經濟部

計畫編號：109-5226904000-05-01

經濟部中央地質調查所

109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（4/4）」

（第4年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本 年 度 計 畫：自109年02月至109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 109 年 11 月

計畫編號：109-5226904000-05-01

經濟部中央地質調查所

109 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（4/4）」

（第4年度）

全 程 計 畫：自106年02月至109年12月止
本 年 度 計 畫：自109年02月至109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 109 年 11 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（4/4）

（第4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　109　年　11　月

目錄

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

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） 15
1-4-3 南部地區斷層模型建置 20

第二章、大地測量資料分析 23

2-1 GPS 連續站解算成果分析 23
2-1-1 GPS 資料品質檢測 23
2-1-2 GPS 連續站時間序列分析 25

2-2 今年度（2020 年）GPS 移動站檢核分析 29
2-2-1 GPS 移動站檢核 30
2-2-2 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析 32
2-2-3 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 解算 GPS 移動站成果之比較 34

2-3 今年度（2020 年）精密水準測量精度分析 36
2-3-1 臺北地區精密水準測線 39
2-3-1-1 石門至萬里測線 39
2-3-1-2 士林至三芝測線 41
2-3-1-3 淡水至士林測線 43
2-3-1-4 五股至台北測線 45
2-3-2 桃竹苗地區精密水準測線 47
2-3-2-1 新屋至童話世界測線 47
2-3-2-2 新竹至五峰測線 49
2-3-2-3 新竹至峨嵋測線 53
2-3-2-4 苗栗至南庄測線 55
2-3-3 中部地區精密水準測線 57
2-3-3-1 大安至東勢測線 57
2-3-3-2 龍井至太平測線 59

2-3-3-3 王功至草屯至埔里測線.....61
2-3-3-4 北斗至水里測線.....63
2-3-3-5 五光至黃竹測線.....65
2-3-4 嘉南地區精密水準測線.....67
2-3-4-1 金湖至瑞峰測線.....67
2-3-4-2 北門至楠西測線.....69
2-3-4-3 善化至關廟測線.....71
2-3-4-4 安平至龍崎測線.....73
2-3-4-5 玉井至新化測線.....75
2-3-5 高屏地區精密水準測線.....77
2-3-5-1 路竹至茂林測線.....77
2-3-5-2 岡山至安坡測線.....79
2-3-5-3 佳冬至七佳測線.....81
2-3-6 恆春地區精密水準測線.....83
2-3-6-1 恆春西臺地至佳樂水測線.....83
2-3-6-2 南樹林至鵝鑾鼻測線.....85
2-3-7 東部地區精密水準解算.....88
2-3-7-1 嶺頂至龍澗測線.....88
2-3-7-2 光復至豐濱測線.....90
2-3-7-3 紅葉至靜浦測線.....92
2-3-7-4 東成至富岡測線.....94
2-3-8 宜蘭地區精密水準解算.....96
2-3-8-1 梗枋至東澳測線.....96
2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站觀測成果分析.....98
2-4-1 臺北地區 GPS 觀測網.....98
2-4-2 桃竹苗地區 GPS 觀測網.....101
2-4-3 中部地區 GPS 觀測網.....103
2-4-4 嘉南地區 GPS 觀測網.....105
2-4-5 高屏地區 GPS 觀測網.....108
2-4-6 恆春地區 GPS 觀測網.....111
2-4-7 東部地區 GPS 觀測網.....115
2-4-8 宜蘭地區 GPS 觀測網.....118
2-5 全臺地表速度場.....120
第三章、東部地區雷達影像分析.....125
3-1 東部地區 PS-InSAR 成果資料分析.....127
3-1-1 ERS1/2（1995/6~1999/9）.....127
3-1-2 ENVISAT（2006/3~2009/6）.....129
3-1-3 ALOS（2007/1~2010/12）.....131
3-1-4 SENTINEL-1A &-1B（2015/4~2020/10）.....133
3-2 GPS 連續站周圍 PS 點之時間序列.....149
3-3 東部地區 PS-InSAR 技術時間序列分析.....154
3-3-1 嶺頂斷層.....156

3-3-2 瑞穗斷層 157
3-3-3 玉里斷層與池上斷層 158
3-3-4 鹿野斷層 160
3-4 PS-InSAR 成果討論 161

第四章、斷層模型建置 165
4-1 斷層幾何參數設定 165
4-1-1 米崙斷層 166
4-1-2 嶺頂-瑞穗斷層 171
4-1-3 奇美斷層 176
4-1-4 玉里-池上斷層 179
4-1-5 鹿野斷層-利吉斷層 183
4-2 BLOCKS 斷層模型 188
4-2-1 斷層模型原理與使用參數 188
4-2-2 斷層模擬結果 190
4-3 DEFNODE 斷層模型 198
4-3-1 斷層模型原理與使用參數 198
4-3-2 斷層模擬結果 202
4-4 基線應變反演模型（Baseline Inversion Model） 208
4-4-1 斷層模型原理與使用參數 208
4-4-2 斷層模擬結果 211
4-5 東部地區之斷層滑移速率 217

第五章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果 220
5-1 2020 年 5 月 3 日臺灣東部近海地震簡介 220

第六章、結論與建議 226
Chapter 6: Conclusions and Suggestions 228

參考文獻 230

期中委員審查意見 233
期末委員審查意見 237

（附錄請參閱光碟）

[附錄 1] 109 年期末_GPS 連續站計算使用軟體與方法策略
[附錄 2] 109 年期末_CGPS 時間序列
[附錄 3] 109 年期末_CGPS 速度表
[附錄 4] 109 年期末_多時序 InSAR 變形監測之研究架構及方法
[附錄 5] 109 年期末_SENTINEL-1A 升軌衛星干涉圖
[附錄 6] 109 年期末_SENTINEL-1A 降軌衛星干涉圖
[附錄 7] 109 年期末_GPS 移動站時間序列
[附錄 8] 109 年期末_GPS 移動站速度表
[附錄 9] 109 年期末_精密水準時間序列
[附錄 10] 109 年期末_精密水準速度表
[附錄 11] 109 年期末_精密水準測量之檢核結果
[附錄 12] 109 年期末_成果報告內圖片「300dpi 以上清晰圖檔（電子檔）」

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 移動站施測與檢核時間表。 31
表 4-1.1：東部地區斷層之幾何參數。 165
表 4-1.2：米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數 170
表 4-1.3：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻。 175
表 4-1.4：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻。 175
表 4-1.5：奇美斷層幾何形貌相關文獻 178
表 4-2.1：GPS 速度場模擬成果之各斷層滑移速率。 193
表 4-3.1：圖 4-3.1 中所示斷層之幾何參數。 201
表 4-3.2：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。 207
表 4-3.3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al., 2016）及平均滑移速率。 207
表 4-4.1：斷層平均滑移速率。 212
表 4-5.1：本計畫模型加權平均斷層滑移虧損率。 218

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：臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。 13
圖 1-4.2：2002 年至 2019 全臺垂直速度場。 14
圖 1-4.3：ERS（1995/4~1999/9）（左上）、ENVISAT（2004/6~2008/9）（右上）、ALOS（2007/1~2011/3）（左下）視衛星方向上年平均變動量。 16
圖 1-4.4：SENTINEL-1 升軌影像（2015/10~2019/9）及降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量。 17
圖 1-4.5：SENTINEL-1 東西方向及垂直方向年平均變動量。 18
圖 1-4.6：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期。 19
圖 1-4.7：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。 20
圖 1-4.8：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。 21
圖 1-4.9：基線應變模型的斷層滑移虧損率。 22
圖 2-1.1：利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GIPSYX（紅點）解算之連續 GPS 測站 S01R 時間序列。 23
圖 2-1.2：利用重新轉檔前（紅點）與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）解算之連續 GPS 測站 CTOU 時間序列。 24
圖 2-1.3：不同運動機制之 GPS 測站時間序列。 26
圖 2-1.4：整合歷史資料至 2020 年 9 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。 27
圖 2-1.5：整合歷史資料至 2020 年 9 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。 28
圖 2-2.1：已完成施測的 GPS 移動站與檢核點位分布圖。 29
圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。 33
圖 2-2.3：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。 35
圖 2-2.4：兩種軟體解算的速度估值的差值（Gamit 結果減去 Bernese 結果）直方圖。 35
圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。 37
圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖。 38
圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較。 39
圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較。 39
圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 40
圖 2-3.6：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。 41
圖 2-3.7：士林至三芝測線水準高程變化圖。 42
圖 2-3.8：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較。 43
圖 2-3.9：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之時間序列比較。 43
圖 2-3.10：淡水至士林測線水準高程變化圖。 44

圖 2-3.11：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較。 45
圖 2-3.12：五股至台北測線水準高程變化圖。 46
圖 2-3.13：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。 47
圖 2-3.14：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 48
圖 2-3.15：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較.....50
圖 2-3.16：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較.....50
圖 2-3.17：新竹至五峰測線之部份時間序列。 50
圖 2-3.18：新竹至五峰測線水準高程變化圖。 51
圖 2-3.19：水準點位 G416 時間序列及現地情形。 52
圖 2-3.20：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較 53
圖 2-3.21：新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 54
圖 2-3.22：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較。 55
圖 2-3.23：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 56
圖 2-3.24：水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較。 57
圖 2-3.25：水準點位 G901 與連續站 TEGS 之時間序列比較。 57
圖 2-3.26：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 58
圖 2-3.27：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較.....59
圖 2-3.28：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 60
圖 2-3.29：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較。 61
圖 2-3.30：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 62
圖 2-3.31：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較。 63
圖 2-3.32：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 64
圖 2-3.33：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較。 65
圖 2-3.34：五光至黃竹水準高程變化圖。 66
圖 2-3.35：水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較。 67
圖 2-3.36：水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較。 67
圖 2-3.37：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 68
圖 2-3.38：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較。 69
圖 2-3.39：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。。 70
圖 2-4.40：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較。 71
圖 2-4.41：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 72
圖 2-3.42：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較。 73
圖 2-3.43：安平至龍崎測線水準高程變化圖。 74
圖 2-3.44：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較。 75
圖 2-3.45：台 20_新化至玉井測線路線圖。 76
圖 2-3.46：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較。 77
圖 2-3.47：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 78
圖 2-3.48：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較。 79
圖 2-3.49：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 80
圖 2-3.50：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較。 81
圖 2-3.51：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 82
圖 2-3.52：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較。 83
圖 2-3.53：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 84
圖 2-3.54：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較。 86

圖 2-3.55：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較。 86
圖 2-3.56：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 87
圖 2-3.57：水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較。 88
圖 2-3.58：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。。 89
圖 2-3.59：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較。 90
圖 2-3.60：光復至豐濱水準高程變化圖。 91
圖 2-3.61：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較。 92
圖 2-3.62：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 93
圖 2-3.63：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較。 94
圖 2-3.64：東成至富岡測線水準高程變化圖。 95
圖 2-3.65：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較。 96
圖 2-3.66：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。 97
圖 2-4.1：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場。 99
圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場。 100
圖 2-4.3：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 101
圖 2-4.4：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2020 年垂直方向速度場。 102
圖 2-4.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 104
圖 2-4.6：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。 104
圖 2-4.7：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 106
圖 2-4.8：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 107
圖 2-4.9：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 109
圖 2-4.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 110
圖 2-4.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 ..112
圖 2-4.12：G643 測站之時間序列。 113
圖 2-4.13：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002-2020 年之 GPS 垂直方向速度場。 114
圖 2-4.14：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 ..116
圖 2-4.15：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場。 117
圖 2-4.16：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 118
圖 2-4.17：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場。 119
圖 2-5.1：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。 122
圖 2-5.2：2002 年至 2020 全臺垂直速度場。 124
圖 3.1：本團隊研究東部地區地殼變形使用 SAR 影像圖資示意圖。 126
圖 3-1.1：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。 127
圖 3-1.2：ERS（1995/6~1999/9）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。 128
圖 3-1.3：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。 129
圖 3-1.4：ENVISAT（2006/3~2009/6）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）

3123、3141 視衛星方向上年平均變動量。 130
圖 3-1.5：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。 131
圖 3-1.6：ALOS（2007/1~2010/12）衛星軌道 444，像幅編號 460 及 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 及 450 視衛星方向上年平均變動量。 132
圖 3-1.7：Sentinel-1 衛星選取區域涵蓋圖。 134
圖 3-1.8：Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 干涉圖。 135
圖 3-1.9：Sentinel-1 干涉影像涵蓋區域。 136
圖 3-1.10：Sentinel-1 短時間基線在中央山脈區域有異常的干涉條紋產生。 136
圖 3-1.11：Sentinel-1 升軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量。 140
圖 3-1.12：Sentinel-1 降軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量。 141
圖 3-1.13：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。 142
圖 3-1.14：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。 143
圖 3-1.14（續）：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。 144
圖 3-1.15：Sentinel-1 東西方向年平均變動量。 147
圖 3-1.16：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量。 148
圖 3-2.1：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 150
圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 151
圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 152
圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 153
圖 3-3.1：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。 155
圖 3-3.2：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 SHUL 相對於 SLIN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 156
圖 3-3.3：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JSUI 相對於 JPEI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 157
圖 3-3.4：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JPIN 相對於 JULI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 158
圖 3-3.5：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 TAPO 相對於 SHAN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 159
圖 3-3.6：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 LONT 相對於 S105 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。 160
圖 3-4.1：Sentinel-1 在臺灣西南部的 PSInSAR 平均速度場與 GPS 平均速度場比對。 162
圖 3-4.2：Sentinel-1 在臺灣東部區域與臺灣西南部區域的影像相關性。 163
圖 3-4.3：臺灣西南部與台灣東部干涉條紋圖比較。 164
圖 4-1.1：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位深度剖面。 167
圖 4-1.2：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位南北向 GG'及 HH'深度剖面 168
圖 4-1.3：花蓮地區 2012 年至 2017 年地震重定位深度剖面。左圖為重定位之震央分布圖。 169
圖 4-1.4：本計畫米崙斷層幾何設定。 170

圖 4-1.5：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖。 172
圖 4-1.6：花東縱谷斷層分段與幾何。 173
圖 4-1.7：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面。 173
圖 4-1.8：左圖為臺灣地體架構及地震站分布。 174
圖 4-1.9：2009 年 12 月 19 日 M_L 4.7 地震序列。 174
圖 4-1.10：豐濱附近奇美斷層露頭。 176
圖 4-1.11：秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭。 177
圖 4-1.12：泰林地區地電阻影像剖面結果圖。 177
圖 4-1.13：本計畫瑞穗斷層及奇美斷層幾何。 178
圖 4-1.14：(a) 池上斷層及附近之地震分布，空心圓圈為 1998-2001 之地震，黑色實心圓圈為 1995 年 M5.4 地震序列(b)1998-2001 地震深度分布剖面(c) 1995 年 M5.4 地震序列深度分布剖面。 180
圖 4-1.15：(a) 2003 年成功地震餘震分布及斷層面解 (b) A-B 剖面餘震深度分布。 180
圖 4-1.16：上圖為臺灣地體架構及地震站分布。 181
圖 4-1.17：位於舞鶴台地之東西向構造剖面。 182
圖 4-1.18：卑南山礫岩構造演化圖。 184
圖 4-1.19：鹿野斷層與利吉斷層之地下構造模型。 184
圖 4-1.20：工作區域之地下構造剖面。 185
圖 4-1.21：(a) 鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，(b) 淺層震測剖面圖 185
圖 4-1.22：左圖為臺灣地體架構及地震站分布 186
圖 4-1.23：(a)2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，(b)臺東地震剖面圖，圖中左側粗紅線為中央山脈斷層，上部紅色虛線為鹿野斷層位置，右側淡藍色多邊形為利吉斷層位置（Wu et al., 2006）。 186
圖 4-1.24：鹿野-利吉斷層系統幾何形貌。 187
圖 4-2.1：斷層模擬初始值。。 189
圖 4-2.2：2020 年台灣東部斷層傾向滑移速率模擬成果。 194
圖 4-2.3：2020 年台灣東部斷層走向滑移速率模擬成果。 195
圖 4-2.4：2020 年台灣東部斷層模擬成果之總滑移速率。 196
圖 4-2.5：台灣東部斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果。 197
圖 4-3.1：(a) 臺灣東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. 米崙斷層； 2.嶺頂斷層； 3.瑞穗斷層； 4.玉里斷層； 5.池上斷層； 6.利吉斷層； 7.鹿野斷層； 8.奇美斷層。 200
圖 4-3.2：(a) 各塊體內之內部形變應變大小 (b) 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）。(c) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。 204
圖 4-3.3：(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。 205
圖 4-3.4：(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 206
圖 4-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。 210
圖 4-4.2：臺灣東部地區相對於測站 S01R 之水平速度場。 213

圖 4-4.3：使用 2002-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(
.....214
圖 4-4.4：使用 2002-2019 年水平速度場之東部地區斷層滑移虧損率分布圖。
.....215
圖 4-4.5：使用 2002-2019 年水平速度場之東部地區斷層滑移虧損率分布圖。
.....216
圖 4-5.1：本計畫 3 種模型之加權平均斷層滑移虧損率。 219
圖 5-1.1：中央氣象局 20200503 地震事件報告。 221
圖 5-1.2：20200503 地震事件之震源機制解與地震波反演之擬合結果。 222
圖 5-1.3：縱谷斷層分段圖。 223
圖 5-1.4：池上斷層區域之地震構造。 224
圖 5-1.5：本次地震與池上斷層歷史地震之地理關係。 225

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（4/4）													
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													
水準資料分析 (由成大工作團隊負責)													
GPS 移動站資料檢核及分析 (由成大工作團隊負責)													
東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 B：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：Interim content

	工作項目	章節
測量外業檢核	1. 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 及精密水準測量成果解算分析	1. 2020 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。	2-3 2-4
東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。	第 3 章
東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. 提供活動斷層及潛在的活動構造之斷層滑移虧損速率。	第 4 章
陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果報告	1. 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。	第 5 章
提供成果報告書內圖片「300dpi 以上清晰圖（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東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 2020 年 9 月的時序分析，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 澎湖白沙站之年速度場。此外，本年度至 9 月底為止，GPS 移動站部分共完成 767 站的施測，精密水準則完成共計 29 條測線之施測。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。PS-InSAR 工作除彙整臺灣東部地區過去的成果外，另加入分析自 2015 年 4 月開始至 2020 年 10 月的 Sentinel-1 影像。並增加長時間基線干涉影像，包括 12、24、36、48、72、96、192、288、384 天的時間基線，以降低大氣、土壤含水量的改變與電離層之干擾所造成的相位變化。目前利用已完成的 1040 幅升軌干涉影像與 867 幅降軌干涉影像得到臺灣東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，本期研究以臺灣東部地區的 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，米崙斷層為 6.9 mm/yr，嶺頂斷層為 9.7 mm/yr，瑞穗斷層為 11.9 mm/yr，奇美斷層為 8.0 mm/yr，玉里斷層 15.4 mm/yr，池上斷層為 9.4 mm/yr，鹿野斷層為 6.9 mm/yr，利吉斷層為 6.2 mm/yr。臺灣東部的斷層滑移虧損速率的估算值有很大的不確定性。

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 eastern Taiwan. By the September of 2020, the daily solutions and time series from 500 continuous GPS stations were calculated to get the interseimic velocity field with respect to S01R by removing removing coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion and unusual data. By the September of 2020, 767 surveyed-mode GPS stations and 29 leveling routes were re-surveyed. As a result, the velocity field shows a similar trend with the previous one. In addition to the past acchivements of eastern Taiwan by using ERS-1/2, ENVISAT and ALOS radar images with PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique, the analysis also includes Sentinel-1 images from April 2015 to October 2020. In this analysis, the different temporal baselines of 12, 24, 36, 48, 72, 96, 192, 288, and 384 days are considered to mitigate phase changes caused by atmospheric effect and soil water content and ionospheric interference. At present, the completed 1040 ascending interferograms and 867 descending interferograms are used to obtain large-scale surface deformation velocity fields in eastern Taiwan. The good correlation of time-series of PS-InSAR and cGPS could provide the spatial-temporal deformation pattern of recent crustal deformation. For the fault model constructions, 8 active faults were selected as the target faults in eastern Taiwan. The results show that the weighted average slip deficit rate of Milum fault is 6.9 mm/yr; Lingding fault is 9.7 mm/yr, Ruey fault is 11.9 mm/yr; Chimei fault is 8.0 mm/yr; Yuli fault is 15.4 mm/yr; Chihshang fault is 9.4 mm/yr; Luyeh fault is 6.9 mm/yr and Lichi fault is 6.2 mm/yr. The uncertainties of slip deficit rates in eastern Taiwan is relatively high.

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、池上斷層和小崗山斷層）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: Continuous GPS stations set up by the 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	GS50	蔡宅	2009/03/25
GS02	新竹高工(2015.08.17 廢站)	2004/10/21	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS03	工研院	2004/10/19	GS52	新發國小(2020.9 廢站)	2009/12/18
GS04	大埔美農場(2009.11.11 廢站)	2004.10.16	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS54	大洲國中(2013.7.12 廢站)	2009/12/15
GS06	民和國中	2004/10/21	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS07	培英國小	2004/10/21	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS08	興華國小(2020.03.26 廢站)	2005/08/15	GS57	石門國小(2016.12.27 廢站)	2009/12/15
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS58	高士國小	2009/12/14
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS11	北投國小	2005/08/15	GS60	永港國小	2009/12/18
GS12	樂善國小(2018.3.8 廢站)	2005/09/06	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS13	國光國小	2005/08/16	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS14	西門國小	2005/09/13	GS63	太興國小	2010/09/24
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS65	茶山國小(2011.7.28 廢站)	2010/10/14
GS17	太平國小	2005/09/14	GS66	達邦	2010/09/28
GS18	嘉義農業試所	2005/09/14	GS67	新美國小	2010/09/28
GS19	保長國小(2012.5.25 廢站)	2006/07/12	GS68	三和國小	2010/12/17
GS20	龜山島	2006/08/04	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS23	五光國小	2006/05/30	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS73	新光國小	2012/11/03
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS74	內門國小	2012/11/03
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS75	旗美高中	2012/11/01
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS76	新興國小	2012/11/03
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS77	深水國小	2012/11/15
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS78	溪洲國小	2013/10/21
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS79	中路國小	2013/10/21
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS80	田寮國中	2013/10/21
GS32	虎頭埤風景區	2006/06/23	GS81	嘉興國中	2013/10/21
GS33	永華國小	2006/06/22	GS82	卓蘭實中	2014/11
GS34	成大航太試驗場	2006/06/24	GS83	土城國小	2014/11
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS84	水里國中	2014/11
GS36	德化國小	2006/10/21	GS85	水泉國小龍泉分校	2014/11
GS37	泰安服務區	2006/10/25	GS86	水美國小	2015/09/15
GS38	清水服務區	2006/10/21	GS87	水源國小	2015/09/08
GS39	龍井國小	2006/10/21	GS88	那拔國小	2015/09/14
GS40	龍峰國小(2016.11.7 廢站)	2006/10/21	GS89	新化國中	2015/09/14
GS41	竹門國小	2007/11/23	GS90	新埔工作站(2019.07.01 廢站)	2016/09/02
GS42	東原國中	2007/11/23	GS91	香山高中	2016/09/02
GS43	果毅國小	2007/11/27	GS92	獅潭國中	2016/09/05
GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30	GS93	七星山	2017/01/01
GS45	霧台鄉公所	2009/01/05	GS94	中湖	2017/12/20
GS46	來義國小	2009/01/06	GS95	八煙	2017/12/20
GS47	台電南展館(2013.7.25 廢站)	2009/01/05	GS96	二溪國小	2020/02/07
GS48	警光山莊	2009/04/01	GS97	玉井國小	2020/02/07
GS49	馬赫坡民宿	2009/04/01			

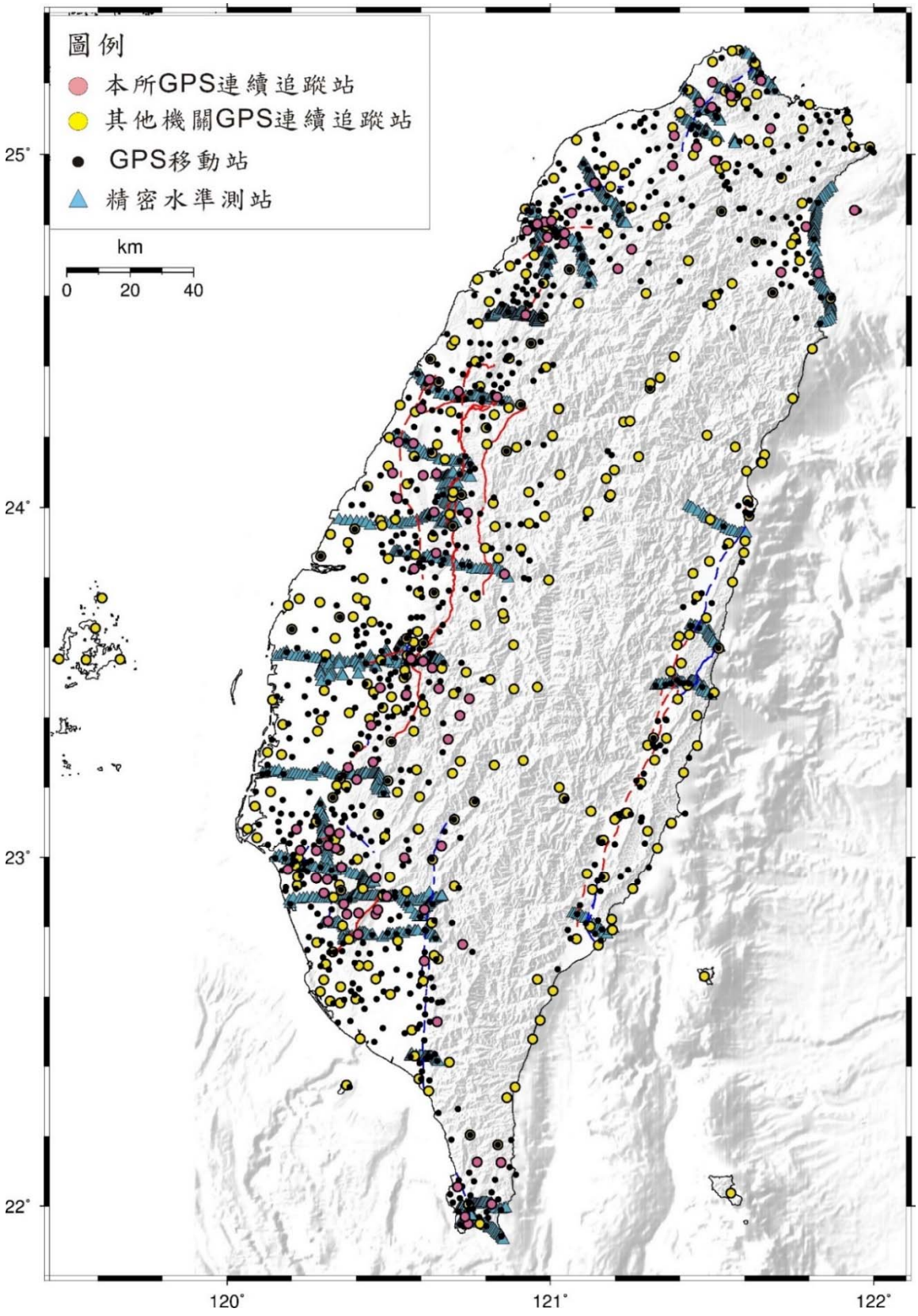


圖 1-2.1：中央地質調查所建立之活動斷層大地測量觀測網。包含 86 站 GPS 連續站、773 站 GPS 移動站以及 42 條精密水準測線。

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

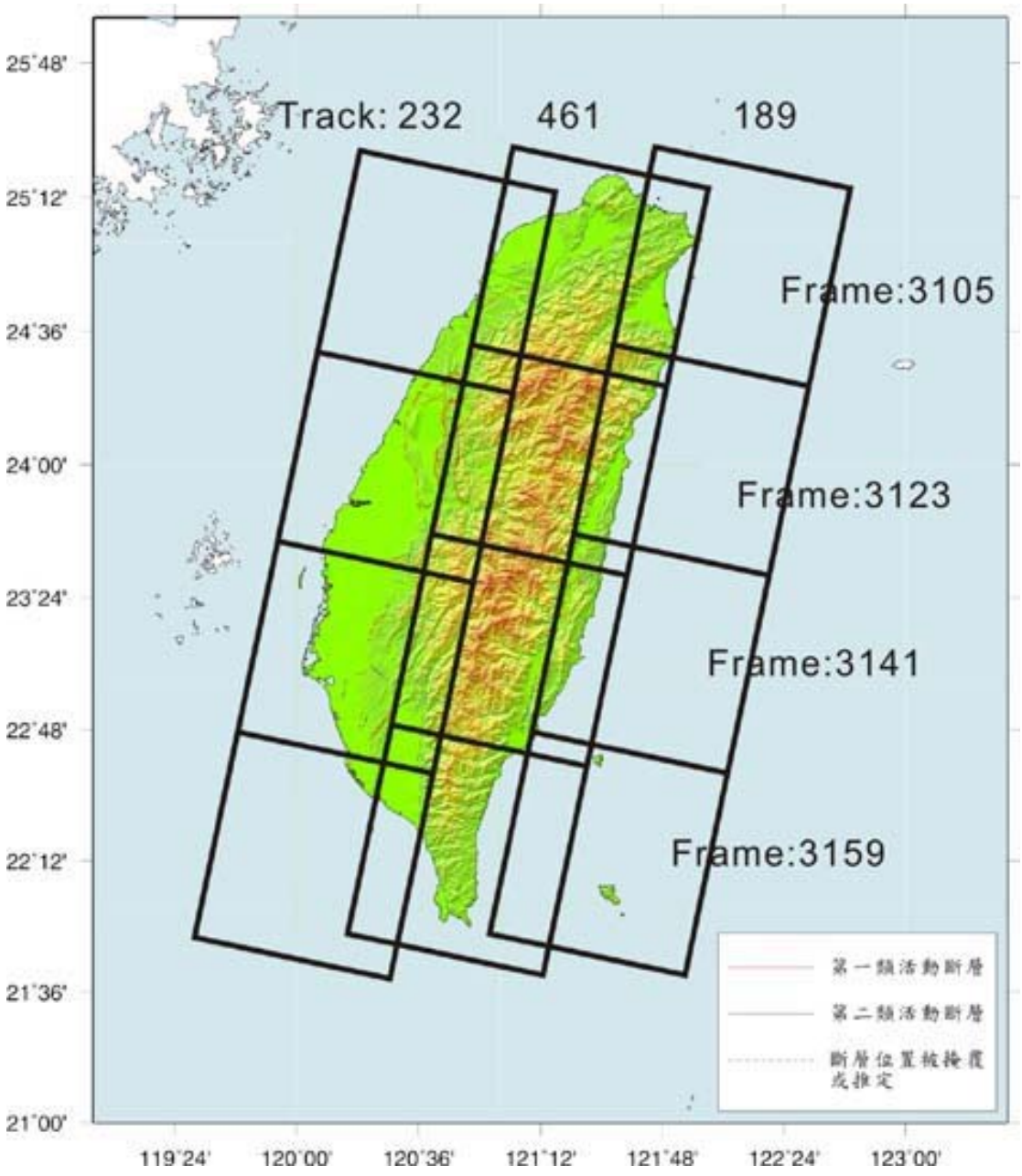


圖 1-2.2：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像升軌、降軌之框架（frame）與軌道（track）圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km × 110 km。

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.

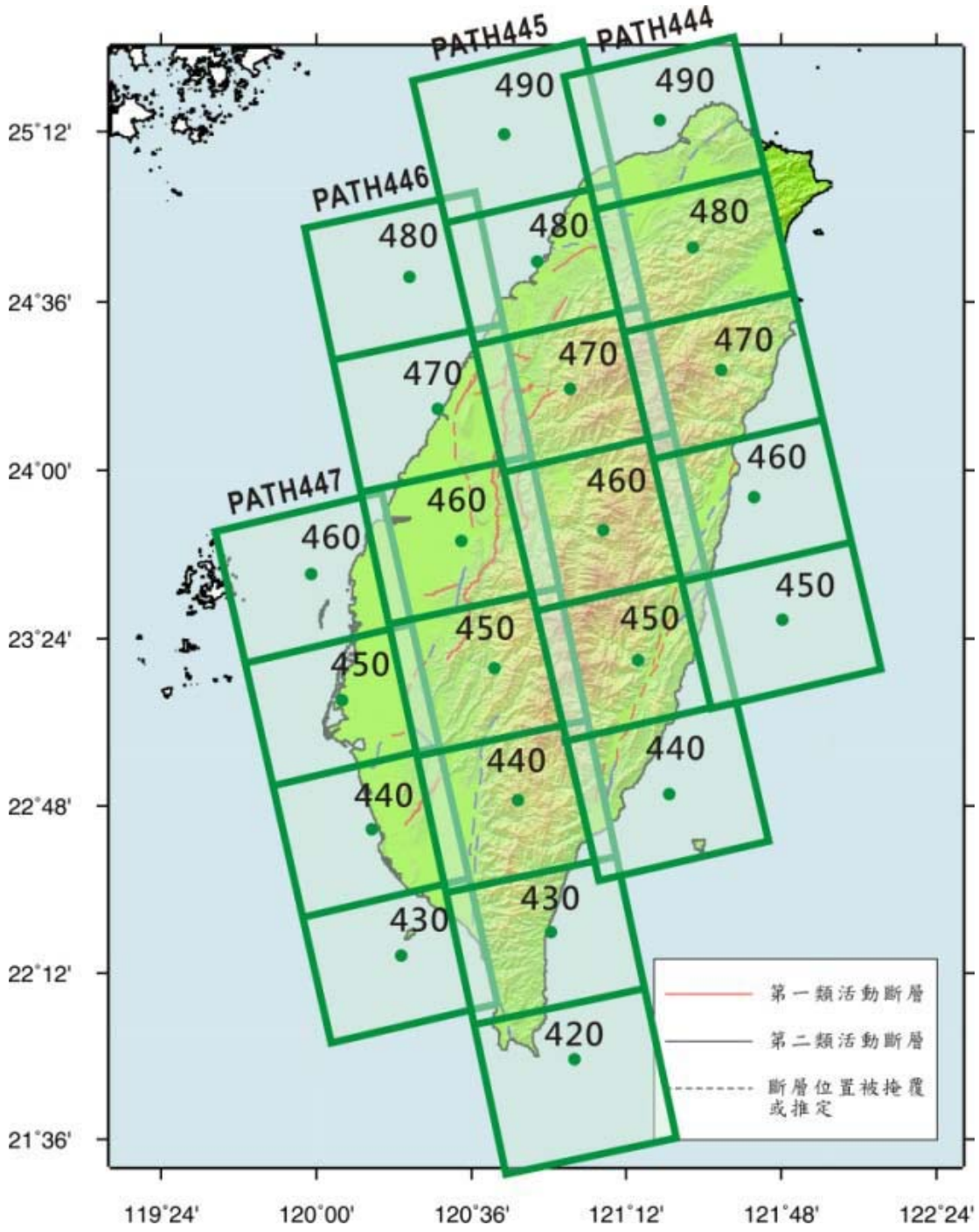


圖 1-2.3：ALOS 衛星影像於臺灣之升軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.3: Ascending tracks of ALOS satellite images.

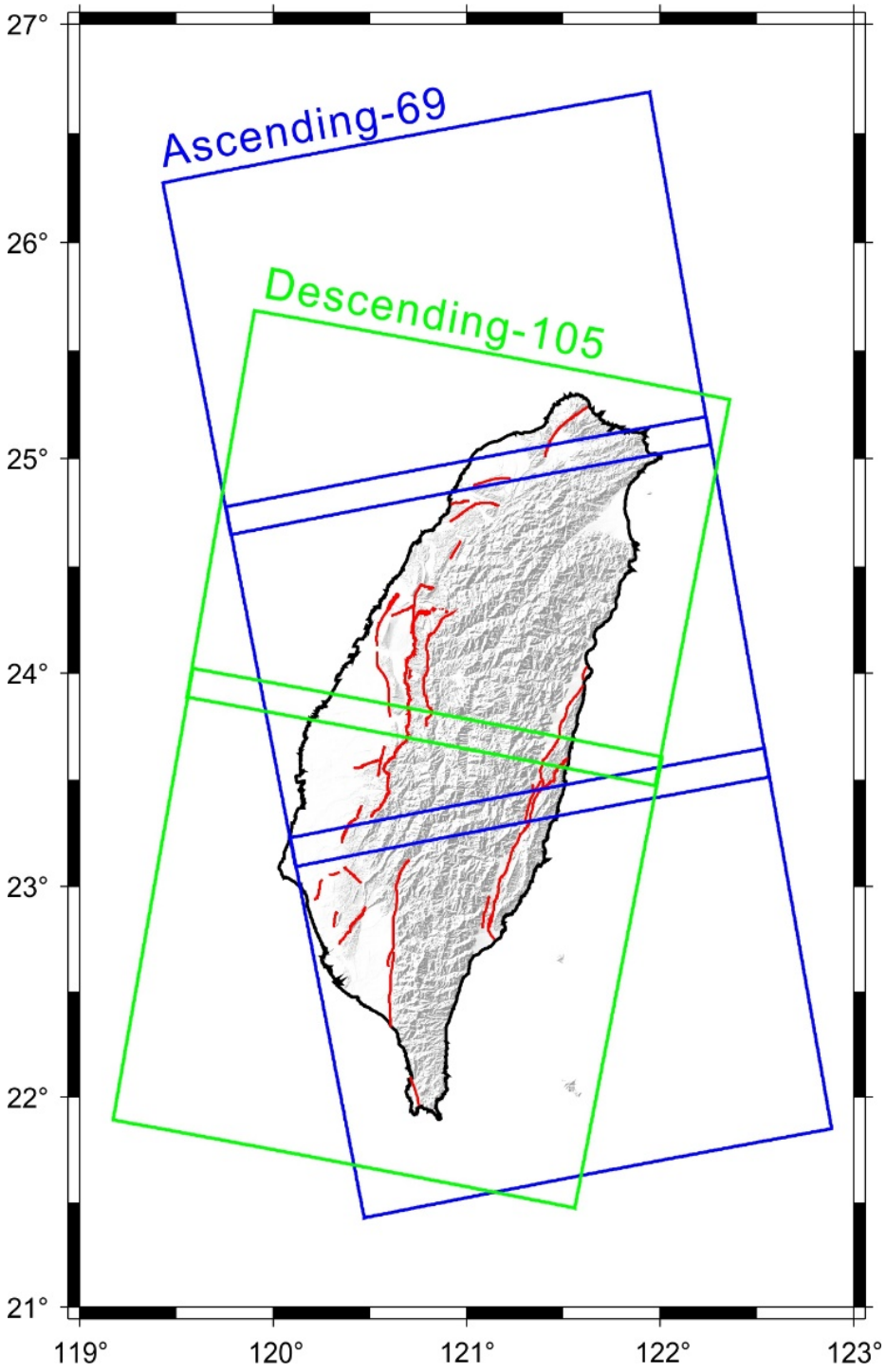


圖 1-2.4：Sentinel-1A 衛星影像於臺灣之升軌、降軌軌道涵蓋圖。
Figure 1-2.4: Ascending and descending tracks of Sentinel-1A satellite images.

1-3 本年度工作概述

1. 測量外業檢核（成功大學工作團隊負責）

   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（台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. 東部地區雷達影像分析（台灣大學工作團隊負責）

   提供「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」計畫內東部地區 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. 東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，評估滑移虧損速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。

6. 連續 GPS 近即時資料解算技術（台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 2019 年 9 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。

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 2002－2019 年 N 方向之殘差值 95% 信賴區間為-0.01 ± 24.90 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。換言之，GPS 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。

至 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，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 % 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。

就臺灣水平速度而言（圖 1-4.1），在桃竹苗地區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。其中，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，至斷層西側速度場降為 7 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層東南側速度值約為 9 mm/yr，竹東、斗煥坪及大平地斷層與新城斷層間速度值約為 6 mm/yr，新城斷層以北速度場約為 4 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。另外，卓蘭地區及獅潭地區之速度場轉為朝西北向運動，速度值約為 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，其速度由約 20 mm/yr 降至約 17 mm/yr；跨越九芎坑－木屐寮－六甲斷層系統，其速度由約 17 mm/yr 降至約 10 mm/yr。繼續往西之西部海岸平原，其速度皆小於 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

之速度約 12~15 mm/yr。後甲里斷層以東速度約 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，顯示旗山斷層有約 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並無顯著差異，速度值約 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，速度值由西向東約在 2~35 mm/yr。

就臺灣垂直速度場而言（圖 1-4.2），大臺北地區皆為穩定沉陷，沉降速率約在 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（平均沉降速率約為 10 mm/yr），而山區抬升的現象（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，小崗山斷層西側約有 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。

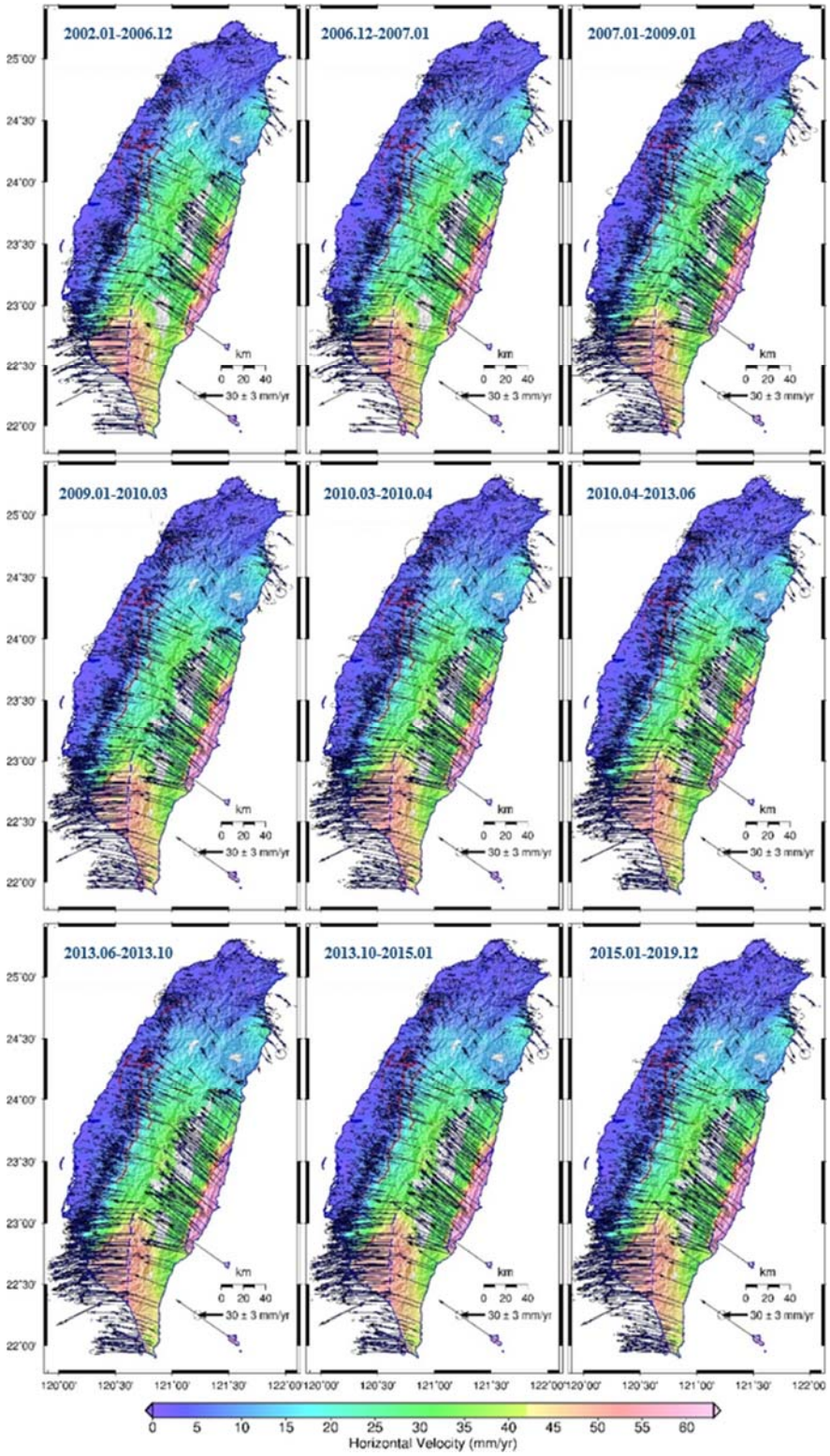


圖 1-4.1：臺灣地區相對於澎湖白沙站（S01R）之水平速度場。
Figure 1-4.1: Taiwan horizontal velocity field relative to Penghu Paisha station (S01R).

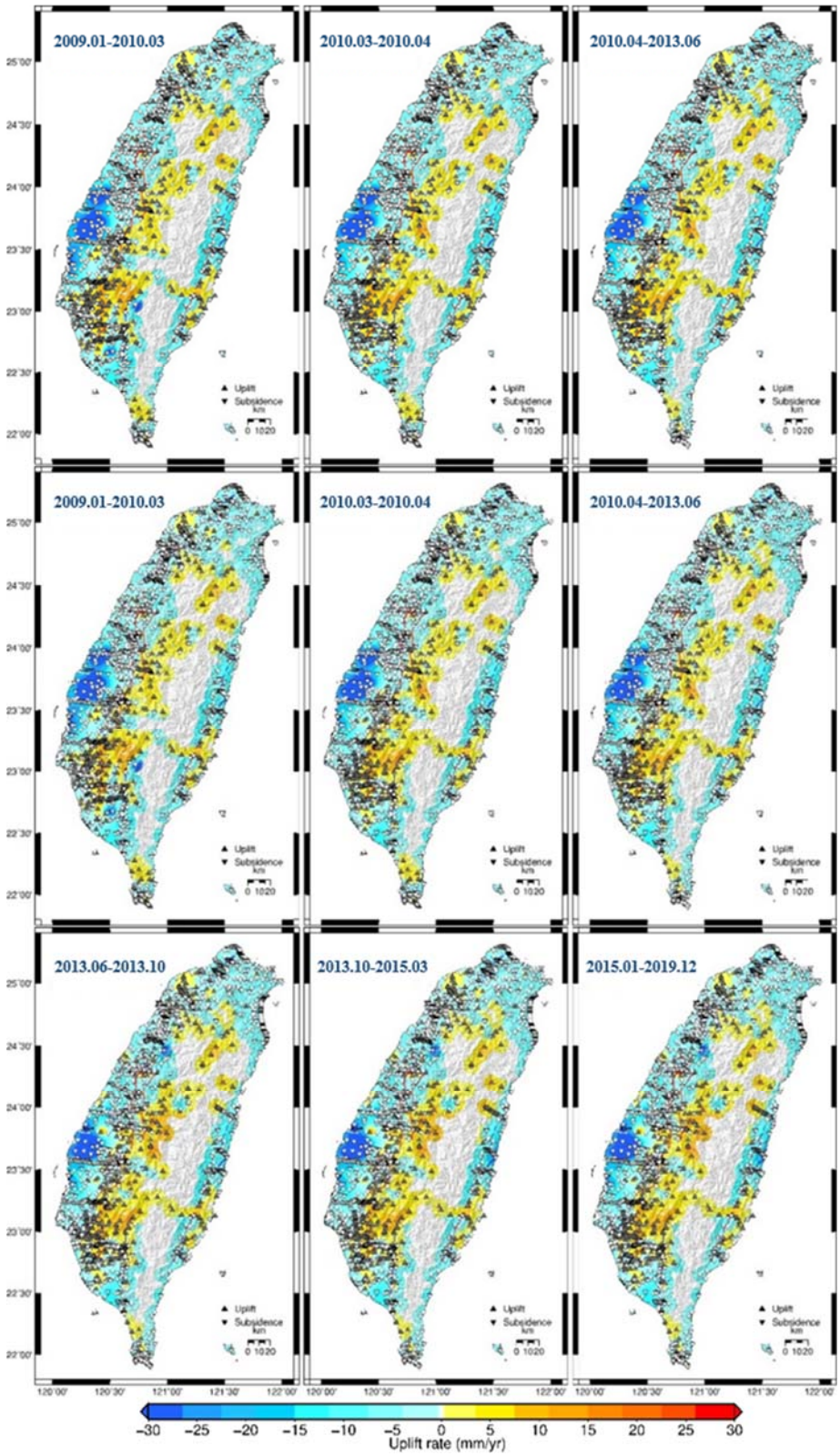


圖 1-4.2：2002 年至 2019 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降，大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、綠色邊框表示移動站、紅色邊框表示連續站。

Figure 1-4.2: Taiwan vertical velocity field from 2002 to 2019. 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.

1-4-2 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術（PS-InSAR）

PS-InSAR 主要工作除彙整臺灣南部地區之成果（圖 1-4.3），另加入 Sentinel-1 衛星進行分析（圖 1-4.4），衛星影像時間為 2015 年 4 月至 2019 年 9 月，並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（圖 1-4.5）。並針對南部地區斷層以 C 波段的 Sentinel-1 衛星進行時間序列分析，進而得知活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊（圖 1-4.6）。

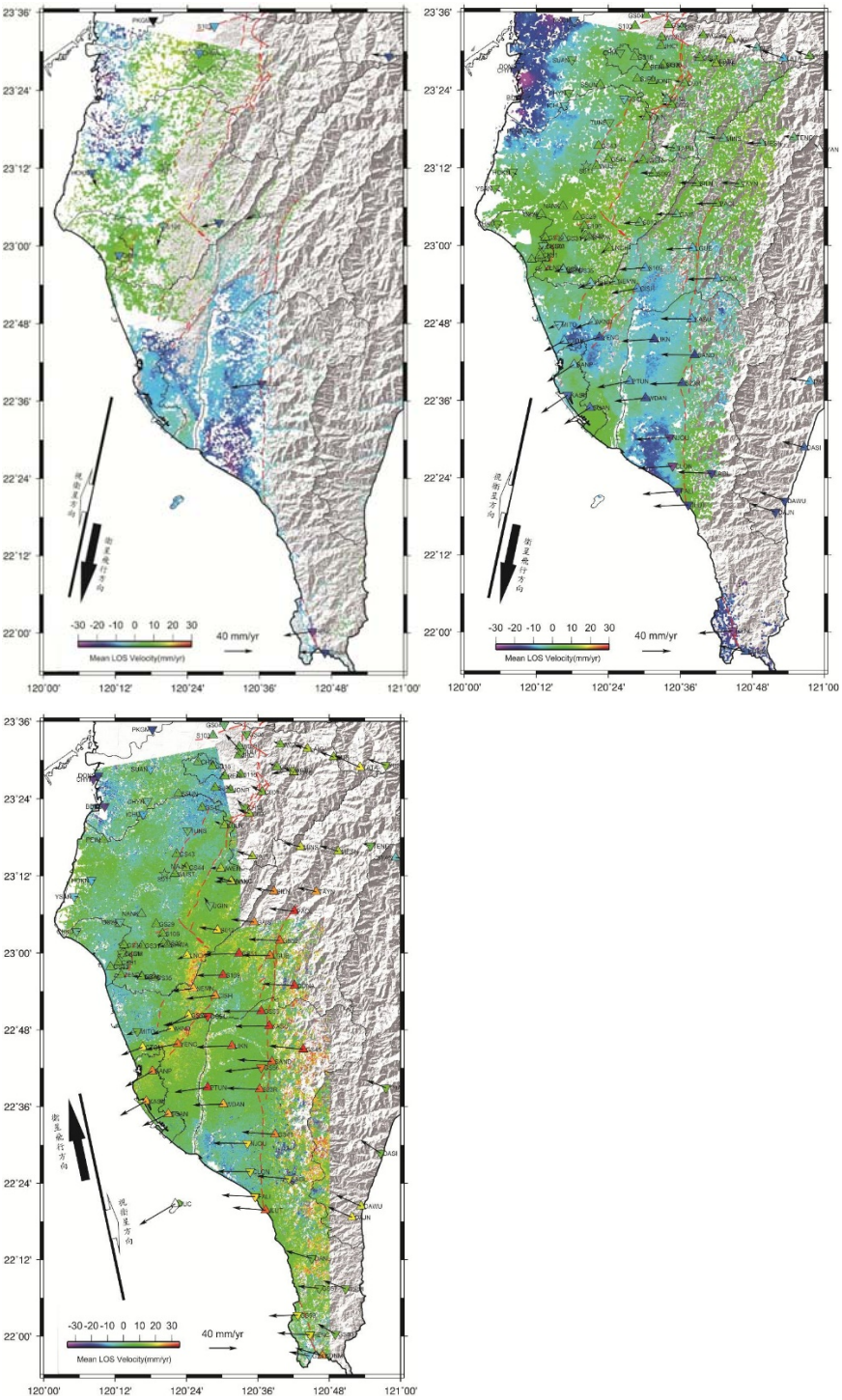


圖 1-4.3：ERS（1995/4~1999/9）（左上）、ENVISAT（2004/6~2008/9）（右上）、ALOS（2007/1~2011/3）（左下）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.3: ERS(1995/4~1999/9) (Left figure) 、 ENVISAT(2004/6~2008/9) (Right figure) 、 ALOS(2007/1~2011/3) (Lower figure). 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. Triangle represents land uplift; while inverse triangles represents land subsidence. Arrows represents horizontal velocity field related to reference point.

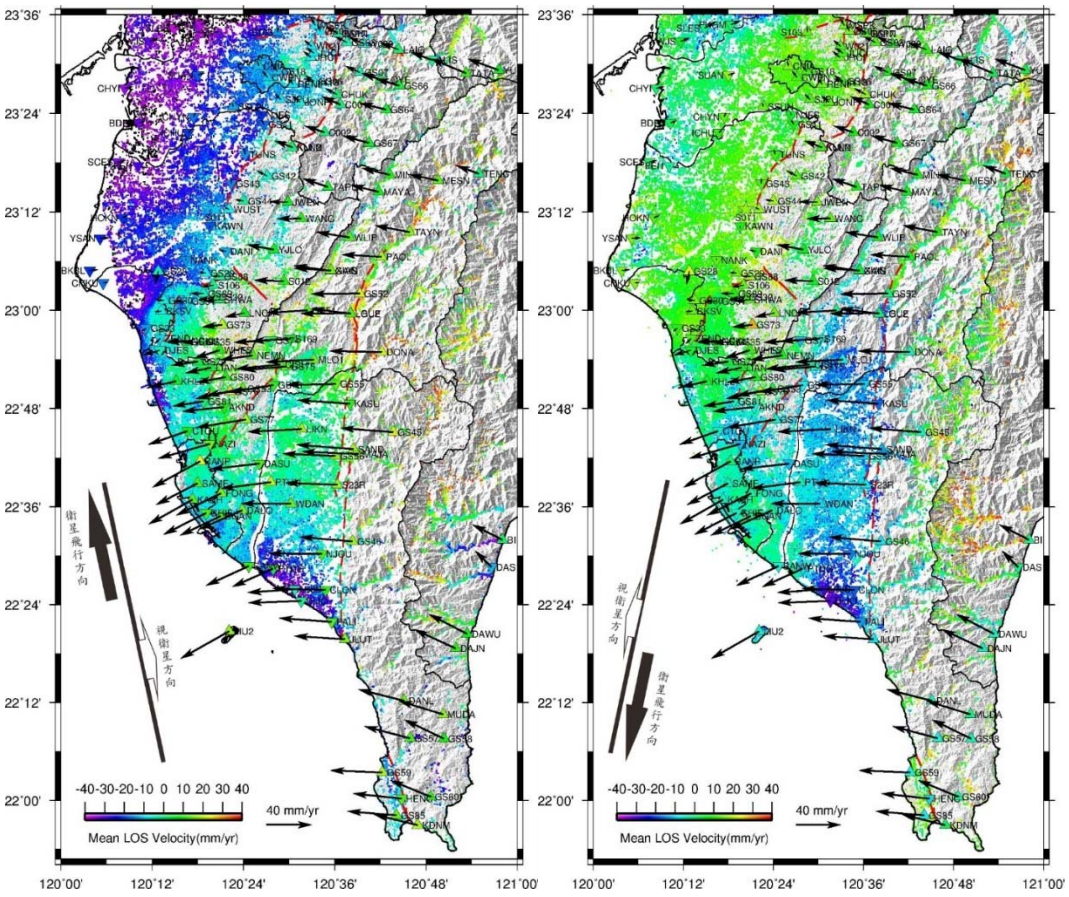


圖 1-4.4：SENTINEL-1 升軌影像（2015/10~2019/9）及降軌影像（2015/4~2019/9）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 S011，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 1-4.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of SENTINEL-1 images (asc: 2015/10~2019/9) and 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 continuous GPS station S011. 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.

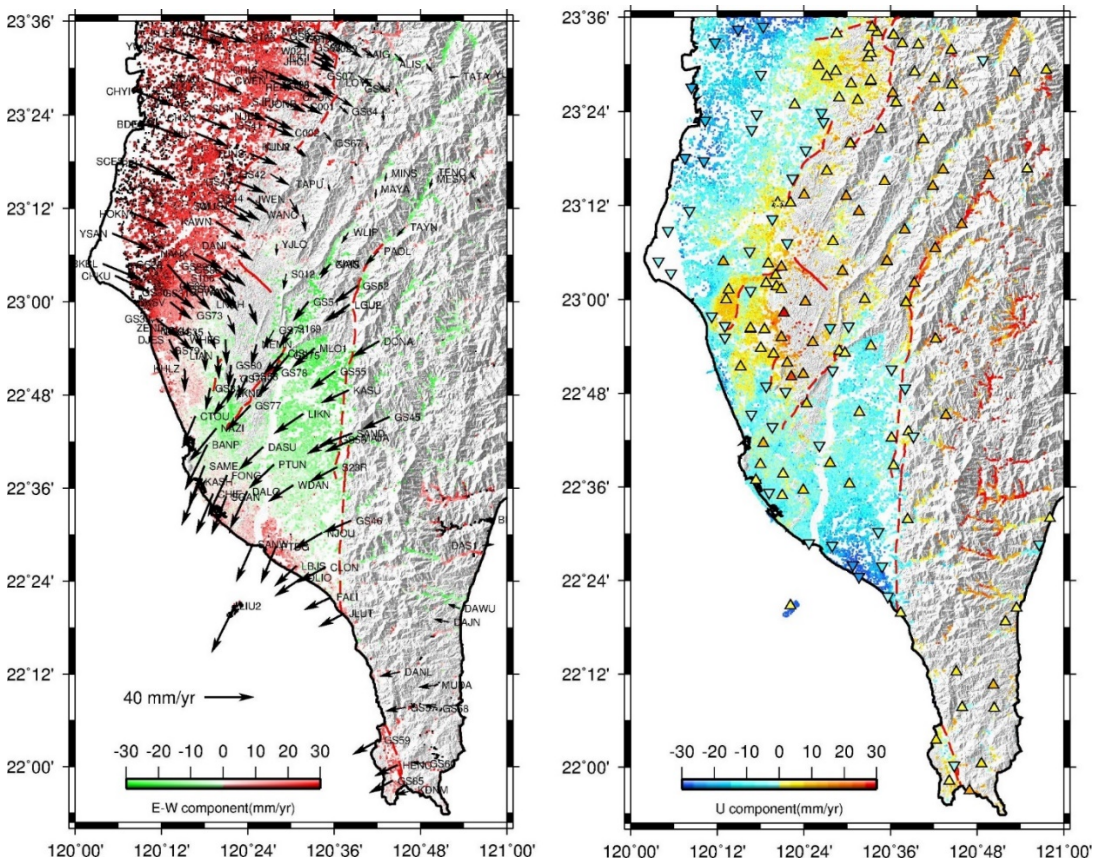


圖 1-4.5：SENTINEL-1 東西方向及垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。

Figure 1-4.5: 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.

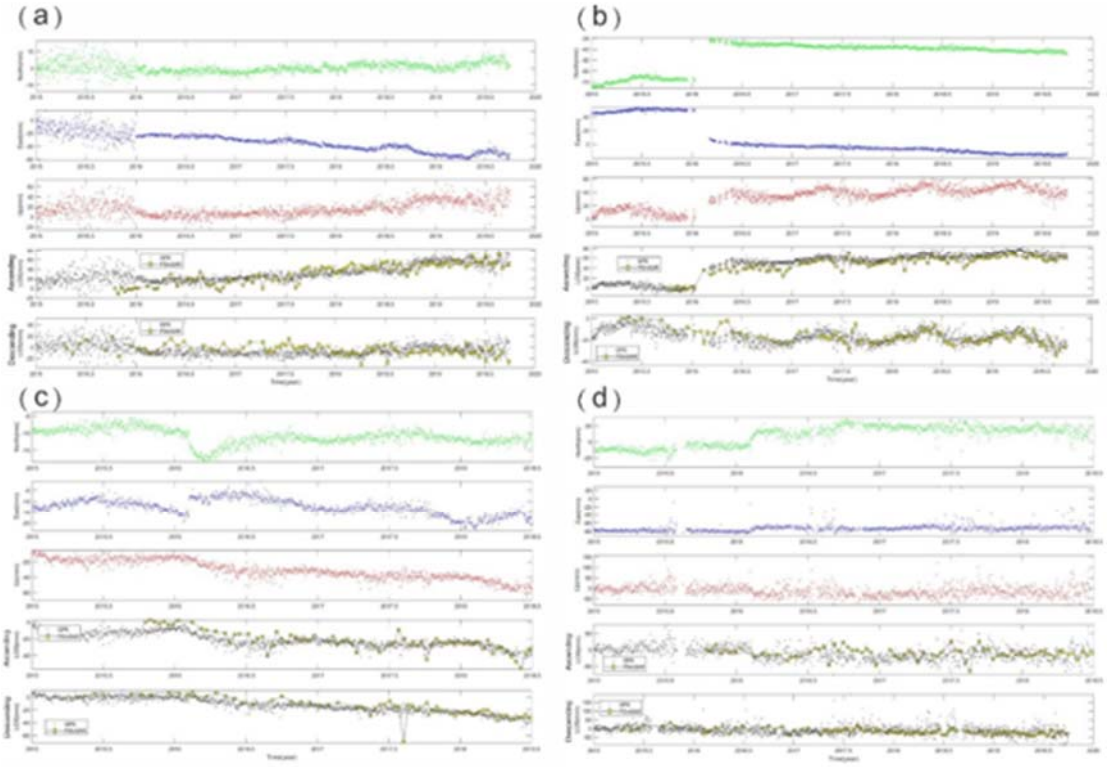


圖 1-4.6：SENTINEL-1（asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9）時期，(a) 針對六甲斷層分析，GPS 測站 GS42 相對於 GS43 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列；(b) 針對新化斷層分析，GPS 測站 S106 相對於 GS29 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列；(c) 針對後甲里斷層分析，GPS 測站 GS31 相對於 GS30 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列；(d) 針對旗山斷層分析，GPS 測站 LIKN 相對於 AKND 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 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 1-4.6: SENTINEL-1 period (asc: 2015/10~2019/9; des: 2015/4~2019/9). (a) For Liuchia fult analysis, comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS42 relative to GPS station GS43. (b) For Hsinhua fult analysis, comparison between PSInSAR and time series at GPS station S106 relative to GPS station GS29. (c) For Houchiali fult analysis, comparison between PSInSAR and time series at GPS station GS31 relative to GPS station GS30. (d) For Chishan fult analysis, comparison between PSInSAR and time series at GPS station LIKN relative to GPS station AKND. 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.

1-4-3 南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 1-4.7 至圖 1-4.9），南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。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（ 2.9 – 5.7 mm/yr），新化斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.9 mm/yr（5.1 – 14.7 mm/yr），後甲里斷層之加權平均滑移虧損速率為 2.4 mm/yr（2.4 – 4.3 mm/yr），左鎮斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.1 mm/yr（0.9 – 5.5 mm/yr），小崗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.3 mm/yr（5.9 – 13.0 mm/yr），旗山斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.0 mm/yr（3.0 – 9.5 mm/yr），潮州斷層之加權平均滑移虧損速率為 3.3 mm/yr（0.0 – 8.5mm/yr），恆春斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.9 mm/yr（2.8 – 17.0 mm/yr）。

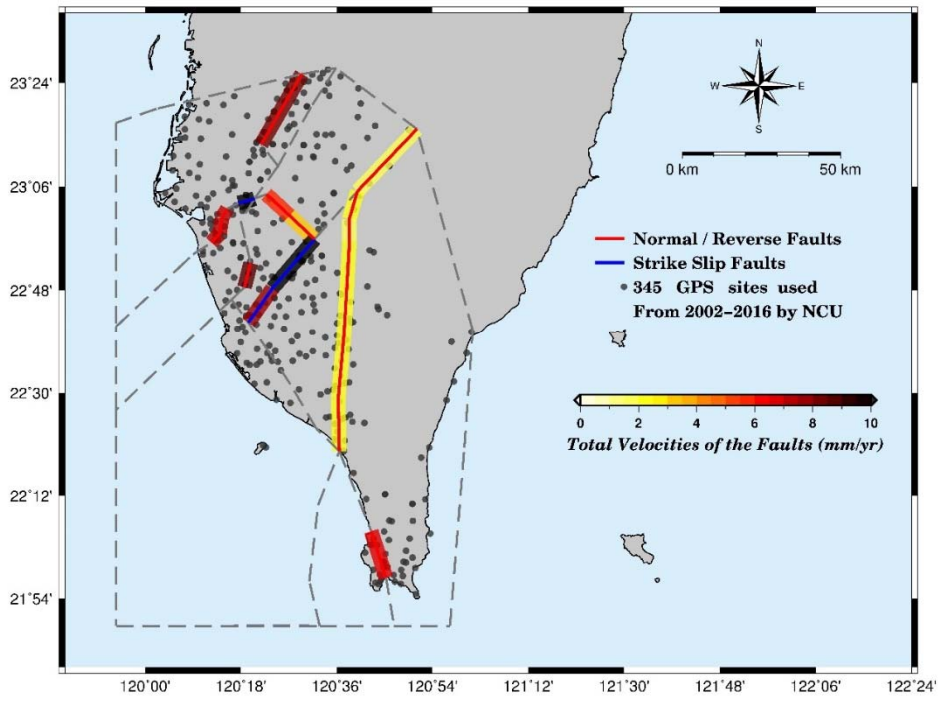


圖 1-4.7：BLOCKS 模型斷層模擬面總滑移速率。
Figure 1-4.7: The total slip rates of BLOCKS model.

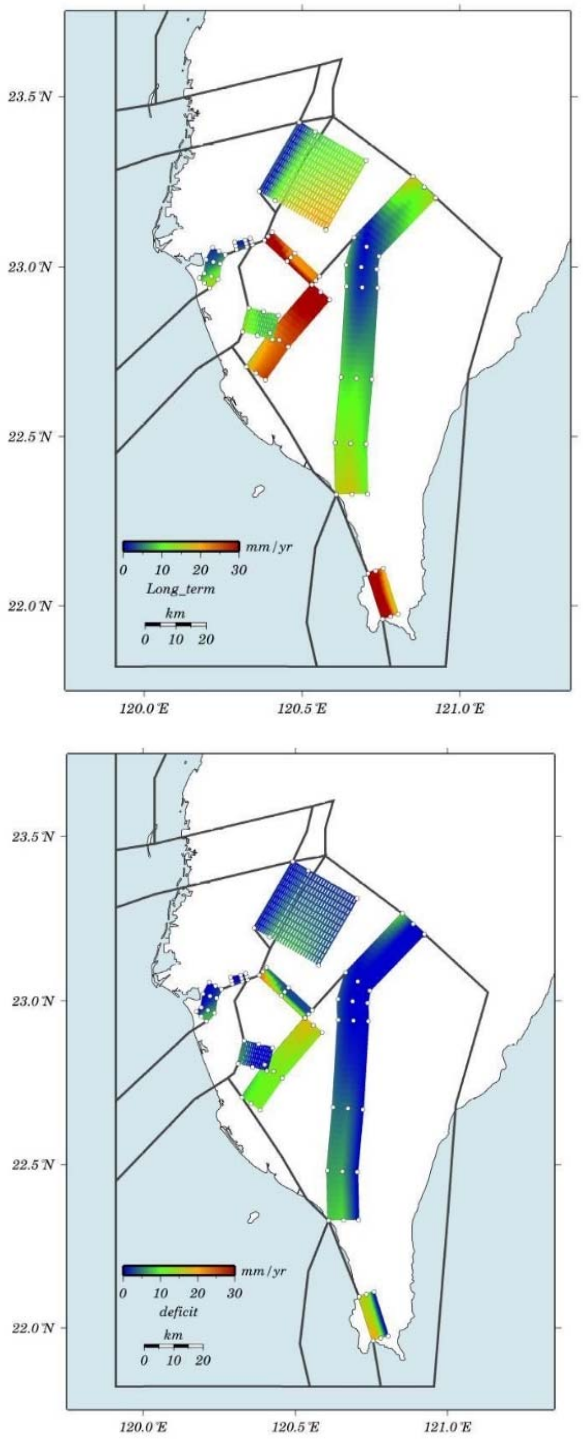


圖 1-4.8：DEFNODE 模型的斷層長期滑移速率、滑移虧損率。
Figure 1-4.8: Long-term fault slip rate and deficit rate of DEFNODE model.

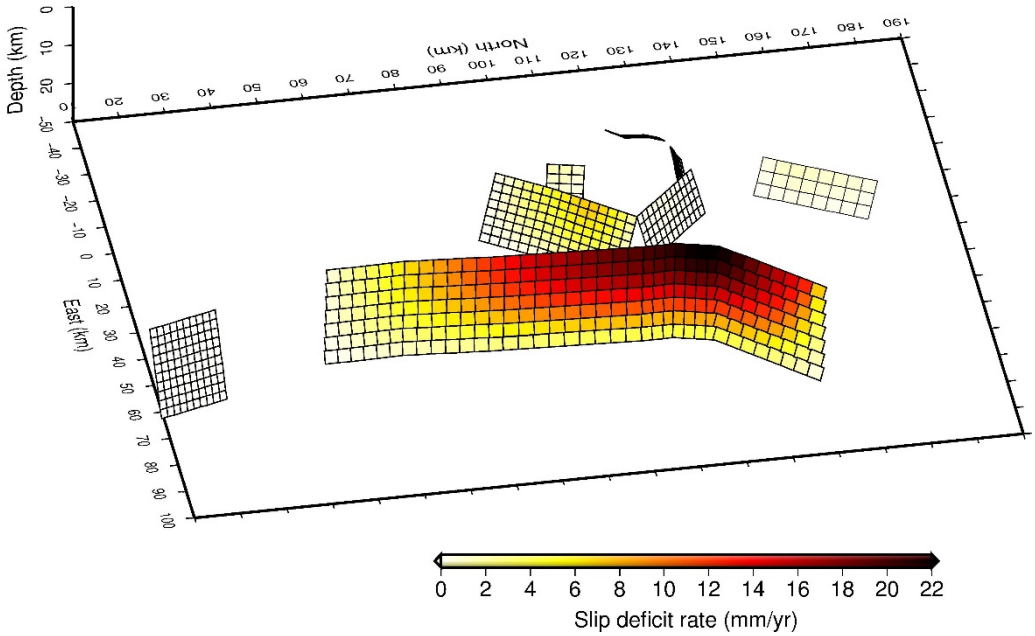


圖 1-4.9：基線應變模型的斷層滑移虧損率。

Figure 1-4.9: Fault slip deficit rate of baseline inversion model.

第二章、大地測量資料分析

2-1 GPS 連續站解算成果分析

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、國土測繪中心及經濟部水利署等單位，約 500 站。以下為計算每日坐標解之方法與流程。

2-1-1 GPS 資料品質檢測

以往報告所使用的解算軟體 GIPSY-OASIS 於 2018 年中即不再提供 ITRF2008 坐標框架之軌道參數，因此本年度改使用新版本 GIPSYX 以目前最新的 ITRF2014 為坐標框架進行全台連續 GPS 測站坐標重新解算。圖 2-1.1 為 S01R 測站利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GIPSYX（紅點）於 2017 至 2019 年解算之時間序列。可看出利用新舊軟體解算之結果大致相同，顯示使用 GIPSYX 解算結果之可靠度。此外，舊軟體解算結果於 2018 年 4 月左右因軌道改變而形成的跳動，也可成功的移除。

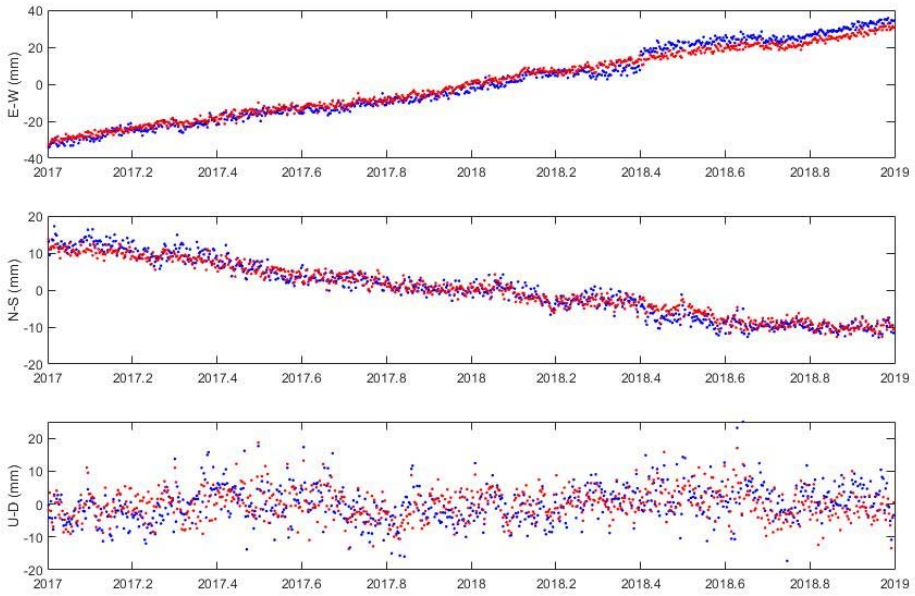


圖 2-1.1：利用 GIPSY-OASIS（藍點）與 GIPSYX（紅點）解算之連續 GPS 測站 S01R 時間序列。
Figure2-1.1: Time series data of continuous GPS station S01R processed by GIPSY-OASIS (blue) and GIPSYX (red).

另外，解算過程中也發現早期（約 2002-2015 年），氣象局測站資料大多使用 Trimble 5700 型號之記錄器，其記錄器對於時間紀錄上有嚴重的漂移現象，導致解算結果相當離散。為修正此問題，需重新針對原始資料轉檔再做計算。圖 2-1.2 即為以 CTOU 測站為例展示利用重新轉檔前（紅點）RINEX 檔案與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）RINEX 檔案之每日坐標解算結果。

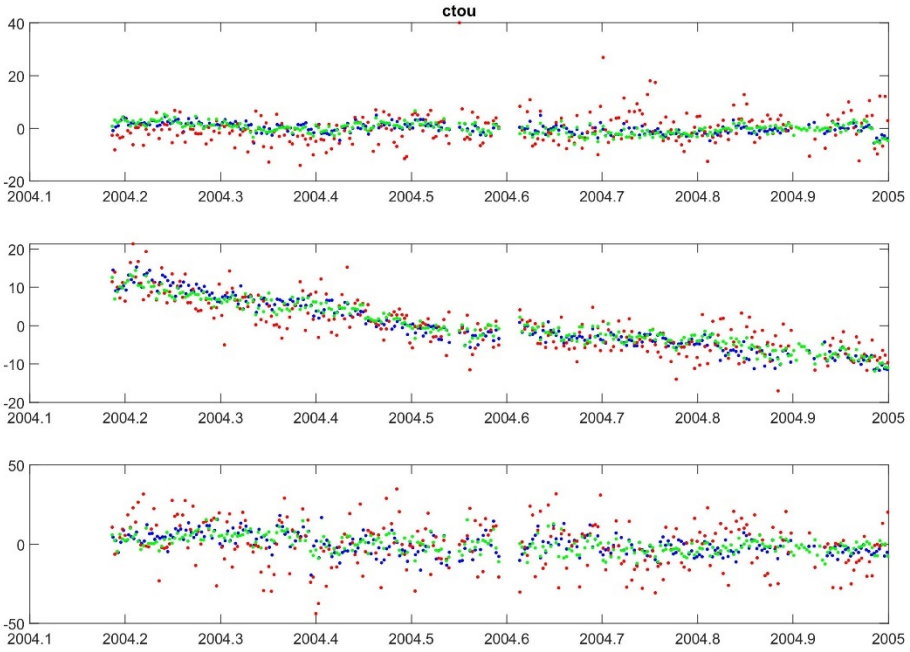


圖 2-1.2：利用重新轉檔前（紅點）與重新轉檔後（綠點：GIPSY-OASIS、藍點：GIPSYX）解算之連續 GPS 測站 CTOU 時間序列。

Figure2-1.2: Time series data of continuous GPS station CTOU processed by original RINEX file (red) and reconvert RINEX file (green: GIPSY-OASIS, blue: GIPSYX).

2-1-2 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，反應地表與地下構造的運動情形，可提供地殼變形的訊息。本年度報告分析 1993 年至 2020 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 為以地調所 GS40、GS15、GS51 及 GS63 測站分別展示代表具有穩定速度的測站、因地震或是天線更換跳階位移或震後呈指數衰減的測站，以及受季節性變化影響明顯之測站。

圖 2-1.4 及圖 2-1.5 為彙整歷史資料至 2020 年 9 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，此結果與過去結果約略相同。

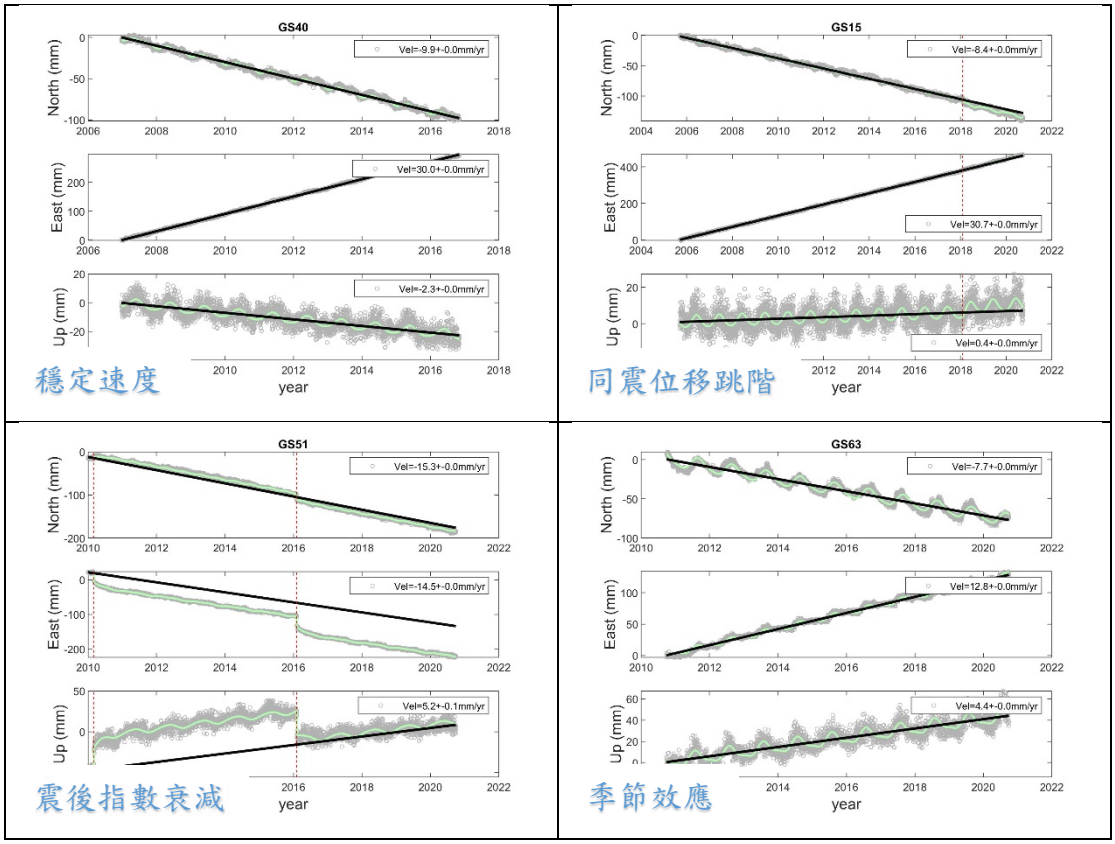


圖 2-1.3：不同運動機制之 GPS 測站時間序列。

Figure 2-1.3: Stable velocity, coseismic offset, post-seismic exponential decay and seasonal effect in GPS time series.

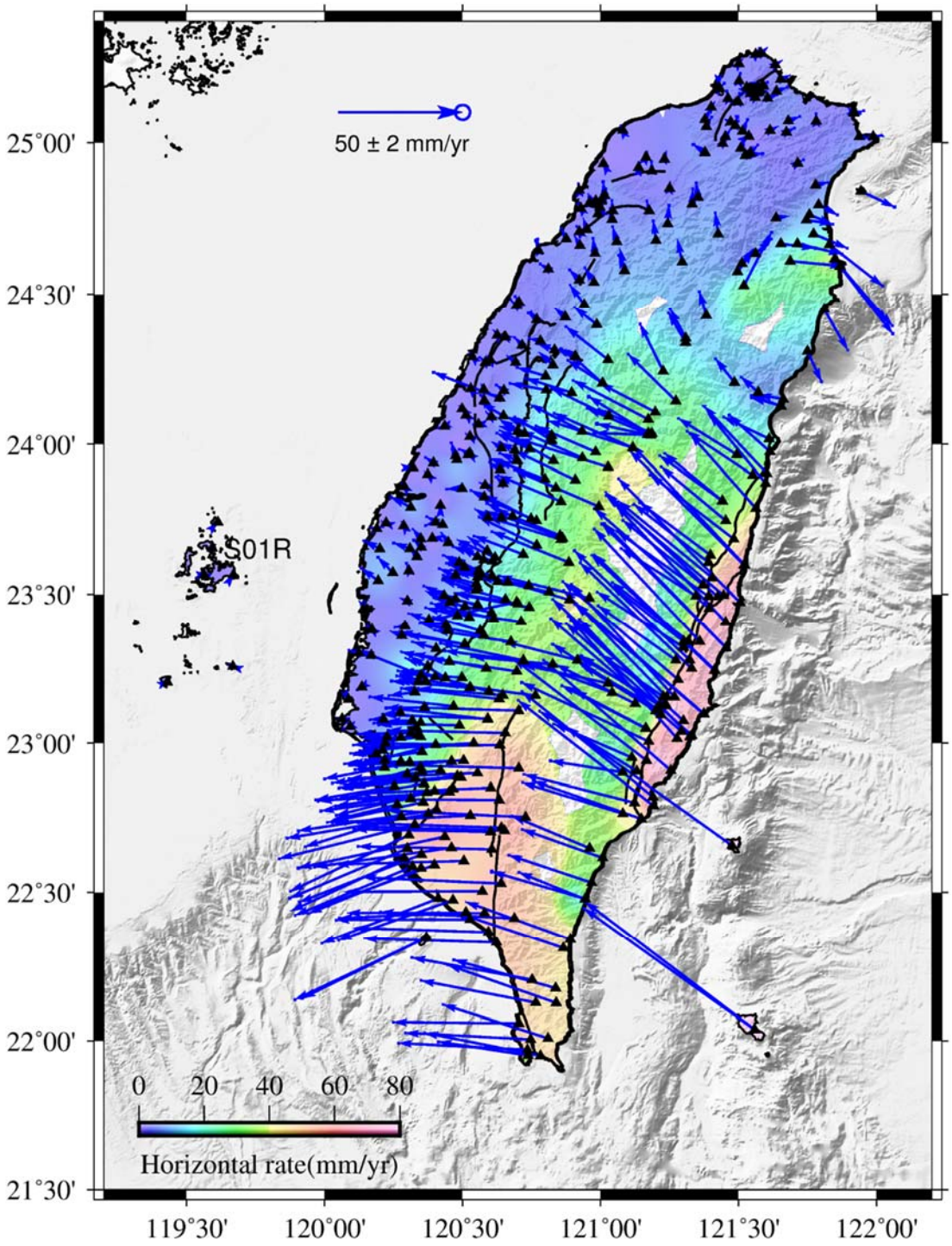


圖 2-1.4：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、震後位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙站之水平年速度場。

Figure 2-1.4: Horizontal velocity field with respect to to S01R from 500 continuous GPS stations calculated by removing coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion, and unusual data by September of 2020.

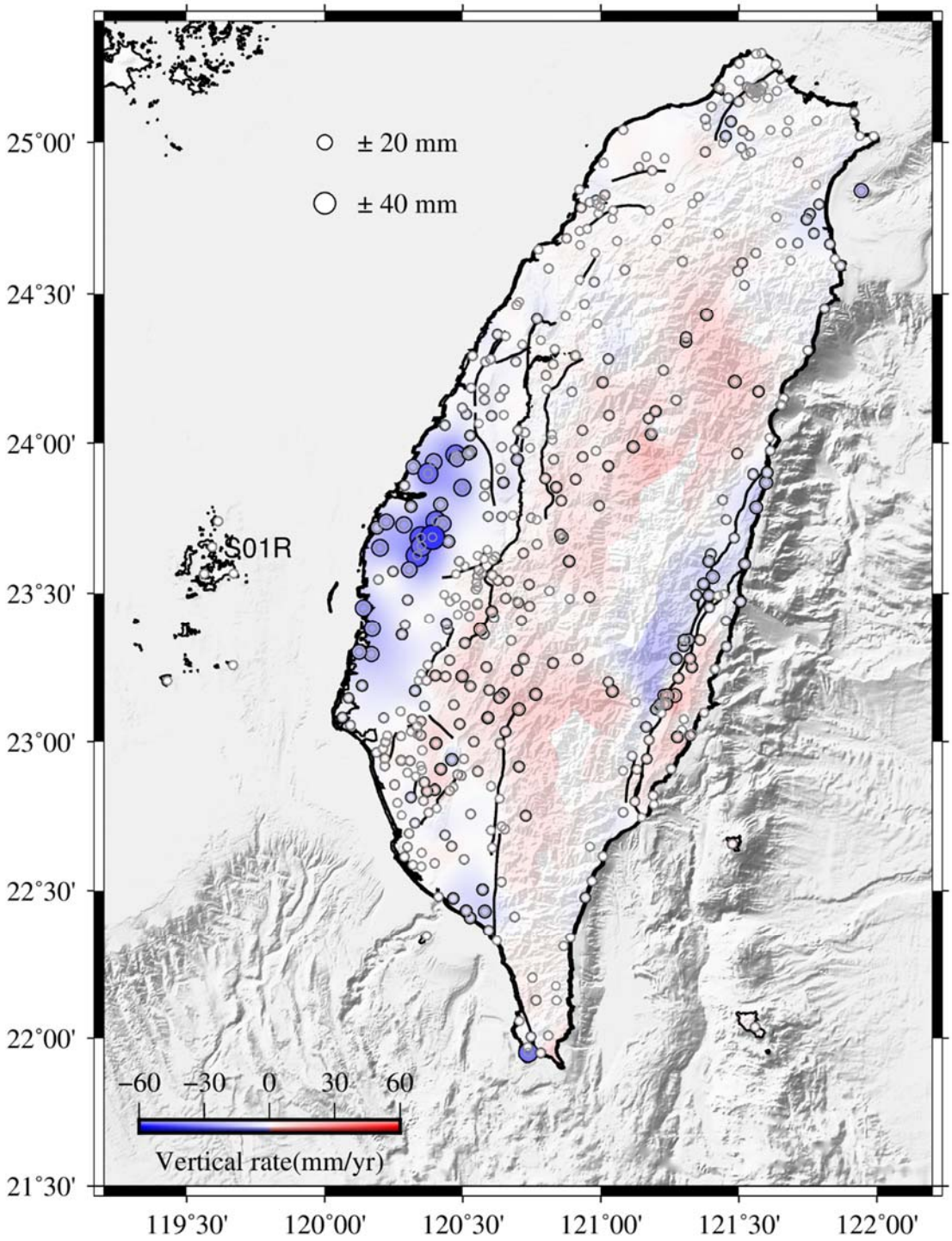


圖 2-1.5：整合歷史資料至 2020 年 9 月，並修正同震位移、週期性變化及測站異常後，相對 S01R 澎湖白沙 S01R 測站之垂直年速度場。圓圈代表速度場誤差值的大小。

Figure 2-1.5: Vertical velocity field with respect to S01R from 500 continuous GPS stations calculated with removing coseismic deformation, post-seismic deformation, periodic motion and unusual data. Circle indicates the size of error of the velocity field.

