

臺灣坐標系統之回顧與展望



楊 名
成功大學測量及空間資訊學系



測繪與空間資訊前瞻發展研討會 2017年2月15日



背景

- 坐標系統為領土位置之參考依據，亦為國防、經濟、交通建設、災害監測、國土規劃、土地利用與稅賦、地籍管理、科學研究的根本。
- 臺灣坐標系統主要分為水平(大地)基準和高程基準兩類。
- 基準延續關鍵：「精確性」和「便利性」



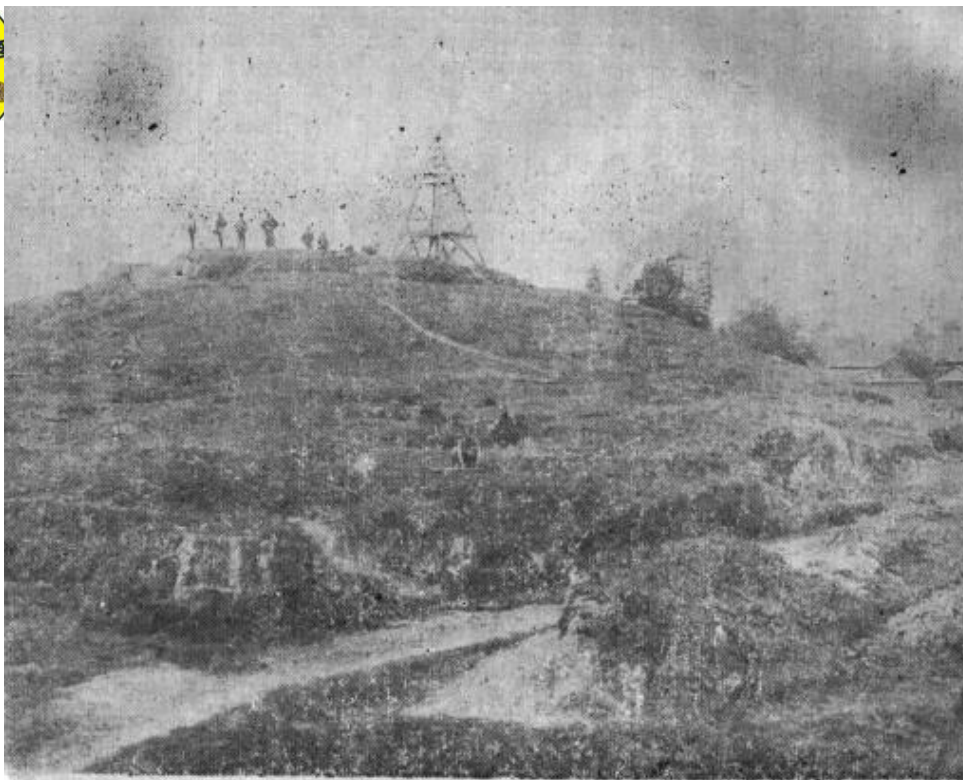
水平基準發展回顧

- 地籍坐標系統
- 陸地測量系統
- 臺灣三角點系統(TWD67)
- 1997年臺灣大地基準(TWD97)
- TWD97[2010]



地籍坐標系統

- 日治時期(1895-1945年)設於臺中市中山公園內之89號主三角點為坐標原點，以三角測量方法推及全省，用於測繪地籍、水利及農林機構測量成果，地籍點位之測量坐標成果係以「間」為單位， $1\text{間} \cong 1.818\text{公尺}$ 。
- 另澎湖地區係以馬公881號主三角點為原點。



臺中公園之三原測量點



國土測繪中心提供



- 民國38年(1949年)國民政府遷台後，軍方為製圖所需，改以南投埔里(臺灣地理中心)之虎子山一等三角點為原點，按大地天文及三角測量方法，依一、二、三、四等規範施測，計算各三角點之大地位置。



陸地測量系統

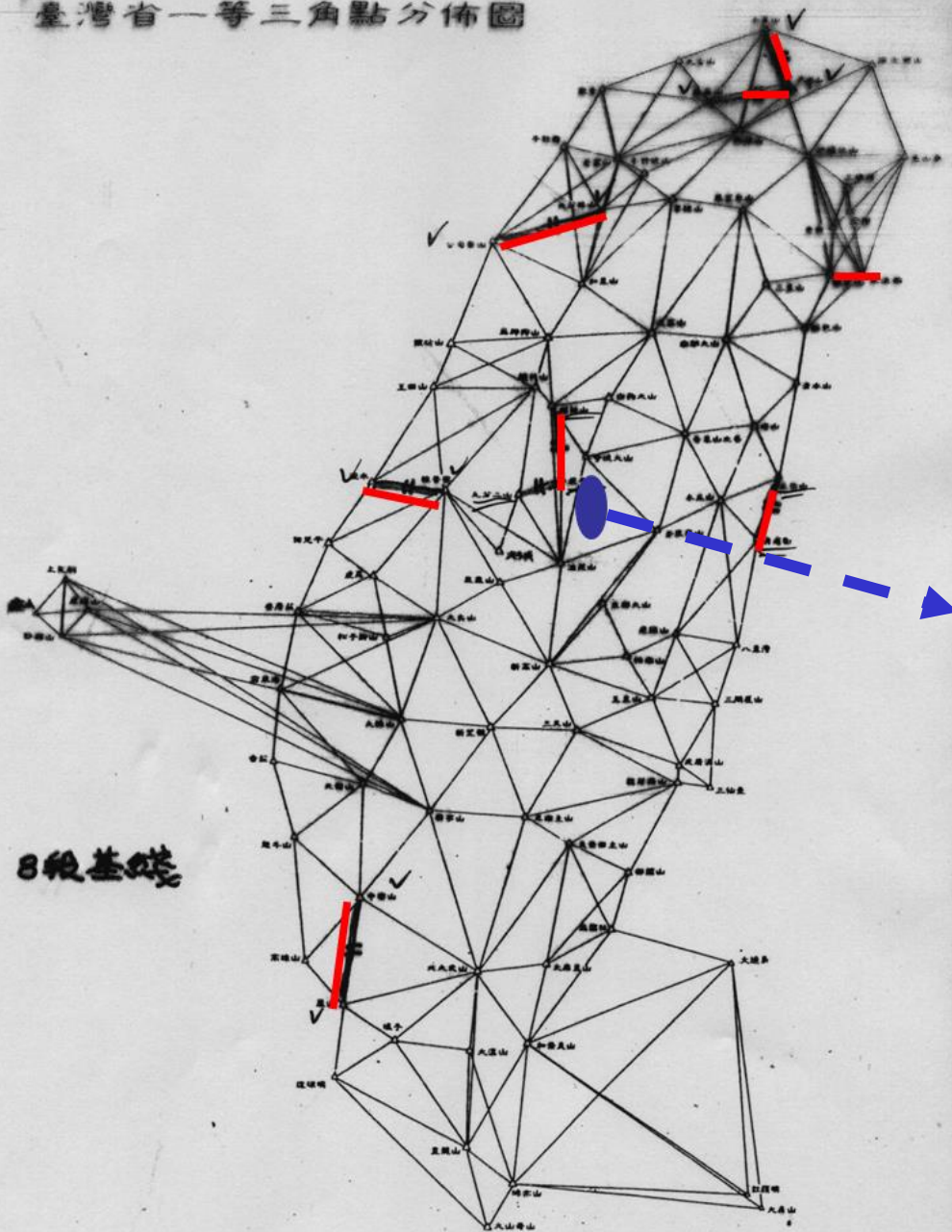
- 上開二者雖系統不同，施測時間亦有前後，但地籍系統之主三角點與軍方之三角點位置相同（同標石），因此內政部在57年決定重新改算成果列出2種坐標，並於59年公布「臺灣省三角點成果表」，此系統所採用之基準為：
 - 基準原點：南投埔里虎子山一等三角點
 - 參考橢球體：1924年國際地球原子
 - 地球投影：橫梅氏六度分帶投影（UTM）



TWD67坐標系統

- 內政部有鑑於地籍坐標系統控制點損壞及遺失嚴重，為增進土地利用效能、提高測量精度、重新進行地籍整理，遂自民國65年委託軍方辦理「臺灣地區三角點檢測暨平差計算」，並連測至澎湖地區。原規劃於民國67年，實際於69年完成檢測並編製公布「臺灣地區三角點成果」，其採用之基準如下：
 - 基準原點：南投埔里虎子山一等三角點
 - 參考橢球體：1967年國際地球原子（GRS67）
 - 地球投影：橫梅氏二度分帶投影(119° 、 121°)

臺灣省一等三角點分佈圖



國土測繪中心提供



測量及空間資訊學系 9



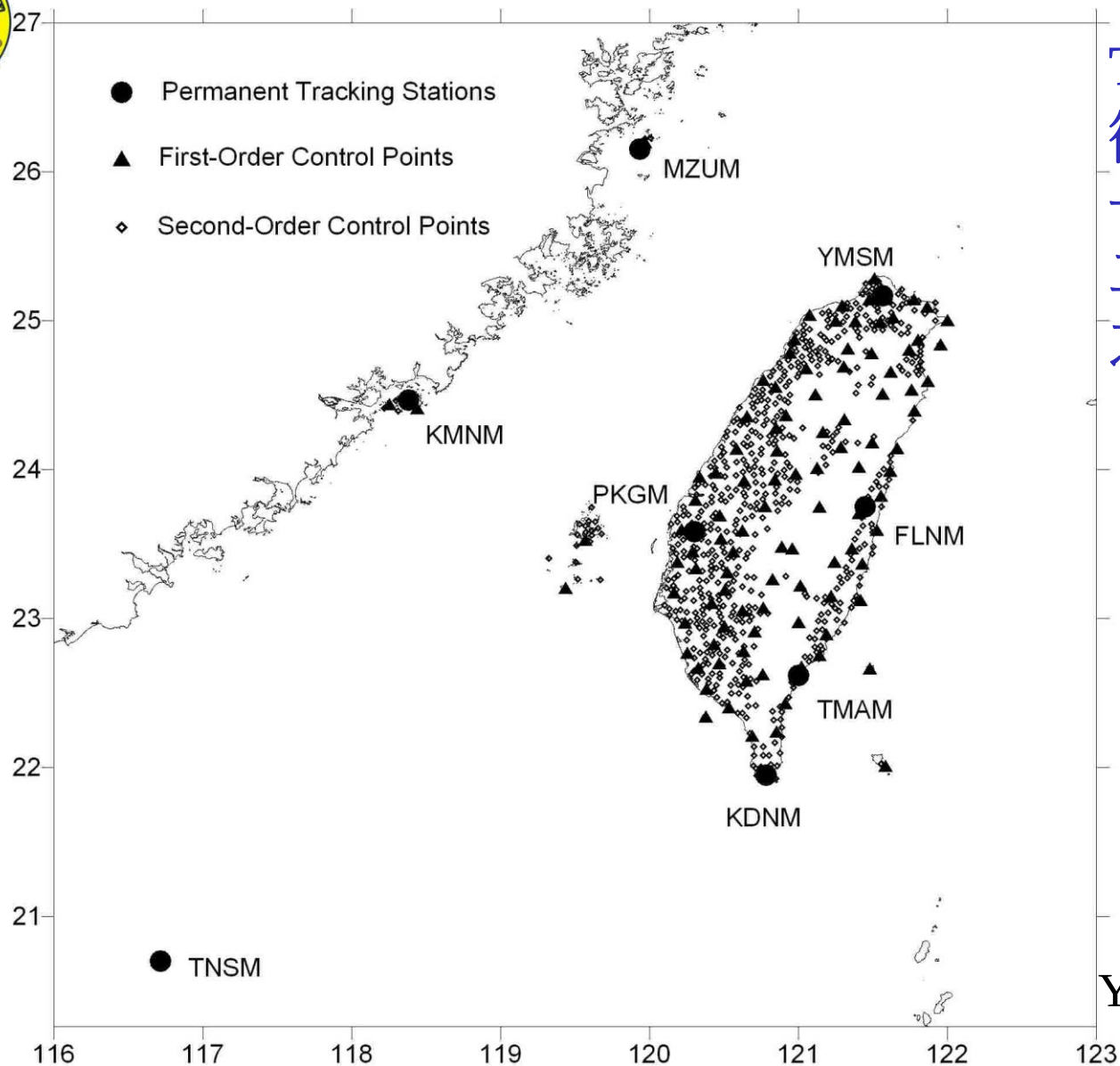
TWD67坐標系統

- 按照古典大地基準定義方式實現。
- 定義量： $\varphi_0, \lambda_0, \xi_0, \eta_0, H_0 + N_0, \alpha_0, a_{GRS67}, f_{GRS67}$
- 大地計算時普遍缺乏大地起伏(undulation)及垂線偏差(deflections of the vertical)資訊。
- 僅虎子山原點之三維位置為已知（因係定義量），其餘點位之高程均由三角高程測量所得；高程與水平位置分開計算。



