

應用小波轉換分析異常波浪特性

張志強¹ 董東璟² 李汴軍³ 高家俊⁴ 蘇嘉平⁵

¹ 國立成功大學水利暨海洋工程學系碩士生

² 國立海洋大學海洋環境資訊學系助理教授

³ 華梵大學環境與防災設計學系副教授兼系所主任

⁴ 國立成功大學水利暨海洋工程學系教授

⁵ 國立成功大學水利暨海洋工程學系碩士生

摘要

前人多以理論推導的方式探討異常波浪的發生機制，本文則從分析實測資料的角度探討其形成機制。本研究利用小波轉換分析海上觀測資料，從小波能譜上探討異常波浪發生時後波浪的組成特性。經分析花蓮浮標 10 年的實測資料數據顯示，異常波浪發生的瞬間譜寬較寬，瞬間總能量最大，但瞬間能譜的最大峰值並不一定產生在異常波浪上。分析小波相位譜得知，異常波浪產生的瞬間，主要的成分波位相一致，顯示異常波浪是一種成分波的疊加所形成。

關鍵詞：異常波浪、小波轉換

On the Characteristic of the Freak Wave by Using Wavelet Transform

Zhi-Chiang Chang^{*} Dong-Jiing Doong Beng-Chun Li Chia-Chuen Kao Chia-Ping Sue

^{*} Master, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Freak wave is the sea suddenly a big wave phenomenon, with many previous studies theoretically the causes Freak waves. This paper tried to proceed from the measured data, using wavelet transform projections when the water level buoys series. Wavelet on the spectrum of Freak wave occurred when the composition of the waves. The analysis of Hualien buoy 10 years the measured data showed Freak waves in a wide-spectrum of the moment, the moment the largest total energy, but the greatest moment of peak energy does not necessarily produce the Freak waves. the phase spectrum that wavelet analysis, Freak waves generated an instant, the main component wave phase fairly consistent, show Freak wave is a component of the wave formed by stacking.

Keywords: Freak waves; wavelet transform; wavelet spectrum

一、前言

異常波浪對於人類在海岸以及海上活動的危害都是不容小覷，異常波浪一旦發生，原本平靜的海面突然出現高聳波高並解挾帶的巨大波力，足以使海洋結構物受損，巔覆航行中之船舶(Alessandro T.,2003)。

現今研究這方面的學者都認為異常波浪的發生

是難以預測的(Dean, R. G, 1990; Paul C. L., 2004; 高, 1999; 曾, 2001; 陳, 2002)。對於異常波浪發生原因之相關研究，前人多以理論推導的方式探討異常波浪的發生機制。例如以非線性理論推導異常波浪的發生原因(曾, 2001)、(陳,2002)，或是波浪的非線性疊加(Dean, 1990)，或是波、流的交互作用(Paul C. L., 2004) (White & Fornberg, 1998)。研究結果充分地說明了異常波浪之發生有多種可能性，是否還

有其他原因，目前也無法知道(高, 1999)。

傳統分析波浪的傅立業轉換方法，在頻譜上我們只看到這一段的平均能量，但瞬間的能量結構實際上是看不到的(俞, 1992)。本文想探討在異常波浪發生時瞬間的能量，在此選擇使用小波分析方法，其最大特點是可以得到時間以及頻率上能量的分布(崔, 1995)，1990 年初期也有探討小波理論分析波浪的數學方法，以及從小波理論去探討波浪傳遞的特性(傅, 1993; 歐, 1994; 陳, 1999)。

二、研究方法

本研究使用的資料來源是從浮標儀器所觀測而來的，其原理是加速度儀量測浮標隨波浪起伏的加速度，將加速度的時序轉換到水位時序，才能看到實際水位的變化而找出異常波浪發生的時間。

