

全自動化的即時地震矩張量(CMT)解算系統

梁文宗¹ 李文蕙¹ 簡珮如²

1 中央研究院地球科學研究所

2 臺灣大學地質科學研究所

何美儀 蒲新杰 許炘志

中央氣象局地震測報中心

摘 要

利用寬頻地震波形資料逆推地震矩張量(Centroid Moment Tensor, CMT)解已是氣象局地震中心的例行性工作，並且據此對學界提供第一手的震源機制解，作為進一步探究震源破裂方式與孕震構造的基礎資訊。為配合地震速報工作以提升解算 CMT 震源解的整體效能，本計畫將開發新版的自動化解算系統，直接從地震中心的地震速報自動觸發一系列的工作，包括：(1)寬頻地震波形資料擷取、(2)波形品質評比、(3)儀器響應修正、(4)測站組合選用最佳化、(5)地殼模型評估及(6)波形逆推 CMT 解。第一年已經完成這六項工作，可以在地震速報出來之後 10 分鐘內，自動提供按不同參數選用的測站組合，共可獲得 108 組的結果，並公布其中的最佳解。另依據測站背景噪訊強度的計算結果，我們可以分辨各測站運作品質的優劣，作為解算 CMT 震源解的重要選站參考。

The Central Weather Bureau (CWB) had routinely inverted the Centroid Moment Tensor (CMT) solutions manually by taking advantage of high quality broadband seismic waveform data for earthquakes occurred in the Taiwan region. These solutions are crucial to better understand the corresponding seismogenic structures as well as the source rupture behaviors. To upgrade the existed system and provide rapid and accurate information of source mechanism, we have developed an automated real-time source inversion system to derive the CMT solution by inverting the collected broadband seismic waveforms at CWB. In this system, a series of job will be conducted sequentially after receiving the issued rapid alert, including (1) broadband waveform data extraction, (2) data quality control, (3) instrument response removal, (4) station optimization, (5) earth model evaluation, and finally the (6) source inversion. An optimum solution will be produced automatically in 10 minutes among 108 solutions. Ambient noise level at each broadband station is also computed for evaluating the performance reliability.

壹、地震矩張量解

求取地震震源機制的方法早期倚賴 P 波的初動解，雖然提供的參數簡單卻相當有效，但是在測站分佈受限時，P 波初動解的可靠度便大幅下降。1980 年代後寬頻地震儀的問世加上以波形來逆推震源的技術有了長足進步，美、日等國開始運用高品質的寬頻波形資料來解算區域(Kawakatsu, 1995 ; Dreger and Helmberger, 1993, Pasyanos and Dreger, 1996)及全球的地震震源機制，其中最著名的計畫為哈佛大學針對全球的大地震所進行的中央地震矩張量(Centroid Moment Tensor, CMT)解震源反演(Dziewonski et al., 1981)，這個計畫在2006年之後隨Ekstrom教授遷移至哥倫比亞大學而改名為全球CMT計畫(Ekstrom et al., 2012)。

