

地震活動度定量化之研究

On the Quantification of Seismicity

徐 明 同

Ming-Tung Hsu

Abstract

New codes of expressing seismicity of particular place or region are proposed in this paper. The idea comes from the chemical or climatological formulation. It consists Roman, Arabic and alphabet numerals in expressing the following set of parameters of seismicity and seismotectonics: (i) type of earthquake T, (ii) depth of earthquake D, (iii) mean energy release E, (iv) maximum earthquake magnitude M, (v) maximum MSK-scale intensity with its acceleration I, (vi) a, b values of the Gutenberg-Richter's magnitude-frequency relation, and (vii) remarks, as specified:

LOCATION/T/DDDD/EEEE/MMM/IIIII/aaaa/bbbb/REMARKS

By using the new codes, a general grasp of the seismicity can be realized not only qualitatively but also quantitatively, as well as with certain relations between seismicity and geotectonics. Moreover, the seismicity at different places and in different time intervals would be able to compare with each other without any difficulties. The method of plotting these parameters on map is proposed for seismic map zoning of which are very useful in the field of seismicity and earthquake engineering.

一、前 言

地震活動（度）(Seismicity)一詞，在地震學及地震工程方面業已廣泛使用，但迄今並無明確的定義，僅模糊地表示地震活動旺盛程度之定性概念。然而各使用者之思想裏，雖不是很明確，但都存有一種定量概念。有時地震活動度指某地區某一段時間之地震次數，或這些地震釋放出來之能量，甚至於地震次數或能量之時間或者空間變化以及地震規模(Earthquake magnitude)之分布等等。總而言之，大家都想以此詞來表示地震活動之生態，並盼望也能定量地表示地震活動之狀況，特性及其旺盛程度。

從歷史上的發展而看，1900 年 Montessus [1] 根據地震之發生次數和強度(Intensity)，把地震活動度，大略分為三類，即穩定(stable, or aseismic) 地區，準地震(penesismic) 地區及地震(seismic) 地區。在穩定地區如俄國或巴西，幾乎沒有地震發生，在準地震地區如瑞士有少數不強烈地震發生，而在地震地區如日本有很多地震包括許多強烈地震發生。此外他並定義地震線(Seismic lines)——每邊長度和 $\sqrt{pA/n}$ 成比例之正方形，n 為地震次數，p 為觀測年數，A 為面積以 Km^2 為單位——想尋找這些線和區域地質之相關。

Sieberg [2] 於 1904 年，定義地震活動度 a 為

上式中 S 為面積， N 為 n 年間觀測之地震次數。顯然地這種定義表示地震發生愈多，地震活動度愈小，故不太合理。因此 Knott [3] 於 1908 年提倡相反定義，即地震活動度 b^2 為

上式表示地震活動度和平均地震次數成正比，較為合理。此外他亦使用極大地震加速度年總和 $\sum_{i=1}^n a_{imax}$ 和 T 年間釋放之平均能量 $\Sigma Ei/T$ 等來表示地震活動度。

Byerly [4] 於 1942 年定義一種加權比指數 (Index number being a weighted ratio) I 為，

$$I = \frac{\sum_i p_i n_i}{\sum_i p_i} \dots \quad (3)$$

上式中 n 為地震次數 p_i 為加權數。加權數的定義如下： $p_i = 1$ 表示該地震強度不致於使可動物體移動者， $p_i = 5$ 該地震比上述者強，但不致石造建築物發生災害者， $p_i = 25$ 該地震致石造建築物發生災害者，而 $p_i = 125$ 該地震在表面發生斷層者。他計算單位面積單位時間的這種指數，當做地震活動度指標而繪製美國加州的地震活動圖。

Gutenberg 和 Richter [5] 於 1949 年，出版著明的「Seismicity of the Earth」一書，廣泛地討論世界地震活動度，但對地震活動度並無明確定義。Bullen [6] 和 Richter [7] 等之著作亦多處使用地震活動度，但也沒有明確定義。

