

温水床暖房ユニットの放熱特性試験の試験結果 標準化に関する研究

第1報——標準化方法の提案及び代表試験による有効性検討

菅 哲 俊*¹ 南 雲 祐 輝*¹ 黒 鳥 皓 史*²

温水床暖房ユニットの放熱特性試験方法は、空気温度など試験条件の設定目標値に許容範囲を設けており、その許容範囲内の試験条件値における性能値を提示することになっている。そこで、実施した放熱特性試験の試験結果を基に求めた床暖房ユニットの熱抵抗値を利用して、試験条件の設定目標値における性能値を求める標準化方法を提案し、代表条件の試験によりその有効性を検討した。検討した結果、試験条件の設定目標値における性能値に対して6.2～4.0%の範囲内に分布した代表試験結果の性能値を0.2～1.4%の範囲内に入るように標準化することを確認した。また、標準化方法に影響を与える床表面熱伝達率等について検討を行い、その影響の度合いを確認した。

キーワード：温水床暖房ユニット・放熱特性試験・標準化方法

はじめに

木造住宅などで使用される床暖房システムは、熱源機から供給された熱エネルギーのすべてを室内などの居住域に提供するのではなく、その一部は床下空間に伝わり、最終的には外気側に放出される。住宅における一次消費エネルギー計算や省エネルギー性能評価を考える場合、放熱器としての床暖房ユニットの居住域に放熱する床上放熱の熱性能を適切に評価することは重要と考える。

床暖房ユニットの床上放熱性を測定する試験規格としては、(一財)ベターリビングが優良住宅部品認定基準及び優良住宅部品性能試験方法書「暖・冷房システム(床暖房ユニット)BLT HS/B-b-8:2020」で示した放熱特性試験¹⁾がある。恒温室を用いた定常状態における測定により床暖房ユニットの床上放熱、床下放熱及び床上放熱が全放熱で占める割合を床暖房ユニットの性能値として求める。放熱特性試験は、試験条件の床上空気温度などについて設定目標値を設定しているが、実際の試験実施現場において試験条件の設定目標値に完全一致させることは労力と時間を費やす

ことである。現状は、試験条件の設定目標値に許容範囲を設けて、その許容範囲内の任意の試験条件値における試験結果の性能値を提示する。本来は試験条件の設定目標値における性能値を示すことが望ましく、他の同種類製品との比較評価を考慮しても試験条件値を合わせたほうが良いと思われる。解決策の一つとして、実施した試験結果の性能値と試験結果を基に補正計算した試験条件の設定目標値における性能値を一緒に示すことが考えられる。熱性能試験分野で、設定目標値における性能値に補正計算する前例としては、ドアやサッシの熱貫流率及び熱抵抗を求めるJIS A 4710「建具の断熱性試験方法」²⁾がある。断熱性試験で求めたドアやサッシの熱貫流率及び熱抵抗を試験条件の設定目標値である高温側空気温度20℃、低温側空気温度0℃などに補正計算した標準化熱貫流率及び標準化熱抵抗を試験結果と一緒に提示する。温水床暖房ユニットの放熱特性試験は、内部発熱があるとともに内部発熱に起因する循環水温度の補正計算などが必要であり、JIS A 4710の標準化方法を適用することができない。

なお、床暖房ユニットの熱性能に関する試験方法において、国内では日本産業標準調査会(JIS)も含めて公的機関

*¹ (一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター 正会員

*² (一財)ベターリビングつくば建築試験研究センター

が定めた試験規格はほとんどなく、特に床上放熱を性能値のひとつとして求める試験方法はほかに見当たらない。

このような背景から、本研究では温水床暖房ユニットの放熱特性試験の試験結果である床放熱及び床下放熱を標準化する標準化方法を確立し、標準化方法によって求めた床上放熱及び床下放熱の誤差範囲を明確に示すことを目的とする。本報では、試験結果を基に床上放熱及び床下放熱を試験条件の設定目標値における標準化床上放熱及び床下放熱に計算する標準化方法を提案し、代表条件の試験ケースにより、提案した標準化方法の有効性を検討した結果を報告する。さらに、標準化方法に影響を与える床上表面熱伝達率及び温水パネルの放熱管内表面熱伝達率について検討を行い、その影響の度合いを調査したので合わせて報告する。

1. 温水床暖房ユニットの放熱特性試験の概要

優良住宅部品性能試験方法書 暖・冷房システム（床暖房ユニット）BLT HS/B-b-8:2020 で示した放熱特性試験の試験装置の平面図を図-1に、断面図を図-2に示す。

