

海洋內波簡介

著者/楊穎堅

臺灣海洋大學海洋學系學士
臺灣大學海洋研究所博士
現任海軍官校海洋科學系副教授

壹、何謂內波

海洋水體的垂直密度是呈現不均勻分佈的，內波運動產生在不同密度的界面上，雖然真實的海洋是連續密度分層(圖1a)，以兩層模式來說明內波波動是學界常用的趨近方法(圖1b)。假設海水上層密度較小，下

層密度較大，在這密度介面上因周遭環境擾動產生的波動稱之為內波，此因密度差異所引發的波動亦時常被設計為玩具，如圖2所示。因密度差異而引發內波現象，就如同就如同空氣與海水面亦是密度介面(但密度差遠較海洋內部大)，風的吹拂即是這一介面的擾動來源之一，其產生的波動就是一般大家所熟知的

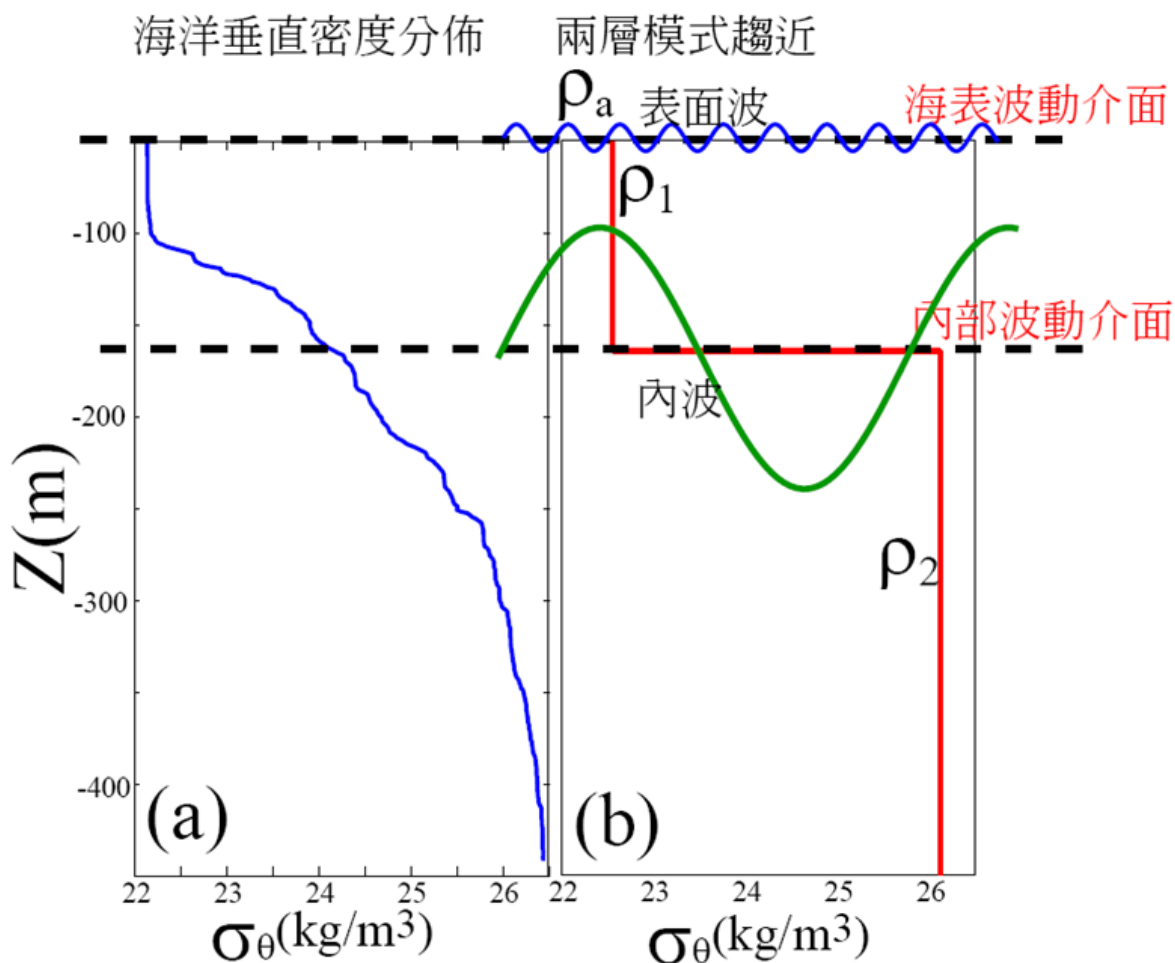


圖1 實際海洋分層與兩層模式示意圖

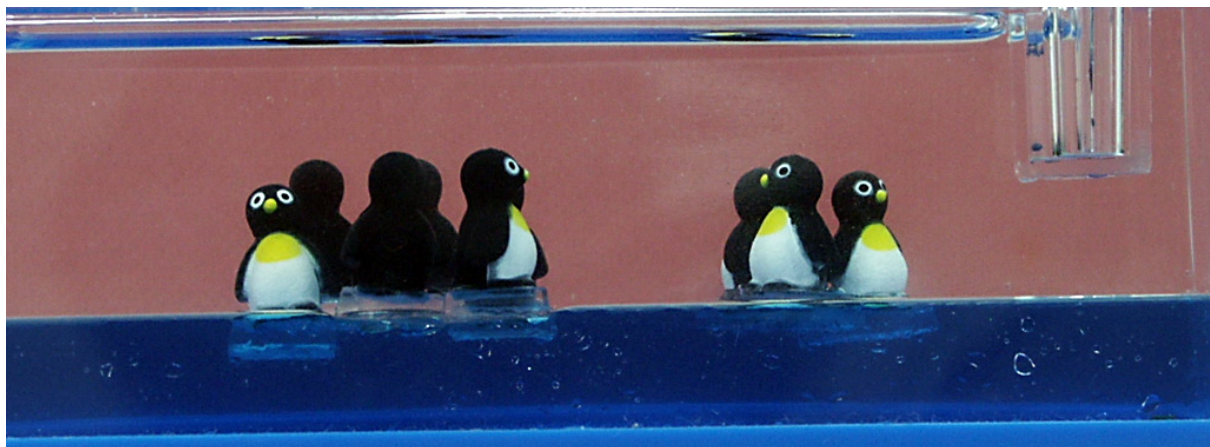


圖2 利用密度差異引發內波之原理所製成的玩具

海表面重力波。海洋內波的能量主要來自風與潮汐，這兩個外力並未直接產生內波，風與潮汐分別產生慣性流與潮流，與突起或淺化地形交互作用而產生內波，稱之為內慣性波 (Internal inertial waves) 與內潮波 (Internal tides)，如圖3所示即是潮流流經海脊，在海脊影響下產生密度面擾動，內潮因而產生，內慣性波週期依緯度不同而有所差異，以北南海附近緯度 21° N 為例，週期約為 33.48 小時，內潮波則可能為全日潮 (24 小時) 或半日潮 (12.42 小時) 週期，內潮波是台灣附近海域內重要的現象，這些週期的內波能量可能再轉成較短週期的內波，此一過程稱之為 Energy cascade，即較長週期 (低頻) 的運動能量往較短週期 (高頻) 運動傳遞的過程，例如盛行於台灣周邊海域 (東海、南海) 的非線性內波 (Nonlinear internal waves)，其週期僅約為 10~20 分鐘。

