天井放射空調システムにおける 最適運転制御システムの構築

CONSTRUCTION OF OPTIMUM OPERATION CONTROL SYSTEM FOR RADIANT CEILING PANEL SYSTEM

塩谷正樹 — * 1 桑原亮一 — * 2
鬼頭則夫 — * 3 佐藤英樹 — * 1

Masaki SHIOYA — * 1 Ryoichi KUWAHARA — * 2
Norio KITO — * 3 Hideki SATO — * 1

キーワード：
天井放射空調システム, 最適運転制御, 平均放射温度, 温熱環境, エネルギー効率

Keywords:
Radiant ceiling panel system, Optimum operation control, Mean radiant temperature, Indoor thermal environment, Energy efficiency ratio

We constructed the operation control system of radiant cooling and heating system by using ceiling panel for the purpose of providing indoor environment with thermal comfort. The control system, which controlled the supply temperature or the flow rate of heat supply water for radiant panel optimally, was able to maintain the constant mean radiant temperature and to improve the follow-up ability for heat load fluctuation. In this paper, we reported the results of field measurement in our demonstration room and we described the effectiveness of the system from the viewpoints of indoor thermal environment and energy efficiency ratio.

1. はじめに

放射空調システムは, 静穏かつ不快なドラフトを生じない環境が提供できる空調方式として, 注目されている。しかし, 放射パネルの運転制御に関しては, 送水温度を一定とし, 室温(空気温度)を制御パラメータとした二位置制御(ON-OFF)を行うことが一般的である。結果として, 放射温度・室温ともにこのディファレンシャルの間を成り行きで変動し, 温冷感上の不具合となることも多い。

そこで, 筆者らは天井放射空調システムにおいて, 室内の平均放射温度(MRT)が一定となるように, 放射パネルへの送水温度または送水流量を制御するシステムに着目し, 実空間を対象として, その構築・検討を行った。本報では, 夏季および冬季において, 天井放射空調システムでMRT制御を行った室内の温熱環境, システム構成機器のエネルギー効率を実測解析した結果を報告する。

2. 導入対象室および放射空調システムの概要

2.1 対象室

放射空調を導入した建物は, 茨城県つくばみらい市に所在するRC造の研究施設である。図1に放射空調システムを導入した対象室の平面図を示す。対象室は, 床面積約108㎡の1階会議室である。東面は, ほぼ全面窓ガラス(窓面積率: 80%), 隣室は廊下・倉庫などの非空調室, 床は土間床で断熱は施していない。

図2に対象室に敷設した天井放射パネルを示す。四枚で一組の放射パネルを形成しており, 放射パネルは傘状に凹凸があり, パネル上方に配管を嵌め込む構造としている。さらに, 放射パネル間にはスリットを設け, 自然対流が増加するような形状としている。これ

により, 放射パネルの単位面積あたりの冷暖房能力が増加し, 天井敷設率の低減を図っている。対象室においては, 2, 850mm×440mmの放射パネルを32枚設置し, 放射パネルの敷設率は約40%である。

2.2 放射空調システム

図3に天井放射空調システムフローを示す。放射パネル系統への冷温水の供給は, 通常の冷温水熱源と井戸水(約16℃)による冷熱が直列で利用できるシステムとしている。冷房時は井戸水系統を優先的に運転し, 要求に対して井戸水の冷熱が不足する場合のみ追い

図1 対象室平面図

図2 放射パネル断面図

本報告は, 文献1), 2)を基に加筆, 修正したものである。

*1 三建設備工業(株)技術本部技術研究所 副主任研究員・修士(工学)
(〒300-2436 茨城県つくばみらい市絹の台4-5-1)

*2 三建設備工業(株)技術本部技術研究所 主任研究員・博士(工学)

*3 三建設備工業(株)技術本部技術研究所 主任研究員

*1 Reserch Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., M. Eng.

*2 Reserch Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Dr. Eng.

*3 Reserch Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd.

