# 2012 年臺灣國際科學展覽會
# 優勝作品專輯

編號：150014

作品名稱

利用全球定位系統觀測電離層海嘯現象

得獎獎項

大會獎：四等獎

作者姓名：周品君、侯信宇、劉天祐

就讀學校：臺北市立建國高級中學

指導教師：劉正彥、李文禮

關鍵字：全球定位系統、電離層、海嘯

# 作者簡介

第一作者(圖右)：

我是周品君，就讀建中，目前高二。由於平時對地球科學有極大的興趣，又曾經在電視上見到有關日本 311 大海嘯的報導，因此我便想要做這方面的研究。經由地科老師的介紹之下，找到了我們的指導教授，學習有關知識，並開始了我們的研究。在研究過程中，雖然常在理論上或是撰寫程式的過程中遇到困難，但我都會去圖書館或是網路上查閱相關書籍或論文，不僅解決了問題，也增進了許多知識與經驗。而本次研究使我獲益最多的除了解決問題後的快樂，最重要的是研究的精神，以及團隊的合作經驗。

第二作者(圖左)：

我是侯信宇，今年建中高二。平常喜歡讀科普雜誌，並在找到問題時嘗試去解決，利用各種方法去達到目的，絕對不放棄。做科展研究的時候，我喜歡寫些實用的程式碼，並上網或閱讀相關書籍查詢各種函數，以擴充程式以計算出需要的數據。

另外，我喜歡沉浸在那種團隊一同討論、一同努力並朝向一致目標的感覺，

這是我在做科展中，所得到的最大收穫。

第三作者(圖中)：

我是劉天祐，目前就讀台北市立建國高級中學二年級。興趣是閱讀有關地球科學、醫學書籍。做科展讓我明白團隊合作的重要性，時間的配合，所以事實上，組員們各捨去個人的時間，全心投入此次科展。在這之中碰到許多困難。有時去尋找一個答案的時候，都會發現新問題，進而使尋找答案的過程中面臨更多的困難，但與大家一起想辦法解決的那種氣氛，卻是令人興奮且高興的。最重要的是，科展提供了我探索求知的成就感。

# 摘要

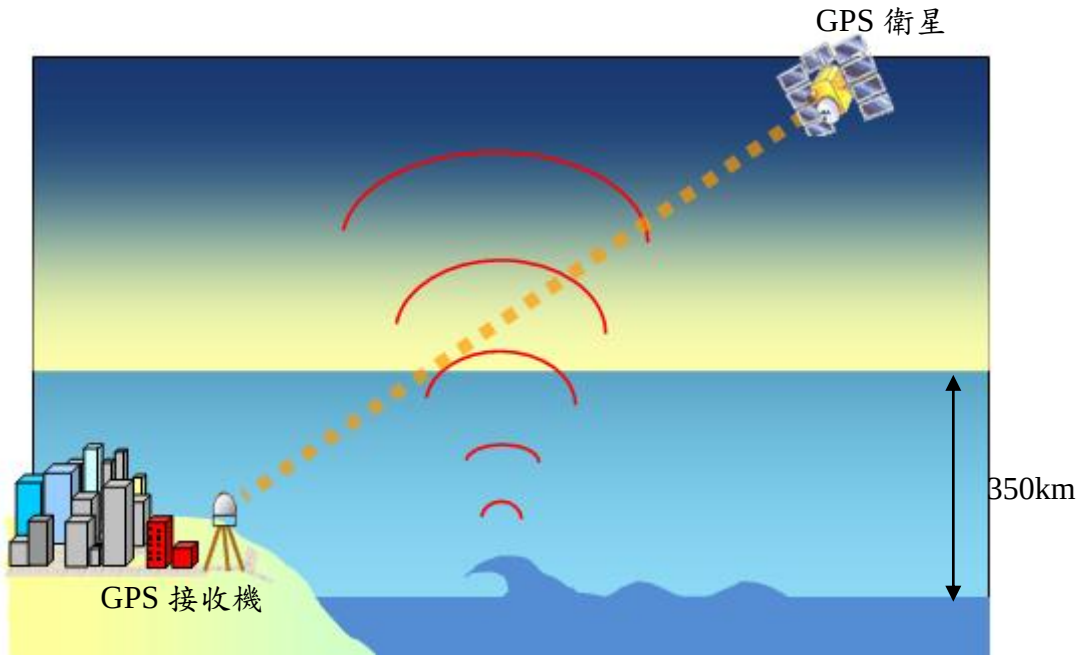
2011 年 3 月 11 日，日本發生規模 9.0 的地震，同時引發海嘯。太空科學家發現海嘯會引起電離層中總電子含量 TEC（Total Electron Content）的擾動。雖然海嘯引起之電離層 TEC 變化以及海嘯模擬結果已被公布，但兩者之關係尚未被探討。因此，我們比對海嘯模擬與當天電離層 TEC 變化，確認此電離層 TEC 擾動是由海嘯所引起的。我們進一步研究電離層 TEC 的擾動大小和海嘯高度的關係，發現兩者之間具有極高之相關性，且到達的時間差約為±10 分鐘，而 1 公尺高的海嘯約會造成 12.8TECu( 即 TEC 之單位，1TECu=1016el/$m^2$ )之總電子含量變化。希望將來能利用地面 GPS 觀測到的電離層 TEC 資料，在地震後迅速確認海嘯之發生與否，並於到達岸邊前訂定其位置，同時推估高度。藉此，建立海嘯預警輔助系統，以降低海嘯對人類生命和財產的威脅與損害。

# Abstract

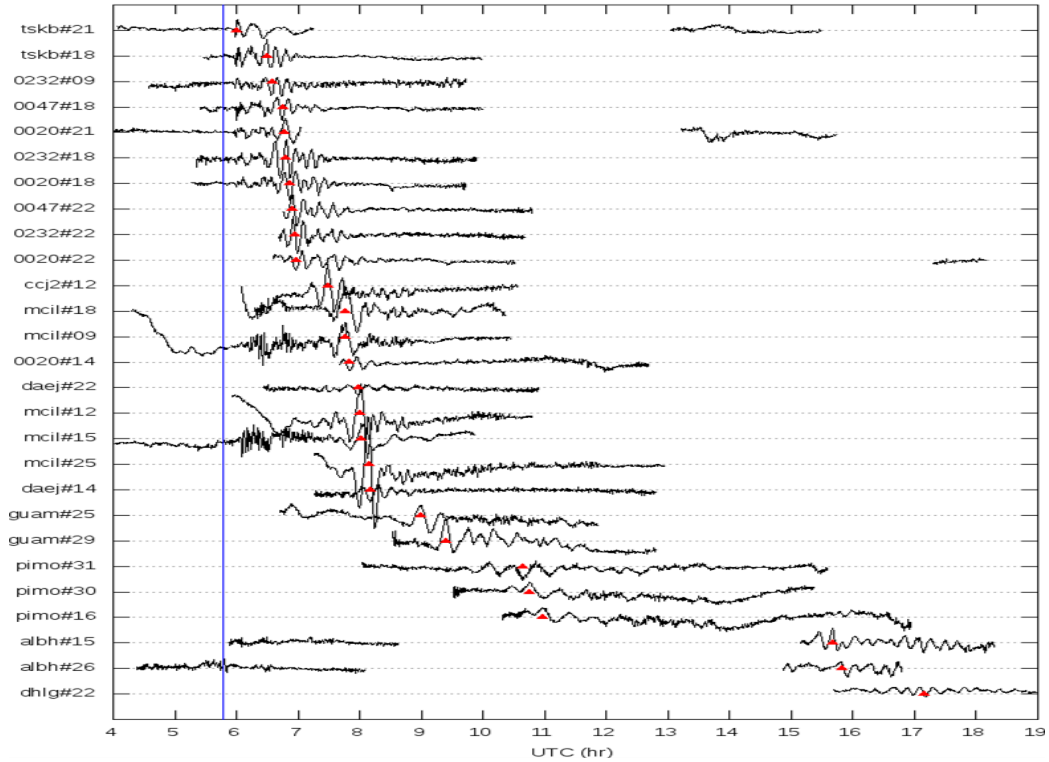
Right after an earthquake occurring, seismologists compute the energy plot to predict the arrival time and height of possible triggered tsunami. Meanwhile, space scientists often observe seismo-traveling ionospheric disturbances (STIDs) in the total electron content (TEC), which is derived from measurements of ground-based GPS receivers, induced by tsunami. The 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake triggered devastating tsunami. Although the tsunami and triggered STIDs of the GPS TEC have been separately reported, the relationship between the two has not yet been investigated. Therefore, we reproduce tsunami variations by using model simulations and reexamine the GPS TEC data to confirm the STIDs being triggered by the Tohoku tsunami. We further analyze the relationship between the STID amplitude and the tsunami height, and find them being highly correlated. The difference between the two arrival times is about ±10 minutes, and 1 meter of the tsunami height results in 12.8TECu (1TECu=1016el/m2) of the STID amplitude. It is our hope that the GPS TEC observation can be employ to confirm the tsunami occurrence, locate its location, and predict its height, which acts an auxiliary of the tsunami early warning system preventing possible disaster and reducing damage.

# 壹、前言

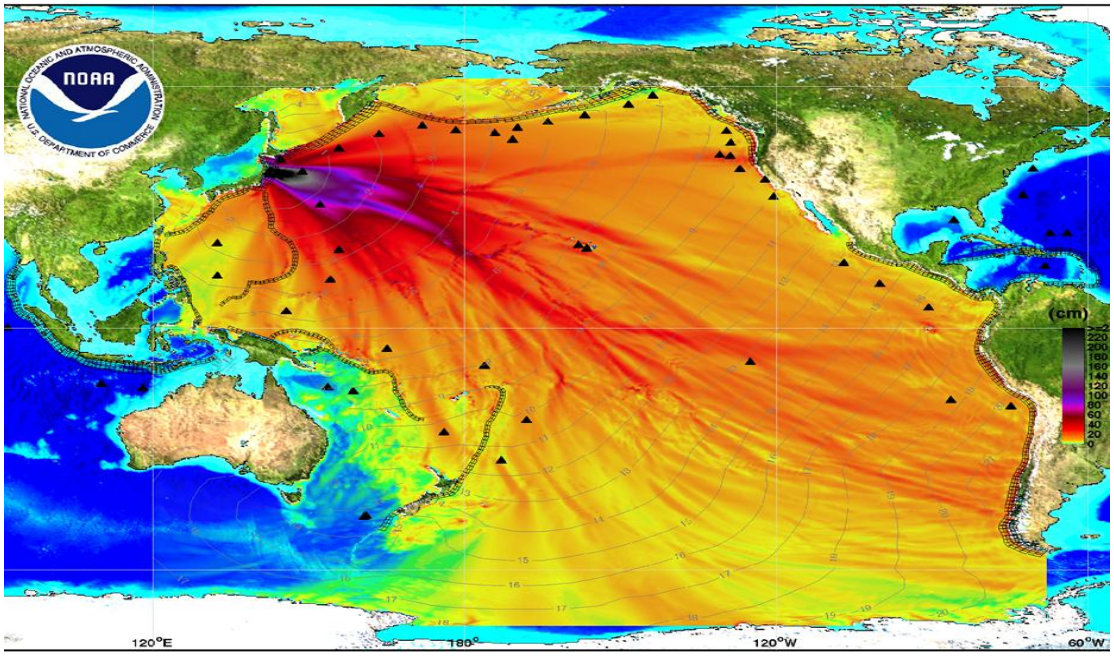
2004 年 12 月 26 日，印尼蘇門答臘發生規模 9.3 的強震，並引發巨大的印度洋海嘯，造成印度洋周邊國家嚴重財損與人員傷亡（印尼約 30 餘萬人死亡）。Liu et al.[2006]分析印尼及印度洋周邊地表 GPS 接收機記錄資料，發現海嘯會引起電離層中總電子含量(TEC, Total Electron Content;即 GPS 衛星與接收機間之總電子量；圖一)的擾動，進而干擾 GPS 衛星發射訊號。2011 年 3 月 11 日，日本東北外海發生規模 9.0 地震，同時引發海嘯，造成近 16 萬人死亡，數百萬人無家可歸。國立中央大學太空所隨後分析日本和台灣地區地面 GPS 接收機網記錄資料(圖二)，發現此次大海嘯亦有引起電離層總電子含量 TEC 擾動的現象[Tsai et al.,2011]。美國海洋大氣總署 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)地震之後隨即公布模擬的海嘯最大高度與走時圖(圖三)。中央大學水文與海洋研究所亦利用 COMCOT (Cornell Multigrid Coupled Tsunami model)模式模擬計算日本地震引發海嘯之走時，並與海潮計觀測相互比較，證實該模式可以正確模擬海嘯高度變化與走時。為進一步探討電離層 TEC 擾動與海嘯波動兩者之關係，我們比對 NOAA 與電離層 TEC 擾動之走時資料，並重製日本東北地震之 COMCOT 模擬與電離層 TEC 變化，藉此證明海嘯會引起電離層 TEC 擾動，並計算 TEC 上的擾動大小和海嘯高度關係。由於並非有地震就有海嘯發生(大部分地震並不會引發海嘯)，我們希望當未來地震發生時，能藉由兩者間的關係，從電離層 TEC 的擾動變化迅速確認海嘯的發生，並即時利用電離層 TEC 擾動大小推估海嘯高度，以輔助海嘯警報的發布，減少海嘯對人們的威脅。




圖一、GPS 人造衛星與地面接收機以及 TEC 之示意。藉由地面接收機接收到 GPS 人造衛星發射訊號飛行時間與其在真空時所需時間之差，推算訊號經過的電離層的總電子含量 TEC。當海嘯發生時，海嘯波能量傳至電離層，會造成 TEC 之擾動，稱為電離層海嘯。此現象可經由 GPS 人造衛星與地面測站紀錄之資料中觀察到。圖中黃點線為 GPS 衛星至地面接收機之連線，此連線上之總電子量可代表電離層 TEC。




圖二、2011 年日本東北地震發生後 27 個不同地點觀測之 GPS TEC 差分量變化。藍線代表地震發生時刻，紅三角點代表最大振幅之發生時刻。差分量由每一時刻 TEC 減去其 30 秒前的值。Tsai et al.[2011]



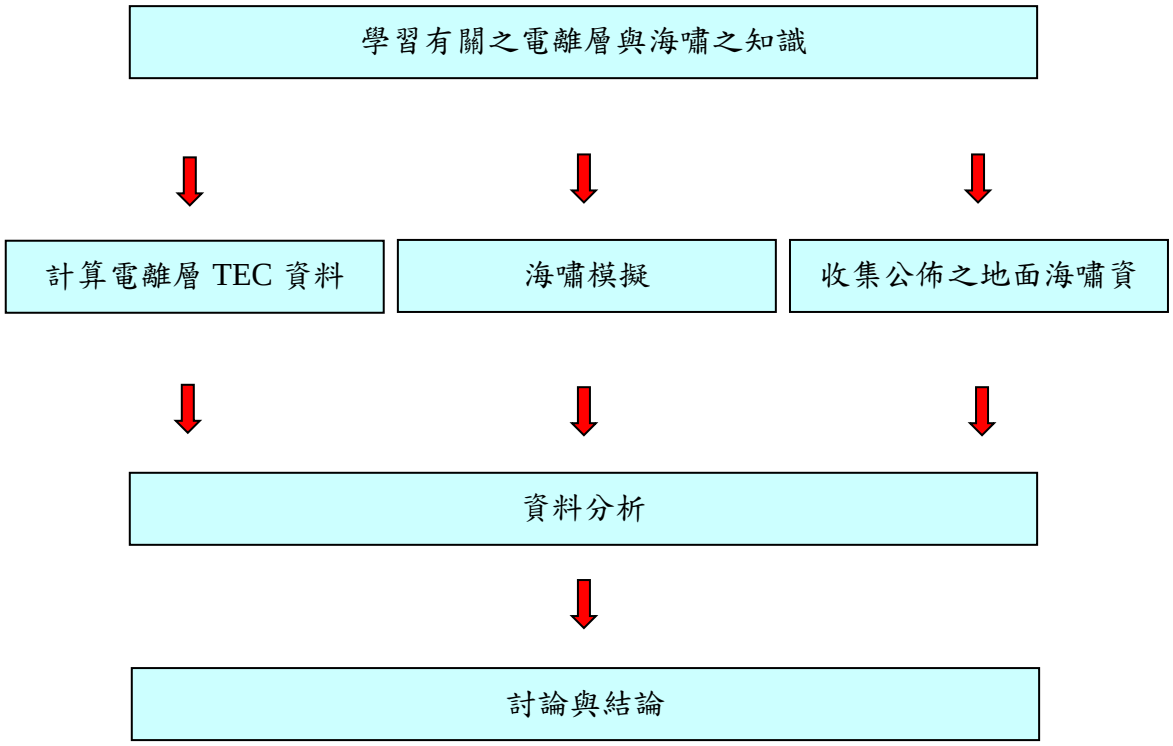

圖三、NOAA 公佈之海嘯最大高度與走時圖。顏色代表海嘯高度(可對照圖右側之色階圖)，黑色三角形代表各個 DART 海潮計所在位置。

圖片引用網址：

http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/Energy_plot20110311_no_tg_lables_cropped.png

# 貳、研究過程及方法

我們透過網路蒐集有關電離層以及海嘯的知識，下載台灣、日本地面和世界 SOPAC 之 GPS 接收機網記錄資料，並向中央大學太空所學習電離層 TEC 計算方法，同時經由網路下載 NOAA 走時與最大高度圖，另外我們向中央大學水文與海洋研究所吳祚任教授取得 COMCOT 海嘯模式，並學習其操作方法。上述各項工作準備就緒後，我們進行電離層海嘯擾動檢測與傳播速度分析、海嘯模擬與海潮計觀測之比對、電離層擾動大小與海嘯模擬高度研究。詳細研究過程與方法如下(圖四)：




圖四、研究流程圖

## 一、學習電離層與海嘯知識

我們向教授請教電離層相關的知識並閱讀相關論文，研究電離層與海嘯的性質。我們研讀電腦程式書，熟悉 MATLAB 程式的使用，並取得利用 GPS 資料計算電離層 TEC 的程式碼。

### 1. 電離層之放大倍率

我們假設海嘯波上下振動拍打海面大氣，會引起類似聲波之縱波 Liu et al.[2011]。根據簡諧運動之能量守恆定律(總能量等於動能加位能; E=K+U)，海嘯引起之振動，能量密度可表示成：

$$E_O=K_O+U_O=K_{O,\ max}=1/2\rho_O\ \ v_O^2=1/2\rho_I\ \ v_I^2=K_{I,\ max}=K_I+U_I=E_I \quad (1)$$

其下標 O 與 I 分別代表海面與電離層， max 代表最大值。因此，$\rho_O$ 和 $v_O$ ($\rho_I$ 和 $v_I$)為海面(電離層)之大氣密度與最大速度。此外，振動速度可表示成 $v=A\omega$，其中 A 和 ω 為簡諧運動之振幅和角頻率。代入式(1)可得：

$$\rho_O(A_O\omega_O)^2 = \rho_I(A_I\omega_I)^2. \quad (2)$$

假設海嘯引起之大氣波動頻率不變 $\omega=\omega_O=\omega_I$，則可獲得海嘯波動傳至電離層之放大倍率：

$$R=A_i/A_O = (\rho_O/\rho_I)^{1/2} \quad (3)$$

由上述之放大倍率，一般海面之大氣振動傳至 350 公里高之電離層時，波動會被放大。

### 2. 海嘯波

海嘯波為淺水波，故其波速可用公式表示為：

$$V=\sqrt{(g*h)}$$

V 為海嘯速度，單位為 m/s； g 為重力加速度，單位為 $m/s^2$；

h 為海水深度，單位 m。

## 二、收集電離層 TEC 資料

從日本國土地理院、台灣中央氣象局、世界 SOPAC(Scripps Orbit and Permanent Array Center)網站(附錄 A)取得日本東北地震當天 GPS 地面接收機紀錄資料。再利用 MATLAB(附錄 B)將所下載之原始資料計算電離層 TEC 之全日變化資料以及對應之所在位置。

## 三、海嘯模式計算

因為海潮計數量有限，本研究利用 COMCOT 海嘯模擬程式(附錄 C)，輸入當時地震相關數據，模擬計算海嘯的走時與最大高度，以做為後續研究參考與相關性比對所需的資料。

## 四、收集公佈之地面海嘯資料

我們自美國海洋大氣總署 NOAA 網站取得海嘯走時與高度彩圖作為參考(圖三)。因為 NOAA 並沒有提供詳細的數位數據，所以我們自行撰寫程式，把圖上的高度顏色分離出 RGB 數值，比對色階圖(colorbar)換算為高度數據。(附錄 D)。

另外，到達時間則藉由圖上的走時等值線，經線性推算得到。

## 五、資料分析

分析電離層 TEC 資料，紀錄 TEC 變化最大擾動強度和時間。由其位置至震央之距離和到達所需之時間計算該擾動傳播速度。檢視速度以篩選和確認電離層海嘯擾動。另外，擷取 COMCOT 模擬與 NOAA 公佈的相關數據，獲取對應 TEC 資料點位置正下方海面之海嘯擾動到達時間與振幅。

為了確定資料分析後所判別的 TEC 擾動為海面的海嘯所引起，我們把該擾動的數據去與 COMCOT 海嘯模擬、NOAA 海嘯數據做對照。

將比對後的速度與波動產生時間去計算相關性。若相關性高，則代表 TEC 擾動是由海嘯引起。另外，由振幅比較出的相關性，可證明 TEC 擾動大小與海面海嘯高度之間的關係。

## 六、問題討論與結論

將分析後的圖表與資料做總整理，討論出 TEC 與海嘯的相關性，做出本研究的結論，並探討如何應用這些成果到實際層面上。

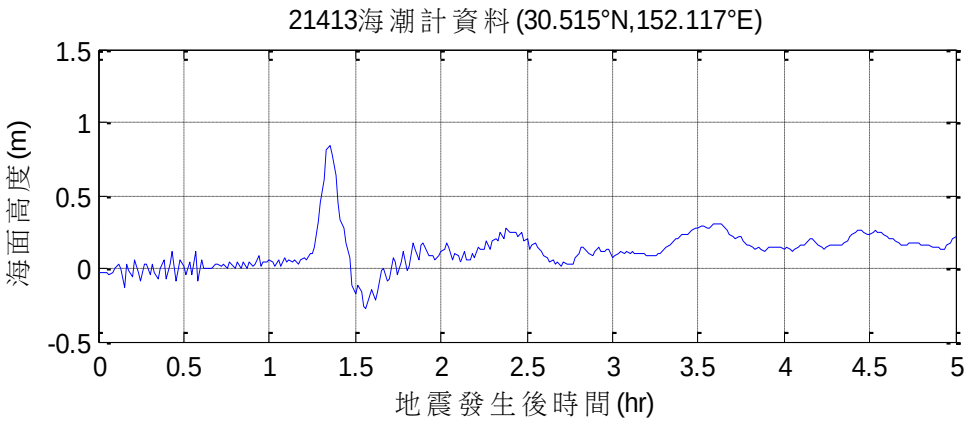
# 參、研究成果與討論

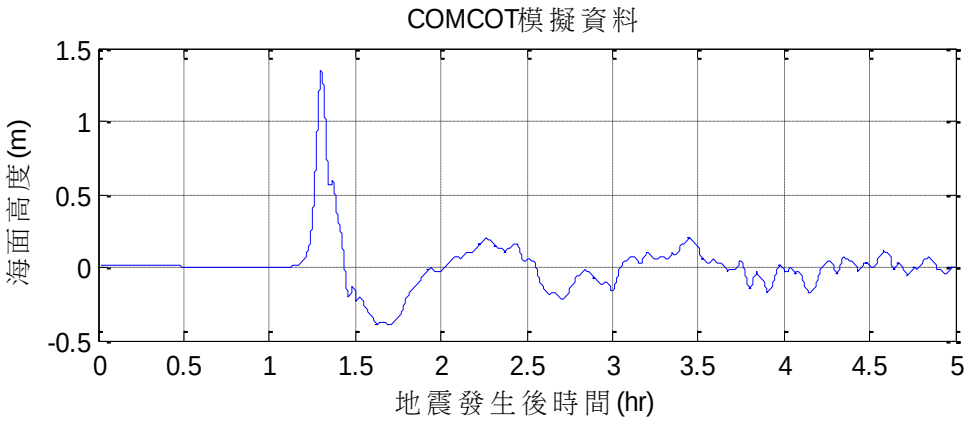
為了確認 COMCOT 海嘯模擬模式之準確性，我們利用 COMCOT 模式模擬位於 30.515°N,152.117°E 之海面高度變化並與同位置的 NOAA 21413 DART 海潮計紀錄進行比對(圖五)。結果顯示 COMCOT 可正確模擬海嘯波動現象，唯模擬海嘯高度 1.35 米較海潮計紀錄 0.78 米大。我們分析地震當天日本及台灣附近 GPS 地面接收機 (圖六)紀錄資料，計算出電離層 TEC 的變化。不同於過去使用 GPS TEC 差分量，我們分析原始 TEC 值，找出最明顯波動，計算波峰與波谷差做為電離層擾動之大小(圖七)。剔除位於陸地及近海上空的資料後，分析了其中 114 筆位於海面上方的資料(附錄 E)，發現距離震央 1000 公里範圍內的資料當中，距離越遠則速度越快(圖八)。我們推測這是因為本次地震所造成之海嘯波源範圍極大，造成 1000 公里範圍內幾乎同時產生電離層 TEC 擾動現象。由這些數據斜率(速度/距離)之倒數，可計算得到海嘯傳上去所花的時間約為 16 分鐘。距離 1000 公里外的資料則沒有同時傳到的現象，有 46 筆資料(圖九、附錄 E)。我們針對這 46 筆資料和海嘯資料(包含 NOAA 公佈資料和 COMCOT 模擬結果)做傳播速率比對(圖十)，發現海嘯引起電離層 TEC 擾動之傳播速率約為 797.2 公里/小時，其與外海海嘯之理論速率 700~800 公里/小時相近。三組資料之相關係數皆極高(大於 0.97)，證實電離層 TEC 擾動是由海嘯所造成。我們進一步比對海嘯波與電離層擾動之走時(圖十一、十二)，獲知「TEC 擾動發生時間」與「海嘯到達時間」相當吻合。然而詳細分析這 46 筆資料，發現海嘯造成 TEC 擾動之時間差並非 16 分鐘，而是約±10 分鐘之差。我們判斷是因 TEC 測量方法以及海嘯模擬誤差所導致的。

