

## 壁内中空層の自然換気による日射熱排除効果

## 第1報——中空層中に生ずる気流および熱流についての実測結果

本	間	宏 <sup>*1</sup>
溝	口	久 <sup>*2</sup>

暑熱気候下で中空層を自然換気することは、日射遮へいに有効な手段と考えられる。中空層内で熱を吸収した空気は浮力によって上昇気流となる。高さ 2.4 m, 厚さ 70 mm で両側面から熱を発生する中空層模型を作成し、上下端に種々の寸法のスリットを設けて、発生する気流とこの熱輸送効果を測定した。両側面で  $78 \text{ W/m}^2$  の発熱で、スリット幅 40 mm の場合、平均流速  $0.28 \text{ m/s}$ , 対流熱伝達率  $2.4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  であった。対流熱伝達率は発熱量によって変化するが、スリット幅や流速にはそれほど影響されなかった。鉛直中空層上下端に開口を設けて換気することによって、日射熱を外部へ効果的に放散できることがわかった。

## まえがき

建築の複層壁体内に存在する中空層および通気性断熱材料中の空気の流動が、その壁の伝熱特性へ与える影響に関してはいまだ研究資料が整っていないが、この影響を究明することは、建築空間の温熱環境調節技術に資するところが大きいように思われる。

従来からこの分野は寒冷地域における断熱上の問題点として指摘され、研究が続けられてきた。例えば繊維質断熱材中に生ずる鉛直方向の気流や断熱層内部に生ずる対流の伝熱特性に与える影響については、幾つかの研究成果が発表されている<sup>1),2)</sup>。また、密閉ないし半密閉の中空層の熱抵抗は壁の熱通過率計算のために確立されている<sup>3)</sup>。しかし、中空層中の鉛直方向の自然換気を暑熱気候下での日射遮へいに応用する技術に関しては、実施上の経験から伝統的手法として利用されているが、研究対象としては取り残されているため、より効果的な手法として発展しないばかりか、忘れ去られるおそれさえある。

換気を利用して日射熱を外部へ放散する技術としては、例えば茅葺き(かやぶき)屋根の多くの茎の間のすきま、真壁造りの土壁と下見板の間のすきま、屋根の防水

層保護のために上に敷かれる小石の間のすきまなどとして挙げられる。また外断熱に長い経験を持つ北欧では、断熱材を夏期の高湿から保護すること、および断熱材内に侵入する水分の除去のために、断熱層の上下端に開口を設けて外気につなぐように指示されている。

中空層へ流入する熱を浮力を利用した気流によって輸送する技術は、原理的にはトロンプ壁とも共通である。この分野では全体的な熱流・効率などの解析はよく進んでいる<sup>4),5)</sup>。しかし、側面と中空層内空気との熱交換、中空層内気流および温度分布などの細部に関しては、この分野においても資料は限られている。

本研究では、鉛直な壁または傾斜した屋根内の中空層の上下端に外部へ通じる開口を設けた場合、浮力による自然換気のために日射熱の建築内部への流入がどのように阻止され得るかを検討している。壁本体の外側へ仕上げ材を取り付け、その間隔に空気層を残す構造はよく行われるが、この壁に日射が入射する場合、外部の仕上げ材および中空層中の空気温が外気温より相当程度上昇することは経験的によく知られている。この日射によって温められた空気は外部の空気に対して浮力を得、中空層の自然換気の原因力となる。中空層中で日射熱を吸収した空気は上部開口から外部へ流出し、ここへより低温の外気が流入する。このため中空層中の空気温が低下すること、および外側の仕上げ材が裏面から冷却されること

\*1 豊橋技術科学大学建設工学系 正会員

\*2 静岡県庁都市住宅部

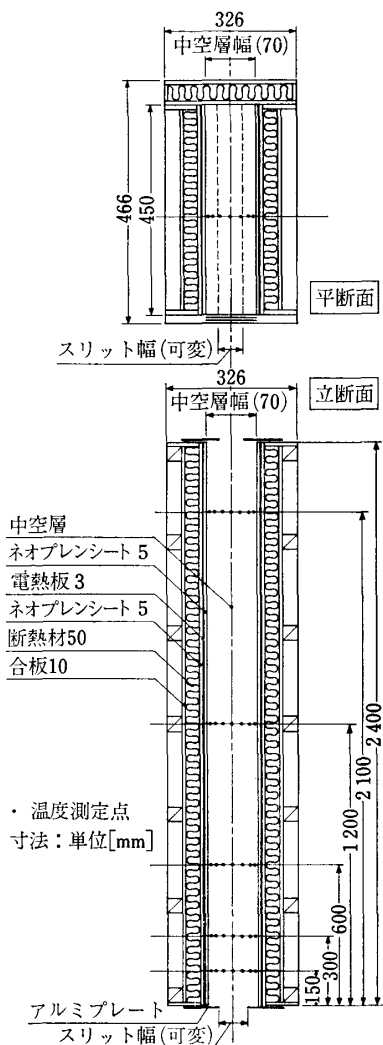


図-1 中空層自然換気実験装置

のため、仕上げ材から壁本体へ伝えられる対流伝熱および放射伝熱の両方が換気によって減少する。

このような換気による建物内部への流入熱の減少効果を検討するための基礎段階として、本研究では上下に開口のある鉛直中空層をその両側面または片面から加熱する場合の、気流および熱流の性質を実寸法模型によって観測した。

### 1. 中空層中に生ずる気流および温度分布実験装置

中空層内の熱流および気流を壁に垂直な鉛直面内における二次元流とみなせる場合について、中空層側壁と中空層内空気との熱交換、および鉛直方向に生ずる気流による熱移動を実験的に明らかにするために、次のような模型実験を行った<sup>6)</sup>。

実験装置の寸法は、縮尺模型とした場合の熱流および気流の相似則の両方を同時に満足させることの困難さ、小型である場合、温度測定および流速測定のためのセン

サの設置位置の精度やセンサを配置することによる自然な気流および熱流が妨げられること、などが予想された。このため、実験のための模型は高さ方向の寸法が2.4 mのほぼ建物の階高1階分に相当する高さとした。

模型は、基本的には高さ2.4 m、幅0.45 mの加熱平板2枚を対向させた間の空間を壁内中空層とみなすようにした。自然換気による日射熱遮へいを効果的に行うためには、予備実験から中空層厚さが50~70 mm必要であることが予測されたので、模型の幅は中空層厚さの6~9倍の450 mmとした<sup>7)</sup>。模型の水平断面および鉛直断面を図-1に示す。加熱平板の構成は、カーボングラファイト電導体をエポキシ樹脂で絶縁した平板型電熱面の両面を厚さ5 mmのネオプレンゴムシートで覆い、その外側のうち、中空層側となる面へはステンレスフォイルを貼付し、放射熱交換を防止した。この反対側の面は厚さ50 mmの発泡ポリスチレン板で断熱し、さらに外側を厚さ10 mmの合板および木製骨組みで補強した。このような加熱平板2枚を中空層厚さとなる間隔において対向させ、両端部分に支持材を取り付けて固定した。間隔は任意に設定できるようにした。端面のうち片方は合板と厚さ50 mm発泡ポリスチレンによる断熱面とし、他の面は観測用に透明板を用いた。透明板は間に厚さ5 mmの空気層を設けた厚さ5 mmの2枚の亚克力樹脂板で、熱伝導の低下を図った。発熱板の両面のネオプレン板はできるだけ等しい厚さのもの2枚を選び、この2枚の熱抵抗は均等とみなした。発熱板で発生する熱量は中空層側へ流れる熱量と断熱材側へ流れる熱量とに、両面のネオプレン板に生ずる温度差に比例して分配されるとみなして、両方向への熱量を計算した。温度測定点は基部から高さ150, 300, 600, 1200, 2100 mmの各位置に設けた。各高さにおける温度測定点は、中空層内部7箇所と4枚のネオプレン板の両面計8箇所とした。空気温測定のためには銅-コンスタンタン熱電対 $\phi 0.3$  mmのものをを用い、測定用接点部から約40 mm(直径の130倍)の被覆は取り去って水平に設置し、同温度の空気に接触するようにした。加熱平板内に埋め込んだ熱電対は上記と同じものを使用した。埋込み部分は素線をロールして幅約0.8 mm、厚さ約0.1 mmに伸ばして表面の平滑化、各層の接触の向上を図った。

