

台大大氣自製聲音雨量筒的實驗與AI資料分析初步成果 preliminary testing result of NTUAS acoustic rain gauge

林博雄¹ (Po Hsiung Lin) 蘇彥文² (Yen-Wen Su) 傅七寶¹ (Chi-Bao Fu)

1國立臺灣大學 2和碩聯合科技
1National Taiwan University
2 Assistant Manager of Pegatron

- 本文說明臺灣大學大氣科學系首創的聲音雨量筒軟硬體以及2026 年2-6 月戶外實驗數據成果，透過 AI (Claude Sonnet 4.5)協助分析聲音檔案和同地同步觀測的傾斗式傳統雨量計實測資料，顯示其期進階運用發展的可能性。

關鍵字：聲音雨量筒 傾斗式傳統雨量計 AI (Claude Sonnet 4.5)

大綱

1.動機說明

Motivation: acoustic environmental voice in life (rain, wind) and meteorology

2.聲波雨量筒概要

Diagram of NTUAS cook acoustic rain gauge?

3.人工智慧的資料分析

How AI could help us to diagnose the detecting voice and the hourly rain gauge measurement at same location/time.

4.個案說明

Cases demonstration in 2026 (winter/light, summer/heavy cases)?

5.參考文獻

Any similar approach (references ?)

6.未來展望

Next Steps !

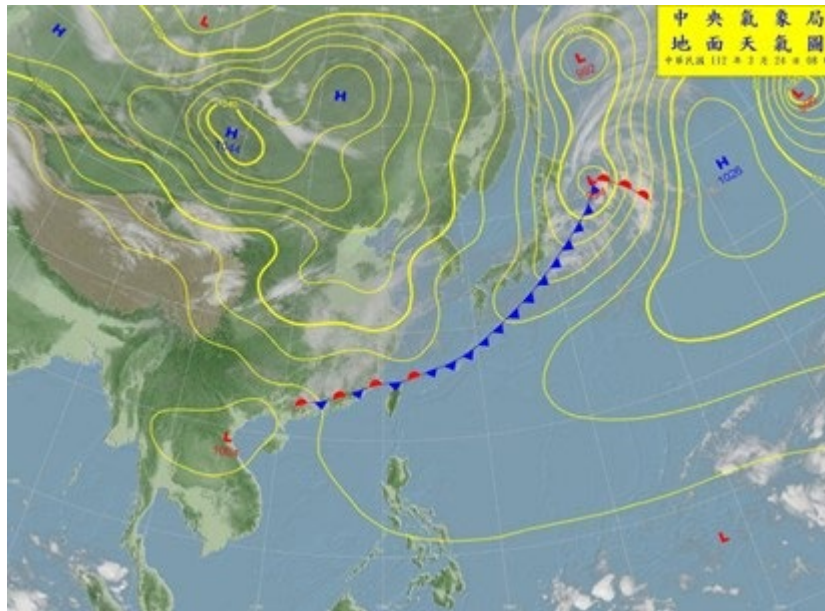
Motivation: acoustic enmental voice in life (rain, wind) and meteorology



Spring Rain

story:

40年前的春天(周末作文一篇) 台南一中 高二 國文課



Rain in front of Cold front weather (Feb.-Apri. Eastern Asia)

Motivation: acoustic enmental voice in life (rain, wind) and meteorology

Plants can sense the sound of rain, a new study finds

Experiments by MIT engineers show rice seeds sprout faster to the sound of rain.

Jennifer Chu | MIT News

April 22, 2026

In experiments with rice seeds submerged in water, MIT researchers found that the sound of falling droplets shook the seeds out of a dormant state, stimulating them to germinate more quickly than seeds that were not exposed to the same sound vibrations.

落下的水滴聲將種子從休眠狀態中喚醒，刺激它們比未接觸到相同聲音振動的種子更快速地發芽。

Credits:

Credit: Cadine Navarro

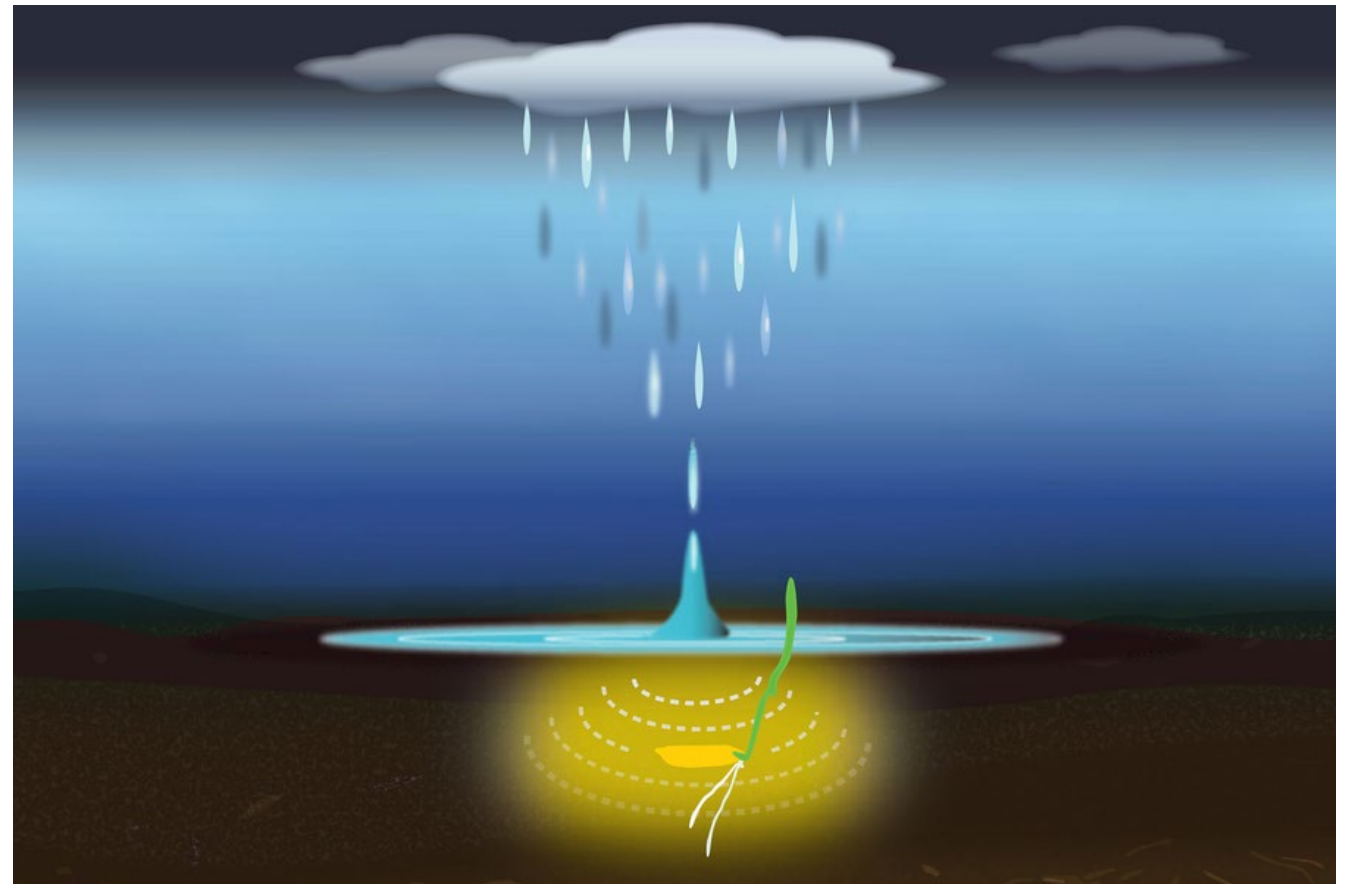
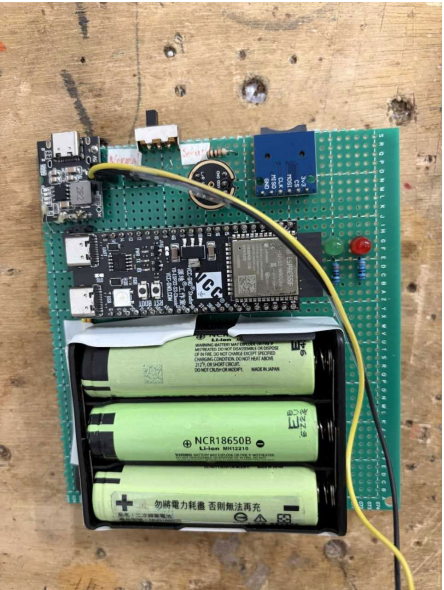
