

熱中症予防対策のための湿球黒球温度の簡便な自動測定記録装置

伊藤 武彦 ・ 三村由香里 ・ 鈴木 久雄*

熱中症予防対策に使用する目的で、湿球黒球温度を自動的に連続して測定・記録できる簡便な装置を試作した。この装置を本学グラウンドに設置し、2008年夏季の暑熱環境の測定を行った結果に若干の考察を加えて報告した。

Keywords : 湿球黒球温度, データロガー, 熱中症予防, 温暖化, 暑熱ストレス

緒言

体温調節は身体から発生する熱（代謝熱，骨格筋から発生する熱など）と外部環境から体内に流入する熱に対して，体内から放射，対流，蒸散，伝導によって体外に流出する熱の出納バランスの変化によって成り立っている。運動時は骨格筋から発生する熱が，もともと存在する代謝熱に加わり体温が上昇するので，皮下の血流量が増加して皮膚温が上昇し，放射による熱の放散がおこる。また皮膚温よりも気温が低い場合は対流によって皮膚温が下がる効果も期待できる。風が吹くと涼しく感じるゆえんである。さらに，発汗によって水の気化熱の形で皮膚表面の熱が奪われることも起こる。通常環境ではこれらの組み合わせによって体温の異常な上昇が抑えられている。しかし湿度が極めて高い場合（梅雨の頃）や気温が高く，太陽からの放射も強い場合（真夏の炎天下）などでは，上記の体温低下のためのメカニズムがどれも有効に働かなくなり，その結果体温が異常に上昇することがある。

熱中症は，このように体温調節が破綻して，高体温が持続するようになった病態である。乳児や高齢者では，高温多湿の状況があれば，じっとしていても熱中症になる場合がある（古典的熱中症）。これに対して，スポーツや労働作業など筋肉を動かす場面では，環境要因に加えて，個体が発生する熱が増加するために熱中症になる場合がある（運動による熱中症）¹⁾。

日本スポーツ振興センターによる統計では，学校管理下において災害共済給付金を受ける程度の熱中

症が少なからず発生している。どのくらいが予防可能であったかは統計からは読み取ることができないが，環境由来の暑熱ストレスは客観的に測定が可能であるので，それを用いて予防対策を講じることは可能であり。実際各種の予防対策マニュアルで推奨されている²⁻⁴⁾。

湿球黒球温度（以下WBGT）は，気温，湿度に加えて放射熱（および測定系が潜在的に持つ機能の結果としての対流の影響）を加味した暑熱ストレスの指標であり，「日照のある屋外」，「屋内及び日照のない屋外」のそれぞれの場合について定義式が存在する。我が国ではISO 7243を受けて日本工業規格JIS Z 8504で詳細が規定されている⁵⁾。

WBGTの測定はもともとの測定法に忠実に再現すれば，通常環境測定に使われている直径15cmの黒球温度計と，自然湿球温度計，放射の影響を排除した乾球温度計の3種の温度計が必要になる。しかしこの方法では装置が大掛かりであり，多地点に設置することは困難である。さらに自動化するとなると自然湿球温度計は定期的給水が必要になるなど扱いが難しい。

これらの難点を解消し，誰もが簡便にWBGTを測定できるような携帯用装置が数年前から市販されるようになった。この装置は測定したい点でポイントデータを測定するのには便利である。また，測定者が測定地点に存在するので，暑熱ストレスを肌で感じるができるから，測定値と自らの身体の感覚を結びつけることができる。ただし同じ地点で一定間隔のデータを取り続けようとするのは労力を

岡山大学大学院教育学研究科発達支援学系 700-8530 岡山市津島中3-1-1

A simple device to measure and record wet bulb globe temperature for prevention of heat disorders

Takehiko ITO, Yukari MIMURA and Hisao SUZUKI

Division of Developmental Studies and Support, Okayama University Graduate School of Education, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700-8530

*Okayama University Interactive Sport Education Center, 2-1-1, Tsushima-naka, Okayama 700-8530

要するので、長期間にわたる測定には無理がある。

今回報告する WBGT の簡便な自動測定記録装置は、多点の WBGT を同時に自動的に測定・記録する目的で試作したものである。この装置は暑熱ストレスを継続的にモニタしたい地点に設置し、以後は一定時間間隔で自動的に測定・記録するもので、無線によるデータ通信機能を有する部分を組み込んでいるので、データ回収親機を使えば、同時に多点をカバーすることが可能である。また、5～10分間隔などで測定したデータの時間加重平均を求めることも可能になり、時間とともに変化していく環境ストレスの程度を時間軸に沿って評価することが可能になる。

