

◇技術紹介 Technical Report

WBGTワイヤレス通知システム 「暑さ指数ウォッチャー™」 WBGT Wireless Notification System 'Atsusa Shisu Watcher'

笠井 泰彰
飯塚 浩二
渡辺 充敏

Yasuaki Kasai
Koji Iizuka
Mitsutoshi Watanabe

1. はじめに

近年の地球温暖化に伴う気候変動、および都市化によるヒートアイランド現象等による夏期の高温化に伴い、熱中症の増加が懸念されている。建設業は熱中症災害の発生率が高く、熱中症の低減は急務となっている。

現在、作業現場では熱中症を防ぐため、クールルームや冷水器の設置、塩アメなどの配布などさまざまな対策が講じられているが、これらの対策を適切かつタイムリーに実施するためには、現場内の暑さ環境を複数箇所、かつ連続的に測定し、その情報を迅速に職員や作業員に通知することが重要となる。

そこで、作業現場内の複数箇所の WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, 暑さ指数) を連続測定し、無線通信によりその情報を工事事務所で一括管理することができる「暑さ指数ウォッチャー™」を開発した。

「暑さ指数ウォッチャー」は、建設現場における熱中症災害の低減に貢献できることを目指している。

2. 作業環境におけるWBGT基準値

2.1 暑さ指数(WBGT)とは

WBGT は、熱中症を予防することを目的として 1957 年に米軍で提案された指標である¹⁾。単位は温度と同じ℃で示されるが、その値は温度とは異なる数値となる。

WBGT は人体と外気との熱のやりとり(熱収支)に着目した指標であり、人体の熱収支に与える影響の大きい「湿度」、「日射・輻射(ふくしゃ)」、「気温」の3つの影響を取り入れているため、気温が低くても湿度が高く日差しが強ければ WBGT の値は大きくなる。

2.2 WBGTの基準値について

WBGT の基準値として知られているものに「日常生活における熱中症予防指針 Ver.3」²⁾(Table 1)がある。しかし、この4段階の分類は「日常生活」を対象としているため、作業環境には当てはまらないとされている。

一方、作業環境においては、JIS Z 8504「WBGT 指数に基づく作業者の熱ストレスの評価」³⁾の附属書 A に示されている「WBGT ストレス指数の基準値表」(Table 2)および別表 (Table 3)⁴⁾に基づき、「どんな作業をしているか」「暑い環境に慣れているか」「気流を感じるかどうか」などの要素を反映して、基準値を決めることとなっている。

しかし、Table 2 は Table 1 に較べ判定が複雑であり、適切な基準管理が困難である。このため、身体作業強度(代謝率区分)、熱への順化、気流感の有無、着衣の4つの条件を作業場所ごとに設定することで、Table 2 の WBGT 基準値を意識せずに管理できるようにすることが、開発すべきシステムのひとつの要件であると考えた。

Table 1 日常生活における熱中症予防指針
Heat Stroke Prevention Guidelines for Everyday Life

WBGT(℃)	25℃未満	25℃～28℃	28℃～31℃	31℃以上
		注意	警戒	嚴重警戒

Table 2 WBGT熱ストレス指数の基準値表
WBGT Reference Value Table

代謝率区分	熱に順化している人		熱に順化していない人	
	気流を感じないとき	気流を感じるとき	気流を感じないとき	気流を感じるとき
0(安静)	33		32	
1(低代謝率)	30		29	
2(中程度代謝率)	28		26	
3(高代謝率)	25	26	22	23
4(極高代謝率)	23	25	18	20

数値の単位は℃。JIS Z8504 附属書A 表 A.1より一部を抜粋

Table 3 衣類の組合わせによりWBGTに加えるべき補正值
WBGT Correction Value Due to the Combination of Clothes

作業服の種類	WBGTに加えるべき補正值(℃)
作業服(長袖シャツとズボン)	0
布(織物)製つなぎ服	0
二層の布(織物)製服	3
SMSポリプロピレン製つなぎ服	0.5
ポリオレフィン布製つなぎ服	1
限定用途の蒸気不浸透性つなぎ服	11

