

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	靴内部の温湿度から算出したWBGT とその評価
Title(English)	
著者(和文)	秋永将人, 北澤正樹, 高橋聡, 吉川厚
Authors(English)	Masaki Kitazawa, Satoshi Takahashi, Atsushi Yoshikawa
出典(和文)	SR-2 Proceedings of Life Engineering Symposium 2022 (LE 2022), , ,
Citation(English)	SR-2 Proceedings of Life Engineering Symposium 2022 (LE 2022), , ,
発行日 / Pub. date	2022, 8
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は公益社団法人計測自動制御学会に帰属します。 (c) 2022 The Society of Instrument and Control Engineers

# 靴内部の温湿度から算出した WBGT とその評価

秋永将人<sup>1\*</sup>, 北澤正樹<sup>2,1</sup>, 高橋聡<sup>3</sup>, 吉川厚<sup>4,1</sup>

1 立教大学大学院人工知能科学研究科

2 北澤技研

3 関東学院大学理工学部

4 東京工業大学情報理工学院

\* 21vr017k@rikkyo.ac.jp

**Abstract:** Health risks from heat stroke are increasing, and rising shoe temperatures are one of the factors. In this study, we attached a sensor to the inside of shoes and measured the temperature and humidity inside shoes over time while wearing and calculated the heat index (WBGT) by considering the increase in the temperature and humidity. We compared our "in-shoe WBGT" with the WBGT provided by the Ministry of the Environment. The results showed that our WBGT was higher than the provided WBGT. We believe that measuring the temperature and humidity inside shoes is effective for early heat stroke prevention and indicating heat stroke risk for each individual.

**Keywords:** 熱中症, WBGT, 靴内気候

## 1. はじめに

日本の年平均気温は年々上昇している。気温の上昇に伴って、熱中症による死亡者が増加している。環境省は熱中症への警戒を促すために、暑さ指数 (WBGT: 湿球黒球温度: Wet Bulb Globe Temperature) を算出し提示している[1]。WBGT は、人体の熱収支に与える影響の大きい湿度、輻射熱、気温の3つを取り入れた労働環境や運動環境での指針であり、値によって活動の指針が設定されている。ほかにも、環境省は実際の生活の場は環境省が計測している露場よりも建物や地面からの反射があるため厳しい暑熱環境になっているとして、従来の観測値に補正を加えた「生活の場の暑さ指数」を提示している。生活の場の暑さ指数の1つとして、通常の150cmの高さで計測した値ではなく、50cmの高さで計測した値を用いて WBGT を算出するものがある。これは地面に近いほど輻射熱の影響を受けやすくなることを考慮しており、コンクリート上では150cmと比べて50cmではWBGT1.1°C、5cmではWBGT2.1°C高くなるとの報告[2]や、砂場の日陰では150cmと比べて20cmでは乾球温度が1.5°C高くなるとの報告[3]がある。したがって、熱中症の警戒には地面の近いところの考慮が

重要と考えられる。

地面に近い靴に焦点を当てた熱中症対策の事例が存在する。全国高等学校野球連盟では、従来はスパイクの色は黒のみと規定していたが、熱中症対策の一環として2020年から白色も使用可とする規定に変更した[4]。このように地面に近い靴は輻射熱の影響を強く受けて高温になりやすいため、靴内部にセンサーを装着し、温湿度を計時的に計測して WBGT を算出することで、着用者が現在いる環境により即した熱中症対策が可能になると考えられる。しかしながら、靴は場所や日当たりといった外部環境だけでなく足の動きや体温といった着用者の影響も受けるが、着用中の靴内部の温湿度や WBGT の変化は明らかになっていない。

そこで本研究では、着用中の靴内部の温湿度を計測して算出した WBGT と、環境省で掲示されている同地域の WBGT との関連性を明らかにする。本研究ではさらに熱の影響を強く受けるコンクリートに着目し、コンクリート上の日なたと日陰それぞれで実際に着用した状態の靴内部の温湿度を計測し、算出した WBGT と従来の WBGT を比較した。

