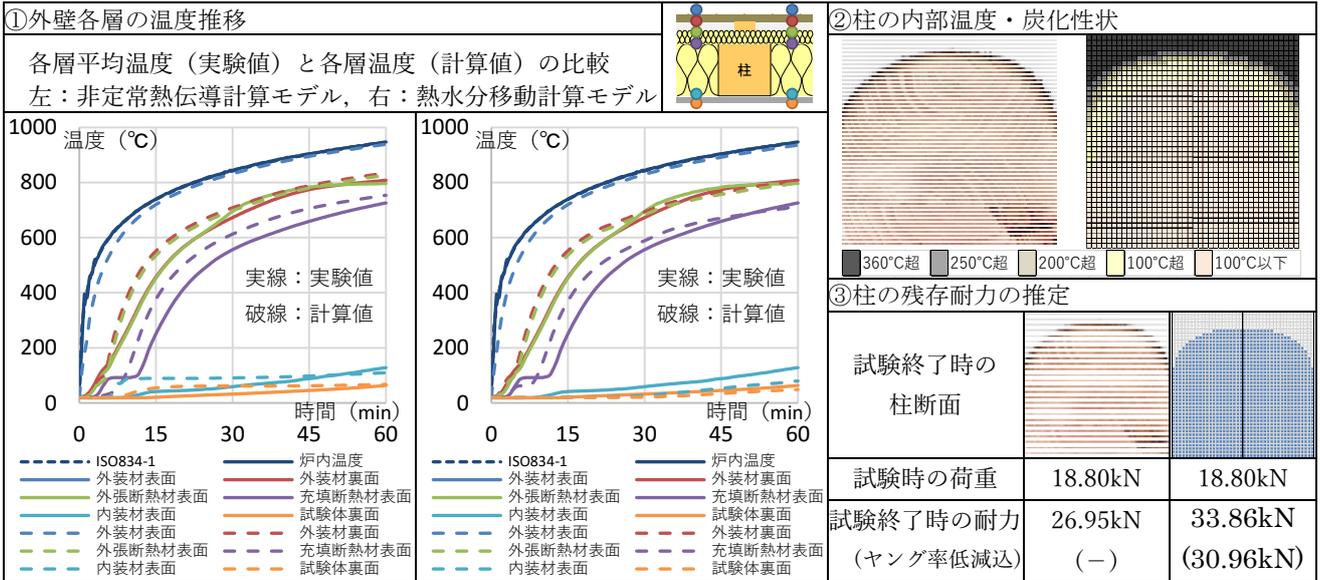


図 小型実験結果と計算結果の比較 例) 屋外側加熱：付加断熱外壁（付加断熱材厚さ 25 mm）

4. 今後の見通し

- ・この数値予測モデルにより、対象外壁において、外壁仕様による防火性能の優劣を想定できるようになるため、壁体開発時に必要な実験数を減らすことができ、開発コストの削減につながる。
- ・本研究成果は、民間企業からの技術相談等において、活用される。
- ・対象外壁の適用範囲をさらに広げるためには、火災加熱時に損傷や変形、燃焼する建材に対する見かけの熱抵抗値の推定法の構築、外壁内の中空層等に生じる熱対流に対するモデル化が必要となる。



## 目次

1. 研究の背景・目的 .....	1
(1) 背景.....	1
(2) 目的.....	1
(3) 研究の内容.....	1
2. 数値解析手法.....	2
(1) 熱伝導モデルによる解析法 .....	2
(2) 熱水分同時移動モデルによる解析法.....	3
(3) 柱耐力算定モデルによる解析法.....	4
3. 検討対象とする木造外壁.....	5
(1) 対象外壁の選定 .....	5
(2) 対象外壁の計算対象範囲と節点の設定 .....	6
(3) 対象外壁の違い・特徴.....	6
4. 外壁各層の温度推移予測に関する検討.....	7
(1) 計算条件の設定 .....	7
(2) 小型試験結果との比較.....	7
(3) 実大試験結果との比較.....	8
5. 壁内柱の温度分布、炭化性状予測に関する検討 .....	9
(1) 小型試験結果との比較.....	10
(2) 実大試験結果との比較.....	10
6. 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討 .....	11
7. まとめ.....	12



## 1. 研究の背景・目的

### (1) 背景

建築基準法では地域の防火規制、建築物の規模、用途に応じて、建築物の主要構造部に所定の防火性能を備えた防耐火構造とすることを要求している。木造断熱外壁を防耐火構造として用いる場合、木造断熱外壁の構成ごとに、国土交通大臣による大臣認定を取得する必要がある。

断熱化された木造外壁（以下、木造断熱外壁とする。）は、断熱材の種類や厚さ、断熱工法による断熱材の配置の組合せにより、外壁の構成・断熱仕様は多岐にわたる。しかし、それら外壁の構成・断熱仕様と防火性能を関連付ける指針は整備されていない。そのため、壁体開発を行う企業等は、試行錯誤しながら実大規模の防耐火試験による仕様検討をせざるを得ない現状がある。

これまで道総研建築研究本部では、木造断熱外壁内の断熱材の位置・種類・厚さが防火性能に及ぼす影響を実験的に明らかにし<sup>1)~3)</sup>、性能評価機関への情報提供、評価手法の提案を通じて、壁体開発・評価の負担軽減に努めてきた。

さらに木造断熱外壁の防火性能について、伝熱工学に基づく数値計算により、完全再現による絶対評価は不可能としても、防火性能の見通しが得られるような予測が可能となれば、異なる外壁仕様間の相对比较ができるようになる。この相对比较により実大規模の防耐火試験の実施数を削減できたり、1回の試験で防火性能を確認できる仕様範囲を拡大できたりと壁体開発の負担をさらに軽減できれば、その意義は大きい。

一方、防火性能の数値予測に向けては、常温時の伝熱計算とは異なり不明な点が多い。次に示す①～③をはじめ、今後、解決されるべき課題が数多く存在する。

- ①各種建材の高温時の物性値は把握が難しく、これまでの既往研究等で高温時の物性値が明らかな建材は限られている。
- ②溶融・熱分解が発生する熱的挙動が不安定な建材は、火災加熱時に生じる溶融や熱分解、燃焼を加味した実効的な熱物性の定式化が数値計算で扱うためには必要となる。木材については研究が進んでいるが、発泡プラスチック断熱材をはじめ、木材以外の建材では熱物性の定式化は進んでおらず、数値計算では扱える状況にない。
- ③火災加熱時の外壁内中空層の熱収支については、中空層内の対流や放射成分の熱伝達、中空層に接する建材からの熱分解による吸熱・発熱等の実態が解明されておらず、モデル化できていない。本研究では、これらの事情を踏まえた上で、①物性値がすべて既知の建材、②燃焼や溶融・熱分解が発生しない耐熱性が高い建材、③中空層がない外壁の3点をすべて満たす外壁を対象に、防火性能の数値予測モデルを構築することを目指す。そしてこれら不明な点については、今後、研究が進み解決された時点で、本研究で構築する数値予測モデルに取り込んでいく方針とする。

### (2) 目的

耐熱性が高く高温時の物性値が既知である建材を用いた木造断熱外壁を対象に、外壁の防火性能の数値予測モデルを構築することを目的とする。

### (3) 研究の内容

鉛直荷重を支える外壁の防火性能には、火災加熱に対し、所定の時間、遮炎性、遮熱性、非損傷性の3つを保持し続けることが要求される。遮炎性とは外壁が火炎を通さないこと、遮熱性とは外壁越しに可燃物に着火して燃え移るような熱を通さないこと、非損傷性とは外壁が荷重支持能力を失わないことをそれぞれ指す。

