經濟部

計畫編號：108-5226904000-05-01

經濟部中央地質調查所

108年度委辦計畫執行期末報告書(完稿)

「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（3/4）」

（第3年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本年度計畫：自108年02月至108年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學、國立臺灣大學

中 華 民 國 108 年 12 月

計畫編號：108-5226904000-05-01

經濟部中央地質調查所

108 年度委辦計畫執行期末報告書

（完稿）

「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層反演評估（3/4）」

（第3年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本 年 度 計 畫：自108年02月至108年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立成功大學、國立臺灣大學

中 華 民 國 108 年 12 月

斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（3/4）

（第3年度）

計畫主持人：景國恩

協同主持人：胡植慶

研　究　員：陳宏宇、張午龍、鄭凱謙、莊昀叡

委託機關：經濟部中央地質調查所

執行單位：國立成功大學、國立臺灣大學

中　華　民　國　108　年　12　月

目錄

目錄 .....
表目錄 V
圖目錄 VI
摘要 XVII
Abstract XVIII

第一章、緒　論 1

1-1 計畫整體概述 1

1-2 研究目的 2

1-3 本年度工作概述 8

1-4 前一年工作成果 10
1-4-1 GPS 及精密水準測量 10
1-4-1-1 GPS 連續站資料分析 10
1-4-1-2 GPS 移動站與精密水準測量精度分析 10
1-4-1-3 全臺水平與垂直速度場 11
1-4-2 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR） 13
1-4-3 北部地區斷層模型建置 13

第二章、大地測量資料分析 24

2-1 GPS 連續站解算成果 24
2-1-2 GPS 資料品質檢測 24
2-1-3 GPS 連續站時間序列分析 26

2-2 今年度(2019 年)GPS 移動站外業督導與檢核分析 31
2-2-1 GPS 移動站督導與檢核 31
2-2-2 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析 32

2-3 今年度(2019 年)精密水準測量精度分析 35
2-3-1 精密水準督導 38
2-3-2 台北地區精密水準解算 40
2-3-2-1 石門至萬里測線 40
2-3-2-2 士林至三芝測線 41
2-3-2-3 淡水至士林測線 41
2-3-2-4 五股至台北測線 42
2-3-2-5 信義測線 42
2-3-3 桃竹苗地區精密水準解算 43
2-3-3-1 新屋至童話世界測線 43
2-3-3-2 新竹至五峰測線 43
2-3-3-3 新竹至峨眉測線 45
2-3-3-4 苗栗至南庄測線 45
2-3-4 中部地區精密水準解算 47
2-3-4-1 大安至東勢測線 47

2-3-4-2 龍井至太平測線.....48
2-3-4-3 跨車籠埔斷層之短測線.....49
2-3-4-4 王功-草屯-埔里測線.....51
2-3-4-5 北斗至水里測線.....52
2-3-5 嘉南地區精密水準解算.....53
2-3-5-1 金湖至瑞峰測線.....53
2-3-5-2 北門至楠西測線.....54
2-3-5-3 善化至關廟測線.....55
2-3-5-4 安平至龍崎測線.....56
2-3-5-5 玉井至新化測線.....57
2-3-6 高屏地區精密水準解算.....58
2-3-6-1 路竹至茂林測線.....58
2-3-6-2 岡山至安坡測線.....59
2-3-6-3 佳冬至七佳測線.....61
2-3-7 恆春地區精密水準解算.....62
2-3-7-1 恆春西臺地至佳樂水測線.....62
2-3-7-2 南樹林至鵝鑾鼻測線.....63
2-3-8 東部地區精密水準解算.....64
2-3-8-1 嶺頂至龍澗測線.....64
2-3-8-2 光復至豐濱測線.....65
2-3-8-3 紅葉至靜浦測線.....66
2-3-8-4 東成至富岡測線.....67
2-3-9 宜蘭地區精密水準解算.....68
2-3-9-1 梗枋至東澳測線.....68
2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站與精密水準觀測成果分析.....69
2-4-1 臺北地區觀測成果分析.....69
2-4-2 桃竹苗地區觀測成果分析.....71
2-4-3 中部地區觀測成果分析.....74
2-4-4 嘉南地區觀測成果分析.....76
2-4-5 高屏地區觀測成果分析.....79
2-4-6 恆春地區觀測成果分析.....81
2-4-7 東部地區觀測成果分析.....84
2-4-8 全臺速度場.....87
2-5 臺灣西南部 GPS 單頻資料計算.....92
2-5-1 單頻觀測試流程.....92
2-5-2 單頻 2018 年之解算成果.....96
2-5-3 臺灣西南部單頻 GPS 速度場.....100
第三章、南部地區雷達影像分析.....104
3-1 南部地區 PS-InSAR 成果資料分析.....106
3-1-1 ERS1/2 (1995/4~1999/9).....106
3-1-2 ENVISAT (2004/6~2008/9).....109
3-1-3 ALOS (2007/1~2011/3).....112
3-1-4 SENTINEL-1 (2015/04~2019/9).....115

3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列 121
3-3 南部地區 PS-InSAR 技術時間序列分析 123
3-3-1 六甲斷層 125
3-3-2 新化斷層 126
3-3-3 後甲里斷層 127
3-3-4 旗山斷層 128

第四章、南部地區地表速度場分析 129
4-1 GPS 與精密水準觀測資料整合 129
4-2 GPS 與 InSAR 觀測資料整合 132
4-2-1 資料整合方法 132
4-3 南部地區應變速率分布 137
4-3-1 應變速率計算方法 137
4-3-2 應變速率計算結果 139
4-3-3 應變速率成果分析 141
4-4 斷層活動分析-車瓜林斷層 143

第五章、斷層模型建置 148
5-1 斷層幾何參數設定 148
5-1-1 木屐寮-六甲斷層 149
5-1-2 新化斷層 152
5-1-3 後甲里斷層 154
5-1-4 左鎮斷層 156
5-1-5 小崗山斷層 158
5-1-6 潮州斷層 161
5-1-7 旗山斷層 167
5-1-8 恆春斷層 171
5-2 BLOCKS 斷層模型 173
5-2-1 斷層模型原理與使用參數 173
5-2-2 斷層模擬結果 177
5-3 DEFNODE 斷層模型 187
5-3-1 斷層模型原理與使用參數 187
5-3-2 斷層模擬結果 190
5-4 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model) 198
5-4-1 斷層模型原理與使用參數 198
5-4-2 斷層模擬結果 201
5-5 南部地區之斷層滑移速率 209

第六章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果-2019.04.18 花蓮地震 216
6-1 2019.04.18 花蓮近海地震簡介 216
6-2 2019.04.18 花蓮地震震源區地質簡介 219

6-3 2019.04.18 花蓮近海地震同震地表位移場 222
6-3-1 GPS 連續站同震位移場 222
6-3-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場 224
6-4 2019.04.18 花蓮近海地震震源模型 225
6-4-1 斷層錯位模型 225
6-4-2 斷層模型結果 226
6-5 2019.04.18 地震事件討論與結論 229

第七章、結論與建議 230
Chapter 7: Conclusions and Suggestions 232

參考文獻 234
期中委員審查意見 238
期末委員審查意見 242

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1] 108 年期末_GPS 連續站計算使用軟體與方法策略
[附錄 2] 108 年期末_CGPS 時間序列
[附錄 3] 108 年期末_CGPS 速度表
[附錄 4] 108 年期末_SENTINEL-1A 升軌衛星干涉圖.docx
[附錄 5] 108 年期末_SENTINEL-1A 降軌衛星干涉圖.docx
[附錄 6] 108 年期末_GPS 移動站時間序列
[附錄 7] 108 年期末_GPS 移動站速度表
[附錄 8] 108 年期末_精密水準時間序列
[附錄 9] 108 年期末_精密水準速度表
[附錄 10] 108 年期末_GPS 單頻解算與分析實務教育訓練
[附錄 11] 108 年期末_精密水準每二年較差圖
[附錄 12] 108 年期末_精密水準高程地形變化、水準平均抬升速率圖

表目錄

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。.....XII
表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。.....XIII
表 C：期末須交付之各項工作項目。.....XV
表 1-2.1：中央地質調查所建置的GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。.....3
表 2-2.1：GPS 移動站施測、督導與檢核時間表.....32
表 2-3.1：精密水準測量施測與督導時間表.....39
表 2-5.1：Bernese 5.0 與 5.2 版坐標輸出差異比較表。.....94
表 5-1.1：南部地區 8 條斷層之幾何參數。.....148
表 5-1.2：木屐寮-六甲斷層傾角及深度資料與文獻列表(胡植慶等，2016).....151
表 5-1.3：新化斷層傾角及深度資料與文獻列表(胡植慶等，2016) 153
表 5-1.4：潮州斷層幾何資料及文獻列表。.....166
表 5-1.5：旗山斷層幾何資料及文獻列表。.....170
表 5-2.1：斷層模擬初始值；斷層幾何與地質滑移速率(Shyu et al., 2016)。.....176
表 5-2.2：以 2002-2016 年速度場模擬成果之各斷層滑移速率。。.....179
表 5-2.3：以 2016-2019 年速度場模擬成果之各斷層滑移速率。。.....179
表 5-3.1：圖 5-3.1 中所示斷層之幾何參數。.....190
表 5-3.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。.....197
表 5-3.3：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及平均滑移速率。.....197
表 5-4.1：斷層平均滑移速率。.....203
表 5-5.1：本計畫 2002 至 2016 年加權平均斷層滑移虧損率。.....211
表 5-5.2：本計畫 2016-2019 年斷層滑移虧損速率。.....212
表 5-5.3：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與過去測地斷層長期滑移速率比較表。.....213
表 5-5.4：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與長期滑移速率比較表。.....214

圖目錄

圖 1-2.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。 4
圖 1-2.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。 5
圖 1-2.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。 6
圖 1-2.4：Sentinel-1A 衛星影像於臺灣之升軌、降軌軌道涵蓋圖。 7
圖 1-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。 14
圖 1-4.2：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。 15
圖 1-4.3： ERS（1996/1~1999/7）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 16
圖 1-4.4：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 444、445 及 446，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 17
圖 1-4.5：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）升軌軌道 69，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 18
圖 1-4.6：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌軌道 105，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 19
圖 1-4.7：ENVISAT（2004/3~2008/6）衛星軌道 461，像幅編號 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 20
圖 1-4.8：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。 21
Figure 1-4.8: The total slip rates of BLOCKS model. 21
圖 1-4.9：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。 22
圖 1-4.10：基線應變模型的斷層滑移虧損率。 23
圖 2-1.1：MESN 測站資料接收度低於 80%。 24
圖 2-1.2：GS27 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。 25
圖 2-1.3：整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之水平年速度場。 28
圖 2-1.4：整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙 S01R 測站之垂直年速度場。 29
圖 2-1.5：BIMO 測站資料受軌道參數轉換影響之時間序列。 30
圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。 33
圖 2-2.2：2003-2019 年截至 9 月底 GPS 點位坐標殘差分布圖。 34
圖 2-2.3：2003-2019 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 34
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 36
圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖。 37
圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較。 40
圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較。 40
圖 2-3.5：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較。 41
圖 2-3.6：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較。 41
圖 2-3.7：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較。 42
圖 2-3.8：水準點位 5003 與連續站 S101 之間序列比較。 42
圖 2-3.9：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較。 43

圖 2-3.10：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較。.....44
圖 2-3.11：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較。.....44
圖 2-3.12：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較。.....45
圖 2-3.13：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。.....45
圖 2-3.14：水準點位 GD58 與連續站 GS92 之時間序列比較。.....46
圖 2-3.15：中部地區 GPS 連續站 GS82 及精密水準測站 B283 周圍環境圖。...47
圖 2-3.16：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較。.....47
圖 2-3.17：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較。.....48
圖 2-3.18：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較。.....48
圖 2-3.19：水準點位 G937 與連續站 GS23 之時間序列比較。.....49
圖 2-3.20：水準點位 T074 與連續站 WUFN 之時間序列比較。.....49
圖 2-3.21：水準點位 GE89 與連續站 WFEN 之時間序列比較。.....50
圖 2-3.22：水準點位 T005 與連續站 CAOT 之時間序列比較。.....50
圖 2-3.23：水準點位 B238 與連續站 KZN1 之時間序列比較。.....50
圖 2-3.24：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。.....51
圖 2-3.25：水準點位 B280 與連續站 GS83 之時間序列比較。.....51
圖 2-3.26：水準點位 G297 與連續站 VR03 之時間序列比較。.....52
圖 2-3.27：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較。.....53
圖 2-3.28：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較.....54
圖 2-3.29：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較.....55
圖 2-3.30：水準點位 B299 與連續站 GS89 之時間序列比較。.....55
圖 2-3.31：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較.....56
圖 2-3.32：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較.....56
圖 2-3.33：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較。.....57
圖 2-3.34：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較。.....58
圖 2-3.35：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較。.....59
圖 2-3.36：水準點位 J105 與連續站 LIAN 之時間序列比較。.....59
圖 2-3.37：水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較。.....60
圖 2-3.38：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。.....60
圖 2-3.39：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較。.....61
圖 2-3.40：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。.....62
圖 2-3.41：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。.....63
圖 2-3.42：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較。.....63
圖 2-3.43：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較。.....64
圖 2-3.44：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較。.....65
圖 2-3.45：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。.....66
圖 2-3.46：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。.....67
圖 2-3.47：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比。.....68
圖 2-4.1：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....69
圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場.....70
圖 2-4.3：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場。.....70
圖 2-4.4：桃竹苗地區 GPS 連續及移動測站分布情形.....71
圖 2-4.5：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場.....72
圖 2-4.6：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2019 年垂直方向速度場。

.....73
圖 2-4.7：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....74
圖 2-4.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。.....75
圖 2-4.9：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。.....75
圖 2-4.10：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....76
圖 2-4.11：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....77
圖 2-4.12：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。.....78
圖 2-4.13：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....79
圖 2-4.14：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....80
圖 2-4.15：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。.....80
圖 2-4.16：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形.....81
圖 2-4.17：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....82
圖 2-4.18：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2019 年之 GPS 垂直方向速度場。.....83
圖 2-4.19：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形。.....84
圖 2-4.20：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。....85
圖 2-4.21：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。....86
圖 2-4.22：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。.....89
圖 2-4.23：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。.....91
圖 2-5.1：單頻站與約制站空間分布圖。.....93
圖 2-5.2：相同設定下測站 0602 之時間序列圖。.....95
圖 2-5.3：相對於測站 GS74 之單頻站 0604 坐標時間序列。.....97
圖 2-5.4：相對於測站 GS74 之單頻站 0609 坐標時間序列。.....97
圖 2-5.5：相對於測站 GS74 之單頻站 0607 坐標時間序列。.....98
圖 2-5.6：相對於測站 GS74 之單頻站 0602 坐標時間序列。.....98
圖 2-5.7：最大觀測量基線解算策略之殘差分布圖。.....99
圖 2-5.8：強制固定測站基線解算策略之殘差分布圖。.....99
圖 2-5.9：相對於測站 GS74 之單頻站 0605 坐標時間序列。.....100
圖 2-5.10：相對於測站 GS74 之單頻站 0609 坐標時間序列。.....101
圖 2-5.11：相對於測站 GS74 之單頻站 0607 坐標時間序列。.....101
圖 2-5.12：相對於測站 GS74 之單頻站 0602 坐標時間序列。.....102
圖 2-5.13：2018 至 2019 年水平速度場。.....103
圖 3.1：本團隊研究南部地區地殼變形使用 SAR 影像圖資示意圖。.....105
圖 3-1.1：ERS（1995/4~1999/9）衛星軌道（Track）232，像幅編號（Frame）3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。.....107
圖 3-1.2：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。.....108
圖 3-1.3：ENVISAT（2004/6~2008/9）衛星軌道 232，像幅編號 3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。.....110
圖 3-1.4：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。.....111
圖 3-1.5：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 447，像幅編號 430、440 及 450 及

衛星軌道 446，像幅編號 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 113
圖 3-1.6：ALOS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。 114
圖 3-1.7：SENTINEL-1 升軌影像（2015/10~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 116
圖 3-1.8：SENTINEL-1 降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 117
圖 3-1.9：SENTINEL-1 升軌影像（左圖）及降軌影像（右圖）的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。 118
圖 3-1.10：SENTINEL-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。 119
圖 3-1.11：SENTINEL-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。 120
圖 3-2.1：ERS（1996/1 ~ 1999/7）時期及 ALOS（2007/1 ~ 2011/3）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 122
圖 3-3.1：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站新化（S106）時間序列比較圖。 123
圖 3-3.2：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。 124
圖 3-3.3：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS42 相對於 GS43 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 125
圖 3-3.4：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 S106 相對於 GS29 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 126
圖 3-3.5：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS31 相對於 GS30 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 127
圖 3-3.6：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 LIKN 相對於 AKND 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 128
圖 4-1.1：南部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場....130
圖 4-1.2：南部地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 131
圖 4-2.1：臺灣南部 PS-InSAR 速度場資料，顏色條帶的單位為 mm/yr。....133
圖 4-2.2：(a)，參考區域內包含的資料點；(b)，經過一維率波後的資料點顏色條帶的單位為 mm/yr；(c) 參考區域內資料的半方差圖。 134
圖 4-2.3：PS-InSAR 資料在減點後的結果，依據減點後的 LOS 速度值在區塊中上色。 135
圖 4-2.4：圓點為減點後的資料點，與其 LOS 速度值；三角形圖案為 GPS 速度場合成至 LOS 方向後的速度場。 136
圖 4-3.1：臺灣西南部地區應變場圖。 139
圖 4-3.2：臺灣西南部地區剪應變場圖。 140
圖 4-3.3：臺灣西南部地區之旋轉率分佈圖。 140
圖 4-4.1：中央地質調查所五萬分之一區域地質圖之旗山圖幅（林啟文，2013）。 143
圖 4-4.2：GPS 速度場套疊在 20 米數值高程，顏色表示 GPS 速度場內差所得之速度變化。 144
圖 4-4.3：PS-InSAR 視衛星方向速度場套疊在 20 米數值高程，顏色表示視衛星方向速度場。 145

圖 4-4.4：跨越車瓜林斷層西南端延伸段可能的斷層跡位置和右昌斷層的速度場變化剖面。 147
圖 5-1.1：台南地區構造剖面及地震深度剖面。。 150
圖 5-1.2：木屐寮-六甲斷層幾何面破裂模式。 150
圖 5-1.3：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。 152
圖 5-1.4：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面。 153
圖 5-1.5：新化斷層幾何面破裂模式。 153
圖 5-1.6：台南地區區域地質圖及震測剖面圖。(a)台南地區區域地質圖，(b) 反射震測 D5 剖面(Le Béon et al. 2019)。 154
圖 5-1.7：跨台南台地地質剖面圖。(a)台南地區鑽井位置及剖面圖位置，(b)跨後甲里斷層 129 地質剖面(Le Béon et al. 2019)。 155
圖 5-1.8：後甲里斷層幾何面破裂模式。 155
圖 5-1.9：地調所新化地質圖幅地質剖面圖（修改自何信昌等，2005）。 156
圖 5-1.10：左鎮斷層淺層震測資料（陳延宗，2007）。 157
圖 5-1.11：1900~2015 年左鎮斷層地震分布及深度分布剖面。 157
圖 5-1.12：左鎮斷層幾何面破裂模式。 157
圖 5-1.13：上圖，小崗山斷層條帶地質圖；下圖，08P-HKS-AL-1 震測剖面（林啟文等，2009；陳文山等，2010）。 159
圖 5-1.14：小崗山斷層鑽井資料（陳文山等，2010）。 160
圖 5-1.15：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。 162
圖 5-1.16：潮州地區震測剖面及地下構造解釋。 162
圖 5-1.17：B-B’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。 163
圖 5-1.18：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。 163
圖 5-1.19：臺灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。 164
圖 5-1.20：（a）地震、震源機制解及剖面線分布圖（b）剖面 7 及剖面 9 之地震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層（c）剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖（Wu et al., 2014）。 165
圖 5-1.21：臺灣西南部地區 Line 27 及 Line 28 平衡剖面（黃旭燦等，2004）。 168
圖 5-1.22：西南部地區地質剖面圖（洪日豪，2006）。 168
圖 5-1.23：B-B’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。 169
圖 5-1.24：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。 169
圖 5-1.25：西南部地區速度構造剖面圖（陳文山，2016）。 170
圖 5-1.26：南部斷層幾何形貌設定。 172
圖 5-2.1：斷層模擬初始值。 174
圖 5-2.2：斷層模擬初始值。 175
圖 5-2.3：2002-2016 年傾向滑移速率模擬成果。 180
圖 5-2.4：2016-2019 年傾向滑移速率模擬成果。 180
圖 5-2.5：2002-2016 年走向滑移速率模擬成果。 181
圖 5-2.6：2016-2019 年走向滑移速率模擬成果。 181
圖 5-2.7：2002-2016 年斷層模擬成果之滑移速率。 182
圖 5-2.8：2016-2019 年斷層模擬成果之滑移速率。 182
圖 5-2.9：2002-2016 年地表速度場正演模擬成果.....184
圖 5-2.10：2016-2019 年地表速度場正演模擬成果。 185

圖 5-3.1：(a)臺灣南部三維塊體模型及活動斷層分布。 (b)從 2002 至 2015 年底的 GPS 資料所觀測到的平均水平速度場。 189
圖 5-3.2：(a)最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。(b）最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。 193
圖 5-3.3：(a）推求的斷層長期滑移速率。 (b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c）各斷層面的滑移虧損率。 194
圖 5-3.4：(a) GPS 觀測速度場。(b）最佳塊體模型所預估的地表速度場。(c）模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。 195
圖 5-3.5：各塊體內之內部形變應變大小。 196
圖 5-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。 200
圖 5-4.2：臺灣南部地區 GPS 連續站、移動站相對於測站 S01R 為之水平速度場。 204
圖 5-4.3：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a）水平速度場觀測值。(b）水平速度場計算值。(c）水平速度場殘差。 205
圖 5-4.4：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 206
圖 5-4.5：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 206
圖 5-4.6：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a）水平速度場觀測值。(b）水平速度場計算值。(c）水平速度場殘差。 207
圖 5-4.7：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 208
圖 5-4.8：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。 208
圖 5-5.1：本計畫 2002 至 2016 年加權平均斷層滑移虧損率，對應表 5-5.1。.210
圖 5-5.2：本計畫 2016-2019 年斷層滑移虧損速率。 212
圖 5-5.3：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與過去測地斷層滑移速率比較圖。 213
圖 5-5.4：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與長期滑移速率比較圖。 214
圖 6-1.1：中央氣象局 20190418 地震事件報告 217
圖 6-1.2：中央氣象局 20190418 花蓮地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果。 218
圖 6-2.1：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001）。 219
圖 6-2.2：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖。 221
圖 6-3.1：測站 TUNM 與 PEPU 每日解時間序列。。 222
圖 6-3.2：花蓮秀林鄉地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。 223
圖 6-3.3：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。 225
圖 6-4.1：2018 年與 2019 年花蓮地震餘震分布。 227
圖 6-4.2：2019 年花蓮地震斷層模型擬合結果。 228

表 A：預期進度甘梯圖（Gantt Chart）：計畫進度控制及檢討之依據。

Table A：Gantt Chart of expected progress.

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估（3/4）													
月 次 工 作 項 目	第1月	第2月	第3月	第4月	第5月	第6月	第7月	第8月	第9月	第10月	第11月	第12月	備註
第一季查核點													
第二季查核點													
期中報告													
第三季查核點													
期末報告													
第四季查核點													
GPS 移動站及單頻站資料檢核及分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 及水準測量規劃、督導 (由成大工作團隊負責)													
南部地區斷層之斷層幾何參數 (由成大工作團隊負責)													
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算 (由臺大工作團隊負責)													
PSInSAR 衛星影像分析 (由臺大工作團隊負責)													
整合並綜合分析觀測資料 (由成大工作團隊負責)													
預定進度（累積數）	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

表 B：預期進度查核點（Check Point）：計畫進度控制及檢討之依據。

Table A：Check point of expected progress

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期款請款收據 3. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核12-1月 b. GPS 連續站計算及時序分析 11-1 月 c. 彙整以往 PS-InSAR 成果資料	三月三十一日	契約書與工作計畫書修正，第一期請款(金額)。
2	（第二季查核點） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料查核2-4 月 b. GPS 連續站計算及時序分析2-4 月 c. 處理連續 GPS 站周圍 PS 點之時間序列	六月三十日	第二季工作進度報告與繳交文件
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第二期款請款收據	七月三十一日	期中報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況、第二期請款(金額)
4	（第三季查核點） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻及水準資料查核5-7 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至5-7 月 c. 處理PSInSAR 時間序列分析	九月三十日	第三季工作進度報告與繳交文件
5	（期末報告） 1.工作進度報告表 a. GPS 移動站、單頻站及水準資料8-9 月查核及分析 b. GPS 連續站計算及時序分析 8-9 月 c. 彙整南部地區活動斷層	十一月三十日	期末報告書面資料、會議記錄與委員意見辦理狀況

	及潛在活動構造之斷層幾何參數各活動斷層的滑移虧損率 d. 綜合分析觀測資料 2.期末報告書面資料初稿		
6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔10份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	清點所有交付項目與教育訓練等契約承諾、尾款請款(金額)

查核點共計六個請標示於甘梯圖上(包括以季為單位之工作進度報告表、期中簡報及期末簡報)。
本欄內文字僅為範例，可依據個案狀況酌予修正內容。

表 C：期末須交付之各項工作項目。

Table C：Final report content

	工作項目	章節
測量外業督導與檢核	1. 在測量外業督導部分，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 42 測段。以上數據以 2018 年度測量公司承辦之業務範圍為準。 2. 在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	2-2
連續 GPS 觀測站資料解算分析	1. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果（以超過兩年以上之資料做分析）。	2-1
移動式 GPS、精密水準測量及單頻 GPS 觀測網成果解算分析	1. 2019 年 GPS 移動站與精密水準測量成果解算誤差及成果分析。 2. 完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場。 3. 解算西南部地區單頻 GPS 觀測網之成果與精度，並評估其取代 GPS 移動站之可行性。	2-3 2-4
南部地區雷達影像分析	1. 利用分析之 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊。（規劃區域與委託機關溝通協調後決定）。	第三章
南部地區地表速度場分析與斷層參數求解	1. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊。 2. 南部地區應變速率場之推求。 3. 提供至少三種不同模型，使用斷層潛勢分析計畫提供之斷層幾何，反演斷層滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊。 4. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所劃設建議。	第四章 第五章
陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告	1. 陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告（成功大學及臺灣大學工作團隊負責）利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時觀測，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一週內完成連續 GPS 速度場之解算工作（包含地調所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料），並配合地調所測量外業等資料（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。本年度計畫工作中，若截至期末簡報前仍無規模大於 6 的陸域地震事	第六章

	件，本團隊會提供本年度重要地震事件之分析成果。	
臺灣西南部地區單頻 GPS 觀測網成果分析。		2-5
舉辦至少一場數日之 GPS 單頻解算與分析實務教育訓練。		附錄 10
提供成果報告書內圖片「300dpi 以上清晰圖檔(電子檔)」以及計畫參與人員運用計畫執行成果發表之相關著作電子檔。		
成果報告書 30 份、光碟片 10 份。		

摘要

本計畫分析臺灣全島近十數年來的 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測線及 PS-InSAR 資料，提供全臺地表速度場，接著透過斷層模型之建立，推估斷層短期滑移速率及滑移虧損率等資訊。今年度計畫主要執行重點地區為臺灣南部地區之活動斷層及潛在活動構造。在 GPS 連續站資料處理方面，本計畫解算全臺近 500 站連續全球定位系統測站，資料累積至 2019 年 9 月。此外，本年度至 11 月底為止，GPS 移動站部分共完成 761 站的施測，精密水準則完成共計 30 條主線測線及 12 條水準副線側線之施測。本報告解算累積歷史資料至今之平均速度場結果與過去長期解算結果比較並無重大差異。PSInSAR 工作除彙整臺灣南部地區過去的成果外，另加入分析自 2015 年 4 月開始至 2019 年 9 月的 Sentinel-1 影像，利用超過 100 張的升軌及降軌干涉圖得到臺灣南部地區大面積的地表變型速度場，並且在時間序列方面，其與 GPS 良好的關連性可以提供近期地殼變形的時空分佈。在斷層模型建置方面，本期研究以臺灣南部地區的 8 條活動斷層作為塊體邊界斷層，以 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 等三個模型計算各斷層的加權平均滑移虧損速率，木屐寮-六甲斷層為 3.3 mm/yr，新化斷層為 8.9 mm/yr，後甲里斷層為 2.4 mm/yr，左鎮斷層為 3.1 mm/yr，小崗山斷層為 9.3 mm/yr，旗山斷層為 6.0 mm/yr，潮州斷層為 3.3 mm/yr，恆春斷層為 9.9 mm/yr。然而臺灣南部的斷層滑移虧損速率的估算值有很大的不確定性，可能和臺灣南部具有非彈性變形的構造活動有關。此外，採用不同斷層模型的結果來進行交互比對是必要的，因為測地滑移速率的計算結果和斷層模型的假設高度相關。最後，本計畫同時也求解 2019 年 4 月 18 日規模 6.1 花蓮近海地震之地表同震位移場與震源模型。

關鍵詞：全球衛星定位系統、精密水準、PS-InSAR、斷層模型

Abstract

We analyze the geodetic data from the island-wide continuous and campaign GPS network, precise leveling lines and PS-InSAR to provide the surface velocity field in this project. We also invert the surface velocities to estimate the short-term fault slip rate, slip rate deficit and optimized fault geometry parameters by adopting the fault models. The main target area in this year is southern Taiwan. By the September of 2019, the daily solutions and time series from 500 continuous GPS stations were calculated. By the November of 2019, 761 surveyed-mode GPS stations and 42 leveling routes were re-surveyed. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous one. In the work of PS-InSAR (Permanent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar), more than 100 ascending and descending interferograms were acquired from the Sentinel-1 SAR images (April 2015 - September 2019) adopted additionally in this project. The good correlation between GPS and ERS result can provide temporal and spatial deformation pattern in early stages. The horizontal and vertical velocity fields from 2002 to 2016 was inverted by the BLOCKS, the DEFNODE and the baseline inversion models for estimating slip deficit rate on each active fault in southern Taiwan. The results show that the weighted average slip deficit rate of Liuchia-Muchiliao fault is 3.3 mm/yr; Hsinhua fault is 8.9 mm/yr, Houchiali fault is 2.4 mm/yr; Zuozhen fault is 3.2 mm/yr; Hsiaokangshan fault is 9.2 mm/yr; Chishan fault is 5.9 mm/yr; Chaochou fault is 4.5 mm/yr and Hengchun fault is 10.0 mm/yr. However, the reliability of slip deficit rates in southern Taiwan is low, may caused by the inelastic deformation which is not related to fault motion. In addition, it is necessary to evaluate geodetic slip deficit rates using different models because the result is highly model dependent. Finally, we also estimated the coseismic displacements and the coseismic source model of 2019 M_L 6.1 Hualien offshore earthquake.

KEYWORDS: GPS, precise leveling, PS-InSAR, fault model

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

發生於 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 日本宮城外海地震，提醒我們兩件重要的事情：（1）辨識已知與未知高發震潛勢構造的位置及（2）評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛勢構造不一定會通過主要城市，然其引發之重大地震卻會對周遭城市造成慘重之災情，因此瞭解活動斷層現今之活動性及分析潛在孕震斷層的潛勢評估是地震與活動斷層危害度評估的重要參考數據。此外，由於臺灣地區都市化程度的日益升高，未來因斷層潛移活動直接導致之建物破壞與經濟損失，以及斷層鎖定所引起的地震災損可能更為嚴重。故對於活動斷層的加強調查與持續性觀測，以及瞭解活動斷層的運動特性與危害度分析就顯得非常急迫與重要。

經濟部中央地質調查所於民國 91–95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，逐年在臺灣陸上活動斷層帶設置全球定位系統（Global Positioning System，簡稱 GPS）監測網與精密水準測線。於民國 96–99 年「地震地質與地變動潛勢分析」計畫中，除了逐步累積 GPS 與精密水準之觀測成果，並開始嘗試各種斷層模型建置之測試，試圖藉由斷層模型來擷取地表變形資訊所顯示之斷層運動特性。在民國 98–101 年「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測與潛勢分析研究」與民國 102–105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中，已完成 86 站 GPS 連續站（表 1-2.1）、773 站 GPS 移動站及 42 條精密水準路線（含 29 條長測線及 13 條短測線）之設置（圖 1-2.1），並藉由高精度的 GPS 與水準觀測數據分析，瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，進一步計算出間震期的斷層滑移速率與同震及震後的斷層面滑移特性。另外，PS-InSAR 衛星影像分析技術也在這一時期之計畫工作中被引進（圖 1-2.2 與圖 1-2.4），可針對大範圍的地表地形變化進行觀測，快速地獲得大區域面狀之地殼變形資訊。因此經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到包含東部縱谷、宜蘭平原及臺灣西南部等數個在臺灣可能存在高發震潛能構造之區域。

另一方面，在民國 98–101 年之「斷層活動性觀測研究第二階段－斷層監測

與潛勢分析研究」計畫中，特別針對臺灣 8 條活動斷層（瑞穗斷層、車籠埔斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小岡山斷層）嘗試進行斷層活動度及地震潛能分析，逐步研究詳細的斷層參數並評估其地震發生機率。在民國 102–105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫中，透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料，並參考日本地震研究推進本計畫及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作臺灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。然而在此工作中，並未很好的將大地測量監測資料引用至此斷層活動潛勢分析工作中。因此，在本階段之工作中，將試圖找到合適之方法將大地測量監測資料引用至斷層活動潛勢分析的工作中。

1-2 研究目的

本階段「斷層活動性觀測研究第四階段－地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」計畫的研究目的，(1) 將著重在活動斷層模型的建置工作上，利用近十數年來的地表變形觀測結果，同時針對活動斷層及潛在的活動構造，採用三種以上的斷層模型進行參數反演，推估斷層短期滑移速率或滑移虧損率等資訊，並結合民國 102－105 年「斷層活動性觀測研究第三階段－斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫與後續計畫中所提出的斷層幾何參數進行評估，找出最佳的斷層幾何參數組合結果，其相關結果也將納入斷層潛勢分析計畫整體評估，作為製作臺灣活動斷層潛勢圖的重要參考依據。此外，(2) 由於過去礙於大地測量資料蒐集時間長度之不足，特別是 GPS 移動站資料，難以對垂直速度場有足夠的解析能力，然而在蒐集近十數年的大地測量監測資料後，本階段計畫除持續分析中央地質調查所活動斷層觀測網之資料外，還將進一步解析這些數量龐大的大地測量監測資料，嘗試建立臺灣地區三維地表速度場之時空變化，並檢核其精度。(3) 本階段計畫另嘗試利用單點定位技術（PPP）發展連續 GPS 近即時資料解算技術，針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一週內完成連續 GPS 同震位移場之解算工作。

表 1-2.1：中央地質調查所建置的GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。

Table 1-2.1: Time preiod of continuous GPS stations set up by Central Geological Survey.

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002/06/17	GS48	警光山莊	2009/04/01
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01
GS03	工研院	2004/10/19	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS04	大埔美農場 (2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS52	新發國小	2009/12/18
GS06	民和國中	2004/10/21	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS07	培英國小	2004/10/21	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS08	興華國小	2005/08/15	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS57	石門國小(2016.12.27 廢站)	2009/12/15
GS11	北投國小	2005/08/15	GS58	高士國小	2009/12/14
GS12	樂善國小(2018.3.8 廢站)	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS13	國光國小	2005/08/16	GS60	永港國小	2009/12/18
GS14	西門國小	2005/09/13	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS17	太平國小	2005/09/14	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS66	達邦	2010/09/28
GS20	龜山島	2006/08/04	GS67	新美國小	2010/09/28
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS68	三和國小	2010/12/17
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS73	新光國小	2012/11/02
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/02
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS76	新興國小	2012/11/02
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS77	深水國小	2012/11/14
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS78	溪洲國小	2013/10/22
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS79	中路國小	2013/10/16
GS33	永華國小	2006/06/22	GS80	田寮國中	2013/10/16
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS81	嘉興國中	2013/10/16
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS82	卓蘭實驗高中	2014/12/16
GS36	德化國小	2006/10/21	GS83	土城國小	2014/12/22
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS84	水里國中	2014/12/17
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2015/01/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS86	水美國小	2015/09/15
GS40	龍峰國小(2016.11.7 廢站)	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS42	東原國中	2007/11/23	GS89	新化國中	2015/09/14
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS90	新埔工作站	2016/09/02
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS91	香山高中	2016/09/02
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS46	來義國小	2009/01/06	GS93	七星山	2017/01/01
GS47	台電南展館 (2013.7.25 廢站)	2009/01/05	GS94	中湖	2017/12/28
			GS95	八煙	2017/12/28

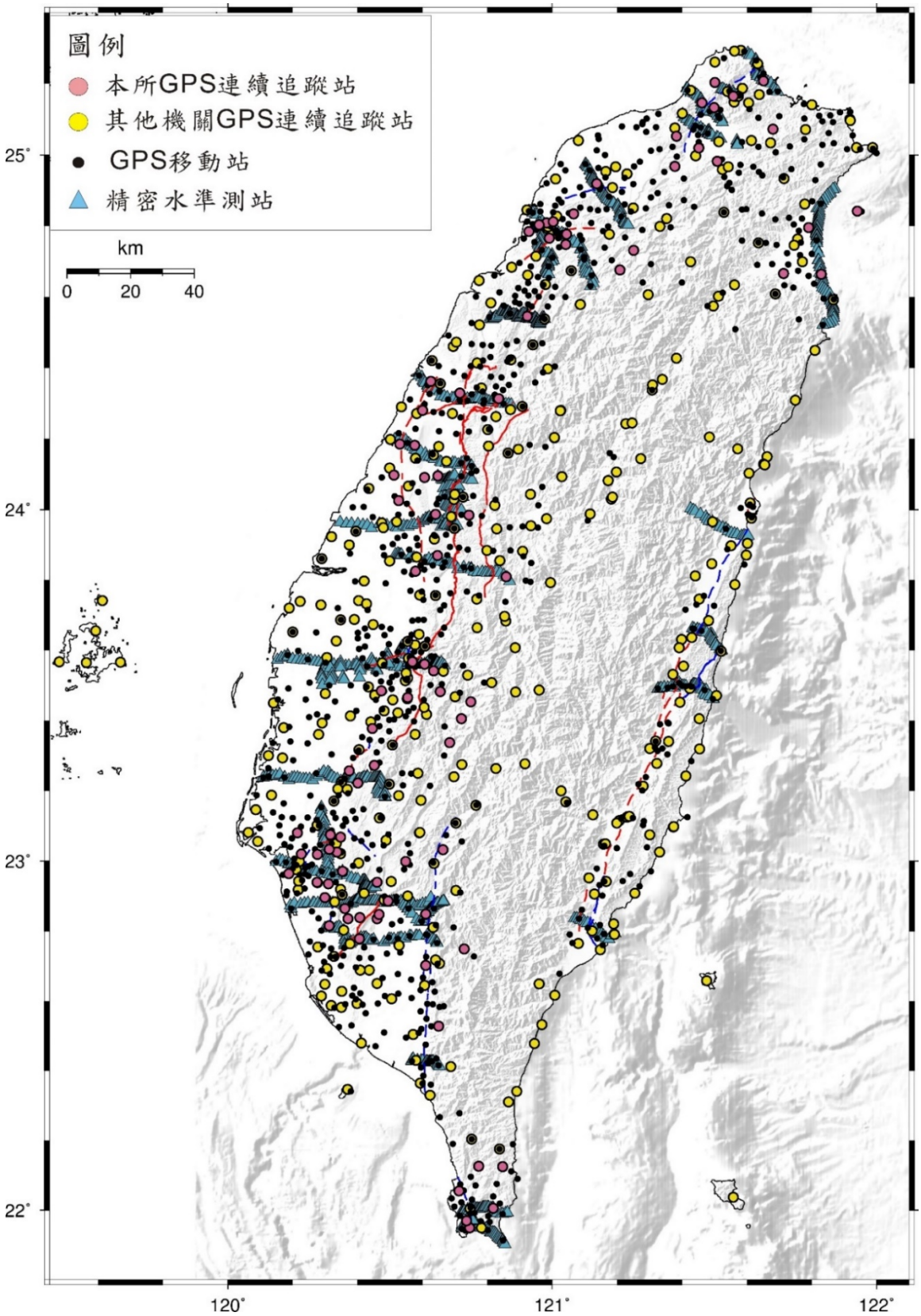


圖 1-2.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 86 站 GPS 連續站、773 站 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。

Figure 1-2.1: Active fault geodetic observation network of CGS, including 86 continuous GPS stations, 773 campaign-mode GPS stations and 42 pricise leveling routes.

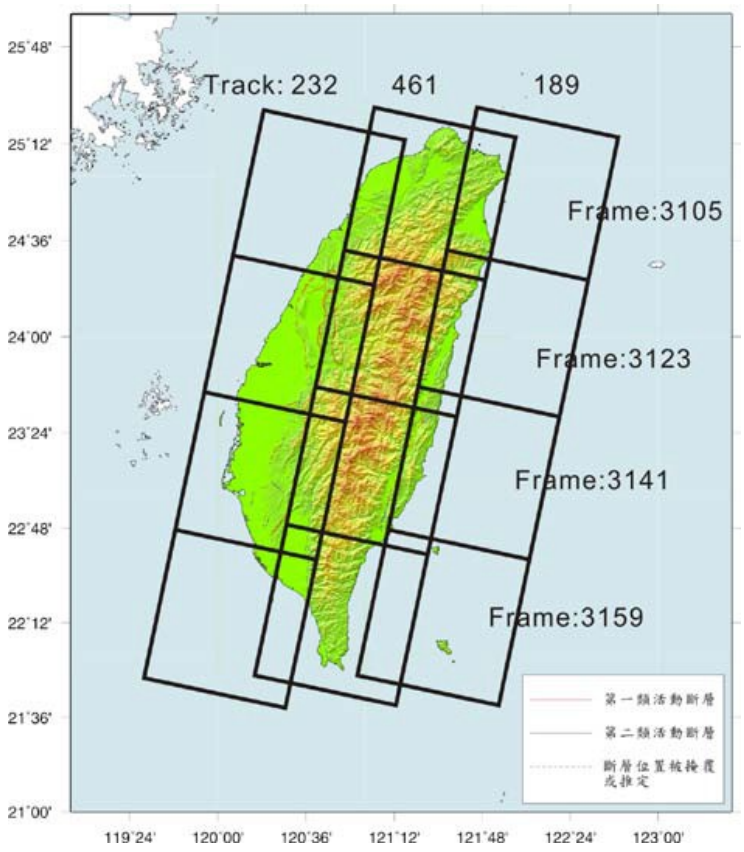


圖 1-2.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

Figure 1-2.2: Frames and tracks of ascending and descending orbits of ERS-1/2 (C-band) and EnviSAT (C-band) satellite images. Area of SAR image is about 110 km × 110 km per frame.

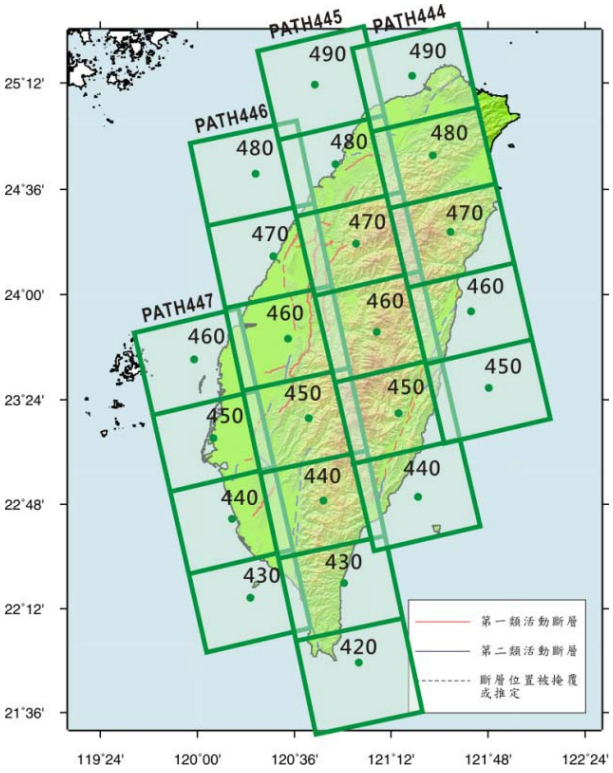


圖 1-2.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.3: Ascending tracks of ALOS satellite images.

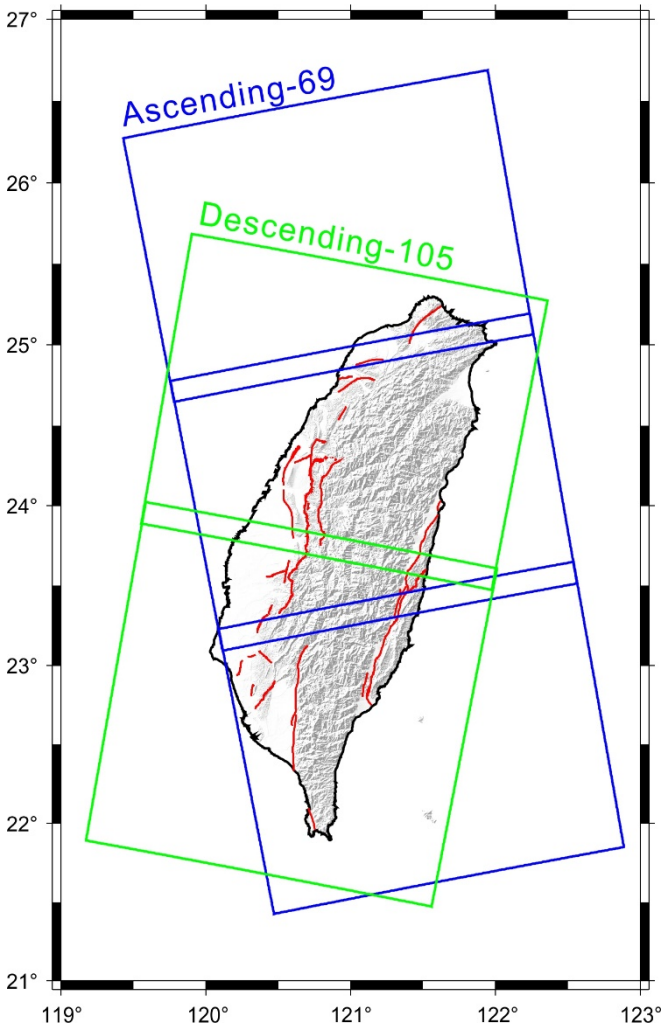


圖 1-2.4：Sentinel-1A 衛星影像於臺灣之升軌、降軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.4: Ascending and descending tracks of Sentinel-1A satellite images.

1-3 本年度工作概述

1. 測量外業督導與檢核（成功大學工作團隊負責）
   a. 在測量外業督導部分，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段。以上數據以各年度測量公司承辦之業務範圍為準。
   b. 在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核測量，並針對 GPS 移動站測量成果與抽測結果進行基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。
2. 連續 GPS 觀測站資料解算分析（臺灣大學工作團隊負責）
   處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料（視實際交換所得資料而定），進行資料檢核、坐標解算及時序分析，獲得地表水平與垂直速度場，並提供週期性變化結果（以超過兩年以上之資料做分析）。
3. 移動式 GPS 及精密水準測量成果解算分析（成功大學工作團隊負責）
   完成全台 GPS 移動站與精密水準資料之時序分析，由連續 GPS 坐標時間序列判斷地震同震變形、震後變形及其他擾動所造成地表變形之時間，確認各時期之 GPS 移動站速度場及水準測量是否受相同影響，提供全台不同時期之加密水平與垂直速度場。
4. 南部地區雷達影像分析（臺灣大學工作團隊負責）
   提供「斷層活動性觀測研究第四階段-斷層整合性觀測與潛勢分析」計畫內南部地區 PS-InSAR 成果資料，評估地調所公布活動斷層活動性或潛在活動構造活動性。並配合規劃區域，利用 PS-InSAR 技術時間序列分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊。
5. 南部地區地表速度場分析與斷層參數求解（成功大學工作團隊負責）
   a. 整合 GPS 連續站、移動站及精密水準測量資料，求得區域性不同時期之三維變形資訊
   b. 利用速度場推求南部地區應變速率之空間分布情形。
   c. 利用至少三種不同的斷層模型，使用斷層潛勢分析計畫提供之斷層幾何，反演斷層滑移虧損率及最佳斷層幾何參數等資訊，並進行整合分析，提供相關斷層參數供斷層潛勢分析工作所需。
   d. 分析活動斷層地質敏感區之活動特性，提供中央地質調查所劃設建議。

6. 連續 GPS 近即時資料解算技術（臺灣大學工作團隊負責）

針對陸地上規模大於 6 的地震事件，在一週內完成連續 GPS 同震位移場近即時之解算工作（包含中央地質調查所提供之 GPS 連續觀測站高頻資料）。此外，成功大學工作團隊會配合中央地質調查所測量外業等資料（GPS 移動站及精密水準測量），在完成所有觀測工作 3 週內提出分析成果報告。本年度計畫工作中，若截至期末簡報前仍無規模大於 6 的陸域地震事件，本團隊會提供本年度重要地震事件之分析成果。

1-4 前一年工作成果

1-4-1 GPS 及精密水準測量

1-4-1-1 GPS 連續站資料分析

彙整歷史資料至 2018 年 09 月相對澎湖白沙站（S01R）之年速度場結果。由解算結果顯示，水平速度場在跨越縱谷斷層系統、西部麓山帶和變形前緣的速度梯度變化較大，與主要活動構造的分布吻合。臺南以南地區，新化斷層南北兩盤的水平速速場變化較大；在新化斷層以南地區，測站速率約 3-5 cm/yr，向西或西南運動，速度場呈現逆時針旋轉，前人研究指出（Ching et al., 2007; Hu et al., 2007）此速度場逆時針旋轉，可能與構造側向擠出有關。另外北部地區則呈順時針旋轉，速度場由西北向逐漸轉向北和東北向，在宜蘭地區則由東北向漸轉至向東和東南向，且速度場由北往南漸增，其變形模式以橫移伸張變形為主，主要受控於板塊碰撞和隱沒作用板塊後撤的綜合影響（Hu et al., 2001, 2002; Rau et al., 2008; Hou et al., 2009），或是和構造側向擠出有關（Angelier et al., 2009）。垂直速度場方向上則以西部彰雲地區、宜蘭平原、屏東平原、中央山脈東翼以及海岸山脈北段為主要下陷區域。西部彰雲地區的地表沉降主要受超抽地下水影響（e.g., Tung and Hu, 2012）；屏東平原和宜蘭平原則可能同時受構造作用和地下水位升降所影響（e.g., Hu et al., 2006; Hsieh et al., 2011; Su et al., 2017）；海岸山脈北段下陷則可能與菲律賓海板塊向北隱沒作用有關（Wu et al., 2009）。主要的構造抬升區，以西部麓山帶和中央山脈為主，此結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。

1-4-1-2 GPS 移動站與精密水準測量精度分析

GPS 移動站之坐標精度分析指出，在 2002－2017 年 N 方向之殘差值 95% 信賴區間為 0.3 ± 4.2 mm；E 方向為-0.1 ± 4.9 mm；H 方向為-0.1 ± 15.6 mm，2018 年截至 9 月底為止 N 方向之殘差值 95%信賴區間為 0.3 ± 2.7 mm；E 方向為-0.3 ± 3.8 mm；H 方向為 0.1 ± 16.3 mm。而 2002－2017 年平面坐標之均方根誤差平均值為 9.8 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 22.1 mm，2018 年平面坐標之

均方根誤差平均值為 8.6 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 21.3 mm。換言之，GNSS 移動站坐標的平面精度約在 10 mm 左右，高程精度約在 20 mm 至 30 mm 左右。

至 2018 年 12 月底前所獲得共計 700 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 694 個測段，佔所有測段比例之 99.1 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 97.0 %（679 個測段）；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 99.9 %（699 個測段）。考慮與測段距離的關係後（Bomford, 1985），每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 674 個測段達測段達 96.3 % 顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

1-4-1-3 全臺水平與垂直速度場

藉由檢視 GPS 連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此本計畫針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算速度場，結果如圖 1-4.1 及圖 1-4.2。

由解算結果可知臺灣地區 GPS 水平速度分布，北部地區在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 2-35 mm/yr。在桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0-10 mm/yr。

中部地區在大茅埔斷層以東速度場約 30-45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16-20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6-15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海

地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12-16 mm/yr。

嘉南地區在嘉義南部至臺南北部地區在觸口斷層和九芎坑斷層－木屐寮斷層－六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12-15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15-20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增，速度值約為 10-40 mm/yr。

高屏地區主要之活動構造為東北走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，高屏地區跨過潮州斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr，恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41-62 mm/yr。

花東地區自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20-40 mm/yr 增加至 50-70 mm/yr 再減少為 20-60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

根據圖 1-4.2，大臺北地區皆為穩定沉陷，沉降垂直速率約落在 10 mm/yr 內。桃園地區除跨湖口斷層附近點位有約 0-1 mm/yr 的抬升速率，其餘點位之沉降速率約在 0-2 mm/yr 間。新竹地區在跨斷層速度並無明顯變化，沉降速率約 0-5 mm/yr。苗栗地區跨斷層變化也不顯著，沉降速率皆約在 5 mm/yr 上下。台中地區跨斷層也無明顯變化，沉降速率約 0-5 mm/yr 間。彰化、南投地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，最大沉陷速率達到 40 mm/yr，而進入南投山區最大有約 10 mm/yr 的抬升速率。雲林、嘉義地區在沿海一帶的沉降速率約為 15-20 mm/yr，而進入山區則約有 3 mm/yr 的抬升速率。臺南地區也是呈現沿海沉陷、山區抬升的現象，平均沉降速率約為 10 mm/yr，平均抬升速率約為 7 mm/yr；善化－關廟一帶多落在 0-4 mm/yr 之間，然龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的抬升量。高雄地區的車瓜林斷層周遭有約 15 mm/yr 的抬升量，小岡山斷層西側約有 10 mm/yr 的沉降速率，東側則有約在 0-3 mm/yr 的抬升速率。屏東地區在潮州斷層以西有

約 20 mm/yr 的沉陷速率，以東則無顯著變化。恆春半島地區在 2010 至 2017 年，恆春斷層以東有約 3 mm/yr 的抬升速率。宜蘭地區在頭城鎮至五結鄉一帶，沉降速率最大達 18 mm/yr，進入蘇花公路(蘇澳至東澳段)，沉降速率則約在 10 mm/yr 左右。花蓮地區之嶺頂-瀧澗一帶，由西向東一路由約 5 mm/yr 之抬升速率轉變為約 10 mm/yr 之沉降速率。光復-豐濱一帶，僅在跨瑞穗斷層後之海岸山脈一帶約有 5 mm/yr 之抬升速率。紅葉-靜浦一帶皆為沉降，但在跨瑞穗斷層後之沉降速率由約 10 mm/yr 降至 1 mm/yr。台東地區之利吉斷層西側為約 0.3 mm/yr 之些微抬升，東側為 0-4.8 mm/yr 之沉降。

1-4-2 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

PSInSAR 主要工作除彙整臺灣北部地區成果，另加入了 Sentinel-1A 於 2015 年 4 月至 2018 年 8 月之視衛星方向上年平均變動量。

在時間序列方面，針對北部地區斷層利用 C 波段的 ERS 影像（1996/1~1999/7）及 SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌影像，針對北部地區斷層進行 PS-InSAR 技術時間序列分析，可得到斷層空間與時間上的變化（圖 1-4.3 至圖 1-4.7）。

1-4-3 北部地區斷層模型建置

在斷層模型建置方面，本期研究主要以 BLOCK、DEFNODE 與基線應變模型三個不同的斷層模型（圖 1-4.8 至圖 1-4.10），今年北部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果於工作會議時討論出各模型結果之權重，並依據討論所得之權重計算出加權平均滑移虧損速率。計算結果顯示，山腳斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.9 mm/yr，湖口斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.8 mm/yr，新竹斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.1 mm/yr，新城斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.3 mm/yr，三義斷層之加權平均滑移虧損速率為 5.9 mm/yr，屯子腳斷層之加權平均滑移虧損速率為 1.7 mm/yr，獅潭斷層之加權平均滑移虧損速率為 5.2mm/yr，宜蘭北部構造之加權平均滑移虧損速率為 7.4 mm/yr，宜蘭南部構造之加權平均滑移虧損速率為 6.1 mm/yr。

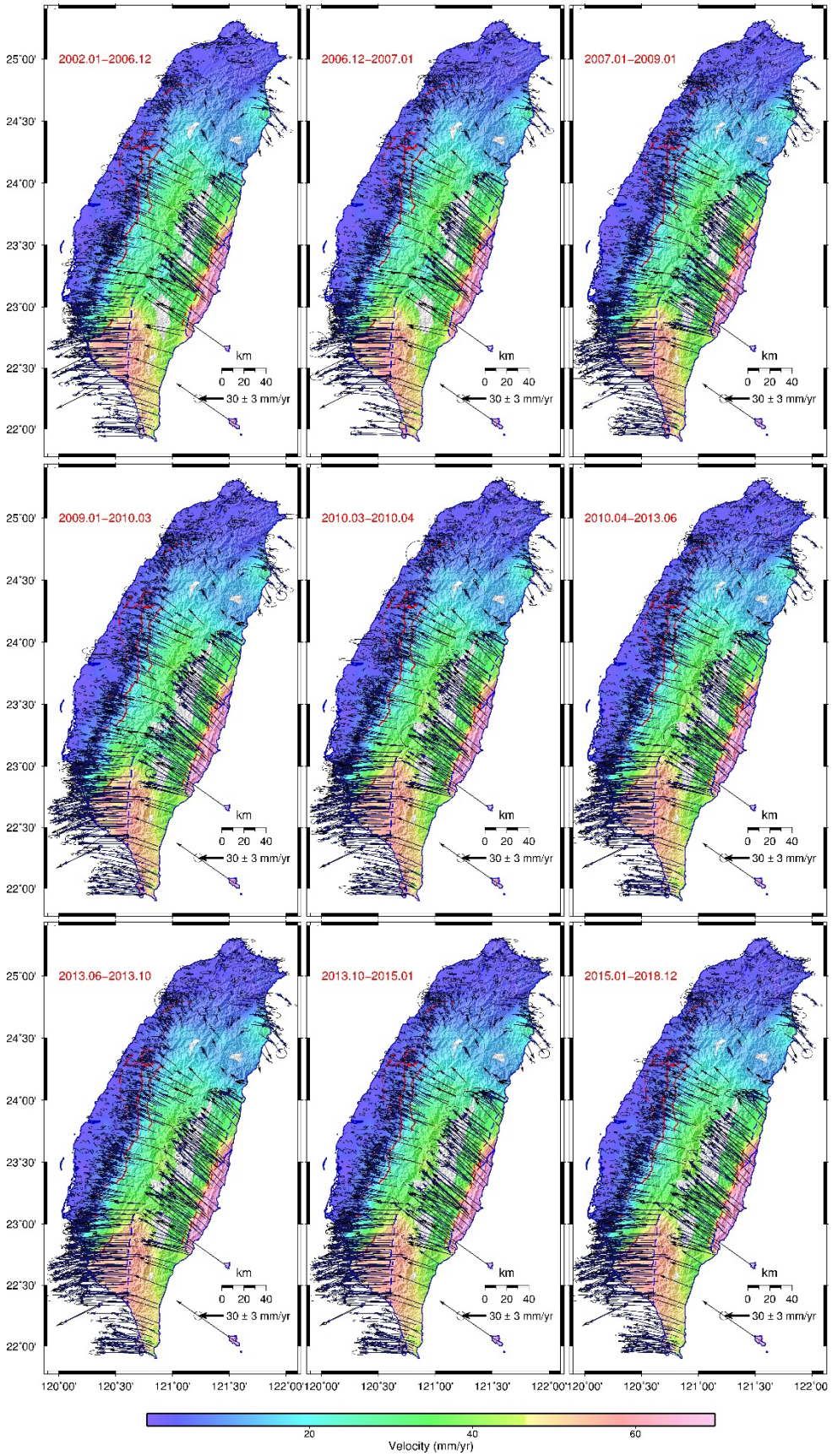


圖 1-4.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。
Figure 1-4.1: Taiwan horizontal velocity field relative to Penghu Paisha station (S01R).

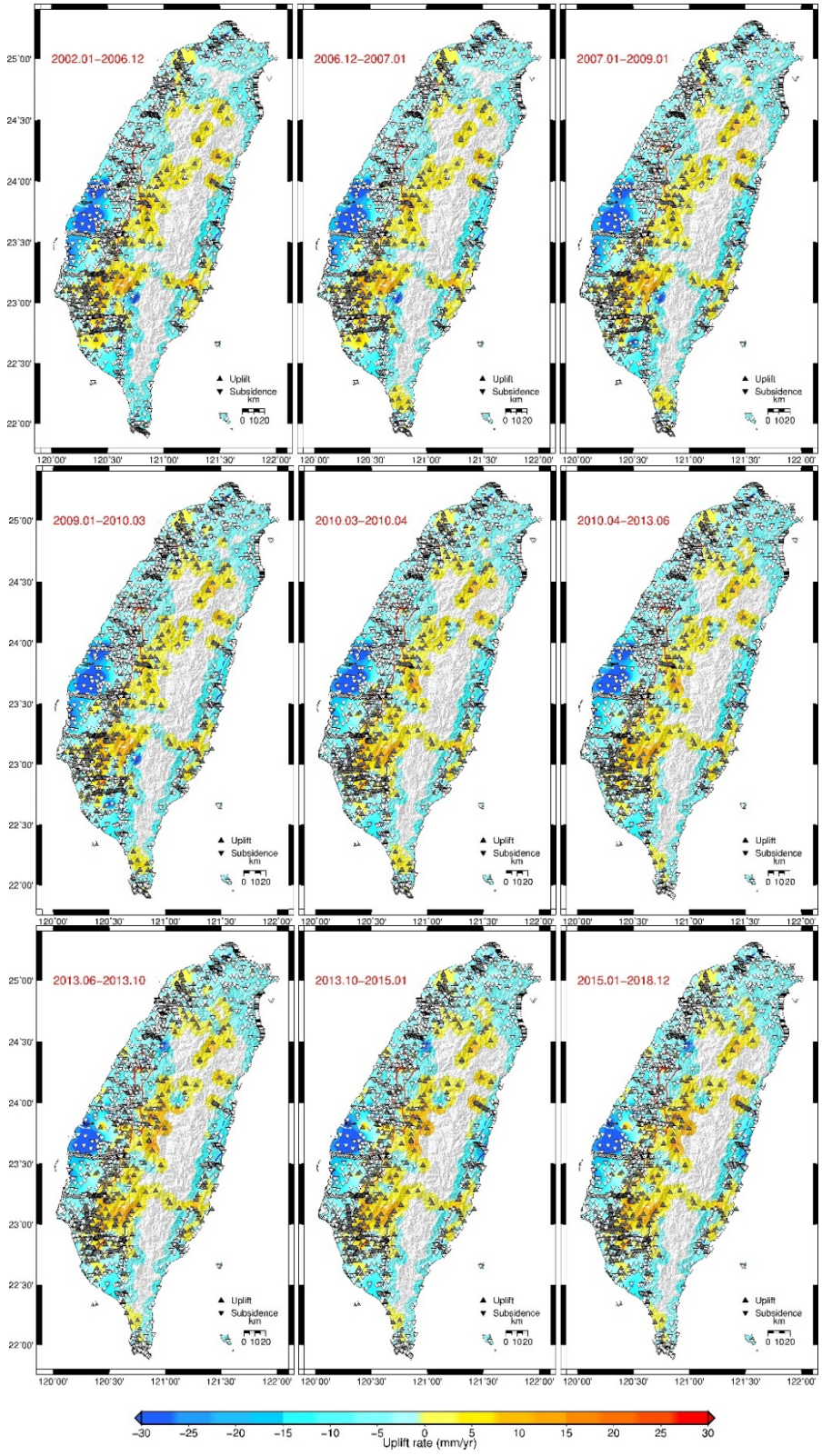


圖 1-4.2：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 1-4.2: Taiwan vertical velocity field from 2002 to 2018. Warm-colored triangles are uplift while cool-colored inverse triangles are subsidence. Size of triangles represent amount of velocities. Precise leveling benchmarks are in dark frame; campaign-mode GPS sites are in green frame; continuous GPS sites are in red frame.

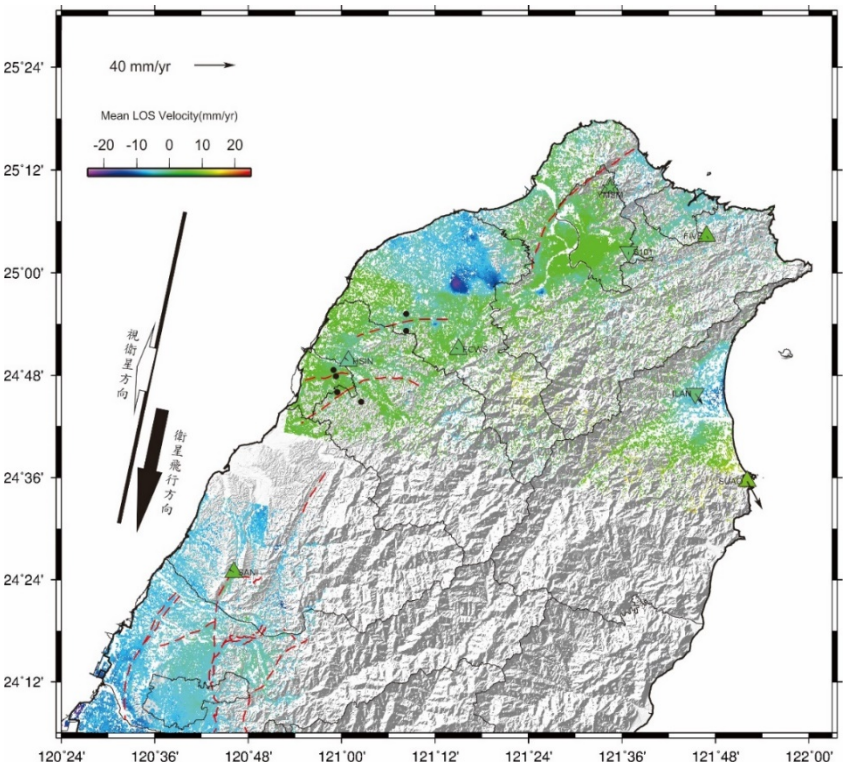


圖 1-4.3： ERS（1996/1~1999/7）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1996/1~1999/7) (Track=461, Frame=3105). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangle represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

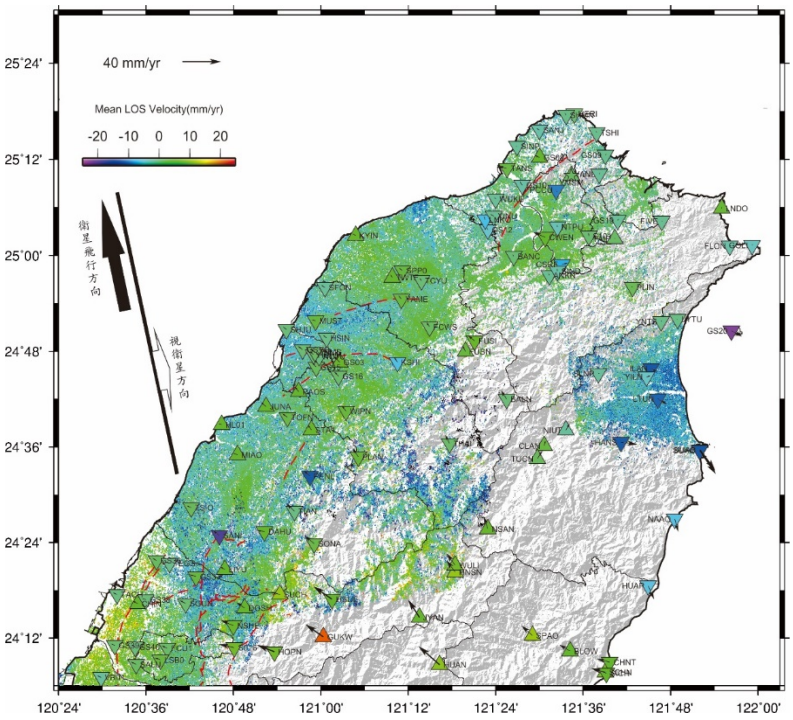


圖 1-4.4：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 444、445 及 446，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2004/3~2008/6) (Track=461, Frame=3105). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

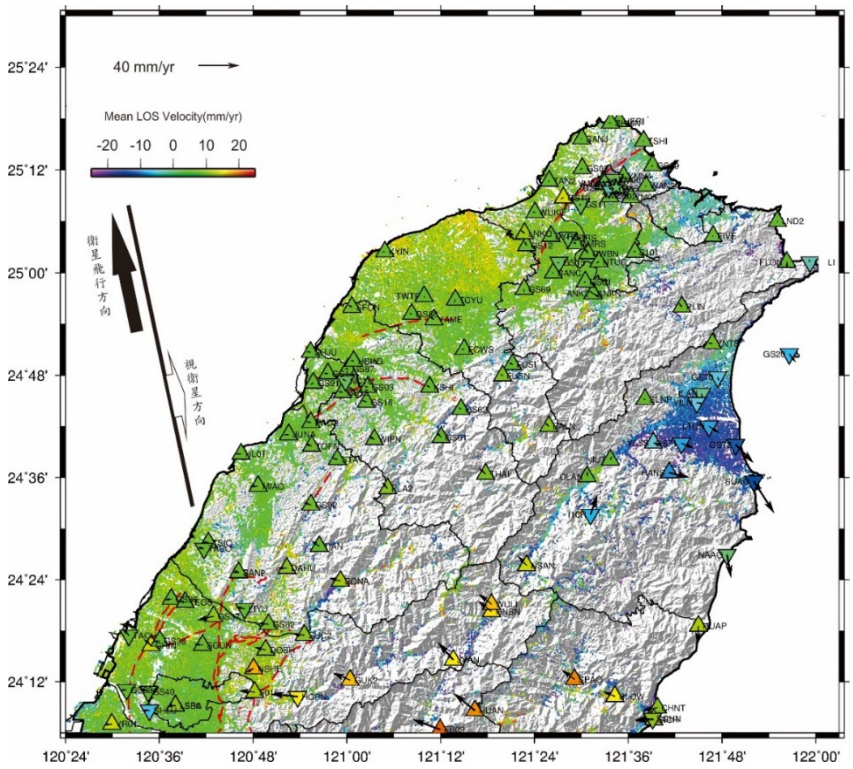


圖 1-4.5：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）升軌軌道 69，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.5: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2011/3) (Track=444, 445, 446). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangle represents land uplift; while inverse triangle represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

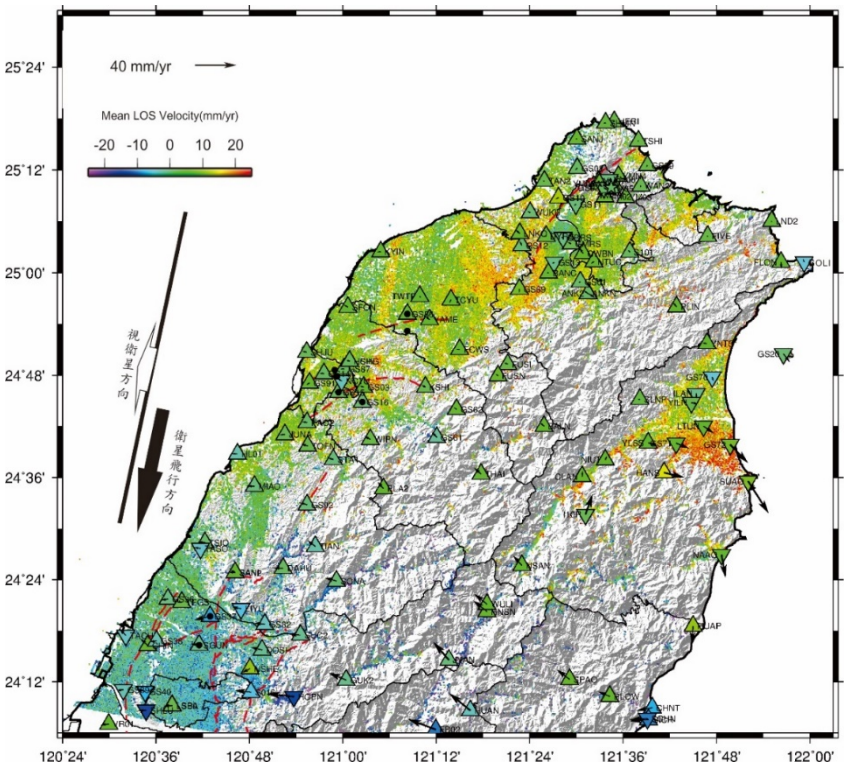


圖 1-4.6：SENTINEL-1（2015/4~2018/8）降軌軌道 105，視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.6: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of SENTINEL-1 images (asc: 2015/4~2018/8). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangle represents land uplift; while inverse triangle represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

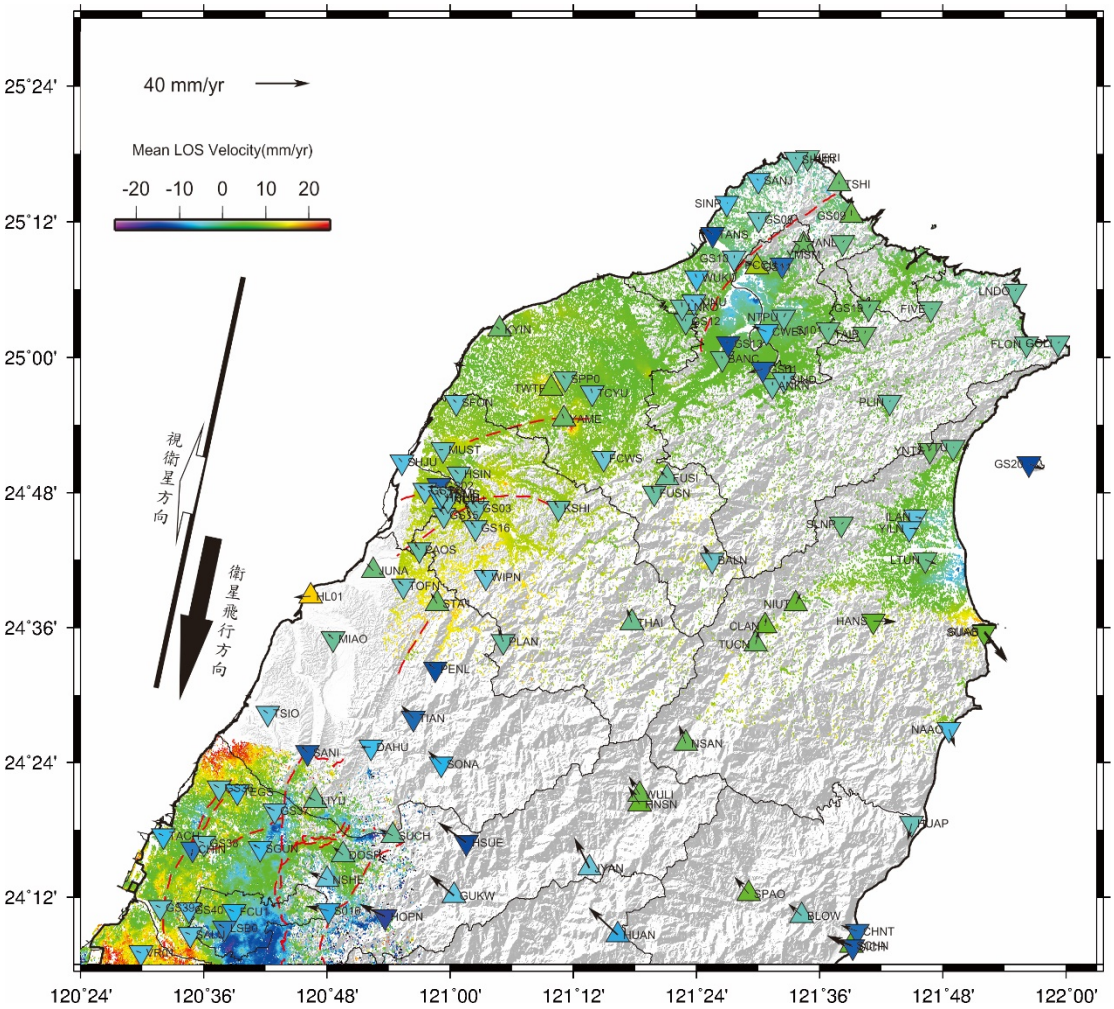


圖 1-4.7：ENVISAT（2004/3~2008/6）衛星軌道 461，像幅編號 3105 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 YMSM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.7: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT images (asc: 2004/3~2008/6). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station YMSM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangle represents land uplift; while inverse triangle represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

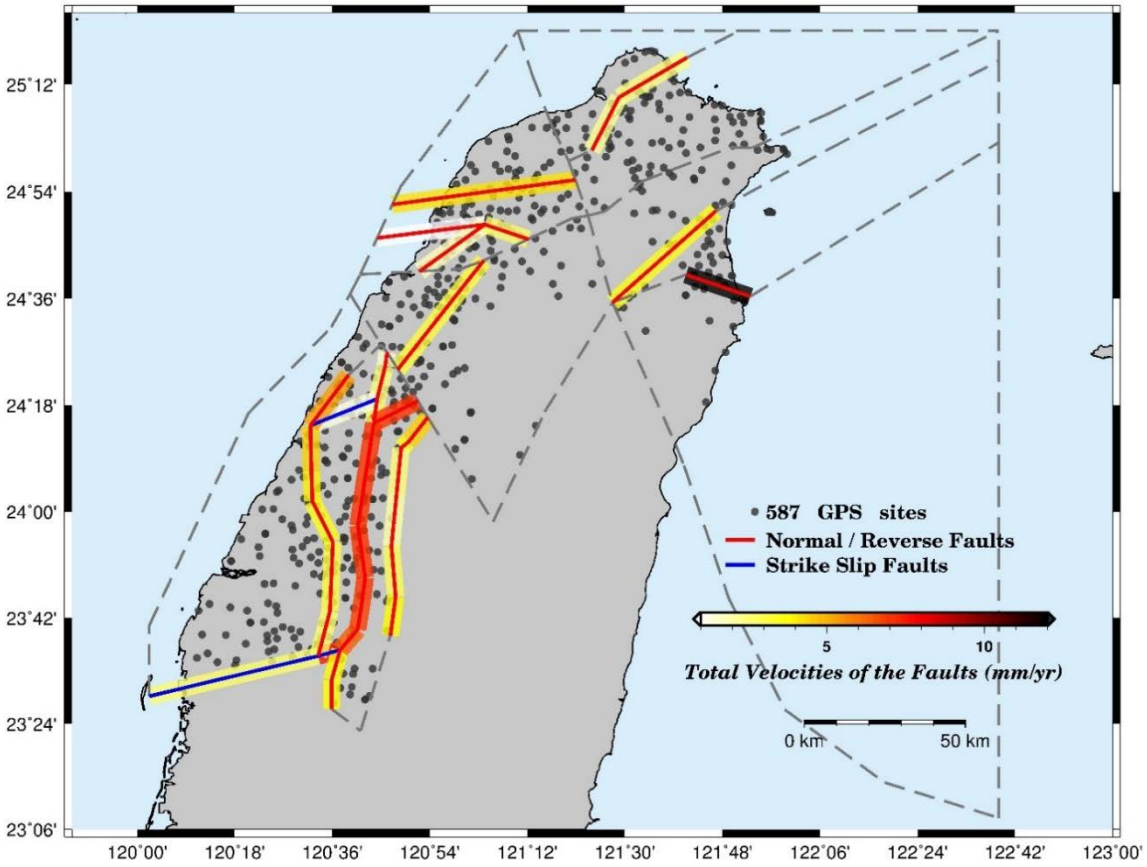


圖 1-4.8：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。
Figure 1-4.8: The total slip rates of BLOCKS model.

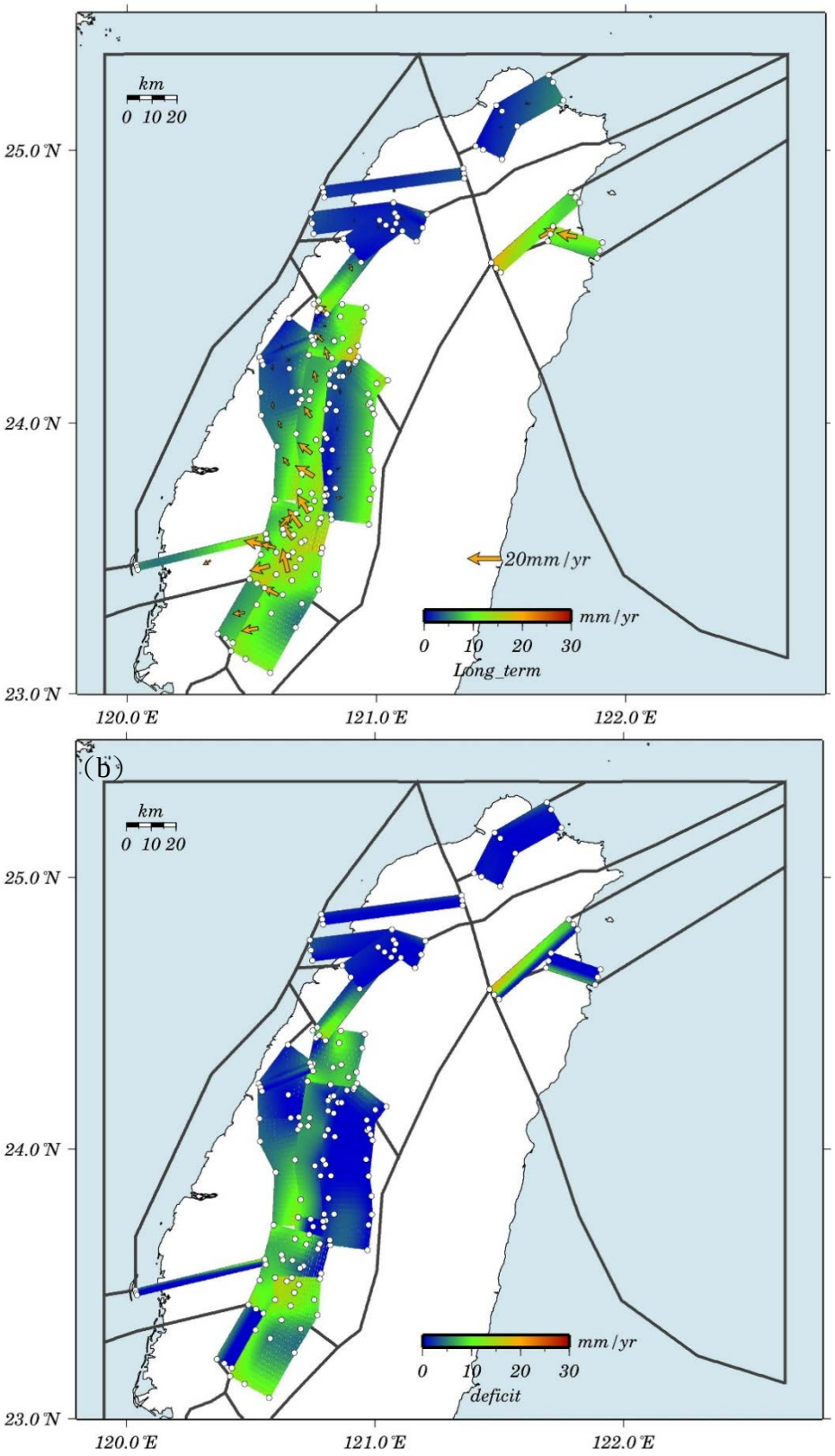


圖 1-4.9：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。
Figure 1-4.9: Long-term fault slip rate and deficit rate of DEFNODE model.

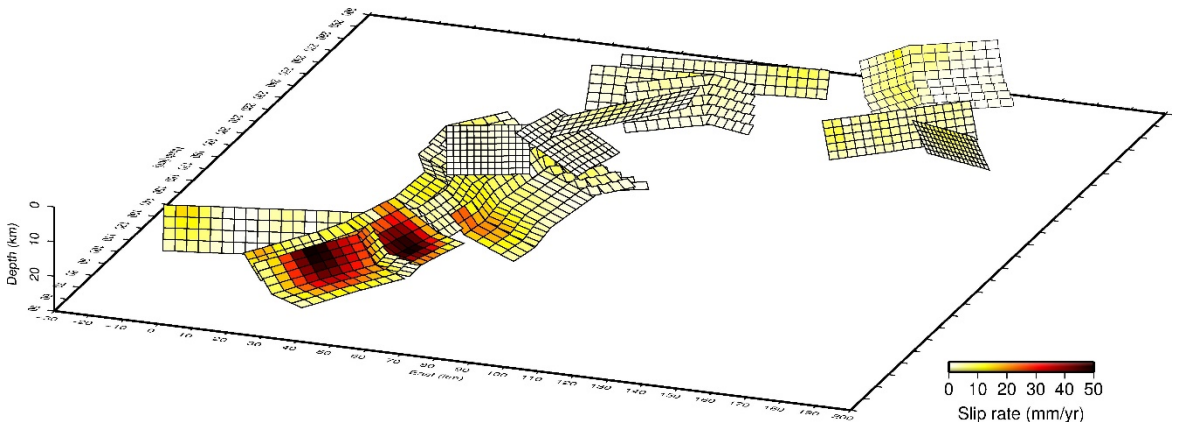


圖 1-4.10：基線應變模型的斷層滑移虧損率。

Figure 1-4.10: Fault slip deficit rate of baseline inversion model.

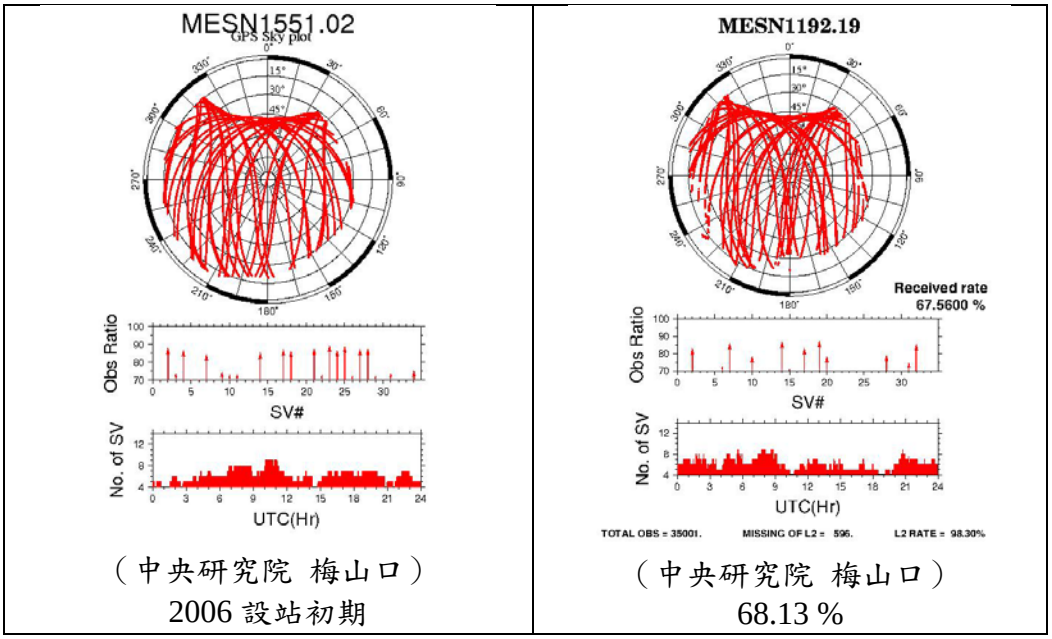
第二章、大地測量資料分析

2-1 GPS 連續站解算成果

本次報告所使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央研究院、中央氣象局、內政部、國土測繪中心、中正大學及經濟部水利署等單位，約 495 站。以下為計算每日坐標解之方法與流程。

2-1-2 GPS 資料品質檢測

以圖 2-1.1 中央研究院連續 GPS 測站 MESN 為例，由 2019 年 04 月 29 日點位透空圖可見得此測站東方有建築物的遮罩，而西南方則有疑似因植被遮罩而產生的資料接收不連續，相較設站初期可明顯看出衛星軌跡的不連續。目前針對此站，已架設新點置換。



（中央研究院 梅山口）
2006 設站初期

（中央研究院 梅山口）
68.13 %

圖 2-1.1：MESN 測站資料接收度低於 80%。
Figure 2-1.1: Completeness of data receiving from MESN station is < 80%.

此外，由圖 2-1.2 地調所測站 GS27 之時間序列可明顯看出 2014 年開始因為遮蔽增加導致坐標解算產生較大之跳動進而影響速度計算，以及 PUSN 測站 2014 年後 L2 接收率下降同樣導致坐標解算產生較大之跳動影響速度計算。因此目前認為測站環境與儀器運作正常為兩個影響時間序列分析的重要因子。

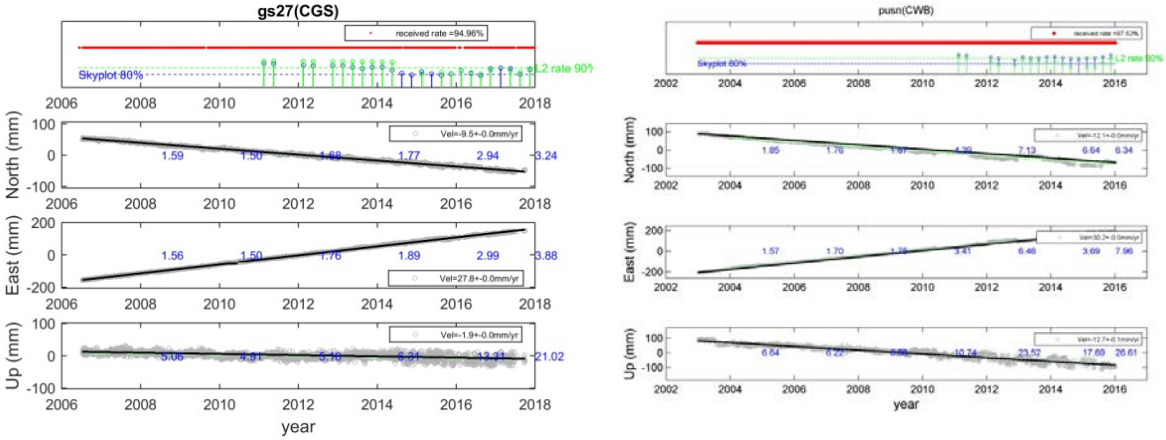


圖 2-1.2：GS27 與 PUSN 測站資料受遮蔽與儀器運作異常影響時間序列。

Figure 2-1.2: Time series data of GS27 and PUSN stations affected by the cover and unusual instrument operation.