雖然海表面重力波與內波皆為密度介面波動，但是其基本性質卻有所不同，這些基本性質包括時間尺度、空間尺度與產生的海洋流速溫度等變化。內波的密度介面 (ρ_1, ρ_2) 差異 $\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \approx 0(10^{-3})$ ，表面波介面則為 $\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} \approx 0(1)$ ，兩者尺度相差約 1000 倍，此現象可以把海表密度介面想像成拉緊的橡皮筋，把內部密度介面想像成輕拉的橡皮筋，當對橡皮筋施以初始擾動後，拉緊的橡皮筋會呈現高頻且較小振幅的運動，輕拉的橡皮筋則相對較低頻且振幅較大。一般而言，表面重力波波長為數公分至數公

尺，週期約數秒到數分鐘，振幅小於數公尺，內波波長為數公里到數 10 公里，週期為 10 分鐘到數 10 小時，振幅為數十公尺。在南海的實際量測實驗，非線性內波週期約為 10~20 分鐘，波長為 2~3 公里，振幅可達 150 公尺，半日內潮波週期為 12.42 小時，波長約 90 公里，振幅可達 70 公尺 (Yang et al., 2004)。由此可見表面波與內波在時間及空間尺度上具有明顯的差異。

本節最後要強調，真實的海洋是連續分層，波動介面並非如上所述的單純，但是兩層模式的假設與真實海洋相去不遠，對於內波的理解亦較為直覺，是理想的趨近方式。

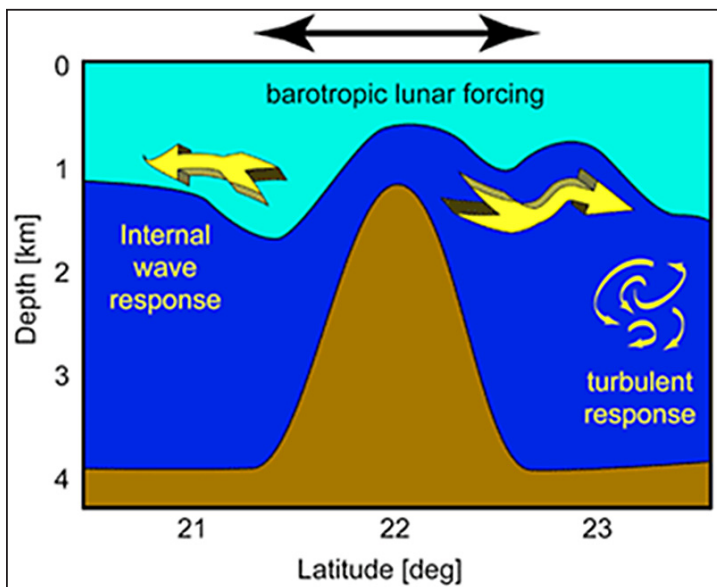


圖3 當潮流經過海脊時對分層擾動產生內波 (取材自 <http://chowder.ucsd.edu/home/>)

