

南海內潮之傳播與演化(I)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91 - 2611 - M - 002 - 013

執行期間： 91 年 8 月 1日至 92 年 10 月 31 日

計畫主持人：王 冑

共同主持人：

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學海洋研究所

中 華 民 國 92 年 11 月 27 日

南海內潮之傳播與演化(I)

91-2611-M-002-013

摘要

大規模的海洋內波運動是南海北部海盆內經常出現的物理海洋學現象。由衛星圖像上常觀察到南海內出現波列綿延數百公里長的內波孤立子訊號，這些訊號表現在實際海面時往往就是寬約 1-2 公里的激浪帶，船隻通過時只見四週海面洶湧翻騰，碎浪帶起自遠方海天交界處再延伸至另一方向之海天交界處。由過去一些觀測推知，這些內波孤立子波列應當源自於呂宋海峽東側之巴坦群島，大洋潮通過此群島時，由於潮流推動層化海水通過島群間呈鞍狀的海檻地形產生內潮，這些內潮生成後再繼續傳入南海海盆，因非線性作用再演化成為內波孤立子波列。內潮波進入南海後之傳播以及演化過程，以及其與南海環流場間之關係是本計畫擬探討的問題。本年度內我們已在自力研發的船舶雷達遙測基礎上更進一步強化了雷達遙測資料之定量分析能力，另外理論方面我們也提出了一個由內波驅動的動力機制，定性上可以解釋過去在台灣灘陸棚區上發現之區域性環流現象。

ABSTRACT

Large-scale internal waves, such as internal tidal waves, internal solitons, are energetic and ubiquitous physical processes in the northern South China Sea (NSCS) basin. In the NSCS, the surface signatures of internal solitons, with lateral scale spanning hundreds of kilometers, could be seen from satellite imageries quite often. These signals correspond usually to bands of rips, with width of 1-2 kilometers, on the surface. When a ship passes through such a rip band, one may encounter choppy seas full of rolling waters, and the rip bands are seemingly endless, originating from one horizon and extending to the other. According to previous observations, we anticipate that these rip bands are surface signatures of internal solitons, whose ancestors are internal tidal waves generated along the Batan island chain, east of Luzon Strait. The flow-topography interaction mechanism, i.e. tidal currents pushing stratified waters flowing through the saddle shaped sill topography in between islands, could interpret the generation of internal tidal waves well. The latter then propagate into the NSCS and evolve into internal solitons along their way to the western NSCS basin, in which they are dissipated and eliminated finally. The evolution process of internal tidal waves and its possible relationship with the NSCS circulations are interesting and important topics to the regional oceanography. During the past year we have established the real-time remote-sensing technology by using a marine-Radar, which is the first step of the future field works for the present project. Additionally, we have done some theoretical works. The mechanism developed could interpret qualitatively the occurrence of a clockwise eddy found on the continental shelf during the ASIAEX experiment.

前言、

近年隨著人造衛星合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar, SAR)之應用逐漸普及,南海海域衛星 SAR 觀測圖像數量因此日益增多,另一方面也因為亞洲海域國際聲學實驗(Asian Seas International Acoustics Experiment, ASIAEX)在南海北部執行了密集的海洋觀測工作,後這些圖像以及資料更是豐富了我們對南海北部經常出現顯著內波孤立子長波列的認知。Hsu and Liu (2000)曾綜合 1993 年至 1998 年間由歐洲資源衛星 ERS-1/2 在南海上空所拍攝到的百餘張 SAR 圖片並繪出一張內波分佈示意圖,指出南海北部海域顯著內波孤立子波列訊號出現率最高的地區主要是東沙島附近及其週遭的陸棚海域,而由呂宋海峽至 118°E 之間的廣大海域,則除了一次以外,並未發現有較強的內波波列訊號出現。我們認為這種不均勻分佈情形和內波波列之生成、傳播以及演變有關,因此是值得投入之長期研究目標。針對此項研究需求,我們覺得衛星遙測資料雖好但卻因觀測密度不足且不易與研究船航次密切配合,因此對現場實驗而言其實幫助有限,但遙測技術確為內波研究所必需,是以我們在近期內乃預定先行開發出船舶雷達遙測技術,期望以此作為下階段內波現場實驗研究之輔助工具。

