

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180011
參展科別 地球與環境科學
作品名稱 地球低頻震動事件偵測
得獎獎項

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學
指導教師 梁文宗、王靖華
作者姓名 李恩齊、王宥姍

關鍵詞 風暴震(stormquake)、雷利波定位、山崩

作者簡介



我是王宥姍，目前就讀於師大附中三年級。上了高中後有幸發現對地球科學的興趣，因此在高中的專題課程中選擇了地科研究。

在一路走來的專題研究中，學習到了許多知識也增進了表達能力，很感謝一直以來遇到的指導與幫助與建議，也很開心能參與這次活動！



我是師大附中高三的李恩齊，在機緣之下進入地球科學的世界。在專題研究的過程中學到許多、也認識了很多朋友和老師們。希望能在這次活動中與各地的學生們交流！

摘要

本研究主要成果為：

- 一、利用本分析法成功驗證颶風 Bill (2009) 侵襲美國東岸期間沿著棚裂形成的“stormquakes”現象（下文稱為「風暴震」）。
- 二、探討並確認近十年間 10 個中、強颶通過臺灣附近水域時，臺灣的地震測站沒有記錄到風暴震產生的訊號。

我們透過頻譜分析發現，0.01 ~ 0.05 Hz 頻段的地震波形數據在我們研究的多數西太平洋颶風通過期間有顯著的能量增加，卻沒有產生來自海域的點源訊號。不過在 2009 年莫拉克颶風與 2013 年天兔颶風期間，波形記錄到了數十起來自陸地的振動訊號（經判定為山崩）。我們發展了一種定位方法，成功定位颶風 Bill 與上述兩颶風期間的訊號；並且對比了 20 次已知震央的構造地震，確認定位方法的可行性。

英文摘要

In this project, we have two main results:

1. Our analysing approach successfully recapture and verify the “stormquakes” phenomenon formed along the shelf breaks during Hurricane Bill (2009) hitting the east coast of the United States.
2. We explore and confirm that during 10 medium to strong typhoons passed through the waters near Taiwan in the past ten years, the seismic web did not record the signal generated by the stormquakes.

Through spectrum analysis, we find out that the seismic waveform data in the 0.01 ~ 0.05 Hz frequency band has a significant increase in energy during the passage of most of the western Pacific typhoons we studied. In most of the cases, point-source signals from the sea were generated. However, during Typhoon Morakot in 2009 and Typhoon Usagi in 2013, the waveform recorded dozens of vibration signals from land, which are later determined as landslides. We develop a positioning method to successfully locate the signals during Hurricane Bill and the above two typhoons and compared 20 tectonic earthquakes with known epicentres, confirming the feasibility of the positioning method.

壹、研究動機

臺灣作為一個位處亞熱帶的島嶼，颶風帶來的的水氣能量交換一直是近期熱門的研究主題。較少人關注的則是水圈與地圈的交互作用。佛羅里達州立大學的研究人員於 2019 年發表了一篇文章（Fan et al., 2019），聲稱在美國沿岸發現了一種由颶風期間長週期海浪與棚裂交互作

用形成的點波源：「風暴震」，會激發週期 20~50 s 的低頻雷利波。我們以此為靈感，觀察臺灣周遭水域在颱風侵襲期間有無類似的訊號，並探究其相關性質。

貳、研究目的

- 一、探討多颱風的臺灣地區是否也有風暴震的現象。
- 二、了解大西洋和太平洋周邊陸棚於颶風（颱風）期間的低頻振動訊號特徵。
- 三、研發運用雷利波分析低頻震動訊號震央的方法。
- 四、利用雷利波訊號定位地球低頻震動的事件，例如山崩或其他災害。

參、研究設備及器材

一、分析與繪圖工具

1. MATLAB 2020a
2. Seismic Analysis Code (SAC)

二、分析之數據來源

（一）颱風資料

1. 颱風資料庫（由中央氣象局運作）
2. 美國國家海洋暨大氣總署 NOAA

（二）地震觀測資料

全球數位寬頻地震網聯盟 FDSN 的會員網，包括：

1. 臺灣寬頻地震觀測網 BATS（TW，由臺灣中研院地球所運作）
2. US Transportable Array（TA，由地震學研究機構聯合會 IRIS 運作）
3. Global Seismograph Network（IU 等，由 IRIS 及美國地質調查局 USGS 等運作）

在本研究中，我們選擇 BHZ 頻道（即垂直向，記錄的數據為地表振動速度）的波形資料作為分析的對象，由此可以確保波形在濾波後只會留下雷利波訊號。因為洛夫波並不會產生垂直向的振動訊號，並且可以透過計算波速排除體波訊號。我們以 sac 檔的格式在 SAC 與 MATLAB 中進行處理。

（三）地震事件

1. 地震學研究機構聯合會 IRIS Wilber3（紀錄歷史上 $M > 5$ 的地震）
2. 美國地質調查局 USGS

肆、研究過程或方法及進行步驟

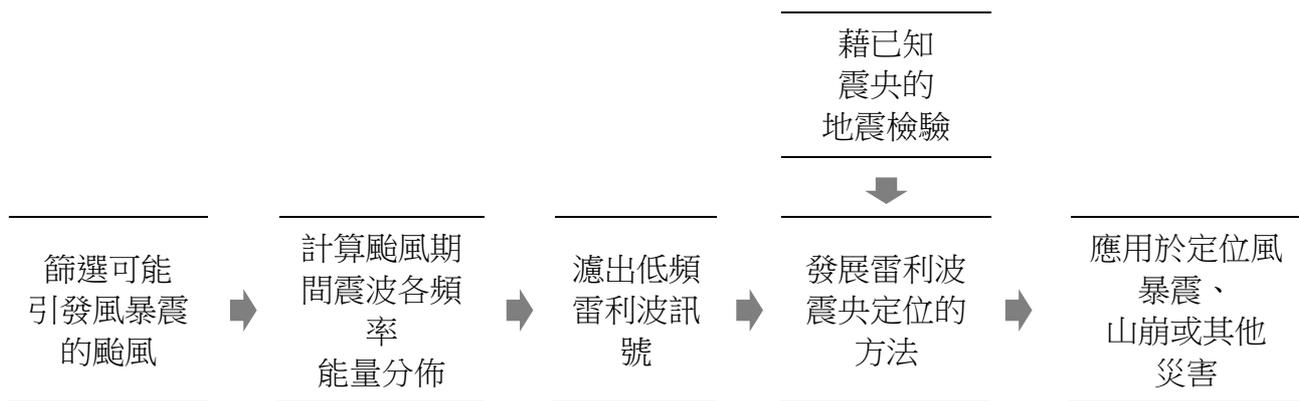


圖 1 研究過程流程圖。(李、王，2020)

一、文獻探討

根據 Fan et al. (2019)，研究人員發現在颶風和東北風等大型風暴期間，長周期海浪與位於大陸棚邊緣附近的淺海海底特徵的相互作用激發了 20 ~ 50 s 的周期帶。這些「風暴地震 (stormquake)」與風暴同時遷移，但實際上是時空聚焦的地震點源，等效規模可能大於 3.5。此外，它們提供了一種具有高空間和時間分辨率的新地球物理可觀測數據，可用於研究大風暴期間的海浪動態。

二、確定研究對象

我們將觀察目標鎖定在從西太平洋向臺灣襲來的颱風。為了確保分析方法的正確性，我們將曾經觀測到風暴震的颶風 Bill 納為對照，以驗證我們的實驗步驟。(李、王，2020)

(一) 西太平洋組

表 1 列出我們認為 2009 至 2020 年間侵襲臺灣的颱風中，較有可能產生風暴震的颱風。這些選擇基於以下幾個依據：

1. 中央氣象局有發布颱風警報，時長超過 4 天。
2. 路徑通過 120° ~ 130°E, 15° ~ 30°N (臺灣和附近的棚裂範圍) 且在通過期間有部分時間強度屬於強颱。

莫拉克颱風 (2009) 被額外納入分析名單，因為 2009~2010 年間並沒有符合上述標準的颱風；而莫拉克颱風雖然強度僅達中級，但對臺灣造成極大損傷。

表 1 西太平洋組的颱風與用以進行頻譜分析的地震測站。

區域	時間	名稱	觀測網	使用的測站				
西太平洋	2009 八月	莫拉克	BATS	CHGB	HGSD	KMNB	MASB	NACB
	2011 八月	南瑪都		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB
	2013 九月	天兔		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB
	2015 八月	天鵝		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB
	2015 九月	杜鵑		CHGB	HGSD	KMNB	MASB	NACB
	2016 七月	尼伯特		CHGB	HGSD	KMNB	MASB	NACB
	2016 九月	莫蘭蒂		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB
	2018 七月	瑪莉亞		CHGB	HGSD	KMNB	MASB	NACB
	2018 九月	山竹		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB
	2019 八月	利奇馬		HGSD	KMNB	LYUB	MASB	NACB

(二) 西大西洋組

我們選擇在 Fan et al. (2019)中明確提到有觀測到風暴震的颶風 Bill(資料如表 2)。我們對兩組颱風期間收集到的數據進行相同的實驗流程，以確保我們採用的方法可以成功捕捉風暴震產生的訊號。

表 2 颶風 Bill 與用以進行頻譜分析的地震測站。

區域	時間	名稱	觀測網	使用的波形數據來源測站				
西大西洋	2009 九月	Bill	USArray, TA	A20A	B20A	C20A	E20A	G20A

三、地震波頻譜分析

(一) 目的

我們最初的目標是尋找風暴震產生的震動訊號。根據 Fan et al. (2019) 的研究報告，風暴震在北美洲棚裂產生的能量落在 0.02~0.05 Hz 頻段。考慮到美東沿海與臺灣周圍水域地形不盡相同，我們首先探討颱風與非颱風期間，地震測站記錄到

的波形數據有何不同，並用快速傅立葉轉換協助分析一段波形中各頻率的能量大小。（李、王，2020）

（二）實驗設計

1. 時間區段、資料來源選擇

以 UTC 時間為基準，我們將颱風最接近棚裂的一天定為「颱風期間」；其前後各第七天則定為「非颱風期間」。這三天將是我們進行時頻分析的時間段。

對於每一個颱風，我們從 BATS 與 USArray 中挑選波形數據完整、品質良好的五個測站作為頻譜分析的原始數據的提供者，列於表 1 與表 2。

2. 數據前置處理

- (1) 去趨勢：波形數據平均值常常不為 0 或存在長期的線性趨勢，會影響後續分析的結果，因此需在進一步分析前先加以去除。同時，為了減少後續濾波時產生洩漏誤差，我們使用 SAC 中的 taper 指令對數據加上了 5% 的漢寧窗（Hanning window）以進行兩端尖滅，如圖 2 所示：

