

從中共潛艦「掉深」 看海洋密躍層對潛艦潛航的重要性

毛正氣、崔怡楓、劉偉峰

提 要：

- 一、中共潛艦去年(2014)4月執行任務時，發生「掉深」航安事件，但是這專業潛艦術語相信很多人未有所聞，當然更不瞭解這些名詞的真正海洋物理意義何為？想要瞭解潛艦為何失重——也就所謂的「掉深」，就必須知道海水密度(溫度)垂直分布情形。
- 二、根據相關網路報導，研判中共潛艦去年在執行任務時發生「掉深」的地點是臺灣西南海域東沙島附近；再者，大海裡單獨存在水平方面的「海水密度驟變」，是太不可能的發生的，從物理海洋學家觀點來看，造成潛艦掉深失重的原因是內波(Internal Waves)。
- 三、臺灣周邊海域四季都有密躍層，而密躍層正是形成內波的主因。臺灣西南海域常年存在的深層密躍層，加上潮汐的推動與地形變化，巨型內波自然生成；加上行進過程的淺化效應，更加劇內波的振幅與速度，同時亦將內波提升至中層海水面(約300公尺)，造成潛艦失重。身為海軍軍官的我們，對此不可不知。

關鍵詞：掉深、內波、密躍層、溫躍層、潛艦航安

壹、前言

2014年9月3日，一則「鳳凰網」網路新聞：「昨日(9月2日)中共中央軍委海軍給372潛艦記一等功慶功大會在南海艦隊某潛艦支隊禮堂舉行……」¹，9月11日另一則網路新聞—環球軍事：「372艦掉深時，我就

在艦上」²，這兩篇網路新聞引起作者的興趣，並開始研究何謂潛艦「掉深」，和臺灣周邊海域何處是潛艦容易「掉深」。三個月後，我國報紙聯合報新聞網於12月17日刊出「陸潛艦遇斷崖『掉深』，3分鐘穿越生死線」³；12月17日直播港澳台更在電視上討論此議題⁴；中時新聞網於12月18日刊出「

註1：鳳凰網，「南海艦隊立功潛艦處置的是什麼重大險情」，資料來源：<http://news.sina.com>，2014年9月3日03:20。

註2：環球軍事：<http://mil.hi.huanqiu.com/posts/view/998>

註3：聯合報新聞網，<http://udn.com/NEWS/BREAKINGNEWS/BREAKINGNEWS4/9136181.shtml>

註4：直播港澳台，「海軍372潛艦遠航訓練曾遭遇掉深險情」，2014年12月17日，<https://www.youtube.com/watch?v=T4RmLFLGP4s>

372潛艦遇『海中斷崖』，3分鐘搏命」⁵，國內相關單位才開始注意到，潛艦在水中航行的危險性。

原來新聞背後是這樣的；2014年4月初，隸屬中共南海艦隊的一艘基洛級(Kilo)的潛艦在大洋中，以數百公尺的深度潛航時，突然遭遇海水密度驟變，潛艦失去應有的浮力而發生下掉的情況。當時潛艦1分鐘內掉深10公尺，該艦意識到這是突發的異常掉深，雖做了相關作為，但效果不大；第4分鐘已掉深度30公尺；第5分鐘掉深度已達40公尺；6分鐘，潛艦已經掉深達49公尺，艦體開始因周遭海水巨大水壓而發出異響，主推進電機艙的高壓海水管路破裂，大量海水噴入艙內。此時潛艦已經大量進水且失去推進，導致潛艦繼續掉深，約在開始掉深的第8分鐘，排除壓載水櫃以及損管堵漏產生效果，潛艦在掉深度達70.6公尺時終於停止掉深並開始上浮。潛艦終於在開始掉深之後的第14分鐘，於夜色中浮出水面。中共有關當局為了獎勵該艦官兵處置得宜、保存潛艦與人員的安全，而對該艦指揮官與所有官兵的獎勵，當然也趁機告訴全世界：中共潛艦部隊訓練精良，就算遇到險惡的海洋環境「海中斷崖」之稱的內波等危急狀況，一樣能克服。

但是這些專業潛艦術語「掉深」、「海中斷崖」，相信很多人未有所聞，當然更不瞭解這些「名詞」的真正海洋物理意義何為？海洋並不如我們想像的平靜，真實的海水就像一層一層的千層派一樣，有著不同的溫度與壓力，而在溫度、鹽度和洋流影響下，

在同一深度不同地點，海水密度和溫度會有所不同，且存在影響潛艦航行安全與聲納使用效能的「密躍層」，想要瞭解潛艦為何失重——也就所謂的「掉深」，就必須知道海水密度(溫度)垂直分布情形。再者，大海裡單獨存在水平方面的「海水密度驟變」，是太不可能的發生的，而從物理海洋學家觀點來看，是內波(Internal Waves)所造成的水平方向「海水密度驟變」。再者，這艘隸屬中共南海艦隊的潛艦，是在哪裡遇到「海中斷崖」？

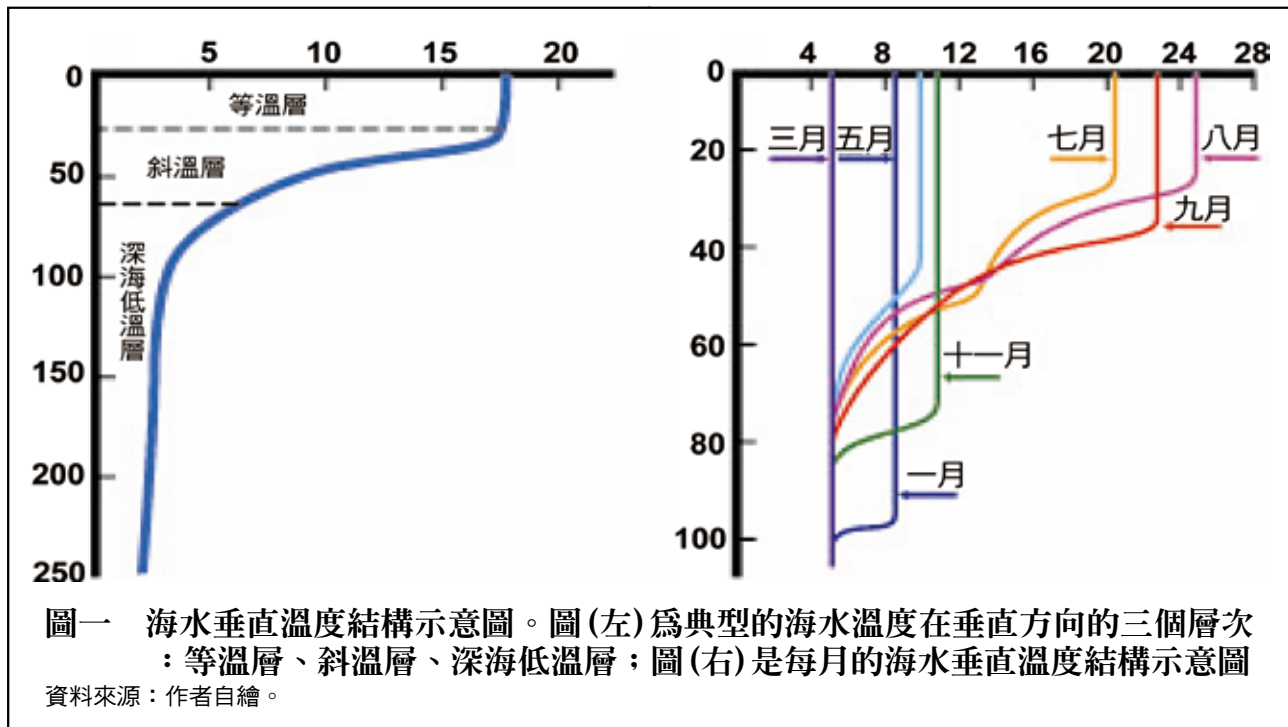
在我國周圍海域存在許多海水溫度與密度躍層，例如在我國西南海域和巴士海峽，就常年存在海水嚴重密度分層(Stratified Ocean Water)，不利於潛艦航行與武器裝備的使用，因此瞭解與掌握海水躍層的分布和相關海洋物理參數是潛艦部隊所必須瞭解的。本文有系統的完整介紹海水溫度與潛艦作戰的關係；第二節將介紹海水密度垂直結構。其次介紹內波生成機制與特徵與臺灣周邊海域的密躍層分布情形；同時另闢專文說明內波對潛艦航行的影響。最後希我海軍軍官能瞭解臺灣周邊海域內波產生的地區，確保我潛艦部隊航行的安全。

