

銅製中空パイプ方式床暖房を敷設した実家屋の温熱環境計測と解析

MEASUREMENT AND ANALYSIS OF FLOOR HEATING SYSTEM
WITH VOID COPPER PIPE INSTALLED IN A HOUSE志賀 均*¹, 吉浦温雅*², 中園真人*³, 福代和宏*⁴, 水沼 信*⁵

Hitoshi SHIGA, Atsumasa YOSHIURA, Mahito NAKAZONO,

Kazuhiro FUKUYO and Makoto MIZUNUMA

Using the feature of the thermal conductivity of copper, the authors developed the void pipe floor heating system. Indoor experiments verified that the system has the same heating performance as the general heating ones. In this paper, the data from the experimental house equipped with our newly developed system and the data from indoor experiments on the same system were compared. Also, by using the simplified floor panel model we computed the heating performance of the systems in the experimental houses with different insulation capacities. The data from the experimental house showed that the system in the steady state can keep the floor surface temperature at about 31°C and indoor temperature at about 25°C. However, although the system has an improved heating performance, it still takes about 8-10 hours to reach the steady state even in case that the house has high insulation capacity.

Keywords: Void pipe, Thermal conductivity of Copper, Heating performance, Floor heating system

中空パイプ, 銅の熱伝導, 放熱性能, 床暖房

1. 序論

著者らは、温水循環パイプ間に熱伝導率が約 370~400 W/m·K と高い銅製の「中空パイプ」を導入した新しい温水式床暖房システムを考案した。図 1 に中空パイプシステムの概要図を示すが、本方式は温水循環パイプ間に銅製の中空パイプを接続し、従来の温水循環パイプの大部分をこの中空パイプで代用することにより、温水パイプの敷設延長を大幅に短縮するものである。また、パイプの下部にあたる床の大部分にアルミ均熱板を敷設し、パイプ下側への熱損失を制御し、効率よく床面に伝達できるよう工夫している。この方式の利点は、①システムの簡便さから敷設工期の短縮化が図れ、インシヤルコストの低減が可能となる、②銅製の中空パイプから放熱するためパイプ径が小さくて済む、③温水循環回路が短縮されるためボイラーの負荷が軽減される点である。

室内模型実験によりシステムの放熱性能の計測および従来方式との性能比較を行った結果、床表面平均温度は定常状態で 21~22°C に達し、市販の標準タイプ^{注1)}と同等の性能を有すことを確認した。また床表面平均放熱量についても、定常状態で 95W/m²程度の放熱量に達し標準タイプと同等の性能を有すことを確認した¹⁾。

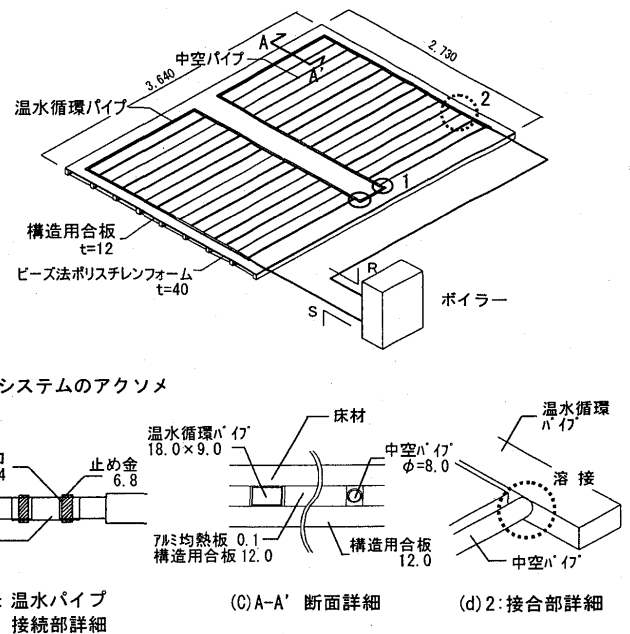


図 1 中空パイプシステム概要図

*¹ (株)ジャスト東海 代表取締役社長
*² 山口大学大学院理工学研究科博士後期課程 修士(工学)
*³ 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博
*⁴ 山口大学大学院技術経営研究科 准教授・博士(工学)
*⁵ 山口県産業技術センター 専門研究員

President, Just Tokai Co.
Doctoral Course, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., M. Eng.
Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Innovation and Technology Management, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.
Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute

しかし、床暖房が実家屋に設置された場合、室内模型実験²⁾と実家屋では、空間スケールの相違から暖房床面積や室内気積が異なり、暖房開始後の床表面温度・放熱量は模型実験と異なる変動を示すことが予測される。また、模型と実家屋の壁体熱容量の違いが室内空気温度の変化に与える影響も大きいものと考えられる。これらの条件の違いは、実家屋に設置された床暖房のスタートアップ時の暖房性能や消費エネルギーに直接影響を及ぼすものと考えられるため、本システムを一般住宅に導入するためには、実家屋実験による放熱性能の確認が必要である。

これまでの床暖房の室内実験に関しては、実際の使用状態に近い床組構成を有する実験装置を作製し、放熱量を測定した研究²⁾があるが、これは床暖房を木造住宅に敷設した場合の定常時における床上・下への放熱量の比率を求めたもので、スタートアップ時の放熱性能については触れられていない。温水式床暖房のスタートアップ時の放熱性能に着目した研究³⁾に関しては、フィン効率を利用して求めた床からの一次元放熱応答を二次元計算による放熱応答へ近似化を試みたものがある。これは、一次元放熱応答から二次元放熱応答を簡単に近似推定することでシミュレーションの効率化が可能になることを示したものであり、実家屋に設置された床暖房のスタートアップ時の放熱性能を明らかにする観点のものではない。また、床暖房の実大実験に関しては、深夜電力や太陽エネルギーを利用したシステムを検討した研究^{4), 5)}が多く、これらはエネルギーの有効利用を主眼とし、提案システムによる良好な室内環境形成の可能性を検討したもので、床暖房本体の性能評価を目的としたものではない。