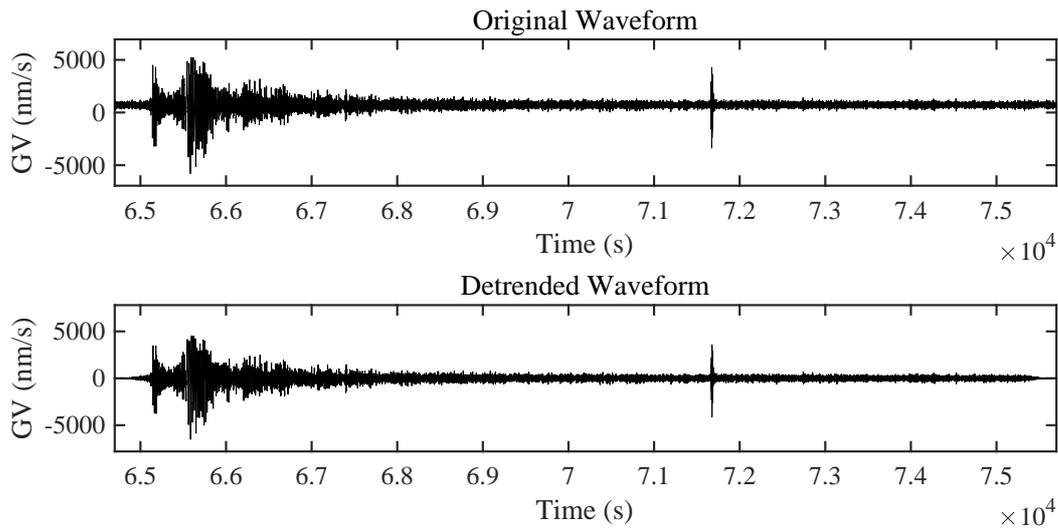


圖 2 震波波形去趨勢前（上）、後（下）的比較。

圖中橫軸為自 2019 年八月 2 日 00:00:00 算起經過的秒數， 6.5×10^4 s 代表 18:03:20。

- (2) 分割：為了避免構造地震產生的震波過大而掩蓋過其它訊號，我們以 3 小時為單位進行分析，將三天中的 03:00:00 至 21:00:00 劃分為六個時段，每時段前後各加長 100 s 以避免漢寧窗將重要訊號尖滅。如果發現波形中包含明顯構造地震訊號（圖 3 八月 16 日即為一例），該筆數據被捨棄不用。

3. 透過計算訊噪比量化「颱風期間」與「非颱風期間」地震波形在頻率的差異

我們對分割後的波形數據在 MATLAB 中套用 fft 與 movmean 函數進行快速傅

立葉分析並進行滑動平均（moving average, MA），以計算出颱風與非颱風期間地震訊號在各頻段的訊噪比，結果如圖 3。

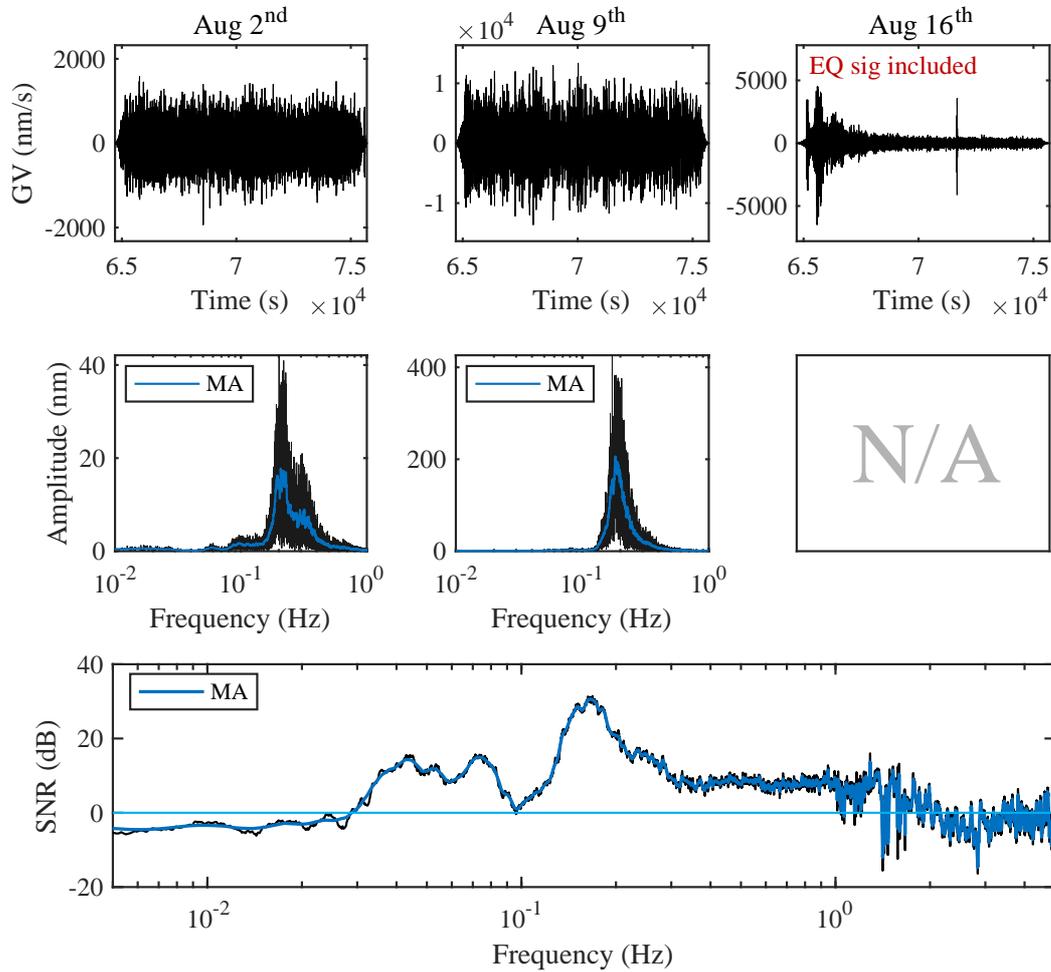


圖 3 颱風與非颱風期間地震波形的振幅（上）在頻率上的分布與（下）能量比值。

以利奇馬颱風為例，上列由左至右依序為：八月 2 日（利奇馬颱風前）、八月 9 日（颱風期間）、八月 16 日（颱風後）三個時段區間寧安橋測站（NACB）在 18:00:00 至 21:00:00 的記錄到的地動加速度值（圖中橫軸為自當日 00:00:00 算起經過的秒數， 6.5×10^4 s 代表 18:03:20）；中列左至右依序為三時段的快速傅立葉分析與進行滑動平均結果（因為颱風後當日該時段有一場構造地震，故省略傅立葉分析的過程）。（李、王，2020）

我們計算出颱風與非颱風期間各頻段的訊噪比函數 SNR，如圖 3 中的下圖。當三段波形都不包含地震訊號，我們將非颱風期間的振動作為背景噪訊，可定義頻率為 f 時的 $SNR(f)$ 為：

$$\begin{aligned} \text{SNR}(f) &\equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P(f)_{\text{颱風期間}}}{\sqrt{\frac{1}{2} \left(P(f)_{\text{颱風前}}^2 + P(f)_{\text{颱風後}}^2 \right)}} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{2A(f)_{\text{颱風期間}}}{A(f)_{\text{颱風前}}^2 + A(f)_{\text{颱風後}}^2} \right) \end{aligned}$$

其中 $P(f)$ 表示功譜， $A(f)$ 表示振幅頻譜。SNR 的單位是分貝（dB）。

考慮到波形會無可避免地記錄到地震訊號，因此我們有如下應對方法：

(1) 當非颱風期間的波形包含地震訊號（圖 3 即為一例），可將上式改為：

$$\begin{aligned} \text{SNR}(f) &\equiv 10 \log_{10} \left(\frac{P(f)_{\text{颱風期間}}}{P(f)_{\text{非颱風期間（僅一天）}}} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{A(f)_{\text{颱風期間}}}{A(f)_{\text{颱風後}}} \right) \end{aligned}$$

(2) 如果某時段內颱風期間的波形數據包含地震訊號或颱風前後波形數據皆包含地震訊號，則不計算訊噪比。

由此可知，在不遇到狀況(2)時，一個颱風應該會得到：

$$5 \text{ 個測站} \times 6 \text{ 個時段} = 30 \text{ 組 SNR 函數}$$

將 30 組函數取平均則可得到颱風期間地動訊號在各頻段的強弱增減。不過考慮當遇到狀況(1)，因為少了一天的數據，計算得到的訊噪比較有可能出現雜訊，因此在計算總體平均值時將其權重乘以 0.5。

透過計算訊噪比，我們能夠鎖定日後進行進一步分析時需要考慮的頻段。

四、利用低頻地震波到時定位訊號源的位置與發生時間

根據 Fan et al. (2019)，風暴震的一項重要特徵是其主要產生於棚裂。考慮到其他事件也可能會產生低頻地震波（雷利波）訊號，因此我們必須發展出能夠回推一段訊號的等效震央及發震時間的工具。

（一）風暴震的性質與相應的觀測條件

風暴震不屬於構造地震，最大的差別有二（Fan et al., 2019）：

1. 風暴震並不會產生高頻的 P 波與 S 波。風暴震的能量峰值落在 0.02~0.05 Hz，以雷利波的形式向外傳遞，因此我們只需使用寬頻或低頻的垂直向的測站波形數據即可。我們選用了 BHZ 頻道。

2. 風暴震產生在棚裂，因此我們可假設事件發生在海平面，深度為 0。

綜上，我們不能使用體波走時差進行三角定位，而須依照以上性質重新設計定位方法。但我們可將震波的傳遞簡化為發生在二維球面的過程，降低運算難度。

(二) 前人方法簡述

Fan et al. (2019) 與陈箫翰 (2019) 對於這種非傳統震源分別採取兩種不同的方法進行定位：前者將分佈於美國境內的測站德勞內三角化 (Delaunay triangular)，運用三角關係估計震央；後者則將所有的測站兩兩配對計算互相關函數後進行向量分析。但是此二種方法皆需大量的計算與震測站，不適合在臺灣使用。

