短波長放射中のガラス表面温度測定方法に関する実験的研究
EXPERIMENTAL STUDY ON MEASURING METHOD FOR GLASS SURFACE
TEMPERATURE UNDER SHORTWAVE RADIANT ENVIRONMENTS渡部 真志*, 武田 仁**
Masashi WATANABE and Hitoshi TAKEDA

This paper describes the measuring device for glass surface temperature under shortwave radiant environments.

The measuring method of proposing is as follows :

This method in which the cover glass (thickness $50\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$, 30 mm by 30 mm) for use in electronics and microscopes, coated thinly and uniformly with a cyanoacrylate-based colorless and transparent glue, is gently bonded onto the glass specimen with bare thermocouple element with diameter of $25\mu\text{m}$ sandwiched in between.

We verify this measuring method by using radiation thermometer with a measurable wavelength range of approx. $8\mu\text{m}$ to $13\mu\text{m}$, under equal distribution of luminous intensity from background surface.

Keywords : glass surface temperature, shortwave radiation, cover glass, radiation thermometer

ガラス表面温度, 短波長放射, カバーガラス, 放射温度計

1. はじめに

建築物を構成する床・壁・屋根等が比較的断熱性能を高めやすく固定的であるのに対し、開口部（窓）は断熱性能を高めることが相対的に難しい一方、室内の良好な環境の確保のために、また人間の精神的・社会的な求めに従い、内・外部環境のかかわり合いを可変的に調節し得る機能を伝統的に持つ唯一の部位であると言える。また、開口部（窓）と他の部位との違いを決定的にしているものは短波長放射について優れた透過特性を持つ板ガラスの存在であると思われ、内・外を区画する面材として断熱性能上決して有利な材料とは言えないにもかかわらず通常の窓にほぼ偏偏的に板ガラスが採用されているのは、採光（熱）や眺望という本質的にガラスが担っている機能が、人間が生活を営む一般的な空間に欠かすことのできない重要なものと認識されている現れであろう。

開口部のこうした機能を生かし発展させながら、他の部位に比べ熱的にも温冷感的にも弱点になりやすい宿命をどう克服するかが、開口部の大きな課題のひとつと考えられる。窓ガラスの表面温度は、こうした開口部における熱流の把握や解析にとって有力な指標になり得ると

同時に、室内の熱的快適性や人体の温感の形成を検討する場合にも欠かせないと言える。

以上のことから、本論文では短波長放射がある故に真値が得にくいと考えられる開口部（窓）のガラス表面温度を、より明確に測定し得る方法の開発と、その測定値を現実の地上における太陽放射の下で検証することを目的とし、短波長放射中のガラス表面温度測定方法として、どの程度の妥当性があるかについて論じることとする。

2. 各種の表面温度測定方法とその誤差検討用基準温度

建築環境工学においては、熱電対や測温抵抗体等の感温素子を物体表面に接触固定させ伝導伝熱により感温素子温度を真の物体表面温度に近似させてその表面温度を得ようとする接触式表面温度測定方法は広く行われ、測定精度についても幾つかの研究事例が報告されている。

宮野・小林は^{x1)}、熱電対の種類、貼付や接着の方法、測定表面の材質や形状が測定誤差に及ぼす影響に関して、供試体材料内に埋め込まれた熱電対により得た定常伝熱下の内部温度勾配より求めた温度を一応の真の表面温度として検討を加えている。しかしながら、その基準表面温度の扱い方を短波長放射の影響を受けている板ガ

本論文の一部は、1990年の日本建築学会大会学術講演会に発表したものである。

* 東京理科大学理工学部建築学科 助手

** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology Science Univ. of Tokyo
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Technology Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

ラスについて適用するには無理があるように思われる。

梅干野・塩月^{文2)~文4)}らは、スリガラスや透明ガラスに貼付材や接着剤により各種熱電対を接触固定させ、これに白熱人工光源により放射を与え、市販の走査式赤外線放射温度計により得た放射温度画像を用いて、熱電対の線径、形状、感温部の吸収率や貼付材の種類、接着剤塗布状態等の誤差要因が測定誤差に及ぼす影響について体系的な検討を加え、一定の知見^{文5)}を得ているが、いずれの基準表面温度もその検証ができていないと難しい面があり、誤差の検討のよりどころとなる基準値が暫定的なものである感は否めない。

ところで、赤外線放射温度計等によるいわば非接触式表面温度測定方法は、測定対象表面の温度場のかく乱がない点で非常に優れているが、放射温度計が感度を有する波長帯域についての対象表面の放射特性や、背景からの放射の影響と大気吸収の把握という厄介な問題を解決する必要がある。特に常温近辺の物体を対象とする場合、波長8~14 μm 前後の検出範囲がSN比上最も有利となるが、この波長域でガラスを測定対象とする場合、背景からの放射の反射成分の影響が無視できない問題となる。

梅干野ら^{文6)}は、ガラスによる放射の反射がほとんどない波長帯域(6.5~8.6 μm)に感度波長帯を持つ放射カメラを試作し、そのガラス表面温度測定結果に周囲の高温物体からの放射の影響がほとんど出ないことを明らかにしている。しかし、この方法により常温域のガラス表面温度の絶対値を高い精度で定量化することは、測定波長帯域を絞り込んだために常温物体から射出されるものと大きいとは言えない放射エネルギーの限られた一部しか利用しておらず、SN比上難しい面があるのではないかと予想される。

また筆者ら^{文7)~文11)}も熱平衡式によるガラス温度推定方法^{文12)}、独自の考案のものも含む接触式および非接触式測定方法等、計4つの測定方法を用意し、現実の太陽放射の存在する屋外実験を中心に1つのガラス供試体について同時にこれらの測定を実施し、その各測定の比較により、未知の真のガラスの温度を直線の交点を求めるように探りだそうとしてきたが、表面からの放射を検出し、表面温度を求めようとする2つの方法に誤差がある程度入る余地を排除しきれず、真値を求めるための直線を一定の幅を持つ帯と見なすべきであることが明らかになりつつあり、基準温度がこの帯の幅の中のどの辺りにあるかは特定できないと言える。

以上の検討により、基準温度をより明確にするための測定方法の開発を非接触式測定方法の範囲内で行ったり、その絶対性を根拠とする形で他の方法との比較から基準温度としての妥当性を検証することには現時点ではなかなか越え難い難しさがあると考え、本研究では

基本として接触式の範囲内で測定方法の開発を行い、接触式の大きな欠点と言える測温体の接触による測定対象表面温度場のかく乱を極力抑える方法を考究することとした。

3. 本論文のガラス表面温度測定方法

接触式表面温度測定方法の場合、測定対象表面に熱的に異なる特性を持つ測温体表面を形成している限り本質的な限界があり、またそのことにより検証の手掛かりもつかみにくなっていると思われる。むしろ、測定対象表面に測温体を形成した後もその表面が本来の表面と事実上変わらないと考えられる方法を追求する方が測定精度上も有利であり、検証を進めるうえでも同一表面の相対的な温度差の有・無を非接触で検出し得る放射温度計の長所を活用でき、活路が開けると考えられる。

