立方体正味放射計を用いた測定に基づく室内各壁の 面積平均表面温度の算定の信頼度

RELIABILITY OF ESTIMATION OF AREA MEAN SURFACE TEMPERATURE FOR EACH WALL INSIDE A ROOM BASED ON MEASUREMENT USING A CUBIC NET RADIOMETER

天川 章史*, 百家 裕季**, 岡本 孝美***, 中村 泰人****
Akifumi AMAKAWA, Hiroki MOMOKA, Takami OKAMOTO
and Yasuto NAKAMURA

Area mean temperature for each surface of six walls inside a living room is estimated on measurement using a cubic net radiometer. The walls include a floor with electric heating, a south wall with window curtain, a north wall with curtain in part and a ceiling. Reliability of temperature estimation is discussed comparing measurement of surface temperature of a west wall by 36 sensors of thermo-couple. The result shows high reliability for values of surface temperature obtained by using the cubic net radiometer. In the case of receiving solar radiation on the curtain the error increases between the estimated and the measured.

Keywords: wall surface temperature, estimation, measurement, cubic net radiometer, shape factor, reliability
壁表面温度、算定、測定、立方体正味放射計、形態係数、信頼度

1. 緒 言

室を構成する床・窓・天井を含む周壁全体の表面温度は、室の熱環境性能評価において必要とされる要素である。性能評価の対象は室内の熱環境評価と、省エネルギーの観点から換気と壁面からの伝熱量評価である。「室内環境測定マニュアル」¹⁾では、室内温熱環境、熱負荷要素に相当する。室内の熱環境評価では、計測に限れば必ずしも室内周壁の表面温度を必要としないが、解析の場合はすべて、一般にも周壁の表面温度に形態係数を乗じて、人体形状に対応した平均放射温度を求め、それを評価に用いている。熱損失・熱取得など、壁を通じての伝熱量が知りたい場合は、室内周壁の表面温度を知ることは必須の要件である。

熱環境性能評価は主として解析に依存しており、これまでに精緻な研究成果が蓄積されている。しかし、解析結果を検証する計測法では、解析法の方式に整合する信頼性の高い方法が十分でない。すなわち、表面温度測定法は接触法と非接触法に大別され、接触法ではセンサーとして熱電対やサーミスタなどが用いられるが、局所的で測定範囲が限定される。したがって、広い壁面を覆うには多数のセンサーを用いる必要があるので、室内周壁の表面温度を知ることが容易でない。また非接触法では、赤外線感知型センサーを用いて接触法より広い範囲を測定できる利点があるが、それでも室内周壁すべての表面温度を求めるためには、センサーの視野の方向を幾度

も変える操作が必要になり、操作に多大の時間を要するので実際のでない。このように、温度に関して計測法は性能的に解析法に及ばない、というのが一般的認識であろう。

こうした状況のもと、著者らは周壁温度計測法の開発のため、立方体正味放射計²⁾ ^{注1)}を用いた計測の応用として、室内周壁6面(床・天井と窓を含む周壁4面)のそれぞれの面積平均表面温度を算定した³⁾ ^{注2)}。この方法は、従来不可能であった室内全周壁の表面温度の計測算定を可能にしたが、得られた結果の信頼性評価については、定性的な説明にとどまっていた。そのため本論文では、定量的な説明を与えることを目的として、熱電対を用いた接触法による測定結果と比較検討を行う。

なお、本論文は既発表文献⁴⁾を基に加筆構成したものである。

2. 方 法

2.1 測定の対象とした室

測定の対象とした室^{注3)}は、図1に示すように、平面4.5m×6.0m、天井高2.45mの、住宅のLDKの造りである。南面は一部が壁で他は窓であり、カーテンが二重にかけられている(図示はしていない)。北面はキッチンにつながる開口があり、間仕切り代わりにカーテンがかけられている(図中に矢印で示す)。そのカーテンは、キッチンにある排気ファンの作動によって室からの一定換気を確保するため、

* 関西電力(株)エネルギー利用技術研究所

** PS (株) 修士(工学)

*** 元 熊本県立大学 修士(工学)

**** 熊本県立大学 京都大学 名誉教授・工博

The Kansai Electric Power Co., Inc.

