

GPS 測波系統研發

張育璋¹ 林演斌² 林清睿³ 高家俊⁴ 董東璟⁵

¹ 國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士

² 國立成功大學近海水文中心計畫副理兼品保組組長

³ 國立成功大學近海水文中心系統組副組長

⁴ 國立成功大學水利及海洋工程研究所教授

⁵ 國立台灣海洋大學海洋環境資訊系助理教授

摘要

本文利用衛星移動速度與波浪運動速度頻率不同的特性，應用訊號分離技巧，發展一套分析方法，自 GPS 訊號中將衛星速度與波浪運動速度分離，求得波浪資訊。這套方法具有計算快速且能消除低頻雜訊的優點。經實驗室及海上實測驗證的結果顯示，用 GPS 量測之波浪與加速度計量測的波浪在統計特性上一致，其差異小於 5%，且此一差異值頗為穩定，不隨波浪大小而改變。由驗證結果證明，本文提出的方法可使 GPS 量測獲得正確且可信賴的波浪資訊。

關鍵字：波浪觀測、GPS 衛星、方向波譜

Development on GPS Wave Measurement System

Yu-Wei Chang Yen-Pin Lin Ching-Ruei Lin
Chia Chuen Kao* Dong-Jiing Doong

* Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

This system combines Global Positioning System, wave theories and signal analysis to develop a new technology of wave measurement. We develop a system of the directional wave measurement by GPS buoy. Buoy equipped with GPS are moored in the observational sea area. As 3D movement of the buoy depends on the movement of seawater particle, We measure the 3D velocity of buoy by GPS, then calculate significant wave height, mean wave period and dominant wave direction. As the test result, The new GPS system performs excellently, giving essentially the same results as the accelerometer sensors. We can find the precise and reliable informations of wave according to the velocity of the buoy with the 3D buoy movement analysis by GPS.

Key words: wave measurement; GPS; directional spectrum

一、前言

波浪為海面上最主要的天然作用力之一，對於海洋工程之規劃、施工、營運與維護、離岸資源調查、海水遊憩活動進行與航行安全等影響甚鉅。現場觀測是了解波浪特性的重要方法，正確地波浪資訊是從事安全的海岸工程設計與海域活動的依據。目前國際上的海洋波浪觀測多以量測浮標加速度為

主，此法在數據分析上頗為複雜，是否有更好的波浪觀測方法一直是一個重要的課題。

美國政府將全球定位系統(Global Positioning System, 簡稱 GPS)解密釋出，提供民間使用後，立即引起大地測量學者的研究與應用(曾清涼等, 1999)[5]。在 GPS 定位技術上，不論是軟體或硬體開發，都有著迅速的發展，尤其是應用於精密大地測量的數據採集上，使得測量方法有了極大的變

革(王廣運等, 1988)[1]。經由這幾年的研究及實測數據證實, 在一般的控制測量應用方面, 能滿足公分等級的需求(曾清涼等, 1988)[2]。

將 GPS 技術應用於海上波浪觀測, 是否能夠達到觀測精度為一值得探討的議題, 就國際上的研究概況而言, 應用 RTK-GPS 量測海嘯之水位變化, 與當地潮位站量測資料進行比較, 從分析結果可知 GPS 水位測值與潮位站資料的趨勢一致(Kato, 2001) [9]; (Fujita, 2004)[12]。以 RTK-GPS 浮標觀測沿海波浪、潮與海嘯(Nagai, 2003) [10]; 用 RTK-GPS 與加速度計推算之波高進行比較, 兩者推算之波高具有高度相關(Jean, 2003) [11]。然 RTK-GPS 有其限制, 當 GPS 基準站與接收器之間的距離增加, 大氣誤差影響增加, 使得接收器與基準站距離約 6-10 公里之內才能達到公分級精度(楊名, 1997)[4], 使 RTK-GPS 測波系統只能應用於沿海海域, 將此技術應用於深海區域, 量測精度將大幅下降而不符合實際需求。

為改進 RTK-GPS 測波系統與基準站之間距離的限制, Hou 提出 Velocity Integration GPS, 簡稱 VI-GPS 法(Hou, 2006) [13], 其方法係將衛星速度與位置資料輸入進行繁雜的計算, 自 GPS 訊號中去除衛星運動的因素, 然而衛星速度資料無法即時取得, 僅能進行事後追算, 且尚未解決低頻雜訊的影響, 並不很實用。為克服這項缺點, 本文依據海面上波浪頻率範圍的特性, 應用數據分析技巧, 嘗試發展一套新的方法, 自 GPS 量測之浮標運動訊號中直接分離出波浪運動訊號, 以推求波浪位移變化。

