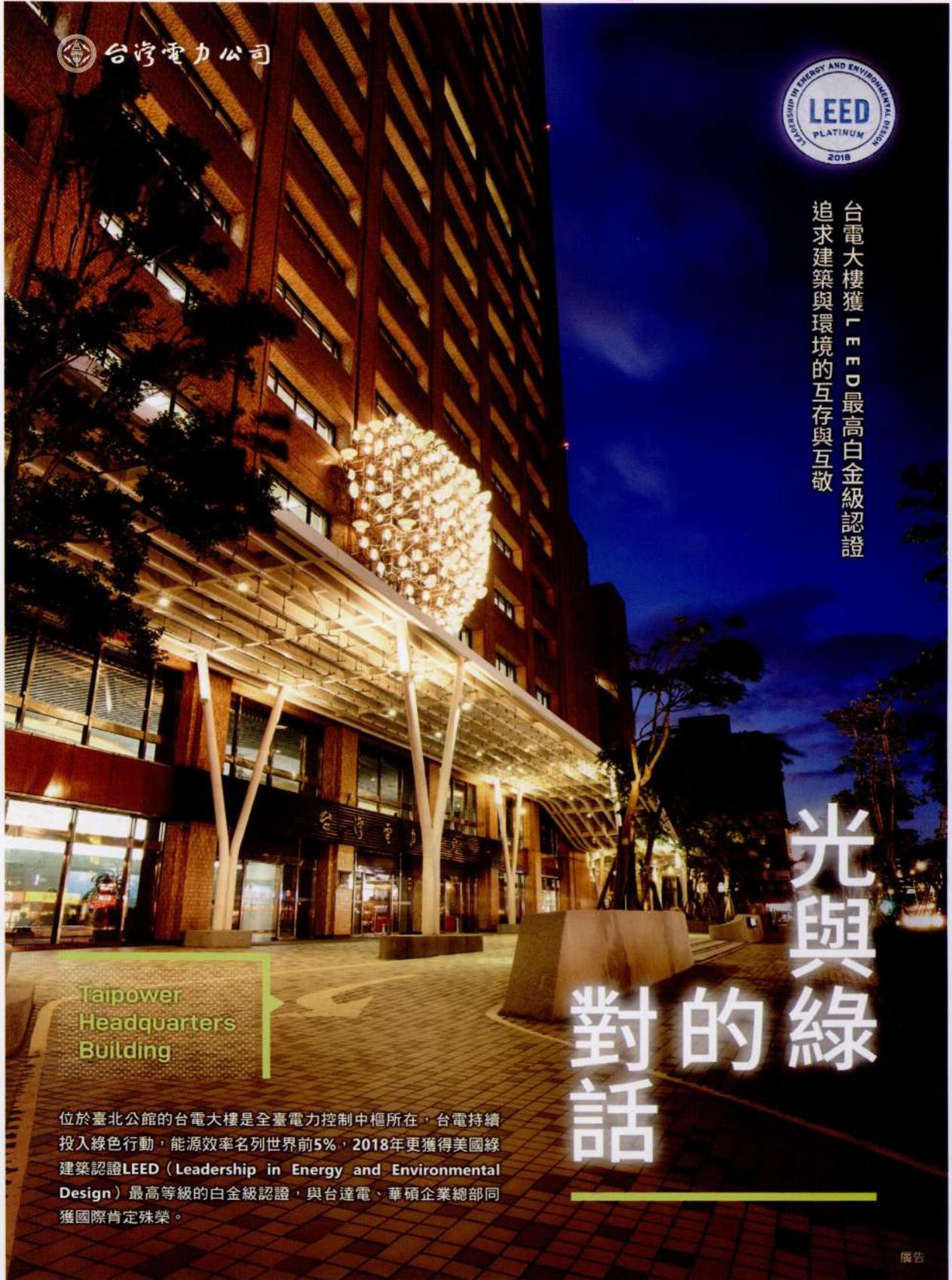


海洋及水下科技季刊

Journal of Ocean and Underwater Technology

第29卷第4期
108年12月

「海岸帶環境(生態)監測與衝擊/海岸保護」
「海漂垃圾與海域汙染」 專輯



台灣電力公司

LEED PLATINUM 2018

台電大樓獲「LEED」最高白金級認證
追求建築與環境的互存與互敬

光與綠
對話

Taipower
Headquarters
Building

位於臺北公館的台電大樓是全臺電力控制中樞所在，台電持續投入綠色行動，能源效率名列世界前5%，2018年更獲得美國綠建築認證LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) 最高等級的白金級認證，與台達電、華碩企業總部同獲國際肯定殊榮。