このうち遮炎性については、数値計算では直接把握できない。しかし火炎が外壁を貫通し遮炎性が失われる場合、その時間の前後で遮熱性もあわせて喪失するケースが多い。従って遮熱性を予測できれば、遮炎性についての推測も可能になると考えられる。

非損傷性は外壁が火災加熱を受けて、壁内の柱断面が小さくなることにより、柱の細長比が大きくなって、柱は座屈に至り荷重支持能力が失われる。従って、非損傷性の予測は、壁内柱が火災加熱を受けて、柱の炭化状況から残存断面、残存耐力を求めた上で試験時の載荷荷重に対する評価が必要となる。



図 1-1 実験に基づく防火性能の検討

本研究では、数値計算が最も単純な場合として、耐熱性が高く高温時の熱物性が既知である建材を用いた付加断熱工法の木造断熱外壁を対象に、1) 遮熱性（外壁各層の温度推移予測）、2) 炭化性状（壁内柱の温度分布予測）、3) 非損傷性（壁内柱の残存耐力の予測）の3つの観点から、外壁の防火性能の数値予測モデルを構築する。

### 1) 外壁各層の温度推移予測に関する検討

外壁の構成部材各層表面、壁内柱の表面および試験体裏面（遮熱性の判定指標）における火災加熱時の温度推移を算出できる数値予測モデルを構築する。

### 2) 壁内柱の温度分布、炭化性状予測に関する検討

1) 外壁各層の温度推移予測と併せて、壁内柱の内部の温度分布と推移、並びに壁内柱の欠損状況を把握できる数値予測モデルを構築する。

### 3) 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討

2) で算出される壁内柱の内部の温度分布、炭化性状から、火災加熱後の柱の断面性能、実大規模の防耐火実験を想定した载荷条件に対する柱の残存耐力を把握でき非損傷性を予測できる数値予測モデルを構築する。

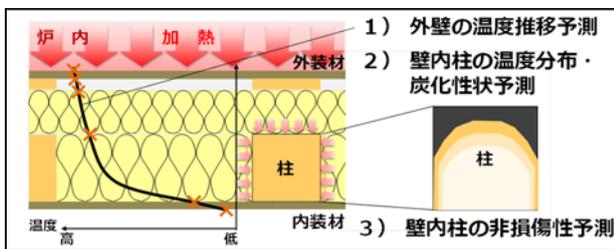


図 1-2 本研究の構成 (イメージ図)

## 2. 数値解析手法

第1章で示した本研究の検討項目となる数値予測モデルと第2章における数値解析手法の関係を表2-1に示す。

1) 外壁各層の温度推移予測に、2) 壁内柱の温度分布、炭化性状予測までを組み込み、火災加熱による外部環境の温度変化から、柱の炭化まで一気に数値解析を行う方針とした。この数値予測モデルの構築にあたり(1)熱伝導モデルによる解析法と(2)熱水分同時移動モデルによる解析法の2つのモデルを検討した。

3) 壁内柱の損傷による非損傷性予測については、(1)熱伝導モデルまたは(2)熱水分同時移動モデルで得られた柱の内部温度および残存断面から、実大規模の防耐火実験を想定した载荷条件に対する柱の残存耐力を求められるよう(3)柱耐力算定モデルを検討した。

### (1) 熱伝導モデルによる解析法

防火性能の試験体間比較を比較的短時間で行うことを目的に熱伝導による数値解析モデルを構築する。ここで考慮するのは、試験体表面および試験体内部の空間における対流・放射熱、材料内部の熱伝導、水分の蒸発・凝縮、木材の気化・炭化・燃焼である。潜熱を有効熱容量に換算すると、二次元モデルにおいて、熱収支は以下のように表される。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_B$$

$$C = c\rho + \frac{Q_e}{T_{ee} - T_{es}} + \frac{Q_p}{T_{pe} - T_{ps}} + \frac{Q_d}{T_{de} - T_{ds}}$$

ここで

$x, y$ : 位置[m],  $t$ : 時間[s],  $T$ : 温度[K],  $C$ : 有効体積比熱[J/(m<sup>3</sup>・K)],  $\rho$ : 材料の密度[kg/m<sup>3</sup>],  $\lambda$ : 材料の熱伝導率[W/(m・K)],

本研究における 数値予測モデルの検討 (第1章)	数値解析手法 (第2章)
1) 外壁各層の温度推移予測に関する検討	(1) 熱伝導モデル (2) 熱水分同時移動モデル
2) 壁内柱の温度分布、炭化性状予測に関する検討	
3) 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討	(3) 柱耐力算定モデル

図 2-1 検討項目と数値解析手法との関係

$c$  : 材料の比熱[J/(kg・K)],  
 $Q_e$  : 蒸発潜熱[J/m<sup>3</sup>],  $Q_p$  : 気化潜熱[J/m<sup>3</sup>],  
 $Q_d$  : dehydration 潜熱[J/m<sup>3</sup>],  
 $T_{es}, T_{ee}$  : 蒸発開始, 終了温度[K],  
 $T_{ps}, T_{pe}$  : 気化開始, 終了温度[K]  
 $T_{ds}, T_{de}$  : dehydration 開始, 終了温度[K]  
 $Q_B$  : 境界面における熱移動量 [W/m<sup>3</sup>]

材料の熱伝導率、比熱は温度の関数<sup>4)</sup>であり、蒸発の開始、終了温度はそれぞれ 90、110°C、木材揮発成分の気化開始、終了温度はそれぞれ 250、360°C とした。

境界面における熱移動 $Q_B$ には空気との対流熱伝達、火炎や材料間の放射熱伝達、燃焼発熱、水蒸気の凝縮熱がある。

外表面における対流熱伝達率は次式より算出し、通気層などの空洞内の対流熱伝達率は一定値 (5W/m<sup>2</sup>K) を与えた。

$Gr \cdot Pr > 108$  のとき、 $Nu = 0.13 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33}$

$Gr \cdot Pr \leq 108$  のとき、 $Nu = 0.56 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25}$

ここで

$Nu$  : ヌセルト数、 $Gr$  : グラスホフ数、

$Pr$  : プラントル数

放射熱伝達はモンテカルロ法によって各面要素間の形態係数を算出し、放射率を 1 と仮定して面要素間の放射熱伝達量を求める。

燃焼発熱<sup>5)</sup>には、発生したガスの有効発熱量および木材が炭化した炭の燃焼発熱量を与える。ガスの有効発熱量は、燃焼発熱量に試験体への吸収割合を表す係数を乗じたものである。

また、炭の燃焼発熱は、350°C以上の条件において、燃焼速度を一定として与える。

水蒸気の凝縮熱は、木材などから発生した水蒸気が低温の部位に移動して凝縮する現象を簡易的に模擬するものであり、次節の熱水分同時移動の結果などを参考に設定する必要がある。

数値計算には後退差分法を用いる。物性値は常に前時間ステップの値を用いることで収束を容易にする。

## (2) 熱水分同時移動モデルによる解析法

防火試験中には材料中の水分の蒸発により水蒸気が発生し、試験体内部の伝熱に影響を与える。そこで、水分移動を考慮した数値解析モデルを構築する。モデルの構築に当たり、次のことを仮定する。

- ・含水率が低く液状水の移動は無視できる
- ・水蒸気の拡散は Fick の拡散則に従う

・水蒸気を含む空気の移動は Darcy 則に従う

二次元モデルの場合、熱水分移動は下記のように表される<sup>6,7)</sup>。

[空隙空気の水分収支]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \varphi}{\partial t} + u \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial \varphi}{\partial y}) + E \\ & \quad + \varphi F_a \end{aligned}$$

[空隙空気の物質収支]