2-2 今年度（2020 年）GPS 移動站檢核分析

本年度至 10 月為止，GPS 移動站部分台北地區於 3 月 9 日至 20 日完成 73 個點位施測、恆春地區於 4 月 6 日至 9 日完成 37 個點位施測、桃竹苗地區於 5 月 4 日至 19 日完成 94 個點位施測、嘉南地區於 6 月 1 日至 22 日完成 167 個點位施測、高屏地區於 7 月 13 日至 24 日完成 103 個點位施測、中部地區於 8 月 11 日至 20 日完成 153 個點位施測、花東地區於 9 月 1 日至 15 日完成 102 個點位施測、宜蘭地區於 10 月 5 日至 8 日完成 38 個點位施測，共計完成 767 點 GPS 移動站的施測（圖 2-2.1）。

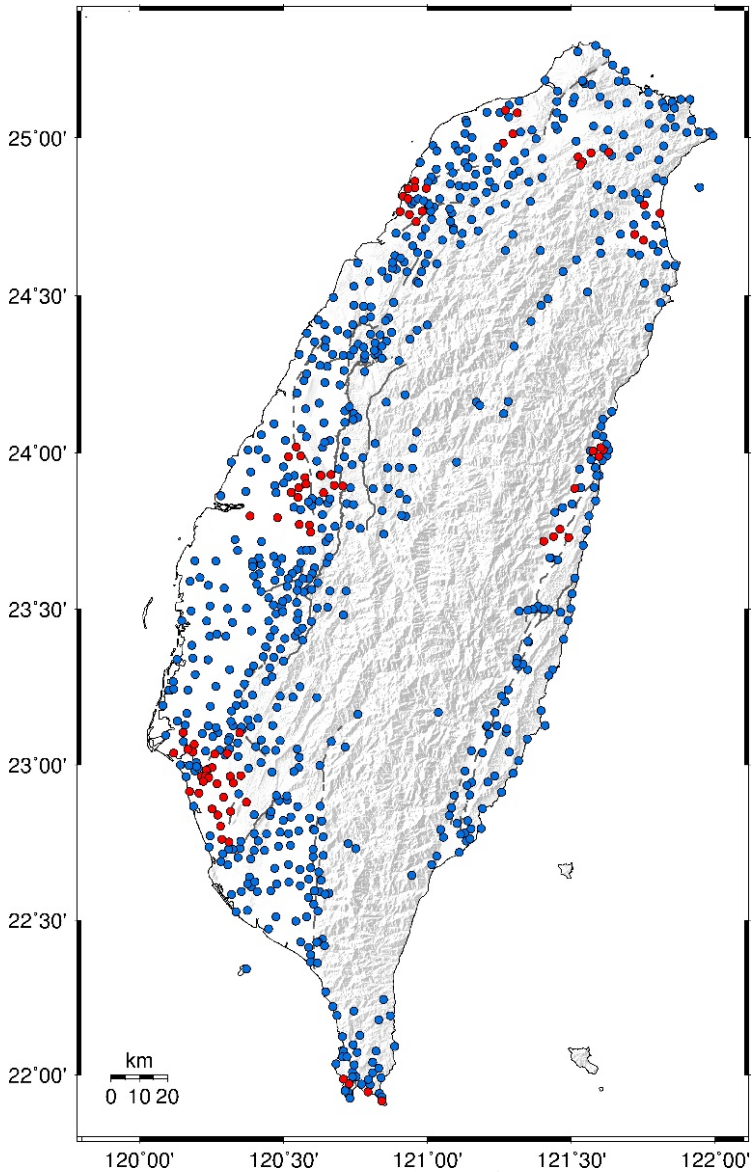


圖 2-2.1：已完成施測的 GPS 移動站與檢核點位分布圖。藍色圓圈為施測點位，紅色圓圈為檢核點位。

Figure 2-2.1: Distribution of surveyed campaign-mode GPS stations and check points. Blue circles are surveyed stations. Red circles are check points.

2-2-1 GPS 移動站檢核

根據測量外業檢核規範要求，於全臺灣 8 個地區進行 GPS 移動站檢核測量，每區抽樣 GPS 移動站分區數量 10%（小數點以下四捨五入）進行檢核，並採取 GPS 靜態測量進行觀測，於同一個測站連續觀測 6 小時以上。

檢核成果計算採研究用軟體 Bernese 5.2，加入 IGS 精密星曆解算衛星軌道資訊，及長期觀測之多個連續站進行約制網型平差後求得測站坐標資訊，其中重複基線須小於 5 mm + 0.2 ppm · L 規範（基線長 m）。

GPS 移動站檢核截至 10 月底為止已完全臺灣 8 個分區之檢核測量，台北地區於 3 月 19 日至 24 日完成 9 個點位施測檢核、恆春地區於 4 月 10 日至 11 日完成 4 個點位施測檢核、桃竹苗地區於 4 月 30 日至 5 月 1 日完成 10 個點位施測檢核、嘉南地區於 6 月 10 日至 22 日完成 19 個點位施測檢核、高屏地區於 7 月 15 日至 16 日完成 10 個點位施測檢核、中部地區於 8 月 17 日至 20 日完成 15 個點位施測檢核、花東地區於 9 月 14 日至 16 日完成 10 個點位施測檢核、宜蘭地區於 10 月 19 日至 20 日完成 4 個點位施測檢核（表 2-2.1）。

台北地區共有 73 個移動站點位數，故在此區選擇 9 個點位進行檢核，共有 36 條基線。本區之基線長度落在 1320 m 至 39100 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 12.8 mm 之間，計算後的基線差在 0.5 mm 至 10.7 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

恆春地區共有 37 個移動站點位數，故在此區選擇 4 個點位進行檢核，共有 6 條基線。本區之基線長度落在 2600 m 至 15850 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 8.2 mm 之間，計算後的基線差在 0.2 mm 至 4.3 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

桃竹苗地區共有 94 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 45 條基線。本區之基線長度落在 2000 m 至 14250 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 7.9 mm 之間，計算後的基線差在 0.2 mm 至 6.1 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

嘉南地區共有 167 個移動站點位數，故在此區選擇 17 個點位進行檢核，共有 136 條基線。本區之基線長度落在 1320 m 至 25160 m，基線差規範值在 5.3 mm 至 10.0 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 8.9 mm 間，此區測量結果

皆符合規範。

高屏地區共有 103 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 45 條基線。本區之基線長度落在 2700 m 至 22830 m，基線差規範值在 5.5 mm 至 9.6 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 5.9 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

中部地區共有 153 個移動站點位數，故在此區選擇 15 個點位進行檢核，共有 105 條基線。本區之基線長度落在 2255 m 至 34400 m，基線差規範值在 5.4 mm 至 11.9 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 8.6 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

花東地區共有 102 個移動站點位數，故在此區選擇 10 個點位進行檢核，共有 45 條基線。本區之基線長度落在 1290m 至 38740 m，基線差規範值在 5.2 mm 至 12.7 mm 之間，計算後的基線差在 0.1 mm 至 5.4 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

宜蘭地區共有 38 個移動站點位數，故在此區選擇 4 個點位進行檢核，共有 6 條基線。本區之基線長度落在 6286 m 至 11089 m，基線差規範值在 6.2 mm 至 7.2 mm 之間，計算後的基線差在 1.2 mm 至 4.1 mm 間，此區測量結果皆符合規範。

表 2-2.1：GPS 移動站施測與檢核時間表。
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	檢核結果細項說明
				施測日期	檢核日期
3	73	台北	**9**	2020/03/09 ~ 2020/03/20	2020/03/19 ~ 2020/03/24
4	37	恆春	**4**	2020/04/06 ~ 2020/04/09	2020/04/10 ~ 2020/04/11
5	94	桃竹苗	**10**	2020/05/04 ~ 2020/05/19	2020/04/30 ~ 2020/05/01
6	167	嘉南	**19**	2020/06/01 ~ 2020/06/22	2020/06/10 ~ 2020/06/22
7	103	高屏	**10**	2020/07/13 ~ 2020/07/24	2020/07/15 ~ 2020/07/16
8	153	中部	**15**	2020/08/11 ~ 2020/08/20	2020/08/17 ~ 2020/08/20
9	102	花東	**10**	2020/09/01 ~ 2020/09/15	2020/09/14 ~ 2020/09/16
10	38	宜蘭	**4**	2020/10/05 ~ 2020/10/08	2020/10/19 ~ 2020/10/20

2-2-2 GPS 移動站解算流程與坐標精度分析

本計畫 GPS 移動站資料解算採用廣義約制台灣 5 個連續站於 ITRF[2014]坐標框架下之坐標，此 5 個連續站分別為陽明山站（YMSM）、鳳林站（FLNM）、北港站（PKGM）、墾丁站（KDNM）、澎湖站（S01R）、金門站（KMNM）。為了確保此 5 個連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，同時將此 5 個台灣連續站資料與 IGS（International GPS Service）國際連續站資料進行聯合解算，求解此 5 個台灣連續站於 ITRF[2014]框架之坐標時間序列。IGS 國際連續站分別為中國北京站（BJFS）、澳洲科科島站（COCO）、南韓大田站（DAEJ）、澳洲達爾文市站（DARW）、美國關島站（GUAM）、中國拉薩站（LHAZ）、菲律賓馬尼拉站（PIMO）、台灣新竹站（TNML）及日本筑波站（TSKB）。我們利用 IGS 公告各連續站於 ITRF[2014]坐標框架下之坐標及速度，以線性關係式推出各個連續站於任一觀測時刻之坐標，並約制此國際連續站之坐標，求解台灣 5 個連續站於 ITRF[2014]坐標框架之時間序列，確認此 5 個台灣連續站坐標時間序列之可靠度與穩定性，並求出各測站之線性速度，即可以任一觀測時刻之作標，作為移動站解算時之約制條件。

在 GPS 移動站資料解算流程部分，本計畫採用 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 International Earth Rotation Service 的 Bulletin B 公佈值，修正 UTC 與 UT1 之差值，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。

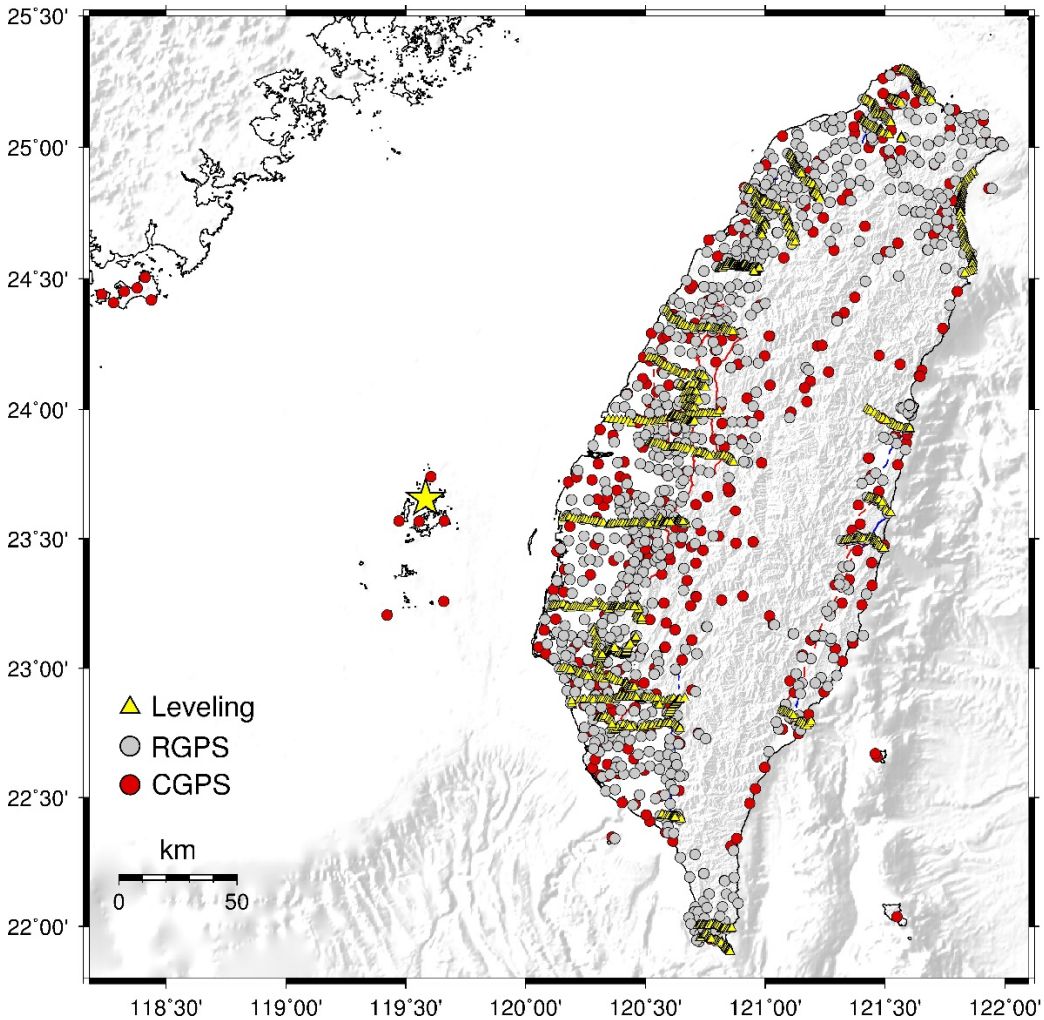


圖 2-2.2：臺灣地殼變形監測網。灰色圓圈為 GPS 移動站，紅色圓圈為 GPS 連續站，黃色三角形為精密水準點位，黃色星號為澎湖 S01R 連續站。紅色實線與藍色虛線為中央地質調查所公告之活動斷層分布位置。

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 S01R continuous GPS station. Red solid lines and blue dashed lines represent the active faults reposrted by the CGS.

2-2-3 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 解算 GPS 移動站成果之比較

本計畫分別採用兩套軟體：Bernese 與 GAMIT/GLOBK 處理全臺灣的 GPS 移動站資料，並且估算坐標的速度，所涵蓋的年份為 2002－2019 年。

本計畫採用廣義約制（generalized constraint）方式使用 GAMIT/GLOBK 軟體，以計算各站的每日解。廣義約制的方式採用一組具有可靠先驗坐標與速度場的連續站當約制站，利用其先驗誤差決定權值。在接下來將誤差最小化的計算中，允許每日網形在疊加過程中有小幅度的平移、旋轉與尺度調整。因為選做約制站大多為穩固的國際 IGS 連續站，因此每日的資料中的粗差（outliers）可以容易被偵測且排除（Herring et al. 2015）。本案採用臺灣附近的國際 IGS 站，按照站名字母順序為：中國北京（BJFS）、澳洲科科島（COCO）、南韓大田（DAEJ）、澳洲達爾文市（DARW）、美國關島（GUAM）、中國拉薩（LHAZ）、菲律賓馬尼拉（PIMO）、臺灣新竹（TNML）、臺灣桃園（TWTF）等。計算的框架為 International Terrestrial Reference Frame 2014，簡稱 ITRF14（Altamimi et al. 2016）。在採用 IGS 站進行坐標速度的計算上，不同的約制方式並對最後坐標速度估值的影響量很小，沒有顯著的差異（鄭凱謙等，2019），不過為了比較上能有較高的一致性，本計畫在 Bernese 軟體上也選擇採用相同的約制方式進行每日解的計算。

本計畫比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 分別解算的移動站每日解，計算各移動站的水平、垂直速率估值，剔除不合理的移動站，例如：時間涵蓋長度有明顯差異者，共 664 個移動站進行比較與統計。整體而言，兩種軟體的結果相當類似，水平方向的相關係數達 0.99 以上，垂直方向相關係為 0.90，相關性稍低於水平方向。且在垂直速度上 Gamit 解有稍微高估的情況。移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果比較如圖 2-2.3。速度估值的差異（Gamit 結果減去 Bernese 結果）在南北、東西、垂直三分量上平均分別為 1.28、0.49、2.29 mm/year，差值的直方圖與直方圖的常態分佈曲線如圖 2-2.4。結果顯示兩種解算軟體的水平速度估值差值小於 2 mm/year，垂直方向差異稍大，達 2.29 mm/year。且三分量的速度估值的差異都為正，代表 Gamit 結果稍微高於 Bernese 結果。造成此速度差值的原因之一是殘餘的系統誤差，因位大部份軟體在解算 GPS 資料時，雖然都有提供若干選項，但同時也在內部有許多處理方法沒有開放給使用者調整，

例如在多路徑效益、天線相位中心、非長期線性（nonsecular）的地表信號等（Belwitt, 2015），導致不同軟體的解算結果存在少量的系統性。然而因數量級不大，對於後續的逆推影響並不顯著。

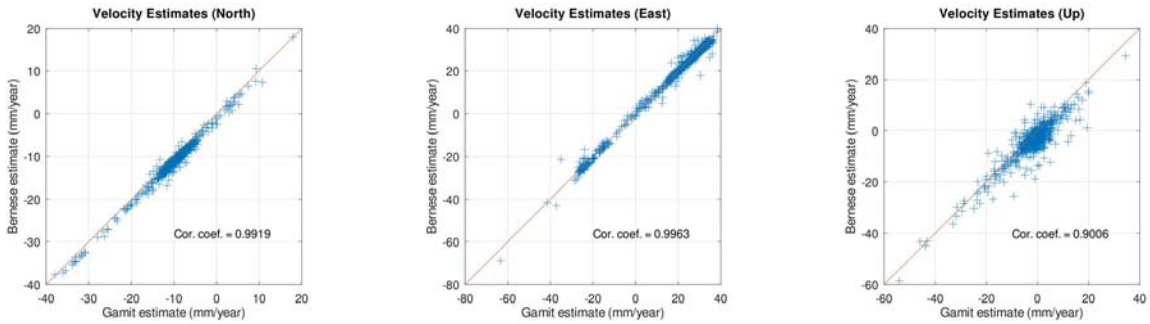


圖 2-2.3：移動站速度南北、東西、垂直三分量的估算結果。

Figure 2-2.3: Velocity estimates of the survey GPS sites in the north, east and up components.

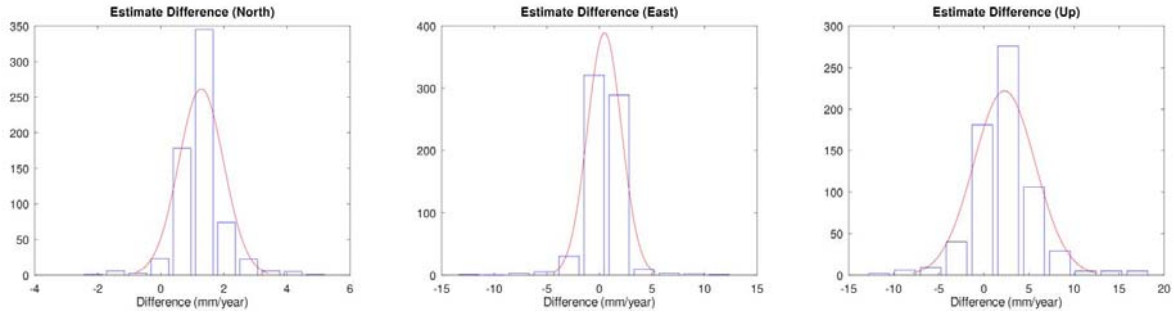


圖 2-2.4：兩種軟體解算的速度估值的差值（Gamit 結果減去 Bernese 結果）直方圖，紅色曲線為直方圖的常態分佈曲線迴歸解果。差值在南北、東西、垂直三分量上平均分別 1.28、0.49、2.29 mm/year。

Figure 2-2.4: Histograms for the velocity estimate difference (Gamit solution minus Bernese solution) in the north, east and up components. The average diference are +1.28, +0.49, +2.29 mm/year in the north, east and up components.

2-3 今年度（2020 年）精密水準測量精度分析

水準測量是獲得高精度相對高程的測量方法。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。

2020 年 9 月底前所獲得共計 944 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 932 個測段（圖 2-3.1a)，佔所有測段比例之 98.7 %。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 96.4 %（910 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 99.2 %（936 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 905 個測段達測段達 95.9 %（圖 2-3.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

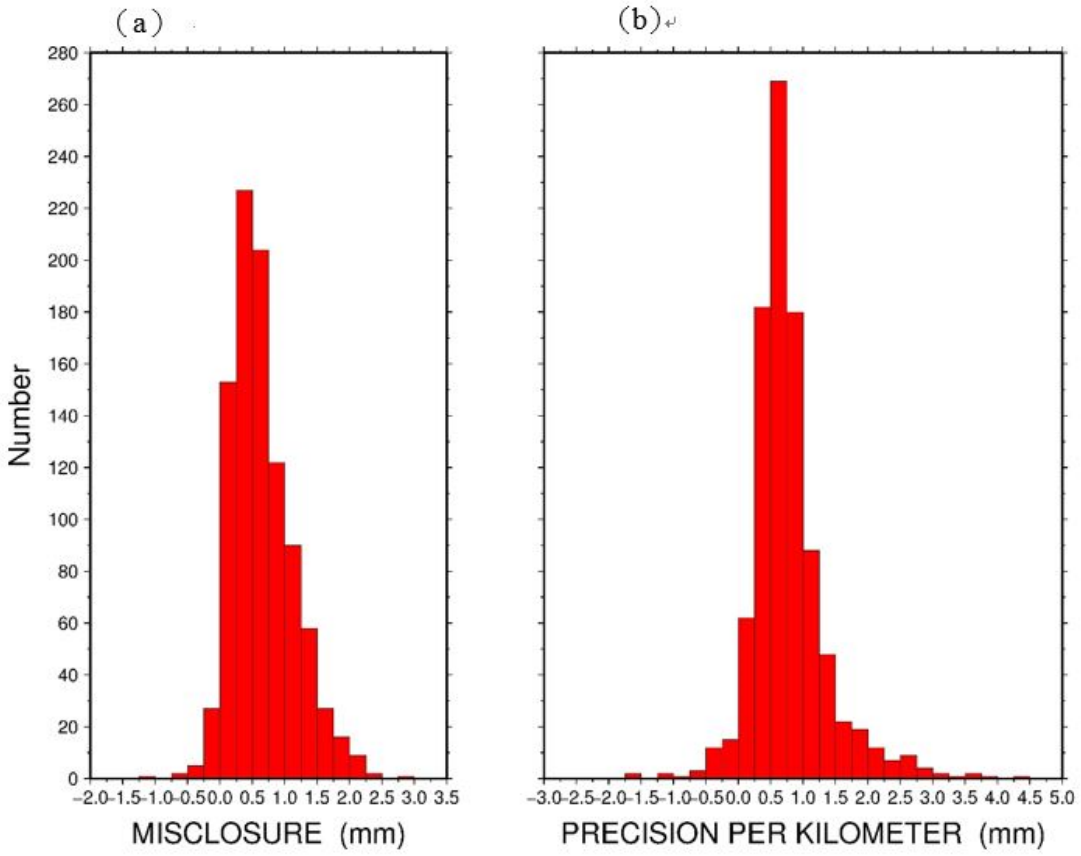


圖 2-3.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a) 為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.25 ~ 0.5 mm 上。(b) 為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 0.5 ~ 0.75 mm 上。

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 0.25~0.5 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。

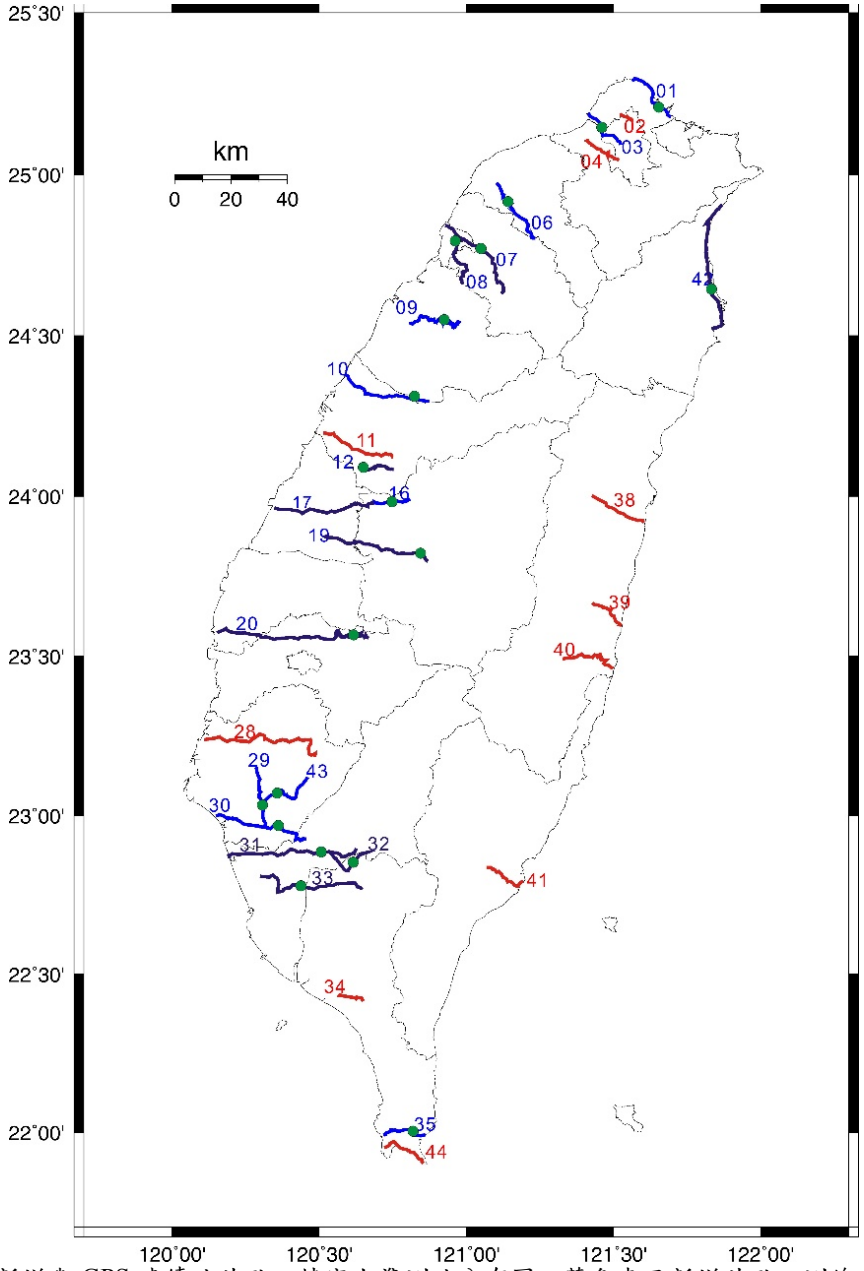


圖 2-3.2：新增與 GPS 連續站共點之精密水準測站分布圖，藍色表示新增共點之測線，紅色表示尚未新增之測線，綠色點位表示共點點位位置。

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 臺北地區精密水準測線

2-3-1-1 石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 20 公里，2004 至 2020 年間共進行 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS09 與 TSHI 之垂直速率（-0.6 mm/yr 與-1.6 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）。

根據圖 2-3.5，本測線垂直速度均落在 -3.0 至 0 mm/yr 之間，而跨斷層點位之垂直速度變化< 1.0 mm/yr，此結果說明近幾年山腳斷層在該區域並未有明顯之活動跡象。

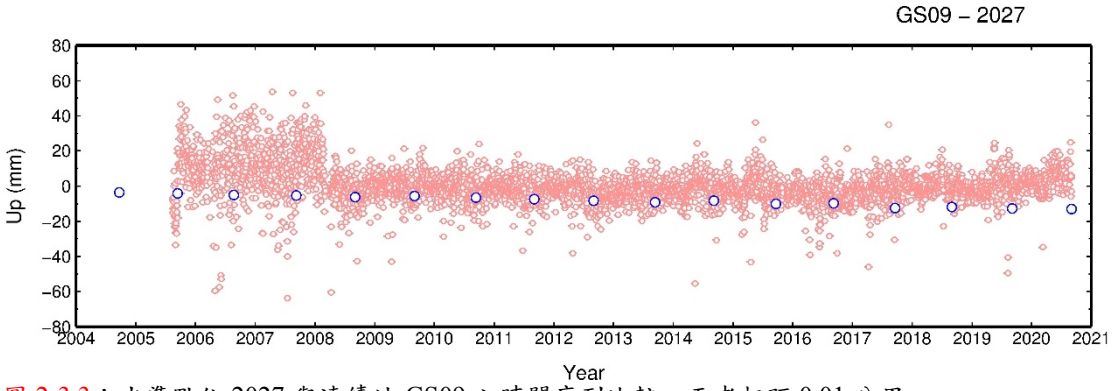


圖 2-3.3：水準點位 2027 與連續站 GS09 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。

Figure 2-3.3: Time series comparison between leveling bench mark 2027 and continuous GPS station GS09. The distance between two stations are 0.01 km.

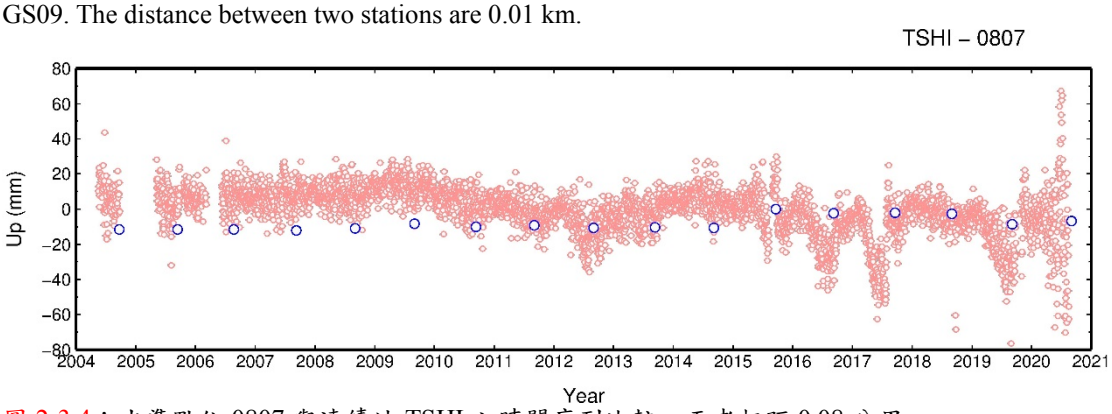


圖 2-3.4：水準點位 0807 與連續站 TSHI 之時間序列比較，兩者相距 0.08 公里。

Figure 2-3.4: Time series comparison between leveling bench mark 0807 and continuous GPS station TSHI. The distance between two stations are 0.08 km.

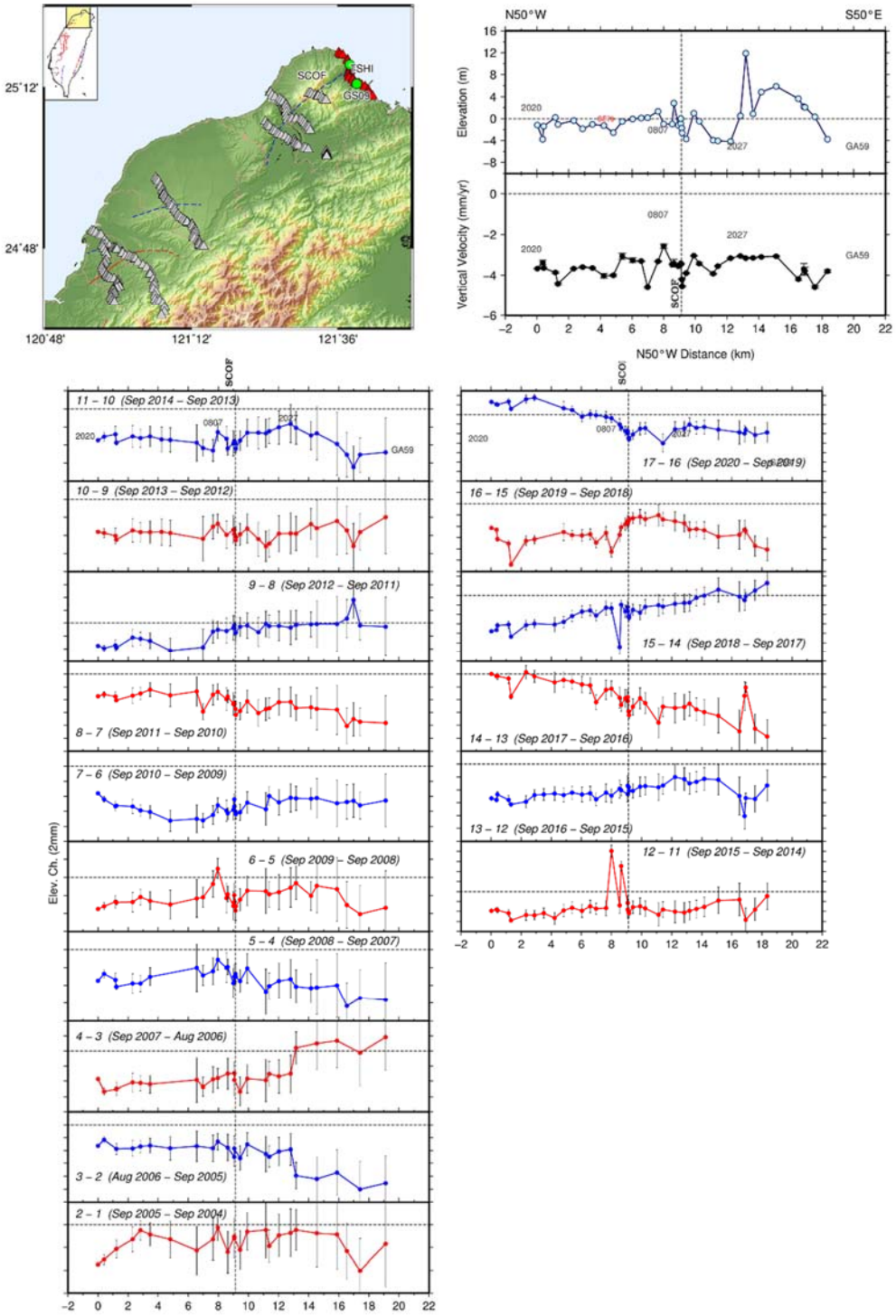


圖 2-3.5：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.5: Elevation change of the Shihmen-Wanli leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-1-2 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 2020 年間共進行 17 次測量。本測線以 GPS 連續站 YMSM 之垂直速率（-0.6 mm/yr），作為約制點來校正 GB06 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.6）。

根據圖 2-3.7，此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側，整條水準的垂直速度均介於 -4.0 至 0.0 mm/yr 之間。跨斷層之垂直速度非常不明顯（約 0 至 1 公里之測段），僅有約 0.3 mm/yr 的變化量，在 2 到 5 公里之測段稍有變化。據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能略為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要更長時間的監測以及與其他資料來佐證。

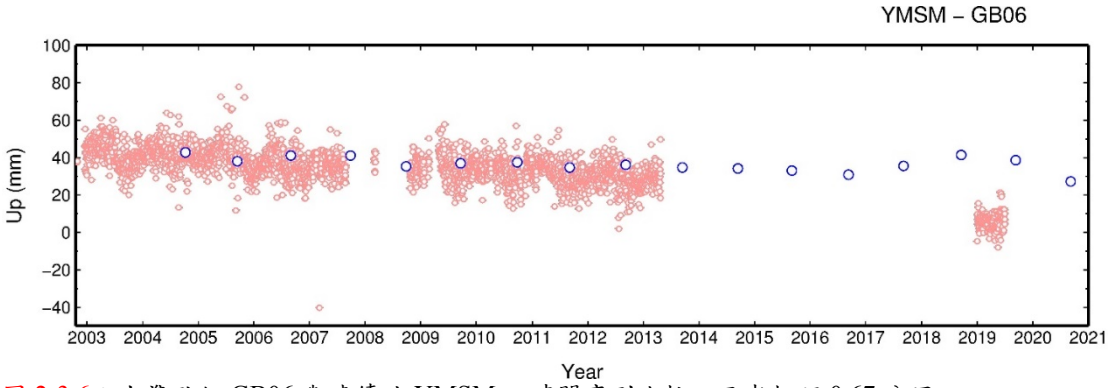


圖 2-3.6：水準點位 GB06 與連續站 YMSM 之時間序列比較，兩者相距 0.67 公里。

Figure 2-3.6: Time series comparison between leveling bench mark GB06 and continuous GPS station YMSM. The distance between two stations are 0.67 km.

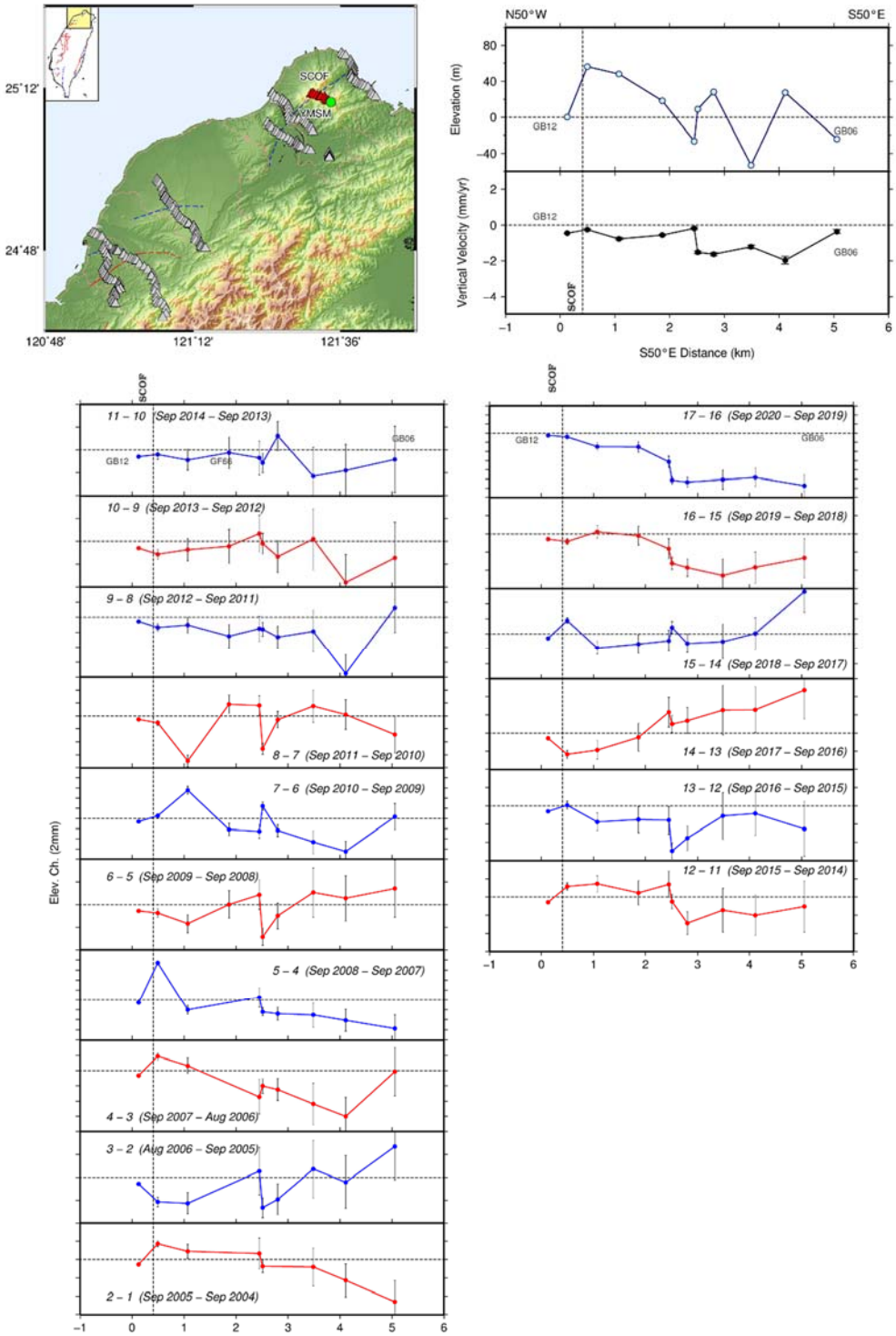


圖 2-3.7：士林至三芝測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.7: Elevation change of the Shilin-Sanzhi leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 2 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-1-3 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 2020 年間進行共 17 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 及 TANS 之垂直速率（-7.1 mm/yr 及-3.3 mm/yr），作為約制點來校正 GA69 與 GA63 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.8 及圖 2-3.9）。

根據圖 2-3.10，此測線之垂直速度在跨斷層有 10.0 mm/yr 的沉降變化量，最大值達 16.3 mm/yr；在斷層東側的垂直速率呈現逐漸增加的趨勢。觀察 2004~2006 及 2007~2014 之歷年高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由 30.0 mm 至 10.0 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。

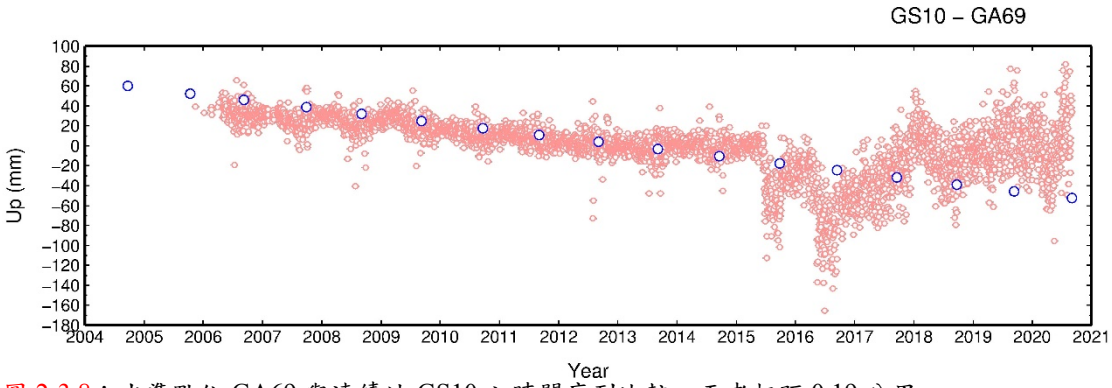


圖 2-3.8：水準點位 GA69 與連續站 GS10 之時間序列比較，兩者相距 0.19 公里。
Figure 2-3.8: Time series comparison between leveling bench mark GA69 and continuous GPS station GS10. The distance between two stations are 0.19 km.

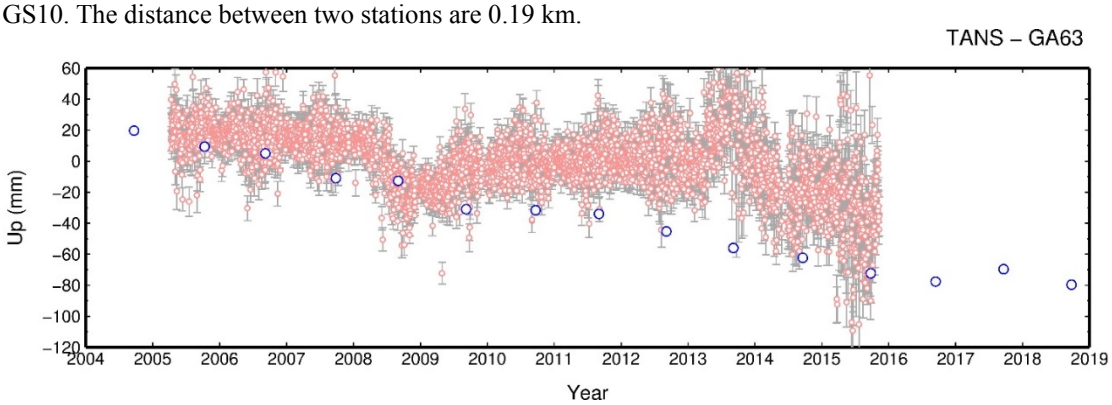


圖 2-3.9：水準點位 GA63 與連續站 TANS 之時間序列比較，兩者相距 0.65 公里。
Figure 2-3.9: Time series comparison between leveling bench mark GA63and continuous GPS station TANS. The distance between two stations are 0.65 km.

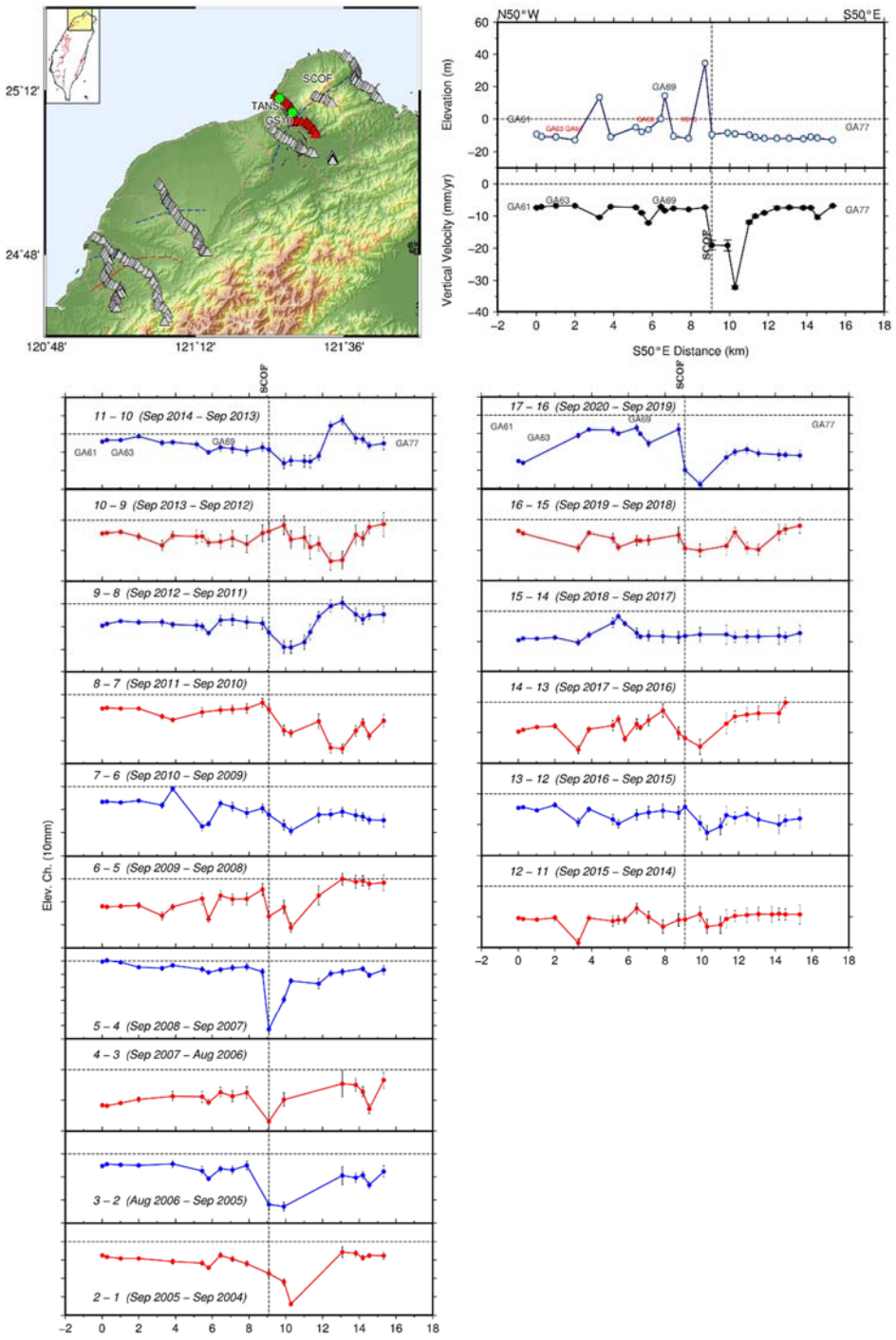


圖 2-3.10：淡水至士林測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，下欄中每個刻度代表 10mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.10: Elevation change of the Tamsui-Shihlin leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-1-4 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 14 公里。此水準測線於 2004 至 2020 年間共進行 17 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率（-3.9 mm/yr），作為約制點來校正 GA78 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.11）。

根據圖 2-3.12，此測線之垂直速度在跨斷層約有 6 mm/yr 的沉降變化量，在疏洪親水公園一帶為本測線沉陷較大的區域，最大垂直速度達-7.1 mm/yr，此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。另從歷年高程變化來看，2008 年至 2013 年在山腳斷層東側有週期性的抬升及沉降現象，2014 年起至今變化則較不明顯。

此外，點位 GA83 之時間序列之形態與其他點位相較明顯不同，沉陷速率也較大。該點為水準與 GPS 移動站共同監測點位，其 GPS 觀測結果也與該區速度場趨勢不符。根據實地勘驗，由於該點位於台 107 甲（新五路二段）與市道 108（中興路四段）高架聯絡道下方交會處，推測可能原因為該地該架工程載重及五股溼地地質影響（工程於 2006 年開工，2009 年竣工）。

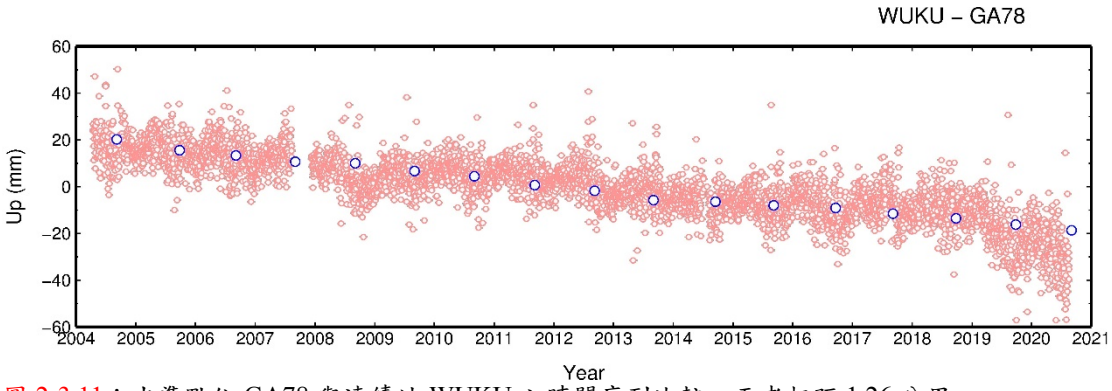


圖 2-3.11：水準點位 GA78 與連續站 WUKU 之時間序列比較，兩者相距 1.26 公里。

Figure 2-3.11: Time series comparison between leveling bench mark GA78 and continuous GPS station WUKU. The distance between two stations are 1.26 km.

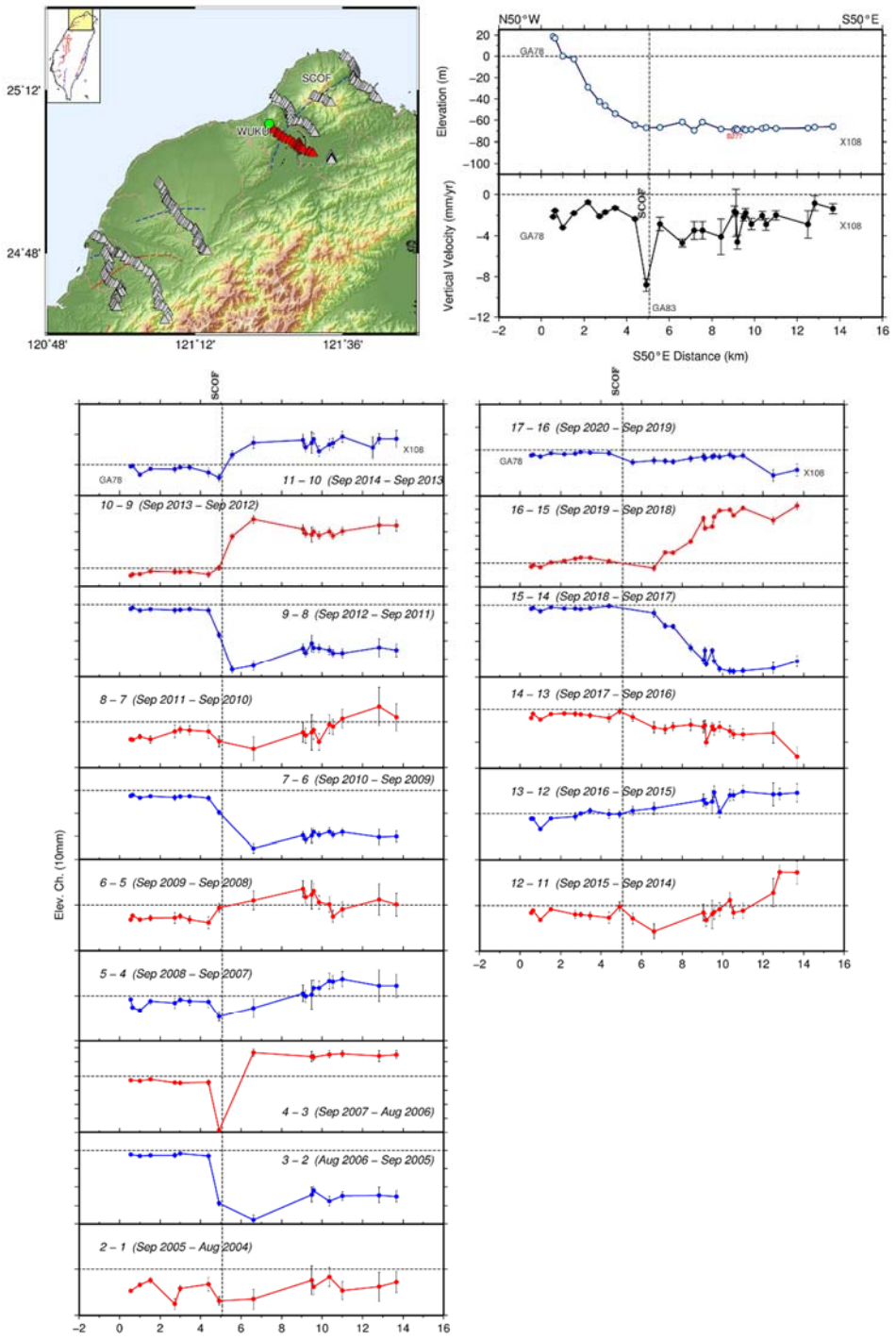


圖 2-3.12：五股至台北測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

Figure 2-3.12: Elevation change of the Wugu-Taipei leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. SCOF is Sanchiao fault.

2-3-2 桃竹苗地區精密水準測線

2-3-2-1 新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層，測線長約 24 公里，並於 2004 至 2020 年間共進行 16 次的施測。該測線以 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 2-3.13）。

根據圖 2-3.14，此測線之垂直速度在跨越湖口斷層由南往北的抬升速度以約 3 mm/yr 的速率增加。

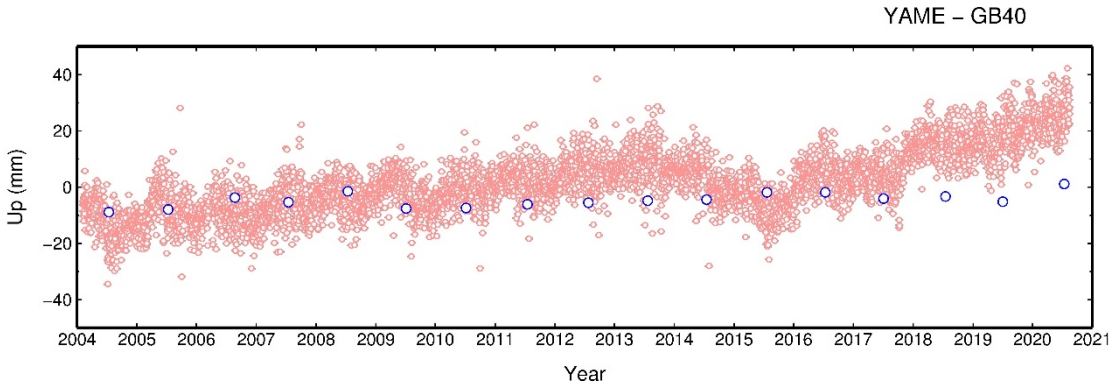


圖 2-3.13：水準點位 GB40 與連續站 YAME 之時間序列比較。兩者相距 3.3 公里。
Figure 2-3.13: Time series comparison between leveling benchmark GB40 and continuous GPS station YAME. The distance between two stations are 3.3 km.

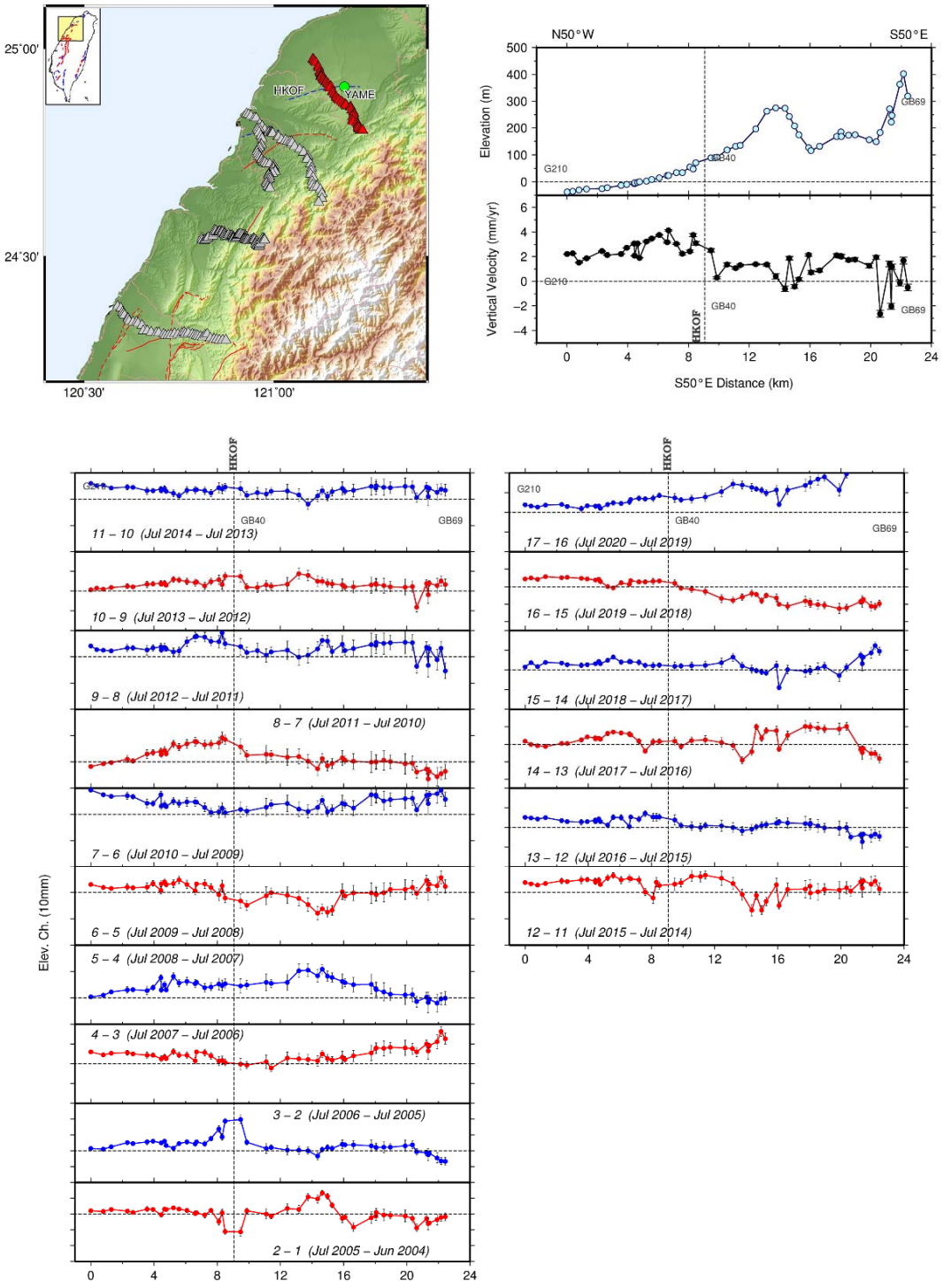


圖 2-3.14：新屋至童話世界測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKOF 為湖口斷層。

Figure 2-3.14: Elevation change of the Xinwu-Guanxi leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKOF is the Hukou fault.

2-3-2-2 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），此測線於 2002 至 2020 年間共進行 16 次的施測。本測線分別以 GPS 連續站 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 2-3.15~16）。

根據圖 2-3.18，此測線跨新竹斷層之垂直速度並無顯著變化，變化量皆< 2.0 mm/yr，但在跨新城斷層有約 4.0 mm/yr 的垂直速度變化量（約-2.0～2.0 mm/yr）。從歷年高程變化來看，水準點位 G416（五峰國小）近 2013 至 2014 年間年下陷約 2.1 cm，而此點 GPS 之觀測資料也與鄰近地區之速度型態不一致（圖 2-3.17）。經實地勘查後發現，點位本身並無損壞，由於該校位於山坡地，因此這段時間的變位是否和該地區的邊坡運動有關，需要進一步分析與討論。不過長期來看，此點建議仍然可以繼續觀測，但在資料使用上須要特別注意（圖 2-3.19）。

另外，根據此測線 G429、T004、T003 三個點位之時間序列顯示（圖 2-3.18），在工研院竹東院區附近，其時間序列變化明顯與鄰近點位不同，需要注意此區域是否有地滑現象。

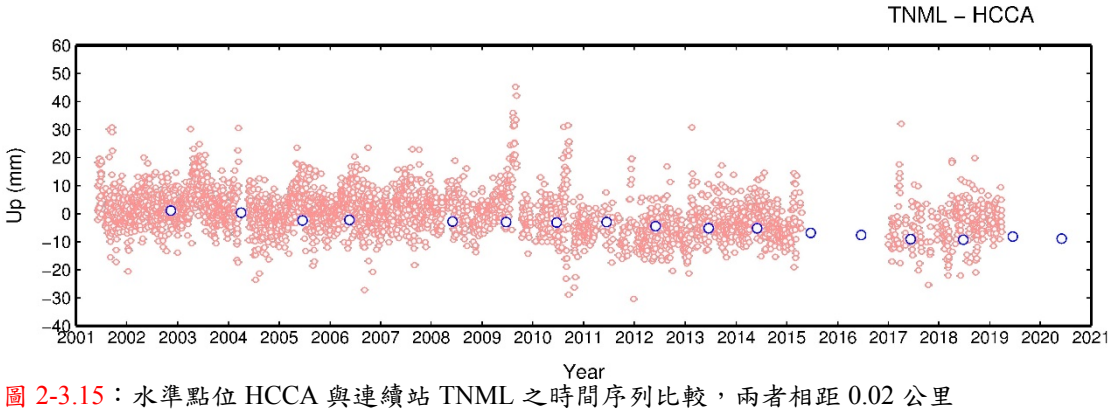


圖 2-3.15：水準點位 HCCA 與連續站 TNML 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里

Figure 2-3.15: Time series comparison between leveling benchmark HCCA and continuous GPS station TNML. The distance between two stations are 0.02 km.

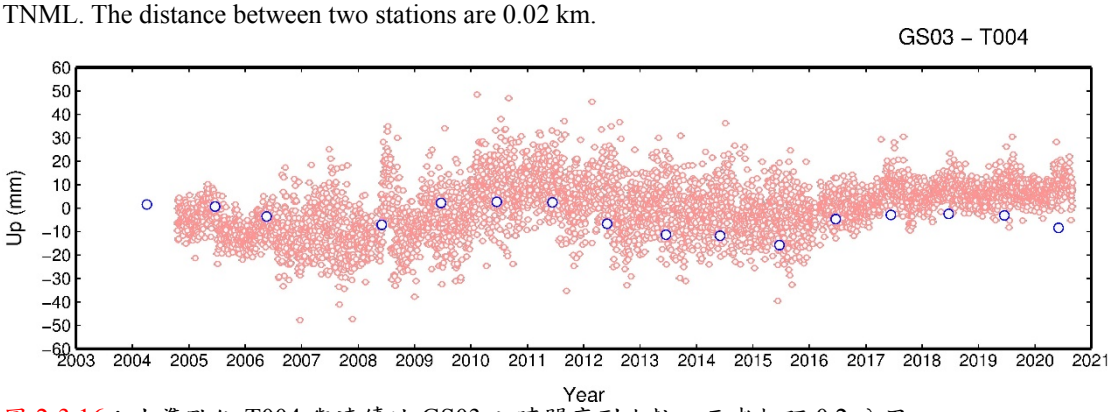


圖 2-3.16：水準點位 T004 與連續站 GS03 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里

Figure 2-3.16: Time series comparison between leveling benchmark T004 and continuous GPS station GS03. The distance between two stations are 0.2 km.

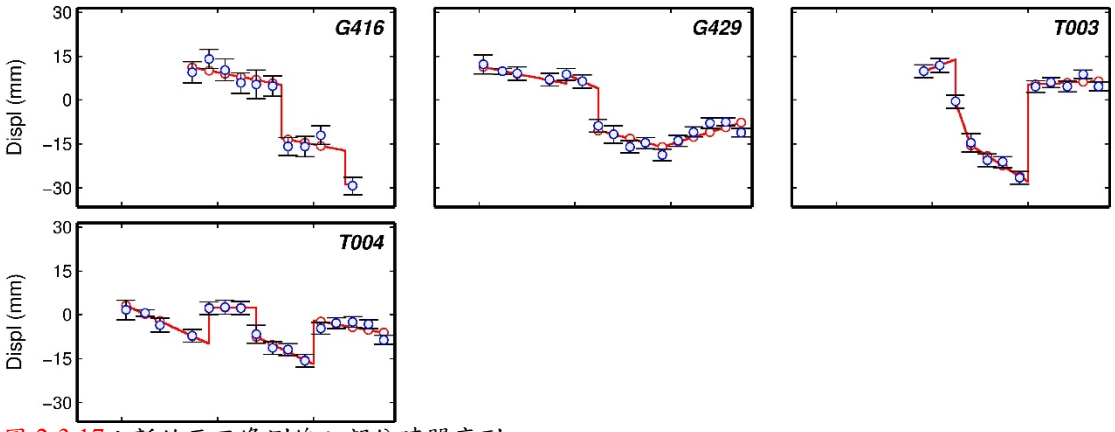


圖 2-3.17：新竹至五峰測線之部份時間序列。

Figure 2-3.17: Part of leveling time series of the Hsinchu-Wufeng leveling route.

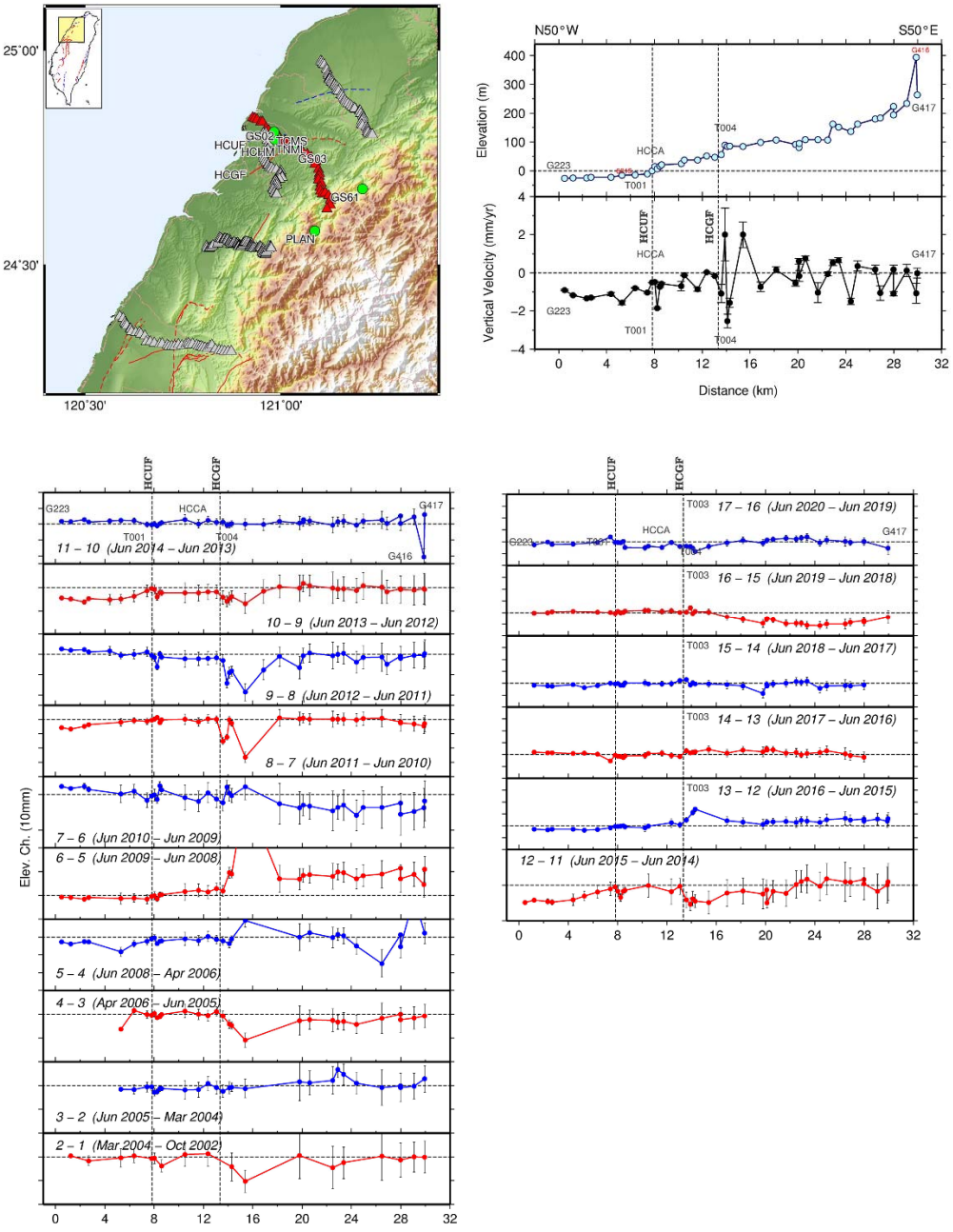


圖 2-3.18：新竹至五峰測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.18: Elevation change of the Hsinchu-Wufeng leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.



圖 2-3.19：水準點位 G416 時間序列及現地情形。
Figure 2-3.19: Time series of bench mark G416 and its present situation.

2-3-2-3 新竹至峨嵋測線

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 2020 年間共進行 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 2-3.20）。

根據圖 2-3.21，此測線的垂直速度由東南往西北逐漸由約 1.0 mm/yr 的沉陷速度增加至約 3.0 至 4.0 mm/yr 的沉陷速度。然而，跨越新竹斷層和新城斷層皆未有顯著的速率變化，變化量皆< 1.0 mm/yr。

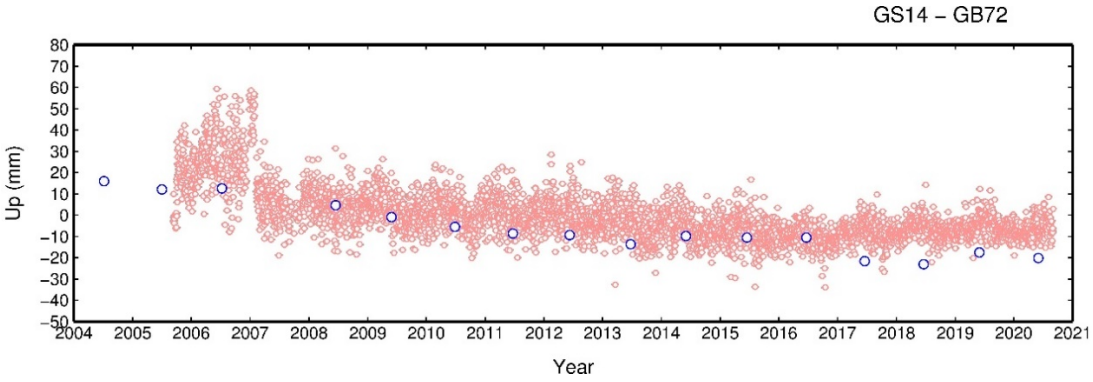


圖 2-3.20：水準點位 GB71 與連續站 GS14 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。
Figure 2-3.20: Time series comparison between leveling benchmark GB71 and continuous GPS station GS14. The distance between two stations are 0.1 km.

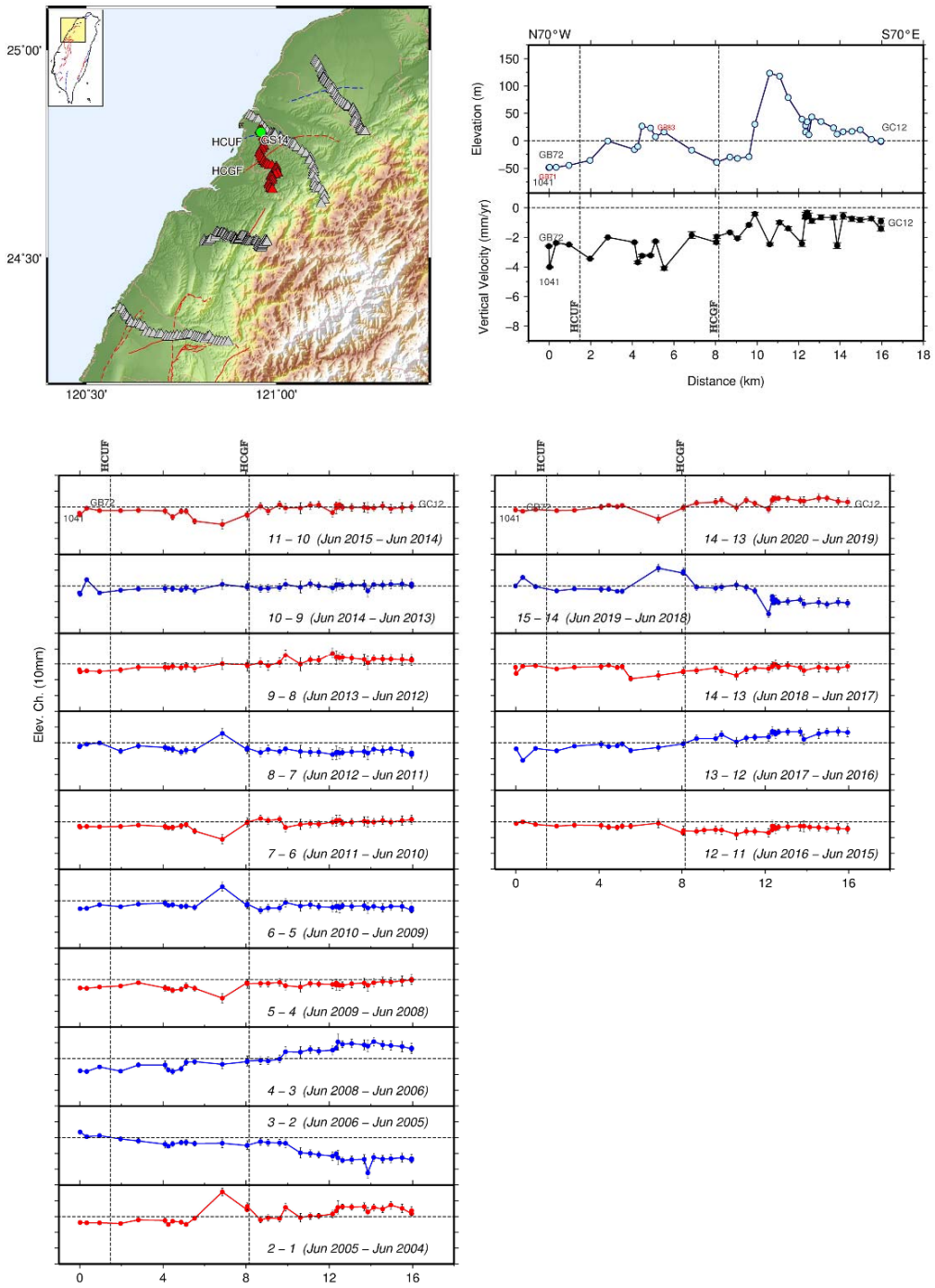


圖 2-3.21：新竹至峨眉測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層。

Figure 2-3.21: Elevation change of the Hsinchu-Emei leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCUF is Hsinchu fault, and HCGF is Hsincheng fault.

2-3-2-4 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 2020 年間共進行 14 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-5.5 mm/yr），作為約制點 GD97 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.22）。

根據圖 2-3.23，整條測線的水準沉陷速率大多在 2.0～4.0 mm/yr 之間，少數最大沉陷速率可達 7.0 mm/yr。跨獅潭斷層區域之速率變化並不顯著（變化量< 1.0 mm/yr），可說明獅潭斷層近幾年並無活躍之運動。從歷年高程變化來看，在 2005~2009 年、2010~2016 年及 2017~2020 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。

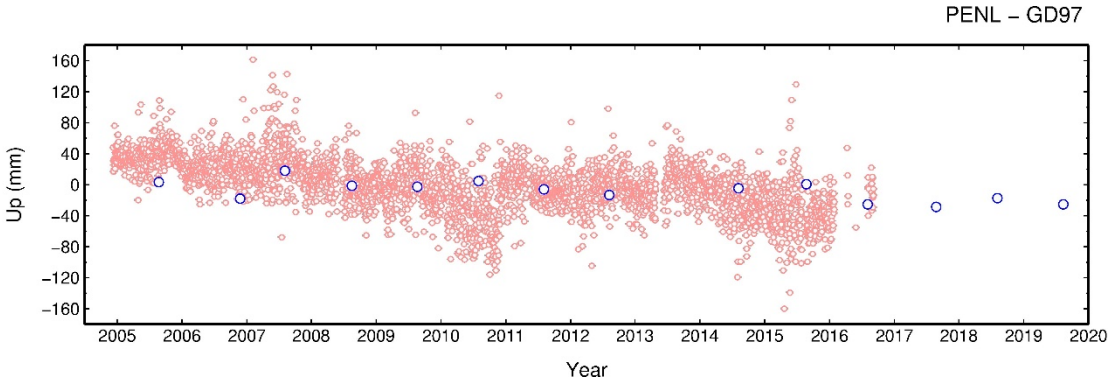


圖 2-3.22：水準點位 GD97 與連續站 PENL 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.22: Time series comparison between leveling benchmark GD97 and continuous GPS station PENL. The distance between two stations are 0.02 km.

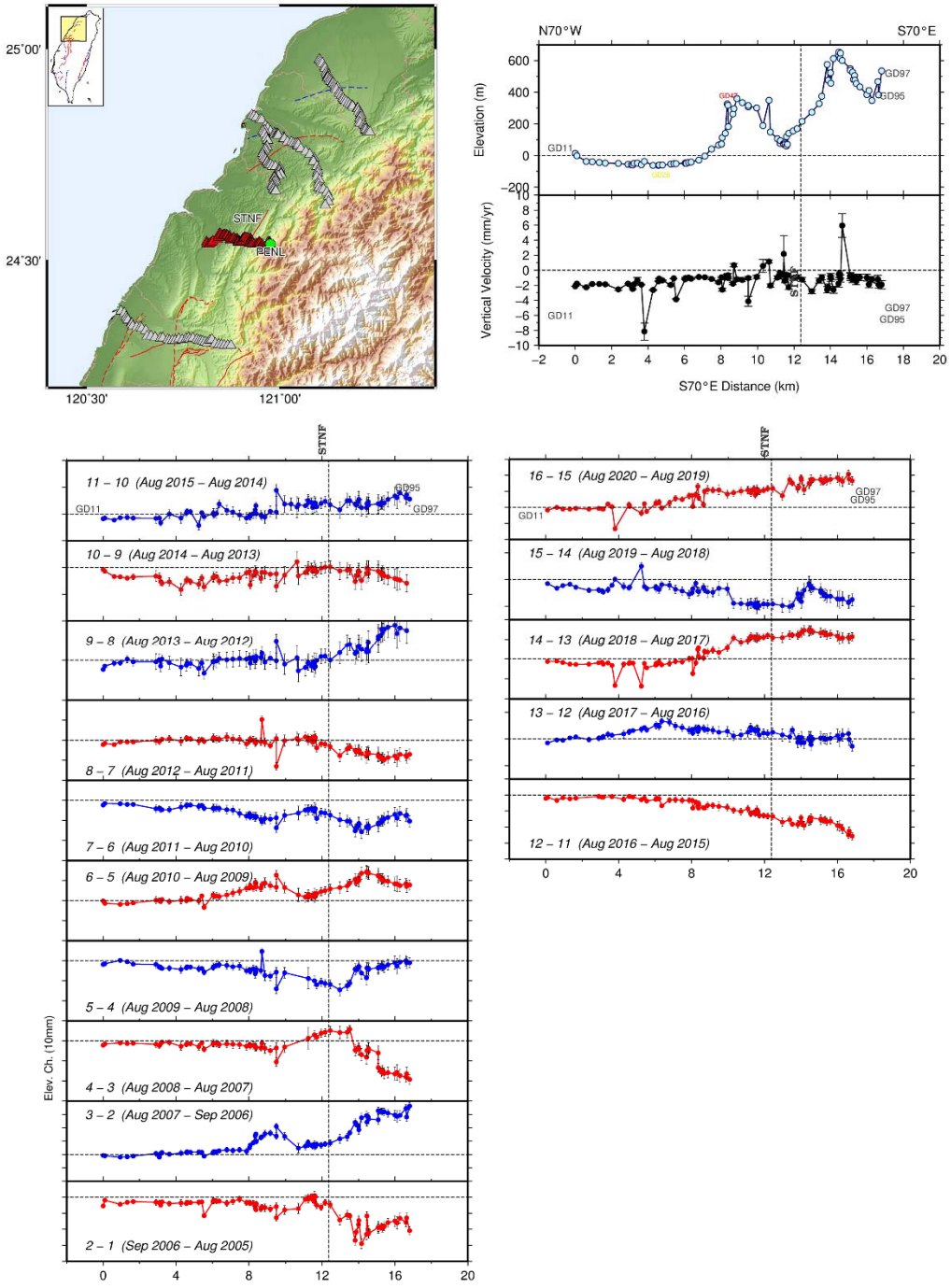


圖 2-3.23：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每欄刻度均代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。STNF 為獅潭斷層。

Figure 2-3.23: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. STNF is the Shihtan fault.

2-3-3 中部地區精密水準測線

2-3-3-1 大安至東勢測線

中部地區完成的精密水準測線分別為大安-東勢、王功-草屯-埔里及北斗-水里測線，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 2020 年止共計有 16 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，因此使用連續站 GS82 與 TEGS 之垂直速率（-1.4 mm/yr、-1.8 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 2-3.24 及圖 2-3.25）。

大安-東勢測線各水準點之垂直速度多在-5.0 mm/yr 至-2.0 mm/yr 間（圖 2-3.26），而 G920 以東之水準點因測量次數過少建議持續監測。且自鐵砧山至屯子腳斷層間（東陽國小至內埔國小）持續呈現下陷（約-3.0 mm/yr），但高程地形卻是逐漸抬升。在通過三義斷層後的垂直速度（貓仔坑至明正國小）逐漸由-4.0 mm/yr 增加至測線末端的-2.0 mm/yr 至 1.0 mm/yr 間，反映三義斷層的上盤相對其下盤正持續抬升。

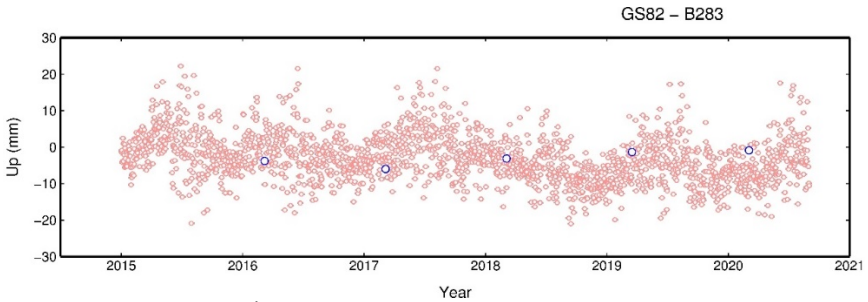


圖 2-3.24：水準點位 B283 與連續站 GS82 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。
Figure 2-3.24: Time series comparison between leveling bench mark B283 and continuous GPS station GS82. The distance between two stations are 1.5 km.

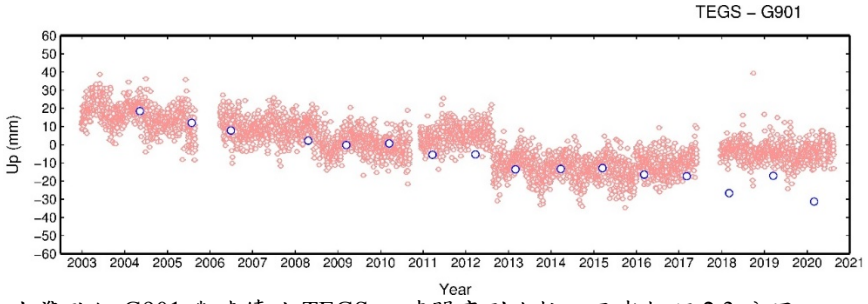


圖 2-3.25：水準點位 G901 與連續站 TEGS 之時間序列比較，兩者相距 2.3 公里。
Figure 2-3.25: Time series comparison between leveling bench mark G901 and continuous GPS station TEGS. The distance between two stations are 2.3 km.