また近年の研究成果では、住宅への適正な床暖房の普及をはかるために、床暖房による熱的快適性を実現するための温熱環境設計法を提示したもの⁶⁾がある。床表面温度と室内空気温度を設計条件として指定し、床座する人体形状に応じた平均放射温度を算定し、作用温度を指標として熱的快適性の予測を可能とする方法である。この場合には前提条件として、床暖房システムの性能と住宅の床表面温度及び室内空気温度の関係が明らかになっている必要がある。

そこで、著者らは実家屋に設置された場合の本システムの放熱性能を明らかにすることを目的に、室内模型実験に次いで本システムを設置した実家屋で冬季に放熱性能試験を実施した。本報告では、室内模型実験結果と実家屋の放熱性能試験結果を比較し、実家屋に設置した場合の床表面の放熱特性と室内空気温度の変動特性を明らかにする。さらに、Kollmar-Lisesの床暖房略算法⁷⁾を用いて床表面放熱量を算出し、断熱性能が実験住宅と異なるケースについても、床表面温度と室内空気温度の変動を解析的に求め、一般的な住宅に本システムを導入した場合の暖房性能の予測を行う。

2. 室内模型実験と実家屋計測の概要

2.1 室内模型実験による空気温度測定

実験は、温度と湿度の環境条件をコントロールできる人工気象室(図2)内で、中空パイプ方式の試験体(図3・写真1)上に発泡ポリスチレン板(熱伝導率 $\lambda=0.037\text{W/m}\cdot\text{C}$)25mm厚で作成した1辺800mmの立方体ボックス(図4)を設置し、ボックス模型内の空気温度変化を計測した。

図4に示す通り、温度測定点はボックス模型内の9ヶ所(B-B'断

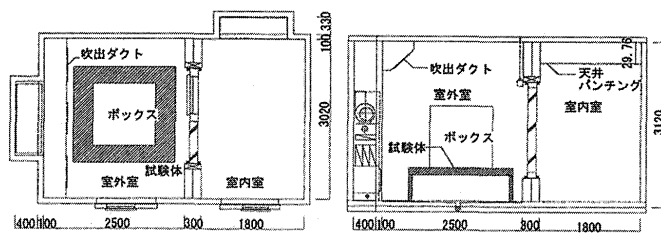


図2 実験室平面図・断面図

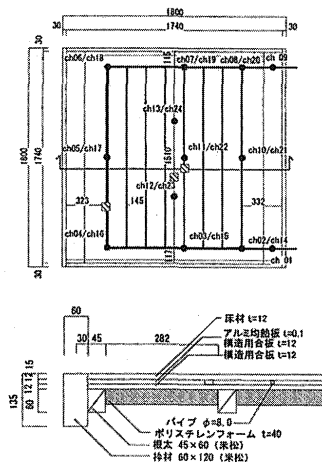


図3 試験体平面図・断面図

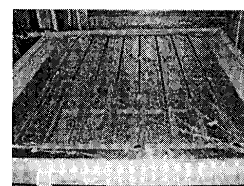


写真1 試験体設置状況

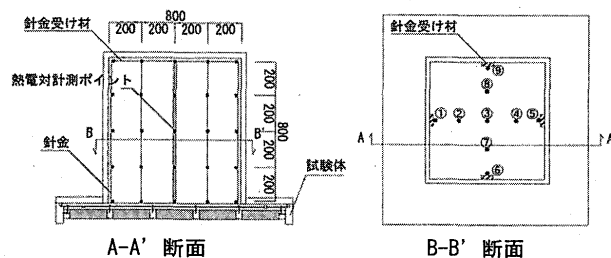


図4 模型形状と温度測定点

面参照)に各5点(A-A'断面参照)、計45点設置した。床暖房運転開始と同時に1分間隔で5時間連続して空気温度の計測を行った。人工気象室内の温度は、室内上部に設置されている空調機により冬季の非暖房時の室内平均温度と想定した10℃に保ち実験を行った。

2.2 実験住宅の概要と測定方法

実験住宅は、山口県宇部市に立地する木造2階建て住宅である。測定居室は2階部分で、中央の建具により東西二室に分かれるが、本実験では建具を開放した状態で両室の室内空気温度の計測を行った。写真2に実験住宅の外観、図5に断面図、図6に床・外壁・天井・屋根の仕様詳細図、図7に測定居室の平面図及び配管図を示す。

測定期間は、2004年2月1日～2月27日である。床暖房の作動時は、午前5:00から午後9:00までで、翌日の午前5:00までは運転を停止している。温水温度の設定は60℃である。温水循環パイプ・中空パイプ・均熱板・床表面温度の計測点は図7中に併記する。室内空気温度の計測点は、図7に示す位置で床表面から1mの高さである。

3. 室内模型実験と実家屋計測の結果

3. 1 室内模型実験結果

温水温度設定 60℃、流量 2.0l/min の条件で行った室内模型実験の結果を図 8 に示す。床表面平均温度は 9 点の床表面計測点の温度を毎分平均したものであり、模型内空気温度は計測箇所③の床表面から 400mm の高さ(模型内中央)での計測温度の変動を示している。床表面平均温度は計測開始直後から上昇し始め、80 分後に約 22℃に達し、3 時間後には約 25℃に達している。3 時間以降は約 25℃で一定に保たれており、定常状態に達していると考えられる。模型内空気温度については、計測開始後から 30 分後までは床表面平均温度とほぼ同様に上昇していき、3 時間後には約 23℃まで上昇している。それ以降は 23℃程度で一定に保たれており、定常状態に達していると考えられる。

