

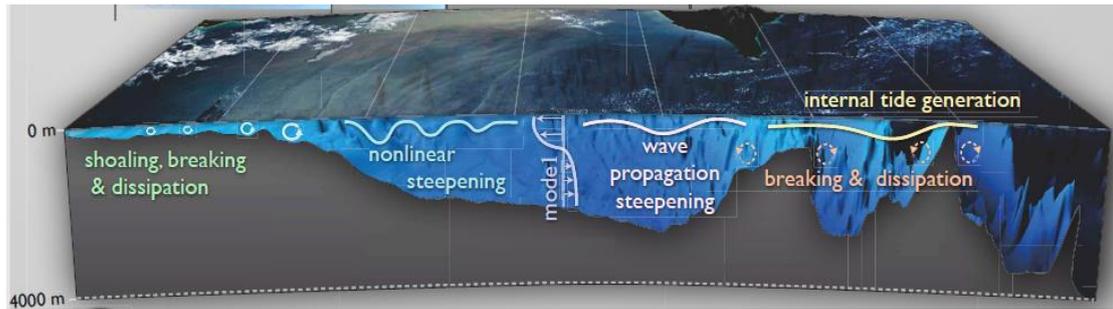
南海內波造成的折翼事件？

王玉懷 (yhwang@nsysu.edu.tw)

國立中山大學 海洋系

溫馨感言：我心目中的劉康克(KK Liu)教授是一知名學者，學識淵博、做事嚴謹。在海科中心(NCOR)他曾是我的主任，我受惠最大、印象最深的勉勵是：「作為一個好的科學家，至少要有兩篇文章在外面轉」，投稿審核修改，是冗長與耗費心力的過程，KK的勉勵，無疑的是一盞常存的明燈。最欽佩他主持國際會議時的功力，遊刃有餘、面面俱到。劉康克教授對台灣海洋界的貢獻及他的待人處事，汪東平教授有一貼切回憶：「KK and I have crossed paths many times: Tsinghua, KEEP, NCOR, and NCU. His leadership in KEEP and NCOR has shaped the ocean science in Taiwan. On a personal note, my wife and I always have fond memory of him - he is gentle, unassuming, and with a loving heart. We will miss him.」。

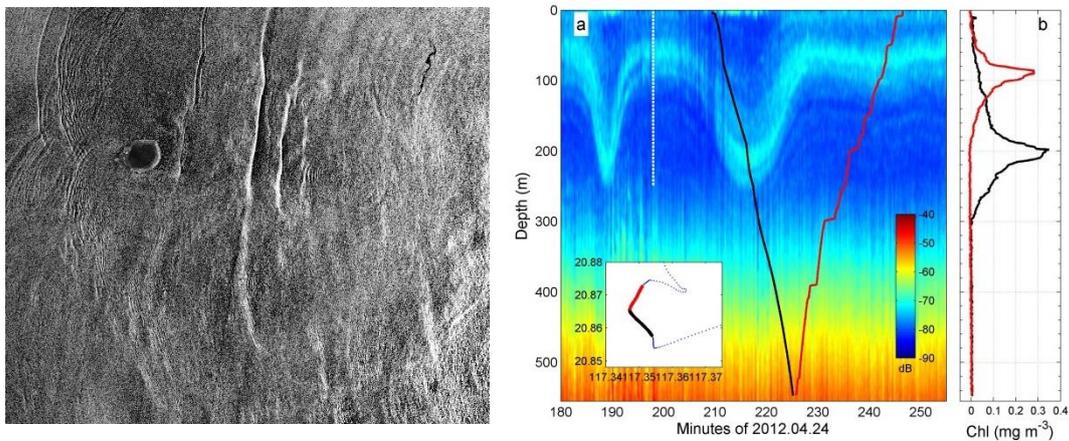
南海內波的研究，近二十年有很大的進步¹，包括較早期的衛星影像分析²⁻³，研究船水文探測⁴，各式的儀器串錨定⁵⁻⁶，漂浮式儀器觀測⁷，數值模擬⁸⁻⁹，到近期的自航式儀器¹⁰等。目前的認知是，內波起源於巴士海峽(圖一)，因潮流受蘭嶼海脊及恆春海脊的作用，產生內潮(internal tide)。內潮向西傳播進入南海，受非線性作用及海水分層強度的變化等之影響¹¹，波形變陡，逐漸演化成孤立內波(internal soliton)，當內波受陸棚淺化效應，單一的孤立波進一步演化成內波群，在東沙海域，一群內波可包含十幾個小孤立波。內波振幅大小，與原始驅動力(大小潮)及海水分層強度等有關；當內波到達淺水區，波感受到海底時(波高與水深之比約0.5)，會由下沉型(depression)波形轉變成上舉型(elevation)波形¹²。通過東沙島時，內波有繞射現象，兩個波群在東沙環礁西方會合，繼續向西北進行，最後因混合擴散等作用而消失不見¹³。