廣告

深海著陸器的發展與展望

鄭欣雅¹、魏志濤²、林卉婷²、謝祥志¹、何文華²

摘要

深海著陸器有如海上的登月小艇，著陸器上方通常配置音響釋放儀及浮球，下方則搭載重捶及科學儀器。施放時，著陸器利用下方重捶的重量自由下潛至海床進行實驗，回收時，再由母船以音頻命令呼叫釋放儀釋放重捶，靠上方浮球提供之正浮力回到水面。著陸器也有如海床上的小型實驗室，可以搭載多種科學儀器，進行長時間觀測或是時序培養實驗。鑒於其低成本，各國海洋研究機構皆積極發展著陸器作為深海觀測平台。被深海環繞的臺灣也於 2016 年引進深海著陸器，本文簡介著陸器的基本架構，並透過海上實測探討目前著陸器發展所遭遇的問題，也探討其未來之廣大應用性。本文中介绍的應用實例是利用著陸器觀測深海生物群聚的呼吸作用，所量測之數值稱為沉積物群聚耗氧量 - 代表底棲群聚分解有機碳的能力，同時也反映了由海表沉降到深海的顆粒有機碳通量。而不論是生物群聚行有氧呼吸消耗的氧氣量或是被生物分解的有機碳量，都是海洋生地化過程的重要議題，這些通量也直接影響了深海底棲生物之生物量、多樣性與物種組成甚至全球變遷下二氧化碳在海洋中的源匯過程。著陸器的應用也不僅止於目前發展中的沉積物群聚耗氧量觀測及底泥採樣，依不同科學議題也可加裝其他化學探針或搭配遠端採水器，進行更精密的化學分析，測量更多海床生地化參數的時空變化。另外，為了記錄著陸器運作而發展的攝影系統也可獨立施放，以誘餌進行遠端水下縮時攝影，紀錄深海生物群聚結構及多樣性。近年來海洋探勘的科技日新月異，臺灣的海洋觀測技術也逐漸由傳統的船載儀器測量或實驗逐漸發展至自走載具觀測及現場實驗，未來著陸器將朝與其他觀測技術整合的方向發展，透過多種載具及多尺度觀測建構綿密的長期海洋觀測網。

