

6 2020 年の情報提供に向けての調査開発等

6. 1 各地区での WBGT 予測システムの開発

オリンピック・パラリンピック開催時に各会場周辺の暑熱環境を予測し、熱中症予防情報として発表するために必要な WBGT 予測システムの開発を行った。

(1) WBGT 予測システムの概要

WBGT 予測の手法は、WBGT の計算に必要な気象要素 (Ta,Tw,Tg) を求め、

$$\text{WBGT}(\text{℃}) = \text{Tw} \times 0.7 + \text{Tg} \times 0.2 + \text{Ta} \times 0.1$$

ここで、Tw：湿球温度 (℃)、Tg：黒球温度 (℃)、Ta：乾球温度 (℃)

により WBGT 予測値を求めることである。

基本的には気象庁数値予報資料から気象要素 (Ta,Tw,Tg) を求めて算出する。しかし、数値予報資料の利用のみでは、会場周辺の局地的な WBGT 予測値としては精度が不十分であることが想定されるため、本業務で実施している各地区の WBGT 等観測値を用いて、補正処理を行うことで、精度向上を図る。処理の概要を、図 6-1 に示す。

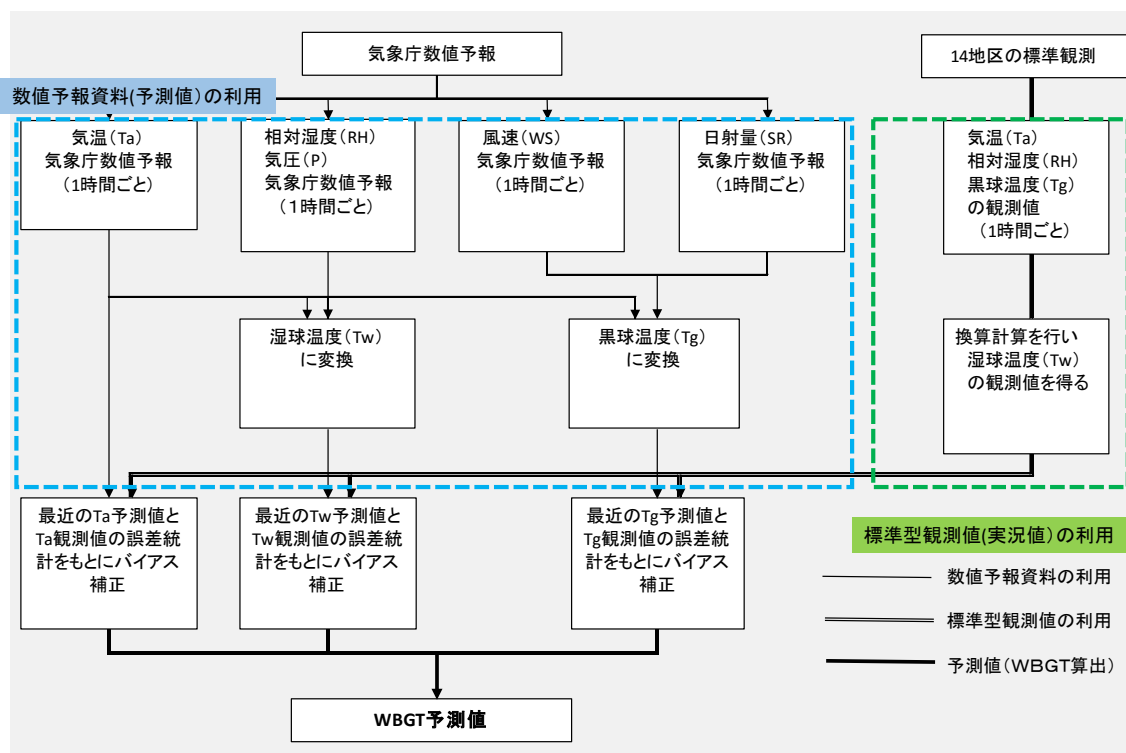


図 6-1 WBGT 予測手法の概要

気象庁数値予報資料から気象要素 (Ta,Tw,Tg) を算出する。この気象要素 (Ta,Tw,Tg) と各地区の測定から得られる気象要素 (Ta,Tw,Tg) を比較することで、予測誤差を求めることができる。予測の対象の前日～数週間前の補正値を統計処理し、得られた補正係数を加えることで、数値予報資料から算出した予測値を修正して最終的な予測値とする。この手法で得られる補正係数は日々緩やかに変動するため、予測計算の度ごとに再計算し、より信頼性の高い補正係数に更新する。

○数値予報結果からオリパラ地点の気象要素の推定について

オリパラ主要会場周辺等の予測値を数値予報値から推定する手順を図 6-2 に示す。図 6-2 に示したように、オリパラ主要会場周辺等の予測値として、その地点から最も近い数値予報の格子点の値を使用する。

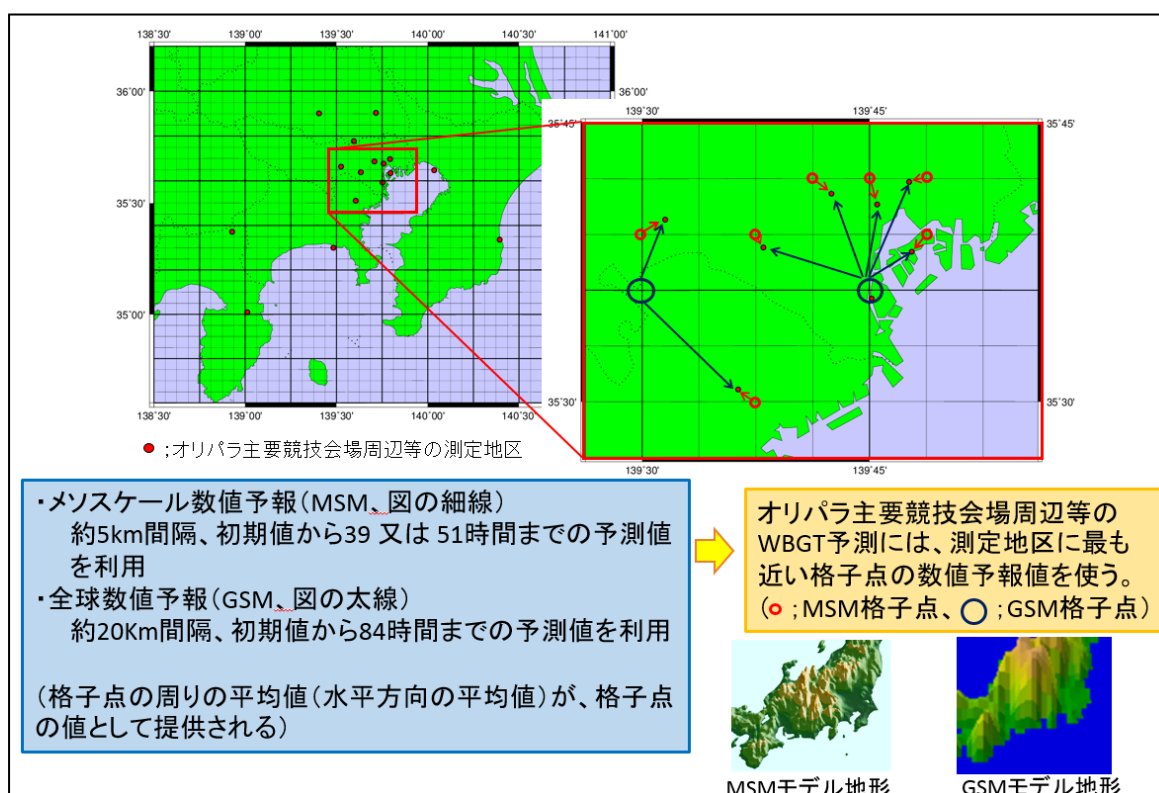
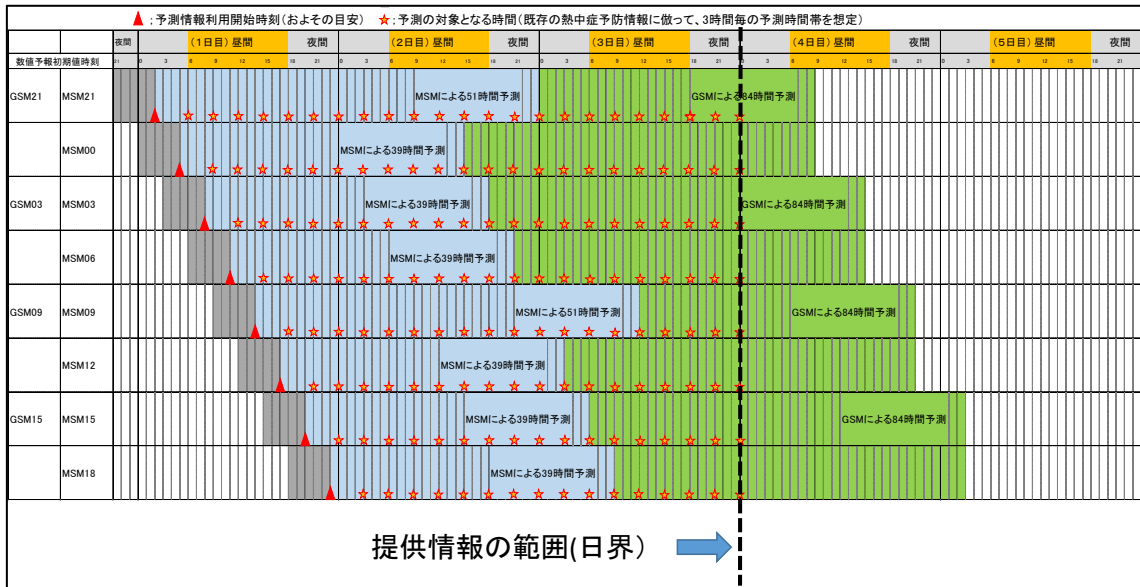


図 6-2 数値予報の格子点配置とオリパラ主要会場周辺等への適用

○WBGT 予測時間と情報作成スケジュールについて

現在、開発・試行中の予測情報の予測対象時間と情報作成スケジュールを図 6-3 に示す。



図示したスケジュールにより、以下の情報作成を準備している。

- ・数値予報を反映して3時間毎にWBGT予測情報を更新する。(MSM3時毎、GSM6時間毎)
- ・予測時間の短いMSMによる予測と長いGSMによる予測を組み合わせ、熱中症予防情報サイトと同様に翌々日までの予測情報を利用可能とする。

(2) 17 地区の WBGT 予測システムの開発状況

17 地区の WBGT 予測技術の現在の開発状況は以下のとおりである。

これまでの実施事項としては、

- ・気象庁数値予報モデル（MSM・GSM）を用いた WBGT 予測値を、標準点データで逐次補正することで、精度向上を図る手法による予測システムを開発した。
- ・上記のシステムによる予測情報作成実験を 2019 年夏期（7/1～9/16）の期間について、1 日 8 回の模擬予測を実行した。

これまでの模擬予報から得られた成果として、

- ・ 予測時間の長さ（2 日前、1 日前、当日）に依存して、予測精度に差はあるものの暑熱の出現等について実用的な精度の予測が実現できている。

今後の予測精度の改善については、

- ・最新の実況を用いて、目先数時間の予測精度を改善する短時間予測補正手法を開発した（この開発内容については、6章3節参照）。
- ・上記の短時間予測補正を組み込んだ、より精度の向上したシステムを作成した。

以下に、これまで得られた成果の概要を紹介する。

○会場周辺の WBGT 予測例

図 6-4 に開発した予測システムによる会場周辺の WBGT 予測例を示す。(a)は新国立競技場の周辺、(b)は霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺の WBGT 予測例（1 時間間隔予測の時系列）である。

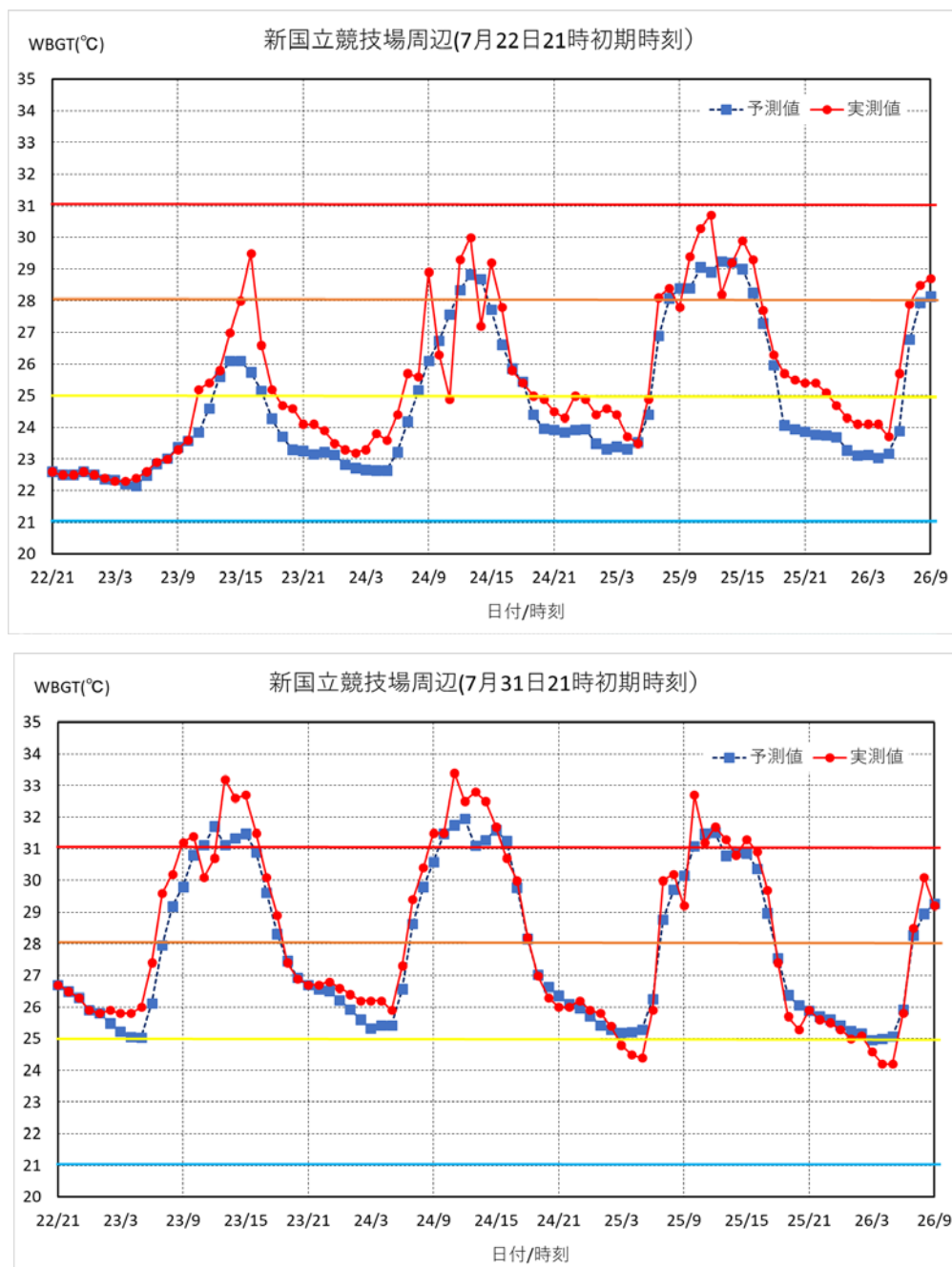


図 6-4(a) 予測システムによる会場周辺 WBGT 予測例ー
新国立競技場周辺（上図:7 月 22 日 21 時初期値、下図 : 7 月 31 日 21 時初期値）

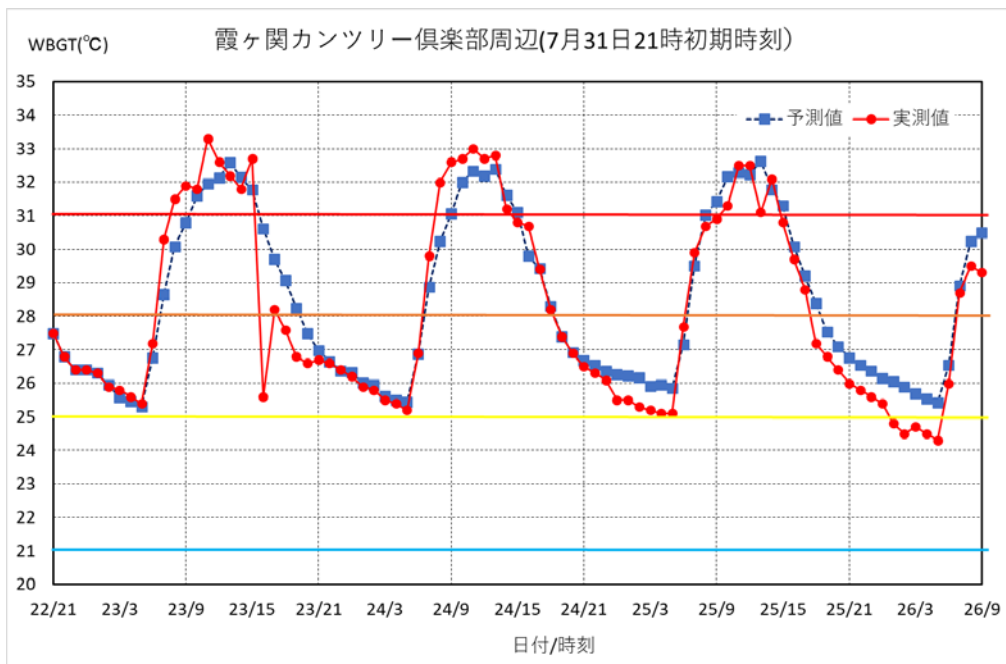
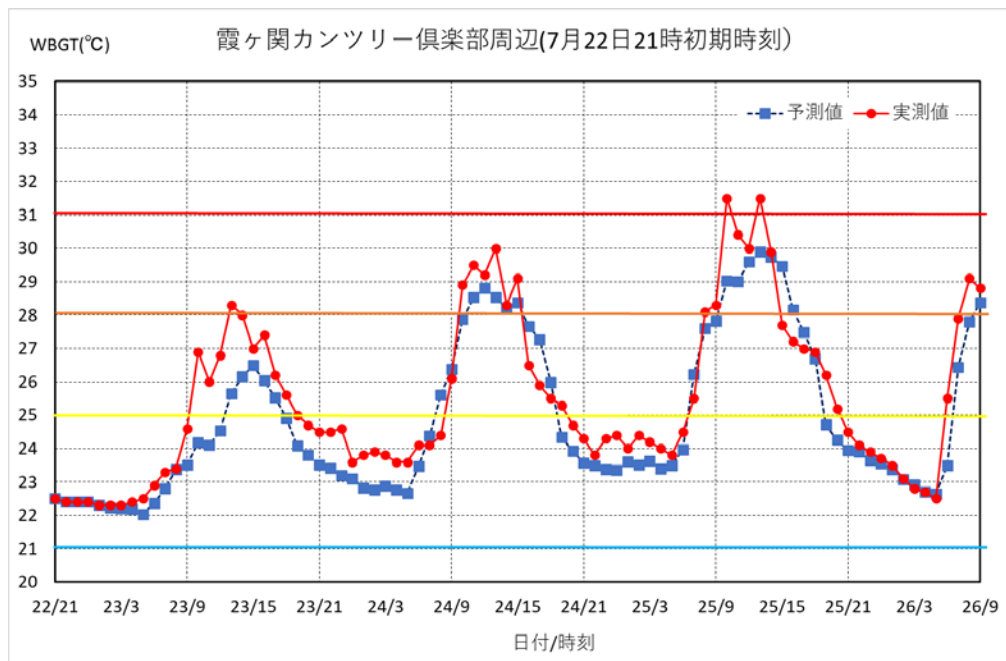


図 6-4(b) 予測システムによる会場周辺 WBGT 予測例－
霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺

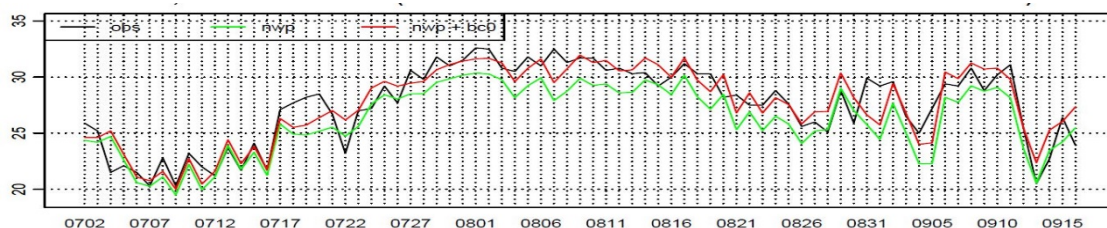
(上図:7月22日21時初期値、下図:7月31日21時初期値)

各図の上段はオリンピック期間開始の前日(7月23日早朝)に相当する時期に提供されると想定される予測例である。この時期は、それ以前の比較的低温で推移した時期から日中の WBGT が急激に高くなった時期であるが、2日目、3日目の高温へ推移する傾向をおおむね予測できている。

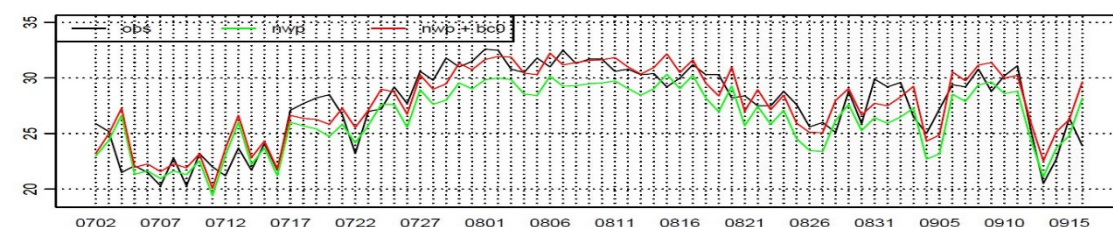
各図の下段は、本夏の最も暑かった時期 8 月の最初 3 日間を対象として 8 月 1 日早朝に提供される想定予測例である。この例でも、連日の危険ランク（WBGT $\geq$ 31 度）に達する暑熱状況を良好に予測できている。

○2 日先までの WBGT 予測の推移

新国立競技場周辺 当日の早朝に予測を行った場合 （当日 0 時初期値の数値予報 (MSM) を用いた 14 時の WBGT 予測）



新国立競技場周辺 前日の早朝に予測を行った場合 （前日 0 時初期値の数値予報 (MSM) を用いた 14 時の WBGT 予測）



新国立競技場周辺 前々日の早朝に予測を行った場合 （3 日前 21 時初期値の数値予報 (GSM) を用いた 14 時の WBGT 予測）

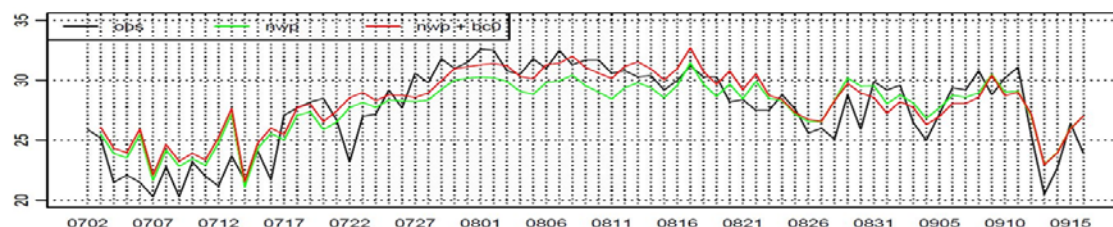


図 6-5 2019 年夏期の各日 14 時の WBGT 予測時系列

図 6-5 は、業務期間の各日の 14 時を対象とした予測値の時系列を示している。上段：当日早朝、中断：前日の早朝、下段：前々日の早朝に予測を行った場合であり、グラフの黒線：実況観測、緑線：気象庁の数値予報、赤線：バイアス補正を適用した予測値である。予測時間が短いほど、実況との予測（黒線と赤線）の差が小さいが、前々日早朝からの予測の場合でも、各日の高 WBGT を良好に予測できている。

また、予測の元データとしてもちいた数値予報値（緑線）は実況より低めの値となる場合が多いが、バイアス補正済みの予測値（赤線）は、実況観測（黒線）にかなり近い値になっており、開発された逐次バイアス修正システムにより WBGT 予測の精度が大幅に向上していることが示されている。

○暑熱時間帯（12～15 時）の予測精度

暑熱時間帯の予測精度を統計的に表現するため、暑熱時間帯（12～15 時）の各正時の「嚴重警戒」レベル（WBGT $\geq$ 28℃）の出現について、観測と予測の関係について、評価した。観測と予測の関係については、図 6-6 予測と観測の関係の分割表 に示したように、観測された「嚴重警戒」レベルの値が正しく予測されている「適中」の場合のほか、見逃し（観測されたが、予測されなかった）、空振り（観測されなかったが、予測されていた）などの組み合わせがある。予測の正確さを評価する場合は、「適中」がより多く「見逃し」や「空振り」がより少なくなることが望ましい。

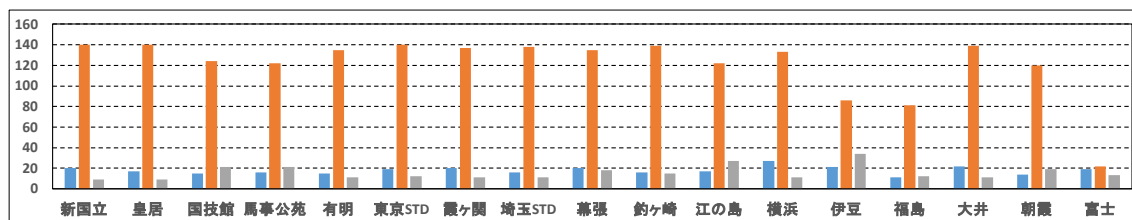
分割表の概念図			分割表の例(新国立競技場の当日早朝予測)		
予測	観測		予測	観測	
	28℃以上	28℃未満		28℃以上	28℃未満
	28℃以上	28℃未満		28℃以上	28℃未満
28℃以上	的中	空振り	28℃以上	140	9
28℃未満	見逃し		28℃未満	20	

図 6-6 予測と観測の関係の分割表

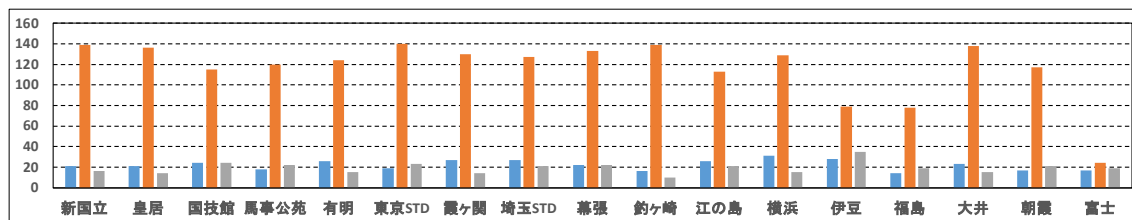
図 6-7 は、WBGT28℃を閾値とした分割表を 17 地区すべてについて作成し、回数を棒グラフにしたもので、上段：当日の早朝に予測を行った場合、中段：前日の早朝に予測を行った場合、下段：前々日の早朝に予測を行った場合、である。いずれも、逐次バイアス補正を適用した予測結果についてのものである。

結果を見ると、いずれの日でも、適中の比率が極めて高く、当日、前日、前々と予測期間が長くなるにつれて、見逃しや空振りの回数が相対的に大きくなるものの、適中の割合はきわめて高い値に維持できており、多くの場合に正しい暑熱予測情報を提供できることが示されている。

当日の早朝に予測を行った場合 (当日0時初期値の数値予報(MSM)を用いた12~15時のWBGT予測)



前日の早朝に予測を行った場合 (前日0時初期値の数値予報(MSM)を用いた12~15時のWBGT予測)



前々日の早朝に予測を行った場合 (3日前21時初期値の数値予報(GSM)を用いた12~15時のWBGT予測)

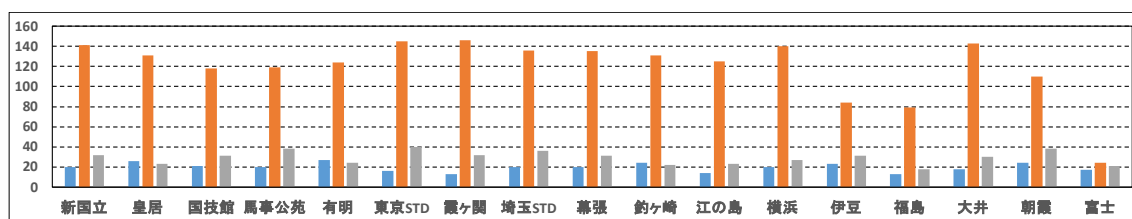


図 6-7 17 会場周辺の WBGT 予測精度評価

WBGT28℃を閾値とした分割表に基づく評価

(2020 年 7 月 1 日～9 月 15 日、12,13,14,15 時についての予測)

(3) 最新の実況観測に基づく短時間予測の補正について

これまでに報告した WBGT 予測の基盤となった数値予報は、大変複雑で大規模な計算を行うため、観測に基づく初期値の時刻から、予測値が利用できるまでに、4~5 時間を要する。実際の状況では、この 4~5 時間の間に新たな観測データが入手でき、この最新の観測値と既存の予測値の関係を利用して、目先数時間の予測をより誤差が少なくなるように補正することが可能である。

○短時間の誤差の相関について

まず、観測値と既存の予測値との誤差が得られた場合、その誤差は、何時間か後の将来の誤差とどの程度の相関があるのかを調査した。例えば最新の観測が既存の予測より高く、予測が低すぎる場合に、その後の予測も低めだろうと判断してよいか、という問題である。こ

の誤差の傾向が何時間かにわたって継続するならば、これを使ってより誤差の少なくなる方向に予測を修正することが可能になる。

この調査にあたって、以下のような状況を想定した。

- ・ WBGT 予測値（短時間補正前） 06JST 初期値 MSM のバイアス補正予測値
- ・ 観測データ 10JST までの観測データを利用する
- ・ 初期誤差 10JST における（予測値－観測値）および、これに
1～3 時間先行する誤差を含む平均値についても調査した。
- ・ 誤差相関を求める時間範囲 最新観測時刻後 1～10 時間
- ・ 統計期間 2019 年 7 月 20 日～9 月 15 日
(逐次バイアス修正が有効に反映されている期間)

午前 10 時の時点では 06 時初期値の MSM 予測値をベースとした WBGT 予測が得られるが、10 時の観測値と 06 時から 4 時間予測値との間の誤差がそれ以後の予測値（例えば 10 時から 4 時間先の短時間予測の対象時刻は 14 時）とどの程度の相関があるかを調べたわけである。

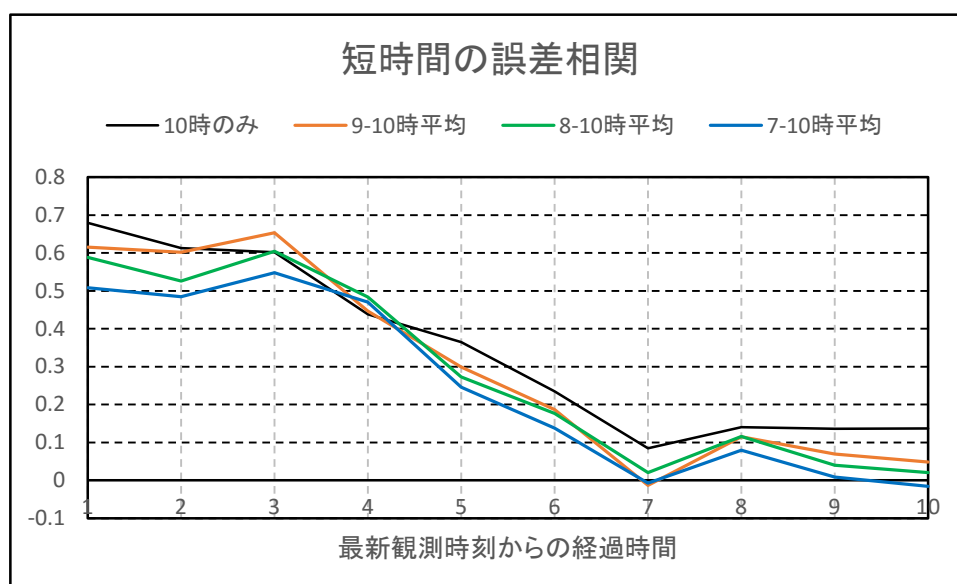


図 6-8 WBGT の予測誤差（予測値－観測値）の相関係数

図 6-8 は、一例として新国立競技場周辺についての相関係数の時間変化のグラフを示したものである。4 本のグラフはそれぞれ以下を表す。

- ・「10 時のみ」：最新の観測時刻（10 時）の誤差（予測値－観測値）とその後の時刻の誤差との相関係数
- ・「9-10 時平均」：最新の観測時刻とその 1 時間前（10 時と 9 時）の誤差の平均値と 11 時以後の各時刻の誤差との相関係数
- ・「8-10 時平均」は 8,9,10 時の誤差の平均値、「7-10 時平均」は、7,8,9,10 時の誤差の

平均値と 11 時以後の各時刻の誤差との相関係数

結果を見ると、いずれも、最新観測時刻に近い時間帯は相関が高いが 3 時間を超えると、相関が直線的に減少し、7 時間程度ではほぼ無相関となる。このことから、短時間の補正は 6 時間程度までが有効な時間範囲と判断できる。

また、全体として相関が最も高いのは最新の観測時刻（10 時）のみとの相関だが、3～4 時間後については、9,10 時の 2 時間平均や 8-10 時の 3 時間平均との誤差相関が相対的に高くなった。これ等の時間帯は、13-14 時の暑熱時間帯に対応しており、注目される。

短時間の予測補正を考える場合に、考慮すべき点として、作成時間ごとの予測の変動の問題がある。各時刻の WBGT 観測値は、それぞれの時刻の日射の強弱などを反映して、大きく変動する場合がある。単一の時刻の誤差をその後の数時間の補正に反映させる場合、予測時刻毎にその後の予測値が大きく変動する可能性があり、利用者にとって、利用しづらい情報になることが懸念される。この問題を緩和するには、初期の誤差として複数の時刻の誤差の平均値をその後の短時間補正に反映させることで、時刻毎の変動幅が比較的小さい安定した予測値を提供できる。

以上のような考察から、予測の短時間補正については、以下のような仕様とすることが望ましいと考えられる。

- ・短時間補正の時間範囲は 6 時間まで
- ・誤差の初期値としては、最新の観測時刻とそれに先行する 1～2 時間の誤差の平均値を用いる。

○短時間補正の試行結果

前述の考察に基づいた短時間補正を、2019 年の業務期間について適用し精度評価をおこなった結果を以下に報告する。精度評価の試行の内容は以下のとおりである。

- ・対象地点：新国立競技場周辺
- ・統計期間：2019 年 7 月 1 日～9 月 15 日
- ・対象時間：10 時から 6 時間後（16 時）まで
- ・短時間補正手法の内容

06JST 初期値 MSM のバイアス補正予測値について、9 時と 10 時の観測値と対応する予測値（3 時間予測と 4 時間予測）との誤差の平均値を、11-16 時の予測時間帯に内挿（10 時で 1.0～17 時で 0.0 となる直線関数の重みをかける）した値を短時間補正值とし、その補正值を、それぞれの時刻の予測値から減算した。

短時間補正の精度検証の結果を図 6-9 に示す。

グラフの横軸は最新観測時刻 10 時から 6 時間後までの短時間予測時間で、それぞれの時刻における以下の 3 種類の手法による予測誤差 (RMSE)を示している。

- ・「当日_MSM_I00」は、当日の 00JST 初期値の MSM 予測値を用いた WBGT 予測値、この予測情報は早朝 04:30 ころに利用可能である。
- ・「当日_MSM_I06」は、当日の 06JST 初期値の MSM 予測値を用いた WBGT 予測値、この予測情報は午前 10:30 ころに利用可能である。
- ・「当日_MSM_I06+SRF」は、前項の予測値に短時間補正を適用した WBGT 予測値、この予測情報は前項と同様に午前 10:30 ころに利用可能である。

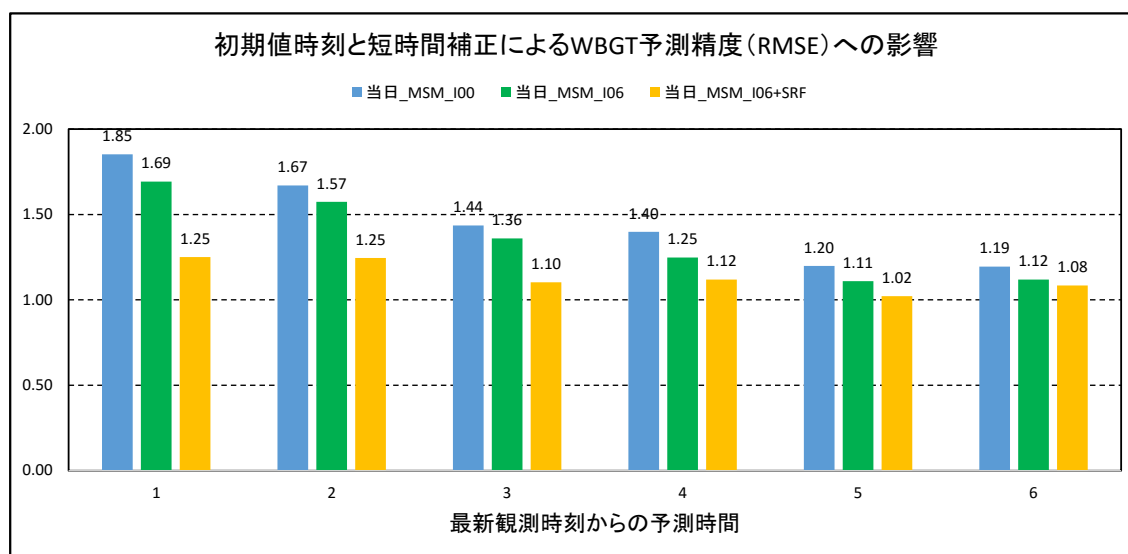


図 6-9 短時間補正された WBGT 予測の精度検証 (RMSE)

(最新観測時刻 10 時からの 6 時間後までの短時間予測時間ごとの RMSE)

検証結果を見ると、

- ・ 00JST 初期値の予測値よりは、より新しい 06JST 初期値の予測値の方が誤差が小さい。
- ・ 06JST 初期値の予測値に短時間補正を適用すると、さらに大きく誤差を減らせる。
- ・ 短時間補正による精度の改善（誤差の減少）は、1, 2 時間の短時間ではきわめて顕著で、予測時間が長くなるにつれて改善幅は小さくなるが、6 時間まではすべての予測時刻で改善効果がある。

以上により、最新の観測値との誤差を活用した 6 時間先までの短時間補正は、WBGT 予測情報の精度向上に大きな効果があることが確かめられた。今回の試行例は、午前 10 時という特定の時刻を想定したものであるが、他の時間帯についても、同様の効果が期待できるので、これを毎時の処理の中で行えば、各時刻に作成される予測情報の、短時間予測部分の精度向上に大きく貢献すると期待できる。

（４）今後の課題と計画

17 会場の標準観測点に対する WBGT 予測システムは、（３）で紹介した短時間補正の機能以外は安定した稼働を確認するため試験運用を 2020 年 2 月末まで継続した。

2020 年オリンピック・パラリンピック開催時期に向け、短時間補正を作成した予測システムに組み込んでシステムを早期に完成させる必要がある。

6. 2 同一地区内の日なた・日陰などの測定結果の活用法検討

(1) 目的・概要

オリンピック・パラリンピック開催時に厳しい暑熱環境からの退避等の参考すべく、2017年以降測定してきた、「日なた・日陰」「コンクリート上・草地上」での WBGT 測定結果を用いた活用法を検討した。

各地区における基本的な測定点として、標準機を設置した「草地・日なた」を位置付け、「草地・日陰」「コンクリ（コンクリートを省略、以下本節内で略記）・日なた」「コンクリ・日陰」について WBGT の差を定量的に求め情報提供することで観客や主催者等が活用しやすくと仮定して解析を進めた。

