

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

MEASUREMENT AND MODEL EXPERIMENT OF AIR TEMPERATURE DISTRIBUTION
IN NATURAL CONVECTION BY HOT WATER FLOOR HEATING SYSTEM志賀 均*1, 吉浦温雅*2, 濱砂ひとみ*3, 水沼 信*4
福代和宏*5, 中園真人*6*Hitoshi SHIGA, Atsumasa YOSHIURA, Hitomi HAMASUNA, Makoto MIZUNUMA,
Kazuhiro FUKUYO and Mahito NAKAZONO*

Floor heating systems are recently coming into wide use in general Japanese houses. To apply the floor heating systems not only to general houses, but also to high-ceiling houses and large-scale facilities, we must clarify indoor air-temperature distributions and its formation processes in various shape and scale buildings with heating systems. We thus measured vertical air-temperature distributions at three actual houses of different ceiling heights, *i.e.*, one storied house, house with an atrium, and gymnasium with hot-water floor heating systems. Moreover we cleared the air-temperature distribution in a general room with the floor heating system and its formation process by model experiment. Consequently, the followings were revealed regarding the houses. 1. Although the ceiling heights were different, the air-temperature distributions of the houses and model with the hot-water heating-floor systems were similar. 2. The temperature difference in vertical direction was small.

Keywords: Hot water floor heating system, Natural convection, Measurement, Model experiment, Rayleigh number

温水式床暖房, 自然対流, 実測, 模型実験, レイリー数

1. 序論

近年住宅に床暖房が普及し¹⁾、床暖房の採用範囲は今後拡大するものと予想される。床暖房が設置される建築空間は、天井高の高い単一の居住空間で構成されるタイプと、床暖房が設置された空間に開放された、多層の居住域を有するタイプに大別される。後者としては、多層の吹き抜けに廊下等が開放されたアトリウム、ギャラリーを持つ体育館等があげられる。

前者の空間、すなわち、天井高のある単一の居住空間に対しては、石油ストーブ等の暖房を行うと垂直方向に温度差が生じるため、居住域を十分に暖房することが難しい。そこで、オフィスビルのアトリウム空間を暖房する¹⁾際や、土間や板張りの大空間を有する伝統民家の改修²⁾において、天井に熱溜りを形成することなく居住域を効率よく暖房する方法として床暖房が採用されている。

これまでの床暖房に関する既往研究は、前者の空間を対象としたものが多い。本来床暖房が床面からの放射により人体を直接温めることから、人の生活が行われる空間の範囲を対象とした温熱環境の研究²⁾、数値解析により室内熱環境を予測し、床暖房使用時の床表面近傍の温熱環境を実測値と比較した研究³⁾、床暖房が設置された実家屋での長期計測により、PMVおよび相対湿度頻度分布を計測し、床暖房による温熱環境が人体に与える快適性を検討した研究⁴⁾等

が報じられている。これらの研究は単層の大空間に床暖房を設置することにより、快適な温熱環境が形成されることを示している。

後者の空間、例えば、吹き抜けを持つ住宅の場合、吹き抜けの床に床暖房を採用することで、吹き抜けに面した二階の居住域に個別の暖房設備の設置が必要なくなることが期待される。これにより、寒冷地においても吹き抜けをもつ開放的な空間構成が可能となってきた⁵⁾。こうした鉛直方向のボリュームが大きい空間の場合、

(1) 吹き抜け空間の床表面近傍での熱的快適性を確保した状態で、吹き抜け空間の上方においても熱的快適性が得られること、(2) 短時間に上下方向に均質な温度分布が形成されること、(3) 吹き抜け空間の天井に熱溜りの形成を防ぐため、壁・天井面からの熱損失と床面からの熱放出のバランスが取れていること、の三点が床暖房の基本性能として重要であると考えられる。しかし、既往研究では床表面近傍の温熱環境に関するもの他には、自然エネルギーを利用する熱源のシステムに関するもの⁵⁾⁻⁹⁾がほとんどであり、床暖房が設置された吹き抜け空間に開放された、二層以上の居住域に対する暖房効果について検討を行った研究は少ない。

そこで本論では、単層・二層・大空間を対象とした3棟の実空間での温度分布計測により、二層以上の実空間での温水式床暖房によ

*1 ㈱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前期課程 大学院生

*3 ㈱ジャスト東海

*4 山口県産業技術センター 専門研究員

*5 山口大学大学院技術経営研究科 助教授・博士(工学)

*6 山口大学工学部感性デザイン工学科 教授・工博

President, Just Toukai Co.

Graduate Student, Graduate School of Science and Design Eng., Yamaguchi Univ.

Just Toukai Co.

