

6. 2021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進めてきた。2020 年夏期前までに、毎時予測を実行可能なシステムの構築が概ね完了したので、2020 年夏期業務期間に、リアルタイムで予測値算出の試行を行った。システムの概要と試行結果について報告する。

(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、

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

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

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。

処理の手順としては、気象庁数値予報資料から求めた気象要素 (Ta,Tw,Tg) から数値予報 WBGT 予測値を求める。一方、各地区の実測から得られる気象要素 (Ta,Tw,Tg) から WBGT 観測値を求める。この数値予報 WBGT 予測値と WBGT 観測値とを比較することで、予測誤差を求めることができ、これから得られた補正係数¹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 WBGT 予測値とする。

予測値の修正は、以下の 2 段階で行われる。

① 「逐次バイアス修正法」による、2 日先予測までの修正

数値予報 WBGT 予測値の 2 日先までの毎時の予測値と WBGT 観測値との誤差から、それぞれ予測時間ごとの補正係数を求め、修正に利用するものである。この手法では補正係数を予測対象の前日～数週間前の統計処理から求めるが、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。

② 「短時間バイアス修正」による予報作成時から目先 6 時間の修正

上記の統計的な補正值を適用した予測値も実況との誤差は、ある程度生じる。毎時の処理の時点での最新の WBGT 観測値と逐次バイアス修正法による修正後の予測値との誤差を元に、6 時間先までの予測値をさらに修正することで、短時間予測の精度向上を図っている。この短時間修正の補正係数の算出は、令和元年度の技術検討に基づき以下の通りとした。

¹補正係数：過去の予測値と実際の観測値との差を統計的に処理した係数（本章補足参照）

- ・最新時刻とその1時間前の誤差の平均値を修正値の開始値とする。
- ・この修正値の開始値から、7時間先で0となるように直線的に減少する関数を適用し、6時間先までの毎時予測値に対する修正値を求める。

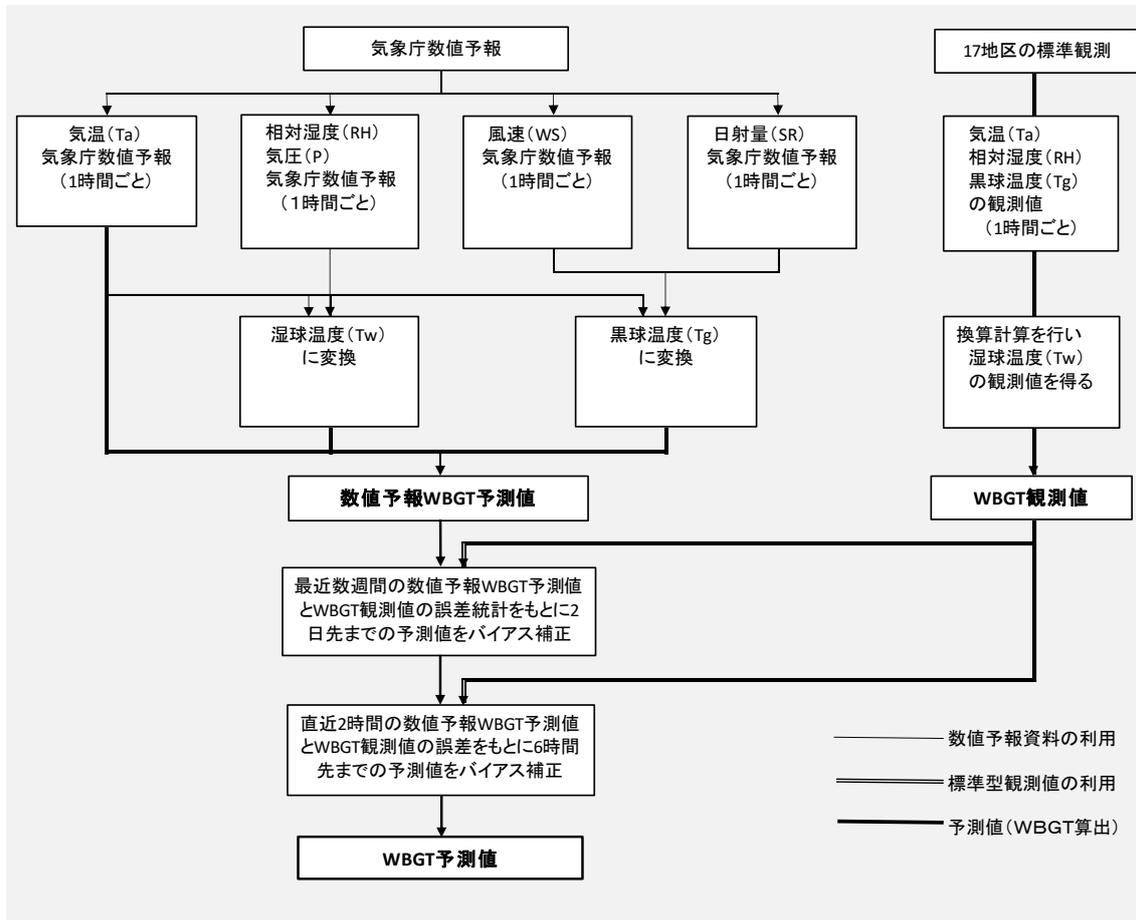


図 6-1 WBGT 予測手法の概要

今年度の WBGT 予测试験の予測情報作成に用いたシステムでは、上述の通り、気象要素 (Ta, Tw, Tg) ごとのバイアス補正ではなく、WBGT の計算結果に対するバイアス補正による予測値作成を行った。これは、これまでに開発された WBGT に関するバイアス補正計算は線形的な重ね合わせであるため、要素ごとの補正後に WBGT を計算する場合と、WBGT 計算後に補正を加える場合との結果が一致するため、より処理が単純になる後者を選択したものである。よりシンプルな補正手法を取ることで、より安定した毎時プロダクトの提供が期待できる。

なお、気象要素 (Ta, Tw, Tg) ごとのバイアス補正値の算出も実行している。

○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

WBGT 予測の基盤データであるオリパラ測定対象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。同図に示したように、オリパラ対象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。

図示したスケジュールにより、以下の情報作成を行う。

- ・ 数値予測を反映して3時間毎に WBGT 予測情報を更新する。(MSM3 時間毎、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 予測システムによる予測の試行結果について

上記のシステムによる予測情報作成の試行を 2020 年夏期 (7/1~9/15) の期間について、毎時 (1 日 24 回) 実行した。

以下に、この試行予測の結果を報告する。

○会場周辺の WBGT 予測例

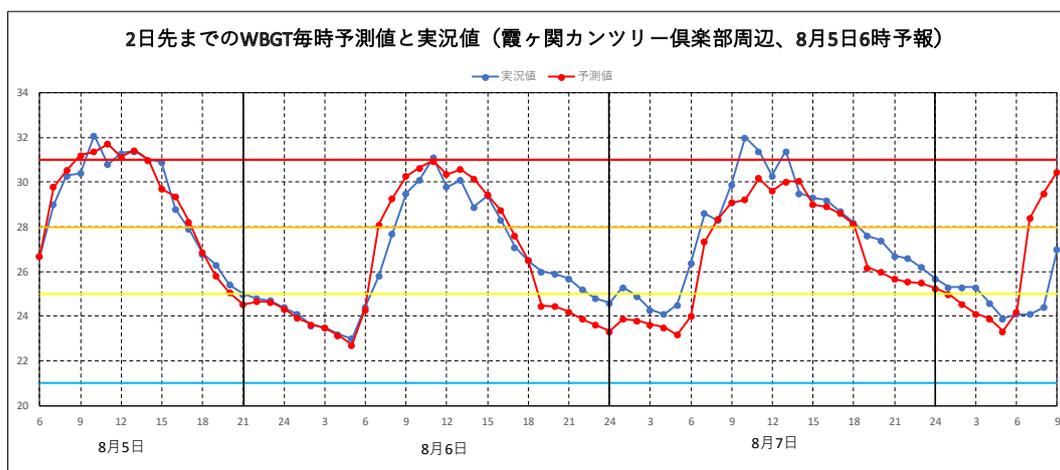
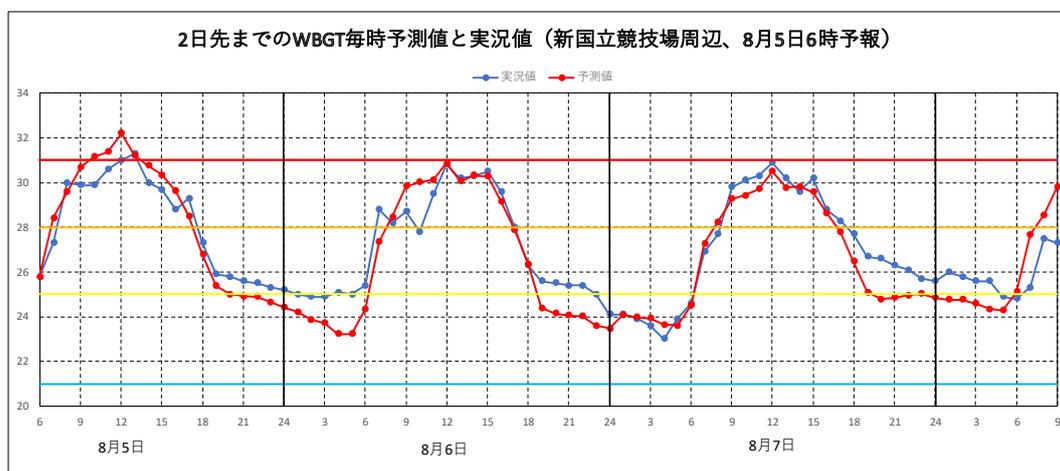


図 6-4 試行による会場周辺 WBGT 予測例

8 月 5 日朝 6 時作成予測値 (上：新国立競技場周辺、下：霞ヶ関カントリー倶楽部周辺)

図 6-4 に、今回の試行による予測例を示す。

同図は、オリンピック開催計画期間中で高温が連続した、2020 年 8 月 5 日、6 日、7 日についての予測 WBGT の時系列を、観測された WBGT と対比してグラフ表示したものである。地点は新国立競技場周辺と霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺で、予測値は 8 月 5 日朝 6 時の時点で作成されたものである。グラフを見ると、正午前後に最高値となる WBGT 値の日変化がおおむね良好に予測されているものの、最高値付近の予測が高い場合とともに低くて実際の最高 WBGT 値に達しない場合もあることがわかる。

○日最高 WBGT 値の予測結果について

次に、2020 年 7 月 1 日～9 月 16 日の業務期間の各地区を対象とした、日最高 WBGT 値の予測結果を示す。図 6-5(a)～(q) は、当日朝 6 時の時点で計算し、公表する前提で「6 時予報」とした。この設定での各日の WBGT 予測値の最高値（特定時刻ではなく予測値の中の最高値）と対応する観測値の最高値のグラフである。

期間中に予測された WBGT はこの期間の WBGT 値の日々の変動をよく表現できている。日最高 WBGT 値の予測精度を定量的に把握するため、期間中の統計的な誤差の大きさを、バイアス（誤差の平均値）RMSE（誤差の 2 乗の平均値の平方根）の 2 つの指標で評価し、各グラフに付記した。

バイアス値を見ると、ほとんどの地点で、0 に近い小さな値となっており、逐次バイアス修正法による、バイアス補正が、よく機能していることがわかる。RMSE についても、ほとんどの地点で 1.1～1.5 程度の小さな値であり、良好な予測精度が得られている。

福島あづま球場周辺については、バイアス 0.49、RMSE1.84 と比較的大きな値となっているが、この地点に特有の低温日の予測の誤差が比較的大きく（予測が高すぎる）、誤差統計に大きく寄与したものと思われる。



図 6-5 (a) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (新国立競技場周辺)

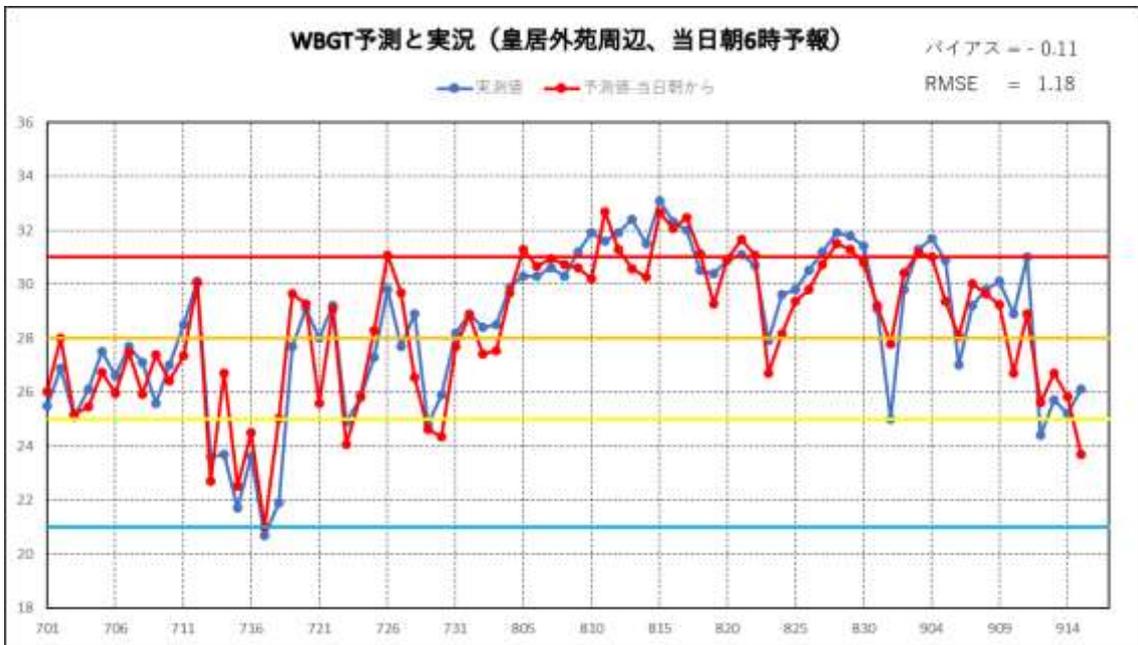


図 6-5 (b) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (皇居外苑周辺)

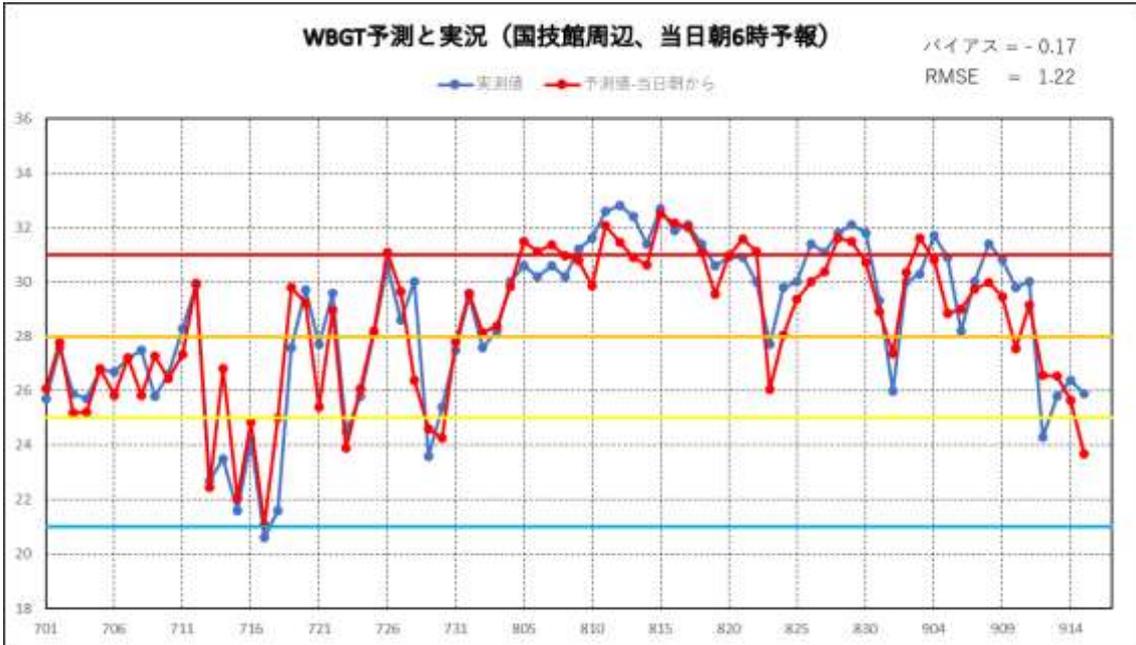


図 6-5(c) 日最高 WBGT 予測の検証結果（国技館周辺）

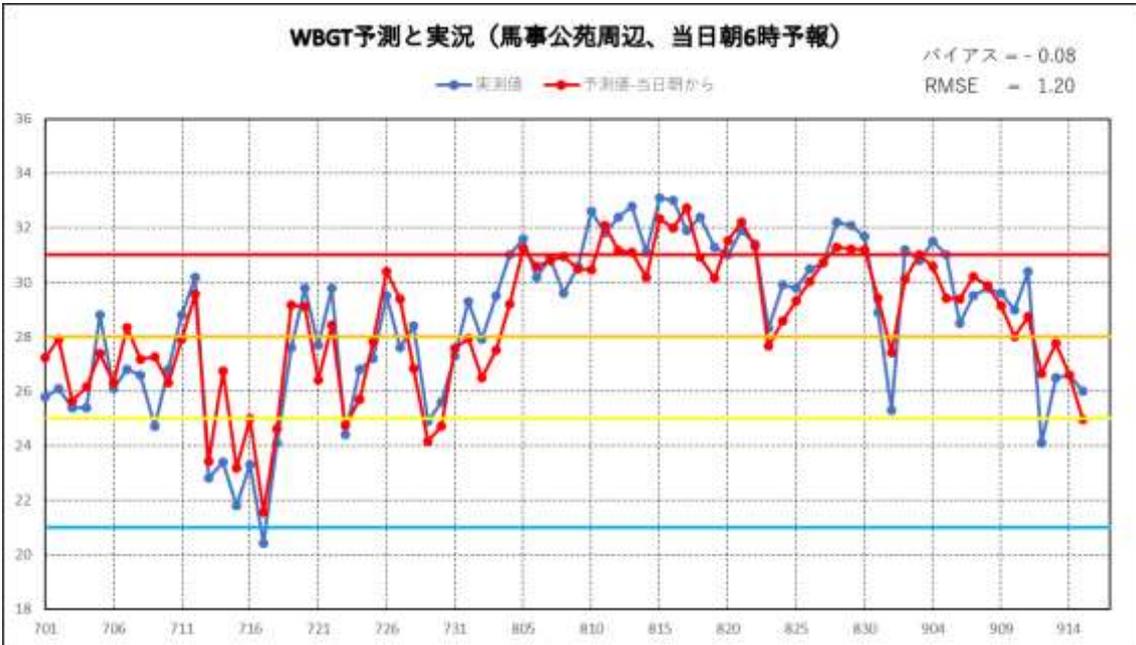


図 6-5(d) 日最高 WBGT 予測の検証結果（馬事公苑周辺）

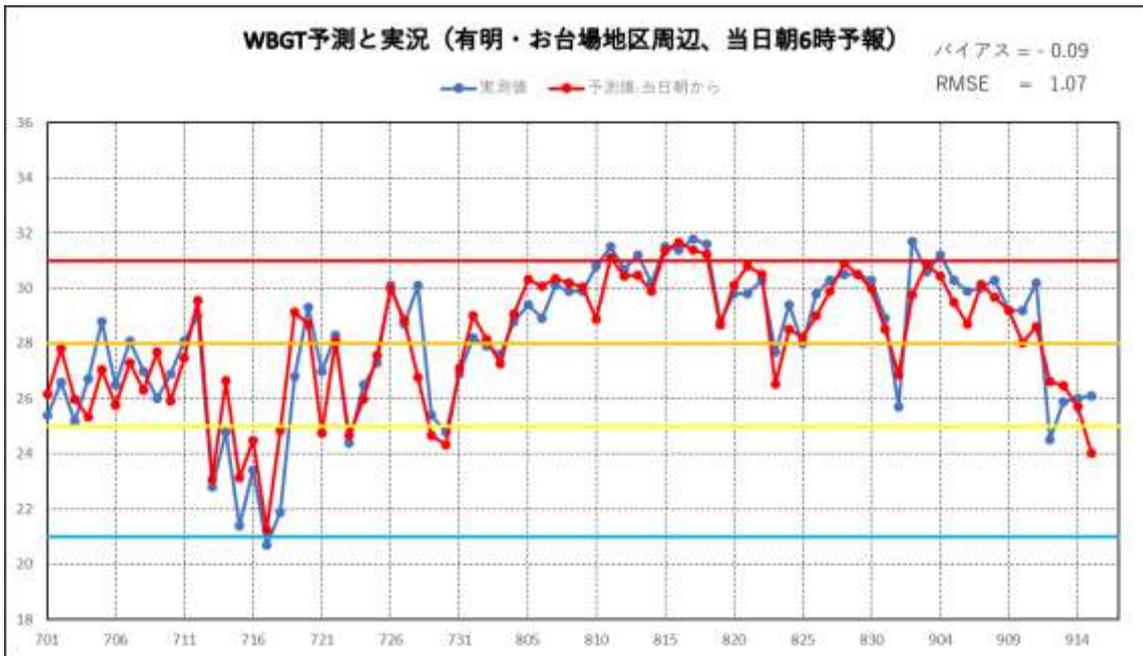


図 6-5 (e) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (有明・お台場地区周辺)

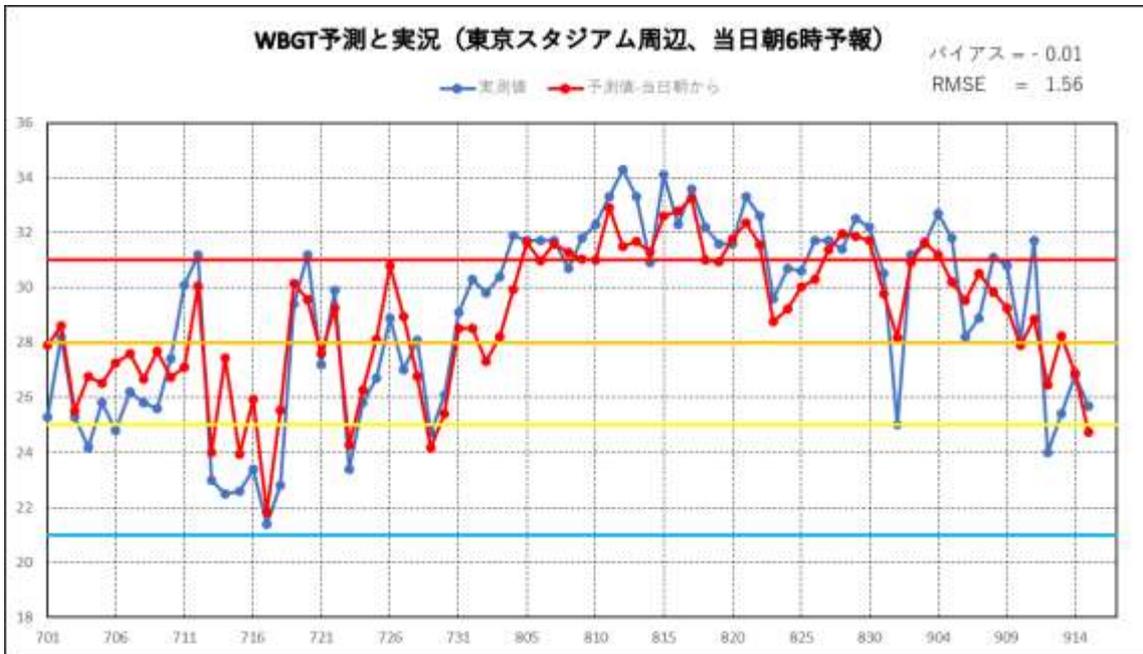


図 6-5 (f) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (東京スタジアム周辺)

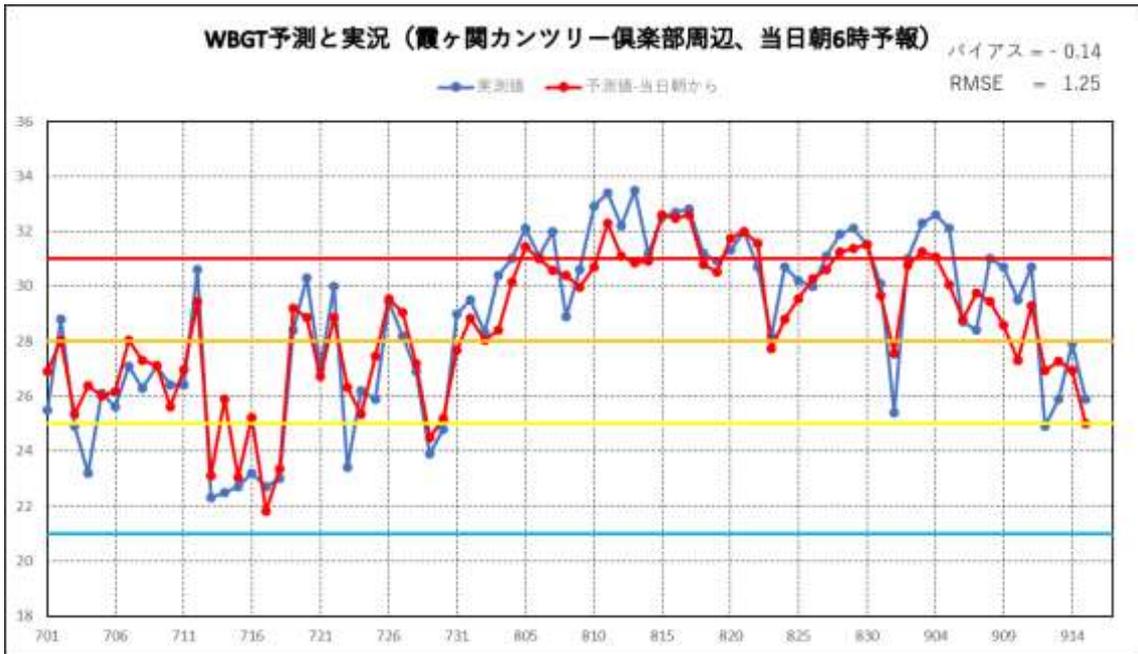


図 6-5 (g) 日最高 WBGT 予測の検証結果（霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺）

