

內波與海軍作戰

著者／毛正氣

海軍官校77年班
曾任大氣海洋局局長
備役上校

臺灣周邊東北角和西南海域都是巨型內波的多發區，而內波會影響海軍潛艦水下航行及聲納與武器的使用，是一極為重要的海洋戰場環境參數。內波會使潛艦水下航行操控變得困難且具危險性；內波會導致海水等密度面的波動，使水下聲波的音源強度大小和行進方向發生變化，內波會對水下武器(魚雷與潛射飛彈)的使用，產生限制與危險性；因此，了解海洋內波及其發生機制，對海軍作戰與海戰場環境的經營有極大的幫助。

壹、前言

內波是一項重要的海洋水平與垂直海水運動，它將海洋上層的熱能、高含氧量的海水傳至深層，又把深層較冷的、高營養鹽的海水帶到海洋表面來，促進海洋生物的生息繁衍不息。但到目前止，世界各國學者對海洋內波的產生機制仍並不十分清楚，而臺灣周邊海域東北部和西南部海域以都是巨型內波的多發區；因此，了解海洋內波及其發生機制，對臺灣周邊海域戰場環境經營有極大的幫助。

內波是會影響潛艦航行、反潛作戰及水下武器的使用是一極為重要的海洋水文環境因素。振幅劇烈的內波可將潛艦拋向水面或壓向海底，危及潛艦安全，就如同水面艦艇在波浪處航行一樣，當潛艦在海洋內波區域活動時，也會產生「中拱」、「中垂」現象，嚴重時會造成艦體斷裂，或者潛艦不易保持正常的航向和

武器發射姿態，水下武器發射後也難以命中目標。內波會導致海水等密度面的波動，使水下聲波的音源強度大小和行進方向發生變化，對聲納裝備與水下武器的使用影響極大。

本文有系統的完整介紹海洋內波與海軍作戰的關係；第二節將介紹內波生成機制與分類。其次第三、四節介紹臺灣周邊海域東北角與南部海域的內波；同時另有專文第五節說明內波對海軍作戰的影響。最後希我海軍軍官能了解臺灣周邊海域海洋的限制與優勢，能佔地利之便，確保主導戰場的能力、武器裝備充份發揮以及戰場人員安全¹。

貳、內波生成機制與分類

一、內波生成機制

在海洋，斜溫層(thermocline)是海洋內波(internal wave)產生的主要地方，也是內波震幅最大的地方。海洋內波是發生在溫度、鹽

度變化斜溫層的水下重力波(gravity wave)²。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。海水的密度分佈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，必定引發震幅劇烈的內波。地形變化越激烈，內波震幅越大，同時連續的密度分層密度差越大，內波震幅也越大，當然外力擾動的大小，也會影響內波的大小。

圖1說明內波產生在斜溫層的底部，分層海水受到擾動，立即產生波動。圖1(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1(c)為密度，利用海水狀態方程式³推算出來的，而內波的發生是在密度變化劇烈

的深度(有學者稱為「躍密層」)，約80-90公尺的地方。內波發生的大小與斜溫層(或「躍密層」)的厚度有關，斜溫層越厚實，內波震幅越大；擾動源越大，內波震幅越大；地形越陡峭，內波震幅也越大。

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，⁴也正因如此，內波的震幅要比表面波大得多，震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周期也達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

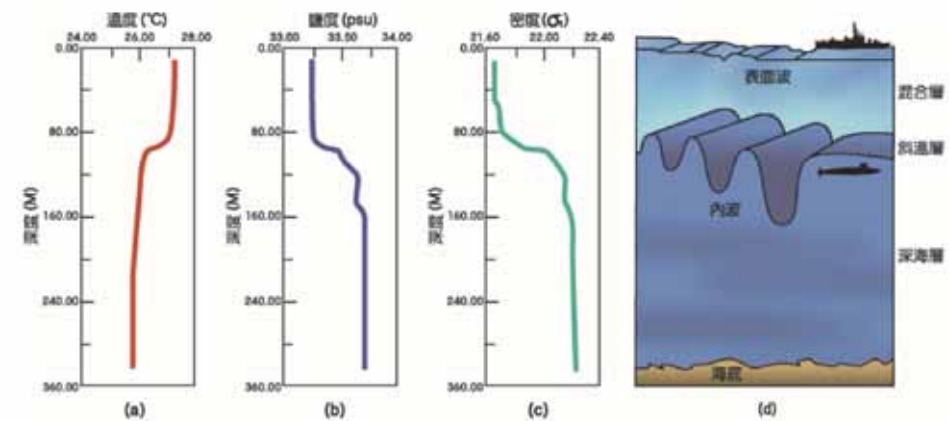


圖1 內波產生在斜溫層地帶，分層海水受到擾動能源，內波即發生是在密度變化劇烈的深度，約80-90公尺的地方。資料來源：許光明、劉安國，2010，神秘的巨浪-南海內波，科學發展，第446期；作者修改。

