

# 海氣象海嘯資料浮標之發展與應用

林演斌、吳立中、余孟娟、黃清哲

成功大學近海水文中心

## 摘要

臺灣處於環太平洋地震帶上，同時又為颱風必經之地，颱風及地震為臺灣主要的天災。成功大學近海水文中心(COMC)多年來接受中央氣象局、水利署及觀光局等單位的委託，發展國內自主的資料浮標技術，建立環臺海氣象資料浮標觀測網。過去五年站網平均觀測成功率達94%，顯示自主觀測技術已達成熟。目前布放的資料浮標中有兩座設於深海，均為中央氣象局所有。其一為台東外洋資料浮標，位置於臺灣東部海域離岸300 km外，水深5,600 m；另外一座為東沙島資料浮標，水深2,600 m。深海資料浮標能提早掌握颱風氣壓、氣溫、水溫、風速、風向及波浪等相關海氣象即時資訊，提昇颱風預報能力。考量臺灣海嘯偵測需求，本文以深海海氣象資料浮標建置之技術為基礎，研發海嘯觀測系統，掌握關鍵技術，做為佈建自主海嘯觀測站之基礎。

海氣象海嘯監測系統包含三個子系統：水面浮標系統、水下系統及預警系統。水面浮標系統以現有資料浮標為基礎，接收水下系統測得之海嘯資訊，透過衛星通訊將數據即時傳回陸上接收站；水下系統具有抵抗海底6,000 m以上水壓的能力、儲備超過一年以上的電力、具備海嘯波分析能力及管辨識技術、應用水下通訊技術將底碇式壓力計觀測到的海嘯資訊傳輸到水面浮標。

成功大學近海水文中心在現有資料浮標技術基礎上，有能力於兩年內完成海嘯系統之研發、測試與布放。自主研發可以掌握關鍵技術，對確保未來長期維運之順暢極有助益。

關鍵字：深海資料浮標、海嘯、颱風、水下通訊、海嘯預警技術

## 一、前言

環太平洋地震帶是地震發生最頻繁的區域，一旦深海地震引發海嘯，沿地震帶周遭的沿海城市都有可能受到海嘯的影響，尤其外海海底坡度平緩的地理環境有助於海嘯波能量累積。海嘯波為長周期波，波長極長但波高僅數十公分，在傳遞的過程中能量幾乎無耗損，隨著海嘯波往海岸傳遞的過程，受到地形影響後產生淺化效應，波高迅速增加，終變成海嘯巨浪。

美國太平洋海嘯警報中心(Pacific Tsunami Warning Center, PTWC) 提供太平洋地區的海嘯警報，一旦發生震度6.5以上的海底地震，在地震發生後約10-20分鐘時間，PTWC根據地震資訊研判發生海嘯災害的可能性，並針對可能遭受海嘯威脅地區發出警報。海嘯警報發布後，PTWC會持續發布警報，更新地震及海嘯警戒範圍，並將量測到的海嘯波水位加入警報內容中，以追蹤海嘯波到達的確切位置，直到解除海嘯警報，因此建立大洋海嘯監測站是執行海嘯預警不可或缺的要項。

雖然臺灣近年來並無海嘯災情，但有鑑於日本311海嘯事件災損慘重，同樣位於環太平洋的臺灣亦應該提高警戒，未雨綢繆。發展臺灣自主的海嘯監測技術並建置海氣象海嘯資料浮標，在海嘯警報發布期

間能主動在第一時間偵測水位變化，掌握即時情報做為海嘯警報發布的參考。

此外，颱風侵襲臺灣之頻率較海嘯高，掌握颱風在海氣交界面的海氣象變化歷程之工具，唯有海氣象資料浮標，COMC於1998年成立前即已建立海氣象資料浮標技術(Kao, 1999; 高, 2003, 2005)。設置在西太平洋的海氣象資料浮標能提早提供颱風的海氣象資料，進而建立深海海氣象資料浮標之作業能量(李, 2007)，並由中央氣象局採用設置於台東外洋與東沙島。

