

交通部中央氣象局
委託研究計畫期末成果報告

最大餘震規模預報模式之建立
Forecast of the Largest Magnitude in Aftershock Sequence

計畫類別：氣象 海象 地震

計畫編號：MOTC-CWB-100-E-03

執行期間：100年01月01日至100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 100年11月17日

目錄

摘要資料表.....	2
摘要.....	5
研究方法.....	6
研究結果.....	8
參考文獻.....	11

政府研究計畫期中報告摘要資料表

計畫中文名稱	最大餘震規模預報模式之建立		
計畫編號	Forecast of the Largest Magnitude in Aftershock Sequence		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立台灣大學地質科學系		
年度	100 年度	執行期間	100 年 01 月 01 日至 100 年 12 月 31 日
本期經費 (單位：千元)			
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	30	30	0
經費支用	預定(千元)	實際(千元)	支用率 (%)
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳逸民		趙韋安
			黃信樺
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>迄今已有許多研究專注於大地震的前兆、預警分析，卻甚少研究關注其餘震帶來的危害性。事實上，以 1999 年集集地震為例，在主震發生後一週內即有 12 個 $M_L \geq 6.0$ 的餘震發生，其中 $M_L \geq 6.5$ 的更高達 6 個。由於些許建築物之結構已經遭受主震的破壞，更放大了餘震造成的地震損害。因此這些連續性的中、大規模餘震活動也是造成集集地震災情如此嚴重的原因之一。台灣地區位處高聚合速率之板塊邊界，擁有極高的地震活動度。歷來災害性地震序列的發生都造成難以估計的災損。因此，除主震的研究之外，若能同時分析並推估後續餘震可能之最大規模，將會使未來我們在防、減災方面的工作更加完善。</p> <p>本研究之目的在於推算主震發生後每個時點可能發生的最大餘震規模，進而建立預報系統，在主震發生後提供防、減災工作的警訊，使人們有更多的反應時間與心理準備。</p>		

研究成果

本研究中最大餘震規模 (M_a) 的推算，建基於兩個地震統計學上的經驗公式：Omori's law (Omori, 1894) 與 Gutenberg-Richter relation (Gutenberg and Richter, 1944)。前者是餘震個數隨時間遞減的經驗回歸公式；後者則是描述地震累積個數與地震規模間的對數關係式。Omori's law 在 1894 年由 Omori 發表後 (式 1.1)，Utsu (1961) 提出新的修訂公式，稱 modified Omori formula (式 1.2)：

$$n = \frac{C}{K+t} \quad (1.1)$$

$$n = \frac{C}{(K+t)^P} \quad (1.2)$$

在 1.1 與 1.2 式中， n 為餘震個數， C 、 K 為與餘震特性相關之常數， P 則是由 Utsu (1961) 所增訂之餘震衰減速率 (通常等於 1)。利用 modified Omori formula，我們可以經由分析台灣地區歷年的地震序列求取出常數 C 、 K 、 P 的地區經驗參數。於是便能得到餘震個數 (n) 隨主震發震後時間 (t) 的變化。接著利用 Gutenberg-Richter relation (式 1.3)：

$$\log N = a - bM \quad (1.3)$$

N 與 M 分別代表地震累積個數與規模， a 為此對數關係式中之常數，當 $M=0$ 時之截距。換言之， a 代表地震規模大於 0 之累計的個數。 b 則是斜率，在統計意義上，代表著不同規模間之地震活動度的分配情形 (在全球許多的地震統計研究中皆顯示其值應趨近於 1) (圖一)。

C 、 K 、 P 分別是我們已經求得的經驗參數，因此將式 1.2 之主震發生後之任意時間區段積分，便可求解出每一時間段的 n 個餘震個數。同樣地，經由分析我們可以得到台灣各地的經驗 b 值，帶入式 1.3 之後，接著我們將從式 1.2 得來的地震個數 n 作為此關係式的地震累計總數 a 帶入 (圖二)，再令 $N=1$ (代表累積個數的第一個地震，即為最大規模)，便能反求出可能發生的最大規模。