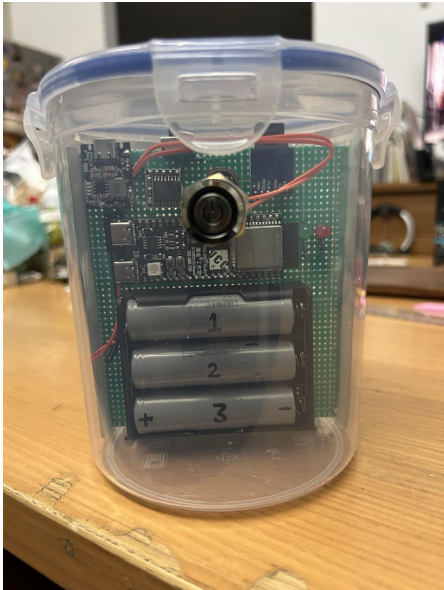
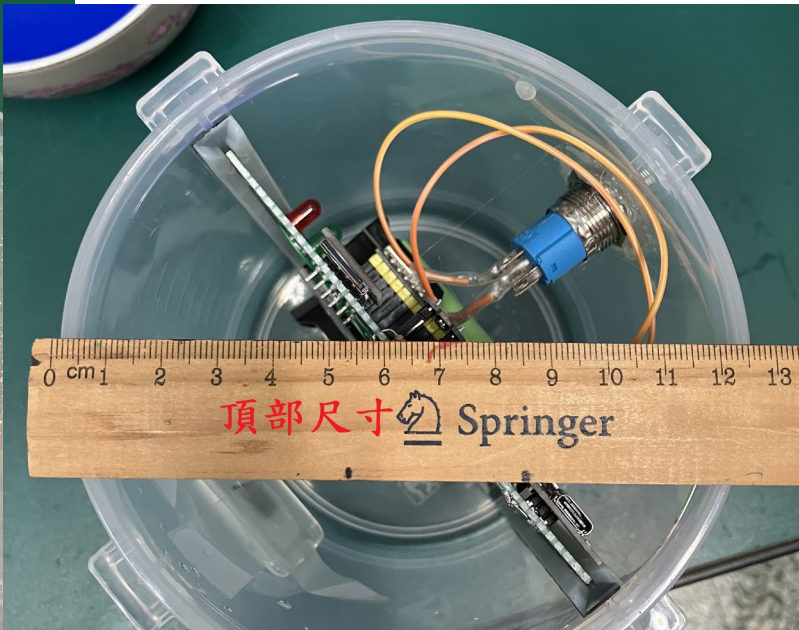
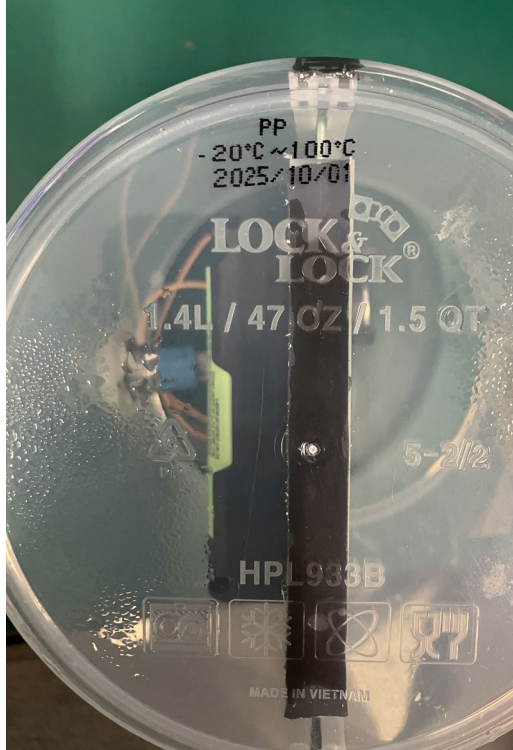


