

ヒートパイプ壁面暖房の開発 (第 1 報)

富田 和彦, 三上 正樹, 石井 慎二*

Development of Wallface Heating using Heat Pipes (Part I)

Kazuhiko TOMITA, Masaki MIKAMI
Shinji ISHII*

抄 録

ヒートパイプを利用した壁面暖房方式における壁表面温度分布の均一化を図るため、温水 2 箇所加熱方式を提案し、加熱部構造として 2 重管ループ式及び 3 重管式のヒートパイプを試作して熱輸送実験を行った。その結果、本提案の温水 2 箇所加熱方式は、壁表面温度分布の均一化に有効な手段であることが確認された。

1. はじめに

近年、住宅の高断熱、高气密化に伴い、快適性に優れた床暖房やパネルラジエータに代表される自然対流・放射型の温水式セントラル暖房方式が新築住宅を中心に急速な普及をみせている。本研究は、この自然対流・放射型暖房方式の一形態である室内壁を加熱面として利用するヒートパイプを活用した温水式壁面暖房を開発することにより、室内空間の有効活用、暖房環境の向上、暖房方式の多様化、またヒートパイプの用途開発を図ろうとするものである。この壁面暖房はパネルラジエータと同様、窓下のコールドドラフト防止や床暖房の施工が困難な場合、また体育館、病院、老人ホームなど壁面を加熱面として広く利用できる場合などの効果的な暖房方式と言える。

2. ヒートパイプ壁面暖房の特徴

壁面を温水を用いて加熱する場合、温水管を壁体内部

に直接埋設する方法が考えられるが、この方法では温水配管が長くなり、また曲りの箇所も多くなるためにシステム水量、送水抵抗が大きくなる。このためボイラ缶体、膨張タンク及び循環ポンプなどシステム全体の大型化につながるばかりでなく、室内の温度応答性に劣るなどの欠点が考えられる。さらに施工面や漏水事故による修復工事などにおいても技術的に難しい問題を抱えている。

これらの問題を解決する手段として熱輸送性や温度均一性に優れたヒートパイプの利用が考えられる。ヒートパイプ壁面暖房の仕組みは、壁体内部に温水配管の代わりにヒートパイプを埋設し、ヒートパイプの下端を温水により加熱する。これにより、温水からの熱はヒートパイプを媒体に壁面へと輸送され、壁面を均一に加熱し、室内に放射熱及び対流熱として放出する。このように、温水配管はヒートパイプ下端を加熱するのに必要な長さがあれば良く、水量を含めシステム全体を小さくすることができ、温度応答性にも優れた暖房システムを作ることが可能となる。また壁内部での漏水の心配がなく、厄介な空気抜き操作も容易となる。