2-1-3 GPS 連續站時間序列分析

時間序列（time series）和速度場（velocity field）是 GPS 資料處理的主要成果，而其表現是地表與地下構造的運動情形，並提供有關更多地殼形變的訊息。本年度報告分析 1993 年至 2019 年 09 月的資料，輔以各測站從設站以來長時間資料解算的結果，就測站移動速度場或地震跳階影響加以探討。為了對觀測資料做有效的時間序列分析，首先需要對所有的 GPS 觀測數據辨別雜訊並加以剔除，如此才能真正地觀測時間序列上的微小變動，藉以瞭解斷層活動的特性。由於觀測值中的離群點會影響時間序列模型擬合的結果，因此在進行時間序列分析之前，我們針對每日解坐標誤差大於 1 cm 的資料先剔除，剩餘的坐標資料才進行進一步的時間序列分析。此外，篩選出資料時間至少兩年以上的測站進行速度場分析。對於 GPS 時間序列資料之分析，本年度我們加入考慮長時間的地殼變動、週期性之變化、以及地震引發的同震與震後活動。諸歸於此類的時間序列模式可以用下式表示（Nikolaidis, 2002）：

$$y(t_i) = a + bt_i + c\cos(2\pi t_i) + d\sin(2\pi t_i) + e\cos(4\pi t_i) + f\sin(4\pi t_i)$$
$$+\sum_{j=1}^{n_g} g_j \cdot H(t_i - T_{eq}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot t_i + \sum_{j=1}^{n_k} k_j \cdot H(t_i - T_{eq}) \cdot \exp^{-(t_i - T_{eq})/\tau_j} + v_i$$

其中，a 為觀測初始坐標，b 為間震期（inter-seismic period）地殼運動速率；係數 c、d 為年週期（annual period）變化之震幅；係數 e、f 為半年週期（semi-annual period）變化之震幅；g 表示時間序列中的不連續跳動，可能為地震造成的同震位移或是人為天線更換；h 為震後線性速率改變量；k 為震後變形呈指數衰減的現象；最後 v 為殘差項；其中 H 為階梯函數（Heaviside step function），τ 為鬆弛時間（relaxation time），代表震後變形衰減至總變形量的 1/e 所需時間。

圖 2-1.3 及圖 2-1.4 為彙整歷史資料至 2019 年 09 月相對澎湖白沙站（S01R）之年速度場結果。由解算結果顯示，水平速度場在跨越縱谷斷層系統、西部麓山帶和變形前緣的速度梯度變化較大，與主要活動構造的分布吻合。臺南以南地區，新化斷層南北兩盤的水平速速場變化較大；在新化斷層以南地區，測站速率約 3-5 cm/yr，向西或西南運動，速度場呈現逆時針旋轉，前人研究指出（Ching et al., 2007; Hu et al., 2007）此速度場逆時針旋轉，可能與構造側向擠出有關。另外北部地區則呈順時針旋轉，速度場由西北向逐漸轉向北和東北向，在宜蘭地區則由

東北向漸轉至向東和東南向，且速度場由北往南漸增，其變形模式以橫移伸張（transtensional）變形為主，前人研究此變形模式主要受控於板塊碰撞和隱沒作用板塊後撤的綜合影響（Hu et al., 2001, 2002; Rau et al., 2008; Hou et al., 2009），或是構造側向擠出有關（Angelier et al., 2009）。垂直速度場方向上則以西部彰雲地區、宜蘭平原、屏東平原、中央山脈東翼以及海岸山脈北段為主要下陷區域。西部彰雲地區的地表沉降主要受超抽地下水影響（e.g., Tung and Hu, 2012）；屏東平原和宜蘭平原則可能同時受構造作用和地下水位升降所影響（e.g., Hu et al., 2006; Hsieh et al., 2011; Su et al., 2017）；海岸山脈北段下陷則可能與菲律賓海板塊向北隱沒作用往下沉有關（Wu et al., 2009）。主要的構造抬升區，以西部麓山帶和中央山脈為主，此結果與過去只使用線性迴歸結果約略相同。

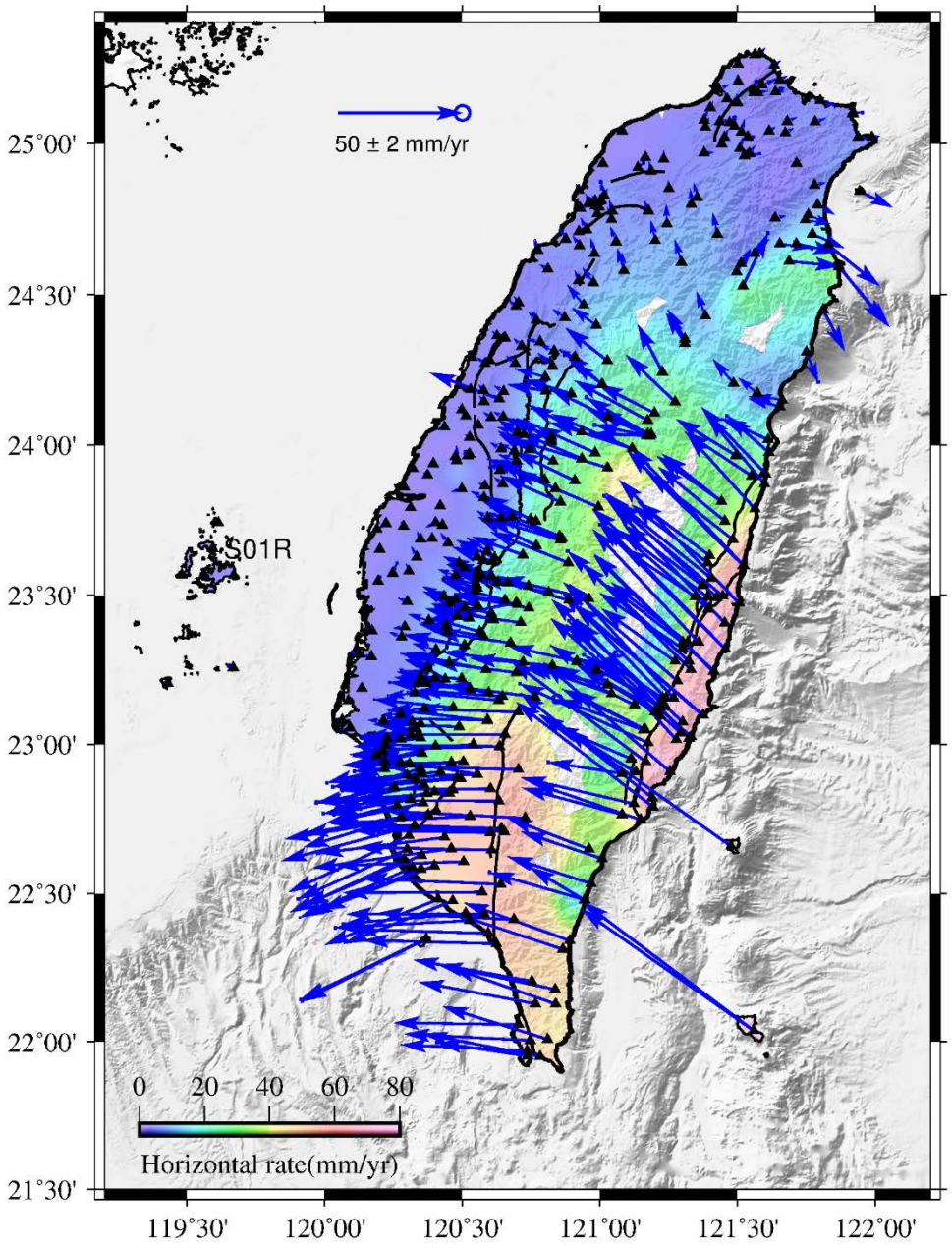


圖 2-1.3：整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之水平年速度場。

Figure 2-1.3: Horizontal velocity field with respect to to S01R from 495 continuous GPS stations calculated by removing coseismic, post-seismic, periodic motion, and unusual data by September of 2019.

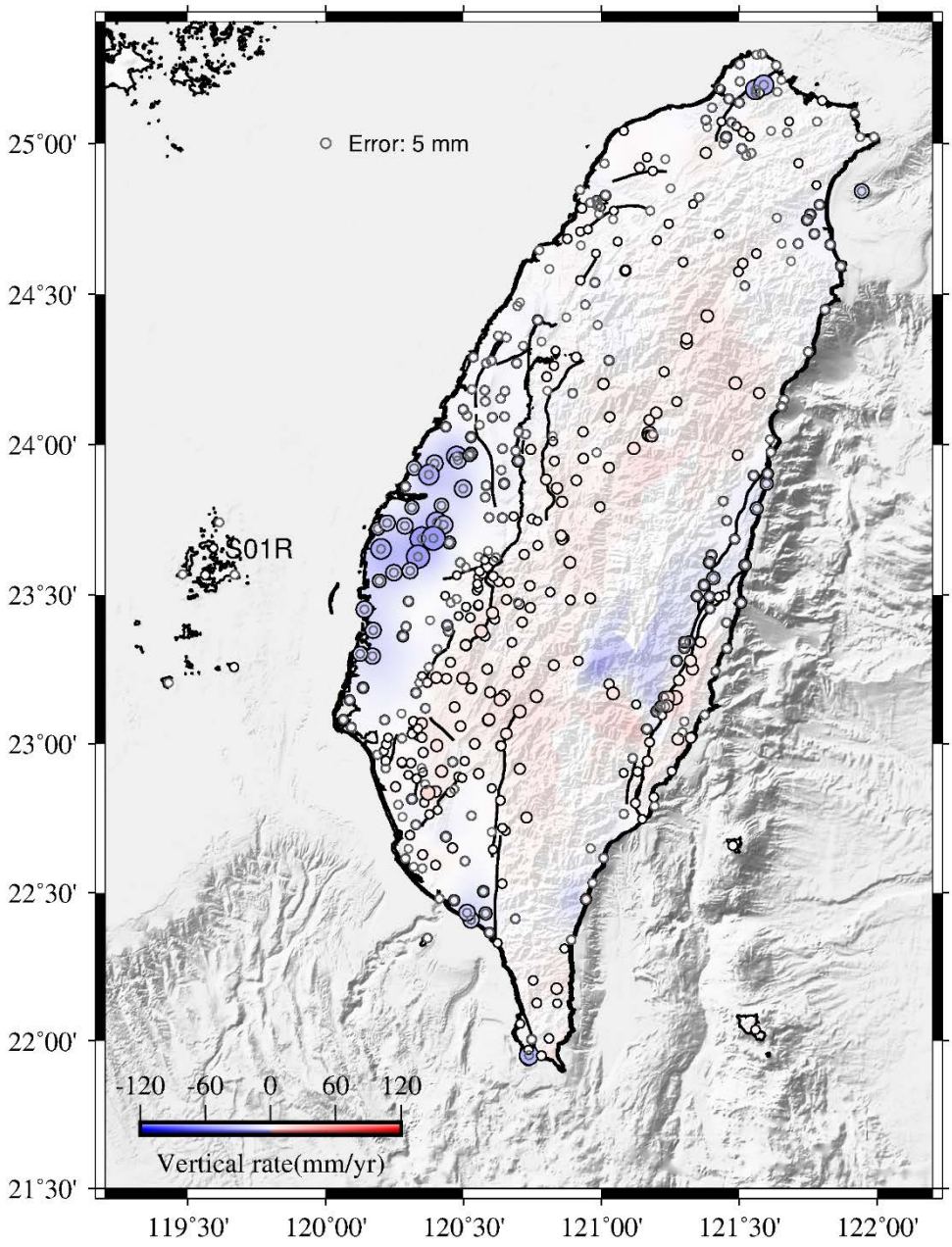


圖 2-1.4：整合歷史資料至 2019 年 09 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙 S01R 測站之垂直年速度場。圓圈代表速度場誤差值的大小。

Figure 2-1.4: Vertical velocity field with respect to S01R from 495 continuous GPS stations calculated with removing coseismic, post-seismic, periodic motion and unusual data. Circle indicates the size of error of the velocity field.

此外，由於目前所使用的解算軟體 GIPSY-OASIS 於 2018 年中即不再提供 ITRF2008 座標框架之軌道參數，因此目前於連續 GPS 測站之時間序列均可見一不連續跳躍（圖 2-1.5，以 BIMO 測站為例），此跳躍對解算長期速率不致影響過大，但對於時間較短的測站會有較大的影響。由於目前更新的 ITRF2014 軌道資料只回溯到 1996 年，預計下年度會將所有資料重新解算以符合目前最新的 ITRF2014 座標框架。

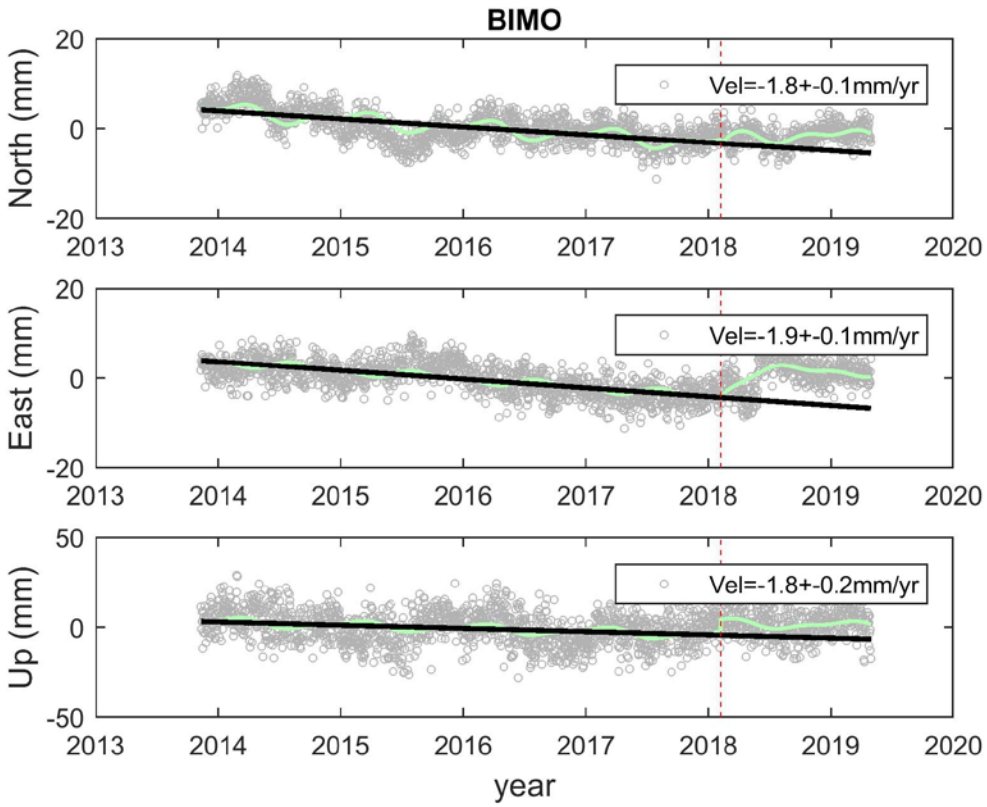


圖 2-1.5：BIMO 測站資料受軌道參數轉換影響之時間序列。

Figure 2-1.5: Time series data of BIMO station affected by orbit parameter conversion.

2-2 今年度(2019 年)GPS 移動站外業督導與檢核分析

本年度至 10 月初為止，GPS 移動站部分台北地區於 3 月 18 日至 29 日完成 76 個點位施測、恆春地區於 4 月 1 日至 4 日完成 32 個點位施測、桃竹苗地區於 5 月 13 日至 24 日完成 114 個點位施測、嘉南地區於 6 月 3 日至 25 日完成 170 個點位施測、高屏地區於 7 月 15 日至 28 日完成 106 個點位施測、中部地區於 8 月 5 日至 26 日完成 153 個點位施測、花東地區於 9 月 17 日至 24 日完成 74 個點位施測、宜蘭地區於 10 月 2 日至 5 日完成 36 個點位施測，共計全台完成 761 點 GPS 移動站的施測。

2-2-1 GPS 移動站督導與檢核

根據測量外業督導與檢核規範要求，GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點。在測量外業檢核部分，抽樣 GPS 移動站分區測量數量 10% (小數點以下四捨五入) 進行檢核測量。GPS 移動站督導與檢核部分 (表 2-2.1)，台北地區於 3 月 22 日完成 5 個點位督導；並於 4 月 19 日至 21 日完成 10 個點位施測檢核、恆春地區於 4 月 1 日完成 5 個點位督導；並於 5 月 9 日至 10 日完成 4 個點位施測檢核、桃竹苗地區於 5 月 23 日至 24 日完成 16 個點位督導；並於 7 月 8 日至 12 日完成 12 個點位施測檢核、嘉南地區於 6 月 14 日完成 5 個點位督導；並於 7 月 4 日至 6 日和 22 日至 26 日完成 20 個點位施測檢核、高屏地區於 7 月 24 日完成 5 個點位督導；並於 8 月 6 日至 8 日和 21 日至 23 日完成 12 個點位施測檢核、中部地區於 8 月 9 日完成 5 個點位督導；並於 9 月 10 日至 12 日和 18 日至 20 日完成 16 個點位施測檢核、花東地區於 9 月 24 日完成 5 個點位督導；並於 10 月 21 日至 25 日完成 12 個點位施測檢核、宜蘭地區於 10 月 2 日完成 5 個點位督導；並於 10 月 30 日至 11 月 1 日完成 4 個點位施測檢核，共計完成 4 點 GPS 移動站的施測檢核。

表 2-2.1：GPS 移動站施測、督導與檢核時間表
Table 2-2.1: Schedule of campaign mode GPS surveying, supervising and validation.

測量月份	點位數量	地區	檢核點數	中興測量	督導檢核結果細項說明	
				施測日期	督導日期	檢核日期
3月	76	台北	10	2019/03/18～2019/03/29	2019/03/22	2019/04/19～2019/04/21
4月	32	恆春	4	2019/04/01～2019/04/04	2019/04/01	2019/05/09～2019/05/10
5月	114	桃竹苗	12	2019/05/13～2019/05/24	2019/05/23、2019/05/24	2019/07/08～2019/07/12
6月	170	嘉南	20	2019/06/03～2019/06/25	2019/06/14	07/04~06、07/22~26
7月	106	高屏	12	2019/07/15～2019/07/28	2019/07/24	08/06~08、08/19~21
8月	153	中部	16	2019/08/05～2019/08/26	2019/08/09	09/10~12、09/18~20
9月	74	花東	12	2019/09/17～2019/09/24	2019/09/24	2019/10/21～2019/10/25
10月	36	宜蘭	4	2019/10/02～2019/10/06	2019/10/02	2019/10/30～2019/11/01

2-2-2 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析

為了和臺灣坐標基準有比較的基礎，本計畫資料解算採用最小約制金門連續站（KMNM）於 TWD97[2010]基準下之坐標，求解各測站於 TWD97[2010] 基準下之坐標。然而，為了確保 KMNM 站坐標時間序列之可靠度與穩定性，同時也將 KMNM 站資料與 5 個 IGS（International GPS Service）連續站資料進行聯合解算（圖 2-2.2），求解 KMNM 於 ITRF 框架之坐標時間序列。5 個 IGS 連續站分別為日本筑波連續站（TSKB）、澳洲柏斯連續站（PERT）、俄羅斯伊爾庫斯克連續站（IRKT）、美國關島連續站（GUAM）及印度班加羅爾連續站（IISC）（圖 2-2.2）。我們利用 IGS 公告各連續站於 ITRF 坐標框架下之坐標及速度場，以線性關係式推出各個連續站於任一觀測時刻之坐標，並約制此 5 個國際連續站之坐標，求解 KMNM 站於 ITRF 坐標系之坐標時間序列，確認 KMNM 站坐標時間序列之可靠度與穩定性。

在 GPS 移動站資料解算流程部分，採用 Bernese 軟體求解各測站之坐標。資料處理所需的衛星軌道資料是直接採用 IGS 提供的精密星曆，極運動改正是採用 IERS（International Earth Rotation Service）的 Bulletin B 公佈值，將 UTC 與 UT1 之差值加以修正，並將坐標值由瞬間極坐標系統修正至 J2000 平均極（CIO）坐標系統。接著利用電碼資料進行測站單點定位及接收儀時鐘改正量計算。計算出的時鐘改正量會在利用相位觀測量進行定位的步驟中被採用，使接收儀之時間能準確至 10^{-6} 至 10^{-7} 秒。下一步，將所有測站依觀測量數目的多寡，選擇兩測站間共同觀測量最多之測站組何組成基線並進行一次差分。再透過三次差分對精密星曆與衛星時錶資料進行資料編修、週波脫落之補正、時錶差修正、錯誤觀測量之移除。最後，將篩選過之相位觀測量，利用無電離層線性組合信號（L3）來解

算週波未定值，並組成二次差觀測量以求解坐標參數。為避免低仰角觀測時伴隨之較大雜訊，本計畫僅處理仰角 15°以上的觀測資料。因對流層折射效應對於 GPS 的高程定位精度有著顯著的影響，本計畫採用 Saastamoinen model（Saastamoinen, 1973），以海平面標準氣象資料推求各測站的對流層改正起始值，並引用大氣資料進行對流層折射影響量的改正參數。以各測站每 2 小時增加 1 個參數之方式加以吸收殘留的對流層折射誤差。

由於環境變化與隨機誤差的存在，使得 GPS 坐標時間序列會呈現離散跳動的型態，因此本計畫採用坐標殘差及均方根誤差分析兩種方式來查核資料計算結果的穩定性。坐標殘差（residual）分析是將各站每次測量所獲得之坐標觀測值與擬合曲線上之坐標計算值相減，將所獲得之坐標殘差值進行統計，在測量學中又稱為外部誤差。在理想狀況下，如果坐標計算成果是穩定的，此殘差值會近乎等於零；均方根誤差（RMS error）分析為針對各測站每次坐標解算時所產生的均方根誤差量進行統計，在測量學中又稱為內部誤差。

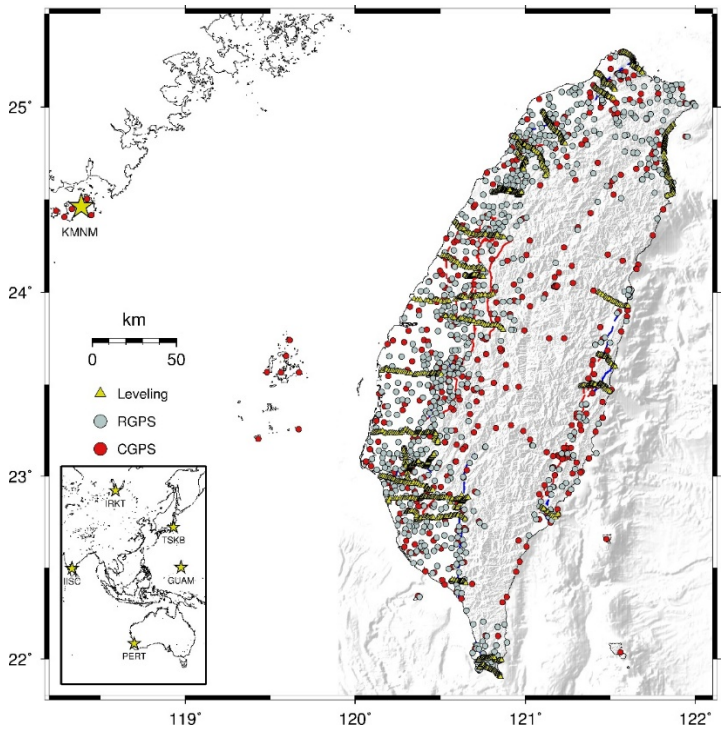


圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。灰色圓圈為 GPS 移動站，紅色圓圈為 GPS 連續站，黃色三角形為精密水準點位，黃色星號為金門連續站。紅色實線與藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層分布位置。左下圖黃色星號為本計畫使用之 IGS 連續站。

Figure 2-2.2: Taiwan crustal deformation monitoring network. Grey circles are campaign-mode GPS stations; Red circles are continuous GPS stations; Yellow triangles are precise leveling benchmarks; The yellow star is KMNM continuous GPS station. Red solid lines and blue dashed lines represent the active faults reposrted by the CGS. The yellow stars in the bottom left figure are the IGS stations used in this project.

根據 GNSS 坐標殘差之分布情形指出（圖 2-2.2），2002－2019 年 N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.005 ± 24.9 mm；E 方向為 0.03 ± 10.72 mm；H 方向為-0.31 ± 28.46 mm。而 2002－2019 年平面坐標之均方根誤差平均值為 30.78 mm，高程坐標的均方根誤差平均值為 24.56 mm（圖 2-2.3）。換言之，GNSS 移動站坐標的平面精度約在 30 mm 左右，高程精度約在 20 mm 至 30 mm 左右。

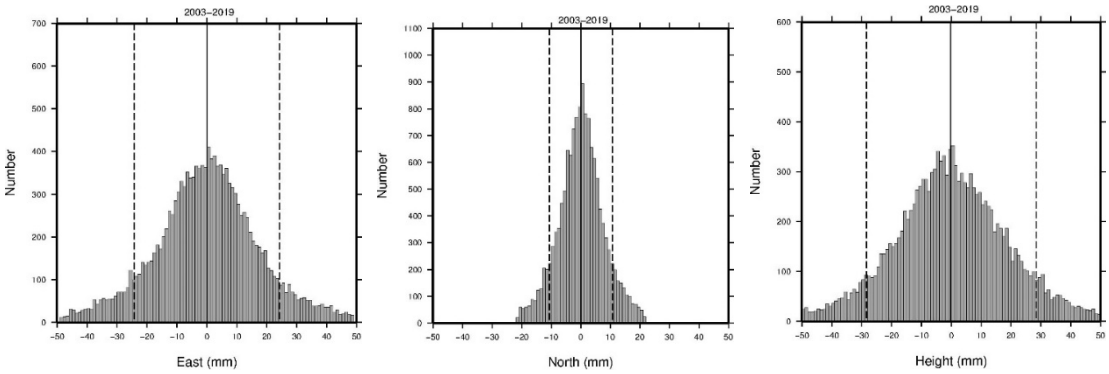


圖 2-2.2：2003-2019 年截至 9 月底 GPS 點位坐標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95%信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

Figure 2-2.2: GPS coordinates residuals of 2002-2019 September. The solid line is the arithmetic mean, the dashed lines indicate 95% confidence interval (two standard deviations).

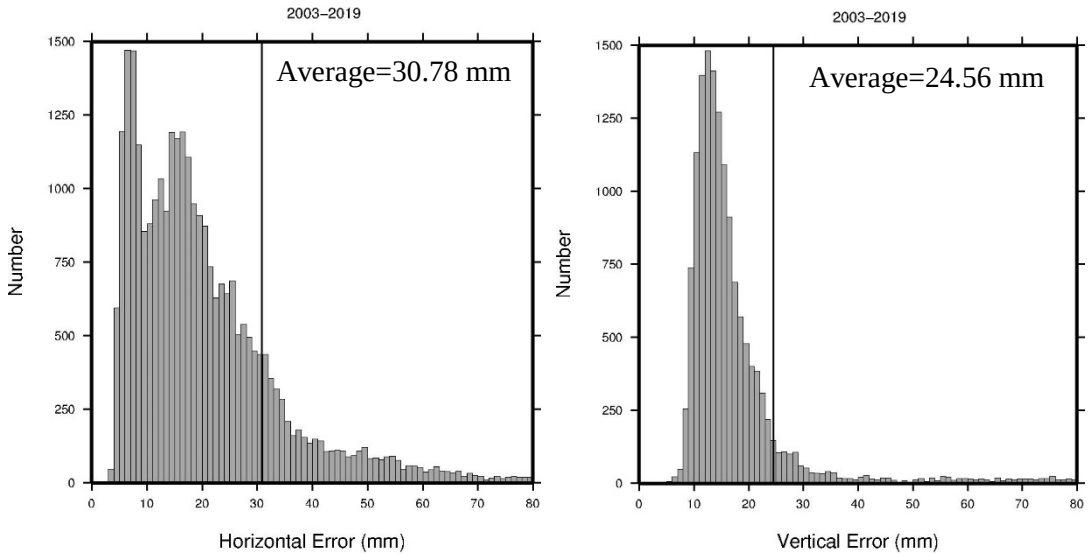


圖 2-2.3：2003-2019 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

Figure 2-2.3: 2003- 2018 GPS root mean square.

2-3 今年度(2019 年)精密水準測量精度分析

水準測量是一門古老但卻是高精度獲得相對高程的測量方法，其使用的儀器相當簡單，僅是在一望遠鏡上裝置有一水平氣泡，而透過此一保持水平的望遠鏡讀取前後二根有刻劃的水準尺，而用以估計此兩根水準尺之立足點間的高程差。至今除了在水準尺刻劃的精度，尺的熱膨脹係數，水準儀氣泡的精度以及其架裝微米尺來改進讀數的精度外，其他均無任何改變。

水準測量誤差來源分為儀器誤差、觀測誤差及受外界因素影響的自然誤差。按其影響的性質則分為偶然誤差(隨機誤差)和系統誤差兩類。對系統誤差而言，有些可通過選線或觀測的安排加以消除或減弱 （許榮欣和高書屏，1996)。在精密水準測量中，最常注意的系統誤差包括有：(1) 視準軸誤差、(2) 折射誤差、(3) 地球曲率改正、(4) 水準尺溫度改正、(5) 水準尺刻劃改正與 (6) 正高改正。這些系統誤差在嚴格的精密測量程序中，如：規定往返測必須在不同的環境中進行、相鄰兩測站採用不同之觀測次序、每測段的總測站為偶數等方法，均可消除一些系統性誤差的影響。然而，縱使依照如此嚴格的觀測程序，最後仍會存有部分的系統誤差必須依靠儀器之校準與修正模式來消除或降低（劉啟清，1986)。這些系統誤差的修正方法，主要參照 Ching et al.（2011b）使用的方式。其中，因為本研究分析水準資料的目的在於求取垂直速度場，在此計算過程中，正高改正量會因為是定值而被移除掉，所以不進行正高改正的系統誤差修正。

2019 年 10 月底前所獲得共計 1149 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 1133 個測段（圖 2-3.1a)，佔所有測段比例之 98.6 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 96.8 %（1113 個測段)；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 99.8 %（1147 個測段)。考慮與測段距離的關係後（Bomford, 1985)，每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1118 個測段達測段達 97.3 %（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

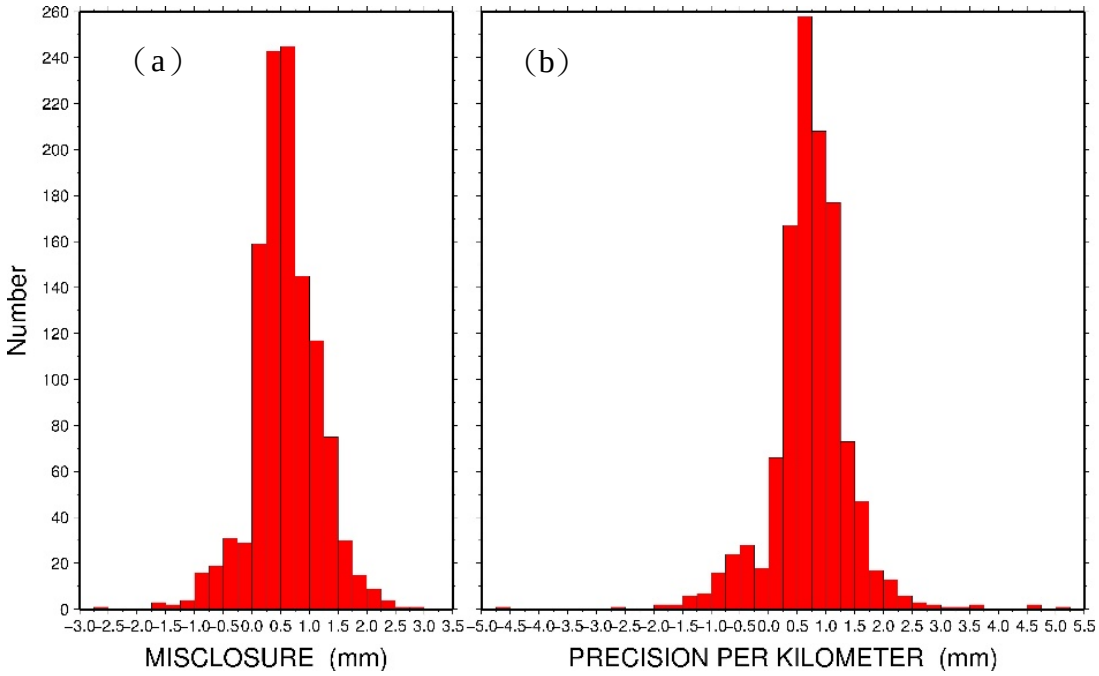


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a) 為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。(b) 為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

Figure 2-3.1: Diagram of pricise leveling data. Red column is the amount of 0.25 mm statistics value. (a) The error of closure, maximum is around 0.5~0.75 mm. (b) Observation accuracy of every kilometer, maximum is around 0.5~0.75 mm.

就精密水準的測量成果而言，同樣是利用式 2.1-式 2.3 來擬合水準坐標時間序列，推估精密水準資料之垂直速度場。由於精密水準獲得之高程坐標為相對高程值，會受到參考點高程設定之不同而變化。此外參考點坐標時間序列的穩定性，也會因誤差傳播的效應，影響其他水準點位之速度精度。因此，本計畫會先測試不同參考點之時間序列穩定性，挑選最佳之參考點來計算該測線之相對垂直速度場。然而，在討論水平速度場時，根據 Yu et al.（1997）的建議，本計畫水平速度場採用之參考站為澎湖白沙 S01R 站。因此，為了讓臺灣地表速度場有統一的參考點，且澎湖白沙站相對於地心也確實近乎不動，本計畫採用以下的策略，重新計算各水準垂直速度場相對 S01R 測站之速度值。首先，假設 GPS 連續站與水準點共點，則兩者之垂直速度差異，即是兩個速度場參考點的速度差異，因此可直接將水準垂直速度場修正至相對 S01R 測站之速度值。若該水準測線上並無和 GPS 連續站共點之水準點，我們可以合理地假設，如果 GPS 連續站和水準點位間的距離越接近，則兩者的垂直速度將越一致。因此，本計畫會尋找距離水準點位最接近且坐標時間序列較穩定的 GPS 連續站，假設該站與其最近之水準點為

共點，來進行速度場參考站之轉換，獲得相對於測站 S01R 的垂直速度場，截至 2018 為止，已增設 19 點精密水準測線與連續站（圖 2-3.2），惟部分 GPS 連續站因架設時間較晚且該地區發生速度變化，因此僅在較穩定之區域約制該共點站速度。

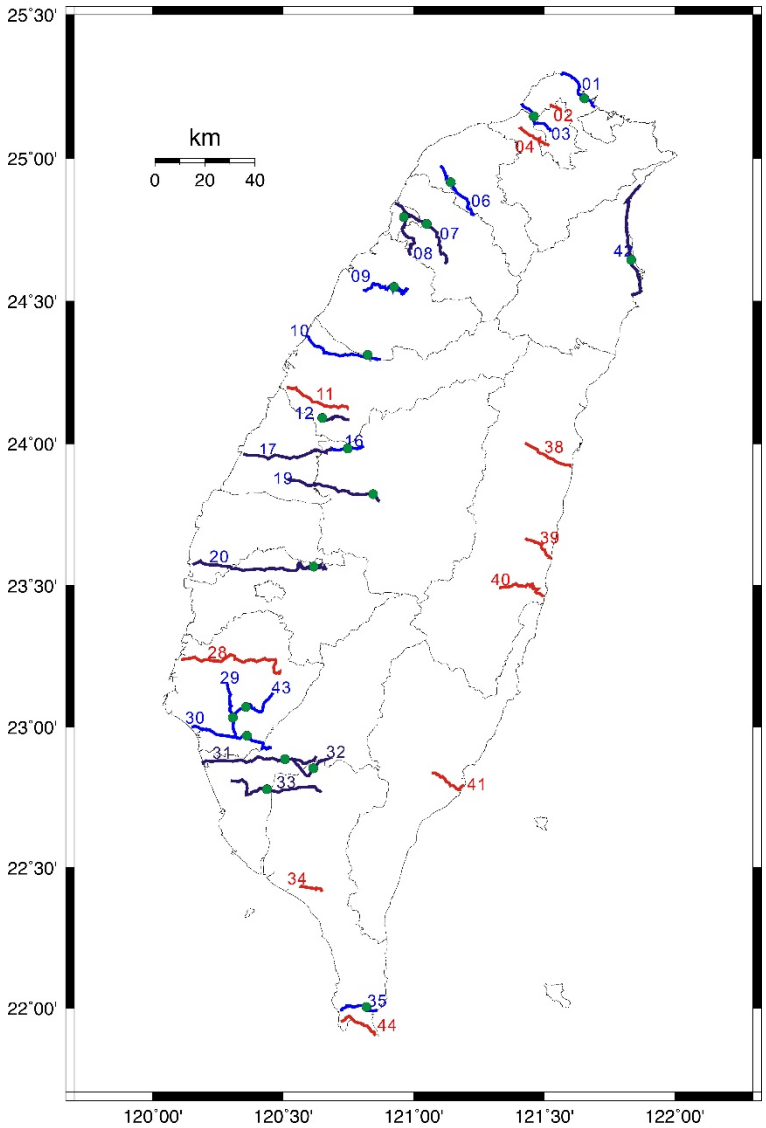


圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖，藍色表示新增共點之測線，紅色表示尚未新增之測線，綠色點位表示共點點位位置。

Figure 2-3.2: New overlapping location of GPS and pricise leveling. Blue lines are the new overlapping lines, red lines are those have not yet added, the green dots are the overlapping location of GPS and pricise leveling.

2-3-1 精密水準督導

根據測量外業督導規範要求，精密水準督導部分，實施每條測線抽樣監工督導 1 測段 (表 2-3.1)。路竹-茂林副線於 2 月 20 日完成水準外業督導、王功-草屯測線；北斗-水里測線於 3 月 14 日完成督導、大安-東勢測線於 3 月 21 日完成水準外業督導、草屯-埔里測線於 3 月 26 日完成水準外業督導、北門-楠西測線；恆春西臺地-佳樂水測線；南樹林-鵝鑾鼻測線於 4 月 1 日完成督導、安平-龍崎測線；岡山-安坡測線於 5 月 13 日完成督導、玉井-新化測線於 5 月 24 日完成水準外業督導、新竹-峨眉測線於 6 月 3 日完成水準外業督導、新竹-五峰測線於 6 月 24 日完成水準外業督導、新屋-童話世界測線於 7 月 9 日完成水準外業督導、龍井-太平測線於 7 月 11 日完成水準外業督導、五光-黃竹測線於 8 月 1 日完成水準外業督導、北勢-峰谷副線於 8 月 5 日完成水準外業督導、曾厝-霧峰副線於 8 月 6 日完成水準外業督導、烏溪南岸副線於 8 月 7 日完成水準外業督導、苗栗-南庄測線於 8 月 15 日完成水準外業督導、烏溪南岸副線中興新村副線於 8 月 23 日完成水準外業督導、石門-萬里測線於 9 月 2 日完成水準外業督導、金湖-瑞峰測線於 9 月 4 日完成水準外業督導、士林-三芝測線於 9 月 9 日完成水準外業督導、淡水-士林測線於 9 月 11 日完成水準外業督導、佳冬-七佳測線於 9 月 23 日完成水準外業督導、信義副線於 9 月 26 日完成水準外業督導、嶺頂-龍澗測線於 10 月 3 日完成水準外業督導、善化-關廟測線於 10 月 4 日完成水準外業督導、東成-富岡測線於 10 月 5 日完成水準外業督導、梗枋-東澳測線於 10 月 17 日完成水準外業督導、紅葉-靜浦測線於 10 月 28 日完成水準外業督導、光復-豐濱測線於 10 月 29 日完成水準外業督導、B002-B059 測線和 B110-B101 測線於 11 月 4 日完成水準外業督導、B003-B092 測線和 B087-B080 測線於 11 月 5 日完成水準外業督導、B037-B095 測線和 G088-G330 測線於 11 月 6 日完成水準外業督導、B036-B086 測線於 11 月 7 日完成水準外業督導，共計完成 42 條精密水準測量的外業督導。

表 2-3.1：精密水準測量施測與督導時間表

Table 2-3.1: Schedule of precise leveling surveying and supervising.

月份	編號	測線名稱	中興測量		督導結果	
			預期日期	實際日期	督導日期	備註
2 月	31	路竹-茂林 主線	2019/02/18~2019/02/20	2019/02/18~2019/02/20	2/20	
	32	路竹-茂林 副線				
3 月	10	大安-東勢測線	2019/03/07~2019/03/16	2019/03/18~2019/03/22	3/21	
	16	草屯-埔里測線	2019/03/05~2019/03/05	2019/03/25~2019/03/26	3/26	
	17	王功-草屯測線	2019/03/04~2019/03/15	2019/03/04~2019/03/15	3/14	
	19	北斗-水里測線	2019/03/04~2019/03/15	2019/03/04~2019/03/15	3/14	
4 月	28	北門-楠西測線	2019/04/01~2019/04/19	2019/04/01~2019/04/19	4/1	
	35	恆春西臺地-佳樂水	2019/04/01~2019/04/03	2019/04/01~2019/04/03	4/1	
	44	南樹林-鵝鑾鼻測線	2019/04/04~2019/04/05	2019/04/01~2019/04/03	4/1	
5 月	30	安平-龍崎測線	2019/05/10~2019/05/23	2019/05/10~2019/05/23	5/13	
	33	岡山-安坡測線	2019/05/13~2019/05/23	2019/05/13~2019/05/23	5/13	
	43	玉井-新化測線	2019/05/07~2019/05/10	2019/05/24~2019/05/29	5/24	
6 月	07	新竹-五峰測線	2019/06/17~2019/06/20	2019/06/24~2019/06/26	6/24	
	08	新竹-峨眉測線	2019/06/20~2019/06/25	2019/06/01~2019/06/08	6/3	
7 月	06	新屋-童話世界測線	2019/07/03~2019/07/10	2019/07/01~2019/07/09	7/9	
	11	龍井-太平測線	2019/07/17~2019/07/24	2019/07/10~2019/07/24	7/11	
8 月	09	苗栗-南庄測線	2019/08/26~2019/08/30	2019/08/12~2019/08/16	8/15	
	12	五光-黃竹測線	2019/08/21~2019/08/22	2019/08/01~2019/08/09	8/1	
	13	曾厝-霧峰副線	2019/08/21~2019/08/21	2019/08/06~2019/08/06	8/6	副線，四年測一次
	14	北勢-峰谷副線	2019/08/19~2019/08/20	2019/08/01~2019/08/05	8/5	

月份	編號	測線名稱	中興測量		督導結果	
			預期日期	實際日期	督導日期	備註
	15	烏溪南岸副線	2019/08/26~2019/08/26	2019/08/07~2019/08/07	8/07	
	18	中興新村副線	2019/08/22~2019/08/23	2019/08/08~2019/08/23	8/23	
	01	石門-萬里測線	2019/09/18~2019/09/20	2019/09/02~2019/09/04	9/2	
9 月	02	士林-三芝測線	2019/09/09~2019/09/12	2019/09/09~2019/09/12	9/9	
	03	淡水-士林測線	2019/09/18~2019/09/21	2019/09/09~2019/09/12	9/11	
	04	五股-臺北測線	2019/09/05~2019/09/06	2019/09/18~2019/09/19	9/18	
	20	金湖-瑞峰測線	2019/09/11~2019/09/28	2019/09/02~2019/09/25	9/4	
	34	佳冬-七佳測線	2019/09/20~2019/09/22	2019/09/23~2019/09/24	9/23	
	5	信義副線	2019/09/23~2019/09/30	2019/09/26~2019/09/26	9/26	副線，四年測一次
10 月	29	善化-關廟測線	2019/10/02~2019/10/04	2019/10/01~2019/10/04	10/4	
	38	嶺頂-龍澗測線	2019/10/07~2019/10/09	2019/10/02~2019/10/04	10/03	
	39	光復-豐濱測線	2019/10/22~2019/10/25	2019/10/28~2019/10/31	10/29	
	40	紅葉-靜浦測線	2019/10/14~2019/10/18	2019/10/25~2019/10/31	10/28	
	41	東成-富岡測線	2019/10/21~2019/10/25	2019/10/05~2019/10/09	10/5	
	42	梗枋-東澳測線	2019/10/28~2019/10/31	2019/10/14~2019/10/18	10/17	
	21	B003-B092 測線	2019/11/05~2019/11/05	2019/11/05~2019/1105	11/5	副線，四年測一次
	22	B036-B086 測線	2019/11/07~2019/11/07	2019/11/07~2019/11/07	11/7	
	23	B087-B080 測線	2019/11/05~2019/11/05	2019/11/05~2019/11/05	11/5	
	24	B002-B059 測線	2019/11/04~2019/11/04	2019/11/04~2019/11/04	11/4	
	25	B110-B101 測線	2019/11/04~2019/11/04	2019/11/04~2019/11/04	11/4	
	26	B037-B095 測線	2019/11/06~2019/11/06	2019/11/06~2019/11/06	11/6	
	27	G088-G330 測線	2019/11/06~2019/11/06	2019/11/06~2019/11/06	11/6	

2-3-2 台北地區精密水準解算

臺北地區的水準測線包含台 2_1.石門至萬里、士林至三芝、淡水至士林、五股至台北、信義共五條。

2-3-2-1 石門至萬里測線

其中台 2_石門至萬里測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2019 年間共進行 16 次施測，該測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-3.0 mm/yr 與-3.7 mm/yr），作為約制點來校正 2027 和 0807 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.3 及圖 2-3.4）。GE78 樁點損毀（附錄 12）。

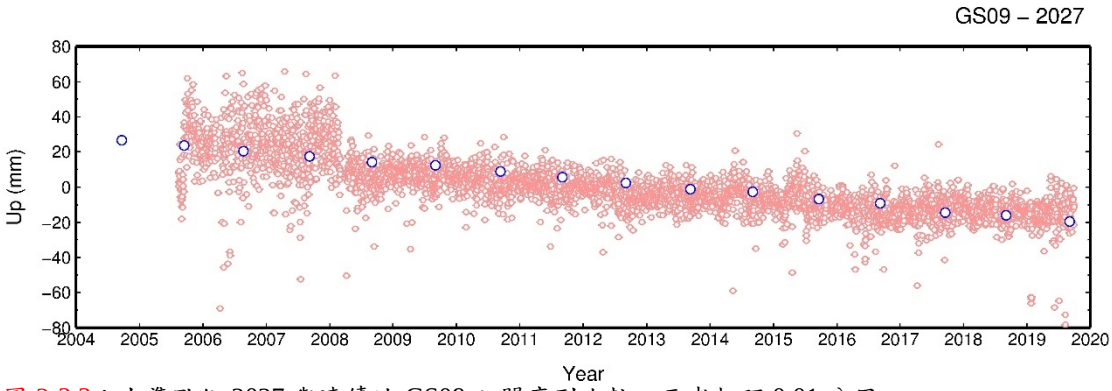


圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之間序列比較，兩者相距 0.01 公里。
Figure 2-3.3: Time series comparison between leveling bench mark 2027 and continuous GPS station GS09. The distance between the two is 0.01 Km.

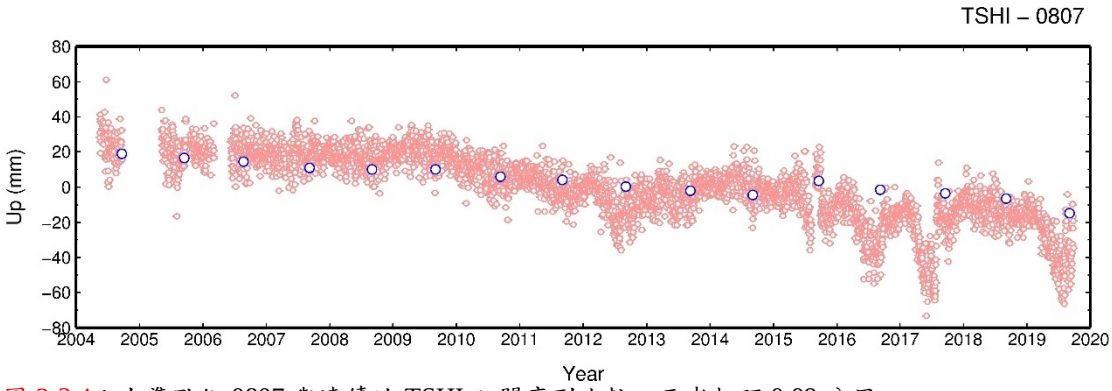


圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之間序列比較，兩者相距 0.09 公里。
Figure 2-3.4: Time series comparison between leveling bench mark 0807 and continuous GPS station TSHI. The distance between the two is 0.09 Km.

2-3-2-2 士林至三芝測線

士林至三芝測線跨越山腳斷層，測線長約 5 公里。該測線 2004 至 2019 年間共進行 16 次測量。本測線以 GPS 連續站 YMSM 之垂直速率（-2.3 mm/yr），作為約制點來校正 GB06 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.5）。

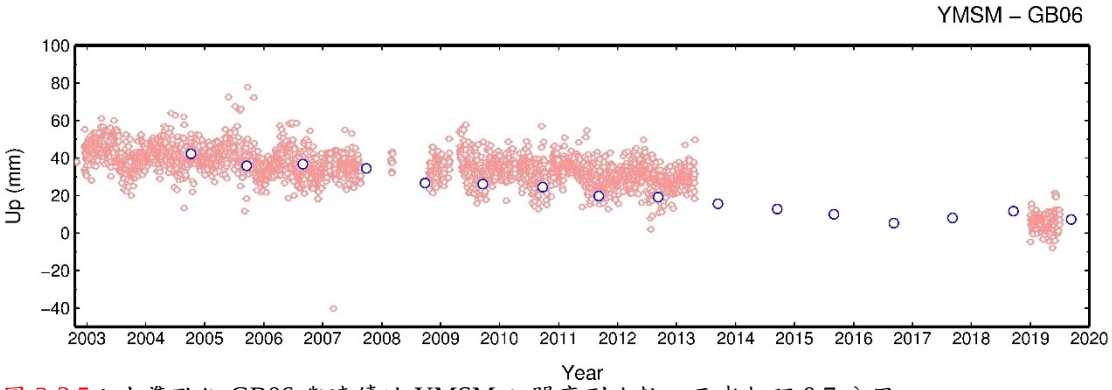


圖 2-3.5：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之間序列比較，兩者相距 0.7 公里。
Figure 2-3.5: Time series comparison between leveling bench mark GB06 and continuous GPS station YMSM. The distance between the two is 0.7 Km.

2-3-2-3 淡水至士林測線

淡水至士林測線橫跨山腳斷層，測線長約 16 公里，在 2004 至 2019 年間進行共 16 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 之垂直速率（-7.1 mm/yr），作為約制點來校正 GA69 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.6）。GA63、GA64、GA68、X016 樁點損毀（附錄 12）。

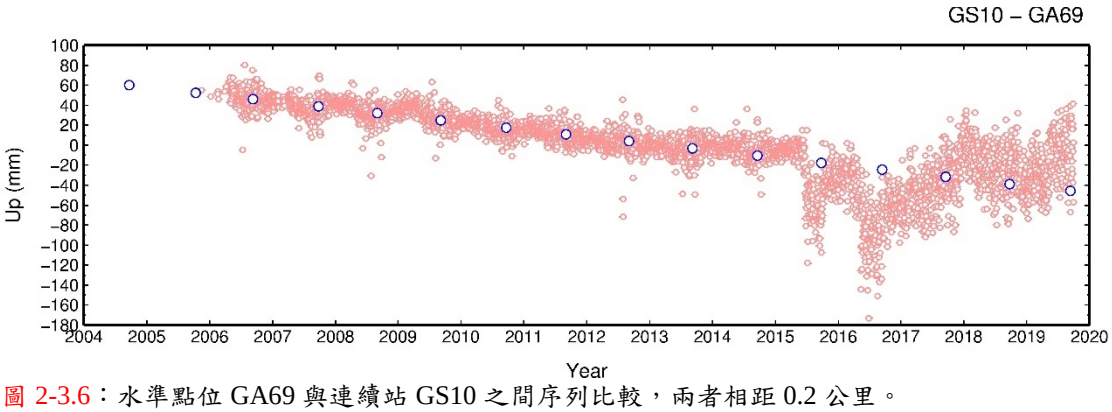


圖 2-3.6：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之間序列比較，兩者相距 0.2 公里。
Figure 2-3.6: Time series comparison between leveling bench mark GA69 and continuous GPS station GS10. The distance between the two is 0.2 Km.

2-3-2-4 五股至台北測線

五股至台北測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2019 年間共進行 16 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率（-2.1 mm/yr），作為約制點來校正 GA78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.7）。B227 樁點損毀（附錄 12）。

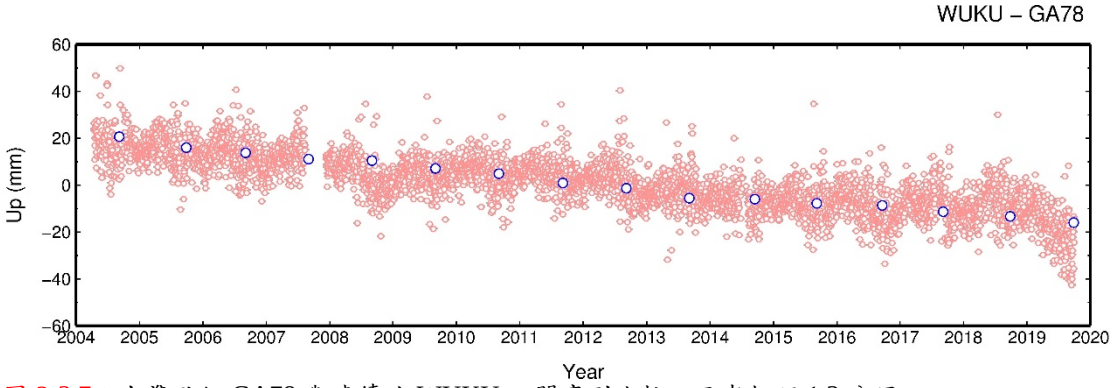


圖 2-3.7：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之間序列比較，兩者相距 1.3 公里。
Figure 2-3.7: Time series comparison between leveling bench mark GA78 and continuous GPS station WUKU. The distance between the two is 1.3 Km.

2-3-2-5 信義測線

信義測線測線長約 1.3 公里。此水準測線於 2009 至 2019 年間共進行 6 次的施測。本測線以 GPS 連續站 S101 之垂直速率（-2.8 mm/yr），作為約制點來校正 5003 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.8）。1187、0249、1149、1150 樁點損毀（附錄 12）。

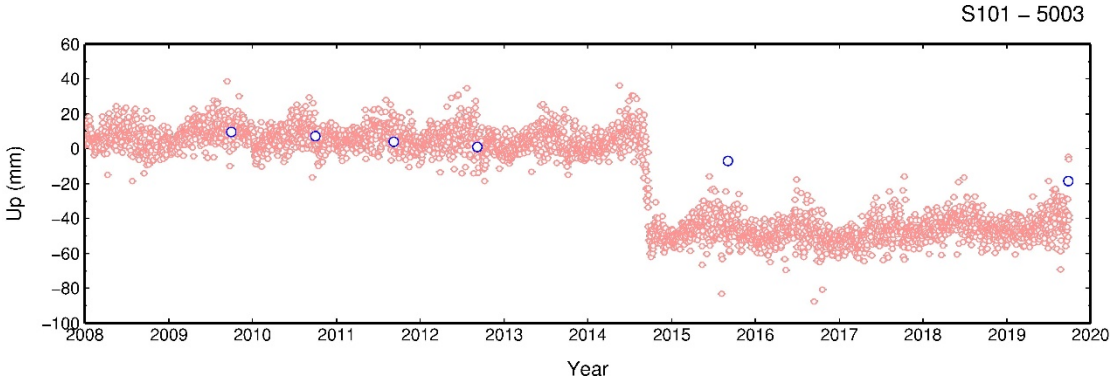


圖 2-3.8：水準點位 5003 與連續站 S101 之間序列比較，兩者相距 4.6 公里。
Figure 2-3.8: Time series comparison between leveling bench mark 5003 and continuous GPS station S101. The distance between the two is 4.6 Km.

2-3-3 桃竹苗地區精密水準解算

桃竹苗地區的水準測線包含縣 115_新屋至童話世界、縣 122_新竹至五峰、縣 117_新竹至峨眉、苗栗至南庄共四條。

2-3-3-1 新屋至童話世界測線

其中縣 115_新屋至童話世界測線主要橫跨湖口斷層，測線長約 24 公里(投影至剖面的長度)，分別於 2004 至 2019 年間進行 16 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（1.3 mm/yr），作為約制點來校正 GB40 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.9）。

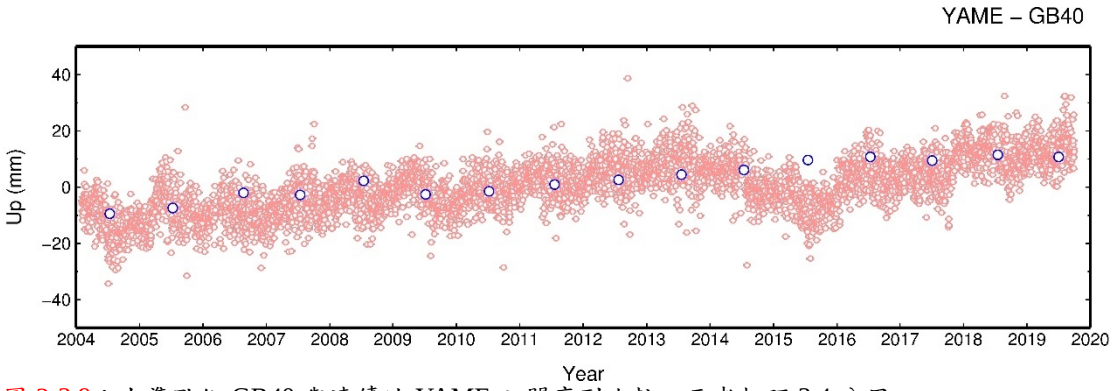


圖 2-3.9：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之間序列比較，兩者相距 3.4 公里。
Figure 2-3.9: Time series comparison between leveling bench mark GB40 and continuous GPS station YAME. The distance between the two is 3.4 Km.

2-3-3-2 新竹至五峰測線

縣 122_新竹至五峰測線橫跨新竹斷層及新城斷層，測線長約 31 公里(投影至剖面的長度)。2002 年至 2019 年間，共進行 16 次的施測。本測線分別以連續 GPS 站 TNML、GS03 之垂直速率（-0.5 mm/yr 、-1.1 mm/yr），作為約制點來校正 HCCA、T004 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率之垂直速率（圖 2-3.10 及圖 2-3.11）。6015、G416 樁點損毀（附錄 12）。

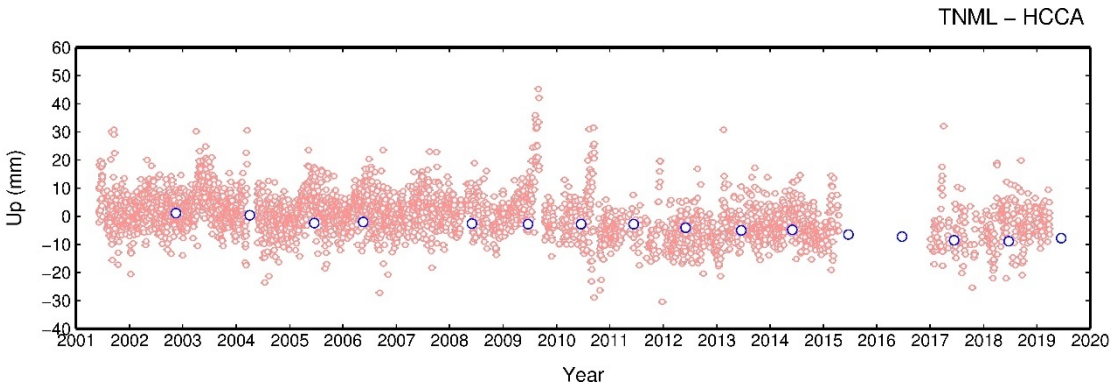


圖 2-3.10：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

Figure 2-3.10: Time series comparison between leveling bench mark HCCA and continuous GPS station TNML. The distance between the two is 0.5 Km.

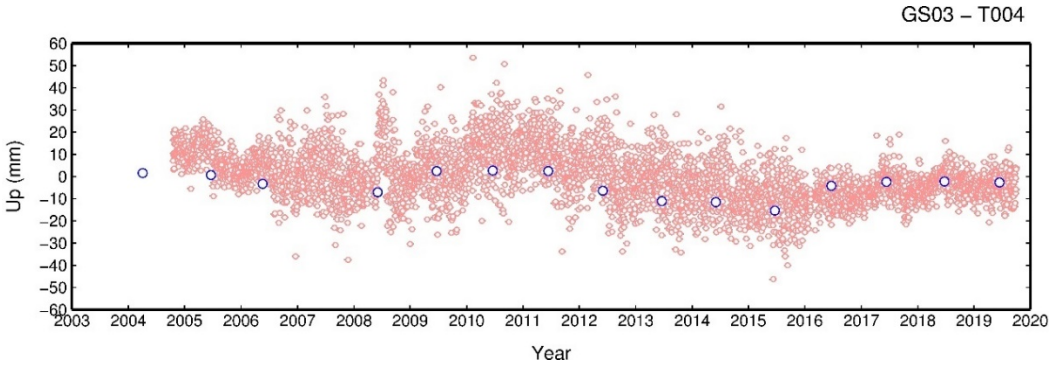


圖 2-3.11：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.4 公里。

Figure 2-3.11: Time series comparison between leveling bench mark T004 and continuous GPS station GS03. The distance between the two is 0.4 Km.

2-3-3-3 新竹至峨眉測線

縣 117_新竹至峨眉測線跨新竹斷層及新城斷層，測線長 16 公里(投影至剖面的長度)。此測線於 2004 至 2019 年間進行共 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-4.0 mm/yr），作為約制點 GB71 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.12）。GB71、GB83 樁點損毀。

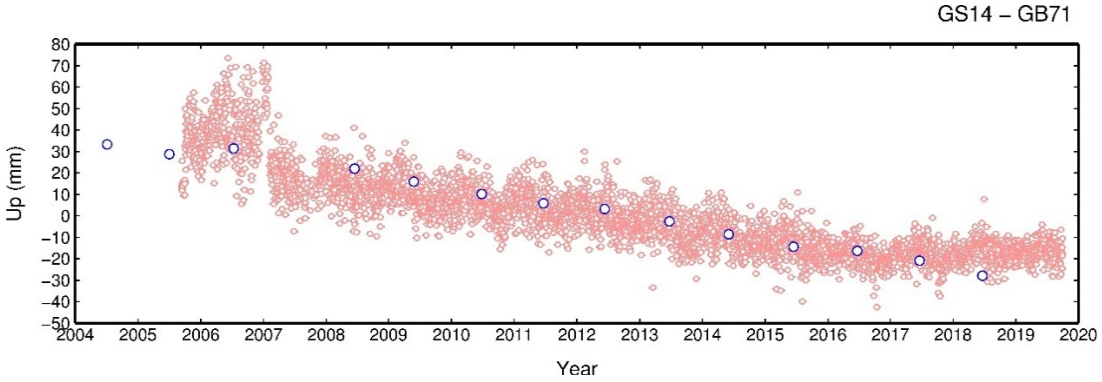


圖 2-3.12：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.5 公里。
Figure 2-3.12: Time series comparison between leveling bench mark GB71 and continuous GPS station GS14. The distance between the two is 0.5 Km.

2-3-3-4 苗栗至南庄測線

苗栗至南庄測線橫跨獅潭斷層，測線長約 17 公里，此測線於 2005 至 2019 年間共進行 15 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 與 GS92 之垂直速率（-5.7 mm/yr、-0.4 mm/yr），作為約制點 GD97、GD58 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.13 及圖 2-3.14）。GD26、GD47 樁點遺失（附錄 12）。

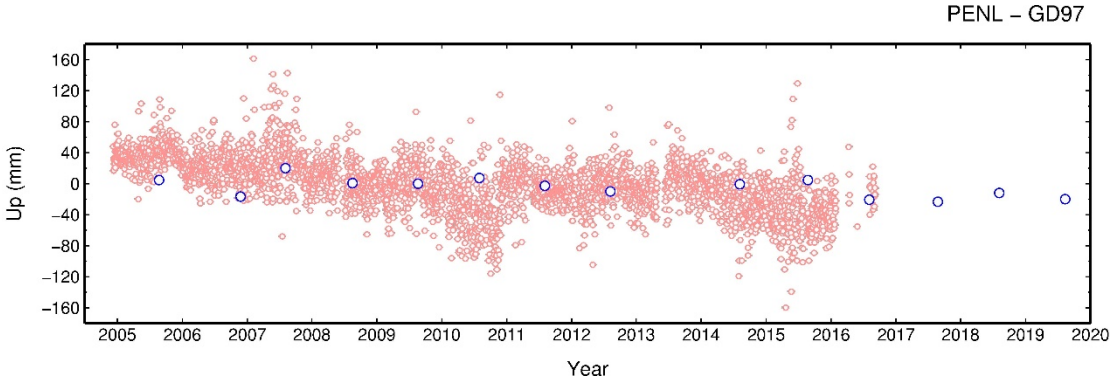


圖 2-3.13：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.07 公里。
Figure 2-3.13: Time series comparison between leveling bench mark GD97 and continuous GPS station PENL. The distance between the two is 0.07 Km.

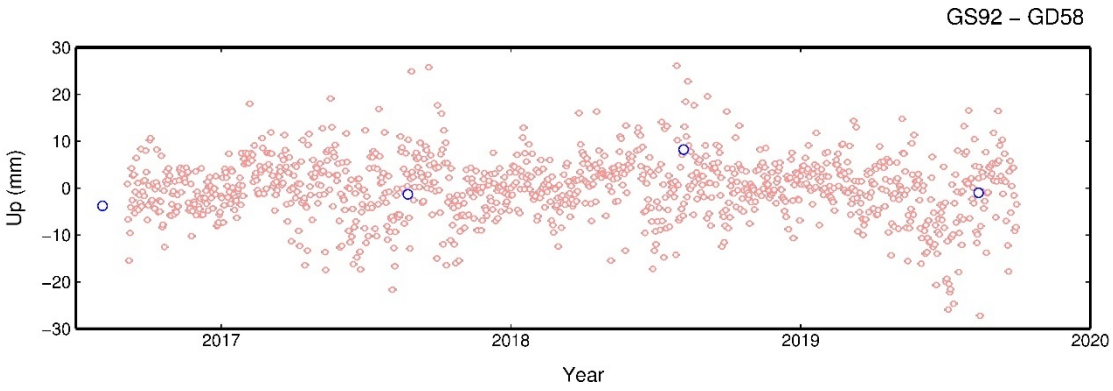


圖 2-3.14：水準點位 GD58 與連續站 GS92 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。

Figure 2-3.14: Time series comparison between leveling bench mark GD58 and continuous GPS station GS92. The distance between the two is 0.9 Km.

2-3-4 中部地區精密水準解算

中部地區完成的精密水準測線分別為大安至東勢、龍井至太平、跨車籠埔斷層之短測線(五光-黃竹、曾厝-霧峰、北勢-峰谷、烏溪南岸、中興新村)、王功-草屯-埔里及北斗-水里測線。

2-3-4-1 大安至東勢測線

其中大安-東勢測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 30 公里(投影至剖面的長度)，並於 2015 年後段新設 14 個測站，從 2004 年至 2019 年止共計有 15 次施測。2015 年起由 GF44（卓蘭國小）延伸測線至 B283（卓蘭實驗高中），該點位位於連續站 GS82 天線盤支架結構體上（圖 2-3.15），因此使用連續站 GS82 與 TEGS 之垂直速率（-1.4 mm/yr、-4.178 mm/yr）作為約制點，來校正 B283 與 G901 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.17)。

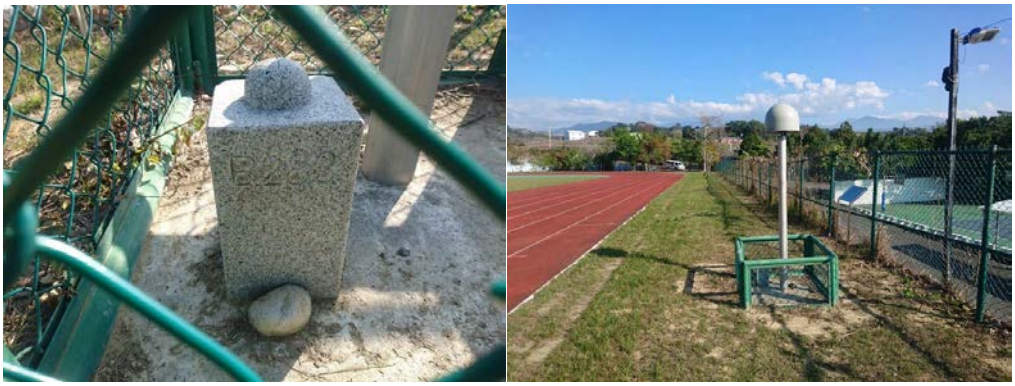


圖 2-3.15：中部地區 GPS 連續站 GS82 及精密水準測站 B283 周圍環境圖。
Figure 2-3.15: GPS continuous station GS82 and leveling bench mark B283.

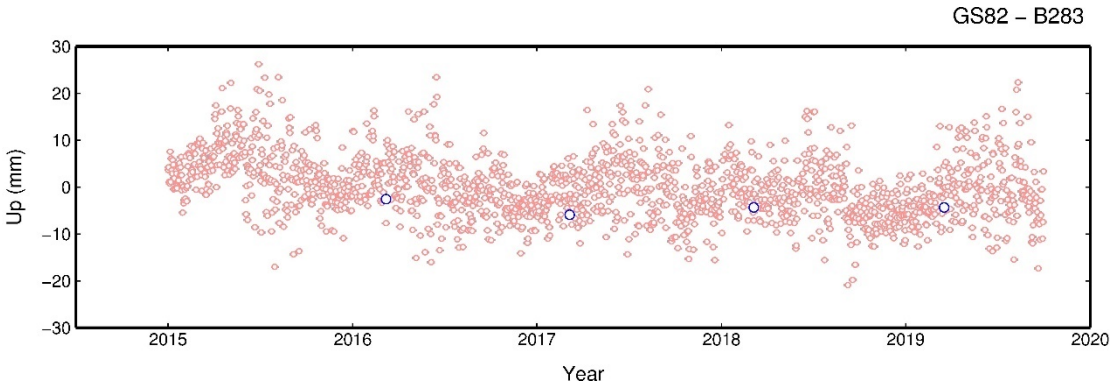


圖 2-3.16：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。
Figure 2-3.16: Time series comparison between leveling bench mark G896 and continuous GPS station GS36. The distance between the two is 1.5 Km.

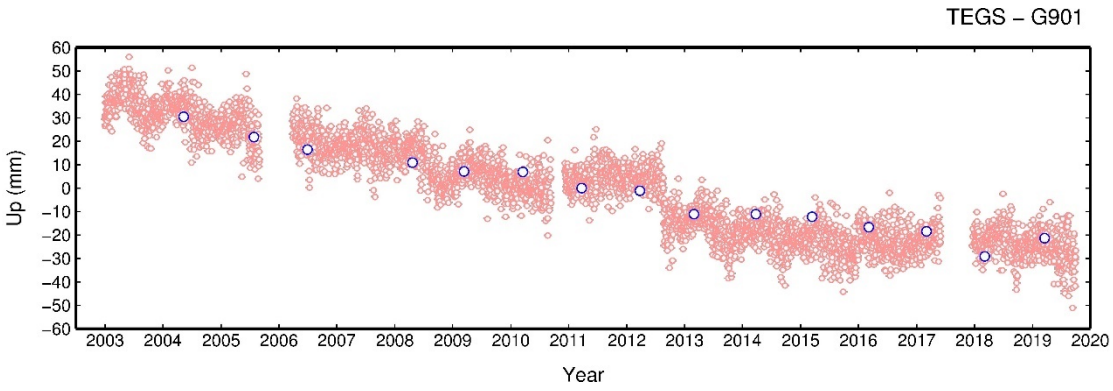


圖 2-3.17：水準點位 G896 與連續站 GS36 之時間序列比較，兩者相距 2.3 公里。
Figure 2-3.17: Time series comparison between leveling bench mark G896 and continuous GPS station GS36. The distance between the two is 2.3 Km.

2-3-4-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨清水斷層和車籠埔斷層，測線長約 25 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2019 年間，共進行 16 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 之垂直速率（-1.8 mm/yr），作為約制點 G937 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.18）。

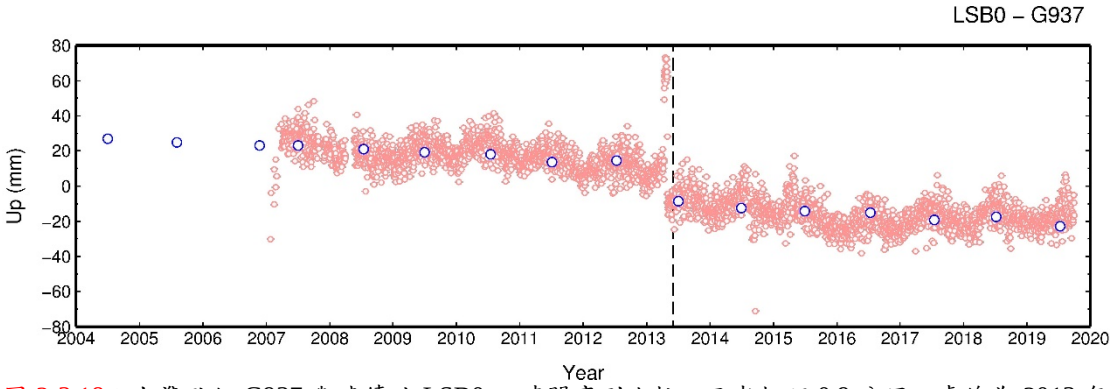


圖 2-3.18：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。
Figure 2-3.18: Time series comparison between leveling bench mark G937 and continuous GPS station LSB0. The distance between the two is 0.9 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

2-3-4-3 跨車籠埔斷層之短測線

經濟部中央地質調查所從 2007 年起在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，由北至南分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。自 2007 至 2019 年止五光至黃竹共計施測 13 次，其餘測線共計為 9 次。此五段短測線分別以 GPS 連續站 GS23、WUFN、WFEN、CAOT、KZN1 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr、-2.4 mm/yr、-3.1 mm/yr、-2.5 mm/yr、-4.1 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr、-3.1 mm/yr、-1.7 mm/yr、-0.4 mm/yr、-3.5 mm/yr），作為約制點 G937、T074、GE89、T005、B238 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.19~圖 2-3.23）。T081、T082、N015、T031、T066、T002、T004、T007、B239 樁點損毀（附錄 12）。

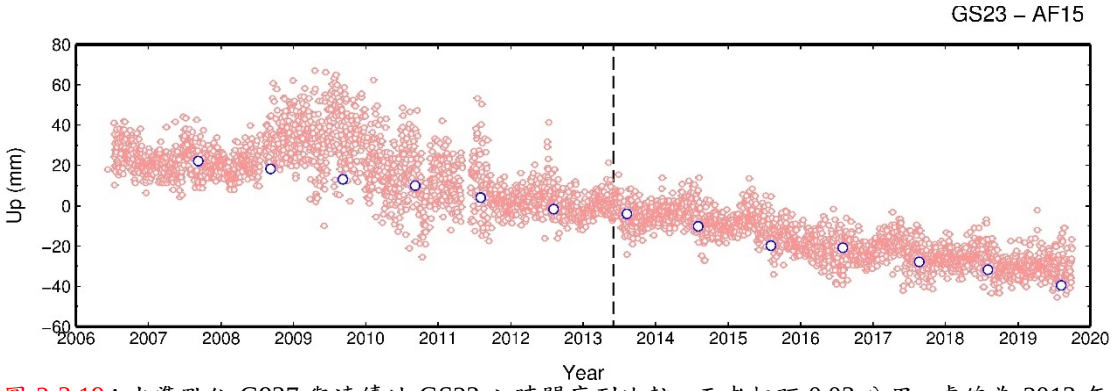


圖 2-3.19：水準點位 G937 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.19: Time series comparison between leveling bench mark G937 and continuous GPS station GS23. The distance between the two is 0.03 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

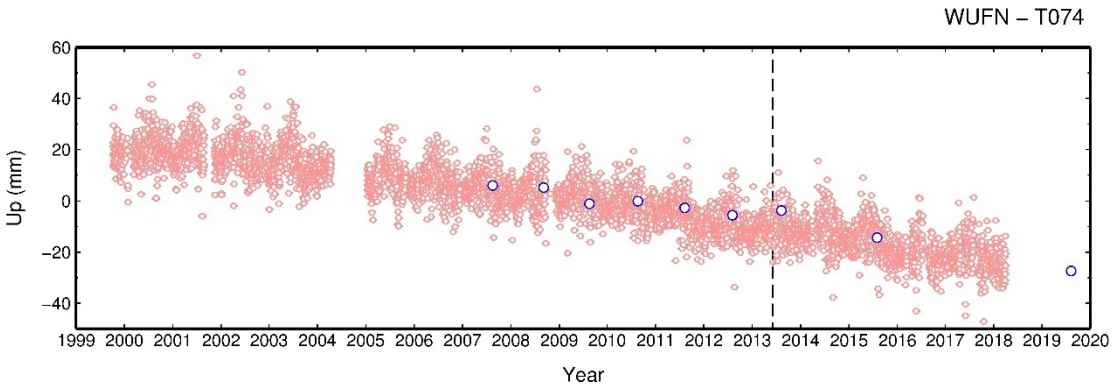


圖 2-3.20：水準點位 T074 與連續站 WUFN 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.20: Time series comparison between leveling bench mark T074 and continuous GPS station WUFN. The distance between the two is 2.1 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

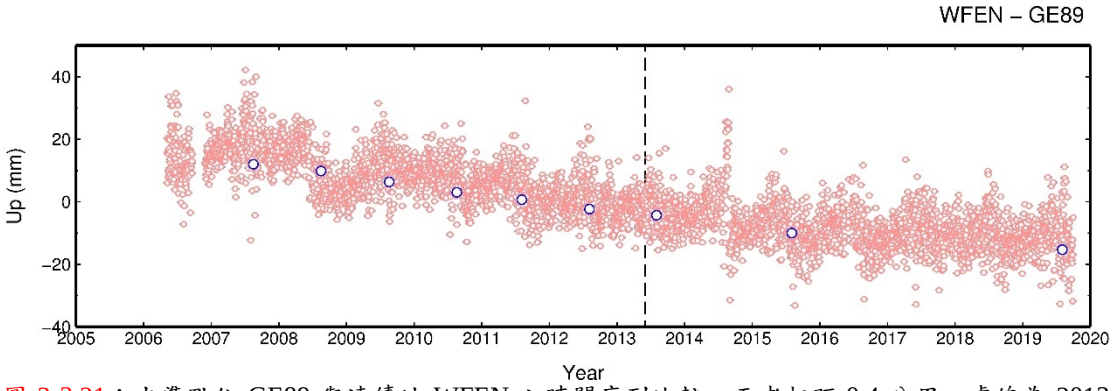


圖 2-3.21：水準點位 GE89 與連續站 WFEN 之時間序列比較，兩者相距 0.4 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.21: Time series comparison between leveling bench mark GE89 and continuous GPS station WFEN. The distance between the two is 0.4 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

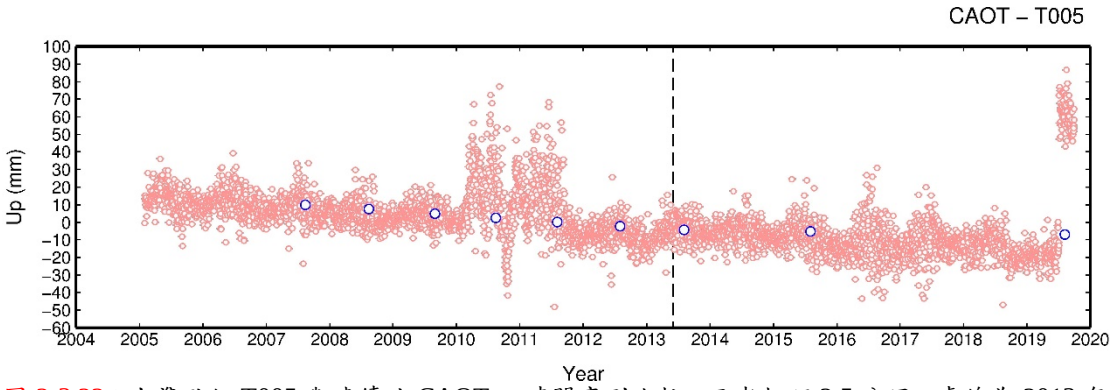


圖 2-3.22：水準點位 T005 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 2.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.22: Time series comparison between leveling bench mark T005 and continuous GPS station CAOT. The distance between the two is 2.5 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

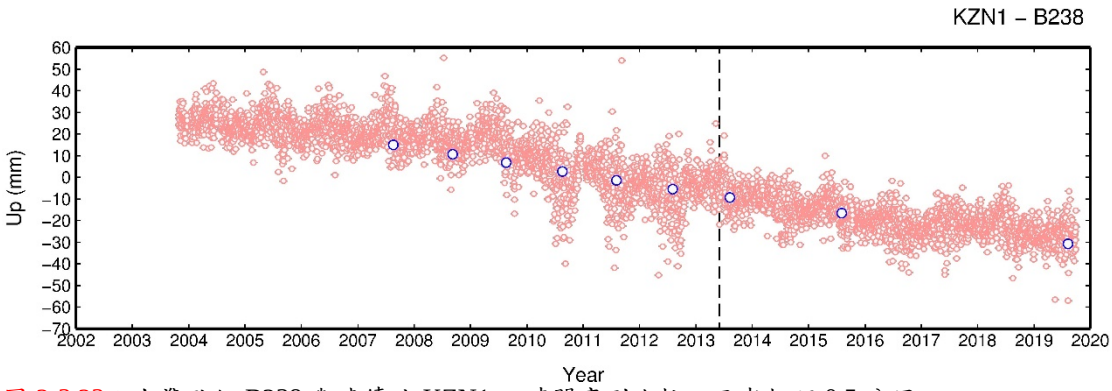


圖 2-3.23：水準點位 B238 與連續站 KZN1 之時間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

Figure 2-3.23: Time series comparison between leveling bench mark B238 and continuous GPS station KZN1. The distance between the two is 0.5 Km.

2-3-4-4 王功-草屯-埔里測線

王功-草屯-埔里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，總長約47 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2019 年共計有 16 次施測。本測線以GPS 連續站 CAOT 之 2013 年地震前垂直速率（-2.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-0.3 mm/yr）與 GS83 之 2013 年至今之垂直速率（1.9 mm/yr），作為約制點來校正 T075 與 B280 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.24 及圖 2-3.25）。

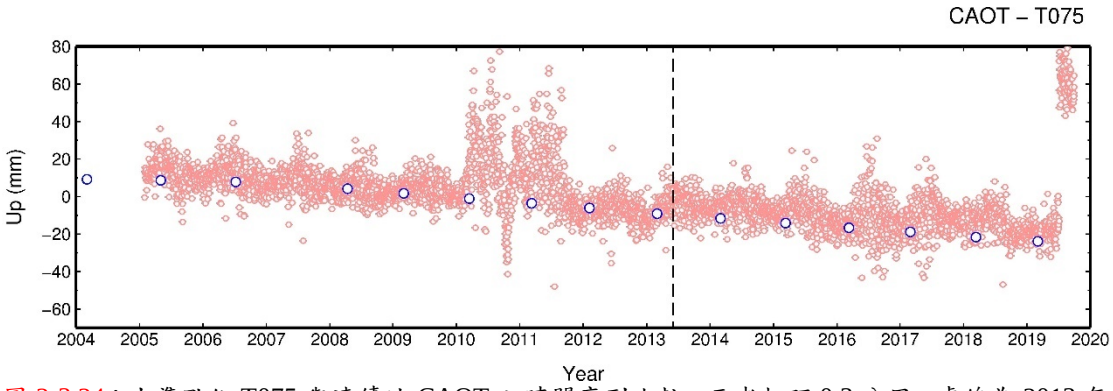


圖 2-3.24：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.24: Time series comparison between leveling bench mark T075 and continuous GPS station CAOT. The distance between the two is 0.3 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

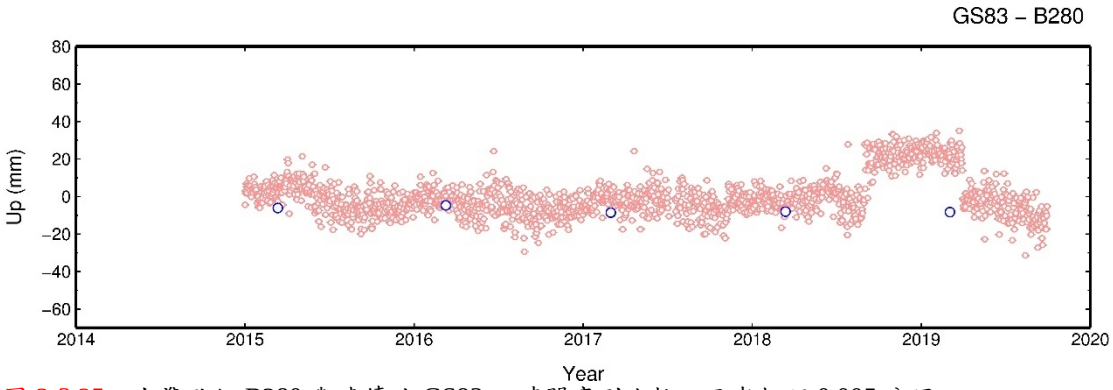


圖 2-3.25：水準點位 B280 與連續站 GS83 之時間序列比較，兩者相距 0.005 公里。

Figure 2-3.25: Time series comparison between leveling bench mark B280 and continuous GPS station GS83. The distance between the two is 0.005 Km.

2-3-4-5 北斗至水里測線

北斗-水里測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 38 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2019 年共計有 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 VR03 之 2013 年地震前垂直速率（-6.4 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-4.7 mm/yr），作為約制點來校正 G297 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.26）。

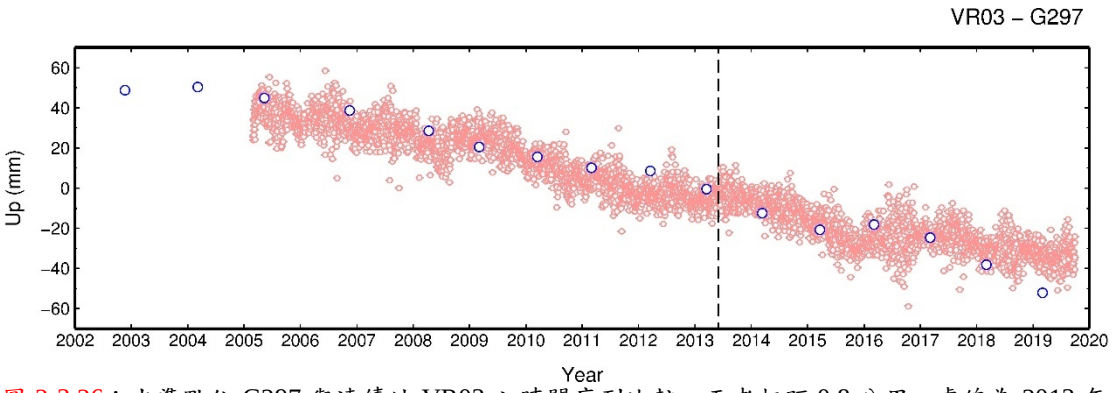


圖 2-3.26：水準點位 G297 與連續站 VR03 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.26: Time series comparison between leveling bench mark G297 and continuous GPS station VR03. The distance between the two is 0.8 Km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

2-3-5 嘉南地區精密水準解算

嘉南地區完成的精密水準測線分別為金湖至瑞峰、北門至楠西、善化至關廟、安平至龍崎和玉井至新化測線。

2-3-5-1 金湖至瑞峰測線

金湖至瑞峰測線橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及觸口斷層，總長約 54 公里，2003 年至 2019 年間共進行 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17 之垂直速率（2.3 mm/yr），作為約制點來校正 G776 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.27）。G722、G726、G740、G769、G772 樁點遺失（附錄 12）。

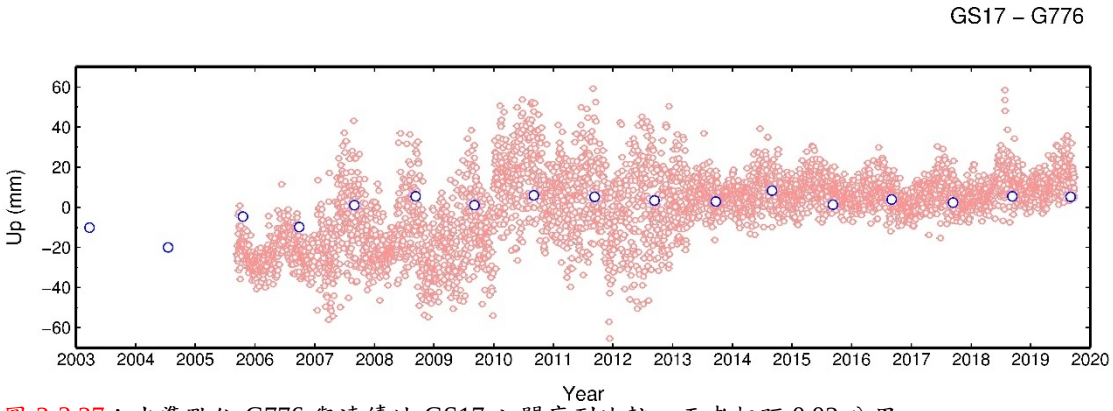


圖 2-3.27：水準點位 G776 與連續站 GS17 之間序列比較，兩者相距 0.02 公里。

Figure 2-3.27: Time series comparison between leveling bench mark G776 and continuous GPS station GS17. The distance between the two is 0.02 Km.

