

出國報告（出國類別：短期研究）

赴北京大學地球與空間科學學院進行 短期研究與技術交流

服務機關：中央氣象局地震測報中心

姓名職稱：羅翊菁技佐

派赴國家/地區：中國北京

出國期間：107年10月9日至107年10月23日

報告日期：107年10月31日

摘 要

北京大學（以下稱北大）地球與空間科學學院係由地質、地球化學、固體地球物理學、空間科學與技術及地理信息系統專業級研究所組成。此行主要訪問分別獲選大陸千人計畫及大陸青年千人計畫，目前於任教北大的趙里教授及岳漢助理教授。趙里和岳漢是地震震源物理學與動力學的專家，對於有限斷層上震源的逆推有相當豐碩的成果及經驗，透由本次短期研究與技術交流，與趙里教授及岳漢助理教授探討2018年2月6日花蓮地震模擬震源破裂及學習震源逆推技術，模擬結果能有效對災害性地震的地震災害潛勢或後續餘震發展提供重要依據。

除在北大學習震源逆推技術及探討花蓮地震模擬震源破裂外，交流及研習期間適逢2018年中國地球科學聯合學術年會，羅員亦順道參加會議中唯一的國際英文專題—地球物理研究及亞洲區域動力學之進展(Progress in the Studies of Geophysics and Regional Dynamics of Asia)研討，並以2018年規模6.4花蓮地震-來自隱沒板塊交界到近垂直走向滑移斷層的震源破裂行為「2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake: Rupture from slab interface to a sub—vertical strike slip fault.」為題進行研究成果報告。藉此年會將此行短期交流的成果公開發表並與與會之專家學者討論花蓮地震構造及破裂行為。

目 次

一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得與建議.....	18
四、附錄.....	19

一、目的

地震波模擬技術在國外已經發展得很成熟，而國內熟悉震源模擬技術的研究學者不多，中央氣象局(以下簡稱氣象局)地震測報中心(以下簡稱地震中心)已擁有地震模擬技術，並利用該中心獨有的世界級資料庫，在大地震後迅速得到詳細的震源資訊以研判地震發展趨勢，有效為災害性地震的地震災害潛勢或後續餘震發展提供重要依據。

然而，快速的震源模擬反演對於區域型中型地震(如2018花蓮地震)細部構造尚無法充分解析，因此需加入多斷層或曲面斷層等控制因素，才能將花蓮地震的真實破裂行為反演出來。藉由此次參訪北京大學地球與空間科學學院進行業務交流，探討震源破裂模擬及學習新的震源反演技術，並與趙里教授及岳漢助理教授探討2018年2月6日花蓮地震模擬震源破裂，所模擬結果將是了解花蓮地區更細緻地震構造的重要依據。

此外，此行亦藉由參加2018年中國地球科學聯合學術年會公開發表此次短期研究結果，並宣傳氣象局近年來對中大型地震震源破裂模擬反演的成果，可以在大地震後迅速得到詳細的震源資訊研判地震發展趨勢，能有效為地震災害分布的評估和救災應急應變提供可靠的科學依據。

二、 過程

本次短期研究與技術交流，與北京大學趙里教授及岳漢助理教授討論2018年2月6日花蓮地震模擬震源破裂及學習新的震源逆推技術。最後兩天行程羅員參加2018年中國地球科學聯合學術年會，並於會議中唯一的國際英文專題—地球物理研究及亞洲區域動力學之進展(Progress in the Studies of Geophysics and Regional Dynamics of Asia)發表論文，題目為2018年規模6.4花蓮地震—來自隱沒板塊交界到近垂直走向滑移斷層的震源破裂行為(2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake: Rupture from slab interface to a sub-vertical strike slip fault.)。

(一)參訪行程

日期	工作摘要
107年10月9日(二)	赴北京。 搭乘長榮BR716班機，9時15分起飛前往北京，於當地時間12時30分抵達北京國際機場，並搭乘機場線T3站至東直門站換乘2號線至西直門站，抵達下榻飯店。
107年10月10日(三) 至 107年10月20日(六)	每天自地鐵西直門站搭車至北京大學東站。 北京大學東南門入口後第一棟逸夫樓8樓，即是地球與空間科學學院固態地球物理系。
107年10月21日(日)	參加2018年中國地球科學聯合學術年會。
107年10月22日(一)	參加2018年中國地球科學聯合學術年會。 主要參與第26專題—地球物理研究及亞洲區域動力學之進展(Session 26—Progress in the Studies of Geophysics and Regional Dynamics of Asia.)，於會中報告研究成果。
107年10月23日(一)	返回臺北。 搭乘長榮BR715班機，13時45分起飛，於臺灣時間17時抵達桃園國際機場。

(二) 第26專題-地球物理研究及亞洲區域動力學之進展(Session 26-
Progress in the Studies of Geophysics and Regional Dynamics
of Asia.)之議程

羅員受邀參加該年會中唯一的英文專題研討，其他受邀請的國際學者尚有 Dr. Simon L. KLEMPERER，其演講關於西藏西部利用地球化學元素解析地函熱對流及印度及亞洲下地函的構造情形；另一位受邀講者是來自伊利諾大學的Dr. Lijun Liu，其演講內容為了解地快及造山岩石圈的演進及發展。Dr. Liu除了是受邀講者外，亦是此專題的會議召集人，另外3個會議召集人則分別是北京大學趙里教授、中國科學技術大學孫道遠教授及中央研究院李憲忠研究員。羅員於專題研討會中為第5順位報告，報告題目為2018年規模6.4花蓮地震—來自隱沒板塊交界到近垂直走向滑移斷層的震源破裂行為(2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake: Rupture from slab interface to a sub-vertical strike slip fault.)

