

押出成形アルミ均熱板で被覆された中空パイプ方式温水床暖房の放熱特性

HEATING PERFORMANCE OF A HOT WATER FLOOR-HEATING SYSTEM WITH EXTRUDED ALUMINUM THERMO-UNIFORMITY PLATE AND HEAT PIPE

志賀 均 ——* 1 水沼 信 ——* 2
中園真人 ——* 3 小金井 真 ——* 4
吉浦温雅 ——* 5 後藤伴延 ——* 6

Hitoshi SHIGA ——* 1 Makoto MIZUNUMA ——* 2
Mahito NAKAZONO ——* 3 Makoto KOGANEI ——* 4
Atsumasa YOSHIURA ——* 5 Tomonobu GOTO ——* 6

キーワード：
温水式床暖房, アルミ押出成形均熱板, ヒートパイプ, 放熱特性

Keywords:
Hot water floor-heating system, Extruded aluminum thermo-uniformity plate, Heat pipe, Heating performance

The purpose of this paper is to improve the performance of the HOT WATER FLOOR-HEATING SYSTEM WITH HEAT PIPE by solving the problems suggested in the previous paper. The problems were uneven temperature of the floor surface and slow temperature rising. THERMO-UNIFORMITY PLATE were developed to solve the problems. Effect of this member was verified in the artificial climate room. The results are as follows; Because of improvement of THERMO-UNIFORMITY PLATE from plywood covered with aluminum foil to Aluminum extrusion panel, 1) The heat transfer from pipe to THERMO-UNIFORMITY PLATE was promoted extremely. 2) Heating performance can be improved by about 30 %. 3) Accordingly uneven temperature and rising speed of temperature of floor surface were improved.

1. 序論

温水床暖房の開発に関する最近の研究には、機器自体の省エネルギー化を検討するもの¹⁾⁻³⁾や性能の推定法に関するもの^{4),5)}に多くの蓄積がある。また構成部品・部材の違いによる床暖房システムの性能を比較した報告⁶⁾⁻⁸⁾が見られる中で、金らはヒートパイプを利用した床暖房システムの性能試験により、温水循環パイプ回路にヒートパイプを組み合わせたことにより、放熱性能と省エネルギー性能の向上が可能となることを示している⁹⁾。関連して筆者らは「中空パイプ方式」床暖房システムの床面放熱性能を実験室実験により計測し、市販の標準的温水床暖房と同等の放熱性能を有することを明らかにするとともに、立ち上がり時間の短縮とより均一な床表面温度分布の実現を検討課題として指摘した¹⁰⁾。

一方、床仕上げ材に熱を伝達する重要な役割を持つ均熱板に関しては、アルミシートの厚さと設置位置による人体床接触温度への影響を評価した報告¹¹⁾があるものの、立ち上がり時間短縮や温度ムラ解消を目的とした研究開発や報告は少ない。そこで本報では、立ち上がり時間短縮、床表面温度ムラの解消と放熱性能の更なる向上を目的に開発した「押出成形アルミ均熱板」を用いた床暖房システムの性能試験結果を報告する。

2. 中空パイプ方式床暖房システムの改良点

図1-3に中空パイプ方式床暖房システムの構成と改良点を示す。従来型システムは構造用合板の上に温水循環パイプと中空パイプを

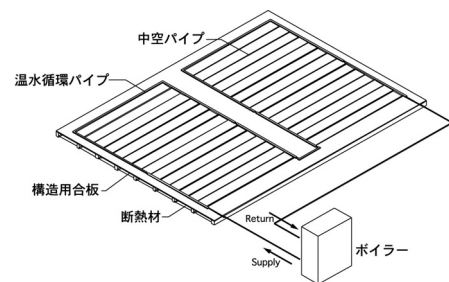


図1 中空パイプ方式温水床暖房システム

敷設し、中空パイプ間にはレベル調整を兼ねる0.1mmのアルミシートを巻き付けた9.5mm厚の構造用合板を敷設している。温水循環パイプ、中空パイプとも銅製である。外周を巡る温水循環パイプは二重構造になっており、内部の丸パイプを温水が循環し、外部の角パイプに等間隔に中空パイプが溶接され、温水循環角パイプと中空パイプの内部は連通している。この接合部から中空パイプに熱が供給されるが、温水循環角パイプと中空パイプ内部には作動液(純水)が減圧注入されており、液体の蒸発と凝縮の潜熱を利用し高速かつ大量の熱輸送を実現する。さらにパイプ間に均熱板を設置し、熱が面的に拡散しやすくしている。

従来型システムからの改良点は以下の通りである。第一に、温度ムラの解消と立ち上がり速度の短縮及び放熱性能の向上を意図して、熱抵抗・熱容量共に大きい木材とアルミシートの複合部材からアル

¹⁾ (株)ジャスト東海 代表取締役社長
(〒759-0207 山口県宇部市厚南区上中野)
²⁾ 山口県産業技術センター グループリーダー・博士(工学)
³⁾ 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博
⁴⁾ 山口大学大学院理工学研究科 准教授・博士(工学)
⁵⁾ 山口大学大学院理工学研究科 博士後期課程 修士(工学)
⁶⁾ 山口大学大学院理工学研究科 講師・博士(工学)