2-3-5-2 北門至楠西測線

北門-楠西測線橫跨六甲斷層與觸口斷層，測線長約 40 公里(投影至剖面的長度)，從 2003 年至 2019 年共計有 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS44 之垂直速率（6.4 mm/yr)，作為約制點來校正 I088 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.28)。G824 樁點損毀（附錄 12)。

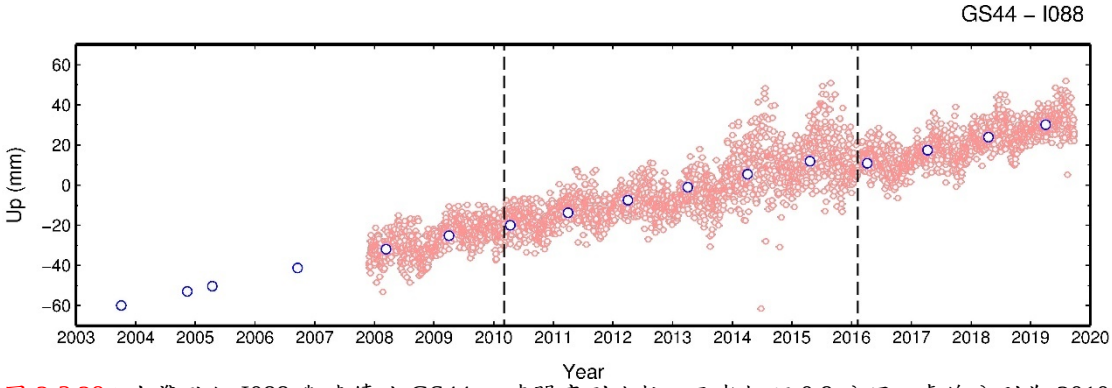


圖 2-3.28：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.28: Time series comparison between leveling bench mark I088 and continuous GPS station GS44. The distance between the two is 0.9 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

2-3-5-3 善化至關廟測線

善化至關廟測線由北往南走橫跨新化斷層，測線長約 22 公里，從 2003 年至 2019 年共計有 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之 2010 年地震前垂直速率（-4.0 mm/yr）、震後至 2016 年垂直速率（-0.4 mm/yr）及 GS89 之 2016 年至今之垂直速率（-1.6 mm/yr），作為約制點來校正 G374 與 B299 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.29 及圖 2-3.30）。G374 樁點損毀（附錄 12）。

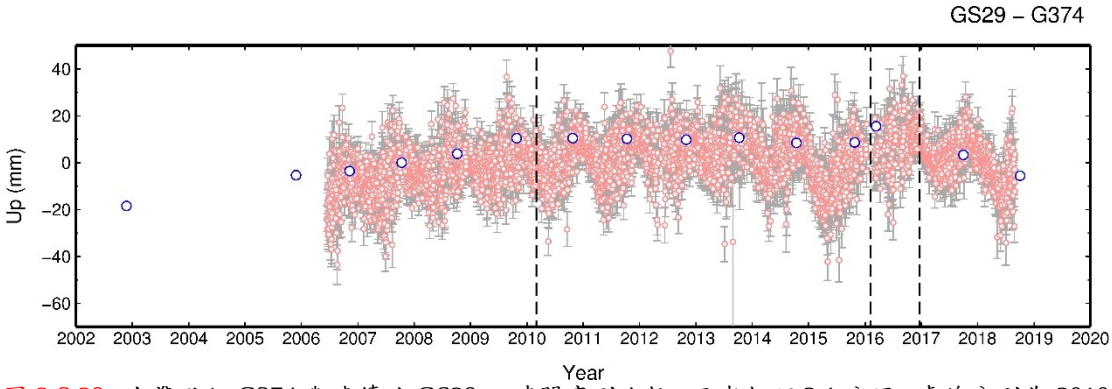


圖 2-3.29：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震、2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.29: Time series comparison between leveling bench mark G374 and continuous GPS station GS29. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

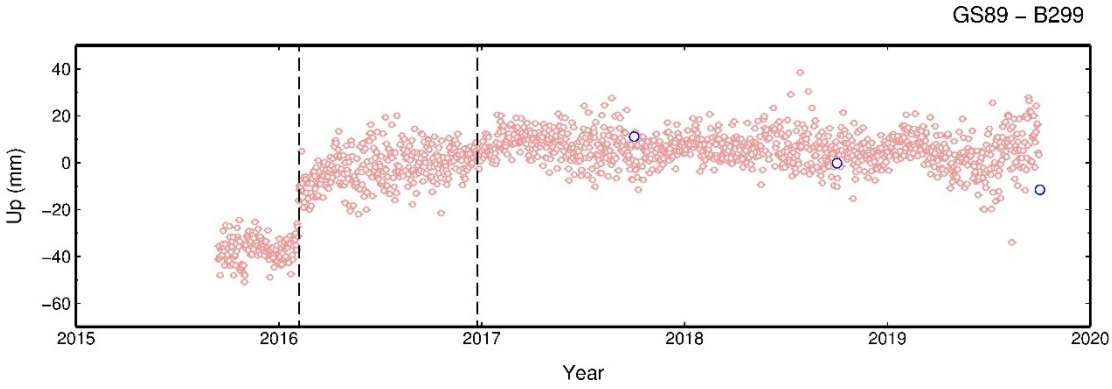


圖 2-3.30：水準點位 B299 與連續站 GS89 之時間序列比較，兩者相距 0.002 公里。虛線分別為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.30: Time series comparison between leveling bench mark B299 and continuous GPS station GS89. The distance between the two is 0.002 Km. The left dashed line is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

2-3-5-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨臺南台地、後甲里斷層與龍船斷層，從臺南安平區至龍崎區，2013 年起延伸至高雄市內門區，全長約 33 公里，從 2001 年至 2019 年共計有 20 次施測。本測線以 GPS 連續站 CK01 之 2010 年地震前垂直速率（-2.1 mm/yr）、GS73 之 2010 年震後至 2016 年垂直速率（-3.7 mm/yr）及 GS73 與 CKSV 之 2016 年至今之垂直速率（5.9 mm/yr、1.1 mm/yr），作為約制點來校正 G435、TN04、G358 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.31~33）。X210 樁點損毀（附錄 12）。

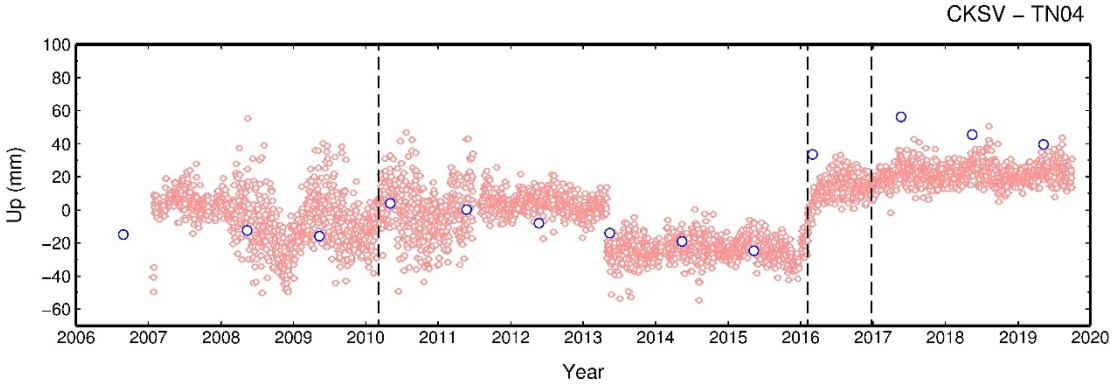


圖 2-3.31：水準點位 TN04 與連續站 CKSV 之時間序列比較，兩者相距 1.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。
Figure 2-3.31: Time series comparison between leveling bench mark G435 and continuous CKSV station GS89. The distance between the two is 1.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

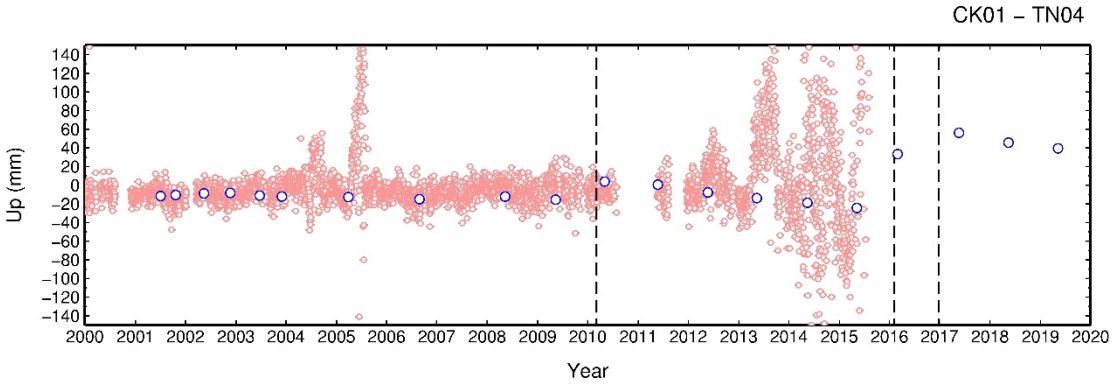


圖 2-3.32：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。
Figure 2-3.32: Time series comparison between leveling bench mark TN04 and continuous GPS station CK01. The distance between the two is 1.4 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the middle one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

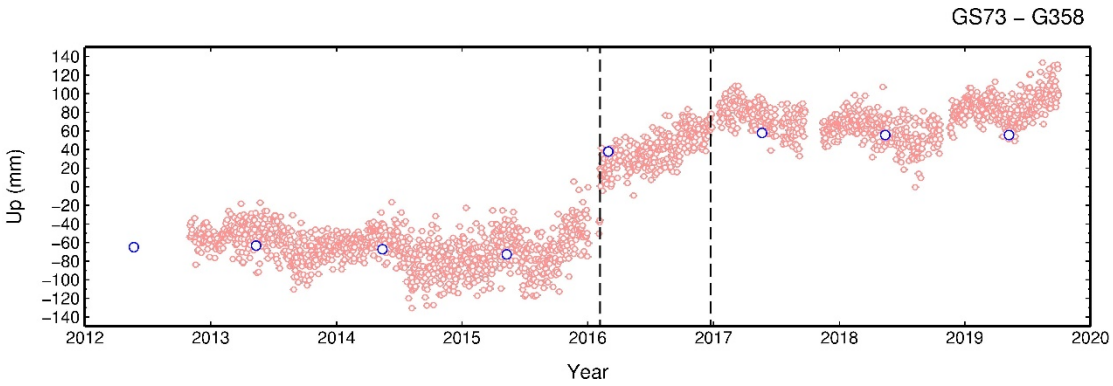


圖 2-3.33：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較，兩者相距 1.0 公里。虛線分別為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.33: Time series comparison between leveling bench mark G358 and continuous GPS station GS73. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

2-3-5-5 玉井至新化測線

玉井至新化精密水準測線，路線長約 25 公里，包括 55 個點位。此測線的 J006（垂直速率-0.2 mm/yr）與善化至關廟測線共點，所以台 20_新化至玉井測線、善化至關廟與安平至龍崎測線可以組成更好的垂直速度場監測網。GH78 樁點損毀（附錄 12）。

2-3-6 高屏地區精密水準解算

高屏地區完成的精密水準測線分別為路竹至茂林、岡山至安坡、善佳冬至七佳測線共三條。

2-3-6-1 路竹至茂林測線

路竹-茂林測線橫跨小岡山、龍船、旗山及潮州斷層，路線長約 50 公里(投影至剖面的長度)，從 2002 年至 2019 年共計有 16 次施測。本測線以 GPS 連續站 NEMN 之 2010 年地震前垂直速率（5.2mm/yr）、NEMN、GS55 與 LIAN 之 2010 年震後至 2016 年垂直速率（8.8 mm/yr、-0.8 mm/yr、-2.8 mm/yr）及 GS55 與 LIAN 之 2016 年震後至今垂直速率（-3.3 mm/yr、2.0 mm/yr），作為約制點來校正 R016 與 G3027 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.34 及圖 2-3.36）。GG33 樁點因所在區域進行新建工程架設圍籬而未能進行觀測。

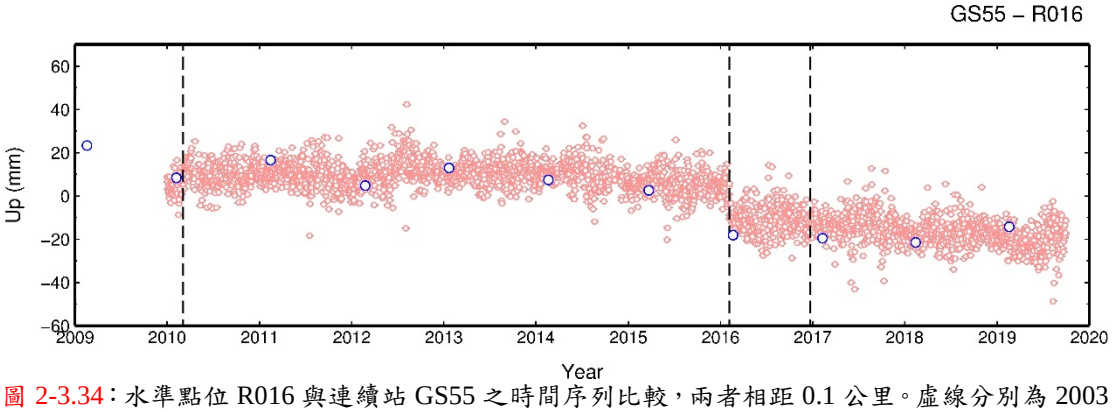


圖 2-3.34：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2003 年台東成功地震、2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.34: Time series comparison between leveling bench mark R016 and continuous GPS station GS55. The distance between the two is 0.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

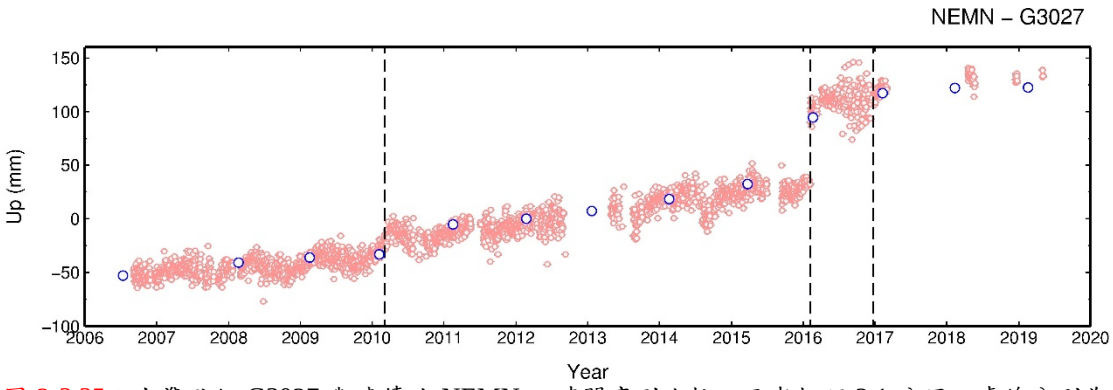


圖 2-3.35：水準點位 G3027 與連續站 NEMN 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2003 年台東成功地震、2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.35: Time series comparison between leveling bench mark G3027 and continuous GPS station MEMN. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

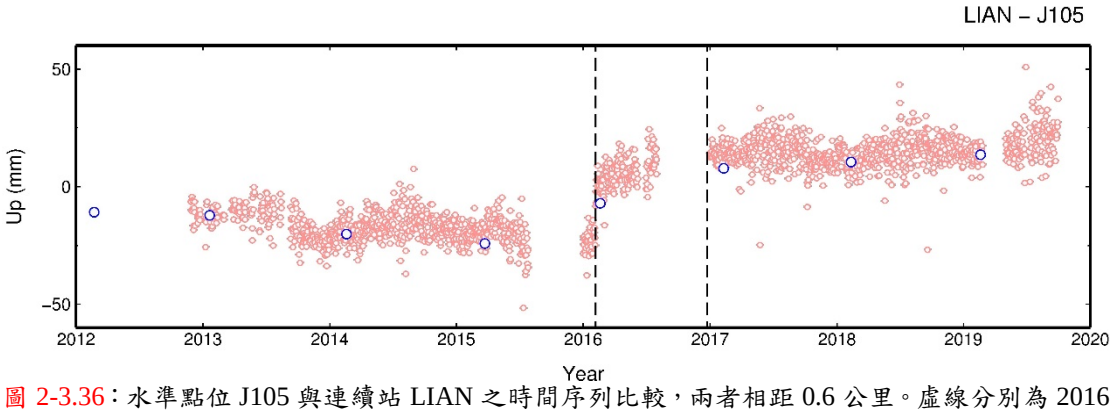


圖 2-3.36：水準點位 J105 與連續站 LIAN 之時間序列比較，兩者相距 0.6 公里。虛線分別為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.36: Time series comparison between leveling bench mark G3027 and continuous GPS station MEMN. The distance between the two is 2.1 Km. The left dashed line is the left one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

2-3-6-2 岡山至安坡測線

岡山至安坡測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 36 公里，從 2004 年至 2019 年共計 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS77 及 AKND 之垂直速率（1.9 mm/yr、-1.4 mm/yr），作為約制點來校正 G536 與 G526 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.37 及圖 2-3.38）。T049、GH22、G562 樁點損毀（附錄 12）。

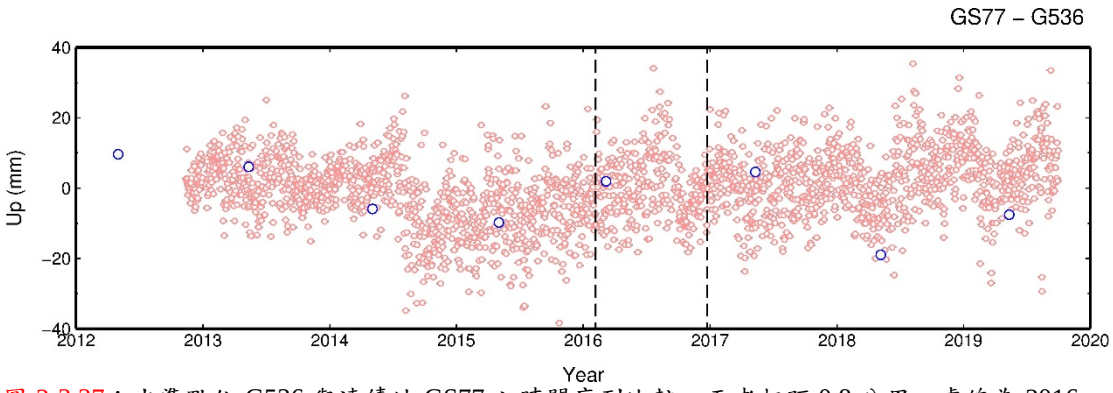


圖 2-3.37：水準點位 G536 與連續站 GS77 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.37: Time series comparison between leveling bench mark G536 and continuous GPS station GS77. The distance between the two is 0.8 Km. The dashed line is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

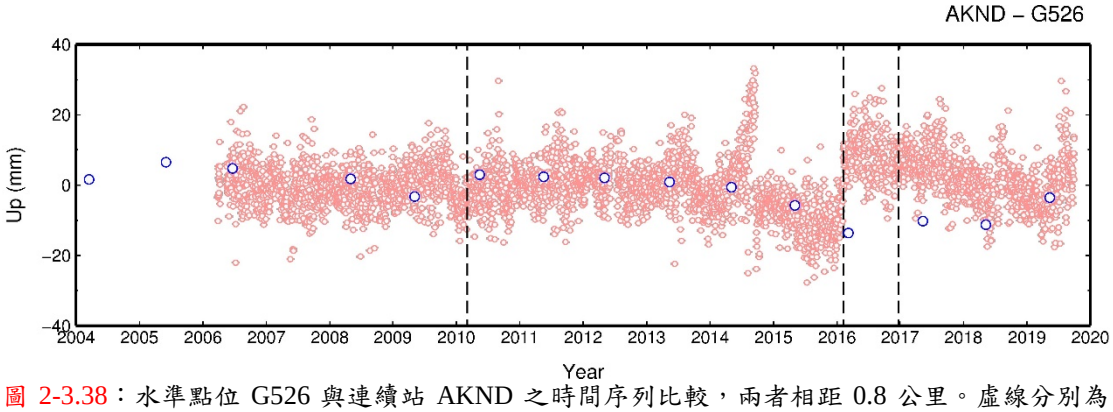


圖 2-3.38：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.38: Time series comparison between leveling bench mark G526 and continuous GPS station AKND. The distance between the two is 0.8 Km. The left dashed line is the March 4th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

2-3-6-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮州斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2019 年間共進行了 15 次的施測，主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GPS 連續站 CLON 之垂直速率（-15.8 mm/yr），作為約制點來校正 GC85 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.39）。GC89、GC75、GC74 樁點遺失（附錄 12）。

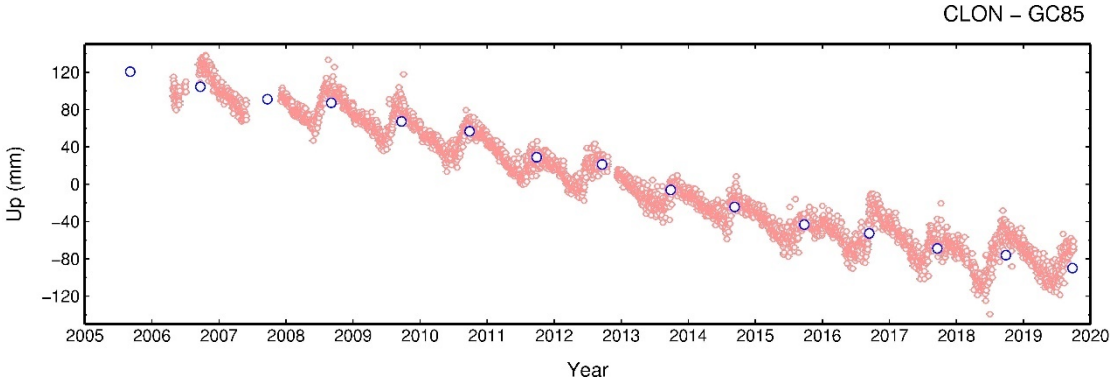


圖 2-3.39：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之間序列比較，兩者相距 0.5 公里。

Figure 2-3.39: Time series comparison between leveling bench mark GC85 and continuous GPS station CLON. The distance between the two is 0.5 Km.

2-3-7 恆春地區精密水準解算

恆春半島地區共規劃有 2 條橫跨恆春斷層的精密水準測線，分別是北邊的恆春西台地至佳樂水測線（投影至剖面的長度約 15 公里）以及南邊的台 26_南樹林至鵝鑾鼻測線（投影至剖面的長度約 13 公里）。至 2019 年止，各有 16 次的測量資料。

2-3-7-1 恆春西臺地至佳樂水測線

精密水準資料處理時，恆春西台地至佳樂水測線以 GPS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-2.3 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（-7.0 mm/yr）及 2010 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），作為約制點來校正 G670 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.40）。G665、G674 樁點損毀（附錄 12）。

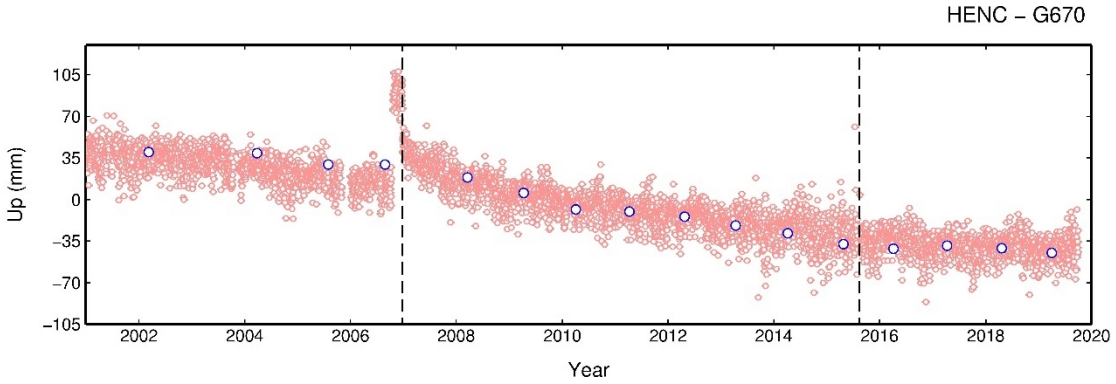


圖 2-3.40：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.40: Time series comparison between leveling bench mark G670 and continuous GPS station HENC. The distance between the two is 0.1 Km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

2-3-7-2 南樹林至鵝鑾鼻測線

台 26_南樹林至鵝鑾鼻則以 GPS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（-0.4 mm/yr）、震後至 2010 年垂直速率（1.7 mm/yr）與 GS85 之 2010 年至今之垂直速率（0.3 mm/yr），作為約制點來校正 Q014 與 G656 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.41 及圖 2-3.42）。

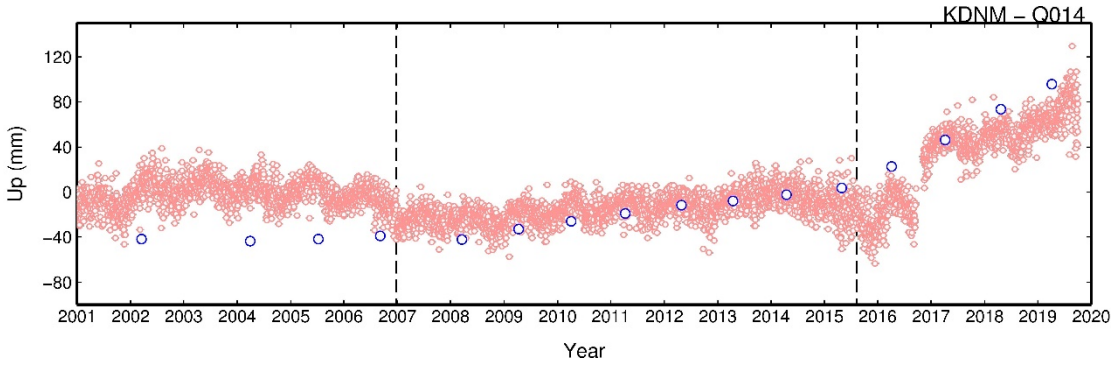


圖 2-3.41：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.41: Time series comparison between leveling bench mark Q014 and continuous GPS station KDNM. The distance between the two is 0.6 Km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

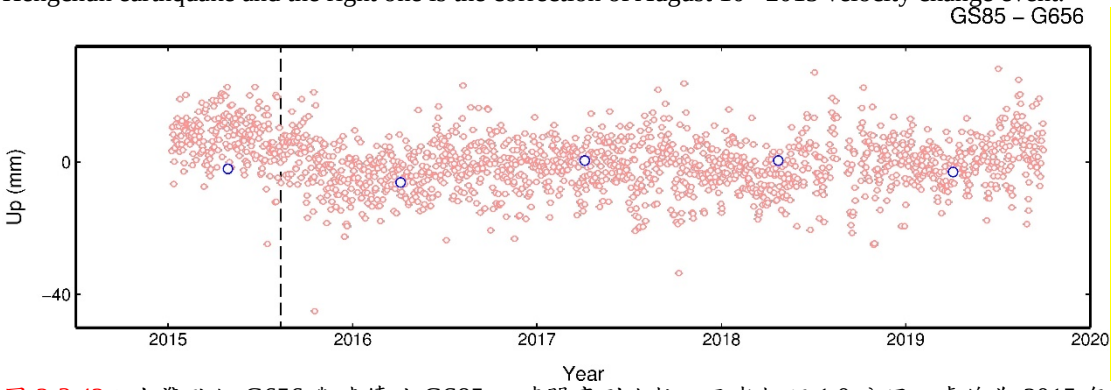


圖 2-3.42：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較，兩者相距 1.0 公里。虛線為 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.42: Time series comparison between leveling bench mark G656 and continuous GPS station GS85. The distance between the two is 0.6 Km. The dashed line is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

2-3-8 東部地區精密水準解算

東部地區完成的精密水準測線分別為嶺頂至龍澗、光復至豐濱、紅葉至靜浦和東成至富岡測線。

2-3-8-1 嶺頂至龍澗測線

嶺頂至瀧澗測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 20 公里，從 2004 年至 2019 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 YENL 之 2009 年地震前垂直速率（-9.4 mm/yr）、2009 年震後至 2018 年垂直速率（-9.2 mm/yr）及 2018 年至今之垂直速率（-1.3 mm/yr），作為約制點來校正 G970 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.43）。G971 樁點損毀（附錄 12）。

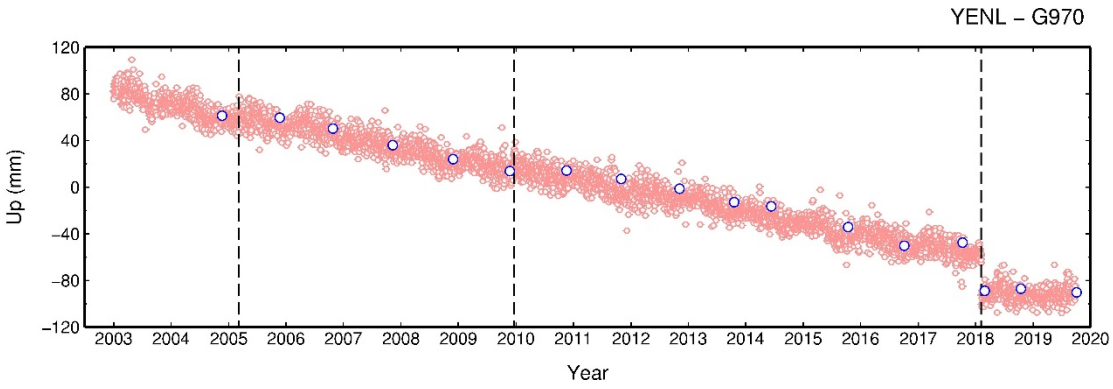


圖 2-3.43：水準點位 G971 與連續站 YENL 之時間序列比較，兩者相距 2.4 公里。左邊虛線為 2005 年 3 月 6 日蘇澳地震；中間虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.43: Time series comparison between leveling bench mark G971 and continuous GPS station YENL. The distance between the two is 2.4 Km. The left dashed line is the March 6th 2005 Suao earthquake, the middle one is the December 19th 2009 Hualien earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

2-3-8-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層（圖 2-3.44），測線長約 12 公里，從 2004 年至 2019 年共計有 17 次施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之 2009 年地震前垂直速率（-14.9 mm/yr）、2009 年震後至 2013 年垂直速率（-7.6 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-11.3 mm/yr），作為約制點來校正 G991 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。R037 樁點遺失（附錄 12）。

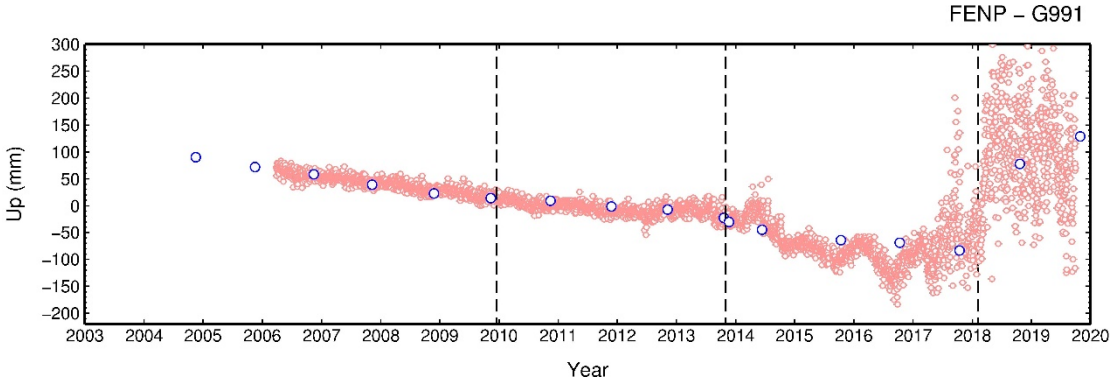


圖 2-3.44：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.44: Time series comparison between leveling bench mark G991 and continuous GPS station FENP. The distance between the two is 1.0 Km, the middle one is the December 19th 2009 Hualien earthquake and the right one is the October 31st 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

2-3-8-3 紅葉至靜浦測線

紅葉至靜浦測線橫跨玉里斷層、瑞穗斷層及奇美斷層（圖 2-3.45），測線長約 18 公里，2004 年至 2018 年間進行共 16 次的施測，其中 2013 年因為瑞穗地震，故在該年 10、11 月連續進行施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（0.6 mm/yr），作為控制點來校正 GA22 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。

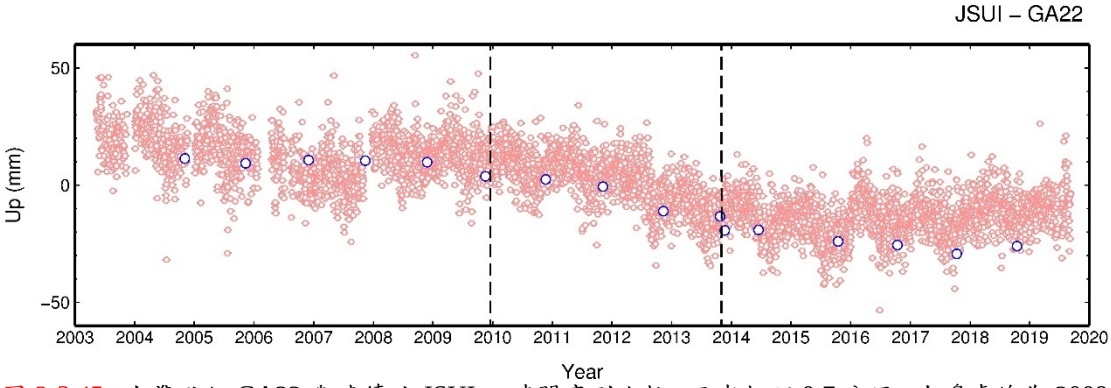


圖 2-3.45：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 2-3.45: Time series comparison between leveling bench mark GA22 and continuous GPS station JSUI. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the March 6th 2009 Suao earthquake and the right one is the October 31st 2013 Ruisui earthquake.

2-3-8-4 東成至富岡測線

東成至富岡測線橫跨鹿野斷層及利吉斷層(圖 2-3.46)，測線長約 14 公里，2009 年至 2018 年間共進行 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（0.003 mm/yr），作為控制點來校正 A086 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。A087 樁點遺失（附錄 12）。

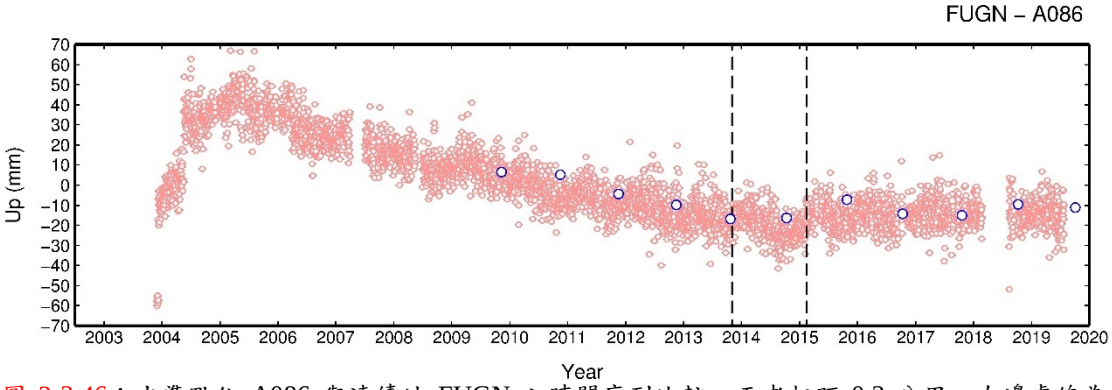


圖 2-3.46：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日台東外海地震。

Figure 2-3.46: Time series comparison between leveling bench mark A086 and continuous GPS station FUGN. The distance between the two is 1.0 Km. The left dashed line is the October 31st 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 14th 2015 Taitung offshore earthquake.

2-3-9 宜蘭地區精密水準解算

宜蘭地區完成的精密水準測線分別為梗枋至東澳測線。

2-3-9-1 梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長約 44 公里（圖 2-3.47），2011 年至 2019 年間共進行 9 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS72 之 2018 年地震前垂直速率（-7.9 mm/yr）與 2018 年至今垂直速率（-7.1 mm/yr），作為控制點來校正 GG78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率。GG67 樁點損毀（附錄 12）。

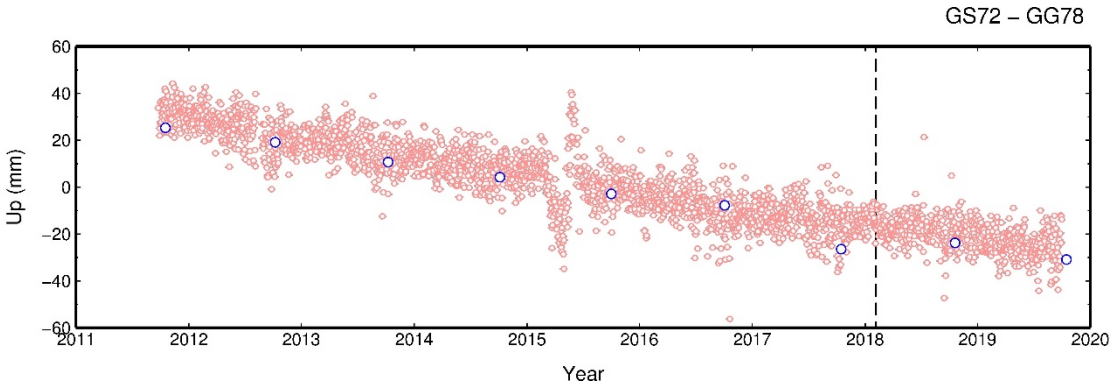


圖 2-3.47：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較，兩者相距 1.1 公里。虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.47: Time series comparison between leveling bench mark G971 and continuous GPS station YENL. The distance between the two is 1.1 Km. The dashed line is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站與精密水準觀測成果分析

2-4-1 臺北地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之臺北地區（圖 2-4.1）觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 77 點位施測。藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GPS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列。

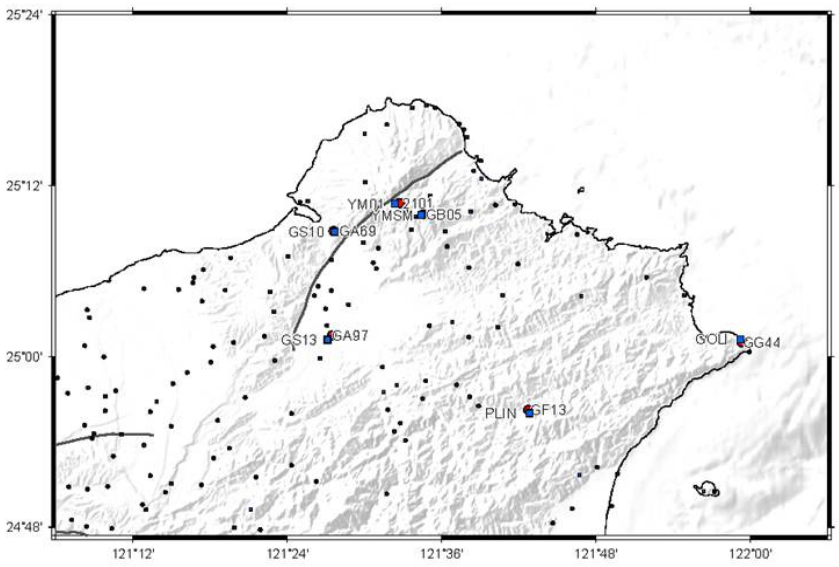


圖 2-4.1：臺北地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.1: Taipei area GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.2 所示，黑色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2019 年之 GPS 移動站速度場，由結果可知本區速度場 2002－2019 大致朝東北向運動為主，由南向北略呈順時針旋轉，速度量值集中在 3.2 - 4.6 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.3 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。

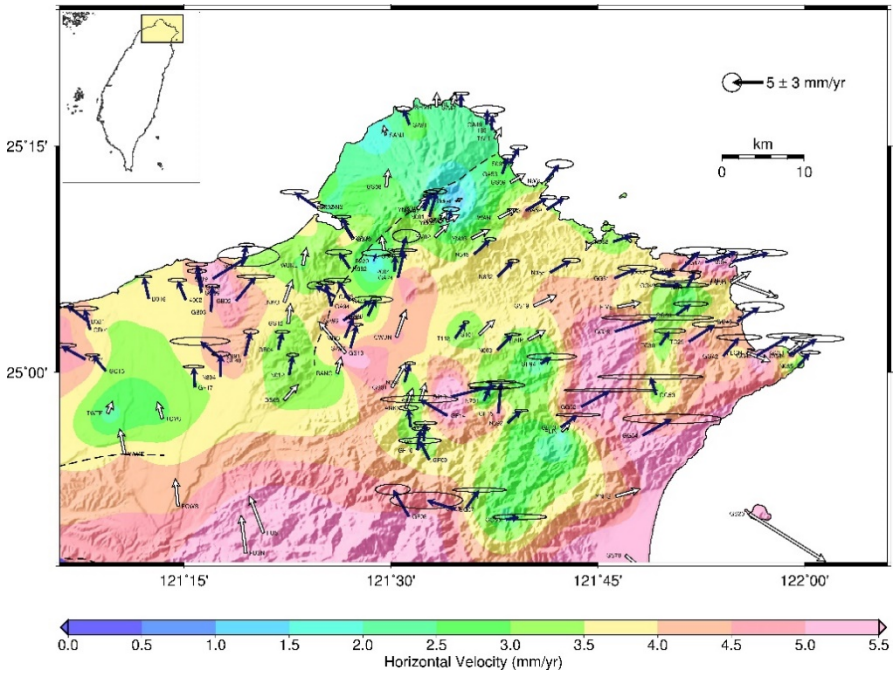


圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場，彩色色階為 2002~2019 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002~2019 年 GPS 移動站速度場，白色箭號為 2002~2019 年 GPS 連續站速度場。

Figure 2-4.2: Taipei area GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2019. The black arrows are campaign-mode GPS velocity field and the white arrows are continuous GPS velocity field from 2002~2019.

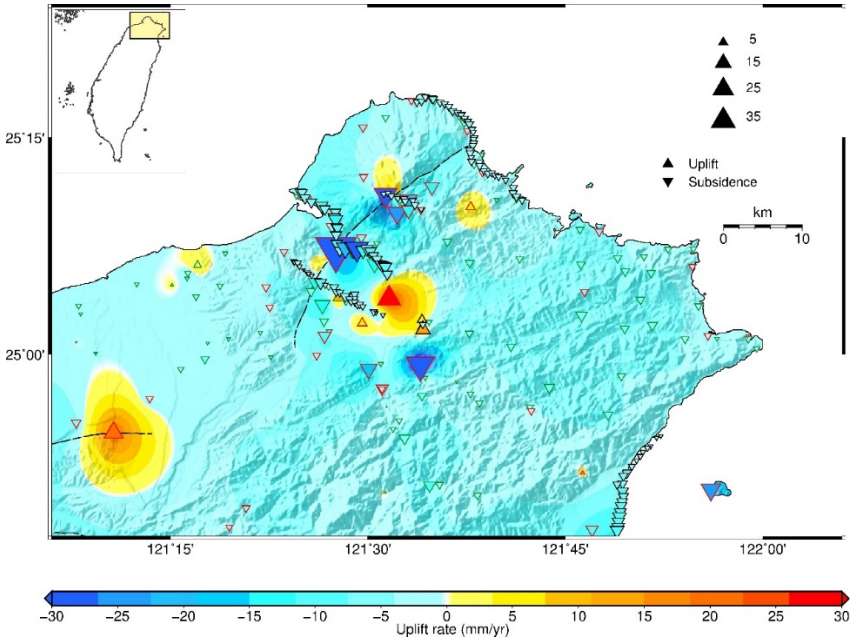


圖 2-4.3：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站，GPS 站觀測時間為 2002-2019 年，精密水準站觀測時間為 2004-2019 年。

圖 2-4.3: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2019 in Taipei area. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame. The duration of continuous GPS observation is from 2002-2019; while pricise leveling is from 2004-2019.

2-4-2 桃竹苗地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之桃竹苗地區（圖 2-4.4）觀測資料進行分析，截至十月底為止完成 GPS 移動站 104 點，以及 4 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，桃竹苗地區動站與連續站坐標時間序列型態皆相符。

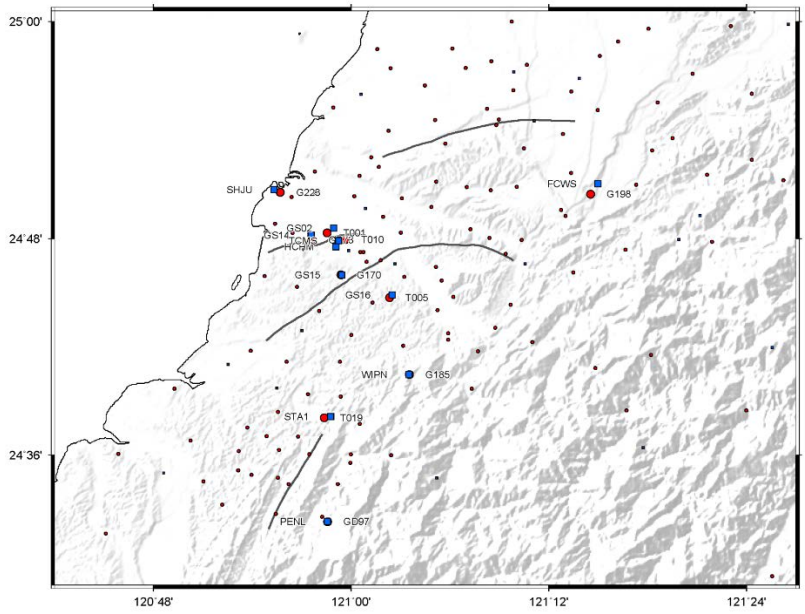


圖 2-4.4：桃竹苗地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.4: Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

桃竹苗地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.5 所示，由結果可知本區速度場 2002－2019 年間朝西北向運動為主，量值大致上約為 3.6~ 5.5 mm/yr（圖 2-4.5）。

垂直速度場如圖 2-4.6 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10 mm/yr 內。

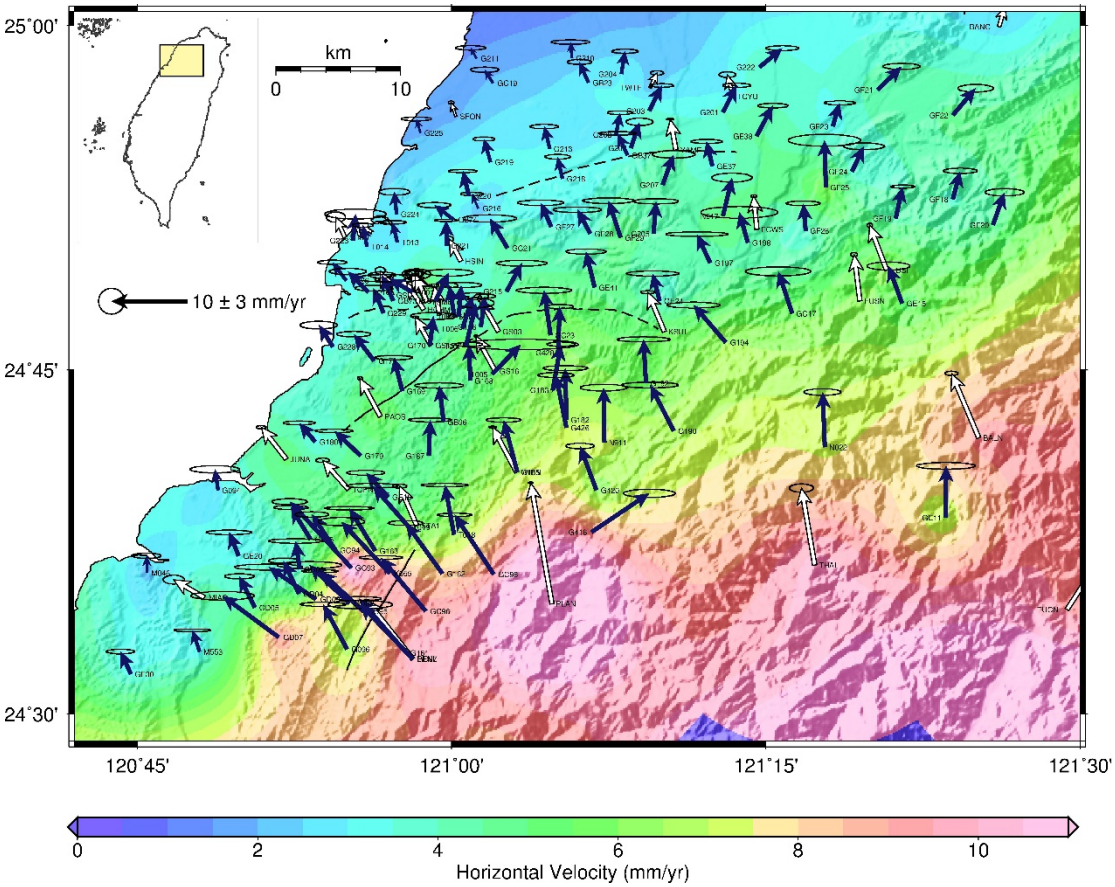


圖 2-4.5：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2019 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.5: Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2019.

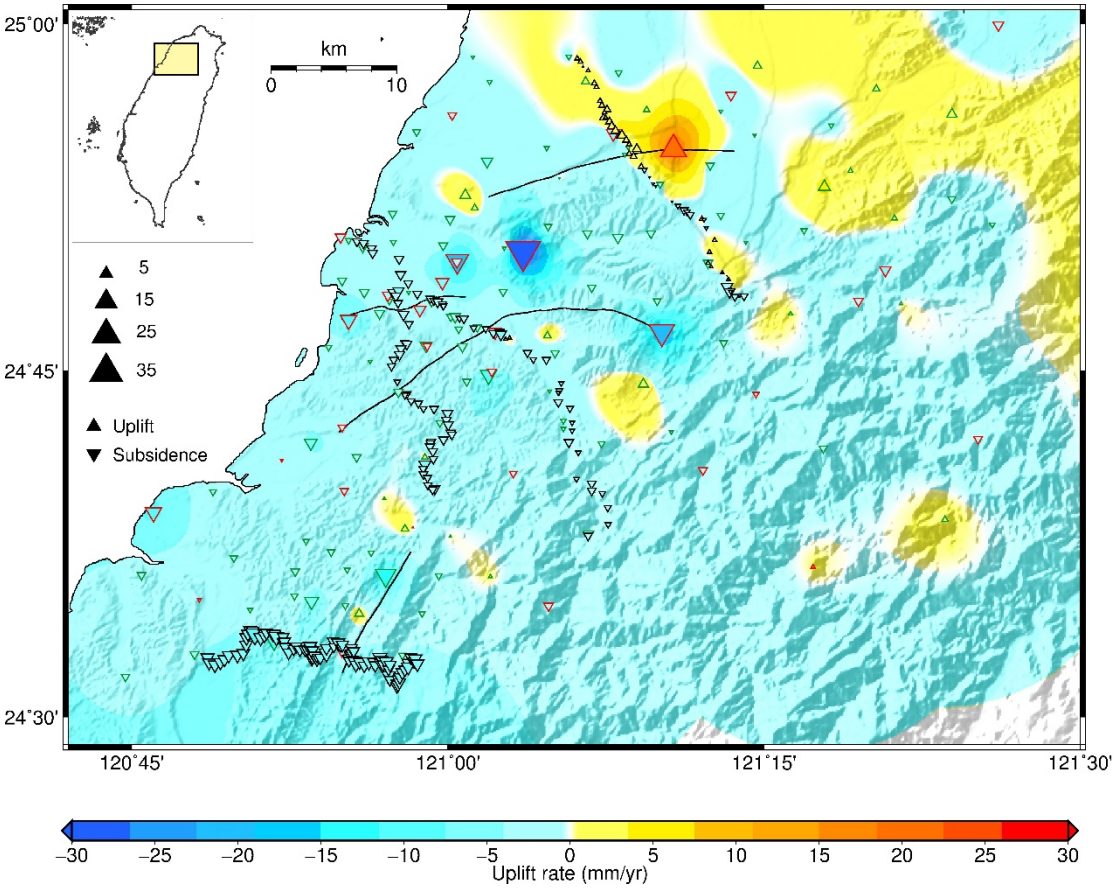


圖 2-4.6：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2019 年垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 2-45.6: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2019 in Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-3 中部地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之中部地區（圖 2-4.7）觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 151 點，以及 5 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，中部地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

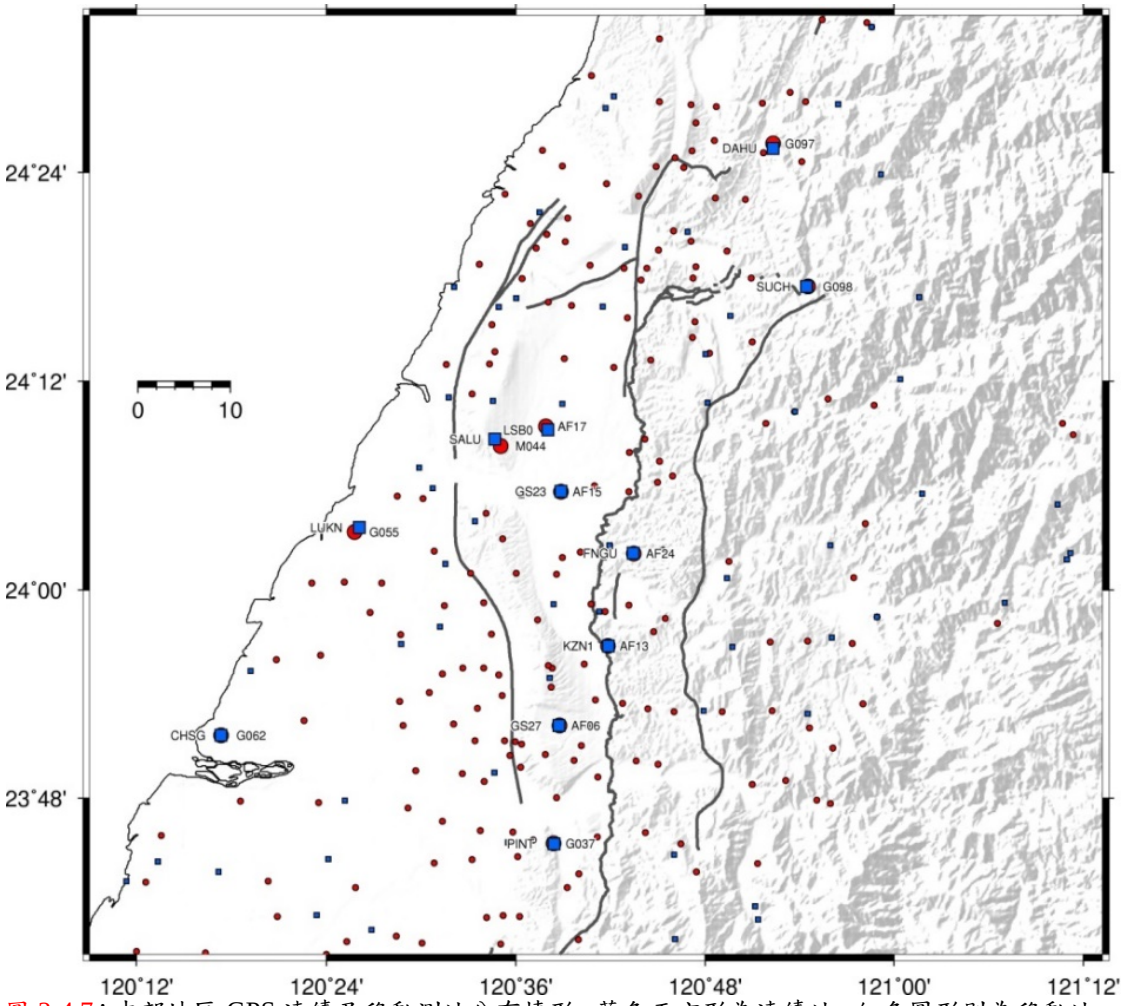


圖 2-4.7：中部地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。
Figure 2-4.7: Central Taiwan area GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

檢視中部地區 GPS 移動站坐標時間序列，2013 年 6 月 ML 6.5 之南投地震，改變了本地區之速度場。因此在估算臺灣中部地區速度場時，本研究將 2002－2019 年分為 2002－2013 年以及 2013－2019 年兩個時間段，分別估算速度場。

中部地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.8 所示，由結果可知本區速度大

致朝西北向運動，2004-2013 年速度約為 3.77 ~ 10.85 mm/yr，2013-2019 年速度約為 3.35 ~ 10.73 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.9，台中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、南投地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，第一段速度值約為 38.9 ~ 107.5 mm/yr，第二段速度值約為 28.5 ~ 51.9mm/yr。進入南投山區則呈抬升，第一段速度值約為 12.7 ~ 16.5 mm/yr，第二段速度值約為 7.5 ~ 9.1mm/yr。

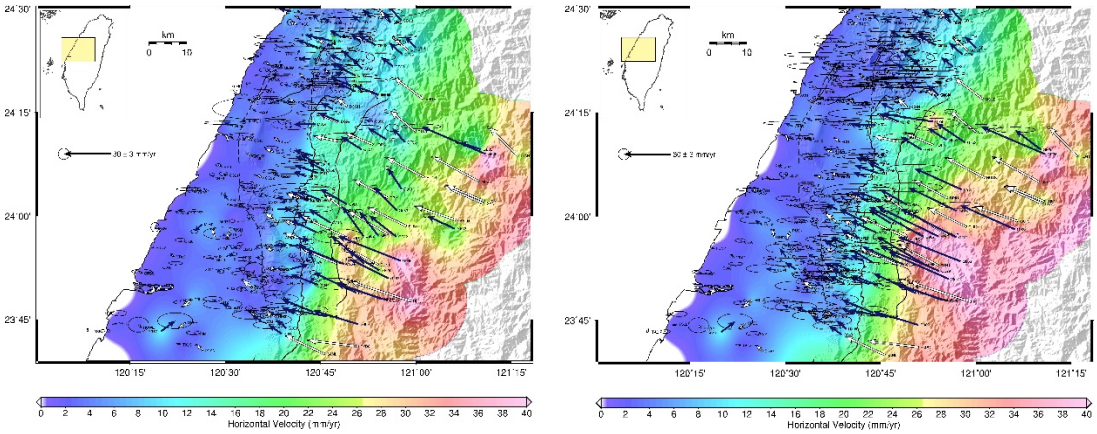


圖 2-4.8：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2004~2013 年速度場，右圖表示震後 2013~2019 年速度場。

Figure 2-4.8: Central Taiwan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2004~2013; while the right one is from 2013~2019.

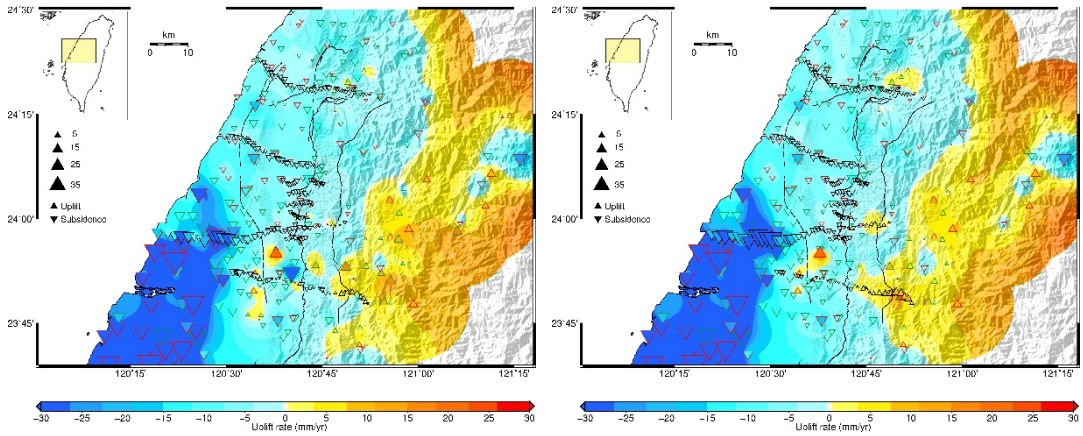


圖 2-4.9：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左表示 2002-2013 年速度場，右表示 2013-2019 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.9: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Central Taiwan. The left figure is the velocity field from 2004~2013; while the right one is from 2013~2019. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-4 嘉南地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 171 點，以及 5 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，嘉南地區（圖 2-4.10）移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

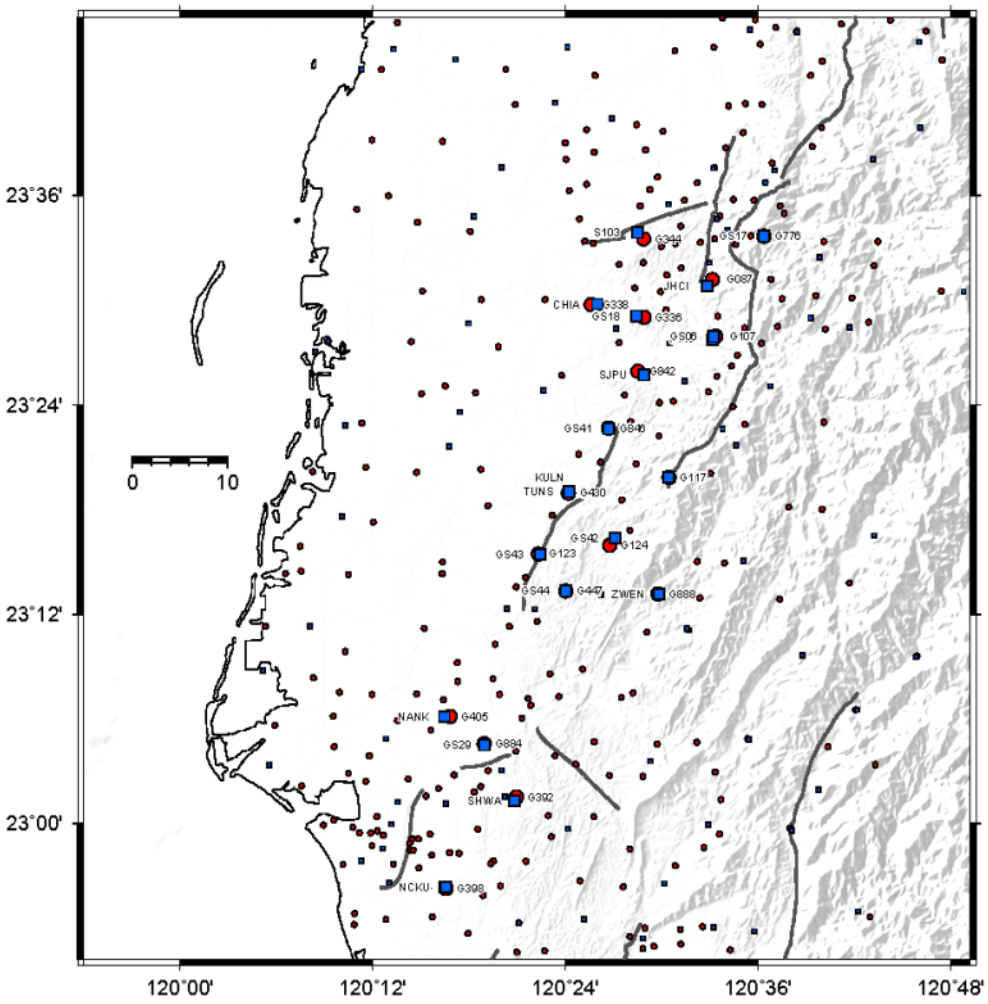


圖 2-4.10：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.10: Chiayi, Tainan areas GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

嘉南地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.11 和圖 2-4.12，雲林、嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度約為 15 至 20 mm/yr，進入山區則有約 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之沿海也呈現約 10 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0-4 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20 mm/yr 的抬升速度。

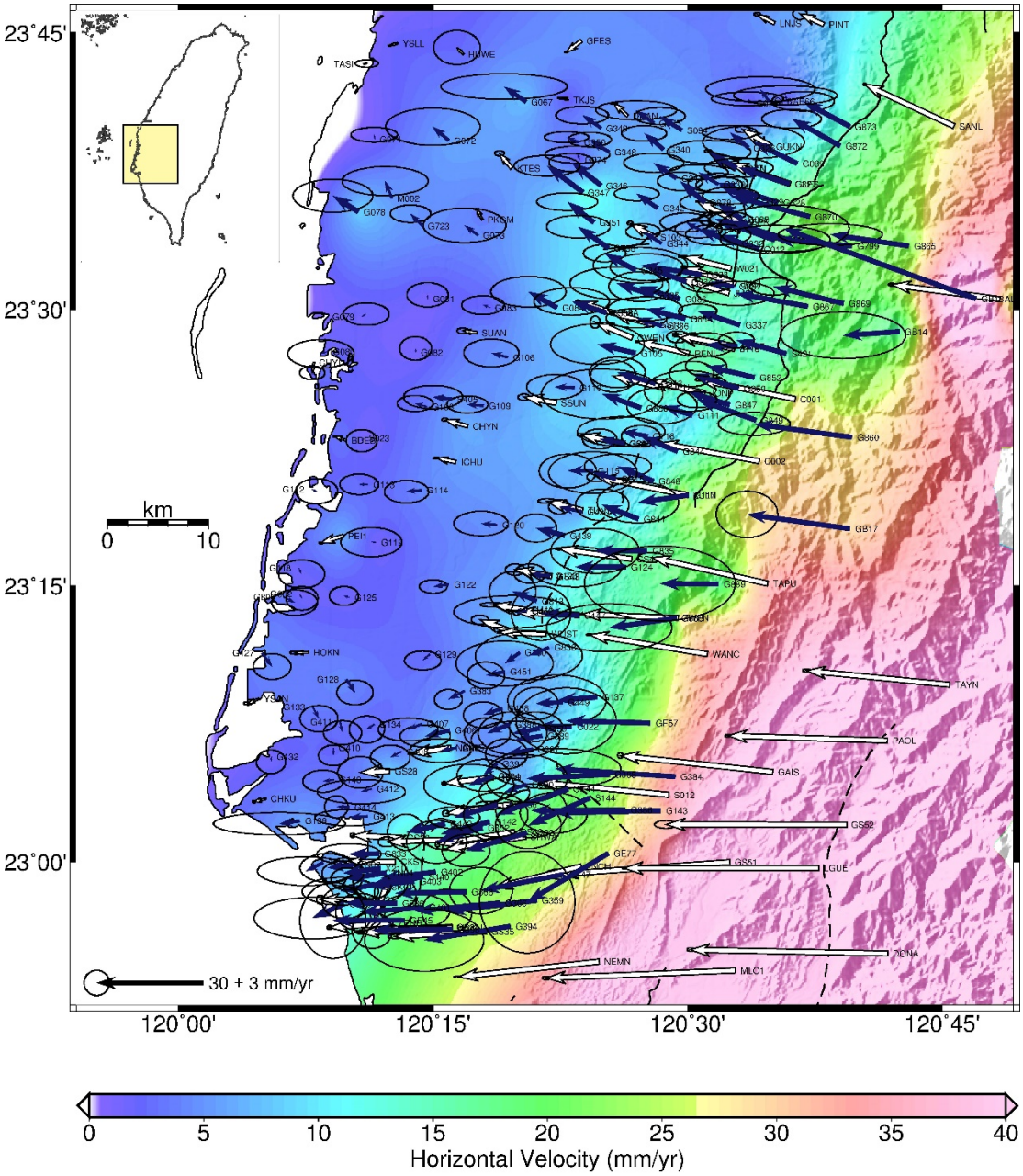


圖 2-4.11：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2019 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.11: Chiayi, Tainan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2019.

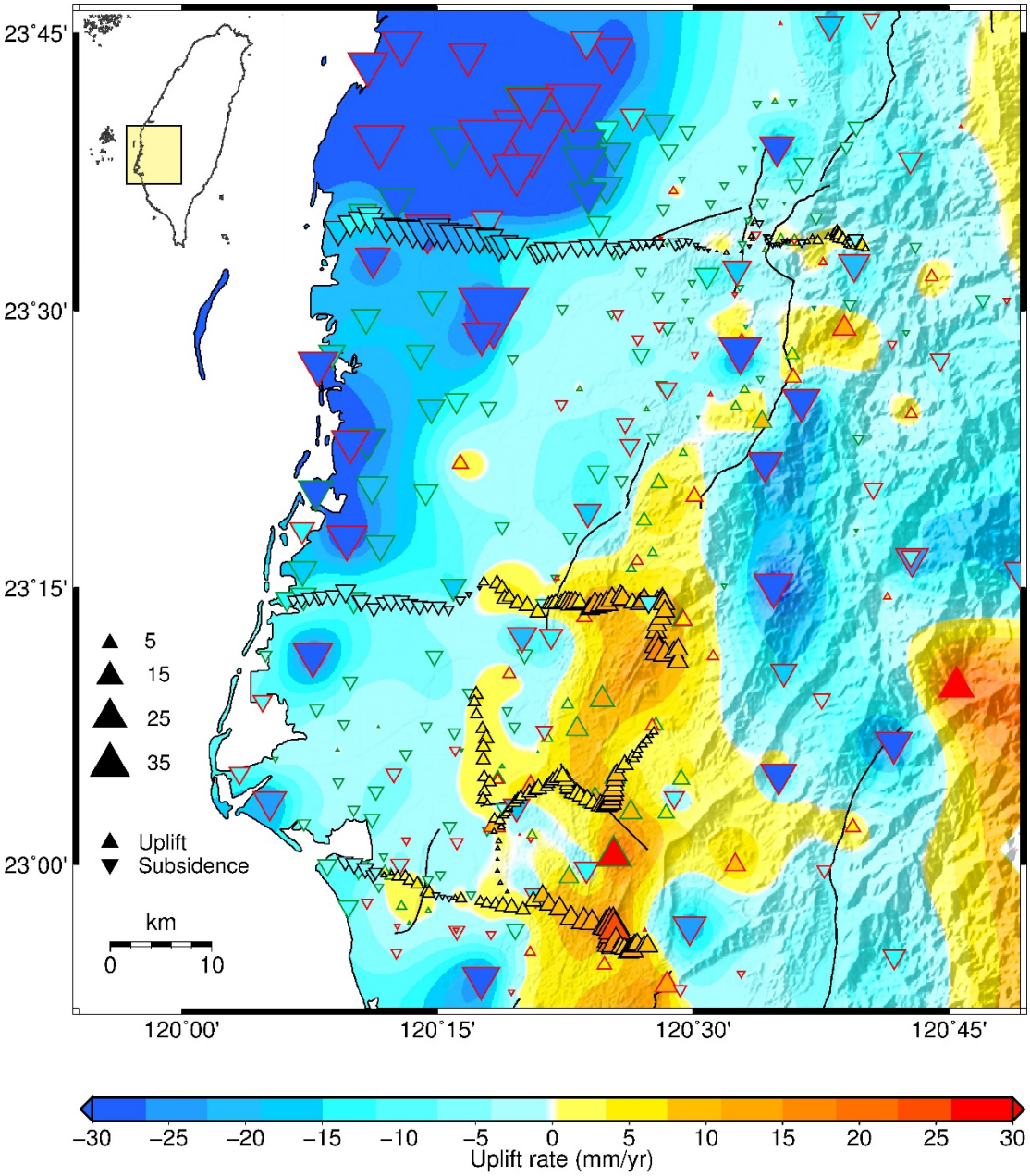


圖 2-4.12：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，圖表示 2002~2019 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 2-4.12: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2019 in Chiayi, Tainan areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-5 高屏地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 106 點，以及 3 條精密水準測線之施測，藉由移動站與該地區連續站解算結果之坐標時間序列可知，高屏地區（圖 2-4.13）由坐標時間序列比對可知，移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

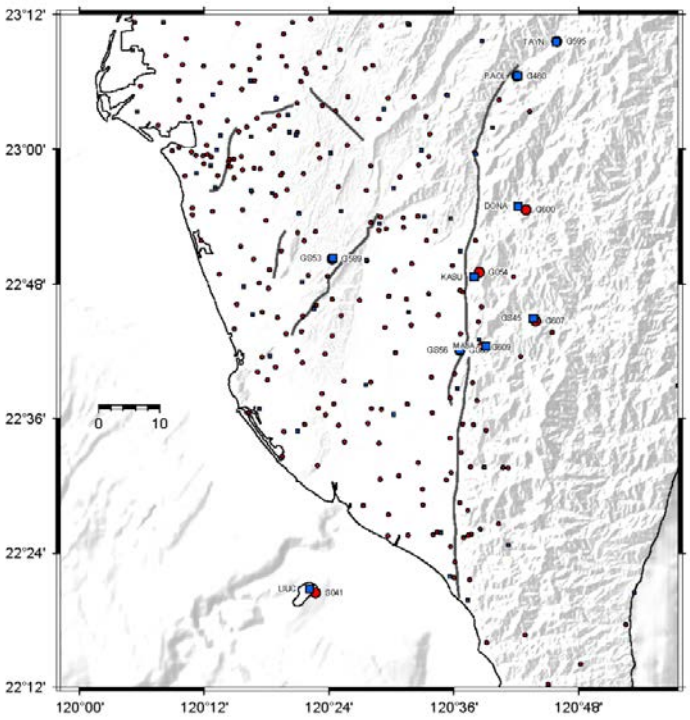


圖 2-4.13：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.13: Kaohsiung and Pingtung areas GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

高屏地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.14 和圖 2-4.15，因 2010 甲仙地震，本研究將 2002－2010 年分為 2010－2019 年兩個時間段分別估算速度場。高雄地區的車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，小岡山斷層西側有約 10 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0 至 3 mm/yr。

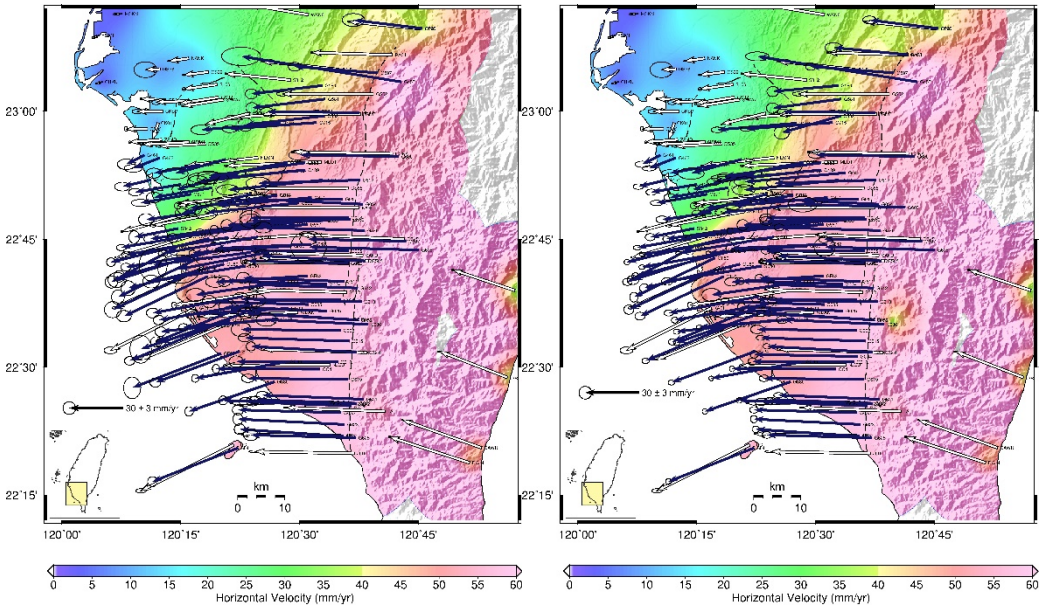


圖 2-4.14：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2019 年速度場。

Figure 2-4.14: Kaohsiung and Pingtung areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2002~2010; while the right one is from 2010~2019.

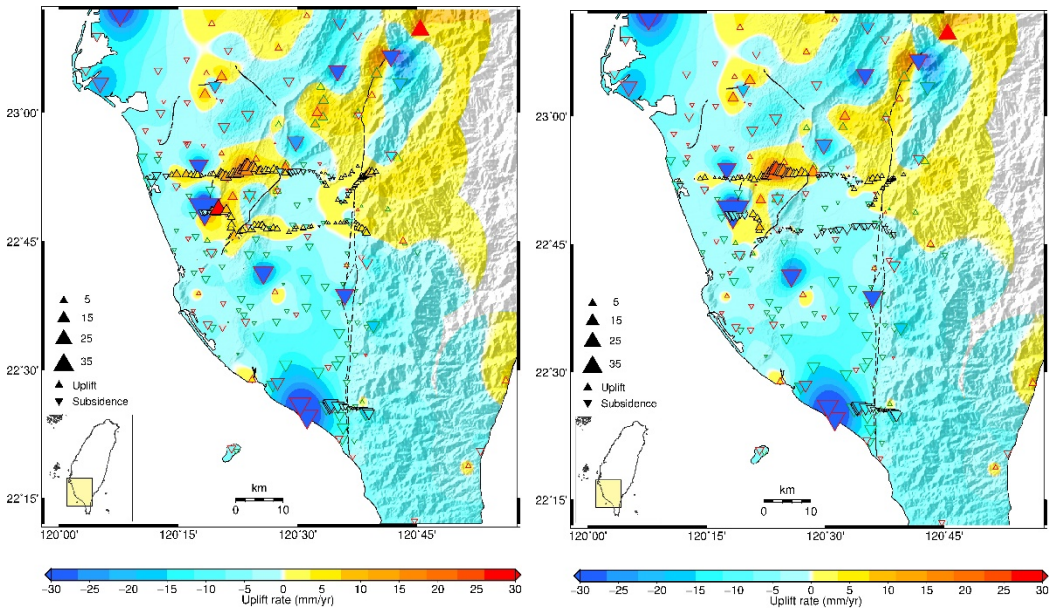


圖 2-4.15：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002~2010 年速度場，右圖表示 2010~2019 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.15: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002~2010 (Left figure) and 2010~2019 (Right figure) in Kaohsiung and Pingtung areas. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-6 恆春地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之恆春地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 32 點以及 2 條精密水準測線，藉由移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列可知，恆春地區（圖 2-4.16）在水平方向速度場符合連續站趨勢，然而在高程方向可發現 2006 年底恆春地震之後移動站坐標時間序列與 HENC 連續站型態分布不同，震前高程速度值亦有所差異。推測造成高程方向時間序列的差異可能是由於此二測站皆位於斷層帶上，又由於垂直分量之變化對於傾向滑移斷層之活動相當敏感，因此短距離之差異就有可能產生不同之高程變化。其餘各組移動站與連續站坐標時間序列型態相符。

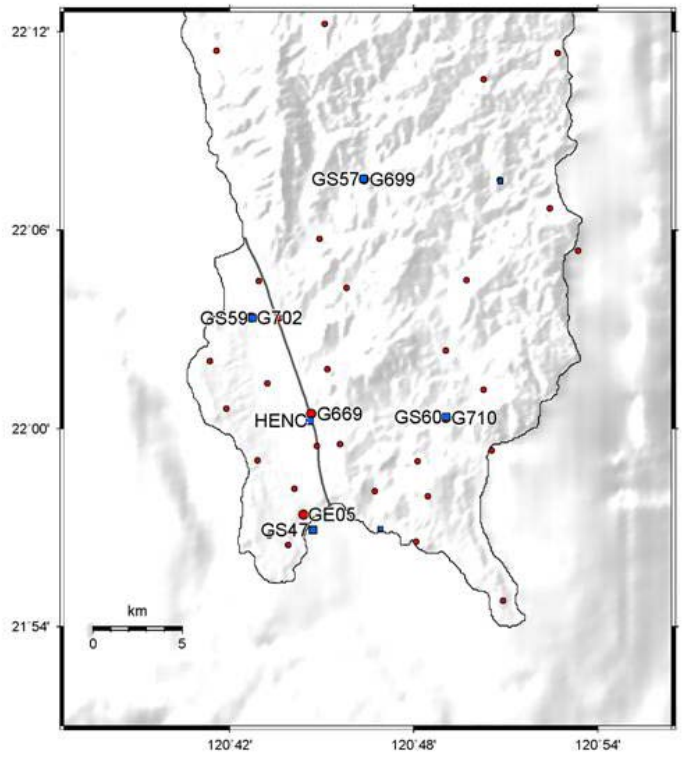


圖 2-4.16：恆春地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.16: Hengchun GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

恆春地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.17，屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，速度量值 51.77～55.15 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場，速度量值 47.39~56.89 mm/yr， 2010 年中至 2015 年之速度場，速度量值 45.07~49.85 mm/yr，2015 年之後之速度場，速度量值 45.00～52.72(44.65~53.03) mm/yr，唯第四段之觀測次數僅 5 次尚需更多觀測資料進行精確分析。

恆春地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.18，以斷層東邊約兩公里為分界，兩條測線在震後均呈現不同的運動型態，西側為沉陷、東側為抬升。其中較南邊的南樹林至鵝鑾鼻測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為 3.7 mm/yr，2010 年至今的平均速率約為-0.9 mm/yr；較北邊的恆春西台地至佳樂水測線在 2006 年震後至 2010 年間東側的平均速率約為-1.9 mm/yr，2010 年至今的平均速率約為-0.5 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2019 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象。

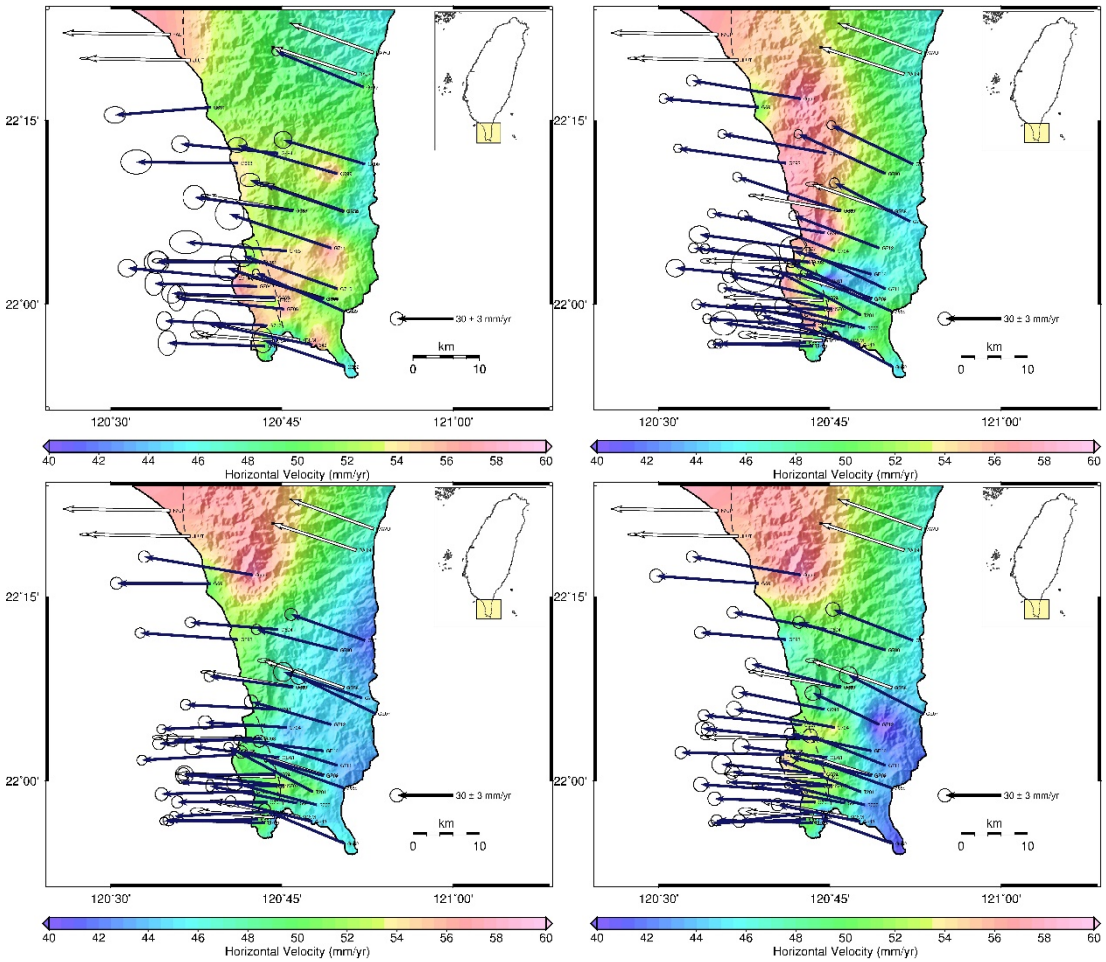


圖 2-4.17：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2019 年速度場。

Figure 2-4.111: Hengchun GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The top left figure is the velocity field from 2002~2006 before the Pingtung offshore earthquake; the top right one is from 2006~2010 after the earthquake; the bottom left is from 2010~2015; the bottom right is from 2015~2019.

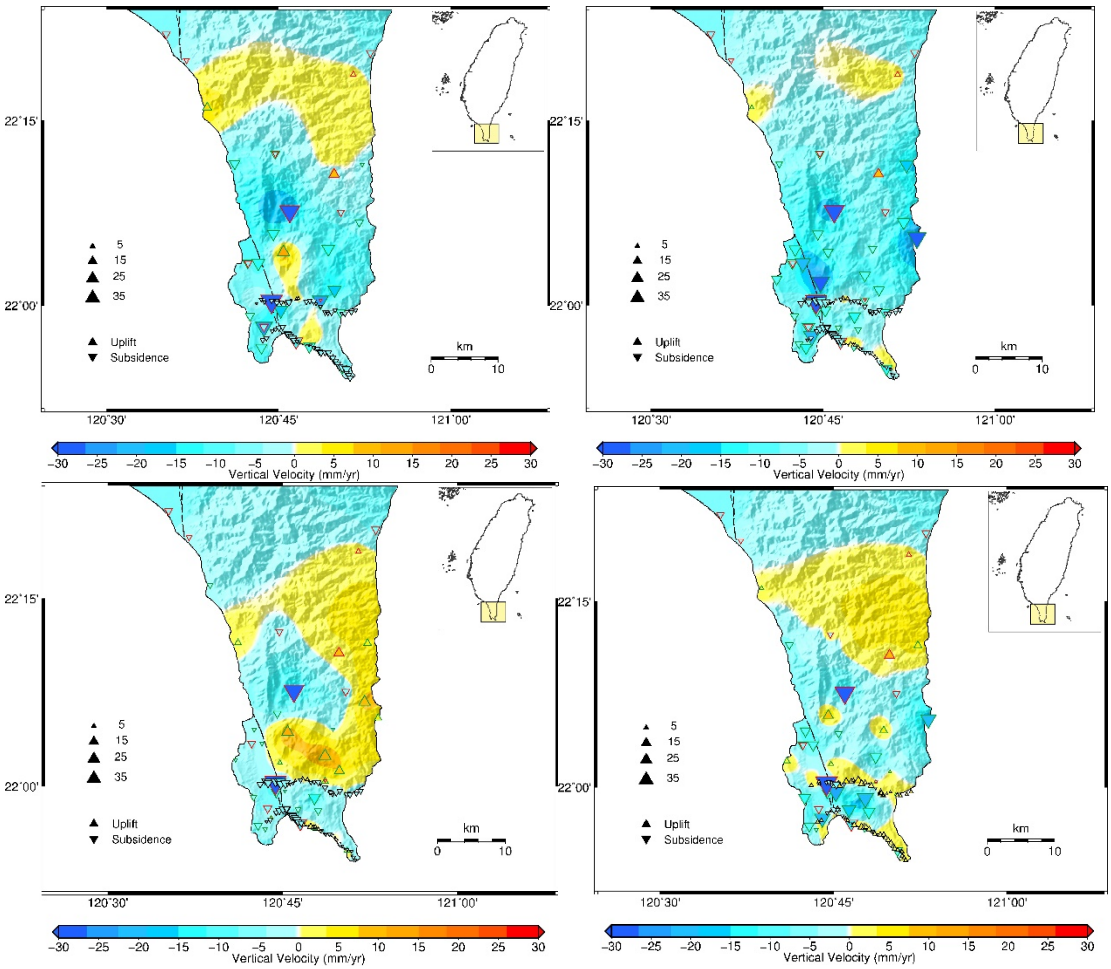


圖 2-4.18：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2019 年之 GPS 垂直方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002~2006 年速度場，右上表示震後 2006~2010 年速度場，左下表示震後 2010~2015 年速度場，右下為 2015~2019 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 2-4.18: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002~2019 in Hengchun area. The top left figure is the velocity field from 2002~2006 before the Pingtung offshore earthquake; the top right one is from 2006~2010 after the earthquake; the bottom left is from 2010~2015; the bottom right is from 2015~2019. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-7 東部地區觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之東部地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 67 點以及 4 條精密水準測線，花東地區（圖 2-4.19）移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

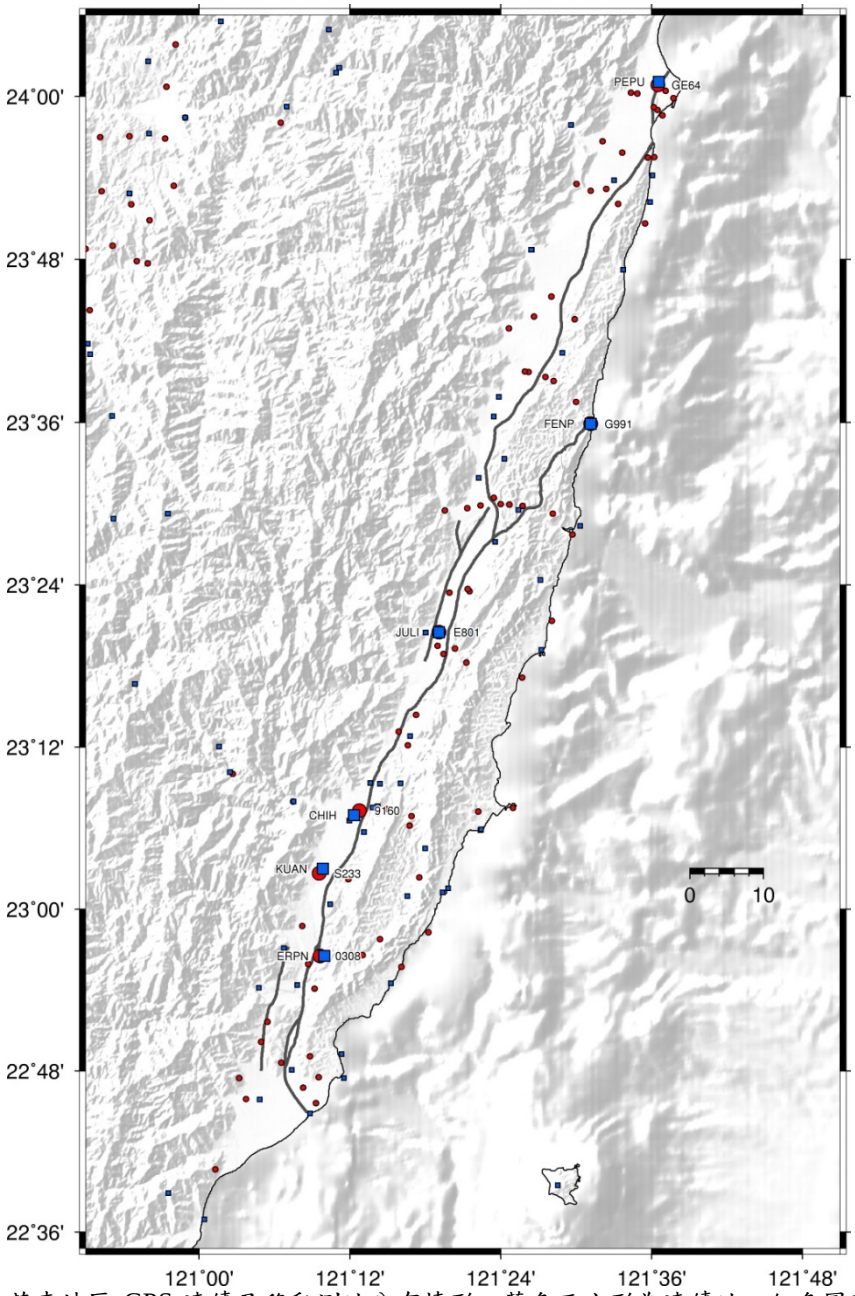


圖 2-4.19：花東地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

Figure 2-4.19: Eastern Taiwan GPS location distribution. The blue triangles are continuous GPS stations; the red circles are campaign-mode GPS stations.

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.20 和圖 2-4.21，因 2013 瑞穗地震，本研究將 2003－2013 年分為 2013－2019 年兩個時間段分別估算速度場。

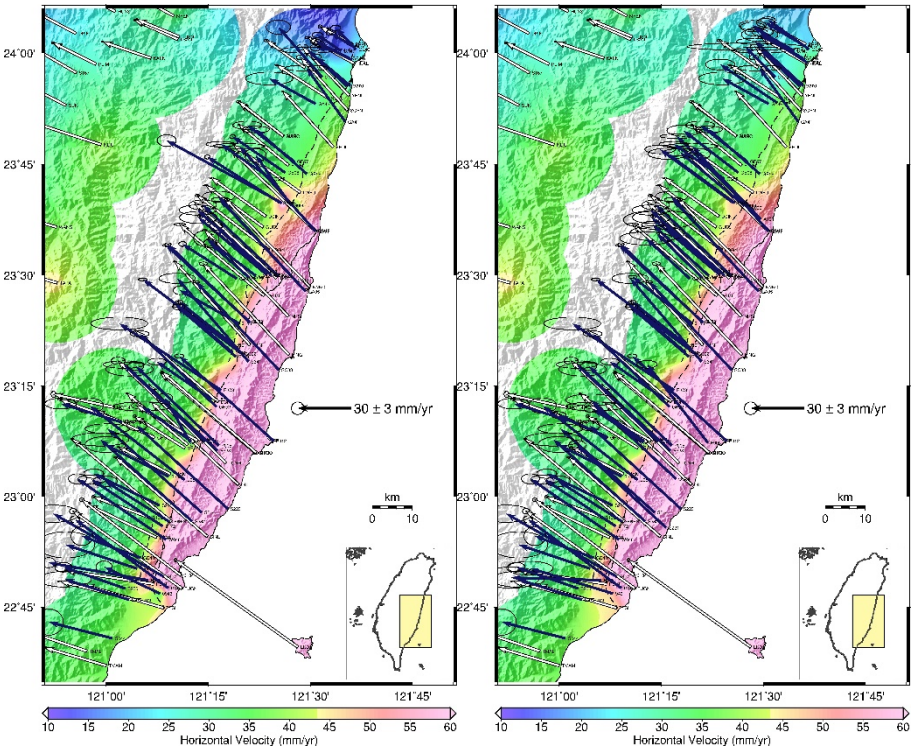


圖 2-4.20：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2003~2013 年速度場，右圖表示 2013~2019 年速度場。

Figure 2-4.20: Eastern Taiwan GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The left figure is the velocity field from 2003~2013; while the right one is from 2013~2019.

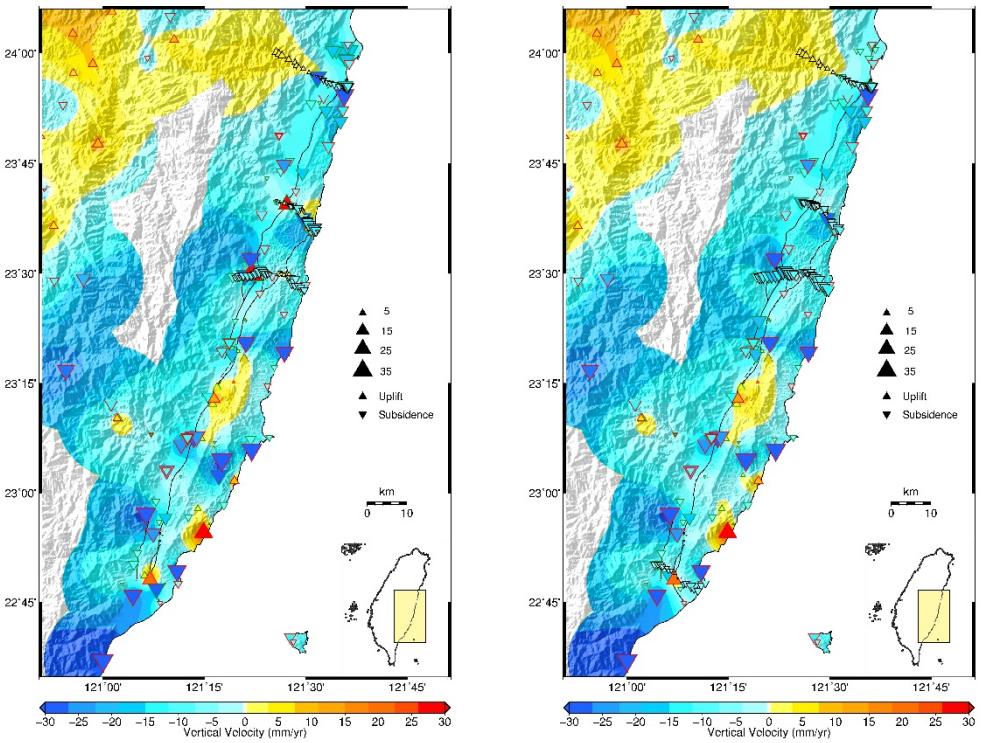


圖 2-4.21：東部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，左圖表示 2003~2013 年速度場，右圖表示 2013~2019 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 2-4.21: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Eastern Taiwan. The left figure is the velocity field from 2003~2013; while the right one is from 2013~2019. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-4-8 全臺速度場

藉由檢視 GPS 連續站及精密水準測量之坐標時間序列可發現，地表速度場會隨著主要地震事件的發生而變化，因此我們針對 2006 年恆春地震、2010 年甲仙地震、2013 年南投地震、2013 年瑞穗地震等，以及發生速度場變化之轉折點，分別為 2007 年 1 月（中部地區）、2009 年 1 月（東部地區）、2010 年 4 月（恆春地區）、2015 年 1 月（恆春地區），分為九個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-4.22 及圖 2-4.23。

由解算結果可知臺灣地區 GPS 水平速度分布，在桃竹苗地區在獅潭斷層及神卓山斷層東側速度場值約為 10 mm/yr 方向為西北向，至斷層西側速度場值降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度場值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度場值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 mm/yr；由解算結果可知本區速度場分布大致保持西北向趨勢，速度變化由南向北呈順時針旋轉，值約 0~10 mm/yr。

中部地區在大茅埔斷層以東速度場約 30~45 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 16~20 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小約 6~15 mm/yr，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，卓蘭地區及獅潭地區點位速度場分布轉為西北向值約 12~16 mm/yr。

嘉南地區在嘉義南部至臺南北部地區在觸口斷層和九芎坑斷層－木屐寮斷層－六甲斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr;跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，其水平位移速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其水平位移速率皆小於 10 mm/yr，臺南地區速度場分布則以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平位移速率約 12~15 mm/yr。後甲里斷層以東水平位移速率約 15~20 mm/yr 速度場呈西向東逐漸遞增，速度值約為 10 至 40 mm/yr。

高屏地區主要之活動構造為東北走向之旗山斷層與南北走向之潮州斷層。由東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，顯示旗山斷層吸收約 10 mm/yr 之縮短量，並具有右移之分量。橫跨潮州斷層東西兩側之測站速度差異顯示，高屏地區跨過潮州斷層之東西向壓縮量極小，值約 60 mm/yr，恆

春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向，值約 41~62 mm。

花東地區自北段花蓮至中段玉里瑞穗方位角由西北西轉為西北，至南段臺東則再轉為西北西，速度值由約 20~40 mm/yr 增加至 50 ~ 70 mm/yr 再減少為 20~60 mm/yr，在東西向速度場由西向東有逐漸增加的趨勢，方向由西向東跨越海岸山脈後由西北西轉為西北北。

北部地區在宜蘭平原地區之速度場就整個臺灣北部而言其速度變化是最顯著的，由西向東其速度變化亦由西北快速地往東南方向移動，越靠近外海移動速度越快，速度變化由西向東南順時針旋轉且愈靠近沿海速度愈大，值由西向東約在 2~35 mm/yr。

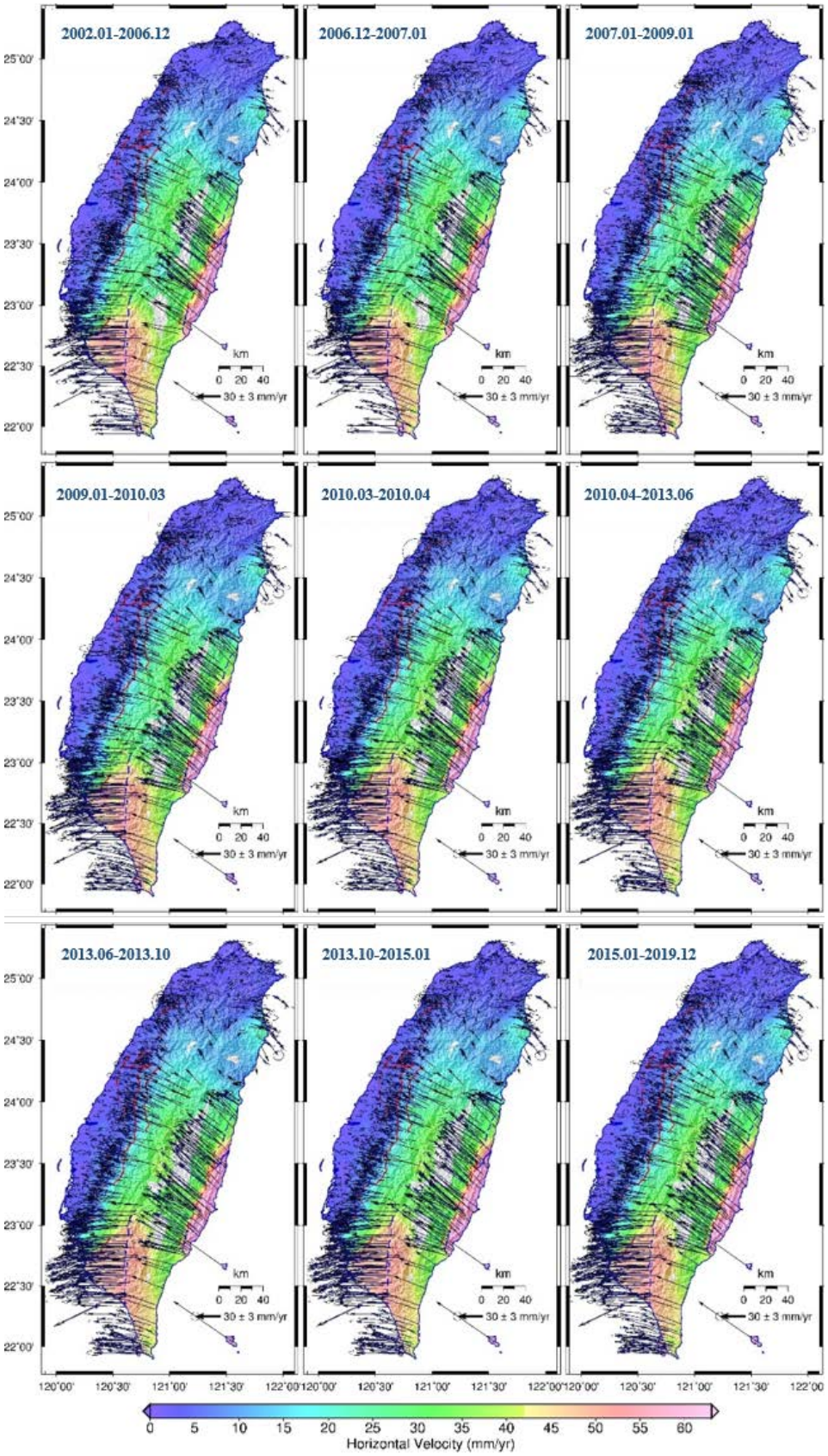


圖 2-4.22：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。
Figure 2-4.22: Taiwan horizontal velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station.

