

丈量我們的島：淺談水準測量與衛星導航系統測量高程之差異

Measuring the Taiwan Island: The Difference Between Leveling Surveying and Global Navigation Satellite System

陳建良

經濟部地質調查及礦業管理中心

Chen, Chien-Liang

Geological Survey and Mining Management Agency,
MOEA

梁勝雄

經濟部地質調查及礦業管理中心

國立臺灣大學地質科學系

Liang, Shen-Hsiung

Geological Survey and Mining Management Agency,
MOEA

Department of Geosciences, NTU

水準測量利用水準儀及水準尺根據水平視線測得兩點間的高程差，稱為正高，屬於水準面間的高程累加，具有物理上的意義；衛星導航系統測量之高程建立在地球坐標系統，屬於橢球坐標系統，稱為橢球高，由數學方式計算而來，本文為您說明此二種高程的差異。

衛星導航系統高程精度較差？

有關衛星導航系統 (Global Navigation Satellite System，簡稱GNSS) 國人最常聽到的一般多為GPS，其中文全稱為全球定位系統 (Global Positioning System) 是由美國在1994年全面建成並發展，且已廣泛運用於各領域的空間定位需要。

衛星導航系統則是涵蓋世界各國的衛星定位系統之全稱，現今除了美國的系統外，還包括歐盟的伽利略系統 (Galileo Satellite Navigation，簡稱Galileo)、俄羅斯的格洛納斯系統 (Глобальная навигационная спутниковая система 或 Global Navigation Satellite

System，簡稱GLONASS)、中國的北斗系統 (BeiDou Navigation Satellite System，簡稱BDS)，以及印度與日本區域性的衛星系統。

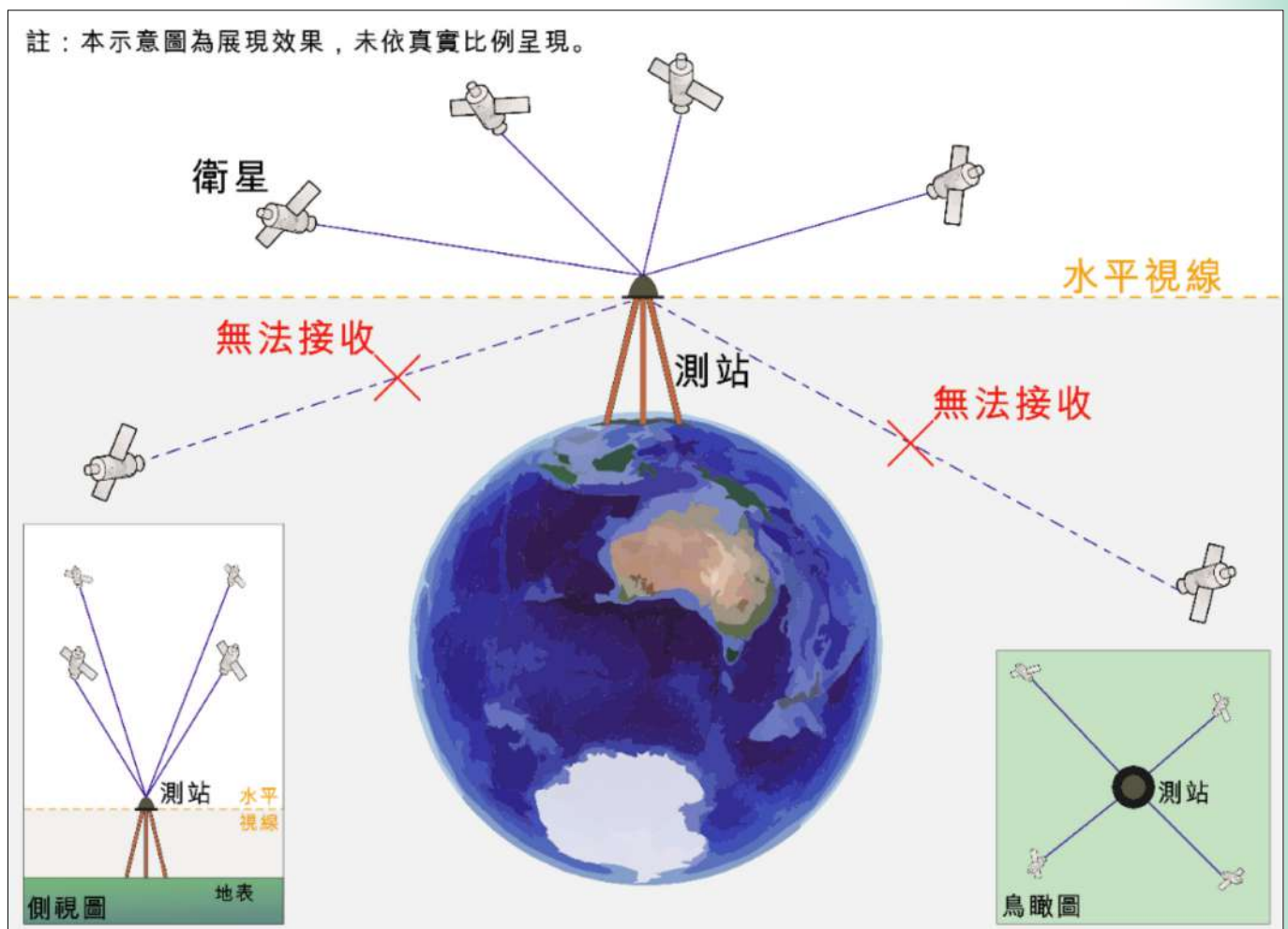
衛星導航系統的運作原理，簡要說，即衛星在距離地面19,000公里至近40,000公里不等的天空中，不斷發射無線電波訊號，因為訊號接近光速，由地面接收儀器接收到後進行解算，就能得到衛星與接收儀器間之距離，當有4個以上的衛星，就能精確定位到接收儀器的位置。有趣的是因相對論效應的影響，因衛星上的時鐘每天會比地球上接收儀的時鐘快38微秒，在衛星發射上空前，可將衛星的振盪器作頻率的平移以補償相對論的影響。