(2) 解析内容

- ・4 種類のカテゴリーでの暑熱環境の違い（WBGT 差）の主な原因は、日差しの有無であることから、草地日なたでの標準型での（黒球温度－気温）を日射の強さの指標とした。
- ・これまでの調査で、同じ日なたであっても、草地とコンクリでは草地が午前中、コンクリが午後、WBGT が高くなる事例もあることから、解析に当たっては、時刻別に統計した。
- ・利用データは、同じ仕様の測定器を使った 2018 年、2019 年のデータとし、設置期間や欠測の場合もあるが、同一測定地点で最大 155 日分（223,200 データ、1 時刻あたり 9,300 データ）を用いた。

- ・解析は、地区毎に日射の強さと WBGT 差を評価するため、縦軸に日射の強さ、横軸に時刻の図を各地点、草地日なたに対する比較として測定地点（草地日陰、コンクリ日なた、コンクリ日陰）毎に作成し、データ数及びマス目毎の平均値を算出した。

- ・地区毎にその分布状況に差はあるものの、全体的な傾向は共通するパターンがみられる（本節資料として地区毎の分布図を図 6-12 として掲載）ことから、各地区の解析結果をさらに合計し、マス目毎の平均値を求めた。

- ・平均値のプロットにあたっては、地区毎の解析ではデータ数 100 個以下、全地区を対象とする場合には 1500 個以下を対象外とした（概ね 1%以下を除外）

全地区の平均をとる場合のデータ数の分布について草地日陰の例で図 6-10 に示す。日中の Tg-Ta が 10℃前後で最大 1 マス目に 1 万程度のデータがあり、夜間は Tg-Ta がほとんどゼロ近くに集中するので 8 万個程度のデータが解析対象となっている。

- ・全地区平均した分布図から、各時刻での最も日射が強い場合、すなわち Tg-Ta が最大値を取る場合の WBGT 差をまとめ、この差をもって、熱中症予防情報サイトの「生活の場」の各指標と同様に、オリンピック・パラリンピック期間の標準型データ公表に合わ

せた、日陰での WBGT 推定値提供の基礎資料とした。

○ データ数の例

草地日なた全体での各マス目（時刻及び日射の強さによるカテゴリー分け、以下同様）のデータ数。

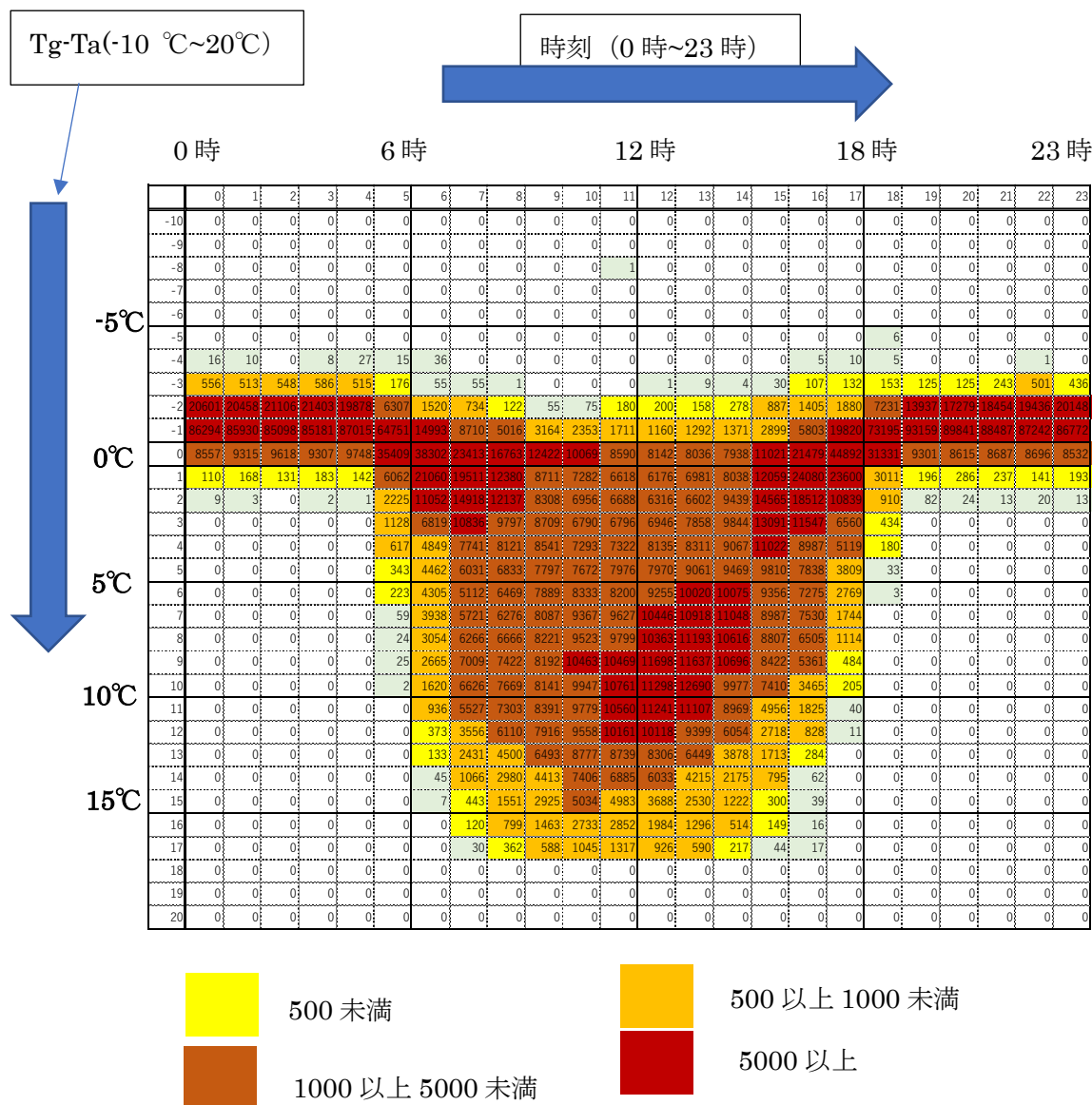


図 6-10 全体のデータ数の分布（全地点合計草地日陰の例）

○ 解析から除外の地域と時間帯

5章6節での各地区の日なた、日陰での晴天日の平均的な WBGT 変化の解析から、一部地区で、日陰と設定したが明らかに日なたとなっている場合、その逆の場合があることが明らかになっている。このため、特に影響が大きい期間として、下記の表 6-1 に示す地区・測定地点については、表中の時間帯について解析対象から除外した。

表 6-1 草地日なたとの比較で除外した時間帯一覧表

地区名	測定地点	除外時間帯
新国立競技場周辺	コンクリ日なた	6時から9時
	コンクリ日陰	6時から9時
皇居外苑	コンクリ日なた	6時から8時
国技館周辺	コンクリ日陰	6時から7時
有明・お台場地区周辺	草地日陰	6時から7時
埼玉スタジアム 2002 周辺	草地日陰	13時から15時
釣ヶ崎海岸サーフィン会場 周辺	砂地日陰	15時から18時
江の島ヨットハーバー周辺	コンクリ日陰	15時から17時
横浜国際総合競技場周辺	コンクリ日陰	6時から8時、14時から18 時
福島あづま球場周辺	草地日陰	7時から9時
陸上自衛隊朝霞訓練場周辺	コンクリ日陰	6時から18時

(3) 解析結果

(ア) 全地区をまとめた解析結果

○ 草地日陰

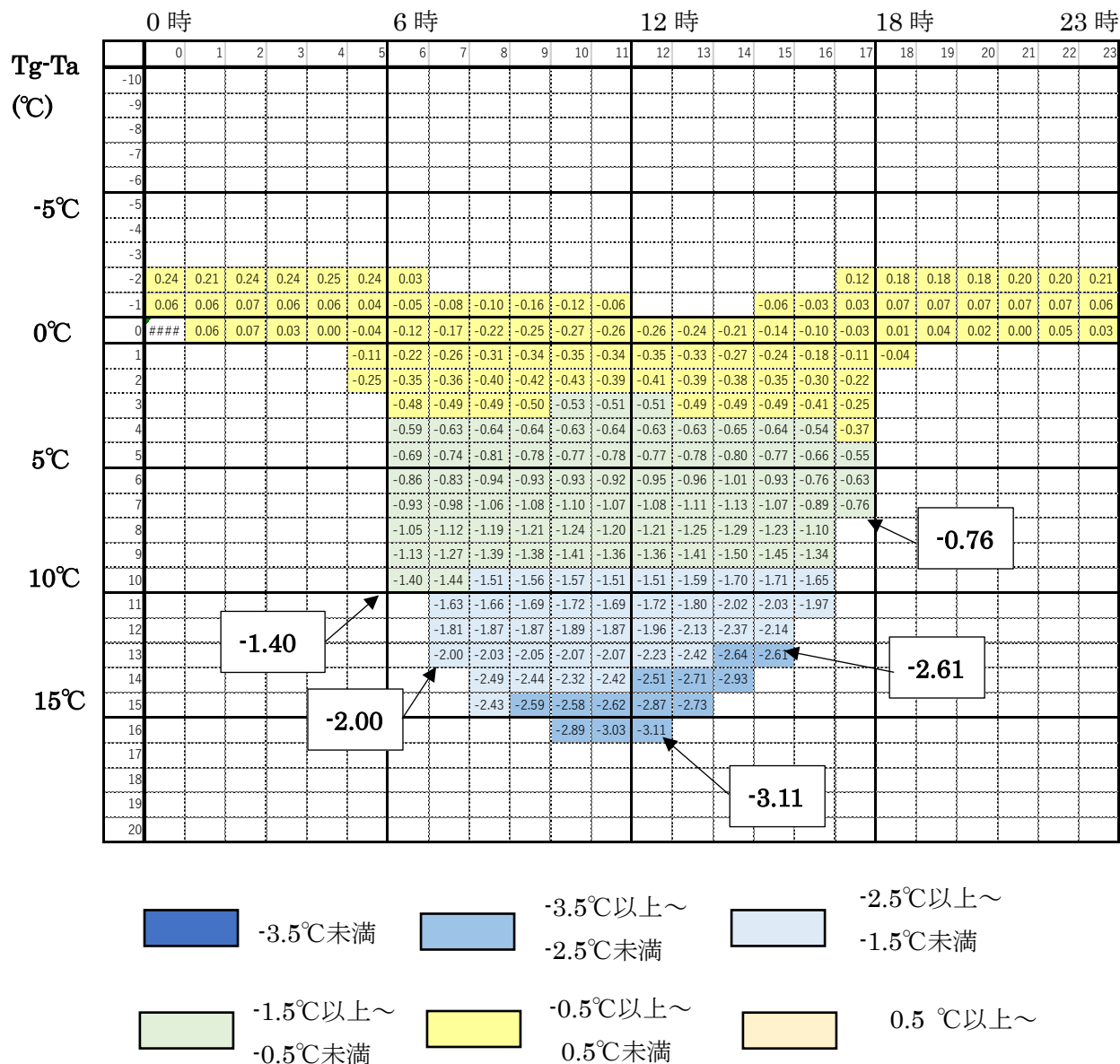


図 6-11(a) 草地日陰についての草地日なたとの WBGT 差の時刻別・日照の強さ別分布

「草地日陰」では「草地日なた」にくらべて、全地区を平均した場合には正午前後には、3°C程度 WBGT が低くなる。

各時刻で最も日射が強い場合には早朝で 1.4°C、夕方には 0.8°C 程度の差になっている。

日射の強さが同程度であっても、午前と午後では、午後のほうが WBGT 差が 0.5°C 程度大きくなる。

○ コンクリ日なた

0 時

6 時

12 時

18 時

23 時

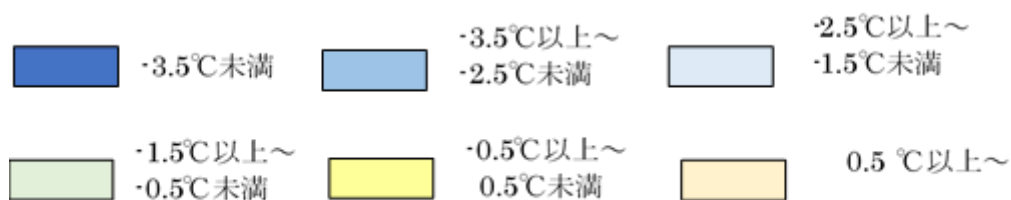
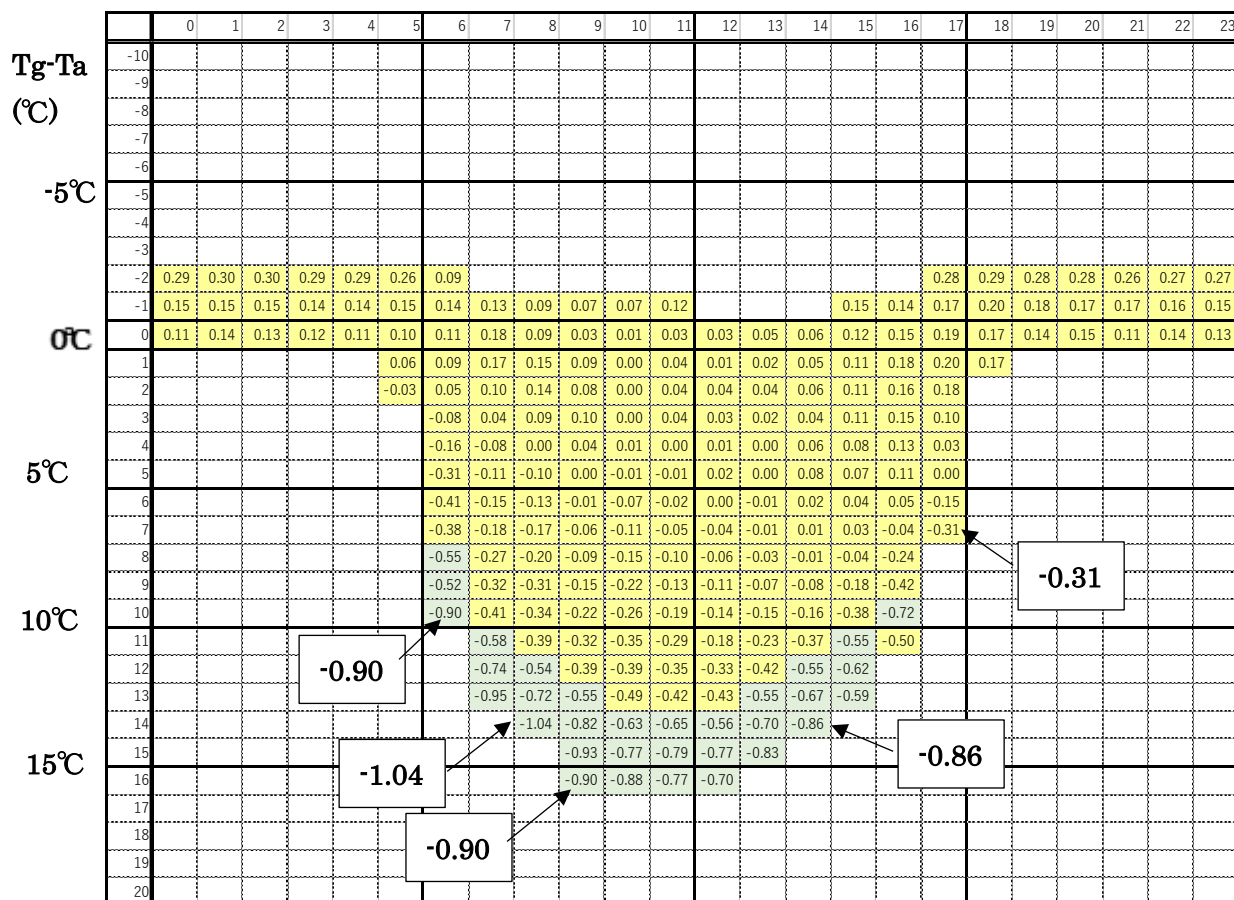


図 6-11 (b) コンクリ日なたについての草地日なたとの WBGT 差の
時刻別・日照の強さ別分布

「コンクリ日なた」では「草地日なた」にくらべて、ほぼ同程度（誤差±0.5℃以内）となる場合が多いが、日射が強い場合には草地日なたより WBGT が低くなる場合があり、最大で 1℃程度であり、この差は時刻によってそれほど差がない。

日射の強さが同程度であっても、午前と午後では、午後のほうが WBGT 差が小さくなる場合が多いがその差はごくわずかである。

○ コンクリ日陰

0 時

6 時

12 時

18 時

23 時

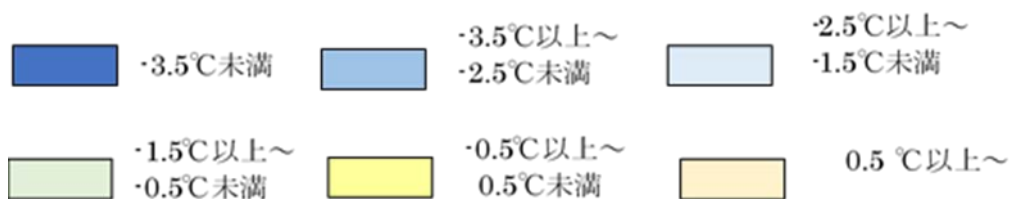
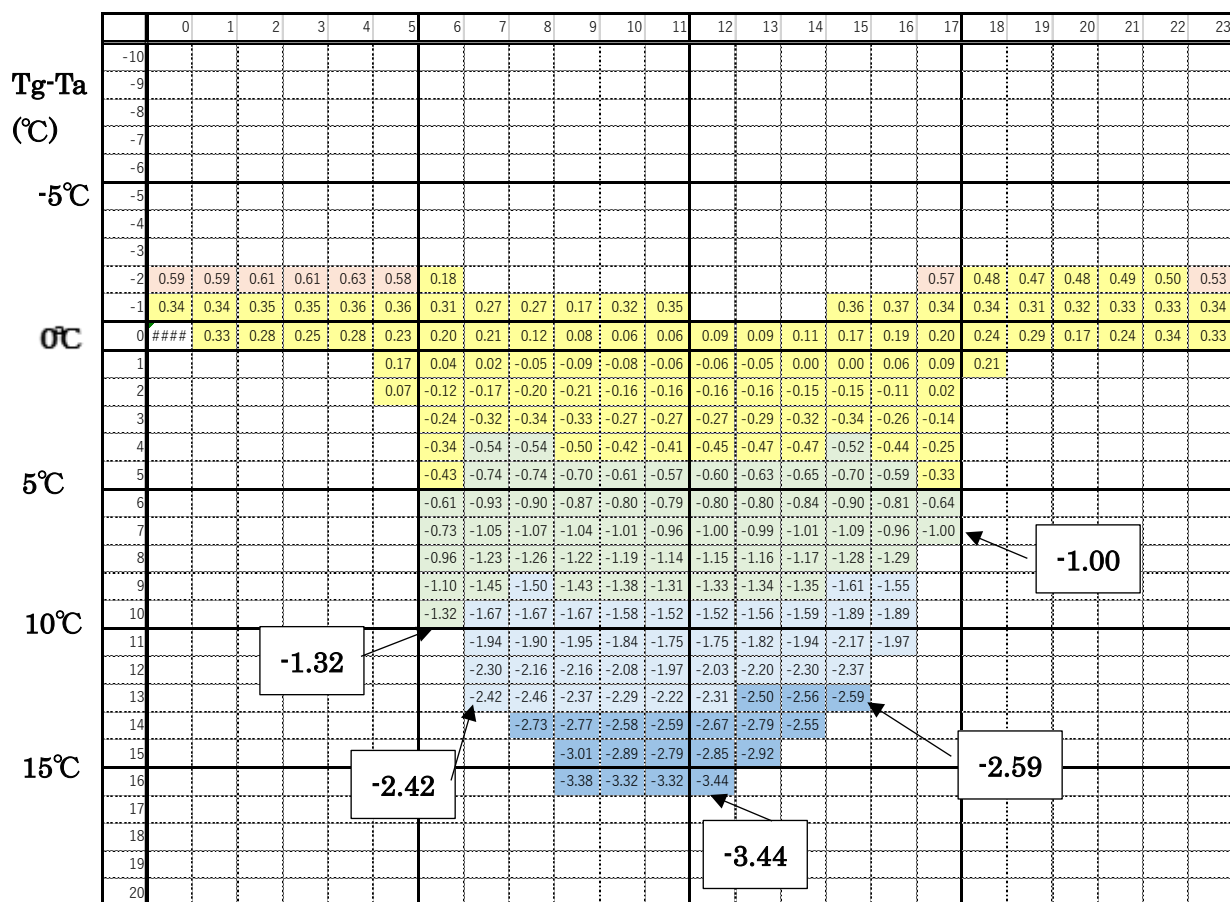