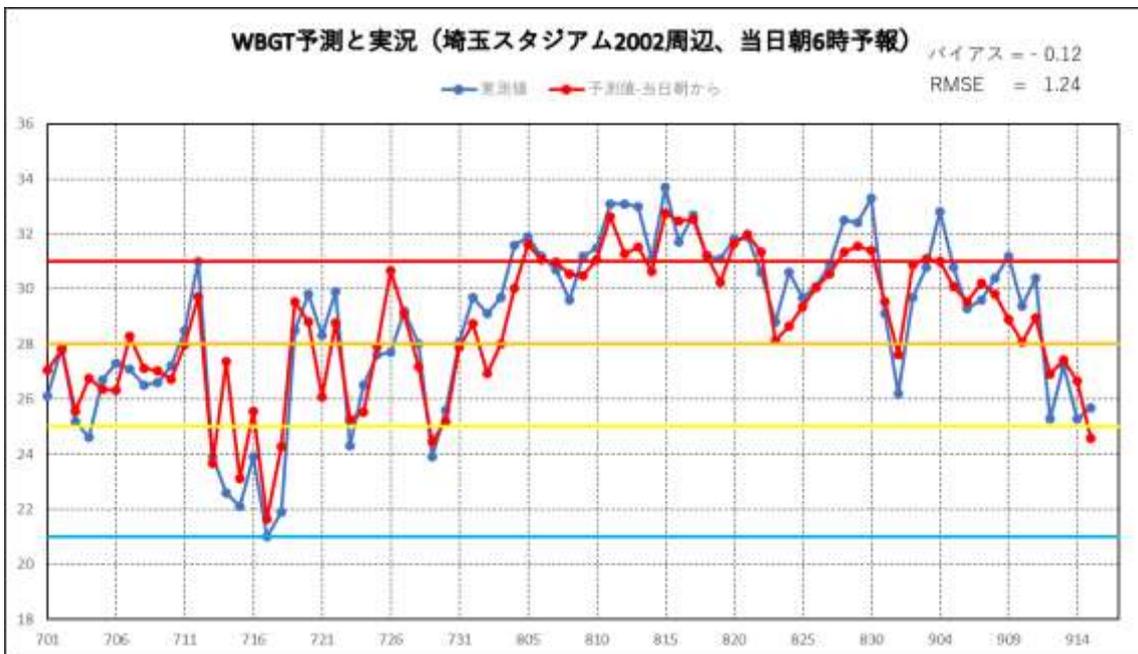


図 6-5 (h) 日最高 WBGT 予測の検証結果（埼玉スタジアム 2002 周辺）



図 6-5(i) 日最高 WBGT 予測の検証結果（幕張メッセ周辺）

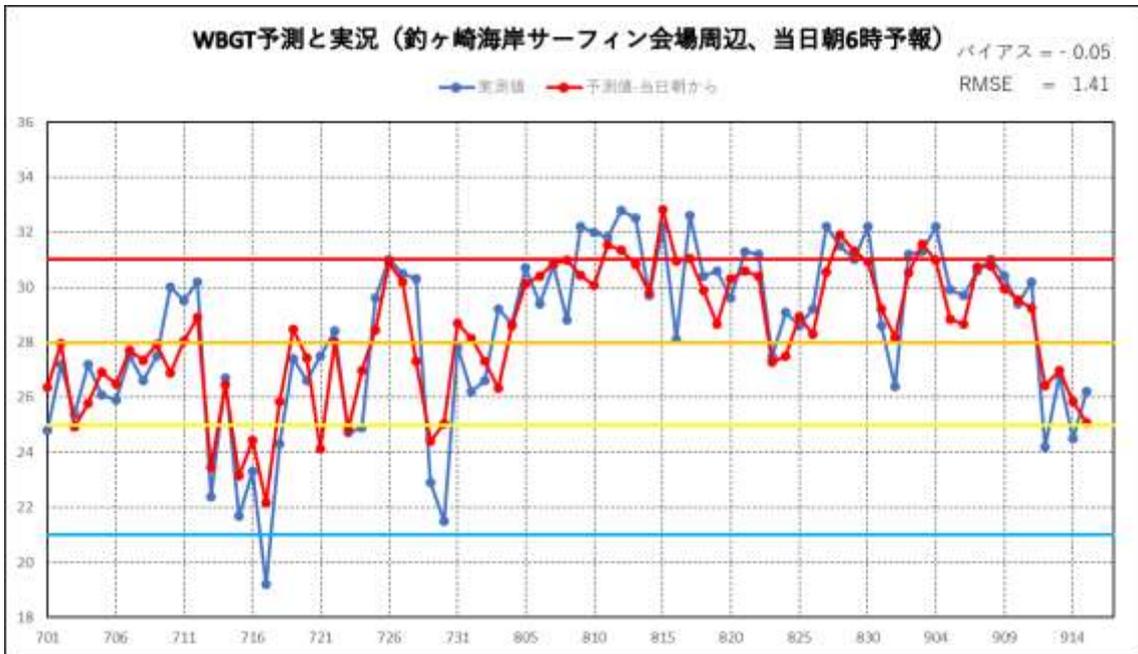


図 6-5(j) 日最高 WBGT 予測の検証結果（釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺）

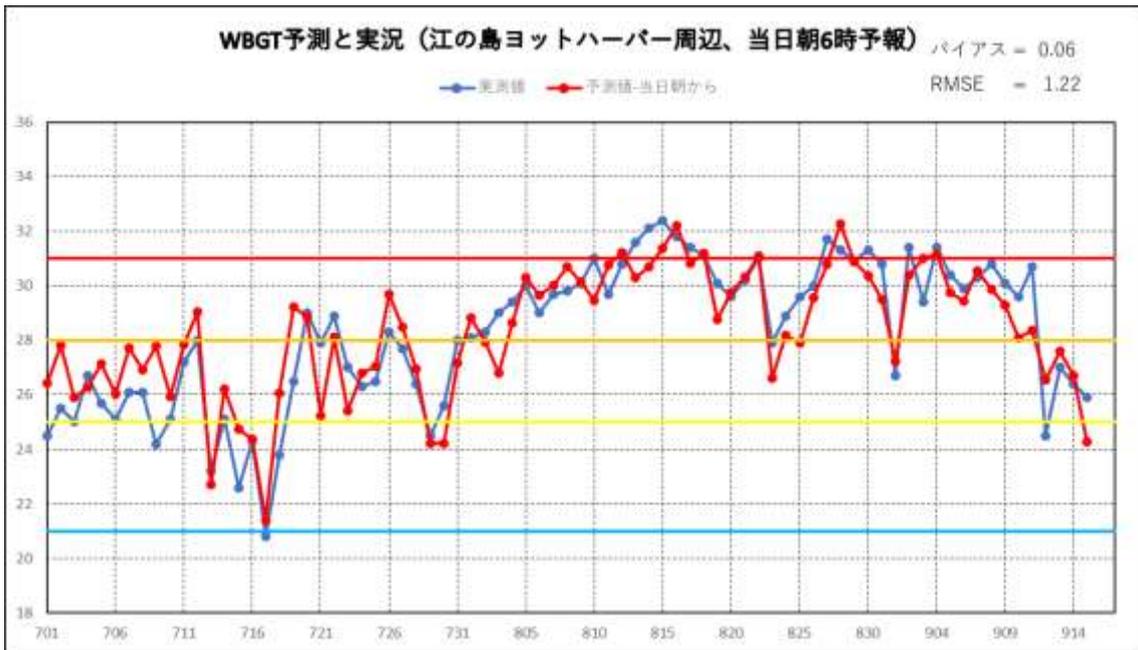


図 6-5(k) 日最高 WBGT 予測の検証結果（江の島ヨットハーバー周辺）



図 6-5(l) 日最高 WBGT 予測の検証結果（横浜国際競技場周辺）

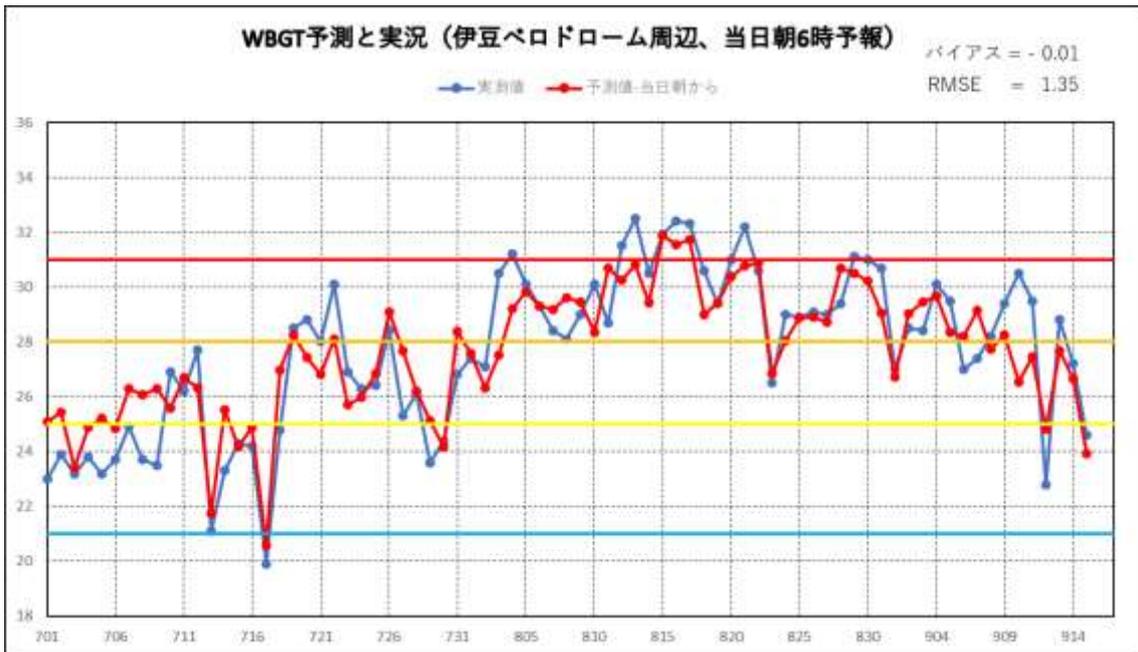


図 6-5 (m) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (伊豆ペロドローム周辺)



図 6-5 (n) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (福島あづま球場周辺)

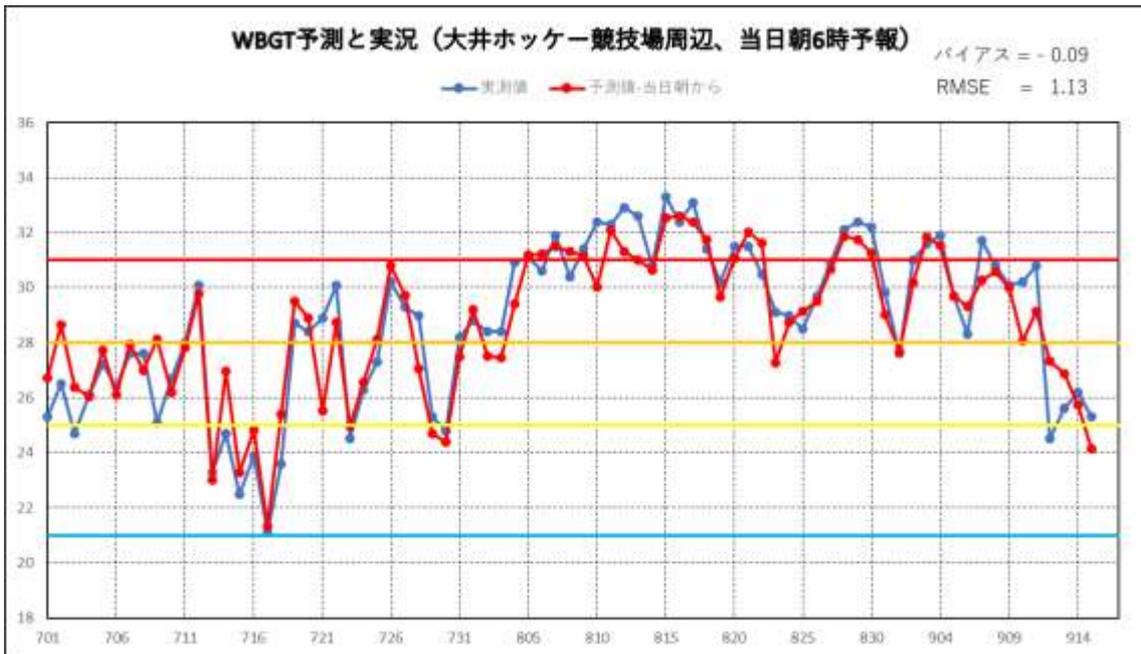


図 6-5(o) 日最高 WBGT 予測の検証結果（大井ホッケー競技場周辺）

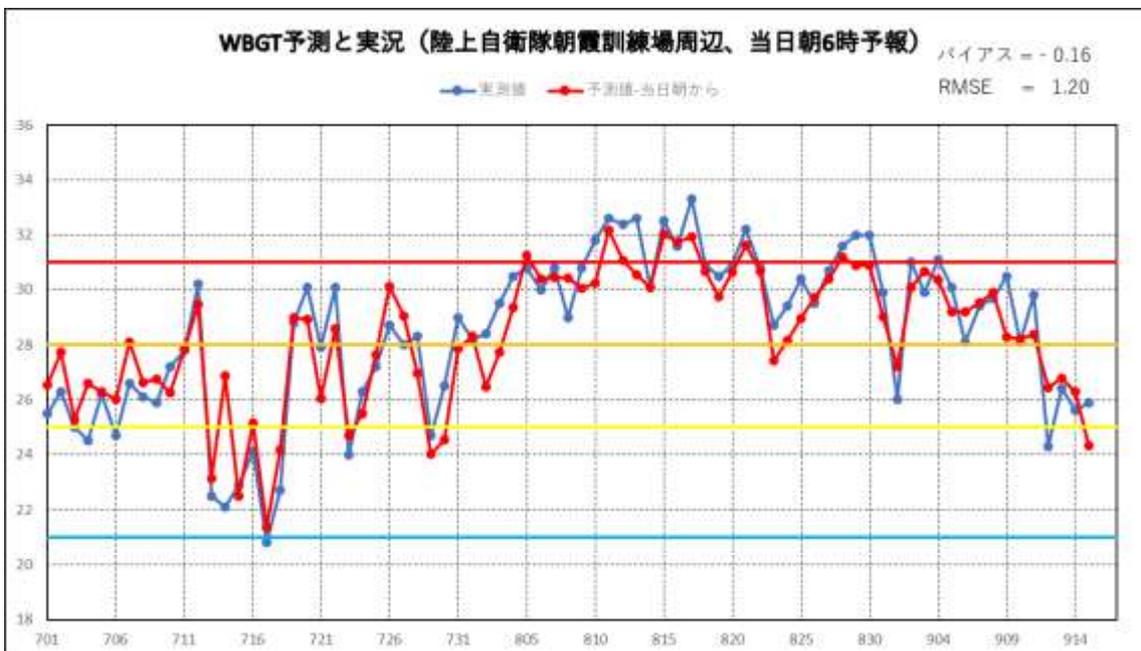


図 6-5(p) 日最高 WBGT 予測の検証結果（陸上自衛隊朝霞訓練場周辺）



図 6-5(a) 日最高 WBGT 予測の検証結果 (富士スピードウェイ周辺)

○予測期間による WBGT 精度の比較

本業務では、2日先までの、WBGT 予測を作成・提供する計画で、今回の試行でも、毎時に2日先までの予測情報を作成した。予測期間が長くなる場合の精度への影響を見てみる。

図 6-6 は、新国立競技場周辺の各日の日最高 WBGT について、当日 6 時作成の予測 (同図、上段)、前日朝 6 時作成の予測 (中段)、前々日朝 6 時作成の予測 (下段)、を示したグラフである。

前日、前々日からの予測も、日最高 WBGT の日変動をおおむね良好に表現できているが、予測期間が長くなるにしたがって、誤差が少しずつ大きくなっていることが見て取れる。誤差統計値を各グラフに付記したが、これを見ると、バイアス値は全期間で小さな値を保っており、2日予測でもバイアス誤差はほとんど拡大していない。一方、RMSE は、次第に大きくなっており、予測期間が長くなるにしたがって、個々の予測値の誤差が増大していることが認められるものの、2日予測で 2°C 未満の誤差であり、かなり良好な精度と言える。

表 6-1 に、全 17 地点について、当日、前日、前々日からの予測誤差について、まとめた。前項で触れた福島あづま球場周辺以外の地点では、2日予測でも 0 に近いバイアス値と、おおむね 2°C 以下の RMSE 値を実現できている。

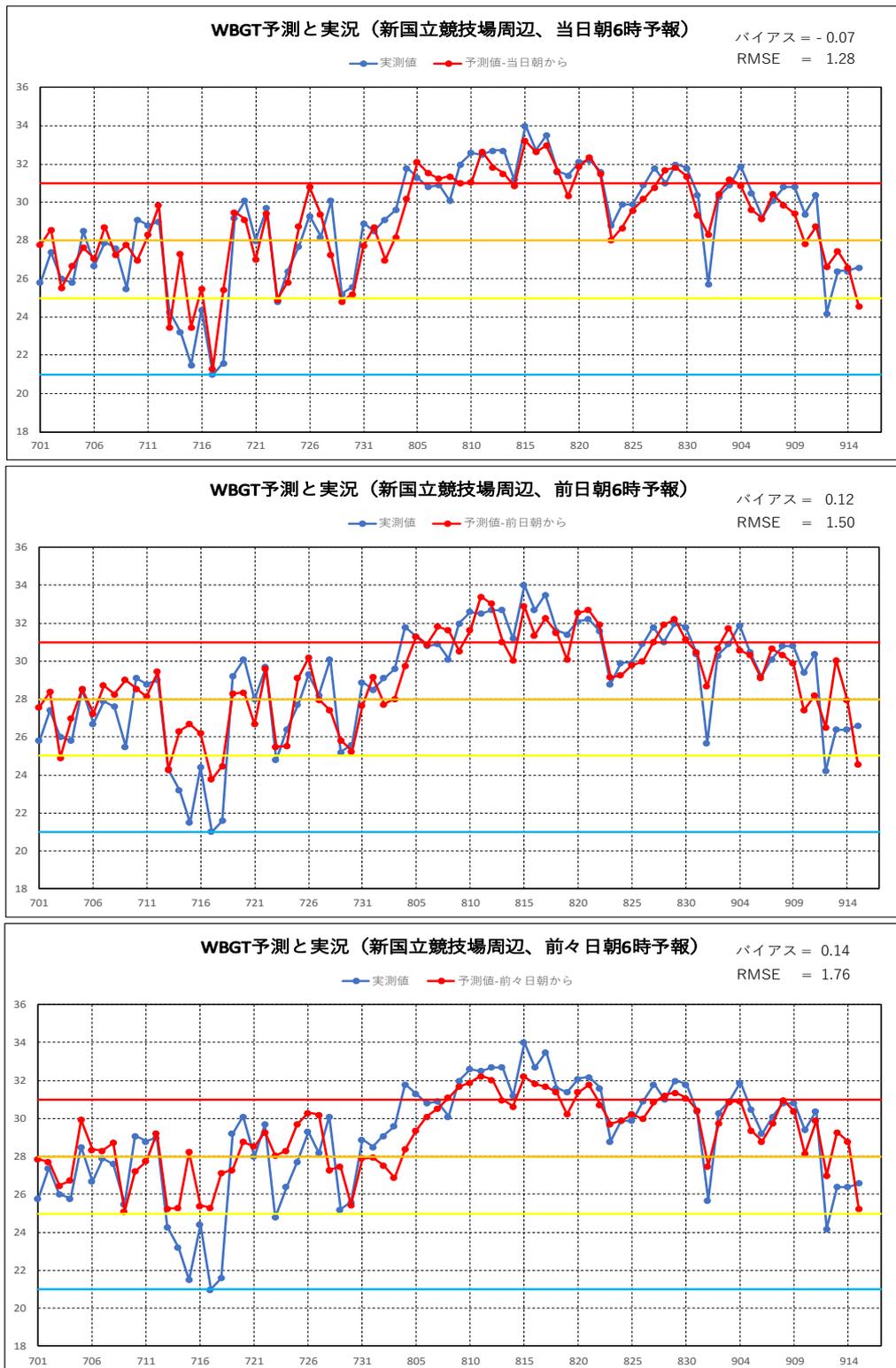


図 6-6 日最高 WBGT 予測の検証（予測期間の長さへの依存性、新国立競技場周辺）
 （上段：当日朝からの予測、中段：前日朝からの予測、下段：前々日朝からの予測）

表 6-1 各地区の日最高 WBGT 予測精度の検証結果一覧表

No	測定地区	当日朝予報		前日朝予報		前々日朝予報	
		バイアス	RMSE	バイアス	RMSE	バイアス	RMSE
1	新国立競技場周辺	-0.07	1.28	0.12	1.50	0.14	1.76
2	皇居外苑周辺	-0.11	1.18	0.14	1.47	0.19	1.61
3	国技館周辺	-0.17	1.22	0.08	1.52	0.05	1.69
4	馬事公苑周辺	-0.08	1.20	0.14	1.52	0.04	1.66
5	有明・お台場地区周辺	-0.09	1.07	0.12	1.41	-0.06	1.55
6	東京スタジアム周辺	-0.01	1.56	0.26	1.85	0.18	2.18
7	霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺	-0.14	1.25	0.11	1.54	0.04	1.88
8	埼玉スタジアム2002周辺	-0.12	1.24	0.07	1.46	-0.01	1.74
9	幕張メッセ周辺	-0.17	1.26	0.09	1.60	-0.12	1.63
10	釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺	-0.05	1.41	0.17	1.85	0.09	2.00
11	江の島ヨットハーバー周辺	0.06	1.22	0.38	1.52	0.15	1.59
12	横浜国際総合競技場周辺	-0.15	1.37	0.11	1.59	-0.07	1.75
13	伊豆ペロドローム周辺	-0.01	1.35	0.37	1.79	0.06	1.71
14	福島あづま球場周辺	0.49	1.84	0.71	2.28	0.99	2.68
15	大井ホッケー競技場周辺	-0.09	1.13	0.11	1.46	-0.02	1.58
16	陸上自衛隊朝霞訓練場周辺	-0.16	1.20	0.00	1.32	-0.03	1.74
17	富士スピードウェイ周辺	0.37	1.32	0.56	1.62	0.41	1.80

(3) WBGT 予測試行のまとめ

開発された WBGT 予測システムにより予測を試行した結果、各会場周辺の地点のほとんどの地点で、良好な精度で WBGT 予測情報を作成できることが確認できた。

また、毎時処理も基本的にトラブルなく実行できており、安定性も確認できた。

(補足)

予測値と観測値から求める補正係数について

その時点までの予測値と観測値の誤差を推定して統計的に処理を行うことで、次の予測値の補正を行うための係数(補正係数)を求める。

予測対象要素(T_a, T_w, T_g)の真の値と対応する数値予報値の差 (バイアス補正值) bc (bias correction) を考える。

$$bc = Y_{real} - Y_{nwp} \quad (\text{式 a})$$

予測値の真値 Y_{real} は直接には分からないが、観測値の近くにあると推定して、適当な bc 値を仮定しその bc を用いた予測結果と実際の観測値とを以下の式 **b** に従い、繰り返し比較し、その結果にもとづいて bc を少しずつ修正し、より予測誤差が少ない値に近づける。($bc = 0$: 統計開始の際に最初の推定値とする)

$$bcr = bc0 + \delta \times (Y_{obs} - Y_{estimated}) \quad (\text{式 b})$$

式 **b** 中の $Y_{estimated}$ は、処理の時点で利用可能なバイアス補正值 ($bc0$) を使った予測値で左辺の計算結果 bcr が修正後のバイアス補正值である。(次回の処理ではこれが $bc0$ となり $Y_{estimated}$ の計算に使われる。) この式により、前回までの処理で推定されたバイアス補正值を適用した予測値と観測を比べてみて、高すぎれば低く、低すぎれば高めになるように、 bc を逐次 (例えば 1 日に 1 回) 修正していく。

補正された予測値 (Y_{fcst}) は、最新のバイアス補正值を予測の根拠の数値予報値にプラスすることで求められる。

$$Y_{fcst} = Y_{nwp} + bcr \quad (\text{式 c})$$

式 3.2 の δ は、 bc の変化の速さを決めるパラメータである。1 例として、毎日の予報を補正する場合に、主に 1 ~ 2 週間以内の平均的誤差が bc 修正に反映される δ 値 0.07 を用いた。

(平成 29 年度体感指標に関する調査及び黒球温度等観測・WBGT 算出業務 業務報告書 99 ページより作成)

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とすべく、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 測定結果の活用法を検討した。

各地区における基本的な測定点（以下「標準点」と略記）として、標準型測定機器を設置した「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」の WBGT との差を定量的に情報提供することで、観客や主催者等が暑熱環境の把握に活用することを想定して解析を進めた。

(2) 解析内容

- ・測定箇所 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、日射の有無による日射の強さの違いであることから、草地日なたでの標準型での黒球温度と気温の差（以下「Tg-Ta」と略記する場合がある）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。
- ・また、測定地点間の比較は同一測定器による差を用いることが適当であることから、利用データは、同じ仕様の測定器を使った 2018 年、2019 年、2020 年の携帯型データを対象とした。設置期間の短縮や欠測による減少の場合もあるが、同一測定地点で最大 233 日分（2018 年 77 日、2019 年及び 2020 年は 78 日）1 分値 335,520 データ、1 時刻あたり 13,980 データ）を用いた。

