

東沙東北部內孤立波與高屏海底峽谷內潮 之流場觀測

梁家睿¹ 曾若玄² 蘇峰鈞³

¹ 國立中山大學海洋資源系研究生

² 國立中山大學海洋資源系教授

³ 國立中山大學海洋資源系博士後

摘要

內波與內潮都是因海水密度垂直分層所引發的一種重力波，兩者都可以產生強烈的垂直混合，水平流速的垂直剪切，以及營養鹽的湧升，因此對於海洋工程，生態環境與水中聲波傳遞都有影響。本研究使用船載式和下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Shipboard and Lowered ADCP)與溫鹽深儀(CTD)觀測內波與內潮。分別於 2007/5/3 ~ 5/7 在東沙東北部大陸棚區和 2008/7/5~7/6 在高屏海底峽谷開口處，共兩個航次以海研三號進行。觀測流速與溫鹽性質的垂直分布。結果發現內波下層 370m 最大流速可達到向東 1.5m/s，而上層最大流速發生在約 80m 為向西 0.6m/s，節點約在深度 200m；內潮則是有一個半日潮週期的流速往返變化。

關鍵詞：內孤立波、內潮、東沙島、高屏峽谷、垂直剪應力

Flow Observations of Internal Solitons Northeast of Tung-Sha Island and Internal Tides in the Kao-Ping Submarine Canyon

Jia-Rui Liang Ruo-Shan Tseng* Feng-Chun Su

* Professor, Department of Marine Biotechnology and Resources, National Sun Yat-sen University

ABSTRACT

Internal solitons and internal tides are both internal gravity waves that occur in a stratified fluid. They induce strong vertical mixing, vertical shear of horizontal velocity, and nutrient pumping. As a result, they have significant influence on the ocean engineering, ecological environment, and underwater acoustic propagation. In this study, shipboard and lowered ADCP and CTD were used to observe internal solitons northeast of Tung-Sha Island during 2007/5/3-5/7, and internal tides in the Kao-ping Submarine Canyon during 2008/7/5-7/6 with R/V OR3. The results show that in one event of internal solitons maximum current speed at 370m depth can reach 1.5m/s eastward, while at 80m depth the current speed is 0.6m/s westward, with the node occur at about 200m depth. On other hand, the internal tides in the Kao-Ping Submarine Canyon exhibit strong semidiurnal tidal signals with alternating current velocity in the upper and lower layers.

Keywords: Internal soliton; internal tide; Tung-Sha Island; Kao-Ping Submarine Canyon; vertical shear

一、前言

內波(internal wave)是一種發生在海洋內部的波動現象，是一種重力波，存在於具有分層明顯的

海洋環境，簡單的來說是發生在兩種不同密度的水層界面上。各種類型的內波，其振幅、週期、傳波速度和存在深度都有很大的不同，其中一種很重要的類型，其週期為半日潮或是全日潮者，就是內潮；另一種大振幅、非線性、孤立的波，顧名思義就是內孤立波(internal solitary wave)，其可以在傳遞相當遠的距離而不散失其能量，並且有兩波相碰而不會改變外型及傳遞的特殊性質。

最常見的內潮引發機制是往復的潮流經海脊、大陸斜坡等一些較為崎嶇的地形時所造成的，由於是潮流所激發的，所以會有接近潮頻的頻率，就是所謂的內潮。內孤立波發生的機制也是潮流的漲退潮時流經海脊，因而引發駐波將能量停滯在山後，當潮流轉向後，此山後波擾動會伴隨著相對較慢的潮流運動再次越過海脊，同時擾動區域將會變得較為寬廣，而此擾動的傳遞過程會引發非線性效應，進而產生內孤子(Yang et al., 2004)。內波的能量在整層的海流中震盪，對水體的垂直混合有很大的影響，可將底層較冷的海水和營養鹽帶至上層混合，以促進生物繁殖，除此之外，內孤立波通常伴隨著強大的流切(current shear)，威脅著如石油鑽井台等海洋工程，而內潮或內波都是發生在密度介面中，對水中聲音傳遞也有相對的影響。