Yamaguchi Prefectural Industrial Technology Institute

Assoc. Prof., Graduate School of Innovation and Technology Management, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Perceptual Science and Design Eng., Faculty of Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

る自然対流場の鉛直方向温度分布特性を示した上で、室内模型実験^{注4)}と実空間における計測データの比較を行い、垂直方向温度分布の形成過程を明らかにし、多層の居住域を持つ空間へ床暖房を採用する場合、上記床暖房の基本性能(1)及び(2)が確保され得ることを示す。

2. 実空間における温度分布計測

2.1 床暖房システム

温度計測を行った建物3棟には図1に示す床暖房が設置されている。本システムは、303×606mmサイズ 48mm厚のポリスチレンフォームと2mm厚のポリプロピレンを根太掛けし、内径10mmのポリプテンパイプを埋め込む方式である。また、ポリプテンパイプとポリプロピレンの間には、アルミ均熱板を敷設している。特徴として、温水パイプの直径がφ9.8mmと従来の床暖房の温水パイプの直径に比べて大きく、パイプ内の温水流量の増加とパイプの短縮が可能である。また、断熱材・放射板・配管溝がユニット化され、これを根太間に敷き詰めた後にパイプ配管を行う方式であり、従来の床暖房に比べ工期の短縮による設置コストの削減が可能となる。

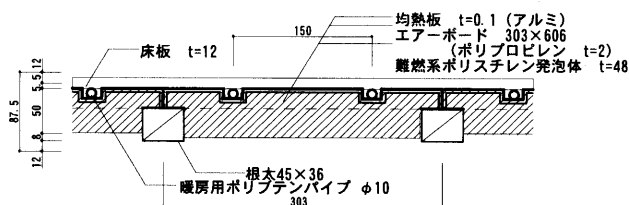


図1 床暖房システムの断面図

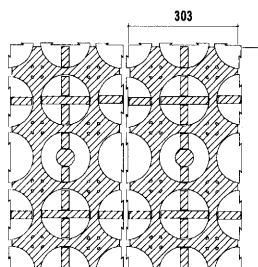


図2 床暖房システムの平面図 写真1 システムの設置例

	戸建住宅A	戸建住宅B	体育館
平面図			
断面図			
天井	住宅用ロックウール t=75 野地受け 45×45 9955 野地受け 45×45 8303 小根太 t=12 下地 石膏ボード 厚9.5 クロス貼	塗装ガリバリウム鋼板 t=0.7 互神置き アスファルトルーフィング22kg 断熱材 公庫仕様C種 t=77 構造用合板 t=15	折板はめ合わせ 折板F-80 フッ素ガルバリウム鋼板φ-0.8 曲面屋根 断熱化ポリエチレンフォーム 裏貼り ゴムアスルーフィングφ2 下地 三井耐火野地板φ18 裏板 母屋 C-100×50×2.3 φ600 2C-100×50×2.3 φ1,800 母屋受け梁 H-125×125×6.5×9 グラスウール吸音板 ハイラートーン
詳細断面図	弾性シリコン吹付 FTラスPMモルタル t=20 VFフェルト 真板 t=12 石膏ボード t=12.5 クロス貼 住宅用ロックウール t=55	押出し成形セメント板 t=15 横張、撥水放水剤塗リ 透気網織 (通気層) 断熱材 防湿材 防湿材 公庫仕様C種 t=55 石膏ボード t=12.5 土壁状仕上材塗リ 調漆 t=18	内壁 外壁 2階 1階 ハイドロテクトタイル 50T ALC グランデ タイルパネル t=133 音響調整板 t=12 シオン突き板 有孔加工 t=5.5 グラスウール 32kg/m3 t=25 ハイドロテクトタイル 50T ALC グランデ タイルパネル t=133 音響調整板 t=12 カベックスタモ壁面板 タモ-17×220×1800 吸音材グラスウール t=30
床	暖房用ポリプテンパイブ φ10 床板 t=15 均熱板 t=0.1 (アルミ) エアボード 303×606 (ポリプロピレン) t=2 難燃系ポリスチレン発泡体 t=48	暖房用ポリプテンパイブ φ10 床板 t=15 均熱板 t=0.1 (アルミ) エアボード 303×606 (ポリプロピレン) t=2 難燃系ポリスチレン発泡体 t=48 根太 90×45 8313 断熱材 公庫仕様C種 t=65 耐水合板 t=15	暖房用ポリプテンパイブ φ10 カバ板 t=21 (アルミ) 均熱板 t=0.1 (アルミ) エアボード 303×606 (ポリプロピレン) t=2 難燃系ポリスチレン発泡体 t=48 播粘合板 t=9

図3 測定対象建物の概要

2.2 測定対象建物

測定対象建物は、山口県宇部市に立地する戸建住宅2棟と、山口県豊浦郡に立地する小学校体育館である。図3に測定建物の平面・断面図及び天井・壁・床の断面詳細図を示した^{注5)}。また床暖房の設置状況を写真1に示す。戸建住宅Aは、2002年の改修時に床暖房が設置された木造二階建て住宅で、測定を行った1階の天井高は2,400mmである。戸建住宅B(2002年竣工)も木造二階建てで、ファミリールームは2層吹き抜けで天井は片流れになっており、測定点の天井高は5,400mmである。体育館(2001年竣工)はフロア全体に床暖房が敷設されている。天井は円弧状の立体トラスにより構成され、最高天井高は10,600mmである。測定を行った四点の天井高は10,125mmで、測定最高点は8000mmである。