そこで本研究では、原理的に測温体装着後も装着前と表面の短・長波長放射に対する特性がほとんど変化しないと考えられる公称厚50~75 μm 、大きさ30 mm×30 mmの透明ガラスシート(以下、カバーガラスと称する)を用い、極細線径の熱電対を測定対象表面に被覆接着することとした。従来まで、通常の建材の表面温度測定に用いられることが多かったと思われる一般的な合成樹脂製ベースの粘着テープは、そのベース厚が約50 μm 、接着層厚が約25 μm 前後^{文1)}であり、本研究のカバーガラスはこれとほぼ同じ水準の厚さと言え、被覆材として用いた大きさも30 mm角と、その公称厚の600倍から400倍の平面的広がりを持っているため、対流熱伝達量を違ったものにするほど表面近傍での気流をかく乱することは無いと考えられる。

感温素子には基本としてK型^{文2)}の裸熱電対を用いることとし、それ自体の短波長放射特性のガラスとの違いによる影響を極力抑えることを意図して、その素線径は25 $\mu\text{m}\phi$ ないし12 $\mu\text{m}\phi$ としたが、その表面に反射率の高い異種の金属膜を形成することは熱起電力への影響を懸念して行っていない(以下、これを無処理と称する)。また、比較のために素線径25 $\mu\text{m}\phi$ のT型無処理熱電対も用いた。素線径を25 $\mu\text{m}\phi$ 以下とすることにより、カバーガラスで被覆される熱電対の各構成金属線の長さは、感温接点を中心として各々素線径の600倍前後以上となる。

この熱電対を測定対象表面にカバーガラスで被覆接着する際に用いる無色透明接着剤^{文3)}はシアノアクリレート系の低粘性型のものとした。この接着剤は、その100%成分であるシアノアクリレートモノマーが材料表面や空気中の水酸基:OH⁻(主に水蒸気中の)によりアニオン重合反応を起こし、シアノアクリレートポリマーに変化することにより接着力の発現が得られるタイプのもので、ガラスとカバーガラスの間でも比較的短時間に硬

化し気泡も入りにくい。また、接着初期の粘性が他の接着剤に比べ適度に低く、貼付したカバーガラスを軽くガラスに押し当てる操作により余分な接着剤を周囲に押し出すことが可能で、これにより接着層の厚さを熱電対の素線径程度に管理することが比較的容易である。さらに万一接着層内に微小な気泡が入った場合も、同様の操作によりこれをカバーガラスの外へ押し出せる場合が多い。

この接着剤が硬化した後のシアノアクリレートポリマーという樹脂はアクリル酸のアルキル基がエチルと簡素であるため、アクリル板と通称されているアクリル酸メタクリレート（メタアクリレートポリマー）とその原子構造の主要骨格が近く、種々の物性は互いに非常に似ていると言える。アクリル板（厚3mm）は、地上における太陽放射のエネルギー強度が大きい波長域において透明板ガラスを上回る透過特性²¹³⁾を示しており、本報で用いたシアノアクリレート系接着剤の硬化後の透過特性もこれに近いものと考えられる。このような短波長域における特性は長波長放射を透過しない透明板ガラスとカバーガラスの間に位置する薄い中間層としては問題の少ないものと考えられた。

4. 検証実験方法

本論文のガラス表面温度測定方法により得られた測温が、本来の測定対象ガラス表面温度と必要十分な水準で一致していることが検証できれば、前章3. で提案した方法は、その水準の範囲内でガラス表面の基準温度を測定し得る方法であると言えよう。

本研究ではこの検証をカバーガラスで測定対象表面に被覆接着した極細線径の熱電対感温接点の温度とカバーガラスの空気側の表面温度とを、カバーガラスの熱伝導率やその薄さから考えて実用上等しいと見なし、（この検討は、後述6.章）このカバーガラス表面温とその周囲の測定対象板ガラス表面温との間に温度差が存在するかを、高分解能の走査式赤外線放射温度計による双方の表面の放射温度画像示度の相対比較で検証することとした。

図一 本論の放射温度計の総合感度特性

放射温度計は測定対象表面温度場のかく乱が無いため、大気の吸収と背景の放射環境が同一の状況下で、隣接する同一の材料表面の相対的な温度比較を行うには大変適した機能を有していると言え、面的な温度分布を検出し得る走査式放射温度計は、その走査形式により大きく2つのタイプに分かれる。1つは、一画面を例えば上・中・下と3つに分割し、三器の検知器で同時に走査することにより一画面の走査時間の短縮を狙ったもので、もう一方は、一器の検知器により一画面を統一して走査するタイプで、画面全域を均一な特性で走査でき、表面温度の時系列変化が比較的遅い静止した物体の各所の表面温度の相対比較などの場合に厳密性を確保しやすいと言えるものであり、本研究では後者のタイプを採用した。

この走査式放射温度計に搭載されている検知器はM. C. T. (Hg-Cd-Te: 液体窒素冷却型) で常温域の物体表面から射出される放射の放射発散輝度が最も高くなる波長域に対し、その検知度も最も高くなる性質の量子型検知器で、常温域の物体表面から射出される放射の検出において高いSN比を確保するのに非常に有利と言える。本研究では、同一メーカー製の機種（世代）の異なるこのタイプの放射温度計を2台用いているが、これらの放射温度計検出部を構成する検知器や光学系の本質的な機能や構造は同一のもので、後世代の方は検出した表面温度情報の演算処理機能が前世代の機種に対し向上しているだけである。

この2台の放射温度計検出部の光学系も含めた総合感度特性（メーカー公表）を図一1に示す。これらの放射温度計が感度を有する波長域は、約8~13 μm（ピークに対する半値幅²⁴⁾による表示）である。通常の測定モードにおいて30°Cの黒体を走査する場合、仕様書で公称されている相対的な表面温度差検知能力（最小検知温度差）は2台とも0.1°Cとなっているが、実際の検証実験の際には、日射量や風速が安定し表面温度の時系列変化がほとんど無いと思われる状況下において、4回分ないし16回分（後世代機種のみ）の走査情報を各々加算平均することによりSN比を向上させるSN比改善とメーカーが称する測定処理モードにおいて放射温度画像

図二 透明板ガラス（厚3mm）とカバーガラスの分光反射特性

の収録を行った。この場合の最小検知温度差はかなり向上し、常温域を中心とする温度測定範囲について、4回分の走査情報を加算平均するモードで 0.05°C 、同16回分の走査情報を加算平均するモードで 0.025°C の水準が仕様として公称されている。

隣接するカバーガラス表面と周囲の測定対象ガラス表面との温度が一致しているかを、この走査式放射温度計で検証しようとする場合、非常に重要になってくるのは、使用した放射温度計の測定波長帯域における双方の表面の放射特性の一致の程度であると考えられる。そこで本研究では、カバーガラスを装着していない測定対象そのものである建材用透明板ガラス（厚3mm）表面と、この透明板ガラスに前章3. で述べた方法によりカバーガラスを被覆接着した場合のカバーガラス表面との赤外域分光反射特性をフーリエ変換型の赤外分光光度計にて測定した。その結果を図-2に示す。波長が約 $4.5\mu\text{m}$ 前後より長い領域では双方の供試体とも透過が無いため、反射率特性の一致は放射率特性の一致を意味する。この図から明らかなように、放射温度計が感度を有する約 $8\sim 13\mu\text{m}$ の波長域全体で見ると、双方の表面の放射率ひいては放射率は実質的に同一と見なせる。

