

應用 GNOME 推算 TOROS 實測流場作用下的綠島不明油污來源

邱啓敏¹、莊士賢²、賴堅戊³、黃清哲⁴、陳禹儒⁵

摘要

臺灣四周海域為亞太航運要道，大型船隻往來頻繁，導致海上油污染事件發生的風險增加。近年來，臺灣附近海域屢有不明來源油污事件發生，基於溢洩油時間與地點不明，因此要追查油污的來源有一定的困難度，例如 2017 年 3 月 10 日綠島海岸遭受不明油污的污染，目前還無法追查到排放來源。風與海流主導海上油污漂移軌跡與擴散範圍，若能得到較精確的風與海流，即可應用油污擴散模式進行油污源可能排放位置與時間的推算 (hindcast)。有鑑於此，本研究應用美國 NOAA 發展的油污擴散模式 GNOME，輸入綠島氣象站的實測風速風向，以及台灣海洋科技研究中心 TOROS (Taiwan Ocean Radar Observing System) 的實測多站合成海流 (TUV)，情境模擬該不明油污的可能排放位置與時間；然後與環保署透過 AIS (船舶自動辨識系統) 所推測二艘可能排放不明油污的船舶航跡進行比對，來初步建立一套推算海上不明油污來源的方法。

關鍵字：海上不明油污源推算、GNOME、TOROS 高頻雷達合成海流、船舶自動辨識系統

一、前言

臺灣自 2000 年海洋污染防治法施行後，在近二十年來歷經多次的油污染事件，環保署與各機關在油污事件的相關應變處理機制已臻完備。臺灣四周海域大型船隻往來頻繁，每當颱風季節與東北季風盛行之際，時有船隻擱淺、觸礁甚至污染外洩之情況發生，此類的油污染事件已明確得知船隻所屬公司、擱淺位置與時間，以及溢洩油的數量，所以能較精確的掌握油污漂移軌跡與擴散範圍，據此能有效作為後續對船公司求償海洋環境復原經費的重要依據。但另一種海上油污染事件為來源不明的油污染，由於無法得知偷排放油污的船隻以及位置與時間，造成油污排放元凶追查時的困難度，因此無法對偷排放油污船隻所屬的船公司提出求償。

2017 年 3 月 10 日台東綠島東北角自綠島燈塔至中寮港沿岸遭受到不明油污的污染 (如圖 1)，環保署雖透過 AIS 分析出可疑貨輪，但目前也尚未追查到真正偷排放油污的船隻，導致無法做進一步求償綠島海

岸環境復原的經費。針對不明油污染事件發生時，除了在遭受污染的海岸現場採集油污樣品進行分析成份，研判可能為何種船隻偷排放的油品，接著可應用油污擴散模式進行情境模擬，自發現油污的位置往回推算 (run backward hindcast) 船隻可能偷排放油污的起始位置與時間。

GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment; Cheng et al., 2011; Zelenke et al., 2012; Beedle-Krause, 2001) 是美國海洋及大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 開發的油污擴散模式，若美國海域發生油污染事件時，NOAA 會以 GNOME 模擬海面上油污擴散及漂移軌跡，提供政府在油污事件緊急應變處理時的重要參考，最著名的案例即 2010 年墨西哥灣漏油事故 (Mariano et al., 2011)。同時，針對不明油污染事件，GNOME 有往回推算的功能，以追溯油污可能排放的起始位置及時間。

另外，風與海流為主導海上油污漂移軌跡與擴散範圍的重要因子 (Cheng et al., 2011; Yu et al., 2016)，若能得知實測風與海流的時序列變化趨勢，再應用油污擴散模式情境模擬，並往回推算不明油污染可能的來源，由此方法得到的推算結果也較具備科學的依

1 國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人
2 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授
3 國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心副研究員
4 國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨
近海水文中心主任
5 國立成功大學海洋科技與事務研究所博士生

據。有鑑於此，本研究蒐集綠島氣象站監測的風速風向資料，以及台灣海洋科技研究中心 TOROS 在綠島附近海域量測的合成海流 (TUV)，輸入至 GNOME 往回推算綠島不明油污可能的排放位置與時間。同時，將模擬結果與環保署公布的可疑貨輪之航跡進行比對確認，以初步建立一套推算海上不明油污來源的方法。