Benioff [8] 計算應變釋放 (Strain release) 能量的平方根，為時間的函數，也被視為某特定地區，甚至於全世界的多年地震活動度。

Amand [9] 於 1956 年，提倡兩種地震活動度表示法。即比地震活動度 (Specific seismicity) S 和構造通量 (Tectonic flux) F。S 為某地區某段時間內，地震釋放能量之總和，

上式中 J 為能量， A 為所選定的面積， T 為觀測時間，而 K 為隨着所用單位而不同的常數。構造通量 F 為某地區某段時間內，地震釋放能量之平方根，

$$F = \frac{1}{AT} \int_{\tau_0}^{\tau_1} \int_{\omega_0}^{\omega_1} \sqrt{J} dA dT \dots \dots \dots (5)$$

根據 Benioff [8] F 和某地區之應變釋放率 (Strain

release rate) 成比例。Amand 上述兩種定義，事實上和 Båth [10] 的想法相同。

據 1960 年出版的 Webster 辭典 [11]，地震活動的定義如下：地震之狀態（State），性質（Quality）或程度（Degree）；相對遭震率（Relative liability to earthquakes），明確地指某地區發生之地震頻率，用所紀錄地震總數和該地區面積（單位為平方哩）之比率表示。

Ullmann 和 Maaz [12] 於 1967 年，定義地震活動度 $S(Z)$ 為，

$$S(Z) = \sum_{i=1}^n S_i(Z) \approx \sum_{i=1}^n E_i p_i \dots \dots \dots (6)$$

E_i 為第 i 個地震的能量， $p_i(Z)$ 為在點 Z 第 i 個地震之分布密度 (Distribution density) 值，而此值由震央距離和觀測震度間之關係而定。

Stacey [13] 說，Seismicity 和 Seismic activity 完全相同，係指地震之地理學，特別是地震和地表面狀態以及地震規模（或能量）之關係。

另一方面在俄國 Riznichenko [14, 15, 16] 不但想定性地表示地震活動度，而且也想定量地表示。他以地震活動 (Seismic activity) 和震動能力 (Shakeability) 來表示整個地震活動度。震動能力的定義，為任意震度階級，其平均發生次數。地震活動 A，反映震央密度之橫向分布。A 表示地震規模範圍， $K = 10 \pm 0.5$ ($K = \log E$, E 為能量, joule 為單位) 之地震，每年每 $1,000 \text{ Km}^2$ 發生之平均頻率。在俄國 $A \sim 0.01$ 程度區域，當做弱震區， $A \sim 0.1$ 程度為中震區，而 $A \sim 1$ 程度，為強震區。可能發生之最大地震 K_{\max} ，為平均地震活動 \bar{A} 的函數，而由兩者相關關係求之。他以這些指數表示許多地方之地震活動狀況。此外他亦提倡地震「氣候」(Seismic climate) 及地震「天氣」(Seismic "weather") 等兩種概念，應用於區域地震活動之研究。

在日本方面有關地震活動度之研究，不勝枚舉。對於地震活動度都無明確定義，大都分研究例如 Tsuboi [17], Hirono [18], Tamaki [19], Suzuki [20] 等，均討論地震之空間及時間分布，以及其規模或能量。最近的研究例如 Miyamura [21, 22], Katsumata [23]，不但討論空間及時間地震分布，而且也考慮地震活與地體構造 (Geotectonics) 之關係。

最近 Terashima (24), 提倡地震活動度指數 (Seismicity index) S_r 為,

$$S_T = \left(\frac{\sum_{M \geq 6} N(M)}{T} \right)_{\Delta \leq 100 \text{ Km}} \dots \dots \dots \quad (7)$$

上式中 T 為統計年數， $N(M)$ 為震央距離 Δ 在 100 Km 以內，規模 M 大於或等於 6 之淺層地震次數。他以此 S_T 定量地表示地震活動，並繪製日本地震活動度圖。