Session26 Progress in the Studies of Geophysics and Regional Dynamics of Asia			
(Conveners: Li ZHAO, Daoyuan SUN, Shiann-Jong LEE, Lijun LIU)			
TIME:October 22 LOCATION: Room27 (On the first floor, Hall five D)			
Chair: Lijun LIU, Daoyuan SUN, Li ZHAO			
Time	Sequence	Title	Speaker
8:30-8:45	*1	A method for calculating surface wave dispersion in layered medium	Jianxun YANG
8:45-9:00	2	S and P-wave velocity structure of the lithosphere beneath Sichuan-Yunnan and its surrounding regions	Zhi WEI
9:00-9:20	*3	Joint inversion of multiple seismic datasets for crustal structure	Adebayo
		in Cameroon	Oluwaseun OJO
9:20-9:35	4	Seismic body wave travel time anisotropy tomography of the seismotectonic structure of the 2013 Ms 7.0 Lushan earthquake, China	Ying LIU
9:35-9:50	*5	2018 Mw 6.4 Hualien Earthquake: Rupture from slab interface to a sub-vertical strike slip fault	Yi-Ching LO
9:50-10:10	*6	The Rise, Collapse, and Compaction of Mt. Mantap from the 3 September 2017, North Korean Nuclear Test	Teng WANG
10:10-10:20		BREAK	
10:20-10:40	*7	Mantle component of ³ He in western Tibet: evidence for incipient mantle melting, and implications for the location of the Indian-Asian mantle suture	Simon L. KLEMPERER

10:40-10:55	8	Progress in understanding the evolution of cratonic and orogenic continental lithosphere	Lijun LIU
10:55-11:10	9	High-resolution 3D crustal shear-wave velocity structure of the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt	Song LUO
11:10-11:25	⑩	Preliminary study of landslides by probability tomography of self-potential data	Kaiyan HU
11:25-11:40	⑪	Phase Stability and Thermal Equation of State of δ -AlOOH: Implication for Water Transportation to the Deep Lower Mantle	Yunfei DUAN
11:40-11:55	⑫	The numerical simulation of delamination in lithospheric mantle triggered by plate subduction	Miao CHEN
11:55-12:10	⑬	Effects of rheological heterogeneities in the upper mantle on the viscoelastic postseismic deformation of the 1964 Mw9.2 Alaska earthquake	Kejing HUANG

表一、第26專題-地球物理研究及亞洲區域動力學之進展議程，羅員為第5順位報告。



照片一、2018年中國地球科學聯合學術年會於北京國際會議中心舉行。



照片二、進入會場前都要進行脫包安檢。



照片三、2018年中國地球科學聯合學術年會報到處。



照片四、國際專題報告之會議廳-第27廳。



照片五、國際會議專題召集人，(照片右側)由左至右分別為 Prof. Liu、孫道遠教授及趙里教授。



照片六、羅員英文口頭報告。



照片七、來自東非的講者，其報告內容是利用地震數據聯合反演地殼構造。

(三)羅員短期學術研究成果

1. 摘要

2018年2月6日芮氏規模6.4的地震發生在臺灣東方海域，此地震造成花蓮市多處地表破裂與許多人員傷亡及建物損害。此次短期研究，利用遠震地震觀測資料、近場強震觀測資料、GPS 靜態位移場及 SAR 影像進行聯合反演。聯合反演前，先利用大地測量觀測資料(GPS 靜態位移場和 SAR 影像)找出多斷層的幾何形貌，再利用多點源反演方法來決定破裂過程中震源機制解的變化情形，最後利用氣象局的餘震分布所做的重定位結果決定完整的斷層形貌。

反演結果顯示花蓮地震是由外海斷層開始破裂，再往東南方傳播(如圖一)，最後連動近垂直的米崙斷層，因此可以在距離震央較遠的米崙斷層看到明顯的地殼形變。震源破裂結果指出2018花蓮地震並非一般的滑移情形，逆衝機制在美崙斷層兩側呈現“翹翹板”理論，也就是說，斷層形貌和滑移過程在臺灣東部的隱沒帶到碰撞帶之間的轉換帶中有所改變，才造成此次地震破裂的複雜行為。

2. 地震背景介紹

2018年2月6日芮氏規模6.4的花蓮地震，氣象局人工重新定位的震央位在東經121.73度，北緯24.1度，震源深度6.31公里。許多報告指出花蓮地震造成地表破裂，尤其是在震央東南方20公里花蓮市的美崙斷層附近，造成17個建物損傷及300人受傷。氣象局震源機制解及美國地質調查局的震源機制解(gCMT, (Ekström et al., 2012)都包含了很大部分的非力偶矩的成分，其顯示此地震的破裂並非在單一的斷層面上，而多斷層在此次地震是有被觸發的，在地震中造成很大的同震位移。

花蓮市在花東縱谷的北端，也是臺灣東部隱沒帶到碰撞帶的轉型帶，因此花蓮可以說是地震活動度非常高的地方。歷史上，在2018花蓮地震震央附近亦發生了一個芮氏規模7.3的地震，1951年10月21日的花蓮-臺東地震序列造成美崙斷層約1.2公尺的垂直抬升及近2公尺的地表錯動(Cheng et al., 1996; Hsu, 1962)，此次地震序列亦有不少芮氏規模大於6的地震沿著縱谷斷層發生。除此之外，在臺灣地震模型發表最新的臺灣地震潛勢分析圖中(TEM, Wang et al., 2016; Shyu et al., 2016)，花蓮的地震發生率是相對高的，而其預估花蓮地震的再現週期是66-67年，而2018花蓮地震正好發生在

1951年花蓮-臺東地震序列後66.3年。

3. 觀測數據和方法

利用地震觀測資料和大地測量數據來分析地震震源的動態破裂過程，可以幫助我們了解地體構造環境和地震破裂之間的關係。此研究中，我們利用這兩者數據進行聯合反演，找出斷層幾何形態及地震破裂機制來得到複雜的地震震源破裂細節，最後聯合反演的結果可以解析地震破裂的過程和區域構造及地體環境之間的關係。