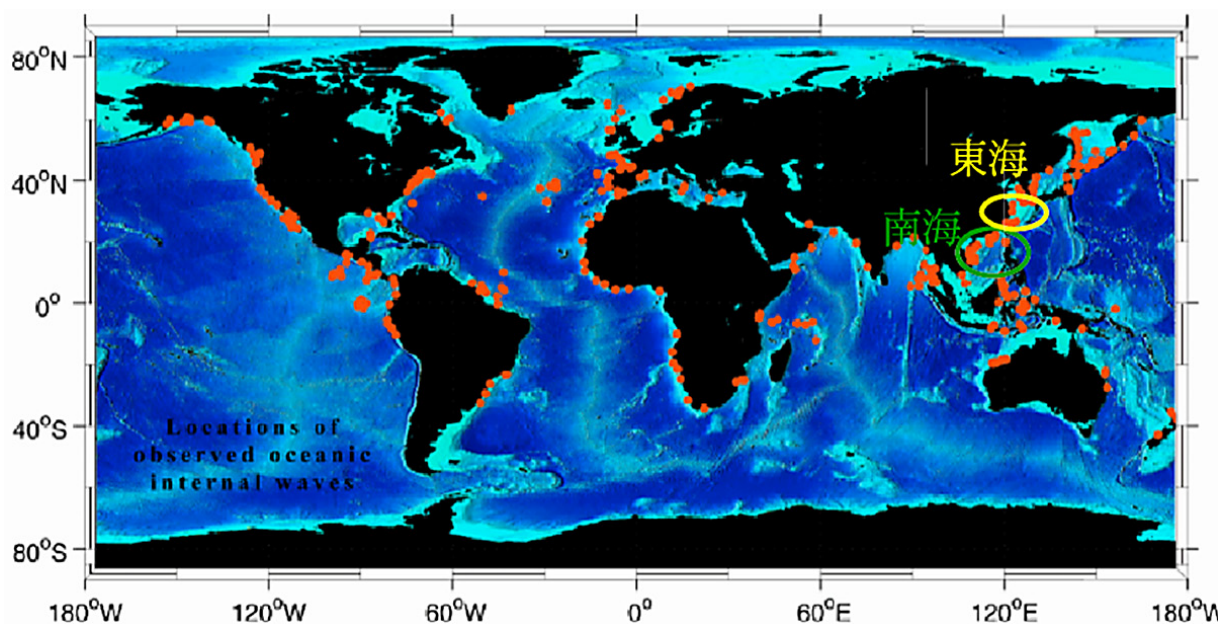


圖4 全球內波分佈圖，紅色點為曾經被衛星影像或場實測證實有內波存在的海域，台灣周遭的東海及南海亦是內波活動頻繁區域。(取材自http://www.internalwaveatlas.com/Atlas2_index.html)

貳、內波的重要性與對海洋環境的影響

圖4為全球內波存在海域的分佈圖，圖中顯示內波為全球皆存在的自然海洋現象，且存在位置皆位於近海岸的大陸棚與大陸斜坡處或者海底突出地形，其中台灣周遭的東海及南海海域皆是內波活躍的地帶。就全球海洋能量觀點來看，內波於海洋內部能量轉換扮演著重要角色，海洋能量來源包括風與天體引潮力等等，當這些能量源源注入海洋時，海洋要如何把這些能量消耗掉以達成平衡狀態？就我們一般所知，這些能量多半形成海流及波浪，最終在近岸及海底因摩擦把能量損耗掉(dissipation)，另一個最有效率的方法即是紊流(turbulent flow)的產生，讓這些能量在到達海岸邊前即消散一部分。依半日潮流流經突出海脊為例，於海脊處必然有紊流產生(圖3)，部份能量已被消耗，假設半日潮流70%能量被轉換成內潮，能量即因而被內潮帶出，內潮行進的過程中會產生不穩定態(instability)，進而形成紊流把能量消耗，此一現象

在大陸斜坡至大陸棚區，因淺化作用更為明顯，很多研究顯示此一機制為重要的能量消耗管道。在部份海域內潮甚至釋放部份能量形成大振幅的非線性內波，而非線性內波亦更有效率地經由不穩定態產生紊流把能量消耗。

除了物理海洋上的重要性，在海洋油井探鑽上，內波產生的流速，流切對鑽井平台的穩定性可構成威脅，亦有石油公司對其做過相關研究。在聲學傳導上，內波產生的溫度場擾動對海洋聲傳有相當影響，是海洋聲傳研究不可忽略的因子，如圖5即示內波影響水中聲音行進途徑。在國防上，其密度差異、水平與垂直流速變化等會影響潛水艇的航行安全。在海洋地質研究上，內波產生的泥沙再懸浮作用是目前亟欲擴展的研究領域。在海洋生物研究上，其湧升作用攜帶上來的營養鹽對於浮游生物與漁場的影響已有相關研究，亦是值得深究的領域(Yang et al., 2004)。