PS Company Ltd., M. Eng.

Past Prefectural University of Kumamoto, M. Eng.

Emeritus Prof., Prefectural University of Kumamoto, Kyoto University, Dr. Eng.

図1 面放射温度測定のためのセンサーの配置

西壁から幅 20cm ほどを開けた状態にしてある。南壁・東壁・西壁は高断熱構造で、東壁と西壁は対称形でキッチン寄りに扉が一箇所ある。両壁とも背面側の空間は擬似外気として機能させるため、ファン3台で強制的に大量の外気を吸い込む構造になっている。天井は一般的な石膏ボードによる仕上がりで、照明器具が2灯とりつけられているが、測定中は消灯された。床は電気式の暖房パネルが敷設されていて、室内の周壁で温度差を生じさせるために、測定は外気温の低い冬季に床暖房を作動させて行われた。

2.2 室内周壁表面温度の算定方法

研究対象は、立方体正味放射計¹⁾を用いて立方体6面で面放射温度 (PRT) の測定を行い、それから周壁6面の面積平均表面温度を算定する方法³⁾ ²⁾である。詳細は次のとおりである。

図1において、室のほぼ中央の■印で示す点C、高さ100cmに中心が位置するよう、また、立方体の表面が床と壁に垂直または平行になるよう、立方体正味放射計をセットした。写真1に測定状況を示す。計測によって立方体の6表面で個別に、入射する長波長放射の熱流束 $[W/m^2]$ と日射の熱流束 $[W/m^2]$ が得られる。入射する長波長放射の熱流束は、面放射温度 PRT (Plane Radiant Temperature) $[K]$ または $[^{\circ}C]$ でも表される。室内では、波長の短い日射の熱流束は南面のカーテンにさえぎられて、実質的に $0 W/m^2$ であった⁵⁾ので、以後は長波長放射について面放射温度で表す。

室内周壁を構成する材料には金属性のもの(放射率が小さい)がなく、表面の放射率はすべて1(黒体)に近いと考えられるので、室内の全周壁が、温度は異なるがそれぞれの面内で温度が一樣な、6面の黒体からなっているという仮定が満たされるとすると、測定された立方体6面の面放射温度は、室内周壁表面温度の形態係数の重みつき平均で表されることになる。すなわち、立方体の第*i*面($i=1, 2, \dots, 6$)の面放射温度 T_{ri} $[K]$ は、式(1)で表される。

$$T_{ri} = (F_{i1}T_{w1}^4 + F_{i2}T_{w2}^4 + F_{i3}T_{w3}^4 + F_{i4}T_{w4}^4 + F_{i5}T_{w5}^4 + F_{i6}T_{w6}^4)^{1/4} \quad (1)$$

写真1 西壁・南壁・床と立方体正味放射計による測定状況

場所による温度変化の幅が狭ければ、線形化した次の近似式(2)を用いてよい。

$$T_{ri} = F_{i1}T_{w1} + F_{i2}T_{w2} + F_{i3}T_{w3} + F_{i4}T_{w4} + F_{i5}T_{w5} + F_{i6}T_{w6} \quad (2)$$

ここに、 F_{ij} は立方体の第*i*面から周壁の第*j*面($j=1, 2, \dots, 6$)を見る形態係数 $[ND]$ 、 T_{wj} は第*j*周壁面の表面温度 $[K]$ である。形態係数 F_{ij} は、視野が 180° の正射影型魚眼レンズを装着したカメラによる写真撮影を基に、画像上で第*j*壁面の面積を求めて算定される。これらの関係は行列式で表されるので、逆行列を求めることによって、室内周壁6面の面積平均表面温度 T_{wj} が算定される²⁾。