由於衛星導航系統測量受限於觀測者在地面接收衛星訊息時，需要廣播路徑無障礙地接收各衛星之訊號，並不能接收到水平視線以下的衛星訊號(圖1)，衛星在空間上的幾何分布(Satellite Geometry)讓測站在水平方向與高程方向定位精度產生差異，一般測站在水平方向與高程方向定位精度產生差異，一般測站如果透空情形良好，衛星在三維空間的水平幾何分布都會優於高程幾何分布，因此觀測者定得之位置在高程方向的精度相較水平方向精度差，通常是三到四倍(圖2)。雖然衛星導航系統的精度可以透過拉長連續觀測時間的方式讓精度提升，但是精度隨著時間的增加提升有限，這是我們在應用衛星導航系統測量時不得不面對的問題。

除此之外，衛星導航系統測量還隱藏了一個大問題，是一般人較少深究的，那就是衛星導航系統測量的高程與一般民生使用的高程系統並不一樣，不一樣在於計算方式不同，意義上也不一樣。

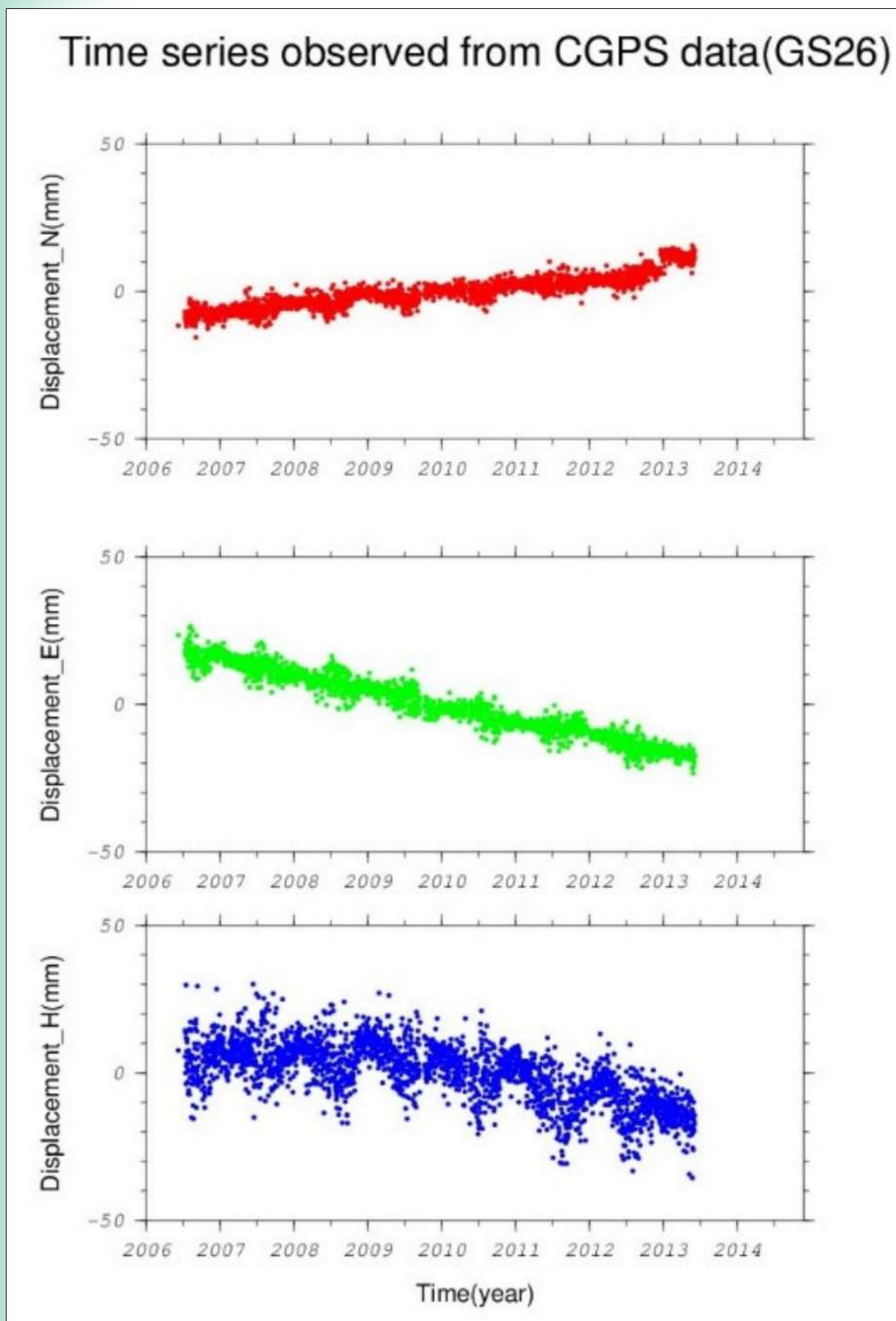
正高與橢球高

水準測量使用水準儀與水準尺，根據水平視線測得兩點間的高程差，為水準面間的高程累加。以臺灣為例，水準網聯測到基隆的驗潮站以平均海面為起算依據獲得各水準點的高程，我們稱之為正高(H)，分布在各地水準點的高程值由內政部定期測得後，公



1

測站接收衛星訊號示意圖(作者繪製)



