

# 配管断熱が温水床暖房の室内熱環境・資源消費に与える影響に関する研究

– 夜間冷え込み防止運転にかかる検討 –

## A STUDY ON THE INFLUENCE OF PIPING THERMAL INSULATION ON INDOOR CLIMATE AND RESOURCE CONSUMPTION RELATED TO HOT WATER FLOOR HEATING

– Numerical studies focusing on avoiding room temperatures decline during night time –

根本晋吾\*, 高橋 達\*\*

*Shingo NEMOTO and Itaru TAKAHASHI*

This paper describes results of a numerical simulation and an exergy analysis focusing on the influence of piping thermal insulation on thermal comfort and resource consumption related to hot water floor heating during night time. In a case, pipe length is 1m indoor and 4m outdoor, changing from polyethylene foam 10mm to urethane foam 30mm can reduce warm exergy consumption within the pipe from the boiler to the inlet of the floor in 68%. At the same time, the seasonal median of the room air temperature at am 6:00 can be raised from 15.5°C to 20.0°C. Improving thermal insulation of piping increases radiant and convective warm exergy from the floor two times and four times, even if hot water temperature at the outlet of the boiler is the same.

**Keywords:** Hot Water Floor Heating, Piping, Heat Loss, Thermal Insulation, Exergy

温水床暖房, 配管, 熱損失, 断熱, エクセルギー

### 1. はじめに

国内における建築設備の温水配管では、保温の推奨仕様<sup>①</sup>が守られらず、断熱不良になっている例が珍しくない<sup>②</sup>。例えば、水式太陽熱利用システムの簡易設計法では、配管の熱損失は集熱量の10%以下とみなしており、配管断熱の徹底が必ずしも推奨されてはいない<sup>③</sup>。これに対して、西欧・北欧では、日本で露出することの多いバルブ類でさえも相応の断熱材で覆うことが一般的である。

日本では、外皮の断熱性能などが2020年に義務付けられる予定である。建築外皮だけでなく、設備配管の断熱性をも向上させることは、化石エネルギー使用量の削減と熱的快適性の向上につながるはずである。住宅の一次エネルギー使用量の表示が省エネルギー基準の改正で求められているが、温水床暖房が導入される住宅については、配管断熱の有無を申告するようになっているのはそのためである。

既往の研究では、水野・下田らが、給湯配管の熱損失に関する数値解析により断熱材厚さとエネルギー削減量等との関係を求めている<sup>④</sup>。また、三浦・鉢井・中原は、ある高断熱・高気密住宅の床暖房に関する実測調査から、床下への熱損失量と配管熱損失が小さくないことを確認している<sup>⑤</sup>。平田・宿谷らは、温水床暖房のシミュレーション方法を導くとともに、外皮熱性能が室内熱環境に与える影響について明らかにしているが、配管断熱については検討していない<sup>⑥</sup>。若林・宿谷、

Isawa and Shukuya は、温水床暖房の配管埋設深さの最適化についてエクセルギーを用いた検討を行なっているが、配管断熱については検討していない<sup>⑦⑧</sup>。すなわち、これらの既往研究では、配管断熱単体の検討はあっても床暖房が行われている住宅の室内熱環境にそれが与える影響は把握されておらず、さらにシステム各部位におけるエクセルギーの流れ・消費について検討したものはない。配管断熱の良し悪しが、ボイラーへの一次投入化学エクセルギーだけでなく、配管における温水の熱エクセルギー消費過程、床からの熱エクセルギー出力に与える影響を理解できるようになると、それは一次エネルギー評価だけでは見えなかった視点を新たに加えることになると考える。このような視点は、断熱配管も含む床暖房システム全体の理解と改善に役立つと考える。

以上のことから、本研究では、配管断熱が戸建住宅における温水床暖房の室内熱環境と資源消費に与える影響を数値シミュレーションとエクセルギー解析により明らかにし、設計に寄与するような知見の導出を目的とした。

### 2. 研究方法

温水配管の断熱性と距離についてバリエーションを与えた床暖房の数値シミュレーションとともに、温水放射暖房システムを導入した住

本論文の一部は既発表論文の1) 2) 3)を加筆・修正したものである。

\* (現)ZO 設計室 修士(工学)  
(当時、東海大学大学院生)

\*\* 東海大学工学部 教授・博士(工学)

ZO Consulting Engineers, M. Eng.

(Ex-Grad. Stud. of Tokai Univ.)

Prof. Faculty of Eng., Tokai Univ., Dr. Eng.

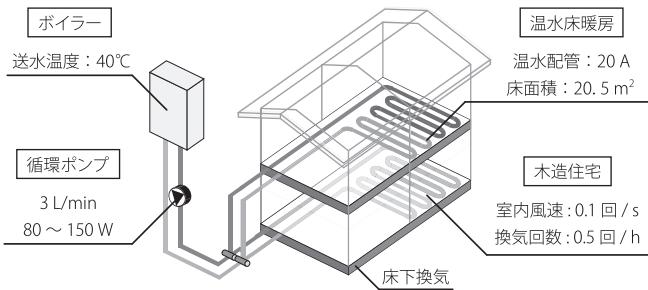


図1 温水床暖房システムの概要

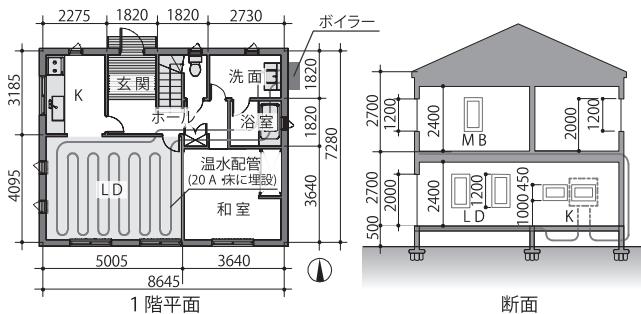


図2 計算対象とした住宅モデル

宅の実測調査を行なった。実測調査は数値シミュレーションの精度確認のために行い、数値シミュレーションにより配管断熱と室内熱環境や配管熱損失について検討し、さらに、温水床暖房システムにおける部位毎の資源消費を把握するため、エクセルギー解析を行なった。