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_a}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_a}{\partial y} = \rho_a F_a$$

[材料の水分収支]

$$\rho_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = \rho_w W - E + F_B$$

[熱収支]

$$\begin{aligned} & C \frac{\partial T}{\partial t} + C_a u \frac{\partial T}{\partial x} + C_a v \frac{\partial T}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - L_e E \\ & \quad - L_v \rho_s S - L_d \rho_w W + Q_B \\ & C_a = \rho_a c_a + \varphi c_v \\ & C = \rho_s c_s + \rho_w c_w \theta + C_a \end{aligned}$$

ここで

$x, y$  : 位置[m],  $t$  : 時間[s],  $u, v$  : 風速[m/s],

$\theta$  : 含水率 [kg/kg],  $\varphi$  : 水蒸気濃度[kg/m<sup>3</sup>],

$T$  : 温度[K],  $\rho_w$  : 水の密度[kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_s$  : 材料の乾燥密度[kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_a$  : 乾燥空気の密度[kg/m<sup>3</sup>],

$C$  : 体積比熱[J/(m<sup>3</sup>・K)],

$C_a$  : 空隙空気の体積比熱[J/(m<sup>3</sup>・K)],

$c_w$  : 水の比熱[J/(kg・K)],

$c_s$  : 材料の比熱 (乾燥時) [J/(kg・K)],

$c_a$  : 乾燥空気の比熱[J/(kg・K)],

$c_v$  : 水蒸気の比熱[J/(kg・K)],

$L_d$  : dehydration 潜熱[J/kg],  $L_e$  : 蒸発潜熱[J/kg],

$L_v$  : 気化潜熱[J/kg],

$\lambda$  : 材料の熱伝導率[W/(m・K)],

$\lambda_a$  : 空気の熱伝導率[W/(m・K)],

$D_v$  : 材料中の水蒸気の拡散係数,

$W$  : dehydration 速度[1/s],

$E$  : 材料からの蒸発量[kg/(m<sup>3</sup>・s)],

$Q_B$  : 発熱および境界面における熱移動量[W/m<sup>3</sup>],

$F_B$  : 境界面における水蒸気移動量[kg/(m<sup>3</sup>・s)],

$F_a$  : 境界面における空気移動量[1/s]

材料からの水の蒸発（空隙空気への水分伝達）は次式で表される。

$$E = \alpha_m(\varphi_e - \varphi)$$

ここで

$\alpha_m$  : 物質伝達率[ $\text{kg}/\{(\text{m}^3 \cdot \text{s}) (\text{kg}/\text{m}^3)\}$ ],

$\alpha_h$  : 熱伝達率[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],

$\varphi_e$  : 温度  $T$ 、含水率  $\theta$  の材料に平衡する水蒸気濃度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

局所平衡に近い状態を想定し、物質伝達率には十分大きな値を与える。温度  $T$ 、含水率  $\theta$  の材料に平衡する水蒸気濃度は、材料の平衡含水率曲線  $f(T, \theta)$  を用いて次式で表される。

$$\varphi_e = \frac{M h_r P_s}{RT}$$

$$h_r = f(T, \theta)$$

ここで

$\varphi_e$  : 平衡する水蒸気濃度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$h_r$  : 平衡する相対湿度[%],  $P_s$  : 飽和水蒸気圧[kPa],

$M$  : 水 1mol の質量[g],  $R$  : 気体定数[ $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ],

$T$  : 温度[K],  $\theta$  : 含水率 [kg/kg]

材料中の水蒸気の拡散係数は Penman の経験式<sup>8)</sup>より次式とする。

$$D_v = 0.66 D_0 \phi_g = 0.66 D_0 (\phi_p - \theta \rho_s / \rho_w)$$

ここで

$D_0$  : 空気中の水蒸気の拡散係数[ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$\phi_g$  : 材料中の気相率[ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ],

$\phi_p$  : 材料の間隙率[ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ],

$\theta$  : 含水率 [kg/kg],

$\rho_w$  : 水の密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$\rho_s$  : 材料の乾燥密度[ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

温度上昇に伴い、圧力が上昇し、膨張に伴う空気移動が生じる。ここで、材料中の空気移動は Darcy 則に従うと仮定すると次式で表される。

$$u = K \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = K \frac{\partial P}{\partial y}$$

ここで

$P$  : 材料中の圧力[Pa],  $K$  : 通気係数[ $\text{m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ ]

材料中の圧力は乾燥空気の圧力と水蒸気の圧力の和であり、それぞれの圧力（分圧）は理想気体を仮定すると次式で表される。

$$P = p_v + p_a$$

$$p_a = \rho_a RT / M_a$$

$$p_v = \varphi_e RT / M_w$$

ここで

$p_a$  : 乾燥空気の圧力[Pa],  $p_v$  : 水蒸気の圧力[Pa]

木材の揮発成分の気化速度は次式とする<sup>9)</sup>。

$$S = R_v A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

ここで

$S$  : 気化速度[1/s],  $R_v$  : 揮発成分残存率[-],

$T$  : 温度[K],  $R$  : 気体定数[ $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ],

$E$  : 活性化エネルギー[ $\text{J}/\text{mol}$ ],  $A$  : 係数 [1/s]

せっこうボードの結晶水の分離 dehydration 速度は次式とする。

$$W = R_h A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

ここで

$W$  : dehydration 速度[1/s],  $R_h$  : 結晶水残存率[-],

$T$  : 温度[K],  $R$  : 気体定数[ $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ],

$E$  : 活性化エネルギー[ $\text{J}/\text{mol}$ ],  $A$  : 係数 [1/s]

境界面の熱フラックス  $Q_B$  には空気との対流熱伝達、火炎や材料間の放射熱伝達、燃焼発熱がある。

外表面における対流熱伝達率は次式より算出し、通気層などの空洞内の対流熱伝達率は一定値 ( $5\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$ ) を与えた。

$\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 10^8$  のとき、 $\text{Nu} = 0.13 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0.33}$

$\text{Gr} \cdot \text{Pr} \leq 10^8$  のとき、 $\text{Nu} = 0.56 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0.25}$

ここで

$\text{Nu}$  : ヌセルト数,  $\text{Gr}$  : グラスホフ数,

$\text{Pr}$  : プラントル数

放射熱伝達はモンテカルロ法によって各面要素間の形態係数を算出し、放射率を 1 と仮定して面要素間の放射熱伝達量を求める。

燃焼発熱<sup>5)</sup>には、発生したガスの燃焼や木材が炭化した炭の燃焼がある。揮発成分の燃焼発熱  $B$  は、着火温度以上のとき、

$$B = B_v S$$

ここで

$S$  : 気化速度[1/s],  $B_v$  : 揮発成分の燃焼熱[ $\text{J}/\text{kg}$ ]

この揮発成分の燃焼発熱  $B$  の値にさらに試験体に吸収される割合を表す係数を乗じた値を有効発熱量として与える。

また、炭の燃焼発熱は、 $350^\circ\text{C}$ 以上の条件において、燃焼速度が一定であると仮定して与える。

数値計算には後退差分法を用いる。物性値は常に前時間ステップの値を用いることで収束を容易にする。また、前時間ステップにおける温度の値を用いて空気移動の計算を先に行い、温度、水分の計算の際に風速は既知の値として扱う。

### (3) 柱耐力算定モデルによる解析法

火災加熱を受けた柱は、加熱側に近い面から柱部の温度が上昇し、炭化して断面欠損が生じる。この断面欠損の進み方に応じて、断面二次モーメント $I$ は低下し、残存断面の中立軸は非加熱側へ移動し柱に偏心が生じる。