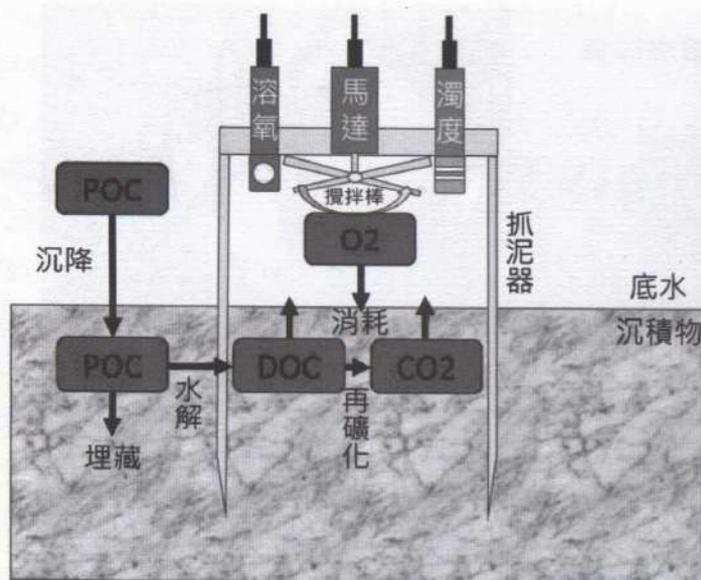
一、前言

水深是海洋探測最難克服的問題之一，因為水深越深壓力越大，深海探測所需要的物料、時間成本與風險也越大，而取得海洋物理、化學或生物的樣本與資料，或進行長時間實驗或觀測也越加困難。因此為了減低時間成本與風險及進行長時間觀測或實驗，各海洋研究單位皆積極發展無需繫纜施放、回收的深海著陸器，並設計各式外掛儀器如：採泥器、採水器或生物陷阱來取得深海樣本，或加裝各式探針或影像系統來量測水文、流場變化或記錄生物的數量及行為 (Bagley et al., 2004; Cowen et al., 2012, Jamieson, 2016; Jamieson et al., 2013; Tengberg, 1997)。然而在各項科學應用中，著陸器經常被用來測量沉積物的群聚耗氧量，也就是用密閉罩蓋法 (圖一) 來測量底棲生物的呼吸作用 (Glud, 2008; Rowe et al., 2008; Tengberg et al., 2004, 1995)。由於海床是海洋中有機顆粒的終點，不論是在海表吸收二氧化碳、行光合作用的藻類或是透過河口溼地注入海洋的有機碎屑，海洋中的有機顆

粒無論經過何種過程，最終都將因重力而沉降，經年累月的累積在海床上，除了少數有機碳被永久埋藏在底泥深處，絕大多數的有機碳都被海床上豐富的微生物及無脊椎動物所利用 (Middelburg, 2018; Snelgrove et al., 2018)。因此底棲生物的呼吸作用相當程度反映底泥內能被使用或被分解的有機碳，也代表了從海表傳輸到深海的顆粒有機碳通量 (因為吃的多才能用的多) (Glud, 2008; Middelburg, 2018; Stratmann et al., 2019)。顆粒有機碳的傳輸與埋藏為海洋碳循環及生地化過程的重要議題，除了調控深海底棲生物之生物量、多樣性與物種組成，也間接影響了全球變遷下二氧化碳在海洋中的源匯過程 (Middelburg, 2018; Snelgrove et al., 2018)。因此國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組 2016 年自丹麥 KCDenmark 引進著陸器以來，首要的目標既設定為近底的溶氧時序觀測，並利用沉積物採樣器進行底泥培養，測量沉積物群聚呼吸率。然而著陸器的科學應用十分廣泛，根據不同科學目的能夠負載的儀器繁多，本文僅簡介目前著陸器在本中心的發展近況，其他應用則不在此贅述。

1 國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組

2 國立臺灣大學海洋研究所



圖一：密閉罩蓋法測量底泥生物呼吸作用過程中消耗的氧氣量。顆粒有機碳(POC)沉降到海床，除了少部分難被分解的有機碳會被永久埋藏，大多顆粒有機碳在深海沉積物與海水交界會被微生物透過呼吸作用分解再礦化為二氧化碳或水解成溶解態有機碳(DOC)釋放回水體中。透過安裝在培養艙內部的溶氧探針可以估計沉積物群聚耗氧率，以及估計降落到海床上的顆粒有機碳通量。右圖為安裝在深海著陸器上的箱形沉積物採集器。

二、KCDenmark 深海著陸器簡介

本中心所引進的 KCDenmark 著陸器最大作業深度為 6000 米，主體由長寬 1.5 米、高 3 米的不銹鋼方形框架所構成(圖二)，框架上層架設兩支音響釋放儀，四周裝設 12 顆玻璃浮球。下層則搭載四組槓片及水文探測系統、抓泥器等科學儀器。一般而言，著陸器利用槓片重量自由下潛至海床，進行海床實驗後再由母船以音頻命令呼叫釋放儀釋放槓片，槓片脫落後著陸器靠玻璃浮球提供之正浮力回到水面。在緊急狀況，若音響釋放儀失去作用或無法跟母船聯絡，著陸器也可用備用音響釋放儀脫開槓片，或在預定時間自行燒斷燃燒金屬絲(後稱 burnwire) 後釋放槓片，然後同樣靠玻璃浮球提供之正浮力回到水面。本文介紹之應用實例中，著陸器酬載之科學儀器包括：長寬 30 公分、高 36 公分箱形採泥器(圖一右)、水文探針、資料紀錄儀、burnwire 定時器及水下攝影系統。箱形採泥器的穿透深度取決於著陸器底部伸縮腳的高度，為避免採泥器碰撞甲板，我們調整伸縮腳尖使其些微超過油壓罐底部，因此擋泥板至尖端約可採集約 20