我們觀測之 46 筆資料中，有數筆資料顯示電離層 TEC 主擾動之前 1 小時出現另外的微小擾動現象(圖十三、附錄 F)。而 Makela et al. [2011] 於夏威夷觀察到 2011 年日本東北地震引發之海嘯落後電離層擾動約 1 小時。有人認為 1 小時之時間差是因為海嘯引發之大氣波動斜向傳播(即艏震波)所引起。

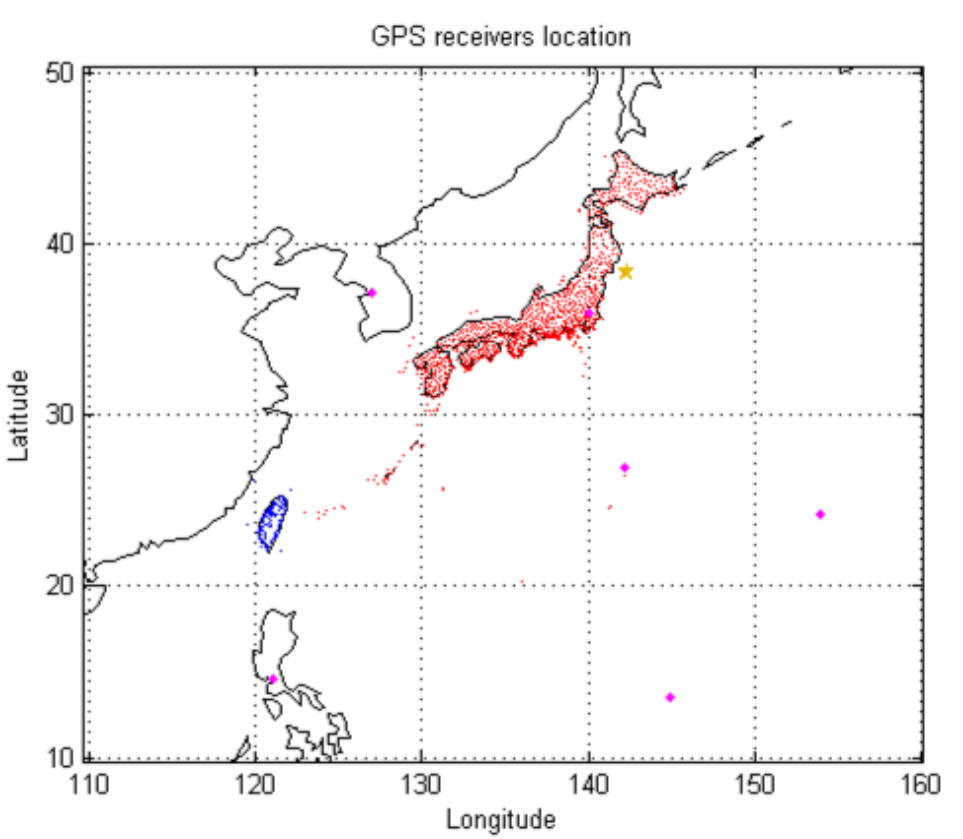
我們比對電離層 TEC 擾動大小與 COMCOT 海嘯振幅和 NOAA 所公佈之海嘯高度 (圖十四、十五)，發現資料雖然有些散亂，但仍有 TEC 擾動振幅隨海嘯振幅增加的趨勢。根據式(1-3)海嘯波傳至電離層之放大理論，電離層擾動正比於海嘯高度，沒有海嘯高度變化則電離層就不會出現擾動現象，然而太小的海嘯高

度變化無法明顯引起之電離層 TEC 擾動。依據上述推論，我們繪製兩條細點線代表資料範圍，其後於兩線之中間繪製趨勢線。經由計算，1 公尺的海嘯約會造成 12.8TECu 之總電子含量變化。換句話說，1TECu 之電離層總電子含量變化可反推出 0.0781 公尺之海嘯高度。

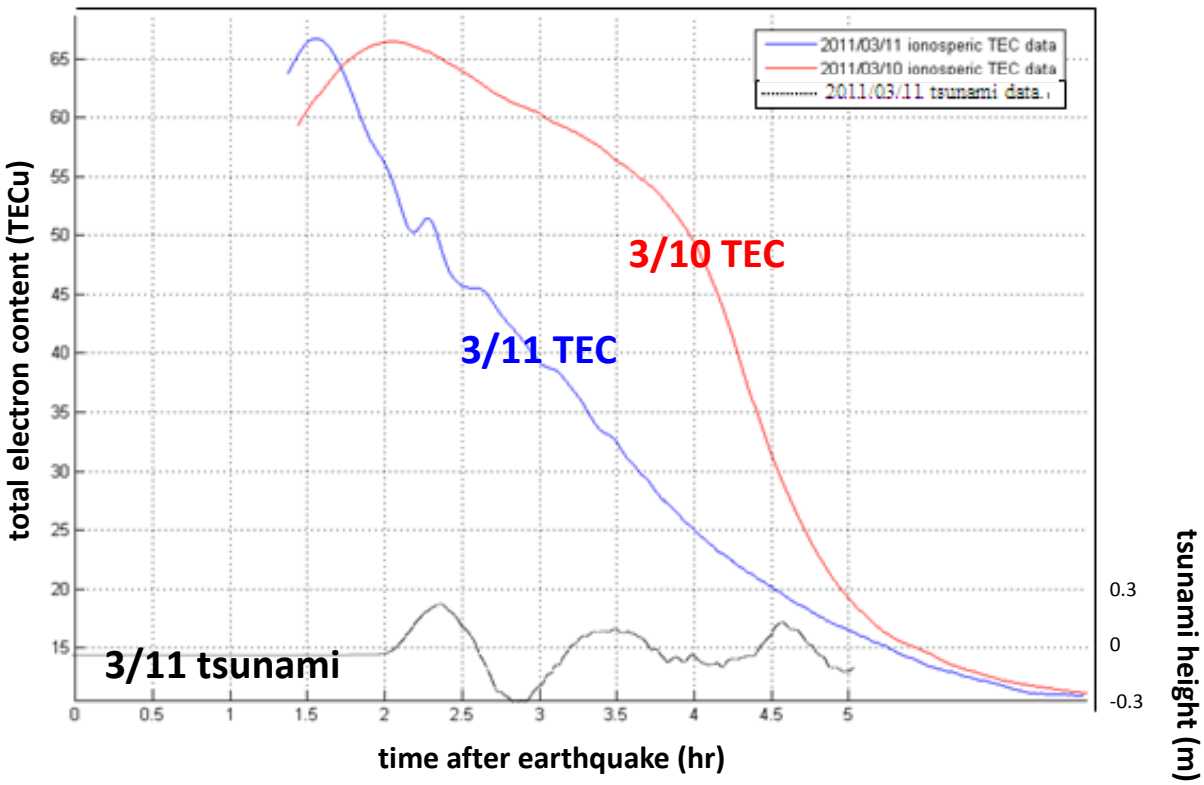


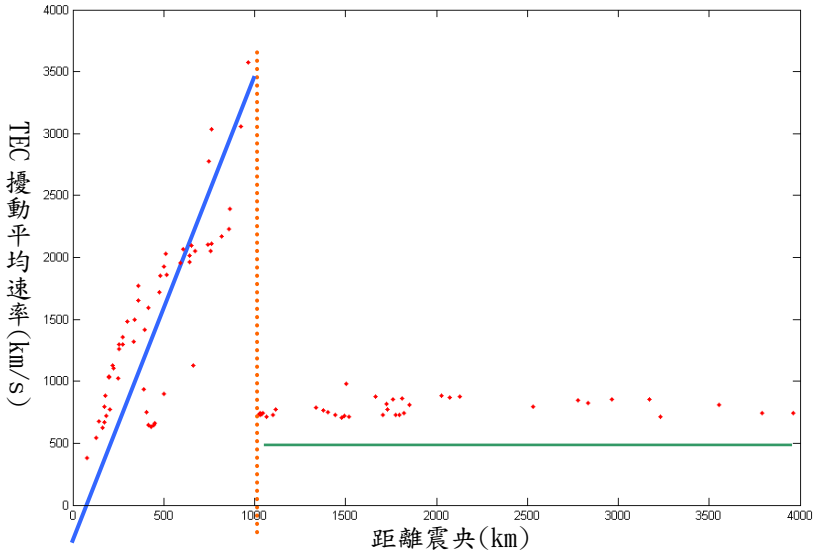

圖五、同一地點之海潮計觀測與 COMCOT 海嘯模擬比對。上圖是 NOAA 的 21413 DART 海潮計 (30.515°N,152.117°E)所記錄的海平面高度變化，下圖則是海嘯模式 COMCOT 計算之海平面高度變化。



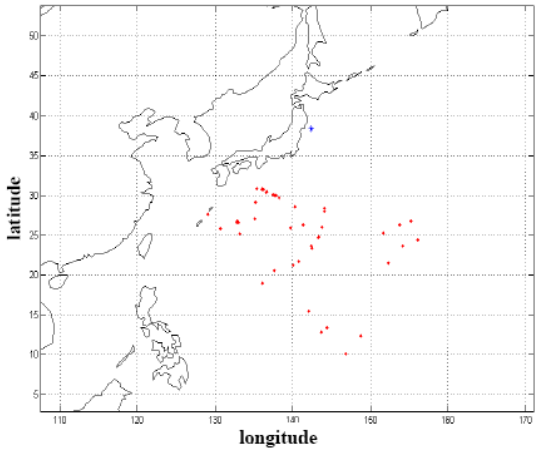

圖六、本研究使用之 GPS 衛星地面接收機分布。日本東北地方太平洋外海地震之震央位於圖中黃色星星處(38.322°N,142.369°E)。電離層 TEC 資料來自分布於日本、台灣(包含離島)、以及附近區域的 GPS 衛星地面接收機網記錄資料，其中日本有 1211 個台站，台灣有 131 個、其他有 6 個，由紅點、藍點及紫點分別表示。



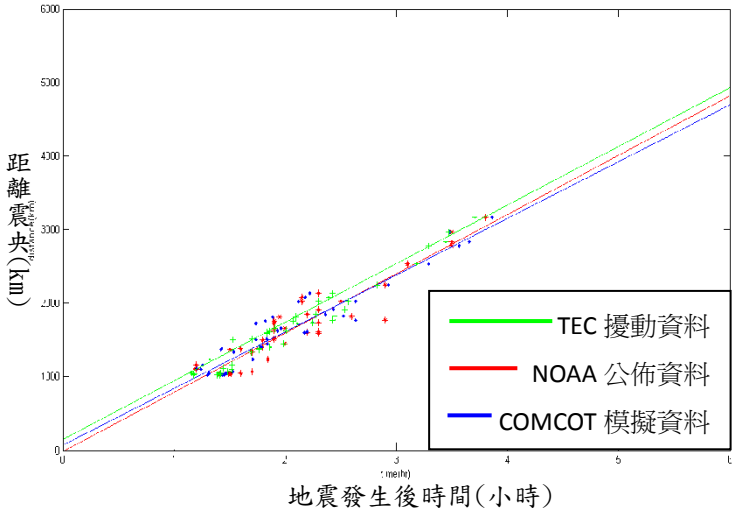

圖七、COMCOT 模擬海嘯變化與地震當天與前一天之 TEC 變化。黑線代表 COMCOT 模擬日本 GPS 接收機網第 605 號站接收第 25 號 GPS 衛星測得電離層 TEC 資料點位置，位置：21.21°N，140.7°E; 藍線與紅線分別代表地震當天 2011/03/11 和前一天 2011/03/10 位於 COMCOT 模擬正上方之電離層 TEC 變化。



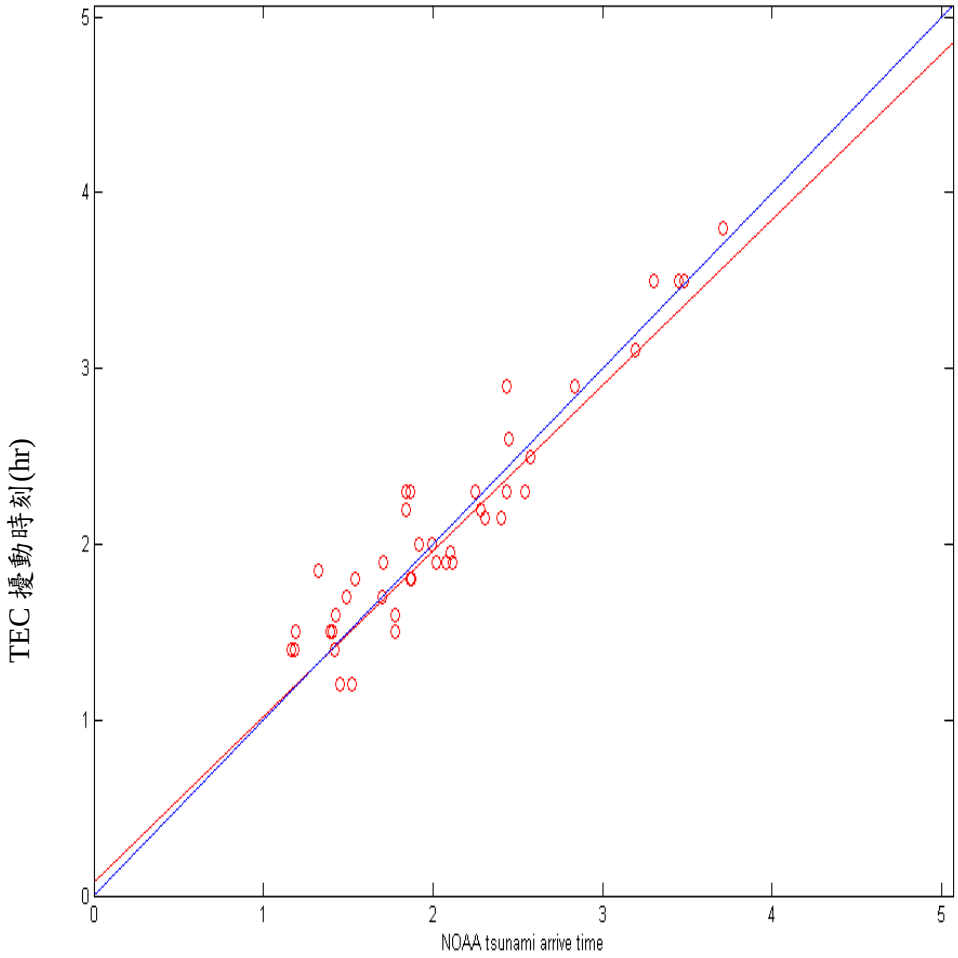

圖八、TEC 波動速度與其和震央距離之關係圖。藍線為距離震央 1000 公里內之資料趨勢線，綠線則為距離震央 1000 公里外之資料趨勢線，橘色虛線為距離震央 1000 公里內外之分隔線，橘線右側有 46 筆資料，左側有 68 筆。1000 公里以內之趨勢線斜率代表平均速率除以距離，會得到時間的倒數，此時間約為 16 分鐘，表示海嘯傳至電離層所需時間。




圖九、本次研究所使用之 46 組 TEC 資料的所在位置(紅點)。藍色星號處為本次日本大地震震央所在。

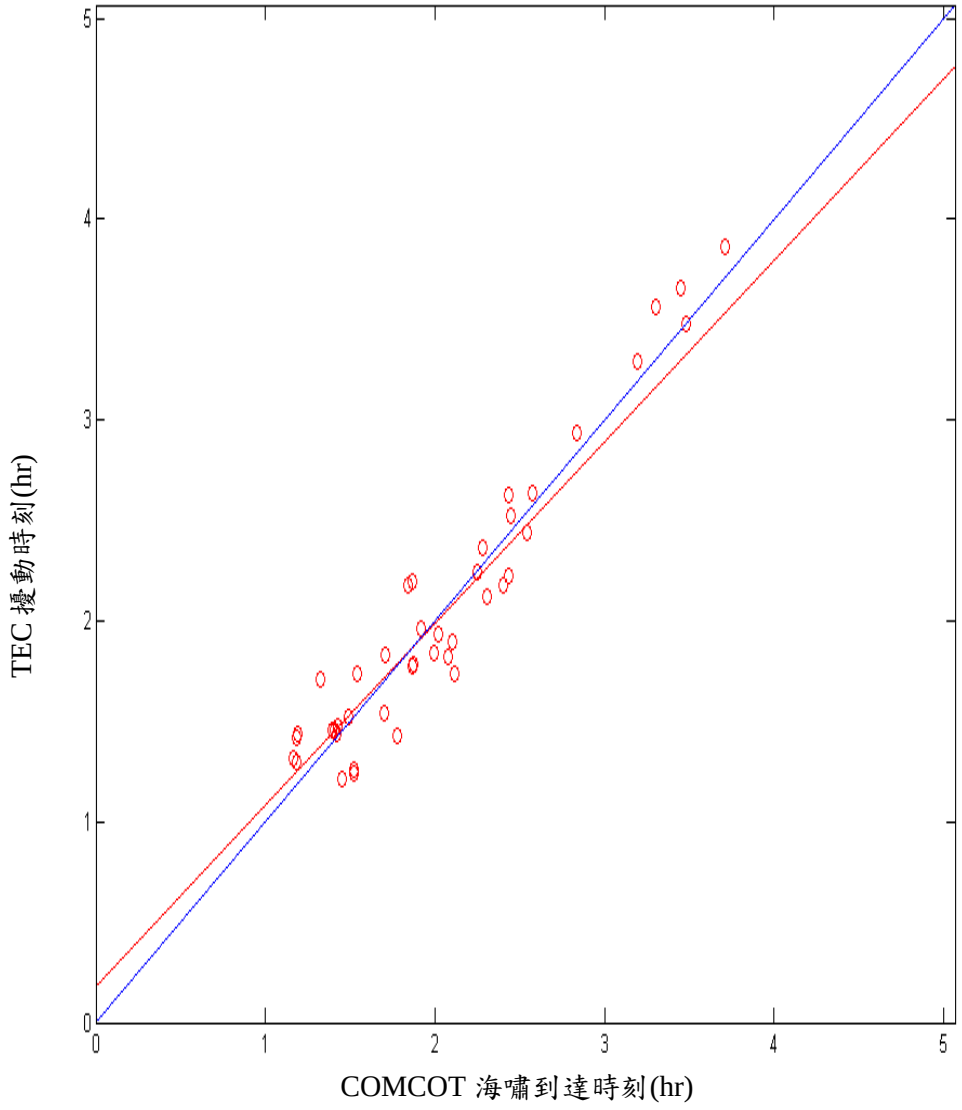



圖十、電離層 TEC 波動、海嘯波動到達時間(NOAA 資料以及 COMCOT 模擬資料)與其至震央距離之關係圖。綠線表示 TEC 擾動資料，紅線表示 NOAA 公佈資料，藍線表示 COMCOT 模擬結果之資料。

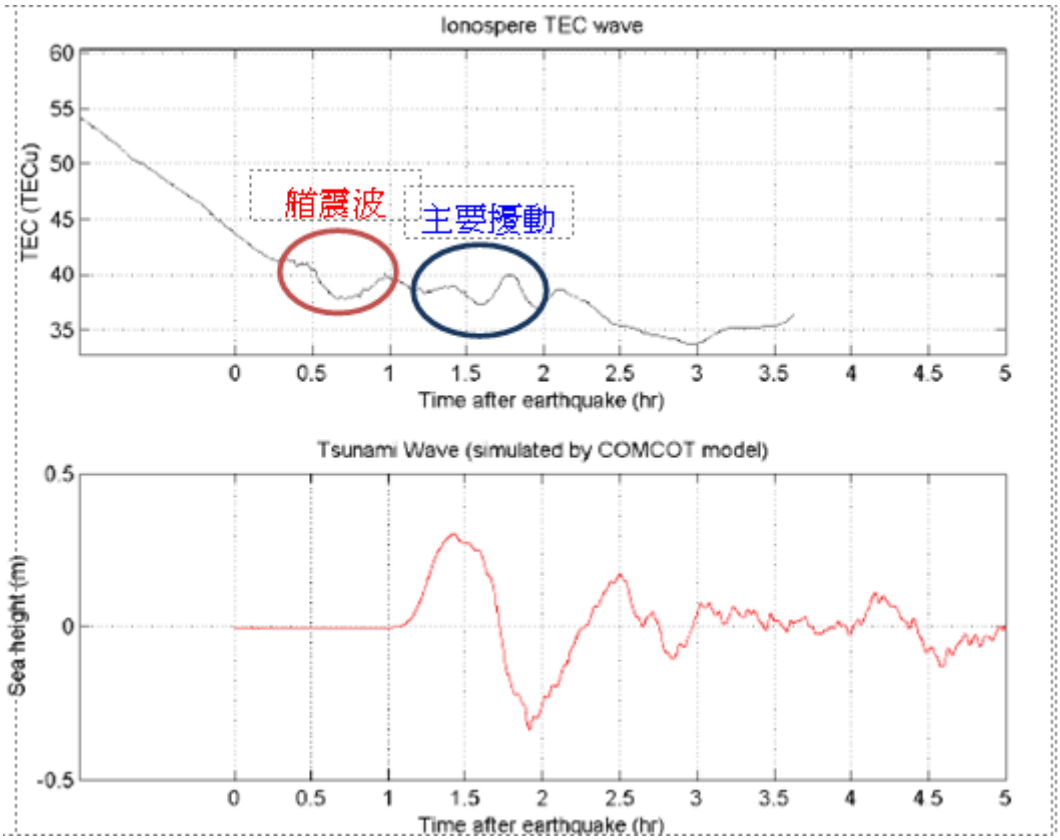



NOAA 海嘯到達時刻(hr)

