

出國報告（出國類別：開會）

參加第 4 屆地震預警國際研討會

服務機關：交通部中央氣象局

姓名職稱：陳達毅技士

派赴國家/地區：韓國

出國期間：108 年 9 月 3 日至 9 月 6 日

報告日期：108 年 10 月 25 日

摘 要

面對突如其來的地震威脅，在現今地震預測技術尚未成熟之際，地震預警系統是 1 套能夠有效達到防震減災的工具之一。近年來，世界上位處地震帶的國家，紛紛投入大量人力與物力在發展此類系統，就是希望在大地震發生後，在強烈的地震波尚未侵襲前，提供數秒到數十秒的預警時間，不僅讓交通運輸系統等自動化的設備能提早因應、也可以讓民眾提早進行避難。本次地震預警國際研討會，有來自韓國、美國、日本、臺灣、義大利、以色列與中國大陸等地的學者專家與會，參與會議的過程不僅可以了解各國在地震預警系統上最新的研究成果，也有機會展示中央氣象局（以下簡稱氣象局）在此方面的研究成果，並增加彼此未來合作的機會。本文將簡要概述各國地震預警技術的發展現況，與臺灣的發展現況，最後提出未來發展方向與願景建議。

目 次

一、目的	4
二、過程	4
三、美、日、韓地震預警技術介紹.....	12
四、氣象局地震預警系統現況與未來發展.....	17
五、心得及建議	23

一、目的

近年來國際上地震災害時有所聞，位處地震活躍區域的國家在地震預測技術尚未成熟之際，紛紛投入地震預警系統的研究與發展，此類系統無疑是目前最有效的防震減災工具之一，能夠在災害性的地震波侵襲前提供地震預警警報，使得位處距震央較遠區域內的民眾及交通運輸系統等自動化設備能夠提前採取緊急應變行動，以達到防震減災的目的。

世界各國地震預警技術發展迅速，除了日本之外，包含中國大陸及美國加州的地震預警系統，對於位處於地震觀測網內的地震都有能力在地震發生之後 10 秒內發出地震警報，但是以地震觀測網密度全世界最高的臺灣而言，現階段之預警系統卻需要 15 秒才能發布預警警報。為了縮短預警警報發布作業時間，氣象局地震預警系統一方面整合更多即時觀測訊號，一方面也修正資料處理方式與預警模式，目前已經在線上測試的系統中成功地於地震發生後 10 秒內產生地震預警警報。

本次參加會議希望能藉由彼此交流，了解我方不足之處並學習國外最新技術，學習更多資料處理方法，以達到縮短預警警報發布作業時間的目標。另外，也希望能與國外學者開啟合作機會，增進彼此交流。

二、過程

地震預警國際研討會沒有固定的舉辦時間和地點，完全由參與的成員自發性主辦。過去曾在美國加州理工學院舉辦第 1 屆會議、在日本京都大學舉辦第 2 屆會議，在美國柏克萊大學舉辦第 3 屆會議。此行所參加的是由韓國氣象廳所舉辦的第 4 屆地震預警國際研討會，地點在韓國首爾，會議中有來自美國、義大利、日本、韓國、加拿大、以色列及中國大陸等國家的地震預警專家參與，於會議中提出各國在地震預警研究上最新發展情形，並介紹未來發展方向。圖 1 至圖 7 為研討會期間相關照片。出國行程安排如表 1，於 9 月 4 日下午以「Toward a 10-second earthquake early warning system in Taiwan」為題，介紹氣象局地震預警系統。

表 1、出國行程安排。

日期	地點與簡要說明
9月3日	1. 搭機抵達韓國首爾。 2. 準備會議報告。
9月4日	1. 參加研討會。 2. 於會中報告氣象局地震預警系統近況。
9月5日	參加研討會。
9月6日	1. 參加研討會。 2. 拜訪韓國氣象廳。 3. 搭機返回臺灣。



圖 1、研討會會場外。



圖 2、會議名牌與手冊。

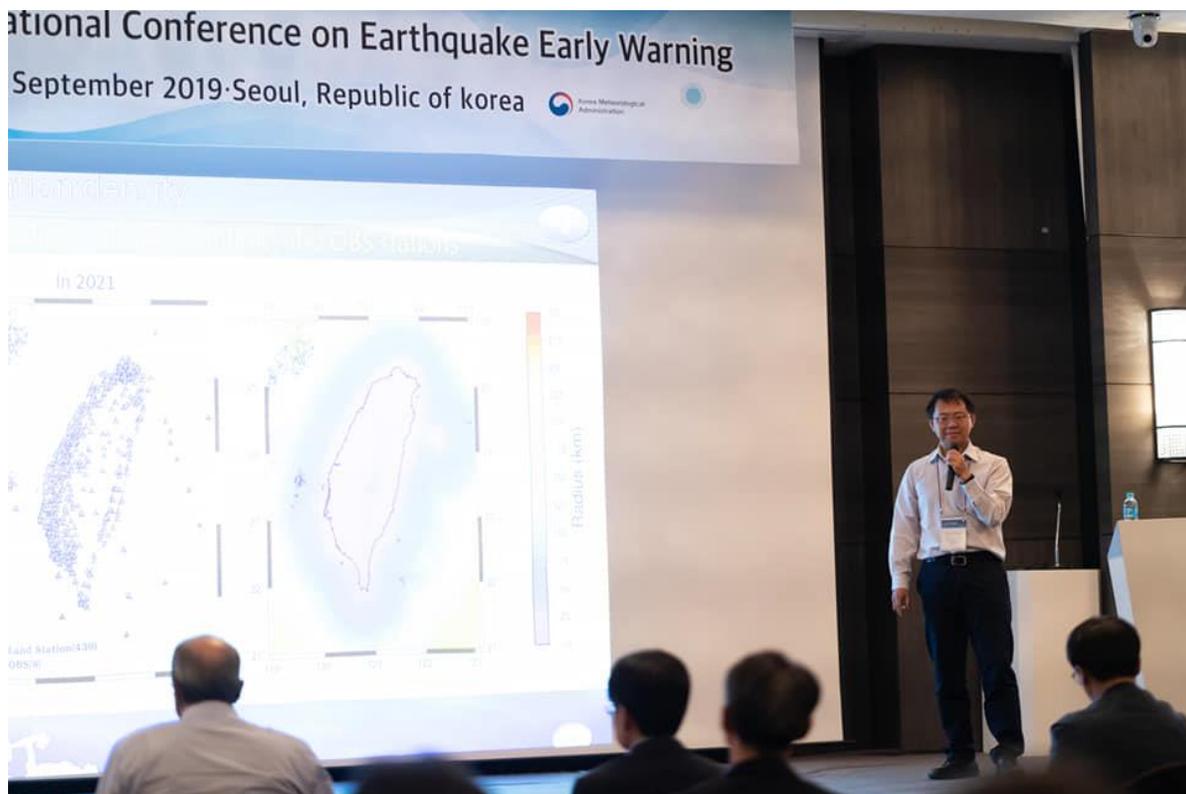


圖 3、氣象局陳達毅技士於會議中介紹氣象局地震預警系統。



圖 4、與會的臺灣地震預警專家。(左 1)國立臺灣大學吳逸民教授；(左 2) 氣象局陳達毅技士；(左 3)國立臺灣科技大學許丁有教授。



圖 5、地震預警座談會。(右 1)以色列教授 Alon Ziv，(右 2)臺灣大學教授吳逸民，(右 3)韓國氣象廳 Duk Kee Lee，(右 4) 柏克萊大學教授 Richard Allen，(左 1)日本氣象廳 Mitsuyuki Hoshiba，(左 2)美國地質調查所 Doug Given，(左 3)義大利拿波里大學教授 Aldo Zollo。



