室内気流の流速と乱れの強さのサーマルマネキン各部の 対流熱伝達率への影響に関する研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT DISTRIBUTION ON THERMAL MANIKIN BY AIR FLOW WITH VARIOUS VELOCITIES AND TURBULENCE INTENSITIES

李 徹球*, メリコフ A.K.** , 本間 宏***

Chulgoo LEE, Arsen Krikor MELIKOV and Hiroshi HOMMA

The impact of velocity and turbulence intensity of airflow on convective heat transfer coefficient distribution on a thermal manikin was experimentally investigated using a turbulence intensity changeable low airflow producer. When the velocity of forced airflow was below 0.2 m/s, the convective heat transfer coefficient changed little at the lowest part of the foot and increased at the upper part compared to the condition of natural convection. It increased over the whole surface when forced airflow was over 0.3 m/s. The heat transfer coefficient increased significantly with the turbulence intensity, when the forced convection was over 0.3 m/s.

Keywords : convective heat transfer coefficient, turbulence intensity, thermal manikin, low airflow producer, natural convection, forced convection

対流熱伝達率, 乱れの強さ, サーマルマネキン, 微風速発生装置, 自然対流, 強制対流

1. 序

室内で自然にまたは強制的に生ずる気流は室内の温熱環境を構成する主因子の一つであり, 居住空間の快適状態に強い影響力を持つ。この気流が人体の対流熱放散に及ぼす影響については, 人体またはサーマルマネキン等を対象にし, 様々な実験が行われ, 対流熱伝達率を流速の関数として多くの実験結果が出されてきた。これらの実験式の中には Colin らの式のように対流熱放散によって生じる自然対流の影響を加味した式もある¹⁾。これらの研究は人体全体の熱バランスを確立するには有効であるが, ドラフトと定義されている, 人体の部分的冷却を予測するには不十分である。

ドラフトに関する最初の包括的な研究として, Houghten らが 10 名の被験者を対象にして行った研究がある²⁾。彼らは各被験者の首の後面と足首を独立に気流にさらしてドラフト反応を調査したが, 足首では気流の温度が約 19.5°C, 流速が約 0.25 m/s の場合, 不快を感じる被験者の比率は約 10 % であったが, 首後面では

約 40 % であったことを報告した。McIntyre は Houghten らと類似な実験を行い, 被験者の頭部を気流に暴露し, 温度 23°C で流速 0.25 m/s, また温度 21°C で流速 0.2 m/s を持つ気流では誰も不快感を感じないと述べている³⁾。Berglund らは 50 名の被験者を対象に実験を行い, 流速 0.25 m/s 以下なら室内の快適条件に影響を及ぼさないと発表している⁴⁾。しかし, これらの研究で用いられた気流は層流または層流に近い気流である。ASHRAE STANDARD, ISO 等の快適基準に定まっているドラフトについての基準は大部分, 気流の平均速度に根拠を置いている。様々な原因により室内に存在する気流は一般的に乱流であり, その程度を表している乱れの強さ (Turbulence Intensity 以下 T.I. と略記) は 10 ~ 70 % に至っていると言われている⁵⁾。

Fanger と Pedersen は非定常流に被験者をさらす実験を通じて, 変動気流 (乱流) は層流よりもっと不快感を与えることを示した⁶⁾。Melikov は Fanger, Christensen と Berglund, Fobelets が各々行った類似な気流速

* 豊橋技術科学大学建設工学系 大学院生・工修

** デンマーク工科大学 研究員・工博

*** 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Regional Planning Technical Univ. of Toyohashi, M. Eng.

Research Engineer, Laboratory of Heating and Air Conditioning Technical Univ. of Denmark, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Regional Planning Technical Univ. of Toyohashi, Dr. Eng.