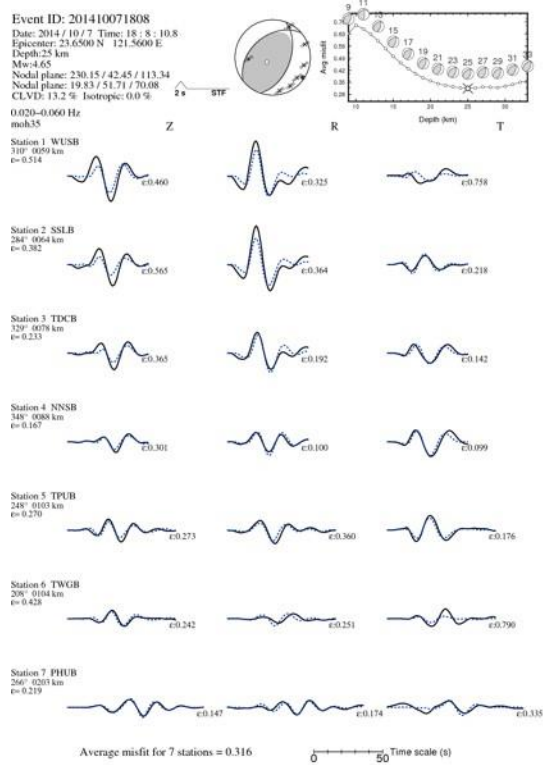
有鑒於臺灣多數的有感地震大都發生在東部近岸或外海，因此利用寬頻地震波形來推算震源機制解便顯得迫切需要。中研院地球所於1992開始規畫設置臺灣地區寬頻地震觀測網，1995年後開始在臺灣地區解算CMT震源機制解(Kao et al., 1998)，並於2001年後對外提供例行性的快速CMT震源解。過去由於解算系統倚賴人工進行測站資料品質與P波到時的判定，無法全然自動化，但是在掌握速度模型與自動挑波技術之後，加上有系統的測站挑選，已經讓近即時自動化取得可靠的震源機制解不再遙不可及。

寬頻波形反演技術是將各測站的觀測波形(u_i)透過格林函數的空間導數($G_{ij,k}$)與地震矩張量(M_{jk})直接線性關聯：

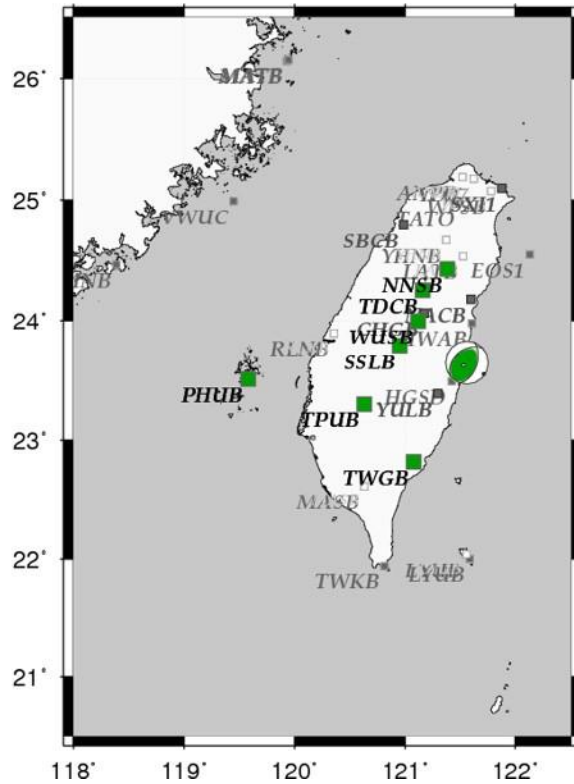
$$u_i = G_{ij,k} M_{jk} \quad (1)$$

換句話說，有了可靠的速度模型與震源參數，便可掌握格林函數，本研究的格林函數計算採用Zhu & Rivera (2002)的頻率波數(fk)法；接著只要有高品質的寬頻波形，便可求得地震矩張量，再依據地震矩張量解計算地震矩規模(Mw)與斷層面解，包括等向性(isotropy)與補償線性向量偶極(compensated linear vector dipole, CLVD)大小等。對於測站包覆不均的問題，多站多分量的波形仍然可以提供充分的制約條件來評估地震的破裂行為。

圖一和圖二分別是2014/10/07 18:08 (UT)發生在花蓮地區，ML達5.2的地震震源機制解與所使用的測站分布；圖一完整描述地震的震源機制、波形擬合情形與其相對於震源深度的變化，圖二則標示提供最佳解所使用的測站分布。