## 2-1 数値シミュレーションの方法

図1に温水床暖房システムの概要を、図2に計算対象にした住宅モデルの平面・断面<sup>13)</sup>と配管ルートを、図3に建築外皮の断面構成を示す。

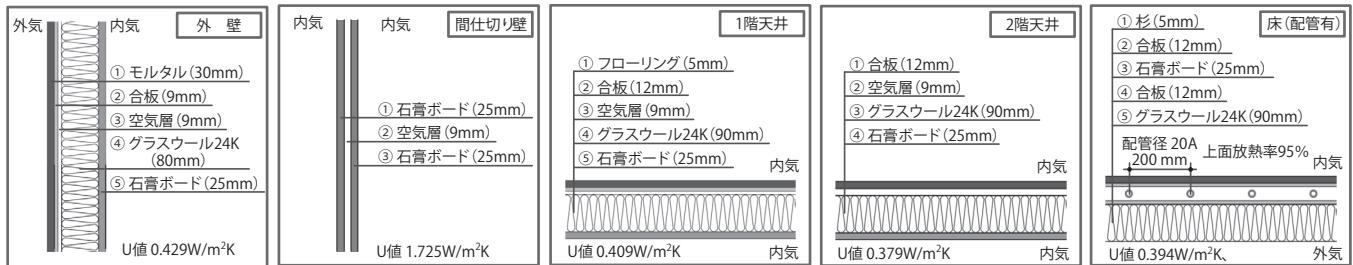


図3 建築外皮の断面構成

表2 温水床暖房に関する伝熱の計算式

室空気の熱収支 <sup>10) 14)</sup>	床への投入熱量 <sup>10)</sup>	配管が埋設されている床内部質点の温度 <sup>10)</sup>
$Q_r \frac{d\theta_r}{dt} + \sum_{j=1}^k S_j \alpha_{ic} (\theta_r - \theta_j) + G_v (\theta_r - \theta_a) = H_c \quad (1)$	$q = c_{pw} \rho_w V_w (\theta_{wi} - \theta_{wo})$	$\theta_k = (1 - \eta_f^*) \theta_e + \eta_f^* \theta_{kp} \quad (8)$
壁内部質点 $k$ における熱収支 <sup>10) 14)</sup>	温水の床入口温度 <sup>10)</sup>	$\ell = (w - d) / 2 \quad (9)$
$Q_k \frac{d\theta_k}{dt} + {}_{+1}C_k (\theta_k - \theta_{k+1}) + {}_{-1}C_k (\theta_k - \theta_{k-1}) = 0 \quad (2)$	温水の床出口温度 <sup>10)</sup>	$\eta_f^* = (1 - d / w) \eta_f + d / w \quad (10)$
壁内表面の熱収支 <sup>10) 14)</sup>	$\theta_{wo} = \left\{ \theta_k / \eta_f^* + \theta_e (1 - 1 / \eta_f^*) \right\} A_f E / (c_{pw} \rho_w V_w) \quad (11)$ + $\theta_{wi} \left\{ 1 - A_f E / (c_{pw} \rho_w V_w) \right\} \quad (12)$	$z = (-_1 C_k + {}_{+1} C_k) / (d \cdot \lambda) \quad (11)$ $\eta_f = \tanh \left( \ell \sqrt{z} \right) / \left( \ell \sqrt{z} \right) \quad (12)$
$+ {}_1 C_{m+1} (\theta_{m+1} - \theta_m) + \alpha_{ic} (\theta_{m+1} - \theta_r)$ $+ \left( \theta_{m+1} - \sum_{j=1}^y g_{ij} \theta_j \right) = R_i \quad (3)$	$E = c_{pw} \rho_w V_w \left[ 1 - \exp \left\{ K_{jp} L_{jp} / (c_{pw} \rho_w V_w) \right\} \right] / A_f \quad (7)$	$\theta_e = (-_1 C_k \cdot \theta_{k+1} + {}_{+1} C_k \cdot \theta_{k-1}) / (-_1 C_k + {}_{+1} C_k) \quad (13)$

$Q_r$ : 室空気の熱容量 [J/C]。 $d$ : 温水配管の外径 [m]。 $\theta$ : 室空気温 [C]。 $t$ : 時間 [s]。 $N$ : 壁面数 [-]。 $S_j$ : 壁  $j$  の面積 [m<sup>2</sup>]。 $\alpha_{ic}$ : 壁  $j$  の内表面放射熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>C]。 $\theta$ : 壁の内表面温度 [C]。 $G_v$ : 隙間換気の熱容量 [W/C]。 $\theta_a$ : 外気温 [C]。 $H_c$ : 内部発熱の対流成分 [W]。 $Q_k$ : 壁内部質点  $k$  の熱容量 [J/C]。 $\theta$ : 壁内部質点  $k$  の温度 [C]。 $C_k$ : 壁内部質点  $k$  の前後の熱コンダクタンス [W/m<sup>2</sup>C]。 $g_{ij}$ : 面  $i$  に対する面  $j$  の放射吸収係数 [-]。 $R_i$ : 壁内表面に吸収される短波長放射量 [W/m<sup>2</sup>]。 $c_{pw}$ : 水の定圧比熱 [J/kgK]。 $\rho_w$ : 水の密度 [kg/m<sup>3</sup>]。 $V_w$ : 温水流量 [m<sup>3</sup>/s]。 $\theta_{wi}$ : 温水の床入口温度 [C]。 $\theta_{wo}$ : 温水のボイラー出口温度 [C]。 $\theta_{wo}$ : 温水の床出口温度 [C]。 $K_{jp}$ : LD室・MB室床埋設部以外に設置された配管の線熱貫流率 [W/mC] ( $= \pi d / (1/\alpha_{pi} + 1/C_{in} + 1/\alpha_{po})$ )。 $\alpha_{pi}$ 、 $\alpha_{po}$ : 配管内表面と外表面の熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>C] (300, 23または9)。 $C_p$ 、 $C_{in}$ : 配管材、断熱材の熱コンダクタンス [W/m<sup>2</sup>C]。 $L$ : LD室・MB室床埋設部以外に設置された配管の距離 (片道) [m]。 $\eta_f$ : 配管径を考慮した温水配管のフイン効率 [-]。 $A_f$ : 床面積 [m<sup>2</sup>]。 $E$ :  $\theta_{wi}$  を  $\theta_{wo}$  の一次関数として扱うために必要な係数 [-]。 $K_c$ : LD室・MB室における床埋設配管の線熱貫流率 [W/m<sup>2</sup>C] ( $= \pi d / (1/\alpha_{pi} + 1/C_p)$ )。 $L_{jp}$ : LD室・MB室における床埋設配管の距離 (片道) [m]。 $\theta_e$ : LD室・MB室床埋設部以外に設置された配管の周囲空気温 [C]。 $\theta_{kp}$ : 床埋設配管の表面温度 [C]。 $w$ : 床埋設配管の間隔 [m]。 $\eta_f$ : 床埋設配管のフイン効率 [-]。 $\lambda$ : 床部材の熱伝導率 [W/m<sup>2</sup>C]。