3-1 地震觀測資料

地震觀測資料包括 IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) waveform webserver (<https://www.iris.edu/hq/>)下載的遠震資料和氣象局地震觀測網及中研院寬頻觀測網(BATS, Kao et al., 1998)的近場強震資料(如圖二)。由於花蓮地震屬於規模不大的中型地震，因此我們只使用震央距小於100公里的強震站，以限制側向異向性及確保高品質噪訊比的觀測資料。

3-2 大地測量資料

本研究使用了27個氣象局及臺灣地震中心(<http://gps.earth.sinica.edu.tw>)架設的三分量同震位移站(如圖二)，同震位移是由GIPSY/OASIS software (Zumberge et al., 1997; <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov>)計算而得，得到靜態位移的結果於聯合反演使用。

SAR 圖像使用來自 ALOS 衛星的干涉譜及 ALOS 和 S1衛星影像，並利用 AZO 和 SBI 方法解析得的圖像，再利用解析後的圖像進行地表位移的重建(如圖三)。重建的地表位移可以看到在美崙斷層兩側有明顯的變化，在美崙斷層東側的側向變化比西側來得大，但是垂直抬升量相對地不明顯。至於美崙斷層東側的抬升量不斷地向海外遞增，這個情形可能是由外海的逆衝斷層造成的，因此猜測走向滑移量和逆衝機制在此次地震有被分割的情況。

3-3 斷層的幾何形態

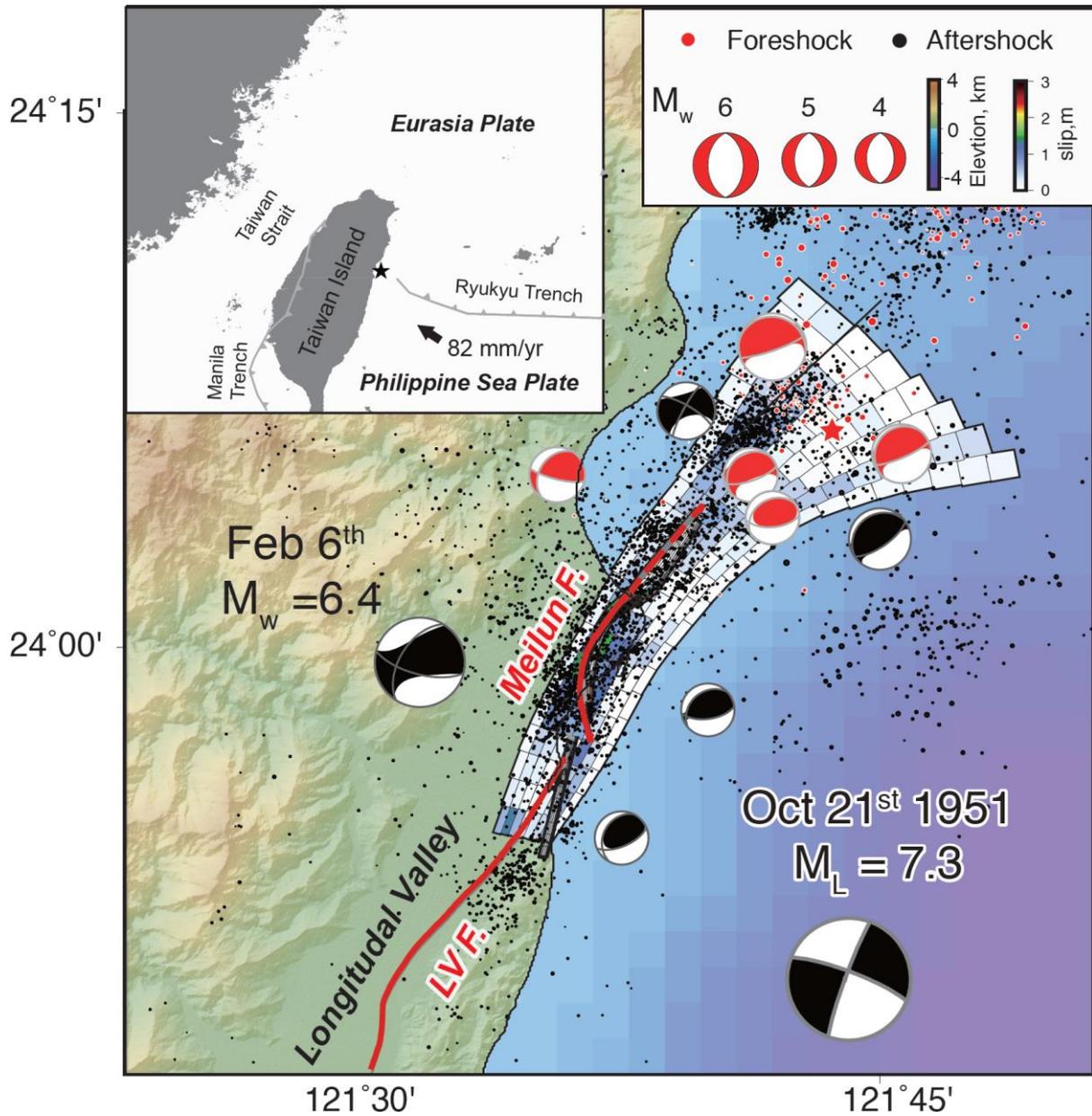
利用大地測量結果知道斷層的大致走向後，利用格點搜尋的方法搜尋每個斷層的傾角。斷層模型總共有四個(如圖四)，其中因外海斷層沒有大地測量的數據可以判斷傾角，因此我們利用多點源逆推的方法決定斷層1的傾角。而斷層2至4傾角格點搜尋的結果顯示斷層2和3是向西傾，分別是 72° 和 86° ，斷層4則是向東傾 86° (如圖五)，多點源逆推的結果中，也可以看到美崙斷層的走向和大地測量數據得到的結果一致。