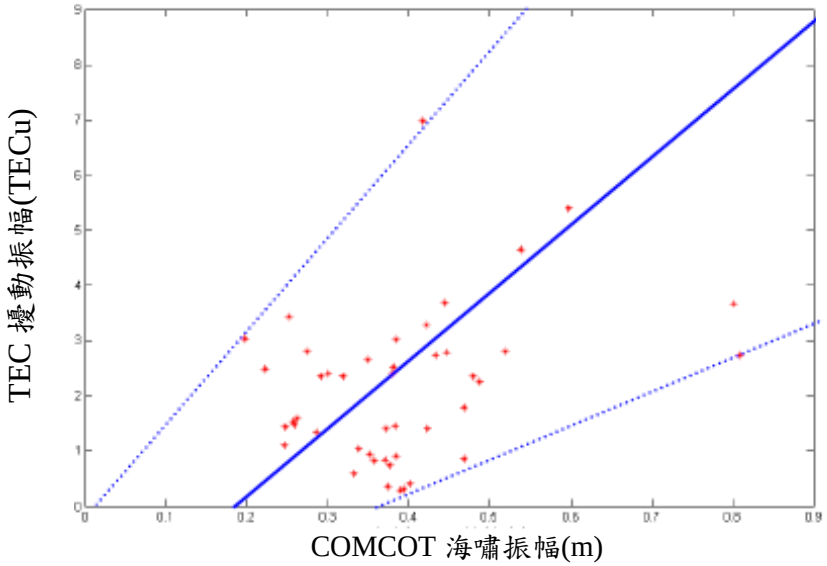
圖十一、NOAA 公佈之海嘯到達時間與 TEC 擾動發生時間之比較。紅線為資料之趨勢線，藍線為 45 度角線。藍線以上表示 TEC 較慢反應，以下則相反，但都約在正負十分鐘區間以內。



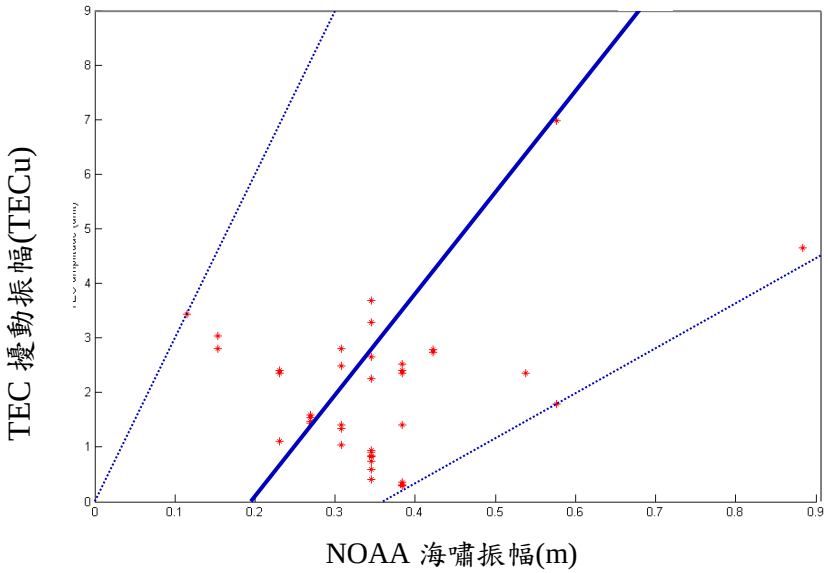

圖十二、COMCOT 模擬之海嘯到達時間與 TEC 擾動發生時間比較。紅線為資料之趨勢線，藍線為 45 度角線。藍線以上表示 TEC 較慢反應，以下則相反，其結果與圖十一相似。




圖十三、日本 GPS 地面接收機網第 604 站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。震後 0.55 小時出現一微小擾動，其領先電離層主要擾動和海嘯模擬到達時間(震後 1.8 小時)，1.25 小時(=1.8-0.55)。




圖十四、電離層 TEC 擾動振幅與 COMCOT 模擬之海嘯振幅比較。




圖十五、電離層 TEC 擾動振幅與 NOAA 公佈之海嘯振幅比較。

# 肆、結論與應用

本研究首次探討海嘯波動與電離層之相關性，我們發現:

一、海嘯垂直影響電離層 TEC 約需要花 16 分鐘，但因為 TEC 測量方法，使資料產生±10 分鐘的差異。

二、部分海嘯資料中，TEC 在主要擾動出現前，也出現許多較小的擾動，推測是海嘯斜向傳播(艏震波)影響所致。

三、海嘯高度與 TEC 變化大致成正比，且每 1 公尺高的海嘯大約會造成 12.8TECu 的 TEC 擾動變化量。

本研究確認海面海嘯會造成電離層 TEC 的擾動，且傳上去的時間只需要約 10-16 分鐘，經由分析擾動的時間去與海嘯平均速度作比較，可以快速確認海嘯之發生，而由 TEC 擾動之位置推定海嘯當時的位置，藉此二者以輔助海嘯警報的發布。另外，在主要的擾動發生前，TEC 亦可能會因為海嘯的艏震波所影響，這些 TEC 提前產生的小擾動，可以再爭取一段約(近 1 小時)海嘯到達時間。藉由分析 TEC 主要擾動的變化量大小，可以推算該處下方海面的海嘯高度。即能判斷海嘯的強度，作為海嘯預警的輔助與災害嚴重性評估。因此，將來利用 GPS 衛星系統換算得的 TEC 資料，可以用來偵測海嘯發生，並確定海嘯位置與高度，作為海嘯警報的參考，為當地民眾在海面海嘯抵達前爭取逃生時間，更可以把大海嘯產生的人身與財產的損失降到最低。

應用方面可用下例說明：令海邊 GPS 衛星之仰角為 30 度，而電離層高度為 350 公里，則其觀測 TEC 波動位置為距海邊站 605 公里(約等於 350√3)。觀測資料和過去研究顯示海嘯領先 TEC 波動約八分鐘(近乎同時)。所以 605 公里遠之海嘯大約 41 後分鐘會抵達岸邊，而電腦計算所需時間少於一分鐘，即電離層海嘯波動可爭取 40 分鐘左右(若偵測到艏震波，甚至可爭取到 100 分鐘左右)之預警時間。另外則可藉由電離層 TEC 振幅推估海嘯高度，協助海嘯警報之發布。

# 伍、參考資料


GEODAS Grid Translator - Design-a-Grid:
http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html

Giovanni Occhipinti, Pierdavide Co¨ısson, Jonathan J. Makela, S´ebastien Allgeyer,Alam Kherani, H´el`ene H´ebert, and Philippe Lognonn´e, Three-dimensional numerical modeling of tsunami-related internal gravity waves in the Hawaiian atmosphere, 2011.

Global Centroid Moment Tensor Catalog :

http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html

Liu, J. Y., H. F. Tsai and T. K. Jung, Total Electron Content Obtained by Using the Global Positioning System, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 7, 107-117, 1996.

Liu, J. Y., Y. B. Tsai, K. F. Ma, Y. I. Chen, H. F. Tsai, C. H. Lin, M. Kamogawa, and C. P. Lee, Ionospheric GPS total electron content (TEC) disturbances triggered by the 26 December 2004 Indian ocean tsunami, Journal of Geophysical Research, 111, A05303, 10.1029/2005JA011200, 2006.

Liu, J. Y., H. F. Tsai ,C. H. Chen, and Masashi Kamogawa ,Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 *M*9.0 Tohoku earthquake, Journal of Geophysical Research, 116,A06319,5 PP., 2011.

Makela, J. J.,P. Lognonné, H. Hébert, T. Gehrels, L. Rolland, S. Allgeyer, A. Kherani, G. Occhipinti, E. Astafyeva, P. Co¨isson, A. Loevenbruck, E. Clévédé, M. C. Kelley, and J. Lamouroux,Imaging and modeling the ionospheric airglow response over Hawaii to the tsunami generated by the Tohoku earthquake of 11 March 2011,2011.

NDBC-Northwestern Pacific Recent Marine Data:
http://www.ndbc.noaa.gov/maps/Northwestern_Pacific.shtml

NOAA Center for Tsunami Research - Tsunami Event - March 11, 2011 Honshu (northeastern Taiheiyou)：http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/

Phil's Group: Research - COMCOT:
http://ceeserver.cee.cornell.edu/pll%2Dgroup/comcot.htm

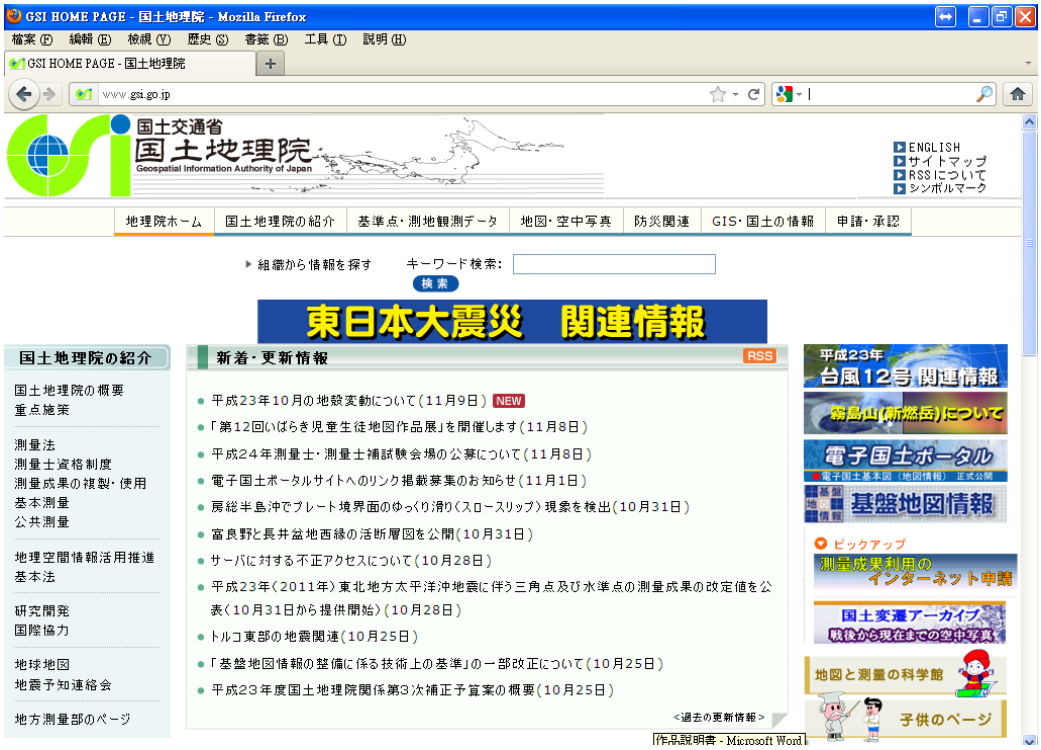
SOPAC Online Map Interface：http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/somi4i?

SOPAC -Rinex Data Browser：http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi

Tsai, Ho-Fang, Jann-Yenq Liu, Chien-Hung Lin, and Chia-Hung Chen, Tracking the epicenter and the tsunami origin with GPS ionosphere observation, Earth Planets Space, Vol. 63 (No. 7), pp. 859-862, 2011.

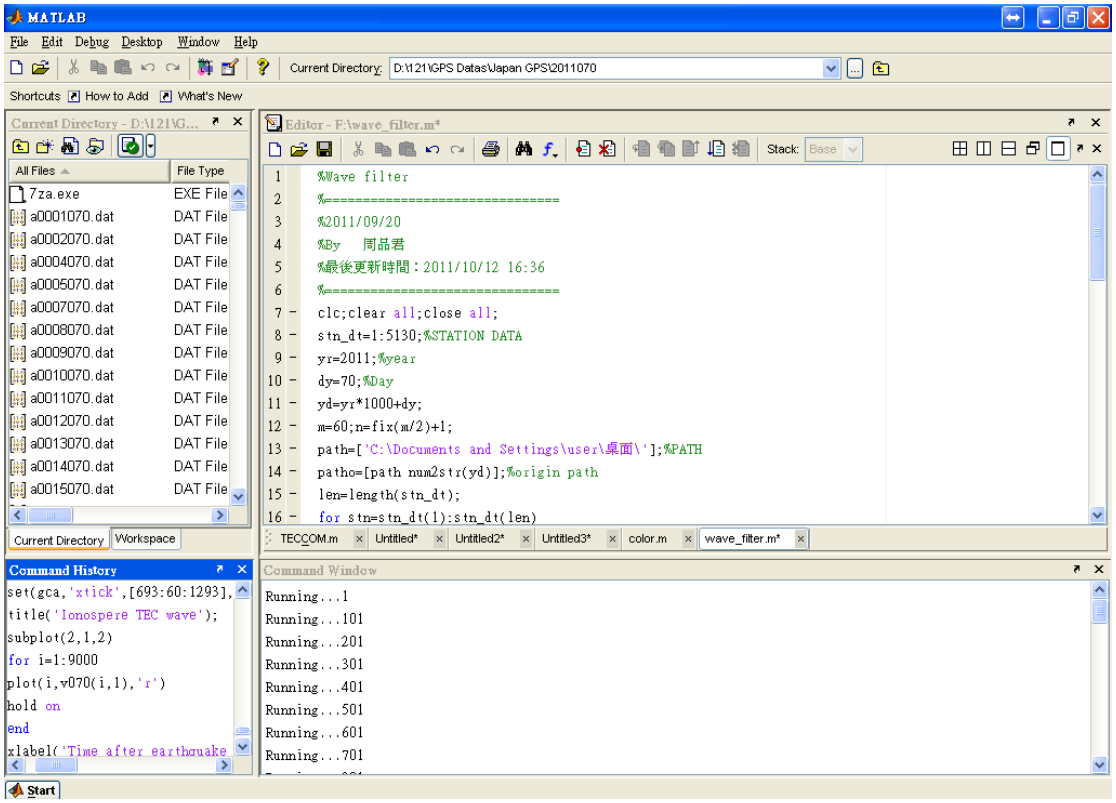
# 附錄 A

## 日本國土地理院網站與 SOPAC 網站



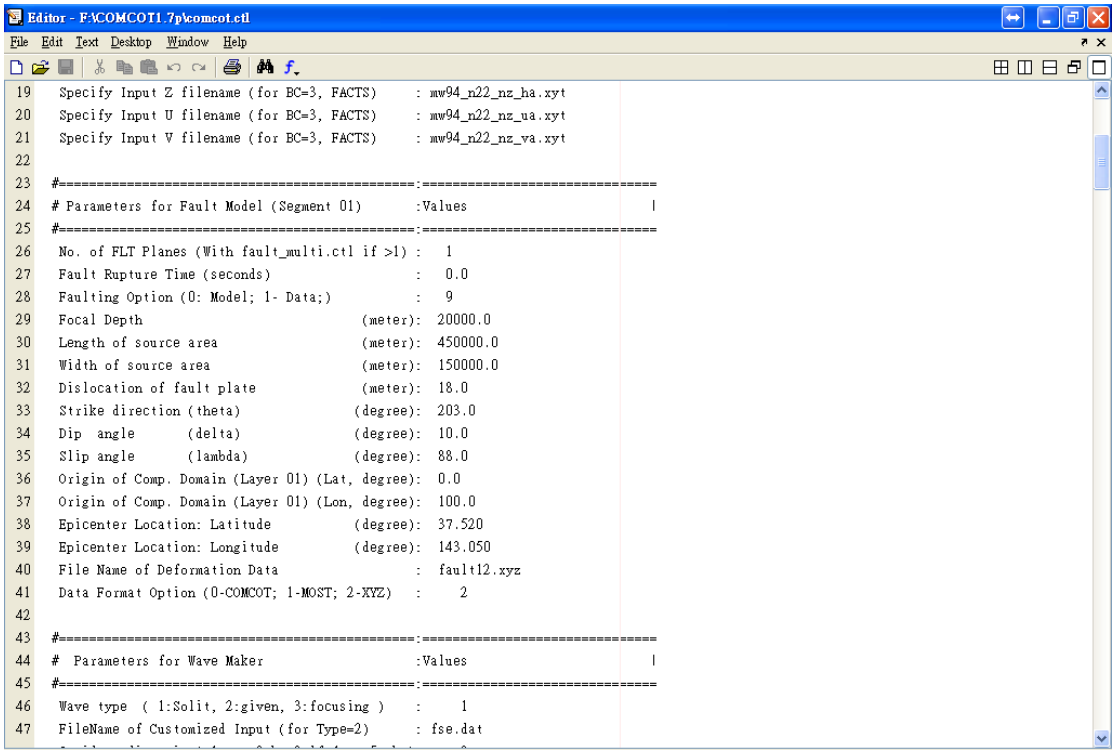
# 附錄 B

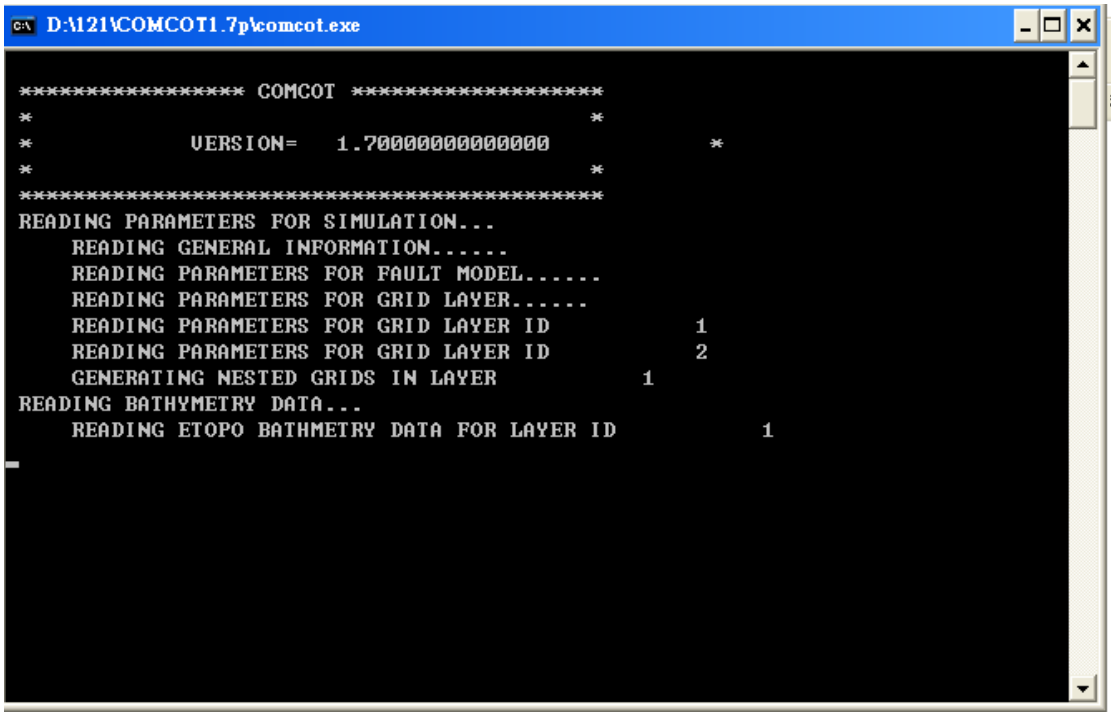
MATLAB 程式視窗。我們學習 C 語言，自己寫程式碼，以進行 TEC 資料分析與數據繪圖工作。



# 附錄 C

輸入地震數據於 COMCOT 海嘯模擬程式與其執行之兩介面。



# 附錄 D

RGB 比對程式碼：本程式輸入經緯度後，即可由 NOAA 公佈的海嘯走時圖上擷取該地的顏色，並與色階圖做顏色比較。如此一來便能由圖還原 NOAA 模擬出的數據，以用來比較 TEC 和 NOAA 公佈的海嘯高度。

```
figure;
eplong=142.369;
eplat=38.322;
wro=30;
coo=0;
grid on;
hold on;
sst=1;
contra1=999
est=1500;
cut=1000;
for i=sst:est
      if exist(['dat',num2str(i,'%04d')])
        k=eval(['dat' num2str(i,'%04d')]);
            for j=1:32
              if k(j,5)~=0
              rlong=k(j,5);
              rlat=k(j,6);
              longdis=(rlong-eplong)*40076.5938*cosd(rlat)/360;
              latdis=(rlat-eplat)*111;    %km
              dis=sqrt((latdis*latdis)+(longdis*longdis));
              if dis>cut
                  v=load(['F:\2011070\v',num2str(i,'%04d'),'070.dat']);
                  coo=coo+1;
                  ilong=k(j,5);
                  ilat=k(j,6);
                  ttt=k(j,2);
```

```
                k(j,7)=k(j,4)/v(ttt,j);
                rjing=round((ilong-120)*262/60+126);
                rwei=round(-ilat*262/60+353);
                R = time(rwei,rjing,1);% 取出 R 值
                G = time(rwei,rjing,2);% 取出 G 值
                B = time(rwei,rjing,3);% 取出 B 值
                R=double(R);
                G=double(G);
                B=double(B);
                 for mat=353:478
                 RR = time(mat,900,1);% 取出 R 值
                 GG = time(mat,900,2);% 取出 G 值
                 BB = time(mat,900,3);% 取出 B 值
                 RR=double(RR);
                 GG=double(GG);
                 BB=double(BB);
                 if abs(R-RR)<wro & abs(G-GG)<wro & abs(B-BB)<wro
                     numm=-(mat-353)*240/125+240;
                     disp('########################################')
                     disp(['information number:',num2str(coo)])
                     disp(['the height is ',num2str(numm),'cm'])
                     plot(numm,k(j,7),'b.')
                     break;
                   end
                end
             end
             end
           end
      end
end
xlabel('NOAA tsunami amplitude (cm)')
ylabel('TEC height amplitude(unit)')
```