写真2に、点C、床上100cmにおける立方体の6表面から魚眼レンズを通して見た周囲の形態を示す。室内周壁は、天井面・床面・南壁面・西壁面・北壁面・東壁面の6面とした。ただし床面は、床下に暖房パネルのある部分とない部分で表面温度が著しく異なるので、暖房パネルのない部分はむしろ壁の温度に近いとみて、床面は実質的に暖房パネルのある部分だけとし、床で暖房パネルのない部分はそれに接した壁に含めるものとした。写真2に見られる床の白線が暖房パネル有無の境界を示す。暖房パネルのない床と壁とは表面温度が異なるであろうが、両者合わせて面内では表面温度は一樣とみなすのである。同様に、写真2を参照して、南壁面は窓の部分と壁の部分で表面温度が異なるであろうし、北壁面ではカーテンの部分と壁の部分で表面温度が異なるであろうが、いずれも両者合わせて表面温度は面内で一樣とみなす。

表1に、写真2の画像を基に面積をプランメーターで求めて算定された形態係数 F_{ij} の諸数値を示す。形態係数は、円形画像の面積に対する所定の周壁の面積の比で表される。

表1 立方体表面から周壁面を見る形態係数 F_{ij}

面	天井	南面	西面	北面	東面	床面	合計
①	0.810	0.044	0.060	0.020	0.066	0	1.000
②	0.205	0.384	0.090	0	0.087	0.234	1.000
③	0.186	0.058	0.486	0.030	0	0.240	1.000
④	0.244	0	0.124	0.231	0.120	0.281	1.000
⑤	0.204	0.066	0	0.030	0.480	0.220	1.000
⑥	0	0.039	0.043	0.016	0.052	0.850	1.000

①は立方体の上向き面、②は南向き面、③は西向き面、④は北向き面、⑤は東向き面、⑥は下向き面、を表す

立方体：No. 6（下向き面）

立方体：No. 3（西向き面）

立方体：No. 1（上向き面）

立方体：No. 4（北向き面）

立方体：No. 2（南向き面）

立方体：No. 5（東向き面）

写真2 視野180°の正射影型魚眼レンズを通して立方体表面から見た周壁の形態（設置場所は室内中央部の点C）

図2 西壁の熱電対による表面温度測定点(36点)の配置

2.3 熱電対による西壁の表面温度測定法

立方体正味放射計を用いて周壁の表面温度を算定する方法の信頼度を明確にするために、周壁の代表として西壁を選び^{註4)}、熱電対の接点を壁表面に貼りつけて温度を測定した。

図2に、熱電対による表面温度の測定点の配置を示す。西壁表面上の60cm間隔で4行9列の交点、合計36点である。西壁に接した暖房パネルのない床の部分は含まない。用いた熱電対はT型、直径は0.2mmである。

2.4 その他の関連測定項目

室内気温の測定点は、図1の◎印で示す7点、高さはほぼ中央高さの床120cmである。西壁表面温度測定と同一仕様の熱電対が用いられた。

外気温の測定には南面の窓の外側で、直径0.076mmの極細T型熱電対を素線のままで用いた。

測定中の天気状態を知るため、南面の窓ガラスとカーテンの間の狭い空間に日射計を水平に置き、日射量を測定した^{註5)}。

3. 結果

3.1 立方体表面における面放射温度の測定結果

図3に、2005年1月26日に立方体正味放射計で測った、立方体表面における面放射温度を示す。10時前から床暖房が開始され、面放射温度が上昇をはじめ、約6時間経過後に値が安定している。直達日射のある12:30に注目して面放射温度を見ると、最も高いのはNo.6(立方体の下向き面)で、これは温度の高い床面を大きく見るためである。次いで高いのはNo.2(南向き面)で、経時変化を見ると日射量の変動と同期している。これは日射がカーテンに当たって

吸収し、カーテンの表面温度が上昇したことを意味している⁵⁾。No.3(西向き面)、No.4(北向き面)、No.5(東向き面)の3面は、ほぼ同値で、経時変化も少ない。最も低いのはNo.1(上向き面)で、温度の高い床面をまったく見ないためである。