除了斷層的傾角，還需要知道斷層的大小，也就是斷層的上下界。餘震隨著深度

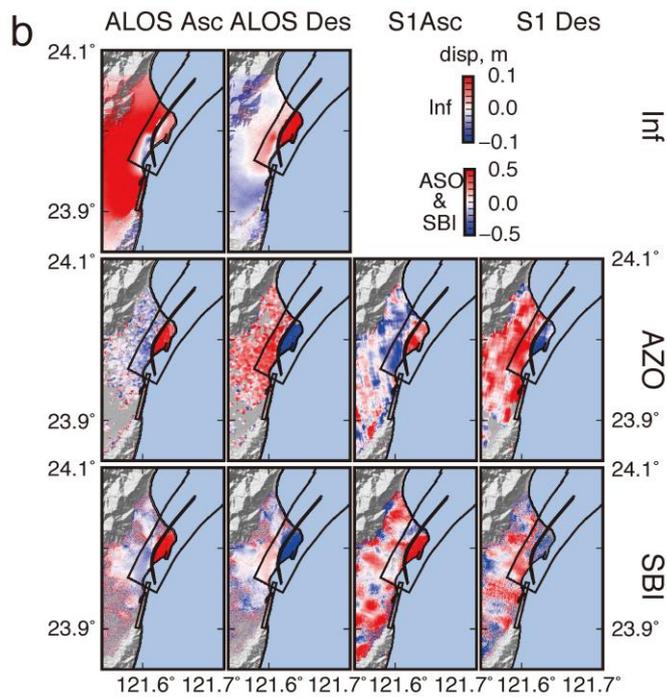
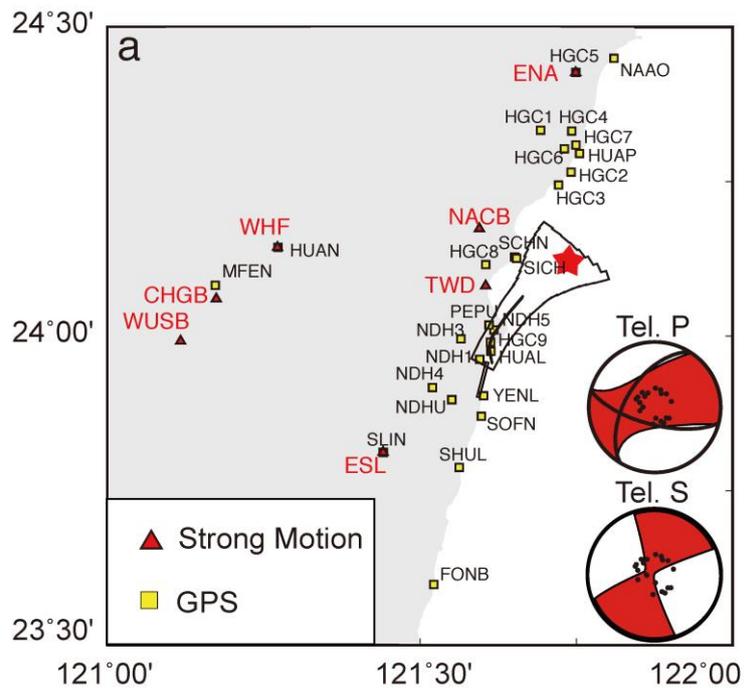
的分布可以看出斷層面的形貌分布，因此我們以氣象局的地震目錄利用重定位方法(Wu et al, 2008.)得到新的重定位目錄，共5710個重定位結果(如圖六)，其重定位地震位置可以使構造看得更清楚。重定位後的地震可以看到是分布在一個區域而非一個斷層面上，此現象顯示多斷層系統有可能在此地震被觸發了。另外，重定位地震大至可分為較深的餘震(震源深度8-10公里)及較淺的餘震(震源深度4-6公里)，較深的地震都沿著海岸線分布，因此較深的地震可以判斷斷層的下界。靠近美崙斷層區域較淺的餘震，也都分布在海岸線附近，斷層的上界和斷層的下界幾乎在同一區域，美崙斷層附近的餘震說明了此區域的斷層是近垂直的，至於外海較淺層的餘震則是較分散的，顯示外海斷層的傾角較緩。因此，由重定位的餘震分布可以看到，地震震央是在外海傾角較緩的斷層破裂後，向東南方傳播到較陡的斷層面上。

