温水パネルラジエーターの 輻射放熱量に関する測定と その考察

MEASUREMENT ON THE AMOUNT OF THERMAL RADIATION OF HOT WATER PANEL

吉野 博 ——*1
石川善美 ——*2
長友宗重 ——*3
佐々木耕一 ——*4

Hiroshi YOSHINO
Yoshimi ISHIKAWA
Muneshige NAGATOMO
Koichi SASAKI

The net thermal radiation of hot water panel was measured in accordance with the new measurement method using the radiant illumination meter, developed by Heating Machinery Society of Japan in 1987. The main results are shown as follows: (1) The ratio of radiation to total output of single panel and double panel are 20~30% and 11~14%, respectively, regardless of temperature difference between room air and hot water in panel. (2) the measured values are 0~20% greater than predicted values of thermal radiation based on Hottel's radiant theorem.

キーワード:

温水パネルラジエーター, 輻射放熱量, 輻射照度計, 輻射理論, 実験測定

Keywords:

Hot water panel, Thermal radiation, Radiant illumination meter, Radiant theorem, Experimental measurement

1 はじめに

パネルラジエーターの性能は、全放熱量を輻射成分と対流成分に分離して評価することが重要であるが、この種のデータは大変少ない。これまでの例では、サーモパイル型の輻射計を用いて温水パネルラジエーターの輻射放熱量を推定した斉藤ら¹⁾の研究と、さまざまな条件の下で電気ヒーターを内蔵したパネルラジエーターの輻射放熱量を各部の表面温度より求めた水野ら^{2),3)}の研究が貴重である。暖房機器工業会(放熱機器部会)は、木村ら⁴⁾の実験に基づいて輻射放熱量に関する新しい測定法⁵⁾を提案した。これは、輻射照度計を用いることによって、ある条件下では、パネルの輻射率やパネル表面の温度分布などには無関係に輻射放熱量を簡易に測定できる点に特徴がある。今回、この測定法を用いて、温水パネルラジエーターからの輻射放熱量と、全放熱量に対する輻射成分の割合を測定するとともに、その結果を輻射理論に基づいて行った簡易な計算結果と照合したので報告する。

2 試験装置の概要

2.1 試験室

パネルラジエーターの置かれる試験室を、室温制御の可能な空調実験室の中に設置した。試験室の断面図を図1に示す。大きさは、測定法に準拠して、床面積 18 cm^2 ($4.0\text{ m} \times 4.5\text{ m}$)、天井の高さ 2.2 m

とし、試験室の一方の側面は天井から下がり小壁を設けるだけとし、開放した。壁及び床、天井の構造は気密にして、その内面は灰色のつや消しペイントを施し平滑な仕上げとした。パネルラジエーターは、試験室開放側から見て正面の壁面中央に、壁から 3 cm 離し、パネル下端が床面上から 15.5 cm の高さに設置した。

2.2 試験体

試験体の対象としたパネルラジエーターは、パネルⅠ～パネルⅤの5種類で、それぞれ、パネルの数とフィンの有無及びその設置箇所が異なる。その構成を図2に示す。大きさは、パネルⅠが高さ $0.4\text{ m} \times$ 幅 1.0 m 、その他のパネルが $0.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ である。熱源は、電

図1 試験室断面図

*1 東北大学工学部建築学科 教授・工博

*2 東北工業大学工業意匠学科 教授・工博

*3 鹿島建設株式会社 専務・工博

*4 東北大学工学部建築学科 技官

*1 Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.

*2 Prof., Department of Industrial Design, Tohoku Institute of Technology, Dr. Eng.

*3 Senior Managing Director, Kajima Corp., Dr. Eng.

*4 Technical Officer, Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Univ.