2.3 測定方法

表1に測定概要を示し、測定点は図3中に併記した。表1中の体育館の温水温度のみが70℃に設定されているが、これは竣工時、床暖房の効果を確認するため最高温度に設定したためである。温度測定はT型熱電対を使用した。戸建住宅Aでの計測点は、床暖房が設置されたリビングに設定した。戸建住宅Bにおいてはファミリールームで計測を行い、体育館ではフロア内の四箇所において垂直温度の計測を行った。また、戸建住宅A及びBでは、生活が行われている中での計測のため、暖房時の室内温度設定については居住者に依存している。

3. 実空間の計測結果

3.1 戸建住宅A(2002年12月27日)

図4に外気温度・床表面温度・室内温度(生活域の空気温度として床上1700mmでの測定温度、以下同じ)を示す。床暖房の作動時間は午前6時から午前0時までで、翌日の午前6時までは運転を停止させている。床表面温度は、床暖房が作動開始して1時間半後の7:30には22℃前後まで上昇し、以降も16:00頃まで徐々に上昇し27℃に

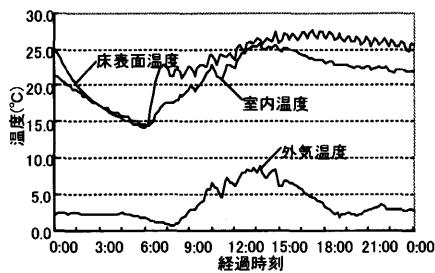


図4 戸建住宅Aの温度変動

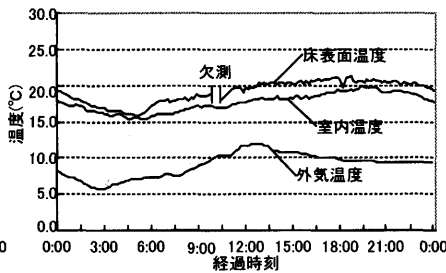


図6 戸建住宅Bの温度変動

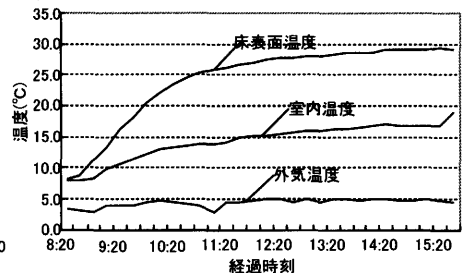


図8 体育館の温度変動

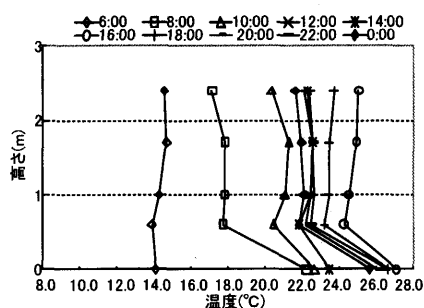


図5 戸建住宅Aの垂直温度分布(リビング)

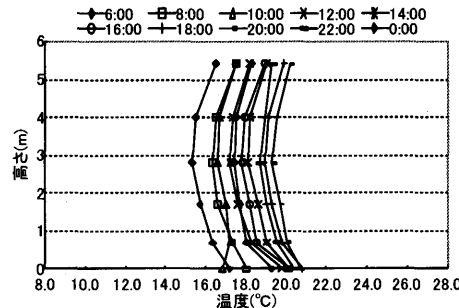


図7 戸建住宅Bの垂直温度分布(ファミリールーム)

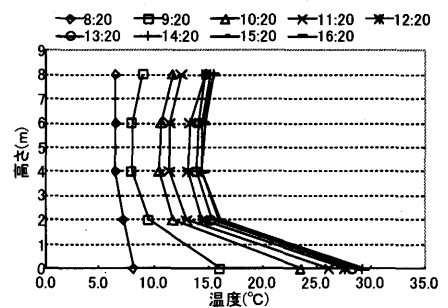


図9 体育館の垂直温度分布(計測点1)

達している。室内温度は、暖房開始より外気温度の上昇と同時に10:00までに20.0℃付近まで上昇する。13:30から16:00の間はほぼ25℃前後で推移し、16:00以降は外気温度低下の影響により室内温度も低下している。

次に図5にリビングの垂直温度分布を示すが、作動開始時(6:00)の温度分布は5点とも約14℃と等しい。これは深夜の暖房停止時間帯において、床表面温度の低下と連動して室内温度が低下しているため、床表面温度と室内温度が等しくなるものと考えられる。作動2時間後(8:00)の時点では床表面温度22℃に対し、室内温度は18℃程度で約4℃の差が生じているが、室内4点の温度はほぼ等しく、この時点ですでに垂直方向の均一な温度分布が得られている。10:00以降の垂直温度分布を見ると、床表面以外の4点では20.0℃から25.0℃の範囲に保たれ、かつ、どの時刻においても温度差は1.0℃以内と小さく、室内の垂直方向温度分布はほぼ均一である。ただし床表面付近では温度差が生じているが、これは図3に示すように、床下の断熱性能が低く、外気温度も10℃以下と低温であったためと考えられる。また、12:00頃まで天井付近の温度が低下しているが、これについても小屋裏と居室間の断熱性能が低いことによるものと考えられる。尚、16:00以降の床表面温度と床表面以外の温度に3.0℃程度の温度差が生じているが、これは外気温度の低下による熱損失の影響と考えられる。