また同時に柱部の温度が上昇する過程で、ヤング係数 $E$ は、図 2-2<sup>10)</sup>に示す通り温度に依存して低減する。柱偏心時の座屈荷重 $P_{cr}$ は、Secant 式<sup>11)</sup>より次式となる。

$$P_{cr} = \frac{\sigma_y A}{\left\{ 1 + \frac{ec}{i^2} \sec\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P_{cr}}{P_e}}\right) \right\}}$$

但し

$$P_e = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2}, \quad i = \sqrt{\frac{I}{A^2}}$$

ここで

$P_{cr}$  : 座屈荷重[N],  $\sigma_y$  : 降伏強度[N/mm<sup>2</sup>],  
 $A$  : 断面積[mm<sup>2</sup>],  $e$  : 偏心量[mm],  $\pi$  : 円周率,  
 $c$  : 図心から縁までの距離[mm],  $i$  : 断面二次半径[mm],  
 $P_e$  : 弾性座屈荷重[N],  $E$  : ヤング係数[N/mm<sup>2</sup>],  
 $I$  : 断面二次モーメント[mm<sup>4</sup>],  $l_k$  : 座屈長さ[mm],  
 実大規模の防耐火試験では、荷重支持部材(柱)の長期許容応力度に相当する荷重(一定値)を試験荷重として載荷し、試験を実施している。

柱の断面が減少し、柱の圧縮応力が降伏強度 $\sigma_y$ (近似的に、木材の基準強度 $F_c$ の値を使用)に達した時に柱が座屈すると仮定すると、その時の荷重 $P_{cr}$ が、想

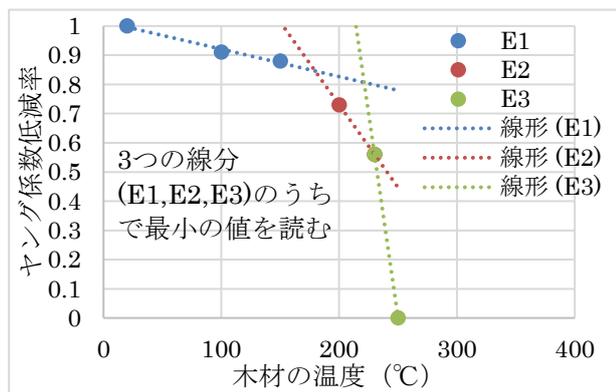


図 2-2 木材温度とヤング係数低減率<sup>10)</sup>

定される柱の座屈荷重となる。この $P_{cr}$ が、試験荷重を下回れば、座屈が生じて、非損傷性が失われるとした。

### 3. 検討対象とする木造外壁

#### (1) 対象外壁の選定

本研究で検討対象とする木造断熱外壁は、当機構の既往研究<sup>1)~3)</sup>において防耐火試験を実施し、試験データを有する外壁の中から、耐火性が高く高温時の熱物性が既知である建材で構成される木造軸組工法の外壁を選定した。

具体的には、外装材にけい酸カルシウム板または窯業系サイディング、内装材にせっこうボード、断熱材にロックウール断熱材を用いた付加断熱工法の木造外壁とし、図 3-1 に示す 2 種類の外壁(以下、対象外壁とする)とした。

外壁 A は、既往研究<sup>1)</sup>で実施した小型試験体を用いた防耐火試験(以下、小型試験)を行った際の試験体(幅 800 mm×高さ 800 mm)とした。この小型試験体には、加熱時間は 60 分までとし、加熱方向は屋外側加熱および屋内側加熱をそれぞれ行った試験データがある。

外壁 B は、既往研究<sup>3)</sup>で実施した実大規模の試験体(以下、実大試験体)を用いた防耐火試験(以下、実大試験)を行った際の試験体(幅 3,240 mm×高さ 3,230 mm)とした。この実大試験体には、加熱時間は防火性能が失われるまでとし、加熱方向は屋外側加熱および屋内側加熱をそれぞれ行った試験データがある。

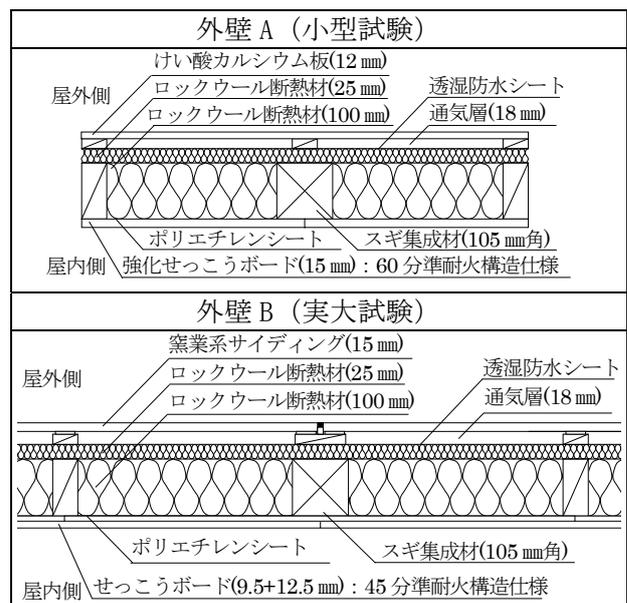


図 3-1 対象とする外壁仕様

## (2) 対象外壁の計算対象範囲と節点の設定

図 3-2 に示す通り、数値解析にあたり対象とする外壁仕様から計算対象範囲を定め、2 mm~3 mm の格子状になるように分割して、格子の中心に熱容量を持つ節点を設けた。また建材が外部境界や通気層の内部空洞に面する場合は、放射熱量の計算のため、その境界面に熱容量を持たない節点を配置した。

熱伝導モデルでは、さらに隣接する点を挟んで入力する建材の物性値が異なる場合はその境界（建材の表面に位置する点）には、熱容量を持たない表面節点を設けた。

## (3) 対象外壁の違い・特徴

外壁 A は小型試験、外壁 B は実大試験の試験デー

タを用いる。外壁の防火性能は、通常、実大試験による評価される。従って、実大試験の実験データは、外壁の防火性能（遮熱性・遮炎性・非損傷性）を評価したものといえる。

一方、小型試験では、その試験体の大きさの違いに起因し、同じ防耐火試験を実施しても、実大試験で評価される防火性能のうち、評価できていない部分がある。具体的には、小型試験では柱の全長を再現できないため、最終的には柱の座屈に支配される非損傷性は直接評価できない。また遮熱性・遮炎性についても、小型試験では外壁内の伝熱状況は再現できるが、実大試験に比べ壁の力学的変形や各構成部材の亀裂や損傷等による影響が小さくなる点や加熱側面材の脱落挙動を再現できない点がある。

一方、数値計算からみると、小型試験のデータは外壁内の伝熱状況を、実大試験に比べ不均一化する要因の影響（各構成部材の損傷や外装材の脱落による影響）を除いた状態で再現されていると言える。また小型試験では再現できない柱の座屈についても、外壁柱の重要な座屈要因である柱の断面性能の低下は小型実験でも把握でき、非損傷性に対する見通しは得られる。従ってこの柱の断面性能を数値計算により再現できれば、非損傷性に対する予測が可能となる。

以上の実大試験と小型試験の違いや特徴を踏まえ、本研究では、次章以降、第 2 章の数値解析手法で得られた計算結果と実験データとの比較を行うにあたり、次の視点により考察を行う。

まずは外壁 A（小型試験）の実験データとの比較から、外乱要因が少ない条件下で、数値解析手法としての妥当性を検証する。次に外壁 B（実大試験）の実験データとの比較から、外壁の防火性能を評価する実大規模の防耐火試験に対して、本研究の数値解析手法による適用範囲を検証する。