貳、海水密度(溫度)垂直結構

一、海水密度

海水密度與溫度、鹽度與水壓有關。鹽度(Salinity)是將海水中一切碳化合物(碳酸鹽)、溴及碘化物等均代換為氯化物，同時將所有有機物完全氧化，則一公斤海水中所

註5：中時電子報，<http://www.chinatimes.com/newspapers/20141218000934-260309>



含有之固體物質之總克數即為鹽度。所以鹽度是重量百分比濃度，其單位為千分之一(‰)，常用PSU(Practical Salinity Unit)來表示。換言之，鹽度係指一公斤海水中含有之溶解物質的總克數。鹽度大幅度變化多發生在沿岸地區；淡水河水大量注入海中，特別是雨季或旱季，造成河水出口沿岸海水鹽度的劇烈變化，這種變化以水平分層為主，垂直分層為輔；越靠近岸，海水鹽度越高；越是海水表面，鹽分也越高，因為大海中，海水表面鹽度因蒸發原因，導致鹽度較高，越往深處鹽度減少並趨於穩定。

海水壓力與水深有關；海水表面為1大氣壓(1atm=1.013250 bar=14.6959 psi=33.08fsw=1013250kpa)，每下深10公尺，增加1大氣壓；海水壓力大小不僅隨深度增大而增加，而且也是溫度和鹽度的函數，

壓力對電導的影響比溫度或鹽度的影響更明顯。越到深海，溫度與鹽度變化小時，壓力就決定海水密度了。但真正影響大洋表面水深500公尺的海水密度的是溫度。海洋表面或水中溫度，無論是水平分布或是垂直分布，都顯得異常複雜。然而這些海水溫度變化肇因千變萬化、錯綜複雜，與各海洋風、流、波浪間又有關聯，致使研究分析起來，格外不易。

而海水密度是海水鹽度、溫度以及壓力三者的函數。密度隨鹽度增加、溫度減少、壓力增加而增，反之則減。海水密度 ρ ， $\rho = \rho(T, S, P)$ ，T是溫度，S是鹽度，P壓力(水深)，單位是 g/cm^3 。在實測海水之溫、鹽及壓力等數值後可根據海水的狀態方程式計算出海水的密度。海水的密度多為1.0xx xx... (純水近似為1，表面海水密度最大約

為1.028)⁶。

二、海水溫度環境

海水溫度主要來源仍為空氣與海水交界面的熱交換。太陽輻射能經大氣反射、散射與吸收後到達海面。海水的溫度介於-2℃至35℃之間，其水平方向之變化雖較小，但在垂直方向變化卻很顯著。一般在高緯度區域的溫度變化大都呈等溫結構，變化較小，亞熱帶區域的層次變化較為明顯，赤道區的變化最大⁷。典型的海水溫度在垂直方向的變化大致上可分為三個層次：等溫層（又名混合層，Isothermal）、斜溫層（又名溫躍層、躍變層、變溫層，Thermocline）⁸、深海低溫層（又名深海層，Deep Permanent Thermocline），如圖一所示。

海水溫度的分布結構，除地理（高緯度、中緯度及低緯度）位置外，與季節、月份及當日陽光之加熱及海面擾動有密切之關連。冬季時，海水隔熱效用降低，且風浪較大，海洋表層之溫度得以混合，使恆溫表層溫度向下延伸。春季時，海洋表層溫度上升，

若海面平靜或僅有輕微風浪，溫度將保持穩定之分布狀態（等溫層）；當海面有波浪運動時，海面下數公尺深之海水逐漸混合形成等溫層，使太陽輻射熱不再繼續往下傳導，故等溫層與下方海水之間形成一溫度梯度驟增之交界層（斜溫層）。因此春夏之際，當海面受風吹而產生浪時，可觀測到逐漸加深之表面等溫層，其下方斜溫面之溫差亦加大；秋冬之初，海水表層隔熱作用逐漸降低，海面波浪增大，表層溫度逐漸下降，最後達冬季等溫狀態。因此，基本上，深海水溫因不受表面風及氣溫影響，得以保持其原有之低冷溫度狀態，故形成「深海低溫層」。混合層一般位於海平面到25～200公尺的深度，受到陽光照射，加上洋流及各種波浪的混合作用而形成，沿岸與近岸混合層變化較大，大洋則趨近穩定而成規律變化。

造成等溫的表面層的原理很簡單，就是海水的表面被攪動—混合了；攪動的主要動力是風和日光的照射，但海流、雲的結構、降雨情形等也都會對混合能夠到達的深度產

註6：海水狀態方程 -海水的現場密度略大於1。在海洋學中常用現場條件密度 $\sigma_{\text{Tp}}=(-1) \times 10^3$ 。在大氣壓 $p=0$ 條件下的密度，稱為條件密度 σ_{T} ，現場比容 α_{STp} 和現場密度成反比，即海水狀態方程。同理，現場條件比容 α_{STp} 和條件比容 α_{T} 分別為 $\alpha_{\text{T}}=(-0.9) \times 10^3$ 。勒羅等人按新鹽標計算實際鹽度 S ，並提出了新的狀態方程式，並寫成在一個標準大氣壓（ $p=0$ ）下的海水密度可由下列方程確定；式中 ρ_w 為基準純水密度， K_0 和 K 分別為大氣壓下和壓力為 p 時的正割體積彈性模量，其中：

$$K_0 = K_w + fS + gS^2/2$$

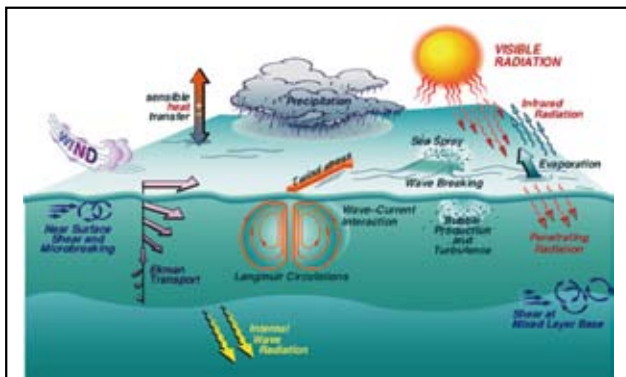
$$A = A_w + iS + jS^2/2$$

$$B = B_w + mS$$

式中下角標 w 代表純水的量； K_w 、 A_w 、 B_w 、 ρ_w 、 b 、 c 、 f 、 g 、 i 、 m 都是和溫度有關的係數； d_0 和 j_w 為常數（見表）。此方程式的準確度相當高，能計算出某些熱力學參數，已被聯合國教科文組織的海洋學常用表和標準聯合專家小組第九次會議採納，並向全世界的各海洋學技術組織和學者推薦使用。它的適用範圍為：溫度-2～40℃，壓力0～1,000巴，鹽度0～42。

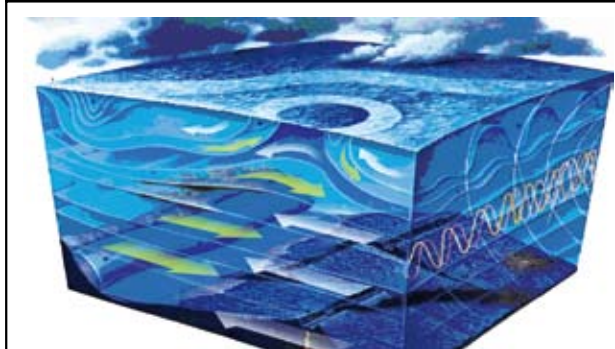
註7：毛正氣，〈海水的物理特性〉，《海軍軍官雙月刊》，第17卷，第3期，民國87年6月。

註8：許多海洋學名詞，英文只有一個，但中文卻有很多不同譯名；主要原因是臺灣以早期留美學學者譯名為主，加上政府不重視海洋科學，大學中僅有三所有海洋科學系，因此就以學者自譯的名詞為主。中國大陸近百所大學有海洋科學系，官方有正式翻譯名稱；日本海洋科學也很發達，也有正式官方譯名。