表1 測定概要

	垂直温度測定点	測定日時	温水温度	計測間隔
戸建住宅A	FL0, 600, 1000, 1700, 2400	02.12.22~03.1.11 0:00~24:00 測定	60℃	10分
戸建住宅B	FL0, 700, 1700, 2800, 4000, 5400	02.2.26~2.28 0:00~24:00 測定	60℃	10分
体育館	FL0, 2000, 4000, 6000, 8000	01.1.22 8:20~16:20 (8時間) 測定	70℃	15分

3.2 戸建住宅 B (2002年2月27日)

床暖房の作動時間帯は戸建住宅 A と同じく午前 6 時から午前 0 時までである。図 6 に外気温度・床表面温度・室内温度を示すが、床表面温度は暖房が作動開始して 6 時間後の 12:00 には 20℃ 前後まで緩やかに上昇し、以降は 20~22℃ で推移している。戸建住宅 A と比較すると約 5℃ 程度低い。これはパイプ水温の設定温度の差によるものである。室内温度は、一日の最低気温が 5℃ 以上と外気温度が比較的高く、昼夜の温度差も小さいため、暖房開始時より 20 時にかけて 15℃ から 20.0℃ 付近まで緩やかに上昇している。

次に図 7 に吹き抜けのファミリールームの垂直温度分布を示すが、戸建住宅 A 同様、作動開始時における温度は、床表面から中間点 (2800mm) まで 2℃ 弱低下し、再び上昇する傾向にある。天井付近の温度が中間点に比べわずかに高いが、これは図 3 に示されるように戸建住宅 B の天井周りの断熱性が高く、また気密性も高いことにより屋外への熱損失が少なくなるためと考えられる。8:00 以降の温度分布のパターンもほぼ同一で、床表面から天井付近までの計測点全 6 点の温度差は 2.0℃ の範囲にあり、均一な室内の温度分布が形成されている。これは床下の断熱性能が十分であること、室内温度が夜間においても低下することが無かったことにより、一日を通して安定した室内の垂直温度分布を示したものと考えられる。

3.3 体育館 (2001年1月22日)

図 7 に外気温度、計測点 1 の床表面温度及び体育館中央 (床上 1500mm) の室内温度を示す。測定時間帯の昼間 8 時間の外気温度は 3~5℃ と低くかつ変動が少ない。パイプ水温を最高温度に設定しているため、床表面温度は作動開始 3 時間後には 8℃ から 25℃ に達し、以後も上昇し 8 時間後には 30℃ 近くまで上昇している。一方室内温度は 3 時間半後に 8℃ から 15℃ まで上昇しているが、その後は緩やかな上昇で計測終了時の温度は 17℃ 程度である。

次に計測点 1 の垂直温度分布を図 8 に示すが、作動開始時の室内温度分布は 5 点とも 7℃ から 8℃ で差はなく、床上 2m から 8m の範囲においてはほぼ同じ分布パターンを保ちながら、室内全体の温度が上昇している。いずれの計測時間においても、床表面からの高さ 2m 以上での垂直温度分布はほぼ均一であり、大空間においても戸建住宅 A・B と同様の温度分布を示すことが確認される。ただし、床表面と垂直方向の温度分布の間に、10℃ 以上の大きな温度差が存在するが、これは外気温度が 5.0℃ 以下で体育館内の空気が暖まりにくい条件の中で、ボイラーによる温水設定温度を 70℃ と高くしたことにより、床表面の温度上昇速度と室内空気の上昇速度の差が大きくなったためである。またこの体育館では、床面からの高さ 2 m 付近まで開口部が多く、屋外への熱損失が大きい点も影響しているものと考えられる。

4. 室内模型実験

4.1 実験概要

模型四周の壁面と天井面は、25mm 厚のスタイロフォーム (熱伝導率 $\lambda=0.037\text{W/m}\cdot\text{℃}$) により構成されている (図 9)。模型は温水式床暖房が家屋に設置される実際の状態を再現した供試体の上に置かれ、模型内を床面から加熱している。実験は人工気象室内で行い、室内温度を 10℃ に設定し、模型周囲と床下の温度を一定に保ってい