根據圖 2-4.23，大臺北地區之四條精密水準，皆為穩定沉陷，垂直速度大約落在-10 mm/yr 內。桃園地區之精密水準，除跨湖口斷層附近點位有些微的抬升速度(約 0 至 1 mm/yr)，其餘點位之垂直速度約在-2 至 0 mm/yr。新竹地區之兩條精密水準在跨斷層速度並無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區之精密水準在跨斷層變化也不顯著，速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之兩條精密水準在跨斷層也無明顯變化，垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區之精密水準在沿海一帶有相當大的沉陷量，最大沉陷速度達到-40 mm/yr，而進入南投山區最大有約 10 mm/yr 的抬升速度。雲林、嘉義地區之精密水準，在沿海一帶的垂直速度約為-20 至-15 mm/yr，而進入山區則約有 3 mm/yr 的抬升速度。台南地區之北門-楠西測線，也是呈現沿海沉陷、山區抬升的現象，平均垂直速度分別為-10 mm/yr 與 7 mm/yr；善化-關廟測線除少數點位沉陷，其餘大多落在 0-4 mm/yr 之間；安平-龍崎測線在龍船斷層附近約有 20 mm/yr 的速度變化，而高雄地區的路竹–茂林測線同樣也在龍船斷層南接之車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，岡山-安坡測線在小岡山斷層西側約有-10 mm/yr，東側則約在-3 至 0 mm/yr，由於此一系列地表垂直速度場之空間變化有可能是受到背衝斷層、活動褶皺或是泥貫入體的影響所造成，所以和龍船斷層或車瓜林斷層的具體關聯性，需要其他更多的地球物理觀測，如高精度之地震層析成像、地電、重力等，來協助解析。屏東地區之佳冬-七佳測線，在潮州斷層以西約有-20 mm/yr 的沉陷速度，東側則無顯著變化。恆春半島地區的時間段為 2010 至 2017 年，在恆春斷層以東有些微的抬升現象，速率約 3 mm/yr。宜蘭地區之梗枋-東澳測線在頭城鎮至五結鄉一帶，垂直速度最大達-18 mm/yr，進入蘇花公路(蘇澳至東澳段)，垂直速度則約在-10 mm/yr。花蓮地區之嶺頂-瀧澗測線之垂直速度，由西向東一路遞減，約由 5 mm/yr 降至-10 mm/yr；光復-豐濱測線僅在跨瑞穗斷層後在海岸山脈一帶約有 5 mm/yr 之抬升速度；紅葉-靜浦測線之垂直速度皆為負值，但在跨瑞穗斷層後由約由-10 mm/yr 升至-1 mm/yr。台東地區之東成-富岡測線之垂直速度在利吉斷層兩側有不同的運動型態，西側為抬升（約由-8 mm/yr 上升至 0.3 mm/yr），東側為沉降（0 mm/yr 下降至-4.8 mm/yr）。

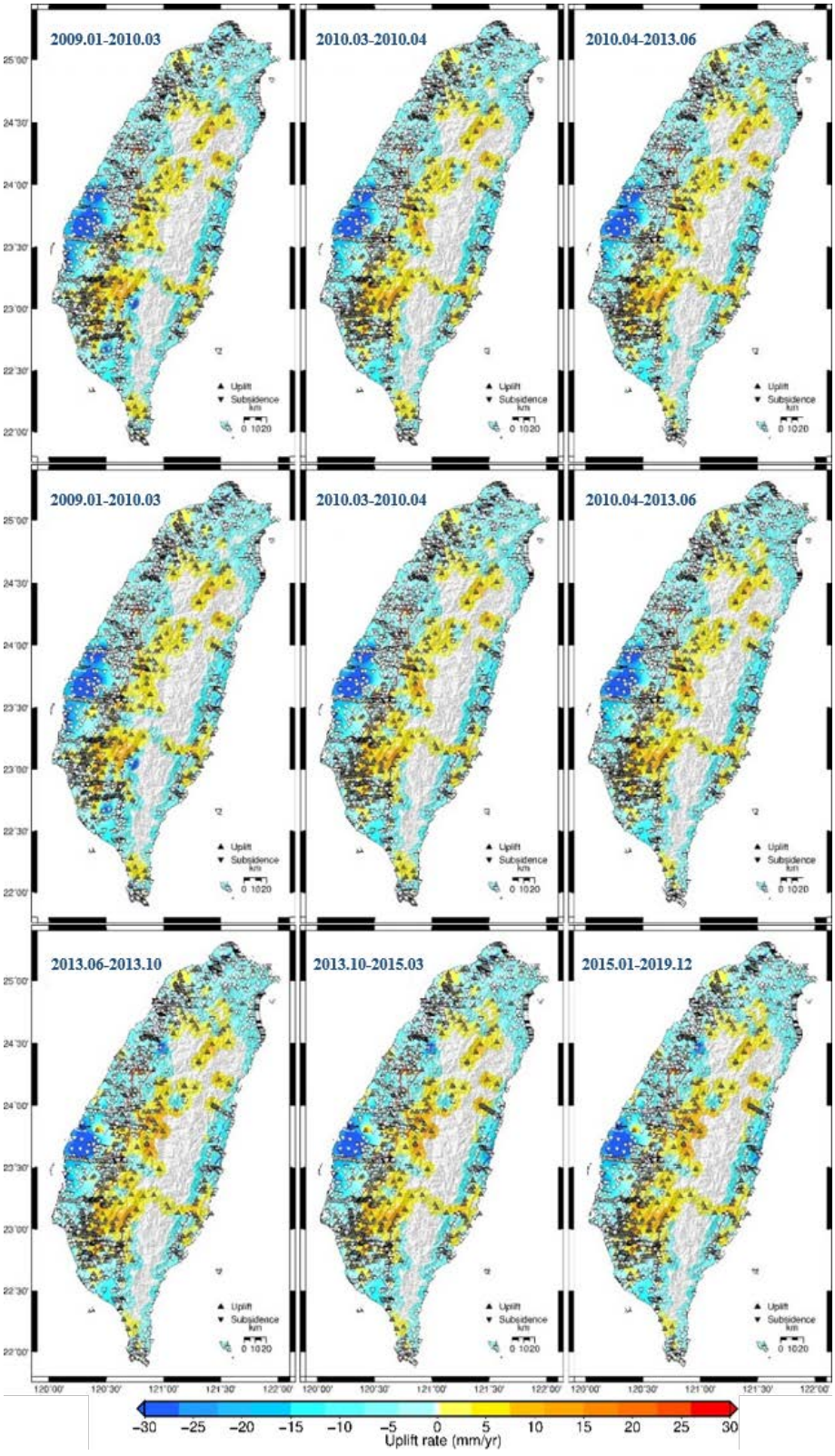


圖 2-4.23：2002 年至 2018 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

圖 2-4.23: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taiwan from 2002 to 2018. The direction of the triangle indicates uplift or subsidence; the size of the triangle represents the speed of the velocity; warm colors represent uplift while cold colors represent subsidence. Precise leveling shows in dark frame; campaign-mode GPS shows in green frame; continuous GPS shows in red frame.

2-5 臺灣西南部 GPS 單頻資料計算

由於地殼變形的分析工作需要大量的觀測資料，但是因為雙頻 GNSS 儀器單價較高，為了取得更大量的觀測資料，本計畫因此嘗試採用低單價之單頻 GNSS 儀器。然而，由於單頻 GNSS 儀器缺少 L2 的觀測量，無法組成 L3 觀測量來消除電離層的延遲誤差，而電離層延遲誤差又可達數十公尺，所以對單頻使用者而言，通常會加入一個電離層模型予以改正（Hofmann-Wellenhof et al., 2001）。然而全球性電離層模型時是針對全球的使用者而設計，所以將因模型精度偏低而不適用於電地殼變形監測。因此本計畫在單頻觀測量處理部分，則是利用 GNSS 雙頻觀測量線性組合組成的 L3 觀測量，將鄰近 GNSS 單頻觀測量之低階項電離層誤差消除。因此理論上若有使用到雙頻觀測量的情況下，電離層誤差、衛星時錶誤差、衛星與接收儀的硬體延遲偏差都可以消除（Yang et al., 2007）。

2-5-1 單頻觀測試流程

在本計畫中，單頻 GNSS 觀測量處理部分採用瑞士伯恩大學開發之 Bernese GNSS software 進行計算。首先將觀測資料 RINEX 檔案編修並剃除品質不佳的觀測資料，再將測區內雙頻連續站的觀測檔加入以當作約制站使用。因為對於小於 10 公里之測站基線而言，衛星訊號對兩部接收儀在傳遞路徑上的大氣狀況可假設為相等，大氣模式之誤差便可在二次差分中予以消除（Chang, 2007），因此本計畫使用與各單頻 GNSS 站基線長度<10 公里之連續站作為約制站，在此情況下，單頻機的 L1 載波相位觀測量即可足夠作為基線解算之用。此外，本計畫也在約制站的考量上，選擇測工作區範圍內穩定且連續之雙頻 GNSS 測站，故本計畫選擇地調所提供之 GS73、GS74、GS76、GS79 與 GS88 作為約制使用。在單頻測區周遭之連續站以 GS73 與各測站之相對距離最短應為最佳選擇，但因考量時間序列之穩定性，最終於測試中決定採 GS74 作為約制站使用（圖 2-5.1）。

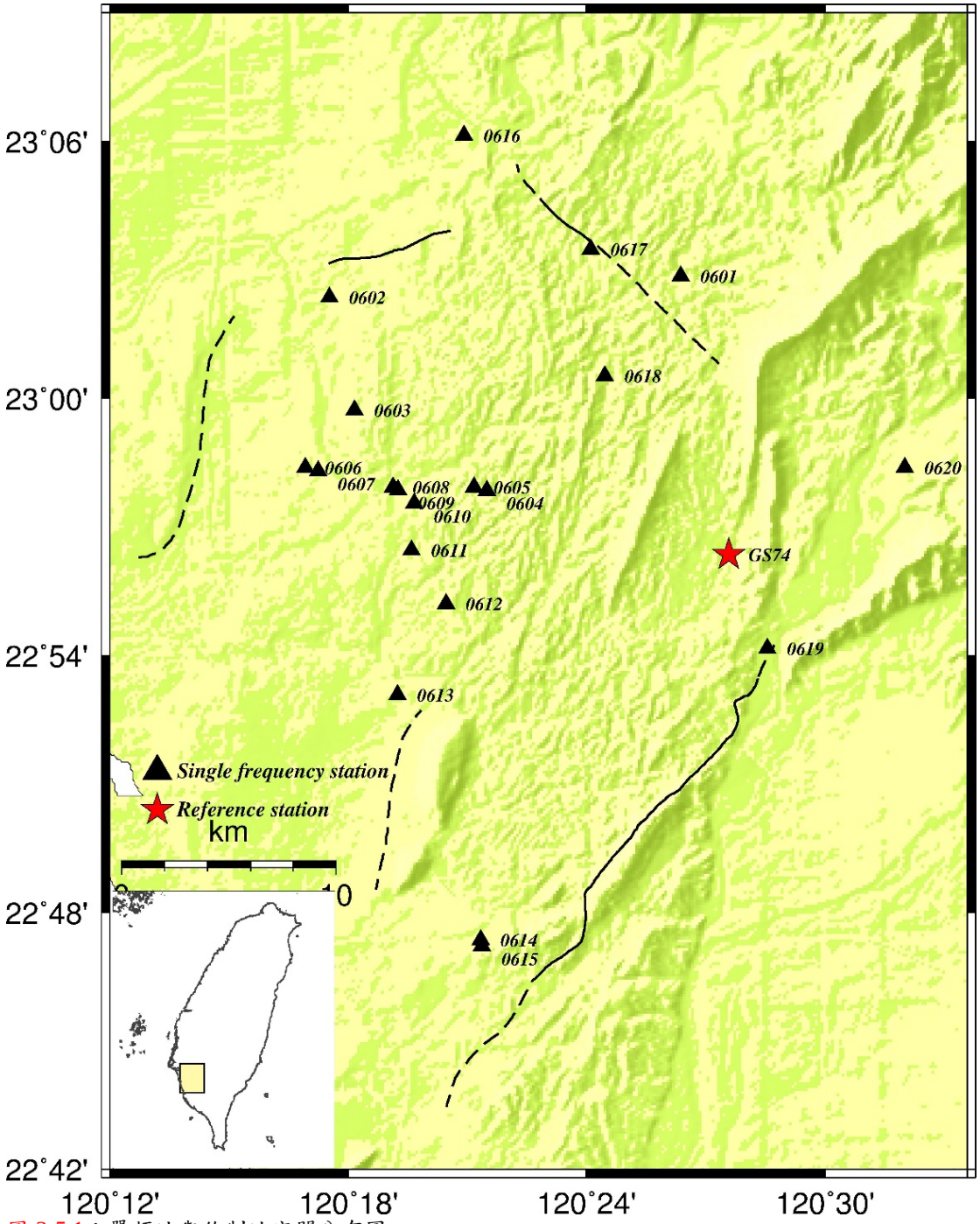


圖 2-5.1：單頻站與約制站空間分布圖。

Figure 2-5.1: Distribution of single-frequency GPS stations and constrained dual-frequency station.

由於 Bernese5.2 版本釋出後，瑞士伯恩大學官方已不再支援舊版本之更新與維護，但由於過去的計畫是採用 Bernese5.0 版本進行單頻 GNSS 資料解算，因此本計畫在利用 Bernese 5.2 版本進行單頻 GNSS 資料計算前，我們先行測試於相同參數設定條件下之新舊版本解算成果差異比較，確認更換軟體版本後，解算成果同樣是穩定的。

表 2-5.1：Bernese 5.0 與 5.2 版坐標輸出差異比較表（以 2018 年第 260 天為例）。
Table 2-5.1: Coordinate differences from Bernese version 5.0 and 5.2.

	Ver 5.2			Ver 5.0			坐標差(m)		
CODSPP	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0601	-2975617.1060	5062437.1669	2481490.6271	-2975616.5030	5062436.1436	2481490.1650	-0.603	1.023	0.462
0602	-2962738.2925	5070341.0023	2480635.7508	-2962737.5941	5070339.8482	2480635.0888	-0.698	1.154	0.662
0603	-2964632.4933	5071459.6795	2476158.4041	-2964631.7616	5071458.4904	2476157.7451	-0.732	1.189	0.659
MAURPR	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0601	-2975614.7719	5062433.0066	2481487.7450	-2975614.7636	5062432.9756	2481487.7292	-0.008	0.031	0.016
0602	-2962735.7897	5070336.5476	2480632.5127	-2962735.7795	5070336.5211	2480632.5053	-0.010	0.027	0.007
0603	-2964629.9978	5071455.3284	2476155.1808	-2964629.9870	5071455.3077	2476155.1739	-0.011	0.021	0.007
GPSEST	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0601	-2975614.8105	5062433.0222	2481487.7510	-2975614.8104	5062433.0209	2481487.7507	0.000	0.001	0.000
0602	-2962735.8362	5070336.6022	2480632.5315	-2962735.8366	5070336.6011	2480632.5315	0.000	0.001	0.000
0603	-2964630.0416	5071455.3763	2476155.1982	-2964630.0417	5071455.3750	2476155.1981	0.000	0.001	0.000
FN	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0601	-2975614.8099	5062433.0254	2481487.7475	-2975614.7936	5062433.0036	2481487.7387	-0.016	0.022	0.009
0602	-2962735.8374	5070336.6137	2480632.5311	-2962735.8199	5070336.5892	2480632.5223	-0.018	0.024	0.009
0603	-2964630.0401	5071455.3845	2476155.1969	-2964630.0256	5071455.3615	2476155.1894	-0.015	0.023	0.008

註：CODSPP 為單點定位步驟輸出之坐標；MAURPR 為週波脫落偵測與補償步驟輸出之坐標，GPSEST 為大氣層誤差改正步驟輸出之坐標，FN 為最終輸出之坐標。

本計畫採用 2018 年第 205 天至 2018 年第 321 天測站 0601、0602、0603 資料，分別利用兩個版本的 Bernese 進行坐標解算，比較 Bernese 兩個版本在不同步驟中輸出的坐標比較釐清在更換版本後，坐標解算是否合理（表 2-5.1 與圖 2-5.2）。結果顯示，新舊版本於單點定位步驟（CODSPP）時，坐標差異最大，X 分量約為 60 至 73 cm，Y 分量約為 102 至 118 cm，Z 分量約為 46 至 66 cm。隨後，在各資料處理步驟消除各種誤差後，坐標差異漸漸減少，至大氣層誤差改正步驟（GPSEST）時，各分量之坐標差已縮小至接近 1 mm，才又於最終輸出坐標時出現差異。因此，最終兩個解算軟體版本的結果指出，X 分量坐標差約為 1 至 2 cm，Y 分量約為 2 cm，Z 分量約為 1 cm。由此可見，在相同參數設定下，新舊版本解算之每日解最終坐標差異並不顯著。

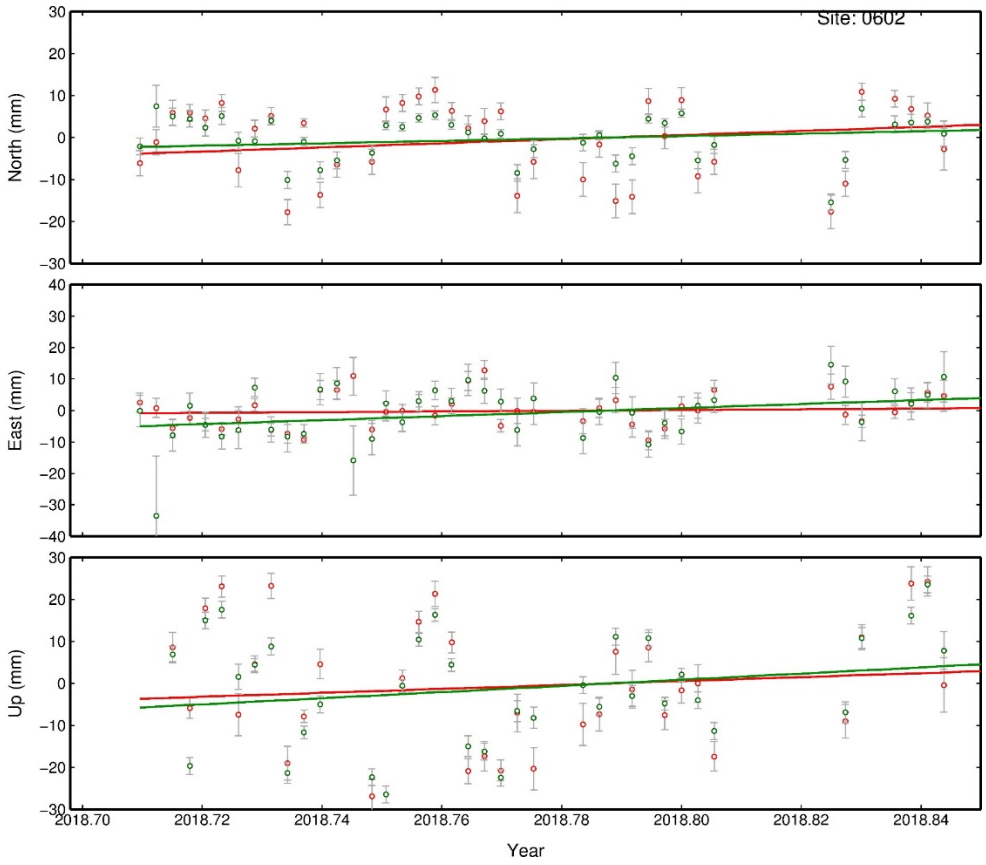


圖 2-5.2：相同設定下測站 0602 之時間序列圖，綠色圓點為 5.2 版解算成果，紅色圓點為 5.0 版解算成果。

Figure 2-5.2: Time serie of 0602 station under the same processing settings. Green dots are coordinate from Bernese version 5.2 and red dots are results from Bernese version 5.0.

2-5-2 單頻 2018 年之解算成果

在確定 Bernese 5.2 版解算成果穩定後，本計畫接著測試並調整適合 5.2 版本之最佳參數設定。其中，本計畫特別針對基線解之參數部分，測試強制固定測站（STAR），以及最大觀測量（OBS-MAX）之差異，強制固定測站之基線解算策略，是以強制各單頻測站與雙頻測站組合成之基線作為線性組合來消除各項誤差，最大觀測量則從所有可能的組合中，選擇一組具有最大共同觀測值的基線，來消除各項誤差。

本計畫採用 2018 年之單頻 GPS 觀測資料進行測試（圖 2-5.3 至圖 2-5.6）。單頻資料解算皆約制在測站 GS74，並採用兩種不同之基線解算方式。解算結果顯示，兩個不同基線組何之結果在平面分量之差異不大，在移除趨勢線後，於 N 分量採最大觀測量解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 8.2 mm，強制固定測站解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 8.2 mm，E 分量採最大觀測量解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 12.2 mm，強制固定測站解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 12.2 mm（圖 2-5.7 至圖 2-5.8）。在高程分量上，測試結果指出，使用最大觀測量之成果較佳（圖 2-5.3 至圖 2-5.6）。最大觀測量解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 12.2 mm，強制固定測站解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 27.3 mm（圖 2-5.7 至圖 2-5.8）。

在高程分量上，測試結果指出，使用最大觀測量之成果較佳（圖 2-5.3 至圖 2-5.6）。最大觀測量解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 12.2 mm，強制固定測站解之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 27.3 mm（圖 2-5.7 至圖 2-5.8）。

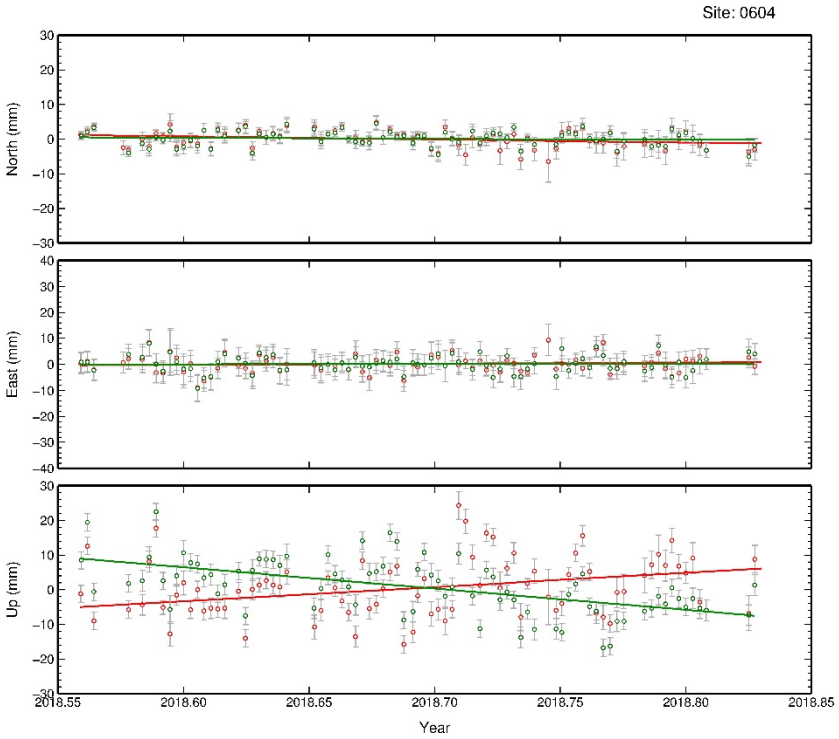


圖 2-5.3：相對於測站 GS74 之單頻站 0604 坐標時間序列。GS74-0604 基線距離約 10.1 公里。綠色圓點為最大觀測量解，紅色圓點為強制固定測站解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.3: Coordinate time series of single frequency staion 0604 relative to station GS74. Distance between 0604 and GS74 is 10.1 km. Green dots are results from the maximum observation solution. Red dots are resultd from the fixed solution. The slash lines are the fitting trend.

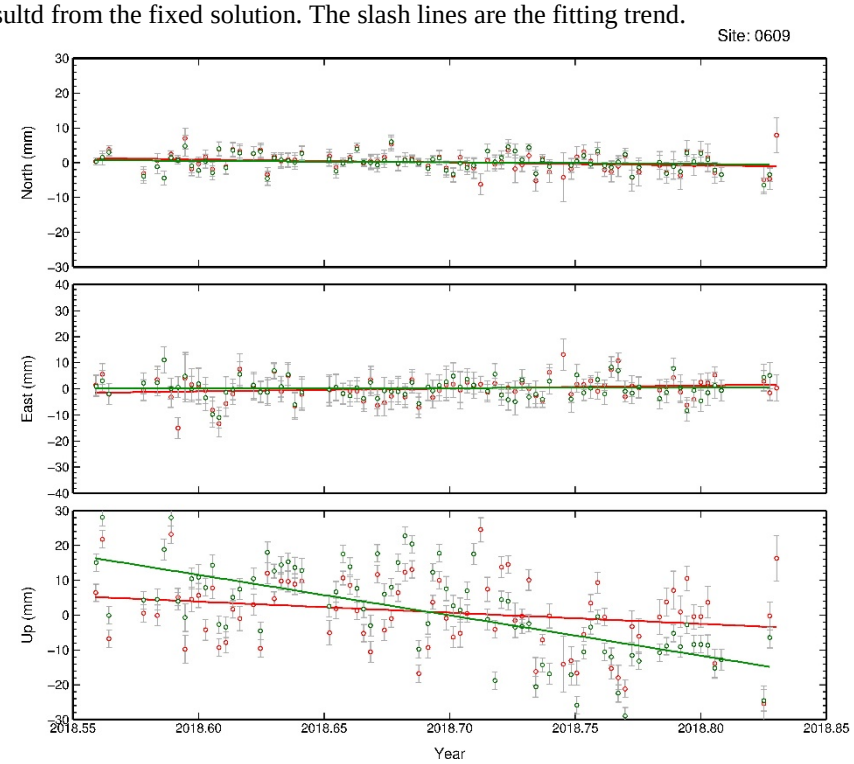


圖 2-5.4：相對於測站 GS74 之單頻站 0609 坐標時間序列。GS74-0609 基線距離約 13.8 公里。綠色圓點為最大觀測量解，紅色圓點為強制固定測站解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.4: Coordinate time series of single frequency staion 0609 relative to station GS74. Distance between 0609 and GS74 is 13.8 km. Green dots are results from the maximum observation solution. Red dots are resultd from the fixed solution. The slash lines are the fitting trend.

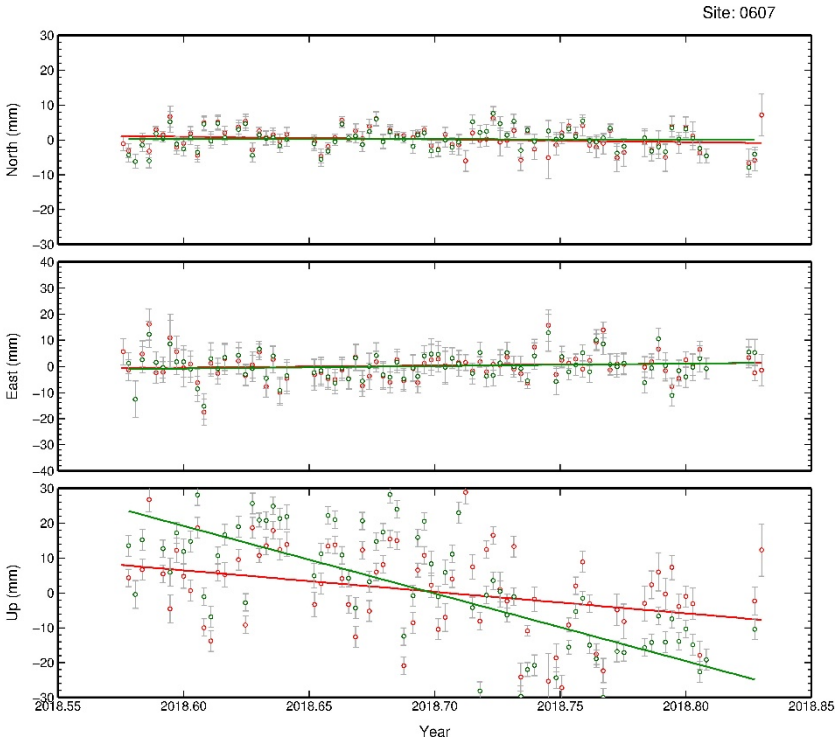


圖 2-5.5：相對於測站 GS74 之單頻站 0607 坐標時間序列。GS74-0607 基線距離約 17.3 公里。綠色圓點為最大觀測量解，紅色圓點為強制固定測站解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.5: Coordinate time series of single frequency staion 0607 relative to station GS74. Distance between 0607 and GS74 is 17.3 km. Green dots are results from the maximum observation solution. Red dots are resultd from the fixed solution. The slash lines are the fitting trend.

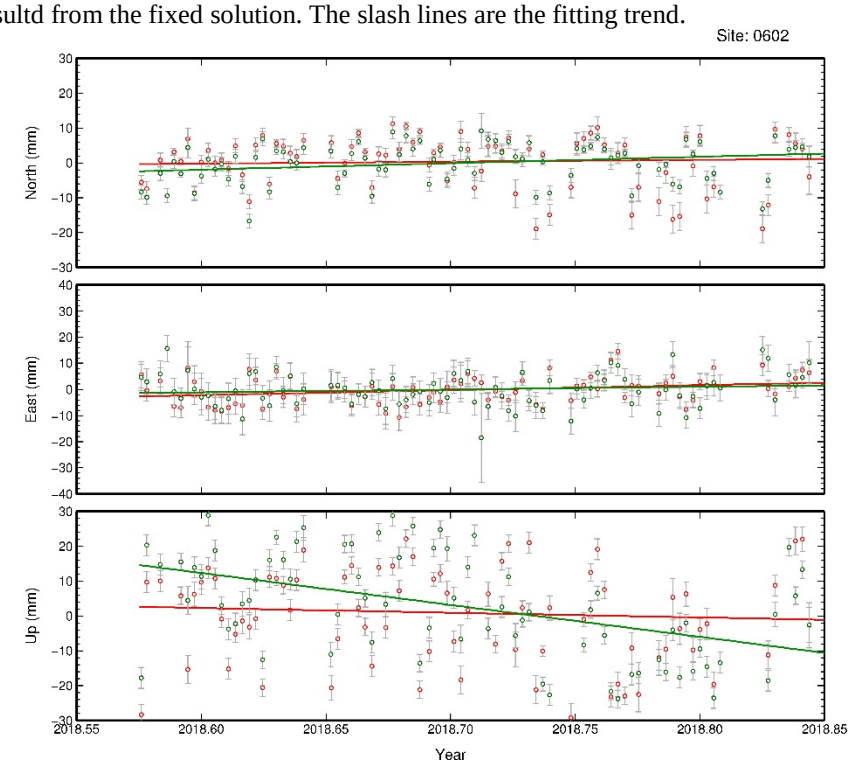


圖 2-5.6：相對於測站 GS74 之單頻站 0602 坐標時間序列。GS74-0602 基線距離約 19.8 公里。綠色圓點為最大觀測量解，紅色圓點為強制固定測站解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.6: Coordinate time series of single frequency staion 0602 relative to station GS74. Distance between 0602 and GS74 is 19.8 km. Green dots are results from the maximum observation solution. Red dots are resultd from the fixed solution. The slash lines are the fitting trend.

此外，本計畫也同時測試單頻 GPS 站與雙頻 GPS 約制站間，基線長度與坐標解算精度之變化關係。本計畫同樣採用殘差值反映坐標時間序列上之坐標離散度。在採最大觀測量解之參數設定下，考慮單頻 GPS 站與雙頻 GPS 約制站距離由近（10 km）到遠（20 km）之 4 個測站（0604、0609、0607、0602）。結果指出（圖 2-5.3 至圖 2-5.6），N 分量殘差值 95%信賴區間分別為 0.1 ± 4.1 mm，0.1 ± 4.4 mm，0.1 ± 5.2 mm，0.1 ± 12.0 mm，E 分量之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 9.6 mm，0.1 ± 10.6 mm，0.1 ± 12.1 mm，0.1 ± 14.5 mm，高程分量之殘差值 95%信賴區間為 0.1 ± 12.2 mm，0.1 ± 19.9 mm，0.1 ± 26.6 mm，0.1 ± 32.6 mm，0.1 ± 41.3 mm。由此可見測站與約制站之距離增加，也造成坐標離散度漸漸增加。然而，當基線距離落在 14 km 內，坐標穩定度的表現依然不錯。

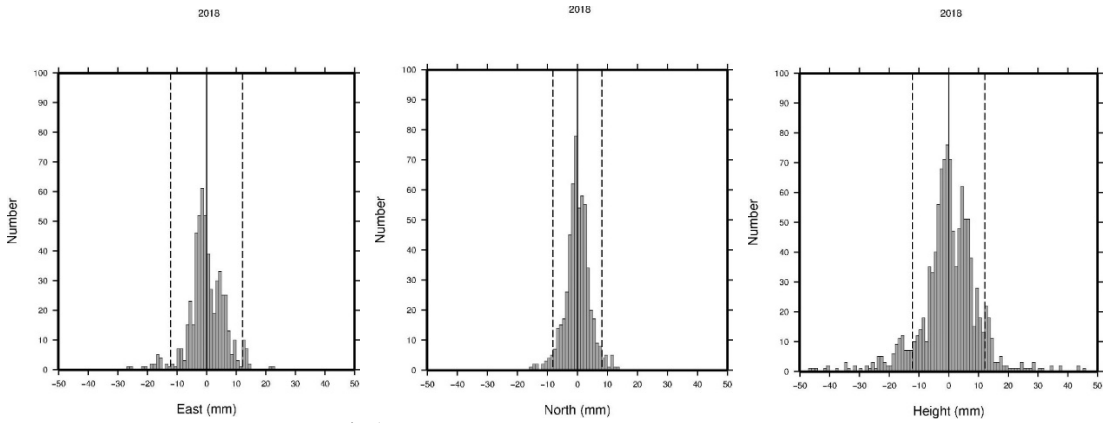


圖 2-5.7：最大觀測量基線解算策略之殘差分布圖，虛線表示兩倍標準差。

Figure 2-5.7: Residual diagram of maximum observation baseline solution stretagy. The dashed lines show 95% confidence interval.

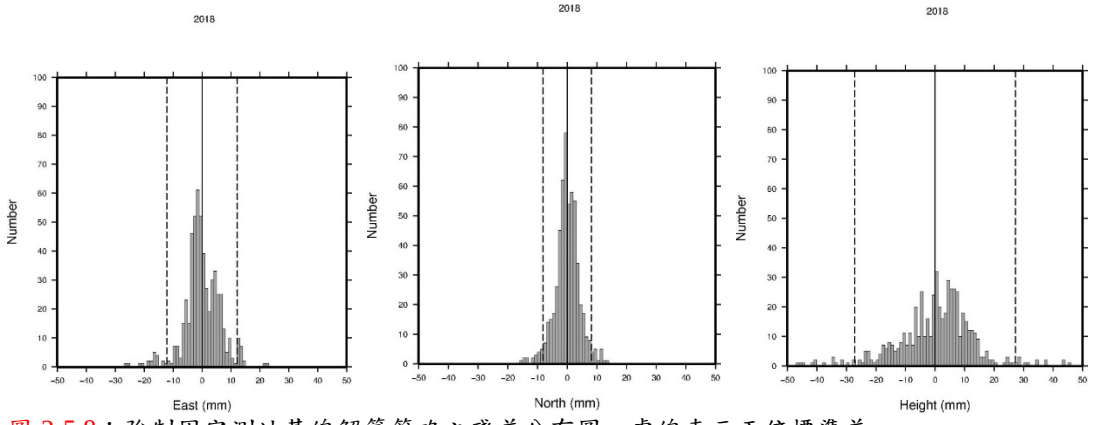


圖 2-5.8：強制固定測站基線解算策略之殘差分布圖，虛線表示兩倍標準差。

Figure 2-5.8: Residual diagram of fixed station baseline solution stretagy. The dashed lines show 95% confidence interval.

2-5-3 臺灣西南部單頻 GPS 速度場

在經過一系列的測試，本計畫計算約制於 GS74 雙頻 GPS 站，0601 至 0615 等 15 個 GPS 單頻測站之坐標時間序列，資料觀測時間自 2018 年第 260 天至 321 天與 2019 年第 185 天至 306 天各站相對澎湖白沙站 S01R 之水平速度場（圖 2-5.9 至圖 2-5.12）。排除掉速度誤差較大及觀測時長較短的測站後，指出 E 分量之速度量值為-26.1 至-47.1 mm/yr，N 分量之速度量值為-12.7 至 2.1 mm/yr。其中除了 0616、0617、0618 及 0620 測站速度與周圍測站較不一致（圖 2-5.13），其餘測站大致與周圍測站速度方向相近。0616、0617、0618、0620 等五個測站之差異應源自於觀測天數不足，觀測資料自 2019 年第 185 天開始至 306 天（僅有 121 天），因而導致速度誤差較大。

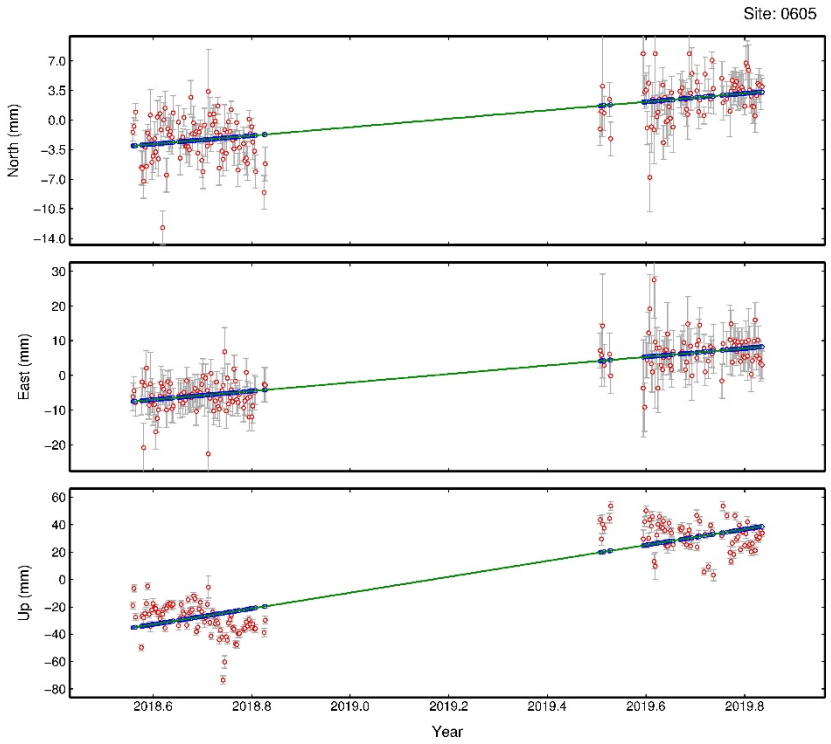


圖 2-5.9：相對於測站 GS74 之單頻站 0605 坐標時間序列。GS74-0605 基線距離約 10.7 公里。紅色圓點為每日解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.9: Coordinate time series of single frequency staion 0605 relative to station GS74. Distance between 0605 and GS74 is 10.7 km. Red dots are daily solution. The slash lines are the fitting trend.

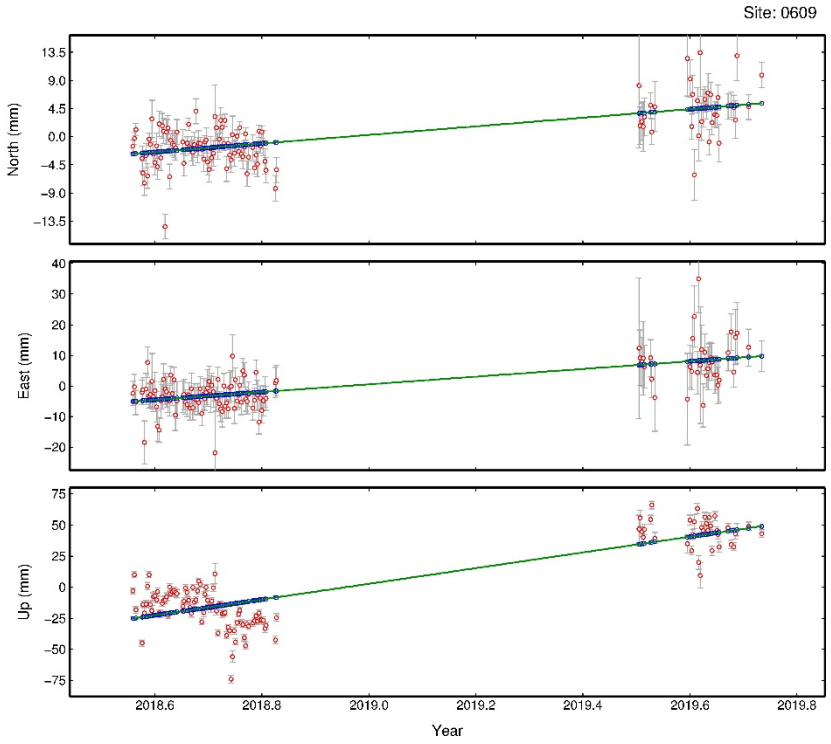


圖 2-5.10：相對於測站 GS74 之單頻站 0609 坐標時間序列。GS74-0609 基線距離約 13.8 公里。紅色圓點為每日解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.10: Coordinate time series of single frequency staion 0609 relative to station GS74. Distance between 0609 and GS74 is 13.8 km. Red dots are daily solution. The slash lines are the fitting trend.

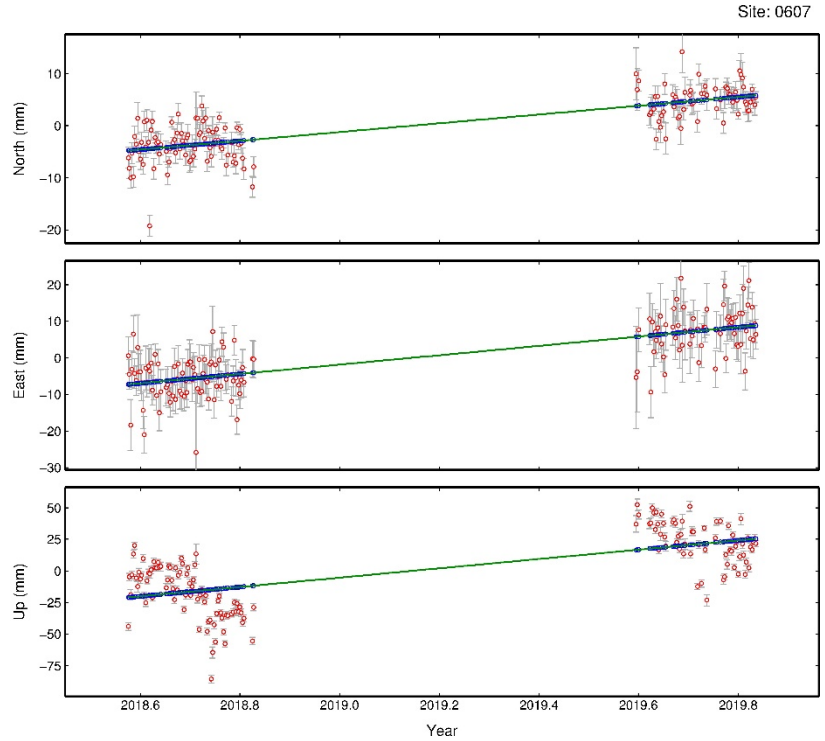


圖 2-5.11：相對於測站 GS74 之單頻站 0607 坐標時間序列。GS74-0607 基線距離約 17.3 公里。紅色圓點為每日解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.11: Coordinate time series of single frequency staion 0607 relative to station GS74. Distance between 0607 and GS74 is 17.3 km. Red dots are daily solution. The slash lines are the fitting trend.

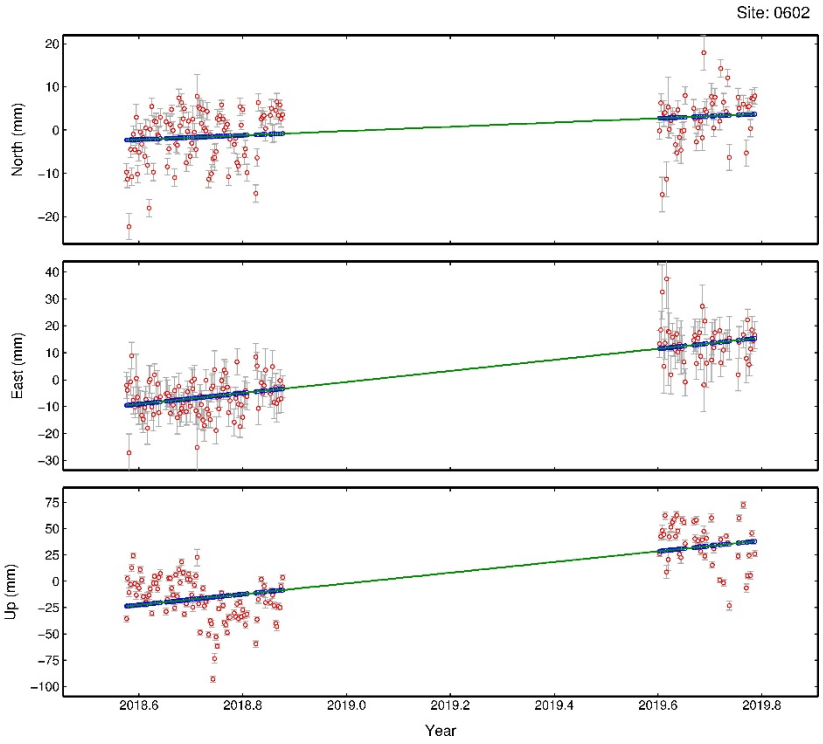


圖 2-5.12：相對於測站 GS74 之單頻站 0602 坐標時間序列。GS74-0602 基線距離約 19.8 公里。紅色圓點為每日解，斜線為擬合趨勢線。

Figure 2-5.12: Coordinate time series of single frequency staion 0602 relative to station GS74. Distance between 0602 and GS74 is 19.8 km. Red dots are daily solution. The slash lines are the fitting trend.

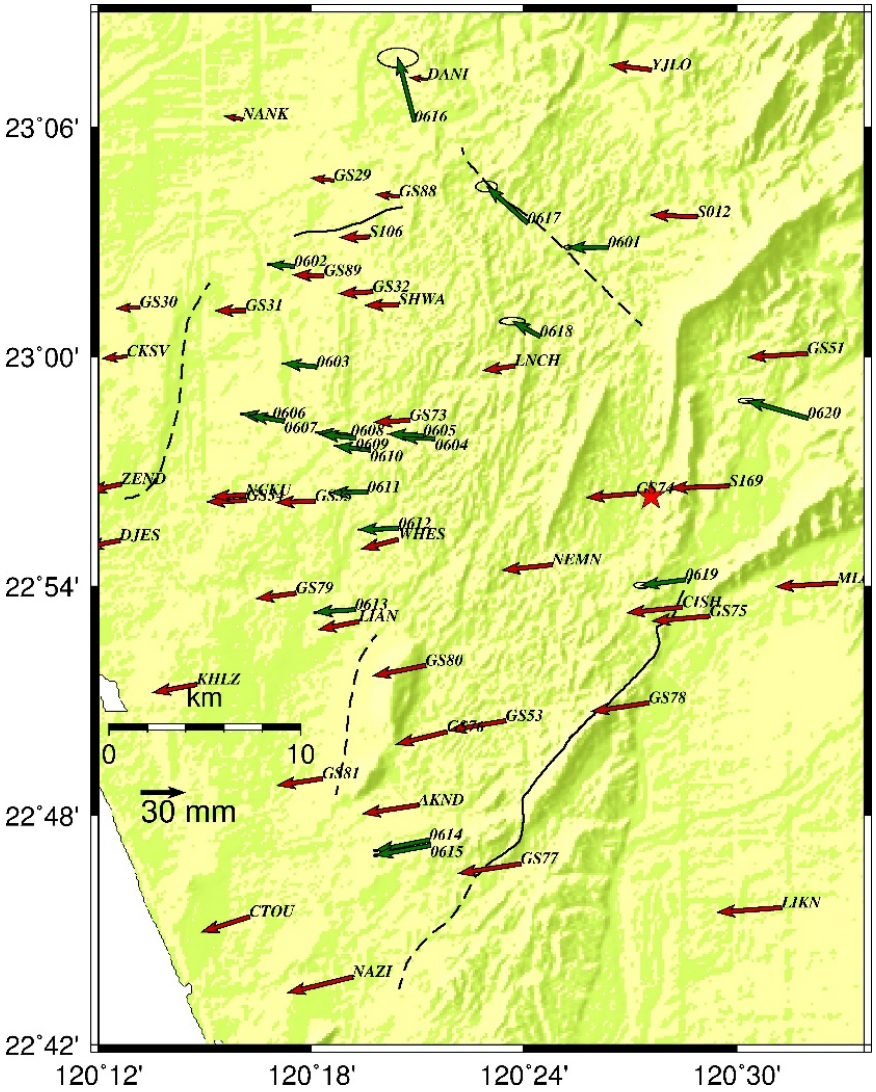


圖 2-5.13：2018 至 2019 年水平速度場，綠色箭頭為單頻測站之速度向量，紅色箭頭為連續站之速度向量，各站速度相對澎湖白沙站 S01R。

Figure 2-5.13: Horizontal velocity field relative to station S01R during 2018 - 2019. Green arrors indicate single-frequency GPS stations, while red arrors are dual-frequency GPS stations.

第三章、南部地區雷達影像分析

本計畫彙整臺灣地區，由 ERS（European Remote Sensing Satellite）-1/2、ENVISAT（Environmental Satellite）、ALOS（Advanced Land Observing Satellite）以及 Sentinel-1A 等衛星所拍攝的 SAR 影像，並分析其相對基線值，以檢核可供產生干涉之影像對，製作干涉影像。

歐洲太空總署（European Space Agency，ESA）於 1991 年 7 月發射 ERS-1 衛星，並於 1995 年發射同系列的 ERS-2 衛星，波長為 C 波段。ENVISAT 為 ERS-1/2 後續繼承任務的衛星，於 2002 年發射；Sentinel-1A 衛星於 2014 年發射，同樣為 C 波段。而 ALOS 衛星於 2006 年 1 月 24 日發射，並於 2006 年 2 月 16 日拍攝第一幅影像，為日本地球觀測衛星計畫中，負責針對陸地區域進行觀測的衛星，為 L 波段。

本計畫針對 ERS-1/2、ENVISAT 及 ALOS 三種衛星所拍攝的 SAR 影像先利用影像對相關值，根據時間基線（Temporal Baseline）、空間垂直基線（Perpendicular Spatial Baseline）、都普勒中心頻率（Doppler Centroid Frequency）及熱雜訊（Thermal Noise）挑選出主影像（Master）。在進行影像干涉處理時，使用以單一主影像對方法作為影像配對方式，將影像製作出 N-1 張干涉條紋圖，並用利用 StaMPS 軟體進行 PS-InSAR 流程解算。而 Sentinel-1 衛星 SAR 影像因為有良好的軌道控制，為了減少雜訊的干擾，則使用時間基線小基線方法作為影像配對方式，使所有影像間時間間隔都小於 40 天，將影像製作出干涉條紋圖，以獲得最佳干涉結果，再利用與 GPS 相同方式，獲得永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。

本研究團隊目前使用於地殼變形監測之雷達影像分別有以下衛星、波段（圖 3.1）及所使用的時間區間：

（1）C 波段之 **ERS-1/2** 衛星 SAR 影像時間：從 1995 年 4 月至 1999 年 9 月。

（2）C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：從 2004 年 6 月至 2008 年 9 月。

（3）L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像時間：從 2007 年 1 月至 2011 年 3 月。

（4）C 波段之 **SENTINEL-1A** 衛星 SAR 影像時間：從 2015 年 4 月至 2019 年 9 月。

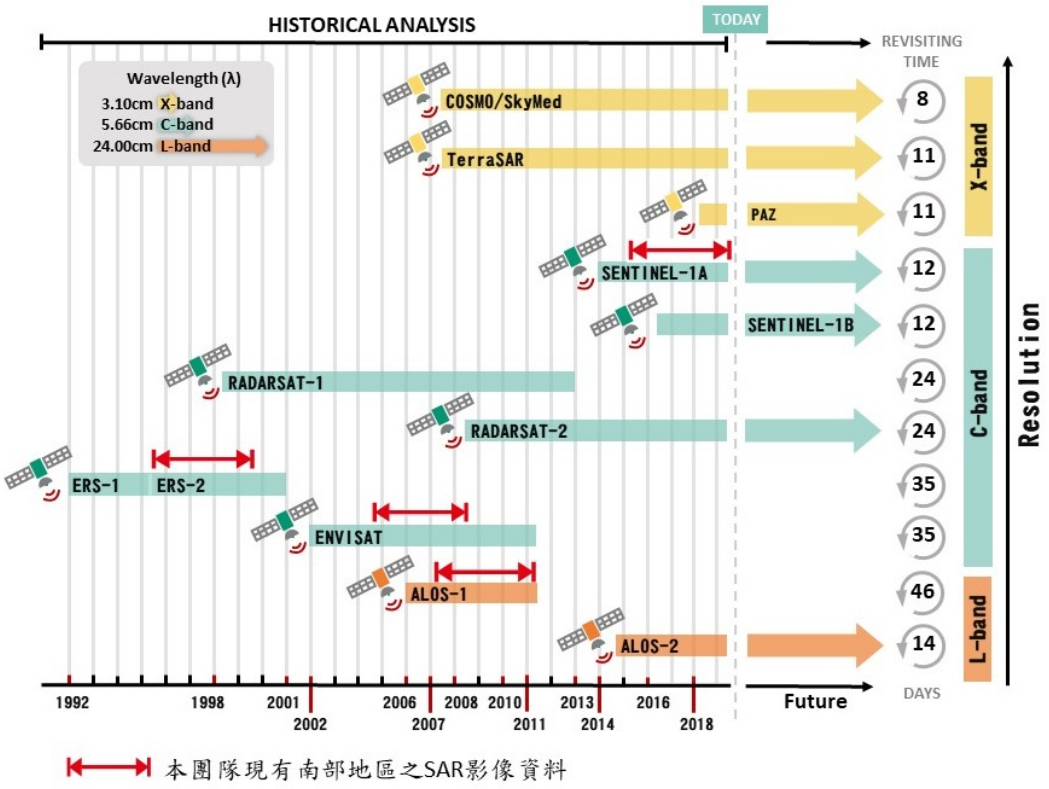


圖 3.1：本團隊研究南部地區地殼變形使用 SAR 影像圖資示意圖。
Figure 3.1: SAR images used for crustal deformation of the southern Taiwan.

3-1 南部地區 PS-InSAR 成果資料分析

3-1-1 ERS1/2 (1995/4~1999/9)

圖 3-1.1 即為 ERS 影像在此期間（1995/4~1999/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間（1995/4~1999/9），兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 S011 為不動點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則觀測到最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。此外，跨過龍船斷層以及鳳山轉換帶也有明顯的速度不連續，速度梯度可達將近 20 mm/yr，需持續關注。

圖 3-1.2 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ERS 影像與連續 GPS 測站所測得的速率有高度相關性（1.0695），顯示本結果可信度相當高。

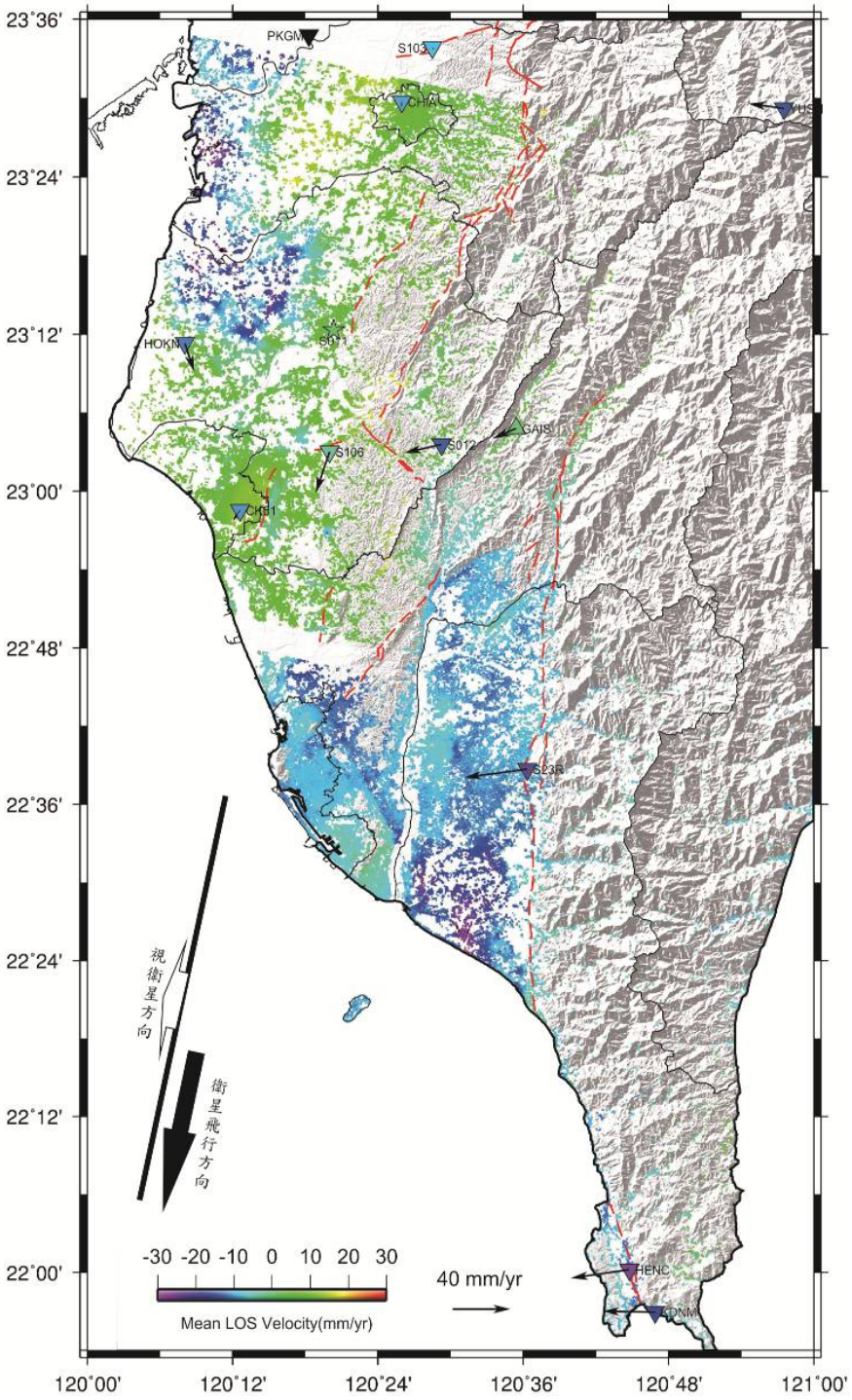


圖 3-1.1：ERS（1995/4~1999/9）衛星軌道（Track）232，像幅編號（Frame）3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.1: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1995/4~1999/9) (Track=232, Frames=3141&3159; Track=461, Frame=3159). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

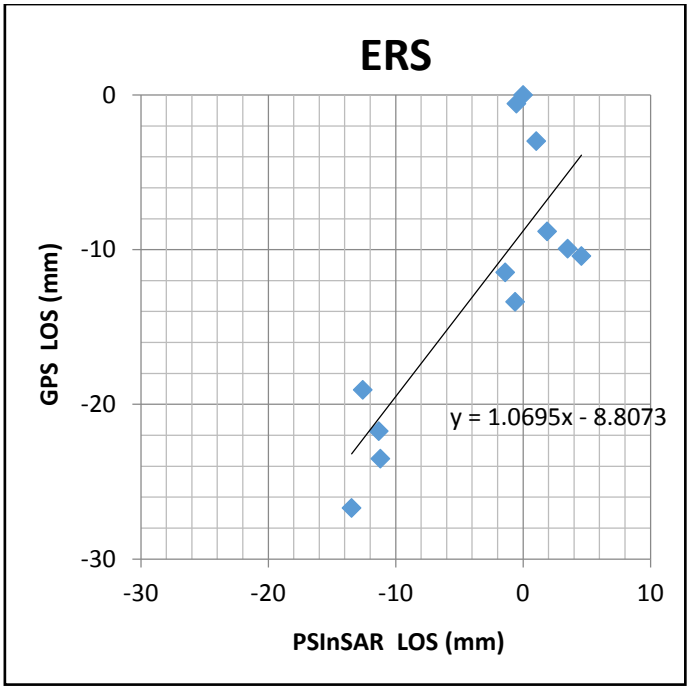


圖 3-1.2：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。
Figure 3-1.2: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ERS images and continuous GPS stations.

3-1-2 ENVISAT (2004/6~2008/9）

圖 3-1.3 為 ENVISAT 影像在此期間（2004/6~2008/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠信相當高。從圖 3-1.3 可見，在這段期間（2004/6~2008/9），西南地區變形行為與 ERS 結果相似。以 S011 為參考點而言，嘉南沿海地區最大視衛星方向下陷量約為 30 mm/yr。新化斷層以北以及台南台地及大灣低地南側則擁有最大抬升量，最大速率約為 10 mm/yr。其中跨過六甲斷層、木屐寮斷層及龍船斷層都能看到有變形速率不一的情形。反之，跨過後甲里斷層兩側之變形不連續則較為不明顯。

圖 3-1.4 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ENVISAT 影像與連續 GPS 測站所測得的速率相關性為 0.8032，可得到本結果之 ENVISAT 影像與連續 GPS 測站所測得的速率有高度相關性，顯示本結果可信度相當高。

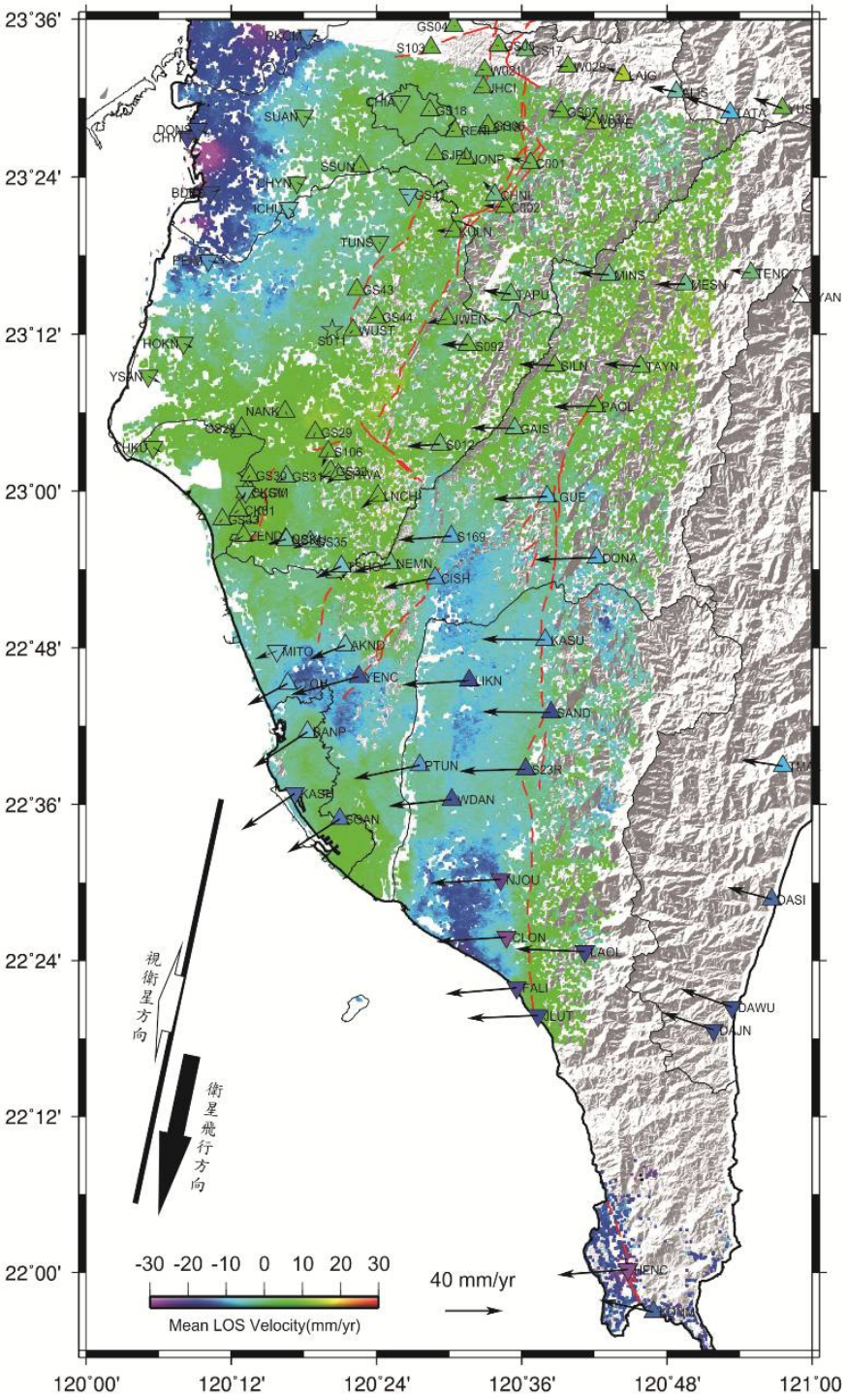


圖 3-1.3：ENVISAT（2004/6~2008/9）衛星軌道 232，像幅編號 3141、3159 及衛星軌道 461，像幅編號 3159 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.3: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2004/6~2008/9) (Track=232, Frames=3141&3159; Track=461, Frame=3159). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

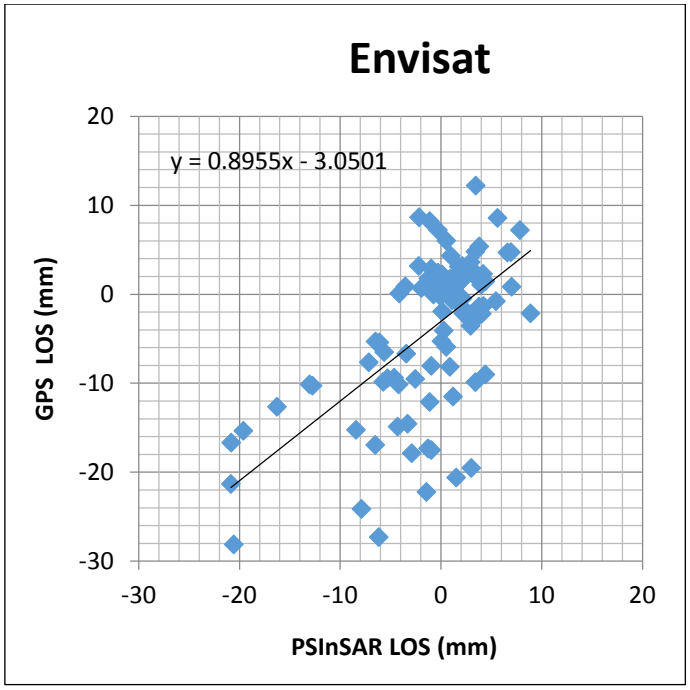


圖 3-1.4：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。
Figure 3-1.4: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ENVISAT images and continuous GPS stations.

3-1-3 ALOS (2007/1~2011/3）

圖 3-1.5 即為 ALOS 衛星影像在此期間（2007/1~2011/03）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，可發現南邊的 PSInSAR 速度都比連續 GPS 測站速度小，造成此原因應該為此影像有包含一南北方向的長波長效應，未來也可針對此校正方式研究出更好的方法，以避免此問題。以 S011 為不動點而言，其最大視衛星方向抬升量約為位於龍船斷層西側的 30 mm/yr。在這段期間（2007/1~2011/3），西南變形行為顯示九條斷層跨斷層兩側都有明顯程度不一的速度變化，其中又以旗山斷層最為明顯。另外，跨過龍船斷層以及右昌斷層也顯示出明顯的速度不連續。

圖 3-1.6 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 ALOS 影像與連續 GPS 測站所測得的速率相關性為 1.7148，其可信度較低，其原因可能為 ALOS 衛星影像是由多個不同軌道拼接時造成的誤差，以及 ALOS 衛星結果中由南至北有一長波長軌道效應誤差。

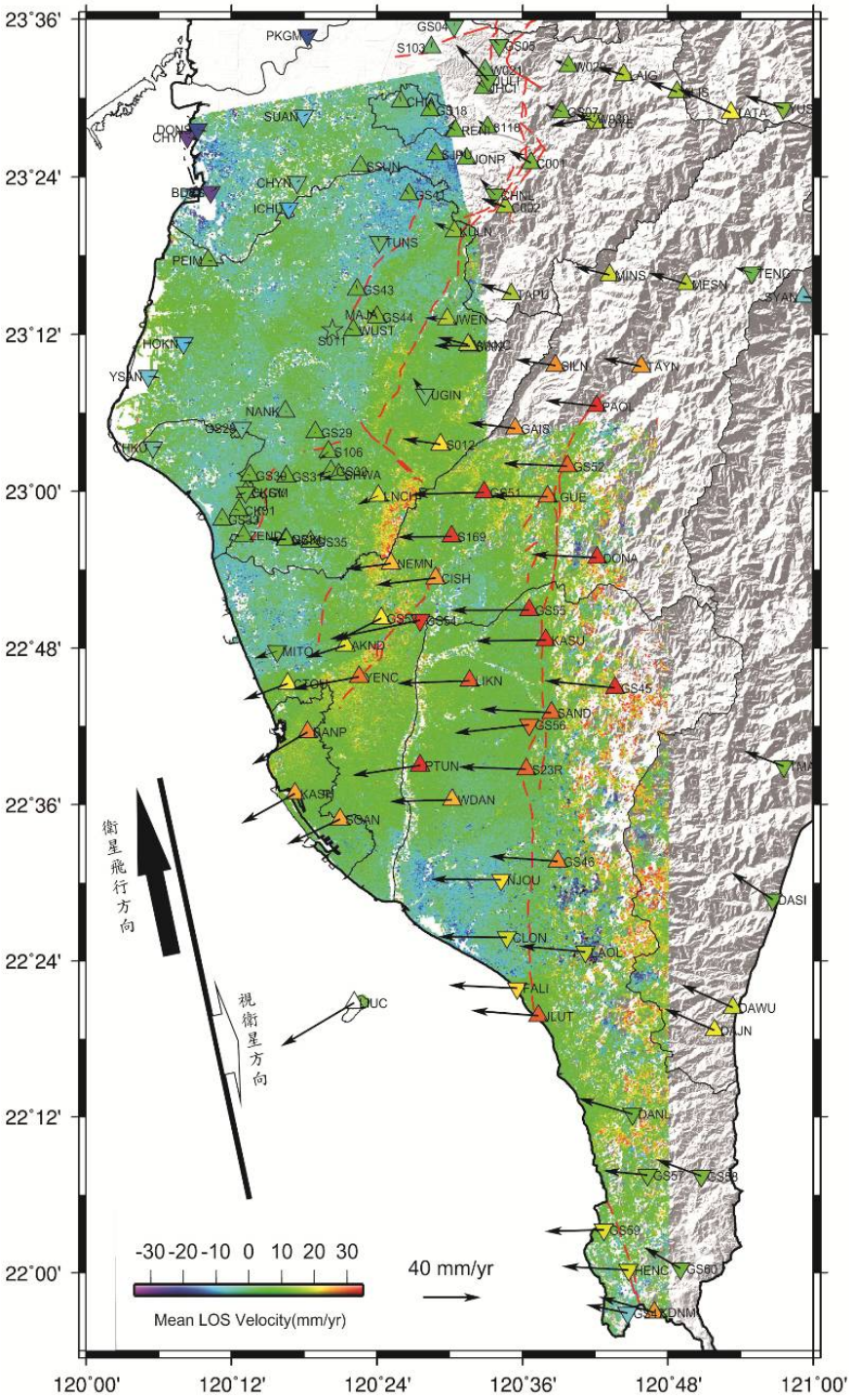


圖 3-1.5：ALOS（2007/1~2011/3）衛星軌道 447，像幅編號 430、440 及 450 及衛星軌道 446，像幅編號 430 及 440 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.5: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2011/3) (Track=447, Frames=430, 440&450; Track=446, Frames=430&440). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

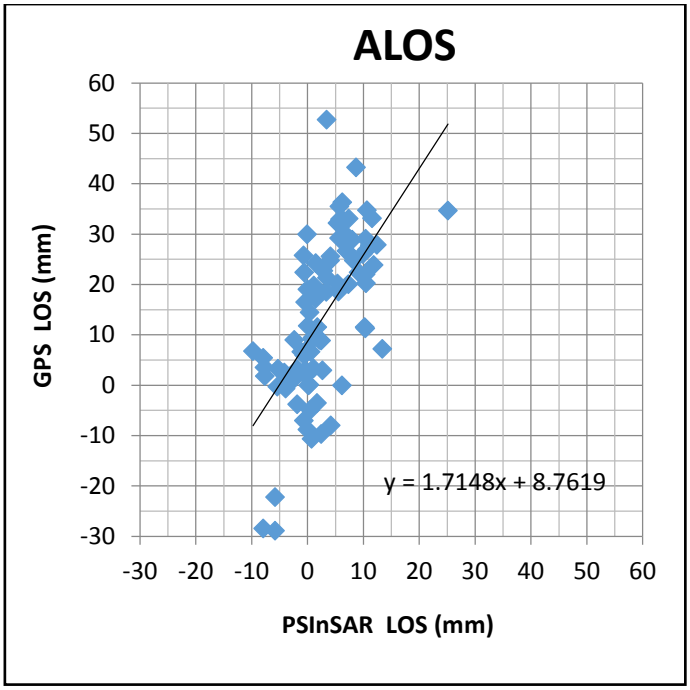


圖 3-1.6：ALOS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。
Figure 3-1.6: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ALOS images and continuous GPS stations.

3-1-4 SENTINEL-1（2015/04~2019/9)

圖 3-1.7 及圖 3-1.8 即為 Sentine-1 衛星影像在此期間（2015/04~2019/09）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。並以星星標示連續 GPS 測站 S011 為參考點位，對所有 PS 點做校正。並且將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與 PSInSAR 速度相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。分析永久散射點的結果，可以得到在這段期間，兩個主要的下陷區域位於沿海的嘉南地區以及南邊的屏東地區。以連續 GPS 測站 S011 為參考點而言，此兩處沿海地區最大視衛星方向下陷量可達到近 30 mm/yr。台南台地則最大抬升量，速率約將近 20 mm/yr。此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層以及旗山斷層兩側可以看到明顯的速度不連續性。另外，跨過鳳山轉換帶也有明顯速度不連續。

圖 3-1.9 為連續 GPS 測站與永久散射點於測站周圍 5 公里平均值相關性圖。由圖可得到本結果之 Sentinel 影像與連續 GPS 測站所測得的速率有良好的相關性（asc: 0.57; des: 0.78），顯示本結果可信度相當高。

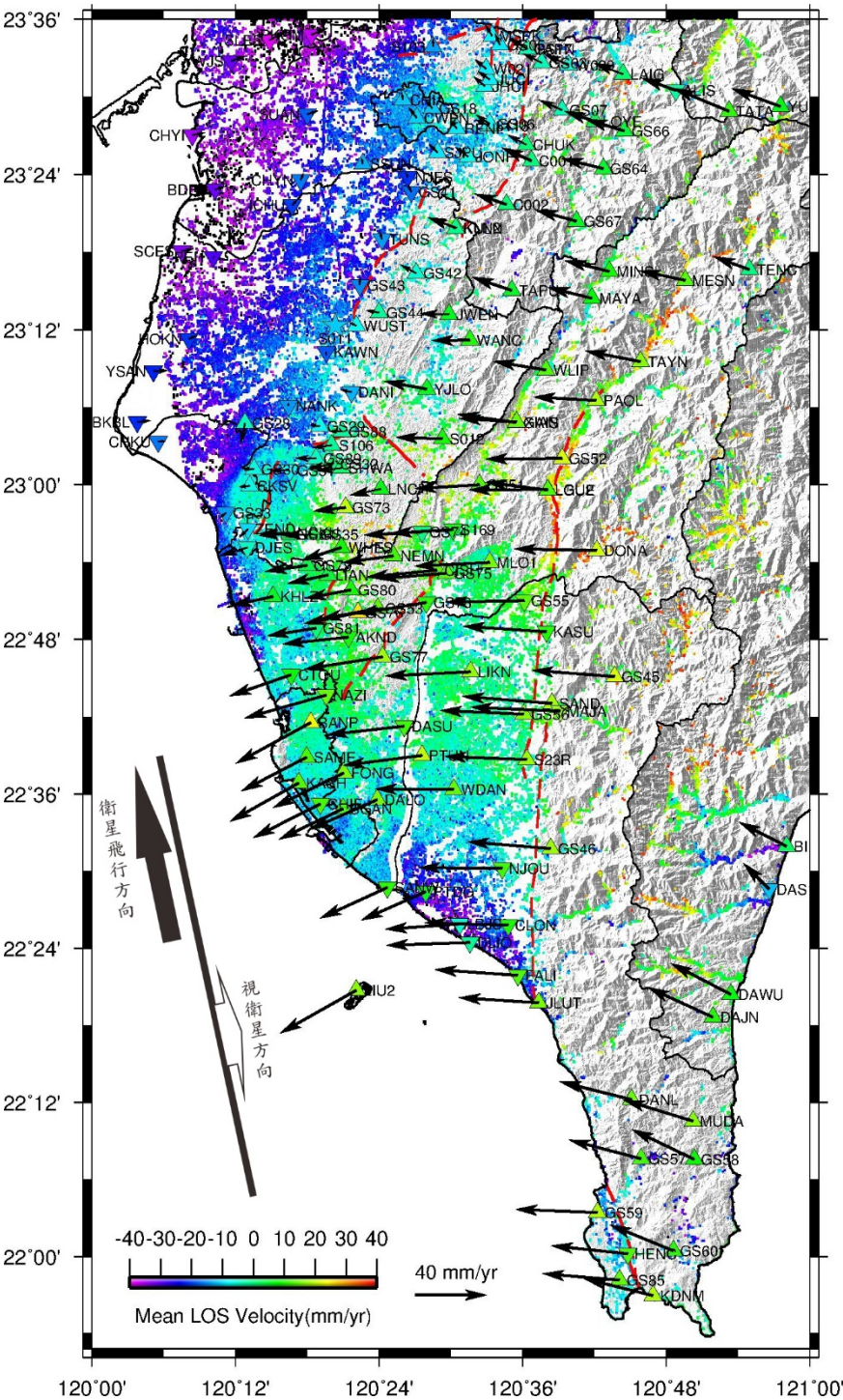


圖 3-1.7：SENTINEL-1 升軌影像（2015/10~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.7: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of SENTINEL-1 images (asc: 2015/10~2019/9). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is continuous GPS station S011. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

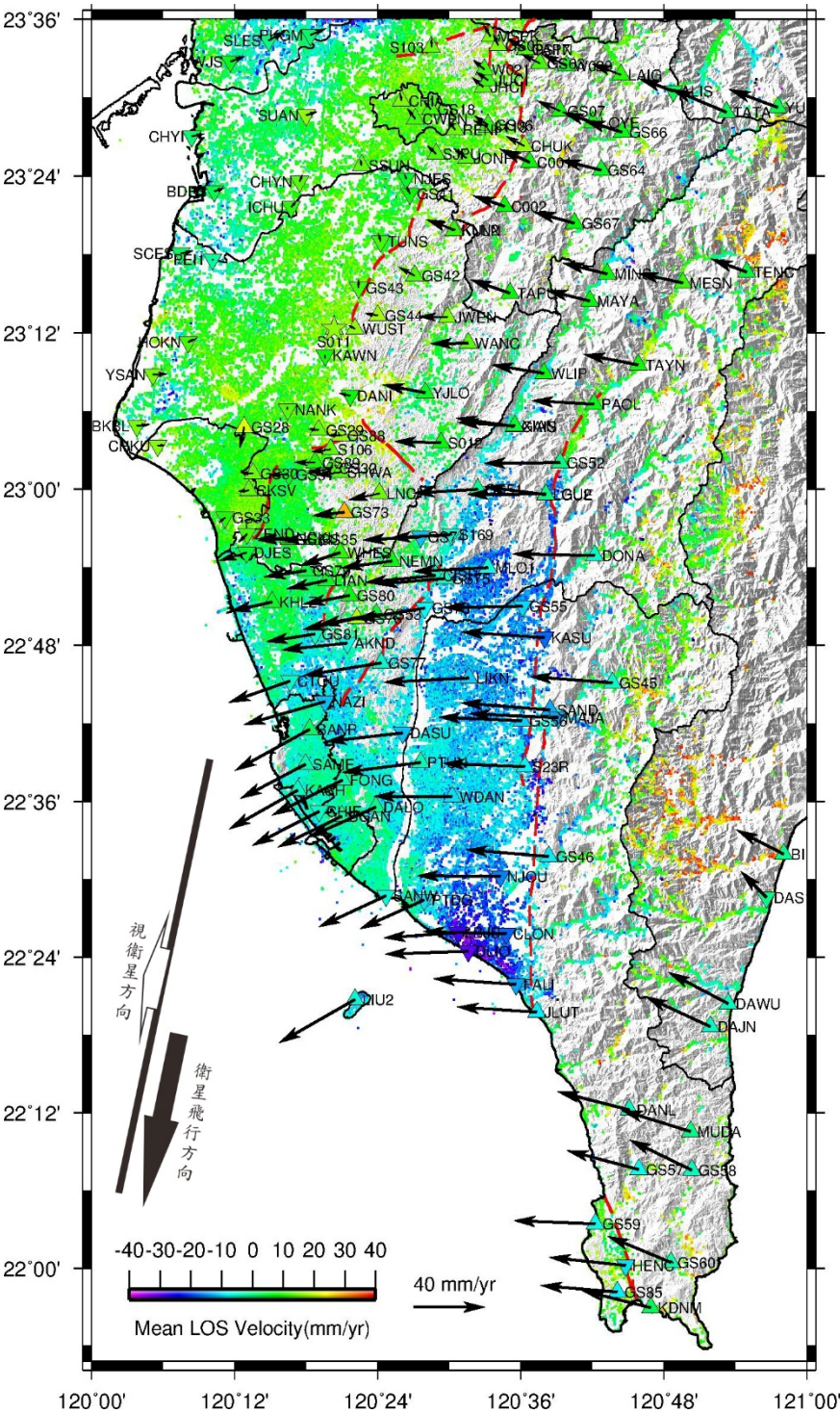


圖 3-1.8：SENTINEL-1 降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.8: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of SENTINEL-1 images (des: 2015/4~2019/9). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence. Reference point is S011, continuous GPS station. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

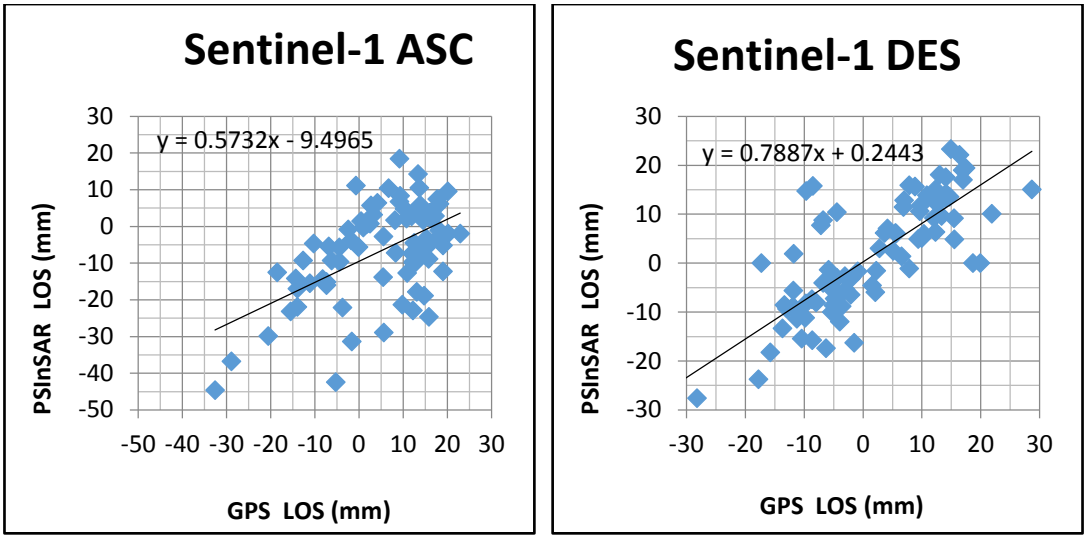


圖 3-1.9：SENTINEL-1 升軌影像（左圖）及降軌影像（右圖）的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-1.9: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs PSs of SENTINEL-1 images and continuous GPS stations.

接著，我們結合升軌與降軌影像以獲得東西方向（圖 3-1.10）與垂直方向（圖 3-1.11）上的地表變形。由結果可以得到在這段期間，嘉義的東石鄉、雲林的內陸以及屏東的林邊與佳冬為主要的下陷區域，其下陷量可達到近 30 mm/yr。主要的抬升則位於台南台地，抬升速率約為 15 mm/yr，而龍崎地區則擁有最大的抬升速率，約 25 mm/yr。此外，嘉義市則是呈現不動或輕微抬升的運動行為。其結果與 GPS 相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。並且，經過這樣的運動方向轉換，可以發現此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層、旗山斷層、小崗山斷層以及六甲斷層與木屐寮斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。

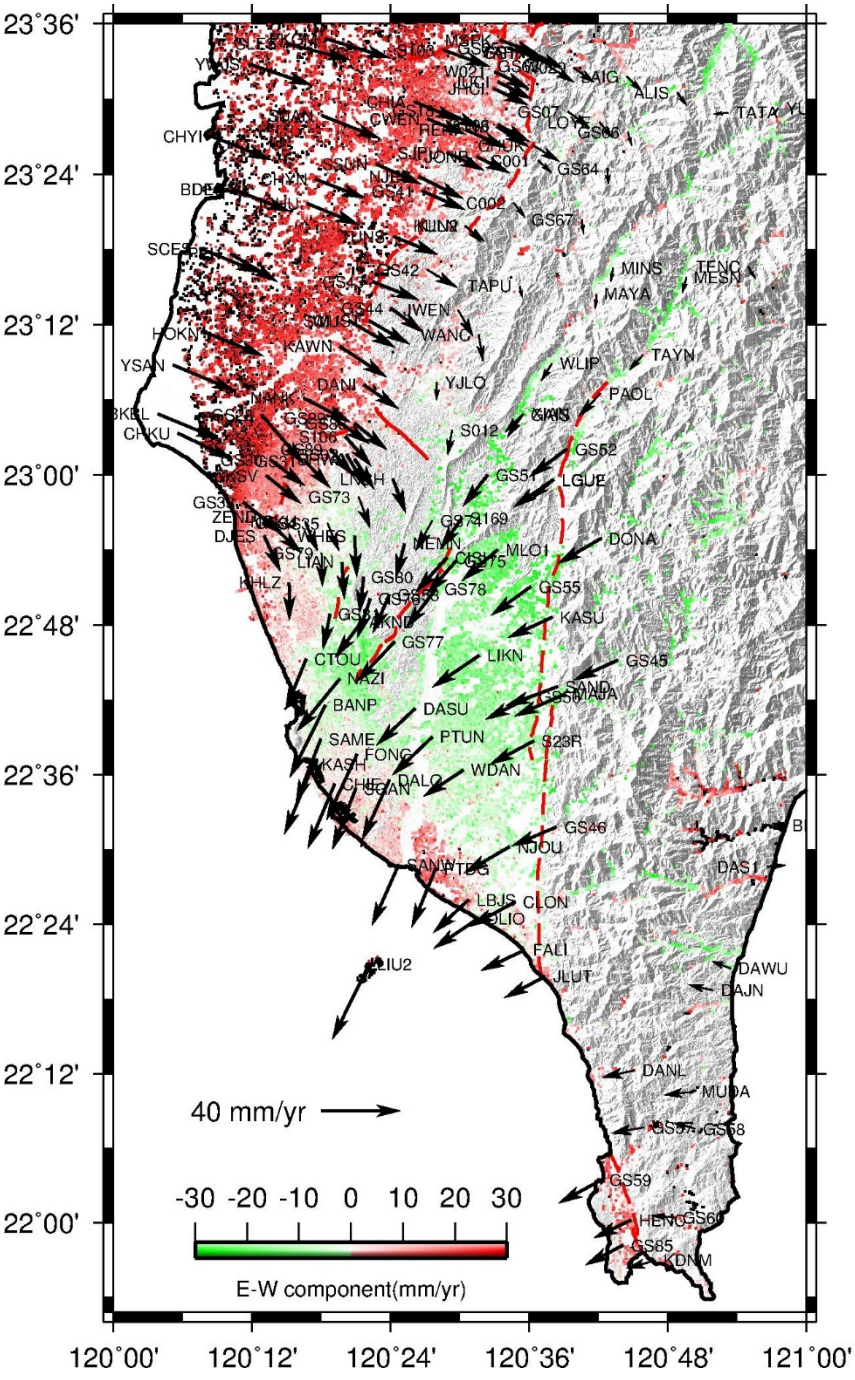


圖 3-1.10：SENTINEL-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。

Figure 3-1.10: 2.5-dimension velocity field (E-W direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color represents eastward; cold color represents westward). The symbol arrows present the GPS horizontal velocity.