圖二 影響斜溫層深度 (Thermocline Depth) 的因素。海水中明顯的一條界線，軍事海洋學稱為層次深度 (MLD, Mixed Layer Depth)，而這深度 (溫躍層) 也是內波產生的地方

資料來源：<http://www.whoi.edu/science/AOPE/dept/CBLAS/Tmain.html>。



圖三 海水分層概念圖。每一水層中，都有水流在緩慢流動，以達到溫度平衡；層與層之間有擴散作用，讓熱量由表面進入海底

資料來源：<http://scienceblogs.com/deepseanews/2007/05/23/oasis-in-the-sargasso-sea/>，作者自繪海流。

生影響(如圖二)。在海水與空氣的交界面，會因為風的吹動而發生擾動動能(Turbulent Kinetic Energy, TKE)，這些擾動動能在向傳遞時，會使海水攪和，將熱往下搬運並消耗這些擾動動能；因此，表面層能夠到達的

混合深度，就會隨著風力愈大而愈深，但也隨著日光照射對海水表面的增溫愈強而愈淺⁹。

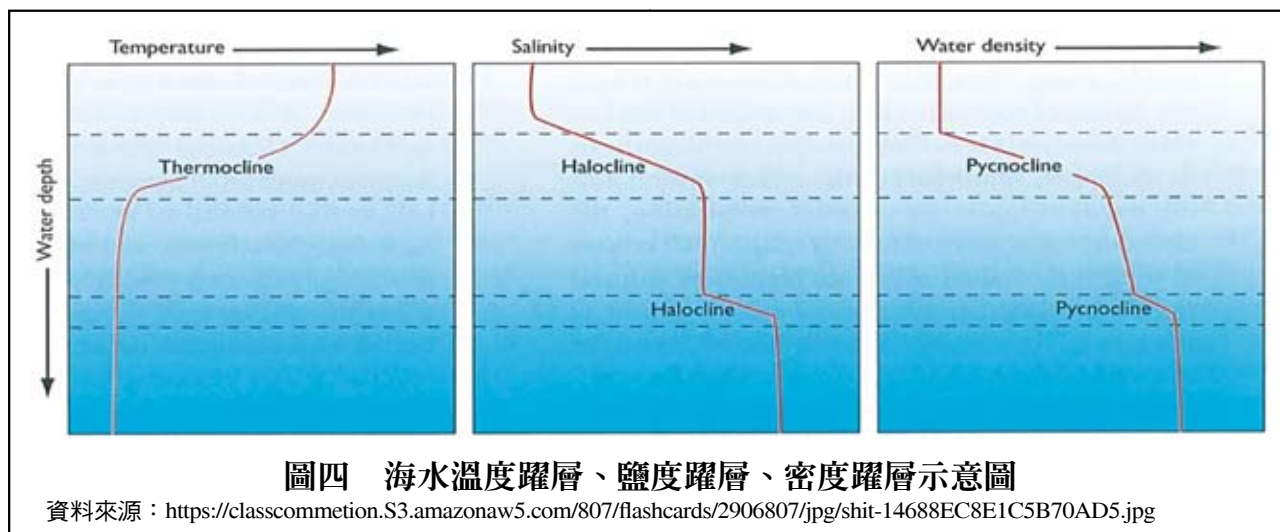
三、海洋層化(Stratified Ocean)與躍層

深入海洋底部，海水雖是「等溫」、「等鹽」，但並不如我們想像的平靜，因為海水受溫度、鹽度、壓力(水深)及重力(Gravity)的原因，造成海水分層(Stratified Ocean)，就像一層一層的千層派一樣(如圖三)。每一層海水並非是死水，而是有溫鹽環流在流動，就如我們常看到的氣壓圖一樣，風是順著等壓線在流動，也因為海水流動，海水表面所吸收的熱能才能逐漸的進入深層的海底。

海水的各種性質(溫、鹽、密度、氧含量、酸鹼值、葉綠素、濁度、有機物等)都隨水深增加而變化，但不同物質的性質隨水深變化的規律和特點是不同的，即使同一種性質隨水深的垂直變化，在不同的水層也會不一樣。

事實上，在某些水層中，某些海水性質不僅因水流與波浪等動力進行水平交換，而在垂直分布上，也會與其上下水層間的海水性質進行交換，尤其是海水溫度、鹽度這2項物理特性特別明顯。在海洋科學中，將海水溫度、鹽度、密度、聲速等物理參數出現急劇變化或不連續劇變的階躍狀變化水層，稱為海水溫度躍層(Thermocline)、鹽度躍層(Halocline)、密度躍層(Pycnocline)和聲速躍層(Sound Velocity Spring Layer)

註9：陳企韶，〈簡介海水層次深度及其變化〉，《海軍軍官雙月刊》，第11卷，第5期，民國81年5月。



，這些躍層說明上下層海水性質是有所不同的(如圖四)。

躍層的厚薄與距海水表面的深淺，是隨海域的地理位置和氣象條件而變化。溫度躍層在海洋中經常存在，並影響鹽度躍層、密度躍層和聲速躍層。通常，海水的密度變化主要取決於溫度的。在海面以下100~200公尺左右，溫度的垂直分布有巨大且明顯變化，薄薄一層是上層的薄暖水層與下層的厚冷水層間出現水溫急劇下降的層。由於在開闊海域中，鹽度幾乎是穩定的，而壓力對密度僅有固定的影響，因此溫度就成為影響海水密度的一個最重要的因素。大洋表面的海水溫度較高，因此它的密度就比深處的冷水要小。

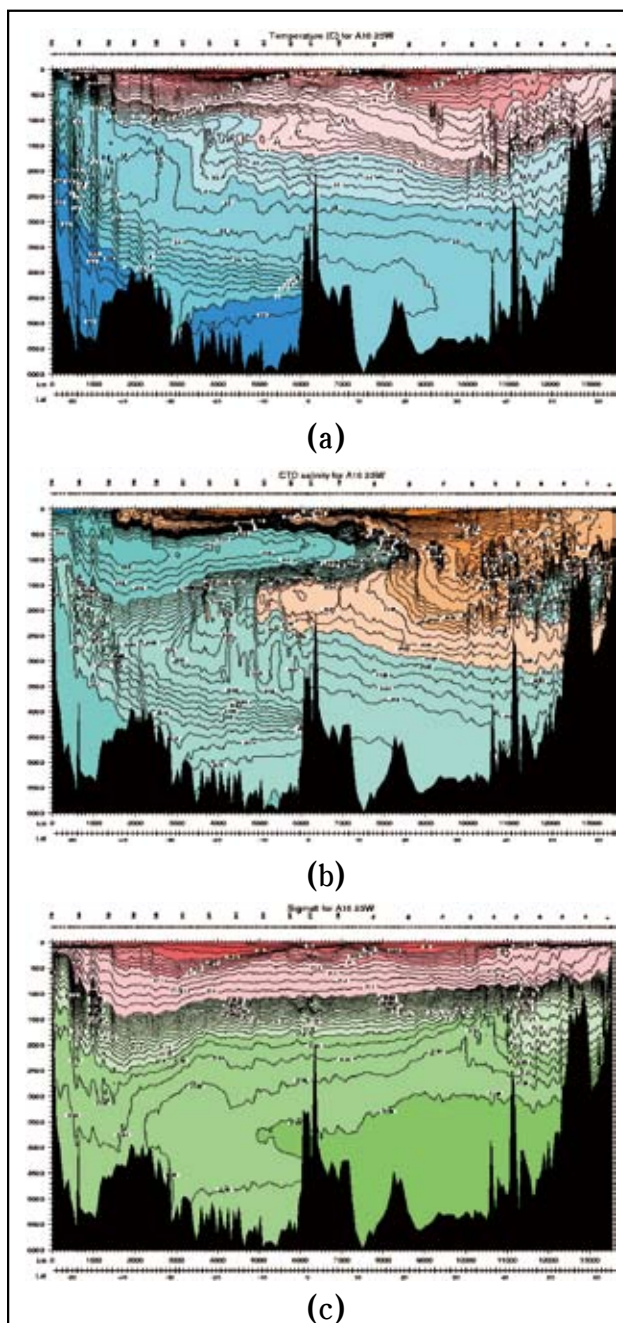
海水的溫度、鹽度、密度和聲速等，在垂直方向都有可能出現躍層。然而只有溫度躍層和鹽度躍層可以「獨立」出現，密度躍層和聲速躍層則一般是依附於溫、鹽躍層而伴隨而生。溫度和密度在溫躍層發生迅速變化，使得溫躍層成為生物以及海水環流的一