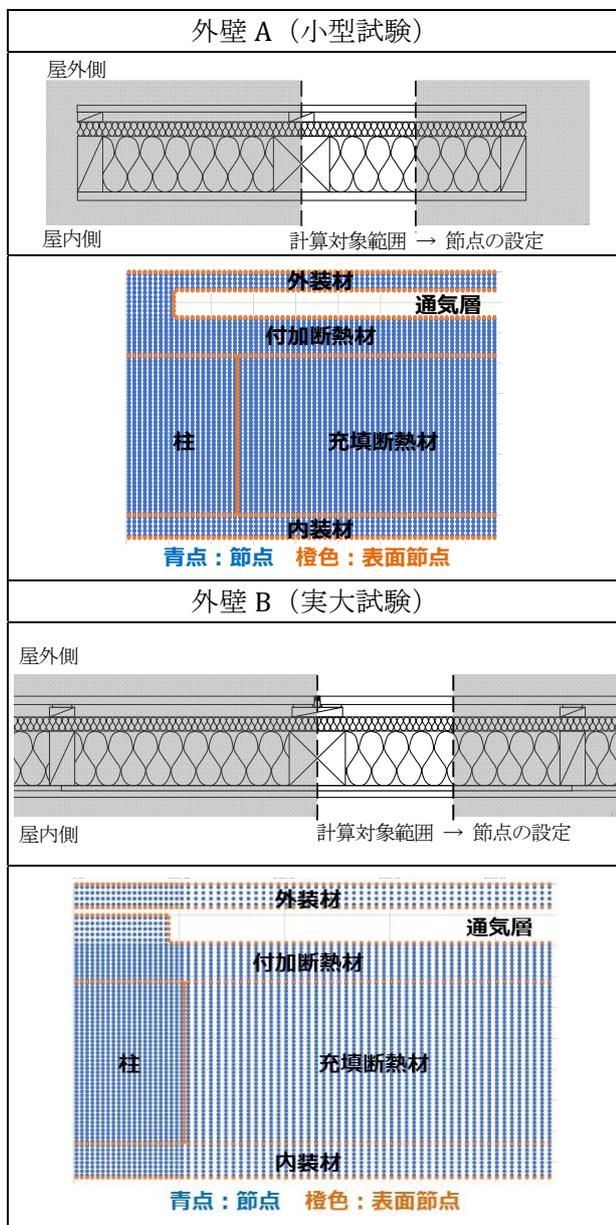


図 3-2 対象外壁の計算対象範囲と節点の設定

#### 4. 外壁各層の温度推移予測に関する検討

外壁 A, 外壁 B を対象に、外壁各層の温度推移および壁内柱の温度分布・炭化性状について、相変化を考慮した非定常の熱伝導モデルおよび熱・水分同時移動モデルの 2 つの手法により数値計算を行った。

本章では外壁各層の温度推移予測について、次章では壁内柱の温度分布・炭化性状予測について、これら計算結果と実験データとの比較を行い、数値解析手法の妥当性および適用範囲を検証する。

##### (1) 計算条件の設定

加熱条件にあたる外部境界について、加熱側は、ISO834-1 に規定される標準加熱曲線に合わせて温度を変化させた。非加熱側は 20°C 一定とした。非定常熱伝導計算では、外壁内で発生する水蒸気の移動に伴う熱輸送を直接計算できないため、次の①～③に示す設定を行って、相変化を考慮した。

- ①各構成部材内の水分は、各構成部材が 90°C～110°C の温度域において気化する。
- ②①で発生した水蒸気は、屋外側加熱時は内装材表面に、屋内側加熱時は外装材表面に凝縮し、その潜熱を設定する。水蒸気潜熱は 2,256 kJ/kg<sup>12)</sup> とする。発生した水蒸気の 50% が凝縮すると設定した。

③内部結晶水を有し、含水量が多いせっこうボードでは、ボード内の水蒸気移動を考慮して、その含水量をせっこうボードの非加熱側に集中的に配置した。

また木材における揮発成分の燃焼発熱のうち試験体に吸収されて有効発熱量となる割合を屋外側加熱時は 0.167、屋内側加熱時は 0.25 とした。

外壁 B で生じる内外装材の脱落について、熱伝導モデルでは、実験データの脱落時間にあわせて、それ以降の内外装材の熱伝導率  $\lambda = 10,000(W/mK)$  とし、熱抵抗を無視できる程度に小さくなるように設定した。熱水分同時移動モデルでは、計算モデルの設定上、内外装材の脱落へ対応する計算条件を入れ込むことができず、加熱終了まで内外装材の脱落が生じていない条件下で計算を実施した。

##### (2) 小型試験結果との比較

外壁 A における外壁各層の温度推移の計算結果を図 4-1 に示す。

外壁内各部の温度推移については、屋外側加熱、屋内側加熱の両方において、熱伝導モデル、熱水分同時移動モデルともに実験結果に近い値が得られた。これにより火災加熱を受ける対象外壁内各部の温度

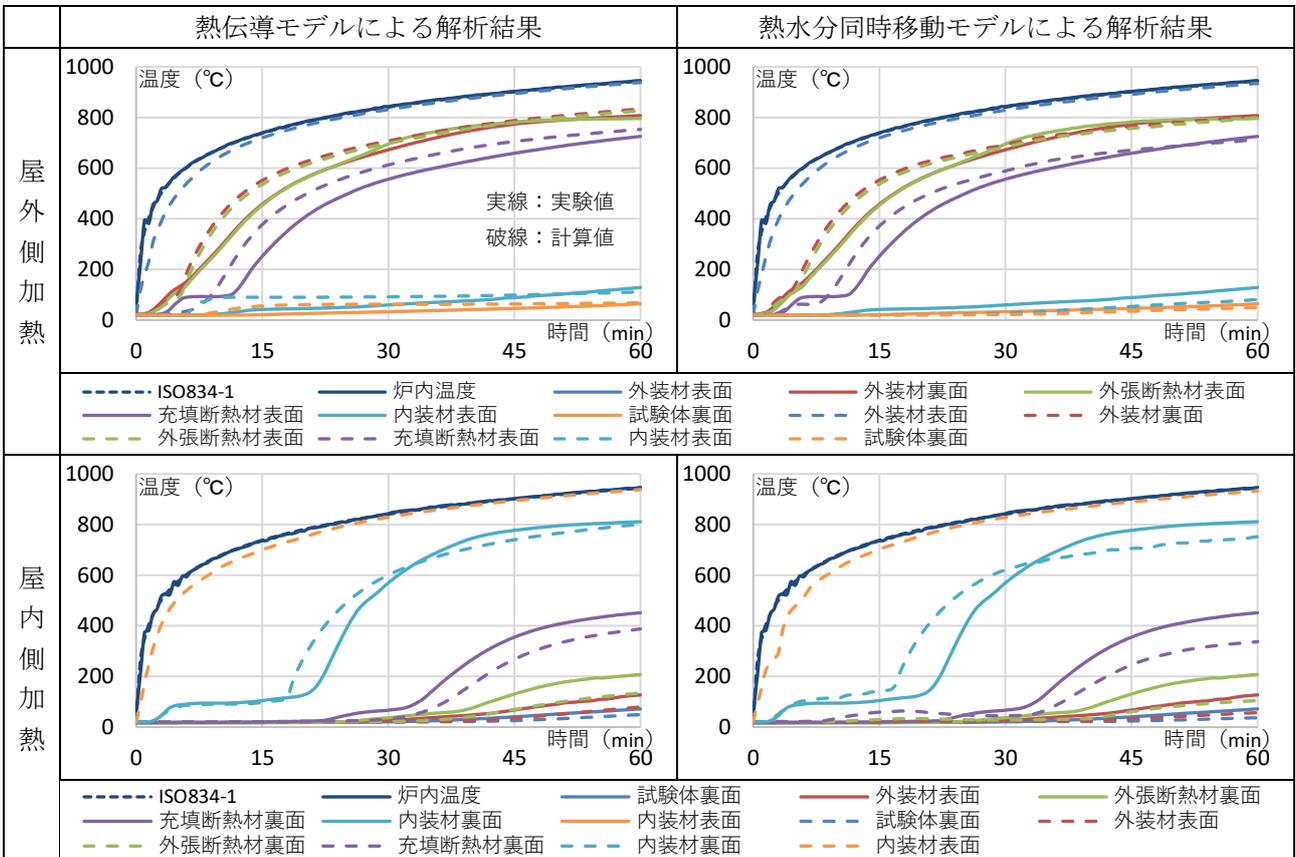


図 4-1 外壁各層の温度推移の計算結果 (外壁 A : 小型試験)