如何得知發生異常波浪及其發生的時間，本文發展一個計算程序將加速度小波能譜轉為水位小波能譜，其計算流程如圖 1 所示。處理浮標上垂直加速度計所測量到的加速度時序資料為 10 分鐘觀測資料，取樣頻率 2Hz。公式(1)為連續小波轉換公式。小波轉換根據分析資料的需要會有不同的小波母函數(Massel, 2001)認為在幾個常見的小波母函數當中以 Morlet 小波母函數最適合分析海浪水面的變化，如公式(2)。 ψ^* 為小波母函數的共軛，震盪頻率 k 通常會選擇是大於 5 的數字，因為小於 5 將不符合小波母函數的假設。

$$W_{\psi}(\eta)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t) \psi^* \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad (1)$$

$$\psi_{morlet}(T) = e^{ikT} e^{-T^2/2} \quad (2)$$

t_i 和 f_i 是時間軸和頻率軸，其值已知，可以計算出尺度參數 a_i 和位移參數 b_i 。

前人處理浮標資料已經證明浮標低頻雜訊對水位譜的影響的影響(Lang, 1987)。本文在小波能譜根據小波能譜的時頻特性上依時間逐時逐筆對能譜做濾除，濾除方法參考(邱, 2001)在加速度能譜以頻率 0.02(1/sec) 以下找一個最大值的能量，與頻率 0.15(1/sec) 能量值為零的兩點相連做為濾除的界線。

濾除過後的加速度小波轉換函數必須先轉換為水位小波轉換係數。從微積分的方式可以證明，由加速度轉換到水位之間存在轉換函數 $(2\pi f)^{-2}$ 。濾除浮標低頻雜訊之後的加速度小波積分轉換係數

$W_{\psi}(\eta_a)(b, a)$ 乘上轉換函數 $(2\pi f)^{-2}$ 轉換後為水位小波積分轉換係數 $W_{\psi}(\eta_x)(b, a)$ 。

水位小波積分轉換係數計算水位時序列要經過逆小波轉換。 C_{ψ} 為小波容許條件。從小波理論定義的連續逆小波轉換公式如下：

$$\eta_x(t) = \frac{2}{C_{\psi}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (W_{\psi} \eta_x)(b, a) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_{ba} \left(\frac{t-a}{b} \right) db \frac{da}{a^2} \quad (3)$$

經過逆小波轉換可以得到水位時序列 $\eta_x(t)$ 。以上述方法求出水位時序列利用零上切法找出每一個單一的波，經過波浪統計的方法去求出示性波高，還有找到他的最大波高，根據(Klinting, P. and Sand, S., 1987)定義的異常波浪，找出符合異常波浪定義的波浪。

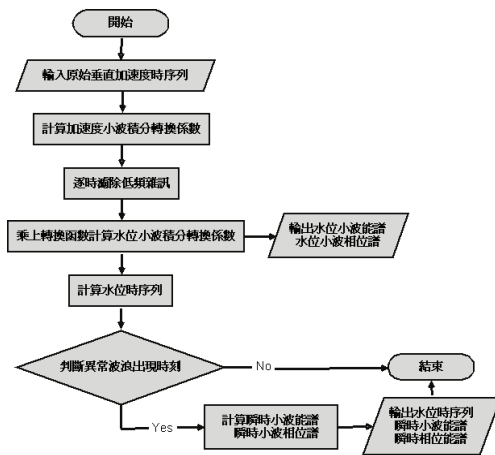


圖1 異常波浪分析流程圖

三、小波能譜上異常波浪的特性

根據花蓮浮標 1997-2007 十年時間共 4 萬多筆資料分析示性波高以及最大波高。找出大於比值 2.0 以上，總共發現有 532 筆，圖 2 將全部異常波浪資料點繪在以示性波高 1 米以上則可以發現共有 158 筆。考慮對海上活動的危害性，特別將其中示性波高大於兩米的異常波浪共 25 筆，以小波能譜討論其特性。從水位時序列上判斷異常波浪的發生時間，本研究從小波時頻譜上討論異常波浪發生時的特性。圖 3 為水位時序列以及小波能譜，從零上切法可以知道水為時序列當中異常波浪出現的位置，異常波浪出現的時候大部分是小波時頻譜能量最大的地方。

3.1 時間上累積總能量討論異常波浪的特性

本文在分析大於 2 米示性波高的異常波浪資料中，看到了一筆比較特別的資料。case 22 中異常波浪發生的位置是在 280 秒左右(如圖 4)，但是小波時頻譜上可以看到能量最大的地方在 550 秒附近(如圖 5 箭頭處)。小波能譜對頻率做積分可以表現時間上累積總能量(圖 6)，可以明顯看到異常波浪出現的時候，在累積總能量上也是最大的。在分析大於兩米示性波高異常波浪資料中 25 筆只有 1 筆異常波浪不在小波時頻譜上的能量最大值。因此試著分析其他大於 1 米以上示性波高的資料。分析結果發現，全部資料共有 159 筆，其中有 5 筆資料異常波浪發生位置不在小波時頻能譜上的最大值，但是全部的資料都發生在時間上累積總能量最大的地方(如圖 5 箭頭處)。因此如果要從小波能譜上直接用能量判斷異常波浪發生的時間應該需要搭配其他的方法。並不是只有單一個頻率的能量很大就一定可以形成異常波浪，但是如果從時間上累積總能量來看，目前的研究資料都是出現在總能量最大的地方。