図 6-11(c) コンクリ日陰についての草地日なたとの WBGT 差の時刻別・日照の強さ別分布

「草地日陰」では「草地日なた」にくらべて、全地区を平均した場合には正午前後には、**3.4℃程度 WBGT が低くなる**、この差の最大値は草地日陰の場合より大きい。

各時刻で最も日射が強い場合には早朝で 1.3℃、夕方には 1.0℃程度の差になり、草地日陰と同程度である。

日射の強さが同程度の場合、午前と午後では大きな差はない。

(イ) 解析結果から得た時刻別補正量

熱中症予防情報サイトでの、「草地日陰」「コンクリ日なた」「コンクリ日陰」の「草地日なた」に対する補正量について、上記解析の各時刻の最も日射が強い場合の「差」を用いることとし、下記の表 6-2 とした。なお、夜間はすべて補正量 0 とした。

表 6-2 熱中症予防情報サイトでの情報提供に当たっての時刻別補正量

時刻	0	1	2	3	4	5
草地日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草地日陰	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
コンクリ日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
コンクリ日陰	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
時刻	6	7	8	9	10	11
草地日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草地日陰	-1.40	-2.00	-2.49	-2.59	-2.89	-3.03
コンクリ日なた	-0.90	-0.95	-1.04	-0.90	-0.88	-0.77
コンクリ日陰	-1.32	-2.42	-2.73	-3.38	-3.32	-3.32
時刻	12	13	14	15	16	17
草地日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草地日陰	-3.11	-2.73	-2.93	-2.61	-1.97	-0.76
コンクリ日なた	-0.70	-0.83	-0.86	-0.59	-0.50	-0.31
コンクリ日陰	-3.44	-2.92	-2.55	-2.59	-1.97	-1.00
時刻	18	19	20	21	22	23
草地日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
草地日陰	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
コンクリ日なた	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
コンクリ日陰	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

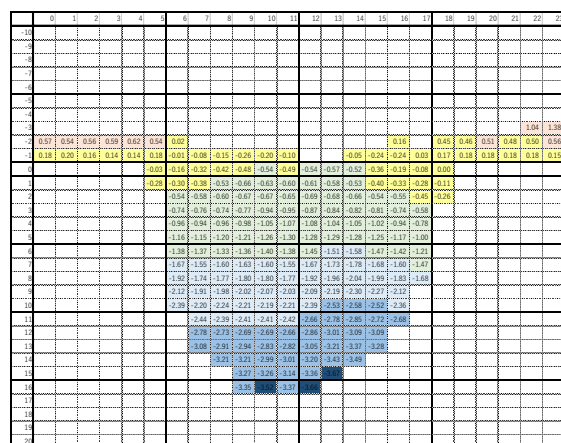
(単位 °C)

なお、日射の最も強い場合を示していることから、特に曇天、雨天の場合には、標準型のデータを日陰等でも参照することを推奨することを補足する必要がある。

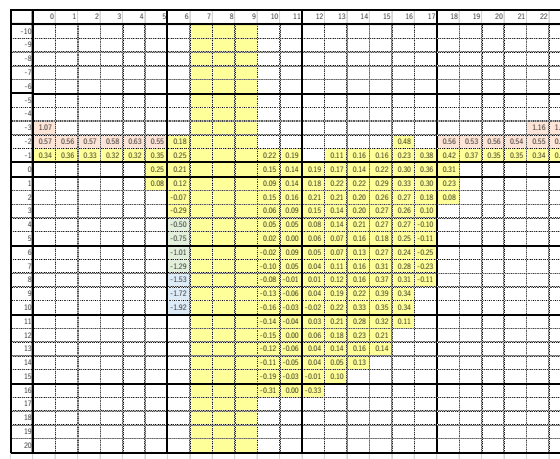
(ウ) 各地区ごとの「草地日陰」「コンクリ日なた」「コンクリ日陰」の時刻別、日射の強さ別「草地日なた」との WBGT 差の分布図

○ 新国立競技場周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

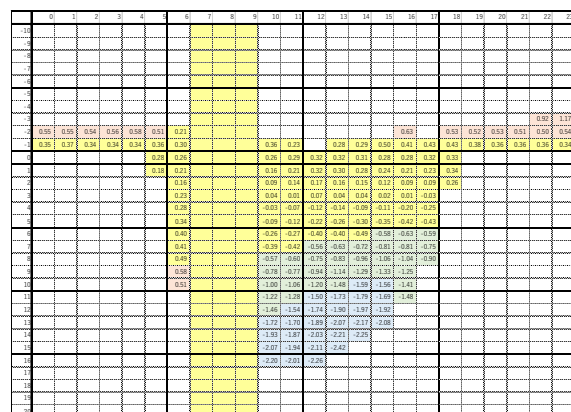
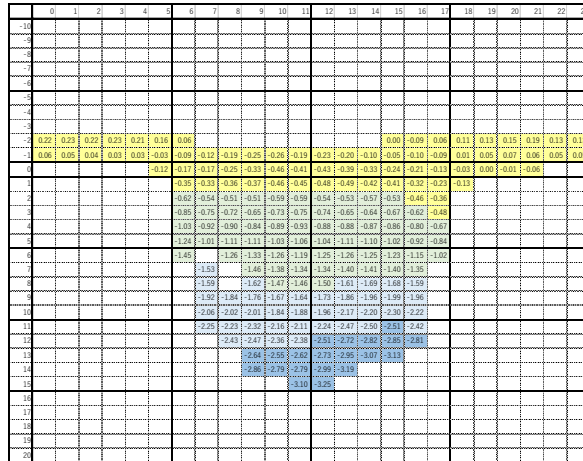


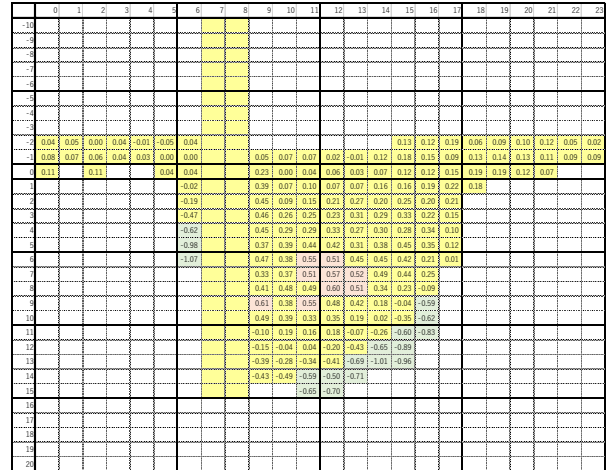
図 6-12(a) 新国立競技場周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 皇居外苑周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

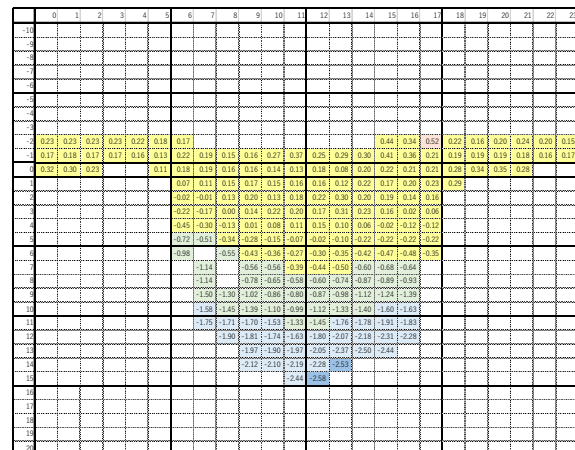


図 6-12(b) 皇居外苑周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 国技館周辺

草地日陰

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
16																								
15																								
14																								
13																								
12																								
11																								
10																								
9																								
8																								
7																								
6																								
5																								
4																								
3																								
2																								
1																								

コンクリ日なた

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
16																								
15																								
14																								
13																								
12																								
11																								
10																								
9																								
8																								
7																								
6																								
5																								
4																								
3																								
2																								
1																								

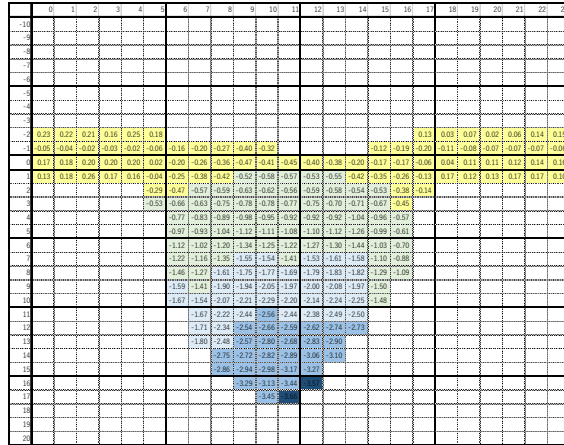
コンクリ日陰

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
16																								
15																								
14																								
13																								
12																								
11																								
10																								
9																								
8																								
7																								
6																								
5																								
4																								
3																								
2																								
1																								

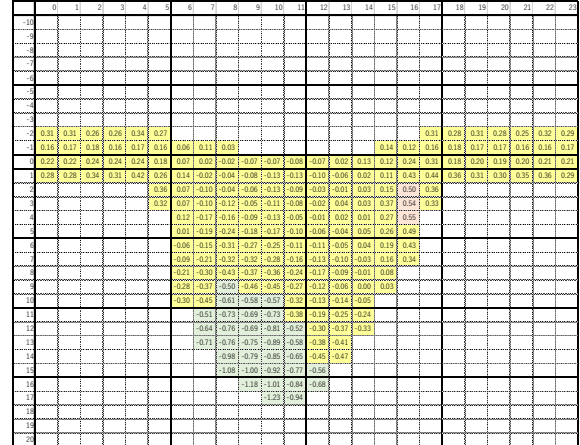
図 6-12(c) 国技館周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 馬事公苑周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

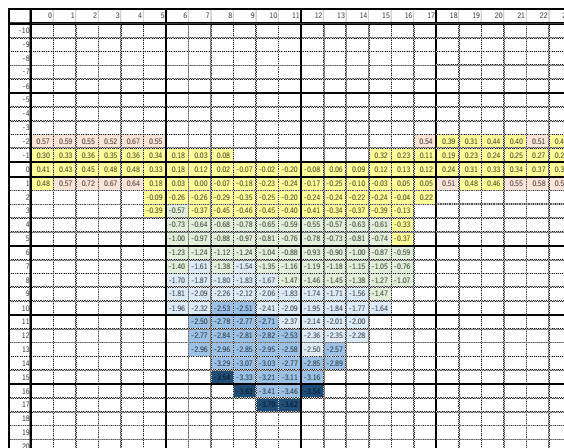
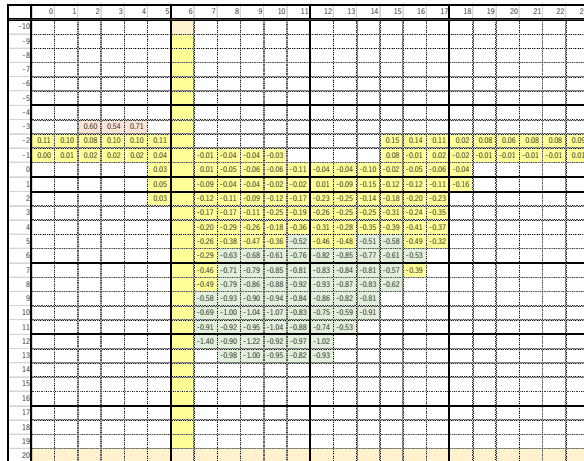


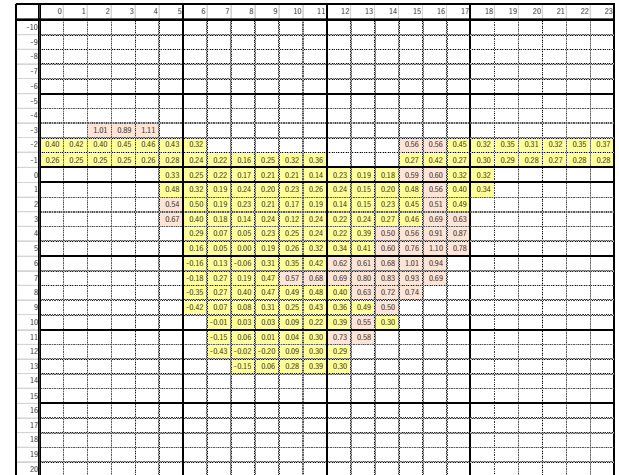
図 6-12(d) 馬事公苑周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 有明・お台場地区周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

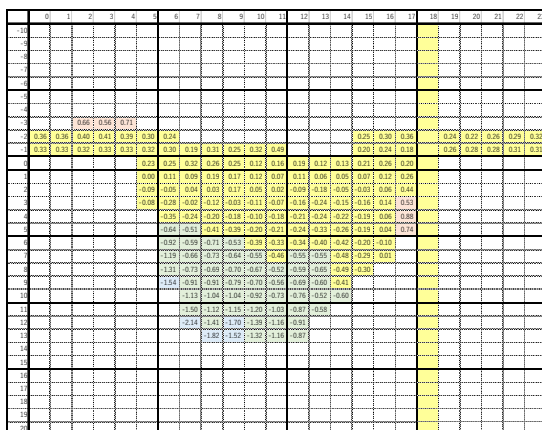
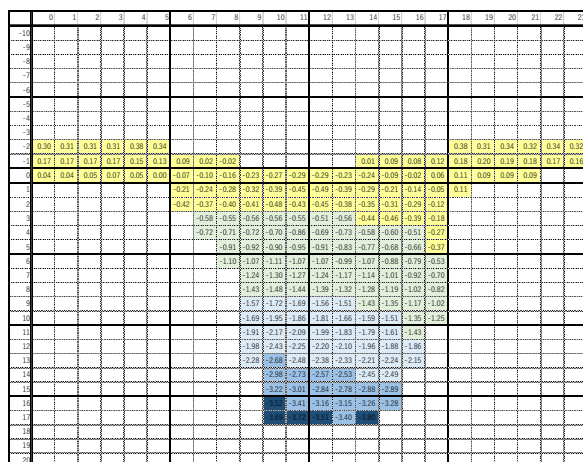


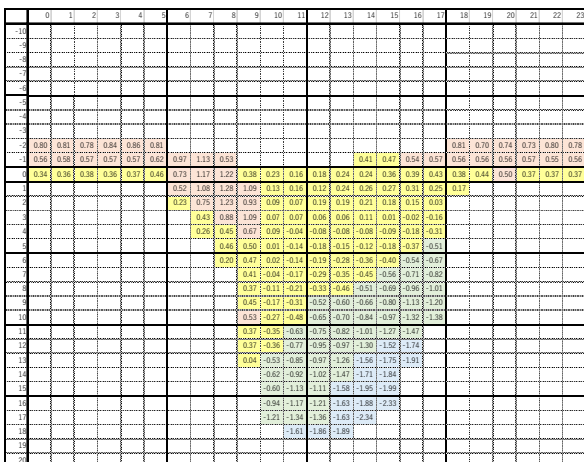
図 6-12(e) 有明・お台場地区周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の
WBGT 差分布

○ 東京スタジアム周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

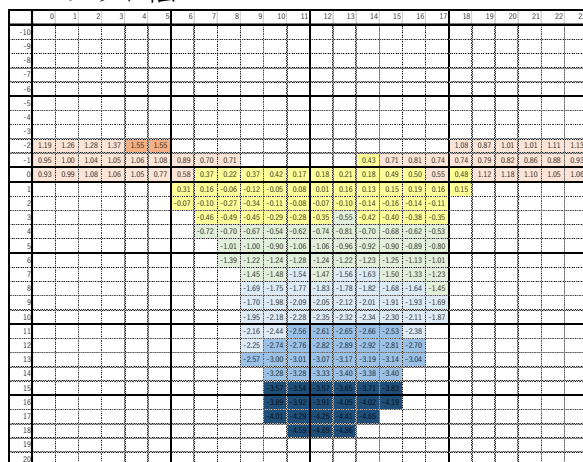
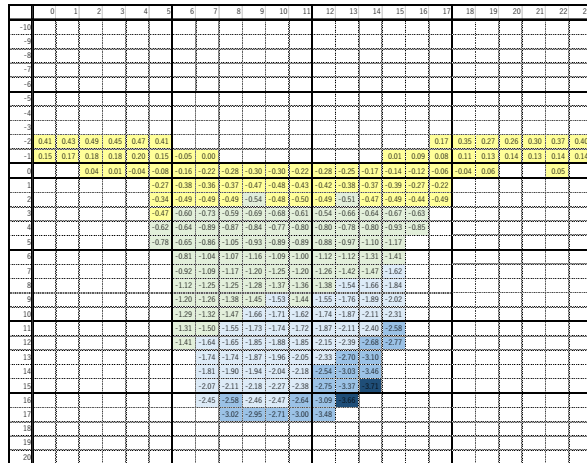


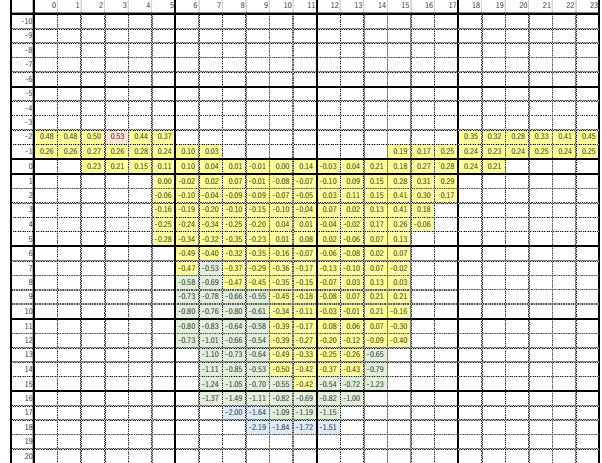
図 6-12(f) 東京スタジアム周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

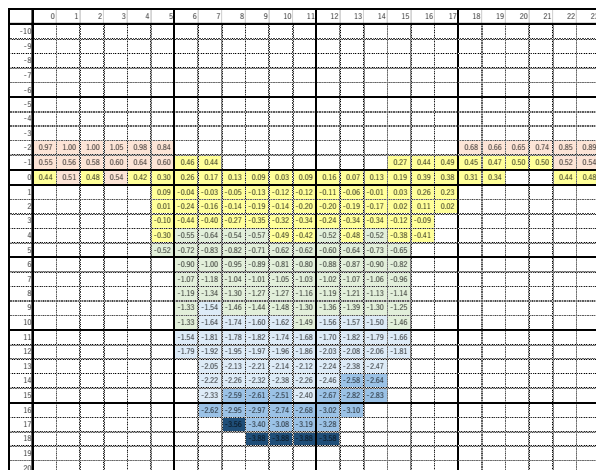
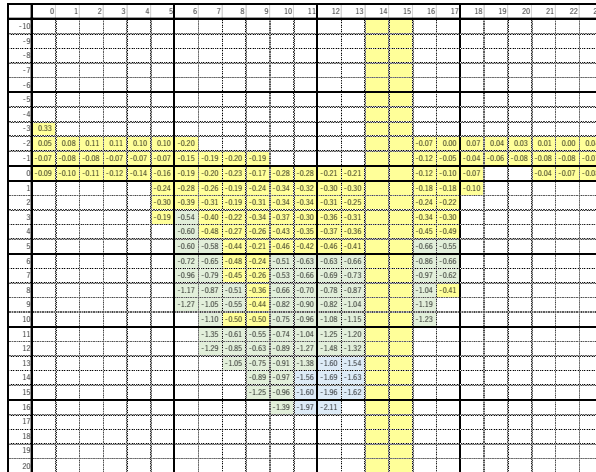


