

CCD 遙測規則波波浪之研究

周宗仁¹ 尹 彰¹ 黃偉柏² 林家群³

摘要

本研究是應用遙測技術，以電耦合元件影像攝影機 (CCD, charged coupled device) 拍攝規則波波場的變化，同時配合波高計陣列的量測，將兩種量測系統的量測數據，回歸出轉換函數，以計算波場的波高。實驗總共進行兩個區域的量測，以驗證轉換函數的可行性。

A Study of Remote Sensing to the Measurement of Regular Waves with CCD Images

C. R. Chou J. Z. Yim W. P. Huang C. C. Lin

ABSTRACT

Experiments were carried out to assess the feasibility of measuring wave fields using a CCD camera system. Information concerning the wave fields can be extracted from the CCD images in forms of gray scales. These were then related to the physical wave characteristics by comparing with results measured by wave gauge arrays at the same location through a transfer function. Using this transfer function, we further compared results for other regions of the wave basin. It is shown here in this paper that the results for mechanically generated regular waves are favorable.

一、前言

在進行波場特性的量測時，傳統的方法通常採用現場定點直接(in-situ)量測的方式，如設置波高計測站或是放入浮球測器等。一般來說，這樣的量測結果皆極為準確。但是，由於大部分的量測儀器皆露出於水面上，除了會阻礙漁事工作進行和船隻航行外，更容易受到暴風雨和海浪的侵襲而損害，導致在架設的人力以及儀器維持的經費上耗費甚鉅。另外，這樣的量測數據，所代表的是「點」的量測結果。如果在地形、地物變化較大的波場附近進行量測，這樣的方式，較不易得到代表當地波場特性的結果。隨著科技的發展，遙測系統的技術日漸成熟，由於其不限定需要在特定位置上設置測站，可以簡便的搭載於航空器上或是於岸上裝設的特點，

因此在儀器的維持方面較為方便；此外，大範圍面積的擷取資料，也是其優點之一，經計算後所得的波浪特性資料具有「面」的意義，也較具有代表性。而這樣的量測方式簡化了傳統量測方式需不斷的移動測站的位置，以期擷取大範圍資訊結果的窘境，相對的也減少了人力、物力和時間的耗損。

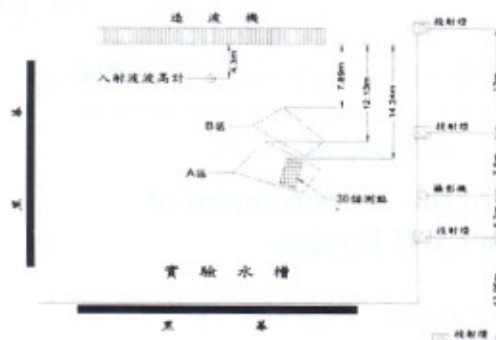
遙測的方式一般是使透過雷達的偵測或是採用攝影的方式擷取所需的資料。兩種方法皆是將傳回的訊號，利用圖像以不同強度的色階及紋理來表示波場波浪的振幅變化；而影像中每一個像素(pixel)的色階代表該瞬時內波浪對發射訊號波源的反應。需注意的是，在以攝影方式進行遙測時，影像裡波浪的反光強度是受到波浪表面的斜率影響，而非波高(Gangerkar, 2000)。

然而，透過遙測系統所擷取的訊號數據與實際海面上波動變化之間關係的相關研究至今仍未有較明確的結果。本研究是在國立台灣海洋大學海洋工程綜合試驗室裡的平面水槽進行。應用遙測技術，以電耦合元件影像感測器拍攝試驗範圍裡的波場變

1. 國立台灣海洋大學教授
2. 國立台灣海洋大學博士班研究生
3. 國立台灣海洋大學碩士班研究生

化，同時配合波高計陣列的量測。初期先以規則波波場進行造波，將兩種量測系統的量測數據，經比較後回歸出兩者間的轉換函數。

二、實驗設備及量測方法



本研究是在國立台灣海洋大學海洋工程綜合試驗館裡的平面水槽進行。使用到的相關設備簡述如下：

實驗水槽：水槽長 50 公尺、寬 50 公尺、深 1.5 公尺。實驗進行時，水深 0.4 公尺，無設置任何地形地物。
造波機：實驗館內現有造波機組為由七部日本本田工業株式會社(Honda Engineering Co. Ltd)出廠的多方向不規則造波機所組成。每部造波機控制八片造波板，造波板總長為 28 公尺，可造出任一方向 ($0 \leq \theta_0 \leq \pi$)， θ_0 是造波主方向、不同週期 ($0.5 \text{ sec} \leq T_{i,j} \leq 5 \text{ sec}$) 之規則波與不規則波波列。