室内気温は、同一水平面の7点は近い値を示し、相互の変化は±0.3Kを超えないので、同一とみて水平面内平均で表すこととした。室内気温は面放射温度のNo.2(南向き面)より低く、No.3、No.4、No.5よりは高い値で、No.2ほどではないが、日射量の変動に同期する傾向がうかがえる。このことは、南面カーテンの日射吸収の影響が、対流によって室中央高さの気温にまで及んでいることを示している。面放射温度のそれぞれと室内気温には、相互に矛盾するところがないことから、いずれも妥当な値と判断される。

なお、室の換気回数は、電気コンセント部分に目張りをして隙間風の抑制をはかったためか、0.25回/hと少ない値を示した。

3.2 室内周壁6面の面積平均表面温度の算定結果

図4に、立方体表面における面放射温度を基に、周壁6面を黒体とみなして算定した面積平均表面温度を示す。1月26日の場合である。全体の特徴として、日射量の変動と同期して南壁面の変動の激しいことが指摘できる。この室の熱環境形成には南面カーテンの日射吸収が大きく関わっていることが示唆される。

前項と同じく直達日射のある12:30に注目して、周壁表面温度の算定値(実線)を見ると、最も高いのは南壁面である。次いで高いのは床面である。床暖房の床面より日射を受けたカーテンのある南壁面が高いのが注目される。3番目に高いのは天井面である。それから2Kほど温度が下がって、西壁面と東壁面はほぼ同値で、北壁面が最も低い。室内気温は床面の表面温度より3Kほど低いが、天井面よりは1Kほど高い温度である。

午前中の天気は「晴れときどき曇り」で、直達日射がなくなったときでも、南壁面の表面温度は室内気温より高かったが、午後は「曇り」となって、南壁面の表面温度は室内気温より低くなることしばしばであった。南壁面を除くと1日中、壁面によって表面温度および室内気温の大小の順序は変わらなかった。

これらの結果から、この室における加熱源と吸熱源については、次のような構造が想定される。

〔加熱源〕床面、南壁面(カーテンで直達日射の吸収)

〔吸熱源〕天井面、西壁面、北壁面、東壁面、換気(外気)

以上を要するに、周壁表面温度の算定値および室内気温の値には相互に矛盾がなく、定性的には妥当とみなされる。

図3 立方体6表面の面放射温度の計測値(1月26日)

図4 室内周壁6面の表面温度の算定値(1月26日)

3.3 西壁の表面温度の実測結果

図5は、1月26日の西壁表面温度36点の実測結果である。図に示すように、西壁表面温度には空間分布があって、初期を除くと最高と最低で、最大約3.5 Kの幅が生じた。しかし、床面からの同一高さでは気温に分布がないので、壁表面温度でもほとんど差がないとみて同一高さで平均すると、図6となる。

西壁面上、中段の「ロ」の並び、すなわち「ロ」行(床上1525mm)と「ハ」行(床上925mm)がほぼ同値で高い表面温度を示している。下段の「ニ」行(床上325mm)は最も低い。しかし、上段の「イ」行(床上2125mm)は、夜間には中段の「ロ」行や「ハ」行に接近するが、直達日射のある日中は、それらとの差が拡大して、低くなっているのが注目される。西壁表面では中段の温度が上段より高くなっているのである。この特徴は、熱画像式の放射温度計の測定でも確かめられた。その理由としては、南面カーテンの高温からの長波長放射伝達において、西壁では中央部で形態係数が大きくなるために、影響が強く表れたと考えられる。このことはまた、西壁では対流伝熱より放射伝熱が卓越していることを意味する。

図5 西壁36点の表面温度の実測値(1月26日)

図6 同一高さで平均した西壁表面温度の実測値(1月26日)

4. 考 察

4.1 西壁表面温度の実測値と算定値の比較

図4中に、点線で示したのが西壁表面温度の実測値(36点の平均)である。見かけ上、実測値は算定値より若干、高くなっている。実測値は確かな値と考えられる一方で、先に示したように、算定値は定性的に確からしい。両者の違いは何か。整合するのか、しないのか。それが問題である。

