

＜一般研究課題＞ 温水床暖房システムを利用したハイブリット

冷房システムに関する研究

助成研究者 豊橋技術科学大学 宋 城基



温水床暖房システムを利用したハイブリット 冷房システムに関する研究

宋 城基
(豊橋技術科学大学)

Study on the hybrid cooling system with convection and floor radiant cooling

Sung-Ki SONG
(Toyohashi University of Technology)

Abstract:

The purpose of this study is to use the floor radiation system widespread to the house through one year. Therefore, how to use the system as cooling in summer was verified by the experiment and simulation. As a result, the cooling by hybrid cooling system with air-conditioner and floor radiation was more comfortable and acceptable than the cooling by only air-conditioner. In addition, it found that the cooling by hybrid cooling system was small cooling load and energy saving than the cooling by only air-conditioner.

1. はじめに

通常、住宅のエネルギー消費の約1/3が冷暖房であり、特に暖房エネルギーが大半を占めているとされてきた。ところが、最近の調査によると暖房用エネルギーは高断熱高気密住宅の普及によりその増加率は鈍化しているものの冷房用エネルギーの増加が眼立つようになっていることがわかった。これは家庭のエアコン普及率が高くなっていることや一つの家庭で使用するエアコンの台数とエアコンの容量もが大きくなったためである。また、このような背景から省エネルギーと快適な室内温熱環境のため、新築の役半数以上が床暖房を採用し、また既存住宅においても床暖房システムの普及が伸びている。これはエアコンのような対流式暖房に比べて床暖房の場合は空気を暖めなくても放射により人は暖を得ることができるためであり、その結果、室温をそれ程高くしなくて

も快適な温熱環境を得ることができる。また、同じ温熱環境が要求される場合、床暖房は対流式と比べて室内設定温度が低くできるため、室内外温度差が小さくなり、外への熱損失が小さくなる。結局床暖房システムは対流式に比べ省エネルギーの実現がしやすくなる。さらに、床暖房は燃焼式暖房器具による室内空気の汚れや火災の心配がほとんどないため、空気質改善と防災にもつながる。このようなメリットがある床暖房システムは文字通り暖房のみであり、冬季のみ利用するシステムである。せっかく設置した床暖房システムを年間を通して利用できないのは設備の無駄であり、その有効利用は必然である。既往の研究¹⁾²⁾では、床放射冷房をメイン冷房システムとし、一部対流冷房ができる除湿システムを組み合わせたシステムを提案し、その有効性について検討した。確かに提案されたシステムは有効であるが、メインとされている床放射冷房システムよりも補助とされる対流式除湿システムが多くの冷房負荷を処理しており、当初の提案したシステムのような利用は難しく、特に両方の制御はかなり複雑となる。また、新しく除湿システムを設ける必要があるが、これより既存の多くの家庭においてあるエアコンを有効に利用した方が良いのではとの疑問が残る。さらに、冷房負荷のみに着目しているため、床面が冷えることによる室内温熱環境の影響については検討されていないのが大きな課題である。

そこで、本研究ではエアコンをメイン冷房システムとし、床放射冷房を補助システムとするハイブリット冷房システムを提案し、その適用可能性について被験者実験³⁾⁴⁾と数値シミュレーションにより検討を行った。また、数値シミュレーションにより、ハイブリット冷房システムの省エネルギー評価についても検討した。

2. 実験概要

2.1 実験装置と実験方法

実験は図-1に示すようにチャンバー(2m×2m×2m)と前室を備えた環境実験室で行った。チャンバーの西側の壁には幅720mm、高さ1808mmの出入り口用の2重ガラス扉があるが、その他の天井と壁と床には断熱材40mmでできている。また、チャンバー内には床放射冷暖房パネルが敷設され、また環境実験室内のエアコンがダクトにより接続されており、対流のみあるいは対流と放射の併用による冷暖房ができるようになっている。前室は床放射パネルがなく、チャンバーと同じエアコンが接続されている。エアコンからチャンバー内へ供給される冷風は定流量100m³/hとなるようにし、チャンバー内の空気温度が設定温度となるように吹出温度を制御した。床放射冷房による冷房の流量は定流量1L/minとし、放射パネル入口冷水温度が設定温度となるように水温を制御した。実験中は環境実験室内の全ての窓、ブラインド、扉を閉じた。