個重要分界面。一般而言，溫躍層只有一個，約100公尺左右；相同深度也有一個鹽躍層與密躍層；再往深處，常會發生第二個躍層。

四、海洋躍層形成的原因

溫度躍層的形成原因可歸納為兩類：熱力-動力和水團的分布情形。太陽輻射使上層海水增溫，而風、浪、流等導致的混和，則可使混和作用所及水層內的水溫趨於均勻，隨著熱量的繼續輸入和混和的持續作用，就會使上均於層均勻層的下界附近形成了水溫垂直向梯度而出現躍層；在淺海，潮流與海底的摩擦導致附近底層混合也在一定程度上促成和加強了溫躍層。在暖季形成的這種季節溫躍層深度不太深，通常稱為淺躍層或第一躍層。而第二躍層則指熱性質不同的水團疊置形成的溫躍層，如主溫躍層。

鹽度躍層的形成也有2類機制：溫躍層的影響或鹽度不同的水團的疊置。由於溫躍層率先形成，阻礙了上、下層之間的鹽量交換，有利於鹽度躍層的形成，特別是當海面



圖五 真實海洋海水分層現象。地點為西經 25° 的垂直剖面—北緯 60° 至南緯 60° ，水平距離單位為公里；垂直座標是水深，單位公尺

資料來源：http://sam.ucsd.edu/vertical_sections/Atlantic.html#64w。

降水大於蒸發或有淡水輸入時，鹽度躍層很容易形成。大洋次表層高鹽水團與中層低鹽水團之間形成會鹽度躍層；沿岸的河流的淡水與近岸的海水相會，也易形成較強的鹽度躍層。

海水密度隨水溫、鹽度和壓力而變化，但在海洋上層(如水深1,000公尺以內)海水密度的變化主要取決於水溫和鹽度，因而密度要層的形成便與溫躍層和鹽度躍層密切相關。聲速的變化也與海水的溫、鹽、壓有關，但以溫度的影響最重要，其次是壓力；鹽度的變化影響較小，除非在沿岸地區，一般是可以忽略鹽份。

海水表面溫度變化大，等溫線較為稠密，海流流速較快；愈到海底，等溫線較為疏鬆，海水也比較穩定，流度也較為緩慢。等溫線密集的部分就是溫躍層。真實的海洋分層現象(如圖五所示)，資料地點為西經 25° 的垂直剖面—北緯 60° 至南緯 60° ，依海水真實當地(當地實際)水深所呈現的海水溫度、鹽度與密度曲線圖。圖五(a)顯示溫躍層約有2層，一層約在200公尺左右，另一層約在800公尺左右；圖五(b)顯示有一淡水源從西方進入，鹽躍層分布在周圍，最大的鹽躍層也約有2層，一層約在500公尺左右，另一層約在1,500公尺左右。由圖五(a)與圖五(b)資料，加上水深，並運用海水狀態方程式¹⁰，得出圖五(c)的結果。圖五(c)顯示密躍層約有2層，一層約在水深500公尺以內，另一層約在1,500公尺左右。第一層密度躍層變動略大，但第二層密度躍層是很平穩的；因此，大海裡單獨存在水平方面的「海水

註10：同註6。

密度驟變」，是太不可能的發生的。

參、臺灣周邊海域躍層的分布

臺灣周邊海域密度躍層分布除中國大陸沿岸淡水河淡水影響較明顯外，主要以溫度躍層變化為主。春季海溫逐漸升高，夏季達最高溫，冬季逐漸下降，是淺海區躍層季節性躍層變化的主因。其次，表面水團主要特徵為溫度高，鹽度差異不大，其與其他各層水團(次表層水團、次-中層混合水團、中層水團、深層水團等)交界處常有穩定之躍層存在，以東海表層水團與黑潮次表層水團之交界最為明顯，這應為臺灣以東海域和臺灣海峽以南之外海域全年各月都有大範圍上界深度較深的弱躍層分布之主因。

臺灣周邊海域水流系統複雜，北部淺海區近岸海域受沿岸流和臺灣暖流交互作用，及大陸沿岸南部海域及外海海域受沿岸流、南海暖流等影響，為這些海域躍層常發生的原因。冬季期間，因各海域風力較大，表層海水混合較深，可達30~50公尺，而混合越均勻越不易形成躍層，在淺海區尤其明顯，此為大部分淺海區在冬季無躍層之主因。而在深海區，則加深躍層深度，因此冬季在深海區的躍層上界深度一般都較深之原因。在大陸沿岸部分海域因有淡水終年匯入，在入海口易形成淡水團，對密度分布影響大，此為大陸沿岸有較多強弱躍層及強躍層之主因。

密躍層是內波發生的必要條件。檢視臺灣周邊海域的密躍層分布情形發現，臺灣周邊海域由於水團及水深分布差異大，因此，

密度躍層的分布自然也趨於複雜，在不同季節具有不同的分布特點及變化規律。依據1900~2001年計102年的海洋調查資料分析，另將密度躍層依梯度的大小分為弱躍層和強躍層，其中弱躍層強度為 $0.015\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$ ，強躍層強度為 $0.10\text{kg}\cdot\text{m}^{-4}$ ，可以得到下列特性¹¹：

一、臺灣周邊海域密度弱躍層特性

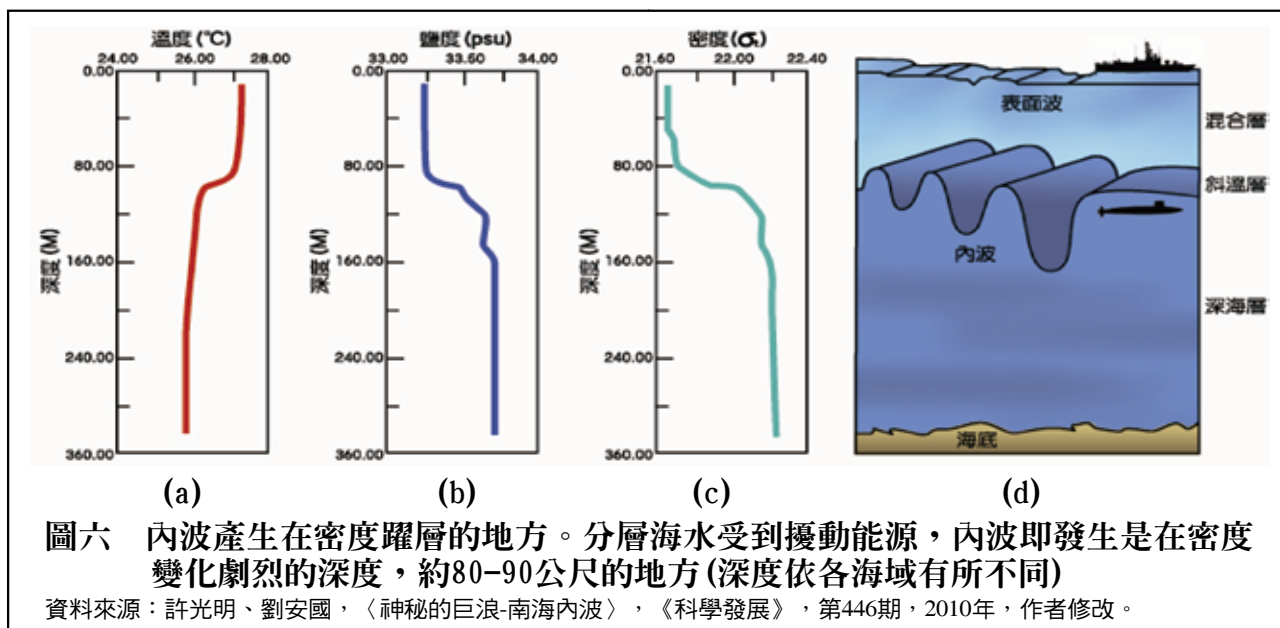
初始期弱躍層主要集中在大陸沿岸，成長期範圍明顯擴大，強盛期已涵蓋大部分海域，9月份起大陸沿岸之弱躍層範圍已逐漸衰退，衰退期僅10、11月份於東海北部淺水區仍有弱躍層，臺灣海峽及大陸沿岸於12月份已無弱躍層分布或分布較稀鬆。臺灣東部海域以東全年均有弱躍層分布。淺海區弱躍層之上界深度依冬、春、夏、秋季的順序由深變淺，大陸沿岸及臺灣海峽深度為25公尺以下，深海區上界可達50~100公尺。淺水區沿岸及臺灣海峽厚度在50公尺以下，第春、夏、冬季差異不大，秋季厚度最大，大多在50~100公尺。深水區厚度都在50公尺以上，東部深海域厚度可達100~150公尺。