度と気流温度の範囲で被験者の不快度を調べる研究を比較し、気流の温度が 21°C 、平均気流速度が 0.3 m/s の場合、Berglund らの実験において不快を感じた被験者の比率は約 23 % であるが、Fanger らの実験では 45 % を超えており、これは主に乱れの強さの差が原因であると提起している⁷⁾。両方の実験における乱れの強さは共に平均流速が増加するに従って減少したが、その範囲は Berglund らの実験においては 5～40 %、Fanger らの実験においては 30～65 % であった。乱れの強さの、人体のドラフト反応への影響を調べるために、Fanger らは 3 種類の乱れの強さ ($\text{T.I.} < 12\%$ 、 $20\% < \text{T.I.} < 35\%$ 、 $\text{T.I.} > 55\%$) を持つ気流を用いて人体のドラフト反応を測定し、同じ平均流速では乱れの強さが大きいほど不快感が大きくなると報告した⁸⁾。Mayer は加熱頭部モデルを種々の流速と乱れの強さを持つ気流にさらして行った実験でモデルの対流熱伝達率は気流の平均流速と乱れの強さを掛けた値の平方根に比例して増加すると言っている⁹⁾。しかし、これらの研究における気流は強制対流を対象にしており、人体または発熱モデル自身の発熱による自然対流の影響は考慮していない。人体自身の発熱により人体周辺に生じる上昇気流は上半身では 0.25 m/s 近くになっており、これは快適基準に定められている気流の許容範囲の上限に匹敵する値である。また、この上昇気流は人体各部位ごとの自然対流熱伝達率に影響を及ぼしている。居住空間に存在する室内気流はこの居住者からの自然対流と競合し、この二つの気流の競合はドラフトについての人体の反応をより複雑にすると思われる。人体の各部位の対流熱伝達率は人体が発生する自然対流が強制対流にどのくらい入り込まれるかによると考えられることも出来る。

このように、室内気流中の乱れの強さは人体のドラフトへの反応に大きな影響力を持つことが示されてきた。しかし、乱れの強さの物理的な側面、特に人体が発生する自然対流と強制対流の共存下における乱れの強さの影響についての知識が不足している。そこで本研究は乱れの強さによる人体の各部位ごとのドラフトの物理的性状を調べるために人間と同じ形状をしているアルミ鋳造外殻を持つサーマルマネキンを用いて、マネキンの局部対流熱伝達率への強制対流の乱れの強さの影響と、マネキンから発生する自然対流とその自然対流に入り込む強制対流の相互作用について実測を行い、その結果を検討した。強制対流の流速が遅い場合、熱伝達に対して気流の影響が最も強く現れるのは気流に正対する面である。本実験では、自然対流と共存する強制対流の影響を明確に把握するために、水平気流に正対する面における測定を行った。

2. 実験方法

2.1 実験対象および実験空間

実験対象として図—1 に示す身長 1.705 m の男子体形のサーマルマネキンを用いた。これはアルミで中空に作られており、頭、胸、腹、両腕、両脚部の 7 部分に分割されている。この 7 つの各部分の内部にはヒーターとファンが組み込まれ、電力供給の自動調節によって各部の内部温度が均等になるようになっている。表面は人体とほぼ同じ放射率を持つ黒色焼付塗装が施されている。

本実験は気密性、断熱性が優れており、外気温変動の室内への影響の少ない奥行、長さ、天井高さそれぞれ 6.65 、 16 、 3.15 m の部屋の中に、さらに実験のために作り出す気流以外の、室内で生じる気流を遮断するために、木材を骨組みにし内部をアルミ板で貼った $1.8 * 5.85 * 2.35\text{ m}$ の実験空間を作って行った。実験空間の床は部屋の床からの熱伝導を防ぐために厚さ 0.1 m の発砲スチロール板を敷いた。実験空間の中には後述する 4 台の微風速発生装置とサーマルマネキンが入っており、測定機器とそれをコントロールするコンピューターは実験空間の外に配置し、測定者は気流の性状を調節する時のみ実験空間に入り、データの収集は室外で行った。

2.2 実験装置および実験方法

乱れの強さが変化する水平気流を作るために図—2 に示すように幅、高さ、長さそれぞれ 0.92 、 0.465 、 1.7 m の装置を 4 個作り、それを 4 段に重ねることによって $0.92 * 1.86 * 1.7\text{ m}$ の水平微風速発生装置になるようにした。実験対象になる立位マネキンは身長 1.705 m 、最大幅が 0.62 m であるので、装置の縦と横はマネキンの頭上と両腕の外側より約 0.15 m ずつ大きくした。ま

