

菲律賓馬里其納谷斷層活動性研究—GPS連續觀測

Continuous GPS Monitoring Along the Marikina Valley Fault, the Philippines

溫瑜培¹ 饒瑞鈞¹

Teresito C. Bacolcol² Renato U. Solidum, Jr.²

Yu-Pei Wen Ruey-Juin Rau

摘要

評估高度都市化地區鄰近斷層活動性及其地震潛能的重要性，於近來2010 M_w 7.0海地地震與2010 M_w 8.8智利地震所造成的災害中再度被凸顯出來。為了闡明位於菲律賓馬尼拉地區中，由West Marikina Valley Fault (WMVF) 與East Marikina Valley Fault (EMVF) 所組成的斷層系統Marikina Valley Fault System (MVFS) 探討現今的地殼變形模式及地震潛能，本研究於2008年4月在MVFS地區架設6台雙頻與4台單頻GPS連續監測站來監測MVFS之活動性。各站之座標與速度場採用GAMIT/GLOBK軟體求解。GPS速度剖面指出WMVF為一帶有壓縮分量(2.1 mm/yr)的左移斷層(2.7 mm/yr)；EMVF呈現出微量右移型態，移動速率約2.1 mm/yr。由此區域靠近Laguna De Bay之GPS座標時間序列分析顯示，在乾季2008/12–2009/05與2009/12–2010/03時出現累積約19.1與17.5 mm的沉陷量，在濕季時則停止沈陷，甚至在2009年9月26日Ketsana颱風帶來單日250 mm豪雨後，發生20天累積抬升約14 mm的情形，此時間序列的週期變化推測與季節性地下水補注量的變化有關。此外，WMVF南段兩側測站東西方向基線長度在濕季2008/06–2008/11與2009/06–2009/11時產生5.9與11.8 mm/yr的伸長，推測可能因為降雨或地下水位變化導致地層間的孔隙水壓力增加，使得有效應力降低而促使WMVF南段發生潛移。

關鍵詞：全球定位系統、馬利吉娜山谷斷層系統、地震潛能

¹國立成功大學地球科學研究所
²菲律賓火山與地震研究所

Abstract

Recently, 2010 Mw 7.0 Haiti earthquake and Mw 8.8 Chile earthquake re-emphasize the importance to evaluate earthquake potential and the fault activity near highly urbanized areas. In order to understand the recent deformation mode and earthquake potential of the Marikina Valley Fault System (MVFS) which includes West Marikina Valley Fault (WMVF) and East Marikina Valley Fault (EMVF), we set up 6 dual-frequency and 4 single-frequency continuous GPS stations in April, 2008 to monitor the activity of MVFS. In terms of GPS analysis, we used GAMIT/GLOBK 10.35 software to obtain the coordinate and velocity of the stations. GPS velocity profile shows WMVF is a left-lateral strike-slip fault (2.7 mm/yr) with a component of compression (2.1 mm/yr) and EMVF is right-lateral with a slight rate of 2.1 mm/yr. GPS coordinate time series indicates that the GPS stations in the region near Laguna De Bay accumulated 19.1 and 17.5 mm subsidence during dry season: 2008/12–2009/05 and 2009/12–2010/03 but stop subsidence in wet season. Even after the 250 mm torrential rain which was brought by the Ketsana typhoon on September 26, 2009, the area uplifted 14 mm in the next 20 days. We speculated that the GPS time series cycles have something to do with the change of seasonal groundwater recharge. Furthermore, the baseline time series among the GPS stations located nearby the southern part of WMVF had 5.9 and 11.8 mm/yr extension in wet season: 2008/06–2008/11 and 2009/06–2009/11, we infer that is because rainfall or groundwater level change increases the stratum's pore water pressure and decreases the effective stress then to trigger creeping in the southern part of WMVF.

Keywords: GPS, Marikina Valley Fault System, Earthquake potential

一、前言

1.1 研究動機及目的

二十多年來，數起大地震（例如：1995年Mw 6.8日本阪神地震；1999年Mw 7.6台灣集集地震；2004年Mw 9.3印尼蘇門答臘地震；與2008年Mw 7.9中國汶川地震；2010 M_w 7.0海地地震與2010 M_w 8.8智利地震）對世界上各大城市帶來嚴重的生命財產與經濟損失，這些事件使得世人日益關注都會地區斷層的活動性與斷層對都會區可能帶來之巨大威脅，並且強調了評估高度都市化地區的地震潛能和斷層活動性的重要性。

菲律賓群島位處於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合帶之間（圖1.2），屬於環太平洋地震帶西側的一部份（圖1.1）。這兩個板塊的相對運動使得菲律賓群島上發生許多地殼形變與地震事件。位於呂宋島弧中段，擁有超過一千萬人口的大馬尼拉地區（Metro Manila），就遭受來自臨近斷層Marikina Valley Fault System（MVFS）之地震威脅。菲律賓地震歷史紀錄指出，這個城市在過去400年來至少發生了六次破壞性地震（Repetti, 1946）；在MVFS的古地震研究中，也發現此斷層系統在過去1400年間曾發生過三次，可能多達四次的地表破裂事件（Nelson *et*

al., 2000), 而且在近期對MVFS的研究中則指出該斷層仍是活動的(Daligdig *et al.*, 1997), 目前縱貫大馬尼拉地區之MVFS被認為可能是產生地震災害之主要來源之一(Daligdig *et al.*, 1997)。不過現今對其可能之發震構造仍然瞭解甚少, 對於MVFS之現代變形模式、地震潛能及災害潛勢分析也鮮有相關研究成果, 這對大馬尼拉地區在土地利用、城市發展和人口擴張方面是一個很嚴重的警示。

本研究之研究區域位於Marikina Valley Fault System所在之菲律賓大馬尼拉地區東部(圖1.3)。我們在斷層兩側架設共9處GPS監測站, 其中包含6台雙頻GPS接收儀與3台單頻GPS接收儀, 藉由結合多點位單頻及雙頻GPS的方法對MVFS之活動性做連續觀測。GPS連續觀測之結果藉由時間序列、GPS速度場與GPS速度剖面進行分析, 最後與前人研究做對比, 期望能夠辨識出MVFS之確切位置; 確定其運動型態、滑移速率與斷層參數, 更進一步評估MVFS地震潛能和未來對馬尼拉可能帶來之威脅, 期望能在未來提供馬尼拉市在土地利用與城市發展上做為參考依據。

1.2 區域地質與前人研究

MVFS第一次被辨識出來是在1929年, 當時Marikina Valley被認為是一個因為重複的垂直運動而形成的地塹(Alvir, 1929)。之後Irving(1947)更進一步指出在Marikina Valley北部的斷層活動主要是向西沉降, 而南部斷層則是向東沉

降。Gervasio(1968)推論地塹是在走向滑移斷層活動開始之前形成的, 但是後來有學者認為在地塹形成之前就曾發生逆衝與走向滑移斷層活動(Arcilla *et al.*, 1983)。Marikina Valley北部區域被認為可能有著旋轉抬升作用(Arcilla *et al.*, 1983)。另外位於左移Philippine Fault 與右移EMVF之間的塊體可能進行脫逸作用(escape)(Rimando and Knuepfer, 2006)。Galgana *et al.*(2007)利用塊體模擬的方法對菲律賓呂宋島做的地殼變動分析, 結果發現MVFS可能有10–12 cm/yr的左移壓縮量。

Thibault(1999)利用GPS大地測量的方法, 研究指出橫跨MVFS只有很小量的活動, 他把這現象歸因於在Metro Manila地區地下水的退縮。而日本方面利用合成孔徑雷達干涉技術(InSAR)與精密水準測量所做的研究也有類似的結論, 他們認為WMVF表現出潛移性質與地區沉降的原因可能與大範圍的地下水抽取有關(Deguchi *et al.*, 2007)。關於大馬尼拉地區地下水超抽, 導致地下水位下降的報告早在1971年就有發表(Quiazon, 1971), Roca(1993)認為本區地下水位下降的原因是在地下水補注效率不佳的情況下實施大量地下水抽取而造成。而Haman(1997)研究本區域在1990–1996七年間地下水變化發現, 地下水的抽取量在這七年間增加至一百萬cu.m./d(cubic meter per day), 估計導致地下水位產生每年6–12公分的下降。

