

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

斷層破裂過程中動態誘發分析 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 96-2116-M-041-003-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：嘉南藥理科技大學休閒保健管理系

計畫主持人：王正誠

計畫參與人員：此計畫無其他參與人員：

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年10月31日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

斷層破裂過程中動態誘發分析

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2116-M-041-003-

執行期間：96年8月1日至97年7月31日

計畫主持人：王正誠

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：得立即公開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學休閒保健管理系

中華民國 97 年 7 月 31 日

中文摘要

本研究利用集集地震的破裂過程，結合庫倫應力的計算方法，來探討斷層破裂過程中動態誘發分析。其中對破裂過程的分析中，當子斷層滑移量大於 0.1m 時，則視該子斷層為破裂；由破裂的時序分布得知，破裂過程中，從發震後大約 4 秒至 25 秒是破裂最劇烈的時期，直到 40 秒後則不再發生破裂。對於動態誘發分析可以得知，大部分的子斷層破裂前，庫倫應力增大，導致其他子斷層的誘發破裂，但是還是有一些子斷層在發生破裂前 ΔCFS 值小於 0，其發生原因可能為 ΔCFS 太小，雖然降低了區域的庫倫應力，但是還是發生破裂。未來應計算所有子斷層面上庫倫應力變化的時間序列，並且考慮時空的分布加以分析，有了這項數據才能更清楚來驗證斷層破裂所產生的動態庫倫應力變化，與斷層面的誘發破裂之間的關係。

關鍵字：庫倫應力，斷層破裂，集集地震，動態誘發

英文摘要

This study utilizes the rupture processing of Chi-Chi earthquake, combine the computing of the Coulomb stress, to confer the analysis of dynamic triggering, in the course of fault breaking. In rupture processing, the fault is judged breaking when the slip is more than 0.1m. From the breaking time series, the breaking is in the most violent period from about 4 seconds to 25 seconds, but does not recur after 40 seconds. By the analysis of dynamic triggering, most part of the Coulomb stress on the breaking sub-faults is positive. But the negative of the Coulomb stress on the breaking sub-faults may be too small so still breaking. In the feature, it should calculate all of the change of the Coulomb stresses on sub-faults, and consider the analysis of temporal-spatial distribution, to prove the relationship of dynamic Coulomb stress change and the fault triggering rupture.

Keywords: Coulomb stress, fault rupturing, Chi-Chi earthquake, dynamic triggering

一、前言

地震發生的過程中，斷層破裂會產生動態應力的變化，這動態應力變化是否會引發斷層的繼續破裂或是使得破裂停止，它們之間有著密不可分的關係，本研究利用 921 地震研究成果中，所逆推出來的破裂過程，結合庫倫應力的計算方法，來探討斷層斷層破裂過程中動態誘發的現象。

二、研究目的

從斷層的分布與調查可知，由於斷層很少單獨存在，當主斷層破裂時，產生應力改變並傳播到鄰近斷層而相互影響，使得有些斷層因此而誘發破裂，也可能使得有些斷層因為應力的抵消而更為穩定，因此斷層交互作用是斷層破裂傳遞時的一項重要的現象，其中動態應力的變化主宰著地震發生時的數秒(或數十秒)間，整個斷層系統的動態表現。

本研究基於以上的觀點，來研究斷層破裂過程中，由初始破裂所造成庫倫應力變化與斷層破裂傳遞的關係，也就是在整個斷層破裂過程中，檢視前一個時間點破裂產生的庫倫應力對下一個時間點斷層面上的影響，這個時間序列的檢視反應了斷層破裂的動態誘發，對斷層破裂的機制將能有更進一步的了解。

三、文獻探討

在過去的研究中對地震後產生的應力轉換導致區域應力的改變，使致發生誘發餘震或是改變地震活動度，這類的研究已經在許多大地震後被研究(Wang et al., 2003; Toda et al., 2005; Ma et al., 2005)，在這類的研究中，往往討論的是震後改變的區域庫倫應力，對數日到數年間餘震或是地震活動度的改變，其中由於應力的轉移，庫倫應力大於 0 的區域，較容易誘發餘震或使地震活動度增加，反之，庫倫應力小於 0 的地方，則因應力轉移抵消了初始的區域應力，使得該區域不易誘發餘震或地震活動度減小，從這些研究與分析中發現，應力轉移的理論都已經在實際的觀測中得到很好的驗證。