研究目的、文獻探討

雷達連續掃描海面的資料除了可用來估算波浪參數、表達成海面波浪之動態圖像外,另外也可以用來探討一些水平尺度比較大的物理海洋學現象,例如海洋內波、近岸鋒、河流出海口處之沖淡水舌(river plume)分佈、海面油污、船隻尾跡等等,這是因為這些現象中有些(如內波、鋒面等)往往會造成海面流場發生水流輻散或輻合,經由小波與流場的交互作用就會改變海面粗糙度的分佈情形,有些現象(如油污或船隻尾跡亂流等)則會抑止小波發展,使得海面變得比較平滑,但是不論如何,假使海面非常平靜、無風同時也沒有任何小波,那麼雷達往往也很難感測出海面粗糙度分佈有什麼有意義的變化,因此如果期望使用雷達來探測這些海洋現象,基本上仍需要有一定數量以上的小波分佈在海面上,好在海上多數時段均有海風吹拂故海面有波實屬常態,如此則雷達遙測不愁無用武之地。可是另一方面,當風強浪大時,波浪所產生的雷達回訊強度往往又會比想看的海洋現象要強得太多,此時我們就必需濾除掉波浪的效應,而平均過程或許正是一種最簡單的濾波方法。如果能將雷達連續觀測畫面平均,平均圖像往往便能將有意義的海洋現象特別凸顯出來。

近年來我們為了測波作業曾經自力設計、開發了 ROCOS 雷達測波儀系統,此系統之前級輸出為電壓,經 A/D 轉換後進入電腦儲存之讀數值與雷達回波強度成正比,由於欠缺價昂的微波量測設備因此這些數值我們無法以常規的方法加以率定。測波作業時最終需要的其實是換算成為相當於波高的物理量,相對於微波量測而言量測波高就便宜多了,Ziemer and Gunther (1994)曾提出一種簡便的方法可以進行經驗性校正工作。首先計算出連續雷達圖像的 3D 能譜(含二波數分量以及一頻率分量),再經波浪/雷達能譜轉移函數修正後換算成對應之 3D 波浪譜,然後根據波浪的離散關係式(Dispersion Relation)設計動力學濾波器,也就是藉助離散關係式而在 3D 能譜所對應之波數-頻率空間中界定出能譜各成份分量何者與波浪相關,何者與波浪無關,如此將能譜中與波浪相關程度較高的能量篩出,累積積分後得出(雷達讀數)波浪總能量,此值開方後應與實際波高成正比,故代入同

步觀測之波高計實測資料復經統計迴歸即可得出波高與雷達方根值間的經驗關係式。

得出波高後如果又獲有同步觀測之風速等資料，那我們就可再使用統計方法求出各種修正公式，接著再使用這些公式可將雷達原始圖像之掠角、風速等效應重新修正。經此種初步處理，接下的工作便是如何再根據修正後之雷達遙測資料來研判內波所造成之海面流速分佈，並從而推估出水下內波之垂直構造情形。由於水下內波會產生海面水流之輻合或輻散，經由波流交互作用後便會影響到海面重力波波能量密度的水平分佈情形。對雷達遙測而言，海面小波才是造成雷達波後向散射效應最重要的散射體，其分佈情形又和海面風應力之大小以及海面大波(其能量大小分佈情形則會受到內波所造成之水流輻合或輻散作用所影響)所引起之水分子運動分佈情形有密切關係，是以從雷達圖像上就可以觀察到水下內波。在水下內波波峰(對下壓型內波而言，此即等密面深度最大之處)前緣處，海面水流係呈現水平輻合，故水面重力波在此處之能量密度較大，亦即海面比較粗糙，反之在水下內波之背面(即內波波峰與下一波波谷間)，海面水流係呈現水平輻散，因而海面重力波之能量密度較小，海面則相對較為平滑，透過這重重的關係就可將雷達回訊強度與水下內波運動情形連結起來。

Alpers (1985)曾指出雷達是海面粗糙度的感應器，與水流之關係可以用簡化的公式來近似。雷達回訊強度通常是用雷達截面積率(Normalized Radar Cross Section, 簡稱為 NRCS) σ 來表示，假如海面水平流速 \vec{u} 所造成之輻散為 $\nabla_H \cdot \vec{u}$ ，式中 ∇_H 為水平梯度運算，則根據第一階近似之雷達成像原理，海面上 NRCS 之相對變化($\Delta\sigma/\sigma_o$)和水平流速輻合量間會呈正比，即

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_o} = -A\nabla_H \cdot \vec{u},$$