南海地理上為擁有廣大的陸棚又是個半封閉的海盆，海域水文複雜，海水分層明顯，此海域是內孤立波相當活躍的一個區域。Yang et al.(2004)研究指出南海可能是全世界最大振幅內孤立波發生區，此地內波的起源可能是來自呂宋海峽附近的地形變化。內孤立波在流速方面，有上下分層的現象，上層之最大流速為向西 240 cm/s，下層最大流速為向東 150 cm/s，節點約在 130~190 公尺之間，大多以第一斜壓模流場(first baroclinic mode depression wave)為主。近年來，南海內孤立波或內潮的研究有越來越受重視的趨勢，本研究想以內孤立波如此特殊的流速變化為切入點，進行探討。

高屏峽谷(Kao-ping Submarine Canyon)陸地河流進入海域擴散到陸棚或深海的重要通道，海流環境受近海潮流及北向黑潮支流或南海暖流支配，海底特殊 S 形地形使流場趨向複雜，而 Wang et al.(2007)觀測發現峽谷中水團移動傳輸的主要機制是潮流的往復震盪；內潮產生的水體垂直舉升達 200m 之多，表示

此海域垂直混合範圍之大，值得深入討論。

二、研究方法

本研究於 2007 年 5 月及 2008 年 7 月分別利用四天、兩天的時間，使用下放式聲學都卜勒海流剖面儀(Lowered Acoustic Doppler Current Profiler, LADCP)及溫鹽深儀(Conductivity, Temperature, Depth Recorder, CTD)再加上船碇式 ADCP(Sb-ADCP)於南海北部陸棚區和高屏峽谷谷口進行兩個航次的觀測。

2.1 內波觀測

本研究利用海研三號於 2007/5/3 ~ 5/7 共四天，在南海觀測內孤立波，因內孤立波的傳播速度快，行進的位置又不固定，只能在定點等待，依靠船上雷達判定，如圖 1 先從位於大陸棚邊緣的第一站開始等待，此站約水深一千多公尺，待完成觀測候，再採用追著內波跑的方式，到第二站進行觀測，以此類推，直到東沙上方陸棚區的第九站結束，此站約水深 200~300 公尺，共完成了 21 個測站，從深水區一路觀測到水深較淺的陸棚區。本研究只取出第三站觀測的結果作為代表。

實驗利用 Lowered ADCP/CTD 觀測內波上分為兩種方法：

1.當內孤立波通過時，將儀器固定深度(約 150~200m)停著不動，等待內波通過後完成觀測，此方法可加以了解其流速場與水文變化。

2.當內孤立波通過時，將儀器重複下放上收，通常可完成一整個內波的垂直剖面，此方法可求得整層海流的流速或物理性質的垂直分布。

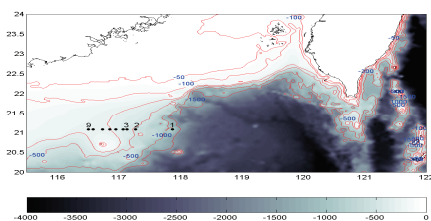


圖 1 南海海域地理位置與測站位置圖

2.2 內潮觀測

相較於內波，內潮的觀測上就為簡單許多，本研究利用海研三號於 2008/7/5~ 7/6 共兩天的航次進

行，因內潮是一種長週期的波動，資料必須為一個長時間觀測內潮的時間序列，所以本研究在高屏峽谷靠近谷口的 A 站(圖 2 北緯 22°21' 東經 120°16') 此站深度約為 600 公尺，同一定點連續下放上收 LADCP 和 CTD 從海面到海底共 15 次，每次下放時間間隔為 2 小時，共 27 小時，藉此收集一個超過一天的時間序列 CTD 和 LADCP 資料。