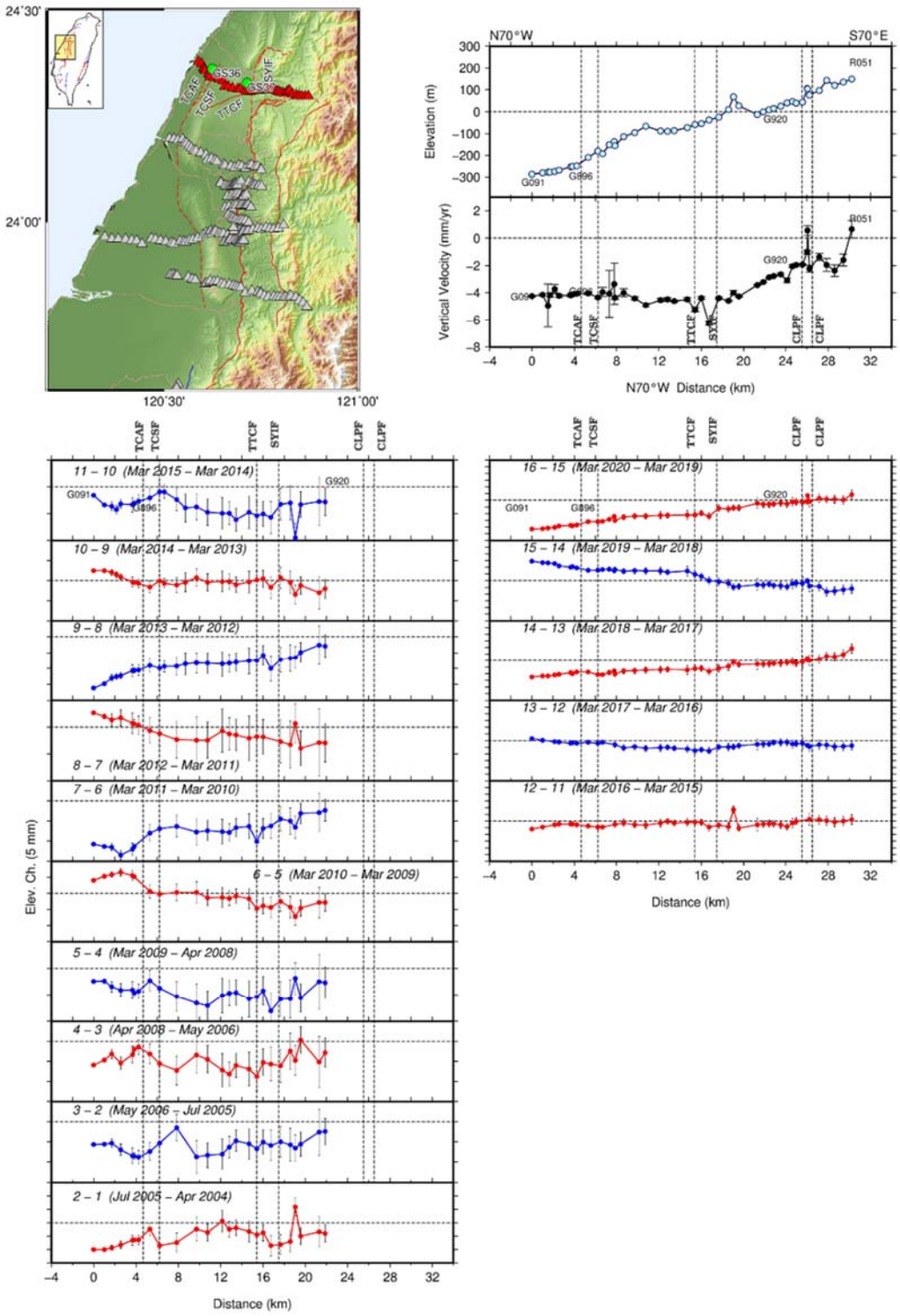


圖 2-3.26：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為水準平均抬升速率。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、CLPF 車籠埔斷層。

Figure 2-3.26: Elevation change of the Da'an-Dongshi leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. TCAF is Tachia fault, TCSF is Tiehchanshan fault, TTCF is Tuntzuchiao fault, SYIF is Sanyi fault, and CLPF is Chelungpu fault.

2-3-3-2 龍井至太平測線

龍井至太平測線橫跨車籠埔斷層，測線長約 25 公里(投影至剖面的長度)，於 2004 至 2020 年間，共進行 16 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 垂直速率（-18 mm/yr），作為約制點 G937 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.27），而地震前後速度變化不明顯，以約 1.8 mm/yr 沉降速度運動。

根據圖 2-3.28，此測線 2013 年 6 月前之垂直速度在兩個斷層間之垂直速率大多落在 0.0 ~ 3.0 mm/yr 之間，而 2013 年 6 月後之垂直速度的垂直速度並無太多變化，亦無顯著抬升變化；在 2004 年至 2020 年間在跨車籠埔斷層區域之垂直速度有約 3.0 mm/yr 的速度變化量，可說明此斷層可能在 1999 年集集地震後有持續性的抬升現象。

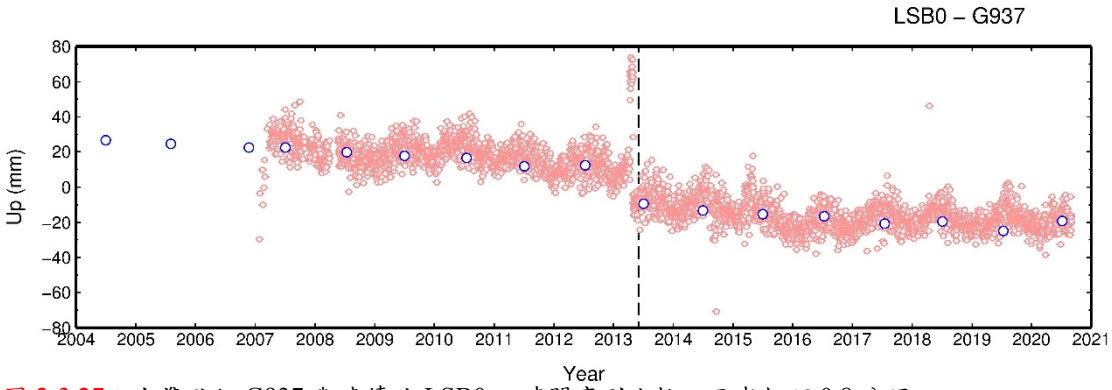


圖 2-3.27：水準點位 G937 與連續站 LSB0 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。

Figure 2-3.27: Time series comparison between leveling bench mark G937 and continuous GPS station LSB0. The distance between two stations are 0.8 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

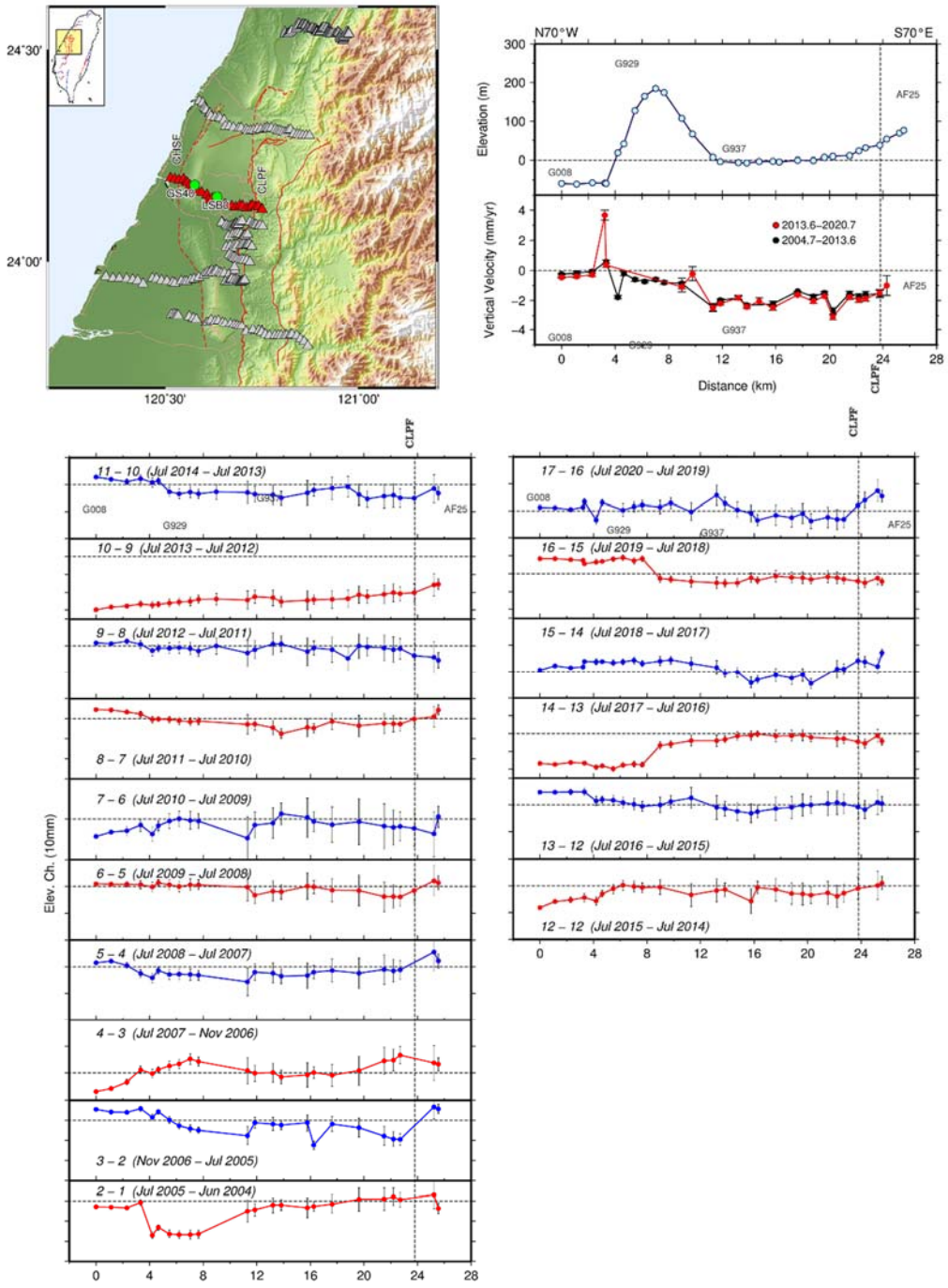


圖 2-3.28：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。
Figure 2-3.28: Elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPE is Chelungpu fault.

2-3-3-3 王功至草屯至埔里測線

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 2020 年共計有 17 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），作為約制點來校正 T075 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.29）。

由精密水準時間序列得知本測線於 2007 年發生速度變化，因此以 2007 年為速度變化分界；南投在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的地震。

根據圖 2-3.30，彰化斷層以西（王功至員東國小）可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速率最大可達約 55.0 mm/yr，但高程地形卻沒有太大的變化；彰化斷層以東跨車籠埔斷層至大茅埔－雙冬斷層一帶（八卦山山脈至雙冬國小），平均垂直速度均約在-10.0 ~ 0.0 mm/yr 之間，雖然八卦山背斜一帶地形較高，但垂直速度未有明顯變化。相較於彰化斷層西側，東側之垂直速度變化並不顯著。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，彰化斷層以東之垂直速度變化相對而言較不顯著。

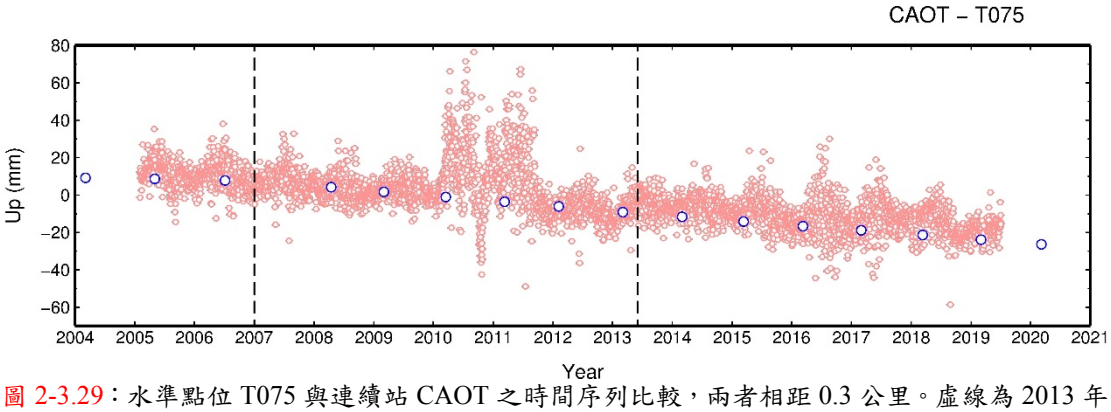


圖 2-3.29：水準點位 T075 與連續站 CAOT 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.29: Time series comparison between leveling bench mark T075 and continuous GPS station CAOT. The distance between two stations are 0.3 km. The left dashed line is the 2007 velocity change event and the right is June 2nd 2013 Nantou earthquake.

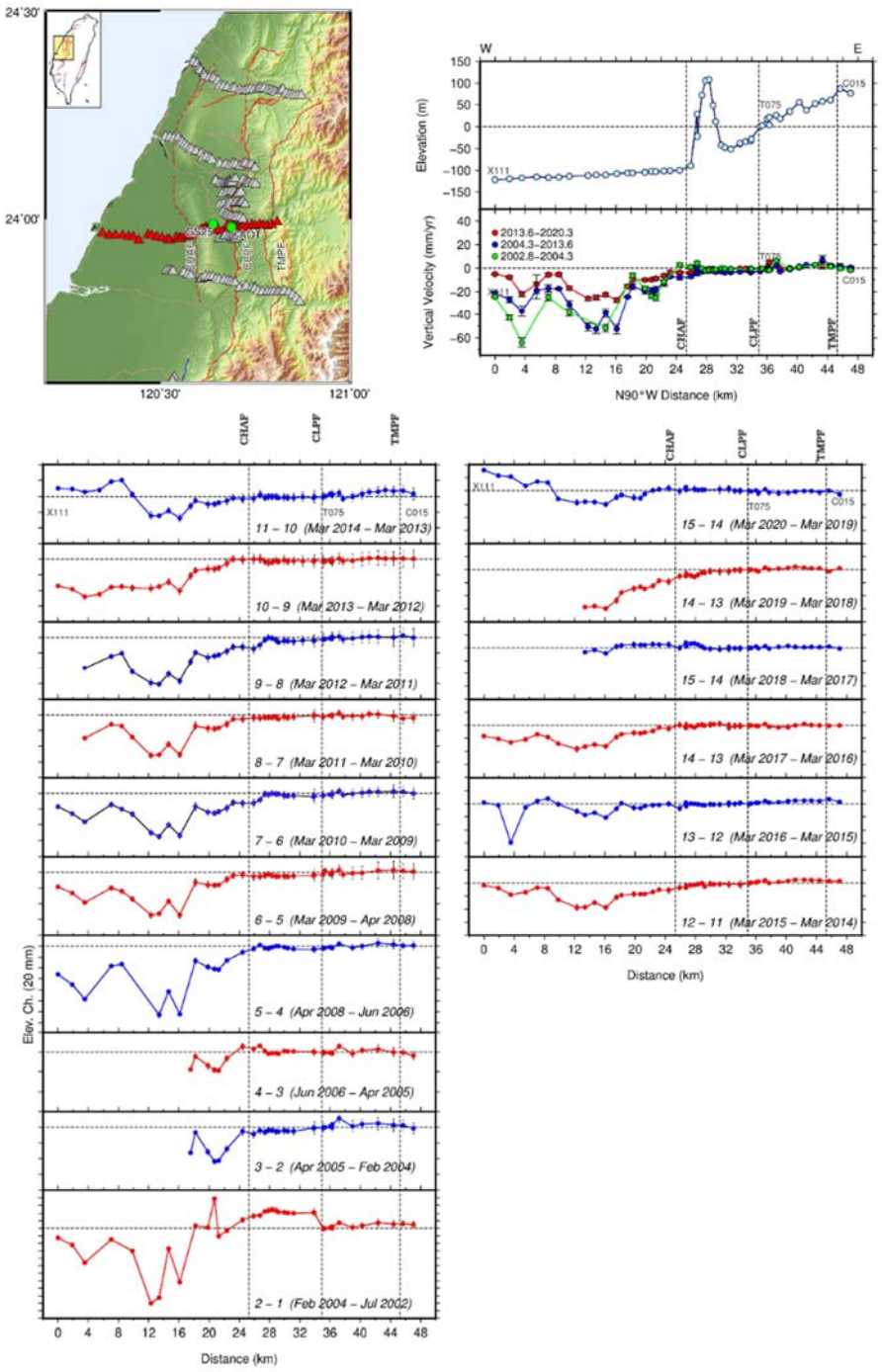


圖 2-3.30：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2004 年之垂直速度、藍色為 2004 - 2013 年南投地震震後垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.30: Elevation change of the Wanggong-Caotun and Caotun-Puli. leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity of 2002-2004, blue is the vertical velocity before the Nantou earthquake, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-3-4 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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS26 之 2013 年地震前垂直速率（-0.9 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-4.3 mm/yr），作為約制點來校正 MX83 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.31），在 2013 年 3 月和 6 月發生兩次規模 6 以上的南投地震，造成此測線各點位有 64.0 mm 到 138.0 mm 的同震位移量，2013 年至 2014 年之歷年高程差在大茅埔－雙冬斷層上盤也有顯著的抬升，最大值達 85.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮南投地震同震位移之影響。

根據圖 2-3.32，2007 年前之垂直速度大致呈現抬升現象，除彰化斷層以西沉降運動約 10 mm/yr，越往東之抬升速度逐步上升至約 12 mm/yr，2007 年至 2013 年間彰化斷層以西之垂直速度雖沉陷（最大值約-6.0 mm/yr），但不似王功至埔里測線可見明顯的地層下陷現象（最大值約-80.0 mm/yr）。而彰化斷層以東至赤水派出所一帶，高程地形有顯著抬升，但垂直速度變化不大。2013 年後之垂直運動在通過彰化斷層後亦逐步抬升，且最大值約為 12 mm/yr，較往年數值更為增加。通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的區段（名間國小至水里隧道），高程地形與垂直速度抬升的狀況更為明顯（約由-7.0～10.0 mm/yr），然而通過大茅埔－雙冬斷層後之地區，其抬升速率由 10.0 mm/yr 下降至 3.5 mm/yr。

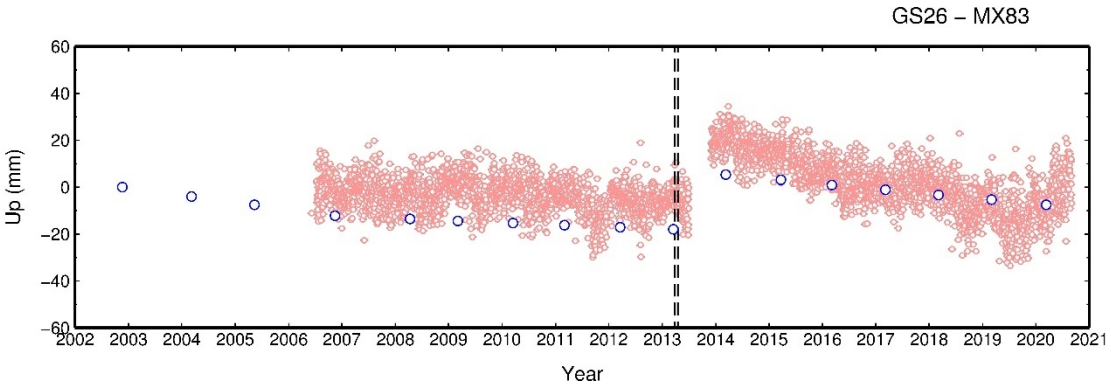


圖 2-3.31：水準點位 MX83 與連續站 GS26 之時間序列比較，兩者相距 1.5 公里。虛線為 2013 年 6 月 2 日南投地震。

Figure 2-3.31: Time series comparison between leveling bench mark MX83 and continuous GPS station GS26. The distance between two stations are 1.5 km. Dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

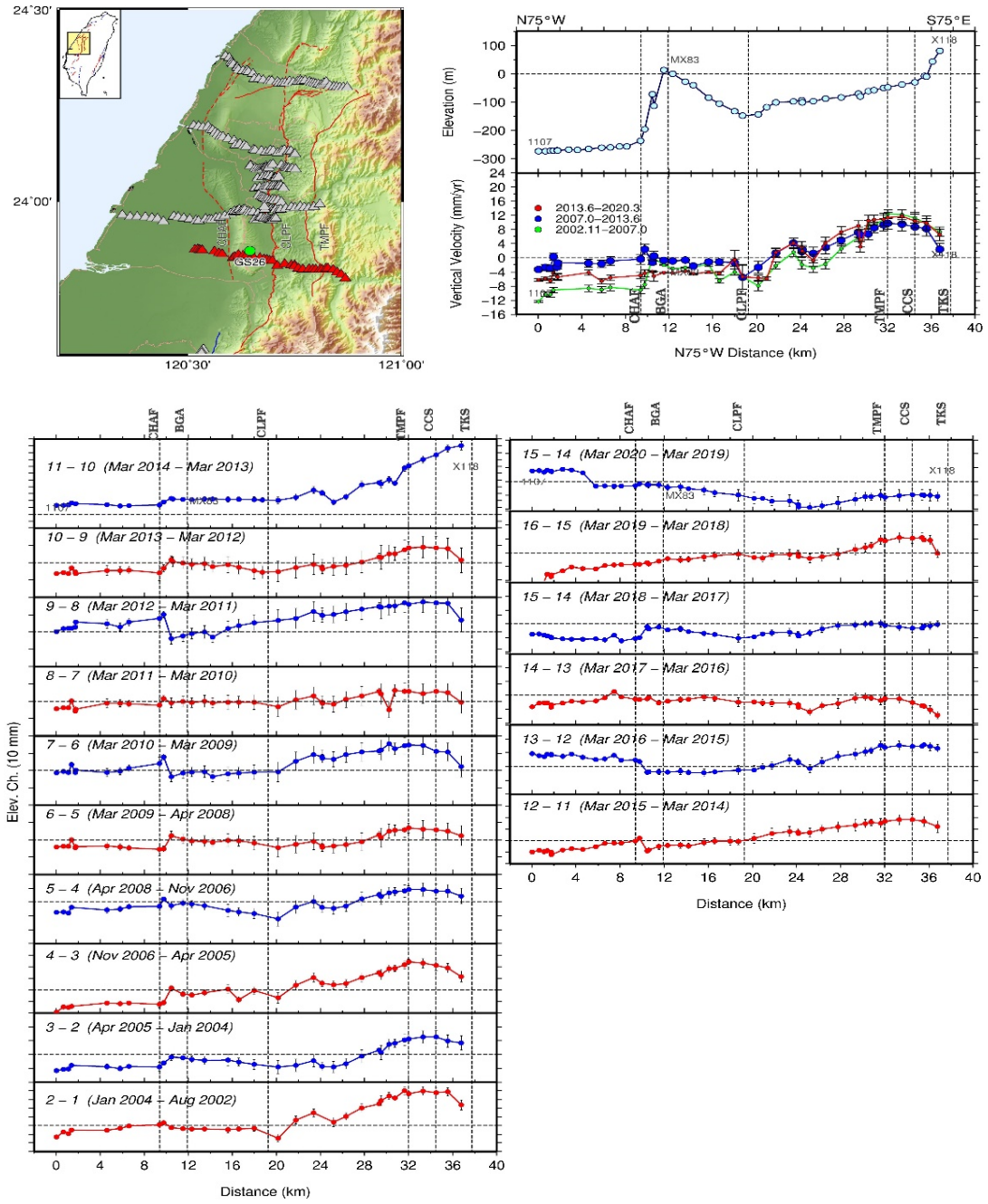


圖 2-3.32：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2002 - 2007 年之垂直速度、藍色為 2007 - 2013 年南投地震震前垂直速度、紅色為 2013 年南投地震後至今之垂直速度。下欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

Figure 2-3.32: Elevation change of the Longjing-Taiping leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity of 2002-2007, blue is the vertical velocity before the Nantou earthquake, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CHAF is Changhua fault, CLPE is Chelungpu fault, and TMPF is Tamaopu-Shuangtung fault.

2-3-3-5 五光至黃竹測線

五光-黃竹測線橫跨車籠埔斷層，總長約 11 公里（投影至剖面的長度），自 2006 至 2020 年止共計施測 15 次。本測線以 GPS 連續站 GS23 之 2013 年地震前垂直速率（-4.7 mm/yr）及 2013 年至今之垂直速率（-5.6 mm/yr），作為約制點來校正 AF15 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.33）。

根據圖 2-3.34 之垂直速度及歷年高程變化來看，此測線 2013 年 6 月前與後的垂直速度並無太多變化亦無顯著抬升變化，近幾年並無明顯之變化呈現相對穩定的狀態。

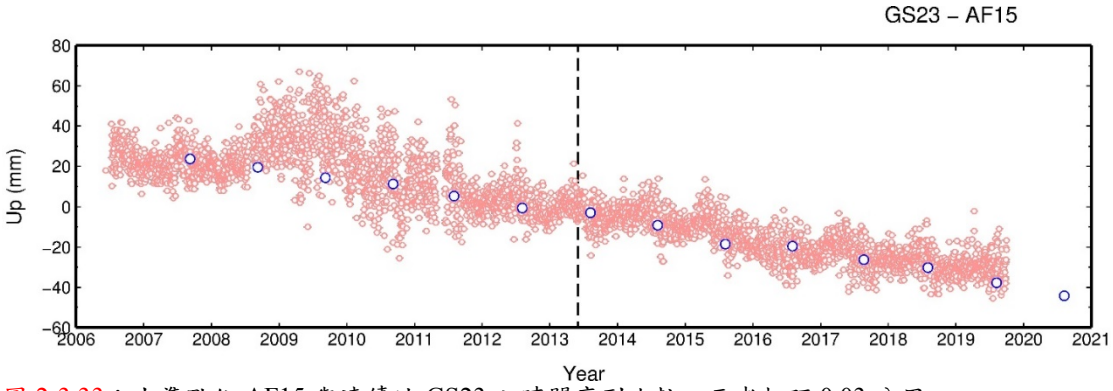


圖 2-3.33：水準點位 AF15 與連續站 GS23 之時間序列比較，兩者相距 0.03 公里。

Figure 2-3.33: Time series comparison between leveling bench mark AF15 and continuous GPS station GS23. The distance between two stations are 0.03 km. The dashed line is the June 2nd 2013 Nantou earthquake.

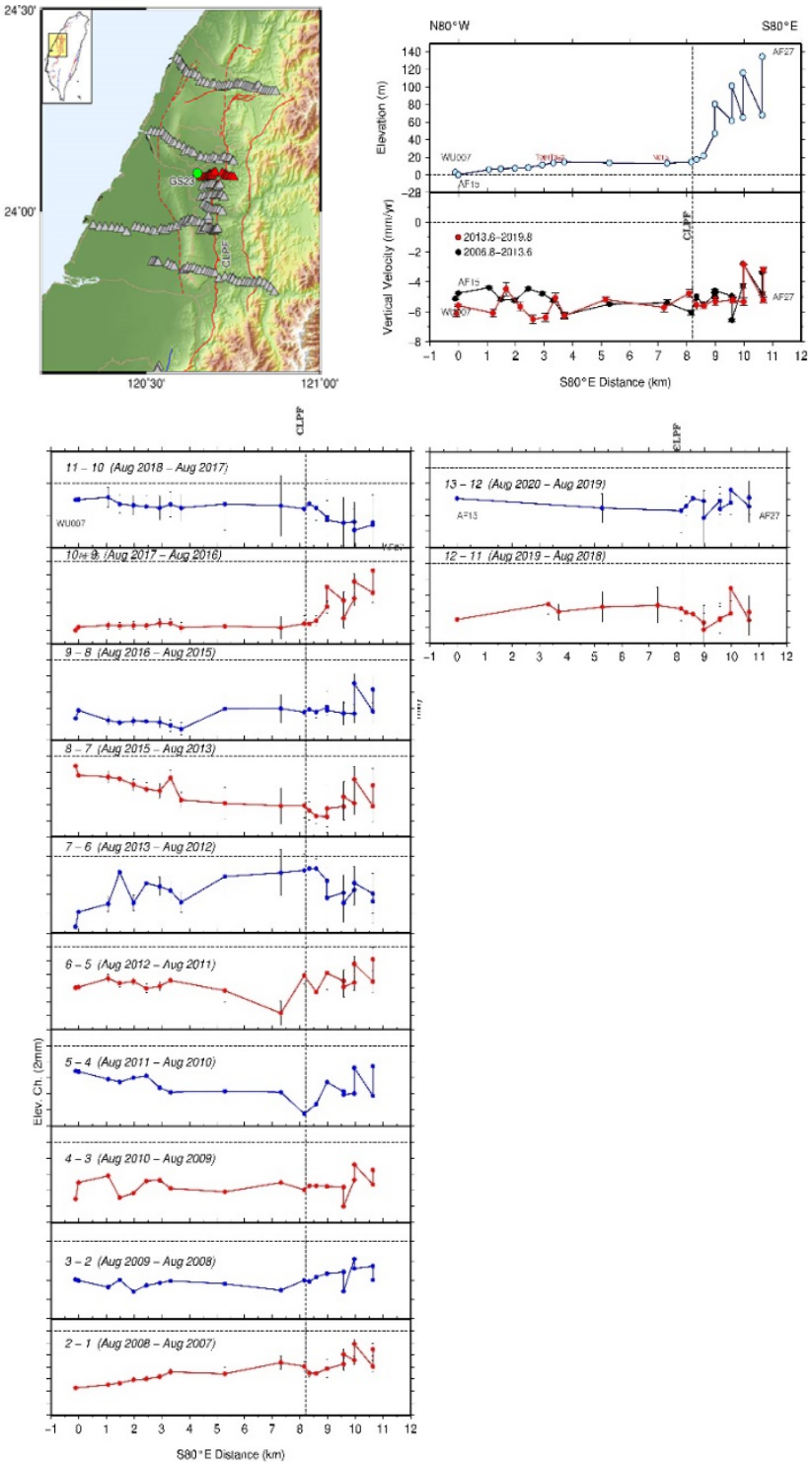


圖 2-3.34：五光至黃竹水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2006 - 2013 年之垂直速度、紅色為 2013 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

Figure 2-3.34: Elevation change of the Wuguang-Huangzhu leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity of 2006-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 2 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CLPF is Chelungpu fault.

2-3-4 嘉南地區精密水準測線

2-3-4-1 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 2020 年間共進行 18 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS17 及 S103 之垂直速率（2.3 mm/yr 及-0.1 mm/yr），作為約制點來校正 G776 及 G742 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.35 及圖 2-3.36）。

根據圖 2-3.37，梅山斷層以西之垂直速度變化較大，最大達-26 mm/yr，以東到九芎坑斷層則大多介在-2.0 至 0.0 mm/yr 之間；在跨九芎坑斷層與觸口斷層之區域（約 40~46 公里處），垂直速率雖然未有顯著變化（變化量<2.0 mm/yr），但至測線末段之整體趨勢為逐步抬升（約從 0.0 到 4.0 mm/yr）。

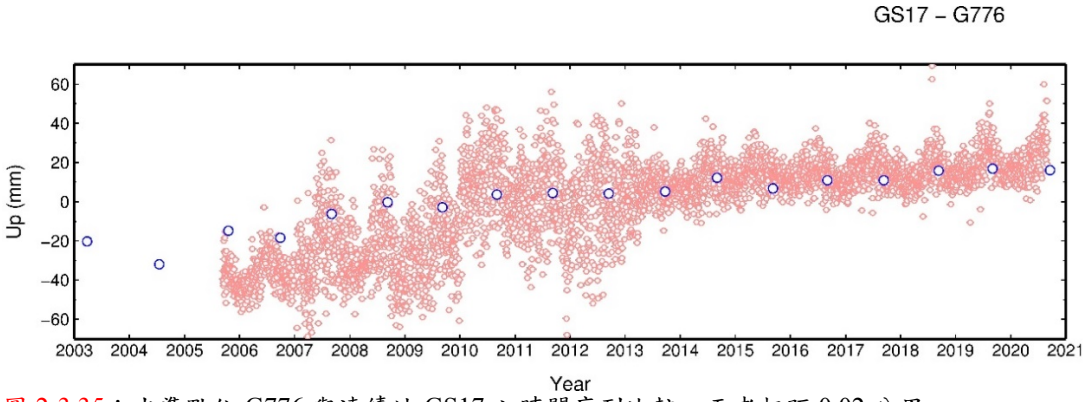


圖 2-3.35：水準點位 G776 與連續站 GS17 之時間序列比較，兩者相距 0.02 公里。
Figure 2-3.35: Time series comparison between leveling bench mark G776 and continuous GPS station GS17. The distance between two stations are 0.02 km.

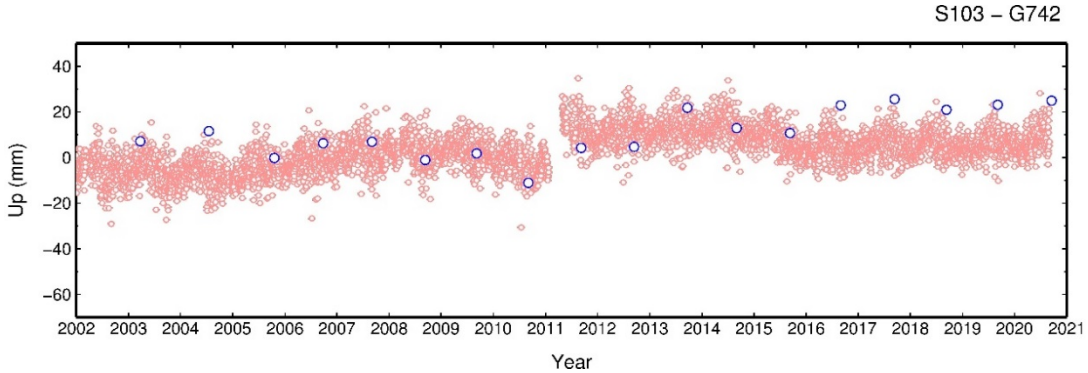


圖 2-3.36：水準點位 G742 與連續站 S103 之時間序列比較，兩者相距 0.78 公里。
Figure 2-3.36: Time series comparison between leveling bench mark G742 and continuous GPS station S103. The distance between two stations are 0.78 km.

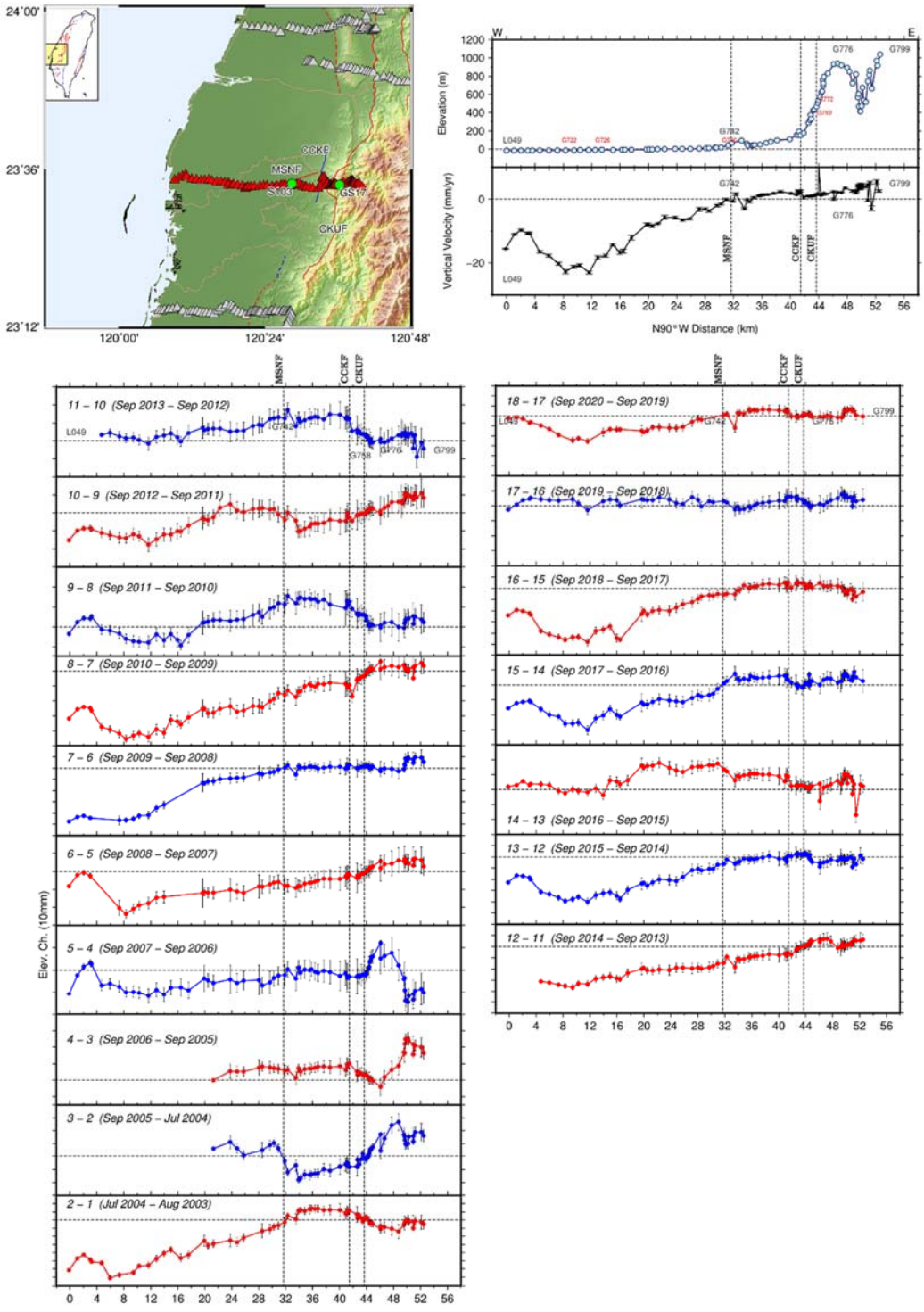


圖 2-3.37：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。MSNF 為梅山斷層、CCKF 為九芎坑斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.37: Elevation change of the Jinhu-Ruifeng leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. MSNF is Meishan fault, CCKF is Chiuchiungkeng fault, and CKUF is Chukou fault.

2-3-4-2 北門至楠西測線

嘉南地區完成的精密水準測線為北門-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 2020 年共計有 17 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 2-3.38)。而本測線測量點位經查證後已確認測量樁點柚子坑（G824）已滅失，無法繼續觀測。

根據圖 2-3.39，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2003 年 10 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 年 3 月至 2020 年 4 月之垂直速度，六甲斷層以西的高程地形變化雖較和緩，但垂直速率卻有逐步抬升的趨勢（約-16.0～4.0 mm/yr)，在通過六甲斷層至觸口斷層之間有達 10.0 mm/yr 以上的垂直抬升速度。由於本測線自六甲斷層以東，點位的地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入山區地段，地表垂直運動活動性增加。

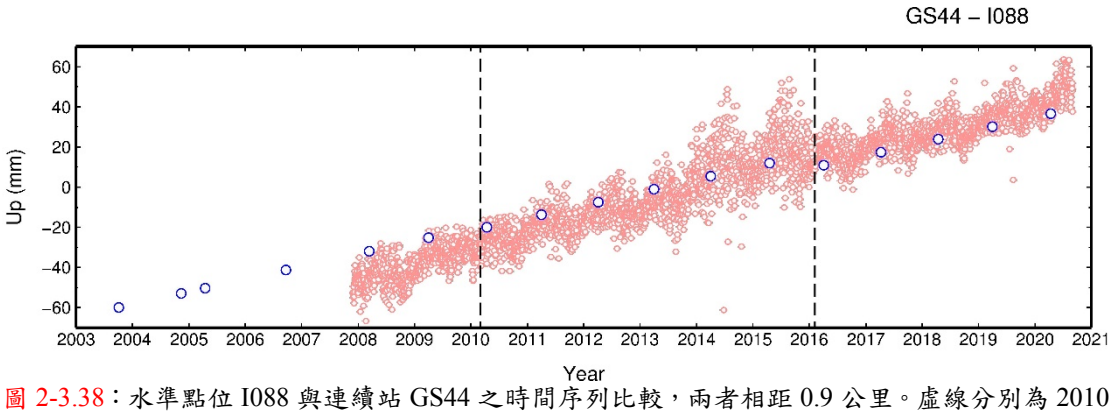


圖 2-3.38：水準點位 I088 與連續站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.38: Time series comparison between leveling bench mark I088 and continuous GPS station GS44. The distance between two stations are 0.9 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake and the right one is the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake.

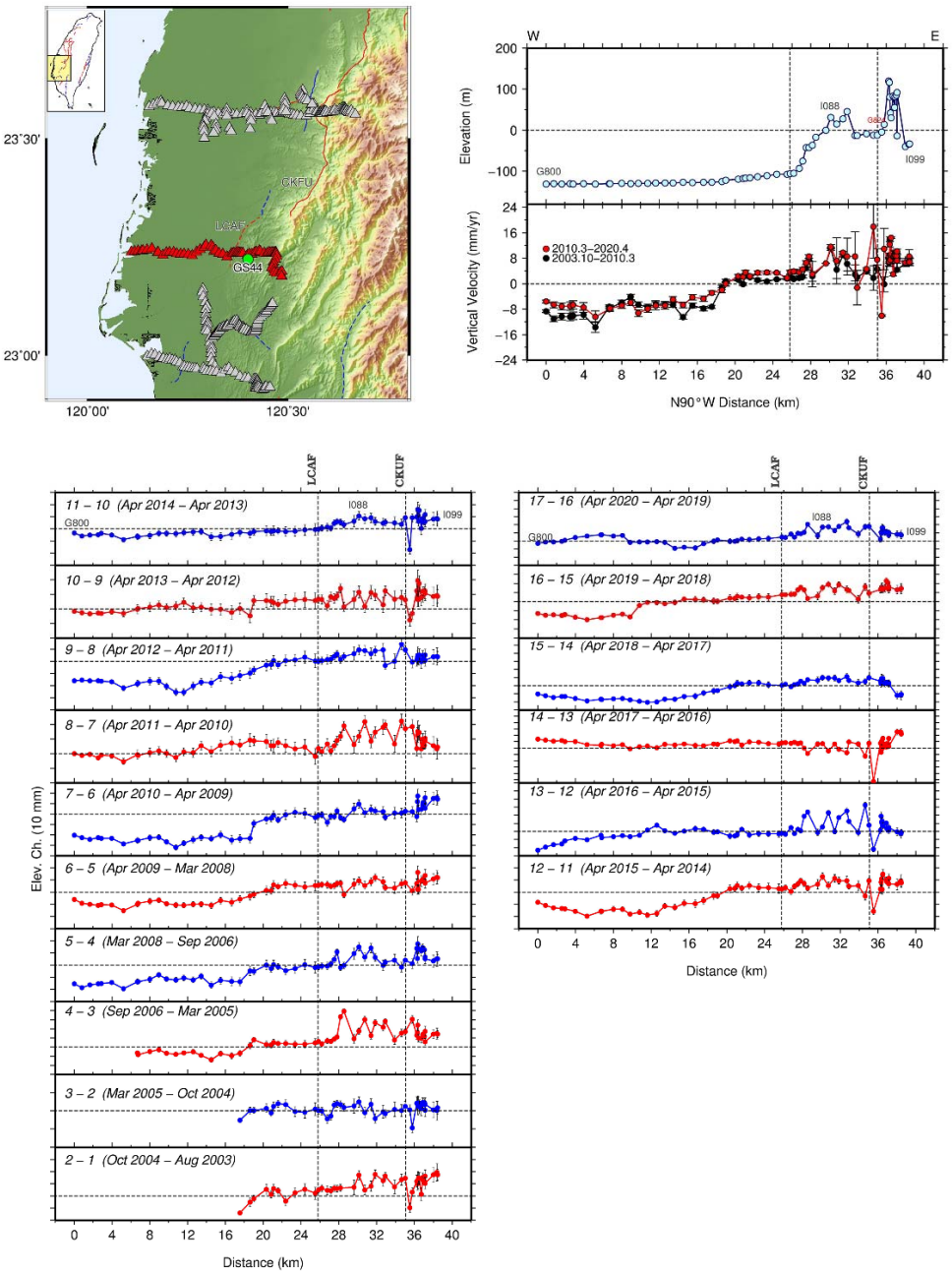


圖 2-3.39：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑色為 2003 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、CKUF 為觸口斷層。

Figure 2-3.39: Elevation change of the Miaoli-Nanzhuang leveling route. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , red is the vertical velocity from 2010 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LCAF is Liuchia fault, and CKUF is Chukou fault.

2-3-4-3 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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（0.9 mm/yr），作為約制點來校正 G377 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-4.40），由於 G374 自去年遺失今後將以相近的 G377 作為取代。

根據圖 2-4.41，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 11 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月之垂直速度、藍色為 2016 年 3 月至 2020 年 10 月之垂直速度。 此測線北段（新化斷層以北）之垂直速度約落在 0.0 mm/yr 到 2.0 mm/yr 之間，南段（新化斷層以南）垂直速度則約落在-1.0 ~ -3.0 mm/yr 之間，地形高程在跨越斷層後也有約 25.0 m 之抬升現象（新化高中至關廟區）。

2016 年 2 月芮氏規模 6.4 的美濃地震，造成此水準測線點位有-7.0 ~ 39.0 mm 之同震位移量。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在測線南段（約新化區至關廟區一帶）最大變化量達 39.0 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮地震之同震位移之影響。

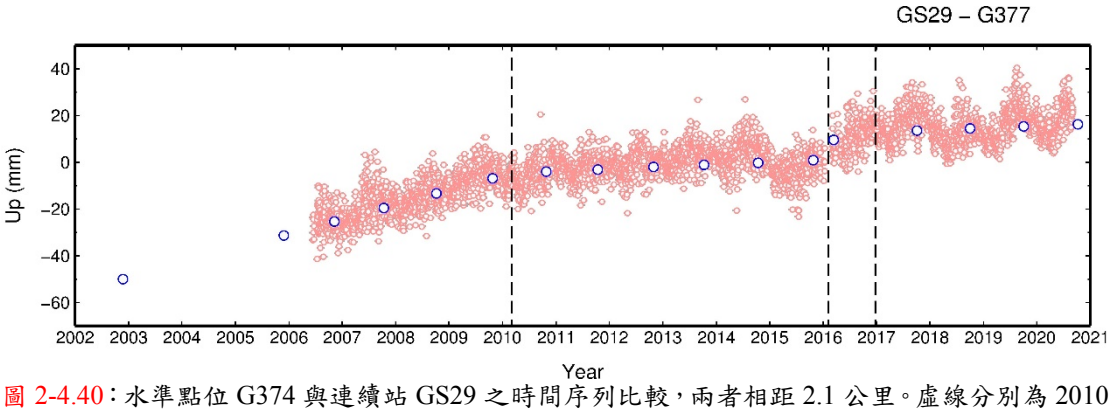


圖 2-4.40：水準點位 G374 與連續站 GS29 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-4.40: Time series comparison between leveling bench mark G377 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 them correction of coseismic slip event.

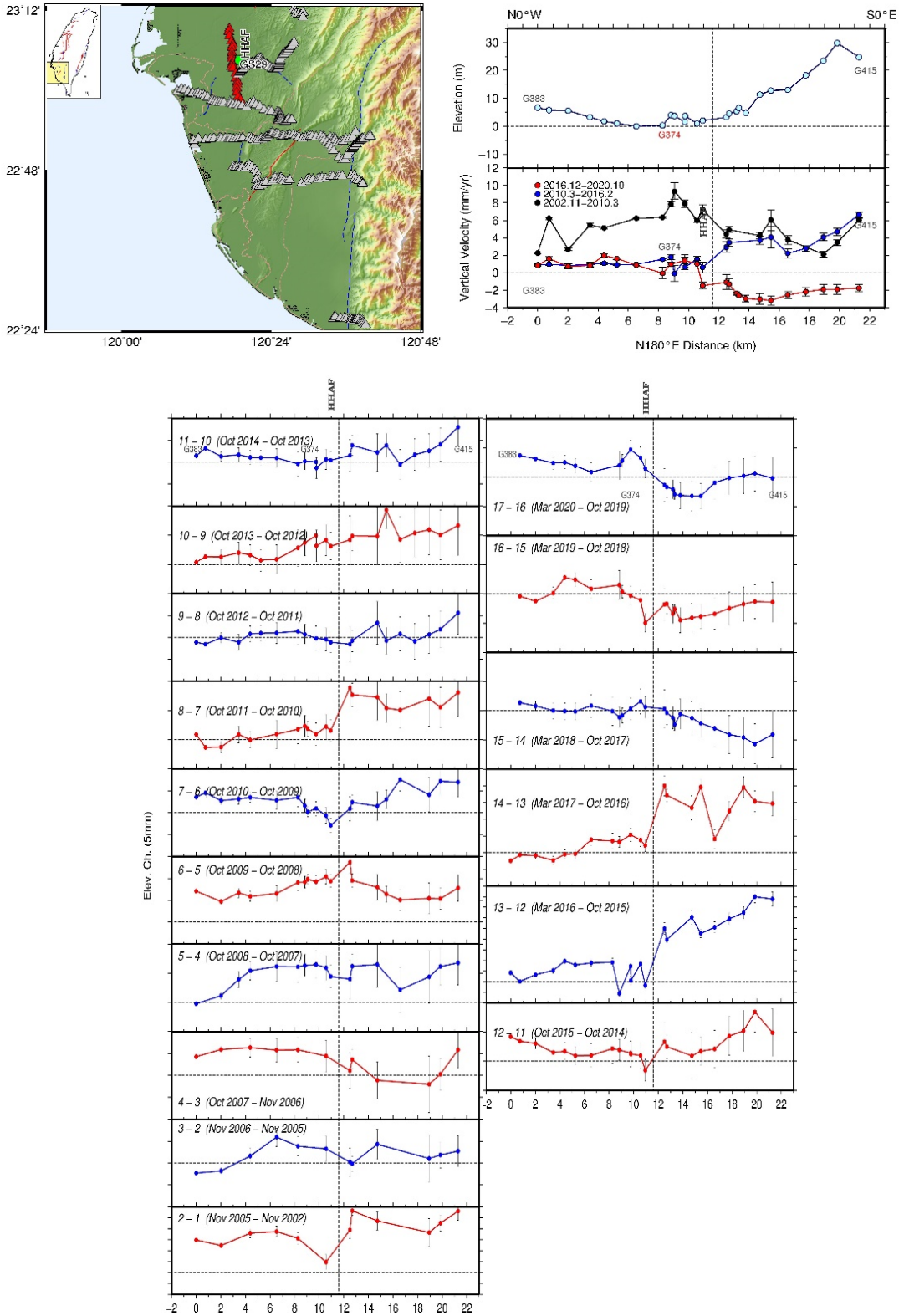


圖 2-4.41：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層 。

Figure 2-3.41: Elevation change of the Shanhua-Guanmiao leveling route. Black is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake of 2003-2010 , blue is the vertical velocity before the Meinong earthquake of 2010-2016, red is the vertical velocity from 2016 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault.

2-3-4-4 安平至龍崎測線

安平至龍崎測線橫跨後甲里斷層，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 2006 年至 2020 年共計有 14 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS73 之垂直速率（1.1 mm/yr），作為約制點來校正 G358 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.42），2016 年美濃地震前垂直抬升速率約為 2.5 mm/yr，而 2017 年美濃地震後抬升速率上升至約 5.7 mm/yr。

根據圖 2-3.43，黑色為 2001 年 7 月至 2003 年 12 月之垂直速度，在跨越後甲里斷層前後皆為沉降約 5.0 ~ 10.0 mm/yr，越靠近龍船斷層時逐步抬升但跨越該斷層後出現沉降現象：綠色為 2003 年 12 月至 2010 年 5 月之垂直速度，跨越後甲里斷層前為沉降約 5.0 ~ 10.0 mm/yr，但跨越後甲里斷層後有明顯沉降速度減緩情況，直至靠近龍船斷層前才逐步變成抬升現象；藍色為 2010 年 5 月至 2016 年 2 月之垂直速度，在後甲里斷層以西呈現 5.0 ~ 15.0 mm/yr 的沉降運動，通過後甲里斷層後亦呈現約 10.0 mm/yr 沉降速度，往東逐漸抬升直至通過龍船斷層後才變為沉降運動；紅色為 2016 年 12 月至 2020 年 5 月之垂直速度，後甲里斷層以西呈現 0.0 ~ 5.0 mm/yr 沉降現象，而往東通過斷層後呈現抬升現象，以 0 ~ 20.0 mm/yr 的數值越往東遞增。由歷年高程變化圖可知，美濃地震在關廟至龍船斷層附近有產生同震抬升的型態。

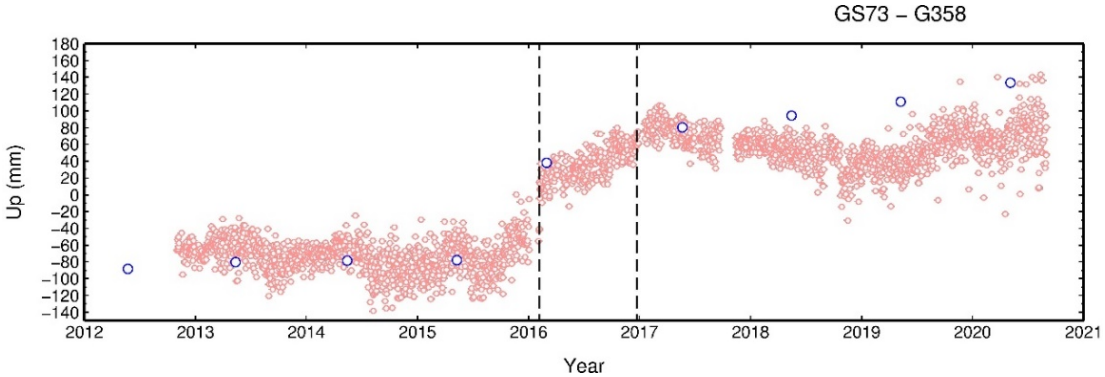


圖 2-3.42：水準點位 G358 與連續站 GS73 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2016 年 2 月 6 日美濃地震及 2017 年 2 月 11 日美濃地震。

Figure 2-3.42: Time series comparison between leveling bench mark G358 and continuous GPS station GS73. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the February 6th 2016 Meinong earthquake, the right is the February 11th 2017 Meinong earthquake.

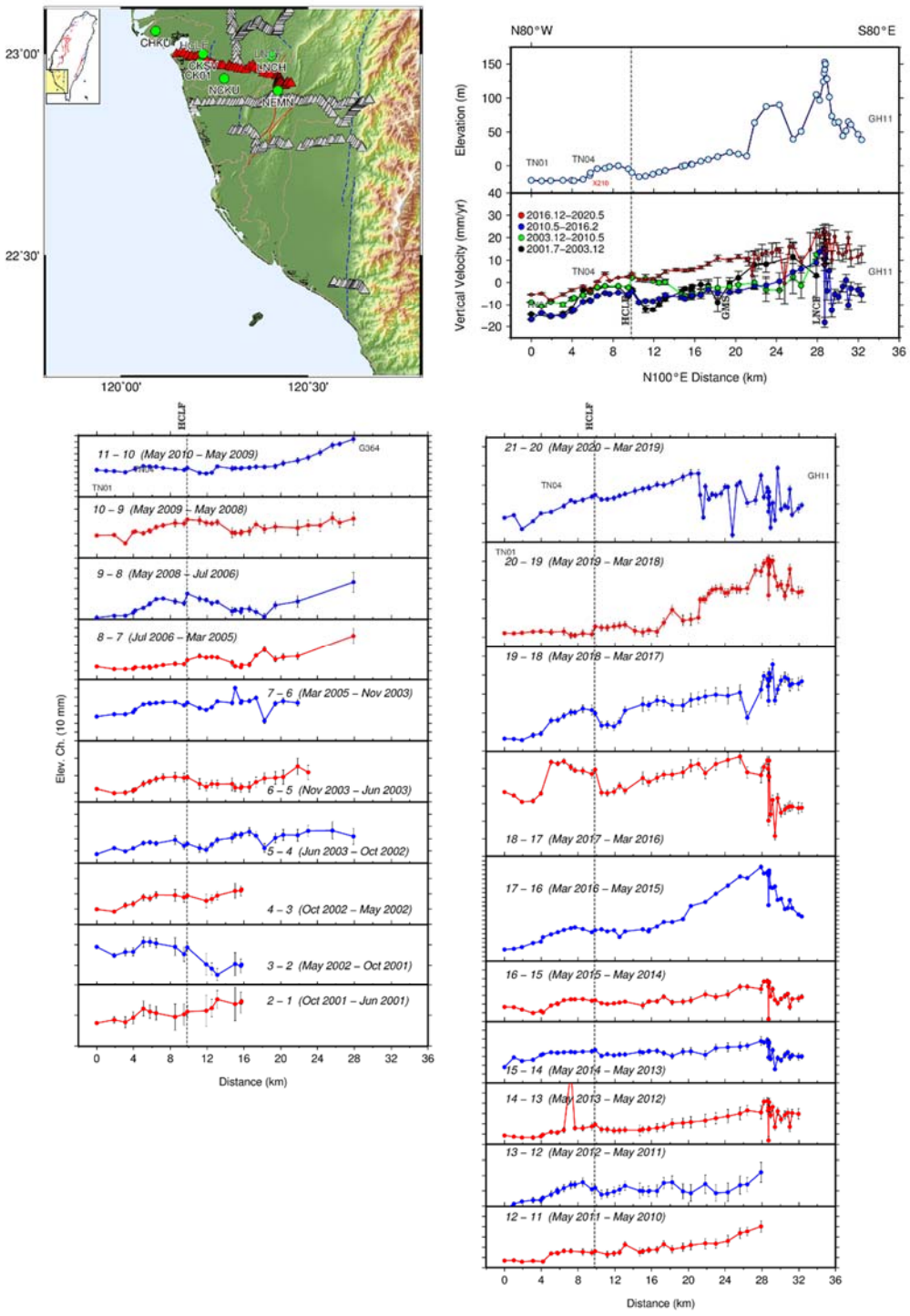


圖 2-3.43：安平至龍崎測線水準高程變化圖。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層。

Figure 2-3.43: Elevation change of the Anping-Longci leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCLF is the Houchiali fault.

2-3-4-5 玉井至新化測線

玉井至新化精密水準測線橫跨左鎮斷層，測線長約 25 公里，從 2001 年至 2020 年共計有 21 次施測。本測線以 GPS 連續站 CK01 之垂直速率（3.4 mm/yr），作為約制點來校正 TN04 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.44）。

根據圖 2-3.45，新化斷層兩側有明顯垂直速度的變化，西側以約 3 mm/yr 沉降速率運動，跨越斷層後逐步增加至約 3 mm/yr 的抬升速率。而橫跨左鎮斷層兩側並無明顯垂直運動方向的不同，但抬升速度逐步增加至約 5 mm/yr。此外本測線的 J006（新化高中）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。

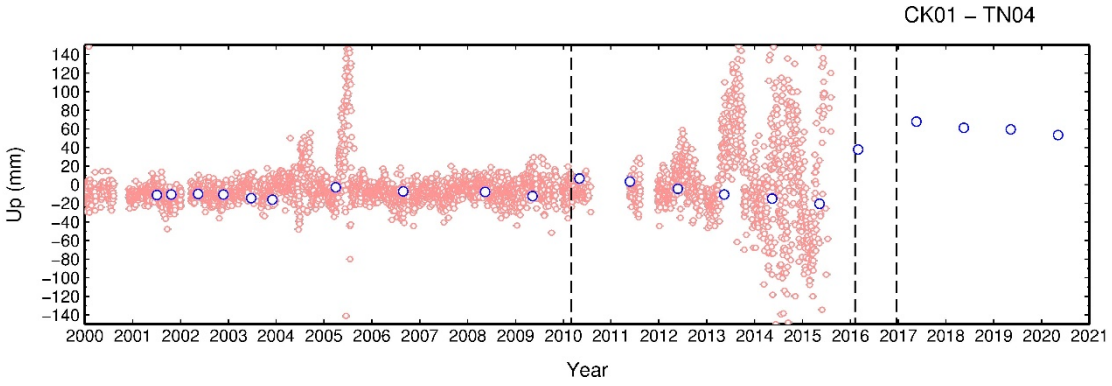


圖 2-3.44：水準點位 TN04 與連續站 CK01 之時間序列比較，兩者相距 1.4 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震、2016 年 2 月 6 日美濃地震及 2017 年 2 月 11 日美濃地震。

Figure 2-3.44: Time series comparison between leveling bench mark TN04 and continuous GPS station CK01. The distance between two stations are 1.4 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right two are the Feburary 6th 2016 Meinong earthquake and the Feburary 11th 2017 Meinong earthquake.

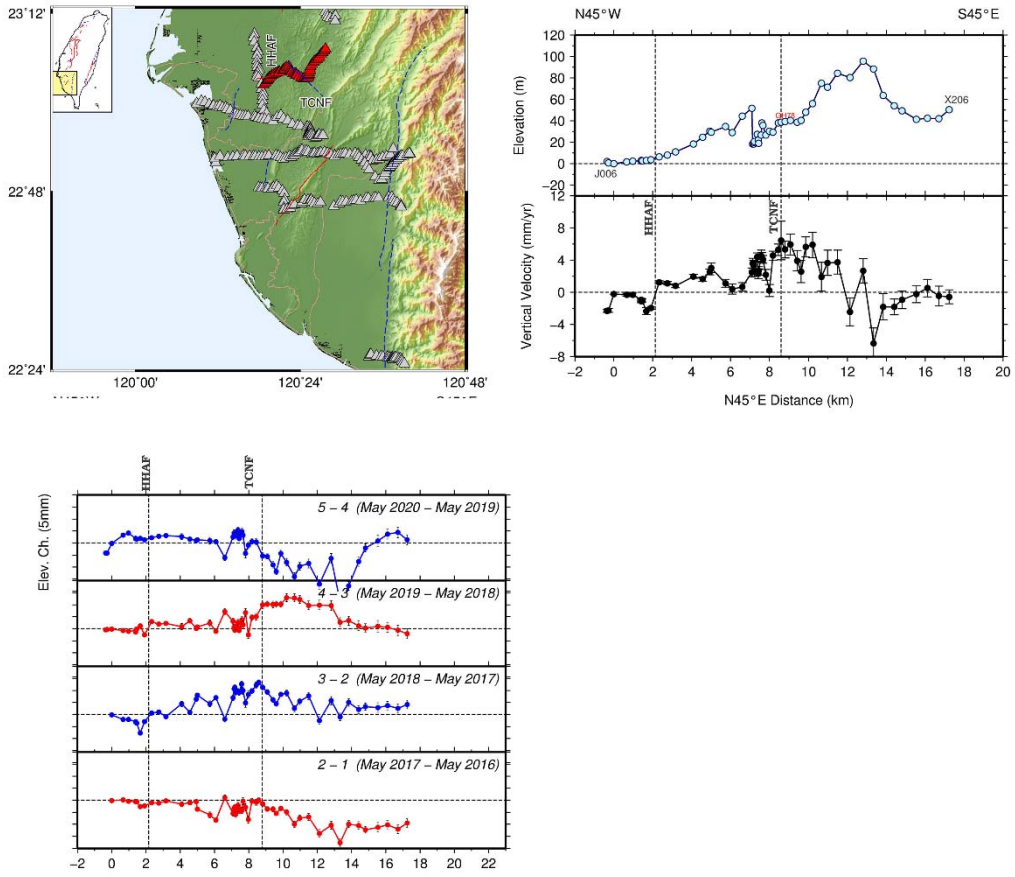


圖 2-3.45：台 20_新化至玉井測線路線圖。下欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層、TCNF 為左鎮斷層。

Figure 2-3.45: Elevation change of the Yujing-Xinhua leveling route. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HHAF is Hsinhua fault, and TCNF is Tsochen fault.

2-3-5 高屏地區精密水準測線

2-3-5-1 路竹至茂林測線

高屏地區完成的精密水準測線為路竹-茂林測線，其橫跨小岡山、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 2020 年共計有 17 次施測。本測線以 GPS 連續站 GS55 之垂直速率（0.1 mm/yr），作為約制點來校正 R016 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.46）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點情人廣場（GG33）及濫墾山地告示牌（G665）已滅失，無法繼續觀測。

台 28_路竹至茂林測線於中壇附近分成北（縣 184 主線）與南（台 27 副線）兩條水準測線。圖 2-3.47 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中藍色為 2002 年 12 月至 2010 年 3 月、紅色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、黑色為 2016 年 12 月至 2020 年 2 月，主線於小岡山斷層的垂直速率持續增加（約 0.0～20.0 mm/yr），與地形剖面比較，此區域（月世界一帶）垂直速率增加之處與地形高程變化並不吻合，目前對於此結果的解釋仍然沒有定論，可能與小岡山斷層的運動、活動背斜的活躍或是泥貫入體的發育有關。

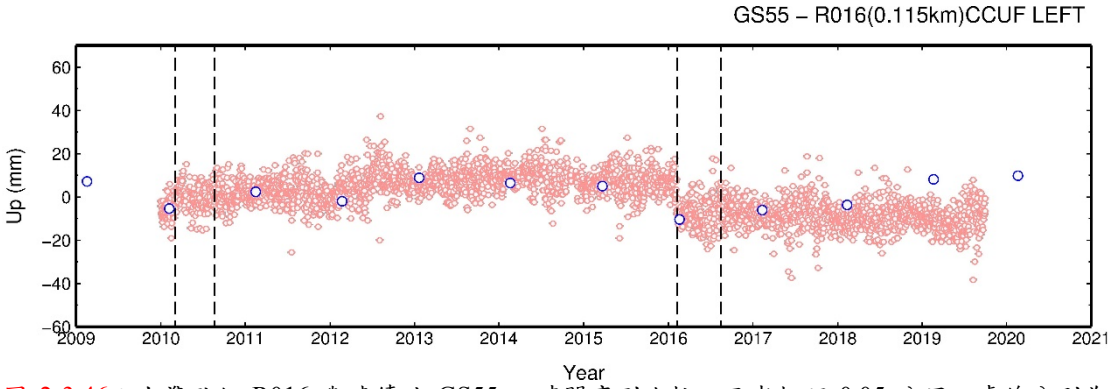


圖 2-3.46：水準點位 R016 與連續站 GS55 之時間序列比較，兩者相距 0.05 公里。虛線分別為 2010 年甲仙地震及 2016 年美濃地震及修正美濃震後滑移的事件。

Figure 2-3.46: Time series comparison between leveling bench mark R016 and continuous GPS station GS55. The distance between two stations are 0.05 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

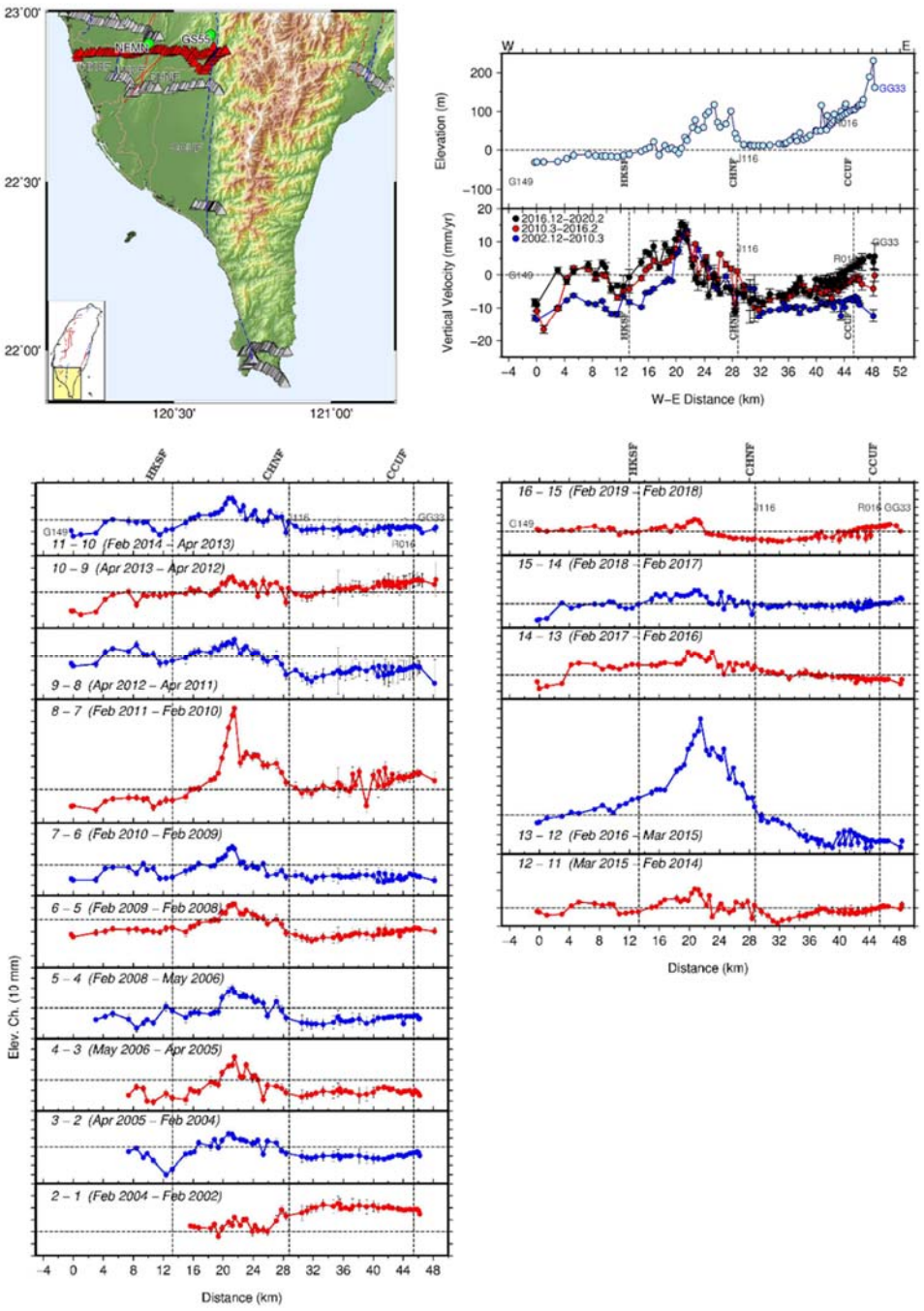


圖 2-3.47：台 28_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，藍色為 2002 - 2010 年甲仙地震震前垂直速度、紅色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度，黑色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.47: Elevation change of the Luzhu-Maolin leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the Jiaxian earthquake, red is the vertical velocity before the Meinong earthquake, black is the vertical velocity from 2016 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

2-3-5-2 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 2020 年共計 15 次施測。本測線以 GPS 連續站 AKND 之垂直速率（2.5 mm/yr），作為約制點來校正 G526 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.48）。

根據圖 2-3.49，各時間分段之水準平均抬升速率圖中綠色為 2004 年 3 月至 2010 年 3 月、藍色為 2010 年 3 月至 2016 年 2 月、紅色為 2016 年 2 月至 2018 年 5 月，垂直速度在跨越小崗山斷層至 旗山斷層之間有明顯的垂直運動改變的現象，約由 12.5 mm/yr 沉降運動改變成約 3.2 mm/yr 抬升運動；而旗山斷層至潮州斷層之間，沉降速度呈現緩降的趨勢，大致由 1.8 mm/yr 增加至 7.5 mm/yr；在橫跨潮州斷層區域，垂直速率並未有明顯之變化量（約在-1.0 mm/yr 左右），或許可說明潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生。

2016 年 2 月美濃地震造成此水準測線點位有-11.0～25.0 mm 之同震位移量。從歷年高程變化來看，此測線 2015 至 2016 年之變化並未如較北邊之路竹至茂林測線顯著，變化量約在 4.0 mm 到 30.0 mm 之間。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

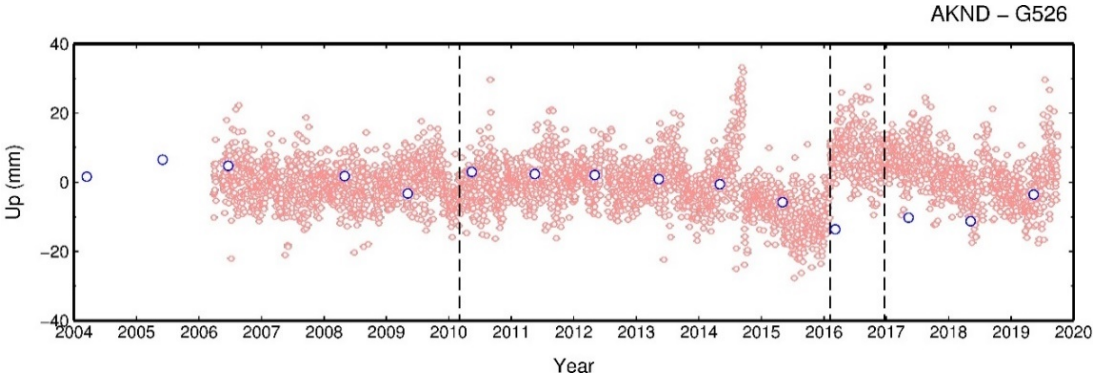


圖 2-3.48：水準點位 G526 與連續站 AKND 之時間序列比較，兩者相距 0.8 公里。虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震。

Figure 2-3.48: Time series comparison between leveling bench mark G526 and continuous GPS station AKND. The distance between two stations are 0.8 km. The left dashed line is the March 4 th 2010 Jiaxian earthquake, the right one is the Feburary 6th Meinong 2016 earthquake and the right one is the correction of coseismic slip event.

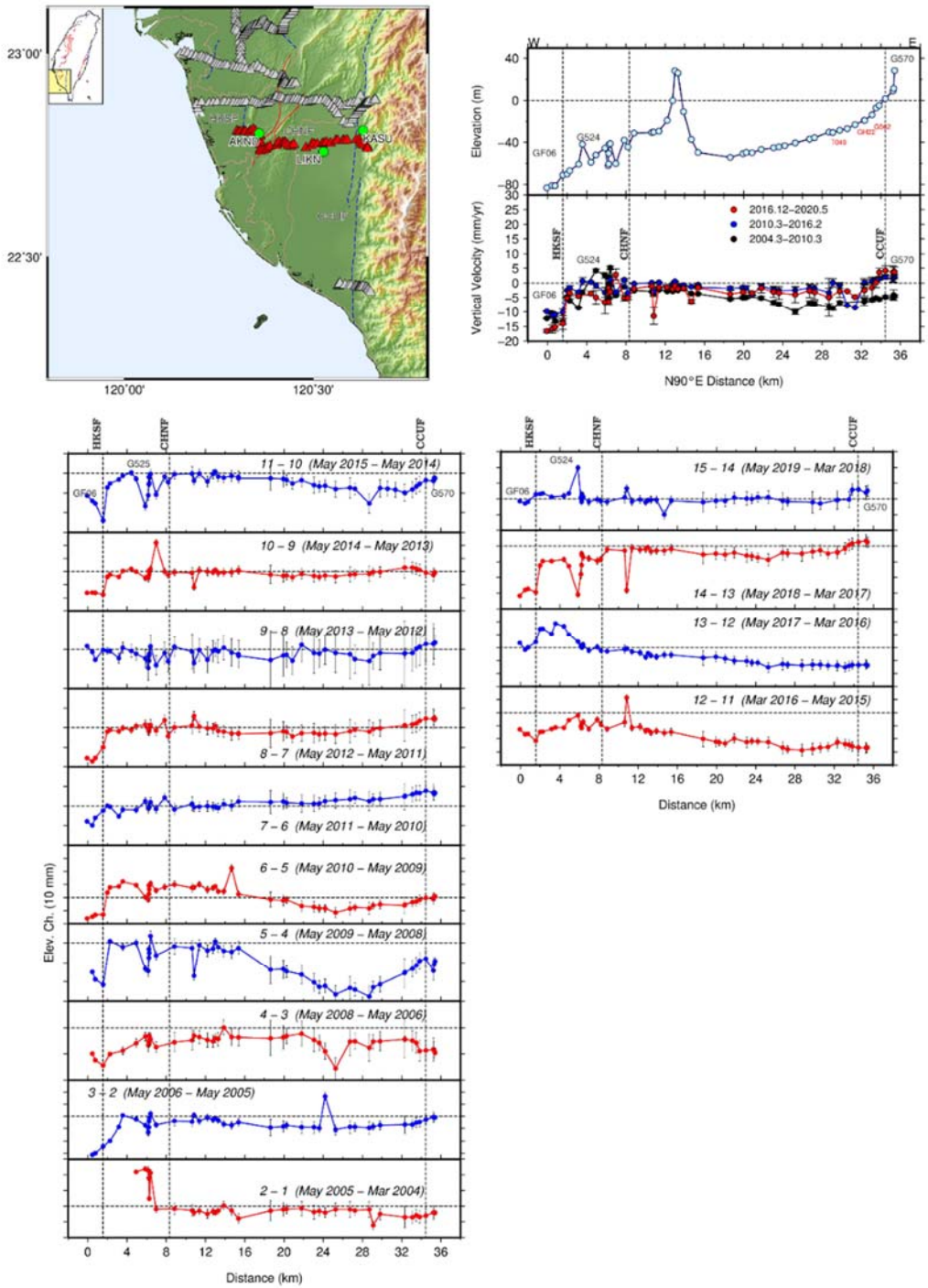


圖 2-3.49：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，所示黑色為 2004 - 2010 年甲仙地震震間垂直速度、藍色為 2010 - 2016 年甲仙地震與美濃地震震間垂直速度、紅色為 2016 年至今之垂直速度。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.49: Elevation change of the Kangshan-Anpo leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity during Jiaxian earthquake of 2004-2010, blue is the vertical velocity between the Jiaxian earthquake and Meinong of 2010-2016 , red is the vertical velocity from 2016 until now. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HKSF is Hsiaokangshan fault, CHNF is Chishan fault, and CCUF is Chaochou fault.

2-3-5-3 佳冬至七佳測線

佳冬至七佳測線橫跨潮洲斷層，長約 9 公里，於 2005 至 2020 年間共進行了 16 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（-14.8 mm/yr），作為約制點來校正 GC85 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.50）。

根據圖 2-3.51，該測線於 2007~2008 年間之高程變化與其他時段（2005~2007 年、2008~2010 年）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19~8/21；水準測量期間：9/04~9/09）。潮州斷層西側之垂直速度變化較明顯，最大值達-20.0 mm/yr；而斷層東側 2 公里內之變化較小，垂直速度落在 -0.2 至 1.0 mm/yr 之間。

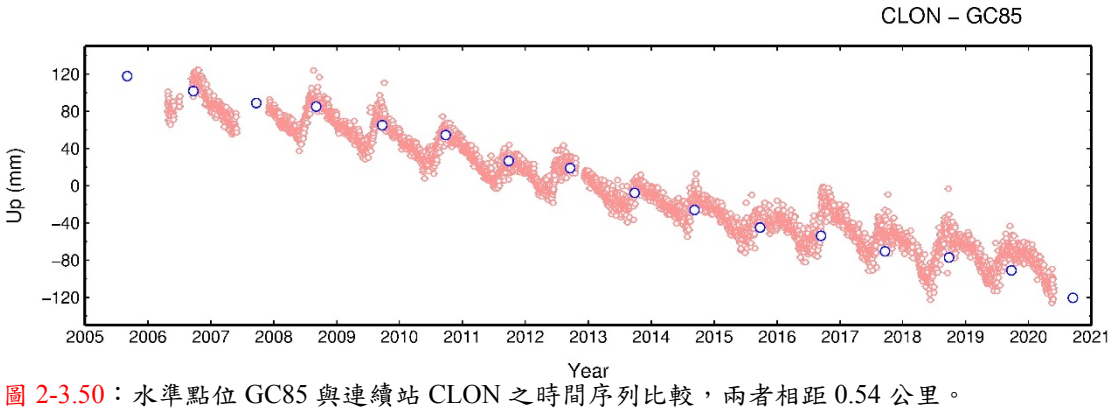


圖 2-3.50：水準點位 GC85 與連續站 CLON 之時間序列比較，兩者相距 0.54 公里。

Figure 2-3.50: Time series comparison between leveling bench mark GC85 and continuous GPS station CLON. The distance between two stations are 0.54 km.

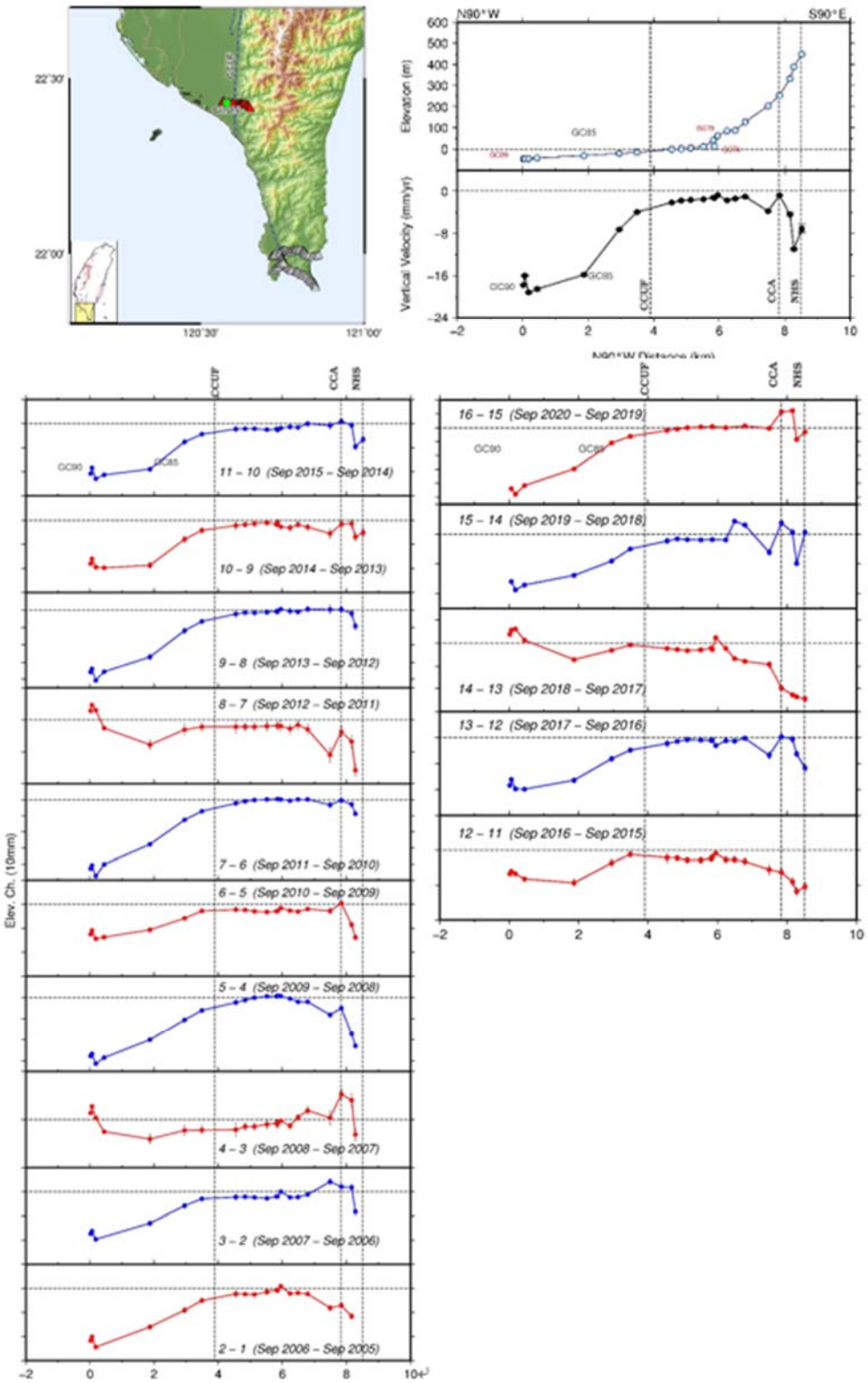


圖 2-3.51：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層。

Figure 2-3.51: Elevation change of the Jiadong-Qijia leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. CCUF is Chaochou fault.