2

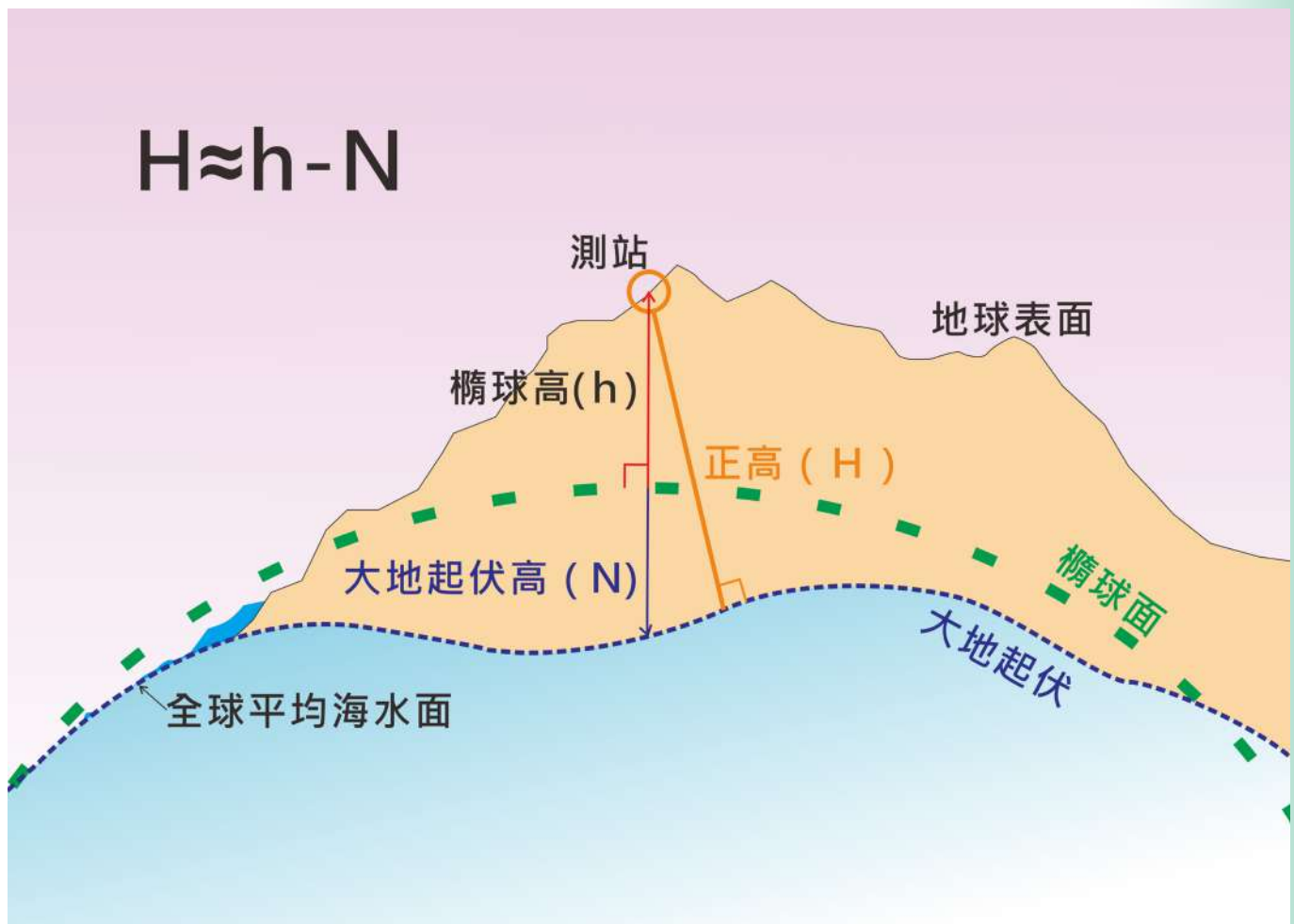
名崗國小(站號：GS26)衛星導航系統連續站2006至2014年間的觀測結果的原始資料。上、中、下圖分別代表該站於南—北方向(N)、東—西方向(E)、高程方向(H)的位移情形，每個點代表每天的位置，藉由圖中，我們能觀察到資料顯示之高程方向的震盪較大，暗示其精度相對南北向與東西向比較不佳(作者繪製)

告給各界使用，假設在一個已知高程的水準點上進行衛星導航系統測量，由於衛星導航系統測量的坐標系統建立在地心地固的球面坐標系統，例如：WGS84，中文稱為世界大地測量系統1984 (World Geodetic System 1984)，即在1984年定義。