4. 聯合反演結果

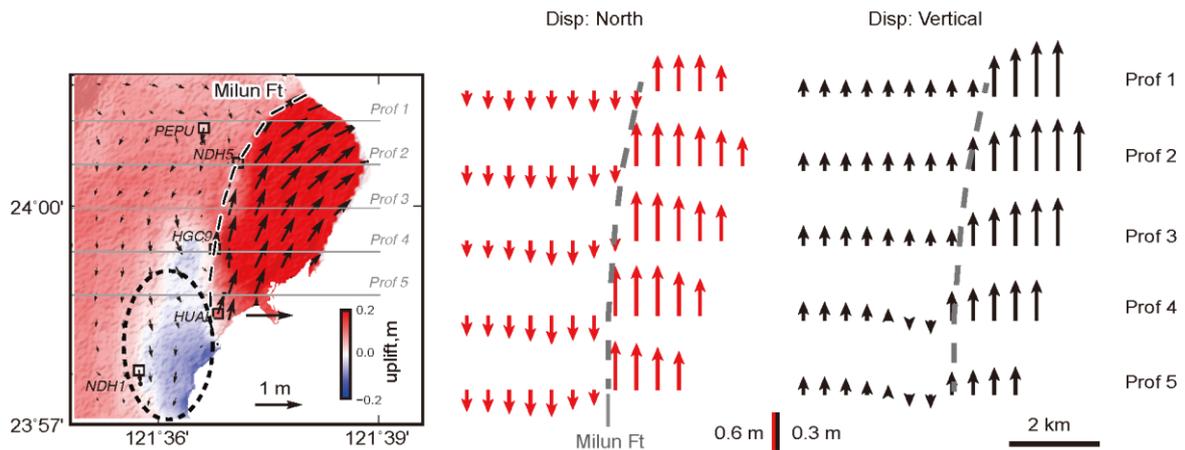
本研究利用遠震地震觀測資料、近場強震觀測資料、GPS 靜態位移場及 SAR 影像來進行聯合反演，反演模型包含三個主要斷層的多斷層系統，分別為外海板間斷層(offshore interplate fault, Seg I)、美崙斷層(Meilun Fault, Seg M)及花東縱谷斷層(Longitudnal-Valley Fault, Seg L)(如圖七)。在美崙斷層上的滑移量主要是走向滑移機制，在美崙斷層最南端兩公里深的地方最大滑移量有將近3公尺的錯動。縱谷斷層的滑移量則是集中在淺部，是同震破裂的最後階段。總而言之，花蓮地震的錯動是一連串的錯動過程，不僅引發了多斷層系統的錯動，在不同斷層上也表現了不同的機制，我們稱為”翹翹板理論”(Teeterboard)，翹翹板理論指的是在花蓮地區板塊斜向碰撞的系統下，逆衝機制在不同的地震週期發生在不同的斷層系統(如圖八)。1594年花蓮-臺東地震序列逆衝機制是發生在美崙斷層，造成美崙臺地有約2公尺的抬升量，而在此研究中顯示2018花蓮地震主要的逆衝機制是發生在外海的板間地震，在美崙斷層則是觀測到較多的走向滑移機制，因此兩個地震的逆衝機制是表現在不同的斷層系統上。



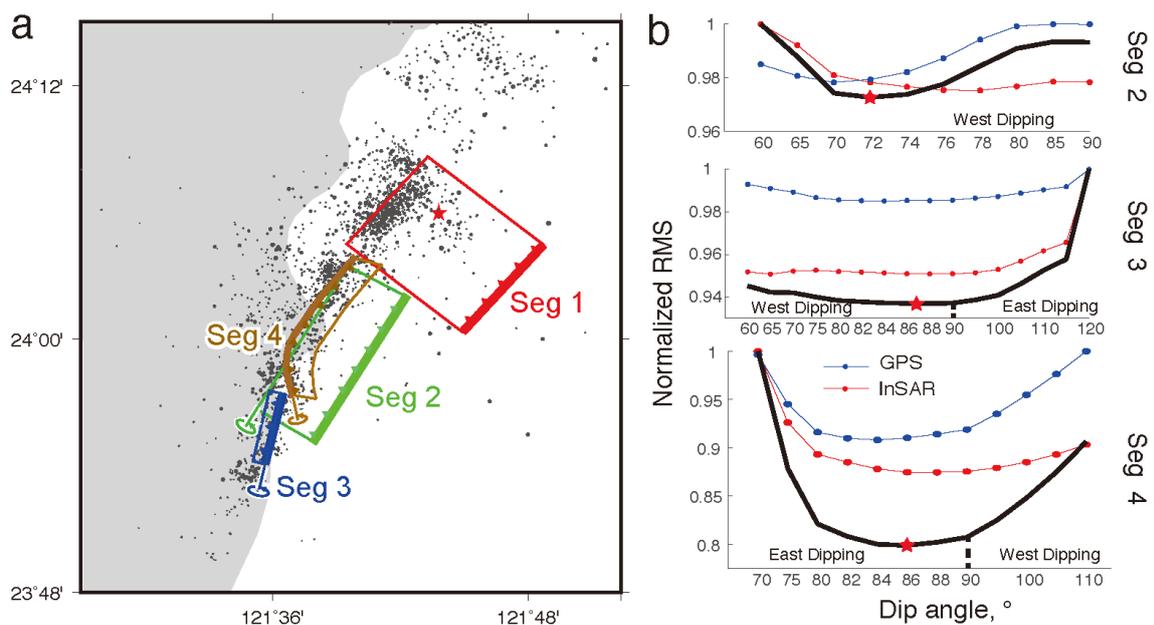
圖一、本研究區域及斷層模型圖，斷層模型上包含本研究滑移量分布結果。紅色星星為震央位置，黑色圓點為2月6日花蓮地震重定位後的餘震，紅色原點則是前震。震源機制解包含氣象局的CMT解及GCMT解。紅色粗線為美崙斷層(Meilun F.)及縱谷斷層(LVF.)。