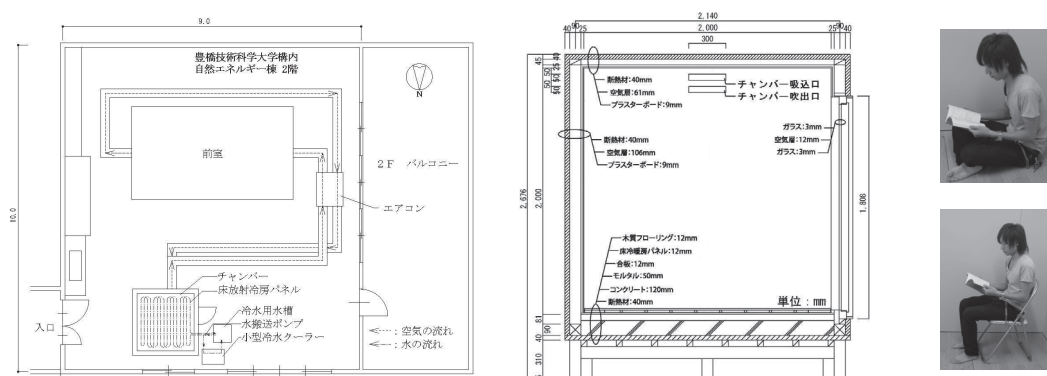


図-1 環境実験室概略図(左)、チャンバー断面図(中央)、姿勢(平座(右上)・椅子座(右下))

2.2 実験概要とアンケート調査概要

表-1 に示すように環境実験室と前室は空気温湿度のみを、チャンバーは空気温湿度と表面温度およびグローブ温度、PMV、冷水温度を1分間隔で測定した。チャンバーの内部表面温度は天井と東南北の壁および扉に各1点ずつ、床は中央と周囲を含め5点で、計10点測定した。空気温度はチャンバー中央部の床から400mm(平座における被験者重心高さ)、600mm(椅子座における被験者重心高さ)の位置と、チャンバーの吸込口と吹出し口および環境実験室内と前室に各1点の計6点測定した。空気湿度はチャンバーの吸込口と吹出し口に各1点測定した。グローブ温度はチャンバー中央の平座と椅子座における被験者重心高さで各1点測定した。PMVはPMV計により被験者重心高さで測定した。また、冷水温度は放射パネル行きと還りの水温を各1点測定した。

実験ケースと設定条件および被験者データを表-2 に示す。実験はチャンバーの室内空気温度が26℃、28℃の2パターン、冷水温度16℃、20℃、23℃および冷水供給無し運転(以下、非運転)の4パターン、平座と椅子座の2姿勢を組み合わせた計7ケースについて行った。また、人体と床表面の接触と非接触による影響を検討するため、すべてのケースにおいてチャンバー入室40分後から10分間のみは断熱台を使用させ、人体と床表面の熱絶縁を図った。以後、エアコンのみによる冷房運転を単独運転、エアコンと床放射パネルを併用した冷房運転を併用運転と称する。

アンケート調査は20歳から24歳の大学生の男性13名と女性5名の計18名に対して行った。被験者実験では最初にチャンバーと同じ設定空気温度に設定された前室で体を慣らし、その後チャンバーに入室してもらった。表-3 に示すように被験者実験のアンケート項目は快適感、温冷感I、温冷感II (ASHRAE・ISO推奨)、接触部温冷感、許容度の5項目であり、その尺度は7つで