2-3-6 恆春地區精密水準測線

2-3-6-1 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 2-3.52）。本測線測量點位經查證後已確認測量樁點進誠橋（G674）已滅失，無法繼續觀測。

由圖 2-3.53 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月、藍色為 2006 年 12 月至 2009 年 10 月、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至 2020 年 4 月。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。恆春西台地至佳樂水測線之點位，最大同震沉降量達 63.1 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

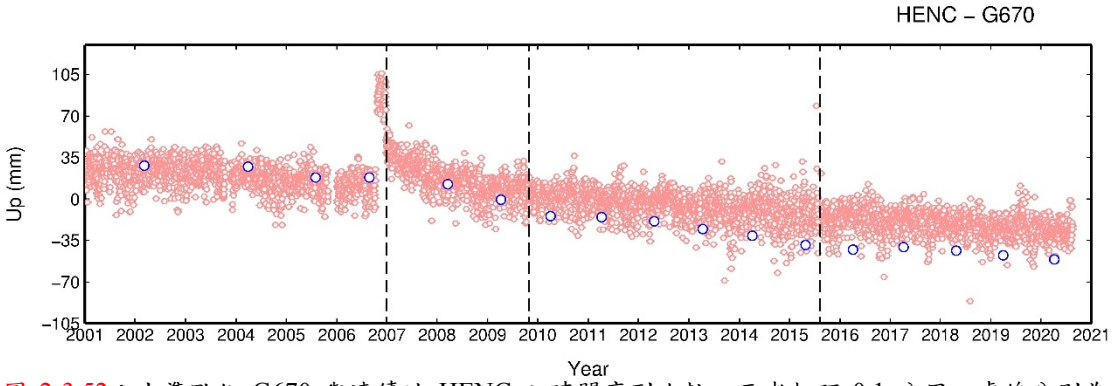


圖 2-3.52：水準點位 G670 與連續站 HENC 之時間序列比較，兩者相距 0.1 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 2 日速度發生變化及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.52: Time series comparison between leveling bench mark G670 and continuous GPS station HENC. The distance between two stations are 0.1 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle one is the April 2nd 2010 velocity change event and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

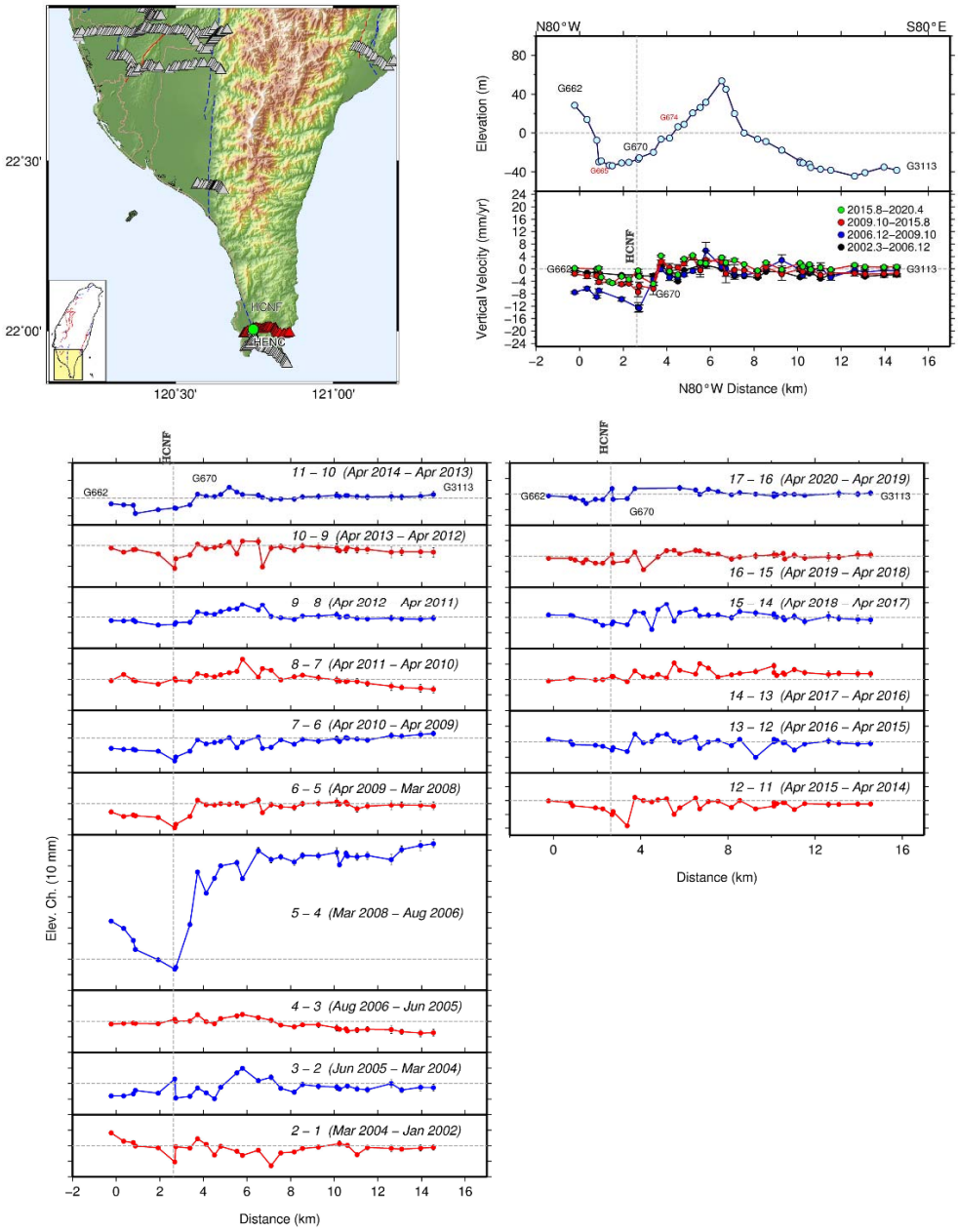


圖 2-3.53：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2009 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.53: Elevation change of the Hengchun-Jialeshuei leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2009 , red is the vertical velocity of 2009-2015,green is the vertical velocity from 2015 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-6-2 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 2-3.54、圖 2-3.55）。

由圖 2-3.56 顯示，各時間分段之水準平均抬升速率圖中黑色為 2002 年 3 月至 2006 年 12 月，大致呈現沉降速度約 5 mm/yr；藍色為 2006 年 12 月至 2009 年 10 月，跨斷層兩側出現明顯垂直運動的不同，斷層西側逐漸抬升至約 6 mm/yr；紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月，跨斷層西側的抬升速度減緩至 1 mm/yr；綠色為 2015 年 8 月至 2020 年 4 月，跨斷層兩側亦出現明顯垂直運動的不同，斷層西側抬升速度至約 3 mm/yr。

2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之芮氏規模 7.0 的地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層兩側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月間有明顯變化。南樹林至鵝鑾鼻測線，最大同震沉降量達 76.1 mm。因此速度之估算是藉由坐標時間序列之擬合而得，同時也考慮兩個地震之同震位移之影響。

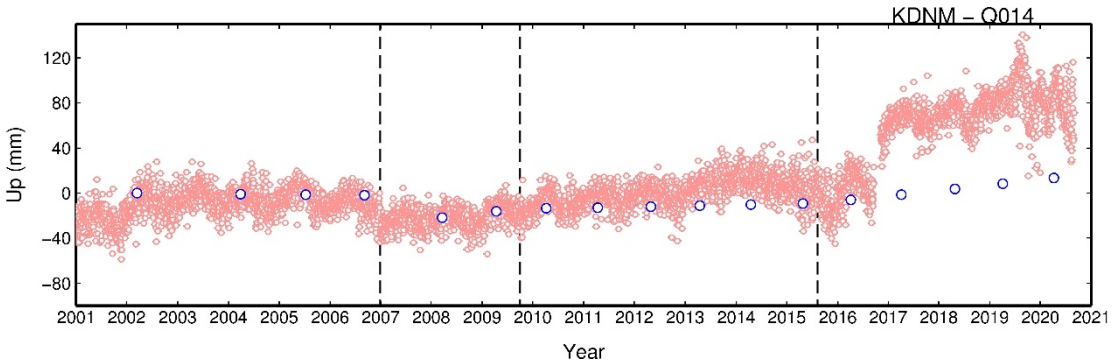


圖 2-3.54：水準點位 Q014 與連續站 KDNM 之時間序列比較，兩者相距 0.2 公里。虛線分別為 2006 年 12 月 26 日恆春地震、2010 年 4 月 2 日速度發生變化及 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.54: Time series comparison between leveling bench mark Q014 and continuous GPS station KDNM. The distance between two stations are 0.2 km. The left dashed line is the December 26th 2006 Hengchun earthquake, the middle one is the April 2nd 2010 velocity change event and the right one is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

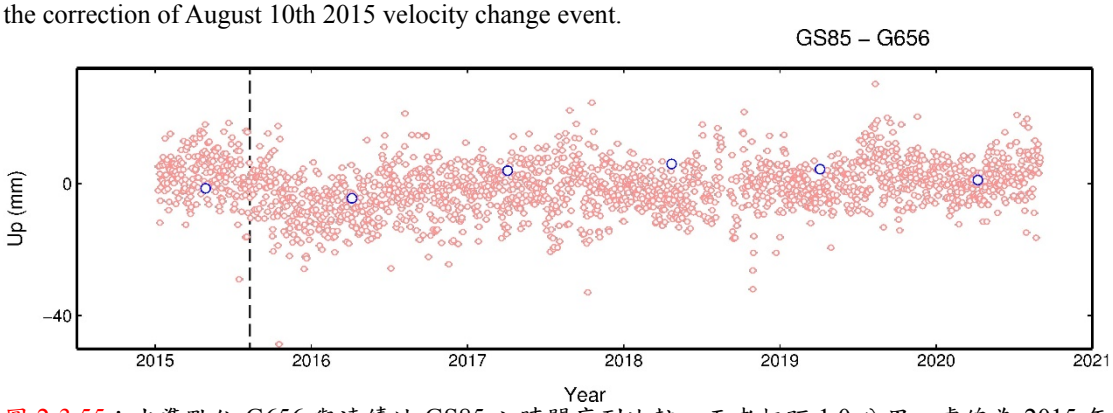


圖 2-3.55：水準點位 G656 與連續站 GS85 之時間序列比較，兩者相距 1.0 公里。虛線為 2015 年 8 月 10 日速度發生變化。

Figure 2-3.55: Time series comparison between leveling bench mark G656 and continuous GPS station GS85. The distance between two stations are 0.1 km. The dashed line is the correction of August 10th 2015 velocity change event.

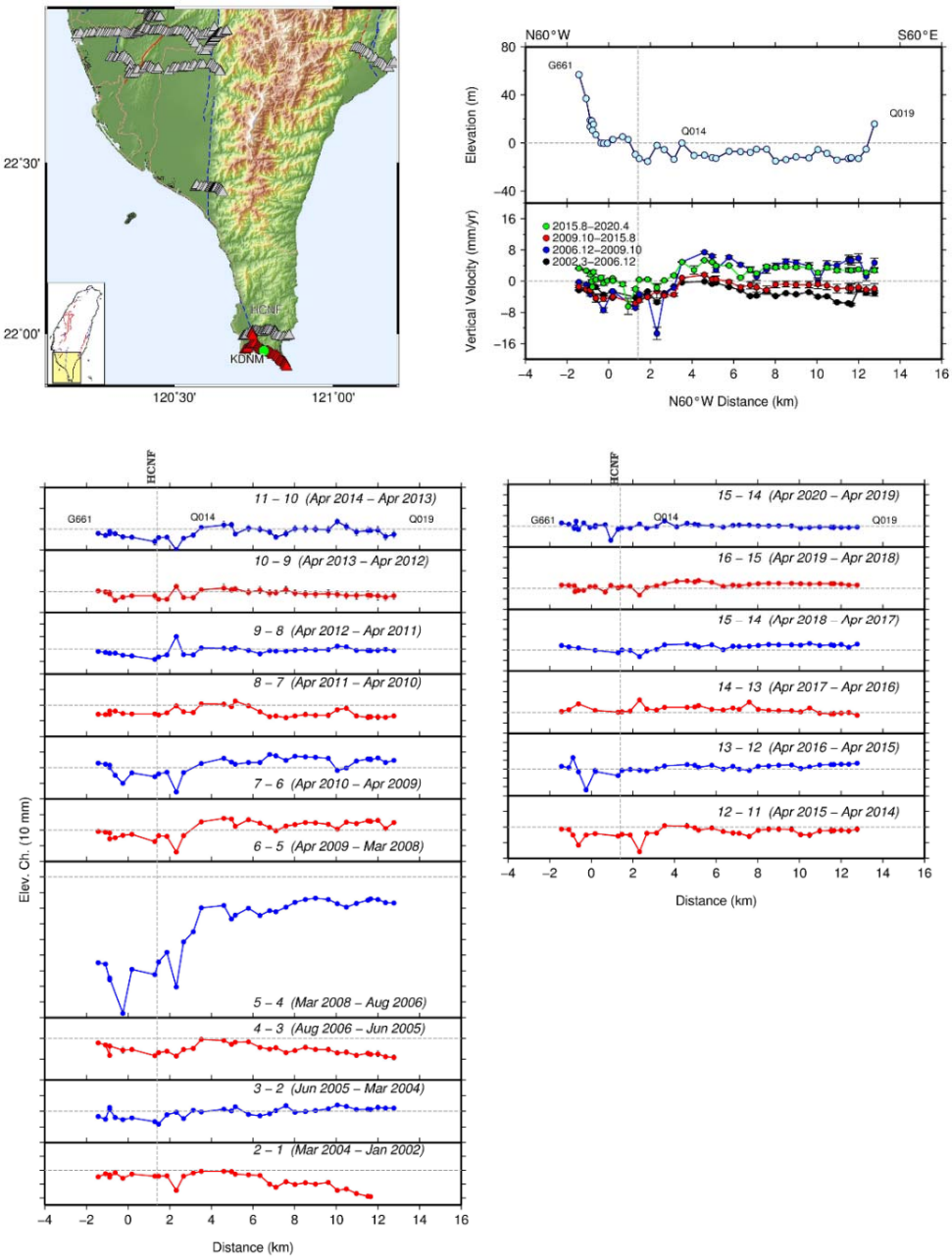


圖 2-3.56：台 26_南樹林至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，黑為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度、藍色為 2006 - 2009 年恆春地震震後垂直速度、紅色為 2009 年 10 月至 2015 年 8 月、綠色為 2015 年 8 月至今之垂直速度。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

Figure 2-3.56: Elevation change of the Nanshulin-Eluanbi leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the Hengchun earthquake of 2002-2006, blue is the vertical velocity after the Hengchun earthquake of 2006-2009 , red is the vertical velocity of 2009-2015,green is the vertical velocity from 2015 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. HCNF is Hengchun fault.

2-3-7 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。

2-3-7-1 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 2020 年共計有 18 次施測，其中 2018 年因為花蓮地震，故在該年 2、10 月進行施測。本測線以 GPS 連續站 TUNM 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 G979 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率（圖 2-3.57）。由於道路坍方故自 2016 年後僅有 N670 以東之垂直速度資料。

根據圖 2-3.58，2018 年以後此測線在嶺頂斷層西側之垂直速度約由 20.8 mm/yr 降至-10.3 mm/yr，以靠山區之測站較以往增加最大差約 13.9 mm/yr 之抬升速率，而嶺頂斷層東側與以往相似皆呈沉陷之趨勢約-10.1mm/yr。

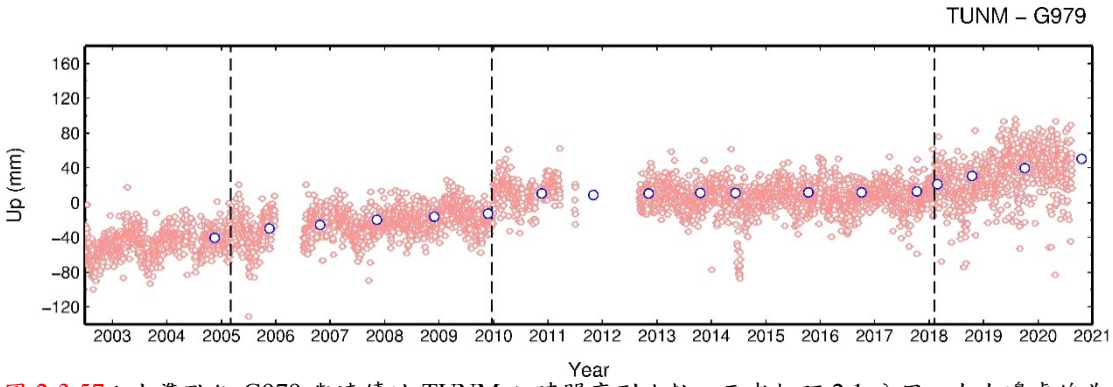


圖 2-3.57：水準點位 G979 與連續站 TUNM 之時間序列比較，兩者相距 2.1 公里。左左邊虛線為 2005 年 3 月 6 日蘇澳地震；中間虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.57: Time series comparison between leveling bench mark G979 and continuous GPS station TUNM. The distance between two stations are 2.1 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.

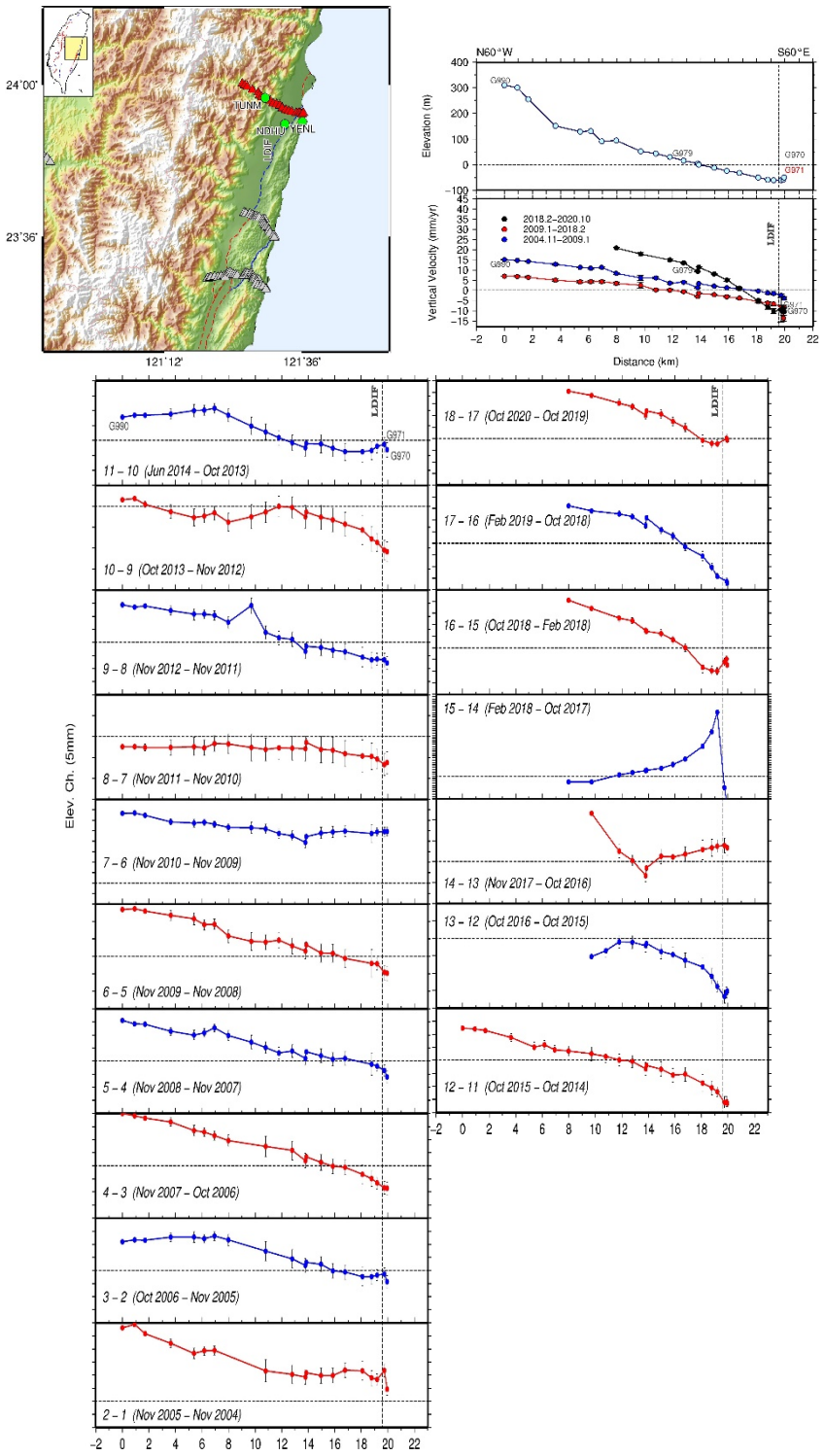


圖 2-3.58：嶺頂至瀧澗測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地直購造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

Figure 2-3.58: Elevation change of the Lingding-Takigami leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Blue is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, red is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2018 , black is the vertical velocity from 2018 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LDIF is Lingding fault.

2-3-7-2 光復至豐濱測線

光復至豐濱測線橫跨瑞穗及奇美斷層，測線長約 12 公里，從 2004 年至 2020 年共計有 18 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(圖 2-3.59)。

根據圖 2-3.60，此測線在奇美斷層以西之地表高程變化與垂直速度趨勢相似，但在奇美斷層東側則不一致。在瑞穗斷層西側之垂直速度在 2018 年花蓮地震後之速率約落在-20.9 mm/yr 至-12.8 mm/yr，跨斷層後則逐漸抬升至 0.1 mm/yr。在跨奇美斷層後之地表高程約有 4.5 m 的沉陷量，而垂直速度則從-12.3 mm/yr 緩升至-11.3 mm/yr。

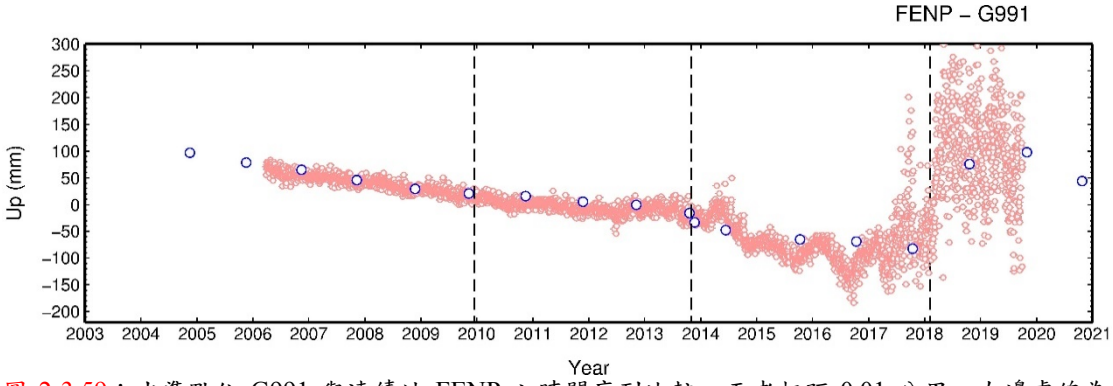


圖 2-3.59：水準點位 G991 與連續站 FENP 之時間序列比較，兩者相距 0.01 公里。左邊虛線為 2009 年 12 月 19 日花蓮地震；中間虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.59: Time series comparison between leveling bench mark G991 and continuous GPS station FENP. The distance between the two is 1.0 Km, the left one is the December 19th 2009 Hualien earthquake, the middle one is the October 31th 2013 Ruisui earthquake and the right one is the Feburary 6th 2018 Hualien earthquake.

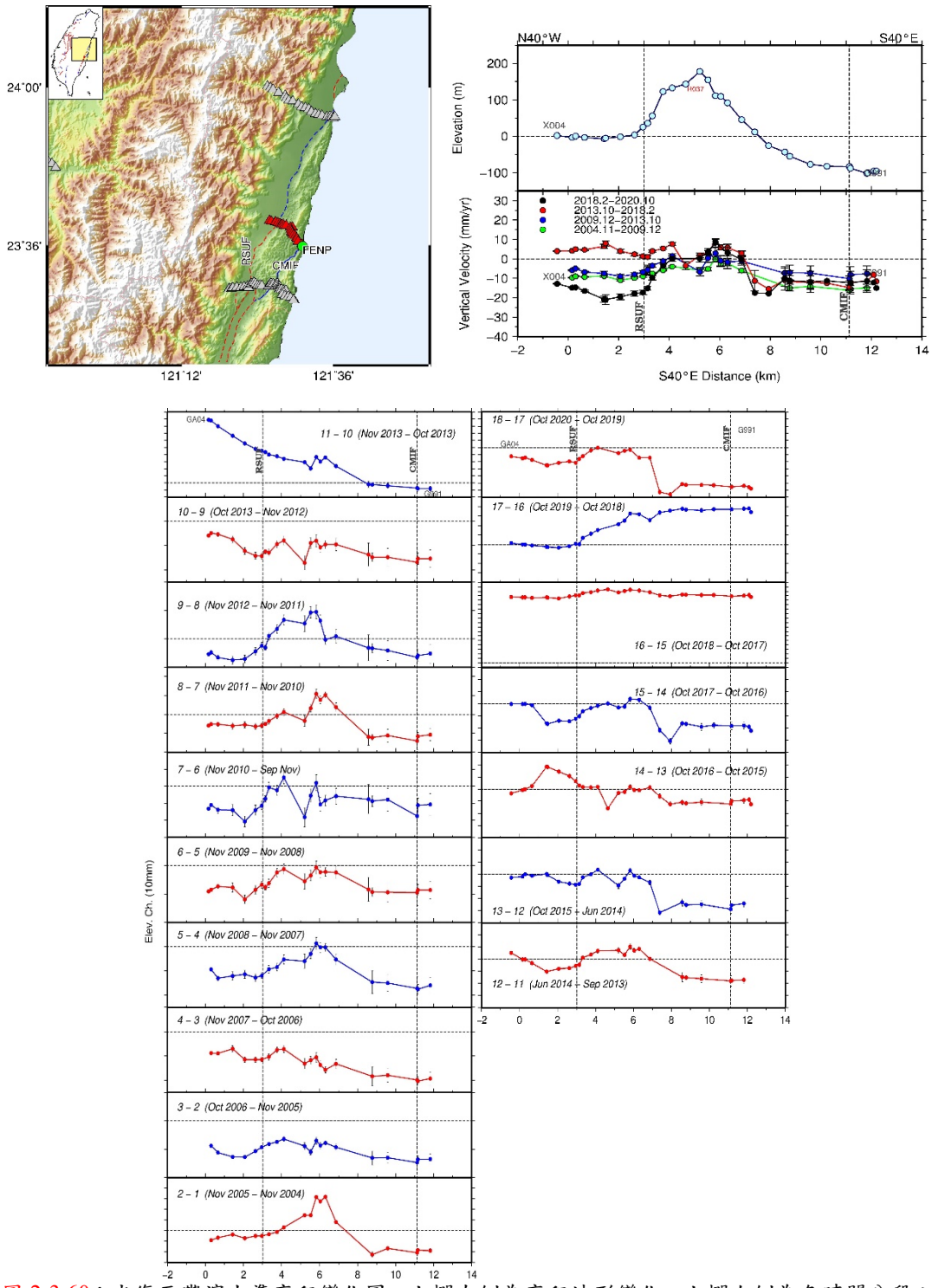


圖 2-3.60：光復至豐濱水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。RSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.60: Elevation change of the Guangfu-Toyohama leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity after the 2013 Ruisui earthquake of 2013-2018, black is the vertical velocity from 2018 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. RSUF is Rueyshui fault, CMIF is Chimei fault.

2-3-7-3 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，測線長約 18 公里，2004 年至 2020 年間進行共 18 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 2-3.61）。

根據圖 2-3.62，此測線在玉里斷層左側之垂直速度約由-4.4 mm/yr 降至-8 mm/yr，在玉里斷層東側至奇美斷層西側，速度變化約由-9.5 mm/yr 緩升至 1.9 mm/yr，可說明此測線跨過的三條斷層仍有地質活動。

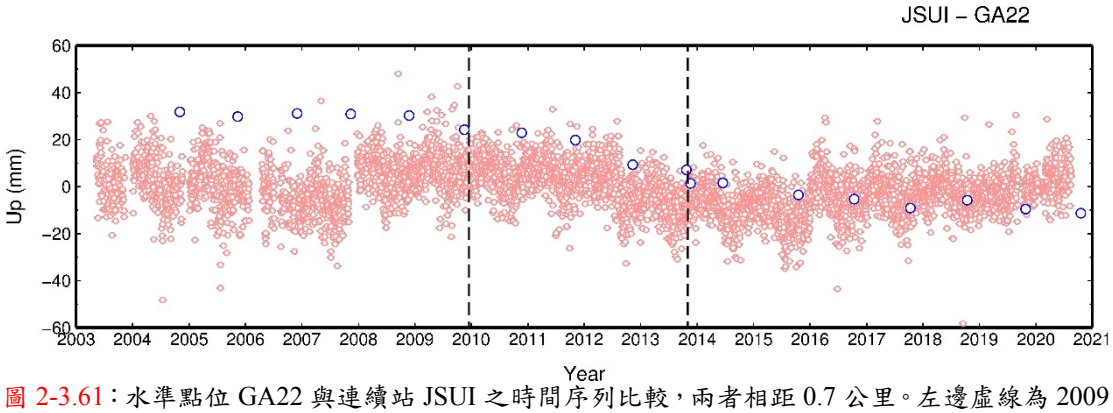


圖 2-3.61：水準點位 GA22 與連續站 JSUI 之時間序列比較，兩者相距 0.7 公里。左邊虛線為 2009 年 3 月 6 日蘇澳地震；右邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震。

Figure 2-3.61: 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.

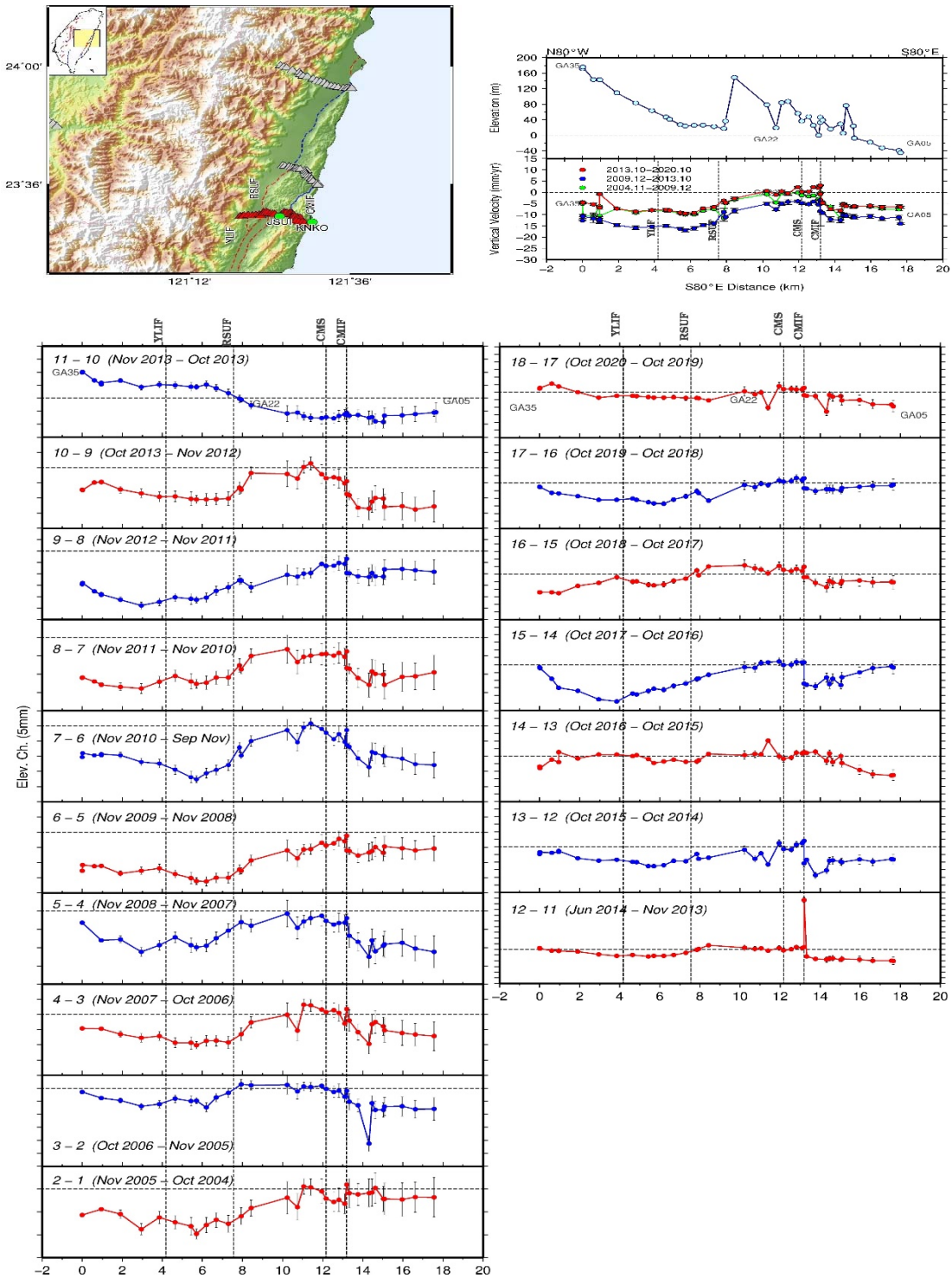


圖 2-3.62：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、RSUF 為瑞穗斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

Figure 2-3.62: Elevation change of the Hongye-Jingpu leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Green is the vertical velocity before the 2009 Hualien earthquake earthquake of 2004-2009, blue is the vertical velocity after the 2009 Hualien earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. YLIF is Yuli fault, RSUF is Rueyshui fault, CMS is Chimei syncline, CMIF is Chimei fault.

2-3-7-4 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，測線長約 14 公里，2009 年至 2020 年間共進行 12 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（2.2 mm/yr），作為控制點來校正 A086 相對於 GPS 測站 S01R 之垂直速率(圖 2-3.63)。

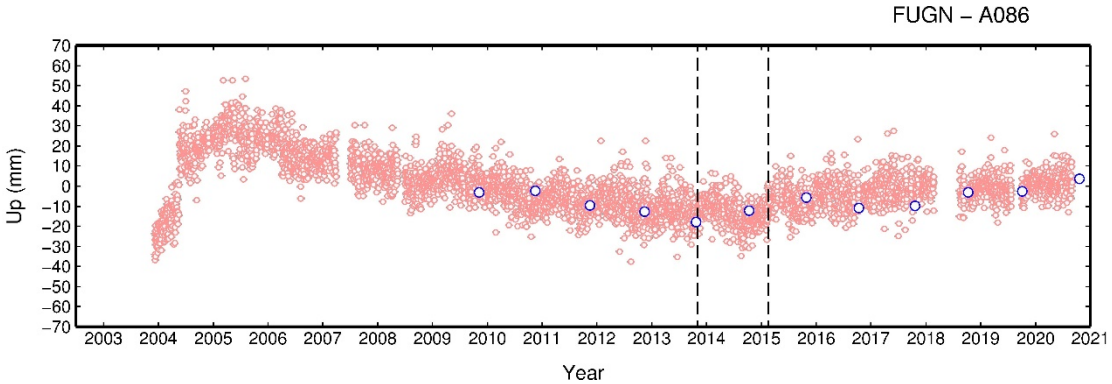


圖 2-3.63：水準點位 A086 與連續站 FUGN 之時間序列比較，兩者相距 0.3 公里。左邊虛線為 2013 年 10 月 31 日瑞穗地震；右邊虛線為 2015 年 2 月 14 日台東外海地震。

Figure 2-3.63: 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.

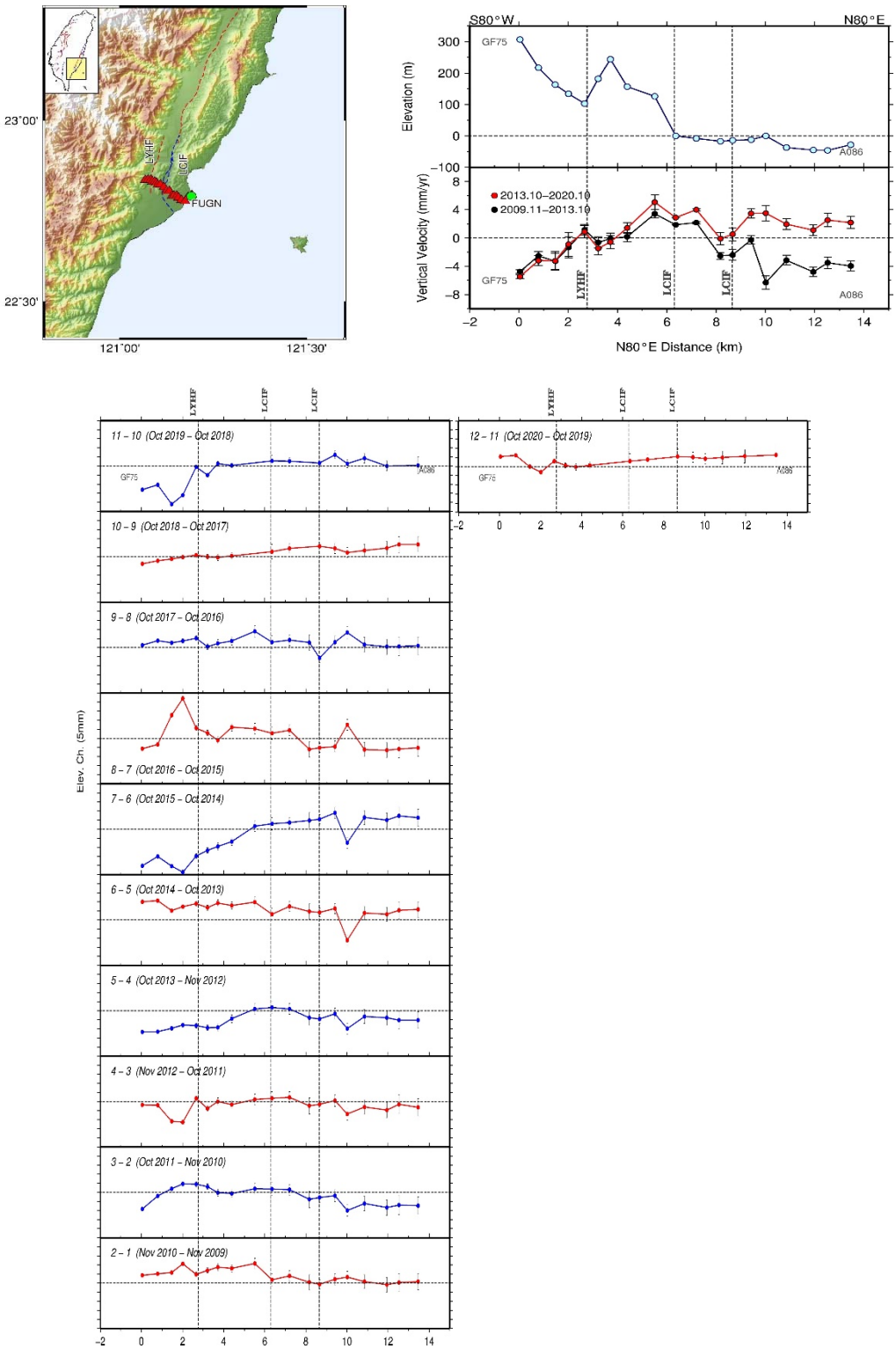


圖 2-3.64：東成至富岡測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

Figure 2-3.64: Elevation change of the Dongcheng-Fugang leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 5 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. LYHF is Luyeh fault, LCIF is Lichi fault.

2-3-8 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。

2-3-8-1 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，2011 年至 2020 年間共進行 10 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（圖 2-3.65）。

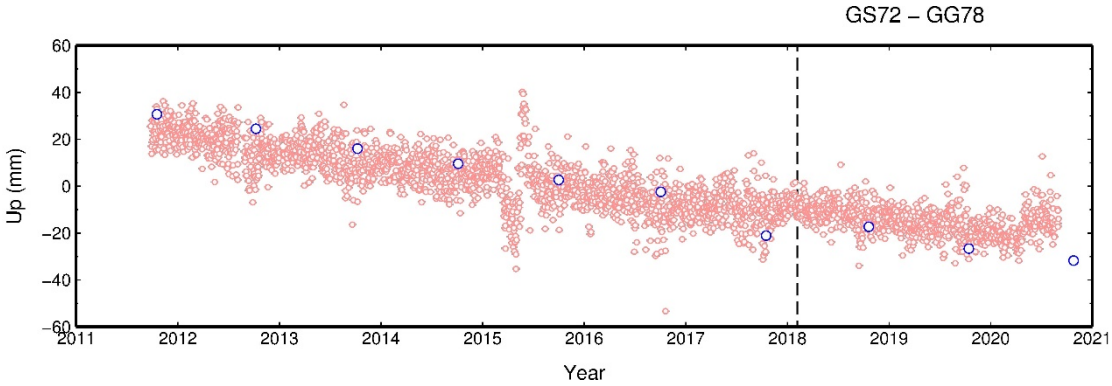


圖 2-3.65：水準點位 GG78 與連續站 GS72 之時間序列比較，兩者相距 1.1 公里。虛線為 2018 年 2 月 6 日花蓮地震。

Figure 2-3.65: 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.

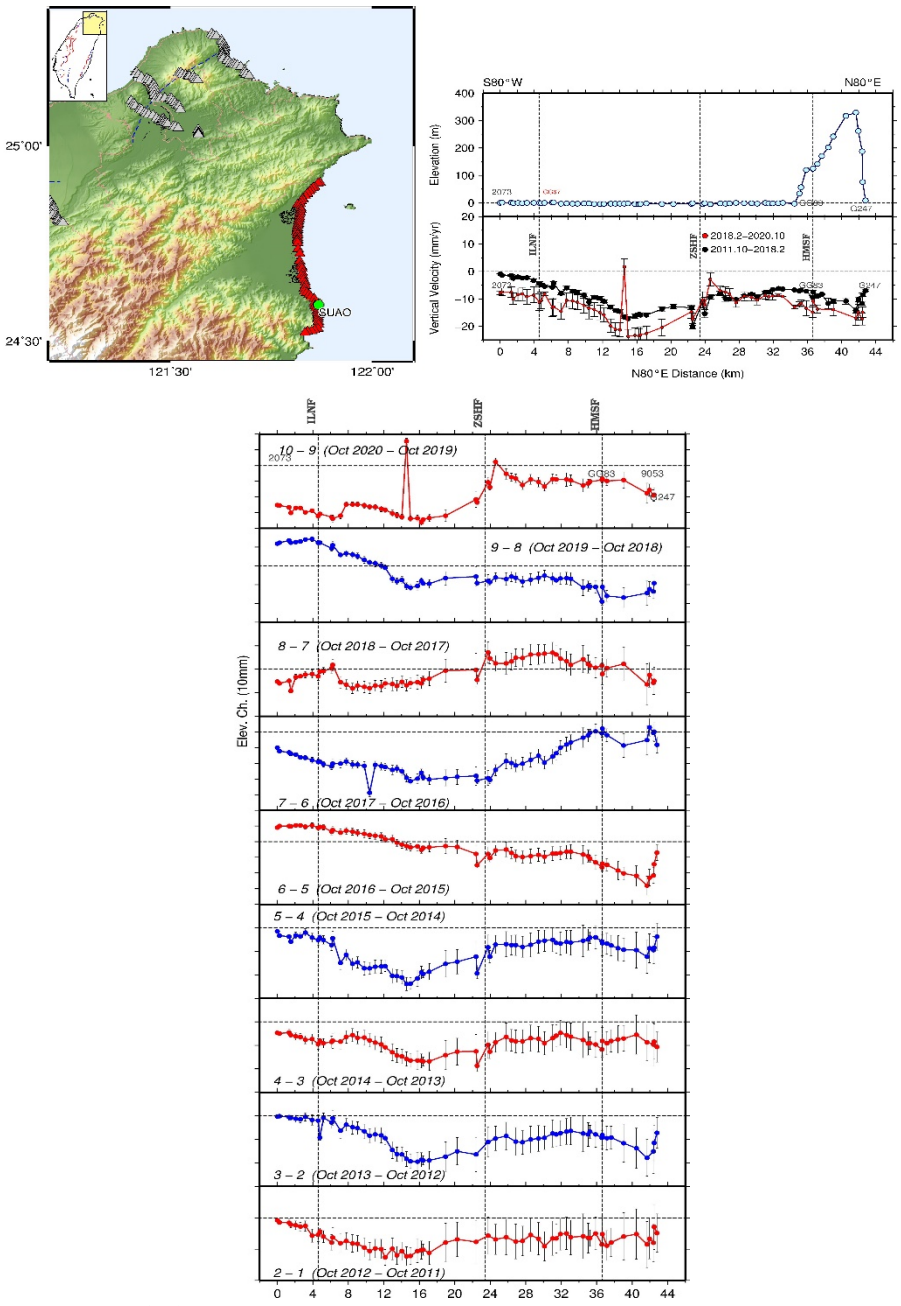


圖 2-3.66：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率。下欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

Figure 2-3.66: Elevation change of the Gengfang-Dongao leveling route. The upper left is the elevation change, the upper right is the avarege vertical velocity in different time periods. Black is the vertical velocity before the 2013 Ruisui earthquake earthquake of 2009-2013, red is the vertical velocity from 2013 to the present. Each line in the lower panels is the elevation change in every two years, and each scale represents 10 mm. Vertical dashed lines indicate the location of active faults. X-axis is the distance projected along the fault-perpendicular profile. ILNF is Yilan fault, ZSHF is Zhuoshui-Lishan fault, HMSF is Hsiaomaoshan fault.

2-4 臺灣各分區之 GPS 移動站觀測成果分析

2-4-1 臺北地區 GPS 觀測網

本節針對今年已完成測量之臺北地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 73 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。

臺北地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.1 所示，黑色箭號表示 GPS 移動站之速度場，相對於 S01R 測站，本區 2002－2020 年相對移動大致朝東北向運動為主，由南向北略呈順時針旋轉，相對速度量值集中在 2.5～3.5 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.2 所示，由結果可知新北地區大致呈現無明顯垂直運動，局部以 5.0 mm/yr 速度抬升，而台北地區則顯示沉降特徵，速度大約落在 10.0 mm/yr 內。

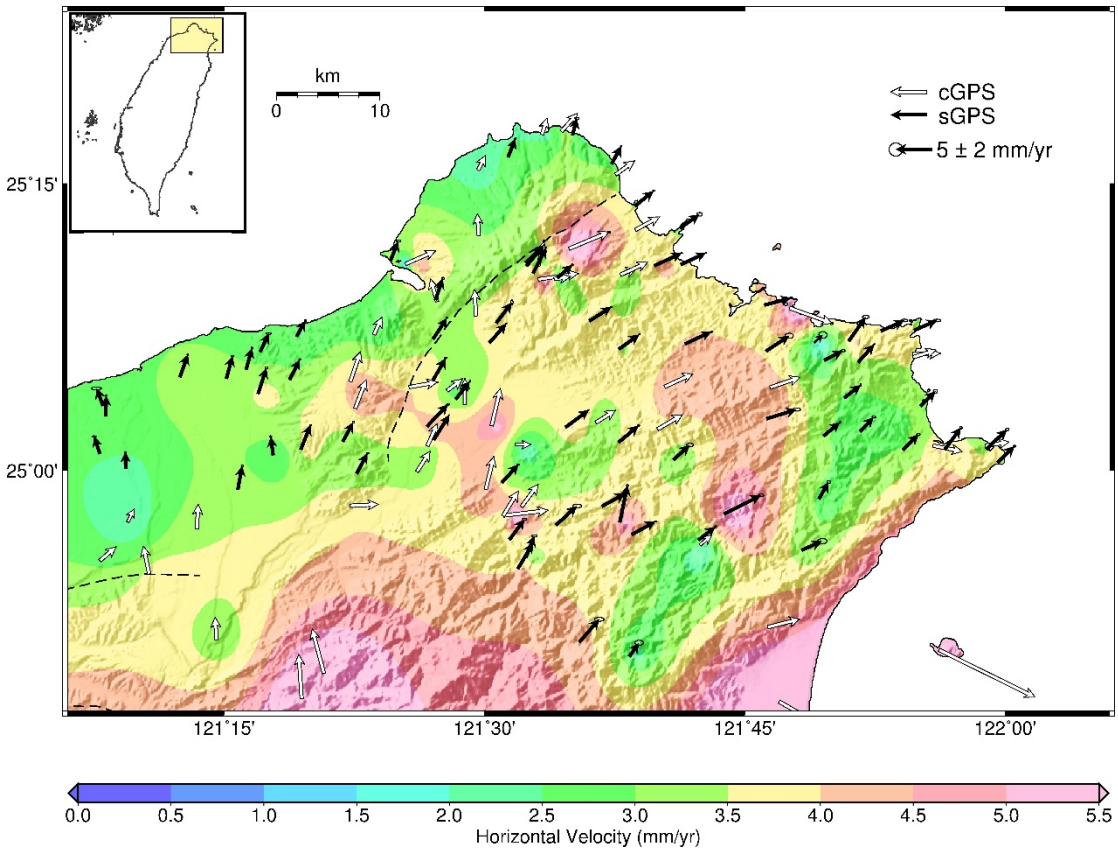


圖 2-4.1：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平速度場，彩色色階為 2002-2020 年資料所解算之速度場分布色階圖，黑色箭號為 2002-2020 年 GPS 移動站速度場，白色箭號為 2002-2020 年 GPS 連續站速度場。

Figure 2-4.1: Taipei area GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002-2020. The black arrows are campaign-mode GPS velocity field and the white arrows are continuous GPS velocity field from 2002- 2020.

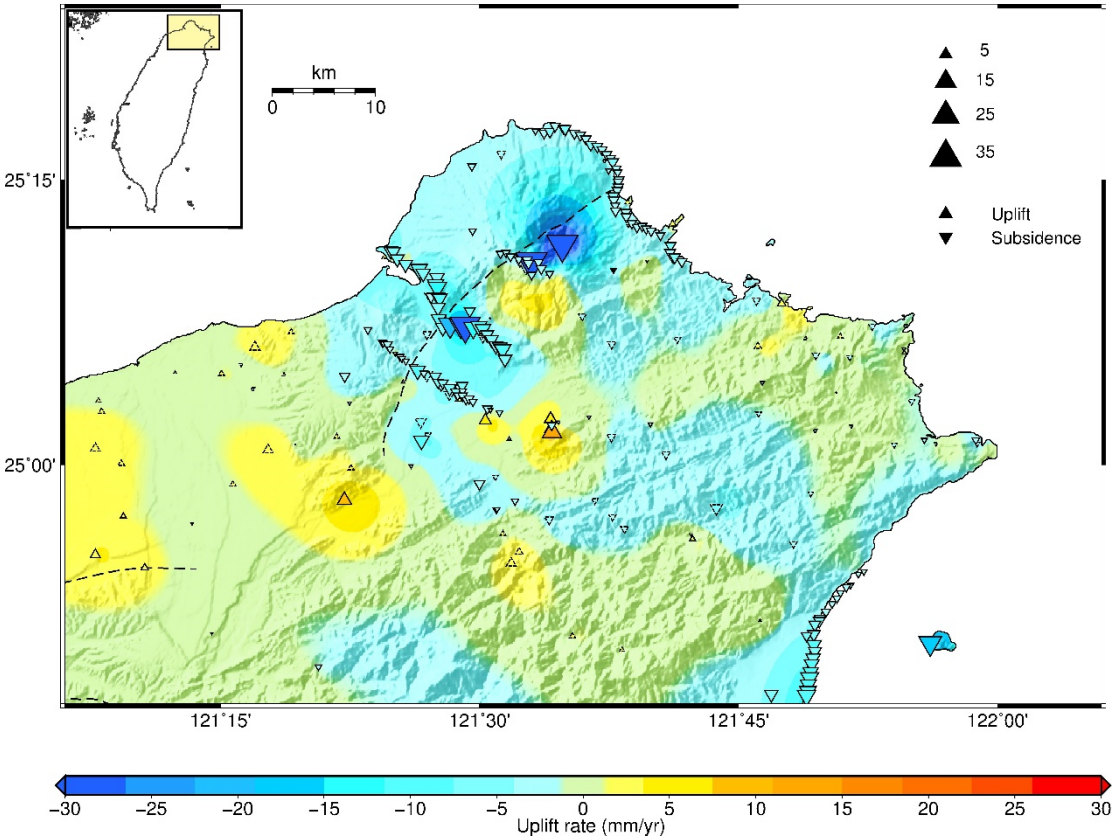


圖 2-4.2：臺北地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。GPS 站觀測時間為 2002-2020 年，精密水準站觀測時間為 2002-2020 年。

圖 2-4.2: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame. The duration of continuous GPS observation is from 2002-2020; while pricise leveling is from 2002-2020.

2-4-2 桃竹苗地區 GPS 觀測網

本節針對今年已完成測量之桃竹苗地區觀測資料進行分析，截至十月底為止完成 GPS 移動站 94 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。

桃竹苗地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.3 所示，相對於 S01R 測站，可知本區 2002－2020 年間朝西北向運動為主，速度場量值大致上約為 3.6～5.5 mm/yr（圖 2-4.3）。

垂直速度場如圖 2-4.4 所示，由結果可知本區皆為沉陷，沉降速度大約落在 10.0 mm/yr 內。

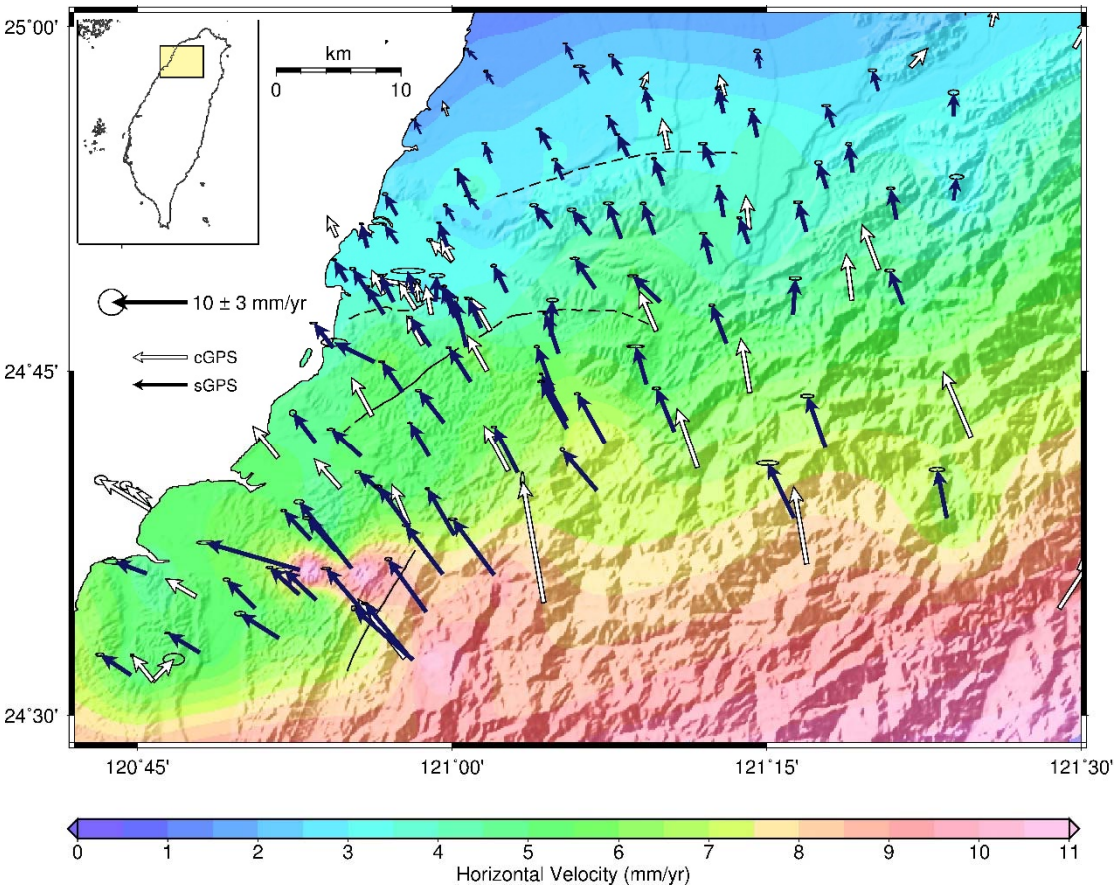


圖 2-4.3：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.3: Taoyuan, Hsinchu and Miaoli areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2020

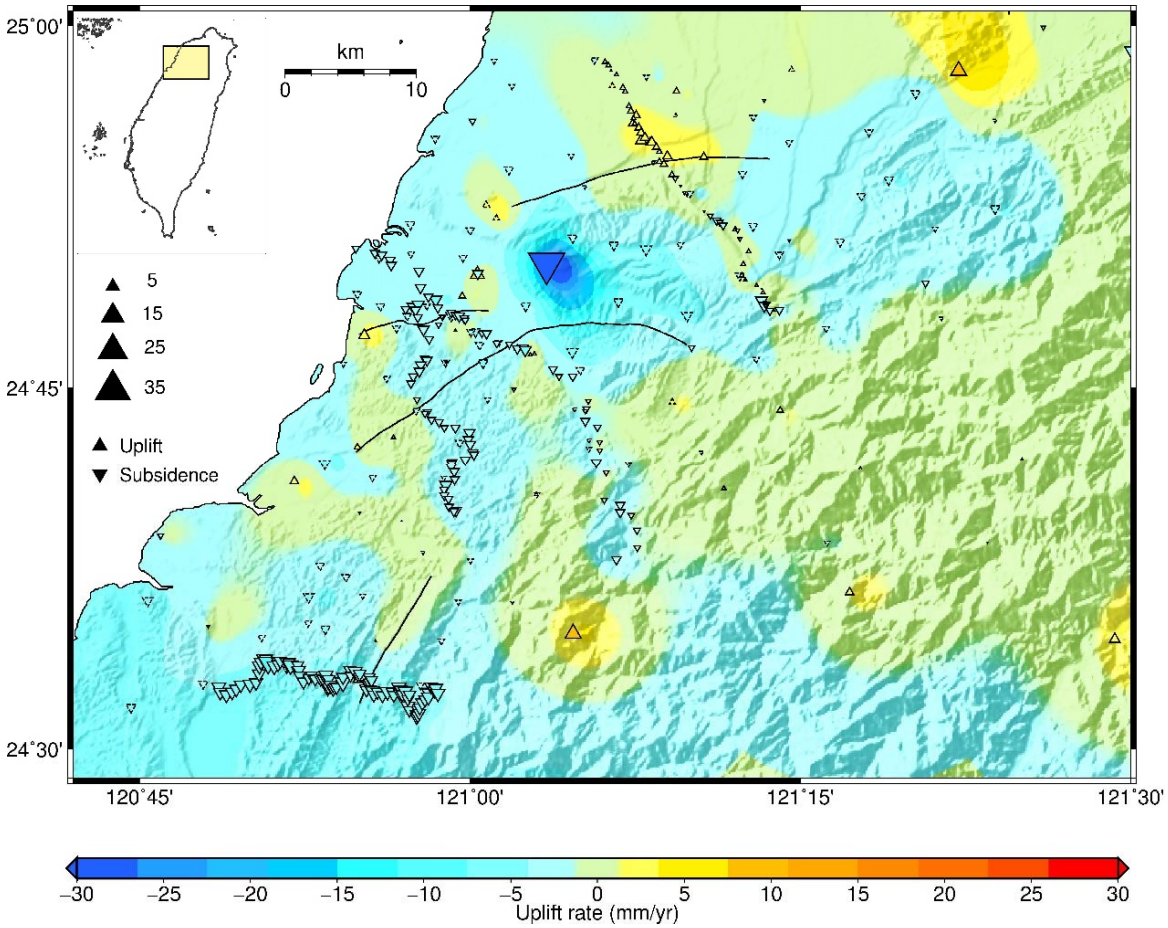


圖 2-4.4：桃竹苗地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002~2020 年垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率臺灣地區。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.4: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-3 中部地區 GPS 觀測網

本節針對今年已完成測量之中部地區觀測資料進行分析，截至九月底為止完成 GPS 移動站 153 點，以及 9 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。

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 2002－2020 年分為 2002－2013 年以及 2013－2020 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 2-4.5 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 3.8 ~ 10.9 mm/yr，2013-2020 年速度約為 3.4 ~ 10.7 mm/yr。

垂直速度場如圖 2-4.6，台中地區跨斷層之垂直速度並無明顯變化。彰化、雲林地區在沿海一帶有相當大的沉陷量，沉降速度值約為最大 35.0 mm/yr，進入南投山區則呈抬升，最大速度值達到約 10.0 mm/yr。

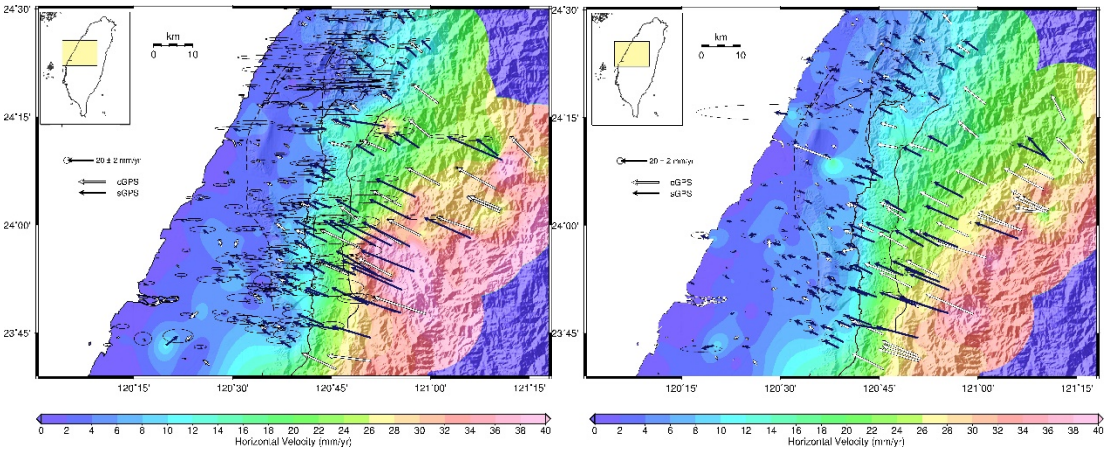


圖 2-4.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，上圖表示 2004-2013 年速度場，下圖表示震後 2013-2020 年速度場。

Figure 2-4.5: 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 2013-2020.

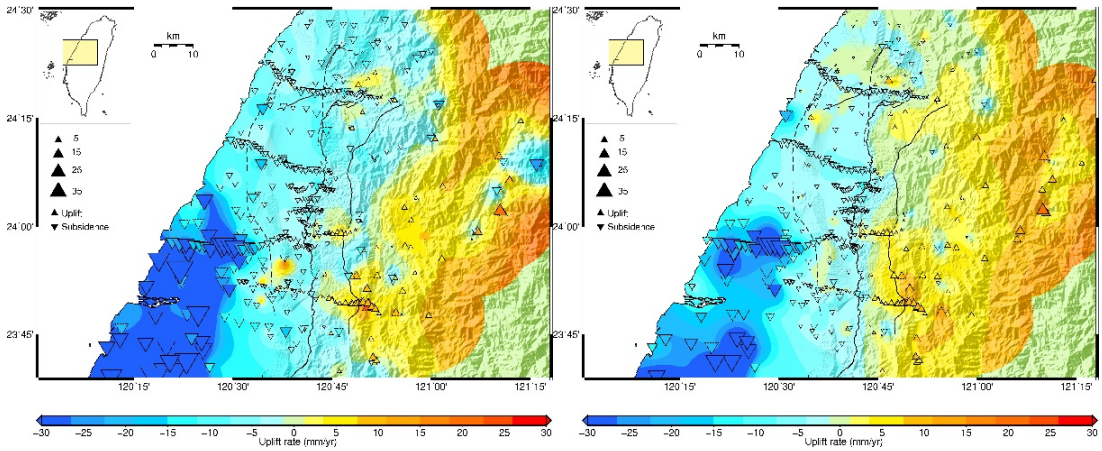


圖 2-4.6：中部地區相對於 S01R 測站之垂直方向速度場。左表示 2002-2013 年速度場，右表示 2013-2020 年速度場。三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.6: 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 2013-2020. 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-4 嘉南地區 GPS 觀測網

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 167 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，嘉南地區移動站與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

嘉南地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.7 和圖 2-4.8，相對於 S01R 測站，嘉南地區的水平運動方向呈順時針旋轉，而越往嘉南平原其水平速度量值則越小。雲林沿海一帶沉降速度最大達到 30.0 mm/yr，推測與超抽地下水導致地層下陷有關，而嘉義地區在沿海一帶的垂直沉降速度也達到 15.0 至 20.0 mm/yr，進入嘉南地區的山區則有約 3.0 mm/yr 的抬升速度。台南地區之沿海亦呈現約 10.0 mm/yr 之平均沉陷速率，山區則有約 7.0 mm/yr 的平均抬升速率。善化-關廟地區之垂直速度約在 0.0 至 4.0 mm/yr 之間，在龍船斷層附近則約有 20.0 mm/yr 的抬升速度。

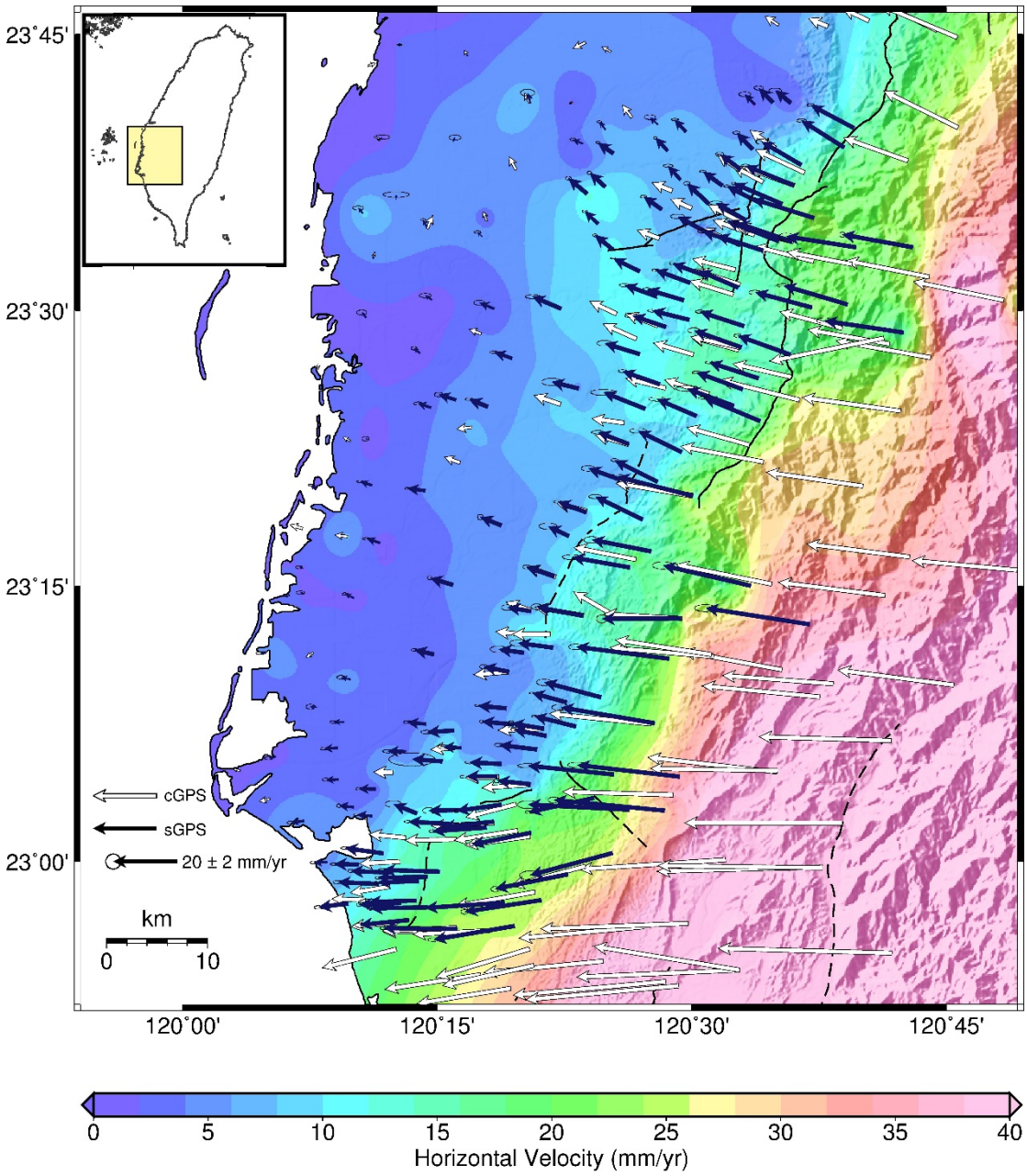


圖 2-4.7：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002-2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.7: Chiayi, Tainan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002-2020.

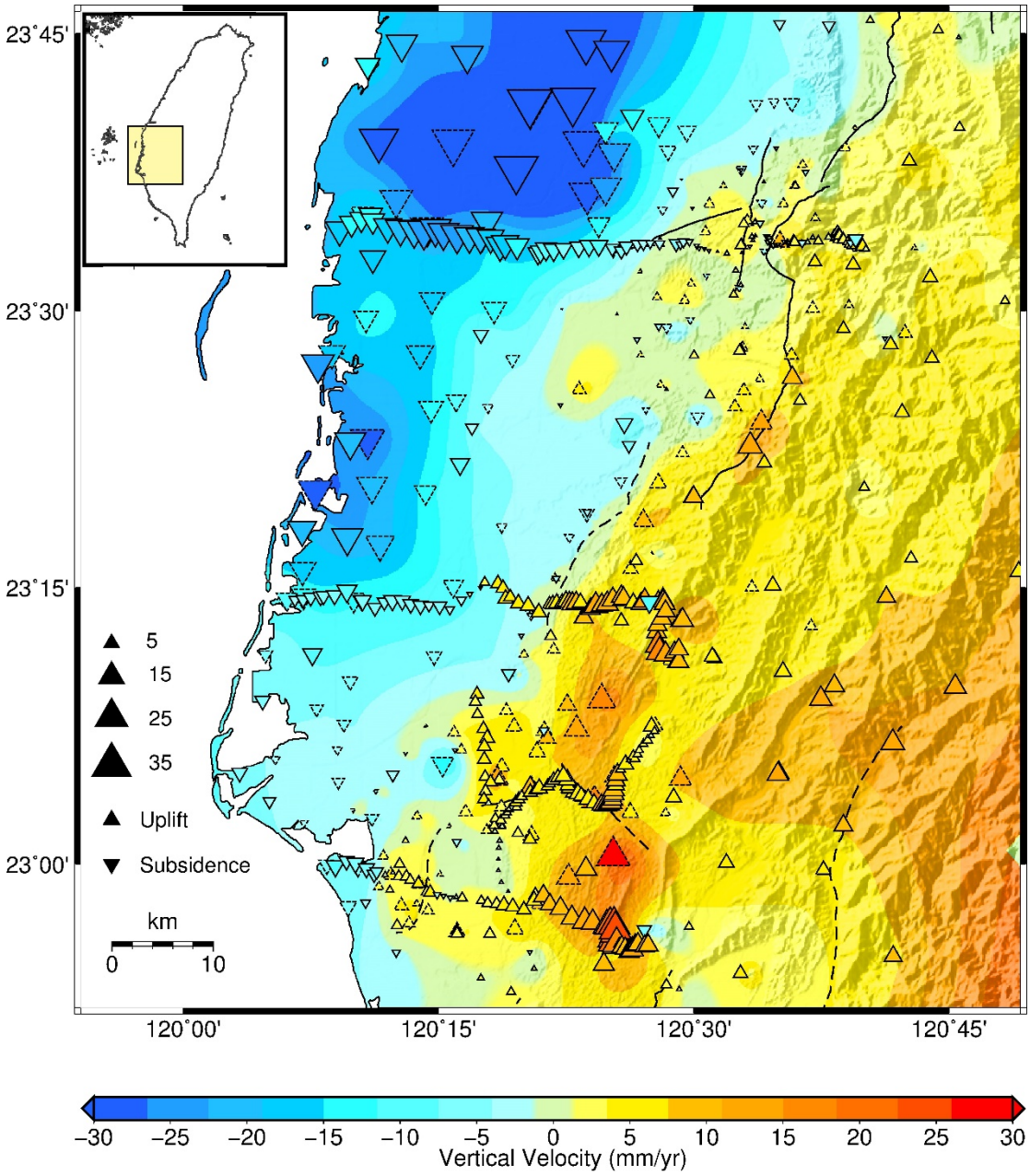


圖 2-4.8：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，圖表示 2002-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.8: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-5 高屏地區 GPS 觀測網

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 103 點，以及 2 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。

高屏地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.9 和圖 2-4.10，因 2010 甲仙地震及 2016 美濃地震，本研究將速度場區分為 2002－2010 年、2010－2016 年以及 2016－2020 年三個時間段分別估算速度場。高雄地區的車瓜林斷層周遭有 15.0 mm/yr 的抬升速度，小崗山斷層西側有約 10.0 mm/yr 的沉降速率，東側之沉降速率則降至 0.0 至 3.0 mm/yr。

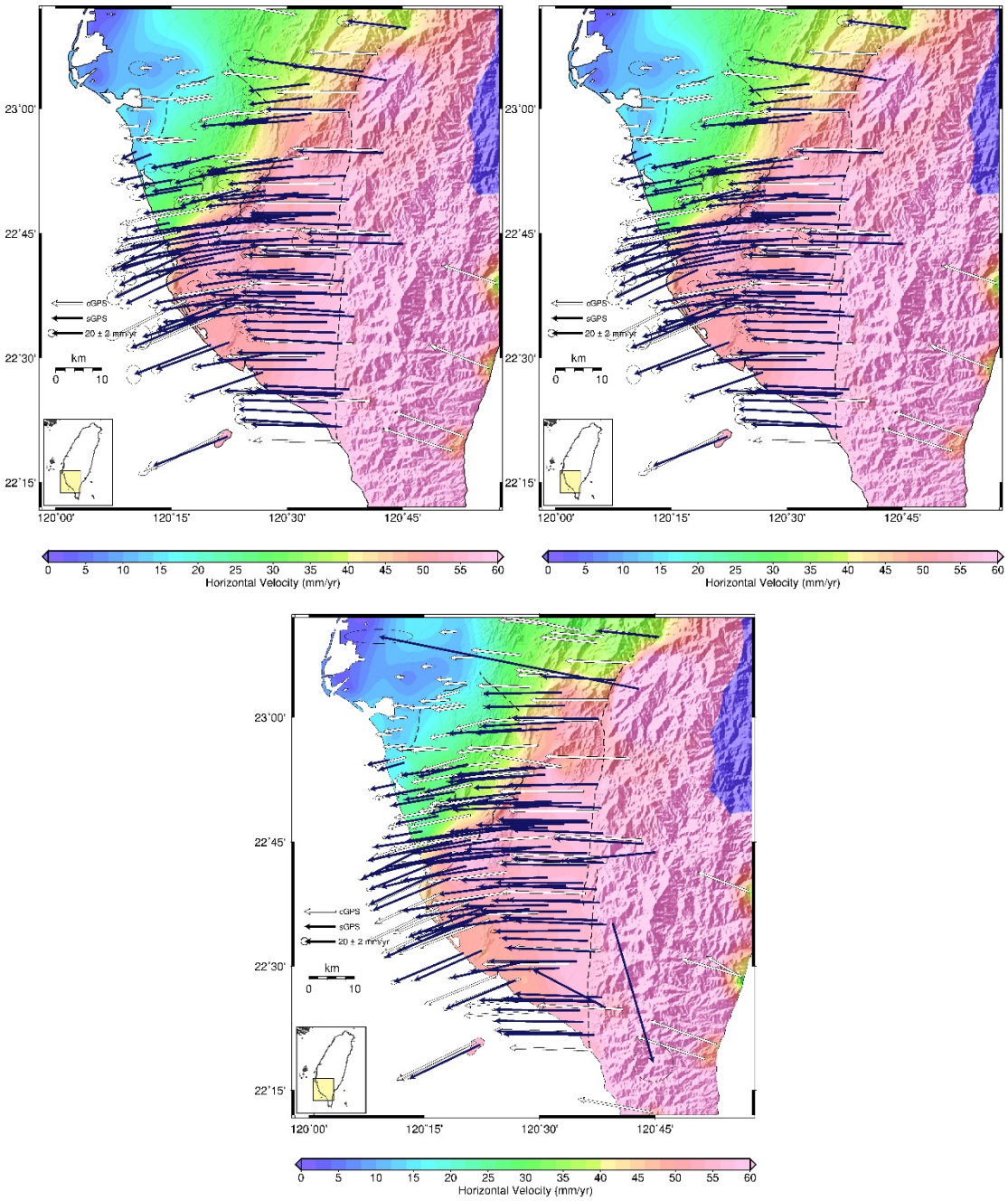


圖 2-4.9：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2020 年速度場。

Figure 2-4.9: 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 2010-2016; The down figure is the velocity field from 2016-2020.

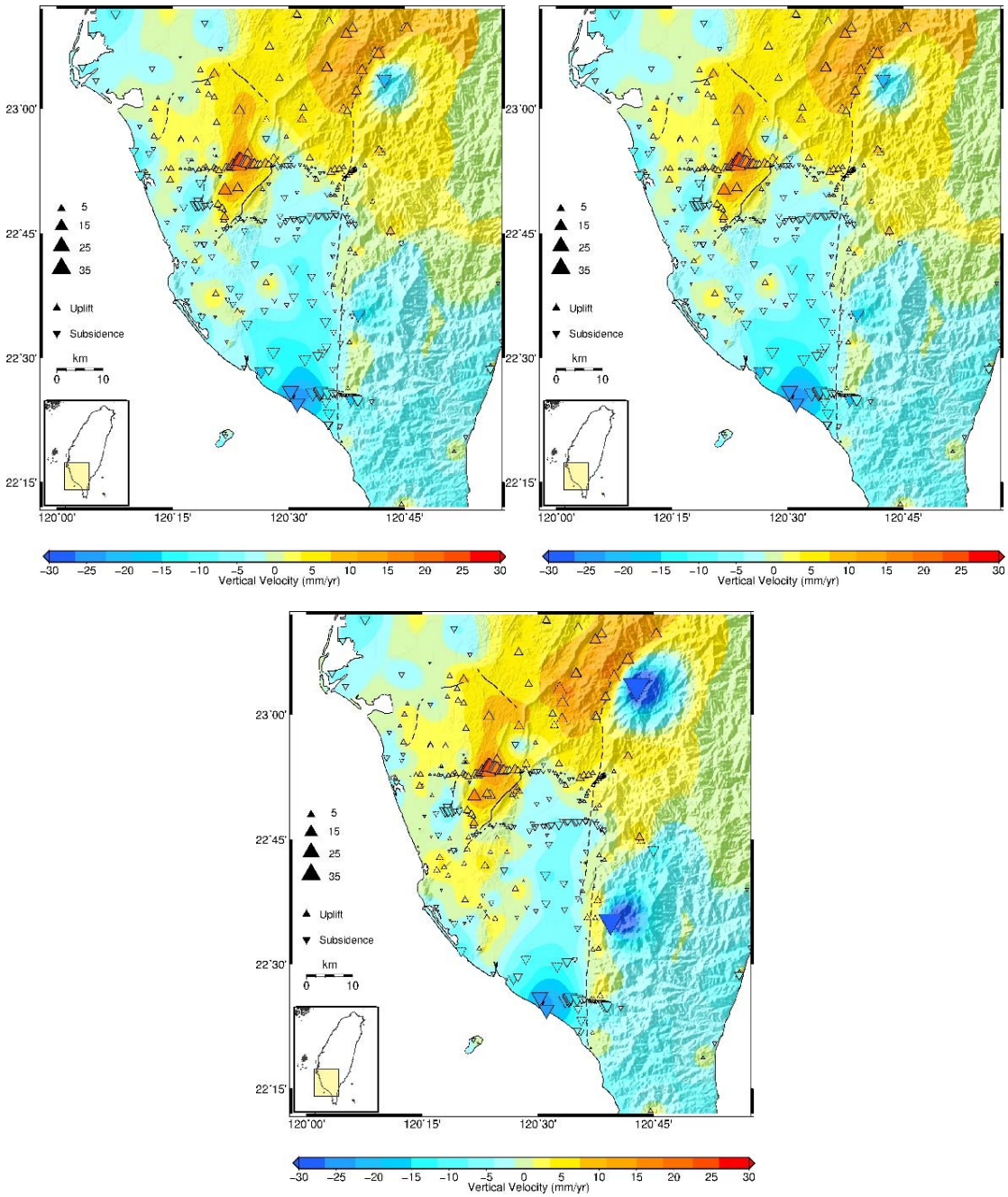


圖 2-4.10：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，左圖表示 2002-2010 年速度場，右圖表示 2010-2016 年速度場，下圖表示 2016-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.10: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2010 (Left figure) and 2010-2016 (Right figure) and 2016-2020 (Down 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-6 恆春地區 GPS 觀測網

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 37 點，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，恆春地區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。

恆春地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.11，相對於 S01R 測站，屏東外海地震前 2002－2006 年速度場，速度量值 50.5 ~ 55.6 mm/yr，2006 年地震後至 2010 年中的速度場，速度量值 48.6~54.3 mm/yr， 2011 年中至 2016 年之速度場，速度量值 46.7~50.9 mm/yr，2017 年之後之速度場，速度量值 45.0 ~ 50.0 mm/yr。大部份 GPS 移動站呈現向西運動，但在鵝鑾鼻地區及牡丹鄉西部附近之六個測站時間序列在 2017 年始有明顯跳動情況，從其中一個測站 G643 的時間序列如圖 2-4.12 進行分析，推測此現象是因為儀器誤差亦或是局部運動方向不同所導致，但仍須更長期的監測來得到結論。

恆春地區各觀測點位之垂直速度場如圖 2-4.13，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 2.4 mm/yr，2011 年至今的平均速率約為-0.4 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-10.9 mm/yr，2011 年至今的平均速率約為-0.7 mm/yr，此現象或許可說明在 2006 年震後至 2020 年期間，恆春半島地區的垂直速度有由南往北變化的現象，可能和恆春斷層的活動有關。

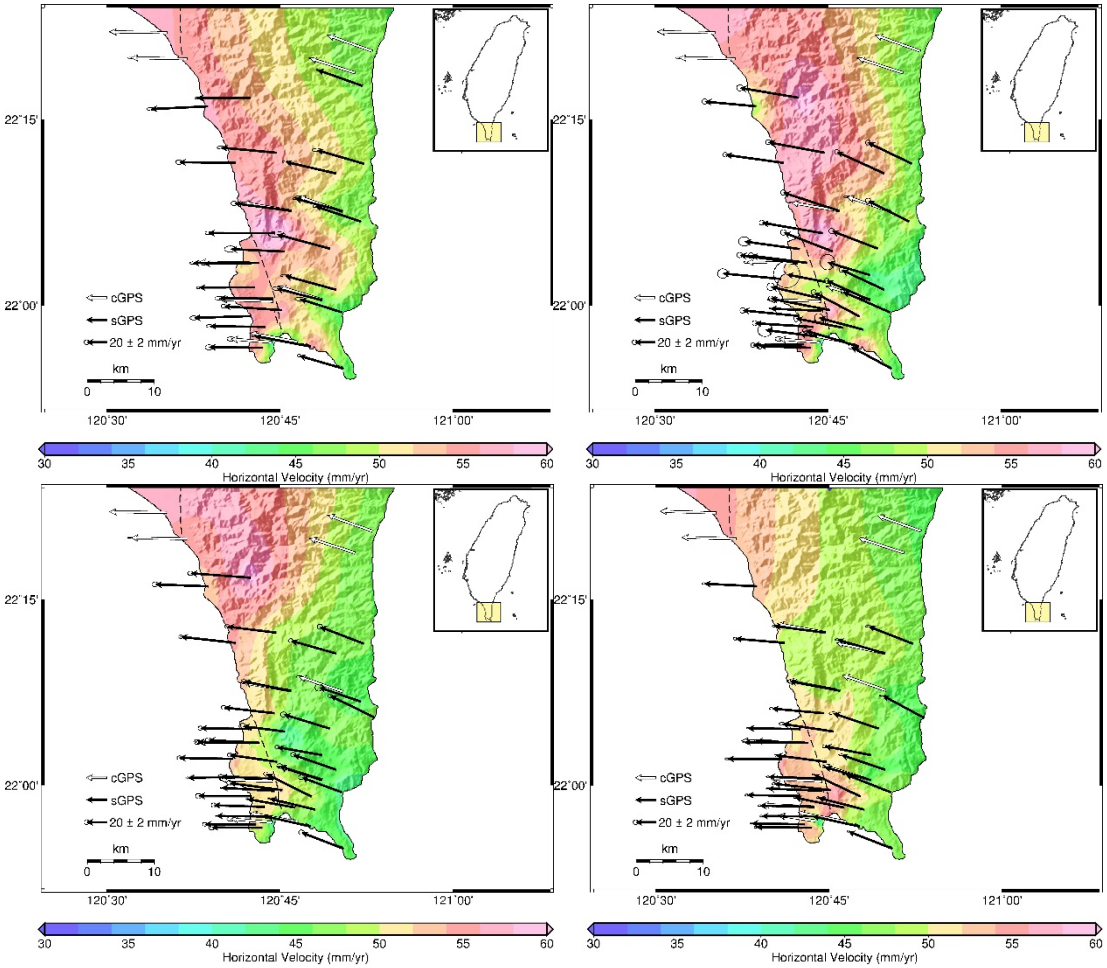


圖 2-4.11：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002-2006 年速度場，右上表示震後 2006-2010 年速度場，左下表示震後 2011-2016 年速度場，右下為 2017-2020 年速度場。

Figure 2-4.11: 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 2015-2020.

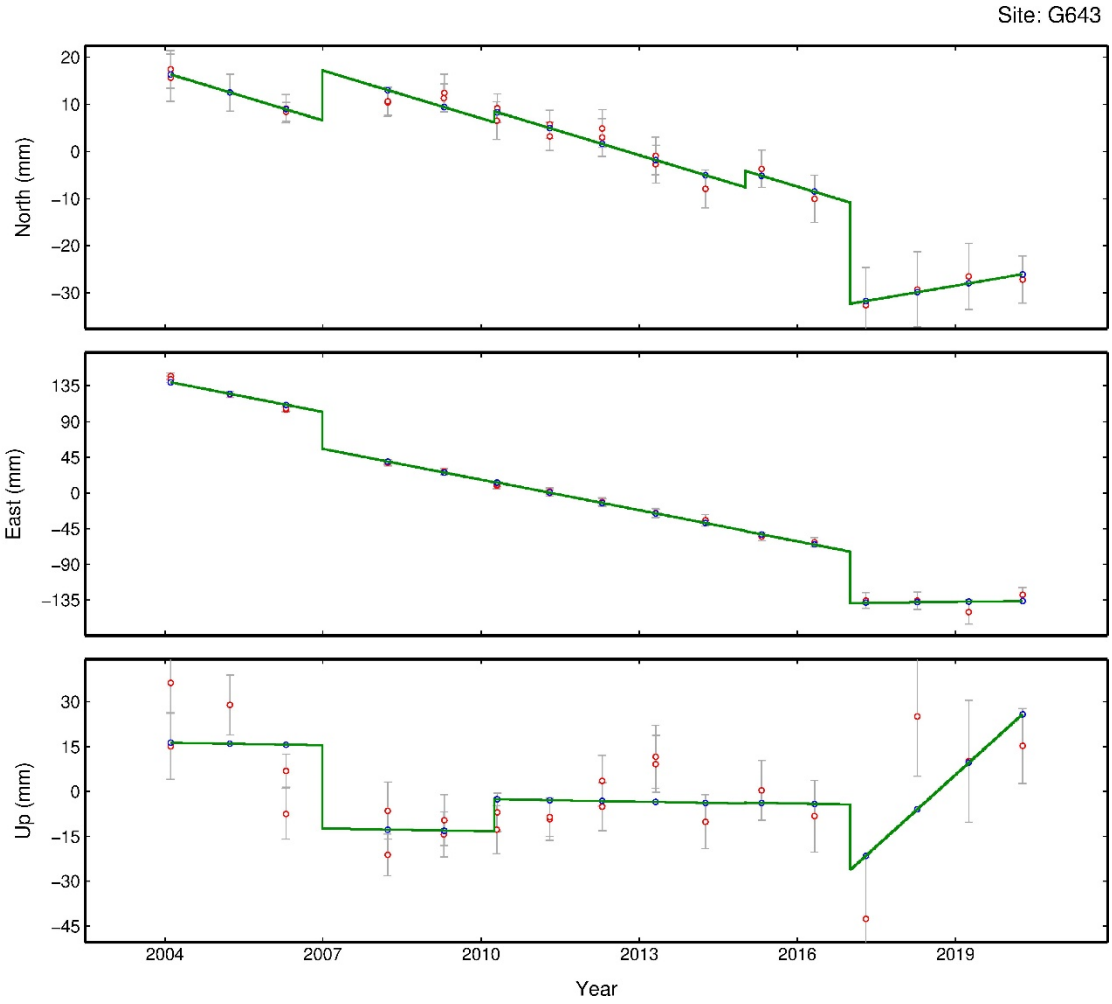


圖 2-4.12：G643 測站之時間序列。

Figure 2-4.12: Time series of GPS campaign station G643.