ただし、放射温度計の測定波長域とガラスの反射が高くなる波長域がほぼ重複するため、周囲からの放射がガラス表面において反射されたものも放射温度計にて検出されることになり、放射温度計の放射温度画像により、カバーガラス表面から射出される放射エネルギーと本来のガラス表面から射出される放射エネルギーとが同一であることを検証するためには、ガラス表面で反射して放射温度計の視野内に入る背景からの放射を放射発散輝度面分布の均一なものにする必要がある。

そのため、検証実験は図-3に示す南向きの開口部（厚3mm透明板ガラス）を持つRC造打ち放しの小室を用い、開口部の窓ガラスに装着した本論文の測温体と比較のために用意した各種測温体（後述）およびその周囲のガラス表面からの放射をおおむね図に示すような状況で検出することとした。放射温度計の視野に入る背景面には、急激な温度変動が起こりにくく、夜間の蓄冷により昼間に日射を受けているガラスに比べ相対的に低温と予想されるRC造の壁体を用いることとし、背景面の範囲は放射温度計の視野に収め、その中に写り込んでいる背景のRC壁上の範囲が比較的溫度分布幅の小さな壁の中央寄りの部分になるように、なおかつガラス表面の法線に対し放射温度計の視野中心線がなす角が極端に大きくならないように、各要素のバランスをとりながら放射温度計の位置を変更・調整しつつ決定した。

この背景面には素線径 $100\mu\text{m}\phi$ のT型無処理熱電対を接着剤で直付けし、その上から表面の均一な放射特性

と周囲からの放射の不用意な反射を極力抑えることを意図して、全波長域についてその放射（吸収）率が0.98以上と称されているパーソンズ社製オプティカルブラックを吹き付け塗装した。背景面の熱電対感温接点の配置と前述の塗装範囲は、図-4に示すように放射温度計視野内背景面よりかなり大きく取り、コンクリートと塗装面との放射率の違いによる放射熱収支の違いが視野内背景面内の温度分布をかく乱する

懸念を少なくした。放射温度計で視野内背景面を直接走査した放射温度画像（最小検知温度差 0.05°C 設定）にはほとんど温度むらが認められず、後述のデータロガー等による視野内背景面の熱電対測温もロガーの温度測定分解能 0.1°C の水準でほとんどの場合互いに一致しており、まれに差がついたとしても $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ の範囲にあった。検証実験の放射温度画像の収録は、これらの温度が 0.1°C の水準で一致している時に行った。

以上のことより、検証実験中の放射温度計の視野内に入射する背景からの放射の放射発散輝度面分布は実用上均一なものにできたと考える。また測定対象ガラス表面と放射温度計検出部ウィンドウ面との距離は最大で約1700mmであり、特別な加湿なども行っていない通常の室内であるため空気による放射の吸収も極めて小さく視野内の伝搬経路上の吸収の差も無いと考えられる。

本論文で提案したガラス表面温度用測温体を始め、比較のために用意した後述の測温体等に用いた熱電対は、前述の背景面用のものも含め、文献14)で行った方法に準じてその校正を行い、 0°C 、 10°C 、 20°C 、 30°C 、 40°C の校正温度設定全体にわたり測温（後述のデータロガー等による）が一致するもののみを感温素子として採用した。

温度測定については、電圧測定分解能 $1\mu\text{V}$ のデータロガーを用い零点補償は電子式零接点装置を用いた。この装置の零点の精度はメーカーによると $0.00^{\circ}\text{C} \rightarrow +0.05^{\circ}\text{C}$ の範囲にあり、周囲温度と熱電対の種類や本数によって零点精度が異なり、詳細は特性線図参照と称さ

図-3 室内側検証実験状況概要

図-4 背景面概要

れているが、零点槽の中に挿入する零接点用プローブの数が増えてくれば、プローブ用熱電対線を通して伝導で外乱が槽内に及び、零点の精度が低下することは明らかであるため、メーカー製零接点用プローブ（素線径 $200\ \mu\text{m}\phi$ ）を用いず、ガラス表面温度用感温素子に用いた前述の熱電対と同一メーカー製の素線径 $75\ \mu\text{m}\phi$ テフロン薄膜被覆熱電対を電磁誘導誤差を嫌ってツイスト処理し自作の零接点用プローブとした。本研究で使用した熱電対はK型が主流であるが、零接点装置メーカー公表の零点精度算出用特性線図によると、K型メーカー製プローブ24対が負荷として零点槽内に挿入され、装置の周囲温度が 25°C の時には、その零点精度は 0.01°C と読み取れる。本研究の自作零接点用プローブの場合、細線径化した分、外乱が槽内に到達しにくく、検証実験時挿入数も最大で15対としたため、槽内の零点精度は前述の読み取り値よりは向上し、安定性も増したものになっていると考えられる。

測温体に使用した熱電対とデータロガー端子板および零接点用プローブとの間を結ぶ信号線には補償導線などを用いず、感温接点を構成している熱電対素線と同素材（同一メーカー製）の素線径 $250\ \mu\text{m}\phi$ のテフロン被覆熱電対線を用い、その総延長を熱電対校正時も含めて各感温接点ともほぼ4m程度とし、いたずらに熱電対自体の電気抵抗が増えることを抑え、同型熱電対同士間の電気抵抗に大きな違いが出ないようでき得る限りの配慮をした。

実際の検証実験に際しては、日射量と板ガラス近傍の外気温、外気風速、室内空気温、室内風速を併せて測定した。日射量は熱流素子型の精密全天日射計を用い、その受感面を板ガラス面と平行にガラス面から20cm程度離して設置した。外気温、室内空気温は文献14)で報告した空気温度計を用いた。内・外風速は熱線風速計を用い、外気側は無指向性プローブを、室内側は指向性プローブを窓近傍の自然気流の方向を考えて昼間は下向き、夜間は上向きとした。空気温度計の空気吸引口と熱線風速計のプローブは、外気側・室内側共、ガラス面より約25cm離れた。外気側各側定器は、それ自体の影が実験中の板ガラス測定対象範囲に入らないような配置とした。

放射温度計に入力する板ガラス表面の放射率には、放射温度計の測定波長域について、その総合感度特性の重みを掛けた値(0.85)を用いることを原則としたが、後述の無色透明テープ被覆等の測温体がある場合は適宜0.90~1.00の値を用いた。本論文の検証実験の趣旨が、測温体として装着されたカバーガラス表面とその周囲の板ガラス表面との相対的な温度差の有・無の検出にあるため、一画面の放射温度画像中に問題となる双方の表面が存在すれば、余り低い放射率を入力しない限り、これ

らの表面温度の相対比較には問題はないと考えられる。

5. 検証実験内容とその結果

写真—1は、厚3mmの透明板ガラスの室内側表面に熱電対を挟まずにカバーガラスのみをシアノアクリレート系接着剤を用い装着したものを夜間に放射温度画像化したものである。この時の板ガラスおよび放射温度計の配置と背景面の概要については、前章4.の図—3と図—4で示してあるとおり（以下、写真—11まではほぼこの実験状況）である。放射温度画像上の温度分布グラフ一目盛りは画像示度 0.1°C に設定してあり、縦・横の温度分布グラフは各々縦・横のカーソル線上の放射温度画像示度を示し、縦グラフの左端と横グラフの下端の目盛線がカラーバーの下端の放射温度画像示度（この場合、 13.8°C ）に、縦グラフ右端と横グラフ上端の目盛線がカラーバーの上端の放射温度画像示度（同 14.6°C ）に対応している（以下、すべて同じ）。また、この時の最小検知温度差は 0.05°C の水準（以下、写真—7までの放射温度画像は同水準）にある。