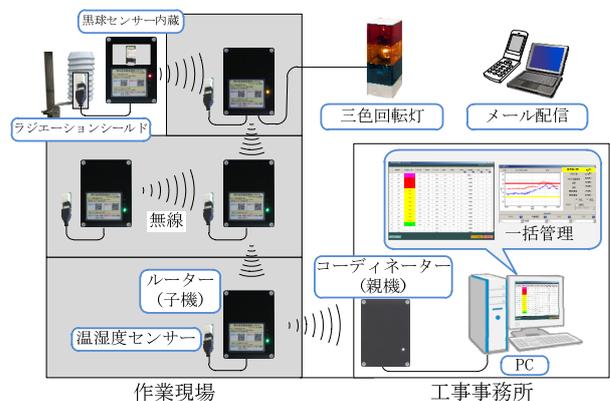


Fig. 1 システム構成
System Configuration

3. 「暑さ指数ウォッチャー」の概要

開発した暑さ指数ウォッチャーのシステム構成図を Fig. 1 に示す。主として、多点設置する①ルーター(無線子機)、②コーディネーター(無線親機)、工事事務所に設置する③パソコンの三つの要素で構成されている。

3.1 ルーター

無線子機であるルーターには、温度(乾球温度)および相対湿度を計測するための温湿度センサーが接続でき、後述する簡易黒球センサーも内蔵している。ルーターは「無線機能部」であると同時に「計測部」でもある。

温湿度センサーは、通風状態での測定が必要であること、センサー交換の必要があることなどから、内蔵型とはせずにルーター筐体の外に接続する方式としている。

一方、無線機能部は、IEEE802.15.4 に対応しており、本システムのみで独自のデジタル無線ネットワークを構築することができる。使用周波数は 2.4GHz 帯である。全てのルーターが無線中継機能を有しており、中継を繰り返すことで工事事務所から離れた点であっても通信をすることができ、また最大 200 台まで同時に計測・通信することができる。

情報表示部として3色(赤, 黄, 緑)LED を実装している。このほか、パトライトをLED と連動させるための接点出力や、温湿度以外のデータも送受信できるアナログ入出力端子も実装した。

ルーター筐体は防雨仕様であり、温湿度センサーをラジエーションシールドに収納すれば屋外設置も可能である。実際に屋外に数ヶ月間設置し、大雨や台風を経験させ、問題なく稼働を続けることを確認している。

3.2 コーディネーター

無線親機のコーディネーターは、多数のルーターから送られてくる情報を受信するための無線機器である。このため、1 台のみを工事事務所に設置し、パソコンとは有線(USB)で接続する。無線仕様はルーターと同様であるが、LED は白色の電源インジケータのみとなる。

3.3 パソコン

黒球温度の補正、WBGT の算出やデータの記録は③のパソコンが受け持つ。このためルーターには演算部や記憶領域が不要となり、コンパクト化と低価格化に寄与している。なお、WBGT の算出は(1)式を用いている¹⁾。

ここで、 T_w は湿球温度、 T_G は黒球温度、 T_D は乾球温度(温湿度センサーの温度)であり、湿球温度は乾球温度と相対湿度から求めることができる。また、日射(或いは輻射熱)がない環境下では黒球温度と乾球温度は等しくなり、乾球温度の測定のみでよいため黒球センサーが省略できる場合がある。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_G + 0.1T_D \quad (1)$$

番号	設置場所	設置機との差	WBGT値	設置機	センサ種	温度で	湿度%	黒球温度で	湿度%	熱順化	作業強度
1	屋外	-7.6	35.6	28	20F7	41.5	43	53	28.3	あり	中程度
9	10F	+4.1	30.1	28	20F7	33.3	60	---	26.3	あり	中程度
2	1F	+0.5	28.5	28	20F7	33.4	---	---	---	あり	中程度
7	8F	+0.3	28.2	28	2101	---	---	---	---	あり	中程度
8	6F	+0.0	28.0	28	---	---	---	---	---	あり	中程度
6	4F	-0.0	20.0	20	---	---	---	---	---	あり	中程度
5	B1	-0.4	27.6	28	---	---	---	---	---	あり	中程度
3	2F	-0.5	27.5	28	---	31.5	65	---	25.8	あり	中程度

Fig. 2 暑さ指数ウォッチャー表示画面 Display Screen Image of 'Atsusa Shisu Watcher'