実際の建築壁体では中空層の空気流路の途中に外部仕上げ材の支持部材が存在し、気流の障害となる。気流に対する中空層の寸法・形状の影響を調べるため、本実験では中空層の底面および頂面へ壁面に平行なスリットを設け、スリット寸法を変化させて障害物の影響の代わりとした。

熱電対による温度測定は、各熱電対を金接点のメカニ

表-1 使用機器

温度測定	熱電対：銅-コンスタンタン $\phi 0.3\text{ mm}$ デジタル電圧計：タケダ理研 TR-6841 （パラレルデータ出力ユニット TR-1150 を介してコンピュータへ接続） 多点継電装置：金めっき，メカニカルリレー（オムロン G2V2）を用いて自作 制御・処理・記録装置：パーソナルコンピュータ Sharp MZ-80 B
気流速測定	定温度熱線微風速計：日本科学工業製 CTA アネモメーター Model 1011 リニアライザー Model 1013 温度補償器 Model 1020 RMS ボルトメーター Model 1021 DC ボルトメーター Model 1008
電力測定	積算電力計：三菱電機製 MF-80 電圧計：タケダ理研 TR-6841 電流計：タケダ理研 TR-6841
電熱板	カーボングラファイト電導体：日本バイオニクス製 X-1486 型 寸法：400×800 mm，厚さ 3 mm，エポキシ樹脂絶縁 6 枚 AC 100 V，負荷時の消費電力 422 W (1 300 W/m <sup>2</sup> ) 電圧変圧器：東芝製スライダック SK-110 型

カルリレーを介して順次分解能  $1\text{ }\mu\text{V}$  のデジタル電圧計によって行った。温度測定点は実験模型内部合計 75 点のほかに実験室内の高さ別空気温度 5 点であったが，これらの測定制御はマイクロコンピュータによって行い，全点の測定に約 40 秒を要した。

中空層内の気流速の測定は感応部に直径  $5\text{ }\mu\text{m}$ ，長さ  $1\text{ mm}$  のタングステン線を用いた定温度型熱線微風速計によって行った。この測定に用いたプローブは，あらかじめ測定範囲内の風速について既知の速度の水平気流中で流速と電圧出力の関係を求めたものを使用した<sup>9)</sup>。さらに，この熱線微風速計は水平気流・鉛直上向きおよび下向き気流を発生する装置によって，上向き気流の場合について流速と電圧出力の関係を補正し，流速を求めた。流速測定は高さ 250, 550, 1 150 および 2 050 mm の位置で，中空層の厚さ方向へは温度測定点と等しい位置（中空層厚さ 70 mm の場合，一方の加熱面から 5, 10, 20, 35, 50, 60, 65 mm の位置）に透明板を取り付けた端面から流速測定プローブを挿入して行った。流速測定時の温度補正は熱線流速計の温度補償ユニットによって行い，温度補償用プローブは流速測定点と温度が等しく，かつ流速測定点の流れの障害にならない位置を選んで設置した。

## 2. 測定方法

本実験装置は，豊橋技術科学大学の建築環境実験室内に設置した。この実験室は床面積  $45\text{ m}^2$  で前室付き出入口と  $0.6\text{ m}^2$  の二重気密窓があり，壁はガラスウール 100 mm の断熱が施されている。実験期間中の平均室温は

$16\sim 19^{\circ}\text{C}$  で，床上 5 cm から天井下 5 cm の間で上下温度差は  $1^{\circ}\text{C}$  以下であった。

実験は次のような手順で行った。最初に上下のスリット幅を設定した後，必要な発熱量となるように電熱板へ与える電圧を電圧変圧器によって調節した。模型は熱容量が小さいため約 2 時間で熱的に定常状態になった。この後，温度測定は 5 分間隔で 4 回行い，4 回の平均値を測定値とした。この測定はマイクロコンピュータで自動的に行われ，その間，流速測定を行った。流速測定は熱線微風速計の時定数を 1 秒に設定し，各測定点で 5 秒間隔で 15 回の読み取りを行い，その平均値を測定値とした。測定中の電熱板への電力供給は交流電圧計と電流計による測定と積算電力計とを併用した。本実験に使用した測定機器を表-1に示す。

本実験では，発熱板の単位面積あたり発熱量が均等になるように供給電力を調節した。このため模型下部では中空層側への発熱量が大きく，断熱材側への熱損失は小さくなり，上部ではこの関係が逆になった。この結果，図-23に示すように高さ 150 mm の測定点では中空層への発熱量は平均値より約 10% 大きく，高さ 600 mm ないし 1 200 mm ではほぼ平均値に等しく，高さ 2 100 mm では平均より約 5% 小さくなった。

## 3. 測定結果

中空層厚さを 70 mm に設定し，上下端のスリット幅を種々の寸法に変えた場合の気流速および中空層内温度分布の測定を行った。加熱方法は両面均等加熱，両面非均等加熱および片面加熱の 3 種類とした。加熱面から

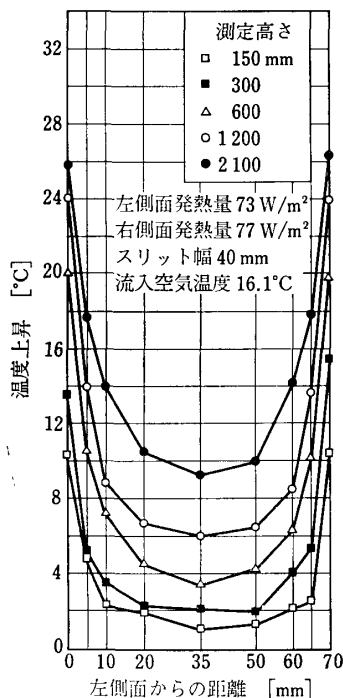


図-2 測定高さ別温度上昇

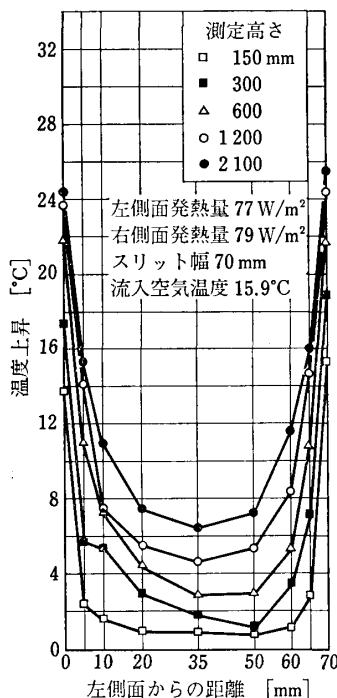


図-3 測定高さ別温度上昇

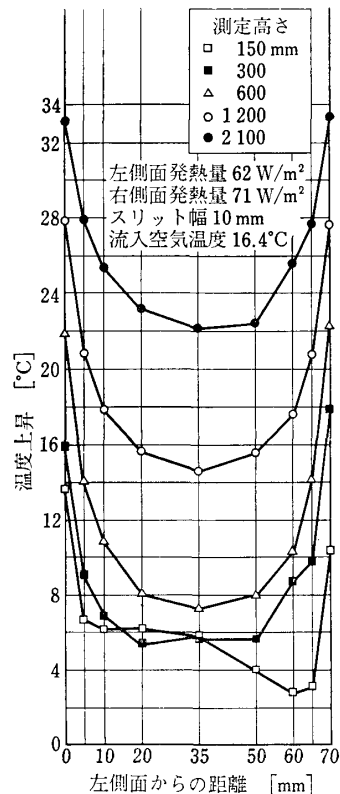


図-4 測定高さ別温度上昇

中空層への熱流束は0から144 W/m<sup>2</sup>の間で数段階に変化させて測定を行った。熱流束100 W/m<sup>2</sup>は、例えば薄い鋼板(放射吸収率0.9)の外表面に1000 W/m<sup>2</sup>の日射熱が入射し、このときの外表面総合熱伝達率20 W/(m<sup>2</sup>・K)、中空層側表面の対流熱伝達率3 W/(m<sup>2</sup>・K)、放射熱伝達率4.8 W/(m<sup>2</sup>・K)の場合、中空層側へ対流によって伝達される熱量に相当する。

