

5. 5 携帯型の補正について

携帯型測定機器（以下「携帯型」という。）の利用に際しては、以下の特性に留意し、必要に応じて測定値を補正して利用する必要がある。

- ・ 筐体が小さいため、日射により暖められた筐体の温度が気温センサーに伝わり気温が本来よりも高く計測される傾向がある。気温の上昇に伴い飽和水蒸気圧は増加するため、相対湿度の測定値は低下する。（気温は高く、湿度は低く測定される傾向にある。）
- ・ 黒球の直径が 3cm と小さいため（黒球の熱容量が小さいため）、標準型測定機器(以下「標準型」という。)（黒球の直径 15cm）に比べ黒球温度が低く計測される傾向がある。

今回使用した携帯型による測定値は、上記特性により気温、黒球温度のいずれも標準型による測定値と差が生じたので、標準型の測定値との比較結果に基づいて（1）項の補正式により WBGT を算出した。

（1） 携帯型測定値の補正

地点ごとに測定機器を置いている条件は異なるため、携帯型測定値の補正はそれぞれの測定機器の測定値から行う必要がある。

標準型と携帯型の測定値を比較したところ、日射が強いほど携帯型で測定した気温は標準型で測定した気温より高くなり、日射が強いほど携帯型で測定した黒球温度は標準型で測定した黒球温度より低くなったため、携帯型で測定された黒球温度（Tg）と気温（Ta）の差をパラメータ（説明変数）として、標準型と携帯型の気温（Ta）及び黒球温度（Tg）の差を目的変数とした相関分析を行った（図 5-11 および図 5-12）。補正式の作成には、比較的 WBGT が高い値までを測定できた、皇居外苑周辺、東京スタジアム周辺、霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺の測定値（1 分値）を使用することでなるべく広い WBGT 幅に対する補正式の作成を目指した。さらに、一時的な晴天はあったものの、9 月前半の気温が低かったことから、7 月と 8 月の日中（6 時～18 時）の測定値を用いた。相関関係は良好で（R²は 0.63 および 0.74）、ある程度の精度で適切な補正ができると考えられる。

気温および黒球温度の補正式は、携帯型の気温の測定値を Ta、黒球温度の測定値を Tg とすると、

気温の補正值 Ta(adj)は、

$$\begin{aligned} \text{Ta(adj)} &= \text{Ta} - 5.95 && ((\text{Tg} - \text{Ta}) > 10.0^\circ\text{C}) \\ &\text{Ta} - 0.59 \times (\text{Tg} - \text{Ta}) - 0.05 && (10.0^\circ\text{C} \geq (\text{Tg} - \text{Ta}) \geq 2.0^\circ\text{C}) \\ &\text{Ta} - \{ (0.59 \times 2.0 - 0.05) / 2.0 \} \times (\text{Tg} - \text{Ta}) && (2.0^\circ\text{C} > (\text{Tg} - \text{Ta}) > 0^\circ\text{C}) \\ &\text{Ta} && ((\text{Tg} - \text{Ta}) \leq 0^\circ\text{C}) \\ &&& \dots\dots (5.1) \end{aligned}$$

黒球温度の補正值 $T_g(\text{adj})$ は、

$$\begin{aligned}
 T_g(\text{adj}) = & T_g + 6.7 && ((T_g - T_a) > 10.0^\circ\text{C}) \\
 & T_g + 0.63 \times (T_g - T_a) + 0.4 && (10.0^\circ\text{C} \geq (T_g - T_a) \geq 2.0^\circ\text{C}) \\
 & T_g + \{ (0.63 \times 2 + 0.40) / 2.0 \} \times (T_g - T_a) && (2.0^\circ\text{C} > (T_g - T_a) > 0^\circ\text{C}) \\
 & T_g && ((T_g - T_a) \leq 0^\circ\text{C}) \\
 & && \dots\dots (5.2)
 \end{aligned}$$

湿度については、絶対湿度が殆ど変化していないことから、補正前の気温 (T_a) と補正前の相対湿度 (RH) から蒸気圧を求め、その蒸気圧と補正後の気温 ($T_a(\text{adj})$) から相対湿度の補正值 (RH(adj)) を求めた。

最後に、補正された気温 ($T_a(\text{adj})$)、相対湿度 (RH(adj)) から湿球温度 ($T_w(\text{adj})$) を算出し、式(5.3)により WBGT の補正值 (WBGT(adj)) を求めた。

$$\text{WBGT}(\text{adj}) = 0.7 \times T_w(\text{adj}) + 0.2 \times T_g(\text{adj}) + 0.1 \times T_a(\text{adj}) \quad \dots\dots(5.3)$$

図 5-11、図 5-12 に、携帯型 T_g —携帯型 T_a と標準型 T_a —携帯型 T_a の散布図と補正式、及び携帯型 T_g —携帯型 T_a と標準型 T_g —携帯型 T_g の散布図と補正式を示す。

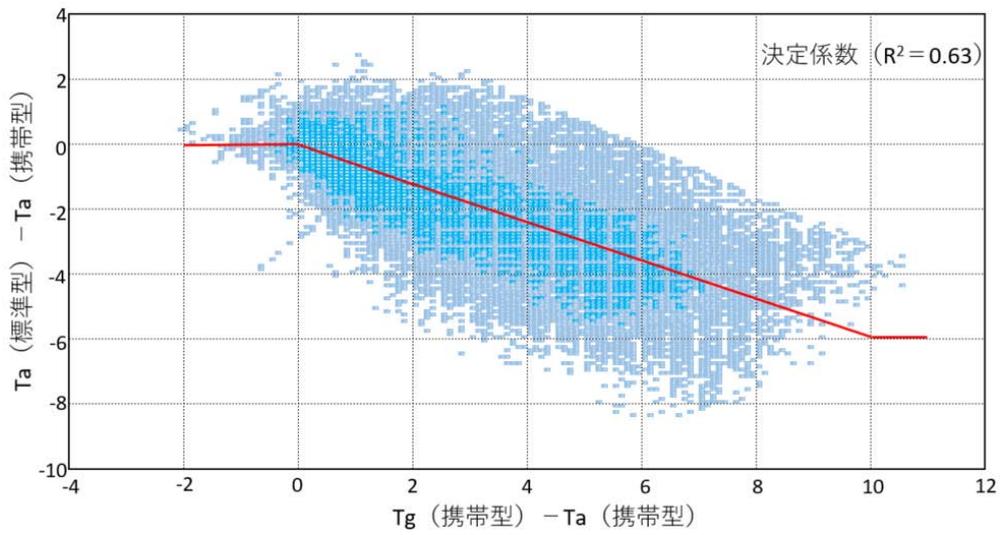


図 5-11 携帯型 T_g -携帯型 T_a と標準型 T_a -携帯型 T_a の散布図と補正式 (2017 年 7-8 月)
 0.1°C 升目に測定値の数が 20 個以上を水色、1~19 個を灰青色で示す。赤線が補正式。