* ㈱北海道フジクラ

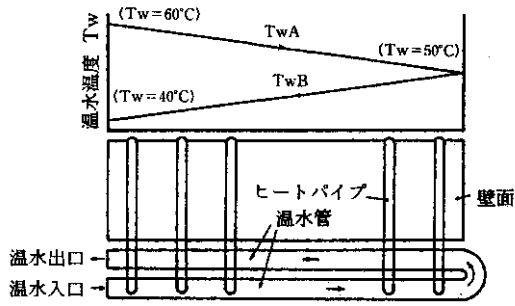


図1 ヒートパイプ壁面暖房の概念図

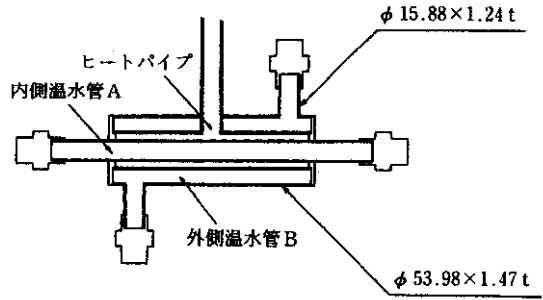


図2 3重管式ヒートパイプの加熱部構造

3. ヒートパイプの2箇所加熱

ヒートパイプは垂直温度分布の均一性には非常に優れているが、多数本のヒートパイプを用いて広い壁面を加熱する場合、放熱による温水温度の降下に従って各ヒートパイプの温度も低下する。このため温水流れ方向に温度降下のある壁面全体としては不均一な温度分布を示すことが予想される。この問題を解消する方法として、加熱壁面を細かく分割して温水入出の温度差を小さくする工夫が考えられるが、ヘッダー管の分岐数が多く、配管も長く複雑になる。そこで、本研究ではヒートパイプを2箇所から加熱する方式を提案し、これにより表面温度分布の均一化を図ろうとするものである。その概念を図1に示す。図に示すように各ヒートパイプを加熱する温水管を2本設け、この両温水管に壁面他端を境に温水を反対方向に流す。その間、温水温度は放熱に伴い温水管流れ方向に対し徐々に低下するため、温水入出口付近のヒートパイプは両温水管から温水温度差の最も大きな2箇所加熱が行われる。また他端のヒートパイプでは温水入出温度の中間程度の温水温度による加熱が行われ、途中のヒートパイプは各々2種類の異なる温水温度により加熱を受ける。その結果、各ヒートパイプを加熱する2種類の温水の平均温度は、温水管全体に渡って等しくなり、各ヒートパイプの熱流束は均等化され、壁面全体の表面温度分布が均一になるものと考えられる。

本研究では、ヒートパイプ壁面暖房の表面温度分布均一化を図る目的に、ヒートパイプ2箇所加熱による壁面暖房として実用可能な加熱部構造からなるヒートパイプを二種類設計試作し、これらの伝熱特性を試験した。

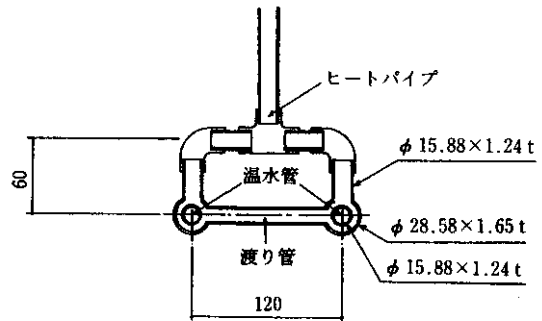


図3 2重管ループ式ヒートパイプの加熱部構造

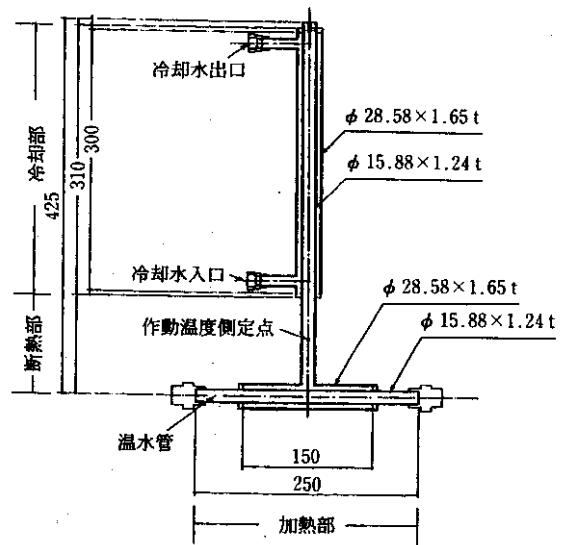


図4 2重管ヒートパイプ断面図

4. 実験装置及び方法

4.1 試作ヒートパイプ

試作したヒートパイプは、図2に示すように加熱部構造が3重管からなるヒートパイプ（以下、3重管式ヒートパイプ）

トパイプと呼ぶ。)と図3に示すように同じ2本の2重管を渡り管を用いて連結したループ構造のヒートパイプ(以下、2重管ループ式ヒートパイプと呼ぶ。)の2本である。また、この他に3重管式ヒートパイプのヒータ加熱実験などの代用として図4に示すような同寸法の2重管式ヒートパイプを併せて試作した。

3重管式ヒートパイプでは、作動液が封入されているヒートパイプを挟んで、内側温水管Aと外側温水管Bを温水が反対方向に流れることにより、内外の2箇所から加熱が行われる。また、2重管ループ式ヒートパイプでは、2本の2重管の内管に温水を流すことにより、外管のヒートパイプを加熱する構造になっている。