3. 2 実家屋の測定結果

温水循環パイプ・中空パイプと均熱板の温度の 1 分間隔計測結果から、15 分毎に前後 30 分間の平均値を求めた結果を図 9 に示す。入口側温水パイプ表面(CH02)温度は、床暖房開始直後から上昇し、30 分後には 45℃に達し、暖房終了時まで約 47℃程度を保っている。出口側温水パイプ表面(CH18)温度は、暖房開始直後から上昇し、4 時間後に 40℃付近に達し、暖房終了時までほぼ一定に保たれている。入口側中空パイプ表面(CH21)温度は、暖房開始直後から温水循環パイプ(CH02)と同様に温度が上昇していき、1 時間後には約 42℃に達し、暖房終了時まで温水循環パイプ(CH02)と比較して約 2℃下回る程度で、45℃と高温で一定に保たれている。出口側中空パイプ表面(CH24)温度は、暖房開始直後から温水循環パイプ(CH18)と同様に上昇していき、暖房終了時までわずかに温水循環パイプ(CH18)温度を下回る程度で一定に保たれている。

入り口側均熱板(CH25)・出口側均熱板(CH30)の温度は、共に温水循環パイプや中空パイプと比較して緩やかに温度上昇し、5 時間以降は、入り口側(CH25)約 37℃、出口側(CH30)約 35℃で一定に保たれている。

次に西側居室と東側居室において計測した 9ヶ所の床表面温度を図 10, 11 に示す^{注 3)}。西側居室 CH38 と東側居室 CH33・34 の温度は暖房開始 1 時間後に 25℃に達し、13:00 には 30℃付近まで上昇している。その後 13:00 から暖房が終了する 21:00 までの間はほぼ 31℃程度に保たれ、測定居室の床表面温度は定常状態にある。また西側居室 CH40 と東側居室 CH35 では、暖房開始 3 時間後に 25℃に達し、13:00 以降はほぼ 31℃程度に保たれている。西側居室の室内空気温度計測点の床表面で計測した CH47 は、暖房開始 30 分後に 26℃に達し、13:00 以降は 32℃程度に保たれている。

一方西側居室 CH41 と東側居室 CH36 では、暖房開始 30 分後までは CH38, 33, 34 と同様に温度上昇するが、以後は温度上昇が緩やかになり、13:00 から 21:00 までの間は 28℃程度に保たれている。これに対し東側居室 CH32 の温度は、暖房開始 2 時間後の 7:00 に 30℃に達し、それ以降も温度上昇し 13:00 以降は 35℃程度に保たれている。

以上から、本実験の床表面温度の計測結果は両室の各計測点において、温度差があることが確認できる。これは、実験住宅に本システムを設置する際に生じた、パイプ表面と床材との間の接触熱抵抗が床内の各点で異なっているためと考えられる。

