



OSHEasy 職安易技術研究報告

以一般氣象資料推估 WBGT

物理模型、中央氣象署資料、職安易實作與歷史比較

作者：巫振銘

完成日期：2026 年 8 月 13 日

目錄

摘要	1
一、研究目的與分析方法	2
二、WBGT 的三個溫度代表什麼.....	3
2.1 戶外與室內公式.....	3
2.2 氣溫	3
2.3 自然濕球溫度.....	4
2.4 黑球溫度	4
三、〈 Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements〉 (2008)	5
3.1 作者、論文與研究背景.....	5
3.2 方法與輸入	5
3.3 程式版本與職安易移植.....	6
四、一般氣象資料如何換算成 WBGT	7
4.1 模型輸入與單位.....	7
4.2 平均期間中心與太陽位置	8
4.3 自然濕球的求解.....	9
4.4 黑球的求解	9
4.5 10 m 風速換算至 2 m	10
五、中央氣象署 WBGT 預報與歷史比較.....	10
5.1 M-A0085-001 公開內容	10

5.2 官方預報與職安易推估的比較方式	11
5.3 歷史資料重算結果	11
六、職安易現行資料處理與模型執行	13
6.1 資料取得與更新週期	13
6.2 氣象欄位與時間	14
6.3 日射差分	14
6.4 站點配對、氣壓與固定設定	15
6.5 官網呈現	15
七、程式移植與可重現計算	16
7.1 交叉計算方法	16
7.2 三筆案例的交叉計算結果	16
7.3 2026 年 8 月 11 日中央氣象署案例	17
7.4 單因子敏感度	18
八、日本與台灣的職場熱危害管理	18
8.1 日本 2025 年強制規定	18
8.2 日本 2026 年指引	19
8.3 台灣一般戶外作業	20
8.4 台灣法定高溫作業	21
8.5 台日制度比較	22
九、資料尺度與現場量測	23
9.1 三種資料在本研究中的角色	23

9.2 應使用作業場所儀器的情况	23
十、適用條件與現場驗證	24
十一、結論.....	25
附錄 A 符號、固定值與單位	25
附錄 B 案例附件.....	26
參考文獻	26

摘要

本研究說明如何用氣溫、相對濕度、氣壓、風速、日射、位置與時間推估戶外綜合溫度熱指數（wet-bulb globe temperature, WBGT），並以程式交叉計算及中央氣象署歷史預報檢查職安易實作。計算方法以 James C. Liljegren、Richard A. Carhart、Philip Lawday、Stephen Tschopp 與 Robert Sharp 於 2008 年發表的物理模型為主。「Liljegren」是第一作者的姓氏，本文據此稱為 Liljegren 模型。該模型分別求解自然濕球溫度與黑球溫度，再依戶外 WBGT 公式加權。自然濕球的計算包含蒸發、對流與輻射；黑球的計算包含對流、天空與地表長波輻射，以及直達、散射與地面反射的短波輻射。風速若在 2 m 以外的高度量得，模型以大氣穩定度及都市或鄉村地表類型選定冪律指數後換算。

2008 年論文以美國陸軍化學彈藥儲存場的一般氣象資料為輸入，並和共址或鄰近塔台的 WBGT 儀器比較。研究使用 50.8 mm 黑球、15 分鐘平均及定期查核的氣象儀器。儀器正常時，模型 WBGT 的平均偏差（bias）不超過 0.4 °C、均方根差（RMSE）小於 0.6 °C，91–100% 的預測落在實測值 ± 1 °C 內。上述統計反映原研究在這些場站、儀器與配對條件下的表現。本文以程式交叉計算確認職安易移植結果；作業場所的微環境差異由現場儀器評估。

中央氣象署公開的 M-A0085-001 資料提供全台鄉鎮五日逐三小時的熱傷害指數及警示，輔助說明以 WBGT 指稱 HeatInjuryIndex。本研究將官方預報與職安易推估對齊相同有效時間，比較數值區間、日內變化與 32 點分類結果。這是兩套模型輸出的歷史數值對照；作業場所儀器用於評估作業位置的環境熱負荷及實測誤差。

職安易讀取中央氣象署 0-A0003-001 氣象觀測與 0-A0091-001 日射資料。日射以同站相鄰值的差分換算為 W/m^2 ；氣象與日射也必須使用相同站號。缺少氣壓時由站高估算。風速高度 10 m、都市地表及上下層溫差 0 °C 均為固定假設，會連同模型輸入保存。來源過期、觀測時間不一致、夜間出現正日射或日射遭模型截頂時，結果標為降級。自動警示與日本作業門檻採用場址距模型站 35 km 以內且來源正常的結果；35–80 km 僅顯示參考值，超過 80 km 不提供推估。職安易將 35 km 設為分級呈現與決策資格的產品門檻。

為核對程式移植，本研究選取三筆完整測試案例。每筆案例以相同輸入交由阿貢國家實驗室（Argonne National Laboratory）研究團隊的 WBGT 1.1 版歷史 C 程式、Max Lieblich 的雙精度衍生 C 與職安易 TypeScript 各計算一次。三種實作的 WBGT 顯示至小數第 2 位時一致。2026 年 8 月 11 日 16:10 的中央氣象署固化案例得到 35.3791 °C，用於重現舊版跨站資料工程與程式移植；現行流程要求氣象與日射使用相同站號。現場誤差評估仍需配合作業位置的共址儀器資料。

歷史資料重算共取得 2,965 組可比較資料。品質合格、模型站距預報位置 10 km 內且站高低於 500 m 的子集包含 1,446 組資料、24 個測站；職安易平均值為 28.15 °C，中央氣象署預報平均值為 27.92，平均差為 +0.23 點，平均絕對差為 1.69 點，RMSE 為 2.13 點，32 點分類一致率為 88.3%。品質合格且預報位置 35 km 內的資料中，06:00 與 09:00 平均差分別為 -3.26 與 -1.79 點。比較附件保存逐筆配對、品質旗標與統計程式；作業場所誤差另以同地點、同時間的綜合溫度熱指數儀器量測評估。

關鍵詞：WBGT、自然濕球、黑球、熱危害、日射、Liljegren 模型、中央氣象署、職安易

一、研究目的與分析方法

一般氣象站通常量測氣溫、相對濕度、氣壓與風速，部分站另有日射。WBGT 儀器則直接讓自然濕球、黑球與乾球暴露於所要評估的環境。兩者的空間代表性不同。氣象資料描述測站附近的大氣狀態；作業場所量測還會受到屋頂、牆面、地面材質、機械熱源、遮蔭、局部風場與作業位置影響。

本研究說明一般氣象資料如何轉換為自然濕球、黑球與戶外 WBGT，重建職安易從中央氣象署資料到模型輸出的處理方式，並比較職安易歷史重算結果與中央氣象署 WBGT 預報。技術方法、法規義務與行政建議採用不同資料層級，重要敘述依下列方式標示：

表 1 本文證據標示與用法

標示	本文用法
原論文	2008 年論文的研究背景、方法、驗證及作者報告的結果
官方資料	政府資料集、法令條文與公開技術文件
法規義務	法令條文要求雇主必須執行的事項

標示	本文用法
行政指引	政府提出的風險管理方法；法定門檻另依適用法規判定
系統行為	現行程式、資料表與測試可直接重現的行為
本研究計算	使用固化資料與固定程式版本得到的結果
現場驗證	以作業場所儀器評估作業位置、控制措施及場域差異

一般氣象資料可驅動物理模型，得到自然濕球、黑球與戶外 WBGT。公開程式與職安易實作的計算結果可以交叉重現。站點配對、日射時間、風速高度與地表類型會改變輸入及輸出，使用時要連同這些條件一併保存。歷史預報比較呈現兩套模型輸出的差異；特定作業位置、控制措施效果與法規監測需要現場資料。

