

台灣地區地震預警之初探

辛在勤

中央氣象局

摘要

本文利用22組中央氣象局在過去6年所收錄的強震資料，探討地震預警的可行性，在簡化某些繁雜的計算及模擬後，可歸納出適用於台灣地區的PGA衰減公式及各測站的場址效應因子，配合所得PGA在震源處與ML之關係，各地震度可在地震位置及規模被計算出的同時獲得，而估算的結果已能有效的描述地振動加速度在8gal以上之區域。雖有小局部地方的加速度仍舊超出估算值，其是否受波徑的影響尚待探討，但此地震預警模式已具相當程度之應用性。

關鍵字：地震預警

一、前言

地震預警並不是一個新的名詞或觀念，早在百年前Cooper (1868) 就已經提出了地震預警的可行性。其實地震預警的基本觀念並不複雜，尤其當地震學家充分瞭解地震波的特性，P波傳遞速度遠比S波速度快，而以S波為主體的剪力波群往往是造成破壞的主要來源，因此如果能利用P波傳遞快的特性快速的分析地震各項相關參數，將可能在剪力波群尚未到達前預估其強度。這樣明確的觀念無法落實在應用上，主要因為過去觀測點太少，再加上1960至1980年間地震界把焦點放在地震預測上，但當地震預測仍侷限於研究的範疇無法突破時，基於地震防災的需求，地震預警逐漸被大家再度重視，此時觀測站的數目亦成長至相當程度，就某些地區而言，已造就了很好的環境去深入探討或進行地震預警系統的建立。

爭取因不同地震波傳遞速度快慢所造成的時間差，以作有效之應用是地震預警之基本觀念，因此目標地距震央愈遠則所能爭取的時間相對變長，例如以台灣地區為例，地殼內之平均P波之波速約為 6.35km/sec ，S波為 3.67km/sec ，震央距為100公里時P波傳遞約需15.7秒，S波則在其後11-12秒到達，但距離至200公里時P波傳遞約31.5秒，而S波

則晚到22-23秒，可見在震央距200公里之處，則有更充裕的時間去處理較近震源之觀測資料。但在較遠地點的地震預警並無太大的防災功能，因為震波隨著傳遞距離會有衰減效應，所以如何界定具破壞力的震波可能到達的距離範圍，作為地震預警的目標地是地震預警的重要課題之一，尤其考慮在各種不同地質狀況下會反應出不同的地振動特性（即所謂的場址效應）時，地震預警的實用性開始變得複雜了。這種複雜性在台灣地區更為明顯，震波不論朝那一個方向傳遞只要超過數十公里即可能穿過不同的構造區，構造區間的不同波速構造亦可能造成震波不同的特性，但即使再複雜的情況如能在研究的區域內有足夠的觀測站蒐錄足夠的資料，在合理的假設下亦有可能理出一個可用的頭緒。當然這些主客觀的條件是見仁見智的問題，卻關係到應用層面的寬廣，因此在條件未充足前就應適度的放寬嚴謹性以達成各階段的目標，地震預警的應用正是此狀況的寫照。

台灣地區自從中央氣象局建立強震觀測網至今已滿6年，其間陸續建置超過600個以上強震站，就測站密度而言已相當具代表性，所蒐錄地震雖有數千筆，但規模大的地震資料加上同一地震觸發上百個測站之資料僅十數筆，由於筆數不

多，因此以之從事地震預警的探討必有所不足，但鑑於地震預警的複雜及肯定其在防災上的功能，利用現有的資料建立一個階段性的模式以資應用，亦應有其正面的效益，並且初探的經驗及結果，可為日後累積更多資料時詳細分析的墊腳石。

從強震觀測的角度而言，所謂的地震預警就是最大地動加速度（Peak ground acceleration,PGA）的預估，此數值是評估地震災害的最重要參數之一，亦廣為地震工程界訂定耐震設計及評估之用，本研究將從防災實用的眼光去探討至目前為止所收錄之強震資料其PGA的特性，歸納出可以預估PGA行為的模式，包括PGA隨震波傳遞的衰減及其在不同地質狀況下的效應，配合目前正進行之地震速報系統（Shin et al.,1996），將有助於地震預警之建立。

二、方 法

一般而言PGA是剪力波群中的波相，在彈性波理論中剪力波歷時函數可以下式表示

$$O(Az,t) = S(f) * G * R * A * P * R \Phi \quad \dots \dots (1)$$

其中

$O(Az,t)$ ：在方位角Az之歷時函數

$S(t)$ ：震源歷時函數

G：擴張因子（Geometric Spreading factor）

R：測站場址效應

A：衰減因子

P：波徑效應

$R\Phi$ ：震源輻射型態（Radiation pattern）

若考慮波傳遞的均勻性或視研究區為整體性及PGA大部分落於剪力波群而非單一波相的表現時，則P及 $R\Phi$ 可為單一常數亦或歸入G，R或A因子內亦即不考慮方位角的差異，而其中G及A隨距離的衰減是指數下降關係，則上式可簡化為

$$O(t) = S(t) * r^a * R \quad \dots \dots (2)$$

其中r是震源距，本文使用震源距以便更能代表震波能量隨傳遞的衰減，式中a即為綜合幾何擴散及能量衰減之效應。而PGA即為O(t)歷時函數的峰值。因此

$$PGA = PGA(0) * r^a * R \quad \dots \dots (3)$$

其中PGA(0)表示震源破裂時在震源距近乎零

時之最大加速度值，此項因子將與地震規模有密切之關係，而式中R因子則與測站座落的地質狀況相關。所以能解出上式中右邊之各因子，則PGA是可預估的。

三、資料分析

從中央氣象局強震觀測網在過去6年所蒐錄的強震資料中，尋找出22個地震資料，作為本研究之用，這些地震資料符合下列3項條件：

- 同一個地震必須觸發100個以上之強震儀，如以該觀測網之命名分區原則（即台北(TAP)、台中(TCU)、嘉南(CHY)、高雄(KAU)、宜蘭(ILA)、花蓮(HWA)、台東(TTN)，則觸發之測站須涵蓋兩個區以上。
- 同一個地震所觸發最近及最遠測站間之距離須超過100公里，以便在衰減分析時能有較大的間距。
- 最近測站之PGA值超過40gal。

這22個地震的空間分布如圖1，其詳細的地震參數則列於表1內，其中前14個屬於地殼內之地震，後8個地震則發生於地底35-100公里間，表1的最後一欄是地震規模，由於所選用的地震大都在規模5.0以上，因此依中央氣象局在過去6年的正常定位程序（尚未使用即時強震資料）規模會有較大的誤差，蓋因速度型地震儀器有較高的放大倍率，當地震稍大則易達記錄之飽和，而無法用於計算規模，因此只有在較遠的測站紀錄可用，規模計算時的資料相對減少，誤差則相對增大，為了有較合理的地震規模值，所使用的地震資料皆計算出其模擬伍德安德森之地震紀錄並依Shin(1993)的方式分別計算出新的規模，表1的規模欄並列兩個規模值作為比較，括弧內的數值即為原中央氣象局發布之地震規模。選用的22個地震中1996年3月的兩個地震及1996年9月的地震分別位於花蓮外海及蘭嶼附近，距離台灣本島較遠，但其規模夠大且觸發站數夠多，仍將其納入分析，因這些地區如果發生稍大地震，似仍有地震預警之需求。

四、分析結果

為了進一步瞭解震源深度在PGA隨距離衰減關

係中所扮演的角色，以及區域場址效應的影響，圖2為選用1995年6月25日的地震為範例，將PGA隨距離之變化繪製如實心方形，顯而易見在距離小於40公里（約為震源深度）資料點的分布與大於40公里的資料分布有很大的差異，如以震源距為橫軸如空心方形所示，則PGA隨距離的衰減在對數座標軸上則有明顯的線性關係，但在實心方形資料分布中以點線圓所圈出的資料分別為台北地區及嘉南地區，仍舊可在空心方形的資料分布中出現，區域的場址效應有別於一般正常情況下之衰減，顯然是在衰減分析中不可不事先考量的因素。