波高計：本實驗使用電容性波高計共 31 支。其中包含 30 支排列成矩陣形式 (6 列 \times 5 行) 和第 31 支做為入射波高之量測。波高計陣列中的波高計列間距為 0.4 公尺，行間距為 0.8 公尺，而入射波波高計距離造波板 4.3 公尺。

攝影儀器：攝影系統為高感度 CCD 攝影機，可拍攝的光譜波長除了一般的可見光之外，還可感應到 750nm 以上的紅外光。攝影機鏡頭與底座裝有遠端遙控裝置，可控制攝影機的焦距、角度和攝影範圍。鏡頭前加裝一組偏光鏡，來阻擋偏射的光源入鏡，以減少水面的反光與強光對實驗結果的影響。設置高程距離靜水面 7.4 公尺。光源為 4 盞 400W 的投射燈，高程位置與攝影機等高。為避免有其他光源對

實驗拍攝產生干擾，實驗室在晚上進行，也就是說整個試驗過程，光源是在恆定的狀況下進行。

實驗是以規則波波場進行，實驗條件詳列於表一，實驗佈置示意圖如圖一。採樣頻率 20Hz，共擷取 1024 比資料。實驗區域共分為兩區，分別為 A 區和 B 區。先以 A 區的資料進行轉換的函數計算，而後再轉換鏡頭的俯角與拍攝範圍後進行 B 區的試驗，驗證轉換函數不因改變拍攝範圍而改變的通用性。

表 1 實驗條件

造波週期 T	造波激增益值(gain)	造波波高 $H(\text{cm})$
0.6	06、07、08、10、12、14	2.64--5.7
0.7	07、09、11、13、15、17	3.42--6.74
0.8	08、10、12、14、15、16	3.30--6.74
0.9	09、12、14、15、16、18	3.41--6.42
1.0	09、11、13、15、17、19	3.10--6.25
1.1	09、11、13、15、17、19	2.72--5.77
1.2	09、11、13、15、17、19	3.01--6.38
1.3	12、14、16、18、20、22	3.10--6.29

在分析遙測圖像時，大多數的研究是從波數-頻率域著手。其原理是將圖像中的每一個像素的灰階值以及所在的平面座標代入二維傅利葉轉換(Fourier transform)後轉換成二維波數譜。其代表的是能量在波數和波向的分佈情形(Atanassov et al., 1985; Brüning et al., 1992)。如果擷取的影像連續的，對時間軸可再進行一次傅利葉轉換，則分析結果則再增加一維-頻率軸(Hilthuisen, 1981)，所呈現的是能量在波數方向和頻率域的分佈情形(Senet et al., 2000)。藉由分散關係式和積分的步驟，可將三維的變數加以改變或降階，以簡化討論能量分佈的特性。

然而，由於機器架設的位置關係，進行遙測時常會形成斜向的拍攝，造成所攝入的影像是扭曲的(Sugimori, 1975)。也就是說對於較遠的景物，所攝入的範圍會越來越寬，因此景物會相對的縮小，這個現象會導致空間譜的計算失真。Senet 等人(2000)發現，影像顯示的照片雖然是方形的，但實際攝入的範圍，卻是隨著與攝影機的距離增加而逐漸加大，因此攝入波場的範圍實際上是一個梯形的區塊。所

以在計算二維波數譜時，需要先利用空間的轉換函數，將影像裡的每一點重新定位於正確的新座標，以減少運算時的誤差。而這樣的轉換計算過程，十分複雜。

本研究分析的方法是從空間-時間域著手。計算的數據包括連續畫面中選取像素位置的灰階變化與波高計量測結果。由於計算是以畫面序列中該選取像素的數據做為考量，其所佔的實際面積非常小，所以影像扭曲所造成空間轉換的計算誤差對本研究的影響則非常輕微。其原理是利用波高計陣列所量測取樣的規則波波動變化以零上切法定義出波高(H)和週期(T)並與 CCD 攝影系統所擷取的連續畫中該點影像的灰階變化值以同樣方法定義出的灰階振幅(G)和變化週期(GT)來相互比較計算之間的轉換函數。