図-2は、上下のスリット幅を40 mmとし、発熱量を左側面73 W/m<sup>2</sup>、右側面77 W/m<sup>2</sup>とほぼ均等としたときの各測定高さ別の表面温度、および空気温度の流入空気温度よりの上昇分の分布を示す。空気温度は発熱のある両側面近傍で高く、中心付近で低い分布を示した。中心線上の気温は測定位置が高くなるにつれて上昇し、底面から150 mmの高さでは約1°Cの上昇であったが、2100 mmの高さでは約10°C上昇した。側面の表面温度は高さ150 mmで流入空気温度より約10°C高いのみであったが、高さ2100 mmでは約26°C高くなった。このように中空層内で空気は両側面から熱を吸収しながら上向きに流れるため、上部ほど高い温度となる。

図-3は、発熱量が左側面で77 W/m<sup>2</sup>、右側面で79 W/m<sup>2</sup>とほぼ等しく、上下端を全開(スリット70 mm)として測定した結果である。中心部の空気温度上昇は高さ150 mmで0.8°C、高さ2100 mmで6.5°Cであった。

図-4は、発熱量を左側面62 W/m<sup>2</sup>、右側面71 W/m<sup>2</sup>

とし、上下のスリット幅を10 mmとして測定した値である。中心線上の空気温度の上昇は高さ150 mmで6°C、高さ2100 mmで22°Cであった。このように中空層中の空気温度は発熱量がほぼ等しい場合、スリット幅の増大とともに低下し、これに伴って両側面の温度低下も顕著であった。

図-5は、発熱量が左側面77 W/m<sup>2</sup>、右側面79 W/m<sup>2</sup>の場合で、高さ1200 mmの測定位置の表面温度および空気温度の流入空気温度からの上昇分をスリット幅ごとに示したものである。また図-6は発熱量が左側面40 W/m<sup>2</sup>、右側面39 W/m<sup>2</sup>の場合であり、図-7は発熱量左側面9 W/m<sup>2</sup>、右側面11 W/m<sup>2</sup>の場合のスリット幅別温度上昇分を示す。温度上昇はスリット幅が小さいほど高いが、特にスリット幅10 mmと20 mmの間で大きな差が生じた。中央部の空気温度はスリット幅の増大とともに大きく低下するが、両側面の表面温度は中央付近の低下分のほぼ1/2の低下であった。これは側面に真近の空気層は中央部の流速のいかにかわらず、ほとんど流動しないためであると思われる。

図-8,9,10は、それぞれ図-5,6,7の場合と同じ実験中に得られた測定高さ1150 mmにおける流速分布である。スリット幅が増大するにつれて、流速が最大となる位置は中空層の中央寄りに移動していた。スリット幅50 mm以上では側面から10 mmの測定点における流速