但在資料分析的過程中亦發現有些非常小局部的測站其場址效應表現非常突出，為了防止類似的現象影響衰減分析或其可能是造成區域場址效應的主要來源，本研究將每一PGA資料予以平均化，即每一單點PGA資料與其距離5公里內，方位角 5° 以內之資料予以幾何平均代表該點之資料，如圖2中實心三角形，其資料之分布則有較集中之現象，但原先所提之區域效應雖較改善但仍可能造成衰減分析之誤差，經仔細分析發現所謂造成區域效應的站皆在台北盆地內、嘉義市及臺南市附近，因此將三個地區內的站從衰減分析中剔除，即視其並未設站，重複上述分析（平均化），如圖2中之實心圓點，其線性關係已經非常明顯。本研究中發現除了上述三區外，台中、彰化沿海有相同情況，所以該資料亦被摒除在衰減分析之外。

本文所採用之22組地震資料經上述方式分析後，發現各組地震資料之線性關係非常相似，因此採用多重迴歸取得共同的衰減因子(a)，可表為

$$PGA = PGA(0) * R^{-1.837} \quad \dots \dots (4)$$

圖3為選取四個地震資料為例，顯示其共同衰減關係之情形，各小圖右上方之數字表示所選用地震之日期（可對照表1），經由多重迴歸各地震資料組在縱軸（PGA）之截點即為該地震之PGA(0)，其與表1所計算出之規模ML有如圖4之關係：

$$PGA(0) = 12.44e^{1.31ML} \quad \dots \dots (5)$$

由此二公式已可算出在某一震源距的理論PGA值，將此式代入公式(3)中則成

$$PGA = 12.44e^{1.31ML} \cdot r^{-1.837} \cdot R \quad \dots \dots (6)$$

和

$$R = \frac{12.44e^{1.31ML} \cdot r^{-1.837}}{PGA}$$

利用上式則各地震在某一特定測站的場址效應即可算出，而該測站的場址效應因子可用平均方式求得，圖5為本研究所求得台灣地區的場址效應以等值圖形表現，綠線代表相對於估算值無放大之地方，而紅線是代表放大倍率為2之地區，概括言之西部地區有較大的場址放大數值，尤其台北地區及嘉南地區，此與台灣地區地質狀況甚為融合。

五、結論與討論

本文選用22組發生在台灣地區之地震資料，其規模範圍介於5.3至6.7之間，來探討地震預警之可行性，由於地震預警是一須與地震波競時的工作，因此如何在合理的假設下簡化繁雜的計算及模擬，而能有效的描述台灣地區不同地質狀況下複雜的強地動特性是成功的要素，本文首先仔細分析過去所蒐集之強震資料，即最大地動加速度（PGA）的特性歸納出一平均的PGA衰減公式（公式(5)），並找出PGA在震源處與地震規模的關係，由此再計算出台灣地區592個地震測站的場址放大因子，利用這些結果各測站的PGA在計算出地震位置及規模後是可以預估的。

綜合本文之探討有下列的結果可資討論：

1.一般的場址效應研究其結果皆呈現測站點相對的放大效應，及其與地質狀況間的關係，這些結果在地震預警的應用是有限的，而本文所計算的測站場址效應似可視為相對性但並不是測站間的相對，而是相對於衰減效應及PGA與ML的關係，但如納入衰減及ML所計算出的PGA則可視為絕對的數值，即其可與觀測站PGA值直接互相比對，就是在地震發生後真正的可預估最大地動加速度。當然本文省略了所謂波徑效應及震源輻射型態，是基於資料及計算時間的考量，雖然已選用了22組地震資料，但就地震的空間分布及所觸發測站數而言，欲仔細探討震波經不同構造區的差異仍嫌不足，況且它以什麼樣的方式進入預警模式尚待評估，如要用到太多的時間去計算此效應可能就失去了預警的效果，至於輻射型態方面，如果在計算地震位置參數或規模時能同時求

得震源輻射型態參數則可計算在各方位角及距離之數值而直接利用它，亦或有效的區分台灣地區為不同的震源區，而各震源區皆給一個代表性的震源輻射型態，則這問題亦可解決，唯此一震源輻射型態的適用性是需事先加以評估的。

2.仔細分析圖5的台灣地區場址效應圖，可發現嘉南平原區的放大效應最大（超過2倍），尤其是在濱海地區，此現象亦發生在新竹至苗栗間，顯示在這些沿海地區的開發尤應注意，所應注意的是受限於資料範圍，本文所用強震資料的PGA值一般而言並不太大，是否有資料非線性化及液化事件的發生，尚不足以討論。在北部及東北部地區，台北盆地內的西南及信義區是放大較大的地方，而宜蘭平原雖具放大作用，但似仍不如其北方地區的放大情形，此結果有點出人意料，但如仔細分析強震資料，可發現本文使用的PGA是屬較寬頻之資料，嚴格說來是高頻（3HZ以上，Campbell(1985)）資料，而在蘭陽平原及台北盆地內軟弱地質的放大作用可能較偏向稍低頻的範圍（1HZ左右），作者亦正進行分頻之分析研究，初步可看出在不同頻率範圍其場址效應會有很大的不同。

3.結果的校驗是非常重要的事，本文綜合22組地震資料的PGA特性，歸納出一PGA預估模式，其中省略波徑效應，平均同一測站不同地震的放大因子，因此其預估模式佔有一定比例的平均效應。圖6為選用6個可代表不同震區的地震並利用本文結果繪製估算之等震度圖與實際觀測等震度圖之比較，考量規模計算的誤差（約±0.2），圖中同時展示規模±0.2時之估算等震度圖。圖中左上小圖為觀測圖，右上小圖為根據表1所列規模所估算之等震度圖，左下小圖及右下小圖分別為（規模-0.2）及（規模+0.2）時之情況。

圖6(a)為1994年6月5日南澳地帶，比較估算及觀測之等震度圖可見加速度大於8gal以上之區域甚為融合，而80gal以上的地區，估算結果令人滿意。圖6(b)為1993年12月15日大埔地震，雖然估算250gal以上區域有低估的現象，但如考量規模加0.2時則亦可有效描述。圖6(c)1995年5月27日台灣東南地區地震，估算結果雖在嘉南地區有些

地方高估，但基本上結果不錯，況且以等震度描述震度分布時會受限於觀測資料點的完整與否，但就估算模式而言，每一測站皆可計算出，因此難免會有所差異，圖6(d)1995年6月25日東北部深度約40公里之地震，在新竹地區較高的加速度分布並無法掌握，比較圖6(a)，地震位置相當，唯其深度差異較大，是否有波徑上的問題值得探討。圖6(e)1995年4月25日台灣西南約40公里深之地震，8gal以上之區域尚稱融合。圖6(f)1996年9月5日蘭嶼地震，距台灣本島有較大之距離，估算結果對於描述恆春半島甚至8gal以上之振動區亦令人滿意。

4.根據目前中央氣象局利用即時強震資料之定位作業，假如地震發生在台灣本島附近（20公里以內）規模大於4.5的地震可在20-30秒內獲得初步定位結果（Wu and Shin,1997），其位置誤差在5公里以內，規模值之誤差在0.2內，利用本文之結果台灣地區的地震震度分布情形亦可在相同時間內估算出，顯而易見此地震預警模式已有其實用價值，亦即震度大於3級（ $PGA > 8\text{gal}$ ）的區域已能有效掌握，未來該定位作業系統在增加即時強震測站而作有效的子網域作業時，定位時間亦將相對縮短，其地震預警之功效亦將可隨之提升。

六、參考資料

- Campbell, K.W., (1985). Strong motion attenuation relations : a ten-year perspective, *Earthq. Spectra*, 4, 759-804.
- Cooper, J.D., (1868). Letter to editor, *San Francisco Daily Evening Bulletin*, Nov. 3, 1868.
- Shin, T.C., (1993). The calculation of local magnitude from the simulated Wood-Anderson seismograms of the short-period seismograms, *TAO*, 4, 155-170.
- Shin, T.C., Y.B. Tsai, and Y.M. Wu (1996). Rapid response of large earthquakes in Taiwan using a real-time telemetered network of digital accelerographs, Paper no. 2137, 11th World Conference of Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Wu, Y.M., T.C. Shin, and Y.B. Tsai (1997). Quick and reliable determination of magnitude for Seismic Early Warning, Submit to TAO.