在地震研究中，受限於地震網儀器紀錄的靈敏度，往往我們能完整記錄到的最小規模並非為 0，而是最小完整地震規模 (M_c)，因此在式 1.3 中， a 值並無法利用直接觀測得知，而是以規模大於最小完整地震規模之地震目錄逆推得出。本計劃將採用 maximum likelihood approach (Aki, 1965) 逆推求得 Gutenberg-Richter relation 中 a 與 b 值。

具體落實應用情形	下半年度將使用研究成果分析實際觀測資料
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)	

最大餘震規模預報模式之建立

Forecast of the Largest Magnitude in Aftershock Sequence

吳逸民、詹忠翰

摘要

伴隨在災害性主震之後的中、大規模餘震活動常是造成嚴重災損的原因之一，但分析餘震規模之相關研究卻不多。如何掌握餘震活動可能帶來的危害性亦是防、減災工作的要點。本計劃欲利用 Omori's law 與 Gutenberg-Richter relation 之統計經驗公式來推算主震發生後每個時點所可能發生的最大餘震規模(M_a)，進而建立預報系統，期能對民眾與防、減災工作者提供主震後更多的訊息。

迄今已有許多研究專注於大地震的前兆、預警分析，卻甚少有研究關注其餘震帶來的危害性。事實上，以 1999 年集集地震為例，在主震發生後一週內即有 12 個 $M_L \geq 6.0$ 的餘震發生，其中 $M_L \geq 6.5$ 的更高達 6 個。由於些許建築物之結構已經遭受主震的破壞，更放大了餘震造成的地震損害。因此這些連續性的中、大規模餘震活動也是造成集集地震災情如此嚴重的原因之一。台灣地區位處高聚合速率之板塊邊界，擁有極高的地震活動度。歷來災害性地震序列的發生都造成難以估計的災損。因此，除主震的研究之外，若能同時分析並推估後續餘震可能之最大規模，將會使未來我們在防、減災方面的工作更加完善。

本研究之目的在於推算主震發生後每個時點可能發生的最大餘震規模，進而建立預報系統，在主震發生後提供防、減災工作後續的警訊，使人們有更多的反應時間與心理準備。

Abstract

Moderate and large aftershocks followed by devastating earthquakes usually cause serious damages. However, only few studies focus on aftershock behaviors. It is important for seismic hazard prevention and mitigation to understand behaviors of aftershock activities. In this project, we will introduce Omori's law and Gutenberg-Richter relation to forecast maximum magnitudes (M_a) during different periods after occurrence of large earthquakes. We expect that through this project, decision makers and the general public acquired more information after occurrence of large earthquakes.

We expect to analysis seismic sequence in the Taiwan region and acquire empirical formulas to evaluate largest magnitude of aftershocks. In the second year,

we apply our empirical formulas practically and evaluate its feasibility. In the third year, we try to build up an automatic forecasting system in Central Weather Bureau.

研究方法

本研究中最大餘震規模 (M_a) 的推算，建基於兩個地震統計學上的經驗公式: Omori's law (Omori, 1894) 與 Gutenberg-Richter relation (Gutenberg and Richter, 1944)。前者是餘震個數隨時間遞減的經驗回歸公式；後者則是描述地震累積個數與地震規模間的對數關係式。Omori's law 在 1894 年由 Omori 發表後 (式 1.1)，Utsu (1961) 提出新的修訂公式，稱 modified Omori formula (式 1.2)：

$$n = \frac{C}{K + t} \quad (1.1)$$

$$n = \frac{C}{(K + t)^P} \quad (1.2)$$

在 1.1 與 1.2 式中， n 為餘震個數， C 、 K 為與斷層特性相關之常數， P 則是由 Utsu (1961) 所增訂(通常等於 1)。利用 modified Omori formula，我們可以經由分析地震序列求取出常數 C 、 K 、 P 。於是便能得到餘震個數 (n) 隨主震發震後時間 (t) 的變化。接著利用 Gutenberg-Richter relation (式 1.3)：