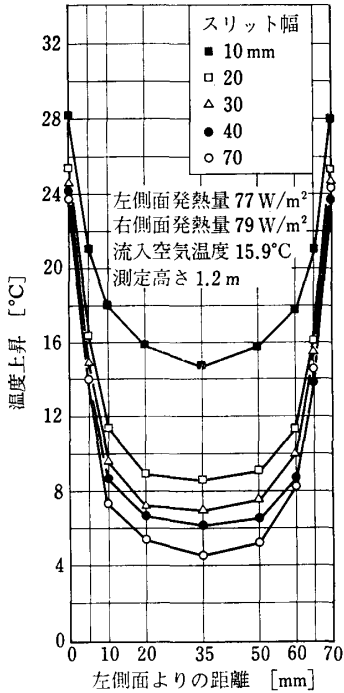


図-5 スリット幅別温度上昇

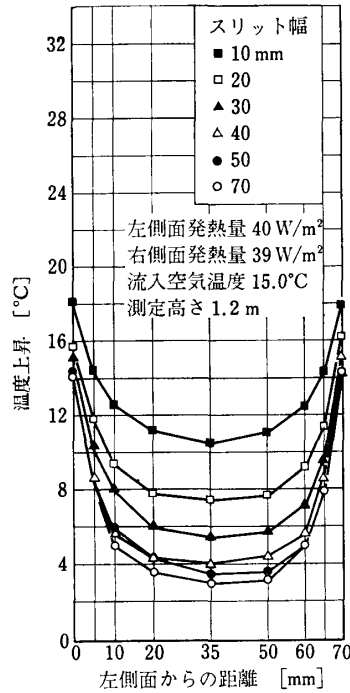


図-6 スリット幅別温度上昇

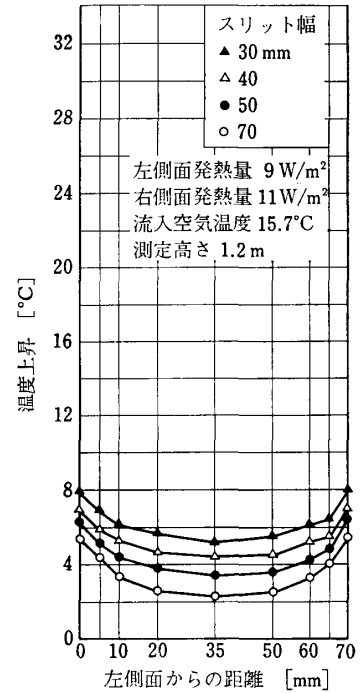


図-7 スリット幅別温度上昇

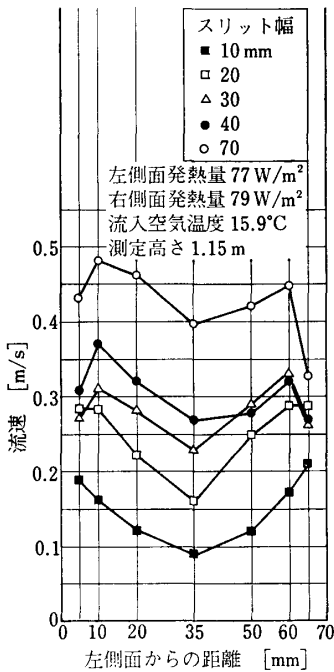


図-8 スリット幅別  
流速分布

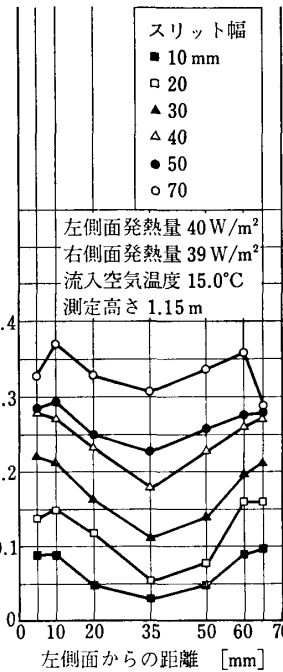


図-9 スリット幅別  
流速分布

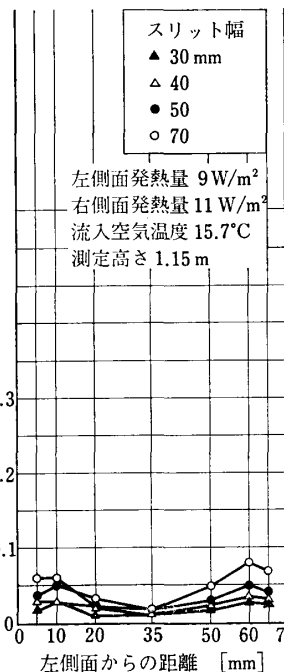


図-10 スリット幅別  
流速分布

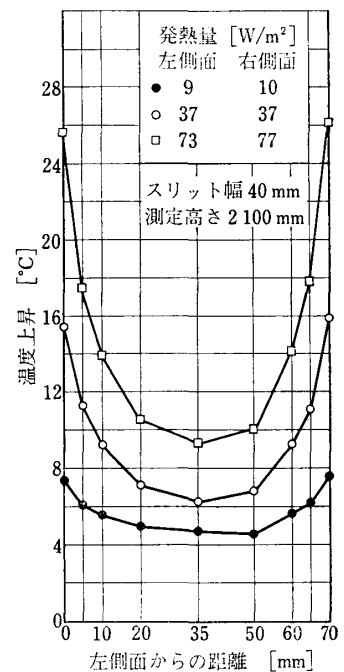


図-11 発熱量別温度上昇

が最大値を示した。スリット幅 10 mm の場合、発熱量が左右それぞれ 77 および 79 W/m<sup>2</sup> (図-8) では平均流速 0.13 m/s で、中央部と側部の差はあまり大きくなかったが、スリット幅が 20~50 mm では側部の流速は大きく上昇したが中央部の流速上昇は側部ほどでなく、中央の凹な分布形となった。スリット幅 40 mm の場合、平均流速は 0.28 m/s であった。スリット幅 70 mm では

中央部の流速が著しく上昇し、側部との差が縮まり、平均流速は 0.40 m/s に達した。このような流速分布は、両側面付近でそれぞれ独立に生ずる自然対流の速度境界層が二つ狭い間隔で対向して存在するため、中央付近では空気粘性による気流が誘引される結果生ずるものと思われる。空気の熱伝導率の低さのため中央部付近の浮力は側面付近より弱く、中央に谷を生じている。中間的

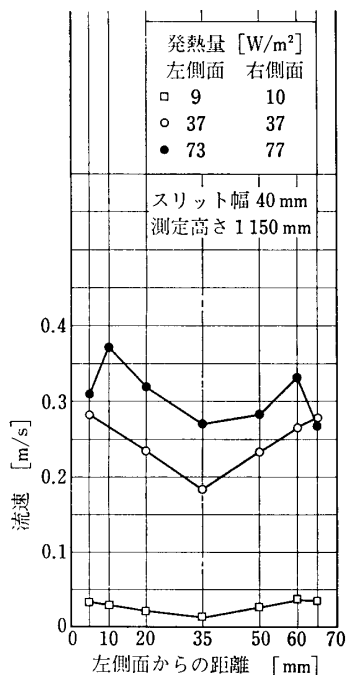


図-12 発熱量別流速分布

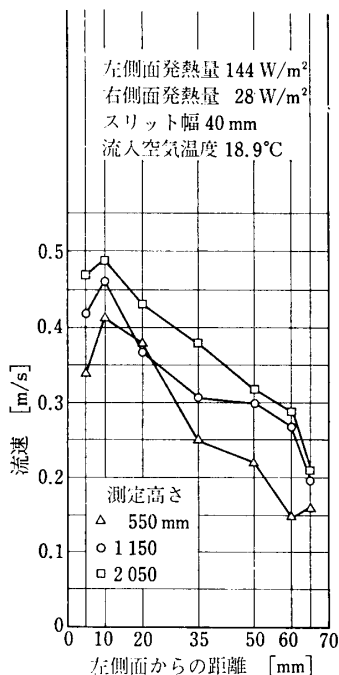


図-13 非対称発熱時の流速分布

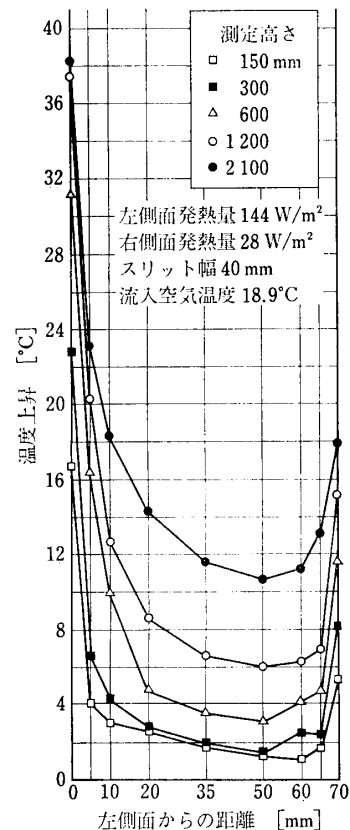


図-14 非対称発熱時の温度上昇

発熱量である図-9の場合にもこの傾向は明白に表れたが、発熱量の小さい図-10の場合にはスリット幅増大による空気温度の低下は明白であったが、流速の差はそれほど明確ではなかった。

これらのことから、流速が小さい場合、流出入口で速度の2乗に比例する動圧損失、形状抵抗はあまり大きな役割を果たさず、側面との摩擦抵抗によって流速分布が支配されるのに対し、発熱量が大きくなると摩擦抵抗に比較して動圧損失が大きな影響力をもつようになり、スリット幅による流速の差が明確になるものと思われる。

図-11は、上述の側面の発熱量が左右ほぼ均等で、3段階に変化した場合の実験結果から、スリット幅40mmの場合の高さ2100mmにおける側面および空気温度の流入空気温度からの上昇分の比較である。また図-12は、この場合の高さ1150mmにおける流速分布である。発熱量の左右の平均が10 W/m²の場合、流速の平均値は0.03 m/sで、側面付近と中央部との差も小さくなった。側面の発熱量が増加すると流速は増大したが、このとき側面近傍の流速が著しく増大し、中央部との差が大きくなった。発熱量の増大とともに側面およびその近傍の空気温度の上昇が顕著であったが、中央付近の空気温度の上昇は表面温度の上昇の1/3以下に抑えられた。これら2図から、流速が遅い場合、水平方向の空気

の熱伝導によって側部と中央部の温度差が小さくなるが、流速が増大すると熱伝導よりも上向き気流による熱輸送効果の中空層内空気温度に大きく影響し、側部と中央部との差が大きくなるものと思われる。平均発熱量10 W/m²の場合、高さ2100mmにおける空気温度上昇分の平均値は5.4°Cであったが、平均発熱量78 W/m²の場合、この値は13.2°Cとなり、発熱量の増加に比較して中空層内空気温度の上昇は低く抑えられていることがわかった。

実際の中空層換気時によく生ずる両側面から中空層への伝達熱量が非対称の状態における実験結果は、次のようであった。図-13は、左側面発熱量144 W/m²、右側面発熱量28 W/m²、スリット幅40mmの場合の、高さ550, 1150, 2050mmにおける流速分布である。どの高さにおいても左側面より10mmの測定点における流速が最大値を示し、この位置より右側ではほぼ直線的に流速が低下していた。この実験では高さ550mmにおける平均流速は0.26 m/s、高さ1150mmでは同じく0.31 m/s、2050mmでは0.34 m/sであった。流れが断面内で十分発達した二次元流になっている場合、両側面の発熱量と高さ2100mmにおける温度分布の測定値から計算すると、平均流速は0.29 m/sとなるはずである。このような平均流速の高さによる誤差のうち、どれだけが