手順 1 地区ごとの解析

- ・解析は、最初に、地区毎に日射の強さと同一測定機による WBGT 差を評価するため、縦軸に日射の強さ（標準型での黒球温度－気温：Tg-Ta）、横軸を各時刻とした、方眼紙状の図を各地点毎に、草地日なたに対する比較として 3 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、データ数及び各方眼紙のマス目毎の携帯型 WBGT 差（例えば「草地日なた－草地日陰」）の平均値を算出し、分布図として求めた（地区ごとの分布図は図 6-10～図 6-12）として掲載した。
- ・草地日なた（単独）3 地区、コンクリ日陰（予備）1 地区も分布図を作成した（図 6-13）
- ・概ね、各地区とも草地日陰、コンクリ日陰では日射が強くなるにつれて WBGT 差が大きくなる傾向がみられた。ただし、その大きさは地区によって異なる。コンクリ日なたは同じ日なたであるが、草地日なたと同一ではなく、コンクリ日なたでの WBGT がわずかに低くなる場合が多くみられたが、パターンは様々であった。
- ・地区ごとの解析結果については、以降の作業の基礎となるので、資料としては（3）解析

結果（ウ）にまとめた。

手順2 全体を通しての解析

- ・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こと、また、この解析の目的として、特定の測定地点に依らない日陰など暑熱環境の緩和状況の情報提供であることから、各地区の解析結果をさらにまとめることとした。
- ・2019年度業務では、各マス目に対して17地区全体での平均値を求めたが、各地区間で日陰でのWBGT低下には差があり、「十分でない日陰によって全体で日陰効果が低く見積もられる」可能性もあることから、本年度（2020年度）業務では、17地区の全項目で作成された各マス目の平均値のほか、各マス目ごとに偏差の最大値（草地日なたに対する差で多くの場合負偏差）についても求めた。
- ・平均値のプロットにあたっては、各マス目ごとに、地区毎の解析ではデータ数100個以下、同様に全地区を対象とする場合にはそれぞれのデータ数の平均値が100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3年間の平均での分布について、草地日陰の例で図6-7に示す。日中のTg-Taが10℃前後で最大1マス目に1000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8000個程度のデータが解析対象となっている。
- ・草地日なたに対する草地日陰、コンクリ日陰、コンクリ日なたの差は、日陰の場合最も日射の強い場合では最大値は4℃を上回り、平均値は3℃程度とその差は大きくなった。コンクリ日なたでは、日射が最も強い場合には1℃を超えるが平均的には1℃以内に収まっている。
- ・以上の解析は（3）解析結果（ア）としてまとめた。

手順3 補正量の算出

- ・今回の解析結果から補正量の算出にあたっては、上記の全体的な評価からもとめた各地区の平均値と最大値いずれも妥当か判断が難しいことから、各地区の偏差の分布などをより詳細に比較し、測定結果としてあまり適切ではないものを除いたうえで、各地区の測定環境の特徴を反映した値を求めることとした。
- ・補正量の算出の詳細は（3）解析結果（イ）にまとめた。

○ 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。

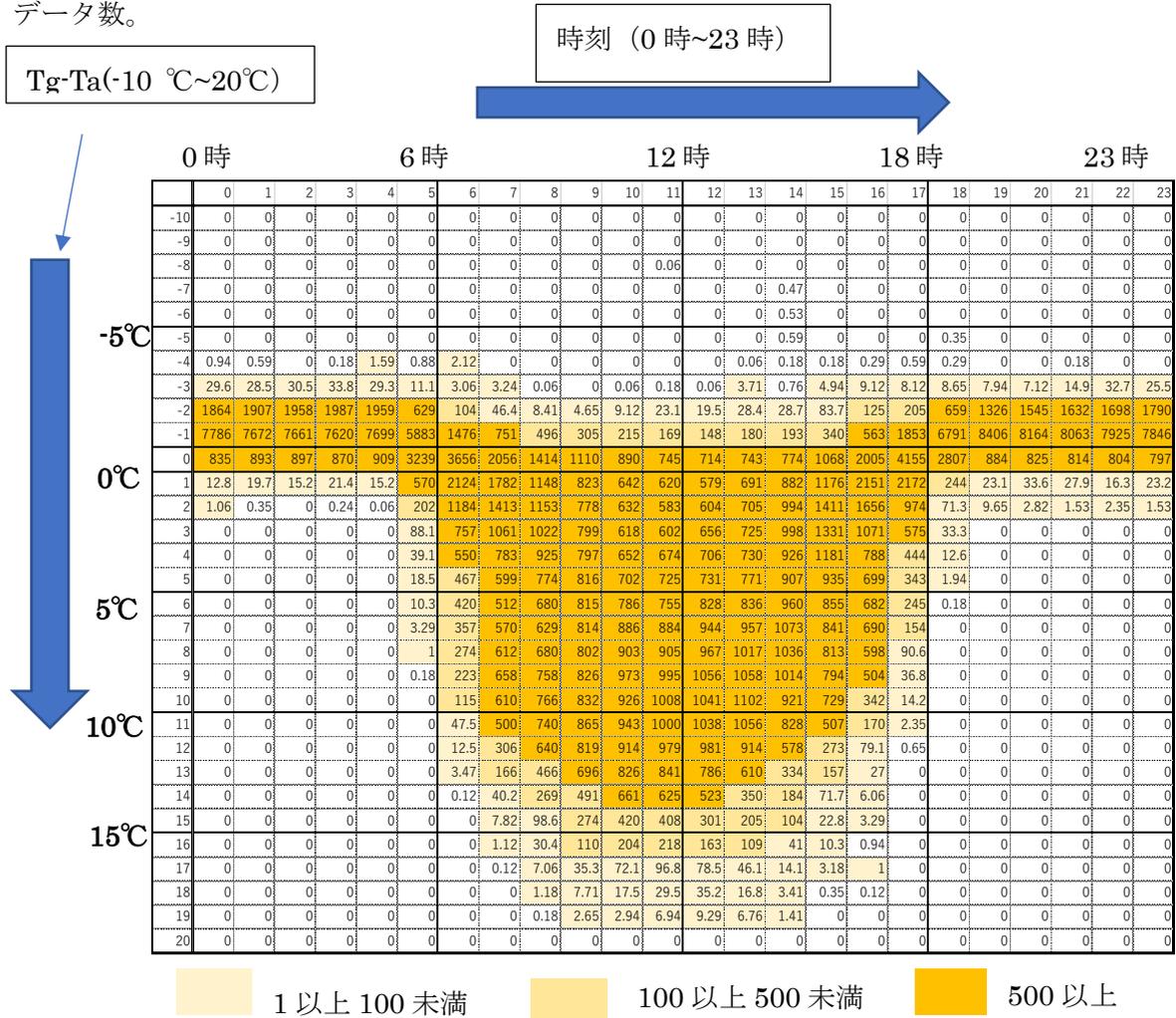


図 6-7 全体のデータ数の分布（3年間の平均、全地点合計草地日陰の例）

○ 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、また、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 6-2 に示す地区・測定地点については、3年間のすべての測定データを対象として表中の時間帯について解析対象から除外した（ただし、2019年より測定開始した陸上自衛隊朝霞訓練場周辺は、2019年のコンクリ日陰が不適地であったが2020年は移設により適切な配置となったため、2019年のコンクリ日陰の全データのみ除外した）。

表 6-2 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
皇居外苑周辺	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	2019年全データ

(3) 解析結果

(ア) 手順2 全地区をまとめた解析結果

○ 草地日陰

「草地日陰」では「草地日なた」にくらべて、全地区での最も大きな負偏差は7時頃から16時にかけて3℃以上になり、13時頃には最も差は大きく4℃を超える。全地区の平均値でも13時頃には3℃を超える。

また、日射の強さが同程度の場合、午前と午後では、WBGT 差に大きな違いはなかった。

(最大偏差)

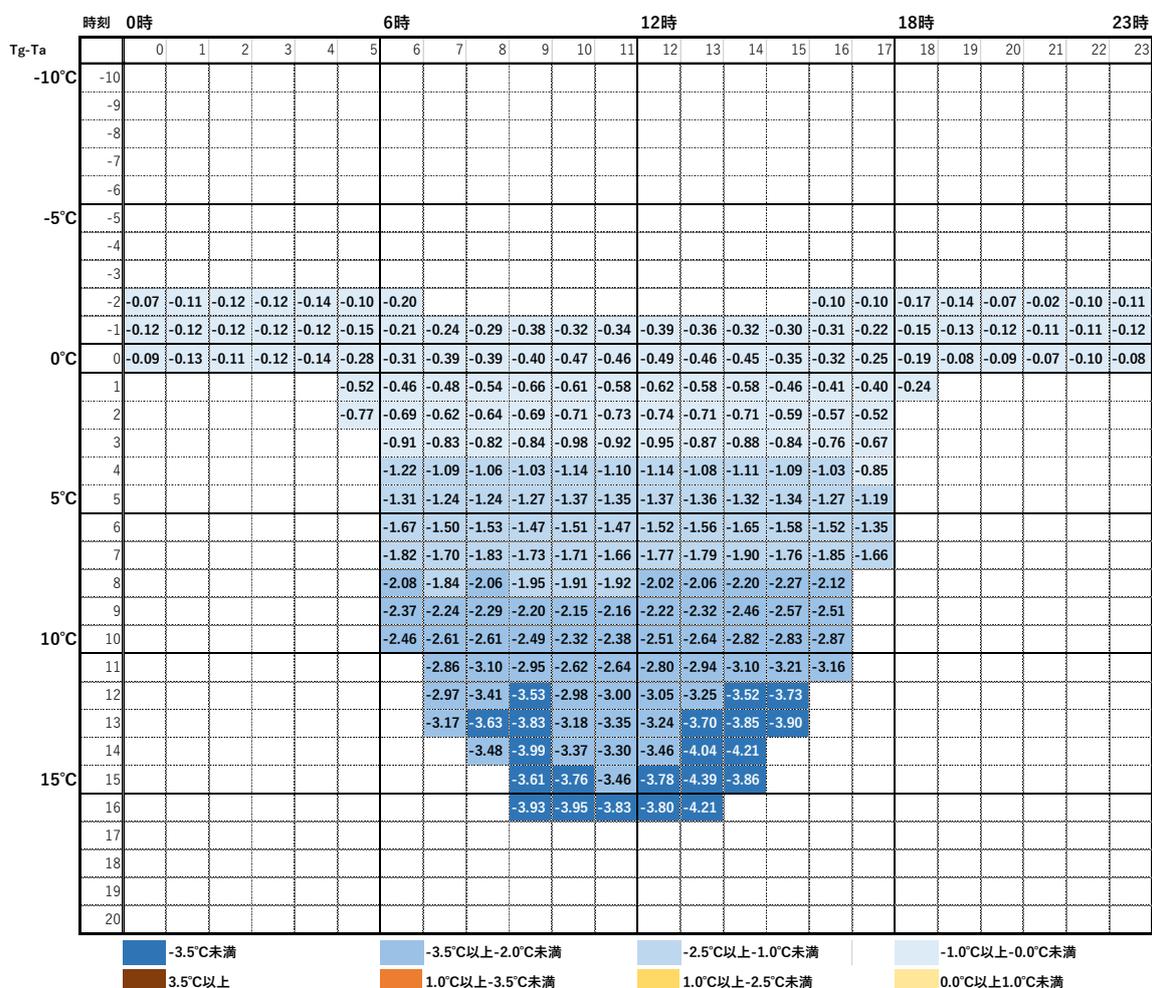


図 6-8(a) 草地日陰についての草地日なたとの WBGT 差(最大負偏差)の時刻別・日照の強さ別分布

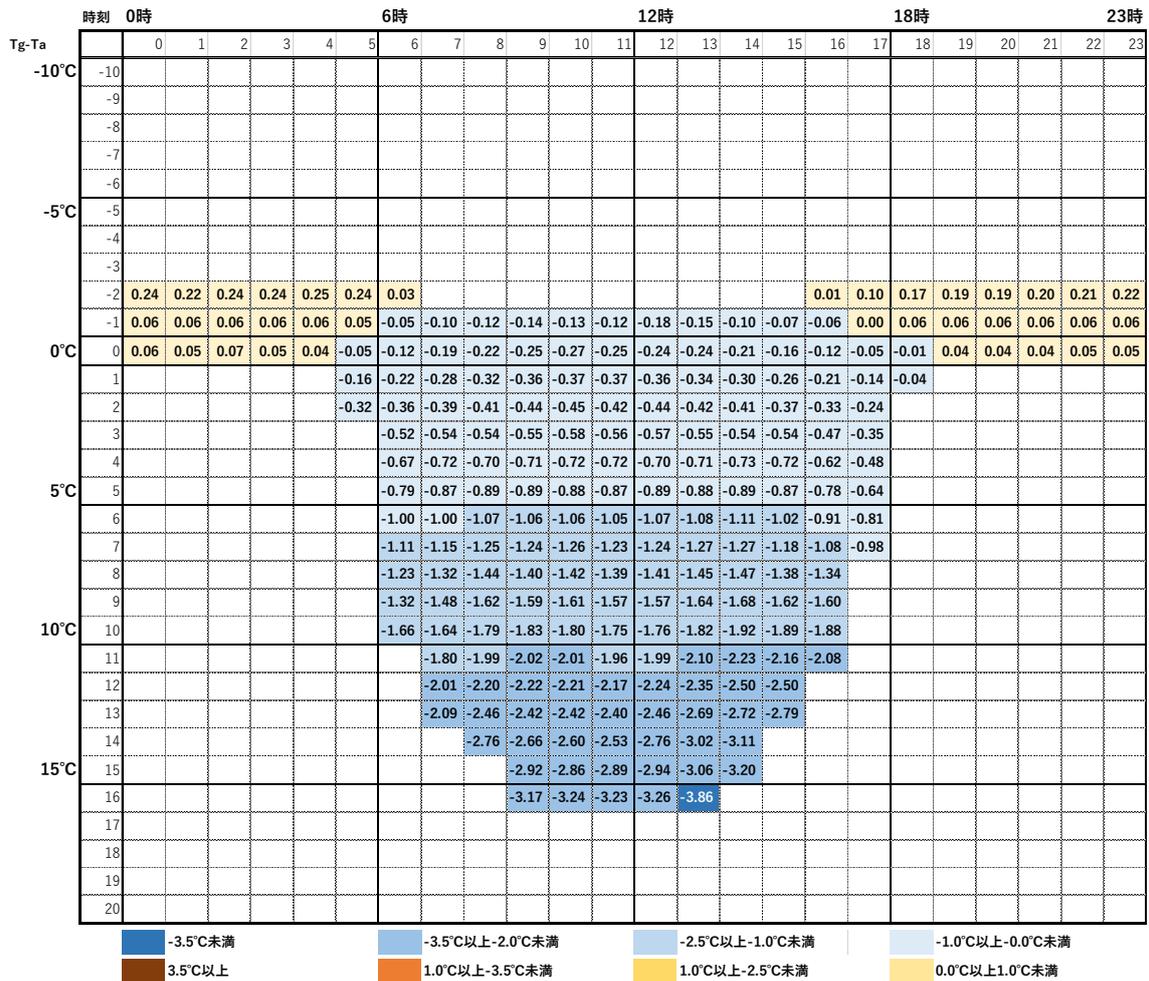


図 6-8(b) 草地日陰についての草地日なたとの WBGT 差(平均値)の時刻別・日照の強さ別分布

○ コンクリ日陰

コンクリ日陰では、草地日陰と同様に差の最大値は7時頃から16時頃にかけて、3℃以上になり、ピーク時には-4℃以上になった。平均値で見ても13時には4℃を超えた。

午前中と午後では大きな差はないが、負偏差最大値の分布で見ると、午後に差が大きくなる時間帯がある。

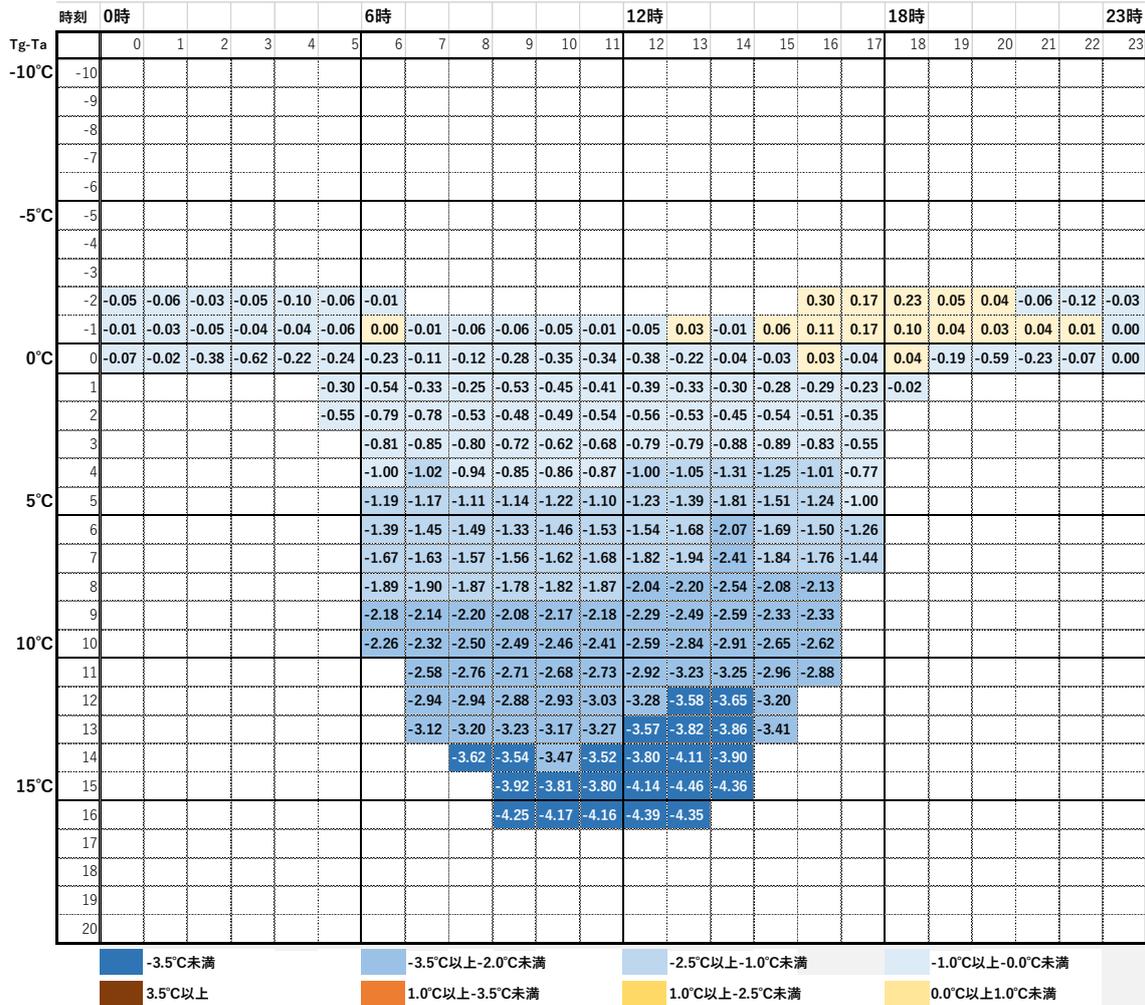


図 6-8(c) コンクリ日陰についての草地日なたとの WBGT 差(最大負偏差)の時刻別・日照の強さ別分布

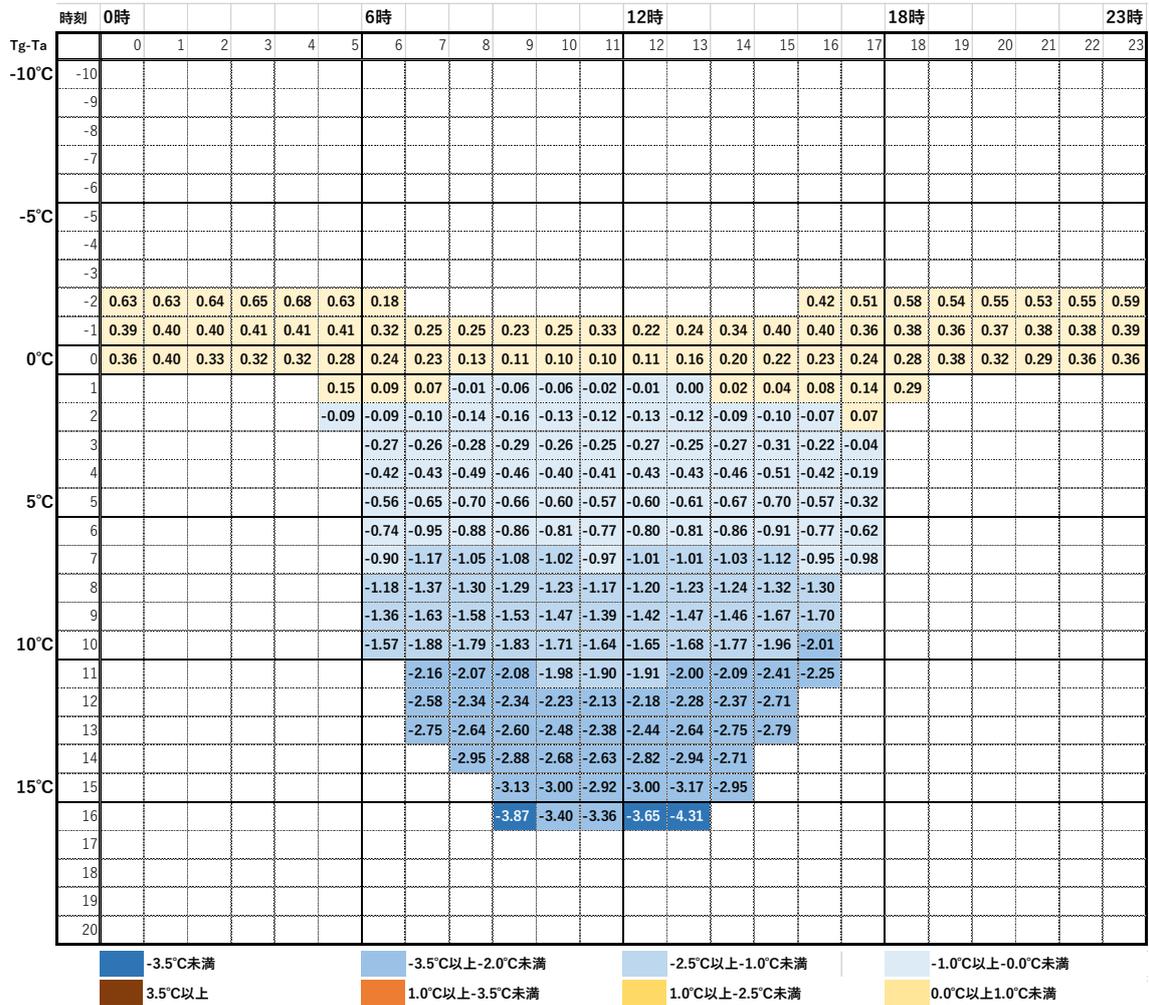


図 6-8 (d) コンクリ日陰についての草地日なたとの
WBGT 差(平均値)の時刻別・日照の強さ別分布

○ コンクリ日なた

コンクリ日なたでは、同じく日射のある草地日なたに比べて、わずかではあるが、WBGTが小さくなる傾向がある。その差の最大値は日射が強い場合には 2℃を超える場合がある。

平均値としては最も日射が強い場合でも 1℃前後である。

また、その差は午前中にわずかに大きな値となる場合もあるが、顕著な差ではない。

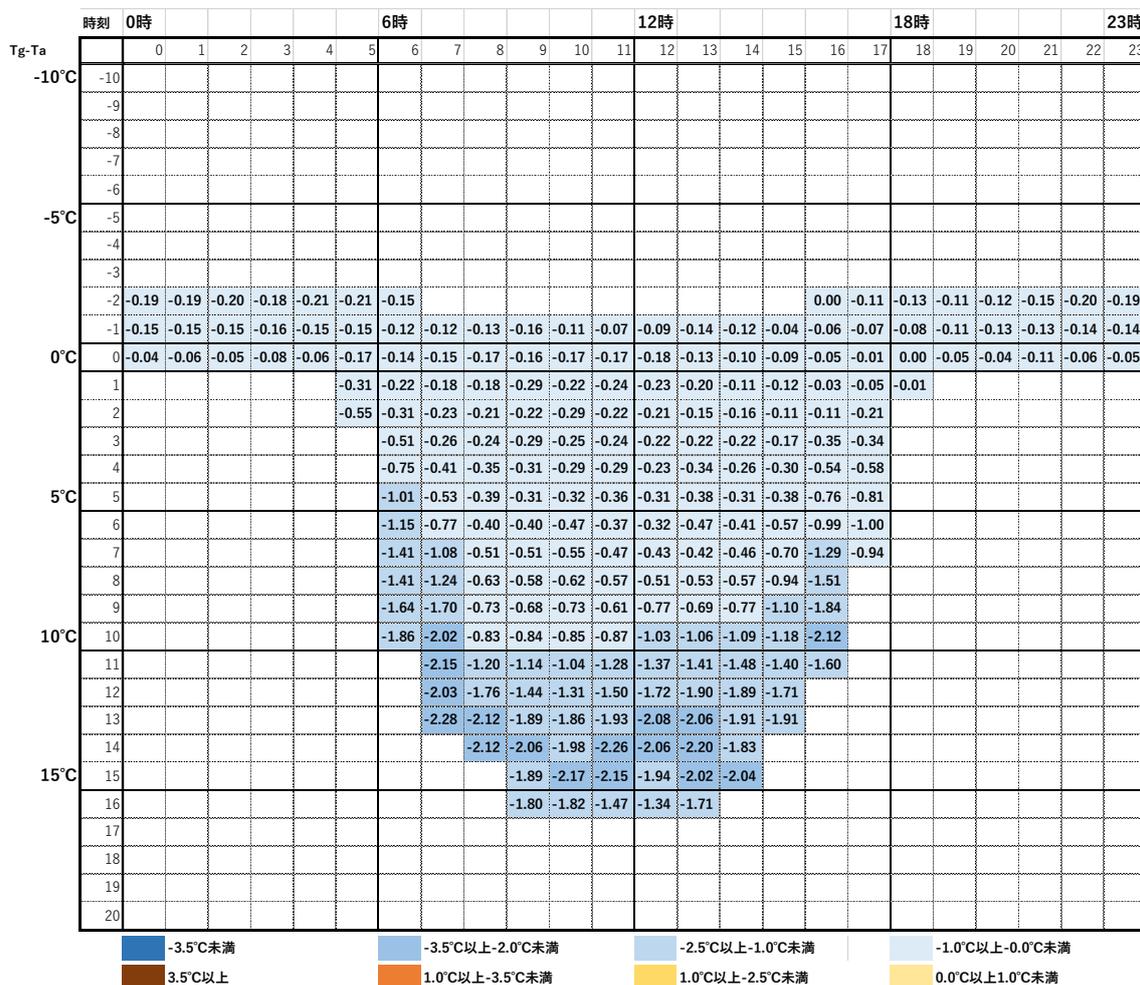


図 6-8(e) コンクリ日なたについての草地日なたとの WBGT 差(最大負偏差)の時刻別・日照の強さ別分布

(イ) 手順3 時刻別補正量の算出

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」に対する補正量を提示するためのデータの扱いについて、調査した。

