

応答性を考慮した熱放射環境測定

高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻 建築環境工学研究室
 学籍番号：1190031 氏名：大野凌
 指導教員：田島昌樹

小型グローブ温度計 室内実験 精度検証
 時定数 屋根付き屋外空間 温熱環境

1. はじめに

熱放射環境を測定する機器として、グローブ温度計がある。グローブ温度計は温度センサーの周囲を黒色つや消し中空銅球で覆った測定器であり、周囲からの熱放射および気流の影響を考慮したグローブ温度が測定できる。またグローブ温度計の直径は JIS^[1]で 150 mmと定められているが、一般的に 75 mm径も用いられる。このグローブ温度計を使用する WBGT 計は乾球温度、湿球温度も測定し、熱中症の危険性を数値で表した WBGT 値が算出され、夏季の熱中症対策として室内空間だけでなく建設現場などの屋外空間でも多く使用されている。しかし屋外空間では室内空間に比べて気流や放射等が変化しやすいため、WBGT 等の環境測定を行うには応答性の良い機器を用いる必要があると考えられる。

そこで本研究では応答性を考慮したグローブ温度計を作成し、環境が変化しやすい空間で温熱環境を調査することを目的とし、屋外空間である建物に付属した屋根付きのスペース（以下、屋根付き屋外空間）を対象として実測調査を行った。

2. 研究概要

グローブ温度計の応答性を向上させるために、中空銅球が 75 mm径のグローブ温度計（以下、75 mmグローブ温度計）よりも径の小さいグローブ温度計を作成（以下、小型グローブ温度計）し、精度検証として 75 mmグローブ温度計を使用した WBGT 計とともに室内実験を行った。そして夏季と冬季に温湿度計、小型グローブ温度計、75 mmグローブ温度計を使用した WBGT 計および風速計を用いて、屋根付き屋外空間における温熱環境の実測調査を行った。夏季については表 1 に示す熱中症予防運動指針^[2]を用いた温熱環境の評価を行った。

3. 小型グローブ温度計の作成と精度検証

3.1 小型グローブ温度計の作成

既往研究で住吉、小島が作成した小型グローブ温度計^[3]を参考に、釣りの際に使用されるプラスチック製の 24 mm 径の玉ウキを用いて小型グローブ温度計を作成した。写真 1 に 75 mmグローブ温度計を使用した WBGT 計（左）と作成した小型グローブ温度計（右）を示す。作成方法は、まず表面の塗料を落とすために玉ウキにヤスリをかけ、黒色のラッカースプレーを塗布した。次に球体の一か所に穴を開け、ビニールチューブを差して木工用ボンドで固定し、ビニールチューブに T 熱電対温度計を挿入した。

3.2 小型グローブ温度計の精度検証

(1) 実験概要

作成した小型グローブ温度計の測定精度検証を目的に電気ストーブと扇風機を用いた室内実験を行った。表 2 に測定項目、使用機器および測定間隔を示す。また実験で使用した室の概要および各測定器設置点を図 1 に示す。室に設けられた空調機は使用せず、計 4 時間、各項目 1 秒間隔で連続測定を行った。

表 1 熱中症予防運動指針^[2]

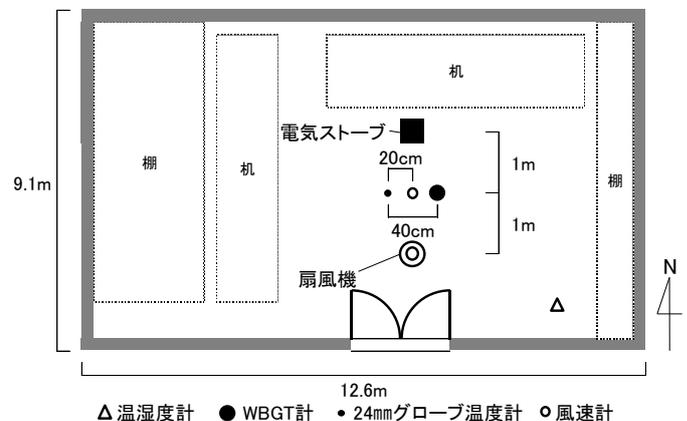
注意すべき生活活動の目安	WBGT [°C]
運動は原則禁止	31 ≤ WBGT
嚴重警戒（激しい運動は中止）	28 ≤ WBGT < 31
警戒（積極的に休息）	25 ≤ WBGT < 28
注意（積極的に水分補給）	21 ≤ WBGT < 25
ほぼ安全（適宜水分補給）	WBGT < 21