簡單來說，是經過空間三維的數學計算方式，決定一個適當的橢球體後，由WGS84的球面坐標系統進而轉換至平面的二度分帶坐標系統(TWD97)而來，得到的高程值建立在以參考橢球面為依據所起算的高程，稱之為橢球高(h)，將不同於內政部所公告之海拔高程H(正高)，這之間的差異我們稱之為「大地起伏值(N)」(圖3)。

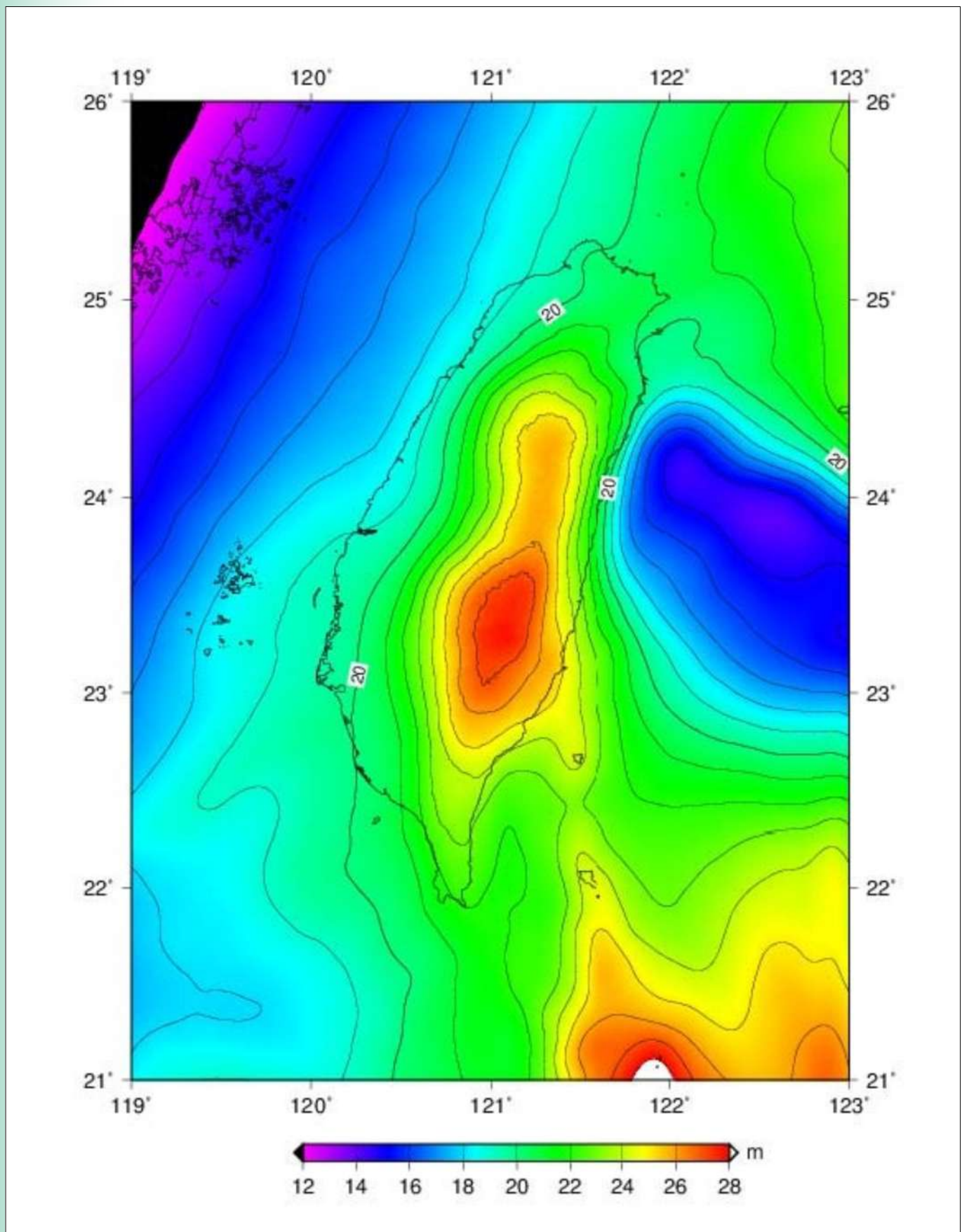
其中，TWD97為臺灣大地基準1997 (Taiwan Datum 1997)的簡記，即在1997年以GPS重新計算坐標基準(因當時其他國家發展的導航系統尚不完備)而定義的經緯度數值，其坐標基準原點經緯度為東經120°58'55.2886”，北緯23°58'25.9486”，早期還有TWD67，即以大地參考系統1967 (Geodetic Reference System 1967)為基準的經緯度數值，然而TWD97與TWD67的坐標數值的測量結果可能差1公里，如果搞混的話，可能會因延遲救援，而發生危險。