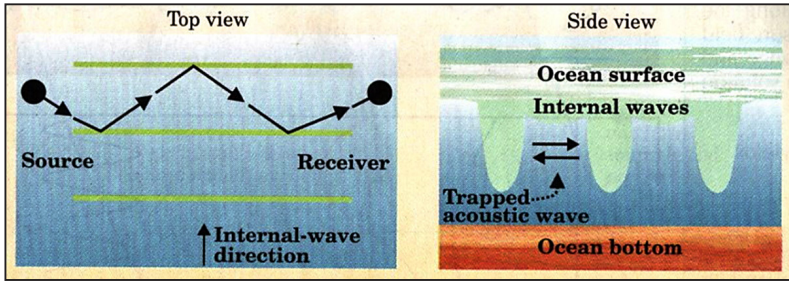


圖5 內波影響水中聲音行進途徑示意圖。(取材自kuperman and Lynch (2004))

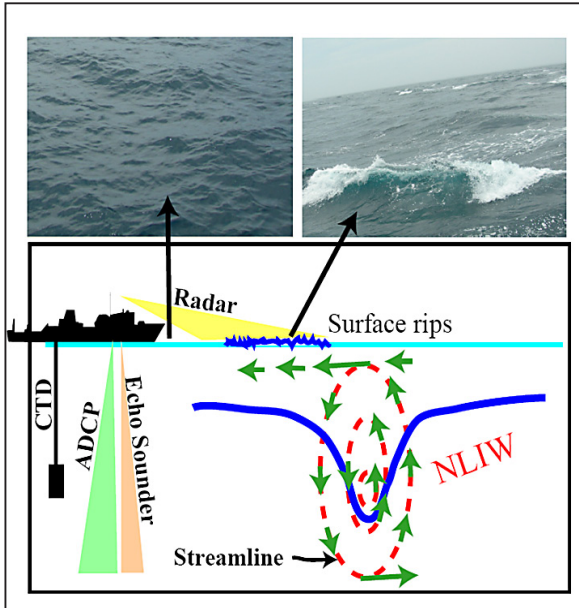


圖6 非線性內波、內波表面訊號及船測方法示意圖。

參、內波造成的海洋變化與其觀測方法

內波造成的速度場與垂直振幅位移變化，以非線性內波為例，如圖6所示，上層流速與波行進方向一致，下層則相反，在波前端是下降流，後端為湧升流，流速變化可達200cm/s，垂直位移可達150公尺。內波的觀測方法一般分為兩種，分別為遙測與現場觀測，遙測方法乃是使用衛星(如合成孔徑雷達影像(Synthetic Aperture Radar, SAR)與可見光影像)，或者利用船載之航海雷達觀測內波表面訊號，航海雷達觀測原理如圖6所示，由於內波前端造成的海表面速度場的空間不均勻分佈，造成海表面波非線性疊置作用產生碎波，這一碎波帶形成海表面的粗糙帶，圖6的海上觀測照片即可顯示出其差異，在內波到達前較為平靜的海面，於內波到達後出現較為粗糙表面，並且出現碎