図—1 サーマルマネキンの全体図と測定位置

図-2 微風速発生装置の構造

た、装置の中に気流を制御するために必要な構成部品を設置するために装置の長さは1.7 mとした。4個の装置は個々に調節でき、均等な気流を発生したり、4個の装置から気流を独立に発生したりして色々な形のドラフトが生じるようにした。本研究では4個の装置全部から同じ気流を発生した場合について報告する。

各装置の外側は合板で造られており、出力100Wの遠心送風機2台が装置を通して気流を押出すようになっている。吹出し口において流速を均等にさせるために各々15枚と10枚のフィルタを重ねた2つの抵抗体を設置した。フィルタはレンジの排気フードに用いられる不燃性不織布を用いた。また、気流の乱れを一度できるだけ小さくするために整流器として厚さ0.1 mのハニコーンを取り付けた。最終段階で乱れを与え、その強さを変化させるため出口に3枚のウィングを軸を水平に取り付け、気流を層流の状態から任意の乱れの強さを持つようにコントロールした。3枚のウィングの回転はそれぞれステッピングモーターの円運動によって行われた。ステッピングモーターの回転速度は実験に応じて設定された範囲内で一定に、回転角度は範囲内でランダムに動くようにした。この角度は制御用コンピューターのランダム関数を利用している。3枚のウィングの寸法は各々0.13*0.87 mであり、装置の吹出し口のほぼ全面積をカバーしている。さらに、装置からの気流の温度を調節するためにクーラー用熱交換器とニクロム線を張ったヒーターを取り付けた。今回の実験では熱交換器とヒーターは稼働しなかった。装置から出る流速は0.1 m/s以下から1 m/s以上まで広く調節できる。乱れの強さは5%から50%の間で調節可能である。装置から発生する気流のエネルギースペクトルはウェーブ数約10 m⁻¹までほぼフラットで、これ以上では急激に低下する。

予備実験として変動因子である気流の速度および乱れの強さと遠心送風機の送風量および3枚のウィングの回転速度と角度の関係を求めた。用いた流速計のプロープは加熱楕円球型の風速計である。乱れの強さは次式に

よって算出した。

T.I. (Turbulence Intensity)

$$= (S.D. / V) * 100(\%) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Vは平均流速、S.D.は流速の標準偏差で風速計により直接表示される。

この微風速発生装置では、装置からの距離により気流の流速と乱れの強さに関する特性が異なる。装置から近い所では乱れが少ないのでウィングの操作により乱れの強さの調節が自由にできるが、遠い所では自然に乱れが加わり、乱れの強さの低い気流は得にくい。一方、装置から近い所では4段に重ねた各装置の間の継ぎ目で気流の不連続性があるが、遠い所ではこのような不均一性はなくなる。本実験の予備テストとして微風速発生装置から0.2~1 mの6か所で平均流速と標準偏差を測定した結果、0.8 m以上離れた所では低い速度で低い乱れの強さの気流(流速0.2 m/s以下で乱れの強さ10%)は得られなかった。一方、装置から0.2 m以内の範囲では、各装置間の継ぎ目における気流の不連続性のため流速と乱れの強さの均一性の面での調節が困難であった。0.3~0.7 m/sでは気流の乱れの強さの調整も比較的容易にでき、装置の各部分間の流速の差も5%以下であったのでマネキンの位置は上記範囲の中間である、装置から0.5 m離れた所に設定した。マネキンにさらした気流は平均速度が0.12, 0.2, 0.3, 0.42 m/sの4種類、乱れの強さは約10, 30, 45%の3種類とした。ただし、流速0.12 m/sの場合の乱れの強さ45%および流速0.42 m/sの場合の乱れの強さ10%は気流が不安定なため、実験できなかった。

マネキンの各部の表面温度の測定に使用した熱電対は銅-コンスタンタン熱電対で直径0.2 mmのものをロールにより幅約0.8 mm、厚さ約0.01 mmに伸展し測定表面への接触面積を拡大するとともに表面の平滑化を図った。マネキン各部の表面熱流を測定するための熱流センサーは公称感度465 W/m²・mVで寸法30*15*1.5 mmの軟質シリコンゴムで作られたものを使い、取り付けたセンサーとマネキン表面の間にすき間が生じないように心がけた。測定点の位置は図-1に示す。