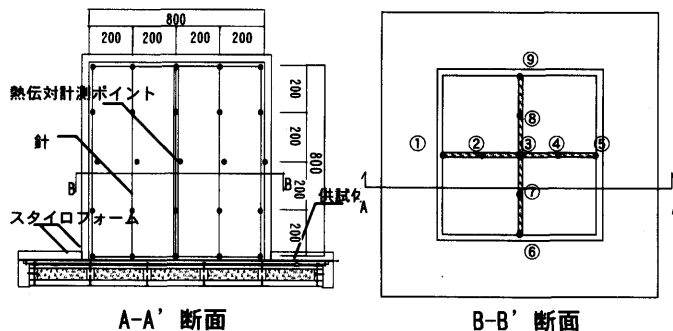


図 9 模型形状と温度測定点

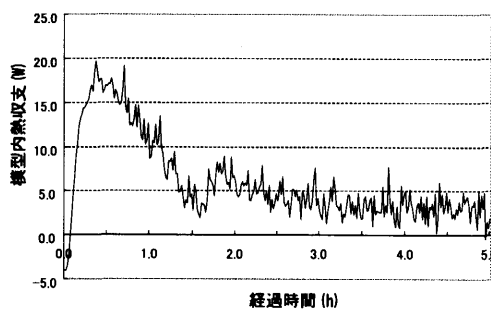


図 10 模型内への正味投入熱量

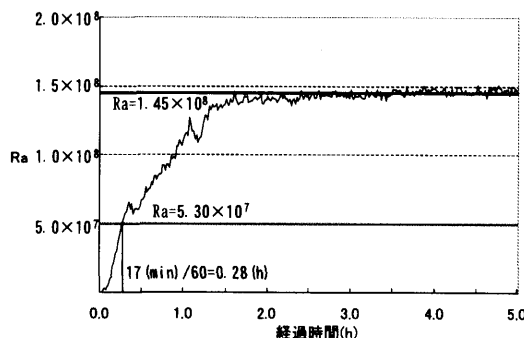


図 11 模型実験のレイリー数 (Ra)

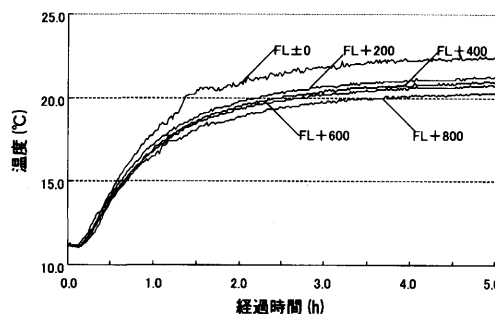


図 12 計測高さ毎の温度変化 (計測点③)

る。模型内の温度計測は、T 型熱電対を使用して 1 分ごとに行い、床暖房の作動と同時に計測を始め 5 時間計測を行った。温度計測点は図 9 に示す通りである。模型実験での床暖房からの床表面放熱量を、模型内中央の床表面で熱流計により計測し、定常時の平均値として

62.5W/m²を得た。また図10は、模型内熱収支として床表面計9点での温度、床下温度、供試体の熱貫流率から算出した床下への貫流損失熱量、同様に模型の5面からの貫流損失熱を床表面放熱量から差し引いて算出した結果を計測時間毎に示したものである。計測開始から約35分後までに上昇し、それ以降は徐々に減少していき、計測開始約3時間以降は0Wから5Wの範囲で変動している。このことから計測開始約3時間以降の模型内の温度はほぼ一定になっていると考えられる。因みに、計測開始3時間後の模型の壁四面と天井、床下への貫流熱量は、模型壁①7.2W⑤7.0W、⑥7.1W⑨6.8Wであり、天井面は6.8W、床下は最も少ない1.7Wである。

4.2 形成された気流性状の相似性

自然対流場における相似則の成立条件は、レイリー数 (Ra) により判断されている。従って本実験の Ra を算出し、既往研究の Ra の相似範囲と比較することにより、本実験の流れ場が相似性を有するかを検討する。レイリー数は次式で定義される。

グラスホフ数: $Gr = g\beta\Delta T l^3 / \nu^3$ (1)

プラントル数: $Pr = \nu / a$ (2)

レイリー数: $Ra = Gr \cdot Pr$ (3)

l : 代表長さ (m) ν : 分子動粘性係数 (m²/s) g : 重力加速 (m/s²)
 β : 体積膨張係数 (1/K) ΔT : 代表温度差 (K) a : 分子温度拡散係数 (m²/s)

本実験の Ra は、代表長さを模型一辺の長さ=800mm、代表温度差を0mmと800mmの各5点の平均温度差とし、図11に計測開始時からの Ra の値の変化を示す。グラフより十分乱れた流れが形成される時刻を計測開始から1時間30分後と見なし、1時間30分後から5時間後までの Ra の平均値を求め、 $Ra=1.45 \times 10^8$ を得た。既往研究¹⁸⁾の条件 ($Ra > 5 \times 10^7$) と比較して、本実験ではそれ以上に乱れた流れ場を確認できた事から、模型内での気流性状と実空間の相似則が成立しているものと判断される。

4.3 模型実験の結果及び考察

先ず図12に計測ポイント③の垂直方向5点の計測結果を示す。計測点毎の温度変化を見ると、模型内熱収支が上昇する35分間に床表面と他4点の計測温度はほぼ同じ勾配で上昇し、模型内熱収支が徐々に減少していく計測3時間後までの間に、床表面と他4点の温度上昇の勾配は緩やかになり、同時に床表面と他4点との温度差が増大している。また模型内熱収支が定常状態に近づくに従って、各計測点温度もほぼ一定になっていることが確認できる。