圖一 內波起源到消散在通過南海的示意圖¹。

內波的樣貌

依據衛星合成口徑雷達所拍攝的影像，內波的波峰線可達 200 公里，如圖二東沙附近之 ASAR³ 影像 (2004/6/22)。由多年水文觀測之分析整理，內波通過的時間約數十分鐘，振幅最大的超過 200 公尺¹，基本原因是內波介面為水下的密躍層，上下密度差很小，約僅差千分之五，當產生擾動後，垂直方向的重力回復力小，垂直方向之移動就很大，相對於表面波，海氣密度差約一千倍，所以當風浪產生後，重力回復力使波高只能長到數米高。內波行進速度緩慢，也因受密躍層上下密度差小所侷限，每秒約 1-3 米。圖三為觀測到的典型內波，位置在東沙東北東方 48 公里，水深 600 米處，由 EK60 影像顯示，內波介面約在水下 70 米，此下沉型內波振幅約 180 米，內波通過的時間約 10 分鐘，若以每秒 2 米速度估計，此內波東西向的寬度約 1200 米。



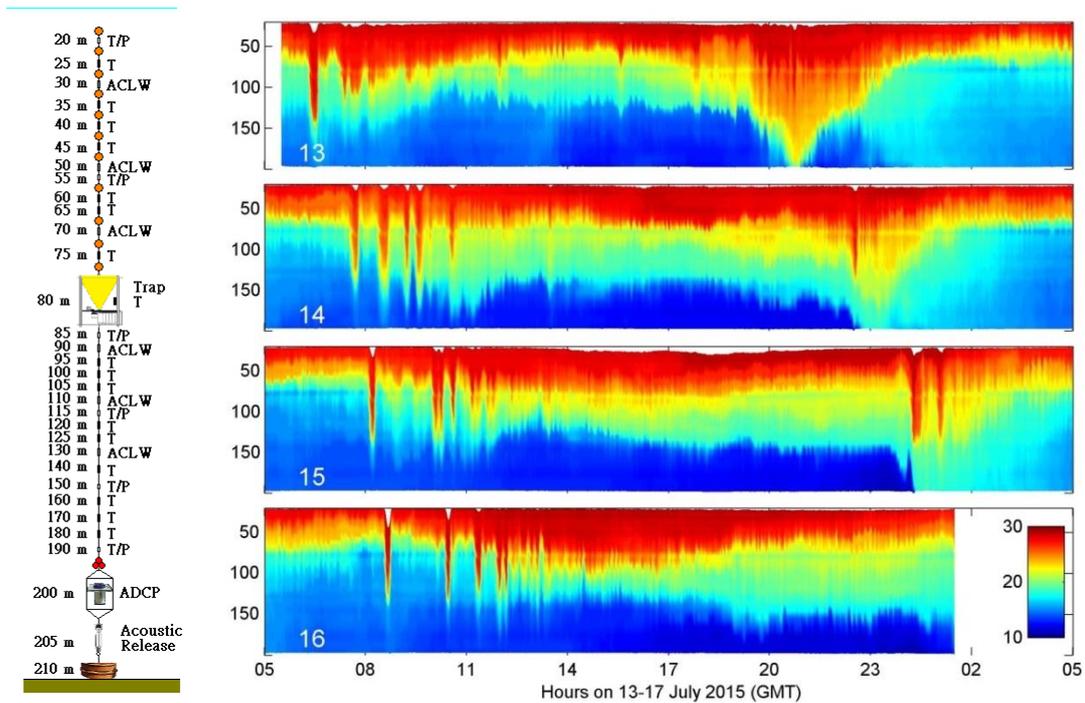
左：圖二東沙附近之 ASAR 影像。右：圖三 EK60 觀測到的典型內波。

圖三(a)左下插圖為航跡圖，海研三號於 2012/4/24 前往東沙途中，發現水面有巨型內波波紋，EK600 也顯示有一下沉型內波。隨即要求停船(途中白色垂直點線)，等內波前緣到達時，下放 CTD 以探測水文特性，很幸運的，儀器下放時(黑線)剛好通過內波波谷，之後，按標準作業程序 CTD 繼續下放到離底 10% 水深，即水深 540 米時，開始上收(紅線)，此時右舷受 CTD 拉力，研究船由漂向西北改成漂向東北。水文資料還顯示一重要資訊，在海洋中，葉綠素最大值通常在混合層底部，因為此處有來自上層的光線、又有海洋下層的營養鹽補充，如圖三(b)紅線所示，在這個例子是在水下 90 米，當下沉型內波通過時，如圖三(b)黑線所示，葉綠素最大值，被下推移到水下 200 米。意即，內波可將整個水團(南北向 100 公里、東西向 1 公里、垂直 100 公尺)，在約 5 分鐘時間內，向下移動 110 米，之後再送回原來的位置。