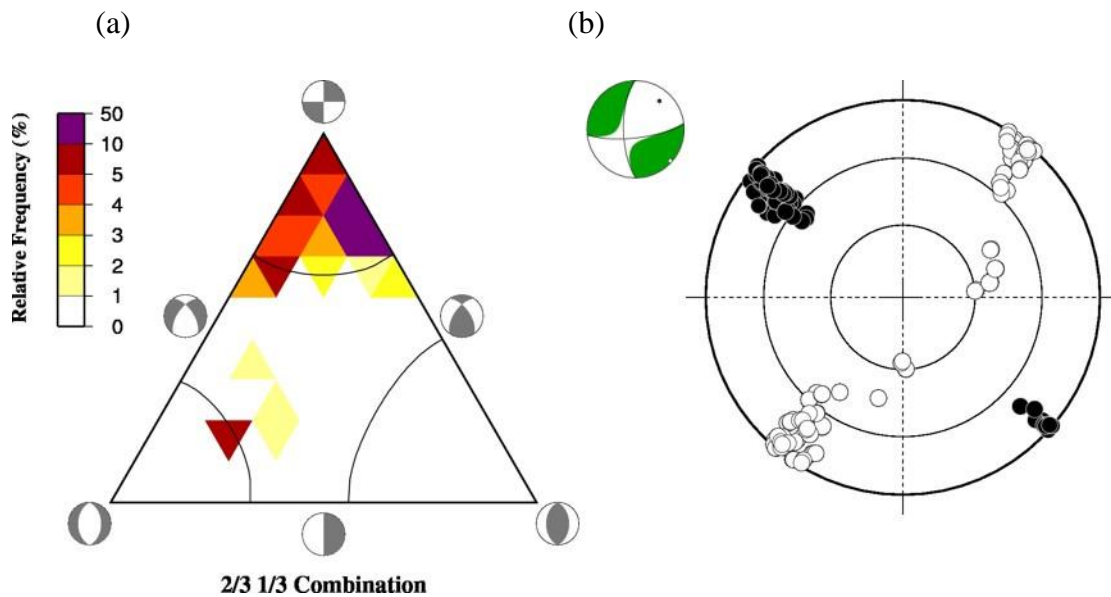
圖一、2014/10/07 18:08 (UT)發生在花蓮地區，ML達5.2的地震震源機制解與波形擬合情形。



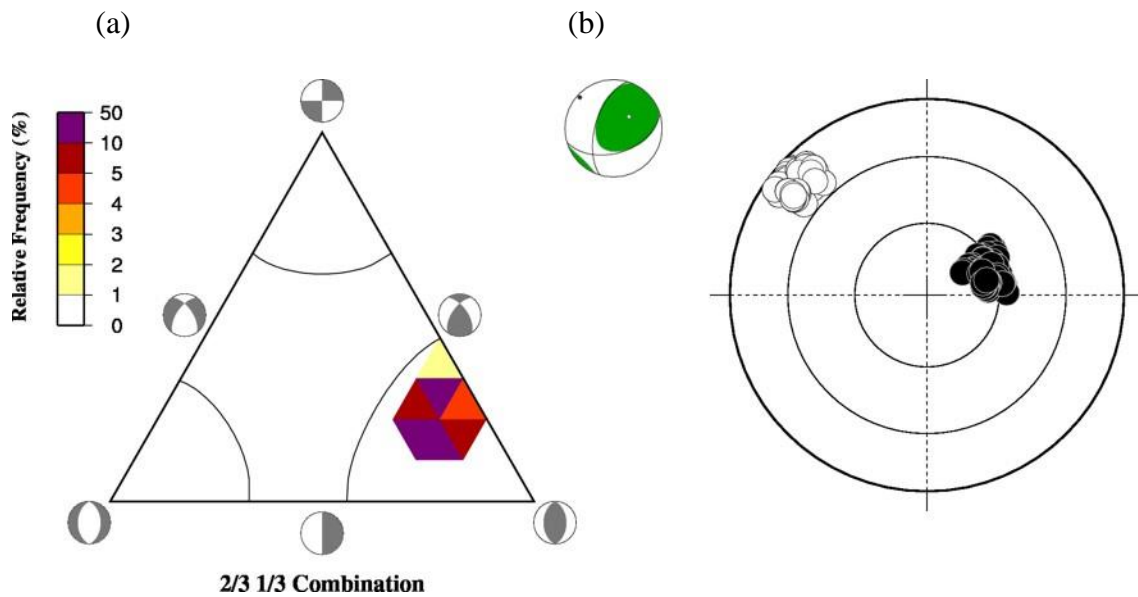
圖二、2014/10/07 18:08 (UT)地震最佳震源機制解所使用的測站分布。