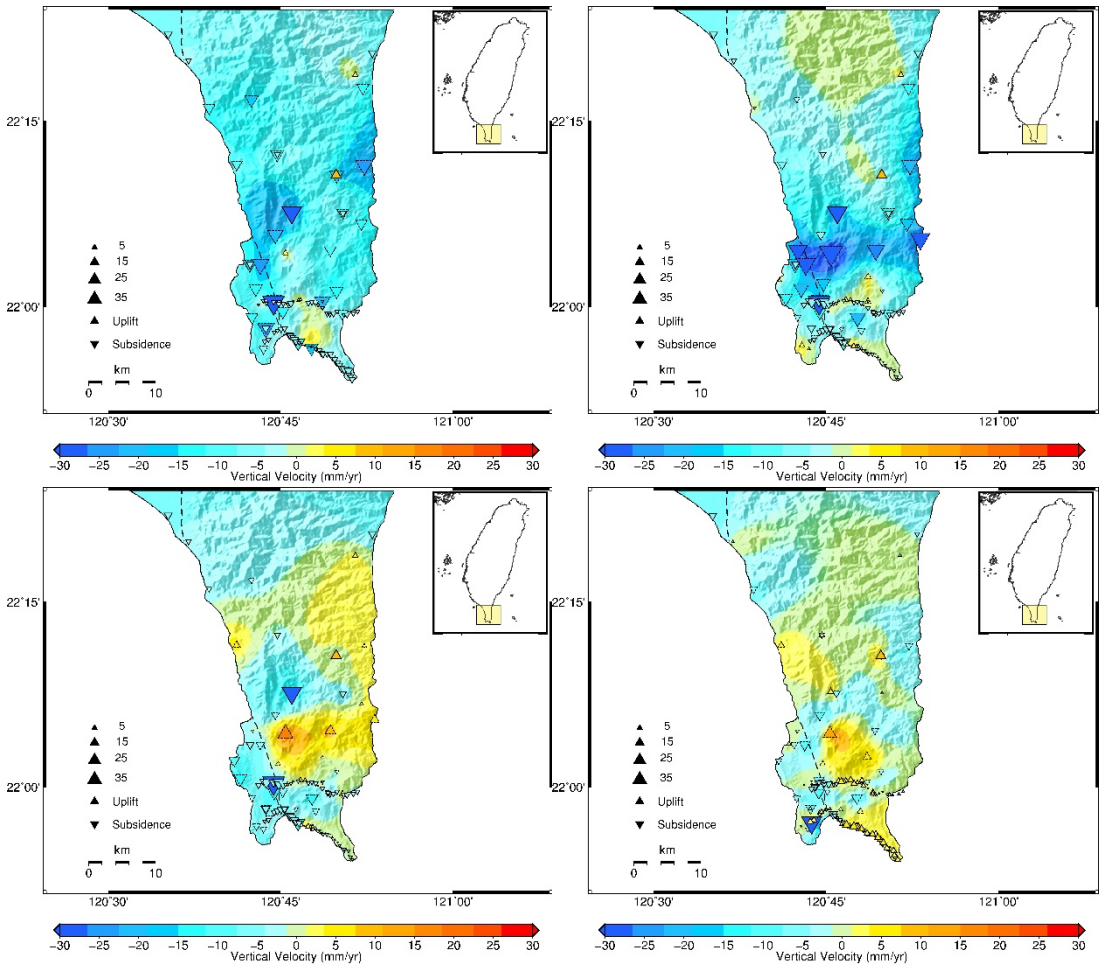


圖 2-4.13：恆春地區相對於澎湖白沙站（S01R）2002-2020 年之 GPS 垂直方向速度場，左上表示屏東外海地震前 2002-2006 年速度場，右上表示震後 2006-2010 年速度場，左下表示震後 2011-2016 年速度場，右下為 2017-2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.13: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002-2020 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 2011~2016; the bottom right is from 2017-2020. 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-7 東部地區 GPS 觀測網

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 102 點以及 4 條精密水準測線，花東地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

花東地區各觀測點位之速度場如圖 2-4.14 和圖 2-4.15，花東地區的水平速度相對於 S01R 測站，大致呈現往西北 50 ~ 80 mm/yr 速度運動，在池上斷層東西側也有約 10 mm/yr 的水速度落差。從垂直方向的速度場可觀察到跨池上斷層的兩側有不同的運動方向，東側約有 10mm/yr 的抬升速度，而西側約有 10 mm/yr 的沉降速度。

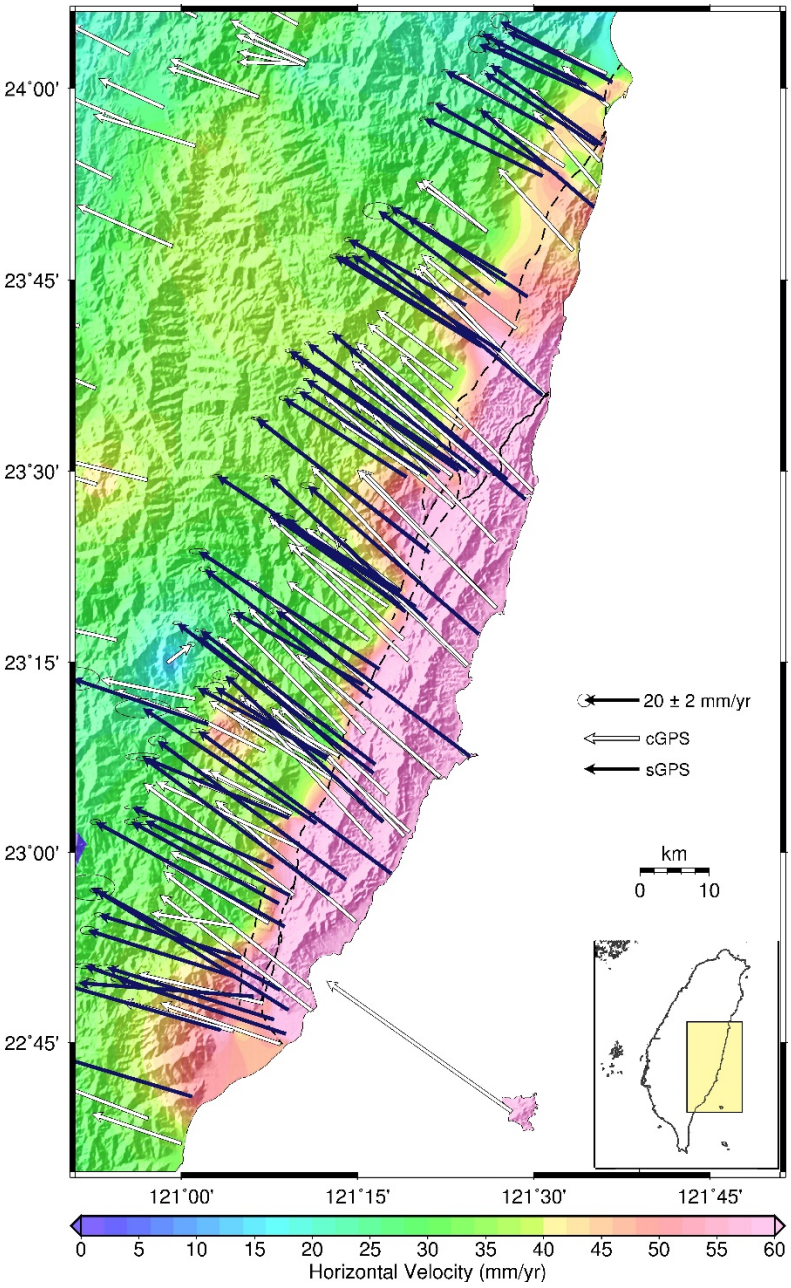


圖 2-4.14：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，彩色色階為 2002~2020 年資料所解算之速度場分布色階圖。

Figure 2-4.14: Eastern areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station. The color ramp represents the horizontal velocity from 2002~2020

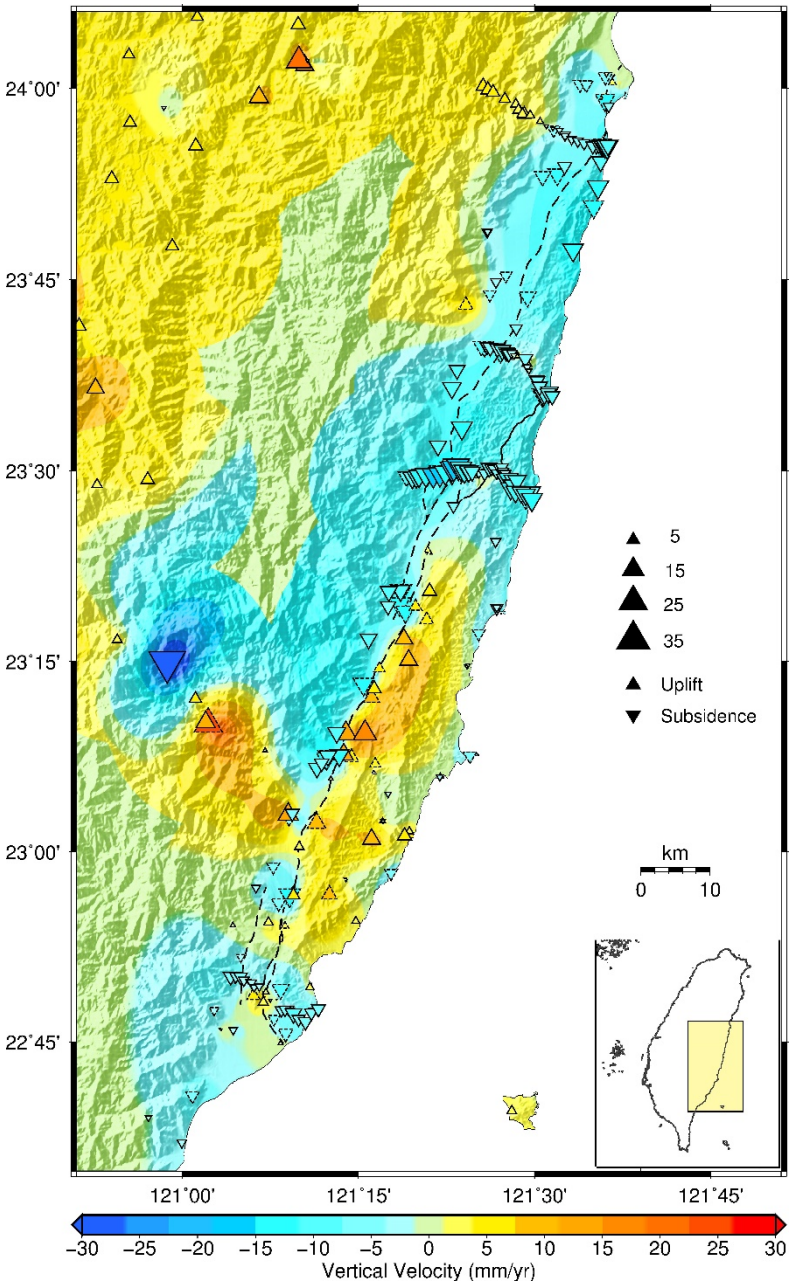


圖 2-4.15：花東地區相對於澎湖白沙站（S01R）垂直方向速度場，圖表示 2002~2020 年速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.15: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Eastern 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-4-8 宜蘭地區 GPS 觀測網

本節針對今年已完成測量之宜蘭地區觀測資料進行分析，已完成 GPS 移動站 28 點以及 1 條精密水準測線，宜蘭地區移動站解算結果與連續站解算成果速度場分布趨勢吻合。

宜蘭地區各觀測點位之水平速度場如圖 2-4.16，2004 至 2020 年速度量值 4.5 ~ 33.5 mm/yr 。

垂直速度場如圖 2-4.17，在蘭陽平原垂直方向大致為沉陷，其沉陷量由北至南先增加後再減少，往南至南澳亦呈現沉陷，整體值約 0.5 ~ 26.8 mm/yr。

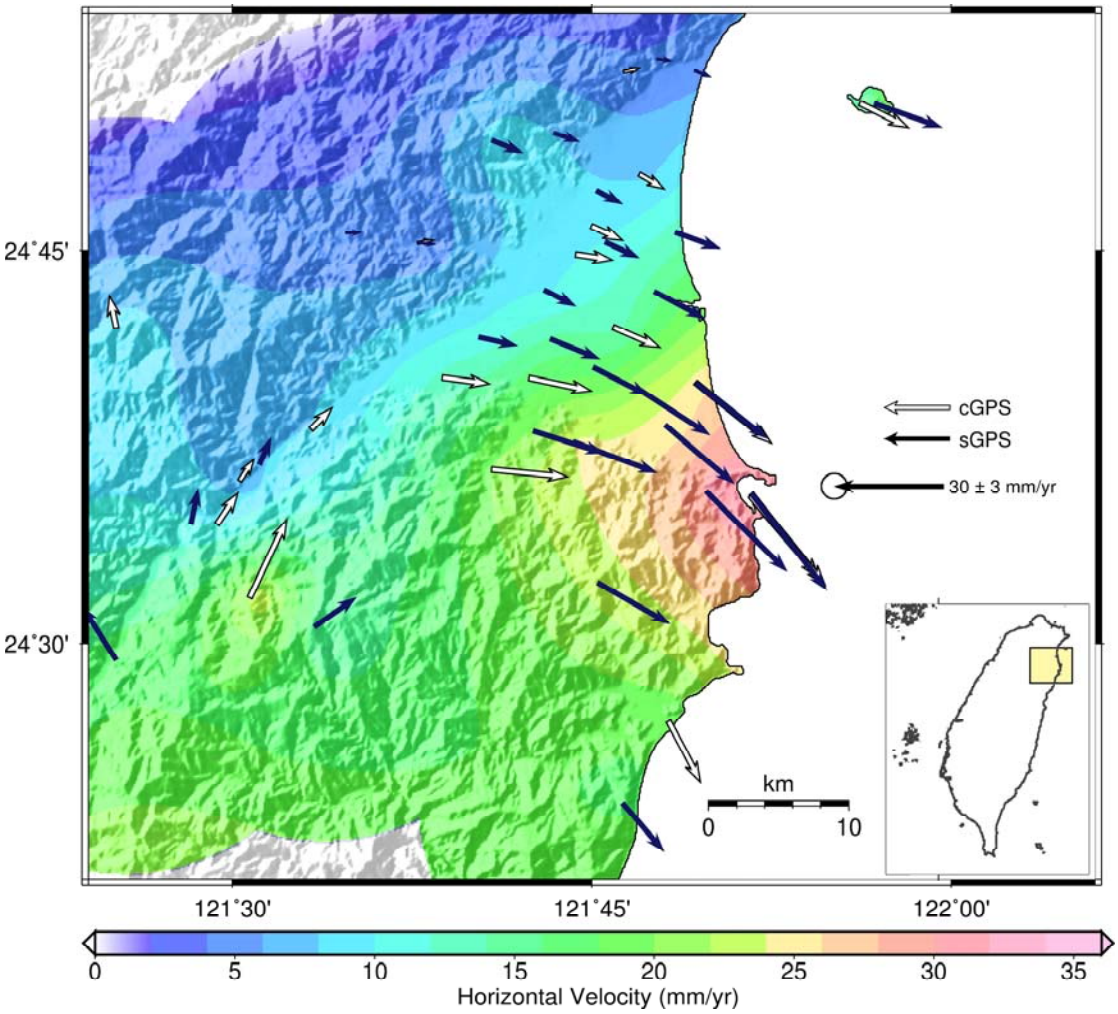


圖 2-4.16：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

Figure 2-4.16: Yilan areas GPS horizontal velocity field relative to Penghu Paisha (S01R) station.

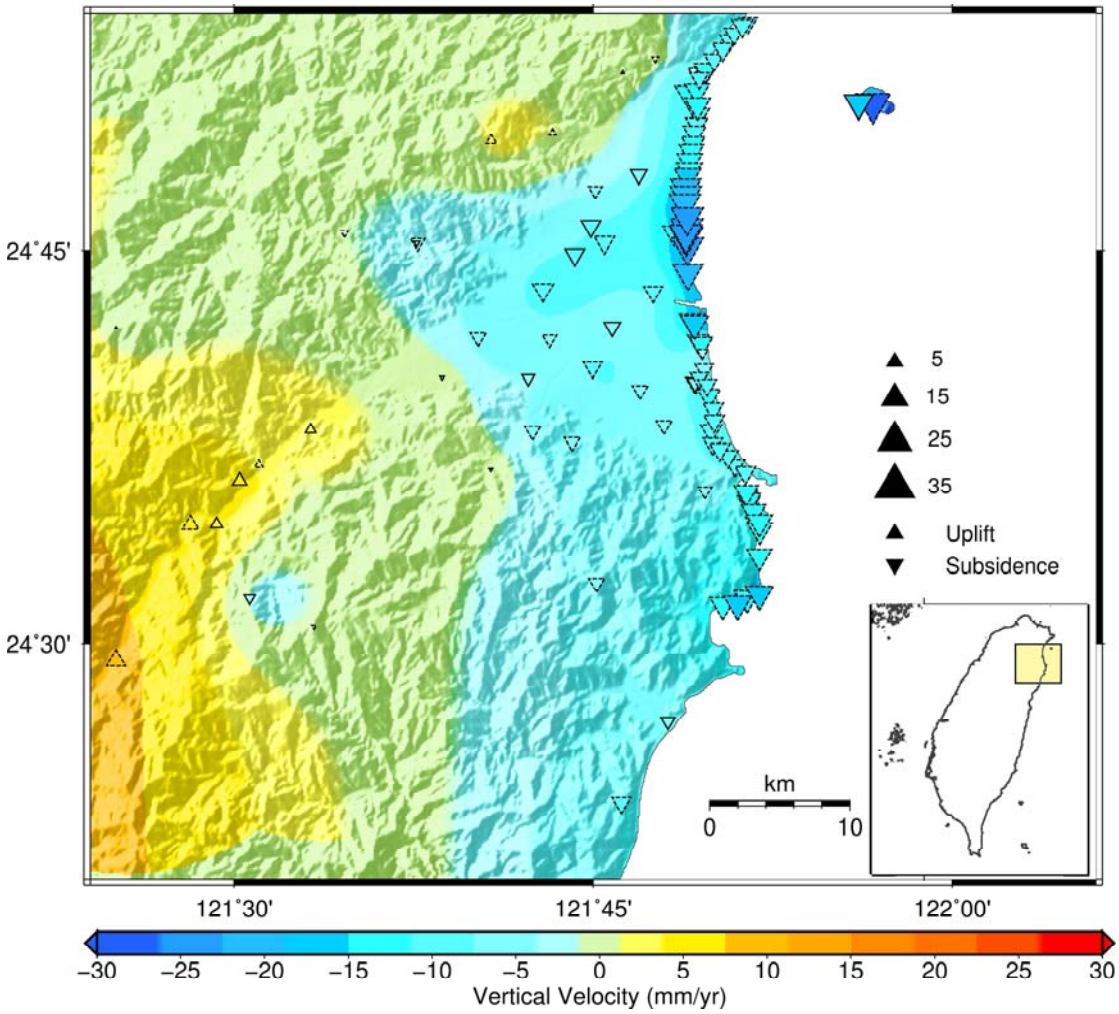


圖 2-4.17：宜蘭地區 2004-2020 年相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 垂直方向速度場，三角形方向表示抬升或沉降，三角形大小表示速度大小，暖色系表示抬升速率，冷色系表示沉降速率。黑色邊框表示精密水準、GPS 移動站；虛線邊框表示 GPS 連續站。

Figure 2-4.17: Vertical velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station from 2002 to 2020 in Yilan 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 and campaign-mode GPS shows in dark frame; continuous GPS shows in dotted line frame.

2-5 全臺地表速度場

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，分為七個時間段分別解算速度場，結果如圖 2-5.1 及圖 2-5.2。

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，整體區域的速度值約為 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。

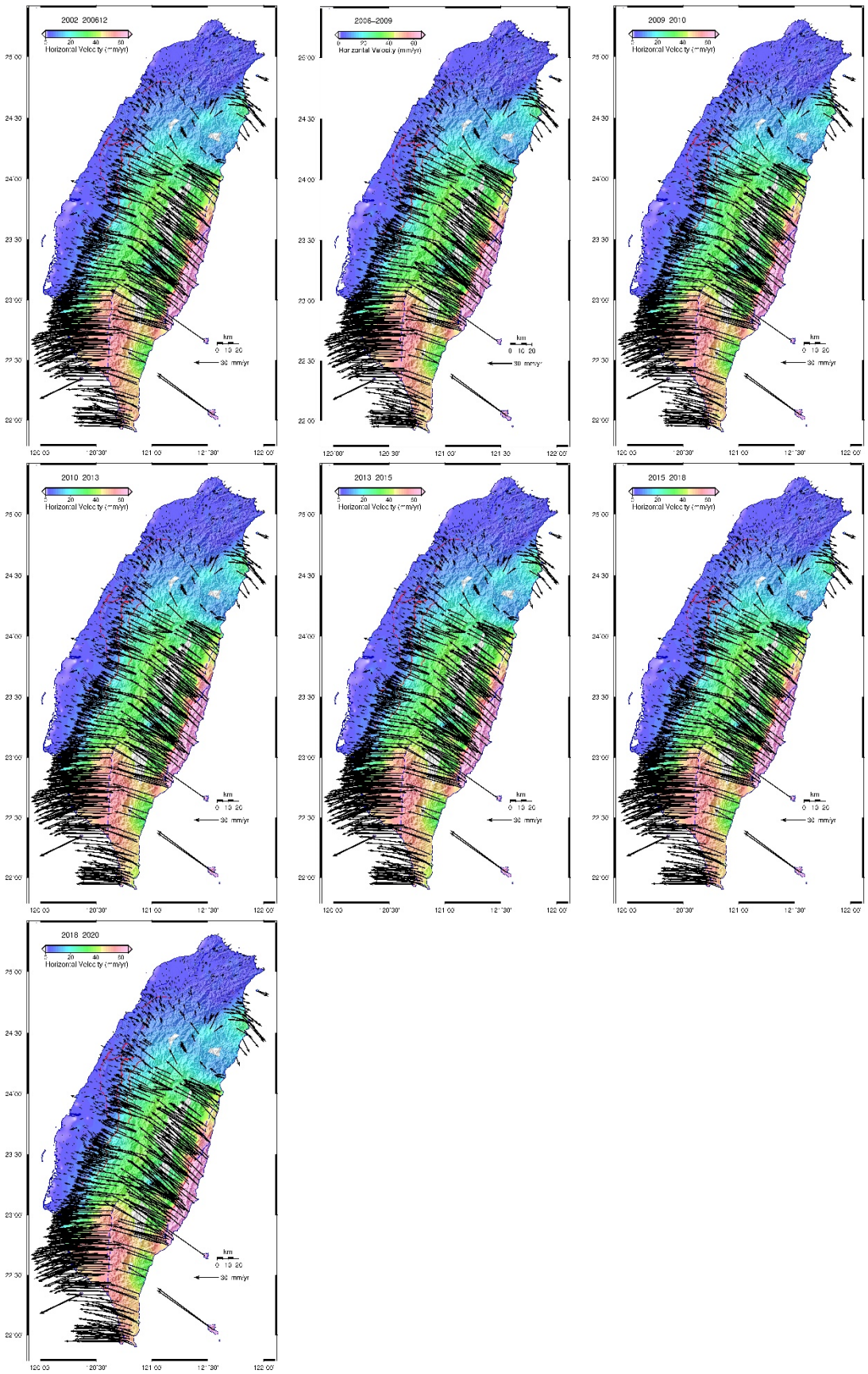


圖 2-5.1：臺灣地區水平方向相對於澎湖白沙站（S01R）分段時間段速度場分布情形。

Figure 2-5.1: Taiwan horizontal velocity relative to Penghu Paisha (S01R) station.

根據圖 2-5.2，大臺北地區皆為穩定沉陷，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。新竹地區垂直速度約-5 至 0 mm/yr。苗栗地區速度皆約在-5 mm/yr 上下。台中地區之垂直速度約-5 至 0 mm/yr。彰化、南投地區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，而高雄地區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，在小崗山斷層西側約有-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來協助解析。屏東地區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 2015 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。花蓮地區之垂直速度，由西向東一路遞減，約由 5 mm/yr 降至-10 mm/yr，但在跨瑞穗斷層後由約由-10 mm/yr 升至-1 mm/yr。台東地區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）。

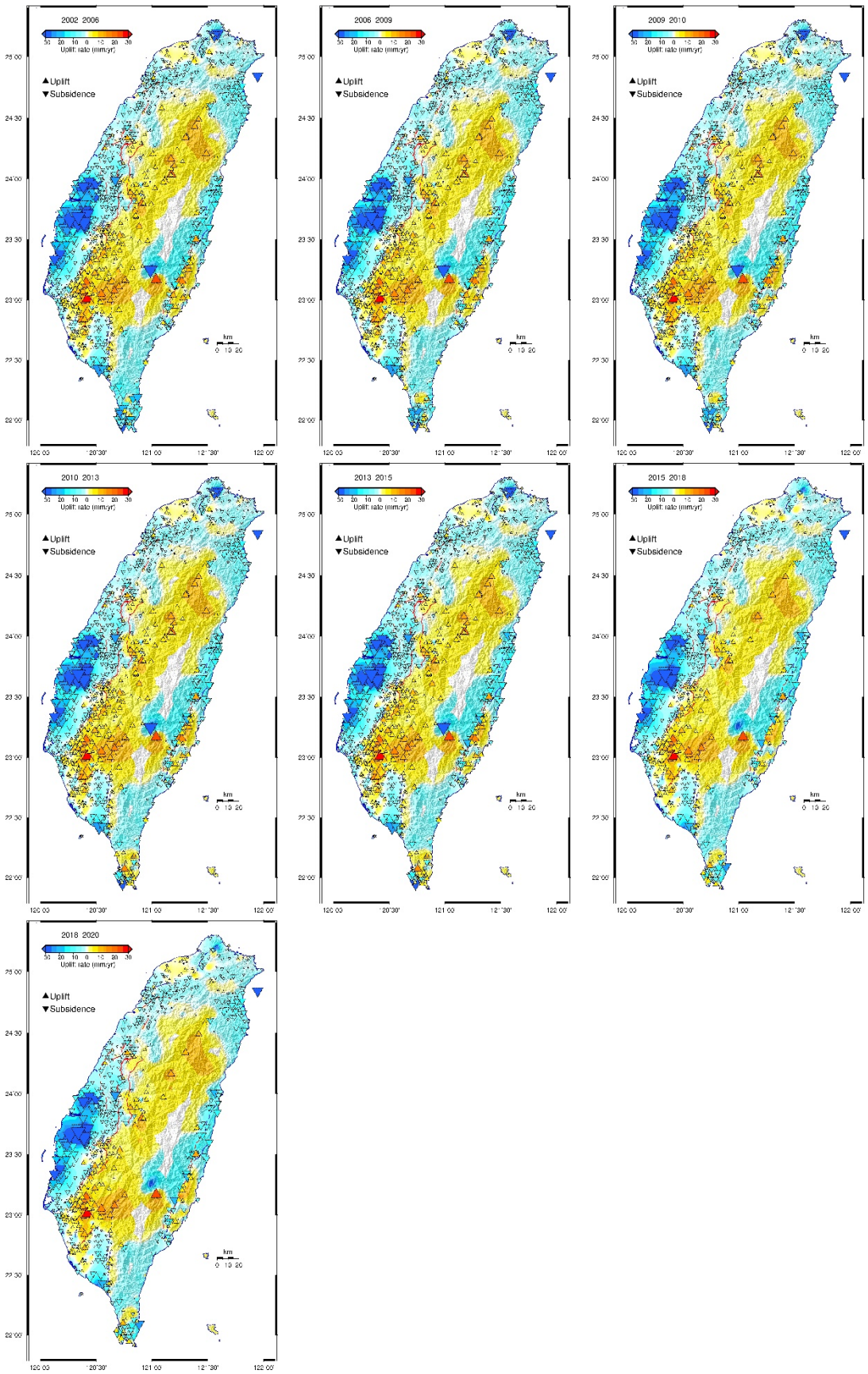


圖 2-5.2：2002 年至 2020 全臺垂直速度場。三角形方向表示抬升或沉降。

Figure 2-5.1: Vertical velocities relative to Penghu Paisha (S01R) station in Taiwan from 2002 to 2020.

第三章、東部地區雷達影像分析

本計畫彙整臺灣地區，由 ERS-1/2（European Remote Sensing Satellite）、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，研究方法及流程請參考附錄 4。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包括 12、24、36、48、72、96、192、288、384 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 6 月至 1999 年 9 月。

（2）C 波段之 **ENVISAT** 衛星 SAR 影像時間：從 2006 年 3 月至 2009 年 6 月。

（3）L 波段之 **ALOS** 衛星 SAR 影像時間：從 2007 年 1 月至 2010 年 12 月。

（4）C 波段之 **SENTINEL-1A** 衛星 SAR 影像時間：從 2015 年 4 月至 2020 年 10 月。

（5）C 波段之 **SENTINEL-1B** 衛星 SAR 影像時間：從 2018 年 2 月至 2020 年 10 月。

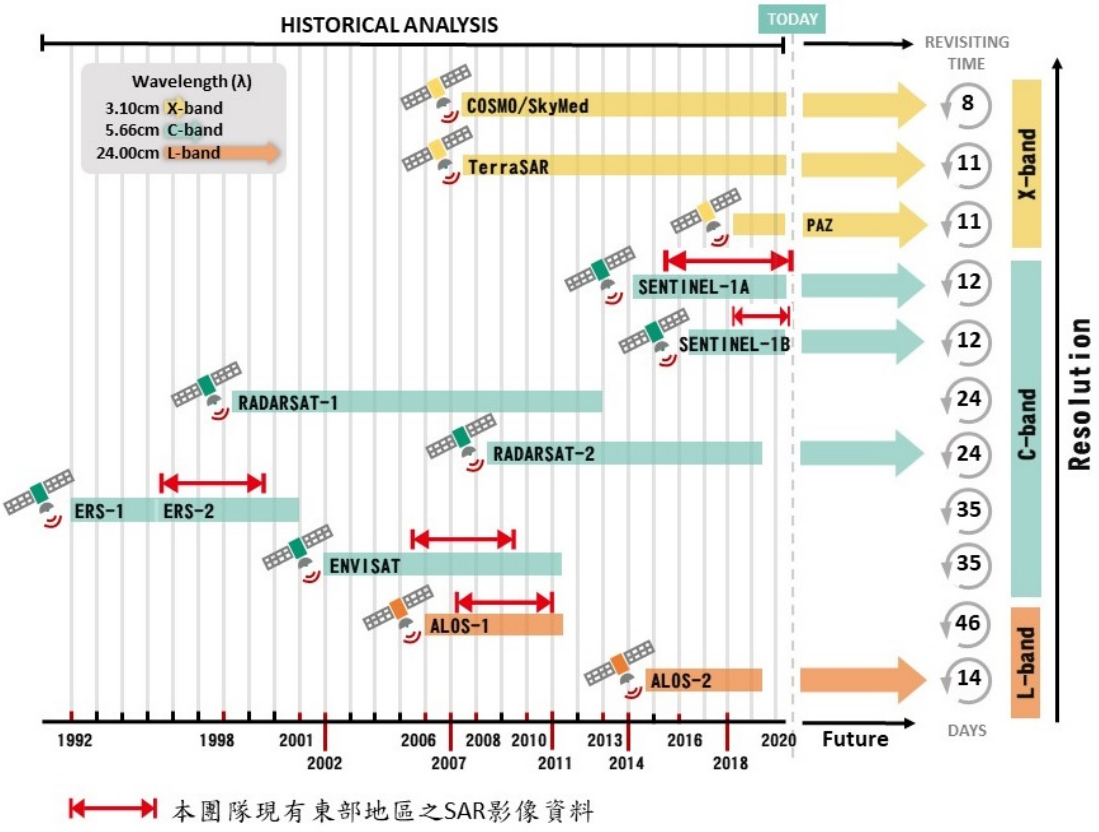


圖 3.1：本團隊研究東部地區地殼變形使用 SAR 影像圖資示意圖。

Figure 3.1: SAR images used for crustal deformation of the eastern Taiwan.

3-1 東部地區 PS-InSAR 成果資料分析

3-1-1 ERS1/2（1995/6~1999/9）

圖 3-1.2 即為 ERS 衛星影像在此期間（1995/6~1999/9）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示北段花蓮地區由西向東呈現視衛星方向速度由接近 0 慢慢轉為負值，但跨過斷層並無明顯的速度梯度差異。而中段則明顯看出玉里斷層與池上斷層間有明顯的視衛星方向遠離及跨過更南側的池上斷層向東也有相當明顯的速度梯度差異，轉換為視衛星方向拉近。往南到利吉斷層與鹿野斷層速度梯度差異雖變小，跨過利吉斷層還是可見速度梯度差異，與池上斷層類似，約有將近 10 mm/yr。圖 3-1.1 將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與永久散射點於測站周圍 0.5 公里平均值進行比較。

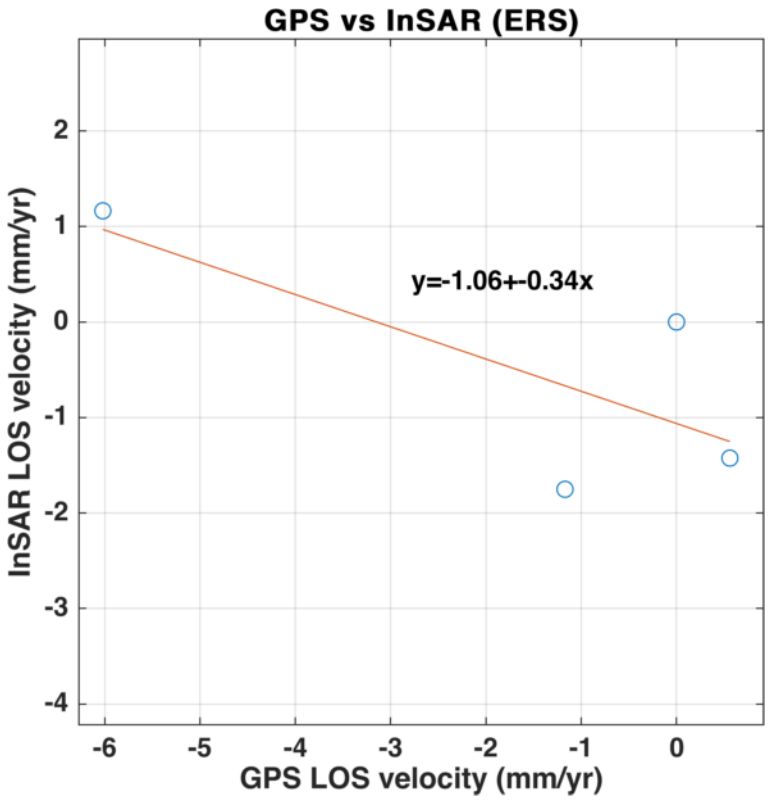


圖 3-1.1：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-1.1: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ERS images and continuous GPS stations.

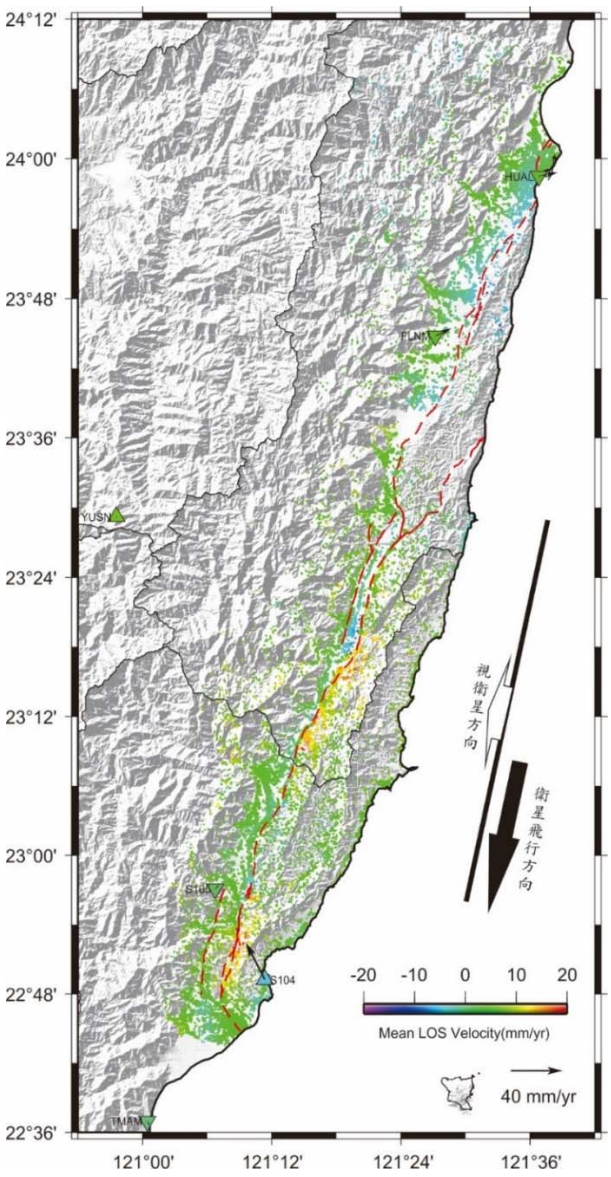


圖 3-1.2：ERS（1995/6~1999/9）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.2: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ERS (1995/6~1999/9) (Track=461, Frames=3123&3141). 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 FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

3-1-2 ENVISAT（2006/3~2009/6）

圖 3-1.4 即為 ENVISAT 衛星影像在此期間（2006/3~2009/6）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示跨過幾條主要斷層都沒有明顯的速度梯度差異。整體來說，只有北側向東跨過嶺頂斷層有些微的轉變為視衛星方向遠離與在卑南臺地向東跨過利吉斷層有較明顯視衛星方向拉近的速度梯度差異，約為 5 mm/yr。反而在跨過池上斷層並無明顯的速度梯度差異，可能因為總影像數目只有 9 張，略顯不夠導致干涉結果不好而造成。圖 3-1.3 將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與永久散射點於測站周圍 0.5 公里平均值進行比較。

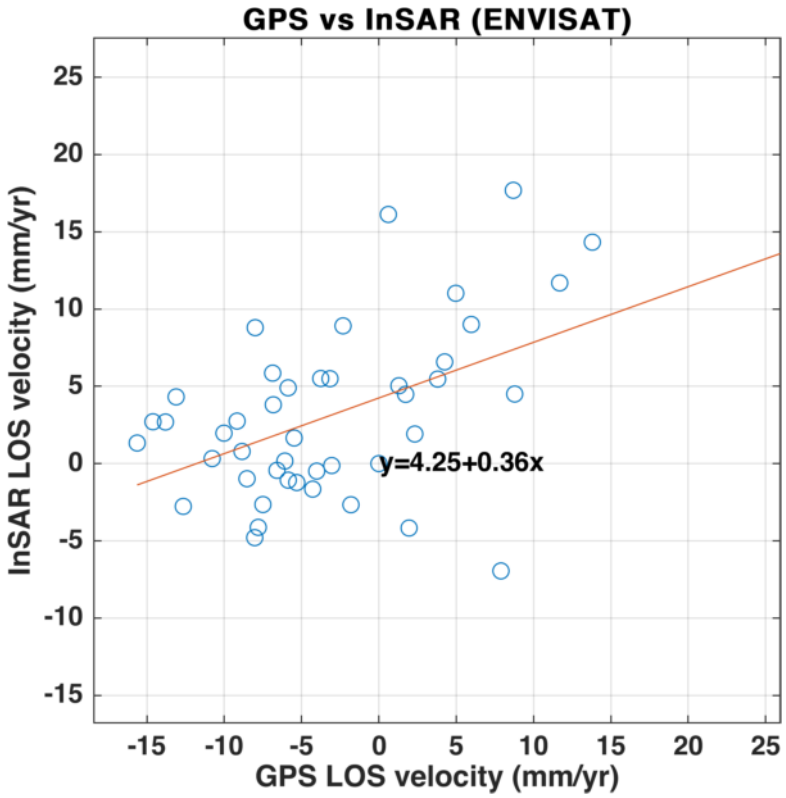


圖 3-1.3：ENVISAT 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-1.3: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ENVISAT images and continuous GPS stations.

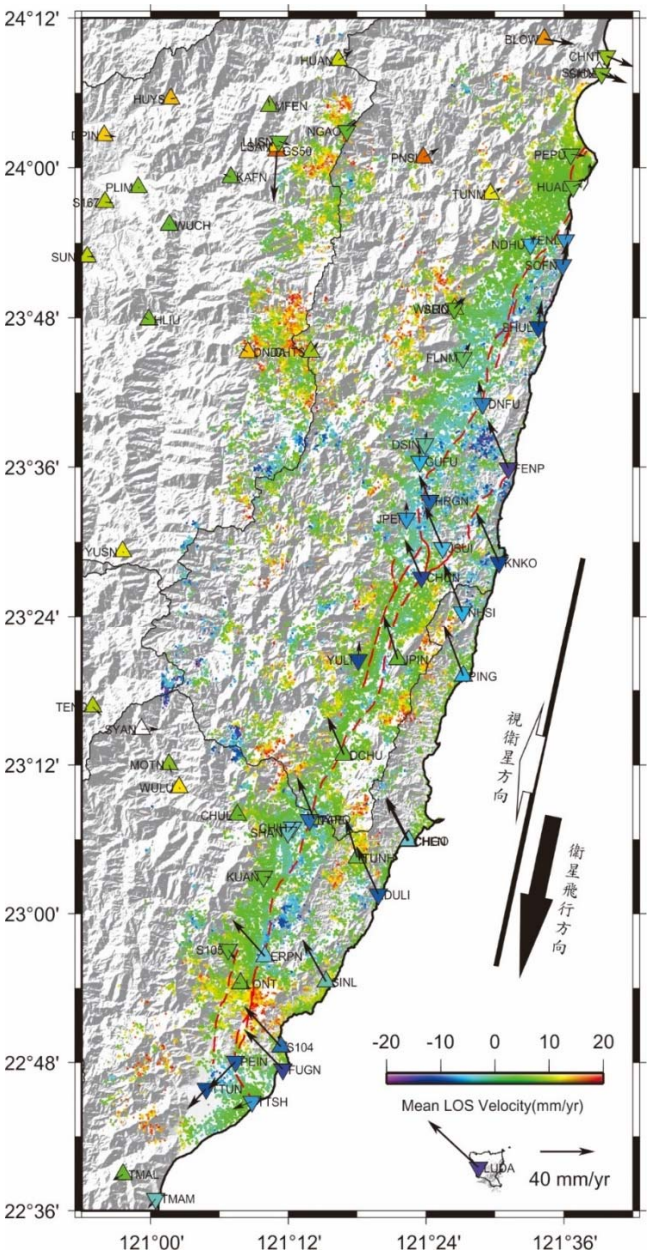


圖 3-1.4：ENVISAT（2006/3~2009/6）衛星軌道（Track）461，像幅編號（Frame）3123、3141 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.4: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ENVISAT (2006/3~2009/6) (Track=461, Frames=3123&3141). 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 FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

3-1-3 ALOS（2007/1~2010/12）

圖 3-1.6 即為 ALOS 衛星影像在此期間（2007/1~2010/12）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。結果顯示北段向東跨過嶺頂斷層呈現為視衛星方向遠離，速度梯度差異約為 10 mm/yr。而跨過池上斷層則有每年約 20~35 毫米的速度梯度差異，且有明顯的分界，能有效的萃取出池上斷層在地表上的位置。向南則顯示出向東跨過鹿野斷層也有速度梯度差異，約為 10 mm/yr。相較於 C 波段的衛星影像，L 波段的 ALOS 干涉結果較適合用來監測臺灣東部的活動斷層。圖 3-1.5 將連續 GPS 三方向速度投影至視衛星方向上，與永久散射點於測站周圍 0.5 公里平均值進行比較。

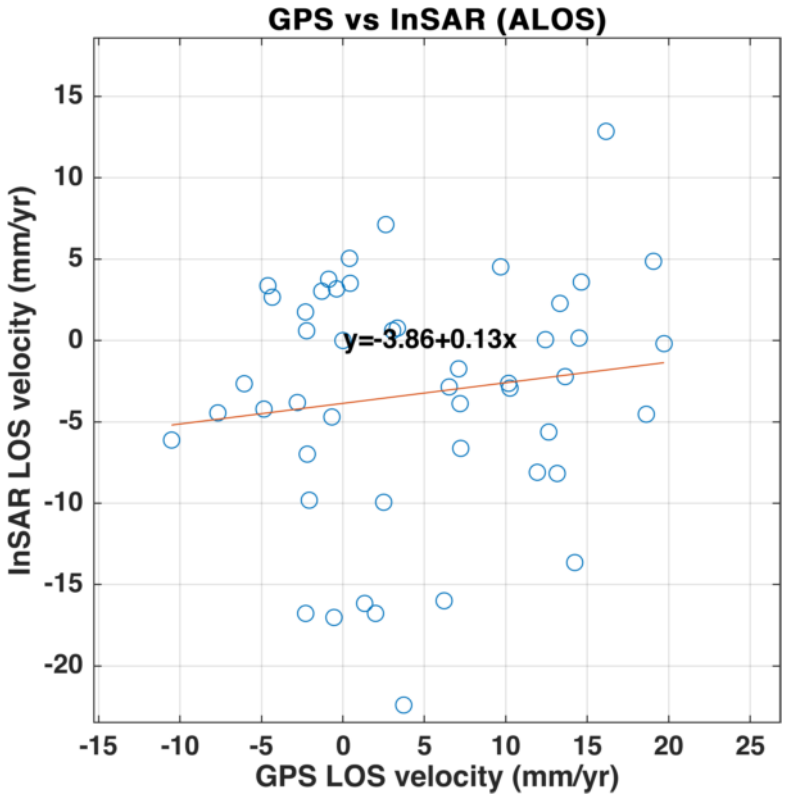


圖 3-1.5：ERS 影像的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-1.5: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of ERS images and continuous GPS stations.

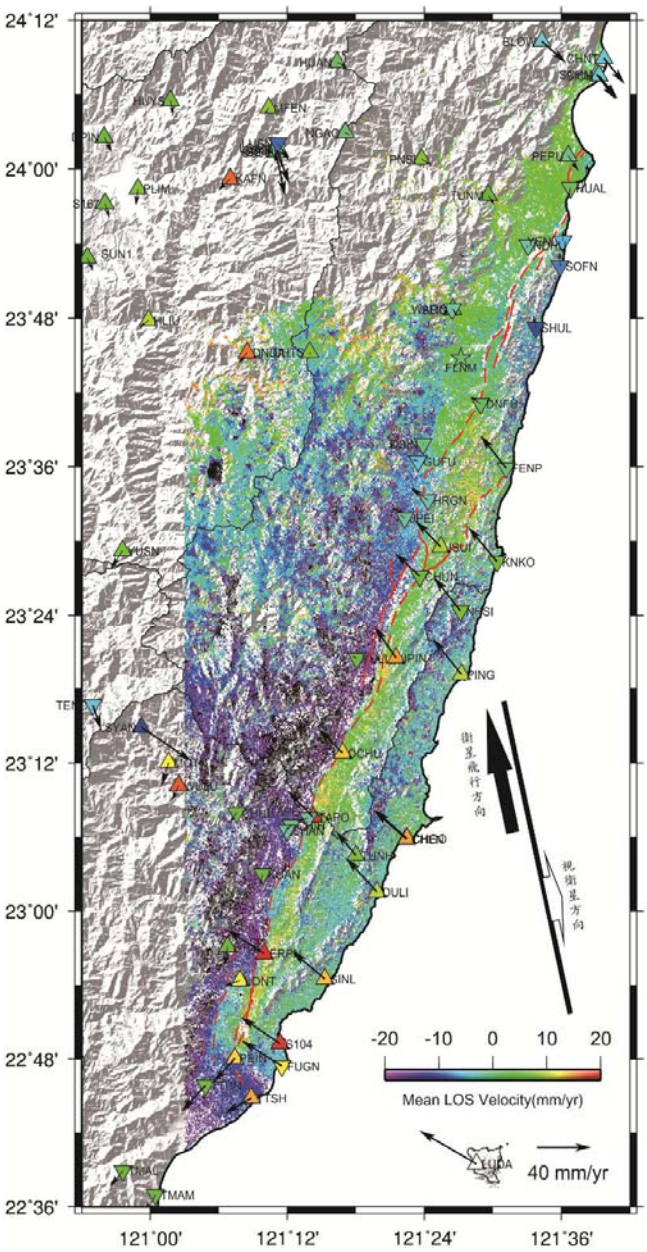


圖 3-1.6：ALOS（2007/1~2010/12）衛星軌道 444，像幅編號 460 及 470 及衛星軌道 445，像幅編號 440 及 450 視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.6: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of ALOS (2007/1~2010/12) (Track=444, Frames=460&470; Track=445, Frames=440&450). 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 FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

3-1-4 SENTINEL-1A &-1B（2015/4~2020/10）

本計畫選取 Sentinel-1 衛星 SAR 影像區域如圖 3-1.7 所示。分為降軌（Descending）及升軌（Ascending）兩部分。初步分析影像時間從 2015 年 5 月至 2020 年 10 月，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包括 12、24、36、48、72、96、192、288、384 天，將影像製作出干涉條紋圖，以獲得最佳干涉結果。升軌的部分，目前共有 132 幅合併後影像作為干涉，完成的干涉影像共 1040 幅；降軌的部分，目前共有 128 幅合併後影像作為干涉，完成的干涉影像共 867 幅。詳細干涉條紋圖成果請參閱附錄 5 及附錄 6。

本計畫目前的研究使用到較長時間基線，與過去只有使用 40 天內的短時間基線有所差異。干涉影像對時間較短的情況下，構造變形所產生的相位變化有較多的機會比其他訊號造成的干擾來的小，例如水氣、土壤含水量的改變與電離層等。如果要利用 SAR 作為長期構造活動監測之工具，必須仰賴良好的干涉資料，每一對干涉資料包括這兩張影像（主影像與副影像）之間的變形所造成的相位改變，也包括其他訊號造成的相位改變。如果並非地質在短時間內造成的地表變形，較短時間基線的情況下干涉對，其中構造變動所造成的相位變化有機會比水氣、土壤含水量或者軌道誤差等等的干擾所造成的相位變化還要小，結果可能會導致干涉後計算相位回復時的錯誤，並最終影響長期構造變形時間序列監測的誤差。

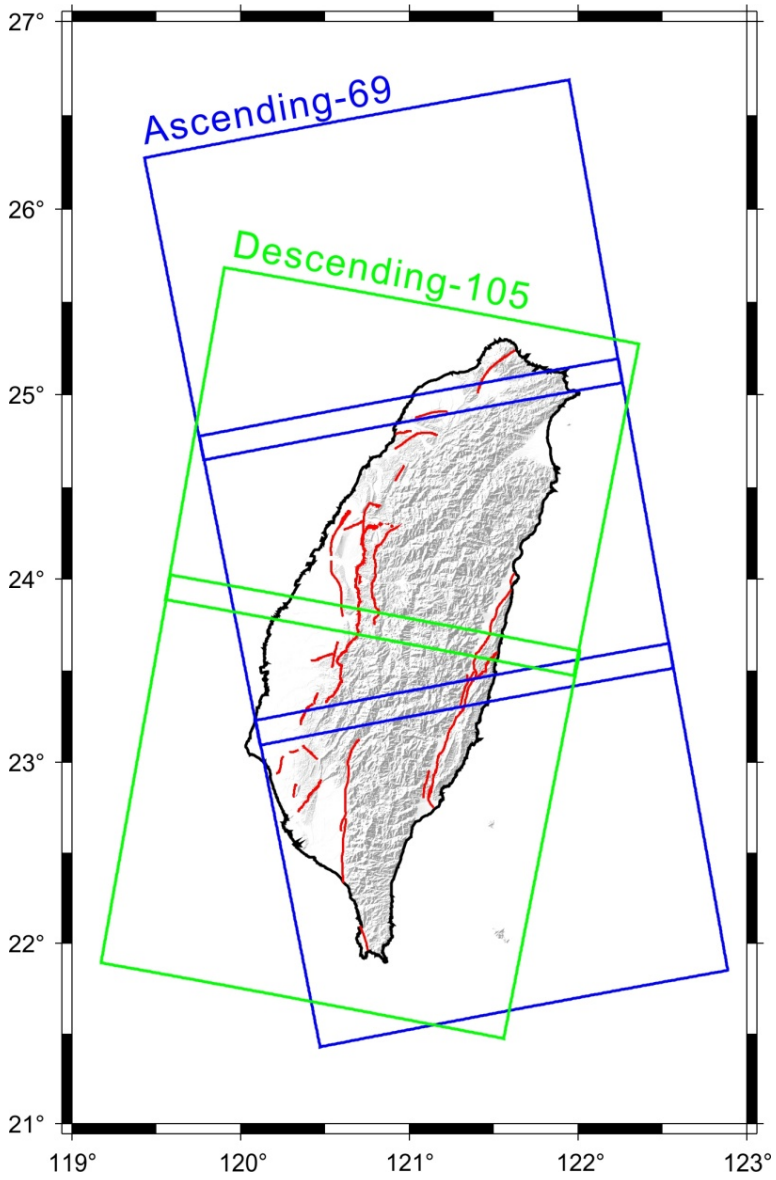


圖 3-1.7：Sentinel-1 衛星選取區域涵蓋圖。

Figure 3-1.7: Sentinel-1 AOI in this project that contains 3 ascending images in orbit number 69 and 2 descending images in orbit number 105.

圖 3-1.8 為以 Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 兩張干涉圖為例。顯示由於 Sentinel-1 衛星影像垂直基線都相當短，除中央山脈多為高山植被所覆，C 波段影像波長較短無法穿透而形成良好的干涉訊號外，大致上都能產生大範圍的干涉條紋。由圖可見影像中干涉條紋大多產生於縱谷區域的城市、裸露河川地，中央山脈山區大部分只能在溪谷中有干涉條紋。

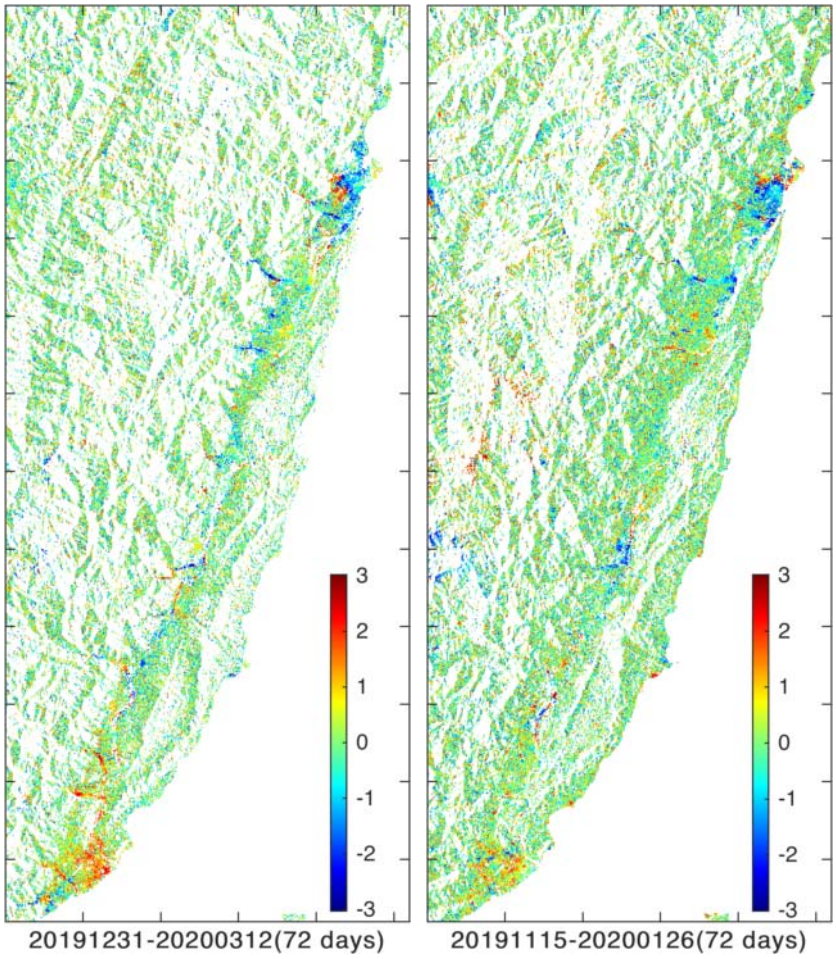


圖 3-1.8：Sentinel-1 升軌衛星影像 20191231-20200312 及降軌影像 20191115-20200126 干涉圖。

Figure 3-1.8: Sentinel-1 ascending interferogram of 20191231-20200312 and descending interferogram of 20191115-20200126.

圖 3-1.9 Sentinel-1 早期與現在在台灣區域所拍攝的範圍會略有差異，在進行干涉處理時，並非每個干涉對都能完整涵蓋研究區域，必須要經過挑選移除不完整的干涉對。而圖 3-1.10 為 20170127-20170208 與 20200124-20200205 干涉圖，時間基線是 12 天，由圖可見影像中於中央山脈區域有異常的干涉條紋呈現，然而這些區域屬於植被明顯，SAR 訊號的相位屬於比較不連續的區域。這些相位資訊可能是由於短時間基線干涉所導致的水氣、土壤含水量的改變與大氣中水氣之干擾。

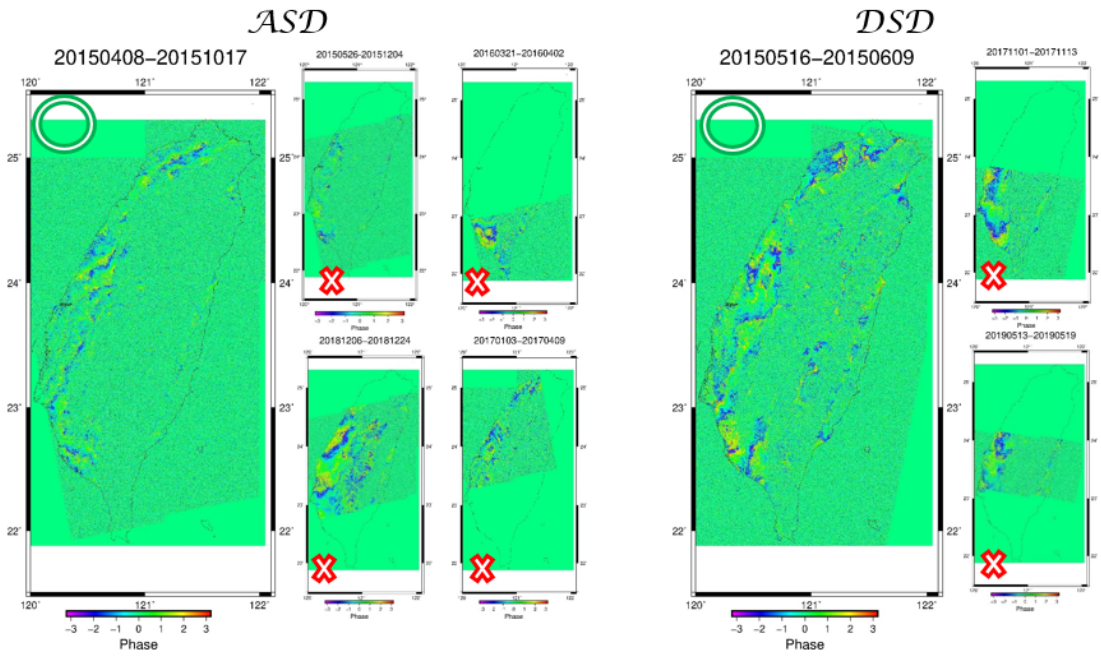


圖 3-1.9：Sentinel-1 干涉影像涵蓋區域綠色圓圈代表可以作為後續時間序列分析的資料，而紅色叉叉的干涉必須要移除。

Figure 3-1.9: Sentinel-1 interferograms covered in AOI of this project. We use the inteferograms marked with green circles and exclude those with red crosses.

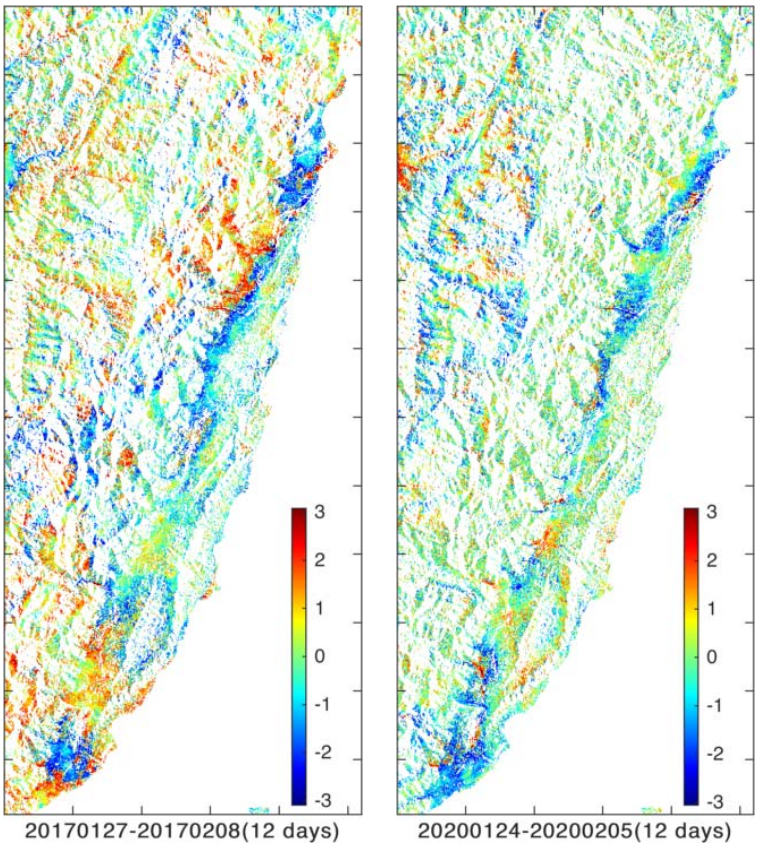


圖 3-1.10：Sentinel-1 短時間基線在中央山脈區域有異常的干涉條紋產生。

Figure 3-1.10: Abnormal fringe observed in short-term temporal baseline in Central Range area.

圖 3-1.11 及圖 3-1.12 即為 Sentine-1 衛星影像在此期間（2015/04~2020/04）獲得的永久散射點在視衛星方向上的年平均變動量。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，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，與永久散射點於測站周圍 0.5 公里平均值進行比較。升軌的比對結果的相關性比降軌比對結果小（圖 3-1.13），可能是由於東部區域的速度場有較多平行於升軌衛星飛行方向的分量（圖 3-1.11），平行衛星飛行方向的變形在相位變化上並不明顯，導致 InSAR 在偵測接近平行衛星飛行方向的變形並不敏感。

對於升軌衛星是由西往東觀測，台灣東部縱谷區域大部分斷層上盤北偏西的速度場在視衛星方向的變化是縮短的，數值上為正值。而對於降軌衛星是由東往西觀測，北偏西的速度場在視衛星方向遠離，數值顯示為負值。

圖 3-1.14 剖面 A 向東跨過米崙斷層，升軌的 LOS 速度約在-15 mm/yr 至 5 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在 10 mm/yr 至 20 mm/yr 之間變化。整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，速度梯度有明顯變化，明顯的分界能有效的萃取出米崙斷層在地表上的位置。跨過米崙斷層之後，升軌的速度變得更小，而降軌的速度變得更大。在升軌與降軌的變化方向相反的主要原因，可能是由於實際地表變形速度是發生在水平方向（向東）而非垂直，會在升軌的視衛星方向伸長（負變化），在降軌的視衛星方向縮短（正變化）。綜合升軌與降軌的速度場剖面資料顯示，在跨過米崙斷層後地表有明顯水平速度分量（約向東）增加。

剖面 B 向東跨過嶺頂斷層，升軌與降軌的 LOS 速度約在-4 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化。整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，速度梯度有明顯變化，明顯的梯度分界能有效的萃取出嶺頂斷層在地表上的位置，斷層西側的速度較為一致，約-3 mm/yr。特別的是此剖面區域不論升軌或降軌的速度變化都相當一致，這有可能是由於該區域的水平速度相當小，主要貢獻在 LOS 的速度是來自於垂直的速度分量。這一推論也可從該區域都有相當小的 GPS 水平速度場（圖 3-1.11 或圖 3-1.12）得到佐證。

剖面 C 向東跨過瑞穗斷層與奇美斷層，升軌的 LOS 速度約在-1 mm/yr 至 6 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在-2 mm/yr 至-9 mm/yr 之間變化。主要明顯速度梯度變化的地方發生在瑞穗斷層，跨過瑞穗斷層之後，升軌的速度變得更大，而降軌的速度變得更小。與剖面 A 的解釋一樣，是由於主要地表變形速度是發生在水平方向（向西）的壓縮，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。綜合升軌與降軌的速度場剖面資料顯示，在跨過瑞穗斷層後地表有明顯水平速度分量（約向西）增加。但跨越奇美斷層時並沒有發現明顯的速度梯度變化。

剖面 D 向東跨過玉里斷層與池上斷層，升軌與降軌的 LOS 速度約在-6 mm/yr 至 2 mm/yr 之間變化。原來速度場由西向東遞減，在跨過玉里斷層後向東增加，然後在池上斷層附近達到最大，過了池上斷層約 0.5 公里之後，升軌與降軌的速度變得較為反向不一致。整體來說，池上斷層以西的 LOS 速度場，除了受到水平運動的貢獻外，主要受到垂直地表變化控制，因此在升軌與降軌的速度變化接近一致，而池上斷層以東的 LOS 速度場主要受到接近北偏西的水平運動影響，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。

剖面 E 向東跨過池上斷層南段，升軌的 LOS 速度約在-7 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在-5 mm/yr 至 4 mm/yr 之間變化。直到池上斷層之前，整體 LOS 速度不論升軌或降軌都是由西向東遞減，接近池上斷層時，升軌的 LOS 速度場在 1 公里內上升了約 7 mm/yr，降軌的 LOS 速度場在 1 公里內上升了約 4 mm/yr。過了池上斷層約 1 公里之後，升軌與降軌的 LOS 速度場有些微反向的趨勢，推測可能主要受到接近北偏西的水平運動影響，會在升軌的視衛星方向縮短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。

剖面 F 向東跨過鹿野斷層與利吉斷層，升軌的 LOS 速度約在-4 mm/yr 至 9 mm/yr 之間變化，而降軌的 LOS 速度約在 0 mm/yr 至 7 mm/yr 之間變化。從升軌與降軌 LOS 速度幾乎反向的表現，說明該區域的變形主要以水平變形為主，從 GPS 速度場可以看出該區域具有北偏西的構造活動，在升軌的視衛星方向縮

短（正變化），在降軌的視衛星方向伸長（負變化）。一直到靠近鹿野斷層前約 1 公里，升軌的 LOS 速度就開始明顯上升，直到跨鹿野斷層後約 0.5 公里，LOS 速度上升了約 8 mm/yr，但此現象在降軌的 LOS 速度變化較不明顯。目前推測可能是由於向西旋轉的速度改變，導致變化的速度在升軌 LOS 貢獻的比例較多，而在降軌的 LOS 的貢獻較少而造成。另外速度場的變化並非以斷層為分界，可能也指示了主要活動來自於斷層較深處，斷層淺部是鎖定的。升軌與降軌的 LOS 速度場在跨過鹿野斷層後基本上是反向的，在升軌的 LOS 速度呈現向東增加，在降軌呈現遞減。在跨過利吉斷層後升軌與降軌的 LOS 速度場又反過來，在升軌的 LOS 速度呈現向東遞減，在降軌呈現增加。升降軌反向的 LOS 速度場說明在鹿野斷層東側的構造活動有水平方向的速度改變，並且受到利吉斷層淺部活動的影響，速度場的變化大約發生在利吉斷層的位置。

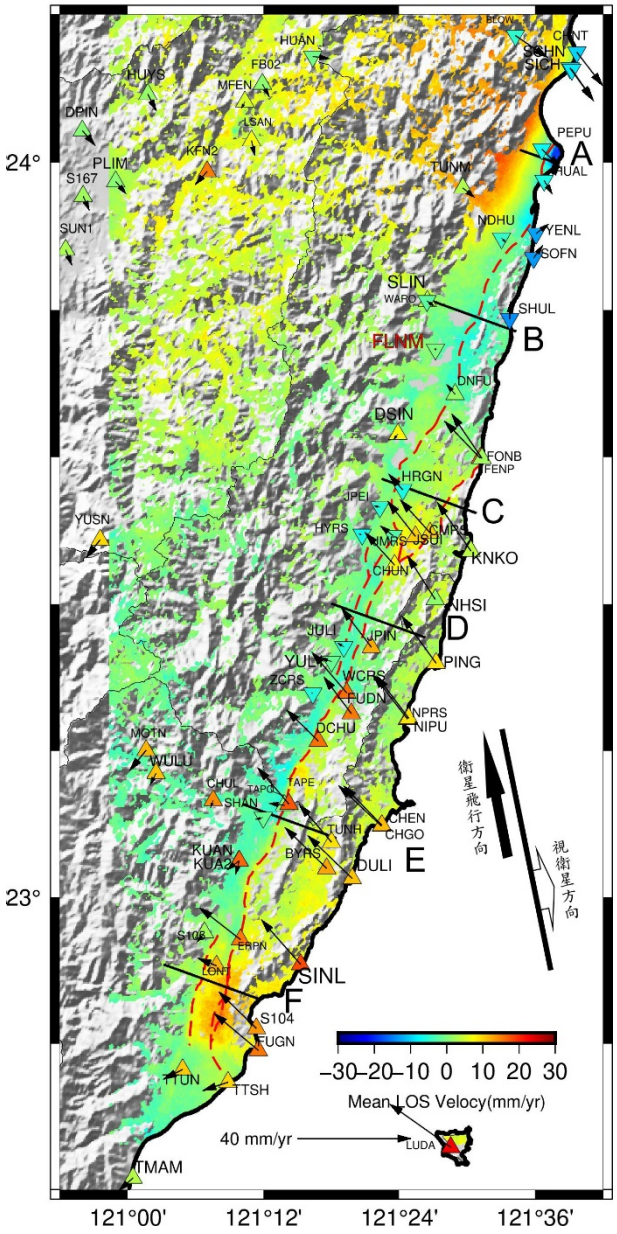


圖 3-1.11：Sentinel-1 升軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.11: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 ascending images (2015/04~2020/04). 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 FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

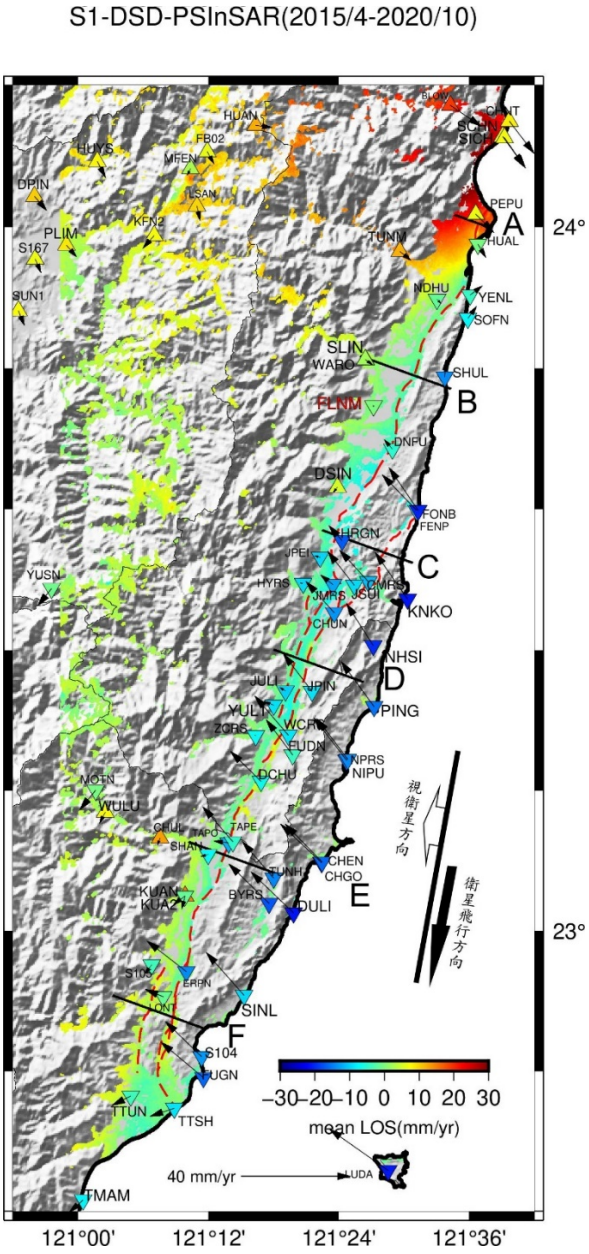


圖 3-1.12：Sentinel-1 降軌影像（2015/04~2020/10）視衛星方向上年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形沿視衛星方向靠近；冷色系代表地表變形沿視衛星方向遠離。參考點為連續 GPS 測站 FLNM，三角形為連續同時期 GPS 站三維向量投影至視衛星方向。尖端朝上指示垂直向量抬升；尖端朝下指示沉降，箭頭為水平速度場相對參考點的速度方向。

Figure 3-1.12: Slant range displacement rate of the processed PSs (mm/yr) of Sentinel-1 descending images (2015/04~2020/04). Shortening in slant range direction (rate in positive with warm colors) represents land uplift and eastward motion while elongation in slant range direction (rate in negative with cold colors) represents land subsidence and westward mtion. Reference point is continuous GPS station FLNM. Color-coded triangles and inverse triangles represent projection of 3D GPS velocity to LOS direction towards to satellite. Triangles represent land uplift; while inverse triangles represent land subsidence. Arrow represents velocity direction of horizontal velocity field referencing to reference point.

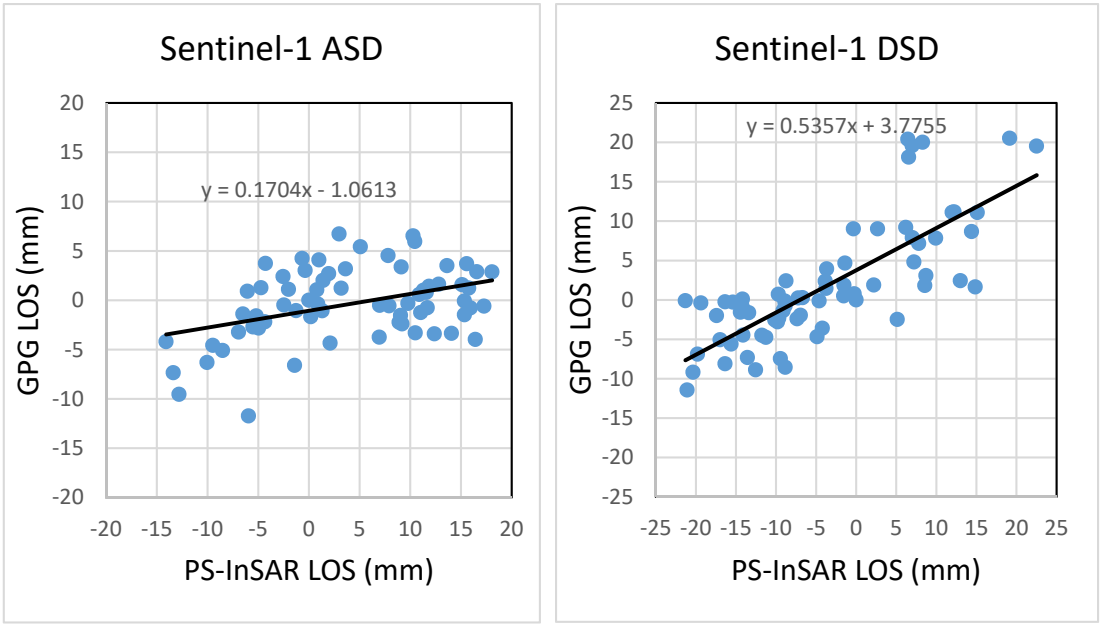


圖 3-1.13：Sentinel-1 升軌影像（左圖）及降軌影像（右圖）的永久散射點與連續 GPS 測站視衛星方向變形量的相關性。

Figure 3-1.13: Correlation between deformation along the LOS directin from PSs of Sentinel-1 images and continuous GPS stations.

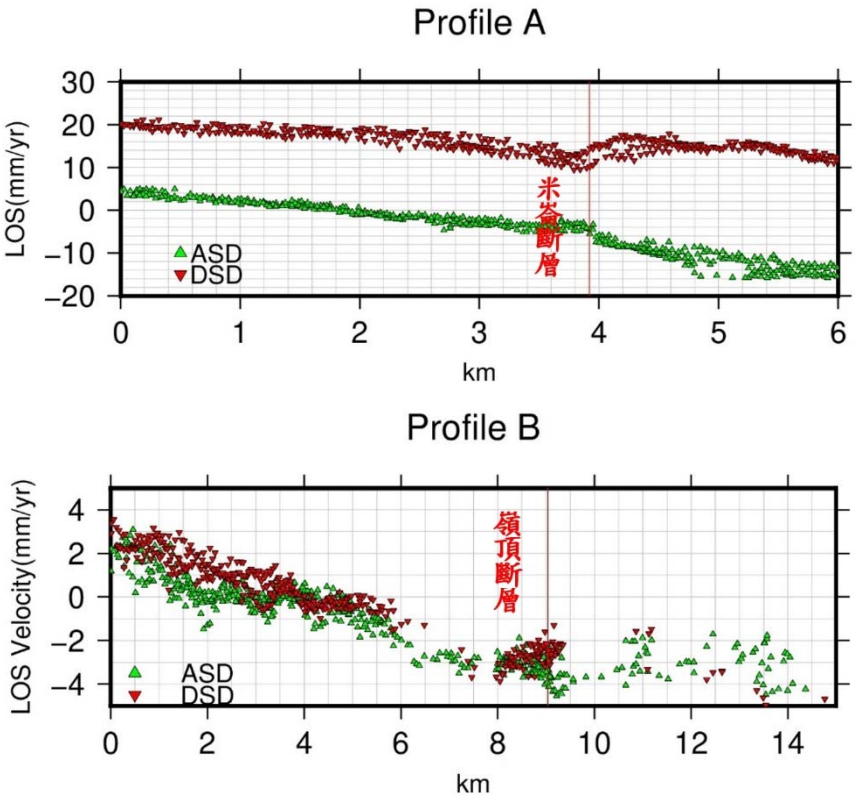


圖 3-1.14：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。剖面位置如圖 3-1.8 或圖 3-1.9。綠色三角形為升軌 LOS 速度場剖面，紅色三角形為降軌 LOS 速度場剖面。

Figure 3-1.14: Mean LOS velocity profile from PSs of assending and descending orbits. Locations of profiles are shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9. Green triangles represent LOS velocity in ascending oribit while red triangle represent LOS velocity in descending orbit.

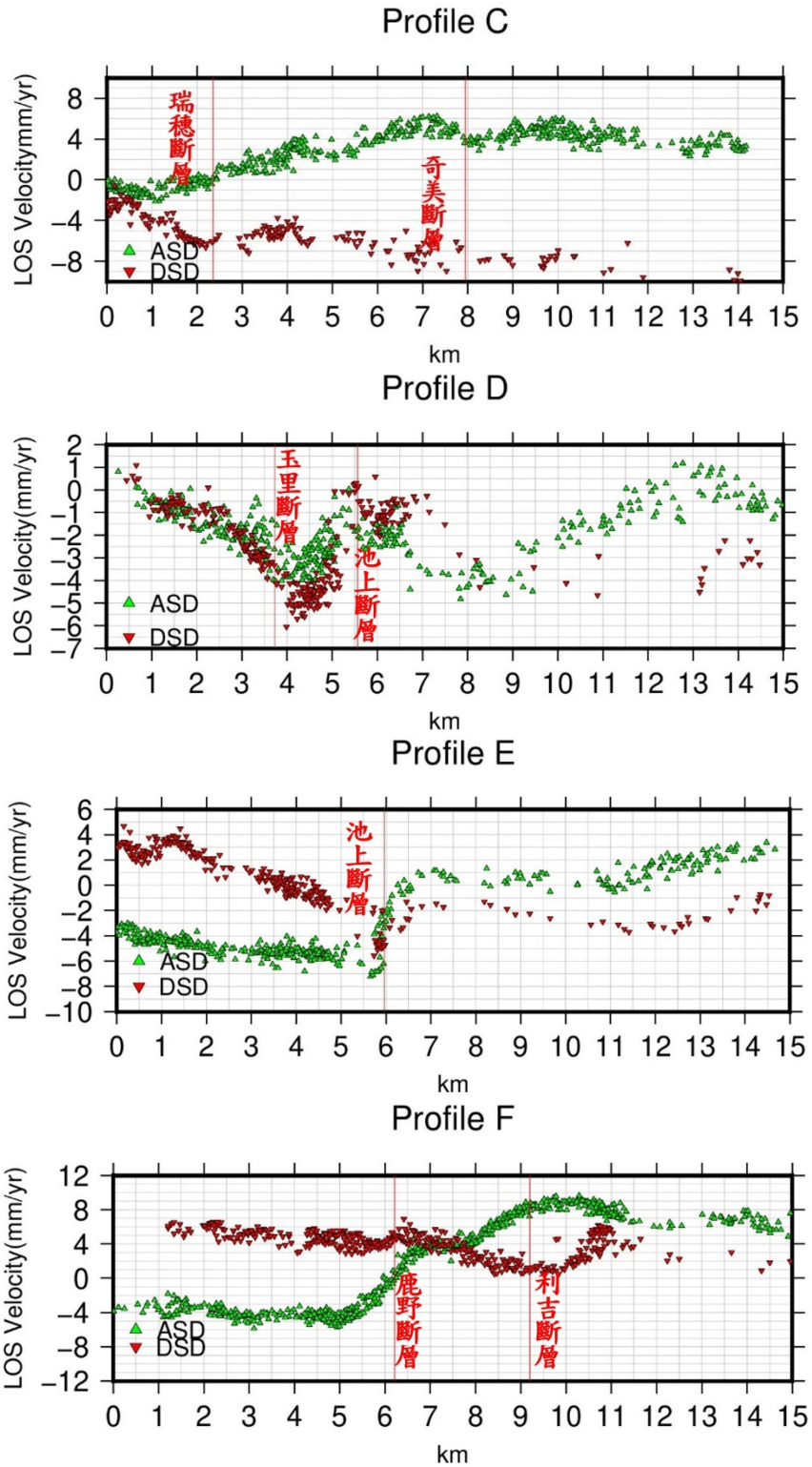


圖 3-1.14（續）：Sentinel-1 PS 平均 LOS 速度場剖面。剖面位置如圖 3-1.8 或圖 3-1.9。綠色三角形為升軌 LOS 速度場剖面，紅色三角形為降軌 LOS 速度場剖面。

Figure 3-1.14 (Cont.): Mean LOS velocity profile from PSs of assending and descending orbits. Locations of profiles are shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9. Green triangles represent LOS velocity in ascending oribit while red triangle represent LOS velocity in descending orbit.

SAR 所分析的變化一般都是指視衛星方向的變化，但 Sentinel-1 衛星對於同一區域會有升軌與降軌影像，也因此可以獲得兩個方向的速度場，因此可以計算獲得垂直方向與東西方向上的地表變形速度場（Tung, et al., 2019）。

$$E = \frac{LOS_{dsc}\cdot\cos(\theta_{asc}) - LOS_{asc}\cdot\cos(\theta_{des})}{\cos(\alpha_{dsc})\cdot\sin(\alpha_{dsc})\cos(\theta_{asc}) + \cos(\alpha_{asc})\cdot\sin(\alpha_{asc})\cos(\theta_{dsc})}$$

$$U = \frac{LOS_{asc} + E\times\cos(\alpha_{asc})\sin(\theta_{asc})}{\cos(\theta_{asc})}$$

LOS_{asc} ： 升軌視衛星方向變形量
LOS_{dsc} ： 降軌視衛星方向變形量
θ_{asc} ： 升軌衛星觀測入射角度
θ_{dsc} ： 降軌衛星觀測入射角度
α_{asc} ： 升軌衛星軌道飛行方向角度（與正北之夾角）
α_{dsc} ： 降軌衛星軌道飛行方向角度

接著，我們結合升軌與降軌影像以獲得東西方向（圖 3-1.15）與垂直方向（圖 3-1.16）上的地表變形。由結果可以得到在這段期間：（1） 縱谷大致呈現向西的構造活動速度分量。（2）縱谷北端從嶺頂斷層北端以北有明顯向東的構造活動分量。（3）縱谷南端鹿野斷層兩側的速度場不同，上盤（東側）向西，而下盤（西側）向東。（4）縱谷北側米崙斷層西側至中央山脈區有明顯抬升的變形趨勢，而且越往西側變形速度場越大，可以達到 20 mm/yr，此結果與 GPS 的速度場相符。（5）池上斷層兩側有明顯垂直速度場差異，但差異量約 14 mm/yr。（6）InSAR 所顯示的水平與垂直速度場有一致的趨勢，但量值都較 GPS 小。

對於縱谷北側木瓜溪以北，或米崙斷層西側至中央山脈區域，抬升變形速率不論是 InSAR 或 GPS 都顯示有越來越大的現象，比對 Ching et al.（2011a）研究中更北側一點，沿著立霧溪從東往西向中央山脈的水準測量結果，也有相同的抬升變形速率變化變大的現象。這個情況可能與臺灣造山系統的板塊隱沒特性有關，歐亞板塊大約在臺灣東部向東隱沒，而菲律賓海板塊在台灣東部以斜碰撞的方式撞上歐亞板塊，並且在臺灣東北區域向北隱沒，然而隱沒於地涵的歐亞板塊

有可能隨著越往臺灣東北測產生脫落（Teng et al., 2000）或者裂縫（Lallemand et al., 2013）而變短，結果會導致受板塊帶動的地涵物質累積在這個區域造成較大的抬升力。Lin and Kuo（2016）藉由各種板塊隱沒的模型結果也顯示在花蓮以西的中央山脈區域會有較大於中央山脈中南段的垂直變形速率。另外 Yang et al.（2018）的研究中顯示 2018 年花蓮地震發生在一個向西傾的左移走向斷層，主震除了觸發了米崙斷層的活動，並且包括了更多的震後滑移，造成了地表變形抬升。

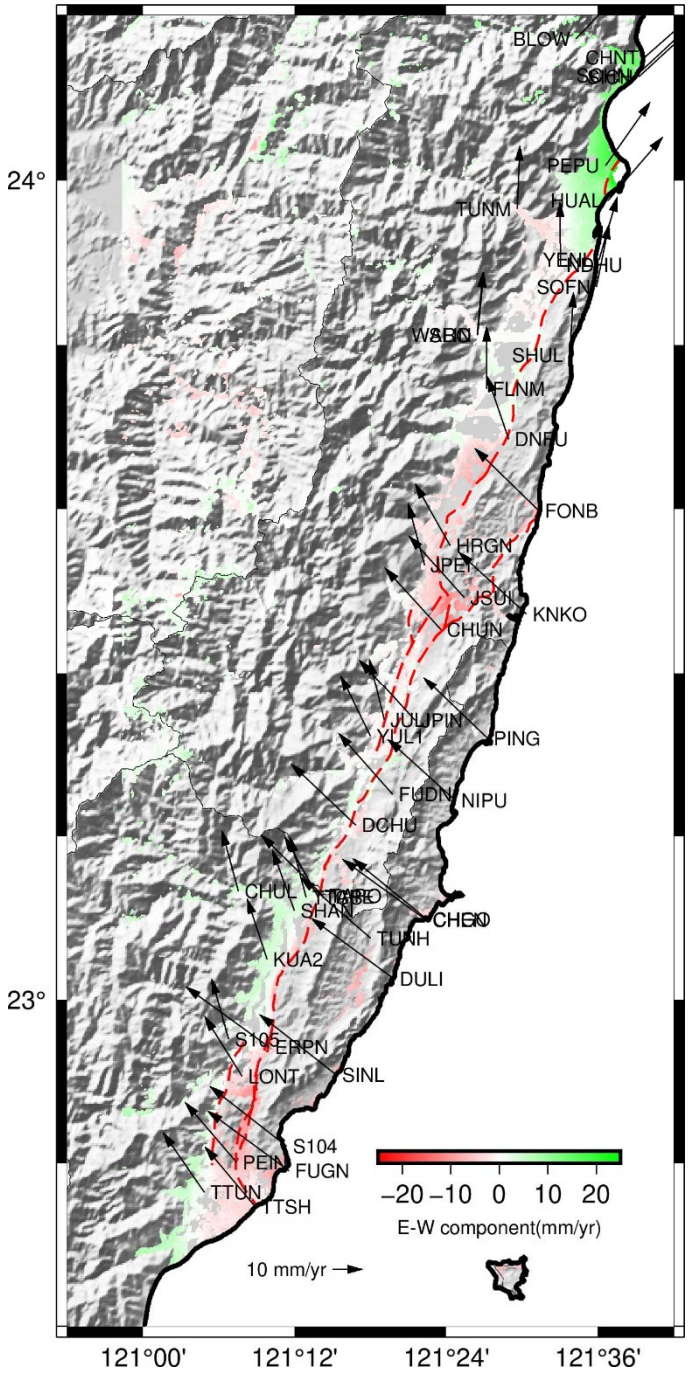


圖 3-1.15：Sentinel-1 東西方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系代表地表變形向東；冷色系代表地表變形向西。箭頭為連續 GPS 測站水平方向移動速率。

Figure 3-1.15: 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.