¹⁾ President, Just Tokai Corporation
²⁾ Group Leader, Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute, Dr. Eng.
³⁾ Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
⁴⁾ Assoc. Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
⁵⁾ Doctoral Course, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., M. Eng.
⁶⁾ Lecturer, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

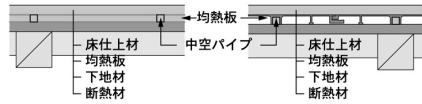
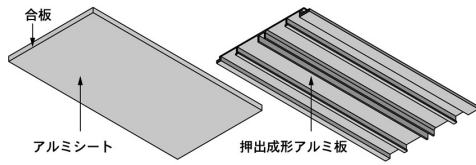


図2 均熱板変更点 (左: 従来型, 右: 改良型)

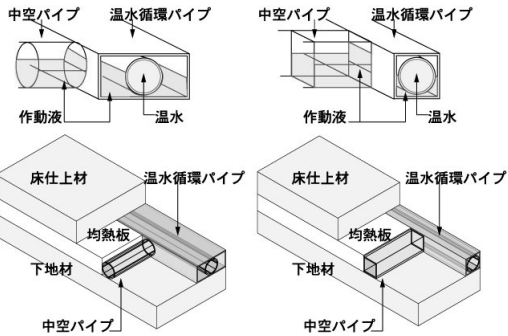


図3 パイプ変更点 (左: 従来型, 右: 改良型)

ミ単一部分に改良した。具体的には従来型では構造用合板を 0.1mm 厚のアルミシートで包装していたが、これに換えて専用のアルミ押出成形材を製作し用いた (図2)。さらに角型中空パイプが均熱板に3面で接触するようにアルミ押出成形材にリブを設けた。

第二に、均熱板の改良に合わせて温水循環パイプの形状を変更した。温水循環パイプは、温水が流れる丸パイプとその外側に作動液を充填した角パイプからなる二重構造である。開発当初は温水用と作動液用共に9mm×9mmの角パイプを並列した構造であったが、従来型はその外形だけを踏襲した9mm×18mmの扁平型角パイプの中に丸パイプを挿入した構造である。改良型ではこれを9mm×9mmの正方形パイプの中に丸パイプを挿入した構造とした (図3)。これは丸パイプと角パイプの間の空隙を小さくすることにより、温水と熱交換した作動液が温水循環パイプ縦断方向に流れ、停滞が抑制され中空パイプ内に移動しやすくなると考えたからである。

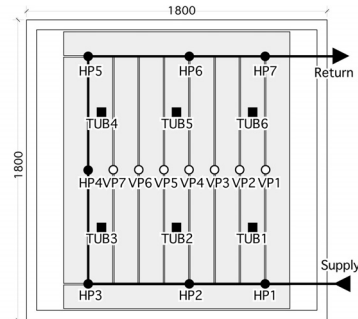
第三に、中空パイプの断面形状を丸形から角形に改良した (図3)。これにより、①温水循環パイプとの接線を直線にすることで、温水循環パイプとの溶接部位で溶接ばりの発生を抑制でき、作動液移動時の抵抗を低減するとともに、溶接手間も軽減することができる。②床仕上げ材との接触面積を広くすることで、熱移動の向上が期待できる。

3. 実験方法

温度・湿度を制御できる人工気象室内に、1800mm×1800mmの床暖房システムを再現した (写真1)。その際、試験体下部に断熱材を敷き込み床下へのヒートロスが少ないよう配慮した。人工気象室内温度を冬季の非暖房時を想定した室内温度 10[°C]に設定し湿度は成り行きである。床仕上げ材表面温度、パイプ表面温度の定常状態を確認後温水供給を開始し、図4に示す床仕上げ材表面、床内部各層およびパイプ表面の温度 (T型熱電対使用) と、床仕上げ材表面熱流量 (栄弘精機株式会社ヒートセンサーMD-140使用) を1分毎5時間

表1 実験条件および記号

仕様 流量 (ℓ/min)	丸パイプ+ アルミシート均熱板	角パイプ+ アルミシート均熱板	角パイプ+ 押出アルミ均熱板
2.0	RW2.0	SW2.0	SAI2.0
2.5	RW2.5	SW2.5	SAI2.5
3.0	RW3.0	SW3.0	SAI3.0



● 温水循環パイプ測定点 ○ 中空パイプ測定点 ■ 均熱板測定点
全ての測定点の直上の床表面で表面温度を、HP3,VP7,TUB3直上の床表面で熱流量を測定した。

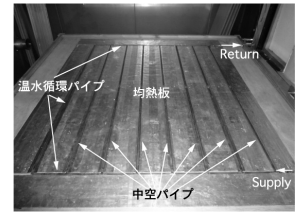


図4 試験体および測定点 写真1 試験体外観 (床仕上げ前)