差の変化の状態を明確にするため、図7に西壁表面温度の実測値と算定値の差を示す。午前から13:30までの前半は、天気は「晴れ

ときどき曇り」で直達日射があり、最大で1.3 Kの差を示すが、後半は曇って直達日射がなくなり、約0.6 Kの差にとどまっている。次の日の天気は「曇り」で、1日通して0.6 Kの差であった。このことから、「曇り」の直達日射がない状態では、西壁表面温度の実測値と算定値に0.6 Kの差を生じさせる構造的な原因があることが推測される。「晴れときどき曇り」でも同様で、差の最大値1.3 Kのうち、0.6 Kは構造的原因によるもの、残り0.7 Kが直達日射の作用によるもの、と考えられる。

図7 西壁表面温度の実測値(36点平均)と算定値(面積平均)の差(1月26日)

4.1.1 温度差0.6Kの構造的な原因の推測

西壁表面温度の実測値と算定値に0.6 Kの差を生じさせる構造的な原因の解明のために、表面温度の実測値に基づいて算定値の推定を試みる。

実測値は36点の直接測定の相加平均であるが、算定値は立方体から見た形態係数の重みつき平均であり、さらには西壁に接した低温の床面を一部含んでいることで、差が生じたと考えられる。

西壁に接した床部分の表面温度は連続測定されていないが、次の日(1月27日)に行った単独測定では、西壁の中央部が20.2°Cのときに、この部分は18.3°Cという、両者で1.9Kの差を観測した。この低温は床構造の特性と思われる。さらに西壁の下の方の床面では、隙間風の侵入によって14°Cという低い温度を観測した。このときの外気温は8°Cで、前日(1月26日)とあまり変わらない。

立方体No.3(西向き)面から西壁面を見た形態係数は0.486である(表1参照)が、そのうち、表面温度の実測「イ」行が占める領域を見る形態係数は写真2(立方体No.3)から求めて0.087、「ロ」行を占める形態係数は0.123、「ハ」行を占める形態係数は0.133、「ニ」行を占める形態係数は0.091、西壁に接した床部分を見る形態係数は0.052、計0.486であった。

一例として、天気は「曇り」で直達日射のない15:00に注目すると、表面温度の算定値18.5°Cに対して、実測値は、図6の同一高さ平均で「イ」行19.0°C、「ロ」行19.3°C、「ハ」行19.2°C、「ニ」行18.6°Cであった。平均は19.1°Cであるから、実測値と算定値の差は0.6Kである。西壁に接した床部分の表面温度は、先の説明から、19.1°C-1.9K=17.2°Cでよいとみなして、17.2°C:14°Cを4:1で面積配分すると、西壁表面温度の推定値 θ [°C]は、

$$0.486\theta = 0.087 \times 19.0 + 0.123 \times 19.3 + 0.133 \times 19.2 + 0.091 \times 18.6 + 0.052 (4 \times 17.2 + 1 \times 14.0) / 5 \quad (3)$$

より、 $\theta=18.8[^\circ\text{C}]$ と得られる。したがって、算定値と推定値の差は $18.5^\circ\text{C}-18.8^\circ\text{C}=-0.3\text{K}$ になる。温度計測器の許容誤差範囲は一般に $\pm 0.3\text{K}$ であるから、実質的に推定値は算定値に一致する。このようにして、温度差 0.6K の構造的原因が解明された。

4.1.2 温度差 0.7K の直達日射の作用の推測

直達日射の作用について検討する。図3、図4は、データが1分間隔で示されている。立方体正味放射計の時定数は約 $10\text{秒}^{2)}\text{注1)}$ であるから、計測器起因の時間遅れはなく、データは本来の変動に追従している。