Diagram of NTUAS cook acoustic raingage?



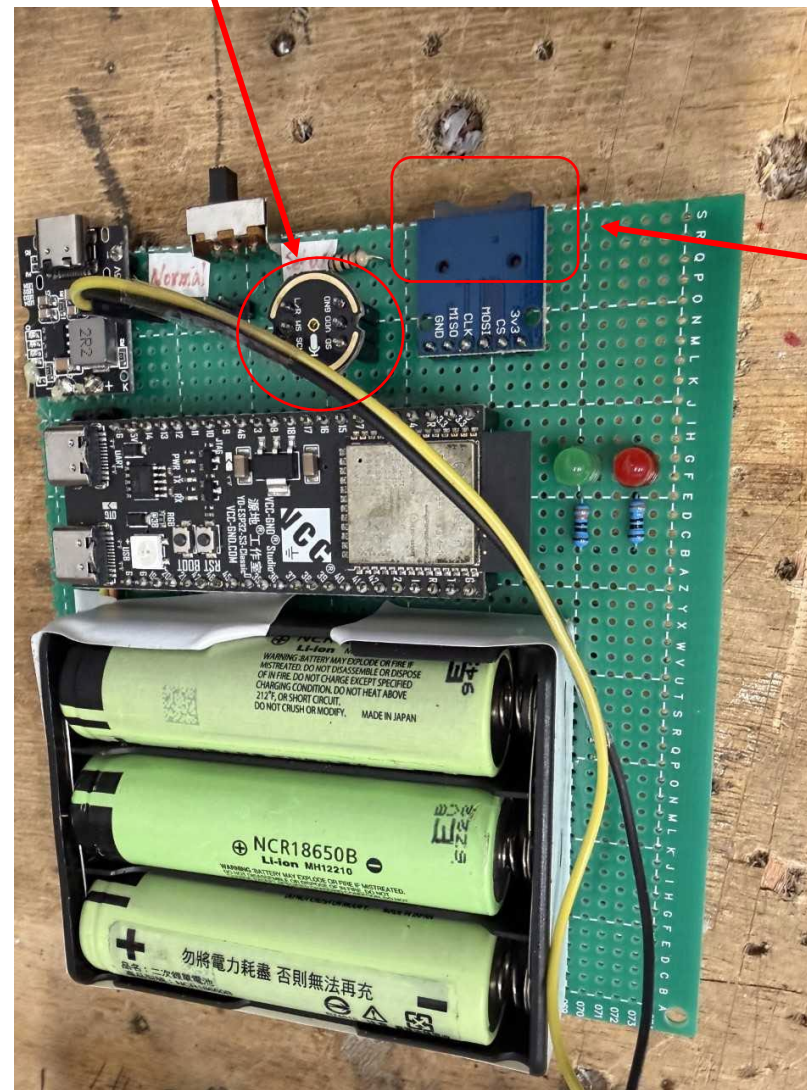
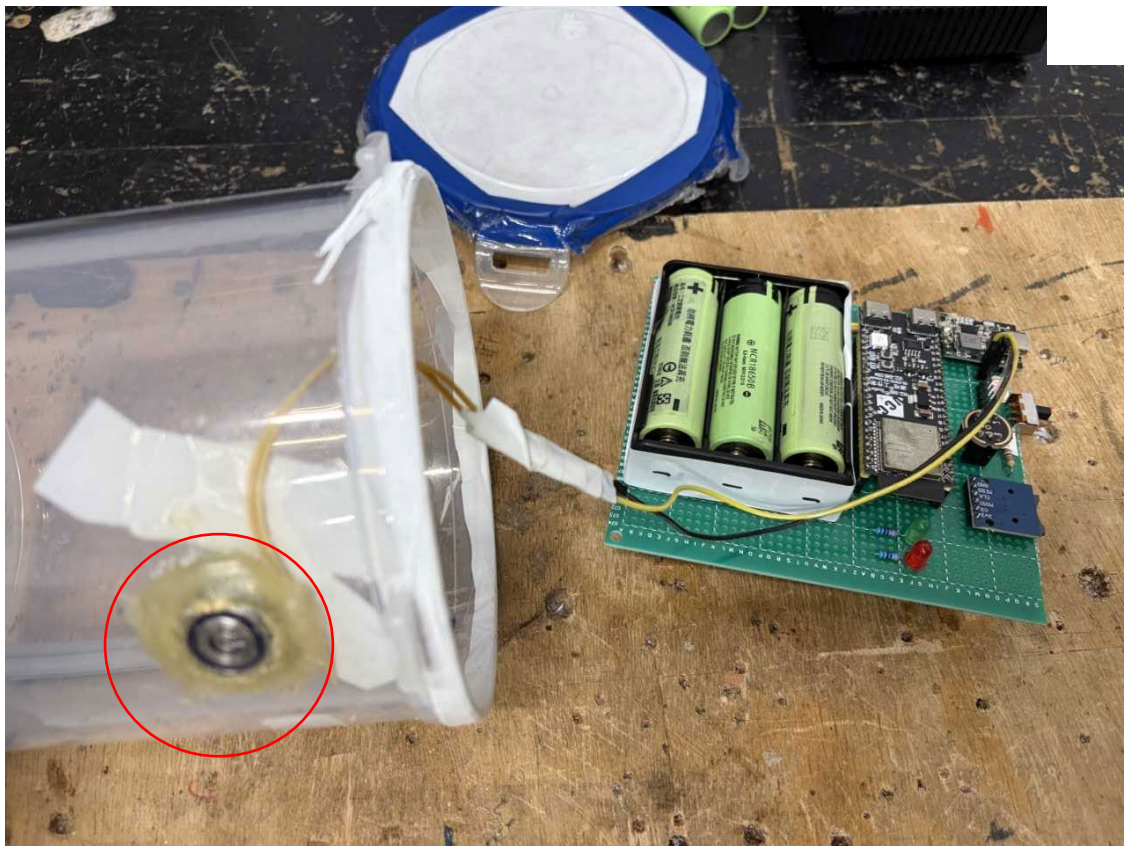
1.4L
PP