二、理論解析

GPS 衛星發送波長約 20 公分的電磁波, 當衛星與接收器之間有相對速度時, 電磁波之頻率產生偏移, GPS 接收器可量測頻率的偏移量。此為都卜勒頻率偏移以下式表示:

$$f_r = \frac{\overline{v - v_r}}{v - v_s} f_s \quad (1)$$

其中 f_s 為衛星發送的電磁波頻率; f_r 為接收器接收的電磁波頻率; v 為電磁波在空氣中的傳送速率, v_s 為衛星移動速度; v_r 為接收器移動速度。當 v_s 與 $v_r \ll v$ 時

$$f_r = \frac{1 - \overline{v_r}/v}{1 - \overline{v_s}/v} f_s = \left[1 - \frac{\overline{v_r}}{v} \right] \left[1 - \frac{\overline{v_s}}{v} \right]^{-1} f_s \quad (2)$$

將式(2)最後一項以二項式展開

$$(1+x)^n = 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!} x^2 + \dots \quad (3)$$

其中 $x \ll 1$, 故高階項可以省略, 則式(3)可改寫為

$$f_r \approx \left[1 - \frac{\overline{v_r}}{v} \right] \left[1 + \frac{\overline{v_s}}{v} \right] f_s = \left(1 - \frac{\overline{v_{rs}}}{v} \right) f_s \quad (4)$$

其中 $\overline{v_{rs}} = \overline{v_r} - \overline{v_s}$, 則都卜勒偏移量 f_d 如下式:

$$f_d = f_r - f_s = \frac{-\overline{v_{rs}}}{v} f_s \quad (5)$$

由都卜勒頻率偏移計算之速度是衛星與接收器間的相對速度, 若衛星速度已知, 即可用 Hou(2006) 的方法決定接收器之瞬間速度, 亦即波浪的表面運動速度。然而衛星的資料不易即時獲得, 只能事後計算, 使得 Hou(2006) 的 GPS 測波方法無法滿足即時測報的需求。

為克服這項缺點, 本文在頻譜上處理都卜勒訊號。衛星為等速運動的物體, 與波浪在水氣交界面上呈週期性運動的特性明顯不同, 將都卜勒頻率偏移時系列作頻譜轉換, 在頻率域上二者的能量範圍是完全分開的, 運用高通濾波(high pass filter)的技巧可在頻譜上濾除衛星運動的低頻能量, 從而獲得波浪的資訊。

頻譜由衛星與接收器的相對速度之自相關函數的傅立葉轉換求得, 自相關函數如下式表示:

$$R_{ii}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_i(t) V_i(t + \tau) dt \quad (6)$$

$V_i(t)$ 是衛星與接收器的相對速度時系列, $i = 1, 2, 3$, 數字分別代表垂直、東西及南北向。將式(6)經傅立葉轉換可得下式:

$$V_{ii}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ii}(t) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (7)$$

$V_{ii}(f)$ 為衛星與接收器之相對速度譜, 其為相對速度在某頻率範圍內所含之能量, 運用高通濾波(high pass filter)保留波浪運動速度的能量, 如下式表示:

$$C_{ii}(f) = V_{ii}(f) \cdot H(f)$$

$$H(f) = \begin{cases} 0 & f > B, f < A \\ 1 & A \leq f \leq B \end{cases} \quad (8)$$

$C_{ii}(f)$ 為波浪速度譜, $H(f)$ 為 high pass filter function, A 、 B 分別為頻率的上下限, 本文引用美國國家海洋暨大氣總署的標準, 海洋波浪能量頻率

範圍為 0.03~0.4Hz， $A = 0.03$ 、 $B = 0.4$ 。

以波浪水粒子之垂直、東西與南北向速度計算交錯譜，配合有限傅立葉級數法計算方向波譜如式(9)：

$$S(f, \theta) = a_0(f) + \sum a_n(f) \cos n\theta + b_n(f) \sin n\theta \quad (9)$$