3.2 瞬時小波能譜討論異常波浪的特性

藉由小波分析在時頻上的優點，對異常波浪發生瞬間的小波能譜做討論。已經知道異常波浪發生都在這一段時間當中累積能量最大的地方。在本小節將試著討論異常波浪發生的時候，能量在頻率上的分佈。小波能譜(圖 5)對時間積分可以得到總時間頻率上的能量分布(如圖 7)試著與異常波浪發生瞬間的一維小波能譜(如圖 8)比較。由於波譜的形狀可以表現波浪的重要特性，現在已有幾種表示海浪譜的參數。(Longuet H.1957)建議譜寬參數 ν 以及(Goda,1970)建議用尖度 Q_p 來表示譜的尖窄程度。 m 為譜的矩。如下定義譜的 n 次矩

$$\nu = (m_0 m_2 / m_1^2 - 1)^{1/2} \quad (4)$$

$$m_n = \int \omega^n S(\omega) d\omega \quad (5)$$

$$Q_p = \frac{2}{m^2} \int f S^2(f) df \quad (6)$$

從譜寬參數以及尖度參數比較異常波浪的瞬時能譜的形狀，因此本文將式(4)。小波能譜對時間積分的總時間能譜(圖 7)以及異常波浪發生瞬時能譜(圖 8)做分別做比較。

$$\text{無因次參數} = \frac{\text{異常波浪能譜譜寬(尖度)}}{\text{平均時間能譜譜寬(尖度)}} \times 100\% \quad (7)$$

將無因次參數按照表一案例編號繪出圖形比較(圖 9、圖 10)。從 25 筆分析資料中可以看到同樣一個現象，在異常波浪發生時候的能譜的譜寬與這一段時間平均能譜的譜寬較寬，尖度也較小。可以合理的判斷異常波浪在能譜上組成的成分波較多，每一個成分波在頻率的分布較均勻。這也可以解釋 3.1 節，異常波浪出現在總能量最大的地方，而不一定出現在小波時頻譜能量最大處。因為在小波時頻譜能量最大處雖然有一個很大的能量存在，但是在其他頻率卻是能量很小，在缺少其它成分波之下可能因為能量太小或是其他原因而不足以形成異常波浪。

3.3 瞬時小波相位譜討論異常波浪的特性

從譜寬參數以及尖度係數知道異常波浪具有較多的成分波。本節試著討論各個成分波間的相位角在異常波浪出現的時候具有什麼樣的特性。由小波積分轉換係數 W 為一個含有實部加上虛部的值，因此將小波積分轉換係數轉換為相位譜的形式 $\text{phase angle} = \tan^{-1}(\text{Im}(W)/\text{Re}(W))$ 。在異常波浪出現的時間 280 秒左右，這一張圖並沒有辦法清楚的表現異常波浪的特性。為了探討異常波浪出現時刻當時相位的變化，將相位譜在異常波浪的那一時刻切出來(圖 11)，同樣的在這一張也沒有辦法看出來一些現象。考慮波浪的組成結構由能量加上相位角。因此將異常波浪瞬間的能譜來做對照，並且能量太小不足以影響這一個波的能量忽略。將主要能量對應的相位角作為以下討論。其主要能量的相位角(圖 12)上以圓圈表示，可以明顯看到異常波浪出現瞬間主要能量對應的相位角都有非常集中的現象。進一步在分析大於 1 米示性波高的 158 筆資料，主要能量對應的相位角都有集中的相同現象發生。為了比較在異常波浪相位角出現的特性，對其他時間出現大波但是不符合異常波浪定義波浪的相位角做比較，目前 25 筆大於兩米的異常波浪中通常發現異常波浪瞬間的相位角明顯比較集中(如圖 13)。在發生異常波浪前後分別 12、6、5 秒的位置求出瞬時能譜以及相位譜，在異常波浪出現的那一時刻相位都是最集中的時候，可以看出來主要能量對應的相位角隨著時間漸漸集中，一旦異常波浪消失相位又漸漸分散(如圖 14)。