測定記録し、併せてパソコンモニター上で逐次観察した。実験条件を表1に整理する、「丸パイプ+アルミシート均熱板 (以下 RW 仕様と記す)」は従来型の中空パイプ方式床暖房システムの仕様、「角パイプ+アルミシート均熱板 (以下 SW 仕様と記す)」は従来型システムのうちパイプを変更した仕様、「角パイプ+押出アルミ均熱板 (以下 SAI 仕様と記す)」はさらに均熱板を変更した仕様である。また既報実験において床表面温度に対する供給温水の流量の影響が無視できないことが確認されていたため、流量を今回の実験における実験条件に加えた。なお、供給水温はボイラータンク内温度サーモスタットで制御し屋外に設置したボイラーで60[°C]に加熱した。

4. 表面温度

既報の結果を確認するための予備実験として、供給温水流量による床表面温度への影響を比較した。その結果、今回の実験では流量を変更しても床表面温度に差は認められなかった^{註1)}。従って本報では温水流量 2.0[ℓ/min]の場合の実験結果を用いて比較考察する。

4-1 パイプ温度と床表面温度

図5は温水循環パイプ測定点 (図4;HP1~HP7) におけるパイプ表面温度の平均値の時間推移を、図6は中空パイプ測定点 (図4;VP1~VP7) におけるパイプ表面温度の平均値の時間推移を示している。いずれの仕様においても約 15分周期で上下動しながら1時間から1時間30分で周期定常状態に達している。図7は均熱板測定点 (図4;TUB1~TUB6) における均熱板表面温度の平均値の時間推移を示している。図8~10はそれぞれ図5~7に示す測定点直上の床仕上げ材表面温度の平均値の時間推移を示している。

定常状態の温水循環パイプ表面温度は、RW仕様・SW仕様はほぼ同じ温度であるが、SAI仕様は約3[°C]低い。これに対し定常状態の中空パイプ表面温度は、RW仕様とSAI仕様はほぼ同じ温度であるが、SW仕様は約3[°C]高い。定常状態の均熱板表面温度はRW仕様よりSW仕様が約3[°C]高く、さらにSW仕様よりSAI仕様が約12[°C]高く温度差が大きいことが特徴である。

RW仕様とSW仕様に注目すると、温水循環パイプ表面温度はほぼ

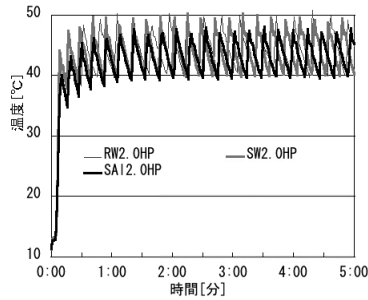


図5 温水循環パイプ表面平均温度

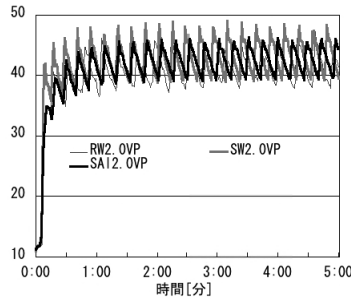


図6 中空パイプ表面平均温度

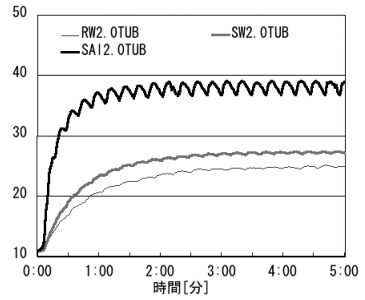


図7 均熱板表面平均温度

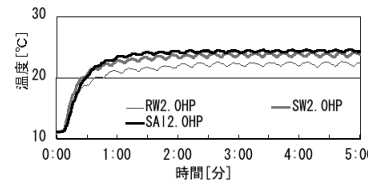


図8 温水循環パイプ上床表面平均温度

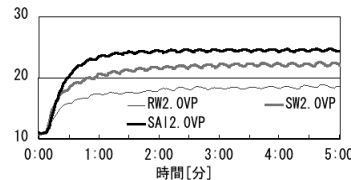


図9 中空パイプ上床表面平均温度

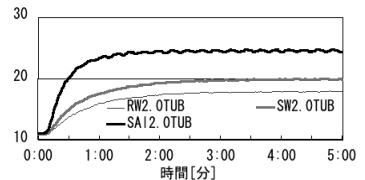


図10 均熱板上床表面平均温度

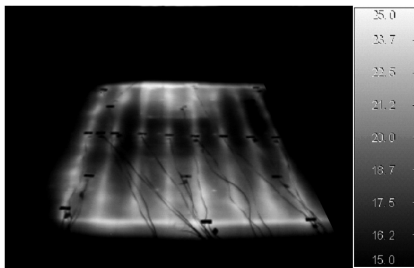


図11 RW仕様床表面熱画像

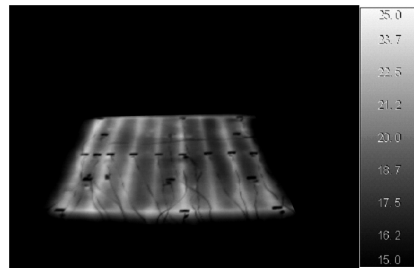


図12 SW仕様床表面熱画像

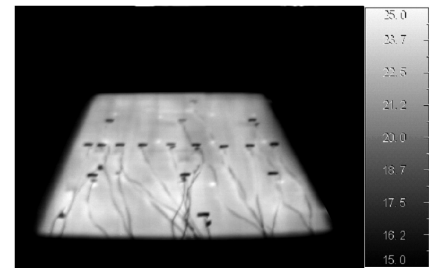


図13 SAI仕様床表面熱画像

同じであるのに対し、中空パイプ表面・均熱板表面ではSW仕様の方が高温になった。これはSW仕様の方がRW仕様と比較して温水循環パイプから中空パイプさらに均熱板への熱移動効率が高いことを示しており、パイプ形状変更の効果が確認できた。