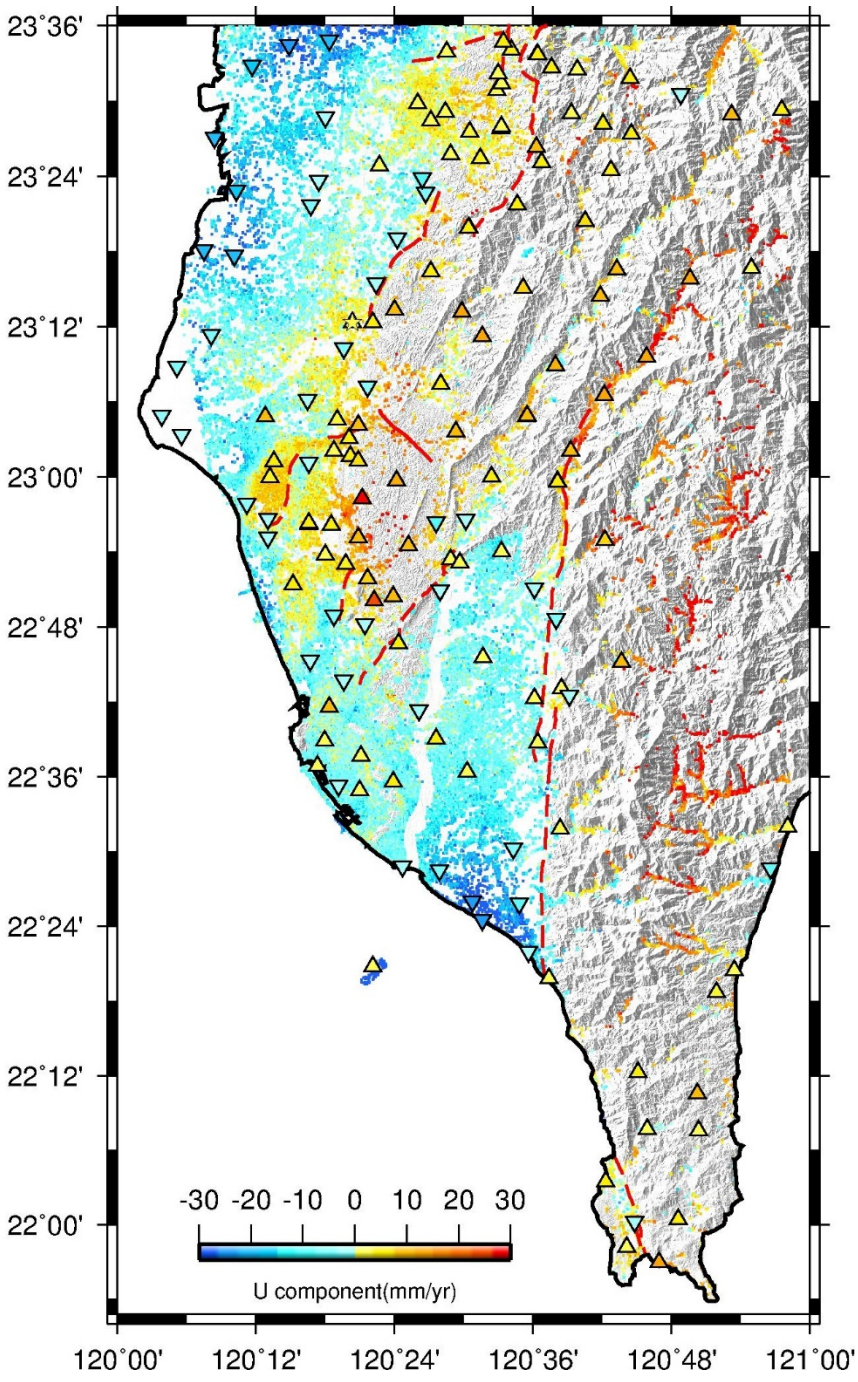


圖 3-1.11：SENTINEL-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系三角形代表地表變形抬升；冷色系倒三角形代表地表變形下降。三角形為連續 GPS 測站垂直方向移動速率。
Figure 3-1.11: 2.5 dimension velocity field (vertical direction) converted from ascending and descending interferograms (warm color triangle represents uplift; cold color inverse triangle represents subsidence). Triangles and inverse triangles represent the vertical velocity field.

3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列

由圖 3-2.1 上圖為連續 GPS 測站時間圖，可看出中部地區大部分的連續 GPS 測站都架設於 1999 年 921 集集地震之後（綠色三角測站），因此大部分測站都無法與 ERS 衛星時期做比較。本計畫上半年度報告針對 ERS 衛星首先挑選南部地區中央研究院位於甲仙之連續 GPS 測站（GAIS）以中央研究院位於角秀山之 S011 測站為參考點進行測試比較。由於 PSInSAR 獲得之時間序列為對視衛星方向（LOS）上的變化，圖 3-2.1 為利用衛星與地面的幾何關係將 GPS 時間序列之 ENU 三個方向上的變化（藍色、綠色及紅色）轉換至 LOS 方向上（黑色），並截取與衛星拍攝同時期之比較。圖中顯示出 ERS 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有較好的關聯性，但因大部分測站架設時期較晚，而無法比較全時段。未來可利用 ERS 衛星之結果分析探討早期地殼變形的時空分佈，以補足 GPS 測站的缺乏。針對 ALOS 衛星則是挑選南部地區中央研究院位於鹽寮之連續 GPS 測站（YENC）以中央氣象局位於仁德之 ZEND 測站為參考點進行測試比較。結果顯示 ALOS 衛星於 2010 年後的影像有明顯的大氣干擾，或是跨過甲仙地震，可能含有相位回覆錯誤，後續應將此結果修正再做分析。

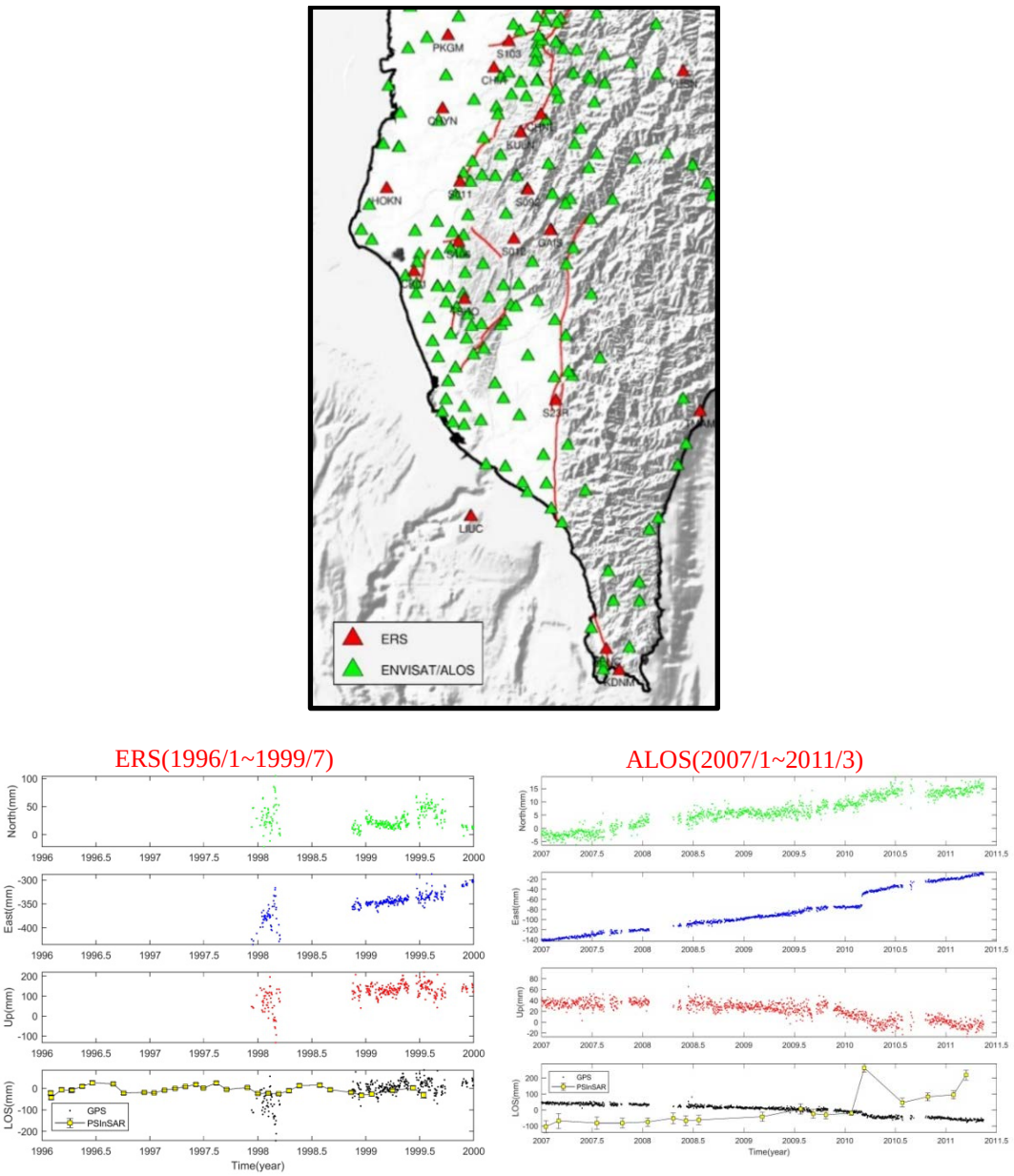


圖 3-2.1：ERS（1996/1～1999/7）時期及 ALOS（2007/1～2011/3）時期之 PSInSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。上圖為 GPS 測站位置。

Figure 3-2.1: Comparison between PSInSAR and time series of GPS during ERS period (1996/1 ~ 1999/7) and ALOS period (2007/1 ~ 2011/3). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR. Upper figure is the location of GPS stations.

3-3 南部地區 PS-InSAR 技術時間序列分析

根據期中報告的評估，本期末階段利用 SENTINEL-1 影像（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9），針對南部地區斷層進行 PS-InSAR 技術時間序列分析。為了確立 SENTINEL-1 影像的可信度，首先挑選南部地區中央研究院位於新化之連續 GPS 測站（S106），以中央研究院位於角秀山之 S011 測站為參考點進行測試比較。圖 3-3.1 為利用衛星與地面的幾何關係將 GPS 時間序列之 ENU 三個方向上的變化（藍色、綠色及紅色）轉換至 LOS 方向上（黑色），並截取與衛星拍攝同時期之比較。圖中顯示出 SENTINEL-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。另外，選擇美濃地震中位移最大的中央研究院位於龍崎之連續 GPS 測站（LNCH），同樣以 S011 為參考站測試地震的效應。由圖 3-3.2 同樣可得到 SENTINEL-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。

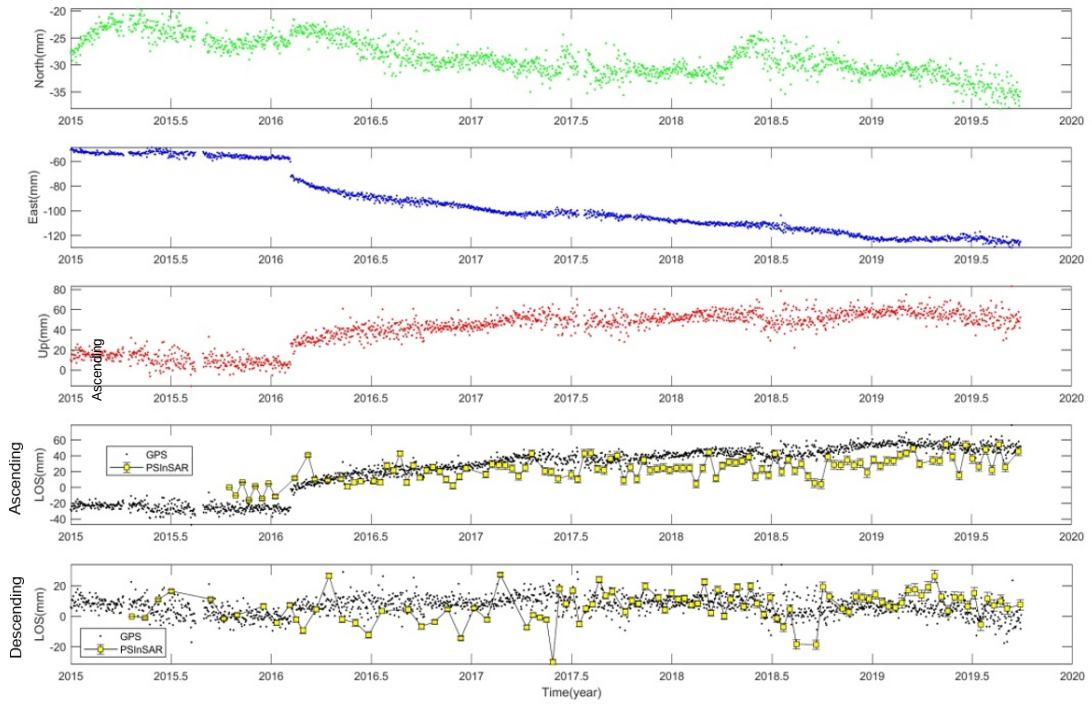


圖 3-3.1：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站新化（S106）時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.1: The comparison between PSInSAR and time series of GPS station S106 during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

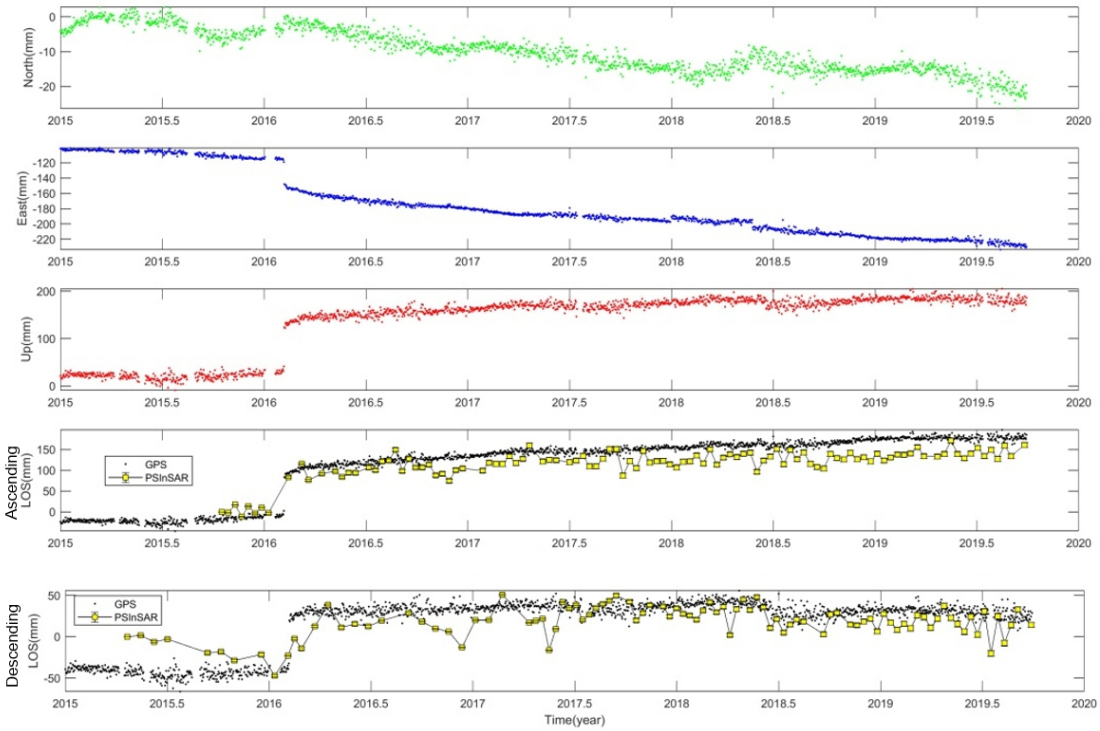


圖 3-3.2：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期之 PSInSAR 與 GPS 測站龍崎(LNCH)時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.2: The comparison between PSInSAR and time series of GPS station LNCH during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

接著由北至南選擇南部地區五條斷層東西兩側（上下盤）各一連續 GPS 測站及附近的永久散射點位進行分析。

3-3-1 六甲斷層

根據圖 3-3.3 GPS 及衛星時間序列結果顯示，SENTINEL-1 衛星時期（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）上盤 GS42 相對下盤 GS43 速度差異不明顯，顯示此斷層淺部近期並未有活動的現象。

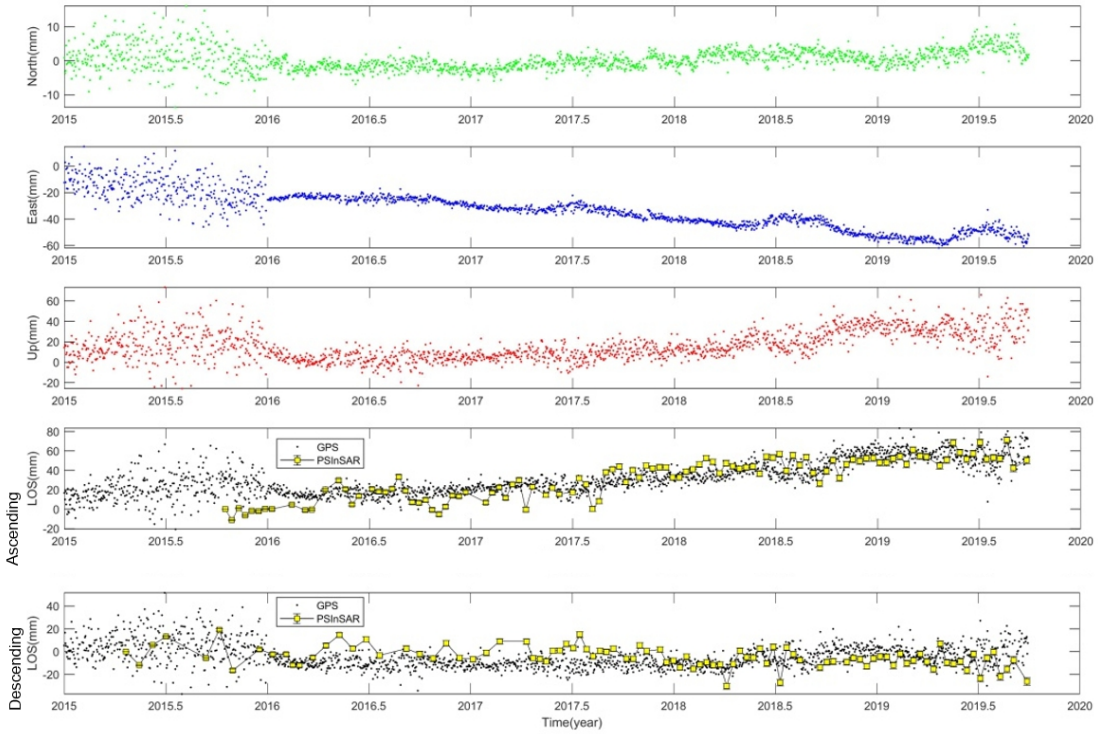


圖 3-3.3：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS42 相對於 GS43 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.3: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS42 relative to GPS station GS43 during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

3-3-2 新化斷層

根據圖 3-3.4 GPS 及衛星時間序列結果顯示，新化斷層南側 GPS 測站 S106 相對於北側 GS29 於美濃地震時呈現變形大小不同的行為，此現象可於升軌影像觀察到，並且與 GPS 的時間序列相當一致。但除了美濃地震以外，長期來說，此兩測站之間並無明顯的速度差異。另外，由 GPS 及衛星影像都可以觀察到相當明顯的季節性年周期震盪。

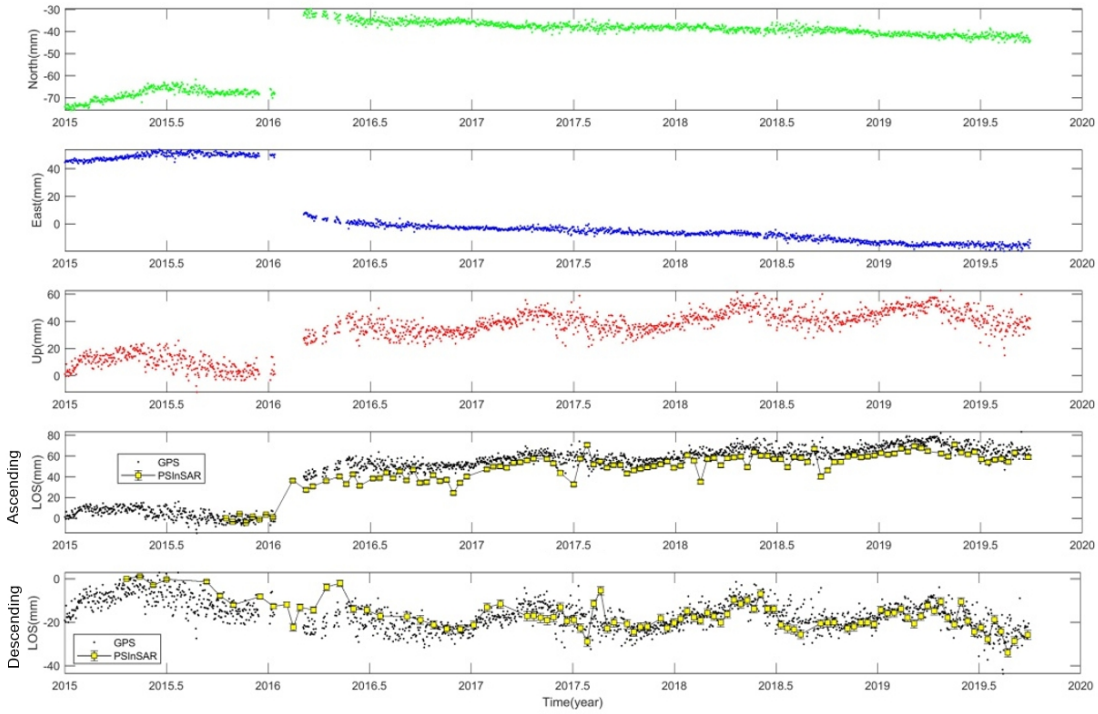


圖 3-3.4：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 S106 相對於 GS29 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.4: The comparison between PSInSAR and time series at GPS station S106 relative to GPS station GS29 during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

3-3-3 後甲里斷層

根據圖 3-3.5 GPS 及衛星時間序列結果顯示，後甲里斷層東側 GPS 測站 GS31 相對於西側 GS30 於美濃地震時呈現變形大小不同的行為，但此現象經過座標投影到視衛星方向上卻較不明顯，但其測站之間的相對速度似乎在美濃地震後有了很大的改變，GPS 及 InSAR 結果都顯示台南台地於美濃地震震後抬升速度變快。

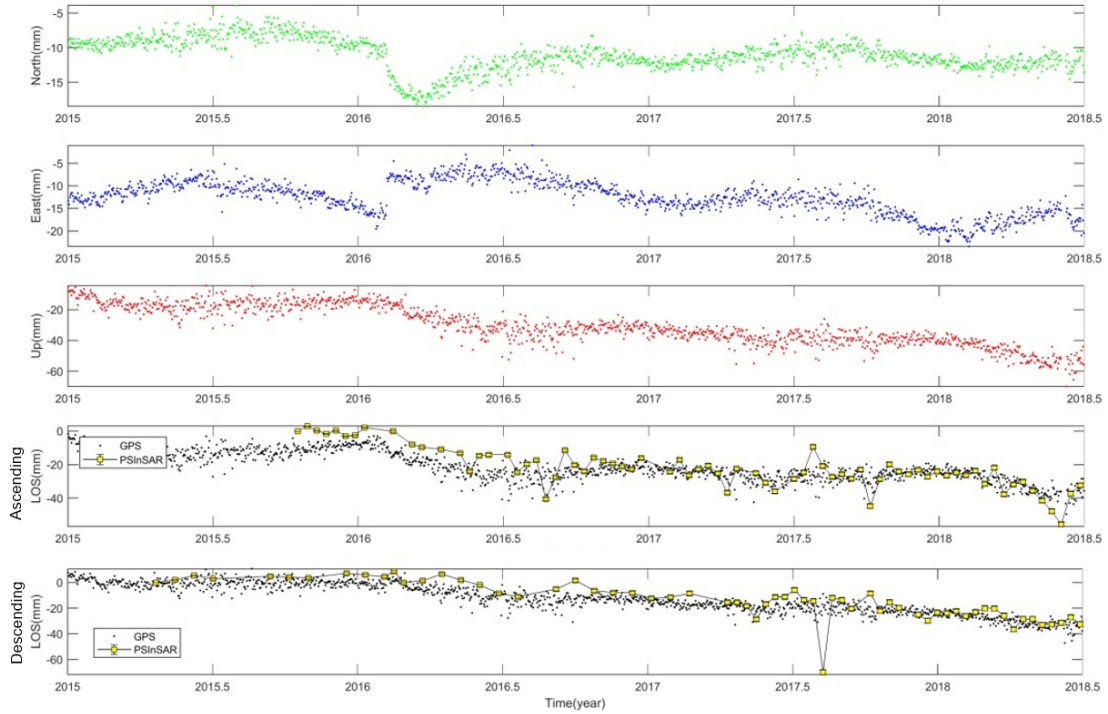


圖 3-3.5：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 GS31 相對於 GS30 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure3-3.5: The comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS31 relative to GPS station GS30 during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

3-3-4 旗山斷層

根據圖 3-3.6 GPS 及衛星時間序列結果顯示，旗山斷層東側 GPS 測站 LIKN 相對於西側 AKND 於美濃地震時呈現些微變形大小不同的行為，但此現象經過座標投影到降軌影像視衛星方向上卻較不明顯，只有在升軌影像上可以觀察到約 2-3 公分的同震變形。長期來說，此兩測站之間並無明顯的速度差異。

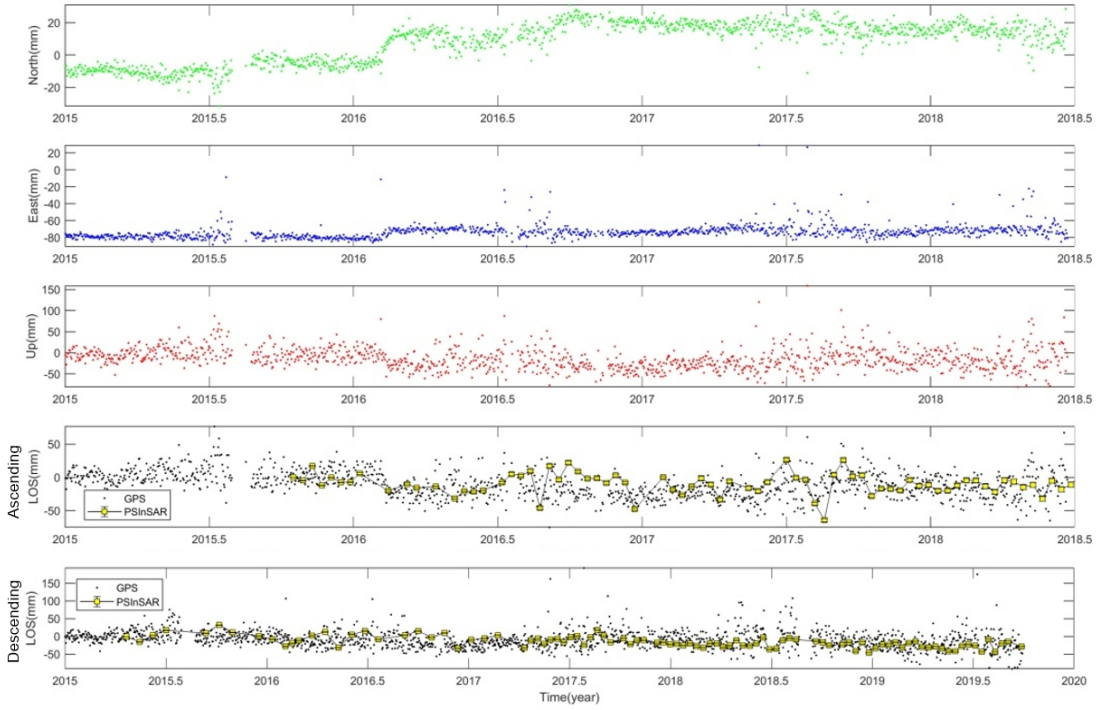


圖 3-3.6：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期 GPS 測站 LIKN 相對於 AKND 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.6: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station LIKN relative to GPS station AKND during SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS respectively. Black point represents transferred GPS velocity from 3D to LOS direction. Yellow square represents time series of PS-InSAR.

第四章、南部地區地表速度場分析

4-1 GPS 與精密水準觀測資料整合

本節針對南部地區之 GPS 與精密水準觀測資料進行整合，然而由於恆春半島地區自 2006 年屏東外海地震事件後，該地區之地殼變形行為較為複雜，故在 2-5-6 節個別列出恆春半島地區發生的各事件以及速度變化。在此節僅針對嘉南地區與高屏地區進行觀測資料整合。藉由 GPS 測站與精密水準速度場分布之空間趨勢比對，可見嘉南地區與高屏地區可以很好的相互接合。

根據時間序列分析指出，2010 甲仙地震後南部地區之速度場發生改變，而 2016 美濃地震在南部地區垂直速度場也有些為改變，因此本計畫在評估南部地區 2002 - 2019 年速度場時，針對 2002 - 2010 年, 2010 - 2016 年與 2016 - 2019 年三個時間段分別估算速度場（圖 4-1.1 和圖 4-1.2）。

就水平速度場而言（圖 4-1.1），在 2010 甲仙地震前，南部地區 2005-2010 水平速度場，平均速度量值 8.5 - 43.1 mm/yr，在 2010 地震過後之速度場，速度量值約 8.5 - 43.0 mm/yr，整體南部地區在地震前後並無明顯差異。但在高雄市杉林區和內門區與台南市龍崎區的部份測站，在甲仙地震後有觀察到 3 - 4 mm/yr 的速度增加，研判是受到潮州斷層最北段於甲仙地震後的影響。在 2016 年美濃地震後，龍崎與燕巢地區也觀察到水平速度的改變。

就三個時間段垂直速度場而言（圖 4-1.2），在台南至屏東沿海一帶的垂直沉降速度約為 10 至 15 mm/yr，進入山區則有約 3 - 6 mm/yr 的平均抬升速率。善化 -關廟地區之垂直速度約在 0 - 4 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20 mm/yr 的抬升速度，在高雄地區車瓜林斷層周遭有 15 mm/yr 的抬升速度，小岡山斷層西側有約 10 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0 至 3 mm/yr，在潮州斷層以西約有 20 mm/yr 的沉降速率，東側則無明顯變化。垂直速度場也可以觀察到，在 2010 年甲仙地震後高雄市杉林區和內門區與台南市龍崎區，抬升速度與甲仙地震前相比增加了約 10 - 15 mm/yr。而在 2016 年美濃地震後高雄市燕巢區，抬升速度與美濃地震前相比增加了約 5 - 10 mm/yr。

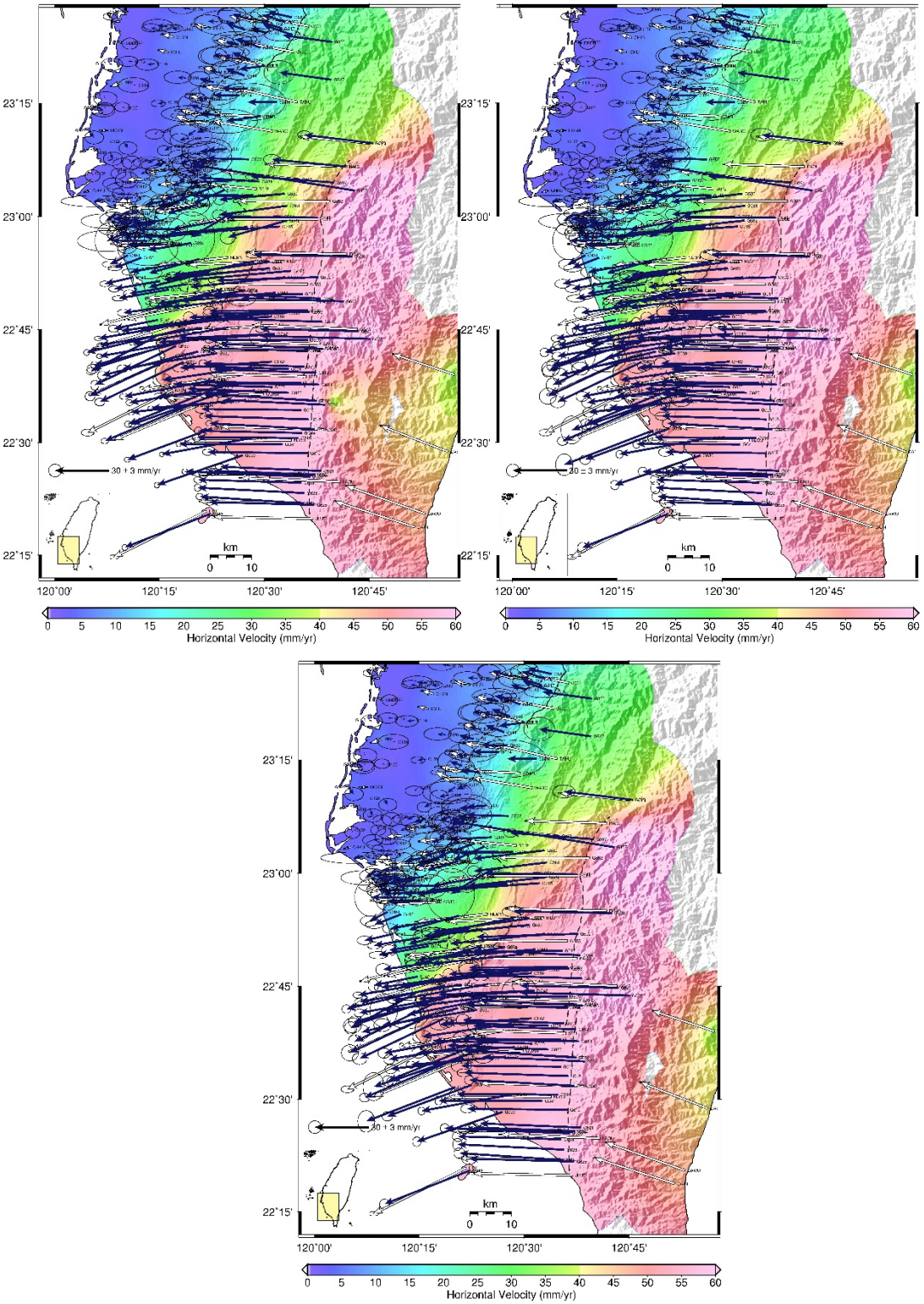


圖 4-1.1：南部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示 2010–2016 年速度場，下圖表示 2016–2019 年速度場。

Figure 4-1.1: Horizontal velocity field relative to station S01R in southern Taiwan. Left figure is the velocity field from 2002 to 2010; the right figure is the velocity field from 2010 to 2016; the lower figure is the velocity field from 2016 to 2019.

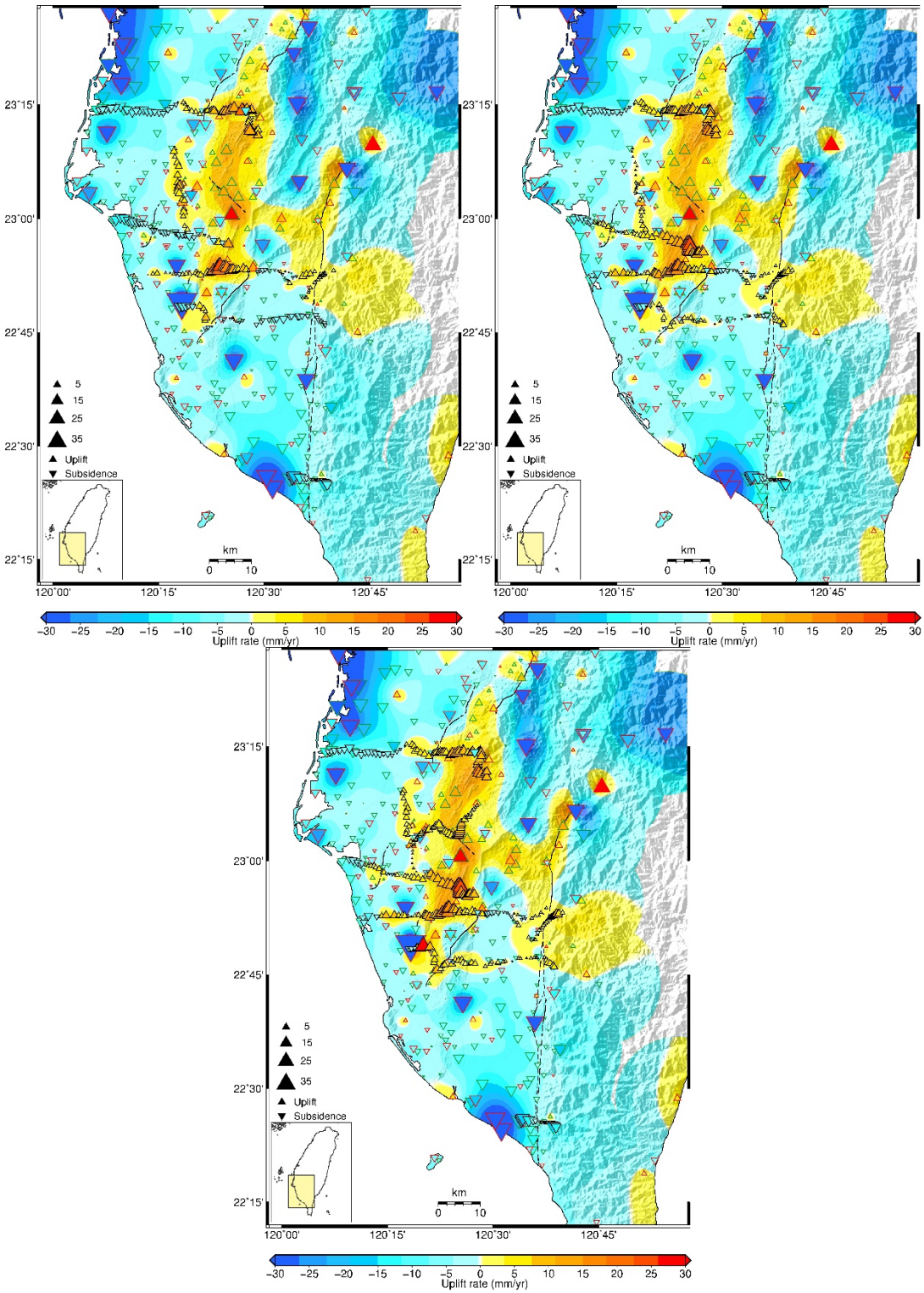


圖 4-1.2：南部地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左上圖表示 2002 - 2010 年速度場，右上圖表示 2010 - 2016 年速度場，下圖表示 2016 - 2019 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示 GPS 移動站、紅色邊框表示 GPS 連續站。

Figure 4-1.2: Vertical velocity relative to station S01R during 2002 - 2010 (Left figure), 2010 - 2016 (Right figure) and 2016 - 2019 (Lower figure) in southern Taiwan. Warm-colored triangles are uplift while cool-colored inverse triangles are subsidence. Size of triangles represent amount of velocities. Precise leveling benchmarks are in dark frame; campaign-mode GPS sites are in green frame; continuous GPS sites are in red frame.

4-2 GPS 與 InSAR 觀測資料整合

4-2-1 資料整合方法

在空間上由於 InSAR 的觀測資料數量明顯多於 GPS，因此若要將這兩種資料整合到塊體模型中進行計算，InSAR 資料點數的縮減勢在必行。而如何在 InSAR 資料減點的同時將地殼變動的重要資訊保留，便是影響塊體模型結果合理性與的重要關鍵。以下根據臺灣大學胡植慶團隊所處理之臺灣南部 ERS 衛星的 PS-InSAR 成果，來進行資料減點分析。

本研究以 Bagnardi and Hooper (2018).所發表之 Geodetic Bayesian Inversion Software (GBIS)為工具執行 Quadtree 資料減點。首先根據 PS-InSAR 的 LOS (line-of-sight)速率觀測值分佈（圖 4-2.1），選定地表變形相對穩定之區域（圖 4-2.2a）作為計算 LOS 背景雜訊的參考。由於南部沿海地區的地表變形受到人為活動影響較嚴重，如抽取地下水，且脊樑山脈資料點分佈較為稀疏，故在本研究中選取西部麓山帶作為參考區域並標示於圖 4-2.1 中。選定參考區域後，先將資料進行平面的一維濾波，以去除空間相關的訊號（圖 4-2.2b）。接著取出參考區域內的一個資料點，將其與參考區域內的其他資料點逐個配對算出其之間的距離與 LOS 速率值的差異；接著取出下一個資料點，執行同樣的動作。算出所有資料點之間兩兩配對的距離差異值後，參考 Decriem et al., (2010)所使用的方法，計算在不同距離(h)下，所有資料點配對的半方差值(semivariance) γ(h)，

$$\gamma(\mathrm{h}) = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}[vel(m_i) - vel(s_i)]^2$$

其中 N 為參考區域內相距 h 的資料點配對數量，$vel(m_i)$與$vel(s_i)$為該配對的 PS-InSAR 速率值。隨著距離(h)由近至遠，我們可以畫出一半方差圖(semivarigram)(圖 4-2.2c)，最後經由經驗公式擬合並算出減點時所需要的門檻值(Bagnardi and Hooper, 2018)：

$$\gamma(\mathrm{h}) = \gamma_0 + (\gamma_{sill} - \gamma_0)[1 - \exp(-\frac{h}{h_{range}})]$$

從擬合的結果中我們會獲得資料本身的隨機雜訊(γ_0)，也就是當距離為 0 時的半方差值，以及資料點間當達到特定距離(h_{range})所形成的飽和半方差值

(γ_{sill})。將飽和半方差值減去隨機雜訊，便能獲得所有資料點彼此之間存在的穩定半方差值，以做為減點時的門檻值。

在使用 Quadtree 方法進行資料減點時，我們首先將區域分割為 4 塊，計算其中包含的資料點之方差值(variance)，方差值(var)之公式如下：

$$\text{var} = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}[vel(m_i) - vel_{avg}]^2$$

其中此處的 N 為該區塊內資料點的數量，$vel(m_i)$、vel_{avg}分別是各個資料點的速度值與區域內資料點的平均速度值，若該區域方差值高於利用上述方法所求得的門檻值時，則持續進行區域分割，切割次數上限為 1000 次。若超過此次數時方差值仍高於門檻值，則將其視為與其他資料空間相關性不足的雜訊並捨棄。另外為了提高資料的代表性，我們增加了兩個篩選條件。首先，每個區塊中必須包含至少 5 個資料點；其次，每個區塊中每平方公里至少要包含 11.3 個資料點。由以上方法所得的結果如圖 4-2.3 所示，PSInSAR 由原來的 379302 個資料點濃縮至 4434 個，數量約為原來的 1.17%，減點後的資料將會以各區塊的中心做為其座標，並以區塊內所有資料的平均值作為其所代表的數值。圖 4-2.4 展示減點後的 PS-InSAR 速度值分佈。

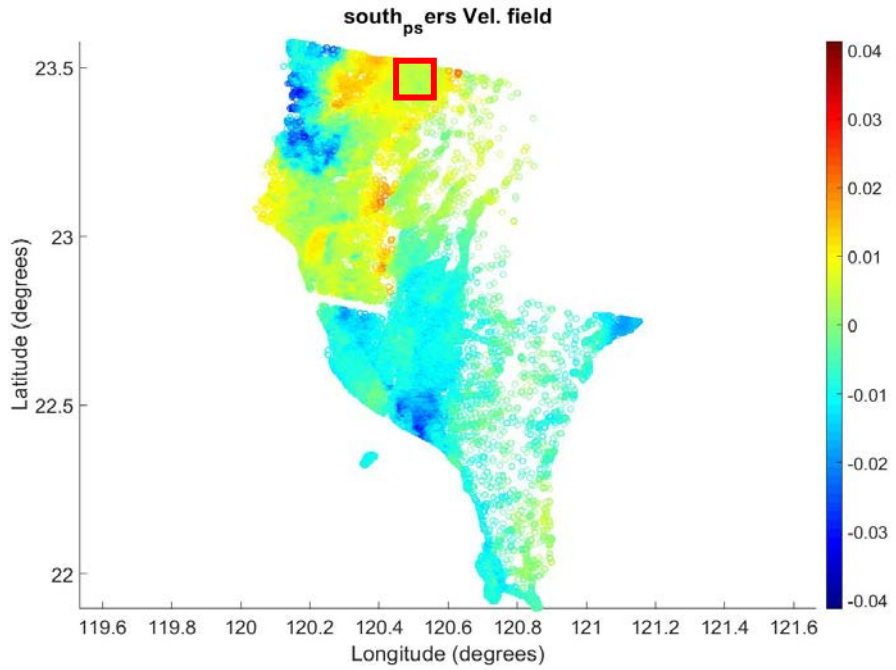


圖 4-2.1：臺灣南部 PS-InSAR 速度場資料，顏色條帶的單位為 mm/yr。紅色方框為所選定之參考區域。

Figure 4-2.1: PS-InSAR velocity in southern Taiwan, the unit of the color bar is mm/yr. The red box is the location of the reference area.

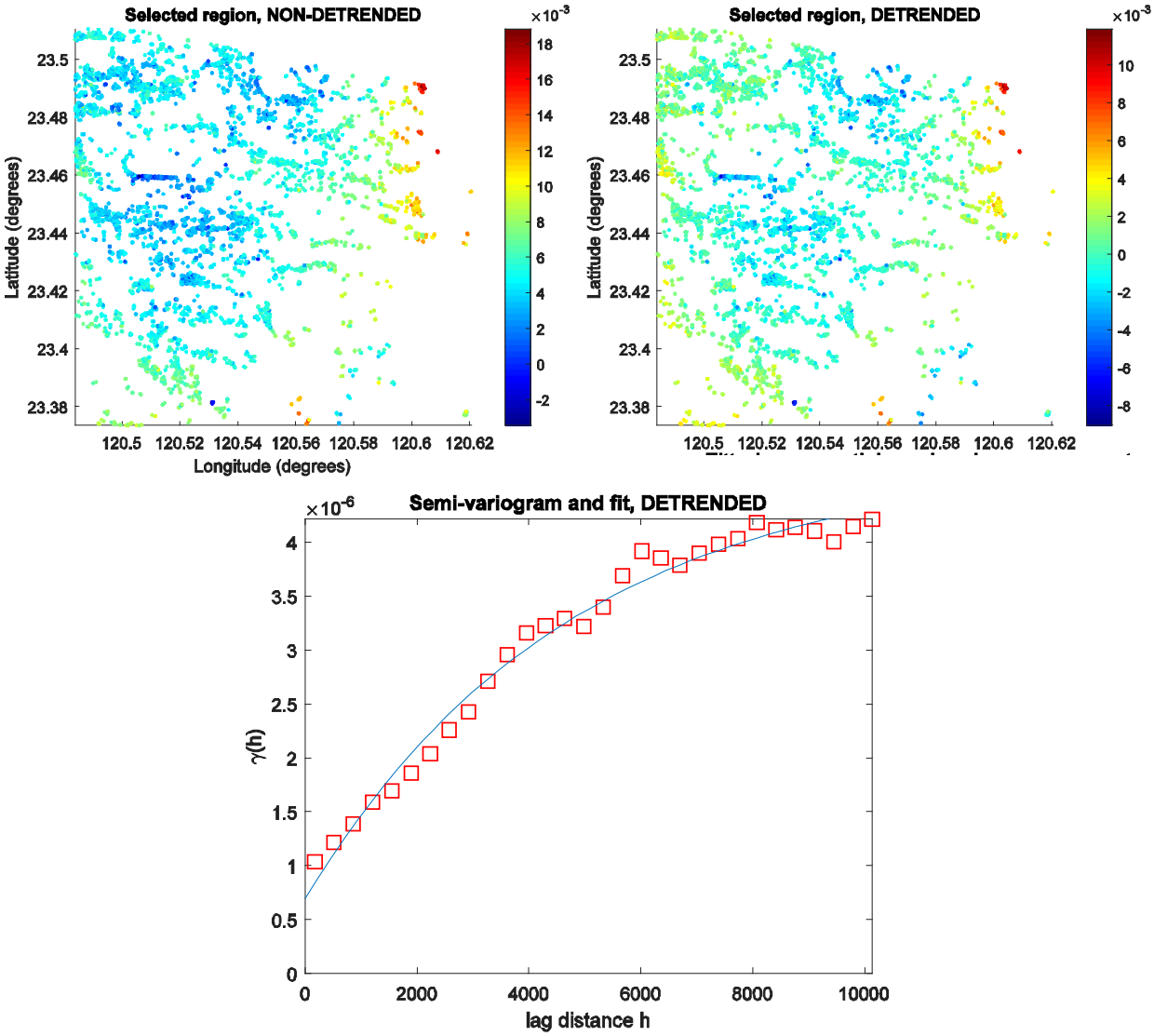


圖 4-2.2：(a)，參考區域內包含的資料點；(b)，經過一維率波後的資料點顏色條帶的單位為 mm/yr；(c) 參考區域內資料的半方差圖；紅色方框，該距離下的半方差值；藍線，由經驗公式所擬合的半方差圖，顏色條帶的單位為 mm/yr。

Figure 4-2.2: (a) Data points in the reference area. (b) Data points after 1D filter, the unit of the color bar is mm/yr. (c) Semi-variogram of the data in reference area.The red box represents the semivariance of each distance; the blue line is the fitting result from empirical formula.

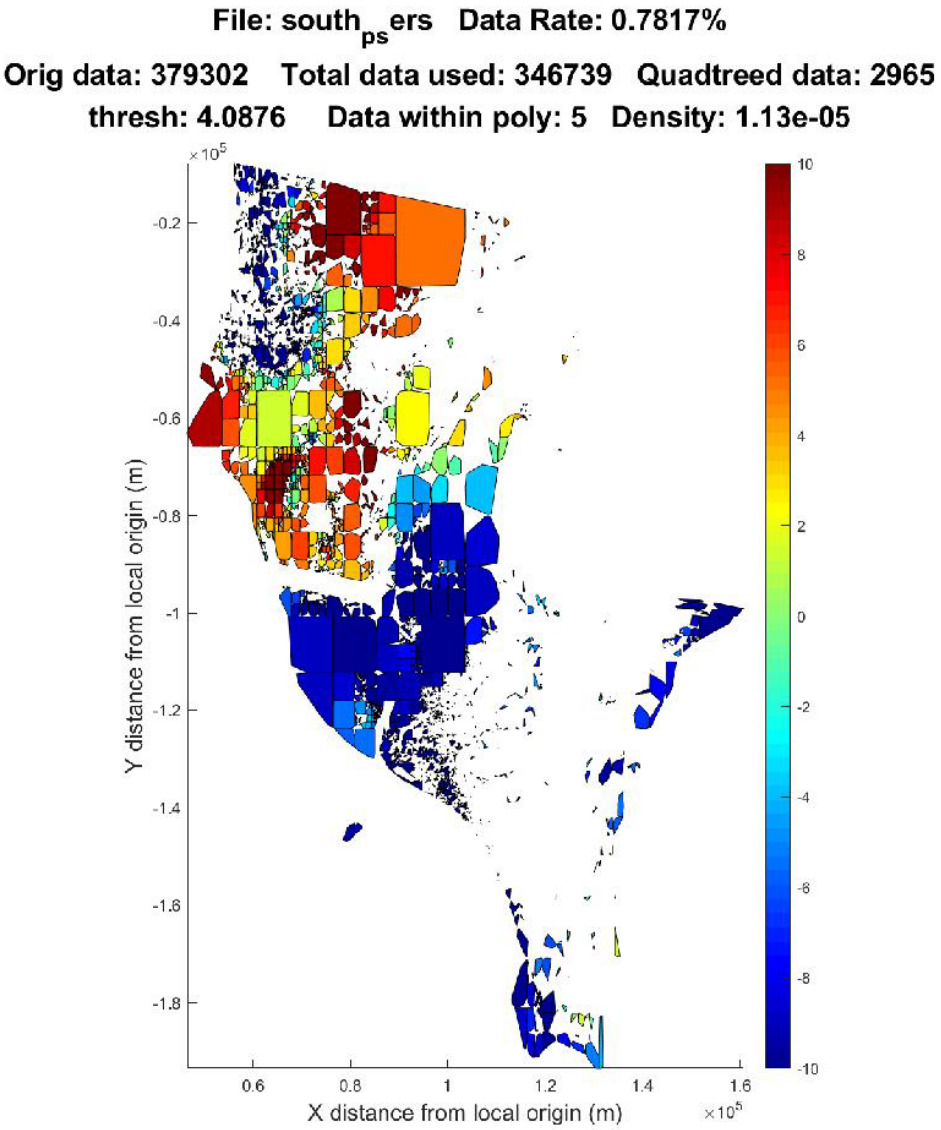


圖 4-2.3：PS-InSAR 資料在減點後的結果，依據減點後的 LOS 速度值在區塊中上色，圖中為當地座標，以澎湖 S01R GPS 測站為原點，XY 軸座標為與原點的距離，顏色條帶的單位為 mm/yr。
Figure 4-2.3: The PS-InSAR result after reducing points. Then coloured the blocks according to the LOS velocity after point reduction. The coordinates in the figure use Penghu S01R GPS station as reference. XY axes are the distance between the original point. The unit of the color bar is mm/yr.

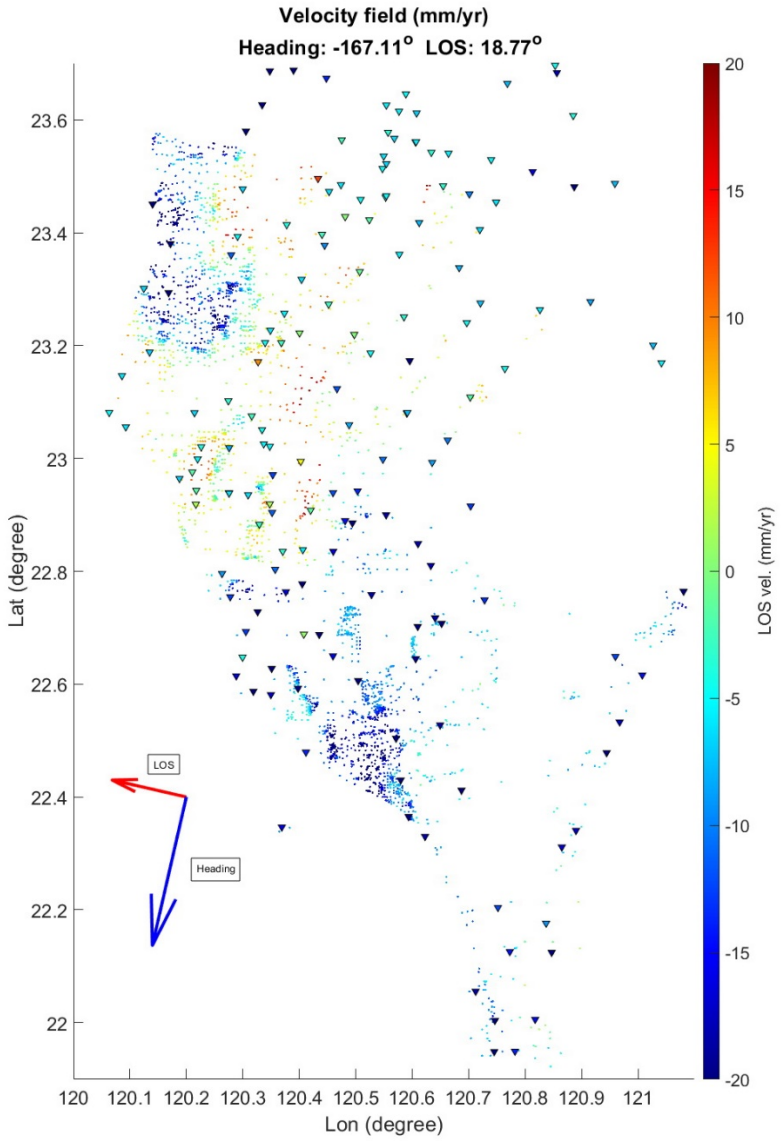


圖 4-2.4：圓點為減點後的資料點，與其 LOS 速度值；三角形圖案為 GPS 速度場合成至 LOS 方向後的速度場。

Figure 4-2.4: The round points are the data and LOS velocity after point reduction. The triangle in the figure represent the GPS project LOS velocity.

4-3 南部地區應變速率分布

4-3-1 應變速率計算方法

地表之速度向量於空間中分布的形貌特性，會因為坐標框架的選擇不同而有所變化。然而，應變速率反映的是各測站間的速度梯度變化，此特性得以使應變速率於空間中分布的型態變化獨立於不同坐標框架的選擇。因此，利用應變速率於空間中分布的特性，可以有效地協助我們討論各個區域應變累積及其地震危害度之問題（Ward, 1994）。

應變速率計算的基本計算原理是基於平面應變的假設，我們考慮一個物體受到應力作用後，應變只反映在x-y 平面上，z 方向則無應變發生，正值表示伸張，負值則表示縮短。早期研究中，應變速率的計算是將測網分成各個多邊形，並計算每個測網內的應變速率。測網內任一測線的應變率（$\dot{\varepsilon}$）可以寫成:

$$\dot{\varepsilon} = (dL / dt) / L$$

其中是L 基線長，是dL 基線長變化量，dt 是時間間距，故dL/dt 為基線長度之變化速率。而應變速率$\dot{\varepsilon}$與應變率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$ 之關係為：

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_{ee}\sin^2\theta + \dot{\varepsilon}_{en}\sin\theta\cos\theta + \dot{\varepsilon}_{nn}\cos^2\theta$$

其中θ為自正北以順時鐘方向量度之測線方位角，應變率張量的參考座標為e 軸向東、n 軸向北之地平座標系。$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 之正值表示伸張，負值則表示縮短；$\dot{\varepsilon}_{en}$ 正值表示沿南北方向有左旋剪切應變率。若同一測網內有三條以上不同方向的測線，則可利用最小二乘法求得該測網之應變速率張量$\dot{\varepsilon}_{ee}$ 、$\dot{\varepsilon}_{nn}$ 與$\dot{\varepsilon}_{en}$（Prescott et al., 1979）。

在本計畫中，為了求得一個符合諧和（compatibility）條件之連續應變速率場，我們首先計算一個在空間上連續之地表速度場，最後再藉由速度的梯度計算應變速率。就連續地表速度場之計算面，我們先在計畫執行區域內進行網格點（內插點）之建立，每一個內插點之速度量是由周圍之 觀測點計算而來（Shen et al., 1996）。

傳統上，我們可以將此逆推問題視為以下形式：

$$d = G(m)s + e$$

G(m)是連結非線性模型參數向量 m、線性模型參數向量 s 與觀測資料向量 d 之核心矩陣，e 則為的觀測與模型的誤差，其平均為零，斜方差距陣（covariance matrix）為 Σ 讓誤差呈常態分佈 e ~ N（0, Σ）。非觀測資料向量 d 之形式為$d = [d_1^T, d_2^T, \cdots, d_n^T]^T$，誤差向量的形式為$e = [e_1^T, e_2^T, \cdots, e_n^T]^T$。通常來說，網格點的總數大於有資料點的網格數，且整個系統合理假設為連續變化，因此有必要對線性模型 s 參數施以正則化（regularization） 以最小化平滑或阻尼運算式$\|Ds\|^2$。如此，最佳解就是將下列的目標公式最小化：

$$\Phi(m,s) = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i^2 \left\{ (d_i - G_i(m)s)^T \sum_i^{-1} \left(d - G_i(m)s\right) \right\} + \sum_{j=1}^{k} \beta_j^2 \left\| \left(s\right) \right\|^2$$

γ_i 是不同資料間的權重、β_j 是平滑參數。一般來說，平滑參數通常用經驗選取或自由決定。

為了更客觀的估計平滑參數來推估更可靠的應變率分佈，我們可以採用貝式逆推方法，如此模型參數的後驗機率（posterior probability）為

$$p(e, \sigma^2, \alpha^2 | d) \propto (2\pi\sigma^2)^{-\frac{N}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} (2\pi\sigma^2)^{-\frac{M}{2}} \times$$

$$exp\left[-\frac{1}{2\alpha^2} (d - Ge)^T \Sigma^{-1} (d - Ge) - \frac{1}{2\alpha^2} (De)^T \left(De\right) \right]$$

如此未知的線性模型參數為每個格點中的應變率張量 e，未知的非線性模型參數為平滑參數 α^2 與資料權重 σ^2。我們可以使用 metropolis 演算法來找出非線性參數的分佈，並由此計算線性最小平方法而求得理想的模型參數數值分佈。D 是一階的平滑運算式：

$$= D_{x,y}\epsilon_i = \sum_{j=1}^{4} \frac{\epsilon_j - \epsilon_i}{\Delta x, y_{ij}}$$

4-3-2 應變速率計算結果

本期計畫所使用之速度場涵蓋全台，包含連續站與移動站資料，就此分析臺灣西南部斷層帶的應變率與主應變軸方向分布的計算。本次計算中，將臺灣西南部區域劃出平行正南北與平行正東西向之格點，約每五公里選取一網格點，自西南部與恆春地區共 238 個格點；使其選取格點鄰近十公里之地表速度資料以達資料密度與平滑化之需求，計算中同時估計各網格的應變率矩陣之量值與平滑參數之數值。計算所得之應變場、剪應變場與旋轉率分佈如下列圖 4-3.1 至圖 4-3.3 圖示所示。

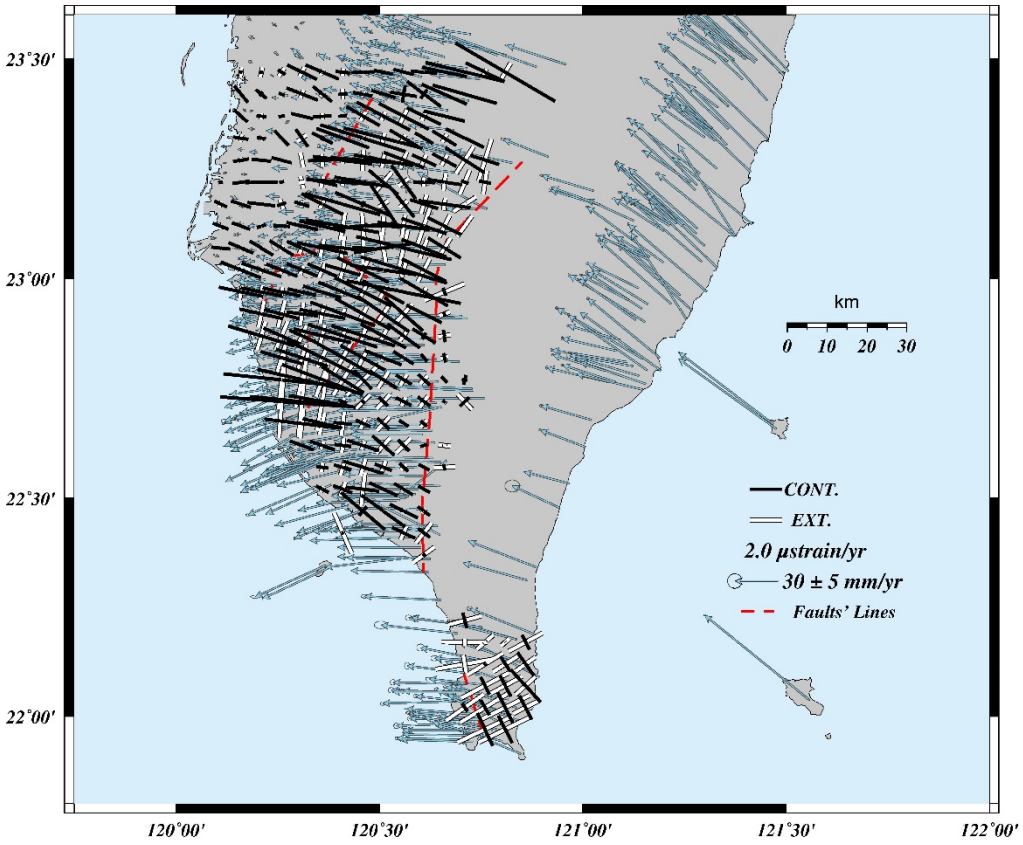


圖 4-3.1：臺灣西南部地區應變場圖。
Figure 4-3.1: SW Taiwan strain fields.

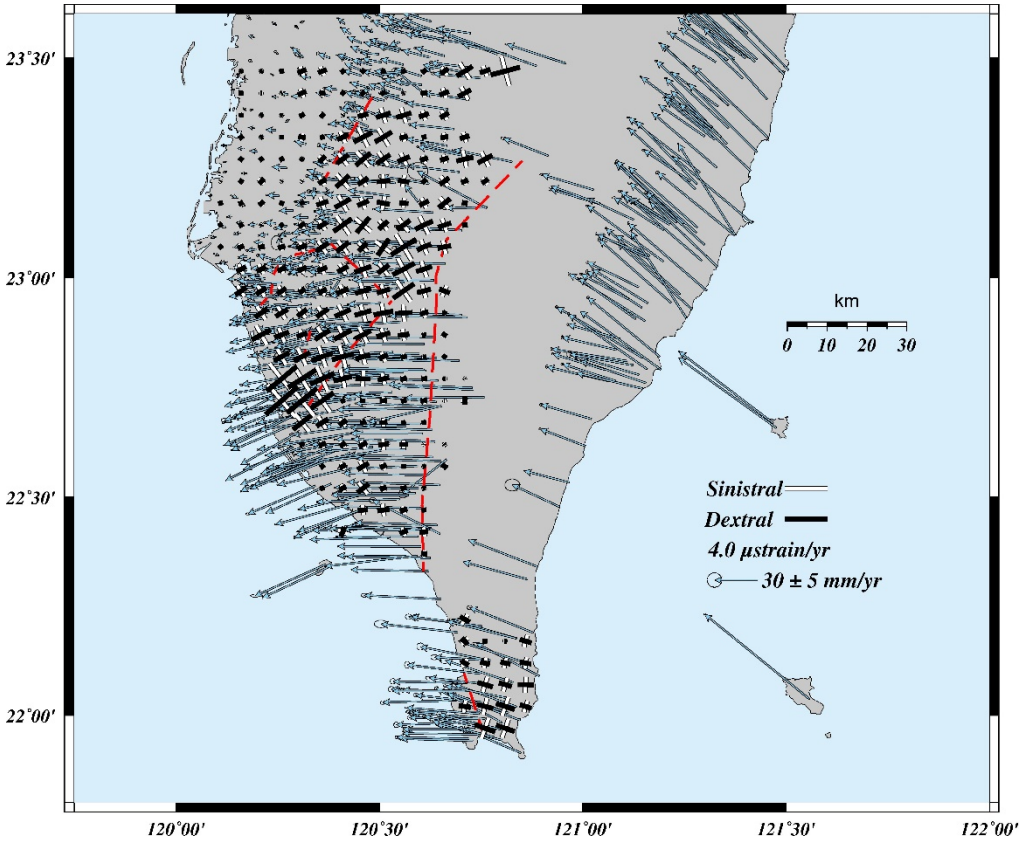


圖 4-3.2：臺灣西南部地區剪應變場圖。

Figure 4-3.2: SW Taiwan shear strain field.

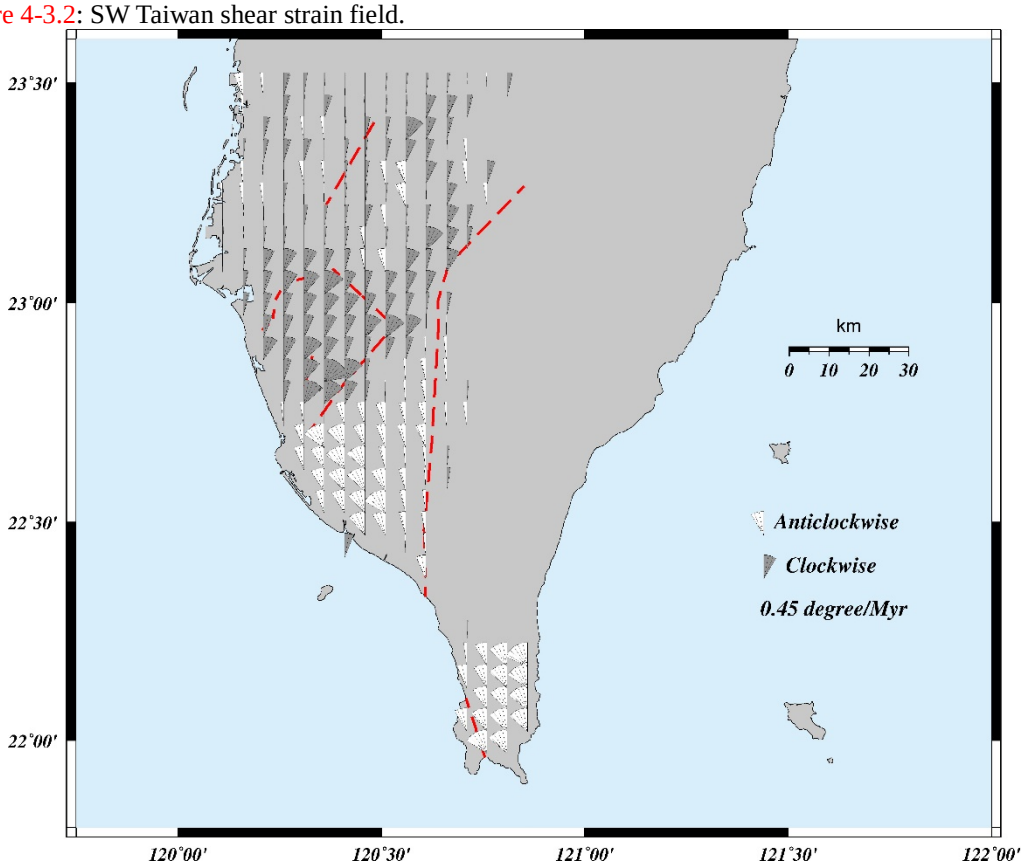


圖 4-3.3：臺灣西南部地區之旋轉率分佈圖。

Figure 4-3.3: Rotation rate distribution of SW Taiwan.

4-3-3 應變速率成果分析

西南部多為平原地形，GPS 架設密集；故本次計算之臺灣西南部應變場之網格點密集許多，可以見到跨斷層兩側因速度方向改變，進而應變也反映出相對的變動。可見整體趨勢沿著東西方向壓縮，東北-西南方向有相對的伸張。

從圖 4-3.1 可見應變場的壓縮量主要集中於潮州斷層以西至木屐寮-六甲斷層之間跨斷層，方向多為西北-東南走向，又以旗山斷層沿線量值較為顯著；伸張量則多平行潮州斷層走向。應變量跨木屐寮-六甲斷層西側有明顯壓縮落差，而伸張量量值相近。而應變伸張量走向於旗山斷層段近乎平行，由北往南量值漸增。潮州斷層中段跨斷層有明顯應變量落差，又以伸張量較為明顯，但應與 GPS 於斷層東側分布稀疏相關，可見圖 4-3.1 中斷層東側較無速度場資料。恆春斷層部分於斷層東側有較明顯的壓縮量大於右側且平行斷層走向，而由北至南段漸增，而伸張量跨斷層較不顯著，越近東部量值越少，可見逆衝分量自東部往西有累加之勢。

剪應變場可見圖 4-3.2，同樣集中於潮州斷層與木屐寮-六甲斷層之間，又以木屐寮-六甲斷層至旗山斷層之間最為顯著，右移分量走向亦平行於其間，量值而言越往南近沿海越大。最北邊的木屐寮-六甲斷層呈西北-東南走向，與右移分量平行，斷層東側量值較大，跨斷層有明顯落差，呼應地質觀測之右移斷層特性。左鎮斷層沿線則顯示平行的平行之左移剪應變分量，斷層東側大於斷層西側，顯示斷層在走向滑移分量上應具左移分量。小崗山斷層之斷層東側右移量值略大於西側，顯示其應包含右移分量，但量值較小。旗山斷層整體而言，斷層西側右移分量大於東側，但量值落差分界並不如木屐寮-六甲斷層以斷層為分界，顯示其應為右移斷層帶鎖定特性。而潮州斷層北段入山區轉折處，於斷層西側右移分量大於東側，中段與南段則因測站於東側較少之故而較不顯著。恆春斷層與左移分量皆近於南北走向，東側大於西側，可見於走向滑移方面其應帶左移分量。

旋轉率分佈圖（圖 4-3.3）可見木屐寮-六甲斷層至旗山斷層之間呈現右旋運動，又於左鎮斷層西北方略帶左旋運動；而潮州斷層中南段至旗山斷層之間則為左旋運動，愈近沿海左旋分量愈增。較明顯者可見左鎮斷層跨斷層之方向落差，顯見其為右移之走向滑移斷層。潮州斷層於北段至中段轉折以北，於斷層西側帶右旋分量，而斷層中段至南段於斷層西側帶左旋分量，東側帶右旋分量，可見潮

州斷層於南段有擴張分量。更南端之恆春斷層則全區為左旋運動，又斷層東側略大於左側，顯示恆春斷層略帶逆衝分量。

4-4 斷層活動分析-車瓜林斷層

根據中央地質調查所五萬分之一區域地質圖之旗山圖幅（林啟文，2013），車瓜林斷層為逆移斷層，呈東北走向，由內門往西南方向延伸至崎溜，總長約 25 公里，斷層線西南端為階地堆積層與沖積層所覆蓋，斷層在西南向的延伸性並不明確（圖 4-4.1）。若車瓜林斷層西南端繼續往西南沿伸約 2 公里會與高鐵相交，因此車瓜林斷層的斷層跡位置、斷層延伸特性與斷層活動性，是本計畫所關注的重要議題。

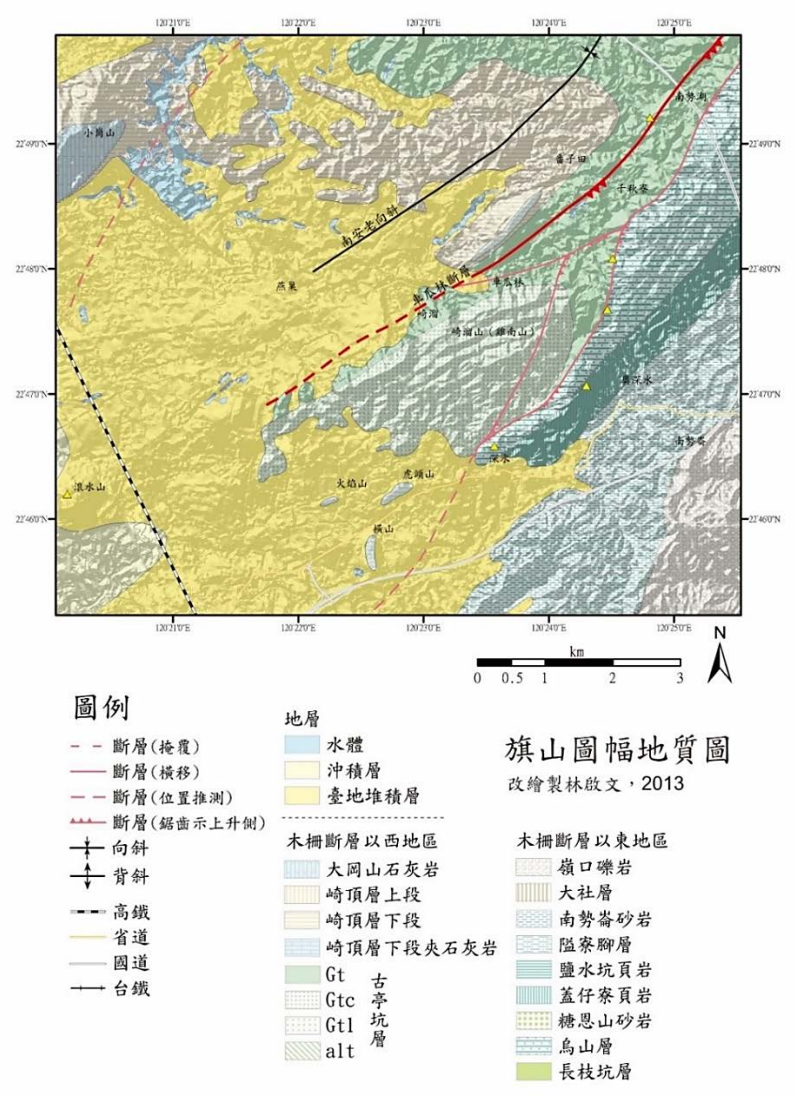


圖 4-4.1：中央地質調查所五萬分之一區域地質圖之旗山圖幅（林啟文，2013）。
Figure 4-4.1: Regional Geological Map of Chishan, 1:50000, Sheet 56, published by the Central Geological Survey (Lin, 2013).

從 GPS 的速度場觀測中（圖 4-4.2），在車瓜林斷層的西南端，由於階地堆積層與沖積層覆蓋，無法知道明確的斷層跡，但 GPS 的速度場觀測中，車瓜林斷層的西南延伸方向，此 GPS 速度變化仍然明顯，但由於 GPS 測站密度不足，車瓜林斷層西南端方向的確切位置和活動性，建議加密測站，持續監測。

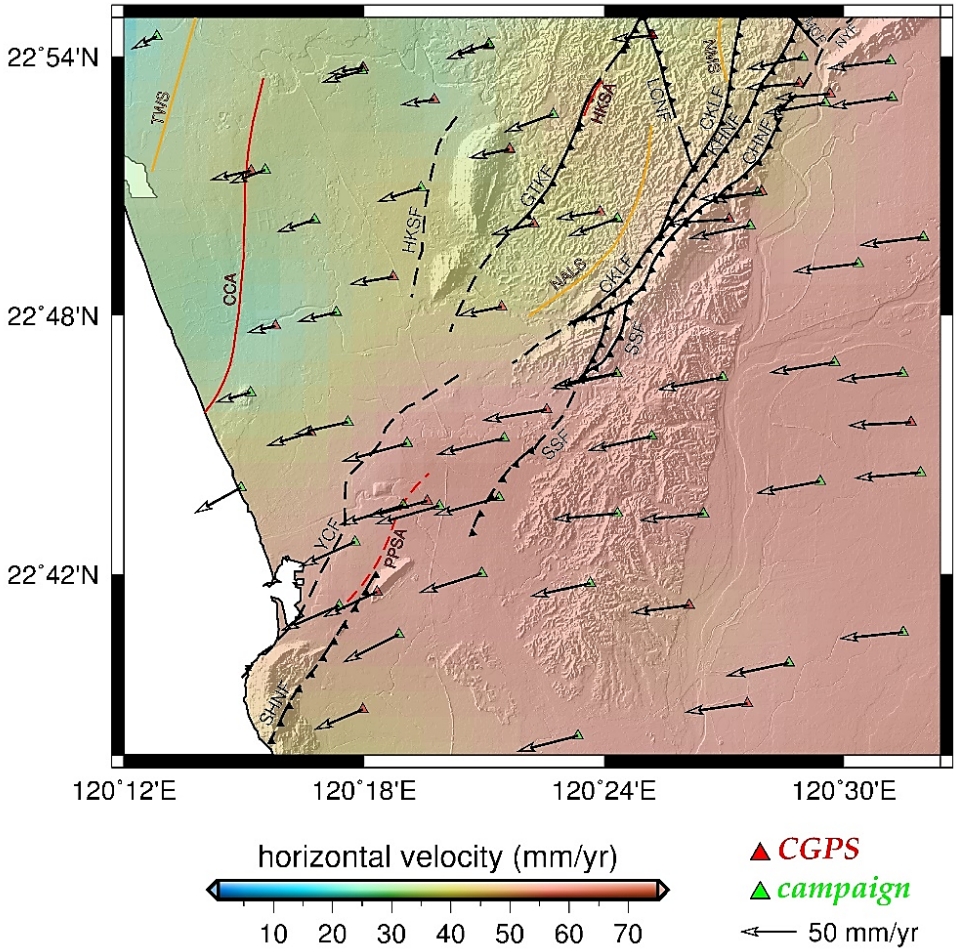


圖 4-4.2：GPS 速度場套疊在 20 米數值高程，顏色表示 GPS 速度場內差所得之速度變化。主要構造線取自中央地質調查所五萬分之一區域地質圖之臺南圖幅（吳樂群等，2011）、旗山圖幅（林啟文，2013）、高雄圖幅（陳華玟等，2001）。黑色線代表斷層線，HKSF 為小崗山斷層，GTKF 為古亭坑斷層，LCNF 為龍船斷層，CKLF 為車瓜林斷層，KHNF 為鼓山斷層，CHNF 為旗山斷層，MCF 為木柵斷層，NYF 為內英斷層，SSF 為深水斷層，SHNF 為壽山斷層；紅色線代表背斜，CCA 為中洲背斜，HKSA 為小滾水背斜，PPSA 為半屏山背斜；橘色線代表向斜，TWS 為大灣向斜，NALS 為南安老向斜，NMS 為內門向斜。其中 YCF 為右昌斷層，參考自徐澔德等（2016）。

Figure 4-4.2: GPS velocity field superimposed on 20 m DEM. Color represents velocity change of GPS velocity field from interpolation. Major structures captured from the Regional Geological Map of Tainan (Wu et al., 2011), Chishan (Lin, 2013), and Kaohsiung (Chen et al., 2001), 1:50000, published by the Central Geological Survey. Black lines represent major faults: HKSF=Hsiaokangshan fault, GTKF=Gutingkeng fault, LCNF=Lungchuan fault, CKLF=Chekualin fault, KHNF=Kushan fault, CHNF=Chishan Fault, MCF=Mucha fault, NYF=Neiying fault, SSF=Shenshui fault, SHNF=Shoushan fault, YCF=Youchang fault (Shyu et al., 2016). Red lines represent major anticlines. CCA=Chungchou Anticline, HKSA=Hsiaokunshui Anticline, PPSA=Panpingshan Anticline. Orange lines represent major synclines. TWS=Tawan Syncline, NALS=Nananlao Syncline, NMS=Neimen Syncline.

利用 2007 年至 2011 年 ALOS 雷達影像，以 PS-InSAR 技術所得之視衛星方向之平均變形場，可發現車瓜林斷層的西南延伸方向，有一明顯的視衛星方向速度變化（圖 4-4.3），可約略定出一視衛星方向速度變化的不連續線型，此一線形在西南端可能連接右昌斷層（YCF），但東北端與車瓜林斷層的連接性仍不清楚，後續工作需要蒐集更多的地質和鑽井資料，以釐清車瓜林斷層向西南端方向繼續延伸可能的斷層跡位置。

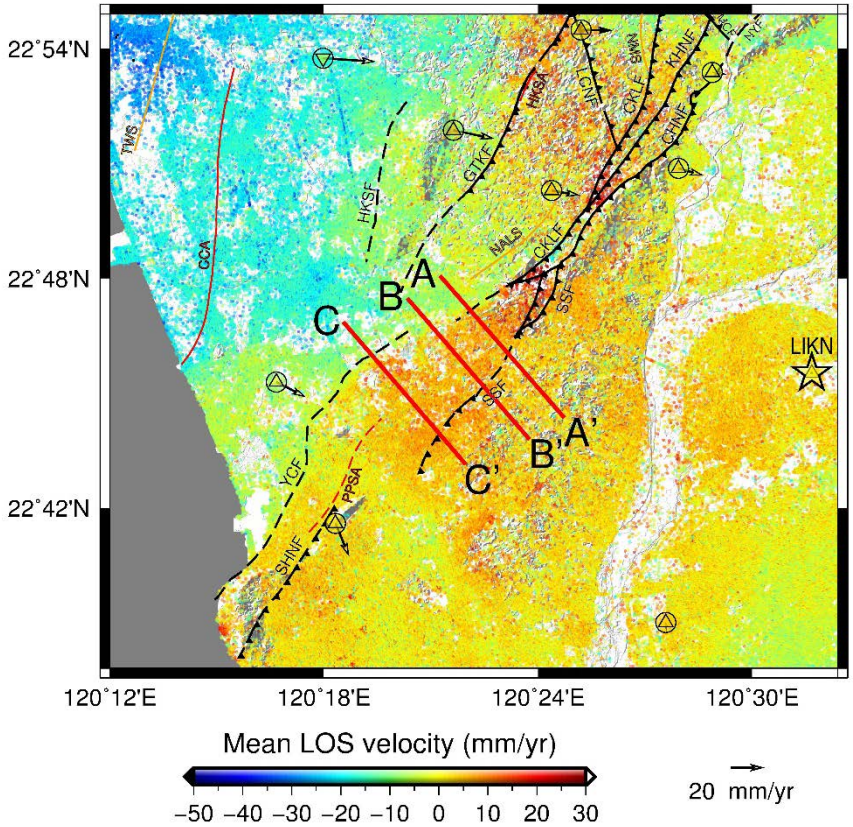


圖 4-4.3：PS-InSAR 視衛星方向速度場套疊在 20 米數值高程，顏色表示視衛星方向速度場。星號為連續 GPS 測站，將所有視衛星方向速度場以此站為參考站。主要構造線取自中央地質調查所五萬分之一區域地質圖之臺南圖幅（吳樂群等，2011）、旗山圖幅（林啟文，2013）、高雄圖幅（陳華玟等，2001）。黑色線代表斷層線，HKSF 為小崗山斷層，GTKF 為古亭坑斷層，LCNF 為龍船斷層，CKLF 為車瓜林斷層，KHNF 為鼓山斷層，CHNF 為旗山斷層，MCF 為木柵斷層，NYF 為內英斷層，SSF 為深水斷層，SHNF 為壽山斷層；紅色線代表背斜，CCA 為中洲背斜，HKSA 為小滾水背斜，PPSA 為半屏山背斜；橘色線代表向斜，TWS 為大灣向斜，NALS 為南安老向斜，NMS 為內門向斜。其中 YCF 為右昌斷層，參考自徐澔德等（2016）。AA’ 、BB’ 和 CC’ 為剖面位置。

Figure 4-4.3: PS-InSAR velocity field of LOS direction superimposed on 20 m DEM. Color represents velocity field of LOS direction. Star, continuous GPS station, is reference point for all velocity field of LOS direction. Major structures captured from the Regional Geological Map of Tainan (Wu et al., 2011), Chishan (Lin, 2013), and Kaohsiung (Chen et al., 2001), 1:50000, published by the Central Geological Survey. Black lines represent major faults: HKSF=Hsiaokangshan fault, GTKF=Gutingkeng fault, LCNF=Lungchuan fault, CKLF=Chekualin fault, KHNF=Kushan fault, CHNF=Chishan Fault, MCF=Mucha fault, NYF=Neiying fault, SSF=Shenshui fault, SHNF=Shoushan fault, YCF=Youchang fault (Shyu et al., 2016). Red lines represent major anticlines. CCA=Chungchou Anticline, HKSA=Hsiaokunshui Anticline, PPSA=Panpingshan Anticline. Orange lines represent major synclines. TWS=Tawan Syncline, NALS=Nananlao Syncline, NMS=Neimen Syncline. AA’, BB’ and CC’ are profile positions.

進一步利用 PS-InSAR 視衛星方向速度，建構三條跨越車瓜林斷層(AA') 、車瓜林斷層可能的西南端延伸段(BB')和右昌斷層東北延伸段(CC')的速度場變化剖面（圖 4-4.3），分析資料同時使用 GPS 三維速度場（東西向、南北向和垂向）投影至雷達視衛星方向的變化量（圖 4-4.3）。AA' 剖面中（圖 4-4.4），車瓜林斷層的上盤側視衛星方向速度約為 5 mm/yr；在斷層的下盤側，視衛星方向速度最小可達約為-5 mm/yr，在近斷層兩側其視衛星方向的變化量約為 10 mm/yr。另外 GPS 測站在斷層兩側的視衛星方向的變化量也約為 5-10 mm/yr，與 PS-InSAR 的觀測大致吻合，但由於 GPS 測站在車瓜林斷層兩側測站數較少，且離斷層線較遠，需要進一步加密測站。BB' 剖面中（圖 4-4.4），車瓜林斷層可能向西南端延伸段的上盤側，視衛星方向速度約為 5 mm/yr；在車瓜林斷層西南端延伸段的下盤側，視衛星方向速度最小可達約為-10 mm/yr，在近斷層兩側其視衛星方向的變化量約為 15 mm/yr。另外 GPS 測站在斷層兩側的視衛星方向的變化量也約為 5-10 mm/yr，但由於其測站數較少，且觀測時段不同，其視衛星方向的速度相較於 PS-InSAR 的觀測要小。CC' 剖面中（圖 4-4.4），右昌斷層東北端延伸段的上盤側，視衛星方向速度約為 5 mm/yr；在右昌斷層東北端延伸段的下盤側，視衛星方向速度最小可達約為-15 mm/yr，在近斷層兩側其視衛星方向的變化量約為 10 mm/yr。另外 GPS 測站在斷層兩側的視衛星方向的變化量也約為 10 mm/yr，但由於其測站數較少，且觀測時段不同，其視衛星方向的速度相較於 PS-InSAR 的觀測要小。從上述 PS-InSAR 和 GPS 的速度變化分析，推論目前車瓜林斷層的西南端位置有可能繼續向西南延伸，並可能與右昌斷層相連，此部分的推論有待進一步蒐集資料釐清。

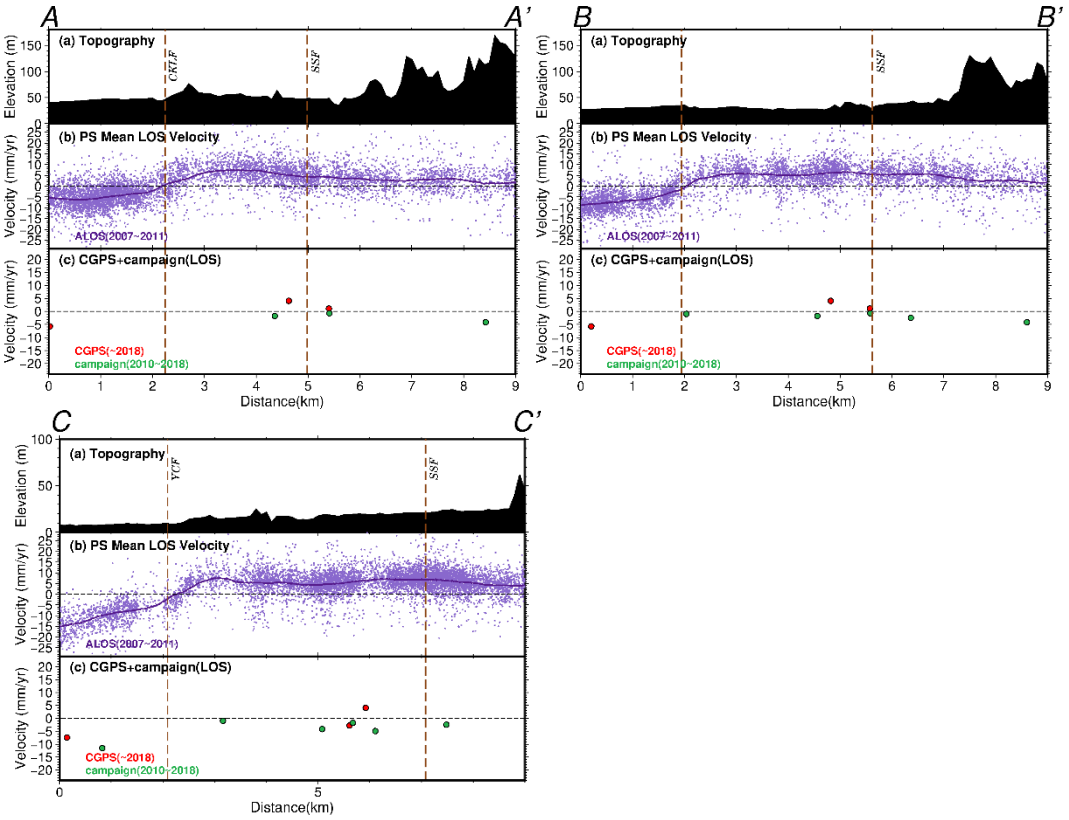


圖 4-4.4：跨越車瓜林斷層西南端延伸段可能的斷層跡位置和右昌斷層的速度場變化剖面。AA’、BB’ 和 CC’剖面位置如圖 4-4.3 所示。

Figure 4-4.4: The possible position of fault trace crossed from southwest extension of Chekualin fault. The velocity field change of profile from Youchang fault. Profile positions of AA’, BB’ and CC’ were shown as Figure 4-4.3.

第五章、斷層模型建置

5-1 斷層幾何參數設定

今年度之計畫區域為臺灣南部地區，包含八條活動斷層，分別為：六甲-木屐寮斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層與恆春斷層。為了與中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫成果進行整合，本章節之斷層幾何參數採用中興工程顧問社彙整之各斷層參數（表 5-1.1），簡要之斷層幾何參數描述內容如下。

表 5-1.1：南部地區 8 條斷層之幾何參數。
Table 5-1.1: Geometry parameters of eight active faults in southern Taiwan.

