

交通部中央氣象局  
委託研究計畫期末成果報告

速報及預警系統中隨時變之地震規模制定  
**Time dependent earthquake magnitude determination in  
early warning system**

計畫類別：氣象    海象    地震

計畫編號：MOTC-CWB-102 - E - 03 -

執行期間：102 年 1 月 1 日至 102 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳逸民

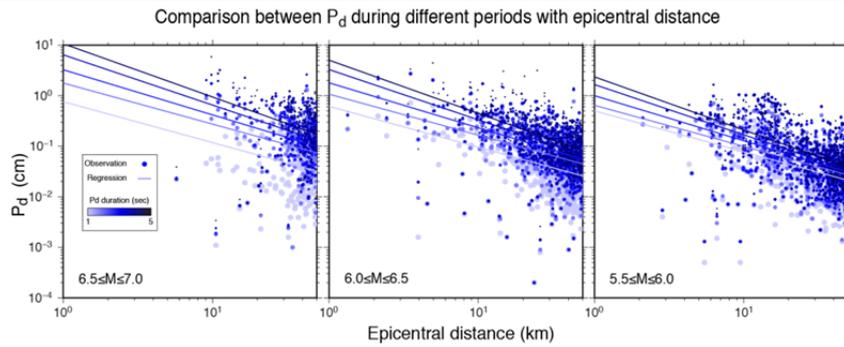
執行機構：國立台灣大學 地質科學系

中華民國 102 年 10 月 24 日

## 政府研究計畫期末報告摘要資料表

計畫中文名稱	速報及預警系統中隨時變之地震規模制定		
計畫編號	MOTC-CWB-102-E-03		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立臺灣大學 地質科學系		
年度	102	執行期間	102/01/01-102/12/31
本期經費 (單位：千元)	950		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100	100	
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
	950	950	100
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳逸民		李柏寬
			林樞衡
			陳璽安
報告頁數		使用語言	中文
中英文關鍵詞	餘震、餘震規模 Gutenberg-Richter law、Omori's law		
研究目的	<p>地震測報的過程中，對於規模的制訂，可以分為預警、速報、海嘯及災害評估等三個階段。地震發生約 30 秒內為預警階段，需要利用初期訊號，主要以 P 波為主，估算規模。地震發生約 30 秒至兩分鐘內為速報階段，芮氏規模 (<math>M_L</math>) 常被使用，主要用於估算震度分布圖。對於地震發生兩分鐘後為海嘯及災害評估階段，前兩者規模的估算，都有可能低估了大地震的規模，導致海嘯及災害評估的低估，而影響防救災，這也是也是一項重要課題。</p> <p>一般地震監測常用芮氏規模 (<math>M_L</math>) 來估算地震的大小，近年來地震矩規模 (<math>M_w</math>) 也常被使用，然而這兩種方法都需要用到最大振幅的訊號，不符合地震預警的需求，因此，Nakamura (1988) 首先使用 P 波的顯著頻率來估算規模。Wu 等人 (1998) 提出 <math>M_{L10}</math> 方法可以在地震發生後約 20 秒可靠地估算地震規模，因此，開啟了臺灣地震預警的發展 (Wu and Teng, 2002)，為了爭取更多的時間，一系列的 P 波方法被開發來估算地震規模 (Allen and Kanamori, 2003; Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005; Wu and Zhao, 2006)，然而，使用 P 波方法</p>		

