多重分光熱画像を用いた建築外部空間における
放射温度計測に関する基礎的研究STUDY ON MEASUREMENT FOR RADIANT TEMPERATURE ON OUTDOOR
BUILDING ENVIRONMENT BY USING MULTI-SPECTRAL THERMAL IMAGES

梅干野 晃*, 内山一雄**, 川合博英***, 笠井 豊****

Akira HOYANO, Kazuo UCHIYAMA, Hirohide KAWAI and Yutaka KASAI

This paper investigates the characteristics of thermal image which has responsibility in 8 to 14 μm band (Band A), in 6.5 to 8.6 μm band (Band B) and in 3 to 5 μm band (Band C). Experiment was carried out at the residential area on a summer clear sky day. Followings were obtained by experimental results. 1) The temperature of roof tile and aluminum sheet in Band A were measured lower than actual temperature by some degree based on effect of sky radiation. 2) The amount of atmospheric effect in Band B was estimated about 6 to 10K when radiant temperature of measured objects were 20K higher than atmosphere. 3) Acceptable measurement accuracy in Band B were limited within 200m in mid-latitude summer, and within 800m in the winter by the difference between atmospheric corrections and measurement errors.

We proposed algorithm to measure radiant temperature of glass based on above investigations. Effectiveness of the proposed algorithm was verified by experimental results.

Keywords thermal image radiant temperature atmospheric effect solar reflection sky radiation
熱画像 放射温度 大気の影響 日射反射 天空放射

I はじめに

市街地などの建築外部空間の熱環境を考察するためには、建物や道路などの放射温度分布を測定することは基本的な項目の一つである。熱電対などを用いた接触法が点的な温度情報しか得られないのに比べて、赤外線放射カメラは面的な放射温度分布を比較的簡便に捉えることが可能なため、熱環境計測の有効な手段と言える。

赤外線放射カメラによって得られる画像（以下、熱画像と呼ぶ。）は、その視野角内における測定対象からの熱放射エネルギーを温度に換算し、イメージ化したものである。したがって容易に測定対象の温度分布をイメージ化できる反面、建築環境計測への応用を考えた場合、以下のような問題がある。すなわち、伝搬経路中の気体分子による吸収、散乱、及び放射による影響と、測定対象が黒体でない場合には対向面からの放射の反射の影響である。前者の大気の影響に関しては、特に高温多湿となる我が国の夏季において顕著になる。しかし、測定時における気温、湿度等の気象条件と測定距離が把握でき

れば数値計算により補正が可能である。^{1), 2)} これに対して後者の問題は、これを解決しようとする測定対象の放射率の値と対向面の表面温度分布を測定しなければならない。このため、特定の対象を計測する場合は別として、画像内の多くの対象に対して上記の処理を行わねばならず、このことは比較的容易に放射温度分布を捉える赤外線放射カメラの特徴を失うことになりかねない。

一般の赤外線放射カメラ（以下、放射カメラと呼ぶ。）では“大気の窓”と呼ばれる、2つの波長帯、3~5 μm 帯と8~14 μm 帯が使用されている。3~5 μm 帯で日中の計測を行うと、通常の建築外部空間において最大の熱放射源である日射の反射の影響が大きくなる。一方、8~14 μm 帯では、この波長帯では後述のように日射の反射の影響は無視できる。しかし、天空が非常に低い温度を示すため、測定対象が黒体でないときには天空放射の反射の影響が計測上、無視できなくなることが多い。このようなことから、筆者らは建築外部空間において多数の測定対象が1画像内に含まれる放射温度計測を行う場合、

* 東京工業大学 教授・工博

** 防衛庁・博士(工学)

*** JR東海(株)・工修

**** 日本電気三栄(株)

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Japan Defense Agency, Dr. Eng.

JR Tokai Railway Co. Ltd., M. Eng.

NEC Sanei Instruments Ltd.