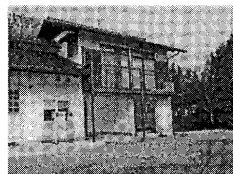


写真 2 実験住宅外観

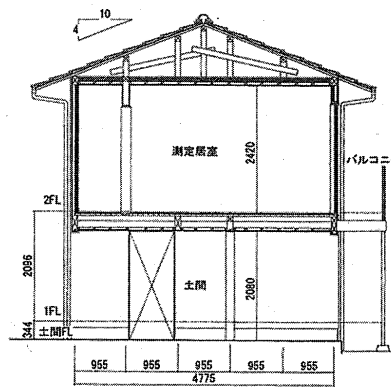


図 5 測定居室断面図

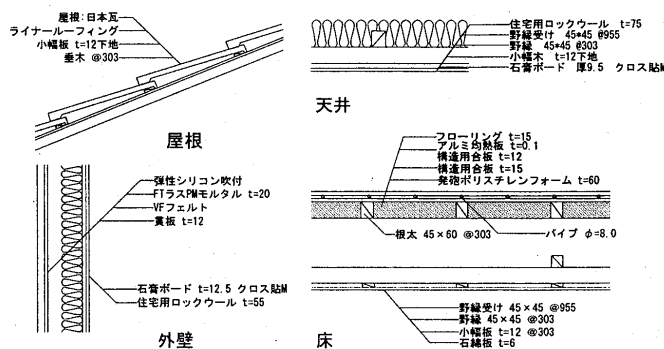


図 6 実験住宅の仕様詳細

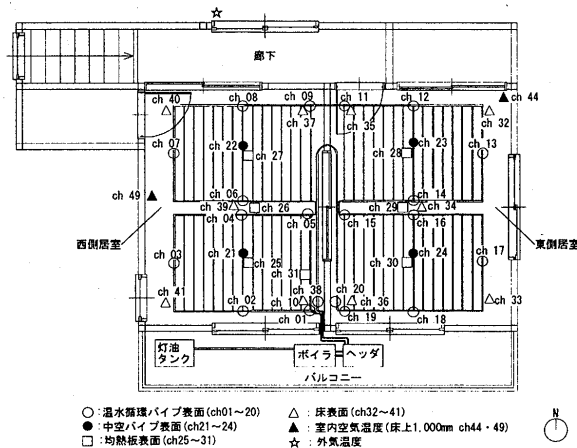


図 7 測定居室の平面・配管図及び計測点

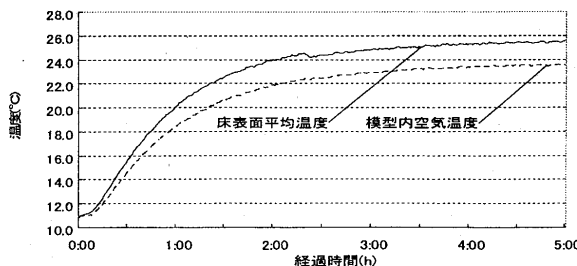


図 8 室内模型実験の結果

次に西側居室(CH49)と東側居室(CH44)で計測した、床表面から1mの高さの室内空気温度を図12に示すが、暖房開始後、両室の室内空気温度は13:00に両室とも25℃程度まで上昇し、13:00以降は暖房が終了する21:00まで、ほぼ25℃程度で一定に保たれている。これより、床表面温度と同様13:00以降測定居室の室内空気温度は定常状態にあることがわかる。

3.3 両実験の比較

室内模型実験と実家屋計測の定常状態の床表面平均温度・室内空気平均温度、計測時の温水流量、熱損失係数^{注5)}Q値、定常状態に達するまでの経過時間を表1に示す。

定常時の床表面平均温度・室内空気平均温度は、共に実家屋計測結果が模型実験結果と比較して高い。この要因としては、(1)模型実験の床暖房パイプ内の温水流量が2.0l/minなのに対し、実家屋計測時の床暖房パイプ内の温水流量が2.5l/minであったことより、実家屋の床表面放熱量が模型実験に比べ多くなったこと、(2)熱損失係数Q値を比較すると、模型:6.6W/m²・K、実家屋:3.0W/m²・Kで、実家屋の断熱性が相対的に高いことが指摘される。しかし、模型実験の定常状態に達するまでの経過時間が3.0h、実家屋計測の場合が8.0hであり、実家屋では模型に比べ床暖房開始から定常状態に達するまでに長時間を要していることが確認できる(表1)。

次に模型実験と実家屋計測結果の床表面温度と空気温度の計測開始から5時間の変化量を定常時の変化量の平均値で除して無次元化した結果を図13に示す。模型実験の床表面・空気無次元温度は、計測開始からほぼ同様に変動し、3時間後に定常状態に達していることが確認できる。計測開始後30分間の実家屋の床表面無次元温度は、模型実験と比較して無次元温度の変化が大きいが確認できる。30分以降は変化量が小さくなっていき、1時間後には模型実験と逆転し緩やかに上昇している。

実家屋の空気無次元温度の変動は、床表面無次元温度が計測開始後に大きな変化を示しているのとは対照的に、模型実験の空気無次元温度と比較して小さな変化量で定常状態へ上昇していることが確認できる。

以上から、模型実験と実家屋計測結果の床表面温度と空気温度は異なる変動をしていることが確認できた。特に、実家屋の室内空気温度の定常状態までの温度変動が、床表面温度の変動と比較して緩やかで、実家屋の室内空気の温度変動は模型実験とは異なる特性を有していることが示された。

4. 実家屋の室温変動解析

本章では、床暖房略算法を適用して実家屋の床暖房時における室温変動を解析的に求め、室内空気温度の変動特性の要因分析を行うとともに、室温変動率を算出し室内模型実験の場合と比較する。

4.1 実家屋の室温変動計算法

実家屋の室温変動の計算には、以下の熱平衡式を用いる。

$$H \cdot \Delta t - KS(\theta_a - \theta_o) \cdot \Delta t = C \cdot \Delta \theta_a \quad \dots\dots\dots(1)$$

H: 室内発熱量(W) K: 熱貫流率(W/m²・°C) S: 表面積(m²)

θ_a : 室温(°C) θ_o : 周囲温度(°C) C: 熱容量(J/K)

t: 時間(s)

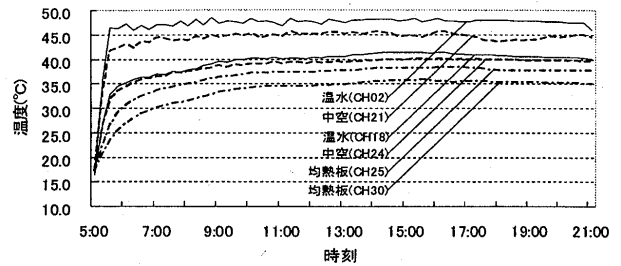


図9 温水・中空パイプと均熱板の温度変化(30分間平均値)