另一方面，庫倫應力產生之因-斷層破裂，這類的問題，早期是以單一斷層自然破裂傳遞的模擬研究為主(Das and Aki, 1977; Miyatake, 1980; Day, 1982; Mikumo et al., 1987)；對於在破裂傳遞的過程中，因為斷層幾何的因素，地質構造的條件，會使得破裂傳遞減速與終止(Aki, 1979; Lindh and Boore, 1981; Scholz, 1990)。

四、研究方法

本研究最主要的工作就是計算斷層破裂時所產生的庫倫應力，使用的方法是採用 Wang et al.(2006)所發展的程式，由於該程式的計算是結合變形與地球重力場效應，因此該程式計算的結果不僅包括變形場中 3 個位移的分量，6 個應力(應變)分量與 2 個傾斜分量，而且還包括大地水準面與重力的改變，除此之外，該程式是可以應用於的層狀結構或半空間的地下構造模型，而地下構造介質可為彈性介質，亦可為黏彈性介質。

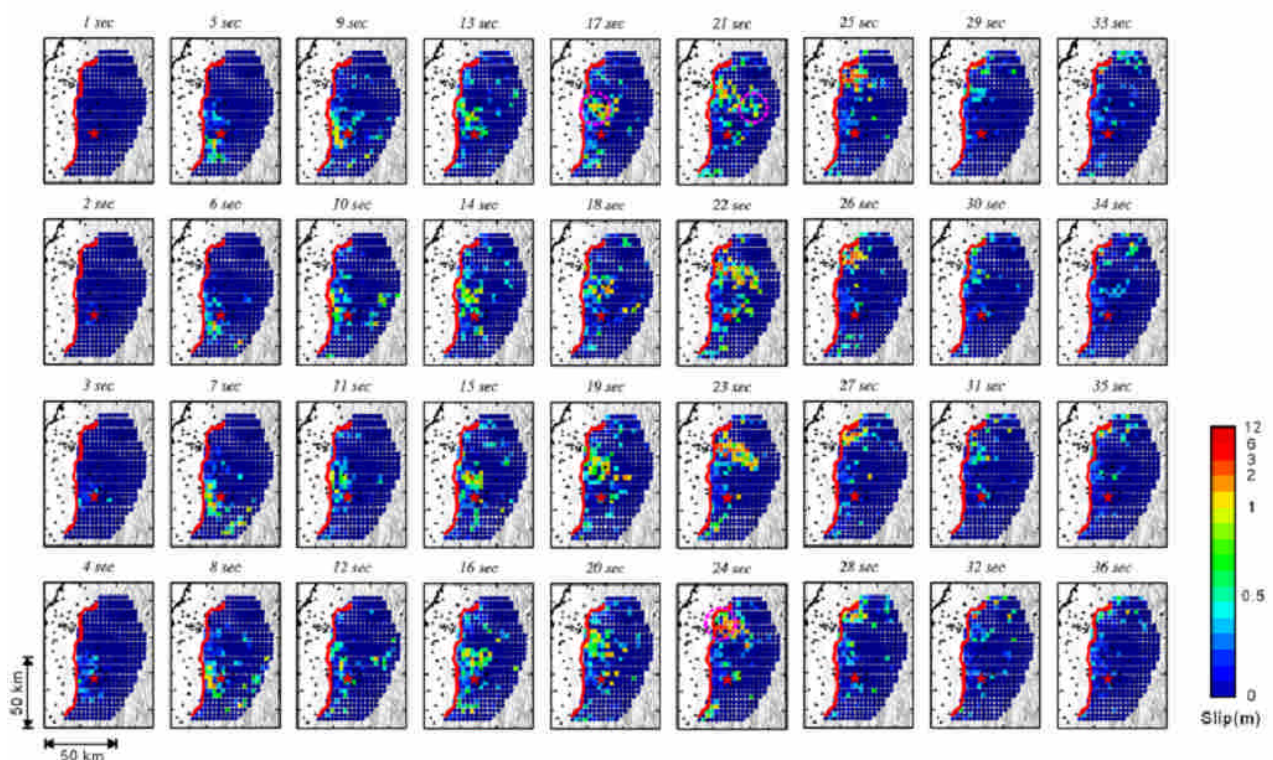
其次，在研究中為了與 Wang et al.的程式座標一致，對於空間的定義我們取(+X, +Y, +Z)=(向北, 向東, 向下)，每個子斷層的(strike, dip, rake) = (ϕ, δ, λ)，庫倫應力 ΔCFS (Coulomb failure stress changes) 則定義為