本研究之目標為建立大洋區域海氣象與海嘯之自主觀測技術，進行相關技術之研發與資料分析演算之發展，達成海嘯觀測、預警以及海氣象觀測功能。藉由本研究完成之水面浮標系統、水下系統及預警系統，提升海嘯防災效率，未來海嘯警報發布，能快速掌握海嘯資訊，進行災害潛勢分析並提供給主管機關決策參採，為沿岸城鄉爭取防災時間。

## 二、原型觀測系統規劃

COMC致力於海洋環境監測技術之建立、發展各種作業化及自動化之海洋環境監測技術及海岸防災預警系統。歷年來，COMC接受水利署、氣象局及觀光局等政府單位委託，為國家建置了完整的環臺海氣象資料浮標觀測網(圖1)；迄2015年7月，已負責布放

及維護的海氣象資料浮標共20座，布放水深為10~5,600 m。過去五年站網平均觀測成功率達94%，颱風警報期間的觀測成功率逾95%，顯示自主觀測技術已達成熟。

海氣象海嘯資料浮標建置包含8項關鍵技術(圖2)，包括：數據擷取、電源、深海資料浮標現場作業、衛星傳輸、監控與資料品管(Doong et al., 2007)、資料庫、資料展示與海嘯觀測等技術。COMC對於其中7項技術，已累積近20年的經驗，僅有海嘯觀測技術一項之研發正在進行中。因此運用既有技術，整合水下通訊以及海嘯壓力感測儀，即可增加觀測海嘯功能。

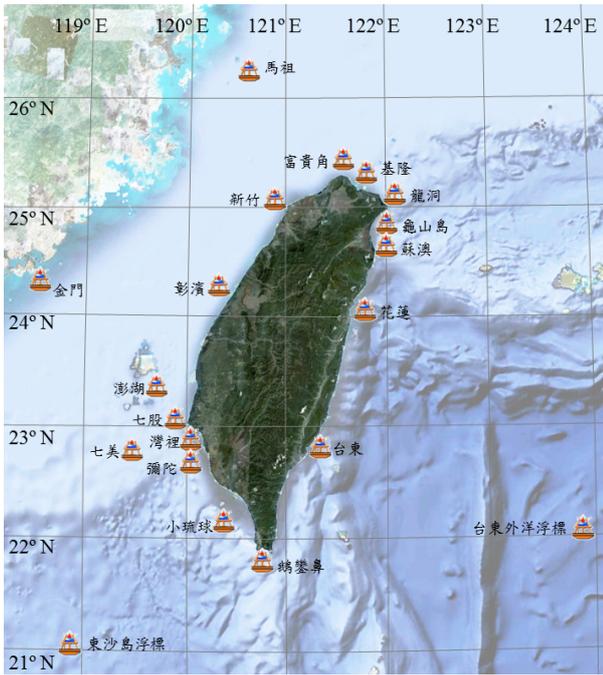


圖1 臺灣環島海氣象資料浮標站網圖

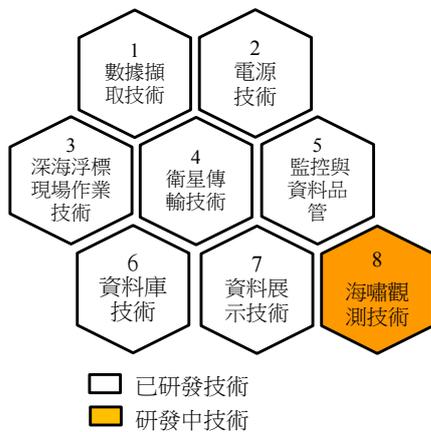


圖2 海氣象海嘯資料浮標關鍵技術

海嘯資料浮標提供即時海嘯水位及海氣象量測資訊，在海嘯波抵達海岸之前，爭取更多寶貴時間作人員疏散及海嘯防災預警。海氣象海嘯資料浮標的布放位置擬設置在台灣東部外海，以偵測環太平洋地震帶深海地震引發之海嘯。