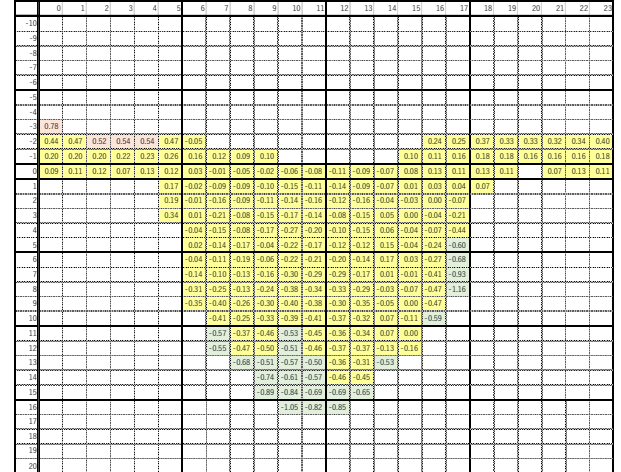
図 6-12(g) 霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 埼玉スタジアム 2002 周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

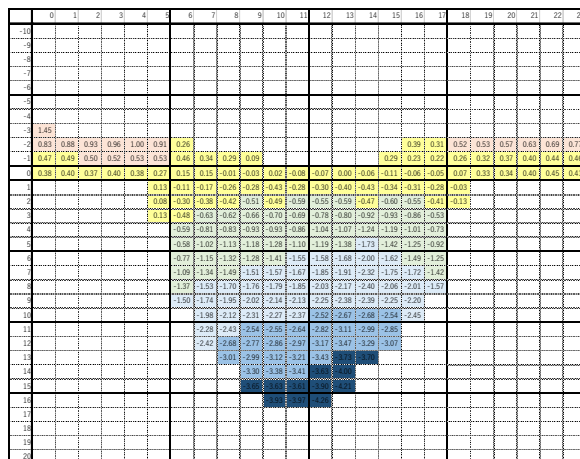
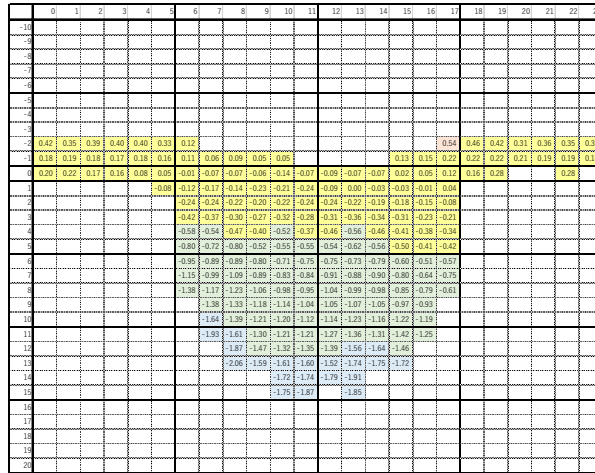


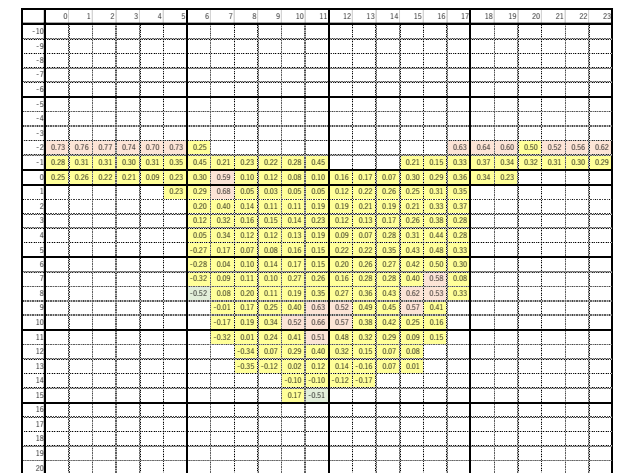
図 6-12(h) 埼玉スタジアム 2002 周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 幕張メッセ周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

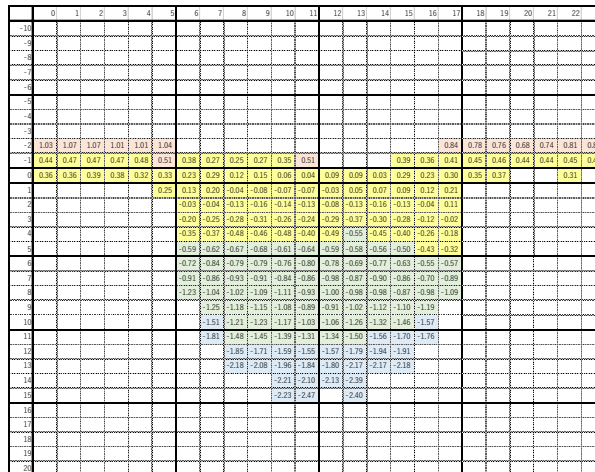
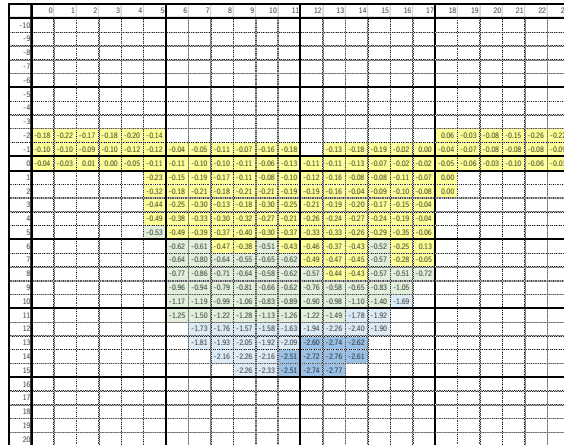


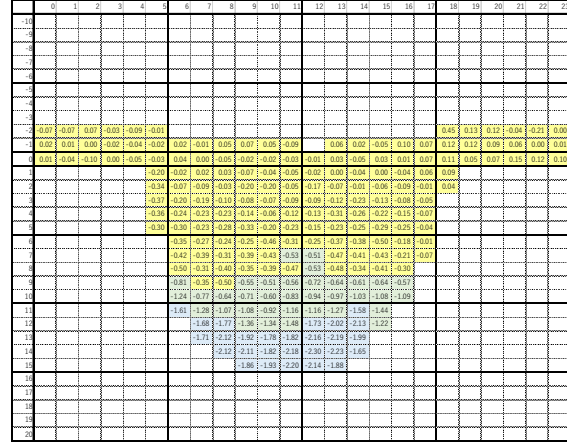
図 6-12(i) 幕張メッセ周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺

草地日陰



砂地日なた



砂地日陰

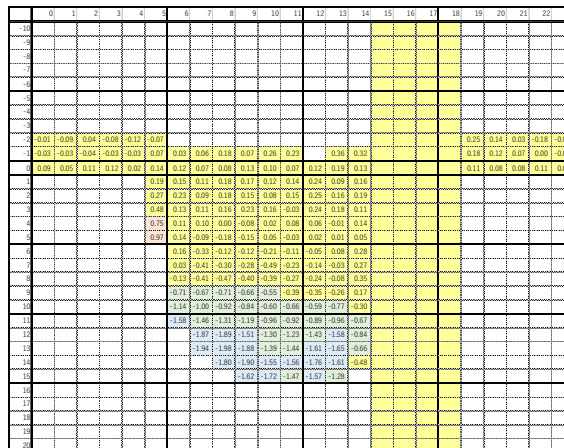
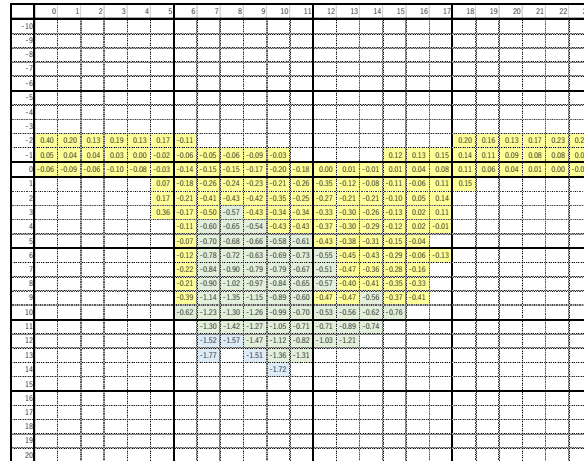


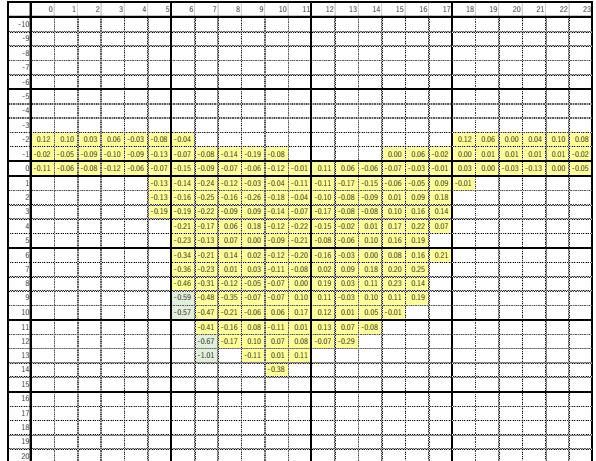
図 6-12(j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺での草地日陰・砂地日なた・砂地日陰の WBGT 差分布

○ 江の島ヨットハーバー周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

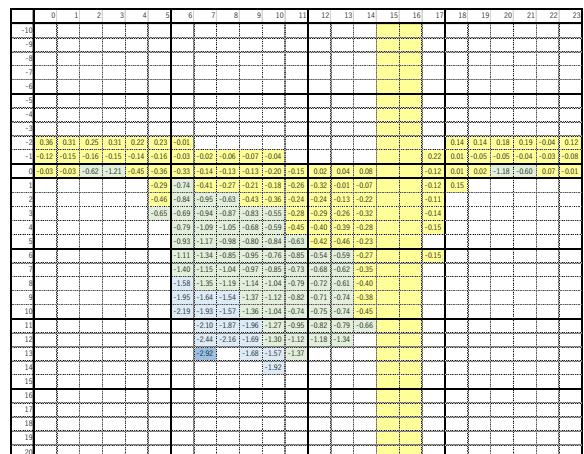
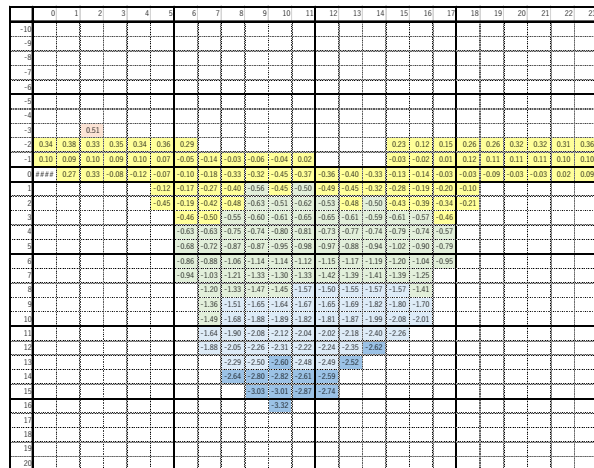


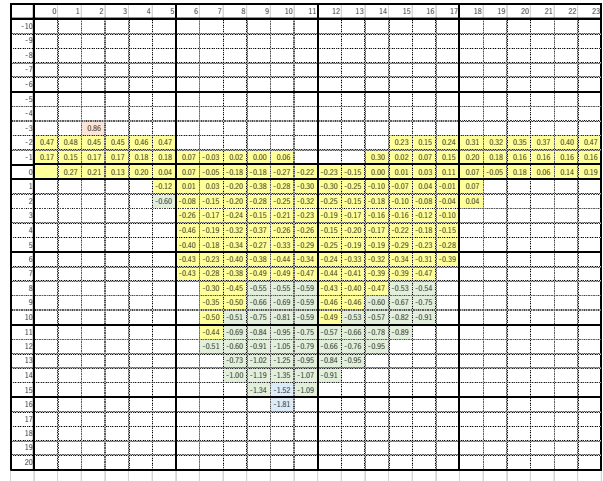
図 6-12(k) 江の島ヨットハーバー周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 横浜国際総合競技場周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

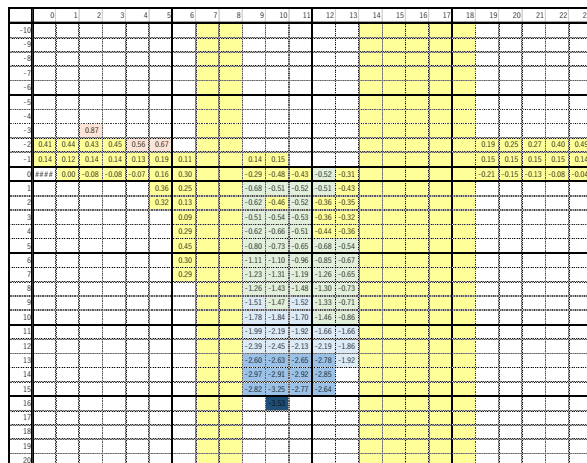
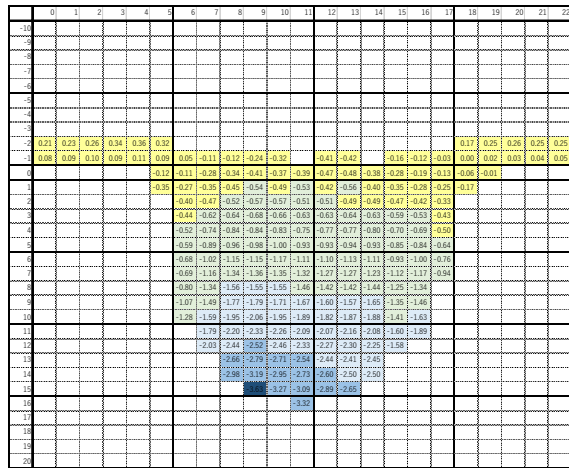


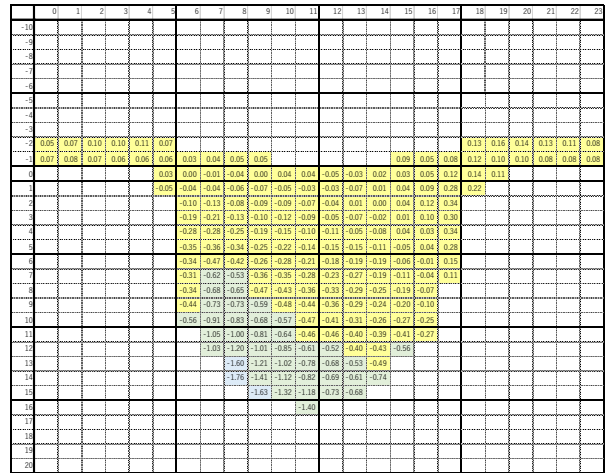
図 6-12(Ⅰ) 横浜国際総合競技場周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 伊豆ペロドローム周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

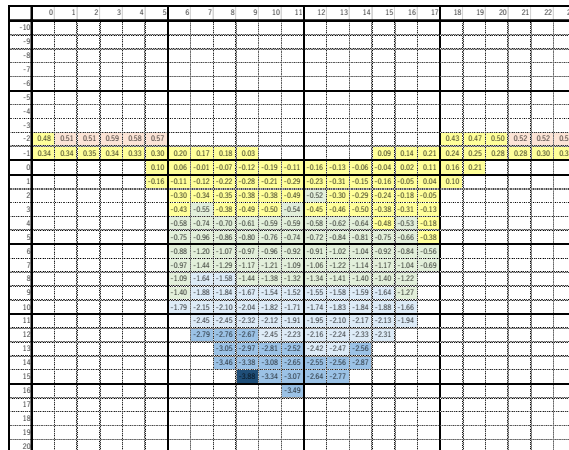
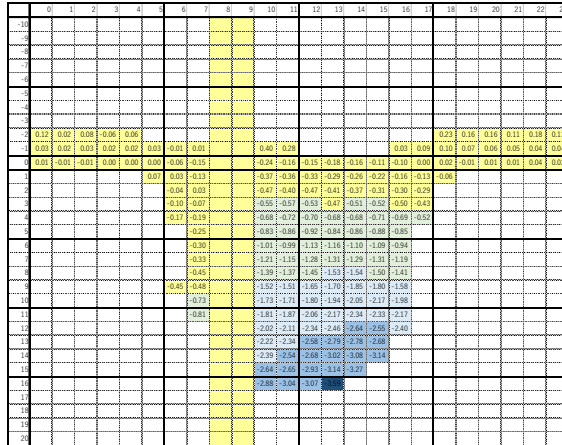


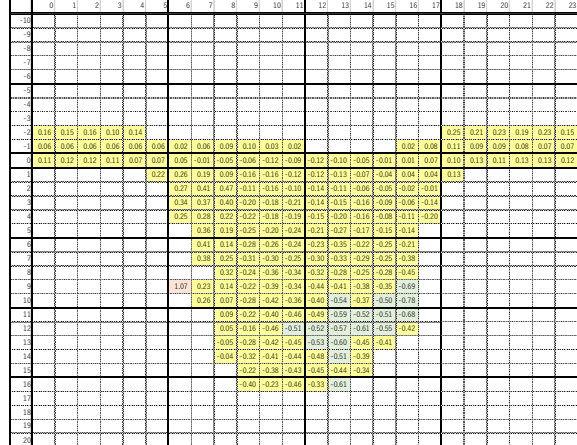
図 6-12 (m) 伊豆ペロドローム周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 福島あづま球場周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

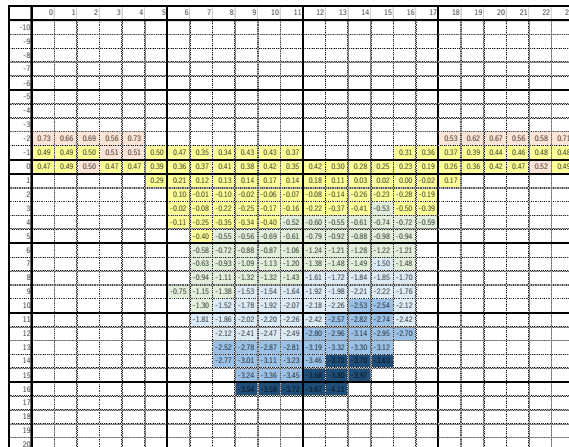
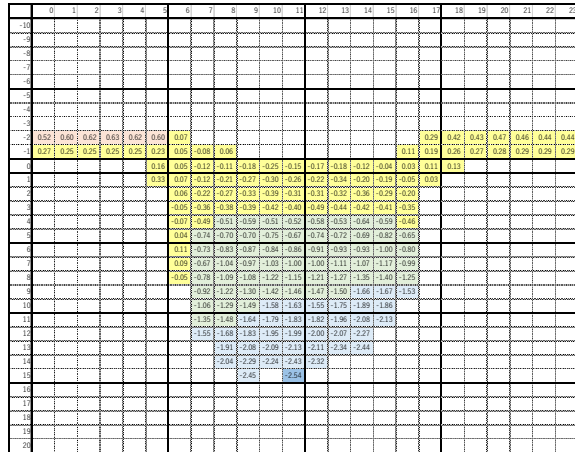


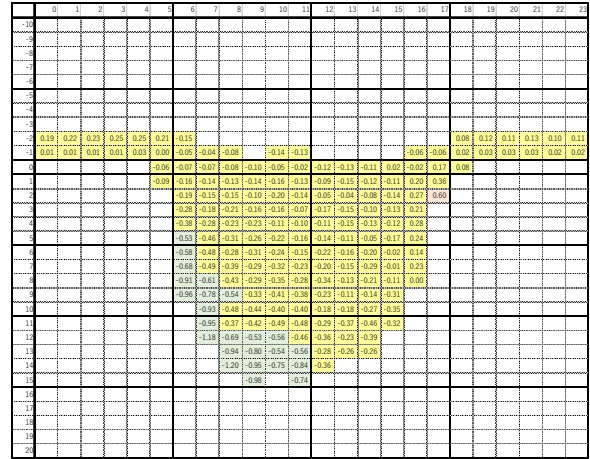
図 6-12(n) 福島あづま球場周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 大井ホッケー競技場周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

