

外断熱工法外壁の内断熱外壁との比較による断熱性能評価

Unsteady State Evaluation of External Wall Insulation by Comparing Internal Insulation Wall

森田 慎一**, 早水 庸隆**, 富永 春香***
Shin-ichi MORITA, Yasutaka HAYAMIZU, Haruka TOMINAGA

概要

寒暖熱源となる屋外側に断熱材が配置される外断熱工法は、内断熱工法に比較して非定常蓄・放熱量抑制により外界の寒暖による影響をうけにくいとされる。しかしながら我が国の建築物の大多数は内断熱工法であり、地球温暖化ガス排出量削減に対する取り組みが盛んになる中、断熱工法の外断熱化はより一層促進されると考えられる。内断熱工法を外断熱工法に改築するとき両者の断熱性能の比較データは、ライフサイクルコストを検討する上で重要となる。本研究は、夏期および冬期における非定常断時の断熱性能について、外断熱および内断熱コンクリート外壁を直接比較した結果について示すものである。断熱性能の直接比較評価結果は、実験データに基づく熱伝達率を用いた数値シミュレーションによって行われ、初期温度および断熱材厚さを実用上の入力条件とする簡易に利用可能な熱流入量および居室内壁面温度の推算式として提案する。

1. 緒言

建築物の断熱には、居室内壁に断熱材を設置する内断熱工法と外壁に断熱材を施す外断熱工法の2種類があり、国内では9割以上の建築物に内断熱工法が採用されているとされる⁽¹⁾。内断熱工法は、工期が短く施工費用が安価であるなど、建築初期投資を抑制できることから国内で多く導入されている。断熱材を屋外側に配置する外断熱工法は、内断熱建物に比較して長寿命⁽²⁾で断熱性能⁽³⁾にも優れていると言われ、ライフサイクルコストの抑制を期待できる。寒暖熱源となる屋外側に断熱層が配される外断熱工法は、内断熱工法に比べて断熱性能が高く、省エネルギーの観点からも導入が望ましいと考えられる。外断熱化による高断熱性能住宅の問題点抽出に関しては、RC構造外壁の躯体蓄熱型冷暖房に関する研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾などが推進されており、外断熱工法が導入の問題点を解決しつつ今後の国内工法の主流となっていくものと予想される。

内断熱工法を外断熱工法に改築するとき、両者の断熱性能の比較データは、省エネルギー効果の検討のみならずライフサイクルコストを比較する上で重要な基礎資料となる。本研究は、コンクリート住宅壁を想定し、実験により測定された熱伝達率を用いた外断熱工法と内断熱工法の非定常断熱性能を数値シミュレーションにより直接比較を実施した結果について述べるものである。簡便に外断熱化による効果を検討できるよう、夏期・冬期⁽⁶⁾における条件を仮定し、初期温度および断熱材厚さを入

力条件とする流入熱量および居室内壁面温度の算出式について提案する。

記号

a	: 温度伝導率	[m ² /s]
Bi	: ビオー数	[-]
C_p	: 比熱	[kJ/(kg·K)]
G	: 質量	[kg]
L	: 代表長さ	[m]
Nu	: ヌセルト数	[-]
Pr	: プラントル数	[-]
q	: 単位面積当たりの熱量	[MJ/m ²]
Re	: レイノルズ数	[-]
R_y	: 最大高さ	[mm]
s	: 断熱材厚さ	[mm]
t	: 温度	[°C]
T	: 温度	[K]
ΔT	: 温度差	[K]
u	: 代表速度	[m/s]
x	: 厚み方向位置	[mm]
Δx	: メッシュ間隔	[mm]
α	: 熱伝達率	[kW/(m ² ·K)]
λ	: 熱伝導率	[W/(m·K)]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
τ	: 時間	[h]