## 2. 関連研究

本章では熱中症、暑さ指数（WBGT）、靴内気候の関連研究について述べる。

### 2.1 熱中症

熱中症に関する研究は発生要因を調査している研究が多い。中井は人口動態統計と新聞記事から熱中症は全国各地で発生し、気温が 38℃を超えるような日は熱中症の発生件数も増加し、さらには若年男性が多いと明らかにしている[5]。三宅らは熱中症の大規模調査を全国で行った[6]。その結果、高齢者の日常生活での発生割合が多く、スポーツ群の中では陸上競技中に熱中症による重症率が高いことを明らかにした。これらの研究から、熱中症は、ある一定温度以上の気温の場合は場所を選ばず発生しているが、対象者は発汗機能が低下している高齢者だけでなく、スポーツ中の若年層も含まれる。したがって、環境による指標だけでは熱中症の目安にもれが生じる場合がある。

### 2.2 暑さ指数（WBGT）

暑さ指数として用いられる WBGT は、Yaglou らによって下記の式で定義されている：

$$WBGT = 0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Ta \quad (1)$$

ここで、Tw は自然通風湿球温度であり、Tg は黒球温度、Ta は自然通風乾球温度である[7]。WBGT は表 1 に示すように値ごとに熱中症予防指針が設けられており、この基準によって危険性や行動が変わる。

近年では Yaglou らの方法とは異なり、通常気象要素のみで WBGT を算出する方法もある。小野らは、乾球温度、相対湿度、全天日射量、風速、そしてこれらの気象要素を組み合わせた乾球温度、相対湿度、全天日射量の二次項から新たな式を算出する方法を提案した[9]。また堀江らは、WBGT から人の生理現象を評価するには気温、湿度、放射、気流の 4 要素を加えるべきと述べている[10]。本研究では靴内部の温湿度から WBGT の算出をするため、気流などの要素を取り入れにくい。そこで本研究では Yaglou の方法を導入し、自然通風湿球温度、自然通風乾球温度、黒球温度の 3 要素から WBGT

表 1: 日常生活における熱中症予防指針

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活行動の目安	注意事項
危険 (31 以上)	すべての生活活動で起こる危険性	安静状態でも発生する可能性あり。すぐさま涼しい部屋に移動する。
厳重警戒 (28~31)	すべての生活活動で起こる危険性	外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する
警戒 (25~28)	中程度以上の生活活動で起こる危険性	運動や激しい活動をする際には十分な休息をとる
注意 (25 未満)	強い生活行動で起こる危険性	危険性は少ないが激しい運動や重労働時には危険性がある

出典：[8] 日本生気象学会（2013）p. 2

を算出する。これにより、本研究で算出した WBGT も、表 1 に示す温度基準に則り危険性を評価できる。

### 2.3 靴内気候

靴内気候の研究では靴の素材や靴下の有無などで靴内部の温度や実験協力者の体感がどう変わるか、どのような影響があるかも研究されている。たとえば、三ツ井は靴の形状やソックスによって靴内部の温度は大きく変わらないが、実験協力者の主観的感覚に大きな影響を及ぼすと明らかにされていることから、靴の形状やソックスは実験条件から外してよいとしている[11]。また、坂本らは場所による靴内温度の研究として、人工芝での運動時の靴内部の温度と人工芝の表面温度を計測した結果、靴内部は 40℃まで上昇し、表面温度は 60℃以上に達することを明らかにしている[12]。靴内気候に影響はあるとしながらも、靴内気候から熱中症の目安になる指標は未だ算出されていない。そこで、本研究では靴内部の温湿度から WBGT を算出して、それがどの程度既存の熱中症指数と関係するかを調べる。

### 3. 実験条件と方法

本章では実験条件や実験に際して検討した項目について述べる。本実験の目的は、場所によって靴内部の温湿度および WBGT にどのような変化があるかを明らかにすることが目的である。

#### 3.1 実験器具と実験協力者の選定

計測装置は靴内部に入れる装置と実験場所の黒球温度を計測する 2 種類の装置を用いた。靴内部の温湿度を計測する装置として、「KN ラボラトリーズ ハイグロクロン温湿度ロガー」を用いた。選定理由としては、温湿度を計測することができることに加えて、大きさが直径約 17mm、厚さ約 6mm の小型であり靴内部に入れても実験協力者が違和感なく行動することができるためである。本温湿度ロガーの測定範囲は、温度が $-20^{\circ}\text{C}$ ～ $+80^{\circ}\text{C}$ 、湿度が 0%～95%で、分解能は温度が  $0.1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が 0.1RH%である。測定精度は温度が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が $\pm 5\text{RH}\%$ である。しかし、この装置では黒球温度を計測できない。そこで本研究では黒球温度の計測として「custom データロガー熱中症指数計」を用いた。データロガーの分解能は、温度が  $0.1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度が 0.1RH%であり、測定精度は温度が $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ である。データロガーは靴と同じ約 5cm の高さに配置し、実験場所の黒球温度を計測した。

