

赤外線センサを用いた空間温度の推定・制御手法の開発

七里 彰俊

Keywords : Infrared sensor, Surface temperature, Air conditioning control, Thermal environment measurement, Office

赤外線センサ, 表面温度, 空調制御, 温熱環境実測, オフィス

1. はじめに

従来の空調は、一般的に空調機本体や壁・天井面に取り付けられたリモートセンサを基に制御を行う(図-1)。しかし、室内空間には温度分布がありリモートセンサの温度と執務者の居住域 (FL+1.1m) の温度は必ずしも一致しない。また放射を考慮した体感指標の作用温度は制御されていないため、執務者の不満の要因となっている。

本研究は快適な環境をもたらす空調制御を実現するため、従来の空調機センサと当社が開発した人の在/不在を検知する赤外線センサ (以下赤外線センサ) を用いた空調制御システムの開発を目的としている。天井面に複数配置されている赤外線センサが計測する温度 (赤外線センサ温度) とリモートセンサを用いることにより執務空間の環境を細かく把握することが可能となる。(図-2)。本制御では、表-1 に示す天井面室内側のリモートセンサによる空気温度(以下、空調機センサ温度)と、赤外線センサ温度から執務空間の体感温度を推定し、その推定値を元に空調の制御を行う。

2. 本制御システムの有効性の検討

本制御システムの有効性の検討のフローを図-3 に示す。体感指標である作用温度は、一般的な手法では室温とグローブ温度、風速から求められる。本手法では赤外線センサ温度が温熱環境の把握、体感指標である作用温度の推定及び空調制御に有用か明確にするため、1) 夏期・冬期の赤外線センサ温度と実測による空気温度・グローブ温度^{注1)} との相関性・追従性の確認、2) 空調機センサや実測による空気温度・グローブ温度との比較、3) 赤外線センサの特性分析 4) 執務者の体感指標となる作用温度^{注2)} との比較、5) 補正を用いた体感指標の用いた推定の5項目を行った。

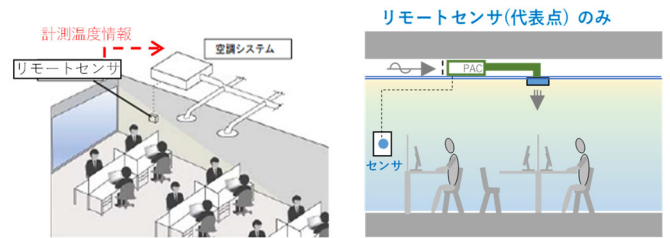


図-1 従来の空調システムの概要
Fig.1 Conventional air conditioning system

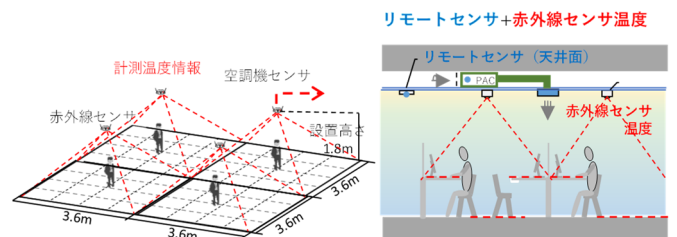


図-2 赤外線センサ利用空調システムの概要
Fig.2 Air conditioning system using infrared sensor

表-1 本制御システムに使用するセンサ
Table.1 Sensors used in this control system

センサ	測定項目	使用機器	設置場所	設置間隔
リモートセンサ	温湿度	温湿度センサ	壁面・天井面・天井内	40-50㎡
赤外線センサ	放射温度	サーモパイルセンサ	天井面	13㎡