添え字

air	: 空気
i	: 断熱材, ステップ, 居室側
ins	: 内断熱工法
max	: 最大

* 原稿受理 平成 23 年 10 月 3 日

** 機械工学科

*** 株式会社アイ・エイチ・アイ マリユナイテッド

out : 外断熱工法
s : 初期
sum : 積算
w : 外壁側

表-1 Thermal properties of test materials

	ρ [kg/m ³]	C_p [kJ/(kg·K)]	λ [W/(m·K)]
Insulator	70	0.92	0.0372

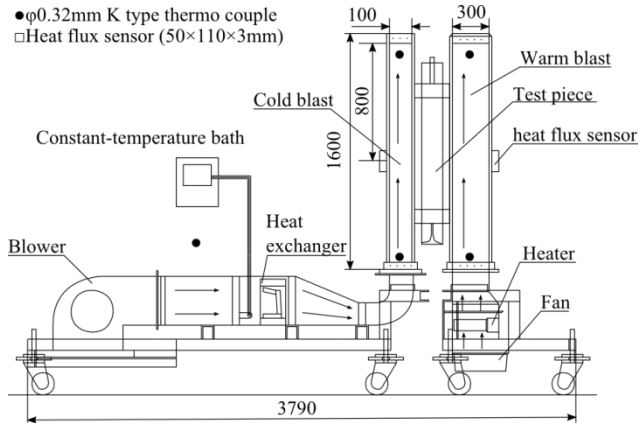


図-1 Experimental apparatus for Nu measurement

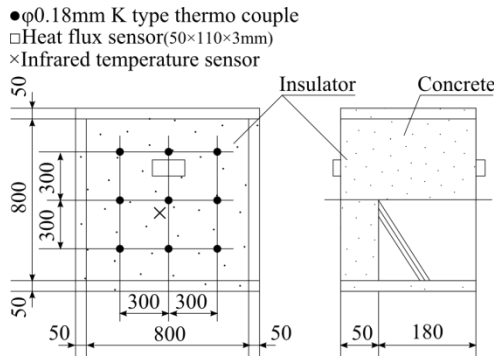


図-2 Test piece for Nu measurement

2. 測定試験片および物性値

本研究における実験データ整理および数値計算で利用した各物性値は、公表値による値⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を用いた。断熱材に関しては、実験値と数値計算結果を比較評価する目的から、外断熱工法にて一般に使用されているフジ化成工業株式会社製の断熱材（商品名：ロックセルボード）の公表物性値（表-1）を使用した。

3. 実験方法及び解析方法

3.1 熱伝達率の測定

本研究においては、実測値を評価に用いるため、凹凸

を有し平滑面ではない外・内壁表面の熱伝達率測定を行った。図-1は、外壁の熱伝達率測定実験装置の概略図を示したものである。装置は、試験片の表裏面に温度の異なる空気を流すことにより、温度差を発生させる構造である。高温側は、ファンから鉛直上向きに流動される空気がヒータにより加熱され試験片に達し、上部から排出される。ファンの平均流速は、最大0.79m/s、ヒータの能力は1kWである。冷却空気の流路における空気の平均流速は、0.52~0.79m/sの範囲で送風機により任意に設定可能である。送風空気の冷却は、予め恒温槽（冷凍能力200W）を用いて蓄熱槽に蓄えられた熱媒流体を熱交換器に導入することで熱交換し、所期の温度条件にコントロールされる。流動空気の温度測定は、素線直径 ϕ 0.32mmのK型熱電対を低温と高温の空気流動部の流入出部に設置することにより行われた。図-2は、熱伝達率測定に用いられた試験片を示したものである。試験片は、800×800mm、厚さ180mmのコンクリートに厚さ50mmの断熱材（フジ化成工業株式会社製ロックセルボード）を接着したものである。実験に用いられた試験片伝熱面の表面粗さは、コンクリート面および断熱材面について最大高さ R_y （測定回数100）が測定された。試験片表面凹凸の最大高さは、コンクリートと断熱材についてそれぞれ0.13~0.57、0.13~0.29mmの範囲にあり、標準偏差は0.12、0.04である。試験片の四方は、外周方向への熱移動を防止するため、断熱材にて覆う構造とした。試験片表面の温度測定は、素線径 ϕ 0.08mmのK型熱電対および赤外線放射温度センサーにより行われた。

3.2 熱伝達率の測定結果

図-3は、実測された熱伝達率を用いて次式により算定される、実測ヌセルト数 Nu とレイノルズ数 Re の関係を示すものである。図中の実線および破線は、垂直平板上での層流（ $Re < 3.2 \times 10^5$ ）および乱流ヌセルト数を示したものである。

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad \dots\dots(1)$$

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad \dots\dots(2)$$

$$Nu_{ml} = 0.664Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad \dots\dots(3)$$

$$Nu_{mt} = 0.037Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad \dots\dots(4)$$