気温水器による温水（温度調整器により 55～85℃の範囲で設定が可能である）である。配管系統は一次側と二次側の 2 系統用意し、熱交換器を介してパネルに二次側の温水を供給できるようにした。

3 測定方法と測定項目

測定方法は、輻射照度計を用いて、パネルラジエーターの前面に遮蔽板を設置した時と設置しない時の輻射照度を測定し、その差より、パネル表面からの輻射放熱量を求めるものである。ただし、この測定方法では、パネル以外からの輻射放熱量については、遮蔽板がある時とない時で、違いがないことを前提としている。詳細は文献⁴⁾を参照されたい。輻射照度計はパネルラジエーター中心より 60 cm 離し、その受照面はパネルに平行に設置した。遮蔽板は、合板(厚さ 2 mm)の間に発泡ポリスチレン板をはさんだもので、パネルより 10 cm 離して設置した。発泡ポリスチレン板の厚さは、十分な断熱性を有し、且つ、輻射照度計からみたパネルの形態係数と遮蔽板の形態係数の差ができるだけ小さくすべきであるとの観点から、2.5 cm とした⁴⁾。大きさはパネルラジエーターと同寸法、表面は周壁と同じ灰色のつや消しペイントを施し、平滑な仕上げとした。試験室の室温は、いずれの測定においても 18.5±2.5℃に制御した。測定項目は、室温、試験室各壁面の表面温度、開放側の表面温度（間仕切り壁温度）パネルラジエーター出入口の温水温度、パネル表面温度、温水の流量、試験室内の輻射温度である。温度の測定には 0.2 mmφ CC 熱電対、流量の測定には非接触ローター方式流量計（ベアリングレスフローメーター社製、E-50）、輻射温度の測定には輻射照度計⁴⁾（B & K 社製、Indoor Climate Analyzer, Type 1213, 以下「輻射計」と呼ぶ。）を用いた。データは、多点記録計とマイクロコンピュータによって 1 分間隔の瞬時値を自動集録した。

4 測定結果

4.1 温水流量と全放熱量の関係

輻射放熱量の測定に先だって、測定対象パネルの放熱特性を明らかにするため、温水流量と全放熱量の関係を調べた。測定条件としては、電気温水器の温水温度を 85℃、70℃、55℃の 3 種類、温水流量を 0.4～2.35 l/min と変化させた。結果の一例として、図 3 に、パネル II における流量と全放熱量の関係を示す。同じ温水温度のとき流量が少なくなると放熱量は小さくなる。また、流量が概ね 1.2 l/min 以上では、流量が増加しても放熱量の増加の程度は頭打ちとなる。この傾向は他のパネルでも同様であった。

4.2 輻射放熱量の測定結果

(1) 各部の温度変化

図 4 に、パネル II の輻射放熱量測定時における各部の温度変化を示す。測定条件は、電気温水器の温水温度が 85℃、流量が 1.2 l/min で、暖房システムと実験室の冷房は 5 日前からの継続運転である。温水器内部の温水温度は、8 時半～10 時の間、設定温度 85℃に対してやや高めで 88℃を示すが、一度、10 時頃にサーモスタットが作動して 82℃程度に降下する。パネル入口の温水温度は 72～76℃であり、温水器の温度変動に追随している。パネル出口は 57～60℃で、パネル入口温度との差は 13～15℃である。温水器の温度変動の影響はパネル出口ではかなり小さくなっている。輻射計パネル側の面（A 面）の輻射温度は、遮蔽板が設置された時、約 22℃、遮蔽板が

図2 測定対象とした5種類のパネルラジエーターの構成

図3 温水流量と全放熱量の関係

ない時、約 36℃である。輻射計のパネルと反対側の面（B 面）はほぼ 20℃で、室温と同様安定した変動を示している。パネル表面温度は、右側上部より温水が流入してくるため上部で 65～69℃と高く、下部で 57～60℃とやや低くなっている。遮蔽板を設置したときの遮蔽板 B 面側の表面温度は、熱伝導により 22～23℃に上昇する。しかし、表面での温度分布は小さい。周壁面温度では、パネル上部の壁 3 の面中央が 28℃と最も高く、次が天井面の 22℃である。他の周壁面は、開放側の間仕切り壁表面も含めてすべてほぼ 20℃で、いずれの壁面温度もほとんど変動がなく安定している。室内の空気温度は 19℃で上下の温度差はみられない。