2.3 放射熱放散量の補正

モデルと周辺との熱交換の内、放射による影響を把握するために、モデル表面の放射率と類似な放射率を持つと考えられる厚さ6 mmの黒いゴムで包まれた直径72 mm、長さ840 mmの円筒を実験空間に設置して予備実験を行った。実験の方法については参考文献10)を参照のこと。完全黒体の放射定数約5.67 W/m²K⁴に、放射熱交換が行われる2面の放射率 ϵ_1 , ϵ_2 をかけたことを意味し、2面間の温度差とともに両面の放射熱交換量の程度を決める因子である有効放射定数は、本実験の場合4.8 W/m²K⁴であった。以下の計算ではこの有効放射定

数値を用いて放射熱放散量を計算し、これを表面熱流から差し引いた残りを対流熱放射量とした。

2.4 対流熱伝達率の算出

マネキンの各部位の対流熱伝達率は各部位ごとの表面温度と熱流束の測定値より求めた。マネキンの表面は全体的に等温になるように部分ごとに発生熱量を調節した。実験中、実験空間の平均気温は 20°C であり、マネキンの表面温度と周辺気温との温度差は 7°C 、 10°C の2段階を目標値として実験を行った。各々の条件下での測定を行う前に10分以上その状態の気流にマネキンをさらしてから測定を始め、約33分にわたって100回表面温度と熱流束を測定した。各測定点のデータの標準偏差は強制対流の平均流速と乱れの強さによって変化した。無風状態の場合、マネキン表面の平均温度 29°C の時、標準偏差は約 0.06°C であった。マネキン表面の各部位別対流熱伝達率は熱電対で求めた表面温度と周辺空気温度、熱流センサーで求めた熱流束および前述の方法で算出した放射熱を用いて、ニュートンの冷却則より算出した。算出過程については参考文献10)を参照のこと。

3. 実験結果

図3～6は室内気流の平均流速が各々 $0.12, 0.2, 0.3, 0.42 \text{ m/s}$ の時の乱れの強さをパラメータとしたマネキンの各部位別対流熱伝達率を示す。マネキンの表面温度と周辺空気温度との差は約 10°C である。図6中の実線は微風速発生装置を停止した状態での各部位別対流熱伝達率を示す。平均流速が 0.12 m/s の図3において下端を除く脚部と腕部の対流熱伝達率は無風時に比べて

$2\sim 3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度大きかったが、部位による対流熱伝達率の分布の形は無風時とほぼ近似しており、脚下端の値が極端に大きい。頭部においては対流熱伝達率が無風時に比べて約 $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ 大きかったが、乱れの強さが変わっても部位による変化に規則性が見られない。胴部においては値も形も無風時と大きな差はない。全体的に強制対流の乱れの強さによる対流熱伝達率の変化に規則性は見られない。平均流速が 0.2 m/s の図4では脚下端の熱伝達率は無風の場合とあまり変わらないが、他の部位は増大した。特に脚中央から上と胴体、腕部では著し

図4 マネキン各部位別対流熱伝達率 (マネキンと周辺との温度差: 10°C , 平均気流速度: 0.2 m/s)

図3 マネキン各部位別対流熱伝達率 (マネキンと周辺との温度差: 10°C , 平均気流速度: 0.12 m/s)

図5 マネキン各部位別対流熱伝達率 (マネキンと周辺との温度差: 10°C , 平均気流速度: 0.3 m/s)

い増加を示し、対流熱伝達率はほぼ脚下端の値に近付いた。胴上端部および頭部ではあまり変化がなかった。乱れの強さの影響は、脚および腕下端部では規則性が現れなかったが、脚、腕、胴の上部および頭では乱れの強さが大きいほど対流熱伝達率が大きくなる傾向が明瞭になった。平均流速が0.3 m/sの図—5では、脚下端の対流熱伝達率までもが1~2 W/m²K上昇し、脚部および腕の熱伝達率はより増大し上下の差があまりなくなった。胴部でも同程度の増加を示し乱れの強さが大きいほど熱伝達率が大きくなる傾向が明瞭に現れた。特に頭ではこの傾向は著しかった。平均流速が0.42 m/sの図—6では脚下端の熱伝達率が8~12 W/m²Kまで上昇し、より上部でも著しい上昇を示した。また乱れの強さの差による熱伝達率の差がより拡大し、頭部では乱れの強さが30%の時、対流熱伝達率は約9 W/m²Kであるが、45%の時は約12 W/m²Kではほぼ脚下端と同じ大きさとなった。