表-1 測定内容と機器

項目	場所(個数)	機器
表面温度	天井(1)、壁(3)、扉(1)、床(5)	熱流センサEM1
空気温度	チャンバー中央(3)、エアコン吸込・吹出口(各1)、環境実験室(1)、前室(1)	T型熱電対 温湿度計RS-12 PMV計AM-101
空気湿度	チャンバー中央(1)、エアコン吸込・吹出し口(各1)、環境実験室(1)、前室(1)	温湿度計RS-12 PMV計AM-101
グローブ温度	チャンバー中央(2)	T型熱電対
冷水温度	行き(1)、還り(1)	T型熱電対

※熱電対、熱流センサはminiLOGGER GL800にてデータ収集

表-2 実験ケースと設定条件および実測結果

ケース	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7
設定空気温度	26	28	28	28	28	26	28
設定冷水温度	非運転	非運転	23	20	16	非運転	23
被験者姿勢	平座	平座	平座	平座	平座	椅子座	椅子座
被験者数[人](※)	8(1)	8(1)	12(2)	10(5)	8(2)	8(2)	8(2)
身長[cm]	169.5(8.2)	167.9(9.4)	167.7(9.0)	162.5(9.0)	165.3(7.5)	165.1(10.7)	164.4(6.2)
体重[kg]	62.6(12.7)	58.3(12.8)	58.0(8.8)	58.6(13.7)	54.4(7.7)	56.3(9.8)	52.1(6.6)
年齢[歳]	22.1(1.1)	21.8(1.2)	21.4(1.0)	20.7(1.8)	20.9(1.5)	21.5(0.8)	21.1(0.9)
着衣量[clo]	0.48 (0.09)	0.45 (0.05)	0.47 (0.05)	0.43 (0.05)	0.43 (0.04)	0.51 (0.06)	0.46 (0.05)
空気温度[℃]	25.5(0.8)	28.2(0.2)	28.0(0.8)	28.2(0.6)	28.2(0.7)	25.8(0.8)	28.0(0.9)
床表面温度[℃]	26.1(0.2)	27.9(0.2)	27.6(0.2)	27.1(0.1)	26.6(0.1)	26.3(0.2)	27.6(0.2)
壁表面温度[℃]	25.9(0.4)	27.9(0.4)	28.0(0.3)	27.8(0.3)	27.8(0.3)	26.0(0.3)	28.1(0.3)
扉表面温度[℃]	27.5(0.3)	28.1(0.3)	28.5(0.2)	28.0(0.1)	28.1(0.2)	27.0(0.3)	28.3(0.2)
天井表面温度[℃]	24.6(0.8)	27.7(0.5)	27.4(0.7)	27.4(0.7)	27.7(0.5)	24.9(0.7)	27.8(0.5)
SET*[℃]	24.3	27.2	27.4	27.7	27.6	24.9	27.6
PMV	-0.5	0.7	0.6	0.7	0.7	-0.3	0.6

(標準偏差)
※被験者数の()は女性の数

表-3 アンケート項目と尺度

	快適感	温冷感 I	温冷感 II	接触部温冷感	許容度
3	非常に快適	非常に暑い	暑い	暑い	明らかに受け入れられる
2	快適	暑い	暖かい	暖かい	受け入れられる
1	やや快適	やや暑い	やや暖かい	やや暖かい	やや受け入れられる
0	どちらでもない	どちらでもない	どちらでもない	どちらでもない	どちらでもない
-1	やや不快	やや寒い	やや涼しい	やや涼しい	やや受け入れられない
-2	不快	寒い	涼しい	涼しい	受け入れられない
-3	非常に不快	非常に寒い	寒い	寒い	明らかに受け入れられない

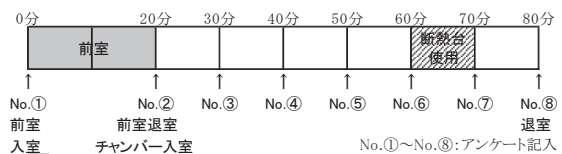


図-2 アンケート記入タイミング

ある。また、温冷感Ⅰと温冷感Ⅱは全身・手・足・頭の4つの部位について、残り3項目は全身のみについて申告してもらった。さらに、被験者には居室にいる状態に近づけるため、半袖シャツ、半ズボンまたは長ズボン、裸足の状態で実験に参加してもらった。アンケートは図-2に示すように、前室で2回、チャンバー入室後から10分間隔で6回、計8回記入してもらった。チャンバー入室から40分経ってからは人体と床表面との間に断熱台を置き、その状態で10分間経過してもらった。実験中、被験者には読書をしてもらった。