公分厚底泥。箱形採泥器的上蓋配備攪拌器、溶氧探針及濁度探針。採泥器內的溶氧探針可記錄沉積物群聚耗氧量，濁度探針紀錄著陸器著陸及底泥採樣過程(由揚塵及懸浮顆粒濃度判斷)，攪拌器可防止採泥器內出現海水分層現象，而導致溶氧濃度不均現象。因採泥器上蓋可換裝不同探針來測得水中溶質之濃度變化並換算水體與沉積物之間的溶值通量，所以又被稱為沉積物通量艙。而除了透過延長纜線連接至通量艙上蓋的探針，水文儀上也加掛了壓力計及導電度探針，其中壓力計可用來確認著陸器的深度以及著陸器是否飄移，而導電度探針則用來記錄環境溫鹽變化，但也可加裝在通量艙上蓋，測量通量艙內若注入少量淡水後的鹽度變化，並換算培養水體的體積。另外，定時器可控制兩組 burnwire 及攪拌馬達，其中 burnwire1 用來施放槓片，burnwire2 控制通量艙的作動，因此著陸器施放之前須透過電腦設定通量艙上蓋及油壓罐關閉時間、攪拌馬達啟動次數、間隔及每次攪拌時間，以及燒斷 burnwire1 時間，而深海電池則供電給定時器來燒斷 burnwire 及啟動攪拌馬達。



圖二：深海著陸器及釋放系統之結構組成。

著陸器的基本運作可分為採泥器作動及槓片釋放系統(圖二)兩大部分。首先，設定通量艙之前需先壓縮蓄壓器內部的強力彈簧，釋放油壓管內壓力，接著將通量艙下方不銹鋼鏟向上推至啟動高度，並用鋼絲將油壓止回閥固定在水平(關閉)位置，而同一條鋼絲的另一端則穿過通量艙上蓋把手並向上反折將通量艙上蓋固定在開啟位置，最後扣住 burnwire2 的釋放器，完成通量艙設定(圖三)。在預定的時間，若 burnwire2 燒斷且鋼絲脫鉤，將依序關閉通量艙上蓋，開啟止回閥(回到垂直位置)，並啟動蓄壓器將油壓鏟關閉，成功使採泥器作動。另外，槓片釋放系統包含兩隻音響釋放儀(其一為備用系統)及 burnwire1 釋放器(第二備用系統)，三者互相串連，開啟任一者都觸動連動系統，使中央立桿及底座向下作動，此時四隻夾住鐵鍊及槓片的橫桿則同時從中央底座脫落，脫鉤四個角落的鐵鍊及下方槓片。為確保實驗品質，貴儀中心也自製深海縮時攝影系統來紀錄著陸器運作過程。自製攝影系統使用市售運動攝影機及防水殼，另外加上自製之電源控制器、環氧樹脂包埋 LED 燈 (Oguri et al., 2015) 及鋰電池組。攝影系統最大作業深度約 2600 米，而控制器可同時控制兩組攝影機及 LED 水下燈進行連續或是縮時攝影(如延遲開啟及間

隔攝影)。



圖三：通量艙的作動系統[上圖]及深海縮時攝影系統[下圖]。

三、陸/海上實測

原廠著陸器系統使用熱縮套管包覆 burnwire，使用前須先將定時器內電容充電至少 1 小時並刮除部分外膜(與海水接觸)才能通電燒斷 burnwire。原本的設計除設定不易外，也可能意外損傷 burnwire 而造成系統無預警啟動，因此決定改用釋放器及較易於更