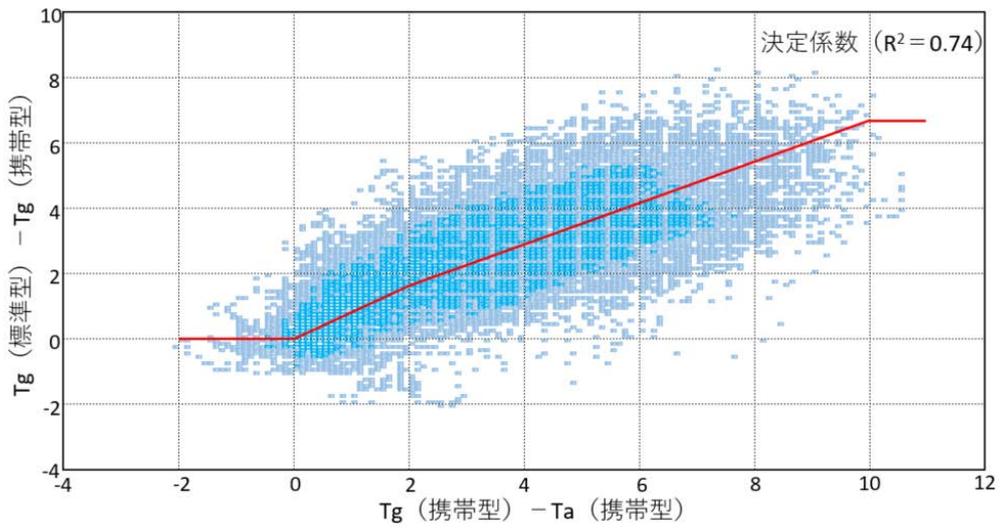


図 5-12 携帯型 T_g -携帯型 T_a と標準型 T_g -携帯型 T_g の散布図と補正式 (2017 年 7-8 月)
 0.1°C 升目に測定値の数が 20 個以上を水色、1~19 個を灰青色で示す。赤線が補正式。

(2) 補正結果

標準点に併設した携帯型と標準型の WBGT 値を比較した。2017 年 7 月 21 日の新国立競技場周辺での補正前と補正後の WBGT の日変化を図 5-13 に示す（上段：補正前、下段：補正後）。日中は標準型より 2 度以上高い値を示していた携帯型の WBGT（赤線）が、補正により標準型の測定値（黒線）にかなり近づく。

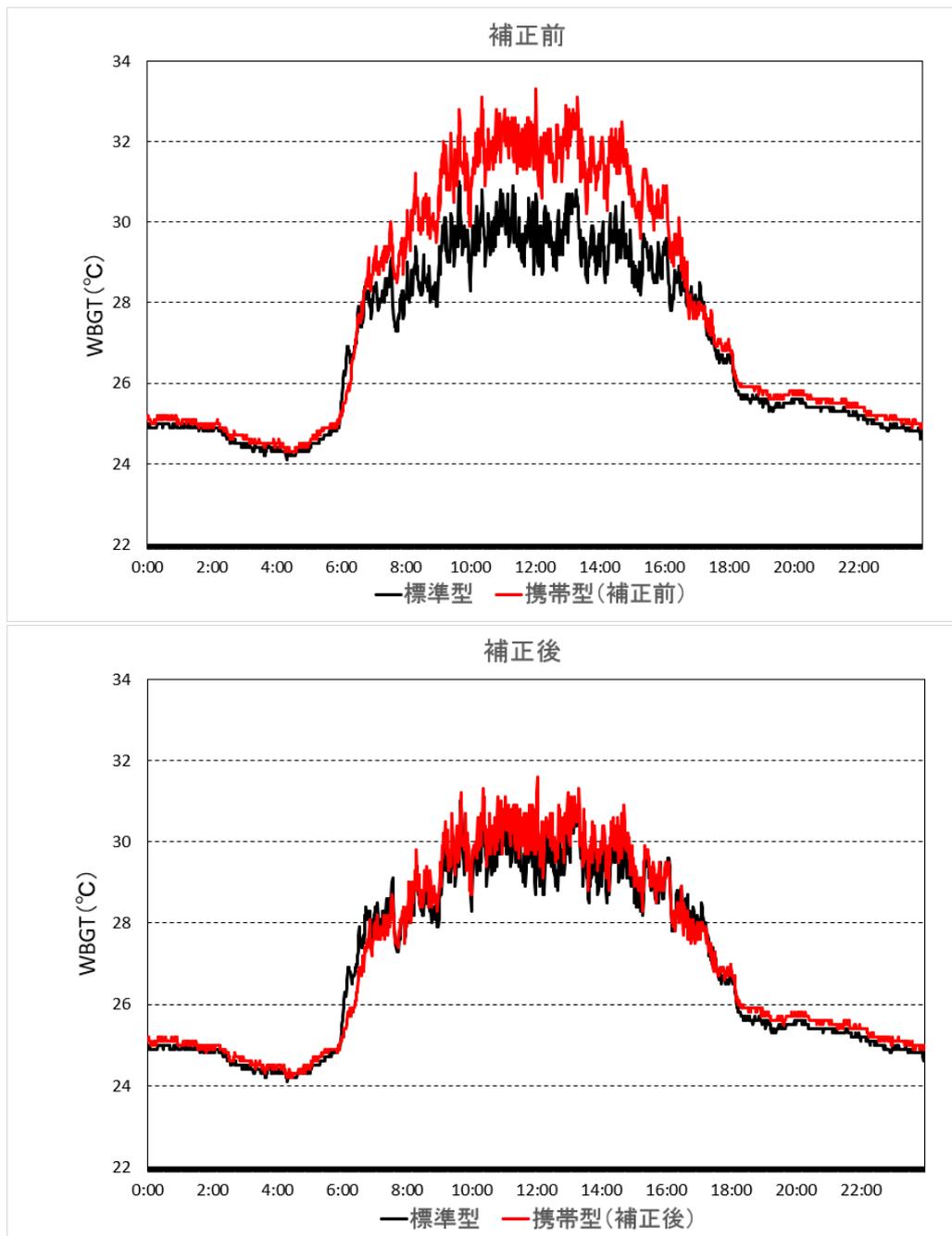


図 5-13 補正前後の WBGT（新国立競技場周辺、2017 年 7 月 21 日）

次に、補正前後の精度を検証した。

標準型での WBGT の測定値と標準点に併設した携帯型での WBGT の測定値の平均誤差¹と RMSE²を、補正前後について測定地区ごとに時刻別に求めた。その最大値を表 5-1 に示す。(各時刻の値には正時の前後 30 分(10 時では 9 時 31 分～10 時 30 分)の計 60 個の測定値を平均した値を使用している。)

また、新国立競技場周辺での時刻別 WBGT について、補正前と補正後の平均誤差と RMSE を図 5-14 に示す。補正前(青線)に最大 1.4℃近くあった平均誤差は、補正後(橙線)は 0.4℃に減少した。また、補正前(青線)に最大 1.6℃近くあった RMSE も、補正後(橙線)は 0.6℃以下に減少した。