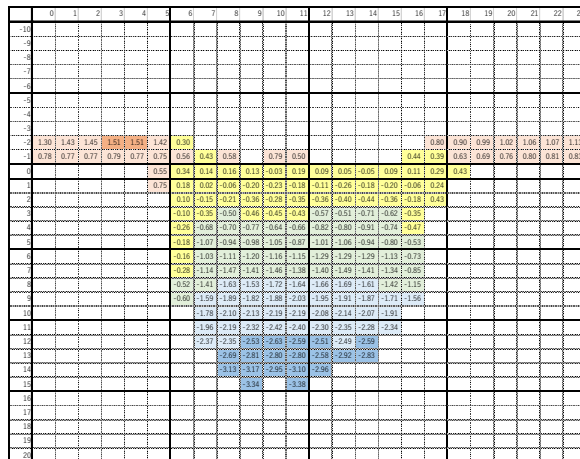
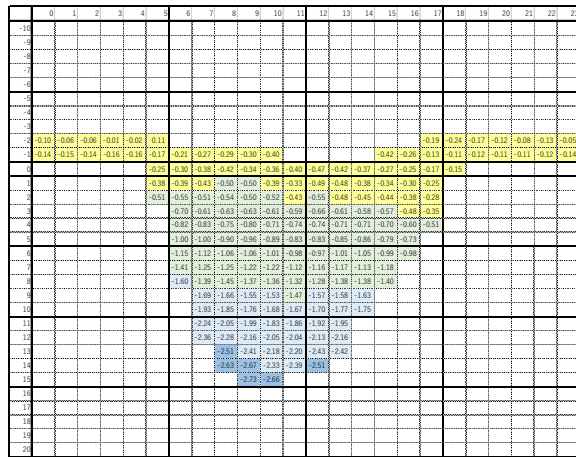


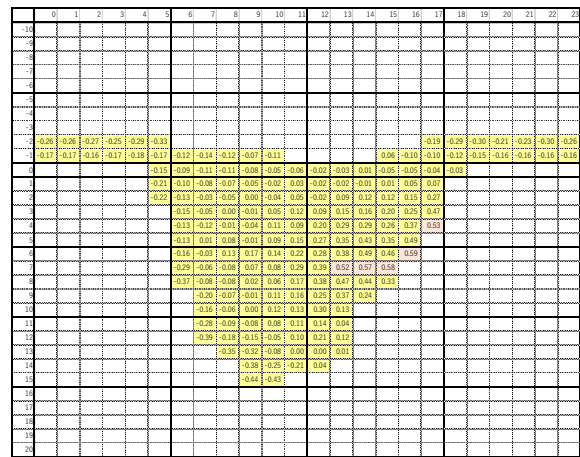
図 6-12 (o) 大井ホッケー競技場周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

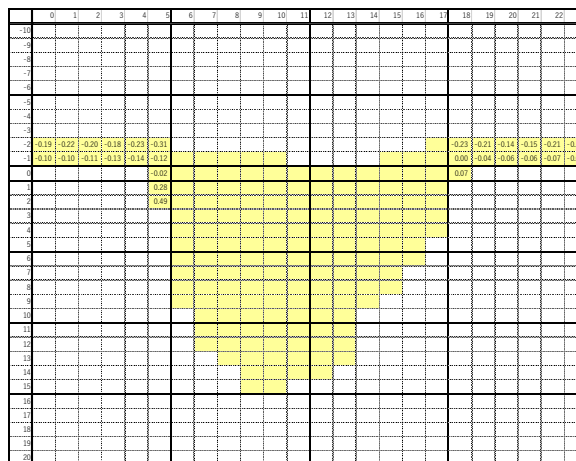
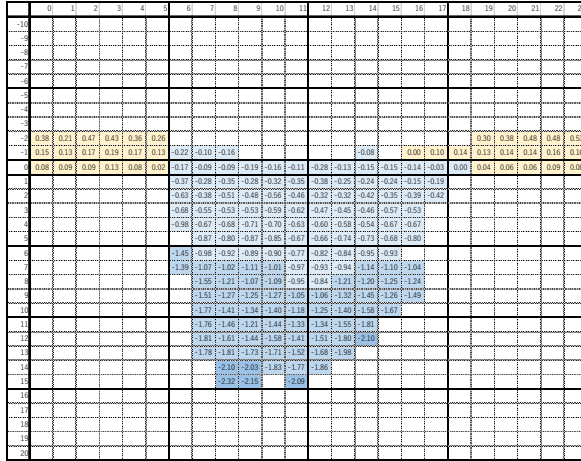


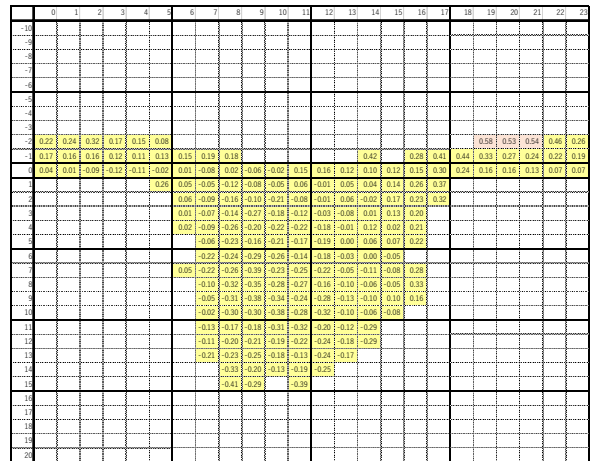
図 6-12(p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

○ 富士スピードウェイ周辺

草地日陰



コンクリ日なた



コンクリ日陰

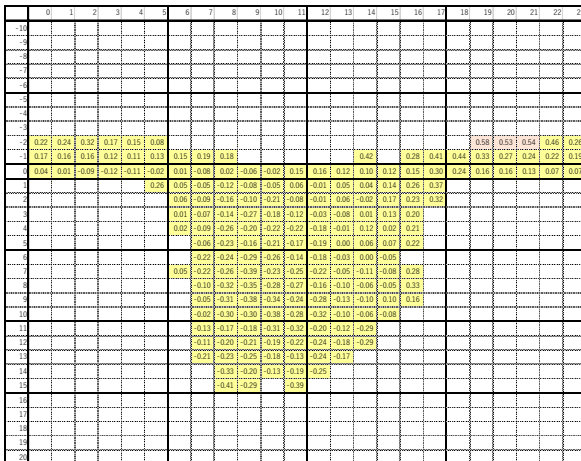


図 6-12(q) 富士スピードウェイ周辺での草地日陰・コンクリ日なた・コンクリ日陰の WBGT 差分布

6. 3 ISO準拠による自然湿球温度を用いた場合のWBGT推定結果

(1) 概要

日本では、WBGT の算出など暑熱環境の把握に際して電子式の温度計・湿度計が広く使用されているが、海外ではあまり使用されていない等、日本の気象観測の標準と、海外の標準は異なっている。海外の方に向けた情報提供のため、各測定地区の測定データを使用して、ISO7243 に準拠した（ISO7243:Annex-D を使用して湿度を自然湿球温度に換算した）WBGT を算出する。

(2) 背景

WBGT は気温・気流・湿度・輻射を考慮し温熱環境を総合的に評価した指標で、日本スポーツ協会の「熱中症予防運動指針」、日本生気象学会の「日常生活における熱中症予防指針」などで活動指標として広く利用されている。また、ISO7243:2017[Ergonomics of the thermal environment - Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index]では、伝統的な観測方法（*）による WBGT により、労働者の暑熱ストレス指標を示している。

(*) 伝統的な観測方法

- ・湿球温度は、温度計の感部を湿らせたガーゼで覆い、常時湿らせた状態で測定する。
- ・湿球温度は自然な対流下で（自然通風で）測定する。
- ・湿球温度は直射日光を受ける状態で測定する。

これらの方法で測定した湿球温度を「自然湿球温度」という。

本業務での測定は電子式 WBGT 計を使用しており、湿球温度は湿度等の観測値から算出している。海外を含む各機関からの問い合わせに対応するためには、測定機器や測定方法、換算方法の違いによる WBGT を比較し、その差異を把握しておくことが必要である。

図 6-13 のような ISO7243:2017 に準拠した WBGT 測定を行える機器（以下「ISO 型測定機器」という。）がある。



図 6-13 ISO 型測定機 （センサーは左から黒球温度、自然湿球温度、気温）

ISO 型測定機器を各測定地区に設置すれば、直接 ISO に準拠した WBGT 値を得ることができるが、実際には機材のメンテナンスなどの課題*1があり実施は難しい。

このため、ISO7243 Annex-D に電子式の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（式(6.1)～(6.2)）が掲載されている。

$$4.18 \times v^{0.444}(T_a - T_{nw}) + 10^{-8} \times [(T_r + 273)^4 - (T_{nw} + 273)^4] - 77.1 \times v^{0.421}[p_{as}(T_{nw}) - RH \times p_{as}(T_a)] = 0 \quad \text{式(6.1)}$$

ここに、 T_{nw} :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)

$p_{as}(T_{nw})$:温度 T_{nw} 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。

$$T_r = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 \times v^{0.6}}{\varepsilon_g \times d^{0.4}} (T_g - T_a) \right]^{1/4} - 273 \quad \text{式(6.2)}$$

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

以降 ISO7243 Annex-D の式(6.1)～(6.2)により換算した自然湿球温度及びその自然湿球温度から算出した WBGT は「ISO 換算」と表記する。

なお、湿球温度をどのように求めても、WBGT は式(6.3)により求める。

式(6.3)

$$WBGT = 0.7 \times T_w + 0.2 \times T_{g(0.15)} + 0.1 \times T_a$$

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)

本業務での測定は、150mm 黒球温度計と、自然通風シェルターに格納した電子式の湿度センサー・温度センサーを使用している。

平成 29 年度業務では野外実験の結果から「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いことによる）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には ISO 型が自然通風型に

*1 湿球温度計の感部を常に湿らせたガーゼで覆うために、水の供給が必要。

比べて 2℃程度の高くなる傾向が見られた。風速の違いによる影響は明確ではなかった。」とされている。

平成 30 年度業務では、各地区の標準型測定データを用いて、ISO7243 Annex-D を用いて WBGT を算出（以下「ISO-WBGT」という。）し、これまでの本報告で報告してきた標準型による WBGT（以下「気象 WBGT」という。）との差異をもとめた。各地区での調査結果からは、日射の強い日中に ISO-WBGT は気象 WBGT に比べて最大 2℃程度高くなっていて、昨年度屋外実験で得られた結論におおむね沿った結果になっていた。

ただし、その差は地域差があり、平均値での差は、江の島ヨットハーバー周辺、有明・お台場地区周辺、釣ヶ崎海岸サーフィン会場など沿岸部では 1℃前後と小さくなっていた。

（3）自然湿球温度を用いた WBGT の算出と評価

今年度業務においては、平成 30 年度業務と同様に、標準型での測定結果から ISO-WBGT を算出し、気象 WBGT（他の章で WBGT として報告）との比較した。

全測定期間について、各地区ごとに毎正時値について、最高値と平均値について求めた、ISO-WBGT は気象 WBGT に比べ日射により高い値となることから、最高値、平均値ともに、日中にもっとも大きな差となり、平均値ではその差は最大 1℃程度、最高値の差の最大値は 2℃程度となった。

各時刻の自然湿球温度を用いた WBGT は付録 DVD に収めた。

以下に、各地区の自然湿球温度を用いた ISOWBGT（平均（ISO）、最高（ISO）と表記）及び通風式による気象 WBGT（平均（気象）、最高（気象）と表記）の時刻別の変化を示す。