波現象，此一海表現象可為衛星影像或者海洋雷達所觀測(圖7)，值得注意的是衛星觀測範圍較大，約數百公里，海洋雷達觀測範圍較小，約十數公里。

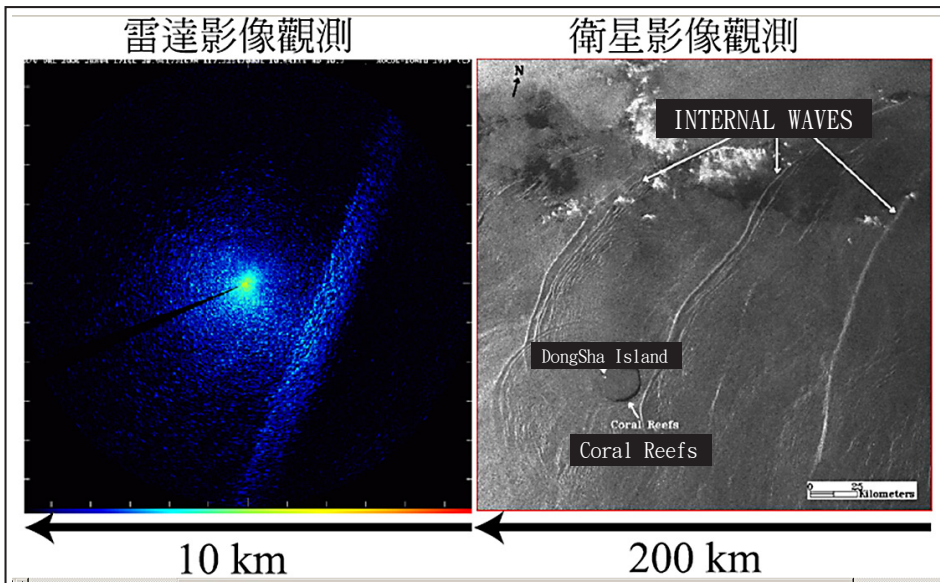


圖7 雷達(左圖)與衛星(右圖)觀測內波。(右圖取材自Hsu et al. (2000))