放射率の補正を行うことは現実的でないと考えた。したがって、放射率の問題に関しては建築外部空間を構成している主な材料の分光放射率を把握し、できるだけ黒体に近い分光放射特性を示す波長帯を選択するという視点も有効であろう。このため、従来のように必ずしも計測に使用する波長帯は大気の窓領域でなくても良いと考える。

以上のような基本的考え方にに基づき、本研究では放射カメラによる放射温度計測システムを開発するための基礎的課題として、以下の事項を検討する。1) 建築外部空間の中で数多く使用されているガラスやタイルなどの放射温度計測に適した波長帯を同定するため、これらの材料の分光放射特性や大気の影響を考察する。そしてこの検討結果を基に、新たな波長帯に感度を有する放射カメラを試作する。2) 夏季の住宅地を対象に、従来より用いられている“大気の窓”領域の2つの波長帯と、試作した水蒸気吸収帯から大気の窓領域にかかる波長帯の熱画像を収録する。そして収録した各波長帯の熱画像を比較・検討して、それぞれの熱画像に含まれる大気の影響、日射の反射の影響、及び対向面からの放射の反射として天空放射の反射の影響を明らかにする。3) 多重分光熱画像を用いた放射温度計測アルゴリズムを提案するとともに屋外における計測の応用例としてガラスの放射温度計測を行い、接触法との比較によりその有効性を検証する。

ここで本論文に用いる用語の意味を明確にしておく。

「放射温度」：放射温度計及び放射カメラによって測定対象から感知したエネルギーを大気補正した後、測定対象の放射率を1と仮定して求めた値である。このため熱収支計算などで必要となる“表面温度”を求めるには、放射率補正が必要となる。

II 水蒸気吸収帯から大気の窓領域にまたがる波長帯の適用性に関する検討

図1に常温黒体(300K近傍)と太陽の分光放射パワー特性、及び赤外線の大気伝搬特性を示す。³⁾ 同図より常温付近の放射パワー特性は $8\mu\text{m}$ 前後で最大となること、太陽の放射パワーは常温物体からの放射パワーに比べて $4\mu\text{m}$ 以下では無視できない値となるが、 $7\mu\text{m}$ 以上では1/50以下にまで減衰されるのでほとんど考慮する必要がなくなるなどが読みとれる。次に建物壁面の主要な要素であるガラス、及びタイルの分光特性を図2に示す。水蒸気吸収帯から大気の窓領域にかかる $6\sim 9\mu\text{m}$ の波長帯では、分光放射率の値が0.95以上となることが示されている。ガラス、タイルがこの波長帯で分光放射率が大きくなるのは SiO_2 を主要な構成要素としているからであるが、この波長帯は水蒸気吸収帯から大気の窓にまたが

図1 大気分光透過率と常温黒体及び太陽の分光放射パワー特性

図2 ガラス、タイルの分光反射特性

図3 試作した赤外線放射カメラの相対分光感度

表1 試作した赤外線放射カメラの仕様

波長帯	バンドA	バンドB	バンドC
検知器	HgCdTe	HgCdTe	InSb
感度波長域	$8\sim 14\mu\text{m}$	$6.5\sim 8.6\mu\text{m}$	$2.7\sim 5.7\mu\text{m}$
瞬時視野角	1.5mrad	1.5mrad	1.5mrad
視野角	水平 30° × 垂直 27°		
解像度	256×256	256×256	256×256
温度分解能	0.1°C	0.2°C	0.1°C
測定温度範囲	$-50\sim 2000^\circ\text{C}$	$-50\sim 2000^\circ\text{C}$	$0\sim 1600^\circ\text{C}$

る領域である。ここで建築外部空間における放射温度計測は概ね数100m以内であることを考えると、 $6\sim 7\mu\text{m}$ 近辺は水蒸気吸収による影響が大きいものの完全には吸収されず、大気補正を併用することで応用が可能になると考える。以上のことから、本研究では建築外部空間における放射温度計測に適した波長帯として $6\sim 9\mu\text{m}$ 帯を提案する。