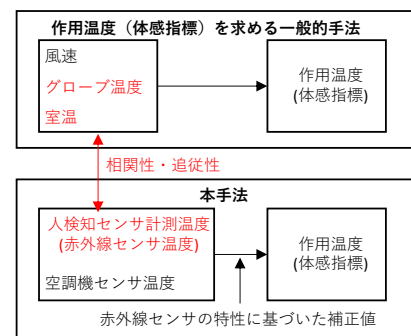


図-3 本制御システムの有効性検討フロー
Fig.3 Effectiveness study flow of this control system

3. 赤外線センサによる温熱評価

3.1 実測概要

本報では赤外線センサを用いた空調制御システムを導入したオフィスを対象に方位・時刻別における温熱環境評価を行った。建物の概要を表-2に示す。東面・北面に開口(窓面積率 70%)を有している。実測箇所はインテリア・ペリメータ(東・北)(外乱の影響を把握)、会議室(同一空調区画で複数の室がある部屋)とした。また、外壁負荷や内部発熱による影響を把握するため、中間階の3階と最上階である13階を選択した。期間は夏期(2022/7/25~9/20)、冬期(2023/1/10~2/27)とした。写真-1に赤外線センサの外観を示す。各赤外線センサは、人の存在範囲や過度な高温の物体(電子機器、湯呑み等)部分を除いた検知範囲の表面温度を平均化して出力する。図-4に示すようにフロアは3,200mm×3,200mmのモジュールを基本にして赤外線センサの検知範囲が区画割されている。赤外線センサの温度と比較するため、表-3に示す通り空気温度、グローブ球温度、床表面温度を計測した。平面温度分布を把握するため、温度センサを黒丸(●)がプロットされた場所をFL+1.1mに設置した。また、執務者の体感指標である作用温度を算出するため、空気温度とグローブ球温度のセンサを居住域の高さであるFL+1.1mに設置した。冬期暖房運転時は、空間の上下温度分布を確認するため、温湿度センサを各方位の白丸(○)がプロットされた場所で鉛直方向3点(FL+0.1m, 0.6, 1.1m)に設置した。

3.2 実測結果

3.2.1 赤外線センサ温度と居住域の追従性

図-5に夏期代表日におけるインテリアの各温度の推移を示す。代表日は気温が高く、晴天^{注3)}となった8/23を選んだ。空調は7:00から稼働し、各温度は24~25℃を推移しており、空気温度とグローブ球温度に差がみられなかった。赤外線センサ温度は、日中、空気温度とグローブ球温度に対して約0.5℃低い温度帯で推移していた。

図-6に冬期代表日におけるインテリアの各温度の推移を示す。代表日は気温が低い1/31を選んだ。空調は7:00から稼働し、23~24℃を推移しており、夏期同様、空気温度とグローブ球温度に差がみられなかった。赤外線センサ温度は、日中、空気温度とグローブ球温度に対して1.0℃程低い温度帯で推移していた。

以上の結果から赤外線センサ温度は夏期・冬期共に日中の時間帯において、空気温度やグローブ球温度より

表-2 建物概要
Table.2 Building outline

延床面積	13,490㎡
建物規模	地上13階 地下1階
対象フロア	3F・13F事務室
対象方位	北・東・西
窓面積率	北面 70%
	東面 70%
	北西会議室70%
	西キッチン70%



写真-1 赤外線センサ
Photo.1 Infrared sensor

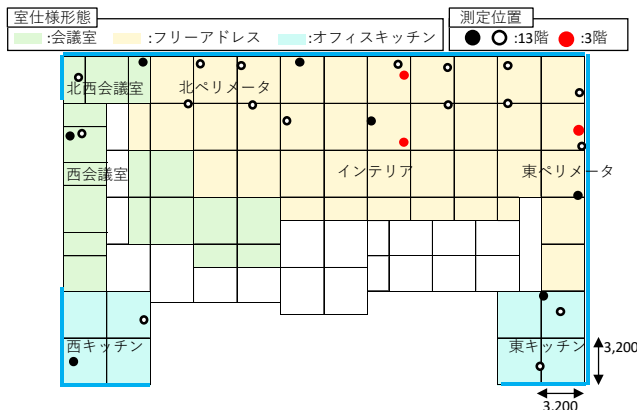


図-4 測定平面図

Fig.4 Plan view of measurement

表-3 測定項目及び使用機器

Table.3 Measurement item

凡例	階数	空気温度/湿度	グローブ球温度	表面温度	設置箇所数
		温湿度計	温湿度計	放射温度計	
●	13階	1.1m	-	-	17
○	13階	0.1・0.6・1.1m	1.1m	床表面	10
●	3階	床上1.1m	-	-	3

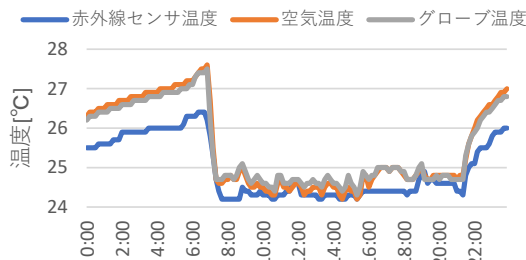


図-5 夏期代表日 各温度時刻推移 (インテリア)

Fig.5 Time transition of each temperature summer day (interior)

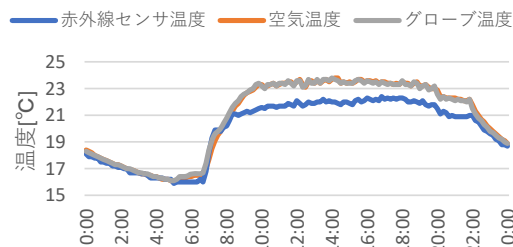


図-6 冬期代表日 各温度時刻推移 (インテリア)