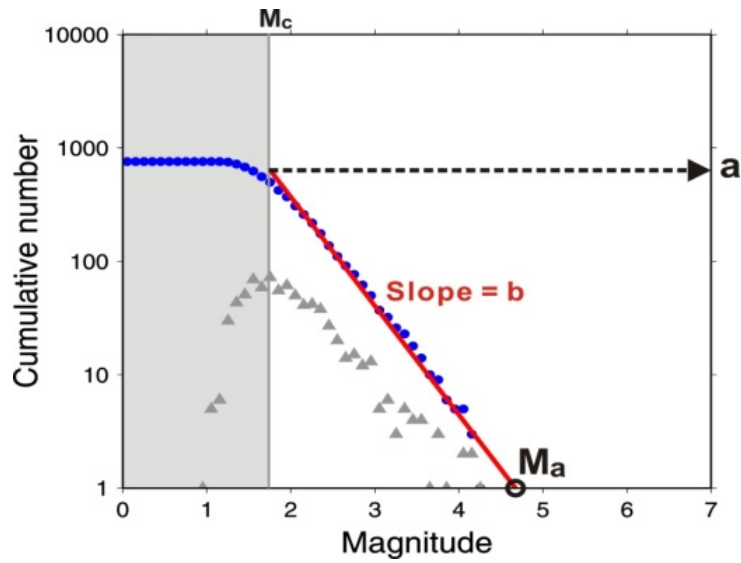
$$\log N = a - bM \quad (1.3)$$

N 與 M 分別代表地震累積個數與規模， a 為此對數關係式中之常數，當 $M = 0$ 時之截距。換言之， a 代表地震規模大於 0 之累計的個數。 b 則是斜率，在統計意義上，代表著不同規模間之地震活動度的分配情形(在全球許多的地震統計研究中皆顯示其值應趨近於 1)(圖一)。

C 、 K 、 P 分別是我們已經求得的經驗參數，因此將式 1.2 之主震發生後之任意時間區段積分，便可求解出每一時間段的 n 個餘震個數。同樣地，經由分析我們可以得到經驗 b 值，帶入式 1.3 之後，接著我們將從式 1.2 得來的地震個數 n 作為此關係式的地震累計總數 a 帶入(圖二)，再令 $N=1$ (代表累積個數的第一個地震，即為最大規模)，便能反求出可能發生的最大規模。

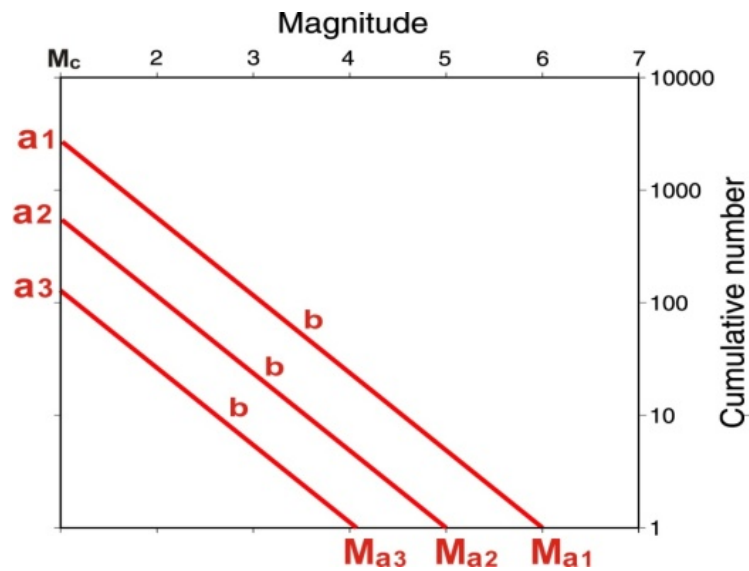
在地震研究中，受限於地震網儀器紀錄的靈敏度，往往我們能完整記錄到的最小規模並非為 0，而是最小完整地震規模(M_c)，因此在式 1.3 中， a 值並無法利用直接觀測得知，而是以規模大於最小完整地震規模之地震目錄逆推得出。本計劃將採用 maximum likelihood approach (Aki, 1965) 逆推求得 Gutenberg-Richter relation 中 a 與 b 值。

圖一 Gutenberg-Richter relation 示意圖。藍點為一地震序列隨規模由大到小的累積個數，灰色三角形則為個別每個規模區段的地震數目，其最大值即為最小完整地震規模(M_c)， a 則代表 $M=M_c$ 時之截距。當 $N=1$ 時即得最大餘震規模 M_a 。



