

Forecasting of oil spills in Taiwan's coastal waters using SCHISM and GNOME

Chi-Min Chiu¹ Ching-Jer Huang^{2*} Laurence Z.H. Chuang³
Yang-Ming Fan⁴ Li-Chung Wu⁵

1 Ph.D. Candidate, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

2 Professor, Department of Hydraulic and Ocean Engineering, National Cheng Kung University

3 Associate Professor, Institute of Ocean Technology and Marine Affairs, National Cheng Kung University

4 Leader of R & D Department, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

5 Assistant Research Fellow, Coastal Ocean Monitoring Center, National Cheng Kung University

ABSTRACT

Oil spills in the coastal waters have serious impact on marine ecosystems and economic activities. Accurate information on the temporal and spatial variations of oil spill would be helpful for mitigating the oil-spill disaster and for making the clean-up operation more effective. Accurate prediction of ocean currents in the coastal waters is crucial for an accurate forecasting of oil spill diffusion. The purpose of this study is to build up two oil spill models, namely the SCHISM and GNOME for assessing their applicability in the coastal waters around Taiwan. Firstly, to verify the SCHISM model, the predicted sea water level and sea surface current were compared with those obtained from the nearby tidal station, X-band radar and HF (High-Frequency) radar. Based on the given current and wind fields, the SCHISM model was used to forecast the oil spill trajectories. Secondly, the GNOME model was also applied to forecast the drift trajectory and diffusion area of oil spills. The field current in GNOME is obtained from the global HYCOM model. The T.S. Taipei's oil spill event that occurred in March, 2016 was used as a case study for testing the capabilities of the SCHISM and GNOME models. The predicted drift trajectories and diffusion area of oil spills obtained from both

* Corresponding author, E-mail: cjhuang@mail.ncku.edu.tw

models agree with those obtained from the field investigation provided by EPA (Environmental Protection Agency), Taiwan.

Keywords: Oil spill, SCHISM, GNOME, X-band radar, HF radar, Weathering processes, Drift trajectories

SCHISM 及 GNOME 油污擴散模式應用於臺灣近岸海域油污染的預測

邱啓敏¹ 黃清哲^{2*} 莊士賢³ 范揚洛⁴ 吳立中⁵

¹ 國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人

² 國立成功大學水利及海洋工程學系教授暨近海水文中心主任

³ 國立成功大學海洋科技事務研究所副教授

⁴ 國立成功大學近海水文中心研發組組長

⁵ 國立成功大學近海水文中心助理研究員

摘要

近岸海域的油污事件會對海洋生態與經濟活動造成嚴重之衝擊，若能掌握油污的發生區域與移動特徵，將能更有效地進行油污災情控制與清理工作，以減少對海洋環境的影響。本研究採用二套油污擴散模式，分別為 SCHISM 及 GNOME，預測油污漂移軌跡與擴散範圍，評估其在臺灣四周海域的適用性。首先收集海氣象資料及 X 波段雷達 (X-band radar) 與高頻雷達 (HF radar) 監測的海表面海流，驗證 SCHISM 模式預測的海表面水位與海流的準確性；並利用 SCHISM 模式中的質點追蹤模式，預測油污漂移軌跡。另外，利用 HYCOM 模式預測出海流後，再應用 GNOME 模式預測油污漂移軌跡與擴散範圍。本研究以 2016 年 3 月新北市石門外海「德翔臺北」漏油事件為例，應用模式預測未來油污之漂移軌跡與擴散範圍。二套模式預測結果與環保署現場實際調查結果相符，證明上述二套油污擴散模式未來可用於臺灣海域油污擴散的預測。