図3 放射空調システムフロー

図4 放射パネル制御概略フロー

表1 測定項目および測定点数

測定項目		測定点数	
		制御用センサ	データロガー
室内	温湿度	3点	20点
	グローブ温度	—	3点
	表面温度	9点	23点
	CO ₂ 濃度	2点	—
放射パネル系統	送水温度	8点	—
	送水流量	3点	—
	搬送消費電力量	—	3点
外調機系統	温湿度	5点	—
	コイル送水温度	2点	—
	搬送消費電力量	—	3点

表2 冬季システム運転条件

測定条件		MRT設定 [°C]	送水温度 [°C]	送水流量 [L/min]
従来制御	送水一定制御	—	32	35
MRT制御	送水温度制御	22	~40	35
	送水流量制御	22	36	0~35

掛けで熱源が動作する。暖房時は熱源を使用する。また、冷温水ポンプには、インバータを設置し、任意の流量が供給可能とする。外調機系統は、外調機、顕熱交換器、RA（還気）ファンで構成している。顕熱交換器は、外気（OA）と給気（SA）の熱交換を行う。これは、除湿、加湿による給気温度の過度な低下・上昇を抑えるためである。室内への給気は、天井内チャンパーへの吹出と、ペリメータに設けたブリーザラインからの吹出との切り替えを可能とする。RAファンはウォーミングアップ時のみ運転し、通常空調時は停止する。これにより、外気導入量に応じて室圧がプラス圧に保たれ、外気の進入を防止する。また、対象室東面は全面窓ガラスを有することから、冬季のコールドドラフト対策として、窓面下部に電気式のヒータを設置している。

2.3 放射パネル制御方法

図4に放射パネルの制御の概略フローを示す。従来制御はパネル送水温度と流量が一定となるように制御するのに対し、MRT制御は図1に示す室内中央部のMRTが一定となるようにパネル送水温度または流量を制御する。MRTの算出方法は、室内各表面の代表温度を測定し、形態係数を利用して求める。送水温度制御は、送水

温度を変化させて、パネル表面温度を制御する事によってMRTを一定に保つ。送水流量制御は、送水流量を変化させて、パネル表面温度を制御する事によってMRTを一定に保つ。

3. 測定概要

表1に測定項目および測定点数を示す。測定は制御システムからの各センサ検出値の自動ロギングに加え、データロガーによる自動測定を行う。測定間隔は5分である。室内は、天井内を含む上下温度分布、グローブ温度、室内各表面温度を測定する。放射パネル系統は、一次側と二次側において、送水往還温度および送水流量と、ポンプ消費電力量を測定する。外調機系統は、機器廻りの空気温湿度とファン消費電力量を測定する。

4. 冬季暖房時実測結果

4.1 測定条件

表2に冬季暖房時の放射パネル制御に関するシステム運転条件を示す。実測は、2006年12月～2007年3月に実施し、放射パネルを従来制御（送水一定制御）とした場合と、MRT制御（送水温度制御、送水流量制御）とした場合について行った。送水一定制御は、送水温度32℃一定、送水流量35 L/min一定とする。一方、送水温度制御は、MRTが22℃一定となるように送水温度を可変とし、上限を40℃とする。送水流量は35 L/min一定である。送水流量制御は、送水温度36℃一定とし、送水流量を0～35 L/min可変とする。なお、いずれの条件も、外調機系統は給気湿度制御を行い、設定は絶対湿度7.2g/kg(DA) (22℃時44%相当)とする。^{注1)}また、室内は、安全側を想定し、照明や人体等の内部発熱を与えていない。

4.2 温熱環境実測結果

図5に送水一定制御、送水温度制御、送水流量制御とした場合の代表日における各測定値の比較を示す。

(1) MRT

送水温度制御、送水流量制御ともに、MRTは設定値の22℃でほぼ一定に保たれている。一方、送水一定制御は22～23℃程度とMRTがやや高い範囲で変動している。これは、送水温度及び流量が一定であり、放射パネルがほぼ一定量の放熱をしているため、室内負荷による周囲面の変動に対応できないことを示している。