	<p>達到快速之規模測定功效，亦伴隨較大之誤差，且有潛在低估大地震規模的危險性。相對地，若用長時窗，預警的時間就會減少。在過去考慮能分辨規模 <math>M_w 6.5</math> 的地震，我們採用 P 波後三秒的訊號 (Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005)。然而，仍須許多站的量測值，方能降低不確定度。因此，離震央最遠的測站也許只有三秒的訊號，但是，靠近震源的測站可能有更多的訊號，卻沒有使用。因此，若加入時間因子，則可以得到最適化的處理，比較遠的測站，用短的時窗，近的測站，則可以用長時窗。一般所得到的特徵值例如 <math>P_d</math> 與規模 (<math>M_w</math>) 的關係式如下：</p> $M_w = a + b \log(P_d) + c \log(r) \quad (1)$ <p>其中 <math>r</math> 為震源距離，<math>a</math>、<math>b</math>、<math>c</math> 為回歸常數。然而，在此關係式中，並無考量不同時窗對於規模判定的效應。因此本研究期望藉由此模式整合不同時窗的特徵值，以達到快速穩定的特性，並且在不同的時間更新不同的地震規模。</p>
<p>研究成果</p>	<p>根據 <math>P_d</math> 之觀測結果中顯示 (圖二)，在相同地震規模 (<math>M</math>)、地震與測站震央距 (<math>r</math>) 之前提，長時窗 (如：<math>P_{d5}</math>，深藍圓圈) 較短時窗 (如：<math>P_{d1}</math>，淺藍圓圈) 之振幅更大。當進一步利用式 (1) 以最小平方法 (least square) 回歸各時窗與其他參數之間關係，得到 (圖二各回歸線)：</p> $\log(P_{d1}) = -1.354 + 0.183M - 0.810 \log(r) \pm 0.443 \quad (2)$ $\log(P_{d2}) = -2.708 + 0.438M - 0.812 \log(r) \pm 0.427 \quad (3)$ $\log(P_{d3}) = -2.944 + 0.512M - 0.891 \log(r) \pm 0.428 \quad (4)$ $\log(P_{d4}) = -3.172 + 0.590M - 0.994 \log(r) \pm 0.438 \quad (5)$ $\log(P_{d5}) = -3.386 + 0.654M - 1.053 \log(r) \pm 0.431 \quad (6)$ <p>根據回歸結果發現，<math>P_{d1}</math> 之規模項係數 (0.183) 明顯較其他時窗小。此結果將造成推估規模時之不穩定性，不利實務上之應用。此外，除了 <math>P_{d1}</math> 以外，<math>P_{d2}</math> 至 <math>P_{d5}</math> 在相同條件下似乎呈現等差級數的變化。此現象可能是由於 P 波到達 1 秒之內與隨後之地震物理特性相異。因此，以下討論僅採用 <math>P_{d2}</math> 至 <math>P_{d5}</math> 之資料。</p>



圖二、(a) 規模 6.5 至 7.0、(b) 規模 6.0 至 6.5、(c) 規模 5.5 至 5.0 地震觀測記錄中震央距與不同時窗長度的最大振幅比較圖。不同顏色代表不同時窗長度；圓圈代表觀測值；線段代表各時窗之回歸最佳解。

根據式 (3) 至 (6)，得知時窗之因子對於規模判定的影響。為了進一步量化時窗與規模之間關係，我們將回歸式中加入時窗因子 ( $d$ )，分別假設該因子與其他參數呈現線性、對數，以及自然對數關係。得到：

$$\log(P_d) = -3.310 + 0.540M - 0.940\log(r) + 0.090d \pm 0.432 \quad (7)$$

$$\log(P_d) = -3.350 + 0.540M - 0.940\log(r) + 0.294\log(d) \pm 0.479 \quad (8)$$

$$\log(P_d) = -7.711 + 1.244M - 2.164\log(r) + 0.676\ln(d) \pm 1.560 \quad (9)$$

結果顯示時窗因子與其他參數為線性關係時，有著最小之標準差。

具體落實應用情形	
計畫變更說明	(若有)
落後原因	(若有)
檢討與建議 (變更或落後之因應對策)	

(以下接全文報告)

# 速報及預警系統中隨時變之地震規模制定

吳逸民 詹忠翰

國立台灣大學 地質科學系

蕭乃祺 李柏寬

中央氣象局地震測報中心

## 摘要

大地震發生後，精確的規模判定有助於增進防救災的成效。尤其在地震速報及預警系統中，地震預警需要及早決定規模；然而地震初期所決定的規模，不確定度大並且大地震會有低估的情形。因此，本計畫加入時間因子在地震規模的制訂，探討不同時間階段最佳的規模制訂方法。

Earthquake magnitude is a key parameter for seismic monitoring and hazard mitigation especially for early warning system. However, magnitude determination from earthquake initial signals is generally with large uncertainty. In addition, large earthquakes may have magnitude saturation problem. It seriously affects earthquake damage estimation and rescue actions. Thus, time factor should be included in magnitude determination for early warning system. In this project, we propose an updating earthquake magnitude determination through considering proper magnitude determination methods for different time windows.