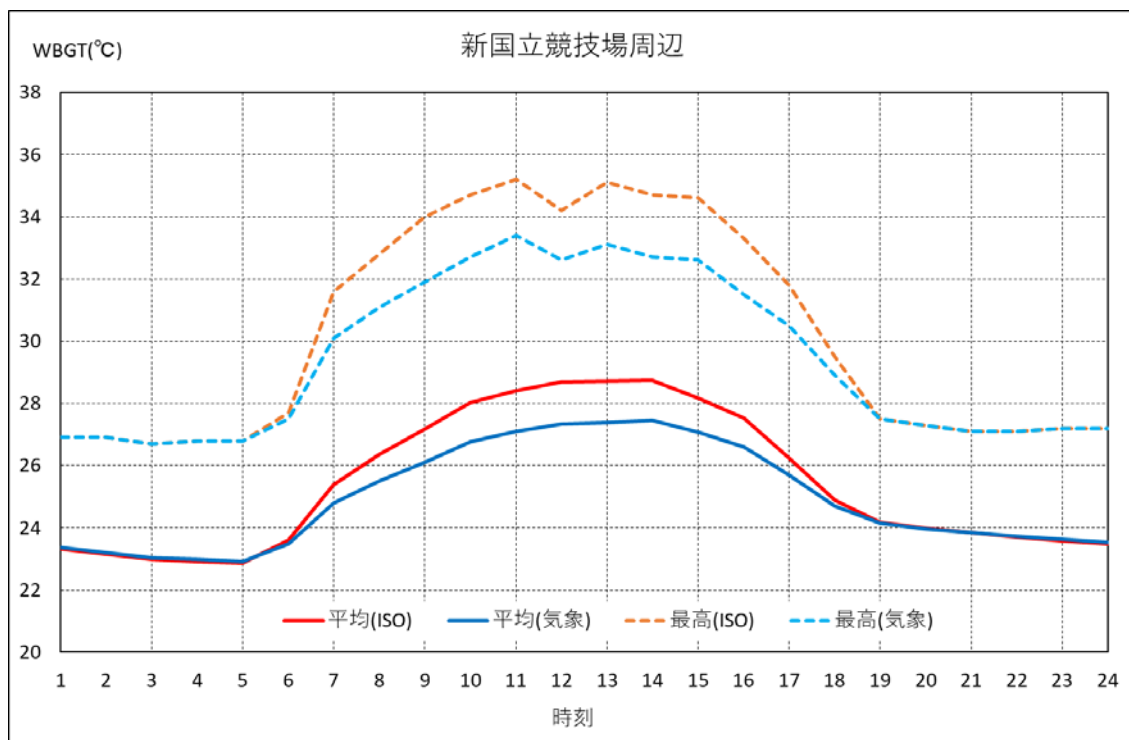


図 6-14(a) 新国立競技場周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

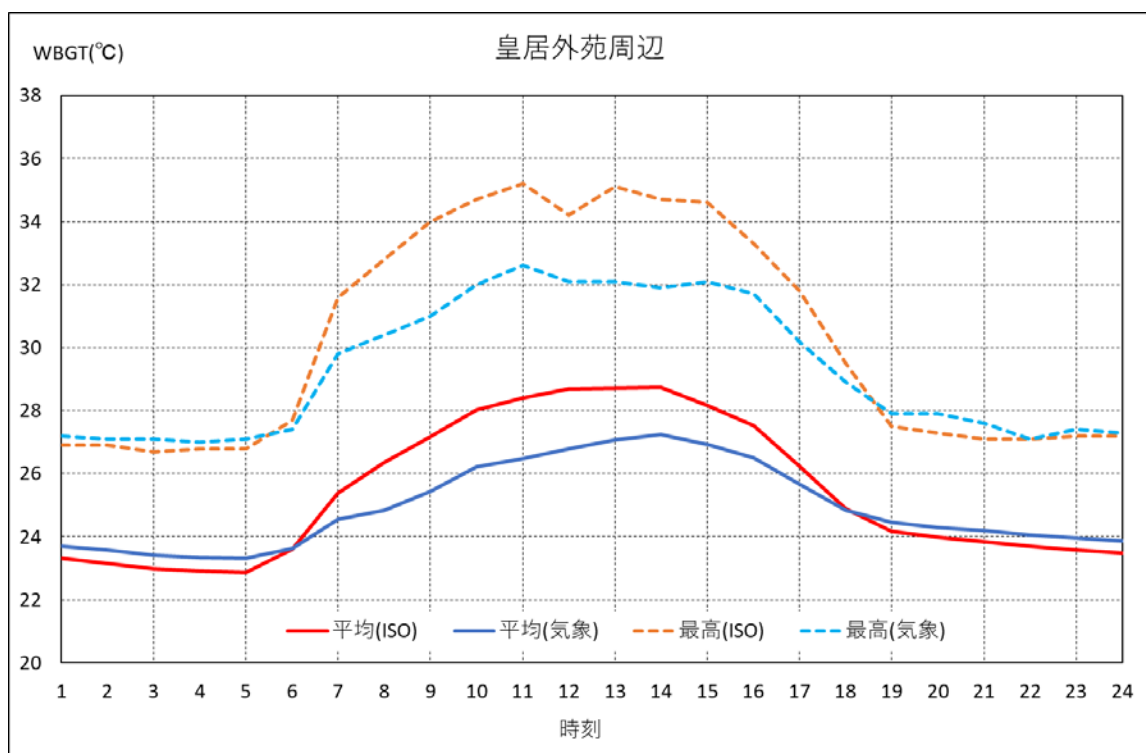


図 6-14 (b) 皇居外苑周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

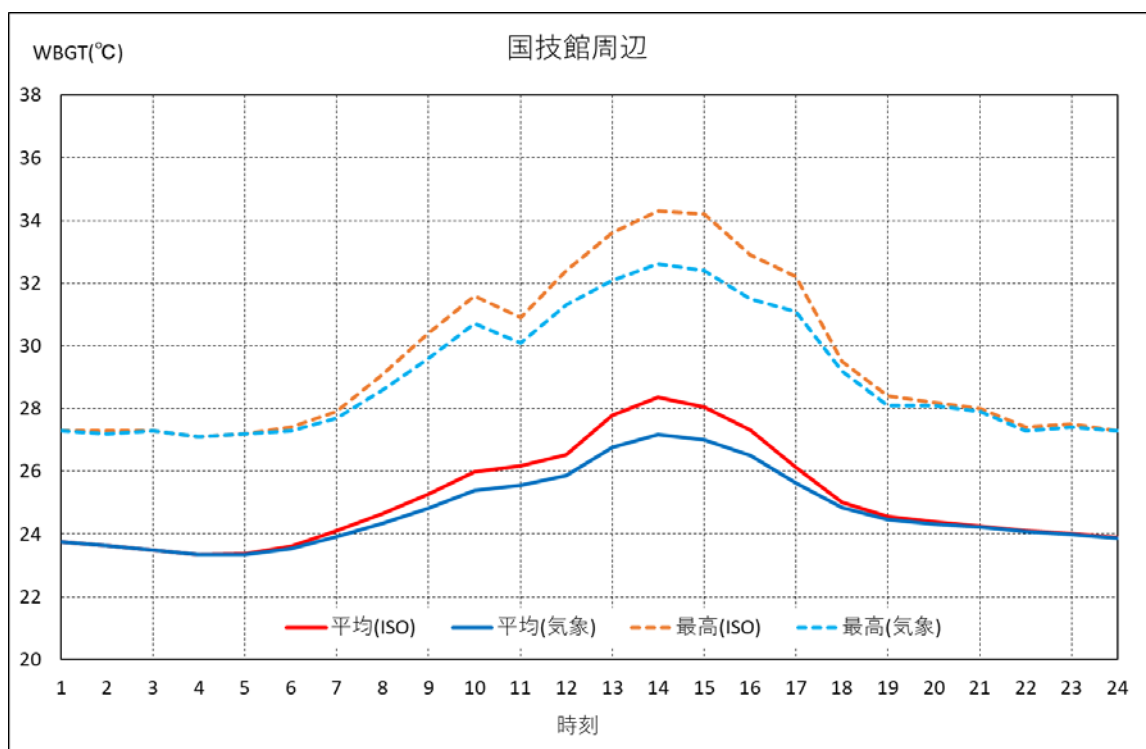


図 6-15 (c) 国技館周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

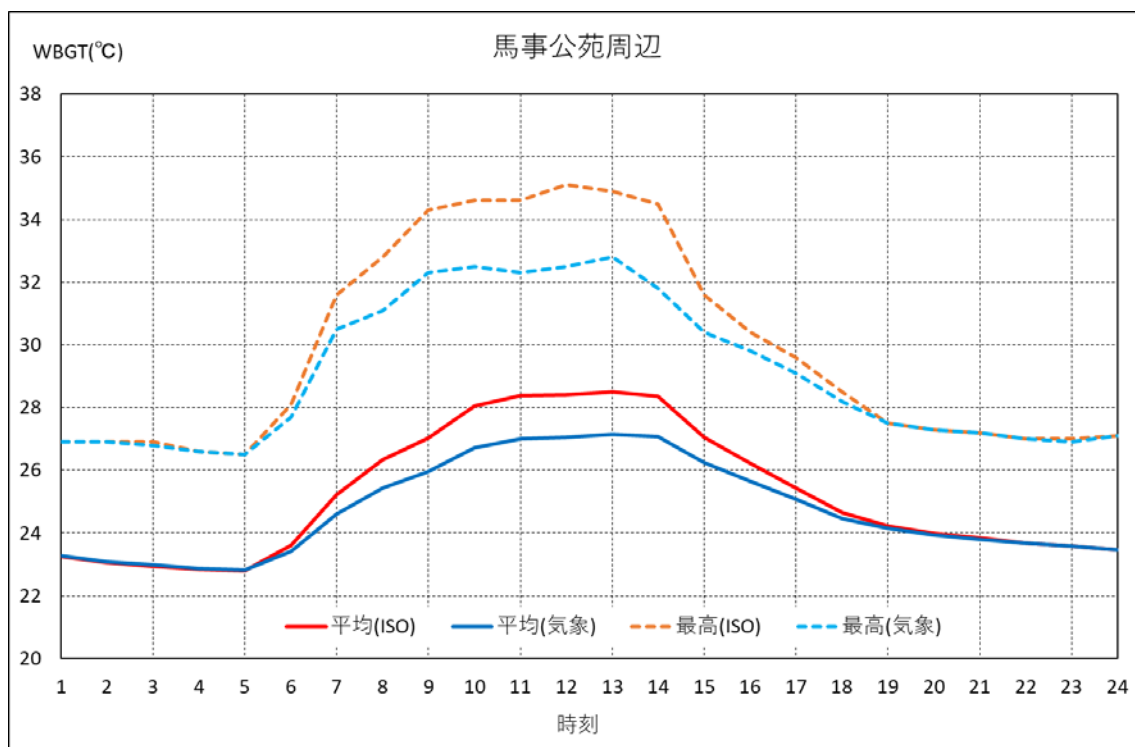


図 6-15 (d) 馬事公苑周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

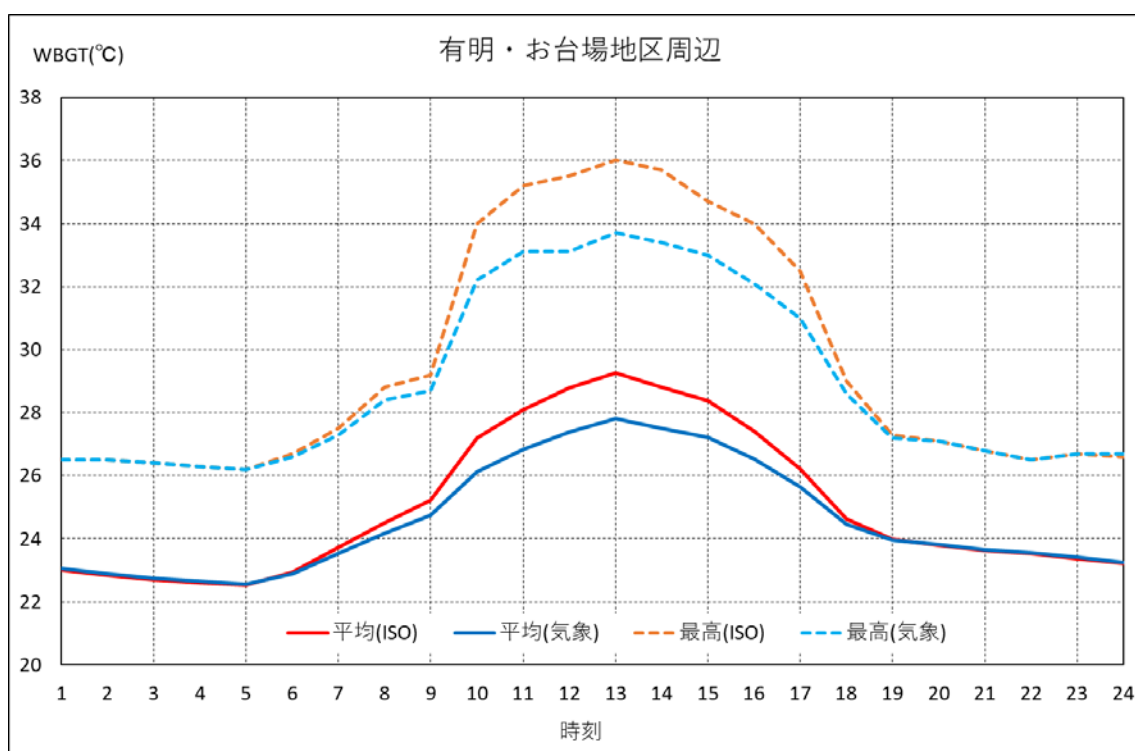


図 6-15 (e) 有明お台場地区周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

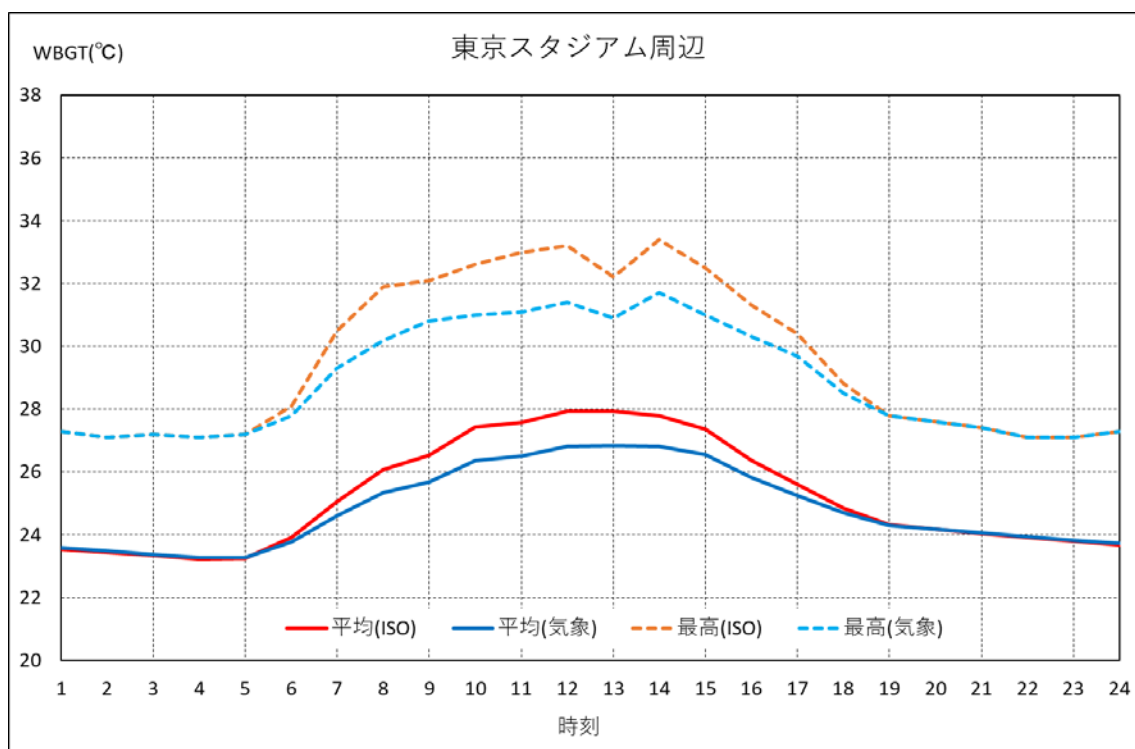


図 6-15 (f) 東京スタジアム周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

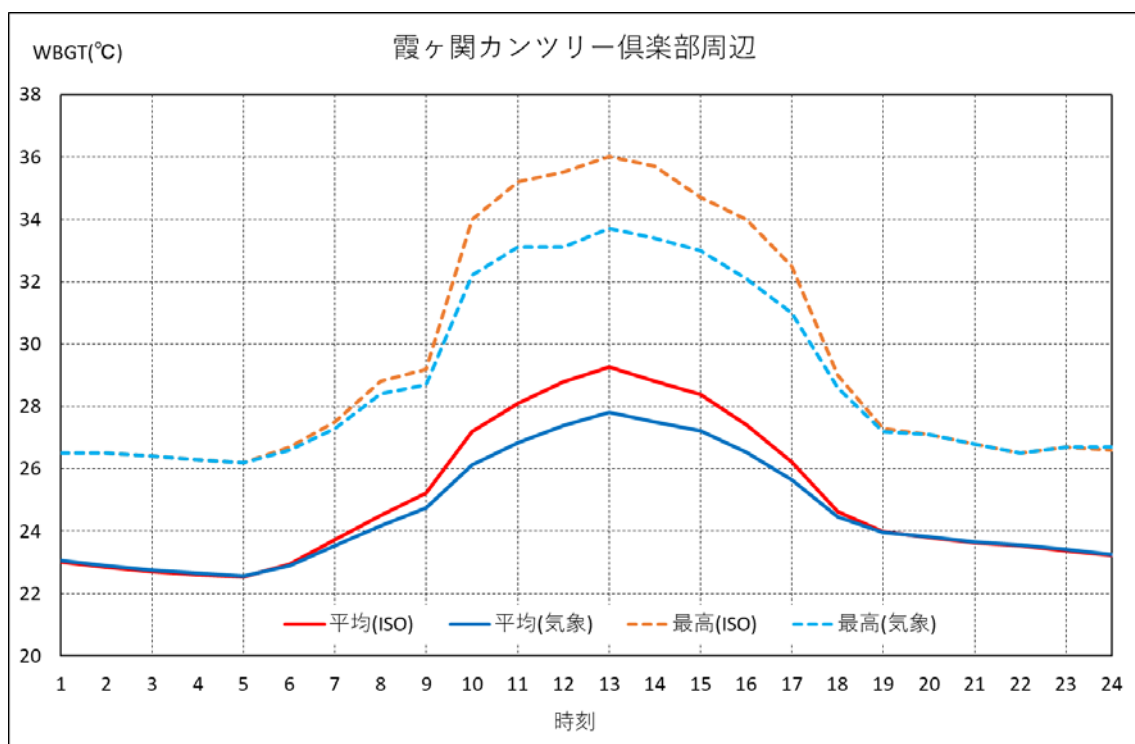


図 6-15 (g) 霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

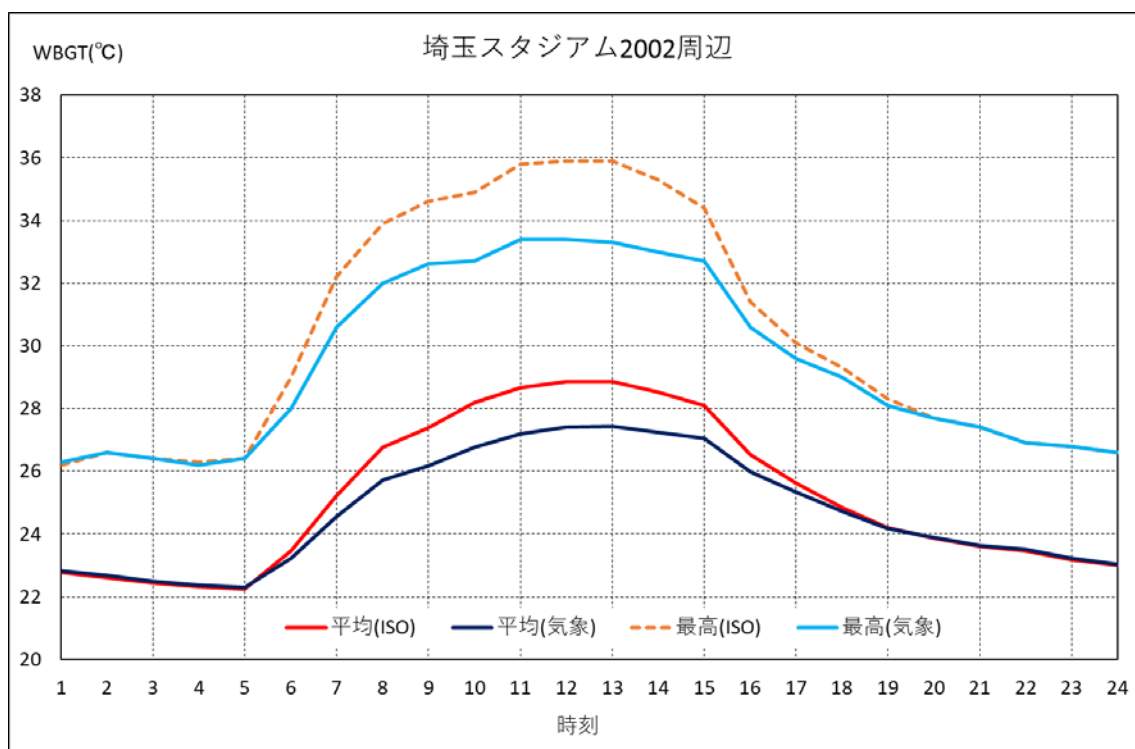


図 6-15 (h) 埼玉スタジアム 2002 周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

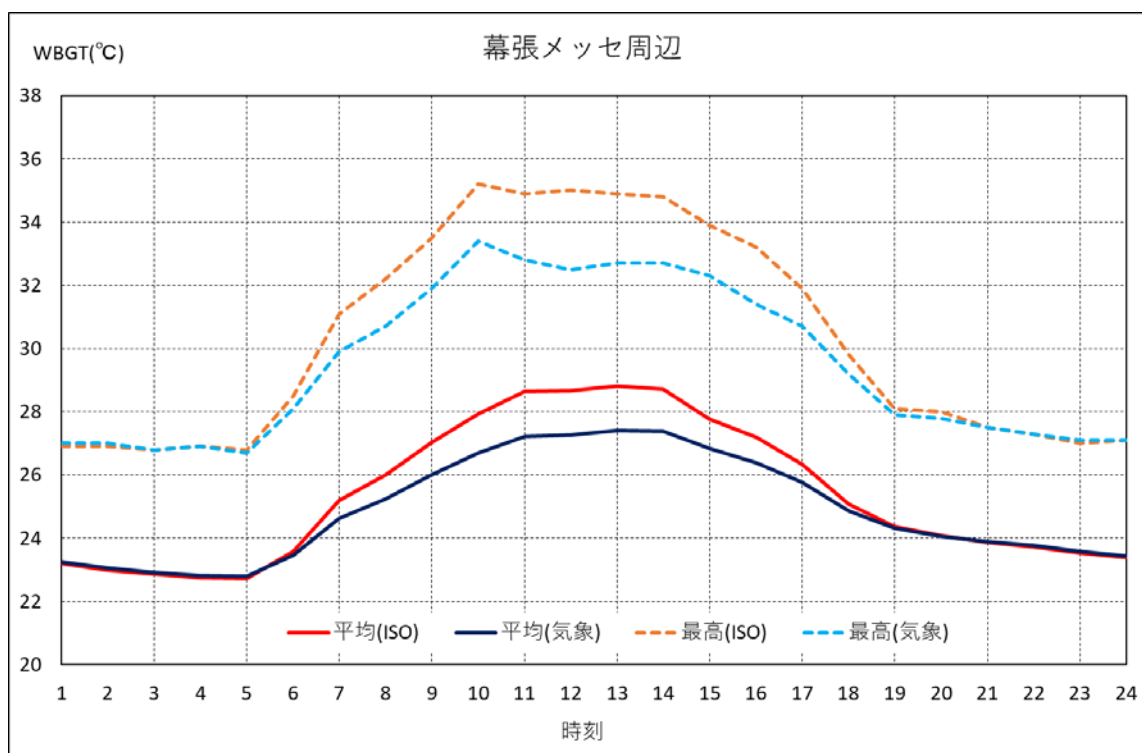


図 6-15 (i) 幕張メッセ周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

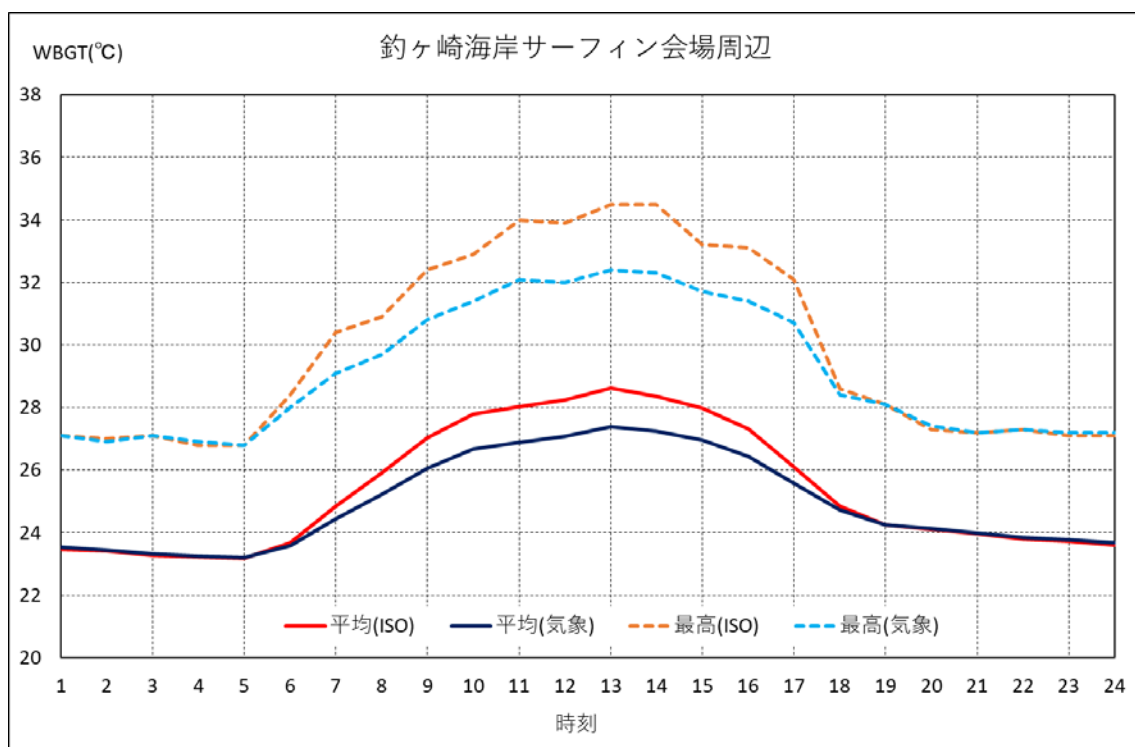


図 6-15 (j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

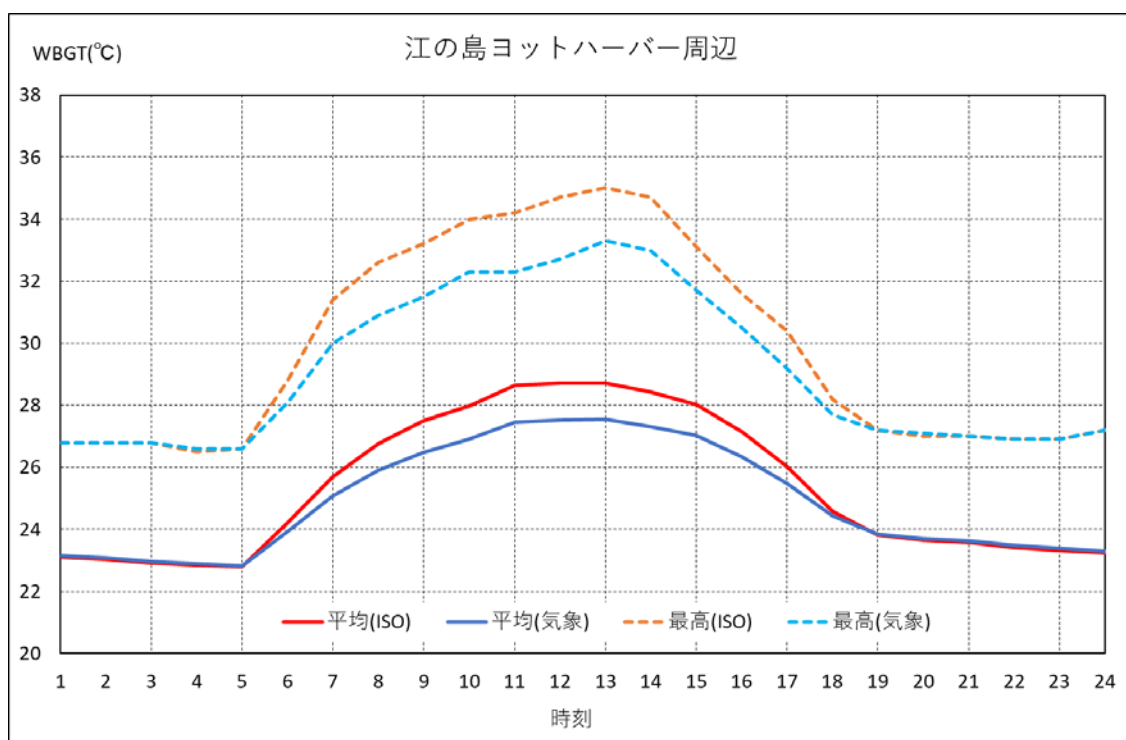


図 6-15 (k) 江の島ヨットハーバー周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

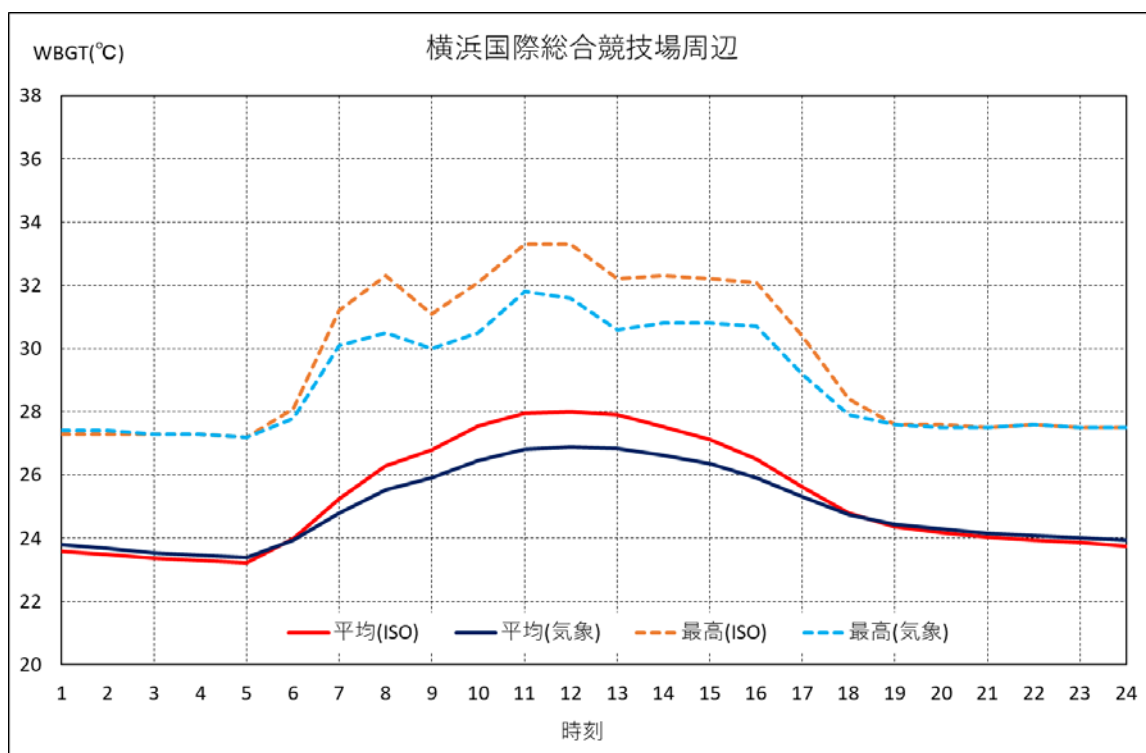


図 6-15 (l) 横浜国際総合競技場周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

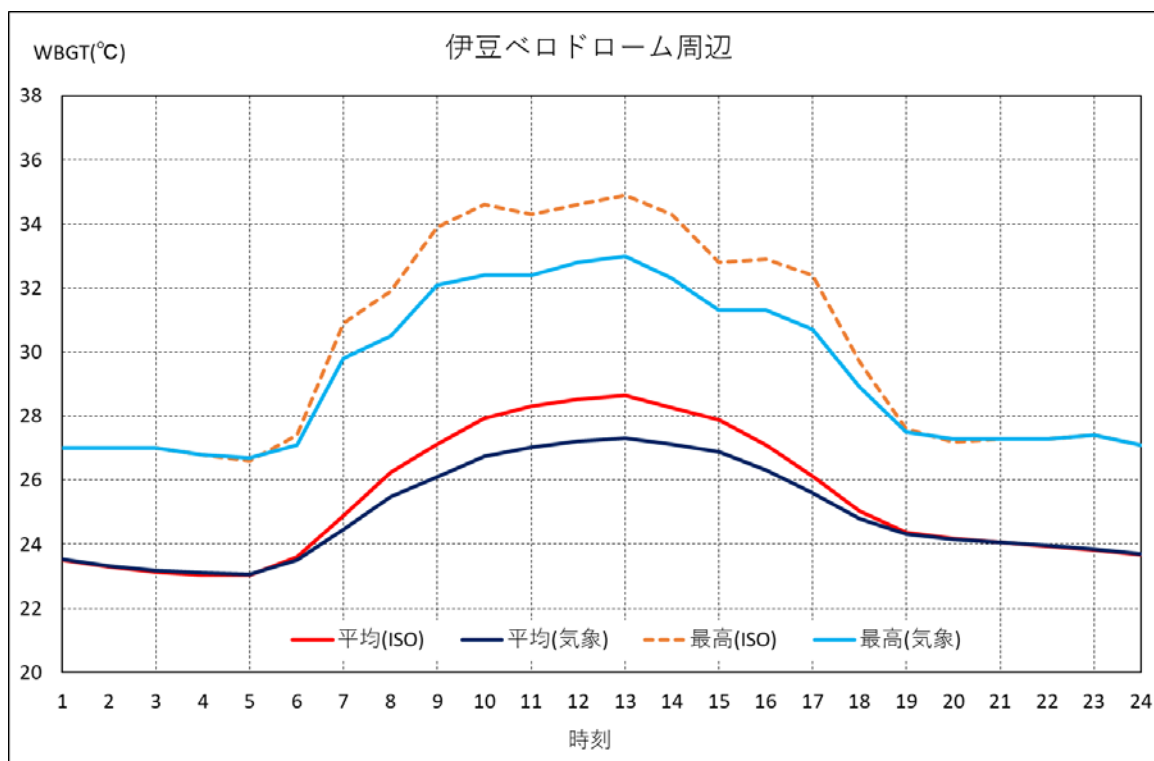


図 6-15 (m) 伊豆ペロドローム周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

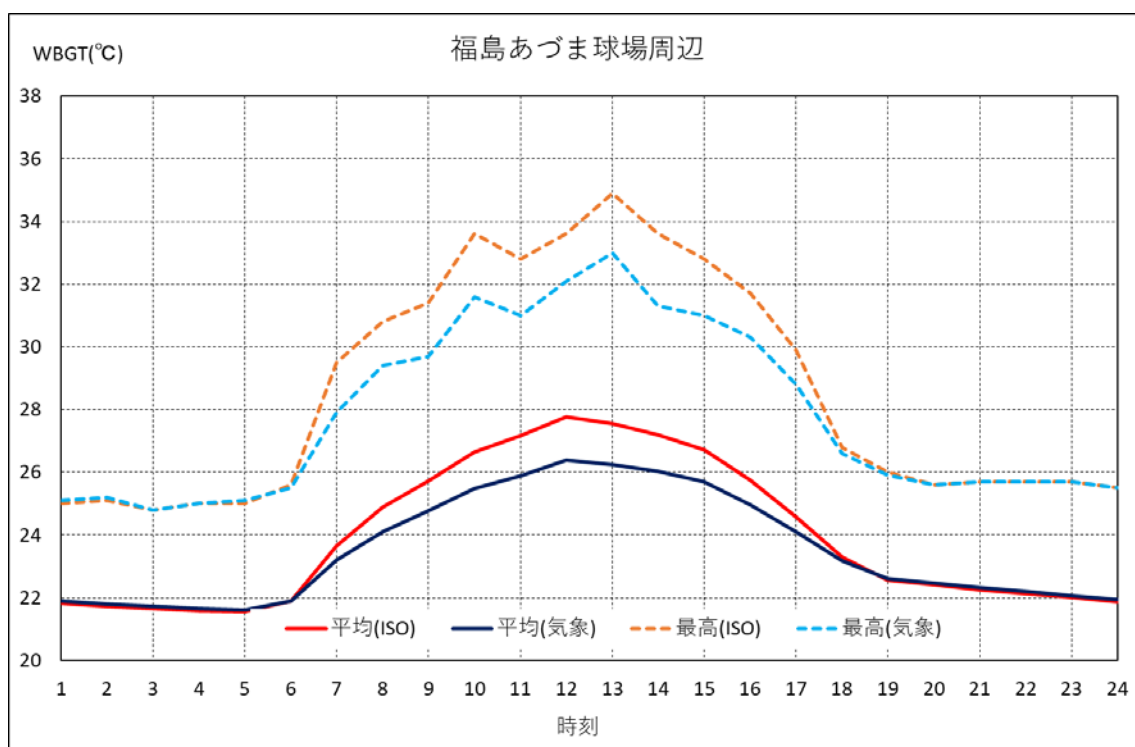


図 6-15(n) 福島あづま球場周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

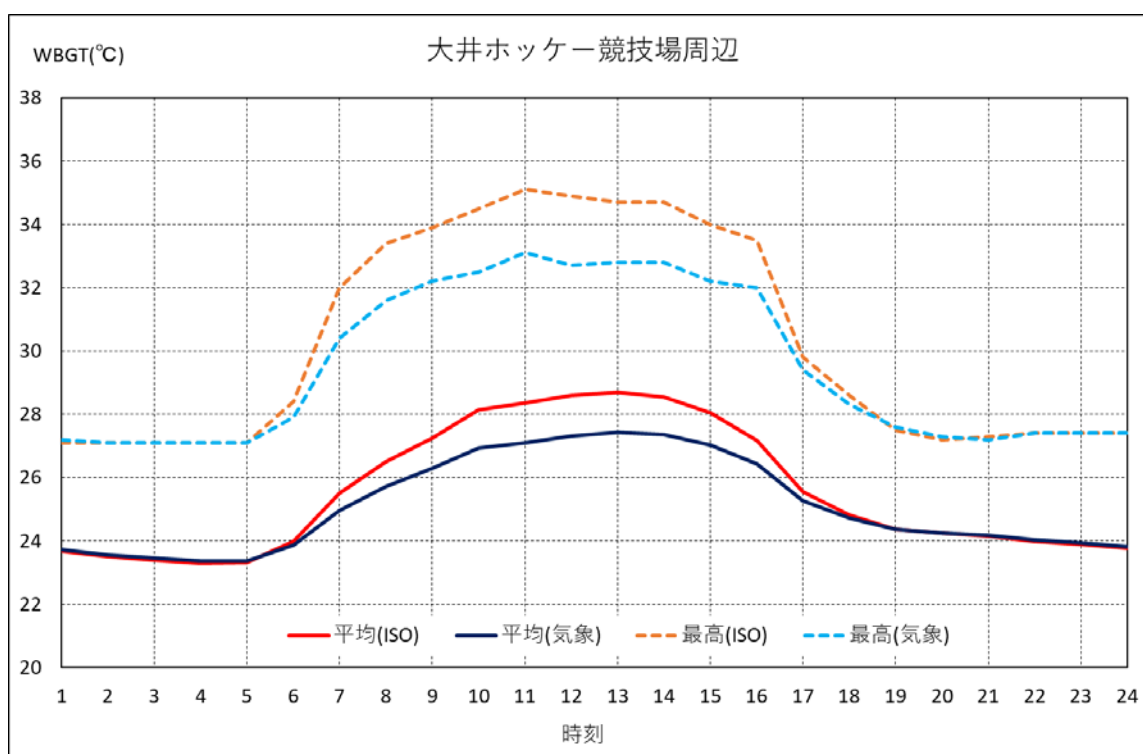


図 6-15(o) 大井ホッケー競技場周辺での ISO WBGT と気象 WBGT の日変化

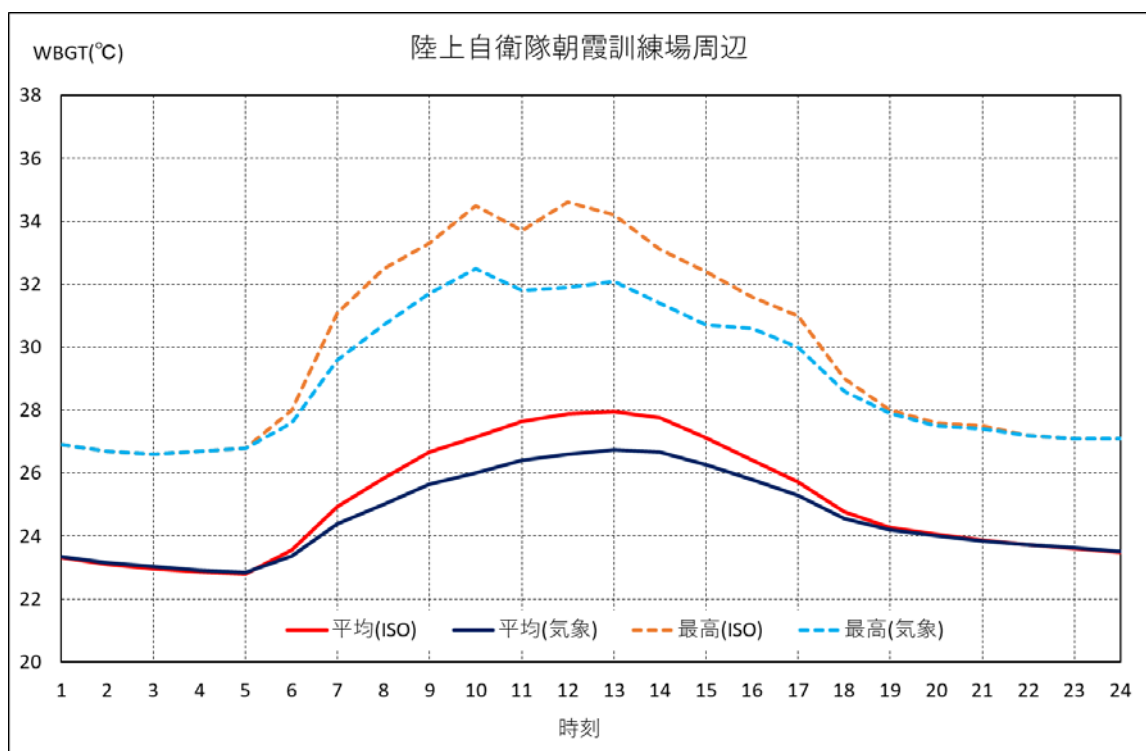


図 6-15 (p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

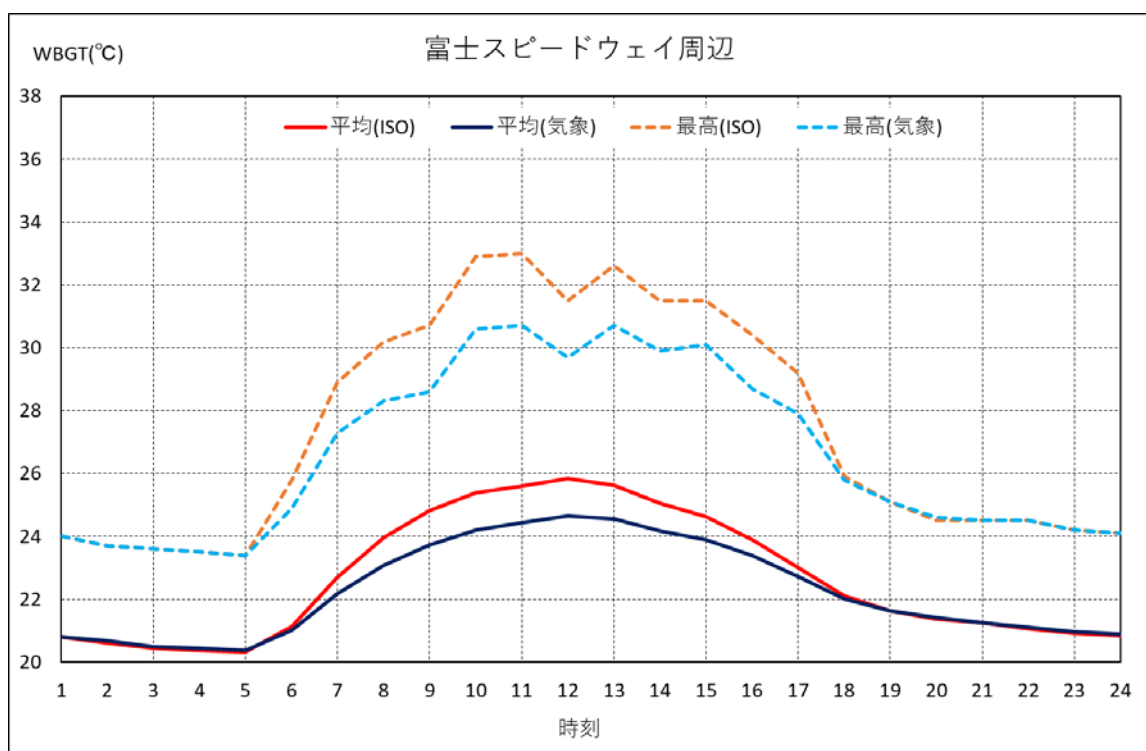


図 6-15 (q) 富士スピードウェイ周辺での ISOWBGT と気象 WBGT の日変化

(参考)