写真—1では、垂れ落ちたシアノアクリレート系接着剤の表面が周囲のガラス表面よりわずかに低い放射温度画像示度として示されているだけで、カバーガラスとその周囲のガラスとの間に差は認められない。さらに板ガラス全体についてわずかに存在する上下方向の画像示度勾配が、対応する高さごとのカバーガラス表面上でも一致して認められる。また、画面右寄りの淡紅色の部分は、カバーガラス位置出し用のマーカとして、板ガラスの室内側表面に貼付したアルミテープの放射温度画像である。

次に、このアルミテープマーカの右斜め下の板ガラス表面に、素線径 $25\ \mu\text{m}\phi$ のK型無処理熱電対を小さく成形されたビニールテープで水平に仮止めし、その感温接点を中心とする熱電対素線部分を前章3.で述べた方法で、カバーガラスにより被覆接着した。写真—2は、この部分を中心とする板ガラス表面を日射量（板ガラス外表面入射全日射量、以下同じ）約 $404\ \text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ の昼間に前述と同様の方法により得た放射温度画像である。接着剤表面の部分は、周囲のガラスに対し画像示度上で約 $0.4\sim0.5^{\circ}\text{C}$ 高めになっているのに対し、カバーガラス表面の放射温度画像は、熱電対の有・無にかかわらず周囲のガラス表面と同一状態であることが認められる。

写真—3は、図—3の透明板ガラスを8mm厚のものに替え、その室内側表面に $25\ \mu\text{m}\phi$ K型無処理熱電対をカバーガラスで被覆接着したもので、左・右に延びる熱電対素線をABS樹脂系無色透明接着剤で直付けし、前述の方法により日射量約 $508\ \text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ の下で放射温度画像化したものである。この測温体の装着および素線の直付けについては敢えて筆者が行わず、この作業の経験

を持たない本学建築学科学生（22才）にその方法を解説したうえで実施してもらった。この写真—3の放射温度画像上で、Bゾーンはカバーガラス表面の画像示度の平均値を計算する範囲を示し、A、Cゾーンは周囲の板ガラス表面の計算範囲を示している。この各ゾーンの平均画像示度が画面左側にゾーンごとに AVE と表示されているもので、MIN、MAX は画像示度の最小と最大の値が表示される。これらによると、カバーガラス表面とその周囲の測定対象ガラス表面との放射温度画像示度の前述三指標は完全に一致し、双方の間にこの放射温度計で識別し得る以上の表面温度差が無いことが分かる。

一方、ABS系無色透明接着剤により直付された熱電対素線部分の放射温度画像示度は、カバーガラス上のものに比べ約 0.3°C ~ 1.0°C 近くも高く、その分布にもむらがある。この画像示度のむらは主に接着剤厚のむらによるものと考えられる。またカバーガラス内左手にある粒状の高示度部分は熱電対直付の際に付着した ABS 系接着剤の微小な滴であり、その下方の流れ出すような高示度部分はカバーガラスを被覆接着する際に押し出されたシアノアクリレート系接着剤である。

次の検証実験では窓ガラスをひき続き厚 8 mm の透明板ガラスとし、カバーガラス被覆熱電対（ $25\mu\text{m}\phi$ K 型無処理）を前述同様、作業未経験の本学学生に室内側に 2 つ、室外側に 1 つ、ほぼ同じ位置に装着してもらった。カバーガラスから外へ延びる熱電対素線は、ABS 系無色透明接着剤により板ガラス表面に直付しているが、室内側の一方の側温体の熱電対素線を直付する際には、接着剤をできる限り少量にするよう心掛けてもらい、その一部が最初に装着された室内側のカバーガラスに少し掛かるようにしてもらった。この板ガラス上の各測温体を室内側から通常の一眼レフカメラで撮影したものが写真—4 である。

これを日射量約 $345\text{ kcal/m}^2\text{h}$ の下で放射温度画像としたものが写真—5 である。この場合でも 2 つのカバーガラス表面とその周囲の透明板ガラス表面との間に放射温度画像示度上の差異は認められず、対応する各ゾーンの画像示度の三指標もすべて同一である。熱電対直付部分の画像示度分布はカバーガラス上に対し最大で約 0.8°C 以上高く、上昇幅にもむらがある。一方、外気側の

- ① 外気側カバーガラス被覆 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型)
- ② 室内側カバーガラス被覆 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型)
- ③ 室内側カバーガラス被覆 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型)

写真—4 内・外表面の本論文測温体の目視外観

本論文測温体による室内側表面温度場かく乱の兆候は認められず、カバーガラス上に直付された熱電対の影響も感温接点真上のカバーガラスまでは波及していない。この時の室内側のカバーガラス被覆熱電対測温は 2 つ共 28.3°C であった。

写真—6 と写真—7 は、表面温度情報としては同一の一画像である。板ガラス表面上の測温体は、写真—5 の透明板ガラス室内側の 2 つのカバーガラス被覆熱電対を挟み、その上・下に、上から順にベース材がアセテートフィルム製の無色透明粘着テープ（通称：メンディングテープ）、同セロファンフィルム製の無色透明粘着テープ（通称：セロハンテープ）と、スチロール系、シアノアクリレート系の無色透明接着剤で筆者が貼付あるいは直付した熱電対（すべて $25\mu\text{m}\phi$ K 型無処理）である。透明テープの左・右に延びる熱電対素線は、画面外の部分で小さく成形されたビニールテープで引張力を掛けて仮止めしてあるだけ（以下、後述の測温体からの素線は同処置）である。

両画面で、一番上の透明テープの左端より左側の部分は、板ガラスから法線方向距離で 135 cm 程度のところに設置した幅 15 cm の遮蔽板により直達日射が遮蔽されており、画面右側の全日射量約 $272\text{ kcal/m}^2\text{h}$ が入射する部分との温度差に起因する伝導伝熱により板ガラスに水平方向の温度勾配が生じている。この時、カバーガラスが装着されている位置と同じ温度分布になると思われる周囲の板ガラス表面と、当概カバーガラス表面との放射温度画像示度を調べてみたが、左・右のカバーガラス共、対応する各ゾーンと画像示度の平均値、最小値、最大値がすべて一致していた。なお、左・右のカバーガラス被覆熱電対測温（左 19.4°C 、右 19.6°C ）の差は、各々の放射温度画像示度の差と等しいものであった。

写真—8 では窓ガラスを厚さ 3 mm の透明板ガラスに戻した。画面の左端の A ゾーンには、 $12\mu\text{m}\phi$ K 型無処理熱電対がカバーガラスにより被覆接着されており、このすぐ上の高示度部分は、カバーガラスを接着する際に余分な量としてカバーガラスの外縁部に押し出されたシアノアクリレート系接着剤である。画面反対側右端の E ゾーンは、 $25\mu\text{m}\phi$ T 型無処理熱電対を被覆接着しているカバーガラスである。この時の日射量は約 $433\text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、放射温度計の最小検知温度差は 0.025°C の水準（以下、写真—13 までの放射温度画像はこれと同水準）の設定である。この場合でも、カバーガラス上の放射温度画像は周囲の板ガラス上のものと全く同様であり、A、B、E 各ゾーンの画像示度の平均、最小、最大値表示（各ゾーンの表示は上からこの順）も互いに同一となっている。この時の双方のカバーガラス被覆熱電対測温は共に 18.5°C であった。

