

# 海上雨量觀測技術研發及應用

邱啓敏<sup>1</sup> 林演斌<sup>1</sup> 施孟憲<sup>1</sup> 陳聖學<sup>1</sup> 董東璟<sup>1&2</sup> 王德根<sup>1</sup> 黃清哲<sup>2</sup> 滕春慈<sup>3</sup>  
陳仁曾<sup>3</sup> 許家誠<sup>3</sup>  
國立成功大學近海水文中心<sup>1</sup>  
國立成功大學水利及海洋工程學系<sup>2</sup>  
中央氣象局海象中心<sup>3</sup>

## 摘 要

臺灣每年因極端天氣與氣候事件造成的極端強降雨，是造成臺灣環境與經濟上鉅大災害損失的重要因素，尤其在全球氣候變遷下極端強降雨導致更多致災性的災害。降雨量會隨著時間與空間變化而改變，隨著科技發展迅速，在降雨觀測與預測已從點到面，如應用氣象雷達的遙測技術可以估算他處的降雨資料，但應用氣象雷達估算區域的降雨情況仍需採用過去長期雨量觀測紀錄資料做為校驗的依據。臺灣在陸地上設置的雨量觀測站非常密集，但海上雨量觀測站卻尚未建置，如海上形成之颱風在未侵襲臺灣陸地時能先觀測到海上的降雨情況，將有助於提升氣象雷達估算雨量以及氣象數值模式預測雨量之精度。有鑑於此，本研究進行研發臺灣海域海上雨量觀測的技術，並於2021年在台南永康氣象站進行雨量觀測系統的校驗，也在東北角海域透過海上浮標的載台進行實海域測試，在觀測期間陸上與海上測站皆成功觀測紀錄到雨量資料，並與鄰近氣象站觀測雨量資料以及氣象雷達估算海面上降雨資料呈現一致的變化趨勢。綜合上述結果可知，本研究發展之臺灣海域海上雨量觀測系統可成功應用在海上進行雨量觀測，此結果亦能做為氣象雷達偵測及氣象數值模式預測海面上雨量之重要校驗依據，在未來可進一步提供不同空間上更精確的雨量分佈情況，並因應極端強降雨事件未造成致災性災害前，政府機關可即早進行緊急應變策略之擬定及應變，以降低鉅大災害損失的程度。

關鍵字：海上雨量觀測、海上浮標、電容式雨量計、傾斗式雨量計、氣象雷達

## 一、前言

臺灣位處於西北太平洋與歐亞大陸之海陸交會邊緣，氣候型態含括熱帶與亞熱帶氣候區，且地理位置座落於熱帶氣旋的移動路徑，每年逢夏秋之際，西北太平洋的颱風使得臺灣處於高風險區域，颱風、洪水、土石流與海上災難等災害屢見不鮮除。另外，強烈的冬季季風對於氣候深具影響，也常為北臺灣帶來豐沛的雨量，也會提高平地發生洪水及山坡土質鬆動區域發生土石流的風險。Wallace Broecker於1975年提出「全球暖化」以來(Broecker, 1975)，氣候變遷的議題開始受到重視，因此科學界藉由不同的科學方法及觀測採樣，瞭解及掌握暖化趨勢及變化。

面臨全球暖化及氣候變遷的挑戰，政府整體的災防能量除仰仗過往所建置的機制外，對

於面臨極端事件發生時的應變能力有著刻不容緩的急迫性。相較於過往的需求性，增加海象監測、海象預報、災害預警及資訊服務等的海事訊息，可作為氣候變遷的調適及兼顧經濟發展下環保永續的基礎，以達成國家永續經營的目標。有鑑於此，為因應上述問題對，中央氣象局於民國110年推出六年期的「智慧海象環境災防服務」計畫(2020, 中央氣象局) 主要工作項目分為四大領域，分別為「精進海域海象監測」、「強化沿岸海氣象監測」、「發展海域海象預報技術」、「推動智慧海象服務」，可提升觀測技術及預報預警能力，並擴大防災服務的能量，以達到防災及減災的目標。

近年來，除了颱風和梅雨帶來持續的豪大雨，在臺灣北部因鋒面伴隨的中尺度降雨系統也會造成淹水災情(林等人, 2020)。中央氣象局雖已在陸地上建構雨量觀測站網，但仍僅表