補正量を提示する目的として、競技会場の来訪者やスタッフがどのような環境であれば標準的な「草地日なた」に比べて暑熱環境が緩和されるかについて情報提供することにある。

○ 草地日陰及びコンクリ日陰

「日陰」については、日陰をもたらすものは、屋根や建物影のほか、樹木、仮設物など様々であり、競技会場によって、また、同一会場でも様々な状況が想定される。このため、17地区で測定した結果について、前項の全体的な傾向の調査に加え、17地区それぞれの測定結果を利用することで多様な「日陰の効果」を平均的に示すことができないか検討した。日なたから日陰に移動することのメリットは、もっとも日射の強い状況で感じられることから、前項の調査に用いた、各地区の時刻ごとの「草地日なた」に対する「草地日陰」「コンクリ日陰」のWBGT差の変動をまとめ、さらに、その平均値をとることで、サイトに提示すべき補正量を求めることとした。この際、表6-2でまとめた時間帯のデータは除いて、草地日陰について図6-9(a)、コンクリ日陰について図6-9(b)を作成した。

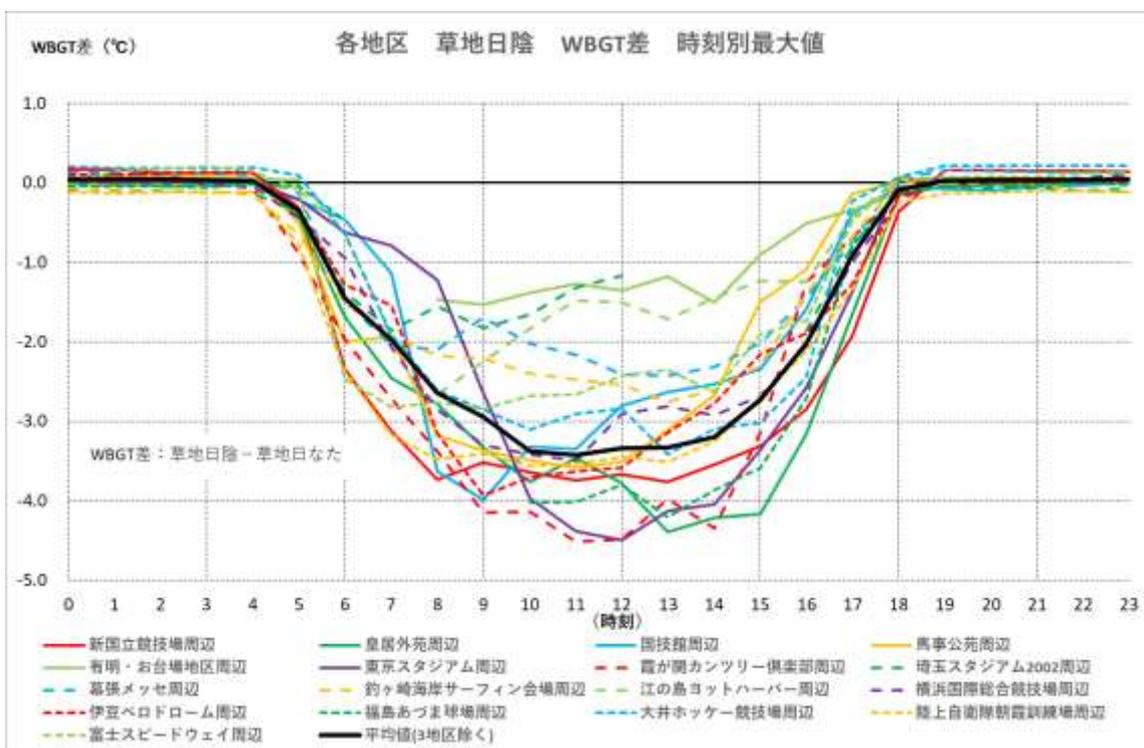


図6-9(a) 草地日陰と草地日なたのWBGT差（日陰－日なた）

17 地区の各時刻の WBGT 差の変動のうち、有明・お台場地区周辺、埼玉スタジアム 2002 周辺、江の島ヨットハーバー周辺では、日中日射が強くなるにつれて差が縮小している。いずれも樹木枝を利用して測定したが、樹木の枝葉の密度が十分でなく「木漏れ日」のように日射が差し込んでいた可能性があり、この 3 地区を除いて平均値(黒実線)を求めた。

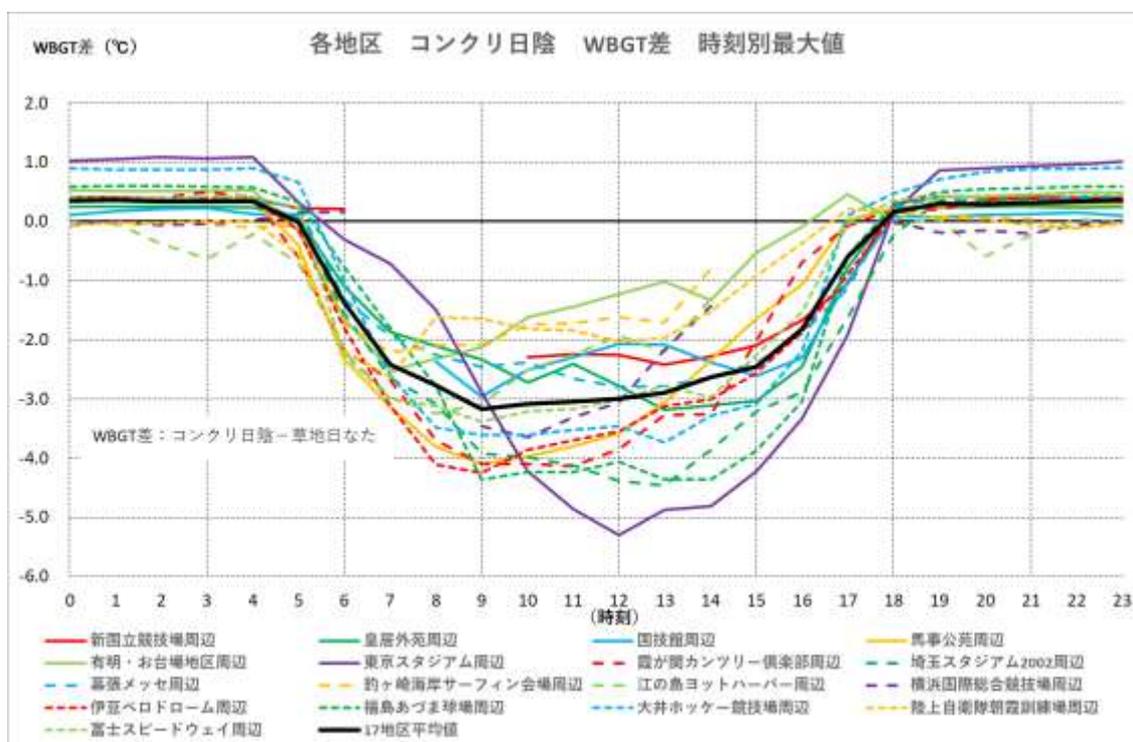


図 6-9(b) コンクリ日陰と草地日なたの WBGT 差 (日陰 - 日なた)

コンクリ日陰については、草地日陰でみられた、日射が強くなるにつれて明らかに WBGT 差が小さくなる地区は無く、平均値(黒実線)は 17 地区すべてを対象とした。

結果として、草地日陰、コンクリ日陰、ともに、平均値としては、朝、日の出とともに WBGT 差を生じ、9 時から 15 時にかけて、最も日射の強くなる時間帯には WBGT3°C 程度の差となっている。ただし、図 6-9(a)、(b)に示された通り測定箇所によって平均値に比べ ±1°C 以上の差があり、日陰の状況によって差が生じることをサイト利用者には解説する必要がある

○ コンクリ日なた

日なたとして、「草地日なた」とともに「コンクリ日なた」での測定を行った。同じ日なたであり、「日陰」のように、あらかじめどちらかが必ず低くなるというような想定は難しく、おおむね差はないものの、同じ地区であっても地表面状況や周囲の環境による風通しの差などによる違いも想定される。このため、前項の調査で求めた、各地区各時刻のコンクリ日なたの草地日なたに対する差の平均値をまとめてみた。

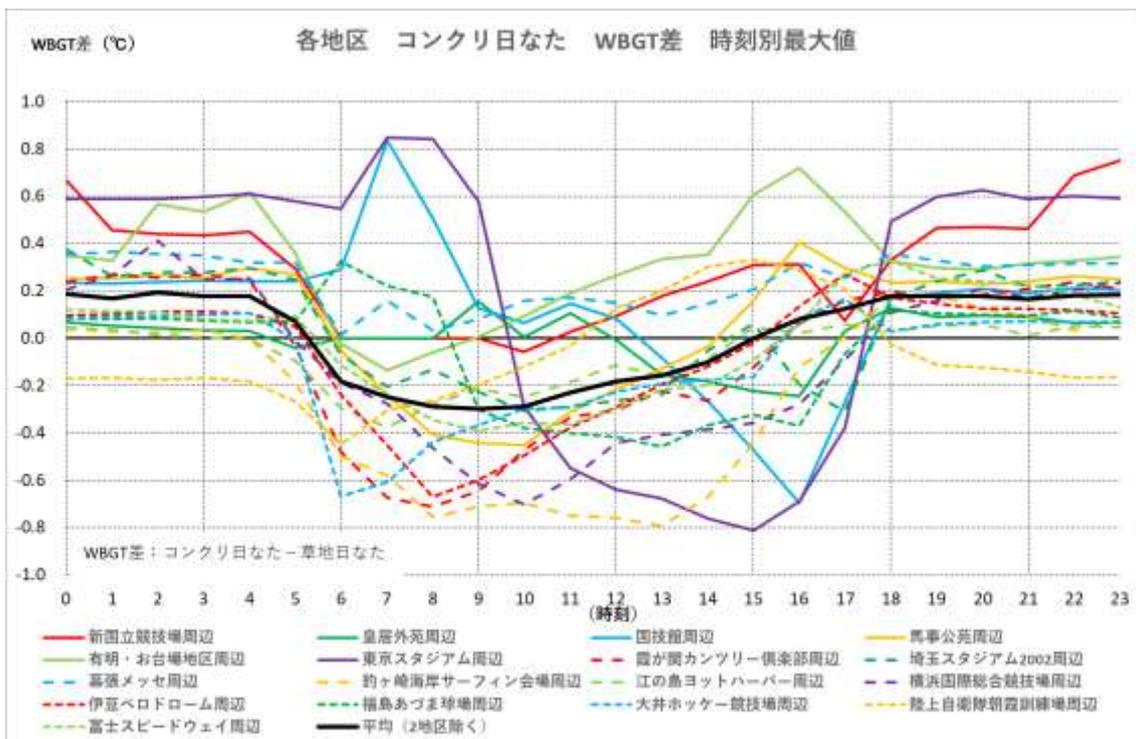


図 6-9(c) コンクリ日なたと草地日なたの WBGT 差 (コンクリ日なた－草地日なた)

多くの地区で、午前中を中心にわずかに負偏差(草地日なたがコンクリ日なたより WBGT が高い)が生じ、午後から夕刻に向かってその差が解消される。ただし、東京スタジアム周辺及び国技館周辺では、午前中にかなり高く、東京スタジアム周辺では午後も大きく低下する傾向がみられた。測定地点の周囲の建物、あるいは植栽の影響が想定されるため、この2地区を除いて平均値を求めた(黒実線)。

求めた平均値は午前中、コンクリ日なたが 0.2°C 程度低く、15 時以降は逆にわずかにコンクリ日なたが高くなる傾向を示している。

以上から、具体的な補正量として、図 6-9(a)~(c)の中で示された平均値をサイトで示す補正量として提案することとし、下記の表 6-3 とした。なお、夜間はすべて補正量 0 とした。

表 6-3 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 (単位 °C)

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	-1.45	-1.97	-2.65	-2.94	-3.37	-3.42
コンクリ日なた	-0.18	-0.25	-0.29	-0.30	-0.29	-0.23
コンクリ日陰	-1.37	-2.42	-2.77	-3.17	-3.08	-3.04
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	-3.33	-3.20	-2.72	-2.02	-0.91	0.00
コンクリ日なた	-0.16	-0.10	0.00	0.08	0.12	0.00
コンクリ日陰	-2.89	-2.63	-2.46	-1.81	-0.60	0.00
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

この補正量を参照して、標準点での WBGT から草地日陰などの WBGT を推定することが可能であるが、下記の 2 点に注意する必要がある。

- (1) 一般的に「日陰」といっても、日射を遮る効果は、その日陰を作る要因、例えば街路樹のような樹木の枝葉によるもの、建物の庇による影や建物そのものの影など様々あり、特に樹木の場合は枝葉の繁り具合により異なることが想定されるので、この補正量に比べて日なたと日陰の差が大きくなる場合も、小さくなる場合もありうる。
- (2) 上記補正量は各地区の日射の最も強い場合から求めているので、該当箇所での暑熱環境として WBGT を推定する場合は、日射の有無や強さを考慮する必要がある。例えば、曇雨天で日射がほとんどない場合には、晴れたら日陰となる地点であっても標準点での標準型のデータと同程度の暑熱環境もありうることを考慮する必要がある。

(ウ) 手順1 各地区・各測定点での WBGT 差の分布

測定地区ごとの「草地日陰」「コンクリ日なた」「コンクリ日陰」毎の時刻別、日射の強さ別「草地日なた」との WBGT 差の分布について、前項までの検討をふまえ、「草地日陰」「コンクリ日陰」では負偏差の最大値、「草地日なた」については偏差の平均値の分布を示す。

理想的には、日陰がもたらす WBGT の低下はどの地区でも同じであるが、実際には、測定地区によって異なる。測定箇所の日陰の濃さ（樹木による日陰の場合は、樹木の繁茂状況が異なることによる影響）、近隣施設からの日射の反射、風通しの有無などによるものと想定される。

① 草地日陰

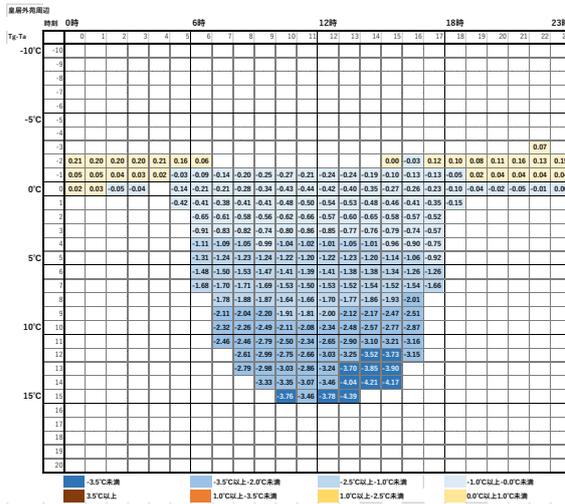


図 6-10(a) 新国立競技場周辺(草地日陰)

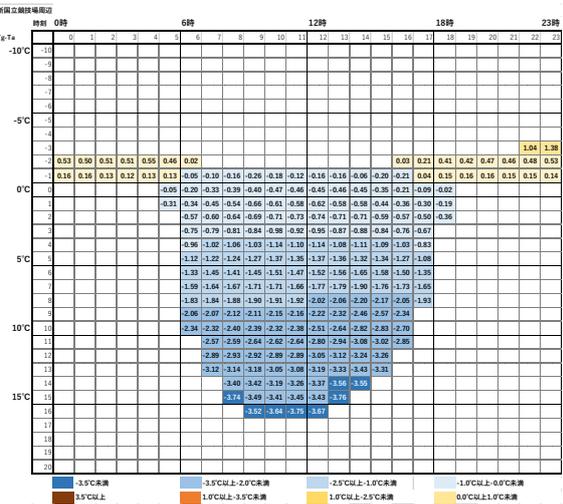


図 6-10(b) 皇居外苑周辺(草地日陰)

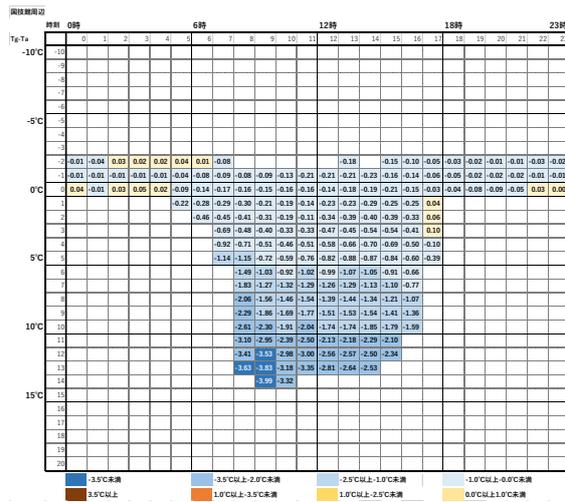


図 6-10(c) 国技館周辺(草地日陰)

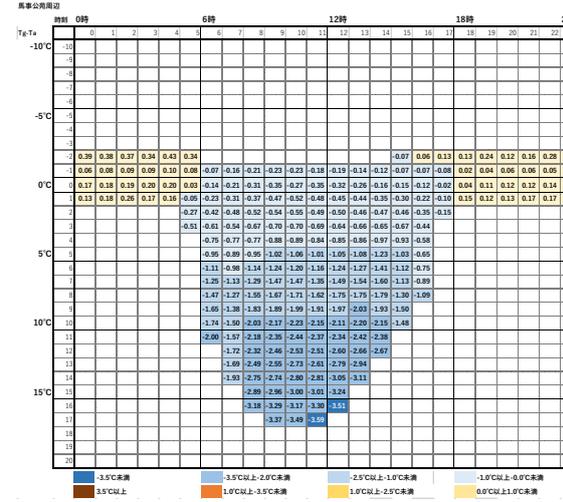


図 6-10(d) 馬事公苑周辺(草地日陰)

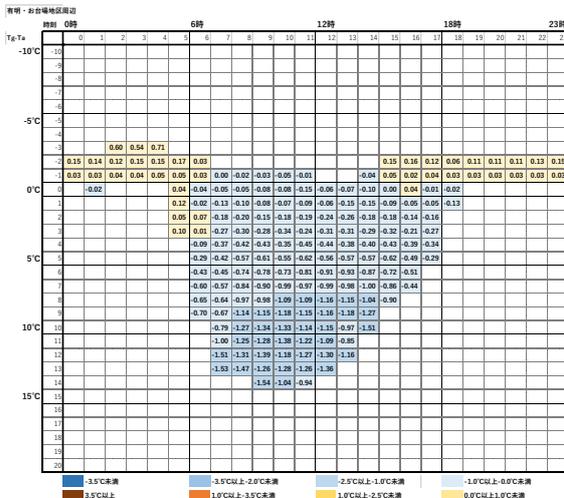


図 6-10(e) 有明・お台場地区周辺(草地日陰)

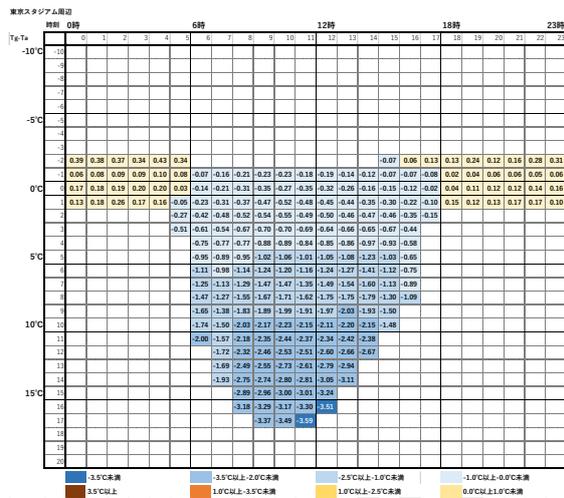


図 6-10(f) 東京スタジアム周辺(草地日陰)

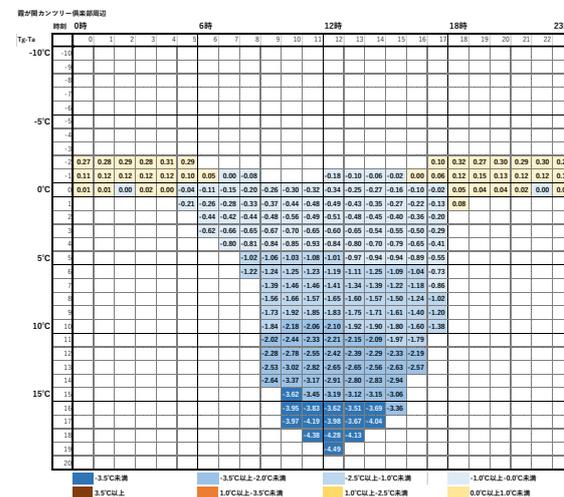


図 6-10(g) 霞が関カンツリー倶楽部周辺(草地日陰)

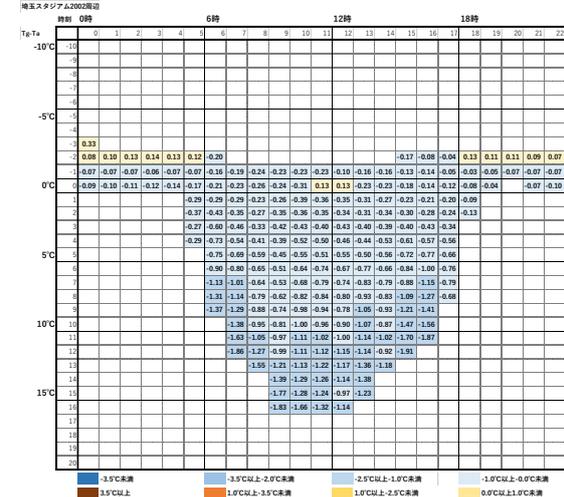


図 6-10(h) 埼玉スタジアム 2002 周辺(草地日陰)

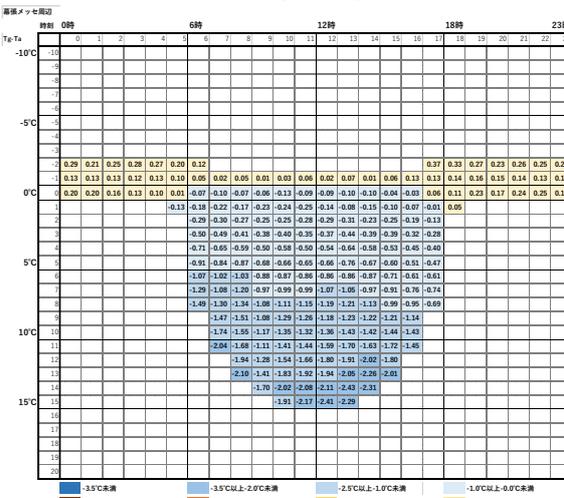


図 6-10(i) 幕張メッセ周辺(草地日陰)

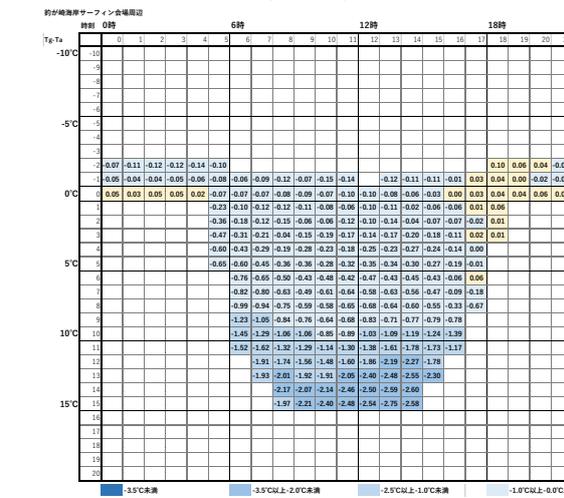


図 6-10(j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺(草地日陰)

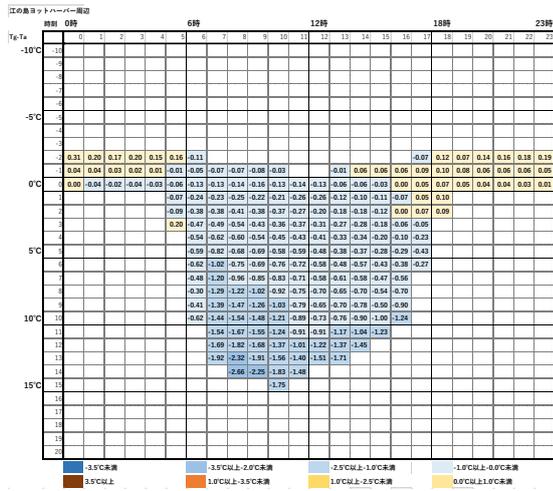
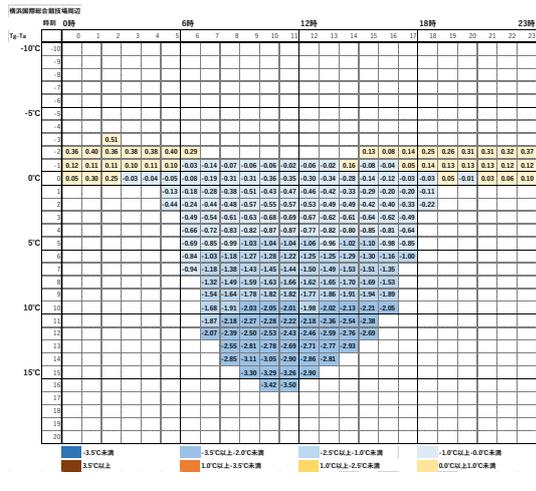