交錯譜可由下式獲得：

$$\phi_{ij}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (10)$$

τ 為稽延時間， $i, j = 1, 2, 3$ ，數字分別代表垂直、東西及南北向。交錯譜為複數形式，可用下式表示：

$$\phi_{ij}(f) = C_{ij}(f) - iQ_{ij}(f) \quad (11)$$

其中 $C_{ij}(f)$ 為同位譜， $Q_{ij}(f)$ 為轉向譜。交錯譜 $\phi_{ij}(f)$ 與方向波譜 $S(f, \theta)$ 具如下之關係：

$$\phi_{ij}(f) = \int e^{-ikx_{ij}} \cdot S(f, \theta) d\theta \quad (12)$$

將式(8)解至二階，各項之係數分別以下式計算：

$$a_0(f) = \frac{C_{11}(f)}{(2\pi f)^2 \pi} \quad (13a)$$

$$a_1(f) = \frac{Q_{12}(f)}{(2\pi f)^2 \pi h} \quad (13b)$$

$$a_2(f) = \frac{C_{22}(f) - C_{33}(f)}{(2\pi h)^2 \pi} \quad (13c)$$

$$b_1(f) = \frac{Q_{13}(f)}{(2\pi f)^2 \pi h} \quad (13d)$$

$$b_2(f) = \frac{2C_{23}(f)}{(2\pi h)^2 \pi} \quad (13e)$$

其中 $h = \frac{\cosh kd}{\sinh kd}$ ， d 為水深， h 以下式計算：

$$h = \sqrt{\frac{C_{22}(f) + C_{33}(f)}{C_{11}(f)}} \quad (14)$$

一維波譜 $S(f)$ 可由方向波譜對方向積分求得：

$$S(f) = \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) d\theta = C_{11}(f) / (2\pi f)^2 = a_0(f) \pi \quad (15)$$

三、動態模擬實驗

為驗證本文提出之方法能否完全分離出衛星與波浪運動速度的能量，本文以動態模擬機模擬一規則的簡諧運動，將 GPS 接收器放置於動態模擬機上，量測垂直，用傅立葉轉換將速度時系列轉換至頻率域上，探討主頻率與實驗輸入條件是否一致，以頻率範圍 0.03-0.4Hz 之能量推算位移變化，討論推算之位移變化與實際位移是否一致。

動態模擬機之力臂轉動半徑為 1 公尺如圖 1，高程位移為 2 公尺，可調整不同的轉動週期。實驗條件如表 1，將 GPS 固定於旋轉臂上，旋轉臂可模擬一圓形軌跡運動，GPS 接收器之取樣頻率為 1Hz，每個實驗組之實驗時間為 20 分鐘，圖 2 係實驗條件為 6 秒之實驗組，實驗已知垂直速度值如下式：

$$V = \frac{2\pi r}{T} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (16)$$

其中 V 為實驗輸入之已知垂直速度， r 為動態模擬機之力臂半徑， T 為動態模擬機轉動週期， t 為實驗時間。

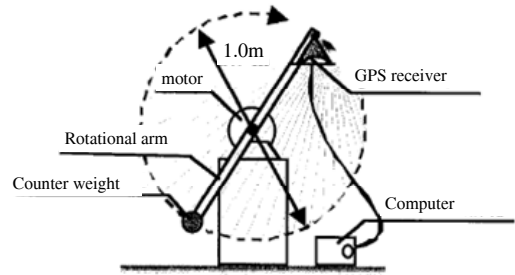


圖 1 動態實驗示意圖

表 1 動態模擬實驗條件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
動態模擬機轉動週期	6 秒	7 秒	8 秒	9 秒	10 秒

圖 2 為 GPS 輸出之垂直速度時系列，波形為一簡諧運動，圖 3 是將圖 2 中的速度時系列經由式(7)計算的速度譜，從速度譜中可以看到在頻率 0.167Hz 處有一尖峰能量，與實驗條件輸入之週期一致。