次にSA1仕様と他2仕様を比較すると、温水循環パイプおよび中空パイプ表面温度は最も低いのにに対して、均熱板表面温度は最も高い。これはSA1仕様が他2仕様と比較して均熱板への熱移動効率が優れて高いことを示しており、均熱板変更の効果が確認できた。

定常状態の均熱板上床表面温度は、RW仕様が18[°C]、SW仕様が20[°C]で約2[°C]の差があるが、均熱板表面温度が最も高いSA1仕様では25[°C]と、SW仕様に比べ5[°C]の温度差が確認された。また均熱板上床表面、中空パイプ上床表面、温水循環パイプ上床表面の順に各仕様間の差が大きい。

4-2 立ち上がり速度

既報では、筆者らが開発した「中空パイプ方式床暖房システム」の運転開始直後立ち上がり時の床表面温度に関し、一般に流通している「樹脂パイプ温水床暖房システム」が約2時間から2時間30分で定常状態に到達するのに対し約30分の遅れが確認され、この短縮を今後の課題として指摘した。今回の実験の測定点直上の床仕上げ材表面温度の平均値の時間推移を示す図8～10に注目すると、温水循環パイプおよび中空パイプ直上の床仕上げ材表面温度が定常状態に達するまでに要する時間は、仕様の違いによる明確な差異は認められないが、均熱板直上の床仕上げ材表面温度は明確な差異が確認できた。RW仕様およびSW仕様では約2時間30分から3時間で定常状態に達したが、SA1仕様では1時間30分程度で定常状態に達

した。このことから、従来型システムのパイプ形状変更のみでは立ち上がり速度の改善は認められないが、均熱板を改良することで大幅に向上しており、一般に流通している「樹脂パイプ温水床暖房システム」を凌ぐ立ち上がり速度実現の可能性が示された^{注2)}。

4-3 床表面温度分布

図11～13はパソコンモニター上に逐次表示する測定結果から定常状態を確認したのち、サーモカメラ(NEC Avio 赤外線テクノロジー(株)製サーモトレーサ TH9100MR)により撮影した試験体全体熱画像である。RW仕様とSW仕様を比較すると、SW仕様の方が中空パイプおよび均熱板上部の温度が高いことがわかる。これはパイプ形状を丸型から角型に変更することで、作動液移動の際の抵抗が低減できたことと均熱板との接触面積が広がった効果と考えられる。しかし両仕様とも温度分布にムラがある。これに対しSA1仕様では明らかに温度分布のムラがなく全体が高温である。これは均熱板に設けたリブによりパイプとの接触面積が広がったことと、均熱板自体の高い熱伝導性の効果と考えられる。

熱画像解析プログラム(NS9200 VER. 1.5C)により、図11～13の熱画像から試験体表面域内各画素の温度データを抽出し、0.5[°C]毎の相対度数を示したのが図14である。SA1、SW、RW仕様の順にピーク温度が高く分布のばらつきが小さく、従来型システムのパイプ形状変更のみでは温度分布のムラはあまり改善されないが、均熱板を改良することで大幅に改善されたことがわかる。

5. 投入熱量

今回の測定では行き還りとも水温自体は測定していない。そこで

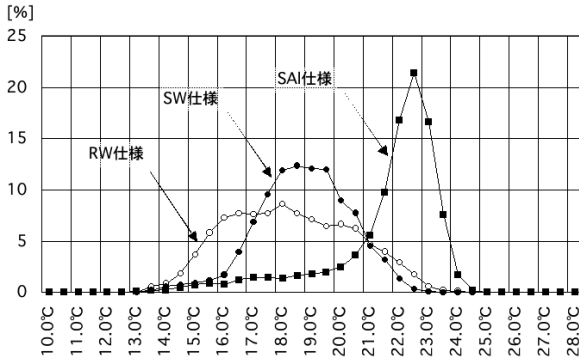
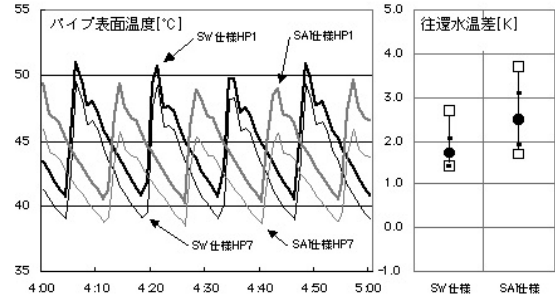


図 14 床表面温度分布



凡例：●は平均値，□は最大値および最小値，・は標準偏差を示す
図 15 パイプ表面温度から計算した往還水温差 [°C]

