

7. 2 比較測定の結果

測定結果を図 7-6 に示した。ISO 型については、8/15 の降雨により、装置内部に水が浸入し測定装置が故障した。その後は代替機を用意し、人の管理下で測定可能な 8/18、8/21、8/29 の一部のみ測定した。自然通風型については、8/14~16 の雨天時のデータの一部が欠測となった。

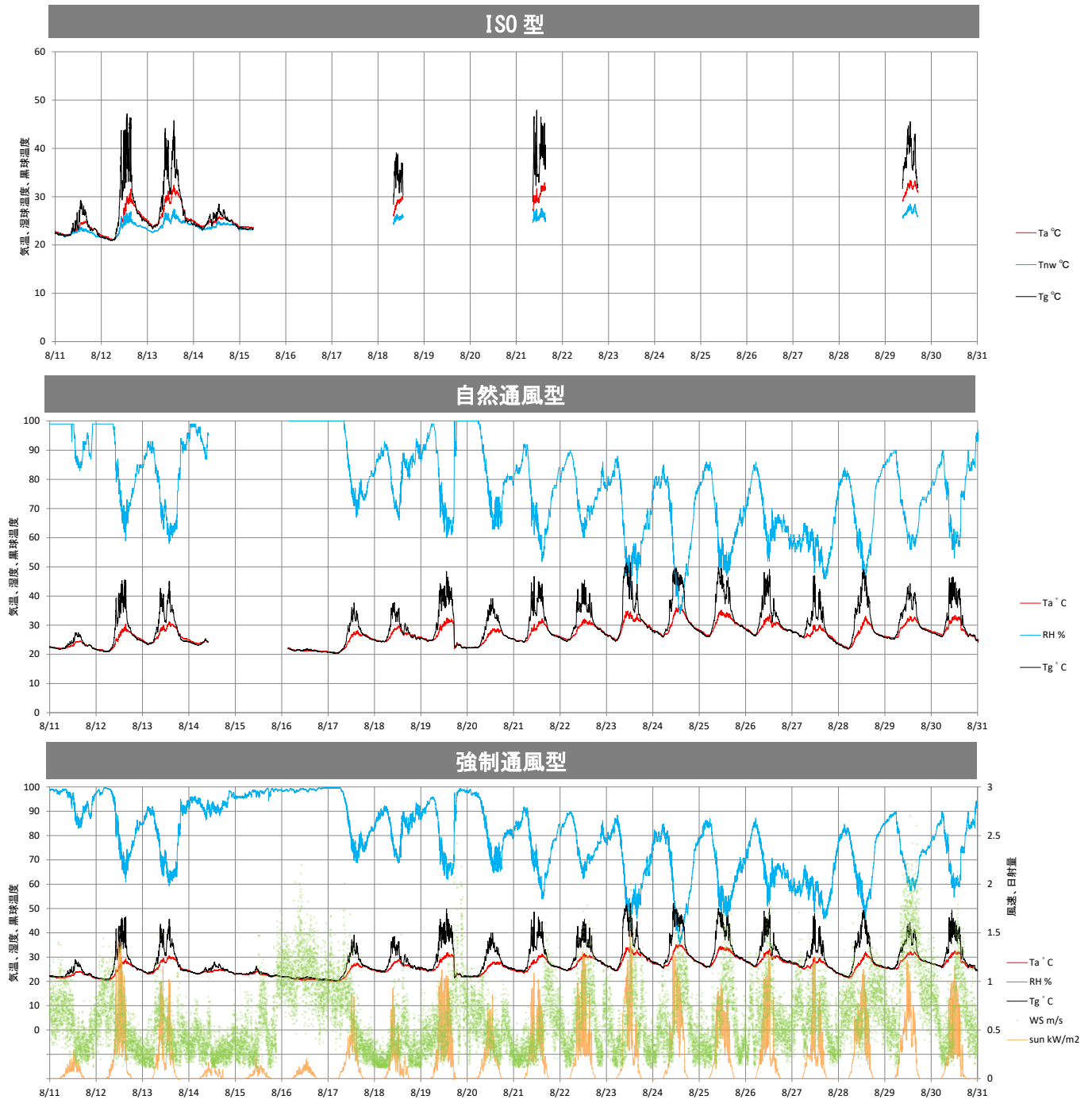


図 7-6 観測データ

比較観測で得られたデータにつき、以下の項目を検討した。

- (1) 自然通風型と強制通風型の差異
- (2) 自然通風型と ISO 型の差異
- (3) 強制通風型と ISO 型の差異
- (4) アスマン通風型と ISO 型の差異
- (5) ISO 型における直達日射の影響
- (6) 湿球温度の換算方法の違いによる差異

なお、電子式の湿度計で計測を行った場合、湿球温度は相対湿度センサーの測定値と気温・気圧等から換算する必要がある。気象観測要素から湿球温度を求める場合は、例えば、Iribarne J. V. and W. L. Godson (1981) による式 (7.1) ~ (7.4) で、気温 (T_a)、露点温度 (T_d)、気圧 (p) を用いて求める。

T_w の一次推定値 $T_{w(1)}$ を、以下の式により求める。

$$T_{w(1)} = (T_a \times f \times p + T_d \times s) / (f \times p + s) \quad (\text{式 7.1})$$

$$\text{ここに、 } s = (e_s - e_d) / (T_a - T_d)$$

$$e_s = \exp(C_0 - C_1 \times T_a - C_2 / T_a)$$

$$e_d = \exp(C_0 - C_1 \times T_d - C_2 / T_d)$$

$$C_0 = 26.66082, C_1 = 0.0091379024, C_2 = 6106.396$$

$$f = 0.0006355(\text{K}^{-1}) = C_p / (L \times \epsilon), C_p = 1004 (\text{JK}^{-1}\text{Kg}^{-1})$$

$$L = 2.54 \times 10^6 (\text{JKg}^{-1}), \epsilon = 0.622$$

次に、二次推定値 $T_{w(2)}$ を、以下の補正式により求める。