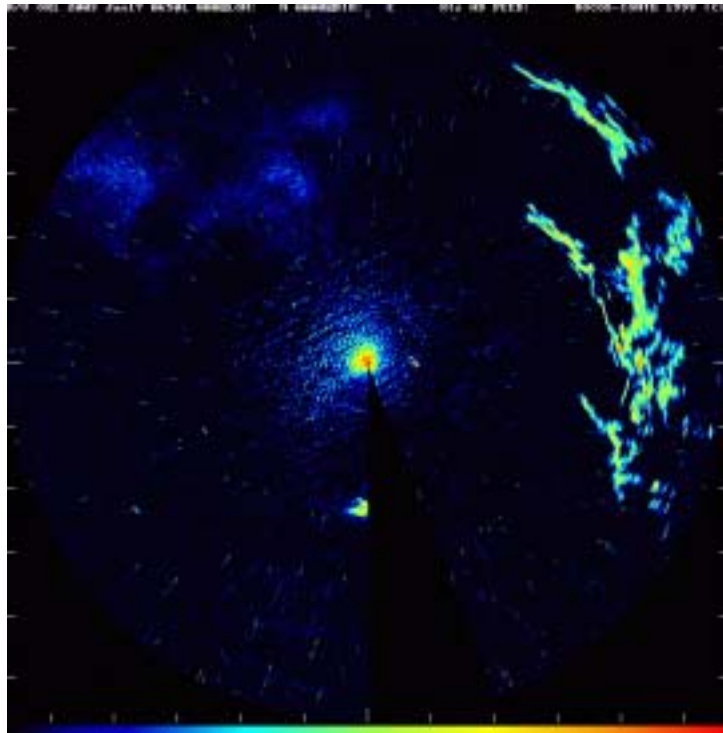
式中 A 為一呈正值的函數，其數值大小和雷達波長、雷達發射之掠角、方位角、以及海面風速等等因素均有關， σ_o 則為具一代表性的海面 NRCS 值(Brandt et al.1996)。海下內波會造成海面水平流速之輻合或輻散，後者經由波浪交互作用則又和海面波場特性間有密切的關係，是以從雷達回訊強度應可有效反算出水下內波場在海面上所產生流速之振幅大小，如果又獲有同時之海水密度垂直剖面分佈資料(使用 XBT 或是 CTD)，那麼根據內波理論就可再進一步算出水下內波之垂直構造、振幅大小、傳播速度、流速振幅等等特性參數。

然而，本計畫執行期間由於未獲安排使用到海研一號航次(需赴外洋作業並需耐心等待時機)，因此目前尚無法如預期收集到較好的內波同步觀測資料來進行分析作業。有鑑於此，第二年起是我們乃改為在淡水河口建立長期之雷達遙測站，希望藉著淡水河口沖淡水舌與外海水間鋒面帶的水流輻合情形可以幫助我們來校驗上述的公式，此項工作目前正在進行中。