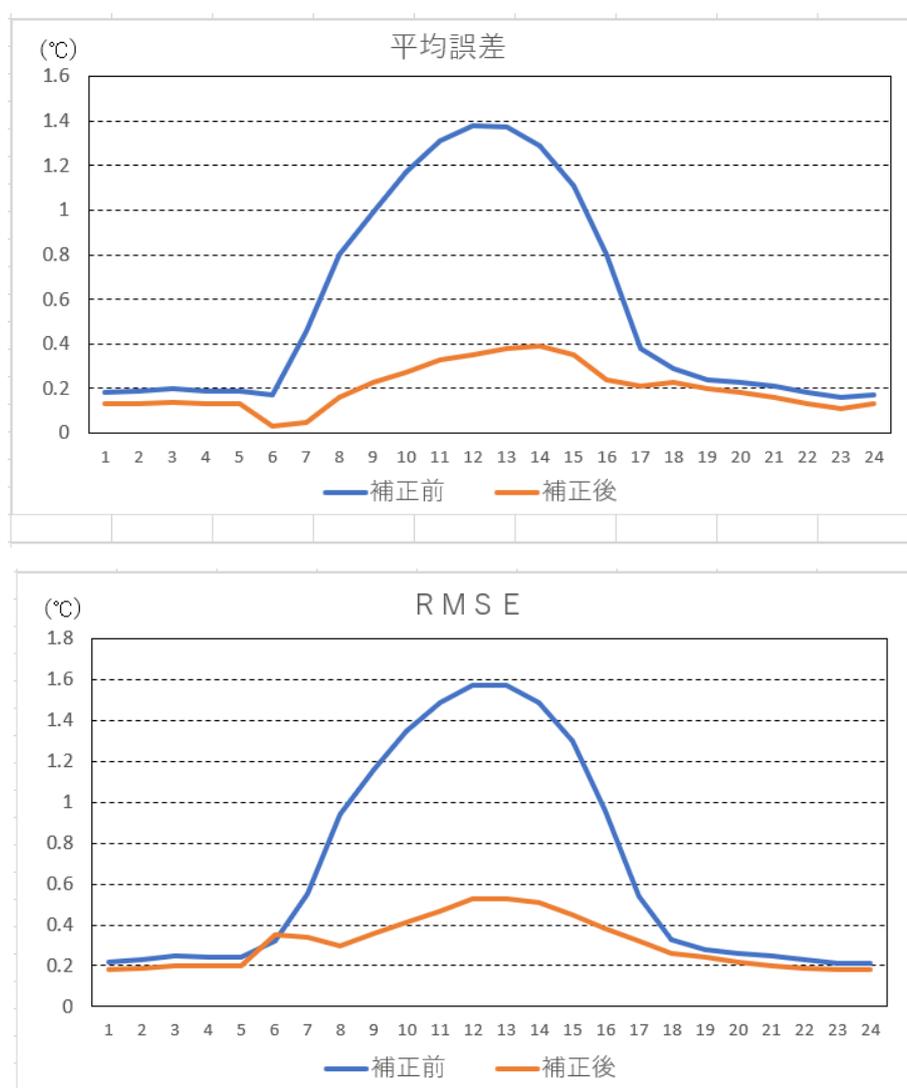


図 5-14 補正前後の時刻別平均誤差と RMSE (新国立競技場周辺、7 月 11 日～9 月 15 日)

1 誤差(携帯型の WBGT 測定値－標準型の WBGT 測定値)の平均。

2 誤差の 2 乗平均の平方根

表 5-1 補正前後の時刻別の平均誤差と RMSE の最大値 (7 月 11 日~9 月 15 日)

	平均誤差最大値		RMSE 最大値	
	補正前	補正後	補正前	補正後
新国立競技場周辺	1.38	0.39	1.57	0.53
皇居外苑周辺	1.67	0.75	1.80	0.83
国技館周辺	1.58	0.60	1.76	0.68
馬事公苑周辺	1.35	0.29	1.49	0.47
有明・お台場地区周辺	1.77	0.74	1.90	0.84
東京スタジアム周辺	1.92	0.65	2.11	0.86
霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺	1.75	0.46	1.92	0.74
埼玉スタジアム 2002 周辺	1.66	0.47	1.82	0.68
幕張メッセ周辺	1.18	0.24	1.32	0.42
釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺	1.44	0.48	1.66	0.67
江の島ヨットハーバー周辺	1.63	0.57	1.74	0.78
横浜国際総合競技場周辺	1.53	0.48	1.72	0.61
伊豆ベロドローム周辺	1.46	0.50	1.59	0.65
福島あづま球場周辺	1.07	0.25	1.25	0.56
平均	1.53	0.49	1.69	0.67

携帯型の測定値および補正值の傾向を調査するため、標準型と携帯型の WBGT 測定値および補正值について相関分析を行った。相関分析は標準型の WBGT を目的変数、携帯型の WBGT の測定値および補正值を説明変数とし、一次回帰式の傾き (a) および切片 (b) を求めた。両者が一致する場合は、 $a=1$ 、 $b=0$ となり、相関係数は 1.00 ($R^2=1.00$) となる。

$$\text{「標準型の WBGT」} = a (\text{傾き}) \times \text{「携帯型の WBGT」} + b (\text{切片})$$

相関分析による係数 a, b および決定係数 (R^2) を補正前および補正後の携帯型測定値について表 5-2 に示した。相関分析に用いたデータは各観測点の標準型および標準型に併設された「草地日なた」の携帯型の測定値で、7月11日～9月15日の全データ(測定開始日が7月11日より遅い場合は測定開始日から9月15日)を用いた。 R^2 は補正前であっても1.0に近く非常に高い相関があるが、補正前の傾き a は 0.84～0.90、切片 b は 1.71～3.30 で、WBGT が高くなるほど携帯型の測定値が高くなる系統的誤差があることを示している。

補正後は、傾き a が 0.95～1.00、切片 b も -0.06 ～1.00 となり系統的誤差が大幅に縮小された。

表 5-2 補正前後の標準型測定値と携帯型測定値の回帰式 (7月11日～9月15日)

	補正前			補正後		
	a	b	R^2	a	b	R^2
新国立競技場周辺	0.87	2.76	0.98	0.98	0.33	0.99
皇居外苑周辺	0.87	2.28	0.97	0.95	0.56	0.99
国技館周辺	0.90	1.73	0.97	0.98	-0.02	0.99
馬事公苑周辺	0.88	2.48	0.98	0.99	0.06	0.99
有明・お台場地区周辺	0.86	2.70	0.97	0.96	0.53	0.99
東京スタジアム周辺	0.84	3.30	0.97	0.95	1.00	0.99
霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺	0.86	2.83	0.98	0.97	0.42	0.99
埼玉スタジアム 2002 周辺	0.86	2.71	0.98	0.97	0.49	0.99
幕張メッセ周辺	0.89	2.19	0.98	1.00	-0.06	0.99
釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺	0.86	2.81	0.98	0.97	0.41	0.99
江の島ヨットハーバー周辺	0.89	2.17	0.97	0.98	0.22	0.98
横浜国際総合競技場周辺	0.87	2.55	0.98	0.97	0.45	0.99
伊豆ベロドローム周辺	0.86	2.71	0.98	0.97	0.34	0.99
福島あづま球場周辺	0.90	1.71	0.99	0.98	0.35	0.99