表1 計算パラメーター

地域	改正省エネルギー基準 IV <sub>b</sub> 地域 (東京)	
建築外皮の断熱	改正省エネ基準相当 (Q値3.28W/m <sup>2</sup> K、詳細は図3)	
配管断熱の種類・厚さ [mm]	ウレタンフォーム 30 (ウ30、2.91、2.83)、20 (ウ20、3.37、3.26) ポリエチレンフォーム 20 (ポ20、4.90、4.66)、10 (ポ10、6.21、5.82)	
埋設部(床暖房面内)以外の配管距離 [m](片道)	屋外 24, 19, 14, 9, 4 屋内 1	
屋外	1	
屋内	1	
屋外	24, 19, 14, 9, 4	
屋内	24, 19, 14, 9, 4	
暖房時間帯	1:00 ~ 6:00 (ウ60)、0:00 ~ 6:00 (ウ40) 23:00 ~ 6:00 (ウ30)、22:00 ~ 6:00 (ウ20) 21:00 ~ 6:00 (ポ20)、20:00 ~ 6:00 (ポ10)	

※ () 内は、本論文中での略称と、屋外、屋内での線熱貫流率 [W/mK]。

す。以下、居間・食事室を LD、主寝室を MB と表す。

表1に計算パラメーターを、表2に温水床暖房に関する伝熱の計算式を示す。式(1)～(3)は室空気・壁体における熱収支式<sup>10)14)</sup>、式(4)～(13)は床温水配管に関する伝熱の計算式<sup>10)</sup>である。室温変動の計算には後退差分法を用い、壁体・室空気の温度を、熱容量質点系熱収支式の逆行列要素算出によって求めた<sup>14)</sup>。床の熱伝導では、温水管のある面で一様に放熱があると仮定する方法<sup>9)</sup>を用いた。この計算モデルは宿谷らにより開発されており、床内熱伝導実験により、計算誤差が床表面温度で1°C以下、熱流で3%未満に収まっている<sup>15)</sup>。また、放射冷暖房時における室空気温や室内表面温度の計算誤差が1°C以下に収まることを筆者らは確認している<sup>2)16)</sup>。ただし、配管温水温の計算については実測・実験による検証例がなかったため、後述する2-

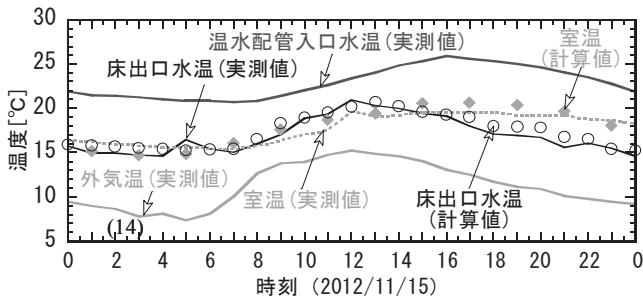


図4 温水床暖房の室温・温水温における実測値と計算値の関係

2の実測を行い、計算精度を確認した。式(5)は、ボイラーの出口で送水温度  $\theta_{f_i}$  [°C] の温水が、配管を通じた熱貫流によって温度  $\theta_a$  [°C] の周囲空気に放熱した結果、床入口では  $\theta_{wi}$  [°C] まで温度低下することを表す計算式である<sup>17)</sup>。なお、式(5)と表1の配管長は、実直管長に加えて、バルブ・ヘッダーなどからの熱損失に相当する熱損失の直管長を追加したものである。バルブ・ヘッダーの相当長は、詳細な実測や実験の結果に基づく一般化がなされておらず、また、それだけで十分な研究課題になるため、本論文では詳細には取り上げず、それも含む配管長を計算パラメーターにした。

配管の熱損失  $q_{loss}$  [W] は、床入口における温水温度  $\theta_{wi}$  [°C]、床出口における温水温度  $\theta_{wo}$  [°C]、暖房配管流量  $V_w$  [m<sup>3</sup>/s] を用いて以下の式(14)により算出した。

$$q_{loss} = c_{pw} \rho_w V_w (\theta_{wi} - \theta_{wo}) \quad (14)$$

温水床暖房システムは、ボイラーから設定温度40°Cで屋内外の配管を通じて温水を送り、床の埋設配管に循環させるものとし、暖房時間は、室温22°C以上を目標にして設定した。その結果、暖房期間の約7割の時間でそのようになった。ボイラー出口水温のみを同一条件にす

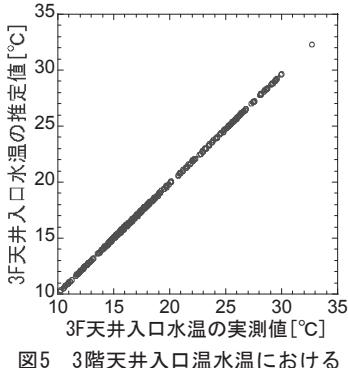


図5 3階天井入口温水温における実測値と計算値の関係

ることによって、配管断熱が室内熱環境とシステム各部におけるエクセルギー消費量に与える影響を比較できるようにした。なお、本論文では、深夜から明け方の冷え込み防止を目的にした床暖房を想定していることから、ON/OFF制御のOFF対応の設定温度ほどには室温が高くならないため、ON/OFF制御の計算を行わなかった。

計算対象住宅の条件は、図2、図3に示す通りとした。窓は空気層の熱抵抗0.07m<sup>2</sup>K/Wの複層ガラスである。LD室・MB室の床暖房パネルは、簡易工法による蓄熱型床暖房パネルを想定し、石膏ボードの継ぎ目部分にモルタルにより隙間なく覆われた架橋ポリエチレン管が埋設されていると仮定したものであり、その上面放熱率は95%である。2階床暖房時の2階から1階への伝導熱流は、下方放熱率が5%であることから無視した。

床下は、気温が外気温と同じになるような床下換気が行われていると仮定した。そのため、床下配管はボイラーから床入口まで外気に接している。床下換気なしの条件については、配管熱損失が間接的な暖房効果を与えることになると予想できるが、他の条件でパラメーターがすでに多数になっているため、本論文では取り上げず、今後の課題とした。屋内配管は、床暖房室の隣室床上で放熱し、隣室の気温が床暖房室における前時刻の気温と等しくなっていると仮定した。

入力データは拡張アメダス気象データの標準年(東京)における日射量、外気温湿度であり、換気回数は0.5回/hとした。

図4にA邸2階の室温・温水温における実測値と計算値の関係を、図5に3階天井入口温水温度の実測値と計算値の関係を示す。なお、図4では、実測調査期間中に2日以上在室して暖房を行なった例が無いため、ある1日の実測値について計算値を表記した。図4に示すように、室温・床出口温水温の計算誤差は0.5~1.0°Cになっている。また、図5に示すように、配管距離2.55m(3階の床から天井)や周囲空気温、2.55m上流の温水温、線熱貫流率などを式(5)に与えて推定した3階天井入口水温は、実測値とほとんど差がない。以上のことから配管熱損失も含んだ床暖房の計算精度は十分と判断した。