海氣象海嘯資料浮標由五個子系統組成：(1) 水下海嘯監測子系統，功能為監測與分析水位高度，若發現疑似海嘯之水位變動則增加水位傳輸頻率；(2) 海氣象資料浮標子系統，接收來自海底之水位與海嘯訊號，並具備海氣象觀測功能，將水位、海嘯訊號與海氣象資料對衛星發射；(3) 資料品管子系統，研判所接收的水位、海嘯訊號與海氣象資料之正確性；(4) 海嘯預測子系統，根據海嘯水位與相關資料，預測海嘯之影響；(5) 資訊展示子系統，匯集實測水位、海嘯、預測海嘯之影響與海氣象等資料，成為具備查詢、展示與預警功能之網頁。

海氣象海嘯資料浮標儀器整合規劃如圖3。由於海上作業的風險與困難性遠大於實驗室或陸上之作業，在各項研發與整合工作完成之後，必須進行嚴謹的現場測試工作，以評估系統的效能。實質產出成果為「實測海嘯水位」、「海嘯預警資訊」、「海象資料」、及「氣象資料」等。

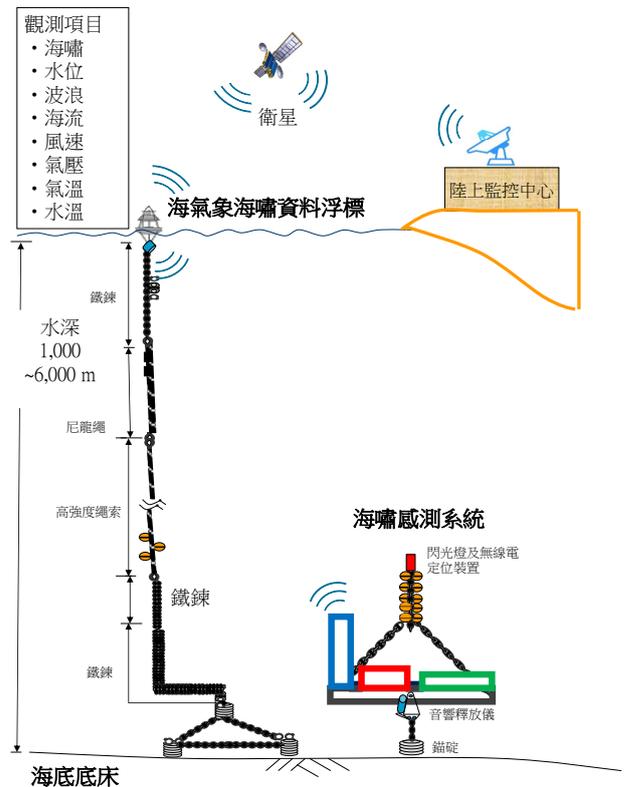


圖3 海氣象海嘯資料浮標儀器整合規劃

### 三、水下系統研發

水下系統主司水下監測，具有抵抗海底6,000 m以上水壓的能力、儲備超過一年以上的電力、具備海嘯波分析能力及品管辨識技術、及應用水下通訊技術將海嘯壓力感測儀觀測到的海嘯資訊傳輸到水面浮標。

水下儀器常用底碇式及底碇半浮式兩種設計，考慮在深海底床幾乎沒有海流存在以及底床底質和傾斜的不確定性，本研究擬採用底碇半浮式的設計，系統由4個模組組成(圖4)：(1)海嘯量測模組：海嘯壓力感測儀與記錄器等；(2)錨碇模組：音響釋放儀、錨碇塊、固定支架及鐵鍊；(3)水下通訊模組：水下傳輸數據機及電池等；(4)浮力模組：玻璃浮球、閃光燈及無線電定位裝置。