パイプ表面温度及び往還温水パイプ上床表面表面温度測定データから往還水温を，往還水温差から投入熱量を算出した。ただし RW 仕様についてはパイプ表面温度が欠測したためサーモカメラによる往還温水パイプ上床表面表面温度測定データから往還水温を算出した。

5-1 往還水温差算出

5-1-1 パイプ表面温度からの SW・SAI 仕様の往還水温差算出

SW・SAI 仕様の往還水温差をパイプ表面温度から算出した。温度測定点のうち温水入口および出口に最も近い測定点(図 4 中 HP1, HP7)で測定したパイプ表面温度を代用して往還水温差を計算した。その際、定常状態を確認した実験終了前 1 時間の測定値の平均を使用した。パイプ表面温度の推移と往還水温差算出結果を図 15 に示す。右図は算出した往還水温差を示しており，SW 仕様より SAI 仕様の方が温度差が大きくその差は 0.8 [°C] であるが，ばらつきは SAI 仕様の方が大きい。左図に示すパイプ表面温度の推移に注目すると，SW・SAI 仕様とも約 15 分の周期定常状態にあるが，温水供給停止時(低温時)は HP1, HP7 の値とも仕様による差異がほとんどない。これに対し温水供給時(高温時)の HP1 と HP7 の温度差は，SW 仕様が約 1.5 [°C] なのに対し SAI 仕様では約 3.5 [°C] であった。このことから，温水供給時においては SAI 仕様の方が温水循環パイプから他の部位への熱移動効率が高く，SAI 仕様の往還水温差のばらつきの大きさに影響しているものと考えられる。

5-1-2 熱画像からの RW 仕様の往還水温差算出

パイプ表面温度が欠測した RW 仕様の往還水温差を，サーモカメラにより撮影した熱画像(図 11~13)から熱画像解析プログラムにより往還温水パイプ上床表面表面温度を抽出し，その値から次式により算出した^{注 3)}。ここで，均熱板の効果により，定常状態では床仕上げ材内部の上向き熱移動量に対する水平方向熱移動量の割合は小さいものと考えられるため，床仕上げ材内部では上向き熱流の一次元熱伝導の式が適用できるものと仮定した。

$$q_i = \alpha_i \cdot (T_{si} - T_r) \quad \dots \textcircled{1}$$

$$q_o = \lambda/d \cdot (T_{pi} - T_{si}) \quad \dots \textcircled{2}$$

式①，②より

$$T_{pi} = T_{si} + (d \cdot \alpha_i / \lambda) \cdot (T_{si} - T_r) \quad \dots \textcircled{3}$$

$$q_o = \alpha_i \cdot (T_{so} - T_r) \quad \dots \textcircled{4}$$

$$q_o = (\lambda/d) \cdot (T_{po} - T_{so}) \quad \dots \textcircled{5}$$

式④，⑤より

$$T_{po} = T_{so} + (d \cdot \alpha_i / \lambda) \cdot (T_{so} - T_r) \quad \dots \textcircled{6}$$

ここで

$$T_{po} \approx T_{pi} \approx T_{wo} \quad \dots \textcircled{7}$$

$$T_{pi} \approx T_{wi} \approx T_{wi} \quad \dots \textcircled{8} \quad \text{とすると}$$

$$T_{wi} - T_{wo} \approx T_{pi} - T_{po} \quad \dots \textcircled{9}$$

q_i : 行き温水循環パイプ直上の熱流 [W/m²]

q_o : 還り温水循環パイプ直上の熱流 [W/m²]

T_{si} : 行き温水循環パイプ直上床表面温度 [°C]

T_{so} : 還り温水循環パイプ直上床表面温度 [°C]

T_r : 人工気象室内温度 [°C]

T_{pi} : 行き温水循環パイプ直上均熱板表面温度 [°C]

T_{po} : 還り温水循環パイプ直上均熱板表面温度 [°C]

T_{pi}' : 行き温水循環パイプ直上表面温度 [°C]

T_{po}' : 還り温水循環パイプ直上表面温度 [°C]

T_{wi} : 行き温水温度 [°C] T_{wo} : 還り温水温度 [°C]

$T_{wi} - T_{wo}$: 往還水温差 [°C]

α_i : 室内側表面の総合熱伝達率 9 [W/m²K]¹²⁾

d : 床仕上げ材厚さ 0.012 [m]

λ : 床仕上げ材熱伝導率 0.16 [W/m²K] (合板:住宅の省エネルギー基準の解説第 3 版)

RW 仕様の往還水温差を算出するにあたり，先ず SW 仕様と SAI 仕様における，5-1-1 による算出結果とサーモカメラによる床表面温度から算出した結果を比較した。その結果，総合熱伝達係数 9 [W/m²K] を用いて算出したときの往還水温差が，5-1-1 により算出した往還水温差と近似することが確認できたため，RW 仕様においても総合熱伝達係数 9 [W/m²K] を用いることとした。算定結果を表 2 に示すが，RW 仕様と SW 仕様の往還水温差はともに 1.8 [°C]，SAI 仕様は 2.7 [°C] であった。また，床仕上げ材内部の上向き熱移動量に対する水平方向熱移動量の割合は SAI, SW, RW の順に大きいと考えられるため，本試算で用いた仮定からのずれはこの順番で大きくなり，計算の精度もこの順番で低くなっているものと考えられる。