表一 地震參數

| 發震時間 世界標準時 | 地 震 位 置 | | 地震深度 (公里) | 地震規模 |
|------------------------|---------|---------|--------------|------------|
| | 緯度 (°N) | 經度 (°E) | | |
| 1993-12-15 21:49:43.10 | 23.21 | 120.52 | 12.50 | 5.91(5.70) |
| 1994-06-05 01:09:30.09 | 24.46 | 121.84 | 5.30 | 6.42(6.20) |
| 1994-10-05 01:13:24.47 | 23.16 | 121.72 | 31.28 | 6.49(5.83) |
| 1994-10-28 23:51:10.48 | 24.63 | 122.27 | 2.00 | 6.09(5.66) |
| 1995-02-23 05:19:02.78 | 24.20 | 121.69 | 21.69 | 6.53(5.77) |
| 1995-05-02 22:48:20.54 | 23.83 | 121.97 | 23.93 | 5.75(5.24) |
| 1995-05-27 18:11:11.12 | 23.01 | 121.46 | 19.73 | 6.17(5.26) |
| 1995-07-07 03:04:48.36 | 23.89 | 121.09 | 13.07 | 6.01(5.30) |
| 1995-07-14 16:52:46.48 | 24.32 | 121.85 | 8.79 | 6.03(5.80) |
| 1995-10-31 22:27:06.94 | 23.29 | 120.36 | 10.65 | 5.39(5.19) |
| 1995-12-18 16:17:54.53 | 24.02 | 121.69 | 22.06 | 5.97(5.80) |
| 1996-03-05 14:52:27.13 | 23.93 | 122.36 | 6.00 | 6.69(6.40) |
| 1996-03-05 17:32:08.56 | 23.90 | 122.30 | 10.81 | 6.39(5.96) |
| 1996-09-05 23:42:07.88 | 22.00 | 121.37 | 14.76 | 6.70(7.07) |
| 1996-11-26 08:22:23.71 | 24.16 | 121.70 | 26.18 | 5.97(5.35) |
| 1994-10-12 09:08:22.13 | 24.81 | 122.00 | 73.14 | 5.90(5.67) |
| 1995-03-24 04:13:51.09 | 24.64 | 121.86 | 76.00 | 6.20(5.64) |
| 1995-04-24 10:04:00.96 | 24.65 | 121.62 | 63.07 | 5.70(5.28) |
| 1995-04-25 08:29:02.96 | 22.65 | 120.51 | 43.67 | 6.00(5.49) |
| 1995-06-25 06:59:07.09 | 24.61 | 121.67 | 39.88 | 6.58(6.50) |
| 1995-12-01 03:17:04.62 | 24.61 | 121.64 | 45.07 | 6.00(5.72) |
| 1996-01-22 19:22:57.53 | 24.93 | 121.72 | 66.86 | 5.67(5.11) |