內孤立波的錨定觀測

海研一號 2015/7/12-7/18，在東沙海域探測，任務之一是下放一組錨定溫度計串，如圖四，以兩個火車輪(約 500 公斤)當沉錘，上部以 11 個浮球(300 浮力)將一條四分錨繩拉直，中間每隔 5 米設一個溫度計(T)，有些是溫壓計(TP)，用以校正錨繩傾斜時儀器的正確水深，儀器串布放位置在東沙環礁東側離岸約 5 公里，水深 210 米處。經過約四天觀測，成功回收錨定串，資料經處理後，得到溫度垂直剖面分布，如圖五所示，從 7 月 13 日到 16 日，每天早上 6-11 時(GMT)，都觀測到一個內波群，每群由 3-5 個內孤立波所領頭。這四天早上的內波群，第一個內孤立波到達時間，每天約晚一小時。7/13 第一個內孤立波 6am 到達，7/16 第一個內孤立波 9am 到達，雖然不是很準時，其特性是正確的。這現象早在十幾年前即被報導^{5,14}，並歸納 a 波群及 b 波群兩種，b 波群是指每天到達的第二群內波，如 7/15 半夜(GMT)到達的群波。這兩種波的產生原因，與潮流在呂宋海峽海底山的作用有關，數值模擬⁹與觀測^{5,14}的說法解釋略有不同，這點有待進一步釐清。此外，波群內的孤立波的數目也不同，7/14 a 波有 5 個，往後兩天，

大孤立波群衍生更多較小的孤立波。這次觀測資料，也解答一個常被問到的一個問題，內波可以預測嗎?答案是:是的，可以預測，依潮汐及海洋分層等條件進行預報，但準確度如何?以 7/14 第一個內孤立波到達時間來說，誤差可能達 1-2 小時。

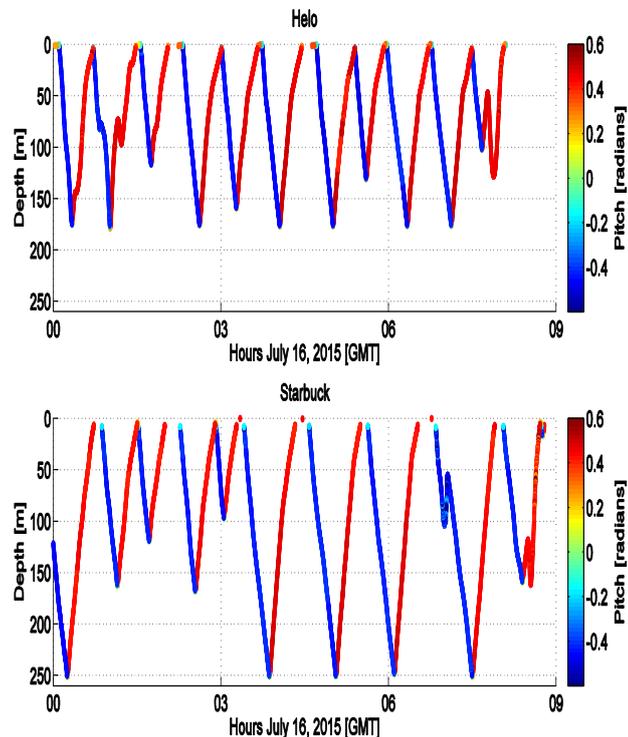


左: 圖四 錨定溫度計串示意圖。右: 圖五 溫度垂直剖面分布四天觀測資料。

內波產生的折翼事件?