本稿では試作機の概要を提示するとともに、本学グラウンドに設置して2008年度夏季に採取したデータを示し、今後の活用法や課題について若干の考察を行った。

材料と方法

1. WBGT の自動測定記録装置の製作

今回製作した自動測定記録装置は、データを集積し、無線回線で親機とデータのやり取りをするデータロガーの部分と、センサ部分によって構成した。データロガーは温度と湿度の2チャンネルのデータをそれぞれ8000点ずつ保存可能なもの（RTR-53；T&D社、松本市）と温度のみの1チャンネルのデータを16000点保存可能なもの（RTR-52；T&D社、松本市）を用いた。これらのデータロガーは、外付けの温湿度センサと温度センサをそれぞれ備えており、カタログデータによれば、我々の使用範囲の温度については精度0.3℃、分解能0.1℃であり、相対湿度については、25℃、相対湿度50%において精度±5%、分解能1%であった。

放射の影響をほぼ受けることなく乾球温度と相対湿度を測定する部分として、前者のデータロガーの温度湿度センサを、厚さ1mmの白色発泡塩ビ板（Forex E-7001；アクリサンデー社、東京都台東区）を使って作った放射シールド内に格納した。また、黒球温度を測定する部分として、黒色つや消し塗料を均一に塗布したピンポン球の中心に後者のデータロガーのセンサ部（テフロン皮膜で覆われたセンサで直径が2mm、空気中の熱時定数は15秒）の先端部が位置するようにして固定したものを作成した。ピンポン球を使った黒球温度計の性能は、通常的环境測定用の黒球温度計（直径15cm；ベルノン式黒球温度計）とは性能が異なるので、両者を屋外で同じ高さに設置して、測定値を同時に測定し、ピンポン球黒球温度計の測定値がベルノン式黒球温度計の

測定値に換算できるようにした。なお放射シールドとピンポン球を使った黒球温度センサの製作方法は、京都大学大学院人間・環境学研究科「みんなの地球科学プロジェクトチーム」のサイトに紹介されている方法に概ね準拠した⁶⁾。

それぞれのデータロガー、センサ部は厚さ5mmの発泡塩ビ板上に固定し、装置自体の固定部としてU字金具を取り付けて、支柱等へ簡単に設置できるようにした。

以上により設置場所の乾球温度、黒球温度、相対湿度が自動的に測定・保存されるようにした。保存されたデータは、データ収集親機（RTR57-C；T&D社、松本市）、またはネットワーク接続対応無線通信ステーション（RTR-5W；T&D社、松本市）を使って無線回線で遠隔的に回収した。また、リアルタイムのモニタリングが可能かどうかを検証した。

湿球温度は、テテンの実験式を原理とする計算をするエクセル上の関数を作成し、乾球温度と相対湿度を引数として、湿球温度が得られるようにした。さらに、乾球温度、相対湿度、黒球温度を引数とするエクセル上の関数を作成し、WBGTが得られるようにした。

2. 製作した装置による測定

今回試作した装置を使って、本学グラウンドのWBGTの経時的変化を観察した。設置場所は野球場とサッカー場の境目にあるサッカー場側のフェンスの上部（高さ約3mで防護ネットの外側）とした。通常WBGTは地上高1～1.5mで測定されるので、地上高1.5mに設置した装置を用いて高さ補正を行った。

結果

図1に今回試作した装置の全体を示した。装置の大きさは高さ30cm、幅20cm、厚さ10cm（固定金具を含む）であり、重量は450～500gであった。これを本学グラウンドに設置すると、約100～150m離れた地上または建物内の窓に近いところで装置と親機間の無線データ通信が可能であった。

データを測定・記録する間隔は、データロガー本体の仕様によって、1秒～60分間隔の15通りから選択できたので、10分おきに測定するようにした。データは定期的に無線回線を使って回収し、データロガー付属のソフトウェアでcsvファイルに変換したのちにエクセルに読み込んで解析を行った。