試験は、試験装置一式を床下空気温度（設定目標値 4℃）に設定した恒温室に設置し、試験体である温水床暖房ユニットは木造住宅の大引きから下部分を想定して製作した試験体の設置用架台に設置して行う。温水床暖房ユニットの上部分は、室内側空気温度を再現できるように断熱処理を行った保護箱で覆う。保護箱内には放射遮熱板付き内箱を設置し、放射熱伝達抵抗が一定となるようにした。また、温水床暖房ユニットの両側には気流発生用のファンを設置して強制対流を生じさせ、床表面対流熱伝達抵抗が試験ごとに差異がなく、試験条件である見かけの床上表面熱伝達抵抗 $R_{ai} = (8.6 \pm 1.7) \times 10^{-2} \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ で試験実施ができるようにした。同様に、床下空気側も図-1、図-2に示すように試験装置から所定距離に設置したファンにより強制対流状態にし、見かけの床下表面熱伝達抵抗を $R_{ao} = (4.3 \pm 1.7) \times 10^{-2} \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ で試験を実施する。試験方法で定めた見かけの床上表面熱伝達抵抗及び床下表面熱伝達抵抗の計算式を式(1)、式(2)に示す。なお、この計算式は正確な表面熱伝達抵抗を求めるための式ではなく、試験ごとに試験条件の差異が生じないように試験条件を合わせるための式である。

$$R_{ai} = A_{sur} (\theta_{si} - \theta_{ai}) / q_i \quad \dots\dots (1)$$

$$R_{ao} = A_{sur} (\theta_{so} - \theta_{ao}) / q_o \quad \dots\dots (2)$$

ここに、

$$R_{ai} : \text{見かけの床上表面熱伝達抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}]$$

$$R_{ao} : \text{見かけの床下表面熱伝達抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K}) / \text{W}]$$

$$A_{sur} : \text{放熱部分の面積} \quad [\text{m}^2]$$

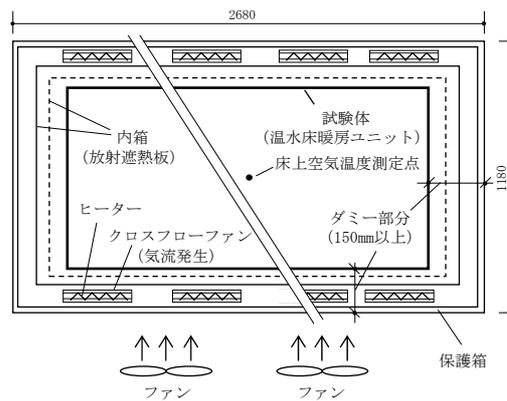


図-1 試験装置の平面図

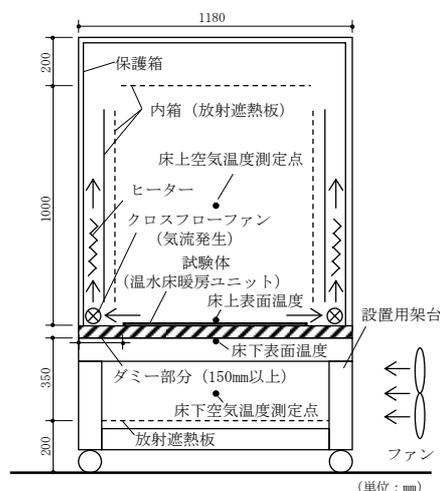


図-2 試験装置の断面図

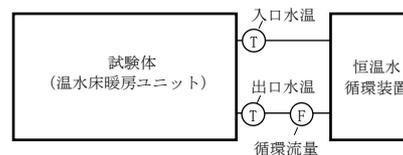


図-3 温水循環システムの概要及び測定点

表-1 試験方法の概要

試験条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 床上空気温度 18.0 ± 1.0 °C ・ 床下空気温度 4.0 ± 1.0 °C ・ 入口水温（製品の仕様値）± 0.5 °C ・ 水流量（製品の仕様値）± 8.3 g/s ※8.3 g/sは工学単位での約0.5L/min ・ 床上表面熱伝達抵抗 $(8.6 \pm 1.7) \times 10^{-2} \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$ ・ 床下表面熱伝達抵抗 $(4.3 \pm 1.7) \times 10^{-2} \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度 床上空気温度8点, 床下空気温度3点 床上表面温度3点, 床下表面温度3点 内箱内表面温度7点 出入口水温各1点 ・ 水流量 ・ 床上放熱（熱流計）
試験結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 床上放熱 (W) ・ 床下放熱 (W) ・ 床上放熱が全放熱に対する割合 (%)

θ_{si} : 床上表面温度	[°C]
θ_{so} : 床下表面温度	[°C]
θ_{ai} : 床上空気温度	[°C]
θ_{ao} : 床下空気温度	[°C]
q_i : 試験結果の床上放熱	[W]
q_o : 試験結果の床下放熱	[W]

放熱特性試験の実施時に温水床暖房ユニットに供熱する温水循環システムの概要と測定点を図-3に示す。出入口水温は、出入口放熱管内に測温抵抗体を挿入して測定し、循環流量は電磁式流量計で測定する。表-1に試験方法の概要を示す。温水床暖房ユニットの全放熱は出入口水温差と循環流量から計算し、床上放熱は床表面に設置した熱流計で測定する。