図4で記録データをたどると、日射量は12:13からステップ(階段)状に増加して30分以上、継続している。このとき、1分遅れて南壁の表面温度が急激に上昇をはじめ、時間とともに速度をゆるめながら上昇する指数関数的増加を示している。次いで、4分遅れて室内気温と天井の表面温度が上昇をはじめ。西壁表面温度の同一高さで平均した実測値(図6)では、「イ」行と「ロ」行が同時に上昇速度を速める兆候が見られるが、「ハ」行と「ニ」行は判然としない。13:08からはステップ状に日射量が減少し、40分以上継続する。このときは、ほぼ同時に南壁の表面温度が指数関数的に下降し、2分遅れて室内気温と天井の表面温度がゆるやかに下降に転じ、同時に「イ」行と「ロ」行の表面温度がいったん下がってのち、緩やかに上昇するのが見られる。南壁面、天井面、室内気温と、「イ」行と「ロ」行の西壁のほかには、目立った変化がない。

この結果から、直達日射があるときは南壁面が加熱源となって、接する空気が対流で暖められ、天井面が放射と対流で暖められるという伝熱構造が推察される。それに伴って西壁の上部の表面温度が上昇し、おそらく東壁も同様であろうが、その上昇が西壁表面温度の平均の実測値を上昇させた、と推測される。しかし、西壁の下部は低温のままで推移して、表面温度の算定値には変化が表れなかった、その結果として違いが 0.7K に達したものと推測される。

4.2 測定場所の違いによる計測の有効性

室内周壁6面の表面温度が相互に異なっていて、「温度一様、黒体6面」の条件が完全に満たされる場合は、立方体正味放射計は室内のどの場所に設置しても、周壁各面の正しい表面温度を求めることができる。ただし、立方体表面センサーが余弦則(完全拡散性)を満たさなければならない。このことは理論的に自明である。そこで測定場所の選択の違いが実際にどの程度有効であるかを、検討してみる。

図1において、□印の点N、点Sは、点Cとは異なった場所で測定した場合に、同様な結果が得られるかどうかを確かめるために、移動計測を行った場所である。測定は1月27日、結果の信頼度を高めるために3回、10時、13時、16時から、それぞれ開始した。いずれも10分ずつ、点S→点C→点Nの順序で立方体正味放射計を移動させながら、計測を行った。

場所による計測結果の違いを「地点差」で評価することにした。地点差とは、点Nでの計測値と点Sでの計測値の差、と定義する。実質的には温度計測器の精度が一般に $\pm 0.3\text{K}$ であるから、その範囲内にあれば地点差がないとみてよい。いうまでもなく、評価の観点からは地点差がないことが望ましい。

図8 面放射温度(計測値)の点Nと点Sの地点差(1月27日)

図9 周壁表面温度(算定値)の点Nと点Sの地点差(1月27日)

図8に、面放射温度(計測値)の地点差を示す。 $\pm 0.3\text{K}$ の許容範囲を超えるのは、立方体の南向き面と北向き面で、南向き面は絶対値で北向き面の約2倍の値を示した。南向き面の地点差が高い値を示した原因は、点Nでの南向き面が点Sでの南向き面より高温の床を大きく見ため、かつ、南向き面では日射の影響で面放射温度が高いため、それだけ効果が増大した、ということである。それに対して、北向き面の地点差が負(－)で約 $1/2$ にまで減っているのは、点Sでの北向き面が点Nでの北向き面より高温の床を大きく見ているけれども、南壁面と違って北壁面が低温であるため、それだけ効果が減少することになった、ということである。

図9では、周壁表面温度(算定値)の地点差を示す。面放射温度の場合と異なって局所的な影響は消滅し、突出して大きい値を示すのは北壁面のみとなった。他の5壁面は最大で $\pm 0.5\text{K}$ 以下、概して $\pm 0.3\text{K}$ 以下である。

北壁表面温度の地点差が 1.58K と大きい値を示すのは、北壁の表面温度に空間分布があることによっている^{注6)}。算定法で「温度一様、黒体6面」という仮定をおいているので、実際が仮定とずれている場合には、その差が誤差となって現われる。逆に、南壁表面温度に地域差が現われなかったのは、カーテン部分と壁部分で表面温度に実質的な違いがなかったことが推察される。