另外，若拍攝畫面若以彩色的方式進行，記錄物體色澤的方式會包含了紅、綠和藍三個基本色的組合變化，所以每一個像素的記錄值會有三個，也就是所謂的 RGB 值，這樣會增加分析過程的複雜程度。因此本實驗是以黑白的方式進行拍攝。影像則以不同的灰階值表現，最暗的灰階值為 0(黑色)，最亮的值則為 255(白色)。實驗進行時，拍攝畫面的解析度為為 320 像素×240 像素，每一個像素等於約實際面積 4.18 平方公分。

Jähne(1997)認為雜訊、非恆定的照明和非均一性的背景往往會使得拍攝的畫面出現異常的變化，而這些變化會直接影響計算的結果。為了減少異常現象對計算結果的影響，需將影像畫面的數位訊號加入平滑視窗處理。本研究在空間域裡進行 2×2 的空間平滑，也就是將擷取點其周圍三點取平均，當做該點的灰階值；另外，在時間域裡，針對擷取點灰階值的時間序列進行五點平均。藉由這些平滑的手續以保持其統計上的定常。

另外，海面波動照片明亮密度決定於光源的平均入射角度和光從波面反射至攝影機的角度，因此，照片上明亮度和顏色會隨著遠離光源方向成梯度變化，為了保持整個畫面光源的均一性，本研究修正 Jähne 等人(1990)所提出量測位置與光源間距離的感光相對強度公式，將距離的參數改變成為畫面的平均灰階值，並將所有測點的灰階振幅(G)需乘上該位置的光源修正係數：

$$G_{\text{modified}} = G \cdot \exp(-G_{\text{avg all}} / G_{\text{avg channel}}) \quad (1)$$

其中

G_{modified} :修正後灰階振幅值

$G_{\text{avg all}}$:整張畫面的時間序列的灰階平均值

$G_{\text{avg channel}}$:量測點時間序列的灰階平均值

三、結果與討論

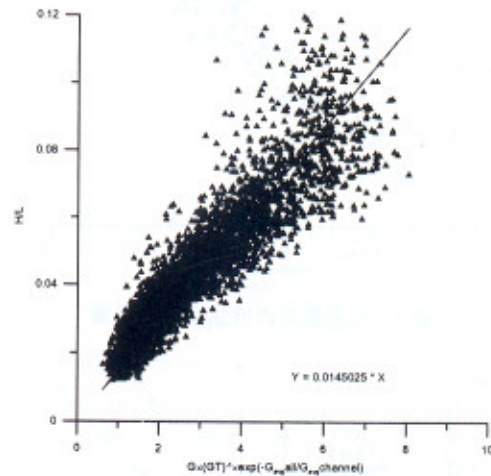


圖 2 回歸曲線圖

以 A 區所有的實驗結果，計算的各個統計參數經排列組合後，發現式二較符合線性關係，且相關性也較高，結果表示於圖二。回歸公式為：

$$HL^{-1} = 0.0145025 \cdot (G \cdot (GT)^{-1}) \cdot \exp(-G_{\text{avg all}} / G_{\text{avg channel}}) \quad (2)$$

其中 L 為波長

而灰階振幅與波高之間的轉換函數則可表為

$$H = 0.0145025 \cdot (G \cdot (GT)^{-1}) \cdot \exp(-G_{\text{avg all}} / G_{\text{avg channel}}) \cdot L \quad (3)$$

利用此轉換函數，在已知水深區域裡，經過遙測攝影計算波浪的週期後，以分散關係式計算波浪波長則可推估該區的波高。圖三是應用轉換函數將在 A 區所遙測拍攝的灰階振幅轉換成波高的結果。橫軸是波高計陣列的量測值，縱軸則是推估值。每一個點代表 30 個測站在每一次實驗條件下的平均值。所有的結果大致沿著量測值和推估值等值的直線分佈，也就是說推估值與量測值十分接近。整體