TWD97坐標系統

- 由於TWD67控制點精度逐漸不符測繪作業需求且點位遺失情形嚴重，內政部自1990年代開始採用GPS衛星定位技術，建立衛星追蹤站、廣設衛星控制點，據以制定新的坐標系統，定名為1997年臺灣大地基準，簡稱TWD97，其採用之基準如下：
 - ITRF94@1997.0參考框架； BIH 1984.0參考方位
 - 參考橢球體：1980年國際地球原子（GRS80）
 - 地球投影：橫梅氏二度分帶投影(117° 、 119° 、 121°)
- 選取點位時考慮到使用者之使用便利性



TWD97系統 衛星追蹤站、 一等衛星點、 二等衛星點 之分佈圖

Yang et al. (2001)



陽明山衛星追蹤站及
超導重力儀、
水汽輻射儀(WVR)



東沙衛星追蹤站



金門衛星追蹤站



TWD97[2010]

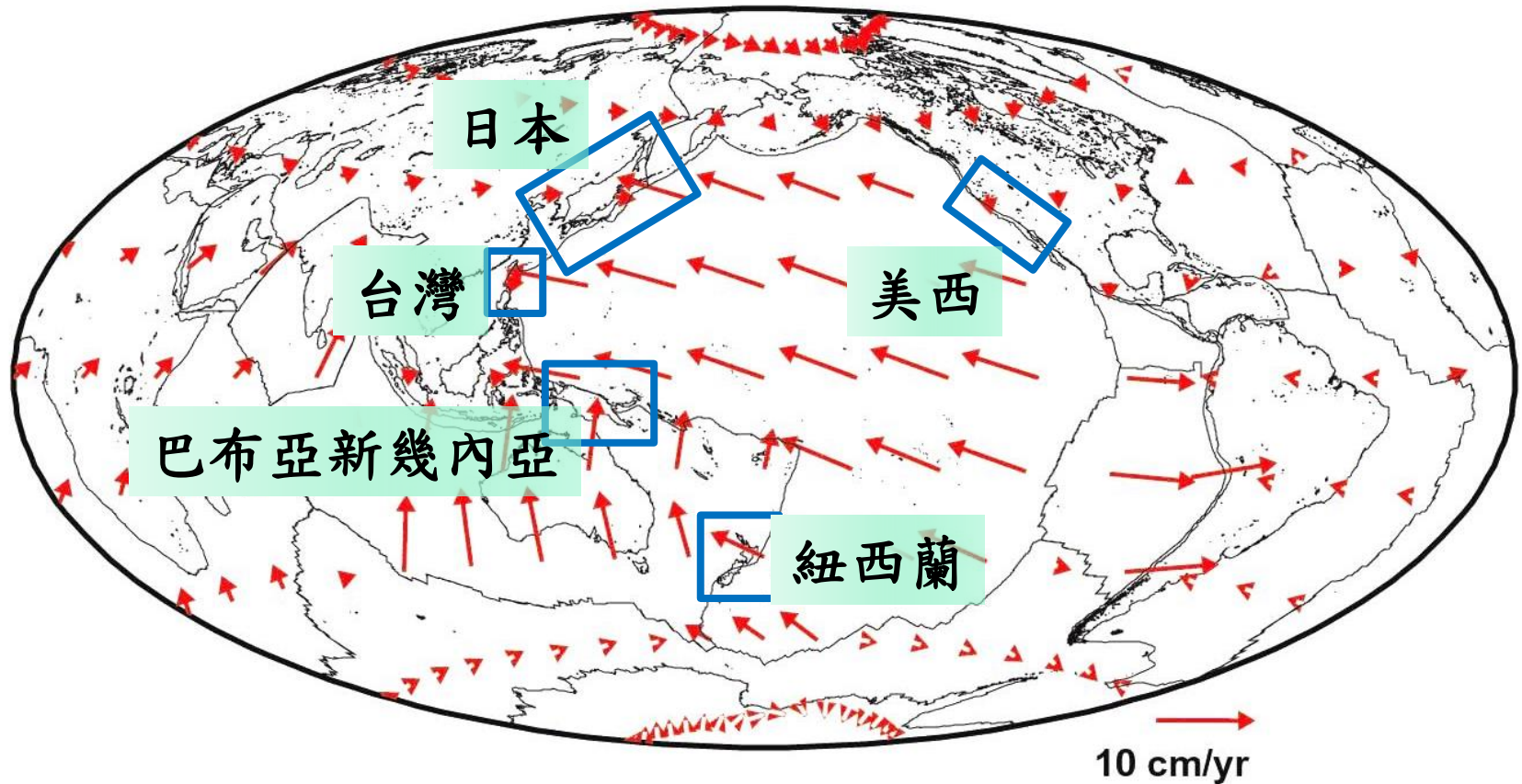
- 由於臺灣地殼運動劇烈，自1997年以來部分地區點位已產生明顯位移，致套合引用有實務上困難，無法符合測繪作業精度需求，內政部於101年公告臺灣大地基準2010年成果（簡稱TWD97[2010]）。同時新增>300 衛星追蹤站作為一等衛星控制點。
- 基準定義與TWD97相同，惟套合至國際框架站2010.0時刻

埔里衛星追蹤站





TWD97[2010]之展望

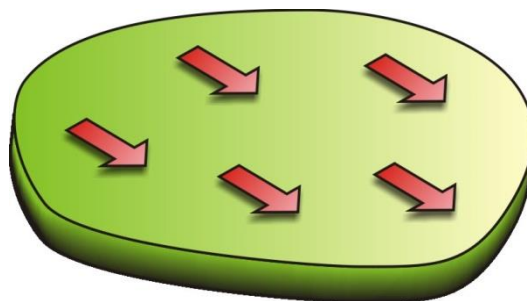
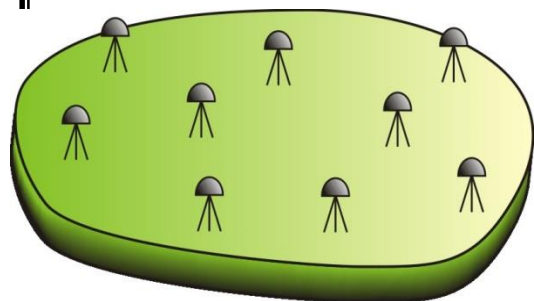


◆位在「板塊邊界」之國家，因地殼運動之影響，其控制點相對精度必將隨時間增長而下降

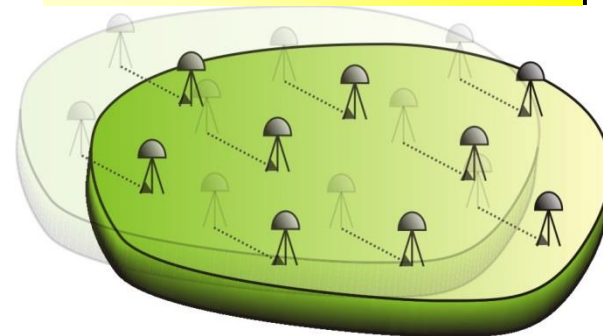


板塊運動與坐標系統精度

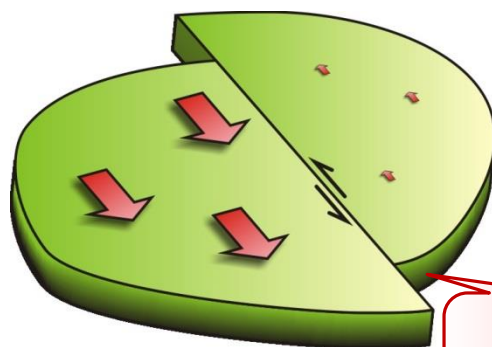
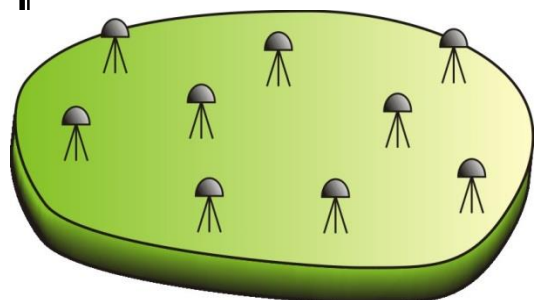
(a) 均勻的塊體運動