二、臺灣周邊海域密度強躍層特性

夏、秋季分布範圍最大，強度在7~9月最強，主要分布在大陸沿岸之淺水區，在西部及東部分深海區亦有出現，春季僅在大陸沿岸出現，第4季深海區域分布範圍大幅縮小，僅在東部和西部深海區局部不規則稀鬆分布，淺海區僅在東海出現，12月份則無強躍層區出現記錄。

淺海區強躍層之上界深度在第夏、秋、

註11：張緒東、佟凱、尼建軍、鄧冰、劉金芳，〈臺灣周邊海域密度躍層分布分析〉，《海洋預報》，第21卷，第4期，2004年。



冬季除大陸沿岸外，均在25~100公尺內，呈現由內海往外遞增趨勢，可達50~100公尺，而大陸沿岸及臺灣海峽深度為25公尺以下；深海區上界可達50~100公尺。在深海區，秋季除西部深海區域在25~50公尺外大部分都在50~100公尺內，冬季則全在50~100公尺內，強躍層隨季節變化不大。以目前紀錄而言，厚度都小於25公尺，範圍在3~25公尺，除大陸沿岸厚度為3~10公尺外，其於區域厚度無明顯分不規律。

肆、海洋內波生成機制與特徵

在海洋，密躍層是海洋內波(Internal Wave)產生的主要地方，也是內波振幅最大的地方。海洋內波是發生在溫度、密度變化

最大的躍層的水下重力波(Gravity Wave)¹²。內波的產生必須具備兩個條件，一是海水密度分層(兩層海水的相對密度值大於0.1%時)的環境，二是要有擾動能源。擾動使原本穩定的密度分層移位，繼之的重力復原效應(Recovery Force)引發了波動。海水的密度分布通常處於不均勻狀態，大氣壓波動、潮汐、海流及海底地震都是重要的擾動能源。如果加上第三個條件—劇烈的地形變化與擾動能源相互作用，必定引發振幅劇烈的內波。地形變化越激烈，內波振幅越大，同時連續的密度分層密度差越大，內波振幅也越大，當然外力擾動的大小，也會影響內波的大小。

圖六說明內波產生在密躍層(斜溫層)的

註12：維基百科：重力波(gravity waves)在流體力學，是在液體介質內或兩種介質界面間(例如大氣與海洋間)的一種波，其恢復力來自於重力或浮力。當一小團液體離開液面(界面類型)或者在液體中到了一個液體密度不同之區域(液體內類型)，透過重力作用，這團液體會以波動形式在平衡態之間擺盪。在液體介質內的類型又稱為內波，在兩界面間的類型又稱為表面重力波或表面波。海浪及海嘯也是重力波的一種表現。資料來源：[http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E6%B3%A2_\(%E6%B5%81%E9%AB%94%E5%8A%9B%E5%AD%B8\)](http://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%87%8D%E5%8A%9B%E6%B3%A2_(%E6%B5%81%E9%AB%94%E5%8A%9B%E5%AD%B8))

底部，分層海水受到擾動，立即產生波動。圖六(a)、(b)是儀器在沿岸測量出來的觀測值。測量資料顯示，此地區鹽度化大，推測為河口附近或沿岸流強勁的地區。資料顯示此區域等溫層在深度80公尺左右，斜溫層厚度約為30公尺，從80-110公尺左右；圖六(c)為密度，利用海水狀態方程式¹³推算出來的，而內波的發生是在密度變化劇烈的深度—密躍層，約80-90公尺的地方。內波發生的大小與密躍層的厚度有關，躍層越厚實，內波振幅越大；擾動源越大，內波振幅越大；地形越陡峭，內波振幅也越大。

在產生內波處的波高比海面波波高大的多，原因是密度躍層把海水分為上下兩層，上層密度隨著深度變化緩慢，下層密度幾乎均勻一致；在這種情形下，層結處(躍層底部)海水容易受到擾動，自由海面的海水受到擾動時的波動，需要克服重力，因此波高受到限制，而海洋內部海水上升時，由於本身的重量大部分被浮力所抵消，因此在相同的能量條件下，與表面波相比，升高就比較容易¹⁴，也正因如此，內波的振幅要比表面波大得多，振幅從數公尺到數幾百公尺；而波長一般有幾百乃至上萬公尺，範圍也有幾百公里。在密度差較小的大洋中已經紀錄到內波週期也達12小時、振幅300公尺以上。內波並不只像海面波那樣僅僅水平傳播，內波也提供了從海底到海面的垂直能量傳播與海水交換，把表面的熱能與高含氧(及二氧化碳)量的水帶到幾百公尺以下的海底，

同時把低溫、高營養鹽、低含氧(及二氧化碳)量的深層海水，帶到海水表面來，提供表面生物必要的養分。因此，整體內波的震盪，是影響到整個海洋水平與垂直上的海水運動，不僅是涉及海洋物理部分，更對海洋生物及海洋化學有大影響。

內波根據不同的分類標準，可從頻率、週期及波長尺度來進行分類。海洋內波大致可分為三類：第一類是短週期及短波長的「高頻內波」，其週期大約在幾分鐘到幾個小時，通常空間尺度也較小，波長為幾十公尺到幾百公尺。這類內波一般表現出很隨機，產生原因很多，即使很微小的擾動也會發生高頻內波，也因此這種內波出現機率不定。

內波第二類最為重要，是具有潮汐週期的潮流生成的內波，稱為內潮波(Internal Tide)¹⁵。這類內波可稱之為「中頻內波」。大洋中之內潮波的形成機制有二。第一種機制是在陸棚邊緣處，潮流(Tidal Current)與地形變化的交互作用，進而產生內潮波。臺灣東北角海域的內波就屬此類。第二種機制則是流速較大的潮流於漲、退潮時流經海脊(Sill)，此擾動的傳遞過程產生內潮波。此種內潮波的波長範圍為 10^2 - 10^3 公尺，其變化週期通常從5-10分鐘到2-5小時不等，傳播速度約為10cm/s，振幅可達100公尺。此類內波是伴隨潮流而發生，臺灣巴士海峽與西南海域(東沙群島附近)的內波就屬此類內波。這種因地形劇烈變化而產生的中頻內波稱為「內孤立波」。

註13：同註6。

註14：張為華、湯國建、文援藍、張洪波、羅亞中、朱彥偉、尚洋，《戰場環境概論》，北京，科學出版社，2012年。

註15：百度百科，<http://baike.baidu.com/view/135485.htm>

第三類是頻率接近當地慣性頻率的慣性內波(Inertially Internal Wave)，稱之為「低頻內波」，其週期在12小時以上，波長為 10^1 – 10^3 公里，傳播速度約 10^2 cm/s。此類波出現是很隨機，不易被觀察到。

伍、臺灣西南海域的內波

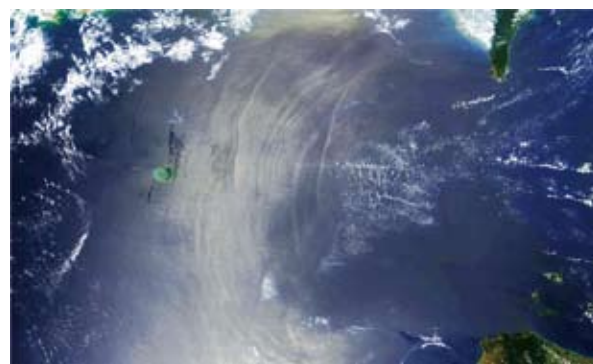
1990年代初期，美國石油公司在南海北部(東沙島附近)探勘石油，當半潛式鑽油平台在作業時，遇到強流發生操作困難並斷纜，調查後發現強流是內波造成的，而南海北部東沙島附近海域的內波才開始受到重視。臺美研究學者把合成孔徑雷達(SAR)所發現南海內波的波峰線，描繪在南海海圖上以製作南海內波分布圖(如圖七)，才逐漸揭開南海內波的面紗。