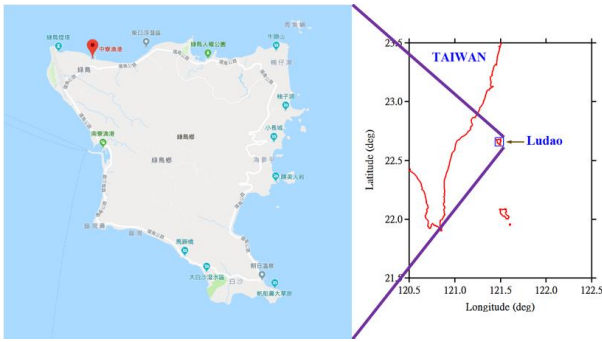


圖 1：綠島(Ludao)北邊燈塔至中寮漁港一帶海岸發現不明油污

二、油污擴散模式

本研究採用的油污擴散模式是由 NOAA 架構下有害物質緊急應變組 (Hazardous Materials Response Division, HAZMAT) 所發展的一套 Eulerian/Lagrangian 的溢油軌跡模式 GNOME，此油污擴散模式是一開放使用的軟體。若美國發生海上油污事件發生，GNOME 是美國官方所使用的油污擴散軟體，並將模擬結果提供政府做緊急應變與救災資源的調配。GNOME 油污擴散模式有多項功能 (NOAA, 2002)：

- 1、可輸入實測與預測的風、海流以及溢油資訊等資料，預測海面上油污擴散與漂移軌跡的變化。
- 2、預測油污漂移的軌跡有考慮實測與預測風與海流的不確定性(uncertainty)。
- 3、NOAA 建置一個線上資料庫系統 GOODS (GNOME Online Oceanographic Data Server)，此系統可提供全世界地圖，不同模式預測的風與海流資料，以及各種資料的來源 (如圖 2)，可提供 GNOME 進行預測油污擴散與漂移軌跡。
- 4、GNOME 可預測油污暴露在海面上的風化演變情況。
- 5、快速更新資料，重新執行油污擴散模擬，以及儲存有關的資訊。

6、提供預測油污軌跡輸出資訊，可應用在地理資訊軟體 (GIS) 展示，讓現場指揮官迅速掌控油污擴散及漂移軌跡的相關地理資訊，做出最佳的決策及應變。

7、若發生不明油污事件，可在發現油污地方，提供往回推算油污軌跡 (trajectory backwards) 的功能，以推算油污可能發生的位置與時間 (此功能為提供高階使用者應用)。

另外，風與海流等移動資料的不確定性，可能會造成油污擴散模式推算與預測油污在水平方向有 30% 誤差。因此，GNOME 模式有考慮風與海流的不確定因素，並應用大量資料進行 1 千次以上的模擬 (Beedle-Krause, 2001)，以提升油污漂移軌跡與擴散範圍的預測。

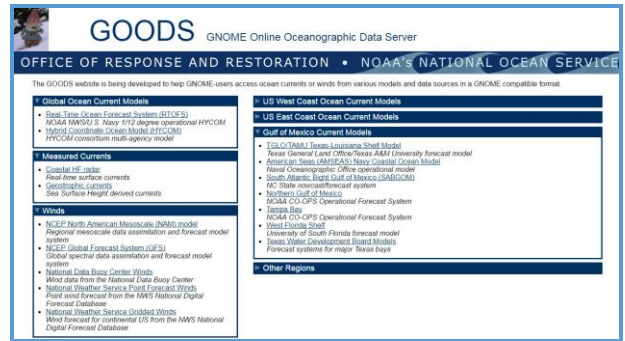


圖 2：GOODS 線上海洋環境資料庫

三、情境模擬綠島不明油污事件

2017 年 3 月 10 日台東綠島北岸的珊瑚海灘與潮間帶，被當地潛水教練發現遭受不明油污的污染，尤其在中寮漁港附近的潮間帶與消波塊有重油覆蓋 (<http://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/2002075>，自由時報)。在事件發生後環保署也成立緊急應變中心，並推測可能是行經綠島附近海域的船舶排放重油，這些油污隨著海流漂移到綠島，嚴重影響到綠島北部海岸生態環境。環保署雖透過 AIS 標示出二艘可疑船舶，於 3 月 9 日早上 10 點左右通過綠島附近海域 (如圖 3)，且追蹤其中一艘在澳洲港口停靠時，登上該可疑船並採取廢油樣品進行分析，但到目前為止也無法證明是哪一艘船舶偷排所致。