關鍵詞：油污、SCHISM、GNOME、X 波段雷達、高頻雷達、風化過程、漂移軌跡

*通訊作者 E-mail: cjhuang@mail.ncku.edu.tw

一、前言

河川、海灣、港區以及海岸地區發生油污事件的原因，大部份來自油輪或大型船舶擱淺、輸油管線破裂、煉油廠或儲油設備意外事故等。當溢油事件發生時，油污會對海岸環境與港區經濟造成嚴重的損害。如何降低油污事件對海岸地區之環境與經濟的衝擊是全世界最關心的議題。根據 ITOPF (International Tanker Owners Pollution Federation, 2016) 統計，全世界超過 700 噸以上的重大油污事件已逐年減少，但小於 7 噸的油污事件發生機率卻佔所有油污事件的 85%。臺灣四周海域為東亞航運必經之地，經濟快速開發使得臺灣對外的航運更趨頻繁，臺灣為自產能源匱乏的海島型國家，大部份的能源需求均仰賴進口，因此臺灣四周海域屬於船舶油污污染風險較高的海域。

若海上發生油污事件，一旦油污進入到海洋環境中，受到風、波浪、海流的作用會發生分散 (dispersion)、擴散 (spreading)、以及分裂成小油團 (fragmentation) 等現象。如油污事件發生在海岸地區，在波浪與潮汐的作用下，油污可能會漂移及擴散至海岸 (ITOPF, <http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/response-techniques/>)，且有可能黏附在海岸，衝擊到海岸生態環境與影響海上航行及漁業等經濟活動。因此，需採用多種不同的技術

與方法來降低油污擴散對海岸環境與生態的影響，如衛星與雷達的遙測技術 (Fingas and Brown, 2014)，以及油污擴散模式。針對油污事件對海洋環境的衝擊、風險的評估、自然資源的災損，油污擴散模式是一套可進行量化的最佳的工具 (French McCay, 2009)。回顧油污擴散模式在 20 世紀的發展，Spaulding (1988)、ASCE (1995)、Reed et al., (1999)、Lehr (2001)、以及 Foreman et al. (2005) 等人探討數值模式在描述油污溢洩在海面上的漂移軌跡 (trajectory) 與宿命 (fates) 的過程，而油污的宿命意即當油污溢洩進入海水表面後，經歷風與海流的作用而產生不同化學與物理作用過程，這些過程合稱為風化過程 (weathering processes)，也決定油污的宿命。早期油污擴散模式從僅考慮水平方向移動的軌跡模式，到近年來考慮真實海洋環境中複雜的三維傳輸 (transport) 過程 (Tklich, 2006; Guo and Wang, 2009) 與宿命模式 (Lehr et al., 2000)，其中宿命模式也能進行緊急應變作業的模擬與對生物影響的推估 (ASA, 2004, 2008)。

目前全世界最常見的油污擴散模式分別有：挪威開發的 OSCAR (Oil Spill Contingency and Response; Reed et al., 2000)，為商業用軟體；美國 ASA (Applied Science Associates) 公司開發的 SIMAP (Spill Impact Model Application Package; French McCay et al., 2015) 以及 OILMAP (Oil Modeling Application

Package; Spaulding et al., 1992)，為商業用軟體；美國海洋及大氣總署 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 開發的 GNOME (General NOAA Operational Modeling Environment; Zelenke et al., 2012 a & b; Beedle-Krause, 2001)，為開放使用軟體；葡萄牙土木工程國家實驗室 LNEC (National Laboratory of Civil Engineering) 開發的 2D/3D VOILS (Vela-OIL-Selfe; Azevedo et al., 2014)，此模式也與美國 VIMS (Virginia Institute of Marine Science) Prof. Zhang (Zhang et al., 2015) 所開發的三維半隱式跨尺度的海洋數值模式 SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 進行耦合，提昇近岸地區油污擴散與傳輸的預測精度。

近十年來，全世界在近岸地區因船舶碰撞或擱淺所發生的小型油污事件有增加的趨勢 (Azevedo et al., 2014)。臺灣四周海域為國際重要航線，冬天又有強烈的東北季風吹拂，增加船舶海上航行的風險。近十年來在北部海域也發生數起的油污事件，如 2016 年 3 月 10 日本國籍「德翔臺北」擱淺石門外海、2011 年 11 月 3 日巴拿馬籍砂石船「瑞興輪」擱淺基隆大武崙外海、以及 2008 年 11 月 10 日巴拿馬籍貨輪「晨曦號」擱淺石門外海等事件，都造成油污的溢洩與近岸海洋環境的污染。若油污事件發生時，可應用油污擴散模式進行預測油污漂移軌跡與擴散範圍，提供政府做緊急應變處置之重要參考依