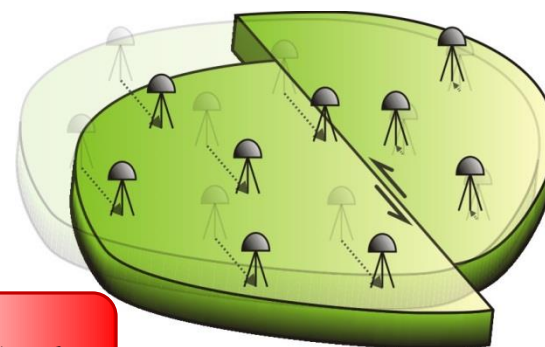
控制點相對精度不變



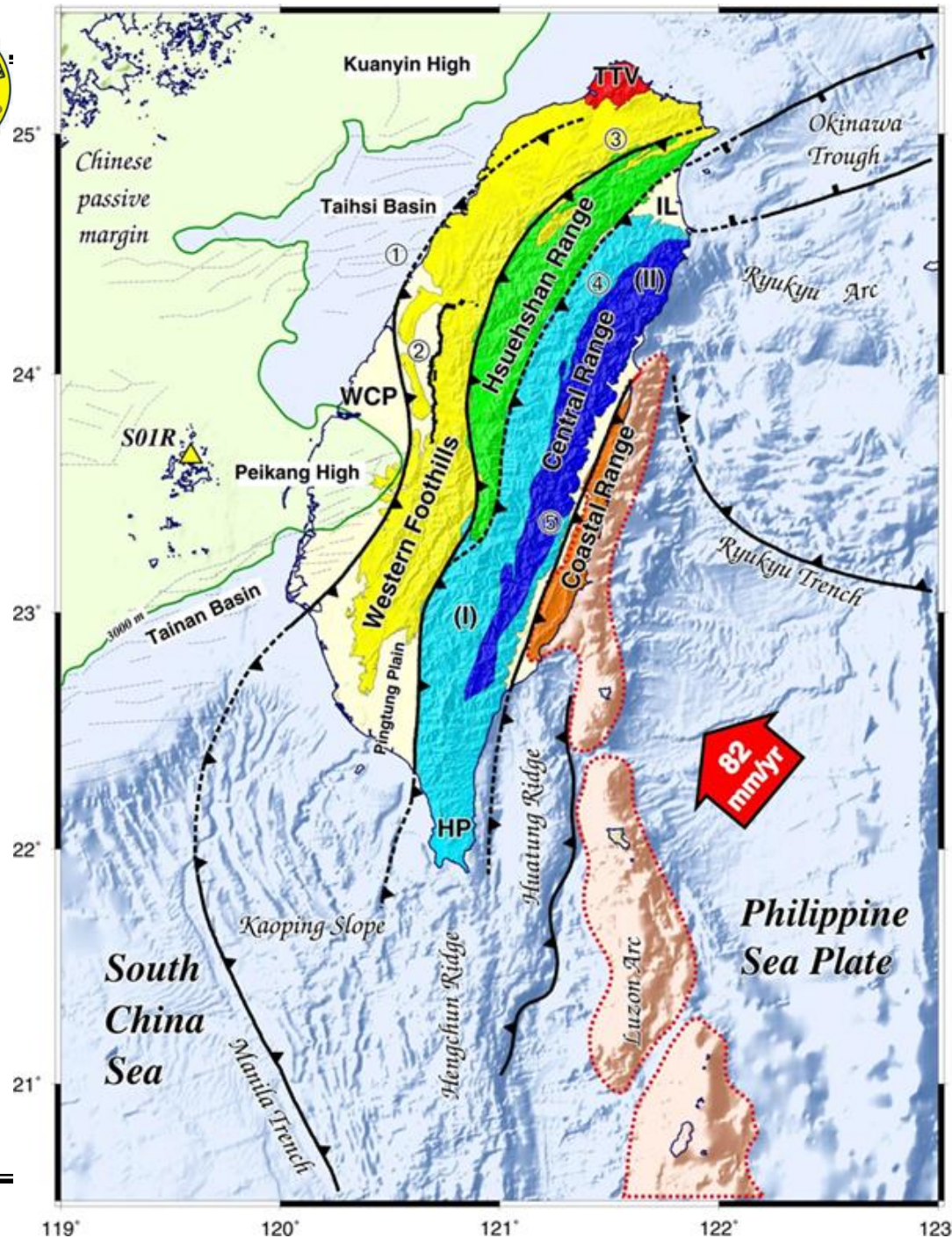
(b) 斷層錯動



左移斷層

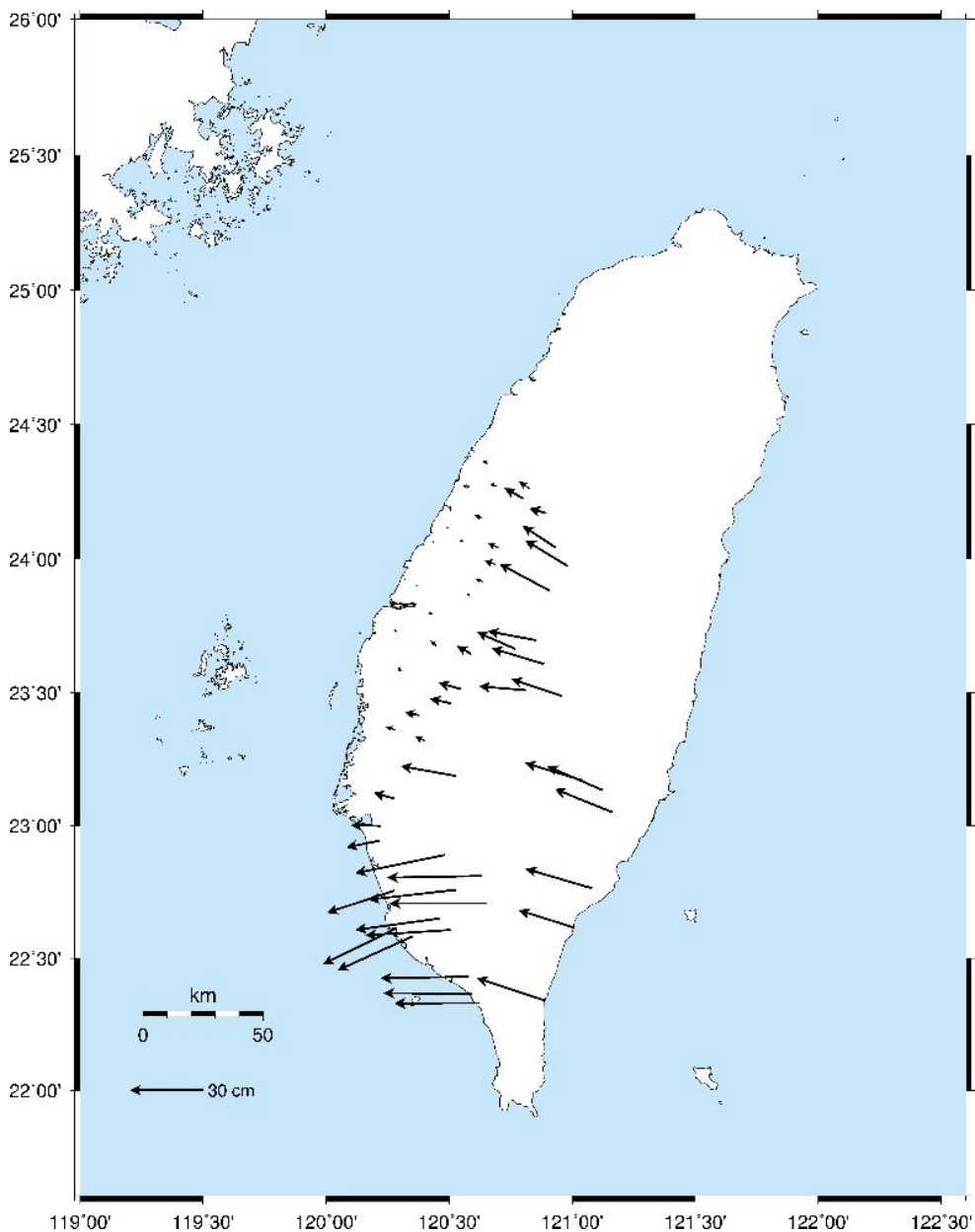


靜態(固定)坐標框架之控制點相對精度必將隨著時間而逐漸下降



持續的造山運動
帶給臺灣許多的
斷層、地震以及
顯著的地殼運動

Ching et al. (2011)

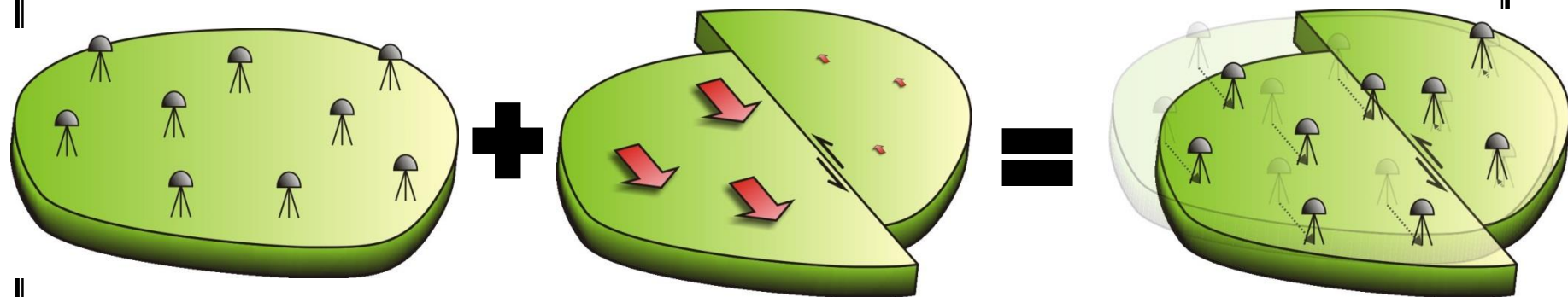


西南部控制點於
2010-2016期間之
相對位移量最大
已達40公分

LiDAR技術更新數值地
形模型成果檢核與監審
工作案期中報告(2016)



動態基準



特定(或參考)時刻
的點位坐標

速度(位移)模型

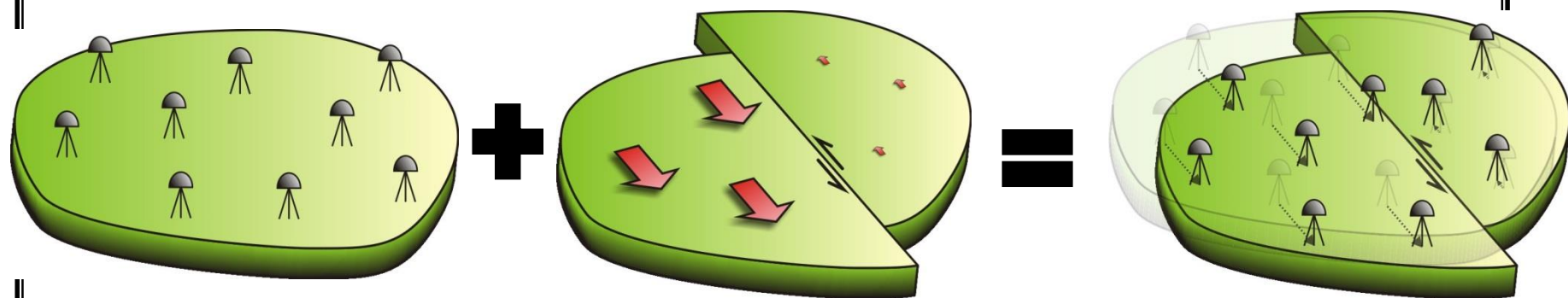


坐標成果：
現在時刻的
點位坐標

真正的4維基準，如同國際參考框架(ITRF)
點位坐標隨時間改變，實際應用時有其困難性



半動態基準



坐標成果：
特定參考時刻的
點位坐標

速度(位移)模型



觀測時刻的
點位坐標

由於點位坐標之參考時刻是固定的，較適合於實際應用

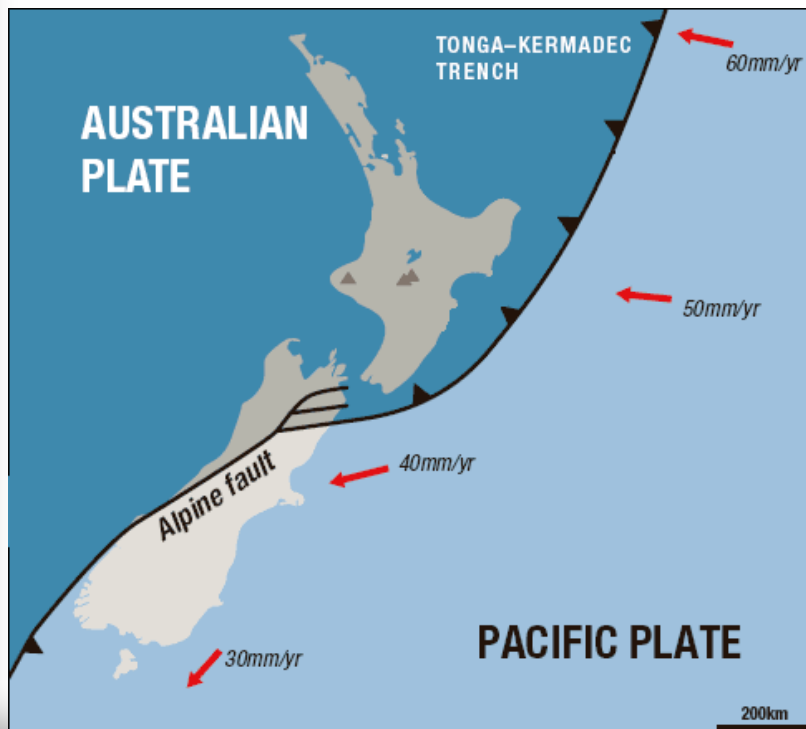
半動態基準

- 定義在某參考時刻下的坐標系統，透過精確的速度或位移模型修正板塊運動之影響，並將坐標成果推估到特定的參考時刻，以兼顧基準的穩定性與精度要求。
- 建立半動態基準之必要條件
 - 高精度震間速度(位移)模型
 - 突發性位移事件(如地震造成之同震位移)更新機制

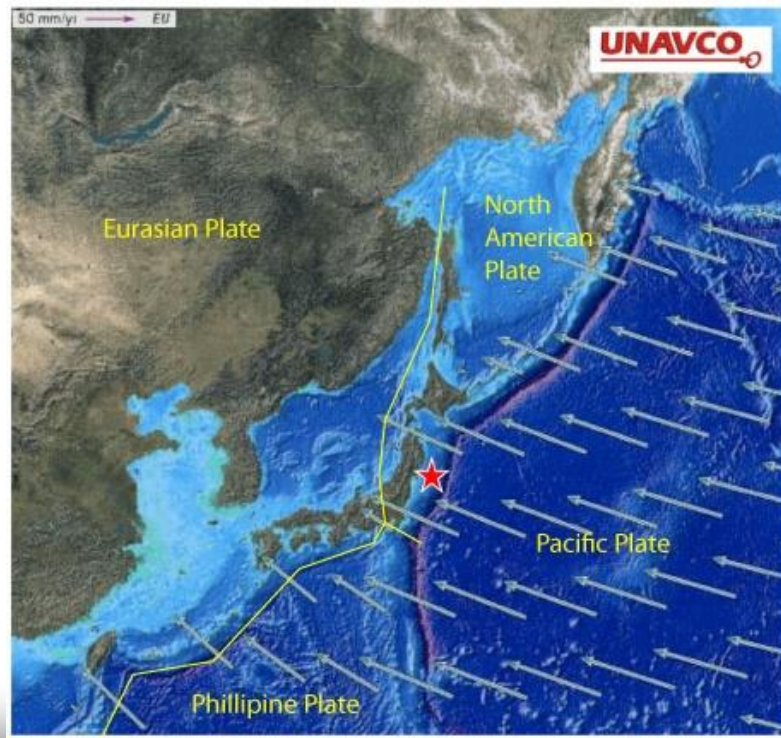
採用半動態基準的國家

- 紐西蘭與日本位於板塊交界帶，長期受到區域內板塊運動的影響。

紐西蘭(NZGD2000)