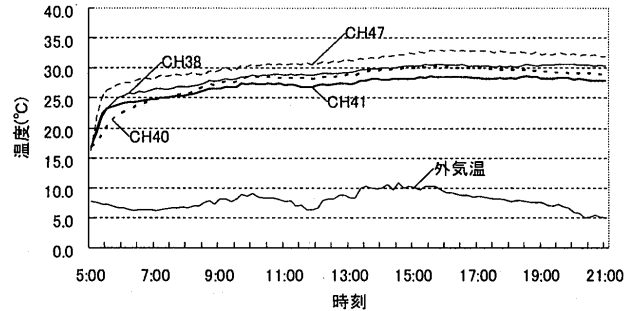


図10 西側居室床表面の温度変化

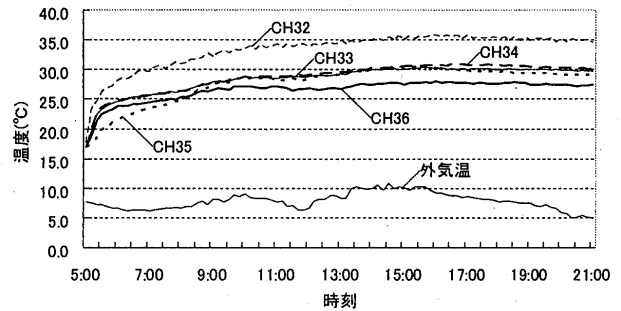


図11 東側居室床表面の温度変化

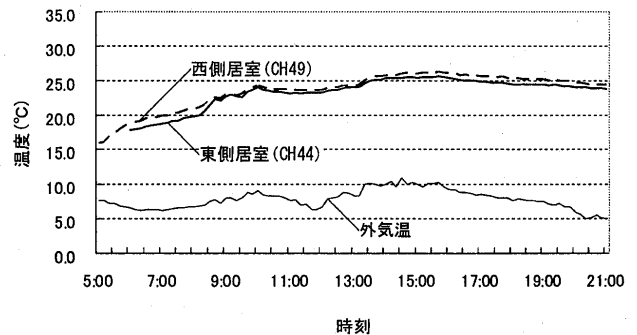


図12 室内空気の温度変化

表1 定常状態の模型実験と実家屋計測結果の比較

	床表面平均温度(°C)	室内空気平均温度(°C)	流量(l/min)	Q値(W/m ² ・K)	経過時間(h)
模型	25.3	23.3	2.0	6.6	3.0
実家屋	31.0	25.1	2.5	3.0	8.0

熱容量C(J/K)は、室温変動に壁体の熱容量の1/2が有効に作用していると推定して、以下の式より求めた。

$$C = \frac{1}{2} \sum c_i \rho_i V_i + c_p \rho V \quad \dots\dots\dots(2)$$

c_i : 壁体材料の比熱 (J/kg · K) , ρ_i : 壁体材料の密度 (kg/m³)
 l_i : 壁体材料厚 (m) S_i : 壁体材料の面積 (m²)
 $c_p \rho V$: 室内空気の熱容量 (J/K)

室内発熱量(H)は、Kollmar-Lisesの床暖房略算法を適用して求める。これは、床内に配管径と等しい厚さのフィンを設定することにより、フィン効率の理論式を床暖房の場合に応用して、床から上側への放熱量を求めるものである。本システムに対応した略算法として、アルミ箔をフィンと仮定し、仮想フィンの熱伝導率と厚さを本システムで使用したアルミ箔の値を用いて、(3)~(5)式より床暖房フィン効率(η_F)を求める⁸⁾。

$$Z = 0.5(W - D) \{ C_F / (\lambda_F \cdot D_F) \}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$C_F = C_{FU} + C_{FD} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta_F = \tanh(Z) / Z \quad \dots\dots\dots (5)$$

そして、フィン・パイプ総合効率(η)として(6)式を定義すると、床から上側・下側への放熱量は(7)・(8)式で表される。

$$\eta = D/W + \eta_F (W - D) / W \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q_U = \eta \cdot C_{FU} (\theta_p - \theta_A) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_D = \eta \cdot C_{FD} (\theta_p - \theta_A) \quad \dots\dots\dots (8)$$

W : 配管間隔 (m)
 D : 配管直径 (m)
 C_{FU}, C_{FD} : 配管上端から上側空気まで、配管下端から下側空気までの熱コンダクタンス (W/m²°C)
 λ_F : アルミ箔の熱伝導率 (W/m²°C)
 D_F : アルミ箔の厚さ (m)
 θ_p, θ_A : 配管表面温度及び室温 (°C)
 Q_U, Q_D : 床から上側・下側への放熱量 (W/m²)

この略算法は、木造の床に設置された温水式床暖房の定常時の床から上側への放熱量を精度よく算出することが可能で⁹⁾、床暖房時の室内温熱環境の数値予測についても実測値と計算値の比較が行われ、その有効性が確認されており^{10), 11)}、本論においても採用する。

室内発熱量(H)は(9)式により求められるため、(1)式は(10)式で表される。

$$H = Q_U \cdot S_F \quad \dots\dots\dots (9)$$

S_F : 床面積 (m²)

$$\eta \cdot C_{FU} (\theta_p - \theta_A) \cdot S_F \cdot \Delta t - \overline{KS} (\theta_A - \theta_O) \cdot \Delta t = C \cdot \Delta \theta_A \quad \dots\dots\dots (10)$$

この(10)式を変形整理し、(11)式より室温変化量 $\Delta \theta_A$ を求め室温変動を計算する。

$$\Delta \theta_A = \{ \eta \cdot C_{FU} (\theta_p - \theta_A) \cdot S_F - \overline{KS} (\theta_A - \theta_O) \} \Delta t / C \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、床から上側への放熱量(Q_U)を(12)式で表すと、

$$Q_U = (\alpha_c + \alpha_r) (\theta_p - \theta_A) \quad \dots\dots\dots (12)$$

床表面温度(θ_p)は(7)式で得られた床から上側への放熱量(Q_U)を代入し(13)式で表される。

$$\theta_p = \theta_A + Q_U / (\alpha_c + \alpha_r) \quad \dots\dots\dots (13)$$

θ_p : 床表面温度 (°C)

$(\alpha_c + \alpha_r)$: 総合熱伝達率 (W/m²°C)

α_c : 対流熱伝達率 (W/m²°C)