(注) a は回帰式 ($y=ax+b$) の傾き、b は回帰式の切片、 R^2 は決定係数 (相関係数 R の 2 乗)

(3) 携帯型メーカー補正值との比較

携帯型は、標準型に比べて気温は高めに、黒球温度は低めの測定値となる特性を有しており、本業務においては、測定値から求めた補正式(5.1)～(5.3)により、気温、黒球温度、湿度を補正(以下、「要素別補正」という。)してWBGTを算出した。

市販されている携帯型でより適切なWBGTを測定できるよう、今回使用した携帯型を製造しているメーカーへ、参考として今年度の標準型と併設された携帯型での測定結果を提供した。すると、メーカーでも測定結果を使用して、補正方法(以下、「メーカー補正」という。)の検討が行われた。

メーカー補正により算出されたWBGTのデータの提供を受けたことから、「メーカー補正」WBGTと「要素別補正」WBGTの比較を行った。

【要素別補正とメーカー補正の比較】

携帯型メーカーからは、霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺と東京スタジアム周辺の標準型に併設された携帯型の「メーカー補正」データ(期間:7月11日～8月27日)の提供を受けた。

「メーカー補正」と「要素別補正」それぞれの補正の特性をみるため、図5-15に東京スタジアム周辺(2017年7月20日)、図5-16に霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺(2017年8月9日)の標準型で測定したWBGT、携帯型で測定したWBGT(補正前)、要素別補正WBGT、メーカー補正WBGTを示した。メーカー補正WBGT、要素別補正WBGTともに、標準型WBGTの日変化とほぼ一致するように補正されていることが確認できた。

次に、霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺と東京スタジアム周辺の7月11日～8月27日の測定値を用いて、標準型測定値に対する「要素別補正」WBGTと「メーカー補正」WBGTの時刻別平均誤差とRMSE(誤差の標準偏差)を求め図5-17に示した。(各時刻の値には正時の前後30分(10時では9時31分～10時30分)の計60個の測定値を平均した値を使用している。)

補正により、メーカー補正、要素別補正のどちらも平均誤差、RMSEともに補正前に比べて大幅に小さくなっている。メーカー補正と要素別補正を比べると、平均誤差はメーカー補正の方がやや小さく、RMSEもWBGTが上昇する10時～13時の時間帯にメーカー補正の方がやや小さくなっているが、ほぼ同程度の精度で補正が行われている。

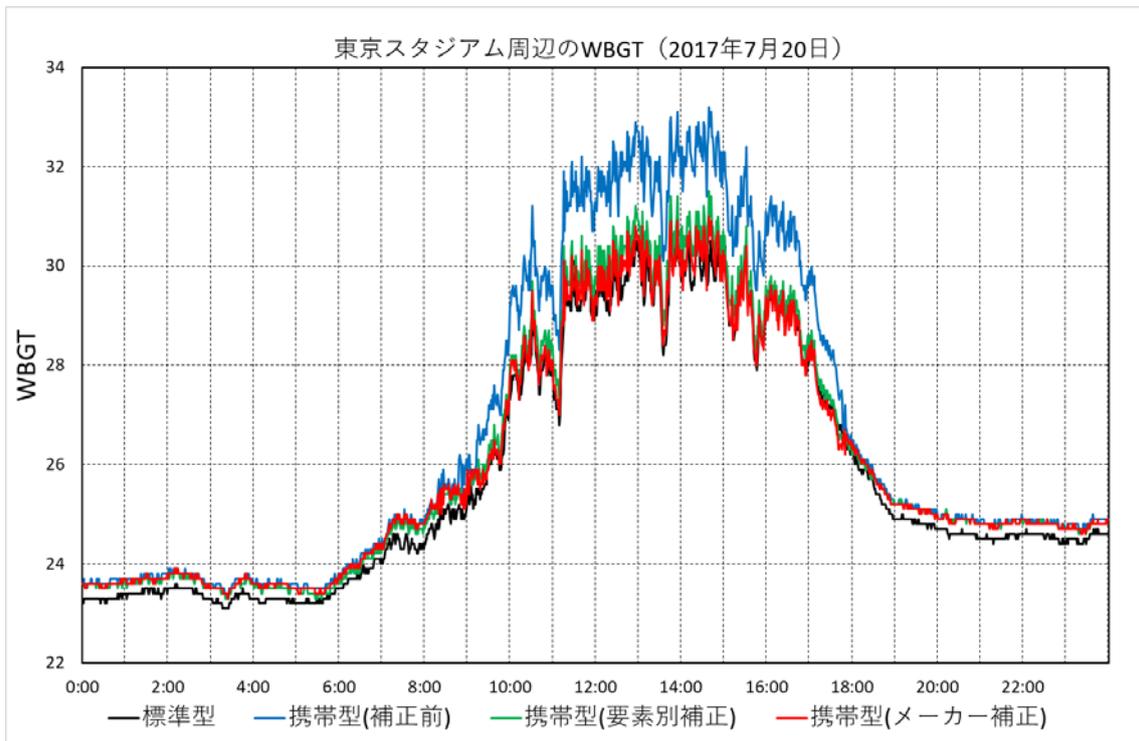


図 5-15 標準型、携帯型(補正前)、要素別補正、メーカー補正のWBGT
(東京スタジアム周辺、2017年7月20日)