	斷層名稱	傾角(degree)	斷層底部深度(km)
1	木屐寮-六甲	45.0	6.0
2	新化斷層	80.0	12.5
3	後甲里斷層	40.0	4.0
4	左鎮斷層	70.0	10.0
5	小崗山斷層	45.0	10.0
6	旗山斷層	60.0	13.0
7	潮州斷層	60.0	17.5
8	恆春斷層	75.0	20.0

5-1-1 木屐寮-六甲斷層

木屐寮-六甲斷層根據楊志成等（2005）莿桐崎剖面及地調所台南藝術學院附近斷層露頭（林啟文等，2007），有破裂到地表。

根據中油牛山背斜軸部之 NS-27 鑽井，在深度約 3,350 公尺處鑽遇一傾角約 43 度的斷面（Hu and Sheen, 1989），因此本計畫固定木屐寮-六甲斷層在深度 4 公里以內的傾角為 45°。至於深部的幾何形貌，楊志成（2007）在台南地區的構造剖面中，參考中油鑽井、地表地層位態、震測剖面及地震分布描繪六甲斷層幾何面，如圖 5-1.1 所示。

本計畫選擇簡單的斷層幾何進行斷層滑移虧損速率的推求，即是斷層深度 0 - 6 km，傾角 45°；深度 6 - 8 km，傾角 6°（圖 5-1.2）。木屐寮-六甲斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 5-1.2 中。

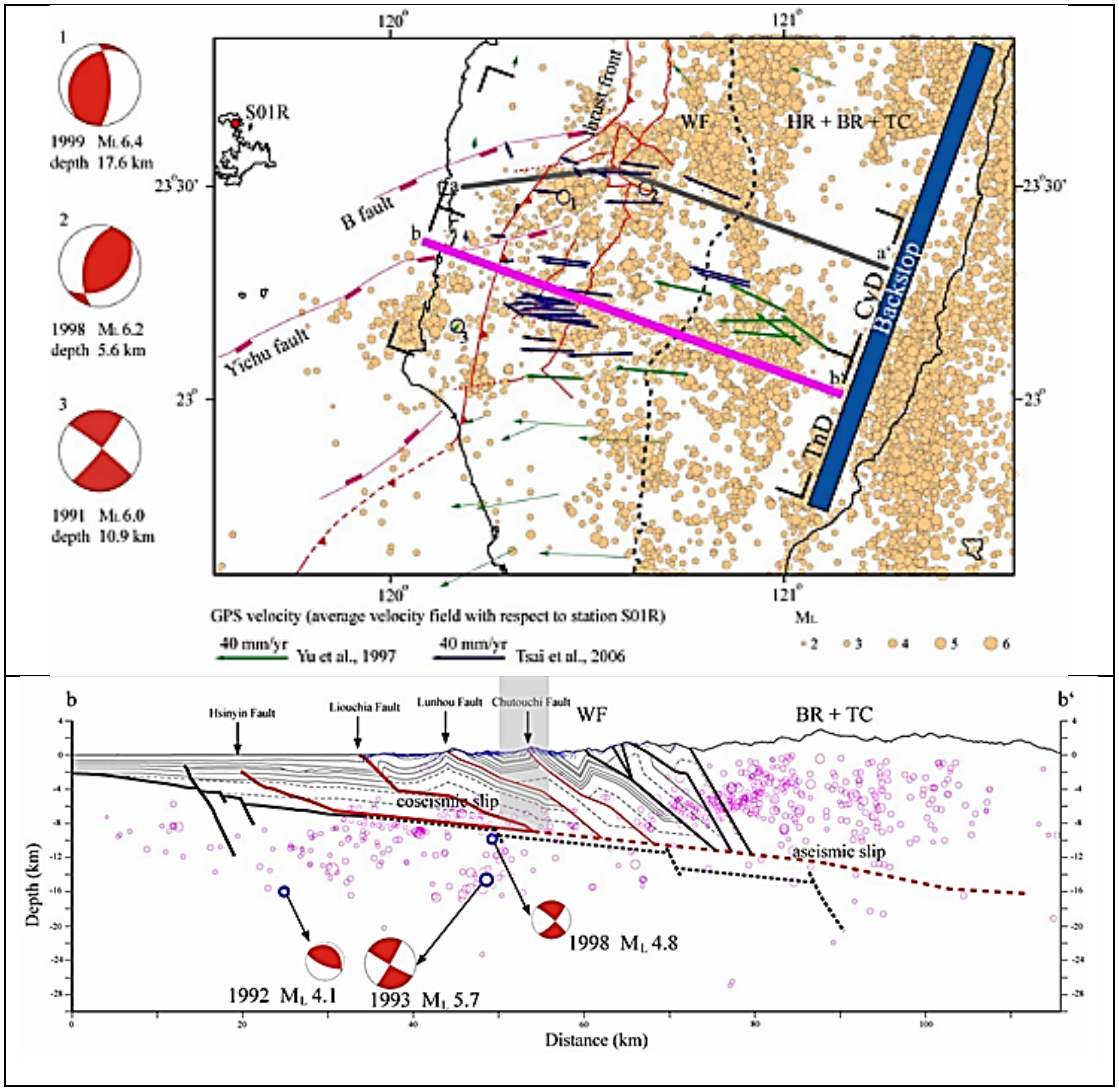


圖 5-1.1：台南地區構造剖面及地震深度剖面。上圖為剖面位置及地震分布平面圖，b-b'以粉紅色線段標記；下圖為 b-b'構造剖面及地震深度，粉紅色圓圈為 b-b'剖面 5 公里寬度範圍內規模大於 2 之地震事件(Yang, 2007)。

Figure 5-1.1: The cross section with the relocated earthquakes across the Tainan domain (Yang, 2007).

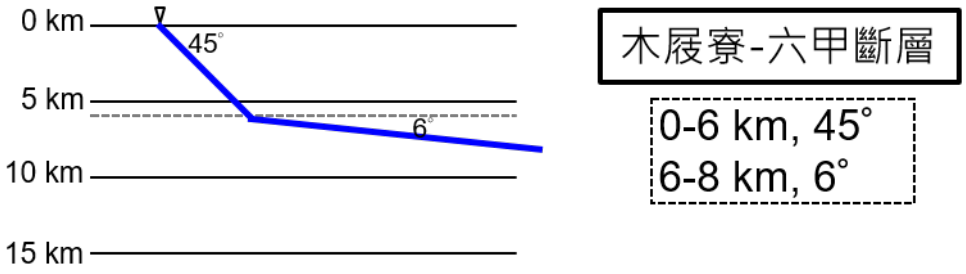


圖 5-1.2：木屐寮-六甲斷層幾何面破裂模式。

Figure 5-1.2: Muchiliao-Liuchia fault geometry rupture pattern.

表 5-1.2：木屐寮-六甲斷層傾角及深度資料與文獻列表(胡植慶等，2016)

Table 5-1.2: Parameters and references of the dip angle and rupture depth of the Muchiliao-Liuchia fault (Hu et al., 2016)

參考文獻	調查方法	調查斷層	傾角	深度
王宏霖, 2006	震測剖面	木屐寮斷層		
Suppe, 1980	地質平衡剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 8 公里
Hu and Sheen, 1989	牛山背斜軸部 NS-27 鑽井	六甲斷層	43E	
Hung et al.,1999	地質剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 8 公里
黃旭燦等，2004	地質平衡剖面	六甲斷層		基底滑脫面至少 5.5 公里
楊志成等，2005	地質剖面	六甲斷層	30~45E	至少 4 公里
陳文山等，2006	鑽井剪切面	六甲斷層	近地表 30E	
胡植慶等，2016	1991-2010 地震分布	六甲斷層		集中於 12 公里內

5-1-2 新化斷層

林啟文等（2007）根據淺層震測資料結果指出，新化斷層淺部為寬廣的剪切帶，剪切帶內岩層被高角度不連續面截切，呈開花狀構造（圖 5-1.3），因此新化斷層被推估為高角度走向滑移斷層。又根據 1900-2015 年地震深度分布剖面指出（圖 5-1.4），背景地震分布集中於 12-15 公里的深度附近。根據上述觀測成果，本計畫將新化斷層之傾角依走向滑移常見之傾角 80°進行設定，斷層深度則參考背景地震發震深度設定為 0.0 - 12.5 km。木屐寮-六甲斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 5-1.3 中。

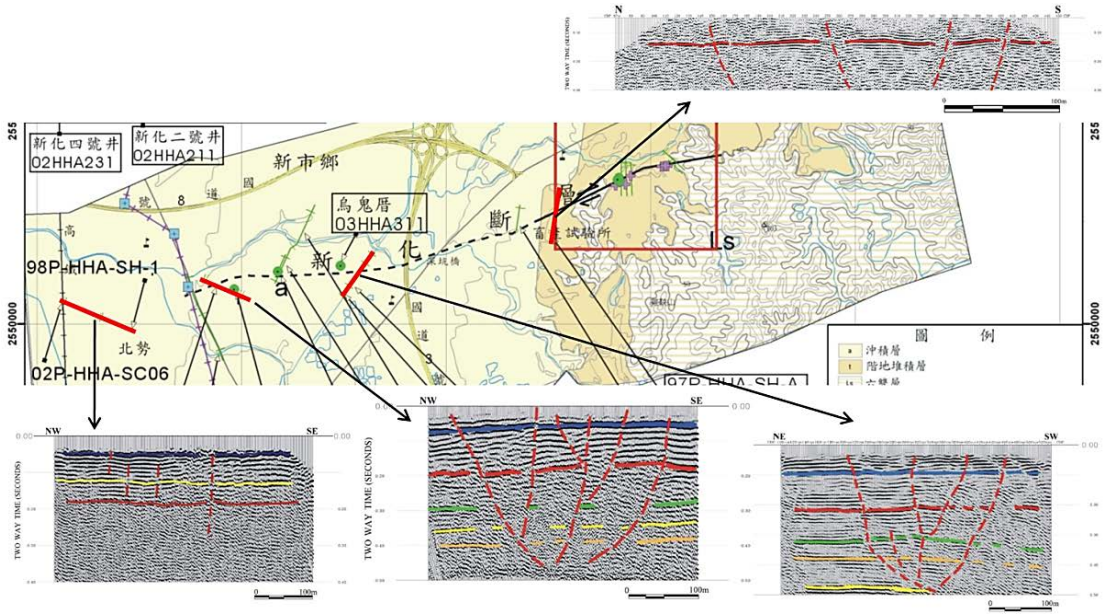


圖 5-1.3：新化斷層淺層震測資料（林啟文等，2007）。

Figure 5-1.3: Shallow seismic reflection across the Hsinhua fault.

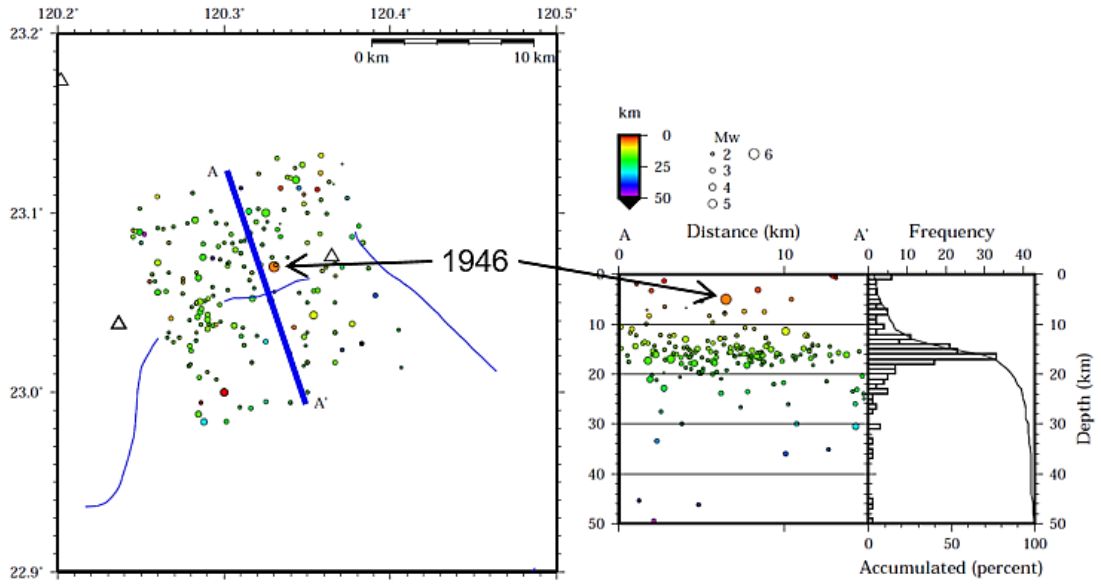


圖 5-1.4：1900~2015 年新化斷層地震分布及深度分布剖面。

Figuer 5-1.4: Background seismicity and distribution of focal depth in the Hsinhua fault are from 1900 to 2015.

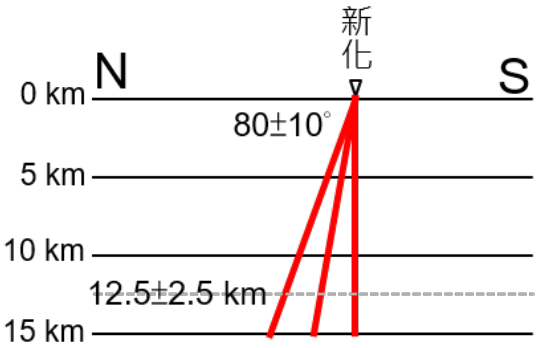


圖 5-1.5：新化斷層幾何面破裂模式。

Figuer 5-1.5: Hsinhua fault geometry ruptue pattern.

表 5-1.3：新化斷層傾角及深度資料與文獻列表(胡植慶等，2016)

Table 5-1.3: Parameters and references of the dip angle and rupture depth of the Hsinhua fault (Hu et al., 2016)

參考文獻	調查方法	傾角	深度
陳文山等，2011	排鑽	高角度	
石瑞銓等，1998，2002；黃勝群等，2004	淺層震測	開花狀構造	基底滑脫面至少 8 公里
黃旭燦等，2004	平衡剖面		滑離面約3.5公里

5-1-3 後甲里斷層

Le Béon et al. (2019)震測剖面及地質剖面（圖 5-1.6，圖 5-1.7）顯示，後甲里斷層為臺南背斜西側的背衝斷層，且後甲里斷層面延伸至地表，斷層深度 4 公里，傾角 40°。圖 5-1.7 中後甲里斷層與滑脫面角度為 47 度。本計畫選擇的斷層幾何進行斷層滑移虧損速率的推求，即是斷層深度 0 - 4 km，傾角 40°。

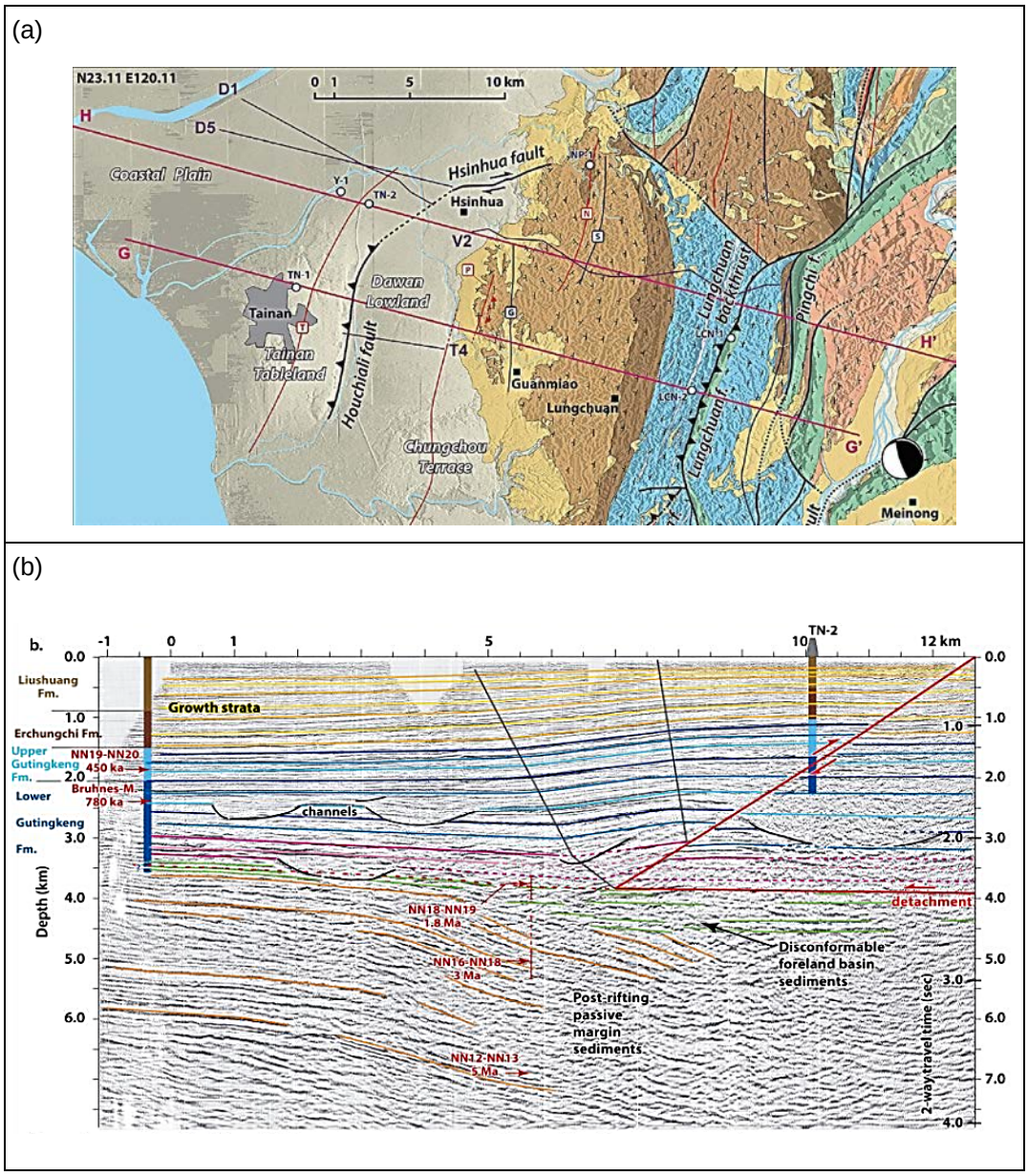


圖 5-1.6： (a)台南地區區域地質圖，(b) 反射震測 D5 剖面(Le Béon et al. 2019)。

Figure 5-1.6: Tainan geologic map and seismic reflection profile D5 (Le Béon et al. 2019).

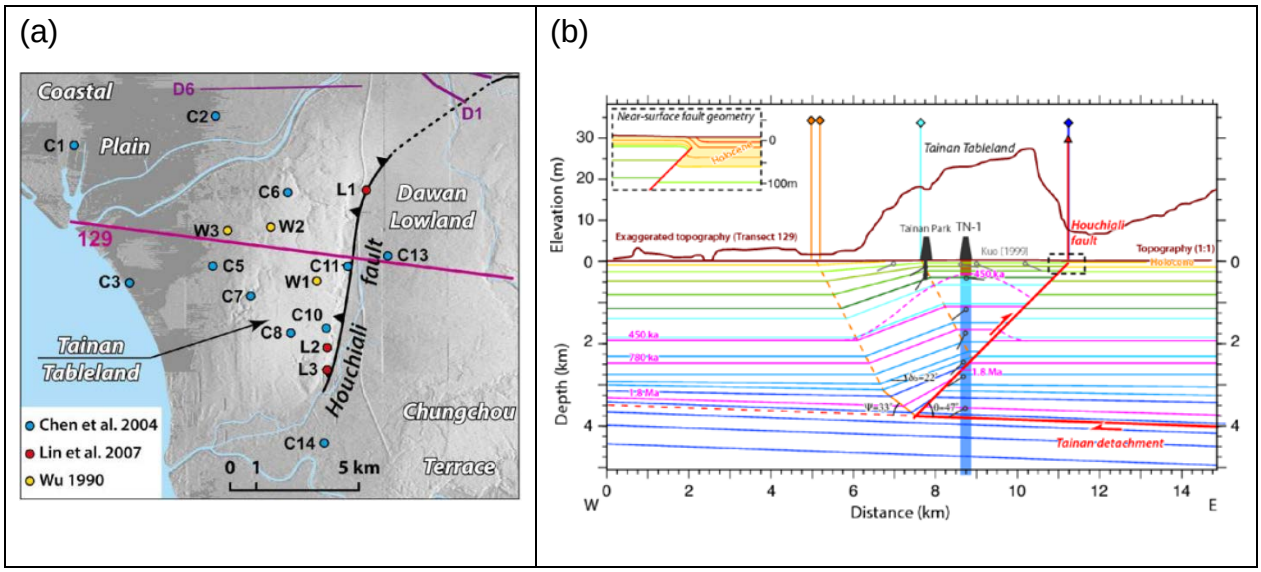


圖 5-1.7：跨台南台地地質剖面圖。(a)台南地區鑽井位置及剖面圖位置，(b)跨後甲里斷層 129 地質剖面(Le Béon et al. 2019)。

Figure 5-1.7: Geological schematic model across the Tainan tableland, southwestern Taiwan (Le Béon et al. 2019).

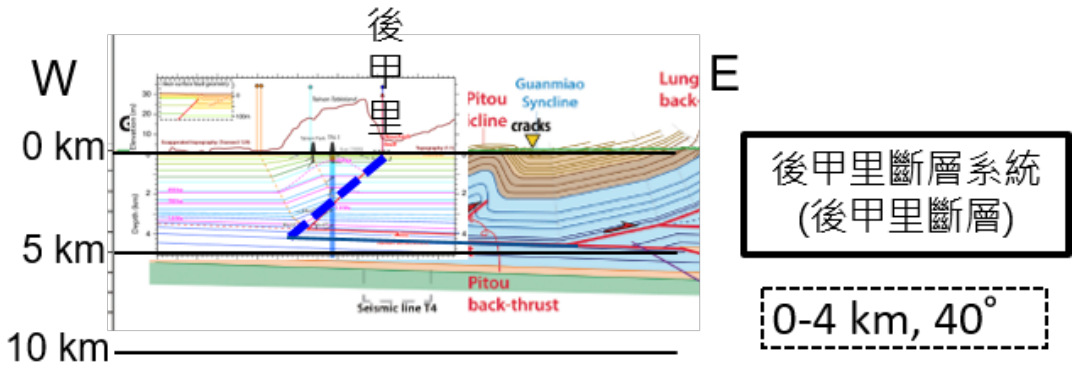


圖 5-1.8：後甲里斷層幾何面破裂模式。

Figuer 5-1.8: Houchiali fault geometry ruptue pattern.

5-1-4 左鎮斷層

在地調所五萬分之一地質圖幅中指出，左鎮斷層為一高角度左移斷層（圖 5-1.9）。陳延宗（2007）以反射震測法研究左鎮斷層，然而由於此區域岩層以泥岩、頁岩為主，震測反射訊號較不明顯，僅能由地層傾角變化與地表地形特徵推測左鎮斷層可能的位置（圖 5-1.10）。根據 1900-2015 年左鎮斷層上盤地震深度分布剖面（圖 5-1.11），地震分布集中於 8 - 14 km 的深度。由於無法由過去之研究成果得知左鎮斷層之幾何樣貌，因本斷層屬走向滑移斷層，因此設定左鎮斷層為高傾角 70°之活動斷層。斷層深度則參考左鎮斷層南北兩側構造單元之滑脫面深度，設為 0 - 10 km（圖 5-1.12）。

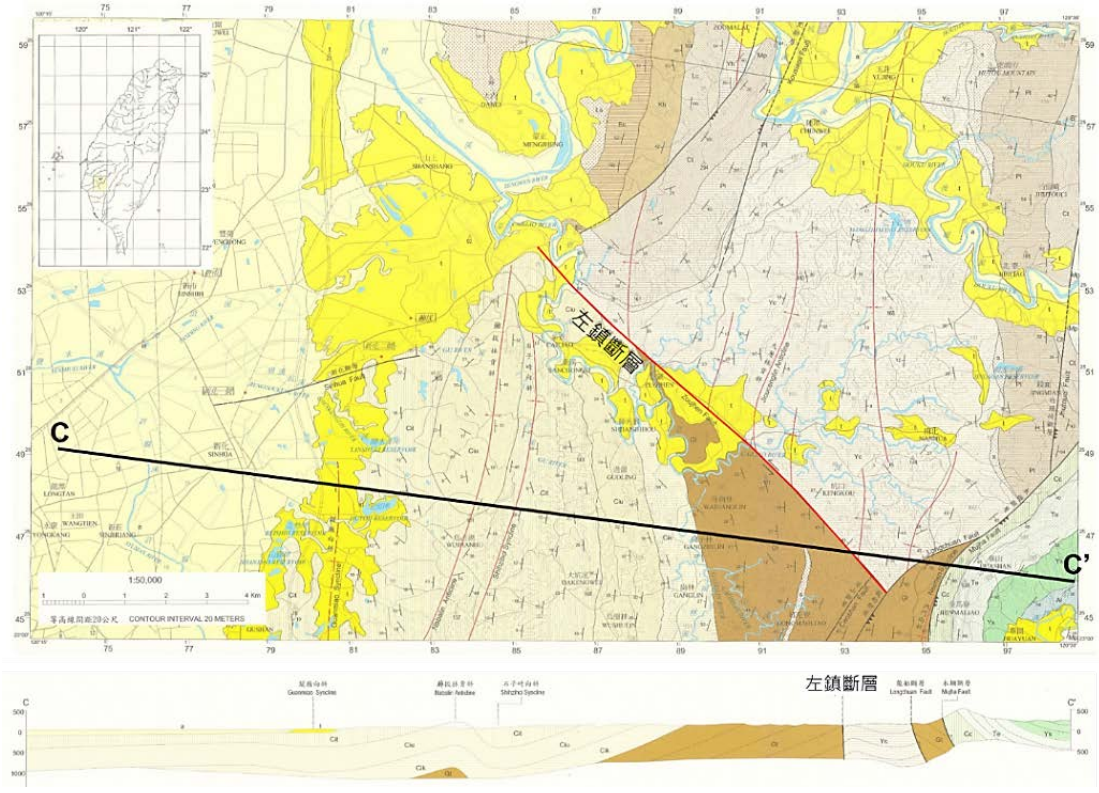


圖 5-1.9：地調所新化地質圖幅地質剖面圖（修改自何信昌等，2005）。

Figuer 5-1.9: Cross-section of Xinhua area geological settings from CGS.

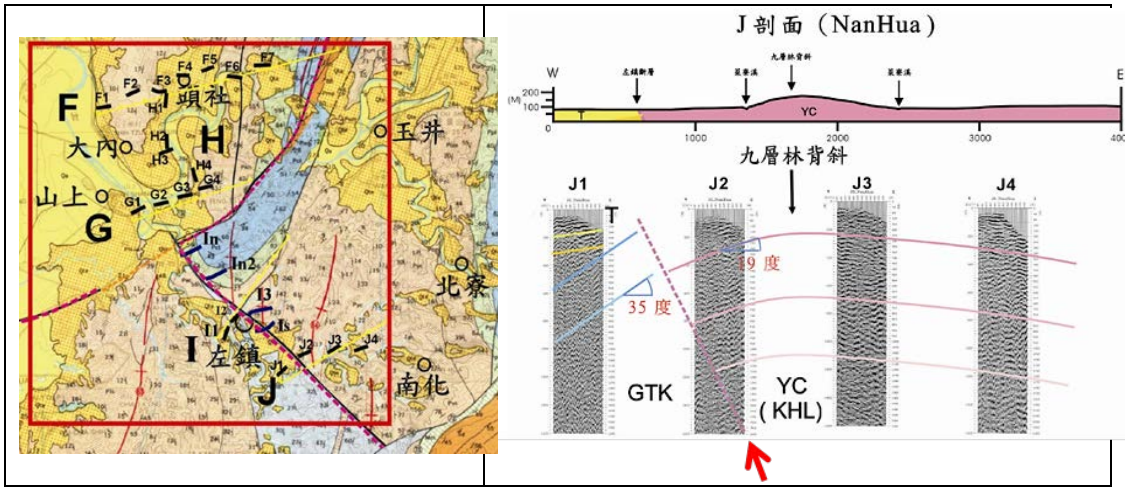


圖 5-1.10：左鎮斷層淺層震測資料（陳延宗，2007）。

Figuer 5-1.10: Tsochen fault shallow seismic prospecting data.

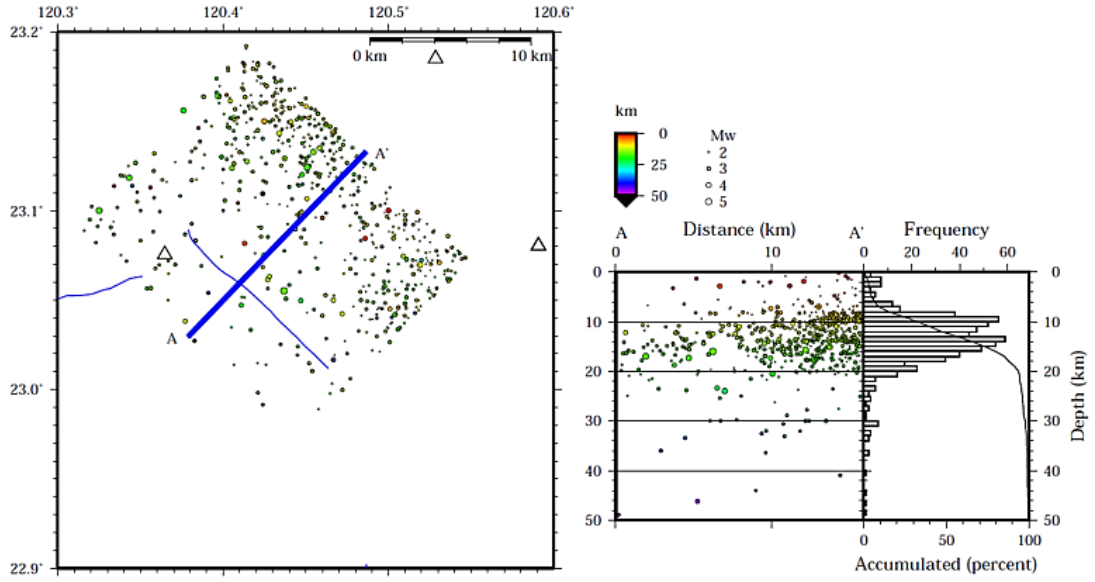


圖 5-1.11：1900~2015 年左鎮斷層地震分布及深度分布剖面。

Figuer 5-1.11: Background seismicity and distribution of focal depth in the Tsochen fault area from 1990 to 2015.

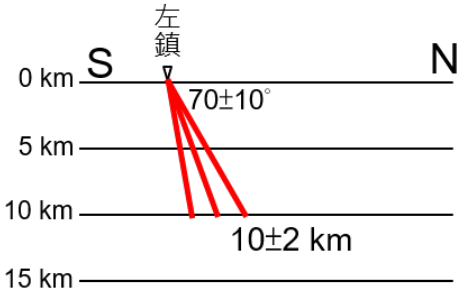


圖 5-1.12：左鎮斷層幾何面破裂模式。

Figuer 5-1.12: Tsochen fault geometry ruptue pattern.

5-1-5 小崗山斷層

中央地質調查所在小崗山斷層沿線實施淺層震測（圖 5-1.13），於大崗山與小崗山之間的測線 08P-HKS-AL-1 可看到基盤向東逐漸升高，推測斷層向東傾斜約呈 45°（林啟文等，2009；陳文山等，2010）。

此外，大、小崗山西側有四孔鑽井，由東至西分別為山腳下 1 號，小崗山 1 號，小崗山 2 號及 3 號。其中，山腳下 1 號、小崗山 1 號井雖都未鑽遇斷層帶，但兩口井的古亭坑層具有密集的剪切構造，剪切面與層面傾角大致平行，傾角向東傾斜約 50-70°（陳文山等，2010）（圖 5-1.14）。

小崗山斷層之傾角及破裂深度，根據所蒐集到之震測剖面及地質資料綜合評估，本計畫採用最適的斷層幾何進行斷層滑移虧損速率的推求，即斷層深度 0 - 10 km，傾角 45°。

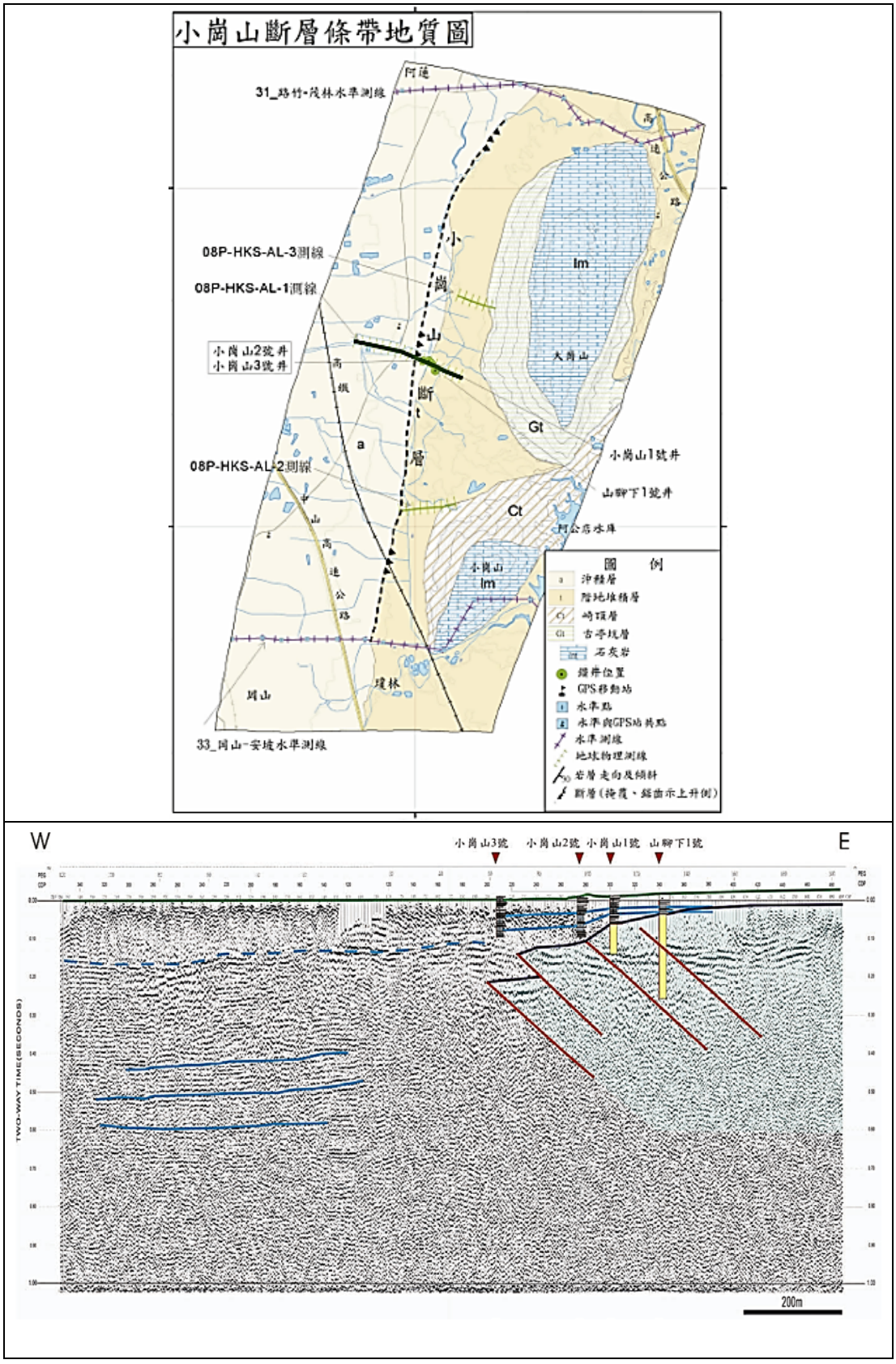


圖 5-1.13：上圖，小崗山斷層條帶地質圖；下圖，08P-HKS-AL-1 震測剖面（林啟文等，2009；陳文山等，2010）。

Figuer 5-1.13: (Up) Geological map of Hsiaokangshan fault. (Down) 08P-HKS-AL-1 seismic reflection.

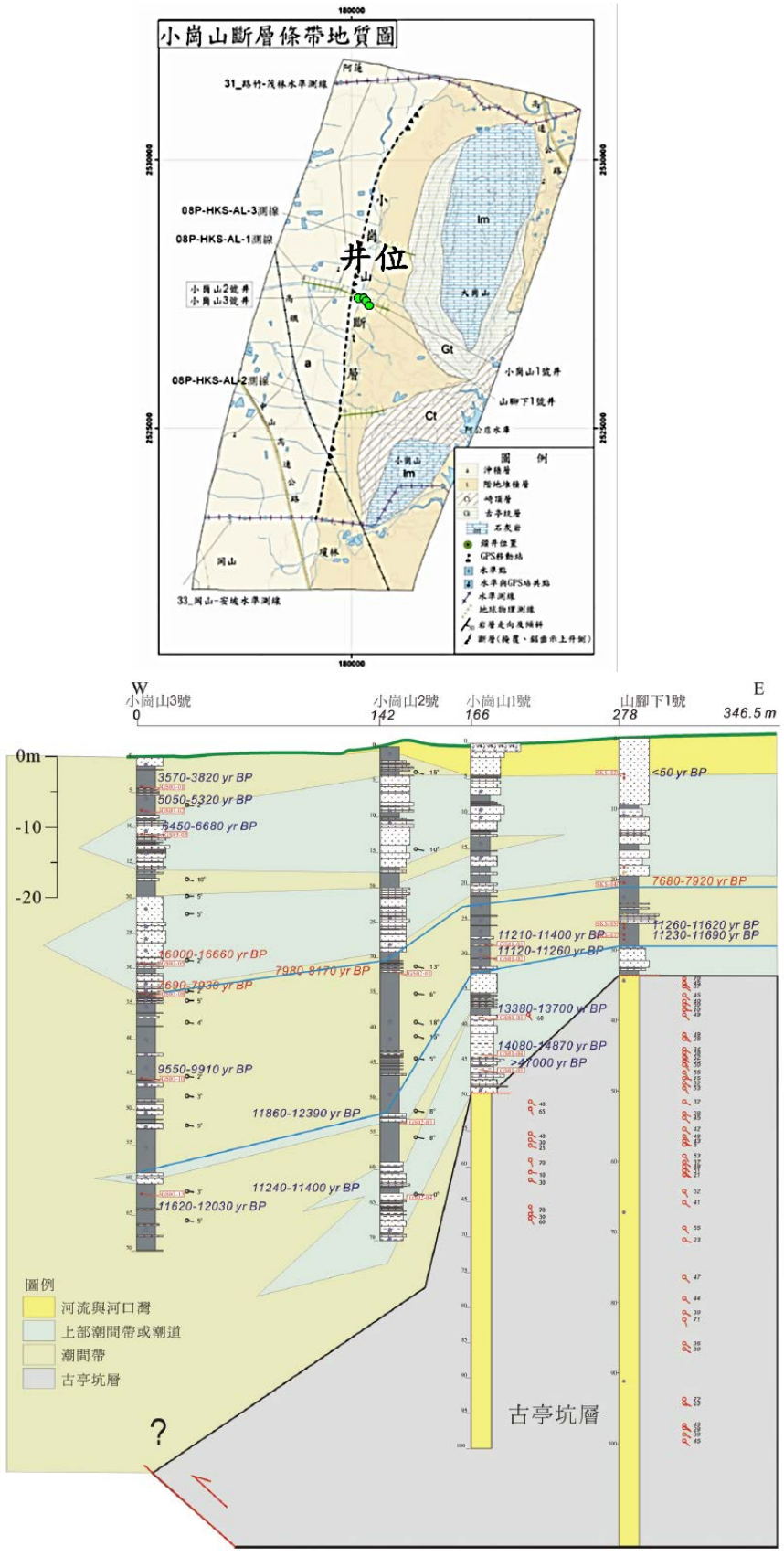


圖 5-1.14：小崗山斷層鑽井資料（陳文山等，2010）。

Figuer 5-1.14: Drilling data across the Hsiaokangshan fault.

5-1-6 潮州斷層

Hsieh（1970）由重力異常資料指出屏東平原東緣的重力梯度甚陡，由屏東平原的重力低值區陡升至中山山脈的高值區，推測有一向東傾斜 75°至 80°的高角度逆斷層。Chiang（1971）則由震測及鑽井資料指出（圖 5-1.15），潮州東南方約 7 公里處的潮州背斜西翼為萬隆逆斷層所切斷，斷層面向東傾斜 50°（圖 5-1.16）。Wiltschko et al.（2010）的構造地質剖面則顯示，潮州斷層於深度 0 - 9 公里，傾角約 65°；深度 9 - 13 公里，傾角約 30°（圖 5-1.17）。陳文山等（2011、2012）平衡剖面（圖 5-1.18）顯示潮州斷層深度約 14 公里，斷層傾角為 62°。

McIntosh et al.（2013）描繪臺灣南部跨越屏東平原之地震活動分布及速度構造剖面（圖 5-1.19），顯示潮州斷層下方的深部地震應是隱沒板塊造成的地震。為了了解潮州斷層孕震深度，蒐集 Wu et al.（2014）的地震及速度構造剖面（圖 5-1.20），從地震深度剖面中推估潮州斷層孕震深度約在 15 - 20 公里。

潮州斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 5-1.4 中。潮州斷層之傾角，根據所蒐集到之震測剖面及地震深度分布等資料，潮州斷層可能為屏東平原處之盲斷層，傾角 50°，也有可能是位於中央山脈與屏東平原之高角度斷層，中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫認為傾角可設定 50°~70°。潮州斷層之破裂深度，根據地震深度分布及速度構造剖面，應在 15-20 公里。所以本計畫採用最適的斷層幾何組合進行斷層滑移虧損速率的推求，即斷層深度 0 - 17.5 km，傾角 60°。

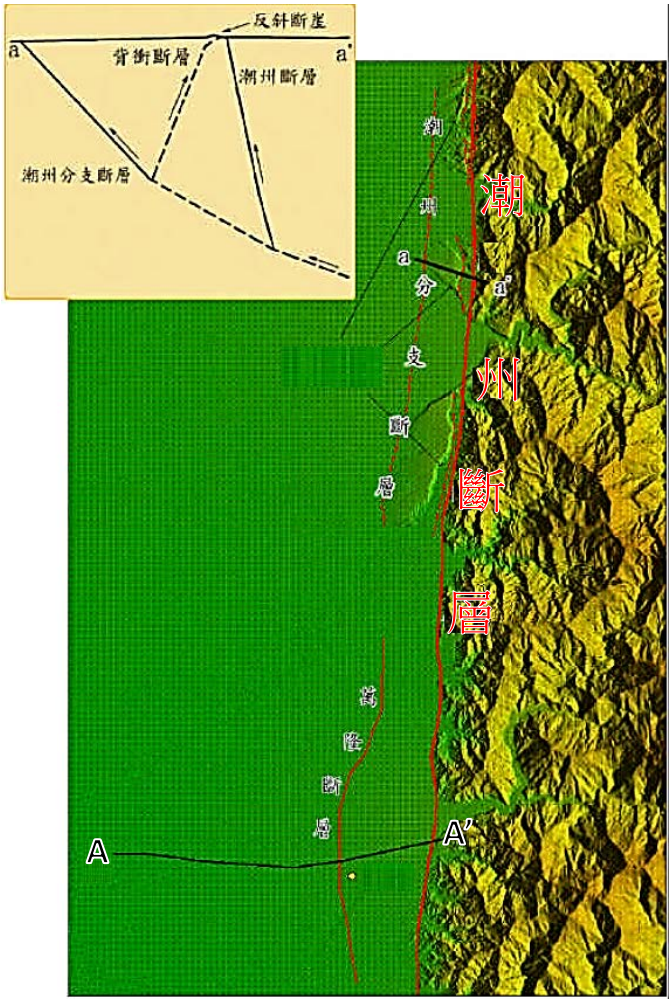


圖 5-1.15：潮州斷層及西側分支斷層構造分布圖。AA'線段為震測剖面位置，黃點為 CC-1 井位。左上角方框為分支斷層、反斜斷崖及潮州斷層之構造示意圖（改自廖何松，2003）。

Figure 5-1.15: Stuctural map of Chaochou fault and its western branch. AA' line is the loction of seismic reflection; yellow dot is CC-1 drilling well. The inset presents the structure of branch fault、back-thrust and Chaochou fault.

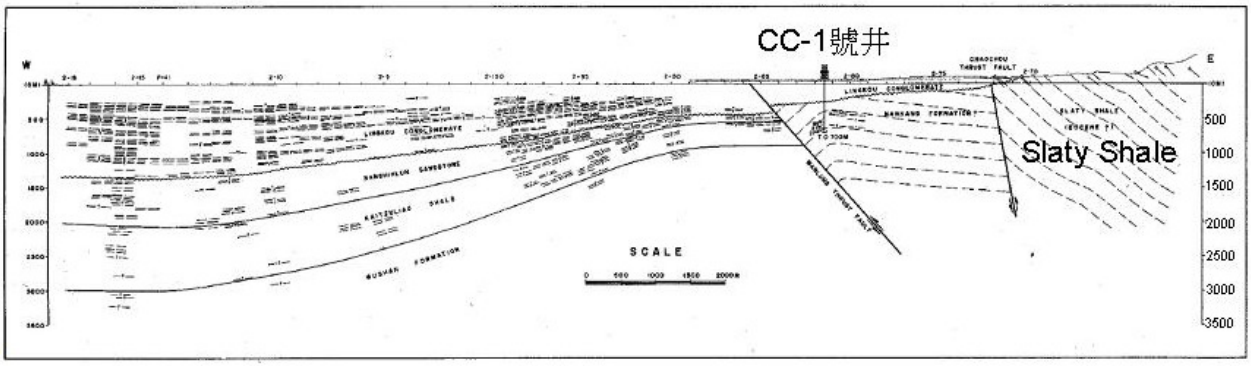


圖 5-1.16：潮州地區震測剖面及地下構造解釋，剖面線位置位於圖 5-1.15AA'線段（修改自 Chiang，1971）。

Figure 5-1.16: Seismic reflection of Chaochou fault. AA' line of Figure 5-1.15 is the cross-section line

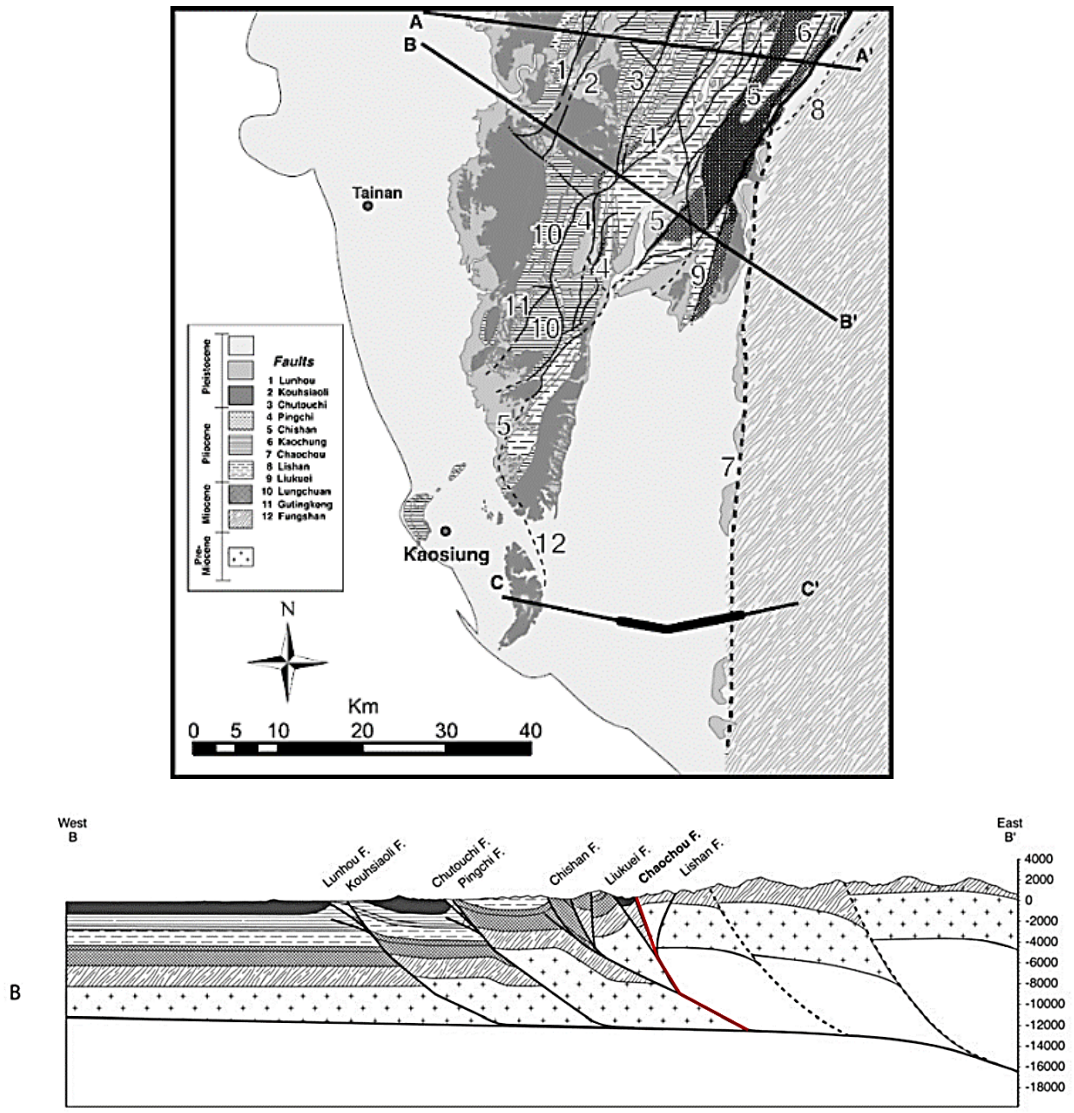


圖 5-1.17：B-B’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。

Figure 5-1.17: B-B’ structure geological cross-section.

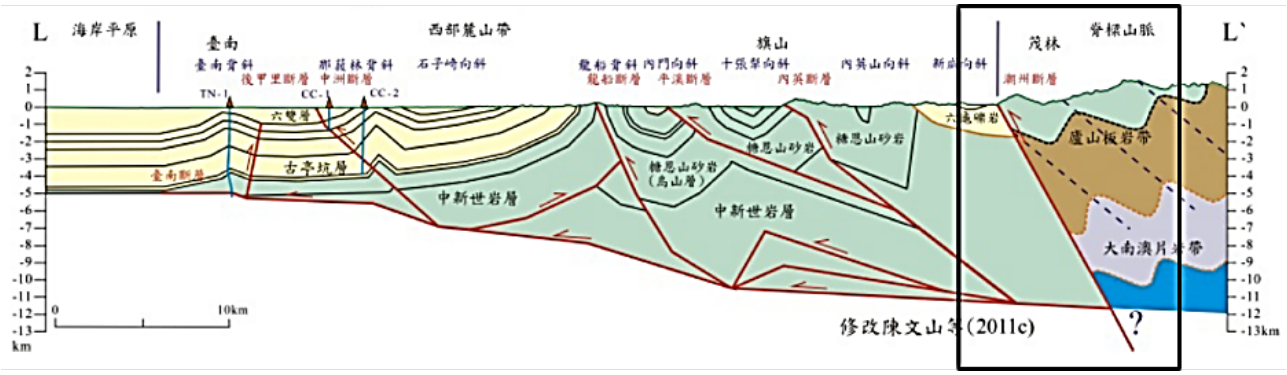


圖 5-1.18：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 5-1.18: SW Taiwan balanced geological cross-section.

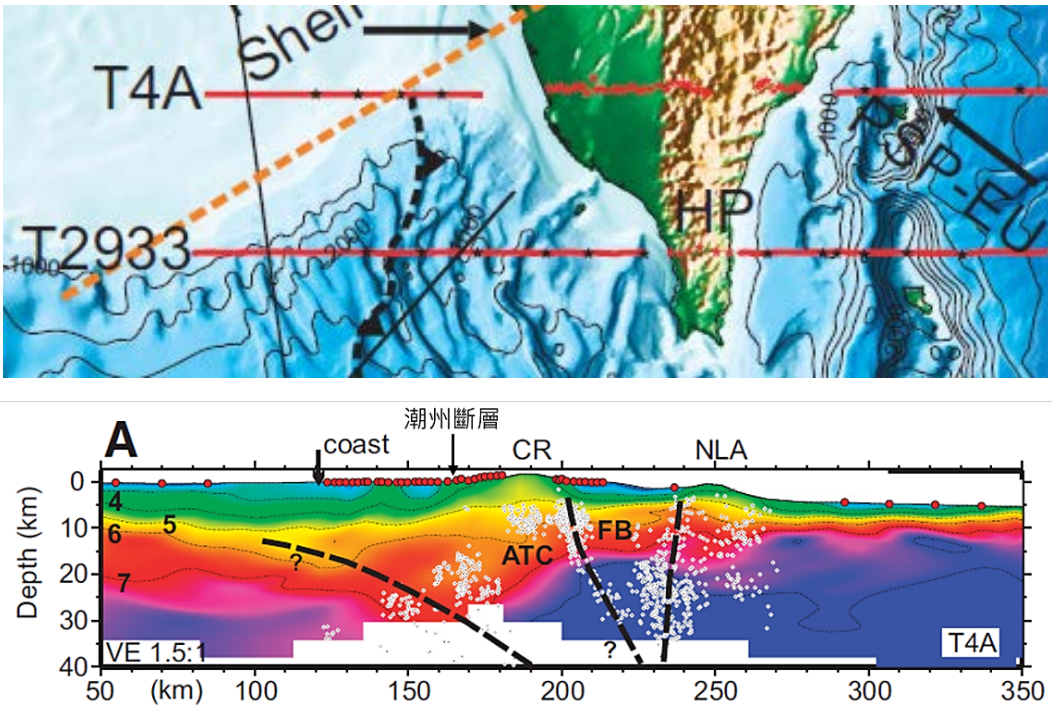


圖 5-1.19：臺灣南部速度構造剖面及重定位地震分布。上圖為 T4A 速度構造剖面分布圖；下圖為 T4A 速度構造及重定位地震剖面（McIntosh et al., 2013）。

Figure 5-1.19: Velocity structure and earthquake relocation in southern Taiwan. Upper figure is location of T4A velocity profile; while the lower one is T4A velocity profile and earthquake relocation (McIntosh et al., 2013).

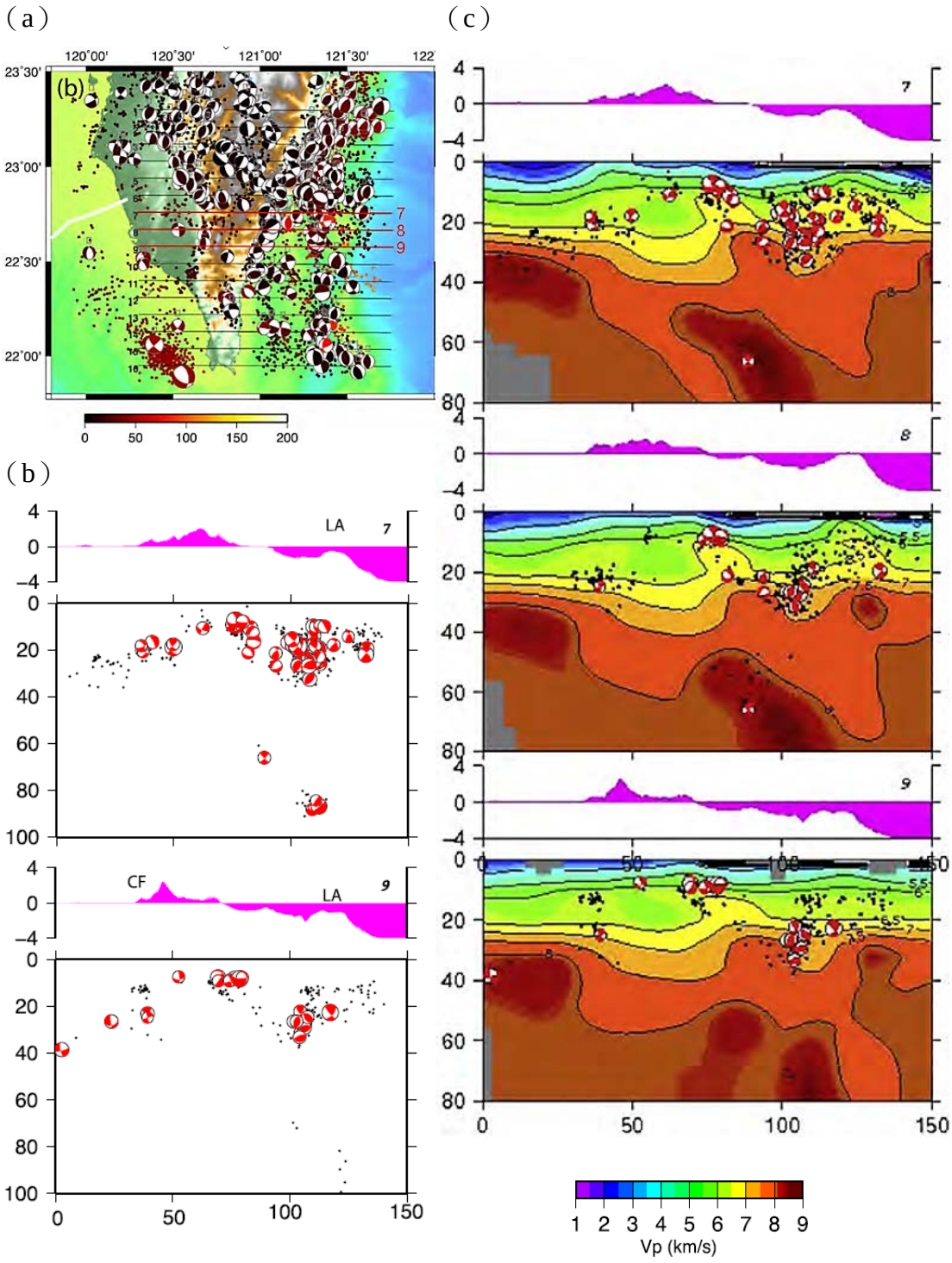


圖 5-1.20：（a）地震、震源機制解及剖面線分布圖（b）剖面 7 及剖面 9 之地震深度分布及震源機制，CF 為潮州斷層（c）剖面 7、剖面 8 及剖面 9 之地震深度分布及地層速度構造剖面圖（Wu et al., 2014）。

Figure 5-1.20: (a) Earthquake, focal mechanism and locations of cross-sections. (b) Focal depth and focal mechanism of profile 7 and profile 9, CF: Chaochou fault. (c) Focal depth, focal mechanism and crustal velocity structure of profile 7, profile 8 and profile 9 (Wu et al., 2014).

表 5-1.4：潮州斷層幾何資料及文獻列表。

Table 5-1.4: Chaochou fault geometry and its references.

參考文獻	調查方法	傾角	深度
謝世雄（Hsieh, 1970）	重力資料	東傾 75 - 80°	-
Chiang (1971)	震測與鑽井剖面	50°	-
Wiltschko et al. (2010)	構造地質剖面	深度 0 - 9 km，65° 深度 9 - 13 km，30°	13 km
陳文山等（2011）	構造地質剖面	深度 0 - 14 km，62°	14 km
Wu et al. (2014)	P 波速度構造剖面		孕震帶約 15 – 20 km

5-1-7 旗山斷層

根據黃旭燦等（2004）繪製的兩條地質平衡剖面（圖 5-1.21），兩條剖面在龍船斷層處呈現反向逆衝斷層與構造三角帶的特徵，旗山斷層位於龍船斷層東側，傾角約 50°。而根據洪日豪（2006）所做出的地質平衡剖面，旗山斷層於深度 0.0 - 6.0 公里，傾角約 67.5°；深度 6.0 - 13.5 公里，傾角約 35°（圖 5-1.22）。Wiltschko et al.（2010）構造地質剖面則顯示，旗山斷層於深度 0.0 - 3.5 公里，傾角約 55°；深度 3.5 - 12.5 公里，傾角約 28°（圖 5-1.23）。陳文山等（2011、2012）平衡剖面（圖 5-1.24）顯示內英斷層（旗山斷層）深度約 12 公里，斷層傾角在 0-3 公里為 55°；3.0 - 11.5 公里為 40°。陳文山（2016）整合速度構造剖面及地震深度分布（圖 5-1.25），地震深度一般比平衡剖面之滑脫面深。

旗山斷層幾何文獻、調查方法及參數彙整於表 5-1.5。綜合野外露頭調查、淺層震測、平衡剖面、GPS 資料反演等前人文獻資料，旗山斷層傾角約 50°-70°。滑脫面深度約 10 公里，以此作為下界；地震深度分布主要集中於 16 公里以上，以此作為上界，中間值取 13 公里深。所以本計畫採用最適的斷層幾何進行斷層滑移虧損速率的推求，即是斷層深度 0 - 13 km，傾角 60°。

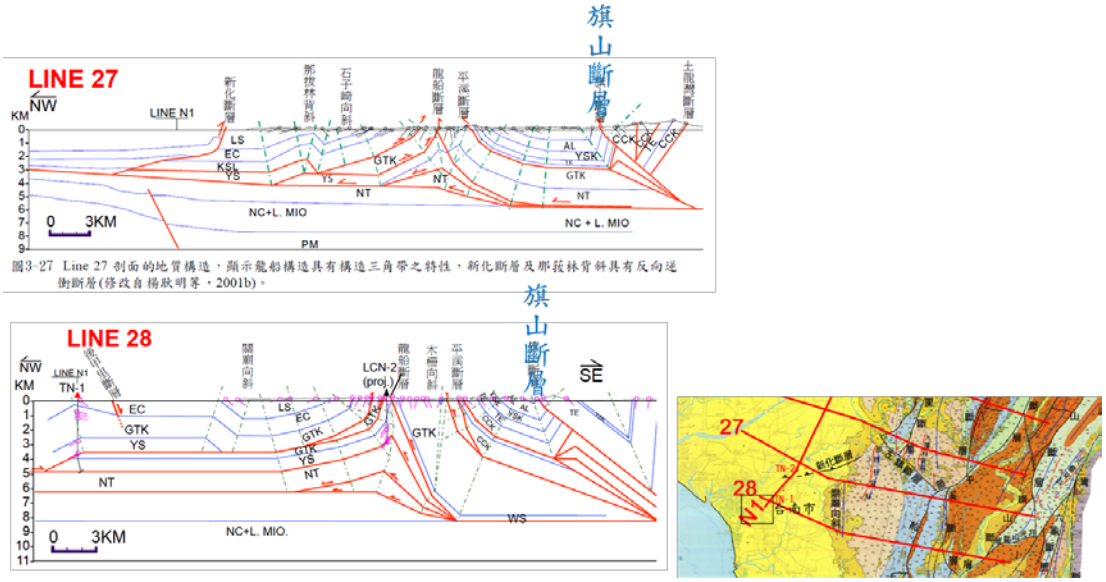


圖3-27 Line 27 剖面的地質構造，顯示龍船構造具有構造三角帶之特性，新化斷層及那拔林背斜具有反向逆衝斷層(修改自楊耿明等，2001b)。

圖 5-1.21：臺灣西南部地區 Line 27 及 Line 28 平衡剖面（黃旭燦等，2004）。

Figure 5-1.21: Geological balanced cross-section of Line 27 and Line 28 in SW Taiwan.

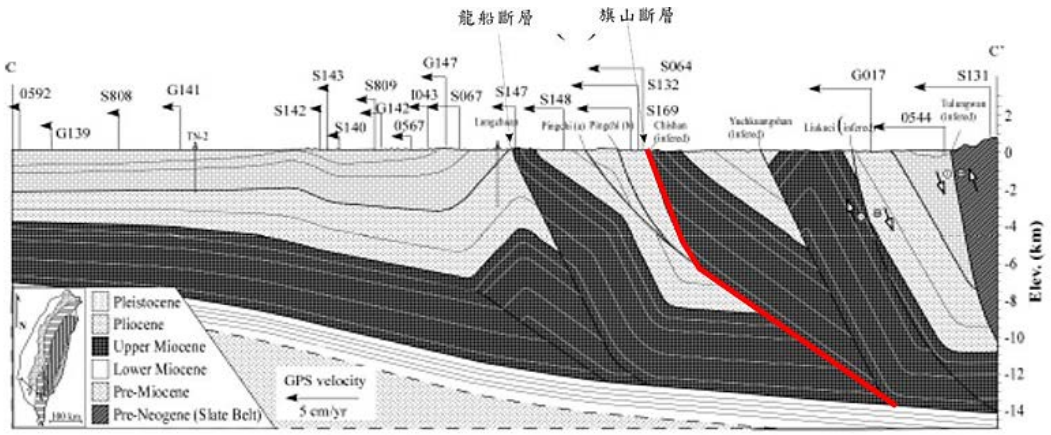


圖 5-1.22：西南部地區地質剖面圖（洪日豪，2006）。

Figure 5-1.22: Geological cross-section in SW Taiwan.

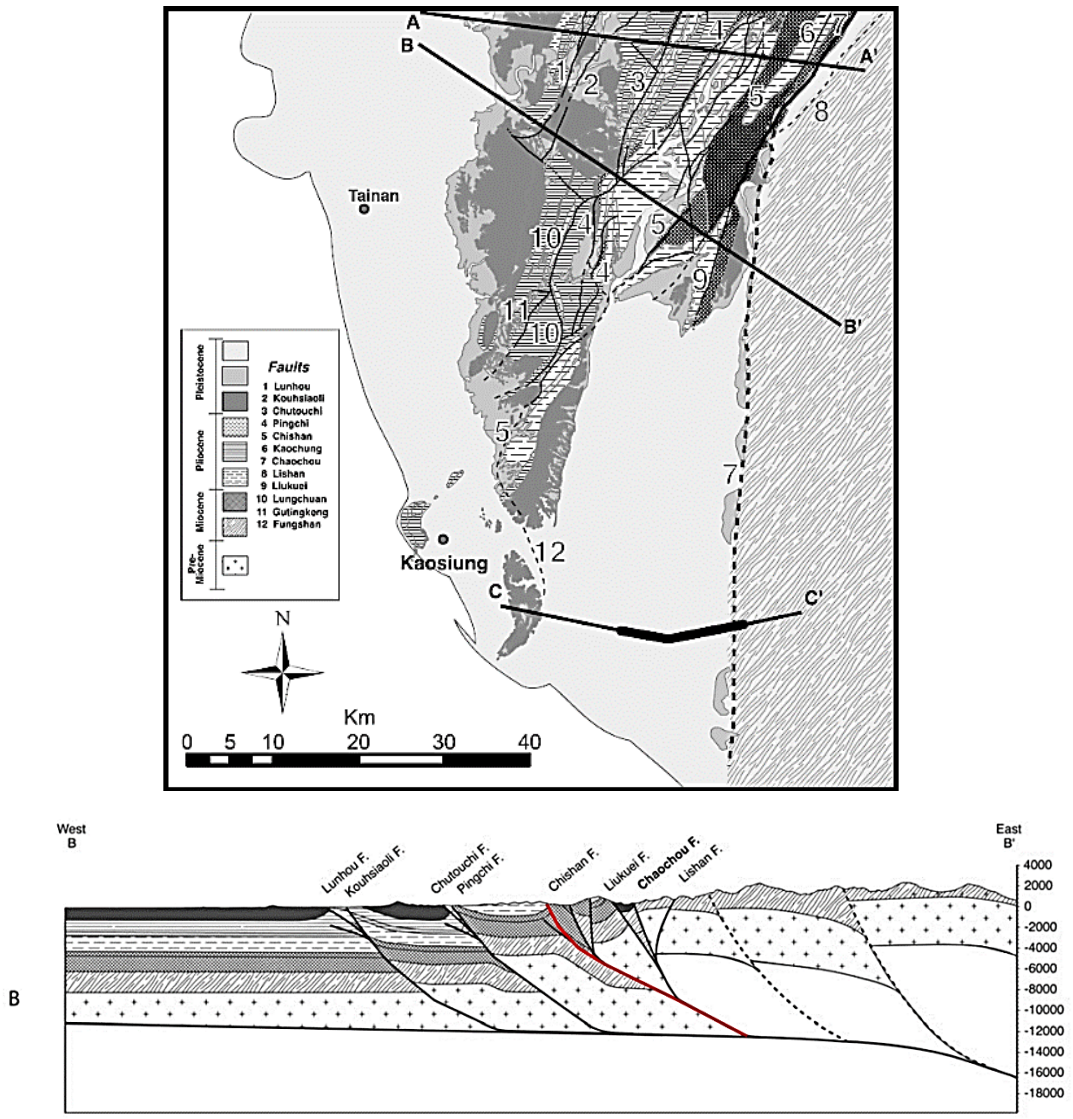


圖 5-1.23：B-B’構造地質剖面（Wiltschko et al., 2010）。

Figure 5-1.23: B-B’ structural cross-section.

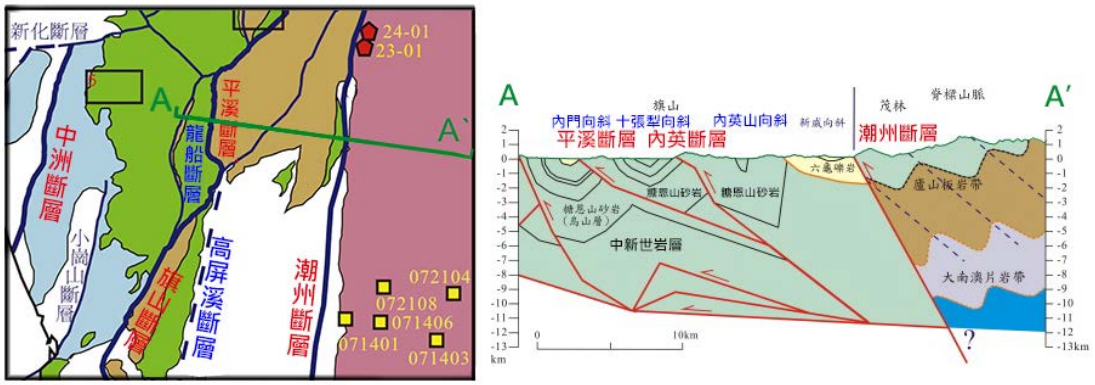


圖 5-1.24：西南部地區平衡剖面圖（陳文山等，2011）。

Figure 5-1.24: Geological balanced cross-section in SW Taiwan.

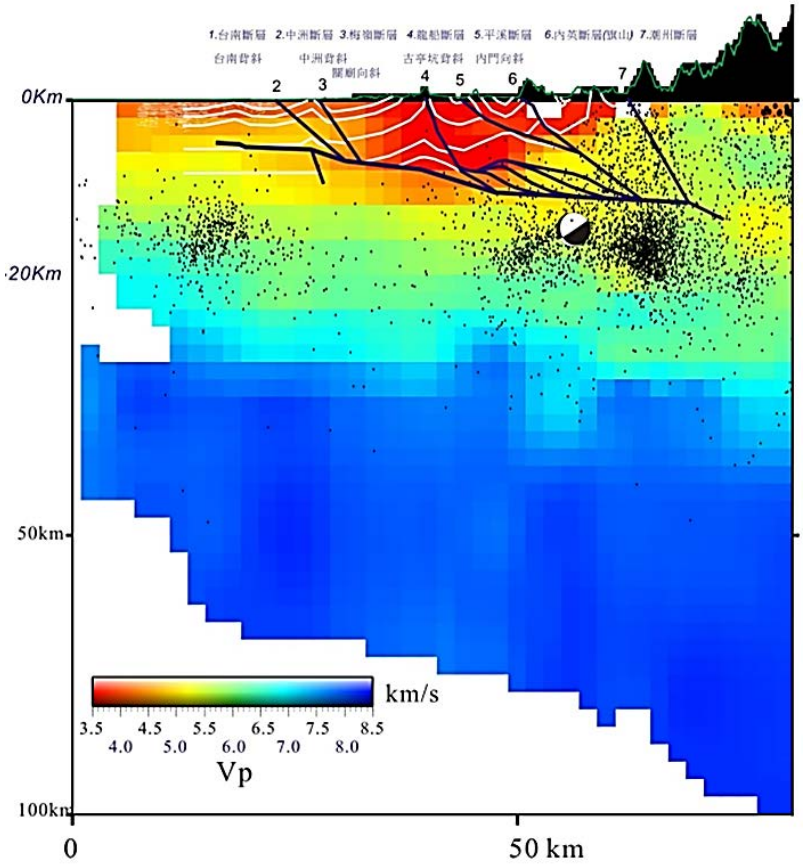


圖 5-1.25：西南部地區速度構造剖面圖（陳文山，2016）。

Figure 5-1.25: Velocity structure cross-section of SW Taiwan.

表 5-1.5：旗山斷層幾何資料及文獻列表。

Table 5-1.5: Chishan fault geometry and its references.

參考文獻	調查方法	傾角	深度
陳柏村（2005）	野外露頭觀察	約 60 度向東	-
黃旭燦（2004）	平衡剖面	50°	
洪日豪（2006）	構造地質剖面	深度 0.0 - 6.0 km，67.5° 深度 6.0 - 13.5 km，35°	13.5 km
Wiltschko et al. (2010)	構造地質剖面	深度 0.0 - 3.5 km，55° 深度 3.5 - 12.5 km，28°	12.5 km
陳文山等（2011）	構造地質剖面	深度 0.0 - 3.0 km，55° 深度 3.0 - 11.5 km，40°	11.5 km
陳文山（2016）	速度構造剖面及地震深度分布	-	16 km

5-1-8 恆春斷層

恆春斷層幾何可考慮地震深度分布，也需考慮與隱沒帶板塊幾何的關係，計畫中將臺灣南部斷層設定綁定三種幾何情形（圖 5-1.26），其中恆春斷層之傾角設定分別為向東傾 60°/75°/75°，斷層深度皆延伸至馬尼拉隱沒帶板塊界面。本計畫選擇最適的斷層幾何進行斷層滑移虧損速率的推求，即是斷層深度 0 - 20 km，傾角 75°。

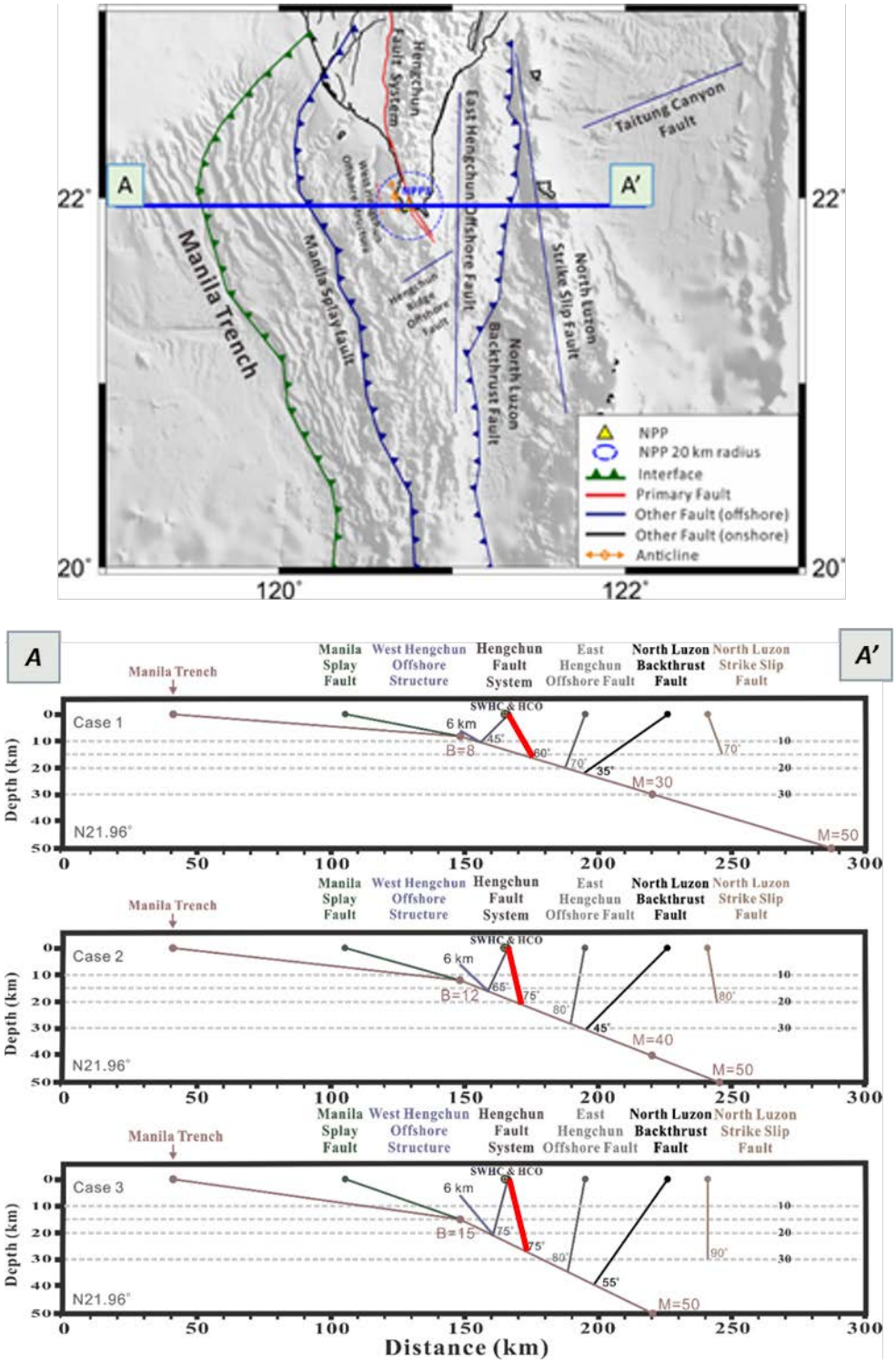


圖 5-1.26：南部斷層幾何形貌設定。上圖為臺灣南部活動斷層分布圖，下圖為臺灣南部活動斷層 AA'剖面之幾何形貌，其中 HCO 即恆春斷層。（SSHAC Level 3, 2018）。

Figure 5-1.26: Fault geometry setting in southern Taiwan. The upper figure is the distribution of active faults in southern Taiwan. The lower one is fault geometries in the AA' cross-section , HCO: Hengchun fault（SSHAC Level 3, 2018）.

5-2 BLOCKS 斷層模型

5-2-1 斷層模型原理與使用參數

BLOCKS 斷層滑移速率模擬，在本次臺灣西南部地區共模擬八條斷層分別為：六甲-木屐寮斷層、新化斷層、後甲里斷層、左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層等。各斷層所使用參數如表 5-2.1，所需之鎖定深度、傾角分別如表列，由團隊會議依文獻討論而得；而初始滑移速率則參考 Shyu et al. (2016)，並依正/逆斷層或走向滑移斷層等不同型態，分別給予傾向滑移初始速率與走向滑移初始速率（圖 5-2.1 與圖 5-2.2）。

本次臺灣西南部八條斷層斷層共由九個塊體描述，而塊體同中央大學張午龍老師團隊所繪，分別為 EFSB、EKSH、HECH、HSS1、KHSC、LUCU、PINT、SCEN、WCPS（圖 5-2.1），待模擬斷層皆位於塊體交界，所有塊體外圍同樣設一點（座標：112.924，31.867），使外圍標訂為相對不動之塊體。

地表長期變動速率使用 GPS 速度場表示，西南部參考 2016 年 02 月 06 日美濃地震為分界，使用兩個速度場進行斷層滑移模擬，2002 年至 2016 年使用中央大學張午龍老師團隊解算成果，共 345 站；2016 至 2019 年使用成功大學團隊所提供之連續站與移動站速度場共 358 站，分布方式如下圖（圖 5-2.1 與圖 5-2.2）。

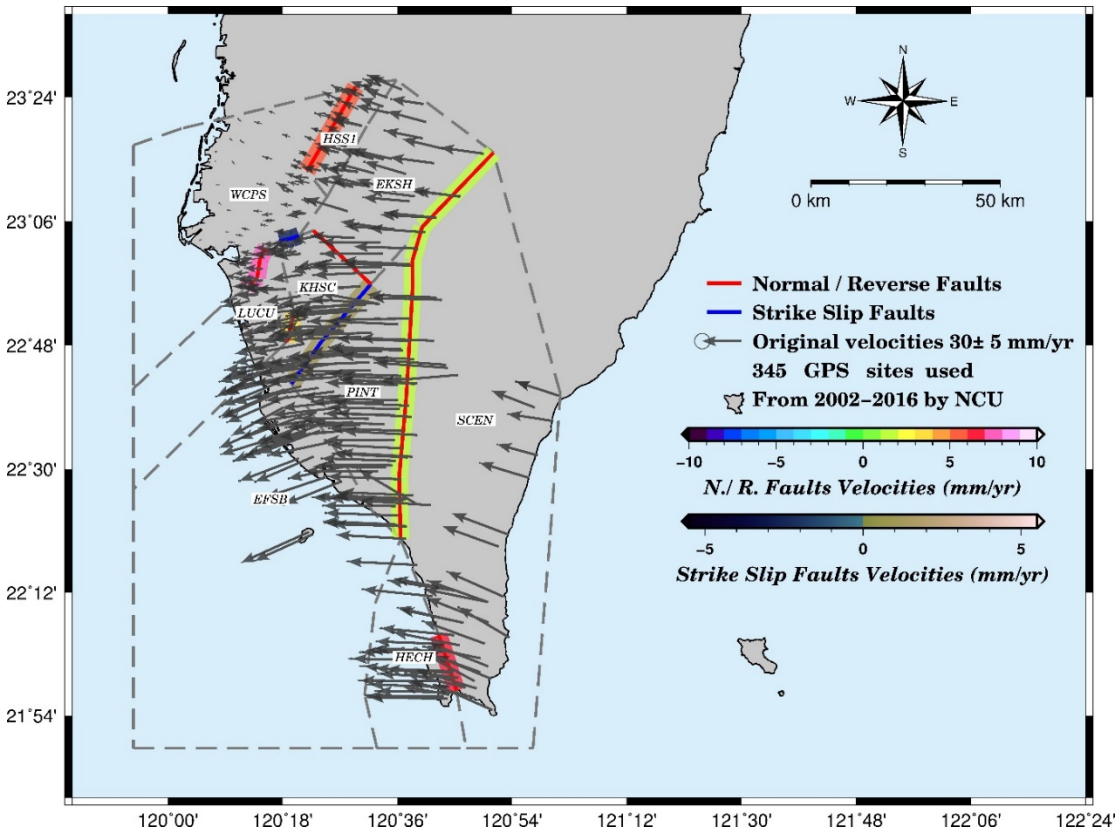


圖 5-2.1：斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。灰色箭頭速度場為中大團隊解算之 2002-2016 年成果。

Figure 5-2.1: The input values of the BLOCK model with the 2002-2016 GPS velocity field (the deep gray arrows) computed by National Central University. The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars in the figure.

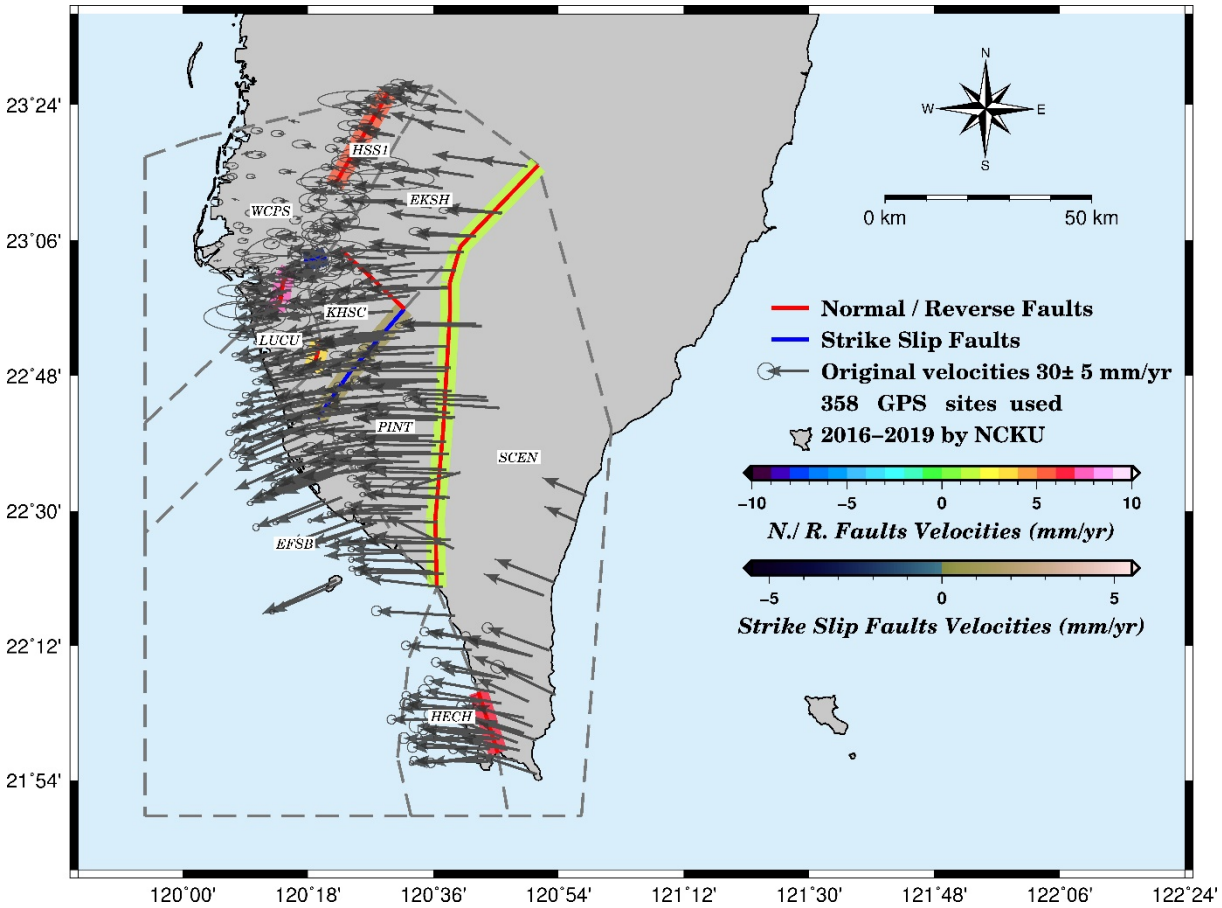


圖 5-2.2：斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。灰色箭頭速度場為成大團隊解算之 2016-2019 年成果。

Figure 5-2.2: The input values of the BLOCK model with the 2016-2019 GPS velocity field (the deep gray arrows) computed by National Central University. The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars in the figure.

表 5-2.1：斷層模擬初始值；斷層幾何與地質滑移速率(Shyu et al., 2016)，地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-2.1: The input values of each segments. The geological rates cite from Shyu et al., 2016. The positive strike slip rates indicate left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數 / 斷層名稱	輸入初始值			
	鎖定深度 (km)	斷層傾角 (deg.)	地質走滑速率 (s.s. mm/yr)	地質傾滑速率 (d.s. mm/yr)
木屐寮-六甲	6	45	x	5.75±1.35
新化斷層	12.5	80	-2.65 ± 1.85	x
後甲里斷層	4	40	x	7.07±0.01
左鎮斷層	10	70	x	x
小崗山斷層	10	45		3.30 ± 2.20
旗山斷層	13	60	1.10±0.36	x
潮州斷層	17.5	60	x	1.76 ± 1.17
恆春斷層	20	75	x	6.15 ± 0.29

5-2-2 斷層模擬結果

本次模擬中，臺灣西南部共有八條主要斷層：其中，六甲-木屐寮斷層、後甲里斷層、小崗山斷層是以傾向滑移運動為主的斷層；新化斷層、旗山斷層、潮州斷層、恆春斷層等則是以走向滑移運動為主的活動斷層。經 BLOCKS 模擬成果，斷層由各分段平均滑移速率成果如表 5-2.2 與表 5-2.3。走向滑移速率中，正值為左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

西南部 2002-2016 年之模擬成果中，多數斷層各分段之傾向滑移分量量值大於走向滑移之分量，量差最大值位於新化斷層東段之 15.4 mm/yr，反之走向滑移分量較傾向滑移分量大者為小崗山斷層、左鎮斷層東段與木屐寮-六甲斷層，量差分別為 3.2、2.0 與 0.1mm/yr。而 2016-2019 年模擬成果同樣顯示各分段之傾向滑移分量較走向滑移分量有明顯較大的量值，量差最大值同為新化斷層東段之 15.4 mm/yr，而走向滑移分量較傾向滑移分量大者為左鎮斷層東段、西段與潮州斷層最北段，量差分別為 2.4、0.4 與 2.6mm/yr。

逆衝分量方面，2002-2016 年間各斷層分段量值最大的為新化斷層東段的 19.4mm/yr，其次為新化斷層西段之 16.9mm/yr (圖 5-2.3)，最小的為潮州斷層中段 1.6mm/yr，對照地質條件約制，落差最大的段落為潮州斷層最北段，差距為 8.84 mm/yr，另木屐寮-六甲斷層落差為 0.15 mm/yr，後甲里斷層 0.03 mm/yr，小崗山斷層 1.2 mm/yr，恆春斷層 0.05 mm/yr，另外僅左鎮斷層東段略帶正斷層運動分量 0.9mm/yr。而 2016-2019 年間各斷層分段同樣多為逆斷層移動型態，逆衝量值最小的為潮州斷層南段 1.1mm/yr，最大的為新化斷層東段的 19.4mm/yr，其次為新化斷層南段之 16.9mm/yr (圖 5-2.4)，而正斷層分量的段落為左鎮斷層東段 5.8 mm/yr，若以量值對照地質條件約制，則差距皆在 0.24 mm/yr 內。觀察臺灣西南部近三年間，塊體模擬逆衝量值介於 1.1mm/yr 至 7.1mm/yr(不含新化斷層)。由於新化斷層模擬成果在兩個速度場明顯大於其他斷層段，推測最主要因素為該塊體構造 LUCU 的幾何形狀設定未似其他塊體邊角較方圓，而新化斷層正位於

該塊體東側幾何形狀尖端之鄰邊，使致其吸收了塊體內速度場旋轉分量，或未定義之其他鄰近構造影響，當然缺乏地質條件約制影響也是可能因素之一。

走向滑移分量中，2002-2016 年間量值最小的為潮州斷層最北段右移的 0.5mm/yr，最大的為小崗山斷層的右移 7.7mm/yr，其次為木屐寮-六甲斷層之右移分量 6.0mm/yr (圖 5-2.5)，對照有地質條件約制者，落差最大的段落為新化斷層西段，差距達 1.75 mm/yr，另旗山斷層段差距皆在 0.2mm/yr 內。2016-2019 年間走向滑移分量量值最小的為小崗山斷層 0.0 mm/yr，其次的潮州斷層中段與南段的左移 0.1mm/yr，最大的為左鎮斷層的左移 8.2mm/yr (圖 5-2.6)，對照地質條件約制，最大的差距為新化斷層西段之 1.75 mm/yr，另旗山斷層段差距皆在 0.1mm/yr 內。可見在有地值約制條件下，兩個時段之速度場落差最大斷層段皆為新化斷層，然而兩者模擬之速率相同，皆在東段為 4.0mm/yr 與西段 4.4 mm/yr。

總滑移速率由傾向滑移分量與走向滑移分量推算而得(圖 5-2.7 與圖 5-2.8)。臺灣西南部八條斷層滑移速率在 2002-2016 年間介於 1.8 mm/yr 至 19.9 mm/yr 之間；2016-2019 年間介於 1.1 mm/yr 至 19.9 mm/yr 之間，兩者之新化斷層皆受傾向滑移速率影響而有近兩公分的滑移速率，此外 2002-2016 年間的旗山斷層除有走向滑移之地質約制外，同樣受傾向滑移速率影響而使北段總滑移速率達約一公分。於傾向滑移、走滑速率皆未有地質約制之左鎮斷層在 2016-2019 年速度場有相對前面 15 年間明顯的移動速率，各段總滑移速率每年約一公分，而須注意的是左鎮斷層西段與東段在 2002-2016 年速度場模擬表現為逆斷層帶左移分量與正斷層帶左移分量，然而在 2016-2019 年則卻呈現為右移；而潮州斷層在 2002-2016 年間主要為左移運動帶逆衝分量，然到 2016-2019 年的速度場模擬表現為右移斷層帶逆衝分量。

表 5-2.2：以 2002-2016 年速度場模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-2.2: The result values of each fault model with 2002-2016 GPS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數項目 / 斷層名稱	2002-2016 BLOCKS 模擬成果		
	平均走滑速 (s.s. mm/yr)	平均傾滑速 (d.s. mm/yr)	總滑移速 (mm/yr)
木屐寮-六甲	-6.0	5.9	8.4
新化斷層	-4.2	18.2	18.6
後甲里斷層	-0.4	7.1	7.2
左鎮斷層	2.9	2.1	4.4
小崗山斷層	7.7	4.5	8.9
旗山斷層	1.1	9.1	9.1
潮州斷層	0.8	1.9	2.1
恆春斷層	-3.1	6.2	6.9

表 5-2.3：以 2016-2019 年速度場模擬成果之各斷層滑移速率。地質走滑速率正值表左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表逆斷層，負值表正斷層。

Table 5-2.3: The result values of each fault model with2016-2019 GPS velocity field. The positive strike-slip rates indicates left-lateral moving and the negative values indicates right-lateral moving. The positive dip-slip rates indicate reverse moving and the negative values indicates normal moving.

參數項目 / 斷層名稱	2016-2019 BLOCKS 模擬成果		
	平均走滑速 (s.s. mm/yr)	平均傾滑速 (d.s. mm/yr)	總滑移速 (mm/yr)
木屐寮-六甲	-0.3	5.7	5.7
新化斷層	-4.2	18.2	18.6
後甲里斷層	-0.4	7.1	7.2
左鎮斷層	-8.2	1.0	10.7
小崗山斷層	0.0	3.4	3.4
旗山斷層	1.1	3.2	3.5
潮州斷層	-0.9	1.8	2.3
恆春斷層	-0.6	6.2	6.2

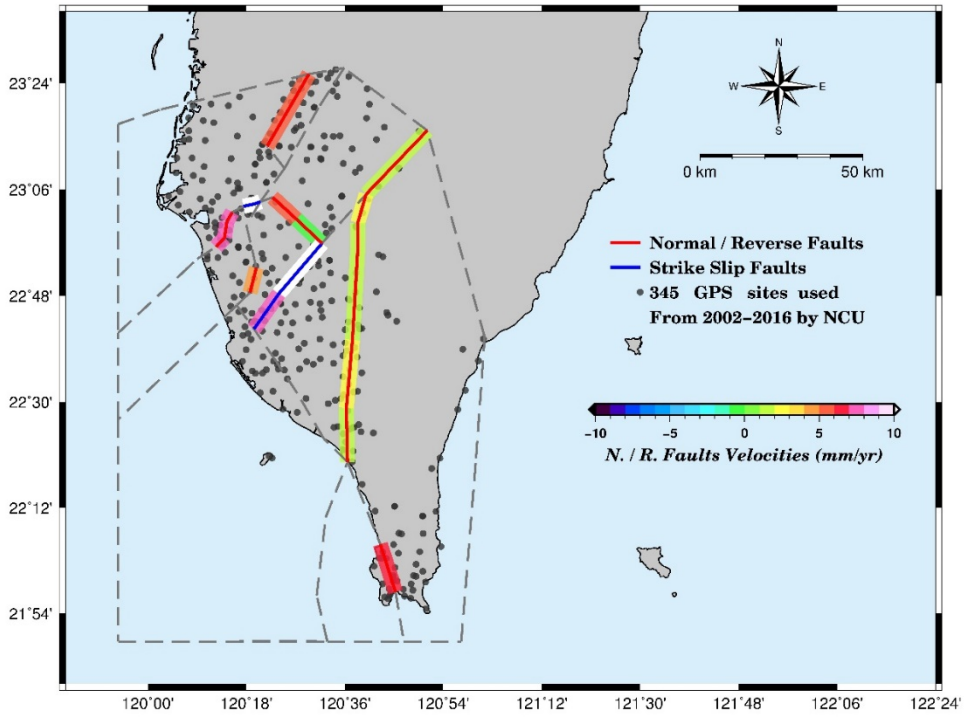


圖 5-2.3：2002-2016 年傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-2.3: The dip-slip rates of each segment modeled with 2002-2016 GPS velocity field.