Fig.6 Time transition of each temperature winter day (interior) 常に0.5~1.0℃低い温度を示しており、各温度との相関が確認された。また、空調稼働後、室温と同様の推移を示していることから赤外線センサの室温に対する追従性が確認された。

3.2.2 赤外線センサによる平面温度分布

従来のシステムでは、空調機 1 台につきセンサ 1 個が空間に設置されており、空間分布の把握における解像度が粗く、温熱快適性を担保できていないといえない。これに対し、本システムは赤外線センサを用いて、空間の温熱快適性を細かく把握することを意図している。そこで本実測では、FL+1.1m に設置した温湿度計による空気温度（以下 FL+1.1m 温度）を基準に、赤外線センサ温度と空調機センサ温度を比較することで赤外線センサの有効性を検証した。

図-7 に夏期代表日(8/10)における実測温度、空調機センサ温度、赤外線センサ温度の各平面温度分布を示す。時間帯は外気温が高くなる 12:00 と 15:00 を選定している。上段は FL+1.1m 温度、中段は天井に設置された空調機センサの温度、下段は赤外線センサ温度である。中段は空調対象エリア毎に示している。実測温度分布図(上段)において、東ペリメータが相対的に高温であること、北西隅角部の会議室に対し西の会議室は相対的に低温であること(12:00)、インテリアにおいても東西方向に温度分布が生じていること等の特徴が確認できる。同時刻における赤外線センサ温度による温度分布図(下段)においても同様の傾向が確認できる。

図-8 に冬期代表日(2023/1/31)における FL+1.1m 温度、空調機センサ温度、赤外線センサ温度との各平面温度分布を示す。時間帯は空調立ち上がり後の 9:00 と日中

の 12:00 を選定した。FL+1.1m 温度は 9:00 において 21°C 程度、12:00 において 22°C 程度を示している。一方で空調機センサ温度は 9:00 は 22°C 程度、12:00 では 22°C 程度、赤外線センサ温度は 9:00 は 21°C、12:00 では 22°C 程度であった。空調機センサは FL+1.1m 温度より 1°C 高く、特に西側においては FL+1.1m 温度より 2°C 程度高い結果であった。空調立ち上がり後の 9:00 に温度の乖離がみられ、12:00 には解消されていることから、冬期における上下温度分布の差を空調機センサが捉えられていないことを示しているといえる。また、赤外線センサ温度は FL+1.1m 温度と同程度の温度を示していることがわかった。

以上の結果から、赤外線センサは居住域の平面的な温度分布を、センサの検知範囲 3.6m の解像度で捉えることが可能である。また、その出力値が温熱環境を精度よく捉えることが可能である。

3.2.3 赤外線センサと上下温度分布の関係

前節で述べたように、空調機本体や天井付近に設置されたセンサは天井付近の温度を計測するため、冬期暖房時は足元の温度を把握できず、執務者の不満となる上下温度差の解消ができない場合がある。そこで 1/31 における各代表時刻の上下温度分布をインテリア・ペリメータ別の結果を図-9 に示す。(a)に示すインテリアでは赤外線センサ温度と FL+0.1m の空気温度を比較すると暖房立ち上がり直後の時間帯を除き、足元

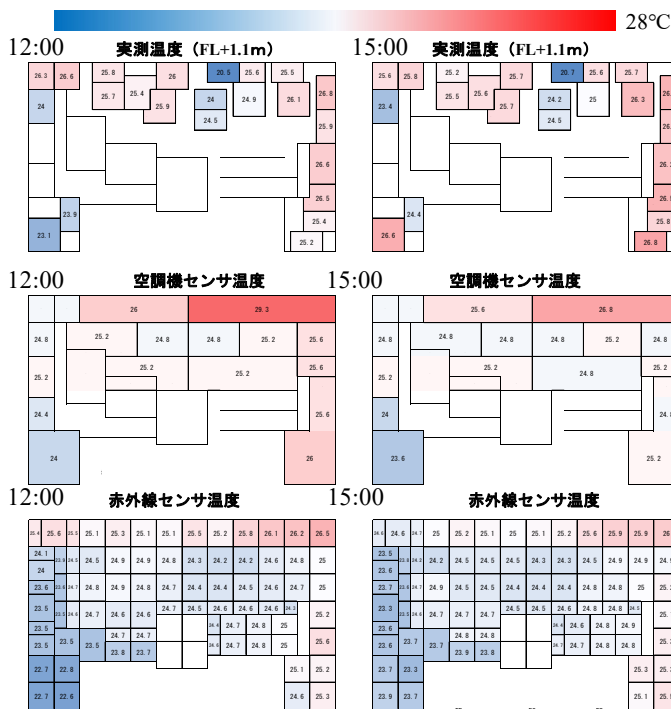


図-7 各手法による温熱環境把握 (13階 8/10 夏期代表日)
Fig.7 Comparison of grasping the thermal environment (13th floor 8/10 Summer representative day)