したがって今の場合、地点差の影響を弱めるためには、立方体正味放射計の設置場所を北壁面から遠ざけよ、ということである。周壁表面温度の算定にあたっては仮定を満たすように、注意深く周壁面を分割しなければならない。

以上の検討から、立方体正味放射計の設置場所は、室内の中央部であれば問題はないといえる。垂直方向でも基本的に水平方向と同様で、床面や天井面などに温度の非一様性がないことを条件として、床上高さ 100cm で十分であるといえる。

天井面で「温度一様」が満たされない場合は天井面を細分割し、壁面の分割数を少なくして合計が6面になるようにできれば、対応が可能である。

5. 結 論

室内において、立方体正味放射計を用いて測定を行うと、結果から室内周壁6面の面積平均表面温度を算定することができる。本研究は、このようにして得られる算定値、および算定法の信頼性を確かめるために、住宅の居間(LDK)を模した室内で測定を行って、室内周壁6面の表面温度を算定し、一方、熱電対を用いた接触法により西壁面上36点の表面温度を測定して、実測値と算定値の比較検討を行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 西壁表面温度について、実測値は算定値より見かけ上、約0.6 K高くなったが、それは対象とする面積と平均の仕方のわずかな違いによって生じたもので、その効果を考慮すれば、両者は一般の温度計測器の許容誤差範囲 ± 0.3 K内で一致した。よって、西壁表面温度の実測値と算定値はともに正しく、信頼できるとみなされる。

(2) 南面するカーテンに直達日射が当たったときには、西壁表面温度の実測値と算定値の温度差が最大で0.7 Kまで上昇するという効果があった。これは日射を吸収して高温になったカーテンからの対流と放射による伝熱によって室内気温と天井表面温度が上昇し、呼応して西壁上部の表面温度が上昇して実測値が上昇したが、下部は低温のままであったために算定値は上昇に至らなかった。その結果が0.7 Kの差となって表れたものと推察される。

(3) 室内周壁6面で算定された表面温度の相互の変化について、定性的に合理的で矛盾のない説明ができた。一方、西壁表面温度の算定値は、定量的にも正しいことが先のとおり説明できた。両者の説明から、周壁6面の他の表面温度の算定値も定量的に信頼できるものとみなされる。

(4) 面内表面温度に空間分布があると、結果に誤差として効いてくることがあるので、「温度一様、黒体6面」の仮定を満たすように周壁の6面は選ばなければならない。

(5) 測定の際の立方体正味放射計の設置場所は、室の中央部であれば問題はない。高さ方向は、床面や天井面などに温度の非一様性がないことを条件として、床上100 cmで十分である。

(6) 日射を受けた窓カーテン・システムが周辺の室内熱環境形成に及ぼす非定常伝熱過程が、立方体正味放射計を用いた計測によって把握することができた。

注

注1) 立方体正味放射計²⁾は一辺が100 mmの正方形、厚さ3 mmの平板状の環境放射束計6枚からなっている。6枚は互いに独立で、平板上の中央部30 mm $\times$ 30 mmがセンサーである。環境放射束計1枚ごとに、起電力[mV] 3点、センサー表面温度[$^{\circ}$ C] 1点、計4点の測定を行うことによって、センサーに入射する(センサーに当たる直前の)短波長放射の熱流束(日射量) J [W/m²]と長波長放射の熱流束 σT_{w}^4 [W/m²]が、別々に約10秒の時定数で測ることができる。長波長放射の測定精度は ± 2 W/m² (± 0.3 K)、日射の測定精度は ± 3 W/m²を有する。立方体正味放射計を支える方法は、立方体の四隅から支持棒を伸ばして定位置に固定することによる(写真1参照)。(σ はステファン・ボルツマン定数 = 5.67×10^{-8} W/m² K⁴)。