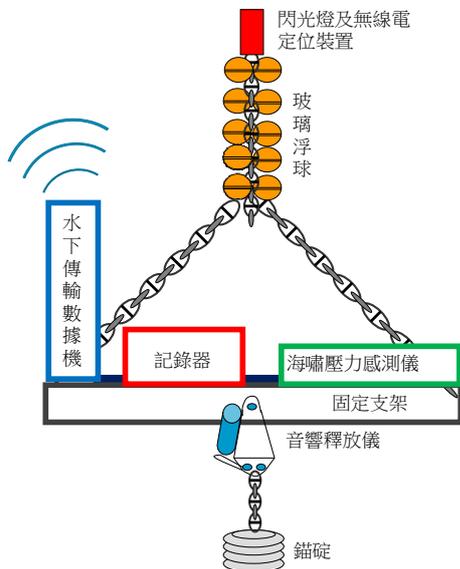


圖4 水下系統載台示意圖

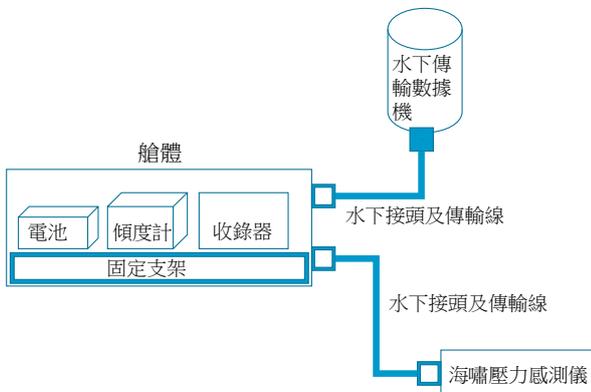


圖5 水下通訊研發儀器配置圖

水下系統研發工作重點包含艙體、連接線與水下通訊功能研發。水下通訊研發的儀器配置如圖5，艙體分別連接水下傳輸數據機及海嘯壓力感測儀，艙體內部架設收錄器(data logger)、傾度計和電池等，收錄器需要具備判斷海嘯訊號以及控制觀測頻率和即時資料傳輸等功能。

### 四、海嘯偵測及分析方法

海嘯壓力感測儀為底碇式壓力計(Bottom Pressure Recorder, BPR)，觀測海表面水位波動  $\zeta(t)$  與水壓  $p(t)$  之間的數學關係如式(1)所示：

$$\zeta(t) = [p(t)/\rho g] - h \quad (1)$$

上式中  $\rho$  為海水密度、 $g$  為重力加速度、 $h$  為BPR所在位置之水深條件。如圖6所示，海水面上的波動週期可從小於一秒到數十小時都有可能發生，其中海嘯的週期約為數十分鐘。因水壓之偵測會受到BPR所在水深之影響(Tucker, 1991)：

$$p(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \rho g a_i \exp(-k_i h) \sin(\omega_i t - \phi_i) \quad (2)$$

上式中  $a_i$  為海面波動之振幅、 $k_i$  為波浪之週波數、 $\omega_i$  為波浪之角頻率、 $\phi_i$  為相位。如式(2)所示，當週波數  $k_i$  愈大，亦即波浪週期愈短，其對應之水壓會以  $\exp(-k_i h)$  的形式衰減。

因此深海地區所測得之水壓僅會呈現出長週期之海面波動，海面風湧浪(波動週期一般為30秒以內)的波動特徵並不易從深海測得之水壓資料中呈現出。相較於海面風湧浪，海嘯(波動週期約為十數至數十分鐘)以及潮汐(波動週期約為數小時到數十小時)因其週期較長，不易衰減，可從深海水壓中偵測出其波動特徵。

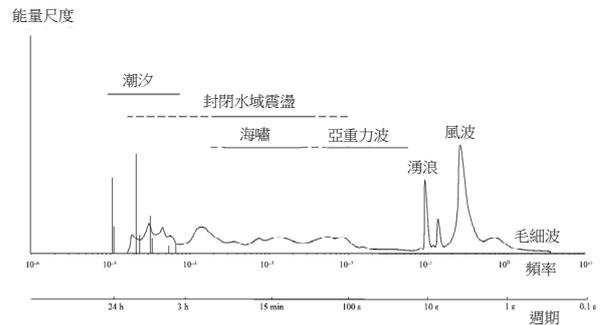


圖6 不同週期尺度的海面波動現象(Holthuijsen, 2007)