$$T_{w(2)} = T_{w(1)} - d_e / d_{er} \quad (\text{式 7.2})$$

$$\text{ここに、 } d_e = f \times p \times (T_a - T_w) - (e_w - e_d)$$

$$d_{er} = e_w \times (C_1 - C_2 / T_w^2) - f \times p$$

この補正を三次補正值まで繰り返すことで、 0.1°C 以内に T_w の推定値が収束するので、この収束した T_w を計算値として用いる。

なお、露点温度 T_d ($^\circ\text{C}$) が求められていない場合については、乾球温度を T_a ($^\circ\text{C}$)、相対湿度を H (%) としたときの水蒸気圧 e の関係式、

$$H(\%) = e / e_s \times 100 \quad (\text{式 7.3})$$

$$\text{ここに、 } e = 6.1078 \times 10^{((T_d \times A) / (T_d + B))}$$

$$e_s = 6.1078 \times 10^{((T_a \times A) / (T_a + B))}$$

$$A = 7.5, B = 237.3 \quad (\text{水})$$

$$A = 9.5, B = 265.5 \quad (\text{氷})$$

を T_d について解いた次式により求める。

$$T_d = (-C_2 - C_3) / C_4 \quad (\text{式 7.4})$$

$$\text{ここに、 } C_1 = \log_{10}(H/100), C_2 = (T_a \times A \times B) / (B + T_a)$$

$$C_3 = C_1 \times B, C_4 = C_1 - A \times B / (B + T_a)$$

また、ISO7243 では Annex-D に相対湿度センサーの測定値から自然湿球温度への換算式が掲載されており、式(7.5)～(7.6)により換算する。

$$4.18 \times v^{0.444}(T_a - T_{nw}) + 10^{-8} \times [(T_r + 273)^4 - (T_{nw} + 273)^4] - 77.1 \times v^{0.421}[p_{as}(T_{nw}) - RH \times p_{as}(T_a)] = 0 \quad \text{式(7.5)}$$