二、WBGT 的三個溫度代表什麼

2.1 戶外與室內公式

有日射的戶外環境使用下式：

$$WBGT_{out} = 0.7T_{nwb} + 0.2T_g + 0.1T_a \quad (1)$$

室內或沒有日射的環境常用：

$$WBGT_{in} = 0.7T_{nwb} + 0.3T_g \quad (2)$$

其中 T_{nwb} 是自然濕球溫度， T_g 是黑球溫度， T_a 是氣溫。三者都以 °C 代入。式 (1) 給自然濕球 70% 權重，反映蒸發散熱受阻對暑熱負荷的重要性；黑球反映輻射與風的合成效果；氣溫提供空氣顯熱的直接資訊。模型計算與儀器量測均依 WBGT 定義使用這組固定權重。

2.2 氣溫

氣溫通常由有通風與輻射遮蔽的溫度感測器量得。人體皮膚溫度高於周圍空氣時，對流可帶走熱；空氣溫度接近或高於皮膚溫度時，這項散熱能力下降，甚至轉為吸熱。完整的 WBGT 評估還需納入濕度、日射、周圍輻射與風速。

2.3 自然濕球溫度

自然濕球由濕潤燈芯包覆溫度感測部，暴露在環境風與輻射中。水分蒸發需要汽化潛熱，因而降低燈芯溫度。空氣越乾，燈芯表面與空氣之間的水氣壓差通常越大，蒸發冷卻越強。相對濕度高時，蒸發受到抑制，自然濕球溫度接近氣溫。

自然濕球仍會吸收太陽短波、天空與周圍表面的長波輻射，也會與空氣對流換熱。風吹得較強時，對流與質量傳遞係數上升。因此，自然濕球須由蒸發、對流與輻射共同求解。通風式乾濕球計抑制輻射影響，代表另一種量測條件。原作者的參考程式另計算「無輻射濕球診斷值」 T_{psy} ，求解時把淨輻射項設為 0。英文 psychrometric wet-bulb temperature 指乾濕球法的濕球溫度，可由具通風遮罩的乾濕球計量得。原論文的方程在輻射項歸零後消除了風速項，因此輸入風速不會改變 T_{psy} 。這個診斷值由氣溫、濕度與氣壓決定；戶外 WBGT 加權使用包含輻射影響的自然濕球溫度。[原論文；1]

2.4 黑球溫度

黑球溫度以黑色球體內的感測器量得。球面吸收太陽直達與散射短波、地面反射短波、天空長波及周圍表面長波，同時以對流向空氣放熱，並以長波向外放射。日射或鄰近熱源增加時，黑球溫度通常高於氣溫；風速增加時，對流冷卻增強，黑球溫度較接近氣溫。

黑球讀值與球徑、表面放射率、吸收率及反應時間有關。本文所用公開 C 與職安易程式採直徑 0.0508 m 的球體；部分標準或儀器使用 0.15 m 黑球。兩種球徑具有不同的熱容量與反應特性。模型透過 0.0508 m 球體的能量平衡，把一般氣象資料換算成與其幾何定義相符的 T_g 。

三、〈Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements〉 (2008)

3.1 作者、論文與研究背景

James C. Liljegren、Richard A. Carhart、Philip Lawday、Stephen Tschopp 與 Robert Sharp 在 2008 年發表〈Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements〉。論文刊於 *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 第 5 卷第 10 期，頁 645–655。五位作者的研究機構均列為美國 Argonne National Laboratory, Decision and Information Sciences Division。論文 DOI 為 10.1080/15459620802310770。[原論文；1–3]

美國陸軍需要在化學彈藥儲存與銷毀場持續掌握 WBGT。部分軍人與文職人員必須穿著防護衣，散熱受限，熱傷害風險升高。戶外 WBGT 儀器要維持連續且準確的量測並不容易，但各場已有一般氣象資料。研究以場站既有的氣象觀測連續估算 WBGT，讓各場站共用同一套物理計算方法。[原論文；1–3]

「Liljegren」是第一作者 James C. Liljegren 的姓氏。本文用「Liljegren 模型」指稱這套物理方法。

3.2 方法與輸入

論文以基本熱傳與質傳原理分別建立自然濕球及黑球子模型，並對各儲存場使用相同方程。各場的位置、時間、氣溫、濕度、風速與日射等輸入反映當地差異。檔頭標示 WBGT, Version 1.1 的公開歷史 C 程式顯示，輸入包括年月日、地方標準時間與 GMT 差、平均期間、緯度、經度、水平總日射、氣壓、氣溫、相對濕度、風速、風速量測高度、上下層溫差及都市／鄉村開關。輸出包括換算至 2 m 的風速、黑球溫度、自然濕球溫度、無輻射濕球診斷值與戶外 WBGT。[原論文；系統行為；1、4]

研究在七個場站使用 QUESTemp 34 取得 WBGT 驗證資料。儀器配有 50.8 mm 黑球，廠商標示自然濕球、黑球與乾球溫度準確度為 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ；兩部儀器並排運轉時讀值相同，乾球感測器和實驗室參考溫度計的 bias 為 0.1°C 。儀器架在主要氣象塔 2 m 高度，或置於靠近氣象塔的 2 m 腳架，並避開塔影

與感測器彼此遮擋。WBGT 儀器每分鐘取樣，事後形成 15 分鐘平均；塔台則以每秒樣本形成 15 分鐘平均。主要氣象儀器每六個月查核，必要時重新校正。[原論文；1]

原論文的結果也呈現感測器與資料來源問題。Deseret 與 Pueblo 的自然濕球量測出現偏差；Pine Bluff 的日射感測器經查高估約 20%，修正後 WBGT 平均偏差由 0.48 °C 降至 0.15 °C，RMSE 由 0.80 °C 降至 0.47 °C，超過 ± 1 °C 的比例由 14% 降至 4%。Pine Bluff 起初另用約 1 km 外塔台的氣溫與相對濕度；該塔氣溫相對於 WBGT 儀器乾球約有 1 °C 偏差，因此表列結果改用 WBGT 儀器的乾球溫度作模型輸入。[原論文；1]

七個場站的模型 WBGT 與量測值 RMS 差均小於 1 °C。排除儀器問題後，作者歸納平均偏差不超過 0.4 °C、RMSE 小於 0.6 °C，且 91–100% 的預測在實測值 ± 1 °C 內。Blue Grass 另比較相距 7.9 km 的兩個位置，WBGT、自然濕球、乾球及黑球的 RMS 差分別為 0.88、0.52、1.08 及 2.56 °C；空間差異已可大於同場共址的模型誤差。論文摘要所稱「優於 1 °C」概括的是上述場站、儀器與配對條件下的結果。[原論文；1]

2008 年研究建立了從標準氣象資料推估 WBGT 的實測基礎。Sauter、Patel 等人、Carter 等人及 Clark 等人後來分別以標準氣象輸入、模式日射、遠端或低成本資料及預報系統評估 WBGT 推估，使這套方法在不同資料來源與應用情境下持續受到檢驗。[後續研究；10–13]

3.3 程式版本與職安易移植

公開的 `wbgt.c.original` 位於 Max Lieblich 維護的 `mdljts/wbgt` 程式庫。原始檔頭記載 UChicago Argonne 的 2008 年版權、程式名稱與版本 WBGT, Version 1.1，作者為 James C. Liljegren；2009 年加入的未收斂回傳處理也記錄在檔內。其中，Argonne 指阿貢國家實驗室（Argonne National Laboratory），Version 1.1 是這支 C 程式的版本標示。本文後續稱它為「WBGT 1.1 版歷史 C 程式」，並以研究附件保存的固定來源檔作為歷史 C 參考實作。來源檔雜湊可供核對。[系統行為；4]