BPR觀測資料偵測海嘯的方法有兩種(Beltrami, 2011)：DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)演算法及類神經網路法。考慮到類神經網路法應用於海嘯偵測作業之前，必須先透過一段時間的觀測數據進行反覆學習，不易於系統布放完成之後就立即啟動海嘯偵測之作業；故本研究擬採用DART演算法作為系統偵測海嘯之核心演算方法。待系統收集到足夠觀測樣本後，再進行評估利用類神經網路演算法進行海嘯偵測之實用性。

DART演算法為Mofjeld (1997)所提出，是以三次多項式(polynomial)為演算核心的預測模式，透過前三小時的BPR實測資料來進行未來5分鐘的水位預測：

$$\hat{\zeta}(t') = \sum_{j=0}^3 w_j \bar{\zeta}(t'' - i\Delta t) \quad (3)$$

$$t' = t + 0.25/60 \quad (4)$$

$$t'' = t - n/(2 \cdot 60) \quad (5)$$

式(3)中  $\hat{\zeta}(t')$  代表在  $t$  的時間點預測未來在  $t'$  時間點所應測得之水位高度  $\hat{\zeta}$ ， $\Delta t$  則可設定為1小時。式(4)顯示所預測未來的時間為 0.25/60 小時，也就是 15 秒，為水位資料的觀測頻率。式(5)則表示以  $t - n/(2 \cdot 60)$  為時間中心點，進行  $n$  分鐘的平均。式(3)中的係數  $w_j$  可利用牛頓前向差分法計算得。此一演算法之示意圖如圖7所示。

一旦從BPR所取得之實測水位高度與式(3)所預測的水位高度相差超過某一門檻值時，則判定有異常之水位波動發生。根據過去所取得之觀測資料，決定出該門檻值為 3 cm。利用此演算法偵測海嘯波動之案例如圖8所示。相較於潮汐波動，當較高頻的海嘯波動發生時，此演算法與BPR實測結果會產生差異，亦即圖8中的(a-b)之值不等於零，藉此可判定海嘯事件的發生。

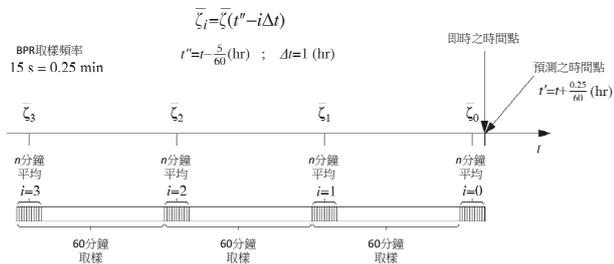


圖7 演算法示意圖(Beltrami, 2008)

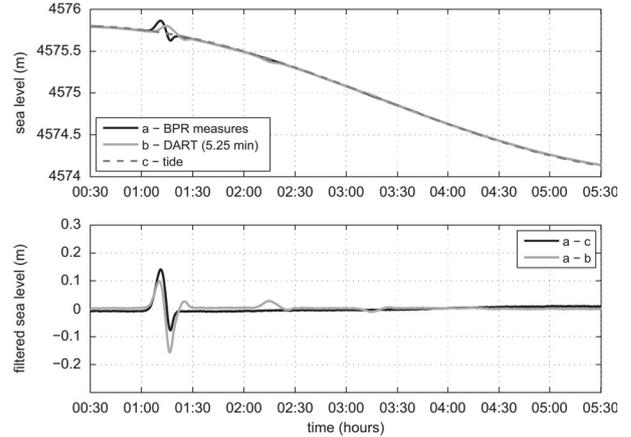


圖8 演算法偵測海嘯波動之案例(Beltrami et al., 2011)

## 五、資料浮標與水下系統關聯研發

COMC研發之作業化海氣象資料浮標(圖9)，包含從儀器系統的設計、開發、組裝、測試、現場安裝、測站維護、資料即時傳輸、系統遠端監控、資料品管展示與資訊服務，在長年運作與持續改善下，已建立一套順暢穩定的操作流程與品質制度，並於2000年9月獲得「ISO 9001」國際認證，成為臺灣海洋研發與操作領域中第一家榮獲ISO國際認證之單位，表示本中心的作業化流程已達國際標準。