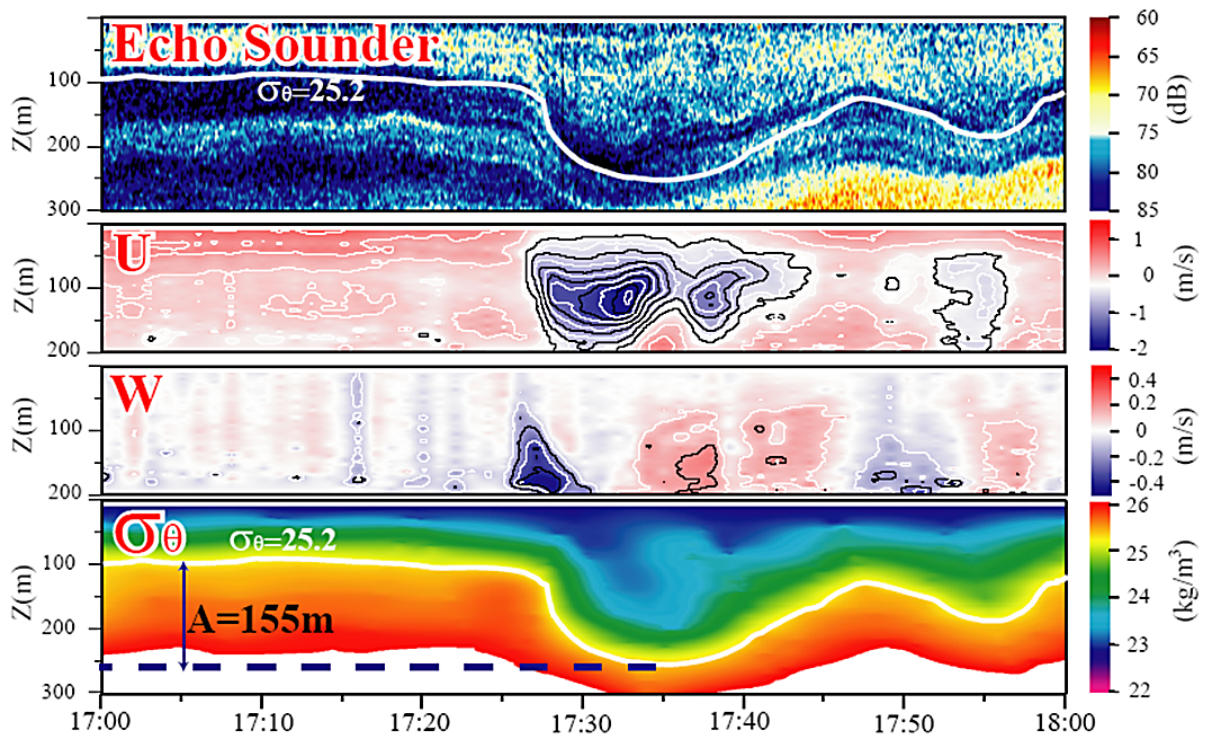


圖8 聲學回跡資料、ADCP的東西方向與垂直方向流速、CTD密度剖面的時間序列圖。

現場觀測使用一般海洋研究船的探測裝備(圖6)，包括都卜勒流剖儀(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)、溫鹽深儀(Conductivity-Temperature-Depth, CTD)、及聲學回跡儀(Echo Sounder)，圖8所示即使用上述儀器所測得之內波的水平流速、垂直流速變化、垂直位移變化。船測方法通常為短期現場觀測，若欲長期觀測，一般皆使用定點錨碇觀測，以ADCP或者溫度壓力等儀器掛於錨碇串，置於海中觀測一段時間後再予以回收。

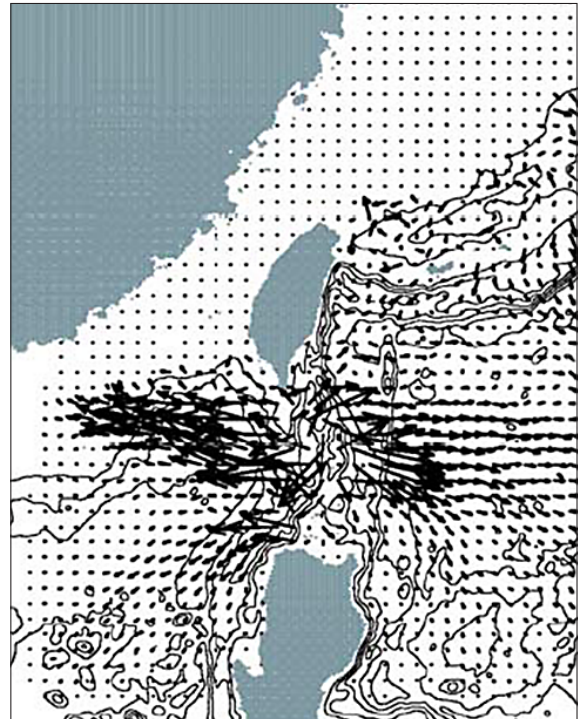


圖9 台灣周遭海域半日內潮能量通量分佈圖。本圖取材自Niwa and Hibiya (2004)。

肆、台灣周遭海域的內波

如圖4所示，台灣周遭的東海及南海亦為內波活動海域，過去研究顯示，主要有半日內潮波與非線性內波兩種，圖9為台灣周遭海域半日內潮波的能量通量 (Energy flux)，顯示在呂宋海峽為半日內潮波能量起點，向兩側傳遞，進入南海以及西太平洋，同時於台灣東北角陸棚區域亦有稍大的能量通量。

圖10為東海與南海的非線性內波衛星觀測分佈圖，東海的非線性內波研究目前多為衛星觀測，現場實測較為缺乏，但由圖10仍可看出非線性內波活動的頻繁。南海的非線性內波現場觀測於近幾年台灣與美國等其他國家共同合作的國際研究計畫中(如：亞洲海域國際聲學實驗，北南海變動研究)，取得不少成果。從呂宋海峽、北南海海盆、到東沙島附近均有船測及錨碇資料，實測資料顯示在東沙島附近的非線性內波為最為強，流速變化可達200 cm/s，垂直位移可達150公尺，相速度為向西 $1.5 \sim 2$ m/s，於海盆與呂宋海峽亦可量測到非線性內波，但較東沙島附近弱。

伍、結論

內波運動於自然界具有相當重要性，尤其台灣周遭海域內波運動活躍，過去幾年已有物理即聲學上的實測資料，但對海洋環境影響的研究較為缺乏，例如海洋生態、海岸飄沙、國防安全的研究評估仍是少人研究的領域，是未來我國海洋研究值得投入的議題。