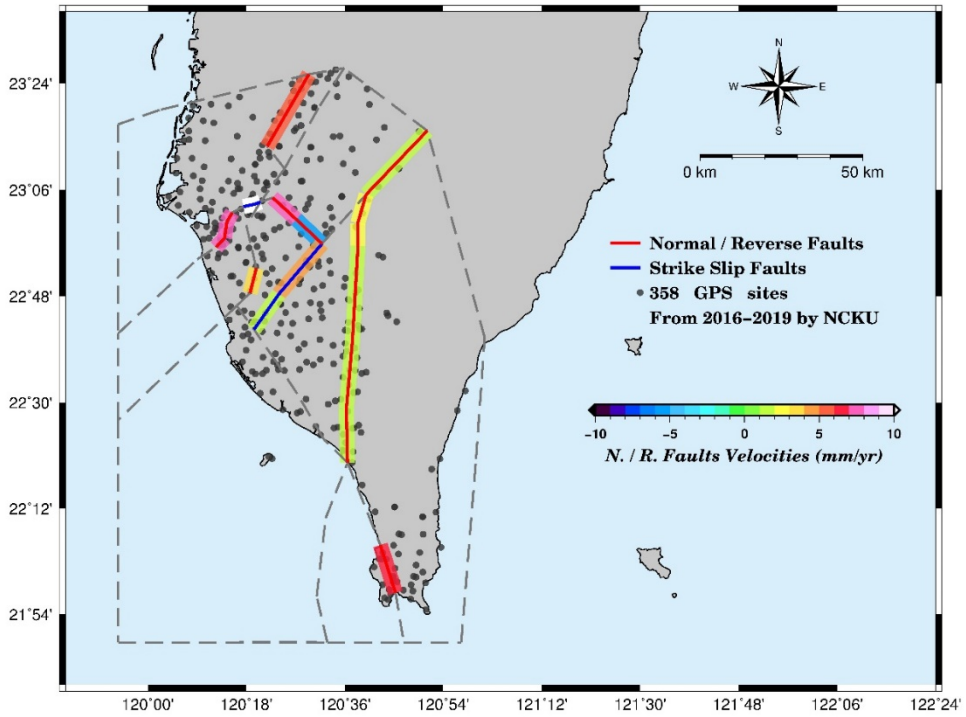


圖 5-2.4：2016-2019 年傾向滑移速率模擬成果。

Figure 5-2.4: The dip-slip rates of each segment modeled with 2016-2019GPS velocity field.

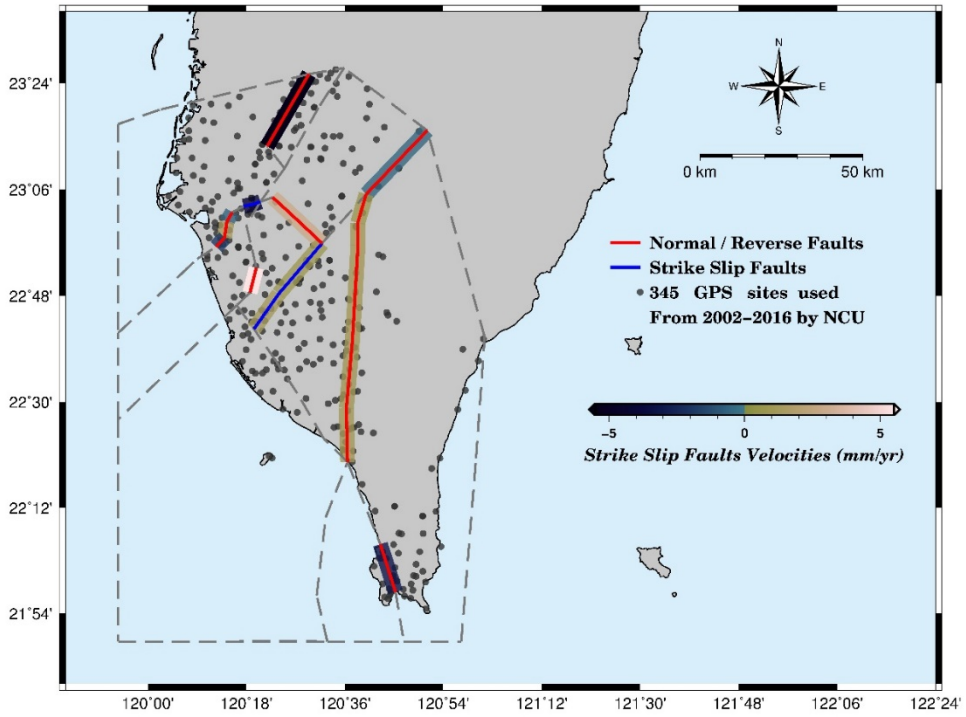


圖 5-2.5：2002-2016 年走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-2.5: The strike-slip rates of each segment modeled with 2002-2016 GPS velocity field.

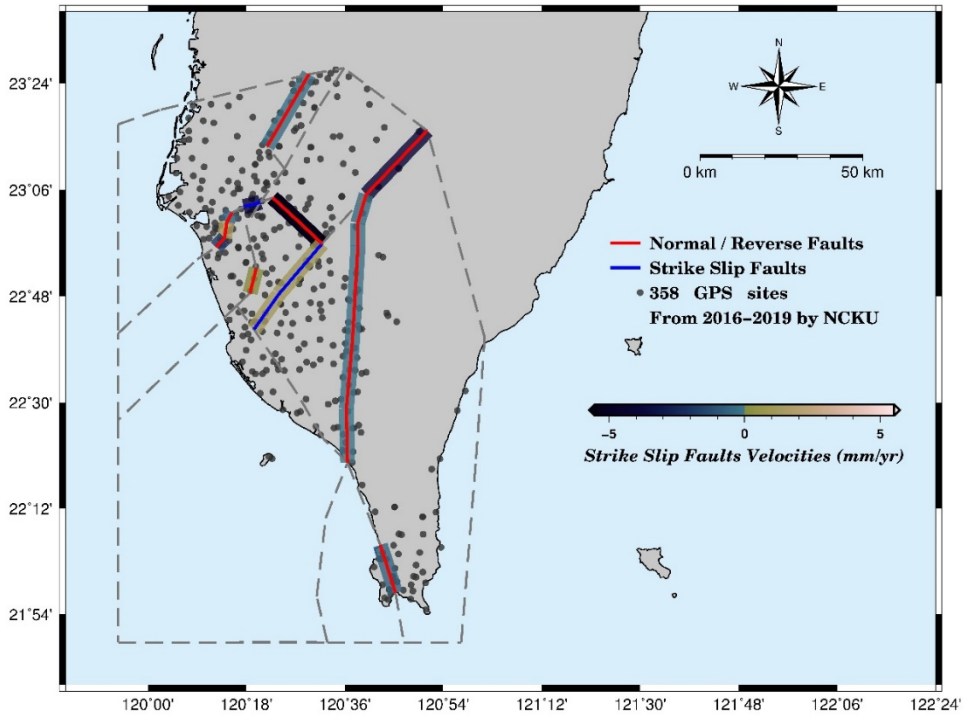


圖 5-2.6：2016-2019 年走向滑移速率模擬成果。

Figure 5-2.6: The strike-slip rates of each segment modeled with 2016-2019 GPS velocity field.

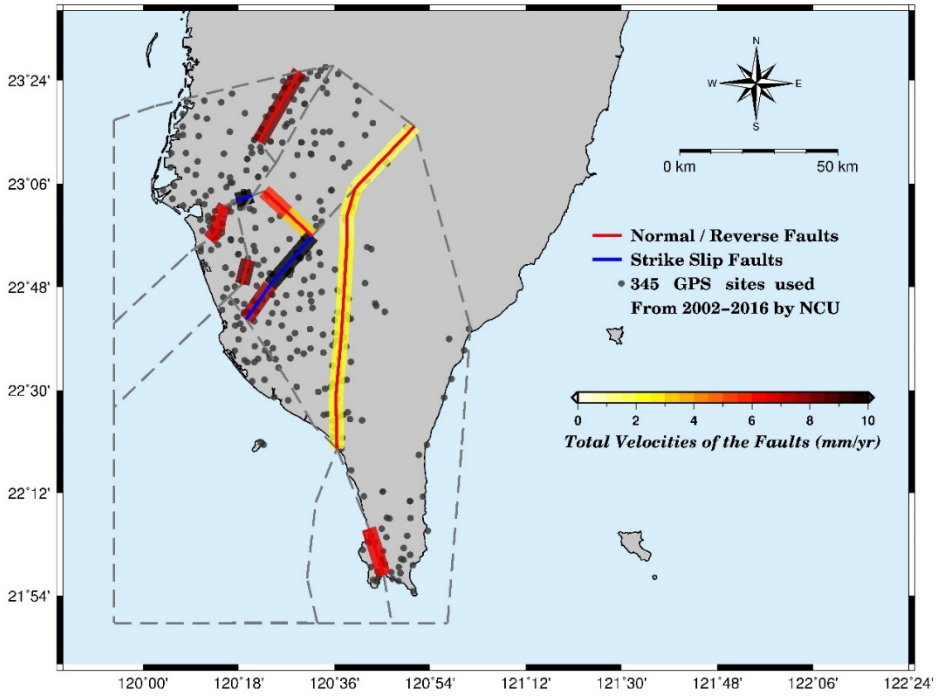


圖 5-2.7：2002-2016 年斷層模擬成果之滑移速率。

Figure 5-2.7: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 2002-2016 GPS velocity field.

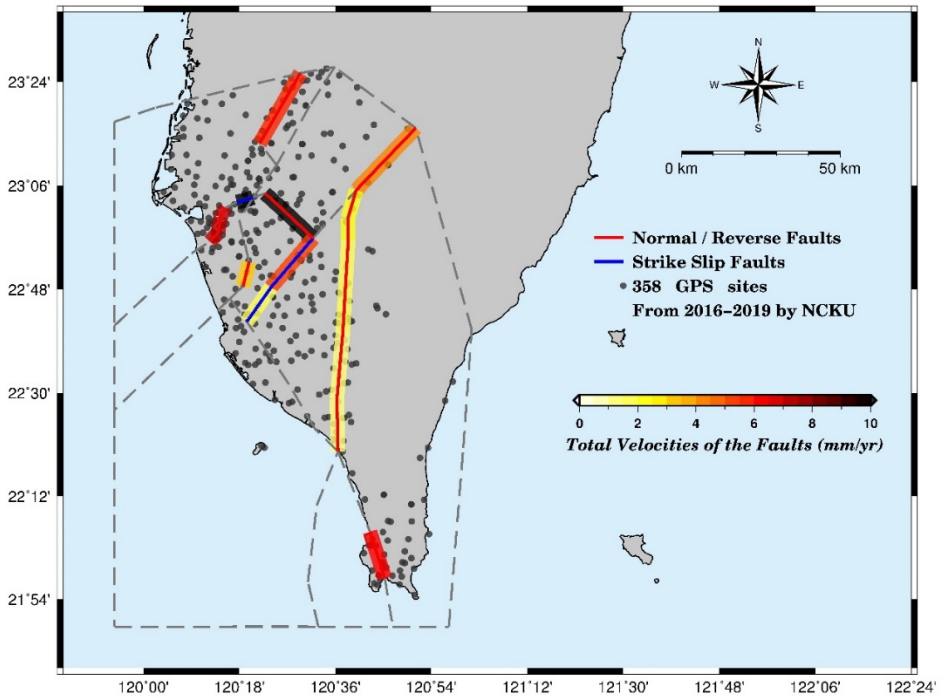


圖 5-2.8：2016-2019 年斷層模擬成果之滑移速率。

Figure 5-2.8: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 2016-2019 GPS velocity field.

我們可以藉由地表 GPS 正演之水平速度場來探討模型所模擬之斷層滑移是否合理；下圖 5-2.9 與圖 5-2.10 為地表速度場模擬成果；兩圖中皆可見兩時間段北邊模擬結果之紅色箭頭整體而言相對原始速率量值略小，多數斷層座落的西半部的正演模擬量較為符合，推測多數斷層參數提供了符合的移動條件。而就量值與方向方面而言，SCEN 塊體尤其潮州斷層北段鄰近的測站模擬也是旋轉量推演相較原始量較少的區塊，越近塊體東南端近沿海處落差愈見明顯，推測與測站分布和 HECH 塊體邊界的構造定義有關。而 EKSH 塊體內速度模擬成果相較於原始速度可見整體量值偏小，在 2002-2016 年的速度場尤為明顯；另兩個時間段速度場在西南部沿海的正演皆有一系統性略少的逆時針旋轉，推測可能有其他構造或地形效應未被納入考量。2002-2016 年模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 9.706；2016-2019 年模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 11.658，相對較大的 RMS 除了測站數量增加外，模擬成果與真實情況之落差應另進一步討論影響因子。

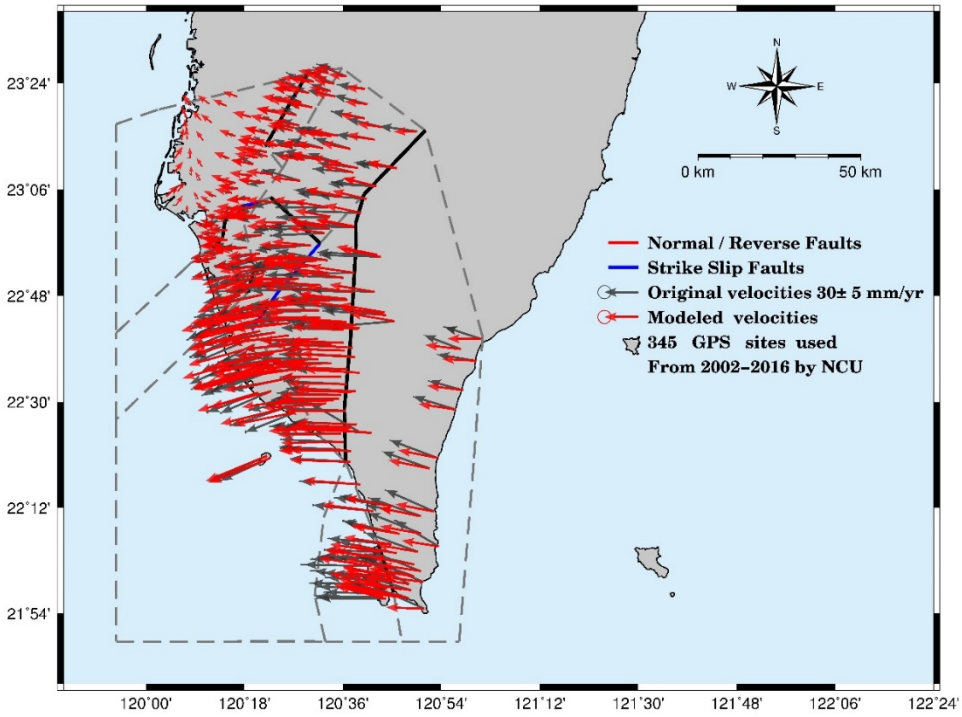


圖 5-2.9：2002-2016 年地表速度場正演模擬成果，整體標準差值為 9.706。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，紅色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-2.9: The results of GPS velocity field modeled with 2002-2016 GPS velocity field which the standard deviation is 9.706. The red arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

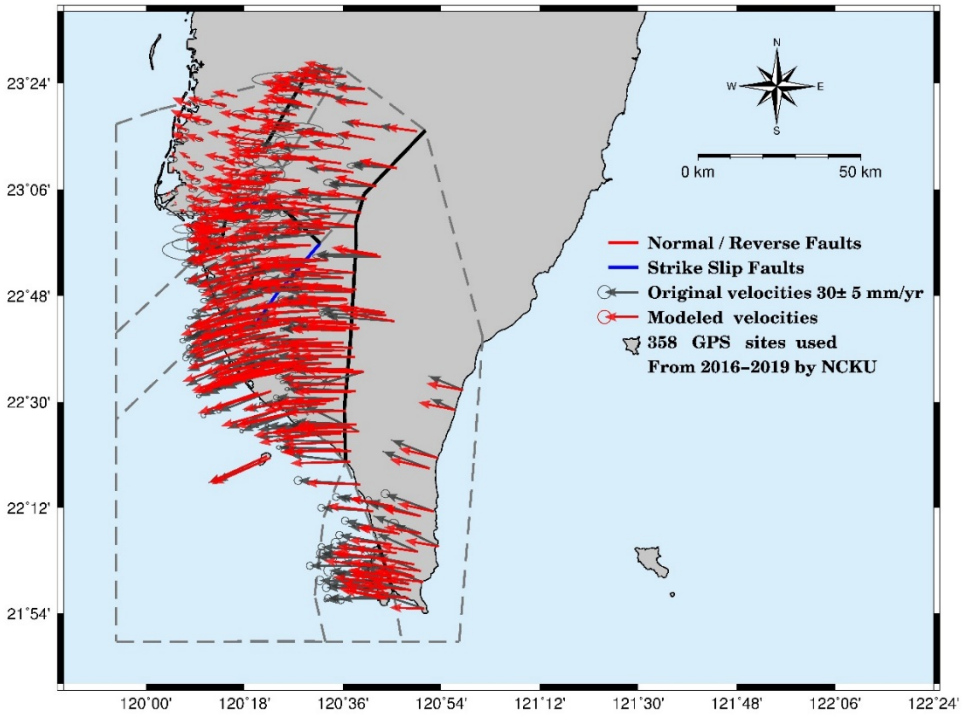


圖 5-2.10：2016-2019 年地表速度場正演模擬成果，整體標準差值為 11.658。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 5-2.10: The results of GPS velocity field modeled with 2016-2019 GPS velocity field which the standard deviation is 11.658. The red arrows are the modeled results, the deep gray arrows are the original velocities and the blue, red and dash lines are the faults and block boundaries which follows the icon chart within the picture.

西南部斷層模擬成果中，2002-2016 年可見新化斷層變動最大，整體滑移速率值貢獻來自於傾向滑移分量，而走向滑速率量值之貢獻未超過 4.4 mm/yr，而潮州斷層最小，各分段中最高總滑移量約 2.2 mm/yr (圖 5-2.7)；2016-2019 年可見新化斷層變動最大，同樣速率值主要貢獻來自於傾向滑移分量，而走向滑速率量值之貢獻未超過 4.4 mm/yr，潮州斷層最小，其分段最高總滑移量約 4.5mm/yr (圖 5-2.8)。對應於預先給定地質滑移速率之約制，有約制滑移速率項相對於未約制滑移速率項者，模擬成果與地質約制速率值落差皆兩毫米的速率內可判斷，地質滑移速率仍有顯著約制效果；而兩時間段模擬速率與約制速率量差最大者皆位於新化斷層，單段量值差距最大約 1.75 mm/yr，但其未約制之傾向滑移項則有 19.4 mm/yr 之逆衝分量，達到每年約兩公分的抬升量，與其他斷層段有一個級距的落差，推測與塊體 LUCU 的幾何形狀於東端設定未似其他塊體邊角較方圓，又新化斷層正位於該側幾何形狀尖端之鄰邊，使致模擬成果不佳，而為與其他斷層模擬相互比對，故本期報告仍維持原塊體幾何設定

5-3 DEFNODE 斷層模型

5-3-1 斷層模型原理與使用參數

依彈性回彈理論指出，板塊之間的相對運動，會使應變在彈性地殼中累積。其中對斷層系統而言，是以剪應變形式的應變能累積為主。斷層破裂時可能的能量釋放比例可藉由各種地殼變形測量結果獲得，其中短期的斷層滑移速率可藉由大地測量的方式，如 GPS 及水準測量，量測斷層兩側之相對地表變形而得。

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE （McCaffrey, 2005）來進行斷層現今滑移速率及滑移虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每條斷層都位於兩個轉動塊體（block）的邊界上。Ching et al. （2011）曾將臺灣地區幾條重要的斷層視為塊體邊界，再利用塊體模型來探討臺灣現今的地殼運動情形。本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的臺灣活斷層位置，並參考本計畫之斷層參數資料（表 5-2.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型（圖 5-2.1）。我們除了根據前一期計畫，在 Ching et al. （2011）的模型所加入的 TAST、CYMT、HSS1、SYSG 等塊體及其幾何修正外，為了符合地調所公布的活動斷層資料，我們也修正了 EKSH、KHSC 等塊體，以使左鎮斷層能對應其塊體邊界（圖 5-2.1）。

本研究使用 EURA 做為參考塊體（圖 5-2.1a），並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體上有部份水平速度是相對於 EURA 的剛體旋轉所造成，DEFNODE 即以此計算各塊體的剛體轉動角速度及斷層面（塊體邊界）上各節點的長期滑移速率以及滑移虧損率。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道各邊界斷層(表 5-2.1)的總滑移速率值、因此我們將塊體模型所得之各斷層節點上的值取平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均，則所得的速率標準差也會相對較大。

由圖 5-2.1(a)可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性以供數值模型所需。圖中邊界上的圓圈代表節點，塊體模型即是用來估算斷層面在各節點上的滑移速率值。

為了求取各斷層面上的間震期滑移速率及滑移虧損率，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由整理臺灣南部活斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，建立了本文研究範圍內的斷層幾何參數表（表 5-2.1）。注意除了如圖 5-2.1(a)中所示的地表節點外（深度為 0 km），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本次研究中在模型反演過程中加入塊體內部形變，此時各塊體將不再是剛性塊體，塊體內部的速度梯度可產生內部形變，較符合臺灣目前大地構造，並加入由地質研究方法推估的斷層滑移速率(表 5-2.3, Shyu et al., 2016)作為反演過程的約束值，以得到能符合不同觀測資料的模型結果。

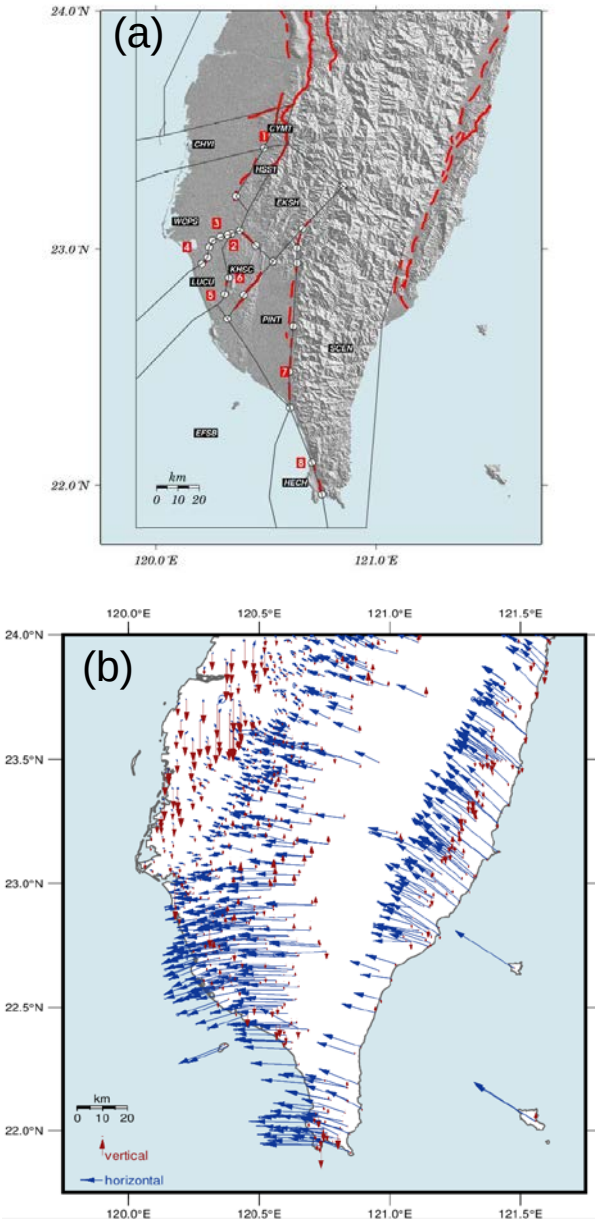


圖 5-3.1：(a)臺灣南部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活斷層，紅色虛線表是推測或隱伏斷層。紅色數字代表之斷層分別為：1.木屐寮-六甲斷層；2.左鎮斷層；3.新化斷層；4.後甲里斷層；5. 小崗山斷層；6. 旗山斷層；7.潮州斷層；8.恆春斷層。(b)從 2002 至 2015 年底的 GPS 資料所觀測到的平均水平速度場(藍色箭號) (相對於澎湖白沙站)及平均垂直速度場(紅色箭號)。

Fgure 5-3.1: (a) The digital terrain model of southern Taiwan. Black lines represent the boundary of blocks with their name marked within the black. Red line and white dots show the active faults and their nods used in our 3D model: 1. Liuchia -Muchiliao fault；2. Zuozhen fault；3. Hsinhua fault；4. Houchiali fault；5. Hsiaogangshan fault；6. Chishan fault；7.Chaochou fault；8. Hengchun fault. (b) Horizontal and vertical GPS velocity field used in our model (blue and red arrows) with the 68% confidence error ellipse.

表 5-3.1：圖 5-3.1 中所示斷層之幾何參數。

Table 5-3.1: The geometry parameters of the faults in figure 5-3-1.

	斷層名稱	傾角(degree)	斷層底部深度(km)
1	木屐寮-六甲	45.0	6.0
2	新化斷層	80.0	12.5
3	後甲里斷層	40.0	4.0
4	左鎮斷層	70.0	10.0
5	小崗山斷層	45.0	10.0
6	旗山斷層	60.0	13.0
7	潮州斷層	60.0	17.5
8	恆春斷層	75.0	20.0

5-3-2 斷層模擬結果

本研究所使用的地表運動資料為臺灣 GPS 觀測網由 2002 年起，至 2015 年年底(1999 集集地震與 2016 美濃地震之間)所觀測到的平均水平速度場及平均垂直速度場，包含了 806 個測站資料（圖 5-3.1b）。利用這些速度場及各塊體相對位置及邊界斷層參數，即可估算出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉軸及旋轉角速度（圖 5-3.2a、b 及表 5-3.2）。圖 5-3.3a、b、c、d 則分別顯示本區域的斷層長期滑移速率、斷層鎖定係數、滑移虧損率及間震期滑移速率等值。圖 5-3.4 則顯示本研究區域的三種水平速度場，分別是 GPS 觀測值(a)、塊體模型之估計值(b)以及上述兩者的差別(殘差值, c)。由此圖 5-3.4c 可知，在大部分地區，觀測值和塊體模型預估的水平運動在大部分地區皆有很好的一致性。其中潮州斷層北段的東側部分測站殘差值較大，可能原因除山區測站的資料容易受大雨引起的山崩、地滑等事件影響外，潮州斷層東側資料數量過低(僅 5 個 GPS 站)會影響模型的估算；而旗山斷層與小崗山斷層南端也有部分測站殘差值較大，我們認為除該區域斷層幾何較為複雜外，也可能受到鳳山轉形帶的影響。最後，南端的恆春斷層可能受到斷層潛移的影響，使模型無法順利擬合斷層的滑移情形。整體來看，垂直

運動的擬合結果則明顯不如水平運動，此現象可能因臺灣西南部的地表垂直運動包含了一些非斷層活動的雜訊(如：地層下陷、地下水位變化、活動褶皺；泥灌入體等)，未來將透過其他分析方法來改善此問題。

除此之外，為了評估各塊體可能存在的內部變形(internal deformation)，我們利用 Block Modeling 來推算研究區域塊體的內部應變率(internal strain rate)。結果如圖 5-3.5 所示，南部地區應變受菲律賓海板塊擠壓影響，皆以東西向擠壓為主，主應變率平均約為 482.9 nanostrain/yr，僅潮州斷層東側之塊體呈現拉張的變形。

圖 5-3.3 顯示本研究中設置的邊界斷層上各節點之滑移速率平均值，並於表 5-3.3 中展示這些斷層之平均長期滑移速率及平均滑移虧損率，及其對應之標準差。這些測地長期平均滑移速率(geodetic long-term slip rate)是由近十年測地資料(GPS, 水準等)所得的地表運動推估而得，因此和利用地質資料(槽溝開挖或河階等)所觀測的地質長期(數百~數千年)滑移速率(geologic long-term slip rate)存在有本質上的差異。若假設斷層的震間能量累積速率為常數，則 geodetic 和 geologic slip rates 應該相同。然而由於板塊構造及運動的複雜性，在地質時間的尺度下，斷層活動應存在變異性，所以許多研究都曾指出這兩種斷層滑移速率的差別(e.g., Ward, 1998)。評估 geodetic long-term slip rate 的方法，除了和 geologic long-term slip rate 進行比較外，也可以由地震活動度等資料來間接進行。

在此針對本階段計畫之 8 條南部的斷層構造進行分析討論，結果陳述如下。首先，我們比較模型所估算的斷層測地長期滑移速率與地質長期滑移速率，結果顯示兩種滑移速率差異較大的分別是左鎮斷層、旗山斷層以及恆春斷層，平均長期滑移速率分別為 28.4 mm/yr、26.6 mm/yr 以及 28.8 mm/yr，從圖 5-3.4 顯示在南部區域的速度場有明顯的逆時針旋轉，造成在左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層兩側的速度場方向有明顯改變，此現象可以視為左鎮斷層、旗山斷層與恆春斷層面上有較快速錯動的原因之一，然而會造成斷層兩側速度改變的除塊體的長期滑移外，也可能受潛移等其他變形影響，因而造成兩種滑移速率間較大的差異。此外因滑移虧損率為長期滑移速率乘以斷層鎖定係數，所以在長期滑移速率較快的

斷層面上往往也會有較高的滑移虧損率，因此非常高的滑移虧損率，可能是因長期滑移速率被高估的影響。

塊體模型所計算的斷層滑移速率主要是受到地表水平運動所影響。本研究加入的垂直速度場資料仍會影響傾角方向的滑移速率估算。但垂直速度場可能紀錄到非構造活動的垂直向地表運動，使得垂直向速度場擬合不如水平向。未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直向速度場以及其他測地資料(如：InSAR、精密水準資料)對塊體模型模擬結果的影響。

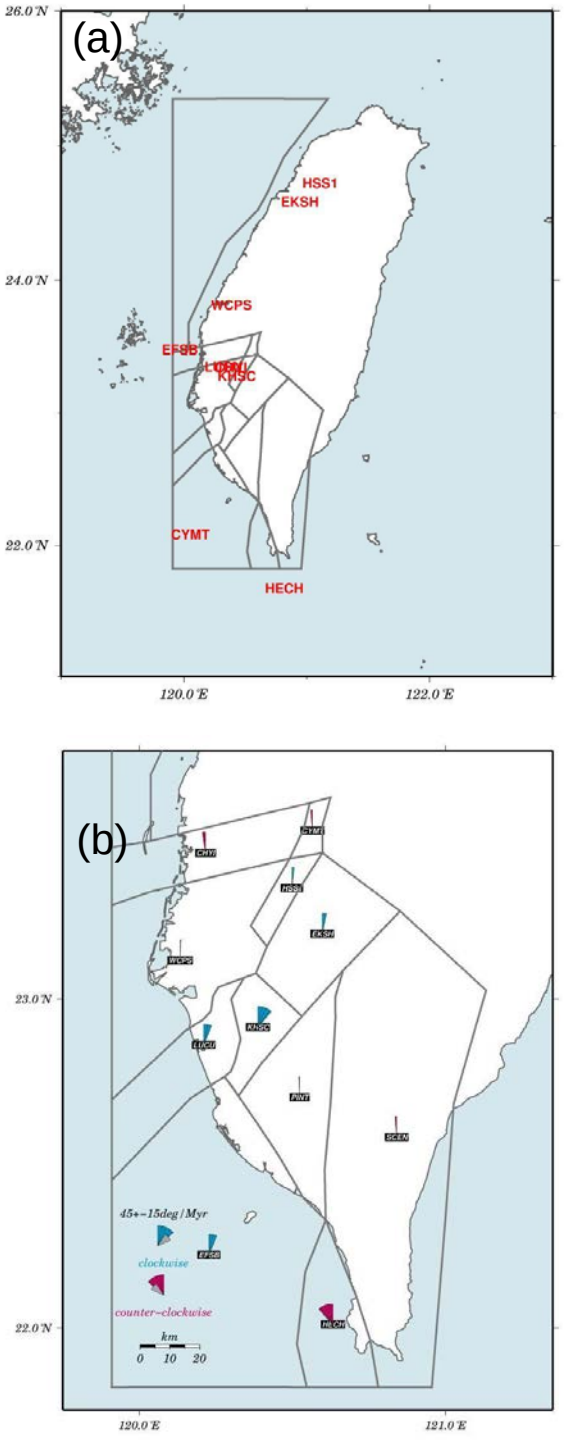


圖 5-3.2：(a)最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體（見圖 5-2.1）。(b）最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。

Fgure 5-3.2: (a) The location of the rotation poles for each block were marked along with the 95% confidence error. (b)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counter - clockwise rotation.

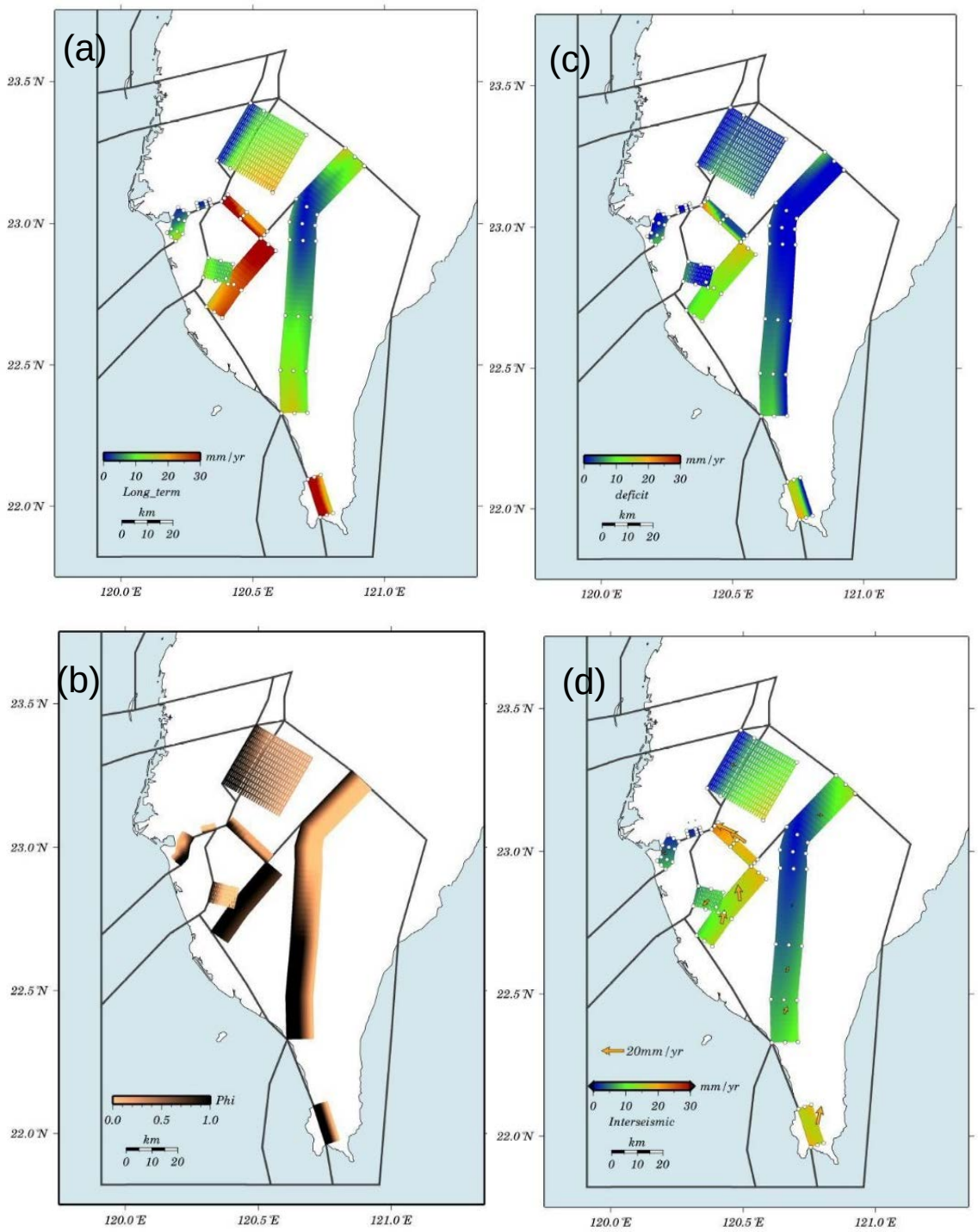


圖 5-3.3：(a) 推求的斷層長期滑移速率。紅線代表各斷層的地表位置，橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向，暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b)各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的間震期滑移速率。

Fgure 5-3.3: (a) The longterm fault slip rate. (b) The distribution of coupling coefficient. (c) The deficit rate on the fault surface. (d) If we take the longterm slip rate and minus deficit, we can get the interseismc slip rate. And the yellow arrow told us the driection of the slip.

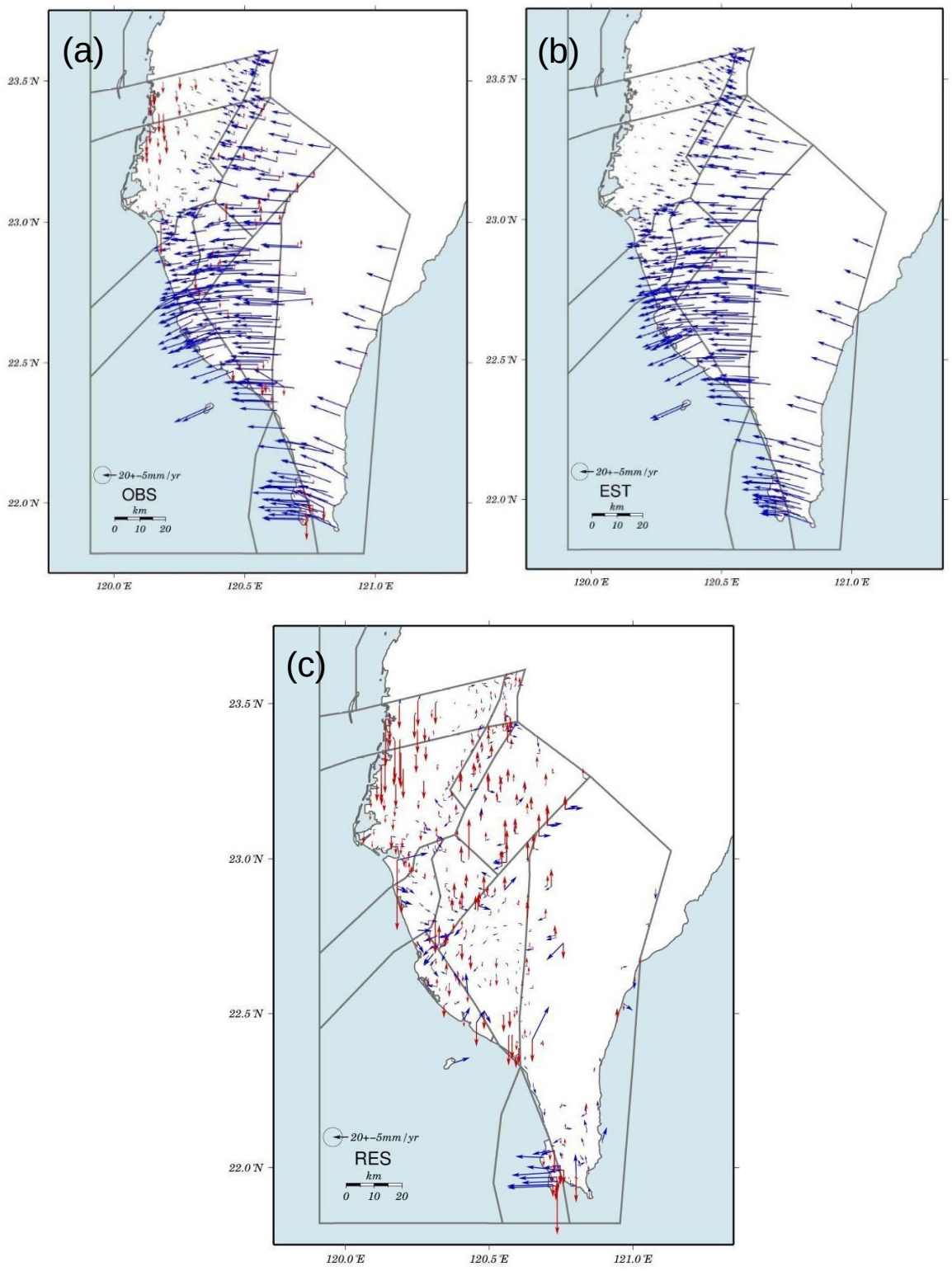


圖 5-3.4：(a) GPS 觀測速度場，藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場，黑線代表各斷層的地表位置。(b) 最佳塊體模型所預估的地表速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。

Fgure 5-3.4: Blue arrows show the horziontal components of the GPS velocity field. Black lines are the boundary of blocks. (a) Shows the observated GPS velocity. (b) The estimated GPS velocity. (c)The residual between our estimated GPS velocity and the observated GPS velocity.

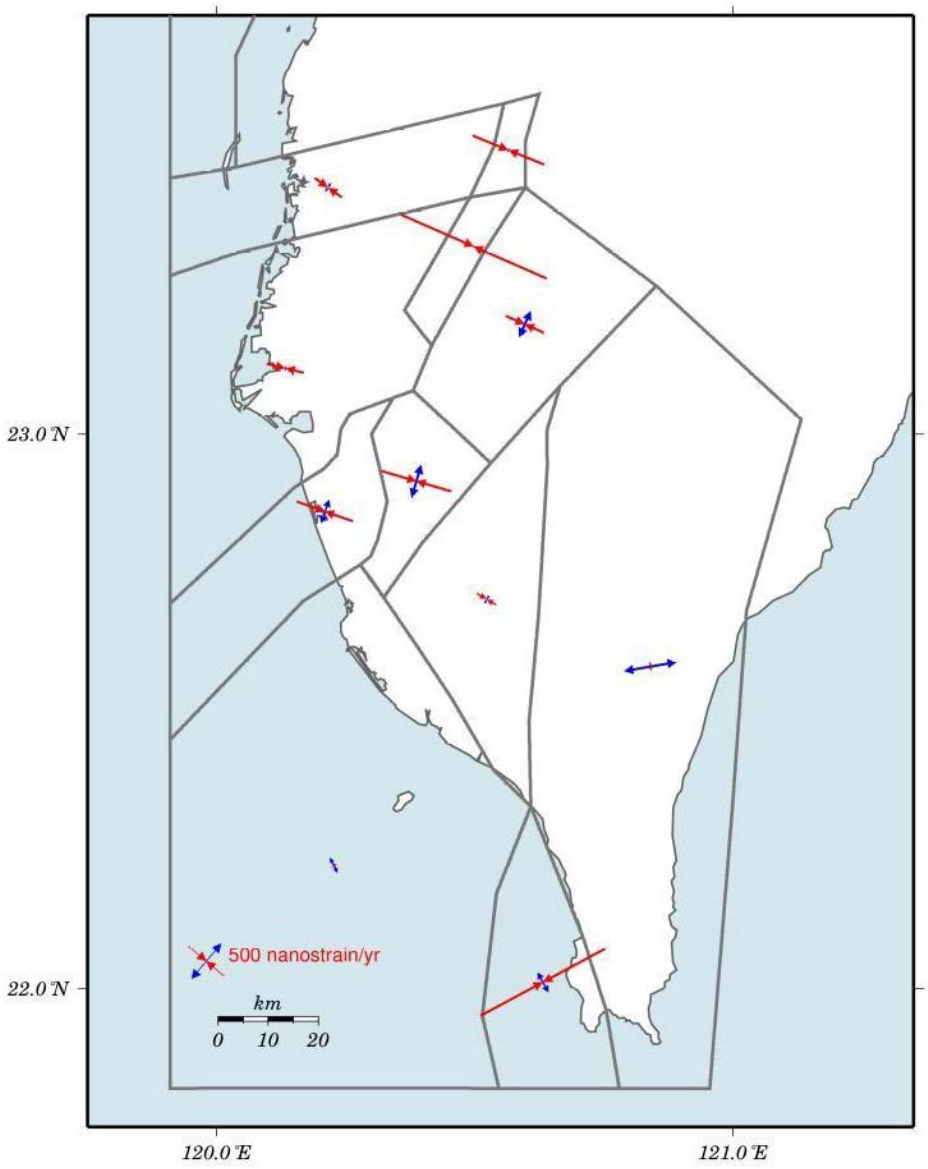


圖 5-3.5：各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。

Fgure 5-3.5: Internal strain within each block. Red and blue arrows reprsent maxmim and minmim principle strain rate.

表 5-3.2：各塊體對應之旋轉軸位置、角速度、角速度誤差及誤差橢圓之描述。

Table 5-3.2: The location of rotation poles, the angular velocities(ω) and the standard error(std_ω) of angular velocities of each block. Along with the maximum, minmum axis and the azimuth of error ellipse for each pole.

名稱	經度	緯度	角速度（deg/my）	角速度誤差（deg/my）	誤差橢圓長軸長（deg）	誤差橢圓短軸長（deg）	誤差橢圓長軸方位角
CHYI	120.25	23.35	9.5	0.04	0.00	0.00	5.8
WCPS	120.22	23.82	-1.9	0.03	0.01	0.00	2.7
EKSH	120.79	24.59	-12.5	0.01	0.00	0.00	7.8
LUCU	120.17	23.35	-23.6	0.11	0.00	0.00	165.0
KHSC	120.28	23.28	-42.8	0.16	0.00	0.00	169.5
PINT	120.76	7.65	1.8	0.06	0.75	0.01	179.3
EFSB	119.82	23.48	-23.8	0.19	0.01	0.00	149.4
SCEN	119.66	17.85	4.8	0.05	0.07	0.00	14.2
CYMT	119.90	22.85	5.1	0.13	0.05	0.00	22.4
HSS1	120.96	24.73	-6.8	0.28	0.09	0.00	17.5
HECH	120.66	21.67	45.9	1.76	0.02	0.00	12.3

表 5-3.3：斷層之地質滑移速率約束值(Shyu et al., 2016)及平均滑移速率。

Table 5-3.3: The minmum, maxmum value of gelogical fault slip rate and the longterm-slip rate, deficit rate along with their standard error cauclated by our model.

斷層名稱	地質長期滑移速率最小值 (mm/yr)	地質長期滑移速率最大值 (mm/yr)	測地長期平均滑移速率（mm/yr）	標準差	平均滑移虧損率（mm/yr）	標準差
木屐寮-六甲	4.4	7.1	10.8	5.2	3.3	1.6
左鎮	Nan	Nan	28.4	6.2	9.1	6.0
新化	0.8	4.5	2.5	1.2	0.6	0.8
後甲里	0.0	7.1	7.6	3.9	3.0	2.4
旗山	0.7	1.5	26.6	4.5	12.8	2.2
小崗山	1.1	5.5	9.1	1.6	1.7	2.1
潮州	0.6	2.9	7.5	4.3	2.5	2.4
恆春	5.9	6.4	28.8	5.6	12.3	5.4

5-4 基線應變反演模型(Baseline Inversion Model)

5-4-1 斷層模型原理與使用參數

本計畫使用 Johnson（2013）基於 Okada（1985，1992）彈性半無限空間斷層錯位模型所開發的基線應變模型。基本原理和塊體模型近乎一致，在塊體模型中假設震間速度場是由於塊體旋轉和斷層鎖定造成之地表速度梯度所組成。斷層錯位模型是基線應變模型的基礎是採用根據彈性錯動理論（Steketee，1958）所建立之斷層錯位模型（Okada，1985，1992），其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體（Poisson solid），即彈性模量（elastic modulus）（λ）等於剪切模量（shear modulus）（μ）之彈性體。沿著斷層（fault patch/fault element）的斷層滑移量Δu_j（ξ_1, ξ_2, ξ_3）會使均質均向的彈性體表面產生位移場Δu_i（x_1, x_2, x_3），其關係如式 5-4.1 所列。

$$u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j [\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right)] v_k d\sum \qquad \text{（式 5-4.1}$$

其中，F 為施力點之作用力；δ_{jk}為克羅內克函數（Kronecker delta），當 j = k 時，δjk = 1，否則為 0；v_k為正交於地表單位（surface element）$d\sum$之餘弦函數方向。Δui 和Δuj 的單位是一致的，如果是模擬地表速度場，則常見的單位為 mm/yr；如果是模擬同震位移場，則常見的單位為 mm 或是 m。根據式 5-4.1，亦即每一個斷層面單位（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單位產生對應之地表位移量；而任一地表單位之位移量，會等於所有斷層單位上滑移量作用在該地表單位位移量的總和。

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。其中，斷層位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層面下緣的深度（圖 5-4.1）。斷層滑移量（fault slip）包

含三個方向的分量[S1, S2, S3]，分別以左移（left-lateral strike slip）、逆衝（reverse dip slip）及伸張（tensile slip）為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時，一般只會考慮走向滑移量（S1，strike slip）與傾向滑移量（S2，dip slip）；在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時，才會採用伸張滑移量（S3）。斷層滑移角（rake）指示斷層上盤相對於下盤之運動方向，其和斷層滑移量之關係為 tan(rake) = S2 / S1。地表位移量（displacement）同樣也包含三個方向的分量[U1, U2, U3]，分別以東（East）、北（North）與上（Up）為正方向。水平位移量（horizontal displacement）則為 sqrt($U_1^2 + U_2^2$)。

在基線應變正演模型中，假設是「地表的應變率是來自於斷層鎖定所造成之彈性變形」，因此基於彈性錯動理論可以估算斷層滑移虧損速率所造成各測站之速度場，進一步可以計算個測站間之基線應變率（Johnson，2013）。測站間基線之建立採用建立德勞內三角形（Delaunay triangle）的方式，對各測站之坐標計算後而得。各基線之伸長率（elongation rate）定義，為將基線兩端測站速度差異向量，投影至基線方向之向量，亦即每年該基線長度之變化量，最後再除以原基線長（式 5-4.2）（Johnson，2013）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad （式 5-4.2）$$

其中 e 為伸長率；ΔL 為每年基線長度之變化量，亦即基線兩端測站速度差異向量在基線上之投影量；L_0 為基線原始長度。

就基線應變反演模型，本計畫給定斷層幾何參數，地表基線伸長率與斷層滑移虧損率間之格林函數 G 由 Okada（1985，1992）所提供之方程式求得，斷層滑移虧損速率矩陣為 s，地表基線伸長率矩陣為 d，則地表速度及斷層滑移虧損率間之關係式以 Gs = d 來表示。本研究以地表速度場誤差之倒數為權重，利用最小二乘法計算式 3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\boldsymbol{Gs} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad （式 5-4.3）$$

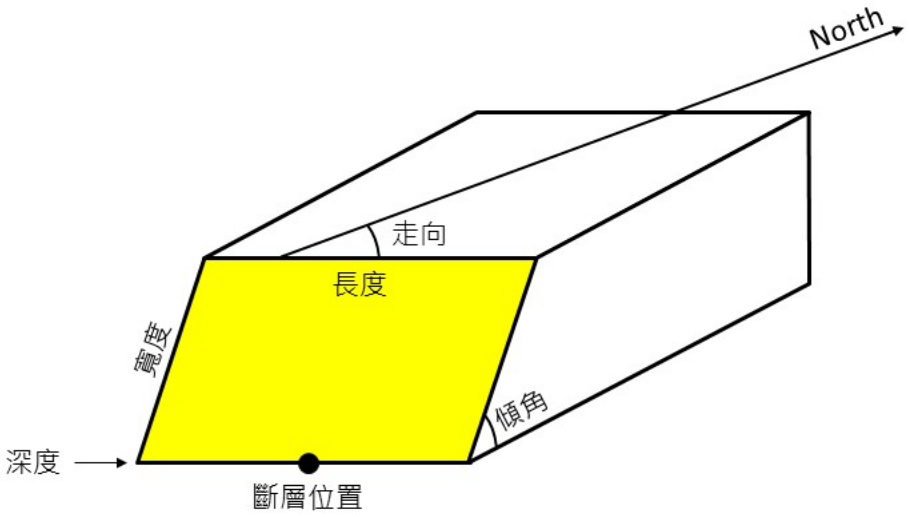


圖 5-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 5-4.1: Perspective schematic view of fault dislocation model and its fault geometry parameters. Fault geometry parameters include fault location (km), depth (km), length (km), width (km), strike (°) and dip (°).

5-4-2 斷層模擬結果

本研究主要為臺灣南部地區，共有八條主要斷層，以 2016 年 02 月 06 日美濃地震為分界，分別使用臺灣南部地區 2002 至 2016 年 GPS 連續站、移動站水平速度場成果及 2016 至 2019 年 GPS 連續站、移動站之水平速度場成果（圖 5-4.2），進行 2 組臺灣南部地區活動斷層及其潛在活動構造斷層模擬，推求此地區主要活動斷層滑移虧損速率分布。利用基線應變模型反演此水平速度分量，計算臺灣南部地區各斷層滑移虧損率平均值（表 5-4.1）。本研究藉由基線應變反演模型之建立，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接求取可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損速率。

模型一使用 2002 至 2016 年水平速度場模型結果顯示不符值為 224.6 mm/yr（圖 5-4.3）。模型參數進行平滑參數（smoothing parameter）之測試，參數從-2 到 0 逐漸減小，最佳值為-1.5 所得到的不符值（misfit）結果作為最佳模型。2002 至 2016 年南部之水平速度場指出此區域無明顯速度梯度差異，除木屐寮－六甲斷層兩側水平速度大小有明顯變化，其水平速率由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。臺南地區之水平速度場由西向東逐漸遞增，以後甲里斷層為分界，斷層以西之水平速率約 12~15 mm/yr；斷層以東水平速率約 15~20 mm/yr。木屐寮-六甲斷層、新化斷層以及後甲里斷層之斷層滑移速率平均值分別為 0.8mm/yr、0.4mm/yr 以及 0.9mm/yr（表 5-4.1）。左鎮斷層週遭測站分佈稀疏，此原因可能造成斷層滑移速率平均值為 0.7 mm/yr。

從滑移速率來看（圖 5-4.4、圖 5-4.5），分別於旗山斷層、潮州斷層有較大的滑移虧損率累積，由於水平速度場在西部麓山帶及西部平原間有明顯變化，於東向西跨越旗山斷層之速度場，由約 60 mm/yr 降至約 50 mm/yr，並具有右移之分量，而橫跨潮州斷層於南部地區速度大小偏大。旗山斷層之斷層滑移速率平均值為 6.7 mm/yr，主要集中於斷層 2 公里處約有 7 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積。潮州斷層之斷層滑移速率平均值為 5.5 mm/yr，主要集中於斷層 3 公里處約

有 22 mm/yr 的最大滑移虧損率於此處累積。

而恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向兩測速度場明顯方向變化，速度值約 41~62 mm，恆春斷層之斷層滑移速率平均值為 10.0 mm/yr。

模型二使用 2016 至 2019 年水平速度場模型結果顯示不符值為 189.5 mm/yr (圖 5-4.6)。模型參數進行平滑參數（smoothing parameter）之測試，參數從-2 到 0 逐漸減小，最佳值為-1.5 所得到的不符值（misfit）結果作為最佳模型。2016 至 2019 年南部之水平速度場（圖 5-4.2(右)）與 2002 至 2016 年水平速度場數值與型態相似。木屐寮-六甲斷層、新化斷層以及後甲里斷層之斷層滑移速率平均值分別為 0.5 mm/yr、0.1 mm/yr 以及 1.1 mm/yr（表 5-4.1）。左鎮斷層週遭測站分佈稀疏，此原因可能造成斷層滑移速率平均值為 0.1 mm/yr。

從滑移速率來看（圖 5-4.7、圖 5-4.8），於旗山斷層、潮州斷層有較大的滑移虧損率累積。旗山斷層之斷層滑移速率平均值為 2.0 mm/yr，主要集中於斷層 2 公里處約有 4 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積。潮州斷層之斷層滑移速率平均值為 4.5 mm/yr，主要集中於斷層 3 公里處約有 19 mm/yr 的最大滑移虧損率於此處累積。

而恆春地區速度場由東向西跨過恆春斷層由西北轉為西向兩測速度場明顯方向變化，速度值約 41~62 mm，恆春斷層之斷層滑移速率平均值為 9.2 mm/yr。

由兩個不同時期的斷層模型結果指出，(1) 由於 2016 年美濃地震震後在台南與高雄地區的速度場型態與地震前相當不一致，因此兩個時間段的模型成果才會在旗山斷層與小崗山斷層得到不一致的斷層滑移虧損速率。(2) 雖然兩個時間段所獲得的恆春斷層的斷層滑移虧損速率相當接近，皆約 10 mm/yr。但是由於恆春斷層在 2006 年 12 月之後，正在經歷疑似慢滑移事件的發生，所以會高估恆春斷層的斷層滑移虧損速率。換言之，本計畫未來需要針對恆春斷層進行更進一步的研究工作，釐清疑似慢滑移事件對於斷層滑移虧損速率的影響量。

表 5-4.1：斷層平均滑移速率。

Table 5-4.1: Average slip deficit rates.

	模型一 2002-2016 年之水平速度場		模型二 2016-2019 年之水平速度場	
斷層名稱	斷層滑移速率（mm/yr）	標準差（mm/yr）	斷層滑移速率（mm/yr）	標準差（mm/yr）
木屐寮-六甲斷層	0.8	0.5	0.5	0.3
新化斷層	0.4	0.4	0.1	0.1
後甲里斷層	1.9	0.7	1.1	0.3
左鎮斷層	0.7	1.0	0.1	0.1
小崗山斷層	6.7	3.2	1.6	0.9
旗山斷層	6.7	2.8	2.0	1.1
潮州斷層	5.5	4.2	4.5	4.0
恆春斷層	10.0	5.5	9.2	5.5

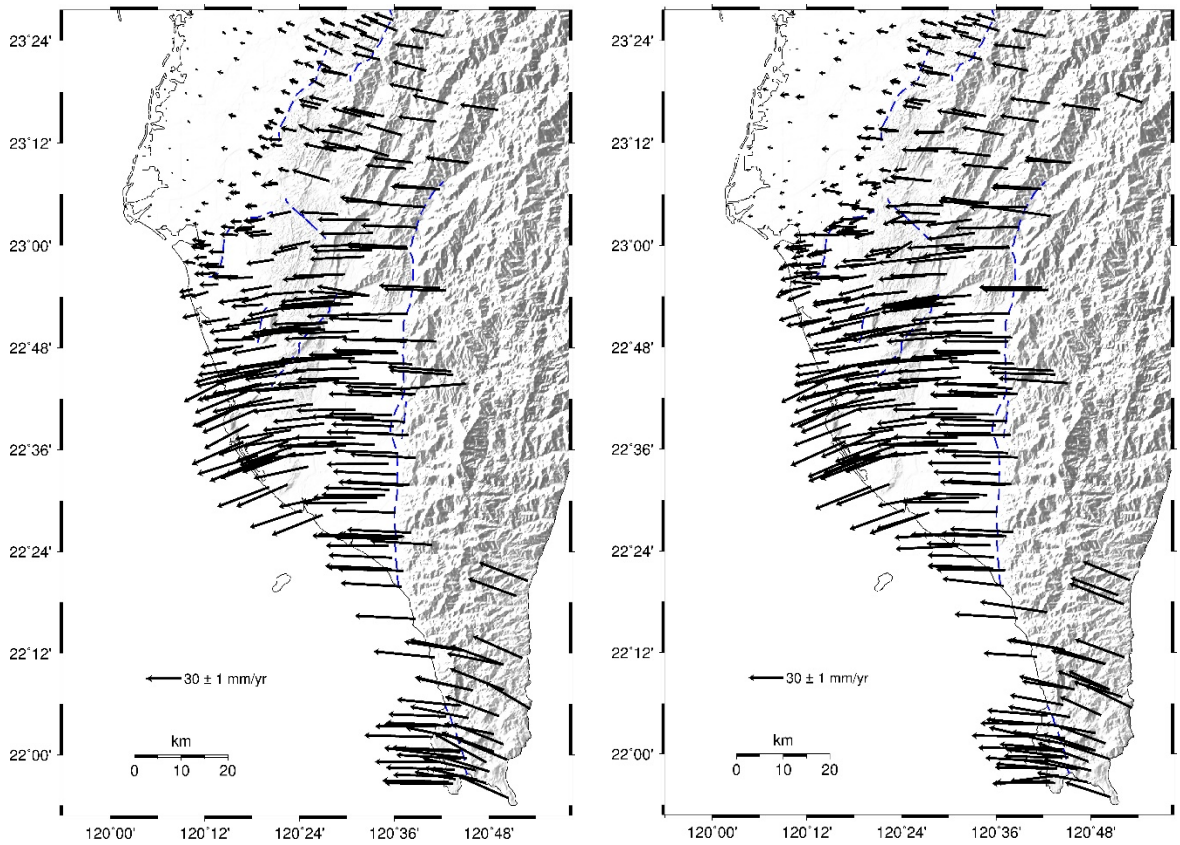


圖 5-4.2：臺灣南部地區 GPS 連續站、移動站相對於測站 S01R 為之水平速度場。藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層。左邊為 2002-2016 年之水平速度場；右邊為 2016-2019 年之水平速度場。

Figure 5-4.2: Horizontal GPS velocity of SW Taiwan. The velocity of CGPS and RGPS are relative to S01R station. Blue dashed lines indicate the active faults defined by CGS. The left figure shows the horizontal velocity from 2002-2016; while the lift one shows the horizontal velocity from 2016-2019.

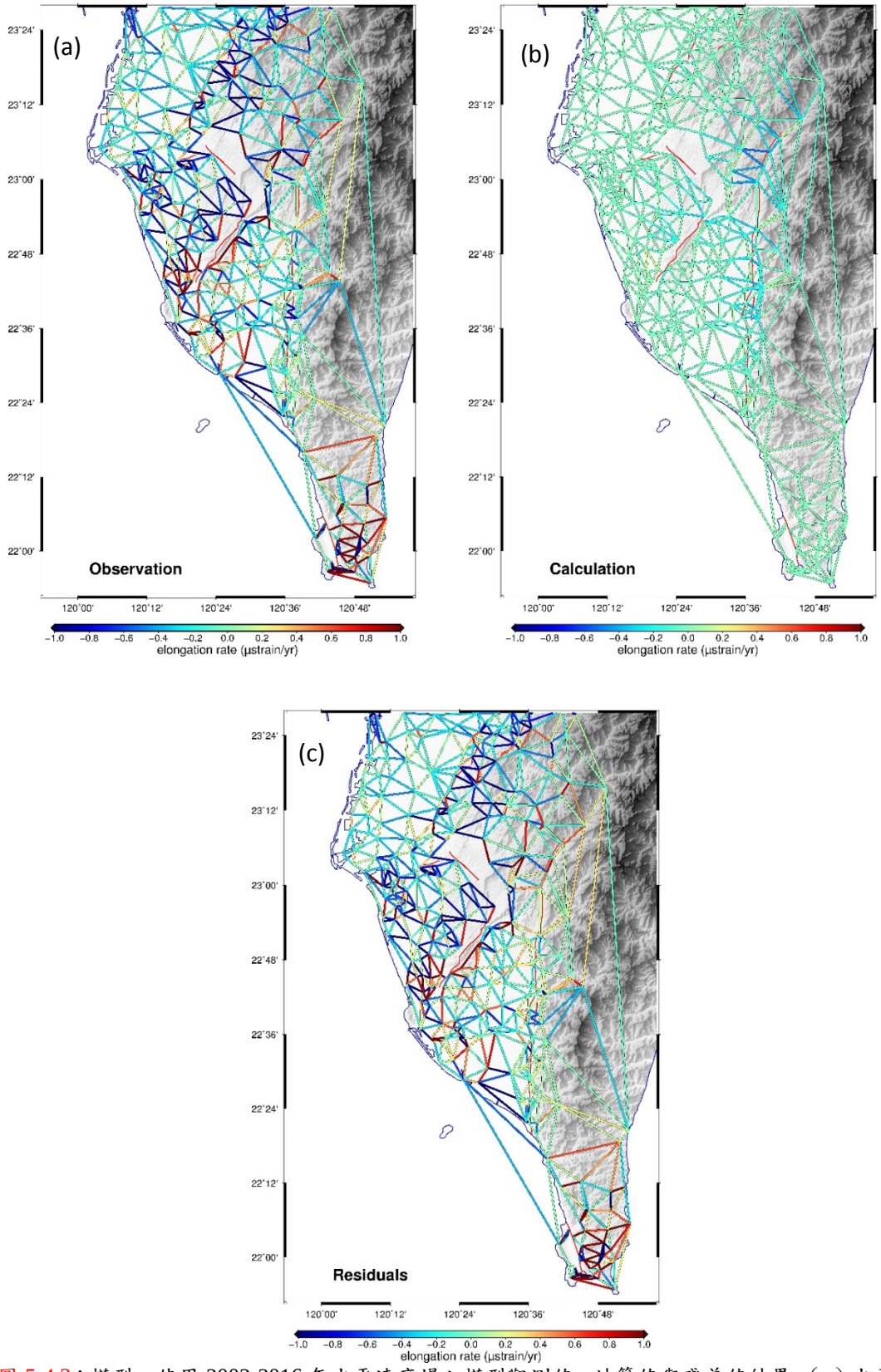


圖 5-4.3：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。（a）水平速度場觀測值。（b）水平速度場計算值。（c）水平速度場殘差。

Figure 5-4.3: The 1st model applies the horizontal velocity from 2002-2016.（a）Horizontal velocity observation；（b）Horizontal velocity calculation；（c）Horizontal velocity residuals.

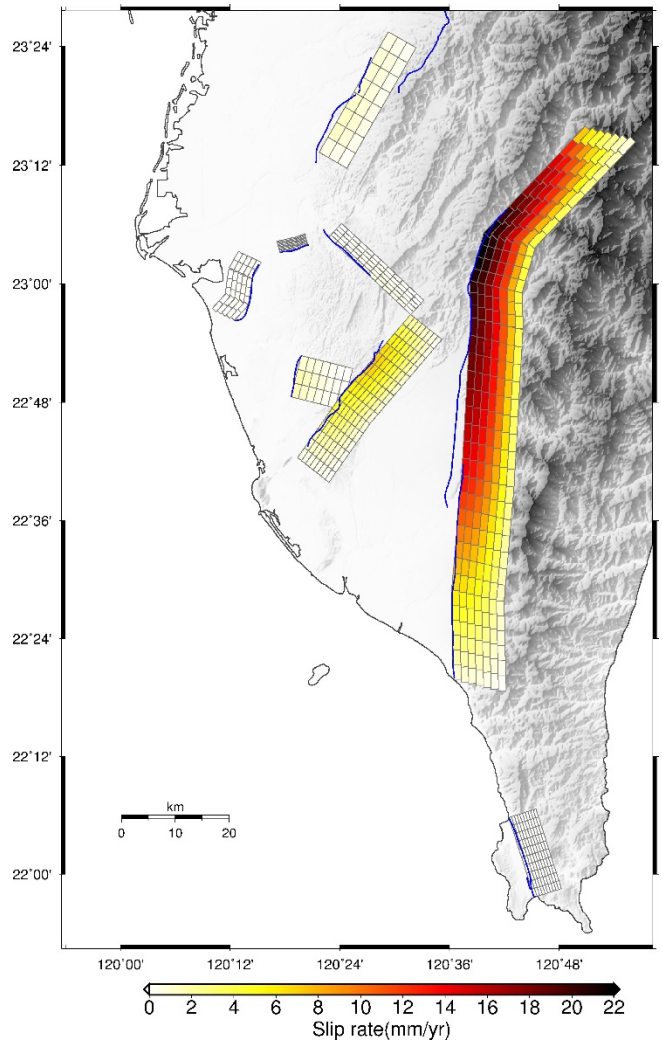


圖 5-4.4：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-4.4: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2002-2016 horizontal velocity.

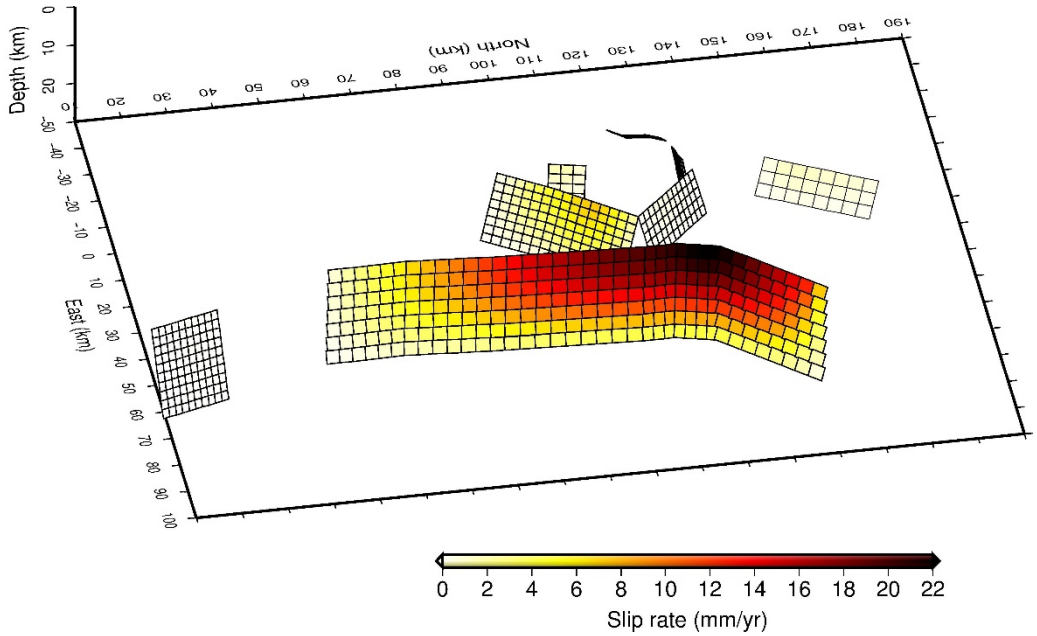


圖 5-4.5：模型一使用 2002-2016 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-4.5: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2002-2016 horizontal velocity.

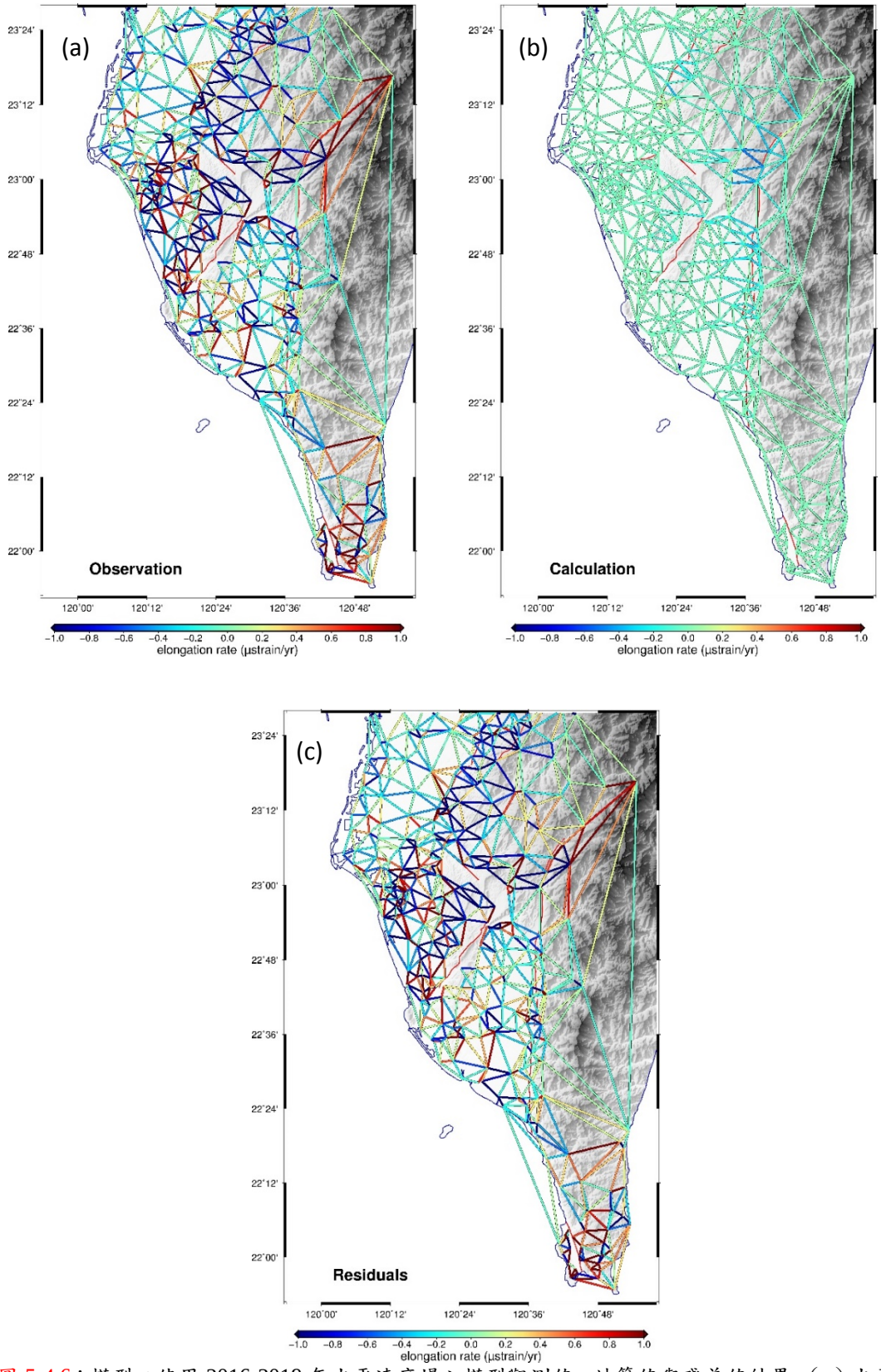


圖 5-4.6：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。（a）水平速度場觀測值。（b）水平速度場計算值。（c）水平速度場殘差。

Figure 5-4.6: The 2nd model applies the horizontal velocity from 2016-2019.（a）Horizontal velocity observation；（b）Horizontal velocity calculation；（c）Horizontal velocity residuals.

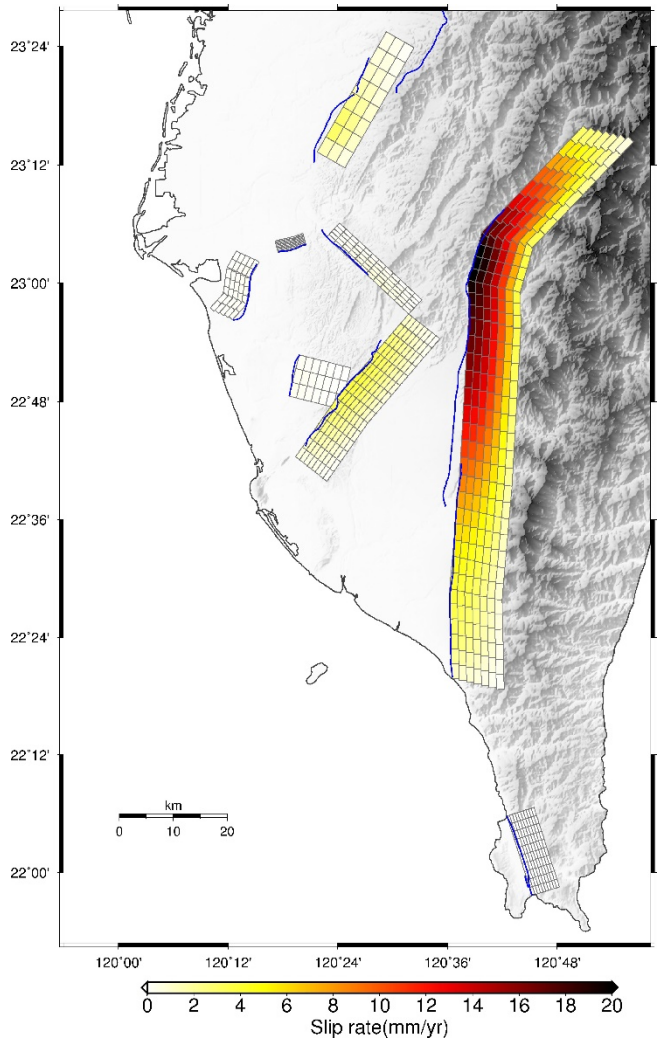


圖 5-4.7：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-4.7: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2016-2019 horizontal velocity.

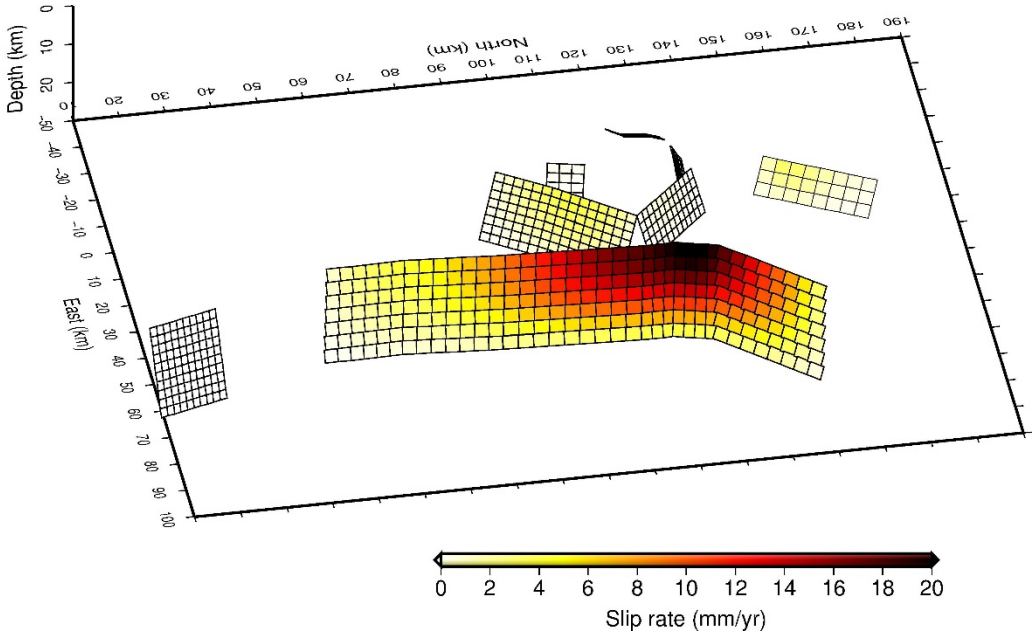


圖 5-4.8：模型二使用 2016-2019 年水平速度場之南部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 5-4.8: Fault slip deficit rate of SW Taiwan from 2016-2019 horizontal velocity.

5-5 南部地區之斷層滑移速率

今年針對臺灣南部地區的活動斷層進行斷層滑移虧損率分析。模型中將此區共分為 9 個塊體。接著以 BLOCKS 程式、DEFNODE 程式與基線應變模型計算各斷層的平均滑移虧損速率，南部地區參考 2016 年 02 月 06 日美濃地震為分界，使用兩個速度場進行斷層滑移模擬，2002 年至 2016 年使用中央大學張午龍老師整合 InSAR 結果之速度場；2016 至 2019 年使用成功大學團隊所提供之連續站與移動站速度場。

今年南部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果（2002 年至 2016 年速度場）於工作會議時討論出各模型結果之權重，並依據討論所得之權重計算出加權平均滑移虧損速率（表 5-5.1、圖 5-5.1），上界為中值加兩倍標準差，下界為中值減兩倍標準差。計算結果顯示，木屐寮-六甲斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，新化斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.9 mm/yr，後甲里斷層之加權平均滑移虧損速率為 2.4 mm/yr，左鎮斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.1 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.3 mm/yr，旗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.0 mm/yr，潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.9 mm/yr。然而，檢視各模型的滑移虧損速率分布值可以發現，除了左鎮斷層的滑移虧損速率較可信，其他斷層的滑移虧損速率值皆有很大的不確定性（圖 5-5.1），其中新化斷層和恆春斷層的滑移虧損速率估算值最不可信。

在 2016-2019 年斷層測地滑移虧損速率方面（表 5-5.2、圖 5-5.2），BLOCKS Model 和 Baseline Inversion Model 在木屐寮-六甲斷層、新化斷層與後甲里斷層有明顯的差異值，其中新化斷層的差異是最大的，可達約 18 mm/yr，此差異結果和利用 2002-2016 年速度場求解斷層模型時一致。至於，左鎮斷層、小崗山斷層、旗山斷層、潮州斷層和恆春斷層由 BLOCKS Model 和 Baseline Inversion Model 推求出來的斷層滑移虧損速率則無太大的差異。左鎮斷層約為 0.1 - 1.8 mm/yr、小崗山斷層約為 1.6 - 3.5 mm/yr、旗山斷層約為 1.7 - 2.0 mm/yr、潮州斷層約為 1.8 - 4.5 mm/yr 和恆春斷層約為 6.1 - 9.2 mm/yr。然而，如果此結果和 2002 - 2016 年速度場推算出來的斷層滑移虧損速率（表 5-5.1）相比，只有潮州斷層和恆春斷層速率接近，位於嘉南地區的左鎮斷層、小崗山斷層和旗山斷層則不一致。

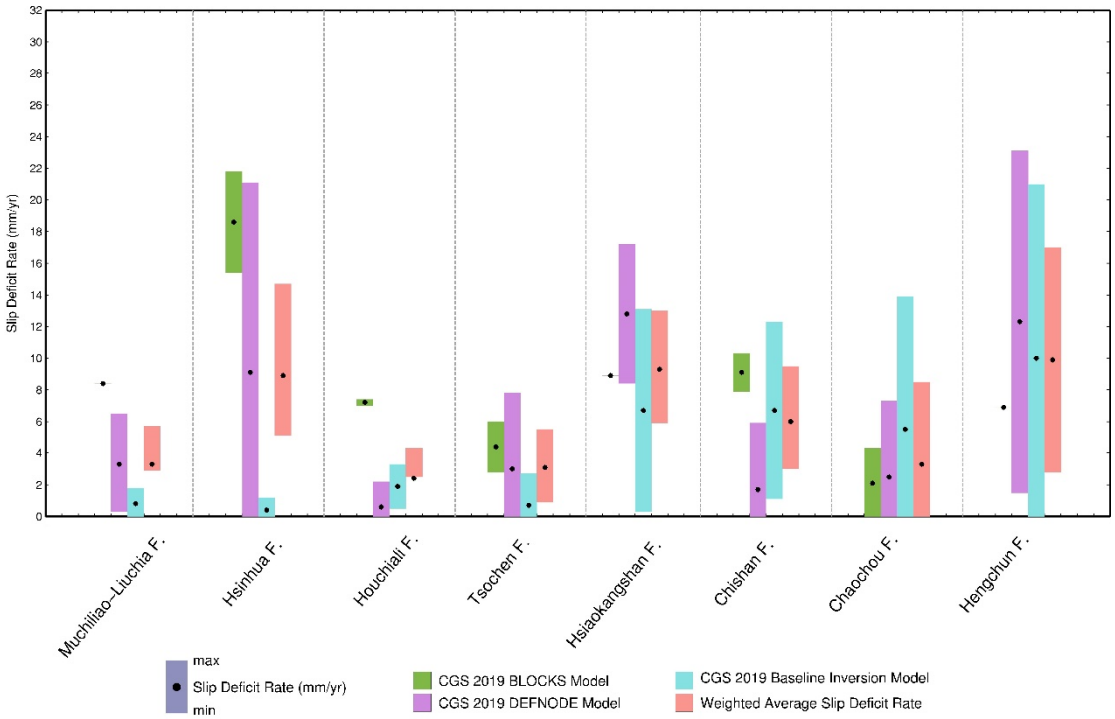


圖 5-5.1：本計畫 2002 至 2016 年加權平均斷層滑移虧損率，對應表 5-5.1。
Figure 5-5.1: Weighted average slip deficit rate during 2002 - 2016 in this project.

此外，本計畫也蒐集其他利用測地資料推算之斷層滑移速率（表 5-5.3、圖 5-5.3），包含有：(1)「2016 年中央地質調查所總報告」中 2002-2016 年斷層滑移速率（CGS 2016）；(2) Chang et al.（2016）文章中推算之斷層滑移速率（Chang 2016）；(3)「核能設施地震危害重新評估計畫 – GPS 資料分析與變形模式建置」中推算之斷層滑移速率（Rau 2016）。理論上，斷層滑移速率與斷層滑移虧損速率的意義並不同。斷層長期滑移速率乘上斷層鎖定率會得到斷層滑移虧損速率。如果斷層完全鎖定，則斷層鎖定率為 1；如果斷層完全潛移，則斷層鎖定率為 0。斷層滑移速率（或稱斷層長期滑移速率）減去斷層滑移虧損速率會得到斷層短期滑移速率。換言之，若斷層完全鎖定，則斷層滑移速率與斷層滑移虧損速率是一致的。就計畫目的與測地資料的特性，本計畫是採用斷層模型推求之斷層滑移虧損速率。然而，過去的研究工作，僅提供斷層長期滑移速率，故以下內容之斷層滑移速率比較差異，有部分是來自於斷層長期滑移速率與斷層滑移虧損速率之差異。整體看來，CGS 2016、Chang 2016 與 Rau 2016 三個模型結果比較接近，然而需要注意的是，這三個斷層滑移速率皆是利用 DENODE 所推算出來的，因此可能會有模型假設的效應干擾估算結果。

表 5-5.1：本計畫 2002 至 2016 年加權平均斷層滑移虧損率。

Table 5-5.1: Weighted average slip deficit rate during 2002 - 2016 in this project .

CGS 2019 2002-2016 GPS Velocity						
			BLOCKS Model	DEFNODE Model	Baseline Inversion Model	加權平均滑移虧損速率 (mm/yr)
	斷層名稱		總變動量 (mm/yr)	平均值滑移虧損率 (mm/yr)	斷層滑移速率平均值 (mm/yr)	
南部	木屐寮-六甲斷層	上界	8.4	6.5	1.8	5.7
		平均	8.4 ± 0.0 (0.20)	3.3 ± 1.6 (0.40)	0.8 ± 0.5 (0.40)	3.3
		下界	8.4	0.3	0.0	2.9
	新化斷層	上界	21.8	21.1	1.2	14.7
		平均	18.6 ± 1.6 (0.30)	9.1 ± 6.0 (0.35)	0.4 ± 0.4 (0.35)	8.9
		下界	15.4	0.0	0.0	5.1
	後甲里斷層	上界	7.4	2.2	3.3	4.3
		平均	7.2 ± 0.1 (0.20)	0.6 ± 0.8 (0.40)	1.9 ± 0.7 (0.40)	2.4
		下界	7.0	0.0	0.5	2.4
	左鎮斷層	上界	6.0	7.8	2.7	5.5
		平均	4.4 ± 0.8 (0.40)	3.0 ± 2.4 (0.40)	0.7 ± 1.0 (0.20)	3.1
		下界	2.8	0.0	0.0	0.9
	小崗山斷層	上界	8.9	17.2	13.1	13.0
		平均	8.9 ± 0.0 (0.35)	12.8 ± 2.2 (0.30)	6.7 ± 3.2 (0.35)	9.3
		下界	8.9	8.4	0.3	5.9
	旗山斷層	上界	10.3	5.9	12.3	9.5
		平均	9.1 ± 0.6 (0.35)	1.7 ± 2.1 (0.30)	6.7 ± 2.8 (0.35)	6.0
		下界	7.9	0.0	1.1	3.0
	潮州斷層	上界	4.3	7.3	13.9	8.5
		平均	2.1 ± 1.1 (0.35)	2.5 ± 2.4 (0.35)	5.5 ± 4.2 (0.30)	3.3
		下界	0.0	0.0	0.0	0.0
	恆春斷層	上界	6.9	23.1	21.0	17.0
		平均	6.9 ± 0.0 (0.30)	12.3 ± 5.4 (0.35)	10.0 ± 5.5 (0.35)	9.9
		下界	6.9	1.5	0.0	2.8

表 5-5.2：本計畫 2016-2019 年斷層滑移虧損速率。
Table 5-5.2: Slip deficit rate during 2016 - 2019 in this project.

斷層名稱	2016-2019 年之水平速度場	
	BLOCKS Model	Baseline Inversion Model
	斷層滑移虧損速率平均值（mm/yr）	斷層滑移虧損速率平均值（mm/yr）
木屐寮-六甲斷層	5.7 ± 0.0	0.5 ± 0.3
新化斷層	18.6 ± 1.6	0.1 ± 0.1
後甲里斷層	7.2 ± 0.1	1.1 ± 0.3
左鎮斷層	10.7 ± 0.8	0.1 ± 0.1
小崗山斷層	3.4 ± 0.0	1.6 ± 0.9
旗山斷層	3.5 ± 0.2	2.0 ± 1.1
潮州斷層	2.3 ± 0.0	4.5 ± 4.0
恆春斷層	6.2 ± 0.0	9.2 ± 5.5

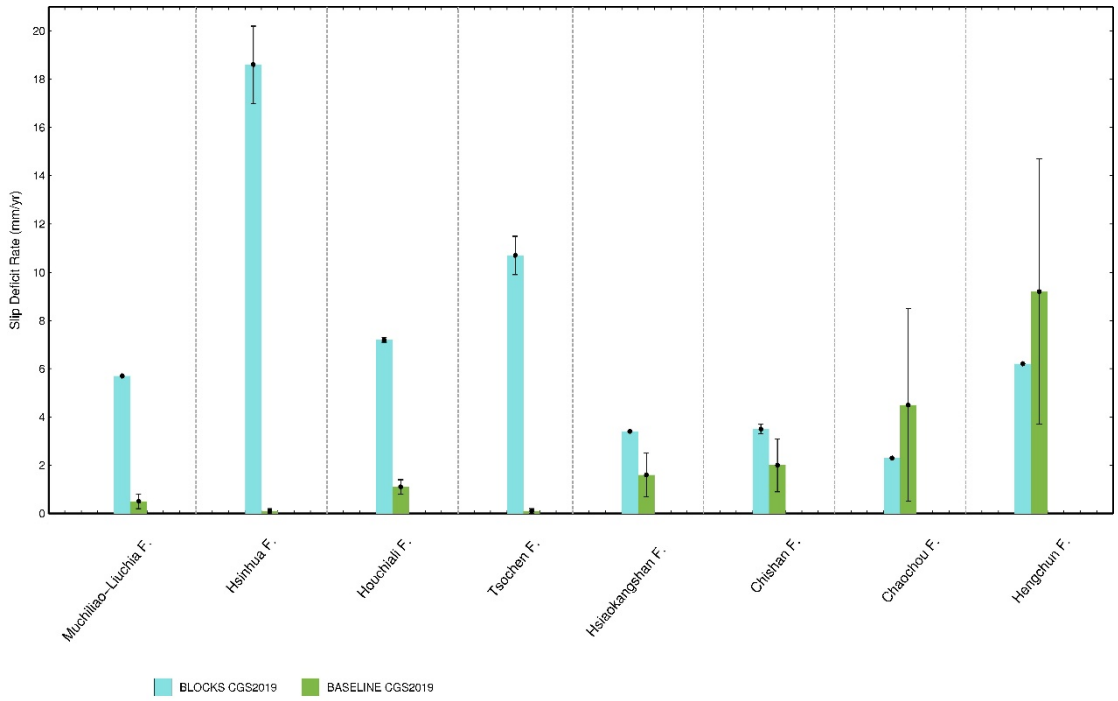


圖 5-5.2：本計畫 2016-2019 年斷層滑移虧損速率。
Figure 5-5.2: Slip deficit rate during 2016 - 2019 in this project .

表 5-5.3：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與過去測地斷層長期滑移速率比較表。

Table 5-5.3: Geodetic slip deficit rate in this project during 2002 - 2016 and geodetic long-term slip rates derived from other researches.

斷層名稱	CGS 2019	CGS 2016	Chang 2016	Rau 2016
木屐寮-六甲	3.3 (2.9 - 5.7)	1.3 ± 3.4	3.8 ± 0.5	5.8 ± 1.4
新化	8.9 (5.1 - 14.7)	0.8 ± 1.3	0.9 ± 0.3	2.7 ± 1.9
後甲里	2.4 (2.5 - 4.3)	0.8 ± 1.3	1.7 ± 0.3	7.1
左鎮	3.1 (0.9 - 5.5)	0.6 ± 2.2	3.9 ± 0.5	-
小崗山	9.3 (5.9 - 13.0)	5.1 ± 7.9	8.8 ± 0.4	3.3 ± 2.2
旗山	6.0 (3.0 - 9.5)	1.7 ± 2.9	1.8 ± 0.4	1.1 ± 0.4
潮州	3.3 (0.0 – 8.5)	1.1 ± 2.0	1.1 ± 0.5	1.8 ± 1.2
恆春	9.9 (2.8 - 17.0)	4.2 ± 6.0	5.4 ± 2.0	6.2 ± 0.3

註：CGS 2019：本期末報告 2002-2016 年斷層測地滑移虧損速率。

CGS 2016：2016 年中央地質調查所總報告 2002-2016 年斷層測地長期滑移速率。

Chang 2016：20. Chang, W.-L., K.-E. Ching, C.-H. Lee, Y.-R. Lee, and C.-F. Lee (2016), Earthquake potential of active faults in Taiwan from GPS observations and block modeling, Seismol. Res. Lett., 87, doi:10.1785/0220160094.