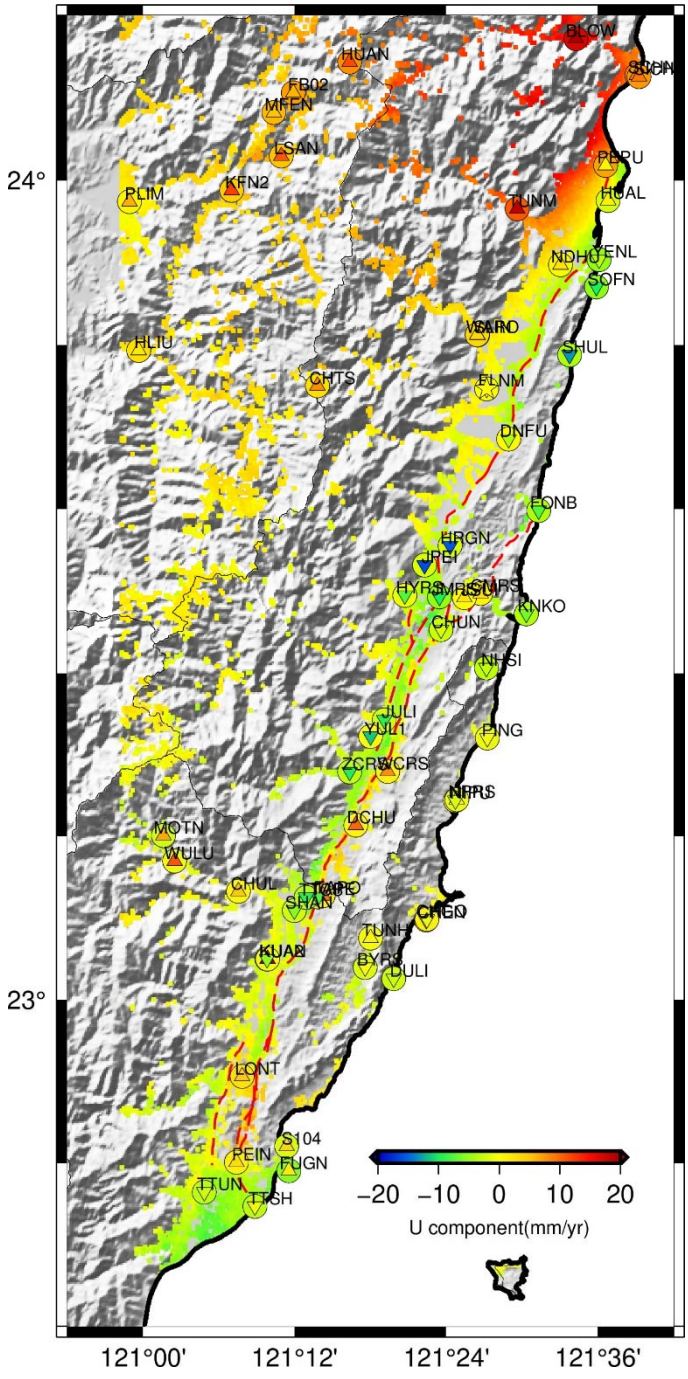


圖 3-1.16：Sentinel-1 垂直方向年平均變動量（單位：mm/yr）。暖色系三角形代表地表變形抬升；冷色系倒三角形代表地表變形下降。三角形為連續 GPS 測站垂直方向移動速率。

Figure 3-1.16: 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

本計畫報告針對 Sentinel-1 衛星進行連續 GPS 測站周圍 PS 點之時間序列進行比對，包括做為參考點的 FLNM 測站、米崙斷層附近的 PEPU、瑞穗斷層與奇美斷層之間的 JSUI 與鹿野斷層與奇美斷層之間的 LONT，共四個測站。FLNM 之 GPS 資料與周圍 PS 點時間序列的參考點相對於 ITFR14，其餘測站皆以花蓮縣鳳林的 FLNM 測站做為參考點進行測試比較。由於 PS-InSAR 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 Sentinel-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有良好的關聯性，趨勢大致符合，米崙斷層附近的 PEPU 站也明顯地顯示了同震及震後的變形行為。

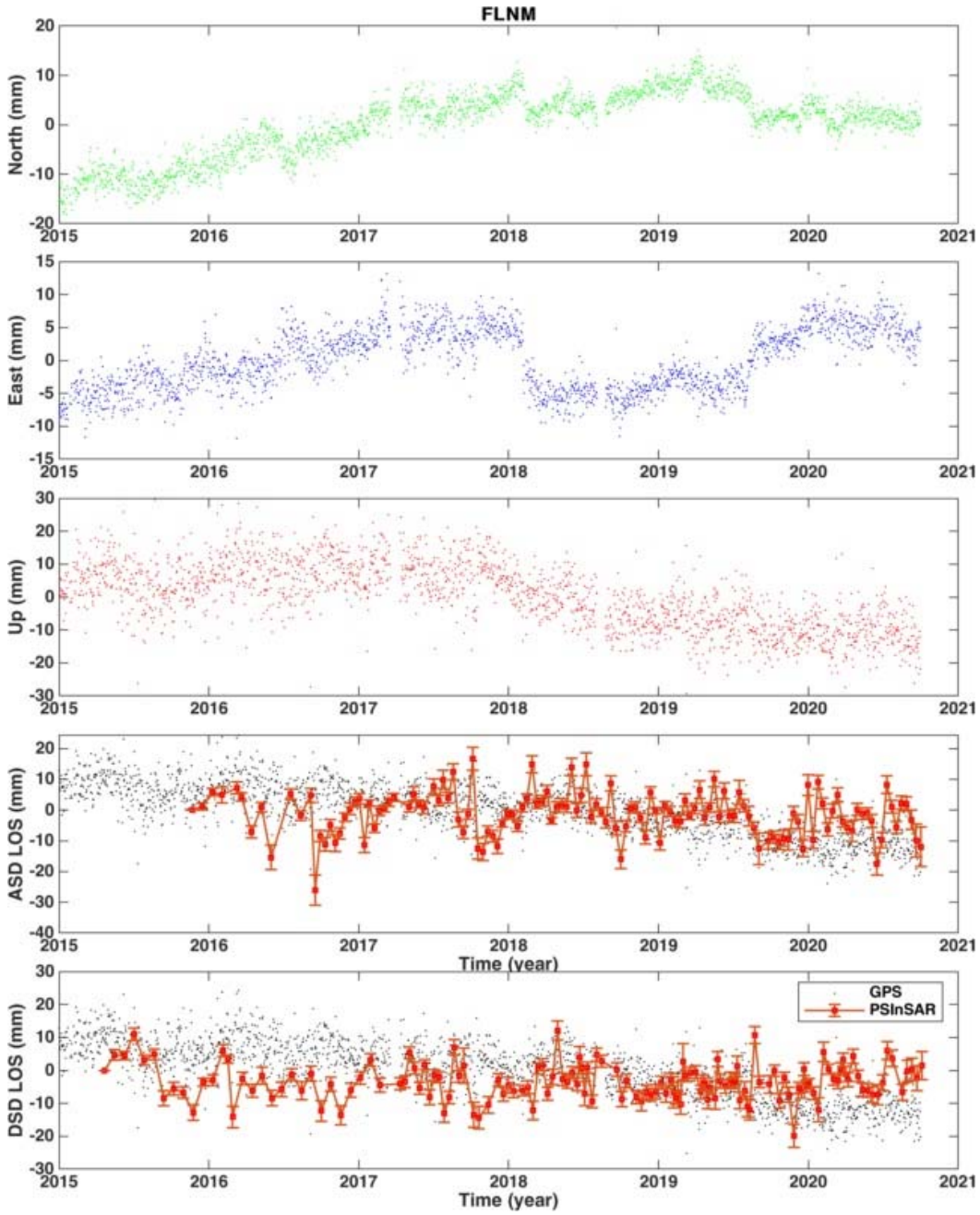


圖 3-2.1：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-1.8 或圖 3-1.9。

Figure 3-2.1: Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

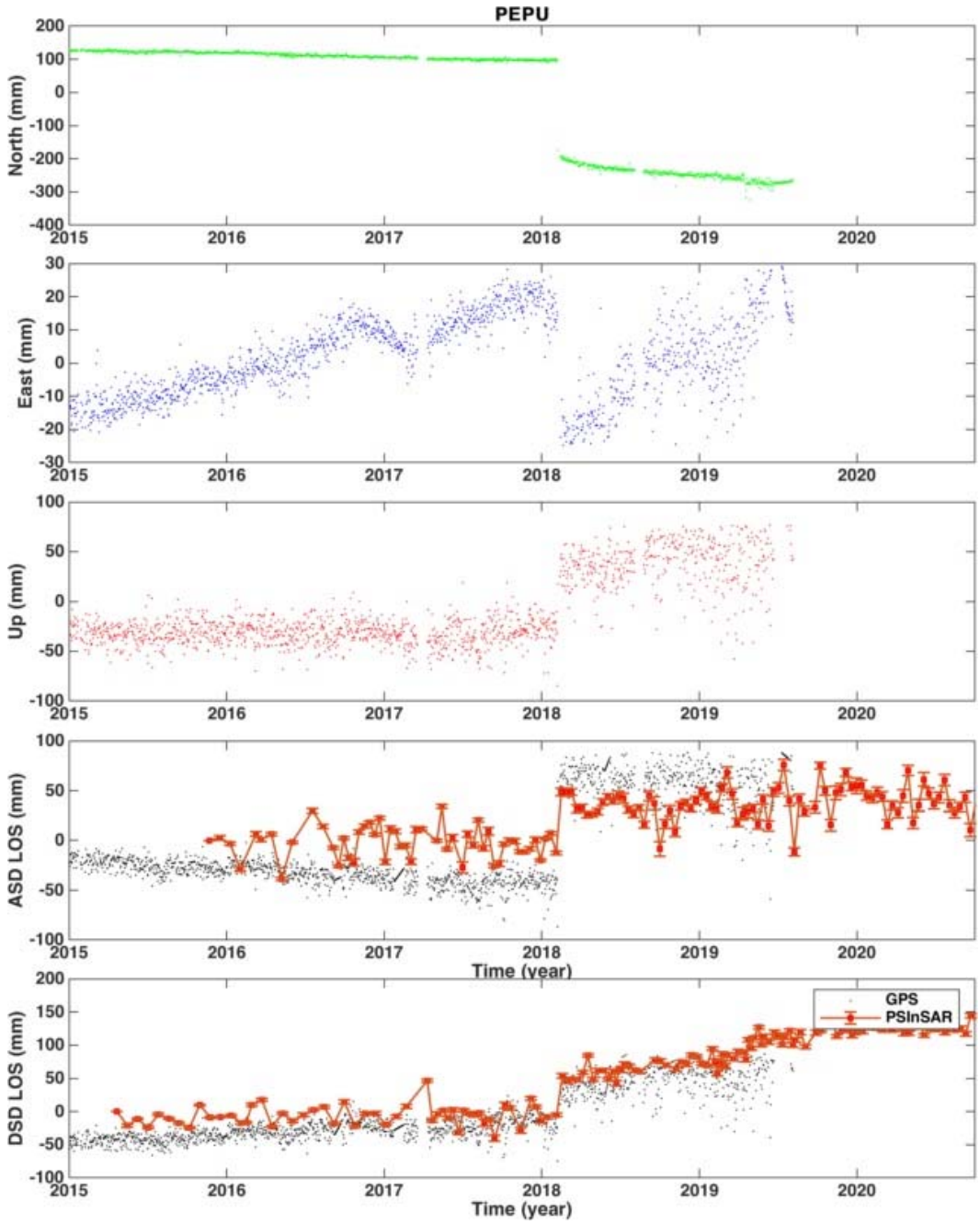


圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-1.8 或圖 3-1.9。

Figure 3-2.1(Cont.): Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

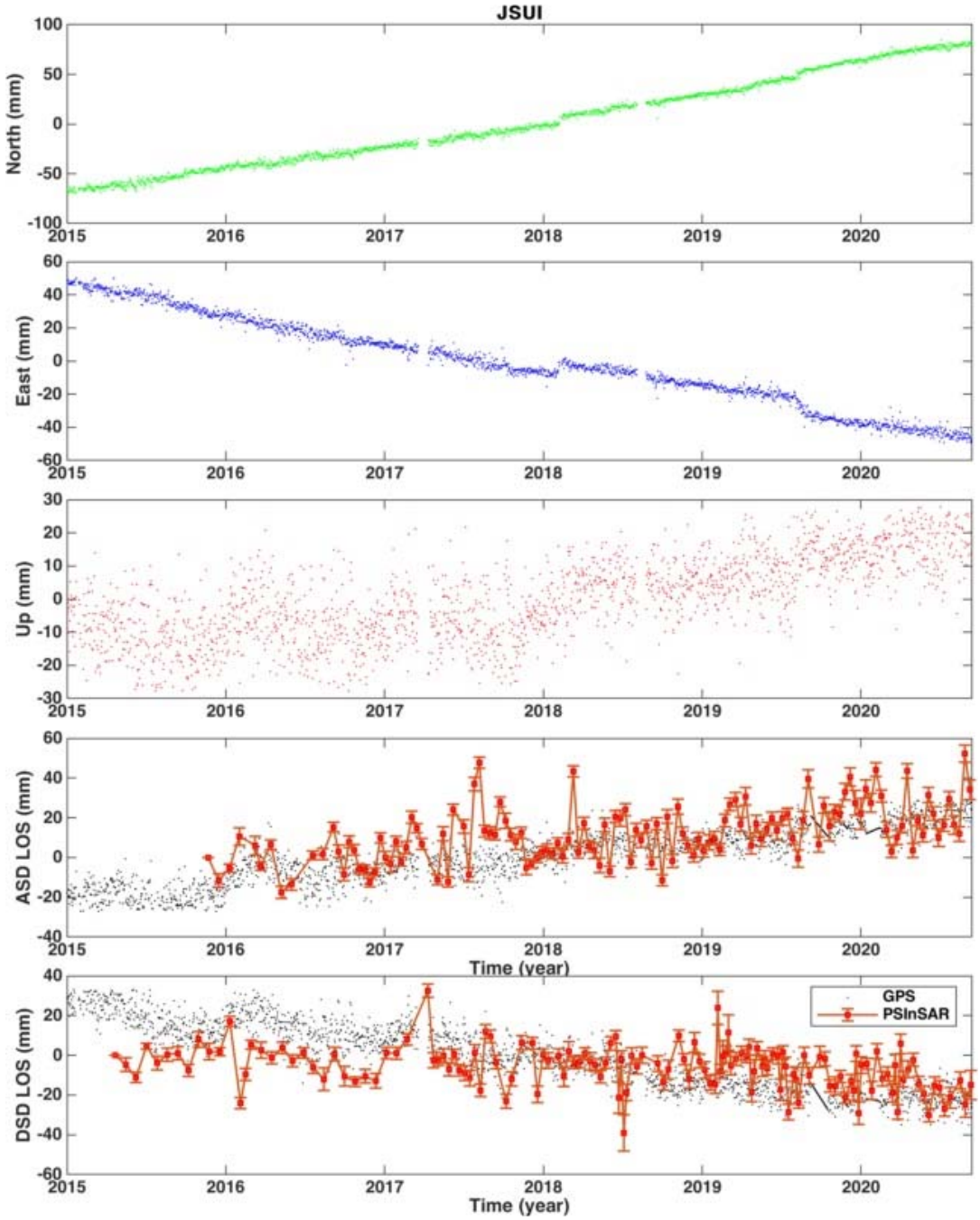


圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-1.8 或圖 3-1.9。

Figure 3-2.1 (Cont.): Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

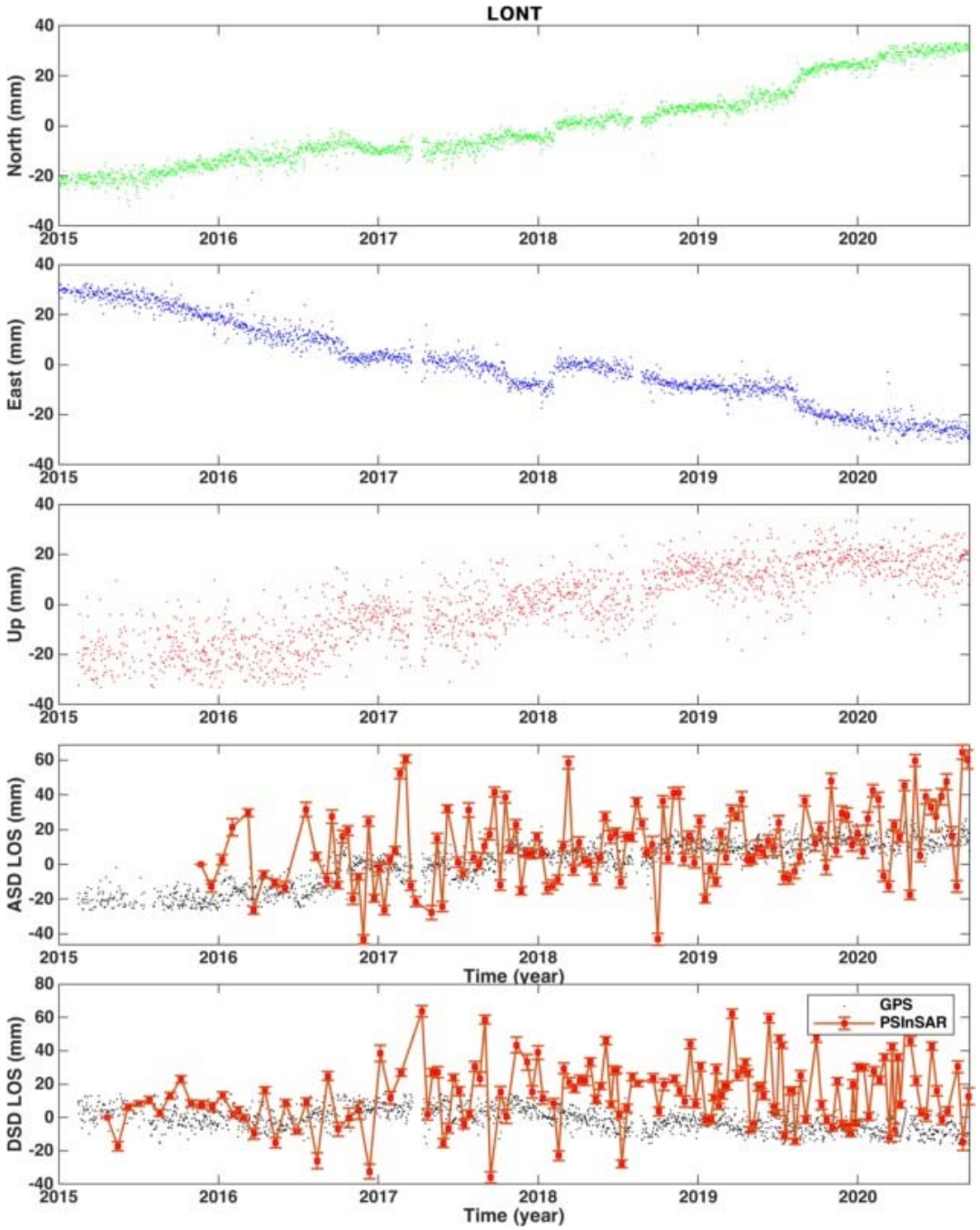


圖 3-2.1（續）：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-1.8 或圖 3-1.9。

Figure 3-2.1 (Cont.): Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. Green point, blue point and red point represent three directions of time series of GPS in north, east and vertical direction respectively. Black point represents 3D GPS velocity projected to LOS direction. Red circles represent time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

3-3 東部地區 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: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10)，針對東部地區斷層進行 PS-InSAR 技術時間序列分析。為了確立 Sentinel-1 影像的可信度，首先挑選東部地區位於米崙斷層之連續 GPS 測站（PEPU)，以位於鳳林之 FLNM 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。

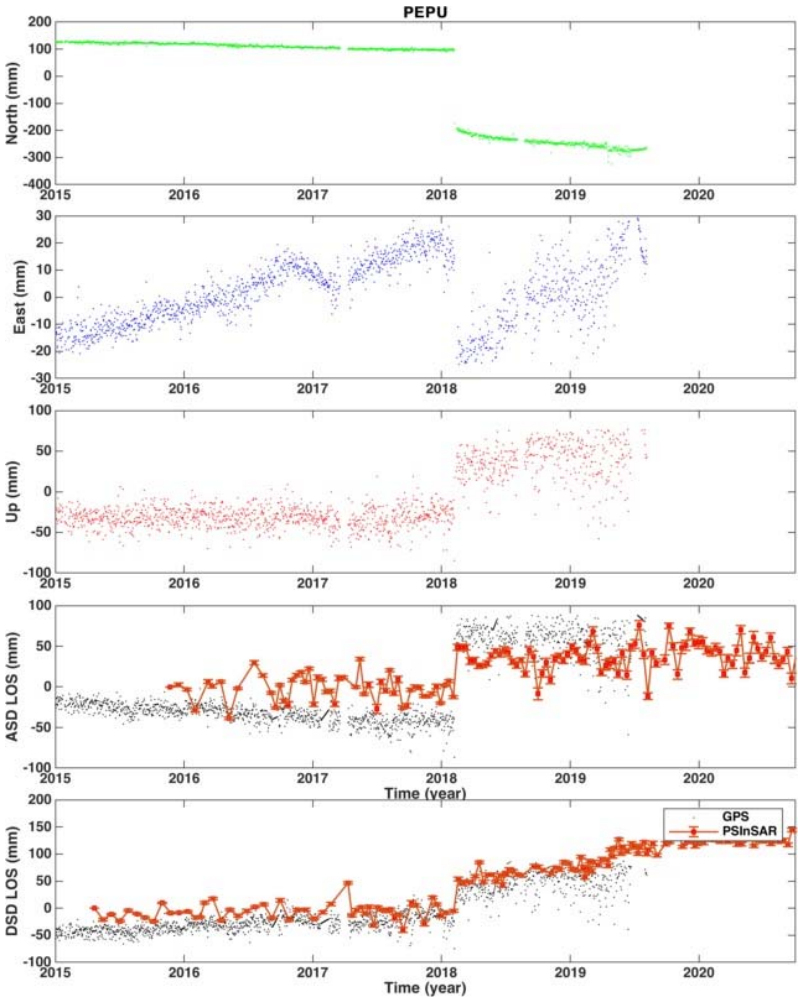


圖 3-3.1：Sentinel-1 之 PS-InSAR 與 GPS 時間序列比較圖。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。紅色圓形為 PS-InSAR 時間序列。GPS 測站位置可參考圖 3-1.8 或圖 3-1.9。

Figure 3-3.1: Comparison between Sentinel-1 PS-InSAR and time series of GPS. 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. Red circle represents time series of PS-InSAR. Locations of GPS stations shown in Figures 3-1.8 and 3-1.9.

接著由北至南選擇東部地區四條斷層東西兩側各一連續 GPS 測站及附近的永久散射點位進行分析。

3-3-1 嶺頂斷層

根據圖 3-3.2 GPS 及衛星時間序列結果顯示，Sentinel-1 衛星時期（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）斷層東側的 SHUL 相對斷層西側 SLIN 在 2018 年花蓮地震有水平向較明顯的同震地表變形，但偏南北向的地表變形在 InSAR 偵測較不敏感，此點可由 GPS 轉 LOS 與 InSAR LOS 的時間序列看出來。

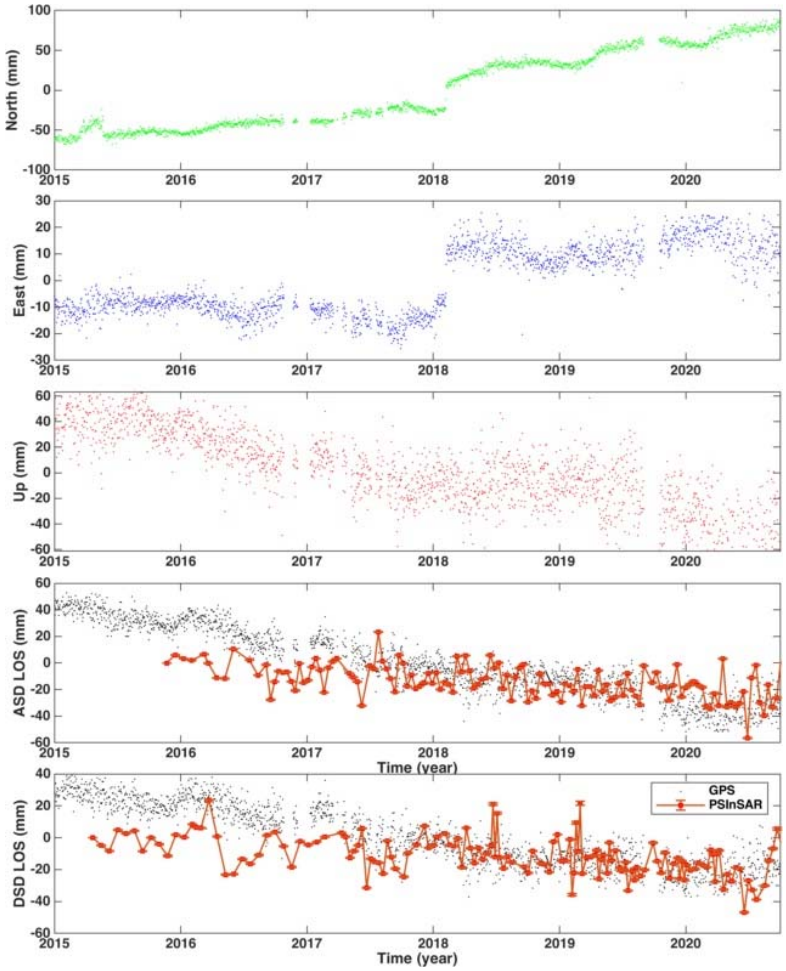


圖 3-3.2：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 SHUL 相對於 SLIN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.2: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station SHUL relative to GPS station SLIN during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). 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 瑞穗斷層

圖 3-3.3 GPS 及衛星時間序列結果顯示，Sentinel-1 衛星時期（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）斷層東側的 JSUI 相對斷層西側 JPEI 在 2018 年花蓮地震有水平向較明顯的同震地表變形，但偏南北向的地表變形在 InSAR 偵測較不敏感，此點可由 GPS 轉 LOS 與 InSAR LOS 的時間序列看出來。

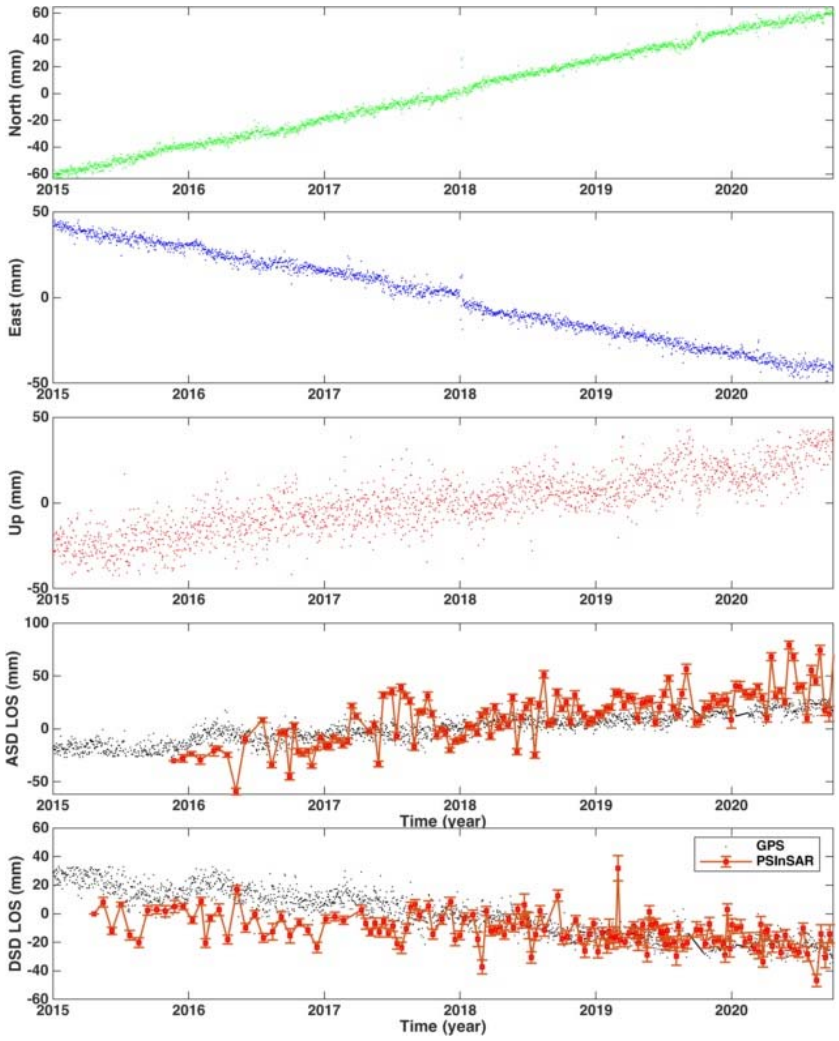


圖 3-3.3：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JSUI 相對於 JPEI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.3: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station JPEI relative to GPS station HYRS during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). 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 玉里斷層與池上斷層

根據圖 3-3.4 GPS 及衛星時間序列結果顯示，池上斷層北段東側 JPIN 相對於玉里斷層西側 GPS 測站 JULI 於長期平均向西北方位移，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致。

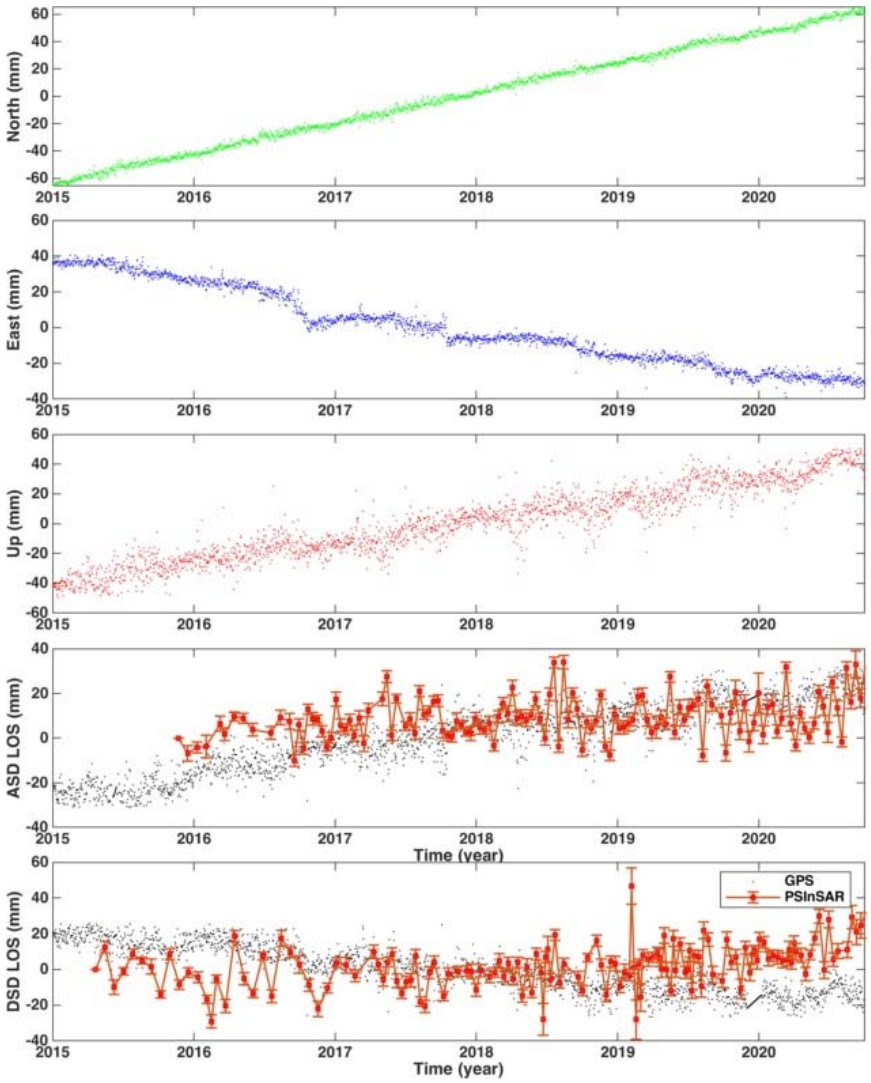


圖 3-3.4：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 JPIN 相對於 JULI 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.4: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station JPIN relative to GPS station JULI during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). 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 3-3.5 GPS 及衛星時間序列結果顯示，池上斷層東側 GPS 測站 TAPO 相對於池上斷層西側 SHAN 長期平均向西北方位移，有明顯週期性抬升，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致。

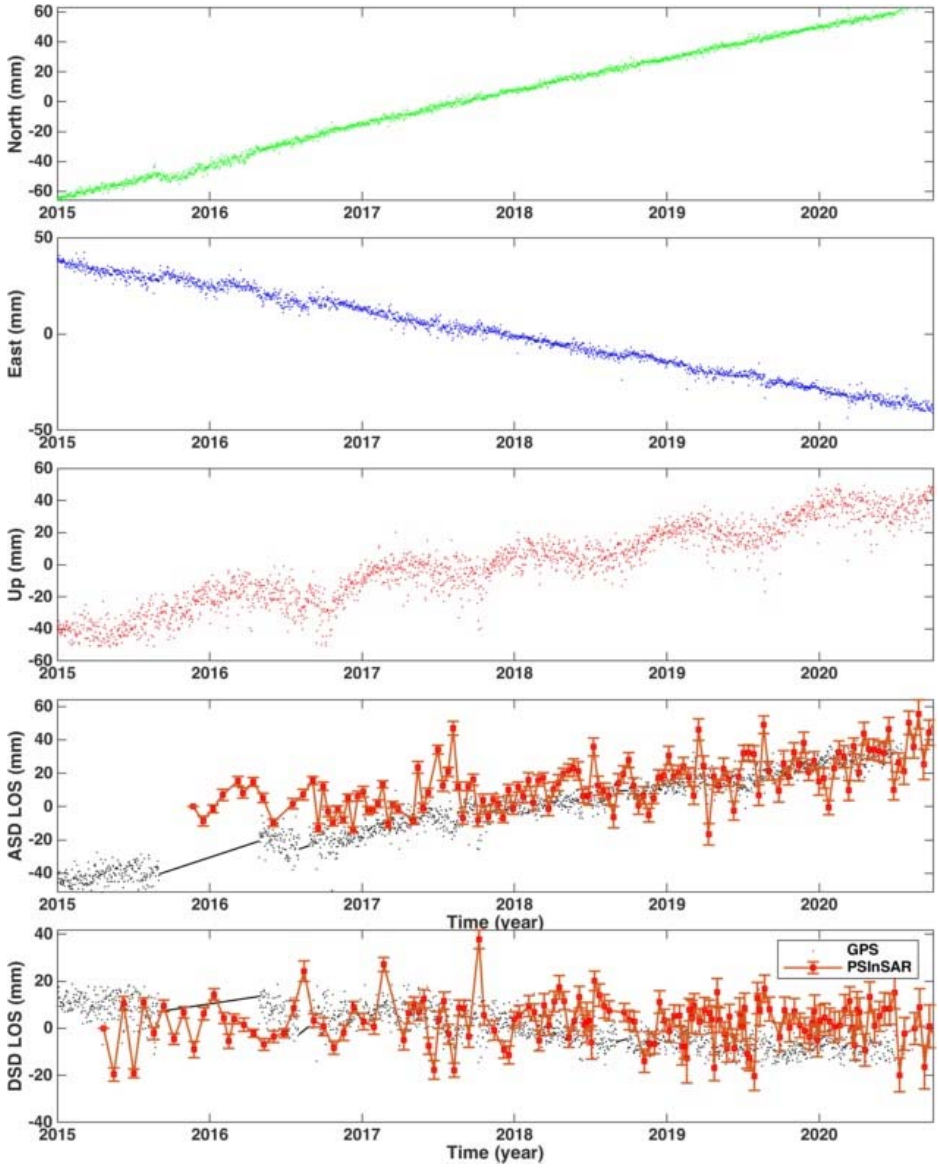


圖 3-3.5：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 TAPO 相對於 SHAN 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.5: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station TAPO relative to GPS station SHAN during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). 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 鹿野斷層

圖 3-3.6 GPS 及衛星時間序列結果顯示，鹿野斷層東側 GPS 測站 LONT 相對於斷層西側 S105 長期平均向西北方位移，有些微週期性抬升訊號，PS-InSAR 的時間序列與 GPS 的時間序列相當一致，降軌的 PS-InSAR 可以看出在 2018 年花蓮地震後到年中有一段變形趨勢變化，之後又回到原來的趨勢。

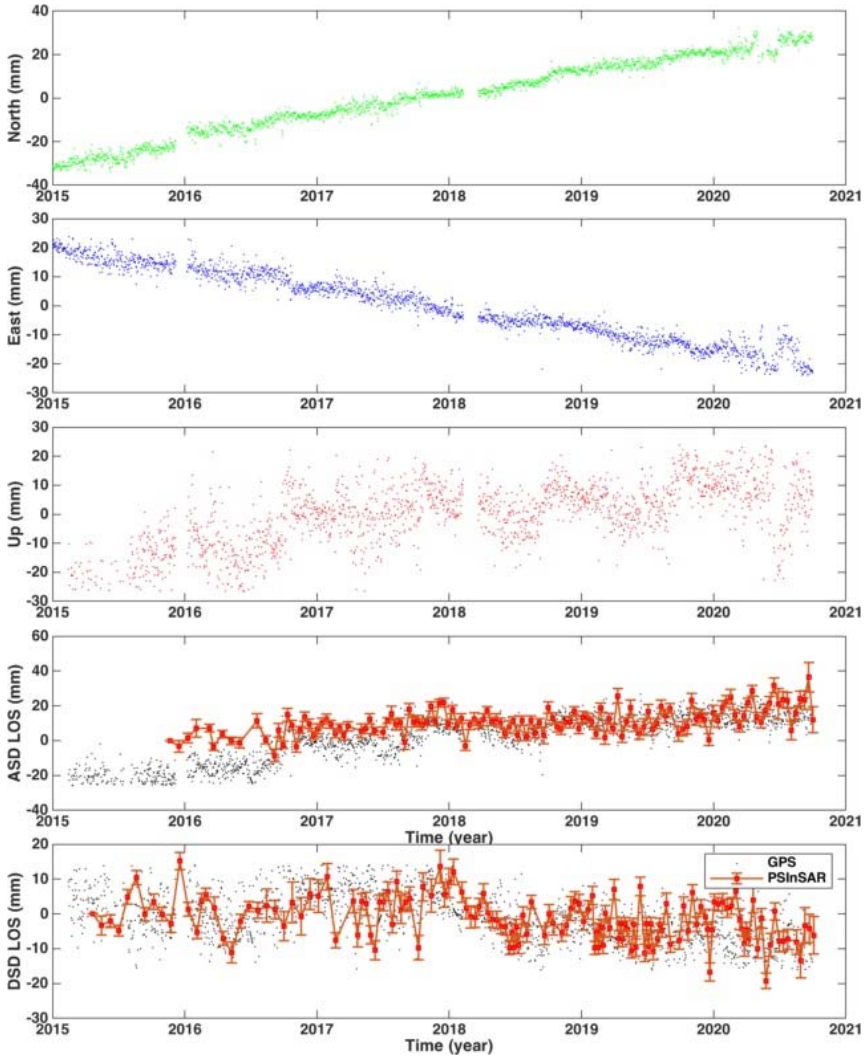


圖 3-3.6：Sentinel-1（asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10）時期 GPS 測站 LONT 相對於 S105 及其周圍 500 公尺永久散射點平均時間序列。綠色、藍色及紅色為 GPS 三方向時間序列；黑色為 GPS 投影至視衛星方向。黃色方型為 PSInSAR 時間序列。

Figure 3-3.6: Comparison between PSInSAR and time series at GPS station LONT relative to GPS station S105 during Sentinel-1 period (asc: 2015/10~2020/10; des: 2015/4~2020/10). 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.

3-4 PS-InSAR 成果討論

東部區域 InSAR 速度場與 GPS 資料比對趨勢大致符合，波長較長的 L 波段 ALOS 成果有較多 PS 點可供分析，且在斷層兩側有明顯速度場差異，適合用來監測臺灣東部的活動斷層，而較短波長的 C 波段 ERS1/2、ENVISAT 與 Sentinel-1 的成果中，可以用來分析的資料點較少。我們以相同研究方法分析臺灣西南部的 InSAR，與 GPS 的吻合度相當高（圖 3-4.1），而臺灣東部區域的 InSAR 平均速度場明顯較小於 GPS 的平均速度場，目前認為可能的原因可能包括：（1）東部區域整體植被茂密，干涉影像的相關性較低，這可能會導致干涉影像在相位回復時有較大的誤差出現（圖 3-4.2）；（2）東部縱谷方向與衛星軌道平行，GPS 速度場也顯示有較多平行軌道方向的運動分量。InSAR 對於平行軌道的運動分量偵測較不敏感，也可能是導致 InSAR 速度場較小於 GPS 速度場的原因。（3）本研究有使用許多短時間基線的干涉影像作為分析，短時間基線的情況中每幅干涉影像相位成分，可能有較多的大氣成分屬於長周期的趨勢訊號（圖 3-4.3）。這種訊號在台灣西南部相當明顯與構造活動不同，可以移除後，再進行分析。而東台灣區域構造本身也含有較長周期的變化，包括從南往北遞減、由東往西遞增後跨斷層向中央山脈遞增（Ching et al., 2011a），直接移除長周期的趨勢訊號，可能會造成把真實構造訊號移除。

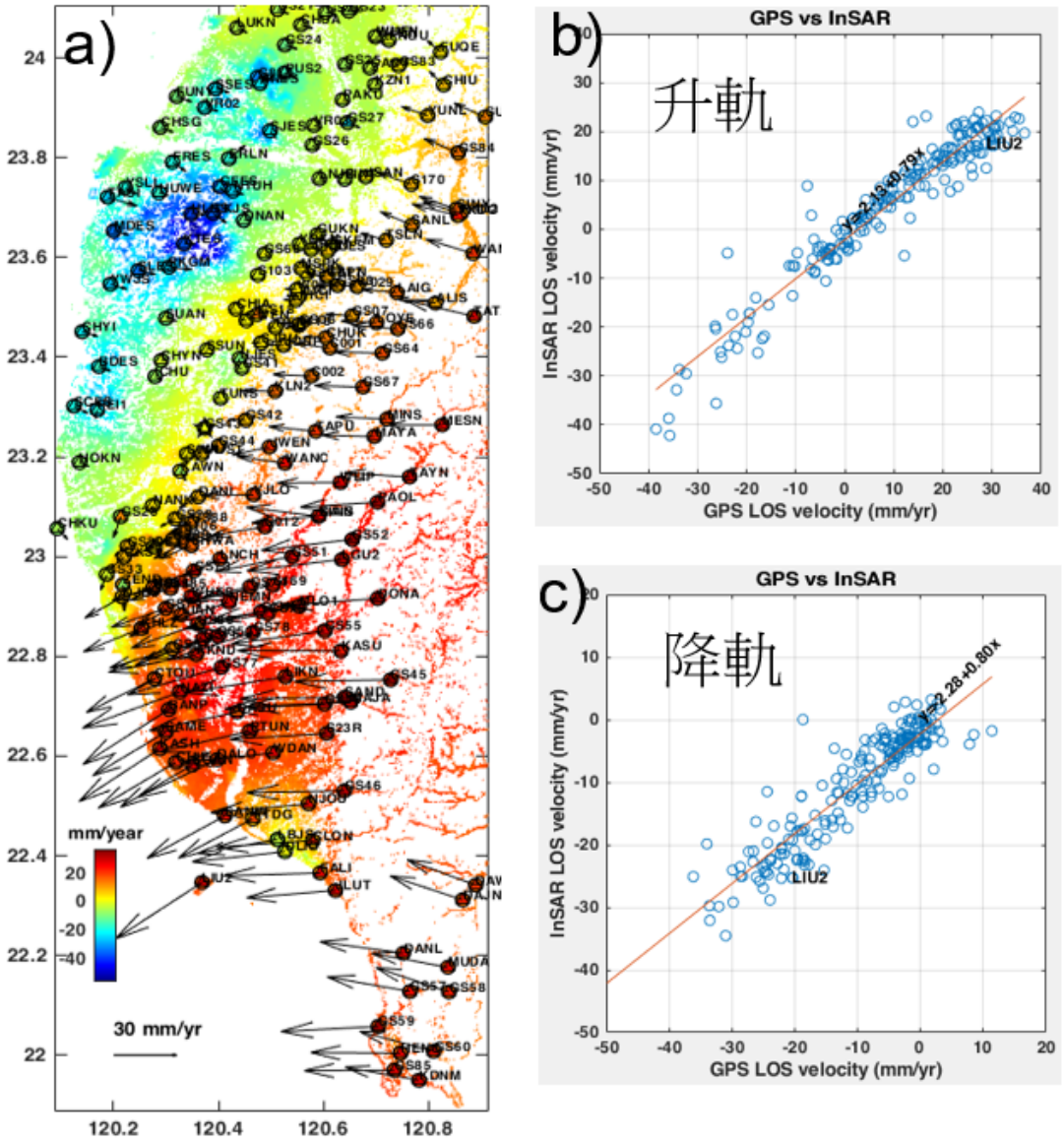


圖 3-4.1：Sentinel-1 在臺灣西南部的 PSInSAR 平均速度場與 GPS 平均速度場比對。(a) 升軌 LOS 速度場與 GPS 投影至 LOS 的速度場，參考點為 GS43。(b) 與 (c) 分別為升軌與降軌 PSInSAR 在 GPS 位置的 LOS 速度場與 GPS LSO 速度場比較圖。

Figure 3-4.1: Comparison of PSInSAR average velocity field and GPS average velocity field of Sentinel-1 in southwestern Taiwan. a) Ascending orbit LOS velocity field and GPS projection to LOS velocity field, the reference point is GS43. b) and c) are the comparison diagrams of the LOS velocity field and GPS LSO velocity field of the ascending and descending PSInSAR at the GPS position respectively.

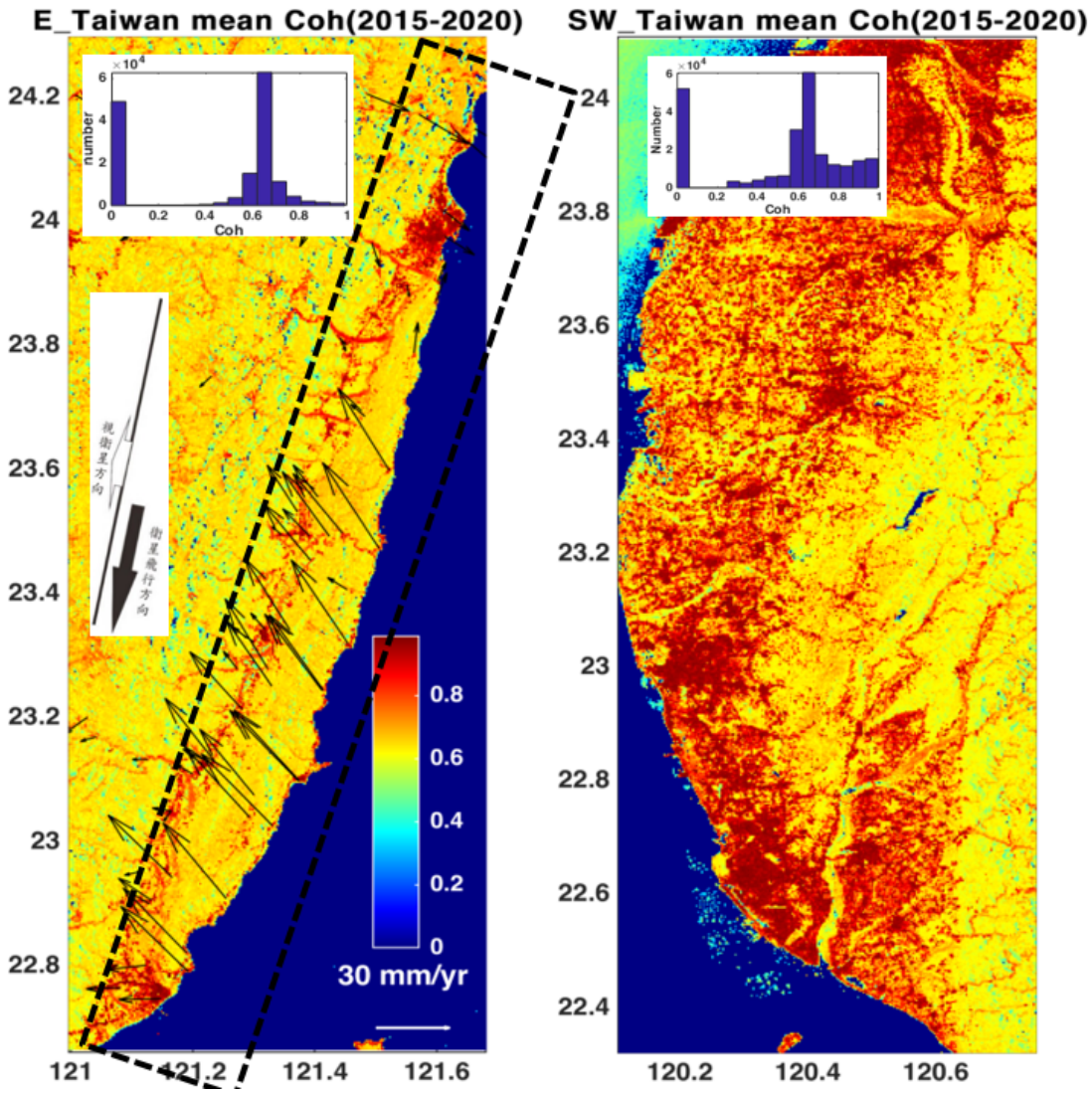


圖 3-4.2：Sentinel-1 在臺灣東部區域與臺灣西南部區域的影像相關性。

Figure 3-4.2: The image coherence of Sentinel-1 in the eastern part of Taiwan and the southwestern part of Taiwan.

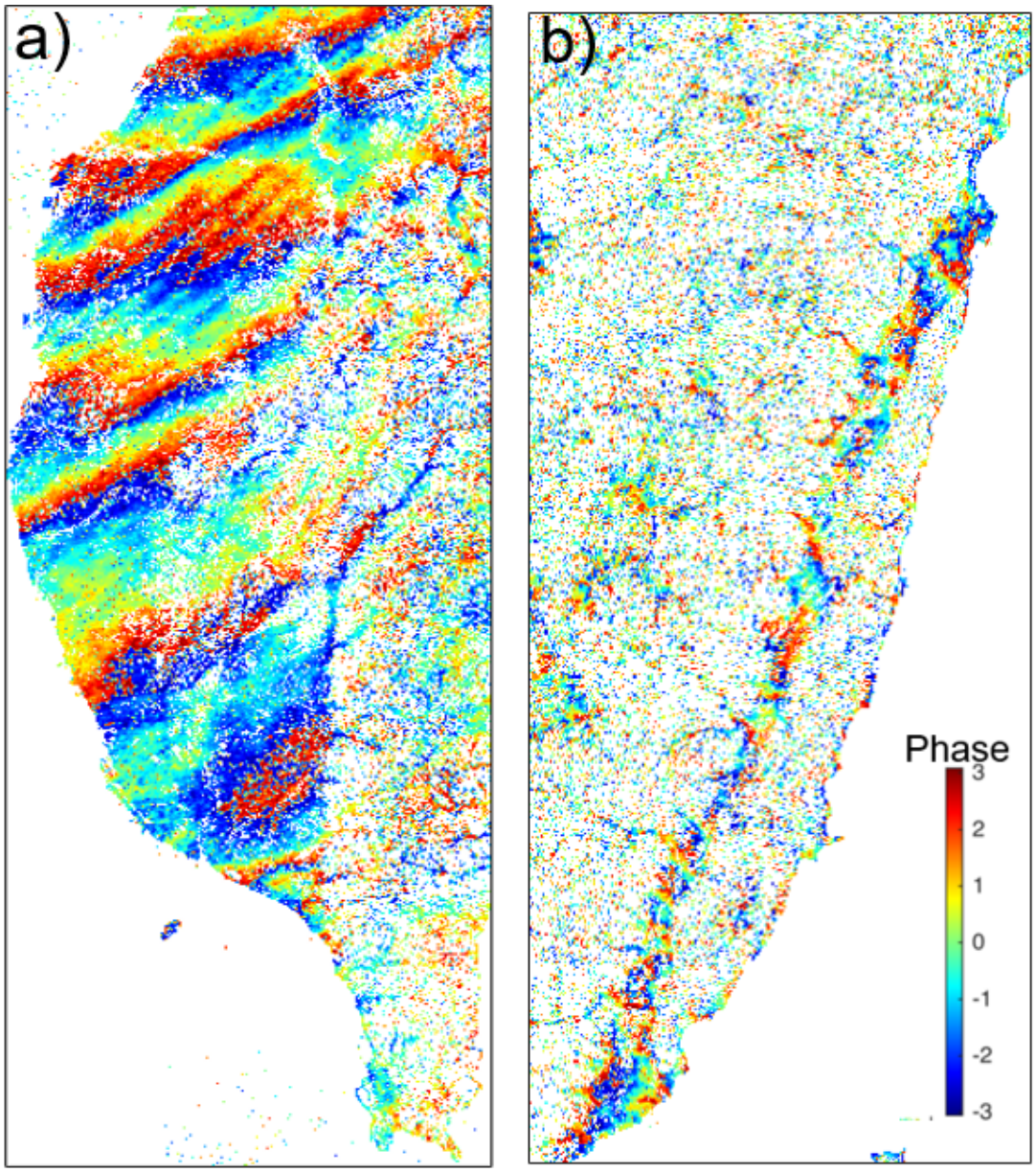


圖 3-4.3：臺灣西南部與台灣東部干涉條紋圖比較。(a) 台灣西南部異常干涉條紋圖具有西北東南向長周期變化。(b) 臺灣東部干涉條紋圖，不易辨識是否有異常。

Figure 3-4.3: Comparison of interference fringe patterns between southwestern Taiwan and eastern Taiwan. a) The pattern of anomalous interference fringes in southwestern Taiwan has a long-period change from northwest to southeast. b) The interference fringe pattern in eastern Taiwan is not easy to identify whether there is an abnormality.

第四章、斷層模型建置

4-1 斷層幾何參數設定

今年度之計畫區域為臺灣東部地區，包含八條活動斷層，分別為：米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層與利吉斷層。此外，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 4-1.1），簡要之斷層幾何參數描述內容如下。

表 4-1.1：東部地區斷層之幾何參數。

Table 4-1.1: Geometry parameters of active faults in eastern Taiwan.

	斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	米崙斷層	65.0 E	0.0-10.0
2	嶺頂斷層	65.0 E	0.0-27.5
3	瑞穗斷層	65.0 E	0.0-27.5
4	奇美斷層	80.0 E	0.0-25.0
5	玉里斷層	51.0 E	0.0-10.0
		下接池上斷層	
6	池上斷層	60.0 E 25.0 E	0.0-20.0 20.0-25.0
7	鹿野斷層	30.0 E	0.0-5.0
		下接利吉斷層	
8	利吉斷層	55.0 40.0	0.0-22.0 22.0-27.5

4-1-1 米崙斷層

陳俊甫（2013）於台灣東部針對 1991-2010 年的地震進行重定位（圖 4-1.1a）。米崙斷層位於美崙台地處，美崙台地下方有編號 1 及編號 3 兩個地震群（圖 4-1.1b）。陳俊甫（2013）認為深部編號 3 地震群可能為海岸山脈深處與中央山脈，抑或是縱谷沈積物，碰撞所引發的地震活動，與美崙台地下方深 10 公里的地震群在深度上以及機制上有明顯的差異，故兩者為不同系統的地震活動。Shyu et al.（2016）進一步繪製美崙台地附近之地震分布來解析美崙台地上部地震群的分布情形（圖 4-1.2）。

2018 年 2 月花蓮地震後，Wen et al.（2019）蒐集米崙斷層附近 2012-2017 地震進行重定位（圖 4-1.3a），其中 C-C’剖面（圖 4-1.3b）正好跨過米崙斷層。結果指出米崙斷層下方 10 公里處有明顯的地震群，而深度 20~30 公里的地震群與米崙斷層關聯性似乎不高。

米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.2。米崙斷層之傾角，根據震測剖面推斷為高角度斷層，然而從地震深度分布剖面中，從幾個地震群中要定出斷層面仍有不確定性，本計畫從 Wen et al.（2019）剖面中得到最符合地震深度分布趨勢線的傾角 65E 度作為斷層面中值（圖 4-1.4）。深度上，對於上部地震群而言，前階段計畫的深度 30 公里顯然太深，因此本計畫修改米崙斷層破裂深度為 10 公里。

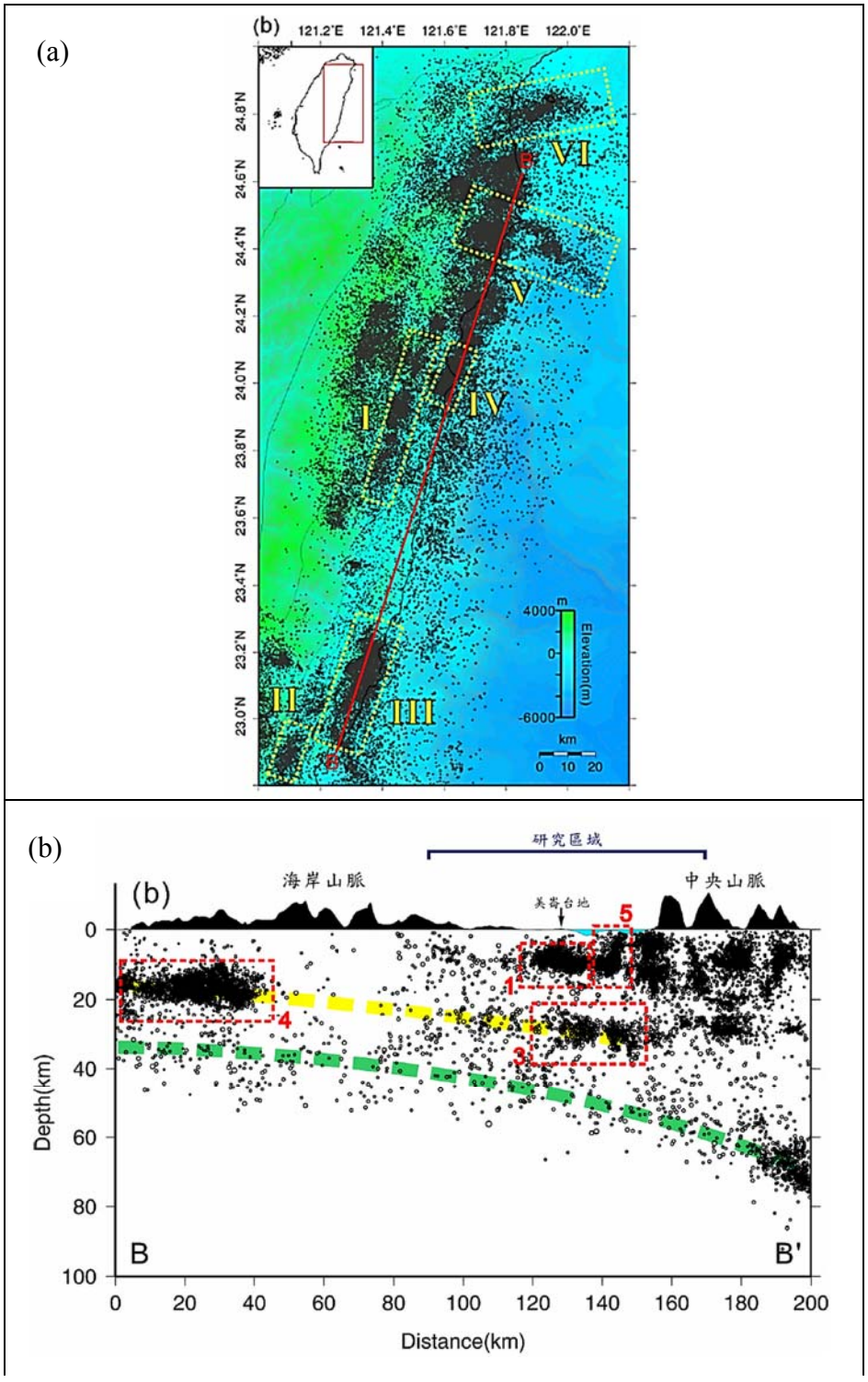


圖 4-1.1：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位深度剖面。(a) 利用 3DCOR 重定位之震央分布；(b) 定位後剖面 B 地震的震源深度分布，綠色虛線為班尼奧夫帶地震帶的位置，黃色虛線為縱谷斷層的地震活動帶（陳俊甫，2013）。

Figure 4-1.1: Relocated earthquake profile during 1991-2010 in eastern Taiwan. (a) The distribution of relocated earthquakes using 3DCOR. (b) The earthquake distribution along the section BB'. The green dotted line is the location of Benioff zone. The yellow dotted line is the seismic zone of the Longitudinal Valley fault (陳俊甫，2013).

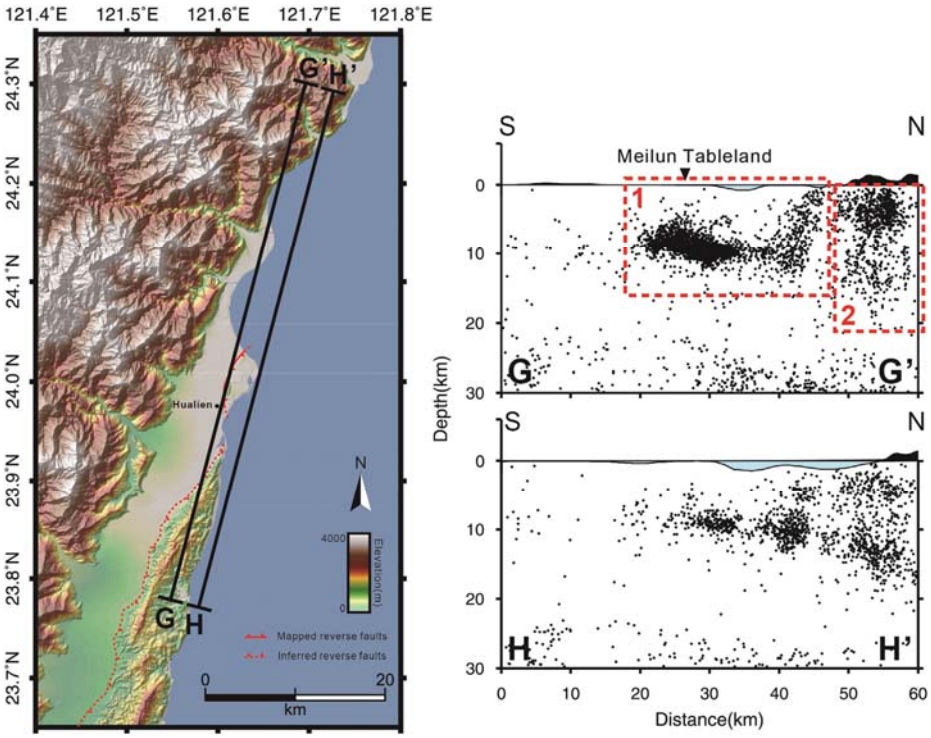


圖 4-1.2：台灣東部 1991 年至 2010 年地震重定位南北向 GG'及 HH'深度剖面（Shyu et al., 2016）。

Figure 4-1.2: Distribution of relocated earthquakes along the GG' and HH' profiles in eastern Taiwan from 1991 to 2010 (Shyu et al., 2016).

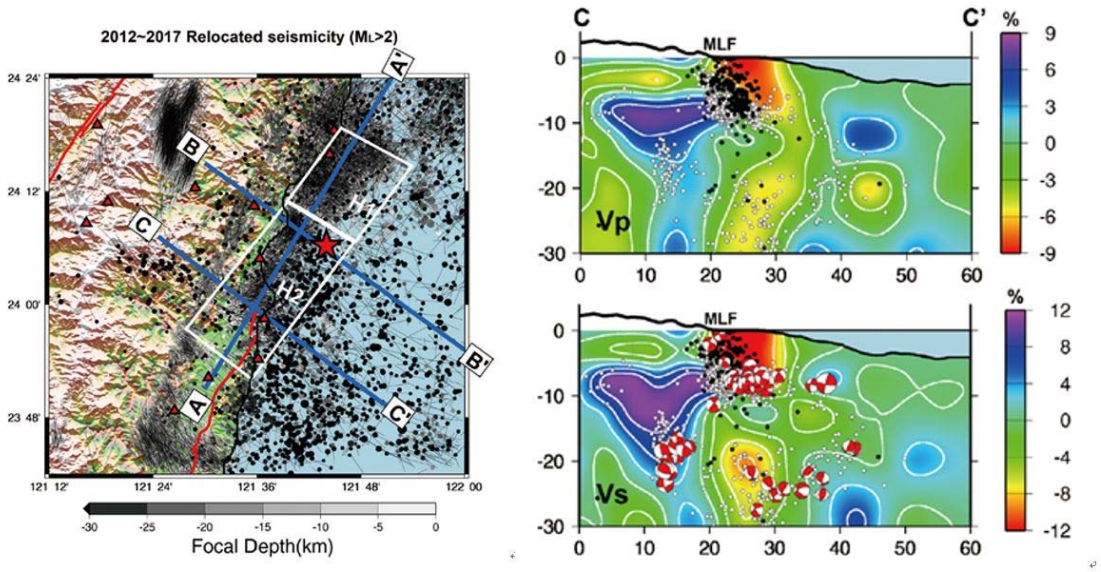


圖 4-1.3：花蓮地區 2012 年至 2017 年地震重定位深度剖面。左圖為重定位之震央分布圖，右圖為 C-C'剖面地震的震源深度分布及 Vp、Vs 速度構造剖面，白點為西元 2012-2017 年 $M_L > 2$ 的地震，黑點為 2018 年 2 月花蓮地震（Wen et al., 2019）。

Figure 4-1.3: Relocated earthquakes between 2012 and 2017 in Hualien area. Left figure is relocated earthquake distribution. Right figure is earthquake distribution and the Vp and Vs velocity models along the CC' section. The white point is the $M_L > 2$ earthquake in 2012-2017, and the black point is the Hualien earthquake in February 2018 (Wen et al., 2019).

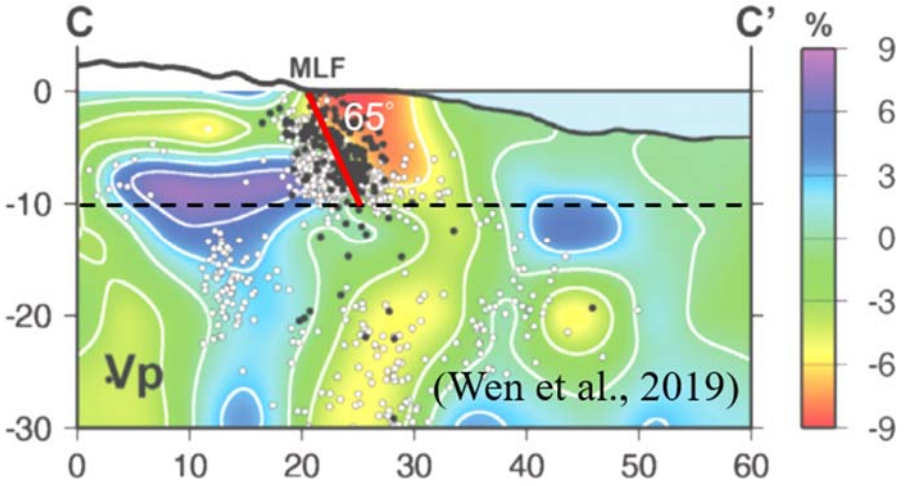


圖 4-1.4：本計畫米崙斷層幾何設定。

Figure 4-1.4: The geometry of Milun fault system.

表 4-1.2：米崙斷層幾何面各調查方法及斷層參數

Table 4-1.2: Various survey methods and fault parameters of the Milun fault geometry

參考文獻	方法	傾角	深度
朱傚祖與游明聖，1996	淺層震測剖面	淺部為高角度斷層	
Kuochen et al., 2004	1991-2002 之 hypoDD 重定位地震	NA	在 10 公里深度有一地震密集區
陳俊甫，2013；Shyu et al., 2016	1991-2010 3DCOR 重定位地震	NA	地震群 1：10 公里
			地震群 3：20-30 公里（研判非米崙斷層地震）
Wen et al. 2019	2012-2017 重定位地震、速度構造剖面	NA	在 10 公里深度有一地震密集區

4-1-2 嶺頂-瑞穗斷層

石瑞銓等（2004）跨嶺頂斷層的地電阻測線顯示，嶺頂斷層上盤處存在低電阻率帶，研判是斷層破碎帶（圖 4-1.5），呈高角度分布。根據李建成（2004）花東縱谷斷層模型及分段，鳳林光復段即嶺頂斷層及瑞穗斷層位置（圖 4-1.6），屬於高角度匙狀幾何。圖 4-1.7 為臺灣東部地區利用 hypoDD 重定位之 1991-2002 地震分布（Kuo-Chen et al., 2004），其中 D 剖面即位於瑞穗斷層所在位置。假設圖 4-1.7（b）中斷層面（紅色虛線）符合地震分布，瑞穗斷層在深度 0-25 公里傾角為 75 度，25-40 公里傾角為 45 度。此外，Kuo-Chen et al.（2012）建立跨全臺灣之速度構造剖面，其中跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面如圖 4-1.8 右上圖所示，從 C03 速度構造剖面不易觀察斷層面的延伸。然而跨越縱谷斷層中段 C02 速度構造剖面，如圖 4-1.8 右下圖所示，可觀察到位於縱谷斷層地震群深度達到 30 公里，假設斷層面符合地震分布，則斷層傾角約為 65 度。最後，根據 Shyu et al.（2016）2009/12/19 M_L 4.7 地震序列，地震主要位於 20~40 公里深度，大部分為逆斷層機制（圖 4-1.9），此地震序列的趨勢線呈現 65E 的傾角。

嶺頂斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.3。嶺頂斷層之傾角，根據地電阻剖面推斷為高角度斷層，然而從地震深度分布剖面中，要定出斷層面仍有不確定性，本計畫從地震深度分布剖面中得到最符合地震深度分布趨勢線的傾角 65 E 作為斷層面傾角。深度上，本計畫認為岩石在深度超過 30 公里已屬於塑性帶，不易產生脆性破裂，因此選用斷層深度為 27.5 公里。

瑞穗斷層幾何面各調查方法及斷層參數彙整於表 4-1.4。本計畫認為嶺頂斷層與瑞穗斷層屬於李建成等（2004）提出的縱谷斷層鳳林光復段，考慮嶺頂斷層與瑞穗斷層系統破裂的可能性，瑞穗斷層幾何參數則同於嶺頂斷層：傾角 65 E。深度上，本計畫認為岩石在深度超過 30 公里已屬於塑性帶，不易產生脆性破裂，因此選用斷層深度為 27.5 公里。

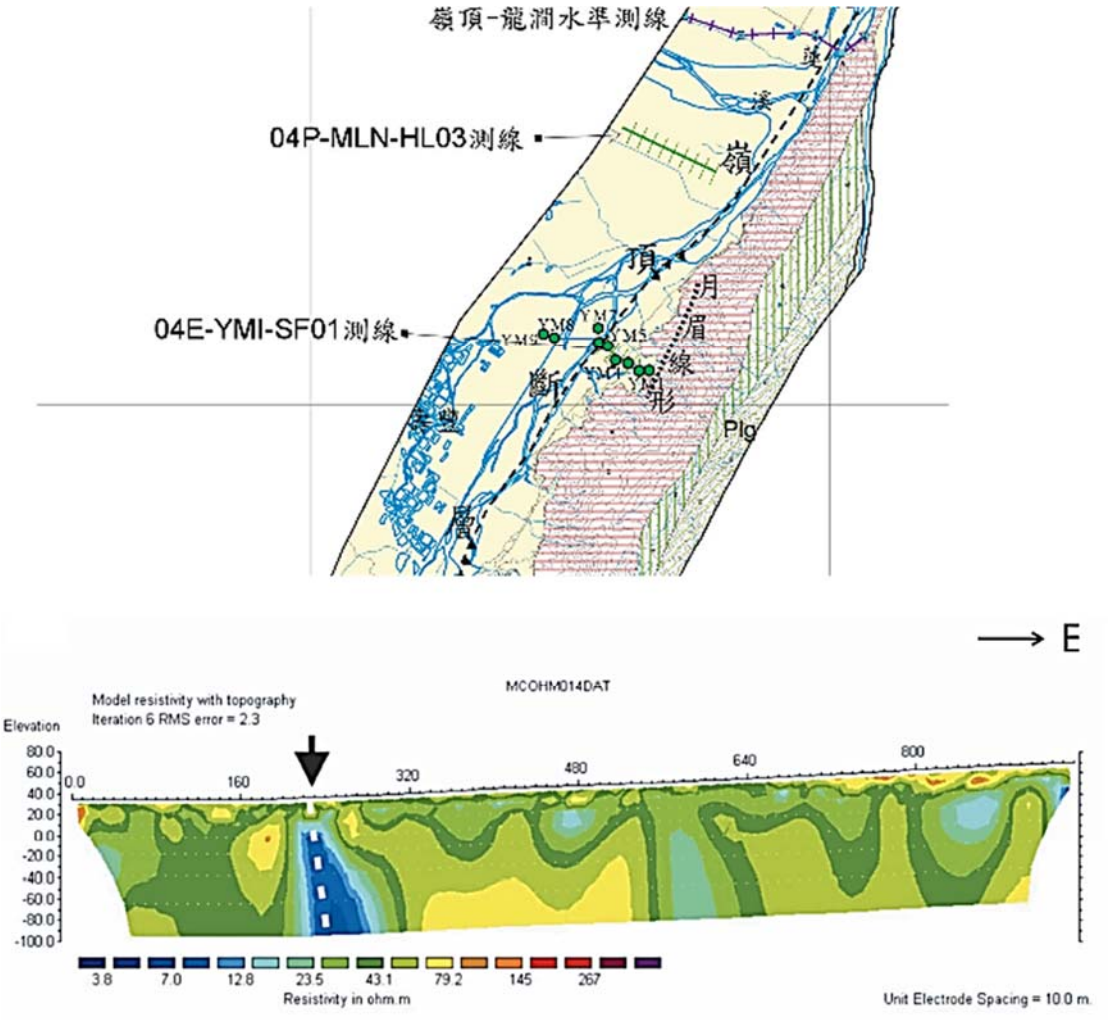


圖 4-1.5：嶺頂斷層地電阻影像剖面圖，剖面位置位於上圖之 04E-YMI-SF01 測線（石瑞銓等，2004）。

Figure 4-1.5: Resistivity profile of the Lingding fault. The profile location is located at the 04E-YMI-SF01 in the above figure.

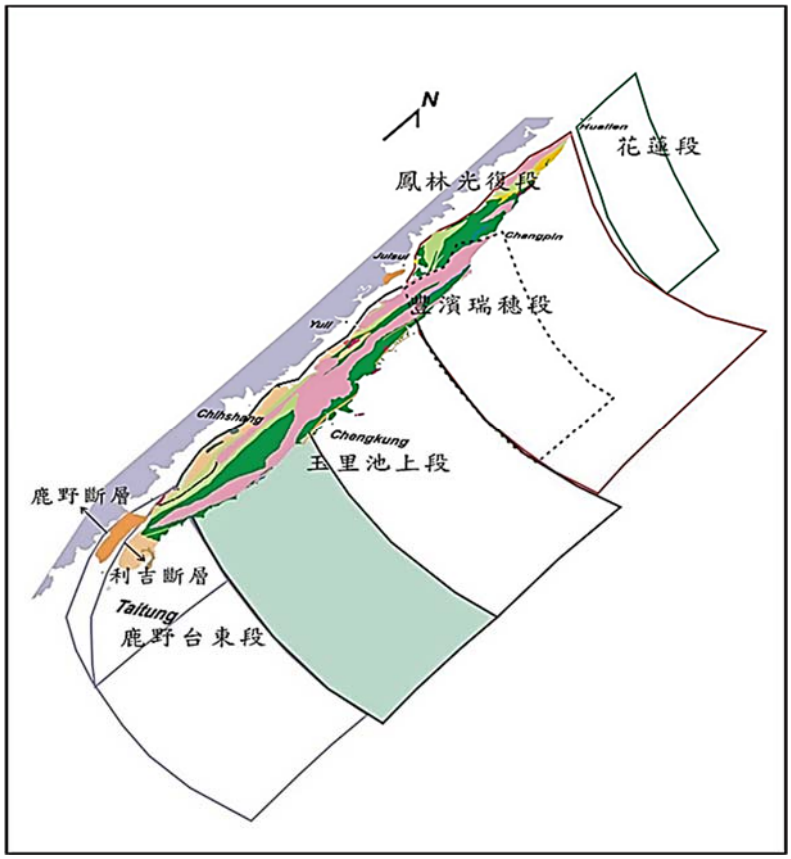


圖 4-1.6：花東縱谷斷層分段與幾何（引自李建成等，2004）。

Figure 4-1.6: Geometry and segmentation of the Longitudinal Valley fault (Lee et al., 2004).

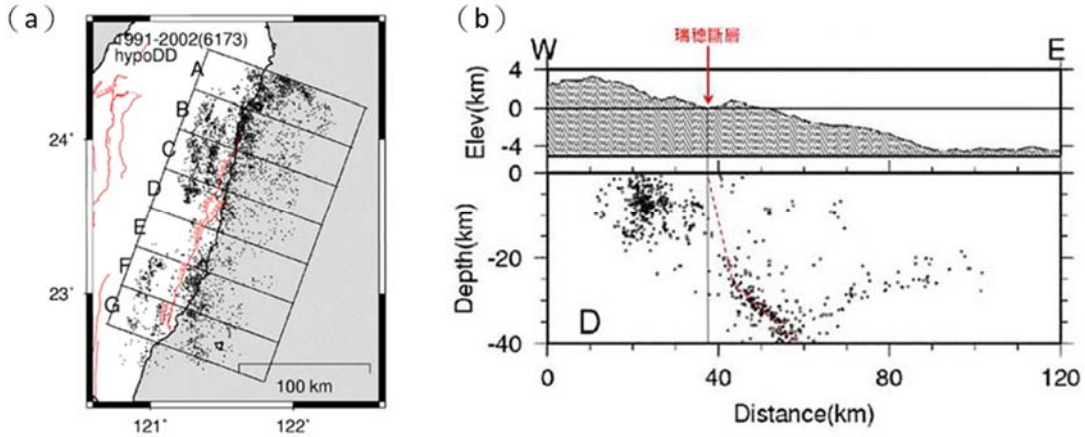


圖 4-1.7：重定位之臺灣東部地震震央分布及 N110E 剖面，其中 D 剖面即瑞穗斷層通過之處，剖面於 25~35 公里深處有明顯之地震富集（修改自 Kuochen et al., 2004）。

Figure 4-1.7: Relocated earthquakes in eastern Taiwan. Rueysui fault passes the D profile. Earthquakes mainly occur at a depth of 25 to 35 km.

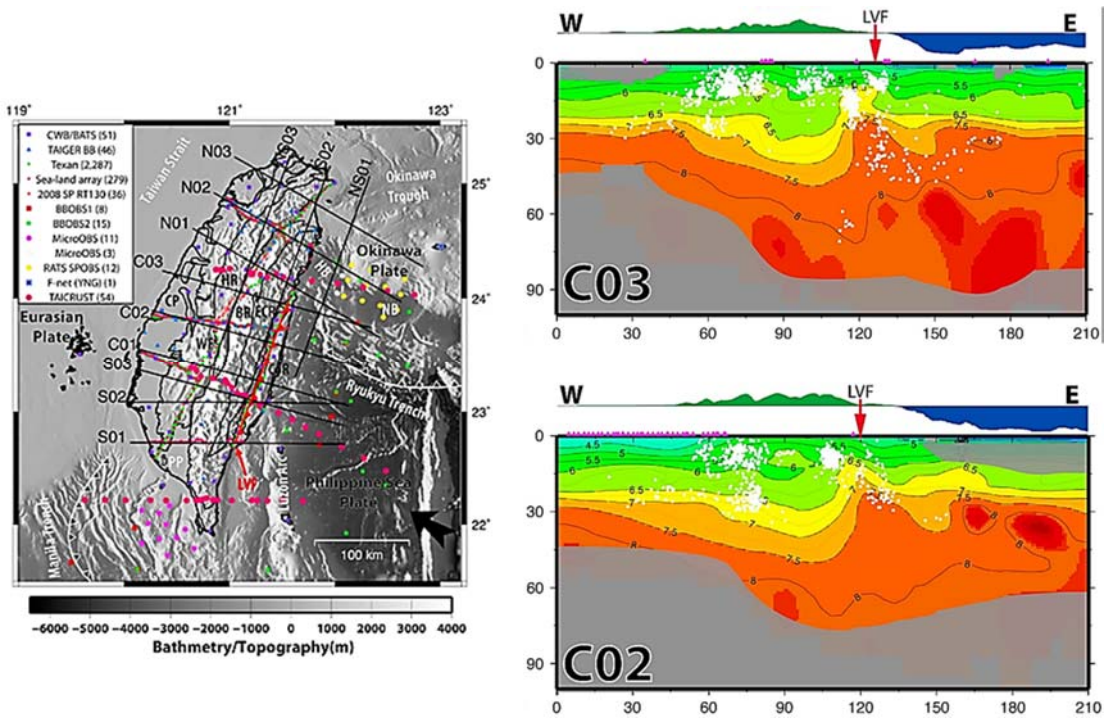


圖 4-1.8：左圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，右圖上為跨越縱谷斷層北段 C03 速度構造剖面，右圖下為跨越縱谷斷層中段 C02 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

Figure 4-1.8: Taiwan tectonics and the distribution of seismic stations. The solid black lines show the locations of velocity cross section. (Up) The northern section of the Longitudinal Valley fault locates at the C03 velocity cross section. (Down) The middle section of Longitudinal Valley fault locates at the C02 velocity cross section across (modified from Kuochen et al., 2012).

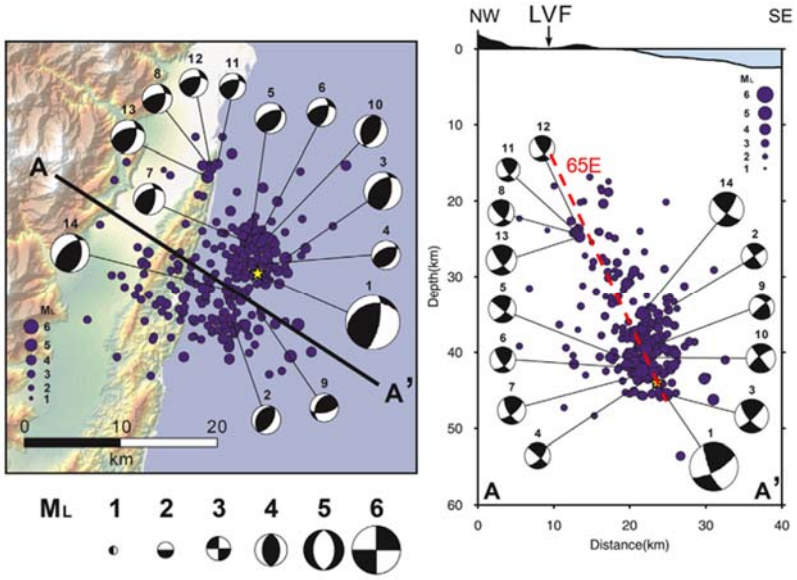


圖 4-1.9：2009 年 12 月 19 日 M_L 4.7 地震序列（Shyu et al., 2016）。

Figure 4-1.9: M_L 4.7 earthquake sequence on December 19, 2009.