加熱部構造の伝熱特性を比較する目的から、3本の試作ヒートパイプの冷却部と断熱部は同じ構造とした。冷却部は2重管ジャケット構造とし、ここに冷水を流すことにより放熱させて熱輸送する。

ヒートパイプの主寸法は、加熱部長さが温水流れ方向

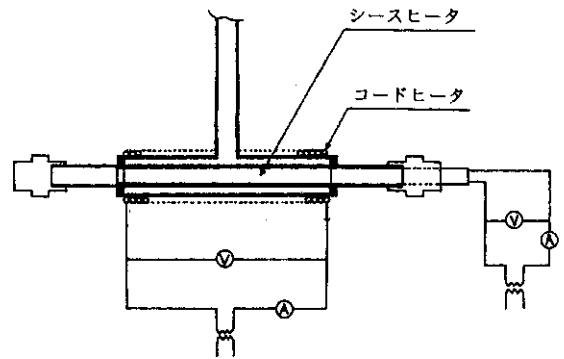


図5 ヒータ加熱実験装置略図 (2重管ヒートパイプ)

ヒートパイプを代用し、内加熱用として外径12.6mm、発熱長さ152.4mm、定格出力500Wのシースヒータを内側温水管内に挿入し、また外加熱用として外径2mm、長さ2m、定格出力225Wの2本のシリコン被覆コードヒータを外管に均一に巻きつけて加熱実験した(図5参照)。加熱条件は、内加熱量と外加熱量の合計が50W~350Wの範囲で、内と外の加熱割合を変化させた。また冷却は、冷水温度が11℃~14℃、冷水流量が1.7l/m~2.0l/mのほぼ同一条件で行った。

2重管ループ式ヒートパイプの加熱には、3重管式ヒートパイプで使用したものと同一シースヒータを2本用い、2本の温水管A、Bの内管に各々挿入し、同様な加熱条件及び冷却条件で実験した。

実験装置はいずれの加熱実験においても、断熱材を用いて十分に保温されている。温度測定は冷却水入出温度、断熱部中心位置が2点、この他参考値として2重管外管の表面温度を数点測定した。また、断熱部平均温度をヒートパイプの作動温度とした(図3参照)。

なお、全実験を通じヒートパイプの作動が定常状態に達したのを確認して測定を行った。

4.3 温水加熱実験

温水加熱実験では、前述のヒータ加熱実験で用いた電熱ヒータに変え、2台の恒温槽で設定温度に調節した2種類の温水を、3重管式ヒートパイプの内側温水管Aと外側温水管Bに、また2重管ループ式ヒートパイプの温水管A、Bに各々流し、定常状態下における作動温度と温水温度を測定した(図6参照)。

温水流量は5l/min、A、B両温水管に流す2種の温水温度は30℃~80℃とし、各々約10℃間隔の組み合わせ

表1 作動液の性質

| | | HCFC-123 |
|-----------|------------------|-----------------------------------|
| 化学名 | | 2,2-ジクロロ-1,1,1-トリフルオエタン |
| 化学式 | | CHCl ₂ CF ₃ |
| 分子量 | | 152.93 |
| 沸点 | °C | 27.5 |
| 密度 飽和液体 | g/m ³ | 0.54 |
| 25°C 飽和蒸気 | g/m ³ | 1.462 |
| 蒸発潜熱 | cal/g | 40.3 |
| オゾン破壊係数 | | 0.013~0.022 |
| 地球温暖化係数 | | 0.017~0.020 |

に150mm、冷却部長さ300mm、断熱部長さ100mmであり、管材料に銅管を使用した。また、作動液には代替フロンHCFC123(表1)を用い、3本のヒートパイプとも温水内管全体が作動液に丁度浸かる程度の量を封入した。

4.2 ヒータ加熱実験

試作したヒートパイプは熱輸送量が少なく、温水加熱実験からでは精度の高い測定が難しいため、電熱ヒータを用いた加熱実験により、ヒートパイプの伝熱特性を解析するために必要なヒートパイプ作動温度と熱輸送量(ヒータ加熱量)の関係を求めた。