画面中央の 4 箇所の高示度部分は、より左寄りの位置

写真—1 カバーガラス（熱電対無し）の夜間の放射画像

外気温
||
10.9℃
室内空気温
||
15.4℃
日射量
||
0kcal/m²h
内・外風速
測定無し

写真—2 カバーガラス（熱電対有り）の昼間の放射画像

外気温
||
16.3℃
室内空気温
||
17.5℃
日射量
||
404kcal/m²h
内・外風速
測定無し

写真—3 カバーガラスと信号用素線直付の放射画像

外気温
||
15.3℃
室内空気温
||
15.4℃
日射量
||
508kcal/m²h
外気風速
||
2.01m/s
室内風速
||
0.11m/s

写真—5 内・外面のカバーガラス熱電対の放射画像

外気温
||
23.9℃
室内空気温
||
25.1℃
日射量
||
345kcal/m²h
外気風速
||
1.56m/s
室内風速
||
0.07m/s

写真—6 板ガラス上に微妙な温度勾配がある場合

外気温
||
14.4℃
室内空気温
||
15.6℃
日射量
||
272kcal/m²h
外気風速
||
0.59m/s
室内風速
||
0.03m/s

写真—7 板ガラス上に微妙な温度勾配がある場合

外気温
||
14.4℃
室内空気温
||
15.6℃
日射量
||
272kcal/m²h
外気風速
||
0.59m/s
室内風速
||
0.03m/s

写真—8 カバーガラス、透明テープ熱電対の放射画像

外気温
||
16.9℃
室内空気温
||
17.8℃
日射量
||
433kcal/m²h
外気風速
||
0.72m/s
室内風速
||
0.04m/s

写真—9 測温体周辺の板ガラス表面の放射画像

外気温
||
12.7℃
室内空気温
||
13.8℃
日射量
||
623kcal/m²h
外気風速
||
0.77m/s
室内風速
||
0.13m/s

から順にセロファンフィルム (D ゾーン)、アセテートフィルム (C ゾーン) テープ貼付の $25\mu\text{m}\phi$ K 型無処理熱電対と、アセテートフィルム、セロファンフィルムテープ貼付の $25\mu\text{m}\phi$ T 型無処理熱電対である。これら各透明粘着テープの附帯サイズはすべて $12\text{mm}\times 30\text{mm}$ であるが、この大きさに相当するのは各テープの画像の淡紅色部程度であり、各テープ周囲のガラス表面温度場がかく乱されている様態が良く分かる。なおこの時のセロファンフィルム被覆熱電対の測温は K、T 型共 18.6°C 、アセテートフィルム被覆の場合は同 18.8°C であった。

写真—9 は、写真—8 と全く同じ板ガラス表面を、放射温度計のズーム機能を働かせ、その走査範囲を広め、日射量約 $623\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ の下で放射温度画像化したものである。測温体周辺の比較的広い範囲にわたり大きな温度むらがないことが伺え、測温体周囲の様態もおおむね写真—8 と同様である。画面の上・下縁の高示度部分は熱電対を仮配置している円形のビニールテープで、周囲のガラス表面の温度場かく乱の様態が分かる。また画面左側の大きな高示度部分は放射温度計からの放射の反射によるものである。この状況下のカバーガラス被覆による K 型 $12\mu\text{m}\phi$ 、T 型 $25\mu\text{m}\phi$ の熱電対測温は共に 15.5°C 、セロファンフィルム被覆 $25\mu\text{m}\phi$ 熱電対測温は K 型で 15.6°C 、T 型で 15.7°C であり、アセテートフィルム被覆 $25\mu\text{m}\phi$ 熱電対測温は K 型、T 型とも 15.9°C であった。

写真—10 と写真—11 も、板ガラスおよびその室内側表面の測温体の種類と配置は写真—8、9 と全く同一で、写真—10 の日射量が約 $559\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ 、写真—11 では約 $582\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ である。縦・横のカーソル線上の放射温度画像示度分布を見ると、カバーガラスとその周囲の板ガラスが同じ画像示度であるのに対し、透明テープとその近傍のガラス部や接着剤の折出箇所の画像示度がその周囲の板ガラスに対して高くなっている様態が分かる。両方の画面上に設定した各ゾーンの画像示度三指標を見ても、カバーガラスとその周囲の板ガラスには全く差が認められないのに対し、アセテートフィルムは板ガラスより平均画像示度で 0.6°C 高く、セロファンフィルムは同 0.4°C 高い。実際の各測温体の熱電対測温は、写真—10、11 共、カバーガラス被覆熱電対 ($12\mu\text{m}\phi$ K 型、 $25\mu\text{m}\phi$ T 型共) が 11.3°C に対し、アセテートフィルム被覆 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型、T 型共) が 11.6°C と 0.3°C 高く、セロファンフィルム被覆 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型、T 型共) が 11.4°C と 0.1°C 高いにとどまる。この時の背景面熱電対測温は、写真—10、11 共 7.8°C であった。

写真—12 は写真—8～11 の板ガラス (3mm 厚) の外表面側にカバーガラス被覆熱電対 ($25\mu\text{m}\phi$ K 型無処理) を一つだけ装着し、図—5 に示す実験状況で日射量約

図—5 外気側検証実験状況

図—6 外気側背景面

$380\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ の下、外気側より放射温度画像化したものである。外表面側に他の測温体の装着は一切無い。放射温度計の視野内に入る背景からの放射の放射発散輝度面分布を均一なものとするための背景面として図—6 に示すものを作製した。実験中の視野内背景面の熱電対測温とその周囲 5 点の熱電対測温との差は 0.2°C 以内であり、放射温度計による視野内背景面の画像示度分布も 0.2°C 以内であった。

写真—12 の画像中でも、装着したカバーガラス (B ゾーン) と本来の板ガラス (A ゾーン) の画像示度の平均値、最小値、最大値はすべて一致しており、外気側表面においても熱電対を被覆接着しているカバーガラス表面とその周囲の板ガラス表面との間には放射温度画像上の差異が認められなかったと言える。また、カバーガラス外縁に押し出されたシアノアクリレート系接着剤は、周囲の板ガラスより相対的に低い画像示度として表示された。この時の周囲の板ガラスや外表面カバーガラスのゾーン別の画像示度平均値は 10.7°C 、カバーガラス被覆熱電対測温は 15.0°C 、視野内背景面の熱電対測温は 18.1°C であった。

一方、この画像で C、D ゾーンの位置の裏側 (室内側) は、各々写真—10 の C (アセテートフィルム被覆)、D (セロファンフィルム被覆) ゾーンであり、室内側に貼付されたアセテートフィルムの影響が外表面の温度場にも及んでいることが分かる。その画像示度平均値の上昇は周囲の板ガラス表面 (A ゾーン) と比べて 0.3°C である。室内側にセロファンフィルムが貼付されている外表面側の D ゾーンでは画像示度平均値は周囲の板ガラスと同じであるが、最小値に 0.1°C の画像示度上昇が見られた。また、室内側にカバーガラスが被覆接着されている外表面 (B ゾーン下方) には放射温度画像のかく乱が認められなかった。