# 附錄 E

我們分析地震當天日本及台灣附近 GPS 地面接收機計算 1500 餘筆 TEC 資料，剔除位於陸地及近海上空的資料後，分析了其中 114 筆位於海面上方的資料，再選出 46 筆(黃色標示)可能與海嘯有關的數據。

| GPS 地面接收機序號 | GPS 衛星序號 | 資料點緯度 (北緯) | 資料點經度 (東經) | TEC 擾動波前時間 (地震後分鐘) | TEC 擾動波峰時間 (地震後分鐘) | TEC 擾動波結束時間 (地震後分鐘) | TEC 擾動振幅 (TECu) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 26 | 45.19 | 147.44 | 19 | 23 | 38.5 | 0.613 |
| 4 | 26 | 44.65 | 148.69 | 18.5 | 21.5 | 30.5 | 0.475 |
| 5 | 9 | 41.84 | 142.79 | 20 | 25 | 28.5 | 0.351 |
| 5 | 15 | 44.01 | 144.8 | 28.5 | 35 | 37.5 | 0.760 |
| 5 | 26 | 44.29 | 148.44 | 18 | 22.5 | 36.5 | 0.667 |
| 7 | 26 | 44.47 | 146.53 | 15.5 | 22 | 36 | 0.895 |
| 8 | 26 | 44.76 | 145.67 | 15.5 | 21.5 | 36.5 | 0.694 |
| 11 | 15 | 43.59 | 143.43 | 15 | 18 | 33 | 0.783 |
| 11 | 26 | 43.91 | 147.42 | 16 | 21 | 34.5 | 0.848 |
| 12 | 9 | 41.09 | 140.84 | 12.5 | 15 | 21 | 0.358 |
| 15 | 26 | 43.28 | 147.13 | 13.5 | 19.5 | 26 | 0.866 |
| 16 | 15 | 42.97 | 142.37 | 14.5 | 16.5 | 23 | 0.732 |
| 16 | 26 | 43.35 | 146.32 | 14.5 | 19.5 | 25.5 | 0.893 |
| 18 | 26 | 43.42 | 145.11 | 15.5 | 17.5 | 25.5 | 0.750 |
| 19 | 15 | 42.64 | 143.11 | 14 | 15.5 | 21.5 | 0.992 |
| 19 | 26 | 42.99 | 147.05 | 15 | 19 | 24.5 | 0.751 |
| 22 | 15 | 42.47 | 140.82 | 14 | 16.5 | 23 | 0.941 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 26 | 42.64 | 144.18 | 14 | 15.5 | 21.5 | 1.052 |
| 24 | 15 | 41.98 | 141.25 | 13.5 | 15.5 | 21.5 | 1.123 |
| 24 | 26 | 42.43 | 145.23 | 14 | 15 | 20.5 | 0.784 |
| 28 | 26 | 40.83 | 145.67 | 11 | 16.5 | 19.5 | 1.101 |
| 32 | 26 | 40.32 | 143.73 | 11 | 14.5 | 17.5 | 1.386 |
| 33 | 26 | 40.17 | 144.16 | 10.5 | 12 | 17 | 0.925 |
| 35 | 26 | 39.78 | 144.17 | 10 | 12 | 15.5 | 1.351 |
| 37 | 26 | 39.74 | 144.67 | 9.5 | 11.5 | 15 | 1.344 |
| 38 | 26 | 39.27 | 144.59 | 9 | 11.5 | 14 | 1.880 |
| 40 | 26 | 39.18 | 143.61 | 9.5 | 12.5 | 15 | 2.097 |
| 41 | 26 | 38.62 | 144.64 | 10 | 11.5 | 14 | 1.864 |
| 42 | 26 | 38.14 | 144.34 | 9.5 | 13 | 14 | 2.073 |
| 49 | 26 | 39.73 | 143.4 | 10 | 12 | 16 | 1.500 |
| 51 | 26 | 39.02 | 142.58 | 10.5 | 12.5 | 16 | 1.637 |
| 57 | 5 | 31.51 | 141.11 | 14 | 15 | 16 | 0.205 |
| 60 | 5 | 31.59 | 142.36 | 13.5 | 16 | 16.5 | 0.215 |
| 61 | 26 | 37.27 | 141.77 | 13.5 | 14 | 15.5 | 1.090 |
| 66 | 5 | 30.01 | 141.81 | 17.5 | 18 | 19 | 0.150 |
| 70 | 5 | 29.7 | 141.25 | 15 | 16 | 18 | 0.127 |
| 170 | 15 | 40.08 | 141.74 | 11.5 | 15.5 | 18 | 1.745 |
| 170 | 26 | 40.55 | 145.5 | 10.5 | 13 | 18.5 | 1.066 |
| 171 | 15 | 39.87 | 141.67 | 11 | 15 | 18 | 1.673 |
| 171 | 26 | 40.35 | 145.39 | 9.5 | 13.5 | 17.5 | 1.255 |
| 174 | 26 | 40.14 | 144.57 | 10 | 12 | 16.5 | 1.051 |
| 175 | 26 | 40.05 | 145.07 | 8.5 | 12 | 16 | 1.367 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 176 | 26 | 39.94 | 144.79 | 8.5 | 12.5 | 15 | 1.392 |
| 177 | 26 | 39.83 | 144.58 | 9.5 | 11.5 | 15 | 1.360 |
| 180 | 26 | 39.47 | 144.18 | 9 | 11.5 | 14.5 | 1.665 |
| 181 | 26 | 41.39 | 145.84 | 32.5 | 41.5 | 48 | 1.937 |
| 182 | 26 | 41.36 | 145.57 | 32.5 | 40.5 | 49.5 | 2.056 |
| 183 | 26 | 41.27 | 146.09 | 33.5 | 41 | 48.5 | 1.895 |
| 184 | 5 | 36.11 | 145.28 | 8 | 12 | 13.5 | 1.295 |
| 184 | 26 | 41.43 | 144.97 | 26.5 | 32.5 | 40.5 | 1.480 |
| 185 | 26 | 41.13 | 145.61 | 31.5 | 38 | 47.5 | 1.813 |
| 247 | 5 | 32.69 | 143.64 | 14.5 | 16.5 | 18 | 0.220 |
| 248 | 5 | 32.66 | 142.6 | 13 | 15 | 16.5 | 0.274 |
| 249 | 5 | 32.58 | 142.74 | 13 | 15 | 16.5 | 0.263 |
| 250 | 5 | 32.54 | 142.92 | 13 | 15.5 | 16.5 | 0.273 |
| 301 | 26 | 36.95 | 141.7 | 14.5 | 15.5 | 17.5 | 1.407 |
| 303 | 26 | 36.84 | 141.69 | 14.5 | 15.5 | 17.5 | 1.390 |
| 361 | 5 | 30.4 | 140.7 | 15 | 16 | 18 | 0.147 |
| 362 | 5 | 30.38 | 140.59 | 15 | 16 | 18.5 | 0.174 |
| 367 | 5 | 29.98 | 141.62 | 17.5 | 18 | 19.5 | 0.140 |
| 367 | 12 | 29.66 | 138.2 | 63.5 | 69.5 | 74.5 | 0.406 |
| 368 | 12 | 30.01 | 137.66 | 66 | 70.5 | 75.5 | 0.308 |
| 369 | 12 | 30.05 | 137.4 | 66.5 | 71 | 75.5 | 0.285 |
| 370 | 12 | 29.95 | 137.86 | 65.5 | 70.5 | 75.5 | 0.355 |
| 420 | 12 | 30.49 | 136.65 | 79 | 84.5 | 92.5 | 0.901 |
| 424 | 12 | 30.32 | 136.6 | 80 | 84 | 92 | 0.743 |
| 427 | 12 | 30.83 | 136.06 | 80 | 84 | 95.5 | 0.821 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 428 | 12 | 30.7 | 136 | 80 | 85 | 94.5 | 0.945 |
| 429 | 12 | 30.7 | 136.26 | 78.5 | 83 | 90 | 0.843 |
| 430 | 12 | 30.84 | 135.39 | 82.5 | 89 | 98 | 1.035 |
| 447 | 25 | 26.75 | 132.89 | 105 | 110 | 120.5 | 1.478 |
| 448 | 25 | 26.57 | 133.06 | 104.5 | 110 | 119.5 | 1.593 |
| 449 | 12 | 29.15 | 135.19 | 72 | 79 | 89 | 0.592 |
| 449 | 25 | 26.57 | 132.81 | 105.5 | 111.5 | 119.5 | 1.544 |
| 497 | 12 | 25.14 | 133.18 | 129 | 134.5 | 142.5 | 1.106 |
| 497 | 15 | 27.04 | 135.16 | 110.5 | 119 | 133.5 | 1.334 |
| 497 | 18 | 25.79 | 130.66 | 135 | 146.5 | 159.5 | 1.439 |
| 497 | 22 | 27.6 | 129.04 | 131 | 145.5 | 153 | 0.850 |
| 603 | 12 | 24.69 | 143.28 | 93 | 102 | 108.5 | 3.014 |
| 603 | 15 | 27.97 | 144.09 | 80 | 91 | 100 | 2.351 |
| 604 | 9 | 26.34 | 141.37 | 97 | 101.5 | 112.5 | 1.404 |
| 604 | 12 | 23.34 | 142.46 | 103.5 | 114.5 | 120.5 | 3.285 |
| 604 | 15 | 26.02 | 143.72 | 95 | 106 | 117.5 | 2.781 |
| 604 | 18 | 25.91 | 139.75 | 96.5 | 111.5 | 124 | 2.409 |
| 604 | 25 | 21.72 | 140.78 | 131 | 136.5 | 149 | 2.525 |
| 605 | 12 | 23.66 | 142.42 | 114.5 | 120.5 | 129.5 | 3.686 |
| 605 | 15 | 25.99 | 143.71 | 95.5 | 106 | 117.5 | 2.744 |
| 605 | 18 | 25.89 | 139.72 | 96.5 | 112 | 124 | 2.356 |
| 605 | 25 | 21.71 | 140.75 | 131.5 | 136.5 | 149 | 2.409 |
| 1140 | 12 | 20.6 | 137.58 | 147 | 154 | 167.5 | 2.801 |
| 1140 | 15 | 21.26 | 140.09 | 133 | 152 | 164.5 | 2.649 |
| 1140 | 25 | 18.96 | 136.11 | 162 | 169.5 | 186.5 | 3.432 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ccj2 | 12 | 24.81 | 143.33 | 86 | 92 | 100 | 1.460 |
| ccj2 | 15 | 28.38 | 144.08 | 78.5 | 86.5 | 97.5 | 1.784 |
| ccj2 | 18 | 28.56 | 140.28 | 78.5 | 91 | 98.5 | 1.410 |
| guam | 15 | 12.38 | 148.79 | 198.5 | 208.5 | 224.5 | 2.495 |
| guam | 18 | 12.82 | 143.63 | 196 | 206.5 | 226.5 | 2.255 |
| guam | 22 | 15.5 | 142.06 | 172 | 191 | 213.5 | 2.360 |
| guam | 25 | 13.37 | 144.39 | 188.5 | 197.5 | 210.5 | 2.808 |
| guam | 29 | 10.1 | 146.83 | 212.5 | 222 | 233 | 3.040 |
| suwn | 14 | 38.13 | 122.88 | 134.5 | 140 | 149 | 0.969 |
| suwn | 22 | 37.53 | 125.17 | 118.5 | 127.5 | 138 | 0.816 |
| mcil | 9 | 26.27 | 153.82 | 115 | 124 | 132 | 2.745 |
| mcil | 12 | 23.65 | 154.21 | 130 | 138 | 146 | 5.400 |
| mcil | 15 | 24.43 | 156.06 | 131.5 | 143.5 | 163.5 | 3.670 |
| mcil | 18 | 25.26 | 151.64 | 113 | 126.5 | 136 | 4.653 |
| mcil | 25 | 21.53 | 152.33 | 138.5 | 145.5 | 153 | 6.982 |
| mcil | 27 | 26.78 | 155.25 | 116.5 | 125.5 | 133.5 | 2.205 |
| pimo | 14 | 17.2 | 121.44 | 251 | 270.5 | 283.5 | 1.536 |
| pimo | 16 | 11.65 | 118.22 | 306 | 319.5 | 331.5 | 1.839 |
| pimo | 30 | 12.86 | 119.09 | 292.5 | 306 | 321.5 | 2.093 |
| pimo | 31 | 16.48 | 118.03 | 256.5 | 263.5 | 276.5 | 1.046 |
| tskb | 18 | 38.39 | 136.6 | 23 | 33.5 | 39.5 | 1.231 |
| tskb | 21 | 35.5 | 136.07 | 14 | 18.5 | 24.5 | 0.864 |