(2) 全放熱量と輻射放熱量の測定結果

温水温度を前述の 3 種類、温水流量を 1.2 l/min 一定とした条件で、遮蔽板がない場合と遮蔽板を設置した場合の測定結果より、流

(1) 温水温度、輻射温度、温水流量の変動

(2) パネルラジエーターと遮蔽板表面温度の変動

(3) 試験室内の各壁表面温度の変動

(4) 試験室内空気温度等の変動

図4 輻射放熱量測定時における各部の温度変動
(パネルII, 温水温度 85°C)

量と各部温度が安定している 10 分間を抽出し、それぞれの測定値の平均値を用いて全放熱量と輻射放熱量を算出した。その結果を、すべてのパネルについて、温度差 $\Delta\theta$ (パネル内温水温度と室温との差) と単位面積当りの放熱量の関係でまとめると、図5に示す通りとなる。温度差 $\Delta\theta$ が大きくなると全放熱量は増加するが、その値はパネルIとパネルIIが最も大きく、パネルVが最も小さい結果となり、二重パネルと単板パネルの違いがあらわれている。いずれのパネルも、カタログの性能表示値は温度差 50°C と 32.5°C のときの全放熱量のみが示されているが、測定された値に沿って曲線を描けば、パネルIを除きカタログ値はその曲線にのる。測定結果はほぼ妥当であると言える。輻射放熱量は、パネルによる差が殆どなく、温度差 $\Delta\theta$ との関係は直線的である。すなわち、全放熱量の少ない単板パネルの方が、二重パネルより輻射放熱量の占める割合が大きくなることが推定される。図6は、その、全放熱量に対する輻射放熱量の割合を温度差 $\Delta\theta$ との関係で示したものである。輻射放熱量の割合は温度差の違いにかかわらず各パネルとも、それぞれ、ほぼ一定の値をとっていることが判る。5つのパネルの中では、パネルVが30%と最も大きく、パネルIVが20%と次に続いている。この2つのパネルは単板パネルであり、他の二重パネルの輻射放熱量の割合は15%以下となっている。パネルIIを基準とすれば、輻射放熱量の割合は、パネルIIIで約1.3倍、パネルIVで約2倍、パネルVで約3倍

図5 温度差(パネル内温水温度と室温との差)と全放熱量および
輻射放熱量との関係

図6 全放熱量に対する輻射放熱量の割合

図7 輻射放熱量の測定値と輻射理論に基づく計算値の照合

となる。

5 輻射理論に基づく計算値との照合

試験室を、異なる表面温度をもつ数個の面から成る閉鎖空間と仮定し、Hottelの輻射理論⁶⁾を適用してパネル表面からの輻射放熱量を推定した。総括輻射吸収係数を $\varepsilon_{i,j}$ 、それぞれの面の絶対温度を $T_k(k=1,2,\dots,n)$ とすると、最終的に i 面から放出される輻射量 q_i は、

$$q_i = \sigma_b \sum_{k=1}^n \varepsilon_{i,k} (T_i^4 - T_k^4)$$

と表わせる。但し、 σ_b はシュテファン・ボルツマンの定数である。試験室の計算モデル作成にあたって、パネル背後の壁3の面は、サーモカメラによる表面温度分布の測定結果に基づき、パネルを含め、4面に分割した。他の面にも温度分布は認められたが、それは最大でも 1°C と小さいので無視し、それぞれ中心点の温度で一樣と仮定した。なお、パネル表面の温度は上下左右4点の平均とした。図7に、すべての面の輻射率を0.95とした場合における各パネルの輻射放熱量について、測定値と計算値を示す。計算値は、パネルIIIの1例を除き、測定値より小さい値が得られた。その違いが最も大きいのはパネルIで、誤差は20%に達するが、その他のパネルは10%の誤差内に計算されている。なお、すべての面の輻射率を0.9とすると輻射放熱量の計算値はさらに5%減少した。