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。

二、內波的分類

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」，其周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，是如何造成此類內波，原因很多，微小的擾動即可發生高頻內波，也因為出現機率不定，因此研究起來，格外不易。一般而言，層次海水，加上擾動能源即可生成此類「高頻內波」。

內波第二類最為重要，是具有潮汐週期的潮流生成的內波(tide-driven internal tide)或稱為內潮波(internal tide)的內孤立波(internal solitary wave)。⁵這類內波可稱之為「中頻內波」。所謂孤立波(solitary wave)，指一種單獨一組波群行進的波，其在很長的空間距離內傳播而不散失其能量，並且有兩波相碰而不會改變外型及傳遞的特殊性質。⁶

而內孤立波是指大洋中，因海水密度的分層效應，使得在海洋內部會產生內波，並具有孤立波的特性。研究顯示：大洋中之內孤立波的形成機制有二。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

引發內潮運動(海水運動有潮汐般的周期)；若傳遞方向與地形斜坡方向平行，則有可能更進一步將能量投影至更高頻率的運動，並引發非線性效應，⁷進而產生內孤立波。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)，因而內潮波引發駐波形式的李氏波(standing leewave)。⁸當潮流轉向後，此李氏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，進而產生內孤立波。⁹此種內孤立波的波長範圍為102-103m，是一非線性很強的內孤立波，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，震幅可達100公尺。此類內孤立波是伴隨潮流而發生，臺灣巴士海峽的內波就屬此類內波。

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」，其周期在12小時以上，波長為101-103 km，傳播速度約102 cm/s。此類波出現是很隨機，不易被觀察與研究。從地理位置對內波進行分類，海洋內波可分為大洋內波、近海內波、極地內波及赤道內波。還可以從擾源進行海洋內波的分類，在應用當中常常採用這種分類來方法。例如：由正壓潮與地形相互作用所產生的內波，稱之為潮成內波(internal tide)；而由風的慣性振盪所引起的內波稱之為慣性內波(inertial wave或inertial oscillation)等。

參、臺灣東北角內波

內孤立波(internal solitary wave)是非線性較強的海洋內波，因此潮流生成的內孤立波(tidally internal solitary wave)，也就是內潮波的生成必須是在潮流流速大、地形變化大的狀況下，才能生成，因此，內孤立波只在各別海域、某些時間出現。臺灣東北部有非常密集的內孤立波分部，表明該區域是一個內孤立波的高發區(圖2)。進一步可以看出，在該區域，各種傳播方向的內孤立波互相交錯，而每一組內孤立波的峰線都較短，這既說明該區域內孤立波的源比較多，生成機制較複雜，也說明該區域的內孤立波源的水平空間尺度較小。¹⁰

臺灣東北角海域因黑潮東西向擺動，撞擊到大陸棚的垂直壁，使黑潮產生渦漩與湧升流，且從海水溫鹽結構分佈來看，深水區存在長年性溫躍層；但在陸架淺水區，高溫、高鹽的黑潮表面海水入侵大陸棚時，始與低溫、低鹽的中國沿岸流進行海水交換。表層的反時針冷渦具有季節性的變化，其變化的主要的原因來自於相對應週期的黑潮東西向擺動，使大陸棚僅存在季節性斜溫層，在這些區域中，內波的出現是具有季節性特徵。因此，就東北角海域內波而言，其時空變化與各個海域溫度垂直分布與變化有密切關係。

從渦漩的行進方向與溫度分層來看，黑潮海水應大部份滯留在大陸棚邊沿上，僅有少量「流進」大陸棚上，且中國沿岸流與臺灣海峽暖流分布在臺灣北部陸棚海域上(大陸學者稱流出臺灣海峽的水流已混了南海海流、黑潮與河水，並自成一個海流體系)；但潮流卻把黑潮海水帶到大陸棚上了，造成嚴重海水分層現象。

臺灣東北角海域的潮差為1.5-2.0公尺，近岸潮流速度約為70 cm/sec，因海底地形與海岸地勢的原因，使潮流又急又快，因此造成東北角海岸受到海水的高度侵蝕。¹²