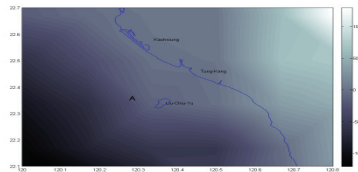


圖 2 高屏峽谷地理位置與測站位置圖

三、結果與討論

3.1 內波

圖 3 為 Sb-ADCP 在第三站(圖 1)所量測到的流速時間序列圖，橫軸為時間、縱軸為深度、顏色代表流速，其流速分東西向流速(U)和南北向流速(V)兩張圖，而在時間 5.71 天(a)和 5.75 天(b)附近各有兩個與一個流速遽增的事件，再根據雷達、EK500 資料與其特殊的流速變化，可斷定此兩事件有共三個內波通過被記錄。此處內波大多由東向西傳所以以再東西向流速(U)的變化最為明顯。

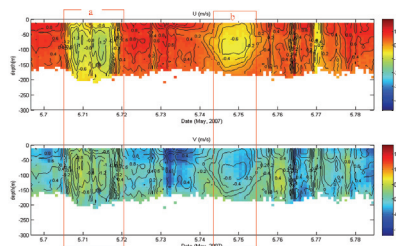


圖 3 第三站的 Sb-ADCP 時間序列圖，a 和 b 為內波通過的事件。

本研究第一種觀測內波方法就是在內波通過發生時將 LADCP 和 CTD 停在水深 150m 處，圖 4 為事件 b 實施此種方法 CTD 量測到的溫度剖面圖，橫軸為位溫、縱軸為深度，整個測站完成約花了一個小時的時間，如圖所示，可先清楚的顯示 CTD 下放上收的軌跡，先下放至 150m 處，從軌跡看出內波過後 CTD 也受內波影響多下放了 10m，再上收至海

面，上收和下放的剖面圖在海面至 40m 來說並無較大的不同，但再往下比較 40m~140m 之間，可看出在內波通過後溫度增加 1~2°C，而在 150m 處溫度更有了約 8°C 的變化的事件(15°C ~24°C)，但詳細的變化情形並無法由此圖了解。

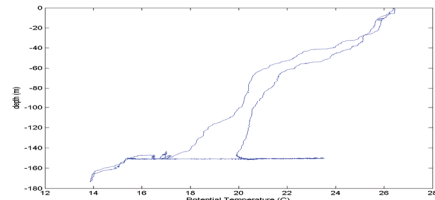


圖 4 第三站內波事件 b，CTD 資料的位溫剖面

故再做出將其事件的時間序列圖為圖 5，橫軸為時間、縱軸為溫度與鹽度，如圖所示，溫度是先從 18°C 遽降至 14°C 後遽增 20°C 再以較慢的速度增至 22.8°C，由此變化可推測內波先將底部較冷的海水帶至上層，再把上層溫暖的海水倒至下層，鹽度則是先減小至 34.55 後回到 34.65，再減小至 34.45 再回復到 34.63 的位置，表示有兩次先與低鹽的水侵入後再與高鹽混合，表示溫度與鹽度都有垂直混合變化。而溫度方面經過此事件過後還是上升了 2°C，顯示上層水向下運動在 150m 處所佔的比例較高才導致溫度升高。

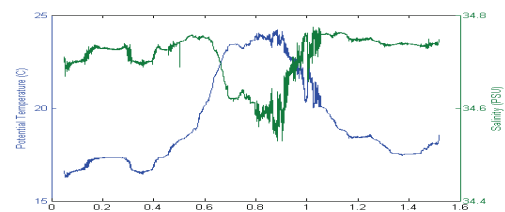


圖 5 第三站在深度 150m 時，位溫和鹽度的時間序列圖

另一方面，圖 6 為事件 a 的溫度剖面圖，此事件是採取第二種量測方法，快速下放與上收，下放為溫度較低那條曲線，相比之下發現，在短短不到 15 分鐘之間(下放與上收)，在深度 100m~220m 之間，有著 6°C 之多的變化。