四、未來展望

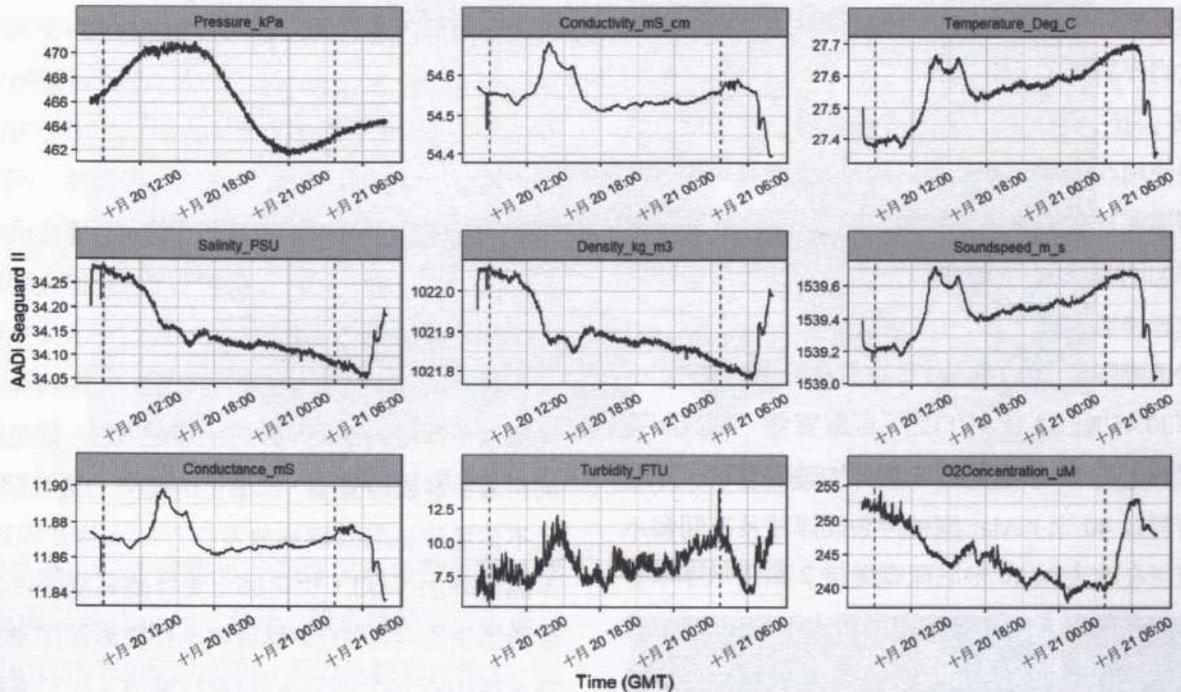
本中心之著陸器雖屬於測試階段，但已在淺水域(~30 米)成功進行測試，短期目標希望能先改善海上實測時遭遇之問題，如 burnwire 系統的穩定性不足，本次海上實測也發生 burnwire 無法燒斷，最終被迫使用備用音響釋放儀來控制通量艙。未來可考慮另外攜帶淺水型音響釋放儀作為控制通量艙的備用系統，但深水施放仍須仰賴 burnwire，因此有必要進一步檢修 burnwire 系統並測試其穩定性。另外，著陸器的高度和重量不管在施放、回收、運送或固定上都是很大的挑戰。尤其沉積物採樣須冒很大的風險，所以除非有絕對必要回收樣本，如進行示蹤劑標定培養實驗，或是非常清楚底質的狀況，初期著陸器施放建議以不採樣為原則，針對上述之狀況，貴儀中心目前也著手發展輕量型、低價位的壓克力通量艙，輕量化不但能降低著陸器施放及操作的風險及困難度(如不需要外加浮球)，也可挪出更多酬載空間供其他科學儀器使用。我們的中程目標則期望能循序漸進至較深水域(100-200 公尺水深)進行實驗，由於著陸器實驗必須保持穩定，而上方繩索越長就越容易受到水流拉力的影響，因此當施放深度超過 40 公尺水深就不再適合使用表面浮標。為降低施放回收風險，初期自主施放可以在著陸器上方裝置繩桶及浮球並搭配淺水型音響釋放儀(類似美國無繫纜捕蟹漁業做法)，若第一、第二備用施放機制皆失效，著陸器上方的繩桶仍可提供第三備用施放機制，以增加著陸器回收的成功率。而長期的目標則期望透過多次施放、回收的經驗累積及不斷的錯誤改進，逐漸發展出適合臺灣海域的著陸器設計，而達到臺灣周遭海域的全海洋深度施放的目標(約 6000 公尺水深)。而除了觀測沉積物群聚耗氧量，未來依不同科學問題也可另外加裝其他化學探針(如二氧化碳分壓、甲烷、營養鹽)，或搭配遠端採水器，依預設時序採集通量艙內水樣並進行化學分析，測量更多海床生地化參數的通量。這些實地的觀測將有助於了解海洋沉積物之微生物活動，營養鹽的利用及再生，硫酸鹽還原及沉積物硫化學，或精確估計天然水合物區之甲烷通量等等。另外，為記錄著