同一程式庫的衍生 `wbgt.c` 由 Max Lieblich 為 R 套件調整，包括移除 `main`、改成 ANSI C99、將 `float` 改為 `double`，並把最大迭代次數由 50 提高至 500。職安易 TypeScript 使用雙精度 JavaScript `number`，最大迭代次數也是 500，常數與主要方程對應這個衍生版本。[系統行為；5] 美國 OSHA 的戶外 WBGT calculator 與 Heat Stress Technical Manual 也將這套熱質傳方法歸於 Liljegren 及阿貢國家實驗室。[官方資料；7、8] 表 2 比較三種程式版本。

表 2 WBGT 三種程式實作比較

項目	WBGT 1.1 版歷史 C	Lieblich 衍生 C	職安易 TypeScript
固定來源	<code>wbgt.c.original</code>	<code>wbgt.c</code>	職安易模型程式
浮點型別	<code>float</code>	<code>double</code>	JavaScript <code>number</code> (雙精度)
最大迭代	50	500	500
收斂門檻	0.02 K	0.02 K	0.02 K
未收斂輸出	負狀態／缺值	負狀態／缺值	狀態碼 -1、溫度 -9999
資料下載與站點配對	—	—	有
台北時間拆解與缺壓估算	—	—	有

四、一般氣象資料如何換算成 WBGT

4.1 模型輸入與單位

表 3 列出計算所需資料。氣溫使用 $^{\circ}\text{C}$ ，方程內轉為 K；相對濕度以百分比輸入後除以 100；氣壓使用 hPa，程式中的飽和水氣壓也採 hPa；風速使用 m/s；日射使用水平面 W/m^2 ；緯經度使用十進位角度；時間必須同時說明時區與平均期間。

表 3 WBGT 模型輸入、用途與常見資料問題

輸入	在模型中的用途	常見資料問題
氣溫	濕球與黑球的對流基準、空氣物性	遮蔽與通風條件不同
相對濕度	空氣水氣壓、蒸發質傳、天空放射率	百分比與比例混用

輸入	在模型中的用途	常見資料問題
氣壓	空氣密度、水氣擴散與蒸發項	缺值或海平面氣壓與站壓混用
風速與高度	對流係數、質傳係數、2 m 風速	量測高度及周圍粗糙度不明
水平總日射	黑球與濕球的短波吸收	累積量、瞬時量與平均量混用
位置與時間	太陽高度、地日距離與直散分解	時區、觀測末點與平均中心不一致
上下層溫差、都市開關	穩定度與風速剖面	現行流程採固定設定

4.2 平均期間中心與太陽位置

若氣象資料代表截至觀測時刻的一段平均，太陽位置應對應該段時間的中心。程式計算時間為：

$$t_{mid} = t_{obs} - \frac{\Delta t}{2} \quad (3)$$

例如 16:10 的 10 分鐘日射差分代表 16:00 至 16:10，太陽位置取約 16:05。程式用年月日、地方時間、GMT offset、緯度與經度求太陽高度，再得到太陽天頂角餘弦 c_z 及地日距離 d 。大氣頂水平面日射為：

$$S_{toa} = \begin{cases} 1367 \frac{c_z}{d^2}, & c_z \geq 0.00873 \\ 0, & c_z < 0.00873 \end{cases} \quad (4)$$

程式在 $c_z < 0.00873$ 時把大氣頂水平面日射設為 0；此門檻約相當於太陽中心高於地平線 0.5° ，用來固定日出與日落附近的計算條件。

觀測水平總日射 S 先以 S_{toa} 正規化，正規化值上限設為 0.85：

$$n = \min\left(\frac{S}{S_{toa}}, 0.85\right) \quad (5)$$

當 $S_{toa} > 0$ 且 $n > 0$ 時，直達比例使用經驗式：

$$f_{dir} = \text{clip}\left[\exp\left(3 - 1.34n - \frac{1.65}{n}\right), 0, 0.9\right] \quad (6)$$

模型由水平總日射推得直達比例，其餘視為散射成分，因此只需一項水平總日射輸入。雲量快速變化時，即使氣象與日射來自同一站，該站和作業場所之間的距離仍會影響代表性。

4.3 自然濕球的求解

程式將濕潤燈芯視為橫向氣流中的圓柱，直徑 0.007 m、長 0.0254 m、放射率 0.95、短波反照率 0.40。

每次迭代在燈芯與空氣平均溫度下計算空氣物性、雷諾數、努塞爾數與圓柱對流係數：

$$Re = \frac{\rho \max(U, 0.13) D_w}{\mu}, \quad Nu = 0.281 Re^{0.6} Pr^{0.44}, \quad h = \frac{Nu k}{D_w} \quad (7)$$

空氣水氣壓為 $e_a = RH e_s(T_a)$ ，燈芯表面水氣壓為 $e_w = e_s(T_w)$ 。程式的溫度更新式可寫成：

$$T_w^* = T_a - \frac{\lambda}{C_m} \frac{e_w - e_a}{P - e_w} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0.56} + \frac{F_{rad}}{h} \quad (8)$$

T_a 、 T_w 在此以 K 計算； P 、 e_a 、 e_w 採 hPa。 λ 是汽化潛熱， $C_m = C_p M_{air} / M_{H_2O}$ ， Sc 是 Schmidt number。 F_{rad} 包括天空與地表長波交換，以及太陽直達、散射與地面反射短波。式 (8) 中的第二項降低燈芯溫度，第三項提高燈芯溫度。

初值取露點溫度。每次計算後以 0.9 舊值加 0.1 新值鬆弛，前後差小於 0.02 K 時停止。職安易與 Liebhlich 衍生 C 最多迭代 500 次。將 F_{rad} 設為 0 可得到無輻射濕球診斷值 T_{psy} ；此時方程中的風速影響也隨輻射項消失。戶外 WBGT 使用包含輻射的自然濕球 T_{nwb} 。

4.4 黑球的求解

模型黑球直徑為 0.0508 m，放射率 0.95，短波反照率 0.05。球體的能量平衡包含天空與地表長波、太陽直達與散射短波、地面反射短波及球面對流。球體對流係數為：

$$Re = \frac{\rho \max(U, 0.13) D_g}{\mu}, \quad Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad h = \frac{Nu k}{D_g} \quad (9)$$

程式依下式更新黑球絕對溫度：

$$T_g^* = \left[\frac{\epsilon_{atm} T_a^4 + \epsilon_s T_s^4}{2} - \frac{h(T_g - T_a)}{\sigma \epsilon_g} + \frac{S(1 - \alpha_g)}{2\sigma \epsilon_g} \left\{ f_{dir} \left(\frac{1}{2c_z} - 1 \right) + 1 + \alpha_s \right\} \right]^{1/4} \quad (10)$$

模型假設地表溫度等於氣溫，地表放射率 0.999、反照率 0.45；天空放射率由氣溫與水氣壓估算。黑球也使用 0.9/0.1 鬆弛與 0.02 K 收斂門檻。 T_g 求得後，式 (1) 直接計算戶外 WBGT。

4.5 10 m 風速換算至 2 m

模型以 2 m 風速計算濕球與黑球的對流。風速量測高度 z 與 2 m 不同時，使用 EPA 氣象監測指引所列的幂律：

$$U_2 = \max \left[U_z \left(\frac{2}{z} \right)^p, 0.13 \right] \quad (11)$$

表 4 列出 Pasquill A-F 穩定度與都市／鄉村地表對應的指數 p 。

表 4 Pasquill 穩定度對應的風速幂律指數

穩定度	A	B	C	D	E	F
都市 p	0.15	0.15	0.20	0.25	0.30	0.30
鄉村 p	0.07	0.07	0.10	0.15	0.35	0.55

日間穩定度由水平總日射與風速分級；日射分界為 175、675、925 W/m²，風速分界為 2、3、5、6 m/s。夜間使用上下層溫差及 2、2.5 m/s 風速分界。EPA 文件把這種幂律定位為平均風速剖面的工程近似，並說明實際剖面還受粗糙度、風向、季節與高度範圍影響。[官方技術文件；9]