次に図13に計測開始10分後から170分後までの10分毎の⑥-⑨断面の模型内等温度線を示す。計測開始10分後はまだ模型内の温度上昇を確認できないが、20分後にはすでに床表面で暖められた空気が模型断面内中央から浮力によって上昇を行う、自然対流による空気の流れを確認できる。計測開始20分後の Ra は 0.62×10^8 であり、この時点で既に相似則成立条件を満足する結果となる(表2)。

計測開始50分後は床表面温度が上昇している段階であり、FL±0とFL+800での温度差は1.5℃以下である(表2)。50minまでの等温度線図からは、模型断面内中央FL+200~+800の領域で、等温度の分布状態を保ちながら温度上昇を継続する傾向が確認できる。これ

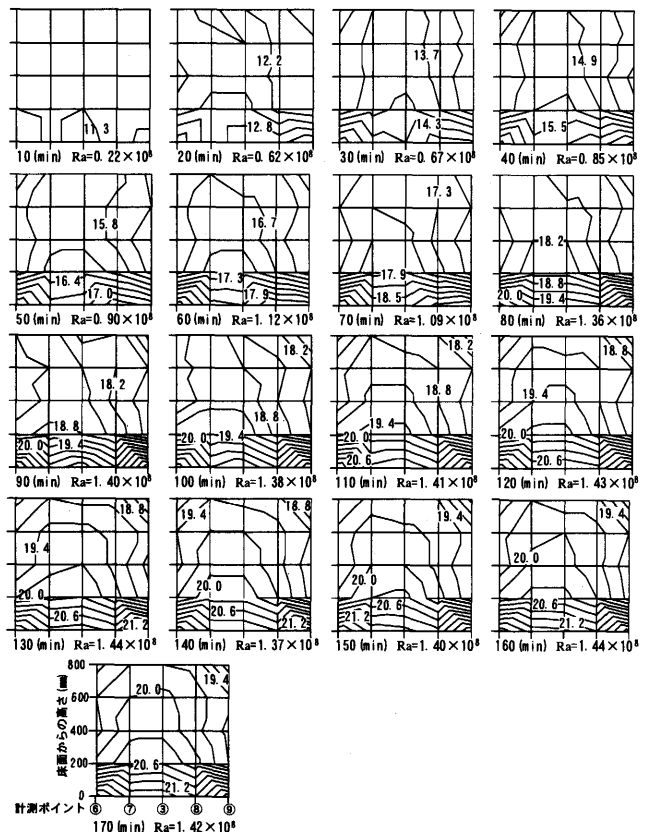


図13 ⑥-⑨断面内の等温度線の変化

表2 レイリー数算出表

t(min)	ΔT(K)	Gr×10 ⁸	R×10 ⁸	t(min)	ΔT(K)	Gr×10 ⁸	R×10 ⁸
10	0.4	0.25	0.22	100	2.3	1.61	1.38
20	1.0	0.72	0.62	110	2.4	1.64	1.41
30	1.1	0.78	0.67	120	2.4	1.66	1.43
40	1.4	0.99	0.85	130	2.4	1.68	1.44
50	1.5	1.05	0.90	140	2.3	1.60	1.37
60	1.9	1.30	1.12	150	2.3	1.63	1.40
70	1.8	1.27	1.09	160	2.4	1.67	1.44
80	2.3	1.59	1.36	170	2.4	1.66	1.42
90	2.3	1.64	1.40	180	2.5	1.72	1.47

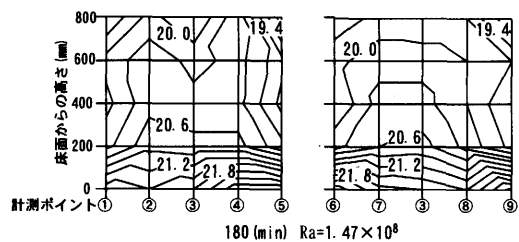


図14 等温度線 (180分後)

は、まだ模型の外気温度(10℃)と模型内FL+800の温度差が小さく、模型天井付近の空気から模型外気への熱の移動がないことによると考えられる。また、この時点で模型内中央部FL+250~+800が高温、模型内壁面近傍FL+250~+800が低温となる温度分布が形成されている。

60min以降は、床表面温度が上昇するに従ってFL±0とFL+800での温度差は大きくなり、Raも1.12~1.36×10⁸を示している。この間の模型内の等温度分布の変化を見ると、床表面近傍では床面よ

り空気が徐々に温められ、200mmの高さまで層状の温度場が形成されている。200mm以上の高さでは等温度の空気の塊が上昇を繰り返し、模型内の温度が上昇していることが確認できる。90min以降は、床表面温度と各計測点の温度上昇勾配は緩やかになっていくため、 ΔT の変動も小さくなりRaは安定していく。また、110min以降は各計測時刻の温度分布パターンに左右対称性が認められるとともに、経過時間毎の温度分布形状は類似性が高い。