示單一位置的降雨狀態。為獲得區域的雨量觀測資料，中央氣象局也應用氣象雷達進行雨量觀測，目前全臺灣已建置10座作業用氣象雷達進行短延時強降雨之監測與預警(Chang, et al., 2021)。氣象雷達雖能進行區域的雨量觀測，但仍需雨量觀測站紀錄之雨量資料進行校驗，在臺灣本島的雨量觀測站數量雖多，但觀測站範圍仍在陸地上。如能提升氣象雷達觀測海上雨量資料的精度，即能爭取更多預警的時間，因此在海上浮標建置雨量觀測站即顯出其重要性，透過海上浮標觀測的雨量資料可做為氣象雷達校驗海面上雨量觀測之參考依據。

本研究進行開發海上雨量觀測的技術，應用電容式雨量計安裝在海上浮標觀測雨量，技術開發分為二個階段，第一階段標準比對作業，選在台南永康氣象站設置電容式雨量觀測系統進行觀測雨量，觀測得到雨量資料以台南永康氣象站傾斗式雨量觀測資料做為校驗依據；第二階段則是在實海域進行測試，本研究選則東北角海域海上浮標的載台安裝電容式雨量計進行觀測，觀測得到雨量資料也與鄰近氣象站觀測雨量資料以及氣象雷達觀測雨量比對。

## 二、研究方法

海上雨量觀測早先受制於幾項因素：1. 載台的晃動、2. 流場的誤差效應、3. 連續觀測長度不足、4. 遙測密度不足及5. 觀測站點分布不均等限制條件。海面降雨觀測設備受制於載台(浮標或觀測船)的晃動而產生觀測偏差，尤其是強調必須重心垂直於觀測水平面的設備，如傾斗式雨量計(tipping-bucket rain gauge)。其次，當風速達到一定程度時，降雨路徑與承雨孔將會有入射角度差異，導致需要重直入射承雨孔進行降雨觀測的儀器容易產生偏差，如撞擊式雨滴計(disdrometer)(Quartly et al., 2002)。而以研究船或其他運輸船隻搭載雨量計，除前述的載台晃動的問題之外，由於

船隻無法長時間座落於海上固定點位，因此無法進行連續且長時間連續觀測(Weller et al., 2004)。

電容式雨量計發展之主要用途即為在海洋中以晃動載體觀測海上降雨(Holmes et al., 1981; Holmes and Michelena, 1983)，其主構造如圖1所示。工作原理為當雨水經由承雨孔進入到觀測槽(Measuring chamber)中，觀測槽之中心設有電容探測棒(Capacitance probe)，隨著收集之雨量增加觀測槽之水位不斷上升導致電容探測棒產生不同之電容值，經由轉換輸出電壓作為觀測值，在經由固定時間間距的擷取觀測電壓並計算電壓變化量，即可以轉換為單位時間內之降雨量。當觀測槽收集至50 mm之雨量時，該雨量計變藉由虹吸管(Siphon tube)排放收集之雨水，以便持續進行雨量觀測。由於該雨量計排放收集之雨水僅需30秒，相較於秤重式雨量計時間大為縮短，對於短時強降雨時，大為減少其觀測偏差。該系統相較於其他種類的雨量計，在大西洋海洋與氣象實驗室(Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, AMOL)的測試計畫中證實為最精確觀測的雨量計(Nystuen et al., 1996)。受限於該系統僅50 mm降雨容量的觀測槽，因此在短時強降雨需搭配其觀測週期並提高其觀測密度，以減少因觀測密度的不足而產生降雨量觀測遺漏(Nystuen, 1998)。該系統經過多年的測試及校驗，已被美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)選為搭載於資料浮標上最佳的海面降雨觀測設備(Serra et al., 2001)。

本研究研發臺灣海域海上浮標雨量觀測系統分為二階段：第一階段為標準比對作業，中央氣象局在台南永康氣象站觀測坪有設置二套傾斗式雨量觀測系統，因此標準比對工作項目將海上浮標雨量觀測系統(電容式雨量觀測系統)設站在永康氣象站觀測坪，可做為電容式雨量計觀測雨量資料之校驗依據。海上浮