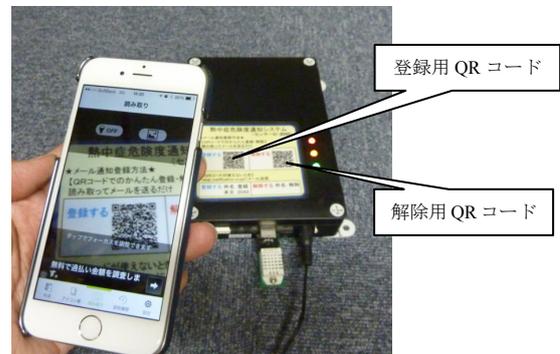


Photo 1 2次元バーコードによるメール受信設定 E-mail Reception Setting Using QR-Code

また、管理機能はパソコンにインストールされたソフトウェアにより実現している。

3.4 管理機能

工事事務所のパソコンに表示される暑さ指数ウォッチャーの画面の例を Fig. 2 に示す。ルーターの設置場所毎に、WBGT値、温度、湿度、黒球温度などの計測値が表形式で表示される。以下に管理機能の例を挙げる。

- 1) 全てのセンサー設置箇所のWBGTを一括表示。
- 2) 身体作業強度に応じてWBGT基準値が自動設定。
- 3) 着衣、気流の有無、熱順化(熱への慣れ)にも対応。
- 4) WBGTの基準値に対する超過度合いを数値化表示。
- 5) ランキング表示により対応すべき順序が見える化。
- 6) メールによる職員や職長への自動通知。
- 7) 2次元バーコードによるメール簡易設定(Photo 1)。
- 8) 連続測定、グラフ表示、記録保存、帳票出力。

4. 簡易黒球センサーの補正

暑さ指数ウォッチャーの黒球センサーは、黒色に塗られたルーター筐体に内蔵される簡易型である。これは、作業現場での使い勝手を配慮した結果、設置のしやすさ

やコストを重視する必要があるため、本来であれば用いるべき150mmφ黒球を使用しないこととなったためである。温度センサーは筐体の箱形の空間の中央に配置し、基板部とは断熱構造になっている (Photo 2右)。

簡易かつ低廉な黒球センサーであっても、150mmφ黒球同等の測定結果が得られるようにすることを目標とし、4ヶ月間 (7月上旬～10月下旬) の比較測定を実施した (Photo 2)。150mmφ黒球の内部中央に、簡易黒球と同型のセンサーを挿入し、1分間隔で同時に黒球温度の測定を行った。ルーターは現場における一般的な取付け方法となるよう横引きの単管パイプに固定している。

補正前の簡易黒球センサーと150mmφ黒球センサーの測定値の相関を、Fig. 3に示す。補正前の黒球温度を $t^{\circ}\text{C}$ 、 $t^{\circ}\text{C}$ における補正温度を $\Delta T_i^{\circ}\text{C}$ とすると、補正後の黒球温度は、 $t + \Delta T_i^{\circ}\text{C}$ である。150mmφ黒球による黒球温度を $T_i^{\circ}\text{C}$ とすると、 T_i と $t + \Delta T_i$ の差の自乗和 S_i を(2)式のように定義する。ただし、 n は補正前の黒球温度が $t^{\circ}\text{C}$ のときの、全観測データの数である。

$$S_i = \sum_k^n \{T_{tk} - (t + \Delta T_i)\}^2 \quad (2)$$

このとき、 S_i を最小とする ΔT_i を、全ての補正前黒球温度 $t^{\circ}\text{C}$ に対して (例えば 1°C 毎に) 求めれば補正温度列 $\Delta T_i^{\circ}\text{C}$ を求めることができる。

Fig. 3の4ヶ月間の比較データを元にした補正温度列を用いて、特定のある1日の黒球温度を補正した結果の例をFig. 4に示す。この日の平均誤差は 0.27°C であり、簡易黒球センサーであっても、150mmφ黒球同等の測定結果が得られている。

5. 実現場での実証試験

暑さ指数ウォッチャーは、これまでに3カ所の建築・土木の作業現場において実証試験を行ってきた。現場担当者の意見や、実現場における暑さ環境の実測結果を示す。

5.1 システムの取付け作業と設置状況

実現場におけるルーターの設置状況をPhoto 3に示す。

ルーターは電池でも動作するが、交換の煩わしさを考慮すると、作業現場の場合には電源盤近くに取り付けることが多くなる。

また、障害物の多い建築の施工現場は一般環境に較べ無線通信が困難となることが多く、通信距離 (ルーター間距離) を最大30m～50m程度として設置していくのが望ましい。見通しや中継を意識して配置する。

温湿度センサーは、建築の現場の中間階や地下などではそのまま取り付けられるが、雨に当たる場所や、作業環境的に水濡れが発生する場所では、センサーをラジエーションシールドに納めて設置する (Photo 3)。