來看，推估值有略低於量測值的趨勢。而 A 區的波高推估值與實際量測的波高值之間的平均相對誤差為 0.1571。

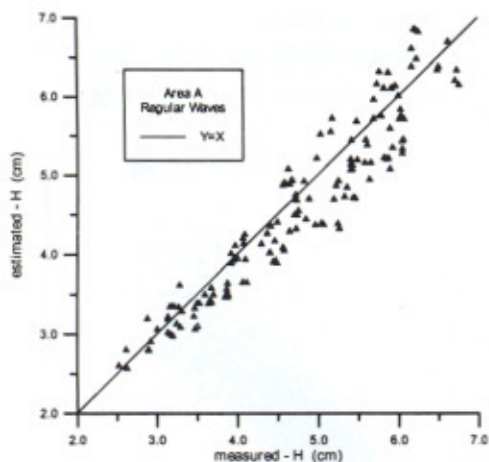


圖 3 A 區量測與推估波高比較圖

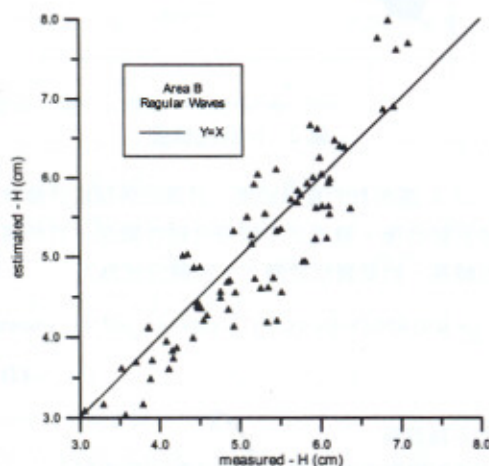


圖 4 B 區量測與推估波高比較圖

圖四是應用轉換函數將在 B 區所拍攝畫面的灰階振幅轉換成波高的結果。大致看來，推估值與量測值仍然十分接近。計算所得的波高與實際量測波高的平均相對誤差為 0.1591，此誤差量與 A 區的計算結果接近。由此證明，此轉換函數可廣泛的在任意區域使用。

圖五、六和七分別為波高計陣列第三行中的測站 3、13 和 28 的灰階振幅與波高關係圖；測站 3 離光源最近，測站 13 次之，測站 28 則最遠；實驗區域為 B 區。圖上的線為轉換函數所計算的推估值，

符號則為量測值。由推估值各個週期的排列順序可以發現，針對相同的灰階振幅，不一樣的週期，所對應的波高也不一樣，週期愈長，所轉換的波高也越大，實測值也大致依造這個趨勢排列。由圖四和圖五的結果發現，在造波週期大於 1.0sec 的實驗結果，推估值略有低估的現象；而在小於週期 1.0sec 的實驗結果，推估值則有大於實測值的現象。