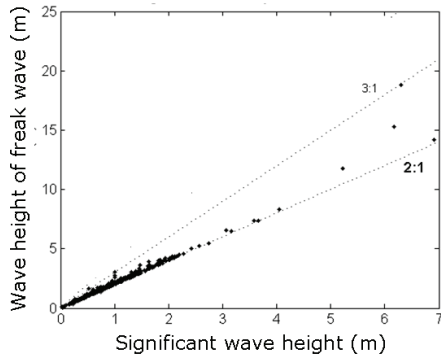


圖2 比率大於二的歷年示性波高與最大波高關係圖

Case 8: Hualien Buoy 2006.01.26 06:00

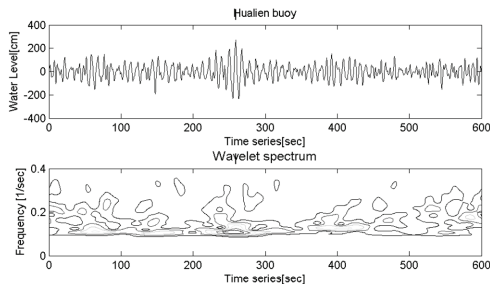


圖3 出現異常波浪資料水位時序列及小波能譜

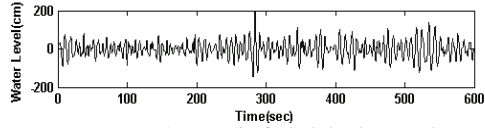


圖4 case 22 出現異常波浪資料水位時序列

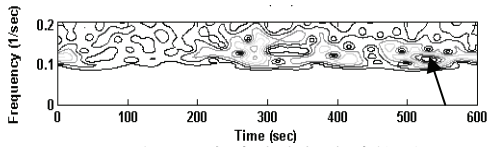


圖5 出現異常波浪資料小波能譜

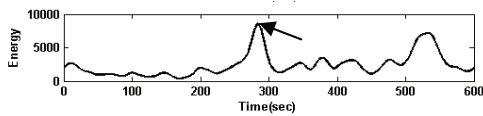


圖6 出現異常波浪資料時間上總能量變化

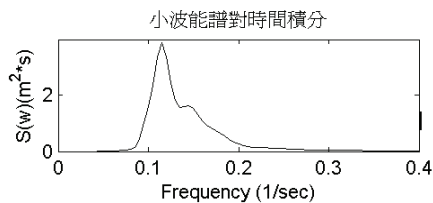


圖7 總時間小波能譜

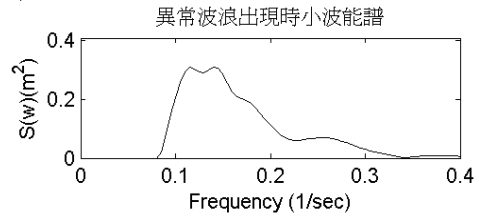


圖8 異常波浪瞬時能譜

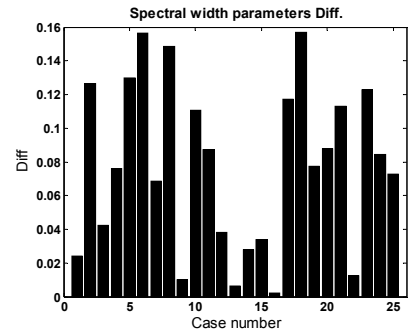


圖9 譜寬參數比較

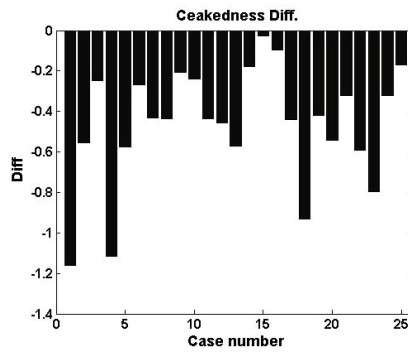


圖10 尖度比較

Case 21 : Hualien Buoy 2007.08.18 07:00
Hs=5.23
H/Hs=2.25

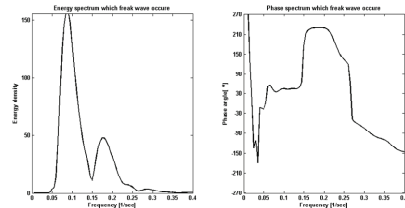
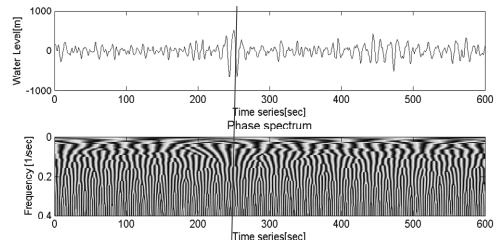
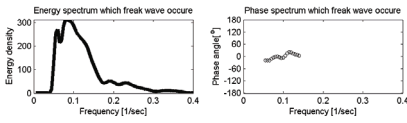