6 まとめ

(1) パネルラジエーターの全放熱量は、温度差(パネル内温水温度と室温との差)が大きくなると増加するが、その値は二重パネルで大きく、単板パネルで小さい結果となった。輻射放熱量も温度差が大きくなると増加するが、パネルによる違いが殆どなく、温度差と線形の関係が得られた。

(2) 輻射放熱量の割合は温度差の違いにかかわらず各パネルとも、それぞれ、ほぼ一定の値をとり、単板パネルで20~30%、二重

パネルで11~14%となった。また、フィンの有無では、フィンなしパネルの方がフィン付きパネルより大きい結果となった。

(3) 輻射放熱量の測定結果を輻射理論に基づく計算結果と照合した結果、すべての表面の輻射率を0.95としたとき、計算値は測定値より0~20%小さい値が得られた。

あとがき

本研究を実施するにあたっては、森永エンジニアリング(株)より多大なる御援助、御協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。なお、本論文は日本建築学会東北支部研究発表会⁷⁾、空気調和・衛生工学会学術講演会⁸⁾にて発表した内容を、修正・加筆したものである。

注1) パネルラジエーターと遮蔽板の大きさが同じ場合、輻射照度計から見た両者の形態係数は当然異なる。すなわち、遮蔽板を置くと、輻射照度計から見たとき、パネルの周囲部分が遮蔽板で隠されてしまう。さらに、パネル直上の壁表面は対流によって暖められているから、その一部分が遮蔽板で隠されると、輻射成分をより多く見積もってしまうことになる。したがって、遮蔽板の厚さについては、厚くすると誤差がますます大きくなるので、薄い方が望ましい。ただし、パネルと同じ大きさの遮蔽板を用いたときに生じる誤差を評価することが必要であるが、これは、今後の検討課題である。

一方、遮蔽板は十分な断熱性を持つ必要がある。今回の実験では、その両方を勘案して、遮蔽板に用いる断熱材の厚さを2.5 cmとした。なお、断熱材厚さを2.5 cm、5 cm、10 cmと変化させた場合の比較実験を行い、遮蔽板表裏の温度差に顕著な違いがみられないことを別途確認している。

注2) ここで用いた輻射照度計は、ISO 7730に準拠したもので、非対称性センサーにより反対方向の2面の平面輻射温度を同時に測定できるものである。センサー部は、透明ポリエチレンで半球状にカバーされた、金箔エレメントと黒色エレメントおよびサーモパイルからなっており、2つのエレメントに生じる電位差が輻射熱量の関数になることを利用して輻射温度を求めるものである。

参考文献

- 1) 園田 隆, 斎藤 武, 谷口 博: 高温水パネルの性能 (第1報), 空気調和・衛生工学会北海道支部, 第8回学術講演会論文集, pp. 7~8, 1974.1
- 2) 水野宏道, 加藤義弘: 輻射・対流形放熱器の放熱特性 (第11報), 平板形放熱器の放熱量(1), 空気調和・衛生工学学術講演会講演論文集, pp. 317~320, 1982.10
- 3) 水野宏道, 落合和也: 輻射・対流形放熱器の放熱特性 (第12報), 平板形放熱器の放熱量(2), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp. 321~324, 1982.10
- 4) 木村建一, 井上宇市, 田辺新一, 藤野健治, 秋元孝之, 伊藤 昭, 杉浦政二: ふく射パネルからのふく射放熱量の簡易測定法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 829~830, 1987.8
- 5) 暖房機器工業会・放熱機器部会: パネルラジエーターのふく射放熱量測定方法, 1987.8
- 6) 日本機械学会・ふく射伝熱研究分科会編: ふく射伝熱に関する最近の発展, 1966
- 7) 吉野 博, 長友宗重, 石川善美, 佐々木耕一: 温水パネルラジエーターの全放熱量と輻射放熱量に関する測定, 日本建築学会東北支部研究報告集, pp. 105~110, 1990.6
- 8) 石川善美, 長友宗重, 吉野 博: 温水パネルラジエーターの輻射放熱量に関する測定とその考察, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 17~20, 1990.10

[1995年6月30日原稿受理 95年8月25日採用決定]