圖 6、地震預警座談會。(左 1) 氣象局陳達毅技士，(右 1) 國立臺灣科技大學許丁有教授。



圖 7、地震預警座談會。(左 1)韓國氣象廳 Jimin Lee 博士，(右 1) 氣象局陳達毅技士。

研討會議程如下：

9.4 (Wed) Afternoon

Time	Session	Program	Presenter
12:00 -	Opening	Desk Opening & Registration	
13:10 - 13:15		Welcome Ceremony (Opening Speech: KMA Vice Administrator)	
13:15 - 13:45	Global Implementation Status	[Keynote] Performance of EEW System in South Korea	Duk Kee Lee (KMA)
13:45 - 14:15		[Keynote] ShakeAlert: U.S. EEW system	Doug Given (USGS)
14:15 - 14:30		[Keynote] Application of the Japanese Earthquake Early Warning Method (IPF method) to the 2018 Hualien earthquake in Taiwan	Masumi Yamada (Kyoto Univ.)
14:30 - 15:00		Coffee Break	
15:00 - 15:15		Implementation status of EEW operated by JMA	Keishi Noguchi (JMA)
15:15 - 15:30		An Earthquake Early Warning System for Canada	David McCormack (NRCan)
15:30 - 15:45		TRUAA - Earthquake Early Warning System for Israel. Implementation and current status	Ran N. Nof (GSI)
15:45 - 16:00		A general introduction of earthquake early warning system in China	Tun Wang (Care-life)
16:00 - 16:15	How to save people from earthquakes	Kazuo Sasaki (Challenge Co, Ltd)	
16:15 - 16:30		Toward a 10-second earthquake early warning system in Taiwan	Da-Yi Chen (CWB)
16:30 - 17:00	Policy Forum	Break Time	
17:00 - 18:00		Chair: Richard Allen	

9.5 (Thu) Morning

Time	Session	Program	Presenter	
9:00 -	Opening	Registration		
9:30 - 10:00	EEW technical Session I	[Keynote] Earthquake Early warning and Rapid Response systems	Richard Allen (UC Berkeley)	
10:00 - 10:15		Earthquake Early Warning system using mobile network and Low-cost MEMS sensor	Young-Woo Kwon (KNU)	
10:15 - 10:30		Deep Learning for Earthquake Detection using Low-cost MEMS sensor	Chul-Ho Lee (Florida Tech)	
10:30 - 11:00		Break time		
11:00 - 11:15		[Seismic Network]	Integration of different observation networks to the IPF hypocenter determination algorithm	Koji Tamaribuchi (JMA)
11:15 - 11:45		-	[Keynote] Development of earthquake early warning and real-time shakemap system low cost sensors	Yih-Min Wu (NTU)
11:45 - 12:00		Fundamental Limits of Ground-Motion Alerts and Warning	Annemarie S. Baltay (USGS)	
12:00 - 13:30		Lunch		

9.5 (Thu) Afternoon

Time	Session	Program	Presenter
13:30 - 14:00		Poster session	
14:00 - 14:30	EEW technical Session II [Strong motion Simulation & Algorithm]	[Keynote] Earthquake Early warning and Rapid Response systems	Aldo Zollo (Naples Federico II Univ.)
14:30 - 14:45		Generic Source Parameter Determination for Earthquake Early Warning	Alon Ziv (Tel Aviv Univ.)
14:45 - 15:00		Newest developments in small-aperture arrays for earthquake early warning	Andreas S. Eisermann (Tel Aviv Univ.)
15:00 - 15:15		Realtime generic algorithms for backazimuth-based location and model-based ground motion prediction: Case study in the Gujarat region, India	Gilles H. Wust-Bloch (Tel Aviv Univ.)
15:15 - 15:30		Improvement of the PLUM earthquake early warning algorithm by introducing P-waves and distance attenuation relations	Yuki Kodera (JMA)
15:30 - 15:45		Retrospective and Real Time Event Detection Performance of the PLUM Earthquake Early Warning Algorithm on the West Coast of the United States	Annemarie S. Baltay (USGS)
15:45 - 16:15		Coffee Break time	
16:15 - 16:30		Matching waveform envelopes for earthquake source parameter determination	Becky Roh (Caltech)
16:30 - 17:00		[Keynote] Numerical shake prediction: Data assimilation and wave propagation simulation	Mitsuyuki Hoshiba (JMA)
17:00 - 17:15		Introduction of a forward scattering model into the Numerical Shake Prediction Scheme: the 2016 Kumamoto earthquake	Masashi Ogiso (JMA)
17:15 - 17:30	Estimating fault geometry from strong motion data for the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake	Xiao Ying (IEM CEA)	

9.6 (Fri) Morning

Time	Session	Program	Presenter
9:00 -	Opening	Registration	
9:30 - 9:45	EEW technical Session III [Public alert service]	Automated procedure for Vs30 estimation using P-wave seismograms	Byungmin Kim (Unist)
9:45 - 10:00		Preliminary study of on-site EEW for agricultural reservoir	Sung-Keun Lim (KRC)
10:00 - 10:15		A Study on onsite earthquake early warning methodology in South Korea	Ho-jun Lee (KIT Velly)
10:15 - 10:30		Break Time	
10:30 - 10:45		Rapid determination of the earthquake magnitude based on PGA-per-second data from a single station	Kwan-Hee Yun (KEPRI)
10:45 - 11:00		Good korail Navigation	Joon-Sun Kim (KORAIL)
11:00 - 11:15		CBS based Public Warning System	Gab-Seoung Park (SKTelecom)
11:30 -		KMA Technical Tour	

三、美、日、韓地震預警技術介紹

參與研討會過程中，學習內容分述如下：

(一) 美國加州柏克萊大學發展智慧型手機 APP 建構全世界的地震預警系統：

使用者下載 APP 之後(如圖 8 所示)，可將記錄到的地動資料傳送到柏克萊大學的資料中心，經過處理，得到地震資訊後，就能夠將地震資訊再發送給使用者。由於智慧型手機在記錄資料時常常在移動中，導致人為的干擾情形十分嚴重，為了分辨地震訊號與人為雜訊，他們採用人工智慧的方法，準確地分辨這兩類訊號，成功率可達 93%(如圖 9 所示)。該系統缺點是，此 APP 在運作時所需耗電量大，不容易為一般民眾所接受，故該 APP 推廣不易。