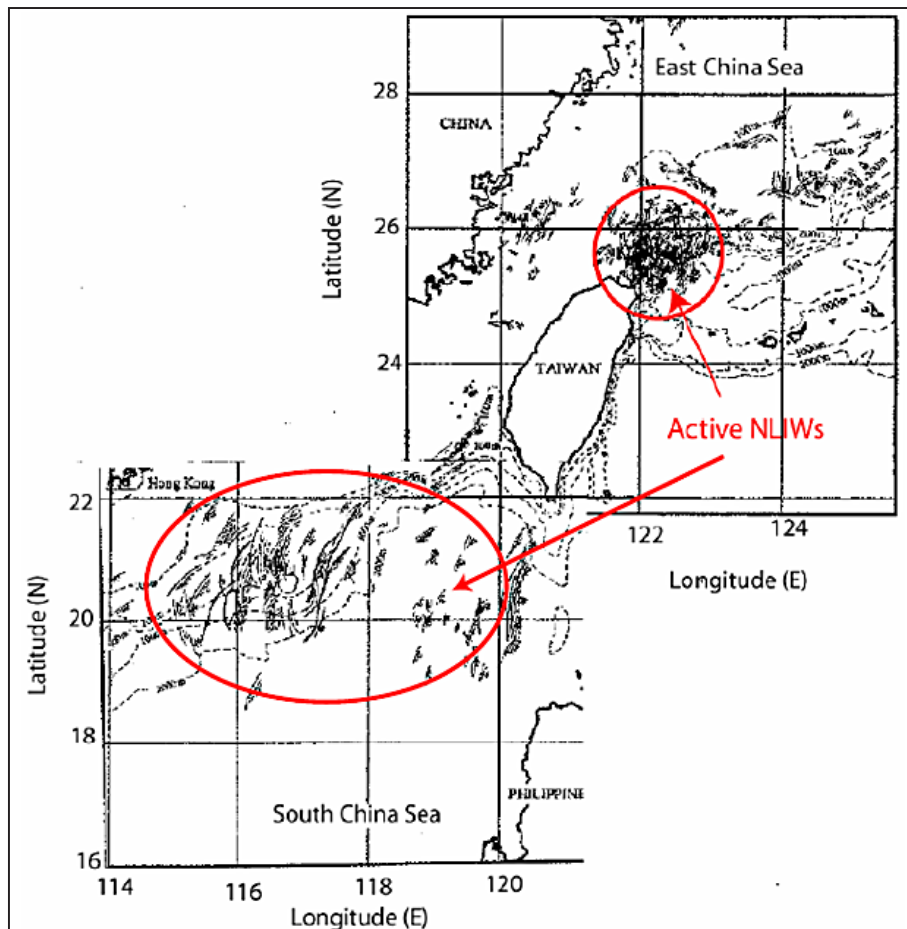


圖10 東海與南海非線性內波的分佈圖。本圖取材自Hsu et al. (2000)。

參考文獻

- 1 Hsu, M.-K., A. K. Liu, and C. Liu, 2000: A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. Cont. Shelf Res., 20, 389-340.
- 2 Kuperman, W. A., and J. F. Lynch, 2004: Shallow-water acoustics. Physics Today, 57, No. 10, 55-61.
- 3 Niwa, Y. and T. Hibiya, 2004: Three-dimensional numerical simulation of the M2 internal tides in the East China Sea, J. Geophys. Res., 109, C04027, doi:10.1029/2003JC001923.
- 4 Yang, Y. J., T. Y. Tang, M. H. Chang A. K. Liu, M.-K. Hsu, and S. R. Ramp, 2004: Soliton northeast of Tung-Sha Island during the ASIAEX pilot studies. IEEE J. Oceanic Eng., 29, 1182-1199.