2. 標準化方法の考え方

温水床暖房ユニットの放熱特性試験における試験結果標準化方法とは、実施した放熱特性試験の試験結果を基に求めた床暖房ユニットの床上熱抵抗と床下熱抵抗を利用して、試験方法で示した試験条件の設定目標値における床上放熱及び床下放熱を求める方法である。表-2に、本報で検討する試験条件の設定目標値及び標準化試験結果項目を示す。

熱負荷シミュレーションの床暖房計算モデル³⁾では、パネル内部の熱流を床上下方向への一次元熱流とし、内蔵した放熱管部分を一樣な面発熱と仮定して計算する場合がある。今回検討する放熱特性試験は、床上空気温度と床下空気温度を一定にした定常状態での試験であり、温水床暖房ユニットに内蔵した発熱部分である温水パネルは温水床暖房ユニットの中央部分に設置し、温水パネルの周りには断熱材などで囲むとともに温水床暖房ユニットの周辺までの距離は150mm以上を設ける（図-1と図-2のダミー部分）。温水パネルからの放熱は3次元熱伝導であるが、本研究で検討する放熱特性試験では温水パネルから横方向への熱伝導量は少なく、ほとんどの熱量は床上及び床下から放熱されると思われる。また、試験実施対象の温水パネルは、放熱性能及び表面温度分布の均一性を高めるために図-4に示すように温水パネル表面に温水配管に密着したアルミ箔を設け、放熱管と放熱管との距離も70~80mmの製品がほとんどである。本来、試験実施時の温水パネル放熱管からの放熱は3次元熱移動であり、温水パネルの放熱管の長さ方向や垂直な方向にも温度分布が生じるが、本研究では試験対象の温水パネル及び温水床暖房ユニットの断面構成などを考慮したうえで、温水パネルの放熱管及びアルミ箔部分から床上及び床下への放熱を1次元熱流と仮定し、式(3)~(6)を立てて放熱を近似した。

式(3)で R_i は放熱管内水から床上空気までの熱抵抗で、 R_o

表-2 試験条件の設定目標値及び標準化試験結果

設定目標の試験条件値	<ul style="list-style-type: none"> ・ 床上空気温度 18.0 °C ・ 床下空気温度 4.0 °C ・ 入口水温（製品の仕様値）°C ・ 水流量（製品の仕様値）g/s
標準化試験結果	<ul style="list-style-type: none"> ・ 床上放熱 (W) ・ 床下放熱 (W)

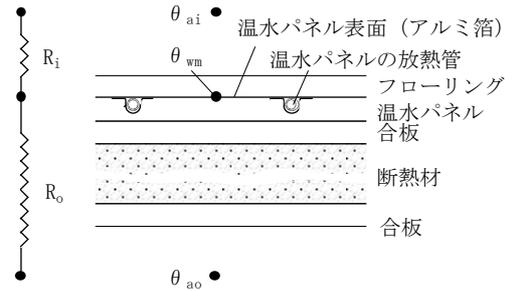


図-4 温水床暖房ユニットの計算概念図

$$c_w G_w (\theta_{win} - \theta_{wout}) = \frac{A_{sur} (\theta_{wm} - \theta_{ai})}{R_i} + \frac{A_{sur} (\theta_{wm} - \theta_{ao})}{R_o} \quad \dots\dots (3)$$

$$q_i = \frac{A_{sur} (\theta_{wm} - \theta_{ai})}{R_i} \quad \dots\dots (4)$$

$$q_o = \frac{A_{sur} (\theta_{wm} - \theta_{ao})}{R_o} \quad \dots\dots (5)$$

$$\theta_{wm} = \frac{(\theta_{win} + \theta_{wout})}{2} \quad \dots\dots (6)$$

ここに、

- c_w : 水の定圧比熱 [J/(g・K)]
- G_w : 水流量 [g/s]
- θ_{win} : 入口水温 [°C]
- θ_{wout} : 出口水温 [°C]
- A_{sur} : 放熱部分の面積 [m²]
- θ_{wm} : 出入口水温の平均 [°C]
- θ_{ai} : 床上空気温度 [°C]
- θ_{ao} : 床下空気温度 [°C]
- R_i : 床上熱抵抗 [(m²・K)/W]
- R_o : 床下熱抵抗 [(m²・K)/W]
- q_i : 床上放熱 [W]
- q_o : 床下放熱 [W]

は放熱管内水から床下空気までの熱抵抗である。床上熱抵抗 R_i は、放熱管内表面の熱伝達抵抗、放熱管内表面から床表面までの熱抵抗及び床表面の熱伝達抵抗の合計とみることができる。この中で、放熱管内表面から床表面までの熱抵