積個數，灰色三角形則為個別每個規模區段的地震數目，其最大值即為最小完整地震規模(M_c)， a 則代表 $M=M_c$ 時之截距。當 $N=1$ 時即得最大餘震規模 M_a 。

圖二 可能最大餘震規模之時序變化示意圖。 a_1, a_2, a_3 分別代表由式 1.2 中代入



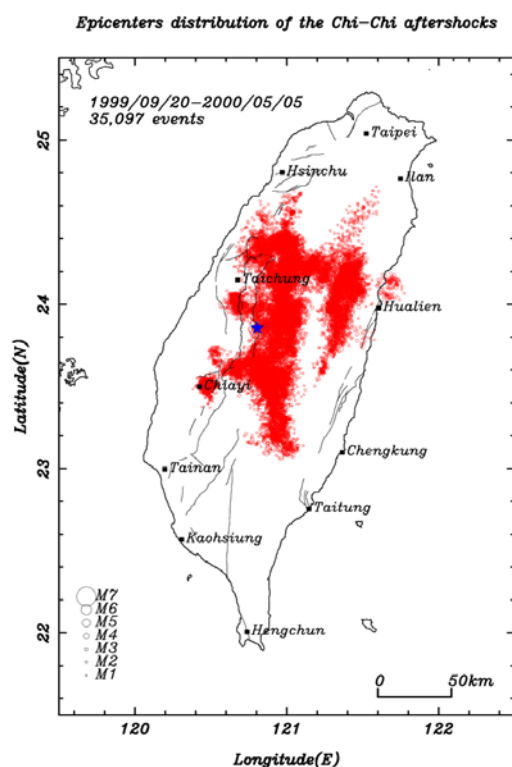
主震發生後時間 t_1, t_2, t_3 所求出之 n 值，隨著時間的增加餘震數目遞減，所推算出的可能最大餘震規模也隨之減小。

研究結果

本研究利用集集大地震的餘震分析台灣地區地震主餘震序列的特性，從而歸納求出公式中地區性的經驗常數，用以建構適用的最大餘震規模轉換公式。圖三是集集大地震的餘震分布，餘震是指地震發生後 3 天內，震央半徑 5 公里內發生之地震。

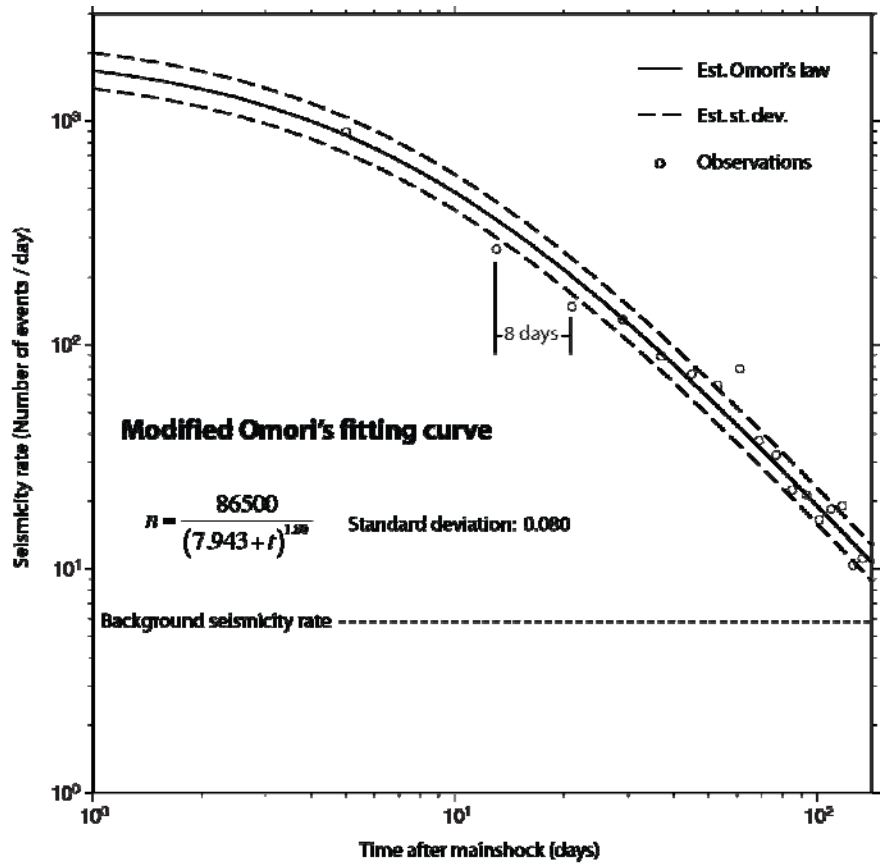
根據統計資料結果，集集地震的餘震自 1999 年 9 月 20 日至 2000 年 5 月 5 日共計發生 35,097 次。