在 MVFS 的古地震研究方面，PHIVOLCS (Philippine Institute of Volcanology and Seismology) 在 1995 年完成了一個由 Nelson 所主持的挖溝計畫，地點位於 WMVF 東北斜面，該計畫利用碳 14 放射性同位素定年，從標示指準層 (Key Horizon) 採取了 19 個標本，用以估計土壤層內的地震次數，結果計算出沿著 WMVF 的分支斷層 (Splay)，在過

去 1400 年間至少發生三次，可能多達四次的地表破裂事件，最大可能發生地震規模為 $M 6-7$ (Nelson *et al.*, 2000)，然而新期構造研究結果則為 $M > 7$ ($M 7.3-7.7$) (Rimando and Knuepfer, 2006)。此外根據地表地形繪製和初步的挖溝揭露地層研究，結論顯示出了 MVFS 在近期仍是活動的 (Daligdig *et al.*, 1997)。

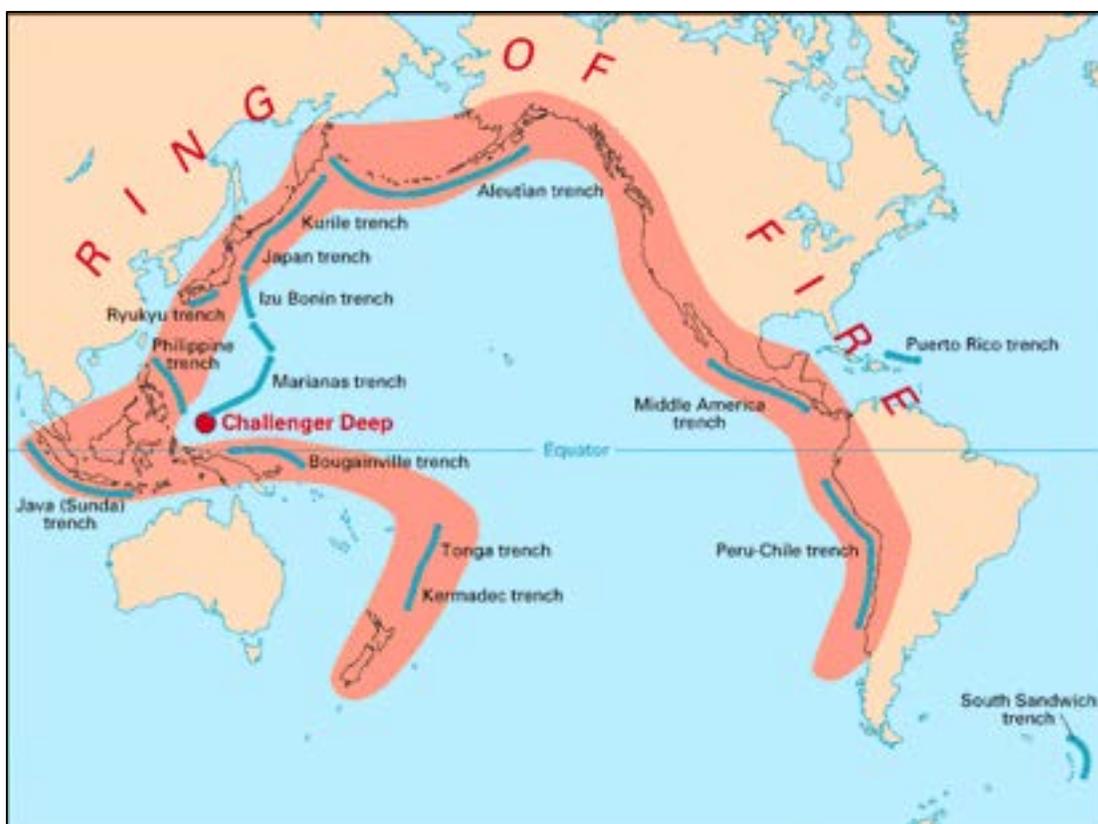


圖 1.1、環太平洋火山島弧與地震帶。橘色部分表示火山島弧與地震帶位置；藍色實線表示主要海溝位置。(USGS)

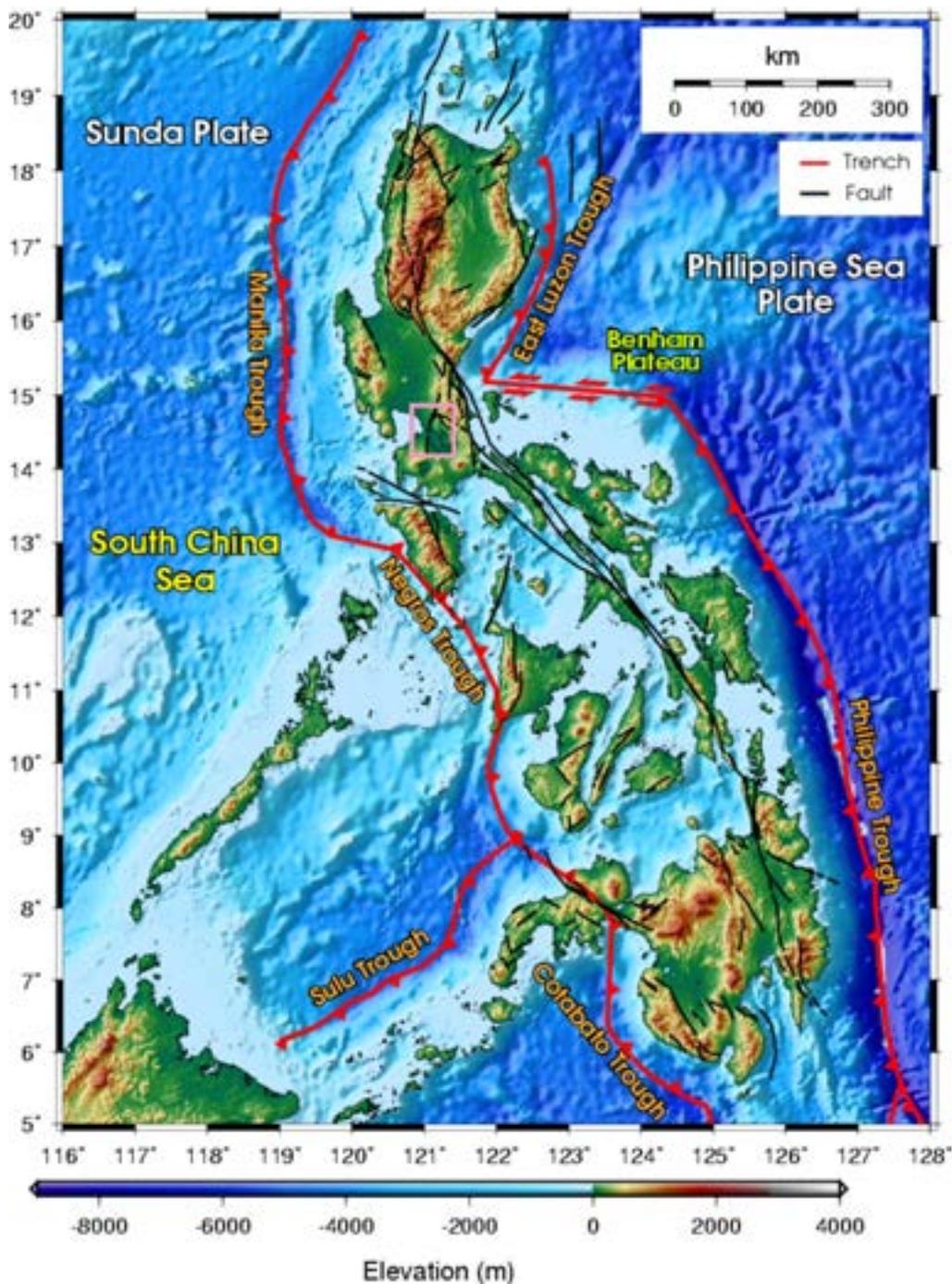


圖 1.2、菲律賓群島大地構造環境。圖中色階變化顯示地形高低之變化；黑色實線為 PHIVOLCS 公告之活動斷層；紅色實線表示海溝位置並以鋸齒符號指示板塊上盤方向。圖中可見兩反向隱沒構造（Manila Trench 與 Philippine Trench）、兩主要板塊（Sunda Plate 與 Philippine Sea Plate）以及貫穿菲律賓南北的主要斷層帶 Philippine Fault Zone。粉紅色區域為圖 1.3 之研究區域。