抗は、熱伝導による熱抵抗であり構成材料の物性値により決まる値である。放熱管内表面の熱伝達抵抗は水との熱伝達抵抗であり、一般的に液体への熱伝達抵抗は建築材料の熱抵抗より著しく小さく無視できる値である。床表面の熱伝達抵抗について、本試験では床表面付近のファンによる強制対流及び放射遮熱板により所定値に合わせる。上記の理由から、今回検討する放熱特性試験において床上熱抵抗 R_i を固定値と仮定した。床下熱抵抗 R_o も同様に固定値と仮定した。

標準化の手順であるが、まず、放熱特性試験を実施し、温水床暖房ユニットの全放熱量を入口水温 θ_{win} 、出口水温 θ_{wout} と循環流量 G_w から計算する。床上放熱量 q_i は温水パネル上部の床表面全面に設置した熱流計で計測し、床下放熱量 q_o は全放熱量から床上放熱量 q_i を引いた値とする。次に、試験結果から求められた入口水温 θ_{win} 、出口水温 θ_{wout} 、床上放熱量 q_i を式(4)、式(6)を入力して、床上熱抵抗 R_i を求める。同様に、入口水温 θ_{win} 、出口水温 θ_{wout} 、床下放熱量 q_o を式(5)、式(6)を入力して、床下熱抵抗 R_o を求める。そのあと、床上熱抵抗 R_i 、床下熱抵抗 R_o と標準化試験条件(床上空気温度、床下空気温度、入口水温、循環流量)を式(3)～式(6)を入力し、連立方程式を解くことにより標準化した床上放熱量と床下放熱量、出口水温及び平均水温を求める。なお、標準化した床表面温度は、標準化試験条件の床上空気温度と標準化した床上放熱量を式(1)を入力して求める。

3. 代表試験による標準化方法の有効性検討

3.1 検討方法及び試験概要

放熱特性試験の試験結果である床上放熱及び床下放熱を試験条件の設定目標値における値に補正計算する標準化方法の有効性を検討するために、代表試験による有効性検討を行った。試験ケースを表-3に示す。試験条件である床上空気温度、床下空気温度、入口水温、水流量を対象にして試験A～試験Hの8試験について検討を行った。また、比較検証の対象として試験条件の設定目標値に合わせた試験Nを行った。試験Nの試験結果である床上放熱及び床下放熱を試験条件の設定目標値における試験結果(標準化した結果)として、標準化方法の有効性を比較検討する。今回は標準化方法の有効性を検討するために、検討対象の試験条件である入口水温、水流量、床上空気温度、床下空気温度を試験方法で示した設定目標値の許容範囲の2倍にして、試験A～試験Hの試験条件を決めた。試験Aと試験Bは、入口水温を設定目標の試験条件である入口水温 60℃に補正する時の有効性を検討する。試験Cと試験Dは、水流量を設定目標の試験条件である水流量 16.7g/sに補正する時の有効性を検討する。試験Eと試験Fは、床上空気温度を設定目標の試験条件である床上空気温度 18℃に補正する時の有効性

表-3 試験ケース

	入口水温	流量	床上空気温度	床下空気温度
	℃	g/s	℃	℃
試験A	62	16.7	18	4
試験B	58	16.7	18	4
試験C	60	20.0	18	4
試験D	60	13.3	18	4
試験E	60	16.7	19	4
試験F	60	16.7	17	4
試験G	60	16.7	18	5
試験H	60	16.7	18	3
試験N (標準)	60	16.7	18	4

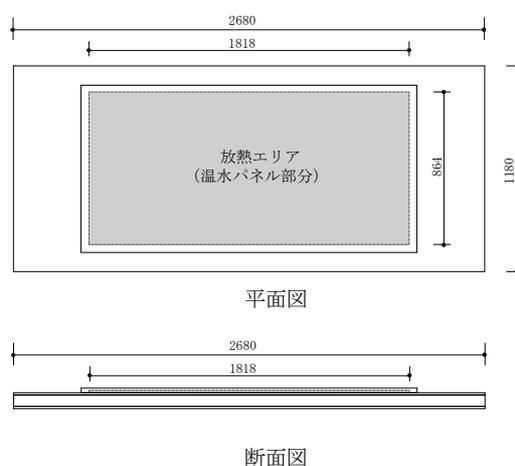


図-5 温水床暖房ユニット試験体

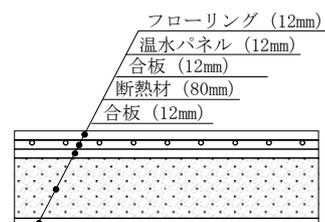


図-6 温水床暖房ユニット試験体の断面詳細図

表-4 温水床暖房ユニットの温水パネル仕様

サイズ	・幅864mm×長さ1818mm×厚さ12mm
基材	・発泡ポリスチレン (厚さ12mm)
表面材	・アルミ箔
放熱管	・架橋ポリエチレン管 ・外径7.2mm 内径5.0mm ・長さ23m ・管ピッチ75～78mm