一般而言，餘震定義為主震所誘發之地震，易言之，餘震期間之地震活動度應大於背景值。因此，本研究考量餘震地區在集集地震震前之地震時空分布，得出該地區之背景地震活動值為每日 5.78 次大於 M_c 之地震。比較震後之地震活動度，發現集集震後 141 天後（即 2000 年 2 月 8 日），地震活動小於背景值。故以此作為餘震終止時間。在此段時間內，共發生 34,546 次規模大於 M_c 之地震。



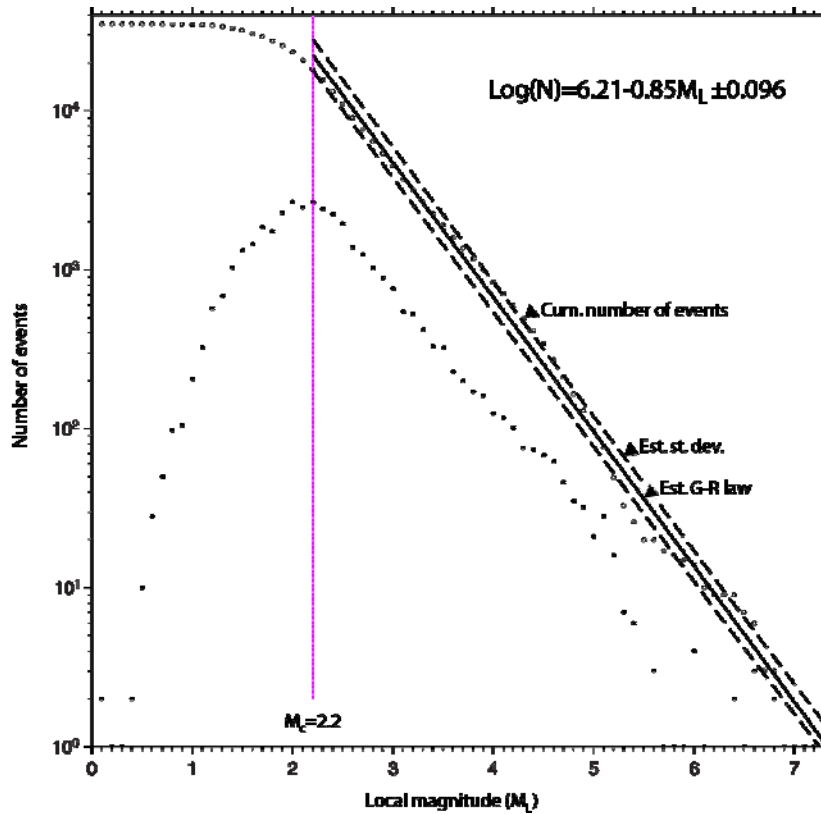
圖三 集集大地震餘震分布

圖四的橫軸為主震發生後經過的時間對數值，縱軸為 1 天內發生的餘震次數對數值，將主震後經過的時間和餘震次數代入 modified Omori formula (式 1.2) 迴歸計算出集集地震之餘震個數隨時間遞減的經驗公式如圖四的黑色實線，計算結果 $K=86500.0$ ， $P=1.80$ ， $C=7.943$ 天。