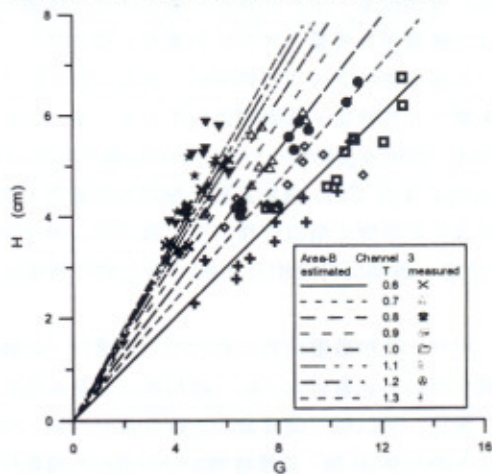


圖 5 測站 3 灰階振幅與波高比較圖

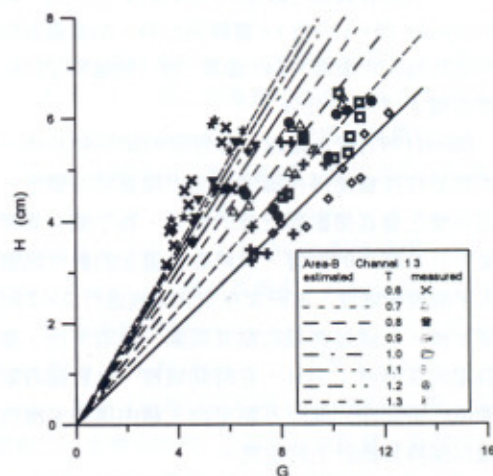


圖 6 測站 13 灰階振幅與波高比較圖

由測站 28 的結果(圖七)發現，距離光源越遠處，也就是畫面中較遠處，推估值與實測值的偏離程度比其他兩者較近處(圖五、圖六)大。推估可能造成誤差較大原因包括光源的不足和影像的扭曲。在實驗過程中發現，如果光源不足，在影像畫面中則無法分辨視出波浪的波動。這樣的現象，會造成在計算

波浪的週期時，計算值會趨向於無限大或是極小值，這與實際造波波場的波相並不相符。但是在檢視測站 28 影像序列的週期計算結果時，並沒有發生這樣的現象，因此排除光源不足的假設。另外，在擷取影像中測點灰階振幅的時間序列時，是擷取該測點所在位置像素的灰階變化。而影像中的景物越遠，像素所涵蓋的實際面積也愈大，然而，波高計量測位置的面積點僅為電容式的測線。相較之下，兩者量測面積的差距甚大。因此，這應該是造成實測值與推估值偏差較大的原因。

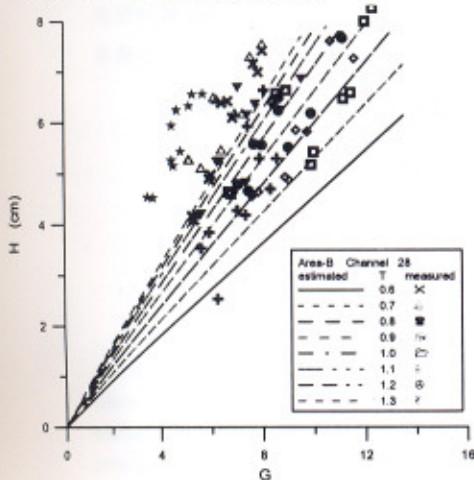


圖 7 測站 28 灰階振幅與波高比較圖

四、結論

本研究最主要的目的是期望能藉由規則波波場實驗，率定遙測拍攝與實地量測兩系統之間在量測波高時的轉換函數。轉換函數計算的波高與實測值之間的平均相對誤差約等於 0.15。

實驗進行除了回歸轉換函數的 A 區實驗外，另外，也將拍攝鏡頭轉移，進行另一區域-B 區的遙測，進行驗證。結果發現推估值與實測值的相對誤差量並沒有因為拍攝區域改變擴大，證明本研究轉換函數的並不會因為遙測範圍改變而需要進行重新修正的通用性。

由本文轉換函數計算所得的灰階振幅與波高比較圖發現，如要降低誤差，光源需要能均勻的照明於所拍攝的區域，而攝影機需儘量設置在較高的地方進行拍攝，以減少遠方景物扭曲的現象。另外，對於相同的灰階振幅，週期愈長，波高愈大，由此

可知，兩個相同灰階振幅的拍攝結果，並不代表兩者波場波高是相同的。

謝誌

本論文係國科會專題研究計畫「利用高感度遙測系統 CCD 進行實驗水槽波浪觀測」(編號 NSC-90-2611-E-019-001) 之研究成果，承蒙國科會經費之贊助使本研究得以順利完成，謹至感謝之意。

參考文獻

- Atanassov, A., W. Rosenthal and F. Ziemer (1985) "Removal of ambiguity of two-dimensional power spectra obtained by processing ship radar images of ocean waves" *Journal of Geophysical Research*, Vol.90, No. C1, pp.1061-1067.
- Brüning, C., W. Aplers and R. Schmidt (1992) "The relationship between ocean waves and SAR image spectra studied by Monte-Carlo simulation techniques" *Proceedings of Geoscience and Remote sensing Symposium 1992*, IEEE, pp.1093-1096.
- Gangeskar, R. (2000) "Wave height derived by texture analysis of X-band radar sea surface images" *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000, Proceedings IGRASS 2000*, IEEE, Vol. 7, pp.2952-2959.
- Holthuijsen, L. H. (1981) *The directional energy distribution of wind generated waves as inferred from stereophotographic observations of the sea surface*, PhD dissertation, Technical University Delft, pp. 193.
- Jähne, B. and K. S. R. Riemer (1990) "Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves" *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. C7, pp.11531-11546.
- Jähne, B. (1997) *Digital image processing*, Springer-Verlag, Berlin, pp.289-341.
- Senet, C. M., J. Seemann and F. Zimer (2000) "Hydrographic parameter maps deduced from CCD image sequences of the water surface supplement by in-situ wave gauges" *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGRASS*, Vol.2, pp.843-846.