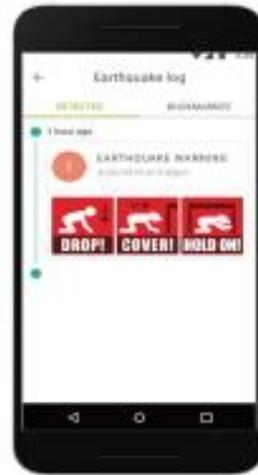
MyShake 2.0



Realtime earthquake information around the globe



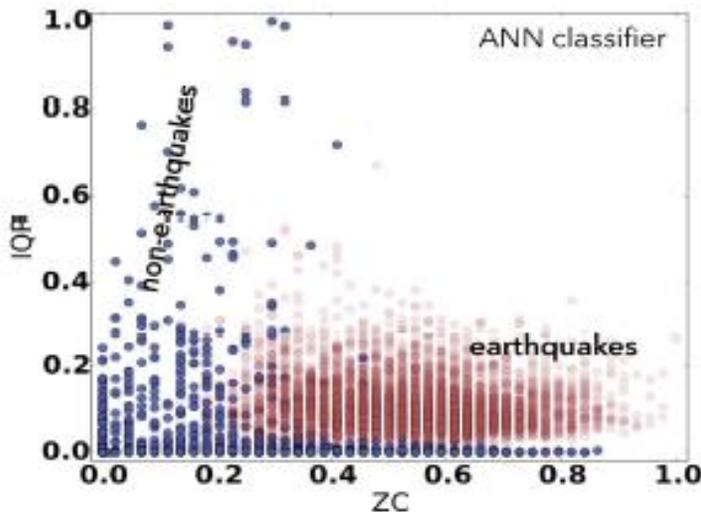
Detailed damage information reported by users



Early warning delivery (ShakeAlerts in testing, public alerts fall 2019)

圖 8、智慧型手機 APP。

Distinguishing earthquakes from other shakes *on a phone*



- Identify key characteristics measured from 2 second windows of data
- Neural Network trained to classify activity

93% success rate on the phone

Then send earthquake trigger into the MyShake cloud

Kong et al., Sci. Adv. 2016

圖 9、以類神經網路模型分辨地震訊號。

(二) 日本氣象廳的地震預警系統研究：

日本地震預警系統從 2007 年開始對一般民眾提供地震預警警報以來，一直成效卓著，且深受世界矚目。經過幾次大地震的考驗之後，該系統也不斷地從錯誤中學習。2011 年 311 東日本大地震之時，地震預警系統對於關東地區的震度預估與實際觀測值有明顯誤差，因此在地震之後，日本地震預警系統在原有的點震源的模型上多加了 1 個方法，用來預估即時的震度，此方法稱為 PLUM 法(Propagation of Local Undamped Motion) (如圖 10 所示)。2016 年熊本地震之後，引起非常多的餘震，有些餘震是在不同地區幾乎同時發生。當時的預警系統常常將兩個幾乎同時發生的地震誤認為是來自同一個地震，造成預估的地震規模比實際觀測值大很多。為了解決此問題，在解算地震參數時引進了一套新的方法，此方法稱為 IPF 法(Integrated Particle Filter)。另外，由於日本的災害性地震有一部分是發生在外海，於是今年(2019)日本也將海底電纜式的地震儀資料加入到地震預警系統的運作中(如圖 11 所示)。

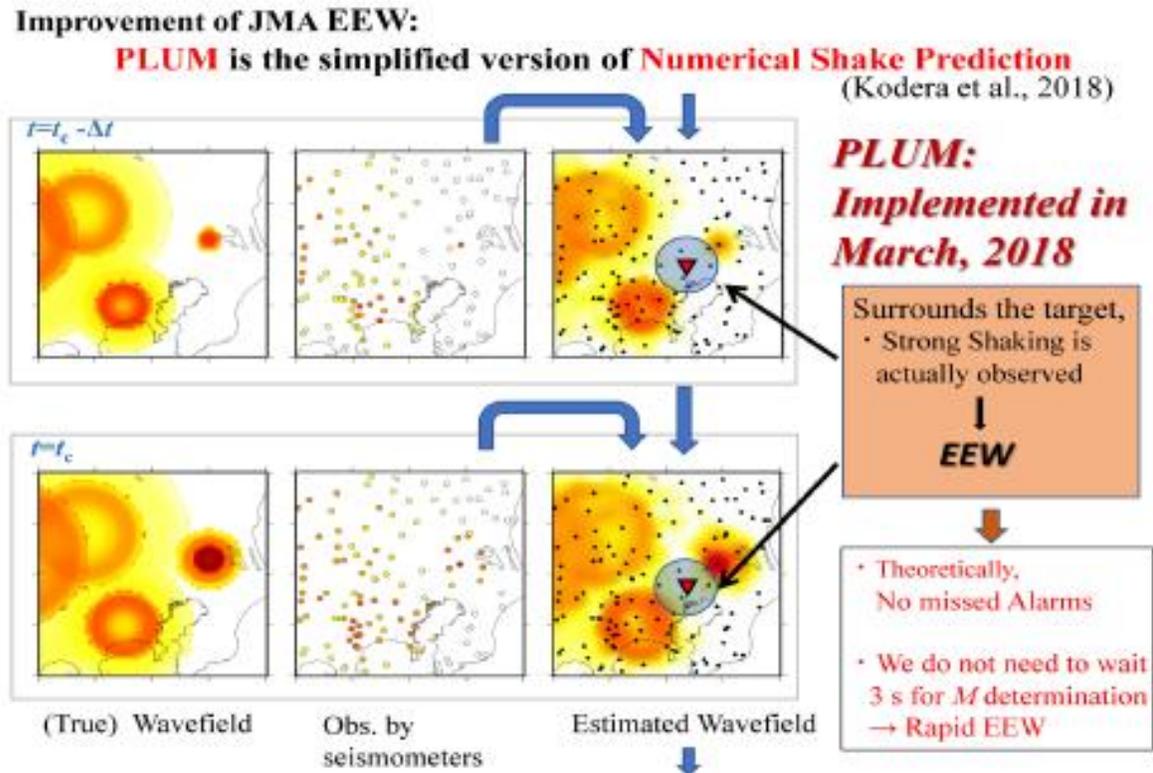


圖 10、PLUM 方法。

Incorporation of OBS in JMA EEW: from June 2019

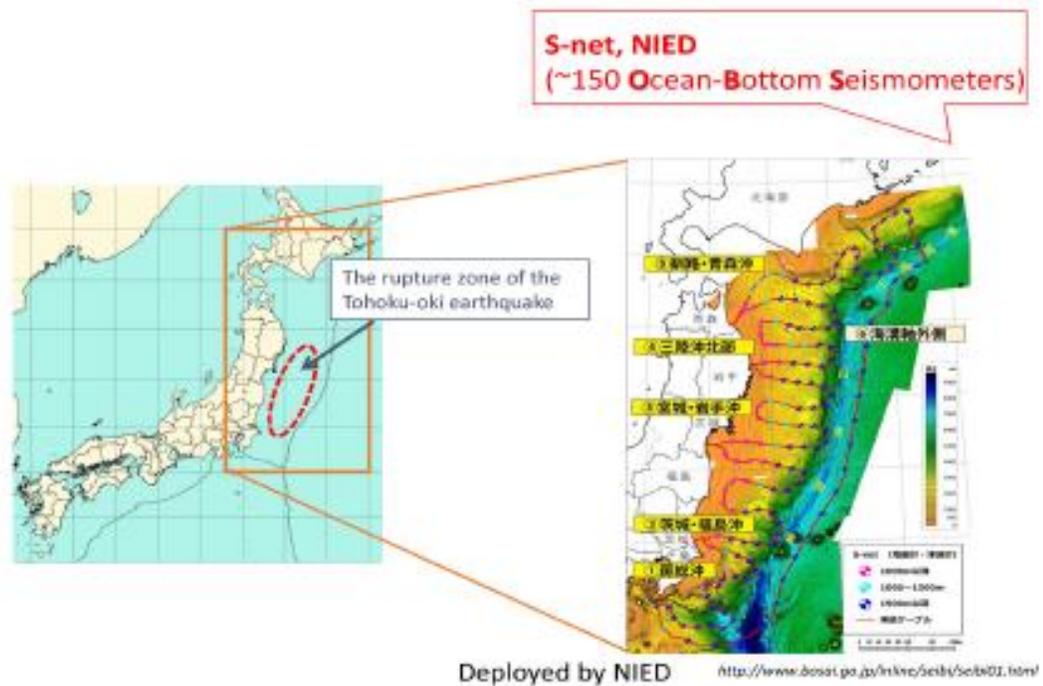


圖 11、海纜系統觀測資料加入地震預警系統中。

(三) 韓國地震預警系統導入低價位地震儀：

低價位地震儀具有成本低廉、容易布置的優點，因此為了構建高密度的地震觀測網，有許多國家紛紛採用低價位地震儀。目前韓國慶北大學已經布置 300 個監測器，並即時接收訊號至資料中心。未來若發展成熟，將與韓國地震觀測網整合，提供地震預警系統更高密度的觀測資料(如圖 12、13 所示)。