(三) 我們的定位方法

為了減少不可控變因，我們假設雷利波在地球表面沿著大圓路徑等速傳遞。由以上假設可以得知，雷利波的走時將與震央距成正比。因此可以透過假設等效震央求出震央距，再計算它與震波到時的線性關係，那麼兩變數相關係數大小可以作為尋找真實震央的依據。我們在本研究中使用 MATLAB 進行數值分析，以求出近似的風暴震發生位置（下稱為等效震央）。（李、王，2020）

1. 波形數據來源

對於颱風期間的訊號，我們選擇表 1 與表 2 所列的觀測網中所有運作中的測站作為數據來源。對於其他事件，我們使用 Global Seismograph Network 作為資料來源。

2. 數據前置處理

- (1) 去趨勢：同前三、(二) 2(1)。
- (2) 濾波：為了留下雷利波的波形並去除其他訊號，我們對波形數據使用四極巴特沃斯帶通濾波 ($n = 4$)，留下 0.02 ~ 0.05 Hz 頻段的訊號，如圖 4。不過在實務運算中，我們常常將拐角頻率的範圍設得更窄（例如 0.03 ~ 0.05 Hz），以取得更乾淨的資料。
- (3) 轉換為包絡函數：在實務處理時，各個測站記錄到的地動速度峰值可能相差 1 至 3 個週期，影響定位準確度，因此我們透過希爾伯特變換將原波形轉為包絡函數，因此等同是觀測雷利波的群速度，如圖 5。
- (4) 透過判斷訊噪比初步篩選數據：為了分辨環境雜訊與有意義的訊號，我們定義訊號訊噪比 S （不同於上文的 SNR）為偵測到最大地動速度的時刻 t_A （即下頁提到的到時）的 200 s 時間窗內與左右兩邊 100 s 時間窗內包絡函數的平方平均之比值。因為波形常以連續波包的形式到來，因此僅剔除 $S < 1.5$ 的數據，如圖 6。

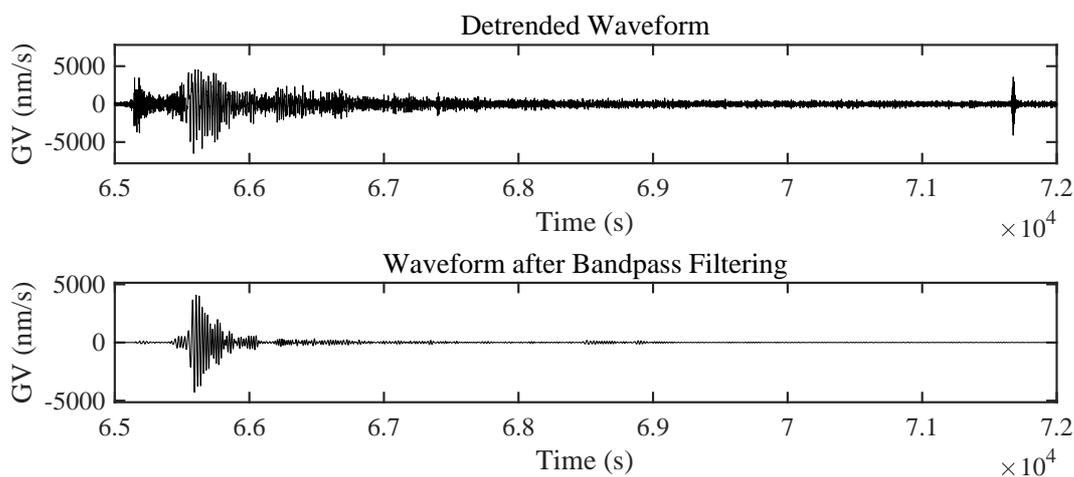


圖 4 震波波形濾波前（上）、後（下）的比較。

圖中橫軸為自 2019 年八月 2 日 00:00:00 算起經過的秒數。下圖的濾波頻段為 0.02 ~ 0.05 Hz。可以看到 65180 s (18:06:20) 與 71676 s (19:54:36) 的訊號被濾掉，留下 $6.5 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$ s 的雷利波訊號（關於我們如何確定此訊號為雷利波，可參見第 11 頁）。

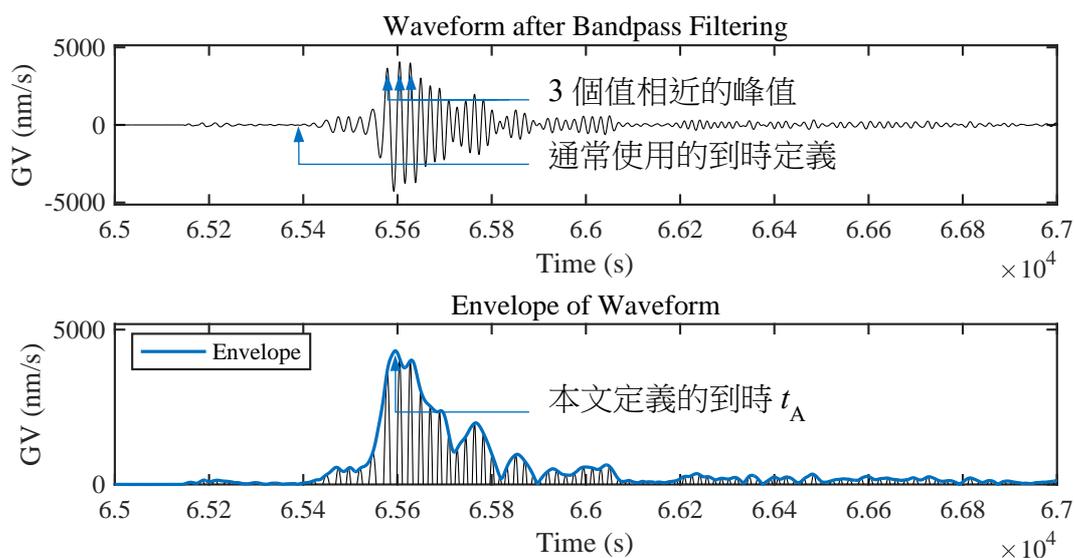


圖 5 震波波形轉換為包絡函數前（上）、後（下）的比較。

圖中橫軸為自 2019 年八月 2 日 00:00:00 算起經過的秒數（即圖 4 的局部放大）。兩圖的濾波頻段為 0.02 ~ 0.05 Hz。

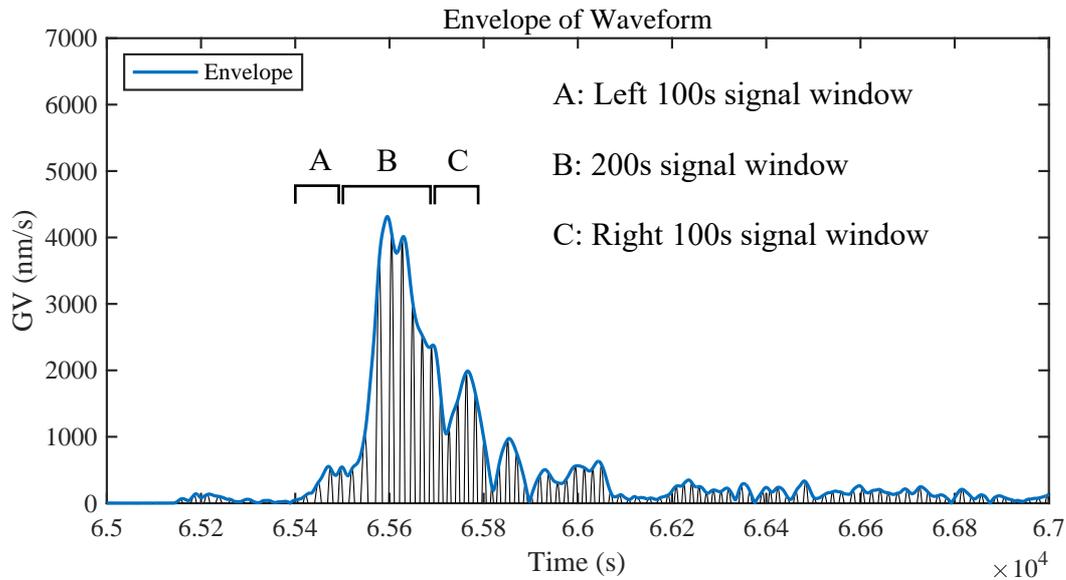


圖 6 震波波形定義訊噪比 S 。

圖中橫軸為自 2019 年八月 2 日 00:00:00 算起經過的秒數（即圖 4 的局部放大）。濾波頻段為 0.02 ~ 0.05 Hz， $S = 2.83$ 。

3. 震央距 d

每一個測站的經緯度記錄在 sac 檔的頭段變量 (header) 中，因此我們可以透過 Lambert's formulae 輕易地得到測站與（候選）震央的距離 (Lambert, 1942)。相較於 Vincenty's formulae (Vincenty, 1975)，存在約 $2 \times 10^{-5}\%$ 的誤差。

4. 到時 t_A

在不同的情況下或使用不同類型的觀測網時，事件造成的訊號型態與振幅可能有很大的差異，基於以上原因與流程自動化的考量，我們最後採用了兩種不同的方法來定義到時：

- (1) 絕對到時：訊噪比良好且波形明顯的事件（如圖 4），我們直接定義地震儀紀錄到雷利波包絡線最大地面振動速度 (PGV) 的時刻為到時（需要注意的是，風暴震的 PGV 普遍不大，需要手動判斷訊號與雜訊的邊界，因此統一以取包絡線後的地面振動速度最大值的時刻定義為到時，而非傳統上訊號出現的時刻定義為到時）。
- (2) 相對到時：訊噪比低但各測站波形相似時，我們隨機選擇其中一個測站作為「參考站」，計算出「一個時段內」各個測站與參考站波形的互相關函數 $R(t)$ ，定義 $R(t)$ 有最大值的時刻為該時段測站相對於參考站的相對走時。要得到絕對到時，需要將相對走時加上參考站的絕對到時。

我們將地球表面沿著經緯線劃分為 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的網格，每個格點代表一個「候選

震央」的座標。我們利用 MATLAB 對每一個格點進行一次震央距與到時相關係數的運算，可得如圖 7 之結果。相關係數高，代表該候選震央極有可能為接近真實的等效震央。同時，最適直線的 y 截距即為發震時刻；斜率即為雷利波群速。因此最適直線斜率是除了頻率和地面振動方向之外，我們判斷一段訊號是否屬於雷利波的依據之一。通常而言，雷利波群速介於 $2.7 \sim 3.6 \text{Kms}^{-1}$ 。