## 2-2 実測調査の方法

東京都港区に建つA邸の放射暖房システムを対象にして2012年11月12日~2013年2月6日に実測調査を行った。表3に計測項目を示す。A邸は地上3階、地下1階のS造住宅であり、延床面積は55.07m<sup>2</sup>である。外壁は金属サンドイッチパネル35 mm であり、ガルバリウム

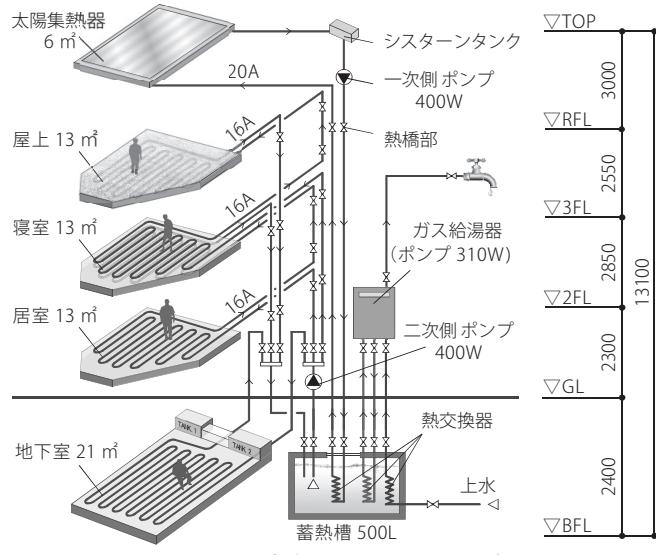


図6 A邸の放射暖房システムの系統

表3 計測の項目と機器(計測間隔5分)

計測の項目	計測機器
外気温湿度[°C]、[%]	日除けシェルター 小型温湿度ロガー
各階の室空気温湿度・グローブ温度[°C]、[%]	
天井・床・壁・窓の表面温度[°C]	
各階の階段室の空気温湿度[°C]、[%]	
蓄熱槽・配管近傍の空気温湿度[°C]、[%]	熱電対 シース型熱電対 小型データロガー 熱電対用データロガー
一次・二次側の配管の表面温度(熱橋の前後)[°C]	熱電対 シース型熱電対 小型データロガー 熱電対用データロガー
一次・二次側の蓄熱槽出入口配管の表面温度[°C]	
ガス給湯器系統の蓄熱槽出入口配管の表面温度[°C]	
蓄熱槽内水温(上層・下層)[°C]	
一次・二次側の配管流量[L/min]	パワーサプライ 羽根車式流量計 バルスロガー

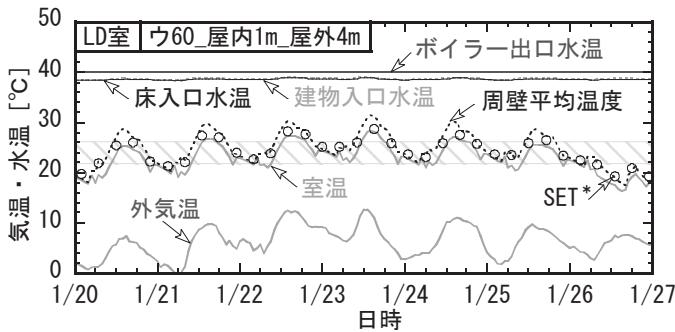


図7 LD室における温水温・室温・周壁平均温度（計算値）

鋼板でポリイソシアヌレートフォーム（熱伝導率0.0216 W/mK）34mmを挟んだ構造である。床は220mm（2階）や250mm（3階）のコンクリートスラブである。図6にA邸の放射暖房システムを示す。A邸の放射暖房システムでは、暖房時、二次側ポンプにより蓄熱槽内の温水が各階の床・天井に循環し、蓄熱槽内が温水が設定温度（42°C）に満たない場合は、ガス給湯器によって蓄熱槽内を追い焚きされるようになっている。配管は呼び径16～20Aの架橋ポリエチレン管20m（屋内）であり、配管の断熱材は厚さ10mmの架橋ポリエチレンフォームである。床に埋設した配管の間隔は200mmである。

### 2-3 エクセルギー解析の方法

ボイラー、配管、循環ポンプ、床、発電所などのサブシステムからなるシステムについてエクセルギー解析<sup>18)</sup>を行なった。例えば、式(15)は往き温水配管のエクセルギー収支式である。

$$c_{pw} \rho_w V_w \left\{ \left( T_{wfi} - T_{oa} \right) - T_{oa} \ln \frac{T_{wfi}}{T_{oa}} \right\} - s_{gp} T_{oa} = c_{pw} \rho_w V_w \left\{ \left( T_{wfo} - T_{oa} \right) - T_{oa} \ln \frac{T_{wfo}}{T_{oa}} \right\} \quad (15)$$

ここで、 $T_{wfi}$ はボイラー出口温水温[K]、 $T_{wfo}$ は床入口温水温[K]、 $T_{oa}$ は外気温[K]、 $s_{gp}$ は往き温水配管でのエントロピー生成量[W/K]である。式(15)は、ボイラー出口で温水がもっている热エクセルギー（左辺第1項）の一部が、配管・保温材・周囲空気での伝热現象で消費され（左辺第2項）、その残りの热エクセルギー（右辺）が床入口へ流れ出ることを表している。

他のサブシステムについても同様にエクセルギー収支式を定め<sup>注1)</sup>、収支式の各項にシミュレーションで算出した各部の温度を代入してエクセルギーの値を算出した。なお、循環ポンプの一次エネルギー使用量は使用電力量（定格電力×使用時間）を発電効率0.35で除したもの