表 2 測定項目、使用機器および測定間隔

測定項目	使用機器	測定間隔
空気温度	RTR-53A	1 秒
75 mmグローブ温度	HI-2000SD	
小型グローブ温度	THERMIC 2300A	
風速	WS-03SD	



写真 1 WBGT 計（75 mmグローブ温度計使用）と小型グローブ温度計



△ 温湿度計 ● WBGT 計 ● 24mmグローブ温度計 ○ 風速計
 ※測定器、電気ストーブおよび扇風機の設置位置は床から 110cm の高さで統一

図 1 室内実験の配置図

(2) 実験結果

図 2 にグローブ温度計 (75 mmおよび小型) による測定値を示す。小型グローブ温度は 75 mmグローブ温度に比べて低い値を示す傾向があり、電気ストーブのみ使用時 (0:00~1:00) は測定値の差が約 3°C、電気ストーブおよび扇風機使用時 (1:00~4:00) は測定値の差は約 1.5°C~2.0°Cであった。結果として両グローブ温度計の測定値に差が見られたが、電気ストーブの熱放射と扇風機の気流による温度変化に対しては同様の波形を示す結果となった。

(3) 小型グローブ温度補正值の算出

75 mmグローブ温度を用いて平均放射温度 T_{mrt} を算出する式 (3-1) [4]、既往研究で住吉、小島により導かれた熱放射と気流を発生させた室内空間で黒体スプレーを塗布した 24 mm径の小型グローブ温度計を用いて平均放射温度 T_{mrt}' を算出する式 (3-2) をそれぞれ示す。これらの 2 つの式を用いて小型グローブ温度を 75 mmグローブ温度に補正する。まず小型グローブ温度計の表面に塗布した塗料の放射率 ϵ は 0.9 として、式 (3-2) から平均放射温度 T_{mrt}' を算出する。算出した平均放射温度 T_{mrt}' を式 (3-1) の平均放射温度 T_{mrt} に代入することで求まるグローブ温度 T_g を小型グローブ温度補正值 $T_{g'}$ とする。

図 2 に実験の測定値から算出した小型グローブ温度補正值を示す。小型グローブ温度補正值は電気ストーブのみ使用時 (0:00~1:00) に 75 mmグローブ温度より約 1°C 下回る結果となり、電気ストーブおよび扇風機使用時 (1:00~4:00) には 75 mmグローブ温度と概ね一致する結果となった。風速を弱に設定した場合 (3:00~4:00) は風速を強および中に設定した場合 (1:00~3:00) に比べて測定値の差が開き、小型グローブ温度補正值が少し小さい値を示した。

$$T_{mrt} = T_g + 2.35\sqrt{V_a}(T_g - T_a) \quad (3-1)$$

$$T_{mrt}' = [(T_{g'} + 273.15)^4 + \frac{2.38 \times 10^9 V_a^{0.58}}{\epsilon D^{0.42}} \times (T_{g'} - T_a)]^{1/4} - 273.15 \quad (3-2)$$

ここでは、

T_{mrt} : 75 mmグローブ温度から算出した平均放射温度 [°C]

T_{mrt}' : 黒体スプレーを塗布した 24 径の小型グローブ温度計を用いて熱放射と気流を発生させた実験時の平均放射温度 [°C]

T_g : 75 mmグローブ温度 [°C]

$T_{g'}$: 小型グローブ温度 [°C]

T_a : 空気温度 [°C]

V_a : 風速 [m/s]

D : 直径 [mm]

ϵ : 放射率 [-]

(4) 小型グローブ温度計の時定数

室内実験の結果をもとに、両グローブ温度計の時定数を算出した。時定数とは環境の変化による測定値の変動が平衡状態に達するまでの時間である。電気ストーブの使用開始時の測定値を 0%、扇風機使用開始直前までの時間で最も高くなった測定値を 100%とし、63.2%の測定値に達した時刻を時定数^[5]とした。表 3 に電気ストーブ使用時におけるグローブ温度 (75 mmおよび小型補正值) の 0%、100%および時定数 (63.2%) にあたる測定値に対応する経過時間を示す。それぞれの時定数は 75 mmグローブ温度が 7 分 55 秒、小型グローブ温度補正值が 3 分 11 秒となり、小型グローブ温度計は 75 mmグローブ温度の時定数の半分以下となった。