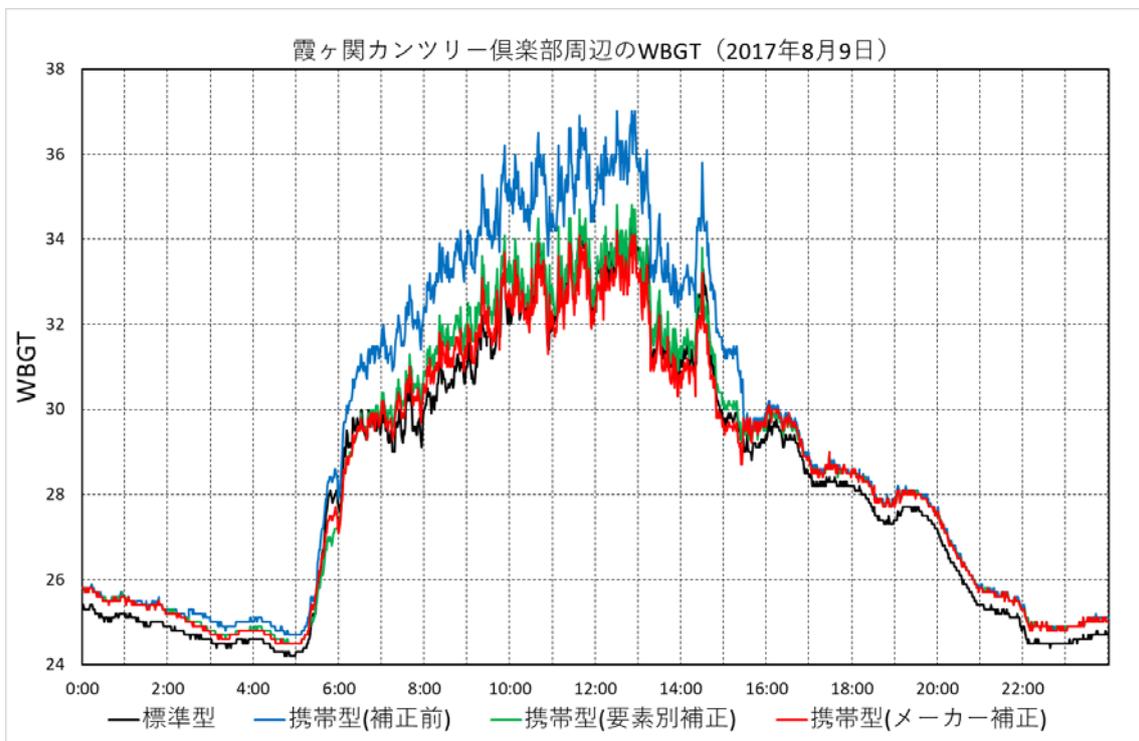


図 5-16 標準型、携帯型(補正前)、要素別補正、メーカー補正のWBGT
(霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺、2017年8月9日)

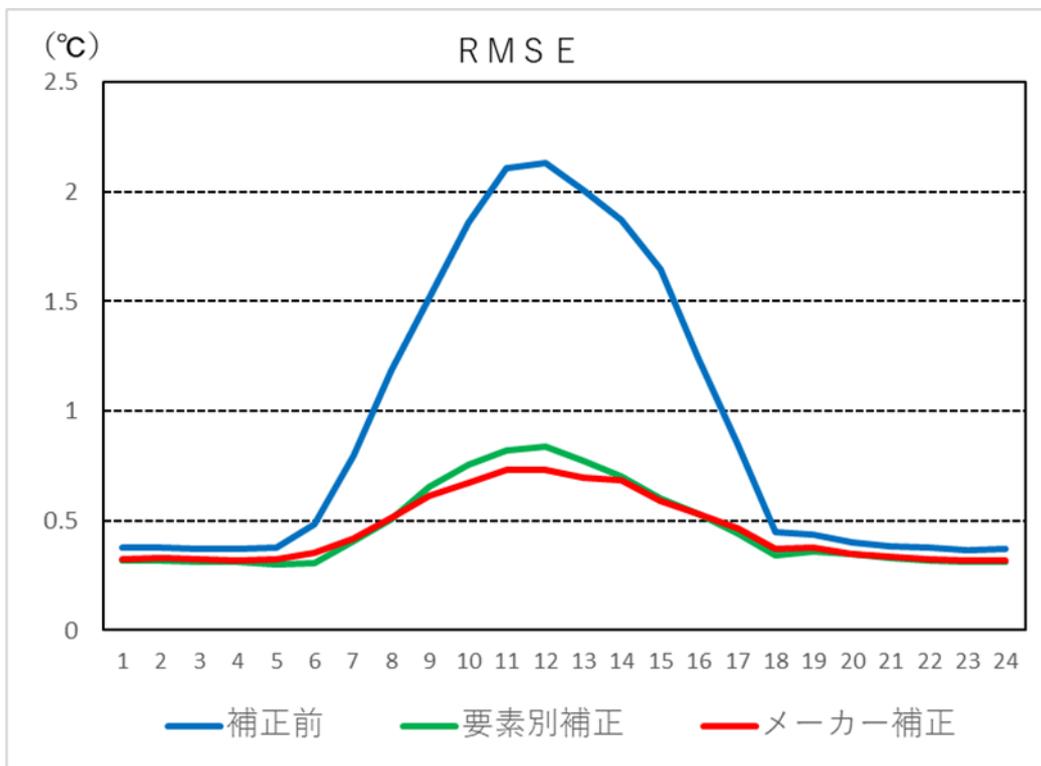
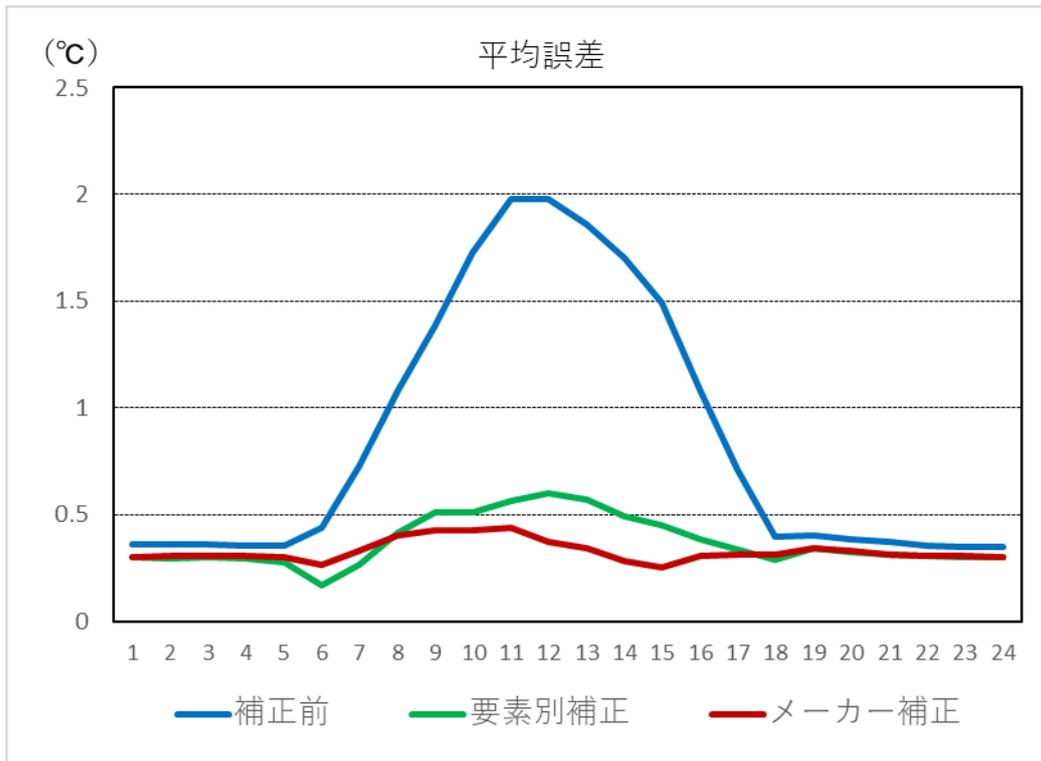