推移を推定できるようになった。

一方、数値計算では再現できていない点も明らかになった。実験では部材が加熱を受けると部材内の水分は非加熱側へ移動するとともに蒸発が進む。その間、部材の非加熱側表面の温度は 100℃付近で温度停滞する。この 100℃付近での温度停滞は、実験データを見ると、屋外側加熱では付加断熱材の非加熱側に位置する充填断熱材表面で、屋内側加熱では内装材の非加熱側に位置する内装材裏面で顕著に確認される。これに対し、熱伝導モデルでは、前節で示したように相変化を考慮した条件を設定して対応し、熱水分同時移動モデルでは、部材内の水分移動もあわせて計算することで対応した。

熱水分同時移動モデルの方が、熱伝導モデルよりも制度は若干向上したが、どちらも 100℃付近での温度停滞する時間は、計算値の方が実験値より短くなり乖離が生じた。構成部材内の水分移動やその間の熱収支の設定方法、また各種建材の高温時における物性値の精度向上などが課題となった。

### (3) 実大試験結果との比較

外壁 B における外壁各層の温度推移の計算結果を図 4-2 に示す。

加熱側に位置する内外装材が脱落する前における外壁内各部の温度推移については、屋外側加熱、屋内側加熱の両方において、熱伝導モデル、熱水分同時移動モデルともに実験結果に近い値が得られた。

また小型試験結果との比較でみられた 100℃付近での温度停滞で実験値と計算値が乖離する点も同様に確認された。

加熱側の内外装材の脱落后について、熱水分同時移動モデルでは、脱落を設定した計算はできていない。熱伝導モデルでは、実験値と計算値で大きく乖離した。実験では内外装材の脱落は大きな試験体面で部分的に起きて徐々に進行する点や脱落后は火災が直接、外壁内部に侵入してくる点、建材自身が加熱を受けて熱性能的に無視できないほど損傷が進む点など、数値計算では対応できない現象が同時進行的に進むことが要因と考えられる。従って内外装材が脱落后については、この数値計算モデルでは対応できないと判断できる。

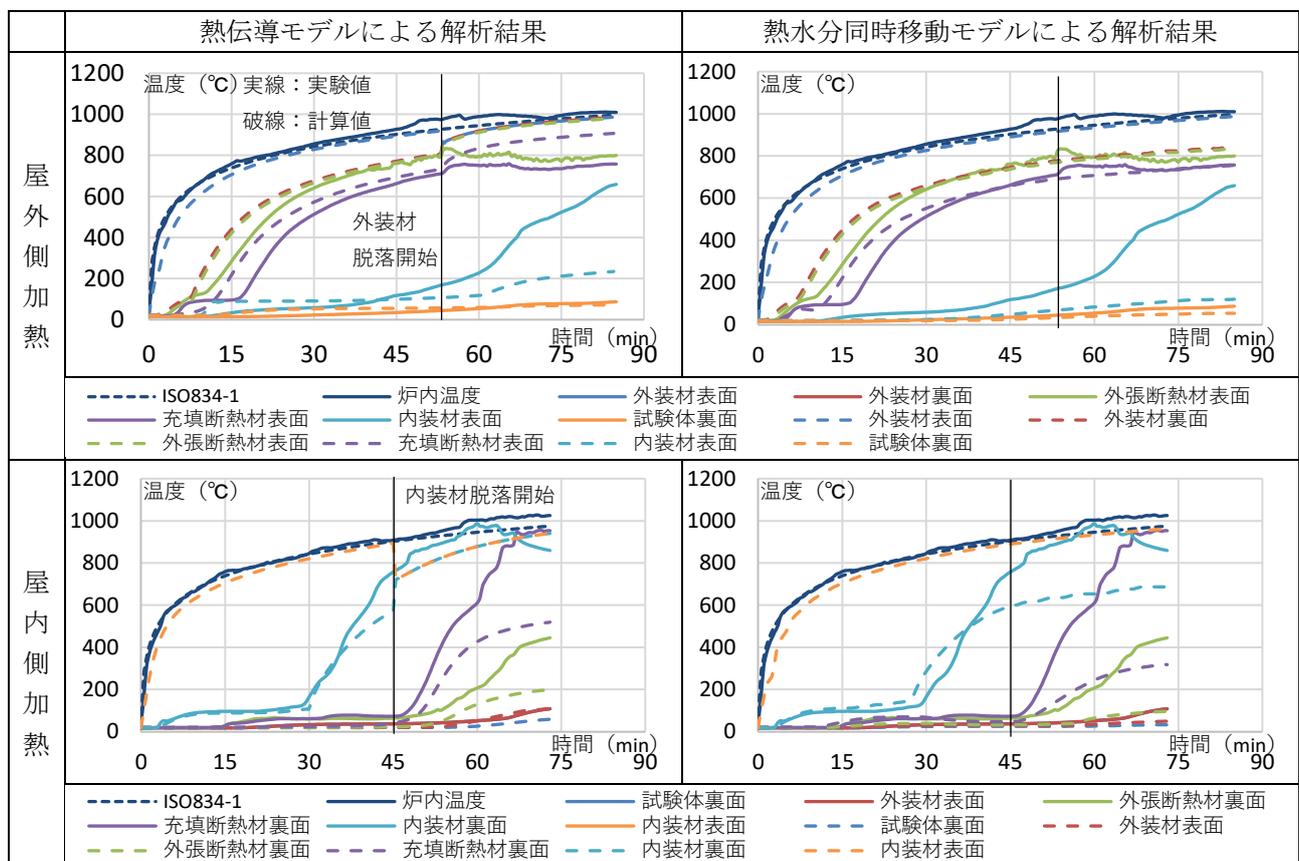


図 4-2 外壁各層の温度推移の計算結果 (外壁 B : 実大試験)

以上より、内外装材が脱落せずに保持されている条件下であれば、実大試験においても、この数値解析手法により火災加熱を受ける外壁内各部の温度推移を推定できる。

### 5. 壁内柱の温度分布、炭化性状予測に関する検討

本章では壁内柱の温度分布・炭化性状予測について、数値解析手法の妥当性および適用範囲を検証する。前章の外壁各層の温度推移予測とあわせて、一気に数値解析を行っているため、計算条件の設定は前章4.(1)と同じである。