據。如美國 NOAA 在海域油污事件發生時，以 GNOME 油污擴散模式預測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)。有鑑於此，本研究將 GNOME 應用在臺灣的油污事件發生時，預測油污漂移軌跡與擴散範圍；另外，SCHISM 模式中有一個油污擴散模組可快速預測油污漂移軌跡，本研究亦應用此模組進行預測油污事件發生後油污的漂移軌跡，並將 SCHISM 與 GNOME 預測油污漂移軌跡與擴散範圍結果與現場調查結果進行比對。

2016 年 3 月 10 日「德翔臺北」貨輪因失去動力，擱淺於新北市石門外海 0.3 海浬處。船體被連日的大浪衝擊，於 3 月 24 日斷裂，溢漏出油污嚴重影響當地海岸環境之生態。因此，本研究即以「德翔臺北」的案例分別應用 SCHISM 與 GNOME 預測油污的漂移軌跡與擴散範圍，並與環保署於石門海岸實際調查油污影響範圍做驗證，以提供政府未來油污緊急應變之參考。

二、數值模式介紹

近岸地區若發生油污事件，若能得知近岸海流流場的變化趨勢，將有助於提昇油污擴散模擬的精度。因此，本研究採用海洋數值模式 SCHISM 進行海流的預測，我國中央氣象局也採用 SCHISM 模式預

測臺灣四周海域的海流。另外，本研究採用 SCHISM 模式中的質點追蹤法 (Lagrangian Particle-Tracking) 以及美國官方所使用的 GNOME 模式模擬油污擴散，並以 2016 年「德翔臺北」擱淺所造成的溢洩油污染案例，探討此二套油污擴散模式在臺灣近岸海域的適用性。以下分別介紹上述海洋數值模式與油污擴散數值模式。

2.1 海洋數值模式-SCHISM

SCHISM 模式 (2014 年 12 月 13 日前稱為 SELFE; Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model) 是由 Zhang and Baptista (2008) 以 ELCIRC 模式基礎修改而成，是一個求解三維淺水波方程 (3D shallow-water equations)、靜水壓方程 (Hydrostatic)、包氏近似 (Boussinesq approximations)、與鹽度及溫度的傳輸方程的海洋數值模式。SCHISM 模式系統有考慮海氣交互作用 (Air-sea exchange)，並與 WWM-III 波浪模式結合 (如圖 1)，來提昇近岸及河口流體動力現象預測的精度。SCHISM 模式所預測的海流，可提供給油污擴散模式使用。SCHISM 模式的基本控制方程式有連續與動量守恆方程式，為簡化 SCHISM 模式的方程式，假設流體為不可壓縮，在卡氏座標下水體的連續方程式、自由液面運動方程式、及動量方程式可分別寫為：

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_h^{\eta} \mathbf{u} dz = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = & \mathbf{f} - g\nabla\eta + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) \\ & - \frac{1}{\rho_0} \nabla P_A - \frac{g}{\rho_0} \int^{\eta} \nabla \rho dz \\ & + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{f} = -f \mathbf{k} \times \mathbf{u} + \alpha g \nabla \psi$ ， \mathbf{k} 為 z 座標上的單位向量。

鹽度及溫度傳遞擴散方程式可分別寫為：

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s \quad (4)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho_o C_p} + F_h \quad (5)$$

以上方程式中符號標記說明如下：

(x, y) ：水平卡式座標(m)； z ：垂直座標，向上為正(m)； ∇ ： $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ； $\eta(x, y, t)$ ：自由液面高度(m)； $h(x, y)$ ：水深(m)； $\mathbf{u}(x, y, z, t)$ ：水平速度向量，於卡式座標速度分量為 (u, v) (ms^{-1})； w ：垂直速度 (m/s)； f ：科氏力參數 (s^{-1})； g ：重力加速度 (ms^{-2})； ψ ：地球