有鑑於此，本研究應用 GNOME 往回推算油污漂移軌跡與擴散範圍的功能，情境模擬綠島不明油污可

能排放的位置與時間。GNOME 可輸入實測與預測的風與海流資料，如採用實際觀測的資料將會提升油污漂移軌跡與擴散範圍的推估與預測精度。風速風向資料來源可由海上浮標或鄰近海岸氣象站量測得到，綠島氣象站鄰近綠島北部的海岸，且無高山地形的影響，所以本研究採用風的資料為綠島氣象站量測的風速風向資料（如圖 4），在 3 月 8 日至 10 日凌晨，風速平均約在 3 m/s，風向則以西北方向為主。海流資料則採用台灣海洋科技研究中心 TOROS 在綠島附近海域量測的 1/15 度空間解析之合成海流 (TUV)，高頻雷達的優勢為可以量測整個海面的海流流場（如圖 5），且 Abascal 等人(2009; 2017) 已將高頻雷達 (high-frequency radar) 量測的海流應用在油污擴散模式，進行推估海面上油污漂移軌跡與擴散範圍。

依據環保署公布資料顯示，3 月 10 日約 19:00 接獲綠島居民通報自綠島燈塔至中寮漁港有發現大量濃稠的不明油污，環保署推測可能是行經綠島附近海域的船舶偷排重油。本研究依據環保署提供的相關資訊，情境模擬綠島不明油污事件，表 1 為情境模擬參數設定，由於不明油污種類與數量無法確認，所以情境模擬案例假設不明油污種類為中等比重原油 (medium crude)，不明油污排放數量為 5 公秉，自發現油污地點(中寮漁港)往回推算 72 小時前油污漂移的軌跡與擴散範圍。GNOME 油污擴散模式輸入風場採用綠島氣象站逐時風速風向資料，海流流場則為 TOROS 在綠島附近海域量測的合成海流 (TUV)。

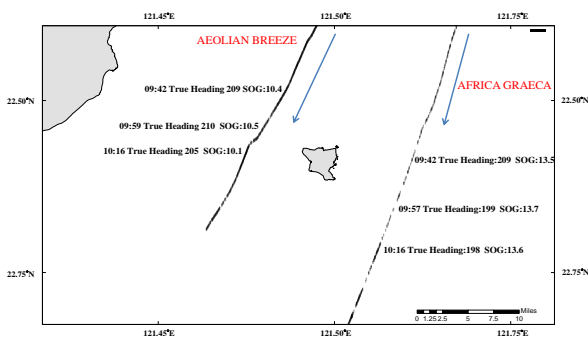


圖 3：環保署由 AIS 辨識出二艘可疑船舶，於 3 月 9 日早上 10 點左右通過綠島附近海域

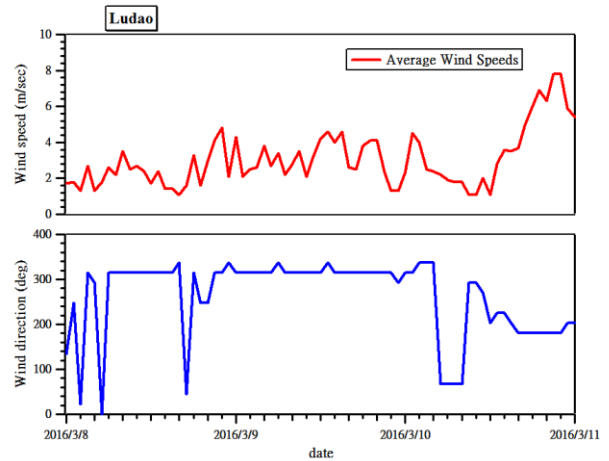


圖 4：2017 年 3 月 8 日至 11 日綠島氣象站監測之時序列風速風向資料。

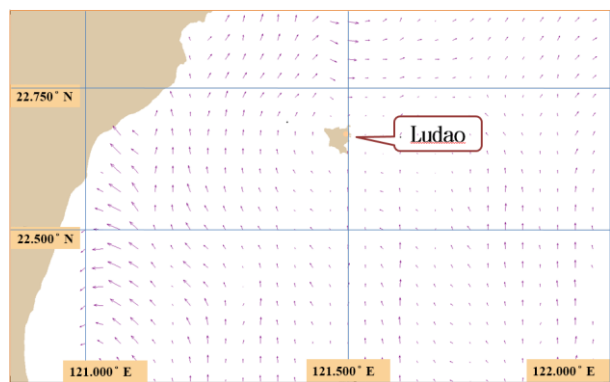


圖 5：TOROS 在綠島附近海域量測的合成海流(TUV)