3重管式ヒートパイプのヒータ加熱には、2重管式

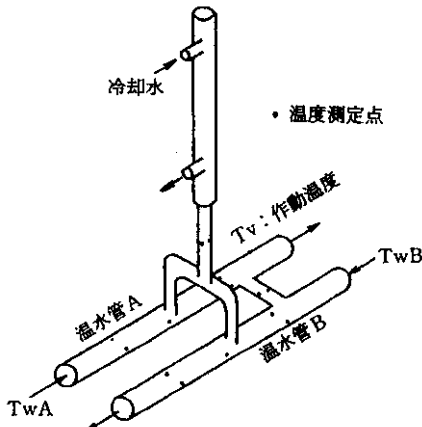


図6 温水加熱実験装置略図
(2重管ハーブ式ヒートパイプ)

でヒートパイプを加熱した。また、温水流量と作動温度の関係を見るため、2重管ループ式ヒートパイプを使用し、A、B両温水管に50℃の同一温度の温水を2.0 l/min ~ 11.5 l/minの流量範囲で流す加熱実験を行った。

温水A、Bの温度は、各々ヒートパイプ加熱部入出口の温度を測定し、その平均値を用いた。なお、その他の実験方法はすべて前述のヒータ加熱実験と同様に行った。

また、上記2種類のヒートパイプの伝熱性能を解析するための基本となる2重管式ヒートパイプについても、同様な温水加熱実験を行った。

5. 実験結果及び考察

5.1 熱輸送量と作動温度

図7に、2重管式ヒートパイプを内外両側からヒータ加熱した場合の外加熱割合 ($Q_A/Q \times 100$) と作動温度 T_v

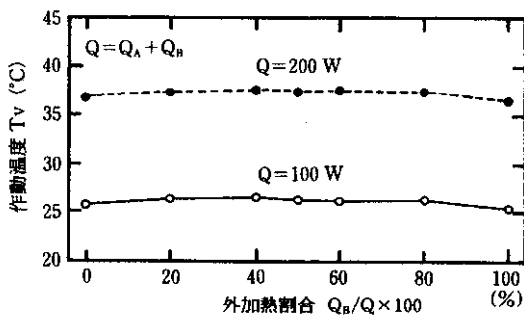


図7 加熱割合と作動温度の関係
(2重管式ヒートパイプ)

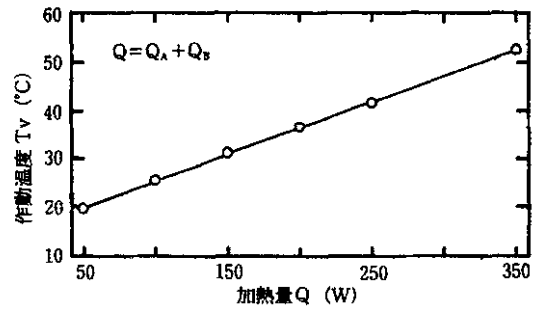


図8 加熱量と作動温度の関係
(2重管ヒートパイプ)

[°C]の関係を、合計値 ($Q[W] = Q_A + Q_B$) が100Wと200Wについてに示す。またヒートパイプ作動温度と熱輸送量の関係を図8に示す。ここに示す熱輸送量は内外の両加熱量の合計値 Q であり、作動温度 T_v はその合計値における加熱割合を変えて測定した時の平均値である。

これらの結果から、加熱量である熱輸送量と作動温度の関係は、内外の加熱割合には無関係であり、測定範囲内において加熱量の合計値とほぼ直線関係にあることが分かる。ここで、作動温度を与えて熱輸送量を求める式

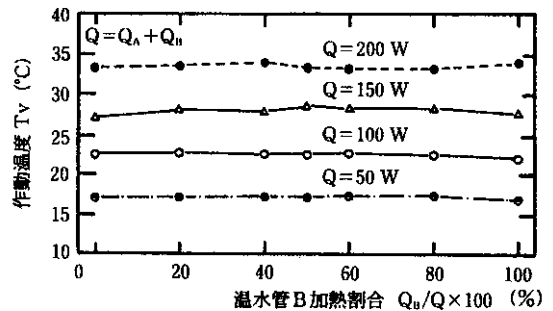


図9 加熱割合と作動温度の関係
(2重管ループ式ヒートパイプ)

