

7. 3 相対湿度の換算方法の違いによる WBGT への影響

前項の比較測定及び解析において、相対湿度の換算方法の違いにより「日射が強い場合に、湿球温度は自然湿球温度より 2~3°C 程度低くなる傾向がみられ、その影響で WBGT についても、日射が強い場合に、湿球温度を使った方が 2°C 程度低くなる傾向」となった。

気象庁の気象観測方法に従って測定した気象観測要素から求めた WBGT（以下、「気象 WBGT」とする）と、ISO7243 に準拠した測定器で求めた WBGT（以下、「ISO-WBGT」とする）の差は主に湿球温度の差であり、両者の差が生じる要因は、その効果が大きい順に以下による。

- ① ISO-WBGT では湿球温度計感部に日射をあてる、気象 WBGT では日射を遮蔽する
- ② ISO-WBGT では自然通風、気象 WBGT では強制通風（5m/s 程度の風を当てる）
- ③ ISO-WBGT では高さ 1m 程度、気象 WBGT では高さ 1.2~1.5m で測定

	ISO-WBGT	気象 WBGT
乾球温度	直射日光を遮蔽 (日よけをつける)	日射・輻射を遮蔽 (金属の二重管内に設置)
湿球温度	日射があたる径 6mm の温度計 に湿らせたガーゼを巻き計測	日射・輻射を遮った状態で湿度を電 氣的に計測 換算式を用いて、気温と混合比(空気中 の水蒸気の比率) から湿球温度を計算
電子式使用時の 湿度の換算式	ISO7243:Annex-D (日射を考慮)	Iribarne, 1981 など (日射を考慮せず)
通風方式	自然通風	強制通風 (およそ 5m/s)



図 7-15 観測機材

(左から 2 つ目[赤]が ISO7243 に準拠した測定機器、右から 2 つ目[緑]が気象庁観測に準拠した測定機器)

(1) 気象 WBGT と ISO-WBGT の差

前節(3)より、気象庁標準観測による湿度を ISO7243:Annex-D により換算した自然湿球温度と ISO 型観測器による自然湿球温度の測定値の比較では「風速 0.3m/s 未満で自然湿球温度 (ISO 換算) が ISO 型測定値より最大で 1°C程度高くなる」が、全データで比較すると換算値は測定値とおおむね良く合致していることから、気象 WBGT と ISO-WBGT の差について、WBGT に最も寄与率の高い湿球温度を求める換算式の違いによる差を検討した。

気象庁の気象観測方法に従って測定した気象要素から、Iribarne の換算式 (式 7.1~7.4) を用いて求めた湿球温度 (以下、「気象湿球温度」という) と ISO7243 の Annex-D (式 7.5~7.6) により換算した自然湿球温度 (以下、「ISO 自然湿球温度」という) の差 (ISO 自然湿球温度-気象湿球温度) を、3 つの条件 (Case1 : 晴天日 ($T_g-T_a : 10^{\circ}\text{C}$)、風速 1m/s、Case2 : 日射が当たらない ($T_g-T_a : 0^{\circ}\text{C}$)、風速 0.15m/s、Case3 : 日射が当たらない ($T_g-T_a : 0^{\circ}\text{C}$)、風速 5m/s) で計算し表 7-1 に示した。(横 : 湿度、縦 : 気温)

表の黄色の欄は、Annex-D の換算の途中で用いる平均放射温度 (T_r) の適応範囲、 $T_a : 18-30^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{nw} : 15-25^{\circ}\text{C}$ を表しており、赤の四角の枠の中は、夏の昼前後の代表的な気温 25,30,35°C、湿度 50,60%のエリアを示している。

計算結果では、真夏の昼間、弱風時は 2~3°C 「ISO 自然湿球温度」が「気象湿球温度」より高く (Case1)、WBGT に換算すると「ISO-WBGT」は「気象 WBGT」より 1.5~2°C 高くなる。

なお、Case3 に示されるとおり、日差しが無く風が強い時には、両者の差はほぼゼロになる。また、風の弱い百葉箱の中では風を当てる場合に比べて湿球温度計の熱が奪われにくくなるため、湿球温度が高くなる。これが、強制通風と自然通風の違いによる差である (Case2 と Case3 の差)。

表 7-1 ISO 自然湿球温度と気象湿球温度の差

Case1: 晴天日 ($T_g - T_a = 10^\circ\text{C}$)、風速1m/s										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
35	1.2	1.3	1.4	1.6	1.7	1.9	2.0	2.2	2.5	2.9
30	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.1	2.3	2.5	2.8	3.0
25	1.8	1.9	1.9	2.1	2.3	2.4	2.5	2.7	3.0	3.1
20	2.1	2.1	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	3.0	3.2	3.4
15	2.4	2.5	2.6	2.8	2.9	3.0	3.2	3.2	3.4	3.6

Case2: 日射が当たらない ($T_g - T_a = 0^\circ\text{C}$)、風速0.15m/s、(風の弱い百葉箱の中の状態)										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
35	0.0	0.0	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.7
30	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	1.3	1.6
25	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.9	1.2	1.4
20	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2
15	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1