写真—13 は、前述の写真—12 の板ガラス外表面にアセテートフィルム (B ゾーン) とセロファンフィルム (C ゾーン) で被覆貼付された $25\mu\text{m}\phi$ K 型無処理熱電対を追加したものを、図—5 の実験状況に準じて外気側に配置した放射温度計により日射量約 $412\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$ の下で放射温度画像化したものである。縦・横のカーソル線上の画像示度分布を見ると、カバーガラス上 (A ゾー

写真—10 室内側各種測温体の放射画像

外気温
||
10.2°C
室内空気温
||
10.7°C
日射量
||
559kcal/m²h
外気風速
||
0.44m/s
室内風速
||
0.025m/s

写真—11 室内側各種測温体の放射画像

外気温
||
9.7°C
室内空気温
||
11.7°C
日射量
||
582kcal/m²h
外気風速
||
1.35m/s
室内風速
||
0.07m/s

写真—12 外表面側カバーガラス被覆熱電対の放射画像

外気温
||
13.1°C
室内空気温
||
13.2°C
日射量
||
380kcal/m²h
外気風速
||
0.40m/s
室内風速
||
0.04m/s

写真—13 内・外表面各種測温体の表面温度場への影響

外気温
||
5.1°C
室内空気温
||
5.3°C
日射量
||
412kcal/m²h
外気風速
||
0.84m/s
室内風速
||
0.06m/s

写真—14 外表面側各種測温体の室内側表面への影響

外気温
||
10.9°C
室内空気温
||
11.0°C
日射量
||
631kcal/m²h
外気風速
||
1.05m/s
室内風速
||
0.08m/s

写真—15 外表面側各種測温体の室内側表面への影響

外気温
||
10.9°C
室内空気温
||
11.0°C
日射量
||
631kcal/m²h
外気風速
||
1.05m/s
室内風速
||
0.08m/s

写真—17 夜間、板ガラス外気側に外窓がある場合

外気温
||
1.9°C
室内空気温
||
10.4°C
日射量
||
0kcal/m²h
外気風速
||
1.79m/s
室内風速
||
0.05m/s

写真—18 夜間、板ガラス外表面が天空に曝される場合

外気温
||
0.9°C
室内空気温
||
9.9°C
日射量
||
0kcal/m²h
外気風速
||
0.26m/s
室内風速
||
0.10m/s

ン)の画像示度がその周囲の板ガラス上と同様であるのに対し、外表面に追加貼付されたアセテートフィルム被覆部(Bゾーン)の平均画像示度は 10.4°C と、外表面カバーガラスの平均画像示度(10.6°C)に比べ 0.2°C 低い。このフィルム近傍の板ガラスの放射温度画像は、表面温度場のかく乱が無いと思われる周囲の板ガラスの画像より $0.2^{\circ}\text{C}\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ 近く画像示度が高く検出されている。実際のアセテートフィルム被覆熱電対の測温は 7.2°C でありカバーガラス被覆熱電対測温の 6.8°C に比べ 0.4°C 高く、放射温度画像上のフィルム近傍板ガラス表面の温度場のかく乱の様態をほぼ裏付けるものであった。また、セロファンフィルム被覆部(Cゾーン)の放射画像示度の平均値は 10.6°C であり、カバーガラスの平均画像示度と等しいが、実際のその熱電対測温は 7.0°C とカバーガラス被覆熱電対測温(6.8°C)より 0.2°C 高いものであった。この時の視野内背景面の熱電対測温は 8.7°C である。

一方、板ガラスの室内側表面にアセテートフィルム被覆熱電対が貼付されている外表面部分(Dゾーン)では、周囲の板ガラスに対しピーク部分で $0.5\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ 画像示度が高く、室内側にセロファンフィルム被覆熱電対が貼付されている外表面部分(Eゾーン)では同 $0.2\sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 高くなっている。ゾーン全体の平均値で見ると、山形のピークを持つ画像示度分布がそのゾーンの中で平準化されるため、やや低めの示度値となる。ただし、A、D、Eの各ゾーンの外表面は放射温度計の測定波長域について実質的に同一の放射率であるため、前述の画像示度分布の様態は現実の表面温度分布の様態をかなり反映していると思われる。これらのゾーンに対応する室内側各熱電対測温はカバーガラス被覆が 6.8°C 、アセテート被覆が 7.3°C 、セロファン被覆が 7.0°C であった。また、室内側にカバーガラス被覆熱電対が装着されている外表面部分(Aゾーン下方)には、放射温度画像のかく乱が認められなかった。

写真—14、15は、前述の写真—13の板ガラスを室内側より図—7に示す実験状況にて日射量約 $631\text{ kcal/m}^2\text{h}$ の下で放射温度画像化したものである。この二枚の写真も放射温度画像情報としては同一の一画像であり、板ガラスの室内側表面に装着されている測温体の種類と配置

図—7 室内側・近接による検証実験状況概要

は、写真—8～11と全く同一のものである。

写真—14のAゾーンは室内側に装着されたカバーガラス被覆熱電対($12\mu\text{m}\phi\text{K型無処理}$)であり、写真—8、10、11中のAゾーンと同一のものである。写真—14の各ゾーンの画像示度三指標においても、カバーガラス表面とその周囲の板ガラス表面との間には放射温度画像上の差異は認められない。カーソル線上の画像示度分布を見ても同様のことが確認できる。この時のカバーガラス(A、Cゾーン)被覆熱電対測温は二つ共 11.5°C であった。

この写真—14においてむしろ特徴的なことは、室内側透明テープ貼付位置の上方に、周囲の板ガラスより高い示度の部分が2つ認められることである。この部分をゾーン設定したものが写真—15のB、Cゾーンであり、各々写真—13における外表面側のB(アセテートフィルム被覆)、C(セロファンフィルム被覆)ゾーンの裏側に対応する。写真—15のBゾーン平均画像示度は 12.5°C 、Cゾーンは同 12.4°C であり、本来の板ガラス表面(写真—14、15のDゾーン、写真—14のBゾーン)の平均画像示度 12.3°C に対し、各々 0.2°C 、 0.1°C 上昇している。これらのゾーン設定範囲はいずれも本来の板ガラス表面であるので、各ゾーンの平均画像示度の相対関係は現実の表面温度関係をほぼ反映したものと推察される。ちなみに、この時の外気側表面のアセテートフィルム被覆熱電対(写真—15、Bゾーン裏側)測温は 11.8°C 、外気側セロファンフィルム被覆熱電対(同、Cゾーン裏側)測温は 11.6°C であり、外気側表面のカバーガラス被覆熱電対(同、Aゾーン裏側)測温 11.4°C に対し、各々 0.4°C 、 0.2°C 測温が高い。

これらに対し、写真—15のAゾーンの室外側表面にはカバーガラス被覆熱電対(写真—13、Aゾーン)が被覆接着されているが、この部分の室内側表面は、設定ゾーンの画像示度三指標でみても、カーソル線上の画像示度分布でみても、周囲の板ガラス表面と放射温度画像上の差異が認められなかった。参考までに、この時の透明板ガラスに装着されている各種測温体の様子を通常の一眼レフカメラで室内側より撮影した外観を写真—16に示