換之 L 型 burnwire。另外，假設沉積物密度為 2.65 g/cm³，沉積物採樣高度為 36 cm (通量艙高度)，採樣後扣除浮力，通量艙至多能增加約 60 公斤水重，因此港邊測試時以 100 公斤槓片模擬採樣後掙脫底泥所需浮力。測試結果發現整個系統加 100 公斤槓片仍需 6 顆外加浮球才能得到正浮力，推論著陸器系統水中總重約介於 325 至 300 公斤左右 (假設每顆浮球約提供 25 公斤之浮力)。若要著陸器能穩定且慢速沉底，估計要使用四組共 160 公斤之槓片。港邊測試也發現伸縮腳擋泥片可能會沒入較鬆軟的底泥，造成錨定效應而增加回收風險，可能解決方法為外加四片包圍著陸器的延伸擋泥板。

貴儀團隊於 2019 年 10 月在西南海域約 35 米水深(120°30.45'N, 22°18.48'E)進行錨錠實測，測試配置為著陸器上方 15 米處加掛 6 顆外加玻璃浮球，浮球串上方再以 40 米 Kevlar 繩連接表面浮球及夜間警示燈，最後在水表以 10 米尼龍繩連接 2 顆標示浮球。施放時依序先用 A 架將著陸器吊掛入水，在 15 米處加掛玻璃浮球串並將表面浮球、警示燈及標示浮球拋入海中，最後再由玻璃浮球串脫勾，自由下潛。透過水下影像發現通量艙約著陸後 1 小時關閉上蓋，但油壓鏟直到三個小時半後才完全關閉。從水文資料(圖四)中可以看出，通量艙內濁度持續的變化，有可能反應底棲生物的活動，或是油壓鏟作動時塌陷的沉積物揚塵，而通量艙外壓力則主要反映潮汐週期，顯示著陸器並明顯位移。另外，通量艙內的溶氧明顯隨時間下降，但 18 小時後溶氧反而開始上升。仔細檢視影片發現通量艙上蓋並沒有完全密合，可能因為通量艙被繩索或纜線勾住，但因攝影角度無法判斷。根據前 18 個小時的資料，可估計沉積物群聚耗氧量為每天每平方公尺約 2.7 毫莫耳(根據溶氧對時間變化斜率*底水體積/培養面積)，相當於每天每平方公尺的海床約消耗 32.4 毫克的有機碳(假設呼吸商數為 1)。雖然因為通量艙未完全密閉而可能低估溶氧通量，本次測試仍完成臺灣鄰近海域首次沉積物群聚耗氧量實測。培養進行約 23 小時之後，以音頻命令打開音響釋放器脫開槓片，並由外加浮球處回收著陸器。

陸器運作而發展的攝影系統也可獨立以深海影像著陸器的方式施放，利用誘餌進行遠端水下縮時攝影 (Bagley et al., 2004; Jamieson, 2016; Jamieson et al., 2013)，紀錄臺灣深海生物群聚結構及多樣性的時空