3. 実験結果

予備実験の結果から、チャンバー内の温熱環境が定常になるには6時間程度必要であったため、全てのケースにおいて8時間以上の十分な助走時間を設けて実験を行った。また、被験者がチャンバーに入室直後、人体発熱と外気の流入により室温が上昇したため、チャンバー入室30分後から60分後の安定したデータを用い、以下の各ケースにおけるチャンバーの室内空気温湿度、各表面温度、SET*、PMVについて検討を行った。

3.1 室内温熱環境

各ケースの前室とチャンバーの空気温度と絶対湿度を図-3に示す。各ケースの前室とチャンバーの空気温度差は併用運転Case6が0.01℃と一番小さく、Case3が0.8℃と一番大きいが、その他は平均0.3℃であった。従って温度変動はややあるものの、平均空気温度は設定温度に制御されていることがわかる。併用運転のCase3(平均0.014 kg/kg(DA))、Case4(0.016 kg/kg(DA))、Case5(0.017 kg/kg(DA))の絶対湿度は単独運転のCase2(0.013kg/kg(DA))よりも0.001kg/kg(DA)~0.004 kg/kg(DA)やや高くなっている。これは併用運転ではエアコンによる潜熱除去が少なかったためである。

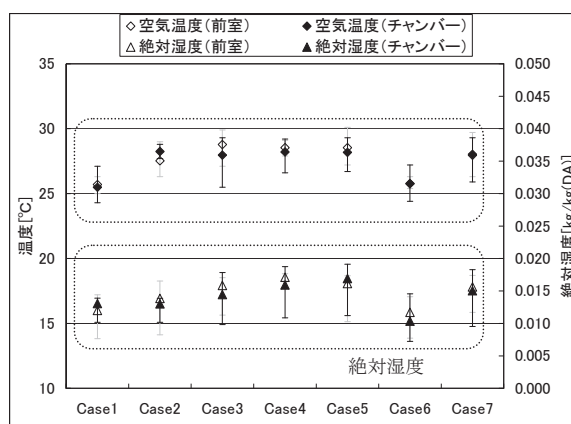
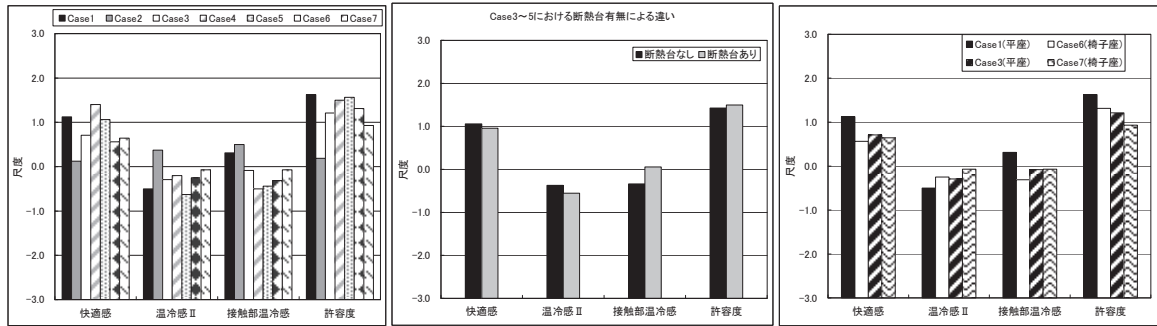