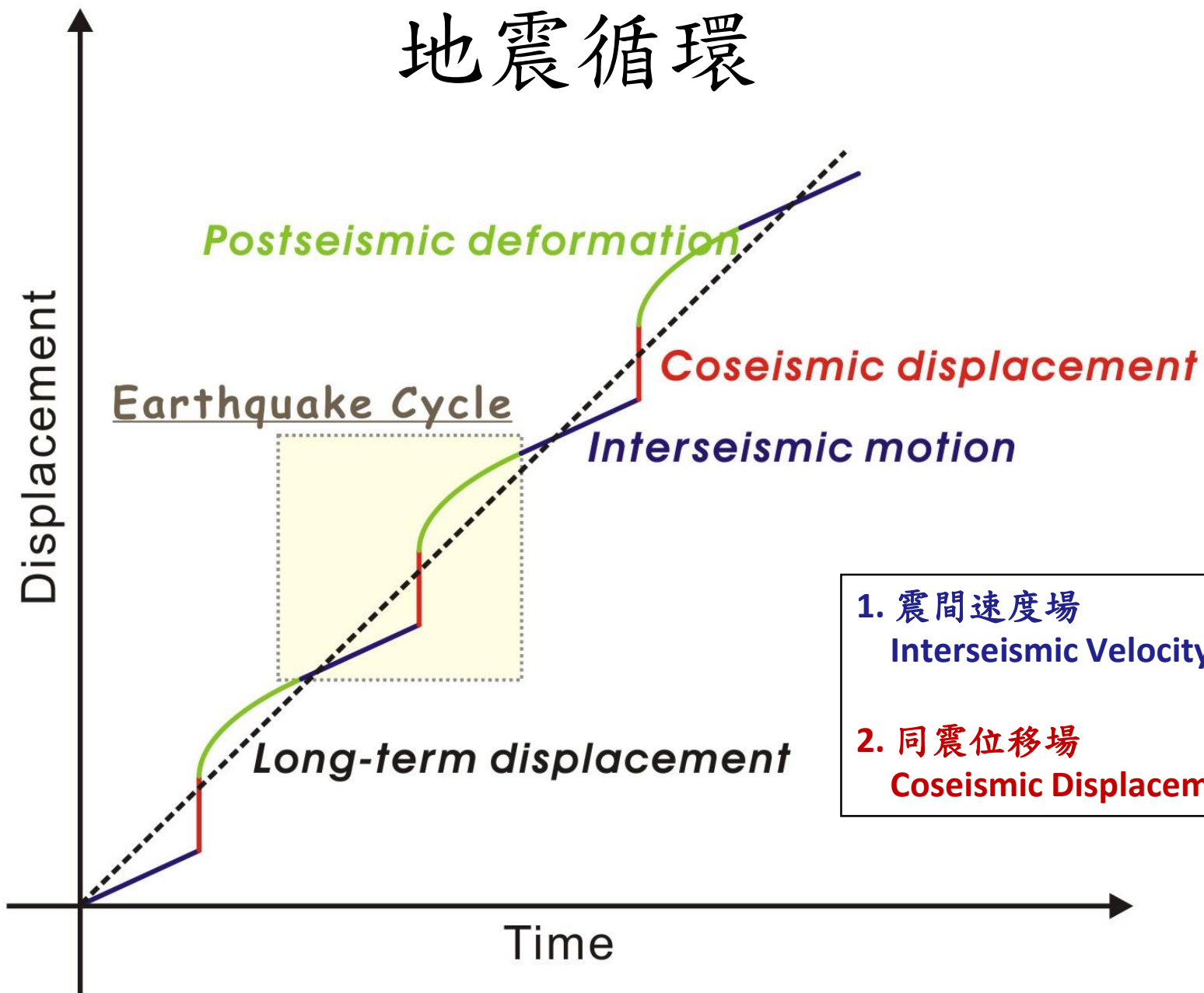


日本(JGD2000)





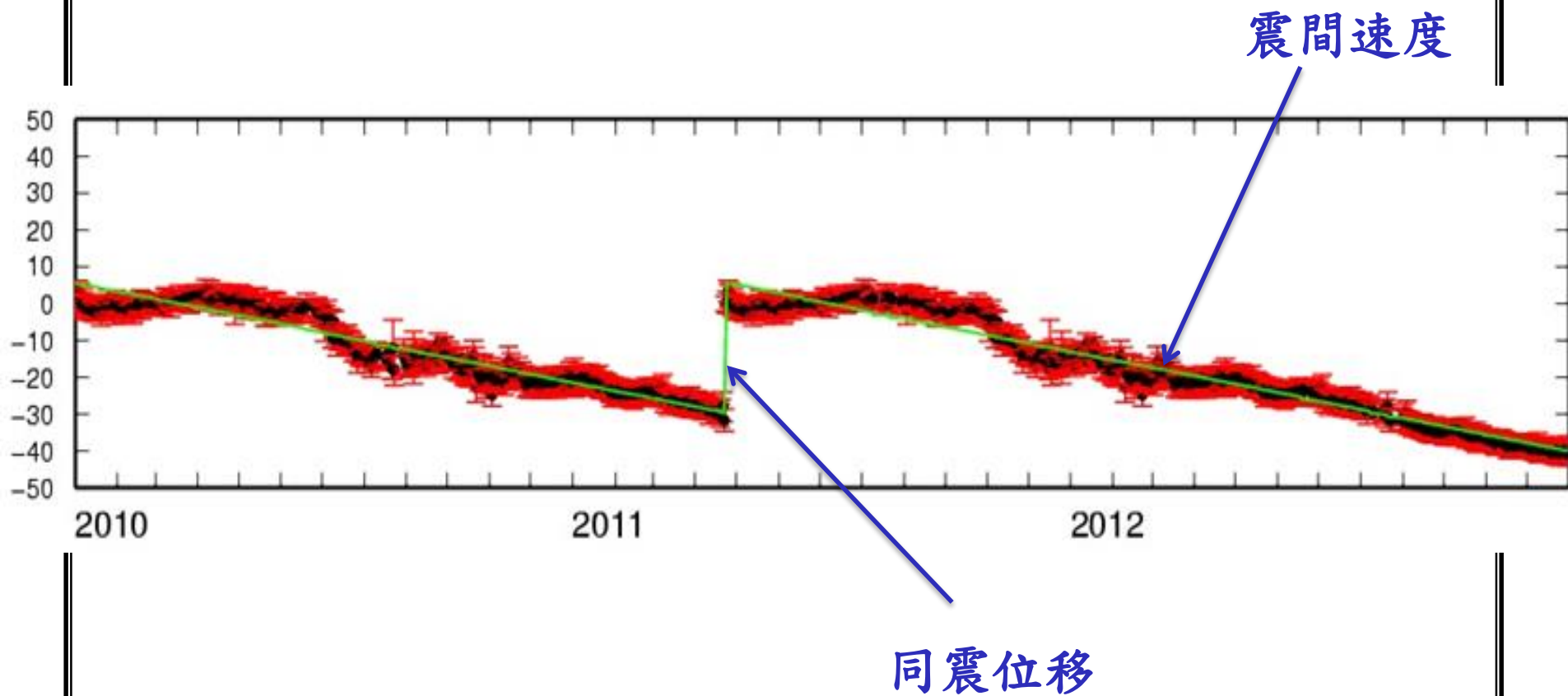
地震循環



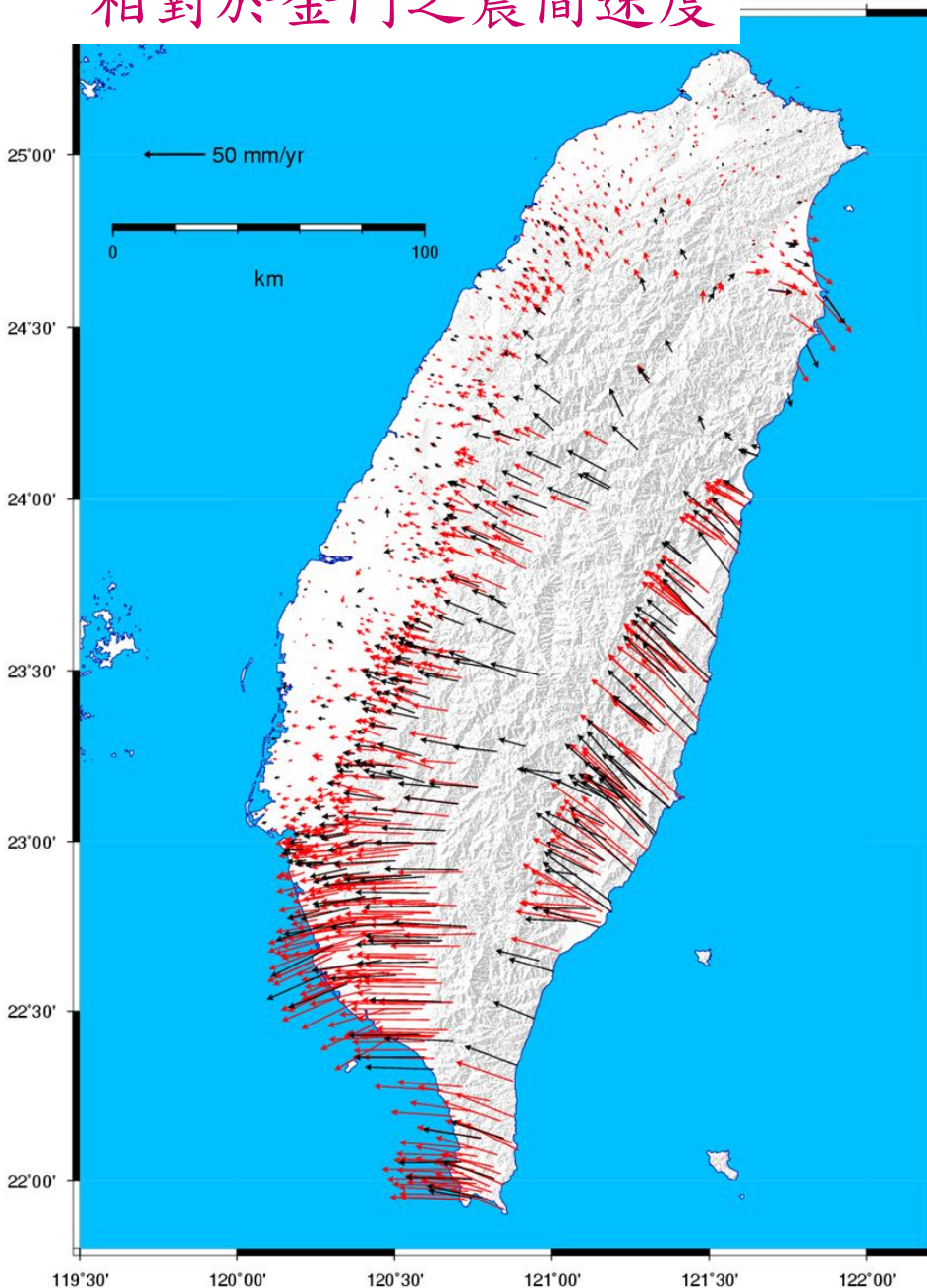
1. 震間速度場
Interseismic Velocity
2. 同震位移場
Coseismic Displacement