有關地震活動，和地體構造關係之研究，近年來很多。例如 Sykes [25]，Hamilton 和 Gale [26]，Hatherton 等 [27]，Katsumata 和 Sykes [28]，Miyamura [29] 及 Hsu [30, 31] 等等。

本文將創造一種新的地震活動綜合表示法，將定性地且定量地表示地震活動之生態，旺盛之程度，並言及地震活動與地體構造之關係，藉以能使各地以及不同時期之地震活動度互相比較，且便於繪製地震分區圖 (Seismic zoning map)，配合地震活動之研究及耐震工程設計之需要。

二、地震活動度之表現法

前面已述地震活動度，必須能定性的且定量的表示某地點或某地區之地震活動狀況，以及和當地地體構造的關係，才能說完整，故過去只用一箇指標不可能完整地表示。著者設計一種綜合表示法，而此法係自 Köppen [32] 的氣候分類方法所暗示得來。

將表示某地點或某地區地震活動度，必須先地震活動度參數分類或分級列出，使各地地震活動之狀況，能一目瞭然地看出才有意義。因此所表示的要素也就是地震活動度的參數，應採用盡量簡單的，容易記憶的，而能定性的且定量的表示地震活動度者。此外也須考慮便於繪圖以及容易互相比較等條件。

為了比較起見，代表某地點或地區，必須採取相同面積，例如以此點中心，半徑 100 Km 之圓 [24]，或以此點為中心之面積 1,000 Km² [15]。關於統計時間以 30 年或 50 年即可。如果統計年數過短，資料較少，如過長不容易看出長期地震活動之變動。

以一段時間內，在此區內發生的地震做基本資料，而訂定此地點或地區的地震活動度。

表示個個地震的參數計有：(1)發震時，(2)震央位置，(3)震源深度，(4)地震規模或(5)震央最大震度等。即表示地震「天氣」，上面的要素就够了。如果要表示地震「天氣」之整體 (Totality)，也就是所謂地震「氣候」，我們必須再考慮下面的問題。

(一) 地震之型式 (以 T 表示) 和地體構造之關係，例如地震是發生在島弧，海溝或者海嶺等問題。

(二) 地震之深度 (D)：此區地震是屬於極淺層、淺層，中深度或深層地震等問題。

(三) 地震能量 (E)：在此區單位面積和單位時間，地震釋放之能量。

(四) 過去發生之最大地震規模 (M)。

(五) 過去發生之最大震度 (I)。

(六) 地震規模與地震次數之關係：據 Guteberg 和 Richter [5]，地震規模 M 和地震 次數 N 之關係式為，

$$\log N = a - bM \dots \dots \dots \quad (8)$$

上式中 a 和 b 為常數而係表示地震活動特性的一種參數。即 a 表示規模零之地震次數的常用對數，和統計年數及所考慮區域之面積大小有關，而 b 表示較大地震和較小地震之比率，如 N 軸取對數刻度， M 軸取普通刻度， b 表示兩者間直線之梯度。據 Miyamura [21] 和 Mogi [33]， b 值和當地地體構造有密切關係。

有了上面所述情報，我們就可以定性地且定量地，也就是完整地表示地震活動度。下面將詳述其表示法。

關於地震之型式 (T)，將採用 Santo [34] 之分類法。即

I 型：海嶺型 (Ocean ridge type)，表示發生沿海嶺之正斷層 (Normal fault) 淺層地震。

II 型：轉變型 (Transform type)，發生在海嶺錯開 (dislocate) 之地帶，也就是破碎帶 (Fracture zone) 或者轉變斷層 (Transform fault) 上的淺層地震。

III 型：下衝型 (Underthrusting type)，發生在沿海溝的淺層地震，因海洋板塊 (Ocean plate) 向大陸板塊 (Continental plate) 下，下衝，而後者被前者拖曳而發生的逆斷層型 (Reversal fault type) 地震。