第二章、研究方法

本研究將Marikina Valley分為南北兩部份，總計共架設9個GPS監測點，其中包含北部4個雙頻站（WAWA、MESA、MALY、MOQC），南部2個雙頻站（TUNA、SOLD）與3個單頻站（CENT、TESD、HEAL），共計6個雙頻站3個單頻站（圖1.3）。另外在本研究區域內有一個國際IGS站：PIMO，在解算時將一併納入計算。

本研究設置之MVFS GPS Network是使用GAMIT/GLOBK 10.35版GPS解算軟體（King and Bock, 1997; Herring et al., 1990）來求解測站座標與評估其速度場（Feigl et al., 1993; Dong et al., 1998）。

2.1 GPS 解算策略

第一步先從資料整理開始，首先利用Trimble公司提供的轉檔程式，將Binary的觀測檔轉成Rinex格式，也就是O檔。接著使用由UNAVCO（University NAVSTAR Consortium）所發展的TEQC（Translate, Edit, and Quality Check）軟體（Estey and Meertens, 1999）來做資料檔頭編修的工作，其中包含天線盤型號、點名、點號、天線高，待資料修正完成後再進行下面的解算。

一、測站初始座標求取

進行MVFS GPS Network主要解算前，必須先求取各測站之初始坐標供

GAMIT解算使用。我們在菲律賓周圍挑選了9個長期穩定且包含在ITRF2005參考框架下的國際IGS站當作約制站（GUAM、KUNM、PERT、TWTF、TNML、DAEJ、TSKB、TOW2、WUHN），加上本研究中的6個雙頻站（MALY、MESA、WAWA、MOQC、TUNA、SOLD）以及一個位於本區域的IGS站PIMO，組成一個16-station的大網，約制國際IGS站的座標，約制量為5公分，解算出MVFS GPS Network中所有雙頻站公分等級以上準度的初始座標值。GAMIT會將解算出之座標寫入至座標檔lfile。最後，利用Trimble Total Control（TTC）固定同樣位於MVFS GPS Network南部區域之雙頻站TUNA與SOLD在上一步求得的初始座標，解算出MVFS GPS Network南部區域單頻站（HEAL、CENT、TESD）的初始座標。

二、雙頻 GPS 網解算

接著進入到MVFS GPS Network的GAMIT主要解算。首先把除了PIMO站之外的IGS約制站取消，將MVFS GPS Network中所有雙頻站組成一7-station的雙頻GPS網（MALY、MESA、MOQC、PIMO、SOLD、TUNA、WAWA），解算時利用上一步驟產生之座標檔lfile。當成初始座標，約制所有測站的座標，約制量為5公分。完成後可以得到供GLOBK後續使用之鬆約制雙頻網協變方矩陣

(Covariance Matrix) H-file。

三、南部區域單雙頻 GPS 混合網解算

接著在MVFS GPS Network南部區域再另組一5-station的單雙頻混合網 (SOLD, TUNA, HEAL, CENT, TEDS), GAMIT解算時使用上一步驟由TTC求得之初始座標, 並約制所有測站的座標, 約制量為5公分, 解算時強制只使用L1以及取消所有的後擬合計算 (post-fit)。完成後可以得到供GLOBK後續使用之單雙頻混合網協變方矩陣H-file。

四、座標、時間序列與速度場求取

在開始本步驟之前, 先使用htoglb指令, 將ASCII格式之H-files轉成Binary格式的H-files, 之後的GLOBK解算再大致分為兩步驟:

globk: 可以將長時間的每日解合併成單一時段解, 並能夠估計測站的座標與速度值。

glred: glred和globk是相似的程式, 不同的地方在於glred是把每一天的H-files視為獨立的, 這種方法比使用卡曼濾波器的globk更能突顯出座標的可重複性。

1. 雙頻GPS網解算

再來進入至利用GLOBK估計座標與速度場的部份。由於在雙頻網中包含一個國際IGS站PIMO, 所以第一步我們約制ITRF2005公告之PIMO的座標與速度場, 利用glred將所有的連續的H-files做成座標的時間序

列 (Coordinate Time Series), 同時找出離群點 (outlier), 將離群點所在的觀測資料利用GAMIT重新做解算, 若是成果依然不佳則直接將其H-file予以移除。將離群資料清除完畢後, 使用globk同樣約制PIMO的座標與速度場估計出其他測站座標的估計值, 最後製作出屬於雙頻網的框架檔 (.apr)。

2. 雙頻網與單雙頻混合網合併

最後進入到利用GLOBK將雙頻網與單雙頻混合網合併的步驟。在上個步驟求取的雙頻網框架檔中, 使用TUNA與SOLD這兩個同時存在於雙頻網與單雙頻混合網中的雙頻站的座標並將其速度值歸零。使用GLOBK做合併時, 利用上一步驟製作出之框架檔, 約制TUNA與SOLD的座標, 將TUNA與SOLD作為兩個區域網的連結, 利用globk將二區域網合併求出MVFS GPS Network所有共10個GPS測站的座標與速度。最後執行glred作出整體的時間序列。

3. 加入Campaign Mode GPS速度場

在求出本研究區域所有測站的速度場之後, 我們將由PHIVOLCS (Philippine Institute of Volcanology and Seismology) 方面解算提供的歷年Campaign Mode GPS速度場合併進本研究的速度場之中。由於Campaign Mode GPS速度場在解算

時有加入國際IGS站：PIMO一起解算，所以我們利用PIMO站做連結，將Marikina GPS Network速度場與Campaign Mode GPS速度場合併。最後加入的Campaign Mode GPS站包含LUZL與MRK5兩點。

第三章、研究結果

3.1 GPS 座標時間序列與速度場

本研究解算的資料自大約有700天（2008/4/21至2010/3/19），完成後得到了一些成果。利用各測站的時間序列（圖3.1、3.2）以及速度場（圖3.3、表3.1）可以得知測站間的相對位移情形，更進一步對斷層做速度剖面分析（圖3.4）則更能顯示出跨斷層的運動方式，在這邊我們的速度場是固定最西邊MESA測站的速度場來做分析。

從速度場分布（圖3.3）可以發現本區大致可以分成南北兩區域，北部區域的速度場方向大致朝西偏北，而南部區域則是為東至東南向。

由斷層速度剖面可以得知在MVFS

GPS Network北部區域平行斷層走向方面，相對於MESA，MALY有大約2.7 mm/yr的左移分量（WMVF）；相對於MALY，WAWA有2.1 mm/yr的右移分量（EMVF）。垂直斷層走向上呈現出由WMVF往西遞減的情況，最大值發生在PIMO站，達到約5.0 mm/yr；其他測站相對於MESA也有大約2mm/yr的分量。高程方面則呈現出由WMVF往東遞減的情況，下陷量最大的地方出現在WAWA，有8.5 mm/yr的下陷量。