我們以附錄中表 3 地震 G 為例具體描述我們的定位過程：

為了降低計算時的負擔，我們逐步縮小等效震央可能出現的範圍並提昇定位的精度，最後達到 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 的精度（視情況所需，可能會提升或降低精度）。

1. **第一次粗略定位**：我們在整顆地球中選出 $(90^\circ\text{S}, 180^\circ\text{W})$ 、 $(80^\circ\text{S}, 180^\circ\text{W})$ 、……、 $(90^\circ\text{N}, 170^\circ\text{W})$ 等彼此間距為 $10^\circ \times 10^\circ$ 的格點作為等效震央的候選座標。對於每一個格點，我們計算得到震央距與震波到時的相關係數大小。繪製在地圖上可得圖 8 (a)。相關係數最高的格點 $E_1(20^\circ\text{S}, 120^\circ\text{W})$ 便是第一次定位得到的粗略等效震央。接著我們由 E_1 向外拓展一個格點的距離形成一個矩形 A_1 （即圖 8(a) 中的黑框），作為第二次粗估的邊界範圍。

2. **第二次與第三次粗略定位**：以 A_1 （或 A_2 ）作為邊界，並將格點間距分別縮小至 $1^\circ \times 1^\circ$ （ $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ）。接著重複第一次定位的步驟，得到更精準的等效震央 E_2 （ E_3 ）與下一次定位的邊界範圍 A_2 （ A_3 ）。

3. **最終定位**：將格點間距縮短至 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。（李、王，2020）

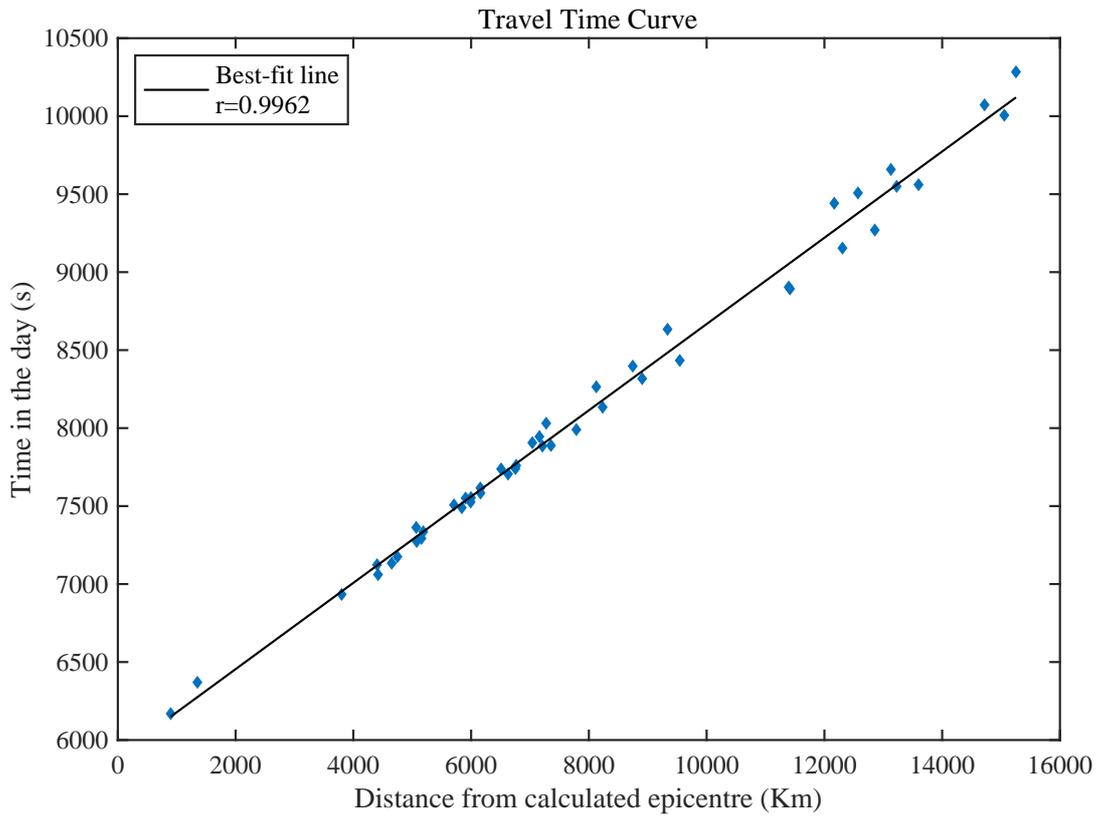
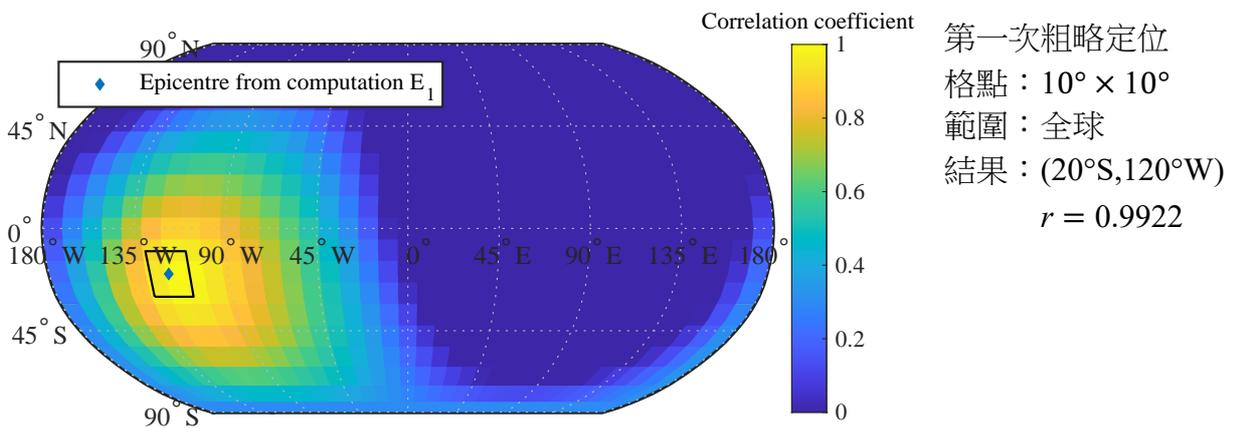


圖 7 對於表 3 地震 G 以(22.91°S,117.07°W)為等效震央繪製出的走時圖。

計算出最佳相關係數後，以算得的等效震央繪製得到的走時圖。作圖得發震時刻為 5900 s (01:38:20)、最適直線斜率（即波速）為 3.61Kms^{-1} 。



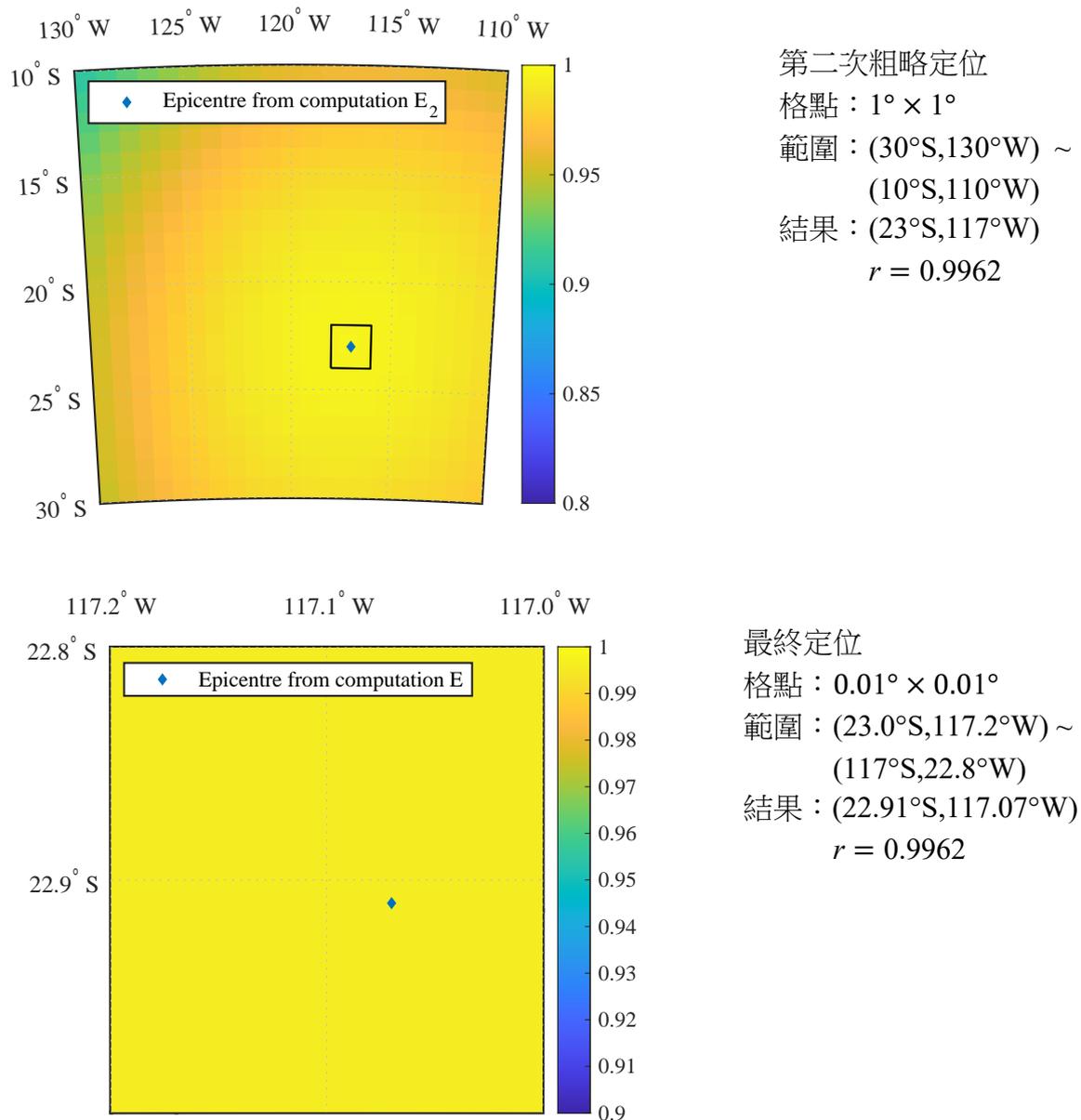


圖 8 以表 3 地震 G 為例，定位訊號等效震央的流程。

說明：(a), (b), (c) 為三種格點間距的結果。(a) 中為方便展示僅繪出 $r > 0$ 的部分， $r \leq 0$ 的部分統一以深藍色代表。

(一) 效果檢驗與量化信賴區間

為了檢驗我們的定位方法精確程度，我們選擇了 IRIS Wilber 3 在 2020 年八月 1 日至八月 15 日期間記錄的 20 次規模介於 5.0 ~ 5.1 的構造地震（詳見附錄表 3），並選用 IU 的測站，按前述步驟濾波並保留雷利波訊號。最終定位結果與真實震央的平均誤差為 4.41° 、標準差為 2.27° 。造成此誤差的重要原因是雷利波的側向速度差異：由於海洋地殼中的雷利波波速較快，因此可以觀察到定位結果系統性地向大洋的方向遠離真實震央。