圖 3 中的事件 B 為圖 4 中所量測到的內波，其中在 30m~120m 之間為流速 0.6m/s 最大向西流場，深一點的流場就如圖 7 所示，此圖為 LADCP 觀測的資料，向下最多可延伸至 350m，而 B 事件發生的時間為 2007 年 5 月 5 日 17:45~18:10(所對應圖 7 的時間 17.8 小時~18.1 小時之間)，當中在 150m 以

上有一向西流場，最大約為 0.6~0.7m/s 發生在靠近 100m 處，與圖 3 相符合，而 150m~300m 之間為反向的向東流場，最大發生在深度 300m 處可達到 1.3m/s 左右，節點約在深度 160m。

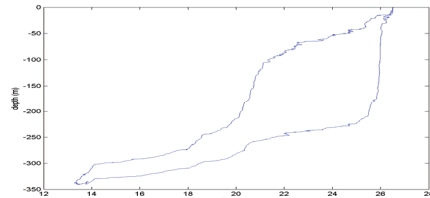


圖 6 第三站內波事件 a 發生時，CTD 所量測到的流速剖面

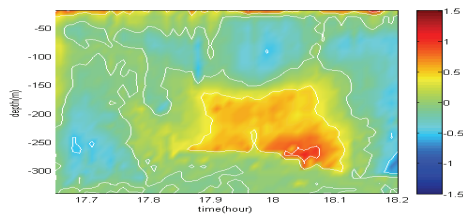


圖 7 第三站 LADCP 流速分量 U 時間序列圖

此結果與楊(2004)在南海觀測內波的結果相符，雖然是上下層流速相反的第一斜壓模流場，但當上層流速達最大的時間點，下層流速並不是最大，也就是整個流場結構並不是相反向(out of phase)，而是上下層流速的向位移(Yang et al., 2004)，此結論由圖 8 事件 A 的流速剖面圖更清楚顯見，紅線為 U；藍線為 V，分量 U 的下層最大可

達到向東 1.5m/s，而上層最大流速發生在約 80m 為向西 0.6m/s，節點約在深度 200m。這可能與當地特殊的陸棚地形有關。

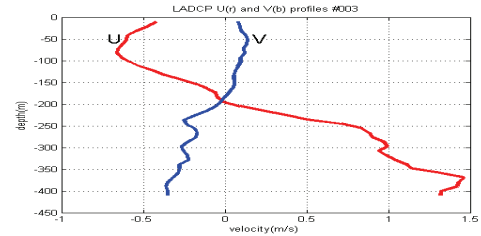


圖 8 第三站內波事件 a 流速剖面圖

3.2 內潮

同樣的，先從物理性質對內潮進行討論，圖 9 為取用 CTD 資料分別以位溫、鹽度及位密度(縱軸)作等值線圖，橫軸為時間，可清楚的看出 A 站各物理量(位溫、鹽度及位密度)的等值線都有波動，其週期也就是波峰到波峰之間的間距約為 12 小時，發生較明顯的區域約再 70m 以下，由此可判定是一個半日潮週期的內潮，而波動較密集的深度範圍約在 50m~250m，底層的波動愈來愈稀疏，而較密集的区域就是溫(密、鹽)度躍層的範圍。也可從圖 10 中看出，圖 10 為每一測站 CTD 的各物理性質(位溫、鹽度及位密度)的資料剖面圖，縱軸為深度、橫軸為其物理量，密(溫、鹽)度躍層意旨密(溫、鹽)度變化較大的區域，如圖所示其變化較大、斜率較大的深度範圍同是 50m~250m 之間，特別是鹽度和密度圖上特別明顯。