(2) 室内温度

室温はMRTと同様の傾向がみられ、送水温度制御、送水流量制御は、21～21.5℃でほぼ一定に保たれるのに対し、送水一定制御は21～23℃で変動する。これらの結果から、MRT制御における作用温度を算出すると、約21.5℃でほぼ一定となり、MRT制御によって、極めて安定した温熱環境が形成されることが確認できる。

(3) 放射パネル表面温度

放射パネル表面温度は、送水一定制御では、運転開始時から空調終了時まで約28℃で一定である。これに対し、送水温度制御では、空調開始直後に約30℃まで上昇する。これは空調開始時のMRTの低下（約17℃）により、これを解消するための制御動作の結果と考えられる。MRTが22℃となると、放射パネル表面温度は28～30℃で変動するが、13時以降に再び上昇傾向をみせる。これは、外気温度の低下に伴うペリメータ負荷の増加に起因した結果と考えられる。一方、送水流量制御では、空調開始時に約30℃となった後、27

～28℃に低下する。これは、外気温度がほとんど低下していないため、ペリメータ負荷が増加せず、流量が低下したためと考えられる。

これらの結果から、送水温度制御、送水流量制御ともに、外気温度の変動に伴う負荷変動に対して、追従することが確認できる。

(4) MRT 水平分布

室内各表面温度測定値から、床上高さ600mmにおけるMRTを1,000mm間隔で算出し、MRT水平分布を求める。図6に送水温度制御定常時におけるMRT分布を示す。MRT制御ポイントである室中央は約22℃となり、壁近傍になるにつれて低くなる。東窓面近傍は、窓表面温度の影響が大きく、約20.5℃と算出される。

(5) 上下温度分布

図7に室内上下温度分布を示す。いずれの条件においても、居住域における上下温度差は2.5℃以下となっており、良好な環境であることが確認できる。床表面温度は、いずれの場合も約21℃である。天井内の温度は、室内温度と比較して約4～5℃高く、約24～26℃であり、上階天井スラブ表面温度は約24～27℃となる。

4.3 放射パネル処理熱量

図8に各制御時の放射パネルによる処理熱量と送水温度、図9に送水流量制御時の送水流量を示す。送水一定制御は、送水温度32℃、送水流量35 L/min一定のため、処理熱量は室内負荷の大小に関わらず、ほぼ一定で約90～100 W/m²である。一方、送水温度制御は、空調開始時に送水温度が約36℃まで上昇する。13時以降、再び送水温度が上昇し、16時に最高値約37℃を示す。処理熱量は送水温度の上昇に伴って増加し、最大約150 W/m²となる。送水流量制御は、送水流量が空調開始時に約32 L/minとなり、11時以降に減

少する。処理熱量は空調開始時に約140 W/m²となり、その後減少して17時には約50 W/m²となる。

4.4 外調機系統処理熱量

図10に各放射パネル制御時における外調機系統の処理熱量と顕熱比を示す。送水一定制御時と送水温度制御時の処理熱量は、日中に最も小さく、朝方と夕方になる傾向がみられる。送水流量制御時の処理熱量は、夕方になるにつれて減少する傾向がみられる。これは同日の気象条件が、夕方にかけても外気温度の低下がほ

図6 送水温度制御時MRT分布(12時)