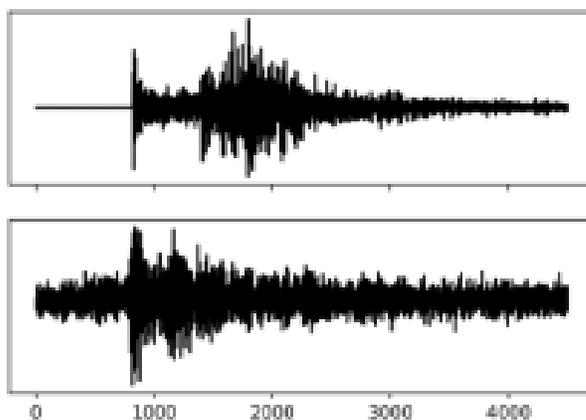


圖 12、上圖為傳統地震儀所紀錄到的波形，下圖為低價位地震儀所紀錄到的波形。



圖 13、使用智慧型手機當作監測器。目前共運作 300 站。

(四) 京都大學山田教授將日本氣象廳的 IPF 方法運用在臺灣地震紀錄上：

IPF 是一套能夠快速地將地震波相資料分群並且進行定位的方法。為了測試該方法除了在日本之外，是否能用於其他國家的地震紀錄，京都大學山田真澄教授與氣象局合作，選取 2018 年芮氏規模 6.2 花蓮地震紀錄進行測試。結果顯示，在不考慮資料傳輸所造成的延遲之下，IPF 法可以在地震發後約 7 秒發佈地震警報(如圖 14 所示)，而且對於發生時間很接近的 2 個前震也能夠很正確地區分，並個別發布警報。

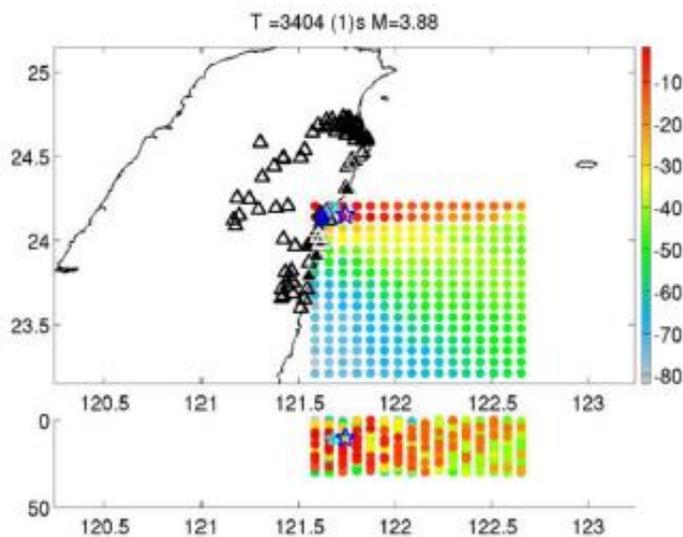


圖 14、IPF 法運用於 2018 年芮氏規模 6.2 花蓮地震。

四、氣象局地震預警系統現況與未來發展

氣象局地震預警系統從 2014 年上線開始服務以來到 2018 年底，若僅考慮規模大於 5.0 且深度小於 40 公里的地震，共計發布 91 次地震警報，其中島內地震平均在地震發生後 15.4 秒發出警報，島外地震平均在地震發生後 23.1 秒發出警報。整體而言，此系統自運作以來相當穩定，沒有發布任何錯誤警報，島內地震的定位誤差約 3 公里，規模誤差約 0.3 (如圖 15 所示)。

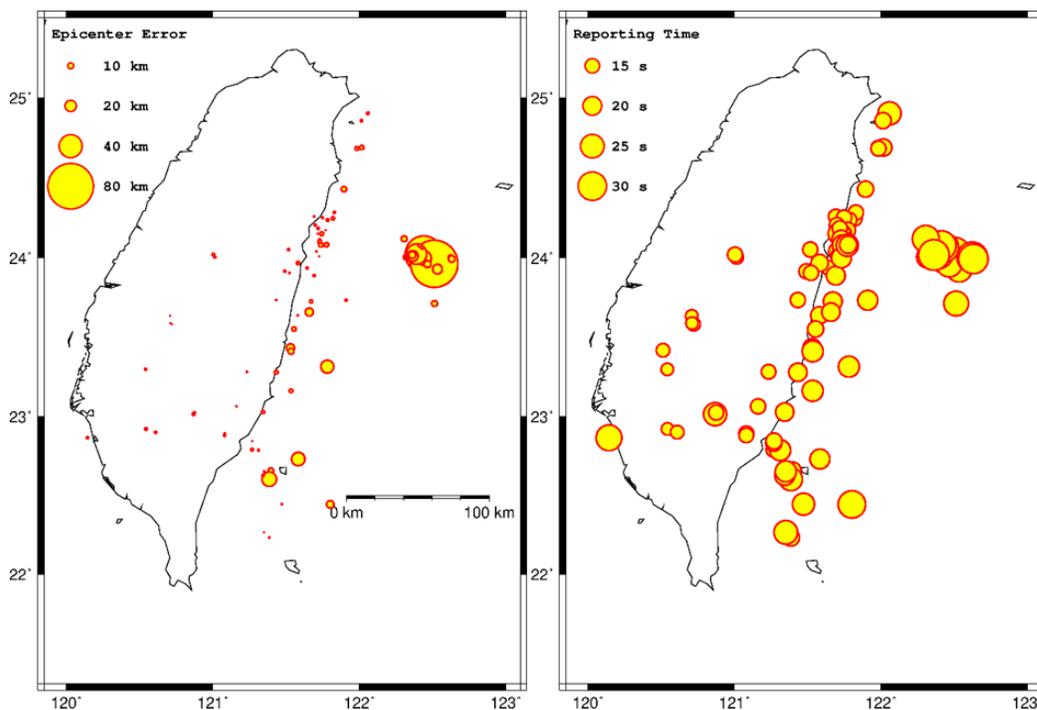


圖 15、2014 年至 2018 年地震預警系統效能。左圖為震央誤差，右圖為警報時間。

目前的地震預警系統雖然穩定，但是在預警時間上仍有進步空間。此系統可以在地震發生後約 15.4 秒發布警報，相當於距離震央約 50 公里以外的地區，才有機會於破壞性的地震波抵達前獲得地震警報。與世界上其他國家比較，除了日本的地震系統之外，無論是美國加州，或是大陸福建地震局的地震預警系統，(如圖 16 與圖 17 所示)，其測試結果皆顯示部分地震網內地震的地震預警時間可以縮短至 10 秒以內。若能將預警時間縮短至 10 秒內，將可以對距離震央 35 公里以外地區提供預警，也可以對於較靠近震央的重災區提供數秒寶貴的預警時間。因此，盡快將地震預警時間縮短至 10 秒內，是當前刻不容緩的工作。