標雨量觀測系統設定為每10分鐘觀測1筆資料並進行回傳，即每小時有6筆10分鐘資料可以進行比對。系統採用電瓶供電搭配90 W太陽能板進行系統充電其位置則置放於南方以增加日照機率(如圖2)，而資料則透過4G-LTE系統進行每10分鐘即時傳輸。電容式雨量計承雨口高度與傳統傾斗式雨量計承雨口高度相同為離地1.36公尺高。電容式雨量計位於觀測坪北邊與傾斗式雨量計處於同一南北向觀測線上。第二階實海域測試則選擇在降雨機率較高的臺灣東北角海域，應用海上富貴角浮標加掛電容式雨量計在實海域測試(如圖3)，並與鄰近測站以及氣象雷達觀測雨量資料進行驗證。

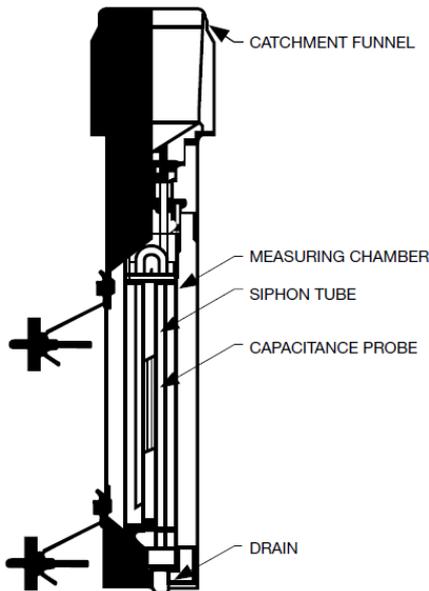


圖1 電容式雨量計內部構造(R.M. Young)



圖2 永康氣象站觀測坪不同雨量計相對位置



圖3 2021年8月27在富貴角浮標進行實海域雨量觀測作業

### 三、結果與討論

#### (一) 標準比對作業

在標準比對作業中，繪製電容式與鄰近氣象站傾斗式雨量計觀測的降雨資料在時間序列上變化趨勢，同時為瞭解電容式與傾斗式雨量計觀測降雨資料之線性相關程度，也採用相關係數( $r$ )以及均方根誤差(rms)來進行分析與探討，相關係數的定義如式(1)：

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (1)$$

其中 $x$ 與 $y$ 分別為兩站的實測值。相關係數 $r$ 其值範圍介於-1到1之間，如果 $r$ 值介於0到1之間則表示兩組時序列資料呈現正相關，且 $r$ 值越接近1則二組時序列的相關性越強；反之， $r$ 值越接近0表示兩組時序列資料的相關性越弱；如果 $r$ 值介於0到-1之間則表示兩組時序列資料呈現負相關，且 $r$ 值越接近-1則兩組時序列的相關性越強，反之 $r$ 值越接近0表示兩組時序列資料的相關性越弱。一般可按三級劃分： $|r| < 0.4$ 為低度線性相關 (Modestly correlated)； $0.4 \leq |r| < 0.7$ 為中度線性相關 (Moderately correlated)； $0.7 \leq |r| < 1$ 為高度線性相關 (Highly correlated)。

均方根誤差(RMSE)的定義如式(2)：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs1,i} - Y_{obs2,i})^2}{n}} \quad (2)$$

其中  $X$  與  $Y$  分別為比對的兩測站之實測值，計算兩測站觀測值與真值偏差的平方和觀測次數  $n$  比值的平方根，均方根誤差能夠很好地反應出測量的精度。

台南於2021年7月29日起受到西南氣流影響出現明顯雨勢，並於8月1日觀測的雨量已達到350毫米以上的大豪雨等級，本研究也在永康氣象站取得降雨資料，同時收集中央氣象局在永康及台南氣象站傾斗式雨量計觀測的雨量資料，以及氣象雷達觀測永康氣象站位置的雨量資料，圖4為永康氣象站與台南氣象站的地理相關位置，由圖中顯示得知永康氣象站海拔高度為8.1 m，台南氣象站海拔高度為40.8 m，二測站的距離約6.0 km，由此可知降雨情況會因距離與地形差異而有所不同。以下即說明永康氣象站電容式雨量計與傾斗式雨量計觀測雨量資料、以及氣象雷達觀測雨量資料，分別進行標準比對作業。