断熱材による熱伝達率の測定結果は、式(3)による層流熱

伝達率の公表値とほぼ一致している。コンクリート壁面上のヌセルト数は、断熱材壁に比較して大きな値を示す結果となった。これは、コンクリート壁面に凹凸が存在することによる気流の乱れ、および試験片サイズに対する実質上の伝熱面積増大に起因する結果と考えられる。コンクリート壁においては、乱流時平均ヌセルト数の式(4)を用いると、レイノルズ数 $3.5 \times 10^5 \sim 7.0 \times 10^5$ に相当するヌセルト数の値が測定された。

本研究における外断熱および内断熱壁の比較評価においては、熱伝達率の実測定データを用いて数値シミュレーションおよび実験データの整理を実施した。

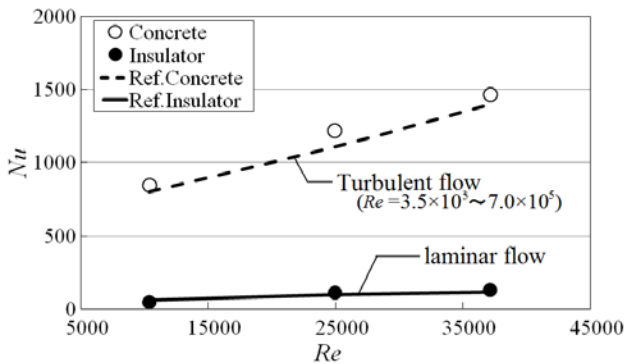


図-3 Variation of Nu with Re

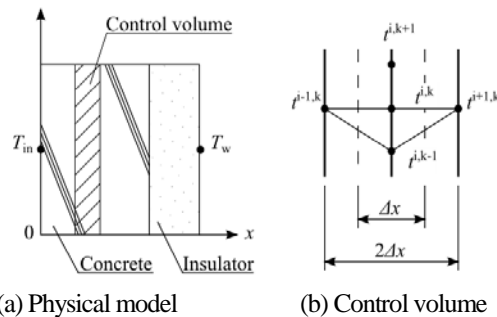


図-4 Simulated model of outside insulation at summer period

3.3 シミュレーション方法

3.3.1 物理モデル

図-4は、厚み方向を x 軸とした一次元平板系で、夏期想定での物理モデルを示したものである。図-4(a)は外断熱工法による外壁を想定しており、図の右側面から太陽による照射を受けて外壁表面温度が 60°C に固定される。内壁は初期温度に固定されており、内断熱工法の場合は試験片を左右反転したモデルとした。図-4(b)に示すように、試験片内部の各点を格子線上とし、このときの縦軸は時間軸である。図-5は、冬期想定での物理モデルで外断熱外壁の場合を示したものである。夏期のモデルと同

様に屋内側を初期温度に設定し、屋外(図右側面)は -5°C の空気による熱伝達による伝熱が行われているとする。このときの平均風速を屋外側 1.8m/s 、屋内側 0.5m/s に固定し、本研究により実験的に得られた前述の熱伝達率が計算に用いられた。

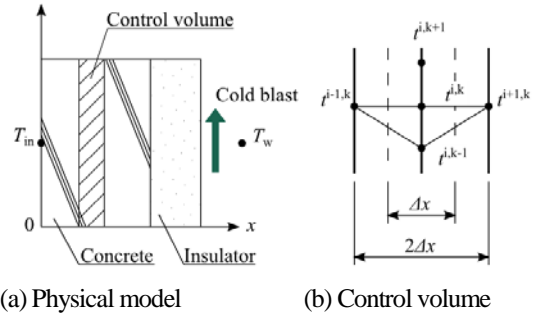


図-5 Simulated model of outside insulation at winter period

3.3.2 基礎式

物理モデルに対する1次元直交座標系の非定常熱伝導方程式は次式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 $a (= \lambda / (\rho C_p))$ は、温度伝導率である。シミュレーションは、コンクリート内部、断熱材内部をそれぞれ等間隔メッシュとし、式(5)の各項を差分化することにより行われた。各項の差分化式は次に示す通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \approx \frac{(T_{i+1}^k - T_i^k) - (T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta x^2} \\ &\approx \frac{T_{i+1}^k + T_{i-1}^k - 2T_i^k}{\Delta x^2} \quad \dots\dots(6) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta \tau} \quad \dots\dots(7)$$