圖3為ERS-1衛星SAR影像所拍攝的影像。¹³影像中KF為黑潮主流，也就是產生內波動力的來源之一。黑潮主軸擺動，撞擊大陸棚壁的水流的流動方向，而產生了內波，依動力來源的反方向，加上潮流的推近，向東海大陸棚方向前進。行進中，遇到高低起伏的海底地形，則增減內波振幅，以維持能量守恆，或是發生頻散(disipation)作用，產生小的內波群。IW就是小的內波群。

肆、臺灣西南海域內波

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

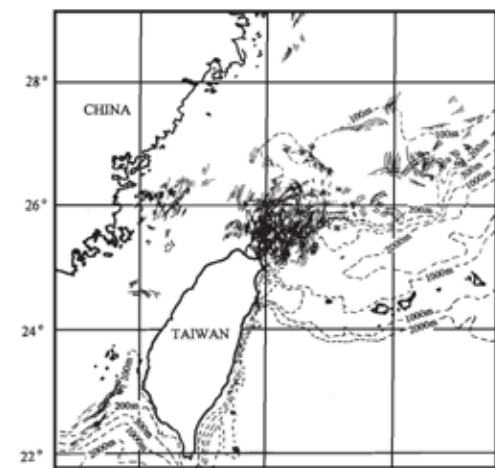


圖2 臺灣東北角海域內波圖。此圖係根據SAR影像描繪而成，取自Hsu et al., 2000。¹¹

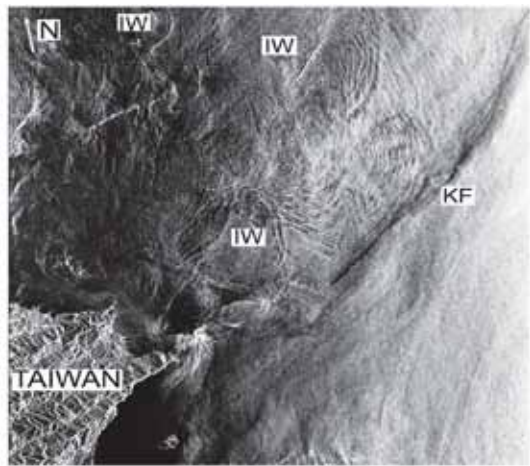


圖3 1994年5月10日圖東北角海域ERS-1衛星SAR影像，影像中KF為黑潮主流，也就是產生第一道內波，IW就是小的內波群。本圖取自本圖取自Hsu et al., 2000。¹⁴

海域的內波才開始受到重視。臺美研究學者把合成口徑雷達(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(圖4)，才逐漸揭開南海內波的面紗。

臺灣南部海域因黑潮擺動而入侵巴士海峽，從海水溫鹽結構分佈來看，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，此區域深存在長年性溫躍層。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

恆春海脊是臺灣南部海域產生內波的地方，所產生內波向西傳播播時，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。依據呂宋海峽衛星合成口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口徑雷達所拍攝的影像(圖5)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

伍、內波對海軍艦艇的影響

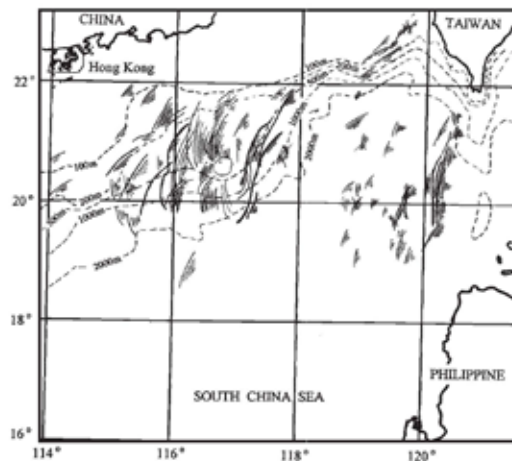


圖4 臺灣西南海域內波圖。此圖係根據SAR影像描繪而成。本圖取自Hsu et al., 2000。¹⁵

海洋內波是一個重要的海水上升與下沉的機制，對海軍潛艦航行安全與武器裝備的使用，有莫大的影響。大振幅的海洋內波對主要航行於水中的潛艦安全有重要的影響；對水中主要裝備聲納的偵蒐性能也有影響；對於水下武器的發射與精準度也有影響；且海洋內波可以暴露潛艦的位置與行蹤。因此，本節分別從海洋內波對潛艦航行安全、水中武器裝備等幾個方面說明海洋內波對海軍作戰的影響。¹⁹