圖4 台南雨量測站相關地理位置

圖5為2021年7月29日至8月9日西南氣流影響期間永康氣象站電容式雨量計觀測的雨量資料，分別與台南氣象站與永康氣象站傾斗式雨量計觀測雨量資料進行標準比對作業，圖中上方藍色實心柱狀圖表示電容式雨量計在永康氣象站觀測雨量資料，圖中上方紅色空心柱狀圖表示傾斗式雨量計在台南氣象站觀測雨量資料，由圖中上方比對結果得知因觀測地點不同導致永康與台南氣象站觀測降雨量雖有差異，但是降雨時間卻呈現一致的情況；圖中

下方藍色實心柱狀圖表示電容式雨量計在永康氣象站雨量計觀測雨量資料，圖中下方紅色空心柱狀圖表示傾斗式雨量計在永康氣象站雨量計觀測雨量資料，由圖中下方比對結果得知電容式與傾斗式雨量計在永康氣象站觀測降雨量大小非常一致；再由7月30日至8月2日的降雨資料來細看(如圖6)，電容式雨量計與傾斗式雨量計在永康氣象站量測的雨量紀錄資料，無論在降雨量及降雨時間皆呈現一致的情況，此亦表示電容式雨量計可以精準量測降雨資料。

依據圖5及圖6比對結果顯示永康氣象站電容式雨量計觀測雨量資料與台南氣象站傾斗式觀測雨量資料在降雨時間與雨量大小因距離差異而不同，但與同為在永康氣象站傾斗式雨量計及氣象雷達觀測雨量資料皆非常一致，因此以永康氣象站三種不同系統觀測的雨量資料進行相關性分析。圖7為永康氣象站電容式及傾斗式雨量計觀測雨量資料之相關性分析，由分析結果顯示二測站的  $r$  值 = 1，相關性屬於高度線性相關，均方根誤差(rms)為0.60 mm。另外，圖8為永康氣象站電容式雨量計與氣象雷達在永康氣象站位置觀測雨量資料之相關性分析，由分析結果顯示二測站的  $r$  值 = 0.97，相關性屬於高度線性相關，均方根誤差(rms)為2.43 mm。由圖7及圖8的比對分析結果顯示，電容式雨量計觀測的雨量與傾斗式的誤差很小，僅有0.60 mm，此驗證電容式雨量計進行雨量觀測作業的適用性。

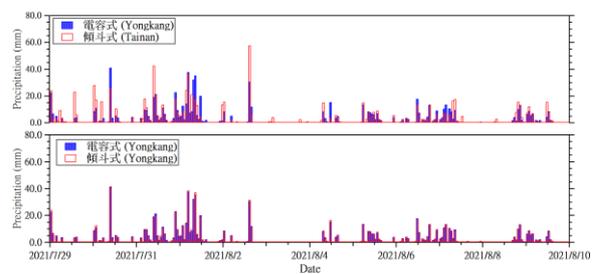


圖5 永康氣象站電容式與傾斗式雨量計觀測雨量之標準比對作業 (07/29-08/09)

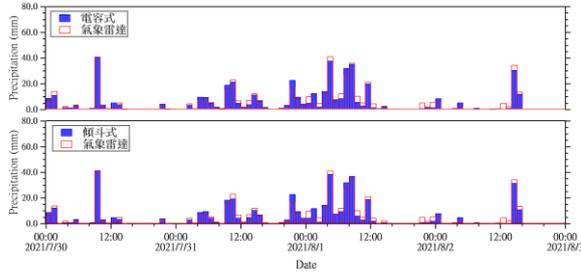


圖6 永康氣象站電容式、傾斗式與氣象雷達觀測雨量資料之標準比對作業(07/30-08/02)

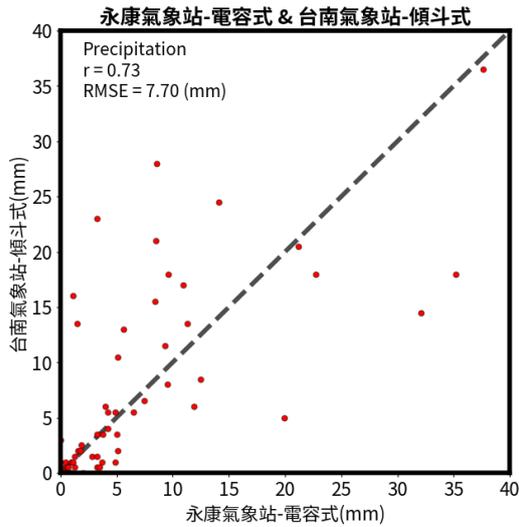


圖7 永康氣象站電容式與傾斗式雨量計觀測雨量資料之相關性分析(07/29-08/02)