脚下端の対流熱伝達率は平均流速0.2 m/sまでは自然対流時の値とほぼ同じ値にとどまり、流速0.3 m/s以上でやや増加したが、これはこの流速の境界以下では自然対流が卓越することを示す。このことは、この流速境界以下では乱れの強さの影響が不明確であったのに対し、この境界以上では乱れの強さの増大と対流熱伝達率の増大の関係が明確に現れたことから言える。胴上部および頭部で乱れの強さの影響が強制対流の流速が遅い段階から明らかになるのは、上向きの自然対流の水平の強制対流による偏向が下部で始まり、上部では自然対流が風下側へ回ってしまうためであろう。

マネキンの表面温度と周辺温度の差が各々10°C、

図—6 マネキン各部位別対流熱伝達率 (マネキンと周辺との温度差: 10°C, 平均気流速度: 0.42 m/s)

7°Cの時の各部位別の対流熱伝達率を各部の表面積で加重平均して求めたマネキン全身の平均対流熱伝達率を図—7に示す。マネキンの表面温度と周辺温度の差が7°Cの時の、気流の乱れの強さによるマネキン各部位の対流熱伝達率は温度差が10°Cの時と比べて全体的に若干小さかったが、乱れの強さによる変化はだいたい同じであった。気流の乱れの強さが45%の場合、 $\Delta T=10^\circ\text{C}$ の時の対流熱伝達率は $\Delta T=7^\circ\text{C}$ の時より大きい、その差は約2~3%であった。乱れの強さが15%および30%の時は、流速が0.3, 0.42 m/sの場合は $\Delta T=10^\circ\text{C}$ の時の若干大きい値を示したが流速0.12, 0.2 m/sの時はこの傾向は現れなかった。

各々の実験条件下におけるマネキンの各部位ごとの熱流速の変動度を次のように定義する。

$$D = S.D. / AVE. \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 D : 各部位ごとの熱流速の変動度

$S.D.$: 各部位ごとの100個の熱流速測定値の標準偏差 (W/m²)

図—7 $\Delta T=7^\circ\text{C}$ および 10°C の時のマネキン全身加重平均対流熱伝達率

図—8 乱れの強さと熱流速の変動度の関係

AVE. : 100 個の測定熱流束の平均値 (W/m^2)

各実験条件について各部位ごとの熱流束変動値をマネキンの全身にわたって平均した熱流束変動度を図—8 に示す。図中の各線は乱れの強さ別の回帰直線である。各流速ごとに若干の差はあるが、乱れの強さが 45 % の時の熱流束変動度は約 0.35, 30 % の時は約 0.24, 10 % の時は約 0.18 であり、乱れの強さが大きいほど熱流速の変動度が大きいことが示された。

4. 考 察

乱れの強さによる対流熱伝達率の変化を示した図—3 ~6 より、一般的に乱れの強さが大きいほど対流熱伝達率が大きいと言える。強制対流の平均流速が 0.3 m/s である図—5 の場合、乱れの強さが 45 % の場合は 10 % の場合に比べて対流熱伝達率が全身で約 1.26 倍、頭部では約 1.55 倍大きかった。

Toy らは加熱黄銅垂直円柱に関して強制対流下における対流熱伝達率を測定し、その結果を Frössling の理論値と Schmidt らの実験式と比較し、Schmidt らの実験式とはよく一致しているが Frössling の理論値よりは 8 % 程度大きかったと報告し、この原因は理論値では考慮していない主流の乱れによると思われると言っている¹¹⁾。