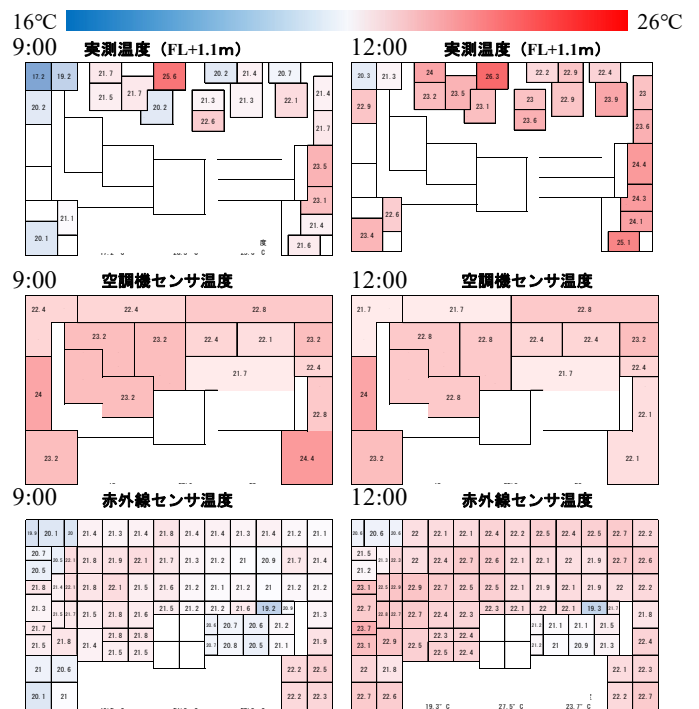
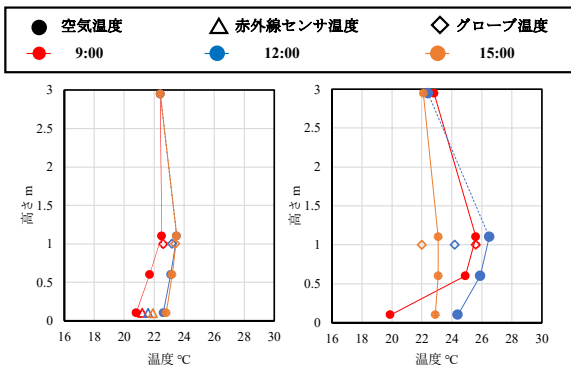


図-8 各手法による温熱環境把握 (13階 1/31 冬期代表日)
Fig.8 Comparison of grasping the thermal environment (13th floor 1/31 Winter representative day)

付近の温度を 0.5℃以内の精度で捉えられている。よって赤外線センサ温度は冬期暖房時の足元付近の温度把握に利用できることが確認された。また、赤外線センサ温度とグローブ温度が同様に温度上昇していることが確認された。(b)に示すペリメータにおいて足元(FL+0.1m)と居住域(FL+1.1m)の上下温度差は 9:00 時点が最も大きく、北ペリメータにおいて約4℃の差が生じている結果であったが、12:00 には上下温度差 2.0℃以内に改善された。本システムで赤外線センサの情報を空調制御に用いることで空調立ち上がり時の上下温度差の解消まで把握が可能となる。



(a) インテリア (b) 北ペリメータ
 図-9 上下温度分布(13階 1/31 冬期代表日)
 (a) Interior (b) North perimeter
 Fig.9 Upper and lower temperature distribution
 (13th floor 1/31 Winter representative day)

3.2.4 赤外線センサと体感温度の関係

図-10 のように同一空調区画が分割されて部屋が構成される場合、窓の開口率などの負荷が異なるため、センサ位置に注意が必要となる。

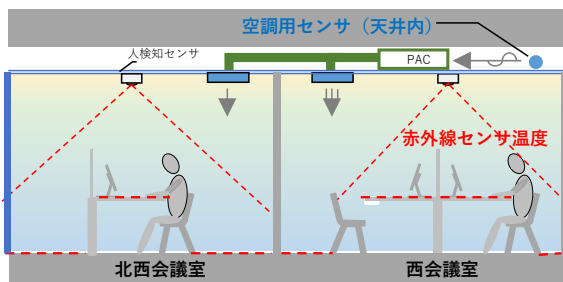
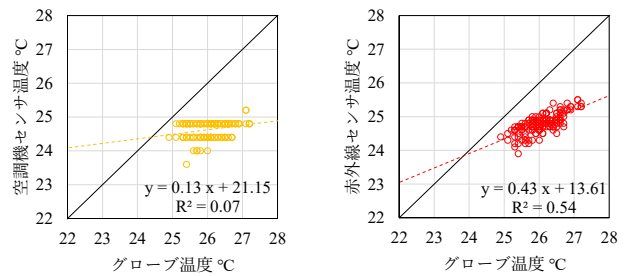