圖11 異常波浪瞬時能譜及相位譜

Case 2
Hs=10.29
H/Hs=2.20



Case 18
Hs=2.10
H/Hs=2.06

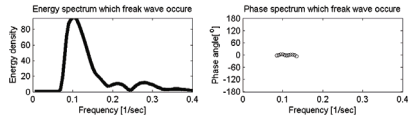


圖12 瞬時能譜與主要能量對應之相位圖

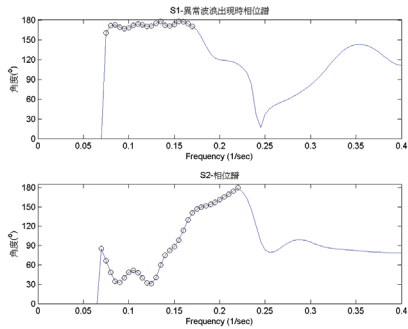
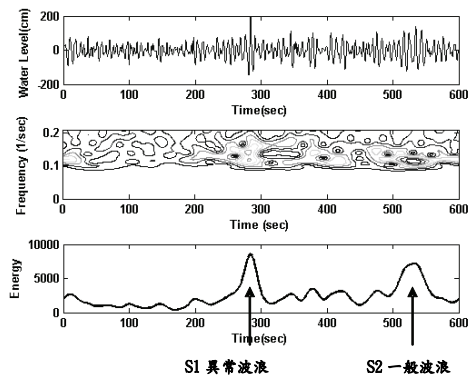


圖13 異常波浪瞬時能譜及相位譜

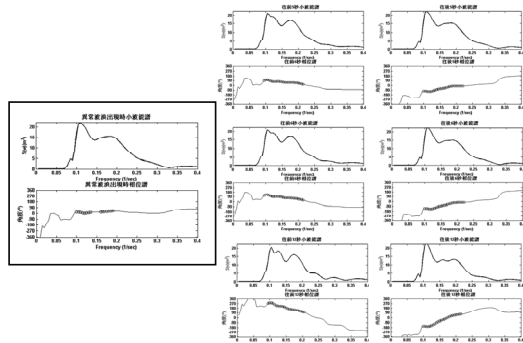


圖14 案例4 異常波浪前後能譜與相位譜比較

四、結論

小波能譜因為具有同時探討時間和頻率上能量分布的優點，本研究利用其優點探討發生異常波浪瞬間時候的能量特性，經綜合分析與討論後可歸納以下幾點結論：

(1) 異常波浪發生的位置，不能直接從小波三維能譜上最高點判斷，其實要配合看時間上的總能量(對頻率積分的小波能譜)。

(2) 透過小波相位譜的分析結果發現，異常波浪發生時，各成份波間會因相位相近而導致相互建設性的疊加(constructive superposition)。

(3) 從瞬時小波能譜的分析結果發現，異常波浪的譜形較寬，代表其所組成之成份波較多。

(4) 異常波浪的發生從小波能譜上去看同時伴隨著最大的能量還有位相的集中，至少在目前 158 筆資料中可以發現同時都有這樣的現象。

綜合以上異常波浪的發生從研究結果分析可以知道異常波浪發生會同時具有總能量最大、譜寬較寬、以及主要能量對應的相位集中的特性。經過本文分析，可以由波浪理論看的出來，不同頻率成份波具有不同的相位速度，當異常波浪發生時相位最為集中。從異常波浪發生時刻往前或是往後推，位相逐漸分散，使得各成份波間無法達成建設性疊加，因此無法繼續維持異常波浪，可以解釋異常波浪往往突然出現又消失的現象。

謝誌

本文承國科會支助(計畫編號：NSC96-2221-E-006-203-MY3)，感謝中央氣象局提供花蓮資料浮標長達 10 年之久寶貴的現場觀測資料，感謝水利署近海水文網提供近海觀測資料，使本文得以順利完成，在此致上誠摯的謝意。