## 一、背景分析

地震測報的過程中，對於規模的制訂，可以分為預警、速報、海嘯及災害評估等三個階段。地震發生約 30 秒內為預警階段，需要利用初期訊號，主要以 P 波為主，估算規模。地震發生約 30 秒至兩分鐘內為速報階段，芮氏規模 ( $M_L$ ) 常被使用，主要用於估算震度分布圖。對於地震發生兩分鐘後為海嘯及災害評估階段，前兩者規模的估算，都有可能低估了大地震的規模，導致海嘯及災害評估的低估，而影響防救災，這也是一項重要課題。

一般地震監測常用芮氏規模 ( $M_L$ ) 來估算地震的大小，近年來地震矩規模 ( $M_w$ ) 也常被使用，然而這兩種方法都需要用到最大振幅的訊號，不符合地震預警的需求，因此，Nakamura (1988) 首先使用 P 波的顯著頻率來估算規模。Wu 等人

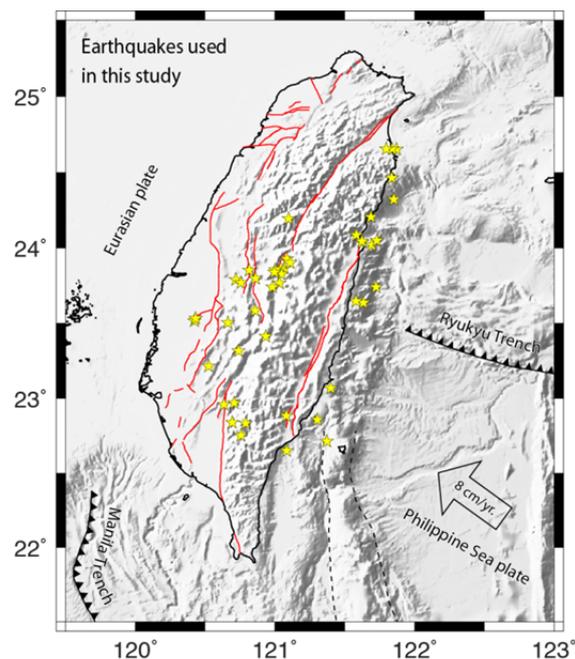
(1998) 提出  $M_{L10}$  方法可以在地震發生後約 20 秒可靠地估算地震規模，因此，開啟了臺灣地震預警的發展 (Wu and Teng, 2002)，為了爭取更多的時間，一系列的 P 波方法被開發來估算地震規模 (Allen and Kanamori, 2003; Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005; Wu and Zhao, 2006)，然而，使用 P 波方法達到快速之規模測定功效，亦伴隨較大之誤差，且有潛在低估大地震規模的危險性。相對地，若用長時窗，預警的時間就會減少。在過去考慮能分辨規模  $M_w 6.5$  的地震，我們採用 P 波後三秒的訊號 (Kanamori, 2005; Wu and Kanamori, 2005)。然而，仍須許多站的量測值，方能降低不確定度。因此，離震央最遠的測站也許只有三秒的訊號，但是，靠近震源的測站可能有更多的訊號，卻沒有使用。因此，若加入時間因子，則可以得到最適化的處理，比較遠的測站，用短的時窗，近的測站，則可以用長時窗。一般所得到的特徵值例如  $P_d$  與規模( $M_w$ )的關係式如下：

$$M_w = a + b \log(P_d) + c \log(r) \quad (1)$$

其中  $r$  為震源距離， $a$ 、 $b$ 、 $c$  為回歸常數。然而，在此關係式中，並無考量不同時窗對於規模判定的效應。因此本研究期望藉由此模式整合不同時窗的特徵值，以達到快速穩定的特性，並且在不同的時間更新不同的地震規模。

## 二、研究方法及進行步驟

為了探討台灣地區中、大型地震記錄中  $P_d$  之特性，本研究採用台灣強震觀測網 (TSMIP) 觀測記錄收錄 1993 至 2012 年間，規模大於 5.5 之淺源 (震源深度小於 30 公里) 地震 (圖一)。為評估近場特性，僅使用測站震央距小於 50 公里之記錄。去除無法判定 P 波到時之記錄，總計使用 1901 筆資料。