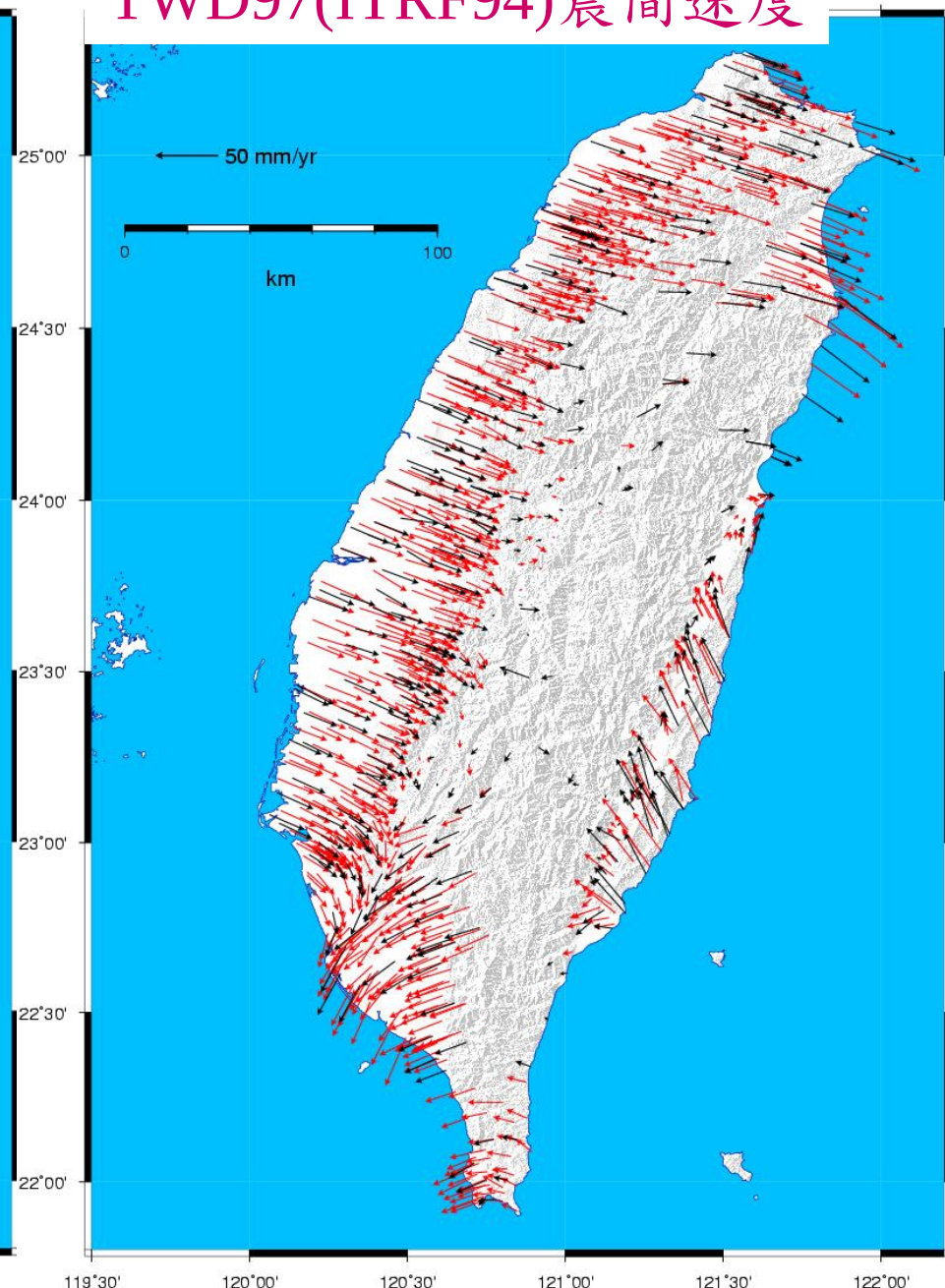
震間速度之估計

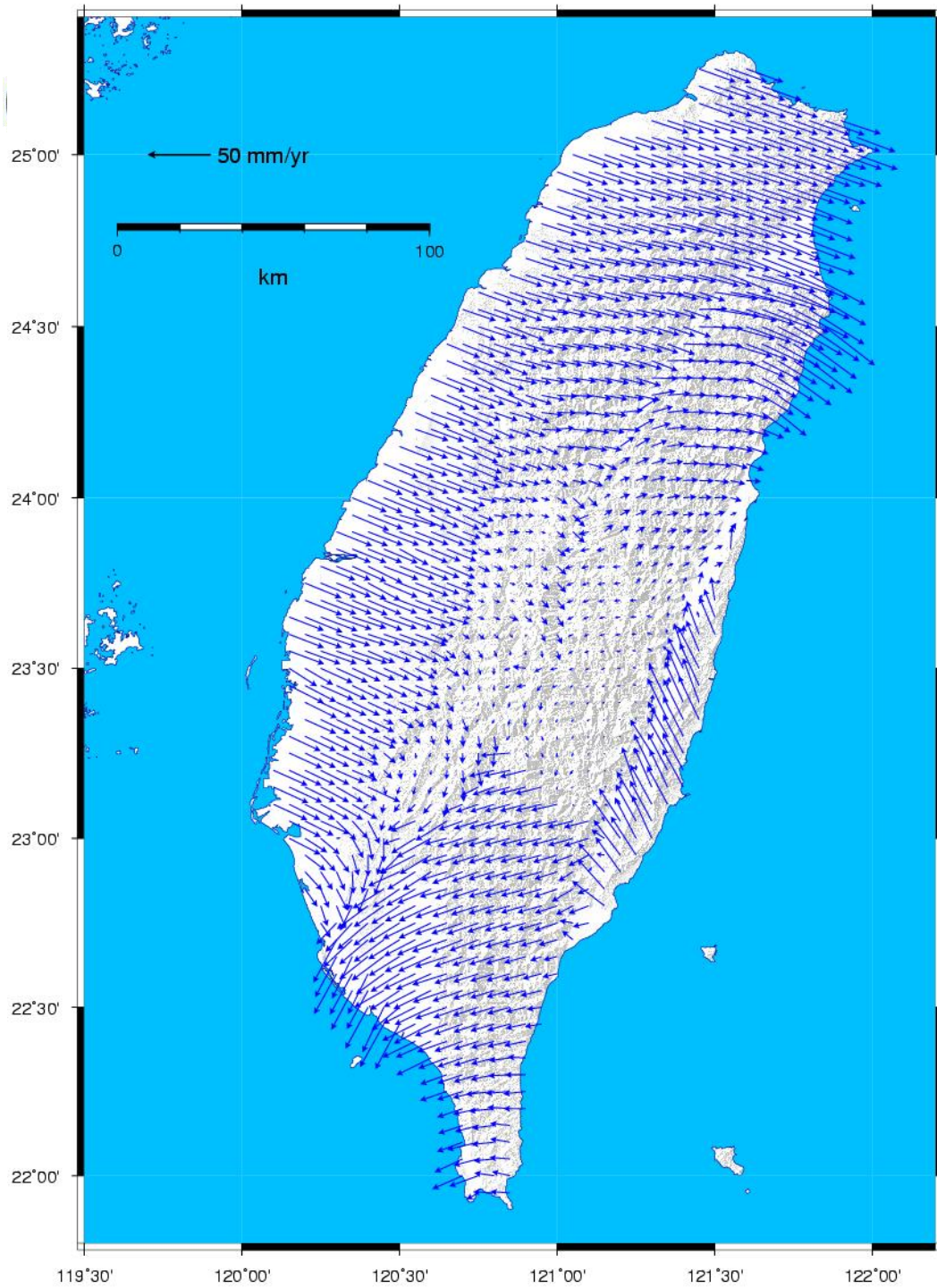


相對於金門之震間速度



TWD97(ITRF94)震間速度





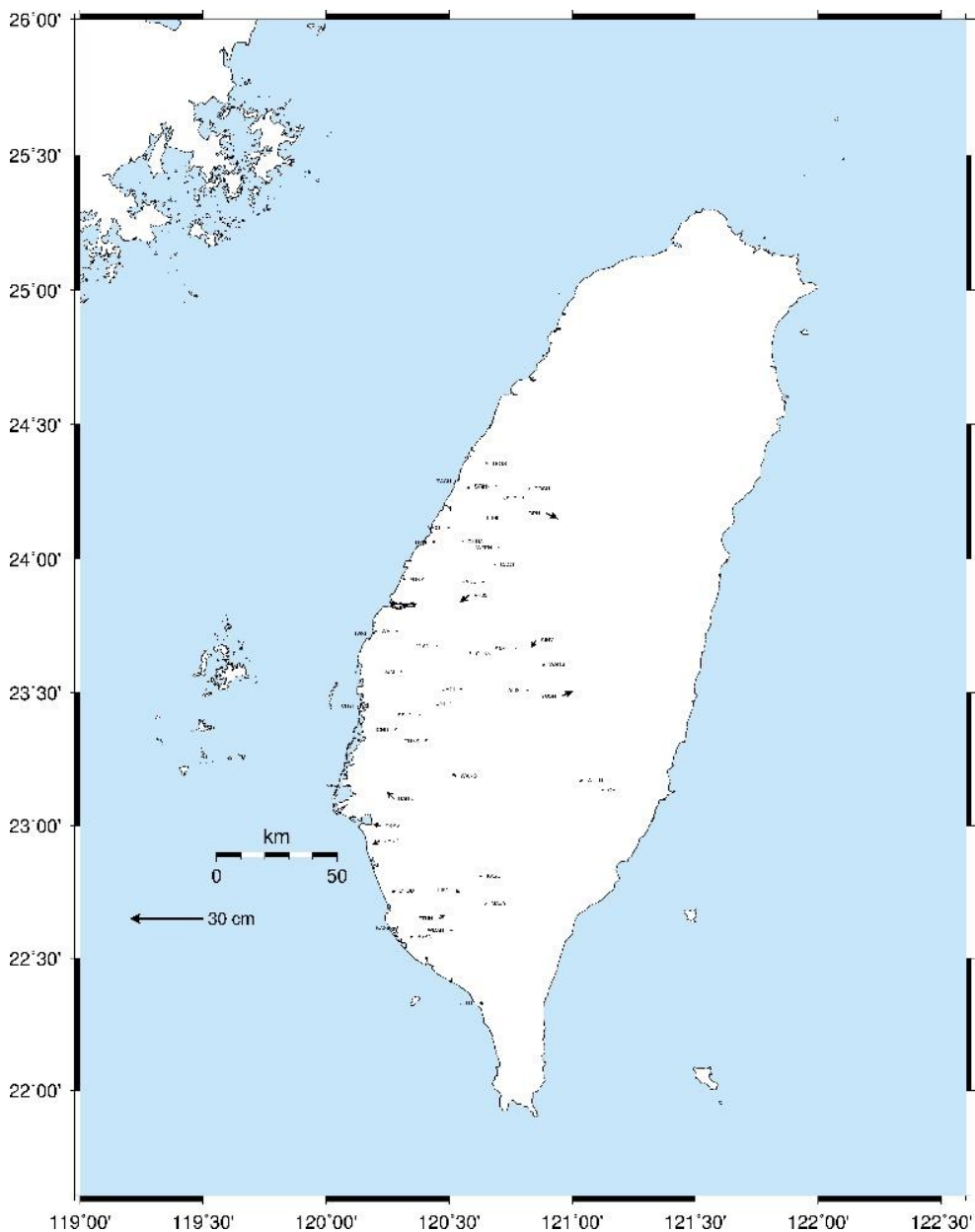
TWD97[2010]

網格速度模型

外部檢核精度(mm/year)

	Mean	STD	RMS
E-W	0.8	3.4	3.5
N-S	-0.5	2.2	2.2

建置現代化TWD97國家坐標
系統變位模式期末報告(2013)