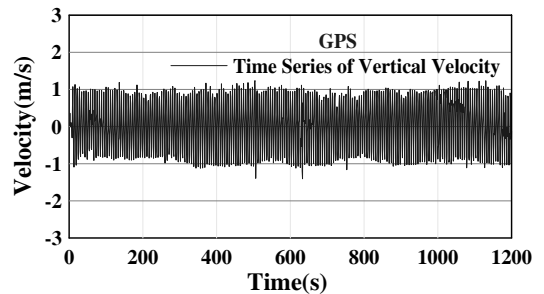


圖 2 GPS 輸出之垂直速度時系列，實驗條件：週期 6 秒

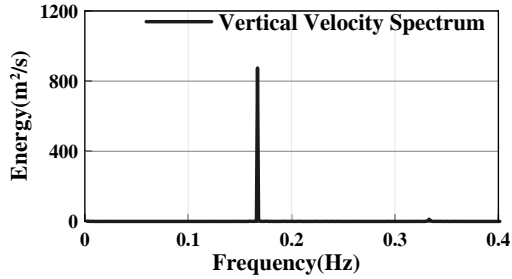


圖 3 GPS 輸出之垂直速度速度譜，實驗條件：週期 6 秒

利用式(15)計算位移譜得圖 4，位移譜中除了頻率 0.167Hz 有能量之外，在靠近頻率為 0Hz 處亦有能量存在，此乃衛星等速運動速度所造成，由於接收器與衛星運動在頻率上的位置完全分開，因此在頻譜上可以清楚的將二者分離。依美國國家海洋暨大氣總署訂定海洋波浪能量的頻率範圍為 0.03-0.4Hz 的規定，進一步將位移譜的能量經由式(17)，計算振幅大小：

$$S(f_{0.03-0.4Hz}) = \frac{1}{2} a^2 \quad (17)$$

a 為振幅。當離散化的資料進行傅立葉轉換時，由於樣本長度與取樣頻率，影響 Δf 值，實際上頻率 1/6 Hz 為無理數，因此實際能量分佈在前、後的 Δf ，但在頻率範圍 0.03-0.4Hz 的總能量不變，除了頻率 1/6 Hz 附近有能量之外，顯而易見的其他值皆為零。

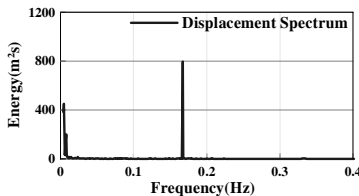


圖 4 GPS 位移譜，實驗條件：週期 6 秒

表 2 為各實驗組推算之主頻與 2 倍振幅，主頻分別為 0.17、0.14、0.13、0.11 與 0.1(1/S)，與實驗輸入的週期一致；推算之振幅分別為 1.97、1.84、1.90、1.91 與 1.98 公尺，推算之振幅與實驗已知振幅之差異分別為 1.11%、7.72%、5.00%、4.40% 及 1.30%。

實驗室測試中以本文提出之方法可準確且清楚地分離出雜訊能量與實驗輸入之能量，而且推算之位移值與實驗已知位移值差異極小，結果證明本文提出之方法，對於實驗室所輸入之單頻波應用本文

的方法可得到良好的結果。

表 2 實驗分析結果

動態模擬機轉動週期(s)	6	7	8	9	10
2 倍振幅(m)	1.97	1.84	1.90	1.91	1.98
主頻(1/s)	0.17	0.14	0.13	0.11	0.1
振幅差異百分比	1.11%	7.72%	5.00%	4.40%	1.30%

四、海上實測驗證

為探討 GPS 海上觀測之可行性，本文將 GPS 掛載於資料浮標上進行測試。資料浮標呈碟型如圖 5，具有較大的預浮力，在垂直及側傾方面均具有較高的隨波性(鄧，1991)[3]，浮標內原測波裝置為加速度計，加速度計量測波面水體的垂直加速度變化與傾角計量測波面的傾度變化，分析後可得到波浪資訊(Chuang, Z. H., et.al., 1998)[8]；(邱，2001)[6]。資料浮標為中央氣象局佈放於小琉球西南方海域的測站，水深 82 公尺，其地理位置見圖 6。本文收集自 2006 年 11 月 22 日到 2007 年 02 月 28 日由浮標加速度計量測之波高、週期、波向與 GPS 量測速度資料，總共 2023 筆。

波浪觀測作業每一小時乙次，使用類比數位轉換器(Analog-to-Digital Converter)擷取加速度計之訊號，每次取樣時間為 50~60 分共 10 分鐘，取樣頻率為 2Hz；同時使用 RS-232 介面擷取 GPS 接收器之訊號，每次取樣時間為 40~60 分共 20 分鐘，取樣頻率為 1Hz。