潮汐位能 (m); α :有效地球彈性因子 (= 0.69); ρ_o :水密度為1,025 (kg m^{-3}); P_A :自由液面的大氣壓力 (Nm^{-2}); S, T :水中鹽度 (practical salinity units, psu) 與溫度 ($^{\circ}\text{C}$); ν :垂直渦流黏滯係數, ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); μ :水平渦流黏滯係數 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); κ :鹽度與熱通量垂直渦流擴散係數或熱通量垂直渦流擴散係數 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); F_s, F_h :水平擴散及質量之來源及耗損 (source and sink) 項; \dot{Q} :太陽輻射的吸收率 (W m^{-2}); C_p :水的比熱($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)。

SCHISM 模式水平網格座標系統可結合非矩型與矩形網格,因應不同計算需求能選用卡式或球面座標系統;垂直網格可採用 SZ (Hybrid SZ coordinates) 及 LSC² (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cell) 的座標系統,其中陡變地形

是許多海洋數值模式一項重要的挑戰,地形的陡變會造成壓力梯度變化劇烈,在海洋數值模式計算中會產生偽流 (spurious flow) 的問題 (Zhang et al., 2015),而 LSC² 座標系統即針對水域中地形陡變變化而發展一個新的數值方法,可有效避免因地形陡變產生偽流的計算誤差。紊流閉合模式採用 Umlauf and Burchard (2003) 的 Generic Length Scale (GLS) turbulence closure,其優點為含括了 $k-\varepsilon$ (Rodi, 1984)、 $k-\omega$ (Wilcox, 1998)、及 Mellor and Yamda (1982) 等紊流閉合模式。由 SCHISM 網頁列出已刊登的國際期刊 (http://ccrm.vims.edu/schismweb/schism_publications.html),顯示 SCHISM 已成功應用在全世界水深地形變化複雜的海岸、潮間帶、河川、以及湖泊等地方。

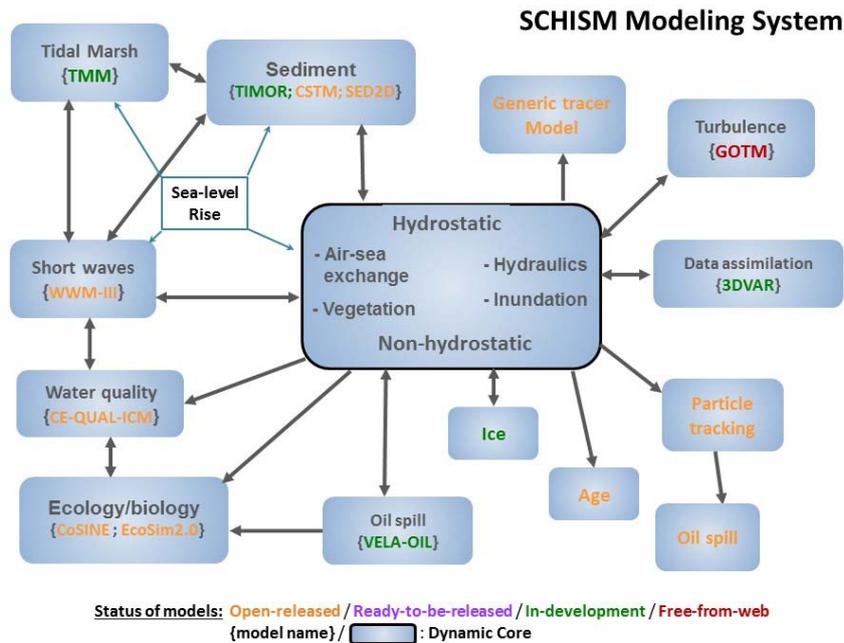


圖 1 SCHISM 海洋數值模式系統
(圖摘自 http://ccrm.vims.edu/schismweb/UPDATED_schism_flow_diagram.jpg)