臺灣南部海域(巴士海峽)因黑潮擺動而入侵巴士海峽，從海水溫鹽結構分布來看，高溫、高鹽的黑潮表面海水入侵時，始與南海海水進行海水交換，此區域長年存在溫躍層。美國海洋學者汪東平教授用海洋數值模式重建臺灣南部海域內波發生的機制發現：黑潮海水入侵是造成海水層化的主因，但黑潮海水動力不足以推動海水以產生內波；而真正造成南海內波的動力是潮流¹⁶，而恆春海脊是西南海域第一道內波產生的地方。恆春海脊所產生內波向西傳播播時，在水深較深的地方，一群內波所包含波的個數並不多，當內波碰到東沙環礁時，分裂成南北兩群內波。這兩群內波在東沙環礁西方會合後，繼續向西北進行，最後因碎波而消失不見。



圖七 臺灣西南海域內波圖。此圖係根據SAR影像描繪而成

資料來源：取自Hsu et al.,2000，蔣國榮、張軍、施偉來、劉群燕，《海洋內波及其對海戰的影響》，北京，氣象出版社，2009年。

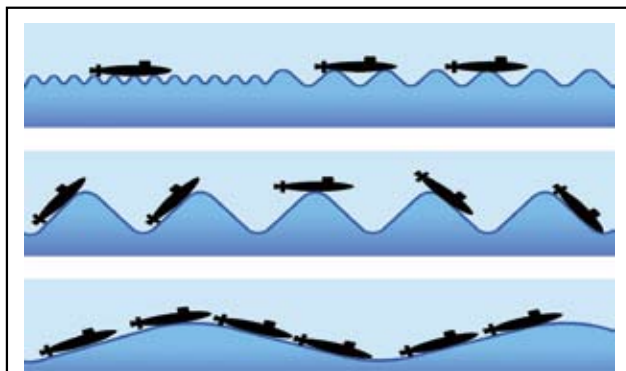


圖八 臺灣西南海域ERS-1衛星SAR影像

資料來源：取自<http://gis.tcgs.tc.edu.tw/resources/news/viewtopic.asp?id=3130>。

依據呂宋海峽衛星合成孔徑雷達所拍攝的影像，發現內波的波峰線長達200公里，且波源可能不只一個。從東沙環礁附近衛星合成孔徑雷達所拍攝的影像(如圖八)與研究資料顯示：海水下冷上熱，這些冷熱海水在大約100公尺深的地方交會，一旦受到崎嶇地形等外在擾動的影響，就會形成海面下的巨浪，也就是「內波」，一般海洋的內波，上下起伏的幅度大多在10幾公尺，但位於臺灣恆

註16：Wang, D.-P., 2012. Diurnal modulation of semidiurnal internal tides in Luzon Strait, Ocean Modelling, 59-60(2012), pp.1-10.



圖九 不同內波對潛艦的影響。圖(上)是當潛艦遇到波長為高頻內波的2種情形；若船長 $>$ 內波波長，這時海洋內波會使潛艦產生小幅度的上下顛簸，此種上下顛簸容易對艦體及其附屬結構與裝備造成損害，若波長再長些，但未超過艦長，易對艦體產生「中拱」、「中垂」現象，嚴重時會造成艦體斷裂。圖(中)是當潛艦遇到波長為中頻內波。圖(下)是當潛艦遇到波長為低頻內波的情形

資料來源，作者自繪。

春半島西南方的南海，內波動輒100公尺以上，振幅最大的甚至超過170公尺，足足有40層樓高，是目前世界上觀測到最大的內波。另外，內波會帶來近8級的扭力，對鑽油平台、海中的潛艦都會帶來不可預測的威脅¹⁷。國立中山大學王玉懷教授也發現兩群非線性內波在東沙環礁的西邊會合，非線性交互作用的現象非常明顯。由於東沙環礁附近水域深度迅速變淺，內波因而產生頻散作用，分解成許多波速不同的小波繼續向西北傳播¹⁸。

陸、內波對潛艦潛航的影響¹⁹

內波對潛艦潛航一般可分為對操作的穩

定性影響，以及對潛艦隱蔽與安全性的影響2類，歸納各類型內波對潛艦航行安全的影響如表一所列，分述如後：

一、對潛艦操作的穩定性影響

當潛艦遇到波長為幾十公尺或更短的短波長的高頻內波時，根據海洋內波的傳播特性，這類內波是傾向於水平傳播。由於船長的長度遠大於內波波長，這時海洋內波主要是使潛艦產生幅度較小的上下顛簸，就像車子行走在石子路上是一樣的，但此種上下顛簸容易對艦體及其附屬結構與裝備造成損害，同時也會產生艦體「中拱」、「中垂」現象，嚴重時會造成艦體斷裂(如圖九)。當背景內波場的頻率與潛艦固有頻率產生共振時，潛艦會受到最大的波致垂向力(Wave-Driven Vertical Force)，容易發生解體事件。

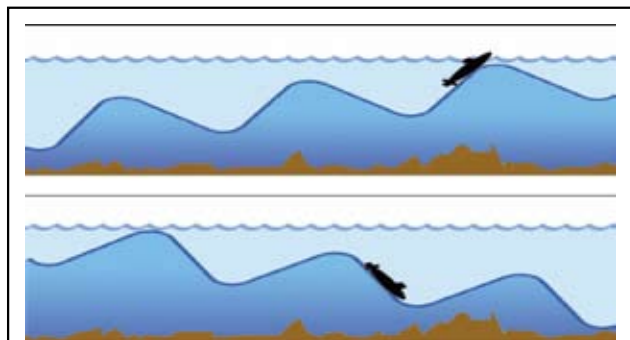
當潛艦遇到波長為幾百公尺到幾千公尺的低頻慣性內波時，對於一個正常航行的潛艦而言，由於這時內波波長遠大於潛艦長度，潛艦僅隨著內波略有起伏，但比較平穩，隨著內波波峰的到來，內波有使潛艦向上或向下運動的趨勢，無論是存在向上還是向下的作用，潛艦航行的動力都足以克服這種趨勢並保持在同一深度航行，但這仍會對潛艦操作產生一定的影響。

當潛艦遇到或接近波長為船長2倍的中頻內潮波時，內波對潛艦的直接影響較大並且可能會出現危險。這類內波波長是幾十公

註17：〈臺美攜手揭海底大風暴—南海發現最大百公尺內波 衝擊潛艦〉，《蘋果日報》，2007年11月9日。

註18：Wang, Y.H., C.F. Dai and Y.Y. Chen, 2007. The physical and ecological processes of internal wave on an isolated reef ecosystem in the South China Sea. Geophysical Research Letters, p.34.

註19：蔣國榮、張軍、施偉來、劉群燕，《海洋內波及其對海戰的影響》，北京，氣象出版社，2009年。



圖十 向上與向下傾斜的中頻內波對潛艦的影響。圖(上)溫躍層接近水面，且內波是傾斜向上傳播，潛艦會被拋出水面，顯現行蹤；圖(下)潛艦潛入深度較深，當遇到傾斜向下的強內波時，會在波谷經過時下俯而觸底或超過極限下潛深度，造成艦毀人亡

資料來源，作者自繪。



圖十一 近年美國與蘇俄潛艦失事的地點

資料來源：http://www.nationalgeographic.com/k19/disasters_main.html。

尺到幾百公尺。正常航速行駛的潛艦隨內波的起伏上仰或下俯，並產生較劇烈的上下顛簸和左右晃動。另外，中頻內波的週期較短，從幾分鐘到幾小時，潛艦在短時間內的運動速度不容易被控制，若應對措施不當，就容易發生意外。

二、對潛艦隱蔽與安全性的影響

高頻內波與低頻內波對潛艦隱蔽與安全性影響不大，主要是此類內波不會使潛艦產

生過大的起伏；但中頻內波則不同；由於其波高較大，且其波長也與船的長度接近，會產生大的顛簸，並推著潛艦行進；這時，如果密躍層較淺且接近水面，且內波是傾斜向上傳播的，潛艦就很容易會被拋出水面，顯露行蹤(如圖十)。

另外，當潛艦遇到傾斜向下傳播的內波時，也會出現同樣的情況。如果水不深但潛艦潛入深度較深，當遇到傾斜向下的強內波時，會在波谷經過時下俯而觸底或超過極限下潛深度，造成艦毀人亡。然而在界面附近活動的潛艦，當內波通過時也具有危險性；因為潛艦會被內波帶著往下沉或向上升，潛艦的浮沉系統為補償內波所造成的升降，會讓潛艦朝相反的方向運動，若操作不當也可能浮出水面或撞到海底。