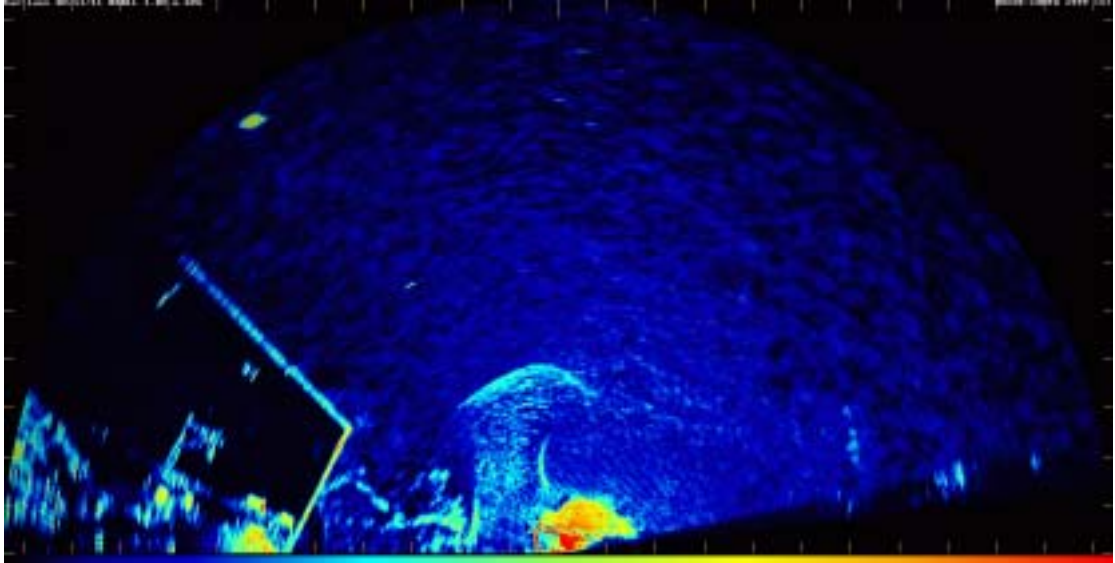
研究方法、結果與討論

如前段所述，本計畫第一階段之任務在於開發船舶雷達遙測技術，藉以輔助下階段之內波研究工作所需。在本年度之計畫執行期間我們預定之首要工作就是製作出一具雷達遙

測儀，有此裝備後才能開展後續之研究工作。由於我們之前曾經自力開發過雷達測波儀(即將一般商用的船舶雷達重新修改電路改裝成為數位雷達，然後自行研發後級之資料處理軟體)，因此在現有的基礎上我們很快便完成了雷達遙測儀硬體整合製作方面的工作，隨後又修改採樣以及後級資料處理系統，今年(92)春、夏季時並已將自製的船舶雷達遙測儀隨著海洋二號研究船出海了兩次進行實地測試工作(圖一)，証實系統穩定可用。隨後我們又接洽了海巡署，將新製作的船舶雷達遙測儀安裝在淡水河口沙崙漁港邊的安檢站樓頂，以觀測淡水河口河川沖淡水舌之變化情形(圖二)，我們將藉著這些資料作為探討雷達回跡強度與水流輻合量間關係之基礎(這部份係第二年計畫之研究項目)。



圖一、自製之雷達遙測儀安裝在海洋二號研究船上出海實測資料之一例。圖右側為和平島以及八尺門海岸，圖中央線下方之亮區為基隆嶼，本圖中央顯示海面有比較弱的內波波列條痕，可能是潮流通過附近海脊所產生的內波造成的。



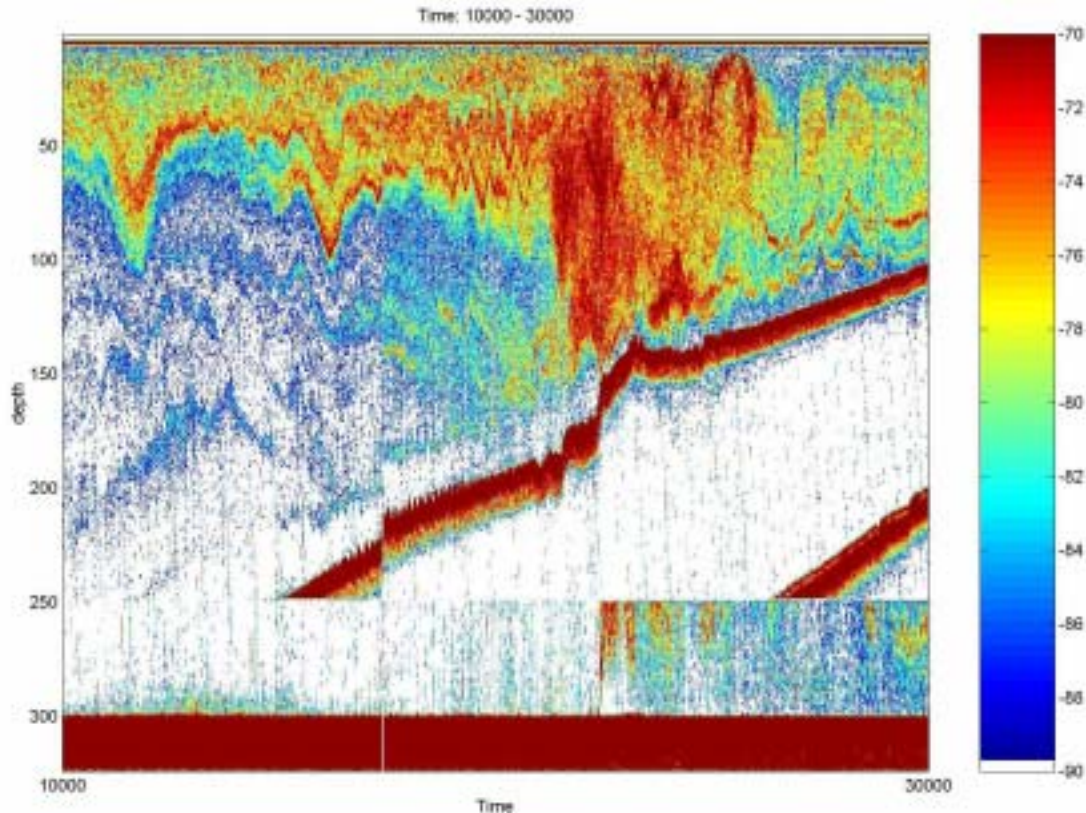
圖二、雷達遙測儀安裝在淡水沙崙港所觀測到勸淡水河口沖淡水所形成之舌狀構造分佈情形(此為已消除海面波浪效應後之平均圖)。