這航次的另一項實驗，是內波紊流觀測，由美國木洞海洋研究所(WHOI)支援儀器及技術人員，我們共施放了兩組水下滑翔儀(Sea Glider, Slocum)，分別是 Helo 及 Starbuck，是幽默的以科幻影集(Galacticwar)戰機駕駛員(Viper pilots)命名，儀器上加載紊流儀(Microrider)，如圖六在南海作業照片，當然量測到內波造成紊流巨量的混合作用。在 7/14-16 兩天半的觀測中，有兩件有趣的事。在 7/16 早上，Helo 開始表現不正常，原本設定是下潛到水下 150 米，會由浮力及前後位置之控制，使儀器頭朝上以浮到海面，進行回報，約每小時一次，但當天早上 Helo 卻遲遲沒有上線，氣氛顯得凝重，擔心儀器落海遺失，當日中午它突然出現，讓

大家鬆了一口氣，我們即決定提早回收，當收上甲板後，發現右翼折斷，這是非常不尋常的現象，原因至今尚不明白，我們很留意海面的狀況，發現附近並沒有船隻航行，也許是撞到海中漂浮物，也可能是內波剪力造成的，因為據以往觀測經驗，內波上層水向西流可達每秒 2 米，隔 30 米的下層，海流可向東可達每秒 1 米以上，這中間海流急速變換的垂直剪切力，不可輕視。由 Helo 上的深度、傾角紀錄(圖七)，傾角向下時儀器下潛，傾角向上時上浮，但卻常被內波上推或下擠，例如，7/16 早上 8 點，Helo 在下潛過程中，傾角突然被改變，整台儀器在 10 分鐘內，被上舉了 60 米，之後 10 分鐘，維持傾角向上角度的狀態，整台儀器被下推 90 米。依時間位置研判，這現象是圖五中 7/16 早上 9 點，第一個內孤立波造成，當時 Helo 位於東沙環礁東北方約 20 公里處，這個內波在該淺水區已經在變形中，由下沉型轉變成上舉型¹²，這個不預期的急遽衝擊，可能是造成折翼的原因。



左：圖六 水下滑翔儀(Sea Glider)在南海作業照片，下圖為右翼折斷，與未斷的左翼比較。右：圖七 水下滑翔儀 7/16 上午的潛航紀錄，橫軸為時間，縱軸為深度，色階為傾角，藍色為下潛時傾角向下，紅色為上升時傾角向上。

謝誌

感謝洪佳璋教授提供共用海研一號船期的機會，及全體船員的海上作業協助。

Dr. Louis st Laurent 團隊的水下滑翔儀及海上操作。

參考文獻

1. Alford et al. (2015) The formation and fate of internal waves in the South China Sea. *Nature*, 521(7550), 65-69.
2. Hsu MK, Liu AK, Liu C (2000) A study of internal waves in the China Seas and Yellow Sea using SAR. *Continental Shelf Research* 20(4-5),389-410.
3. Hsu MK, Wang CT, Liu AK, Chen KS (2010) Radar Observation of Southeast Asia-SAR Atlas, ISBN 978-986-85689-4-5 (in Chinese with English acronyms).
4. Orr MH, Mignerey PC (2003) Nonlinear internal waves in the South China Sea: Observation of the conversion of depression internal waves to elevation internal waves. *Journal of Geophysical Research* 108(C3) 3064.
5. Ramp et al. (2004) Internal solitons in the northeastern South China Sea. Part I: Sources and deep water propagation. *IEEE Journal Oceanic Engineering* 29(4) 1157-1181.
6. Alford et al. (2010) Speed and evolution of nonlinear internal waves transiting the South China sea. *Journal Physical Oceanography* 40, 1338–1355.
7. Centurioni LR (2010) Observations of large-amplitude nonlinear internal waves from a drifting array: instruments and methods. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27,1711-1731.
8. Chao, SY, Ko DS, Lien RC, Shaw PT (2007) Assessing the west ridge of Luzon Strait as an internal wave mediator. *Journal of Oceanography* 63, 897–911.
9. Chen, YJ, Ko DS, Shaw PT (2013) The generation and propagation of internal solitary waves in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research* 118,

6578–6589.

10. Rainville L, Lee CM, Rudnick DL, Yang KC(2013) Propagation of internal tides generated near Luzon Strait: Observations from autonomous gliders. *Journal of Geophysical Research* 118, 4125–4138.
11. Li Q, Farmer DM (2011) The generation and evolution of nonlinear internal waves in the deep basin of the South China Sea. *Journal of Physical Oceanography* 41, 1345–1363.
12. Fu KH, Wang YH, St Laurent LS, Simmons H, Wang DP (2012) Shoaling of large-amplitude nonlinear internal waves at Dongsha Atoll in the northern South China Sea. *Continental Shelf Research* 37(C) 1-7.
13. St Laurent LC, Simmons HL, Tang TY, Wang YH (2011) Turbulent properties of internal waves in the South China Sea. *Oceanography* 24, 78–87.
14. Ramp, SR, Yang YJ, Bahr FL (2010) Characterizing the nonlinear internal wave climate in the northeastern South China Sea. *Nonlinear Process in Geophysics* 17, 481–498.