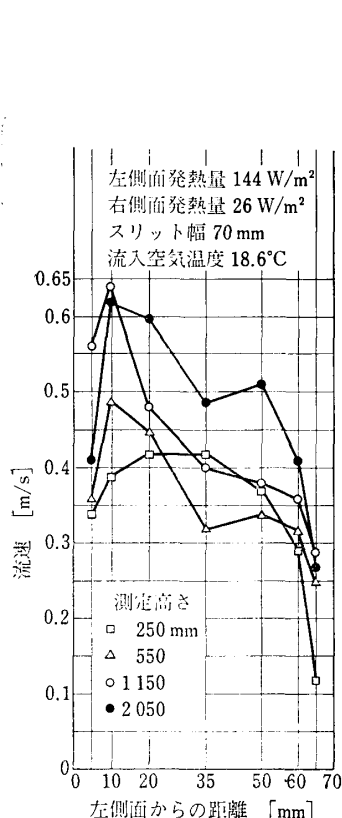


図-15 非対称発熱時の流速分布

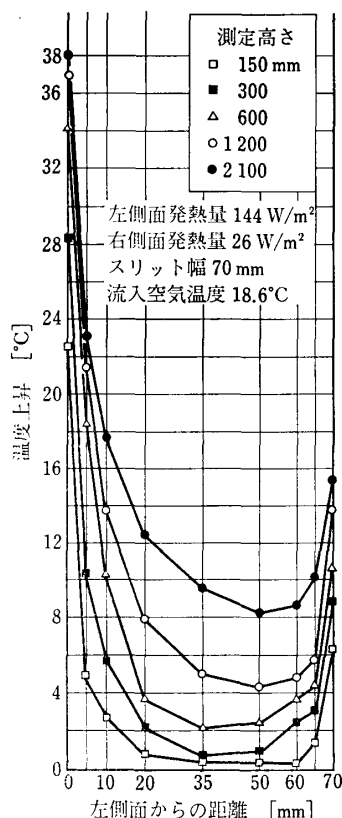


図-16 非対称発熱時の温度上昇

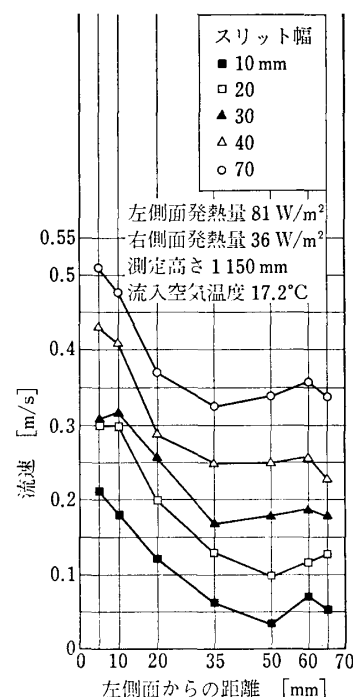


図-17 非対称発熱時のスリット幅別流速分布

測定技術によるもので、どれだけが流れを二次元流と仮定することに無理があるためかは本研究では検討できなかった。図-14は、この場合の各測定高さにおける温度の流入空気温度からの上昇分を示す。空気温度が最低となる位置は中央より発熱量の低い側に移っている。最下部測定位置における温度分布は中央の平坦部が広いことと、右側の温度が側面付近まで低いままであることに特徴がある。また、下から2番目の測定位置では右側面より10 mmの温度が5 mmの温度よりもやや高くなった。このような傾向は、非対称発熱の場合に、例えば図-4でも見られ、さらに図-3のように発熱量が左右ほぼ対称の場合にも生ずることがあった。これは、スリットは中央にあるが、両側面に添う上昇気流が左右不均等のためスリット直後に生ずる渦が左右不均等になったためと思われる。また下部の温度分布で平坦部分が広い理由として、スリット直後で流入した空気が中空層幅全体に拡大するか、または側面近くに渦ができ、逆流部が生じていることを示すものと思われる。

図-15は、発熱量が左側面  $144 \text{ W/m}^2$ 、右側面  $26 \text{ W/m}^2$  でスリット幅を70 mmに拡大した場合の、高さ250, 550, 1150, 2050 mmにおける流速分布の測定結果である。最下部測定位置における流速分布のみは中高の形となったが、これは流入口に近いため助走区間の影響を示

すものと思われる。高さ550 mm以上での測定結果はどれも左側面より10 mmと右側面より25 mmの測定位置の2箇所に頂点を持ち、中央に谷を持つ分布形であった。高さ250 mmでは流入空気の慣性力の影響が流速分布に表れているのに対し、高さ550 mm以上ではこの影響は消滅し、自然対流の速度境界層のような速度分布であった。高さ550 mm以上で慣性の影響は中空層幅全体に拡散して消滅し、新たに自然対流の速度境界層的な流れが発達するものと思われる。この現象は両側面を均等に発熱させた場合にも観察された。高さ1150 mmにおける平均流速は  $0.41 \text{ m/s}$  で、両側面等発熱量  $78 \text{ W/m}^2$  の場合の  $0.40 \text{ m/s}$  よりやや大きな値が得られた。図-16はこの場合の高さ別温度上昇分の分布である。測定高さ300 mmにおいて低温部分が広い、底が平坦な形になり、それ以上では底がややとがった形となることも、慣性の拡散や隅角での渦の存在を示すものと思われる。

図-17は、発熱量を左側面  $81 \text{ W/m}^2$ 、右側面  $36 \text{ W/m}^2$  に保ち、スリット幅を変化させた場合の高さ1150 mmにおける流速分布を示す。両側面近傍を除いて流速が最低値を示す位置は、スリット幅10 mmの場合、右側面から20 mmの測定位置であったが、スリット幅の拡大に伴ってこの位置は中央寄りに移動した。図-18は