Rau 2016：核能設施地震危害重新評估計畫 –GPS 資料分析與變形模式建置

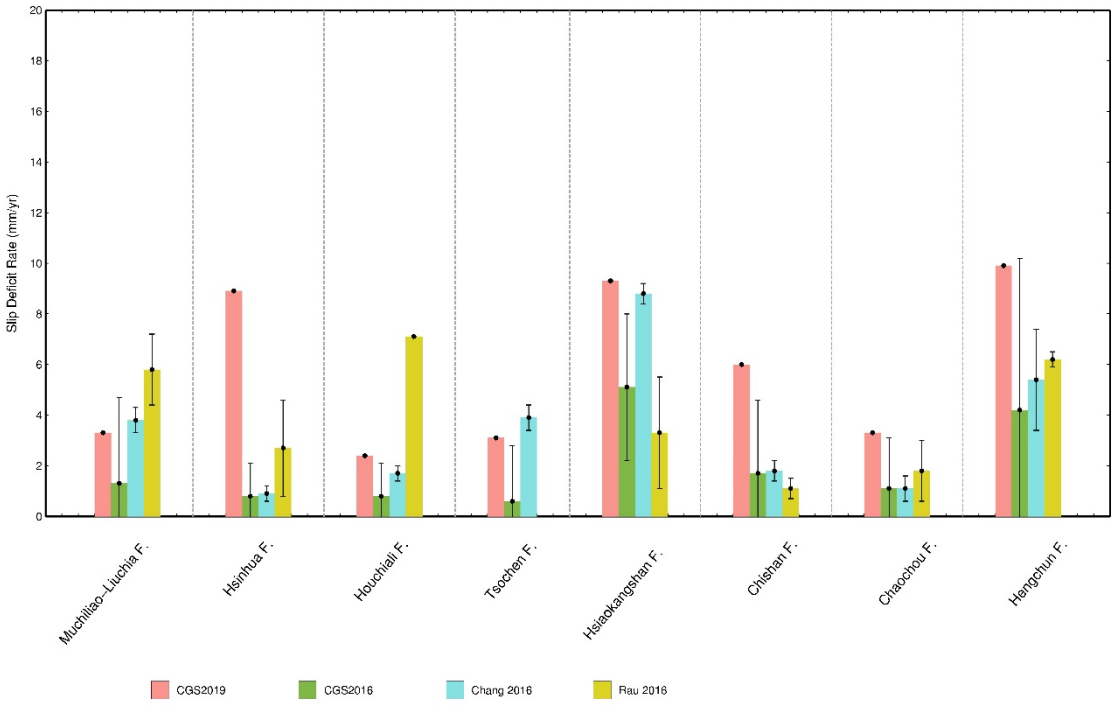


圖 5-5.3：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與過去測地斷層滑移速率比較圖。

Figure 5-5.3: Geodetic slip deficit rate in this project during 2002 - 2016 and geodetic slip rates derived from other researches.

表 5-5.4：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與長期滑移速率比較表。
Table 5-5.4：Geodetic slip deficit rate in this project during 2002 - 2016 and geologic slip rates derived from other researches.

斷層名稱	CGS 2019	GEOLOGY	滑移速率差異值 (CGS 2019 - GEOLOGY)
木屐寮-六甲	3.3	10.2	-6.9
新化	8.9	-	-
後甲里	2.4	5.0	-2.6
左鎮	3.1	-	-
小崗山	9.3	2.4	6.9
旗山	6.0	2.8	3.2
潮州	3.3	1.4	1.9
恆春	9.9	5.8	4.1

註：CGS 2019：本期末報告 2002-2016 年斷層測地滑移虧損速率。
GEOLOGY：中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫

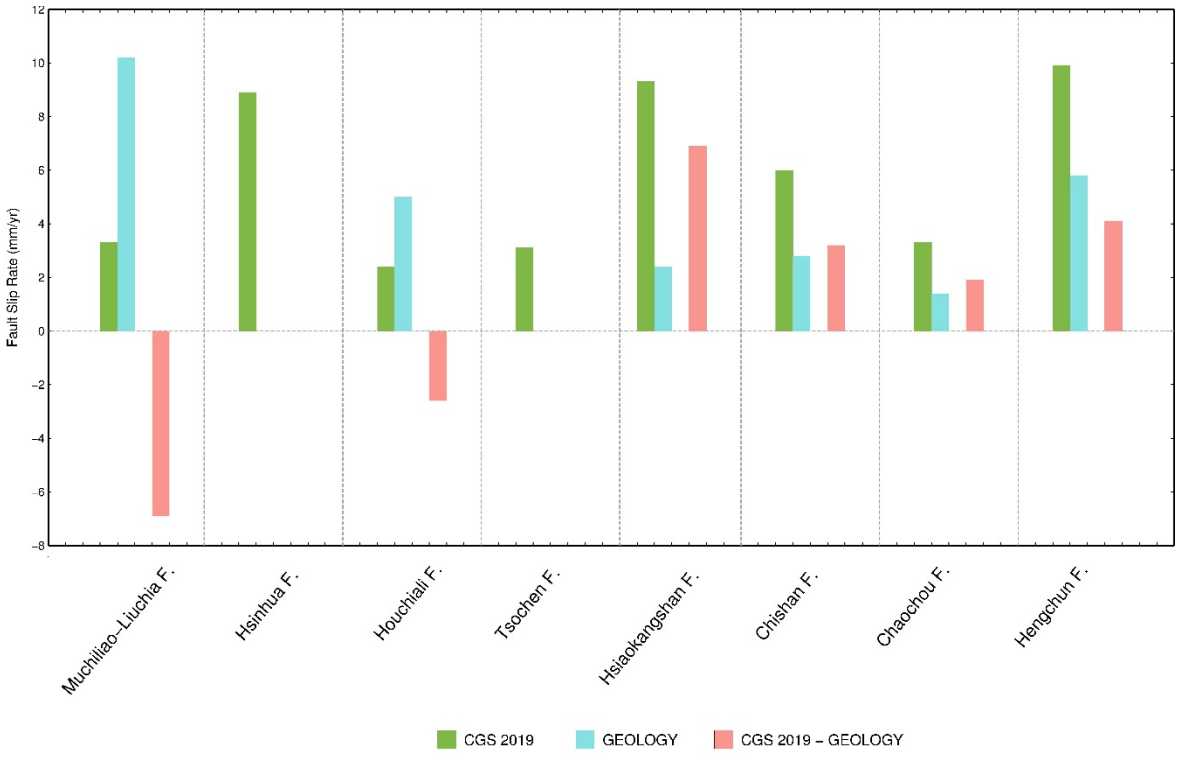


圖 5-5.4：本計畫 2002-2016 年測地斷層滑移虧損速率與長期滑移速率比較圖。
Figure 5-5.4: Geodetic slip deficit rate in this project during 2002 - 2016 and geologic slip rates derived from other researches.

最後，本計畫也比對本計畫 2002-2016 年斷層測地滑移虧損速率與中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫蒐集之斷層長期滑移速率（表 5-5.4、圖 5-5.4）。在考慮測地滑移虧損速率的可能速率範圍後，旗山斷層、潮州斷層和恆春斷層之測地滑移虧損速率和斷層長期滑移速率較一致。木屐寮-六甲斷層和新化斷層的斷層長期滑移速率大於測地滑移虧損速率，後甲里斷層則是測地滑移虧損速率大於斷層長期滑移速率。

第六章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果-2019.04.18 花蓮地震

6-1 2019.04.18 花蓮近海地震簡介

因為歐亞板塊及菲律賓海板塊不斷相互斜向擠壓的作用（Ho, 1986; Teng, 1990, 1996），使臺灣經歷多次的大規模災害性地震（Bonilla, 1975, 1977; Cheng and Yeh, 1989），其中最顯著的例子即是 1999 年發生在臺灣中部的集集地震（Chen et al., 2001）。臺灣東部的花東縱谷為菲律賓海板塊碰撞上歐亞板塊的縫合帶，縱谷斷層則是花東縱谷中的主要構造（Angelier et al., 1997; Shyu et al., 2005），因此縱谷斷層也發生多次的大規模地震，其中最重要的事件是 1951 年的花蓮-台東地震序列（Hsu, 1962; Bonilla, 1975; Cheng et al., 1996）與 2018 年花蓮地震（Huang and Huang, 2018; Yang et al., 2018; Yen et al., 2018）。1951 年與 2018 年的地震事件皆發生在臺灣地震活動最高的地區，指出縫合帶上的縱谷斷層有非常高的地震潛能（Yen et al., 2008）。

在 2018 年 2 月 6 日於臺灣東部花蓮近海於發生了規模 6.0（M_L 6.0；M_w 6.2）的地震後，在今年（2019 年）4 月 18 日於 2018 年花蓮地震震央以西的位置又發生另一個規模 6.1（M_L 6.1；M_w 6.2）的地震（圖 6-1.1），震央位於中央山脈一側（24.0543°N, 121.5592°E），震源深度約 20 km。此次地震雖然並無像去年之地震一樣產生地表破裂，然而中央氣象局即時震度資訊顯示，幾乎全島都能感受到這次地震所引起的震動，最大 7 級震度則分佈在花蓮。由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 6-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為東北–西南走向向東南傾之斷層面。然而，與 2018 年花蓮地震震源機制進行比對，本次規模 6.1 的地震應該是發生在北北東–南南西走向向西傾之斷層面。本報告首先整合 GPS 觀測結果與 DInSAR 的計算成果，解析本次 2019 年花蓮地震造成之地表變形型態。最後再嘗試結合地質、地震等資訊，建立斷層模型來反演大地測量成果，釐清本次地震可能的發生機制。

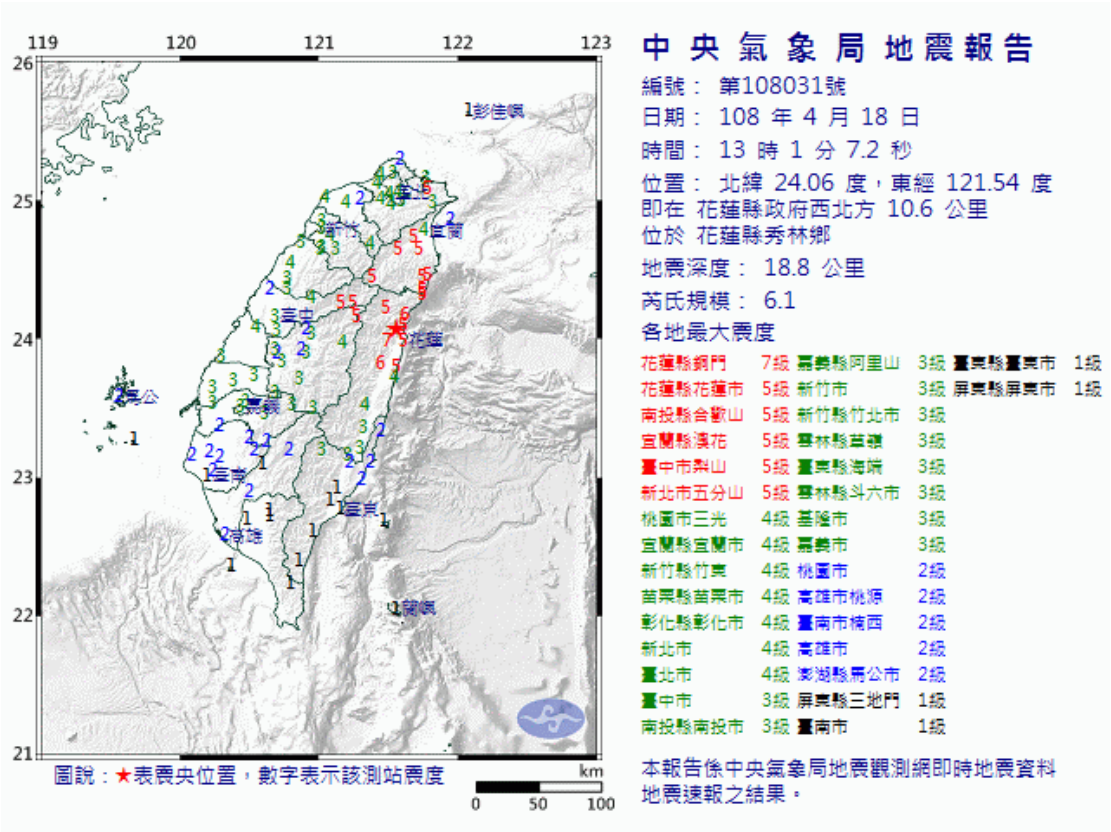


圖 6-1.1：中央氣象局 20190418 地震事件報告（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/imgs/2019041813010761031）。

Figure 6-1.1: 18th April 2019 Earthquake event report from CWB.

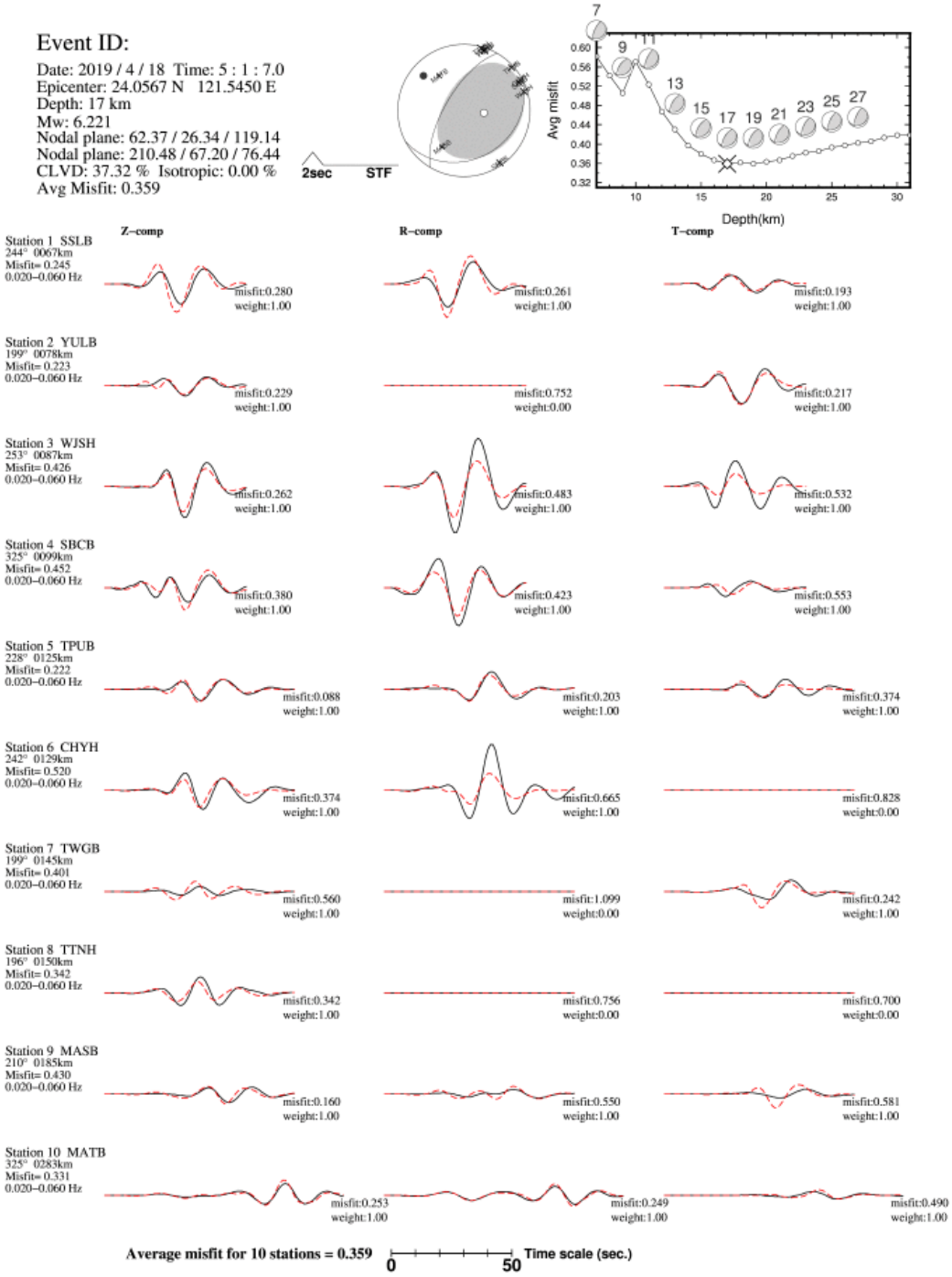


圖 6-1.2：中央氣象局 20190418 花蓮地震事件，震源機制解求解型態與地震波反演之擬合結果（https://scweb.cwb.gov.tw/zh-tw/earthquake/cmt/2019041813010761031）。

Figure 6-1.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 2019 Hualien earthquake event

6-2 2019.04.18 花蓮地震震源區地質簡介

花東縱谷位於中央央山脈與海岸山脈兩大地質區之間（圖 6-2.1）。海岸山脈位於縱谷的東部，其特徵是由中新世到上新世早期的高度變形的弧前盆地和火山弧岩石物質所組成（Chang et al., 2001）。位於縱谷西部的中央山脈，主要由中生代到第三紀的低變質度板岩或片岩（Ho, 1988）。花東縱谷則由晚第四紀河流沉積物組成，這些沉積物源於鄰近的海岸山脈和中央山脈。

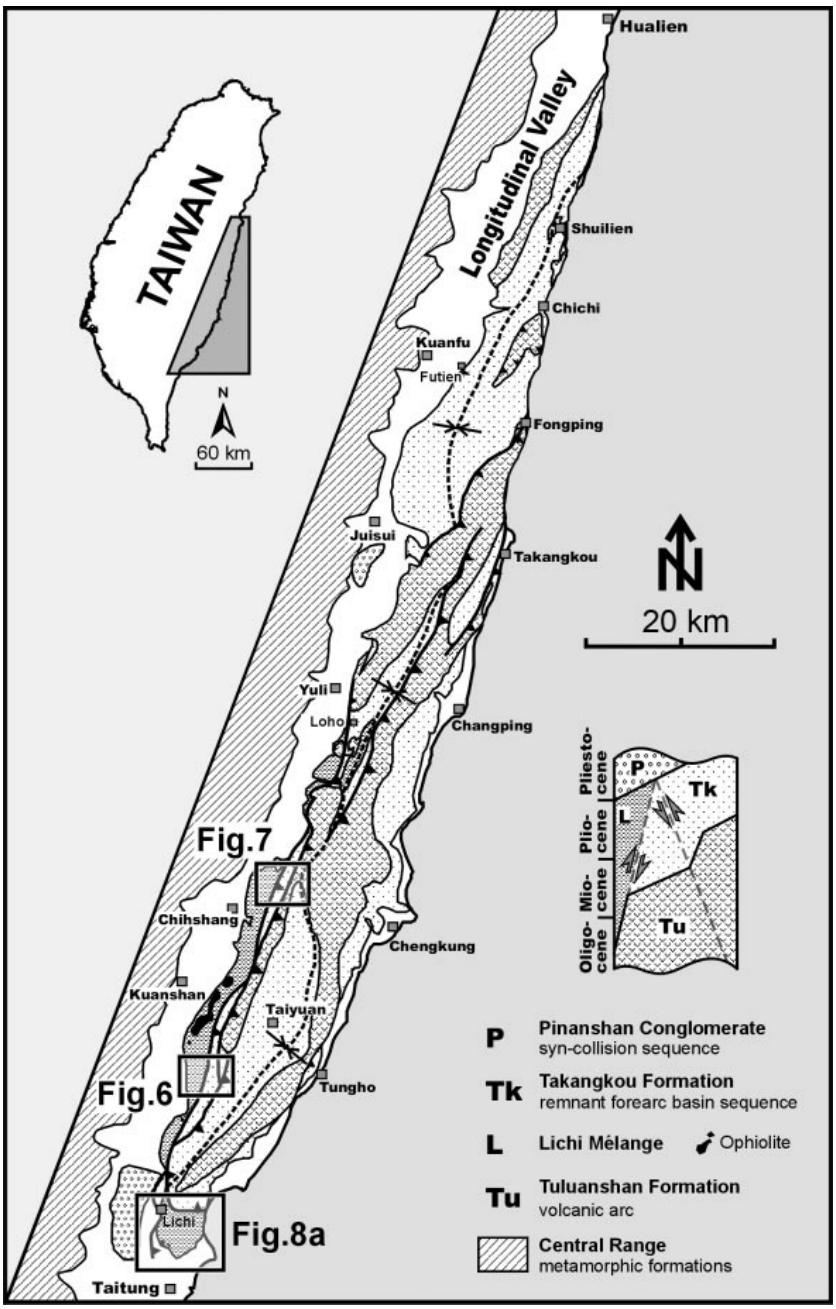


圖 6-2.1：臺灣東部地區地質圖（Chang et al., 2001）。
Figure 6-2.1: Geological map in eastern Taiwan (Chang et al., 2001).

縱谷中最顯著和活躍的構造即是北北東–南南西走向且向東傾的縱谷斷層。縱谷斷層特點是，南段以逆衝斷層分量為主，但在北段則為左移之走向滑移斷層分量為主（例如：Chemenda et al., 1997; Kao and Jian, 2001; Kim et al., 2006）。在地貌上，這個斷層沿線多在河谷中存在明顯的地表隆起或傾斜的河流階地，或以斷層崖，小背斜，山體滑坡等形式表現出來。最近的大地測量成果指出，縱谷正以每年約 40 mm/yr 的速度相互聚合（Yu et al., 1997）。縱谷斷層南段之池上斷層表現出地表潛移的行為，池上地區之速度剖面顯示斷層以約 20-30 mm/yr 的速率在潛移（Angelier et al., 1997; Lee et al., 2001），然而縱谷斷層北段近地表跨斷層僅有較小的速度差異（Yu and Kuo, 2001），而深部仍有較高的斷層滑移速率（Hsu et al., 2003; Johnson et al., 2005; Rau et al., 2007）。

在地震活動方面，縱谷斷層一向被認為是非常活躍的，且有發生過災難性地震的紀錄，導致縱谷斷層地表破裂的發育。1951 年的花蓮台東地震序列（圖 6-2.2）是發生在縱谷斷層上最著名的地震事件，該事件在花東縱谷造成嚴重的生命財產災損（Gutenberg and Richter, 1954; Lee et al., 1978; Abe, 1981; Hsu, 1985; Cheng et al., 1996）。該地震序列在花蓮東部外海地區先後發生 3 次規模 7 的地震，導致縱谷斷層最北端的米崙斷層與嶺頂斷層產生地表破裂；兩次規模大於 6 的地震事件，導致縱谷斷層中的池上斷層及玉里斷層發生地表破裂（Hsu, 1962; Yu, 1997; Shyu et al., 2007）。除了 1951 年花蓮台東地震序列外，花東縱谷也發生其他重要的地震事件，如 2003 年 12 月 10 日規模 6.5 的成功地震導致池上斷層破裂，其為 1999 年集集地震以來，臺灣陸上規模最大的地震；2013 年規模 6.4 的瑞穗地震，則是縱谷北段第一個主要逆衝型地震，根據主餘震序列及大地測量成果指出，北段縱谷斷層下盤為隆起。縱谷斷層南段的斷層滑移速率較穩定，且有重複地震（repeating earthquake）的發生（Chen et al., 2007）；縱谷斷層北段自 1951 年花蓮台東地震序列後，至本次 2018 年花蓮近海地震發生期間則沒有發生過大地震。

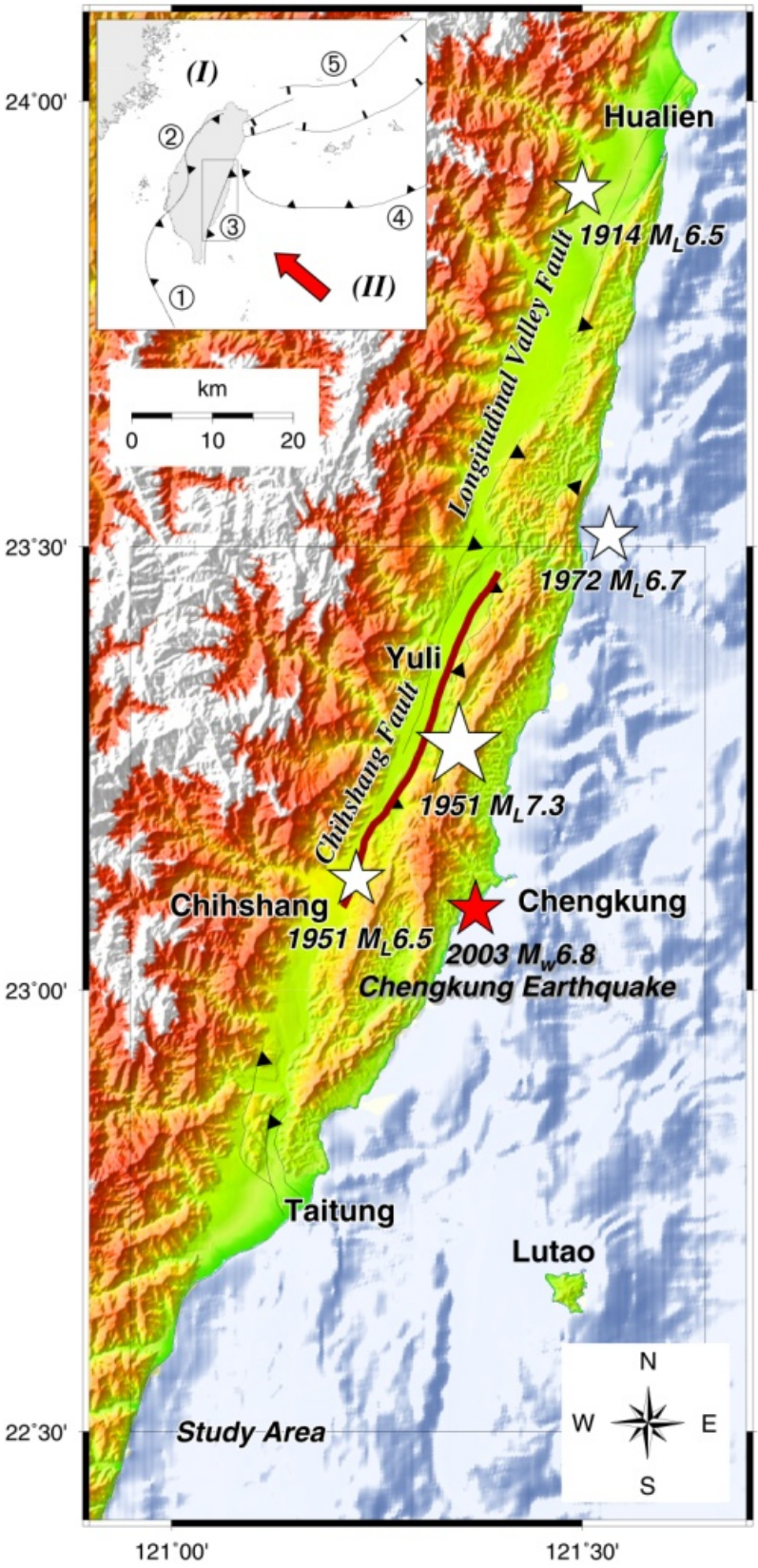


圖 6-2.2：1951 年花蓮台東地震序列與 2003 年成功地震震央分布圖（Ching et al., 2007）。
Figure 6-2.2: 1951 Hualine-Taitung earthquake sequence and 2003 Chengkung earthquake (Ching et al., 2007).

6-3 2019.04.18 花蓮近海地震同震地表位移場

中央地質調查所於 2019 年 4 月 18 日花蓮發生之規模 6.1 地震後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GPS 連續站資料，進行地表同震位移場之解算。最後還蒐集雷達衛星影像進行同震地表位移場解算。

6-3-1 GPS 連續站同震位移場

本研究團隊於地震發生後，即利用布設於震央附近之全球衛星定位系統連續追蹤站進行同震位移之解算，此位移場為利用震前五天與震後四天的平均定位座標相減所得（圖 6-3.1）。由結果可知（圖 6-3.2），GPS 連續追蹤站所測得的最大同震位移，為震央南邊屬於中央氣象局的銅門測站，(TUNM，東經 121.4936 度，北緯 23.9652 度）。同震抬升為 3.1 mm，同震位移水平分量向西為 3.8 m；同震位移水平分量向南為 17.1 mm。而位於震央東南邊的北埔測站（圖 6-3.1(右) PEPU，東經 121.6103 度，北緯 24.0179 度），其同震抬升為 16.1 mm，同震位移水平分量向西為 7.6 mm，同震位移水平分量向南為 12.9 mm。除此之外，周圍測站所記錄到的同震位移均不超過 10 mm，並且於地震後並無明顯的永久變形行為，連續 GPS 的同震位移場大致沿震央呈扇形分布，推測此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的西傾斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

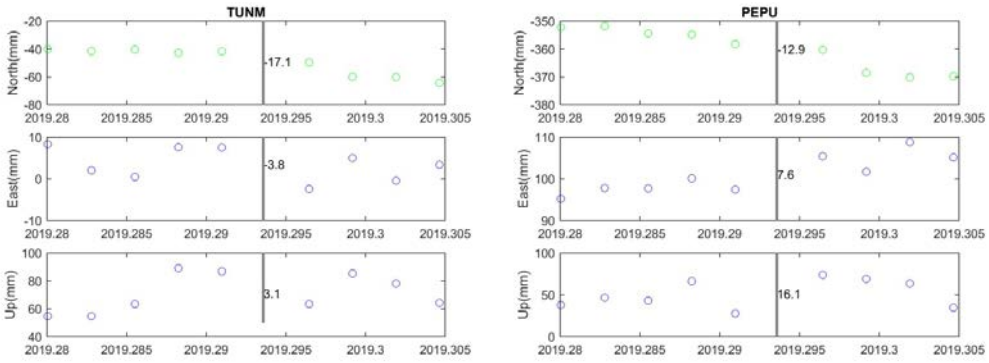


圖 6-3.1：測站 TUNM 與 PEPU 每日解時間序列。圖中灰線為 2019 年 4 月 18 日花蓮秀林鄉地震發震日期，數字為後四日平均減前五日平均之同震位移。
Figure 6-3.1: Coordinate time series of TUNM and PEPU stations. Gray lines represent the original time of event. The numbers represent coseismic displacements calculated by average coordinate differences between four-day after and five-day before the earthquake.

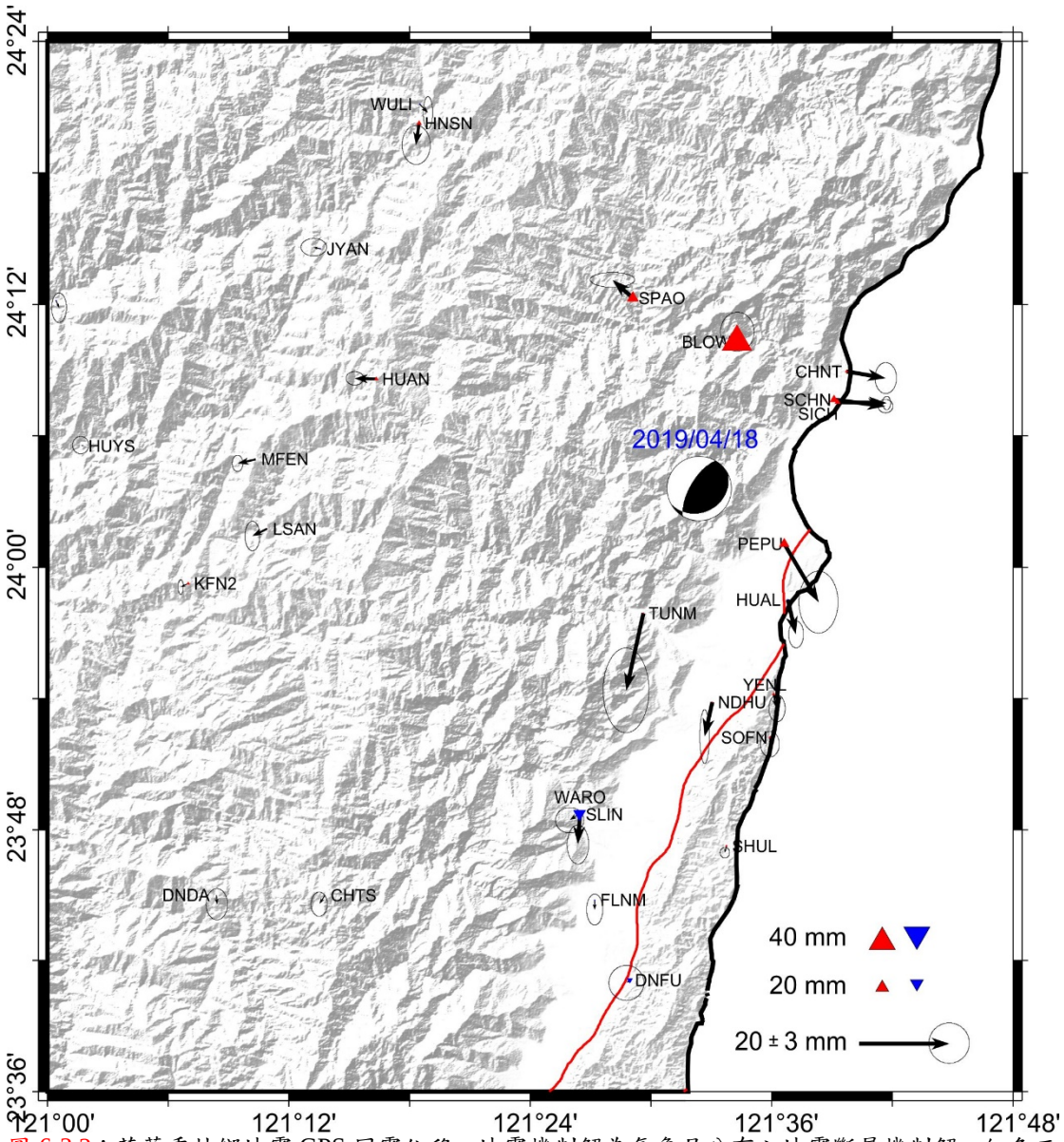


圖 6-3.2：花蓮秀林鄉地震 GPS 同震位移，地震機制解為氣象局公布之地震斷層機制解。紅色三角形代表抬升，藍色三角形代表下陷。

Figure 6-3.2: GPS coseismic displacements of earthquake at Hsiulin township in Hualien county. Focal mechanism solution is from the CWB. Red triangles represent land uplift; blue triangles represent land subsidence.

6-3-2 合成孔徑雷達干涉技術之同震位移場

花蓮秀林鄉地震發生後，歐洲太空總署（European Space Agency；ESA）所屬衛星 Sentinel-1B 於 2019 年 4 月 19 日飛越臺灣上空，拍攝了震後第一幅降軌軌道（descending orbit）雷達影像，但其含蓋範圍太小，無法對整個花蓮地區分析同震行為。因此本團隊利用同年 4 月 23 日 Sentinel-1A 的升軌軌道（ascending orbit）雷達影像及 4 月 25 日 Sentinel-1A 的降軌軌道雷達影像與地震前影像進行同震變形分析。本研究團隊使用差分合成孔徑雷達干涉技術（D-InSAR），將上述影像與震前之影像進行運算，得到視衛星方向同震地表視衛變形圖。圖 6-3.3 即為 Sentinel-1 衛星升軌及降軌干涉圖，由圖可明顯看出相較於 2018 年 2 月 6 日的花蓮地震而言，本次地震在升軌衛星上靠中央山脈側可觀察到梯度較緩的干涉條紋，由影像干涉條紋計算最大變形量沿視衛星方向約 3 cm，比 GPS 觀察的同震變形量級稍大，推測有些大氣的效應貢獻在視衛星的變形上。另外在米崙斷層跟嶺頂斷層兩側並無觀測到明顯的干涉條紋梯度變化或不連續的情況，因此此次地震並無誘發淺部的斷層活動。此同震變形量可能並非為真實地表變形，部分來自於大氣效應或其他誤差。根據合成孔徑雷達干涉技術結果顯示，其變形量與連續 GPS 測站一致，最大均只有數公分，表示此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

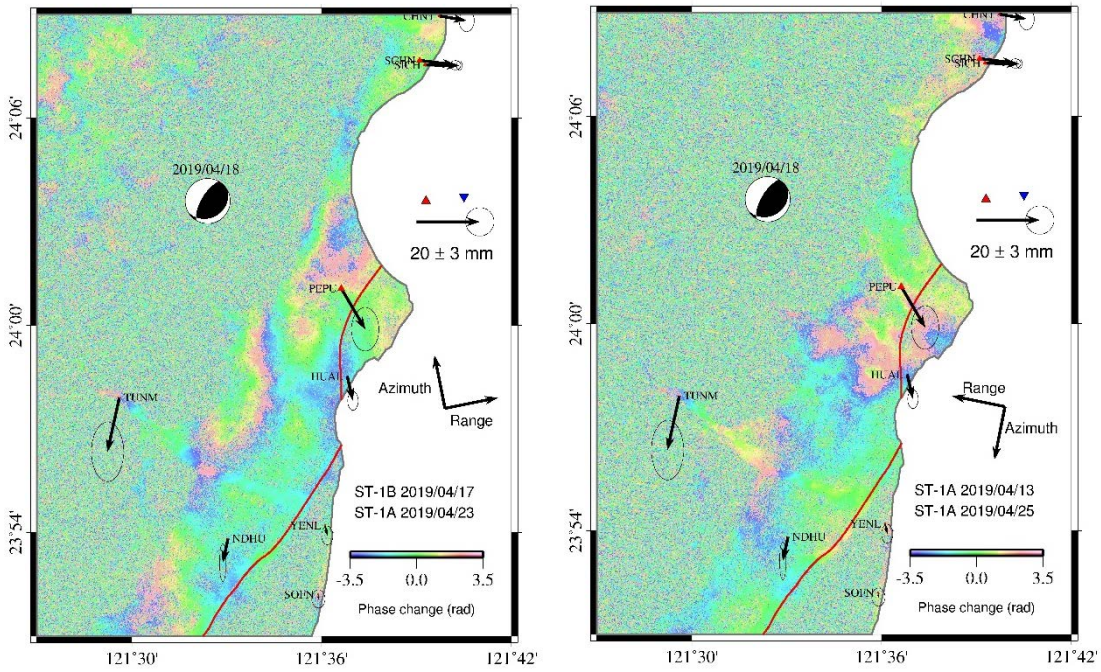


圖 6-3.3：花蓮地震 Sentinel-1 衛星同震地表視衛星方向變形場。
Figure 6-3.3: The coseismic surface deformation field of LOS direction from Sentinel-1satellite of Hualien earthquake.

6-4 2019.04.18 花蓮近海地震震源模型

由中央氣象局公布的震源機制解指出（圖 6-1.2），本次地震的主要斷層面可能有兩種型態，一為北北東–南南西走向向西傾之斷層面；一為東北–西南走向向東南傾之斷層面。然而，根據 2018 年花蓮近海地震的震源機制解指出，本次規模 6.2 的地震可能是北北東–南南西走向向西傾之斷層面。為了解析這個問題，本團隊利用斷層錯位模型（Okada, 1985, 1992），建立初步的斷層模型來嘗試提供一個可能的震源模型。

6-4-1 斷層錯位模型

本計畫的斷層錯位模型是採用根據彈性錯動理論（Okada, 1985, 1992）所建立之斷層錯位模型，其理論是利用斷層滑移量計算地表特定點之位移量。假設地球為表面平坦、垂直方向無限延伸的彈性半空間(half space)，介質特性為具有蒲松比 0.25 的蒲松固體(Poisson solid)，即彈性模量(λ)等於剪切模量(μ)之彈性體。沿著斷層元素(fault patch/fault element)的斷層滑移量 Δu_j（ξ_1, ξ_2, ξ_3）會使均質

均向的彈性體表面產生位移場 Δu_i（x_1, x_2, x_3），其關係如下式所列。其中，δ_{jk} 為克羅內克函數；v_k 為正交於地表元素 $d\sum$ 之餘弦函數方向；F 為施力點之力量大小。

$$u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]v_k d\sum$$

為了更加釐清斷層幾何、斷層滑移量與地表位移量間的關係，在此重新定義個個參數之使用符號。斷層幾何參數包括：斷層平面位置(km)、深度(km)、長度(km)、寬度(km)、走向(°)、傾角(°)。其中，斷層平面位置是指斷層面下緣中間的位置；斷層深度是指斷層斷層面下緣的深度。斷層滑移量(fault slip)包含三個方向的分量[S_1, S_2, S_3]，分別以左移(left-lateral strike slip)、逆衝(reverse dip slip)及伸張(tensile slip)為正方向。在進行對雙偶合震源之斷層活動分析時，一般只會考慮走向滑移量(S_1, strike slip)與傾向滑移量(S_2, dip slip)；在進行火山之岩漿沿岩脈運動分析時，才會採用伸張滑移量(S_3)。斷層滑移角(rake)指示斷層上盤相對於下盤之運動方向，其和斷層滑移量之關係為 tan(rake) = S_2 / S_1。地表位移量(displacement)同樣也包含三個方向的分量[U_1, U_2, U_3]，分別以東(East)、北(North)與上(Up)為正方向。水平位移量(horizontal displacement)則為 sqrt(U_1^2+U_2^2)。

6-4-2 斷層模型結果

由震源機制解與主餘震的空間分布指出（圖 6-4.1），本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，因此本團隊根據 2018 年花蓮近海地震之震源模型，擷取北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，繼續往 25 公里處延伸來建立本次地震的斷層幾何。

接著，本計畫將斷層面劃分成數十個小斷層面（圖 6-4.2），以求取同震斷層滑移量。由於本次地震震源位置太深，DInSAR 與 GPS 垂直位移場的可信度不夠，因此本計畫僅反演 GPS 水平同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型（圖 6-4.2）指出，斷層之滑移量主要分布在 50 mm - 80 mm，集中在深度約 10 - 25 km 的位置。此地震之測地矩（M_0）為 1.06×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 5.98。

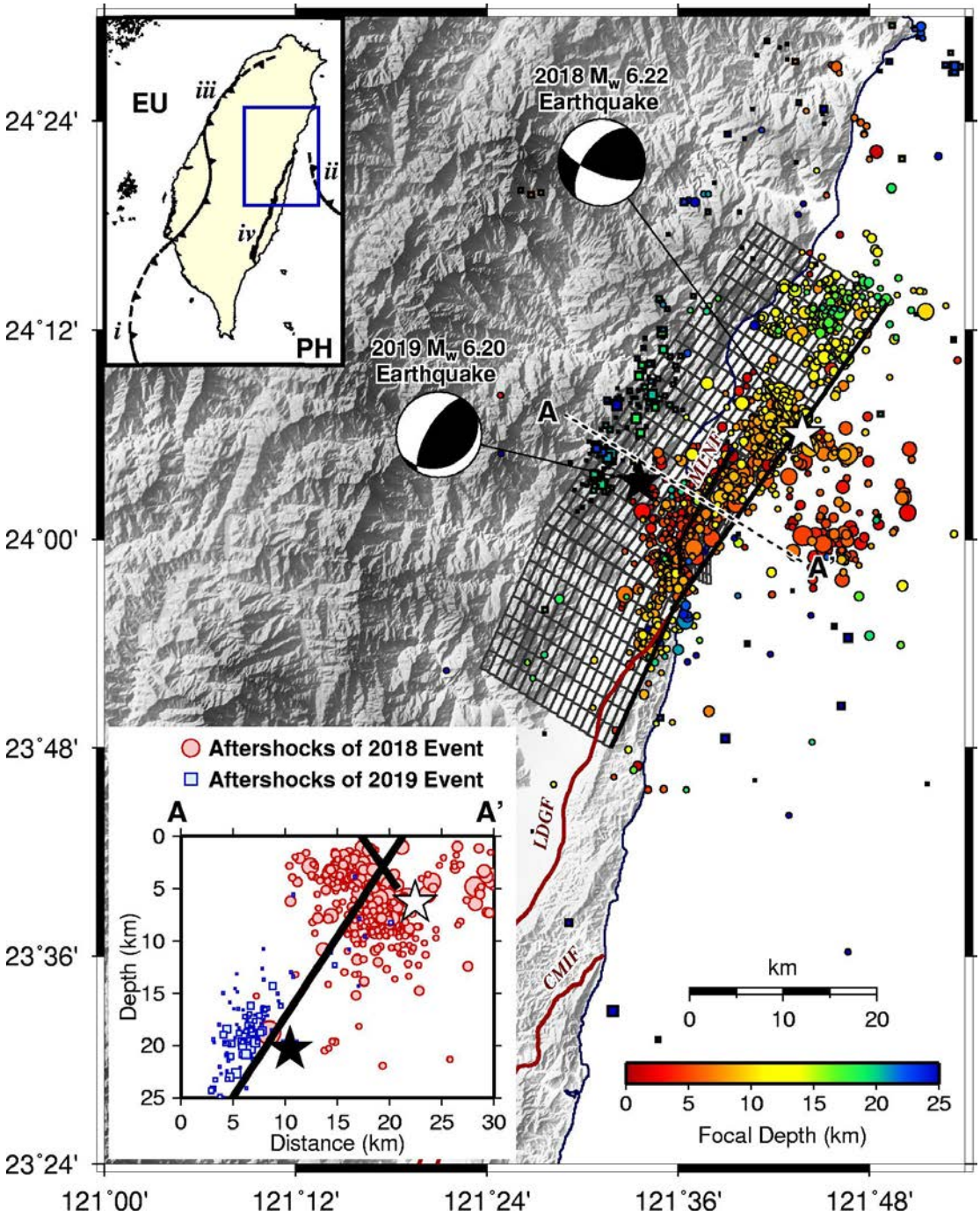


圖 6-4.1：2018 年與 2019 年花蓮地震餘震分布。圓圈為 2018 年花蓮地震餘震，方形為 2019 年花蓮地震餘震，顏色為地震深度。白色星號為 2018 年花蓮地震主震震央；黑色星號為 2019 年花蓮地震主震震央。灰色方框為本研究採用的最佳斷層模型在地表的投影位置；黑色粗線為斷層上緣在地表的投影位置。紅線為中央地質調查所公告之活動斷層，CMIF：奇美斷層；LDGF：嶺頂斷層；MLNF：米崙斷層。左上圖藍色方框標是研究區域。左下圖為 AA'剖面中兩個地震之主餘震分布，黑色粗線為最佳斷層模型之位置。

Figure 6-4.1: Aftershock distribution of 2018 and 2019 Hualien earthquakes. Circles are aftershocks of 2018 event while rectangles are aftershocks of 2019 event. White star is the epicenter of 2018 main shock and black one is the 2019 main shock. Grey rectangles are the location of the fault projected to the surface. Upper inset shows the location of working area. CMIF: Chimei fault; LDGF: Linding fault; MLNF: Milun fault. Lower inset is the profile of main shock and aftershock distribution. Black lines are locations of optimal modeled faults.

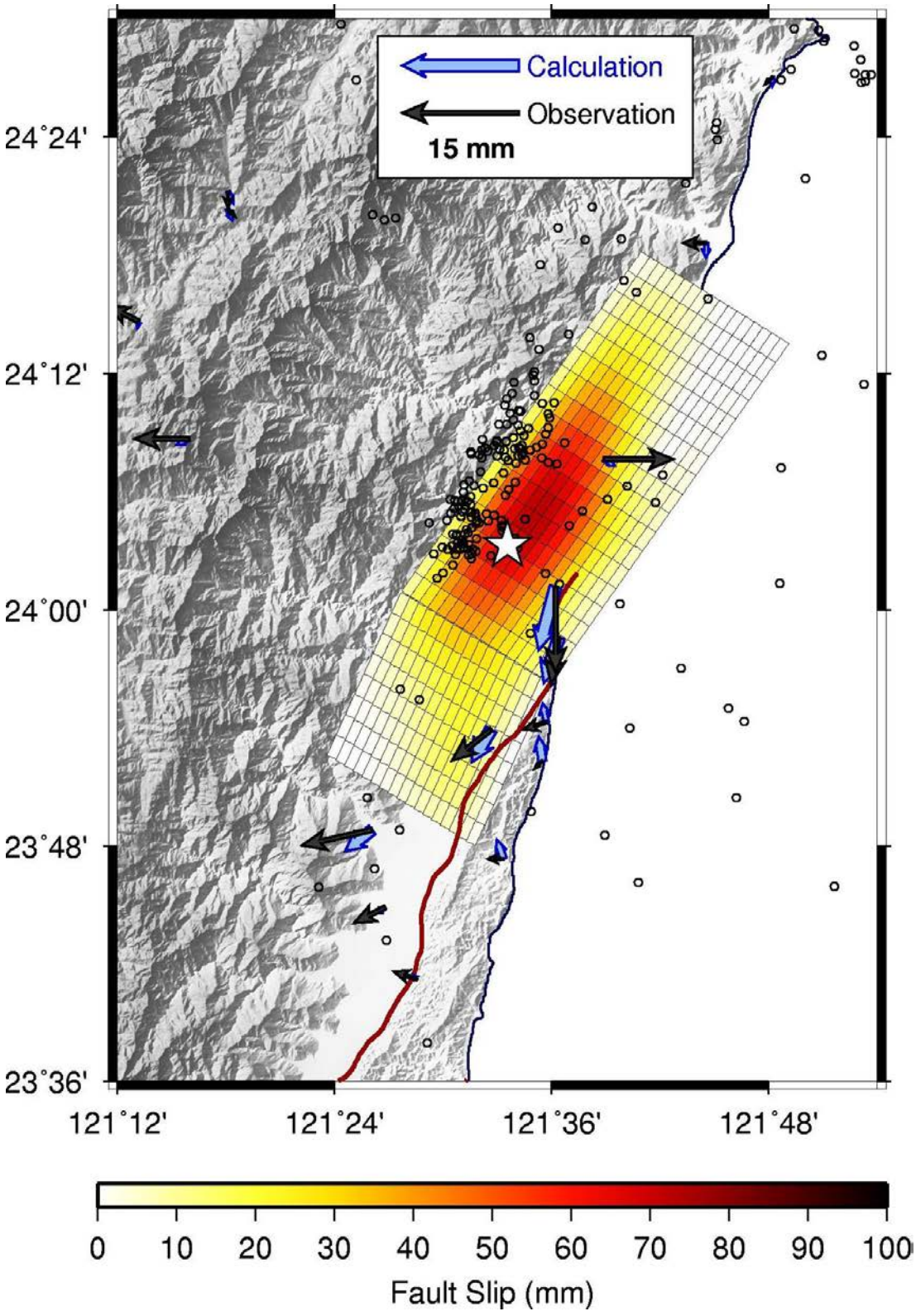


圖 6-4.2：2019 年花蓮地震斷層模型擬合結果。矩形為斷層投影至地表的位置，顏色反映滑移量的大小；白色星號為主震震央位置；圓圈為餘震分布。

Figure 6-4.2: Coseismic source model of 2019 Hualien earthquake. Rectangles are the location of the fault projected to the surface and the color represents the coseismic slip. White star is the epicenter of the main shock and the white circles are aftershocks.

6-5 2019.04.18 地震事件討論與結論

2019 年 4 月 18 日臺灣東部花蓮發生了 M_L 6.1 的地震，震央位於中央山脈一側（24.0543°N, 121.5592°E），震源深度約 20 km。中央地質調查所於該地震發生後，與國土測繪中心、中央氣象局、中央研究院一起蒐集全臺之 GPS 連續站資料來進行地表同震位移場之解算。

由 GPS 連續站獲得之地表同震位移場指出，最大同震位移位於震央南邊的銅門測站，同震抬升為 3.1 mm，水平分量向西為 3.8 m；向南為 17.1 mm。而位於震央東南邊的北埔測站，其同震抬升為 16.1 mm，同震位移水平分量向西為 7.6 mm，同震位移水平分量向南為 12.9 mm。除此之外，周圍測站所記錄到的同震位移均不超過 10 mm，並且於地震後並無明顯的永久變形行為，連續 GPS 的同震位移場大致沿震央呈扇形分布。

在衛星影像處理方面，本團隊主要採用（European Space Agency；ESA）所屬衛星 Sentinel-1A/B 的雷達影像，使用差分合成孔徑雷達干涉技術（D-InSAR），得到視衛星方向同震地表視衛變形圖。然而，此同震變形量可能並非為真實地表變形，部分來自於大氣效應或其他誤差。根據合成孔徑雷達干涉技術結果顯示，其變形量與連續 GPS 測站一致，最大均只有數公分，表示此次花蓮秀林鄉地震應位於較深的斷層系統，且於發震時期並未觸發淺層的斷層活動。

由震源機制解與主餘震的空間分布指出，本次地震主要的孕震構造極有可能是北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，因此本團隊根據 2018 年花蓮近海地震之震源模型，擷取北北東–南南西走向且向西傾之斷層面，繼續往 25 公里處延伸來建立本次地震的斷層幾何。本計畫僅反演 GPS 水平同震位移場來估算斷層滑移分布。其最佳模型指出，斷層之滑移量主要分布在 50 mm ~ 80 mm，集中在深度約 10 – 25 km 的位置。此地震之測地矩（M_0）為 1.06×10^{25} dyne-cm，相當於 M_w 5.98。然而，雖然本次地震的規模和 2018 年花蓮近海地震的規模相當，但是由本次地震深度達 20 公里，因此此模型之可信度仍需要更進一步驗證。

第七章、結論與建議

本期計畫的主要工作重點在於（1）求解臺灣不同時期之地表速度場；（2）嘗試結合 PSInSAR 速度場與 GPS 速度場來獲得更高解析度之的表三維速度場；（3）利用斷層模型反演地表速度場來推估斷層滑移虧損速率。

在 GPS 連續站資料處理方面，計算歷史資料累積至 2019 年 9 月全臺連續全球定位系統測站近 500 站，並加入週期性效應與震後變形衰減因子分析。在 GPS 移動站與精密水準資料處理方面，本年度至 11 月底為止，GPS 移動站部分共完成 761 點的施測，精密水準則完成共計 30 條主線測線及 12 條水準副線測線之施測。相對於澎湖白沙站的全臺速度場顯示，中南部測站多為東南東往西北西移動，臺南以南地區多呈現東北往西南移動；另外北部地區則是由南往北移動，在宜蘭地區有一速度方向轉向東南的旋轉行為。縱谷斷層東側與西南部地區為水平速度較大的區域；垂直速度場以西部彰雲地區以及東部縱谷斷層西側為主要下陷區域，中央山脈呈現以抬升為主的變形行為。

本年度分析處理 Sentinel-1 衛星影從 2015 年 4 月至 2019 年 9 月之干涉影像對，由升軌及降軌結果顯示，除中央山脈多為高山植被所覆蓋，大致上都能產生大範圍的干涉條紋。利用結合升軌與降軌影像以獲得東西方向與垂直方向上的地表變形的結果可以得到，嘉義的東石鄉、雲林的內陸以及屏東的林邊與佳冬為主要的下陷區域，下陷量可達到近 30 mm/yr。主要抬升則位於台南台地，速率約為 15 mm/yr，而龍崎地區則擁有最大的抬升速率，約 25 mm/yr。其結果與 GPS 相當吻合，顯示此結果的可靠性相當高。發現此區九條活動斷層中，主要在跨過後甲里斷層、旗山斷層、小崗山斷層以及六甲斷層與木屐寮斷層兩側都可以看到明顯的速度不連續性。時間序列分析方面， SENTINEL-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有很好的關聯性。大部分斷層上下盤與這段期間均無明顯速度差異，唯跨過後甲里斷層其測站之間的相對速度似乎在美濃地震後有了很大的改變,GPS 及 InSAR 結果都顯示台南台地於美濃地震震後抬升速度變快。

本計畫同時也利用 Quadtree 方法整合 GPS 與 InSAR 速度場。然而，目前尚在嘗試，根據不同的標準給予減點後的 PS-InSAR 速度場不同的權重值，使其與 GPS 和精密水準速度場一起進行模型逆推時能夠得到相輔相成，擬合出更加的結果。

本計畫利用 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 反演水平速度場和垂直速度場，推求臺灣南部地區活動斷層之斷層滑移虧損率。今年南部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果（2002 年至 2016 年速度場）於工作會議時討論出各模型結果之權重，並依據討論所得之權重計算出加權平均滑移虧損速率，結果顯示木屐寮-六甲斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，新化斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.9 mm/yr，後甲里斷層之加權平均滑移虧損速率為 2.4 mm/yr，左鎮斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.1 mm/yr，小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.3 mm/yr，旗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.0 mm/yr，潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr，恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.9 mm/yr。然而在檢視各模型的滑移虧損速率可信區間，同時和過去利用測地資料所推求之斷層滑移速率進行比對後，發現臺灣南部的斷層滑移虧損速率的估算值有很大的不確定性。這樣的結果可能和臺灣南部具有非彈性變形的構造活動有關，這些構造運動在斷層模型建立中並不會被考慮進來。此外，在與過去利用測地資料所推求之斷層滑移速率進行比對中，指出採用不同斷層模型的結果來進行交互比對是必要的，因為測地滑移速率的計算結果和斷層模型的假設高度相關。最後，本計畫嘗試加入的垂直速度場資料，但垂直速度場可能紀錄到非構造活動的垂直向地表運動，使得垂直向速度場擬合不如水平向。未來工作將持續探討非構造活動造成的垂直向速度場對塊體模型模擬結果的影響。雖然在定性討論上，滑移虧損率高低可顯示該斷層在未來破裂及發生地震的潛勢；但如何將此虧損率與地質資料顯示的長期滑移速率結合，來定量地計算斷層破裂機率，並放入機率地震災害評估的邏輯樹中，將是本計畫未來的研究重點。

Chapter 7: Conclusions and Suggestions

The key of this projects are (1) to evaluate the surface velocity fields in different time periods; (2) to integrate the PSInSAR and the GPS velocity fields to increase the resolution of 3D surface velocity field; (3) to invert the surface velocity field using fault models for evaluating fault slip deficit rates.

The continuous GPS data from nearly 500 stations were processed till September 2019. The periodic effects and postseismic deformation were also condidered. Besides, geodetic data from 761 campaign-mode GPS stations and 30 precise leveling routes and 12 sub-leveling routes were also processed in this project. Surface velocity field relative to station S01R shows that the SW Taiwan stations were mostly moving from southeast to northwest. To the south of Tainan, stations were mostly moving from northeast to southwest. In the northern Taiwan, the movements are from the south to the north. In Yilan area, there is a rotation in the direction of the southeast. The east part of Longitudinal Fault and southwestern Taiwan have a large horizontal velocity. The west part of Longitudinal fault and Changhua, Yunlin areas are the main subsidence areas, and the characteristic of Central Range is uplifting.

In this project, the interference image pairs of Sentinel-1 satellite image from April 2015 to September 2019 were processed. The ascending and descending results show that, the interference fringes in whole Taiwan could be generated except for the Central Range because it is mostly covered by alpine vegetation. The results of combining the ascending and descending images to obtain the surface deformation in the east-west component and the vertical component could be obtained. The Dongshi Township of Chiayi, the inland of Yunlin, and Linbian, Jiadong in Pingtung county are the main subsidence areas. The amount of subsidence can reach nearly 30 mm/yr. The main uplift is located at the Tainan area at a rate of approximately 15 mm/yr, while the Longci region has the largest uplift rate of approximately 25 mm/yr. The result is consistent with GPS, showing that the reliability of this result is quite high. It is found that in the nine active faults in this area, obvious speed discontinuities can be seen mainly across the Houchiali fault, the Chishan fault, the Hsiaokangshan fault, and the Liuchia-Muchiliao fault. In terms of time series analysis, the time series of the SENTINEL-1 satellite has a good correlation with the GPS time series. Most of the faults have no obvious speed difference between the footwall and the hanging wall. However, the

relative speed between the stations after crossing the Houchiali fault seems to have changed greatly after the Meinong earthquake. The GPS and InSAR results show that the uplift rate in Tainan tableland became faster after the Meinong earthquake.

We integrated GPS and InSAR results using the Quadtree method. At present, we are still testing how to give proper weights to the PS-InSAR velocity field and getting better modeling results when the GPS and leveling data are adopted in the same time.

The horizontal and vertical velocity fields from 2002 to 2016 was inverted by the BLOCKS, the DEFNODE and the baseline inversion models for estimating slip deficit rate on each active fault in southern Taiwan. The weights of different modeling results were discussed at the working meeting and the weighted average slip deficit rate was calculated. The results show that the weighted average slip deficit rate of Liuchia-Muchiliao fault is 3.3 mm/yr; Hsinhua fault is 8.9 mm/yr, Houchiali fault is 2.4 mm/yr; Zuozhen fault is 3.2 mm/yr; Hsiaokangshan fault is 9.2 mm/yr; Chishan fault is 5.9 mm/yr; Chaochou fault is 4.5 mm/yr and Hengchun fault is 10.0 mm/yr. However, the reliability of estimated slip deficit rates in southern Taiwan is low because the deficit rates derived from different models have low coherence. This low reliability may be caused by the inelastic deformation which is not related to fault motion, such as mud diapirim. In addition, results from comparing our geodetic fault slip rates with others indicate that it is necessary to evaluate geodetic slip deficit rates using different models because the result is highly model dependent. Finally, we attempted to invert vertical velocities for estimating the slip rate in this project. However, the vertical velocity field may be contaminated by the non-tectonic motion so that the vertical velocity fitting is not good. We will continue to explore the effects to the vertical motion caused by non-tectonic activities. In addition, how to estimate the seismic hazaed using geologic and geodetic fault slip rates simultaneously is also our future work.

參考文獻

林啟文、盧詩丁、陳文山（2012）臺灣活動斷層分布圖 2012 年版說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，1-30 頁。

許榮欣、高書屏（1996）臺灣地區一等水準網測量殘留之系統誤差之研究。行政院國家科學委員專題研究計畫成果報

陳文山、游能悌、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析計畫－斷層長期滑移速率與再現週期研究（總報告）。經濟部中央地質調查所研究報告 99-9 號，共 141 頁。

陳延宗（2007）以反射震測法研究左鎮斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 90 頁。

陳文山（2016）臺灣地質概論。中華民國地質學會，共 204 頁。

陳文山、陳于高、楊小青（2011）斷層活動特性分析與評估（1/4）。經濟部中央地質調查所研究報告 100-11 號，共 118 頁。

張國禎（2012）重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析（1/4）。經濟部中央地質調查所委辦計畫成果報告書，共 289 頁。

黃旭燦、楊耿明、吳榮章（2004）臺灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究（V）。經濟部中央地質調查所報告，計畫編號 5226902000-02-93-02。

劉啟清（1986） 水準測量的系統誤差，第五屆測量學術及應用研討會論文集。國科會工程研究中心及成功大學，F1-F25。

洪日豪（2006）臺灣西南部前陸地區斷層演化與具油氣潛能之地塊構造。行政院國家科學委 員會經濟部能源局九十五年度能源科技學術研討暨成果發表會。

吳樂群、陳華玟、顏一勤（2011）臺南圖幅，五萬分之一臺灣地質圖幅第 55 號。經濟部中央地質調查所。

林啟文（2013）旗山圖幅，五萬分之一臺灣地質圖幅第 56 號。經濟部中央地質調查所。

陳華玟、吳樂群、謝凱旋、何信昌（2001）高雄圖幅，五萬分之一臺灣地質圖幅第 61 號。經濟部中央地質調查所。

景國恩（2017）臺灣及鄰近地區地體動力學研究 II (GOTTA II)-探討臺灣西南部、菲律賓中部與印度東北部主要都會區之震間期地表變形特性及其地震潛能，科技部補助專題研究計畫成果報告期末報告，共 58 頁。

徐澔德、莊怡蓉、崔秀國（2016）臺灣地區斷層模型參數建置。國家地震工程中心 2016 期末報告，共 33 頁。

Abe, K. 1981. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. Physics of the Earth and Planetary Interiors 27, 72-92

Angelier, J., Chu, H.T., and Lee, J.C. 1997. Shear concentration in a collision zone: kinematics of the Chihshang Fault as revealed by outcrop-scale quantification of active faulting, Longitudinal Valley, eastern Taiwan. Tectonophysics 274, 117-143

Angelier, J., Chang, T.-Y., Hu, J.-C., Chang, C.-P., Siame, L., Lee, J.-C., Deffontaines, B., Chu, H.-T., Lu, C.-Y. (2009) Does extrusion occur at both tips of the Taiwan collision belt? Insights from active deformation studies in the Ilan Plain and Pingtung Plain regions. Tectonophysics, 466, 356-376, doi:10.1016/j.tecto.2007.11.015.

Bonilla, M.G. 1975. A review of recently active faults in Taiwan. Open file report 75-41, U.S. Geological Survey, Menlo park, 58pp

Bonilla, M.G. 1977. Summary of quaternary faulting and elevation changes in Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 2, 43-55.

Bagnardi, M., & Hooper, A. (2018). Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19, 2194–2211. https://doi.org/10.1029/ 2018GC007585.

Chang, C.P., Angelier, J., Huang, C.Y., and Liu, C.S. 2001. Structural evolution and significance of a mélange in a collision belt: the Lichi mélange and the Taiwan arc-continent collision. Geological magazine 138, 633-651

Cheng, S.N., and Yeh, Y.T. 1989. Catalog of the earthquakes in Taiwan from 1604 to 1988. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, 255pp (in Chinese)

Cheng, S.N., Yeh, Y.T., and Yu, M.S. 1996. The 1951 Taitung earthquake in Taiwan. Journal of the Geological Society of China 39, 267-285

Ching, K.-E., Rau, R.-J., and Zeng, Y. 2007. Coseismic source model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements. Journal of Geophysics Research 112, B06422, doi:10.1029/2006JB004439

Ching, K.-E., Rau R.-J., Lee J.-C., Hu J.-C. (2007) Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995–2005. Earth Planet. Sci. Lett., 262, 601–619, doi:10.1016/j.epsl.2007.08.017.

Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee （2011） Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
Ching, Kuo En, Ruey Juin Rau, Jian Cheng Lee, and Jyr Ching Hu. 2007. "Contemporary Deformation of Tectonic Escape in SW Taiwan from GPS Observations, 1995-2005." Earth and Planetary Science Letters 262 （3–4）: 601–19. doi:10.1016/j.epsl.2007.08.017.
Chaing, S.C. (1971) Seismic study of the Chaochou structure, Pingtung, Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 8, 281-294.
Dragert, H., Wang, K., and James, T.S. 2001. A silent slip event on the deeper Cascadia subduction interface. Science 292, 1525-1528
Decriem Hreinsdó doublet DOI: 10. ally publishe m, J., Árnadót óttir, S., Eina in SW Icelan 1111/j.1365 d as: ttir, T., Hoop arsson, P., La nd. - Geophys -246X.2010. er, A., Geirss Femina, P., B sical Journal 04565.x son, H., Sigm Bennett, R. A Internationa mundsson, F., A. (2010): Th al, 181, 2, 11 Keiding, M., e 2008 May 128-1146
Francis T. Wu, H. Kuo-Chen, K.D. McIntosh (2014) Subsurface imaging, TAIGER experiments and tectonic models of Taiwan. Journal of Asian Earth Sciences 90, 173–208.
Gutenberg, B., and Richter, C.F. 1954. Seismicity of the Earth and Associated phenomena, second ed. Princeton University Press, Princeton, N.J. 310pp
Hamling, I.J., and Wallace, L.M. 2015. Silent triggering: Aseismic crustal faulting induced by a subduction slow slip event. Earth and planetary Science Letters 421, 13-19
Hamling et al., 2018. Complex multifault rupture during the 2016 Mw 7.8 Kaikoura earthquake New Zealand. Science 356 (6334), eaam7194
Herring, T. A., R. W. King, M. A Floyd, and S. C. McClusky. 2015. GAMIT Reference Manual, GPS Analysis at MIT, Release 10.6. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology. http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/docs.htm
Ho, C.S. 1988. An introduction to the Geology of Taiwan, explanatory text of the geologic map of Taiwan, second ed. Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs, Taipei, 192pp
Hsu, H.F. 1985. Analyzing the crustal movement and structure in eastern Taiwan from trilateration networks measurements. Geodetic Eng. 27(1), 1-10 (in Chinese)
Hsu, T.L. 1962. Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 1, 95-102
Hsu, Y.J., Simons, M., Yu, S.B., Kuo, L.C., and Chen, H.Y. 2003. A two-dimensional dislocation model for interseismic deformation of the Taiwan mountain belt. Earth and Planetary Science Letters 211, 287-294
Huang, M.-H., & Huang, H.-H. (2018). The complexity of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake in east Taiwan. Geophysical Research Letters, 45, 13,249–13,257.
Huang, M.-H., Tung H., Fielding, E., Huang, H.-H., Liang, C., Huang, C. Hu, J.-C. (2016) Multiple fault slip triggered above the 2016 Mw 6.4 MeiNong earthquake in Taiwan. Geophys. Res. Lett., 43, doi: 10.1002/2016GL069351.
Hou, C.-S., Hu, J.-C., Chen, Y.-G., Chen, C.-L., Cheng, L.-W., Tang, C.-L., Huang, S.-H., Lo, C.-H. (2009) The crustal deformation of the Ilan Plain acted as a westernmost extension of the Okinawa Trough. Tectonophysics, 466, 344-355, doi:10.1016/j.tecto.2007.11.022.
Hsieh, C.-S., Shih, T.-Y., Hu, J.-C., Tung, H., Huang, M.-H., Angelier, J. (2011) Using differential SAR interferometry to map land subsidence: A case study in the Pingtung Plain of SW Taiwan. Nat. Hazards, 58, 1311-1332.
Hsieh, S. H., 1970. Geology and gravity anomalies of the Pingtung plain,Taiwan, Proc. Geol. China 13, 76-89.
Hu, J.-C., Yu, S.-B., Angelier, J., Chu H.-T. (2001) Active deformation of Taiwan from GPS measurements and numerical simulations. J. Geophys. Res., 106, 2265-2280.
Hu, J.-C., Yu, S.-B., Chu, H.-T., Angelier, J. (2002) Transition tectonics of northern Taiwan induced by convergence and trench retreat, in Byrne, T.B., and Liu, C.-S., eds., Geology and Geophysics of an Arc-Continent collision, Taiwan. Geol. Soc. Am. Special Papers 358, 149-162.
Hu, J.-C., Chu, H.-T. Hou, C.-S., Chen, R.-F., Lai, T.-H., Nien P.-F. (2006) The contribution to tectonic subsidence by groundwater abstraction in the Pingtung area, southwestern Taiwan as determined by GPS measurements. Quatern. Int., 147, 62-69.
Hu, J.-C., Hou, C.-S., Shen, L.-C., Chan, Y.-C., Chen, R.-F., Huang, C., Rau, R.-J., K.H., Chen, Lin, C.-W., Huang, M.-H., Nien, P.-F. (2007) Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan. J. Asian Earth Sci., 35, 287-302, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.020.
Hu, C.-C. and Sheen, H.-C. (1989) An evaluation on the hydrocarbon potential of the Niushan and Lungtien structures in the Tainan area. Petroleum Geology of Taiwan, 25, 11-34.
Johnson, K.M., Segal, P., and Yu, S.B. 2005. A viscoelastic earthquake cycle model for Taiwan. Journal of Geophysics Research 110, B10404, doi:10.1029/2004JB003516

Johnson, K. M. (2013), Slip rates and off-fault deformation in Southern California inferred from GPS data and models,J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 5643–5664, doi:10.1002/jgrb.50365.
Kao, H., and Jian, P.R. 2001. Seismogenic patterns in the Taiwan region: insights from source parameter inversion of BATS data. Tectonophysics 333, 179-198
Kato, A., Obara, K., Igarashi, T., Tsuruoka, H., Nakagawa, S., and Hirata, N. 2012. Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. Science 335 (6069), 705-708
Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., and Jeng, F.S. 2001. Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a Creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics 333, 219-240
Lee, W.H.K., Wu, F.T., and Wang, S.C. 1978. A catalog of instrumentally determined earthquakes in China (magnitude ≥ 6) compiled from various sources. Bulletin of the Seismological Society of America 68, 383-398
Langbein, J., and Johnson, H. （1997） Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. J.Geophys. Res., 102, 59-604.
Le Béon, M., M.-H. Huang, J. Suppe, S.-T. Huang, E. Pathier, W.-J. Huang, C.-L. Chen, B. Fruneau, S. Baize, K.- E. Ching, and J.-C. Hu, 2017: Shallow geological structures triggered during the Mw 6.4 Meinong earthquake, southwestern Taiwan. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 28, 663-681, doi: 10.3319/TAO.2017.03.20.02
Melbourne, T.I., Szeliga, W.M., Miller, M.M., and Santillan, V.M. 2005. Extent and duration of the 2003 Cascadia slow earthquake. Geophysics Research Letters 32, L04301, doi:10.1029/2004GL021790
Miyazaki, S., Segall, P., McGuire, J.J., Kato, T., and Hatanaka, Y. 2006. Spatial and temporal evolution of stress and slip rate during the 2000 Tokai slow earthquake. Journal of Geophysics Research 111, B03409
McCaffrey, R. （2005） Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data, J. Geophys. Res., 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.
McIntosh JR, et al. (2013) Conserved and divergent features of kinetochores and spindle microtubule ends from five species. J Cell Biol200(4):459-74
Nikolaidis, R. (2002) Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., San Diego, La Jolla.
Obara, K., and Kata, A. 2016. Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. Science 353, 253-257
Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 75, 1135-1154
Okada, Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America 82, 1018-1040
Prescott, W.H., Savage, J.C., and Kinoshita, W.T. （1979） Strain accumulation rates in the western United States between 1970 and 1978. J. Geophys. Res., 84, 5423-5435.
Radiguet et al. 2016. Triggering of the 2014 Mw 7.3 Papanoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. Nature Geoscience 9, 829-834, doi:10.1038/NGE02817
Rau, R.J., Chen, K.H., and Ching, K.E. 2007. Repeating earthquakes and seismic potential along the northern Longitudinal Valley fault of eastern Taiwan. Journal of Geophysical Research Letters 34, L24301, doi:10.1029/2007GL031622
Rau, R.-J., Ching, K.-E., Hu, J.-C., Lee, J.-C. (2008) Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: GPS measurements in northern Taiwan, 1995-2005, J. Geophys. Res., 113, B09404, doi:10.1029/2007JB005414.
Su, Z., Hu, J.-C., Wang, E., Li, Y., Yang, Y., Wang, P.-L. (2017) Monitoring interseismic activity on the Ilan Plain (NE Taiwan) using Small Baseline PS-InSAR, GPS and leveling measurements: Partitioning from arc-continent collision and back-arc extension. Geophys. J. Int., 212(1), 264-283, doi: 10.1093/gji/ggx394.
Segall, P., and Bradley, A.M. 2012. Slow slip evolves into megathrust earthquakes in 2D numerical simulations. Geophys. Res. Lett. 39, L18308
Shyu, J.B.H., Chung, L.H., Chen, Y.G., Lee, J.C., and Sieh, K. 2007. Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its Neotectonic implications. Journal of Asian Earth Science 31, 317-331, doi:10.1016/j.jseaes.2006.07.018
Shen, Z.K., Jackson, D.D., and Ge, B.X. （1996） Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. J. Geophys. Res., 101, 27957-27980.
Shyu, J. B. H., Y. R. Chuang, Y. L. Chen, Y. R. Lee and C. T. Cheng （2016） A New On-Land Seismogenic Structure Source Database by the Taiwan Earthquake Model （TEM） Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences 27, 311-323, doi: 10.3319/TAO.2015.11.27.02（TEM）.
Suppe, J. (1980) Imbricated structure of western foothills belt, south-central Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, 17. 1-16.

Steketee, J. A. (1958). On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, Can. J. Phys. 36, 192-205.
Tung, H., and Hu, J.-C. (2012) Assessments of serious anthropogenic land subsidence in Yunlin County of centralTaiwan from 1996 to 1999 by Persistent Scatterers InSAR. Tectonophysics, 578, 126-135.
Wu, F. T., Liang, W.-T., Lee J.-C., Benz, H., Villasenor, A. (2009) A model for the termination of the Ryukyu subduction zone against Taiwan: A junction of collision, subduction/separation, and subduction boundaries. J. Geophys. Res., 114, B07404, doi:10.1029/2008JB005950.
Wiltschko R., Stapput K., Thalau P., Wiltschko W. (2010). Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. J. R. Soc. Interface 7 Suppl. 2, S163-S177
Wallace, L.M., and Beavan, J. 2010. Diverse slow slip behavior at the Hikurangi subduction margin, New Zealand. J. Geophyg. Res. 115, B12402
Wallace et al. 2017. Large-scale dynamic triggering of shallow slow slip enhanced by overlying sedimentary wedge. Nature Geoscience 10, 765-772, doi:10.1038/NGE03021
Ward, S.N. （1994） A multidisciplinary approach to seismic hazard in southern California. Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 1293-1309.
Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.
Yang, Y.-H., Hu, J.-C., Tung, H., Tsai, M.-C., Chen, Q., Xu, Q., Zhang, Y.-J., Zhao, J.-J., Liu, G.-X., Xiong, J.-N., Wang, J.-Y., Yu, B., Chiu, C.-Y., & Su, Z. (2018). Co-seismic and postseismic fault models of the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake occurred in the junction of collision and subduction boundaries offshore eastern Taiwan. Remote Sensing, 10, 1372; doi:10.3390/rs10091372.
Yen, J.-Y., Lu, C.-H., Dorsey, R. J., Kuo-Chen, H., Chang, C.-P., Wang, C.-C., Chuang, R. Y., Kuo, Y.-T., Chiu, C.-Y., Chang, Y.-H., Bovenga, F., & Chang, W.-Y. (2018). Insights into Seismogenic Deformation during the 2018 Hualien, Taiwan, Earthquake Sequence from InSAR, GPS, and Modeling. Seismological Research Letters, 90, doi: 10.1785/0220180228.
Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274, 41-59.

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. P.27圖2-1.4、P.28圖2-1.5請標示S01R位置，並請考慮統一連續站與移動站的參考點(S01R或KMNM)，以利二種成果有需要同時展繪時使用。	感謝委員建議，已修正。
2. PS-InSAR的結果請考慮增加水平方向及垂直(高程)方向的變動結果，而非只有視衛星方向的分析。	感謝委員建議，只有 Sentinel-1 衛星同時具有升軌及降軌的影像才能產出水平方向及垂直(高程)方向的變動結果，請見圖3-1.9。
3. 有關GPS和InSAR如何整合，InSAR資料不需減點，建議以各別資料進行斷層參數逆推，得到各自的reduced-chi-square，再用reduced-chi-squares的值調整GPS & InSAR之權重。	InSAR 由於資料量過多，以 ALOS 為例原始資料中有 1883025 個資料點，其中包含空間中相隔過近的資料點，以及分布零散的山區資料。減點主要是適度保留 InSAR 的空間解析度，降低重複多餘及誤差較大的資料點，以得到穩定的模型結果。 關於GPS與InSAR在模型中的權重設置，非常感謝委員建議，目前已在嘗試中。
4. GPS LOS 與 InSAR LOS的比對不佳(如圖3-1.4及圖3-1.6)，是否有離群資料未移除或其他因素，建議需再進一步了解。	原 ENVISAT 結果包含錯誤點資訊，已更新。剔除錯誤資料後，如圖 3-1.4 所示，其相關性提高為接近 0.9。ALOS 衛星影像離群點為嘉義沿海區域，此區影像覆蓋性不足，PSInSAR 結果較差。但整體相關性為 1.7148，其可信度較低，其原因可能為 ALOS 衛星影像是由多個不同軌道拼接時造成的誤差，以及 ALOS 衛星結果中由南至北有一長波長軌道效應誤差。
5. P.91圖4-3.3請確認引用不同文獻地質構造的位置是否有偏移。另PSInSAR的精確度與準確度為何？其數值顯著變化的位置是否可藉以連結不同斷層？	感謝委員建議，經確認地質構造位置並沒有偏移。PSInSAR 精度為 mm 等級，雖影像結果有部分大氣誤差尚未消除，但此跨過車瓜林斷層的速度不連續數量級約為 1-2cm，且此不連續情形梯度很大，並非為大氣效應造成。另藉由 PS-InSAR 的 LOS 方向上的速度變化趨勢來判斷是否有活動構造，並配合文獻看此線性構造是否與可能的活動斷層相關。

期中審查意見	處理情形
（二）斷層模型反演評估	
1. P.90木屐寮-六甲斷層參數設定，圖5-1.1及圖5-1.2引用Suppe(1980)剖面是以向斜解釋，若有以斷層解釋，應該採用其他人的剖面。 2.	感謝委員意見，本計畫引用 Suppe(1980)剖面主要想了解此區深部基底滑脫面的形貌，後續會以楊志成(2007)的剖面為主要參考依據。
3. P.124 表 5-3.3 滑移速率及P.129 表5-4.1 斷層滑移速率，建議以範圍(range)加平均值(mean)表示。	已參照委員建議來呈現斷層滑移速率。
4. P.153圖6-5.5左圖水平位移皆分解為N-S及W-E分量，與內文描述平行斷層與垂直斷層分量不一致。	感謝委員建議，圖號標示有誤，已修正為圖 6-5.6。
5. 有關後甲里斷層的參數設定只參考 Le Beon et al.(2017)的剖面，該剖面臺南背斜下方的斷層為一未出露地表的盲斷層，請說明將該斷層和地表後甲里斷層連結的理由。	感謝委員建議，Le Beon et al.(2019)新的版本已修改此剖面，此一未出露地表的盲斷層已連接至後甲里斷層，本計畫會以此新版本為主要參考依據。
6. 請釐清將左鎮斷層設定為傾角70度而非90度的理由。	感謝委員意見，因陳延宗(2007)震測資料並沒有觀察到明顯的左鎮斷層斷層面，所以是根據其針對震測解釋的斷層幾何推估。
7. 有關小崗山斷層傾角的描述，P.99第二段提及「剪切面和古亭坑層層面平行，傾角向東傾斜約50～90度」，此與圖5-1.12不一致，請確認。	感謝委員建議，圖 5-1.12 為陳文山等(2010)根據震測剖面所作的斷層面解釋，「剪切面和古亭坑層層面平行，傾角向東傾斜約 50～70 度」這段描述是根據山腳下 1 號、小崗山 1 號井鑽井岩心的描述。
8. 本報告將潮州斷層之傾角權重設定為50度(0.2)、60度(0.6)、70度(0.2)，請說明將60度設定為0.6的理由。	根據各參考文獻調查，潮州斷層傾角有 50 度的可能性，也有 70 度的可能性。本計畫是以 50 度及 70 度作為邏輯樹上下界，因此取平均值 60 度作為中值。
9. 第五章在建置斷層模型時，提及「邏輯樹」及「斷層各分段給予不同的權重」，但內文未提到邏輯樹的定義及權重如何給定。	感謝委員意見，邏輯樹是根據斷層參數不確定性給予一可能的範圍，每個參數都會給予其統計意義上的權重值，以常態分佈而言，上下界值權重通常為 0.6，中值權重為 0.2，本計畫會於期末時補充相關說明。
10. BLOCKS斷層模型沒有展示觀	目前於討論部分，用速度場正演成果表

期中審查意見	處理情形
測值和模型預測值的差異。	示。
11. 表5-5.1西南部多條斷層有走滑分量，建議在表格中分列strike-slip & dip-slip & slip rates。	感謝委員的建議，目前的斷層滑移速率是用來進行後續斷層潛勢評估之用，因此不用特別區分走向滑移與傾向滑移量。但是這是個很好的建議，將在修正版中進行更新。
（三）陸地上規模大於 6 的地震事件	
1. 第6.6章節有關20190418地震，其斷層面直接套用2018花蓮地震的斷層模型，然而背景地震和餘震及相關地質資料並沒有顯示2018花蓮地震的斷層面可向西傾並延伸到銅門。	感謝委員建議，已新增圖 6-4.1 說明 2018 年與 2019 年花蓮地震可能的主餘震關係。
（四）報告書內容及其他建議事項	
1. 報告書內外封面之計畫編號、報告書名稱及計畫執行期間皆有誤植情況，請再確認。	感謝委員建議，已修正。
2. 部分圖片在報告書有放置，但內文中並沒有提及與說明，如 P.40 與 P.41 圖 2-3.4 與圖 2-3.5，請再確認。	感謝委員建議，已修正。
3. 部分圖說與圖片內容不符且圖例有誤，如 P.42 圖 2-3.6 圖說，上欄左側右側及下欄等說明與圖片不符，且上欄左側高程可能有誤，請再確認。	感謝委員建議，已修正。
4. 部分章節標題與子標題無明顯關聯性，建議將4-3章節「車瓜林斷層活動分析」修改為「斷層活動分析-車瓜林斷層」；第六章「陸地上.....分析成果」修改為「陸地上.....分析成果-2019.04.18花蓮地震」。	感謝委員建議，已修正。
5. 圖 4-3.2 及圖 4-3.3 請標示車瓜林斷層位置。	感謝委員建議，已修正。
6. 圖 5-4.4 橫軸為 0-1.0 圖說及內文為參數從-1.5 到 0，請再確認。	感謝委員建議，已修正。
7. P.47 圖 2-3.11、P.57 圖 2-3.20、	感謝委員建議，已修正。

期中審查意見	處理情形
P.58 圖 2-3.21 各圖內均有三條虛線，圖說明確只論述二條虛線代表事件，請考慮移除無論述之虛線,或補充虛線之說明。	
8. P.59 圖 2-3.23 及 P.60 圖 2-3.24 恆春斷層方位角約為 160 度，因此水準剖面的角度有誤(應為 N70°E 或 N80°E，非 N80°W)，此錯誤也會導致各水準點及斷層位置的距離計算錯誤，請再確認。	感謝委員建議，已修正。
9. P.90 圖 4-3.2 缺少位移比例尺、斷層名稱，建議全文之圖片應加強美編工作。	感謝委員建議，已修正。
10. P.110 第二段：「本次臺灣南部…」有許多錯字，語意難懂，請再潤飾。	感謝委員建議，按建議修訂為期末報告。
11. P.135 表 5-5.1 請註明數值單位。	感謝委員建議，已修正。
12. P.143 圖 6-3.2 缺垂直位移比例尺。	感謝委員建議，已修正。
13. P.153 圖 6-5.5 左圖水平位移皆分解為 N-S 及 W-E 分量,與內文描述平行斷層與垂直斷層分量不一致。	感謝委員建議，圖號標示有誤，已修正為圖 6-5.6。
14. 第五章所引用的地質圖和地質剖面圖應該增加其清晰度，必須讓圖內的每一文字和數字皆可清楚呈現。	感謝委員意見,計畫將於期末完稿修改剖面內容不清楚的部分。
15. 請列出圖 5-1.25 剖面 A－A’的地表位置。	感謝委員意見,計畫將於期末完稿中補充剖面位置圖。
16. 有關旗山斷層參數之設定參考數張剖面圖，建議應將每一張剖面位置於地質圖上標出。	感謝委員意見,計畫將於期末完稿中補充說明剖面位置圖。
17. 參考文獻有誤植或缺漏情形，請再確認。	感謝委員建議，已修正。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
（一）地表變形觀測資料處理分析	
1. 第40-68頁，精密水準測線分析缺少每二年間的較差分析及各水準點速度圖，文內描述各點情況均無對應分布圖可參考，請改進。	感謝委員建議，已將上述內容圖轉移至附錄 11、附錄 12。
2. 第89與91頁，全臺水平、垂直速度場圖係前一年工作成果內容，建議要有對應的更新內容(即分析至2019年為止)。	感謝委員建議，已修正。
3. 第93頁，單頻站與約制站空間分布圖太過簡略，請加入斷層線、地名、圖例等資料。	感謝委員建議，已修正。
4. 第101頁，時間序列圖在2019年的資料點過少，請補足。	感謝委員建議，已補足。
5. 第144頁（4-4節)，GPS的速度場因為是內差速度，且GPS的站相距甚遠，加上車瓜林斷層與旗山斷層相鄰近，因此稱車瓜林斷層上盤，其速度60mm/yr似乎不妥，稱速度變化仍明顯，暗示車瓜林斷層可能向西南端繼續延伸，似乎不妥。	感謝委員建議，已修正。
6. 宜將圖4-1.1及4-1.2按圖2-4.22與2-4.23列出不同時間之結果。	雖然全台速度場是區分成 9 個時期，但是那是因為包含到其他不同地區的事件時間。就南部地區，僅有三次速度變化，所以本計畫僅繪製 3 個時期的速度場。
（二）斷層模型反演評估	
1. 第148頁（表5-1.1），「斷層底部深度」應為一個數值，目前表中所列為斷層深部「範圍」。	感謝委員建議，已修正。
2. 第148頁，木屐寮-六甲斷層是否切穿地表，請考量或加強說明。	內文補充說明：木屐寮-六甲斷層根據楊志成等(2005)莿桐崎剖面及地調所台南藝術學院附近斷層露頭(林啟文等，2007)，有破裂到地表。

3.	第164頁（表5-1.2），由潮州斷層開始出現此等幾何資料及文獻列表，為何前面數條斷層皆沒有？	有列表的斷層是未有新調查資料加入評估，因此仍沿用前階段報告(胡植慶等，2016)整理的表格協助判斷斷層幾何。未列表的斷層則是重點說明一些新蒐集的資料及判釋結果，因此未列出前階段已蒐集的成果。每條斷層的幾何資料及文獻列表均可在胡植慶等(2016)報告中取得。
4.	第173頁（表5-2.1），輸入初始值中，潮州及恆春斷層僅有走滑速率是否恰當？	依據報告中作為約制所參考的 Shyu et al., 2016 文章所描述，潮州及恆春斷層兩者皆為走向滑移為主略帶傾向滑移分量(詳見該文章第 316 頁列註)，故期末報告初版將該約制設定於走向滑移分量中。 期末報告已依評委與原著建議修訂為傾滑速率約制，並重新模擬與繪圖、撰寫更新期末報告。
5.	第176頁（表5-2.2及5-2.3），新化斷層結果有極高傾滑速率，但其應為走滑斷層，請說明差異為何。	目前推測應為塊體幾何等影響，已有列述於該章節第 174 頁第一段中。
6.	第197至198頁，文中混用「斷層滑移速率」及「滑移虧損率」需清楚界定兩者之差異。	理論上，斷層滑移速率與斷層滑移虧損速率的意義並不同。斷層長期滑移速率乘上斷層鎖定率會得到斷層滑移虧損速率。如果斷層完全鎖定，則斷層鎖定率為 1；如果斷層完全潛移，則斷層鎖定率為 0。斷層滑移速率（或稱斷層長期滑移速率）減去斷層滑移虧損速率會得到斷層短期滑移速率。換言之，若斷層完全鎖定，則斷層長期滑移速率與斷層滑移虧損速率是一致的。就計畫目的與測地資料的特性，本計畫是採用斷層模型推求之斷層滑移虧損速率。然而，過去的研究工作，僅提供斷層滑移速率，故本報告書之斷層滑移速率比較差異，有部分是來自於斷層長期滑移速率與斷層滑移虧損速率之差異。本報告書已在 5-5 節補充說明。
7.	第199頁（表5-4.1），滑移速率最高值為恆春斷層，意義為何？旗山斷層與小崗山斷層於模型一及模型二之結果差異頗大，請說明可能原因。	雖然兩個時間段所獲得的恆春斷層的斷層滑移虧損速率相當接近，皆約 10 mm/yr。但是由於恆春斷層在 2006 年 12 月之後，正在經歷疑似慢滑移事件的發生，所以會高估恆春斷層的斷層滑移虧損速率。換言之，本計畫未來需要針對恆春斷層進行更進一步的研究工作，釐清疑似

		慢滑移事件對於斷層滑移虧損速率的影響量。 由於 2016 年美濃地震震後在台南與高雄地區的速度場型態與地震前相當不一致，因此兩個時間段的模型成果才會在旗山斷層與小崗山斷層得到不一致的斷層滑移虧損速率。
8.	臺灣南部有許多非彈性變形，若僅採BLOCKS、DEFNODE、基線應變模型是無法模擬非彈性變形，建議思考其他方法來解決。	是的，斷層模型是假設斷層位於彈性物質中，所以無法解決非彈性變形的問題。然而，這個問題現階段並無法解決，仍需更多的研究來釐清非彈性變形的來源與機制，才能設法解決此問題。
9.	活動斷層的調查已經進行10年以上的工作，建議將每期計畫的重要結果及待改進事項列出。若僅持續蒐集資料，在模擬斷層滑移或非彈性變形的方法未持續改進，對既有的問題仍無法解決。	遵照辦理，將會在明年度的計畫成果中一併統整所有的問題、建議與重要成果。
10.	如果採用的資料時段不同或採用的資料不同，不同模型得到的斷層滑移速率的差異有可能是滑移速率在時間上有變化，而不僅是採用不同斷層模型的差異。表 5-5.1. BLOCKS、DEFNODE、BASELINE INVERSION使用的資料是否皆相同？	同一時間段中，三個斷層模型所採用的資料是一致的。不同時間段的速度也就不一樣，因此斷層滑移速率的差異確實是滑移速率在時間上有變化。
11.	斷層模型求得斷層滑移速率速度變化差異過大，權重如何給定，請說明原因。	現階段有採用不同斷層模型成果來推求斷層滑移速率的國家僅有美國 USGS，目前的了解是，它們也僅能採用人為判定。確實人為判定並不是一個好的方法，本計畫也在不斷地研究與搜尋更好的方法，也已經邀請 USGS 的專家於明年前來臺灣與本團隊進行交流討論，期望能在這個交流中獲得更好的處理方法。
12.	對於斷層模型所依據之斷層幾何當中，是否將斷層低仰角的部分列入考慮，應有一致性的作法。	感謝委員建議，已修正。

（三）報告書內容及其他建議事項	
1. 第70、80、82及85頁等圖片解析度不佳，請修正。	感謝委員建議，已修正。
2. 121頁所列「本期中報告」是否為誤植，抑或進度確實尚未整理至期末應有進度？請再查明修正。	感謝委員建議，已修正為「本計畫上半年度」。
3. 159頁（5-1-6節），潮「洲」斷層應為潮「州」斷層。	感謝委員建議，已修正。
4. 第231頁，Shyu et al.(2016)文獻重複。	感謝委員建議，已修正。
5. 速度場(mm/yr)的有效位數應該是小數點後一位。	感謝委員建議，已修正。
6. 第234頁，期中審查意見處理情形(二)第1、4及8等三項，期末報告均未處理，請改正。	相關資料如楊志成(2007)與 Le Beon et al.(2019)說明補充於期末報告定稿版中。本計畫經由綜合考量，選出各斷層最適斷層幾何模型，因此不採用邏輯樹方式進行幾何的評估，各斷層幾何邏輯樹及權重會在「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫中討論，因此在本計畫期末報告中會刪除關於邏輯樹及權重的相關論述。
7. 圖4-2.4 找不到米字圖案。	感謝委員建議，已修正圖改為三角形圖案。
8. 參考文獻許多格式不統一。	感謝委員建議，已修正。