1963年11月10日，美國海軍「長尾鯊(Thresher)」號潛艦在大西洋距波士頓港口350公里處突然沉沒，事後美國海軍對沉入海底殘骸進行分析判斷，下沉的原因是潛艦在水中遇到了強烈的下沉內波，將其「拖拽」至海底，因艦體承受不了超級限的壓力而破碎，這就是內波垂直下降作用力的後果。另外，1968年1月9日以色列海軍「達喀爾(Daker)」號潛艦在地中海遇到內波；1969年2月11日美國海軍「查博(Chopper)」號潛艦在古巴海岸執行任務也遇到海洋內波(如圖十一、附表)²⁰，二者同樣是沉沒。

柒、中共基洛級潛艦372號「掉深」案例分析

註20：同註19。

附表 歸納各類型內波對潛艦航安的影響

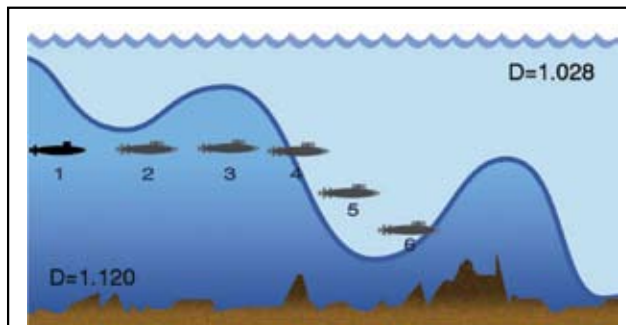
		高頻內波		中頻內波		低頻內波
		高頻波	船長1/2倍的內波	內潮波	內孤立波	
對潛艦航行安全的影響	對操作性、穩定性	小幅度上下顛簸，影響	1. 產生艦體「中拱」、「中垂」現象，嚴重時會造成艦體斷裂。 2. 當背景內波場頻率與潛艦固有頻率產生共振時，潛艦容易發生解體事件。	1. 一般中頻內波長遠大於潛艦長度，潛艦僅隨內波略有起伏，但比較平穩，隨著內波波峰，波谷的到來，內波會使潛艦推向上或向下運動，潛艦要保持一定的深度，有困難度。 2. 當潛艦遇到接近波長為船長2倍的內波時，內波對潛艦的直接影響較大並出現危險。潛艦隨內孤立波的起伏就比較大，並產生劇烈的上下顛簸和左右晃動。 3. 內波週期較短，從幾分鐘到幾小時，潛艦短時間內運動速度不容易被控制，若應對措施不當，容易發生意外。		影響較小
	對隱蔽性、安全性		影響不大		1. 內孤立波波高較大，且波長也與船長度相接近，易產生大顛簸，並推著潛艦行進；如溫躍層較淺，且內孤立波是傾斜向上傳播，潛艦容易被拋出水面，顯露行蹤。如遇傾斜向下傳播的內波，潛艦易被推向深處，觸底或超過極限下潛深度。 2. 在界面附近活動的潛艦，當內孤立波通過時，潛艦會被內波帶著往下沉或向上升，潛艦的浮沉系統為補償內波所造成的升降，會讓潛艦朝相反的方向運動，若操作不當，容易浮出水面或撞到海底。	影響較小

資料來源：作者整理。

我們在分析中共KIL0級潛艦372號在大洋中「掉深」事件，我們需要先瞭解潛艦基本背景資料。首先，潛艦的潛浮原理是利用整個船身密度的改變來控制下潛及上浮，或是懸浮在水中。當船體密度大於水的密度時，潛艦可下潛入水底；反之，艦體密度小於水時，則浮出水面。因此，有效偵知與掌握潛艦周遭海水密度是確保潛艦航行安全手段之一。其次，南海艦隊372號潛艦是中共從俄羅斯引進的8艘基洛級636型常規柴電潛艦的其中一艘，2006年交付中共海軍服役。基洛級636型潛艦的水面排水量2,325噸，水下排水量3,076噸，水面速度11節，水下速度20節，通氣管狀態下續航力7,000浬/7節，

工作深度250公尺，最大下潛深度300公尺，有6具533毫米魚雷發射管。

一、網路上說：「潛艦遇到的『海中斷崖』，是海水密度、鹽度突然變小，浮力也隨即減小。潛艦突然進入鹽度小的區域，浮力突然降低，潛艦迅速下沉，如同疾駛的汽車掉下懸崖，即所謂「掉深」。其實，從海洋物理學來看，這是不正確的。在分層的流動海水裡，不可能上面海水密度大(重)，壓在下面海水密度小(輕)的上面，就算中層海水有其他的原因(熱泉或淡水源)，海水溫鹽環流會自我調適達成平衡狀態(Homogeneous)，也就是上層海水密度輕，下層海水密度高。



圖十二 當潛艦潛航時，遇到內波示意圖。上層海水密度為1.028，下層海水密度為1.120；數字為潛艦行進次序，當潛艦位置為1時，艦體本身密度設定與周遭海水密度相同(1.120)，潛艦繼續航行，航行至第4位置時，周遭海水密度突降至1.028，艦體本身密度設定已大於周遭海水密度，因此艦體開始往下掉。當時，潛艦人員若沒有發現潛艦深度增加，很容易到達潛艦深度臨界值，發生潛艦擠壓破碎的情形

資料來源，作者自繪。

根據中共海洋學界的研究，在中國大陸南海地區，是有這類負密度梯度躍變層在淺海主要出現在廣東、廣西近海和瓊州海峽附近很小的海域，且具有明顯的時間變化，主要發生在秋冬季節，但時間很短、範圍很小。誠如上文所述，海水溫鹽環流會自我調適達成平衡狀態，存在的可能性很小。

二、但中共潛艦遇到「失重」——也就是中共軍方所說的「掉深」是事實，是因為潛艦遇到密度躍層的「波動」，也就是海洋學界所說的內波。當潛艦潛航時，是以潛艦周遭的海水密度為基準，保持自身艦體的密度與周遭的海水密度一樣，以便以平穩的等深度在水中向前航行。當內波接近時，上層海水與下層海水上下震盪，振幅從數公尺到數幾百公尺；且波長從有幾百乃至上千公尺，範圍也有數百公里，是一種緩慢無聲的震盪，航行中的潛艦察覺不出來的。而當表層輕

密度海水被拉到深度約300公尺處，潛航的潛艦正航行過去，就發現本身艦體密度比周遭環境海水密度低，自然往下掉，也就是中共潛艦所謂的「掉深」了(如圖十二)。

三、「掉深」是潛艦部隊的噩夢：想要瞭解「掉深」情形，可以去看德國經典影片「從海底出擊DAS BOOT」，其中就有一段潛艦在試圖通過直布羅陀海峽的時候被擊傷掉深的情節，十分逼真。而潛艦如果想要阻止「掉深」情況發生，有兩個主要方法——一是及時獲得浮力來上浮，二是通過舵面的流體動力作用來「爬升」；如果潛艦潛航深度很深(約200-250公尺時)，而真正有這種狀況發生時，這兩種方法都不易執行。以372艦所屬的基洛級636M型潛艦為例，如果其當時航行在200公尺深度，而極限破壞潛深是350公尺，艦員們必須在潛艦掉到300公尺之前，讓潛艦不再下降。如果官兵不能及時處置的話，這條艦就會在很短時間內被拽入無底深淵，會被巨大的海水壓力壓破船體，造成失事事件。

四、與其說潛艦被內波「拖拽」至海底，不如說是潛艦是失重而向下墜落，而其「重力加速度的慣性」加速往下掉，雖下沉至與潛艦艦體相同的密度層，但因慣性原因潛艦能往下掉，久久才能恢復浮力而往上浮。但常因艦體承受不了臨界壓力而破裂、進水，更加重艦體的密度，增加往下掉的力量。

五、根據實際現地測量資料顯示：臺灣西南海域溫躍層發生在約150-170公尺左右，上層與下層海水溫度差約12℃，密度差約0.003。內波波動上下水流速度50-75cm/sec