ここに、 T_w :自然湿球温度(°C)、 T_a :気温(°C)、 T_r :平均放射温度(°C)

v :風速(m/s)、RH:相対湿度、

$p_{as}(T_a)$:気温 T_a における飽和水蒸気圧(kPa)

$p_{as}(T_w)$:温度 T_w における飽和水蒸気圧(kPa)

なお、平均放射温度： T_r は、以下の式により求める。

$$\bar{T}_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v^{0.6}}{\varepsilon_g \times d^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad \text{式(7.6)}$$

ここに、 T_r :平均放射温度(°C)、 T_g :黒球温度(°C)、 d :黒球の直径(m)、

v :風速(m/s)、 T_a :気温(°C)、 ε_g :黒球の放射率

以下で測定方法の違いによる湿球温度等の比較分析を行うが、式(7.1)～(7.4)を用いて換算した湿球温度等は「Iribarne 換算」、ISO7243 の式(7.5)～(7.6)により換算した自然湿球温度等は「ISO 換算」と表記する。ISO 換算する際の風速は、特に断らない限り仮定値として 0.5m/s を用いている。

また、WBGT はいずれの場合も式(7.7)により求める。

$$wbgt = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_{g(0.15)} + 0.1 \times T_a \quad \text{式(7.7)}$$

ここに、 T_w : 湿球温度(°C)、 $T_{g(0.15)}$: 直径 150mm 黒球温度(°C)、 T_a :気温(°C)

(1) 自然通風型と強制通風型の差異

自然通風型と強制通風型の乾球温度、湿球温度、WBGT を比較したところ、通風方式による差はほとんど見られなかった (図 7-7)。

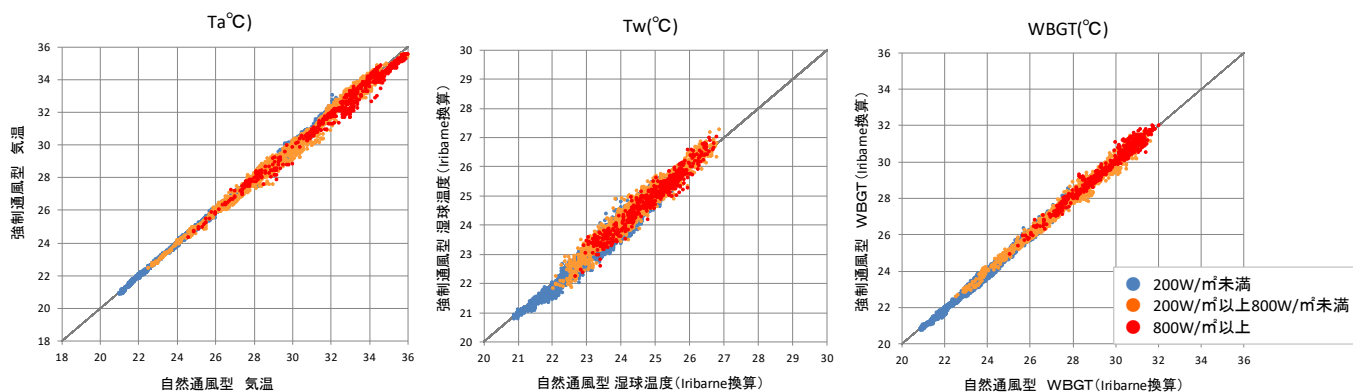


図 7-7 自然通風型と強制通風型の比較

(2) 自然通風型と ISO 型の差異

気温については、日射が強い場合に、ISO 型がやや高くなる傾向 (気温のシェルターが小さく温まりやすことによる) が見られるが、おおむね良好な関係にあった。自然通風型で測定した湿球温度 (Iribarne 換算) と ISO 型で測定した自然湿球温度は、日射の強い場合に、自然湿球温度にくらべて湿球温度が 2~3°C 程度低くなった。WBGT は、湿球温度の影響で日射が強い場合の WBGT に 2°C 程度の差が見られた。風速の違いによる影響は明確ではなかった。(図 7-8)