然而此誤差大小會隨測站分佈的密度和地震網與震央的相對位置等因素而改變，因此對於區域型的事件（如風暴震），定位誤差的尺度會大幅縮小。因而我們改採以下方法量化定位結果的誤差範圍：

注意到 r 值與對應分佈面積有圖 9 的 m 形分佈。若此時將 r 變換為 r^* ：

$$r^* \equiv \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}$$

則 r^* 值對應的分佈面積類似圖 10 的常態分佈（Fisher, 1921）。

我們計算上述 20 場地震的真實震央對應的 r^* 值，標準化得到如圖 8 分佈，我們發現所有真實震央對應的 r^* 值與計算所得的等效震央之 r^* 值比值皆大於 0.79；而其中又有 90%（也就是 18 場）的地震，兩者比值大於 0.89。因此我們定義：

$$N = \frac{r^*}{r^*_{\text{計算得震央}}}$$

而 $N \geq 0.79$ 與 0.89 對應的兩封閉區間分別定義為 **100%分佈區間**與 **90%分佈區間**。在 90% 分佈區間內，定位平均誤差為 3.86° （如圖 10 與圖 11）。（李、王，2020）

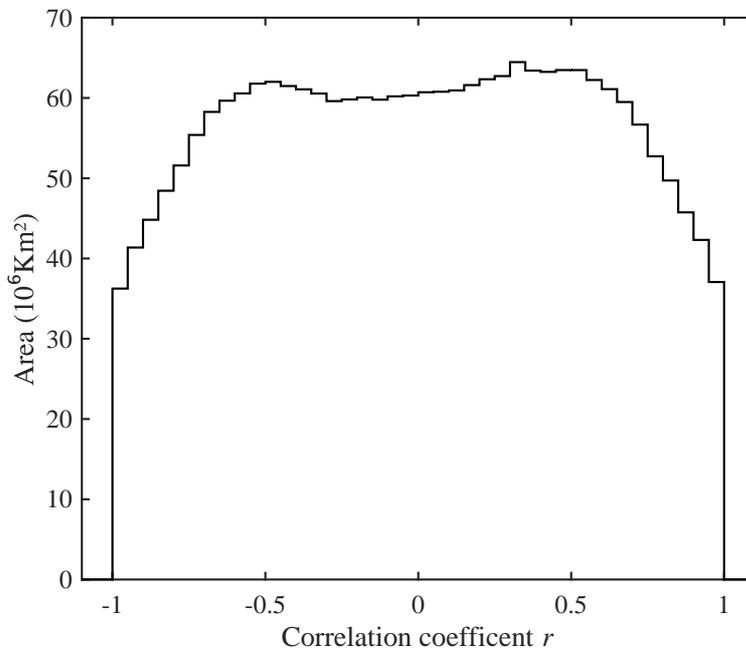


圖 9 以表 3 地震 G 為例， r 值的分佈面積統計圖。

參考圖 8(a)，縮小格點後重新繪製並統計 r 值所對應面積，即可得上圖。

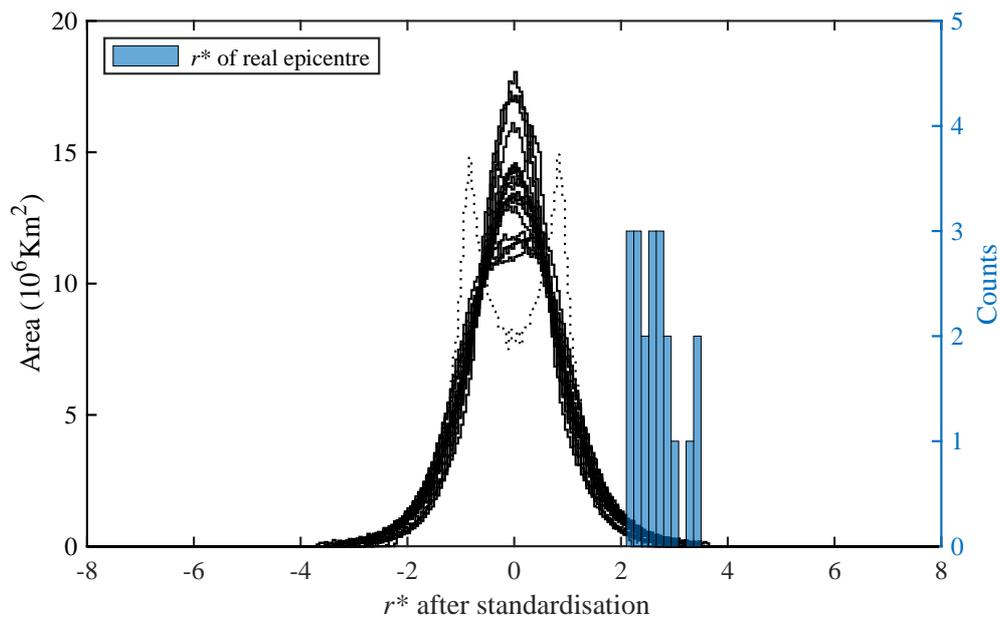


圖 10 表 3 中的 20 場構造地震的 r^* 經標準化後對分佈面積的關係圖。

藍色直方圖為 IRIS 公告的震央對應的 r^* 值。左方的縱軸座標代表 r^* 對應的分佈面積；右方則代表真實震央對應的 r^* 值個數統計。

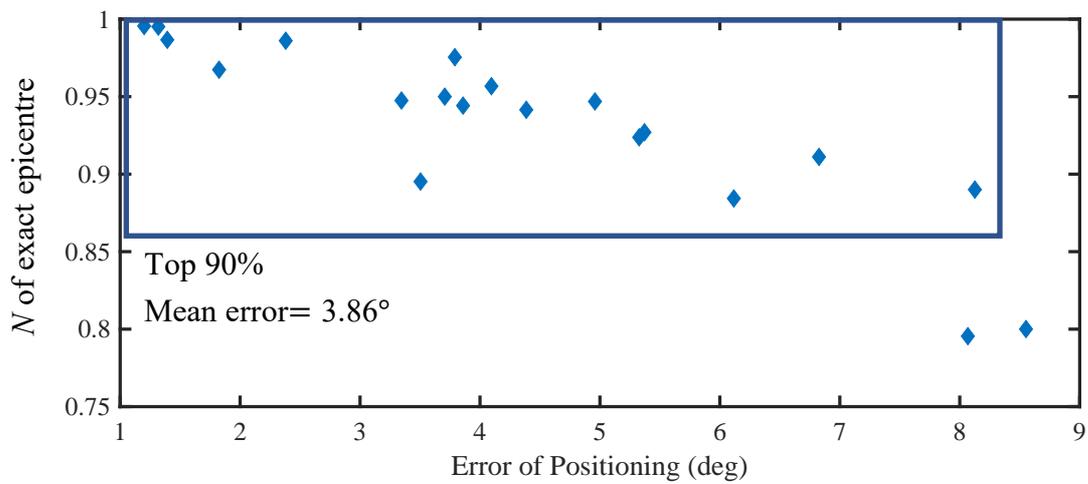


圖 11 表 3 中的 20 場構造地震定位距離誤差與真實震央 N 值關係圖。

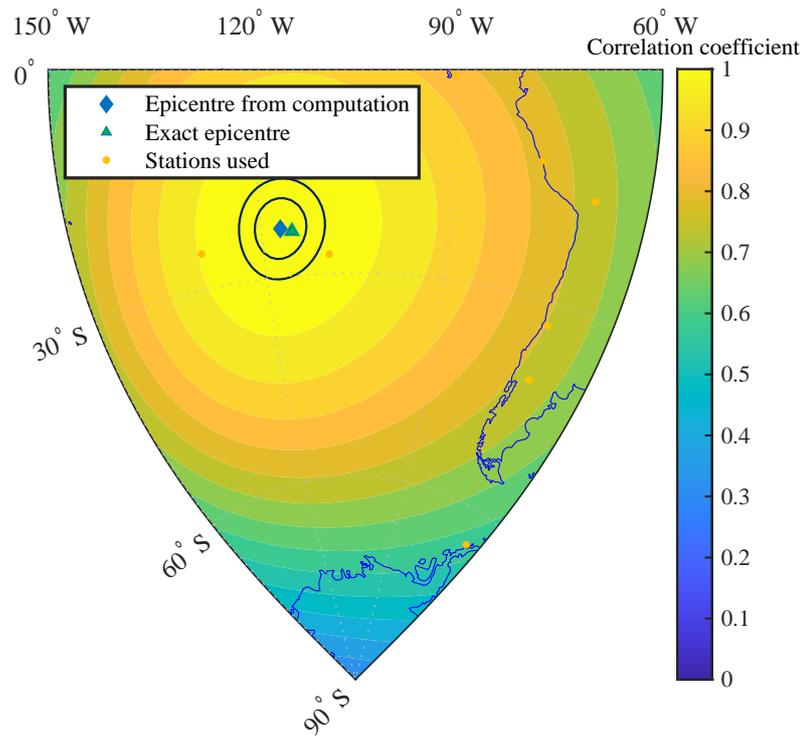


圖 12 以表 3 地震 G 為例，100%與 90%分佈區間範圍。

圖中有兩深藍色圓圈：外圍者為 100%分佈區間；內圈者為 90%分佈區間。

伍、期末之結果

一、頻譜分析

(一) 西大西洋組

圖 13 顯示颶風 Bill 期間與非颶風期間地震測站接收到的波形數據在不同頻段的能量差異。可以觀察到在 0.02 ~ 0.05 Hz、0.05 ~ 0.07 Hz、0.09 ~ 0.1 Hz、0.2 ~ 0.3 Hz 此四頻率區間能量在颶風 Bill 期間存在增加的現象 ($SNR(f) > 0$ dB)，他們分別應是：風暴震、單頻微震 (primary microseism)、雙頻微震 (secondary microseism)、其他高頻訊號。相較於其他三者，風暴震造成的能量增加幅度甚小，僅約 2 倍。然而在 3 小時區間內，此波段仍可增加到超過 10 倍 (不過因為是黑虛線表示，可信度較低)。顯示風暴震出現頻率可能並不高，或單次能量小。事實上當我們濾波到 0.02 ~ 0.05 Hz 一波段檢視原始波形時，我們只在 7 小時區間中觀察到訊號。(李、王，2020)