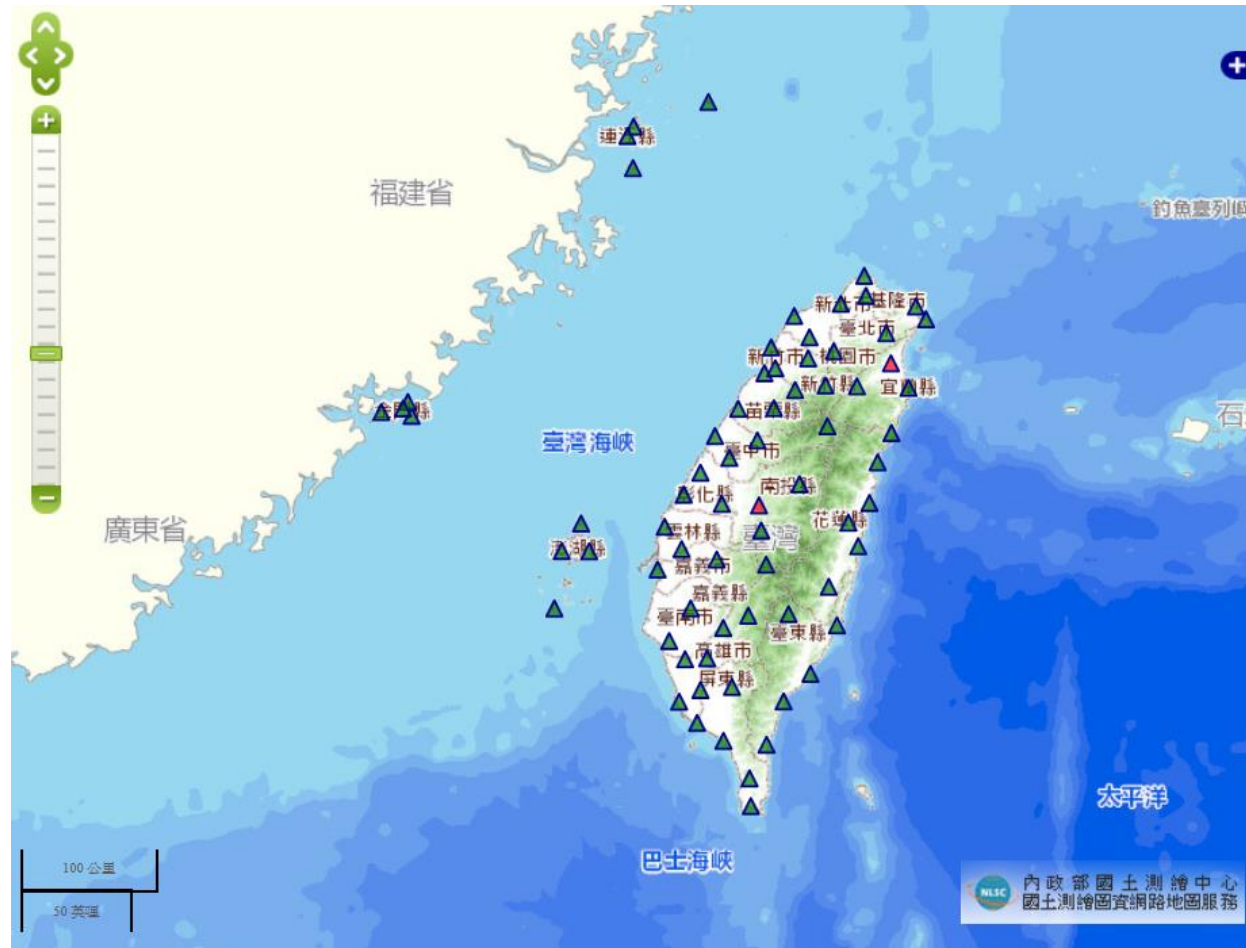
經TWD97[2010]
速度模型修正後
西南部控制點
坐標殘差

LiDAR技術更新數值地
形模型成果檢核與監審
工作案期中報告(2016)



國土測繪中心e-GNSS系統

- e-GNSS: 網路RTK即時動態定位系統，可單機施測
- 定義於e-GNSS坐標系統；平均每2-3年更新坐標系統
- 以「轉換模型」可將測量成果轉換至TWD97、TWD97[2010]！
- 就效果而言，轉換模型 $\approx$ 速度模型





高程基準發展歷程

- 1914-1924年環島水準測量
- 1976-1979年全臺水準測量(TWVD79)
- 2001年臺灣高程基準(TWVD2001)



高程之種類

❖ Geopotential number: $C = W_0 - W = \int_{\text{參考面}}^{\text{水準點}} g \, dn$
(大地位數)

❖ Dynamic height(力高): $H^D = \frac{C}{\gamma_R}$

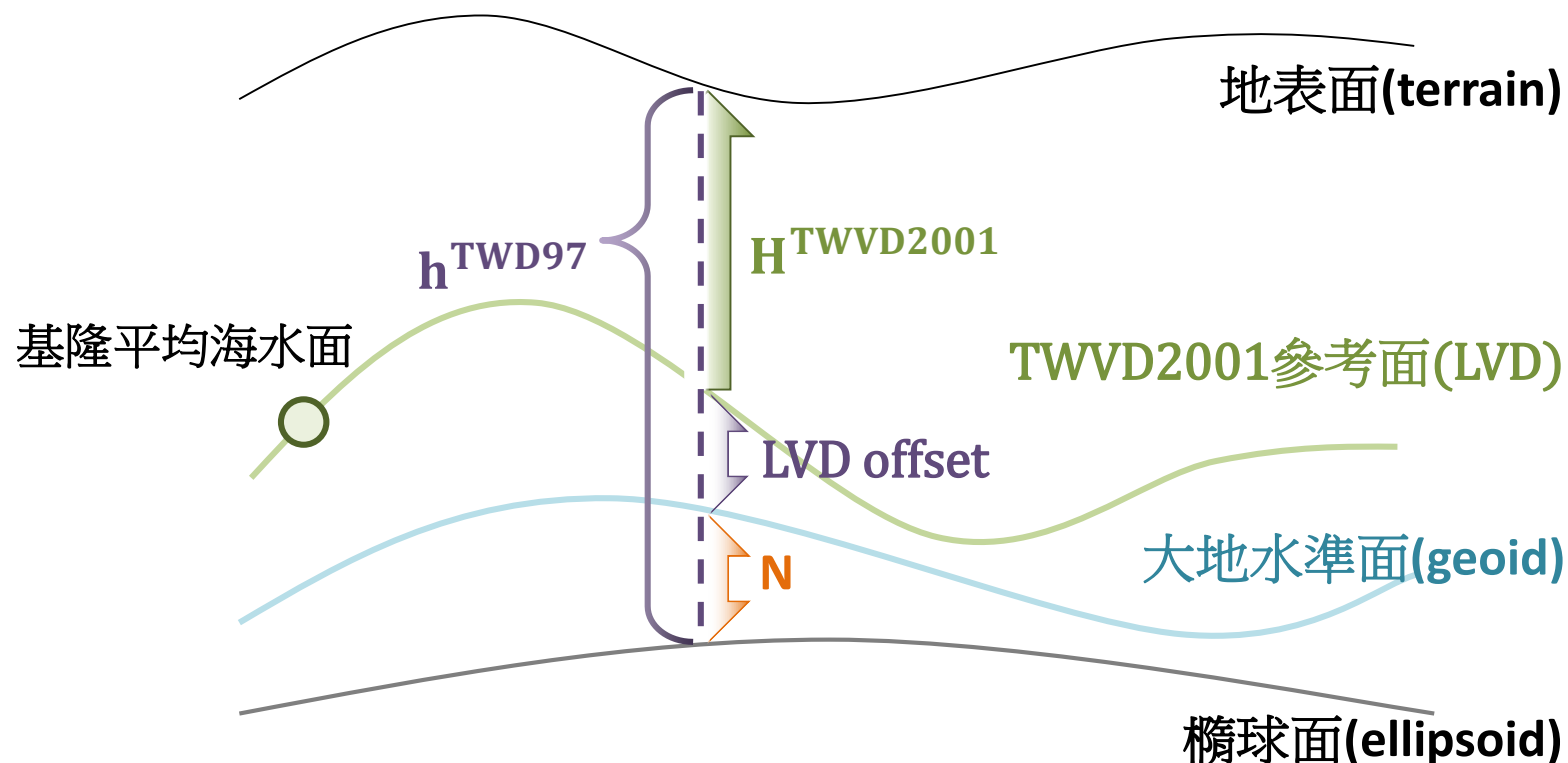
❖ Orthometric height(正高): $H = \frac{C}{\bar{g}}$

❖ Normal height(正常高): $H^N = \frac{C}{\bar{\gamma}}$



TWVD2001

- 採用「**正高**」系統，並以通過1957-1991年基隆潮位站平均海水位之等位面為參考面。
- **水準測量與重力測量合併實施**，以計算各水準點之大地位數。