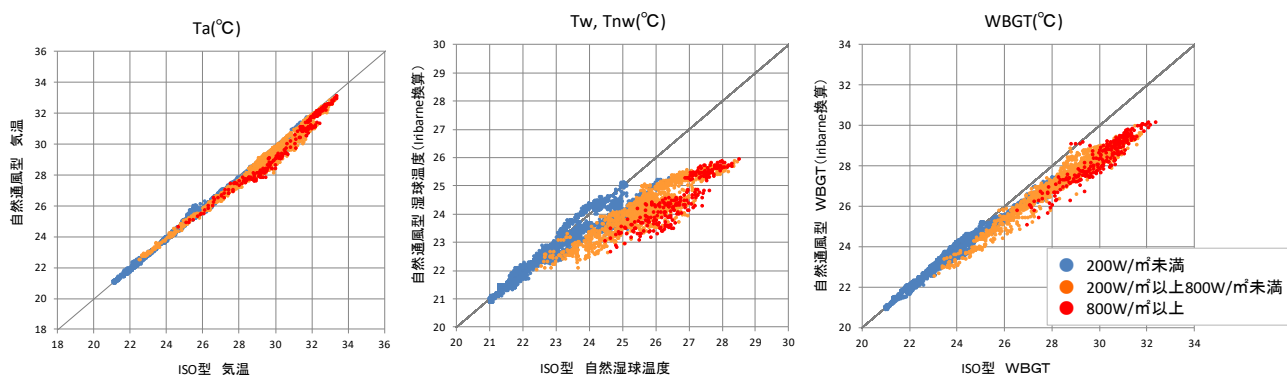


図 7-8 自然通風型 (Iribarne 換算) と ISO 型の比較

ISO 型の自然湿球温度が日射が強い際に高くなるのは、ISO 型の湿球温度センサに日射が当たる影響と考えられる。自然通風型の相対湿度センサーの測定値を用いて、日射を考慮した ISO7243:Annex-D の換算式により自然湿球温度 (ISO 換算) を求め、気温、自然湿球温度、WBGT について比較した (図 7-9)。気温、自然湿球温度、WBGT とも、おおむね良好な関係が見られた。