# 附錄 F

距離震央 1000 公里外之 46 個資料點與對應之 COMCOT 模擬結果。

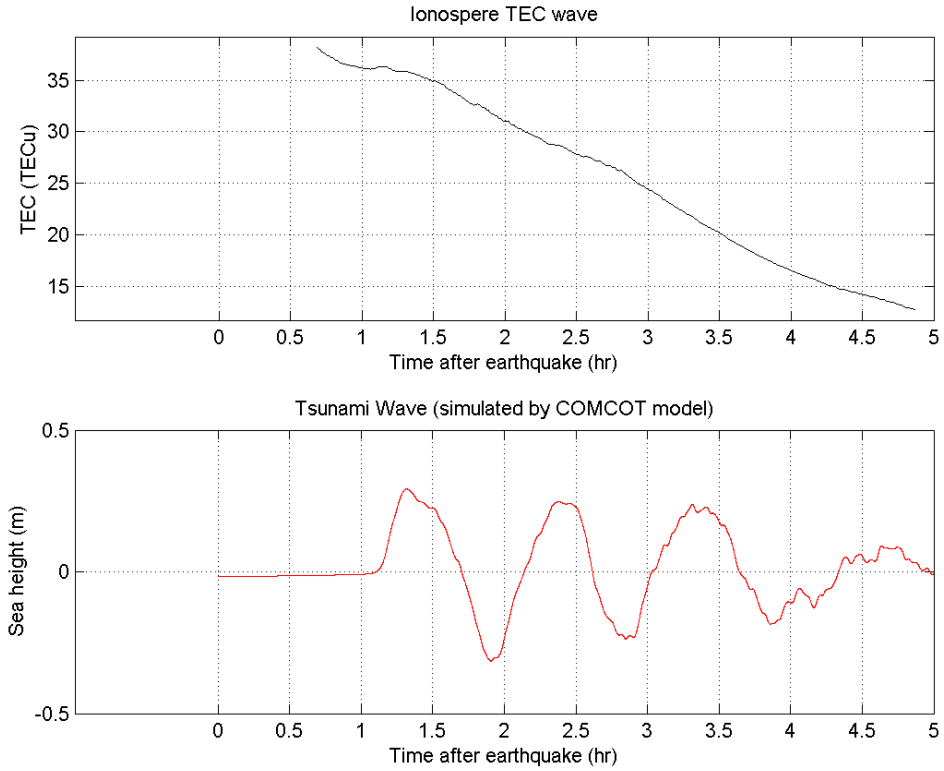



圖 F1、日本 GPS 地面接收機網第 367 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

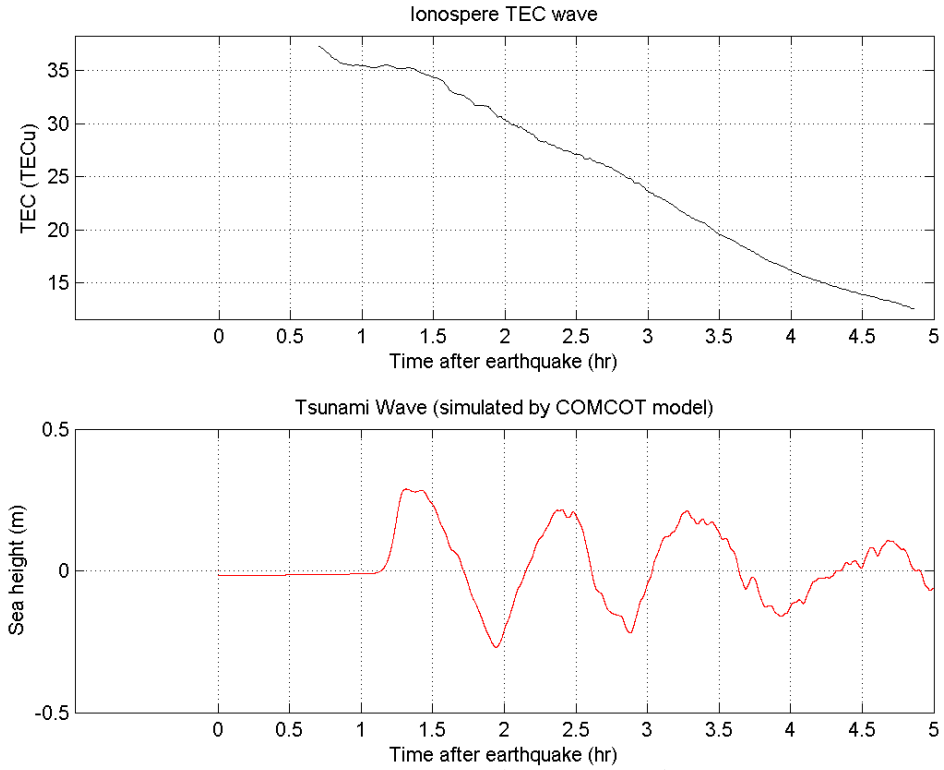



圖 F2、日本 GPS 地面接收機網第 368 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

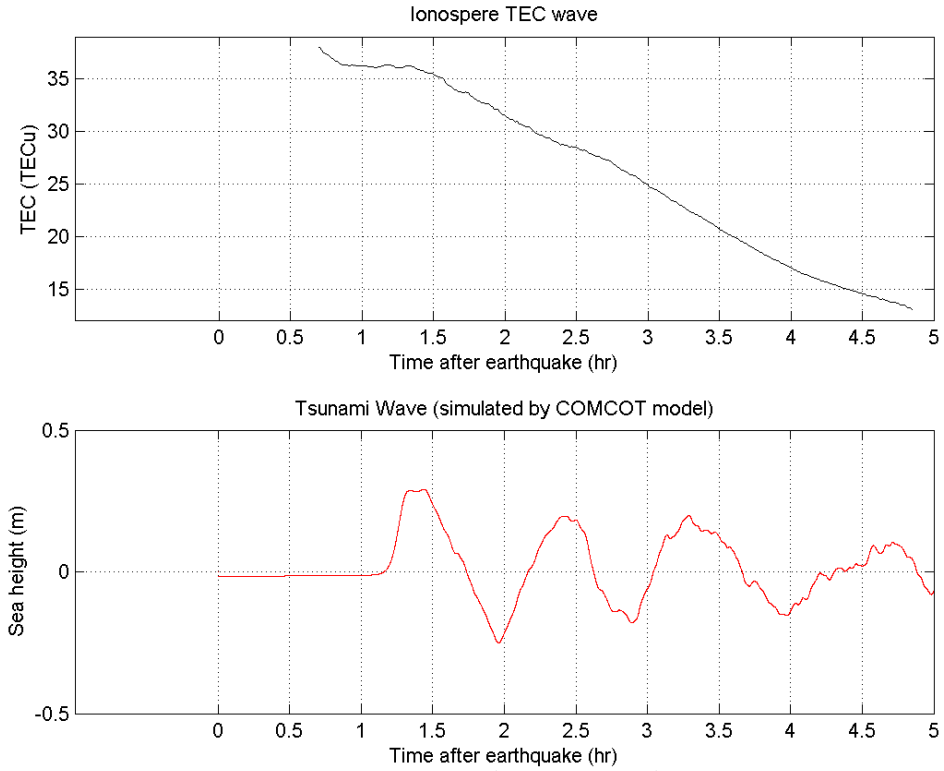



圖 F3、日本 GPS 地面接收機網第 369 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

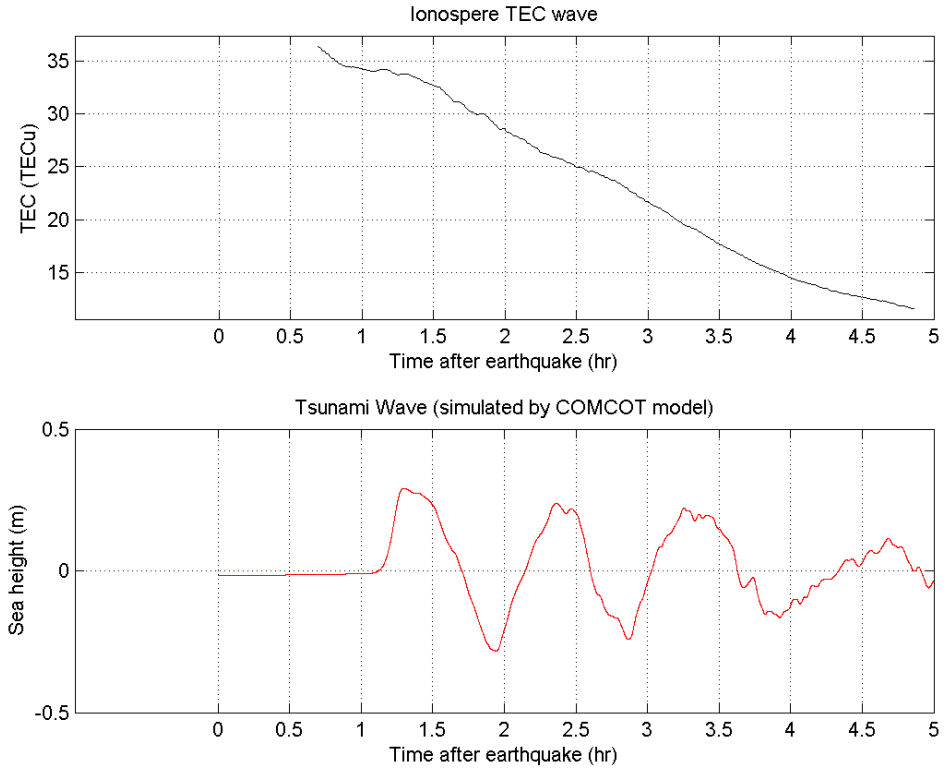



圖 F4、日本 GPS 地面接收機網第 370 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

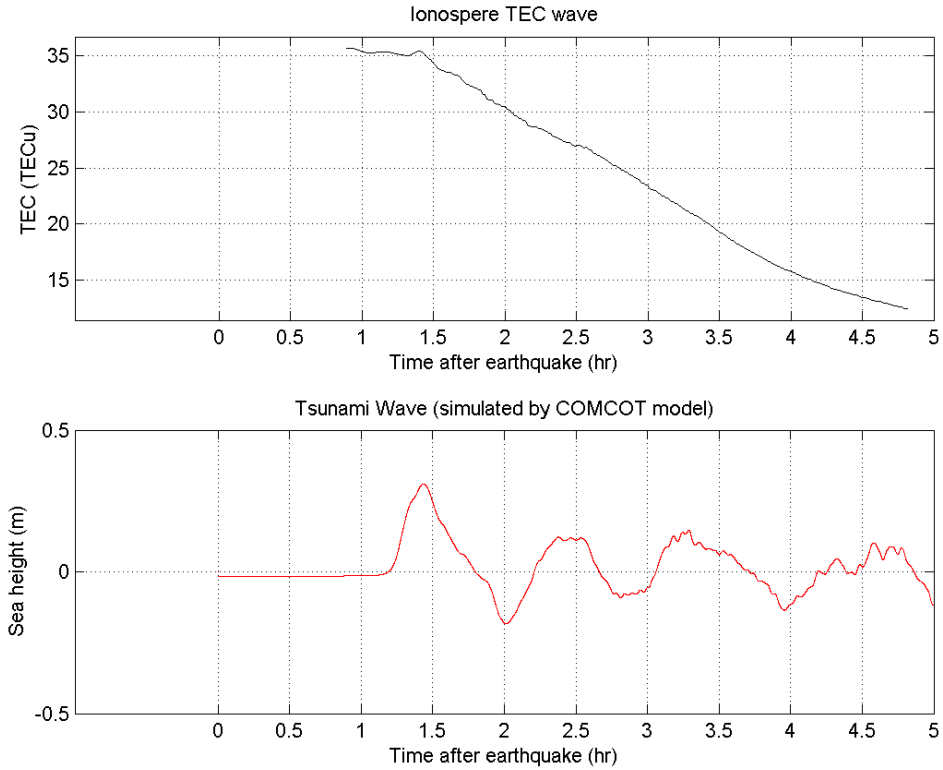



圖 F5、日本 GPS 地面接收機網第 420 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

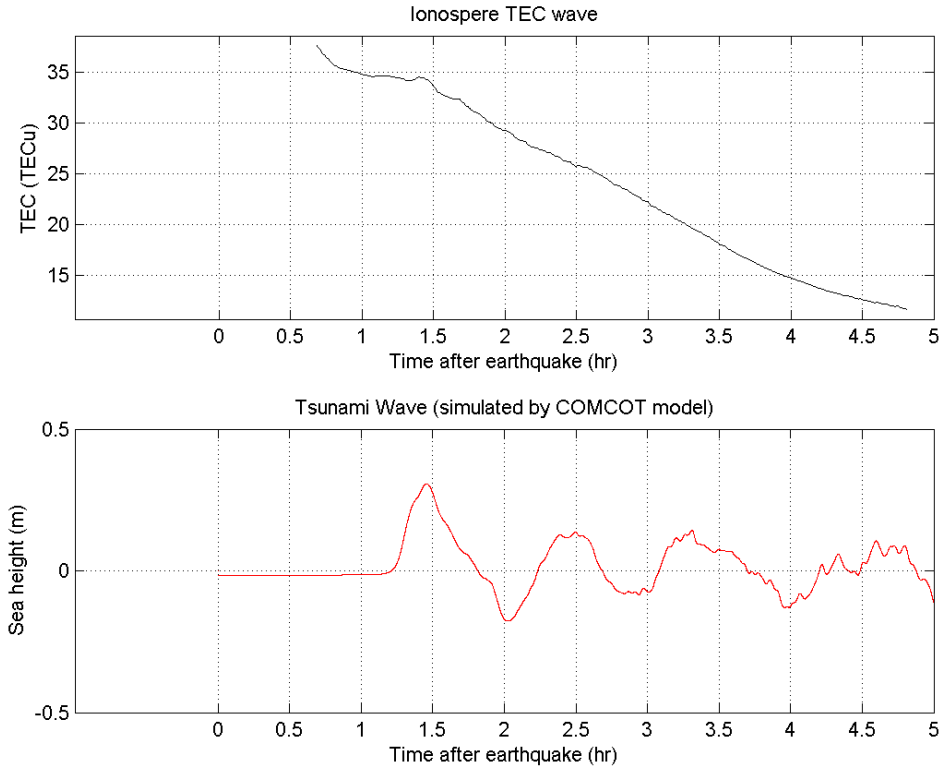



圖 F6、日本 GPS 地面接收機網第 424 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

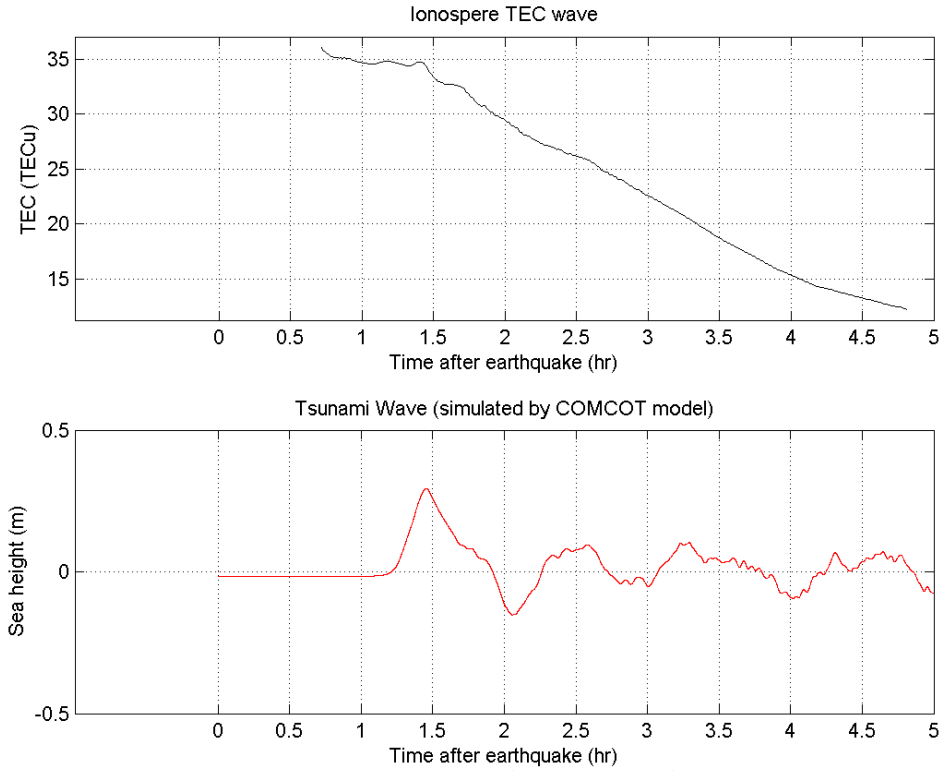



圖 F7、日本 GPS 地面接收機網第 427 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

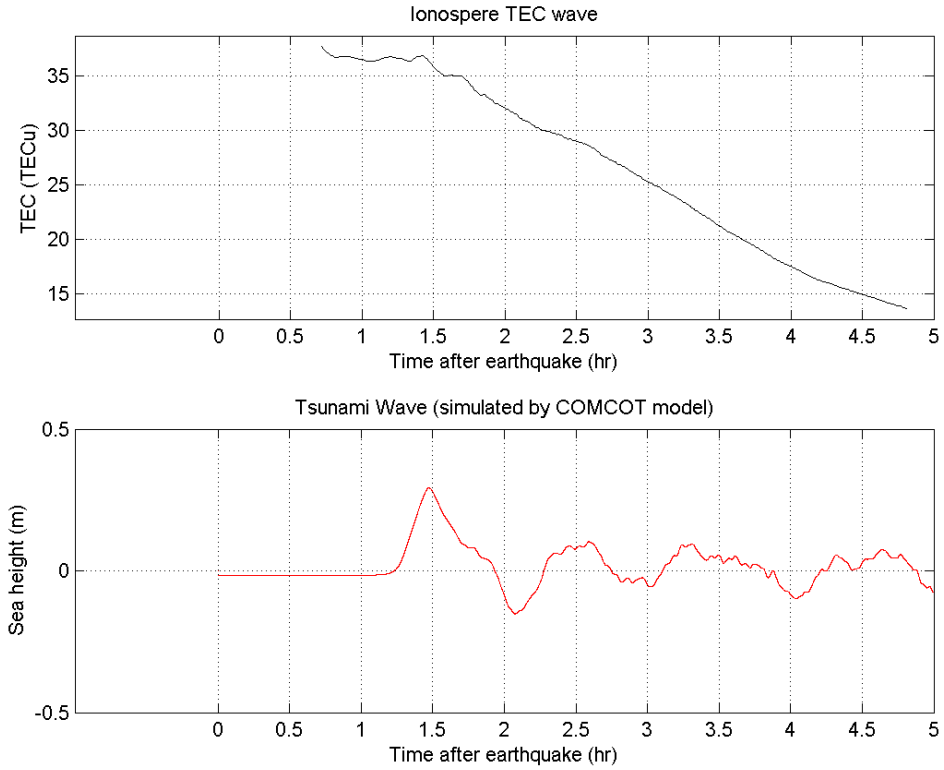



圖 F8、日本 GPS 地面接收機網第 428 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

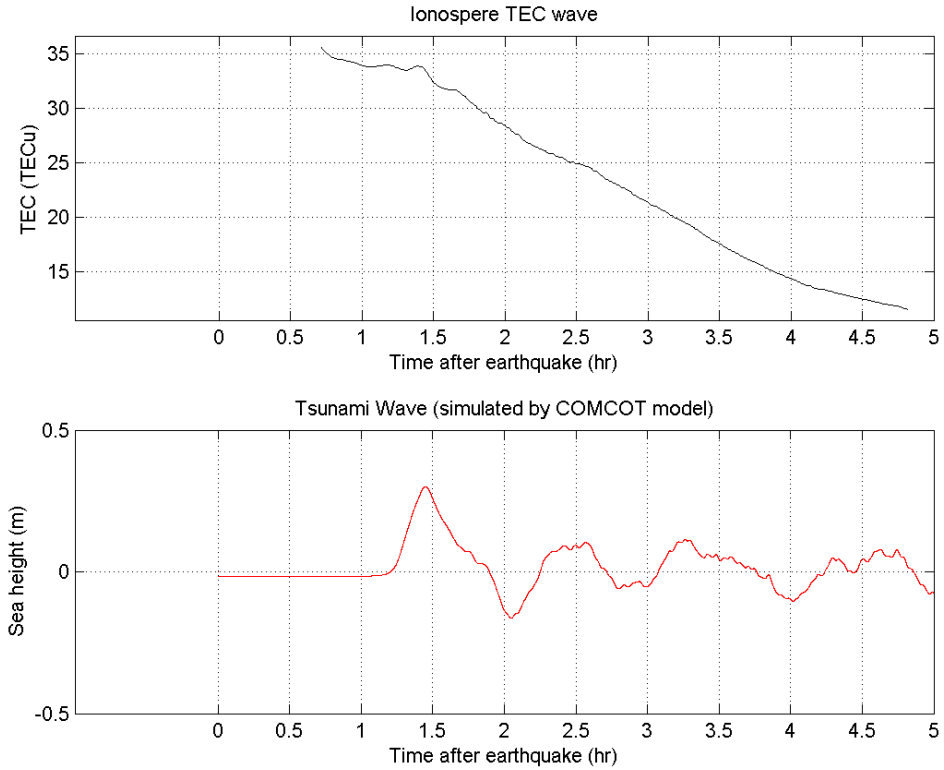



圖 F9、日本 GPS 地面接收機網第 429 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

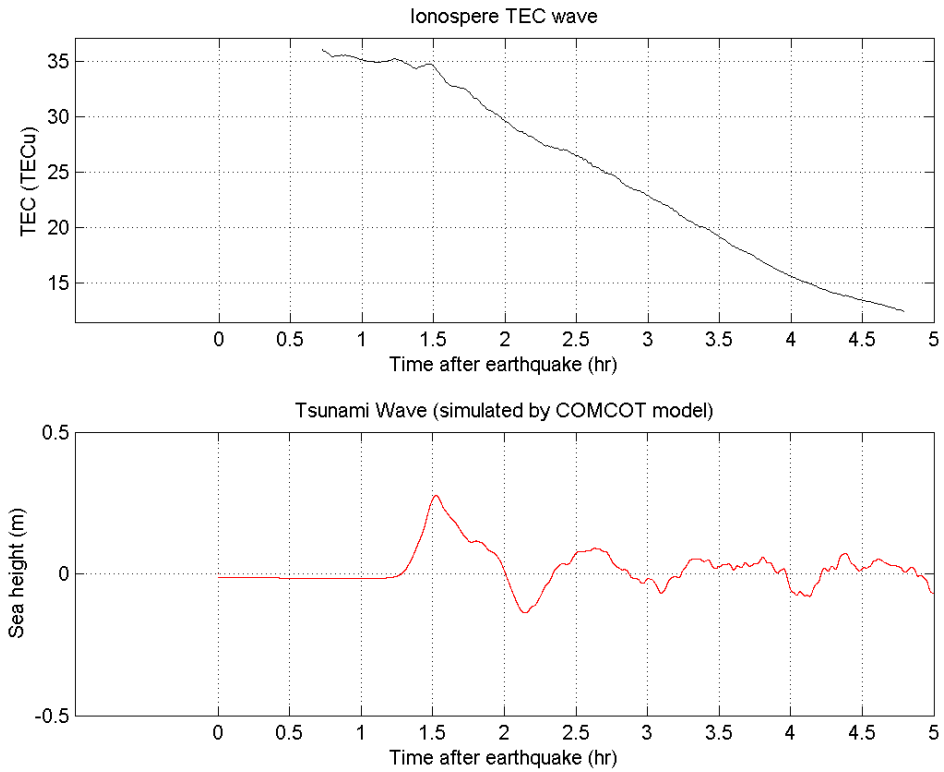



圖 F10、日本 GPS 地面接收機網第 430 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

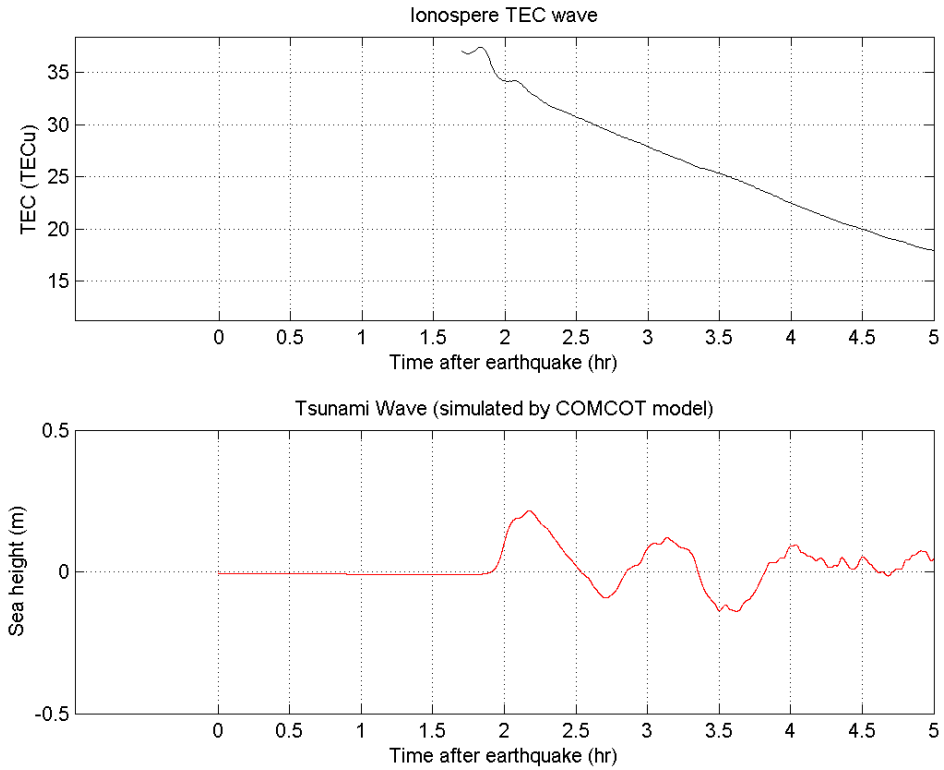