海氣象資料浮標為客製化產品，可依照觀測需求在資料浮標上加裝觀測儀器。其觀測項目包括：風速、風向、氣壓、氣溫、水溫、波高、週期、波向、海流；系統的軟硬體包括：資料浮標本體、錨繫系統、電力系統、儀測系統、資料擷取與控制系統及通訊傳輸與接收系統等6個子系統，每一部份均須設計良好，以避免觀測作業中斷或流失，俾得完整及高品質之觀測資料。圖10右說明ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)安裝於資料浮標之位置，為提昇颱風期間風速、風向資料之觀測達成率，可將圖9之旋槳式風速計升級為圖10左之超音波風速計。

海氣象資料浮標為了節省耗電，於觀測間隔會進行休眠，與海嘯觀測全時運轉有所不同，在硬體上須選用省電的儀器包括水溫計及波浪儀等，通訊系統採用銱衛星為主要傳輸通道。亦須透過水下傳輸數據機傳送指令與資料。電力部分選用大瓦數的太陽能板及不同型式的電池（鋰鐵、鋰電），以增加充電及蓄電量；因此收錄器韌體須升級，以便能中介水下系統與陸上監控中心間之傳輸。

水面浮標系統除了進行海表面的海氣象監測之外，尚需整合水下傳輸來的海嘯資料，並透過衛星系統傳輸回陸上監控中心。水下傳回的海嘯資料主要包含兩種工作模式：觀測模式及海嘯模式，其資料傳輸

頻度不同，不論水下系統以何種頻度傳輸資料，水面浮標系統皆須能及時接收，並轉發至陸上監控中心。



圖9 作業化海氣象資料浮標外觀

觀測數據轉化為能快速掌握的資訊，做為防災、減災、救災與預警決策之參考。

預警系統的建置(圖11)包含下列三個模組：

(1). 即時資料展示模組

將以表列式(文字)呈現所有觀測項目的即時資料，同時顯示觀測項目過去一週之時序列圖，方便使用者快速瀏覽。

(2). 歷史資料查詢模組

主要提供查詢海氣象與海嘯的歷史資料，並且希望藉由此模組追溯海嘯發生前後海氣象及水位資料之相關變化。

(3). 海嘯預警模組

此模組旨在於觀測到海嘯事件時，能於系統上自動顯示相關預警資訊，以爭取較長之預警時間。

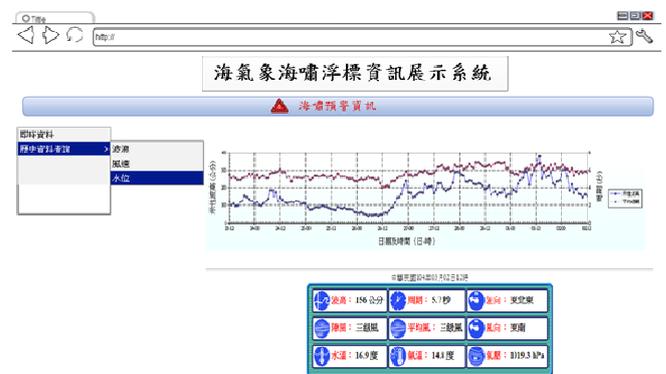


圖11 海氣象海嘯資料浮標預警系統



圖10 海氣象資料浮標上之超音波風速計及ADCP

## 六、預警系統

為確保海氣象海嘯資料浮標取得資料的正確性及準確度，本研究將進一步研發海嘯資料的「品質技術」。此外，一旦海嘯事件發生，決策人員需要在極有限的時間內掌握各種資訊，藉以作為撤離決策之判斷依據。本研究透過「資料展示技術」之研發，可將