筆者らは既に近距離からの剥離検知を念頭において、 $5.5\sim 7.9\mu\text{m}$ 帯に感度を有する放射カメラを試作した⁴⁾。本研究ではさらに建築外部空間における数100m以内の放

射温度計測を考慮し、新たな波長帯として $6.5 \sim 8.6 \mu\text{m}$ 帯（バンドB）をもつ放射カメラを試作した。図3に各波長帯における相対分光感度を、表1に本研究で使用した放射カメラの概要を示す。なおバンドA、バンドBの切り替えは、光学フィルターによって行った。バンドBはバンドAに比べて帯域が狭いことから、検知する放射パワーはバンドAの約1/10になる。このため温度分解能が低下するが、フレーム積分を併用することによってバンドAと同等の温度分解能に改善した。

III 熱画像における大気の影響と日射及び天空放射の反射の影響に関する検討

大気吸収、散乱、放射の影響と日射及び天空放射の反射の影響については、数値計算によりそれらの影響を算出可能である。しかし、収録した熱画像を解析する際には、それらの影響がほとんど考慮されていないのが現状である。本章では建築外部空間における熱画像の検討例の一つとして、夏季の住宅地で収録した熱画像を対象に上記の影響を検討する。

1. 実測概要

住宅地を対象に3バンド（バンドA、バンドB、バンドC）の熱画像を早朝より日没後まで、約50シーン収録した。実測対象地域の選定にあたっては、1)画像内における放射温度のダイナミックレンジが大きくなること、2)収録する熱画像内に瓦、アルミシート、スレート瓦、モルタルやタイル壁面、ガラス、タイル、及び樹木などの市街地を構成する代表的な材料が含まれていること、3)大気光路の距離が異なったときの比較を行うために、画像内に測定距離が数10m～数100mの対象を含んでいること、4)解析対象が画像上で同定できる大きさであること等の条件を満たす地域とした。図4に実測対象地域の概観と地図を、表2に測定条件の概要を示す。

2. 大気の影響とバンドBを用いたときの適用範囲に関する検討

(1) 大気の影響 バンドBは水蒸気吸収帯にまたがるため、バンドAやバンドCに比べて大気の影響が大きくなる。バンドBにおける大気の影響と、バンドAにおける天空放射の反射の影響を各バンドの熱画像より検討する。図5は日中のバンドA、Bの熱画像及びそれらの差画像である。測定距離が約40m～500mの範囲では、日射を受け気温（ 29.6°C ）よりも高温となる屋根などの部位では、ほとんどの画素でバンドBにおける大気吸収の影響がバンドAの天空放射の反射の影響に比べて卓越している。しかし、放射率が低いアルミ屋根ではバンドBの方がバンドAよりも高い温度を示し、大気吸収の影響

図4 実測概要

表2 測定条件の概要

測定日時	: 1989.8.1 ~ 21 07:00~19:00
測定場所	: 町田市立つくしの中学校4階
測定対象	: 町田市南つくしの3丁目住宅地
測定距離	: 約40m~約500m
測定バンド	: バンドA, バンドB, バンドC

図6 バンドAとバンドBとの比較による大気吸収の影響

よりも天空放射の反射の影響が現れていることなどが読み取れる。

各バンドの熱画像を基に、測定対象の放射温度と測定距離が異なったときの大気吸収の影響と天空放射の影響を比較したものが図6である。同図では熱画像の中の主な対象物について地図より測定距離を同定し、図中に円の大ききで示してある。黒丸は100m未満の近距離の測定