圖一、本研究使用地震分布圖。

為了討論不同時窗對於規模判定之效應，分別擷取 P 波到時後 1 至 5 秒之最大振幅（以  $P_{d1}$  至  $P_{d5}$  表示之）。並與之比較其他參數（震源距離、地震規模）之關係。

### 三、結果與討論

根據  $P_d$  之觀測結果中顯示（圖二），在相同地震規模（ $M$ ）、地震與測站震央距（ $r$ ）之前提，長時窗（如： $P_{d5}$ ，深藍圓圈）較短時窗（如： $P_{d1}$ ，淺藍圓圈）之振幅更大。當進一步利用式 (1) 以最小平方方法（least square）回歸各時窗與其他參數之間關係，得到（圖二各回歸線）：

$$\log(P_{d1}) = -1.354 + 0.183M - 0.810\log(r) \pm 0.443 \quad (2)$$

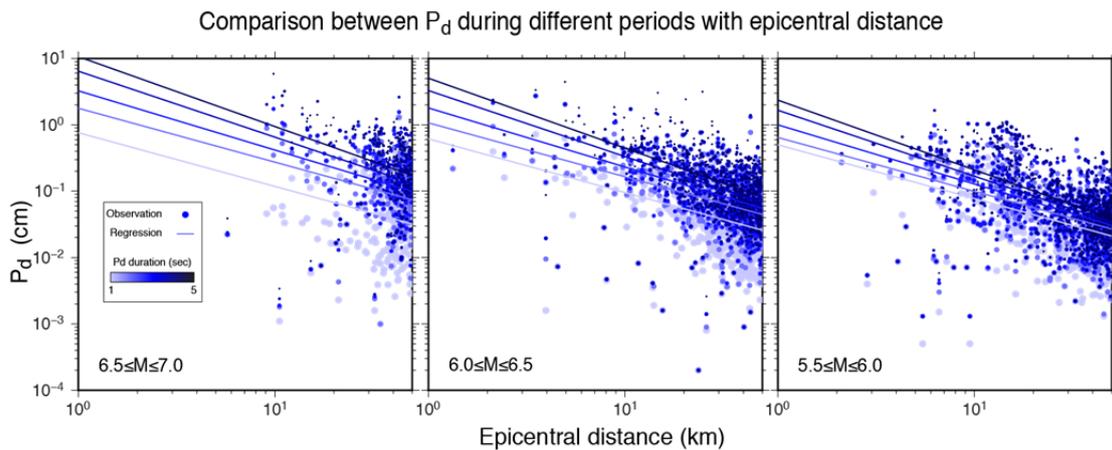
$$\log(P_{d2}) = -2.708 + 0.438M - 0.812\log(r) \pm 0.427 \quad (3)$$

$$\log(P_{d3}) = -2.944 + 0.512M - 0.891\log(r) \pm 0.428 \quad (4)$$

$$\log(P_{d4}) = -3.172 + 0.590M - 0.994\log(r) \pm 0.438 \quad (5)$$

$$\log(P_{d5}) = -3.386 + 0.654M - 1.053\log(r) \pm 0.431 \quad (6)$$

根據回歸結果發現， $P_{d1}$  之規模項係數（0.183）明顯較其他時窗小。此結果將造成推估規模時之不穩定性，不利實務上之應用。此外，除了  $P_{d1}$  以外， $P_{d2}$  至  $P_{d5}$  在相同條件下似乎呈現等差級數的變化。此現象可能是由於 P 波到達 1 秒之內與隨後之地震物理特性相異。因此，以下討論僅採用  $P_{d2}$  至  $P_{d5}$  之資料。



圖二、(a) 規模 6.5 至 7.0、(b) 規模 6.0 至 6.5、(c) 規模 5.5 至 5.0 地震觀測記錄中震央距與不同時窗長度的最大振幅比較圖。不同顏色代表不同時窗長度；圓圈代表觀測值；線段代表各時窗之回歸最佳解。

根據式(3)至(6)，得知時窗之因子對於規模判定的影響。為了進一步量化時窗與規模之間關係，我們將回歸式中加入時窗因子( $d$ )，分別假設該因子與其他參數呈現線性、對數，以及自然對數關係。得到：

$$\log(P_d) = -3.310 + 0.540M - 0.940\log(r) + 0.090d \pm 0.432 \quad (7)$$

$$\log(P_d) = -3.350 + 0.540M - 0.940\log(r) + 0.294\log(d) \pm 0.479 \quad (8)$$