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma_n$$

其中 $\Delta\tau$ ：子斷層面上剪應力改變， $\Delta\sigma_n$ ：子斷層面上有效正應力改變， μ ：靜摩擦係數，因

此，從前段所述計算出來的應力必須先做座標轉換到每個子斷層面上。由於我們計算出的應力是一組包含六個分量的應力張量，所以第一步驟必須將這組應力以 Z 軸為對稱軸，逆時針轉 ϕ 度，將應力轉到子斷層的 strike 方向上，第二步驟再以 X 軸為對稱軸，逆時針轉 δ 度，則此時的正應力為壓應力，方向朝旋轉後的+Z 方向上，且與子斷層面的法向量平行。

在本研究中所使用的斷層破裂過程的時序資料是 Lee et al.(2006)以 921 集集地震車籠埔斷層附近強震資料逆推出來的結果(如圖一)，其中車籠埔斷層是由 357 個 3km \times 3km 的子斷層所組成，在時間序列中 dT=1 秒。本研究將對集集地震動態破裂過程的結果，對每個時間步驟(time step)計算庫倫應力的分佈，同時並考慮每個子斷層的斷層形態，計算子斷層面上的庫倫應力。



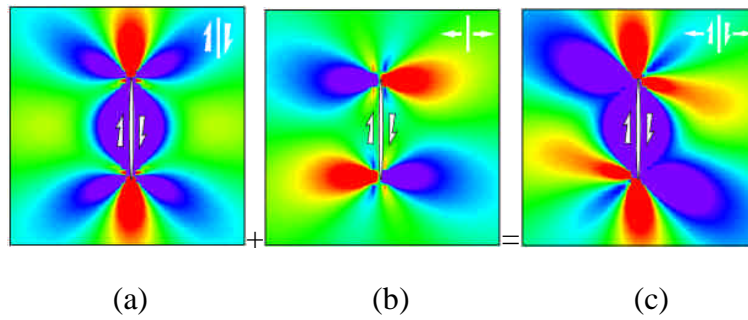
圖一 Lee et al.(2006)以 921 集集地震車籠埔斷層強震資料逆推出來的動態破裂過程資料

對於每個子斷層破裂的判定，本研究採當滑移量大於 0.1m 時，則該子斷層為破裂，再利用統計的方法分析從破裂開始至破裂終止時子斷層面上的庫倫應力與破裂狀況的關係，藉以檢視由斷層破裂所產生的庫倫破壞應力對整個斷層破裂傳遞的影響。

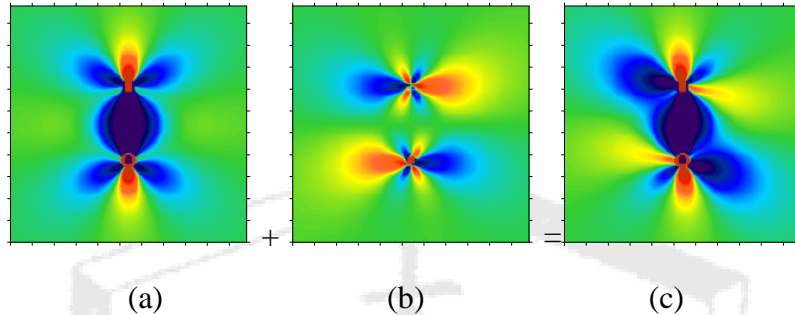
五、結果與討論

1. 由於本研究的庫倫應力求取是利用 Wang et al.(2006)所發展的程式 PSGRN/PSCMP 來做計算，因此必須先對程式本身做測試，為了驗證這個程式的正確性，我們參考 King et al.(1994)文章內計算一個右移的垂直走向-滑移斷層破裂所產生的庫倫應力分佈(如圖二)，與本研究以相同的條件計算出庫倫應力分佈做比對(如圖三)。