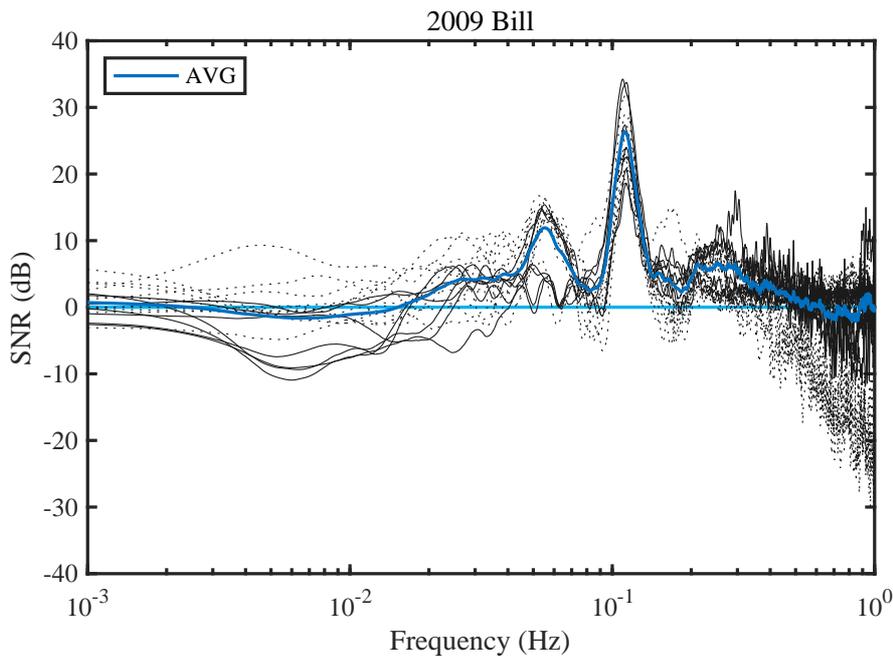


圖 13 2009 颶風 Bill 期間的地震波形頻譜訊噪比。

說明：黑實線代表颶風期間沒有發生地震；黑虛線表示該期間有發生地震(參第 5 頁)；藍實線為 30 組數據的加權平均結果。

(二) 西太平洋組

圖 14 顯示西太平洋組的颶風中，除了依然明顯的第一類微震與第二類微震訊號以外，大多還能在 0.01 ~ 0.05 Hz 頻段發現一明顯的能量增加：除了南瑪都、尼伯特

與瑪麗亞颱風外，此波段的能量在颱風期間皆較非颱風期間強了十倍以上。

然而當我們瀏覽原始波形時，發現 10 個颱風與 1 個颶風中，只有莫拉克颱風與颶風 Bill 期間同時被大部分測站記錄到大量與構造地震無關的低頻地動訊號，天兔颱風期間則記錄到兩起。

比對頻譜分析結果與低頻雷利波訊號數據，臺灣周遭海域在颱風期間受到更強的激發，卻沒有形成類似風暴震的點源訊號。我們懷疑是否因陸棚過小或海底地形變化條件而不利這種風暴震的產生，這仍有待進一步探討。（李、王，2020）

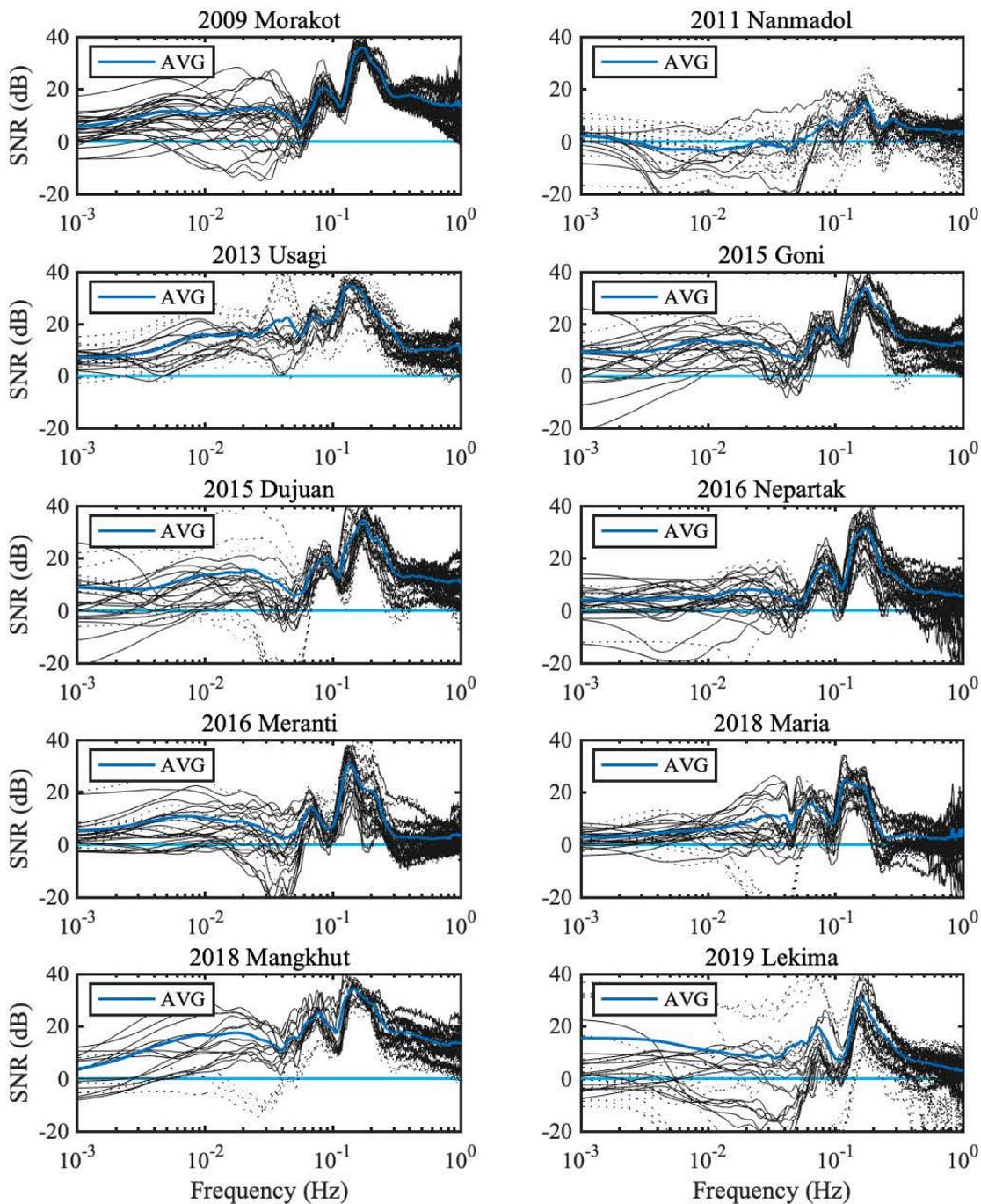


圖 14 表 1 所選定的 10 個颱風期間的地震波形頻譜訊噪比。

黑實線代表颱風期間沒有發生地震；黑虛線表示該期間有發生地震；藍實線為 30 組數據的加權平均結果。

二、2009 颶風 Bill 在美國東岸造成的雷利波震動訊號

(一) 波形數據

如圖 15，2009 八月 23 日晚間至 24 日凌晨 (UTC) 間地美國西部地震測站接收到大量雷利波訊號。由於它們的訊噪比普遍偏小，我們以相對到時進行定位。