5-2 投入熱量の算出

5-1 で求めた往還水温差から投入熱量 Q_{INPUT} [W] を以下により算出した。

$$Q_{INPUT} = c_{pw} \rho_w F (T_{wi} - T_{wo}) / (1000 \cdot 60) \quad \dots \textcircled{10}$$

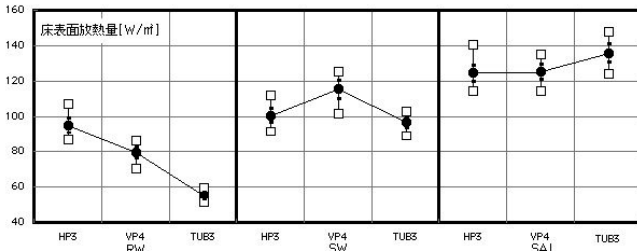
c_{pw} : 水の比熱 4200 [J/(kg · K)]

ρ_w : 水の密度 998 [kg/m³]

F : 送水流量 2.0 [ℓ/min]

T_{wi} : 行き温水温度 [°C] T_{wo} : 還り温水温度 [°C]

$T_{wi} - T_{wo}$: 往還水温差 [°C]



凡例：●は平均値，□は最大値および最小値，・は標準偏差を示す

図 16 床表面放熱量[W/m²]

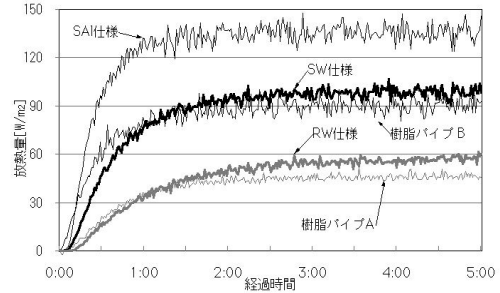


図 17 床表面平均放熱量[W/m²]

表 2 熱収支総括

	行きパイプ表面温度[°C]	還りパイプ表面温度[°C]	往還水温差[°C]	投入熱量[W]	温水循環パイプ上放熱量[W/m²]	中空パイプ上放熱量[W/m²]	均熱板上放熱量[W/m²]	試験体上面の放熱量[W]	試験体上面みかけの放熱量[W]
	行きパイプ上床面温度[°C]	還りパイプ上床面温度[°C]	往還水温差[°C]	投入熱量[W]					
RW仕様	—	—	—	—	95.4	79.5	55.3	184.2	247.9
	19.4	18.3	1.8	251.5					
SW仕様	44.8	43.1	1.7	242.6	100.9	115.5	96.8	316.1	262.4
	17.9	16.8	1.8	251.5					
SAI仕様	44.5	42.0	2.5	351.4	124.6	125.4	136.0	438.7	344.1
	17.9	16.3	2.7	377.2					
本文対応章・節	上段数値 5-1-1 下段数値 5-1-2			5-2	6-1			6-2	6-3

算定結果を表 2 に示すが、RW 仕様と SW 仕様は約 250[W]、SAI 仕様は約 350[W]となった。さらに SW・SAI 仕様とも温水循環パイプ表面温度を用いて算出した投入熱量と熱画像を用いて算出した投入熱量はほぼ一致した。

6. 床表面放熱量

6-1 床表面放熱量の測定

図 4 に示す温度測定点のうち HP3、VP4、TUB3 の床表面の放熱量を測定した。測定には栄弘精機株式会社ヒートセンサーMD-140 を使用した。定常状態を確認した実験最終前 1 時間の測定値の平均値を図 16 および表 2 に示す。

温水循環パイプ直上床表面、中空パイプ直上床表面、均熱板直上床表面のいずれの測定点の放熱量も SAI、SW、RW 仕様の順に多いが、各仕様毎にみると測定点相互の大小関係は異なり、RW 仕様は温水循環パイプ直上床表面、SW 仕様は中空パイプ直上床表面、SAI 仕様は均熱板直上床表面の放熱量が最大であった。このことは温水循環パイプから中空パイプへ、さらに均熱板への熱移動が SAI、SW、RW 仕様の順に効率よく行われたことを示している。

6-2 床表面平均放熱量の算出

試験体平面に占める温水循環パイプ・中空パイプ・均熱板の面積を按分し(温水循環パイプ占有面積比:0.016、中空パイプ占有面積比:0.038、均熱板占有面積比:0.946)、それぞれに 6-1 で算出した HP3、VP4、TUB3 の床表面の放熱量平均値を乗じ加えることにより床表面平均放熱量を算出した。計算結果を図 17 に示す。図中の樹脂パイプ A、樹脂パイプ B は、既報¹⁰⁾に記した一般に流通している樹脂パイプ型床暖房システムの平均放熱量算定結果であり、比較のため示している。いずれも流量 2.0[l/min]の条件下で本報と同様の測定方法により測定した結果をもとに算出している。