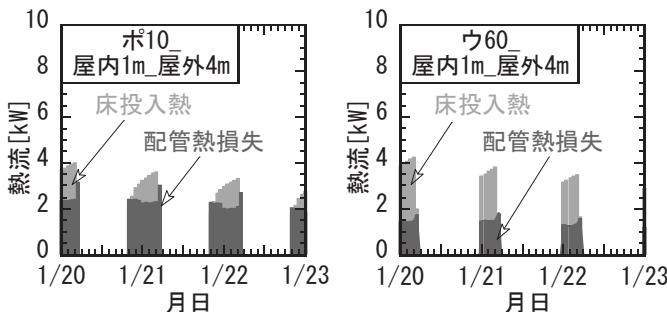


図9 配管熱損失とLD室の床投入熱（計算値）

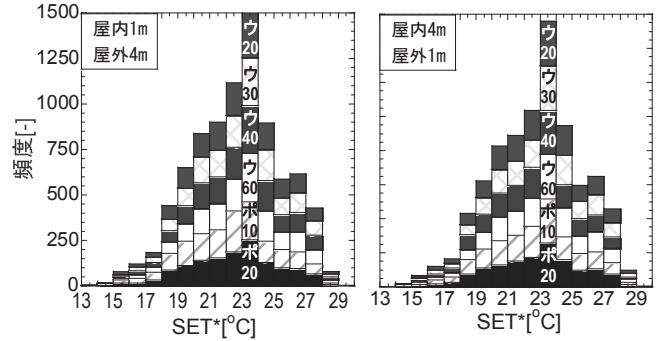


図8 LD室におけるSET\*の頻度分布（計算値）

とした。ボイラーの一次エネルギー使用量は、数値シミュレーションで算出した床投入熱量と配管熱損失の和（ボイラーからの全供給熱）を熱効率0.95で除して求めた。

### 3. 結果と考察

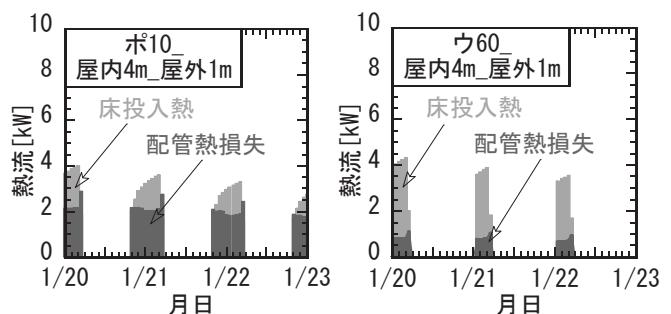
#### 3-1 温水温と室内熱環境

図7にLDの温水温・室温・周壁平均温度を示す。配管断熱がウレタンフォーム60mm（図中、ウ60）で、屋内1m、屋外4mの場合、外気温が0～14°Cの気象条件では、LD室の温水床入口温度が約38°Cでほぼ一定になっている。暖房時間帯（1:00～6:00）において、LD室では周壁平均温度が18～25°C、室温が18～24°C、SET\*が19～25°Cになった。日中の室温やSET\*の最高値が27～28°Cになったのは、屋外遮蔽物がないため、ダイレクトゲイン効果が大きいことによる。

図8にLD室におけるSET\*の頻度分布を示す。SET\*22°C以下では配管断熱がポリエチレンフォーム10mmや20mmの頻度がウレタンフォーム20mm以上の頻度に比べて高くなっているが、SET\*24°C以上ではその逆にウレタンフォーム20mm以上の頻度より低くなっている。すなわち、配管の断熱性の低い計算ケースほど、暖房運転時間を長くしたにも関わらず、低いSET\*の頻度が配管高断熱のケースより高い計算結果になっている。

#### 3-2 床投入熱・配管熱損失・全供給熱

図9に配管熱損失とLD室の床投入熱を示す。配管断熱がポリエチレンフォーム10mm（図中、ボ10）で、屋内1m、屋外4mの配管の場合、暖房時の床投入熱は2.0～4.0 kW、配管熱損失は1.9～3.2 kWになった。これに対して、ウレタンフォーム60mmの場合、暖房時の床投入熱が2.0～4.2 kW、配管熱損失が1.75～2.0 kWになっており、ポリエチレンフォーム10mmの場合の最大34%の熱損失が削減可能である。