職安易現行資料流程把氣象署風速視為 10 m 風速，固定使用都市指數及上下層溫差 0 °C，使各站採用一致的換算條件。鄉村、山區或周圍粗糙度明顯不同的站點，可透過敏感度計算評估地表類型對結果的影響。第七章以指定案例呈現都市與鄉村設定的差異。

五、中央氣象署 WBGT 預報與歷史比較

5.1 M-A0085-001 公開內容

中央氣象署開放資料集 M-A0085-001 名稱為「健康氣象－熱傷害指數及警示全台各鄉鎮五日逐三小時預報」。資料依縣市、鄉鎮及地理編碼提供預報有效時間、HeatInjuryIndex 與 HeatInjuryWarning。資料集頁面列出五日逐三小時預報，更新頻率為每 6 小時；職安易依資料集內容讀取鄉鎮座標與各有效時間的指標值。[官方資料；14、15]

中央氣象署的輔助說明把這個熱傷害指數稱為 WBGT，並說明它同時考量溫度、相對濕度、太陽輻射與風速。小時最高值達 32、34、36、38 時，分別對應注意、警戒、危險與高危險；連續三日達到較低一級門檻時，也會提高警示層級。這些數值屬中央氣象署健康氣象警示；台灣《高溫作業勞工作息時間標準》則按工作強度與作息比例規定作業場所 WBGT。[官方資料；15]

中央氣象署氣候服務頁公布的戶外加權式和式（1）相同。M-A0085-001 輔助說明以 WBGT 指稱 HeatInjuryIndex，並列出溫度、相對濕度、太陽輻射與風速四項考量因子。本文對官方預報的說明以資料集頁面、輔助說明與氣候服務頁的公開內容為限。[官方資料；6、14、15]

5.2 官方預報與職安易推估的比較方式

歷史比較將中央氣象署預報與職安易推估對齊相同有效時間，並以最近的官方預報位置配對模型站。職安易使用同一測站的最近氣象與日射觀測。比較項目包括數值區間、日內變化、差值分布與 32 點分類；觀測時間、預報位置距離、站高、風速高度與固定設定用於解讀差異。

中央氣象署 O-A0003-001 提供氣溫、相對濕度、氣壓與風速等觀測，O-A0091-001 提供署屬站日射量，兩者都是物理模型的輸入。作業場所的準確度評估以共址 WBGT 儀器為基準。勞動及職業安全衛生研究所 2025 年公開摘要記載，研究團隊曾在農田、網室、牧場、營建工地與茶園同步使用三種市售 WBGT 儀器；三種儀器結果高度相關，網室實測值並明顯高於「高氣溫作業防護資訊網」預測值，顯示特殊微環境需要現場量測。[官方資料；官方研究摘要；16–18、27]

5.3 歷史資料重算結果

本研究以 2026 年 7 月 29 日 15:00 至 8 月 13 日 12:00 (Asia/Taipei) 保存的歷史資料重算。每一筆職安易結果都重新讀取當時的原始氣象與日射觀測，依現行同站差分及 Liljegren 模型計算。中央氣象署預報以觀測當時已發布的最近批次為限，預報發布時間依資料來源時區 UTC+8 正規化，並要求逐三小時有效時間完全相同。比較過程不作插值，配對資料也不使用觀測時點之後發布的預報。逐筆輸入、模型輸出、品質旗標及分析程式保存在 case-data/historical-comparison/。[本研究計算]

重算取得 2,965 組可比較資料，涵蓋 32 個模型站。表 5 依空間與資料品質逐步收斂比較範圍。平均差定義為「職安易減中央氣象署」；MAE 為平均絕對差，RMSE 為均方根差。品質篩選排除氣象與日射觀測時間不一致、太陽位於地平線下仍有正日射，以及觀測日射遭模型上限截頂的資料。[本研究計算]

表 5 歷史重算結果依篩選條件比較

比較範圍	組數／模型站	職安易平均 °C	氣象署平均	平均差 (點)	MAE (點)	RMSE (點)
全部可計算資料	2,965／32	27.01	27.35	-0.33	2.28	3.46
品質合格、預報位置 35 km 內	1,859／31	26.49	27.11	-0.62	2.31	3.56
品質合格、預報位置 10 km 內、站高低於 500 m	1,446／24	28.15	27.92	+0.23	1.69	2.13

全部資料、35 km 品質子集及近距離低海拔子集的相關係數依序為 0.747、0.746 與 0.726，32 點分類一致率為 86.4%、89.2% 與 88.3%。近距離低海拔子集的中位絕對差為 1.41 點，90% 絕對差不超過 3.51 點；35.9% 的資料相差不超過 1 點，67.3% 相差不超過 2 點。高山站與鄉鎮預報位置的高度落差會擴大差值：海拔 3,844.8 m 的玉山站對應阿里山鄉預報位置時，平均差為 -13.95 點；海拔 2,413.4 m 的阿里山站平均差為 -6.34 點。低於 500 m 的子集用於減少這類垂直空間差異。[本研究計算]

表 5-1 使用近距離低海拔子集。中央氣象署 HeatInjuryIndex $\geq$ 32 定義為參照陽性，職安易 WBGT $\geq$ 32 定義為推估陽性。TP 表示兩者均達 32，TN 表示兩者均未達 32，FP 表示僅職安易達 32，FN 表示僅中央氣象署達 32。敏感度、特異度與偽陽性率均以氣象署模型輸出作數值參照；現場儀器資料另用於評估作業場所的實測誤差。[本研究計算]

表 5-1 近距離低海拔子集的 32 點分類結果

指標	結果
TP	129
TN	1,148
FP	83
FN	86
氣象署參照陽性	215

指標	結果
職安易推估陽性	212
分類一致率	88.3%
相對敏感度	60.0%
相對特異度	93.3%
偽陽性率	6.7%

品質合格且預報位置 35 km 內的資料呈現明顯日內差異：

表 6 品質合格且 35 km 內資料的分時差異

有效時間	組數	平均差 (點)	MAE (點)
00:00	216	+0.28	1.90
03:00	215	+0.28	1.83
06:00	338	-3.26	3.37
09:00	180	-1.79	2.52
12:00	217	-0.16	2.10
15:00	208	+0.07	2.39
18:00	238	+0.52	2.07
21:00	247	+0.22	1.86

06:00 與 09:00 的職安易結果平均低於中央氣象署預報 3.26 與 1.79 點；其餘時段的平均差在 -0.16 至 +0.52 點之間。清晨差異可作為後續檢查日出後日射累積區間、預報時間代表方式及溫濕度變化的具體方向。這組統計描述兩套模型輸出的差距。作業場所的實測誤差由同地點、同時間的綜合溫度熱指數儀器資料評估。

六、職安易現行資料處理與模型執行

6.1 資料取得與更新週期

職安易服務透過中央氣象署 REST API 讀取 O-A0003-001 氣象觀測、O-A0002-001 雨量觀測、M-A0085-001 熱傷害預報及 W-C0033-002 警特報。日射 O-A0091-001 使用 file API。每次請求設 15 秒逾時，回應須能解析為 JSON。[系統行為]

氣象、雨量、日射與警特報在每小時 02、12、22、32、42、52 分更新；M-A0085-001 每 30 分鐘更新。職安易推估 WBGT 在氣象與日射可用後執行；雨量或警特報等非必要資料集的失敗於 WBGT 更新完成後彙整回報。現行資料新鮮度設為 30 分鐘、日射差分最大間隔設為 30 分鐘、觀測保存期設為 15 日。[系統行為]