一、海洋內波對潛艦航行安全的影響

潛艦長度通常是100公尺左右，不同潛艦的長度差別不大，所以基本上可以用100公尺來代表潛艦的船長長度。根據上節所述之「內波的分類」，內波波長變化範圍較廣，從幾十公尺到幾千公尺，差別甚大，且不同波長的內波對潛艦的影響也是不同的。潛艦在水中是絕大部分是處於航行狀態；因此，本節以不同內波頻率來分析海洋內波對潛艦航行安全方面的影響。

(一)對潛艦操作性與穩定性的影響

當潛艦遇到波長為幾十公尺或更短的短波長海洋內波(高頻內波)時，根據海洋內波的傳播



圖5 臺灣西南海域ERS-1衛星SAR影像。本圖取自<http://gis.tcgstc.edu.tw/resources/news/viewtopic.asp?id=3130>

特性，這類內波更傾向於水平傳播。由於船長的尺度遠大於內波波長，這時海洋內波主要是使潛艦產生幅度較小的上下簸，就像車子行走在石子路上是一樣的，但此種上下簸容易對艇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(圖6)。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海洋內波(如慣性內波)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，潛艦僅隨海洋內波略有起伏，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倍的海洋內波時(中頻內波)，內波對潛艦的直接影響較大並且可能會出現危險。這類內波通常是非線性的內孤立波，其波長是幾十公尺到幾百公尺。正常航速行駛的潛艦隨內孤立波的起伏就比較大(波峰經過時，從上仰到下俯)，並產生較劇烈的上下簸和左右晃動。另外，通常內孤立波的週期較短，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)對潛艦隱蔽性與安全性的影響

高頻內波與低頻內波對潛艦隱蔽性的影響不

大，主要是此類內波不會使潛艦產生過大的起伏；但是內孤立波則不同，由於其波高往往較大，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，如果溫躍層較淺（接近水面），且內孤立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（圖7）。

另外，當潛艦遇到傾斜向下傳播的內孤立波時，也會出現同樣的情況。如果水不深但潛

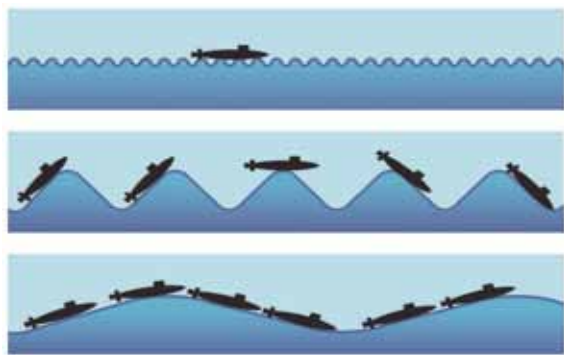


圖6 不同內波對潛艦的影響。圖(上)是當潛艦遇到波長為高頻內波；圖(中)是當潛艦遇到波長為中頻內波；圖(下)是當潛艦遇到波長為低頻內波的情形。資料來源，作者自繪。

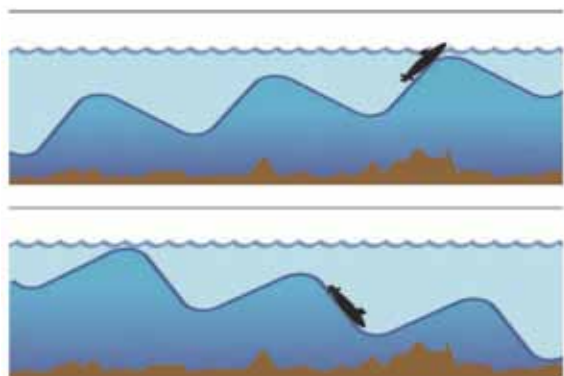


圖7 向上與向下傾斜的中頻內波對潛艦的影響。圖(上)溫躍層接近水面，且內孤立波是傾斜向上傳播，潛艦會被拋出水面，顯現行蹤；圖(下)潛艦潛入深度較深，當遇到傾斜向下的強內孤立波時，會在波谷經過時下俯而觸底或超過極限下潛深度，造成艦毀人亡。資料來源：作者自繪。

艦潛入深度較深，當遇到傾斜向下的強內孤立波時，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，若操作不當也就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。因此要避開內波，只有運動速度超過內波的行進速度，加上駕駛的專注力，才能避免被「吸住」。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（圖7），²⁰二者同樣是沉沒。