表 1：情境模擬 2017 年 3 月綠島不明油污事件

情境模擬參數設定	
1.	發現不明油污時間：2017 / 03 / 10 19:00
2.	發現不明油污地點：Latitude：22.677502° N Longitude：121.472689° E
3.	不明油污種類：中等比重原油 (medium crude)
4.	不明油污排放量：5 公秉
5.	往回推算油污漂移軌跡時間：72 小時
6.	風場：綠島氣象站逐時風速風向
7.	流場：TOROS 在綠島附近海域量測的合成海流

四、結果與討論

應用 GNOME 油污擴散模式往回推算不明油污漂移軌跡與擴散範圍的功能，本研究依據實測的風與 TOROS 海流，針對綠島不明油污事件進行情境模擬(表 1)。依據當地民眾發現海岸油污的時間估算，油污最初可能上岸的最晚時間大約是 3 月 10 日 19:00，如以此開始往回推算至 36 小時前不明油污的漂移軌跡與擴散範圍，圖 6 至圖 9 為情境模擬結果，

表 2 為情境模擬往回推算油污距綠島與西側船航跡最近距離。

圖 6 至圖 9 中綠島左右二條虛線為環保署透過 AIS 所推測的二艘可能排放不明油污的船舶，本研究將交通部運輸研究所港灣技術研究中心提供的二艘船舶之航跡座標位置繪製於圖中，左側的船航跡路徑(靠近臺灣本島) 離綠島約 4.5 浬，右側的航跡路徑離綠島約 6.0 浬。同時，本研究案例有考慮風與海流的不確定性，所以油污擴散範圍有紅色與黑色二種，紅色質點擴散範圍表示模擬的油污擴散範圍有 90% 的可靠性，黑色質點擴散範圍表示模擬的油污擴散範圍則為最佳的模擬結果 (Zelenke et al., 2012)。

由表 2 及圖 6 結果顯示，不明油污往回推算 18 小時前至 3 月 10 日 01:00 時，紅色質點油污水平方向擴散範圍約 2.0 公里，距中寮漁港最近距離約 0.4 公里，距綠島西側船舶行經航線最近距離約 6.8 公里；而黑色質點油污水平方向擴散範圍約 0.7 公里，距中寮漁港最近距離約 0.6 公里，距綠島西側船舶行經航線最近距離約 7.7 公里。

表 2：情境模擬往回推算油污距綠島與西側船航跡最近距離

往回推算時間 (hr)	紅色油污擴散範圍		黑色油污擴散範圍	
	距綠島最近距離(km)	距西側船航跡最近距離(km)	距綠島最近距離(km)	距西側船航跡最近距離(km)
18	0.4	6.8	0.7	7.7
33	1.0	2.6	2.7	4.8
38	2.6	0.0	4.8	2.0
55	7.8	0.0	9.3	0.0

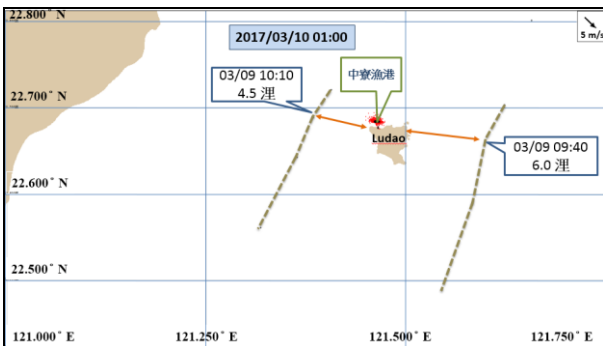


圖 6：情境模擬往回推算 18 小時至 3 月 10 日 01:00 不明油污的漂移軌跡及擴散範圍

由表 2 及圖 7 結果顯示，不明油污往回推算 33 小時前至 3 月 9 日 10:00 時，紅色質點油污水平方向擴散範圍約 4.0 公里，距綠島燈塔最近距離約 2.0 公里；而黑色質點油污水平方向擴散範圍約 0.7 公里，距綠島燈塔最近距離約 3.3 公里；圖 7 情境模擬的時間也是環保署推測在綠島西側船舶行經航線最有可能偷排油污的位置 (距綠島燈塔最近距離約 4.5 浬 (8.3 公里)) 與時間 (3 月 9 日 10:10)，但由情境模擬結果顯示，紅色質點油污離可疑的排放位置最近距離約 1.0 公里，黑色質點油污離可疑的排放位置最近距離約 2.7 公里。