此外，本年度內雖然無法分配到海研一號航次赴南海內波訊號豐集區收集同步觀測資料，但我們仍然使用 ASIAEX 實驗期間所得到的歷史資料進行了一些關於南波內波的研究工作。ASIAEX 期間我們曾在東沙與澎湖之間的台灣灘陸棚緣海域執行了密集的水文以及流速儀錨碇等觀測實驗，這些資料証實此海域經常出現顯著的內波孤立子波列，同時也經常充斥著較短波長的內波信號。從所收集之聲學資料上我們注意到一個現象，那就是該海域之內波強度似乎與當地之地形分佈有密切關係，例如圖三就顯示 150m 等深線似乎是一道有趣的界限，在較深海域內波波高較大，但在較淺海域內波波長較短波高亦較小，另外混合層厚度也在此突然變深，我們對此種跡像之解釋是內波傳到陸棚淺灘時，由於淺化作用故內波造成之水流垂直切變也就增加因而使水柱形成動態不穩定而碎波(Phillips 1977)，如此亦使混合層增厚同時波高也跟著衰減。另方面，劉(2002)分析 ASIAEX 海流資料時發現在觀測區內呈現一奇特的順鐘向小環流，我們可以用內波入射的動力機制來解釋此流況之生成原因。

根據歷史資料知，ASIAEX 當地之孤立內波多以第一模態之波動型式存在，故可將海水垂直分層狀態以理想的準兩層情況來近似，此時第一模態內波解可參考 Phillips(1977)。

假設處於穩定狀態下，由質量守恒式： $\frac{\partial}{\partial x_{\alpha}}(\tilde{M}_{\alpha})=0$ ， \tilde{M}_{α} 為平均之質量輸送(包括內波所造成之質量輸送)，可用流函數來表示。再由動量守恒關係並假定簡化之線性摩擦律：

$\frac{\partial}{\partial x_{\beta}}\{S_{\alpha\beta}\}=T_{\alpha}-r\tilde{M}_{\alpha}$ ，式中 $S_{\alpha\beta}$ 為內波之輻射應力(Radiation stress)， $T_{\alpha}=-\delta\rho g D \frac{\partial d}{\partial x_{\alpha}}$ ， $\delta\rho$ 為斜溫層上下之海水密度差， D 為水深， d 為上層厚度，而 r 則為一簡化之線性摩擦係數(Bowen and Inman, 1969; Phillips 1977)。



圖三、ASIAEX 期間海研一號 EK500 聲學回跡，顯示內波在水深 150m 處其行為有較大之變化，在 150m(右側)以淺之區域內混合層突然增厚，而越往右(淺水區)則內波波高越有減小之趨勢，這點似乎暗示內波由此起開始碎波。

ASIAEX 實驗區之地形是一片近似於桌角形狀的淺灘聳立在南海北端深海平原上，因此我們可以把其地形廓線以直角來近似，而內波則為由南海向著西北方傳上平台(如圖四)，假設內波傳上陸棚後隨即破碎而其波能則隨傳播距離呈指數衰減，如此將前述之動量守恒關係式交互微分消除 d ，並將流量改以流函數來代替，加入內波輻射應力之變化，再經無因次化處理後如此便可得出一個 Poisson 型態的控制方程式，假定在圖四之左側以及上方邊界垂直於邊界之微分量為零，而下方以及右方邊界條件則為入射波之波動量經無因次化轉換成的流函數值(假定其值為由 0 至 2)，如此便可用數值方法快速求出解式，圖四即為其中一例。數值結果顯示當內波傳上平台陸棚後如果發生碎波(觀測資料顯示之趨勢)則波能衰減，但原隨內波所帶來的動量則無從消散，這部份多出的動量輸送要靠產生壓力梯度力(即密度分界面下傾)以及產生沿著陸棚邊緣的沿岸海流才能平衡，在此過程中靠近平台地形彎角的地方則會出現一對旋渦，其中順鐘向旋轉者居左係與向左流動的沿岸流相倚，而與向上流動相伴的則為另一個反鐘向旋轉的小旋渦。但當減低摩擦效應時此二環流強度則均同時減弱。這些數值實驗結果似乎可以解釋實際觀察到的現象，不過目前所用的模式尚過於粗糙，只能說定性上有此可能性，詳細情形仍有待進一步之研究

參考文獻

Alpers, W. (1985) Theory of radar imaging of internal waves. *Nature*, 314, 245-247.