実際に取付け作業を見てもらった現場担当者の意見を以下に挙げる。

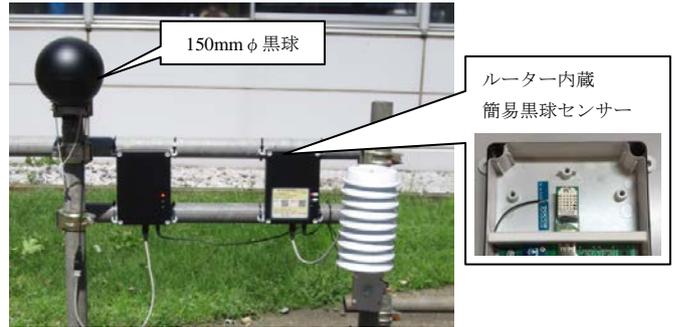


Photo 2 150mmφ黒球との比較測定
Comparison Measurement of 150mmφGlobe

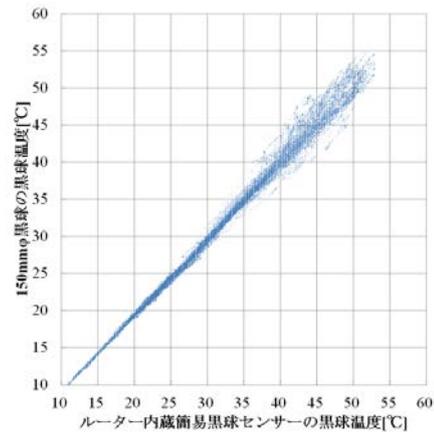


Fig. 3 簡易黒球センサーと150mmφ黒球の相関
Correlation between
Simplified Globe Sensor and 150mmφGlobe

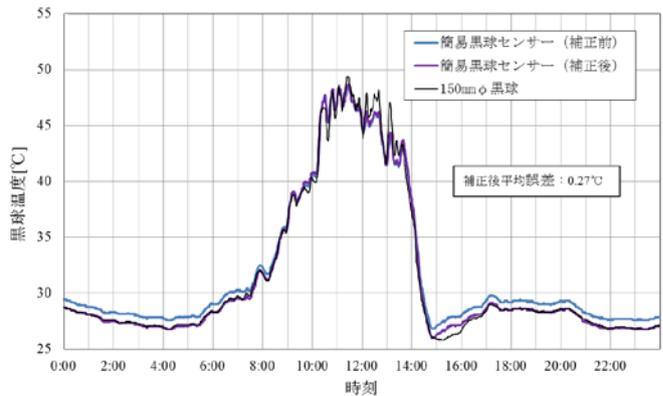


Fig. 4 黒球温度の補正結果の例
A Correction Result Example of the Globe Temperature

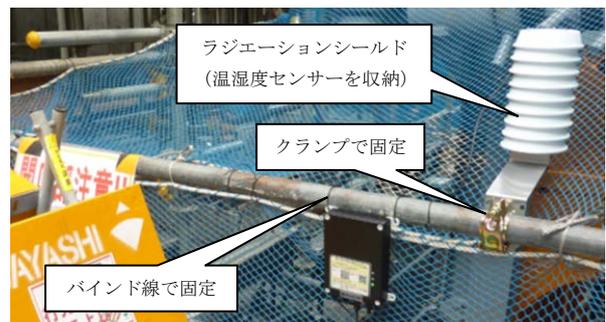


Photo 3 現場におけるルーター設置状況
Installation Location of a Router on a Site

- 1) バインド線やクランプで取付けられ、現場への配慮がされている。
- 2) 取付け作業は非常に簡単だと感じた。
- 3) ルーターの移設作業をしたが非常に簡単であった。

5.2 実現場での暑さ環境の測定結果

暑さ指数ウォッチャーにはグラフ表示機能があるほか、工事事務所のパソコンに測定したデータが保存されるようになっている。これらのデータから夏の現場の暑さ環境を分析することができる。

暑さ指数ウォッチャーを設置した某建築現場の断面図をFig. 5に示す。ルーターは9台設置したが、ここでは2箇所(「6F」および「B1屋外」)のデータのみを紹介する。

8月のある日の「6F」および「B1屋外」のWBGTの日変化を、それぞれFig. 6に示す。現場内においては、設置場所や作業強度の違いにより、場所によってWBGT基準値を超過している度合いが異なることがわかる。

なお、これらのグラフは暑さ指数ウォッチャーのグラフ表示機能で描かれたものである。工事事務所の管理者は全てのルーターの時系列情報をこのような形式でいつでも見ることができる。