表 4-1.3：嶺頂斷層幾何形貌相關文獻。

Table 4-1.3: References for the geometry of Lingding fault.

文獻	方法	傾角	深度（km）
石瑞銓等，2004	地電阻剖面	高角度	-
Kuochen et al., 2012	C02 速度構造剖面及地震分布	65E	30 公里左右
Shyu et al., 2016	2009/12/19 ML4.7 地震序列	65E	20-40

表 4-1.4：瑞穗斷層幾何形貌相關文獻。

Table 4-1.4: References for the geometry of Rueysui fault.

文獻	方法	傾角	深度（km）
Kuochen et al., 2004	1991-2002 之 hypoDD 重定位地震推估	0-25 公里，75 度 25-40 公里，45 度	可達 40 公里
Kuochen et al., 2012	C02 速度構造剖面及地震分布	65 度	30 公里左右

4-1-3 奇美斷層

Chen et al.（1991）於豐濱附近發現一奇美斷層露頭（圖 4-1.10），斷層截切全新世河階，斷層位態為 N40E/80˚E，斷層帶寬約 1 公尺。此外，林啟文等（2009）也指出，在奇美村附近的秀姑巒溪有 3 個奇美斷層的露頭，都鑾山層的火成岩逆衝至八里灣層砂頁岩互層之上，斷層面位態為 N70-80°E/70°S，斷層帶中斷面擦痕的滑移角（rake）分別為 80°與 16°，為逆衝兼具左移分量。秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭則顯示黑色剪裂泥岩與剪裂砂岩層（圖 4-1.11）。

董倫道等（2005）利用大地電磁波進行探勘，在春日以南泰林地區三條剖面線的地電阻影像整合剖面判讀結果，奇美斷層為高角度逆衝斷層（圖 4-1.12）。

奇美斷層幾何形貌相關文獻彙整於表 4-1.5 中。奇美斷層傾角，主要參考野外露頭、地球物理推估，以高傾角 80 度作為斷層面中值。奇美斷層的深度，從目前的地震深度分布中，並無法解析奇美斷層的破裂深度，本計畫考慮奇美斷層與瑞穗斷層之空間關係，假設奇美斷層為瑞穗斷層的分支斷層，則奇美斷層以 80 度傾角向下延伸時，約在 25 公里處與瑞穗斷層相接（圖 4-1.13）。

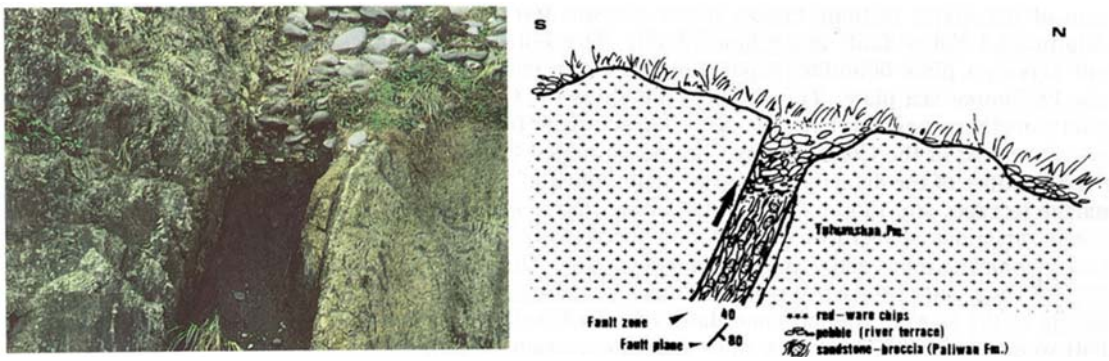


圖 4-1.10：豐濱附近奇美斷層露頭（Chen et al., 1991）。

Figure 4-1.10: The outcrop of Chimei fault near Fengpin (Chen et al., 1991).



圖 4-1.11：秀姑巒溪奇美村東南方奇美斷層露頭（林啟文等，2009）。

Figure 4-1.11: The outcrop of Chimei fault at Hsiukuluan river, southeast of the Chimei village (林啟文等，2009).

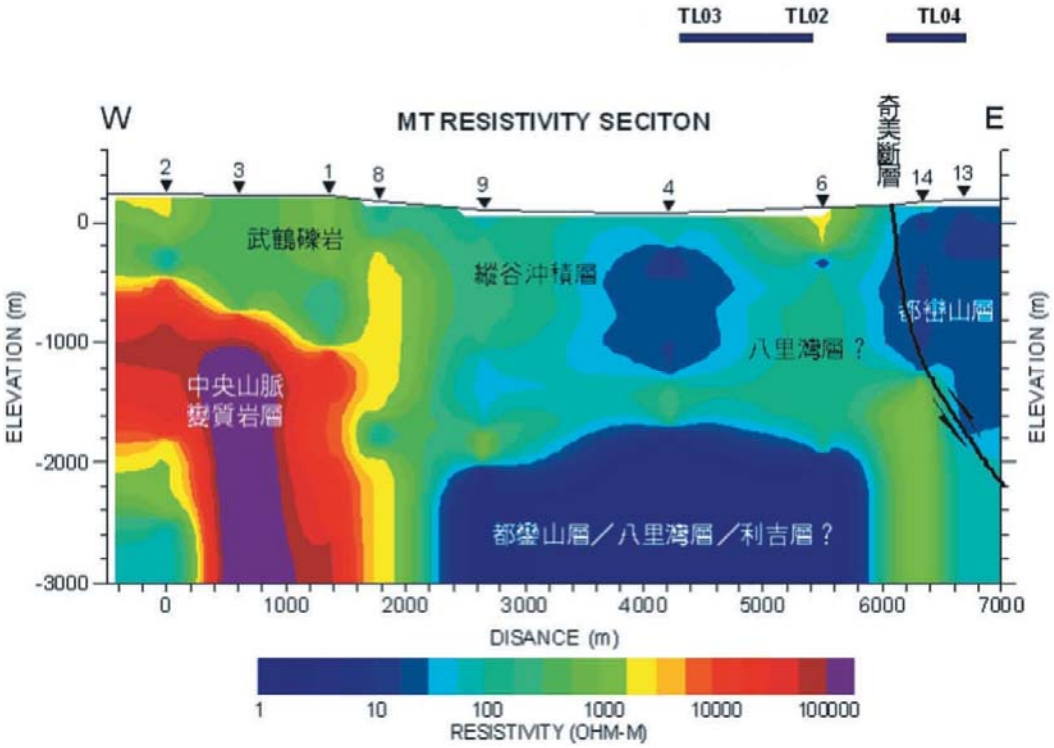


圖 4-1.12：泰林地區地電阻影像剖面結果圖（董倫道等，2005）。

Figure 4-1.12: MT resistivity section in Tailin area (董倫道等，2005).

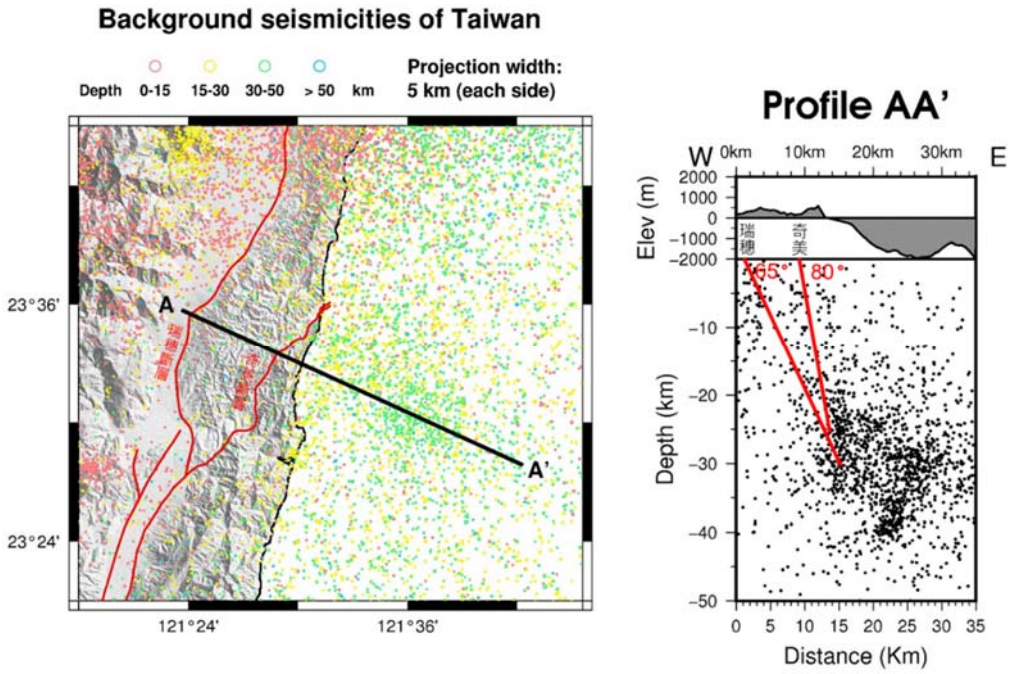


圖 4-1.13：本計畫瑞穗斷層及奇美斷層幾何。圓點為中央氣象局 1900-2015 地震。

Figure 4-1.13: Fault geometry of the Rueyshui fault and the Chimei fault.

表 4-1.5：奇美斷層幾何形貌相關文獻

Table 4-1.5: References for the geometry of Chimei fault.

文獻	方法	傾角（度）	深度（km）
Chen et al., 1991	豐濱附近奇美斷層露頭	80	--
賴文基，1995	秀姑巒溪河谷現地調查	75	--
羅偉與楊昭男，2004	秀姑巒溪奇美斷層的露頭	70	--
董倫道等，2005	地電阻剖面	高角度	--

4-1-4 玉里-池上斷層

Lee et al.（2003）蒐集池上斷層附近 1998-2001 及 1995 年規模 5.4 地震序列之地震記錄（圖 4-1.14），認為地震應是沿著池上斷層之斷層面分布，得到斷層面在 0-10 公里深度傾角約 60-65 度，10-20 公里深度傾角變為 45 度，20-25 公里深度時傾角變為 10 度。Cheng et al.（2009）重定位 2003 年 M_w 6.8 成功地震之餘震結果，可作為池上斷層幾何形貌之參考，由縱谷東邊的餘震序列分佈可以看出有一明顯的地震帶沿著傾角向東的斷層面分佈（圖 4-1.15）。整體而言，在深度 0-20 公里斷層面傾角約 60 度，20-27 公里斷層面傾角約 25 度。另外，根據 Kuo-Chen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估池上斷層傾角 60 度，深度約 27 公里左右（圖 4-1.16）。

池上斷層之傾角及破裂深度，主要參考 P 波速度構造剖面、地震震源分布、2003 年成功地震餘震分布等資料，本計畫認為傾角可採用雙傾角方式呈現。依據地震震源分布，池上斷層在深度 0-20 公里的傾角約 60 度，深度 20-25 公里約 25 度。

玉里斷層之傾角及破裂深度，Shyu et al.（2007）利用 GPS 量測資料與現地調查進行地形分析，建構位於舞鶴台地縱谷地區之東西向構造剖面，依據該模型剖面圖，玉里斷層發育於縱谷中之沖積層，深度可能超過 5 公里，但並未確定，如圖 4-1.17 所示。本計畫則假設玉里斷層為池上斷層的分支，於一定深度與池上斷層相接，深度 0-10 公里 51 度，下接池上斷層。

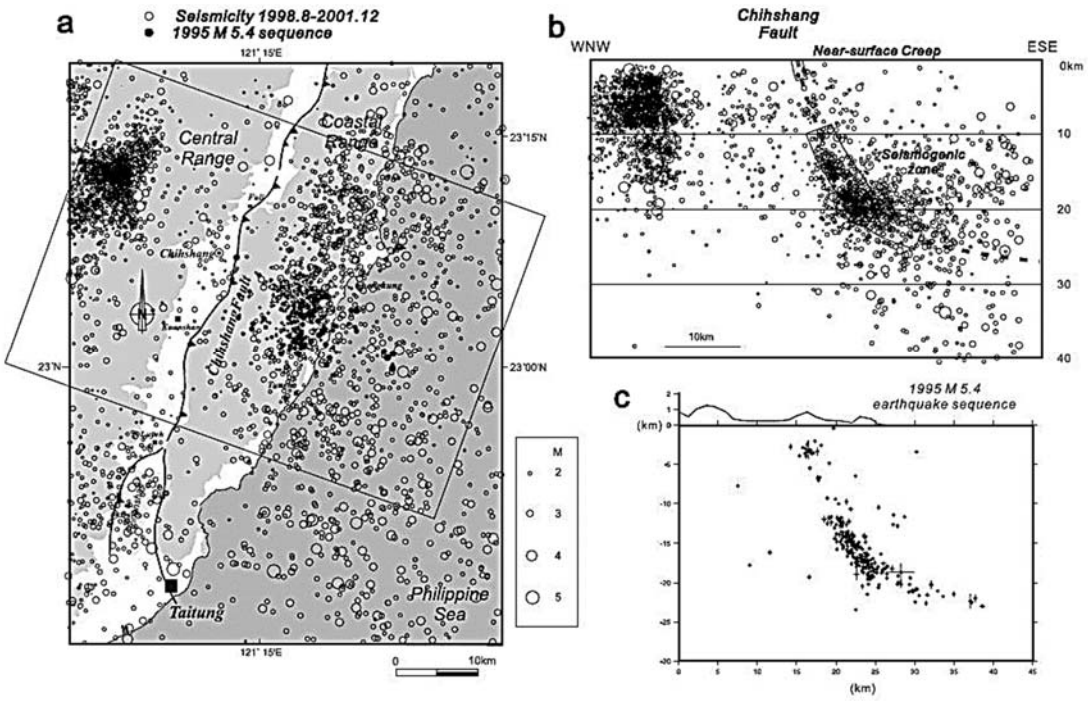


圖 4-1.14：(a)池上斷層及附近之地震分布，空心圓圈為 1998-2001 之地震，黑色實心圓圈為 1995 年 M5.4 地震序列（b）1998-2001 地震深度分布剖面（c）1995 年 M5.4 地震序列深度分布剖面，圖中的十字代表定位誤差（摘自 Lee et al., 2003）。

Figure 4-1.14: (a) Seismicity in the Chihshang fault area. Opened circles are the earthquakes during 1998-2001. Black solid circles are the 1995 M5.4 earthquake sequence. (b) Profile of background seismicity from 1998 to 2001. (c) The earthquake profile of the M5.4 earthquake sequence in 1995. The cross in the figure represents the uncertainty of relocation (after Lee et al., 2003).

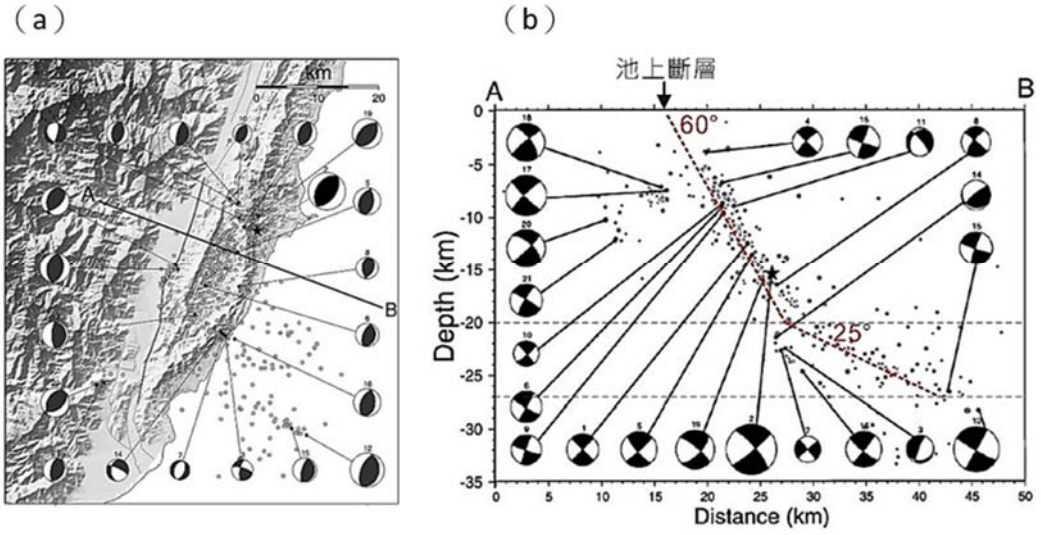


圖 4-1.15：(a) 2003 年成功地震餘震分布及斷層面解（b）A-B 剖面餘震深度分布（Cheng et al., 2009）。

Figure 4-1.15: (a) Aftershock distribution of the 2003 Chengkung earthquake and their focal mechanism solutions. (b) A-B profile aftershock distribution (Cheng et al., 2009).

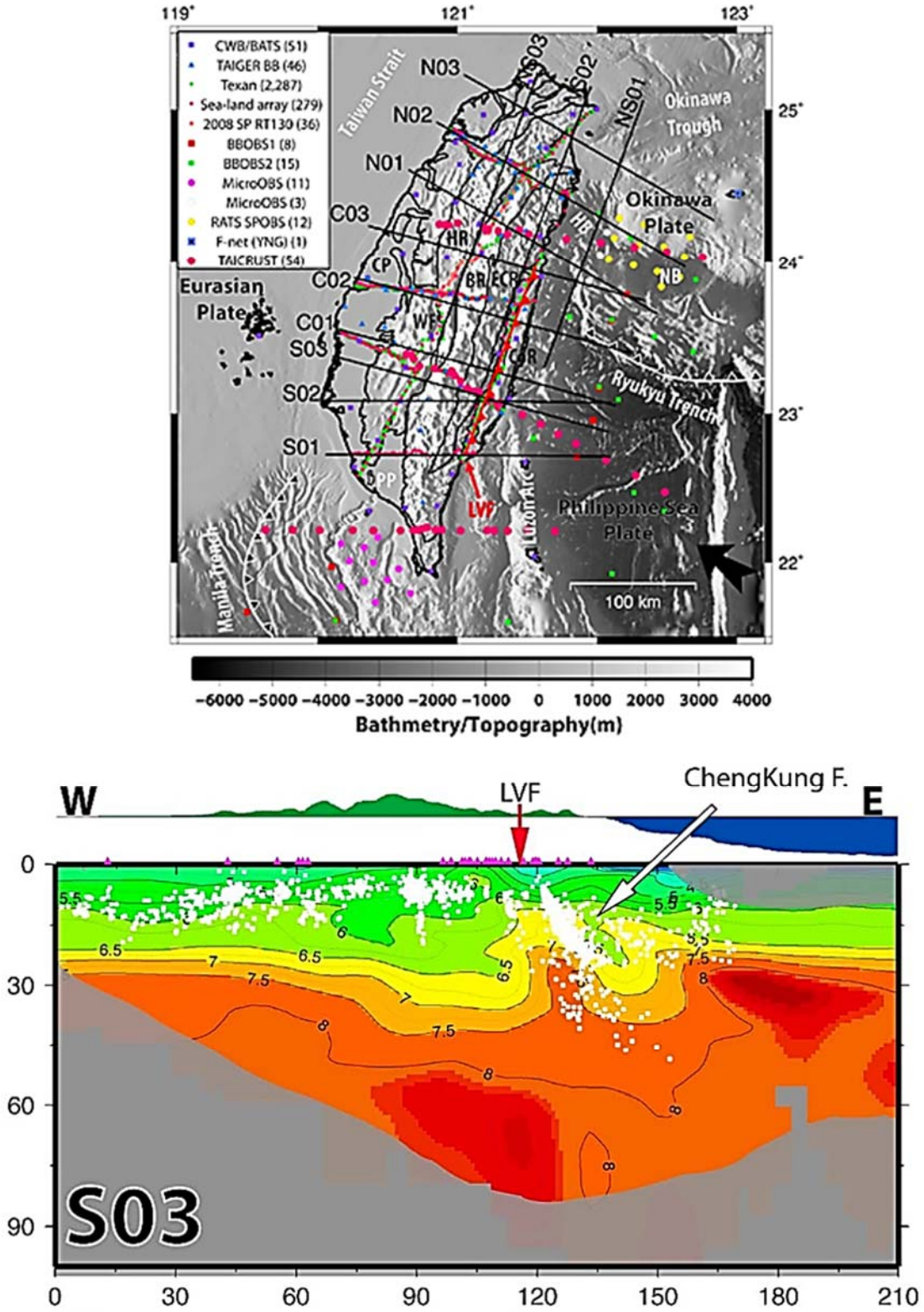


圖 4-1.16：上圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，下圖為跨越縱谷斷層南段 S03 速度構造剖面（Kuo-Chen et al., 2012）。

Figure 4-1.16: (Up) Taiwan tectonics and the distribution of seismic stations. The solid black lines are the distribution of velocity profiles. (Down) The southern section of the Longitudinal Valley fault passes the S03 profile (Kuo-Chen et al., 2012).

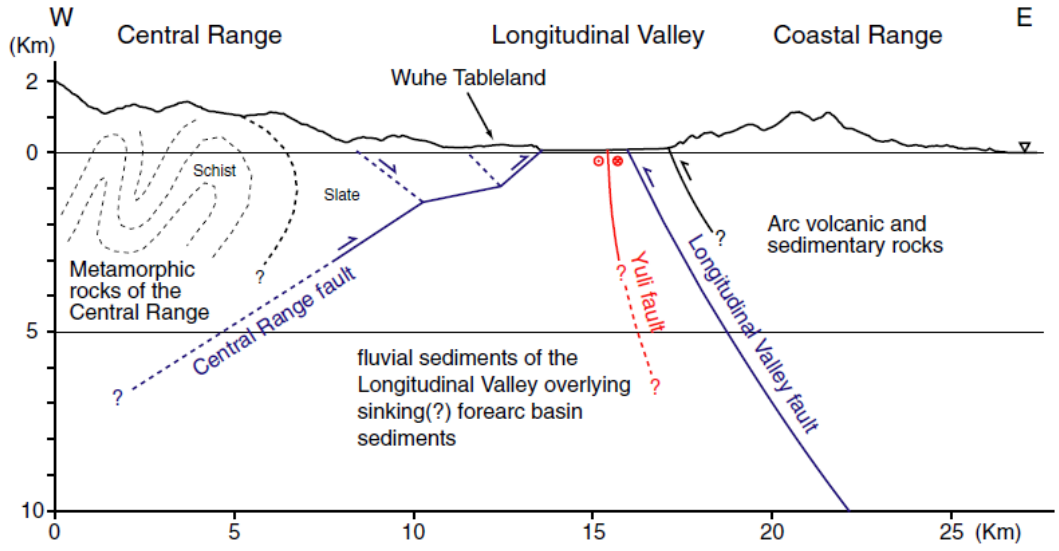


圖 4-1.17：位於舞鶴台地之東西向構造剖面，玉里斷層發育於縱谷中之沖積層，底部未知（Shyu et al., 2007）。

Figure 4-1.17: The east-west structural section on the Wuhe platform, the Yuli fault developed in the alluvial layer of the Longitudinal Valley, and its bottom is unknown (Shyu et al., 2007).

4-1-5 鹿野斷層-利吉斷層

Lee et al.（1998）根據大地測量資料推估之卑南山地區的構造演化模型（圖 4-1.18）：(a）卑南山礫岩於漸新世中期沉積於縱谷斷層（利吉斷層）下盤，(b）後由於逆衝作用使卑南山礫岩摺曲，(c）縱谷斷層逆衝作用於此處傳遞至卑南山礫岩西側並形成鹿野斷層，縱谷斷層（利吉斷層）則變為左移為主的斷層。由此演化模型可知鹿野斷層應為縱谷斷層於淺處分岔出來的低傾角分支逆斷層。

紀權宥（2007）認為利吉斷層及鹿野斷層為潛移作用為主的活動斷層（圖 4-1.19），故以階地抬升速率代表長期地殼垂直變化速率，GPS 水平變化速率代表長期地殼水平速率，估算利吉斷層面傾角約為 53 度，而鹿野斷層則為利吉斷層的分支斷層，傾角 17 度。然而，姜彥麟（2007）利用跨斷層 2006 年 4 月 1 號的臺東地震同震時期，地表的水平壓縮量和垂直抬升量，估算近地表利吉斷層傾角約 70 度，鹿野斷層傾角約 35~40 度（圖 4-1.20）。又王蘭榛等（2010），利用改良淺層震測影像探討鹿野斷層之構造，在龍田階地西側，跨越鹿野斷層位置設置一條測線（07P-LYHF-LT-1）（圖 4-1.21），經剖面量測鹿野斷層傾角約為 45 度。

此外，根據 Kuochen et al.（2012）速度構造剖面及地震震源分布，推估利吉斷層傾角約 55 度，深度約 30 公里（圖 4-1.22）。Wu et al.（2006）則利用 CWBSN 和 TSMIP 於 2006 年 4 月間在臺東地區所記錄的 1265 筆地震事件，包含 2006 年 4 月 1 日臺東地震，進行重新定位並描繪中央山脈斷層、鹿野斷層、利吉斷層三者的斷層面（圖 4-1.23），且認為鹿野斷層為利吉斷層的分支斷層。

本計畫判定鹿野斷層為利吉斷層的分支斷層。因目前針對鹿野斷層幾何的研究僅從地表變形量反推或是僅地下 1 公里深度以內，經諮詢相關專家，幾何模型可設定為深度 0-5 公里傾角 30 度，而後銜接至利吉斷層。利吉斷層在深度 0-22 公里的傾角約 55 度，深度 22-27.5 公里約 40 度（圖 4-1.24）。

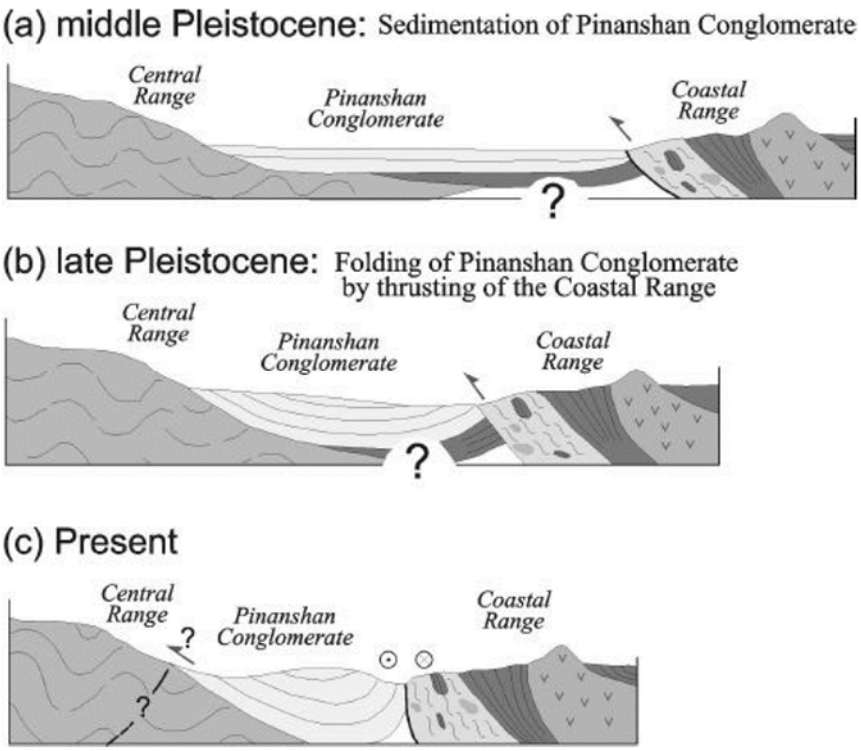


圖 4-1.18：卑南山礫岩構造演化圖（Lee et al., 1998）。

Figure 4-1.18: Tectonic evolution of Pinanshan Conglomerate.

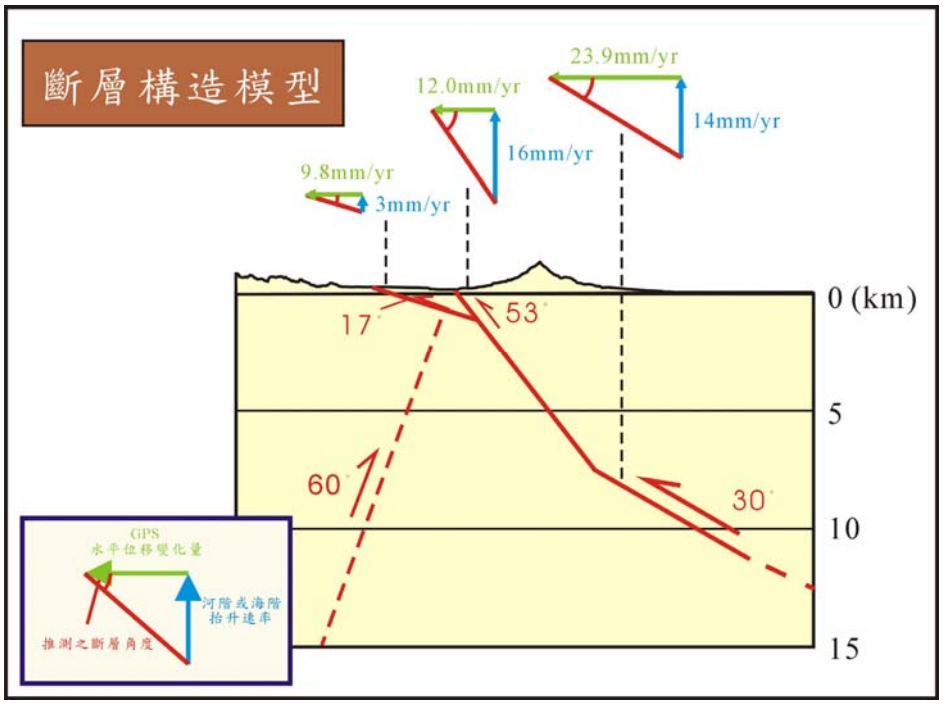


圖 4-1.19：鹿野斷層與利吉斷層之地下構造模型（紀權宥，2007）。

Figure 4-1.19: Structural model of Luyeh fault and Lichi fault (紀權宥，2007).

跨地震時期	抬升量 （mm）	水平壓縮量 （mm）	近地表傾角 （ ° ）
利吉斷層	15.5	5	70
鹿野斷層	10～11	13	35～40

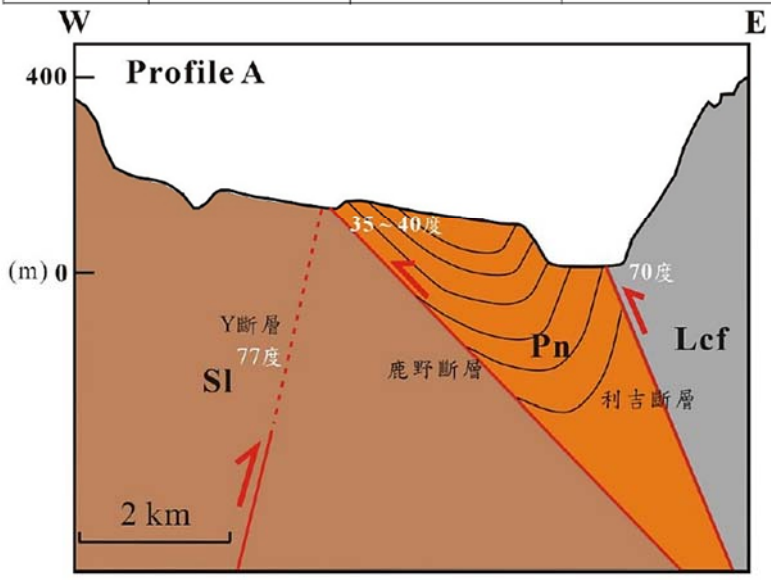
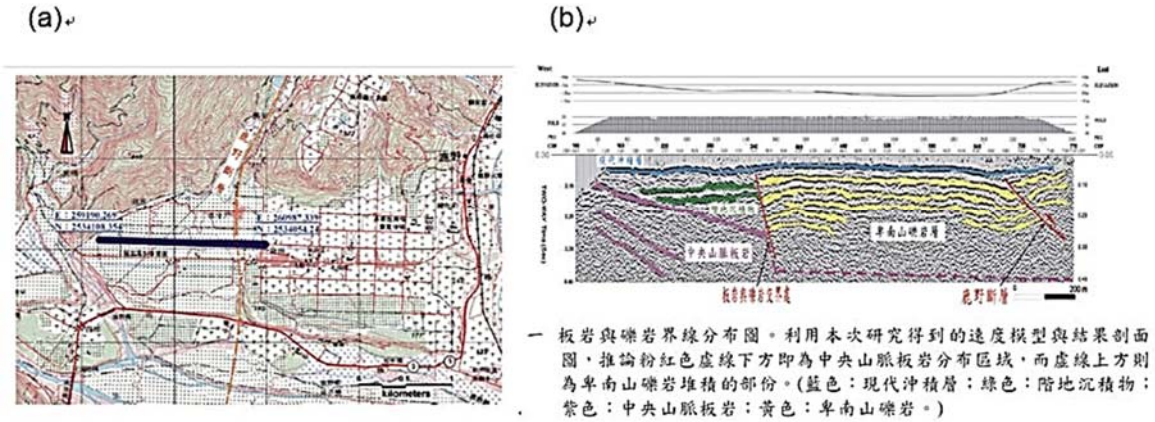


圖 4-1.20：工作區域之地下構造剖面。Lcf：利吉層；Pn：卑南山礫岩；Sl：中央山脈板岩層（姜彥麟，2007）。

Figure 4-1.20: Structural model of the study area (姜彥麟，2007).



一 板岩與礫岩界線分布圖。利用本次研究得到的速度模型與結果剖面圖，推論粉紅色虛線下方即為中央山脈板岩分布區域，而虛線上方則為卑南山礫岩堆積的部份。(藍色：現代沖積層；綠色：階地沉積物；紫色：中央山脈板岩；黃色：卑南山礫岩。)

圖 4-1.21：(a) 鹿野 07P-LYHF-LT-1 測線位置圖，(b) 淺層震測剖面圖（王蘭榛，2010）。

Figure 4-1.21: (a) Location of seismic reflection line (07P-LYHF-LT-1) in Luyeh, (b) Interpretation of shallow seismic reflection profile.

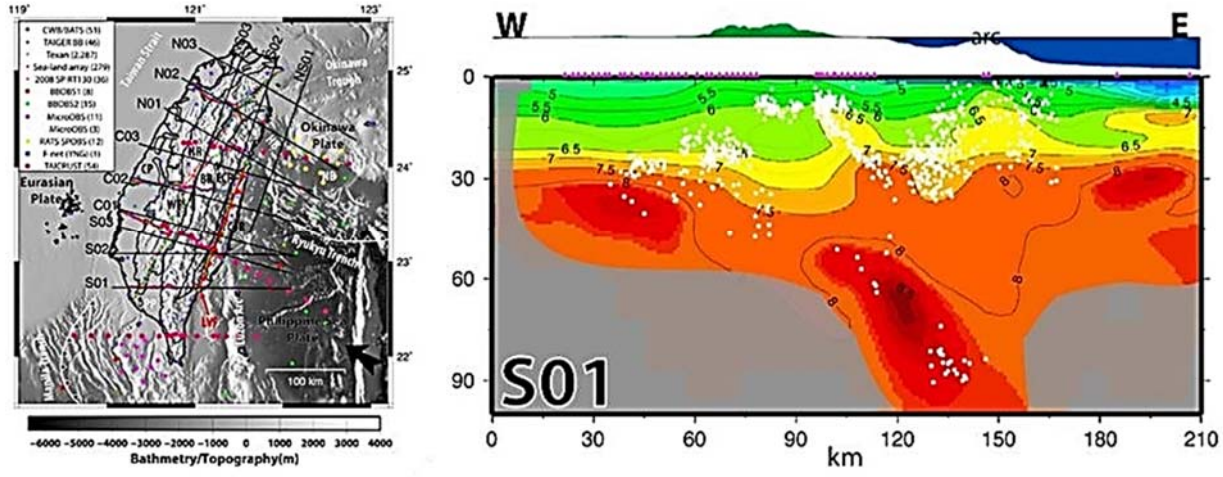


圖 4-1.22：左圖為臺灣地體架構及地震站分布，黑色實線為速度構造剖面分布，右圖為縱谷斷層最南段 S01 速度構造剖面（修改自 Kuochen et al., 2012）。

Figure 4-1.22: Taiwan seismotectonics and the distribution of seismic stations. The solid black line shows the distribution of velocity structure profiles. The picture on the right is the S01 velocity structure section of the southernmost section of the longitudinal valley fault (modified from Kuochen et al., 2012).

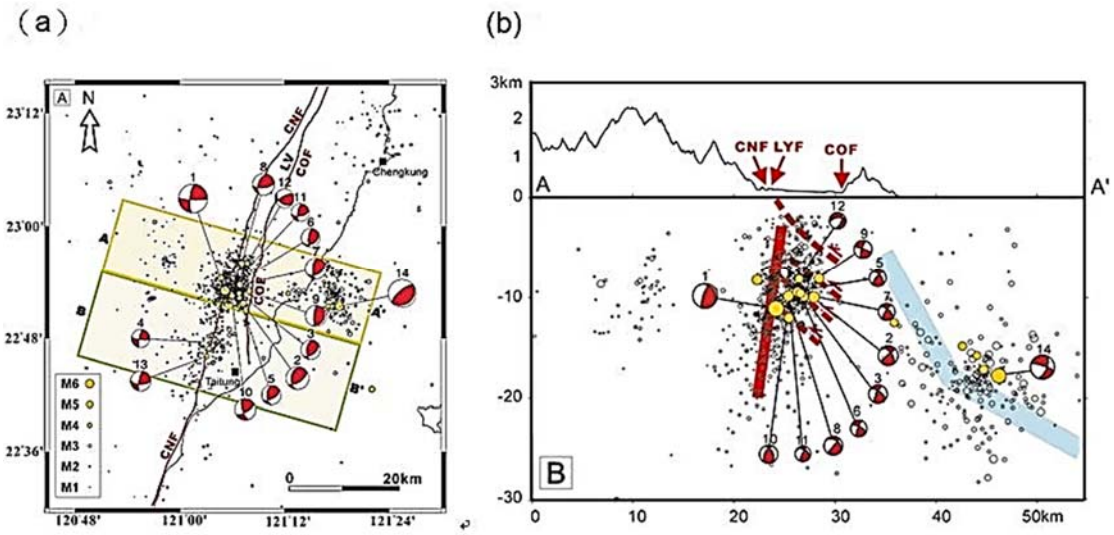


圖 4-1.23：(a) 2006 臺東地震系列重新定位及震源機制解，(b) 臺東地震剖面圖，圖中左側粗紅線為中央山脈斷層，上部紅色虛線為鹿野斷層位置，右側淡藍色多邊形為利吉斷層位置（Wu et al., 2006）。

Figure 4-1.23: (a) Relocation and focal mechanism solutions of the 2006 Taitung earthquake sequence. (b) Earthquake profile. Thick red line on the left is the Central Range fault, the upper red dotted line is the Luyeh fault, and the right light blue polygon is the Lichi fault (Wu et al., 2006).

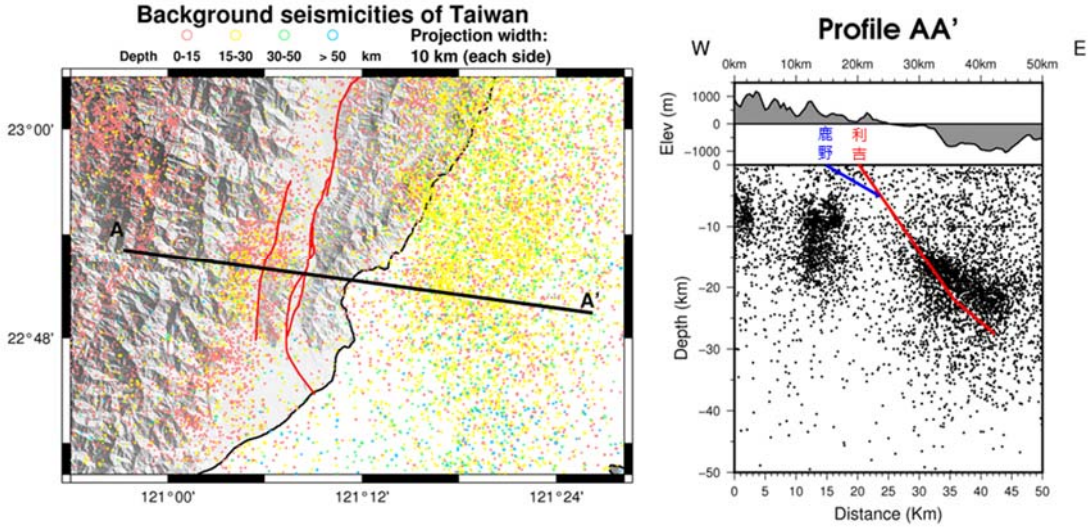


圖 4-1.24：鹿野-利吉斷層系統幾何形貌。

Figure 4-1.24: Luyeh - Lichi fault system geometry.

4-2 BLOCKS 斷層模型

4-2-1 斷層模型原理與使用參數

此斷層模型為 Meade 與 Loveless 所開發的 Block Model（Meade and Hager.,2009），主要的計算原理為將區域視為各斷層作為邊界所劃分而成的塊體，並以地表速度去反推斷層面滑移速度，再以求得之斷層滑移速度推求地表變動速度，使得與真實地表變動速度相互比較驗證模型。相對於基本的錯位模型(Dislocation Model)，Block Model 可以較容易的建構三維斷層幾何與較快速的計算，又 Block Motion 只考慮塊體之旋轉，故模擬中無需垂直向資料。

BLOCKS 斷層滑移速率模擬，在本次臺灣東部地區共模擬八條斷層分別為：米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層、玉里斷層等。各斷層所使用參數如所需之鎖定深度、傾角分別如團隊中興工程顧問社所提供之專家意見彙整，而各斷層初始滑移速率則參考中央地質調查所「臺灣活動斷層潛勢圖精進與震源構造特性評估」計畫所調查之地質滑移速率，初步視基礎幾何分配至傾向滑移速率與走向滑移速率，作為滑移速率初始約制。

本次臺灣東部七條斷層共由四個塊體描述，分別為 NCOR、PHSP、LVFD、YULI 塊體，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。其中根據徐浩德教授（Shyu et al., 2016）發表，本次八條斷層中，僅米崙斷層是以走向滑移為主要運動模式，圖中以藍色線段標示，另六條斷層皆是傾向滑移為主的斷層活動型態，圖中以紅色線段標示，由於玉里斷層未劃定則預定視為逆衝斷層（圖 4-2.1）。

地表長期變動速率使用 GPS 速度場表示，使用成功大學團隊所提供共 1161 站連續站與移動站速度場(圖 4-2.1)，測站速度擬合時間段多為 2016 至 2019 年，分布範圍以臺灣本島為主與鄰近陸地之零星測站。

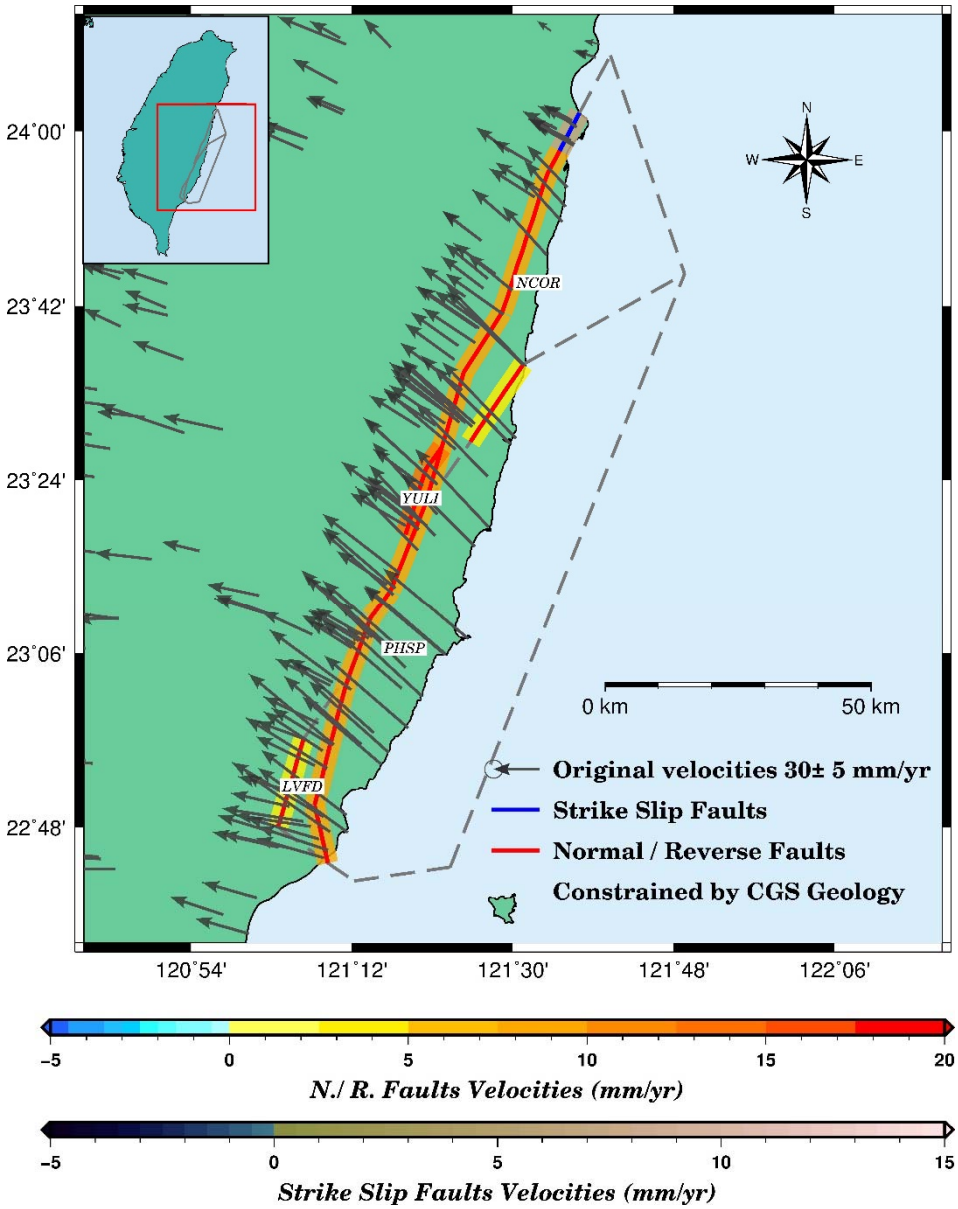


圖 4-2.1：斷層模擬初始值。紅色線段標示之傾向滑移斷層段對應 N./ R. Faults Velocities 之色階。藍色線段標示之走向滑移斷層段對應 Strike Slip Faults Velocities 之色階。灰色箭頭速度場為台灣鄰近 1161 站成大隊所提供之 GPS 測站速度場。

Figure 4-2.1: The input values of the BLOCK model with the 1161 GPS velocity field (the deep gray arrows) computed by National Cheng Kung University. The blue lines indicate strike-slip faults and red lines indicate normal/reverse faults and the corresponding color bars down to the figure.

4-2-2 斷層模擬結果

本次模擬中，臺灣東部有八條主要斷層：嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、池上斷層、鹿野斷層、利吉斷層、玉里斷層是以傾向滑移運動為主的斷層，而米崙斷層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 4-2.1。走向滑移速率中，正值顯示為左移，負值為右移，而傾向滑移速率中，正值表示為逆斷層，負值表正斷層。本次模擬成果，每條斷層的各小段於傾向滑移上皆為正值，走向滑移上亦皆為正值，故東部此八條斷層在各分段上的表現一致，皆為左移與逆衝運動模式。

最北邊的米崙斷層，鎖定深度為 10.0 km 東傾 65.0°，北段於走向滑移速率上略大傾向滑移分量 0.1 mm/yr，平均上量值皆為 7.2 mm/yr（圖 4-2.2、圖 4-2.3），故米崙斷層整體總滑移速率為 10.2±0.1 mm/yr（表 4-2.1、圖 4-2.4）。

連接米崙斷層的嶺頂斷層，期末更新的設定於斷層傾角設定與米崙斷層同為東傾 65.0°，深度則為 27.5km。其成果，傾向滑移分量上量值最小為 4.7 mm/yr，至南段量值遞增至 10.6 mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率表現平均，約為 7.5 mm/yr，最小的為最南一小段之 6.7 mm/yr ，最大值為斷層中段之 7.7 mm/yr（圖 4-2.3），故嶺頂斷層總滑動量，越往南量值越大，最南一小段量值為 12.5 mm/y（圖 4-2.4），故整體總滑移速率為 9.9±1.0 mm/yr（表 4-2.1）。

往南連接的瑞穗斷層，設定的斷層幾何亦與北邊嶺頂斷層相同；成果於傾向滑移分量上近南北段量值較大，最大量值為最北段之 11.2 mm/yr，最小為所連接之南段 6.4 mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率則多為 7.8mm/yr，最小的為最北小段之 6.7 mm/yr，（圖 4-2.3），故瑞穗斷層總滑動量值，最大值位在北段 13.1 mm/yr（圖 4-2.4），故整體總滑移速率為 10.9±1.2 mm/yr（表 4-2.1）。

與瑞穗斷層南端連接有東側近海岸之池上斷層，是本次模擬中最長的斷層，其東傾 60.0°鎖定深度為 20.0km，成果於傾向滑移分量運動型態上，主要為中、南段略高於北段，而各小段量值大小有交錯，最小值為 3.2 mm/yr，最大值為 21.5

mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率運動型態則是中段略大於南、北段，在 2.7 至 11.8 mm/yr 之間（圖 4-2.3），池上斷層總滑動量值，最大值在中段為 23.3 mm/yr，最小值在最中段近北部之 4.2 mm/yr（圖 4-2.4），整體斷層總滑移速率為 13.9±6.3 mm/yr（表 4-2.1）。

與瑞穗斷層平行之奇美斷層，鎖定深度為 25.0 km 東傾 80.0°，成果於傾向滑移分量上，最大量值為最南段之 13.3 mm/yr，最小為北段之 8.4 mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率則表現平均，量值均為 3.3 mm/yr（圖 4-2.3），故總滑動量值，最大值為 12.8 mm/yr（圖 4-2.4），故整體總滑移速率為 11.2±1.5 mm/yr（表 4-2.1）。

往南連接之利吉斷層，鎖定深度為 22.0 km 東傾 55.0°，成果於傾向滑移分量上主要呈現轉折前北段大於轉折後南段量值，最北段量值自 8.4 mm/yr 往南遞增至 9.8 mm/yr，南段則在 4.0 mm/yr 以內，故最小值為轉折後中段 2.4 mm/yr（圖 4-2.2）；而走向滑移速率則是北段量值往中段遞減，整體量值約為 8.7 mm/yr，最小值為 7.7 mm/yr，最大值為 7.9 mm/yr，南邊三段平均為 9.5 mm/yr（圖 4-2.3），利吉斷層總滑動量值，最大值在中段的 12.5 mm/yr，最小值在轉折後的最北段 9.9 mm/yr（圖 4-2.4），整體斷層總滑移速率為 11.0±1.1 mm/yr（表 4-2.1）。

與利吉斷層平行位於西側有一鹿野斷層，本次模擬鹿野斷層幾何設定為東傾 30.0°鎖定深度為 5.0 km，模擬成果於傾向滑移分量上表現均勻介於 4.4-4.6 mm/yr 之間交錯（圖 4-2.2），走向滑移速率表現也相當等量，量值同樣介於 4.4-4.6 mm/yr 之間交錯(圖 4-2.3），鹿野斷層總滑動量值相當平均約為 6.4 mm/yr，最南段有最小值為 6.3 mm/yr（圖 4-2.4），整體斷層總滑移速率為 6.4±0.0 mm/yr（表 4-2.1）。

玉里斷層鎖定深度為 10.0 km 東傾 51.0°，成果整體而言，各段左移量值大於逆衝滑移分量，左移量值平均為 5.2±0.3 mm/yr（圖 4-2.3），傾向滑移速率平均為 3.2±1.0 mm/yr（圖 4-2.2），整體斷層總滑移速率為 6.2±0.6 mm/yr（表 4-2.1）。

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 4-2.5 為本次台灣東部八條斷層涵蓋範圍，地表速度場模擬成果。圖中可見嶺頂斷層至利吉斷層沿線以東模擬結果之紅色箭頭整體而言相對原始

速率量值較小，且有明顯逆時針旋轉的偏量，整體可見相較於期中報告差異更加明顯；米崙斷層以北與利吉斷層最南段鄰近區域則與原始量測值差異較小，正演速度場較為合理；模擬之速度場相較原始速度場之 RMS 值為 19.143，誤差值較期中報告大。

整體而言與期中報告之正演成果相反，期中報告在多數斷層座落的整體塊體中部正演模擬量較為符合，整體塊體南北區域模擬成果較差。差異部分除了斷層幾何調整外，本次使用的測站數增加至全台與本島外部，推測增加採用之 GPS 測站數需有臺灣其他區域之斷層與邊界提供應力反演，才能有較合理的解算成果；若如目前解算斷層僅含臺灣東部，而於塊體外之整體範圍（視為一固定塊體），則該塊體將顯示不合理的塊體內部作用力。而全台與鄰近區域之整體速度場，模擬加入全台之斷層與塊體成果，將於本期另一總報告測試。

本次台灣東部斷層模擬成果中，米崙斷層走向滑移分量高於傾向滑移分量，為左移走向滑移斷層，與所參考之 Shyu et al., 2016 文獻相同，而瑞穗斷層、池上斷層之傾向滑速率量值大於走向滑移量值，亦符合參考文獻。而嶺頂、鹿野、利吉斷層之模擬成果皆為走向滑移分量大於傾向滑移分量，是與參考文獻有相左的部分。由於本次速度場正演成果有一明顯往西南角度上的偏差，回顧各項約制值，推測範圍外距離較遠的速度值，應為影響反演的主要因素，使致模擬成果較期中不佳。

表 4-2.1：GPS 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 4-2.1: The result values of each fault model with 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	2020 BLOCKS 台灣東部斷層模擬成果		
	平均走滑速率（s.s. mm/yr）	平均傾向滑移速率（d.s. mm/yr）	總滑移速率（mm/yr）
米崙斷層	7.2±0.0	7.2±0.1	10.2±0.1
嶺頂斷層	7.5±0.3	6.2±1.7	9.8±1.0
瑞穗斷層	7.6±0.5	7.8±2.0	10.9±1.2
奇美斷層	3.3±0.0	10.7±1.6	11.2±1.5
玉里斷層	5.2±0.3	3.2±1.0	6.2±0.6
池上斷層	8.0±3.4	11.3±5.6	13.9±6.3
鹿野斷層	4.5±0.1	4.5±0.1	6.4±0.0
利吉斷層	8.7±0.9	6.1±3.3	11.0±1.1

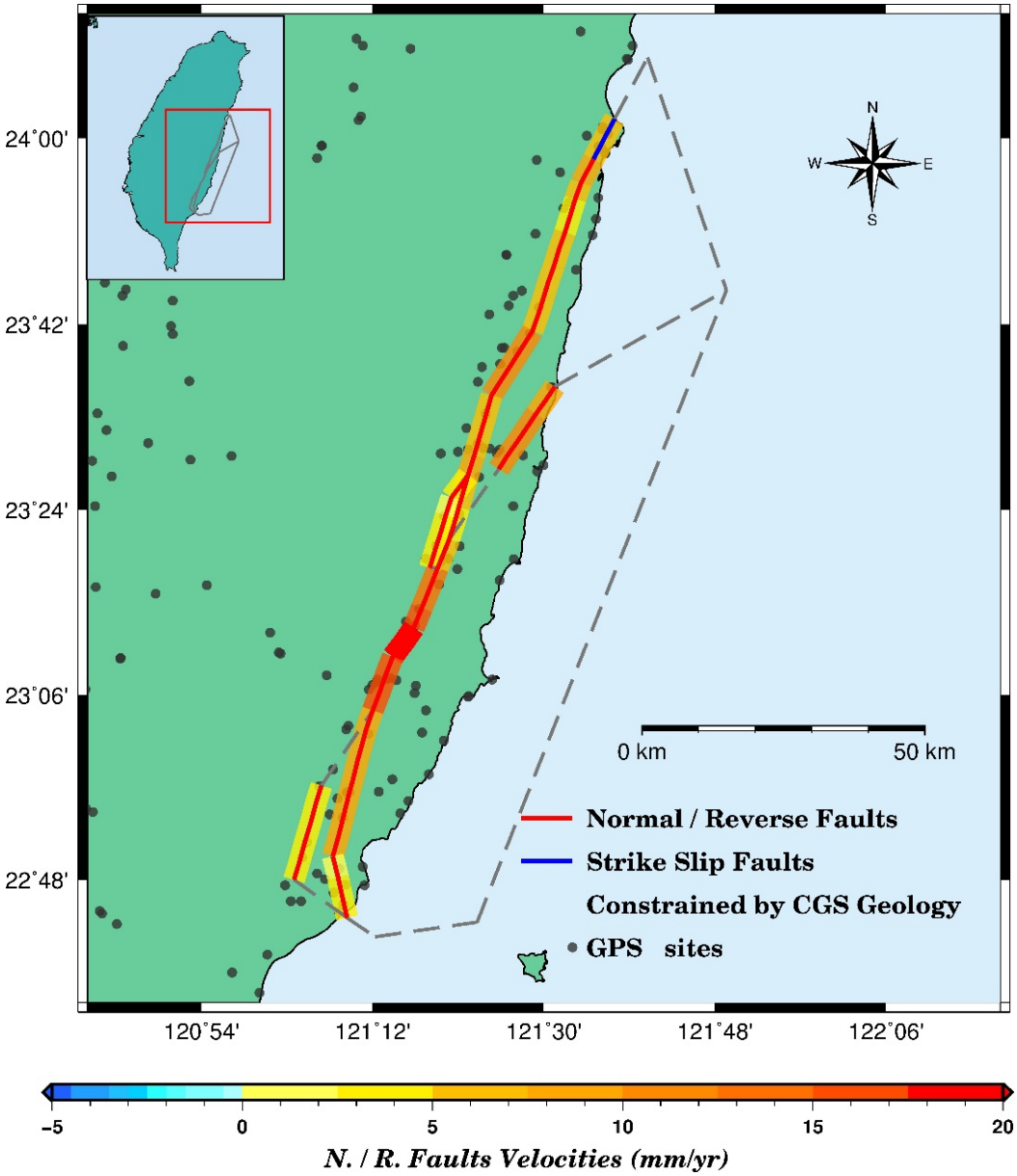


圖 4-2.2：2020 年台灣東部斷層傾向滑移速率模擬成果。

Figure 4-2.2: The dip-slip rates of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

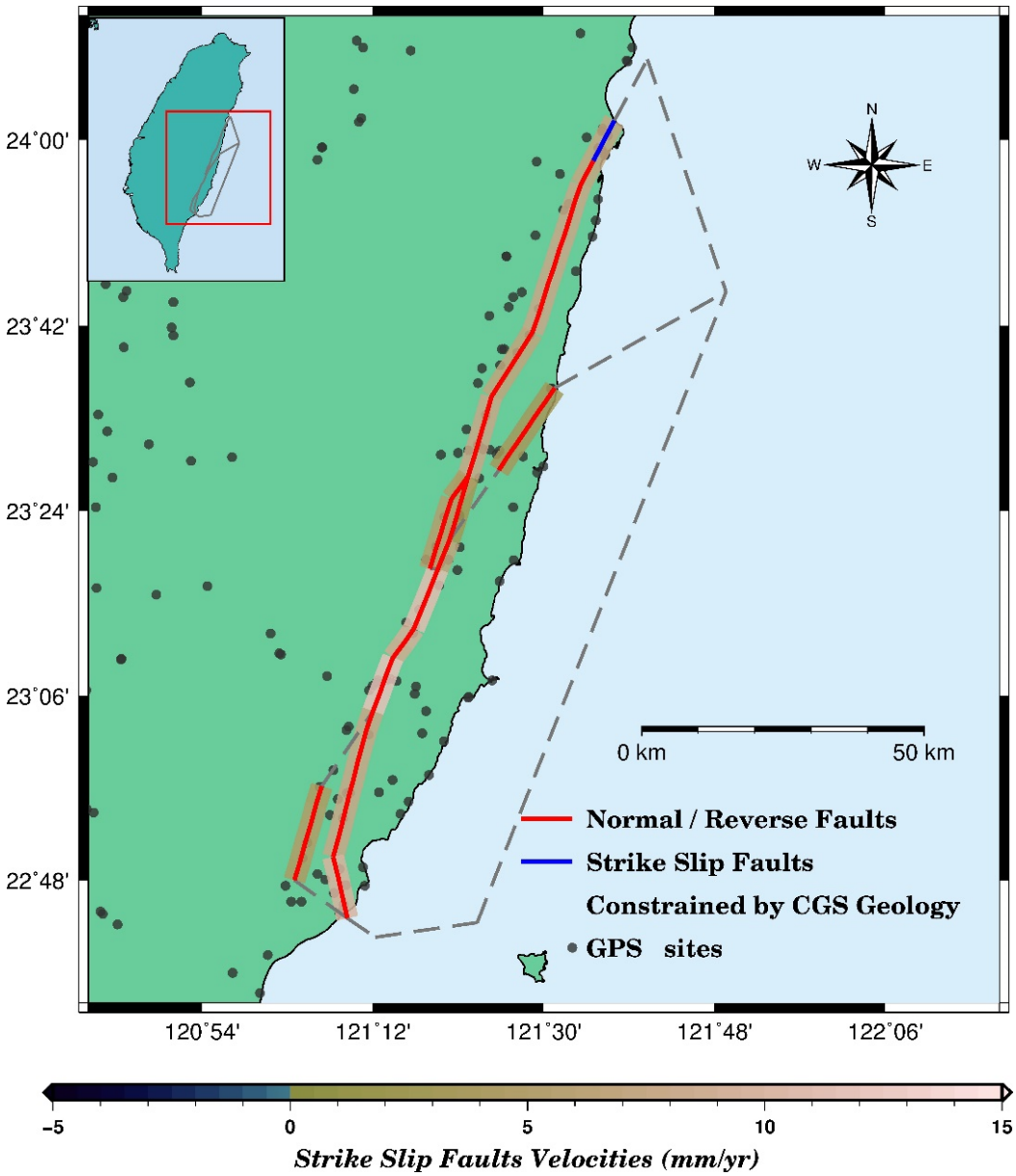


圖 4-2.3：2020 年台灣東部斷層走向滑移速率模擬成果。

Figure 4-2.3: The strike-slip rates of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

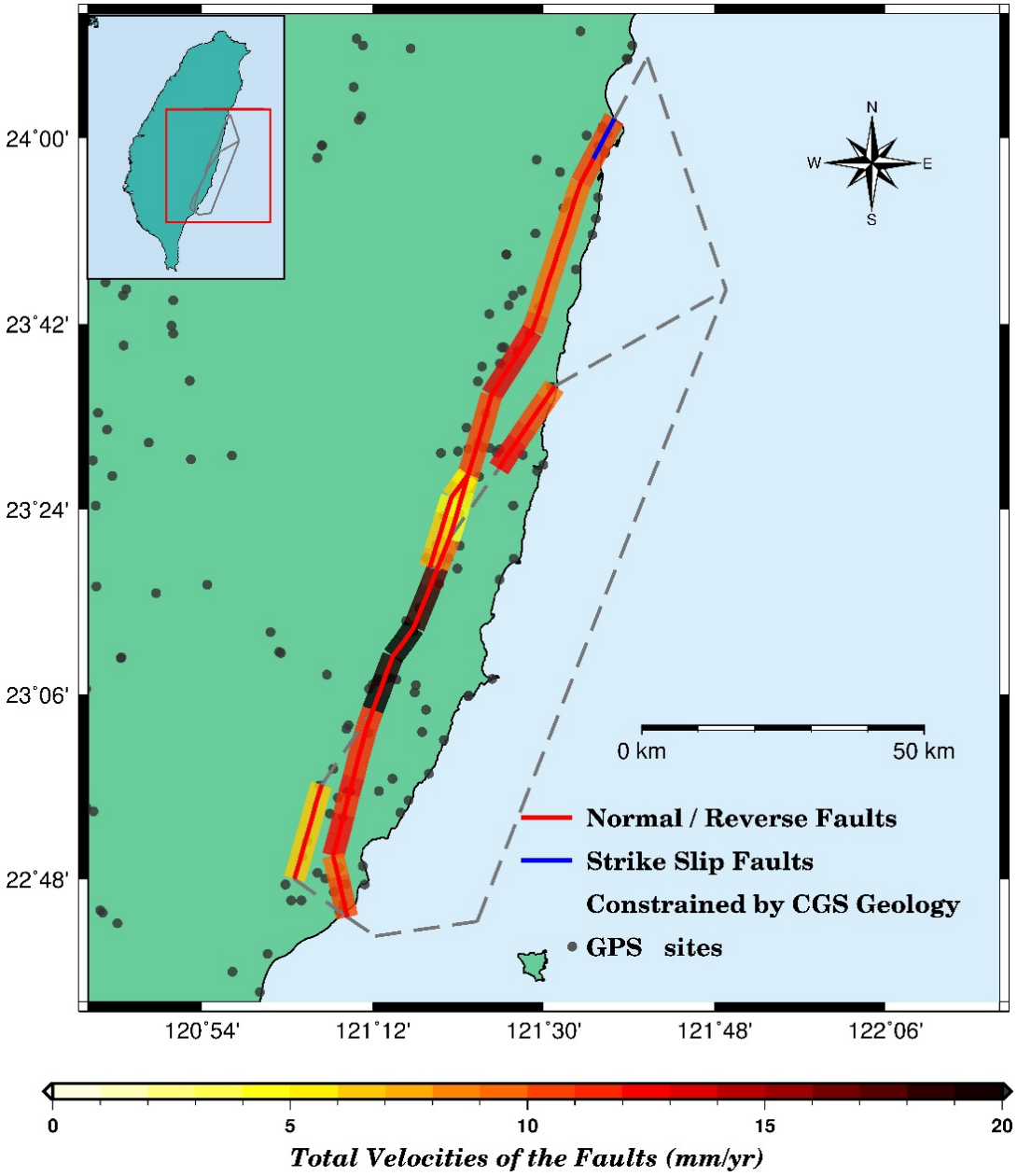


圖 4-2.4：2020 年台灣東部斷層模擬成果之總滑移速率。

Figure 4-2.4: The total slip rates derived from vector value of each segment modeled with 2020 GPS velocity field.

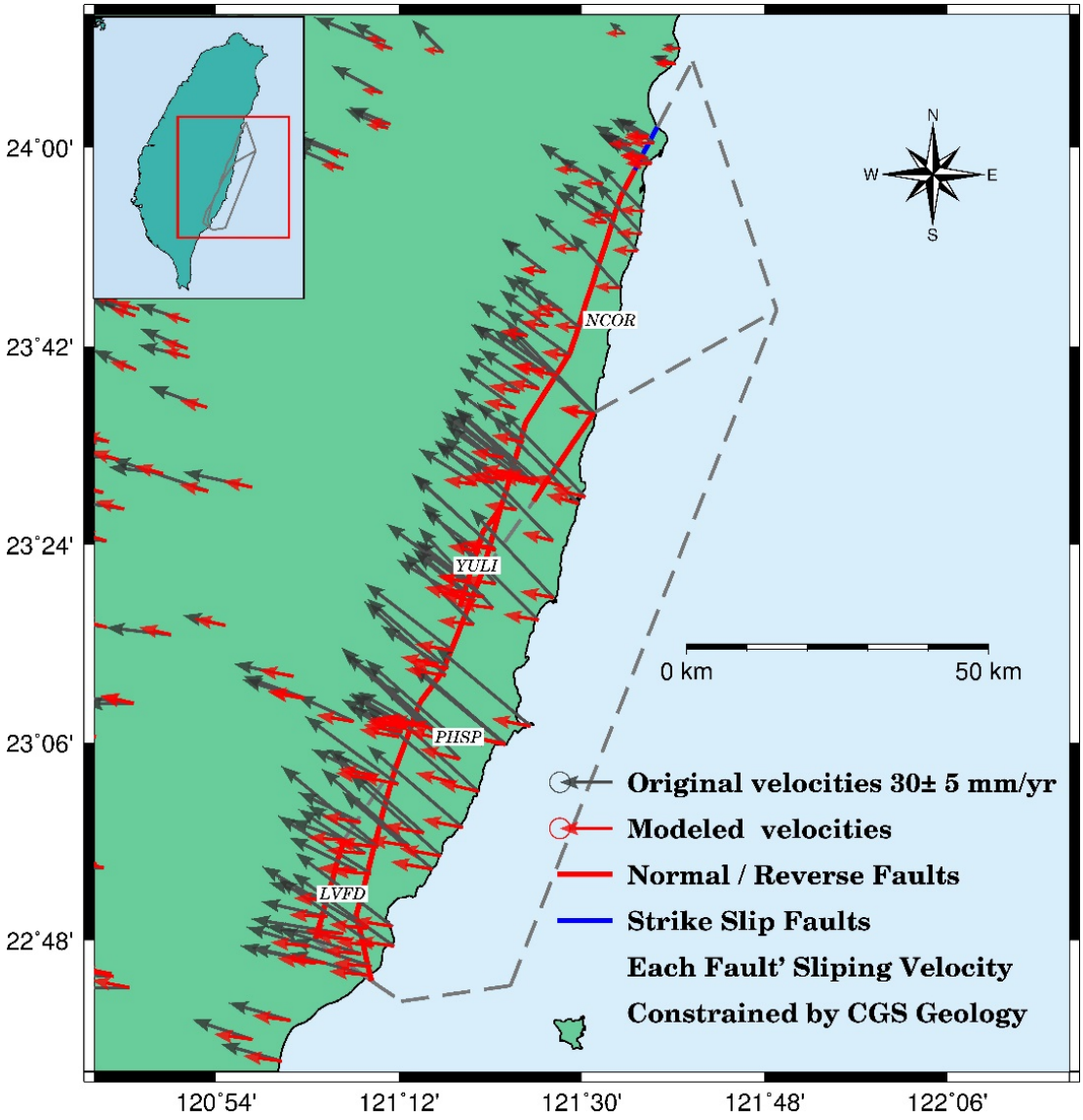


圖 4-2.5：台灣東部斷層滑移速率模擬之地表速度場正演模擬成果，標準差值為 19.143。紅色箭頭為模擬成果，深灰色箭頭為原始速度場。灰色虛線為塊體邊界，黑色、藍色實線為斷層線位置。

Figure 4-2.5: The results of GPS velocity field modeled with 1116 GPS sites velocity field which the standard deviation is 19.143. 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.

4-3 DEFNODE 斷層模型

4-3-1 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（圖 4-3.1），並參考本計畫之斷層參數資料（表 4-3.1），建構了本研究區域的塊體邊界模型。為了符合地調所公布的活動斷層資料，我們也修正了 LVFD、NCOR 等塊體，以使鹿野及嶺頂斷層能對應其塊體邊界。

本研究使用 EURA 做為參考塊體，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 4-3.1 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 4-3.1）。注意除了如圖 4-3.1 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（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。

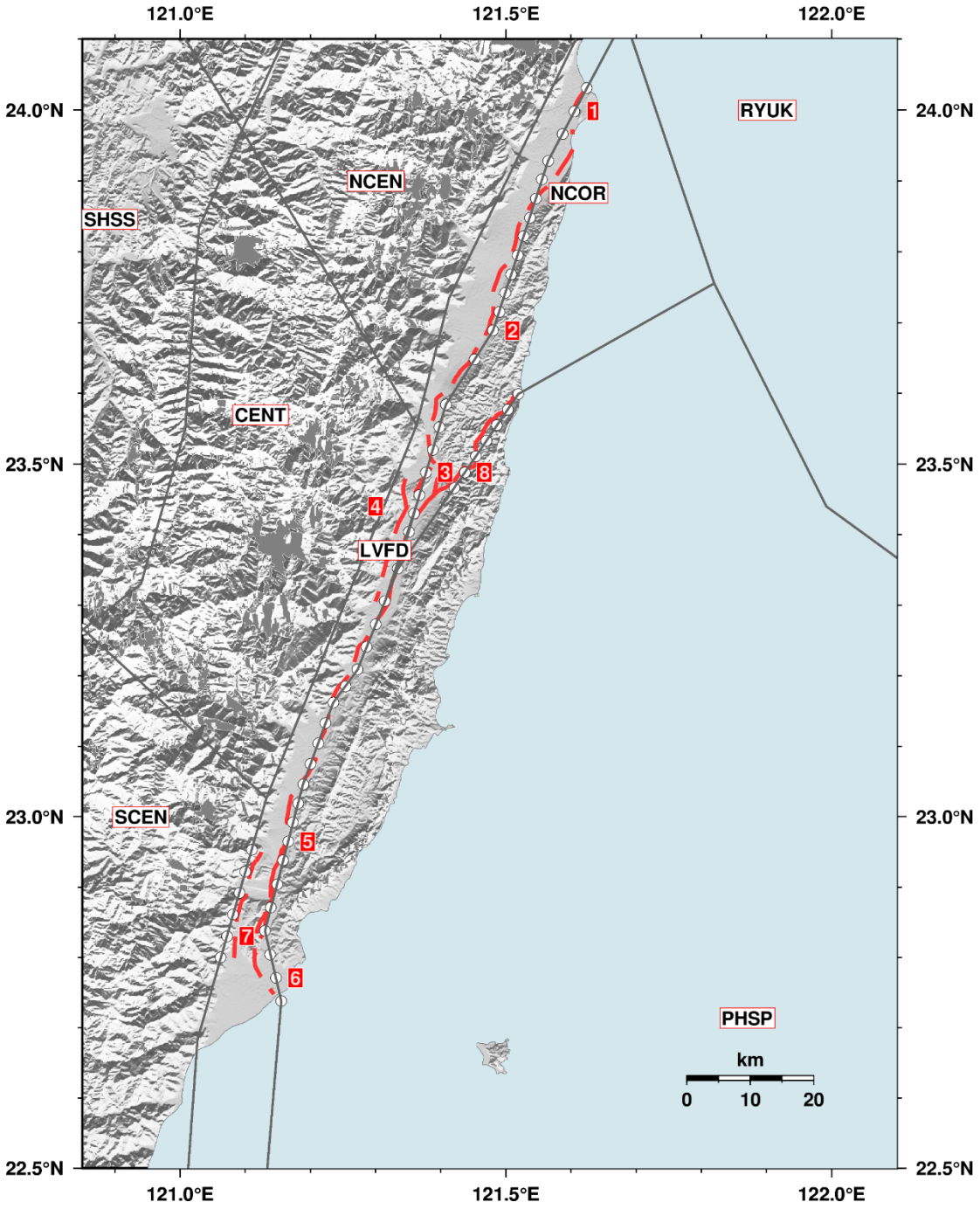


圖 4-3.1：(a) 臺灣東部三維塊體模型及活動斷層分布。四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。紅色實線表示地調所公布之活斷層，紅色虛線表是推測或隱伏斷層。紅色數字代表之斷層分別為：1.米崙斷層； 2.嶺頂斷層； 3.瑞穗斷層； 4.玉里斷層； 5.池上斷層； 6.利吉斷層； 7.鹿野斷層； 8.奇美斷層。

Figure 4-3.1: (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. Milun fault；2. Lingding fault；3. Rueisui fault；4. Yuli fault (not included)；5. Chihshang fault；6. Lichi fault；7. Luyeh fault；8. Chimei fault.

表 4-3.1：圖 4-3.1 中所示斷層之幾何參數。

Table 4-3.1: The geometry parameters of the faults in figure 4-3.1.

	斷層名稱	傾角（degree）	斷層底部深度（km）
1	米崙斷層	65.0 E	0.0-10.0
2	嶺頂斷層	65.0 E	0.0-27.5
3	瑞穗斷層	65.0 E	0.0-27.5
4	奇美斷層	80.0 E	0.0-25.0
5	玉里斷層	51.0 E	0.0-10.0
6	池上斷層	60.0 E 25.0 E	0.0-20.0 20.0-25.0
7	鹿野斷層	30.0 E	0.0-5.0
		下接利吉斷層	
8	利吉斷層	55.0 40.0	0.0-22.0 22.0-27.5

4-3-2 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 年起所觀測到的平均水平速度場及平均垂直速度場（圖 4-3.4a）。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 4-3.2b、c 及表 4-3.2）。圖 4-3.3a、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 4-3.4 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）。由圖 4-3.4c 可知，在大部分地區觀測值和塊體模型預估的水平運動皆有很好的一致性。其中鹿野及利吉斷層週遭部分測站殘差值較大，推估可能受到 2006 台東卑南地震的震後效應影響外，斷層東側測站（資料）數量過低（僅約 5 個 GPS 站）也會影響模型的估算。此外，花東縱谷中段也有部分測站殘差值較大，我們認為除了該區域過於狹長的塊體幾何（LVFD）外，縱谷斷層以西的海岸山脈上測站密度過低也會影響模型的解析度。

整體來看，垂直運動的擬合結果不如水平運動，尤其在縱谷中段接近瑞穗及嶺頂斷層附近有偏大的下沉殘差運動。此現象可能由於本研究的塊體斷層模型未納入東部外海的琉球隱沒系統，進而忽略了菲律賓海板塊（PHSP）向北隱沒到歐亞板塊（RYUK）的效應。由於東部外海的 GPS 測站很少（目前僅有綠島與蘭嶼兩站），且此區的海域地體構造仍不很清楚，因此不易以測地模型來量化評估琉球隱沒系統對縱谷地表運動的影響性，未來必須透過其他分析方法來改善此問題。

圖 4-3.3 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 4-3.3 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。值得一提的是玉里斷層的滑移速率估算值均偏高，可能歸因於此斷層與其東邊邊緊鄰的瑞穗斷層相距過近，因此在模型中形成了一個狹小的塊體。由於其體積過小，GPS 資料無法提供穩定的模型參數反演約制，也造成其滑移速率估算值的誤差偏大。此外，有研究指出玉里斷層在 10 km 以上有可能和瑞穗斷層相接，因此應該將這兩個斷層視為同一地體構造系統。鑒於以上原因，表 4-3.3 中偏高的玉里斷層速率值仍須更進一步的檢驗。

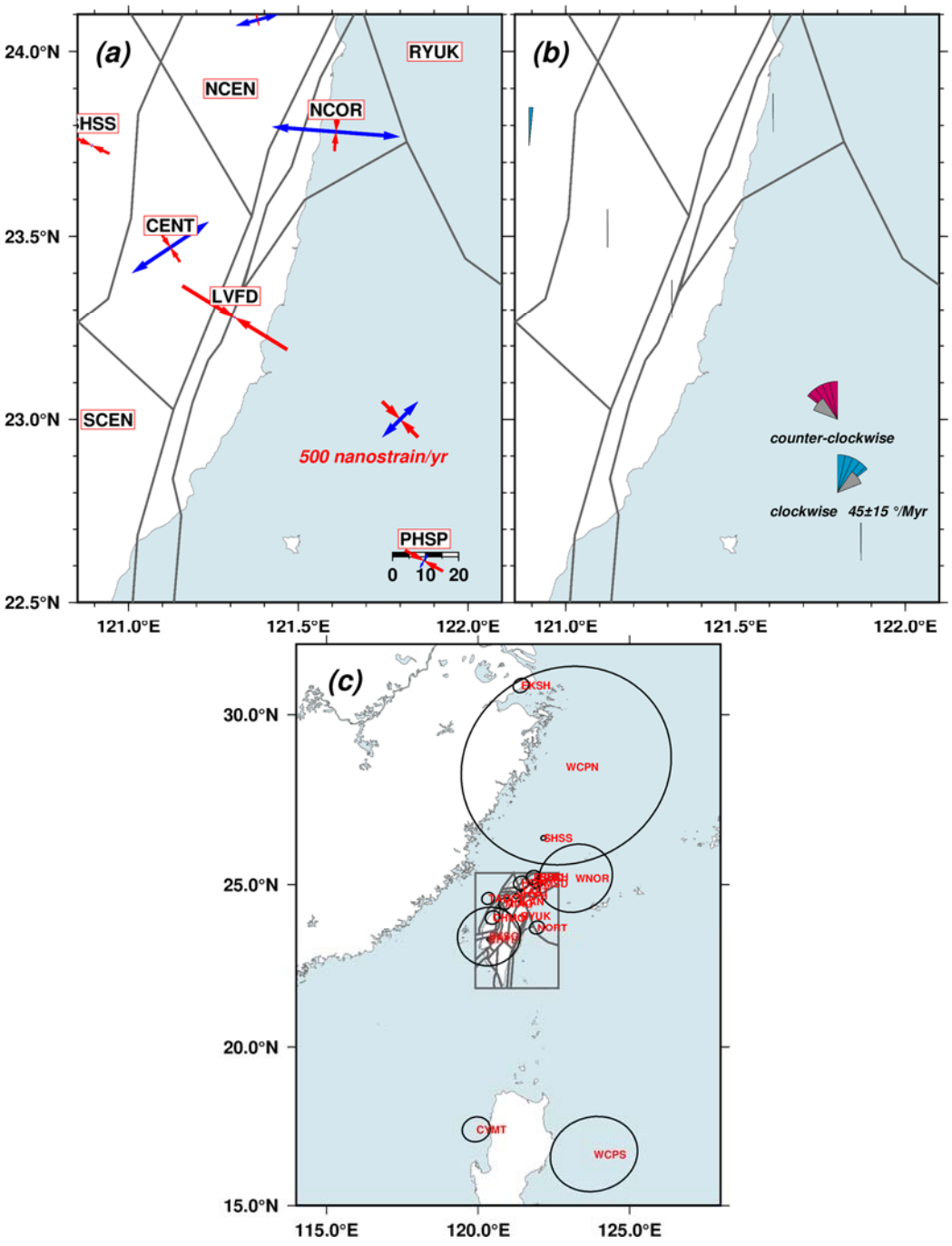


圖 4-3.2：(a) 各塊體內之內部形變應變大小。紅色箭頭代表最大主應力軸方向，藍色箭頭表示最小主應力軸方向。(b) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler pole 所在的位置（黑點）及誤差範圍（黑色橢圓）。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體。(c) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler pole 為軸的旋轉角速度。紅色扇形表示逆時針旋轉，藍色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 15°/My 的角速度。

Figure 4-3.2: (a) Internal strain within each block. Red and blue arrows represent maximum and minimum principle strain rate. (b)The rotation rate of blocks. Blue for clockwise rotation, and red for counterclockwise rotation. (c) The location of the rotation poles for each block were marked along with the 95% confidence error.

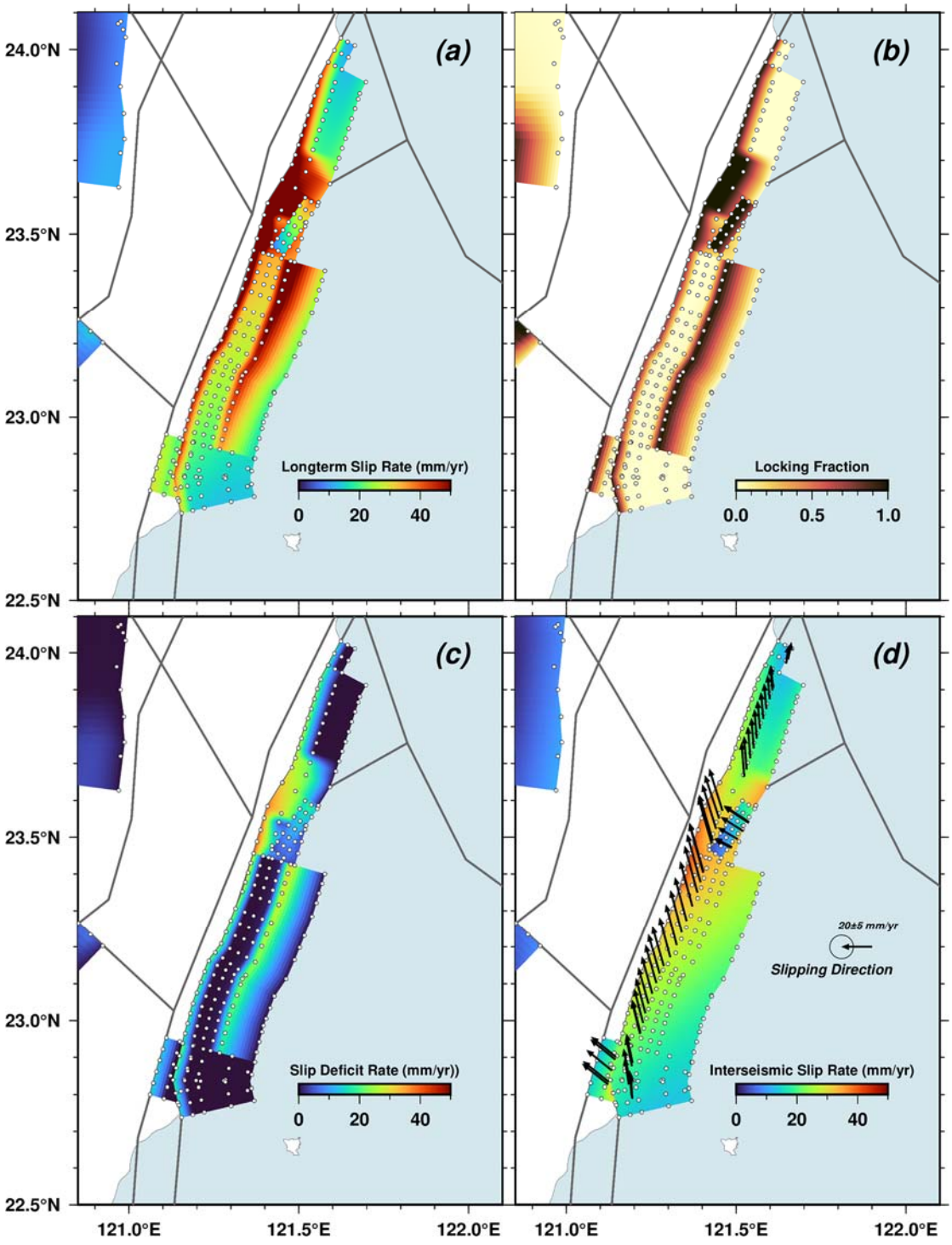


圖 4-3.3：(a) 推求的斷層長期滑移速率。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的鎖定係數(coupling coefficient)分布。(c) 各斷層面的滑移虧損率。(d) 由 (a) 圖減去 (c) 圖，得到斷層面上的震間期滑移速率，黑色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。

Figure 4-3.3: (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 interseismic slip rate. And the black arrow told us the direction of the slip.