在南部區域相對於SOLD平行斷層方向速度量上，HEAL與CENT相對SOLD為左移，有2.6與1.8 mm/yr；TESD則為右移，1.3mm/yr。在垂直斷層走向方面，可以發現斷層帶區域相對SOLD是以2.5–8.3 mm/yr往東移動，最大值仍發生在TESD上；在高程方面，相對SOLD位於最東側的TESD與TUNA測站有著12.4 mm/yr與23.3 mm/yr的下陷量。

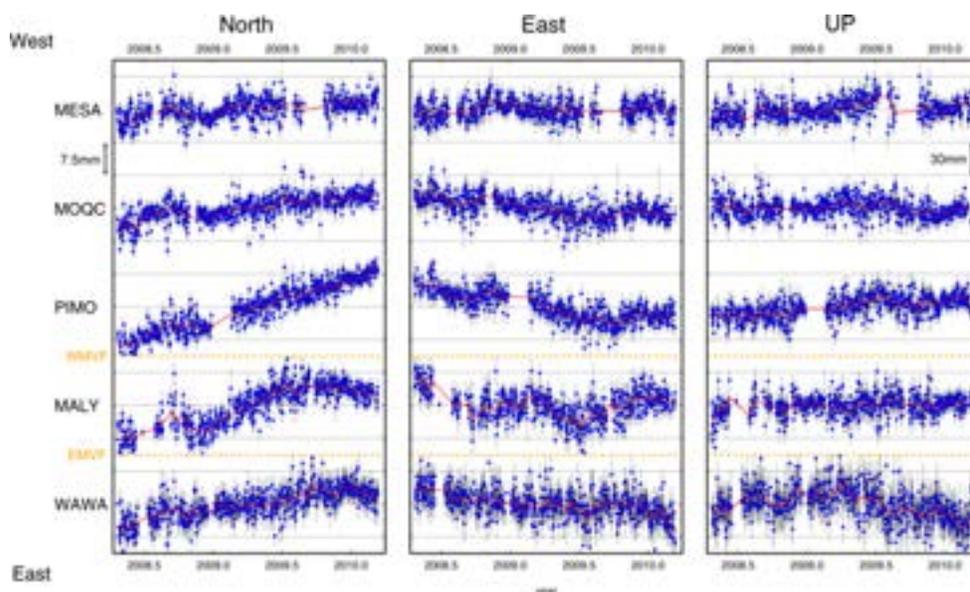


圖 3.1、MVFS GPS Network 北部區域各測站座標時間序列。由左向右之欄位分別為南北向、東西向以及高程向座標變化量。由上至下是根據斷層剖面將測站由西向東排列。紅色趨勢線是利用動態平均 (moving average) 的方法以 15 天的資料做一次平均得出。黃色虛線為斷層與測站間的相對位置。

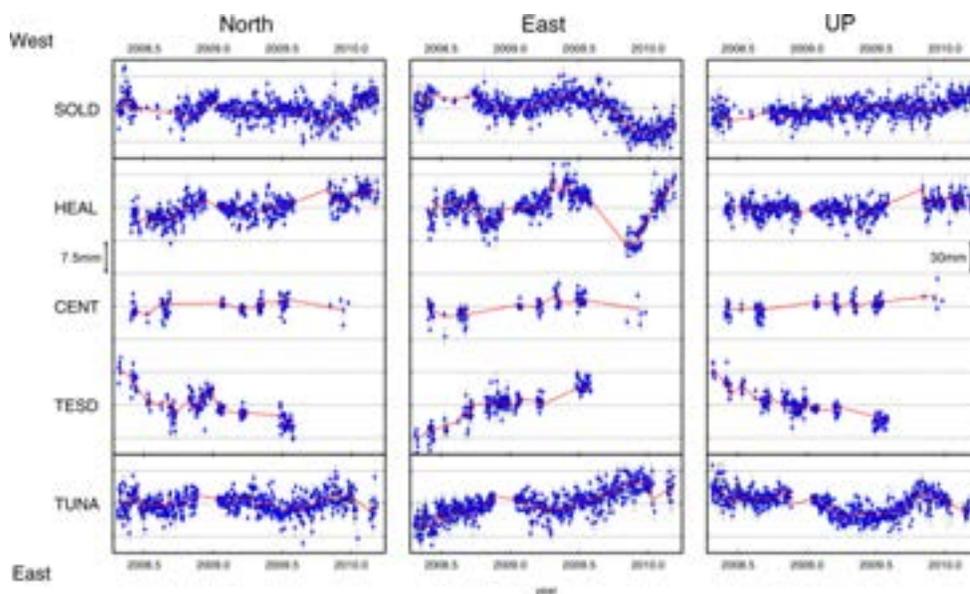


圖 3.2、MVFS GPS Network 南部區域各測站座標時間序列。由左向右之欄位分別為南北向、東西向以及高程向座標變化量。由上至下是根據斷層剖面將測站由西向東排列。紅色趨勢線是利用動態平均 (moving average) 的方法以 15 天的資料做一次平均得出南部區域因斷層線位置不明確而未予標示。

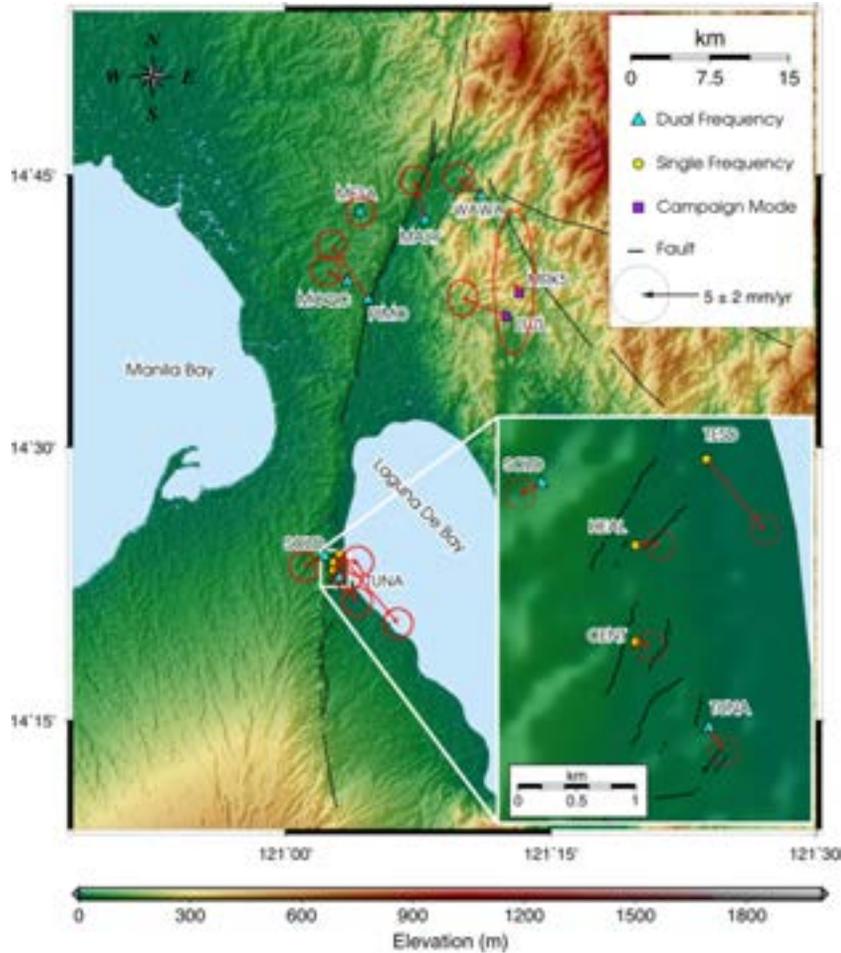


圖 3.3、MVFS GPS Network 相對於 La Mesa Water Treatment Office (MESA) 測站之 GPS 水平速度場分佈。圖中色階變化顯示地形高低變化；紅色箭頭為利用 GLOBK 估計之水平方向速度場，95% 可信區間之誤差橢圓置於各速度向量的頂端。黑色實線為 PHIVOLCS 公告之活動斷層；淺藍色三角形表雙頻 GPS 測站；黃色圓圈表單頻 GPS 測站；紫色矩形表 Campaign Mode GPS 點位。圖中將 MVFS GPS Network 南部區域放大顯示於右下角。