実験に使用する靴には黒色で土踏まずの部分がくり抜ける靴を用いた。これは予備実験において、未着用の白色の靴と黒色の靴を屋外に 1 時間置いて靴内部の温度を比較した結果、黒色の靴のほうが靴内部の温度が  $1^{\circ}\text{C}$ 高い結果が出たため、計測結果の判定が明確になると考えたからである。さらに、靴内部に違和感なく温湿度ロガーを入れるため、靴の中敷きを装置の形にくり抜いて埋め込んだ。

実験協力者は 20 歳以上で、足や体に持病のない男女を募集した。実験参加前に実験の目的や注意点を説明して参加の同意を得たのちに実験を行った。また、炎天下で実験を行うため、水分補給や体調に異変を感じた際には即座に実験を中止するなど、暑さ対策にも留意して実験を行った。

#### 3.2 WBGT の算出と実験方法

本実験では、温湿度ロガーで計測した靴内部の温湿度、靴内部の温湿度から算出した WBGT、データロガー熱中症計で計測した WBGT、環境省が公開している WBGT の 4 つの値を用いる。本実験では Yaglou らが提案した式 1 を用いて、WBGT を算出する。

本実験は以下のような 3 ステップで、1 回あたり合計 30 分で行った。

1. 実験協力者は素足になって、指定した靴下を履いてもらい、一定時間靴を履かずに足の温度を落ち着かせる。
2. 温湿度ロガーを取りつけた靴を履き、靴内部の温度を安定させるために 20 分待機する。
3. 指定する場所の指定コースを 10 分間歩行する。

本実験の待機時間は、予備実験において靴内部の温湿度は室内で靴を履き始めてから約 20 分後に温度が安定すると判明したことから設定した。あらかじめ温度を安定させることで、歩行の際の温度上昇が明確になりやすいと考えられる。

### 4. 実験結果および考察

本章では実験結果と考察について述べる。

#### 4.1 実験環境と実験協力者

実験は 2022 年 7 月 30 日に東京都豊島区西池袋の大学キャンパス内で実施した。当日の気象条件は、天候晴れ、最高気温  $34.5^{\circ}\text{C}$ であり、実験の実施時間は 15 時から 17 時とした。実験場所はコンクリートの地面で日陰になっている場所と日なたになっている場所の 2 地点で実験を行った。実験場所の路面温度と黒球温度を表 2 に記載する。

表 2: 実験時の路面温度ならびに黒球温度

時刻	気温 [ $^{\circ}\text{C}$ ]	相対湿度 [RH%]	路面温度 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
15 時	32.7	64.3	50.2
16 時	31.7	68.5	47.0
17 時	30.8	72.3	44.2

表 3: 実験協力者の条件

実験協力者	性別	条件	計測開始時間
A	女性	日陰	15 時
B	男性	日陰	16 時
C	女性	日なた	17 時

実験協力者は男性 1 名、女性 2 名の合計 3 名となった。各実験協力者の性別と実験場所、実験時間は表 3 に記載するとおりである。

歩行開始前の各実験協力者の靴内温湿度と実験場所黒球温度と靴内 WBGT と環境省 WBGT を表 4 に、歩行終了後の各実験協力者の靴内温湿度と実験場所黒球温度と靴内 WBGT と環境省 WBGT を表 5 に記載する。なお、環境省 WBGT は 1 時間ごとに掲示される値なため、歩行開始前後で同じ数値となっている。実験協力者の靴内温度は A の右足が 37.6°C で一番高く、次に B の右足の 35.1°C、一番低いのが C の両足同じ温度で 32.7°C であった。A と C の差は右足では 4.9°C、左足では 4.4°C の差が見られた。実験協力者 A、B、C ともに

右足の温度が一番高い値となった。靴内湿度では A の 84.7RH% が一番高く、C の左足 75.4RH% が一番低い値となった。したがって靴内温湿度から計算した靴内 WBGT は、A の右足 35.6°C が一番高く、次に B の 33.5°C、一番低いのが C の左足 30.2°C という結果になった。