室内実験では電気ストーブのみ使用時 (0:00~1:00) の小型グローブ温度補正值が 75 mmグローブ温度より低い値となったが、これは小型グローブ温度計の時定数が 75 mmグローブ温度計に比べて小さいため周囲の壁や床等からの僅かな冷放射が影響し、小型グローブ温度補正值が低い値を示したと考えられる。また電気ストーブおよび扇風機使用時 (1:00~4:00) は、風速が最も小さい時間帯 (3:00~4:00) で小型グローブ温度補正值が低い値となっている。電気ストーブのみ使用時 (0:00~1:00) と同様に、小型グローブ温度計は 75 mmグローブ温度計に比べて時定数が小さいため扇風機による僅かな気流が影響し、小型グローブ温度計補正值が低い値を示したと考えられる。室内実験より時定数の小さい小型グローブ温度計は、75 mmグローブ温度計では計測することができない僅かな気流および放射の影響を計測することができることが示唆される。

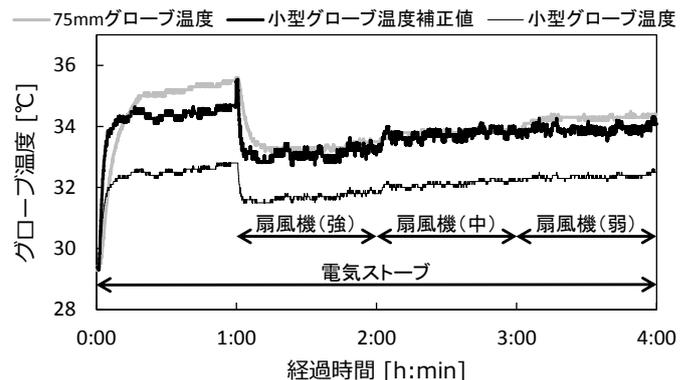


図 2 グローブ温度測定値

表 3 電気ストーブ使用時における両グローブ温度計の測定値が 0%、100%、時定数にあたる経過時間

	75 mmグローブ温度	小型グローブ温度補正值
0%	00:00:00	00:00:00
100%	00:54:23	00:51:37
時定数	00:07:55	00:03:11

※経過時間は、時間(h) : 分(min) : 秒(s)

4. 屋根付き屋外空間における温熱環境調査

4.1. 実測概要

作成した小型グローブ温度計、温湿度計、WBGT 計および風速計を用いて夏季と冬季に屋根付き屋外空間で実測調査を行った。表 4 に測定項目、使用機器および測定間隔、表 5 に測定日と測定場所を示す。測定時間について夏季は全測定場所で 10:00~17:00、冬季は 10:30~17:00 とし、K 棟 2 階喫煙所のみ 12:30~17:00 とした。実測結果は測定時間の内、天候が良く、かつ測定器に直達日射が当たっていない時間の測定データのみを抽出した。

4.2. 夏季の実測結果と考察

図 3 に夏季における測定点 D の 75 mm グローブ温度と小型グローブ温度補正値の時系列データと箱ひげ図を示す。左の時系列データより小型グローブ温度補正値は 75 mm グローブ温度に比べて細かく変動しており、短時間の温度変化を測定できていると考えられる。また右の箱ひげ図より小型グローブ温度補正値は 75 mm グローブ温度に比べて、ばらつきが大きい結果となった。したがって小型グローブ温度補正値は 75 mm グローブ温度計では測定することができない短時間で変化する気流および放射の影響が計測されていると考えられる。

図 4 に測定点 F, G における 75 mm グローブ温度と小型グローブ温度補正値の散布図を示す。図中の楕円はマハラノビス距離による 95% 信頼楕円であり、楕円中の黒点は平均値である。測定点 F は測定点 G に比べて 75 mm グローブ温度と小型グローブ温度補正値の差が大きくなっているため、気流と放射の変化が大きかったことが示唆される。

図 5 に各測定点における空気温度が 28℃ 以上のときの小型グローブ温度補正値と WBGT の箱ひげ図を示す。また箱ひげ図の上部にデータの中央値、図中に熱中症予防運動指針の警戒以上の範囲をグレーで示す。右の WBGT の結果より測定点 E, G 以外は全時間で熱中症に「警戒」、測定点 G は一部の時間で熱中症に「警戒」、測定点 E は全時間で熱中症に「注意」という結果となった。全時間で熱中症に警戒すべき結果となった測定点 E, G 以外は、左の小型グローブ温度補正値の結果においても高い値を示しており、直達日射の影響がない場合でも地面や壁等からの日射の照り返しやガラス面からの反射により放射の影響が大きくなっていると考えられる。