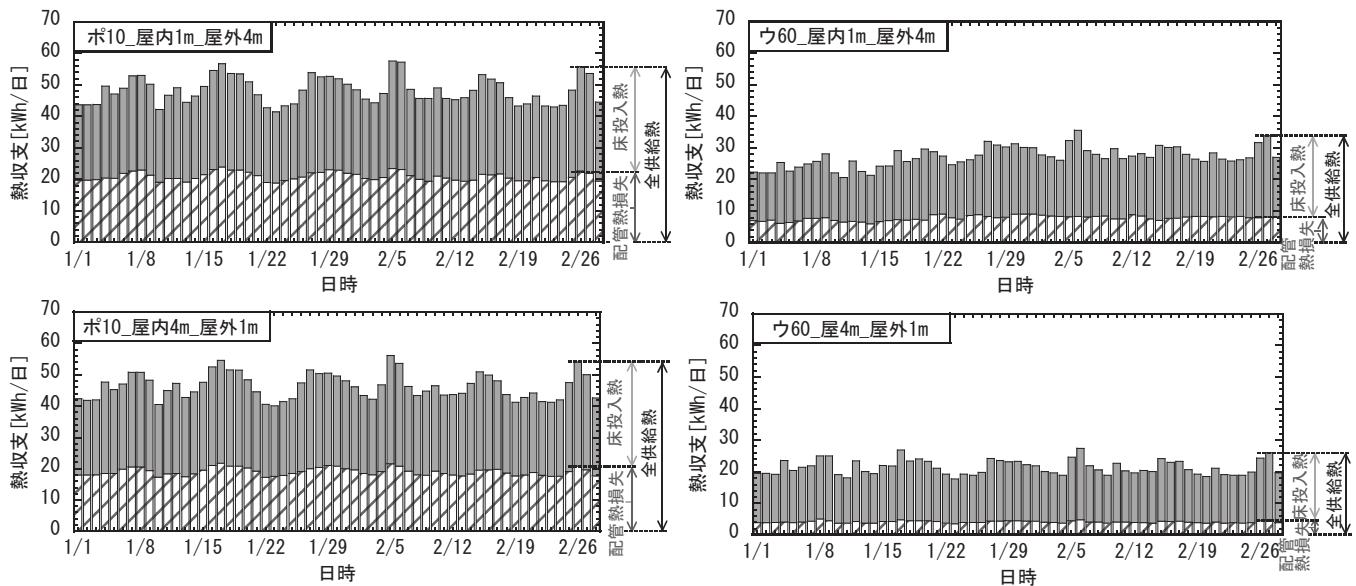


図10 ボイラーからの全供給熱・床投入熱・配管熱損失の日変化（暖房期間全体の計算値、単室暖房時）

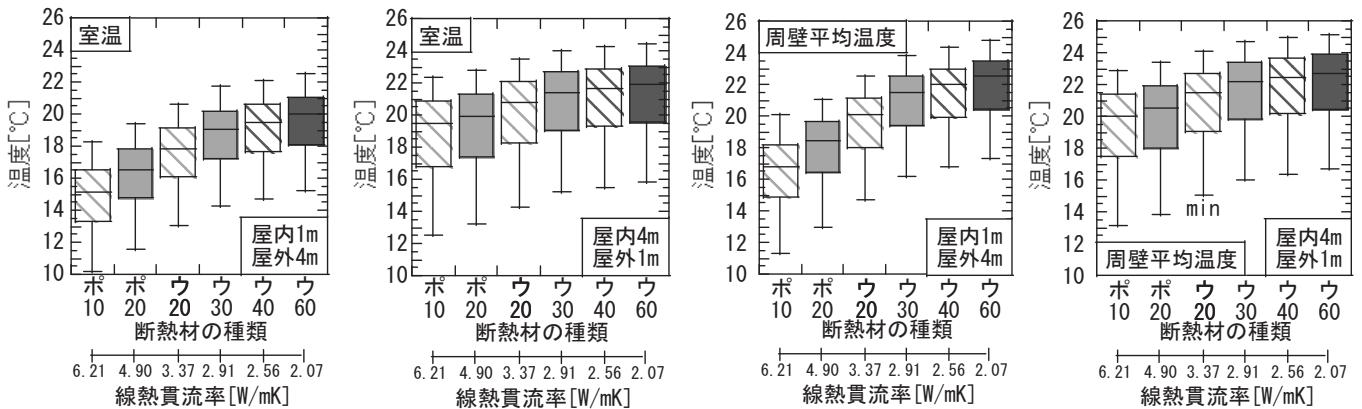


図11 朝6時におけるLD室の室温・周壁平均温度と配管断熱の関係（暖房期間全体の計算値、単室暖房時）

配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内4m、屋外1mの配管の場合、暖房時の床投入熱は2.0～4.0 kW、配管熱損失は1.8～2.9 kWになった。これに対して、ウレタンフォーム60mmの場合、暖房時の床投入熱が2.0～4.2 kW、配管熱損失が0.8～1.3 kWになっており、ポリエチレンフォーム10mmの場合の最大55%の熱損失が削減できる。

図10にボイラーからの全供給熱・配管熱損失・床投入熱の日変化(日積算値の変化、LD室暖房)を示す。ボイラーからの全供給熱(ボイラー出力)に対する配管熱損失の割合は、屋内1m、屋外4mの配管をポリエチレンフォーム10mmで断熱した場合(左上)が40.5～45.8%であり、断熱をウレタンフォーム60mm(右上)にすると23.1～33.3%になり、7.5～22.7ポイント縮小されている。屋内4m、屋外1mの配管では、ポリエチレンフォーム10mmで断熱した場合(左下)が38.8～43.7%であり、断熱をウレタンフォーム60mm(右下)にすると17.5～20.8%にまで縮小されている。

### 3-3 断熱材の種類・厚さ別の室温・周壁平均温度

図11に朝6:00におけるLD室の室温・周壁平均温度と配管断熱との関係を示す。配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内1m、屋外4mの場合、朝6:00における室温と周壁平均温度の期間中央値は、それぞれ15.5°C、15.8°Cになっている。これに対して、ウレタンフォーム30mmの場合、それらはともに20.0°Cになってお

り、早朝の室内の寒さが和らげられている。

配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内4m、屋外1mの場合、朝6:00における室温と周壁平均温度の期間中央値は、それぞれ19.5°C、20.0°Cになっている。これに対して、ウレタンフォーム30mmの場合はそれぞれ21.5°C、22.0°Cであり、それぞれ2.0°C高い。配管断熱がウレタンフォーム30mmと60mmとでは、室温・周壁平均温度の期間中央値の差が約0.5°Cに留まり、期間最低値、期間最高値も同様の傾向になっている。

### 3-4 エクセルギーの流れ

図12にエクセルギーの流れを示す。配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内1m、屋外4mの場合、発電所に投入される化学エクセルギー、床入口で温水がもつ温エクセルギー<sup>18)</sup>、床からの温放射エクセルギー<sup>18)</sup>の値はそれぞれ、4105W、119W、44Wである。これに対して、配管断熱をウレタンフォーム30mmに変えると、ボイラーへの投入エクセルギーは3695Wに削減され、逆に床への投入熱エクセルギーは351Wに、床からの温エクセルギーは83Wに増加する。即ち、配管の断熱は資源消費の削減と床暖房効果の向上をもたらしている。ボイラー出口の温水に与えられる温エクセルギー459Wは、配管断熱がポリエチレンフォーム10mmの場合ボイラーへの投入エクセルギーの11%、配管断熱がウレタン

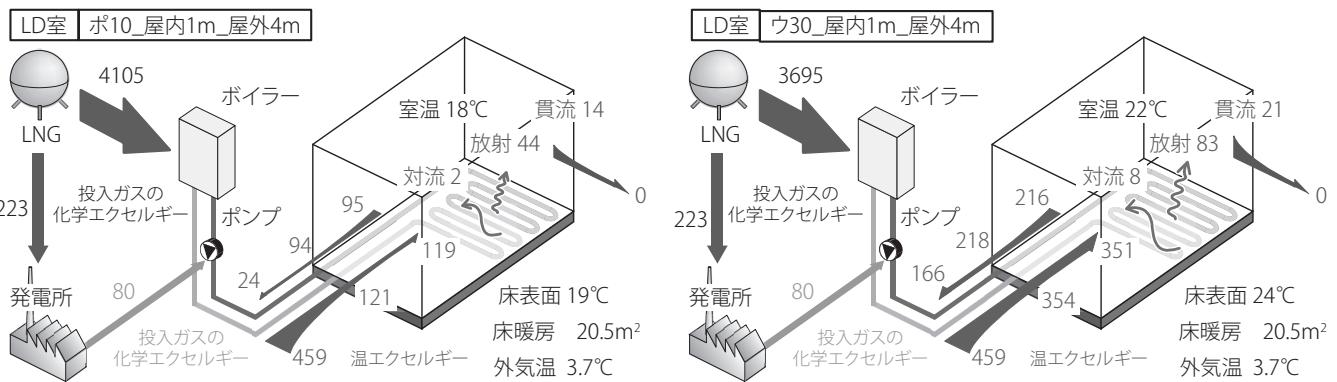


図12 エクセルギーの流れ(1月26日の朝6:00、矢印の始点と終点の数値の差がエクセルギー消費量)

フォーム30mmの場合でも12%に留まり、ボイラーのエネルギー効率(熱効率)95%に比べて著しく小さい。

図13に朝6時における往き配管(ボイラーから床入口まで)の温エクセルギー消費量を示す。配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内1m、屋外4mの場合、ボイラーから床入口までの温水配管における温エクセルギー消費量の期間中央値は340Wである。これに対して、断熱をウレタンフォーム30mmに変えると温エクセルギー消費量は110Wに削減され、約32%の温エクセルギー消費に留まる。