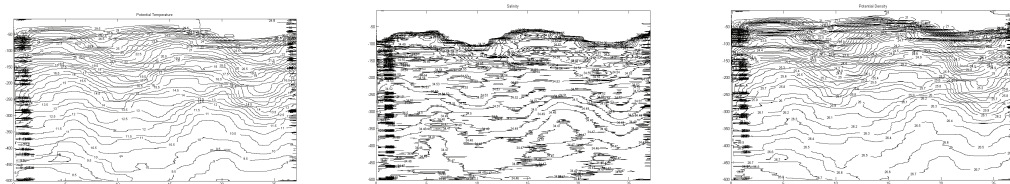


圖 9 為高屏峽谷 CTD 時間序列資料分別是位溫、鹽度和位密度

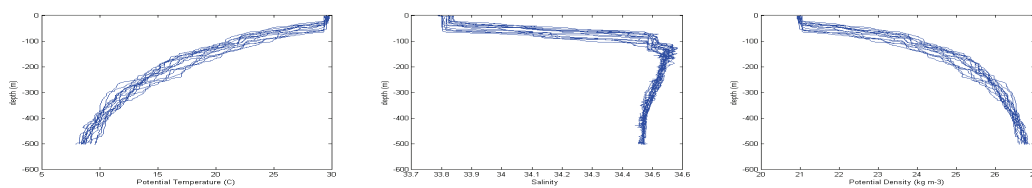


圖 10 為高屏峽谷位溫、鹽度和位密度的剖面圖，CTD 資料

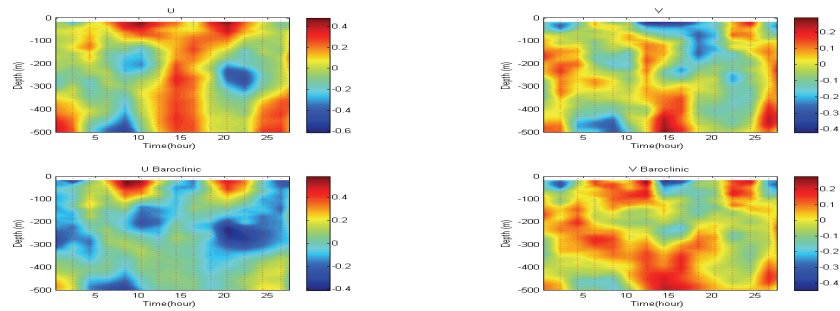


圖 11 高屏峽谷 LADCP 所量測到的 U、V 流速剖面圖，下兩張為推算出的斜壓潮 U 和 V 流速剖面圖

圖 11 為 LADCP 流速資料的時間序列圖，縱軸為深度，橫軸為時間，顏色則代表流速。可清楚的顯現出流速也有的半日潮週期，而且是流速完全相反的變化，特別是東西向的流速(U)，會有這樣的情形是 A 站位於高屏海底峽谷谷口，因地形的關係，此處的行爲東西走向，流場也都為東西流，所以東西向流速(U)較為明顯，南北向流速變化不大。而本研究將所量測到的流場分成正壓潮和斜壓潮的組成，正壓潮的估算為整層深度的流速平均，斜壓則是扣除正壓之後的值。圖 11 下面兩張為斜壓的時間序列，也可清楚的從東西向流速(U)看出半日潮週期的流速反向變化，約以 0.1m/s 為變化間隔。

圖 12 為正壓流速時間序列圖，實線為東西向流速(U)、虛線為南北向流速(V)，正壓流速也是一個往復的變化，東西向的流速(U)最大約為 0.2m/s~0.24m/s 之間。

圖 13 為行徑向量圖，12:00 從原點出發，行徑的軌跡有點類似繞圈，最後有一個很弱的東南向的平均流(0.05m/s, 120°)。

浮力頻率(Brunt-Väisälä frequency) N 是攸關於海水垂直結構穩定息息相關，其公式如下：

$$N^2 = -g (dp/dz)/\rho_0$$

式中 ρ_0 為參考密度、g 為重力加速度，這兩項為常數，所以表示 N 為密度的垂直變化，N 較大的區域就是所謂的密度躍層如圖 14，而圖上另一條粗線 shear 的計算公式如下：