Case3: 日射が当たらない ($T_g - T_a = 0^\circ\text{C}$)、風速5m/s、(アスマン通風乾湿計の観測)										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
35	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
20	0.0	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2
15	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2

「ISO 自然湿球温度」と「気象湿球温度」の差は、電子式湿度計で計測した相対湿度を日射を考慮して換算するか (ISO7243:Annex-D)、日射を考慮しないで換算するか (Iribarne の換算式) による差が大きく、強制通風、自然通風の通風方式の違いによる差よりも数倍大きい。両者の差は、日射強く、風が弱く、湿度が低く、気温が低くなるほど大きくなる傾向にあるが、風速の違いによる差はそれほど顕著ではない。

(2) 日本における WBGT = 日本体育協会の基準 =

日本体育協会では、1994年のガイドラインで、WBGT21,25,28,31°Cを基準とした指針を示している。このガイドラインのとりまとめに関わった中井京都女子大学名誉教授から関連文献を頂き分析を行った。

この基準は、中井名誉教授を中心に、海外におけるスポーツの基準等を調査し、湿球温度およびWBGTと活動指針の素案を作成。その上で、学校管理下における死亡事故について、フィールドにおけるWBGTと乾球温度・湿球温度の関係式を作成し(図7-16の左図)、関係式と最寄り気象台の観測値から運動時熱中症発生時のWBGT分布を統計し(図7-16の右図)、委員会においてWBGT21,25,28,31°Cを決めたと推定される。フィールド観測データについては、湿球温度計に日射が当たっているもの当たっていないものが混在しており、

気象台の観測データは日射を遮った強制通風での観測値であることから、この際に計算された WBGT は気象 WBGT に近かったと推定される。

中井名誉教授の乾球温度または湿球温度から WBGT を求める換算式は、同ガイドラインに掲載され、広く利用されている。

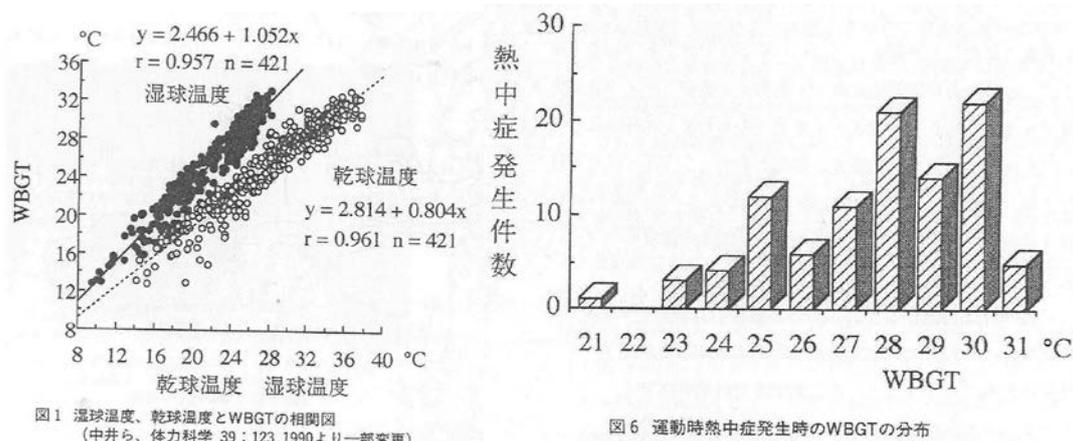


図1 湿球温度、乾球温度とWBGTの相関図
(中井ら、体力科学 39: 123, 1990より一部変更)

図6 運動時熱中症発生時のWBGTの分布

図 7-16 湿球温度、乾球温度と WBGT の相関図 (左)

運動時熱中症発生時の WBGT の分布 (右)

(中井京都女子大学名誉教授提供)

中井名誉教授からは、体側の反応もあるので、WBGT1°Cにそれほどこだわる必要はなく、現在のままの気象 WBGT でも差し支えないのではないかと意見であった。

また、生気象学会の基準は、日本体育協会の基準を参考に、それを一般生活に適用したもので、指針の策定時には、数値基準の生気象的な検討は行っていない。

(3) 「ISO-WBGT」と「気象 WBGT」のリスクの閾値

2017年7月の小石川での気象 WBGT と ISO-WBGT を時刻別に比較した(図 7-17)。ISO-WBGT では、WBGT が 31°Cを超える(日本生気象学会の「日常生活における熱中症予防指針」および日本体育協会の「熱中症予防運動指針」で最も危険なランク「危険」「運動は原則中止」となる)日が 20 日ほどあることとなり、現在の指針と組み合わせると過大評価となる。

2015~2017年の5~9月の東京と大阪について、それぞれの WBGT のパーセンタイル¹を求め表 7-2 に示した。仮に 90 パーセンタイルを最も警戒が必要なランクとすると、閾値を 2°C程度上げるのが望ましくなる。