2.2 油污風化過程

油污在海洋的宿命過程含括油污在海面以及沉入水下的三維傳輸與擴散過程 (如圖 2)，分別有 Diffusion (分散)、Spreading (擴散)、Evaporation (蒸發)、Dissolution (溶解)、Entrainment and droplet size distribution (捲吸與油滴大小的分佈)、Emulsification (乳化)、Biodegradation (生物降解作用)、以及 Sediment oil interaction (油污沉積的影響) 等過程 (Spaulding, 2017)。以下扼要說明各種油污風化的過程：

2.2.1 分散 (Diffusion)

大部份油污擴散模式在油污分散過程皆採用一種數學統計模型，即隨機漫步的過程 (random walk process)，再將海流與風等資料輸入至 Lagrangian 公式，進行預測海表面與水下油污的傳輸。例如 GNOME (Zelenke et al., 2012 a & b)、OSCAR (Reed et al., 2000)、OILMAP (Spaulding et al., 1992)、以及 SIMAP (French McCay et al., 2015) 等油污擴散模式，皆採用隨機漫步的方法預測海表面及水下油污的移動與擴散。海表面與水下的海流流場一般都由海洋流體動力數值模式提供，高頻雷達 (High Frequency Radar, HFR) 系統也可提供海表面海流流場 (Spaulding, 2017)。

2.2.2 擴散 (Spreading)

油污擴散過程取決於油污的重力 (gravitational)、慣性力 (inertial)、黏滯力 (viscous forces)、以及表面張力 (interfacial tension stress) 的平衡 (Azevedo et al., 2014)。油污擴散大部份皆採用實驗室依據不同油污厚度進行實驗而得到的經驗公式 (Mackay et al., 1980 a & b; Lehr et al., 1984; Lehr, 2001)。油污擴散與油污的物理特性以及海表面的環境特性有關，其變化過程非常複雜。

2.2.3 蒸發 (Evaporation)

油污開始溢洩後 48 小時內，油污蒸發到大氣中的量最多。不同的油品蒸發量會有所差異，如輕質油品在溢洩後 48 小時，海面上溢洩油污的總量會因蒸發減少 25-40% (Azevedo et al., 2014)。有三種主要的公式來描述油污的蒸發率，分別為 Evaporative exposure (Stiver and Mackay, 1984)、Pseudo-components method (Payne et al., 1984; Jones, 1997)、以及 Fingas formulation (Fingas, 1997, 1998, 2004)。上述三種方法中雖然 Pseudo-components method 對油污蒸發過程考慮較詳細，但需輸入很多油污性質相關的參數，而油污事件發生初期可能無法立即獲得油污相關資訊，所以大部份油污擴散數值模式採用 Evaporative exposure 與 Fingas formulation 的經驗公式。

2.2.4 溶解 (Dissolution)

油污溶解為油分子溶解到水團中，油污開始溢洩後 1 至 2 天內，油污溶解至水團中最大數量約佔總溢洩油數量的 5%。Mackay and Leinonen (1977) 依據拉午耳定律 (Raoult's Law) 描述油污溶解至水團中的現象。溶解與蒸發作用與油污特性有關，如溢洩油為重質原油或重油，因油污黏滯度較大，油污的蒸發數量相對較少，所以油污溶解至水團中的數量會增多 (Azevedo et al., 2014)。

2.2.5 捲吸與油滴大小的分佈 (Entrainment and droplet size distribution)

Delvigne and Sweeney (1988)、Delvigne (1993)、Delvigne and Hulsen (1994) 等人利用實驗與現場觀測資料，發展油滴自海表面被捲吸至海水中的經驗公式，這些公式與波浪碎波以及海表面油污粒徑大小有關，要定義海表面油污粒徑大小是一件非常困難的工作，最近 Li et al. (2017) 探討油污粒徑大小在波浪碎波與海表面紊流的作用下的變化。

2.2.6 乳化 (Emulsification)