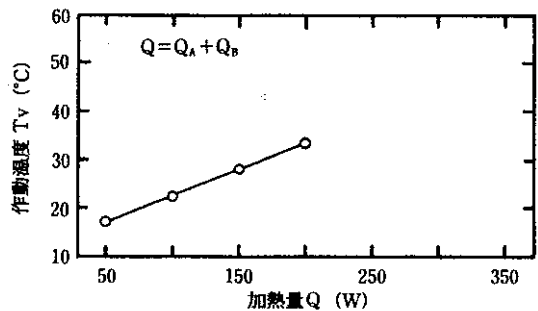


図10 加熱量と作動温度の関係
(2重管ハーブ式ヒートパイプ)

は、相関式 $Q = 9.09 \cdot T_v - 133$ で表わされる。

同様に、2重管ループ式ヒートパイプを用いたヒータ加熱実験の結果を図9、10に示す。これから、2重管式ヒートパイプと同様な結果を示すことが分かる。但し、作動温度と熱輸送の相関式は $Q = 9.09 \cdot T_v - 105$ で与えられる。

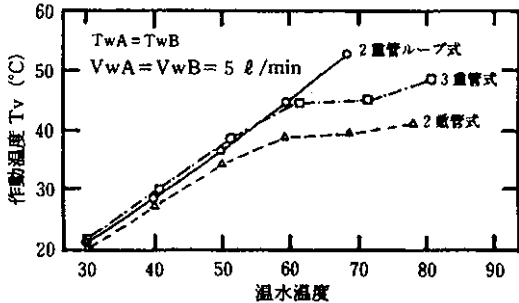


図11 温水温度と作動温度の関係

5.2 温水による加熱実験

5.2.1 同一温水温度による加熱

3重管式ヒートパイプ、2重管ループ式ヒートパイプ及び2重管式ヒートパイプを用いた温水加熱実験の結果を図11に示す。但し、3重管式及び2重管ループ式の場合は、各々温水管A、Bに同一温度の温水を流した場合の値であり、また流量は5l/mで3種のヒートパイプともに同一である。

これから、温水温度と作動温度の関係は、3種のヒートパイプともに、温水温度が増加すると作動温度も上昇することが分かるが、2重管ループ式では作動温度が温水温度70℃程度まで直線的に増加するのに対し、2重管式と3重管式では60℃程度を越えてもほとんど増加していないのが分かる。また、3重管式と2重管式を比較すると、同じ温水温度に対して3重管式の作動温度の方が2重管式のものより高い値を示している。その原因の一つとして、双方ともヒートパイプとしての構造上には違いはないが、温水による加熱方式が2重管式では内管からだけであるのに対し3重管式ではこれに外管からの加熱が加わるためであり、これら熱交換面積の差によるためと考えられる。但し、2重管式、2重管ループ式及び3重管式ヒートパイプの熱交換面積比率は1:2:2.84である。

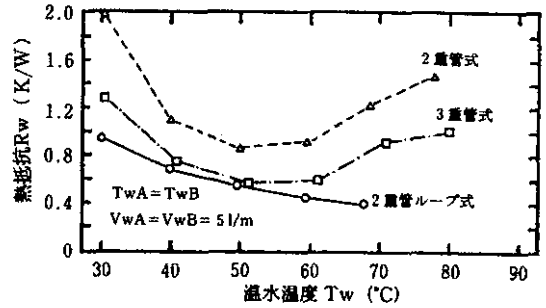


図12 温水温度の加熱部熱抵抗の関係

5.2.2 ヒートパイプの熱抵抗

上述のヒータ加熱実験及び温水加熱実験の結果に基づき、3重管式ヒートパイプ、2重管ループ式ヒートパイプ及び2重管式ヒートパイプの加熱部の熱伝達特性について、温水温度Twと加熱部熱抵抗Rw [K/W] の関係を用いて図12に示す。

ここで、熱抵抗Rは(1)式で与えられる。

$$R_w = \frac{T_w - T_v}{Q} \quad (1)$$

熱輸送量Q [W] は、ヒータ加熱実験から得られた相関式、3重管式と2重管式が $Q = 9.09 \cdot T_v - 133$ 、2重管ループ式では $Q = 9.09 \cdot T_v - 105$ 、を用いて算出した。