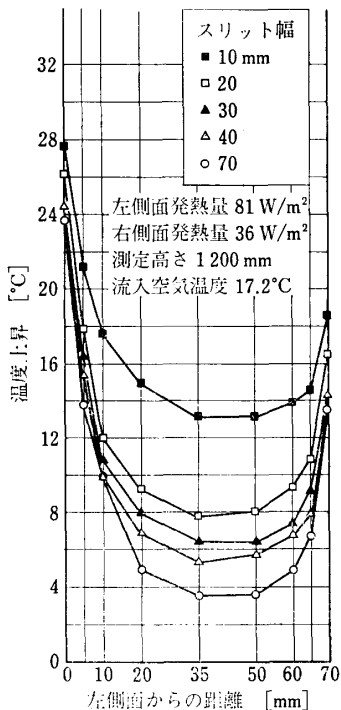


図-18 非対称発熱時のスリット幅別温度上昇

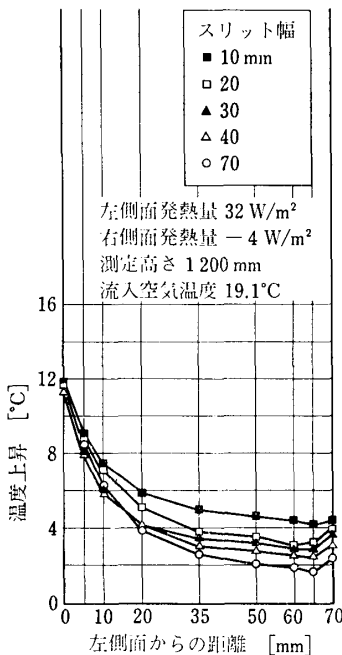


図-19 片面発熱時のスリット幅別温度上昇

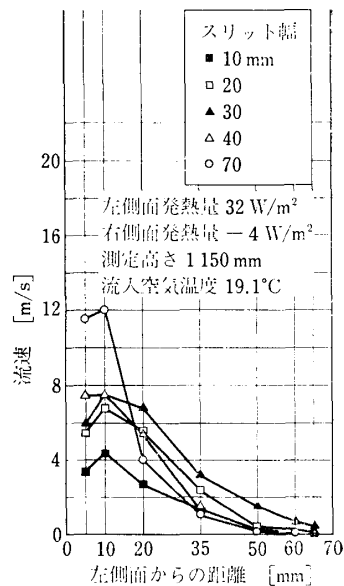


図-20 片面発熱時のスリット幅別流速分布

この条件における温度上昇分の分布である。スリット幅が 10 mm と 20 mm の間で温度上昇に大きな差が生じたが、20 mm 以上では温度分布はほぼ平行に低下した。このことは、スリット幅 20 mm 以上の場合、発熱量に左右で差があるにもかかわらず、左右側面付近に生ずる浮力の釣合いもほぼ同じように変化することを示した。速度分布はスリット幅が増加すると遅かった右側の気流が増加し、左右の差が縮まった。気流を生じさせる浮力に対して、抵抗力として両側における摩擦力と流出入口における形状損失が考えられる。これらの力の均衡がスリット幅の変化に伴って崩れ、このような気流分布形状の変化を生じさせるものと思われる。

左側面へのみ電力供給を行い、右側面へは供給しなかった場合の実験では次のような結果となった。図-19 は、左側面の発熱量を  $32 \text{ W/m}^2$  とし、スリット幅を 10～70 mm と変化させた場合の、高さ 1200 mm における温度上昇分の変化を示す。片面のみの発熱の場合、右側面の熱流測定用ネオプレンシートには見掛け上、負の発熱、つまり熱が左から右へ流れる結果となった。中空層内の空気温度の上昇によって、右側面より、左側面の発熱量の 10% 程度が伝導によって失われた。さらに放射熱伝達防止のため、中空層両側面にはステンレスフォイルを貼付してあるが、これを完全には防止できなかった。このため片側発熱の場合、右側面の表面温度は、この表面から 5 mm の点の空気温度より約  $0.5^\circ\text{C}$  程度高

くなった。なお、この現象は両面均等および非均等加熱の場合には生じなかった。

発熱側である左側面の表面温度はスリット幅の変化の影響をあまり受けて、スリット幅が 10 mm から 70 mm に増加しても表面温度の低下は  $0.5^\circ\text{C}$  以下であった。スリット幅の増加による温度低下の影響はむしろ中央と右側で顕著であった。発熱側ではスリット幅の変化に伴って流速が変化し、表面温度はほぼ一定値を維持するようであった。図-20 は、この場合の高さ 1150 mm における流速分布の変化を示す。左側面付近において、流速はスリット幅の増大とともに上昇している。左側面の表面温度はスリット幅が変化してもほとんど変化が見られなかったため、左側面の発熱は気流によって大部分が中空層外へ搬出され、中央部および右側部へ伝導によって流れる熱量はわずかであると思われる。右側面付近では流速はほとんど 0 であり、かつ速度こう配も右側面にはほぼ垂直に接していた。流速は中央より左側で急激に増大し、左側面から 10 mm 付近で最大値を示していた。この速度分布形は独立した 1 枚の加熱鉛直平板に添った層流境界層の速度分布に近似している。このことから、高さ 1150 mm では速度境界層は中空層の幅全体にまで発達せず、右側面の摩擦抵抗の影響を受けるまでに境界層が発達していないものと思われる。特に上下端開放の場合、左側面付近に薄く流速の大きい速度分布となり、流出入口で縮流が起きる場合、境界層は厚さが厚く、最大



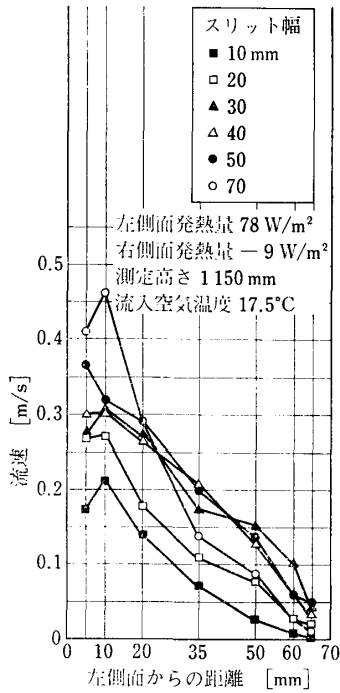


図-21 片面発熱時のスリット幅別流速分布

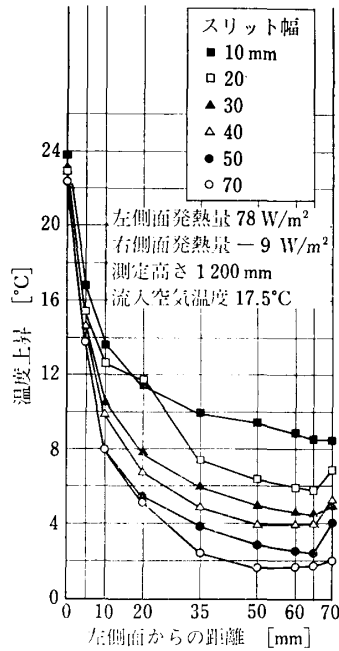


図-22 片面発熱時のスリット幅別温度上昇

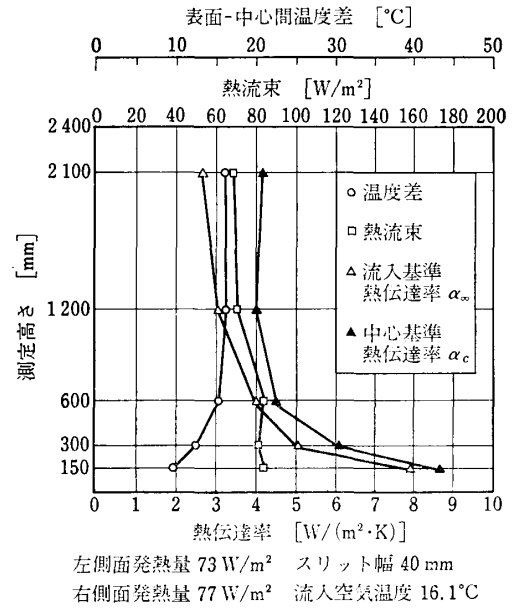


図-23 熱伝達率などの測定高さによる変化

流速の低い形となっていた。

図-21 および 22 は、左側面発熱量  $78 \text{ W/m}^2$ 、右側面電力供給なしの場合である。右側面の熱吸収量は平均  $9 \text{ W/m}^2$  であった。前の条件に比べて発熱量が増加しているため、速度境界層の厚さが増大し、右側面近傍で速度こう配が水平とある角度をなしていた。このことは、中空層内の気流が非発熱面の摩擦抵抗に影響されるまで発達していることを示す。他は前の条件の場合と同じ特徴を示した。