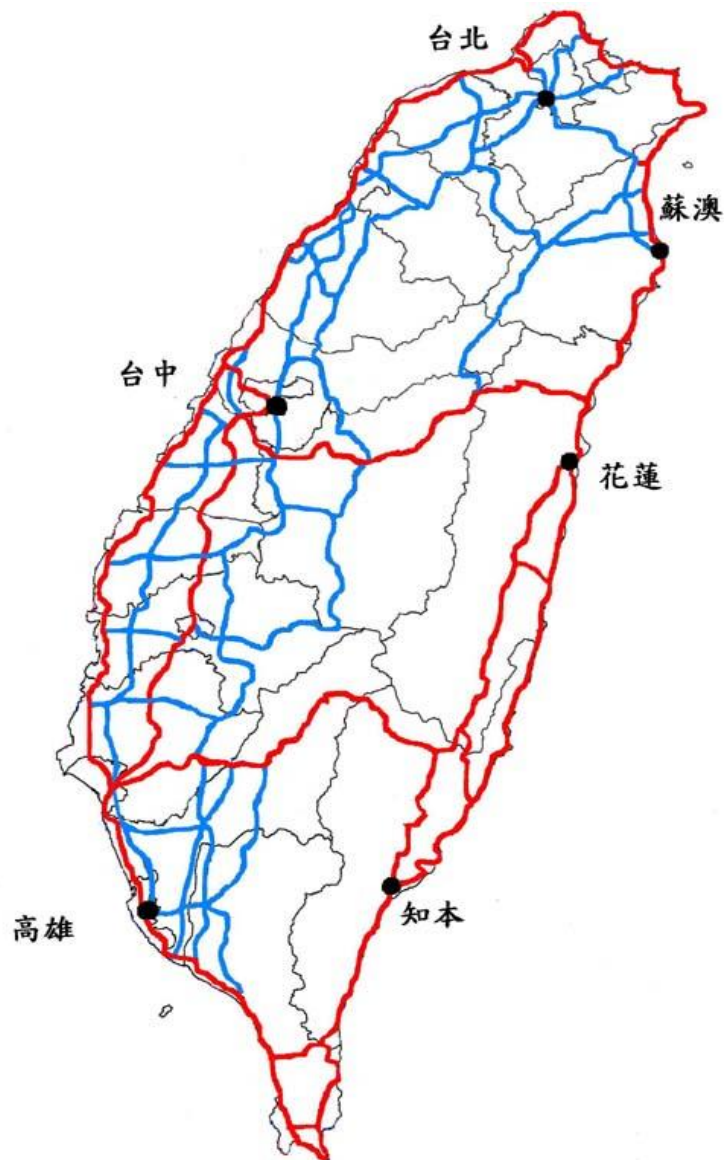




2002年



2013年



■：一等一級水準路線

測段數：1357

全 長：約2052.47 km

■：一等二級水準路線

測段數：1154

全 長：約2200.80 km



TWVD2001水準測量



1



2



3



4

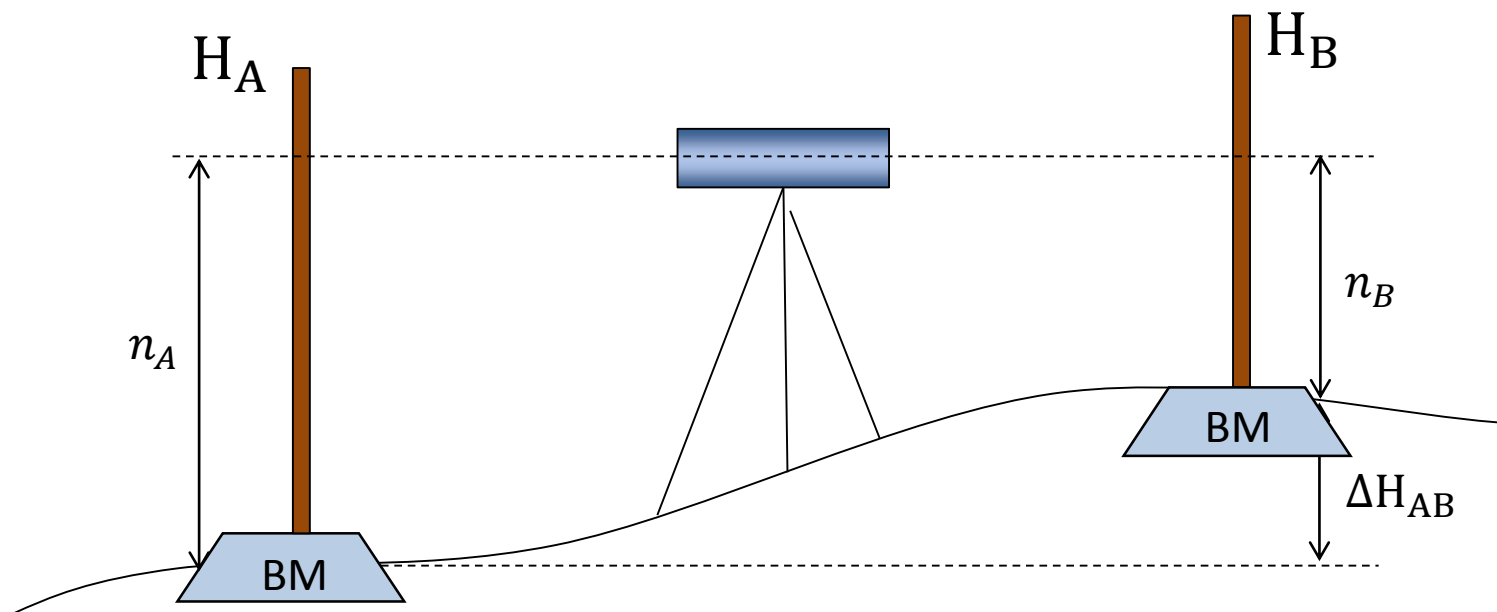


TWVD2001一等水準點正高與正常高之差異

正高 (m)	正高 - 正常高 (cm)
0 ~ 100	-0.1 ~ 0.6
100 ~ 1000	0.0 ~ 6.1
1000 ~ 2000	4.0 ~ 12.9
2000 ~ 3276	8.7 ~ 22.7
0 ~ 100 (花東縱谷)	0.0 ~ -0.7
100 ~ 627 (花東縱谷)	-0.1 ~ -3.9



水準測量

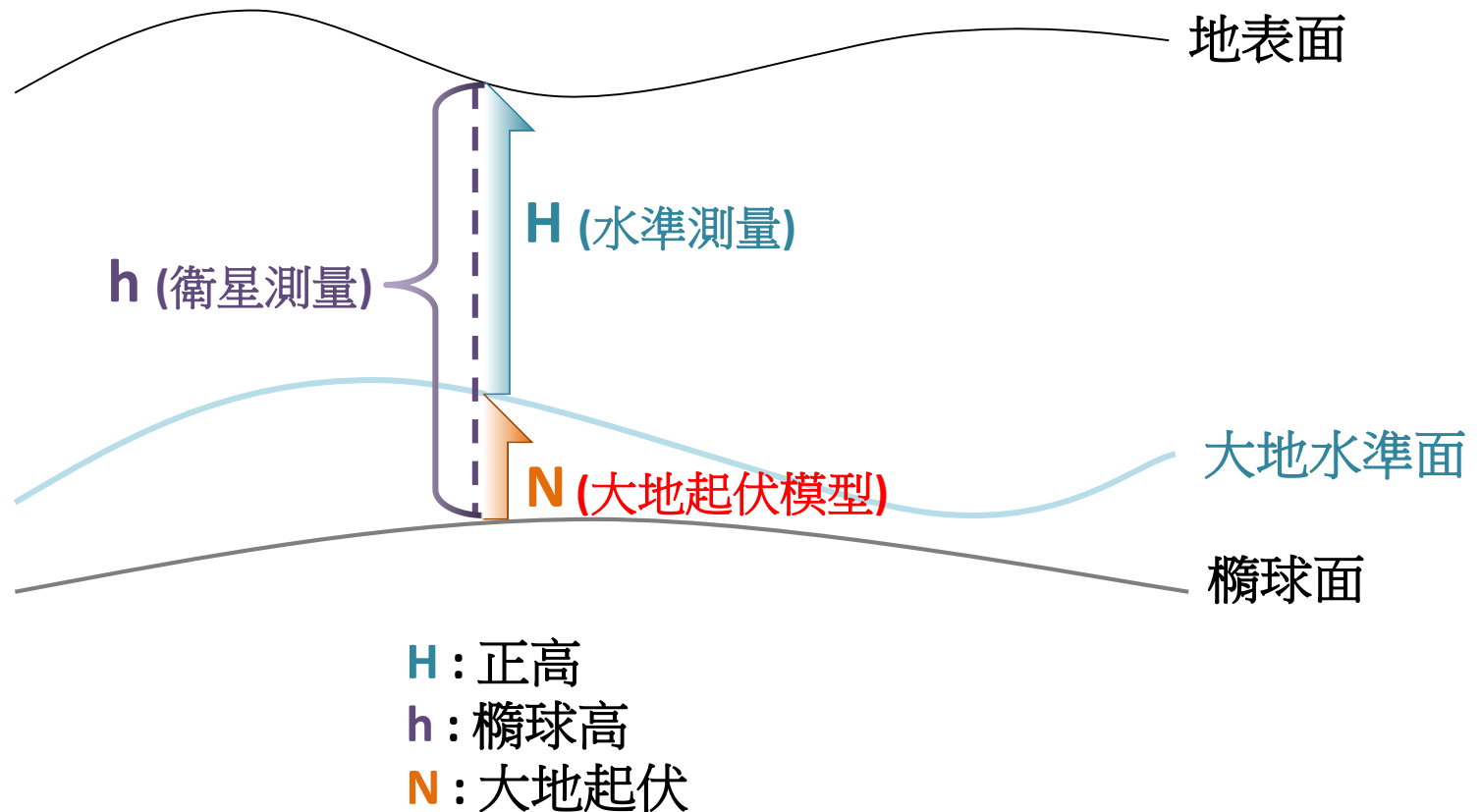


- 觀測兩點間的高程差： $\Delta H_{AB} = n_A - n_B$
- 由已知水準點引測可得到未知點高程： $H_B = H_A + \Delta H_{AB}$
- 相對精度高但費時費力，難以快速地完成大範圍實施！



TWVD2001之展望：高程現代化

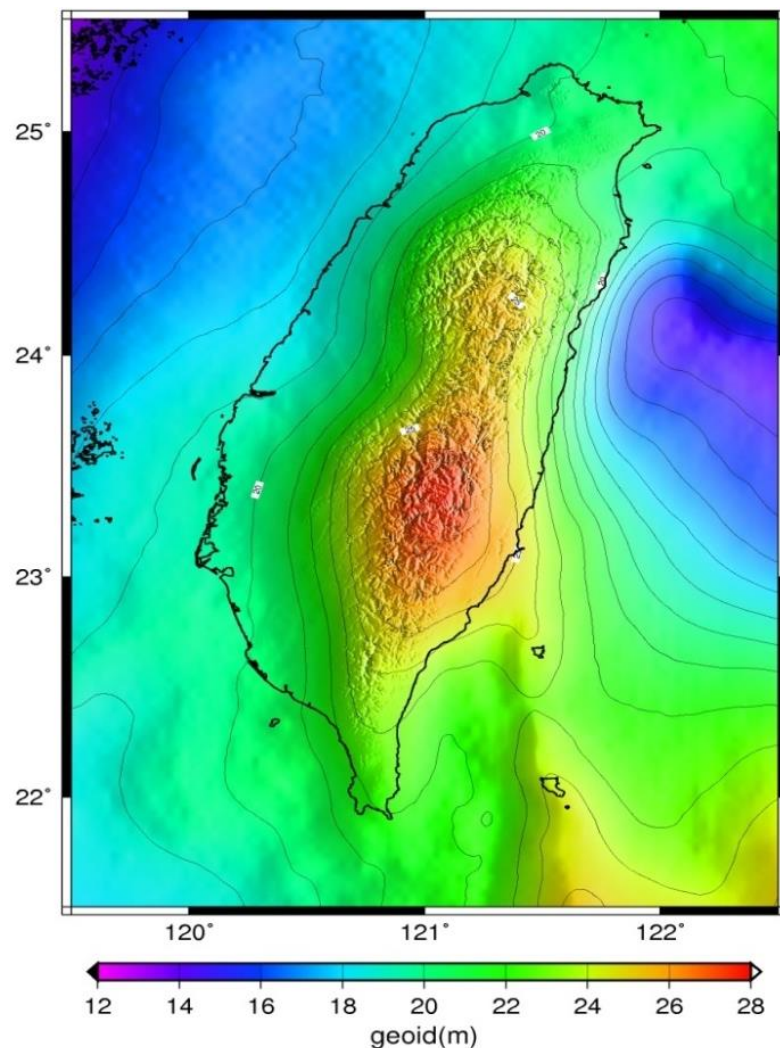
■ 以衛星測量方式得到正高： $H = h - N$





臺灣大地起伏模型

- 建立高精度大地起伏模型是全球趨勢，有助於實現高程現代化
- 因應臺灣特殊地理條件，需蒐集高密度重力資料，包含陸測、船測、空載及測高重力資料(黃金維等, 2013)
- 重力法大地起伏模型誤差來源：
 - LVD offset (基隆平均海水面與大地水準面之差異)
 - 觀測資料誤差



(Hsiao and Hwang, 2011; 黃金維等, 2013)



衛星正高測量

$$h = h^{GPS} + \delta h^{GPS}$$

$$N = N^{model} + \delta N$$

$$H = H^{level} + \delta H$$

■ 由 h^{GPS} 及 N^{model} 獲得正高測量成果(H^{GPS})

$$\begin{aligned} H^{GPS} &= h^{GPS} - N^{model} \\ &= (h - \delta h^{GPS}) - (N - \delta N) \\ &= H - \delta h^{GPS} + \delta N \\ &= H^{level} - \delta h^{GPS} + \delta H + \delta N \end{aligned} \quad (1)$$

$$H^{GPS} - H^{level} = -\delta h^{GPS} + \delta H + \delta N \quad (2)$$

cm等級

mm等級

可達dm等級

- δN 包含LVD offset (基隆平均海水面與大地水準面之差異)，
可藉建立「混合法大地起伏模型」來降低其影響



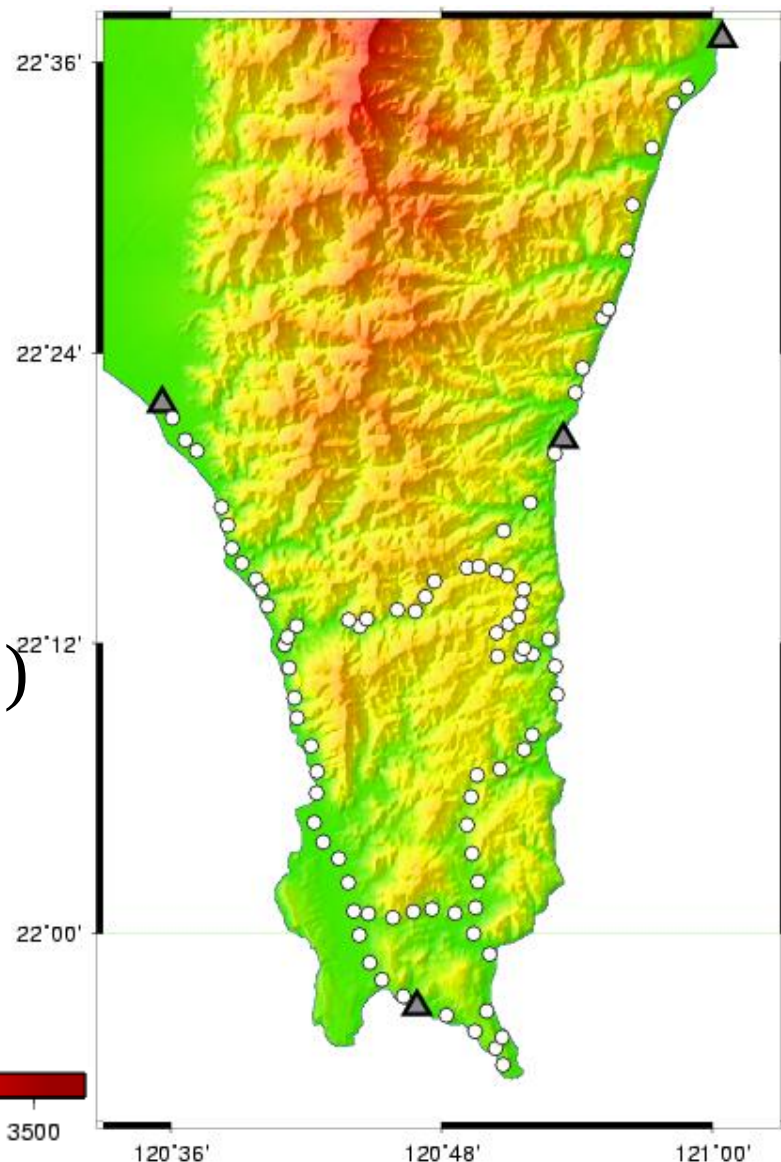
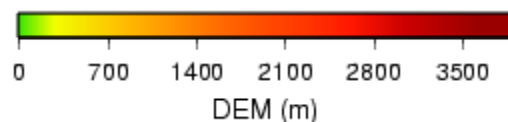
精度評估

