地下水利用・天井放射空調システムに関する実験的研究

— 地下水汲上げ量及びシステム循環水量の PMV 制御 —

EXPERIMENTAL STUDY ON THE CEILING RADIATION COOLING/HEATING SYSTEM USING GROUNDWATER

— PMV control on the flow rate of the groundwater drawing pump and the circulation pump —

垂水弘夫 — * 1 坂本泰邦 — * 2
桑原亮一 — * 3 西澤 淳 — * 4
岩瀬和夫 — * 5

Hiroo TARUMI — * 1 Yasukuni SAKAMOTO — * 2
Ryoichi KUWAHARA — * 3 Makoto NISHIZAWA — * 4
Kazuo IWASE — * 5

キーワード:

天井放射空調システム, 地下水, 温熱環境, PMV 制御,
地下水汲上げポンプ, 冷温水 2 次ポンプ

Keywords:

Ceiling radiation cooling/heating system, Groundwater, Thermal environment, PMV control, Groundwater drawing pump, Circulation pump

PMV control system was applied for a ceiling radiation cooling/heating system utilizing groundwater as heat source/sink. System improvements including extension of the ceiling radiation panel and inverter control of pumps were carried out in the 2012. The research results in summertime cases are summarized below:

1) Indoor PMV values were settled in the range of 0.2-0.6 which was narrower than the previous year. 2) The power consumption of the pumps dropped to 1/3 of the previous year, and that of the whole system containing an makeup air unit dropped to 2/3.

1. はじめに

地下水を熱源とする放射空調システムは、建築物 ZEB 化の要素技術の一つとして研究開発が急がれている。前報¹⁾では、金沢工業大学・地域防災環境科学研究所に設置した放射空調システムについて、システム制御方法と夏季室内温熱環境形成との関係を 3 年間にわたり追跡、検討した結果を提示した。室温制御と比較した PMV 制御の有効性を、室内 PMV の日変化、室内 9 測定点の PMV 分布、低負荷時におけるハンチング現象解消などの点から明らかにしたものである。

本研究では、同システムに次の 1) 及び 2) に示す改良を加え、室内温熱環境形成とエネルギー消費の面からみた効果を、2012 年度の夏季実測を通じて把握したので報告する。

1) 地下水汲上げポンプ及び冷温水 2 次ポンプのインバータ化と、流量の PMV 制御。

2) 南面窓上部の天井面への放射パネルの追加設置。

これらの改良工事の実施によって、PMV の日変化と室内分布の一層の抑制・均一化、PMV 制御を三方弁の開度調整だけでなくポンプの流量制御へ適用することによるエネルギー消費の削減を目標とした。

2. 地下水利用・放射空調システムと実験の概要

2.1 システムの概要

石川県白山市に立地する本システムの構成を図 1 に示す。自然水位-28.5m の揚水井から汲み上げた約 14℃の地下水を熱源として利

図1 地下水利用・天井放射空調システムの構成と変更点

¹⁾ 金沢工業大学建築系 教授・工博
(〒924-0838 石川県白山市八束穂3-1)
²⁾ 金沢工業大学大学院建築学専攻 大学院生
³⁾ 三建設工業(株) 主管研究員・博士(工学)
⁴⁾ 三建設工業(株) 主任研究員
⁵⁾ 三建設工業(株) 技術本部長・工博

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.
²⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology
³⁾ Senior Research Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Dr. Eng.
⁴⁾ Research Engineer, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd.
⁵⁾ Director, Sanken Setsubi Kogyo Co., Ltd., Dr. Eng.