表 4 測定項目、使用機器および測定間隔

測定項目	使用機器	測定間隔
空気温度	RTR-53A	1 秒
小型グローブ温度	THERMIC 2300A	
75 mm グローブ温度	HI-2000SD	
WBGT	HI-2000SD	
風速	Swema 3000	1 時間*

*15 秒平均を 3 回測定し平均したものを扱っている

表 5 測定日と測定場所

時期	測定日	測定点	測定場所
夏季	2018/8/28	A	図書館エントランス
冬季	2018/12/25		
夏季	2018/8/29	B	食堂南西側食事スペース
冬季	2019/1/7		
夏季	2018/8/30	C	B 棟エントランス
冬季	2018/12/28		
夏季	2018/9/3	D	A 棟と B 棟をつなぐ 4 階通路
冬季	2018/12/17		
夏季	2018/9/5	E	アクセス前通路
冬季	2018/12/27		
夏季	2018/9/18	F	B 棟 4 階喫煙所
冬季			
夏季	2018/9/19	G	K 棟 2 階喫煙所
冬季	2019/1/9		

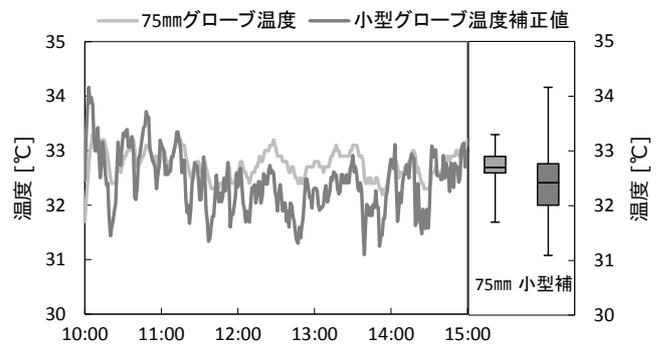


図 3 測定点 D における 75 mm グローブ温度と小型グローブ温度補正値 (夏季)

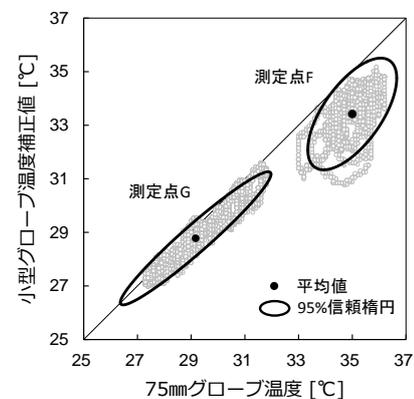


図 4 測定点 F, G における 75 mm グローブ温度と小型グローブ温度補正値

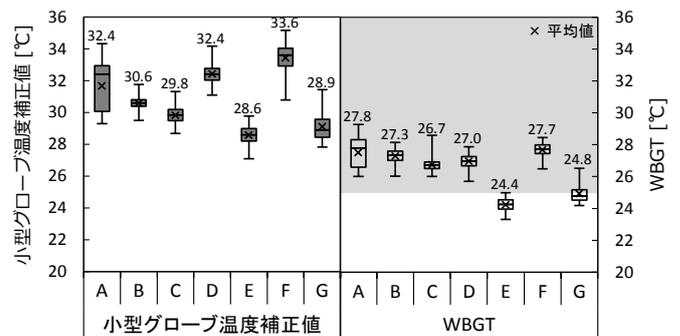


図 5 各測定点における小型グローブ温度補正値と WBGT

4.3. 冬季の実測結果と考察

図6に冬季における測定点Cの75mmグローブ温度と小型グローブ温度補正值の時系列データと箱ひげ図を示す。左の時系列データは夏季と同様に小型グローブ温度補正值が75mmグローブ温度に比べて細かく変動しており、短時間の温度変化を測定できていると考えられる。また右の箱ひげ図についても夏季と同様に小型グローブ温度補正值が75mmグローブ温度に比べて、ばらつきが大きい結果となり、冬季においても小型グローブ温度補正值は短時間で変化する気流および放射の影響が計測されていると考えられる。

図7に測定点A,Eにおける小型グローブ温度補正值の平均グローブ温度との差を示す。測定点A,Eは同時刻の測定データであり、急激な温度変化をしていない1時間分の測定データを抽出した。測定点Aは平均風速が0.5m/s以下、測定点Eは平均風速が0.5m/s以上である。気流の大きい測定点Eは気流の小さい測定点Aに比べて24mmグローブ温度補正值の平均値との差が正負ともに大きい。したがって小型グローブ温度計の温度変化時における測定値のばらつきは気流が一つの要因であることが示唆される。