式(6)(7)より、基礎式を差分化し夏期シミュレーションに用いた次式が得られる。

$$T_i^k = \frac{T_i^{k-1} + a \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (T_{i-1}^k + T_{i+1}^k)}{1 + 2a \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}} \quad \dots\dots(8)$$

冬期想定においては、屋外側の一要素 ($i=0$) にビオー

数 $Bi (=aL/\lambda)$ により熱伝達率を考慮する次式を用いた。ビオー数の計算に用いられた熱伝導率 λ は、固体壁（コンクリートまたは断熱材）の値である。

$$T_i^k = \frac{T_i^{k-1} + a \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (Bi \times T_{i-1}^k + T_{i+1}^k)}{1 + a \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} (Bi + 1)} \quad \dots(9)$$

計算においては、夏期における屋外側壁面温度を 60°C 固定、冬期における外気温度は -5°C で固定として計算された。厚さ 180mm 一定のコンクリート壁に設置される断熱材厚さは、 $10, 30, 50, 70\text{mm}$ の4種類とした。

4. 実験とシミュレーション結果の比較

4. 1 実験装置及び実験方法

シミュレーション結果を実験値と比較検討するため、建築壁を想定した試験片による実験を行った。太陽光としての放射熱は、ハロゲンランプ (500W) が用いられた。実験に用いられた試験片は、 $300 \times 300\text{mm}$ 、厚さ 180mm のコンクリートに断熱材（フジ化成工業製ロックセルボード）を貼付したものを使用した。試験片の表面および裏面には 100mm 間隔で9点のK型熱電対（素線直径 $\phi 0.18\text{mm}$ ）が設置された。コンクリート内部には厚さ方向に 30mm 間隔で熱電対を埋設し、実験中の温度の経時変化を測定する。コンクリート内部に設置された熱電対は、相互の影響がないよう、鉛直方向に 40mm ずつずらして取り付けされた。熱流束の測定のため、熱流センサー（KEM 製汎用低熱流センサ）を試験片の表裏にそれぞれ設置した。内断熱と外断熱工法をそれぞれ想定した実験は試験片の表裏を反転する事で行われた。日射による建築壁表面温度を $60^\circ\text{C} \pm 1\text{K}^{(6)}$ に設定し、断熱材厚さ $10 \sim 70\text{mm}$ 、初期温度 $5 \sim 27.5^\circ\text{C}$ の範囲で実験を行った。実験は、試験片を恒温器内に設置し、試験片温度を初期条件に対し $\pm 0.5\text{K}$ 以内に定常させた後にハロゲンランプ照射により開始された。照射時間は夏期日照時間を考慮して5時間⁽⁵⁾とし、試験片の表面および内部温度と熱流束を実験データとして測定した。

4. 2 試験片内温度分布の経時変化

図7は、断熱材厚さ 70mm 、初期温度 20°C の夏期における、内断熱試験片と外断熱試験片内部の温度分布を時間変化で示し、実験値と比較したものである。内断熱の場合、実験結果とシミュレーション結果の両方とも照射

開始からコンクリート部の受熱により温度は大きく変化している。外断熱の場合、照射側に断熱材が配されていることから温度勾配が大きくなる傾向にある。また、内断熱工法の場合に比べてコンクリート内での温度上昇が少ない。屋内外の温度条件を固定した場合においても、定常状態到達までに10時間以上を必要とすると考えられる。実験による測定結果とシミュレーションによる値は、断熱材厚さおよび初期温度によらず $\pm 9\%$ 以内で一致する結果が得られた。