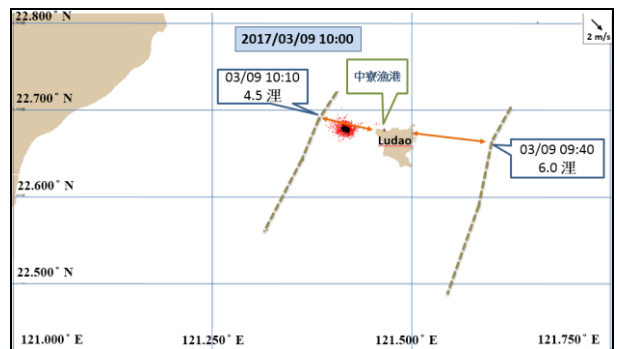


圖 7：情境模擬往回推算 33 小時至 3 月 09 日 10:00 不明油污的漂移軌跡及擴散範圍

由表 2 及圖 8 結果顯示，不明油污往回推算 38 小時前至 3 月 9 日 05:00 時，紅色質點油污水平方向擴散範圍約 5.9 公里，且紅色油污已接近在綠島西側船舶行經的航線，距綠島燈塔最近距離約 2.6 公里；而黑色質點油污水平方向擴散範圍約 1.3 公里，距綠島燈塔最近距離約 4.8 公里，距綠島西側船舶行經航線最近距離約 2.0 公里。

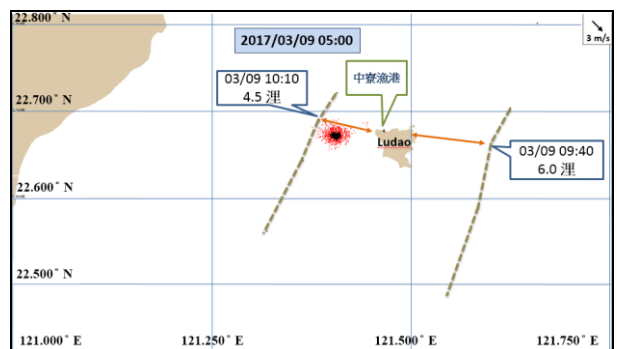


圖 8：情境模擬往回推算 38 小時至 3 月 09 日 05:00 不明油污的漂移軌跡及擴散範圍

由表 2 及圖 9 結果顯示，不明油污往回推算 55 小時前至 3 月 8 日 12:00 時，紅色質點油污水平方向擴散範圍約 7.2 公里，且紅色油污已在綠島西側船舶行經的航線，距綠島燈塔最近距離約 7.8 公里；而黑色質點油污水平方向擴散範圍約 1.6 公里，距綠島燈塔最近距離約 9.3 公里，此時黑色油污已接近在綠島西側船舶行經的航線。

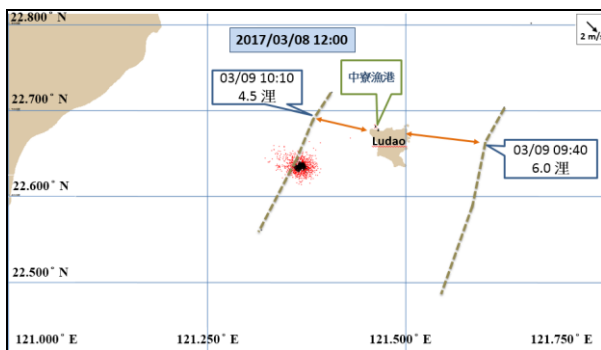


圖 9：情境模擬往回推算 55 小時至 3 月 08 日 12:00 不明油污的漂移軌跡及擴散範圍

綜合上述結果得知，綠島不明油污事件有可能是行經綠島西側的船舶所偷排放，而依據實測的風與海流進行往回推算可能排放的時間，較佳的推測可能偷排放時間是 3 月 8 日 12:00，與環保署推測油污可能投排放時間的時間差距約一天。本研究案例的模擬參數是依據環保署公布的資訊進行設定，且參考綠島居民通報發現不明油污的時間進行模擬，雖這些資訊無法確認油污正確偷排放的位置與時間，但經由 GNOME 油污擴散模式往回推算不明油污漂移軌跡與擴散範圍，再應用 AIS 標示的船舶航跡進行空間與時間比對，可初步辨識出可能排放油污的可疑船舶。環保署推測於 3 月 9 日 10:10 航行經過綠島西側 4.5 海哩處的船舶可能在其先前航程中偷排放不明油污，但依據本研究結果研判不明油污排放的位置與時間與該船航跡不符，但認為偷排放油污的位置應在綠島西側是一致的。