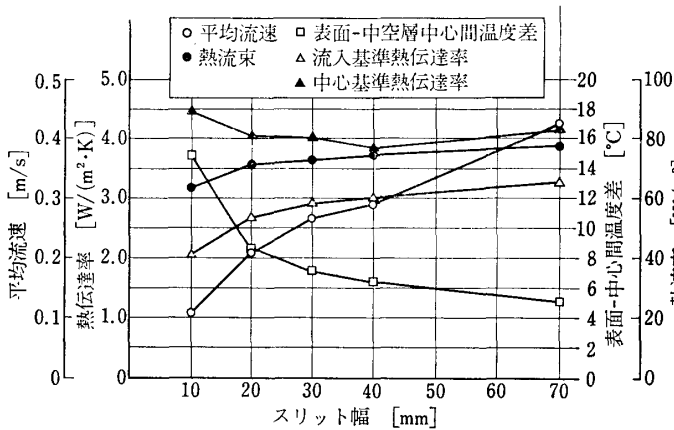
#### 4. 中空層内の熱伝達率

建築壁体表面と周辺空気との熱授受に関する計算には物理的な熱拡散率よりも、工学的な対流熱伝達率が一般的に使われる。壁体内中空層においても、この概念を応用するために実験結果から熱伝達率を算出した。この算出にあたっては、ヒータで発生した熱量がネオプレンシートを通過するときを生ずる温度こう配から中空層中へ流れる熱流束を求め、中空層側面の表面温度、中空層中央における空気温度、中空層下部から流入する空気温度を用いた。本実験模型を設置した実験室は断熱と気密の程度が良く、実験期間中空室の上下差が  $1^\circ\text{C}$  を超えることはなかったため、熱伝達率の基準となる一般流れの温度として流入口における空気温度を使用した。前述の非対称発熱の場合に見られたように、中空層両側面の放射率を完全に 0 とすることはできず、放射熱交換の影響がわずかに生じた。しかし、両側面に極端な温度差が生

じない場合には放射熱交換は無視し得るので、対流熱伝達率の算出には放射熱交換の補正は行わなかった。熱伝達率は各測定点における熱流束  $q$  をその表面温度  $t_w$  と流入空気温度  $t_\infty$  との差で除した値  $\alpha_\infty$  と、表面温度と中空層中心線上で同じ高さの点の温度  $t_c$  との差で除した値  $\alpha_c$  の 2 種類を求めた。以下、前者を流入基準熱伝達率  $\alpha_\infty$  と呼び、後者を中心基準熱伝達率  $\alpha_c$  と呼ぶ。

図-23 は、両側面の平均発熱量  $75 \text{ W/m}^2$ 、スリット幅  $40 \text{ mm}$  の場合の 5 箇所の測定高さ別の熱流束、表面温度-中心空気温度差と、これらから算出した流入基準熱伝達率  $\alpha_\infty$  と中心基準熱伝達率  $\alpha_c$  を示す。電熱板に均等の電圧を与えて測定したため、熱流束は下部で  $82 \text{ W/m}^2$ 、上部で  $73 \text{ W/m}^2$  と約 13% の差が生じた。この方法で求めた各高さにおける  $\alpha_\infty$  は下部で  $8.0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 、上部で  $2.7 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  となり、空気の流入する下部で大きい、高さとともに急激に減少し、高さ  $1200 \text{ mm}$  と  $2100 \text{ mm}$  では差がほとんどなくなった。中心部空気温度は下部では流入空気温度とほとんど差がないが、高い位置では熱を吸収し、温度が上昇しているため表面との温度差が減少する。このため  $\alpha_c$  は下部では  $\alpha_\infty$  とほとんど同じであるが、高さ  $2100 \text{ mm}$  では  $4.0 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  となり、 $\alpha_\infty$  より 50% 大きくなった。

鋭い角形の流入口を持つ円管の助走区間において、熱伝達率  $\alpha_\infty$  に影響が表れる範囲は直径の数倍までとされる<sup>9),10)</sup>。本実験の中空層を長方形管と考えた場合、相当直径は約  $120 \text{ mm}$  であるから、下部から約  $500 \text{ mm}$  まで



左側面発熱量  $77 \text{ W/m}^2$  熱流温度測定高さ  $1200 \text{ mm}$   
右側面発熱量  $79 \text{ W/m}^2$  流速測定高さ  $1150 \text{ mm}$

図-24 スリット幅の変化による流速・熱流束・側面-中心間温度差および熱伝達率の変化

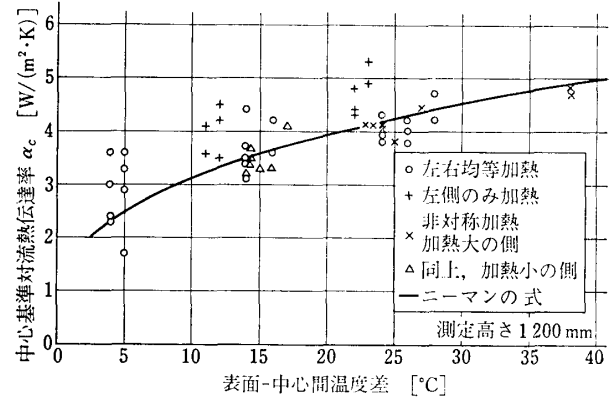


図-25 中空層内中心基準対流熱伝達率

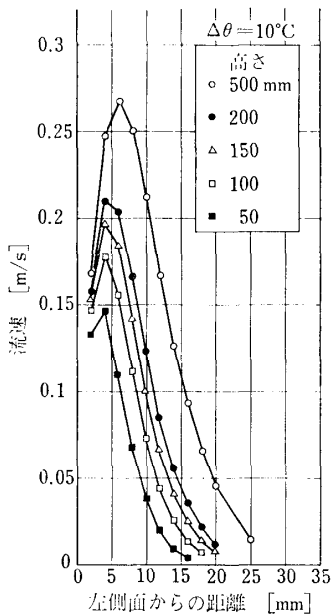


図-26 層流速度境界層内流速分布

は影響を受け、それ以上ではほぼ一定値となると考えられる。しかし本実験では影響範囲は相当直径の数倍よりやや長く、またこの範囲内の  $\alpha_\infty$  の十分高い位置におけるそれとの比率も円管の場合より大きくなった。

図-24 は両側面の平均発熱量  $78 \text{ W/m}^2$  としてスリット幅を変化させた場合の、高さ  $1150 \text{ mm}$  における平均流速、高さ  $1200 \text{ mm}$  における熱流束、表面-中心間温度差、 $\alpha_\infty, \alpha_c$  の変化を示す。スリット幅の増大とともに平均流速は増大し、これとともに  $\alpha_\infty$  もやや増加した。スリット幅  $10 \text{ mm}$  で  $\alpha_\infty$  は  $2.1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  で、スリット幅  $70 \text{ mm}$  では  $\alpha_\infty$  は  $3.3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  となった。  $\alpha_c$  はスリット幅の影響をあまり受けず、ほぼ  $4.1 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  と一定であった。

## 5. 考 察

中空層中を流れる空気は、空気と側面との対流熱交換に支配される。鉛直すきまの対流熱交換に関し、層流域において気流を考慮したニーマンによる空気の見掛けの熱伝導率と静止空気の熱伝導率との比に関する実験式がある<sup>\*1</sup>。この式に本実験の中空層高さ、中空層厚さ、入口空気と側面との平均温度差を代入し、さらに中空層中心線上の温度と側面の温度との差  $1 \text{ K}$  のときの側面の熱流束を熱伝達率として計算した値を、図-25 に実線で示す。同じ図中に本実験から得た中心基準熱伝達率  $\alpha_c$  のうち測定位置  $1200 \text{ mm}$  のものを記入した。実験値は左右均等加熱の場合、表面と中心空気温度との差が  $4 \sim 28 \text{ K}$  の範囲にわたって実験式から得た実線のほぼ周辺に分布する。両側面を非対称に加熱した場合にも、実験から得た熱伝達率は実用式付近に分布した。1 側面のみの加熱の場合には実験値のほうが実用式より最大  $40\%$  大きくなった。本実験のように空気流入口にスリット状に障害を設ける場合には、一方では抵抗が増加し、流速が低下し、他方、流路の急縮小、急拡大のため渦が強くなり、表面との熱交換が活発になった結果、このような分布になったものと思われる。