從圖二與圖三的比較，除了所使的色階可能有些許差異外，基本上，利用 PSGRN/PSCMP 程式計算應力分布，與 King et al.的結果相當接近，已驗證本研究所使用程式的正確性。

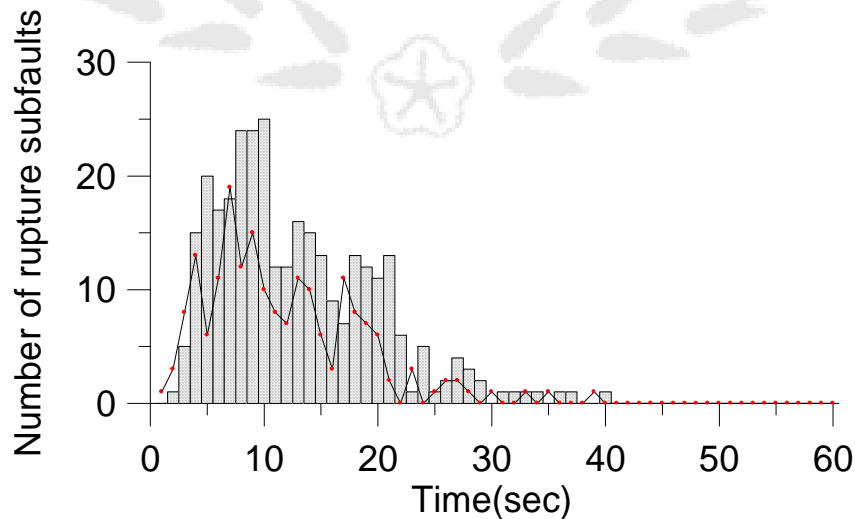


圖二 King et al.計算右移的垂直走向-滑移斷層破裂所產生的 ΔCFS 值(a)剪應力的改變；(b) 摩擦係數 \times 正應力的改變；(c)庫倫應力的改變



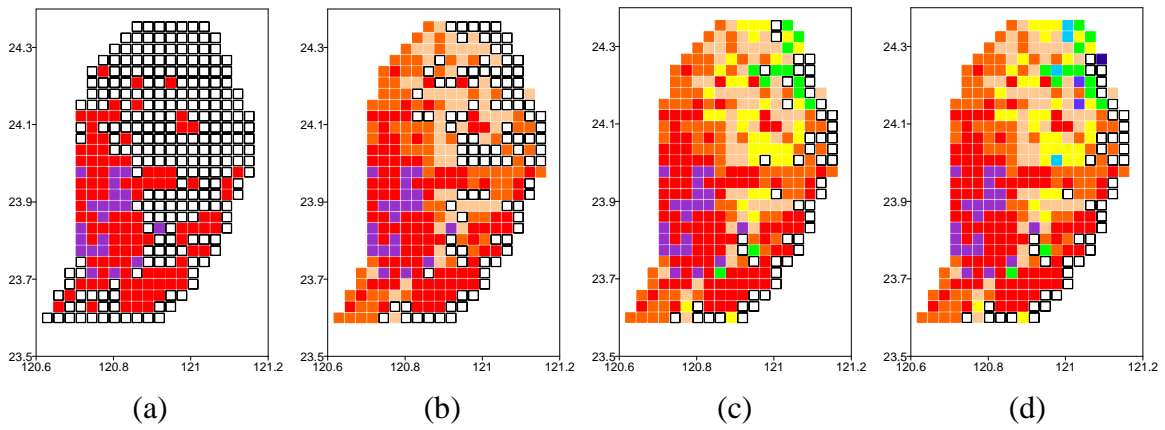
圖三 本研究利用 PSGRN/PSCMP 程式來計算右移的垂直走向-滑移斷層破裂所產生的 ΔCFS 值(a)剪應力的改變；(b) 摩擦係數 \times 正應力的改變；(c)庫倫應力的改變