$$\text{Shear} = du/dz$$

意旨水平向流速 U 在垂直方向的變化，如圖所示，shear 較大的區域好也落在密度躍層中，由此特性可了解，此為第一模內潮(first mode internal

tide)(Park, 1986)。

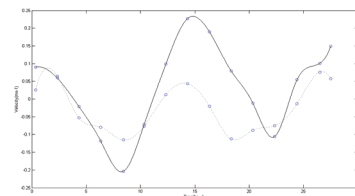


圖 12 正壓潮流速時間序列圖

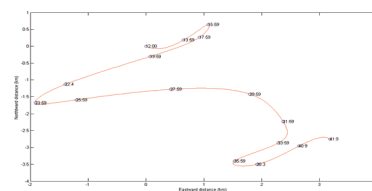


圖 13 行徑向量圖(Corresponding progressive vector diagram)

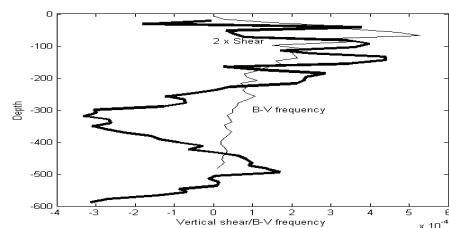


圖 14 剪應力(粗線)和浮力頻率(細線)剖面圖

四、結論

本研究將內波與內潮的觀測資料利用位溫、鹽度及位密度等物理性質和流速方面個別做比較，其結論如下：

1. 內波事件 b 在 150m 處，溫度變化是先從 18°C 遽降至 14°C 後遽增 20°C 再以較慢的速度增至

22.8°C，，由此變化可推測內波先將底部較冷的海水帶至上層，再把上層溫暖的海水倒至下層，表示內波能帶來很強的垂直混合作用，而內潮的也可從各物理量的變化觀察到。

2. 內波事件 a 下層最大可達到向東 1.5m/s，而上層最大流速發生在約 80m 為向西 0.6m/s，節點約在深度 200m。雖然是屬於第一斜壓模流場，但並非上下層流速完全相反的，推測與當地特殊地形有關。
3. 內潮則有一個半日潮週期的流速往返變化，而流速推算的 shear 較大的區域好也落在密度躍層中，此為第一模內潮(first mode internal tide)。
4. 內波的事件 a 在深度 100m~220m 之間變化量最大；內潮波動較密集的深度範圍約在 50m~250m，表示兩者同屬於發生在斜溫層的位置，物理性質變化相當類似，最大的差異為週期上有極大的不同，內波的週期為一個孤立波通過的時間，約為十多分鐘至半小時不等；內潮的週期為當地潮流的週期，半日潮或全日潮等。

謝誌

承蒙國科會經費編號 NSC95-2611-M-110-009-MY3 之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. 張育嘉(2001)高屏峽谷與附近流場之觀測，國立中山大學海洋資源系碩士論文。
2. 丁錡樺(2008)呂宋海峽內潮及其強化生地化通量之數值研究，國立中央大學水文與海洋科學所碩士論文。
3. Liu, A.K., Ramp, S.R., Zhao, Y. and Tang, T.Y. (2004) "A Case Study of Internal Solitary Wave Propagation During ASIAEX 2001," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 4.
4. Park, Y.H., Fudab, J.L., Duranda, I. and Garabatoc, N.C.A (2008) "Internal tides and vertical mixing over the Kerguelen Plateau," *Deep-Sea Research II* 55, pp. 582-593.
5. Wang, Y.H., Lee, I.H. and Liu, J.T. (2008) "Observation of internal tidal currents in the Kaoping Canyon off southwestern Taiwan," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi:10.1016/

j.ecss.2008.07.016.

6. Yang, Y.J., Tang, T.Y., Chang, M.H., Liu, A.K., Su, M.K. and Ramp, S.R. (2004) "Solitons Northeast of Tung-Sha Island During the ASIAEX Pilot Studies," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 29, No. 4.