■ 恆春半島水準環線

- 86個檢核點
 - e-GNSS三維坐標(實測)
 - TWVD2001正高(實測)
- 臺灣大地起伏模型(內政部)

■ 精度分析(e-GNSS正高－水準正高)

Mean(cm)	STD	RMS
-1.4	±6.6	±6.8





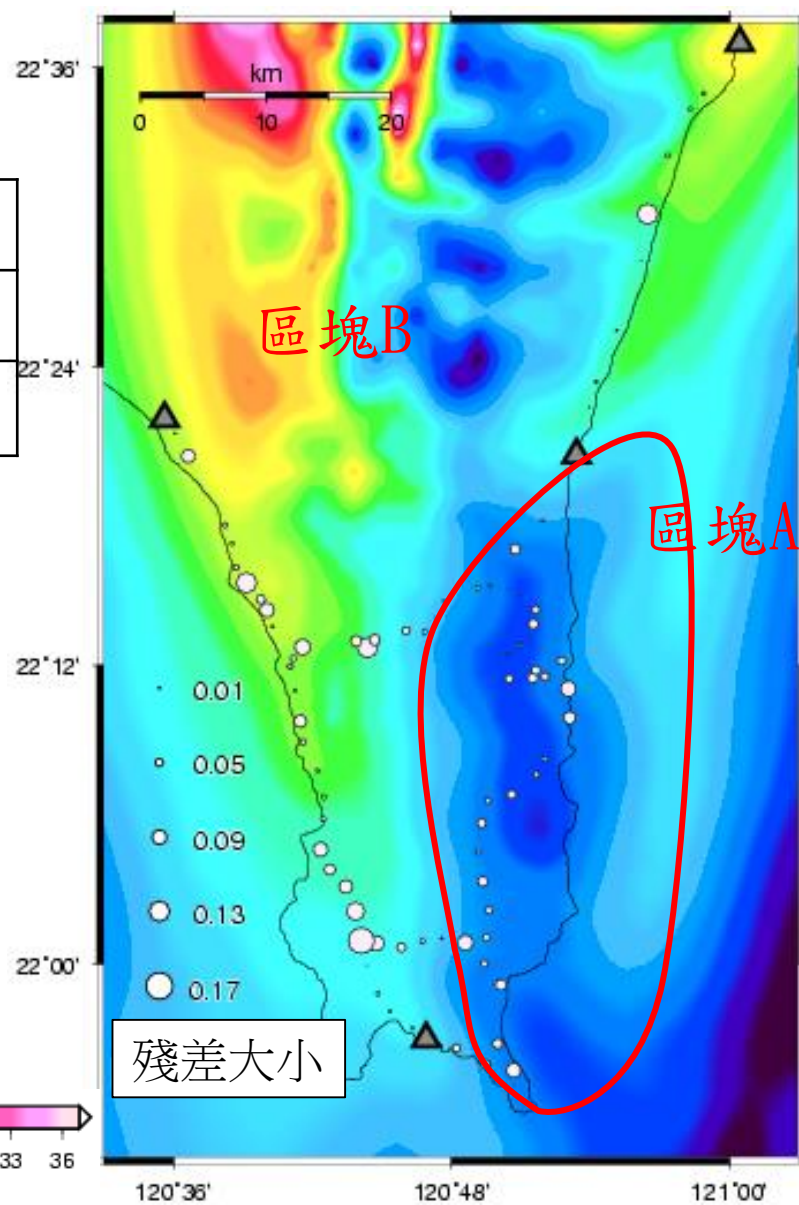
精度評估

■ 大地起伏變化率 vs. 精度(RMS)

	N變化率(")	RMS (cm)
區塊A	8.2	± 5.3
區塊B	18.5	± 6.9

■ 在山區等大地起伏變化較大的地區，e-GNSS正高測量的精度應會較低

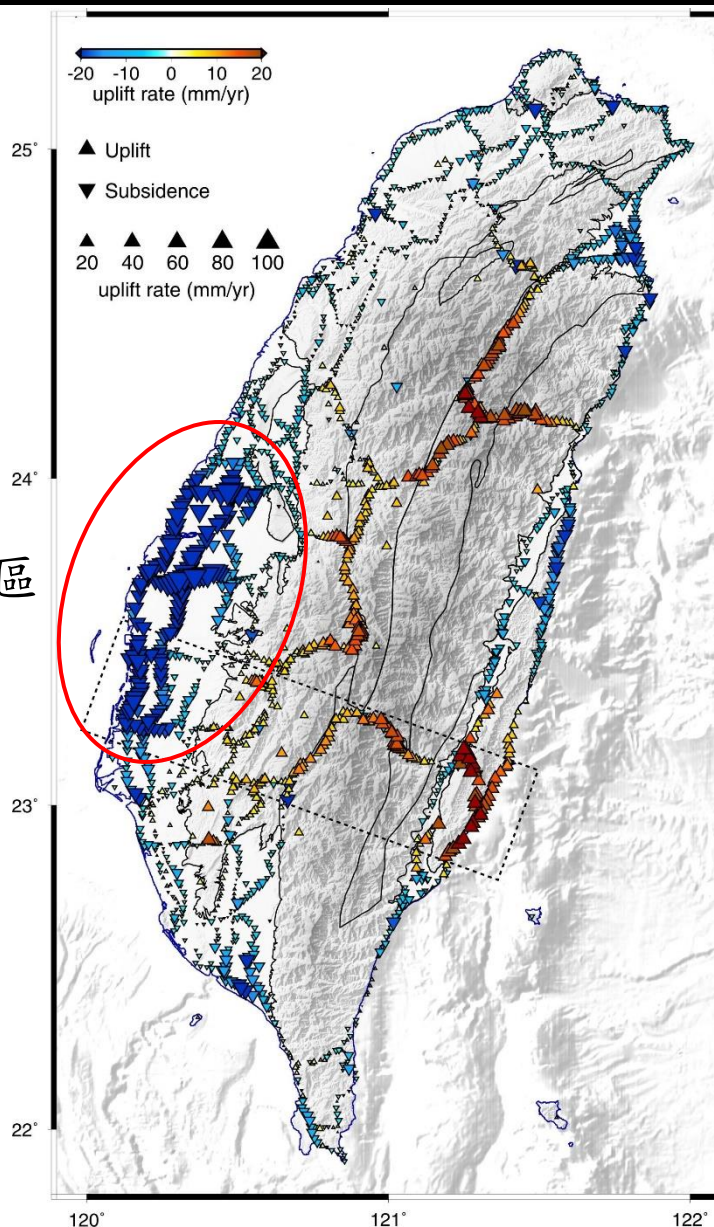
■ e-GNSS正高測量精度已可滿足製圖需求，如以空載光達技術製作土石流潛勢圖





TWVD2001之展望：高程變化模型

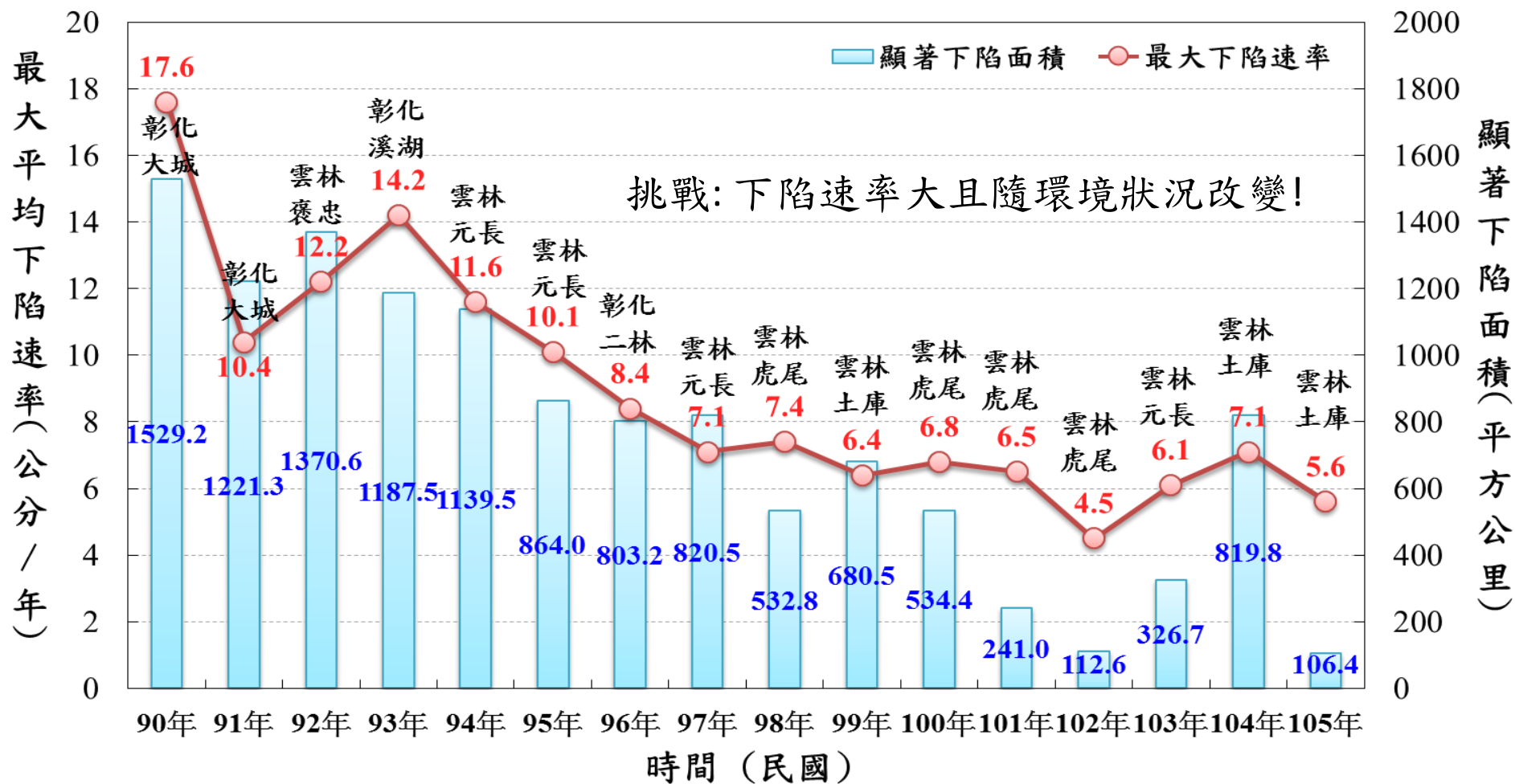
顯著沉陷區



結合衛星追蹤站
與水準測量監測
TWVD2001高程
變化並建立模型

Ching et al. (2011)

90-105年顯著沉陷區水準點最大下陷速率





結論

- 測繪科技的進步使獲得高精度測量成果更加便利，也更突顯坐標系統的重要性
- 區域性重測以及高精度位移(或轉換)模型可協助維持控制點相對精度並適度延長TWD97[2010]、TWVD2001的使用年限
- TWD97[2010]與國際參考框架之銜接可藉由公告轉換參數與更新參考時刻達成



謝謝!