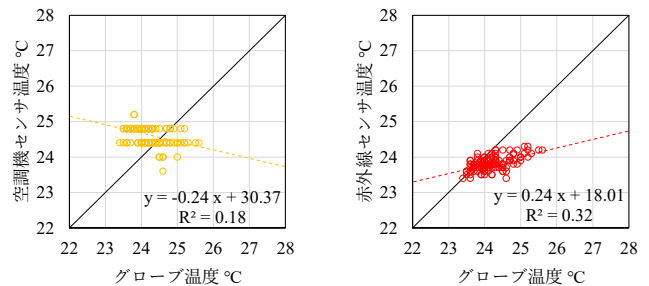
図-10 同一空調区画内におけるセンサの設置状況
 Fig.10 sensors in the same air conditioning section

実測対象オフィスでは、同一の空調機を共有する北西会議室・西会議室の 2 室があり、空調機センサは天井内に設置されており、北西会議室と西会議室で共有している。一方、赤外線センサは北西会議室と西会議室で空間毎に測定している。

北西会議室と西会議室を対象に実測を行った。図-11 に FL+1.1m で測定したグローブ温度と空調用センサにより測定された空気温度 (空調機センサ温度)及び赤外線センサ温度の相関を示す。空調機センサ温度(左)は決定係数が小さく、グローブ温度との明確な相関が確認できない。空調用センサは天井内の温度を計測するため、それぞれ開口率など条件が異なる 2 室の空間の温度毎の把握ができなかったといえる。一方、赤外線センサ温度(右)の決定係数は北西会議室 0.54、西会議室で 0.32 であり、グローブ温度との相関が確認できる。赤外線センサは空間毎に配置されるため、分割されている各部屋の空間を代表する温度を計測できるといえる。このように、赤外線センサを用いることで、高い空間解像度で室内温熱環境の把握が可能となる。



(a) 北西会議室 (13階 開口率:70%)
 (a) Northwest conference room (13th floor opening rate: 70%)



(b) 西会議室 (13階 開口率:0%)
 (b) West conference room (13th floor opening rate: 0%)

図-11 グローブ温度と各センサ温度の相関
 Fig.11 Correlation between globe temperature and temperature of each sensor

3.2.5 赤外線センサによる表面温度の特性の分析

赤外線センサの検知範囲内には床表面と什器が存在する。赤外線センサは検知範囲内の高温発熱体を除いた床面・什器の温度を複数のサーモパイルで測定して平均化している。赤外線センサ温度に対する什器温度の影響の程度を調査するため、冬期において各温度(床表面温度・什器温度・1.1m の空気温度)を熱電対により測定した。図-12 に計測概要を示す。

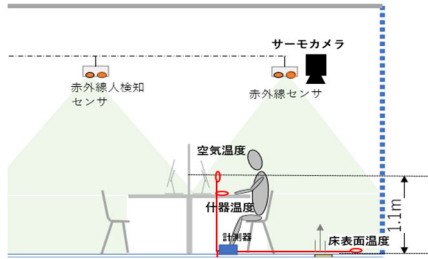


図-12 計測概要
Fig.12 Measurement overview

写真-2 に代表時刻におけるインテリアの熱画像を示す。空気温度 24.1℃に対し床表面温度は 24.6℃、什器温度は 24.4℃であり、什器と床表面の温度差がみられないため、什器レイアウトによる赤外線センサ温度への影響はないと考えられる。

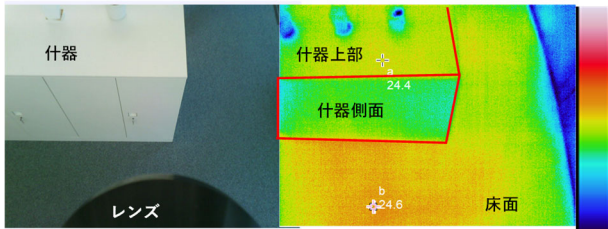


写真-2 什器と床表面温度比較
Photo2. Furniture and floor surface temperature comparison

図-13 に、床表面温度と什器の温度の相関を、インテリアおよびペリメータごとに示す。また、床表面温度と赤外線センサ温度の相関および温度差(床表面温度-赤外線センサ温度)の発生頻度分布について、インテリアの場合を図-14 に、ペリメータの場合を図-15 に示す。インテリア・ペリメータともに空調/非空調時間帯に依らず床表面温度と什器の温度差は小さいことが確認された。また、床表面の温度に対し赤外線センサ温度は