図 6-10(k) 江の島ヨットハーバー周辺
(草地日陰)



6-10(l) 横浜国際総合競技場周辺
(草地日陰)

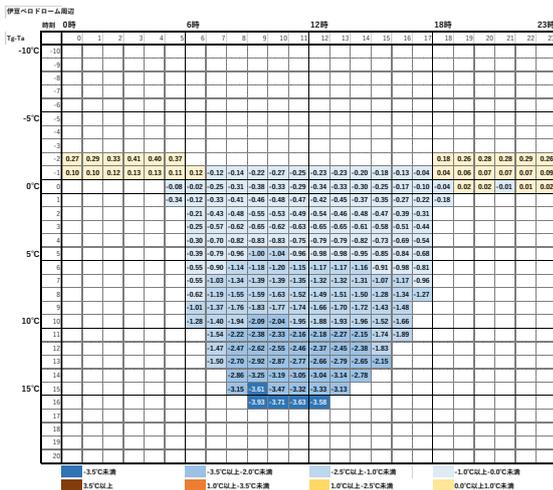


図 6-10(m) 伊豆ベロドローム周辺(草地日陰)

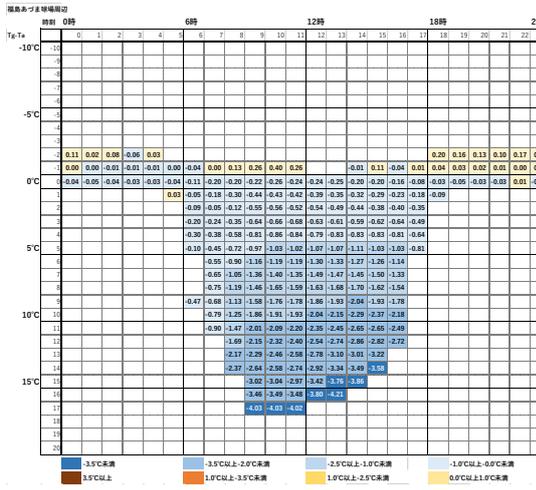


図 6-10(n) 福島あづま球場周辺(草地日陰)

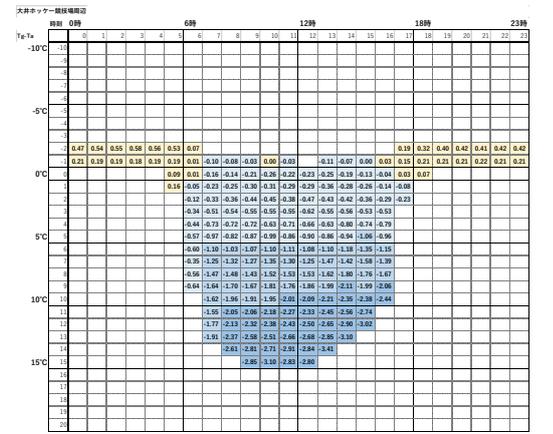


図 6-10(o) 大井ホッケー競技場周辺(草地日陰)

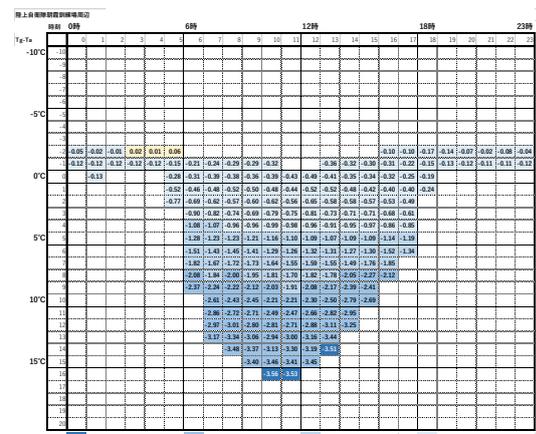


図 6-10(p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺
(草地日陰)

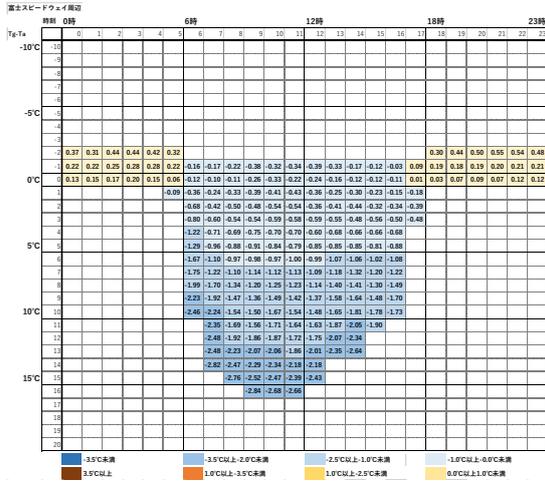


図 6-10(q) 富士スピードウェイ周辺(草地日陰)

○ コンクリ日陰

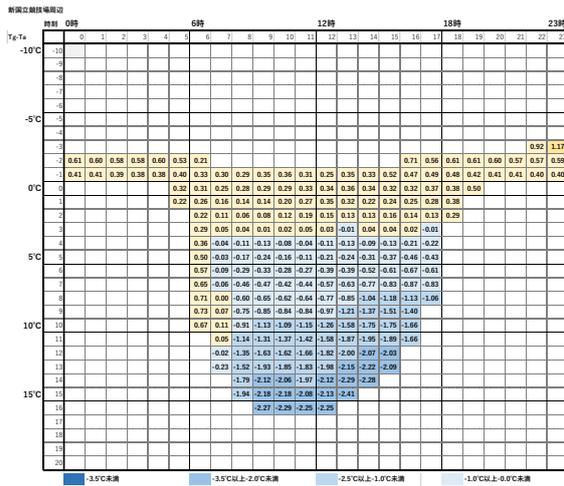


図 6-11(a) 新国立競技場周辺(コンクリ日陰)

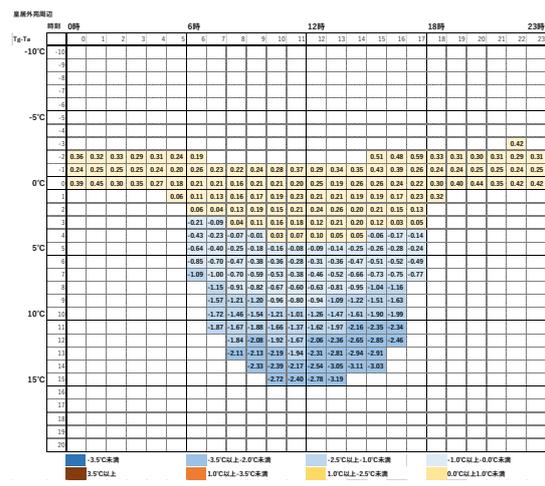


図 6-11(b) 皇居外苑周辺(コンクリ日陰)

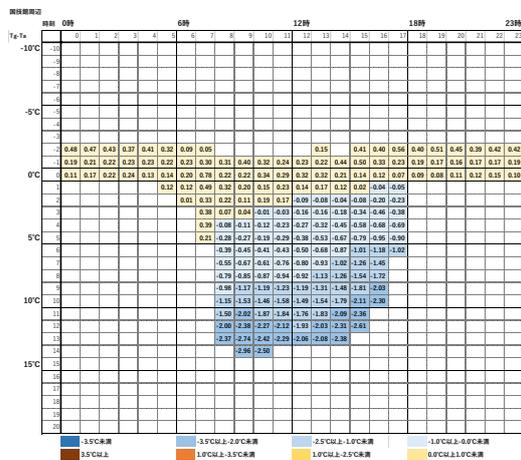


図 6-11(c) 国技館周辺(コンクリ日陰)

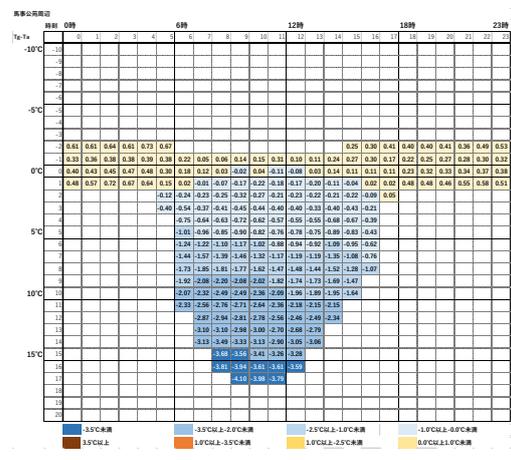


図 6-11(d) 馬事公苑周辺(コンクリ日陰)

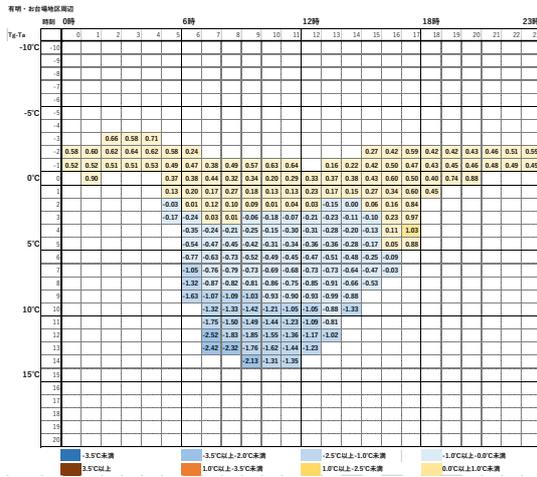


図 6-11 (e) 有明・お台場地区周辺
(コンクリ日陰)

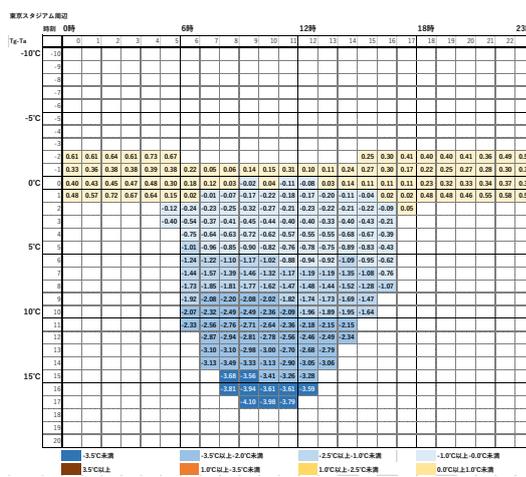


図 6-11 (f) 東京スタジアム周辺
(コンクリ日陰)

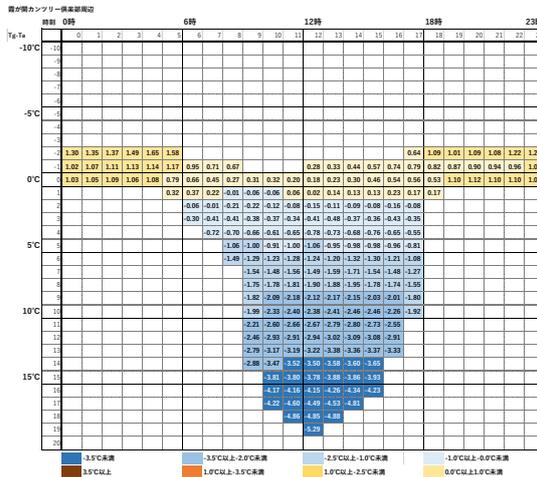


図 6-11 (g) 霞が関カンツリー倶楽部周辺
(コンクリ日陰)

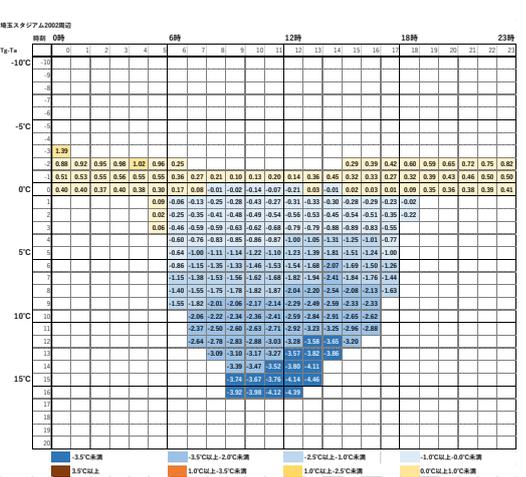


図 6-11 (h) 埼玉スタジアム 2002 周辺
(コンクリ日陰)

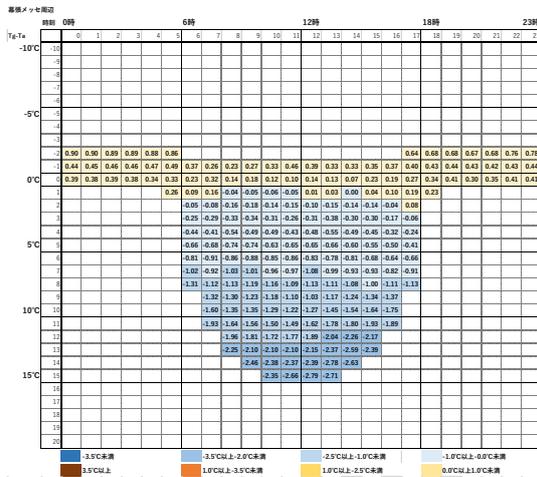


図 6-11 (i) 幕張メッセ周辺(コンクリ日陰)

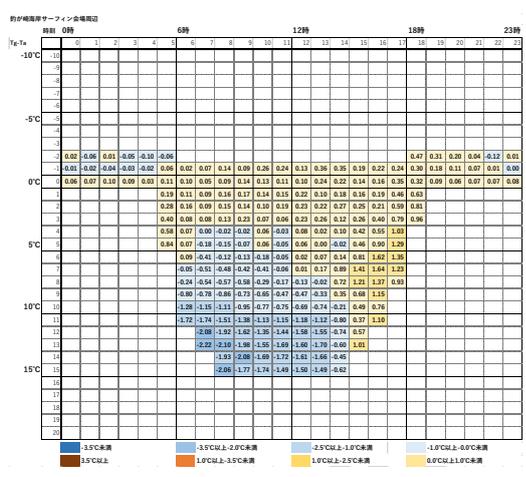


図 6-11 (j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺
(コンクリ日陰)

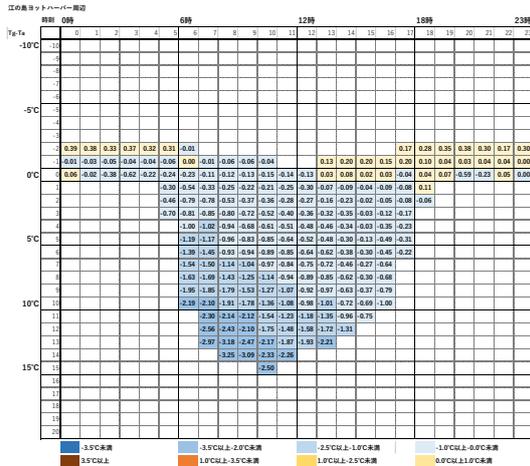


図 6-11(k) 江の島ヨットハーバー周辺
(コンクリ日陰)

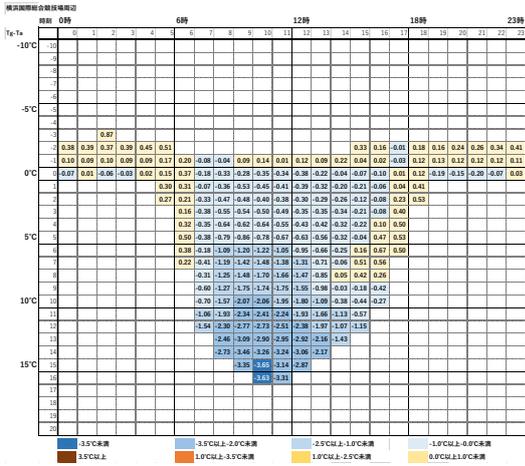


図 6-11(l) 横浜国際総合競技場周辺
(コンクリ日陰)

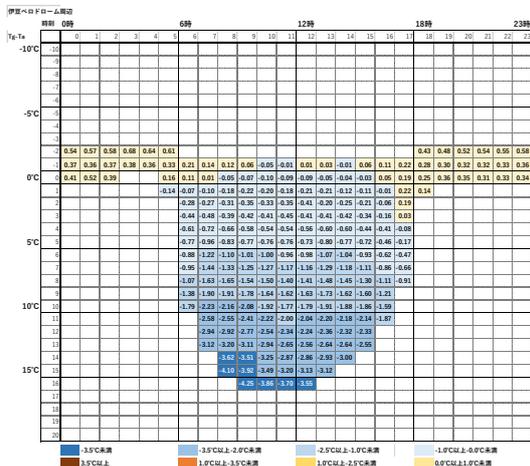


図 6-11(m) 伊豆ベロドローム周辺
(コンクリ日陰)

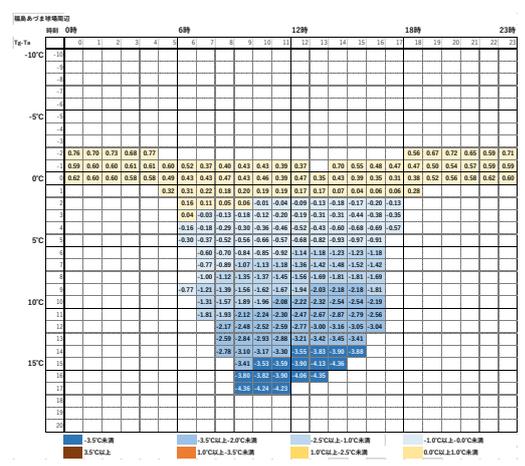


図 6-11(n) 福島あづま球場周辺
(コンクリ日陰)

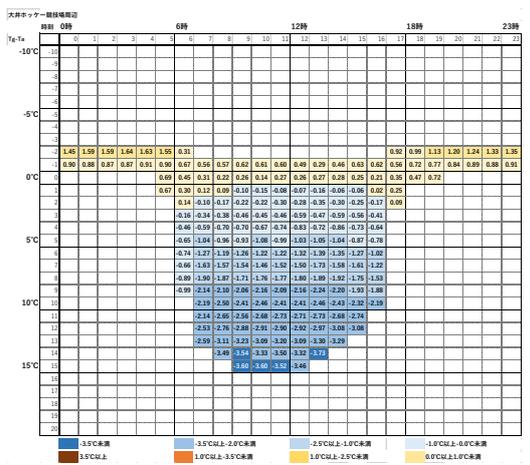


図 6-11(o) 大井ホッケー競技場周辺
(コンクリ日陰)

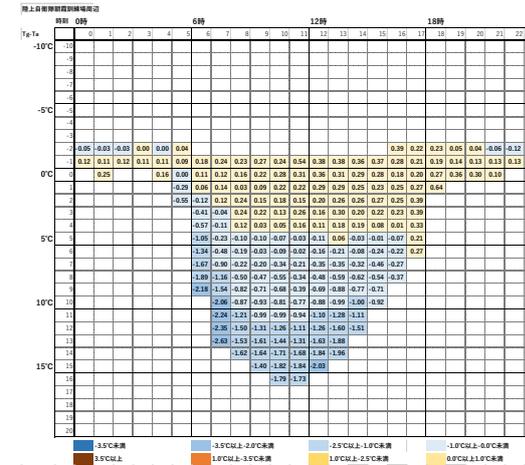


図 6-11(p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺
(コンクリ日陰)

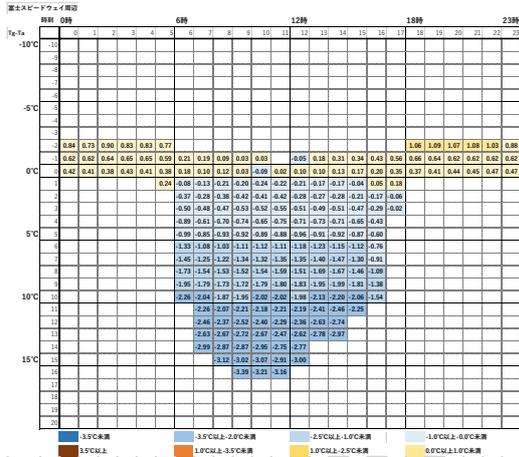


図 6-11(q) 富士スピードウェイ周辺(コンクリ日陰)

○ コンクリ日なた

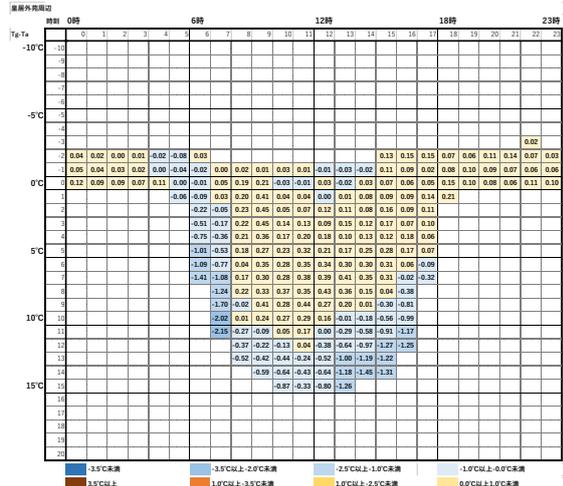
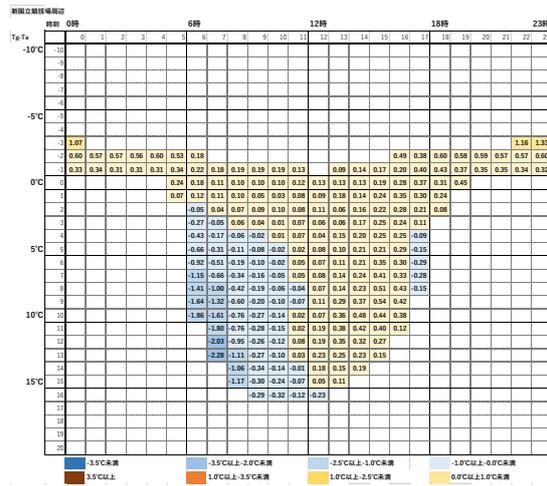


図 6-12(a) 新国立競技場周辺(コンクリ日なた) 図 6-12(b) 皇居外苑周辺(コンクリ日なた)

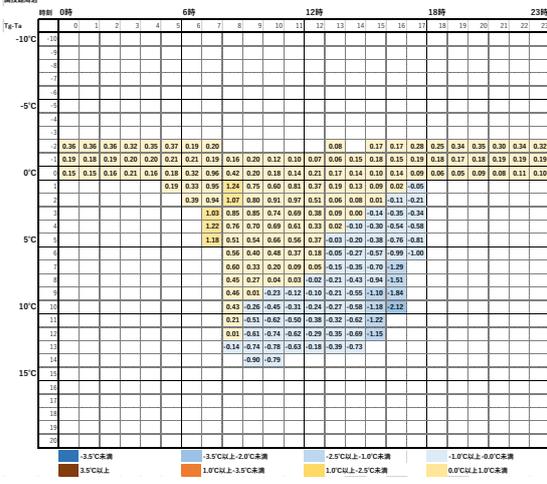


図 6-12(c) 国技館周辺(コンクリ日なた)

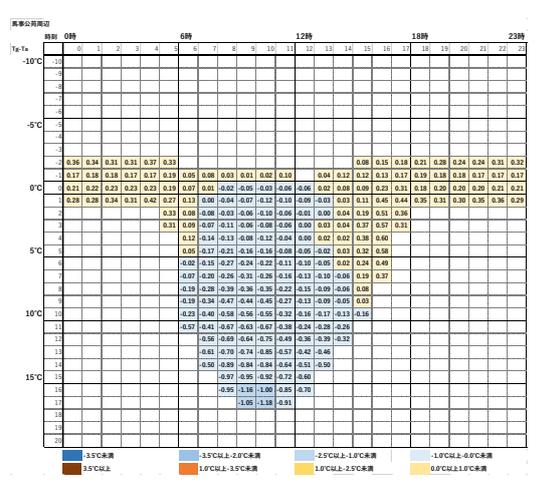


図 6-12(d) 馬事公苑周辺(コンクリ日なた)

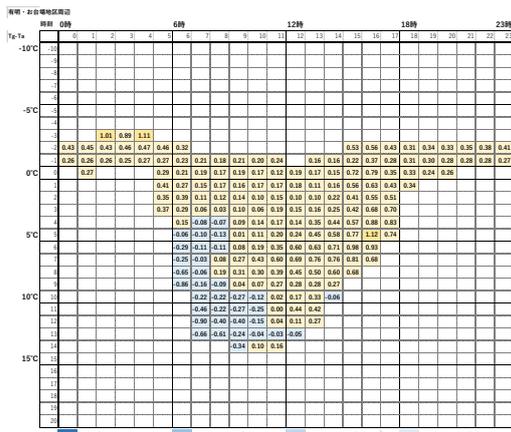


図 6-12 (e) 有明・お台場地区周辺
(コンクリ日なた)

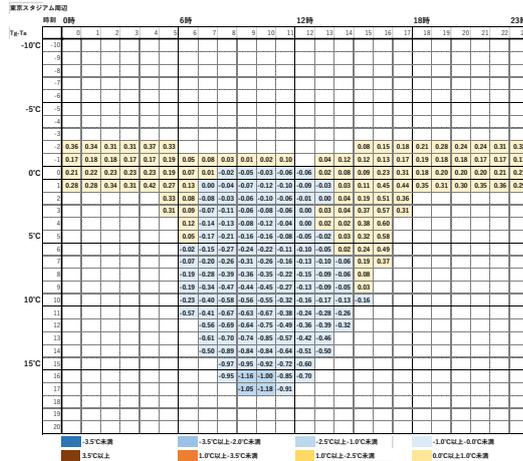


図 6-12 (f) 東京スタジアム周辺
(コンクリ日なた)