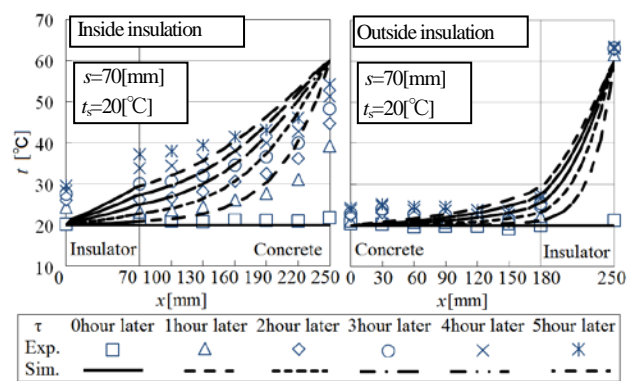


図-7 Temperature distribution at $s=70\text{mm}$, $t_s=20^\circ\text{C}$

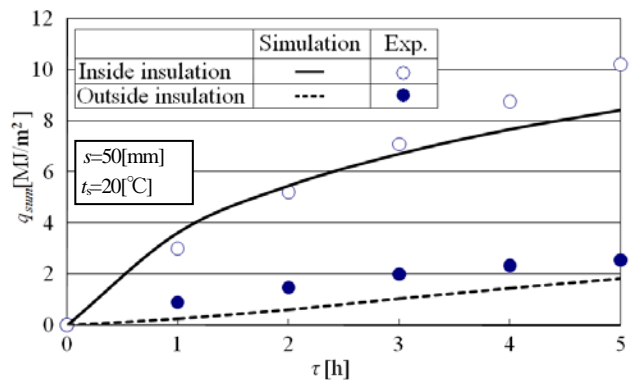


図-8 Variation of q_{sum} with τ at $s=50\text{mm}$, $t_s=20^\circ\text{C}$

4. 3 壁内蓄積熱量評価

単位面積あたりの壁内蓄積熱量を要素各部の単位時間当たりの蓄積量を加算し、次式より求めた。

$$q_{sum} = GCp \int (T_i - T_{i-1}) dt \quad \dots\dots(10)$$

図8は、断熱材厚さ 50mm 、初期温度 20°C の夏期にて、上式より求められた時間当たり壁内蓄積熱量を積算し、経時変化を示したものである。壁内に蓄積される熱量は、断熱工法で増加率が大きく異なり、5時間後で外断熱工

法の値が内断熱工法の約3分の1に抑制される。シミュレーション結果は、実験による実測値との比較により、5時間後の壁内蓄積熱量が±6%以内で一致する結果である。

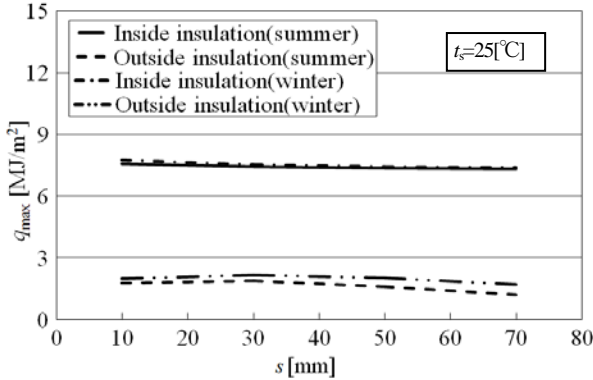


図-9 Relationship between q_{max} and s at $t_s=25^\circ\text{C}$

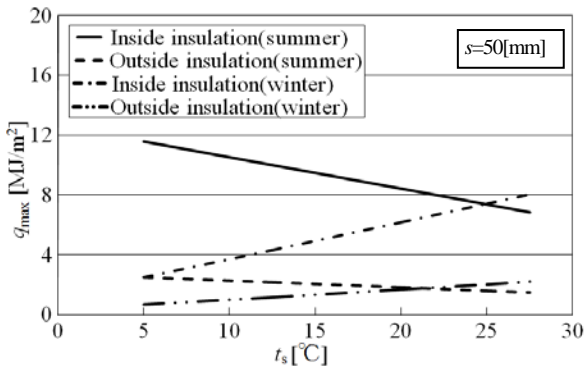


図-10 Variation of q_{max} with t_s at $s=50\text{mm}$

5. シミュレーションによる評価

5. 1 壁内蓄積熱量

5. 1. 1 断熱材厚さの影響

夏期日照時間データ⁽⁵⁾より5時間後までに蓄積される熱量を、冬期想定の場合は外気温度が低下する夜間における8時間の壁内から奪われる熱量を壁内蓄積熱量と定義して以降の評価を行った。

図-9は、夏期においては5時間、冬期においては8時間後の壁内蓄積熱量を、初期温度25°Cの条件で外断熱工法および内断熱工法の場合について断熱材厚さとの関係で示したものである。夏期において、外断熱工法の壁内へ蓄積される熱量は、内断熱工法の場合の約4分の1以下である結果が得られた。壁内蓄積熱量は、断熱材厚さが増すにつれてわずかに減少している。