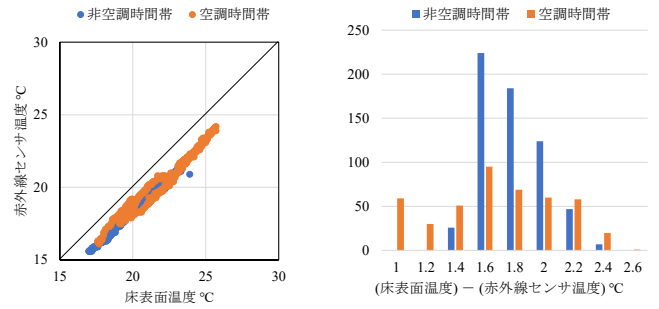


図-15 床表面温度と赤外線センサ温度の関係(ペリメータ)
Fig.15 Relationship between floor surface temperature and infrared sensor temperature (perimeter)

1℃以上低い値を示す特性が確認された。

3.2.6 居住域温度と赤外線センサ温度の相関

図-16 に、空調機センサ温度とグローブ温度の相関および赤外線センサ温度とグローブ温度の相関^{注4)}を示す。赤外線センサ温度のグローブ温度に対する差は-1℃程度となっている。この差は、前述の赤外線センサの表面温度測定の特性によるものと考えられる。この特性を考慮し、赤外線センサ温度に補正を加えた。決定係数は空調機センサ温度の 0.56 に対し、赤外線センサ温度では 0.70 と、グローブ温度と赤外線センサ温度の相関がより高いことが確認された。

この結果から、居住域温度のセンシングにおいて、赤外線センサは空調機センサの代替として活用できると考えられる。

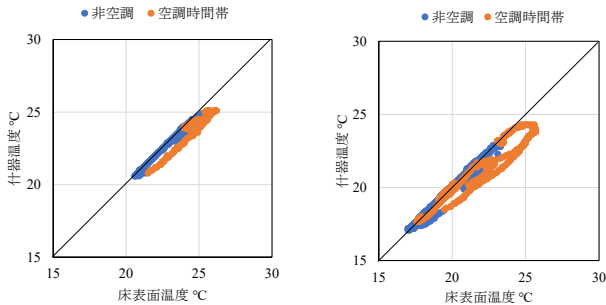


図-13 床表面温度と什器温度の相関
Fig.13. Correlation between floor surface temperature and fixture temperature

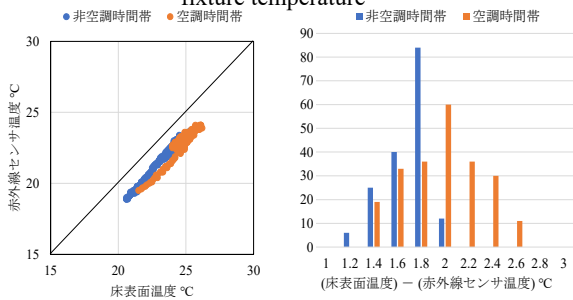


図-14 床表面温度と赤外線センサ温度の関係(インテリア)
Fig.14 Relationship between floor surface temperature and infrared sensor temperature (interior)

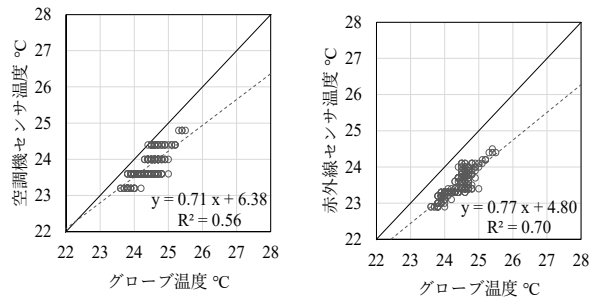
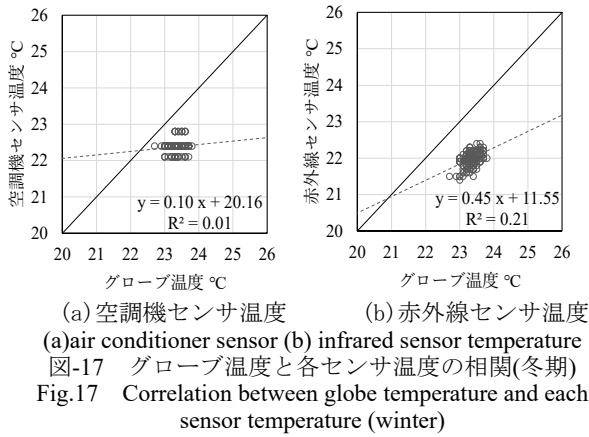


図-16 グローブ温度と各センサ温度の相関(夏期)
Fig.16 Correlation between globe temperature and each sensor temperature (summer)