表 3.1、MVFS GPS Network 各測站相對於 MESA 之速度場。其中 Campaign Mode GPS 測站沒有高程向資料 (LUZL, MRK5)。V、Vh 表相對 MESA 測站之 GPS 水平與高程向速度值；Azi 為 V 之方位角；Se、Sn 與 Sh 表東西向、南北向與高程向之誤差。

Name	Longitude (°)	Latitude (°)	V (mm/yr)	Azi (°)	Vh (mm/yr)	Se (mm/yr)	Sn (mm/yr)	Sh (mm/yr)
WAWA	121.1849	14.7305	2.5	306.9	-8.5	1.0	1.0	8.3
MALY	121.1315	14.7086	3.4	346.4	-0.4	1.0	1.0	5.1
PIMO	121.0777	14.6375	5.5	326.0	3.5	1.0	1.0	5.0
MESA	121.0709	14.7161	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	4.6
MOQC	121.0586	14.6520	2.1	295.4	-4.0	1.0	1.0	4.7
TUNA	121.0510	14.3810	2.6	141.3	-8.8	1.0	1.0	3.3
TESD	121.0510	14.4030	7.7	139.7	-19.7	1.0	1.0	2.1
HEAL	121.0450	14.3960	2.2	90.0	0.8	1.0	1.0	2.2
CENT	121.0450	14.3880	1.4	107.1	4.8	1.0	1.0	2.2
SOLD	121.0370	14.4010	2.0	243.4	3.6	1.0	1.0	2.9
LUZL	121.2080	14.6201	4.0	292.1	*	1.1	1.2	*

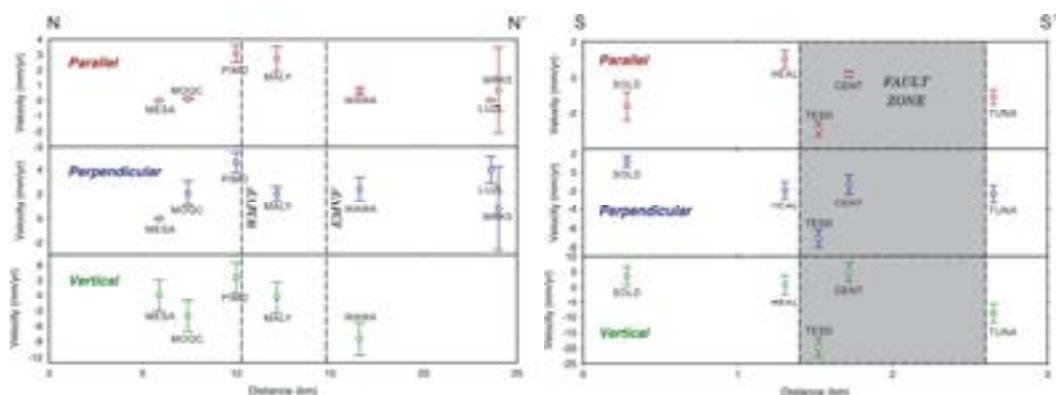
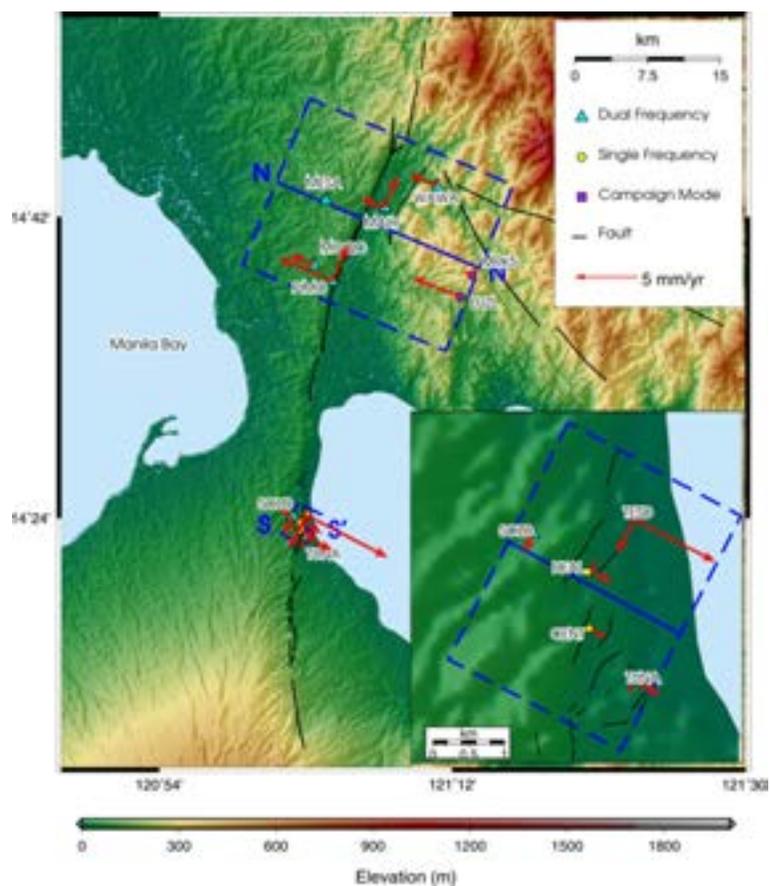


圖 3.4、MVFS GPS Network 各測站 GPS 速度剖面，將 Marikina Valley 分成南北兩部份。下方左圖為北部剖面，下方右圖則為南部剖面。南部剖面中灰色區塊代表斷層帶。紅色點代表平行斷層走向速度分量沿剖面之分佈情形，藍色點代表垂直斷層走向速度分量沿剖面之分佈情形，綠色點代表高程方向速度分量沿剖面之分佈情形。

3.2 基線長度時間序列

GPS除了可以測得測站三維座標外，還能夠得到兩測站之間的基線長度變化。在GPS的分析中，二測站間的基線長是資料解算成果中最直接的結果，只要在求解時，未加以不適當的座標約制（constraints），則基線長應該是所有觀測結果中最精確的值。利用基線長度的三方向分量，可以得到兩測站間的相對運動隨時間變化的情形。

在MVFS GPS Network北部區域，由位於WMVF以西的三個測站間的三條基

線（圖3.5），在基線長度變化的時間序列上，發現PIMO相對於MESA與MOQC十分穩定的朝西北方向移動（圖3.6）。

在MVFS GPS Network南部區域，由SOLD為基準向其他四站做連結，共得到四條基線（圖3.5）。在基線長度變化的時間序列上，可以注意到主要的變化存在於SOLD-TESD和SOLD-TUNA這兩條基線上。TESD相對於SOLD，在2008年4月底至2009年7月初之間有大約6 cm的沉陷；SOLD-TUNA基線則是出現可能為季節性的變化（圖3.7）。