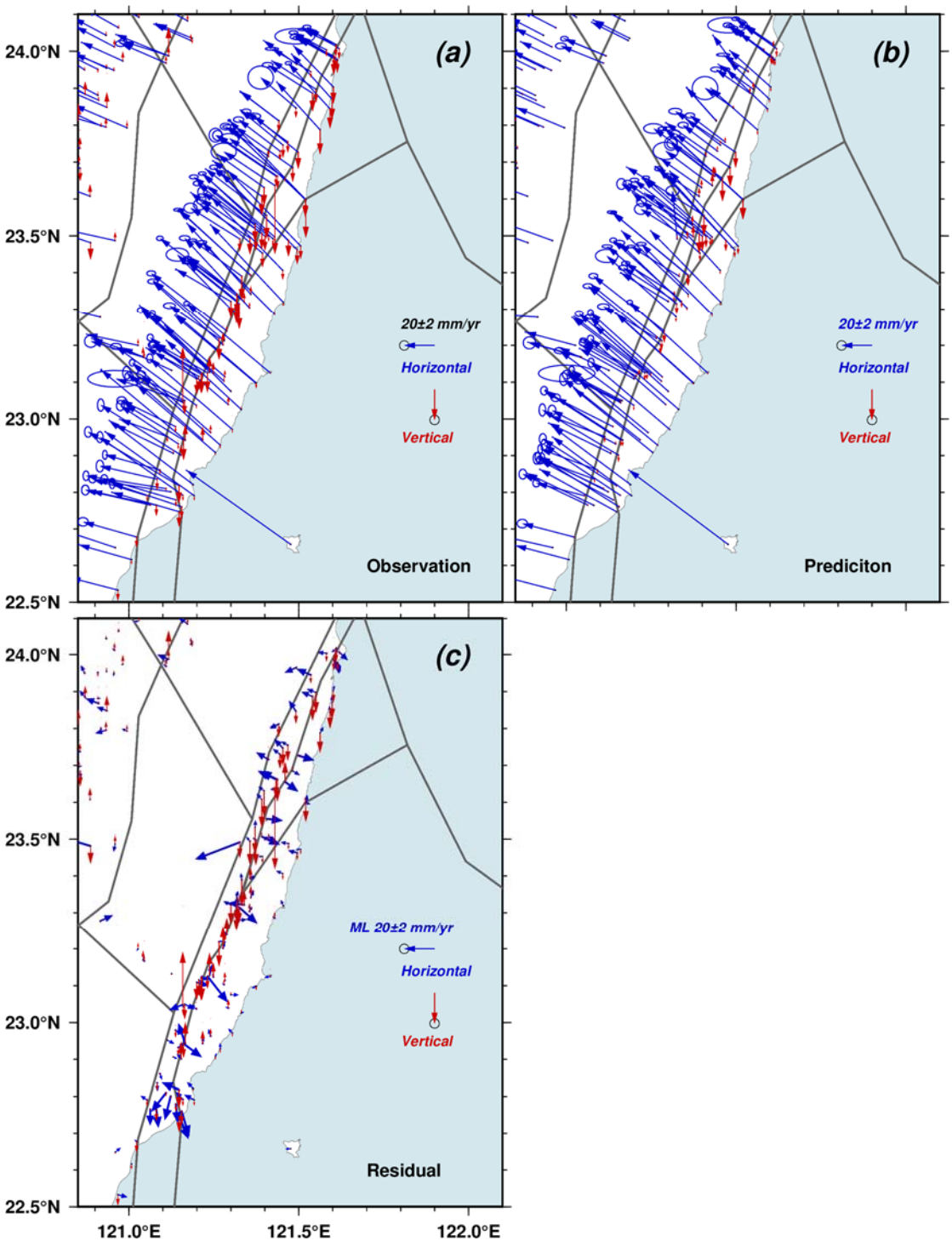


圖 4-3.4：(a) GPS 觀測速度場，藍色及紅色箭號各為水平及垂直速度場，黑線代表各斷層的地表位置。(b) 最佳塊體模型所預估的地表速度場。(c) 模型預估的殘差值，為觀測速度場扣除模型預估速度場之值。

Figure 4-3.4: Blue arrows show the horizontal components of the GPS velocity field. Black lines are the boundary of blocks. (a) Shows the observed GPS velocity. (b) The estimated GPS velocity. (c) The residual between our estimated GPS velocity and the observed GPS velocity.

表 4-3.2：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 4-3.2: The location of rotation poles, the angular velocities and the standard error of angular velocities of each block. Along with the maximum, minimum 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
SCEN	100.56	-52.44	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
NHSS	122.48	19.41	-0.3	0.1	70.8	36.4	32.2
CENT	84.02	-58.14	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
NCEN	135.29	37.84	-0.6	0.0	180	0.0	0.0
LVFD	129.59	34.30	-1.0	0.0	180	0.0	0.0
PHSP	91.60	-12.92	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
NCOR	174.82	43.31	-0.6	0.0	180	0.0	0.0

表 4-3.3：斷層之地質滑移速率約束值（Shyu et al., 2016）及平均滑移速率。
Table 4-3.3: The minimum, maximum value of geological fault slip rate and the longterm slip rate, deficit rate along with their standard error calculated 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
米崙	10.1	10.2	20.2	11.2	5.8	8.8
嶺頂	5.6	17.1	32.8	15.8	10.4	12.7
瑞穗	5.6	17.1	53.3	17.5	19.4	15.3
奇美	-	-	23.1	9.1	10.7	4.4
玉里	5.6	17.1	59.7	15.6	38.7	33.3
池上	5.6	17.1	34.5	14.1	8.1	11.5
利吉	5.6	17.1	20.9	10.0	3.9	8.1
鹿野	6.2	6.5	29.6	9.6	4.6	6.7

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

4-4-1 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，但是在基線應變模型中，則是直接利用斷層錯位模型反演地表速度梯度來推求斷層滑移虧損速率。斷層錯位模型是根據彈性錯動理論（Steketee，1958）所建立之斷層模型（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且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。沿著各斷層單元（fault patch/fault element）的斷層滑移量Δu_j（ξ_1，ξ_2，ξ_3）會使具有均向性的均質彈性體產生位移場u_i（x_1，x_2，x_3）（式 4-4.1）。

$$\boldsymbol{u_i = \frac{1}{F}\iint_{\sum} \Delta u_j[\lambda\delta_{jk}\frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu\left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j}\right)]\, v_k d\sum} \qquad \text{（式 4-4.1）}$$

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，δ_{jk}＝1，否則為 0；v_k為正交於地表單元（surface element）$d\sum$之餘弦函數方向。u_i和Δu_j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 4-4.1，亦即每一個斷層面單元（patch/element）上的斷層滑移量，會在任一地表單元產生對應之地表位移量；而任一地表單元之位移量，會等於所有斷層單元上滑移量作用在該地表單元位移量的總和。

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，在此重新定義各個參數之使用符號。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 4-4.1）。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 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($U_1^2 + U_2^2$)。

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梯度變化，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）。

$$e = \Delta L / L_0 \qquad \text{（式 4-4.2）}$$

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 G**s** = **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 4-4.3 之最小值來求得斷層滑移虧損率之最佳解。

$$\boldsymbol{F(s)} = \left\| \sum^{-\frac{1}{2}} (\mathrm{G}\boldsymbol{s} - \boldsymbol{d}) \right\|^2 \qquad \text{（式 4-4.3）}$$

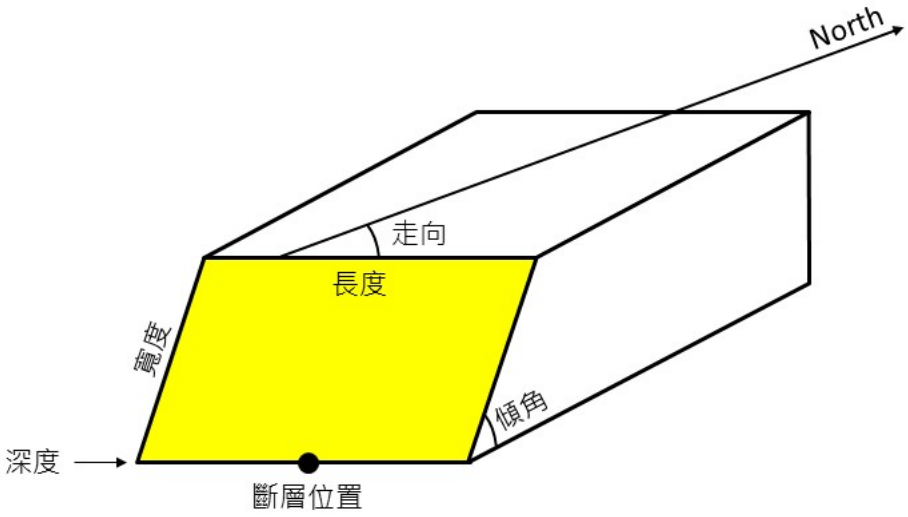


圖 4-4.1：斷層錯位模型之斷層幾何參數示意圖。黃色面為斷層面。斷層幾何參數包含：斷層位置（km）、深度（km）、長度（km）、寬度（km）、走向（°）、傾角（°）。

Figure 4-4.1: Geometry parameters of fault dislocation model. Fault geometry parameters include fault location (km), depth (km), length (km), width (km), strike (°) and dip (°).

4-4-2 斷層模擬結果

本期研究主要針對臺灣東部地區之活動斷層（米崙、嶺頂、瑞穗、奇美、玉里、池上、鹿野及利吉斷層）進行模型建置來推求斷層滑移虧損速率。模型使用的資料為臺灣 GPS 觀測網所評估之 2002－2019 年水平速度場（圖 4-4.2）。本計畫利用基線應變模型反演水平速度梯度，避開傳統塊體模型難以估算塊體運動量的困難，直接計算可以用來評估地震潛勢之斷層滑移虧損率平均值（表 4-4.1）。

為了獲得最佳之平滑參數（smoothing parameter），本計畫測試特定範圍的平滑參數值，根據取捨曲線（trade-off curve），當平滑參數為-1 時，所得到斷層滑移虧損速率分布為最佳模型，模型結果顯示不符值為 112.6 mm/yr （圖 4-4.3）。

東部之水平速度場指出此區域自北段花蓮至中段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北北西。

從滑移速率來看（圖 4-4.4、圖 4-4.5），嶺頂斷層和瑞穗斷層有較大的滑移虧損率累積。嶺頂斷層之平均滑移虧損速率值為 8.8 mm/yr，主要集中於斷層 3 公里處約有 25 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積。瑞穗斷層由東向西跨過兩側水平速度場明顯速度值從約 62 mm 降至 30 mm，瑞穗斷層之斷層平均滑移虧損速率值為 5.4 mm/yr，主要集中於斷層 3 ~ 9 公里處約有 20 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積。

橫跨利吉斷層至鹿野斷層之水平速度場，由 60 mm 減低至 40 mm，且有 15 度明顯的逆時針旋轉方向變化，利吉斷層為潛移斷層可能導致平均滑移虧損速率值相較鹿野斷層來的低，利吉斷層之平均滑移虧損速率值為 3.6 mm/yr，主要集中於斷層 3 ~ 6 公里處約有 8.0 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積，而鹿野斷層之平均滑移虧損速率值為 9.6 mm/yr。

池上斷層之平均滑移虧損速率值為 6.3 mm/yr，主要集中於斷層 3~6 公里處約有 8.0 mm/yr 的滑移虧損率於此處累積。奇美斷層週遭測站分佈稀疏，奇美斷層之平均滑移虧損速率值為 2.0 mm/yr。玉里斷層周遭測站分布較為稀疏，水平速度值約 30~35 mm，斷層滑移速率平均值為 2.4 mm/yr。

表 4-4.1：斷層平均滑移速率。
Table 4-4.1: Average slip deficit rates.

斷層名稱	平均走滑速率（s.s. mm/yr）	平均傾向滑移速率（d.s. mm/yr）	斷層平均滑移虧損速率（mm/yr）	標準差（mm/yr）
米崙斷層	2.4	3.8	4.7	2.8
嶺頂斷層	6.6	4.9	8.8	7.2
瑞穗斷層	3.8	3.3	5.4	3.8
奇美斷層	0.5	0.3	2.0	1.7
玉里斷層	1.2	0.0	1.2	2.4
池上斷層	2.7	3.9	6.3	3.6
鹿野斷層	7.1	6.3	9.6	1.7
利吉斷層	2.6	1.5	3.6	2.5

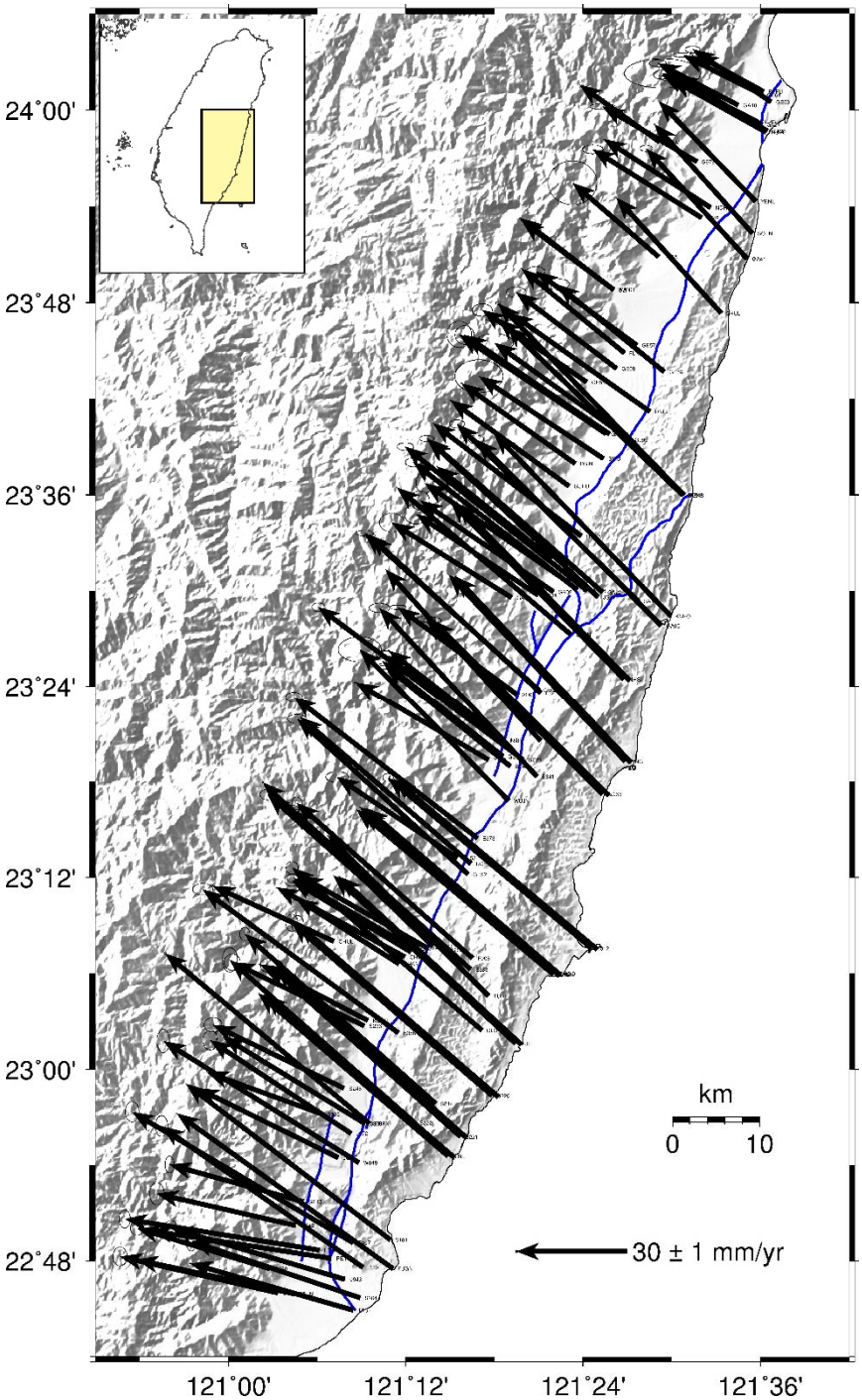


圖 4-4.2：臺灣東部地區相對於測站 S01R 之水平速度場。藍色線為中央地質調查所公告之活動斷層。

Figure 4-4.2: Horizontal GPS velocity of eastern Taiwan relative to S01R station. Blue lines indicate the CGS active faults.

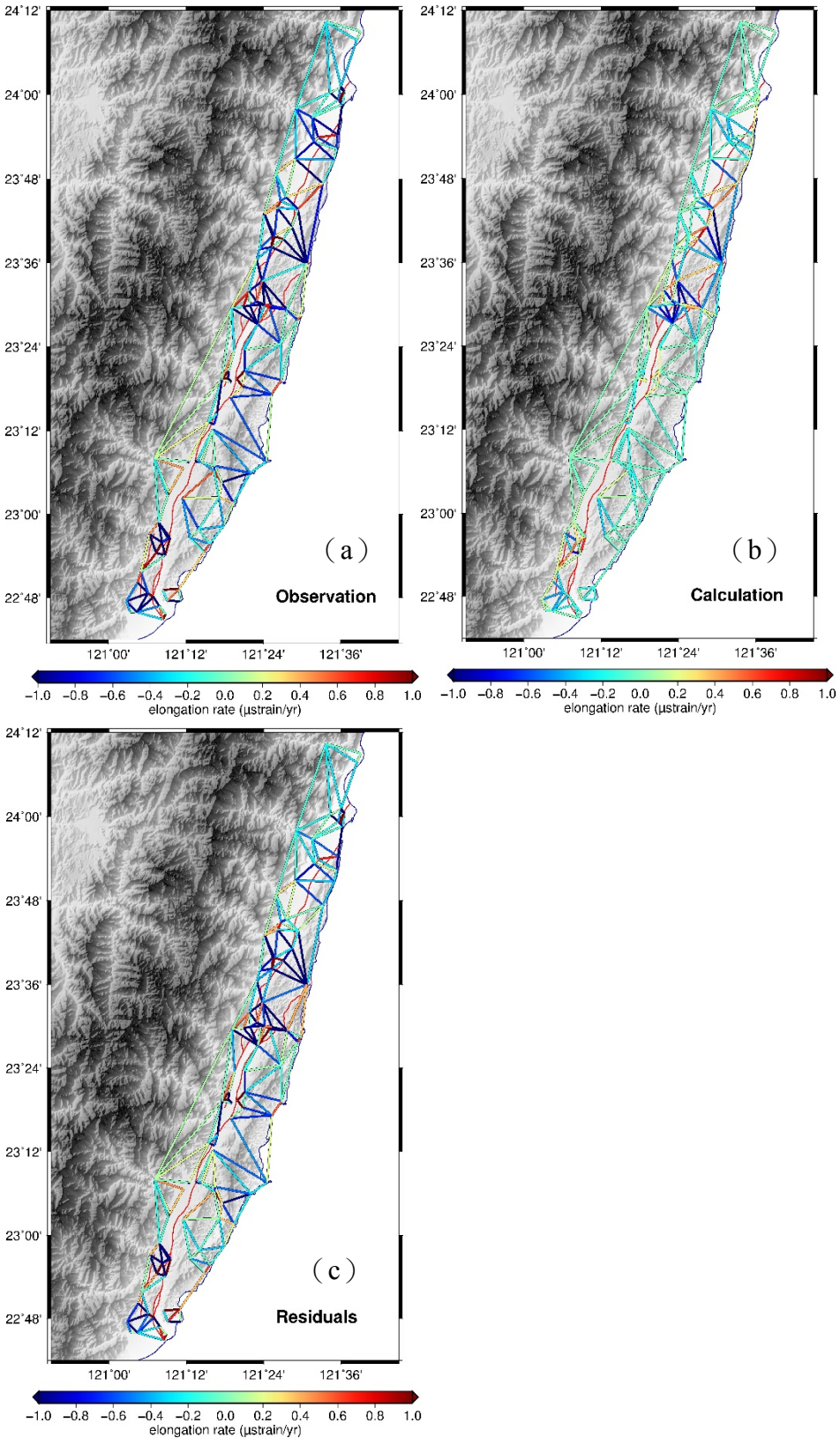


圖 4-4.3：使用 2002-2019 年水平速度場之模型觀測值、計算值與殘差值結果。(a) 水平速度場觀測值。(b) 水平速度場計算值。(c) 水平速度場殘差。

Figure 4-4.3: Comparison of observations and calculations. (a) Observed elongation rates；(b) Calculated elongation rates；(c) Residuals.

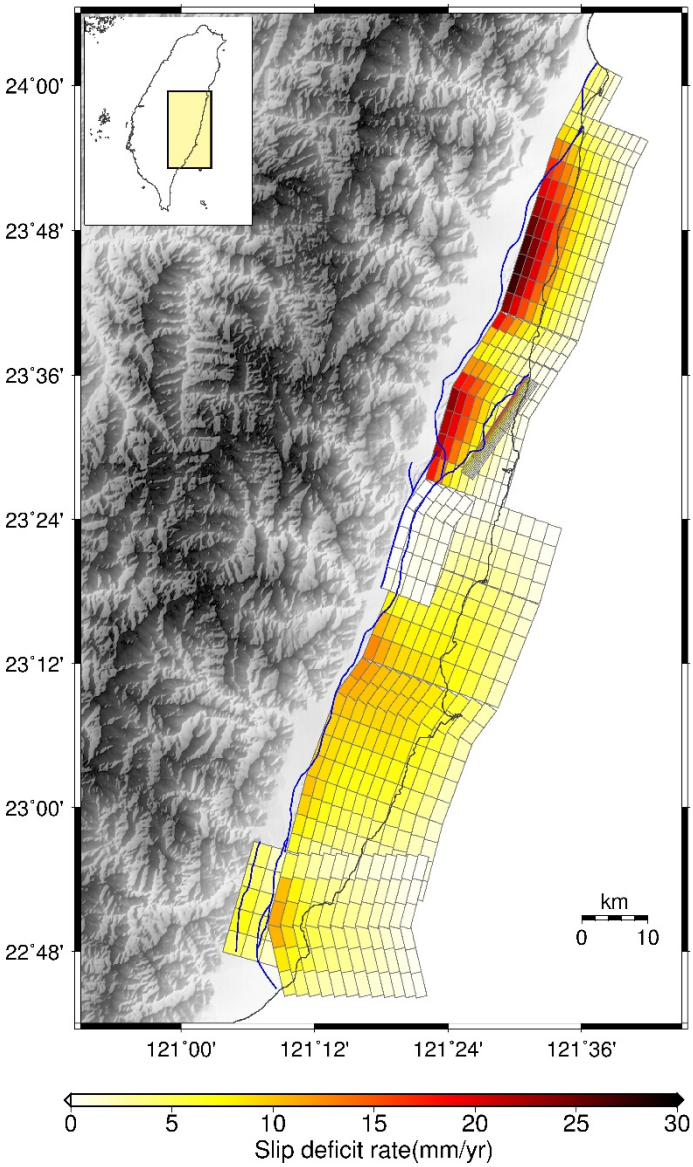


圖 4-4.4：使用 2002-2019 年水平速度場之東部地區斷層滑移虧損率分布圖。
Figure 4-4.4: Fault slip deficit rate distribution in eastern Taiwan using 2002-2019 horizontal velocity field.

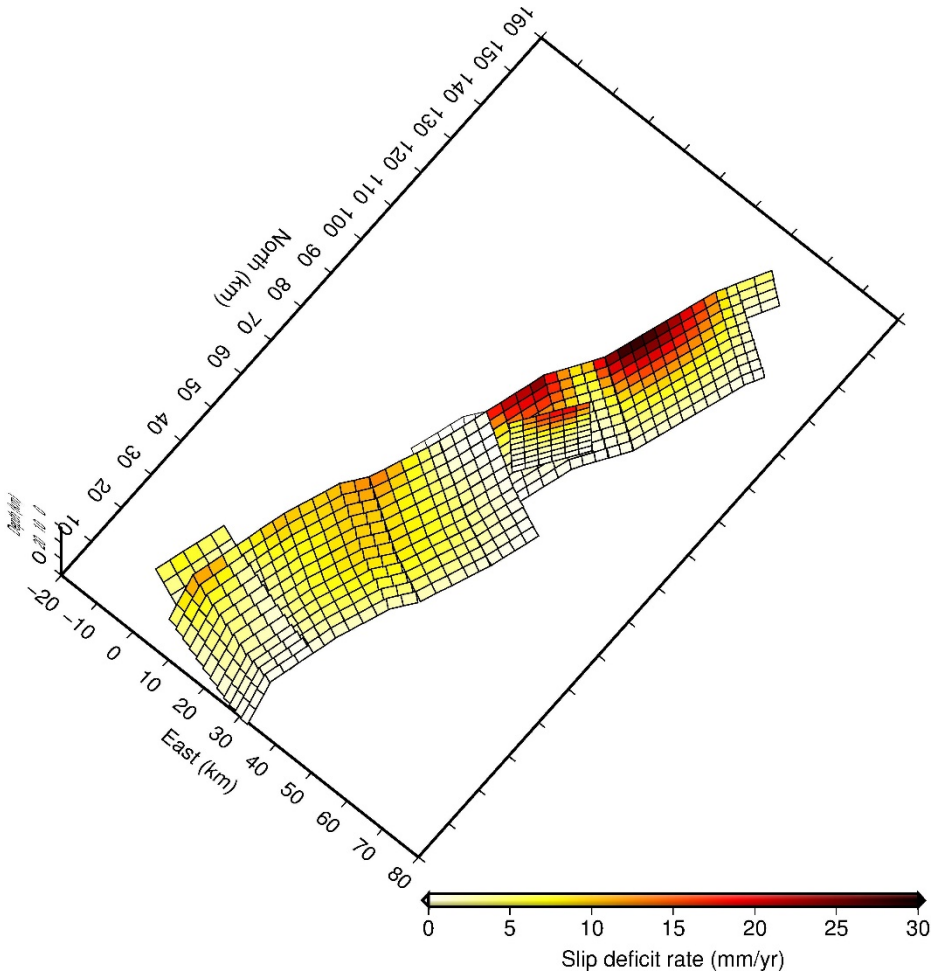


圖 4-4.5：使用 2002-2019 年水平速度場之東部地區斷層滑移虧損率分布圖。

Figure 4-4.5: Fault slip deficit rate distribution of eastern Taiwan using 2002-2019 horizontal velocity field.

4-5 東部地區之斷層滑移速率

今年度之計畫區域為臺灣東部地區，包含八條活動斷層，分別為：米崙斷層、嶺頂斷層、瑞穗斷層、奇美斷層、玉里斷層、池上斷層、鹿野斷層與利吉斷層。

今年東部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果，並依據三種模型結果之平均計算出加權平均滑移虧損速率（表 4-5.1、圖 4-5.1），上界為中值加 1 倍標準差，下界為中值減 1 倍標準差。計算結果顯示，米崙斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.9 mm/yr，嶺頂斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.7 mm/yr，瑞穗斷層之加權平均滑移虧損速率為 11.9 mm/yr，奇美斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.0 mm/yr，玉里斷層之加權平均滑移虧損速率為 15.4 mm/yr，池上斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.4 mm/yr，鹿野斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.9 mm/yr，利吉斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.2 mm/yr。

表 4-5.1：本計畫模型加權平均斷層滑移虧損率。

Table 4-5.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

			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）	
東部	米崙斷層	上界	10.3	14.6	7.5	10.8
		平均	10.2 ± 0.1	5.8 ± 8.8	4.7 ± 2.8	**6.9**
		下界	10.1	0.0	1.9	4.0
	嶺頂斷層	上界	10.8	23.1	16	16.6
		平均	9.8 ± 1.0	10.4 ± 12.7	8.8 ± 7.2	**9.7**
		下界	8.8	0.0	1.6	3.5
	瑞穗斷層	上界	12.1	34.7	9.2	18.7
		平均	10.9 ± 1.2	19.4 ± 15.3	5.4 ± 3.8	**11.9**
		下界	9.7	4.1	1.6	5.1
	奇美斷層	上界	12.7	15.1	3.7	10.5
		平均	11.2 ± 1.5	10.7 ± 4.4	2.0 ± 1.7	**8.0**
		下界	9.7	6.3	0.3	5.4
	玉里斷層	上界	6.8	72	3.6	27.5
		平均	6.2 ± 0.6	38.7 ± 33.3	1.2 ± 2.4	**15.4**
		下界	5.6	5.4	0.0	3.7
	池上斷層	上界	20.2	19.6	9.9	16.6
		平均	13.9 ± 6.3	8.1 ± 11.5	6.3 ± 3.6	**9.4**
		下界	7.6	0.0	2.7	3.4
	鹿野斷層	上界	6.4	11.3	11.3	9.7
		平均	6.4 ± 0.0	4.6 ± 6.7	9.6 ± 1.7	**6.9**
		下界	6.4	0.0	7.9	4.8
	利吉斷層	上界	12.1	12	6.1	10.1
		平均	11.0 ± 1.1	3.9 ± 8.1	3.6 ± 2.5	**6.2**
		下界	9.9	0.0	1.1	3.7

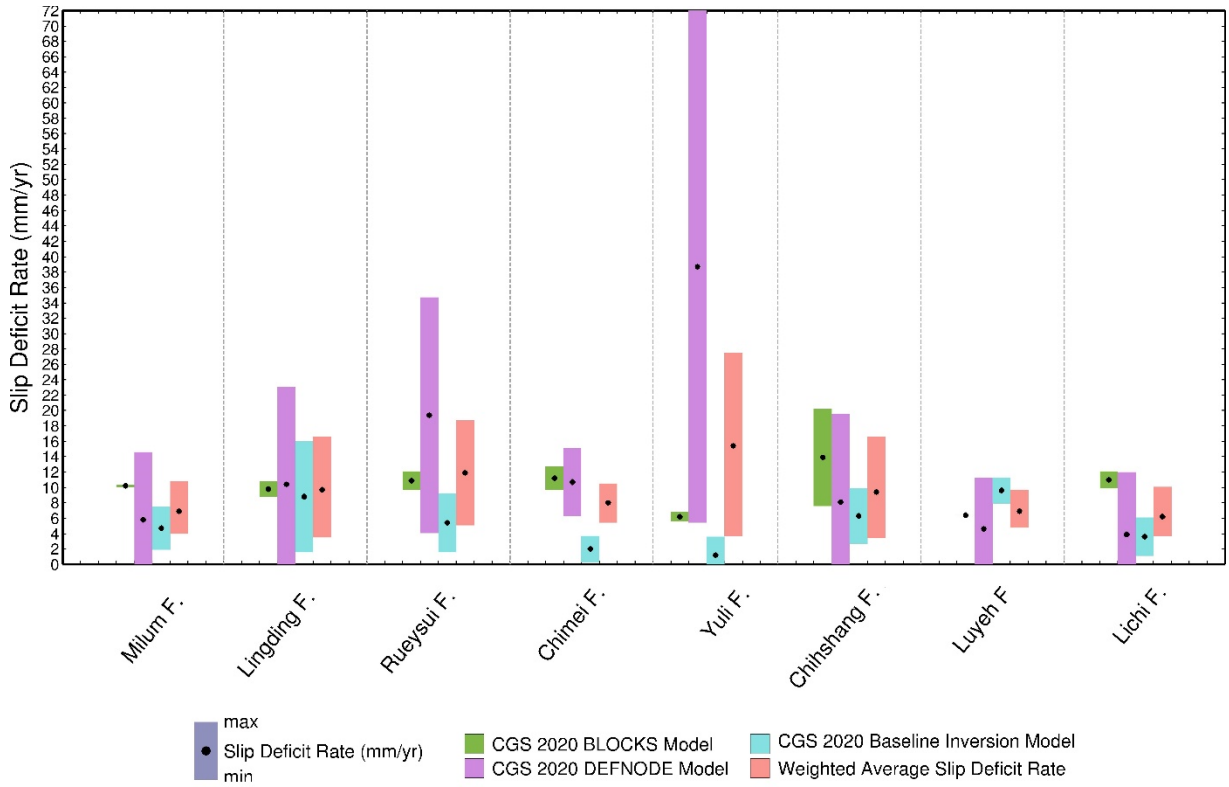


圖 4-5.1：本計畫 3 種模型之加權平均斷層滑移虧損率，對應表 4-5.1。

Figure 4-5.1: Weighted average slip deficit rate in this project.

第五章、陸地上規模大於 6 的地震事件分析成果

今年度截至目前尚未發生陸地上規模大於 6 級的地震，本團隊將提供本年度 2020 年 5 月 3 日臺灣東部長濱鄉外海處芮氏規模 5.9，臺灣本島各地最大震度達 4 級之地震事件之分析成果。

5-1 2020 年 5 月 3 日臺灣東部近海地震簡介

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）。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。

在 2020 年 5 月 3 日於臺灣東部長濱鄉外海處（23.23°N, 121.61°E）發生了芮氏規模 5.9（M_L 5.9；M_w 5.0）震源深度為 40.4 km 的地震。臺灣本島最大震度達 4 級（圖 5-1.1）。孕育本地震可能的斷層面為東北-西南走向，朝東南或西北傾的逆斷層（圖 5-1.2）。

本次地震的活動推測和縱谷斷層有著高度的相關。縱谷斷層是一個傾角向東的逆衝斷層，地表出露之斷層跡大致沿著海岸山脈的西緣山腳下與花東縱谷交接觸，從花蓮到臺東可以區分成幾個不同的斷層區塊，各自有不同滑移錯位的行為模式。Chen et al.（2007）利用歷史地震和地形表現的構造不連續，配合大地測量資料提出了四個分段，由北至南分別為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層和利吉斷層（圖 5-1.3）。此地震位於菲律賓海板塊和歐亞板塊碰撞邊界最底部，位於菲律賓海板塊地函的最上部，淺部對應到池上斷層，極可能和池上斷層在深部的活動相關（圖 5-1.4）。利用 1991－2005 全臺灣規模二以上的地震重新定位後（Wu et al., 2008），此區地震顯現向東傾沒的線性構造，這個線性構造延伸到地表，對應到池上斷層的最北段（圖 5-1.4）。池上斷層的錯動，可朔源至 1951 年的花蓮台東地震序列（Hsu, 1962; Yu, 1997; Shyu et al., 2007）（圖 5-1.5）。除了 1951 年花蓮台東地震序列外， 2003 年 12 月 10 日規模 6.5 的成功地震導致池上斷層破裂

（圖 5-1.5）。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）。

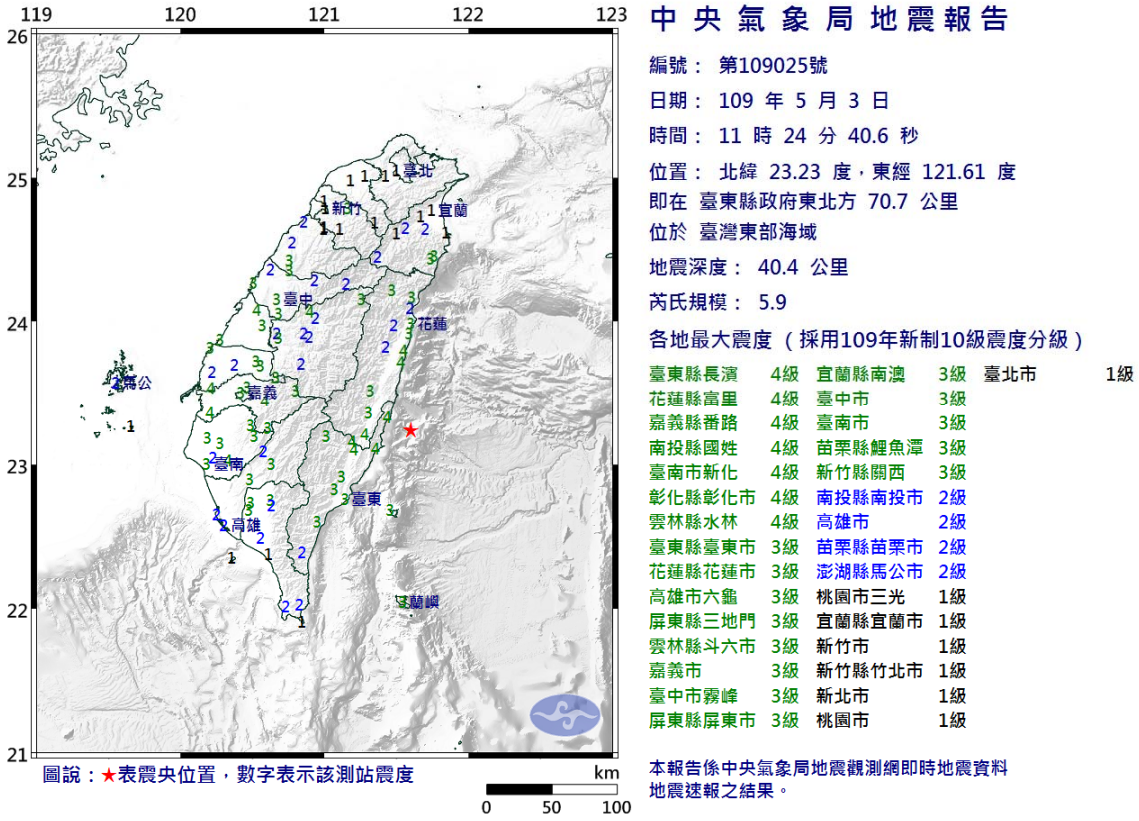


圖 5-1.1：中央氣象局 20200503 地震事件報告（http://www.cwb.gov.tw）。
Figure 5-1.1: 3th May 2020 Earthquake event report from CWB.

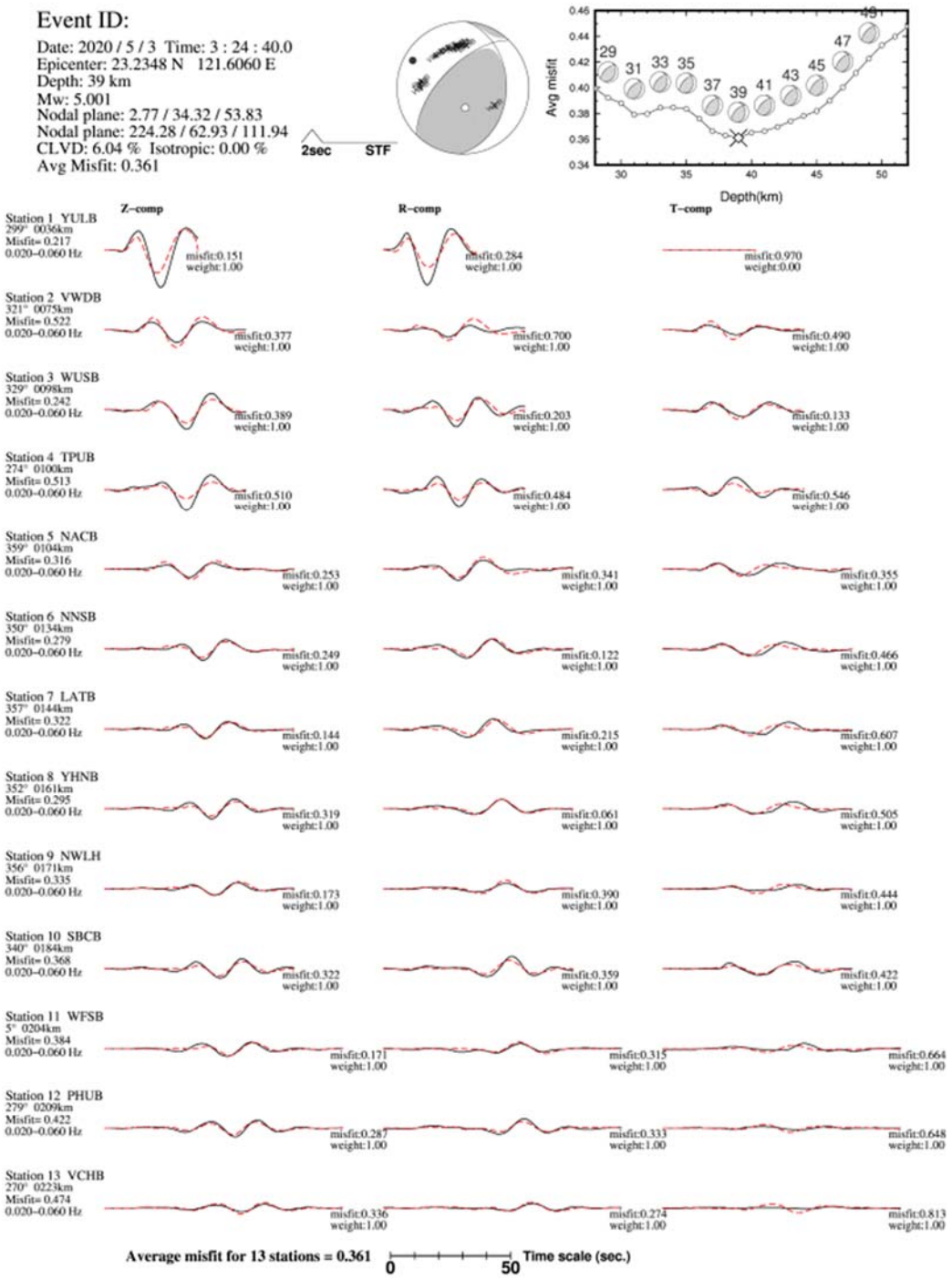


圖 5-1.2：20200503 地震事件之震源機制解與地震波反演之擬合結果（http://www.cwb.gov.tw）。
Figure 5-1.2: The focal mechanism and seismic wave inversion of 20200503 earthquake event.

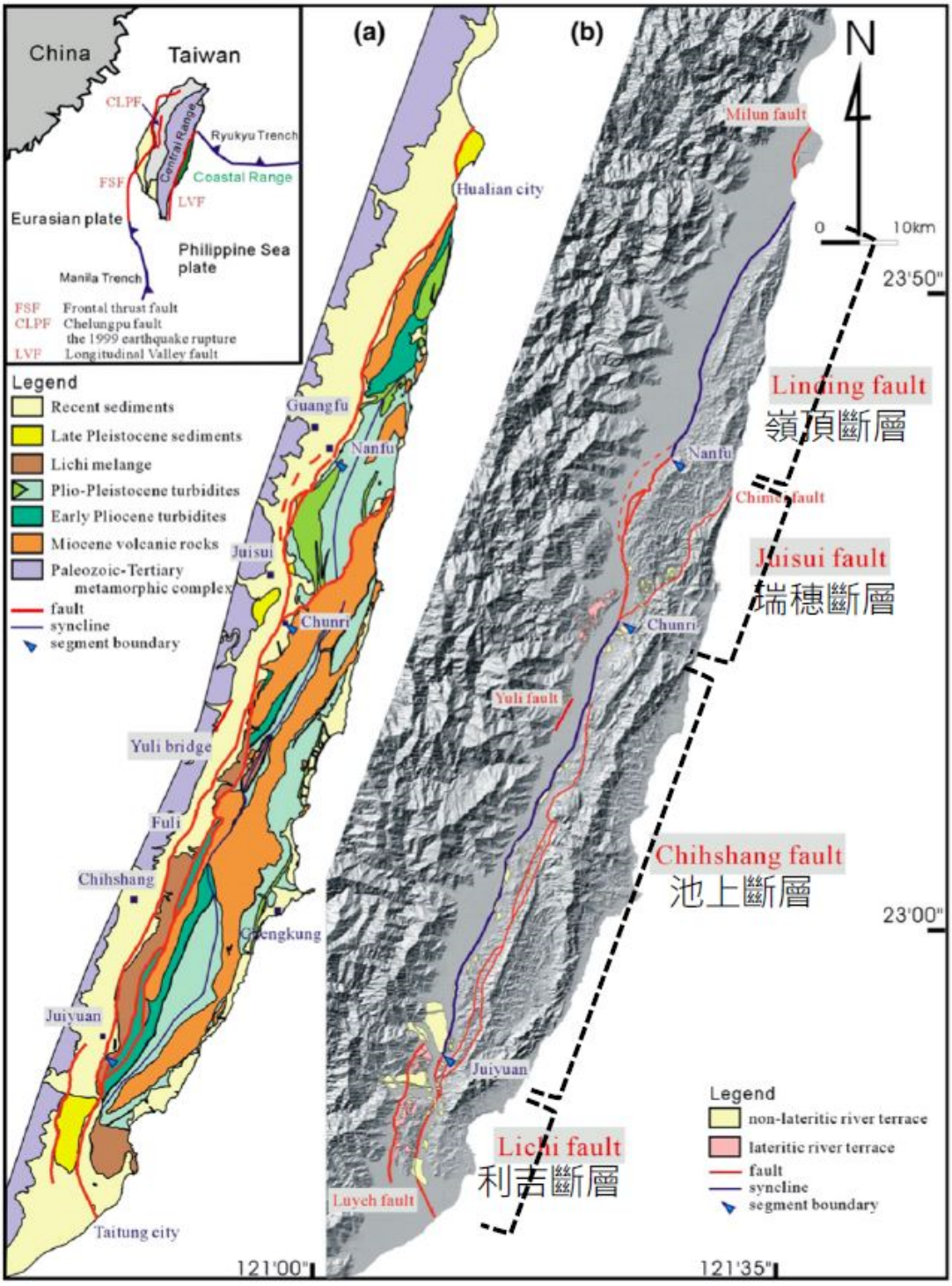


圖 5-1.3：縱谷斷層分段圖（Chen et al., 2007）。縱谷斷層由北至南分別為嶺頂斷層、瑞穗斷層、池上斷層和利吉斷層。

Figure 5-1.3: Segmentation of the Longitudinal Valley fault (Chen et al., 2007). The Longitudinal fault is divided into the Linding fault, Juisui fault, Chihshang fault, and tLichi fault.

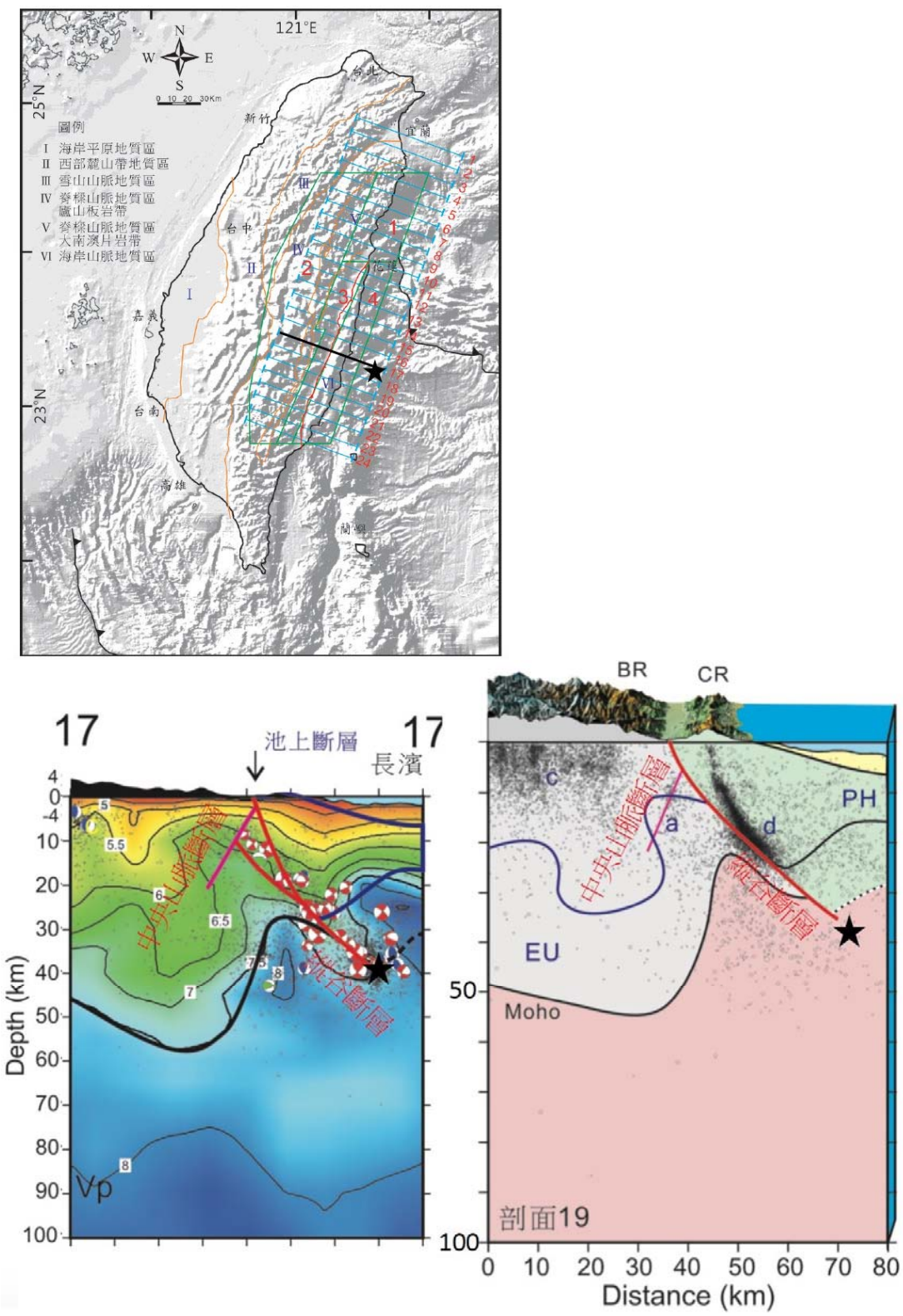


圖 5-1.4：池上斷層區域之地震構造（陳文山等，2018）。

Figure 5-1.4: Seismotectonics of the Chihshang fault area (陳文山等，2018).

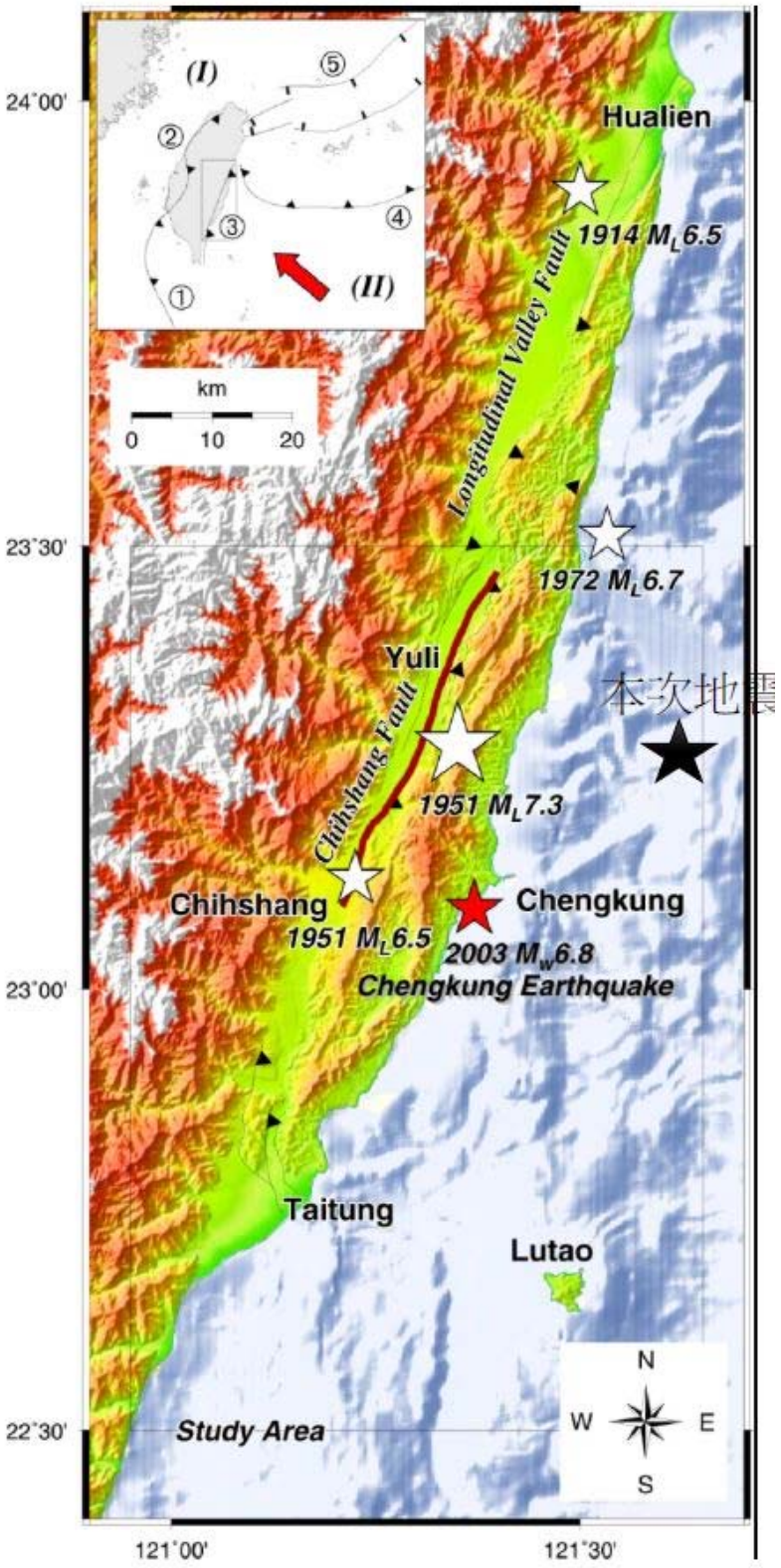


圖 5-1.5：本次地震（黑色星號）與池上斷層歷史地震之地理關係（Ching et al., 2007）。
Figure 5-1.5: Locations of this earthquake and other historical earthquakes related to the Chihshang fault (Ching et al., 2007).

第六章、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) 利用斷層模型反演地表速度場來推估斷層滑移虧損速率；(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 2020 年 09 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 4 月底為止，GPS 移動站部分共計完成 767 點 GPS 移動站的施測；精密水準則完成共計 23 條主線測線及 1 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 2020 年 10 月之干涉影像對，包括 1040 幅升軌干涉影像與 867 幅降軌干涉影像。由升軌及降軌結果顯示，除中央山脈多為高山植被所覆，大致上都能產生大範圍的干涉條紋。短時間基線的干涉對雖然有較好的相關性，但大氣、土壤含水量的改變與電離層之干擾所造成的相位變化，可能會影響這段時間構造活動所造成的相位資訊。已完成 Sentinel-1 干涉對進行永久散射點速度場計算，並結合升軌與降軌 LOS 速度場以獲得東西方向與垂直方向上的地表變形。時間序列分析方面，以 Sentinel-1 衛星為主要分析影像，Sentinel-1 衛星之時間序列與 GPS 時間序列有良好的關聯性，趨勢大致符合，米崙斷層附近的 PEPU 站也明顯地顯示了同震及震後的變形行為。

本計畫分別採用兩套軟體比較採用 Bernese 與 GAMIT/GLOBK 處理全台灣的 GPS 移動站資料分別解算的移動站每日解，所涵蓋的年份為 2002–2019 年，計算各移動站的水平、垂直速率估值，剔除不合理的移動站，例如：時間涵蓋長度有明顯差異者，共 664 個移動站進行比較與統計。整體而言，兩種軟體的結果相當類似，水平方向的相關係數達 0.99 以上，垂直方向相關係為 0.90，相關性

稍低於水平方向。且在垂直速度上 Gamit 解有稍微高估的情況。速度估值的差異在南北、東西、垂直三分量上平均分別為+1.28、+0.49、+2.29 mm/year，結果顯示兩種解算軟體的水平速度估值差值小於 2 mm/year，垂直方向差異稍大，達 2.29 mm/year。且三分量的速度估值的差異都為正，代表 Gamit 結果稍微高於 Bernese 結果。造成此速度差值的原因之一是殘餘的系統誤差，雖然都有提供若干選項，但同時也在內部有許多處理方法沒有開放給使用者調整，導致不同軟體的解算結果存在少量的系統性。然而因數量級不大，對於後續的逆推影響並不顯著。本計畫利用 BLOCKS、DEFNODE 與 Baseline Inversion Model 反演水平速度場和垂直速度場，推求臺灣東部地區活動斷層之斷層滑移虧損率。今年東部地區依據各模型所得到的斷層滑移虧損結果依據三種模型結果之平均計算出加權平均滑移虧損速率。計算結果顯示，米崙斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.9 mm/yr，嶺頂斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.7 mm/yr，瑞穗斷層之加權平均滑移虧損速率為 11.9 mm/yr，奇美斷層之加權平均滑移虧損速率為 8.0 mm/yr，玉里斷層之加權平均滑移虧損速率為 15.4 mm/yr，池上斷層之加權平均滑移虧損速率為 9.4 mm/yr，鹿野斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.9 mm/yr，利吉斷層之加權平均滑移虧損速率為 6.2 mm/yr。臺灣東部的斷層滑移虧損速率的估算值有很大的不確定性。

Chapter 6: 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 2020. The periodic effects and postseismic deformation were also condidered. Besides, geodetic data from 767 campaign-mode GPS stations and 29 precise leveling routes and 1 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 from April 2015 to October 2020 were processed. The interference results include 1040 ascending interferogram images and 867 descending interferogram images. 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. Although the short-term baseline interference has good coherence, the phase change caused by water vapor in the atmosphere, soil water content and the ionospheric disturbance may interfere with the phase change signal caused by tectonic activities. The PS-InSAR velocity field has been performed by the Sentinel-1 interference pair calculation. Combining ascending and descending LOS velocity fields can obtain surface deformation in east-west and vertical directions. In terms of time series analysis, the Sentinel-1 satellite is the main analysis image. The time series of the Sentinel-1 satellite has a good correlation with the GPS time series, and the trend is roughly consistent. The PEPU station near the Milun fault also clearly shows co-seismic deformation behavior.

The horizontal and vertical velocity fields from 2002 to 2019 was inverted by the BLOCKS, the DEFNODE and the baseline inversion models for estimating slip deficit rate on each active fault in eastern Taiwan. The results show that the weighted average slip deficit rate of Milum fault is 6.9 mm/yr; Lingding fault is 9.7 mm/yr, Ruey fault is 11.9 mm/yr; Chimei fault is 8.0 mm/yr; Yuli fault is 15.4 mm/yr; Chihshang fault is 9.4 mm/yr; Luyeh fault is 6.9 mm/yr and Lichi fault is 6.2 mm/yr. The uncertainties of slip deficit rates in eastern Taiwan is relatively high.

參考文獻

李建成、朱傚祖、安朔葉、胡植慶（2004）台灣東部縱谷斷層的快速潛移特性及地質災害。2004年台灣活動斷層與地震災害研討會摘要，國立成功大學，11-18 頁。

紀權宥（2006）南段花東縱谷之新期構造研究-利吉斷層與鹿野斷層的活動特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文。共 84 頁。

姜彥麟（2007）花東縱谷斷層南段地表變形及斷層運動學分析。國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文，共 131 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、林益正、顏一勤、楊志成、紀權宥、黃能偉、林啟文、林偉雄、侯進雄、劉彥求、林燕慧、石同生（2008）從古地震研究與 GPS 資料探討縱谷斷層的分段意義。經濟部中央地質調查所特刊，第二十號，第 165-191 頁。

陳文山、吳逸民、葉柏逸、賴奕修、柯明淳、柯孝勳、林義凱（2018）,臺灣東部碰撞帶孕震構造,經濟部中央地質調查所特刊,第三十三號，第 123-155 頁.

陳俊甫（2013）台灣東部縱谷北端區域的地震構造特性。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 112 頁。

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。

鄭凱謙、陳江鑫、朱郁婷、景國恩、陳建良，2019，臺灣中部 GPS 移動站時間序列速度場。

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.

Altamimi, Zuheir, Paul Rebischung, Laurent Métivier, and Xavier Collilieux. 2016. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 121 (8): 6109–31. doi:10.1002/2016JB013098.

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.

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

Bomford, G. (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.

Blewitt, G. (2015) GPS and Space-Based Geodetic Methods. In Treatise on Geophysics, edited by Gerald Schubert, 2nd Edition, 3:307–38. Oxford: Elsevier. doi:10.1016/B978-0-444-53802-4.00060-9.

Cheng, L.W., J.C. Lee, J.C. Hu, and H.Y. Chen (2009) Coseismic and postseismic slip distribution of the 2003 Mw=6.5 Chengkung Earthquake in eastern Taiwan: elastic modeling from inversion of GPS data. Tectonophysics, 466, 335-343.

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., Rau, R. J., and Zeng, Y. (2007), Coseismic source model of the 2003 Mw 6.8 Chengkung earthquake, Taiwan, determined from GPS measurements, J. Geophys. Res., 112, B06422, doi:10.1029/2006JB004439.

Ching, K. E., Hsieh, M. L., Johnson, K. M., Chen, K. H., Rau, R. J., & Yang, M. (2011a). Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 116(B8).

Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Hu, and J.-C. Lee (2011b) Present-day kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995-2005, J. Geophys. Res., 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.

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.

Chen, W. S., Yen, I. C., Fengler, K. P., Rubin, C. M., Yang, C. C., Yang, H. C., ... Lin, Y. H. (2007). Late Holocene paleoearthquake activity in the middle part of the Longitudinal Valley fault, eastern Taiwan. Earth and Planetary Science Letters, 264(3–4), 420–437.

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

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.

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.

Hsu, T.L. 1962. Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China 1, 95-102

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.

Huang, H.H., Wu, Y.M., Song, X.D., Chang, C.H., Lee, S.J., Chang, T.M., Hsieh, H.H. (2014) Joint Vp and Vs tomography of Taiwan: Implications for subduction-collision orogeny. Earth Planet. Sci. Lett. 392, 177-191https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.026.

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.

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.

KuoChen, H., Francis T. Wu, Steven W. Roecker (2012) Three-dimensional P velocity structures of the lithosphere beneath Taiwan from the analysis of TAIGER and related seismic data sets. JGR, 117, B06306.

Lallemand, S., Theunissen, T., Schnürle, P., Lee, C. S., Liu, C. S., & Font, Y. (2013). Indentation of the Philippine Sea plate by the Eurasia plate in Taiwan: Details from recent marine seismological experiments. Tectonophysics, 594, 60-79.

Lin, S. C., & Kuo, B. Y. (2016). Dynamics of the opposite-verging subduction zones in the Taiwan region: Insights from numerical models. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(3), 2174-2192.

Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, F. S. Jeng, and R. J. Rau (2003) Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998–2001, J. Geophys. Res., 108(B11), 2528.

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.

Meade, B.J. and J.P. Loveless (2009), Block modeling with multiple fault network geometries and a linear elastic coupling estimator in spherical coordinates, Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6).

Nikolaidis, R. (2002) Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. dissertation, Univ. of Calif., San Diego, La Jolla.

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

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.
Saastamoinen, I.I. (1973) Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bull. Geodesique, 107, 13-34.
Shyu, J. B. H., Sieh, K., Avouac, J.P., Chen, W.S. (2006) Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 111, B08403.
Shyu, J. B. H., L. H. Chung, Y. G. Chen, J. C. Lee, K. Sieh (2007) Re-evaluation of the surface ruptures of the November 1951 earthquake series in eastern Taiwan, and its neotectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 31 (3). pp. 317-331.
Shyu, J. B. H., Chuang, Y. R., Chen, Y. L., Lee, Y. R. & Cheng, C. T. (2016), A New On-Land Seismogenic Structure Source Database from the Taiwan Earthquake Model (TEM) Project for Seismic Hazard Analysis of Taiwan, Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 27(3).
Steketee, J. A. (1958). On Volterra's dislocation in a semi-infinite elastic medium, Can. J. Phys. 36, 192-205.
Teng, L. S., Lee, C. T., Tsai, Y. B., & Hsiao, L. Y. (2000). Slab breakoff as a mechanism for flipping of subduction polarity in Taiwan. Geology, 28(2), 155-158.
Tung, H., Chen, H. Y., Hsu, Y. J., Hu, J. C., Chang, Y. H., & Kuo, Y. T. (2019). Triggered slip on multifaults after the 2018 Mw 6.4 Hualien earthquake by continuous GPS and InSAR measurements. Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 30(3), 1-16.
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, Yih-Min, Yue-Gau Chen, Chien-Hsin Chang, Ling-Ho Chung, Ta-Liang Teng, Francis T. Wu, and Chien-Fu Wu (2006) Seismogenic structure in a tectonic suture zone: With new constraints from 2006 Mw6.1 Taitung earthquake. Geophys. Res. Lett., Vol.33, L22305.
Wu, Y.M., Chang, C.H., Zhao, L., Teng, T.L., Nakamura, M., 2008. A comprehensive relocation of earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005. Bull. Seismol. Soc. Am. 98, 1471–1481.
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.
Ward, S. N. （1998） On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophysical Journal International, 135（3）, 1011-1018.
Wen, S., Y.-Y. Wen, K.-E. Ching, Y.-L. Yeh, and Y.-H. Lee (2019) Tectonic implications on the 2018 Hualien Earthquake. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 30, 389-398, doi: 10.3319/ TAO.2019.01.28.01.
Yang, Y. H., Hu, J. C., Tung, H., Tsai, M. C., Chen, Q., Xu, Q., ... & Wang, J. Y. (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(9), 1372.
Yu, S.B., Chen, H.Y., and Kuo, L.C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. Tectonophysics 274, 41-59.
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.

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. 請列出PS-InSAR的執行步驟與使用程式，建議採行科學報告「methodology」方式。	感謝委員建議，已將內容列入附錄4。
2. 請列出可能的wet delay，以及預計解決方式。	颱風與豪雨等厚重水氣將導致該幅干涉影像受到 wet deday 影響。 其中一種方式是移除該干涉對，或者藉由大量的干涉影像降低少數受到 wet deday 影像的相位變化，以減少長時間速度場計算的誤差。 另外，由於導致 wet delay 的氣候效應的範圍較大，有機會藉由一次或二次多項式的擬合來移除可能影響的效應。
3. 請列出可能含ionosphereeffect的影像與預計解決方式。	電離層對於雷達波有一定的影響，對於 L 波段的雷達波會比較明顯，而對 C 波段的雷達波影響較小，主要的影像相位的變化。目前使用的軟體 ISCE 有包括電離層影像效應個估算與移除。
4. 包含ERS、ENVISAT、ALOS、SIA/B的LOS變形與GPS投影至LOS之變形均明顯不同，請說明。	針對波長較短的 C 波段影像，由於東部地區除縱谷外多為植被旺盛的山區，因此許多散射點提供的訊息可能為多次反射或散射的結果，並非真實地表變形，但整體而言還是能在縱谷斷層兩側看出明顯的差異與變形模式。未來將再針對誤差較大的散射點進行剃除，以避免誤判。 針對長波長的 L 波段，其容易受到大氣效應影響，可能藉由二次多項式或是其他大氣資料的擬合來移除可能影響的效應會是較好的處理方式。
5. 時間序列應定義「GPS週遭」的大小，與ps點數，以及顯示標準差。	範圍 500 公尺內的資料點。將會在時間序列的比對上顯示標準差。

期中審查意見	處理情形
6. 圖1-4.1所顯示之南臺灣，潮州斷層上盤之水平速度場變化和圖1-4.2之垂直速度不甚一致，請說明。	由於跨越潮州斷層之速度場並無顯著差異，因此潮州斷層上盤之水平與垂直速度場可能並非反映潮州斷層的活動性。
7. 圖2-4.5和2-4.6恆春半島自2002-2020之間的水平和垂直速度場之區域變化圖，變化相當顯著，請說明。	恆春觀測資料在2017年後鵝鑾鼻附近的測站，出現較大的跳動，當初並無特別進行處理，導致數據錯誤，本次報告已更新
8. InSAR與GPS觀測資料之間相關性為何，及其差異性為何？	InSAR時間序列是透過約6天以上周期的每一對干涉影像的相位差異，進行回推來得知每個時間點的相對相位(相對於第一幅影像)，以得到在視衛星方向的變形量，但每一幅干涉影像的相位回復之正確性、點位的同調性與長時間的大氣情況、地形資料正確等都會影響最後利用InSAR得到時間序列的正確性。而GPS與InSAR同樣都是利用雷達波，也都會受到大氣或電離層的干擾，但GPS在監測時間密度上會高於InSAR，並且GPS可以得到單點時間密度相當高，包括東西、南北與垂直的變形量，但InSAR雖然可以得到大範圍的變形量，可是基本上變形量是指視衛星方向的變形，沒辦法反應真正的變形。而且由於SAR衛星飛行的軌跡接近南北向，而南北向的地表變形在衛星的相位上變化不明顯，因此不容易利用InSAR偵測出來。
9. P.24-27 GPS連續站時間序列分析建議加入某些具代表性的測站時間序列圖，例如具有穩定速度的測站、跳階位移的測站或具加速度的測站等，凸顯GPS連續站觀測結果的細膩性。此章節亦缺應變結果。	感謝委員建議，已新增具代表性的測站時間序列圖。此外，應變計算並非本年度之工作項目。
10. P.35-58各區精密水準測線分析在闡述個水準測線提到相關位置、地名，	水準分析的剖面圖中，已增加通過之斷層的相對位置及名稱。另連續

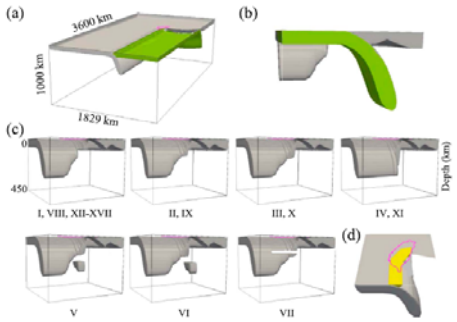
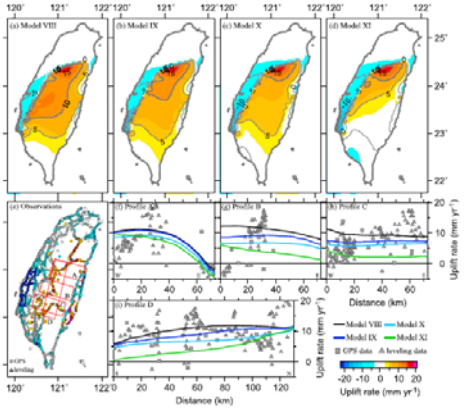
期中審查意見	處理情形
請於剖面圖中標示相對位置，讓閱讀者快速比對；水準點位與連續站之時間序列比較，GPS連續站時間序列應更新解算繪圖至2020年4月；各水準測線的橫軸走向標示，例如p.58圖上標示為N75。W，建議改為N105。E來表示較佳。	站的時間序列也有更新至水準測量觀測時段時的資料
11. P.59-65 GPS監測網建議改稱GPS觀測網。	感謝委員建議，已修正。
12. P.66-69 Bernese與GAMIT/GLOBK解算差異分析請加強說明，比較之後本報告書採用那種方法呈現？若僅使用於GPS移動站，是否會造成GPS連續站的解算基礎與結果出現系統性的差異？	由於兩個軟體的速度解算成果相當一致，因此採用兩者之一皆可行。在本計畫中，最後是採用 Bernese 的結果。此外，在進行速度場的計算後，本計畫也會將移動站和連續站之時間序列進行比對，所以不會有顯著之系統性差異。
（二）斷層模型反演評估	
1. 請確定是否三種斷層模型所使用的參數都相同，P.113和P.127的斷層參數表有些微差異。	感謝委員建議，已修正。
2. 圖4-3.3(P.132)中的說明和圖不吻合。另外，跨過LVF的縮短量應該小於35mm/yr，但是斷層長期的滑移速率可高達50mm/yr？請在確認。	在塊體模型中，由於測站分布之不均勻，導致斷層長期滑移速率的估算有可能會出現偏差。此外，雖然跨斷層之縮短量為 35 mm/yr，然而，斷層淺部會因為鎖定，所以導致斷層深部之滑移速率較跨斷層之縮短量來的高。
3. 縱谷西緣的斷層和東緣的斷層，距離很近，不同的斷層模型是否真的可以得到合理的估算斷層滑移速率？是否可以進行checkerboard test評估結果的可靠性？	由於縱谷西緣和東緣的斷層距離很近，不同的斷層模型確實不容易得到合理的斷層滑移速率。此結果也反映在三個模型所獲得之斷層滑移速率差異較大上面。
4. 跨過不同斷層，總滑移量(long-term slip rate)是否大致相同？	由於縱谷西緣和東緣的斷層距離很近，不同的斷層模型確實不容易得到合理的長期斷層滑移速率，所以在長期總滑移量的估算上，還是略有差異。
5. 圖4-4.4(P.142)鹿野斷層東側的	由於展示圖是以2D圖的方式呈現，

期中審查意見	處理情形
LVF，滑移速率高達30-40mm/yr，GNSS觀察到的速度變化，全然由斷層活動造成的嗎？還是其他地表過程造成的效應？	所以鹿野斷層被利吉斷層所覆蓋遮蔽，此部份的圖示呈現方式會在思考如何改進以免誤導。
6. P.144，請說明如何計算加權平均滑移速率？	感謝委員建議，內文已補上說明。
7. P.145，請說明為何BLOCKS Model得到的平均滑移速率總是高於其他模型計算的結果？	由於BLOCKS預設是斷層面完全鎖定而用以評估，故速度場之速度遞減量完全反映於斷層面鎖定影響，故其推估之斷層錯動時滑移量應較為大。
8. 建議各斷層幾何型態必須依據地球物理資料加以評估。	感謝委員建議，各斷層幾何型態有依據地球物理資料加以評估。
9. P.140 GPS連續站、GPS移動站的水平速度場圖請改變箭頭粗細及比例，方便閱讀，可參考PS-InSAR部分的圖片表示方式。	感謝委員建議，已修正。
（三）陸地上規模大於6的地震事件	
1. Chap5(P.147)2020/05/03EQ震央深度40KM，不一定和池上斷層有關，請納入參考	是的，此地震確實過深，不一定和池上斷層有關。故本文修改為：本次地震的活動推測和縱谷斷層可能有關係，但仍需後續研究釐清。
（四）報告書內容及其他建議事項	
1. Profile(速度)應標明年份，例如p.88,89…等。	感謝委員建議，已修正。
2. 部分圖說和圖中所呈現的字樣不一致，如：1-4.9、2-3.5、2-3.9、2-3.12、2-3.15、2-3.19、2-3.22、2-3.25、4-2.2、4-2.3、4-3.3、4-4.4、4-4.5等。	感謝委員建議，已修正。
3. 第四章文內有些所提之表編號和實際之表編號不一致，請改正。	感謝委員建議，已修正。
4. 請再評估玉里斷層納入分析的必要性。	感謝委員建議，已將玉里斷層納入不評估斷層。

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. 報告書第34頁，GPS移動站檢核建議也在相對應章節討論精密水準測量的檢核結果。	感謝委員建議，已將內容列入附錄11。
2. 報告書缺少東部水準測線編號38、39、40、41的水準高程變化圖，但簡報中有東部的水準測量成果，請將水準測量成果及水準高程變化圖補充於報告書中。	感謝委員建議，已修正。
3. 請說明水準測量高程變化圖中，藍色與紅色折線代表意義為何？是否為GPS水平南北與東西方向的變動？	感謝委員建議，藍色與紅色折線代表每兩年高程變化曲線，與GPS水平方向的變動無關。
4. 有關GPS和水準點時間序列之比較，是否採用共有時間的觀測點來當參考點？或是平移整個時間序列，找到最小的差值？	本計畫在進行GPS和水準時間序列比較時，僅針對共有時間的觀測資料下去做約制。
5. GPS和時間序列的比較圖(例如 圖2-3.5)，左右二側的圖比例尺宜一致。另外，目前報告的成果是展現每年的高程變化，但很多水準測線觀測的高程變化在沒有地震的影響之下，每年的觀測結果差異甚大，例如圖2-3.5、圖2-3.10 、圖2-3.14…等，為瞭解差異的成因是否為人為活動干擾，建議畫出每個水準點的時間序列，看是否為局部的垂直位移變化，還是可能與構造活動相關。	感謝委員建議，比例尺問題已修正。此外，每一個水準點皆有對應的坐標時間序列，可詳見於附錄。由時間序列的趨勢來看，這些點位的長期運動速率是合理的，換言之，這些短期的變化推測是合理的，只是過去我們並沒有這樣高精度的高程成果可以觀察到。目前推測這些變化差異大的區域，除了和人為活動干擾有關外，也可能和當地的地質條件有關，具體可能的原因需要進一步去驗證。
6. 圖2-3.32在彰化斷層東側的抬昇速度2013年後可達20 mm/yr，此速率甚高和前幾年的觀測結果也有所差異成因為何？	感謝委員建議，此次約制條件改以連續站VR03為主體，但從約制站&連續站對照圖即可了解兩站趨勢並不相符，雖然該站在距離上較以往以GS26站來的更近，但還是以往的結果較優，目前相關內容及附錄等資料已改回以往約制條件，此問題已不存在。

期末審查意見	處理情形
7. 由佳冬至七佳的測線可以發現高程的季節性變化可達50 mm，如果每年水準測量施測的時間不同，很難修正季節項對水準測量的影響，建議逐年觀測的月份，不要差太多。	一直以來佳冬至七佳測線的施測時間皆在每年九月，因此這個結果反映即便在同一個月份也可能有很大的變化。
8. 報告書第107頁，美濃地震對高屏地區的速度場也有顯著影響，速度場可以2002-2010、2010-2016、2016-2020為區分的年份嗎？	感謝委員建議，已更新。
9. 報告書第108頁，恆春地區垂直速度場的變化甚大，宜探討其可能原因，主要和活動斷層相關，或者和泥基背斜、泥貫入體相關？	感謝委員建議，雖然目前研究指出恆春半島速度場的差異是源自於恆春斷層活動所造成的，但是在本報告中，主要是闡述地表變形速率的時空變化形態。
10. 圖2-3.14某些年度的高程變化剖面已超過圖面可顯示範圍，請予以調整高程變化區間並檢視其他水準測線是否需要修正。	感謝委員建議，目前圖 2-3.14 已更正，另圖 2-3.18 亦已修正。
11. 圖2-4.1測站分布圖顯得多餘，若要提供與圖2-4.2不同資訊，建議於圖中加入測站編號、斷層名稱或重要地名，其他地區也請一併修正。	感謝委員建議，已修正內文撰寫方式。
12. InSAR速度場與GPS速度場(四種不同衛星)數值差異還是相當大，請補充說明兩者的差異，建議列出InSAR與GPS的Scatter plot。	感謝委員建議，已補充說明於章節3-4。
13. 所有InSAR衛星影像應劃出與GPS相關性。	感謝委員建議，已補充。
14. 請補充說明，InSAR(S-1)分解為EW、UD方向的方法，以及資料是否平滑性？南北方向用什麼數值？	感謝委員建議，已補充於章節 3-1.4。資料並未平滑化，升降軌不同觀測方向的 LOS 速度場，提供了兩組方程解算地表變形場兩個方向的可能性，且由於衛星對於南北向變形較不敏感，所以我們利用升降軌解算東西向與垂直向速度場。
15. 報告書第115頁，中央山脈東側的下陷GPS觀測的結果和SENTINEL有所差異(圖3-1.13，暖色系為上升，為何比例尺為負值)，請討論原因。	感謝委員建議，已更正。

期末審查意見	處理情形
16. 圖3-1.13，木瓜溪以北地表抬升的變化原因為何？其他測量是否看到？	感謝委員建議，圖 3-1.13 有更正。InSAR 在該區域與 GPS、水準資料一致都有抬升的速度場。Lin and Kuo (2016)藉由各種板塊隱沒的模型結果也顯示在花蓮以西的中央山脈區域會有較大於中央山脈中南段的垂直變形速率。 Lin and Kuo (2016)研究中的板塊隱沒模型如下圖:  Lin and Kuo (2016)研究中的模擬垂直變形速度場與水準資料比對如下圖:  另外 Yang et al. (2018)的研究中顯示 2018 年花蓮地震發生在一個向西傾的左移走向斷層，主震除了觸發了米崙斷層的活動，並且包括了更多的震後滑移，造成了地表變形抬升。
17. 請補充說明圖3-1.12/13結合升軌與降軌影像的方法，另南北方向的地表變形資料為何？	感謝委員建議，已補充於章節 3-1.4。升降軌不同觀測方向的 LOS 速度場，提供了兩組方程解算地表變形場兩個方向的可能性，且由於衛星對於南北向變形較不敏感，所以我

期末審查意見	處理情形
	們利用升降軌解算東西向與垂直向速度場。
（二）斷層模型反演評估	
1. 請補充說明，嶺頂斷層為何分11段進行模擬？總滑移速率是否將11段的總和平均？為何每區段的滑移速率有差異？	因為 BLOCKS 模型僅模擬單一斷層面，因此依據單一斷層地表位置沿線，必須將結點間視為斷層分段進行模擬。總滑移速率取自各分段傾向滑移分量與走向滑移分量之合向量值的總合。各區段滑移速率由模型塊體的幾何設計與初始輸入之地表速度場進行反演，故同一斷層不同段落受鄰近速度場影響會有差異。
2. 報告書第180頁，「連接米崙斷層的嶺頂斷層，嶺頂斷層由北至南分11段進行模擬。」如何模擬？……，故整體總滑移速率為 21.6 ± 3.1mm/yr。總滑移速率如何定義？是每區段滑移率的總和平均？每區段的滑移速率的差異為何？是否為斷層面角度的差異？或其他因素？	同上一意見與回覆；因為 BLOCKS 模型僅模擬單一斷層面，因此依據單一斷層地表位置沿線，必須將結點間視為斷層分段進行模擬。同一斷層各區段初始斷層參數相同，每區段的滑移速率的差異來自於鄰近的速度場變化反演影響。
3. 報告書第197頁，表4-3.3的長期滑移速率如何取得？為何嶺頂與瑞穗斷層一樣？玉里、池上、利吉斷層的長期滑移速率一致？	這些斷層參數主要是根據台灣地震模型(TEM)所公布的資料，並由另一地調所委託中興社的合作計畫的專家會議討論過的共識結果。然而，委員對五條斷層為何具有相同滑移速率(區間)的質疑實屬合理，我們也會和中興社的計畫執行團隊就此問題進行更深入的溝通探討。
4. 請補充說明，滑移虧損率如何獲得？	根據斷層錯位理論[Okada, 1985]，在固定的斷層幾何下，速度場的空間分布型態反映的就是斷層滑移虧損速率。
5. 報告書第162頁，為何考慮瑞穗斷層幾何參數相同於嶺頂斷層，請說明。	因嶺頂斷層及瑞穗斷層同屬於縱谷斷層北段，從地震剖面中觀察為為高角度斷層，然而從跨斷層地震剖面中並無法區別兩斷層具有不同的幾何形貌。
6. 報告書第192頁，「整體來說，垂直	海岸山脈北段的活動可能受到東部

期末審查意見	處理情形
運動的擬合結果不如水平運動，尤其在縱谷中段接近瑞穗及嶺頂斷層附近偏大的下沉殘差運動。此現象可能由於本研究的塊體斷層模型未納入東部外海的琉球隱沒系統，進而忽略了菲律賓海板塊(PHSP)向北隱沒到歐亞板塊(RYUK)的效應。」海岸山脈北段的活動受到東部外海的琉球隱沒系統影響有多大？是否可以評估？為何北段的GPS水平位移方向還與南段的方向一致？(圖4-2.1，第179頁)	外海琉球隱沒系統影響的說法已經被許多研究所提出，但是此效應的量化模型始終不見完備，主要的原因除了對該區複雜的地體(下)構造研究仍不清楚外，海域的地質與地球物理(含測地)資料也十分稀少，因此琉球隱沒系統對東部地表變形的量化影響評估不易進行，也不是本計畫的主要項目。 然而，InSAR 與精密水準測量均指出縱谷的鉛直運動在瑞穗以北轉為下沈，但 GPS 資料所得的水平運動卻和南段一致，仍維持西北方向，不過速率相對較慢。這些地表運動的空間的變化，以及測地所得的(短期)下沉和地質資料所得的(長期)抬升運動間的時間變化，將是未來很重要的研究課題。
7. 建議把不同斷層模型預測的垂直速度也呈現出來，以供參考。	由於目前尚未將垂直速度場放入模型中進行反演，所以預期正演之垂直速度差異會較大。本團隊預計在未來的工作中加入垂直速度場的約制，並將展示預測之垂直速度。
8. 許多測站受到地表變形影響，不應該納入模型解算。	本團隊在進行斷層模擬時，已經先移除掉空間分布中速度差異很大的測站。
9. 報告書第205頁，目前玉里附近的斷層虧損率很小，但1951年玉里斷層曾經發生錯動，和報告結果有明顯不同。	本計畫進行的是斷層滑移虧損速率的評估，反映的是斷層面累積能量的速率。換言之，1951 年玉里斷層的活動行為，再結合較低的斷層滑移虧損速率，反映的是玉里斷層具有較長的地震活動週期。
10. 報告書第156頁，玉里斷層不評估部分應再與委辦機關確認是否會有違約問題。	感謝委員建議，已更新補上玉里斷層之模型成果。
（四）報告書內容及其他建議事項	
1. 簡報內容與報告書差異甚大，請將簡報中增加的部分補充於報告書中。	感謝委員建議，視衛星方向轉換東西向與垂直向說明與探討補充於章節 3-1.4，InSAR 成果討論補充說明於章節 3-4。
2. 簡報第47頁，…米崙斷層上盤(西	感謝委員建議，米崙斷層幾何參數

期末審查意見	處理情形
側)...，與報告書第156頁，米崙斷層幾何參數傾角65OE不同，何者有誤，請修正。	傾角 65OE，簡報誤植已更正。
3. 雖然Bernese 與 GAMIT/GLOBK解算成果進行了比較，但沒有與GIPSY-OASIS解算成果比較。	由於 GIPSY 微精密單點定位，在解算策略上，與 Bernese 及 GAMIT 並不一樣，因此本計畫並沒有規劃比較 Bernese 與 GIPSY 的解算成果。
4. 水準資料沒有和GPS、InSAR及斷層模型進行討論。	水準資料提供了非常重要且高靈敏度的垂直速度場訊息，也因為其結果對於斷層幾何相當敏感，所以在斷層模型的建置上也相當不容易擬合，因此水準結果需要非常仔細的分區進行分析。在本計畫中，僅就部分的水準資料進行較細緻的描述。
5. 報告書第86頁，潮州斷層位置有誤。	感謝委員建議，已修正。
6. 請評估4年來量測過程中有那些測站受到自然環境或人為因素影響，可建議補設測站或不再測量。	由於 GPS 測站易受到人為因素(例儀器故障)或自然因素(例如現地植被、區域地滑、地下水等)影響，全臺灣測站數量多，每個地區的原因不盡相同，因此較不容易在短時間內篩選測站，未來將依照委員的建議採取分區進行 GPS 測站的檢核，以提供測站補充或移除之建議。
7. 報告書第2頁，封面頁「期中」報告書請修正為「期末」報告書。	感謝委員建議，已修正。
8. 報告書第3頁，GPS連續觀測站資料接收起始時間表請更新至最新狀態。	感謝委員建議，已更新。
9. 報告書第81頁，小「岡」山斷層請修正為小「崗」山斷層並搜索全文是否有相同錯誤。	感謝委員建議，已修正。
10. 附錄之GPS、水準速度表與時間序列得到之結果不同，應保持二者一致或予以說明；另外對於速度有變化之點位，逕以直線速度迴歸是否恰當也請予以評估。	在進行時間序列擬合時，會考慮到不同型態資料解析力的問題，所以當時間序列趨勢發生變化時，若資料的時間解析力不足，我們僅能採用線性進行擬合。此外，垂直和水平的變形敏感度也不一致，所以 GPS 和水準的擬合結果可能會有出入。