變動。而最終也期望發展中的著陸器能夠與其他的深海長期觀測站(如南海的 SEATS 觀測站或西北太平洋的颱風浮標即時觀測系統)進行共同觀測，探索深海生態系統及海洋生地化循環的相關科學議題。



圖四：著陸器水文資料依序為通量艙外壓力、導電度、溫度、鹽度、密度、聲速以及通量艙內導電度、濁度、溶氧變化。兩條紅虛線間為通量艙內溶氧呈線性遞減區間。

五、參考文獻

1. Bagley, P. M., Priede, I. G., Jamieson, A. J., Bailey, D. M., Battle, E., Kemp, K., 2004. Lander techniques for deep ocean biological research. *Underw. Technol.* 26, 3–12.
2. Cowen, J. P., Copson, D. A., Jolly, J., Hsieh, C.-C., Lin, H.-T., Glazer, B., Wheat, G. C., 2012. Advanced instrument system for real-time and time-series microbial geochemical sampling of the deep (basaltic) crustal biosphere. *Deep-Sea Research I* 61, 43–56.
3. Glud, R. N., 2008. Oxygen dynamics of marine sediments. *Mar. Biol. Res.* 4, 243–289. <https://doi.org/10.1080/17451000801888726>
4. Jamieson, A. J., Boorman, B., Jones, D. O. B., 2013. Deep-Sea Benthic Sampling, in: Eleftheriou, A. (Ed.), *Methods for the Study of Marine Benthos*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 285–347.
5. Middelburg, J. J., 2018. Reviews and syntheses: to the bottom of carbon processing at the seafloor. *Biogeosciences* 15, 413–427. <https://doi.org/10.5194/bg-15-413-2018>
6. Oguri, K., Yamamoto, M., Toyofuku, T., Kitazato, H., 2015. Developments of deep-sea light and charge pump circuits fixed with an epoxy resin. *JAMSTEC Rep Res Dev* 21, 7–15.
7. Rowe, G. T., Morse, J., Nunnally, C., Boland, G. S., 2008. Sediment community oxygen consumption in the deep Gulf of Mexico. *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 55, 2686–2691.
8. Snelgrove, P. V. R., Soetaert, K., Solan, M., Thrush, S., Wei, C.-L., Danovaro, R., Fulweiler, R. W., Kitazato, H., Ingole, B., Norkko, A., Parkes, R. J., Volkenborn, N., 228–259.

2018. Global Carbon Cycling on a Heterogeneous Seafloor. *Trends Ecol. Evol.* 33, 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.11.004>
9. Stratmann, T., Soetaert, K., Wei, C.-L., Lin, Y.-S., van Oevelen, D., 2019. The SCOC database, a large, open, and global database with sediment community oxygen consumption rates. *Sci. Data* 6, 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0259-3>
10. Tengberg, A., 1997. Free-Vehicle Benthic Lander Technology for the Study of Biogeochemical Processes in Marine Sediments (Doctoral thesis). Chalmers University of Technology.
11. Tengberg, A., De Bovee, F., Hall, P., Berelson, W., Chadwick, D., Ciceri, G., Crassous, P., Devol, A., Emerson, S., Gage, J., Glud, R., Graziottini, F., Gundersen, J., Hammond, D., Helder, W., Hinga, K., Holby, O., Jahnke, R., Khripounoff, A., Lieberman, S., Nuppenau, V., Pfannkuche, O., Reimers, C., Rowe, G., Sahami, A., Sayles, F., Schurter, M., Smallman, D., Wehrli, B., De Wilde, P., 1995. Benthic chamber and profiling landers in oceanography — A review of design, technical solutions and functioning. *Prog. Oceanogr.* 35, 253–294. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(95\)00009-6](https://doi.org/10.1016/0079-6611(95)00009-6)
12. Tengberg, A., Stahl, H., Gust, G., Müller, V., Arning, U., Andersson, H., Hall, P. O. J., 2004. Intercalibration of benthic flux chambers I. Accuracy of flux measurements and influence of chamber hydrodynamics. *Prog. Oceanogr.* 60, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2003.12.001>