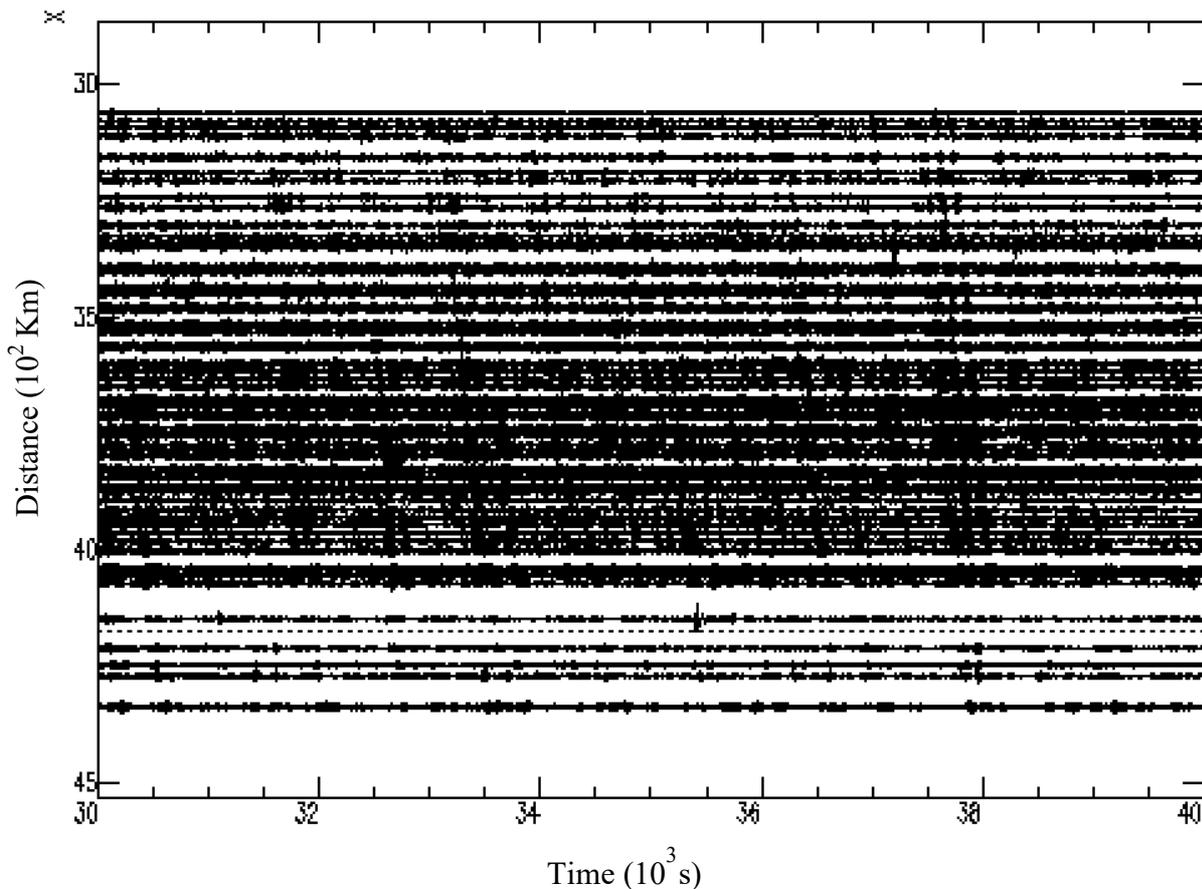


圖 15 颶風 Bill 期間的雷利波訊號。

圖中橫軸為自 2009 年八月 23 日 12:00:00 算起經過的秒數，30000 s 代表 20:20:00。濾波频段為 0.02 ~ 0.05 Hz。

(二) 定位結果

我們在 7 小時區間內看到這些雷利波訊號，因此我們定位時以 1 小時時間窗作為相對到時定位的單位。因此我們可以得到 7 筆定位結果，如圖 16 (其中兩筆位置重合)。

經本研究的定位方法確認，儘管因測站分佈的原因導致緯向誤差大，我們仍

可判定這些訊號應來自聖羅倫斯灣出海口的棚裂區域，即是 Fan et al. (2019) 所觀察到風暴震現象。

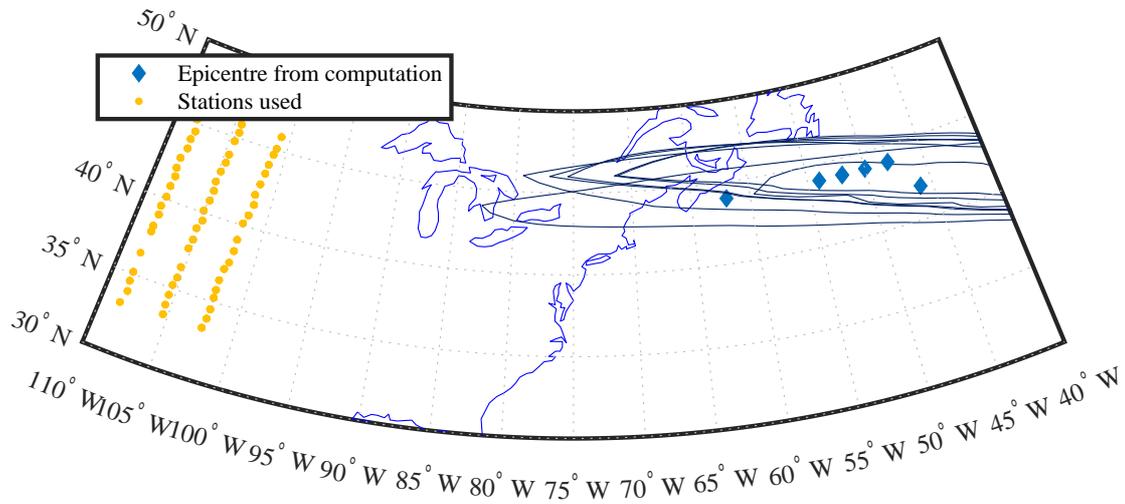


圖 16 颶風 Bill 期間的雷利波震動源定位結果。

黑色圓圈為「90%分佈區間」。因測站網與觀測目標相隔逾 30°，定位結果的緯向不確定性大。不過該地區的棚裂走向恰也是緯向，因此我們仍然相當有把握這些事件發生在棚裂上。我們使用與 Fan et al. (2019)相同的測站網，不過該文章並沒有討論定位時的可能誤差。

三、2009 莫拉克颱風在臺灣造成的雷利波震動訊號

(一) 波形數據

如圖 17，這些訊號在性質上與颶風 Bill 期間紀錄的訊號有許多明顯不同：

1. 造成的地動速度較大，訊噪比 S 強。
2. 各訊號間的時間間隔長。

基於以上原因，我們採用絕對到時進行定位。

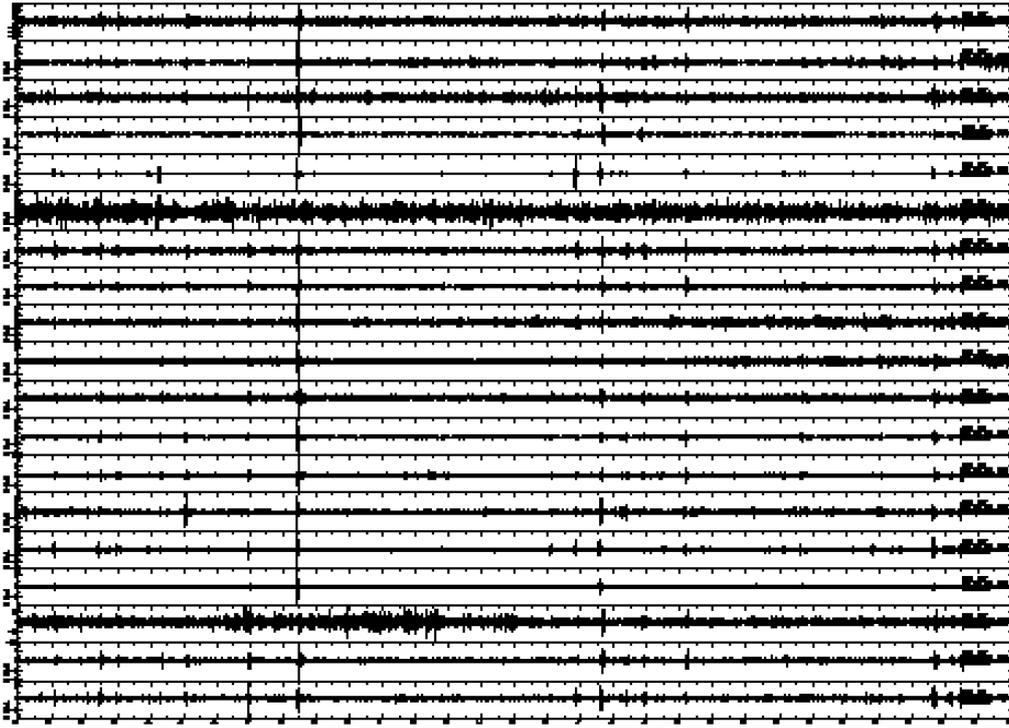


圖 17 莫拉克颱風期間（2009/8/8 19:30 ~ 2009/8/9 2:10）的雷利波訊號

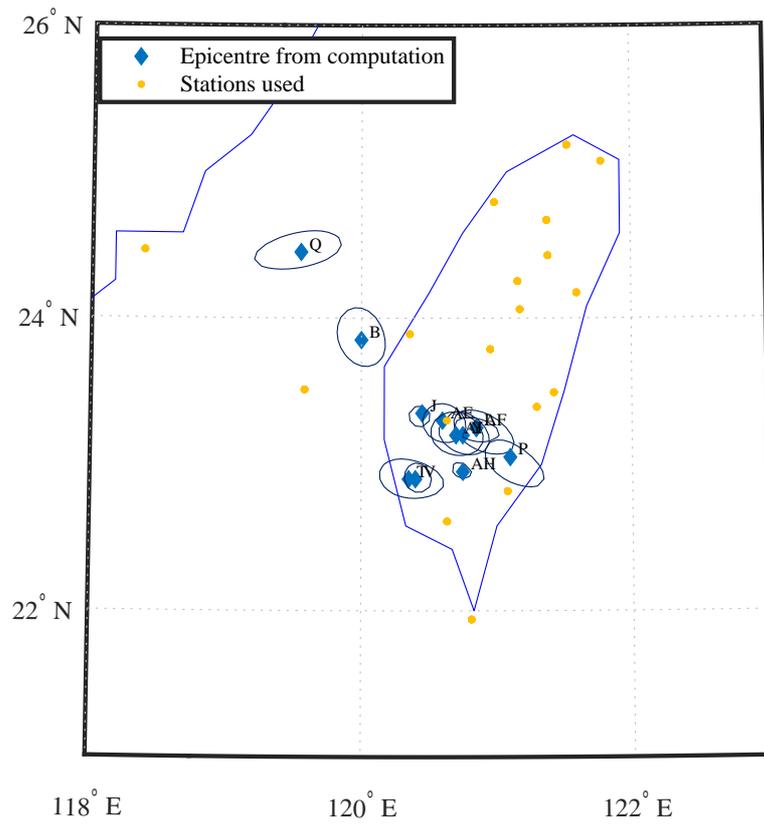
（二）定位結果

如圖 18 與附錄表 4，莫拉克颱風期間非地震的訊號源大多來自陸地且集中在南部山區，顯示它們極可能是山崩等災害所製造的信號。經過與山崩資料 Lin et al.,(2010) 比對，事件 AG 即是造成小林村滅村的獻肚山崩塌事件。然而定位結果與獻肚山真實位置有約 10Km 的誤差。我們認為這可能是因為 0.02 ~ 0.05 Hz 的雷利波群速在臺灣周遭側向差異變化極大（例如 Huang et al., 2012; Zhang et al., 2018），沿大圓路徑等速傳遞的假設無法完全反映這個事實，因此造成定位結果系統性的偏移。