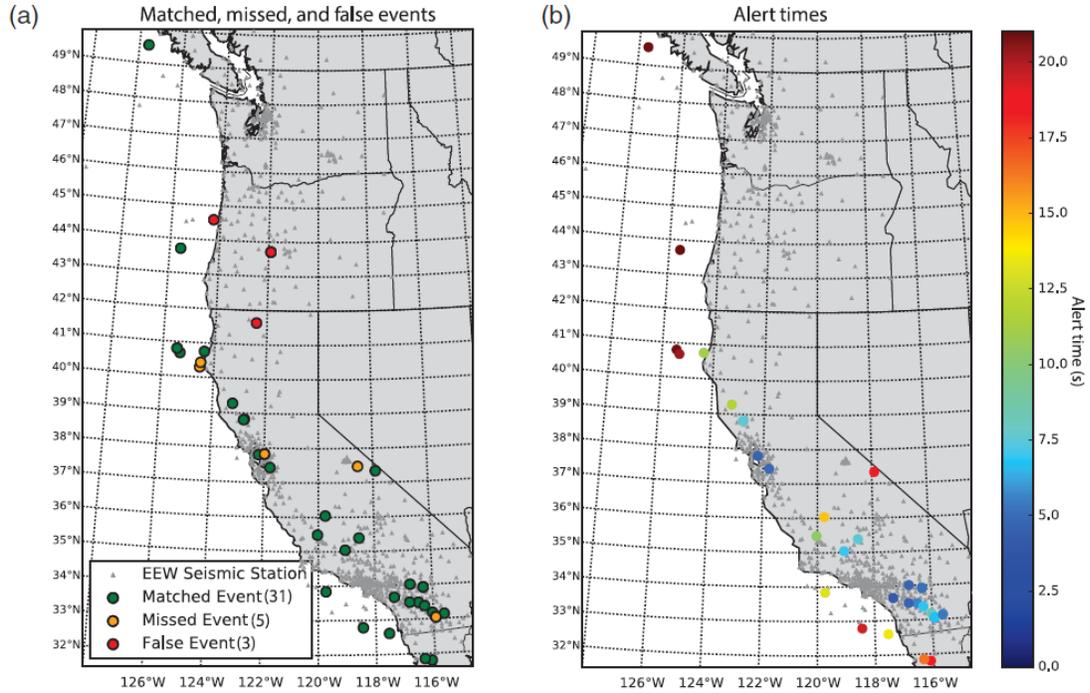


圖 16、美國加州地震預警效能(Chung et al., 2019)。左圖顯示系統偵測能力，右圖顯示地震預警時間。

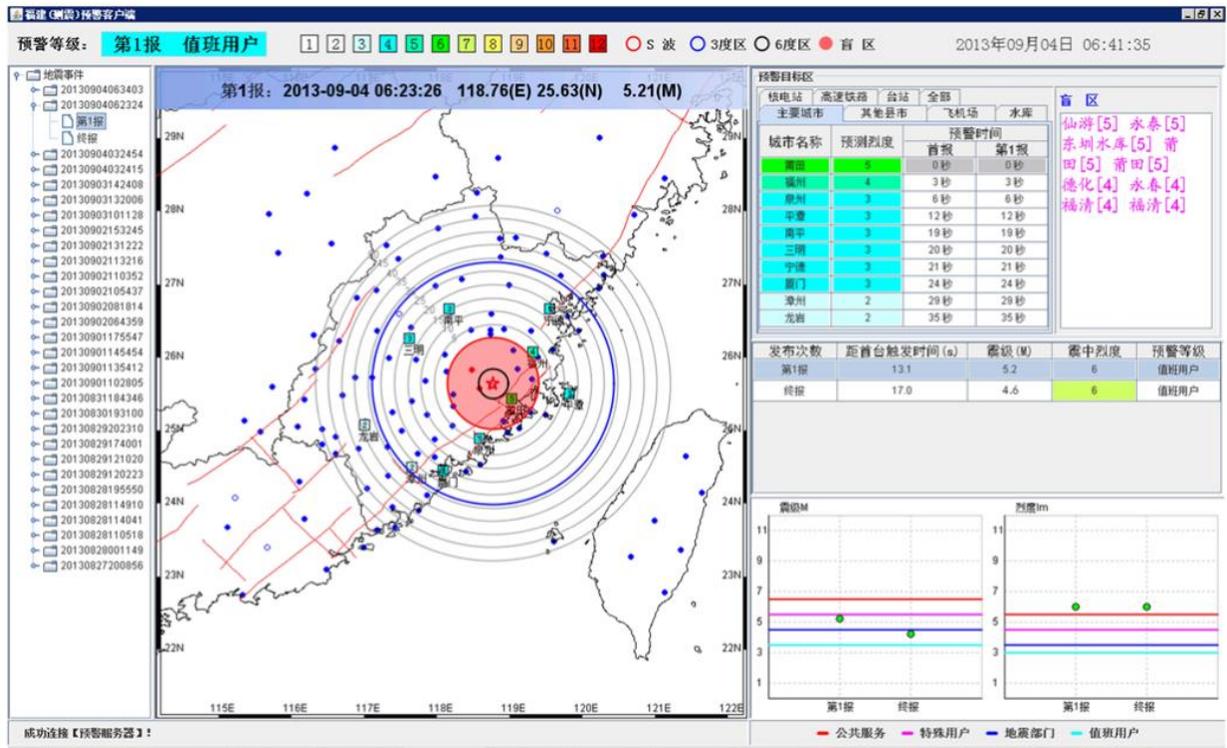


圖 17、大陸福建地震局地震預警系統案例展示。該系統於地震發生後 8.6 秒發布地震警報。

近年來氣象局積極地提高地震觀測網密度、簡化預警系統運算流程，並且改變預警模式，使得在地震發生後 10 秒內發布地震警報成為可能。圖 18(左)為現階段地震預警系統所使用的地震觀測網，總計約有超過 200 個地震站;圖 18(右)為未來地震預警系統所使用的地震觀測網，總計約有將近 500 個地震站。圖 19 為這兩個觀測網的測站密度評估。由 0.1 度*0.1 度大小的顏色方格組成，每一格代表若地震發生於此，至少需要多少公里的半徑，才能夠有 5 個以上的觀測站接收到資料。提高觀測網密度是縮短預警時間最有效且可靠的作法。以圖 5 中最亮的紫色範圍為例，顯示當地震發生於此區域時，所需的半徑約為 10 公里，表示在地震發生之後約 3 秒鐘後就能夠有 5 個以上測站接收到地震訊號，另外，為了計算地震規模，至少再多等待 2 秒鐘的資料，並加上約 1 至 2 秒的資料傳輸延遲時間，及 1 至 2 秒的資料處理時間，總計約需 9 秒就可以發出地震警報。