を検討する。試験 G と試験 H は、床上空気温度を設定目標の試験条件である床上空気温度 4℃に補正する時の有効性を検討する。

図-5 に検討を行った温水床暖房ユニット試験体の平面図と断面図を、図-6 に断面詳細図を示す。表-4 に温水床暖房ユニットの温水パネルの仕様を示す。温水パネルは市販されている製品の中で流通量が多く、一般的と思われる製品にした。

試験は、放熱特性試験装置一式を恒温室内に設置して各部温度及び水流量が安定して定常状態になってから 3 秒間隔で 30 分間行った。試験装置及び測定機器の詳細を表-5 に示す。

3.2 試験結果及び標準化した結果

図-7 に一例として試験条件 N における測定中の各部温度変動及び水流量の推移を示す。入口水温は設定目標の入口水温 60℃に対して±0.3℃以内、水流量は±0.3g/s、床上空気温度と床下空気温度もそれぞれ±0.2℃、±0.4℃の範囲内で変動しており、安定した定常状態での測定であった。

表-5 試験装置及び測定機器

	詳細
恒温水循環装置	低温恒温水循環装置NCC-1110A 東京理化機械株式会社
水温測定	测温抵抗体AAクラス (株)八洲測器
循環流量測定	電磁流量計AXF005G 横河電機株式会社

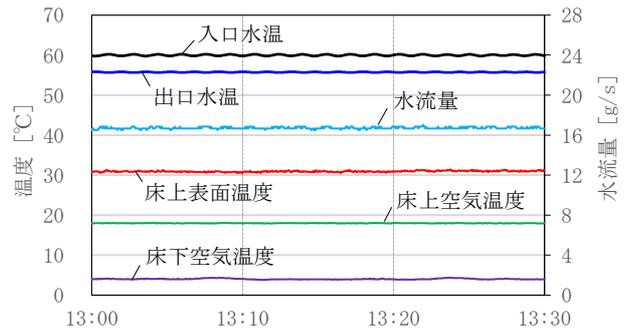


図-7 各部温度及び水流量の測定結果（試験 N）

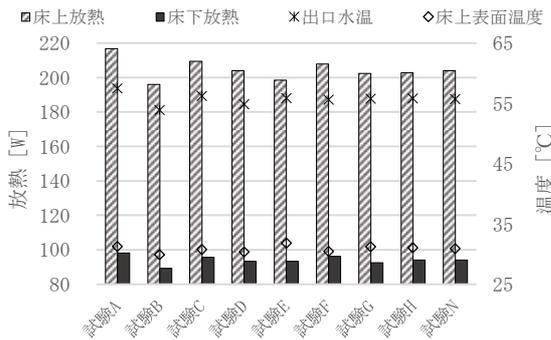


図-8 試験結果

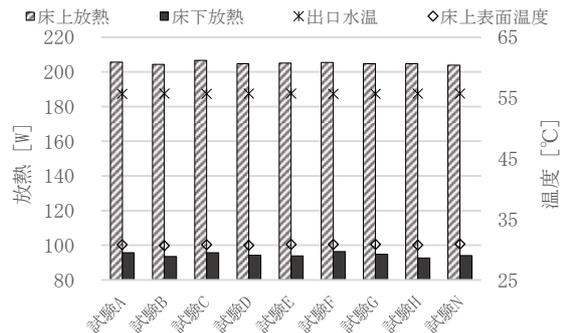


図-9 標準化した結果

表-6 試験結果及び標準化した結果

	試験結果								標準化試験条件				標準化した結果			
	入口水温	出口水温	循環流量	床上空気温度	床下空気温度	床上放熱	床下放熱	床上表面温度	床上空気温度	床下空気温度	入口水温	循環流量	出口水温	床上放熱	床下放熱	床上表面温度
	℃	℃	g/s	℃	℃	W	W	℃	℃	℃	g/s	℃	W	W	℃	
試験A	62.0	57.5	16.6	17.8	4.5	216.7	98.2	31.3	18.0	4.0	60.0	16.7	55.7	205.7	95.7	30.8
試験B	58.0	53.9	16.5	17.7	4.5	195.9	89.4	29.9					55.7	204.4	93.6	30.7
試験C	60.0	56.2	19.1	17.8	4.3	209.3	95.6	30.8					55.7	206.8	95.6	30.8
試験D	60.0	54.8	13.6	17.8	4.1	203.8	93.3	30.4					55.7	204.8	94.3	30.7
試験E	60.1	55.9	16.6	19.4	4.4	198.5	93.3	31.9					55.7	205.2	93.8	30.9
試験F	60.0	55.6	16.6	17.5	4.1	207.8	96.2	30.5					55.7	205.4	96.4	30.9
試験G	60.0	55.8	16.6	18.5	5.3	202.3	92.5	31.2					55.7	204.8	94.8	30.9
試験H	60.1	55.8	16.6	18.5	3.3	202.7	94.0	31.1					55.7	204.9	92.7	30.8
試験N (標準)	60.0	55.7	16.7	18.0	4.0	204.0	94.0	30.9	18.0	4.0	60.0	16.7	55.7	204.0	94.0	30.9