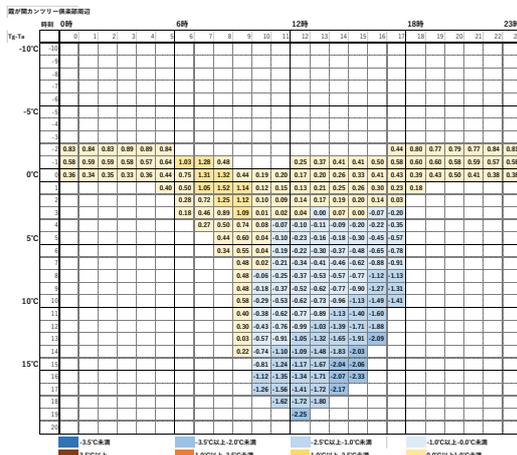


図 6-12 (g) 霞が関カンツリー倶楽部周辺
(コンクリ日なた)

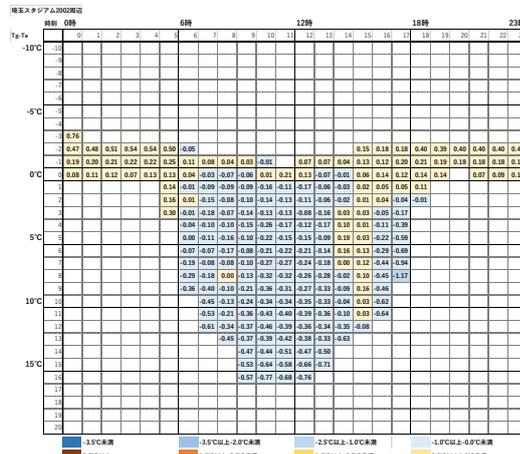


図 6-12 (h) 埼玉スタジアム 2002 周辺
(コンクリ日なた)

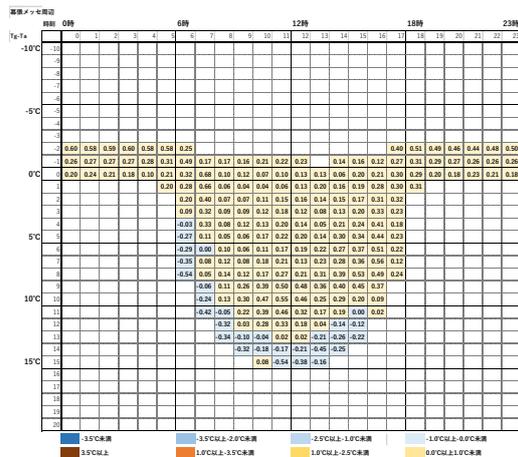


図 6-12 (i) 幕張メッセ周辺(コンクリ日なた)

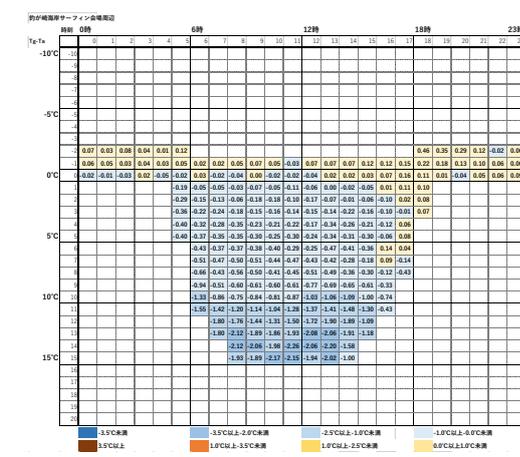


図 6-12 (j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺
(コンクリ日なた)

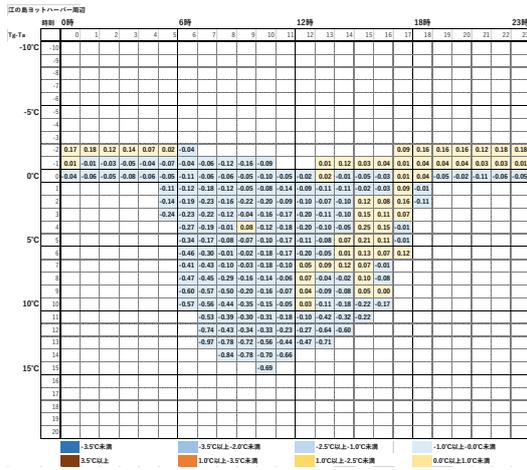


図 6-12(k) 江の島ヨットハーバー周辺
(コンクリ日なた)

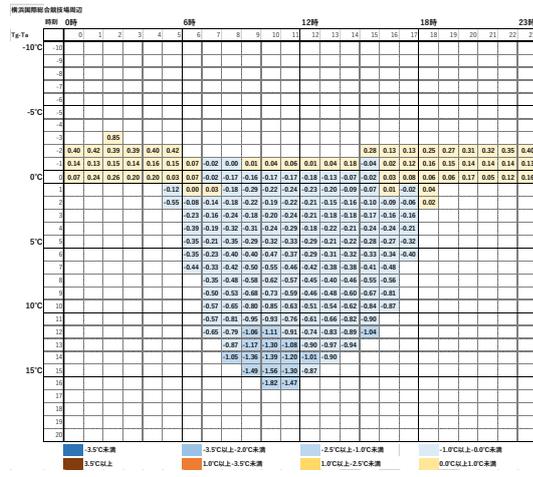


図 6-12(l) 横浜国際総合競技場周辺
(コンクリ日なた)

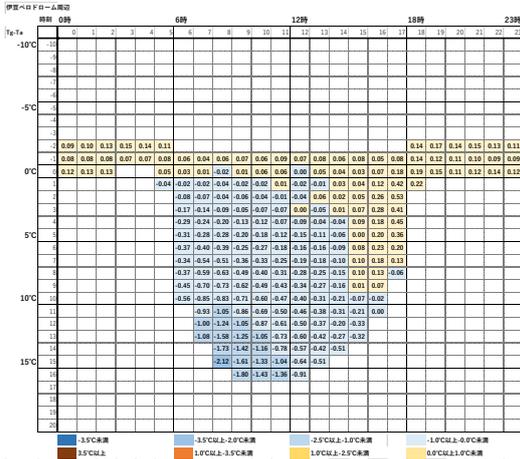


図 6-12(m) 伊豆ペロドルーム周辺
(コンクリ日なた)

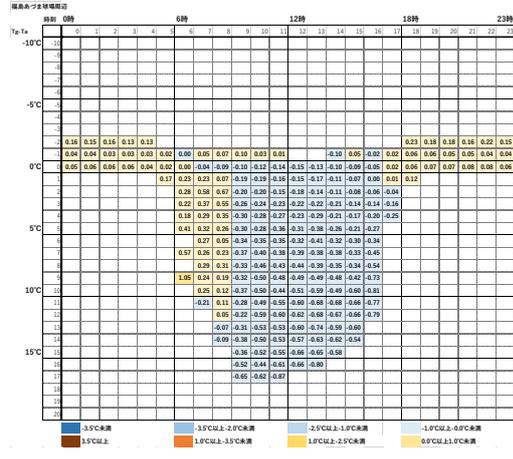


図 6-12(n) 福島あづま球場周辺
(コンクリ日なた)

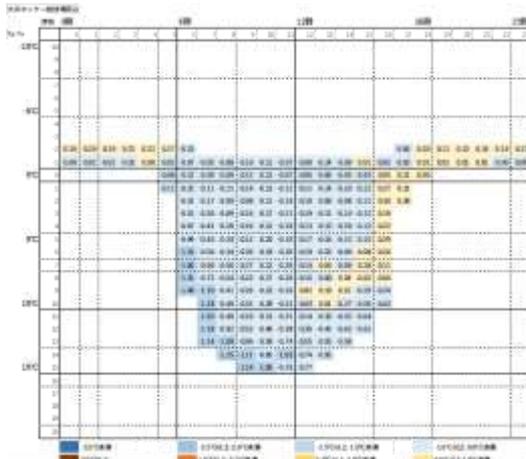


図 6-12(o) 大井ホッケー競技場周辺
(コンクリ日なた)

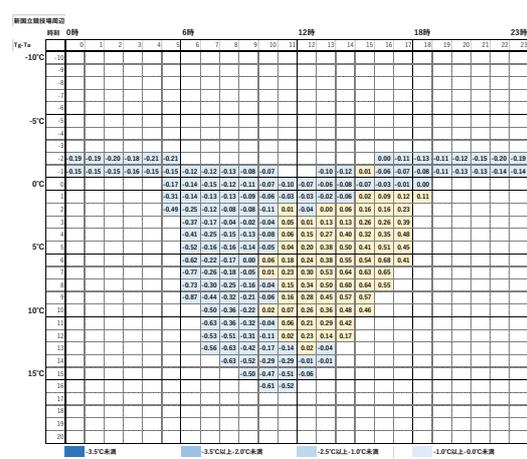


図 6-12(p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺
(コンクリ日なた)

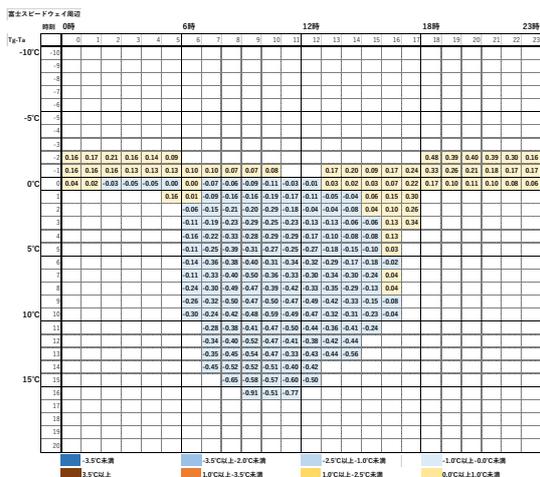


図 6-12(q) 富士スピードウェイ周辺(コンクリ日なた)

○ 草地日なた(単独)、コンクリ日陰(予備)について

皇居外苑周辺、国技館周辺、幕張メッセ周辺では、草地日なたについて単独の測定点を業務開始時から実施し、有明・お台場地区周辺では、2019年にコンクリ日陰の測定点を移設したが、その際予備観測点を設置し2019年、2020年はそこでの測定を実施した。

3か所の草地日なた(単独)及び1か所のコンクリ日陰(予備)について、それぞれの地区の草地日なたとの比較を同様の手法で行った。

・ 皇居外苑周辺について

皇居外苑の草地日なた(単独)と草地日なた(標準)を比較した場合、日射が強い場合には、WBGTは1°C程度の差がみられたが、標準点では日陰となる時間が見込まれない適切な測定データであること、この測定地点のデータを利用して情報発信を行う付近の会場(東京国際フォーラム)の暑熱環境は、標準点の環境に近いと想定されることから、暑熱環境のモニターとしては標準点のデータを公表することとしたい。

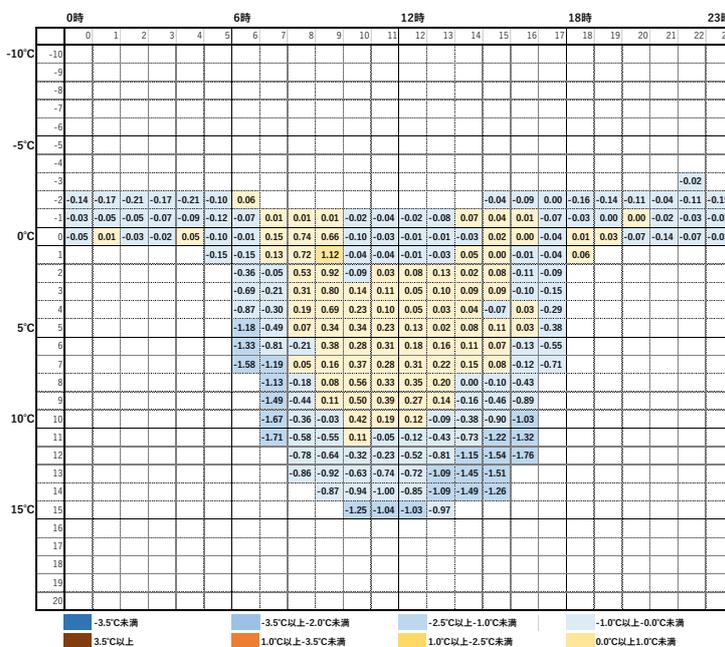


図 6-13(a) 皇居外苑周辺草地日なた(単独)

・国技館周辺

国技館周辺での草地日なた(単独)では、草地日なた(標準)との差が最大で 2℃の差があった。

この地区の標準的な暑熱環境としては、この草地日なた(単独)の測定地点の北側の樹木の枝が広がり、時間帯によっては十分な日なたとなっていなかった可能性があり、一方、標準点は会場(国技館)から若干離れているがほぼ一日、日射があり、風通しもよいことから、標準点でのデータを公表することとした。

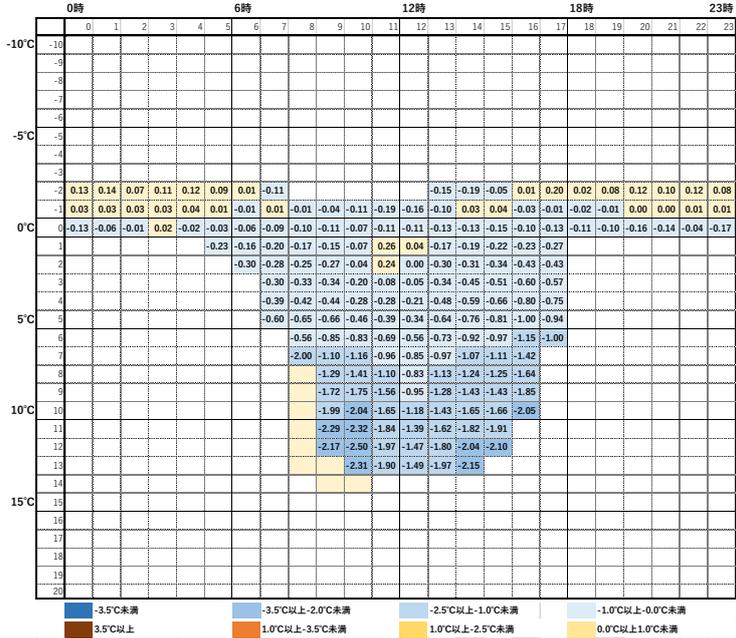


図 6-13 (b) 国技館周辺草地日なた(単独)

・幕張メッセ周辺

幕張メッセ周辺での草地日なた(単独)は、標準点で測定結果に対して、午前中は比較的高く、午後は低くなった。標準点に比べて、幕張メッセ施設に近くて風通しが悪く日が射す午前中は高温になる一方、午後は日陰になって WBGT が低くなった可能性がある。一方、標準点は開けていて一日、日射があり、風通しもよいことから、幕張メッセ周辺の暑熱環境としては標準点の測定結果を公表することとした。

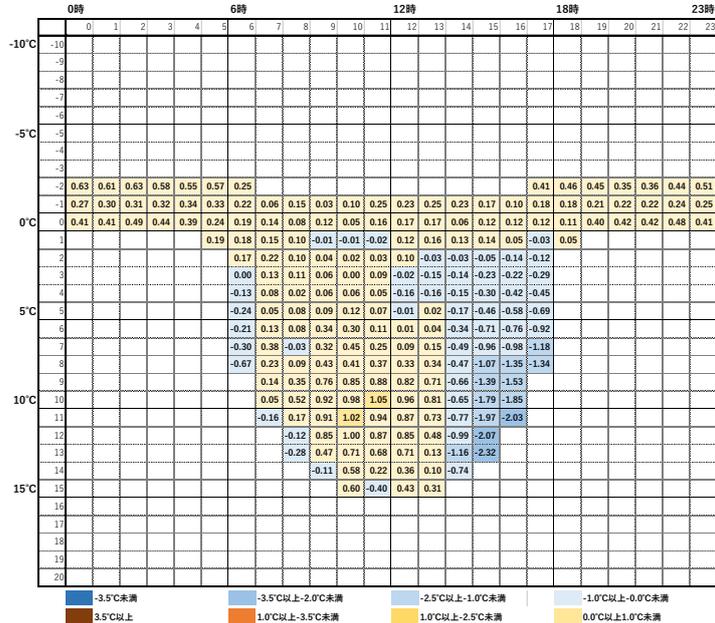


図 6-13 (c) 幕張メッセ周辺草地日なた(単独)

・ 有明・お台場地区周辺

有明・お台場地区周辺では、2019年、2020年には、2018年度まで実施のコンクリ日陰測定点が施設の設備変更で不適となったため、施設屋上庭園の入り口付近をコンクリ日陰としたが、風通しなど十分でない可能性もあったことから、同屋上庭園の中のコンクリート上の日陰にも設置し、コンクリ日陰(予備)とした。このコンクリ日陰(予備)の測定結果からは、午前中は草地日なたと同程度の時間もあり、その他の時間帯もコンクリ日陰(図6-10(e)参照)ほど大きな差にはなっていない。

これは、コンクリの上に設置されたパーゴラの支柱を利用しており、パーゴラにより日陰は建物陰に比べて十分ではなかった可能性がある。そのため、入り口付近のコンクリ日陰のほうが適切と判断し、(予備)は補正の算出に使用していない。

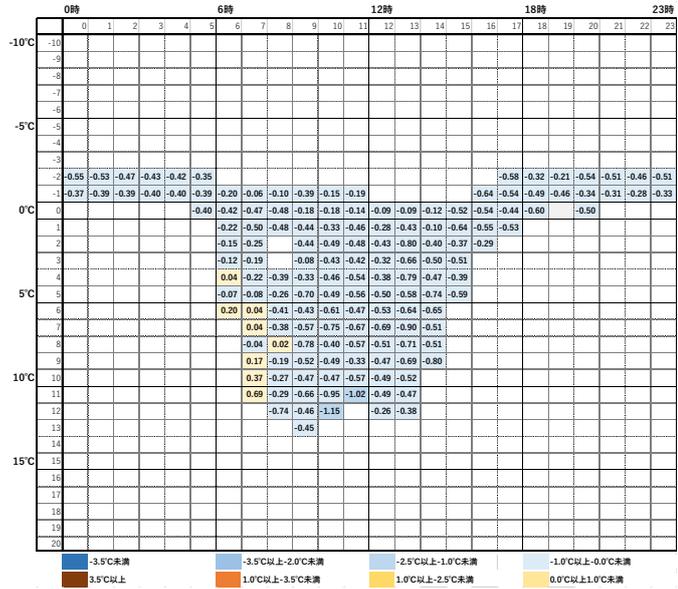


図 6-13 (d) 有明・お台場地区周辺コンクリ日陰(予備)

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6-14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6-14 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、令和元年度業務では、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。詳しくは以下にまとめた。

各時刻の自然湿球温度を用いた WBGT は付録 DVD に収めた。

（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、令和元年度業務と同様に、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）と比較した。

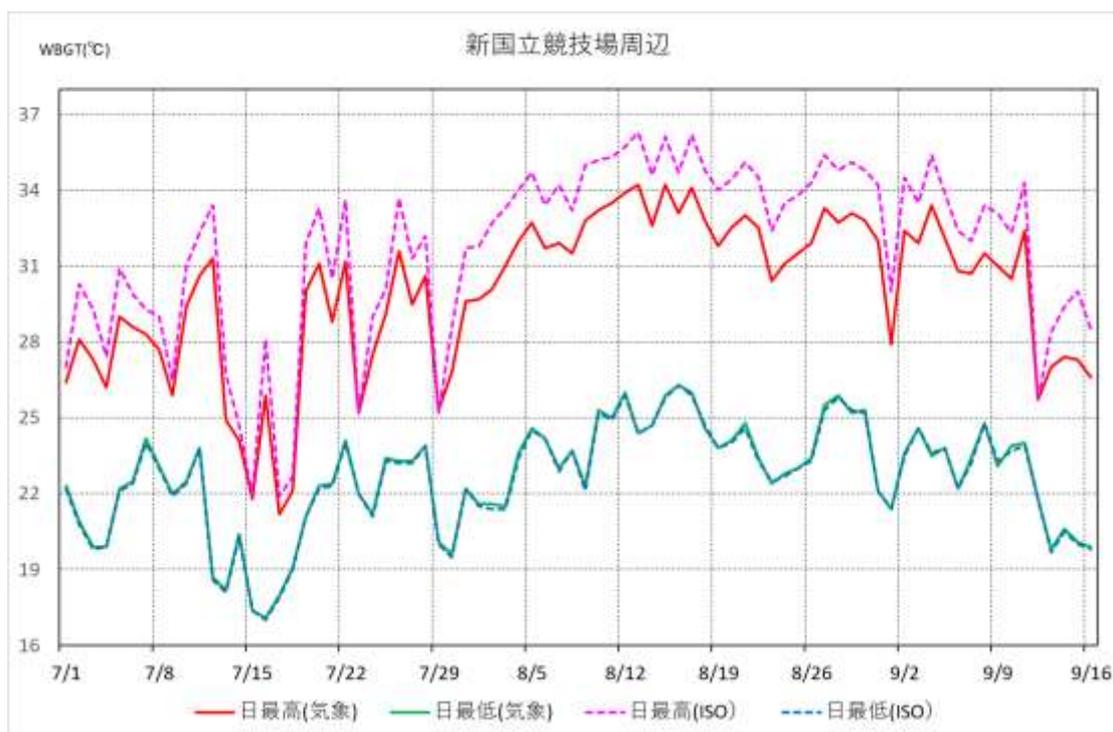
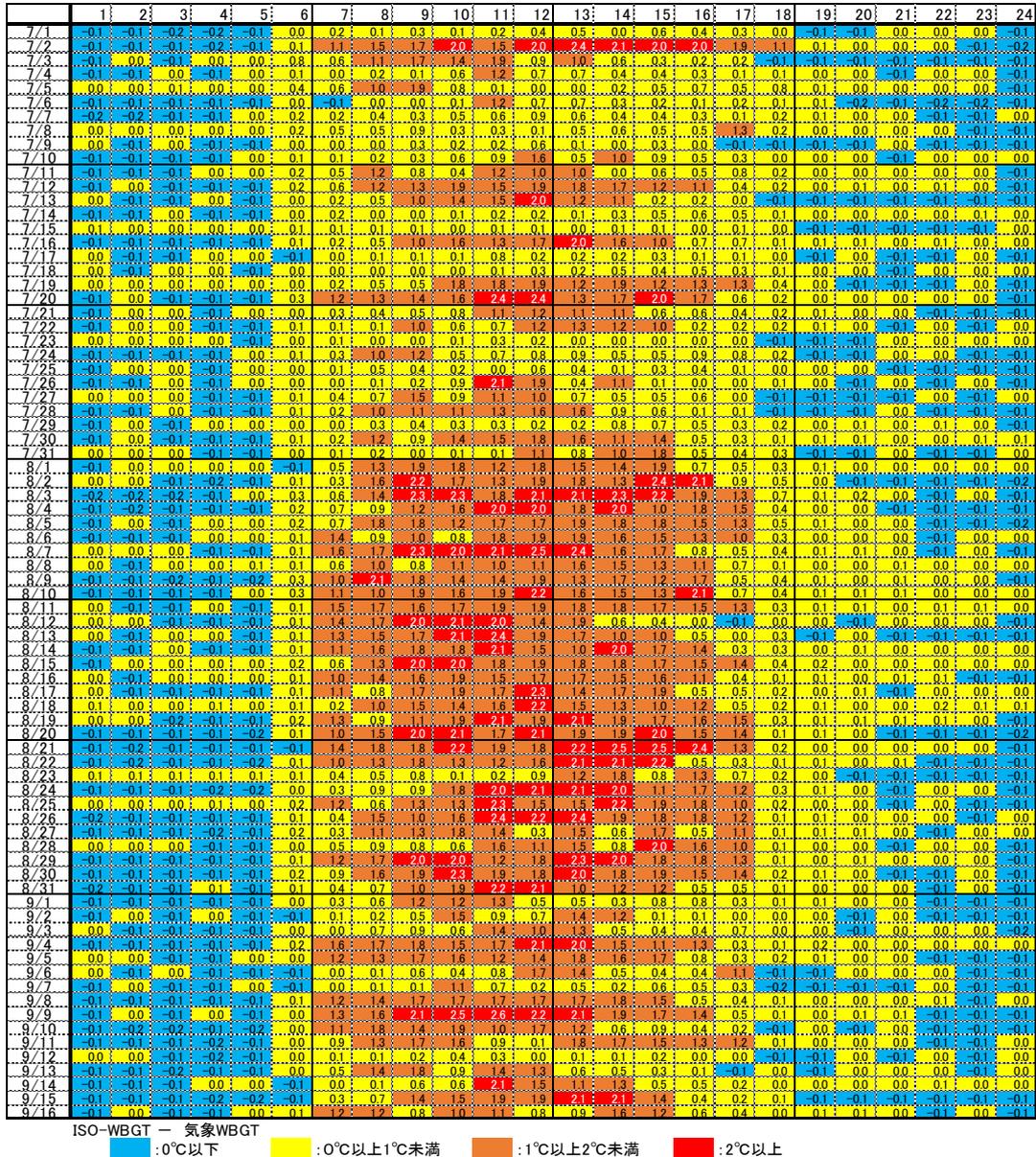
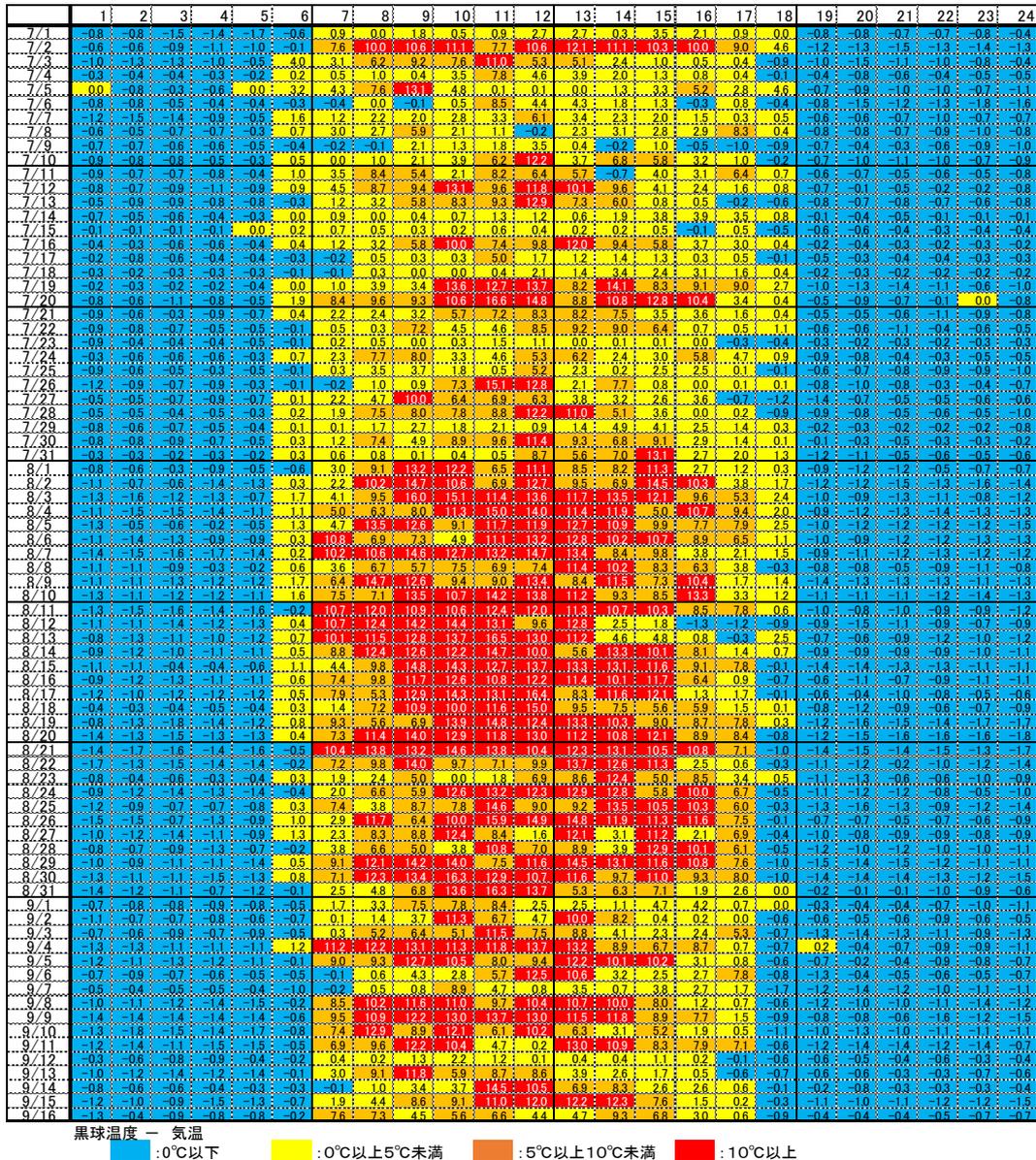