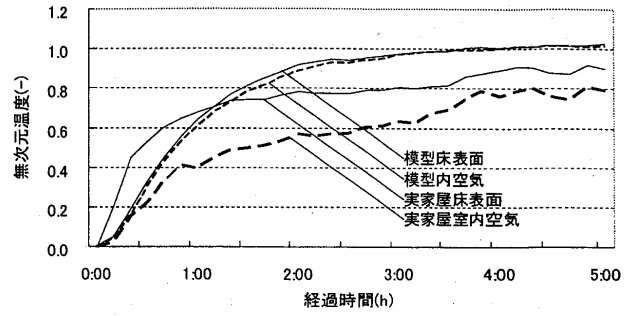


図 13 模型実験と実家屋計測結果の無次元温度比較

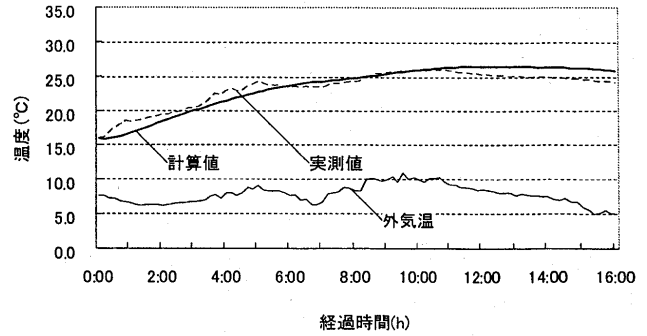


図 14 室内空気温度の計算値と実測値

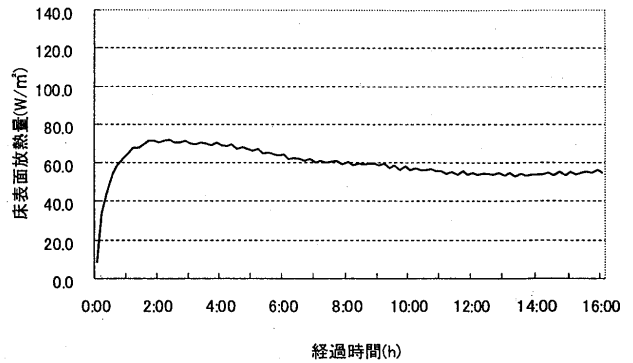


図 15 床表面放熱量計算値

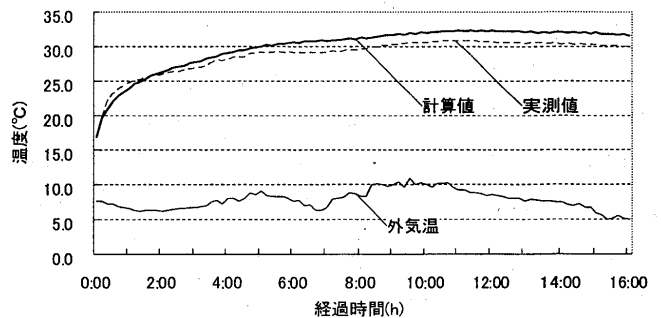


図 16 床表面温度の計算値と実測値

α_r : 放射熱伝達率 (W/m²°C)

さらに、(1)式から導出される室温変動率(14)式を室内空気温度の変動特性を表す指標とする。

$$\text{室温変動率: } \delta = \frac{\overline{KS}}{C} \quad (1/s) \quad \dots\dots\dots (14)$$

4. 2 計算結果

室内空気温度の計算値と実測値を図 14 に、計算により求めた実家屋の床表面放熱量を図 15 に、床表面温度の計算値と実測値を図 16 に示す。図 14, 16 中の実測値は、図 10, 11 と図 12 で示した計測点における室内空気、床表面温度測定結果の平均値である。

室内空気温度は、実測値と比較すると暖房開始 10 時間以降の計算値が僅かに高いものの、計算値はほぼ実家屋の温度変動を再現していると考えられる。

床表面放熱量計算値は、暖房開始 2 時間後に約 70W/m² とピークに達し、暖房開始 8 時間後までの 6 時間は徐々に減少している。8 時間後以降は 60W/m² 程度で一定に保たれており、定常状態に達していることが確認できる。

床表面温度は、暖房開始 8 時間以降計算値が実測値より 2℃程度高く、パイプと床材間の接触熱抵抗の影響と考えられるが、床表面温度の計算値は概ね実家屋の温度変動を再現していると考えられる。

但し、床表面温度・室内空気温度ともに、暖房開始時において計算値が実測値を若干下回る傾向が認められる。これは、(6)式より床表面放熱量を算出する際、配管表面温度 (θ_p) に温水パイプ・中空パイプ・均熱板の平均温度を採用しているが、暖房開始時の中空パイプと均熱板の温度上昇の遅れにより、床表面放熱量が実際より少なく計算されるためと考えられる。

表 2 に模型実験と実験住宅の室温変動率を求めた結果を示すが、実験住宅の熱損失係数 Q 値が模型実験より小さく、実験住宅の断熱性が模型と比較して高いことから、熱容量に着目して比較している。実験住宅の熱容量は、室内空気、居室を構成する壁体の熱容量ともに、模型実験と比較して大きい。(14)式から、この熱容量の差により実験住宅の室温変動率が模型実験と比較して小さな値となるため、実験住宅の室内空気温度の上昇が緩やかになり、定常状態に達する時間が模型実験の結果に比べ長くなったものと考えられる。

5. 住宅の断熱性能レベルと床表面・室内空気温度の関係

比較を行う 6 ケースの断熱仕様を表 3 に示す。Case-1 は、実験家屋の床に次世代省エネルギー基準 IV 地域で推奨されている断熱性能を加えている。Case-2 は、床・壁・天井に充填断熱材を加え、ガラスを高断熱の複層ガラスに変更し、IV 地域での熱損失係数の基準を満たす仕様としている。Case-3 は、Case-2 の壁の断熱性を高め、換気回数を 0.8 回/h に設定し気密性を高めることにより、III 地域での熱損失係数の基準を満たす仕様である。Case-4 は、Case-3 の床・壁・天井の断熱性能を高め、換気回数を 0.5 回/h に設定し気密性を高めることにより、II 地域での熱損失係数の基準を満たす仕様としている。Case-5 は窓を複層ガラスと高断熱複層ガラスの二重窓に変更し、換気回数を 0.5 回/h に設定することで、I 地域での熱損失係数の基準を満たす仕様としている。また計算を行う際には、外気温度は 10℃で一定とし、暖房開始時の室内温度を 10℃と設定した。