油污乳化為海水與海表面浮油受波浪作用，造成海水混入至浮油中形成油包覆水的情況。油污乳化現象與油污的特性及溢洩期間的海洋環境條件有關，當乳化現象達穩定時，油團中有 60-80% 為水，乳化的油團體積相較於未乳化的油團體積，可增大到二至五倍 (Azevedo et al., 2014)。

2.2.7 生物降解作用 (Biodegradation)

油污生物降解作用會因油污可溶性 (soluble) 及不可溶性 (insoluble) 成份而呈現不同的變化。生物降解主要在於油污溶解過程中可溶性和半可溶性芳族化合物能分解的程度，針對不可溶性與高分子量的多環芳香烴 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)，其油團粒徑較大，因此油污分解效果較差 (Spaulding, 2017)。若要增加生物降解作用，可以在海面使用分散劑 (dispersant) 將油污分散成較小的粒徑，會有助於油污生物降解作用，但使用分散劑同時也有可能造成海洋環境的污染。

2.2.8 油污沉積的影響 (Sediment oil interaction)

不能溶解的芳香族油污可能會被海中懸浮物質 (suspended particulates) 吸附 (adsorption) 而沉澱至海底底床。若油污事件發生在近岸地區，沉澱至海底底床的油污將會對底棲生物造成嚴重的影響 (Spaulding, 2017)。油污沉積對海洋環境的影響需較長時期的調查與研究，近年來 Zhao et al. (2016 a & b) 發展出一套可預測油污顆粒聚集 (oil particle aggregates, OPAs) 的模式。

圖 3 為挪威 SINTEF (Stiftelsen for industriell og teknisk forskning) 於實驗室研究原油 (Crude oil) 風化的過程，由實驗結果顯示油污沉積與生物降解作用的

影響可能要 10 天以上，甚至數年後才能估算其影響程度。由於本研究著重溢油事件發生初期於一周內的變化，預測油污漂移軌跡與擴散範圍，這段期間在油污的風

化過程中分別有分散、擴散、蒸發、溶解、捲吸與油滴大小的分佈、以及乳化等過程。

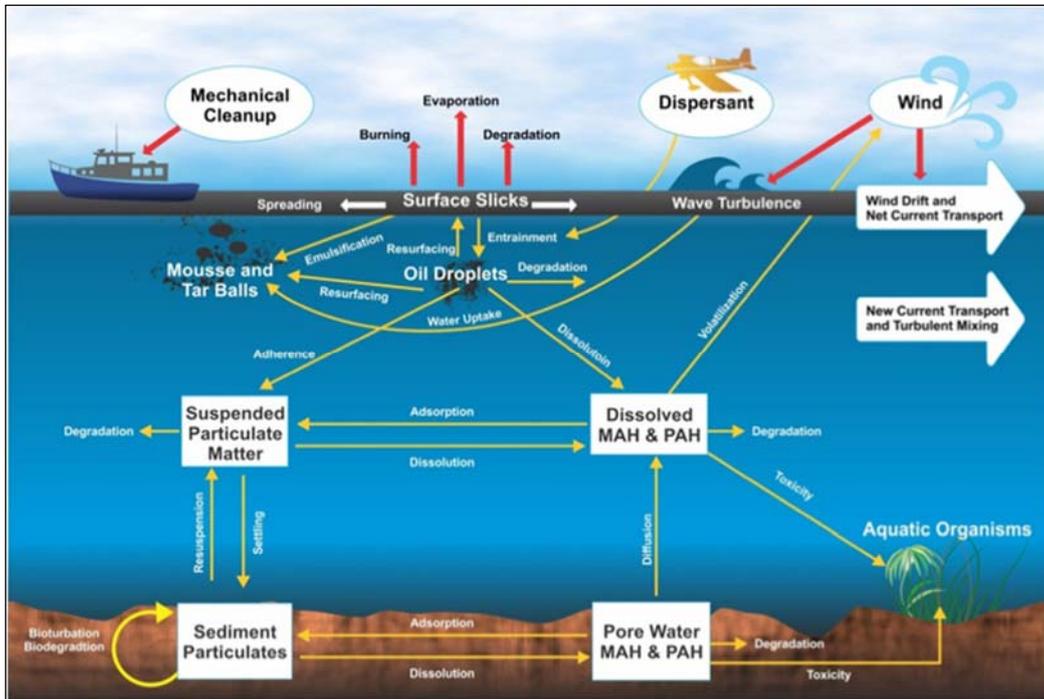


圖 2 油污在海洋的宿命過程 (Spaulding, 2017)