¹ 測定値の分布(ばらつき)を小さい数字から大きい数字の順に並べ、パーセント表示することによって、小さい数字から大きな数字に並べ変えた計測値においてどこに位置するのかを測定する単位。例えば、測定値として 100 個ある場合、5 パーセンタイルであれば小さい数字から 5 番目に位置する数字を指す。

表 7-2 WBGT パーセンタイル (2015~2017 年、5~9 月)

東京				大阪			
パーセンタイル	気象WBGT	ISO-WBGT	搬送者(10万人あたり)	パーセンタイル	気象WBGT	ISO-WBGT	搬送者(10万人あたり)
10	20.9	22.2	0.00	10	20.7	23.2	0.01
20	22.2	24.1	0.01	20	22.5	24.7	0.02
30	23.5	25.4	0.02	30	23.8	26.2	0.03
40	24.5	26.7	0.04	40	24.9	27.2	0.07
50	25.8	27.6	0.06	50	25.9	28.1	0.10
60	27.1	29.2	0.09	60	27.2	29.5	0.16
70	28.4	30.4	0.15	70	28.7	31.1	0.28
80	29.9	31.9	0.27	80	29.9	32.1	0.52
90	31.1	33.2	0.53	90	30.7	32.9	0.80

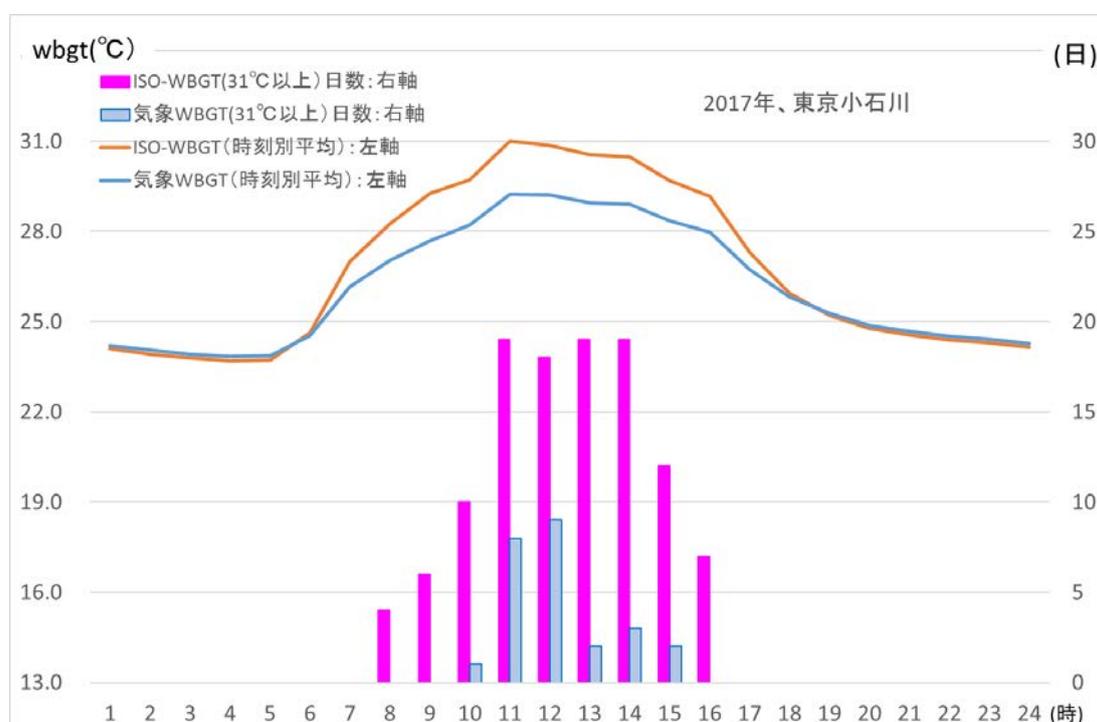


図 7-17 ISO-WBGT と気象 WBGT の違い (2017 年 7 月、東京)

日本でよく利用されている熱中症の統計資料は、消防庁の熱中症救急搬送人数であるが、同報告の 2015,16,17 年の 5~9 月の、東京・大阪・名古屋・札幌の搬送者数について、「ISO-WBGT」と「気象 WBGT」を計算し、各都道府県別の搬送者数と日最高 WBGT を比較したところ、気象 WBGT、ISO-WBGT のいずれも搬送者数と正の相関関係を有しており、その傾向もほとんど変わらなかった。

ここまでに見たとおり、「気象 WBGT」と「ISO-WBGT」は、日射が強い環境では 2°C 程度の差が生じる。しかしながら、気象庁の気象観測データが広く公開・利用されている日本

においては、疫学を含む様々な分野で気象庁観測値、あるいはそれらを用いた WBGT などの指標が利用されており、体育協会などの基準も気象 WBGT と親和性がある。

以上のことから、WBGT を以下の 2 つに定義し、両方の WBGT を計算し提供できる体制を整えておく必要がある。

「暑さ指数 (WBGT)」: 気象 WBGT (従来のもの、国内向け)

「ISO7243-WBGT」: ISO7243 に定める観測方法に拠った WBGT (海外からの要請への対応)