室内温度変動の実験住宅の計算値と各ケースの計算結果を図 17 に、同様に床表面温度変動の計算結果を図 18 に示す。室内温度変動の算結果をみると、暖房のスタートアップ時に大きな差は認められない。6 時間以降になると差が現れ始め、12 時間以降では、実験住宅仕様と Case-1 ではともに 26℃程度でほとんど差がないが、Case-2 は約 27℃、Case-3 は約 28℃と室内温度は断熱性能が高くなるに従って

表 2 室温変動率の比較

	壁体熱容量 × 10 ³ (J/K)	空気熱容量 × 10 ³ (J/K)	全熱容量 × 10 ³ (J/K)	室温変動率 (× 10 ⁻⁵ /s)
模型	14.2	0.52	14.8	28.5
実験住宅	1498.9	67.5	1566.4	3.9

表 3 各ケースの断熱仕様の概要

	断熱仕様				換気回数 (回/h)	Q値 (W/m ² ·K)
	床	壁	天井	窓		
実験住宅	発泡ポリスチレンフォーム 60	ロックウール 55	ロックウール 75	複層ガラス	1.0	3.0
Case-1	発泡ポリスチレンフォーム 135	ロックウール 55	ロックウール 75	複層ガラス	1.0	2.9
Case-2	発泡ポリスチレンフォーム 135	ロックウール 90	ロックウール 180	高断熱複層ガラス	0.9	2.7
Case-3	発泡ポリスチレンフォーム 135	ロックウール 115	ロックウール 180	高断熱複層ガラス	0.8	2.4
Case-4	発泡ポリスチレンフォーム 210	ロックウール 160	ロックウール 200	高断熱複層ガラス	0.5	1.9
Case-5	発泡ポリスチレンフォーム 300	ロックウール 200	ロックウール 300	複層ガラス + 高断熱複層ガラス	0.5	1.6

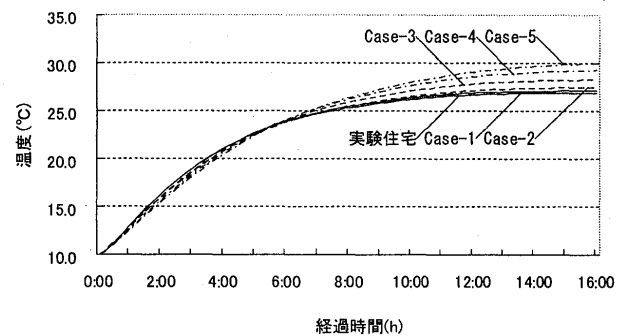


図 17 断熱性能の違いによる室内温度変動の比較

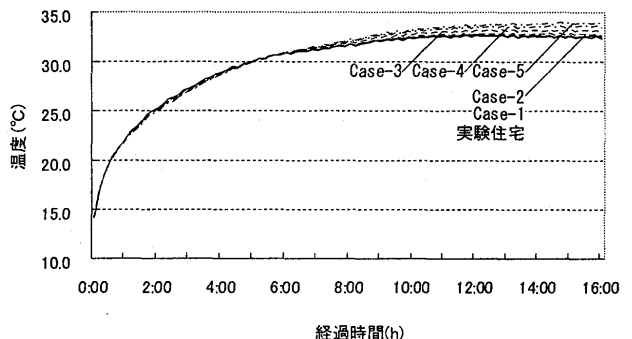


図 18 断熱性能の違いによる床表面温度変動の比較

徐々に高くなり、Case-4 は約 29℃、Case-5 では約 30℃までに上昇している。ただし、実験住宅仕様と Case-3 の差は 2℃以内であり、断熱性能による顕著な室内温度差は認められない。

床表面温度の計算結果をみても、各条件とも暖房のスタートアップ時に大きな差は認められない。10 時間以降では、実験住宅仕様、Case-1 から 5 の順に高い温度を示すが、その差は約 2℃の範囲内にあり、計算結果からは、住宅の断熱性能が床表面温度の変動に及ぼす影響は小さい。しかし、実験住宅仕様、Case-1 の定常状態の室内温度である 26℃に達するまでの Case-2 と Case-3 の所要時間に着目すると、実験住宅仕様・Case-1 では 10 時間要しているのに対し、Case-2 では 9 時間、Case-3 では 8 時間で 26℃に達し、2 時間程度の時間差が生ずることが示されている。また、Case-4・5 では約 7 時間