D: 12.5 cm / area: 122.72 cm²
WMO 規範 200-500 cm²



Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I²S Digital Output



資料記憶卡

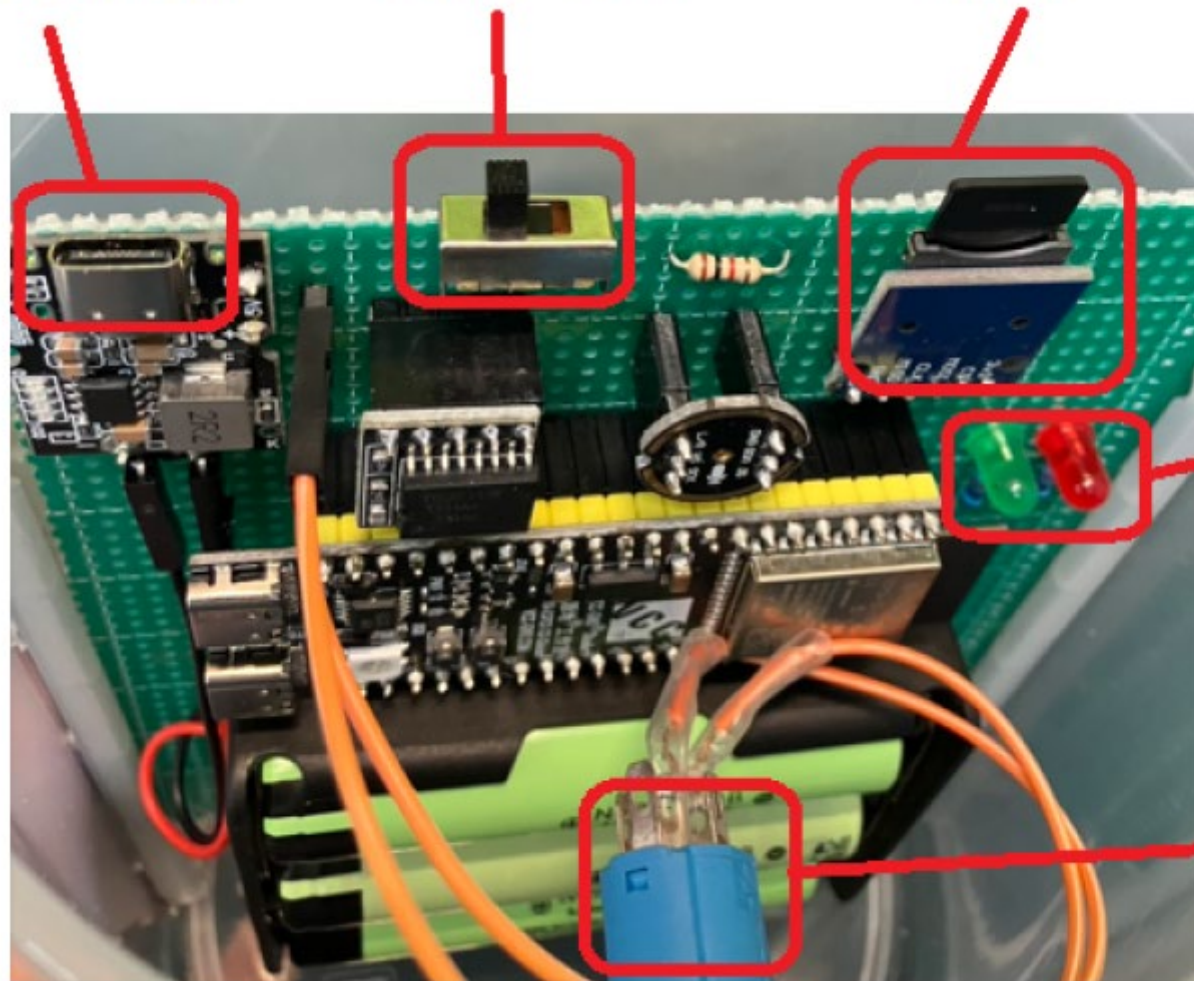
Experimental data saved into **SD** memoroed card (***.WAV**)
File format" RIFF" 48KHz, 16 bit, single sound/hour

(Feb-Jule,2026)實驗資料共含 120 個 **WAV**；檔頭皆為 RIFF、**48 kHz、16-bit、單聲道**。檔案約一小時，實際時長介於 0.176 至 3,596.288 秒。

USB充電孔

運作模式開關

SD卡



指示燈

電源開關

Data records @ NTUAS (from Feb/04, 2026 until now)



CWA

傳統傾斗式雨量筒 (Tipping Bucket Rain Gauge)



Cost:
< NT\$1800

人工智慧的資料分析

How AI (**Claude Sonnet 4.5**) could help us to diagnose the detecting voice and the hourly raingage measurement at same location/time.

1. Problem Definition and Reference Ground Truth

Transform potential raindrop impacts within each WAV file into hourly counts, then cross-reference them with the NTUAS hourly rainfall data. This provides a

2. Data Quality and Temporal Semantics Handling

3. Translating Acoustic Hypotheses into DSP Rules

4. Preserving Guardrails Under Varying Noise Conditions

5. Parameter Selection Using Labeled Data

6. Generating Verifiable Outputs

Produce **hourly rainsound.json**, **ntuas.json**, **stats.json**, and an **HTML report that document the actual thresholds, noise floors, data coverage, correlation coefficients**, and calibration equations to ensure subsequent reproducibility and auditing.