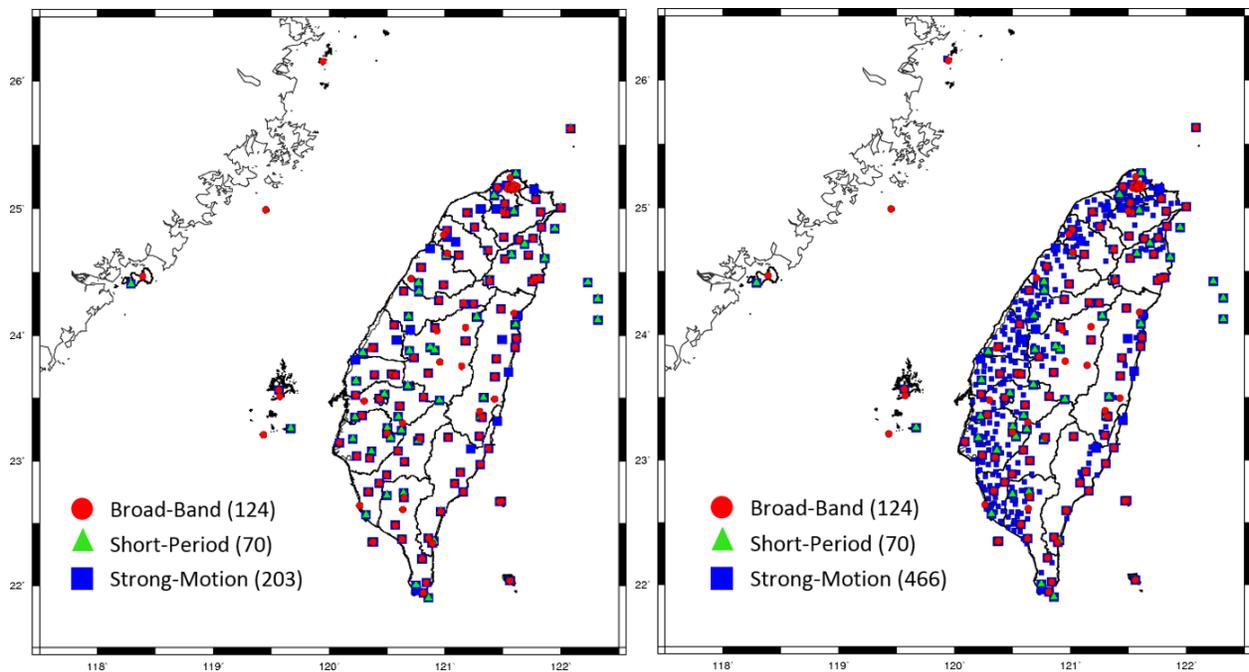


圖 18、地震站分布圖。不同符號代表不同型態地震儀。左圖為現階段地震預警系統所使用的地震觀測網，右圖為未來地震預警系統所使用的地震觀測網。

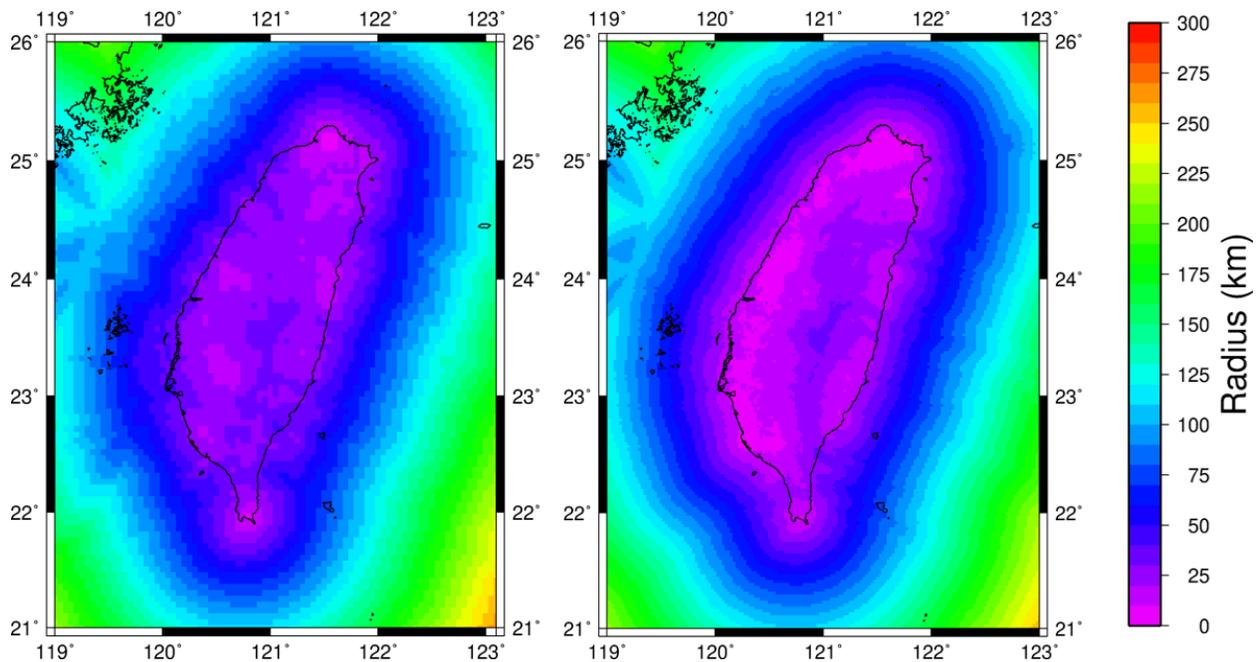


圖 19、觀測網密度評估，由 0.1 度*0.1 度大小的顏色方格組成，每一格代表若地震發生於此，至少需要多少公里的半徑，才能夠有 5 個以上的觀測站接收到資料。其中最亮的紫色範圍顯示所需的半徑約為 10 公里。左圖為現階段地震預警系統所使用的地震觀測網。右圖為未來地震預警系統所使用的地震觀測網。

在簡化預警系統運算流程方面，採用幾何中心法決定震央，取代傳統的定位方式，並且將深度固定於 10 公里處。傳統定位方法需考慮走時殘差，並要求走時殘差的方均根必須小於 0.8，當觸發測站的數量不足且地下速度模型不夠精確時，往往需要等待更多的資料才有機會通過這個門檻，因此使用傳統地震定位方法須耗費相當多時間才能獲得地震參數。採用幾何中心法的優點是，可以在記錄到足夠數量的 P 波到時之後，快速地決定震源位置，並據此推算地震規模及各地的地震震度(如圖 20 所示)。

在改變預警模式方面，採兩階段作業方式，地震發生之後，蒐集最靠近震央的 4 個觀測站資料，採用幾何中心法做第 1 階段的預警作業，接下來再採用傳統的方法做第 2 階段的預警作業。若第 2 階段的預警作業結果與第 1 階段比較有顯著的差異，則發布更新報，反之則無(如圖 21 所示)。其中於進行第 1 階段時，為了避免誤報可以限制觀測到的振幅必須到某個門檻。一般而言，第 1 階段作業所預估的震度結果可能低估或是與實際觀測相近，到了第 2 階段得到較準確的震度資訊後，可以視情況再決定是否發布地震預警更新