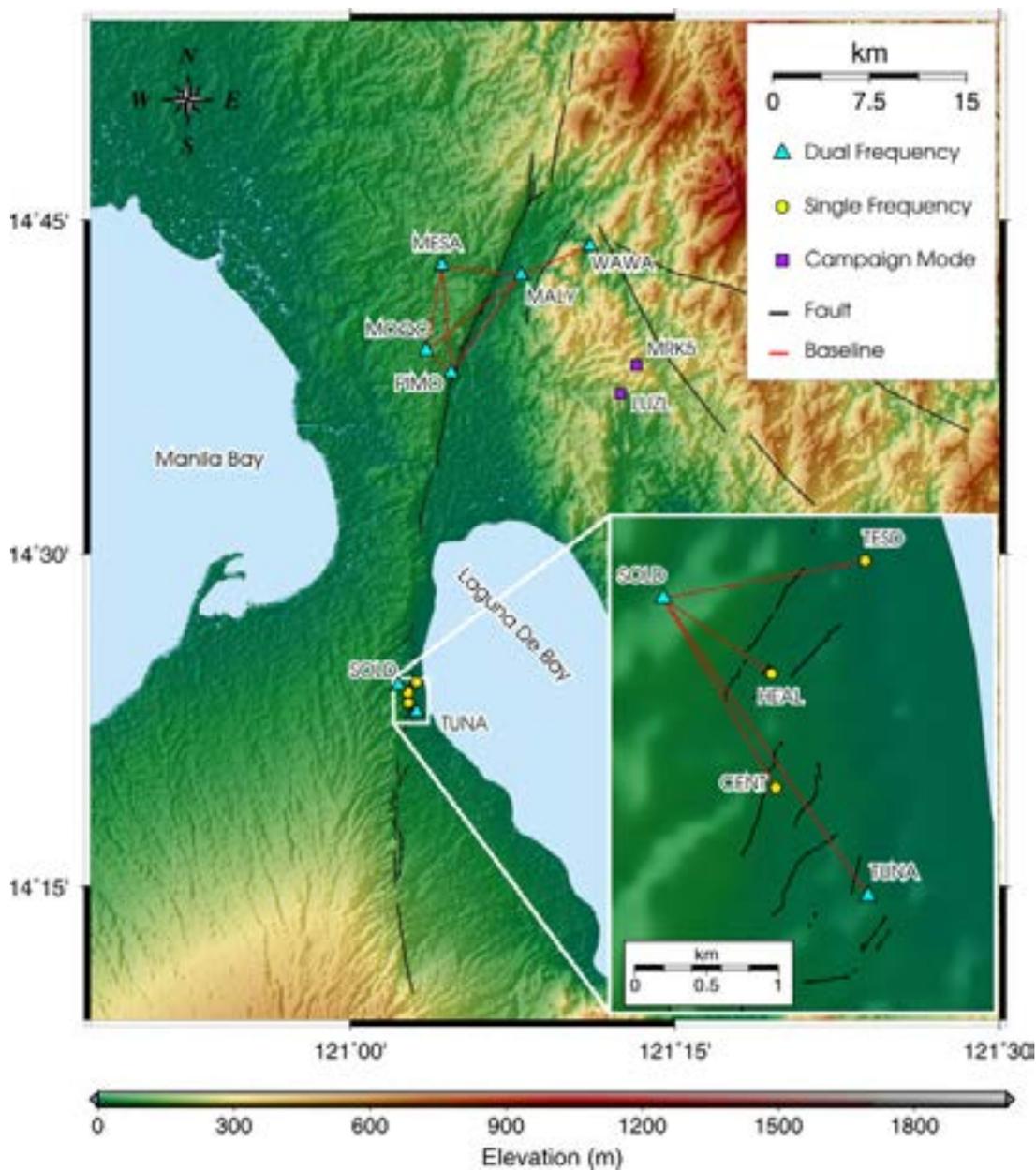


圖 3.5、MVFS GPS Network 各基線分佈圖。淺藍色三角形代表雙頻測站；黃色圈則為單頻測站；紫色方形為 Campaign Mode GPS 點位。黑色實線代表 PHIVOLCS 公告之活動斷層；紅色實線代表基線位置。

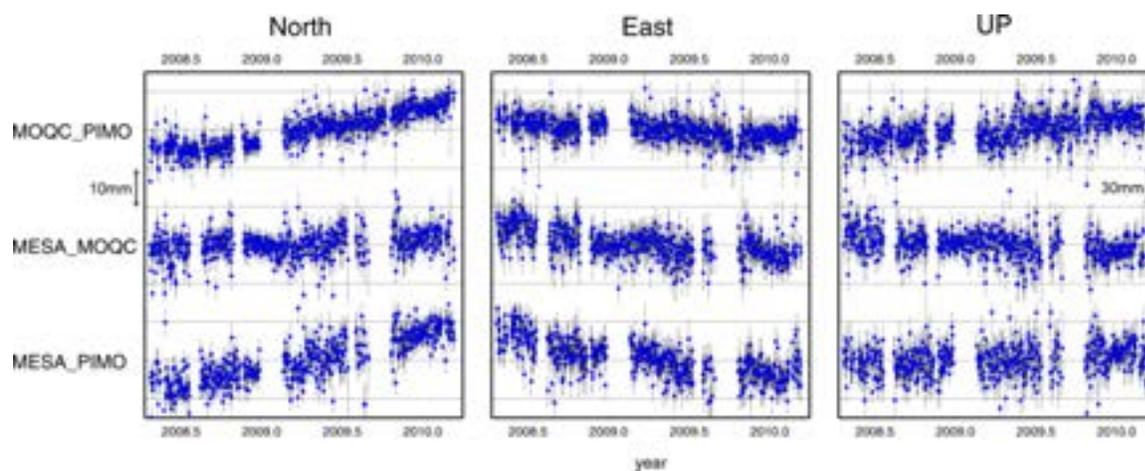


圖 3.6、MVFS GPS Network 北部區域 WMVF 以西基線長度時間序列。基線長度變化分成三方向向量，由左至右分別為南北、東西以及高程向。左側文字代表該基線名稱。

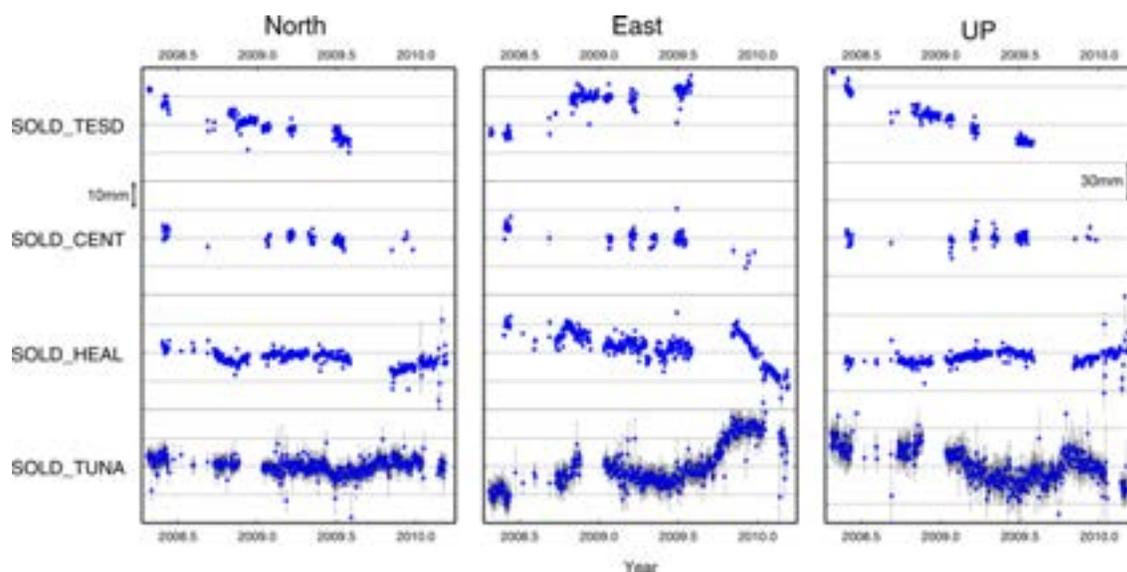


圖 3.7、MVFS GPS Network 南部區域各基線長度時間序列。基線長度變化分成三方向向量，由左至右分別為南北、東西以及高程向。左側文字代表該基線名稱。

第四章、討論

4.1 MVFS GPS Network 北部區域

利用GPS速度剖面（圖3.4）可以得知WMVF為一帶有擠壓分量（2 mm/yr）之左移斷層（3 mm/yr）。

前人利用野外地質調查研究指出MVFS中，不論WMVF與EMVF皆為右移斷層（Gervasio, 1968；Rimando and Knuepfer, 2006），不過就Galgana *et al.*（2007）與本研究皆指出WMVF為一帶有擠壓分量的左移斷層。造成其中差異的原因可能是因為本區域尚受到鄰近其他區域構造的影響，例如位於Laguna De Bay南方的火山張裂帶：Macolod Corridor的張裂活動，若火山近期的張裂活動增強，MVFS就可能呈現出左移的型態。