，核算為1.0-1.5節；波鋒行進速度約10分鐘/次。內波在恆春海脊產生時，振幅並不大，但向西傳播時，因地形變化產生淺化效應，造成內波振幅可達150公尺。雖然內波速度不快，但動能卻很大，層化海水只要被波動，不太容易停下來，這種上升下沉的水流推著潛艦潛進上升與下沉，其力量是很驚人的。

六、我們在分析中共KIL0級潛艦372號在大洋中「掉深」事件中推測，潛艦潛航深度遇到振幅至少150公尺以上的內波，這種內波屬於第二類中頻內波—「內潮波」，也只有在地型急劇變化的區域才能產生振幅巨大的內潮波；如依報導所言，「潛艇以數百公尺的深度潛航時，突然遭遇海水密度驟變…」，推測這艘潛艦發生地就是在臺灣西南海域東沙島附近，因為目前為止，全世界只有臺灣西南海域有這種深層內波的存在，且也只有東沙島大陸棚附近海域因內波淺化作用，內波振幅才會變大。研判KIL0級潛艦潛航深度約200-250公尺，當潛艦遇到內波時，發生「掉深」險境，約至270-320公尺。這種深度遇到這麼大振幅內波，推測就在東沙島附近海域。因為據目前海洋界的觀測，全世界這種巨型內波只發生在臺灣西南海域，且深度在150-250公尺的深度。

捌、結語

中共潛艦在去年(2014)在執行任務時發生「掉深」航安事件，但是這些專業潛艦術語相信很多人未有所聞，當然更不瞭解這些名詞的真正海洋物理意義何為？想要瞭解潛

艦為何失重—也就所謂的「掉深」，就必須知道海水密度(溫度)垂直分布情形。再者，大海裡單獨存在水平方面的「海水密度驟變」，是太不可能的發生的，而從物理海洋學家觀點來看，造成潛艦掉深失重的原因是內波(Internal Waves)。

臺灣周邊海域四季都有密躍層，而密躍層正是形成內波的主因。臺灣西南海域常年存在深層密躍層，加上潮汐的推動與地形變化，巨型內波自然生成；加上行進過程的淺化效應，更加劇內波的振幅與速度，同時亦將深層內波提升至中層海水面(約300公尺)，造成潛艦失重。根據相關報導與作者研析認為中共這艘潛艦發生掉深地點就是在臺灣西南海域東沙島附近。

我國周邊海域東北角與南部海域是內潮波與內孤立波(中頻內波)的多發區，對我潛艦航行與作戰有嚴重影響與限制；換個角度想，身為海軍軍官的我們，尤其是潛艦部隊應瞭解臺灣周邊海域的水文環境，套句中共出版的軍事海洋學的話：「誰掌握最詳細的海洋水下參數，誰就能贏得潛艇戰的勝利，強大海軍的海洋參數都是核心機密，依靠常年的水下偵察測量積累出來的，屬於絕門秘籍，絕不會對外分享的，親爹都不行。」

英國皇家海軍戰爭學院嘉德納(Gernard)教授在其一篇「敵乎？友乎？海洋在反潛作戰中的角色」文章中斷言指出：「反潛作戰中對於海洋環境瞭解的重要性絕對不下於對潛艦裝備的認識。海洋的不透明性有利於潛艦，但也有其他的海洋物理性質是對雙方互有限制的，因此反潛作戰的第一守則

就是不要面對海洋與潛艦兩個敵人，應該先瞭解海洋環境的利弊，驅吉避凶，化環境阻力為助力」²¹。因此，一位海軍軍官對海洋環境的物理特性不夠瞭解，將注定海軍作戰失敗的命運。

<參考資料>

1. 鳳凰網：「南海艦隊立功潛艦處置的是什麼重大險情」，資料來源：<http://news.sina.com>，2014年9月3日 03:20

2. 環球軍事，資料來源：<http://mil.hi.huanqiu.com/posts/view/998>

3. 聯合報新聞網，資料來源：<http://udn.com/NEWS/BREAKINGNEWS/BREAKING-NEWS4/9136181.shtml>

4. 直播港澳台：「20141217海軍372潛艦遠航訓練曾遭遇掉深險情」，資料來源：<https://www.youtube.com/watch?v=T4RmLFLGP4s>

5. 中時電子報，資料來源：<http://www.chinatimes.com/newspapers/20141218000934-260309>

Du, Tseng, Y.H., and Yan, X.H. (2008), 'The impacts of tidal currents and Kuroshio intrusion on the generation of nonlinear internal wave in Luzon Strait', *Journal of Geophysical Research Ocean*, VOL. 113, C08015, doi:10.1029/2007JC004294, 2008.

Hsu, M.-K., A. K. Liu, and C. Liu, 2000: A study of internal wave in the China Seas and Yellow Sea using SAR.

Cont. Shelf Res., 20, pp.389-340.

6. Johns W. E., T. N. Lee, D. Zhang, R. Zantopp, C.-T. Liu and Y. Yang, 2001: The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 array. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, pp.1031-1053.

7. 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.

8. Tang, T. Y., and W. Z. Tang, 1994: Current on the edge of continental shelf northeast of Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences*, 5, pp.335-348.

Tang, T. Y., W. D. Liang, Y. J. Yang, and W.-S. Chuang, 2003: Kuroshio intrusion in the Luzon Strait. *J. Phys. Oceanogr.*

9. Tang, T. Y., Y. Hsueh, Y. J. Yang, and J. C. Ma, 1999: Continental slope flow northeast of Taiwan. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, pp.1353-1362.

10. Wang, D.-P., 2012: Diurnal modulation of semidiurnal internal tides in Luzon Strait, *Ocean Modelling*, 59-60(2012), pp.1-10.

11. 中國船舶重工集團公司編著，《海軍武器裝備與海戰場環境概論》，北京，海

註21：陳企韶譯，〈敵乎？友乎？海洋在反潛作戰中的角色〉，《海軍學術月刊》，第32卷，第11期，民國87年11月。

軍出版社，2007年。

12. 毛正氣，〈海水的物理特性〉，《海軍軍官雙月刊》，第17卷，第3期，民國87年6月。

13. 毛正氣，〈濱海環境作戰參數與海戰場環境即時預報模式〉，《國防雜誌》，第22卷，第3期，頁6-32。

14. 李磊，《海洋戰場環境概論》，北京，兵器工業出版社，2002年。

15. 柯銘澤，《臺灣周圍的流場》，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，2001年，頁78。

16. 孫文心、李鳳歧、李磊，《軍事海洋學引論》，北京，海軍出版社，2011年。

17. 張為華、湯國建、文援藍、張洪波、羅亞中、朱彥偉、尚洋，《戰場環境概論》，北京，科學出版社，2012年。

18. 許光明、劉安國，〈神秘的巨浪—南海內波〉，《科學發展》，第446期，2010年2月。

19. 陳企韶，〈簡介海水層次深度及其變化〉，《海軍軍官雙月刊》，第11卷，第5期，民國81年5月。

20. 湯文慈，《臺灣東北大陸棚邊緣之流場》，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，1993年，頁107。

21. 楊穎堅，〈海洋內波簡介〉，《海軍軍官季刊》，第28卷，第3期，民國98年8

月。

22. 楊穎堅，〈南海的巨大振幅內孤立波〉，《科學月刊》，第528期，民國102年12月。

23. 熊學軍，《中國近海海洋—物理海洋與海洋氣象》，北京，海軍出版社，2012年。

24. 蔣國榮、張軍、施偉來、劉群燕，《海洋內波及其對海戰的影響》，北京，氣象出版社，2009年。

25. 戴昌鳳，《臺灣的海洋》，臺北縣遠足文化事業有限公司，臺灣臺北，2003年。

26. 羅建育，〈臺灣周邊海域海底地形之概述〉，《海軍軍官季刊》，第23卷，第3期，民國93年7月。



作者簡介：

毛正氣先生，備役海軍上校，海軍官校77年班，美國紐約州立大學石溪分校海洋環境科學碩士，美海軍參謀學院2000年班，美國紐約州立大學石溪分校海洋暨大氣科學博士，現服務於民間公司。

崔怡楓上校，中正理工學院測繪工程學系82年班，國防大學中正理工學院軍事工程研究所89年班，現為國立台灣師範大學地球科學研究所博士候選人，現服務於海軍大氣海洋局。

劉偉峰上校，海軍官校78年班，國防大學海軍學部93年班，美戰院函授班，曾服務於海軍司令部軍情處。