冬期の場合、外断熱工法の値に比較して内断熱工法では約3倍の熱量が奪われる結果を得た。内断熱工法の場合、断熱材厚さが増加するにつれて、壁内より奪われる

熱量が減少する。

5. 1. 2 初期温度の影響

図-10は、断熱材厚さ50mmの場合についての壁内蓄積熱量を内断熱と外断熱工法の場合について初期温度との関係で示したものである。夏期における壁内蓄積熱量は、全初期温度範囲において外断熱工法の方が内断熱工法の場合よりも小さな値を示す。初期温度の増加に伴い、壁内蓄積熱量は減少する傾向にあるが、内断熱工法の場合の方がその減少割合が大きい結果が得られた。

冬期想定においては、外・内断熱の双方とも、初期温度の値が大きくなるほど、壁内からの放熱量が増大している。シミュレーションの範囲内において、外断熱工法での初期温度変化に対する傾きは小さい結果が得られた。

5. 1. 3 壁内蓄積・放出熱量に関する簡易整理式

夏期および冬期における壁内蓄積および放熱量に関して、初期温度と断熱材厚さを変数とする簡易計算式を提案する。外断熱と内断熱の断熱性能を検討するとき、非定常として問題を検討する必要があると考えられるが、非定常シミュレーションによる結果を整理し、簡単に外断熱化による省エネルギー効果を検討できるよう配慮するものである。初期温度は、室内での空調温度域を想定し16°Cから28°Cの範囲とした。夏期想定の場合は外側の壁面温度を60°C固定とし、5時間後までの積算熱量とした。冬期想定では外気温度を-5°C固定とし、8時間後の熱量とした。夏期については、(11)、(12)式、冬期の場合は(13)、(14)式となる。

$$q_{out} = (-1.767 \times 10^{-7} t_s + 1.040 \times 10^{-5}) s^3 + (3.000 \times 10^{-5} t_s - 1.790 \times 10^{-3}) s^2 + (-1.118 \times 10^{-3} t_s + 6.707 \times 10^{-2}) s - 4.265 \times 10^{-2} t_s + 2.559 \quad \dots\dots(11)$$

$$q_{in} = (-1.300 \times 10^{-6} t_s + 8.101 \times 10^{-5}) s^2 + (-2.270 \times 10^{-4} t_s - 1.362 \times 10^{-2}) s - 0.2182 t_s + 13.09 \quad \dots\dots(12)$$

$$q_{out} = (1.333 \times 10^{-7} t_s + 7.667 \times 10^{-7}) s^3 + (-2.740 \times 10^{-5} t_s - 1.371 \times 10^{-4}) s^2 + (1.250 \times 10^{-3} t_s + 6.230 \times 10^{-3}) s + 5.651 \times 10^{-2} t_s + 0.2826 \quad \dots\dots(13)$$

$$\begin{aligned}
 q_{in} = & (3.267 \times 10^{-6} t_s + 1.635 \times 10^{-5}) s^2 \\
 & + (-4.722 \times 10^{-4} t_s - 2.361 \times 10^{-3}) s \\
 & + 0.2631 t_s + 1.316 \quad \dots\dots(14)
 \end{aligned}$$

図-11 は夏期を想定した場合の 5 時間後の熱量を断熱材厚さの関係で示したものである。図中のプロット点は、簡易整理式による値を示したものであり、実線および破線がシミュレーションによる結果を示している。

図-12 は、冬期を想定した場合での室内流入熱量を示している。夏期および冬期における簡易整理式による値とシミュレーションによる値は±1%以内で一致する精度で壁内蓄積・放熱量を算定することができる。