報。圖 22 與圖 23 顯示此兩階段方法於 2019 年 8 月至 10 月的線上測試結果。

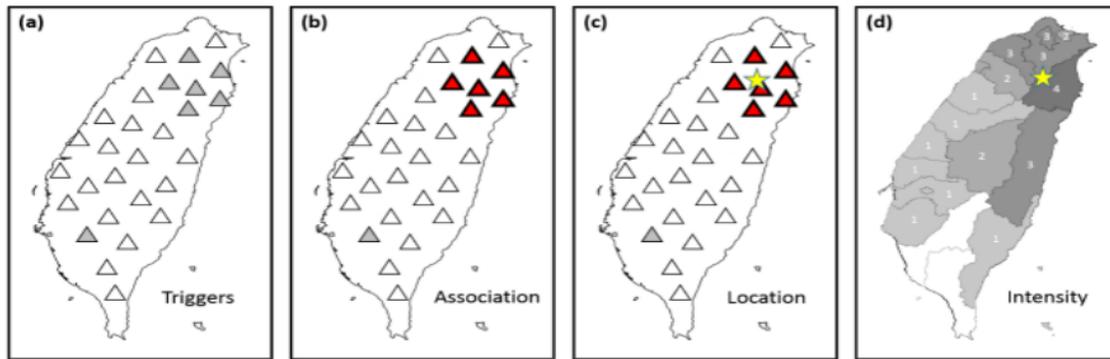


圖 20、幾何中心法運用於地震預警系統示意圖。圖(a)中灰色三角形表示觸發測站，圖(n)中紅色三角形表示經考慮空間和時間的群集性後，所選取的觸發測站，圖(c)取所有觸發測站位置的幾何中心當作震央，深度定為 10 公里，圖(d)根據震源位置決定地震規模與地震震度。

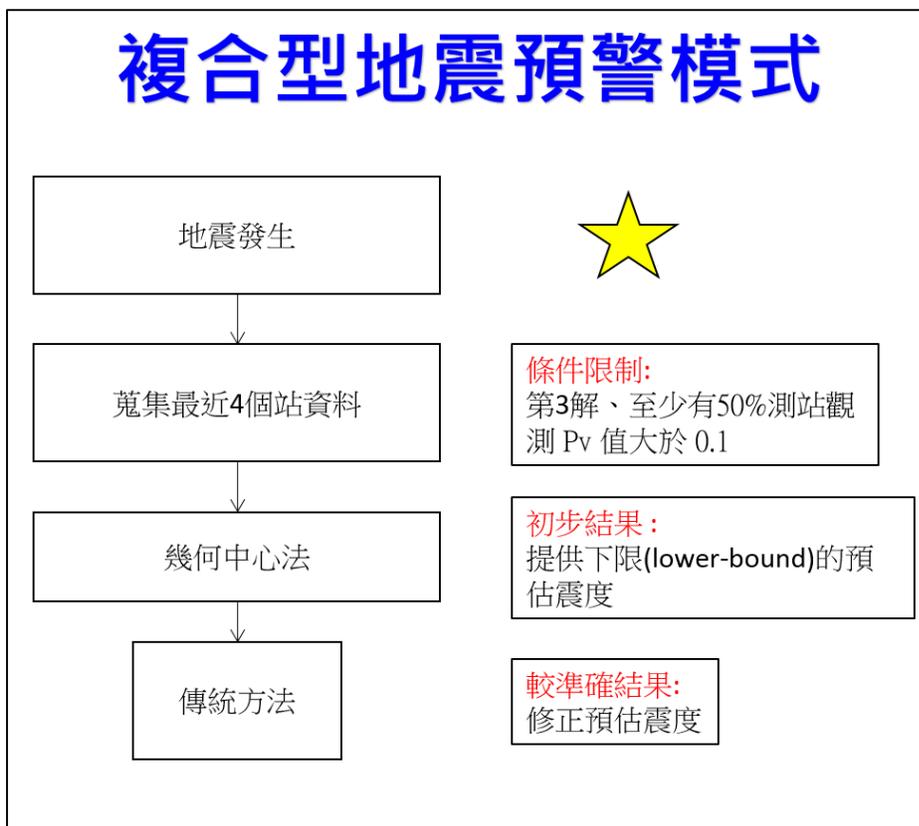


圖 21、複合型地震預警模式示意圖。採兩階段作業方式，地震發生之後，蒐集最靠近震央的 4 個觀測站資料，採用幾何中心法做第 1 階段的預警作業，接下來再採用傳統的方法做第 2 階段的預警作業。若第 2 階段的預警作業結果與第 1 階段比較有顯著的差異，則發布更新報，反之則無。

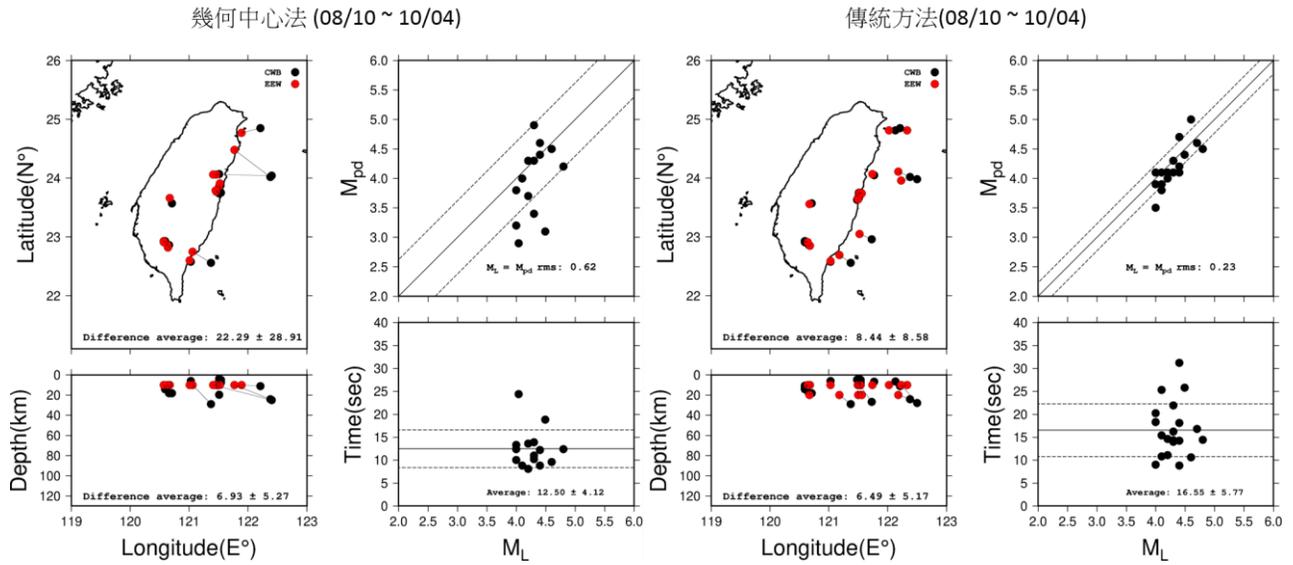


圖 22、地震預警效能比較。其中紅色實心圓代表人工處理所得到的地震位置，黑色實心圓代表地震預警系統所得到的地震位置。資料選取條件為：2019 年 8 月 10 日至 10 月 4 日，規模大於 4.0 且深度小於 40 公里。左圖為採用幾何中心法，右圖為採用傳統方法。