(a) 送水一定制御 (b) 送水温度制御 (c) 送水流量制御

図7 室内上下温度分布

図5 各条件のMRT, 室内温度, 放射パネル表面温度, 外気温度

図8 放射パネル処理熱量と送水温度

図9 送水流量制御時の放射パネル送水流量

図10 外調機系統処理熱量と顕熱比

とんど無い為と考えられる。顕熱比は0.4～0.6となり、外調機と顕熱交換機の組み合わせにより、潜熱処理熱量の割合が高くなる。

4.5 各機器のエネルギー効率

図11に各制御毎の放射パネルの搬送用消費電力量とシステムCOP、表3にシステムCOP算出式を示す。送水一定制御、送水温度制御の搬送用消費電力量は約400Wh、システムCOPは送水一定制御が約2.2、送水温度制御が約2.4となる。流量制御の搬送用消費電力量は11時以降に約50～100Whまで減少し、システムCOPは約2.8となり、流量低下による搬送消費電力量の減少により、エネルギー効率が上がる事が確認できる。図12に外調機系統の搬送用消費電力量とシステムCOPを示す。搬送用消費電力は約800Wh、システムCOPは1.5～2.0となる。これらの結果から、搬送用消費電力量基準の比較では、放射パネルは外調機系統よりエネルギー効率が上がる事が確認できる。

5. 夏季冷房時実測結果

5.1 測定条件

表4に夏季冷房時のシステム運転条件を示す。実測は、2007年6月～9月にかけて実施した。送水一定制御は、送水温度18℃一定、送水流量35L/min一定とする。一方、送水温度制御は、MRTが26℃一定となるように送水温度を可変とし、放射パネル配管表面温度と室内露点温度との比較により、送水温度下限値を14℃まで設定可能とする。送水流量は17.5L/min一定である。送水流量制御は、送水温度16℃一定とし、送水流量を0～35L/min可変とする。なお、いずれの条件も、外調機系統は室内湿度一定制御を行い、設定は絶対湿度10.5g/kg(DA)(26℃時50%相当)とする。^{注2)}また、室内発生負荷として、空調運転時は照明(約10W/㎡)を点灯している。また、人体負荷(25人程度)を想定し、室内において顕熱負荷を約

1,700W、潜熱負荷を約2.5L/min与えている。

5.2 温熱環境実測結果

図13に送水一定制御、送水温度制御、送水流量制御とした場合の代表日における各測定値の比較を示す。

(1) MRT

MRTは東窓からの日射の影響により、空調開始前は約31℃まで上昇する。空調運転するとMRTは下降し、送水温度制御、送水流量制御は11時に約26℃となる。以降MRTは、送水温度制御では26℃でほぼ一定に保たれ、送水流量制御では25.5～26℃となる。一方、送水一定制御におけるMRTは、空調運転時に常に下降し、18時には24℃まで下降し、室内負荷の変動の対応できていない。

(2) 室内温度

室温はMRTと同様の傾向がみられ、空調開始前に約31度まで上昇し、空調運転すると下降し、送水温度制御時、送水流量制御時は、11時以降に約26.5℃でほぼ一定に保たれる。作用温度は約26.3℃でほぼ一定と算出され、夏季においても、MRT制御によって安定した温熱環境となる事が確認できる。

(3) 放射パネル表面温度

放射パネル表面温度は、送水温度制御では、朝方の立ち上がり負荷、日射負荷に伴って20.5℃まで下降する。12時以降に室内負荷の低下に伴って上昇し、18時に約23℃となる。送水流量制御では、

表4 夏季システム運転条件

測定条件		MRT設定 [℃]	送水温度 [℃]	送水流量 [L/min]
従来制御	送水一定制御	—	18	35
	送水温度制御	26	14～	17.5
	送水流量制御	26	16	0～35

図11 放射パネル搬送用消費電力量とシステムCOP

図12 外調機系統搬送用消費電力量とシステムCOP

表3 システムCOP算出式

■放射パネルシステムCOP	
= 放射パネル処理熱量 / 二次側搬送消費電力量 + 井戸水搬送消費電力量(冷房時) + 熱源消費電力量	
■外調機系統システムCOP	
= 外調機系統処理熱量 / 搬送消費電力量 + 熱源消費電力量	
※熱源消費電力量は熱源COPを3.0と仮定して算出	
※冷房時放射パネルで井戸水系統と熱源系統を併用する場合の熱供給割合は、熱交換器間の二次側冷水温度差から算出