4.2 PIMO-MOQC-MESA 區域

不論從GPS平面速度場（圖3.3、表3.1）、座標時間序列（圖3.1）或基線長度時間序列（圖3.6）上，皆可以發現PIMO相對於MESA與MOQC，呈現穩定且朝西北方向移動的行為。但就野外地質調查發現PIMO是位於WMVF之西側，與MESA和MOQC同側，所以PIMO與MESA和MOQC在運動型態的表現上的差異，顯示出在PIMO與MOQC之間還存在有未發現的地下構造。

4.3 MVFS GPS Network 南部區域

在南部區域之每日座標時間序列上可以發現（圖3.2），SOLD與HEAL型態一致；TESD與TUNA型態一致，故本區域主要斷層活動的位置可能位於CENT測站附近。

利用GPS速度剖面（圖3.4）可以得

知本區域處在一個伸張環境下且在Laguna De Bay沿岸出現明顯的沉陷行為。前人研究大致認為本區域的活動可能與大範圍地下水抽取有關（Deguchi *et al.*, 2007；Thibault, 1999）。且本區域也證實的確存在地下水超量抽取的問題（Haman, 1997；Quiazon, 1971；Roca, 1993）。

為了闡明地下水水位變化與地表活動之間的關係，我們依據菲律賓當地乾溼季變化：濕季時期為每年6-11月；乾季時期則為每年12月至隔年5月，固定SOLD測站的速度，將速度場分成四個時段來表示，分別為：2008/06-2008/11；2008/12-2009/05；2009/06-2009/11；2009/12-2010/03（圖4.1、表4.1）。

分析發現在2008/06-2008/11濕季時期，水平方向上HEAL與CENT測站活動較為一致：朝北移動，速度分別為6.3與6.8 mm/yr；而TESD則與TUNA一致：朝東移動，速度分別為15.7與12.8 mm/yr。而高程方向上TESD出現明顯的沉陷，速度為-28.8 mm/yr。整體成一伸張型態。

在2008/12-2009/05乾季時期，水平方向上HEAL與CENT測站活動較不明顯，速度分別為2.5與1.1 mm/yr；而TESD則與TUNA一致：朝西移動，速度分別為6.8與9.3 mm/yr。而高程方向上全部測站均呈現出沉陷的行為，HEAL、CENT、TESD與TUNA的速度分別為9.1、12.7、3.4與44.1 mm/yr。整體成一收縮沉陷型態。

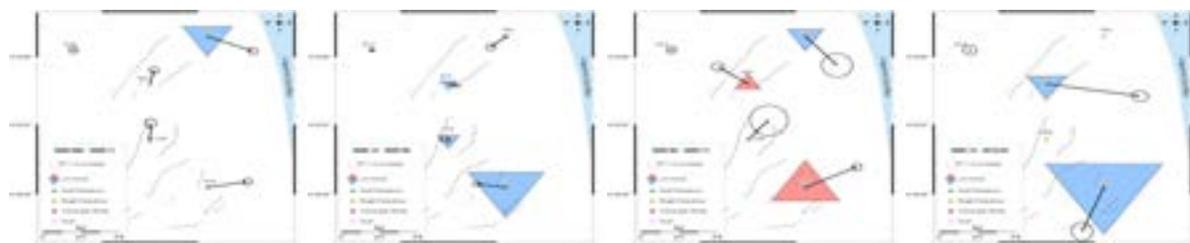
在2009/06-2009/11濕季時期，水平方向上HEAL朝西北移動，速度為12.2 mm/yr；其餘三站則朝偏東活動，其中CENT與TUNA朝東北活動，速度分別為

10.7與18.7 mm/yr；TESD則朝東南移動，速度為16.4 mm/yr。在高程方向上，HEAL與TUNA成抬升型態，速度分別為14.9與39.5 mm/yr；TESD則為沉陷型態，速度為21.1 mm/yr。

在2009/12-2010/03乾季時期，水平方向上HEAL朝東移動，速度為29.8

mm/yr；TUNA朝南活動，速度為21.2 mm/yr。高程方向上，HEAL與TUNA皆為沉陷型態，速度分別為23.4與68 mm/yr。

利用乾濕季速度場分布，可以顯示出MVFS GPS Network南部區域在乾濕季時期的確存在截然不同的運動型態。



(1) 濕季：2008/06-2008/11 (2) 乾季：2008/12-2009/05 (3) 濕季：2009/06-2009/11 (4) 乾季：2009/12-2010/03

圖 4.1、乾濕季速度場變化圖。固定 SOLD 測站的速度並依據菲律賓當地乾溼季變化分成四個時段來表示，(1)至(4)圖時段分別為：2008/06-2008/11；2008/12-2009/05；2009/06-2009/11；2009/12-2010/03。淺藍色三角形代表雙頻測站；黃色圈則為單頻測站。黑色實線代表 PHIVOLCS 公告之活動斷層。圖中紅色箭頭為估計之水平方向速度場，95%可信區間之誤差橢圓置於各速度向量的頂端。紅色矩形大小指示抬升量；藍色矩形大小指示沉陷量。

表 4.1、乾濕季速度場變化表。V 表相對 SOLD 測站之 GPS 水平向速度值；Azi 為 V 之方位角；H 表相對 SOLD 測站之 GPS 高程向速度值，正值代表抬升；負值表示沉陷。

Time	濕季 2008/06-2008/11			乾季 2008/12-2009/05			濕季 2009/06-2009/11			乾季 2009/12-2010/03		
	V (mm/yr)	Azi (°)	H (mm/yr)									
SOLD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
HEAL	6.3	11.8	-0.6	2.5	104.0	-9.1	12.2	309.3	14.9	29.8	100.6	-23.4
CENT	6.8	1.7	-3.2	1.1	275.2	-12.7	10.7	38.2	1.4	*	*	*
TESD	15.7	115.3	-28.8	6.8	225.0	-3.4	16.4	142.9	-21.1	*	*	*
TUNA	12.8	78.3	-1.5	9.3	279.3	-44.1	18.7	60.1	39.5	21.2	199.0	-68.0

相對速度場來說，分析座標時間序列(圖3.2)與基線長度時間序列(圖3.7)可以得到更連續性的變化，由於單頻GPS站資料缺失嚴重連續性較差，故只針對雙頻GPS站：SOLD與TUNA做分析。

2008/06–2008/11 濕季時 SOLD–TUNA東西方向基線長累積約有5.9 mm的伸長；高程方向TUNA相對SOLD累積有2.1 mm的抬升量。

2008/12–2009/05 乾季時 SOLD–TUNA東西方向基線長累積約有3.3 mm的縮短量；高程方向TUNA相對SOLD累積有19.1 mm的沉陷量。

2009/06–2009/11 濕季時 SOLD–TUNA東西方向基線長累積約有11.8 mm的伸長；高程方向TUNA相對SOLD累積有16.3 mm的抬升量，其中在2009/9/26日的Ketsana颱風侵襲後，東西方向的基線長有一波20日累積6.3 mm的伸長量，而高程方向TUNA相對SOLD則產生了20日累積14.0 mm的抬升量。

2009/12–2010/03 乾季時 SOLD –

TUNA東西方向基線長累積約有3.0 mm的縮短量；高程方向TUNA相對SOLD累積有17.5 mm的沉陷量。

綜合乾濕季速度場變化與座標、基線時間序列分析，顯示出本區域在濕季時的活動方式為伸張伴隨抬升，呈現出膨脹的行為；乾季時則轉變為小量擠壓與沉陷，呈現出收縮的行為(圖4.2)。