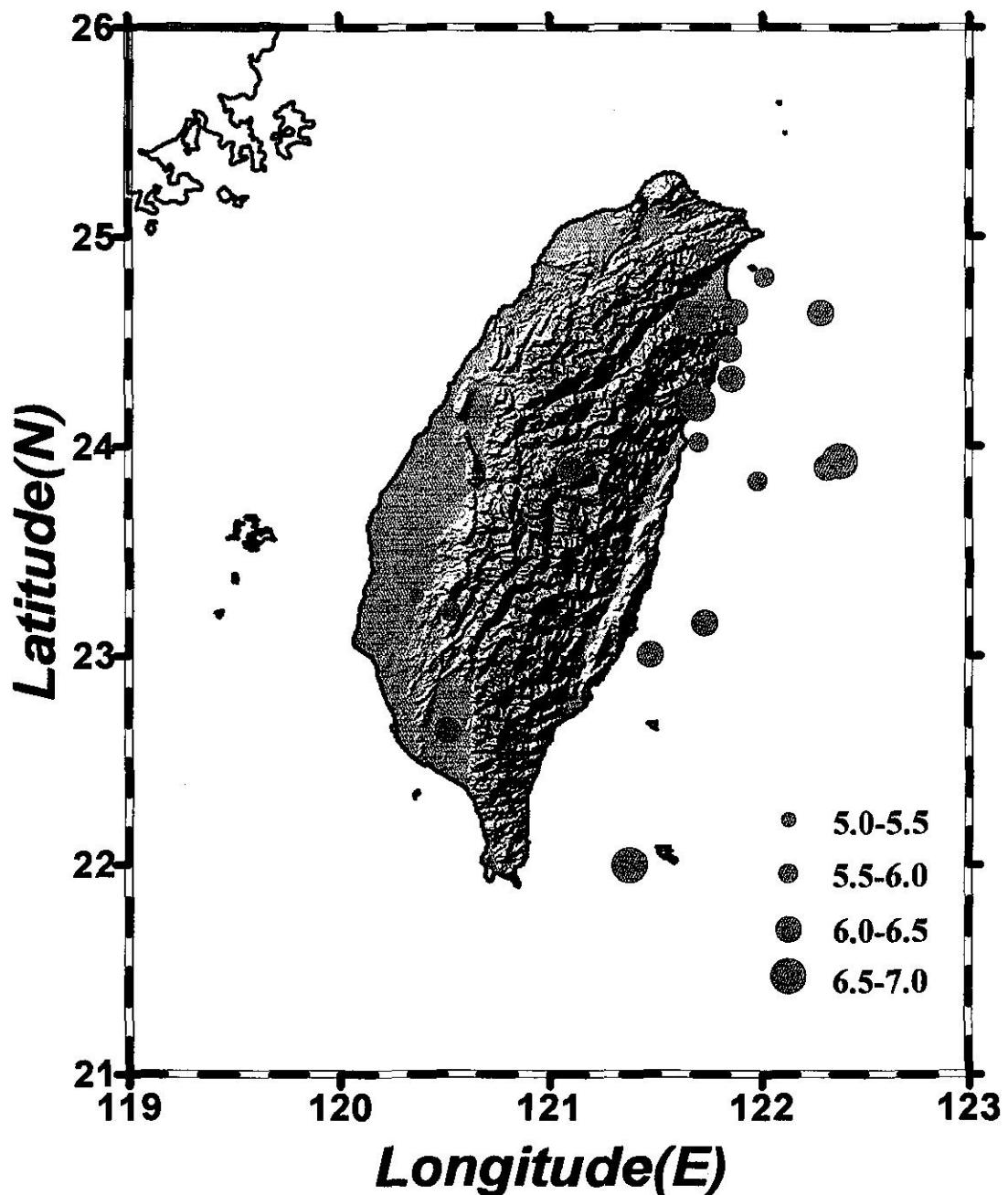


圖 1. 本文所使用22個地震之空間分布圖。

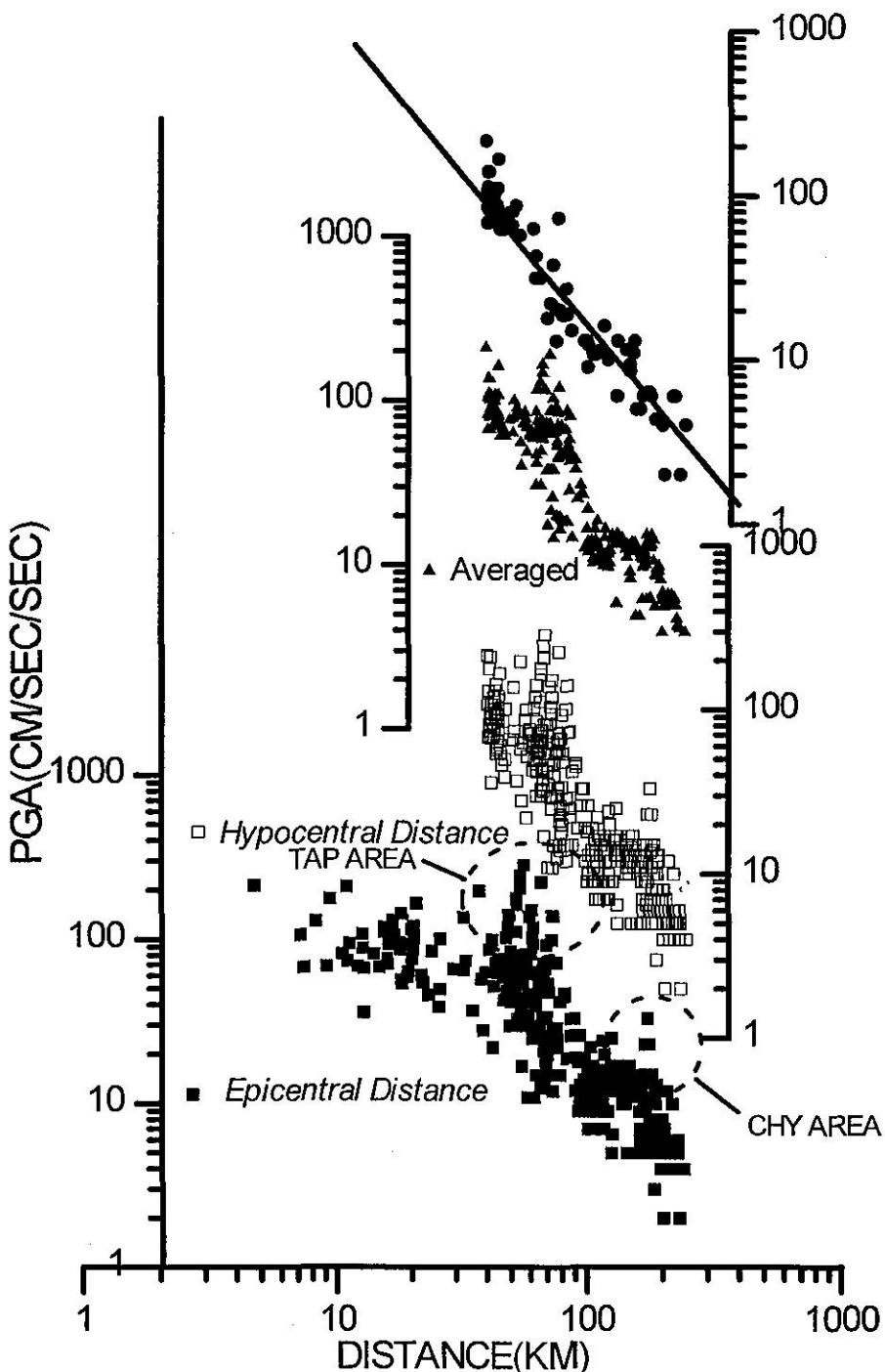


圖 2. 1995年6月25日台灣東北地區震源深度約40公里，規模6.58地震所觸發地震資料之PGA隨距離衰減之情形。實心方形為PGA vs 震央距離，空心方形為PGA vs 震源距離，實心三角形為平均化PGA vs 震源距離，最上之實心圓形為過濾後PGA vs 震源距離，其線性分布最為明顯。

Attenuation Fit

-1.837

$$\text{PGA} = \text{PGA}(0) * \text{HYPO_DISTANCE(KM)}$$

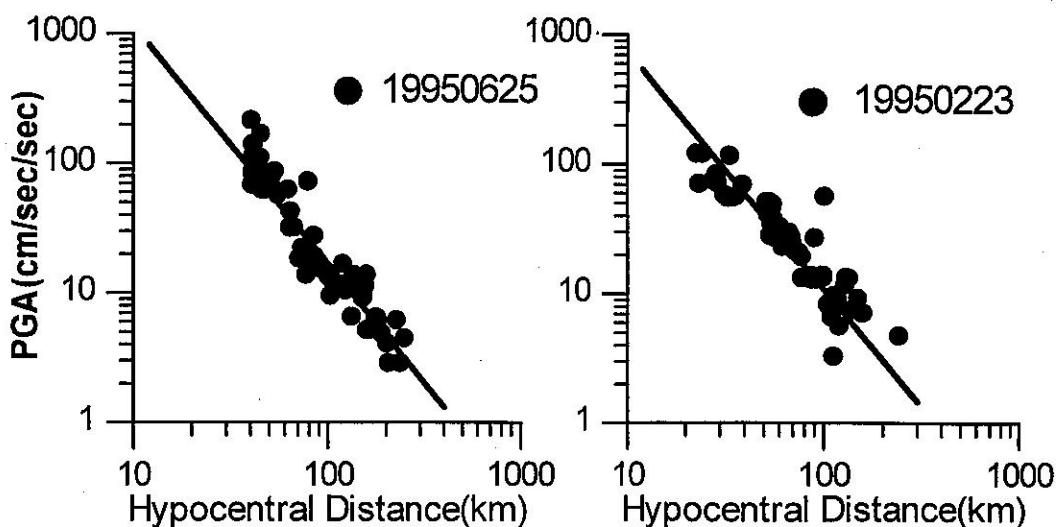
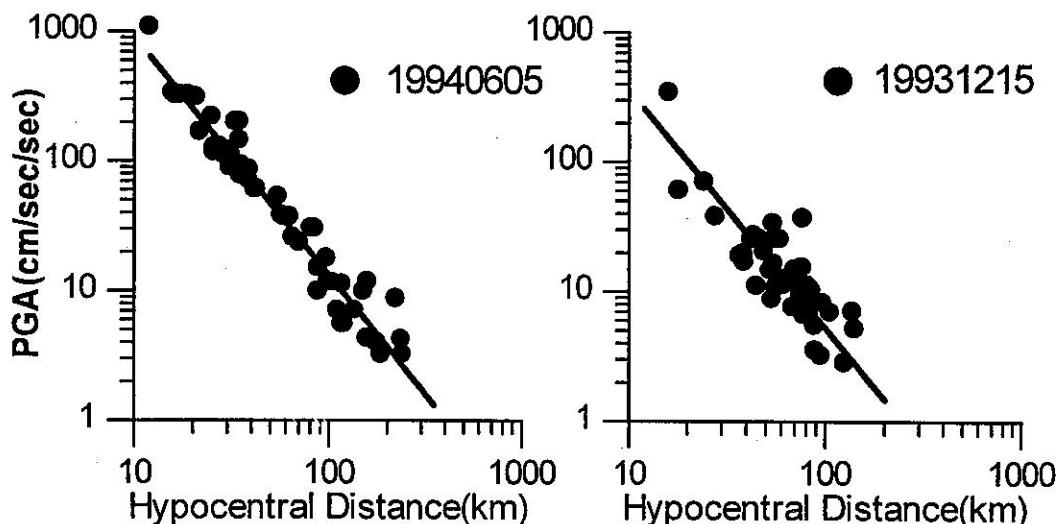