本研究亦將發展海嘯模式以預測海嘯產生之影響並與本系統開發之海氣象海嘯資料浮標監測的水位相互驗證。海嘯模式的計算可分為3個部分：(1) 以深海地震作為模式輸入條件，考慮因海底地層錯位引發的海表面水位波動；(2) 海嘯波(孤立波)在大洋中傳遞，因海嘯波屬於長周期波浪，周期長達十數分鐘至數十分鐘，但相對水深與波長比甚小，因此波浪傳遞過程適用以淺水波方程式解析；及(3) 海嘯波抵達岸邊及對岸上產生的溢淹災害，透過數值模式可預測海嘯波最大波高、抵達時間及溢淹範圍等。

在海嘯預警流程規畫方面，未來一旦發生大規模海底地震，於接獲美國太平洋海嘯警報中心(PTWC)發布海嘯預警後，即可依據所發布的地震震度及震央地點，在海嘯預測子系統資料庫中搜尋最接近條件的計算結果，並且立即評估對台灣沿岸可能影響的程度。同時模式也啟動計算並依據海氣象海嘯資料浮標量測結果進行修正，以得到更精準的預測結果。

## 七、結論與建議

本研究於自主的作業化深海海氣象資料浮標基礎上，完成海氣象海嘯資料浮標原型系統規劃設計。發展海嘯監測與預警技術研究在臺灣是海洋科學研究的創新，掌握深海海氣象與海嘯觀測之關鍵技術，建立臺灣之深海海嘯自主觀測能量。大洋之海氣象實測資訊是颱風預警的重要依據，藉由落實大洋即時觀測數據之應用，能提升海氣象預報之準確度，進而強化海洋防災預警能量。長期間且作業化的大洋海氣象觀測數據則可強化海洋環境資料庫，協助海洋防災應急管理，有效減低災害所造成之損失。

海氣象海嘯資料浮標建置成果必具有實質的應用價值，深海海氣象觀測資料能提供政府在防災、減災、救災與預警最實質的助益。未來更可透過國際合作方式，進行觀測技術以及海嘯觀測資料的共享，與全世界先進國家在海嘯觀測技術接軌，共同強化全球海域的安全。

## 參考文獻

1. 李汴軍, 徐月娟, 高家俊, 饒國清, 施孟憲, 2007: “深海資料浮標作業能量建立”, 海洋及水下技術季刊, 17卷, 1期, 36-39.
2. 高家俊, 錢樺, 邱銘達, 莊士賢, 2003: “碟形浮標觀測方向波譜誤差分析及修正”, 海洋工程期刊, 21卷, 1期, 24-33.
3. 高家俊, 董東璟, 葉姍霏, 林演斌, 2005: 作業化海洋環境觀測技術研發, 海洋環境自動化監測技術研討會, 高雄海洋科技大學, 25-34.
4. Beltrami, G. M., 2008: “An ANN algorithm for automatic, real-time tsunami detection in deep-sea level measurements”, *Ocean Engineering* 35(5-6), 572-587.
5. Beltrami, G. M., 2011: “Automatic, real-time detection and characterization of tsunamis in deep-sea level measurements” *Ocean Engineering* 38(14-15), 1677-1685.
6. Beltrami, G. M., M. D. Risio and P. D. Girolamo, 2011: *The tsunami threat: research and technology*, N. A. Mörner (Ed.), Chapter 27, InTech, 549-574.
7. Doong, D.J., S.H. Chen, C.C. Kao, B.C. Lee, 2007: “Data quality check procedures of an operational coastal ocean monitoring network”, *Ocean Engineering*, 34, 234-246.
8. Kao, C. C., Chuang, L. Z., Lin, Y. P., & Lee, B. C., 1999: “An introduction to the operational data buoy system in Taiwan”, *Proceedings of the International MEDCOAST Conference on Wind and Wave Climate of the Mediterranean & the Black Sea*, Antalya, Turkey, 33-39.
9. Holthuijsen, L. H., 2007: *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge University Press.
10. Mofjeld, H. O., 1997: Tsunami detection algorithm. [http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/tda\\_documentation.html](http://www.pmel.noaa.gov/tsunami/tda_documentation.html).
11. Tucker, M. J., 1991: *Waves in ocean engineering: measurement, analysis, interpretation*, E. Horwood.