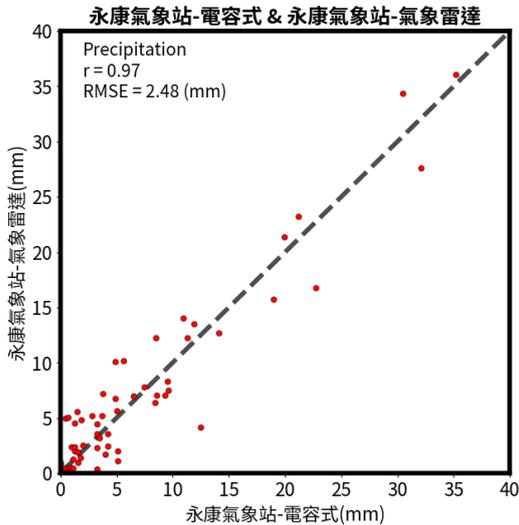


圖8 永康氣象站電容式雨量計與氣象雷達觀測雨量資料之相關性分析(07/29-08/02)

## (二) 實海域測試

本研究自8月27日將電容式雨量計架設在富貴角浮標站進行實海域的雨量觀測作業，並

於9月10日至13日強烈颱風璨樹(CHANTHU)影響臺灣期間，成功觀測到雨量資料，同時也收集鄰近陸地氣象站如白沙灣及富貴角氣象站觀測的雨量觀測資料進行比對分析。圖9為富貴角浮標站、白沙灣，以及富貴角氣象站等測站的地理相關位置，由圖中得知三個測站在地理位置上有距離差異，富貴角浮標站與白沙灣氣象站距離約為2.8 km，富貴角浮標站與富貴角氣象站距離約為5.6 km。

圖10為富貴角浮標站觀測雨量資料與白沙灣及富貴角氣象站觀測雨量資料之比對結果，圖中上下方藍色實心柱狀圖表示富貴角浮標站觀測雨量資料，圖中上方紅色空心柱狀圖表示在白沙灣氣象站觀測雨量資料，圖中下方紅色空心柱狀圖表示在富貴角氣象站觀測雨量資料，由圖中比對結果可知富貴角浮標站設置電容式雨量計觀測降雨時間與白沙灣及富貴角氣象站雖有相近趨勢，但因三測站在地理位置上有距離之差異，所以觀測降雨大小也有所差異。圖11則為富貴角浮標站觀測雨量資料與氣象雷達觀測富貴角浮標站位置雨量資料之比對結果，圖中藍色實心柱狀圖表示在貴角浮標站觀測雨量資料，圖中紅色空心柱狀圖表示氣象雷達觀測富貴角浮標站位置雨量資料，由圖中比對結果可知富貴角浮標站設置電容式雨量計觀測降雨時間與氣象雷達觀測結果非常相近，且降雨量也呈現一致的變化趨勢。

另外，圖12為富貴角浮標站與白沙灣氣象站觀測雨量資料之相關性分析，雖二測站有距離差異，但由分析結果顯示二測站的  $|r|$  值 = 0.86，相關性仍屬於高度線性相關，均方根誤差(rms)為3.23 mm。圖13為富貴角浮標站與富貴角氣象站觀測雨量資料之相關性分析，此二測站的距離相距較遠，由分析結果顯示二測站的  $|r|$  值 = 0.47，相關性仍屬於中度線性相關，均方根誤差(rms)為2.36 mm。圖14為富貴角浮標站觀測雨量資料與氣象雷達觀測富貴角浮標站位置雨量資料之相關性分析，由分析