順帶一提，在1906至1997年以前，未利用衛星導航系統進行大地測量以前的年代，在南投埔里鎮虎子山設有一等天文三角點作為臺灣地區大地測量基準參考原點。



3

正高(H)、橢球高(h)及大地起伏(N)的關係圖(改繪自Snay, R. A., 2012)



4
臺灣大地起伏模型 (TWGEOID2014)。大地起伏模型是將正高與橢球高的差異量匯集成等值線圖，藉此能更容易觀察其分布特性，進一步地說，大地起伏模型能藉由重力法或混合法獲得，此圖為重力法獲得的臺灣大地起伏模型（資料來源：內政部地政司衛星測量中心）

大地起伏模型

受到地殼質量分布不均影響，大地水準面與參考橢球體並非處處貼合，故水準測量得到的正高與衛星導航系統測量得到的大地起伏值在各地均不相同，若我們能找到這個不同大地起伏值之數值，組成一個數學模型，在許多使用衛星導航系統進行測量之處，將能透過這個模型換算得到其正高，其標準差約5公分，雖然誤差已經很小，但因精密水準測量精度達毫米(mm)等級，故可視測量精度需求進行適度調整。

目前臺灣地區之大地起伏模型係由內政部建立並提供，適用範圍為北緯21度至26度，東經119度至123度所形成之矩形範圍(圖4)，使用者申請取得模型後，能將橢球高與正高進行轉換，透過e-衛星導航系統(即時動態定位系統)實際驗證，誤差小於10公分。

差以毫釐將謬以千里

《漢書·司馬遷傳》有云：「察其所以，皆失其本也。故易曰：『差以毫釐，謬以千里。』」誠如此言，當使用衛星導航系統測量所得到的高程，例如e-衛星導航系統、衛星導航系統控制測量、衛星導航系統移動站、衛星導航系統連續站、空載光達原始點雲測量等，必須瞭解到其與水準測量得到之高程並不完全相同。此外，在還沒進行大地起伏改算前，它都還與實際高程存在些許差異。

最後要再提及一點，由於臺灣受到板塊聚合，各地變形程度不一，地表下質量分布狀況並非永遠不變，所以，大地起伏模型也必須定期更新，它的模式精度也會影響到轉換後的精度，以衛星導航系統測量在高程方向的精度已較差的情況下，再進行一次轉換，勢必再度喪失精度，因此，必須小心謹慎的應用，搞懂每種不同測量方式的「根本」才能避免「謬以千里」的錯誤出現！

延伸閱讀

- Snay, R. A. (2012). Evolution of NAD 83 in the United States: Journey from 2D toward 4D, *Journal of Surveying Engineering*, 138(4), 161-171.
- 內政部地政司衛星測量中心網站。檢索日期：2023年7月31日，<https://gps.moi.gov.tw/sscenter/introduce/infopage.aspx>
- 陳建良、梁勝雄、胡植慶(2016)。地表脈動的聽診器—GPS測量與水準測量。科學月刊，554，146-149。
- 梁勝雄、許晉璋、陳建良(2016)。冰島火山活動愈來愈頻繁—都是氣候變遷惹的禍？地質，35(1)，82-87。
- 梁勝雄、陳建良(2019)。從地面到太空—全方位觀測地表變形。地質，38(3)，35-39。
- 曾清涼、儲慶美(1999)。衛星導航系統衛星測量原理與應用，第二版。國立成功大學衛星資訊研究中心。