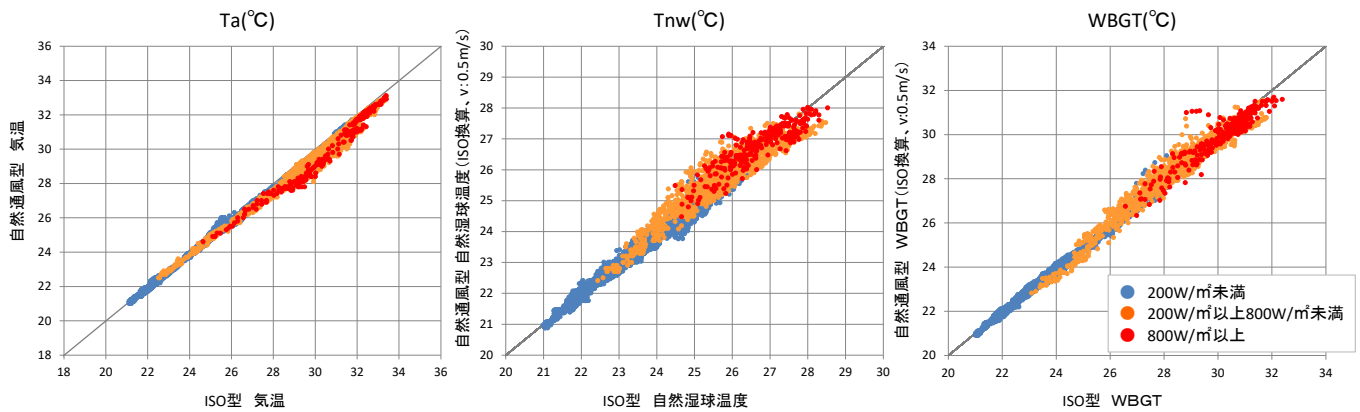


図 7-9 自然通風型（ISO 換算）と ISO 型の比較

(3) 強制通風型と ISO 型の差異

気温は、風速が弱く日射が強い状況で、強制通風型の気温が 1~2°C 程度低くなる傾向であった。強制通風型で測定した湿球温度（Iribarne 換算）と ISO 型で測定した自然湿球温度は、日射の強い場合に、自然湿球温度にくらべて湿球温度が 2~3°C 程度低かった。WBGT は、湿球温度のの影響で日射が強い場合の WBGT に 2°C 程度の差が見られた（図 7-10）。

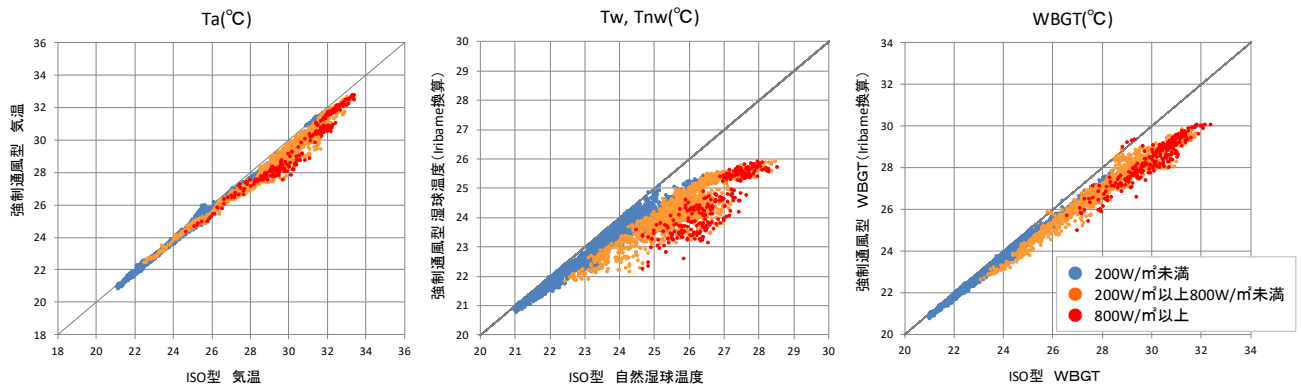


図 7-10 強制通風型（Iribarne 換算）と ISO 型の比較

次に、強制通風型の相対湿度センサーの測定値を用いて ISO7243:Annex-D の換算式により自然湿球温度（ISO 換算）を求めた場合と ISO 型による測定値を比較した（図 7-11）。なお、換算する際に用いる風速は、強制通風型に併設した 2 次元超音波式風速計の実測値を使用する。

風速 0.3m/s 未満で ISO 型による自然湿球温度測定値は強制通風型の自然湿球温度（ISO 換算）より最大で 1°C 程度低くなり、その結果、WBGT については強制通風型（ISO 換算）の方が ISO 型より最大で 0.4°C 程度高くなった（図 7-11(c)）。これは ISO7243:Annex-D の換算式の特徴で、この換算式を用いた場合は弱風時には自然湿球温度が高めに換算されることに留意する必要がある。

一方、風速 1.0m/s 以上では、気温、自然湿球温度、WBGT とともに、ISO 型の測定値が高

温になるほどやや高くなる傾向にあるが、これは ISO 型の温度計のシェルターが小さく熱が溜まりやすいことに起因している。なお、全データでは、気温、自然湿球温度、WBGT ともにおおむね差がなく良好な関係にある。