図-17に、グローブ温度と空調機センサ温度の相関およびグローブ温度と赤外線センサ温度の相関を示す。冬期において赤外線センサ温度は、グローブ温度に対して1°C以上低い傾向にあることが確認された。冬期において、居住域高さと同程度の温度差は顕著になる。赤外線センサは居住域高さより低い位置の床表面を検知範囲の一部としており、床面付近の温度低下を捉えたため、居住域高さのグローブ温度に対し赤外線センサ温度が低く計測されたと考えられる。決定係数は、空調機センサ温度の0.01に対し、赤外線センサでは0.21と、冬期においてもグローブ温度と赤外線センサ温度の相関が比較的高いことが確認された。そのため、赤外線センサ温度は、居住域の体感指標である作用温度推定において有用な情報と考えられる。



4. 居住域における作用温度の推定

4.1 作用温度推定式

本研究では空調機センサ温度と赤外線センサ温度の2種類のセンサ情報を用いて作用温度を推定する。式(1)に、居住域高さの作用温度推定値 OT_c の算出方法を示す。

$$OT_c = \{ \alpha T_a + \beta (\theta_{tz} + \gamma) \} / 2 \quad (1)$$

ただし、 $\alpha + \beta = 2$

ここに、 OT_c : 作用温度推定値 [°C], T_a : 空調機センサ温度 [°C], θ_{tz} : 同一空調区画内に設置された赤外線センサによる測定温度の平均値 [°C], $\alpha \beta \gamma$: パラメータ [-]

式(1)では α 、 β 、 γ のパラメータを導入しており、 α は空調機センサ温度 T_a に、 β は赤外線センサ温度 θ_{tz} (同一空調区画内に設置された複数の赤外線センサによる測

定温度の平均値)に掛かる係数、 γ は赤外線センサ温度 θ_{tz} を補正するパラメータである。居住域高さのグローブ温度の実測値に対して、作用温度推定値が近似するようなパラメータ設定を検討する。表-4に、作用温度推定式におけるパラメータ設定のケースを示す。

表-4 作用温度推定式におけるパラメータ設定
Table.4 Parameter setting in the action temperature estimation formula

Case	α	β	γ	備考
Case 1	1	1	0	空調機センサ温度と赤外線センサ温度の平均
Case 2	0	2	0	補正前の赤外線センサ温度
Case 3	0	2	1.5	補正後の赤外線センサ温度

Case 1は、 $\alpha = \beta = 1, \gamma = 0$ と設定し、空調機センサ温度と赤外線センサ温度の平均値を作用温度推定値とするケースである。Case 2は、 $\alpha = 0, \beta = 2, \gamma = 0$ と設定し、赤外線センサ温度を作用温度推定値とするケースである。Case 3は、 $\alpha = 0, \beta = 2, \gamma = 1.5$ と設定し、 γ により補正した赤外線センサ温度を作用温度推定値とするケースである。なお、この $\gamma = 1.5$ は、前述したように赤外線センサが1°C以上低く測定する特性を反映した数値となる。

4.2 パラメータ設定の妥当性の評価方法

作用温度推定式ではパラメータを設定する必要があるが、この妥当性は、ある瞬間のみではなく、期間的な評価を行う必要がある。そこで、一定期間における真値と予測値の誤差をRMSE(二乗平均平方根誤差)により評価した。式(2)に、本研究におけるRMSEの算出方法を示す。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{g,i} - OT_{c,i})^2} \quad (2)$$

ここに、 $RMSE$: 居住域高さのグローブ温度に対する作用温度推定値の二乗平均平方根誤差、 n : データ数 [-], $T_{g,i}$: i の時点におけるグローブ温度の実測値[°C], $OT_{c,i}$: i の時点における作用温度推定値[°C]

夏期および冬期それぞれの代表週において、冷房もしくは暖房運転時かつ赤外線センサにより人の在が検知された時点 i の各センサ温度と設定したパラメータから $OT_{c,i}$ を計算する。同じ時点におけるグローブ温度の実測値 $T_{g,i}$ と $OT_{c,i}$ の差を求める。以上の計算を代表週の期間内で行い、RMSEを導出する。

4.3 評価結果

表-5 に、インテリアにおける各ケースの RMSE の算出結果を示す。

表-5 各ケースの RMSE 算出結果
Table.4 RMSE calculation results for each case

↔	↔	夏期↔	冬期↔
Case 1↔	$(\alpha=1, \beta=1, \gamma=0)$ ↔	0.79↔	1.22↔
Case 2↔	$(\alpha=0, \beta=2, \gamma=0)$ ↔	0.94↔	1.43↔
Case 3↔	$(\alpha=0, \beta=2, \gamma=1.5)$ ↔	0.63↔	0.22↔