用する。水熱源ヒートポンプは冬季の暖房運転用に1階機械室内に設置している。夏季は地下水との熱交換水を5階実験室の天井放射パネルに循環させることにより冷房運転を実施しており、T1～T6は熱源水・冷温水の温度測定位置、M1とM2は流量測定位置を表わしている。各構成機器の仕様ならびに能力等については既報¹⁾に詳しいが、アルミニウム製の天井放射パネル1.04㎡あたりの冷房能力は、室内温度26℃、冷水温度19℃において約93Wである。改修後の放射パネル全体での顕熱負荷処理能力はおおよそ2.4kWとなる。ただし、室内温度が高い、冷水温度が低いなどの条件下では、これよりも冷房能力が大きくなる点に留意する必要がある。また、主に潜熱負荷の処理を行うデシカントタイプ外調機の除湿冷房性能は6.1kW（消費電力1.3kW）であり、換気風量500㎡/hで相対湿度50%RHの設定運転を行っている。外調機の吹出口は天井内に設置されており、室内への新鮮空气の供給は、平行する放射パネルの10mm幅のスリット部分を通じて行われる。

2.2 システムの変更内容

改良工事を行い変更したのは、次の3点である。

①放射パネル面積の増加（図2参照）

改修前の25.04㎡から27.20㎡へと、8.6%増加させた。

南窓面上部にあったエアコンの室内機を北側に移設し、そこへ北側天井面の放射パネルを移設した。また、移設後のスペースに新規の放射パネル2枚を設置したものである。室面積64㎡に対する放射パネル面積の割合は、改修前の35.9%から改修後は39.3%となった。

②地下水汲上げポンプのインバータ化

改修前は20.0ℓ/minの定流量で汲み上げていたものが、6.0ℓ/min～28.0ℓ/minの範囲で可変となった。

③冷温水2次ポンプのインバータ化

改修前は20.0ℓ/minの定流量であり、三方弁の開度調整により温度を変更して負荷の増減に対応していた。改修後は0.0ℓ/min～24.0ℓ/minの範囲で可変のシステムとなった。最大流量を20%増としたものである。ただし、冷温水2次ポンプの最低流量は、再起動時の立ち上げ性能や、放射パネルへの冷水送水の有無による人体の放射温熱感覚の問題を考慮し、6.0ℓ/minとして運用している。

2.3 実験室の測定点と制御代表点

図3に実験室の平面図と温湿度の測定位置を示す。室を東西方向及び南北方向の2m間隔で等分割した9つの交差点を測定位置とした。測定位置の名称は、A列、B列、C列の各列ごとに、窓面からの位置関係に応じて、「B窓」、「B央」、「B奥」とした。温湿度測定には小型無線温湿度計（パナソニック㈱、WR10）を用い、測定高さは床面から1100mmである。制御代表点は、室中央にあたる「B央」である。

図4に実験室の南北断面図と垂直温度分布を知るための熱電対（林電工㈱、φ0.32mmT型熱電対）設置位置を示す。設置高さは、0mm（床表面温度）、100・1100・1500・2600mm（空気温度）、2700mm（天井または放射パネルの表面温度）である。熱電対測定に使用したデータロガーは、グラフテック㈱製のGL200及びGL800である。また、制御用の表面温度測定を、天井放射パネル面、南窓面、床面及び東壁面などで行った。室内には8つのテーブルを配置し、南側窓のベネチアンブラインドを使用した。

図2 改修工事による天井放射パネルの移設・増設

図3 実験室平面図および制御代表点位置(B央)

図4 垂直温度分布のための熱電対設置位置

図5 2012年度の冷房時制御フロー

2.4 PMV 制御の概要

快適な室内温熱環境を維持するためには、放射環境を如何にコントロールするかが重要になる。放射パネルへの送水温度を一定制御とした場合、内部負荷の変動や外乱などに起因する放射環境の変化に対応することが難しい。また、室内温度を一定となるように放射パネルの表面温度を可変制御とする場合、室内温度に対する熱応答に差があるため、暑すぎ、寒すぎといった不具合が生じる可能性がある。このため本研究では、放射パネルの表面温度を含む室内放射環境を包括した PMV 制御を適用した。具体的には、外気温度と室内温度の差及び外皮の熱貫流率から各面の表面温度を推定し、PMV が一定となるようにパネル表面温度を制御したものである。¹⁾ 2012 年度に新たに加わった地下水汲上げポンプと冷温水 2 次ポンプの流量制御を含め、冷房時の制御フローを図 5 に提示する。PMV の目標値は+0.5 である。流量制御と三方弁開度の制御を併用することで、低負荷時・低流量時の送水温度制御を良好なものとしている。