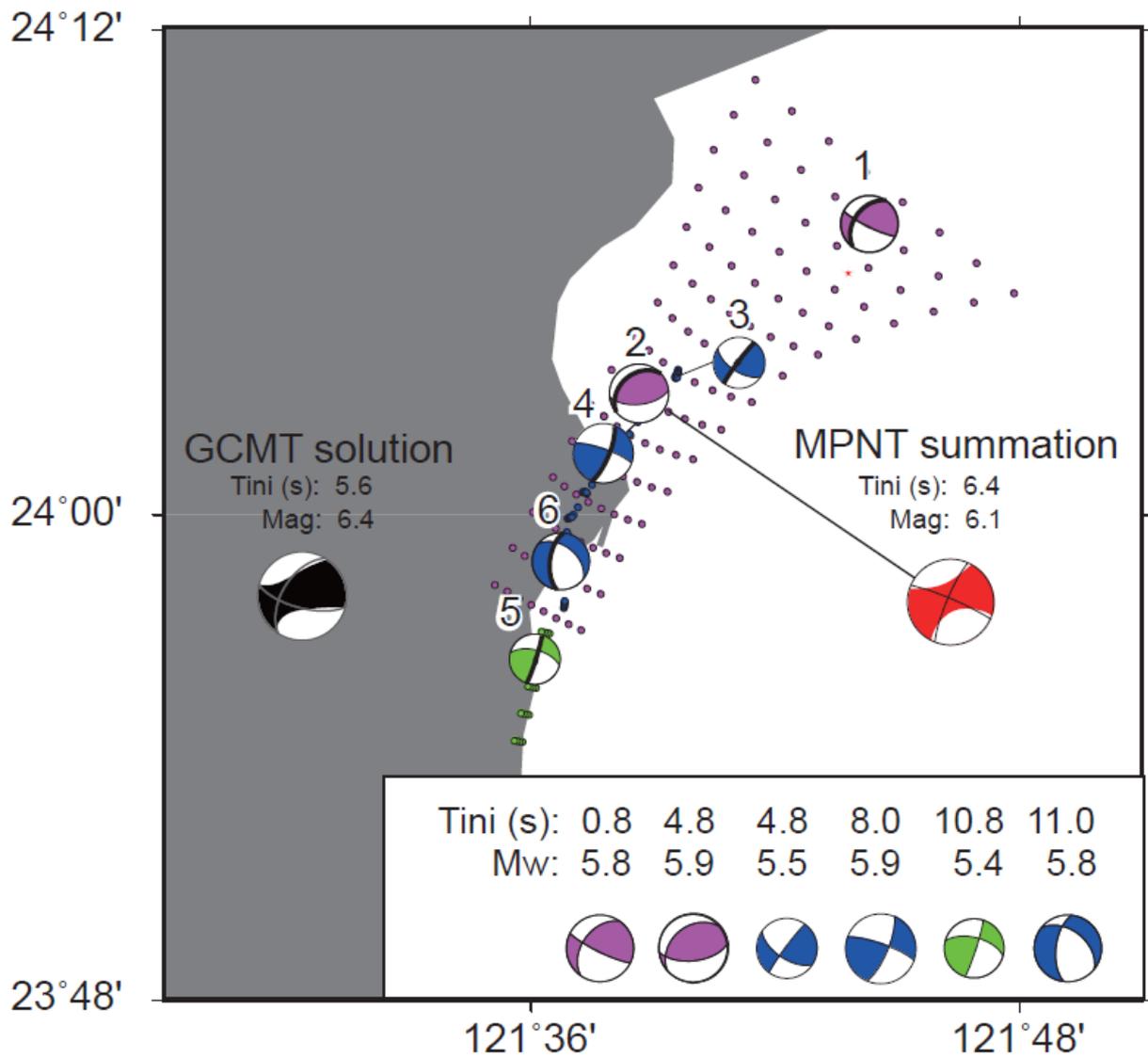
圖二、(上圖)測站分布圖。三角形為氣象局地震觀測網及中研院寬頻觀測網的強震站，方塊為27個氣象局及臺灣地震中心(<http://gps.earth.sinica.edu.tw>)架設的三分量同震位移站。(下圖)使用了來自 ALOS 衛星的干涉譜及來自 ALOS 和 S1 衛星影像，並利用 AZO 和 SBI 方法解析得的 SAR 圖像。



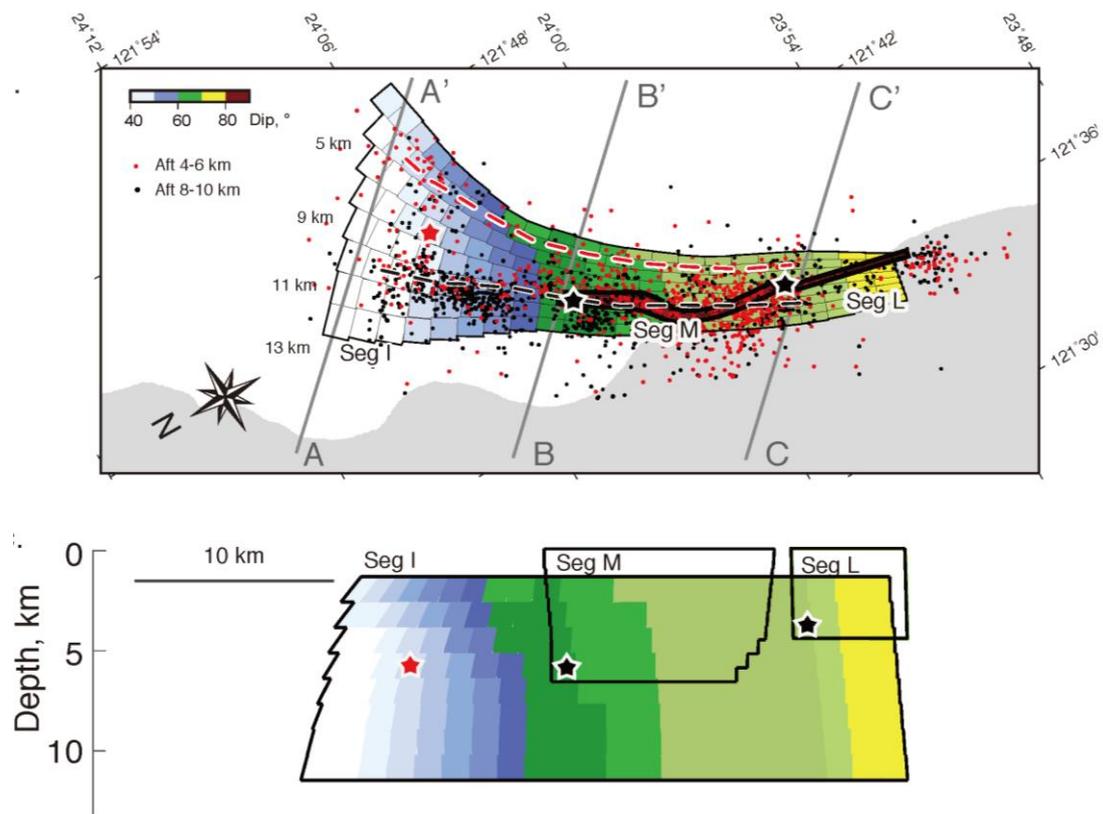
圖三、(左)SAR 圖像解析後進行地表位移重建圖，箭頭表示水平位移，顏色代表垂直抬升量，虛線為美崙斷層(Milun F.)。(中)圖左中五條剖面(灰線，Prof 1-5)，的水平位移量。(右)圖左中五條剖面(灰線，Prof 1-5)，的垂直抬升量。