図 5-17 携帯型 (WBGT) の補正前、要素別補正、メーカー補正の時刻別平均誤差と RMSE

5. 6 携帯型の屋外長期測定後の測定精度

今年度使用した携帯型測定機器は防水処理が施され、雨天時の測定が可能な機器である。

測定を行った東日本では8月に雨の日が多く、各機器は防水機能が試された。また、海岸付近では強風や潮風を受けるなど、過酷な状況に晒された機器もあった。このことから、長期測定実施後の測定精度の悪化の有無等を確認するために、比較測定及び評価を行った。

比較測定は、現場から回収した機器（以下、「測定実施機器」という。）と未使用のまま室内に保管されていた予備機器（以下、「室内保管機器」という。）を用いて、同じ環境で測定を実施した。比較測定は気象業務支援センターの事務室内で実施し、気温と湿度センサーの測定値及びWBGTの算出値を評価対象とした。黒球温度については、測定は事務室内で行われ日射を受けないこと、気温と同一の温度センサーを使用していることから評価は行わなかった。

測定は機器回収後あまり期間を空けないよう、9月26日～29日、10月2日～5日、10月16日～19日、10月24日～26日の4回に分けて実施した。各機器の比較測定実施期間を表5-3に示す。測定値の評価においては、室内保管機器10機の測定値の平均値を求め、その平均値とそれぞれの室内保管機器及び測定実施機器の測定値との差のデータから、各機器の平均偏差と標準偏差を求めた。

なお、事務室では平日日中は空調が入っていることから、この期間の測定値の範囲は、気温が21～28℃、湿度が30～70%、WBGTが17～24℃であった。

表 5-3 比較測定の実施期間

地区名	9/26-29	10/2-5	10/16-19	10/24-26
新国立競技場周辺			○	
皇居外苑周辺			○	
国技館周辺	○			
馬事公苑周辺				○
有明・お台場地区周辺		○		
東京スタジアム周辺	○			
霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺				○
埼玉スタジアム 2002 周辺				○
幕張メッセ周辺		○		
釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺		○		
江の島ヨットハーバー周辺	○			
横浜国際総合競技場周辺			○	
伊豆ベロドローム周辺			○	
福島あづま球場周辺			○	
室内保管機器	○	○	○	○

初めに、気温の測定結果を図 5-18 に示す。室内保管機器は、平均偏差は $-0.03\sim+0.06^{\circ}\text{C}$ 以内の小さな値に収まっており、また機器間のバラツキも小さいことから当初の性能を維持していると判断される。一方、測定実施機器の平均偏差は、機器間のバラツキが大きくなっているが、最大でも -0.1°C 程度で測定に支障のない範囲に収まっている。なお、霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺に設置した機器は 4 台とも正の平均偏差を生じているが、全般的には負偏差の傾向が強い。標準偏差については、大半の機器が室内保管機器同様に 0.1°C 以内に収まっているが、皇居外苑周辺の草地日なたに設置した機器が他の機器より大きく 0.25°C を超えている。

次に、湿度の測定結果を図 5-19 に示す。室内保管機器は、平均偏差は $\pm 0.4\%$ 以内の小さな値に収まっており、また機器間のバラツキも小さく当初の性能を維持していると判断される。一方、測定実施機器は $1\%\sim 5\%$ の正の平均偏差となり、屋外環境にさらされると少しずつ湿度の測定値が上昇する傾向があると言える。標準偏差については、室内保管機器は 0.4% 以下、測定実施機器は少し値が大きくなるが、皇居外苑周辺と江の島ヨットハーバー周辺の草地日なたに設置した機器を除き 0.8% 以下と小さい値である。測定実施機器の平均偏差が $1\%\sim 5\%$ で、標準偏差は 0.8% 以下と小さく、湿度測定としては大きなずれを生じたわけではない。

機器全体の評価として、WBGT の算出結果について確認する (図 5-20)。平均偏差については、測定実施機器は湿度の上昇傾向を受けて正の平均偏差を生じているが、その値は $0.2\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ の小さな値である。更に、測定実施機器の標準偏差は殆どの機器室内保管機器よりわずかに大きい 0.05°C 前後の値に保たれている。皇居外苑周辺の草地日なたに設置した機器が他より大きい、それでも 0.2°C 程度で値に収まっている。

以上の結果から、WBGT 値が 24°C 以下の環境での測定ではあるが、本業務での WBGT 測定値の利用・評価に支障を及ぼすような測定精度の劣化は生じていないと判断される。