圖 3. 經過濾及平均之處理後，以4組地震資料為例顯示共同之衰減關係。所選用地震日期如圖內數字，其詳細資料可見表1.。

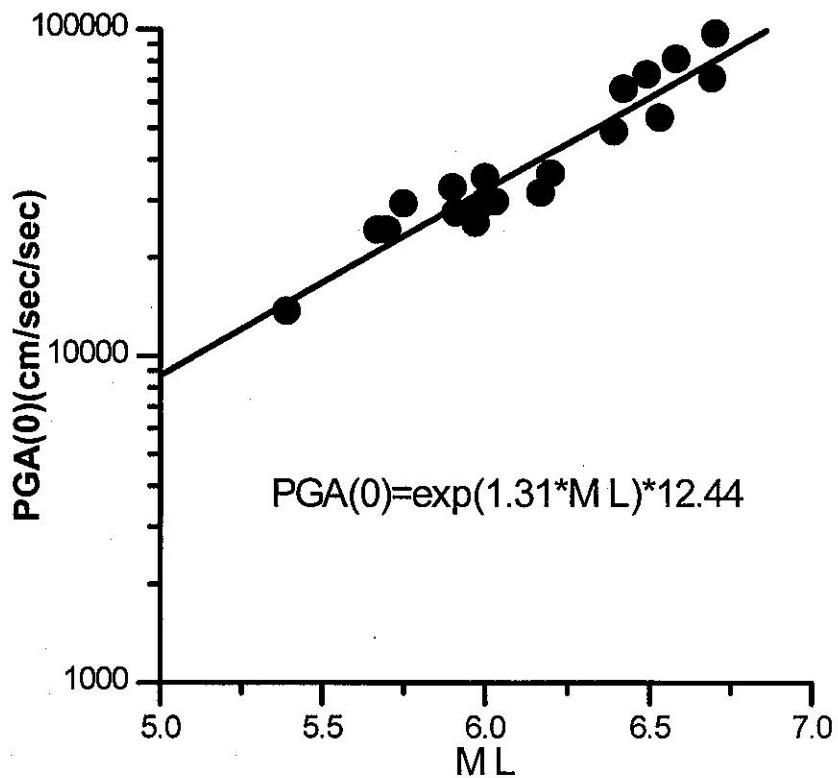


图 4. PGA(0) vs ML。

Site Factor Map

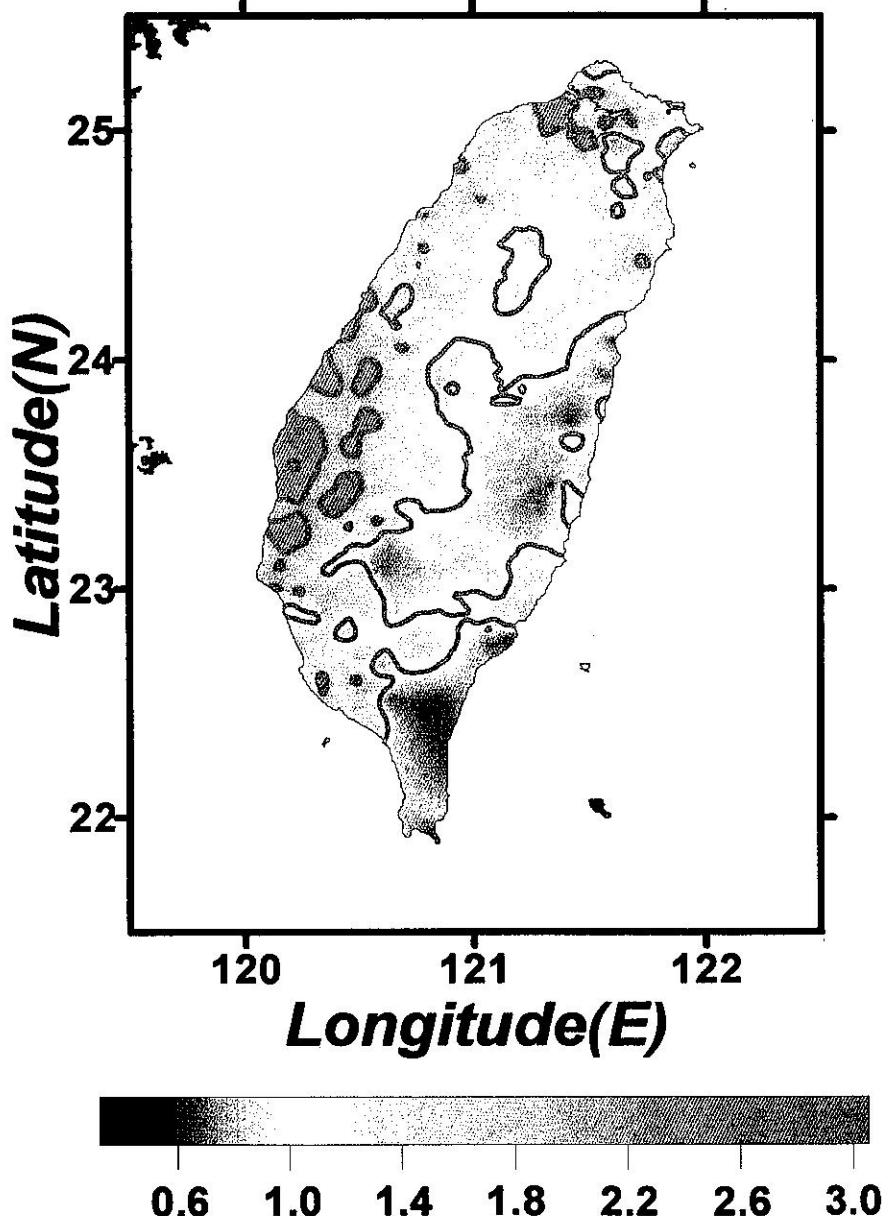
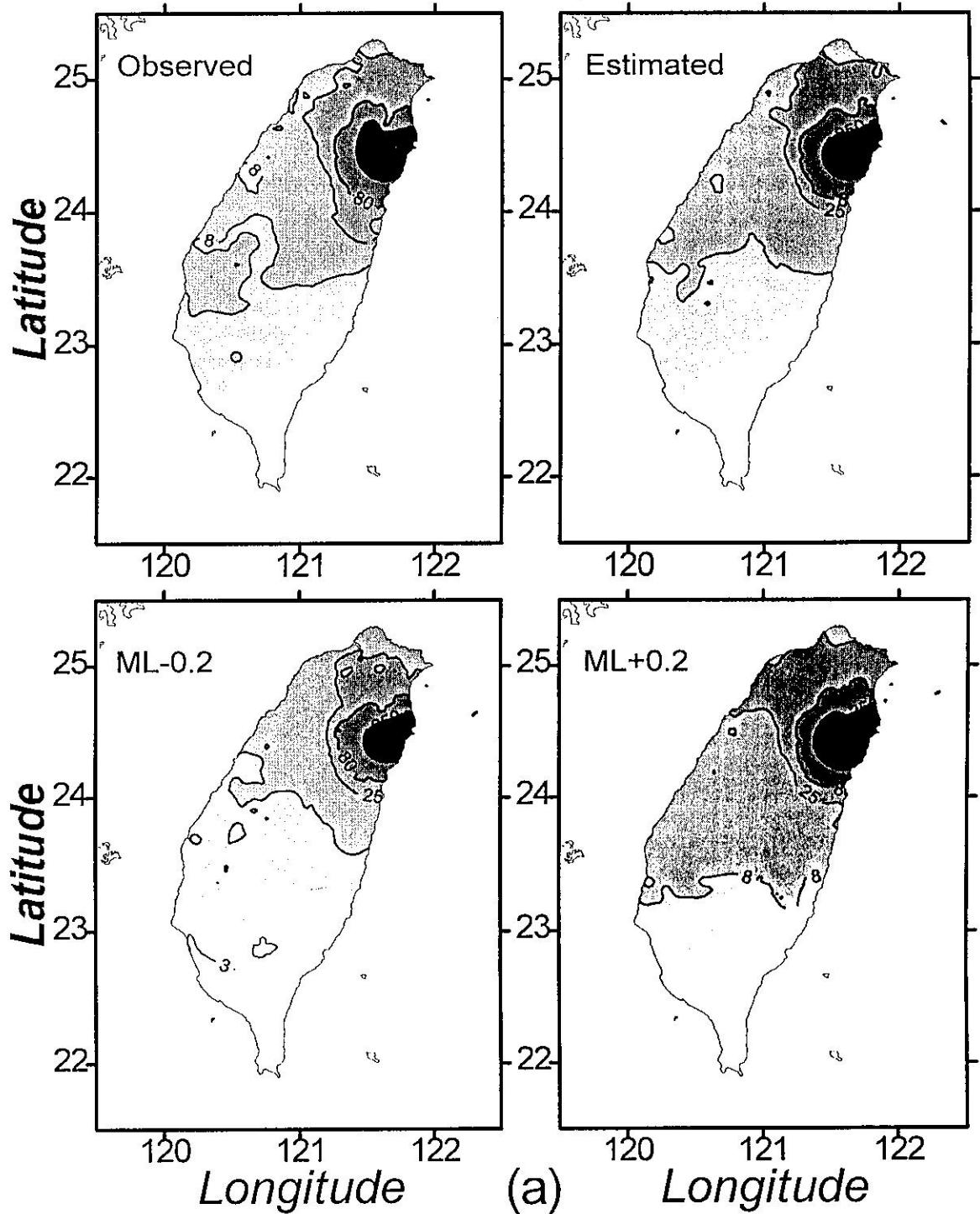