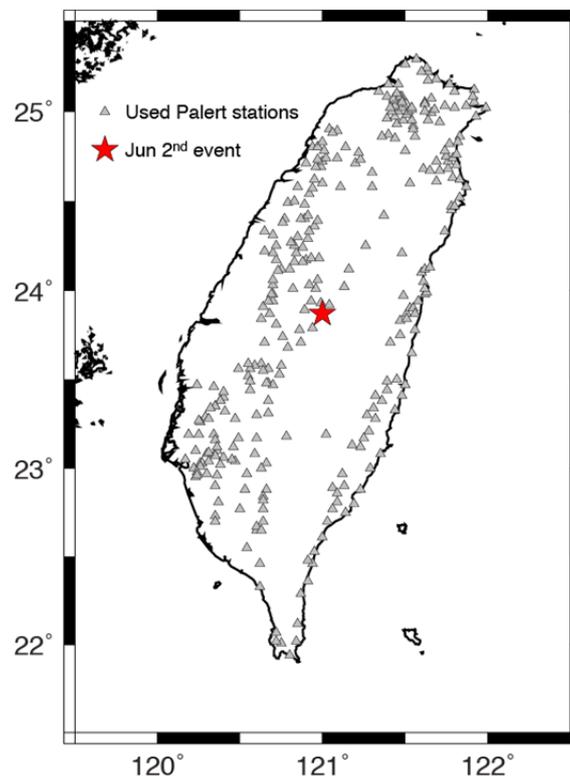
$$\log(P_d) = -7.711 + 1.244M - 2.164\log(r) + 0.676\ln(d) \pm 1.560 \quad (9)$$

結果顯示時窗因子與其他參數為線性關係時，有著最小之標準差。

#### 四、實際案例檢測

為了檢驗回歸式(式2-5)之實用性，將以一實際案例驗證之。利用本實驗室以低價位地震儀(Palart)架構於全台之觀測網所測得2013年6月之南投地震資料加以分析之。

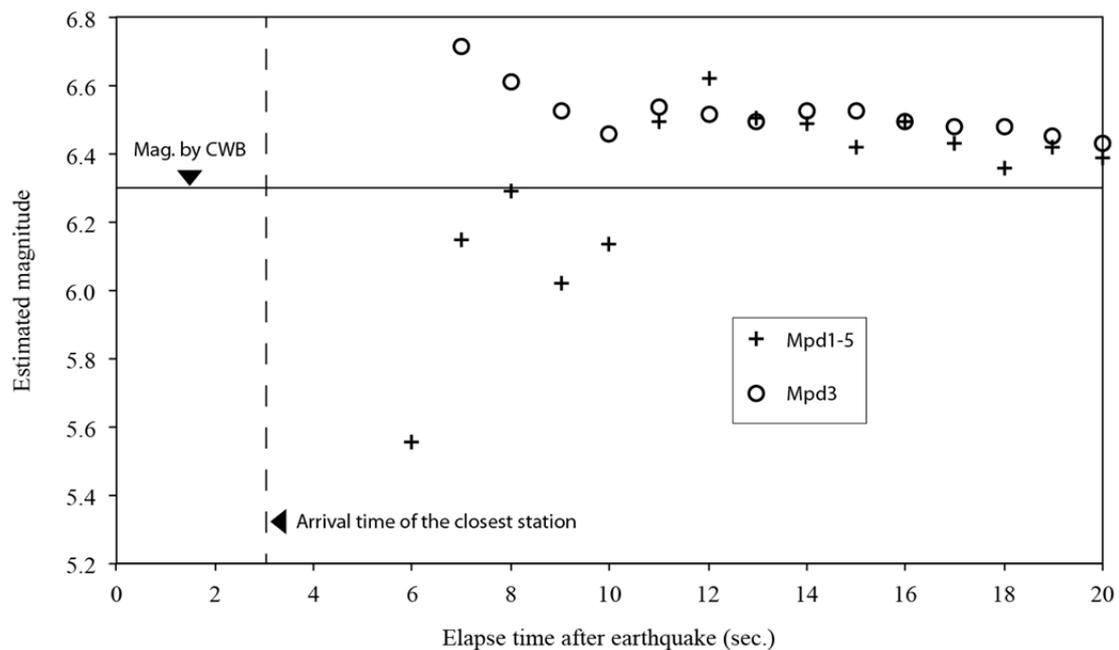
發生於2013年6月2日規模( $M_L$ )6.3之南投地震(圖三)在全台灣各地區皆有感受其地震晃動(<http://scweb.cwb.gov.tw/Page.aspx?ItemId=49&fileString=2013060213430365075&gis=n>)。南投地區更產生了五級之最大震度。該地震共造成了五人死亡、十八人受傷。在鄰近縣市造成了零星建築物的損壞。此外，此一地震亦造成了中部與南部科學工業園區晶圓廠的損失。