図7 バンドBにおける大気補正曲線

図8 バンドBにおける大気補正量と可降水量との関係

図10 バンドBとバンドCの全面素の比較による日射の反射の影響

図11 各材料毎の日射の反射の影響の比較

対象を示すが、これらの黒丸のうちバンドAとバンドBが等しい値を示す測定対象は、黒体に近い材料で構成されたものである。黒丸はそのほとんどがバンドBの方がバンドAよりも高温であり、アルミのように極端に放射率が低いわけではないが、黒体に近くはない材料で構成されていることがわかる。またアルミ屋根のような放射率が非常に小さい材料では、両者の影響によって遠距離でバンドAとバンドBが等しい値を示していることもある。これに対し測定対象が黒体に近い性質を示す場合には、バンドBでは大気吸収の影響の方が卓越する。1例としてバンドAにおける放射温度の測定値が50℃、すなわち気温よりも20℃高い場合、バンドBにおける大気の影響は測定距離が100mのときは8℃になる。

(2) バンドBの熱画像における適用範囲について

バンドBの大気補正には、筆者らの開発した大気自動補正アルゴリズム^{1)・2)}を適用して処理を行った。図7に可降水量と補正前後の測定対象の放射温度との関係を表した大気補正曲線を示す。大気補正を行う場合、バンドAやバンドCでは水蒸気の他にもCO₂やエアロゾルなどを考える必要があるが、バンドBではこれらの影響はほとんど無視できる。したがって、ここでは水蒸気吸収のみを補正する。水蒸気補正に必要な気温、湿度に関しては温湿度計による測定結果を用いた。図7において点線で示したのは、可降水量が0mmのとき、すなわち見かけ上、水蒸気による吸収、放射がないときを意味する。一例として可降水量2mmのときには気温との差が10℃のときで約6℃、20℃のときには約8℃の補正で放射温度が得られることになる。

大気補正曲線を利用し、バンドBにおける大気補正量と可降水量との関係を示したのが図8である。測定対象の放射温度と気温との差が大きくなるにしたがって補正量も大きくなる。補正量が大きくなることは熱雑音の増加をもたらし、測定誤差が大きくなる原因となる。ここで放射温度の補正値の測定誤差を温度分解能相当（0.5℃）と設定すると、可降水量4mmが水蒸気補正の限界とみなせる。ところでLOWTRAN7⁵⁾の中緯度大気モデルでは夏季で絶対湿度20g/m³、冬季で絶対湿度5g/m³が北緯35°付近（本州付近）における夏季、冬季の代表的な値として扱われている。これに基づいて我が国における測定限界を求めると、夏季で距離200m以内、冬季で距離800m以内の測定が好ましいことがわかる。

2. 日射の反射の影響

ここではバンドCの熱画像と後述する大気補正処理を行ったバンドBの熱画像とを比較して、3～5μm帯における日射の反射の影響の実態を示す。図9はバンドC、バンドBの熱画像及びそれらの差画像である。測定対象から日射の正反射成分を受ける位置で計測を行った場合、その測定対象の放射温度はバンドCの熱画像の方が高い値を示している。この反射による影響の程度を明らかにするため、バンドBとバンドCの放射温度の相関を全画素について求めたのが図10である。同図では瓦、アルミ、スレート屋根などの主な対象物についてはそれぞれ記号で示してある。

アルミ等を除くとほとんどの測定対象が黒体に近い性質を示していることが読みとれる。アルミや光沢のある瓦のように日射反射率が高く、かつ反射配向特性が高い材料の屋根を正反射を受ける位置で観測した場合、日射による反射成分が放射温度に重畳され、数℃から10数℃高温になる。次に各材料毎の日射による反射の影響を図11に示す。同図よりモルタル壁などの直達日射が当たらない部位ではほとんどその影響を受けない。しかし屋根などでは拡散反射成分による影響が数℃観測されるのに加えて、正反射を受ける場合には、最大で日射の反射の影響が12～15℃にも達することが明らかである。

3. 天空放射の反射の影響

大気の窓領域（8～14μm）において、黒体でない常温付近の測定対象の場合、天空からの放射の反射は放射温度の測定誤差を大きくする要因である。図12に常温黒体と夏季の晴天日におけるそれに等しい温度の大気の分光放射輝度を比較したものを示す。計算にあたっては文献6)の実測値を基に、高度2km以下の水蒸気のみを考慮した。同図より天頂方向（0°）の天空の分光放射輝度は、9～12μmの波長帯で地表面付近の気温相当の黒体のその約1/4である。したがって8～14μmの領域では、放射