圖 5.台灣地區之場址效應圖。綠線代表相對於估算值無放大之地方，而紅線是代表放大倍率為2之地區。

19940605 ML=6.42 Depth= 5.30km



(a)

圖 6(a). 1994年6月5日地震

19931215 ML=5.91 Depth=12.50km

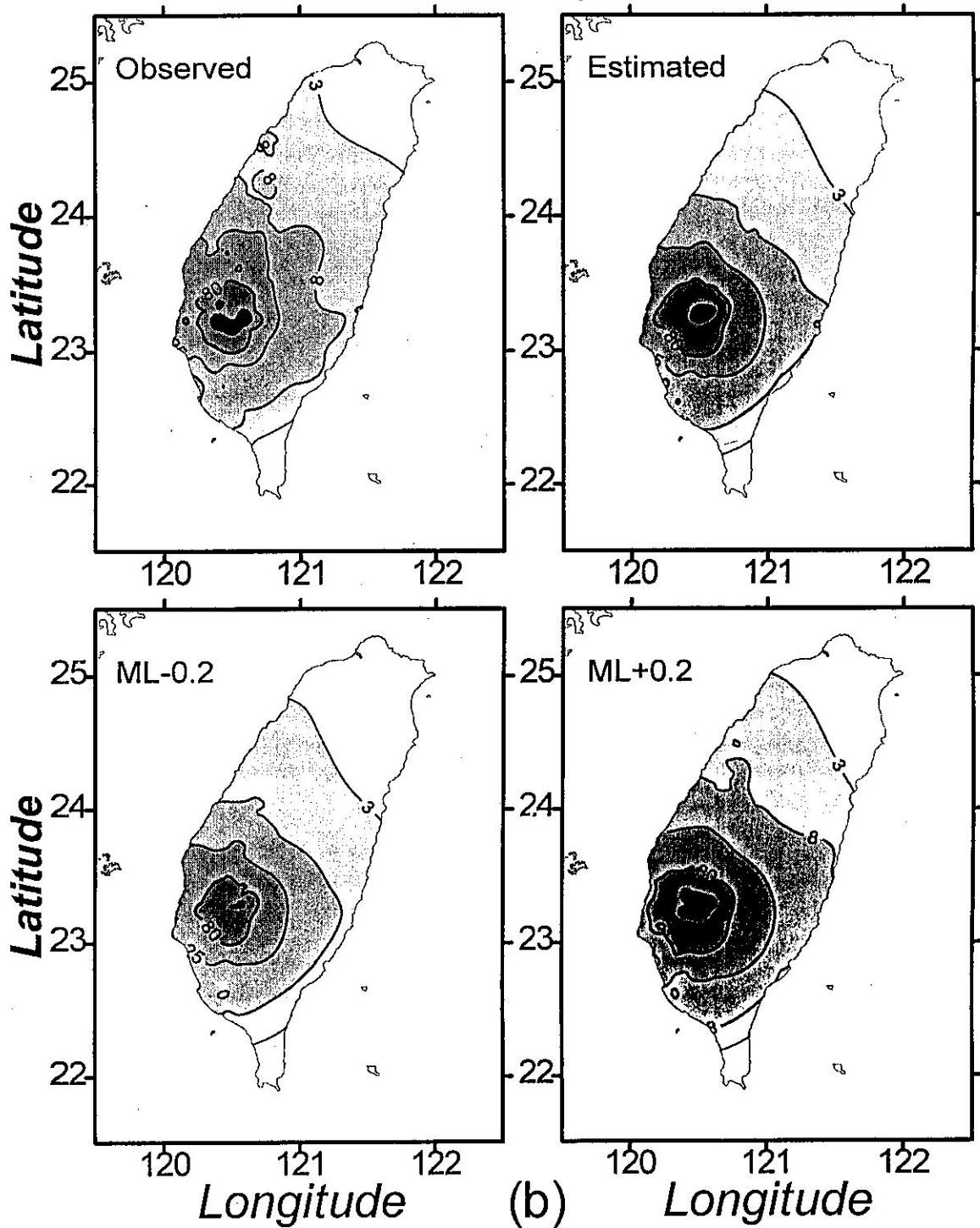


圖 6(b). 1993年12月15日地震

19950527 ML=6.17 Depth=19.73km

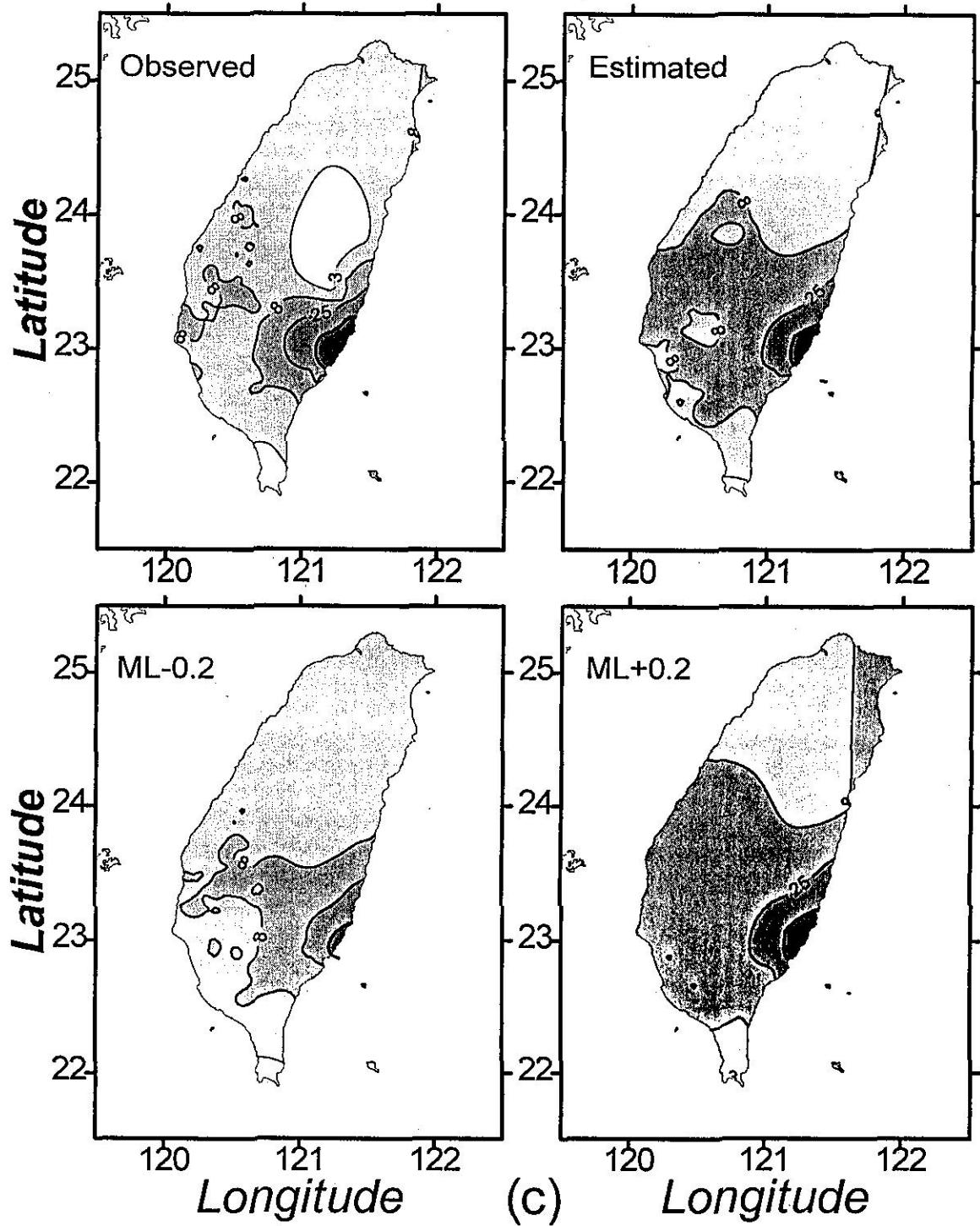


圖 6(c). 1995年5月27日地震

19950625 ML=6.58 Depth=39.88km

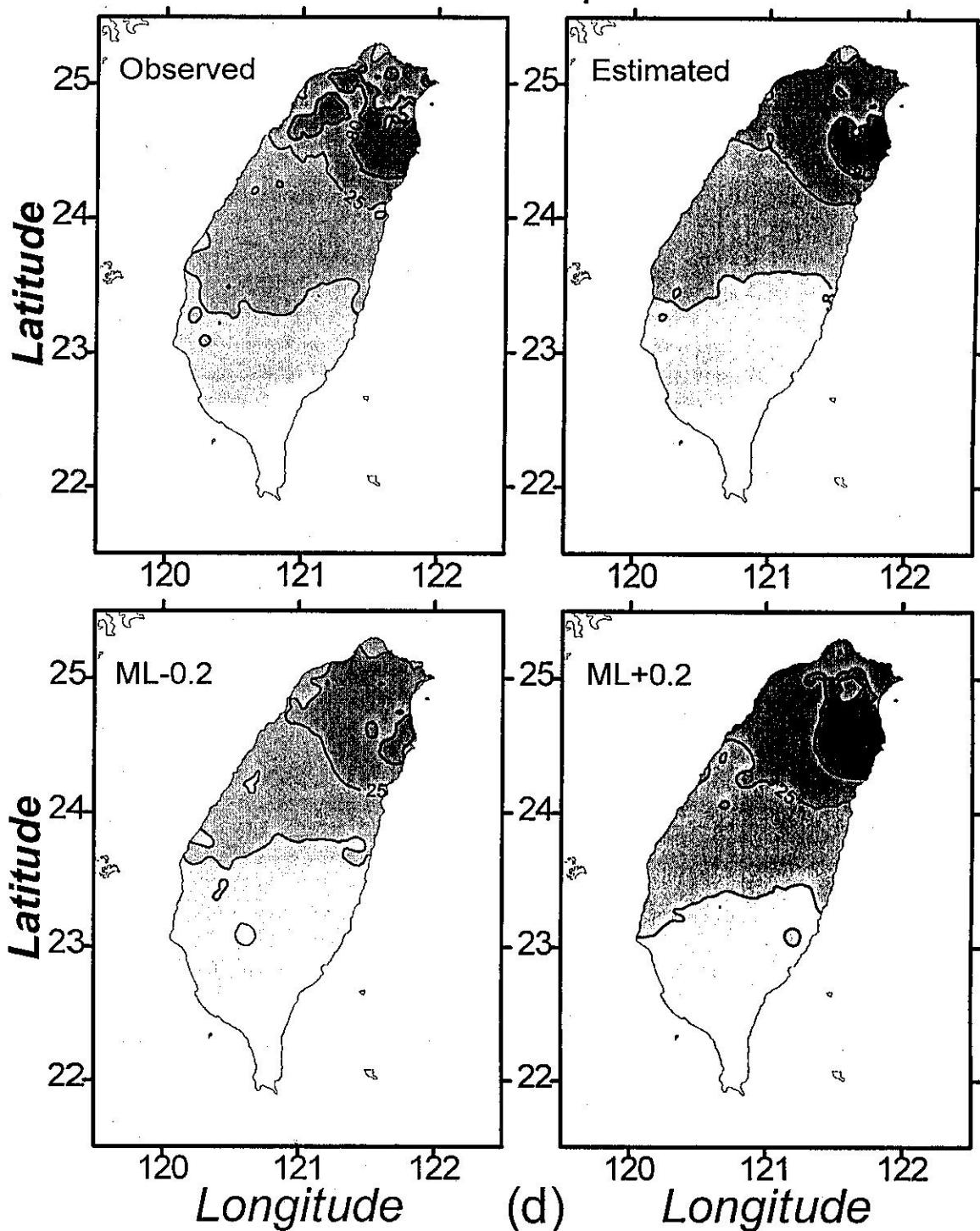


圖 6(d). 1995年6月25日地震

19950425 ML=6.00 Depth=43.67km

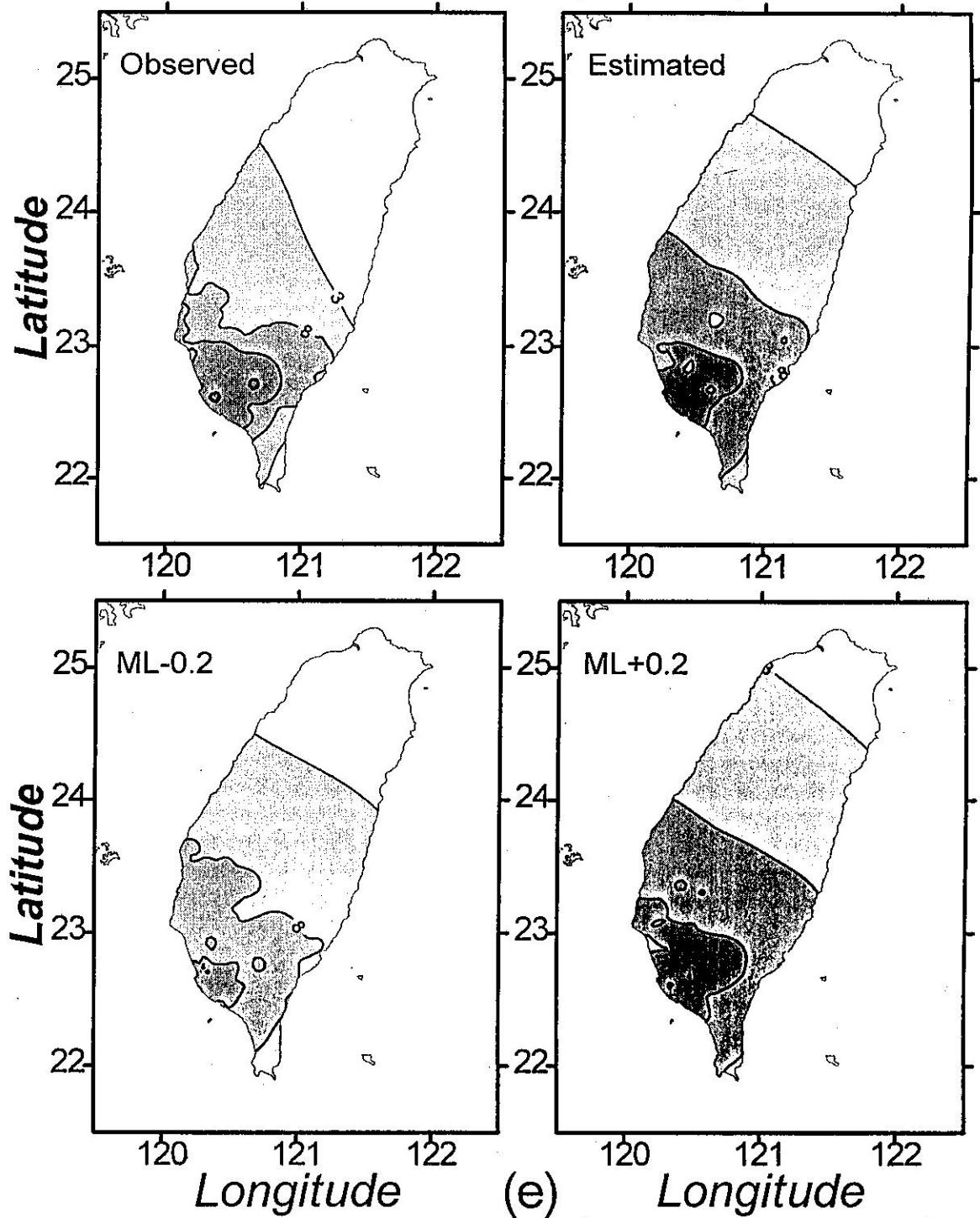


圖 6(e). 1995年4月25日地震

19960905 ML=6.70 Depth=14.76km

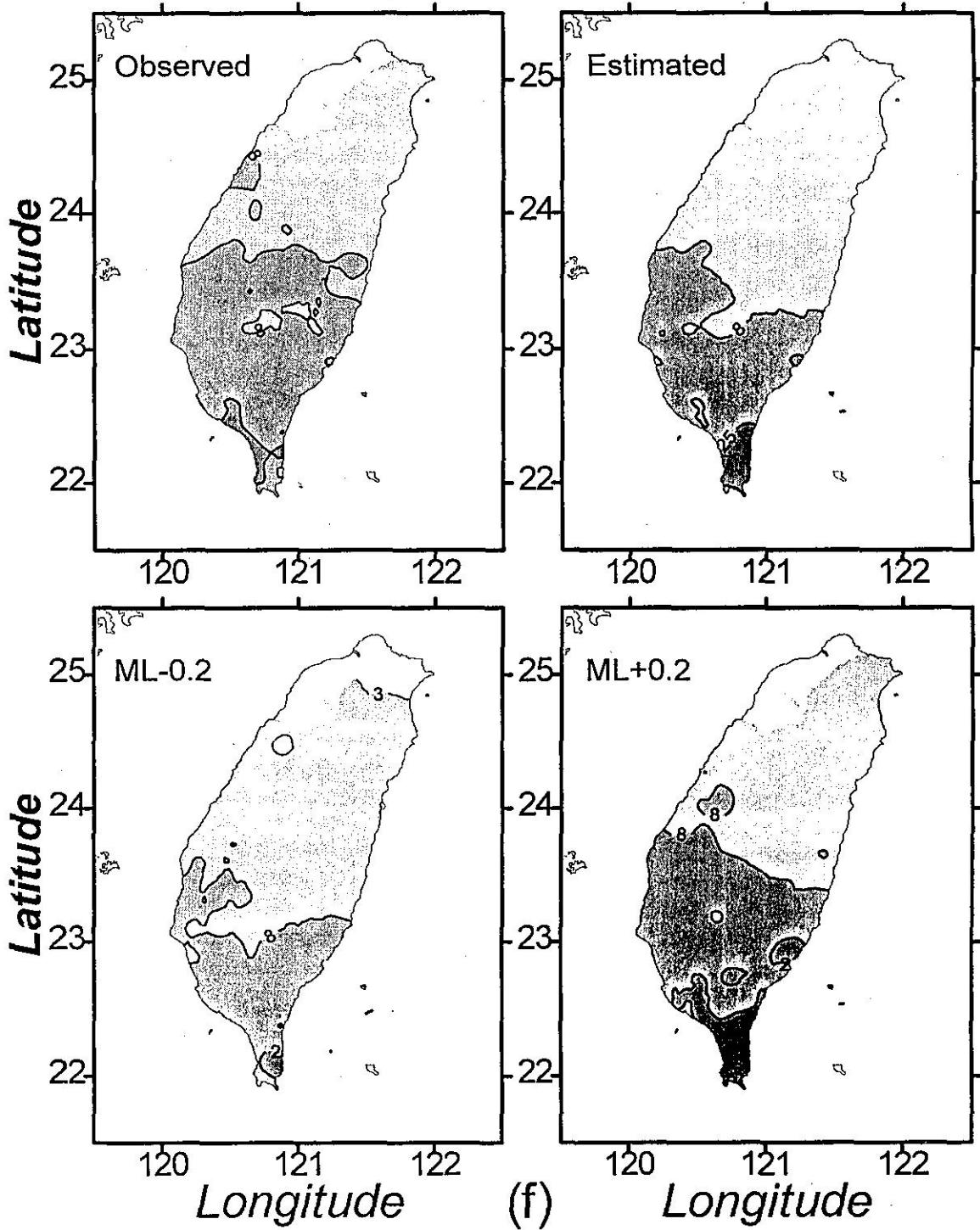


圖 6(f). 1996年9月5日地震