屋内4m、屋外1mの配管の断熱と配置をポリエチレンフォーム10mmから、ウレタンフォーム30mmに変更すると、ボイラーから床入口までの配管における温エクセルギー消費量の期間中央値は210Wから、その31%に相当する66Wに削減される。

配管での温エクセルギー消費量は、配管の断熱性が向上すると、第1四分位値と第2四分位値との差、中央値ともにその変化が小さくなっている。

配管の断熱性が同じで、配置が屋内1m、屋外4mから屋内4m、屋外1mになると、配管での温エクセルギー消費量は36~38%削減される。

#### 4. おわりに

東京で改正省エネルギー基準相当の外皮断熱を施した木造住宅を対象に、配管断熱が夜間運転時の温水床暖房における室内熱環境とエクセルギー消費に与える影響について研究を行なった結果、以下のことがわかった。

- 1) 配管断熱がウレタンフォーム60mmで、屋内1m、屋外4mの場合、暖房時の床投入熱が2.0~4.2 kW、配管からの熱損失が1.75~2.0 kWになっており、ポリエチレンフォーム10mmの場合の最大34%の熱損失が削減できる。また、ウレタンフォーム60mmで、屋内4m、屋外1mの場合、暖房時の床投入熱が2.0~4.2 kW、配管からの熱損失が0.8~1.3 kWになっており、ポリエチレンフォーム10mmの場合の最大55%の熱損失が削減できる。
- 2) 配管断熱がウレタンフォーム30mmで、屋内1m、屋外4mの配管の場合、朝6:00における室温と周壁平均温度の期間中央値は、ともに20.0°Cになっており、ポリエチレンフォーム10mmの場合の15.5°C、15.8°Cより、それぞれ4.5°C、4.3°C高い。
- 3) 配管断熱がポリエチレンフォーム10mmで、屋内4m、屋外1m

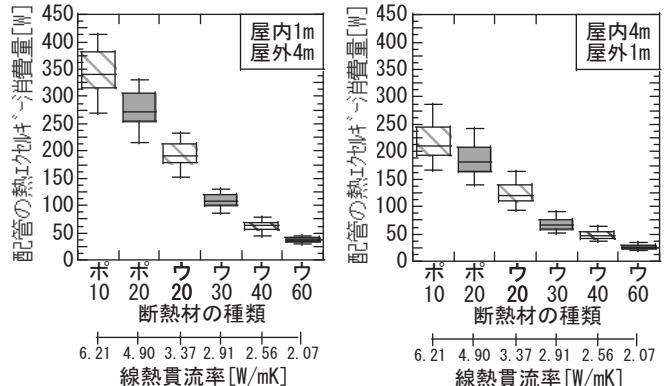


図13 朝6:00におけるLD室床入口までの配管の温エクセルギー消費量と配管断熱の関係(暖房期間全体の計算値、単室暖房時)

の場合、朝6:00における室温と周壁平均温度の期間中央値は、それぞれ19.5°C、20.0°Cになっている。これに対してウレタンフォーム30mmの場合はそれぞれ21.5°C、22.0°Cであり、いずれも2.0°C高い。配管断熱がウレタンフォーム30mmと60mmとでは、室温・周壁平均温度の期間中央値の差が約0.5°Cに留まり、期間最低値、期間最高値も同様の傾向である。

- 4) 屋内1m、屋外4mの配管保温材をポリエチレンフォーム10mmからウレタンフォーム30mmに代えると、ボイラーへのエクセルギー投入量は10%削減され、床への熱エクセルギー投入量は約3倍、床からの温放射エクセルギー放出量は約2倍になる(1月26日の朝6:00)。配管の断熱性向上は資源消費の抑制と床暖房効果の向上を同時にたらす。
- 5) 配管断熱がウレタンフォーム30mmで、屋内1m、屋外4mの配管の場合、期間平均の温エクセルギー消費量は110Wになり、ポリエチレンフォーム10mmの約32%の温エクセルギー消費に留まる。
- 6) 屋内4m、屋外1mの配管で、断熱をポリエチレンフォーム10mmから、ウレタンフォーム30mmに変更すると、ボイラーから床入口までの配管における温エクセルギー消費量の期間中央値は210Wから、その31%に相当する66Wに削減される。配管での温エクセルギー消費量は、配管の断熱性が向上すると、第1四分位値と第2四分位値との差、中央値ともにその変化が小さくなっている。そのため、3)のことと、配管の納まりから、配管断熱はウレタンフォーム30mm程度が望ましいと考える。

## 謝辞

A邸の実測調査において、自宅として意匠設計を行なった岩岡竜夫先生（東京理科大学教授）、設備設計を担当したZO設計室の伊藤教子さん・布施安隆さん、当時、東海大学建築学科卒論生の金尚炫さん・黒岩敬仁さん・渡邊喜喜さんにご協力いただきました。ここに謝意を表します。

なお、本研究は、平成23～24年度科研費（基盤（B）、課題：『人-自然共生建築』系のエクセルギー消費最適化に関する研究、研究代表者：宿谷昌則）、平成25年度科研費（基盤（B）、課題：エクセルギー理論に基づく人-建築環境・コミュニティ環境システムの解明、研究代表者：宿谷昌則）の補助により実現しました。

## 注

注1) ポイラーや発電所に投入される天然ガスの化学エクセルギーは式(A.1)、室空気から外気への貫流熱のエクセルギーは式(A.2)により計算した<sup>14)</sup>。ここで $E_{LNG}$ は暖房用エネルギー使用量[W]、 $A_i$ 、 $K_i$ は外壁*i*の面積[m<sup>2</sup>]、熱貫流率[W/m<sup>2</sup>K]、 $T_r$ は室温[K]である。なお、LD室の外壁は西壁、南壁と床である。床から放出される放射エクセルギー、対流エクセルギーは式(A.3)、式(A.4)により算出した<sup>14)</sup>。ここで、 $A_f$ 、 $T_f$ は床の面積[m<sup>2</sup>]、表面温度[K]、 $T_m = (T_f + T_{oa}) / 2$ 、 $h_r$ 、 $h_c$ は床表面の放射熱伝達率、対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>K]である。

$$(天然ガスの化学エクセルギー) = 0.975 \cdot E_{LNG} \quad (A.1)$$

(室空気から外気への貫流熱エクセルギー)

$$= \sum_{k=1}^n A_i K_i (T_r - T_{oa}) (1 - \frac{T_{oa}}{T_r}) \quad (A.2)$$

$$(床から出る放射エクセルギー) = A_f h_r \frac{(T_f - T_{oa})^2}{2 \cdot T_m} \quad (A.3)$$

$$(床から出る対流エクセルギー) = A_c h_c \frac{(T_f - T_r)(T_r - T_{oa})}{T_f} \quad (A.4)$$

## 参考文献

- 1) 根本晋吾・黒岩敬仁・高橋達：戸建住宅に導入した太陽熱利用天井・床放射暖房システムの実測調査、その1.太陽集熱量と配管熱損失、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2, pp.1331-1332, 2013.8