6.2 氣象欄位與時間

O-A0003-001 解析站號、站名、縣市、鄉鎮、緯經度、站高、觀測時間、氣溫、相對濕度、氣壓、風速及其他天氣欄位。O-A0091-001 解析站點資料、觀測時間與 SolarRadiation。M-A0085-001 的 IssueTime 若沒有時區，程式明確補上 +08:00；若原字串已有 Z 或 offset，則保留原時區。預報有效時間因而固定依資料來源時區解讀，不受部署主機時區影響。[系統行為]

模型時間使用日射區間的結束 obsTime，轉成 Asia/Taipei 年、月、日、時、分與 GMT offset +8；平均期間直接取兩筆日射觀測的實際秒數。太陽位置再依式 (3) 移到平均期間中心。氣象與日射 obsTime 不同時仍計算，但保存時間差並將結果標為降級。

6.3 日射差分

中央氣象署日射欄位的公開單位是 MJ/m²。職安易將同站本次與前次值相減，再除以兩筆觀測的實際秒數：

$$S = \frac{[R(t_2) - R(t_1)] \times 10^6}{t_2 - t_1} \quad [W/m^2] \quad (12)$$

差分結果四捨五入至小數第 2 位。有效差分要求前後兩筆順序正確、間隔大於 0 且不超過 30 分鐘，累積值不得倒退。前後值相同代表該區間平均日射為 0 W/m²，是合法輸入；累積值倒退時視為計數器重設。測試案例以 10.82 至 11.42 MJ/m²、600 秒計算得到 1000 W/m²，並分別覆蓋零差與計數器倒退。[系統行為；本研究測試]

中央氣象署公開技術頁將 SolarRadiation 的單位列為 MJ/m²。2026 年 8 月 11 日 16:00 與 16:10 的兩批固化資料共有 34 個同站序列，其中 32 站兩期皆為有效值，且 32 站全為正增量；另兩站為 -

99 缺值。差分換算範圍為 50–566.67 W/m²。若把 16:10 原值直接當成單一 10 分鐘區間能量，會得到 9,183.33–42,766.67 W/m²，遠超出合理的地表短波日射。這項多站一致性與量級檢查支持「相鄰累積值差分」的資料工程解讀；零差雖未出現在該次日間樣本，程式仍按物理意義保留為合法值。[系統行為；官方資料；本研究計算]

6.4 站點配對、氣壓與固定設定

每個具備位置、氣溫、相對濕度與風速的氣象站，均使用站號相同的日射觀測。資料表保存氣象與日射各自的批次時間、觀測時間、日射間隔、時間差、站號及座標距離。同站觀測時間錯開時，數值仍可供診斷，結果狀態標為降級。

缺少站壓時，程式以站高 z 估算：

$$P = 1013.25(1 - 2.25577 \times 10^{-5}z)^{5.25588} \quad (13)$$

品質旗標會註明由站高估算氣壓、風速高度假設為 10 m、地表假設為都市，以及上下層溫差假設為 0 °C。後三項是可追溯的固定假設，降級狀態仍按來源異常判定。氣象或日射過期、兩者時間不一致、模型地平線以下仍有正日射，或觀測日射遭模型大氣頂上限截頂時，結果狀態標為降級。資料表另保存觀測日射、模型實際使用日射、是否截頂、太陽天頂角餘弦、直達比例、估算 2 m 風速與三項風速換算假設。有限值及數學定義域在單站計算前檢查；某站輸入無效時，該站會被略過，其他站繼續計算。[系統行為]

6.5 官網呈現

官網氣象總攬呈現目前氣象、熱指數與職業安易推估 WBGT，並依目前作業條件整理建議。初次使用採一般戶外作業的預設條件；使用者套用自訂條件後，設定保存在目前瀏覽器。中央氣象署鄉鎮 WBGT 預報保留於後端資料與歷史比較，公開頁不呈現預報數值。安全摘要、場址單筆與批次查詢、具權限查詢及公開 WBGT API 共用距離與資格判斷。場址距模型站不超過 35 km 且來源正常時，頁面標示「正常區域推估」，並可使用既有 WBGT 警示與日本作業門檻。35–80 km 或來源降級時，頁面標示

「降級參考值」，不觸發 WBGT 危險警示，也不納入日本 WBGT 作業門檻；超過 80 km 不提供推估。

API 同時回傳模型狀態、決策資格、品質旗標、日射時間及實際模型輸入。[系統行為]

七、程式移植與可重現計算

7.1 交叉計算方法

本研究選取三筆完整測試案例，每筆都包含模型所需的時間、位置與氣象輸入：

1. 職安易單元測試沿用的 R 套件參考案例，用於回歸測試；
2. V2K610 大庄合作社站 15:40 歷史資料庫案例，用於核對保存結果的重算；
3. V2K610 大庄合作社站 16:10 固化 API 案例，用於重現日射差分、缺壓估算與核心模型。

每筆案例使用相同輸入交由下列三種實作計算：

1. WBGT 1.1 版歷史單精度 C 程式，50 次最大迭代；
2. mdljts/wbgt 的雙精度衍生 C，500 次最大迭代；
3. 職安易 TypeScript，500 次最大迭代。

比較欄位包括估算 2 m 風速、黑球溫度、自然濕球溫度、無輻射濕球診斷值及 WBGT。歷史 C 以 GCC 13.3.0、-O0 -fno-fast-math 編譯；TypeScript 工具鏈為 Node.js 20.20.0、TypeScript 5.9.3 與 ts-node 10.9.2。輸入、harness、來源 SHA-256 與結果均保存在 case-data/canonical-model/。

7.2 三筆案例的交叉計算結果

表 7 三筆案例的跨實作計算結果

案例	實作	2 m 風速 m/s	T_g °C	T_{nwb} °C	無輻射濕球 T_{psy} °C	WBGT °C
R 測試案例	歷史 C	1.219005	39.251213	15.462732	6.578210	19.874155
R 測試案例	衍生 C	1.219005	39.251174	15.462702	6.578229	19.874126
R 測試案例	TypeScript	1.219005	39.251174	15.462702	6.578229	19.874126

案例	實作	2 m 風速 m/s	T_g °C	T_{nwb} °C	無輻射濕球 T_{psy} °C	WBGT °C
V2K610 15:40	歷史 C	3.261508	42.765434	34.882896	34.099998	36.381115
V2K610 15:40	衍生 C	3.261508	42.765505	34.882995	34.100000	36.381198
V2K610 15:40	TypeScript	3.261508	42.765505	34.882995	34.100000	36.381198
V2K610 16:10	歷史 C	3.189031	40.225029	34.248619	33.599998	35.379040
V2K610 16:10	衍生 C	3.189031	40.225018	34.248691	33.600000	35.379087
V2K610 16:10	TypeScript	3.189031	40.225018	34.248691	33.600000	35.379087

三個實作在顯示至小數第 2 位時全部一致。雙精度 C 與 TypeScript 的差異接近浮點末位；歷史 C 的最大 WBGT 差約 0.000083 °C。這項比較支持公式、常數、迭代與程式移植的一致性。作業場所的外部準確度與偏差仍需共址儀器資料評估。

7.3 2026 年 8 月 11 日中央氣象署案例

固化資料包含 V2K610 大庄合作社氣象站與 467270 田中日射站在 16:00、16:10 的原始 API response body、資料集代碼、擷取時間與 SHA-256。兩站距離 22.94237 km，兩來源在 16:10 的 obsTime 相同。此案例沿用修正前的跨站資料流程，用來重現日射差分、缺壓估算與核心模型；現行流程的正常 WBGT 寫入資格要求氣象與日射站號相同。

田中日射累積量由 22.96 增至 23.16 MJ/m²，間隔 600 秒：

$$S = \frac{(23.16 - 22.96) \times 10^6}{600} = 333.333333 \text{ W/m}^2 \quad (14)$$