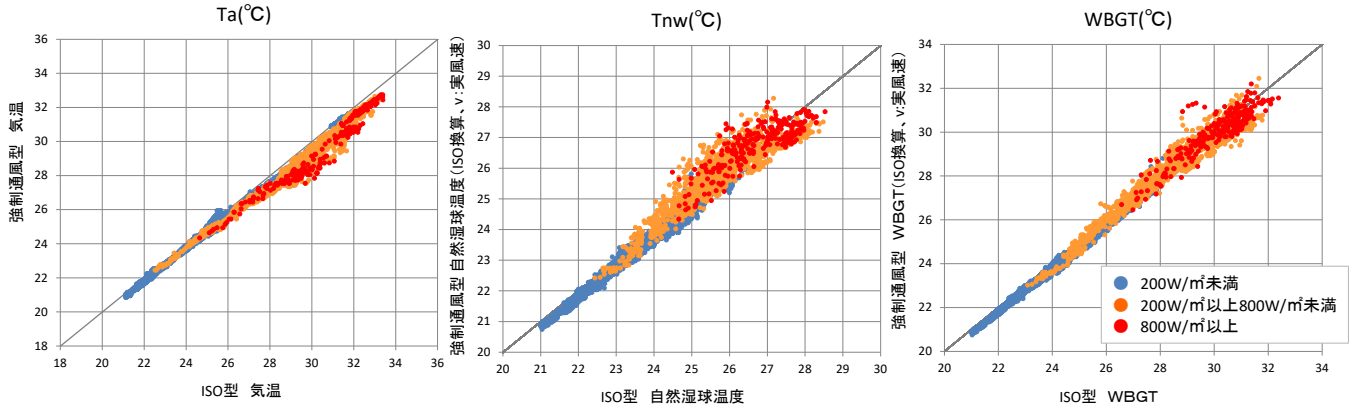


図 7-11 (a) ISO 型と強制通風型（実風速による ISO 換算）の比較（全データ）

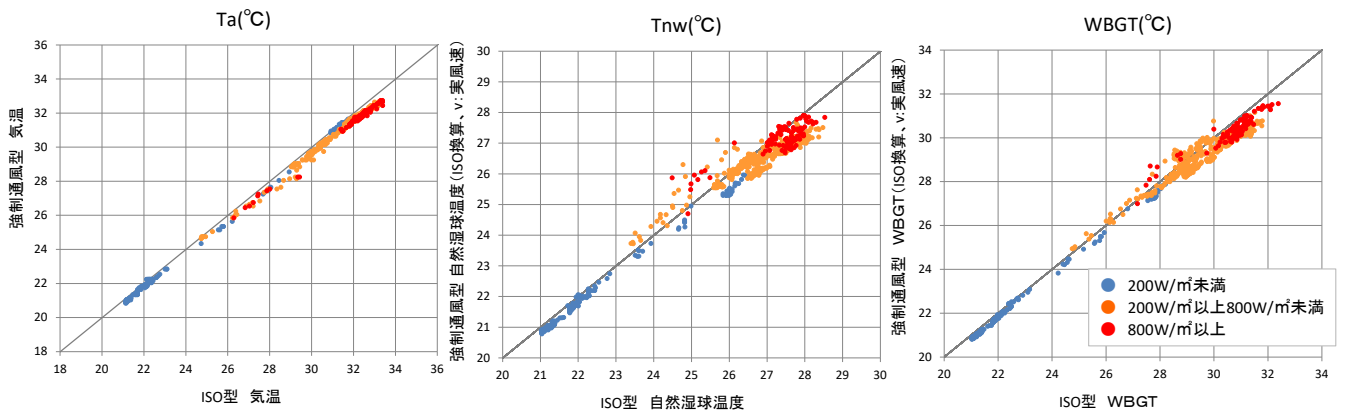


図 7-11 (b) ISO 型と強制通風型（実風速による ISO 換算）の比較（風速 1.0m/s 以上）

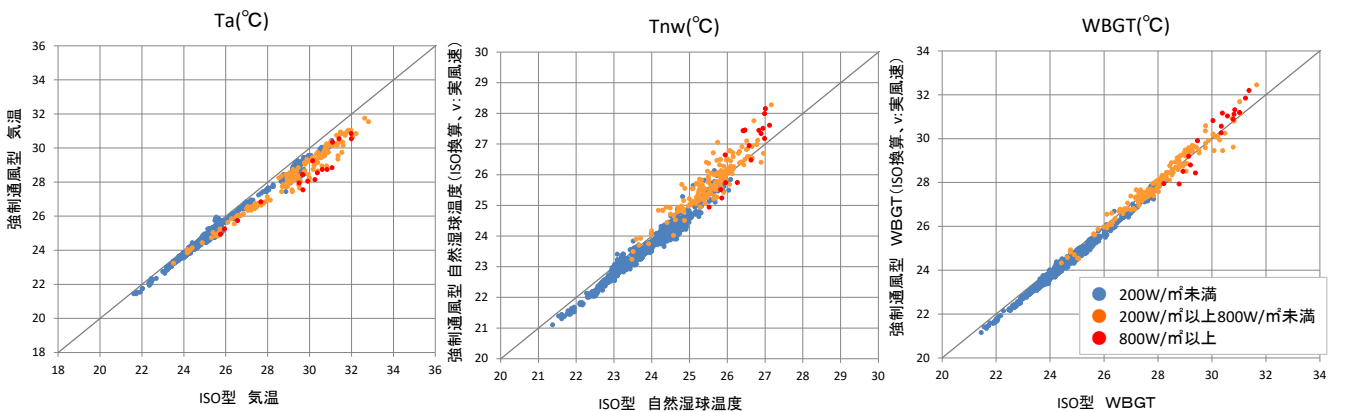


図 7-11 (c) ISO 型と強制通風型（実風速による ISO 換算）の比較（風速 0.3m/s 未満）

(4) アスман通風型と ISO 型の差異

アスман通風型と ISO 型を比較すると、日射を受けないアスман通風型の湿球温度は、ISO 型の自然湿球温度にくらべて 0.5°C 前後低く、その影響により WBGT はアスман通風型の方が最大で 0.5°C 程度低くなった (図 7-12)。