注2) 立方体に入射する長波長放射束から室内周壁表面温度を算定する法³⁾ 室内の周壁が「温度一様、黒体6面」の仮定を満たすとき、

p : 立方体に入射する長波長放射束の列ベクトル、 p_i = 立方体の第 i 面に入射する長波長放射の熱流束 (σ を省略) $T_{\text{w}i}^4$ [K⁴]、 $i = 1, 2, \dots, 6$

F : 形態係数行列、行列の要素 F_{ij} = 立方体の第 i 面から周壁の第 j 面を見る形態係数 [ND]、 $j = 1, 2, \dots, 6$

w : 周壁表面から射出する長波長放射束の列ベクトル、 w_j = 周壁の第 j 面から射出する長波長放射の熱流束 (σ を省略) $T_{\text{w}j}^4$ [K⁴]、

とすると、

$$p = F w \quad (\text{a1})$$

であるから、周壁表面から射出する放射束 w_j は、 F の逆行列 F^{-1} を求めて、次の式で算定することができる。

$$w = F^{-1} p \quad (\text{a2})$$

周壁の表面温度 $T_{\text{w}j}$ [K] は、 w_j の4乗根である。

注3) 実験対象とした室は、軽量鉄骨造2階建ての1階中央部にあり、外気に面した南壁はグラスウール100 mmの内断熱構造、東壁と西壁はいずれも壁中心にグラスウール50 mmを挟んだ断熱構造である。北壁の間仕切りには断熱材が使われていないが、東寄りの約1/4は既設の間仕切り、中央部の1/2は後設の簡易間仕切りで、熱的構造が異なっている。南壁面は、壁は1/3、窓は2/3の面積を占めている。

注4) 東壁は西壁と同一構造のため、熱電対による表面温度の測定を省略した。北壁面と南壁面は、注3)で述べたことから、空間的に不規則な表面温度の変化(ばらつき)が予想された。天井面は照明器具があるほか、測定の作業性に難があった。床面は電気式床暖房によって規則的であるが局所的な表面温度分布が生じた。以上の理由より、表面温度の直接測定は西壁に限定した。

注5) 日射量を測った目的は、太陽が雲から出るか隠れるか、というような晴曇の天気概況を知ることにある。日射量の絶対値でなくて、経時変化を知ることである。したがって、強いて鉛直面の日射量を測る必要はなく、窓際の水平面の測定で十分である。なお、日射が室内に及ぼす影響は日射の短波長成分ではなく、カーテンに日射が当たってカーテンの温度が上昇し、それからの二次放射、すなわち長波長成分によるものである。

注6) 北壁面は西寄り1/4がカーテンで、中央部と東寄りが間仕切り壁であるが、注3)で述べたように、中央部と東寄りでは熱的構造が違っているため、カーテンと間仕切り壁とで表面温度に空間分布が生じるのはもちろん、間仕切り壁の中央部と東寄りでも空間分布が生じる可能性がある。

参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会：建築室内環境・設備システム性能評価方法の標準化研究「室内環境測定マニュアル」、2005.11.
- 2) 中村泰人、辻原万規彦、西村浩一、香川治美：環境放射計からなる立方体正味放射計の構成と較正、日本建築学会環境系論文集、第580号、pp.15-21, 2004.6.
- 3) 中村泰人、岡本孝美、百家裕季、天川章史：床暖房で熱的快適性を実現するための設計法の同定、日本建築学会環境系論文集、第594号、pp.61-67, 2005.8.
- 4) 天川章史、百家裕季、岡本孝美、中村泰人：立方体正味放射計を用いた室内周壁表面温度の算定の有効性、日本建築学会大会(近畿)学術講演梗概集、環境系D-2, pp.71-72, 2005.9.
- 5) 百家裕季、中村泰人、岡本孝美、天川章史：電気式床暖房室内の熱放射場に関する実験的研究、日本建築学会環境系論文集、第594号、pp.23-29, 2005.8.

(2006年6月30日原稿受理、2007年1月5日採用決定)