致謝

作者感謝國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組技術員王漢松、洪瑋廷、連政佳、楊凱絜以及海研一號研究船作業人員提供技術協助。我們也感謝王弼技術員及賴振哲技士設計製作深海縮時攝影系統。

英文摘要

Development and Prospect of Benthic Lander

Sin-Ya Jheng¹、Chih-Lin Wei²、Huei-Ting Lin²、
Shiang-Chih Shie¹、Wen-Hwa Her²

¹Marine Exploration Instrument Center,

Instrumentation Center, National Taiwan University

²Institute of Oceanography, National Taiwan University

Abstract

Deep-Sea benthic landers work like lunar landers that land on the seafloor. In general, a lander's main platform is loaded with scientific instruments, and on the top is supported by an array of floats, whereas the bottom is attached to ballast weights attached to acoustic or burnwire releases. During the deployment, landers free-falls to the seafloor pulled by the descent weights. The recovery of the lander then depends on the positive buoyancy provided by the floats after the release of ballast weights triggered by an acoustic signal or burnwire release. Since benthic landers can stay on the seafloor for a pre-determined time, many oceanographic institutions have used the lander as a seafloor laboratory, which can carry a variety of automated equipment and sensors to conduct time-series experiment. The benthic lander can also add a remote access sampler to conduct discrete water sampling for shore-based sophisticated chemical analyses to reveal the temporal dynamics of biogeochemical fluxes on the seafloor.

In the paper, we describe the ongoing development of the benthic lander modified by the Marine Exploration Instrument Center (MEI) of the Institute of Oceanography, National Taiwan University. The MEI lander equips with a sediment respirometer and various sensors (e.g., oxygen, turbidity, pressure, and conductivity) to measure the in-situ sediment community oxygen consumption (SCOC) and to recover sediment samples for further biogeochemical analyses. The SCOC reflects the rate of organic carbon remineralization and has been considered as a proxy for the export flux of labile particulate organic carbon (POC) to the seafloor. These rates and fluxes describe and quantify the essential biogeochemical processes that determine the fate of atmospheric CO₂ preserved in the ocean, which is also significantly influenced by the biomass, diversity, and composition of the seafloor communities. Moreover, to document the operations of the sediment-core respirometer and the weight-release system, we also developed a low-cost, modular, time-lapse underwater camera system using action cameras and epoxy-encapsulated LED lights. In the future, the underwater camera system will be deployed standalone as a baited lander to document the diversity of deep-sea scavenging fish and visually assess the benthic ecosystem. Our development of the deep-sea landers and in-situ ocean monitoring technology have contributed to the advancement of oceanographic researches in Taiwan from the traditional ship-based surveys to the autonomous surveys. In the future, the MEI benthic lander will be incorporated into the other existing oceanographic instruments in Taiwan to form a long-term, multi-scale ocean observing network.

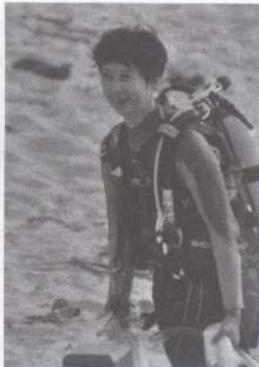
作者簡介



鄭欣雅，國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系碩士，現任國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組技術員，專長為錨碇作業執行。



魏志瀛現任國立臺灣大學海洋研究所副教授，美國德州農工大學海洋所博士，專長底棲生態學、深海生態學與群聚生態學。曾先後擔任紐芬蘭紀念大學海科中心博士後研究、國立臺灣大學海洋研究所助理教授。



林卉婷現任國立臺灣大學助理教授，美國夏威夷大學海洋研究所博士，專長海底熱液化學、海洋溶解態有機物分析化學、海底熱液採樣技術。曾先後擔任夏威夷大學博士後研究員、美國伍茲霍爾海洋研究所訪問科學家。



謝祥志，國立臺灣大學海洋研究所碩士，現任國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組組長，專長為都卜勒流速儀操作。



何文華，國立臺灣海洋大學造船工程學系學士，曾任國立臺灣大學理學院貴重儀器中心海洋探勘組技術員，現擔任國立臺灣大學海洋研究所專任助理。