定常状態において、RW 仕様は約 60[W/m²]、SW 仕様は約 100[W/m²]に達し、RW 仕様は樹脂パイプ A と、SW 仕様は樹脂パイプ B とほぼ同等の平均放熱量であった。これに対し SAI 仕様は SW 仕様の約 1.3 倍の 130[W/m²]程度まで達し、均熱板の改良により放熱性能が大幅

に向上していることから、実用上十分な放熱性能を有していると考えられる。なお、平均放熱量に試験体全面積を乗じ算出した床表面全体の放熱量[W]を表 2 に示している。

6-3 みかけの放熱量の算出

室内壁面の温度境界層における熱伝達を表す⑪、⑫式を用いてみかけの放熱量 q' [W/m²]を算出した。床表面温度は熱画像解析プログラムにより熱画像から抽出した試験体表面域内各画素の温度データである。さらに⑬式により試験体表面全体からの放熱量 Q_{OUTPUT} [W]を算出した。

$$q' = \alpha_i (T_r - T_s) \quad \dots \text{⑪}$$

$$\alpha_i = \alpha_{ic} + \alpha_{ir} \quad \dots \text{⑫}$$

$$Q_{OUTPUT} = \bar{q}' \times S \quad \dots \text{⑬}$$

T_r : 人工気象室内温度 10.0[°C] T_s : 床表面温度[°C]

α_i : 室内側表面の総合熱伝達率[W/m²K]

α_{ic} : 室内側表面上向き熱流のときの対流熱伝達率 4[W/m²K]¹²⁾

α_{ir} : 室内側表面の放射熱伝達率 5[W/m²K]¹²⁾

S : 試験体面積 3.24[m²]

算定結果を表 2 に示すが、RW 仕様は約 250[W]、SW 仕様は約 260[W]であるのに対し、SAI 仕様は約 350[W]と大幅に向上しており、ヒートセンサーによる測定結果同様均熱板変更の効果が確認された。

7. 熱収支の考察

算出した投入熱量と放熱量を表 2 に整理した。今回の測定では行き還りとも水温自体は測定していないため、温水循環パイプ表面温度と熱画像データを使用して往還水温差を求め、投入熱量[W]を算出した。さらに熱画像データを利用して床表面からのみかけの放熱量[W]を算出した。各仕様とも投入熱量とみかけの放熱量がほぼ一致しており、計算結果は信頼できるといえる。仕様相互の値を比較してみると、投入熱量、放熱量とも RW 仕様は比べ SW 仕様がわずかに大きく、SAI 仕様は 2 仕様と比較して 1.3 倍程度大きい値となった。このことは、パイプ形状の変更のみでは放熱量の大きな向上は認められないが、従来型のアルミシート均熱板から押出成形アルミ均熱板

への改良により、パイプから均熱板への熱移動効率が向上し、床暖房全体の放熱量が飛躍的に改善したといえる。なお、ヒートセンサ一測定値から面積按分により算出した全体の放熱量とみかけの放熱量を比較すると約 25%の差がある。これはセンサーの測定誤差もあるが、主として測定位置がそれぞれの領域の代表点（平均値を表す点）となっていないことによると考えられる。

8. 結論

本論では、筆者らが開発した「中空パイプ方式」床暖房システムの改善課題である立ち上がり時間短縮、床表面温度ムラの解消と、放熱性能の向上を目的に、新たに開発した「押出成形アルミ均熱板」の効果を実測した。得られた知見は以下の通りである。

(1) 角形中空パイプ+押出成形アルミ均熱板仕様を他の仕様と比較すると、温水循環パイプ及び中空パイプ表面温度は相対的に低いものの、均熱板表面温度は最も高く、均熱板への熱移動効率が優れて高いことを示しており、押出成形アルミ均熱板の効果が確認された。

(2) 従来型システムのパイプ形状変更のみでは、立ち上がり速度と温度分布のムラの明らかな改善は認められなかったが、加えて押出成形アルミ均熱板を採用することで両者とも大幅に改善され、一般に流通している「樹脂パイプ温水床暖房システム」を凌ぐ立ち上がり速度実現の可能性が示された。

(3) 投入熱量と放熱量を算出した結果、「角形中空パイプ+押出成形アルミ均熱板」仕様では、「角形中空パイプ+アルミシート均熱板」の放熱性能（約 100[W/m²]）に対し、130[W/m²]程度の性能が得られ、一般的に採用されているアルミシート均熱板と比較して約 3 割の性能向上が可能であることが明らかとなった。

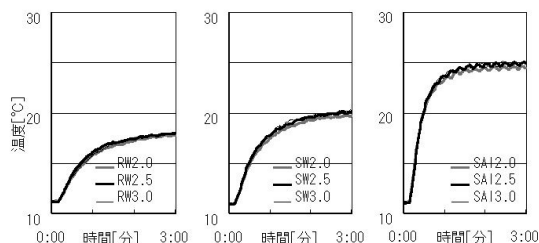
以上、均熱板の仕様を改良することで、従来型「中空パイプ方式」床暖房システムの放熱性能を向上できることを示した。また従来のアルミシート包装合板に対し、押出成形技術の導入により加工手間の削減が可能となり、押出成形アルミ均熱板は材工ともで 1,000 円/m²程度の価格上昇に押さえることが可能である。この結果、本論で提案した押出成形アルミ均熱板を用いた床暖房システムは、ボイラー、配管、制御装置などを含めた床暖房全体の価格において、日本床暖房工業会標準価格（材工とも 21,000～35,000 円/m²）¹³⁾の範囲内に納まり、性能・価格の両面から実用化の意義と可能性を有しているものと考えられる。さらに一般に流通している樹脂パイプ温水床暖房システムにおいても、この均熱板を用いることで同様の効果が期待できる。