#### 4.2 場所による計測結果の比較

日陰で実験を行った A、B と、日なたで実験を行った C の結果を比較する。歩行開始前の A と C の靴内温度を比較すると右足で 3.5°C、左足で 3.6°C の差が見られた。靴内相対湿度では、右足で 4.1RH%、左足で 10.9RH% の差が見られた。靴内 WBGT を比較すると右足で 4.0°C、左足で 4.6°C の差が見られた。靴内温度、靴内相対湿度、靴内 WBGT ともに A のほうが高い値となった。

次に B と C の比較を行う。歩行前の靴内温度は両足ともに 3.0°C、B のほうが高い値となった。靴内相対湿度では右足で 8.2RH%、C のほうが高い値となった。左足は 5.9RH%、B のほうが高い値となった。靴内

表 4: 歩行開始前の計測項目と WBGT

実験協力者			靴内温度 [°C]	靴内相対湿度 [RH%]	実験場所 黒球温度 [°C]	靴内 WBGT [°C]	環境省 WBGT [°C]
ID	場所	足					
A	日陰	右	33.5	82.1	37.1	32.6	32.5
		左	33.6	82.0		32.6	
B	日陰	右	33.0	69.8	37.1	30.4	30.2
		左	33.0	78.8		31.9	
C	日なた	右	30.0	78.0	34.2	28.6	28.8
		左	30.0	72.9		28.0	

表 5: 歩行終了後の計測項目と WBGT

実験協力者			靴内温度 [°C]	靴内相対湿度 [RH%]	実験場所 黒球温度 [°C]	靴内 WBGT [°C]	環境省 WBGT [°C]
ID	場所	足					
A	日陰	右	37.6	75.4	37.0	34.5	32.5
		左	37.1	69.8		33.4	
B	日陰	右	35.1	71.4	35.6	32.2	30.2
		左	34.8	70.2		31.8	
C	日なた	右	32.7	79.2	33.9	30.7	28.8
		左	32.7	70.6		29.7	

WBGT では右足で 1.5°C、左足で 2.1°C、B のほうが高い値となった。歩行前の日陰と日なたを比較すると、靴内相対湿度のみ C が B よりも高い値となった。それ以外では 3 つの値ともに日陰の実験協力者の値が高い結果となった。

次に歩行終了後の靴内温度、靴内相対湿度、靴内 WBGT の比較を行う。A と C の靴内温度を比較すると右足で 4.9°C、左足で 4.4°C の差があり、どちらも A のほうが高い値となった。靴内相対湿度は右足では 3.8RH%、左足では 0.8RH%、C のほうが高い値となった。靴内 WBGT を比較すると右足で 3.8°C、左足で 4.6°C の差があり、左右ともに A のほうが高い値となった。次に B と C の歩行終了後の 3 つの値を比較する。靴内温度では右足で 2.4°C、左足で 2.1°C の差が見られ、どちらも B のほうが高い値となった。靴内相対湿度では右足で 7.8RH%、左足で 0.4RH% の差があり、こちらは C のほうが高い値となった。靴内 WBGT では右足で 1.5°C、左足で 2.1°C の差がありどちらも B のほうが高い値となった。歩行終了後の日陰と日なたでは靴内相対湿度のみ日なたのほうが高く、靴内温度と靴内 WBGT は日陰のほうが高い値となった。歩行による影響で靴内温度や靴内相対湿度、靴内 WBGT ともに上昇した。

C の靴内相対湿度が歩行前後ともに高い値がでたため、日なたによる要因と実験協力者の身体的要因が考えられる。日陰のほうが靴内温度、靴内 WBGT が高くなった要因としては実験時間の違いが考えられる。

### 4.3 靴内 WBGT と環境省 WBGT の比較

靴内 WBGT と環境省 WBGT を比較する。歩行開始前では、A の靴内 WBGT のほうが左右ともに 0.1°C 高い値となった。B を比較すると右足では 0.2°C、左足では 0.7°C の差があり B のほうが高い値となった。C の靴内 WBGT と環境省の靴内 WBGT を比較すると右足では 0.2°C、左足では 0.8°C 環境省のほうが高い値となった。

次に歩行終了時の靴内 WBGT と環境省の WBGT を比較する。A を比較すると右足では 2.0°C、左足では 1.1°C、A の靴内 WBGT のほうが高い値が見られる。B