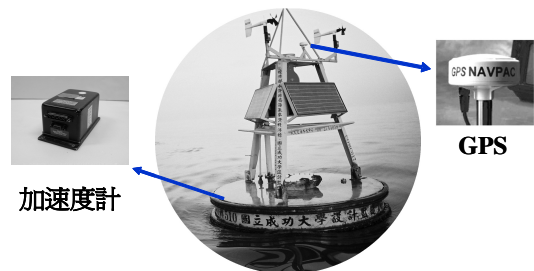


圖 5 浮標裝置

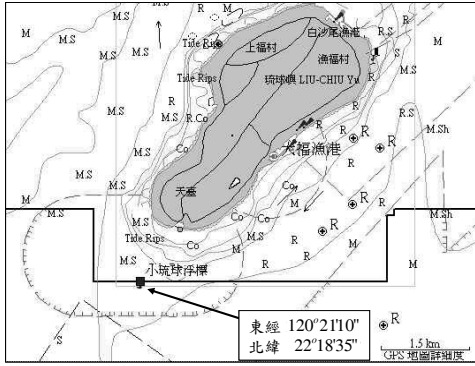


圖 6 海上實測位置圖

本文以示性波高與平均週期做為比對加速度計與 GPS 量測波高值的參數，其計算如下式：

$$H_s = A\sqrt{m_0} \quad (18)$$

$$\bar{T} = \sqrt{m_0/m_2} \quad (19)$$

H_s 與 \bar{T} 分別為示性波高與平均週期； m_0 與 m_2 分別為一維波譜能量之零次矩與二次矩； A 是經驗參數，其範圍從 3.8 到 4.0，分析實際海面上波浪資料後，建議使用 3.80(Goda, 1970)[7]。2023 筆數據分析結果如圖 7、8。

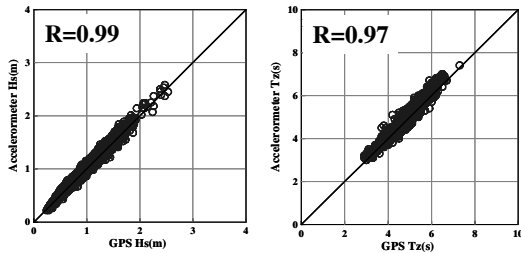


圖 7 示性波高相關性比較 圖 8 平均週期相關性比較

從分析結果顯示，浮標與 GPS 推算之波高與週期相關性皆達 0.97 以上，證明以 GPS 量測之浮標速度推算波浪波高與週期的準確性良好。表 3 為依照波高大小分類比較 GPS 與加速度計推算之示性波高值的差異，其目的是確定兩種觀測方法的差異在不同波高條件下是否有一致性。結果顯示不同波高範圍下的相對差異很小，在統計上可視為穩定。

表 3 依波高大小分類比較 GPS 與加速度計推算之示性波高的差異

波高	1 公尺以下	1~1.5 公尺	1.5~2 公尺	2 公尺以上
GPS 與加速度計 差異百分比	4.58%	4.00%	4.50%	3.57%

圖 9、10 分別為 GPS 及加速度計推算之方向波譜，資料時間為 2006/12/17 日 01:00 時，從兩張圖可看出每個方向來的波浪能量所對應的頻率，等能量線愈密其能量梯度愈大，表示能量愈集中，突顯出主頻能量分佈，圖中兩者推算之主波向相同，都是西北來向的波向能量最大。

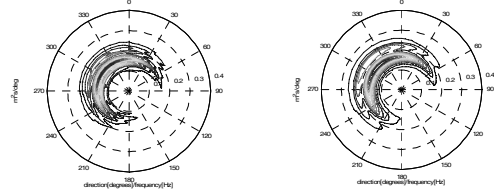


圖 9 GPS 之方向波譜 圖 10 加速度計之方向波譜

圖 11 為 2007 年 1 月 1 日至 12 日的主波向時系列圖，橫軸為日期；縱軸為波向。正方形標記為 GPS 推算之主波向；三角形標記為加速度計推算之主波向。從圖可知，由 GPS 推算之主波向與加速度計推算之主波向非常接近，GPS 推算之主波向在時間上分佈較為集中，加速度計推算之主波向較分散。若參考波高及風速進一步研判可以發現，波向為西北至西北西之間符合台灣海峽冬季季風和小琉球當地海底地貌的聯合效應，而波向偏南時冬季東北季風較弱，是風向改變的結果，且此時風速和波高均非常小，是以用傾角計量測波向的誤差相對較大。