図-3 各ケースの前室とチャンバーの空気温度

表-2にチャンバー内の表面温度とSET*とPMVの平均値を示す。床表面温度は併用運転の場合、Case5が26.6℃、Case4が27.1℃、Case3が27.6℃であり、冷水設定温度を下げるにつれ低く、この3ケースではSET*は大きな差は見られなかった。また、空気設定温度26℃の平座Case1と椅子座Case6のPMVはISOが推奨する許容範囲の±0.5に収まっているが、併用運転を含めた空気設定温度28℃の場合はいずれも+0.6~+0.7であった。

3.2 アンケート調査結果

図-4(a)に被験者がチャンバー入室30分後から断熱台を敷くまでのアンケートNo.5~No.6の平均申告結果を示す。併用運転Case4とCase5のPMVは両方+0.7であったが、温冷感Ⅱ申告を見るとそれぞれ-0.2と-0.5であり、単独運転Case1の-0.5と同じく許容範囲であった。また、快適申告においても両ケースは単独運転Case1と同等の評価を得ていることがわかった。これは、



(a) 全アンケート項目の申告結果 (b) 断熱台有無による違い (c) 姿勢による違い
図-4 アンケート調査結果

Case4とCase5の接触部温冷感申告が「やや涼しい」側の申告からわかるように、床の接触による熱伝導の影響を大きく受けたためと考えられる。このことから、床表面温度が空気温度より低く、人体の一部がその床に接触されている環境下では、熱伝導の影響が加味されていないPMVもSET*のような指標では室内温熱環境を評価しにくいことがわかる。

また、図-4 (b)に示す併用運転Case3～Case5における断熱台の有無によるアンケート結果を見ると、快適感と許容度の差は見られず、接触部温冷感においては断熱材なしが「涼しい」側に申告されており床からの熱伝導の影響を受けていることがわかった。図-4 (c)に示す姿勢の違いによるアンケート結果を見ると、併用運転の平座Case3と椅子座Case7では接触部温冷感の差は見られないが、単独運転の平座Case1は「暖かい」側に、椅子座Case6は「涼しい」側であり、座り方による接触部温冷感の違いが見られた。このことから、空気温度より床表面温度が低い併用運転の場合、接触温冷感は人体と床との接触面積の大小に影響受けないが、空気温度が表面温度より低い単独運転の場合は接触面積の大小に影響を受けることが推測できる。

3.3 熱取得と熱除去

図-5に被験者がチャンバー入室30分後から60分までの熱取得と熱除去を示す。ただし、熱取得の各表面からの熱流は実測値を、人体顕熱と潜熱は理論値を用いた。熱除去はチャンバーの吹出し口と吸込み口の温湿度差と風量、水の行きと還りの温度差と流量から算出した。

熱取得と熱除去を比較すると、各ケース共に熱除去より熱取得の方が大きい結果となっ

たが、これは人体顕熱と潜熱を理論値から用いたため、実験中の人体顕熱と潜熱よりも理論値が大きく考慮されたためと考えられる。また、設定条件が同じである単独運転Case1とCase6 (26℃)、単独運転Case2とCase7 (28℃)の熱取得と熱除去はほぼ同じであった。

熱除去の値は併用運転Case3、Case4、Case5でほぼ等しいが、除去潜熱はCase3、Case4、Case5の順にやや小さくなる結果であった。これは併用運転Case3、Case4、Case5の順に室内の

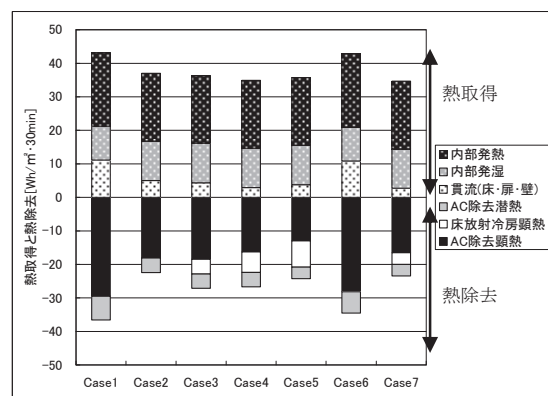


図-5 熱取得と熱除去

絶対湿度が大きくなっていることから推測できるように、床に流す冷水温度が低くなるとエアコンによる除去熱量がやや減少し、その原因により除湿が少なくなったためである。また、単独運転Case1に比べ、併用運転Case3の除去熱量は約 $9\text{Wh/m}^2 \cdot 30\text{min}$ 少なく、Case4は $10\text{Wh/m}^2 \cdot 30\text{min}$ 少なく、Case5は $12\text{Wh/m}^2 \cdot 30\text{min}$ 少なくなる結果であった。