2012 年度の実験は、7 月 24 日から 9 月 14 日までの 53 日間の中で、制御方法 (PMV 制御、室温制御、送水温度一定制御)、PMV 制御方法 (PMV 目標値、PID 設定)、制御代表点 (B 央、西壁央) などを変更しながら実施した。本報では、その中から既報¹⁾ で取り上げた 2011 年度の実験代表日 (2011 年 9 月 11 日) に近い外界条件を有する日として 2012 年 8 月 10 日 (日積算全天日射量 6.2kWh/(m²・日)、日平均外気温度 25.5℃) を実験代表日に取り上げ、システム改良に伴う比較検討を行う。

3. ポンプの PMV 制御による送水温度と循環水量の変化

PMV 制御を三方弁の開度だけでなく、冷温水 2 次ポンプの循環水量にまで拡大した 2012 年のデータを、前年と対比させながら図 6 に提示する。上から順に、実験代表日における三方弁開度、循環水量および送水温度の時系列データとなっている。

黒実線で表示する 2012 年の三方弁開度は、2011 年に比べて短時間での変動が抑制されている。循環水量のグラフでは、2011 年は終日 240ℓ/min で運転していたものが、2012 年は深夜から早朝の 8 時頃までと 17 時以降はほぼ 6 ℓ/min、日中は 15 時前後の 19 ℓ/min をピークに負荷に応じた水量調整を行っている様子が示されている。送水温度のグラフをみると、2011 年の日中は午前・午後によらず約 17.5℃の送水温度となっていたところ、2012 年は午前から午後にかけて送水温度が低下して行く傾向がみられる。

4. 温熱環境改善効果の解析

4.1 垂直温度分布

まず 2011 年度の室内垂直温度分布を図 7 にみると、「B 央」及び「B 窓」の位置によらず、高さ 100～1500mm の範囲では朝 9 時に約 25℃、15 時には約 27℃となっており、日中に 2℃の差が見られる。これに対し 2012 年度の垂直温度分布をみると、「B 央」ではほぼ 26℃と、時刻による変化がほとんど無く、また、「B 窓」でも時刻による差が 0.5℃程度に抑えられていることが分かる。南面窓上部における天井放射パネルの増設 (8.6%増) とポンプのインバータ化により最大流量を増加させた (20%増) 効果が表れたものと考えられる。

4.2 PMV の日変化

2011 年度の B 列における PMV の日変化を図 8 に示す。測定位置ご

図6 送水温度と循環水量の日変化

図7 垂直温度分布日変化(B央、B窓)

とにみると、何れも夜から明け方に掛けては 0 前後にコントロールされ、日中のピークは 14 時～16 時頃に「B 央」及び「B 奥」で 0.6 前後、「B 窓」で 0.9 弱となっていた。室中央よりも窓寄りの位置で 0.25 程度、ピーク時の PMV が高くなる様子が見られたものである。

2012 年度の PMV は、夜間から明け方にかけて 0.25 前後、日中のピークで 0.6 前後になっており、2011 年度と比較して PMV の目標値 +0.5 を挟む比較的狭い範囲にコントロールされていることが読み

取れる。また、「B窓」におけるPMV日変化に注目すると、2012年度の日中は「B央」及び「B奥」との差の縮小も明らかである。

4.3 PMVの室内水平分布

図9に、2011年と2012年の室内PMV分布を提示した。8～18時の間の平均値について、PMVの0.1刻みでトーン表示している。2011年のPMV分布をみると、9測定点の最小値が0.20、最大値が0.54で、差が0.34となっているのに対し、2012年は最小値が0.41、最大値が0.59で、その差は0.18と、2011年の半分程度にまで縮小する結果が得られた。