貳、測站分布與其他參數的選用組合

臺灣地區所布設的地表寬頻測站超過 60 部，如果再加上氣象局新一代的深井測站便接近 100 部，如何自動選擇測站來進行震源反演是一項重要的課題。使用多站資料意味著需要更多計算時間，所以我們設計依照(1)方位角涵蓋率、(2)震央距遠近，以及(3)訊躁比(signal-to-noise)的高低來選用不同的測站組合，另外處理波形的濾波器在 10-50 秒周期之間採用三個頻段，以因應不同震央距或地震規模的訊號主頻有所差異。速度模型則考慮四種莫荷深度面深度的變化，最後在反演過程中分別考慮沒有等向性變化與容許 10% 和 30% 變化的結果。依照這個設計，以現有的計算伺服器而言，可以在 10 分鐘內求得 108 組的 CMT 震源機制解，並根據觀測波形與合成波形的擬合度選出最佳解。如果這 108 組解相當接近，則表示所求解的精度高，相對可信度也較高。圖三(a)是 2014/09/29 Mw 4.1 宜蘭地區淺震，Auto BATS CMT 的 108 組震源機制解分布情形；多數組合的震源機制呈走向滑移的斷型態，與最佳解一致，圖三(b)則將各個解的最大壓縮 P 軸(白色空心)與最小壓縮 T 軸(黑色實心)的分佈畫出，由此可以看出 T 軸分布比 P 軸更為集中。圖四則為 2014/05/21 Mw 5.9 花蓮鳳林地震的結果，其 108 組的震源機制與主壓縮軸的分佈相當集中，顯示所得解的精度較高。



圖三、2014/09/29 Mw4.1 宜蘭地震的 108 組震源機制解的(a)斷層型態與(b)主壓縮軸的分佈情形。機制以走向滑移為主，P 軸(白色空心圓)分布較不集中。