夏期代表週において RMSE は、各センサ温度を平均する Case 1 の 0.79 に対し、赤外線センサ温度(補正前)を作用温度推定値とする Case 2 で 0.94 となり、3 ケース中で最大となった。一方で、補正した赤外線センサ温度を作用温度推定値とする Case 3 で 0.63 と、赤外線センサ温度を補正することで RMSE が低減した。この結果から、Case 3 における補正值 $\gamma=1.5$ が適切な値であったと考えられる。図-18 に、グローブ温度と各ケースの OT_c の相関(夏期)を示す。図-18 右において、Case 3 は Case 2 から補正值 $\gamma=1.5$ の分、上方に平行移動した分布となり、グローブ温度とよく一致していることが確認できる。冬期代表週において RMSE は、夏期の場合と同様に、RMSE は Case 2 が 3 ケース中で最大となり、補正を加えた Case 3 において最小となった。図-19 にグローブ温度と各ケースの OT_c の相関(冬期)を示す。RMSE が最小となった Case 3 により求めた OT_c のグローブ温度に対する差が小さいことが確認できる。

5. おわりに

執務者の快適性の向上を目的とし、体感温度指標を制御値とする空調制御に関して、オフィスを対象に温熱環境実測を実施し、以下の結果を明らかとした。

- ①夏期・冬期ともに赤外線センサ温度は居住域のグローブ温度との相関性、追従性が良く、空調の制御パラメーターとして有用であることを確認した。
- ②日射や躯体の蓄熱といった外乱が放射環境へ与える影響が大きい条件下では、赤外線センサ温度と空調機センサ温度を推定式に利用することで作用温度を誤差 1.0℃以下で概ね推定可能であることを確認した。
- ③赤外線センサ温度の特徴として居住域温度より常に 1.0℃程低い温度を示すことから、赤外線センサ温度に補正值を加えることで作用温度に近いことを確認した。

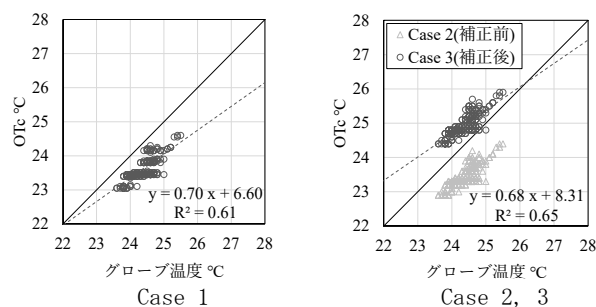


図-18 グローブ温度と各ケースの OT_c の相関(夏期)
Fig.18 Correlation between globe temperature and OT_c for each case (summer)

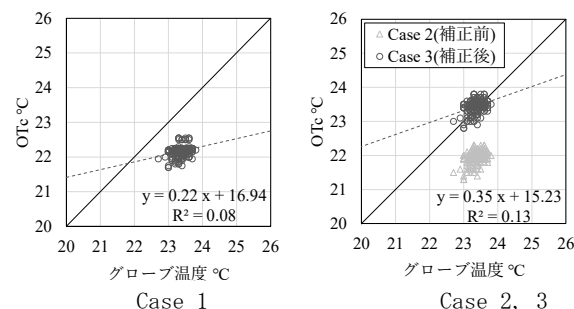


図-19 グローブ温度と各ケースの OT_c の相関(冬期)
Fig.19 Correlation between globe temperature and OT_c for each case (winter)

当社の開発した赤外線センサを用いた本システムを用いることで、新たなセンサを設置することなく従来の空調機センサと比べ居住域の平面的な温度分布を高い解像度で観測し空調制御に反映が可能である。

注

- 注1) 黒色塗装したピンポン玉を用いて測定した。
- 注2) 作用温度は風速が低いとき、空気温度と平均放射温度の平均値で近似できる。平均放射温度は風速が低い且つ空気温度とグローブ温度の差が小さいとき、グローブ温度とほぼ等しくなる。なお、室内代表点で風速を測定し、風速が十分に低いことを確認した。
- 注3) 参考文献²⁾を参照し、東京管区気象台(東京都清瀬市)による測定データを取得した。
- 注4) 夏期および冬期の各代表週において、冷房もしくは暖房運転時かつ赤外線センサによりその検知範囲内で人の在が検知された時点のデータを抽出しプロットした。

参考文献

- 1) 七里 他：次世代人検知センサによるオフィスの温熱評価と制御に関する研究(第3報)フリーアドレスオフィスにおける空間温度分布把握、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 2023.9(投稿中)
- 2) 国土交通省：気象庁 | 過去の気象データ検索, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2023.3.14 閲覧

謝辞

本研究の実証にあたって関電不動産開発・関電ファシリティーズの関係者による助力を得た。ここに記して関係者各位に謝意を表す。