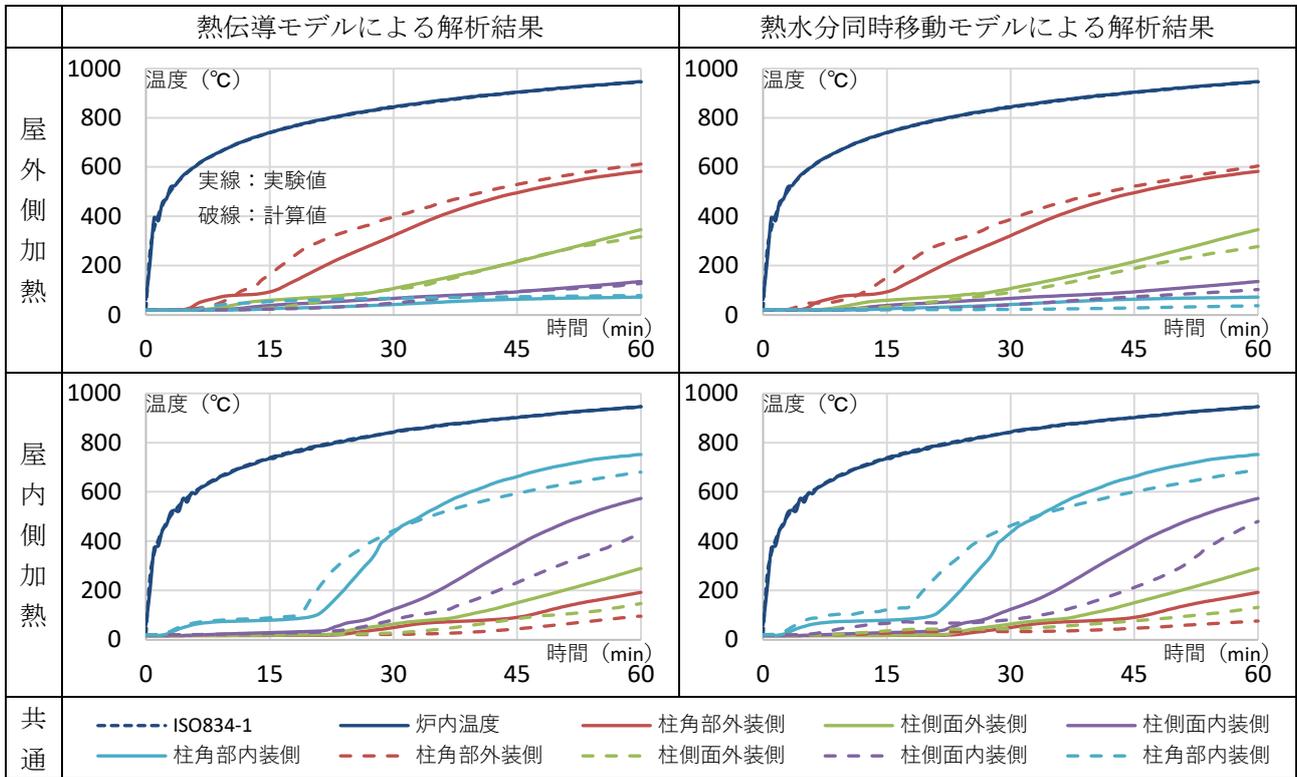


図 5-1 壁内柱側面の温度推移の計算結果 (外壁 A : 小型試験)

表 5-1 壁内柱の内部温度の計算結果および柱残存断面の推定結果 (外壁 A : 小型試験)

	小型実験柱残存断面 (温度測定位置)	熱伝導モデルによる解析結果		熱水分同時移動モデルによる解析結果	
		柱内部温度	柱残存断面	柱内部温度	柱残存断面
屋外側加熱					
屋内側加熱					
		柱内部温度 凡例			

### (1) 小型試験結果との比較

外壁 A における壁内柱側面温度推移の計算結果を図 5-1 に、試験終了時の壁内柱の内部温度の計算結果および柱残存断面の推定結果を表 5-1 に示す。

壁内柱側面の温度推移についても、屋外側加熱、屋内側加熱の両方において、熱伝導モデル、熱水分同時移動モデルともに実験結果に近い値が得られた。また加熱終了時の柱の内部温度の計算結果から柱内各部において 250°C を超えた部分を炭化部、250°C 以下の部分を健全部とすると、既往の実験結果に近い残存断面が得られることがわかった。以上より、壁内柱の温度分布や炭化性状は、温度推移予測モデルに柱内部の温度推移を組み込むことで、数値計算により求められるようになった。

但し、加熱側に最も近い柱角部を除いて、柱側面の温度は、計算値の方が実験値よりも低く推移し、計算により得られた柱の残存断面形状も、柱側面表面では実験値の方が若干燃え進んでいる傾向がみられた。試験体では、ウール状の断熱材では柱と接する面で全面が密着しておらず空隙があることによる影響や屋内側加熱では内装材のせっこうボードの損傷による影響が、その要因の一部として考えられる。

### (2) 実大試験結果との比較

外壁 B における壁内柱側面温度推移の計算結果を

図 5-2 に、柱座屈時の壁内柱の内部温度の計算結果および柱残存断面の推定結果を表 5-2 に示す。

前章の外壁内各部の温度推移と同様に、加熱側に位置する内外装材が脱落する前であれば、壁内柱側面の温度推移についても、屋外側加熱、屋内側加熱の両方において、熱伝導モデル、熱水分同時移動モデルともに実験結果に近い値が得られた。

加熱側の内外装材の脱落后における壁内柱側面の温度推移については、外壁各層の温度推移と同じく熱水分同時移動モデルでは、脱落を設定した計算ができていない。熱伝導モデルでは、実験値と計算値で大きく乖離し、実験結果との対応が取れていない。

小型試験と同様に、加熱終了時の柱の内部温度の計算結果から 250°C (木材の着火温度) を目安に柱の残存断面を求めた。屋外側加熱では、計算では外装材の脱落の影響は反映できていないものの、柱の残存断面は実験と近い形状になった。屋内側加熱では、実験では柱側面部における燃え進みが大きく損傷が激しい結果であったが、計算では、柱側面部の燃え進みがない形状になった。柱側面部の燃え進みは、内装材の脱落后に進んだとみられ、その点を計算では対応が取れていないためと考えられる。