2.從 Lee et al.以 921 集集地震車籠埔斷層強震資料逆推出來的動態破裂過程資料,與滑移量大於 0.1m 時,子斷層視為破裂為基準,將每個時間點的破裂狀況示於圖四,總計在模擬逆推的 357 個子斷層中,發生破裂的只有 313 個,其中在破裂過程中,大約 4 秒至 25 秒是破裂最劇烈的時期,直到 40 秒後則不再發生破裂。



圖四 直方圖為子斷層破裂數目的時序關係；折線則為破裂子斷層上前一秒 ΔCFS 值大於 0 的個數。

圖五(a)~(d)為斷層破裂位置與時間的關係,斷層從南端開始往北方破裂,破裂路徑並非單純以同心圓的方式向外擴散,顯示出斷層面上的摩擦係數相當複雜,另外,子斷層的幾何形狀也是關係到該子斷層是否發生誘發破裂的重要關鍵。



圖五 分別為(a)10 秒、(b)20 秒、(c)30 秒與(d)40 秒子斷層破裂情形

3.依據強震資料逆推出來的結果，發生破裂的只有 313 個子斷層，由圖四的資料，計算每個時間點 t 秒之前一秒($t-1$ 秒)的每個已破裂之子斷層的 ΔCFS 值(庫倫應力變化值)，其中，庫倫應力大於 0 的區域，較容易誘發破裂，反之，庫倫應力小於 0 的地方，則因應力轉移抵消了初始的區域應力，使得該區域不易破裂，因此檢視其正、負值(如表一)。

表一 子斷層破裂與前一秒時斷層上 ΔCFS 值的關係

時間	a	b	時間	a	b	時間	a	b	時間	a	b
1	1	1	16	7	3	31	1	0	46	0	0
2	5	3	17	13	11	32	1	0	47	0	0
3	15	8	18	12	8	33	1	1	48	0	0
4	20	13	19	11	7	34	0	0	49	0	0
5	17	6	20	13	6	35	1	1	50	0	0
6	18	11	21	6	2	36	1	0	51	0	0
7	24	19	22	1	0	37	0	0	52	0	0
8	24	12	23	5	3	38	0	0	53	0	0
9	25	15	24	1	0	39	1	1	54	0	0
10	12	10	25	2	1	40	0	0	55	0	0
11	12	8	26	4	2	41	0	0	56	0	0
12	16	7	27	3	2	42	0	0	57	0	0
13	15	11	28	2	1	43	0	0	58	0	0
14	13	10	29	0	0	44	0	0	59	0	0
15	9	6	30	1	1	45	0	0	60	0	0

a：時間 $t+1$ 秒破裂子斷層數。

b：破裂的子斷層，前一秒時， ΔCFS 值大於 0 的個數。

由圖四的曲線分布可以得知，大部分的子斷層破裂前，庫倫應力增大，導致其他子斷層的誘發破裂，其他發生在破裂前 ΔCFS 值小於 0 的原因可能為 ΔCFS 太小，雖然降低了區域的庫倫應力，但是還是發生破裂。