4. シミュレーション

4.1 計算ケースと計算条件

シミュレーションは1)実現象の再現計算、2)夏季3ヶ月間における冷房負荷のための計算を行った。実現象再現検討計算はCase1からCase5までの5ケースについて行い、すべてのケースにおいて計算モデルが再現できたかどうかについて検討した。また、再現できた計算モデルを用い、単独運転Case1とCase2、併用運転Case4の3ケースについて夏季3ヶ月間の冷房負荷を計算した。

実現象の再現シミュレーションの計算条件は、実験で得たエアコンの吹出し風量 $0.028\text{m}^3/\text{s}$ 、気流速度 0.1m/s 、床面の総合熱伝達率 $7\text{W/m}^2\text{K}$ 、床面以外の総合熱伝達率 $9\text{W/m}^2\text{K}$ 、代謝量 1.0met 、着衣量 0.5clo 、エアコン吹出し温度と壁、床、扉および天井表面温度を用いた。また、夏季の冷房熱負荷シミュレーションの計算では、エアコン風量は換気回数 12回/h 程、エアコン設定温度は 26°C および 28°C 、エアコン運転時間は6時～13時および16時～22時、床放射冷房運転時間は6時～22時とし、計算期間は6月1日～9月30日の3ヶ月である。

4.2 シミュレーション結果

図-6に単独運転Case1と併用運転Case4における実測とシミュレーションのチャンパー室内温度とPMVの変動を示す。両ケースともに室内温度は実測よりシミュレーションが若干遅れる変動を示しているが、その値はほぼ同じであった。また、図に示していない残り3ケースも同じ結果であった。このことから今回のシミュレーション計算モデルは実現象を十分再現できたと考えられる。

図-7に単独運転Case1とCase2、併用運転Case4の夏季3ヶ月間の冷房負荷を示す。3ケースともに冷房負荷は8月、7月、9月、6月の順に大きく、3ヶ月積算冷房負荷は単独運転Case1、併用運転Case4、単独運転Case2順に大きい結果であった。各月における単独運転Case1に対する単独運転Case2の負荷削減率は8～12%(3ヶ月間10%)で、併用運転Case4の負荷削減率は6～10%(3ヶ月間7%)の結果であった。特に、併用運転Case4の冷房

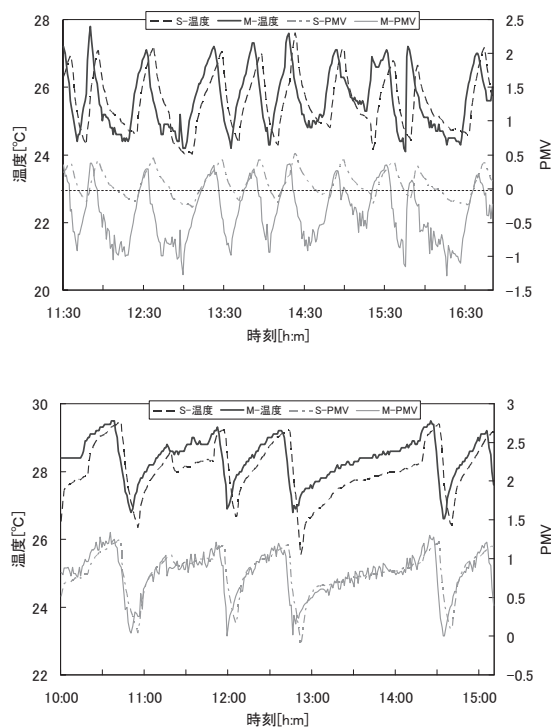


図-6 シミュレーションと実測の室内温度とPMV変動(単独運転(上)と併用運転(下))