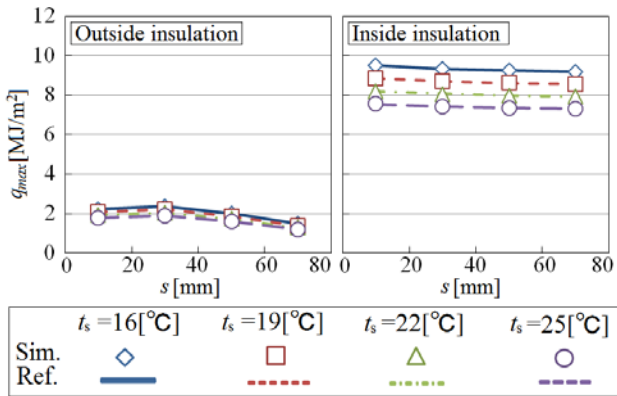


図-11 Relationship between q_{max} and s

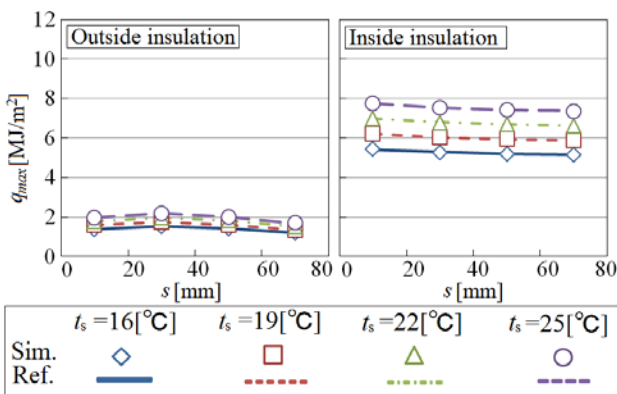


図-12 Variation of q_{max} with s

5. 2 居室内側壁面温度

5. 2. 1 初期温度および断熱材厚さの影響

図-13 は、夏期（5 時間後）と冬期（8 時間後）の居室内側壁面温度を到達温度と断熱材厚さの関係を示したものである。断熱材厚さが増すにつれ到達温度が低減し、初期温度との差が小さくなる傾向にある。これは断熱材

厚さが増すにつれ貫流する熱量が減少したためであると考えられる。図-14 は、到達温度と初期温度の差を初期温度との関係で示したものである。外断熱工法においては、内断熱工法よりも到達温度と初期温度との差が小さい傾向にある。

5. 2. 2 居室内側壁面温度に関する簡易整理式

式(15), (16)は夏期, 式(17), (18)は冬期における居室内側壁面温度を外断熱および内断熱の場合について推算する式を示したものである。

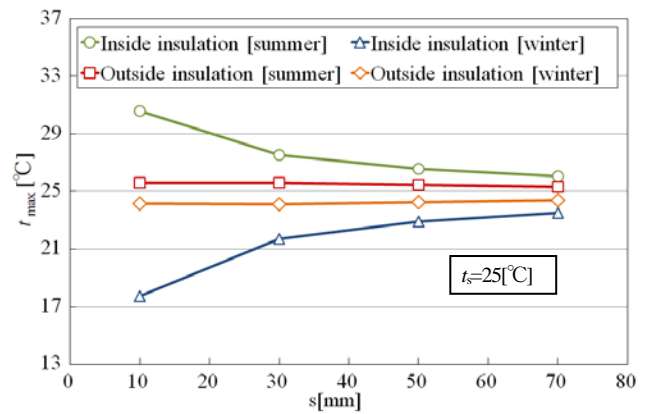


図-13 Relationship between t_{max} and s

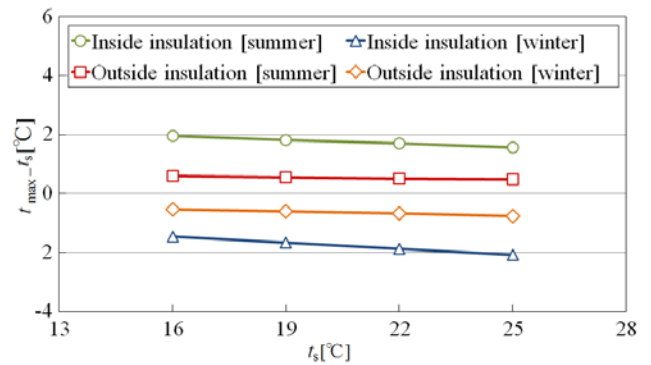


図-14 Variation of $t_{max} - t_s$ with t_s

図-15 は夏期を想定した場合の 5 時間後、冬期での 8 時間後における居室内側壁面温度の居室内側壁面温度を断熱材厚さの関係で示したものである。図中のプロット点は推算式より得られた値であり、実線および破線がシミュレーションによる値を示している。夏期および冬期における推算式による値とシミュレーションによる値は±1%以内で居室内側壁面温度を算定することができる。

$$t_{out} = (2.753 \times 10^{-6} t_s - 1.655 \times 10^{-4}) s^2 + (-7.450 \times 10^{-5} t_s + 4.472 \times 10^{-3}) s + 0.9827 t_s + 1.037 \quad \dots\dots(15)$$