Iribarne J. V. and W. L. Godson (1981) による湿球温度算出方法

Iribarne J. V. and W. L. Godson (1981) による湿球温度の算出では、式 (ア) ~ (エ) により、気温 (T_a)、露点温度 (T_d)、気圧 (p) を用いて、湿球温度 (T_w) を求める。

T_w の一次推定値 $T_{w(1)}$ を、以下の式により求める。

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

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

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

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

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

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

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

次に、二次推定値 $T_{w(2)}$ を、以下の補正式により求める。

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

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

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

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、

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

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

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

$$A = 7.5, B = 237.3 \text{ (水)}$$

$$A = 9.5, B = 265.5 \text{ (氷)}$$

を T_d について解いた次式により求める。

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

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

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

(参考)

日本における WBGT：日本スポーツ協会の基準

(平成 30 年度業務報告書から再掲)

日本スポーツ協会では、1994 年のガイドラインで、WBGT21,25,28,31℃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(図アの左図)、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(図アの右図)、委員会において WBGT21,25,28,31℃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。

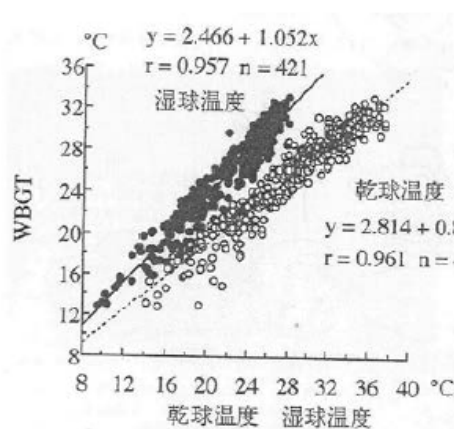


図1 湿球温度、乾球温度とWBGTの相関図
(中井ら、体力科学 39:123,1990より一部変更)

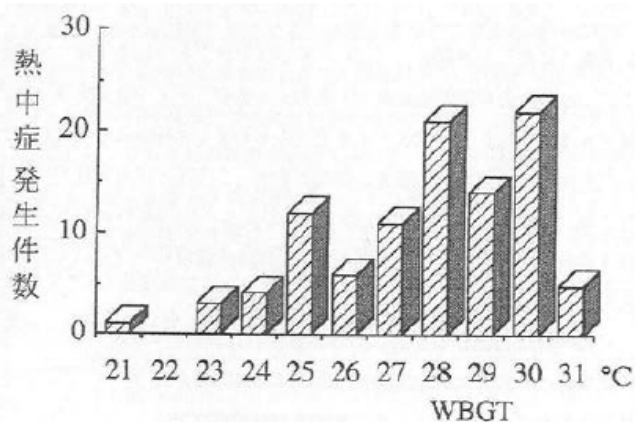


図6 運動時熱中症発生時のWBGTの分布

図ア 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、WBGT31℃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、日本スポーツ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。