負荷のうち、3～5%が冷水による冷房負荷処理となるため、この冷水を未利用エネルギー、すわなち、井戸水などにより処理したとすると、Case1よりCase4はエアコンの処理冷房負荷の11～13%の負荷削減となる。以上のように、併用運転Case4は単独運転Case1と同等あるいはより快適な室内環境が得ることができ、さらに冷房負荷削減ができることから今回提案したハイブリット冷房空調システムは有効であることが確認できた。

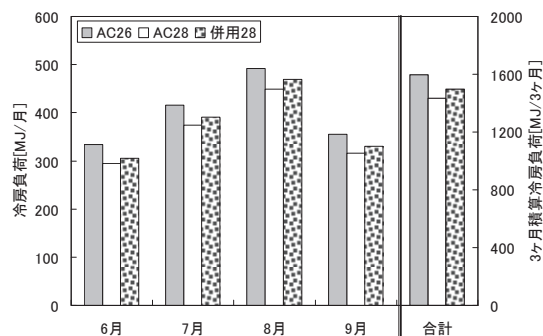


図-7 冷房負荷

5. まとめ

対流冷房を併用した床放射冷房システムについて、実験およびアンケート調査により以下の知見を得た。

- 1) 室内温熱環境に関するアンケート調査結果、併用運転の空気設定温度28℃に冷水設定温度20℃のCase4と空気設定温度28℃に冷水設定温度16℃のCase5は、快適感と許容度において空気設定温度26℃の単独運転Case1と同等あるいはそれ以上の良い評価を得た。
- 2) 併用運転Case3～Case5における断熱台の有無によるアンケート結果、快適感と許容度の差は見られず、接触部温冷感においては断熱材なしが「涼しい」側に申告されており床からの熱伝導の影響を受けていることがわかった。
- 3) 姿勢の違いによるアンケート結果を見ると、併用運転の平座Case3と椅子座Case7では接触部温冷感の差は見られないが、単独運転の平座Case1は「暖かい」側に、椅子座Case6は「涼しい」側であり、姿勢による接触部温冷感の違いが見られた。このことから、空気温度より床表面温度が低い併用運転の場合、接触温冷感は人体と床との接触面積の大小に影響受けないが、空気温度が表面温度より低い単独運転の場合は接触面積の大小に影響を受けることが推測できる。
- 4) 実測による熱除去計算結果、単独運転Case1に比べ併用運転Case4は約20W/m²小さいことがわかった。
- 5) 実測とアンケート調査結果から、併用運転はエアコン単独運転に比べ、少ない除去熱量で同等もしくはより快適な室内温熱環境を得ることが可能であることがわかった。
- 6) シミュレーション計算結果、実測と計算はよく一致しており、今回の計算モデルは実現象を再現できることが示された。
- 7) 夏季3ヶ月間のシミュレーションによる除去熱量を計算した結果、空気設定温度28℃に冷水設定温度20℃の併用運転は空気設定温度26℃単独運転より約10%小さかった。このことから、ハイブリット空調システムによる併用運転はエアコン消費電力の削減に有効であることがわかった。

参考文献

- 1) 瀬沼央, 武田仁, 長期実測による井戸水利用天井放射冷房システムの評価, 日本建築学会環境系論集, No.623,pp31-38,2008.1
- 2) 李勝馥, 黄錫鎬, 宋斗三: オンドルを利用した床放射冷房システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.99,pp19-29,2005.6
- 3) 高根澤武, 宋城基: 対流冷房を併用した床放射冷房の適応可能性に関する実験的研究。
(その1.室内温熱環境についての検討), 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.P.361-364, 2009.2.
- 4) 宋城基, 高根澤武: エアコンと床放射併用の冷房による室内温熱環境に関する実験研究, 日本建築学会2009年度大会(東北)学術講演概要集 D-2 環境工学Ⅱ, pp.1295-1296,2009.8