で26℃に達しており、3時間程度の時間差が生ずる結果となった。

6. 結論

中空パイプ床暖房システムが設置された実家屋の熱環境計測結果を室内実験結果と比較し、床暖房略算法による解析により、実家屋における床表面温度と室内温度の変動特性の検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 中空パイプ方式システムが設置された実家屋の床表面温度は、暖房開始1時間後に25℃、8時間後には30℃付近まで上昇して定常状態に達し、暖房終了時まで約31℃程度で一定に保たれていることが確認できた。また室内空気温度は8時間後に25℃程度まで上昇し、定常状態に達した後暖房終了時までほぼ25℃程度で一定に保たれることが確認できた。
- 2) 定常状態においては、床表面平均温度・室内空気平均温度ともに、実家屋の方が模型実験よりも高くなる結果となったが、模型実験と比較すると、実家屋では暖房開始時から定常状態に達するまでの所要時間が5時間長く、温度上昇が緩やかとなる特性が確認された。
- 3) 床暖房略算法を用い室内空気温度を算出し、室温変動率を求めた結果、実家屋の室温変動率が模型と比べ小さいことが、実家屋の室内空気温度の上昇が緩やかとなる要因であることが明らかとなった。
- 4) 断熱性能レベルの異なる6ケースについて、本システムの暖房性能の比較を行った結果、スタートアップ時・定常状態での床表面と室内空気温度は、基準III地域仕様までの断熱性能の範囲では大きな差異が現れないことが確認された。しかし、実験住宅仕様の定常状態の室内温度である26℃に達するまで、実験住宅仕様の場合には10時間を要するのに対し、基準III地域仕様で2時間程度、基準I地域仕様で3時間程度所要時間が短縮されることが確認された。

以上の結果より、実験家屋に設置された中空パイプ床暖房システムの暖房性能は、定常状態における床表面温度は約31℃程度、室内空気温度は約25℃程度で一定に保たれていることから、実家屋に設置された場合においても、定常状態においては十分な暖房性能が得られると考えられる^{注6)}。

ただし、実家屋の壁体熱容量が大きいため、住宅の断熱性能を高めても室内空気温度の上昇は緩やかで、定常状態に達するまでに約8-10時間を要することが確認された。従って、スタートアップ時の室温上昇を加速し、定常状態に達するまでの時間を短縮するためには、温水温度を高く設定することや、補助暖房を併用することが効果的と考えられる。また暖房システムの放熱性能向上を目指した技術的検討も今後の課題である。

謝辞

本研究の実家屋実験においては、濱砂ひとみ氏（ジャスト東海：当時）の多大な協力を得た。末尾ながら記して謝意を表します。尚、本研究は文部科学省科学研究費補助金（平成15-17年度基盤研究（B）：課題番号15360322及び平成18-20年度基盤研究（B）：課題番号18360294）を受けたものである。

注

- 注1) この方式は根本上に構造用合板を敷設した上に、12mm厚のポリスチレンフォームに内径5mmの架橋ポリエチレンパイプが埋め込まれ、その上に40μmのアルミ箔を貼った一体型のマットを敷設する方式である。
- 注2) パネルの放熱性能実験と併せて、パネル上部の空気流動測定実験を行っている（参考文献12）。実験概要は本文2.2、実験結果は本文3.2に示す。
- 注3) 実家屋での床表面温度の計測は、図7に示す10ヶ所と両室の空気温度を計測した床表面2ヶ所において計測を行ったが、内3ヶ所（CH37・39及び東側居室空気温度計測点CH42）において正確な計測値を得ることが出来なかったため、図10,11には計測結果を示していない。
- 注4) 熱損失係数を算出するために、熱貫流率を求める必要があるが、図3に示す通り、壁体は異なる断面材料により構成されているため、壁体の熱貫流率は、平均熱貫流率により近似的に求めたものを採用した。小屋裏に関しても、天井・屋根・裏面の熱貫流率から、平均熱貫流率を求めた。また、計測を行った居室から廊下への熱損失は、廊下を外気とみなした場合の1/2とした。
- 注5) 日本床暖房工業会が編集した、「改訂3版温水床暖房システム設計・施工ハンドブック」p7において、平成6年度の「床暖房のアメニティ評価」に関連する研究委員会（社）空気調和・衛生工学会のデータを参照して、高气密・高断熱住宅のように気密性が高く、断熱性が高い住宅においても床表面温度は25℃～31℃が快適であり、このときの室温は18℃～23℃が快適推奨範囲とされている。

参考文献

- 1) 志賀均、水沼信、浜砂ひとみ、大内裕子、福代和宏、中園真人：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，pp189-194，2005.6
- 2) 清水則夫：床暖房システムの放熱量に関する研究，日本建築学会計画系論文集 第516号，pp61-68，1999.2
- 3) 郡公子、石野久彌、井上宇市：温水床暖房二次元放熱特性に関する解析-第2報 ステップ放熱応答の解析および近似化，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊，pp233-234，1995.8
- 4) 李小平、奥宮正哉：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，pp29-36，2001.1
- 5) 中村健児、渡辺俊行、林徹夫、龍有二、赤司泰義：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，pp31-38，1999.2
- 6) 中村泰人、岡本孝美、百家裕季、天川章史：床暖房室で熱的快適性を実現するための設計法の同定，日本建築学会環境系論文集 第594号，pp61-67，2005.8
- 7) 井上宇市：改訂3版建築設備ポケットブック，相模書房，1985
- 8) 井上宇市、石野久彌、郡公子：温水床暖房放熱量の推定法に関する研究，日本建築学会計画系論文集 第494号，pp23-28，1997.4
- 9) 東智道、井上宇市、石野久彌、郡公子：温水床暖房二次元放熱特性に関する解析-第3報 温水ユニットの放熱特性及び従来略算法の誤差特性，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊，pp901-902，1996.9
- 10) 李小平、奥宮正哉：簡易床暖房放熱モデルの有効性，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊，pp929-930，2000.9
- 11) 岩本静男、貝塚正光：床暖房による室内熱環境の数値予測-床暖房室内の熱環境の数値予測と実測との比較例，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2 分冊，pp801-802，1990.10
- 12) 志賀均、吉浦温雅、濱砂ひとみ、水沼信、福代和宏、中園真人：温水式床暖房による室内垂直方向温度分布の実測と解析，日本建築学会環境系論文集 第605号，pp39-45，2006.7

(2007年2月10日原稿受理，2007年7月20日採用決定)