以上より、内外装材が脱落せずに保持されている条件下であれば、実大試験においてもこの数値解析

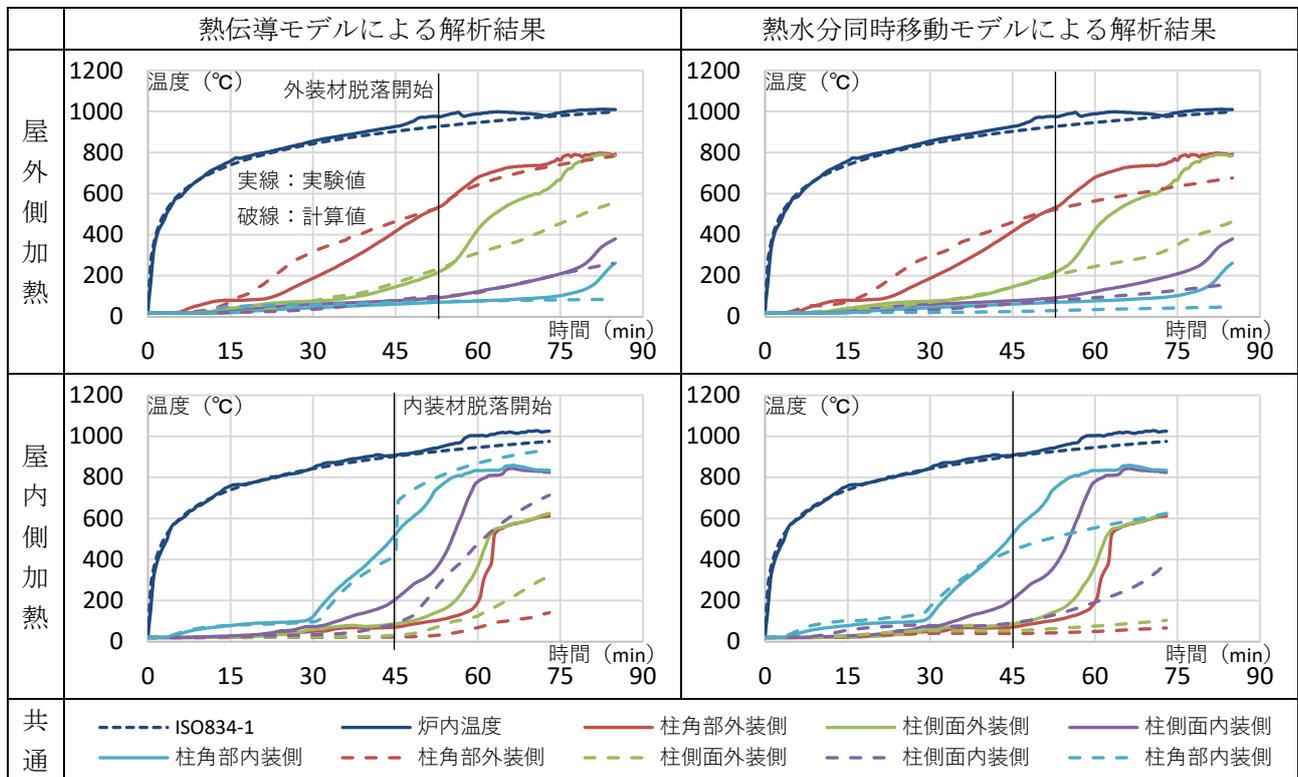


図 5-2 壁内柱側面の温度推移の計算結果 (外壁 B : 実大試験)

表 5-2 壁内柱の内部温度の計算結果および柱残存断面の推定結果（外壁 B：実大試験）

	実大実験柱残存断面 (温度測定位置)	熱伝導モデルによる解析結果		熱水分同時移動モデルによる解析結果	
		柱内部温度	柱残存断面	柱内部温度	柱残存断面
屋外側加熱					
屋内側加熱					
		柱内部温度 凡例			

手法により火災加熱を受ける外壁内各部の温度推移とあわせて壁内柱の温度分布や炭化性状を数値計算により求められるようになった。

6. 壁内柱の損傷による非損傷性予測に関する検討  
柱耐力算定モデルによる解析として、EXCELシートにて、前章で得られた試験終了時または柱座屈時の壁内柱内部の温度分布の情報から、直接、座屈に対する柱の残存耐力を得られるようにした。

残存耐力の算定にあたっては、柱内部の温度に応じてヤング係数の低減量、断面欠損による柱の偏心量（中立軸の移動量）を求めた上で Secant の座屈式に基づき、柱の残存耐力を求めた。検討の結果を表 6-1 に示す。

表 6-1 壁内柱の柱残存耐力の推定結果

	外壁 A（小型実験）の柱断面			外壁 B（実大実験）の柱断面		
	小型実験 終了後	熱伝導 モデル	熱水分同時 移動モデル	小型実験 終了後	熱伝導 モデル	熱水分同時 移動モデル
柱断面残存断面						
屋外側加熱						
加熱時間(分)	60.0 ※小型試験終了時間			84.0 ※柱座屈時間		
試験時載荷荷重(kN)	18.8 ※実大試験を想定			18.8		
残存耐力推定値(kN)	—	31.0	29.2	—	16.2	18.4
屋内側加熱						
加熱時間(分)	60.0 ※小型試験終了時間			72.4 ※柱座屈時間		
試験時載荷荷重(kN)	18.8 ※実大試験を想定			18.8		
残存耐力推定値(kN)	—	13.0	10.5	—	4.1	15.0

実大試験では、屋外側加熱は 84.0 分、屋内側加熱は 72.4 分で、それぞれ柱が座屈している。なお、屋内側加熱では、柱断面がかなり小さくなってから座屈に至っているが、それは付加断熱層の横桟木が柱の非加熱側で支えたためである。

柱の残存断面が実験と近い形状になった実大試験・屋外側加熱の場合、残存耐力推定値は、試験時載荷荷重に近い値となり、残存耐力の計算値は、おおむね適切な値になっていると考えられる。

小型試験では試験時間を 60 分で終了しており、内外装材の脱落もないことから、実大試験より柱残存断面が大きくなったが、計算値もその傾向を反映した結果になっており、適切な値と考えられる。

以上より、柱の残存断面から柱が保有する残存耐力を推定できるようになり、非損傷性の面から防火性能の予測、見通しを得ることが可能となった。

## 7. まとめ

本研究では、耐熱性が高い建材で構成された付加断熱工法の木造高断熱外壁(以下、対象外壁とする)を対象に、熱伝導計算モデルおよび熱水分同時移動モデルの解析法を用いて、1) 外壁各層の温度推移予測、2) 壁内柱の温度分布・炭化性状予測が可能な数値予測モデルを構築した。そして壁内柱内部の温度分布の情報から、直接、座屈に対する柱の残存耐力を得られる EXCEL シートを作成し、3) 壁内柱の非損傷性予測が可能な数値予測モデルを構築した。

これにより、対象外壁において火災加熱を受けた場合の外壁各部温度、柱内部温度、柱の残存断面および柱の残存耐力の推定が可能となり、外壁仕様から防火性能の見通しが得られるようになった。

一方、本研究の数値予測モデルでは、内外装材の脱落后については対応できない点、また精度向上に向けては、構成部材内の水分移動やその間の熱収支の設定方法の改善、各種建材の高温時における物性値の精度向上などが課題となった。また、燃焼に伴い建材から発生する発熱量の与え方に検討の余地があることがわかった。

## [参考文献]

- 1) 糸毛治: 熱変性が最も少ない断熱材を用いた木造壁体の防火設計に関する研究, LIXIL 住生活財団 2012 年度研究助成報告書, 2013.1
- 2) (地独) 北海道立総合研究機構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, 調査研究報告No.346, 2014.3
- 3) (地独) 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所: 木造高断熱壁体の防耐火性能の実大試験検証と評価手法の提案, 調査研究報告No.381, 2017.3
- 4) (一社) 日本建築学会: 鋼構造耐火設計指針, 2008
- 5) (一社) 性能基準推進協会: 木質耐火構造部材の燃え止まり解析とその利用法に関する報告書, 木造耐火燃え止まり WG 報告書, 2014
- 6) Kukuck S.: Heat and Mass Transfer Through Gypsum Partition Subjected to Fire Exposures, NIST IR 7461 U.S. Department of Commerce
- 7) 原田和典, 寺井俊夫: 火災時のコンクリート内部の熱水分移動のモデル, 日本建築学会構造系論文集第 477 号, pp185-190, 1995.11
- 8) 濱本昌一郎, 西村拓: 古典を読む R.J. Millington and J.P. Quirk 著「多孔質媒体中の物質移動」, 土壌の物理性, No.128, pp39-46, 2014
- 9) 例えば, OKekunle P.O., Pattanotai T., Watanabe H. and Okazaki H.: Numerical and Experimental Investigation of Intra-Particle Heat Transfer and Tar Decomposition during Pyrolysis of Wood Biomass, Journal of Thermal Science and Technology, Vol.6, pp360-375 (2011)
- 10) 加来千紘 他: 火災加熱が木材の力学的性能に及ぼす影響 - 加熱した針葉樹材及び広葉樹材の高温時及び加熱冷却後のヤング係数・曲げ強度の測定, 日本建築学会構造系論文集第 701 号, pp1065-1072, 2014.7
- 11) 高橋晃一, 福島暁男共著: 最新建築学シリーズ 7 最新鉄骨構造第 3 版, 森北出版株式会社, 1994
- 12) (社) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂版第 5 版, (社) 日本機械学会, 2009.5