Fanger らは普段着で椅座の被験者の後頭部を対象にし、平均流速を 0.05 m/s から、0.4 m/s まで変えながら行った実験で乱れの強さが大きいほどドラフトによる不快を感じる被験者の比率が高いと報告した⁸⁾。本研究においては 0.3, 0.42 m/s の比較的流速が大きい時は乱れの強さが大きいほど対流熱伝達率が大きかったが気流が低速の時はさほど差がなかった。このような違いの原因として、人体の気流・熱流による刺激に対する反応の生理的な差の他に、Fanger らの実験では椅座であるため後頭部において自然対流の影響が少なかったのに対し、本実験の場合は立位マネキンで強制対流が小さい時は自然対流が相対的に大きく、影響を及ぼしたといった物理的側面も考えられる。Clark らは 0.15~1.4 m/s の気流に被験者の頭部をさらして頭部の垂直中心線上の 4 か所の対流熱伝達率を測定し、気流速が大きい時の 4 点の対流熱伝達率の変化は近似であったが、0.15 m/s の時は異なる傾向が見られて、これは自然対流が水平の強制対流より大きい場合強制対流が自然対流を完全に代替することができず、気流が自然、強制の混合状態になるためと説明している¹²⁾。

乱れの強さが大きいほど人間が不快感を強く感じる理由として Mayer は乱れの強さが大きくなるに従って人体の対流熱伝達率が大きくなるためと説明しており⁹⁾、Madsen は乱れの強さが大きいほど人体からの熱流束が大きくなるためと提起している¹³⁾。Fanger らは乱れの

強さが大きくなるに従って人体の皮膚温度の変動が大きくなり、この皮膚温度の変化は寒さに対しての警告信号として脳に伝わり、この警告信号に対応して人体の調節を促すものとしてドラフトによる不快を感じると説明している⁸⁾。本研究の場合、強制対流が大きい時は、乱れの強さが大きいほど対流熱伝達率が大きくなり、小さい時は乱れの強さによる対流熱伝達率の差はあまり大きくなかったが、測定したマネキン各部位の熱流束と表面温度の変動度は強制対流が大きい時も小さい時も乱れの強さが大きいほど大きかった。

純自然対流領域における垂直シリンダの平均自然対流熱伝達率を示す式が次のように与えられる¹⁴⁾。

$$Nu_a(\text{free}) = 0.522 (Gr'_a)^{1/4} \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{ここで, } Gr'_a = \frac{g\beta\Delta t D^4}{\nu^2 L}$$

D : シリンダの直径 (m)

L : シリンダの高さ (m)

また、強制対流における垂直シリンダの強制対流熱伝達率を表すのがヒルパートの式として次のように示される¹⁵⁾。

$$Nu_a(\text{forced}) = 0.615 Re_a^{0.466} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{ここで, } Re_a = \frac{uD}{\nu}$$

u : 強制対流の流速 (m/s)

マネキンの腕を直径 0.1 m, 長さ 0.7 m, 温度差 10°C の加熱円柱と仮定して、無風の時と平均流速 0.12 m/s の時の Nu 数を上式 (3), (4) で計算してみると各々 10.9, 13.4 になる。混合対流熱伝達率についての自然対流と強制対流の相互作用は実験的に 2 つの対流のベクトル和として知られている。したがって、 $Nu(\text{mixed}) = (10.9^2 + 13.4^2)^{1/2} = 17.3$ になる。本実験結果の腕部における Nu 数は図—6 の無風時が約 12.4, 図—4 の平均流速 0.12 m/s, 乱れの強さが 30 % の強制対流が存在する時は 21.4 になる。本実験の値がやや高いのは腕部が正確な円柱形でないこと、腕部と胴部との気流が干渉することと本実験における気流の乱れなどが原因として考えられる。

図—7 に示されているマネキン全身の平均対流熱伝達率と他の文献^{11), 15)~17)}の対流熱伝達率とを比べてみると本実験の場合がいくぶん大きい。これは、本研究ではマネキンの強制対流に正対する部分だけを考慮に入れているのに対して他の研究では直接さらされない後方等も考慮に入れているためと思われる。

ASHRAE, ISO 等では室内温熱環境の快適条件に気流速の範囲も定めているが、実際この範囲内の平均流速にさらされた室内居住者がドラフトによる不快感を持つという研究結果も出ており⁷⁾、これは気流の乱れの強さが一つの原因として考えられる。室内快適基準に気流の平均流速だけでなく乱れの強さも含まれる必要がある