圖 F11、日本 GPS 地面接收機網第 447 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

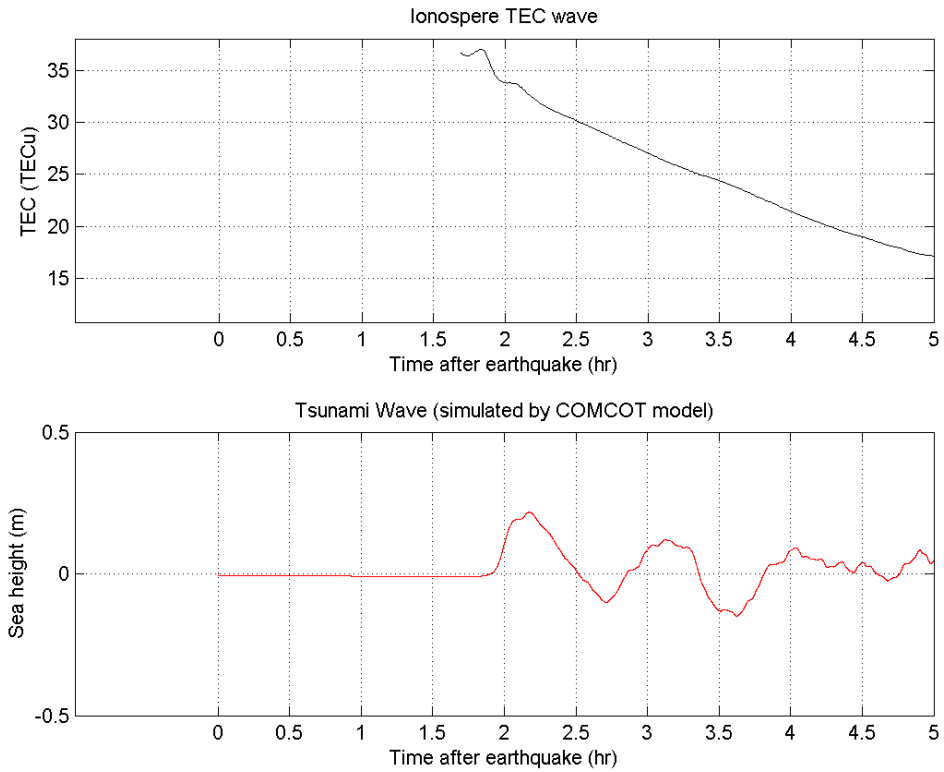



圖 F12、日本 GPS 地面接收機網第 448 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

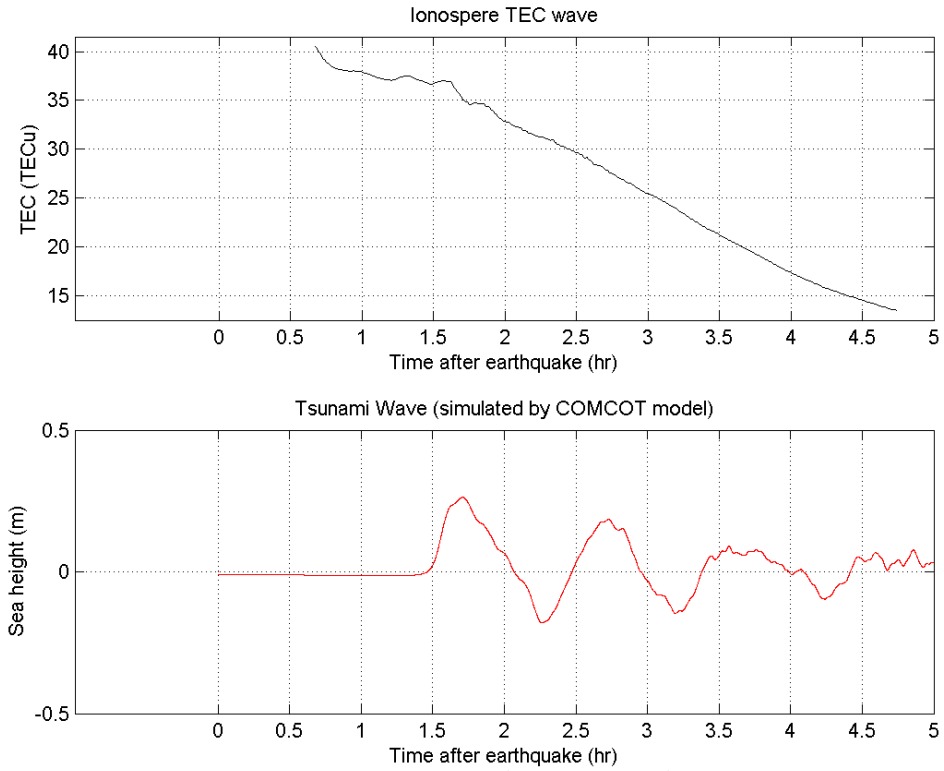



圖 F13、日本 GPS 地面接收機網第 449 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

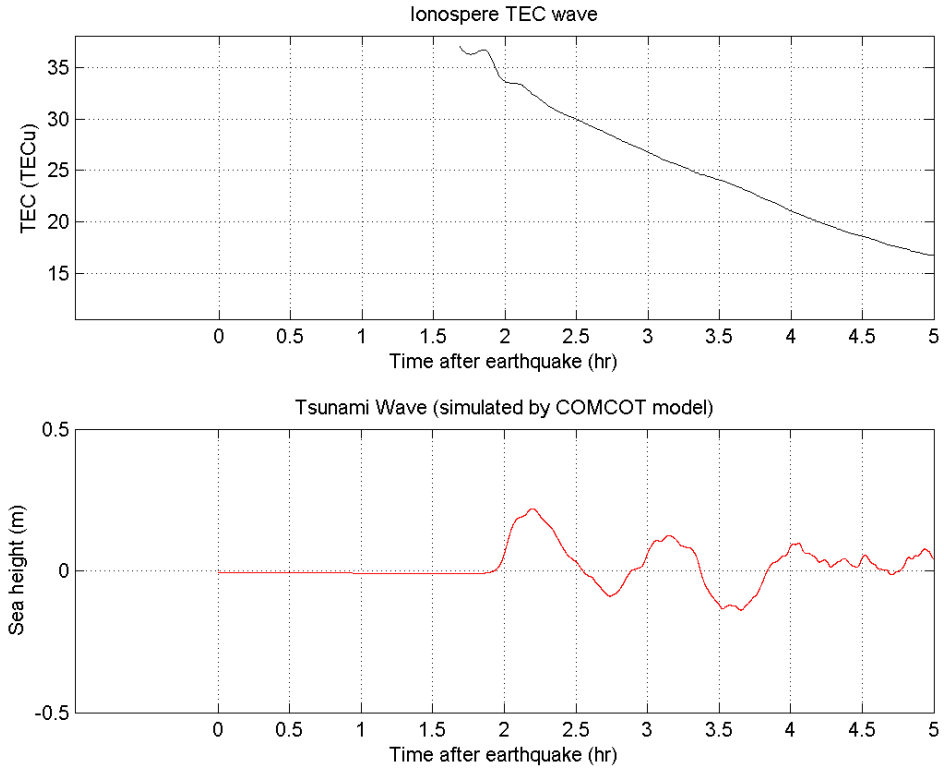



圖 F14、日本 GPS 地面接收機網第 449 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

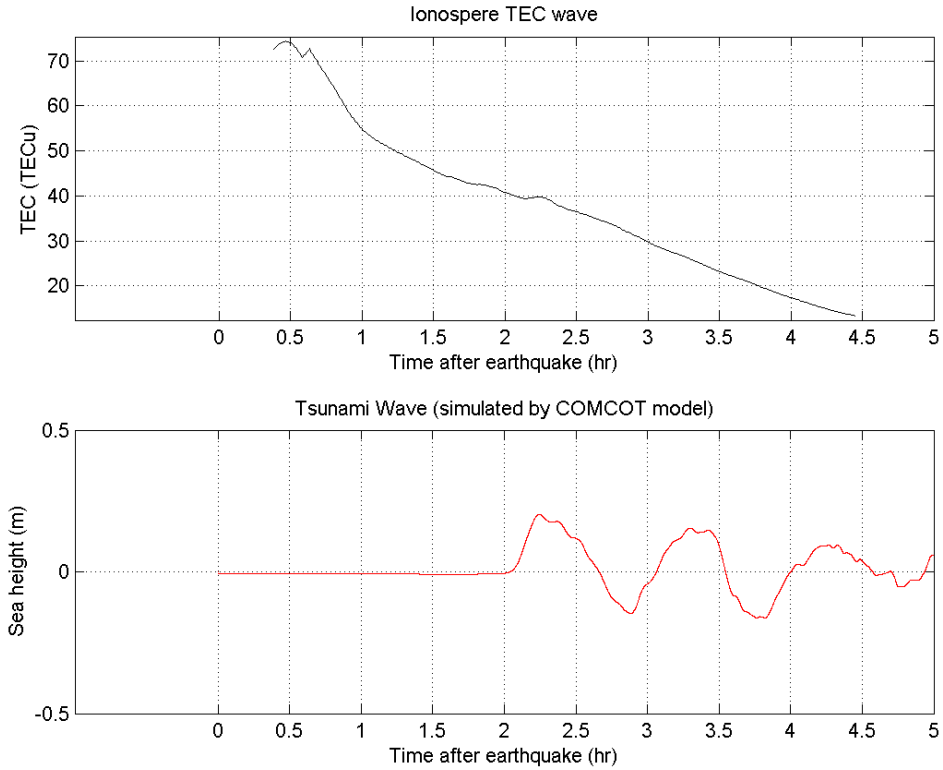



圖 F15、日本 GPS 地面接收機網第 497 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

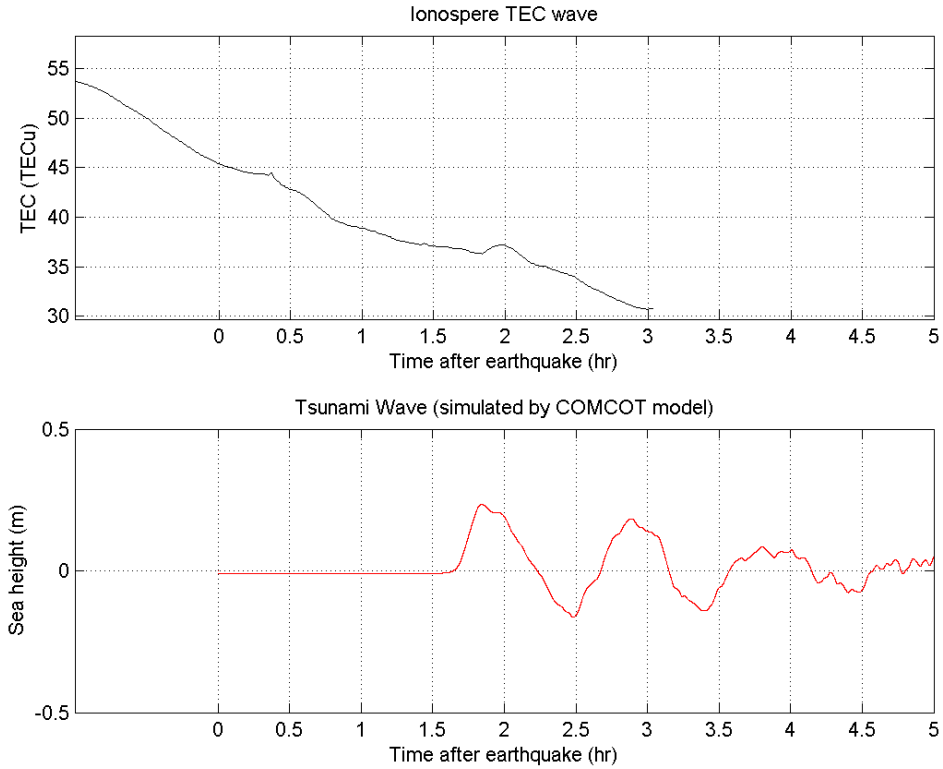



圖 F16、日本 GPS 地面接收機網第 497 號站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

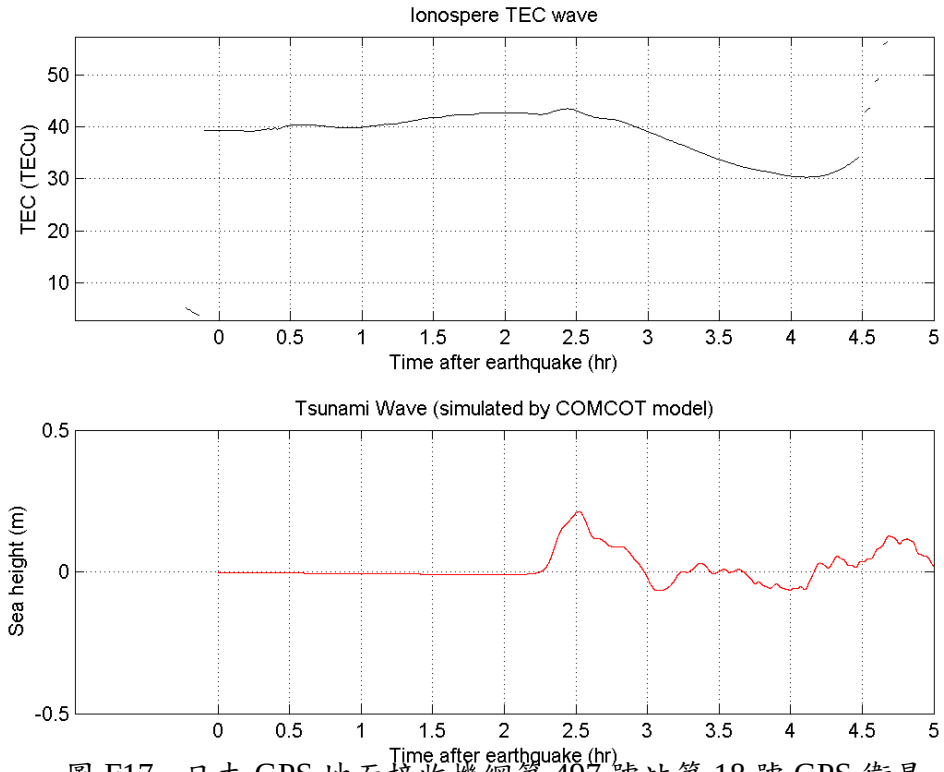



圖 F17、日本 GPS 地面接收機網第 497 號站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

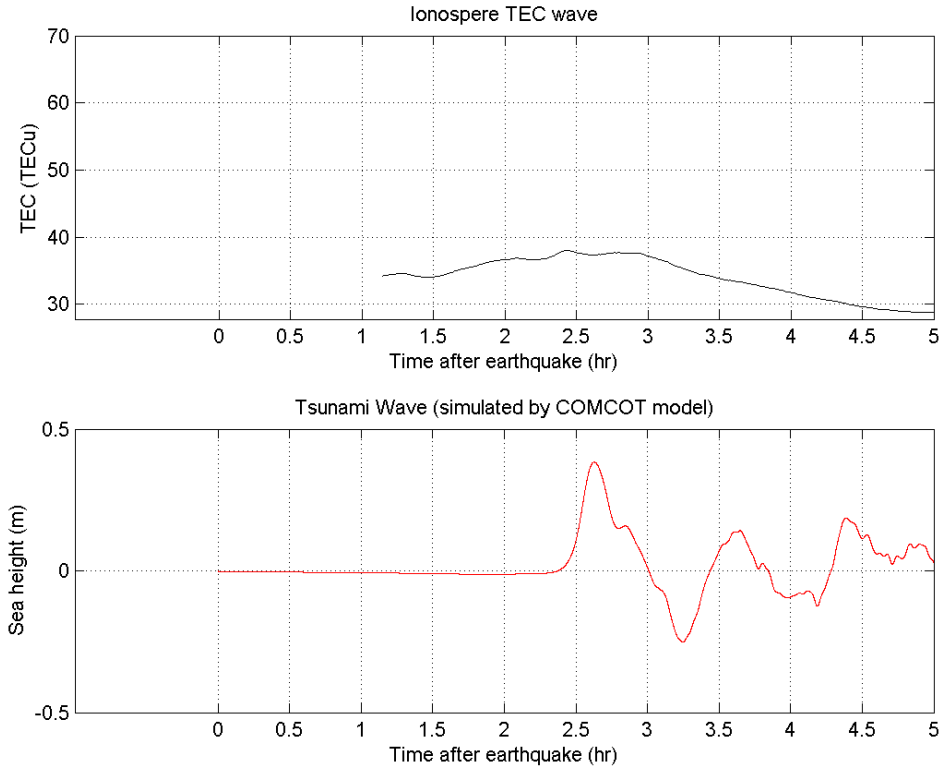



圖 F18、日本 GPS 地面接收機網第 497 號站第 22 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

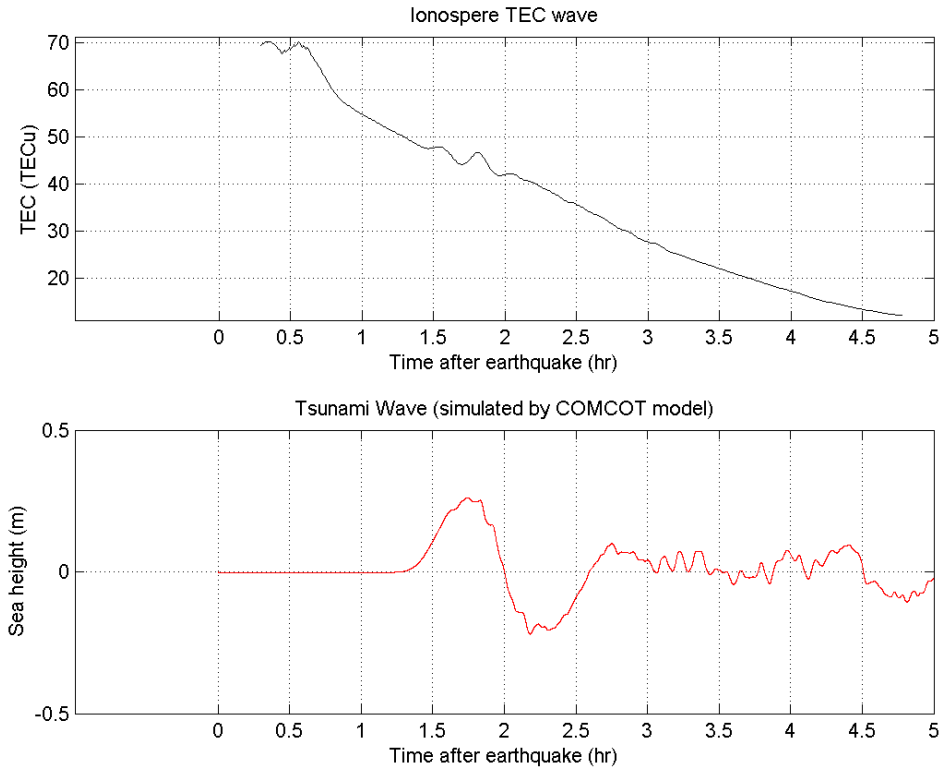



圖 F19、日本 GPS 地面接收機網第 603 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

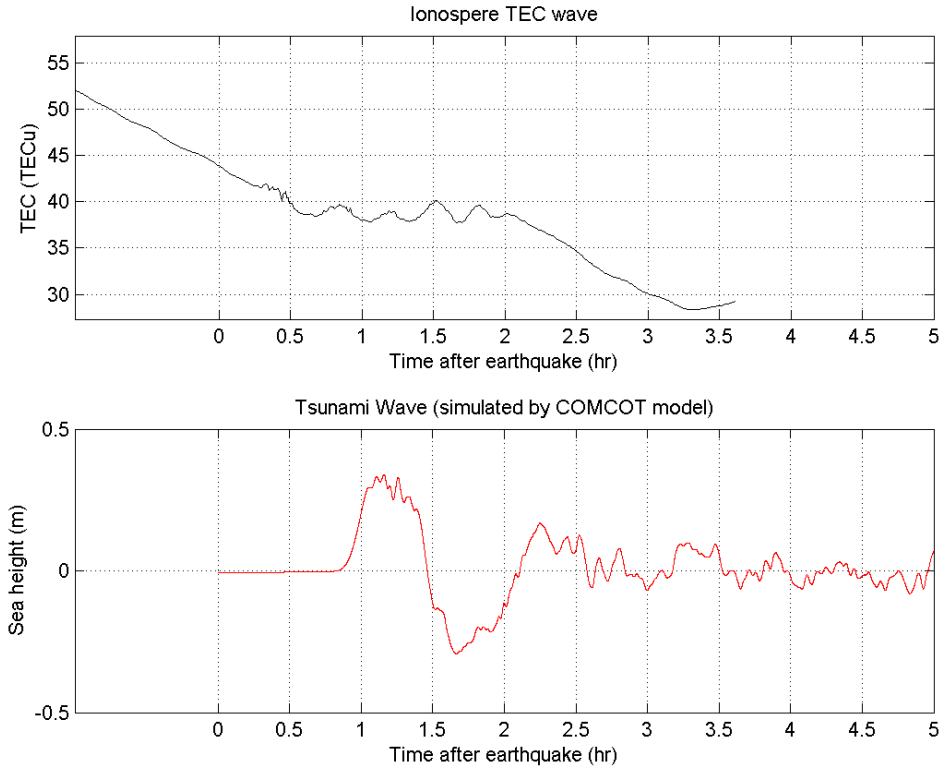



圖 F20、日本 GPS 地面接收機網第 603 號站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

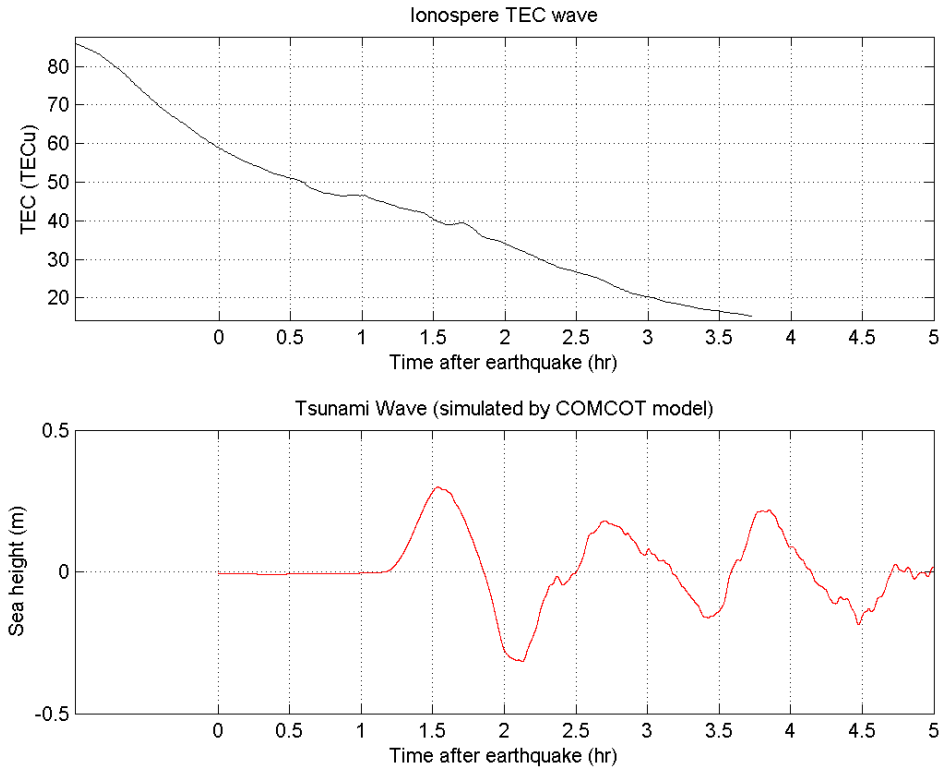



圖 F21、日本 GPS 地面接收機網第 604 號站第 09 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