圖 6. 6個可代表不同震區的地震其估算之等震度圖與實際觀測等震度圖之比較，同時考量規模誤差約為 ± 0.2 時之情況，各圖中左上小圖為觀測圖，右上小圖為根據表1所列規模所估算之等震度圖，左下小圖及右下小圖分別為（規模-0.2）及（規模+0.2）時之情況。

A PRELIMINARY STUDY OF THE EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEM IN THE TAIWAN AREA

Tzay-Chyn Shin

Central Weather Bureau

ABSTRACT

Using the 22 sets of strong motion data collected by the Central Weather Bureau, the feasibility of an earthquake early warning system for the Taiwan area is studied. The attenuation curve of peak ground acceleration(PGA), site effects of strong motion site, and the relationships between PGA and the magnitudes of earthquakes are constructed for the prediction of PGA. The results can be easily applied right after the determination of earthquake epicenter and magnitude. Comparing the observed and calculated isoseismal map of the 22 earthquakes used by this study, it shows that the area of ground motion exceeding $8\text{gal}(\text{cm/sec}^2)$ can be effectively depicted. Some of strong motion sites occasionally show very local site effects which are underestimated by using this method. This may be caused by the effects of radiation pattern or path effects. Nevertheless, the results are stable enough to be tested in the operational mode.

Key words : Early warning system.