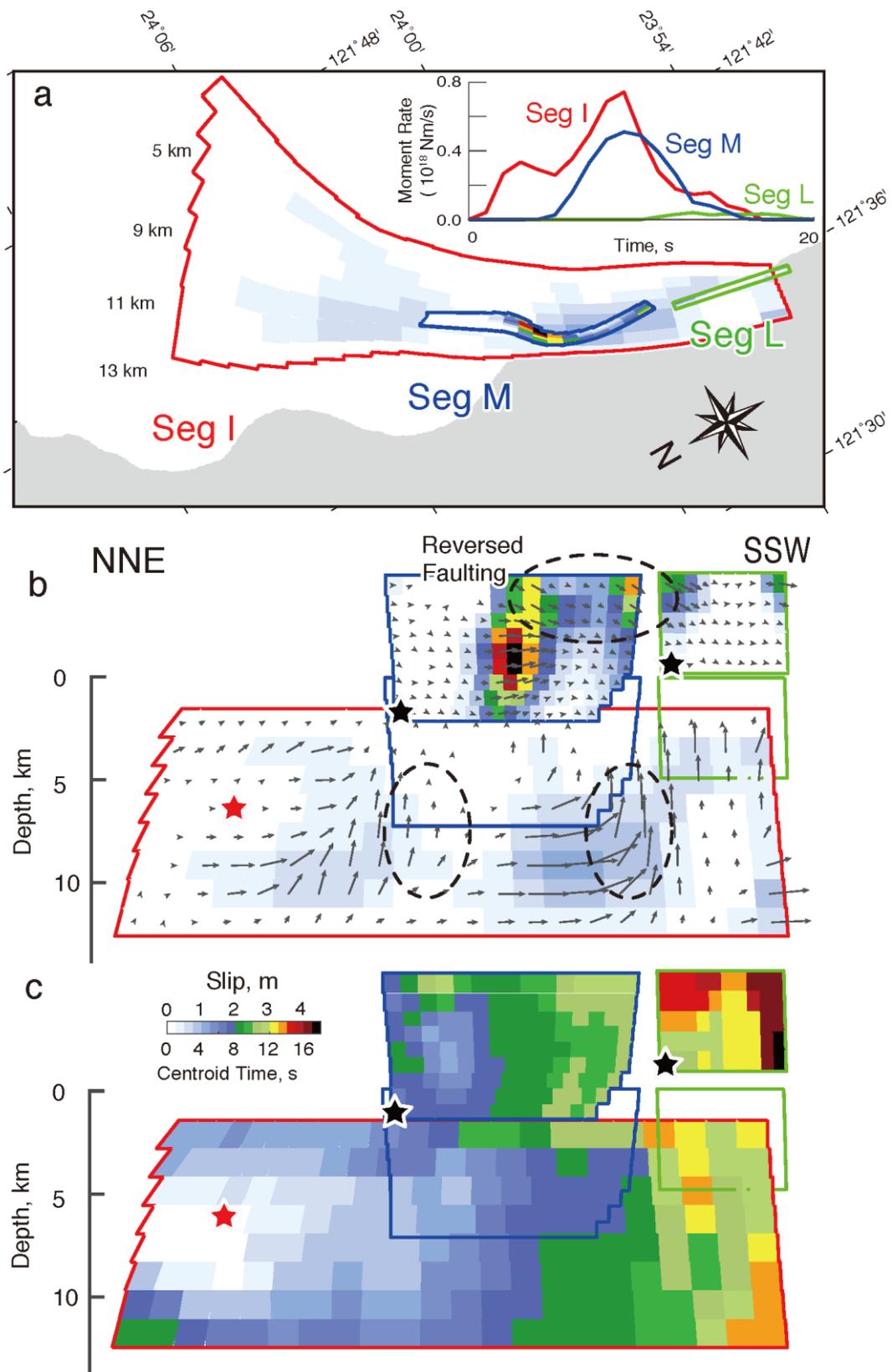
圖四、(左)初始斷層分布圖，分別對 Seg2-4曲面斷層的傾角做網格搜尋，搜尋結果如圖右。(右) Seg2-4曲面斷層傾角的網格搜尋結果，紅色及藍色結果為 GPS 和 InSAR 分別搜尋結果的殘差值，黑色為結合 GPS 和 InSAR 數據搜尋結果的殘差值。