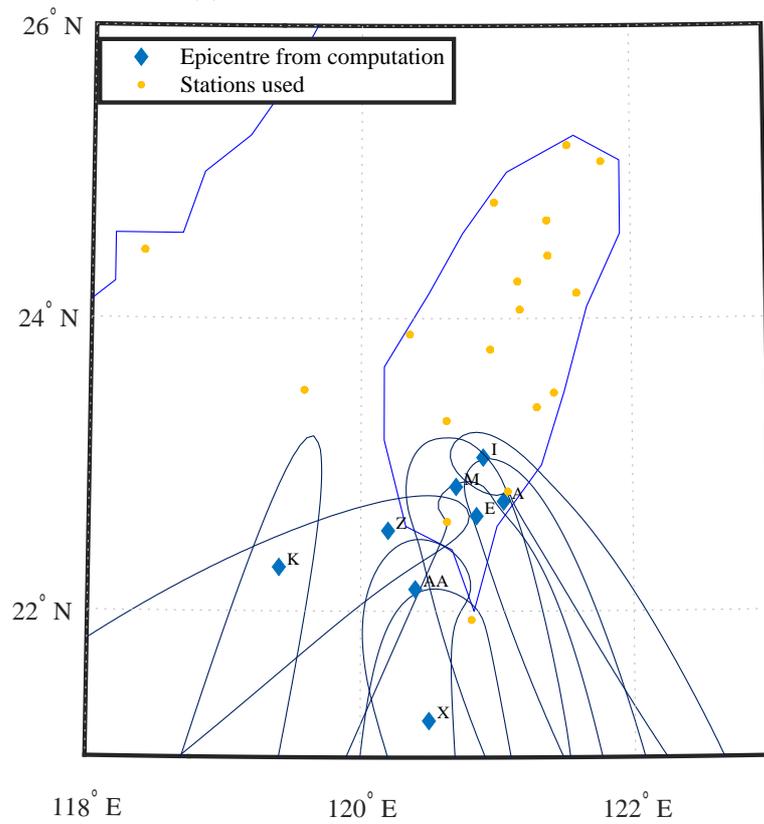
此外，我們可以觀察到接近地震網中心的事件等效震央不確定性較低；反之則有高不確定性。

天兔颱風期間也有接收到兩起應為山崩的訊號，因性質與莫拉克颱風期間的訊號差不多，不特別單獨討論。

總體而言，我們的方法能夠重現颶風 Bill 期間的風暴震現象，但將相同的分析手法套用在西太平洋的颱風上時則沒有發現類似訊號。我們認為海底地形可能扮演激發風暴震的重要角色。



(a) 位置落在測站網內的事件。



(b) 落在測站網邊緣或外圍的事件。

圖 18 莫拉克颱風期間的雷利波震動源定位結果。

陸、結論與討論

一、現有結果

- (一) 利用本分析法成功捕捉並驗證颶風 Bill 侵襲美國東岸期間沿著棚裂形成多個點波源的風暴震現象。
- (二) 我們研究的 10 個颱風期間，頻率低於 0.05 Hz 的震波能量相比於颶風 Bill 有顯著增加，但我們沒有發現任何類似颶風 Bill 所引發的風暴震點源訊號，顯示臺灣周遭水域還欠缺風暴震生成的其他重要條件。
- (三) 我們發展的低頻震動事件定位方法利用已知 20 次構造地震的震央作為檢驗精確度的結果顯示 90% 的地震 N 值大於 0.89、平均誤差為 3.9° ，表示我們所發展出來的地震雷利波震央定位法是可行且可靠的方法。
- (四) 我們能應用低頻雷利波的分析技術成功辨識並定位出莫拉克、天兔颱風期間的山崩事件。學界過去只針對莫拉克颱風引發的山崩振動訊號進行分析，而我們分析了十個颱風，除了莫拉克颱風外，其他颱風也會產生低頻訊號。

二、未來展望

由於風暴震一現象被提出不足兩年，目前學界尚未對臺灣的風暴震現象進行進一步的研究，也無法得知為何臺灣無法產生風暴震。我們預計在未來聯繫海洋物理專業的研究人員，透過實驗模擬與理論計算等方法試圖釐清風暴震產生的機制。

柒、參考資料

- 一、Fan W., J. J. McGuire, C. D. Groot-Hedlin, M. A. H. Hedlin, S. Coats & J. W. Fiedler (2019). Stormquakes. *Geophysical Research Letters*, 12909-12918. doi: 10.1029/2019GL084217.
- 二、Fisher. R. A. (1921). On the “Probable Error” of a Coefficient of Correlation Deduced from a Small Sample, *Metron*, 1: 3-32.
- 三、Huang, T.-Y., Y. Gung, W.-T. Liang, L.-Y. Chiao, and L. S. Teng, (2012). Broad-band Rayleigh wave tomography of Taiwan and its implications on gravity anomalies, *Geophysical Research Letters*, 39, L05305, doi: 10.1029/2011GL050727.
- 四、Lambert, W. D. (1942). The distance between two widely separated points on the surface of the earth. 32 (5): 125-130.
- 五、Lin, C.H., H. Kumagai, M. Ando, T. C. Shin. (2010). Detection of landslides and submarine slumps using broadband seismic networks. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2010GL044685.
- 六、T.Vincenty (1975). Geodetic inverse solution between antipodal points. *DMAAC Geodetic Survey Squadron*. doi: 10.5281/zenodo.32999.
- 七、Zhang Yayun, Yao Huajian, Yang Hsin-Ying, Cai Hui-Teng, Fang Hongjian, Xu Jiajun, Jin Xing, Kuo-Chen Hao, Liang Wen-Tzong, Chen Kai-Xun, 2018, “3-D Crustal Shear-Wave Velocity Structure of the Taiwan Strait and Fujian, SE China, Revealed by Ambient Noise Tomography”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9) 8016-8031.
- 八、李鎮洋、賴文基、陳振宇、黃效禹、郭力行（民 100）。莫拉克颱風複合型災害發生歷程的時空重建—以小林村深層崩塌為例。中華水土保持學報，42(4)：313-324。
- 九、李恩齊、王宥姍（民 110）。地球低頻震動事件偵測。
- 十、陈箫翰（2019）。非传统地震信号探测与震源定位。

捌、附錄

表 3 表用以定義「分佈區間」的 20 次構造地震。

時間	編號	真實震央		定位結果		<i>N</i> 值	
		經度	緯度	經度	緯度		
08/14	20:34:35	A	15.717°S	72.137°W	19.65°S	77.99°W	0.911
	13:21:39	B	10.224°S	124.382°E	10.34°S	125.29°E	0.996
08/13	14:54:54	C	7.391°S	39.892°E	14.40°S	43.55°E	0.890
08/12	07:39:42	D	55.353°S	35.869°W	55.21°S	33.58°W	0.995
08/11	23:42:42	E	23.914°S	175.574°W	23.01°S	171.89°W	0.895
08/10	23:25:14	F	3.901°S	12.364°W	4.20°S	12.72°W	0.987
	01:39:13	G	23.478°S	115.186°W	22.91°S	117.07°W	0.967
08/09	14:57:54	H	55.046°N	157.926°W	46.53°N	157.17°W	0.800
	12:07:37	I	36.476°N	81.094°W	35.34°N	83.66°W	0.986
	09:16:19	J	34.226°N	45.592°E	33.08°N	39.41°E	0.920
	04:52:51	K	9.679°S	118.917°E	14.19°S	121.77°E	0.947
08/08	02:16:31	L	11.291°S	75.978°W	13.17°S	81.92°W	0.884
08/07	11:51:36	M	54.247°N	168.954°E	46.43°N	171.81°E	0.795
	04:39:42	N	22.593°S	173.198°E	23.64°S	178.86°E	0.924
08/06	03:06:33	O	37.422°N	138.674°E	38.72°N	144.06°E	0.942
08/05	08:27:12	P	9.706°S	119.07°E	12.30°S	117.30°E	0.948
08/04	23:51:11	Q	1.780°S	100.182°E	5.53°S	99.54°E	0.975
08/03	15:08:08	R	7.246°S	77.831°W	8.39°S	81.79°W	0.957
08/02	16:44:25	S	0.341°S	124.364°E	1.08°N	137.94°E	0.944
08/01	08:25:26	T	16.343°S	72.603°W	18.21°S	75.96°W	0.950

年份為 2020 年。其中 90% 之 *N* 值落在 0.89 以上。定位是的格點間距為 $0.01^\circ \times$

0.01° 。

表 4 莫拉克颱風期間的雷利波震動源參數。

日期	時間	編號	定位結果		備註
			緯度	經度	
2009 08/08	09:20:50	A	22.77°N	121.03°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
	10:22:24	B	23.86°N	120.00°E	
	13:05:15	D	24.48°N	122.15°E	
	14:25:32	E	22.65°N	120.84°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
	14:59:53	F	22.52°N	119.96°E	
	16:38:12	G	22.43°N	120.72°E	
	17:01:11	H	22.75°N	120.86°E	
	17:09:41	I	23.04°N	120.92°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
	17:31:49	J	23.33°N	120.43°E	
	17:44:15	K	22.25°N	119.39°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
	18:16:06	L	23.24°N	120.88°E	
	18:40:49	M	22.90°N	120.70°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
	21:01:16	N	22.64°N	121.34°E	
	21:13:29	O	22.41°N	121.15°E	
	21:26:40	P	23.04°N	121.09°E	
	21:34:51	Q	24.47°N	119.56°E	
21:56:19	R	23.23°N	120.19°E		
22:45:47	S	22.26°N	120.75°E		
22:54:28	T	22.91°N	120.36°E		
2009 08/09	00:01:00	U	22.87°N	120.05°E	
	00:09:43	V	22.91°N	120.42°E	
	00:14:57	W	22.67°N	120.90°E	

00:59:45	X	21.23°N	120.52°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
01:21:21	Y	23.22°N	120.77°E	
01:54:29	Z	22.54°N	120.17°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
02:45:12	AA	22.16°N	120.42°E	落於 BATS 觀測網外，位置不確定性高。
03:47:11	AB	22.59°N	120.78°E	
04:08:58	AC	23.41°N	120.40°E	
04:26:18	AD	22.95°N	120.40°E	
05:30:04	AE	23.29°N	120.62°E	
05:42:17	AF	23.24°N	120.85°E	
06:16:38	AG	23.16°N	120.71°E	獻肚山崩塌事件，時間、位置吻合。
07:02:02	AH	22.96°N	120.74°E	
07:14:57	AI	23.22°N	120.71°E	

說明：定位是的格點間距為 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。

【評語】 180011

整體研究過程完整，科學意義也很明確，唯結果在意料之中，比較缺乏突破性。本題目是針對一個物理現象的了解，但在物理機制的討論上略嫌薄弱，對結果的物理解釋琢磨較不夠深入。