測定値の高さ補正により、地上高3mに設置した装置の測定結果を地上1.5mの測定として換算する実験式を求めたところ、



図1 試作したWBGT測定記録装置

(地上高1.5mWBGT補正值) = 1.23 × (フェンス上機のWBGT測定値) - 5.06が得られた。

この装置を使って、本学グラウンドの7月3日15時以降のWBGTを10分ごとに連続的に観察した(本稿執筆時も継続して観察中である)。図2は2008年夏季の典型的な一日(8月6日)のWBGT(地上高1.5m補正值)である。日照がある時間帯は測定値が不安定に上下することがあったが(マーカーありの細線)、日没後はそのような不安定さは見られなかった。実際に測定の現場で観察をすると、雲がかかるなど日照が遮られる場合もあれば、風速の変化による場合もあることが分かった。そこで、ある時刻の値を求めるにあたっては、その点と前後各2点の移動平均、すなわち20分前、10分前、当該時刻、10分後、20分後の測定値を平均したものを計算して図2に重ねて表示した(太線)。移動平均のグラフを基準にすると、10時頃から17時30分ころまでWBGTが31℃以上であり、日本体育協会の基準⁴⁾で「原則運動中止(WBGTで31℃以上)」に該当していた。

図3に7月3日15時～8月31日23:50までの10分ごとの測定値(地上高1.5m補正值)を7月前半(観測開始日～15日まで)、7月後半(16～31日)、8月前半(1～15日)、8月後半(16～31日)の4群について、時間帯ごとのWBGT(地上高1.5m補正值)の集計として示した。7月後半と8月前半についてみると、朝8～9時の時間帯で既にWBGTの平均値は「嚴重警戒(WBGTで28℃以上31℃未満)」に該当した。日中もっともWBGTが高値を示す12～13時及びその前後の時間帯は、7月前半の10～11時を除いて平均値が31℃を超えており、「原則運動中止(WBGTで31℃以上)」に該当した。

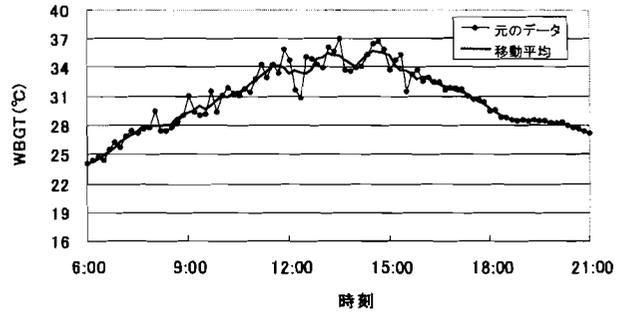


図2 2008年8月6日のWBGTの経時的変化

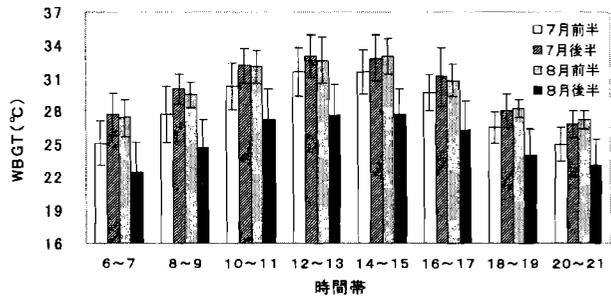


図3 2008年7,8月のWBGTを時間帯ごとに集計したもの(値は平均±標準偏差)。

考察

WBGTは学校だけでなく地域のスポーツ活動や各種競技スポーツ、あるいは産業保健においても暑熱ストレスの指標として熱中症予防のために活用されている²⁾。夏季に運動系の部活動が行われる場所は、屋外・屋内を問わずその大半が熱中症のリスクが高い場所である。熱中症予防のためには、その場所の暑熱環境がどの程度過酷か、どの時間帯は危険で、どの時間帯は比較的安全かをあらかじめ知っておくとともに、活動中も定期的にWBGTをモニタすることが望ましい。今回作成した装置は、そのような目的に使用することを想定して作成した。

図2に示したように、8月6日の本学グラウンドの測定値を見ると、日中の大半においてWBGTが31℃以上であり、日本体育協会や環境省の基準を単純に当てはめると「原則運動中止」である。実際には、運動部員は日々の練習で暑熱環境に馴化する過程を経ており、また部活動を行う時間帯を比較的 안전한時間帯するほか、練習時間の短縮や中止、水分・塩分補給などを含む安全対策が取られていると考えられるが、環境指標だけからみれば熱中症リスクは高いと言わざるを得ない。

図3を見ると、2008年の夏季は、7月前半～8月後半の正午から15時頃にかけてはWBGTが平均値で31℃以上あり、最低でも毎日「嚴重警戒」以上のレベルにあったことが読み取れる。さらに、常

識的には比較的安全と思われがちな比較的早い時間帯（例えば8～9時）でも7月後半と8月前半はWBGTの平均値で「嚴重警戒」レベルにあり、7月後半の8～9時の192回の測定のうち45回（23.4%）はWBGTが31℃以上であった。したがって、もっともWBGTが高くなる時期は、午前中の早い時間帯であっても安全とは言い難いと考えられた。