図8に冬季における各測定点の空気温度と小型グローブ温度補正值の箱ひげ図を示す。また箱ひげ図の上部にデータの中央値を示す。全体的に低い値が測定されており、測定点Cに関しては空気温度および小型グローブ温度補正值ともに他の測定点に比べて低い値が測定されている。測定点Cの測定日は12月28日であり、年末の強い寒波の影響が考えられる。また測定点Gは小型グローブ温度補正值が空気温度より低い値が測定されている。測定点Gは屋外空間とは閉ざされた周囲がガラス面の喫煙所であり、人の出入りによる移動や設置されている分煙機の稼働による気流の発生が一つの要因であると考えられる。

5. おわりに

本研究では小型グローブ温度計の作成と精度検証を行った。また屋根付き屋外空間を対象に作成した小型グローブ温度計を用いて応答性を考慮した温熱放射環境に関する実測調査を行った。

電気ストーブと扇風機を使用した室内実験で小型グローブ温度計の時定数は75mmグローブ温度計に比べて半分以下となり、気流および放射の僅かな影響や短時間の変化を計測できることを確認した。小型グローブ温度計は環境が変化しやすい空間での環境測定に用いるのにより適していると考えられる。環境が変化しやすい建物に付属した場所である屋根付き屋外空間では、気流および地面や壁等からの日射の照り返しやガラス面からの反射に

よる放射の影響があり、当該箇所で小型グローブ温度計による測定を行い、室内実験と同様の結果を得た。

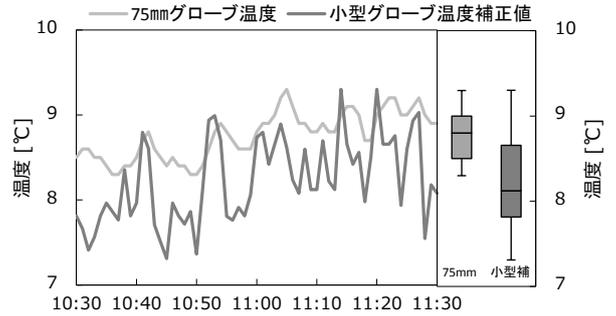


図6 測定点Cにおける75mmグローブ温度と小型グローブ温度補正值（冬季）

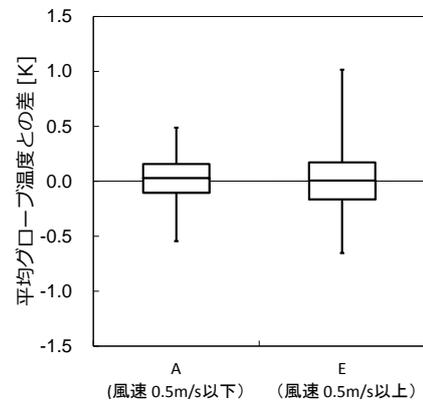


図7 測定点A,Eにおける小型グローブ温度補正值の平均グローブ温度との差[K]

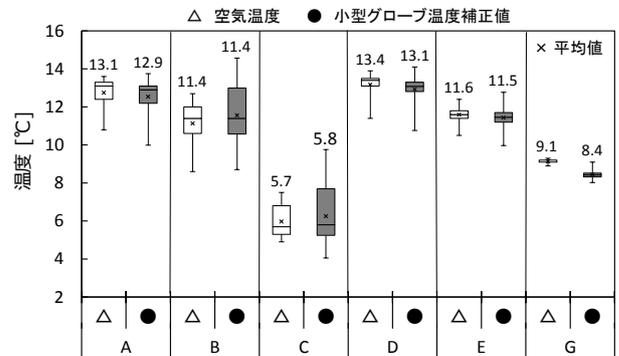


図8 各測定点における空気温度と小型グローブ温度補正值（冬季）

<参考文献>

- [1]日本規格協会 日本工業標準調査会審議：JIS Z 8504 人間工学-WBGT（湿球黒球温度）指数に基づく作業者の熱ストレスの評価-温熱環境，1999 制定 [2]熱中症対策に関する検討会で紹介された熱中症対策について-厚生労働省，https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/kenkou/nettyuu/jirei/120807-1.html [3]住吉栄作 小島昌一：室内環境における小型グローブ温度計の測定精度に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告 第53号，p197-200,2014.3 [4]最新 建築環境工学（改訂4版），p56，2016.2 [5]回路論入門（1），p107，1996.2