(1)式から分かるように、ここで定義した熱抵抗Rは、温水の対流熱伝達抵抗、温水管の熱伝導抵抗及び作動液の沸騰熱伝達抵抗を総括する。

図12から分かるように、2重管ループ式では温水温度の増加に伴い熱抵抗が減少する。一方、3重管式及び2重管式では温水温度50℃程度までは2重管ループ式と比較して大きな減少をみせるが、60℃を越えると反対に

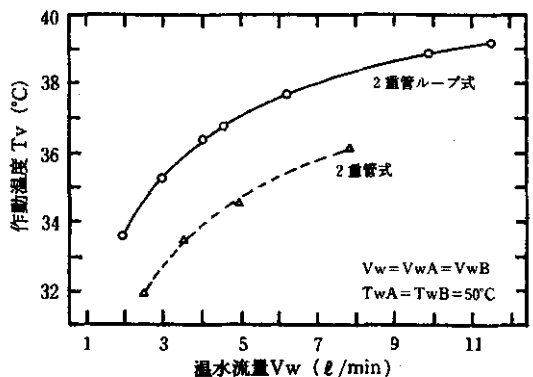


図13 温水流量と作動温度の関係

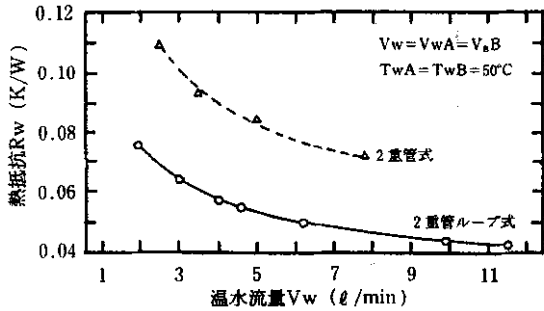


図14 温水流速と加熱部熱抵抗の関係

増加の傾向を示す。温水温度の上昇により温水の対流熱伝達抵抗と温水管の熱伝導抵抗は小さくなることを考えると、作動液の沸騰熱伝達抵抗が熱抵抗 R_w に大きく関与したためと思われる。今後、加熱部構造と熱抵抗の関係について詳細な実験解析を行い、これらの原因を明らかにする必要があると考えられる。

図13に温水流速と作動温度の関係、また図14に温水流速と熱抵抗の関係を示す。温水温度はともに 50°C である。

これから、両ヒートパイプともに流量が増加すると熱抵抗が減少し、また作動温度が増加するのが分かる。これは、流量の増加により温水の対流熱伝達抵抗が減少するためである。また、2重管ループ式の熱抵抗 R_w が2重管式よりも小さいのは、主として温水と作動液の熱交換面積の違いによるものと考えられる。

5.2.3 異種温水温度による加熱

3重管式ヒートパイプの内側温水管Aと外側温水管Bに、異なる温度の温水を流して加熱した場合の、外側温水管Bの温水温度割合 $T_{wB}/T_{wS} \times 100$ と作動温度 T_v の関係を、温水温度の和 $T_{wS} = T_{wA} + T_{wB}$ をパラメー

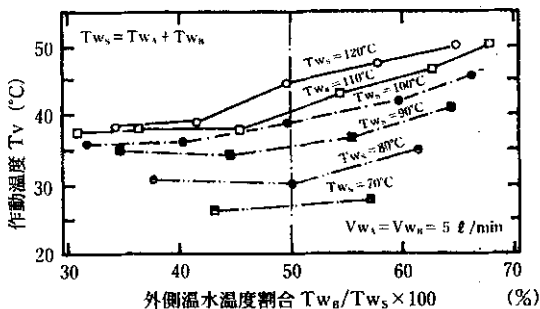


図15 温水温度割合と作動温度の関係 (3重管式ヒートパイプ)

タとして図15に示す。2重管ループ式ヒートパイプについては温水管A、Bが同一形状のため一方の温水温度 T_{wB} について $T_{wS} = T_{wA} + T_{wB}$ をパラメータに作動温度と温水温度割合 $T_{wB}/T_{wS} \times 100$ の関係を図16に示した。