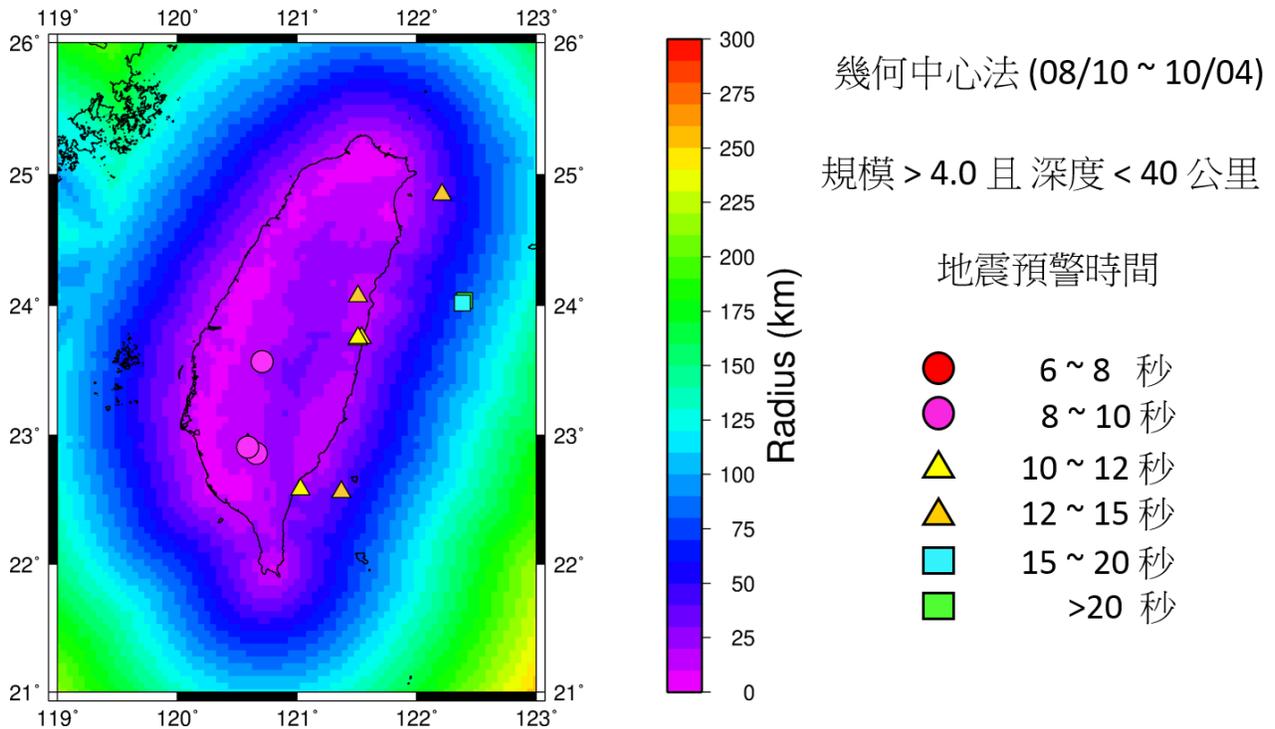


圖 23、幾何中心法的預警時間分布圖。不同的符號代表地震發生之後需多久能夠發布地震警報。平均而言，島內地震地震預警時間為 10.7 秒，島外地震為 16.2 秒。

五、心得及建議

參與此次會議，深深感覺到各國的地震預警系統在短短數年內有長足的進步。無論是地震觀測網的建置，或是地震預警系統的研究，都令人印象深刻。氣象局地震預警系統自 2014 年運作以來，一直保持穩定可靠的優點，唯獨在預警警報發布作業時間上仍有些進步空間。所幸，近年來的研究成果顯示，運用新的地震預警模式能夠再縮短此作業時間，可望達到地震發生後 10 秒內發布預警警報的目標。

地震預警技術日新月異，參與此會議能夠增加與世界各國科學家交流與討論的機會，也可以帶回有實質意義的技術或想法，藉此提升我國於這方面的能力。此行參加地震預警國際研討會深刻地感受到地震預警作業還有些地方可以做得更好，所提供的警報資訊也可以更精緻化，傳遞的對象除了一般民眾之外，也可以針對特別重要的公共建設予以客製化，以提升地震預警系統的服務水準。心得建議如下：

- (一) 持續加密山區地震觀測站並提升資料品質：目前氣象局的即時地震觀測站的數量已經將近 500 個，但是仍有部分地區因設置較不容易導致測站分布較為稀疏，若能在這些地方增加地震觀測站，將可以再縮短預警警報發布作業時間。另外，長期以來有許多地震觀測站訊號品質不良，不但影響地震預警系統的可靠性，也增加系統作業時間。因此在地震觀測網的改進上面，若能一方面增加測站密度，一方面汰弱留強，對於地震預警系統未來發展將有很大助益。
- (二) 整和微機電低價位地震觀測網：臺灣大學地質科學系在全臺灣建置 700 多個微機電的低價位地震站，目前已經將資料即時傳輸至氣象局，未來若能將此觀測資料與氣象局現有的觀測資料整合，將可以大大地提升地震觀測網的密度，有助於縮短地震預警警報發布作業時間。
- (三) 建立機器學習模型，辨識地震訊號：機器學習技術日趨成熟，許多過去很難處理的問題，現在透過此技術可以很簡單且有效地解決。特別是影像分析和自然語言處理上，機器學習技術已經取得輝煌的成果。地震訊號的辨識，與影像分析和自然語言處理等問題相似，因此希望能引進這方面的技術，以突破目前地震預警系統的發展瓶頸。
- (四) 建立井下地震站與海底電纜觀測站的規模修正公式：井下地震儀與海纜資料目前只用於地震定位，並未使用其振幅資料計算地震規模。當地震發生時還是需要等到足夠

數量的地表地震儀資料，才能夠提供地震規模，如此將使地震預警系統作業時間難以縮短。因此，若能建立井下地震站與海底電纜觀測站的規模修正公式，就可以加入更多的資料於地震規模計算，有助於縮短地震預警警報發布作業時間。

(五) 建立地震預警研究團隊：日本氣象廳在地震預警系統的日常工作中，主要負責系統的運作與維護，另外同樣隸屬於日本氣象廳的氣象研究所，則負責地震預警系統的研究與開發。如此分工，使得作業人員可以專心於系統操作與維護，而研究人員可以專心於系統研發工作。目前氣象局在人力有限的情況下，地震預警系統的操作、維護與研發等工作都集中於少數人身上，如此不僅無法專心投入研發工作，也無法做到經驗傳承，不利於地震預警系統未來長遠發展。

(六) 加強與日本交流地震預警技術：氣象局從今年起聘請日本京都大學山田真澄教授為地震預警技術方面的顧問，開啟了氣象局與日本交流與學習的契機。山田教授參與日本氣象廳地震預警相關研究，有十分豐富的經驗。在參加此研討會前，山田教授即著手研究是否可以使用日本氣象廳所採用的地震預警方法於氣象局資料上。其初步結果顯示此方法可以縮短地震預警系統處理時間，也可以分離短時間內密集發生的地震事件。因此，建議未來仍需繼續保持合作關係，才能藉此吸取日本在地震預警技術方面的經驗。

(七) 加強與中國大陸交流地震預警技術：中國大陸福建省地震局近年來投入大量人力及物力於地震預警研究工作，已經取得顯著的成果。從 2018 年開始對一般民眾發布地震預警警報以來，多次成功地於第一個觀測站觸發後 5 至 10 秒產出地震預警。由於中國大陸福建省與臺灣的地理位置相近，將來若能安排訪問交流，讓彼此相互觀摩學習地震預警技術，將有助於氣象局持續發展地震預警系統。