単一の鉛直加熱平板に生ずる上昇気流の速度境界層中の速度分布に関しては、シュミットおよびベックマンによる理論曲線がある<sup>\*2</sup>。この曲線から無次元距離  $\xi$  と無次元速度  $\eta$  の関係を求め、本実験条件を当てはめて計算した速度分布を、図-26 に示す。この図は平板表面と一般空気温  $t_\infty$  との差を  $10^\circ \text{C}$  として計算した結果であ

\*1 グレーベル・エルク・グリグル(坪内・加藤訳)：熱伝達の基礎、(昭38)、p.307、朝倉書店

\*2 グレーベル・エルク・グリグル(坪内・加藤訳)：熱伝達の基礎、(昭38)、p.287、朝倉書店

る。気流速度は平板下端から 50 mm で最大値約 0.15 m/s であり、流速が 0.01 m/s 以下となる平板からの距離は約 13 mm である。高さ 500 mm では平板から約 7 mm で最大流速 0.27 m/s に達するが、平板から 25 mm 以上では流速は 0.01 m/s 以下となる。

本実験では、片側面のみ加熱した場合、速度境界層の厚さは上記の値より大きく、特に流入口で縮流・拡大が生じる場合には流速の最大値は小さいが、境界層厚さは上記の値よりかなり厚かった。本実験の中空層厚さ 70 mm は上記の方法で算出される境界層厚さの 2 倍以上であるから、両側面に生ずる境界層が両側から中央まで連続しないはずであるが、実験結果は中心でもかなりの流速となり、境界層厚さは 35 mm より厚いようだった。この理由としては、気流中の渦または乱れのため、境界層中の摩擦力が増大していることが予測される。

左右両側面の平均発熱量  $75 \text{ W/m}^2$ 、スリット幅 40 mm の場合の平均流速は 0.28 m/s であった。この流速と中空層の等価直径とから求められるレイノルズ数は 2240 である。中空層の自然換気時の流速はこの速度の前後にある。上記レイノルズ数はほぼ臨界値であり、中空層中気流は層流域と乱流域にまたがる。しかし、中空層の流入口の形状や流入気流に乱流成分が含まれていると思われることから、中空層中気流は乱流域の下端に属するとみなすのが適切と思われる。

## 6. 結 語

壁内中空層の上下に開口を設けると、日射熱によって温められた中空層内の空気は浮力を得、自然換気が行われる。本実験では、中空層厚さ 70 mm、上下のスリット幅 40 mm で両側面の発熱量を  $78 \text{ W/m}^2$  としたとき、中空層内の空気の平均流速は 0.28 m/s であった。このような換気は、中空層厚さおよび気流に対する抵抗を合理的に設計すれば、壁に入射する太陽熱を外部に放散し、建物内部への伝熱を減少するに十分な量となると考えら

れる。

中空層中に生ずる流速は側面の発熱量の増加とともに上昇するので、日射の大小に自動的に追従する。また中空層の両側面で発熱量が異なる場合、発熱量の大きい側でより大きな流速が生じ、これによる冷却効果も大きい。これらのことは自然換気による熱放散の好ましい面である。

中空層の自然換気による日射遮へいを実施するにあたって、壁本体、中空層各部の寸法、流路形状がどのように影響するか、また壁体の熱容量、日射量・外気温などの気象変化がどのように作用しあうかに関しては、今後の資料の蓄積を待たなければならない。

## 参 考 文 献

- 1) 福島明ほか：木造家屋の壁内通気による影響と通気止め効果，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭 55-9)，p. 579
- 2) Robinson, H. E. et al.: Thermal Resistance of Air Space and Fibrous Insulations Bounded by Reflective Surfaces, Building Materials and Structures Report<sup>t</sup> 151, NBS (Nov. 1957)
- 3) 渡辺要：防寒構造，(昭 32)，p. 154, 理工図書
- 4) 小宮英孝：温風式集熱壁の特性に関する模型実験(自然対流の場合)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭 57-10)，p. 547
- 5) Mastrullo, R. et al.: The Performance of a Natural-Circulation Solar Air Heater, ASHRAE Transaction, No. 2755, Part 1 A, (1983), p. 288
- 6) 溝口久ほか：上下に開口のある壁内中空層中の気流について，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭 58-10)，p. 685
- 7) Homma H. et al.: Ventilation Effect of Back Space of Building Enclosure Siding as a Releasing Measure for Solar Radiation, ASHRAE/DOE Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, (Dec. 1979) (available as internal report, No. C.B.S.-87, Centre for Building Studies, Concordia Univ., Montreal, Canada)
- 8) 松原正人ほか：加熱棒による風速測定について，日本建築学会東海支部研究報告集，21 号(昭 58)，p. 289
- 9) 甲藤好郎：伝熱概論，(昭 42)，p. 142, 養賢堂
- 10) 日本機械学会：機械工学便覧(改訂第 6 版)(11)熱および熱力学，(昭 51)，p. 11-26

(昭和 60. 5. 23 原稿受付)

## Natural Ventilation of Wall Air Cavity for Solar Heat Gain Reduction

### Part 1—Experiment on Heat and Air Transfer in Cavity

by Hiroshi HOMMA<sup>\*1</sup> and Hisashi MIZOGUCHI<sup>\*2</sup>

**Synopsis:** Ventilation of an air cavity in a building envelope by natural force is expected to be an effective measure to release solar irradiation in a hot or arid district. An external surface of a wall absorbs solar irradiation, and transfers it to the air in the cavity. The warmed air gets buoyant force. So when openings are provided at the top and bottom of the cavity, the warmed air is released through the top opening and cooler outside air replaces the space in the cavity. This reduces the further heat transmission into the built environment. This natural ventilation effect seems to be steady and strong. So if the width of a cavity and the openings are properly designed, the cooling load reduction by natural ventilation is believed to be considerable.

An experimental model of an air cavity was constructed to examine the natural ventilation effect. The model has height 2.4 m, width 70 mm and depth 0.45 m. Electric heating panels were buried in the both sides of the cavity. Slit shaped openings were provided at the top and bottom of the cavity. Temperature and velocity measuring facilities were prepared in the experimental model. A number of measurements were carried out by changing the combinations of heat production and slit width.

When heat production on the both sides were 78 W/sq.m, and slits were set to 40 mm, the average air velocity was 0.28 m/s. The average convective heat transfer coefficient was 2.4 W/sq.m K. It was affected by the surface heat production rate, but it was little affected by the

slit size and the air velocity. When slit width was gradually reduced the air temperature rose, and the air velocity fell suddenly between slit widths 10 and 20 mm. The influence of dynamic loss seemed to become critical between these slit widths. When heat was produced on one of the two surfaces, a strong upward air stream was caused at the near region to the heated surface. The velocity fell steeply in the central region, and the velocity was nearly null at the unheated surface. The velocity boundary layer was much thinner than the half of the cavity width. When the both sides were heated symmetrically, the air temperature was highest at the directly attached regions to the surfaces, and the lowest temperature was observed at the center. The buoyant force was strongest at the attached regions to the surfaces, and it was weakest at the center. The buoyant force, frictional resistance and velocity pressure loss influence each other, and they form the velocity distribution. The peaks of the velocity distribution were observed in the regions 5 to 10 mm from the two surfaces. The velocity distribution showed a trough at the center.

The effect of momentum diffused and disappeared in a relatively short distance from the entrance, it was shorter than 550 mm. In the longer distance, the two thin velocity boundary layers were formed along the two sides, and the air in the center was induced by the air movement of the velocity boundary layers.

This experiment indicated that if a cavity width and opening size are appropriately arranged, the natural ventilation performs effectively to release solar irradiation to the outside.

(Received May 23, 1985)

<sup>\*1</sup> Department of Regional Planning, Toyohashi Institute of Technology, Member

<sup>\*2</sup> Department of City Planning and Housing, Shizuoka Prefecture Office