3重管式ヒートパイプの場合、内側と外側の温水温度の和を等しくなるように流す際、内側の温水温度 T_A を高くするより外側の温水温度 T_B を高くする方が作動温度が高いことが分かる。また、2重管ループ式ヒートパイプについては、A、B両温水管に同一温度の温水を流すよりも異なる温度の温水を流す方が作動温度が高くなることが分かった。

5.3 壁面暖房の表面温度分布予測

一例として、2重管ループ式ヒートパイプを使った壁面暖房の表面温度分布の予測を、2重管式ヒートパイプの場合と比較する。

図1において、温水入口温度を 60°C 、温水出口温度を 40°C とし、他端の温水温度を 50°C と仮定する。この場合、温水入出付近のヒートパイプは、 60°C と 40°C の異なる温水温度から加熱される。この時の作動温度は、図16から温水温度割合60%と $T_{wS} = 100$ の交点約 39°C である。また、他端付近のヒートパイプは同様に温水温度割合50%であるから作動温度約 37°C となる。従って、この場合の壁面表面温度分布は、 39°C から 37°C 、温度差で約 2°C の範囲にあるものと予測される。

次に、2重管式ヒートパイプの場合を考える。温水は入口温度 60°C で入り、温水管を一方に流れ他端の出口から温度 40°C で排出すると仮定する。温水入口付近のヒートパイプ作動温度は図11から約 39°C 、出口付近の

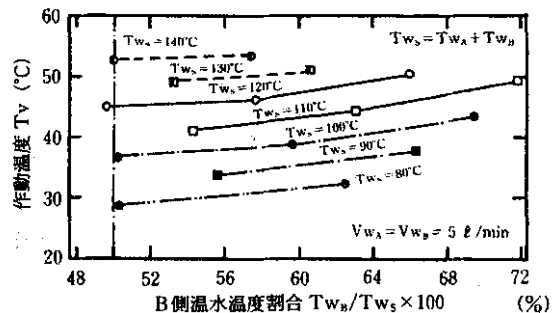


図16 温水温度割合と作動温度の関係 (2重管ループ式ヒートパイプ)

ヒートパイプでは 27.5℃となり、この場合の壁面表面温度分布の最大差は約 11.5℃となる。

以上のように、本研究で提案し、試作した 2 箇所加熱部構造をもつ 2 重管ループ式ヒートパイプあるいは 3 重管式ヒートパイプは、壁面暖房における壁表面温度の均一化を図る上で極めて有効な方式であることが確認された。

6. ま と め

ヒートパイプを利用した壁面暖房方式における壁表面温度分布の均一化を図る手段として、温水によるヒートパイプの 2 箇所加熱方式を提案し、その加熱部構造として 2 重管ループ式と 3 重管式の 2 種類のヒートパイプを設計試作し、ヒータ加熱及び温水加熱による熱輸送実験を行い、以下の結果が得られた。

1. 本提案の温水によるヒートパイプの 2 箇所加熱方式は、壁表面温度分布の均一化を図る上で有効な手段であることが確認された。
2. 熱輸送量と作動温度は、2 箇所からの加熱量割合には無関係であり、加熱室の合計値と直線関係を示した。3 重管式ヒートパイプは、 $Q=9.09 \cdot T_v - 133$ 、2 重管ループ式ヒートパイプは $Q=9.09 \cdot T_v - 105$ で与えられる。
3. 温水温度の増加に伴い作動温度は上昇するが、2 重管ループ式では温水温度 70℃程度までは直線的に増加するのに対し、3 重管式では 60℃程度を越えてもほとんど増加がみられなかった。
4. 2 重管ループ式は温水温度の増加に伴い加熱部の熱抵抗は減少するが、3 重管式では温水温度 50℃程度までは大きな減少をみせたが 60℃を越えると反対に増加の傾向を示した。
5. 3 重管式ヒートパイプにおいて、内管と外管に流す温水の温度の和が等しい場合、内管の温水温度を高くするより外管の温度を高くする方が作動温度が高い値を示した。また、2 重管ループ式ヒートパイプについては、2 本の温水管に同一温度の温水を流すよりも異なる温度の温水を流す方が高い作動温度を示した。

今後、これら 2 箇所加熱方式の加熱部構造と放熱部である壁面部を組合わせたヒートパイプ壁面暖房パネルを試作し、各種の性能試験を行う予定である。