$$t_{in} = (9.401 \times 10^{-7} t_s - 5.641 \times 10^{-5}) s^3 + (-1.582 \times 10^{-4} t_s + 9.491 \times 10^{-3}) s^2 + (9.460 \times 10^{-3} t_s - 0.5676) s + 0.7601 t_s + 14.38 \quad \dots\dots(16)$$

$$t_{out} = (4.501 \times 10^{-6} t_s + 2.25 \times 10^{-5}) s^2 + (-2.342 \times 10^{-4} t_s - 1.171 \times 10^{-3}) s + (0.9749 t_s - 0.1258) \quad \dots\dots(17)$$

$$t_{in} = (1.467 \times 10^{-6} t_s + 7.433 \times 10^{-6}) s^3 + (-2.460 \times 10^{-4} t_s - 1.230 \times 10^{-3}) s^2 + (1.451 \times 10^{-2} t_s + 7.256 \times 10^{-2}) + 0.636 t_s - 1.818 \quad \dots\dots(18)$$

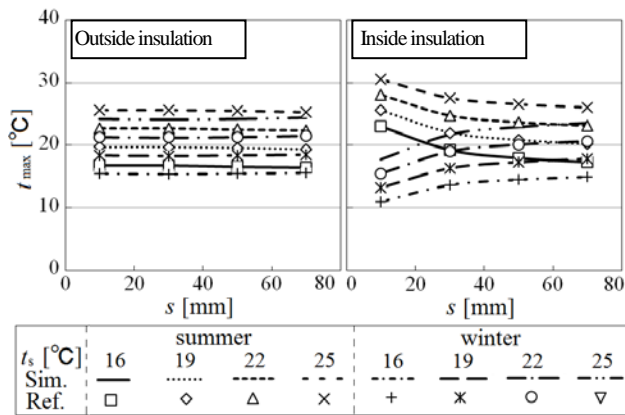


図-15 Relationship between t_{max} and s

6. 結 言

- (1) コンクリートおよび断熱材表面の熱伝達率の測定を行い、実測値を用いたシミュレーション結果を示した。
- (2) コンクリート外壁内の温度分布は、屋内外温度差が固定された場合でも、定常状態に到達するに最低10時間以上を要する。
- (3) 壁内蓄熱量・放熱量を初期温度と断熱材厚さから簡易に計算可能な推算式を提案した。
- (4) 居室内壁面温度を初期温度と断熱材厚さより算出

する、推算式を提案した。

参 考 文 献

- 1) 大倉学, 他1名: 内または外断熱壁を持つ中空矩形物体における冷却特性の数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, Vol.2005, No.1, (2005.7), pp177-180
- 2) 改正総一郎: 省エネルギーのための建築仕上技術海外における湿式外断熱の現状と国内の改修動向について, 月刊建築仕上技術, Vol.30 No.359(2005.6), pp.44-45
- 3) 申雪寒: 外断熱工法の透気性と躯体コンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会技術報告書, No.18(2003.12), pp.21-24
- 4) 菊田弘輝, 他4名: 外断熱住宅の躯体蓄熱型暖房システムに関する研究, 日本建築学会環境系論文集, No.589 (2005.3), pp.37-42
- 5) 菊田弘輝, 他3名: RC造戸建の外断熱住宅における躯体蓄熱型冷房システムに関する性能評価-床冷房の可能性と問題点, 日本建築学会環境系論文集, No.626 (2008.4), pp.463-470
- 6) 菊田弘輝, 他3名: 外断熱建物と内断熱建物の温熱、空調負荷解析-空調学会北海道支部が提案した空調負荷計算法の非定常数値解析による検証-, 空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集, Vol.37th (2003.3), pp.201-204
- 7) 長谷川寿夫: 外断熱建物躯体コンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会技術報告書, No.20(2004.12), pp.59-62
- 8) 森田慎一, 他2名: 外断熱コンクリート外壁の非定常断熱性能評価, 第43回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集(2009.4), pp.139-142
- 9) 国立天文台編集: 理科年表平成21年版(2009), pp.218-220, 丸善株式会社
- 10) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 改訂第5版(2009), pp.289
- 11) 日本機械学会: 流体の熱物性集(1984), pp.162-178