図12 晴天日における天空の分光放射輝度

図13 各バンドにおける天空放射温度の天頂角の角度特性

温度の測定誤差が大きくなることが予測できる。各バンドにおける天空放射の反射が放射温度に及ぼす影響を数値計算と実測結果によって検討する。

図13は各バンドに対して天頂角を変化させたときの天空の放射温度を計算したものである。計算にあたっては夏の晴天日で地表面近傍の気温を35.7℃、湿度を22.6g/m³とし、大気吸収物質の垂直分布は文献7)の実測値を用いた。バンドBでは水蒸気吸収帯にまたがっているため、伝搬経路内に介在する大気がほぼ黒体に近い性質を示し、天頂角に関わらず地表面付近の気温に近い値を示している。またバンドCは大気の窓領域であるが、8～14μm帯に比べて大気透過率が低いため、天空放射の反射の影響が小さいことがわかる。これに対しバンドAでは天頂角が小さくなると急激に放射温度が低下し、0°付近では地表面近傍の気温との差は数10℃にも及ぶ。

図14に夏季の日中及び日没後の熱画像より得たバンドAと大気補正前のバンドBとの相関を示す。日中ではほとんどの測定対象がバンドBとバンドAとの相関が高い範囲に分布しており、図10と同様に黒体に近い性質をもつ材料が多く分布していることがわかる。アルミ屋根な

どはバンドAの放射温度よりもバンドBの放射温度が若干高く、天空放射の反射の影響が大気の影響を上回っている。日没後、ほとんどの放射温度が気温より低い時刻では、瓦やアルミ屋根などは天空放射の反射の影響がよくわかる。測定時刻がそれぞれ異なるときに収録した熱画像から、各材料毎に天空放射の反射の影響を求めたものが図15である。同図よりバンドAでは、夏季の晴天日においては放射率の低い瓦やアルミ屋根などは、2~7℃も天空放射の反射の影響を受けている。

前項1~3までの検討より、建築外部空間を構成するほとんどの測定対象は、アルミ等を除き、ほぼ黒体に近い性質であることを示した。しかし、ほぼ黒体に近い性質を示すにも関わらず、バンドAでは天空放射の反射の影響、バンドCでは日射の反射の影響が数℃から10数℃にも及ぶ場合がある。またアルミの様に非常に放射率が小さい材料では、他の材料と放射温度分布の範囲が大きく異なる。したがって、放射率補正は行わないという筆者らの立場からは、アルミの放射温度を扱うことはあまり意味がないと考える。一方、バンドBでは天空放射の反射や日射の反射の影響はほとんど無視できるが、他のバンドに比べて大気吸収の影響が大きい。しかし、前項1の検討より可降水量4mm以内の計測であれば、バンドBでも十分適用が可能である。

本研究では建築外部空間における放射率補正は有効ではないという考えに基づき、黒体に近い性質を示す波長帯を選択したが、以上の検討結果より実際の建築外部空間内の放射温度計測においてこの考え方が有効なことを示す。

V 試作した赤外線放射カメラによる放射温度計測アルゴリズムとガラスの放射温度計測への応用

建築外部空間の熱環境を検討する上で、建物の窓面（ガラス面）からの熱収支を把握することは重要な項目である。このためにはガラスの表面温度分布を正確に計測する必要がある。ここでは本研究で試作した放射カメラによる放射温度計測のアルゴリズムを建築外部空間におけるガラス面の放射温度計測に適用し、その有効性を検討する。