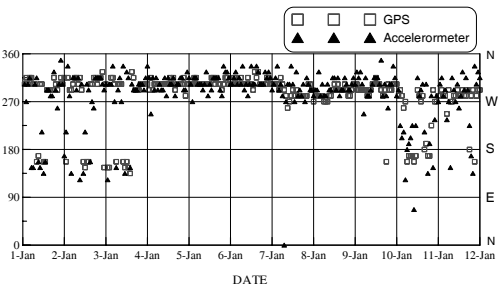


圖 11 GPS 與加速度計之主波向比較

五、結論

本文利用衛星移動速度與波浪運動速度在頻率上之能量分佈不重疊的特性，應用數據分析技巧，發展一套新的方法自 GPS 量測數據中求取波浪訊息，此方法具有以下特點：

- (1)減少以往用速度對時間積分計算位移所需時間，不需輸入衛星速度與位置資料進行繁雜計

算。

- (2)快速且成功地保留波浪水粒子運動速度，即時計算波浪資訊。
- (3)不需配合基準站，使用單一的 GPS 接收器即可進行波浪觀測，使波浪觀測不受地形限制，將波浪觀測拓展到任意水域。

經海上實測數據分析比對顯示用 GPS 量測之波浪與加速度計量測的波浪一致，二者之波高差值小於 5%。此一差異值頗為穩定，不隨波浪大小而改變，顯示這個方法適用於各種波浪條件。

主波向計算中 GPS 與加速度計推求的波向趨勢接近，GPS 推算之主波向在時間上分佈較為集中，加速度計推算之主波向較分散。建議日後以 GPS、加速度計與雷達觀測同一海域，將三種儀器所得之波向資料做交叉比對，進而獲取真實的海面波向資料。

謝誌

本文承國科會支助（計畫編號：NSC95-2221-E-006-487），中央氣象局提供浮標載台及波浪資料，成功大學近海水文中心提供 GPS 數據，特此申謝。

參考文獻

1. 王廣運等 (1988)「GPS 精密測地系統原理」，測繪出版社，北京。
2. 曾清涼、余至義、林宏麟 (1988)「公分及精度 GPS 衛星測量研究(I)」，行政院國家科學委員會 79 年度專題研究報告，國立成功大學測量工程學系，台南。
3. 鄧中柱 (1991)「浮標系統與工程」，資料浮標研討會論文集。
4. 楊名 (1997)「公分級 GPS 衛星即時動態定位系統」，測量工程，第三十九卷，第四期，第 1-18 頁。
5. 曾清涼、儲慶美 (1999)「GPS 衛星測量原理與應用」，台南。
6. 邱銘達 (2001)「資料浮標量測波高波向準確度提昇研究」，國立成功大學碩士論文。
7. Chuang, Z.H., Kao, C.C., Lee, B.C. (1998) "The Development of Operational Data Buoy System in Taiwan," *International Conference on Marine Disaster: Forecast*

and Reduction. Beijing, China.

8. Fujita, T., Terada, Y., Nagai, T., and Kato, T. (2004) "A DEVELOPMENT OF GPS WAVE, TIDE AND TSUNAMI METER," *Workshop on Wave, Tide Observation and Modelings in the Asian-Pacific Region*, 2004.
9. Goda, Y. (1970) "Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation," *Port and Harbour Reserch Institute, Report 9*, No. 3, pp. 3-57.
10. Hou, D., Hamada, M., Yoo, Y., and Kouguchi, N. (2006). "Evaluation Test Result on Wave Direction Measurement Using GPS Buoy," *Navigation(Tokyo)* VOL.NO.163, pp.44-47.
11. Jeans, G., Bellamy, I., de Vries, J.J., van Weert, P. (2003) "Sea trial of the new Datawell GPS direction waverider," *Proc. of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology*.
12. Kato, T., Terada, Y., Itoh, T., Nagata, S., Fujita, T., Abe, T., Miuake, T., Nagai, T., Koshimura, S., and Miyazaki, S. (2001) "A new tsunami detection system using RTK-GPS in Ofunato city, Northeastern Japan," *Proc. Of IUGG 2001*.
13. Nagai, T., Ogawa, H., Terada, Y., Kato, T., and Kudaka, M. (2003) "Offshore wave, tsunami and tide observation using GPS buoy," *Proceedings of Annual Meeting of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers(2003)*, *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14, pp. 137-142.