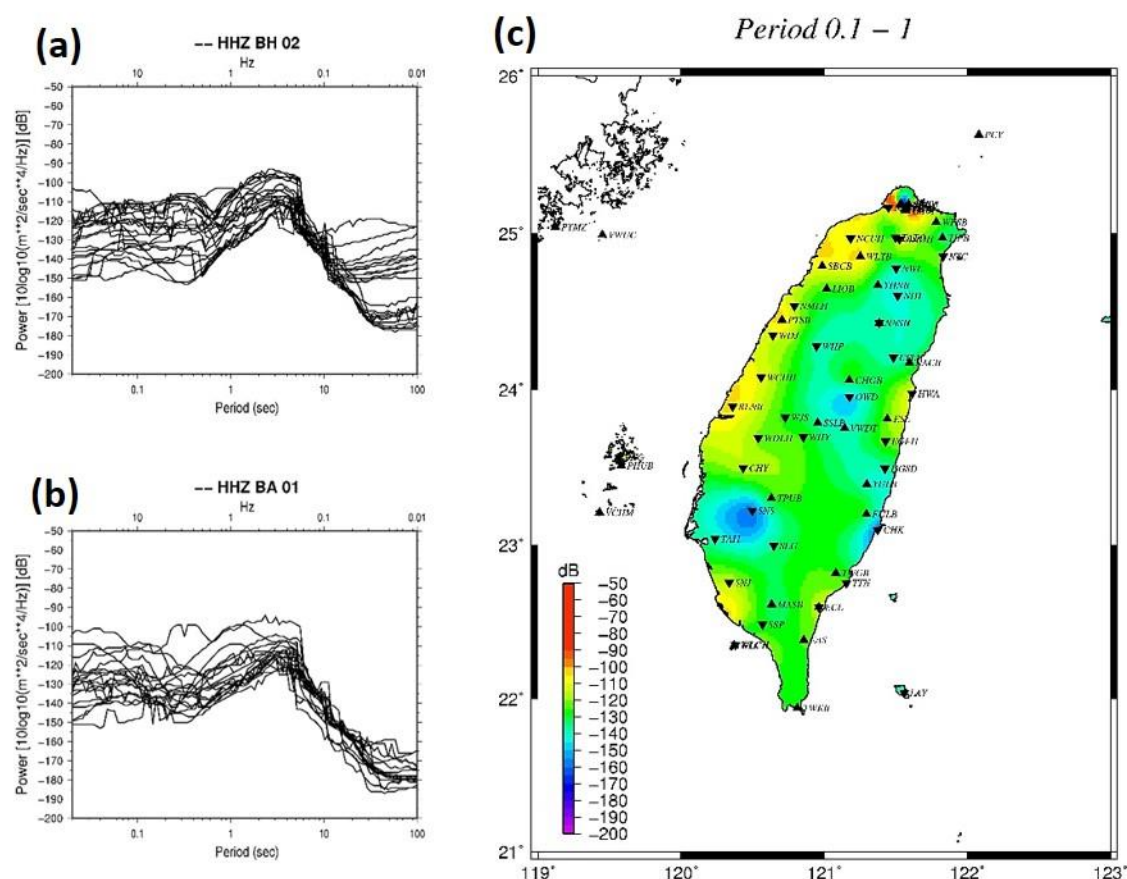


圖四、2014/05/21 Mw5.9 鳳林地震 108 組震源機制解的(a)斷層型態與(b)主壓縮軸的分佈情形。震源機制為逆衝斷層，P 軸與 T 軸(黑色實心)的分佈均相當集中。

參、測站背景地動噪訊強度

大氣擾動、海浪拍擊，甚至風吹樹搖和人為的活動都會產生地動噪訊，進而影響到地震測站對地震的偵測能力，因此有必要進一步評估各個測站受到周遭噪訊影響的程度。本計畫採用 McNamara and Bulland (2004)的技術，計算測站連續紀錄的功譜機率密度函數，評估不同周期的周遭噪訊強度；它的原理是以每小時為單位，波形 50% 重疊，將紀錄的儀器響應移除後得到真實的加速度功譜，如此不斷計算連續紀錄在不同時段的功譜曲線，最後計算各週期的功譜機率密度函數，以中位數或平均數當作該測站的噪訊強度，如此一來便能有效地降低短期干擾，例如颱風或地震，而取得合理的結果。

圖五(a)為氣象局深井站寬頻地震儀的噪訊強度，圖五(b)則為地表寬頻站的噪訊強度，兩者在 5 秒以下高頻部分，深井測站的环境噪訊明顯低了許多。圖五(c) 將 1-10 Hz 的文明噪訊強度畫在地圖上，整個西部平原與東部的花台城市高頻噪訊較高，明顯與都市化的程度相關，深井站的設置有助改善此一窘境。由圖五(a)來看，幾個深井測站在長周(>10 s)的噪訊突然提高，究其原因可能是地震儀並未完全調整至水平，或者儀器響應資訊不明，這些測站在解算 CMT 震源機制解時只能捨棄不用。經過這個步驟，便可定量地評估出各測站對於地震的偵測能力。