二、海洋內波對水中武器裝備的影響

（一）對聲納性能的影響

海洋內波對聲波行進影響很大。在低頻遠距離聲納中，由於海洋內波的存在，使得整個聲納系統的性能受到很大的影響，某些地點信號可能增強，某些地點信號可能減弱，對有用的聲納反射信號產生了很大的干擾。

高頻內波的振幅雖然小於內孤立波的振幅，但其波長、周期都較短；聲納的實際作用距離通常並不長，通常是幾萬公尺，因而聲納接收

信號的時間間隔也是從幾分鐘至幾十分鐘，即使在這麼短的時間間隔中，聲納也能經歷幾個周期的高頻內波，因而產生幾次大的折射，造成聲能損失；由於高頻內波隨機性很強，波動變化並無規則可循，這會造成大量聲波的散射或損失。

相對於高頻內波，中頻內孤立波波幅大、周期長、波長也較長，但隨機性不強；因此，此種內波會造成聲波折射變化大與散射損失小。內潮波波幅小於內孤立波，而波長確長於內孤立波，並且隨機性也很弱，因此，它對聲納的影響比內孤立波小。另外，高頻內波在海洋中的存在較普遍，而內潮波及內孤立波僅屬於陸坡的近海海域。因此，在影響聲納裝備性能的海洋內波，是以高頻內波為主。

（二）對潛射魚雷的影響

內波除了對潛射魚雷的聲納性能影響外，海洋內波尤其是大振幅海洋內孤立波也影響魚雷發射性能、航向和姿態控制等。大振幅的海洋內孤立波會產生空間分佈不均勻、突發性的強流，流場最大流速可達2.5m/s以上。在魚雷的導航定位中，海流對其座標位置的影響是一個主要因素。魚雷的航行的定位主要是利用魚雷速度、航向和深度等參數綜合解算獲得的，這些參數直接影響到位置的精確度。若流速較高，則對位置坐標有較大影響，進而影響到導航。因此，在海洋內波多發區中使用魚雷，一般而言，是難以有效命中目標。

（三）對潛射飛彈的影響

水下潛艦發射的飛彈時，在水下運動中及出水時會遇到種種干擾與限制，這些干擾與限

制主要有發射潛艦的航速和搖擺運動、發射水深、海流、風浪、湧浪以及海洋內波等。由於飛彈在水下處於無控飛行狀態，要求出水姿態越小越好，而飛彈出水姿態隨發射潛艦的航速增大；因此，在發射潛射飛彈時，要求潛艦速度儘量低，但速度低，使潛艦操縱變得困難，且穩定性變差，所以在發射潛射飛彈時，通常是在保持艇體穩定(平衡)的狀況下選擇低速。潛艦的搖擺和升沈運動也是水下發射飛彈時不可忽略的干擾。此外，海流、波浪及發射水深也對潛射飛彈的發射也有影響。

海洋內波對水下潛艦發射飛彈的影響主要在兩個方面，一是影響潛艦的穩定性和操縱性，進而影響飛彈的發射；另一方面是產生大的海流流切(shear current)²¹，進而影響到艦體本身的安全。前述已說明海洋內波對潛艦穩定性及操控性的影響，也指出高頻內波及低頻內潮波對潛艦航行影響較小，唯內孤立波(中頻內波)對潛艦航行影響較大。但也說明了影響潛艦航行安全的海洋環境因素，也影響潛載武器的使用。因此，海洋內孤立波多發的區域，顯然不適合於水下潛射飛彈的發射。原因之一是高達數十公尺甚至上百公尺波高的海洋內孤立波所產生的升沈及搖擺運動，可能會使潛射飛彈發射完全失效。

第二個原因是潛艦水下發射飛彈時，確保準確率要求低航速、高穩定性，而潛艦的這種作戰姿態在內孤立波多發區是很難保持的。因為強內孤立波的波陡較大，慢速移動的潛艦很難在內孤立波存在區保持穩定。因此，在海洋內孤立波存在的區域，難以確保飛彈良好的出

水姿態從，進而無法保證其準確率；第三，海洋內孤立波會產生流速很大的垂直向流切（shear），也就是工程力學界所說的「剪力」，對飛彈的彈道和俯仰、偏航、滾動的影響很大，尤其是海洋內孤立波所導致的不均勻流場的流速遠大於一般海流的流速，因而所導致的影響可能非常大。因此，海洋內孤立波對潛艦水下發射飛彈的影響甚大，海洋內孤立波多發區基本上不能進行水下飛彈發射。