次に計測開始から180min経過後の2断面(①-⑤、⑥-⑨)の温度分布を見ると(図14)、両断面とも床面から暖められた空気が中央部を上昇していることが分かる。また計測開始3時間以降は模型内熱収支が一定範囲内に収束することから、天井付近や四方の壁面近傍においては、貫流熱欠損が増え壁面近傍では下降気流が起きていると考えられる。以上より模型中央では、床表面で暖められた空気が等温度の塊となって上昇し(ブルームが形成され)、四方壁面近傍では下降気流が起き、また下降気流により運ばれた空気が床面により温められ模型中央より上昇するという、サイクルを持った自然対流が起きていることを示している。

5. 実空間の温度分布と模型実験結果の比較

計測を行った実空間と模型実験の代表的な無次元温度 θ^* の垂直分布を比較した。模型実験での無次元温度 θ^* は次式で求める。

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \quad \dots \dots \dots (4)$$

θ : 測定温度 θ_m : 模型内全測定点の体積重み平均温度

θ_0 : 実験室内温度

また、各実空間での無次元温度 θ^* は次式で求める。

$$\theta^* = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} \quad \dots \dots \dots (5)$$

θ : 測定温度 θ_m : 垂直方向全測定点の高さ重み平均温度

θ_0 : 外気温度

図15に各実空間と模型実験の無次元温度の垂直分布を示す。模型実験の垂直温度分布は、各高さの水平断面内の無次元温度の平均値で示した。比較した実空間の垂直温度分布の計測開始からの経過時刻は、3章の図中で示した中から、戸建住宅A 22:00、戸建住宅B 22:00、体育館 15:20、また、模型実験では180minを選んで示している。いずれの場合も温水式床暖房による自然対流が安定していると考えられる時間を選び、戸建住宅A・Bについては、外気温度が一定の時間帯における垂直温度分布を選択した。

戸建住宅Aはほとんど模型実験の垂直温度分布と重なっていることが確認できる。戸建住宅Bは、無次元高さ $H^*=0.75 \sim 1$ において模型実験と若干の差異が見られるが、それ以外では模型実験とほぼ等しい無次元温度を示している。また体育館の無次元高さ $H^*=0.25$ 以下の領域においては、3章で見られた計測結果と同様大きな差異が見られるが、他の測定対象と同じように、無次元高さ $H^*=0.25 \sim 0.75$ の中間域では、ほぼ等しい無次元温度を示す垂直温度分布が形成されていることから、体育館においても模型実験で見られた気流が発生しているものと推察される。以上より、模型実験で見られる一連の流れが床暖房時の実空間においても形成されていると判断される。

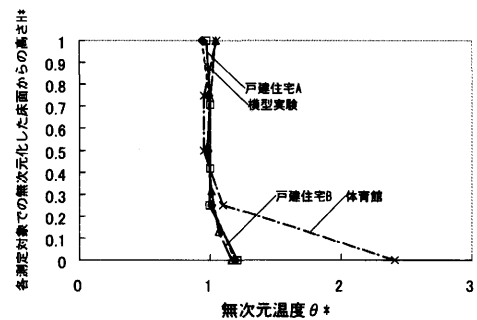


図15 無次元温度の垂直分布

6. 結論

温水式床暖房を使用した、天井高の異なる実空間での垂直方向温度分布実測と模型実験の結果を比較し、以下の知見を得た。

- 1) 3棟の対象家屋における計測結果から、戸建て住宅2棟及び体育館の床面より2m以上の範囲における温熱環境は、天井高に係らず垂直方向においてほぼ均一な温度分布を形成することが確認された。
- 2) 模型実験の等温度線図の変化より、計測開始20分後には床表面の暖かい空気が上昇する流れが確認でき、床表面温度が定常状態となる180分後には、模型内の空気の流れも安定し200mmから800mmの間でほぼ均一な温度分布が形成されていることが明らかとなった。
- 3) 模型実験の定常状態の等温度線図から、模型内中央で暖かい空気の塊が上昇し(ブルームが形成され)、四方壁面近傍では下降気流が起き、その下降気流により運ばれた空気が床面により温められ模型中央より上昇する、サイクルを持った自然対流が起きているものと推察された。
- 4) 無次元温度の垂直分布比較より、床暖房が使用される実家屋では、無次元高さ $H^*=0.25$ より高い領域において、自然対流により空気が均一な温度で上昇するため、天井高が単層の戸建住宅に比べて高い場合においても、温度差が小さい垂直温度分布が形成されることが明らかとなった。

以上より、居住域が二層以上連なる建築空間において床暖房を設置する場合には、暖房範囲、暖房機器の性能、建物の断熱性能、換気量等に関しバランスの取れた総合的な設計を行えば、床暖房が設置されていない第二層以上の居住域においても、第一層居住域と同等の暖房効果を得ることが可能であると考えられる。また、上階居住域への暖房効率についても、暖房開始20分後には床面より暖かい空気が上昇し始め、床表面温度が定常となるほぼ同時刻に、上階居住域についても均一な温度分布が形成されるものと期待される。