IV 型：島弧型 (Arc-island type)，發生於海洋板塊向大陸板塊下衝的部分，即沿海溝但靠大陸或緣海 (Marginal sea) 方面，也就是 Benioff 面內深度較深的地震，而最大應力或張力之方向和板塊平行。

V 型：緣海型 (Marginal sea type)，發生的地方和 IV 型相同，但深度較淺，因蓄積在大陸板塊內應力所引起，而應力方向和島弧或海溝成垂直。

VI 型：孤立大陸型 (Isolated continental type)，孤立的發生在大陸內部，震源深度大約 100

至 200 Km。最大應力軸大都為水平，發生機構尚不太明瞭。

VII型：分散型或塊狀型 (Dispersed type or Block type)，分散發生在大陸地殼內的地震，可能是大陸板塊本身橫方向不均勻而引起，以及許多較小地塊 (Block) 之間互相作用而引起之地震。

VIII型：衝突型 (Collision type)，因兩個板塊突而引起之地震。

IX型：其他型式，不屬於 I 至 VIII型之地震。

關於地震型式 (T)，有 I 至 IX型，可以使用一格而用一箇英文字來表示，代表性地震型式。表示地震型式之英文字如表一。

表 一

| 地震型式 | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX |
|-------|---|----|-----|----|---|----|-----|------|----|
| 英 文 字 | R | F | U | A | M | I | D | C | E |

(D)項有關地震之深度 (D)，可以使用四格，而用四個英文字表示如表二。四格裏，第一格表示有沒

表 二

| | 極淺層 地 震 | 淺層地震 | 中深 度 震 | 深層地震 |
|---------------|---------------|---------|--------------|-----------|
| 地震之 深 度 | 0~33Km | 34~70Km | 71~300Km | 301~700Km |
| 英文字 | N | S | I | D |

有極淺層地震，有時即填 N，第二格表示有沒有淺層地震，有時即填 S，沒有時填一以填空格，以下類推，填到第四格。從這四個資料，可以看出該處地震隨着深度變化之情形。

(E)項表示單位面積單位時間地震釋放之能量 (E)

| 地名 | 地震型式 T | 地震之深度 D D D D | 平均能量 E F E E | 最大規模 M M M | 最大震度 I I I I I | a 值 a a a a | b 值 b b b b | 記事 | |
|----|-----------|------------------|-----------------|---------------|-------------------|----------------|----------------|----|---|
| | | | | | | | | 甲 | U |

即甲 /U/NSI-/2 77/8.0/IX 0.31/8.02/1.12/1941-1970 年

例二：設 Z 點位於華中，使用地震資料年數為自 1901 年至 1950 年，地震型式屬於 VII型即分散或塊狀型，只有極淺層地震，沒有更深的地震，每年每平方公里釋放之地震能量為 1.5×10^7 ，過去最大地震規模為 6.6，過去最大震度為 MS K 震度階級 VII，最大加速度不明，a 也不明，b 為 0.55。此例可寫

，以每年每平方公分 erg 為單位 ($\text{erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr}$)。使用四格來表示，前三格填小數一位數字，後一格使用一箇數表示 10 之方數。例如該處平均地震能量為 $1.5 \times 10^7 \text{ erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr}$ ，就用 1.57 表示。

IV項表示該處過去發生之最大地震規模 [M]，使用三格，填規模至小數一位，例如 7.5, 8.0 等。

VII項表示過去發生之最大震度 (I)。震度階級將使用聯教組織於 1964 年所建議之 MS K 震度階級 [35]，共有 I 至 XII 級。用一格以羅馬數字來表示。如知道加速度以 g (重力加速度) 為單位，填至小數二位，計再用四格，例如最大加速度為 0.45 g，就填 0.45。如果沒有加速度數值，這格中即填——記號。