と思われる。

5. まとめ

強制対流の乱れの強さによるサーマルマネキンの各部位の対流熱伝達率の変化を調べた結果、乱れの強さが大きいほど対流熱伝達率が大きいこと、マネキンの熱流束と表面温度の変動度が大きいことがわかった。このことは室内気流の平均流速が快適基準速度の範囲内にあっても乱れの強さが大きい場合は室内居住者がドラフトによる不快を感じることがありうることを意味する。室内温熱環境を構成する因子の一つである気流の扱いはその平均流速だけでなく乱れの強さも同時に行う必要があると考えられる。また、強制対流が0.2 m/s以下の低流速の時はマネキン各部位の対流熱伝達率は自然対流の上昇気流と強制対流の混合気流に影響され、各部位ごとの対流熱伝達率の分布の形はより速い強制対流がある時とは異なることが示された。今後、快適条件に対する気流の物理的性状に関しても、人体の側面、後面や着衣また椅座のモデルを用いてより幅広い実験を続ける必要があると思われる。

参考文献

- 1) Colin, J. et al. : Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body, J. Appl. Physiol. 22(1), pp. 31~38, 1967
- 2) Houghten, F.C. et al. : Draft temperatures and velocities in relation to skin temperature and feeling of warmth, ASHVE Trans., 44, pp. 289~308, 1938
- 3) McIntyre, D.A. : The effect of air movement on thermal comfort and sensation, Indoor Climate, Danish Building Research Institute, Copenhagen, pp. 541~560, 1979
- 4) Berglund, L.G. et al. : Subjective human response to low-level air current and asymmetric radiation, ASHRAE Trans., 93(1), pp. 497~523, 1987
- 5) Hanzawa, H. et al. : Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces, ASHRAE Trans., 93(1), pp. 524~538, 1987

- 6) Fanger, P.O. et al. : Discomfort due to air velocities in spaces, Proc. of Meeting of commission B1, B2, E1 of Int. Instit. Refrig., 4, pp. 289~296, 1977
- 7) Melikov, A.K. : Quantifying draught risk, Technical review, No2, Brüel & Kjaer, 1988
- 8) Fanger, P.O. et al. : Air turbulence and sensation of draught, Energy and Buildings, 12, pp. 21~39, 1988
- 9) Mayer, E. : Influence of turbulence on the convective surface heat transfer coefficient, Proc. Third International conference on Indoor Air Quality and climate, Stockholm, Vol.5, Swedish Council for Building Research, pp. 377~382, 1984
- 10) 李 徹球ほか：加熱円柱組合せ人体モデルによる人体周辺の自然対流の性状と人体の部位別自然対流熱伝達率に関する実測結果，日本建築学会計画系論文報告集，第416号，pp. 25~34，1990.10
- 11) Toy, N. et al. : A surface plate calorimeter, Jnl Physics E. scient. Instrum. 6, pp. 702~704, 1973
- 12) Clark, R.P. et al. : Forced convection around the human head, J. physiol. 244, pp. 295~302, 1975
- 13) Madsen, E. : Why low air velocities may cause thermal discomfort, Proc. Third International conference on Indoor Air Quality and climate, Stockholm, Vol.5, Swedish Council for Building Research, pp. 377~382, 1984
- 14) Gebhart, B. : Heat transfer, McGraw-Hill, 1961
- 15) Rapp, G.M. : Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinder and spheres at low air velocities, ASHRAE Trans., pp. 75~87, 1973
- 16) Nishi, Y. et al. : Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, J. Appl. Physiol., 29(6), pp. 830~838, 1970
- 17) Tamari, Y. et al. : Convective heat transfer from the human form, J. Appl. Physiol., 32(2), pp. 227~233, 1972
- 18) 李 徹球ほか：乱流を制御した微風速発生装置について（室内気流中の乱れの強さによるサーマルマネキン各部位の対流熱伝達率の変化に関する研究 その1），日本建築学会東海支部研究報告集，pp. 273~276，1991.2

(1991年5月10日原稿受理，1991年9月4日採用決定)