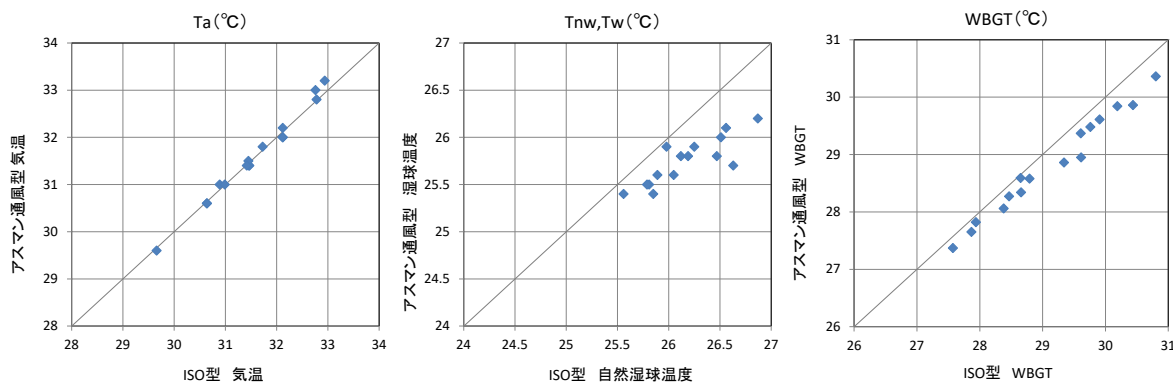


図 7-12 ISO 型とアスман通風型の比較

(5) ISO 型における直達日射の影響

ISO 型の自然湿球温度について、日射の影響を見るため、日射遮蔽用のシェードを装着したものとしていないものを比較した (図 7-13)。日射を当てた場合 (Sun) と日射を遮蔽した場合 (Shade) では、特に日射が強い場合に、日射を遮蔽した方が $1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ 程度低くなった。その結果、日射を遮蔽した場合 (Shade) では WBGT は最大で 1°C 程度低くなった。なお、WBGT の計算の際には、気温、黒球温度については日射を当てた場合の測定値を用いた。