VI項常數 a 及 b，各使用四格，填小數兩位數字。

此外最前面加該地地名，最後一欄加記事，填寫統計年數，或者其他事項。整個格式如下：

地名 /T/DDDD/EEEE/MMM/IIII/aaaa/
bbbb/ 記事

三、實例

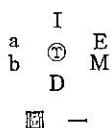
依照前節所規定的方法，表示某地的地震活動度，即可以知道定性且定量的地震活動，以及和地體構造之關係。下面將舉兩個例子。

例一：設以甲點自 1941 年至 1970 年間發生的地震資料為基本資料，且甲點位於日本太平洋岸，地震型式屬於下衝型，有極淺層，淺層及中深度地震但無深層地震，每年每平方公里釋放之地震能量為 $2.7 \times 10^7 \text{ erg}/\text{cm}^2 \cdot \text{yr}$ ，過去最大地震規模為 8.0，過去最大震度階級為 MS K 震度階級 IX 級，最大加速度為 300gal (=0.31g)，a 為 8.02，b 為 1.12。這些情報將用前面所述的格式表示，可得

乙 /D/N---/1.54/6.6/VII---/----/0.55/1901-1950

這種新表示法不但用上述形式，而且也可容易地繪在圖上。以圓圈表示地點，圓圈內 T 字表示地震型式，上面 I 表示最大震度階級，必要時附加加速度

值，F 及 D 表示地震深度，右邊 E 表示平均地震能量，M 表示最大地震規模，左邊 a 值及 b 表示 a 值及 b 值。即如圖一。



圖一

如甲和乙點地震活動度，以這種方法表示在圖上，即如圖二和圖三。

IX (0.31)
8.02 ① 2.7 × 10⁷
1.12 ② 8.0

圖二 甲點

VII
— ① 1.5 × 10⁴
0.55 ② 6.6

圖三 乙點

使用上述方法，把許多地點之資料，填在圖上，即可以繪製各種等值線並可做地震分帶 (Seismic zoning)，一目瞭然地了解各地的地震活動度。不但可以互相比較同一期間內各地之地震活動而且可以比較不同期間之某地地震活動度隨着時間之變化。

四、結語

本文試用一種類似化學公式或氣候表示公式來表示地震活動，希望能定性地且定量地甚至於表示地震活動與地體構造之關係。這種新的表示方式包括許多有關地震活動之重要參數，但方法簡單明瞭且很容易記憶。

過去描寫某地點或某地區之地震活動度僅用上述參數中之一小部分而已，不够詳細，且不能互相比較，其活動之程度。本文所用的表示法，已網羅所有有關地震活動之參數，故世界各地如果都採用這種方法表示，不但便於互相比較各地的或不同期間的地震活動度，而且也很容易繪製地震分區圖，對於地震活動之研究，以及耐震工程設計上有莫大參考價值。

本文中採用 Santo 之地震分類型式，表示地震活動與地體構造之關係。唯一值得再檢討者為這種分類型式，待將來有更進一步分類法時再修改。

未來的工作係把過去所做的臺灣地區地震活動度用這種方式得以完成，並盼望能推廣至世界各地。

參考文獻

- Montesus de Ballore (1900): Introduction à une description séismique du globe et mesure de la séismicité, Beitr. zur Geophys.,