相對於海洋內孤立波，海洋高頻內波振幅不大，但是其振幅也達幾公尺至幾十公尺，這種振幅的內波對水下活動的潛艦仍然會產生較大的搖擺、顛簸，影響潛艦的穩定性和操控性，進而影響潛射的準確率。但是，由於在自然海洋環境中海洋高頻內波的存在較普遍，因此，不能忽視海洋高頻內波對潛射飛彈準確率的影響。

（四）對水雷使用的影響

海洋內波對水雷的影響：聲自導水雷是利用聲納來做目標搜索、識別與定位，由於高頻內波會造成聲波傳播損失，改變聲波傳播方向，因此對聲自導水雷的準確性產生一定程度的影響。

海洋內波對飄雷的影響：漂浮在水面的漂雷受波浪影響很大，但漂浮在一定深度的漂雷則可能受海洋內波影響較大，這與海洋內波對潛艦的影響類似。當大振幅的內孤立波傳到飄雷區域時，內孤立波波峰經過處會托起飄雷甚至使飄雷露出水面從而暴露飄雷行蹤；內孤立波波谷會使飄雷下沉到很深處，使飄雷的攻擊作用失效。

海洋內波對繫留雷（錨雷）的影響：在水中的繫留雷，會因海洋內波的作用下會發生雷體垂直升降、水平運動，以及雷索的震動。垂直升降可能會使水雷浮出水面（如果雷索長度大於水深的话）或沉到比其預設深度更深處；水雷向淺水的水平運動也會產生同樣效果；雷索震動可能會將雷索拉斷。

三、海洋內波對海軍作戰的影響

（一）對水面艦作戰的影響

水面艦的主要特點是通用性好，遂行任務十分廣泛，戰鬥能力強，且較能適應惡劣海、氣象條件；而它的主要缺點是隱蔽性差，易受到來自空中和水下的攻擊。由於海洋內波是發生在海洋內部的波動，其波動的最大振幅是在海水內部，而內波造成的海氣界面起伏不大，因此，海洋內波對主要在海面活動的海上作戰平台——水面艦艇本身影響不大，它不會影響到水面艦艇的航行安全，也不大會影響到水面艦艇的操縱性與穩定性，它對水面艦艇航行的影響可能僅僅是降低其機動性能，²²但在目前這種燃氣渦輪機的動力時代，這種影響是微乎其微。海洋內波對水面艦艇的海上作戰影響最大的應是在水面艦艇對潛艦搜索、攻擊時影響其武器裝備使用，主要是聲納裝備與魚雷的使用。

當水面艦船搜索潛艦時，主要使用的裝備是聲納。聲納裝備是借助於發射、接收聲波確定目標的，由於海洋內波會造成聲波的傳播損失，減小聲納作用距離，從而影響潛艦目標的搜索。對潛攻擊時，主要是通過聲納裝備確定潛艦的位置及運動要素，發射的魚雷也是借助聲納來完成目標定位的。海洋內波的存在導致

聲速起伏，進而影響聲納定位準確性，降低對潛艦攻擊準確率。

（二）對潛艦作戰的影響

潛艦作戰是指潛對潛作戰。潛艦的作戰能力決定於其隱蔽性、作戰半徑、自給力、機動性及使用強度等因素。潛艦主要活動於水中，必然會受到發生在海洋內部的內波的影響。依上述的分析得知，大振幅的海洋內波波動會影響潛艦的航行安全；海洋內波會引起聲速起伏，影響聲納的裝備效能；海洋內波也從多方面影響艦武器的使用。從以上幾點來看，內波必然影響潛艦作戰能力的發揮。

潛艦的一個重要特性-隱蔽性，是執行潛艦任務時最重要優勢。但是，大振幅內孤立波對於在潛行深度不夠深的潛艦來說，極可能破壞其隱蔽性，暴露其行蹤，也會影響到了潛艦的生存安全，當然也削減其隱蔽突襲的作戰能力。

海洋內波對潛艦使用聲納影響很大，主要是使聲能的傳播損失增大，減低聲納有效距離，從而降低潛艦搜索目標的能力；海洋內波導致聲速起伏而影響聲納定位能力。聲納作為潛艦活動的「眼睛」，它的目標搜索及定位能力的降低，必然影響到潛艦作戰能力的發揮。