將聲學假設轉成 DSP 規則。雨滴撞擊是短暫、相對高頻的脈衝；所以先抑制低頻風聲／震動與過高頻電子雜訊，再在訊號振幅的局部極大值找候選撞擊。4. 在不同噪音條件下保留保護機制。對每段音訊估計安靜片段的 RMS 噪音底限，以它設定動態下限；同時以最小波峰距離避免同一撞擊的振鈴被重複計數。

Light rainy timewindow (2026/02/27)



Heavy rainy timewindow (2026/06/18 14:17~)



- Omni-Direction Microphone: sampling rate 4800Hz
- Sound signal filter: 1-6 kHz

AI 協助產生之聲學雨量演算法說明

文件目的與可追溯範圍

本文件依據目前專案內的程式碼、技術文件與已保存的實測輸出，說明「以 WAV 偵測雨滴並估計雨量」的演算法如何被設計、校正與驗證。它描述的是可由 `rain_report.py` 與 `threshold_search.py` 重現的流程；並不嘗試虛構當時與 Claude Sonnet 4.5 的對話、提示詞或其內部推理。

最重要的結論是：**此專案不是把 WAV 交給已訓練的 AI／深度學習模型分類**。Claude Sonnet 4.5 在此脈絡中可視為協助分析問題、提出數位訊號處理（DSP）設計、撰寫程式與協助比較實測資料的開發助手；實際部署的偵測器是固定且可解釋的規則式訊號處理流程。其可調參數再以 NTUAS 參考雨量資料做資料驅動的選擇與校正。

可用資料與量測目標

專案的輸入是 ESP32 加 INMP441 麥克風錄下的單聲道 WAV，以及台大大氣觀測站（NTUAS）的逐時資料：

- 已保存的五批實驗資料共含 120 個 WAV；檔頭皆為 RIFF、48 kHz、16-bit、單聲道。檔案約一小時，實際時長介於 0.176 至 3,596.288 秒。
- 根目錄 `NTUAS/` 保存 126 天（2026-02-21 至 2026-06-29）的原始觀測文字檔；每日分析資料夾另保存對應的 NTUAS 子集。
- WAV 的直接量測目標是「符合聲學條件的撞擊波峰數」`drop_count`，不是直接量到毫米；NTUAS 的 `H_R (fields[25])` 才是小時雨量 mm 的參考真值。

雨滴撞擊受雨滴大小、落點材質、麥克風位置、增益與環境聲影響。因此，演算法把「撞擊脈衝數」當作雨量的代理變數，並以同時段的測站資料校正為 mm。

AI 協助形成演算法的流程

可重現的開發流程可整理為以下六步：

1. **定義問題與參考資料**。將每個 WAV 中可能的雨滴撞擊聲轉成逐時計數，再與 NTUAS 逐時雨量對照。這讓「偵測到多少聲音」有可量化的外部標準，而不是由主觀聽感決定。
2. **處理資料品質與時間語意**。針對 ESP32 可能沒有回寫 RIFF 長度的 WAV，先用 SciPy 讀取，失敗時改由 44-byte 標頭讀取採樣率與位元深度。再把檔名時間、跨日檔案與 NTUAS 的 01-24 小時慣例統一成 0-23 的 HH:00-(HH+1):00 區間。
3. **將聲學假設轉成 DSP 規則**。雨滴撞擊是短暫、相對高頻的脈衝；所以先抑制低頻風聲／震動與過高頻電子雜訊，再在訊號振幅的局部極大值找候選撞擊。
4. **在不同噪音條件下保留保護機制**。對每段音訊估計安靜片段的 RMS 噪音底限，以它設定動態下限；同時以最小波峰距離避免同一撞擊的振鈴被重複計數。
5. **以有標記資料選參數**。`threshold_search.py` 在一系列門檻值上重新執行全套偵測，對每個結果計算相關性、迴歸誤差、漏報與誤報，而非憑直覺固定門檻。
6. **輸出可檢核結果**。產生逐時 `rainsound.json`、`ntuas.json`、`stats.json` 與 HTML 報告，保留實際門檻、噪音底限、覆蓋率、相關係數及校正式，讓後續能重跑或審核。

換言之，AI 的貢獻是將「聲音是否像雨滴」這個模糊問題拆成可測試的假設、參數與驗證迴圈；最後落地的是
一般 CPU 即可執行的 SciPy 演算法，不依賴雲端模型推論。

偵測演算法的詳細原理

令單聲道 PCM 樣本為 $r[n]$ 、採樣率為 $f_s = 48,000$ Hz。演算法如下。

1. 讀取與正規化

`int16` PCM 除以 32,768，得到約落在 $[-1, 1]$ 的浮點訊號：

$$x[n] = r[n]/32768$$

若輸入是多聲道，程式只取第一聲道。低於一秒的檔案不做雨滴偵測，避免用極短片段產生不可靠的結果。

2. 1–6 kHz 四階 Butterworth 帶通濾波

程式以 `scipy.signal.butter(..., btype="band", output="sos")` 建立 1,000–6,000 Hz 的 Butterworth 帶通濾波器，再以 `sosfilt` 逐段套用，得到 $y[n]$ 。Butterworth 的通帶響應平坦；SOS (second-order sections) 將濾波器拆成二階節，降低高階直接運算的數值不穩定風險。