- ①外気側アセテート被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ②外気側セロファン被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ③外気側カバーガラス被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ④室内側カバーガラス被覆
($12\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ⑤室内側カバーガラス被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{T型}$)
- ⑥室内側アセテート被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ⑦室内側アセテート被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{T型}$)
- ⑧室内側セロファン被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{K型}$)
- ⑨室内側セロファン被覆
($25\mu\text{m}\phi\text{T型}$)

写真—16 各種測温体の室内側から見た目視外観

す。

写真—17, 18 は、板ガラス両表面の測温体の種類・配置と放射温度計の配置等が写真—14, 15 の場合と全く同一で、日射の無い夜間に室内側より放射温度画像化したものである。ただし、写真—17 の場合（時刻、21:40）には、測定対象板ガラスの外気側に中空層を確保するような形で、ポリスチレンフォーム製の枠にはめ込んだ透明板ガラス（厚 3 mm）を同日夜 18:40 頃より配置していた。この板ガラスを 22:08 頃に取り外し、測定対象板ガラス室内側表面の放射温度画像を、その様態が安定するのを待ってから収録したものが写真—18（時刻、22:22）である。両方の放射温度画像の様態や縦・横のカーソル線上の画像示度分布より、この場合でもカバーガラス表面と周囲の板ガラス表面との間に放射温度画像上の違いが無いことが分かる。

一方、写真—17 では、無色透明テープや接着剤の画像示度が周囲のガラスより相対的に高いのに対し、写真—18 では、これが逆に低くなっているのが目を引く。ここで、カバーガラス被覆熱電対の測温を見てみると、写真—17 の場合が 2 つ共 7.9°C（透明テープ被覆熱電対も 4 つ共 7.9°C）、写真—18 の場合にも 2 つ共 3.4°C（アセテート被覆 T 型は 3.3°C、他の透明テープ被覆熱電対は 3.4°C）となり、板ガラスの温度が外気や天空等に曝されて低下していることが確認できるが、この間放射温度計視野内背景面の熱電対測温は 6.6°C から 6.4°C へと比較的わずかな変化にとどまっており、その結果、室内側のカバーガラス被覆熱電対測温と背景面測温との相対的な温度関係は、写真—17 では各々 7.9°C と 6.6°C であるのに対し、写真—18 では 3.4°C と 6.4°C と逆転している。

これらのことより、背景面測温よりカバーガラス被覆熱電対測温が高い場合には、本論文で用いた無色透明テープや接着剤などは、その周囲の板ガラスより放射温度画像示度が相対的に高く表示され、背景面測温よりカバーガラス被覆熱電対測温が低い場合には、無色透明テープや接着剤は周囲の板ガラスより画像示度が低く表示されると、ここでは見ることができそうである。このことは、写真—13 の外表面側の各透明テープとその近傍の板ガラスとの間の画像示度関係や、写真—12, 13 の外表面側カバーガラスの外縁および下方の接着剤と周囲の板ガラスとの間の画像示度関係等にも共通して認められる。

さらに写真—18 で興味深いのは、外気側表面に装着された透明テープ等の影響が、夜間においても板ガラスの室内側表面における温度場のかく乱として認められることである。これらに対し、外表面側にカバーガラスが被覆接着されている部分の室内側表面（写真—17, 18 の A ゾーン）の放射温度画像はその周囲と同じ様態であり、

夜間においても裏側表面の温度場のかく乱は認められなかった。写真—18 の外気側カバーガラス被覆測温は 3.1°C、同アセテート被覆は 2.9°C、同セロファン被覆は 3.0°C であった。

6. 本論文のガラス表面温度用測温体の測定精度の吟味

前章 5. で報告してきたように、予想される代表的な種々の状況下で、本論文の測温体の表面であるカバーガラスと測定対象ガラスとの間には、日射量 600 kcal/m²h 前後の下、放射温度計の最小検知温度差が約 0.025°C の水準の時でもその放射温度画像上に差が認められなかった。

ここで、測温体の感温素子である熱電対の感温接点部の温度を感温層の厚さ方向において一つの温度と見なすと、熱電対感温接点の温度と測温体周囲の測定対象ガラス表面温度との間に前述の最小検知温度差以上の違いがあるとすれば、この違いの主な部分は、感温接点および接着剤を被覆しているカバーガラスの両側表面の温度差によるものであると考えられる。そこで本章では、提案した測温体によるガラス表面温度測定で精度追求上厳しいと思われる状況を想定し、測温体の熱的構造などからその熱挙動の概略を推察し、本研究で講じた検証実験の範囲でどの程度の確からしさまで言及することができるのか検討してみることにした。ただし、ここでは熱電対自体の感温素子としての精度や、その熱起電力の大・小と電圧計測側の分解能・精度に起因する問題等とは一応切り離して考えることとする。

カバーガラスの両側表面に温度差が生じる主な状況としては、熱電対および接着剤の日射等の短波長放射吸収が大きく感温層の温度が真の表面温度よりも高くなるか、熱電対による反射日射の吸収により入射側ガラス部の温度が高くなるかにより、カバーガラスの厚さ方向に局所熱流が生じる場合と、板ガラスを境にその両側の空気温度の差が大きく、相当量の貫流熱流がカバーガラスも含めた板ガラスの厚さ方向に生じる場合とが考えられる。

前者の場合、日射が板ガラス内に入射した後、多重反射などのプロセスも経て感温層に入射する時の強さは大きくとも 600 kcal/m²h 程度と見積れば十分ではないかと考えられる。感温層の日射吸収率を仮に 40 % と相当大きく見積り、これにより吸収された熱が、相対的に熱抵抗の小さいカバーガラス側に定常熱流ですべて流れたと仮定しても、この熱流束に対応するカバーガラス両側表面の温度差は約 0.023°C 程度^(注5)と推察される。また、熱電対による反射日射の吸収による入射側ガラス部の温度上昇によりカバーガラスに生じる熱流束も前述の想定より大きくなるとは考えにくい。

次に板ガラスの内・外空気温度差により相当量の貫流

熱流が生じる場合を考える。熱貫流率 $5.8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 前後とされる正味厚 3 mm の透明板ガラスで構成される窓の屋外気温が -15°C 、屋内気温が $+25^\circ\text{C}$ と仮定すると貫流熱流束は約 $232 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 程度となり、正味厚 3 mm の板ガラスの両側表面温度差は約 1.05°C 程度であると考えられる。測温体の熱抵抗がカバーガラス表面温度に及ぼす影響を考えるに当り、感温層の熱伝導特性として熱伝導率の小さい接着剤のほうを採り、その値として物性の近いアクリル樹脂の約 $0.18 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ を仮定すると、感温層は熱伝導係数上その厚さの約 3.6 倍のガラスに置き換えることができる。仮に感温層の実際の厚さを $40 \mu\text{m}$ 前後^(注6)とすれば、カバーガラスと合わせて測温体の測定対象ガラス表面への装着で約 $200 \mu\text{m}$ ガラスの厚さが増加したと見ることができる。概略的な仮定の話であるが、測温体の有・無による見掛けの板厚（熱抵抗）変化の影響が局所的な熱流束の違いの形で現れず、一様な熱流束の仮定の下、すべてカバーガラスの表面温度の変化に現れたとすると、それは厚 3 mm 板ガラスの場合、内・外気温差 40°C の設定で約 0.029°C 、同 20°C 差の設定の下では約 0.014°C となり、通常の測定状況では大きな問題とはならないと考えられる。