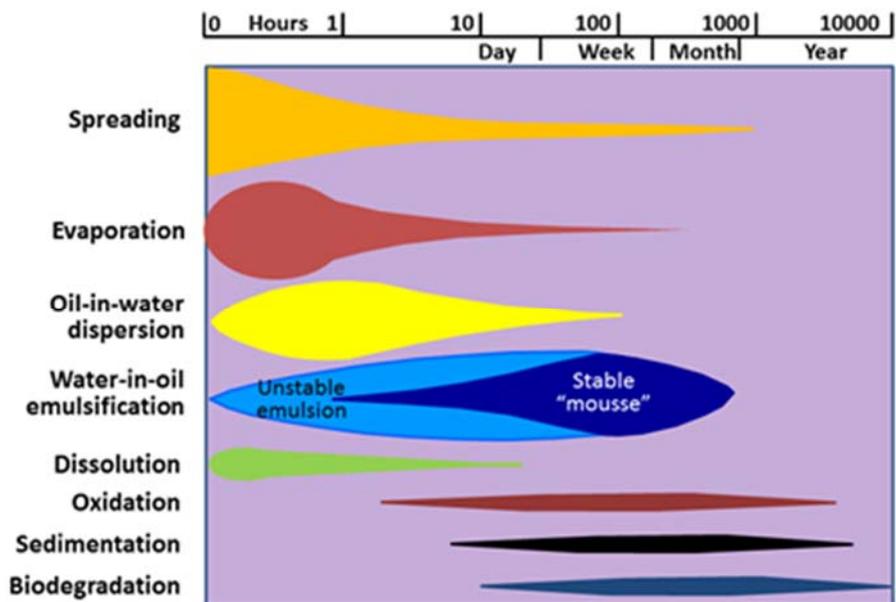


圖 3 原油風化 (Weathering) 的過程 (Courtesy of SINTEF, Norway)

2.3 油污擴散數值模式

本研究採用二套油污擴散模式，第一套應用 SCHISM 模式的 Oil Particle-Tracking method 進行預測油污漂移軌跡，第二套則應用 GNOME 模式進行預測油污漂移軌跡與擴散範圍，以下扼要介紹二套油污擴散模式。

2.3.1 SCHISM 模式的 Oil Particle-Tracking method

SCHISM 模式系統有二套油污擴散模式，第一套為美國奧勒岡健康與科學大學 (Oregon Health and Science University) Dr. Yun Jung 所發展的 Lagrangian Particle-Tracking method (如圖 1)，可簡易及快速預測油污的漂移軌跡；另一套為葡萄牙土木工程國家實驗室 (National Laboratory for Civil Engineering, LNEC) 所發展的三維油污擴散模式 VELA-OIL。本研究著重在油污事件發生初期，可快速的預測油污漂移軌跡，所以採用第一套 Lagrangian Particle-Tracking method。

Lagrangian Particle-Tracking method 採用隨機位移模型 (Random Displacement Model, RDM)，與隨機游走模型 (Random Walk Model) 類似，屬於一種數學統計模型 (Visser, 1997; North et al., 2006 and 2011)，它是由一連串的軌跡所組成，其中每一次都是隨機的。此模型可用來表示不規則的變動形式，記錄隨機游走粒子過程，用以描述油污質點在海面