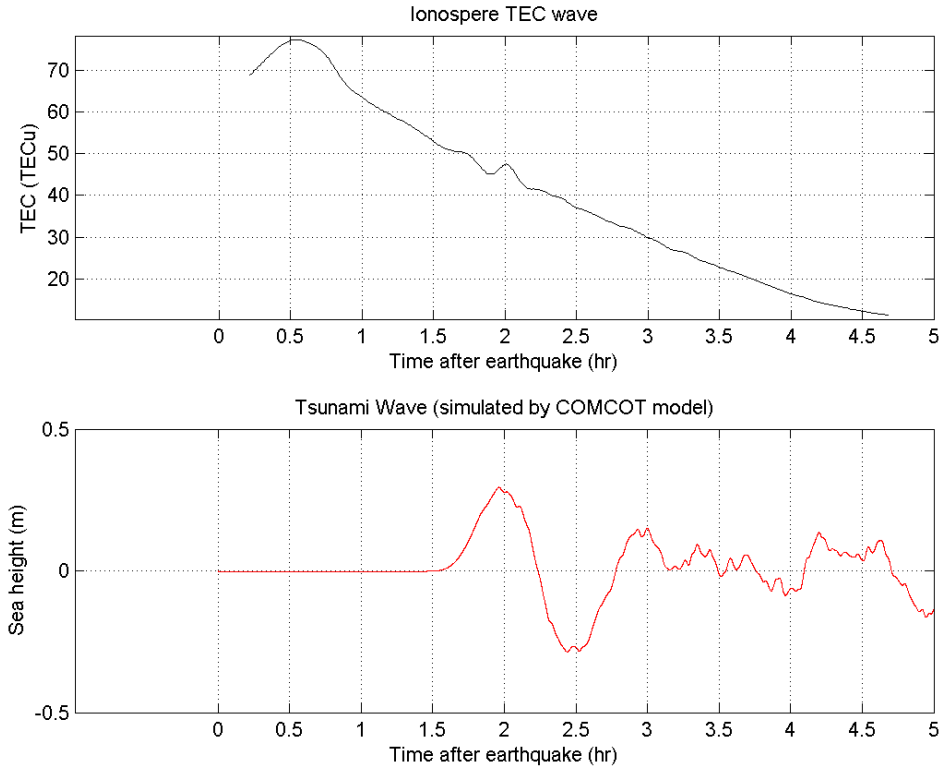



圖 F22、日本 GPS 地面接收機網第 604 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

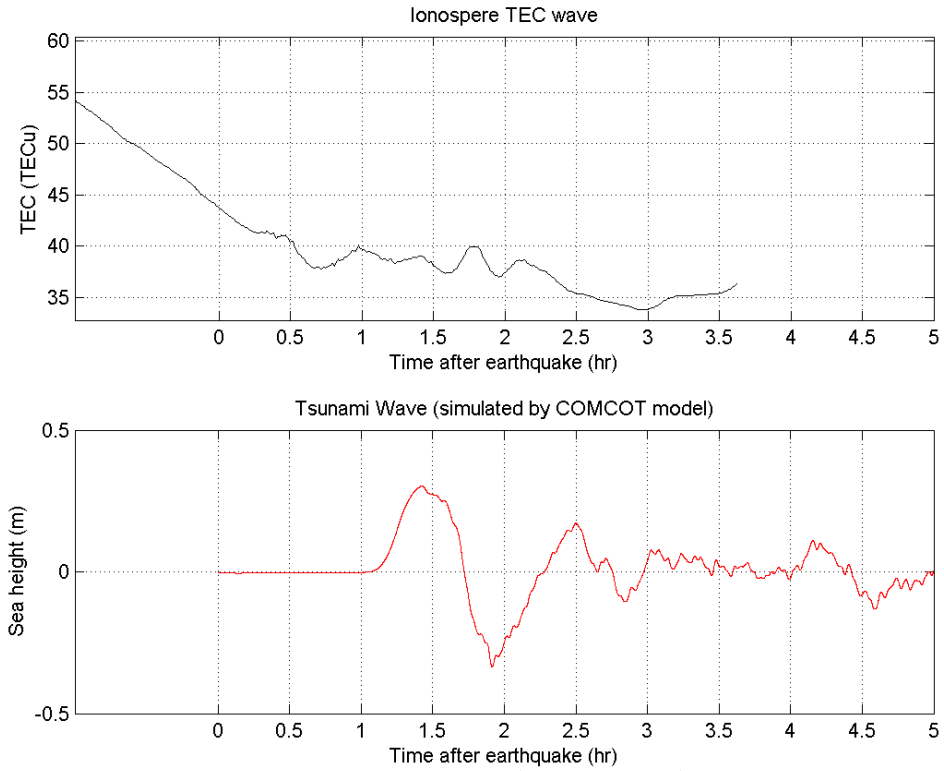



圖 F23、日本 GPS 地面接收機網第 604 號站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

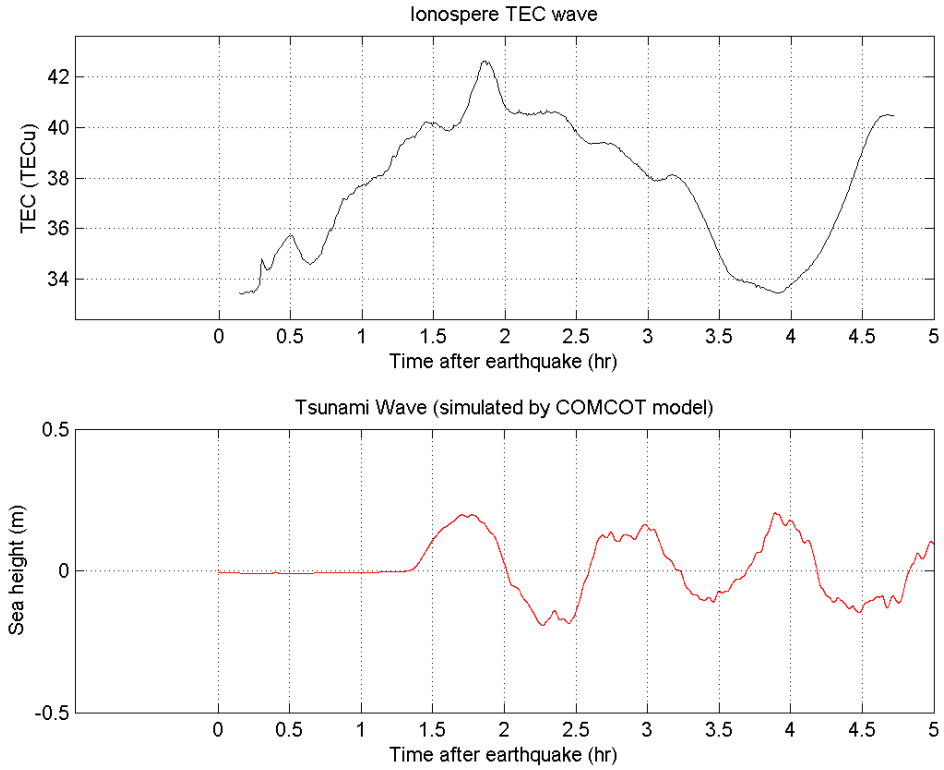



圖 F24、日本 GPS 地面接收機網第 604 號站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

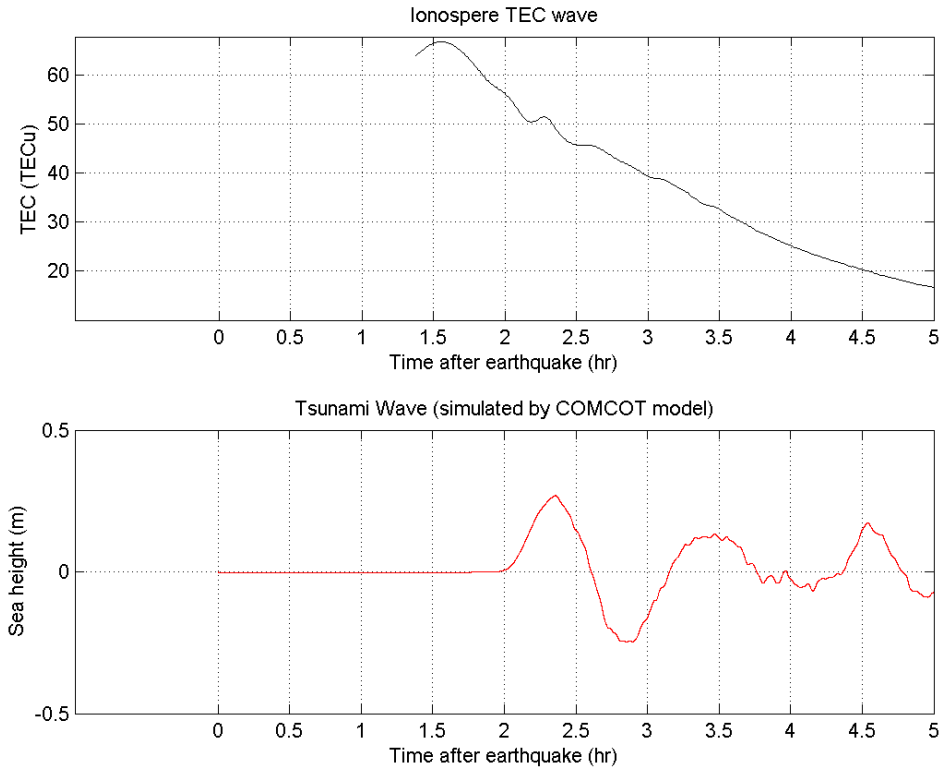



圖 F25、日本 GPS 地面接收機網第 604 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

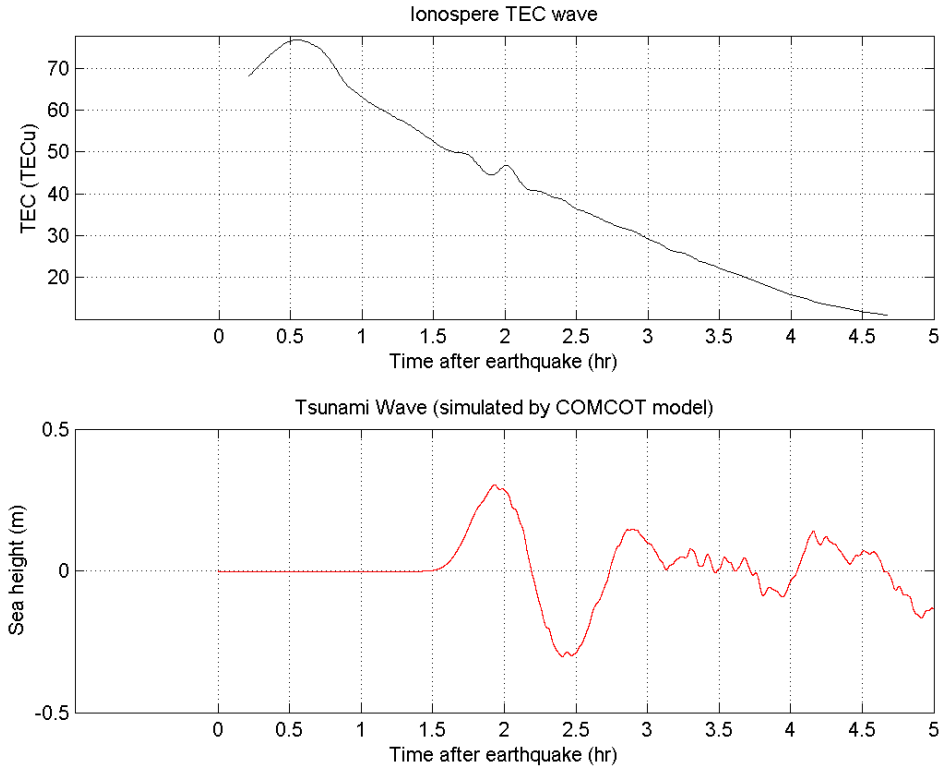



圖 F26、日本 GPS 地面接收機網第 605 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

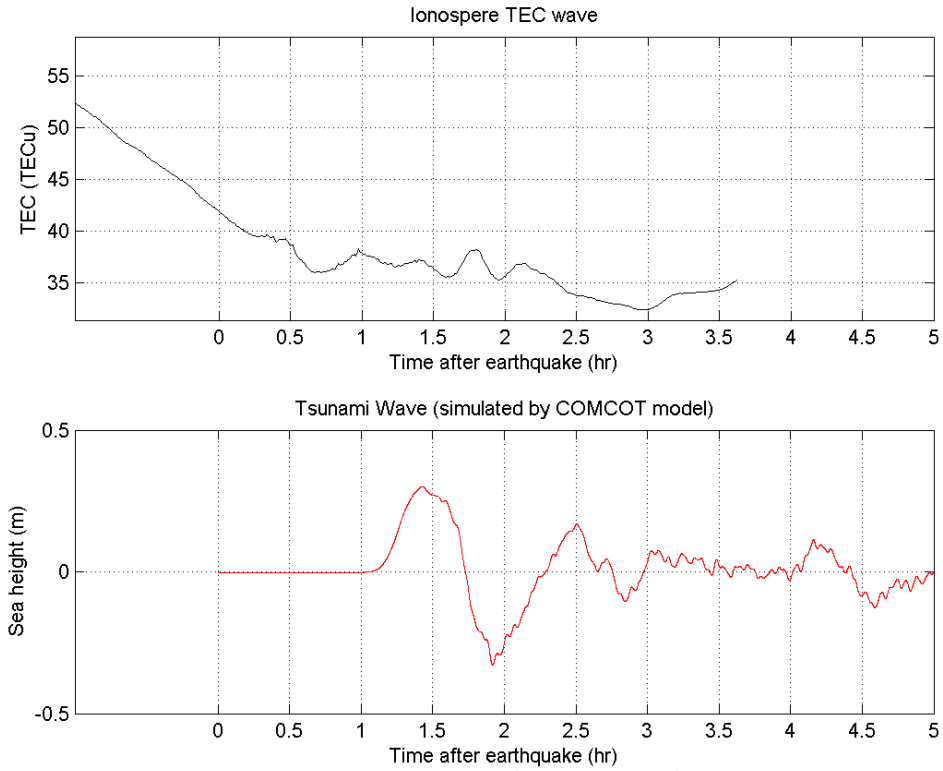



圖 F27、日本 GPS 地面接收機網第 605 號站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

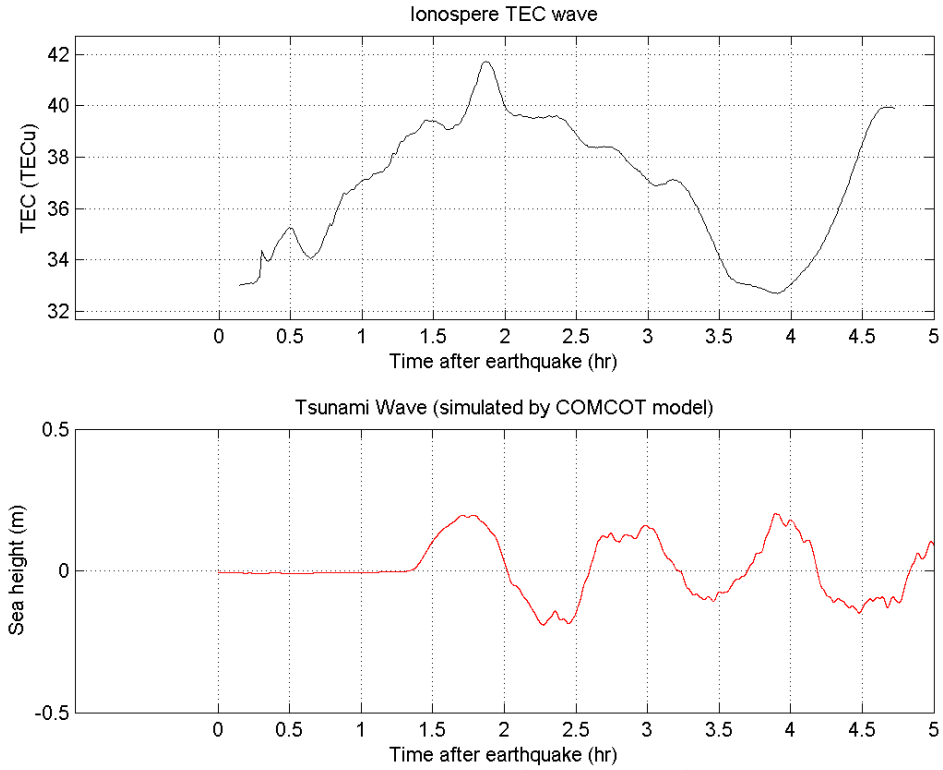



圖 F28、日本 GPS 地面接收機網第 605 號站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

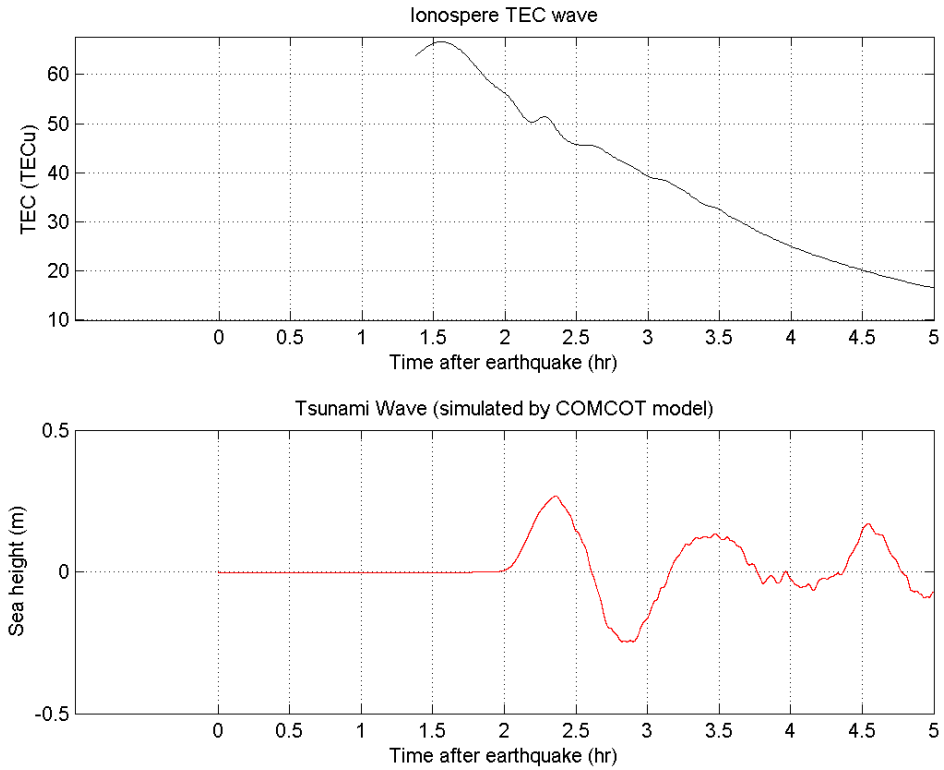



圖 F29、日本 GPS 地面接收機網第 605 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

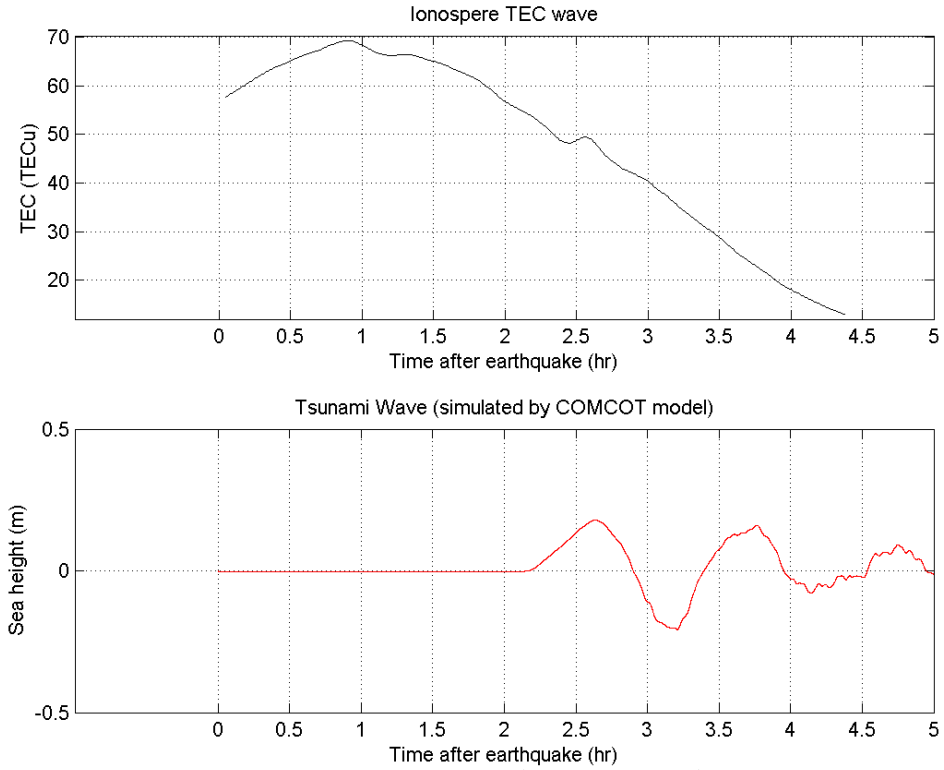



圖 F30、日本 GPS 地面接收機網第 1140 號站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

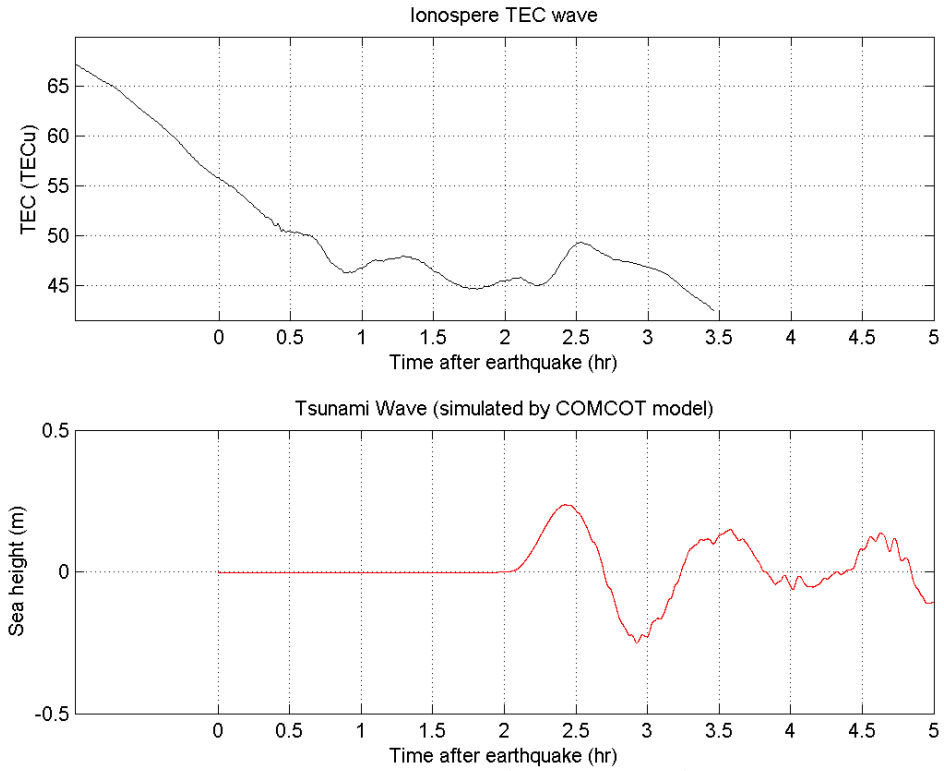



圖 F31、日本 GPS 地面接收機網第 1140 號站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

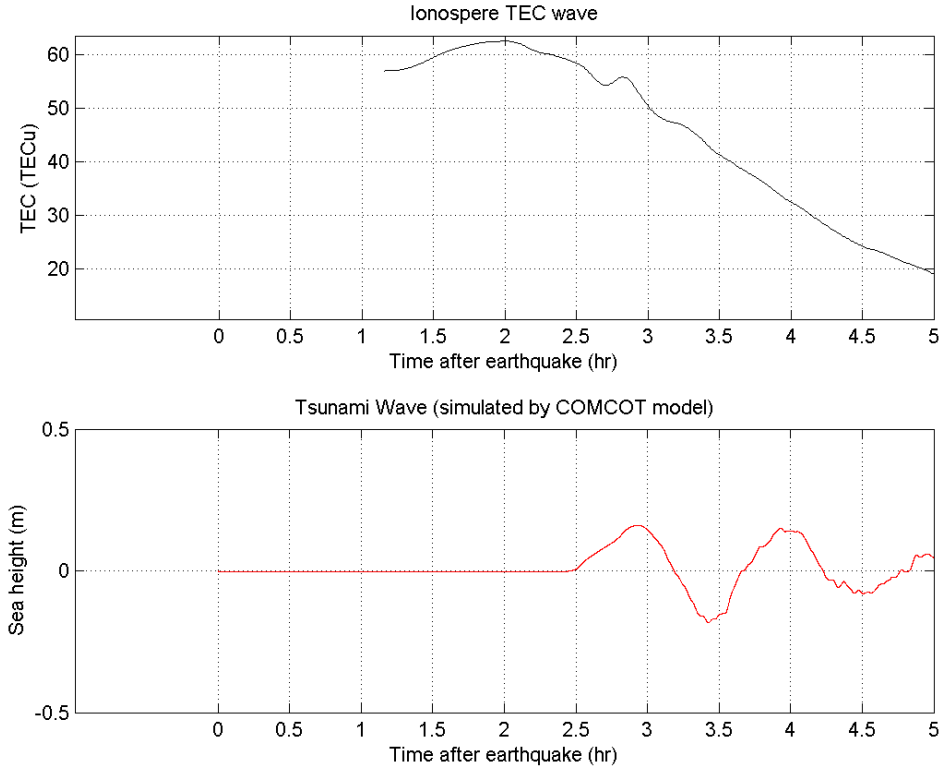



圖 F32、日本 GPS 地面接收機網第 1140 號站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

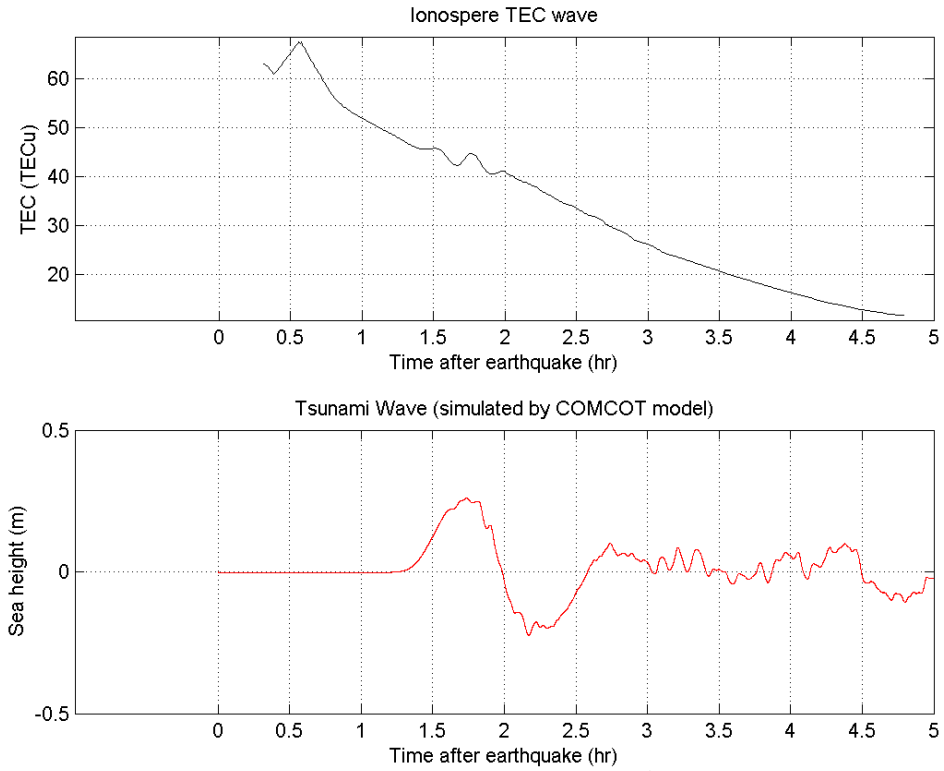



圖 F33、SOPAC GPS 地面接收機網 ccj2 站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

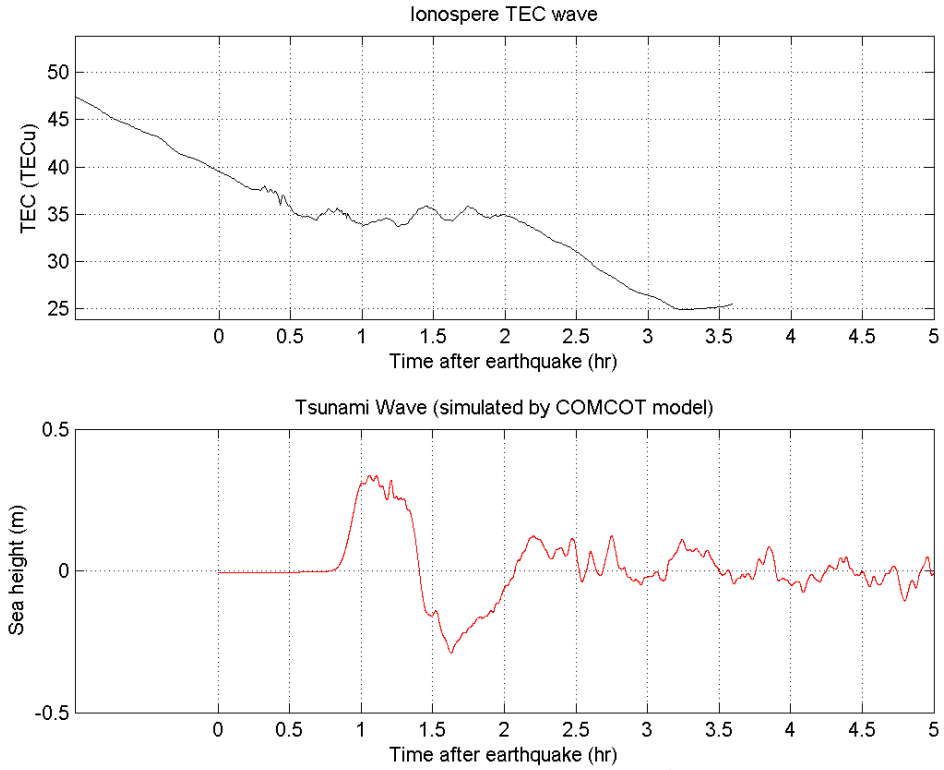



圖 F34、SOPAC GPS 地面接收機網 ccj2 站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

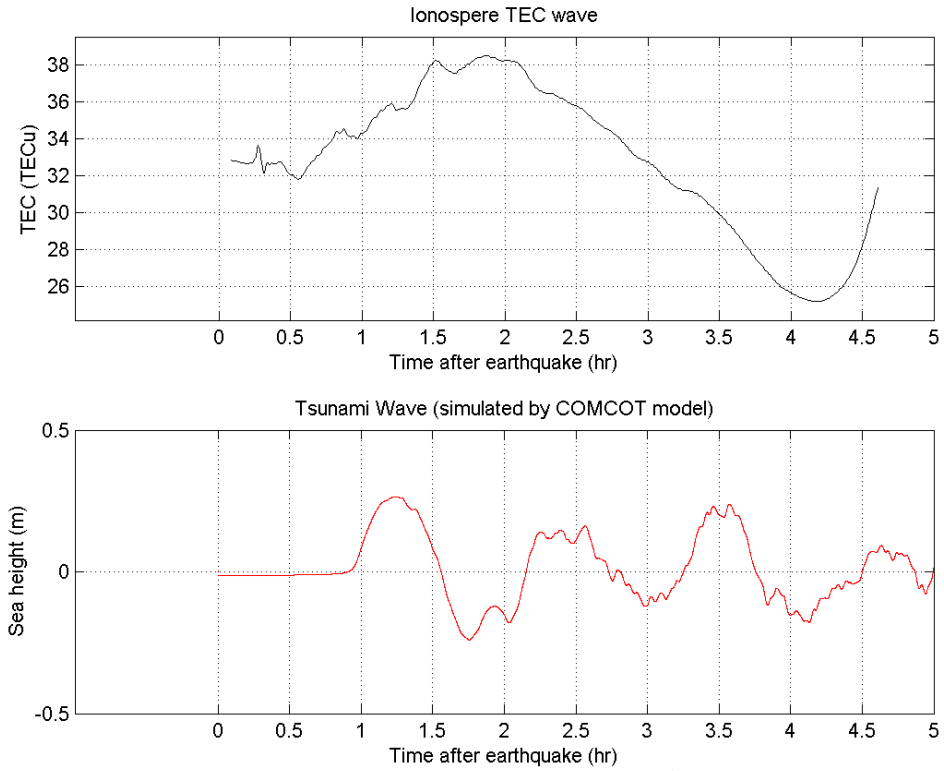



圖 F35、SOPAC GPS 地面接收機網 ccj2 站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

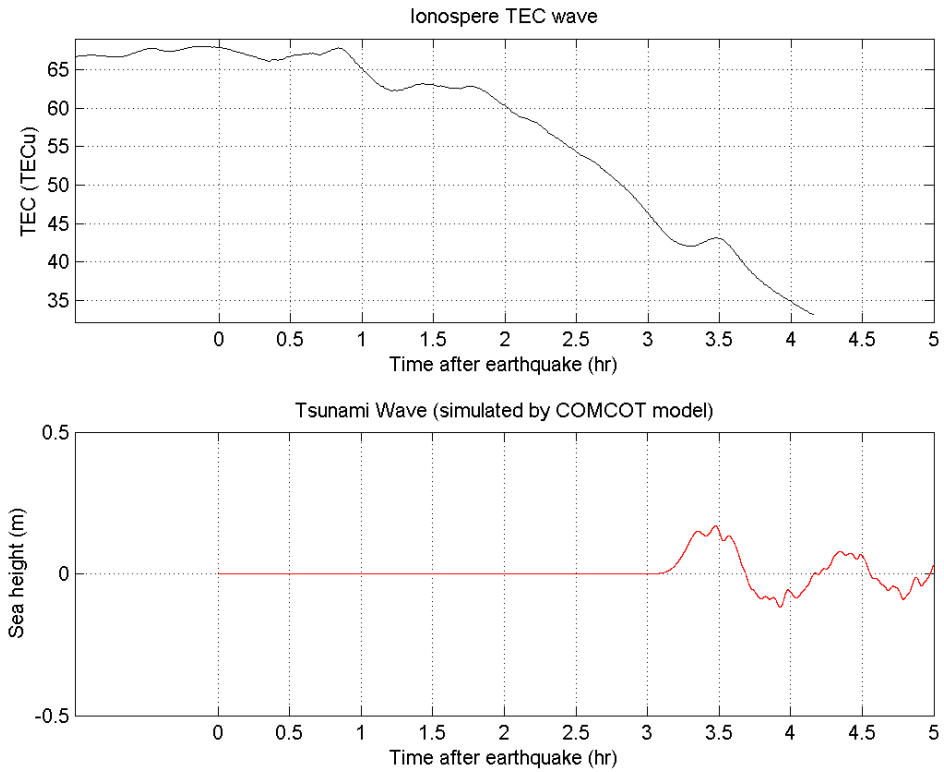



圖 F36、SOPAC GPS 地面接收機網 guam 站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