7. まとめ

(1) 接触式表面温度測定方法でありながら、測温体装着後も測温体表面の放射熱収支特性や対流熱伝達特性が周囲の透明板ガラスと同様な方法を考案した。これは、素線径 $25 \mu\text{m}\phi$ 以下の無処理熱電対をシアノアクリレート系無色透明接着剤（低粘性型）を用い、公称厚 $50\sim 75 \mu\text{m}$ のカバーガラス（ $30 \text{ mm}\times 30 \text{ mm}$ ）で被覆接着するものである。

(2) 地上の太陽放射や、天空との対向による放射冷却等に曝される現実の開口部（窓）の透明板ガラスを対象として、考案したガラス表面温度用測温体の検証を行った。本論文の測温体の表面と、その周囲の透明板ガラス表面との間には、日射量 $600 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 前後の下、放射温度計の最小検知温度差が 0.025°C の水準においても放射温度画像上の差異は認められなかった。

(3) 本論文のカバーガラス被覆熱電対の感温接点温度とカバーガラス空気側表面との温度差は、感温層等の日射熱吸収による局所熱流の想定でも（大きくとも 0.023°C 程度）、内・外気温差による貫流熱流による想定でも（ 40°C 差で 0.029°C 、 20°C 差で 0.014°C 差前後）、極めてわずかと推察された。検証実験中の放射温度計の最小検知温度差等を勘案すると、熱電対感温接点温度と真のガラス表面温度との差は、測定精度追求上相当厳しい状況の下でも、 0.1°C 以内の水準にあるとして差し支えないと考えられる。

(4) アセテートフィルムがベース材の通称メンディン

グテープで被覆された熱電対（素線径 $25 \mu\text{m}\phi$ 以下、無処理）測温は、本論のカバーガラス被覆熱電対測温に対し、日射量 $600 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 前後の下で約 $0.3\sim 0.5^\circ\text{C}$ 高くなり、夜間に天空に曝される側では、約 $0.1\sim 0.2^\circ\text{C}$ 低い測温となった。セロファンフィルムがベース材の通称セロハンテープで被覆された同熱電対測温は、本論のカバーガラス被覆熱電対測温に対し、日射量 $600 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 前後の下で約 $0.2\sim 0.3^\circ\text{C}$ 高く、夜間に天空に面する側では、約 0.1°C 程度低くなっている。これらは、主に各透明テープと板ガラスとの放射特性の違いによる表面の放射熱収支の違いが各熱電対測温に現れたものと考えられる。

(5) 板ガラス表面での短・長波長放射のやり取りが相対的に大きい状況では、各透明テープ貼付位置の裏側のガラス（ 3 mm 厚）表面にも温度場のかく乱が及んでいた。カバーガラス被覆の場合は、外気側、室内側どちらに装着してもその裏側表面に温度場のかく乱は認められなかった。

(6) カバーガラス被覆熱電対測温と、比較のために用意した各測温体測温との差は、検証実験中、おおむね被覆材の材質と日射量によって支配されていたが、外気風速の大・小や長波長放射環境の違い等の影響を受けることも伺えた。このため、現時点で各種の測定方法との体系的な比較（誤差）を論じるにはいまだ測定数が十分ではないと考えられ、この問題については次報に譲ることとしたい。

謝 辞

透明板ガラス（厚 3 mm ）および同板ガラスに装着したカバーガラス表面の分光放射特性の測定に際し、本学理学部、化学・応用化学科の小出直之教授の御協力を得ました。記して謝意を表します。

注

- 一般的にセロハンテープ、メンディングテープと称されている無色透明の各粘着テープについて、その代表的製造メーカーへ問い合わせた結果。
- K型熱電対はT型に比べ素線の引張強度が高いため、極細線径の熱電対を扱う場合にはその分作業が容易となり、素線径 $12 \mu\text{m}\phi$ のものまで扱える。また耐酸化性にも優れている。中高温度（ $200^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ ）の測定では『短範囲規則化誤差』と言う問題もあるが、常温域の測定では熱起電力特性の直線性も安定性も良好である。
- 多くの無色透明接着剤は基材である合成樹脂を溶剤に溶かしたもので、比較的粘性の高いものが多く接着層が厚くなりがちである。低粘性のものもあるが、ガラスとカバーガラスの間では溶剤の気化が順調に進まず硬化に非常に時間を要し、垂直なガラス面への装着の場合には、硬化前に接着剤が垂れ落ち過ぎ、入れ替わりのように気泡が接着層に入ることも多い。
- 常温の黒体を走査する場合、本研究で用いた放射温度計

が検出し得る放射エネルギーの9割以上はこの半値幅表示の測定波長域内で検出されると称されている。

- 5) カバーガラス厚を公称厚の中央値：約63 μm と仮定，その熱伝導率は通常の透明板ガラスと同程度とした。
- 6) 使用熱電対の感温接点は品質の安定した工場生産品で，顕微鏡で拡大するとほぼ球形であり，その大きさは素線径の1.5倍～2倍弱であった。これを押し潰し厚さを薄くする方法もあるが，本研究では短波長放射の影響と成形サイズのばらつきを懸念し押し潰さずに使用した。

参考文献

- 1) 宮野秋彦，小林定教：熱電対による表面温度測定について，日本建築学会論文報告集，No. 253，pp. 81～89，1977. 3
- 2) 梅干野晃，塩月義隆，林 宏幸：日射透過材料の表面温度測定法に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 699～700，1984. 10
- 3) 梅干野晃，塩月義隆，林 宏幸，川野洋一：日射透過材料の表面温度測定法に関する実験研究（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 831～832，1985. 10
- 4) 梅干野晃，塩月義隆，林 宏幸：日射透過材料の表面温度測定法に関する実験研究（その3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 833～834，1985. 10
- 5) 梅干野晃，塩月義隆，林 宏幸：日射透過材料の表面温度測定法に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 408，pp. 13～21，1990. 2
- 6) 梅干野晃，川合博英，笠井 豊：赤外線放射カメラ（6.5

～8.6 μm ）を用いたガラスの表面温度測定（多重分光赤外面像による建築熱環境の計測・その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 465～466，1988. 10

- 7) 筆者ら：開口部の熱流に関する研究（窓部位の熱流測定装置における各種センサーの開発・その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 839～840，1987. 10
- 8) 筆者ら：開口部の熱流測定装置の開発（空気温度測定方法とガラス温度測定方法の検討・その1），空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 625～628，1987. 10
- 9) 筆者ら：開口部の熱流測定装置の開発（窓ガラス温度の測定方法と実験結果の検討・その3），空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 369～372，1988. 9
- 10) 筆者ら：開口部の熱流に関する研究（開口部熱流測定装置の検討・その4），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 845～846，1989. 10
- 11) 筆者ら：開口部熱流測定装置の開発（短波長放射環境下における窓ガラス温度測定方法に関する実験的研究・その4），空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp. 453～456，1989. 10
- 12) JIS A 1422-1982 日除けの日射遮蔽係数簡易試験方法
- 13) 木村健一：建築設備基礎理論演習，学献社1970年，7版（1984）pp. 94
- 14) 筆者ら：短波長放射のある室内における空気温度測定方法に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，No. 399，pp. 1～10，1989. 5

（1991年4月2日原稿受理，1991年6月14日採用決定）