此頻帶是工程上的聲學假設：低於 1 kHz 的風聲、結構震動與慢變背景通常較多；高於 6 kHz 的高頻雜訊則不作為主要撞擊依據。`sosfilt` 是因果濾波，會有相位延遲，但本系統只需要正確歸屬到小時，不以波峰的微秒級絕對時間作量測。

個案說明 →

winter case: 02/27, 2026 (22.5 mm)
冬天弱降水



降雨趨勢 (三源比較，時間已對齊)



個案說明 →

Summer Heavy Rainfall case: 06/18, 2026 (147mm)

夏季強降水

台北公館淹水 + 聲音雨量筒防水效果過關

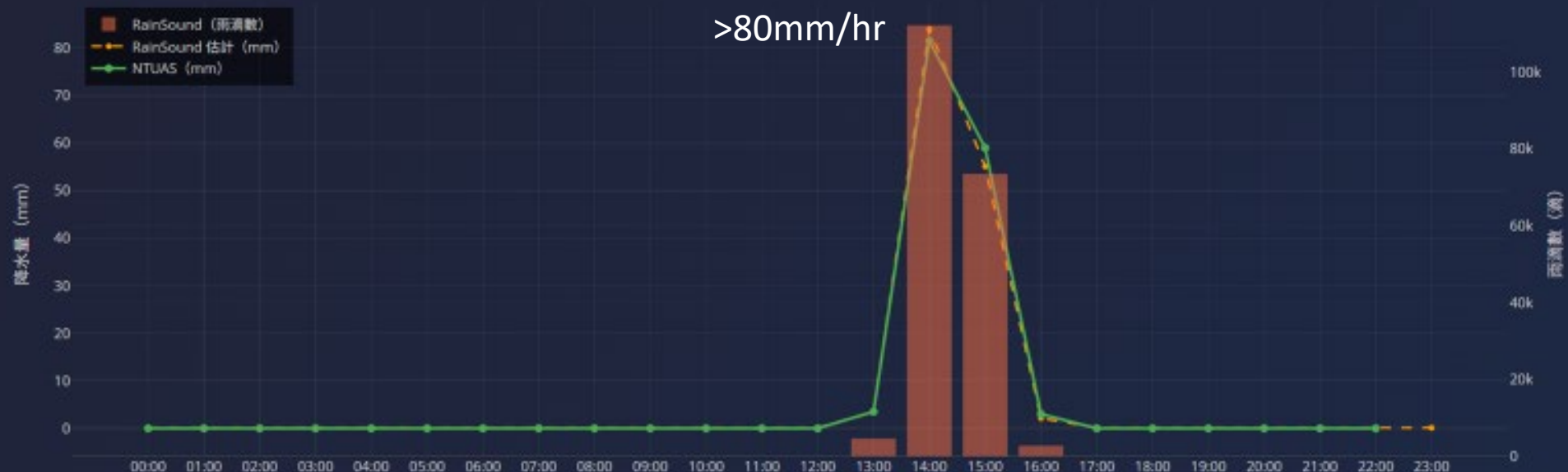
校正曲線 (線性迴歸)

公式: $mm = 0.000748 * drops + 0.1125$
 $R^2 = 0.9976$ (使用 23 個有效時段)

降雨趨勢 (三源比較, 時間已對齊)

Assistant manager

>80mm/hr



聲學雨量計 - 降雨分析報告

日期: 2026/06/18 | 有效時段: 24/24 小時 (100.0%) | RainSound NTUAS

降雨量統計

192,963

RainSound 雨滴總數

147.0 mm

NTUAS 總降水量

112,169

RainSound 最大時雨滴數

81.5 mm

NTUAS 最大時雨量

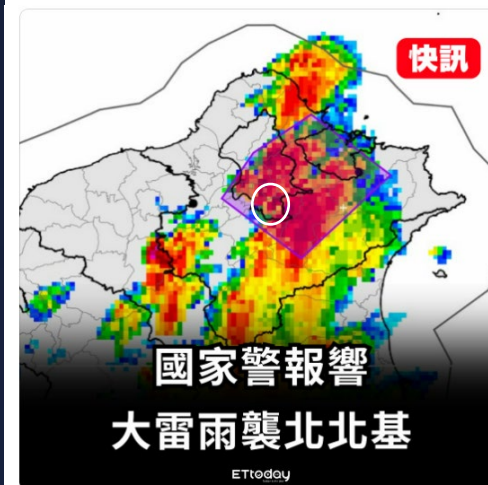
相關性分析 (Pearson r)

0.999***

RainSound vs NTUAS
Pearson r (n=23)

校正曲線 (線性迴歸)

公式: $mm = 0.000748 * drops + 0.1125$
 $R^2 = 0.9976$ (使用 23 個有效時段)



Any similar approach (references ?)