図-8～図-9に、試験A～試験Nの試験結果と試験結果に基づいて標準化した床上放熱、床下放熱、出口水温及び床表面温度を示す。全体として、試験Nの試験結果に対してばらつきが見られた図-8の床上放熱、床下放熱、出口水温及び床表面温度と比較して、図-9の標準化した床上放熱、床下放熱、出口水温及び床表面温度は試験Nの結果に近似することが分かる。

表-6に、試験A～試験Nの試験結果と標準化した結果の詳細比較を示す。温水床暖房ユニットの放熱量に最も大きな影響を与える入口水温を対象にした試験Aと試験Bでは、試験結果の床上放熱が216.7Wと195.9Wであり、設定目標の試験条件値における試験結果である試験Nの試験結果の204.0Wに比較してその差はそれぞれ12.7Wと-8.1Wであった。その差が試験Nの試験結果における割合は6.2%と-4.0%であった。これに比べて、試験Aと試験Bの試験結果に基づいて標準化方法で求めた床上放熱及び床下放熱は205.7Wと204.4Wであり、設定目標の試験条件値における試験結果である試験Nの試験結果の204.0Wに比較してその差はそれぞれ1.7Wと0.4Wであった。その差が試験Nの試験結果における割合は0.8%と0.4%であった。ほかの試験B～試験Hにおいても同じ傾向が見られ、今回検討を行ったすべての代表試験の試験A～試験Hにおいて、標準化方法で求めた床上放熱及び床下放熱が、比較対象の試験Nの床上放熱及び床下放熱の0.2～1.4%の範囲内に入ることを確認した。その他の試験結果である出口温度、床表面温度補正においても同様な傾向があり、試験Nの試験結果の0.1%以内の範囲に入ることを確認できた。今回検討した試験A～試験Hは検討対象の試験条件の設定を試験方法で示した試験条件の許容範囲の2倍以上にしたこと、及び一般的な試験業務における繰り返し測定の見誤差程度を考慮すると、今回提案した放熱特性試験の試験結果に基づいて標準化した床上放熱及び床下放熱を求める標準化方法は、実用上大きな問題はないと考えられる。

4. 試験結果標準化における影響要因及びその影響の検討

今回提案した放熱特性試験の試験結果の標準化方法は、温水床暖房ユニットの温水パネルの放熱管内水から床上空気までの床上熱抵抗 R_i 及び放熱管内水から床下空気までの床下抵抗 R_o が一定である前提での計算方法である。実際、放熱管内水から床上空気までの熱抵抗 R_i は、式(7)に示すように、放熱管内表面の熱伝達抵抗 R_{wi} 、管内壁から床表面までの熱伝導による熱抵抗 R_{si} 、床表面の伝達抵抗 R_{ai} の合計である。この中で、放熱管内表面から床表面までの熱伝導による熱抵抗 R_{si} は、材料の物性値である熱伝導率で決まる値であり一定とみて問題ないとする。放熱管内表面の熱

伝達抵抗 R_{wi} は、管内水の流速の影響を大きく受ける値である。一般的に水に関わる熱伝達抵抗は関係するほかの熱抵抗より著しく小さいことから一定値と仮定しても問題ないとする。また、床表面の熱伝達抵抗については、ファン運転による強制対流及び内壁の放射遮熱板設置により、見かけ床上表面熱伝達抵抗を一定値と仮定している。

しかしながら、理論上温水パネルの放熱管内の水流速(水流量)が、放熱管内表面の熱伝達抵抗に影響を与えることは明白である。また、見かけ床表面熱伝達抵抗においては、床表面温度が床表面の放射熱伝達率に影響を与え、最終的には対流熱伝達率との合計である見かけ床表面熱抵抗に影響を与えることも明らかである。床上熱抵抗における水流速(水流量)や床表面放射熱伝達率の影響を無視できる仮定であるため、その影響の度合いについて検討を行った。

$$R_i = R_w + R_{si} + R_{ai} \quad \dots\dots (7)$$

$$R_{wi} = \frac{1}{\alpha_{wc} + \alpha_{wr}} \quad \dots\dots (8)$$

$$R_{ai} = \frac{1}{\alpha_{fsc} + \alpha_{fsr}} \quad \dots\dots (9)$$

ここに、

$$R_i : \text{床上熱抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$$

$$R_{wi} : \text{放熱管内表面の熱伝達抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$$

$$R_{si} : \text{放熱管内表面から床表面までの熱伝達抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$$

$$R_{ai} : \text{床表面の熱伝達抵抗} \quad [(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}]$$

$$\alpha_{wc} : \text{放熱管内表面の対流熱伝達率} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$\alpha_{wr} : \text{放熱管内表面の放射熱伝達率} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$\alpha_{fsc} : \text{床表面の対流熱伝達率} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$\alpha_{fsr} : \text{床表面の放射熱伝達率} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