5. ポンプのPMV制御による省エネルギー効果

5.1 井水取得熱量及び放射パネル供給熱量の変化

2011年及び2012年の実験代表日における井水取得熱量と放射パネル供給熱量¹⁾の日変化を図10に示す。全体として井水取得熱量及び放射パネル供給熱量ともに2012年の方が2011年よりも少なくなっていること、時刻別にみたピークの値は12000kJ/h程度で両年とも変わらないが、2012年は各時刻の値が小さく深夜から早朝にかけてはほとんどゼロに出来ていること、などが読み取れる。

2年間のデータを比較すると、次のとおりである

- 1) 2011年 井水取得熱量： -151.0MJ/日
放射パネル供給熱量： -131.6MJ/日
- 2) 2012年 井水取得熱量： -113.5MJ/日
放射パネル供給熱量： -105.5MJ/日

両者の差は井水取得熱量で37.5MJ/日、放射パネル供給熱量で26.1MJ/日であり、2012年は2011年と比較して、各々24.8%、19.8%の減少となった。2012年は、地下水からの冷熱取得と放射パネルへの供給熱量を抑制する中で、室負荷がピークを迎える時間帯のPMVを効果的に制御できたと判断される。

5.2 地下水汲上げポンプ及び冷温水2次ポンプの消費電力の変化

夏季における地下水汲上げポンプ及び冷温水2次ポンプの消費電力の日変化を図11に示す。2012年の場合でも、現段階では汲上げポンプを停止できないシステムとなっているため、夜間から早朝にかけて一定の電力消費が存在するが、以下に示す日量で比較すると、2012年は2011年よりも67.7%のポンプ動力削減となっている。

- 1) 2011年 汲上げポンプ：22.9kWh/日、2次ポンプ：6.0kWh/日
- 2) 2012年 汲上げポンプ：7.2kWh/日、2次ポンプ：2.1kWh/日

5.3 外調機を含むシステム全体の消費電力の変化

各年の実験代表日を含む前後4日間（同一実験条件）について、外調機、地下水汲上げポンプ、冷温水2次ポンプに関する消費電力の平均値を求めたところ、次の様になった。

- 1) 2011年 汲上げポンプ：22.9kWh/日、2次ポンプ：6.2kWh/日
外調機：18.0kWh/日。計47.1kWh/日。
- 2) 2012年 汲上げポンプ：7.3kWh/日、2次ポンプ：2.3kWh/日
外調機：21.1kWh/日。計30.7kWh/日。

2012年は、外調機の消費電力が2011年より大きいにも係わらずシステム全体として34.8%の削減となった。

6. まとめ

既報告の地下水利用・天井放射空調システムを対象に改良工事を加え、その効果の把握を目的として夏季実験を実施した。研究成果

図8 夏季実験代表日におけるPMV時刻変化

図9 室内PMV分布

図10 井水取得熱量と放射パネル供給熱量の日変化

をまとめると次のとおり。

- 1) 実験室内の垂直温度分布, PMV の日変化, PMV の水平面分布を把握した結果, 改良前と比較して良好な温熱環境が形成されていることを確認した。
- 2) 地下水汲上げポンプと冷温水2次ポンプの流量制御を可能とし, 放射パネル供給熱量を低減させた結果, ポンプ消費電力は改良前の約3分の1に, また外調機を含むシステム全体の消費電力は約3分の2まで削減できることを明らかにした。

謝辞

本研究における研究装置の整備は, 文部科学省・私立大学戦略的研究基盤形成支援事業補助金「地域基盤を支える防災・環境問題の戦略的研究, 地球環境を考慮した次世代建築・住宅に関する研究プロジェクト」によるものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 垂水弘夫, 小林泰典, 桑原亮一, 岩瀬和夫, 岡崎俊春: 地下水利用・天井放射空調システムに関する実験的研究, PMV制御の導入による夏季室内温熱環境の改善効果を中心として, 日本建築学会, 技術報告集, 第19巻第42号, pp. 639~644, 2013. 6

図11 ポンプ消費電力の日変化

[2013年6月12日原稿受理 2013年8月21日採用決定]