- 2) 黒岩敬仁・根本晋吾・高橋達：戸建住宅に導入した太陽熱利用天井・床放射暖房システムの実測調査、その2.実現された室内熱環境、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2, pp.1333-1334, 2013.8
- 3) 根本晋吾・高橋達：配管断熱が温水床暖房の室内熱環境・資源消費に与える影響の検討、その1.配管断熱と室内熱環境・エネルギー使用量の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2, pp.1237-1238, 2014.9
- 4) 財団法人建築環境・エネルギー機構：住宅の省エネルギー措置の提出の解説、連合印刷センター, p.116, 2010
- 5) 京都市環境政策局地球温暖化対策室：京都市事業者省エネ診断事業 平成21年度省エネルギー診断事業事例集、中外テクノス, pp.28-34, 2010
- 6) 日本建築学会編：ソーラー建築設計ガイドブック、彰国社, pp.64-74, 2001
- 7) 日本サステナブル建築協会編：住宅の改正省エネルギー基準・低炭素建築物認定制度の講習（第2章2.2.1～2.2.10），([http://lowenergy.jsbc.or.jp/top/resource/house\\_slide3.pdf](http://lowenergy.jsbc.or.jp/top/resource/house_slide3.pdf)) (参照 2014.3.1)。
- 8) 水野稔・下田吉之・中村安宏：間欠給湯管の熱計算と最適断熱材厚さ、空気調和・衛生工学会論文集、No.52, pp.29-38, 1993
- 9) 三浦尚志・鉢井修一・中原信生：温水床暖房の熱損失に関する研究、日本建築学会近畿支部研究報告集、環境系(42), pp.321-324, 2002
- 10) 平田勝彦・宿谷昌則：蓄熱式床暖房システムの数値解析—床の蓄熱性、建物断熱性、室内熱環境、温水投入熱量の関係に関するケーススタディ、日本建築学会計画論文報告集、第419号, pp.39-46, 1991.1
- 11) 若林洋行・宿谷昌則：床暖房システムへの投入エクセルギーの数値解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2, pp. 421-422, 1994.7
- 12) K. Isawa and M. Shukuya : *A Combined Exergy Analysis on Human-Body System and Floor Heating System*, The 2005 World Sustainable Building Conference Tokyo (SB05 Tokyo), 01-093, September 2005.9
- 13) 宇田川光弘：標準問題の提案、日本建築学会環境工学委員会熱分科会 第15回熱シンポジウム, pp.22-23, 1985
- 14) 宿谷昌則：数値解析で学ぶ光と熱の建築環境学、丸善, pp.161-207, 1993.7
- 15) 宿谷昌則・鈴木彌也・村松宏：蓄熱式床暖房システムのシミュレーション手法に関する研究（その2.シミュレーションと実験の比較検証）、空気調和・衛生工学会学術講演会講論文集, pp.1001-1001, 1988.9
- 16) 高橋達・辻康昭・伊藤教子著：井水放射冷却・外気予冷兼用システムの開発と室内熱環境に関する実測調査、日本建築学会環境系論文集、第76巻、第670号, pp.1043-1049, 2011.11
- 17) 紀谷文樹・関根孝・入江建久・宿谷昌則編：建築環境設備学、彰国社, pp.197-199, 1988.3
- 18) 宿谷昌則・西川竜二・高橋達・斎藤雅也・浅田秀男・伊澤康一・岩松俊哉・シユバイカ マーセル著：エクセルギーと環境の理論一流れ・循環のデザインとは何か、井上書院, pp.184-240, 2010.9

A STUDY ON THE INFLUENCE OF PIPING THERMAL INSULATION ON  
INDOOR CLIMATE AND RESOURCE CONSUMPTION  
RELATED TO HOT WATER FLOOR HEATING

– Numerical studies focusing on avoiding room temperatures decline during night time –

*Shingo NEMOTO\** and *Itaru TAKAHASHI\*\**

\* ZO Consulting Engineers, M. Eng. (Ex-Grad. Stud. of Tokai Univ.)  
\*\* Prof., Faculty of Eng., Tokai Univ., Dr. Eng.

This paper describes results of a numerical simulation, a field measurement and an exergy analysis focusing on the influence of piping thermal insulation on thermal comfort and resource consumption related to hot water floor heating during night time. The authors executed a series of numerical simulation and an exergy analysis for floor heating in a wooden house and a field measurement for radiant heating using ceilings and floors. The house for the simulation and the field measurement is located in Tokyo and a steel-frame building.

The numerical simulation model adopted control volume heat balance method assuming that the heat emitting from embedded piping is uniformly absorbed by the whole layer of the floor containing the piping. The heat flowing from the piping into surrounding air was calculated with temperatures of the hot water at inlets and outlets of the piping from the boilers to the floor, lengths and place of the piping and thermal transmittance from hot water to the surrounding air via pipe as parameters. Thermal insulation performances of building skin were set uniquely as the next generation energy saving standard of Japan. Varieties in material and depth of piping thermal insulation are urethane foam of 20mm, 30mm, 40mm and 60mm and polyethylene foam of 10mm and 20mm. Those in position and length of piping are 4m, 9m, 14m and 24m outdoor and 1m indoor, and 1m outdoor and 4m, 9m, 14m, 19m and 24m and 1m indoor.

Results of the field measurement were used for confirming the calculation accuracy of the numerical simulation model.

The authors set up exergy balance equations against the boiler, the piping from the boiler to the floor, the returning piping from the floor, the floor, the room air and the house envelope, respectively.

The followings were found. In a case pipe length is 1m indoor and 4m outdoor, changing from polyethylene foam 10mm the urethane foam 30mm as thermal insulation of piping can reduce warm exergy consumption within the pipe from the boiler to the inlet of the floor in 68 %. At the same time, the seasonal median of the room air temperature at am 6:00 can be raised from 15.5°C to 20.0°C. The richer thermal insulation of piping is, the smaller differences of warm exergy consumptions within the piping in seasonal median and difference between seasonal first quartile and third quartile are. Improving thermal insulation of piping increases radiant and convective warm exergy from the floor two times and four times, respectively, even if hot water temperature at the outlet of the boiler is the same.

(2014年10月3日原稿受理、2015年4月22日採用決定)