注釈

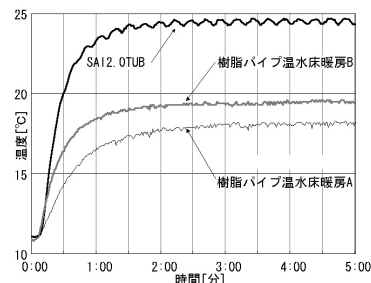
注1) 供給温水の流量の影響を確認するため、3 とおりの流量条件により実験し、その結果を付図 1 に整理した。各グラフはともに図 4 に示す測定点 TUB1 から TUB6 直上の床仕上材表面温度の平均値の実験開始後 3 時間の推移である。既報で報告した従来型中空パイプ方式床暖房システムの実験では、流量条件 2.0ℓ/min の場合、2.5ℓ/min・3.0ℓ/min の場合と比較して床仕上げ材表面温度において 3℃程度の低下が確認できたが、今回の実験では明らかな差異が認められなかった。これは改良型仕様においても同様であった。さらに床仕上げ材表面温度だけではなくパイプ表面温度、均熱板表面温度など他の測定部位においても差異は確認できなかった。既報と結果が異なる理由として、前回の実験では床下の断熱施工が不完全であったと推察する。断熱不備による床下への熱損失量が比較的大きいため、流量が小さい場合における熱平衡状態の床面温度が他の場合より低くなったものと考えられる。

注2) 付図 2 に既報 10) の実験結果との比較を示す。図中「SA12.0TUB」は本報 SA1 仕様による結果を、「樹脂パイプ温水床暖房 A」「樹脂パイプ温水床暖房 B」は市場に流通している「樹脂パイプ床暖房システム」を用いた既報の実験結果である。なお全ての仕様とも温水流量条件が 2.0ℓ/min の場合の均熱板上床表面の平均温度である。「樹脂パイプ床暖房システム」と比較して「SA12.0TUB」仕様では定常状態に達するまでの時間が同等もしくは 30 分程度向上している。

注3) サーモカメラの測定精度検証のため、RW 仕様の床表面温度測定点、全 20 点について、サーモカメラでの測定結果と熱電対での測定結果を突合し、その平均差が約 0.1℃であることを確認した。



付図 1 流量による影響



付図 2 立ち上がり速度比較

参考文献

- 1) 李小平他 1 名: 太陽熱利用床暖房システムに関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第 539 号, pp. 29-36, 2001. 1
- 2) 李小平他 3 名: TRNSYS を用いた真空管集熱式給湯システムのシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学 II, pp. 435-436, 1998. 9
- 3) 中村健児他 3 名: 太陽熱利用空気集熱式床暖房住宅の設計指針, 日本建築学会計画系論文集, 第 516 号, pp. 31-38, 1999. 2
- 4) 三浦尚志他 3 名: 定常状態における温水床暖房のエネルギー消費量の推定法, 日本建築学会環境系論文集, 第 626 号, pp. 487-494, 2008. 4
- 5) 金秀歌他 4 名: 温水ヒートポンプを用いた省エネルギー型床暖房システムに関する研究(第 1 報)床暖房パネルの放熱特性の評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 637 号, pp. 379-387, 2009. 3
- 6) 菅長正光他 2 名: 床埋込み温水式床暖房の特性に関する研究(第 1 報)配管間隔が床表面温度特性へ与える影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 373-376, 2000.
- 7) 清水則夫: 床暖房の放熱量について その 2 温水式床暖房パネルの放熱特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 289-292, 1999. 9
- 8) 北川健司他 3 名: ヒータ式床暖房と温水式床暖房の放熱量比較, 第 20 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 251-254, 2004. 1
- 9) 金鐘秀他 1 名: 自励振動型ヒートパイプを用いた床暖房システム, 月刊省エネルギー, Vol. 55, No. 4, pp. 74-76, 2003. 3
- 10) 志賀均他 5 名: 銅の熱伝導特性を利用した中空パイプ床暖房システムの放熱性能実験, 日本建築学会技術報告集 第 21 号, pp. 189-194, 2005. 6
- 11) 大竹伸明他 2 名: 床接触温による床暖房システムの安全性の評価-均熱板による床接触温上昇の低減効果の検証-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 環境工学 II, pp. 925-926, 1999. 9
- 12) 井上宇市: 空気調和ハンドブック, 丸善(株), 2008. 1
- 13) 日本床暖房工業会: “床暖房にかかるコスト: イニシャルコスト” <http://www.yukadanbou.gr.jp/about/cost/initial.html> (参照 2010-06-08)

[2010 年 10 月 14 日原稿受理 2011 年 4 月 12 日採用決定]