- 4, 331-382.
- Sieberg, A. (1940): Erdbebenkunde, 481.
- Knott, C. G. (1908): The physics of earthquake phenomena, 180.
- Byerly, P. (1942): Seismology, 256.
- Gutenberg, B. and C. F. Richter (1949): Seismicity of the Earth, 303.
- Bullen, K. E. (1947): An introduction to the theory of seismology, 381.
- Richter, C. F. (1958): Elementary seismology, 768.
- Benioff, H. (1955): Seismic evidence for crustal structure and tectonic activity, Bull. Seis. Soc. Am., Spec. Paper 62, 61-75.
- Amand, P. st. (1956): Two proposed measures of seismicity, Bull. Seis. Soc. Am., 46, 41-45.
- Bath, M. (1956): A note on the measure of seismicity, Bull. Seis. Soc. Am., 46, 217-218.
- Neilson, W. A., et al. (1960): Webster's new international dictionary of the English language, 3194.
- Ullmann, W. and R. Maaz (1967): A new determination of seismicity, Gerlands Beitr zur Geophys., 76, 315-320.
- Stacey, F. D. (1969): Physics of the earth, 324.
- Riznichenko, Y. V. (1969): On quantitative determination and mapping of seismic activity, Annali di geofisica, Vol. 12, 2, 227-237.
- Riznichenko, Y. V. et al. (1969): Seismic activity and shakeability of the Apenninian region, Boll. di Geof. Teorica ed Applicata, Vol. 11, No. 43-44, 227-238.
- Riznichenko, Y. V. (1969): Problems in detailed studies of regional seismicity (Translated by J. Büchner) Izv., Earth Physics, No. 7, 3-20.
- Tsufoi, C. (1958): Seismic activities in and near Japan, Contribution in Geophys., 87-112.
- Hirono, T. (1960): Seismicity of Japan, Proc. 2nd World Conf. on Earthq. Eng., 1511-1521.

19. Tamaki, I. (1961): Seismicity relation to the crustal structure, with the special reference to Japan area, Mem. Osaka Inst. Tech., A, 7, 95.
20. Suzuki, Z. and K. Suzuki (1965): On space distribution of earthquakes, Sci. Rep. Tohoku Univ., 5, 17, 9-23.
21. Miyamura, S. (1962): Magnitude frequency relation of earthquakes and its bearing on geotectonics, Proc. Japan Acad., 38, 27-30.
22. Miyamura, S. (1969): The seismicity of Japan and the surrounding area, (Translated by Bücher) Izv., Earth Physics, No. 7, 21-50.
23. Katsumata, M. (1970): Seismicity and some related problems in and near the Japanese Islands, Kenshinjiho, Vol. 35, No. 3~4, 75-142.
24. Terashima, T. (1972): Quantification of seismicity, Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng., Vol. 11, 33-41.
25. Sykes, L. R. (1966): The seismicity and deep structure of island arcs, J. G. R., Vol. 76, No. 12, 2981-3006.
26. Hamitors, R. M. and A. W. Gale (1968): Seismicity and structure of north Island, New Zealand, J. G. R., Vol. 73, No. 12, 3859-3876.
27. Hatherton, T. et al. (1969): The relationship between andeside volcanism and seismicity in Indonesia, the Lesser Antilles, and the other island arcs, J. G. R., Vol. 74, No. 22, 5801-5810.
28. Katsumata, M. and L. R. Sykes (1969): Seismicity and tectonics of the western Pacific: Izu-Mariana-Caroline and Ryukyu-Taiwan regions, J. G. R., Vol. 74, No. 25, 5923-5948.
29. Miyamura, S. (1969): Seismicity of the Earth, Geophys. Monograph, No. 13, The earth's crust and upper mantle, Am. Geophys. Union, 115-124.
30. Hsu, M. T. (1971): Seismicity of Taiwan and some related problems, Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng., Vol. 8, 41-160.
31. Hsu, M. T. (1973): Seismicity and tectonics of Taiwan-Philippine Arc, Bull. Inst. Geophys., National Central Univ., Vol. 13, 1-25.
32. Köppen, W. (1931): Grundriss der Klimakunde, 338.
33. Mogi, K. (1963): The fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 41, 585-614.
34. Santo, T. (1972): Classification of earthquakes into seven types from the view of plate tectonics, Bull. Intern. Inst. Seis. Earthq. Eng., 9, 1-10.
35. Wilimore, P. L. (1970): Manual of seismological observatory practice, Intern. Seis. Centre.

作者通訊處：中央氣象局測政組