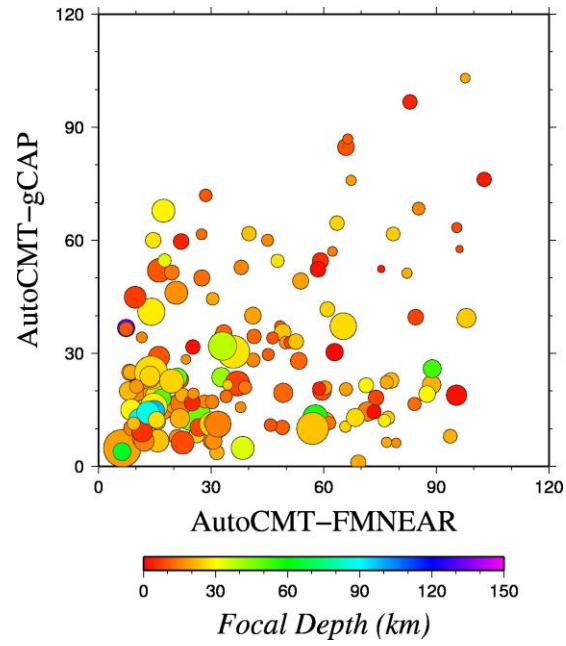


圖五、(a)深井寬頻站的背景噪訊強度，(b)地表寬頻站的背景噪訊強度，(c)各測站 1-10 Hz 的文明噪訊(cultural noise)強度空間分布，這些由人類活動所引起的地動噪訊與都市化程度息息相關。

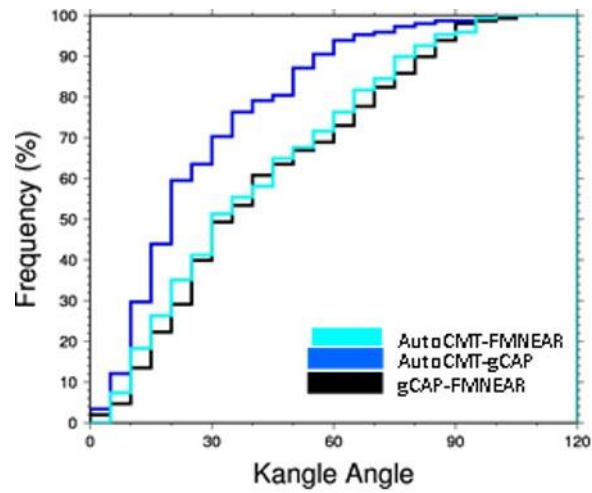
肆、震源機制解的比較

目前依據波形反演求得震源機制解的技術眾多，例如中央氣象局與中研院地球所均同時運作例行的 CMT、gCAP 和 Auto BATS CMT 解等，還有 FMNEAR 解。為了量化兩個震源解之間的差異，Kagan (1991)提出最小旋轉角度的邏輯計算出兩震源機制的差異，完全相同這個角度為 0 度，完全不同則為 120 度，這個評估差異的角度在本文後面我們稱之為 Kangle angle。

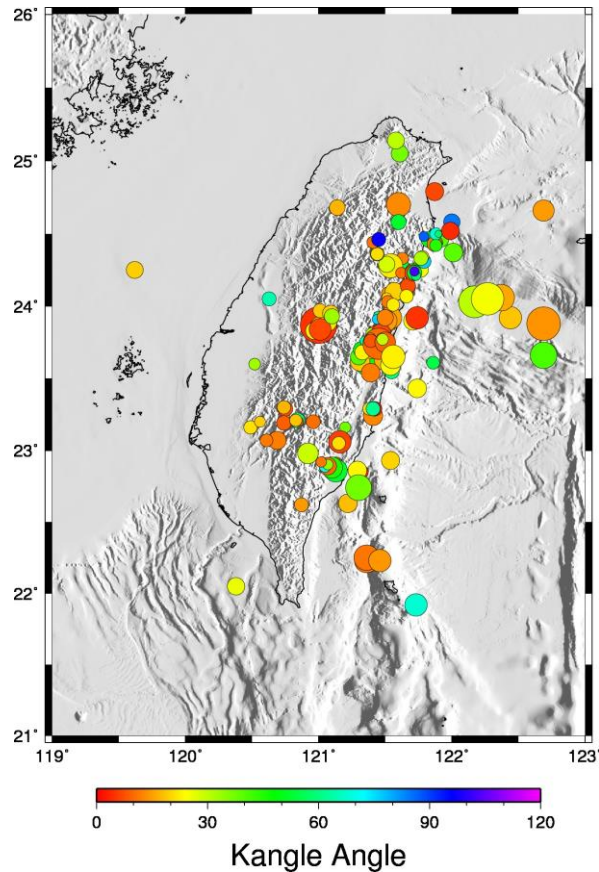
過去一年中(2013/08/09-2014/10/13)，中研院地球所共取得 149 個 AutoCMT 解，同時 gCAP 及 FMNEAR 則有 220 個解，其中 148 個地震同時解出震源機制解，比例約為 67%，將近 2/3。圖六是 AutoCMT 分別與 gCAP 和 FMNEAR 比較的結果，多數的差異都落在 Kagan angle < 40° 的範圍內。圖七則是兩兩比較的 Kagan angle 累進曲線分布圖，AutoCMT 和 gCAP 之間的差異要比其他兩者間的差異小了很多。將近 80% 左右差異在 40° 以內。至於差異較大的情況，我們根據圖八的結果發現震央落在外海或較小規模的地震，不同解之間的差異也較大，這應該是測站所記錄到的長週期(10-50 s)訊號能量不足所致。