結果顯示二測站的  $|r|$  值 = 0.96，相關性屬於高度線性相關，均方根誤差(rms)為0.73 mm。

綜合上述富貴角浮標站雨量標準比對作業結果得知，富貴角浮標電容式雨量計可成功在海上觀測到雨量資料，且與雷達偵測富貴角浮標站位置降雨量大小與降雨時間皆非常一致，相關性分析也呈現高度相關，由此結果可驗證中央氣象局在海上其他的浮標站可架設電容量計進行觀測雨量資料，未來也可以做為氣象雷達觀測海上雨量資料之校驗依據。

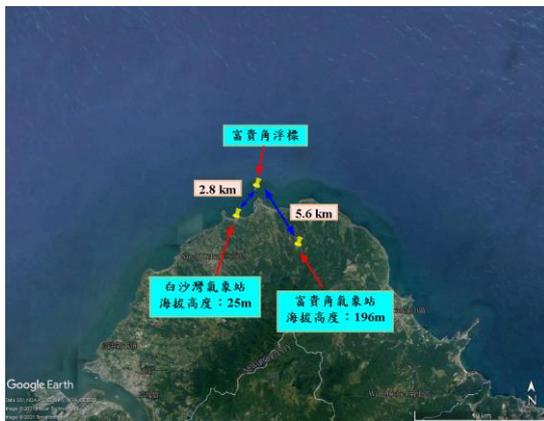


圖9 富貴角浮標站與白沙灣及富貴角氣象站地理位置

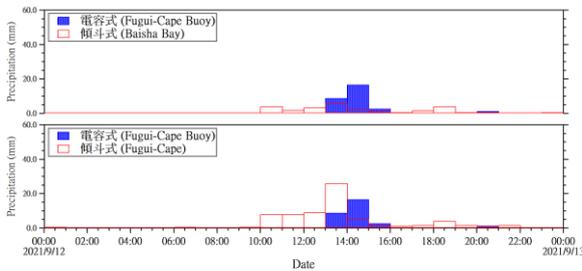


圖10 富貴角浮標站、白沙灣、以及富貴角氣象站觀測雨量資料之比對(9/12-13)

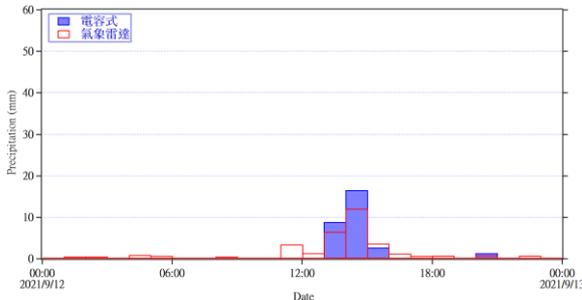


圖11 富貴角浮標站位置電容式與氣象雷達觀測雨量資料之比對(9/12-13)

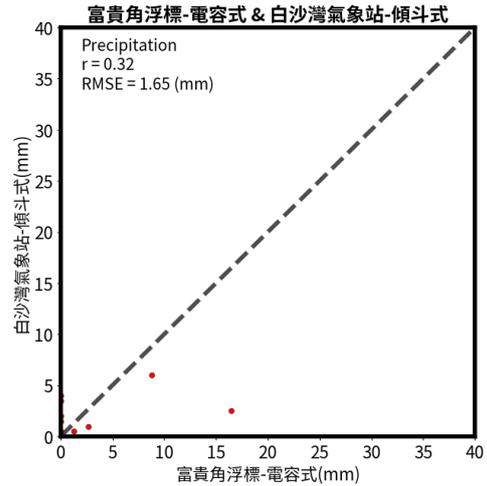


圖12 富貴角浮標站白沙灣氣象站雨量資料相關性分析(9/12-13)

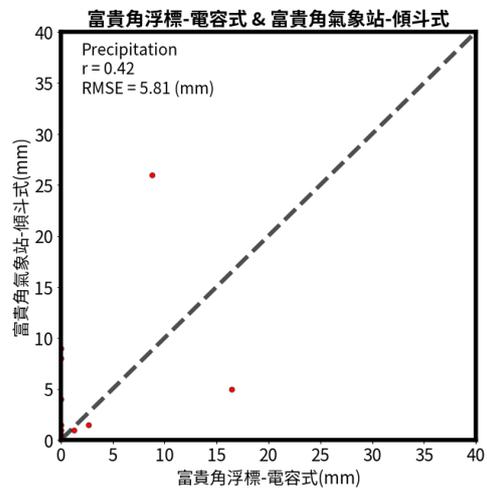


圖13 富貴角浮標站與富貴角氣象站雨量資料相關性分析(9/12-13)