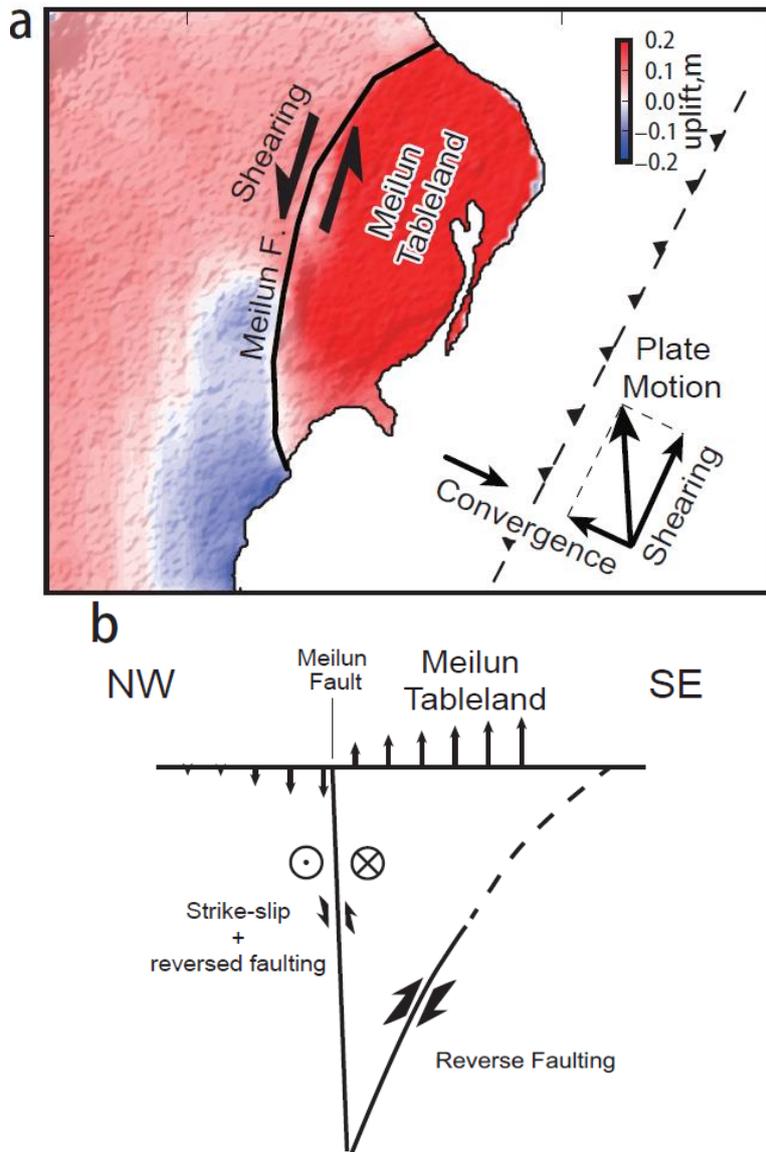
圖五、有顏色的震源機制解為多點源逆推結果，隨著時間順序為1-6及其起始時間和規模如圖例。紅色震源機制解為多點源逆推結果的總和。黑色為 GCMT 的震源機制解結果。



圖六、餘震分布圖、斷層上下界位置及外海板間斷層(offshore interplate fault, Seg I)、美崙斷層(Meilun Fault, Seg M)和花東縱谷斷層(Longitudinal-Valley Fault, Seg L)位置關係圖。



圖七、(上) 外海板間斷層(offshore interplate fault, Seg I)、美崙斷層(Meilun Fault, Seg M)和花東縱谷斷層(Longitudnal-Valley Fault, Seg L)位置分布圖。(中、下)聯合反演逆推結果之滑移量分布圖。



圖八、(上)美崙臺地(Meilun Tableland)、美崙斷層(Meilun Fault, Seg M)和外海板間斷層(offshore interplate fault, Seg I)位置關係圖。(下) 2018花蓮地震之”翹翹板理論”(Teeterboard)卡通圖。

三、心得與建議

氣象局雖然已經將震源滑移量分布逆推程式安裝於氣象局地震中心作業主機，並可成功對歷史地震的逆推進行運作，但對於區域型中型地震(如2018花蓮地震)細部構造尚無法充分解析，因此需加入多斷層或曲面斷層等控制因素，才能將地震真實破裂行為反演出來。

藉由此次參訪北京大學地球與空間科學學院進行業務交流，探討震源破裂模擬，並與岳漢助理教授學習新的震源反演技術，所模擬結果將是了解花蓮地區更細緻地震構造的重要依據。

此行亦有此機順道參加2018年中國地球科學聯合學術年會，將此次短期研究成果在會議中公開發表，並得到與會人員給予許多研究上的建議。綜整心得與建議如下：

氣象局地震中心地震觀測技術已非常穩定，且是我國地震提升及預警技術發展的重要地震資訊來源。另一方面，地震模擬技術已在國際中發展了一、二十年，而國內熟悉震源模擬技術的研究學者不多，氣象局在獨有的世界級資料庫基礎上，已擁有了初步的地震模擬技術，此次訪問北京大學，在地震模擬資源方面學習到的心得對於羅員的地震模擬技術有很大的幫助。因此，建議未來本局地震測報中心也可以有很多的資源投入地震模擬技術，且有機會與國內外學者有更多的交流及分享。

四、附錄-參考文獻

- Cheng, S.-N., Yeh, Y.-T., Yu, M.-S., 1996. The 1951 Taitung earthquake in Taiwan. *J. Geol. Soc. China*, 39, 267-286.
- Ekström, G., Nettles, M., Dziewoński, A., 2012. The global CMT project 2004 – 2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 200, 1-9.
- Hsu, T., 1962. Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China Mem.*, 1, 95-102.
- Kao, H., Jian, P.-R., Ma, K.-F., Huang, B.-S., and Liu, C.-C., 1998. Moment-tensor inversion for offshore earthquakes east of Taiwan and their implications to regional collision. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3619-3622.
- Shyu, J. B. H., Chen, C.-F., Wu, Y.-M., 2016. Seismotectonic characteristics of the northernmost Longitudinal Valley, eastern Taiwan: Structural development of a vanishing suture. *Tectonophysics*, 692, 295-308.
- Wang, Y.-J., Chang, C.-H., Lee, Y.-T., Ma, K.-F., Shyu, J. B. H., Rau, R.-J., and Cheng, C.-T., 2016. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 27(3), 325-340, doi:10.3319/TAO.2016.05.03.01.
- Wu, Y.-M., Chang, C.-H., Zhao, L., Teng, T.-L., Nakamura, M., 2008. A comprehensive relocation of earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 98, 1471-1481.
- Zumberge, J., F., Heflin, M., B., Jefferson, D., C., Watkins, M., M., Webb, F., H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017.