潛艦布雷的主要講求是隱蔽、安全、準確和所布水雷難以被敵方知悉。「隱蔽」是要求潛艦隱蔽進入布雷海域，隱蔽布設水雷，使敵方艦船在被水雷毀傷之前難以發現。「安全」是指潛艦布雷用於對付敵水面艦艇時，布設區水深較淺，潛艦在淺水區機動，必須採取各種措施，避開敵方反潛兵力和防潛器材的阻擾，確保布雷行動的安全。「準確」是指潛艦艦長要

準確地執行布雷計劃，準確地抵達布雷地點，準確地布設水雷等。

但是海洋內孤立波，就對潛艦的安全性和隱蔽性產生很大影響。由於潛艦布雷的水域往往是水深較淺的水域，這種水域可能也是海洋內波活躍的區域，如果是內孤立波多發區，大振幅的內孤立波既可能將潛艦拖入海底造成安全事故，也可能將其拋出水面破壞隱蔽性。因此，潛艦布雷時，除了要注意反潛裝備對潛艦活動的可能威脅外，自然環境因素的海洋內波所造成的潛艦安全性及穩定性的破壞作用，是絕對不能忽視的。

（三）對反潛作戰的影響

自然界海洋中的海水大多是穩定且層化的（stable and stratified），而其內部被擾動後的恢復力（重力）是一個平衡力，目的就是要將海水再帶回「穩定且層化」的海水。根據海洋內波生成的基本條件可知，一個不大的擾動也能於引起不小的內波；因此，水下運動的物體（如潛艦），也可作為一個擾動源而激發出內波。學界把這種由潛艦這類水下運動物體所產生的內波，稱之「潛生內波」。

以一定速度在層化流體中運動的物體，包括水面艦和水下的潛艦，在其尾部都會激發出一個尾流區域（一般稱為「尾跡」）。水面艦表面波尾流和潛艦內波尾流均有為尾的中央湍流區（turbulent wake）和兩側的「V」字型的波峰線（cusp wave）。表面波尾流為海水表面的壓力擾動，一般為橫波（波峰線與船隻運動的方向垂直）和散波（波峰線由船向外輻射），以及湍流（圖8）。圖9是水面艦表面波尾流的中央湍流區

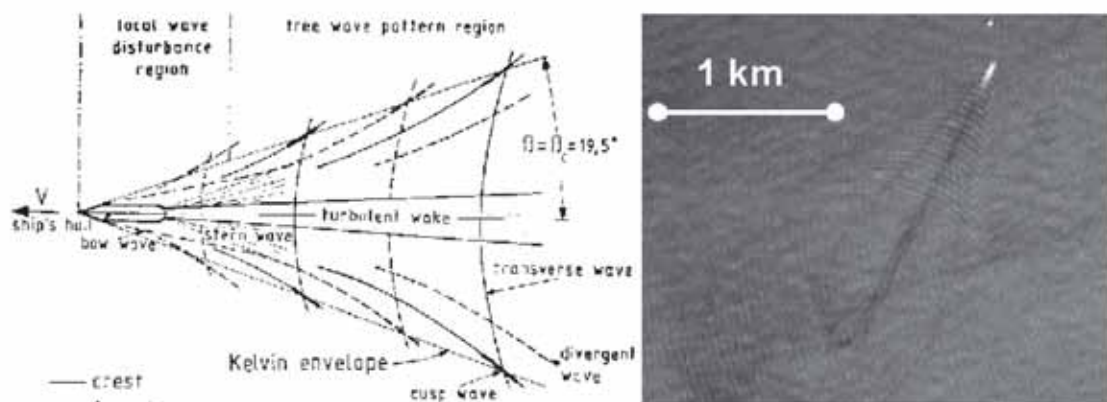


圖8 水面艦表面波尾流的中央湍流區和兩側的「V」字型的波峰線。圖(左)是水面艦表面波尾流理論圖；圖(右)衛星中的SAR所拍到水面艦尾跡。資料來源：<http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/shipwakes/shipwakes.htm>

和兩側的「V」字型的波峰線。在層化海水下運動的潛艦，同樣會產生尾，但層化作用會將潛艦尾激發的各種擾動，並以內波的形式向各個方向傳播，產生極其複雜的物理圖案。²³

潛艦在分層海水中航行，除潛艦圓柱體船體會產生內波外，潛艦的平衡翼、帆罩及尾翼都會產生尾跡波紋與渦旋(vortex) (圖10)，其傳播到海面上的波紋就變得相當複雜，明顯有別於水面艦所產生的尾跡。由於海洋內部耗散機制較弱，導致振盪衰減維持的時間很長，當與自由面(air-sea interaction)相互作用時，會在海面上留下各種內波的「線索」。其主要特徵是表面流場速度大，而波幅很小；且其有一條非常粗糙與一條非常光滑的波紋，相對應的出現。每個內波尾跡具有相同形狀，但幅度隨著深度而變化。當水深一定時，隨著密度躍層的深度不同，潛艦所產生的表面內波尾跡的強度與夾角也有所不同。透過SAR可以觀測海面上所反映出的「特殊」波紋，即可探測到水下潛