市販の携帯型WBGT測定装置と比べると、今回試作した装置の利点として、WBGTの時間加重平均値が測定可能な点が挙げられる。暑熱ストレスの指標として「WBGTの時間加重平均」を用いるという考え方はあまり一般的とは言えず、少なくとも我が国の予防対策マニュアルには書かれていない。しかし、個体側の暑熱ストレスに対する反応が同等である場合を仮定すれば、熱中症リスクはもっぱら環境要因に左右されることになる。単にある時刻のWBGTを参照するだけでなく、暑熱環境の中で個体が過ごした時間と各時刻のWBGT（すなわち暑熱ストレスの程度）を時間経過の中で積み上げたものが、熱中症リスクを評価する上でより好ましいと考えられる。実際JIS Z 8504では「作業場及び活動量の分析から、温熱因子が時間によって一定の値を示さない場合、代表的な平均値を決めなければならない」とし、時間加重平均の使用について言及している。なお、このJIS Z 8504の代謝レベルに関する記述は産業保健を想定してか書かれているようであるが、学校保健においては類似の表として心・腎疾患の生活管理指導表で運動の強度の目安が示されているので、暫定的にこれを活用することも考えられる。この点の妥当性については、稿を改めて論じることにした。

今回作成した装置は、多地点で同時に測定可能なように、小型・軽量に設計したが、実際にスポーツが行われている現場に装置を設置することを試みると、運動の妨げになる、あるいは物（ボールなど）が装置に衝突する可能性があるなど思いのほか適当な場所が見つけにくいことが分かった。今回フェンス上で、なおかつ保護ネットの外側に装置を設置した理由も、ボールが装置に衝突することを避けたためである。しかしスポーツを行っている人は地上で動いており、本来暑熱環境は人々の存在する部分で測定されなければならない。そこで、今回は地上高1.5mの測定を同時に行い、高さによる補正を試みることで対処した。

また、本装置は特定小電力無線（免許不要）によるデータ通信が可能なデータロガーを使用しているために、離れた場所からデータを回収したり、装置の設定を変更したりすることを想定していたが、そ

の点についても検証を試みた。データ回収端末を用いると、概ね見通して100～150mの距離で、データ回収や設定変更などの遠隔操作や連続モニタリング動作が可能であった。この距離は、設置地点とデータ回収端末を操作する地点の位置関係（高さ、建物や木立などの障害物）によって大きく変動した。さらに、ネットワーク接続対応無線通信ステーションを学内LANに接続して遠隔操作することも可能であったが、この方法を用いれば、リアルタイムで測定記録装置のセンサの読み取りデータを参照することも可能であった。

今後の課題としては次のことが挙げられる。まず黒球温度センサの測定値の安定度を増す方法の開発である。おそらく風速センサを測定系に加えて、風速による影響を併せた処理することが必要になると思われる。次にリアルタイムでWBGTを参照するシステムの構築である。熱中症予防のためには、時々刻々変化するWBGTをリアルタイムで簡単に知ることは有用なことである。本稿執筆時点でも、各センサの測定値をネット経由でリアルタイム参照することは可能にしてあるが、WBGTは湿球温度を数値計算で求めた上で、他の2つの（屋内では1つの）測定値を併せた加重平均であるから、もう少し解決すべき点が残っている。

熱中症はその発生機序を理解すれば、ほとんどが予防可能なものである。したがって病気に対する正しい知識と、暑熱ストレスに対応した正しい予防行動の取り方を教育の中で伝えていくことがきわめて重要である¹⁾。暑熱ストレスはWBGTによる客観的な評価が可能であるので、今後WBGTを活用した保健管理と、現場の実測データを活用した保健教育の一層の推進が望まれる。

文献

1. Hyperthermic and hypermetabolic disorders. Hopkins PM and Ellis FR eds. pp3-62, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
2. 「熱中症環境保健マニュアル2008」環境省, 2008.
3. 「熱中症を予防しようー知って防ごう熱中症ー」日本スポーツ振興センター, 2003 (2008統計情報等更新)
4. 「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」日本体育協会, 2006.
5. 「人間工学ー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ー暑熱環境」JIS Z 8504, 日本規格協会, 東京, 1999.
6. 京都大学大学院人間・環境学研究科「みんなの

地球科学プロジェクトチーム」
<http://www.gaia.h.kyoto-u.ac.jp/~minchika/> (2008
年10月30日現在)

7. 「学校の管理下の災害-21」日本スポーツ振興
センター, 2008.