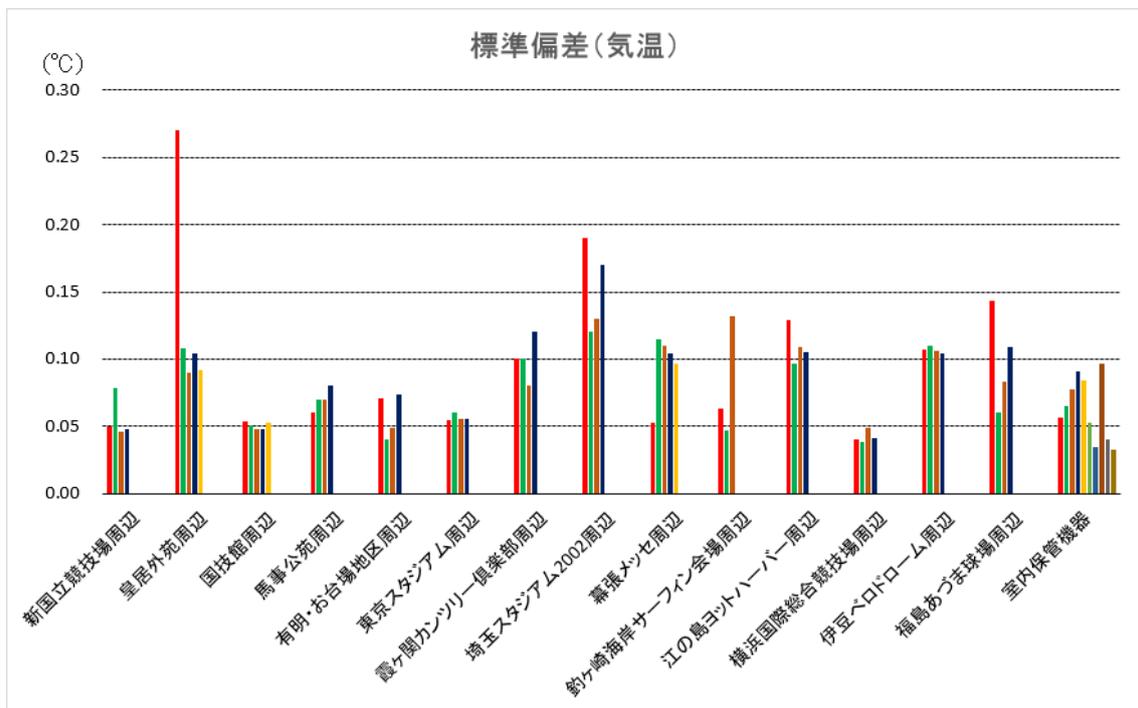
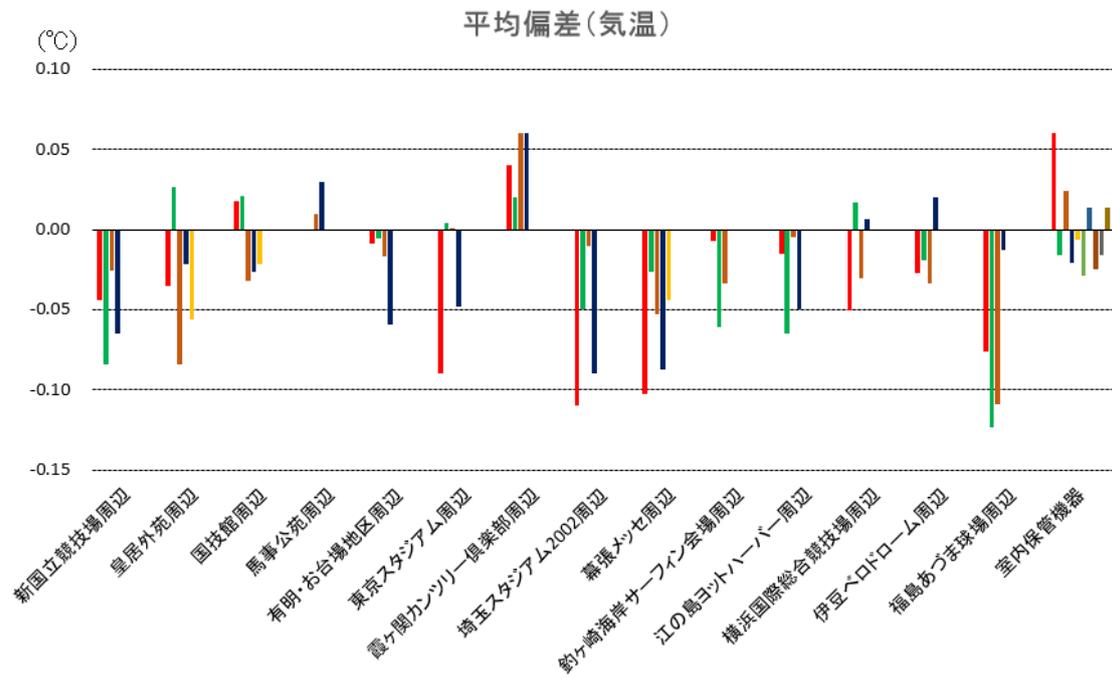


図 5-18 各機器の気温の平均偏差と標準偏差

棒グラフの色は、赤（草地日なた）、緑（草地日陰）、橙（コンクリ日なた）、紺（コンクリ日陰）、黄（草地日なた（単独））。室内保管機器の個別の色には意味は無い。

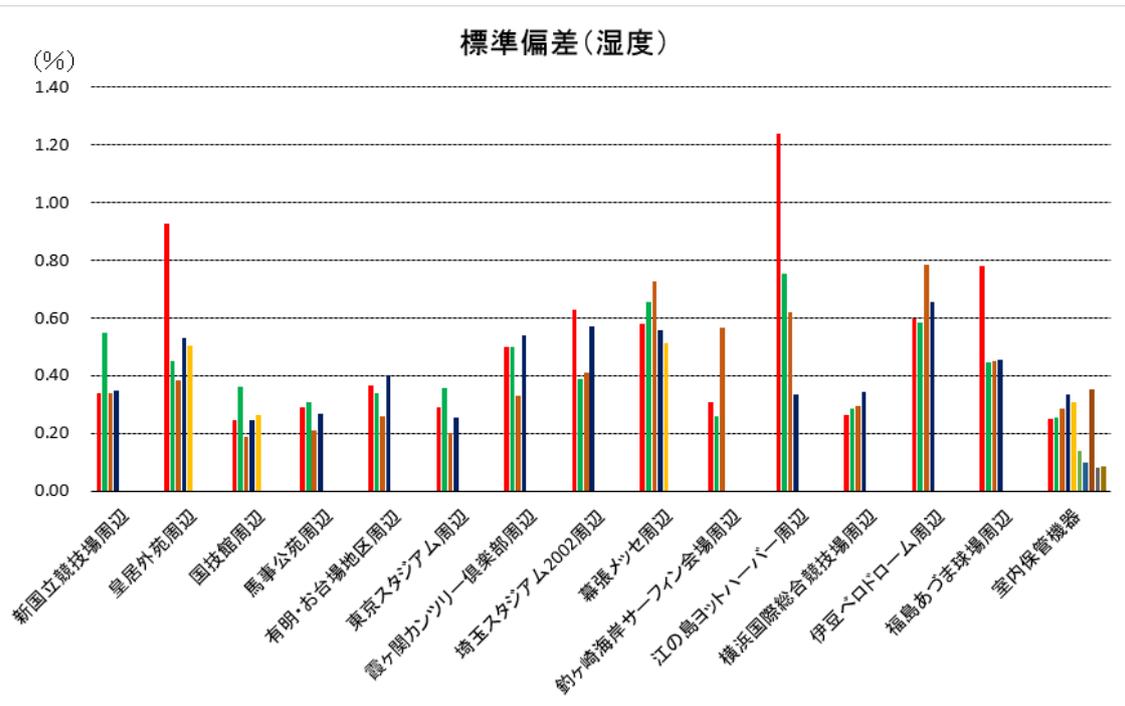
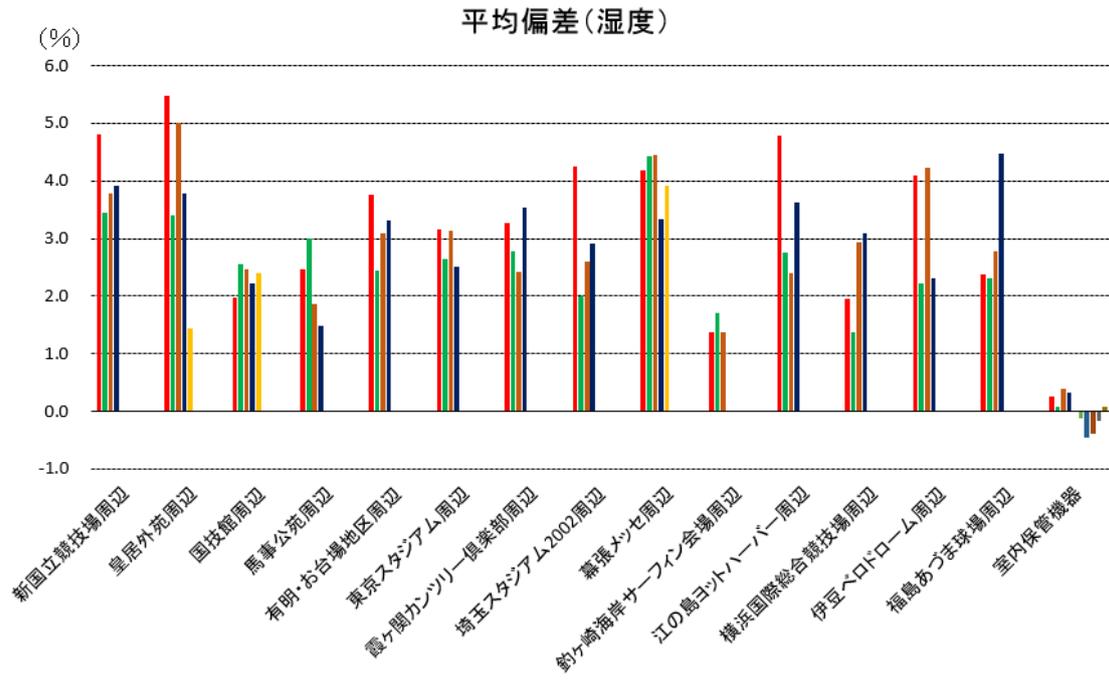