4.1 放熱管内表面の熱伝達抵抗の検討

放熱管内表面の熱伝達抵抗は、式(8)に示すように、放熱管内表面の対流熱伝達率と放熱管内表面の放射熱伝達率の合計の逆数と見ることが出来る。放熱管内表面の放射熱伝達率は、管内表面温度が同じである密閉空間であることを考慮してゼロと見て問題ないと思われる。放熱管内表面の対流熱伝達率は、円管内の発達した乱流の熱伝達率の計算式⁴⁾を用いた計算で検討可能である。水流量を設定条件の対象とした試験C、試験D及び設定目標の試験条件値の試験Nにおける管内表面の対流熱伝達率を(10)～式(13)を用いて計算した。計算結果を表-7に示す。床上熱抵抗における管内表面の熱伝達抵抗対の割合が小さく、放熱特性試験の標準化における水流量を変える程度では、ほとんど影響がないことが確認できた。

$$Nu_{Di} = \frac{\alpha_{wc} D_i}{\lambda_w} \quad \dots\dots (10)$$

$$Nu_{Di} = 0.023Re_{Di}^{4/5} P_{ri}^{1/3} \quad \dots\dots (11)$$

$$Re_{Di} = \frac{u_w D_i}{\nu_w} \quad \dots\dots (12)$$

$$P_{ri} = \frac{\nu_w}{a_w} \quad \dots\dots (13)$$

ここに、

- Nu_{Di} : ヌッセルト数 [-]
- α_{wc} : 放熱管内表面の対流熱伝達率 [W/(m²・K)]
- D_i : 放熱管の内径 [m]
- λ_w : 水の熱伝導率 [W/(m・K)]
- Re_{Di} : レイノルズ数 [-]
- P_{ri} : プラントル数 [-]
- u_w : 管水の流速 [m/s]
- ν_w : 水の動粘度 [m²/s]
- a_w : 水の温度伝導率 [m²/s]

計算式の適用範囲 0.7 < P_{ri} < 160, Re_{Di} > 104, L/D_i > 10

表-7 試験結果及び標準化した結果

	流量	対流熱伝達率 (計算結果)	熱伝達抵抗 (計算結果)	床上熱抵抗 (試験結果)
試験C	20.0	6946.4	0.00014	0.30
試験D	13.3	5303.9	0.00019	0.31
試験N	16.7	6237.5	0.00016	0.31

4.2 床表面の熱伝達抵抗の検討

床表面の熱伝達抵抗は、式(9)に示すように、床表面の対流熱伝達率と床表面の放射熱伝達率の合計の逆数と見ることができる。放熱特性試験では、本試験ではファンの回転数制御により強制対流状態にしており、風速の関数と見ることができるので対流熱伝達率は一定とみて問題ないと思われる。放射熱伝達率は床表面温度と内壁付近の放射遮熱板表面温度の影響を受けており、式(14)を利用して計算することができる^{5) 6)}。床表面温度と床上空気温度が大きく変わる試験条件である試験A、試験B、試験E、試験Fと設定目標の試験条件値の試験Nにおける計算結果を表-7に示す。計算結果の試験A、試験B、試験E、試験Fの放射熱伝達率は、定目標の試験条件値の試験Nの放射熱伝達率と比較して増減割合は-0.6%~1.2%であった。床表面の熱伝達率が放射熱伝達率と対流熱伝達率の合計であることや、床表面熱伝達抵抗が温水床暖房ユニットの床上熱抵抗における割合などを考えると、本報で検討する試験条件値の補正範囲程度における放射熱伝達率の増減割合は実務上問題ない許容範囲と考える。

床下熱抵抗についても、上記の床上熱抵抗と同じ検討が

できる。床下側には熱抵抗が大きい断熱材が含まれており、放熱管内表面の熱伝達抵抗と床表面の熱伝達抵抗が床下熱抵抗で占める割合はもっと小さくなる。

$$\alpha_{fsr} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_{fs}^4 - T_{si}^4)}{T_{fs} - T_{ai}} \quad \dots\dots (14)$$

ここに、

- α_{fsr} : 床表面の放射熱伝達率 [-]
- ε₁ : 床表面の放射率 [-]
- ε₂ : 放射遮熱板の放射率 [-]
- σ : ボルツマン定数 [W/(m²・K⁴)]
- T_{fs} : 床表面温度 [K]
- T_{si} : 放射板の表面温度 [K]
- T_{ai} : 床上空気温度 [K]

表-8 試験結果及び標準化した結果

	床上空気温度	床表面温度	放射熱伝達率 (計算結果)	試験Nの放射熱伝達率との比較	
				差	増減割合
	℃	℃	W/(m ² ・K)	W/(m ² ・K)	%
試験A	17.8	31.3	4.85	0.01	0.1
試験B	17.7	29.9	4.81	-0.03	-0.6
試験E	19.4	31.9	4.90	0.06	1.2
試験F	17.5	30.5	4.82	-0.02	-0.5
試験N	18.0	30.9	4.84	-	-