注

- 注1) 住居における温水式床暖房設備の設置面積は、平成1年度(408×10³ m²)から平成14年度(4,161×10³ m²)にかけて毎年拡大している。平成15年度は3,596×10³ m²に減少しているものの、この15年間で約9倍にまで増加している。(日本床暖房工業会調査)
- 注2) 伝統民家の改修で床暖房が採用された事例では、「京都町屋の再生」所在地 京都府京都市上京区 設計 Nリビングデザイン室 一級建築士事務所がある。ここでは、高い吹き抜け天井に対応するために、床暖房を設置している。また、土間空間へ床暖房を設置した事例では、「太子町のハイカラ農家」所在地 兵庫県 設計 (株)山弘一級建築設計事務所が確認できる。
- 注3) 現在ハウスメーカーが北海道等の寒冷地で販売している住宅の中には、

一階リビング上部を吹き抜けとし、リビングに床暖房を設置している例が確認できる。事例としては、大和ハウス工業「ユニアーヂュ」、パナホーム「エルソラーナ(積雪寒冷地住宅)」等があげられる。

- 注4) 模型実験における温度分布・気流性状が実空間と相似するために満たすべき条件は、一般的に相似則(相似条件)と言われており、縮小模型を用いる際の相似則に関する研究成果の蓄積は進んでいる¹⁰⁾⁻¹⁵⁾。近年では工場内での換気に関する研究¹⁶⁾⁻¹⁷⁾や、集合住宅のポイド(中庭)空間などの半閉鎖空間での重力換気に関する研究¹⁸⁾⁻¹⁹⁾等の成果がある。またこれらの研究により、自然対流場における相似則の適用範囲に関して、新たな相似条件の提案が行われている。このように、縮小模型を用いた室内温度分布・気流性状の推定実験法はほぼ確立されており、模型実験は実空間の室内温度分布・気流性状を把握するための有効な方法として位置付けられている。
- 注5) 三棟の建物の換気量計測は行っていない。しかし、機械換気は行われておらず、換気条件として考えられるのは、建物自体の隙間からの換気のみである。

参考文献

- 1) 青笹健, 吉野博: アトリウムの温熱環境に関する事例調査 垂直温度分布と空間構成との関連日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 1269-1270, 1994. 9
- 2) 菅原正則, 梅干野晃: 温水式床暖房を持つ高断熱の木造住宅における冬期室内気候に関する研究 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 179-180, 1998. 9
- 3) 埴淵晴男, 鈴木修一: 床暖房時の室内温度分布と熱負荷に関する検討 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 175-176, 1997. 9
- 4) 富田博之・他: 蓄熱式床暖房システムを導入した老人保健施設の室内熱環境に関する研究 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 927-928, 1999. 9
- 5) 成哲俊・他: 太陽エネルギーを利用した水蓄放熱床暖房システムに関する研究 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 593-594, 2003. 9
- 6) 西森文佳・他: 空気集熱式床暖房住宅に関する調査研究 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 857-858, 1996. 9
- 7) 本庄ひとみ・他: 太陽熱利用空気集熱式床暖房住宅の室内熱環境に関する実測調査 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 421-422, 1998. 9
- 8) 須永修通・他: 太陽エネルギーを利用した水蓄放熱床暖房システムに関する研究 1. システムおよび実大実験モデルの概要 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 517-518, 2001. 9
- 9) 成哲俊・他: 太陽エネルギーを利用した水蓄放熱床暖房システムに関する研究 2. 冬季実験結果 日本建築学会大会公演梗概集(D-2) pp. 517-518, 2001. 9
- 10) 射場本勘市郎: 暖房環境の模型実験化への統合理論 日本建築学会論文報告集, 第66号, pp. 69-72, 1960. 10
- 11) 前田敏夫, 石黒一郎, 松本衛: 強制換気のある室の近似相似則, 日本建築学会論文報告集, 第66号, pp. 73-76, 1960. 10
- 12) V.V. Baturin: Fundamentals of Industrial Ventilation, Pergamon Press, 1972
- 13) 勝田高司, 土屋喬雄: 室内空気分布の模型実験法に関する研究(その1~3), 空気調和・衛生工学会論文集, 第17号, pp. 89-92, 1980. 9
- 14) 村上周三, 高橋岳生: 熱対流による自然換気に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 279-280, 1980. 9
- 15) 村上周三, 加藤信介, 孔鉄男, 中川浩之: 大架構建築内の温熱・空気環境に関する研究, 生産研究, 39巻9号, pp. 361-370, 1987. 9
- 16) 西岡利晃: 高温工場の換気に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 第18号, pp. 49-61, 1982. 2
- 17) 中村安弘, 辻克彦, 陳威, 水野稔: 自然対流による工場内流れの近似相似則, 空気調和・衛生工学会論文集, 第42号, pp. 79-86, 1990. 2
- 18) 甲谷寿史, 佐藤隆二, 山中俊夫: 床面が加熱されるキャビティー内自然対流における温度分布の相似条件, 日本建築学会計画系論文集 pp. 43-47, 2002. 3
- 19) 田中宏昌, 佐藤隆二, 山中俊夫, 甲谷寿史, 堀貴博: 床面が加熱される半閉鎖空間の重力換気量予測法に関する研究-発熱量と空間のアスペクト比が換気量に及ぼす影響, 平成8年度空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 63-66, 1997

(2005年7月10日原稿受理, 2006年3月16日採用決定)