を比較すると右足で 2.0°C、左足で 1.6°C、B の靴内 WBGT のほうが高い値が見られた。C を比較すると右足で 1.9°C、左足で 1.1°C、C のほうが高い値となった。

靴内 WBGT は歩行前の C が環境省よりも低い値となり、A と B は歩行前後ともに環境省の WBGT よりも高い値となった。歩行後は C の靴内 WBGT も環境省の WBGT よりも高い結果となった。

## 5. 結論

本実験では、日陰と日なたによる靴内部の温湿度、WBGT の変化について明らかにした。実験の結果、日陰と日なたによる靴内温度は日陰のほうが高い値となった。実験時間が異なったため日陰ではあるが日なたよりも高い値が出たと推測できる。靴内相対湿度では歩行終了後の日なたの値が高く出た。実験時間の差があったにも拘関わらず、全実験協力者の中で一番高い値となった。靴内の WBGT は環境省の WBGT よりも高く出たため、靴内部の温湿度を計測することは、熱中症へ早期に対策するために有効な手段になると考えられる。日なたのみ靴内相対湿度が高くなった原因は日なたによる日射の影響か歩行動作による影響か、実験協力者の身体的要因なのかは、今後の研究課題である。

熱中症には場所による違いだけでなく、日射や風速などの外的要因や当事者の体温、体内水分量などの内的要因がある。靴内部の温湿度のみで熱中症の対策はできないが、自らの体温変化を外部に知らせることができない子どもや体温調節機能が衰えている老人、運動中で極度の集中状態にあるアスリートなどにとっては新しい熱中症の指標の 1 つになると考えられる。

今後の展望として、コンクリート以外の場所、例えば体育館や学校などの室内環境、芝生、土など様々な場所でさらに多数の実験協力者を同時に実験することや、歩行などの異なる動作によって靴内温湿度や靴内 WBGT にどのような変化があるかを調査することで、熱中症のリスクが高い場所や動きを明らかにすることができると考えている。

## 参考文献

- [1] 環境省, 熱中症予防情報サイト,  
<https://www.wbgt.env.go.jp/> 最終閲覧日: 2022年8月4日.
- [2] 村山貢司, 登内道彦, 丸山博, WBGTの連続観測と地表面・高さによる違い, 米国気象学会, 2005.
- [3] 佐藤隼, 村上暁信, 公園内の熱放射環境と幼児の行動から捉える熱中症の危険性, ランドスケープ研究, Vol. 74, No. 5, pp. 581-584, 2011.
- [4] 日本高等学校野球連盟, ホワイトカラススパイクについて, 2019 <https://www.jhbf.or.jp/topics/detail/34>  
最終閲覧日: 2022年8月4日.
- [5] 中井誠一, 熱中症の発生実態と環境温度, 日本生気象学会雑誌, Vol. 41, No. 1, pp. 51-54, 2004.
- [6] 三宅康史, 有賀徹, 井上健一郎, 奥寺敬, 北原孝雄, 島崎修次, 鶴田良介, 横田裕行, 本邦における熱中症の実態 - Heatstroke STUDY2008 最終報告 -, 日本救急医学雑誌, Vol. 21, No. 5, pp. 230-240, 2010.
- [7] Yaglou, C.P., Minaed, D, Control of Heat Casualties at Military Training Centers, Arch. Ind. Health, Vol. 16, No. 4, pp. 302-316, 1957.
- [8] 日本生気象学会, 日常生活における熱中症予防指針 Ver. 3, 2021.
- [9] 小野雅司, 登内道彦, 通常観測気象要素を用いたWBGT (湿球黒球温度) の推定, 日本生気象学会雑誌, Vol. 50, No. 4, pp. 147-157, 2014.
- [10] 堀江祐圭, 藤原弘章, 札幌菅区気象台における黒球温度の観測報告およびWBGTの各種推定式の特性について, 日本気象学会北海道支部機関紙, Vol. 55, pp. 15-16, 2009.
- [11] 三ツ井紀子, 靴内気候と快適性, 繊維学会誌 (繊維と工業), Vol. 65, No. 5, pp. 166-170, 2009.
- [12] 坂本雅昭, 田中優理, 清水弘幸, 久保川博夫, 中野隆雄, スポーツ環境変化における暑熱対策の試み - サッカー選手のインソール開発, 医療福祉研究, Vol. 12, pp. 13-24, 2019.