五、結論與建議

本研究成功將美國 NOAA 的 GNOME 油污擴散模式應用在綠島不明油污事件的油污來源推算，利用氣象站實測的風與 TOROS 觀測後合成的海流資料，

以及 GNOME 往回推算不明油污的功能，情境模擬綠島不明油污可能偷排放的位置與時間，並以 AIS 標示的船舶航跡做輔助，可追溯不明油污漂移軌跡與擴散範圍。本文雖僅展示說明油污上岸時間大約是自 3 月 10 日 19:00 的案例推算結果，然依同一流程還可進一步推算油污在其他更早時間上岸時的可能排放位置與時間，但是油污如果在日落前上岸，應會有遊客或民眾在更早時刻通報。

將油污可能上岸時間(地點已知)皆納入推算後，可將污染源排放的可能範圍與時間劃定出，然後由 AIS 資料庫比對出是否有船舶在該時刻航行在該可疑海域內。萬一排放油污的船舶刻意在該海域關閉 AIS，本研究團隊還可運用 TOROS 的原始頻譜資料，進行該船舶的雷達回波訊號之辨識與定位，並追蹤其航行軌跡(莊，2017)。

本研究建立之海上油污推算方法具有科學的依據，可提供做為未來追溯海上不明油污來源的評估工具。

六、參考文獻

1. 莊士賢，《「高頻雷達測流系統應用於海面船舶偵測與追蹤」報告》，科技部研究計畫，2017
2. A. J. Abascal, S. Castanedo, R. Medina, I. J. Losada, and E. Alvarez-Fanjul, 2009, Application of HF radar currents to oil spill modelling. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 58 No. 2, pp. 238-248. [SCI]
3. A. J. Abascal, J. Sanchez, H. Chiri, M. I. Ferrer, M. Cárdenas, A. Gallego, S. Castanedo, R. Medina, A. Alonso-Martirena, B. Berx, W. R. Turrell, and S. Hughes, 2017, Operational oil spill trajectory modelling using HF radar currents: A northwest European continental shelf case study. *Marine pollution bulletin*, Vol. 119, No 1, pp. 336-350. [SCI]
4. C. J. Beegle-Krause, 2001, General NOAA oil modelling environment (GNOME): A new spill trajectory model, in Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference, 2, pp. 865-871.
5. Y. Cheng, X. Li, Q. Xu, O. Garcia-Pineda, O. B. Andersen, and W. G. Pichel, 2011, SAR observation and model tracking of an oil spill event in coastal waters, *Marine pollution bulletin*, Vol. 62, No 2, pp. 350-363. [SCI]
6. NOAA, 2002, GNOME™ User's Manual, National

Oceanic and Atmospheric Administration. Office of Response and Restoration, Hazardous Materials Response Division, 94 pp.

7. F. Yu, J. Li, S. Cui, Y. Zhao, Q. Feng, and G. Chen, 2016, A hindcast method to simulate oil spill trajectories for the Bohai Sea, *Northeast China. Ocean Engineering*, Vol. 124, pp. 363-370. [SCI]
8. B. Zelenke, C. O'Connor, C. Barker, C. J. Beegle-Krause, and L. Eclipse, 2012, General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation, US Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R, 40 Seattle, 105 pp.

致謝

承蒙財團法人國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心提供 TOROS 在綠島附近海域量測的合成海流 (TUV)，以及交通部運輸研究所港灣技術研究中心提供 AIS 船舶自動辨識定位系統標示的船舶航跡，使本文成果更臻完善，在此致上誠摯感謝之意。

英文摘要

Oil Spill Trajectory Hindcast based on the GNOME Model and TOROS HF radar Currents: the Case of Taiwan Green Island Seashore Dampened by illegal Oil Dump

Chi-Min Chiu

Ph.D. Candidate, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

and

Laurence Z.H. Chuang, Ph.D.

Associate Professor, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

and

Jian-Wu Lai, Ph.D.