まとめ

本研究は、温水床暖房ユニットの放熱特性試験の試験結果である床放熱及び床下放熱を標準化する標準化方法を確認し、標準化方法によって求めた床上放熱及び床下放熱の誤差範囲を示すことを目的とする。本報では、放熱特性試験の標準化方法を提案し、市販されている製品の中で流通量が多く、一般的と思われる温水パネル1台を用いた代表試験によりその有効性について検討を行った。以下、本報のまとめを示す。

- 1) 放熱特性試験の試験結果から求めた見かけ床上熱抵抗及び見かけ床下熱抵抗を用いて、設定目標の試験条件値における標準化床上放熱量及び標準化床下放熱量を求める標準化方法を示した。
- 2) 温水パネル入口水温、水流量、床上空気温度及び床下空気温度を対象にした代表試験の標準化した結果と試験条件の設定目標値にける試験結果との比較から、標準化試験方法の有効性について検討を行った。今回の検討対象とした温水床暖房ユニットと試験条件では、標準化した試験結果が設定目標の試験条件値における試験結果の床上放熱量204.0Wに対して値の0.2~1.4%の範囲内に入るように標準化できることを確認した。

3) 標準化試験方法の試験結果標準化における影響要因及びその影響について検討を行った。床上熱抵抗に影響を及ぼす温水パネル放熱管内の水流速（水流量）及び床表面の熱伝達抵抗について検討を行い、見かけ床上熱抵抗及び見かけ床下熱抵抗を一定値にする標準化方法において実用上大きな影響がないと推測する。

本報で検討した温水床暖房ユニット及び試験条件において、提案した標準化方法で求めた結果の誤差が小さくその有効性の可能性を確認した。しかしながら、温水パネルによっては放熱管の配置方法などにより床表面温度分布が異なり、提案した標準化方法で求めた結果及びその精度に影響を与える可能性がある。今後、表面温度分布を考慮して選定した複数の温水パネルを用いた実験を行い、試験対象の温水マットが標準化した床上放熱及び床下放熱結に及ぼす影響について検討する予定である。

提案する標準化方法の設定目標値における適用範囲については、放熱特性試験方法で示した試験条件の許容範囲(床上空気温度及び床下空気温度は設定目標値の $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 、入

口水温度は設定目標値の $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、水流量は設定目標値の $\pm 8.3\text{g/s}$)を目標とする。このような適用範囲が標準化した結果に及ぼす影響についても引き続き今後検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) (一財) ベターリビング：優良住宅部品性能試験方法書 暖・冷房システム(床暖房ユニット) BLT HS/B-b-8:2020 (2020), pp4
- 2) 日本産業標準調査会：JISA4710:2015 建具の断熱性試験方法 (2019), pp11-pp12
- 3) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法, オーム社(1986), pp224-pp226
- 4) 庄司正弘：伝熱工学, 東京大学出版会 (2002), pp164
- 5) 木村建一 建築設備基礎, 国際人間環境研究所(2011), pp42-pp46
- 6) 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄：最新建築環境工学 (1994), pp165-172

(令和 2.6.5 原稿受付)

Test Result Standardizing Method for the Heat Dissipation Test of Water Floor Heating Unit

Part 1—Proposed Standard Method and Examination of Effectiveness by a Representative Test

by Tetsutoshi KAN^{*1}, Yuki NAGUMO^{*1} and Koji KUROTORI^{*2}

Key Words: Water floor heating unit, Heat dissipation test, Test Result, Standardizing Method

Synopsis : The floor heating units used in wooden housing do not dissipate all of heat provided from the heat source machine to the living space; some amount of heat is dissipated outside via the underfloor space. To evaluate the energy efficiency of housing, it is important to estimate the heat dissipation of the floor heating unit above the floor. As the testing standard for heat dissipating characteristic of a floor heating unit, the Center for Better Living has established a heat dissipation characteristic test in the Quality Housing Components (BL Components) certification standard and testing method book “Heating/Cooling system (Floor heating unit) BLT HS/B-b-8:2020”.

The current heat dissipation test method for hot water floor heating unit has a permissible range for its testing condition parameter, and the result is not compensated by the actual test condition.

In this paper, we propose a result standardizing method using the known heat characteristic of previously tested floor heating unit, and we evaluation the method. The result of evaluation showed that this method could standardize the test results in the range from of -4.0~6.2% to 0.2~1.4%, compared with the nominal result. In addition, we evaluated parameters such as floor surface heat transfer coefficient to understand their effect on the standardizing method.

(Received June 5, 2020)

^{*1} Tsukuba Building Research and Testing Laboratory, Center for Better Living, Member

^{*2} Tsukuba Building Research and Testing Laboratory, Center for Better Living