程式保存並輸入 333.33 W/m²。V2K610 站高為 23 m，氣壓缺值，式 (13) 得到：

$$P = 1013.25(1 - 2.25577 \times 10^{-5} \times 23)^{5.25588} = 1010.490024 \text{ hPa} \quad (15)$$

16:10 氣溫 33.6 °C、相對濕度 100%、10 m 風速 4.4 m/s。固定都市地表、上下層溫差 0 °C、平均期間 10 分鐘、GMT offset +8。模型結果為 2 m 風速 3.1890305 m/s、黑球 40.2250178 °C、自然濕球 34.2486907 °C、無輻射濕球診斷值 33.6000000 °C，WBGT 35.3790871 °C。

式 (1) 回代：

$$0.1(33.6) + 0.2(40.2250178) + 0.7(34.2486907) = 35.3790871 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

同日 15:40 的資料庫保存紀錄另有唯讀摘錄。該筆保存 WBGT 為 36.38119758303421 $^{\circ}\text{C}$ ，使用保存欄位與固定設定重算後完全相同。2 m 風速 3.2615084865 m/s 是依保存風速及固定設定重算的中間量；16:10 案例則由固化 API 回應建立模型輸入與結果。

7.4 單因子敏感度

表 8 固定 16:10 的其他輸入，每次只改一個因子，呈現該組氣象條件附近的局部敏感度。

表 8 V2K610 16:10 案例的單因子敏感度

情境	改變	WBGT $^{\circ}\text{C}$	相對基準差 $^{\circ}\text{C}$
基準	日射 333.33 W/m ² 、RH 100%、風 4.4 m/s、都市	35.3791	0
日射降低	133.33 W/m ²	34.3896	-0.9895
日射提高	533.33 W/m ²	36.2331	+0.8540
風速降低	3.4 m/s	35.5910	+0.2119
風速提高	5.4 m/s	35.2848	-0.0943
相對濕度降低	90%	34.3198	-1.0593
地表改為鄉村	其他輸入不變	35.2573	-0.1218

本案例接近飽和濕度，自然濕球接近氣溫；相對濕度降低 10 個百分點使 WBGT 下降約 1.06 $^{\circ}\text{C}$ 。日射增減 200 W/m² 的影響約 +0.85/-0.99 $^{\circ}\text{C}$ 。日射同時改變穩定度分類、2 m 風速及直散比例，因此呈現非線性反應。表 8 的數字適用於本次輸入附近。

八、日本與台灣的職場熱危害管理

8.1 日本 2025 年強制規定

日本在 2025 年 6 月 1 日施行修正後的《勞働安全衛生規則》。預期在 WBGT 28 $^{\circ}\text{C}$ 以上或氣溫 31 $^{\circ}\text{C}$ 以上環境連續作業 1 小時以上，或每日超過 4 小時的作業，事業者須事前建立熱中症症狀的通報體制，

並向作業者周知。疑似症狀可由作業者自覺或由他人發現；事業者也須訂定離開作業、身體冷卻、必要時接受醫師診察或處置等防止惡化的程序及緊急聯絡方式。[法規義務；19、20]

這項修法著重疑似熱中症的早期發現與重症化防止。工作強度、衣著、熱適應與休息安排則由技術指引提供較細緻的風險評估方法。

8.2 日本 2026 年指引

日本厚生勞動省在 2026 年 3 月公布《職場における熱中症防止のためのガイドライン》。指引以符合 JIS Z 8504 或 JIS B 7922 的 WBGT 指數計掌握作業場所數值，區域性一般 WBGT 則供初步參考。直射日光、爐體附近、無冷房或通風不良的室內作業，均以作業位置實測為評估基礎。[行政指引；21、22]

指引依身體作業強度與熱適應狀態設定基準：

表9 日本 2026 指引的 WBGT 基準

代謝率等級	作業例	已熱適應 °C-WBGT	未熱適應 °C-WBGT
0 安靜	安靜坐姿	33	32
1 低	輕手工作、一般駕駛、平地慢走	30	29
2 中	釘鎚、抹灰、除草、採收、2.5–5.5 km/h 平地步行	28	26
3 高	重物搬運、鏟掘、割草、5.5–7 km/h 平地步行	26	23
4 極高	劇烈鏟掘、爬樓梯、跑步、7 km/h 以上步行	25	20

指引把熱適應者定義為評估期至少一週以前，已在相同完整工作期間暴露於相同、類似或更嚴苛高溫條件者。基準值會因熱適應不同而差 1–5 °C-WBGT。工作排程因此要區分新人、休假後復工者與已適應者，分別套用相應基準。[行政指引；22]

衣著以修正值加到實測 WBGT。一般織物工作服與表面加工棉質連身服為 0；單層聚烯烴不織布連身服 +2；織物雙層 +3；連身服外加長袖長版不透濕圍裙 +4；無帽單層不透濕連身服 +10；有帽單層不透濕連身服 +11；一般衣服外再穿無帽不透濕連身服 +12；有帽時另加 +1。這些值顯示防護衣可能改變評估等級。職安易模型計算環境 WBGT，未納入衣著修正。[行政指引；22]

對已熱適應作業者且未採特殊冷卻措施者，2026 指引提出每小時休息參考：修正後 WBGT 自達基準值起至約超過 1 °C，原則上每小時至少休息 15 分鐘；約超過 2 °C、3 °C 時，分別至少休息 30、45 分鐘；更高時宜停止作業。未熱適應者宜安排更長休息。台灣事業單位可將這套方法列為內部風險管理參考，法定休息與工時依台灣規定辦理。[行政指引；22]

8.3 台灣一般戶外作業

台灣《職業安全衛生設施規則》第 324 條之 6 規定，雇主使勞工從事戶外作業，應視天候狀況採取降低場所溫度、提供陰涼休息場所與飲料、調整作業時間、增加巡視、健康管理、熱適應、健康狀況確認、教育及緊急應變等措施。[法規義務；23]

同規則第 303 條之 1 使用熱指數風險等級。戶外作業達表三第 4 級以上時，原則上應設置遮陽設施及風扇、水霧或其他降溫設備，並在鄰近處提供有遮陽及冷氣、風扇或良好自然通風的休息場所與充足飲水。勞工作業時間短暫或現場設置確有困難，且已採第 324 條之 6 所定熱危害預防措施時，排除相關設備義務。[法規義務；23]

表 10 台灣戶外作業 Heat Index 風險等級

Heat Index 風險等級	範圍 °C
第 1 級	26.7 以上、未達 32.2
第 2 級	32.2 以上、未達 40.6
第 3 級	40.6 以上、未達 54.4
第 4 級	54.4 以上

第 303 條之 1 的設施義務以第 4 級為量化觸發條件；第 324 條之 6 則依天候狀況要求雇主採取預防措施。第三版指引另將陽光直射、厚重或不透氣衣著等條件納入風險調整。法定第 4 級依表三 Heat Index 判定。[法規義務；行政指引；23、24]

職安署《高氣溫作業熱危害預防指引（第三版）》說明可利用中央氣象署溫濕度資訊及高氣溫戶外作業熱危害預防行動資訊網，查詢所在地 Heat Index 風險與對策。指引涵蓋勞工健康、飲水、休息、熱

適應、衣著、巡查及緊急處置。一般戶外作業依第 303 條之 1 的 Heat Index 判定法定第 4 級。[行政指引；24]

8.4 台灣法定高溫作業

《高溫作業勞工作息時間標準》第 2 條列舉鍋爐房、灼熱金屬壓軋鍛造、鑄造熔融金屬、加熱熔煉、玻璃與窯爐等高溫作業，並以工作日時量平均綜合溫度熱指數達第 5 條連續作業值以上作為條件。已採自動化操作方式且勞工無暴露熱危害之虞的作業，不在適用範圍內。[法規義務；25]