図13 各条件のMRT、室内温度、放射パネル表面温度、外気温度

放射パネル表面温度は、運転開始後に約20.5℃まで下降し、13時以降に22.5～25℃で変動する。これはMRTが下降すると、放射パネルへの送水を停止し、MRTが上昇すると、再び送水を開始する現象を繰り返す為である。これらの結果より、送水温度制御は負荷変動に対して、十分に追従できることが確認できる。送水流量制御において、低負荷時にさらに精度良く追従する為には、送水を停止せず、送水温度を変更する方が望ましいと考えられる。

(4) MRT水平分布

図14に送水温度制御定常時におけるMRT分布を示す。MRTは室中央で約26℃、壁近傍、窓近傍で26.5～27℃となり、ほぼ均一な分布となる。

(5) 上下温度分布

図15に室内上下温度分布を示す。居住域における上下温度差は0.5℃以下となり、良好な環境であることが確認できる。床表面温度は、居住域温度と同値か約0.5℃低い。天井内温度は、室内温度と同値か約1℃低く、約24～26℃となる。

5.3 放射パネル処理熱量

図16に各制御時の放射パネル処理熱量と送水温度、図17に送水流量制御時の送水流量を示す。送水一定制御は、空調開始時に送水温度が約18℃、処理熱量は約130W/㎡となる。その後、送水温度は一定であるが、処理熱量は、室内負荷の減少とともにゆきで減少し、17時に約80W/㎡となる。送水温度制御は、空調開始時に送水温度が16℃、処理熱量が約160W/㎡となる。11時に送水温度は、室内露点温度の低下とともに約14℃まで下降し、処理熱量は約130W/㎡となる。12時以降に送水温度は、負荷の減少とともに上昇し、17時に約20℃となる。処理熱量は、送水温度の上昇とともに減少し、17時に約65W/㎡となる。送水流量制御は、10時まで送水流量が約35L/min、処理熱量が約135W/㎡となる。その後、送水流量の低下に伴い、処理熱量も減少し、17時に約10W/㎡となる。

図14 送水温度制御時MRT分布(12時)

(a) 送水一定制御 (b) 送水温度制御 (c) 送水流量制御
図15 室内上下温度分布

5.4 外調機系統処理熱量

図18に各放射パネル制御時における外調機系統の処理熱量と顕熱比を示す。8時は予冷運転の為、外気導入は行われず、処理熱量は、12,000～16,000W、顕熱比は約0.6である。9時以降、外気導入が行われると、処理熱量は8,000～12,000Wとなる。顕熱比は約0.35となり、潜熱処理熱量の割合が高くなる。

5.5 各機器のエネルギー効率

図19に各制御毎の放射パネルの搬送用消費電力量とシステムCOPを示す。送水一定制御、送水温度制御の搬送用消費電力量は、それぞれ約370Wh、100Whでほぼ一定である。送水流量制御の搬送用消費電力量は、空調開始時に約370Whとなり、その後約20Whとなる。システムCOPは、いずれ場合も約3.0～5.0となり、冬季と比較して高い結果となる。これらの結果より、井戸水から熱

図16 放射パネル処理熱量と送水温度

図17 送水流量制御時の放射パネル送水流量

図18 外調機系統処理熱量と顕熱比

図19 放射パネル搬送用消費電力量とシステムCOP

図20 外調機系統搬送用消費電力量とシステムCOP

供給することにより、エネルギー効率をさらに高くできる可能性があることが確認できる。図20に外調機系統の搬送用消費電力量とシステムCOPを示す。搬送用消費電力量は約1,500Whとなり、システムCOPは約2.0となる。