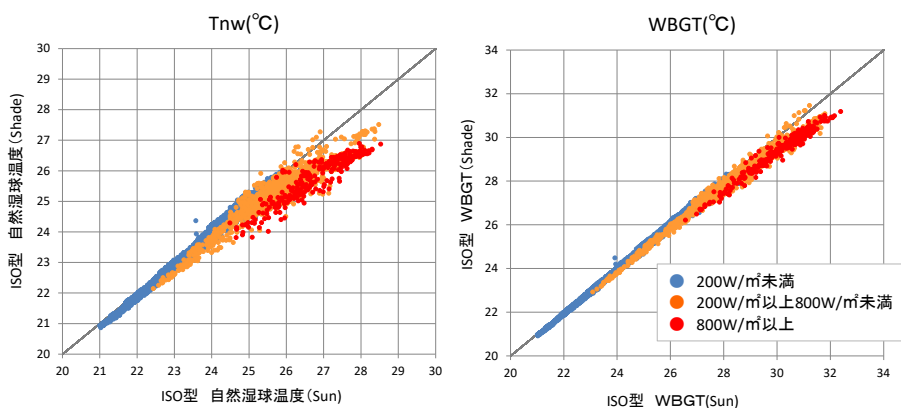


図 7-13 ISO 型における直達日射の有無の比較

(6) 湿球温度の換算方法の違いによる差異

(2) と (3) の前半の解析結果から、ISO 型の自然湿球温度は、気象観測要素から求めた湿球温度より高くなることが分かった。一方、(4) および (5) の解析結果より、この差は主に、ISO 型の湿球温度センサーに日射が当たることに起因すると推定される。また、(2) と (3) の後半の解析結果から、ISO7243:Annex-D を用いた換算値は、ISO 型の自然湿球温度とおおむね一致することから、湿球温度の換算方法の違いによる差異を検討するため、自然通風型の測定値を Iribarne 換算して求めた湿球温度と、同じ測定値を ISO 換算により求めた自然湿球温度を比較し、図 7-14 に示した。

日射が強い場合に、湿球温度は自然湿球温度より 2~3℃程度低くなる傾向が見られた。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℃程度低くなる傾向であった。

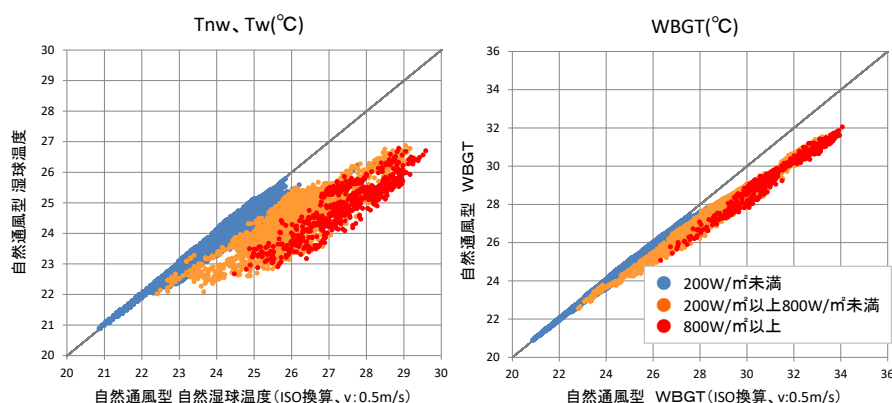


図 7-14 湿球温度 (Iribarne 換算) と自然湿球温度 (ISO 換算) の比較