這類作業依工作強度及綜合溫度熱指數決定工作與休息配置。連續暴露達一小時以上時，以每小時的時量平均綜合溫度熱指數判定；間歇暴露以二小時時量平均綜合溫度熱指數判定。第 5 條的配置見表 11。[法規義務；25]

表 11 台灣法定高溫作業的工作與休息配置

工作強度	連續作業	每小時休息 25%	每小時休息 50%	每小時休息 75%
輕工作	30.6	31.4	32.2	33.0
中度工作	28.0	29.4	31.1	32.6
重工作	25.9	27.9	30.0	32.1

表 11 的單位為 °C-WBGT。勞工操作時須接近黑球溫度 50 °C 以上的高溫灼熱物體，雇主應提供身體熱防護設備並使勞工確實使用；量測位置為勞工工作時的位置。首次從事高溫作業的勞工，雇主應規劃適當的熱適應期間並採取必要措施。[法規義務；25]

實施本標準後降低工作時間，勞工原有工資不得減少。雇主並應充分供應飲用水及食鹽，採取必要的危害預防指導措施。《職業安全衛生法》第 19 條規定，在高溫場所工作的勞工每日工作時間不得超過 6 小時。《勞工作業環境監測實施辦法》第 6 條要求標準所定高溫作業場所每 3 個月監測綜合溫度熱指數一次以上。[法規義務；25、26、29]

這項法定作業環境監測以作業場所量測為基礎，評估特定高溫製程及勞工實際暴露環境。爐體輻射、室內通風、作業位置與休息位置均由現場 WBGT 量測反映。

8.5 台日制度比較

表 12 台日熱危害制度比較

項目	日本 2026 指引	台灣一般戶外制度	台灣法定高溫作業
主要環境指標	作業場所實測 WBGT	Heat Index 風險等級及天候	作業場所綜合溫度熱指數
工作強度	代謝率 0-4，各有基準	指引要求評估工作負荷，法規表三不按代謝率分級	輕、中、重工作對應作息表
熱適應	已／未適應基準不同	第 324 條之 6 明列熱適應措施	首次從事高溫作業須規劃適當熱適應期間並採必要措施（第 6-1 條）
衣著與熱防護	WBGT 加衣著修正值	指引納入衣著與個人防護	接近黑球溫度 50 °C 以上高溫灼熱物體時，須提供身體熱防護設備並使勞工確實使用（第 6 條）
休息	依超過基準幅度提供每小時參考	雇主依天候與作業風險調整時間並提供休息場所	依 WBGT 與工作強度使用法定作息表
現場量測	JIS 相符儀器為基本方法	一般戶外法定第 4 級以 Heat Index 表判斷	每 3 個月監測 WBGT 一次以上
其他雇主義務	依日本法規與指引辦理	依第 303-1、324-6 條辦理	縮短工時不得減少原有工資；充分供應飲用水、食鹽及必要指導（第 7、9 條）
法律效力	2025 通報與處置程序是義務；2026 細部方法多為指引	第 303-1、324-6 是義務；第三版文件是指引	職安法、作息標準及監測辦法是義務

九、資料尺度與現場量測

9.1 三種資料在本研究中的角色

表 13 三種 WBGT 資料的時間、空間與研究用途

資料	時間範圍	空間代表性	本研究中的角色
中央氣象署 WBGT 預報	未來五日、逐三小時	全台鄉鎮	提供另一套官方模型輸出對照
職安易氣象推估 WBGT	最近同站氣象與日射觀測	模型站周邊區域，並附站距與品質狀態	檢查 Liljegren 模型移植、資料鏈及歷史一致性
作業場所 WBGT 儀器	量測當下	儀器所在作業點	評估作業位置熱負荷與模型相對於實測值的誤差

中央氣象署預報與職安易推估都是模型結果，歷史比較衡量兩套數值的一致程度。作業場所儀器提供同地點、同時間的量測基準，可進一步計算 bias、MAE、RMSE 與管理門檻分類表現。三類資料的時間與空間尺度應連同結果一併記錄。

9.2 應使用作業場所儀器的情況

下列任一條件成立時，現場量測比區域推估更合適：

- 作業在室內、半室內、貨櫃、屋頂下或通風不良處；
- 有爐體、蒸汽、熱管線、瀝青、金屬、玻璃或其他輻射熱源；
- 作業點的日照、遮蔭、反射面或風場與氣象站不同；
- 穿著不透濕衣、化學防護衣、呼吸防護具或多層衣物；
- 推估接近內部行動值、法定值或停工判斷需要的界線；
- 要比較遮陽、風扇、水霧、隔熱或工序調整前後的效果；
- 作業者未熱適應、有熱傷害高風險健康狀況或已出現症狀；
- 屬《高溫作業勞工作息時間標準》及《勞工作業環境監測實施辦法》的法定高溫作業。

現場儀器應符合適用標準、正確架設、充分達到反應時間並記錄量測位置。儀器宜設於能代表作業者熱暴露的位置，並分別量測工作區與休息區。

十、適用條件與現場驗證

Liljegren 模型在美國陸軍儲存場的一般氣象資料上完成原始驗證。驗證使用 50.8 mm 黑球、15 分鐘平均、共址或鄰近塔台且受品質管理的儀器；儀器異常與輸入偏差會明顯改變結果。職安易再以歷史 C、雙精度衍生 C 與 TypeScript 交叉計算，確認公式、常數與迭代結果一致。台灣作業場所的誤差評估仍需共址量測資料。

現行流程以相同站號配對氣象與日射。模型站和作業場所之間仍可能有地形、海陸風、遮蔭與局部雲系差異。原論文在相距 7.9 km 的位置量得 0.88 °C WBGT RMS 差，黑球 RMS 差達 2.56 °C；約 1 km 外塔台的氣溫也曾帶來 1 °C bias。這項空間差異已與同場共址模型的 RMSE 處於相近或更大量級。職安易將 35 km 設為產品分級門檻；距離與準確度的關係仍待台灣共址資料評估。

0-A0003-001 提供平均風速，回傳列未附逐站感測器高度；中央氣象署的歷史測站資料另明載板橋 2002-2006 年風速儀地上高度為 53.7 m，顯示實際高度可能偏離現行 10 m 設定。現行 10 m 風速高度、都市地表與垂直溫差 0 °C 均屬可見假設。來源時間錯位、過期、夜間正日射或日射截頂會使結果降級；作業點與測站之間的微環境差異另由現場量測評估。[官方資料；16、28]

台灣場域的偏差評估可建立共址資料：在不同季節、地形、日照、風場及作業型態下，同步保存自然濕球、黑球、氣溫、標準 WBGT、一般氣象輸入與儀器 metadata。分析前定義平均期間、配對容許時間、樣本條件、bias、MAE、RMSE 與超過管理門檻的分類表現，並將官方預報、職安易推估與現場儀器對齊相同有效時間。

十一、結論

一般氣象資料可以透過物理模型推估戶外 WBGT。Liljegren 方法使用位置與時間計算太陽位置，由水平總日射估計直達比例，將風速換算到 2 m，分別求解濕潤圓柱與黑球的能量平衡，最後依戶外 WBGT 定義加權。這套計算所需的物理量與程式步驟可被檢視及重現。

職安易 TypeScript 與固定版本的兩個 C 實作在三筆測試案例中達到小數第 2 位一致。兩批固化日射資料的 32 個有效站皆呈正增量，換算後為 50–566.67 W/m²，支持相鄰值差分的處理方式。V2K610/467270 案例能重建舊流程的日射差分、缺壓估算、站距、2 m 風速與 WBGT；兩者站號不同，案例定位為歷史資料工程示範。