1. 大気の大気領域と新たな波長帯との併用による放射温度計測

(a) 日中

(b) 日没後

図14 バンドAとバンドBの熱画像の全画素の相関による天空放射の反射の影響

図15 主な環境材料の天空放射の反射の影響

アルゴリズム

図16に提案した放射温度計測の流れを示す。

①天空、対向面及び日射の反射成分の補正：測定時間帯や測定対象体の分光特性などから測定に用いる波長帯の選択及び波長帯の組み合わせを決定する。さらに大気補正のための基礎データとして気温、湿度、視程等を測定する。

②大気補正処理：各バンドの熱画像に対して、既に開発した大気補正アルゴリズム^{1)・2)}を適用する。最後に大気補正された熱画像から測定対象の放射温度を求める。

2. 屋外実験による放射温度計測アルゴリズムの有効性の検証

ガラス窓のある建物を対象とし、暖房を行っていることにより窓面に大きな放射温度分布が生じている冬季と、大気吸収の影響が大きい夏季に熱画像を収録した。同時に比較のためガラス面、コンクリート面などの10数箇所に熱電対(0.05mmφT熱電対)を貼付し、接触法により表面温度を計測した。熱電対による計測にあたっては、ガラス面については日射の影響を極力避けるため透明接着剤と透明テープを用いて熱電対の感温部を張り付けた。³⁾また測定点は熱画像上で同定しやすいように数10cm四方以上で温度がほぼ一樣となる箇所を選択した。表3に実験概要を示す。

図17に冬季のバンドB(大気補正後)の熱画像とバンドAとバンドBとの差画像を示す。差画像より、測定対象の低層階から中層階にかけて正対している建物の輪郭が明確に認識できるとともに、高層階における天空放射の反射が映っている。また図18にバンドBの熱画像から得た大気補正前と後の放射温度と接触法による表面温度との比較を示す。図18より大気補正後の放射温度の値は気温より10数℃高い箇所については2~3℃差があるが、気温との差が10℃以内のものについては全て1℃以内の誤差で一致する。以上より提案した放射温度計測アルゴリズムによる計測結果が、建築外部空間における放射温度計測に有効なことを示した。

VI まとめ

従来から用いられている大気の窓領域の2つの波長帯とガラスやタイル等の放射温度計測に有効な水蒸気吸収帯から大気の窓領域にかかる波長帯を用いた放射カメラによる放射温度計測について検討を行った結果、以下に示す知見を得た。

(1) 常温黒体の分光放射パワー特性及び天空の分光放射輝度の数値計算結果とガラス、タイル等の分光放射特性を基に、建築外部空間におけるこれらの材料の放射温度計測に適した水蒸気吸収帯から大気の窓領域にまたが

図16 多重分光熱画像による放射温度計測の流れ

表3 ガラスの表面温度計測の実験概要

測定日時	1989.2.14 16:00~17:00 1989.8.17 14:00~15:00
測定場所	東京工業大学長津田キャンパス
測定対象	長津田キャンパスG3棟
測定距離	50m
仰角	35°
熱電対	屋外側窓ガラス
貼付箇所	室内(天井) 外壁(コンクリート打ち放し仕上げ)

図18 大気補正後のバンドBの測定結果と接触法による測定結果との比較

差画像 (バンド A - バンド B)

差画像 (バンド C - バンド B)

図5 バンド A, バンド B による住宅地の熱画像
1987.8.20, 15:20, 天候: 晴れ, 気温: 28.8°C, 湿度: 20.4g/ρ³

図9 バンド B, バンド C による住宅地の熱画像
1987.8.20, 09:30, 天候: 晴れ, 気温: 29.6°C, 湿度: 21.1g/ρ³

1987.2.14, 09:30, 天候: 晴れ, 気温: 6.1°C, 湿度: 3.5g/ρ³

差画像 (バンド A - バンド B)