造成此差異的原因推論為受壓含水層中季節性地下水位變化所導致。根據 $\sigma' = \sigma - u_w$ (Terzaghi, 1936) (σ 為總應力， σ' 為有效應力， u_w 為孔隙水壓力) 可以得知：濕季時地表降雨或地下水位升高會增大地層間的孔隙水壓，在總應力不變的條件之下將會降低地層間的有效應力，觸發斷層產生潛移。且藉由SOLD–TUNA的基線長連續時間序列可以發現，2009年東西向的基線長最低點較2008年最低點高了約2 mm；同樣的現象在高程向也能看到，2009年高程向的基線長最高點較2008年最高點低了約10 mm，且之間的差異有越來越大的趨勢，這顯示出本區域的變形是屬於不可逆的非彈性變形型態。

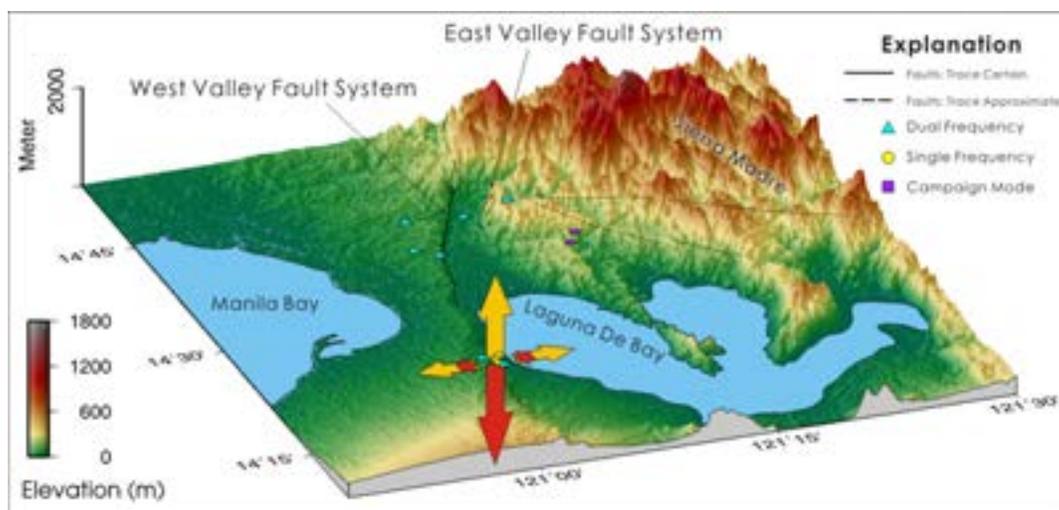


圖 4.2、MVFS GPS Network 南部區域季節性變化示意圖。圖中色階變化顯示地形高低變化；黑色實線表確定位置之活動斷層；黑色虛線表不確定位置之斷層。淡藍色三角形表本研究架設之雙頻 GPS 測站；黃色圓圈表本研究架設之單頻 GPS 測站；紫色矩形表 Campaign Mode GPS 點位。黃色與紅色箭頭表示本區域之水平與垂直向變化量，其中黃色箭頭指示濕季時期；紅色箭頭指示乾季時期。

第五章、結論

本研究利用多點位之單雙頻GPS搭配座標與基線時間序列、GPS速度場分析研究菲律賓 Marikina Valley Fault System活動性，結論如下：

- 一、利用GPS速度剖面可以發現WMVF為一帶有擠壓分量之左移斷層；EMVF為一含有小量右移分量之右移斷層。
- 二、MVFS GPS Network北部區域的運動行為大體上依然被菲律賓海板塊與歐亞板塊斜向碰撞的過程所控制，並且可能受到鄰近其他區域構造的影響，例如位於Laguna De Bay南方

的火山張裂帶：Macolod Corridor的張裂活動。

- 三、利用座標時間序列發現，MVFS GPS Network南部區域斷層主要活動的位置可能位在CENT測站附近。
- 四、造成MVFS GPS Network南部區域季節性活動的原因，推論為季節性地下水位變化所導致。
- 五、分析座標與基線時間序列後發現，MVFS GPS Network南部區域的形變應為非彈性變形。

參考文獻

1. Alvir, A. D., A geological study of the

- Angat–Novaliches region, *Philippine J. Sci.*, **40**, no. 3, 359–419, 1929.
2. Arcilla, C. A., Geology and mineral resources of the Montalban Quadrangle, Luzon Philippines, Philippine Council for Agricultural and Resources Research Development, National Institute of Geological Sciences, unpublished report, **188**, 1983.
 3. Daligdig, J. A., R. S. Punongbayan, G. M. Besana, and N. M. Tungol, The Marikina Valley Fault System: Active Faulting in Eastern Metro Manila, PHIVOLCS Professional Paper, **01**, 1–20, 1997.
 4. Deguchi, T., Y. Kinugasa, and M. Omura, Observation of Creep on Valley Fault System in Republic of the Philippines by InSAR and leveling survey, Japan Geoscience Union Meeting 2007.
 5. Dong, D., T. A. Herring, and R. W. King, Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *J. Geodesy*, **72**, 200–214, 1998.
 6. Estey, L. H., and C. M. Meertens, TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data, *GPS Solutions*, **3**, no. 1, 42–49, 1999.
 7. Feigl, K. L., D. C. Agnew, Y. Bock, D. Dong, A. Donnellan, B. H. Hager, T. A. Herring, D. D. Jackson, T. H. Jordan, R. W. King, S. Larsen, K. M. Larson, M. H. Murray, Z. G. Shen, and F. H. Webb, Space geodetic measurement of crustal deformation in Central and Southern California, 1984–1992, *J. Geophys. Res.*, **98**, 21677–21712, 1993.
 8. Galgana, G., M. Hamburger, R. McCaffrey, E. Corpuz, and Q. Chen, Analysis of crustal deformation in Luzon, Philippines using geodetic observations and earthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, **432**, 63–87, 2007.
 9. Haman, B. Z., On Sustainability of Withdrawal from Metro Manila Groundwater System and Availability of Additional Groundwater Resources, UNDP, 1997.
 10. Herring, T. A., J. L. Davis, and I. I. Shapiro, Geodesy by radio astronomy: the application of Kalman filtering to very long baseline interferometry, *J. Geophys. Res.*, **95**, 12561–12581, 1990.
 11. Irving, E. M., Geomorphological implications of the Marikina drainage pattern, Rizal Province, Luzon, P.I., *Philippine Geologist*, **1**, no. 2, 1–4, 1947.
 12. King, R. W. and Y. Bock, Documentation for the MIT GPS analysis software: GAMIT, version 9.6, Mass. Inst. of Technol, Cambridge, 1997.
 13. Nelson, A. R., S. F. Personius, R. E. Rimando, R. S. Punongbayan, N. Tungol, H. Mirabueno and A. Rasdas, Multiple large earthquakes in the past 1500 years on a fault in Metropolitan Manila, the Philippines, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **90**, 73–85, 2000.
 14. Quiazon, H., Groundwater Situation in Manila and Suburbs. Bureau of Mines. Manila Philippines, 1971.
 15. Repetti, W. C., Catalog of Philippine earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **36**, 133–322, 1946.

16. Rimando, R. E., and P. L. K. Knuepfer, Neotectonics of the Marikina Valley fault system (MVFS) and tectonic framework of structures in northern and central Luzon, Philippines, *Tectonophysics*, **415**, 17–38, 2006.
17. Roca, R. Jr., Current Conditions and Development Plan of the Groundwater System in Metro Manila. Paper presented at the Regional Workshop on Management Modelling for Conjunctive Water Use, 1993.
18. Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp, A model for the motion of the Philippine Sea Plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17941–17948, 1993.
19. Terzaghi, von K., The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear, *First Int. Conf. Soil Mech.*, **1**, 54–56, 1936.
20. Thibault, C., GPS Measurements of crustal deformation in the northern Philippine Island arc. Master's Thesis, Department of Geological Sciences, Indiana University, Bloomington, Indiana, 1999.