圖9 水面艦表面波尾流的中央湍流區和兩側的「V」字型的波峰線。資料來源：<http://blogs.militarytimes.com/scoopdeck/2010/02/25/next-big-surface-ship-flight-iii-ddg/>

艦的蹤跡，甚至可以判別深度與潛艦大小。這種「表面」內波現象，突破聲學和其他非聲學(磁性偵潛、重力偵潛)偵潛的侷限，已成為各國軍方關注的焦點與研究的方向。

參、結論

歷來對學者對海洋的研究，大多以海水表面的波、流為主，甚少探討水下的海水物理性質。近年來，因為海洋與衛星科技的進步，開

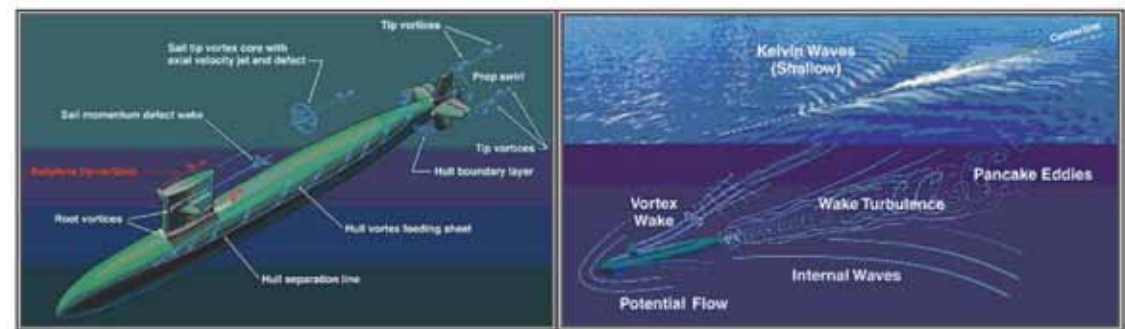


圖10 圖(左)潛艦在水中，整個艦體都會產生波紋；圖(右)潛艦在水中所產生的波紋，與水面艦截然不同。資料來源：<http://www.continuum-dynamics.com/solution-hn-overview.html>

始對深層的海水進行研究，並發現海洋分層現象和內波環境。真實的海洋是嚴重密度分層的，垂直分層為主，也存在水平分層；而這垂直分層的海水一旦受到外部擾動，是很容易產生內波。內波是海洋一項重要的水平與垂直海水運動，它將海洋上層的熱能傳至深層，又把深層較冷的海水與營養鹽帶到表面水層，促進生物的生息繁衍。

同樣地，在任何海域執行任務的潛艦都會面臨複雜的海洋分層和內波環境因素；因此，潛艦在海中的作戰環境並非理想，而是相當有風險的。根據統計，潛艦的海事案件並非都是戰損的；自1851年至2005年，國外柴油潛艦海事案件共309件，沉船150艘；核潛艦事故78件，沉船6件(以上皆不包含中共與其他共產國家)。自二次大戰後60年(1946-2005年)，潛艦事故147件(其中包括核動力潛艦12件)，共沉船29艘。²⁴很慶幸的，潛艦事故有大幅減少的趨勢。但以柴油潛艦海事案件309件而言，215件與海洋環境有關(海流、水深、水壓、海底地形等)；以核潛艦事故78件而言，42件與海洋環境有關。

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，東北角與南部海域是中頻內波何嘗不是一種「海洋環境武器」，可以阻止中共潛艦到這海域來。我海軍主戰場環境就在臺灣周邊海域，惟有我們比中共更了解臺灣周邊海域的海洋物理機制與持久的戰場環境經營，才有反制的力量，也才能使中共海軍因不了解海域特性，而不敢或無法前來。

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(在全球各國近100年反潛作戰戰史研討會中所作的結論)：「反潛作戰中對於海洋環境了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，應該先了解海洋環境的利弊，驅吉避凶，化環境阻力為助力」。²⁵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。