図17 バンド A と バンド B の差画像による対向面の反射の影響

る波長帯を提案し、6.5~8.6 μm 帯に波長帯に感度を有する放射カメラを試作した。

(2) 試作した放射カメラの各波長帯の熱画像を夏季の住宅地において収録し、比較・検討を行った結果、建築外部空間を構成するほとんどの材料はほぼ黒体に近い性質を示す範囲内に分布しているが、バンドAでは天空放射の反射の影響、バンドCでは日射の反射の影響が場合によっては数 $^{\circ}\text{C}$ から10数 $^{\circ}\text{C}$ に及ぶことを明らかにした。これに対しバンドBでは天空放射の反射や日射の反射の影響は無視できるものの大気吸収の影響が他の波長帯よりも大きい。しかし数100m以内の計測であれば、大気補正を行うことにより建築外部空間におけるガラスやタイルなどの放射温度計測に有効なことを示した。

(3) バンドBは他の波長帯よりも大気補正量が多くなるが、可降水量を用いて検討した結果、LOWTRAN7⁵⁾の中緯度大気モデルで扱われている夏季、及び冬季の絶対湿度の代表的な値から、我が国においては、夏季で距離200m以内、冬季で距離800m以内であれば0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内の測定誤差で放射温度を得られることを示した。

(4) 試作した赤外線放射カメラと大気補正手法の組み合わせによる新たな放射温度計測アルゴリズムを提示し、建築外部空間における応用例としてガラス面の表面温度計測に適用した。熱電対による接触法との比較の結果、気温と10 $^{\circ}\text{C}$ 以内の温度差の対象物では最大1 $^{\circ}\text{C}$ 以内の誤差で放射温度が得られることを示し、建築外部空間における計測に有効なことを明らかにした。

注記

本研究は文献No. 9, 10, 11, 12に発表した内容を修正、加筆したものである。

引用文献

- 1) 梅干野 晃、内山一雄、「気象要素を用いた数値計算モデルによる大気補正手法に関する研究」、日本建築学会計画系論文報告集、第414号、pp. 13~21, 1990. 8
- 2) Akira HOYANO, Kazuo UCHIYAMA, "Automatic Correction Method for Atmospheric Effect on Thermal Image and Application to Urban Thermal Environment", Proc. of 4th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, pp. 299-306, July 29-31, 1991
- 3) R.D. Hudson Jr., "Infrared System Engineering", John Wiley & Sons, Inc. 1969
- 4) 梅干野 晃、内山一雄他、"新たに試作した波長域に感度を有する熱画像と熱収支計算による外壁剥離検知手法に関する基礎的研究"、日本建築学会計画系論文報告集、第450号、pp. 29~37, 1993. 8

5) F.X. Kneizys, E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.h. Chetwynd Jr, L.W. Abreu, J.E.A. Selby, S.A. Clough and R.W. Fenn: Atmospheric Transmittance / Radiance: Computer Code LOWTRAN7, AFGL-TR-87-0187, Hanson, Mass(1987)

6) Ely E. Bell et al., "Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelength between 1 and 20 Microns. II. Sky Measurements", J. Opt. Am., Vol 50, No. 12, Dec. 1960

7) R.A. McCartney, et al., "Optical Properties of the Atmosphere", U.S. Air Force Cambridge Research Laboratories Report AFCRL-72-0497, Hanscom Field, Massachusetts, 24 Aug. 1972.

8) 梅干野 晃、塩月 義隆他"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、第408号、pp. 13~21, 1990. 2

9) 梅干野 晃他、"3つの感度波長帯による赤外画像の比較検討(多重分光赤外画像による建築熱環境の計測 その1)"、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 457~458, 1988年

10) 梅干野 晃他"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(多重分光赤外画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年

11) 梅干野 晃他"赤外線放射カメラ(6.5~8.6 μm)による熱画像の水蒸気吸収の補正(多重分光赤外画像による建築熱環境の計測 その3)"、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 839~840, 1989年

12) 梅干野 晃他"赤外線放射カメラ(6.5~8.6 μm)の有効性について(多重分光赤外線画像による建築熱環境の計測 その4)"、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 805~806, 1990

(1993年9月10日原稿受理, 1994年3月2日採用決定)