圖六、AutoCMT 分別與 gCAP 和 FMNEAR 比較的結果，多數的差異都落在 Kagan angle $<40^{\circ}$ 的範圍內，與震源深度並無特殊關係。



圖七、AutoCMT、gCAP 與 FMNEAR 震源機制解兩兩比較的 Kagan angle 累進曲線分布圖。AutoCMT 與 gCAP 解最接近，有將近 80% 的共通解差異在 40° 內。



圖八、震央落在外海或較小規模的地震，AutoCMT 與 gCAP 震源機制解的差異也較大，推論應該是測站所記錄到的長週期(10-50 s)訊號能量不足所致。

伍、結論

全自動化的近即時地震矩張量解算系統已經順利在氣象局開始運作，由於選站的要求較高，且波形擬合度不佳的結果會被剔除，速報的編號地震當中僅有 2/3 可以求出震源機制解。所得結果與 gCAP 震源機制解比較，兩者 Kagan angle 的差異有 80% 左右小於 40° 內。

根據各寬頻測站連續紀錄所計算的背景噪訊強度，我們得以評估各測站紀錄品質在各頻段的品質效能，作為選站的依據。

未來將繼續往前回推規模 >5 的地震進行個案研究，以探討各項參數最佳化的調整走向，並設計出在 2 分鐘內完成所有計算的最速解，同時依據波形擬合和多組解的一致性來評估所得解的可信度，作為是否自動公布的參考。

陸、參考文獻

- Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825
- Dreger, D. S., and D. V. Helmberger, Determination of Source Parameters at Regional Distances with Single Station or Sparse Network Data, *J. Geophys. Res.*, 98, 8107-8125. 1993.
- Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Frolich C., Display and quantitative assessment of distribution of earthquake focal mechanisms, *Geophys. J. Int.*, 144, 300-308, 2001.
- Kawakatsu H., Automated near-realtime CMT inversion, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2569-2572, 1995. doi: 10.1029/95GL02341
- Kagan Y.Y., 3-D rotation of double-couple earthquake sources, *Geophys. J. Int.*, 106, 709-716. 1991. doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06343.x
- Kao, H., P.-R. Jian, K.-F. Ma, B.-S. Huang, and C.-C. Liu, Moment-tensor inversion for offshore earthquakes east of Taiwan and their implications to regional collision, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3619-3622. 1998. doi: 10.1029/98GL02803
- McNamara, D.E. and R.P. Buland, Ambient Noise Levels in the Continental United States, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 4, 1517-1527, 2004.
- Pasyanos, M.E., D.S. Dreger, and B. Romanowicz, Toward Real-Time Estimation of Regional Moment Tensors, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 86, 1255-1269, 1996.
- Zhu, L., and L. A. Rivera, A note on the dynamic and static displacements from a point source in multi-layered media, *Geophys. J. Int.*, 148, 619-627, 2002.