Associate Researcher, Taiwan Ocean Research Institute, National Applied Research Laboratories, Kaohsiung, Taiwan.

and

Ching-Jer Huang, Ph.D.

Professor, Department of Hydraulics and Ocean Engineering, National Cheng Kung University
Director, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

and

Yu Ju, Chen,

Ph.D. Student, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan.

Abstract

The sea around Taiwan is an important gateway of Asia-Pacific region. Increased vessel traffic may lead to an increased risk of oil pollution incidents at sea. In recent years, unknown oil spills have occurred frequently in the sea around Taiwan. So far, it is often difficult to trace the unknown oil spill because the time and location of the oil-spill origin are unknown. Oil spill trajectory backtracking technology based on wind, ocean current and the oil spill modeling can help finding the origin of the unknown source oil spill. Therefore, the GNOME (General NOAA Oil Modeling Environment) was used in this study to run backward-in-time procedure of the unknown oil spill trajectory and diffusion at Ludao on March 10, 2017. In this study, the driving forces for simulating a spill trajectory are surface ocean currents and winds, which were obtained from the TOROS (TORI) and Ludao weather station (CWB), separately. In addition, the AIS (Automatic Identification System) has been compared with the simulation result of unknown oil spill at Ludao. In this study, we conduct the tracing of unknown oil spill according to the GNOME to provide a reference for guiding the direction of the investigation.

Key words: Oil Spill Hindcasting, GNOME, TOROS HF Radar Current, AIS

作者簡介

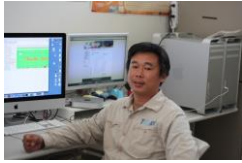


邱啓敏，國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人。專長海洋環境現場監測與調查、油污擴散數值模式、海洋數值模式。曾先後擔任國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系助理研究員與兼任講師、國立成功大學近海水文中心研究助理、國立成功大學水利及海洋工程學系研究助理、2016 及 2017 年曾到美國威廉與瑪麗學院 (College of William & Mary) 的海洋科學學院 (Virginia Institute of Marine Science) 短期進修。

邱啓敏，國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人。專長海洋環境現場監測與調查、油污擴散數值模式、海洋數值模式。曾先後擔任國立高雄海洋科技大學海洋環境工程系助理研究員與兼任講師、國立成功大學近海水文中心研究助理、國立成功大學水利及海洋工程學系研究助理、2016 及 2017 年曾到美國威廉與瑪麗學院 (College of William & Mary) 的海洋科學學院 (Virginia Institute of Marine Science) 短期進修。



莊士賢，現任國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授。獲美國北卡羅萊納州立大學土木工程博士，專長多目標決策分析、遙測系統整合與資料分析、系統動態分析、問卷調查與統計分析等。曾擔任成功大學近海水文中心研究員兼副主任、成功大學台南水工試驗所資料庫及地理資訊系統組副研究員兼組長等。

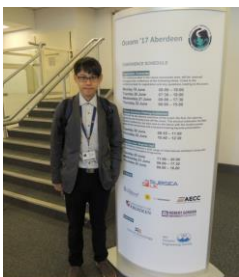


賴堅戊，現任國家實驗研究院台灣海洋科技研究中心副研究員。獲國立成功大學水利及海洋工程學博士，專長港灣工程與海岸防護、近岸水動力學、海洋雷達遙測。曾先後擔任國立成功大學水利系、機械系以及日本名古屋大學土木系等博士後研究員，參與海岸侵蝕與溢淹對策及離岸風電相關研究計畫。目前於海洋中心擔任「環臺岸基海洋雷達系統」計畫之 Principal Investigator，推動高頻雷達海洋觀測網之發展、資料品管及其產出在海洋科研與海洋事務之應用。



黃清哲，現任國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任。獲美國愛荷華大學 (University of Iowa) 機械工程博士，專長三維數值造波水槽之發展及其應用、碎波模擬及碎波產生氣泡之研究、土石流地聲監測、光纖感測器之研發、顆粒流。曾先後

擔任瑞士蘇黎世理工大學空氣動力學研究所專任助教、美國愛荷華大學水力研究所博士後研究、香港大學機械工程學系客座講師。



陳禹儒，目前於國立成功大學海洋科技與事務研究所攻讀工學博士，研究主要為高頻雷達船舶偵測演算法之開發，專長雷達遙測技術、數位訊號處理、數位影像處理、地理資訊系統。2017 年曾赴英國發表國際研討會文章。