図 6-15(a) 新国立競技場周辺での日最高 WBGT・日最低 WBGT の変化

測定期間を通した、毎日の日最高 WBGT 及び日最低 WBGT の変化について、図 6-15(a) に示した。日最高 WBGT は日中に記録される場合が多く、気象 WBGT も ISO-WBGT も同様の変化を示している、ともに高い値を記録した日にその差が大きくなっており、最大で 2℃程度の差となっている。

ISO-WBGT と気象 WBGT の差は高温の日に大きくなっていることから、天候や日射の影響について特徴を見るためそれぞれの WBGT の差を図 6-15(b)にまとめた。





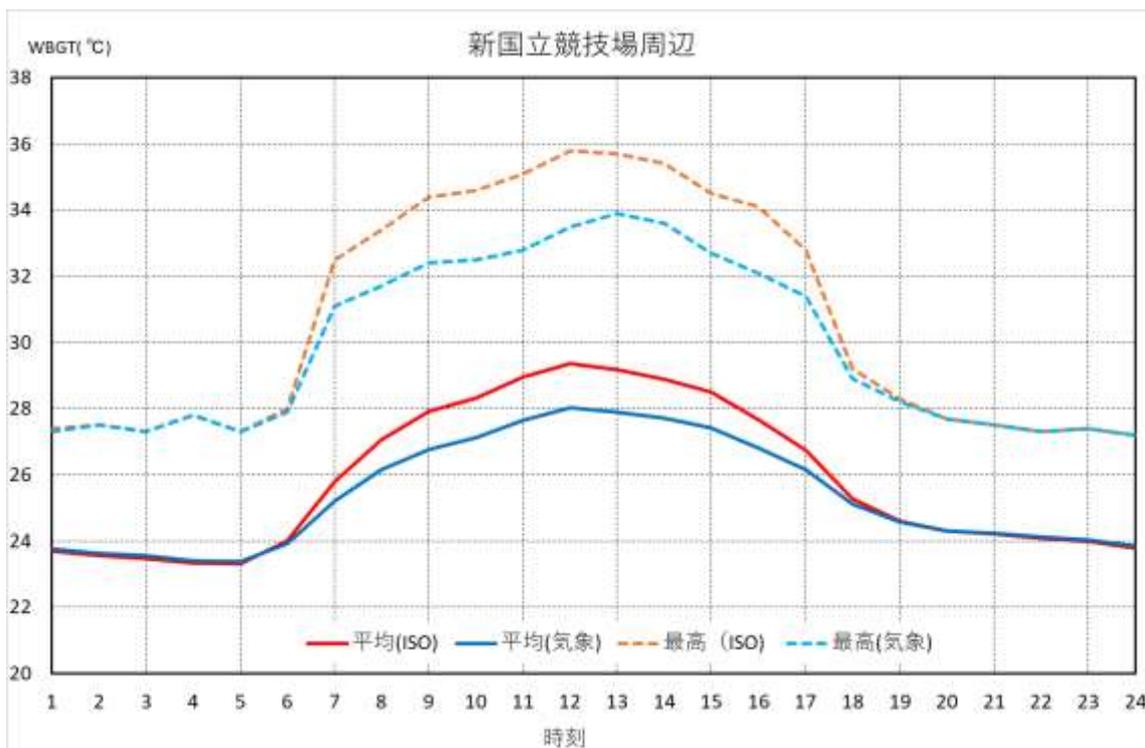


図 6-16 (a) 新国立競技場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

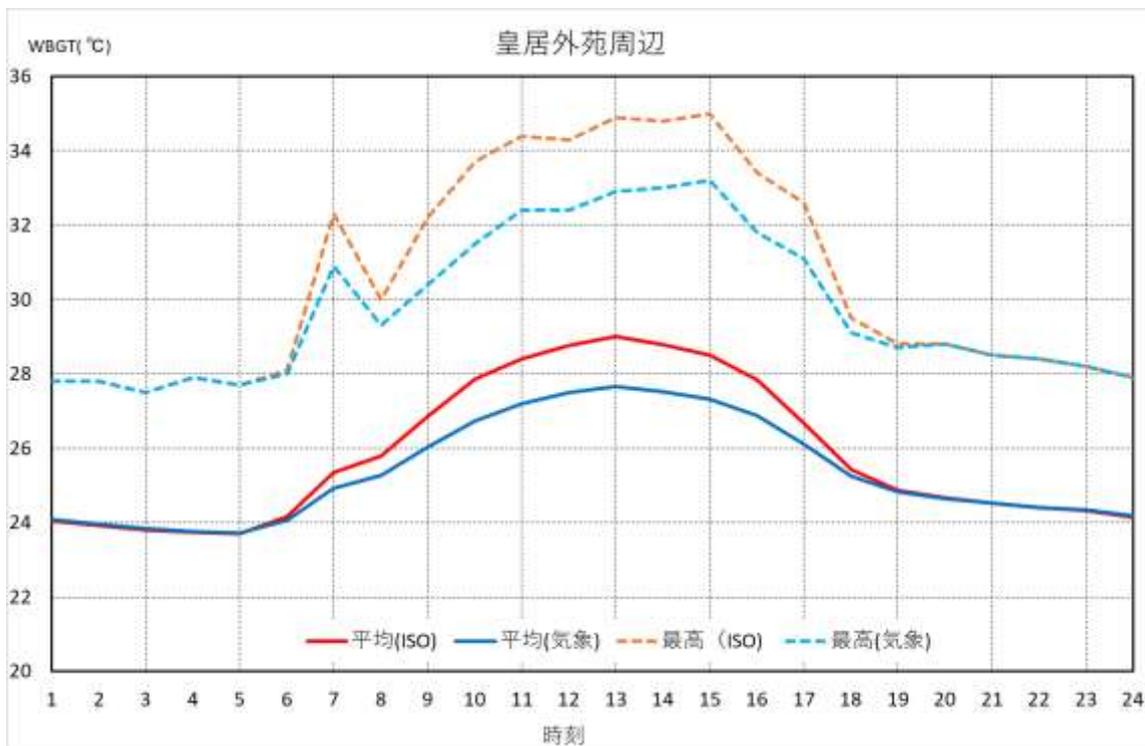


図 6-16 (b) 皇居外苑周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

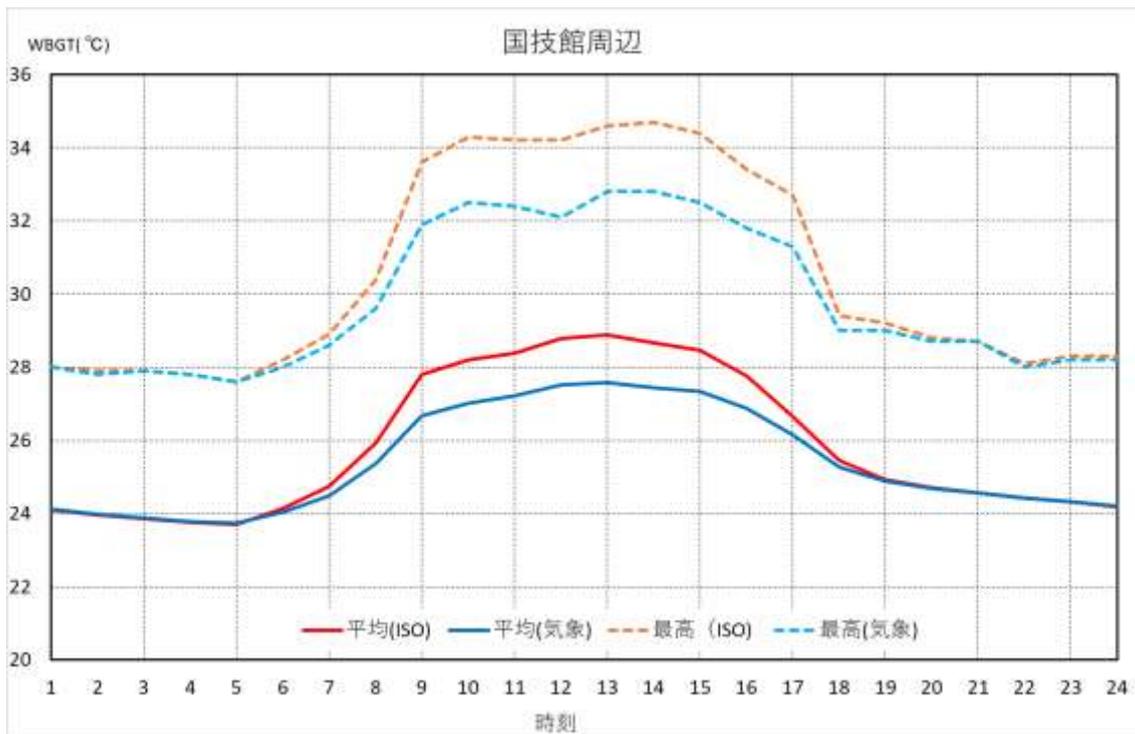


図 6-16(c) 国技館周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

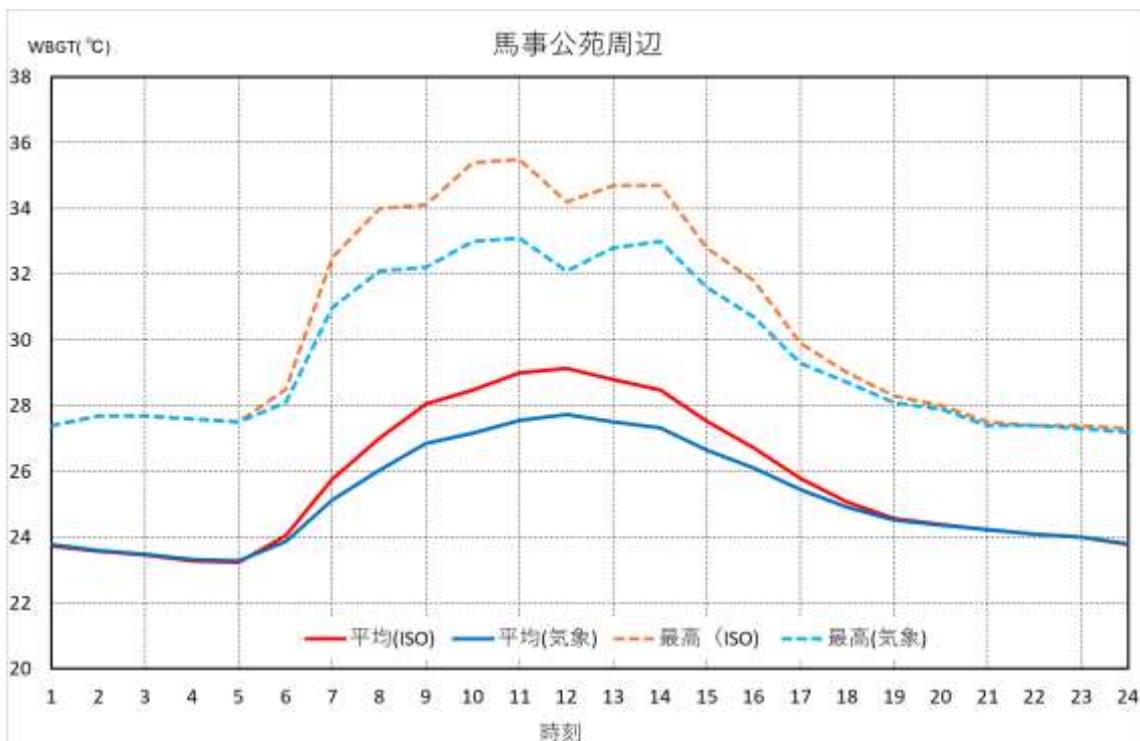


図 6-16(d) 馬事公苑周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

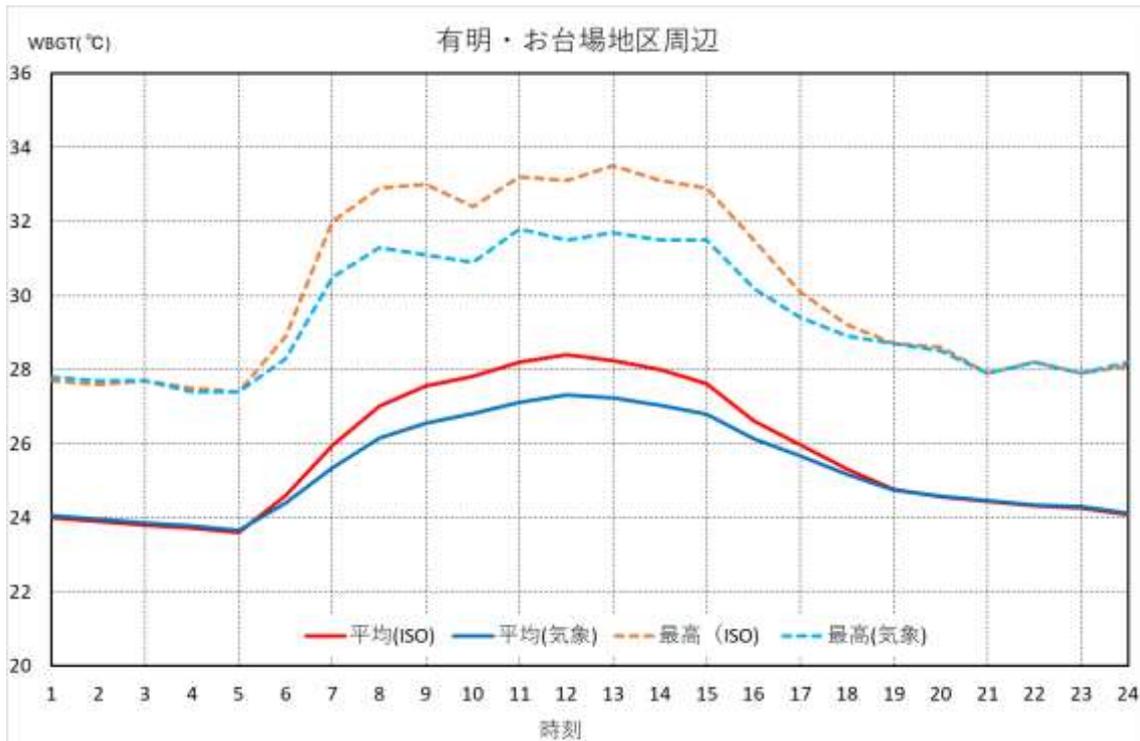


図 6-16 (e) 有明・お台場地区周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

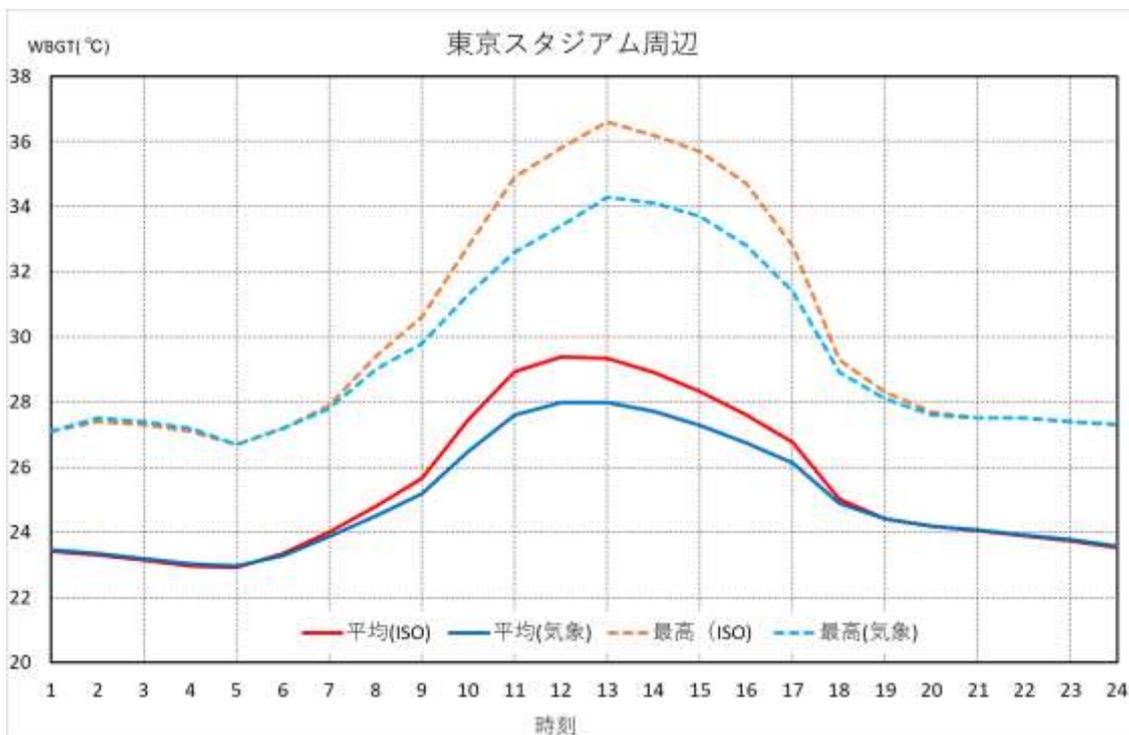


図 6-16 (f) 東京スタジアム周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

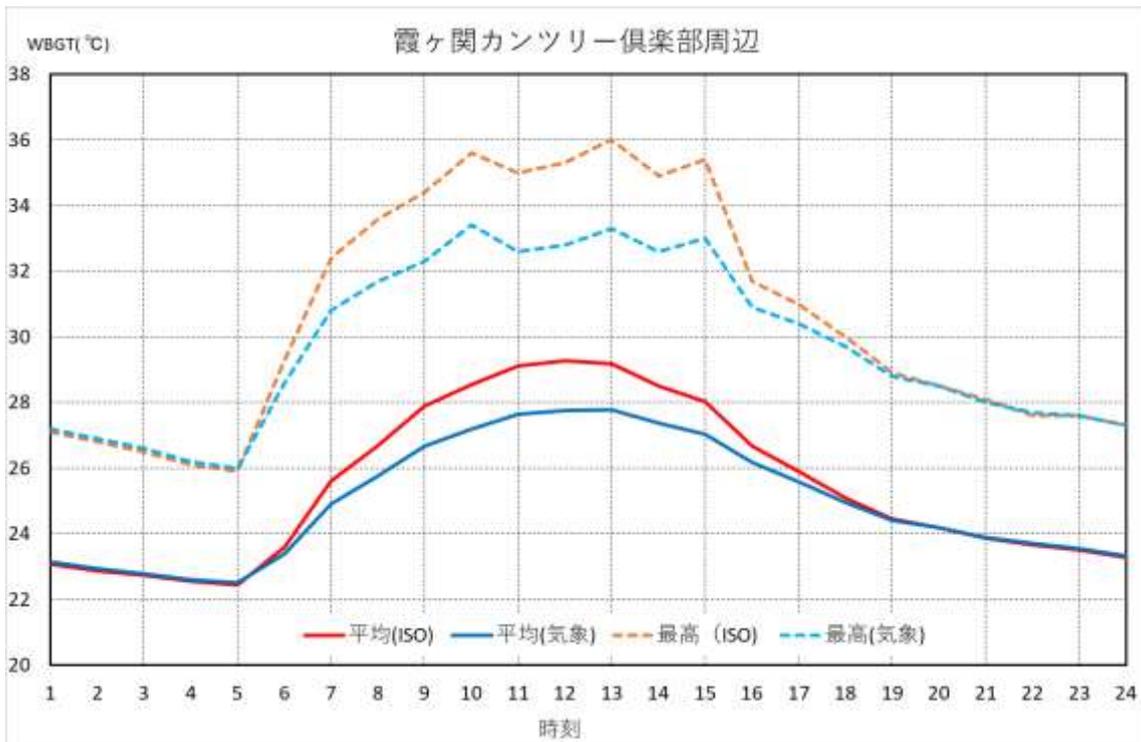


図 6-16(g) 霞ヶ関カンツリー倶楽部周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

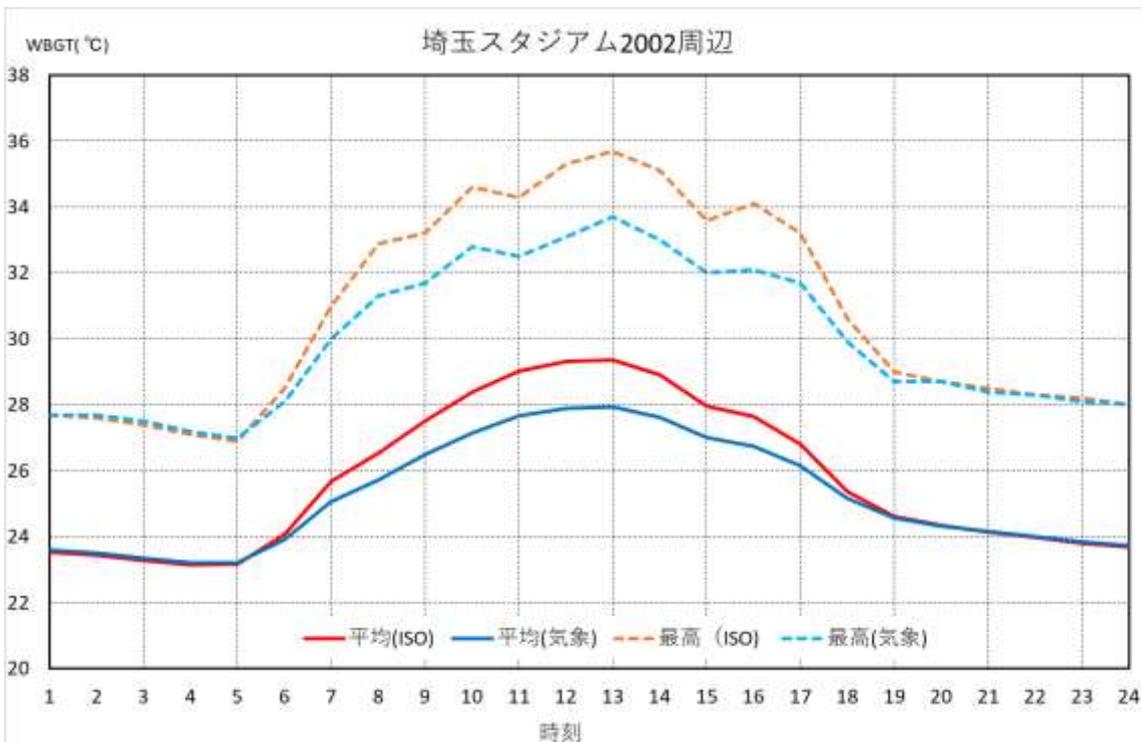


図 6-16(h) 埼玉スタジアム 2002 周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

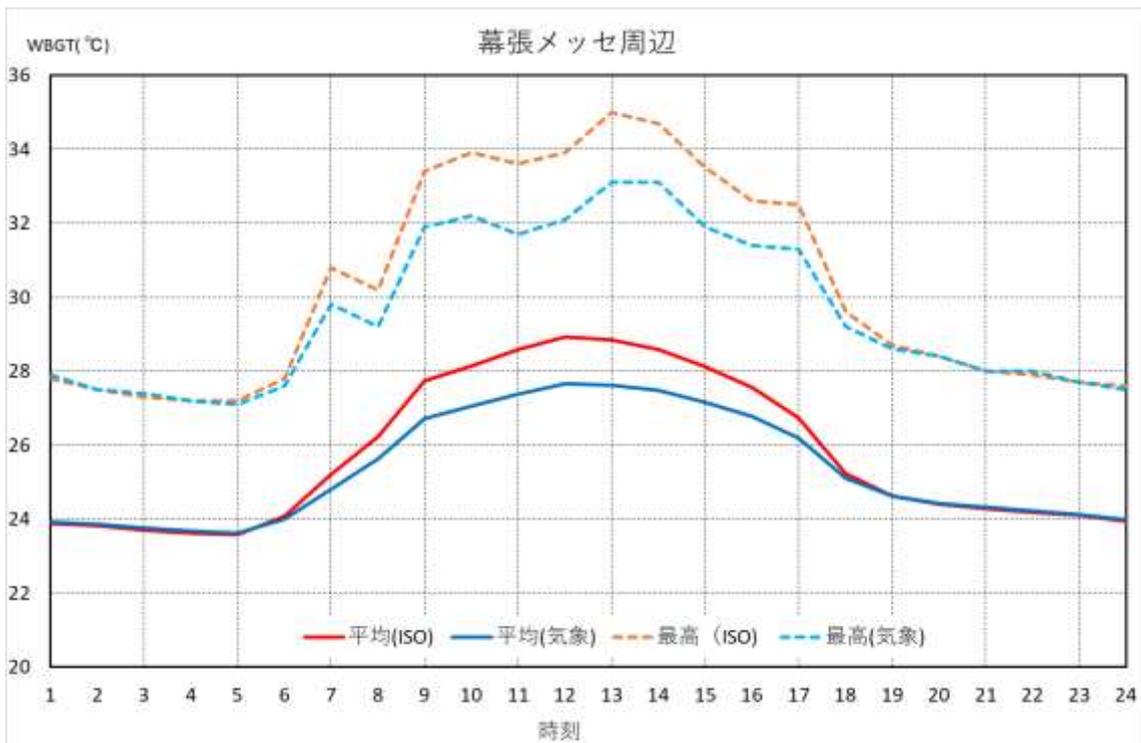


図 6-16(i) 幕張メッセ周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

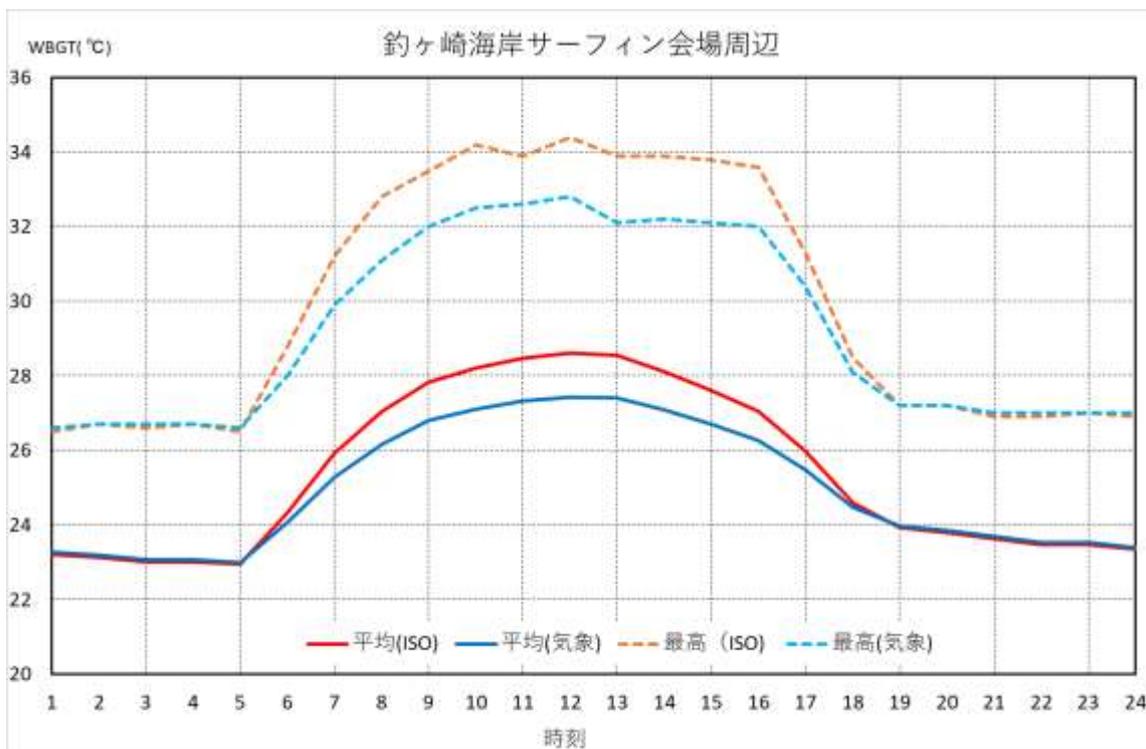


図 6-16(j) 釣ヶ崎海岸サーフィン会場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

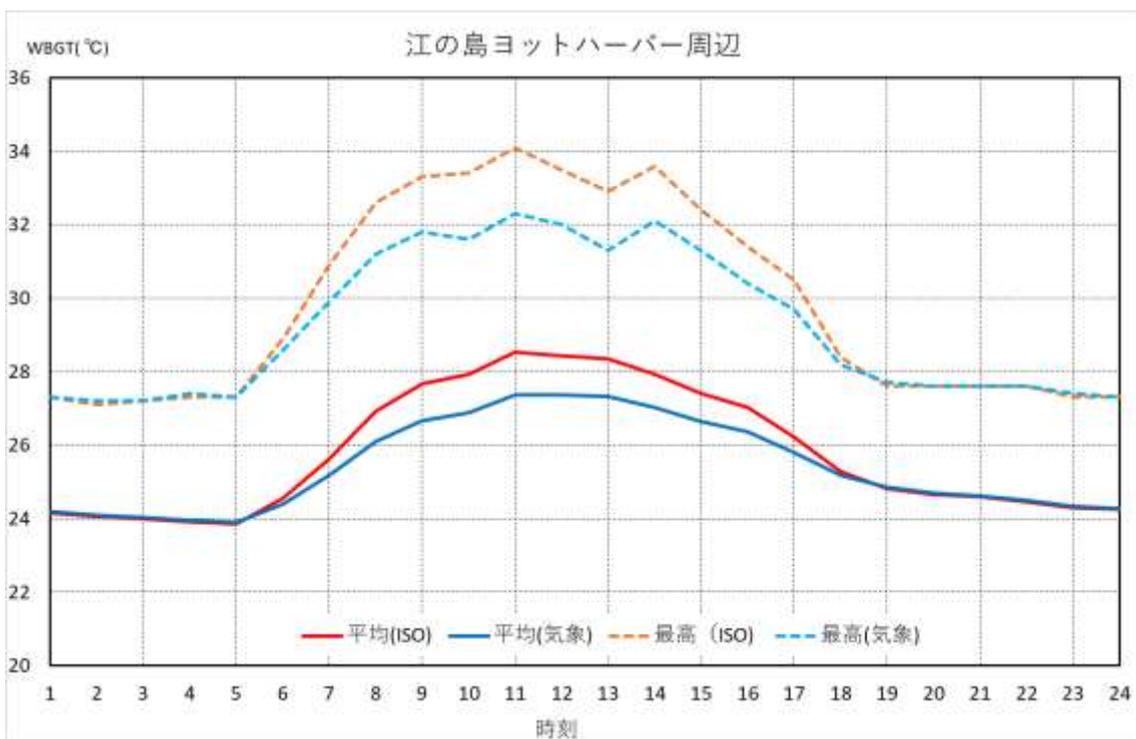


図 6-16(k) 江の島ヨットハーバー周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

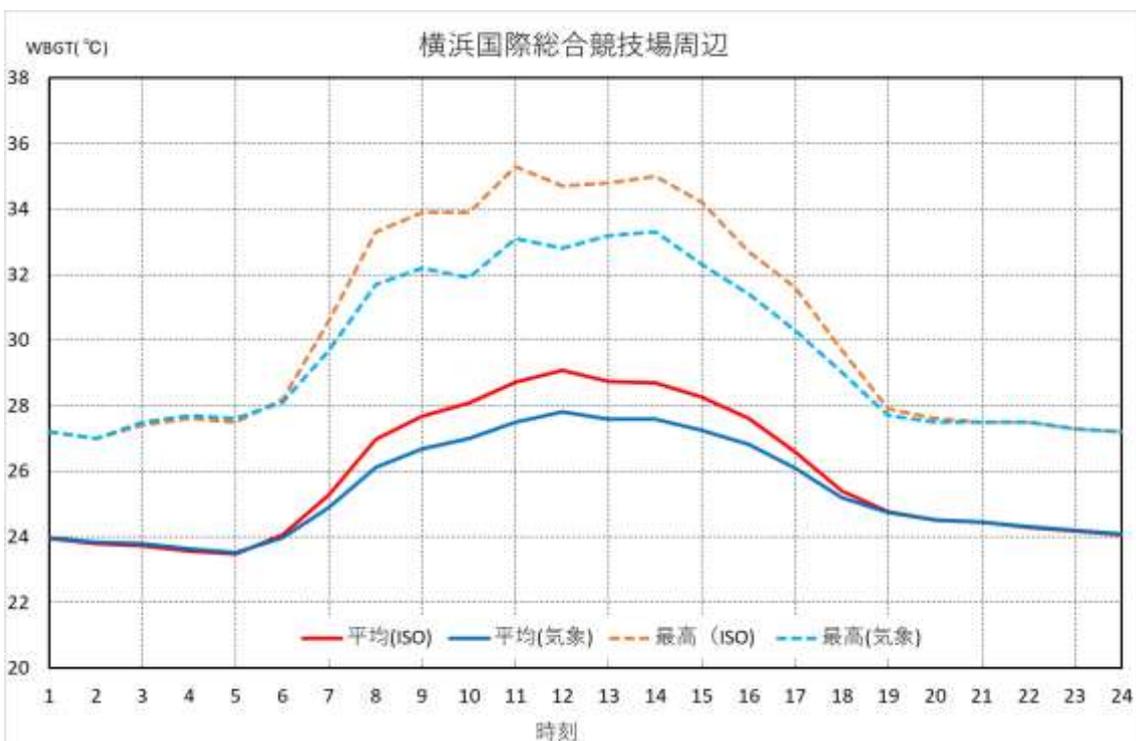


図 6-16(l) 横浜国際総合競技場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