對於研究未來還可以繼續發展的就是，計算所有子斷層面上庫倫應力變化的時間序列，這項分析必須花費相當長的時間來計算，有了這項數據才能更清楚來驗證斷層破裂所產生的

動態庫倫應力變化，與斷層面的誘發破裂之間的關係。

參考文獻

- Aki, K., 1979. Characterization of barriers on an earthquake fault, *J. Geophys. Res.*, 84, 6140-6148.
- Das, S. and K. Aki, 1977. A numerical study of two-dimensional spontaneous rupture propagation, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 50, 643-668.
- Day, S. M., 1982. Three-dimensional simulation of spontaneous rupture: the effect of nonuniform prestress, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 72, 1881-1902.
- King, G. C. P., R. S. Stein, J., Lin, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 935-953.
- Lee, S. J., K. F. Ma, and H. W. Chen (2006), Three-dimensional dense strong motion waveform inversion for the rupture process of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 111, B11308, doi:10.1029/2005JB004097.
- Lindh, A. G. and D. M. Boore, 1981. Control of rupture by fault geometry during the 1966 Parkfield earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, 95-116.
- Ma, K. F., C. H. Chan, and R. S. Stein (2005), Response of seismicity to Coulomb stress triggers and shadows of the 1999 $M_w = 7.6$ Chi-Chi, Taiwan, earthquake, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S19, doi:10.1029/2004JB003389.
- Mikumo, H., K. Hirahara, and T. Miyatake, 1987. Dynamical fault rupture process in heterogeneous media, *Tectonophysics*, 144, 19-36.
- Miyatake, T., 1980. Numerical simulations of earthquake source process by a three-dimensional crack model. Part I. Rupture process, *J. Phys. Earth*, 28, 565-598.
- Scholz, C. H., 1990. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Wang, J. C., C. F. Shieh, and T. M. Chang (2003), Static stress changes as a triggering mechanism of a shallow earthquake: case study of the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 135, 17-25.
- Wang, R., Lorenzo-Martin, F., and Roth, F. (2006), PSGRN/PSCMP[~] A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computers & Geosciences*, 32, 527-541.
- Toda, S., R. S. Stein, K. Richards-Dinger, and S. Bozkurt (2005), Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *J. Geophys. Res.*, 110, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415.

AGU 2007 Fall Meeting 會議心得

每年 12 月在美國舊金山舉行的美國地球物理聯盟秋季大會是地球物理界的一大盛事，來自世界各地的研究學者將自己最新的研究成果在這項會議中發表並與他人交流，今年藉著本研究計畫補助，參加 2007 年 12 月 10~14 日在舊金山舉辦的 AGU 2007 Fall Meeting，這次會議我以 poster 的方式發表，題目為「Static Stress Transfer between the Chinshan and Sanchiao Faults in the Taipei Metropolitan Area」，時間是在第一天的下午。

這篇論文是在探討，台灣北部的斷層中，如果山腳斷層破裂是否會誘發金山斷層的錯動，或是如果金山斷層破裂是否也會誘發山腳斷層的錯動，如果這二種情況有可能發生，則台灣北部是可能發生相當大的災害地震，在發表的過程中不少對這問題有興趣的人都紛紛提問，我也一一的為之解說，在討論的過程中獲得不少知識與經驗，真是獲益良多，這是在個人研究時無法獲得的經驗，討論完後都有交換名片以便後續的聯絡與討論，這真是做研究過程中難以獲得的好機會。

結束了第一天的發表，第二天以後就是我尋寶的開始，往後幾天的行程我都是在前一天休息之前，先看完第二天論文發表的議程，並且規劃當天要聽的場次，或是要去看的 poster，當然各大研究機構所擺設的攤位也是不能缺席的，在後來幾天的議程中有幾項對地震預測的研究相當有意思，其中有一項研究是說地震的發生可能跟季節有關，由於季節的變遷造成誘發出很多地震，這是相當有趣的研究，也是我以前從未想過的問題。

在看 poster 的過程中，對於我曾做過的問題我特別有興趣，也藉著這個機會順便問一下是否曾經遇過相同的難題，這種的交流是參加研討會最有價值的地方，至於廠商與各大研究機構攤位的巡禮，索取紀念品是最大的目的，同時也可以藉此了解他們提供的服務。

這次的美國行是我第一次踏上美國的國土，對於舊金山這個城市，也是非去逛逛不可，於是利用傍晚的時候到舊金山幾個有名的點看看，包括金門大橋、漁

人碼頭等等……都是著名且非去不可的地方，當然當地的名產與紀念品也不能空手而歸，包括巧克力、風景區的鑰匙鍊、T恤，最後都是滿滿行囊。

結束了這五天的行程，我了解到行百里路勝過讀萬卷書這個道理，能夠出國去與這個世界中，其他與我研究相關的人共同討論，真是人生的一大樂事，希望以後還能夠有這樣的機會，出國發表研究與其他人討論，這必能對自己的研究能有更大的進步。