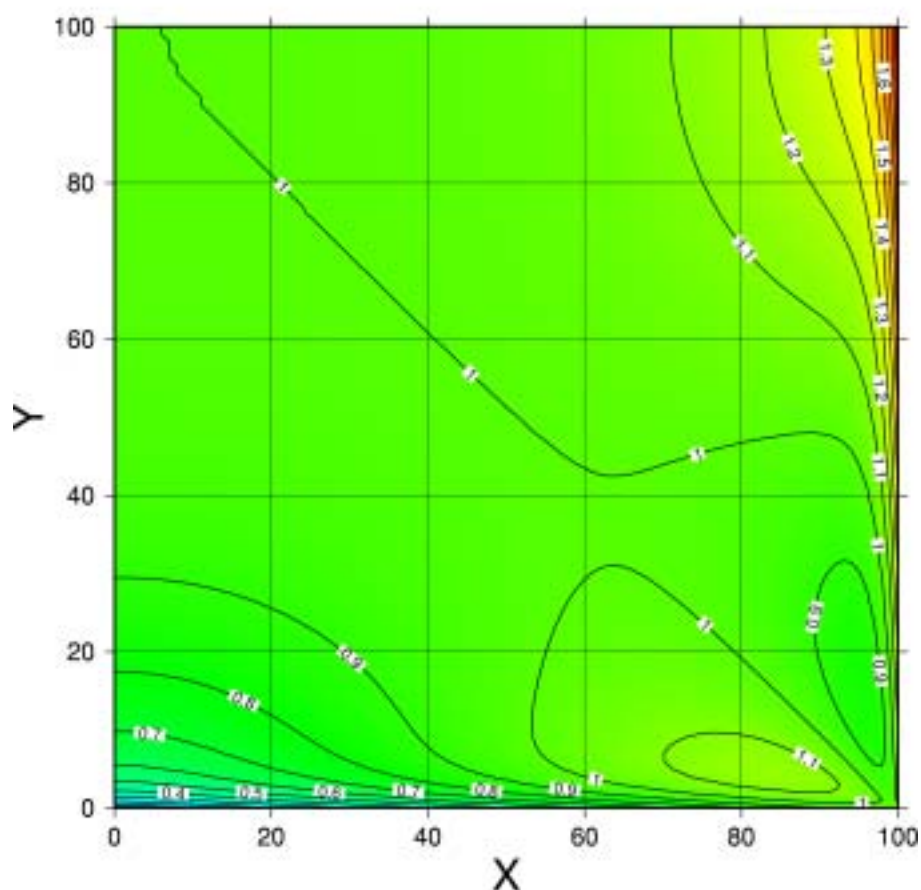
Brandt, P., W. Alpers and J.O. Backhaus (1996) Study of the generation and propagation of internal waves in the Strait of Gibraltar using a numerical model and synthetic aperture radar images of the European ERS1 satellite. *J. Geophys. Res.*, 101, C6, 14237-14252

Phillips, O.M. (1977) *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Ziemer, F. and H. Gunther (1994) A system to monitor ocean wave fields, in: **Proceedings of the 2nd International Conference on Air-Sea Interaction and Meteorology and Oceanography of the Coastal Zone**. Lisbon, Portugal.

劉怡茹(2002) ASIAEX 區間海溫、海流的時空變化，台灣大學海洋研究所碩士論文。

Stream Functions



圖四、理想情形下，海洋內波由右下向左上傳入一塊矩形淺灘(即圖形所顯示區域，係模擬 ASIAEX 實驗區之地形)因碎波後輻射應力變化所造成之沿陸棚緣流場分佈情形，圖中的曲線為流函數等值線(數值為無因次化後之流函數值，面隨流向高值在右)，圖右下角有兩個小環流，其中左方較大者呈順鐘向旋轉，右方較小者則為反鐘向旋轉。圖上之座標單位為網格編號。