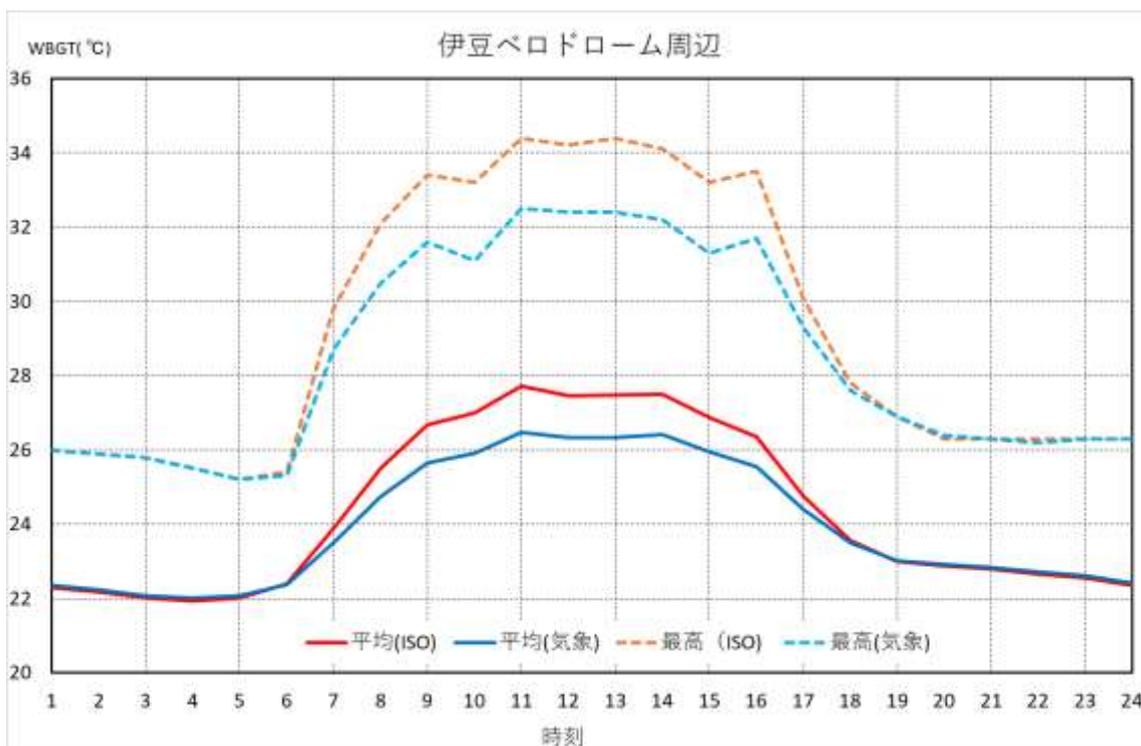


図 6-16 (m) 伊豆ペロドローム周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

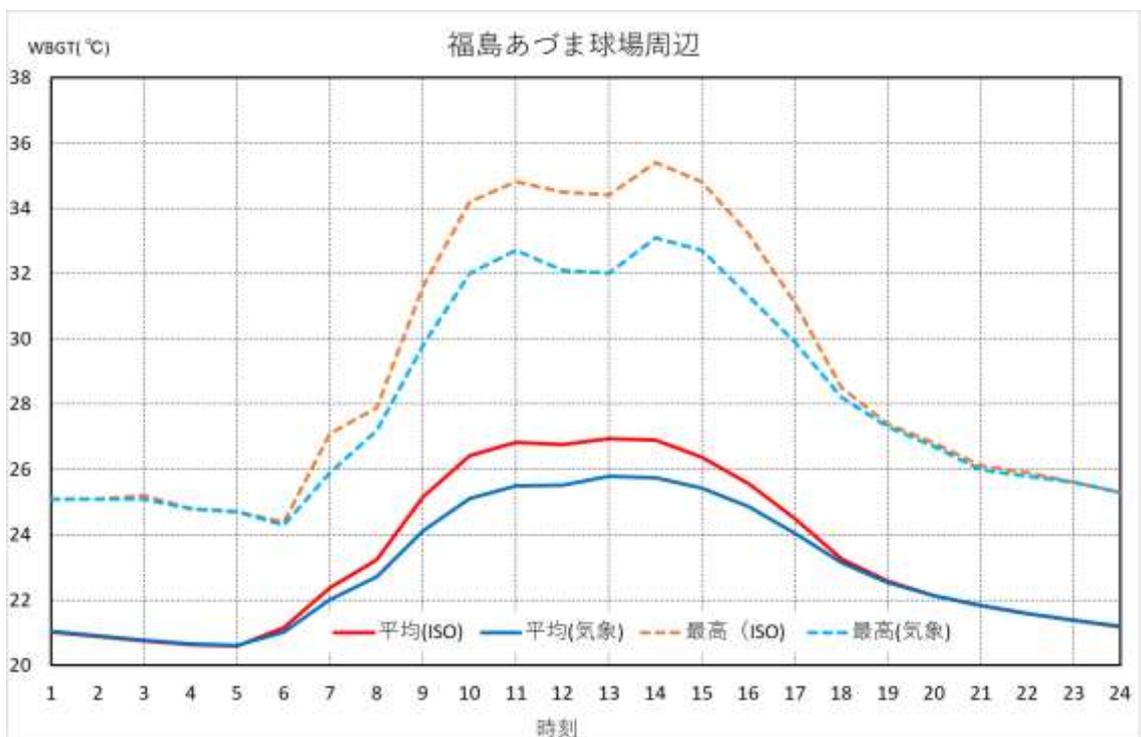


図 6-16 (n) 福島あづま球場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

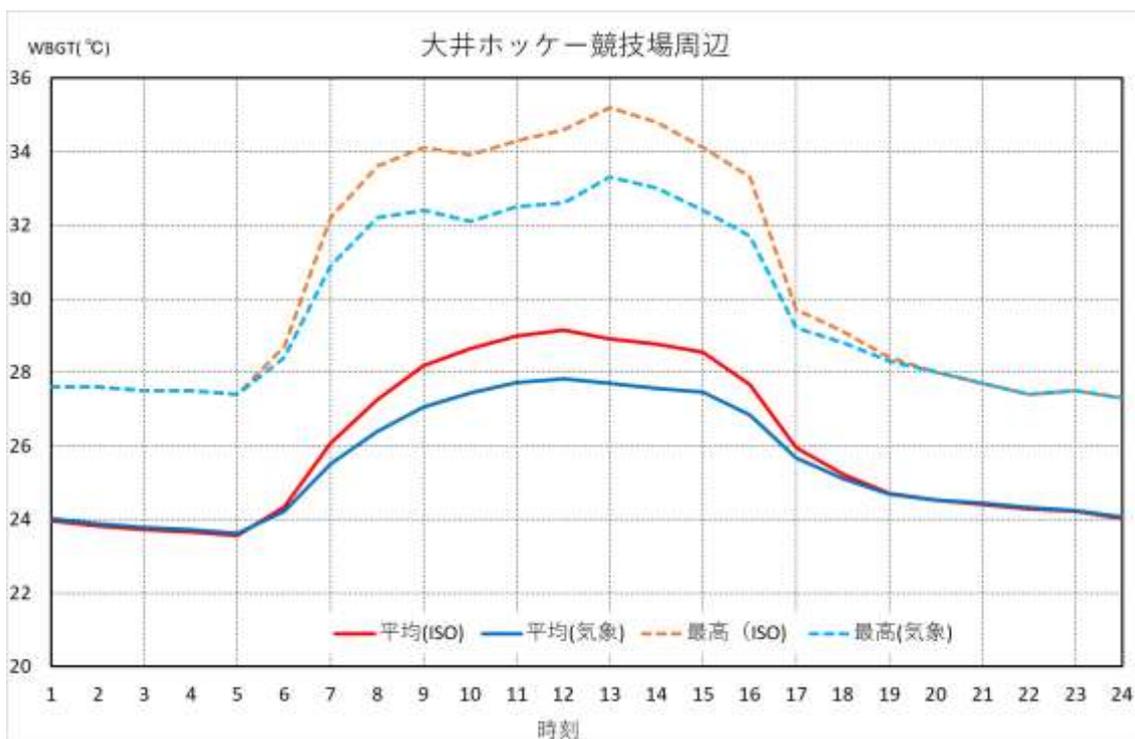


図 6-16(o) 大井ホッケー競技場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

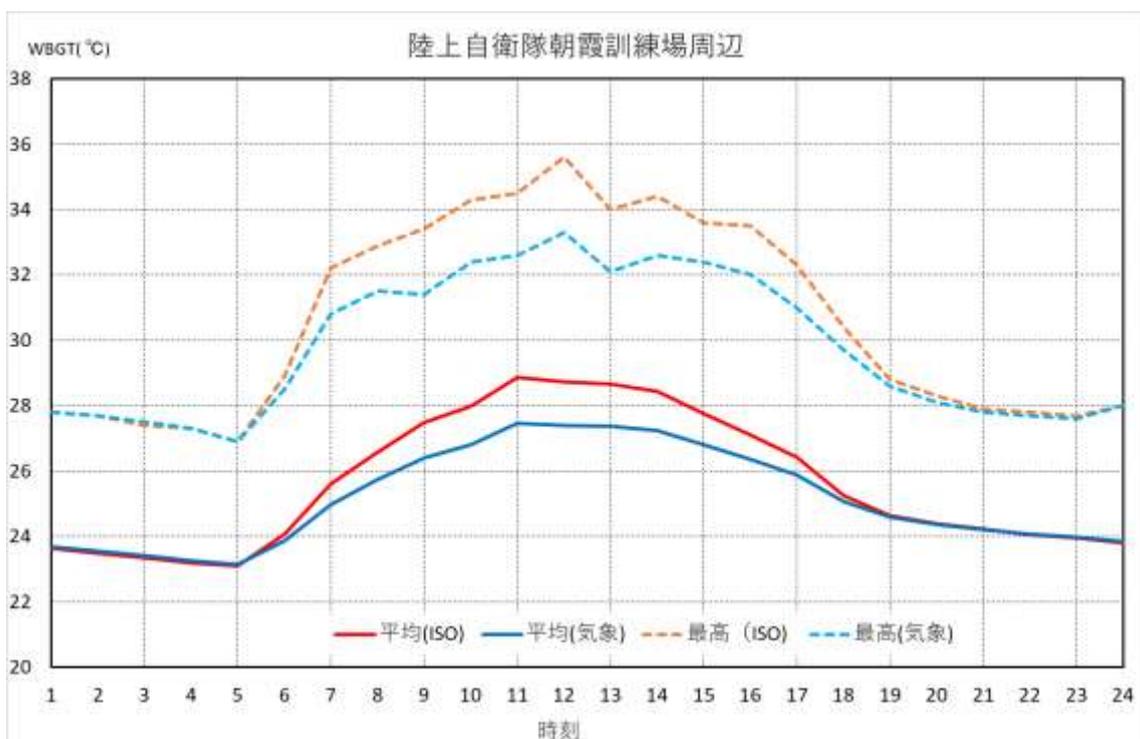


図 6-16(p) 陸上自衛隊朝霞訓練場周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

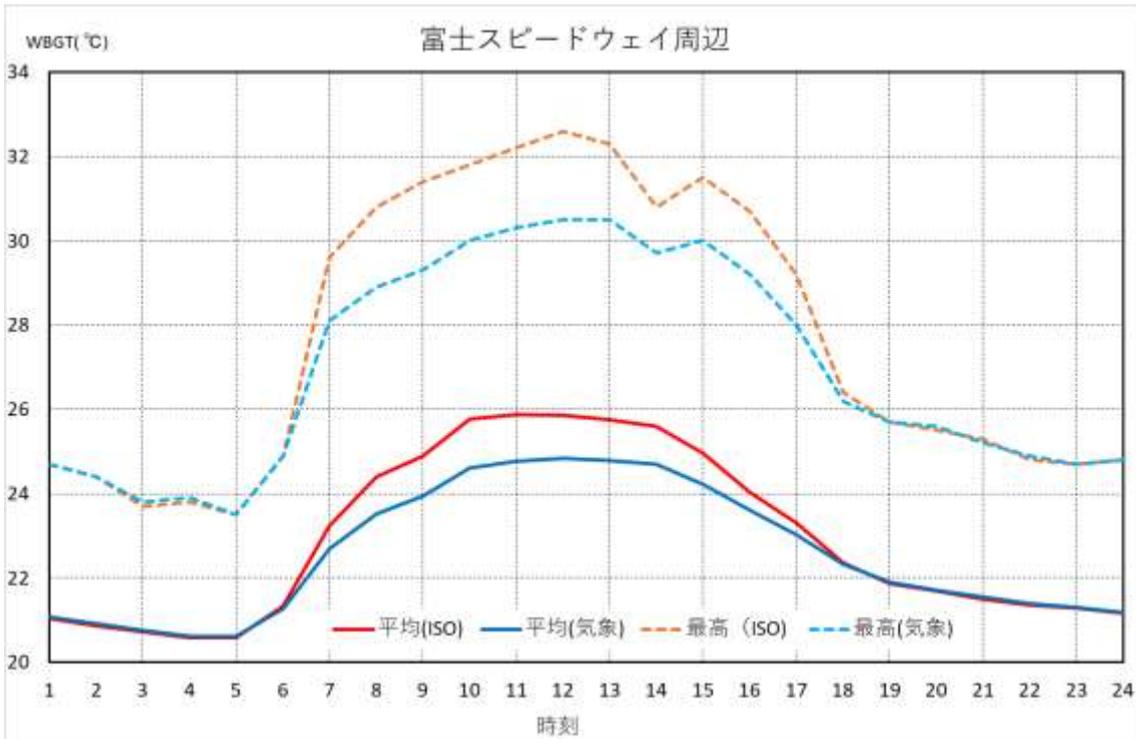


図 6-16 (q) 富士スピードウェイ周辺での ISO-WBGT と気象 WBGT の日変化

(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。

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

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

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

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

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

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

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

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、

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

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

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

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

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

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。

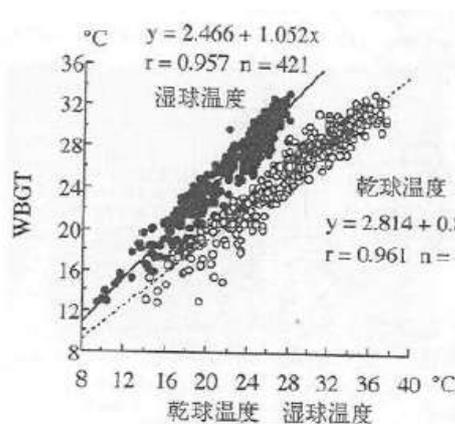


図1 湿球温度、乾球温度とWBGTの相関図
(中井ら、体力科学 39:123,1990より一部変更)

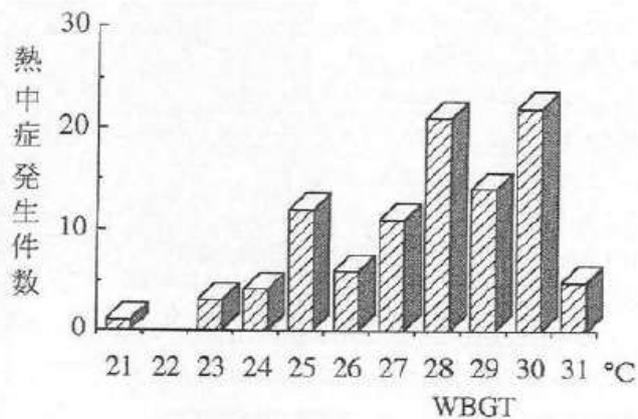


図6 運動時熱中症発生時のWBGTの分布

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の意見であった。

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ない。