6. MRT簡易制御のための予測精度に関する検討

前述の温熱環境測定結果より、MRT制御によってMRTと室内温度が一定に保たれることが確認できた。しかし、MRT制御を行うためには、室内各表面にセンサを配置する必要があり、制御システムの複雑化、コスト増加が懸念される。そこで、室温と各壁表面温度との相関を求め、センサを減らしてMRT制御を試みた。図21に冬季、夏季1ヶ月間の空調時における室温と各壁表面温度の相関を示す。東窓表面温度は日射等の影響により、ばらつき

図21 空調時における室温と各壁表面温度の相関

表5 壁表面温度推定近似式の係数

部 位	夏 季		冬 季	
	a	b	a	b
南 壁	0.96	1.36	0.60	8.01
西 壁	0.99	1.09	0.92	2.22
北 壁	1.15	-4.06	1.20	-4.48

図22 冬季MRTの比較

図23 夏季MRTの比較

がみられるが、内壁（南壁、西壁、北壁）表面温度は高い相関が認められる。これらの結果から、内壁表面温度について、室温との間の近似式を求める。表5に壁表面温度推定近似式の係数を示す。

表面温度推定近似式： $y = ax + b$

y: 表面温度[°C] x: 室温[°C]

これらの結果より、内壁表面温度は、室温とほぼ等しい関係にあることが確認できる。対象室内のMRT制御ポイントに対する各壁面の形態係数はそれぞれ0.16以下であり、壁表面温度が室温と大きな差が生じない限り、壁表面温度を室温と同値と仮定しても、MRT推測精度への影響は少ないと考えられる。そこで、形態係数の大きい床、日射の影響を受ける東窓、放射パネルのみをセンサにより計測し、その他の内壁表面温度を室温と同値と仮定した場合のMRT（以下、壁面温度仮定MRT）の予測精度を検討する。

図22、23に冬季、夏季において、センサによる実測値、近似式による算出値、壁面温度仮定MRTを比較した結果を示す。空調時において、3方法によるMRTはほぼ等しく、MRT制御ポイントに対する形態係数が小さく、日射等の影響が少ない内壁は、室温と同値と仮定しても、MRTが推測可能である。これにより、センサ類を減らした簡易MRT制御も可能であることが示唆される。

7. まとめ

天井放射空調システムにおいて、MRT制御を行った場合の温熱環境とシステムエネルギー効率について、夏季および冬季に実測解析を行った。得られた主な知見をまとめると、以下の通りである。
(1) MRT制御は、夏季冬季ともに、外乱による室内負荷変動に放射パネルが追従して、MRTを一定に保つことが可能であり、結果として室温もほぼ一定に保たれ、制御システムとして有効である。
(2) 外調機系統と比較して、空気搬送系を持たない放射パネルはエネルギー効率が高い。さらに冷房時は井戸水を冷熱源として利用することにより、さらに高効率となる可能性がある。
(3) MRT制御ポイントに対する形態係数が小さく、日射等の影響が少ない内壁の表面温度は、室温と同値と仮定しても、MRTを精度良く推測することが可能である。これにより、センサ類を簡略化した簡易MRT制御が実現可能と考えられる。

注記

注1) 暖房時における室内絶対湿度は、6.8～7.6g/kg(DA)で制御された。
注2) 冷房時における室内絶対湿度は、9.5～12g/kg(DA) (13～17°C DP)で制御され、いずれの測定条件においても、パネルに結露は観測されなかった。

参考文献

1) 佐藤英樹 ほか5名: 天井放射空調システムの制御に関する研究(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), D-2, pp1067-1070, 2007. 8
2) 鬼頭則夫 ほか4名: 放射空調システムにおける放射温度制御に関する研究(第1報), (第2報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(仙台), pp. 389-396, 2007. 9
3) 何原一平, 塩谷正樹: 放射空調システムを対象とした室内放射環境解析手法に関する研究(その1), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(仙台), pp. 201-204, 2007. 9
4) 瀬沼央, 武田仁: 長期実測による太陽熱利用天井放射暖房システムの評価, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第627号, pp. 599-606, 2008. 5

[2008年6月19日原稿受理 2008年8月20日採用決定]