8. Sugimori, Y. (1975) "A study of the application of the holographic method to the determination of the directional spectrum of the ocean waves" *Deep-Sea Research*, Vol.22, pp.339-350.

要旨 本論文は、波の方向性スペクトルを決定するためのホログラフィック法を研究し、その応用について報告する。この方法は、波の方向性スペクトルを決定するための新しい方法であり、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できる。本研究の結果、この方法は、波の方向性スペクトルを決定するための有効な方法であることが示された。

1. はじめに 波の方向性スペクトルは、波のエネルギーがどの方向から来るかを示す重要な指標である。従来、波の方向性スペクトルを決定する方法として、浮き球観測や、波高計観測などが行われてきた。しかし、これらの方法は、観測地点が限られており、かつ、観測期間が長い必要があるという欠点がある。

一方、ホログラフィック法は、波の干渉パターンを記録し、それを解析することで、波の方向性スペクトルを決定することができる。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。本研究では、この方法を応用し、波の方向性スペクトルを決定することを目的とする。

2. ホログラフィック法の基本原理 ホログラフィック法は、波の干渉パターンを記録し、それを解析することで、波の方向性スペクトルを決定する方法である。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。本研究では、この方法を応用し、波の方向性スペクトルを決定することを目的とする。

3. 実験装置と観測方法 実験装置は、波の干渉パターンを記録するためのカメラと、それを解析するためのコンピュータからなる。観測方法は、波の干渉パターンを記録し、それを解析することで、波の方向性スペクトルを決定する方法である。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。

4. 観測結果と解析結果 観測結果は、波の干渉パターンを示す画像である。解析結果は、波の方向性スペクトルを示すグラフである。このグラフは、波のエネルギーがどの方向から来るかを示す重要な指標である。本研究の結果、この方法は、波の方向性スペクトルを決定するための有効な方法であることが示された。

5. 結論 本研究の結果、ホログラフィック法は、波の方向性スペクトルを決定するための有効な方法であることが示された。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。本研究の結果、この方法は、波の方向性スペクトルを決定するための有効な方法であることが示された。

参考文献 1. Sugimori, Y. (1975) "A study of the application of the holographic method to the determination of the directional spectrum of the ocean waves" *Deep-Sea Research*, Vol.22, pp.339-350.

波の方向性スペクトルは、波のエネルギーがどの方向から来るかを示す重要な指標である。従来、波の方向性スペクトルを決定する方法として、浮き球観測や、波高計観測などが行われてきた。しかし、これらの方法は、観測地点が限られており、かつ、観測期間が長い必要があるという欠点がある。



図1 波の方向性スペクトルとエネルギーの関係を示すグラフ。縦軸はエネルギー、横軸は方向を示す。データポイントと回帰直線が示されている。

波の方向性スペクトルは、波のエネルギーがどの方向から来るかを示す重要な指標である。従来、波の方向性スペクトルを決定する方法として、浮き球観測や、波高計観測などが行われてきた。しかし、これらの方法は、観測地点が限られており、かつ、観測期間が長い必要があるという欠点がある。

一方、ホログラフィック法は、波の干渉パターンを記録し、それを解析することで、波の方向性スペクトルを決定することができる。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。本研究では、この方法を応用し、波の方向性スペクトルを決定することを目的とする。

2. ホログラフィック法の基本原理 ホログラフィック法は、波の干渉パターンを記録し、それを解析することで、波の方向性スペクトルを決定する方法である。この方法は、従来の方法よりも高精度で、かつ、比較的簡単に実施できるという利点がある。本研究では、この方法を応用し、波の方向性スペクトルを決定することを目的とする。