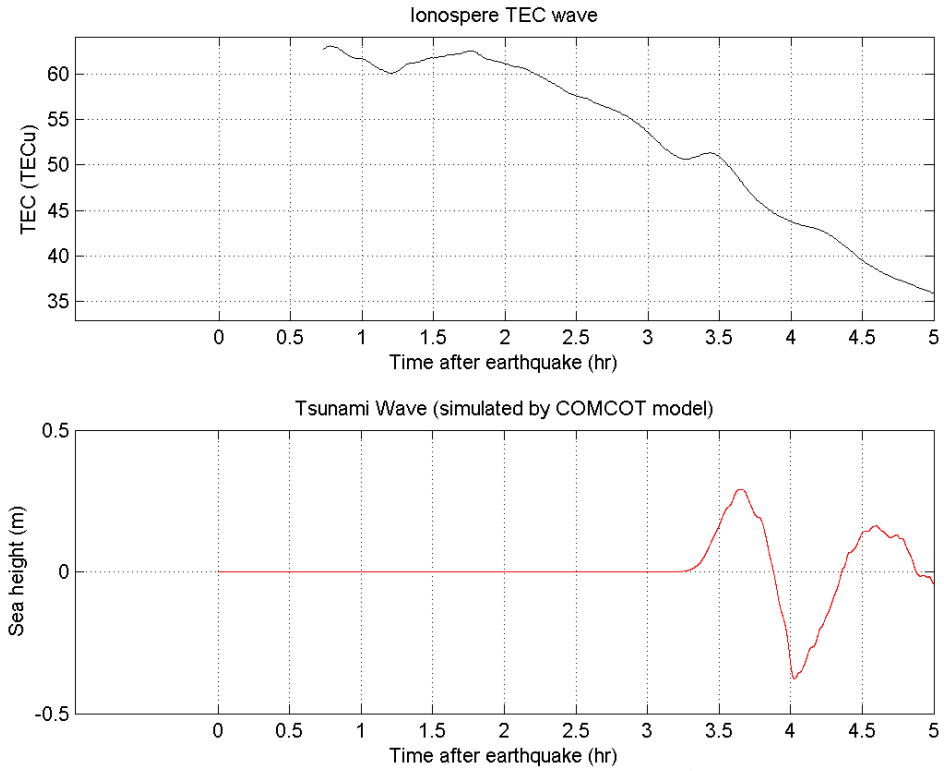



圖 F37、SOPAC GPS 地面接收機網 guam 站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

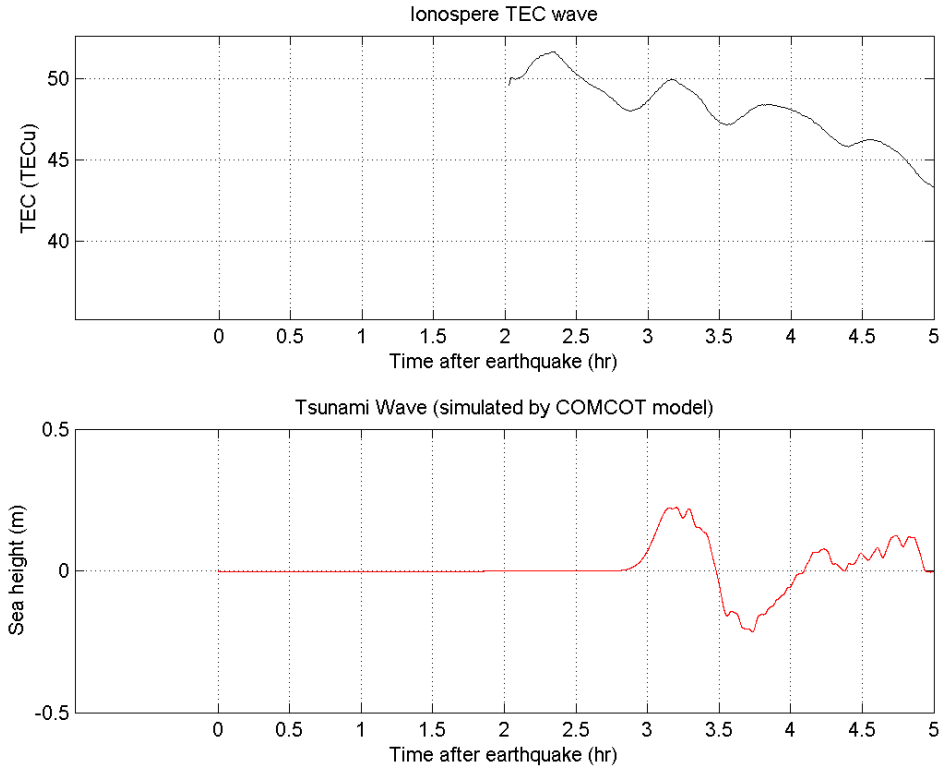



圖 F38、SOPAC GPS 地面接收機網 guam 站第 22 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

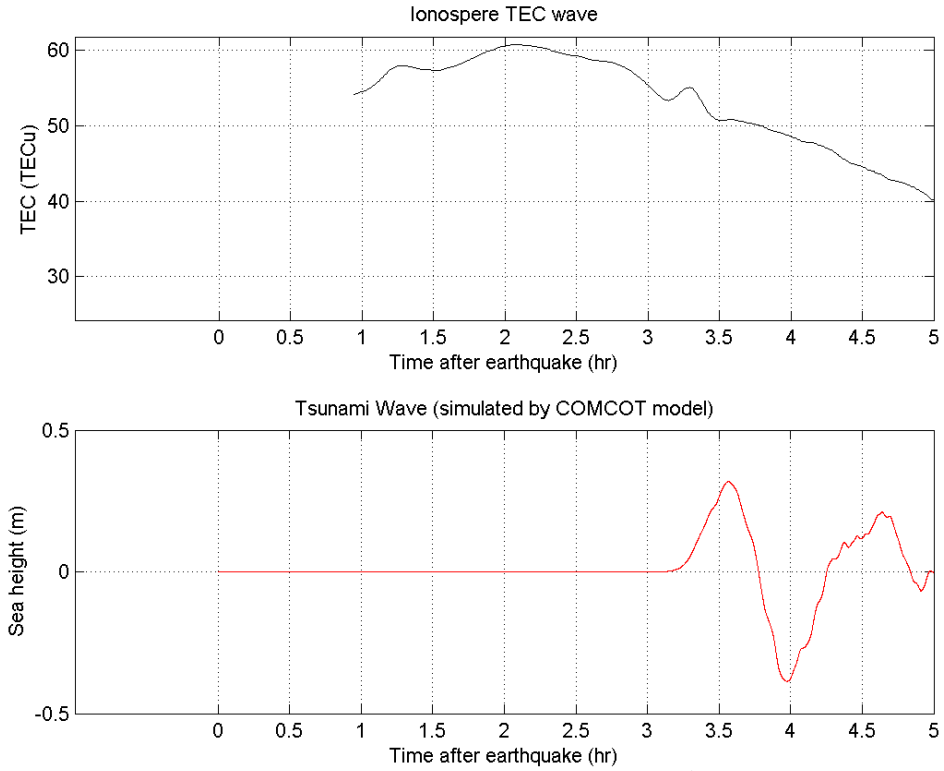



圖 F39、SOPAC GPS 地面接收機網 guam 站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

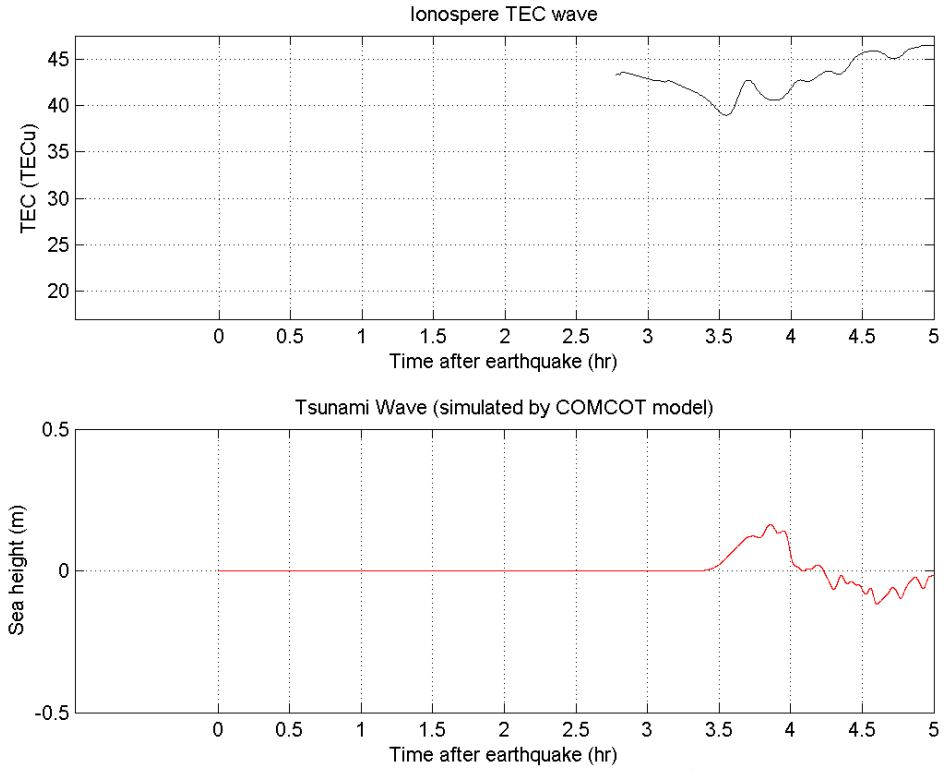



圖 F40、SOPAC GPS 地面接收機網 guam 站第 29 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

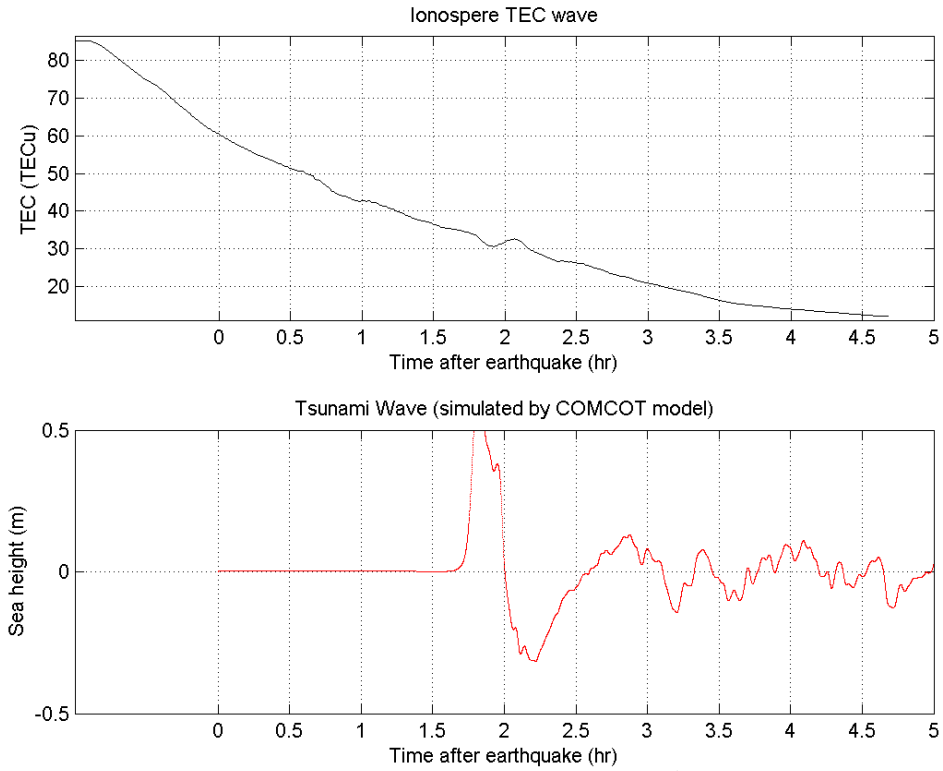



圖 F41、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 09 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

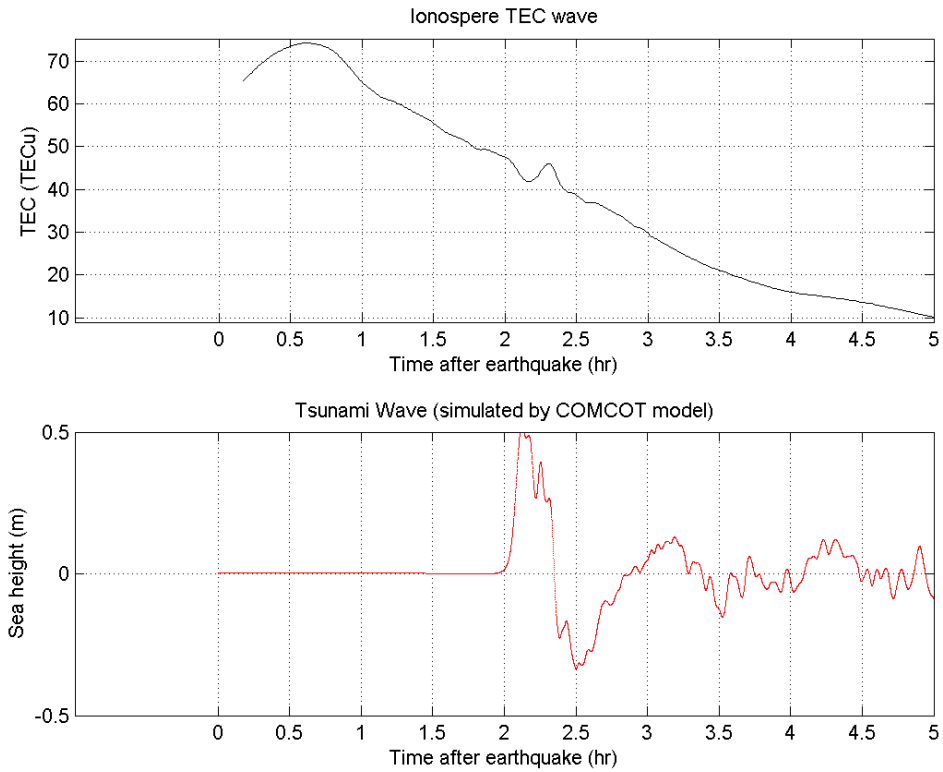



圖 F42、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 12 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

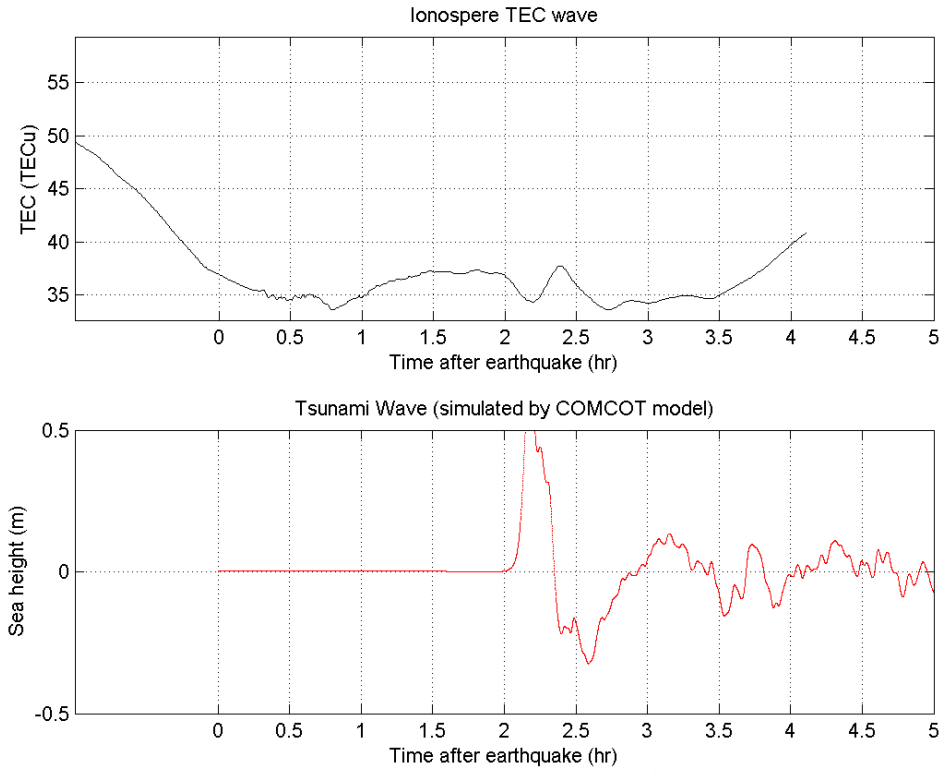



圖 F43、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 15 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

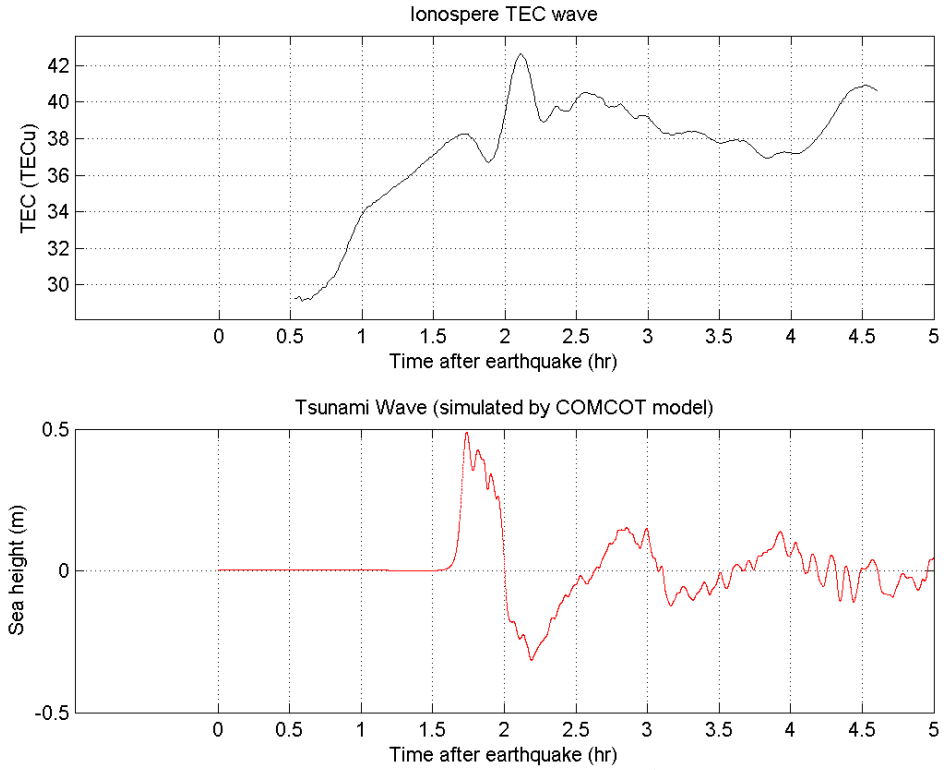



圖 F44、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 18 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

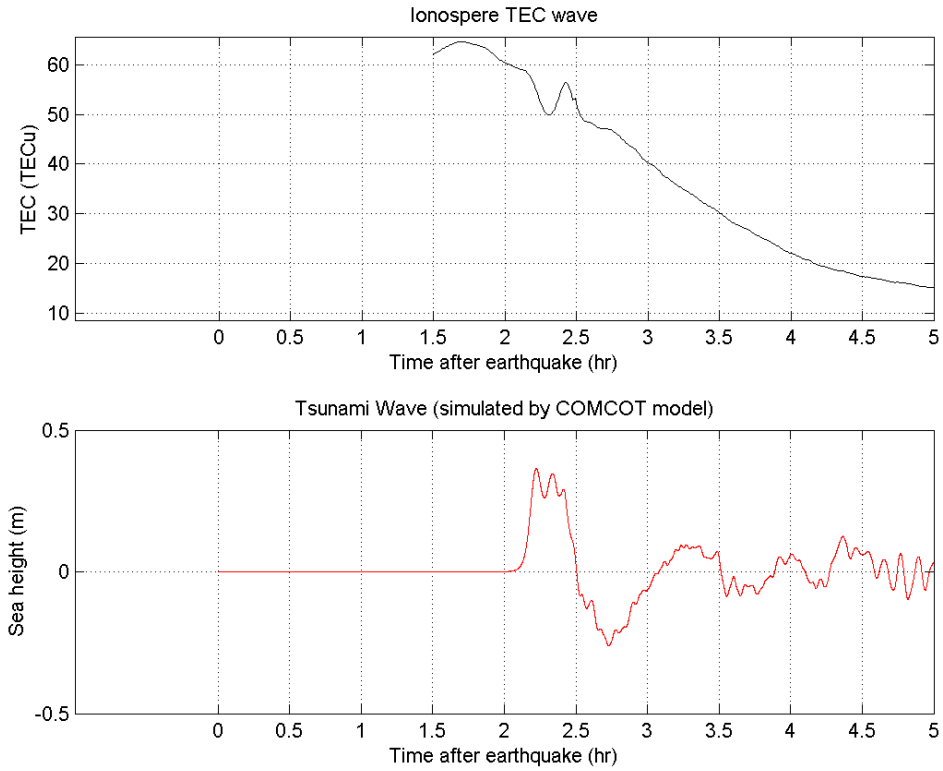



圖 F45、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 25 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

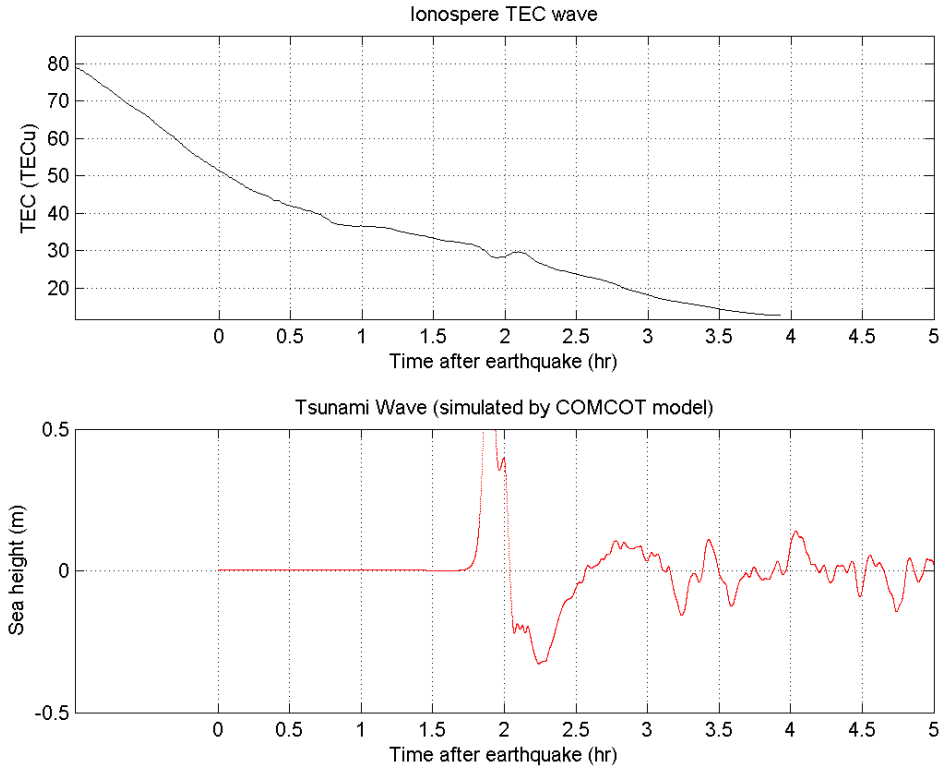



圖 F46、SOPAC GPS 地面接收機網 mcil 站第 27 號 GPS 衛星測得之 TEC 變化與 COMCOT 模擬正下方海面高度變化比較。

## 評語

本研究分析在日本 311 海嘯後，太平洋沿岸地面 GPS 測站所觀測到的電離層全電子含量（TEC）擾動情形，以測試未來利用 TEC 擾動預測海嘯的可行性。本研究未來有發展潛力，宜改進資料分析方法，用更有效的方法，移除 TEC 變動的背景量，以找出相對海嘯振幅高度與向上傳播與斜向傳波之大氣擾動所產生 TEC 擾動之振幅大小之間的關係，以做更精確之海嘯預警預測。

優點：

切合時事，有未來應用性。

缺點：

本研究主要的發現為電離層 TEC 擾動與海面海嘯之間具有極高之相關性，相關資料只有一次事件，比較沒有說服力。並且電離層 TEC 擾動大小與 NOAA 公佈之海嘯高度（圖十五）的相關不顯著，扣除振幅較高的幾點後，其餘點相當散亂，甚至有 TEC 擾動振幅隨海嘯震幅減小的趨勢（反比例），如此就和理論相違背了。另外，海表面高度也受海洋中湧浪、風浪等影響，甚至這些浪的浪高比海嘯還大，沒有把這些浪濾除，本研究的結論仍有值得商榷之處。

建議改進事項：

因為是做資料的「相關性」研究，至少要做些統計分析，例如顯著性檢定（significant test）。