參考文獻

1. 俞聿修(1992)《隨機波浪及工程應用》，中國、大連、大連理工大學出版社，第 199-201 頁。
2. 傅文俊(1993)《應用小波理論分析海洋波浪》，國立成功大學水利暨海洋工程所碩士論文。
3. 歐文松(1994)《小波轉換於分析淺化波浪特性之應用》，國立成功大學水利暨海洋工程所碩士論文。
4. 崔景泰(1995)《小波分析導論》，中國、西安、西安

- 交通大學出版社，第 10~58 頁。
5. 陳正宏(1999)瘋狗浪原因初探，國立成功大學水利暨海洋工程所碩士論文。
 6. 錢樺、莊士賢、高家俊(1999)「異常波浪原因解析」，第二十一屆海洋工程研討會，第 71-78 頁。
 7. 邱銘達(2001)資料浮標量測波高波向準確度提升研究，國立成功大學水利暨海洋工程所碩士論文。
 8. 蔡政翰、林盈成、曾相茂(2001)「群波與瘋狗浪」，*海洋工程學刊*，第 1 卷，第 1 期，第 71-82 頁。
 9. 陳冠宇(2002)「瘋狗浪的可能機制」，*海洋工程學刊*，第 2 卷，第 1 期，第 39-106 頁。
 10. Alessandro T., Jean, M.L., Jaak, M., H.i S. and Elzbieta B.G. (2003) “Freak Waves: Clues for Prediction in Ship Accidents?” *Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii*, pp. 25-30.
 11. Benjamin, S.W. and Bengt F. (1998) “On the chance of freak waves at sea”, *J. Fluid Mech. vol. 355*, pp. 113-138.
 12. Collin, F., Warnant, R. and Bruyninx, C. (1993) “Application of the Wavelet Transform for GPS cycle slip detection,” *International Association of Geodesy – Gemneral Meeting, Beijing, China, 6-13 August*.
 13. Daubechies, I. (1992) *Ten Lectures on Wavelets*, Rutgers University and AT&T Bell Laboratories. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pennsylvania, ISBN 0-89871-274-2.
 14. Dean, R.G. (1990) “Freak waves: a possible explanation,” *Water Wave Kinematics, A. Torum and O.T. Gudmestad ed.*, pp. 609-612.
 15. Didenkulova, I.I., Slunyaev, A.V., Pelinovsky, E.N. and Kharif, C. (2006) “Freak waves in 2005,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, pp. 1007-1015.
 16. Goda, Y. (1970) “Study on Wave Overtopping Rates at Seawalls,” *Report of Port and Harbor Research Institute, No. 9, Vol. 4*, pp. 3-42.
 17. Haar, A. (1910) “Zur Theorie der orthogonalen Funktionen-Systeme,” *Math. Ann.*, 69, pp. 331-371.
 18. Klinting, P. and Sand, S. (1987) “Analysis of Prototype Freak Waves,” *Coastal Hydrodynamics, ASCE*, pp. 618-632.
 19. Liu, P.C. and Keith, R.M. (1996) “ARE THERE DIFFERENT KINDS OF ROGUE WAVES?” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pp. 243-248.
 20. Liu, P.C., Keith, R.M. and Chin, H.W. (2004) “Exploring Rogue Waves from Observations in South Indian Ocean,” *Actes de colloque -IFREMER vol.39*, pp. 143-149.
 21. Longuet H., M.S. “The Statistical Analysis of a Random, Moving Surface,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Volume 249, Issue 966*, pp. 321-387.
 22. Longuet H., M.S., Cartwright, D.E., Smith, N.D. (1963) “Observations of the directional spectrum of sea wave using the motions of a floating buoy”, *Proc. Conf. Ocean Wave Spectra, Prentice-Hall Inc.*, pp.11~132.
 23. Nobuhito, M., Paul, C.L. and Takashi, Y. (2002) “Analysis of freak wave measurements in the Sea of Japan,” *Ocean Engineering vol.29* pp. 1399-1414.
 24. Osborne, A.R. (2000) “Nonlinear instability analysis of deep water wave trains : Computation of maximum heights of rogue waves,” *Proceedings of OMAE 2000, 19th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Feb.*, pp. 14-17.
 25. Stanisław, R.M. (2001) “Wavelet analysis for processing of oceansurface wave records,” *Ocean Engineering vol. 28*, pp. 957-987.