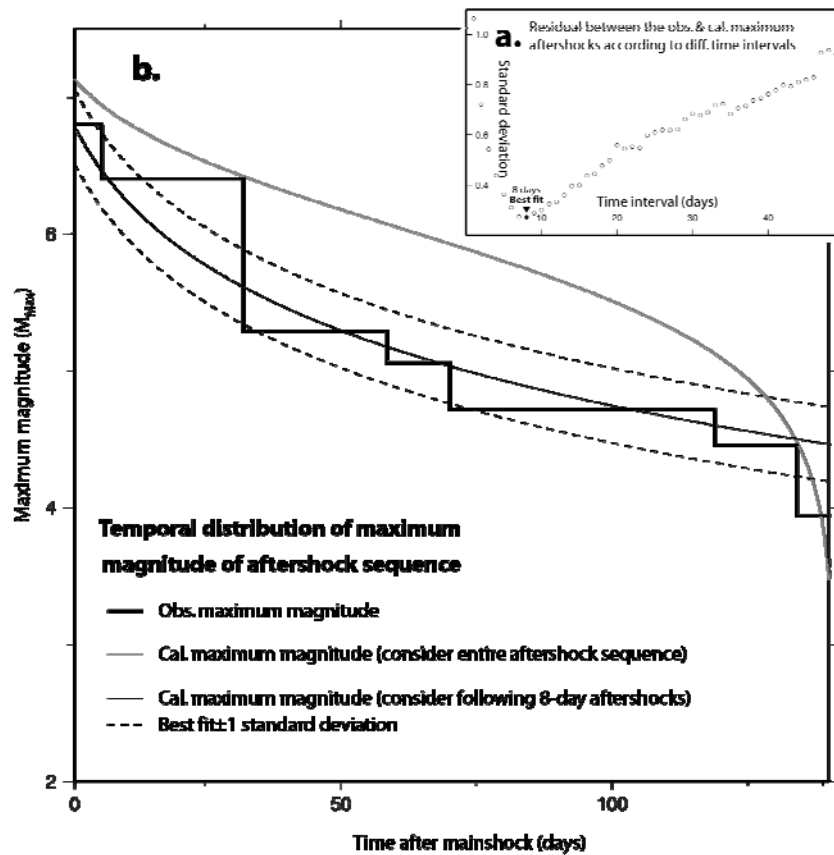
圖四 主震後經過的時間與餘震次數關係圖

圖五的橫軸是地震規模(M_L)，縱軸是地震累積個數(N)的對數值，將地震累積個數和地震規模代入 Gutenberg-Richter relation (式 1.3) 迴歸計算出地震累積個數與地震規模關係的經驗常數 $a=6.248$ ， $b=0.857$ ，標準差=0.109，最小完整地震規模(M_C)為 2.2。



圖五 地震規模與地震累積個數關係圖

將式 1.2 之主震發生後之任意時間區段積分，便可求解出每一時間段的 n 個餘震個數，進一步帶入式 1.3 之後，令 $N=1$ (代表累積個數的第一個地震，即為最大規模)，便能反求出可能發生的最大規模。我們帶入不同時間區段，計算相對應之最大規模並與觀測結果比對 (圖六 a)。發現當時間區間 (time interval) 設定為 8 日時，預估最大規模並與觀測結果有著最大近似結果，二者之間之標準差為 0.27。此一結果顯示在大型地震發生後得以評估在震後不同時間點之最大餘震規模。此外，我們利用各時間點至震後 141 天 (餘震結束) 之時間區間，計算相對應之最大規模 (圖六 b 中灰色實線)。此一結果與觀測結果比對 (圖六 a 中黑色粗實線)，發現此結果囊括各時間觀測之最大餘震。顯示利用此方法可評估隨時間演化之最大餘震的最大值。



圖六 (a) 以不同時間區間計算之最大餘震規模與觀測結果之標準差。(b) 主震後經過的時間與餘震規模關係圖。粗黑色實線為觀測值、灰色實線為各時間點至震後 141 天 (餘震結束) 之時間區間, 計算相對應之最大規模、細黑色實線為各時間點後 7 天之時間區間, 計算相對應之最大規模、虛線為其標準差。

參考文獻

- Aki, K., 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, 43, 237–239.
- Gutenberg, B., Richter, C., 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed., 310 pp., Princeton Univ. Press, Princeton, N. J.
- Omori, F., 1894. On the aftershocks of earthquakes, *J. of the College of Science*, Imperial University of Tokyo, 7, 111–200.
- Utsu, T., 1961. Statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, 30, 521–605.