図 5-19 各機器の湿度の平均偏差と標準偏差

棒グラフの色は、赤（草地日なた）、緑（草地日陰）、橙（コンクリ日なた）、紺（コンクリ日陰）、黄（草地日なた（単独））。室内保管機器の個別の色には意味は無い。

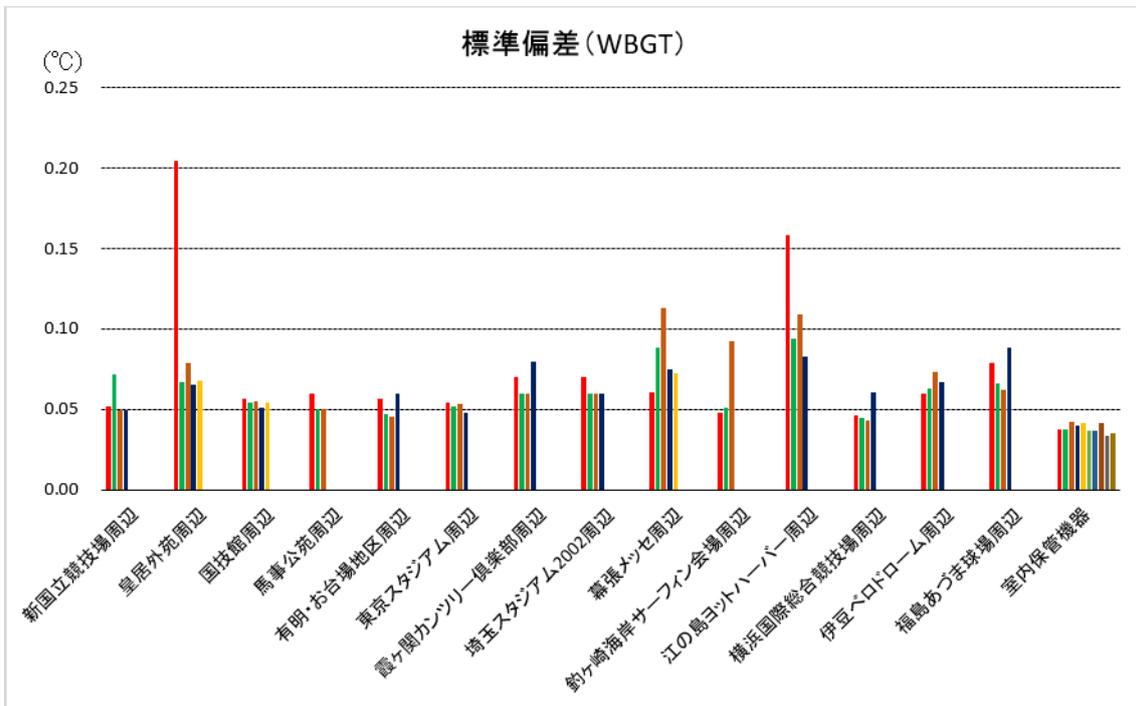
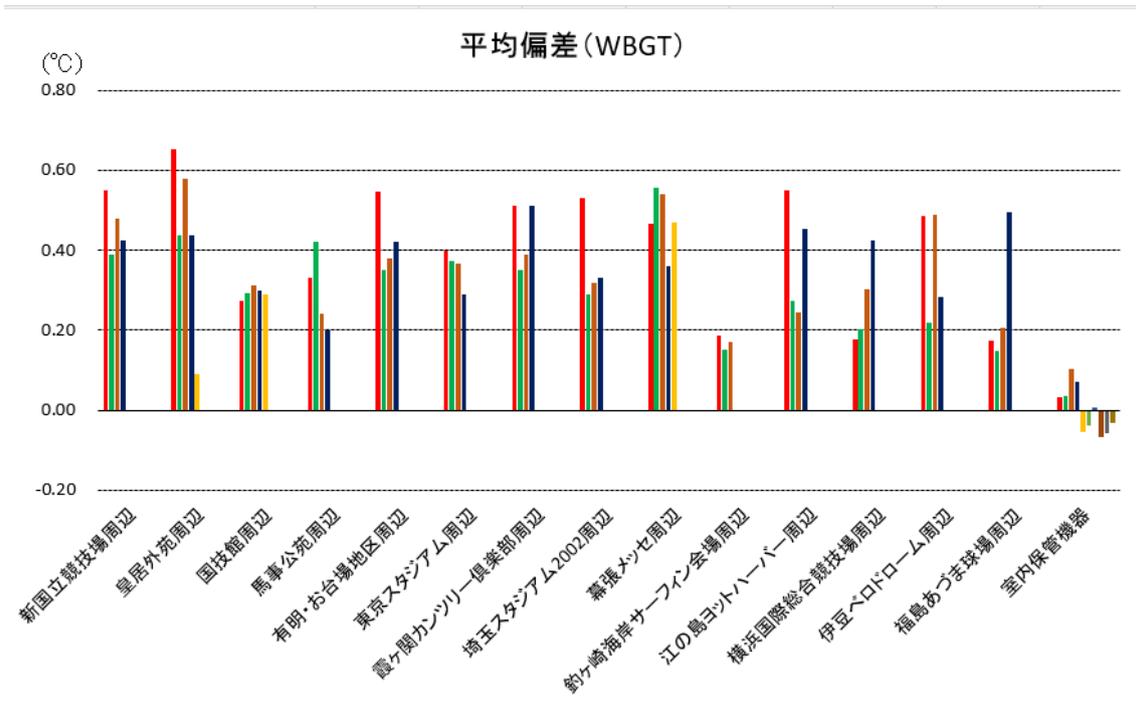


図 5-20 各機器の WBGT の平均偏差と標準偏差

棒グラフの色は、赤 (草地日なた)、緑 (草地日陰)、橙 (コンクリ日なた)、紺 (コンクリ日陰)、黄 (草地日なた (単独))。室内保管機器の個別の色には意味は無い。