Fig. 7は前述の2箇所の点について、保存データから、今夏観測された各日の最大WBGTをグラフ化したものである。連続測定データにより長期的な分析も可能である。

5.3 「暑さ指数ウォッチャー」の効果

暑さ指数ウォッチャーには以下の効果がある。

- 1) 熱中症災害低減への貢献や注意喚起
 - 2) 業務効率の改善
 - ・WBGT計測業務の省力化
 - ・自動メールによる通知業務の省力化
 - ・帳票出力機能による記録作成業務の省力化
- 実際に、現場担当者や協力業者から得られた意見を以下に挙げる。
- 1) 通知メールにより、班長や作業員への注意呼びかけを適切なタイミングで実施できる(協力業者 職長)
 - 2) WBGTのほか、気温や湿度などの時系列情報も知ることができ、より総合的な判断が可能となる(職員)
 - 3) 朝礼や昼礼で適切な注意喚起ができる(職員)
 - 4) 休憩取得を早めたり、給水頻度を増やすなど対策強化をする判断材料として役立った(職員)
 - 5) 帳票出力機能により、書類作成が省力化できた(職員)

6. まとめ

複数箇所のWBGTを連続測定し、工事事務所で一括管理することができる「暑さ指数ウォッチャー」を開発し、その効果と有効性を確認した。

2015年9月現在までの実績は、新たに解体工事の1現場を加え全4件となっている。今後は、社内建設現場への普及を早急に進め、熱中症災害の防止に役立てたい。

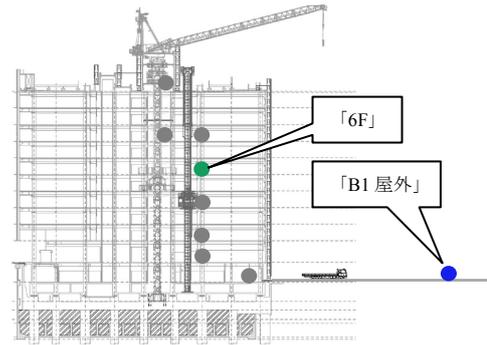


Fig. 5 某建築現場におけるルーターの設置位置
Installation Position of Routers on a Construction site

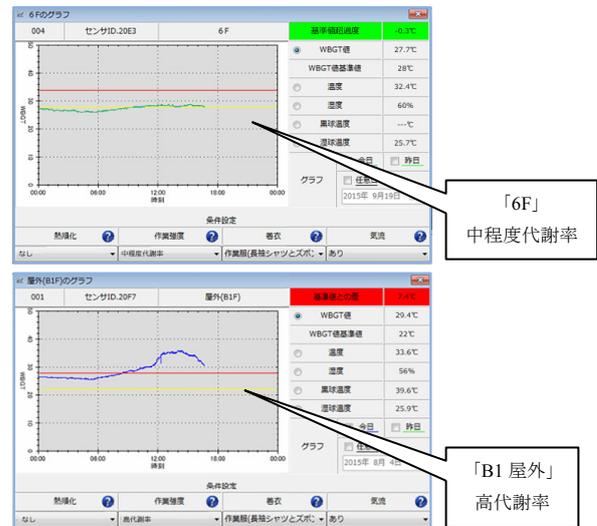


Fig. 6 場所によるWBGTの違い
The Difference of WBGT due to Location

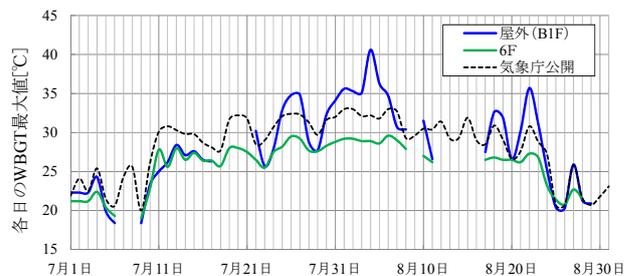


Fig. 7 最大WBGTの変化
Change of the Maximum WBGT

参考文献

- 1) Yaglou, C.P. and Minard, C.D.: Control of casualties at military training centers, AM. Med. Ass. Archs. Ind. Health 16, p302-306, 1957
- 2) 日本生気象学会:日常生活における熱中症予防指針, Ver.3, 2013
- 3) 日本工業規格: JIS Z 8504 人間工学-WBGT 指数に基づく作業者の熱ストレスの評価-暑熱環境, p7, 1999
- 4) 建設業労働災害防止協会:建設業等における熱中症の予防, p22, 2011