圖三、2013 年 6 月之南投地震（星號）與本實驗室以低價位地震儀（Palert）架構於全台之觀測網具有本次地震良好記錄之測站（三角形）分布圖。

在此地震發生之前，本實驗室以 401 部低價位地震儀（Palert）建置分布於全台之觀測網。對於本次南投地震，共有 313 個測站測得良好記錄（圖三）。以下，將以此觀測資料回推本次地震規模以評估其可行性以及時效性。

在地震發生後三秒，第一個測站收到初達波（圖四虛線）後一秒即可以  $P_{d1}$  評估地震規模。至震後六秒以  $P_{d1}$ - $P_{d5}$  評估之規模為 5.56（圖四十字）；至七秒之後，此方法評估之結果收斂在  $6.3 \pm 0.3$  之間；至十四秒之後，此方法評估之結果更收斂至  $6.3 \pm 0.2$  之間，逐漸趨近於氣象局之觀測結果。若單以  $P_{d3}$  評估，至震後七秒得出第一次評估結果為 6.72（圖四圓圈）；至九秒之後，此方法評估之結果收斂在  $6.3 \pm 0.3$  之間；至十六秒之後，此方法評估之結果則可收斂至  $6.3 \pm 0.2$  之間。



圖四、利用  $P_{d1}$ - $P_{d5}$ （十字）以及單以  $P_{d3}$ （圓圈）在地震後不同時間點評估之地震規模。虛線為地震初達波至最近測站之到時；實線為氣象局速報系統測得本地震之規模。

以此實際案例之評估結果，發現聯合  $P_{d1}$ - $P_{d5}$  或單以  $P_{d3}$  皆可取得可信之地震規模。惟以聯合評估方法所得之結果將更為迅速、確實。

## 五、結語

大地震發生後，精確規模測定將有助於提昇防救災的成效。尤其在地震速報及預警系統中，地震預警需要及早決定規模越好。然而地震初期所決定的規模，不確定度大並且大地震會有低估的情形，因此地震規模的制訂需要因時制宜。本研究利用台灣地區之地震觀測記錄，探求 P 波初達 5 秒內之振幅特性與地震規模

之關係。此結果將可應用於地震規模速報之中，提昇在不同時間階段評估規模之精確性。

## 六、重要有關文獻

Allen, R. M. and H. Kanamori (2003). The potential for earthquake early warning in Southern California, *Science* **300**, 685-848.

Kanamori, H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **2005**, *33*, 195-214, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122626.

Wu, Y. M., T. C. Shin, and Y. B. Tsai (1998). Quick and reliable determination of magnitude for seismic early warning, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 1254-1259.

Wu, Y. M. and T. L. Teng (2002). A virtual sub-network approach to earthquake early warning, *Bull. Seism. Soc. Am* **92**, 2008-2018.

Wu, Y. M. and T. L. Teng (2004). Near Real-Time Magnitude Determination for Large Crustal Earthquakes. *Tectonophysics* **390**, 205-216.

Wu, Y. M.; Kanamori, H. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system. *Bull. Seism. Soc. Am.* **2005**, *95*, 347-353.

Lin, T. L. and Y. M. Wu, 2012, A fast magnitude estimation for the M 9.0 2011 Great Tohoku Earthquake, *Seismo. Res. Let.*, **83**, 667-671, doi: 10.1785/0220110119