歷史重算取得 2,965 組職安易與中央氣象署預報的配對資料。品質合格、預報位置 10 km 內且站高低於 500 m 的 1,446 組資料中，平均差為 +0.23 點，MAE 為 1.69 點，RMSE 為 2.13 點，32 點分類一致率為 88.3%。相對敏感度為 60.0%，相對特異度為 93.3%，偽陽性率為 6.7%。品質合格且預報位置 35 km 內的資料中，06:00 與 09:00 平均差分別為 -3.26 與 -1.79 點，提供後續檢查清晨輸入與時間代表方式的方向。配對資料與統計程式可重算上述結果；作業位置的實測誤差由共址儀器資料評估。

附錄 A 符號、固定值與單位

表 A-1 模型符號、固定值與單位

符號	定義	單位／值
T_a	氣溫	°C；方程內 K
T_{nwb}	自然濕球溫度	°C
T_g	黑球溫度	°C
T_{psy}	無輻射濕球診斷值（乾濕球法濕球溫度；psychrometric wet-bulb temperature）	°C
S	水平總日射	W/m ²
P	站壓	hPa

符號	定義	單位／值
U_z	z 高度風速	m/s
c_z	太陽天頂角餘弦	無因次
f_{air}	日射直達比例	0–0.9
C_m	濕球質傳式常數 $C_p M_{air}/M_{H_2O}$	J/(kg·K) 的組合常數
D_w	濕球燈芯直徑	0.007 m
L_w	濕球燈芯長度	0.0254 m
D_g	模型黑球直徑	0.0508 m
ϵ_w, ϵ_g	燈芯、黑球放射率	0.95
α_w	燈芯反照率	0.40
α_g	黑球反照率	0.05
σ	Stefan–Boltzmann 常數	$5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
最小風速	對流相關式下限	0.13 m/s
收斂門檻	連續迭代溫差	0.02 K

附錄 B 案例附件

case-data/canonical-model/ 保存三筆測試案例、三種實作的計算 harness、來源雜湊、輸出 CSV／JSON 及 15:40 資料庫唯讀摘錄。case-data/cwa-2026-08-11/ 保存 16:00、16:10 中央氣象署 API 回應、正規化紀錄、敏感度表及 SHA-256 manifest。case-data/historical-comparison/ 保存 2,965 組歷史配對的重算輸入、逐筆結果、品質旗標、統計程式與輸出摘要。原始回應、解析欄位與模型結果依資料處理階段分層保存。

參考文獻

[1] Liljegren JC, Carhart RA, Lawday P, Tschopp S, Sharp R. *Modeling the Wet Bulb Globe Temperature Using Standard Meteorological Measurements*. Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2008;5(10):645–655. DOI: [10.1080/15459620802310770](https://doi.org/10.1080/15459620802310770). 存取日 2026-08-12。

- [2] U.S. National Library of Medicine. PubMed PMID 18668404, *Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements*. [PubMed](#). 存取日 2026-08-12。
- [3] U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information. OSTI 936511, ANL/DIS/JA-60735. [OSTI](#). 存取日 2026-08-12。
- [4] Liljegren JC. *wbgt.c.original*, WBGT, Version 1.1；檔頭記載 UChicago Argonne 2008 年版權，Lieblich M 保存。[公開程式庫](#). 存取日 2026-08-12。
- [5] Lieblich M. *mdljts/wbgt* 雙精度衍生 C. [公開程式庫](#). 存取日 2026-08-12。
- [6] 中央氣象署。〈高溫〉，WBGT 公式、因子及高溫資訊說明。[官方頁面](#). 存取日 2026-08-12。
- [7] U.S. Occupational Safety and Health Administration. *Outdoor WBGT Calculator*. [OSHA](#). 存取日 2026-08-12。
- [8] U.S. Occupational Safety and Health Administration. *OSHA Technical Manual, Section III, Chapter 4: Heat Stress*. [OSHA OTM](#). 存取日 2026-08-12。
- [9] U.S. Environmental Protection Agency. *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. EPA-454/R-99-005, 2000, §6.2.5 and §6.4.2. [EPA PDF](#). 存取日 2026-08-12。
- [10] Sauter DP. *A Wet-Bulb Globe Temperature Validation Study Using Standard Meteorological Inputs and Modeled Solar Irradiance*. NWA Journal of Operational Meteorology. 2013;1(18):215–225. DOI: 10.15191/nwajom.2013.0118. [PDF](#). 存取日 2026-08-12。
- [11] Patel T, Mullen SP, Santee WR. *Comparison of Methods for Estimating Wet-Bulb Globe Temperature Index From Standard Meteorological Measurements*. Military Medicine. 2013;178(8):926–933. DOI: 10.7205/MILMED-D-13-00117. [PubMed](#). 存取日 2026-08-12。
- [12] Carter AW, Zaitchik BF, Gohlke JM, Wang S, Richardson MB. *Methods for Estimating Wet Bulb Globe Temperature From Remote and Low-Cost Data: A Comparative Study in Central Alabama*. GeoHealth. 2020;4(5):e2019GH000231. DOI: 10.1029/2019GH000231. [全文](#). 存取日 2026-08-12。

- [13] Clark J, Konrad CE, Grundstein A. *The Development and Accuracy Assessment of Wet Bulb Globe Temperature Forecasts*. Weather and Forecasting. 2024;39(2):403–419. DOI: 10.1175/WAF-D-23-0076.1. [NOAA repository](#). 存取日 2026-08-12。
- [14] 中央氣象署開放資料平臺。M-A0085-001，健康氣象－熱傷害指數及警示全台各鄉鎮五日逐三小時預報。[資料集](#). 存取日 2026-08-12。
- [15] 中央氣象署。M-A0085-001 輔助說明，民國 112 年 8 月。[官方 PDF](#). 存取日 2026-08-12。
- [16] 中央氣象署開放資料平臺。O-A0003-001，現在天氣觀測報告。[資料集](#). 存取日 2026-08-12。
- [17] 中央氣象署開放資料平臺。O-A0091-001，日射量資料。[資料集](#). 存取日 2026-08-12。
- [18] 勞動及職業安全衛生研究所。〈即時量測防範熱危害—高氣溫作業 WBGT 量測建議方法〉，2025-08-29。[官方摘要](#). 存取日 2026-08-12。
- [19] 日本厚生勞動省。《労働安全衛生規則》第 612 条之 2 等。[e-Gov](#). 存取日 2026-08-12。
- [20] 日本厚生勞動省。〈労働安全衛生規則の一部を改正する省令の施行等について〉，基発 0520 第 6 号，2025-05-20。[官方通達](#). 存取日 2026-08-12。
- [21] 日本厚生勞動省。〈「職場における熱中症防止のためのガイドライン」を策定しました〉，2026-03-18。[發布頁](#). 存取日 2026-08-12。
- [22] 日本厚生勞動省。《職場における熱中症防止のためのガイドライン》，2026-03-18。[官方 PDF](#). 存取日 2026-08-12。
- [23] 勞動部。《職業安全衛生設施規則》，2026-06-30 修正，第 303 條之 1、第 324 條之 6 及表三。[法令查詢](#). 存取日 2026-08-12。
- [24] 勞動部職業安全衛生署。《高氣溫作業熱危害預防指引（第三版）》，2025-06-20。[官方頁面](#). 存取日 2026-08-12。
- [25] 勞動部。《高溫作業勞工作息時間標準》，2014-07-01 修正。[法令查詢](#). 存取日 2026-08-12。

[26] 勞動部。《勞工作業環境監測實施辦法》，2026-06-12 修正，第 6 條。[法令查詢](#). 存取日 2026-08-12。

[27] 中央氣象署開放資料平臺。觀測類資料集目錄。[資料集目錄](#). 存取日 2026-08-12。

[28] 中央氣象署開放資料平臺。C-B0074-001，氣象測站基本資料；板橋站備註載明 2002-2006 年氣候年報風速儀地上高度為 53.7 m。[資料集](#). 存取日 2026-08-13。

[29] 勞動部。《職業安全衛生法》第 19 條。[法令查詢](#). 存取日 2026-08-14。