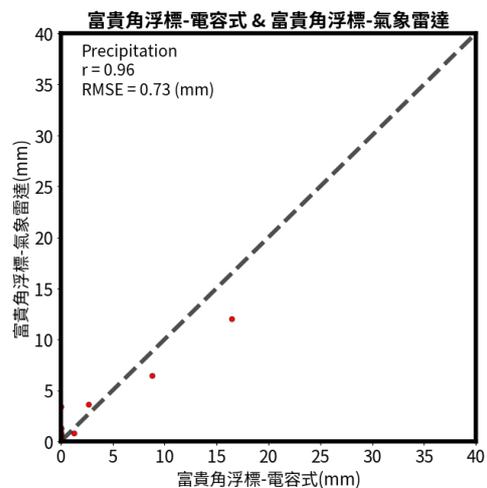


圖14 富貴角浮標站與氣象雷達雨量資料相關性分析(9/12-13)

#### 四、結論與建議

本研究研發的臺灣海域海上雨量觀測系統，經由永康氣象站雨量觀測標準比對作業可驗證海上雨量觀測系統在資料傳輸達成率及雨量資料比對結果均屬良好，亦驗證不同型態雨量計呈現高度正相關之觀測結果，此結果可確認該系統可以安裝於海上浮標進行雨量觀測作業。另外，在富貴角浮標進行實海域雨量觀測比對作業，也皆驗證海上雨量觀測系統能成功觀測到雨量資料，同時與氣象雷達觀測雨量資料比對結果顯示也呈現一致的情況。尤其於2011年9月10日至13日在強烈颱風璨樹(CHANTHU)影響臺灣期間，海上雨量觀測系統能成功觀測到雨量資料，此亦表示雨量觀測作業可由陸地往外延伸至臺灣近岸海域，以爭取更多在陸地上出現強降雨前的預警時間，並進一步降低因強降雨所造成的災害損失。

建議未來能增加臺灣近岸海上浮標雨量觀測站，也能做為氣象雷達觀測海上雨量資料校驗之參考依據。本研究結果也能落實「智慧海象環境災防服務」計畫主要工作項目的四大領域，「精進海域海象監測」、「強化沿岸海象監測」、「發展海域海象預報技術」、「推動智慧海象服務」，實質提升觀測技術及預報預警能力，也能擴大防災服務的能量，以達到防災及減災的效益。

#### 五、參考文獻

- 交通部中央氣象局(2020)。「智慧海象環境災防服務」計畫。交通部中央氣象局。
- 林忠義、廖信豪、劉嘉騏、吳家純、李宗融、林欣弘、王安翔、于宜強 (2020)。氣象雷達於短延時強降雨之監測與預警技術開發。國家災害防救科技中心。
- Broecker, W. S. (1975). Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming?, *Science* 189, 460-463.
- Chang, P. L., Zhang, J., Tang, Y. S., Tang, L., Lin, P. F., Langston, C., ... & Howard, K. (2021). An operational multi-radar multi-sensor QPE system in Taiwan. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E555-E577.
- Holmes, J., Case, B., and Michelena, E. (1981). Rain gauge for noaa data buoys,. in *OCEANS* 81, 463-467.
- Holmes, J., and Michelena, E. (1983). Design and testing of a new rain gauge for ndbc meteorological data buoys. in *Preprints, Fifth Symp. on Meteorological Observations and Instrumentation*, Toronto, ON, Canada, Amer. Meteor. Soc, 34-37.
- Nystuen, J. A., Proni, J. R., Black, P. G., and Wilkerson, J. C. (1996). A comparison of automatic rain gauges. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13, 62-73.
- Nystuen, J. A. (1998). Temporal sampling requirements for automatic rain gauges. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15, 1253-1260.
- Quartly, G. D., Guymer, T. H., and Birch, K. G. (2002). Back to basics: Measuring rainfall at sea. Part 1 - in situ sensors. *Weather* 57, 315-320.
- Serra, Y. L., A'Hearn, P., Freitag, H. P., and McPhaden, M. J. (2001). Atlas self-siphoning rain gauge error estimates. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 18, 1989-2002.