(1) Vaisala WXT536/ all-in-one weather transmitter

Raincape



(2) Acoustic precipitation measurement

The German Fraunhofer Institute for Digital Media

弗勞恩霍夫數位媒體技術研究所

has launched the "**lokaRAIN**" research project in collaboration with
Pan Acoustics GmbH from Wolfenbüttel.

The project is funded by the German Federal Ministry for Economic
Affairs and Climate Action and runs from October 2024 to June 2026.



未來展望

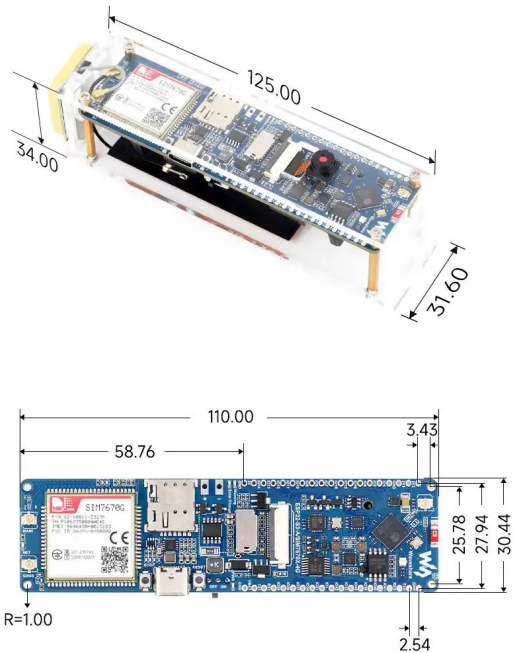
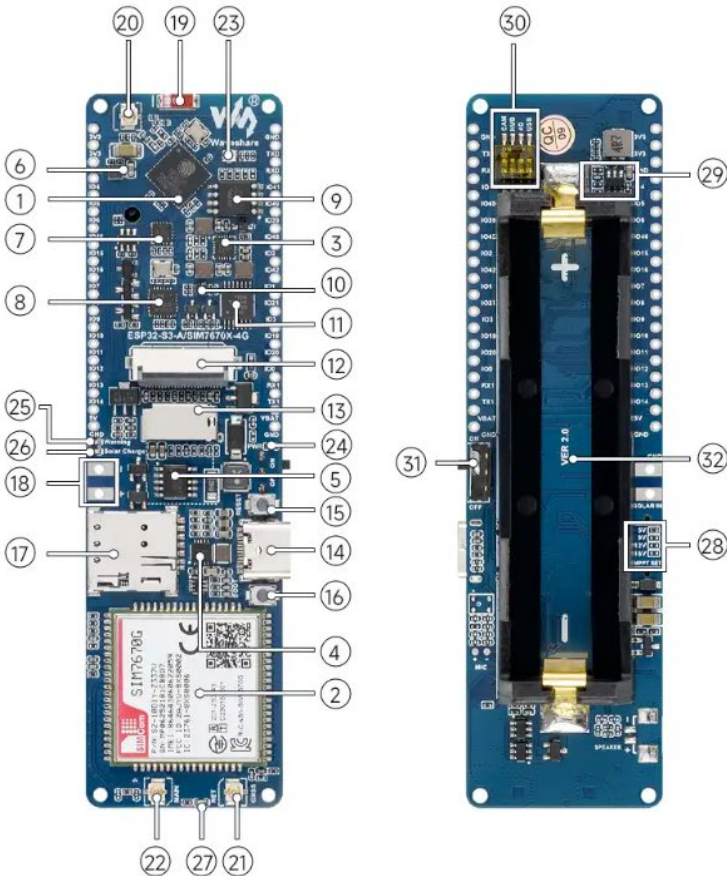
PCB電路板更小+ 太陽能充電



All Documents ESP32 ▾ Raspberry Pi ▾ Displays ▾ More ▾

- Long Range Wireless
 - NB-IoT/Cat-M/LoRa/LoRaWAN
 - Core2021-XF >
 - 5G/4G/GSM/GPRS
 - ESP32-S3-A7670E-4G >
 - ESP32-S3-SIM7670G-4G ▾
 - Working with Windows
 - Working with Arduino
 - Working with ESP-IDF
 - Portable WiFi Firmware Application
 - Resources
 - FAQ
 - Support
 - GNSS/GPS
 - Q43_GNSS_Helical_RTK_Module >

Hardware Description



未來展望

- PCB電路板更小 並有**4G**資料自動傳輸, 內建換算公式估計雨量
- 太陽能充電
- 小規模量產
- 空間多點小中空間尺度同步測試