上的漂移軌跡。RDM 計算質點移動公式可表示如下：

$$X^{n+1} = X^n + \left(U + W_x + \frac{\partial K_x}{\partial x} \right) \Delta t + R \sqrt{6K_x \cdot \Delta t} \quad (6)$$

$$Y^{n+1} = Y^n + \left(V + W_y + \frac{\partial K_y}{\partial y} \right) \Delta t + R \sqrt{6K_y \cdot \Delta t} \quad (7)$$

$$Z^{n+1} = Z^n + \left(W + V_z + \frac{\partial K_z}{\partial z} \right) \Delta t + R \sqrt{6K_z \cdot \Delta t} \quad (8)$$

方程式中符號標記說明如下：

(U, V, W)：在卡式座標 (x, y, z) 中海流的速度分量， z 為垂直座標； n 是時間步長， $n+1$ 是下一個時刻的時間步長； Δt ：時間步長的時間距； R ：均勻的隨機變數 (uniform random number)，介於 -1 與 1 之間； K_x, K_y 與 K_z 是 x, y, z 方向的紊流擴散係數 (turbulent diffusion coefficients)； W_x 與 W_y 為 x, y 方向的風阻力速度 (wind dragging speeds)； $W_i = c_d \times W_vel_i^{10}$ ($i = x$ or y)； c_d 為阻力係數，通常設定為 0.03； $W_vel_i^{10}$ 為參考海平面上方 10 公尺高的風速； V_r 為油污受到水中浮力作用造成的上升速度，可由下列經驗公式求得 (Clift et al., 1978; Zheng and Yapa, 2000)：

$$V_r = \left[\frac{8}{3} g d_i \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

上式中 g 為重力加速度； d_i ：油粒子的直徑； ρ_o 與 ρ 分別為油污與海水的密度。

另外，本研究模式設定若油污抵達岸邊時，80% 的油污會黏附在岸邊，剩下的 20% 的油污會離開岸邊返回到海岸的水域。

2.3.2 GNOME 模式

GNOME 模式是由 NOAA 架構下有害物質緊急應變組 (Hazardous Materials Response Division, HAZMAT) 所發展的二維 Eulerian/Lagrangian 的油污擴散模式，為開放使用的軟體。同時，若美國發生海上油污事件發生，GNOME 模式也是美國官方所使用的油污擴散軟體，並將預測結果提供政府做緊急應變與救災資源的調配。有鑑於此，本研究首次將 GNOME 模式應用臺灣海域曾發生的油污事件並探討其適用性。

GNOME 模式基本分散方程式如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (10)$$

式中 C 為油污的濃度； D 為分散係數。(10)式在卡式座標中又可表示如下：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (11)$$

式中 D_x 與 D_y 分別為在 x 與 y 方向的純量分散係數 (scalar diffusion coefficients)。

GNOME 模式也是採用 Random Walk Model 描述油污粒子的漂移軌跡，分散係數 D 會影響 Random Walk Model 的計算， D 在 GNOME 模式表示為在水中的水平渦流分散係數 (horizontal eddy diffusivity)，最低的值為 $1,000 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ ，最高值為 $100,000 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 到 $1,000,000 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 之間，GNOME 模式 D 值的初始設定為 $100,000 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 。GNOME 模式應用隨機過程的統計方法計算油污在海面上的分散與擴散作用，重力與表面張力僅在油污溢洩在海面上瞬間有影響，因此將這二種作用力的影響予以忽略。另外，GNOME 模式為二維的油污擴散模式，所以水下複雜的分散與擴散作用也予以忽略 (Zelenke et al., 2012 a)。

GNOME 模式也有考慮油污在海面上的分散、蒸發、漂移軌跡、風阻作用 (Windage)、黏附岸邊 (Beaching)、以及油污碰觸到海岸線，會因海岸線礁石中不同的孔隙，油污會再浮升並回到海水中的作用 (Refloating)。上述油污在海面上不同的風化作用，可以參考 GNOME 模式的說明手冊 (Zelenke et al., 2012 a)，手冊中有詳細的說明。

此外，GNOME 模式也有下列多項功能 (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 4)，可提供 GNOME 進行預測油污漂移軌跡與擴散範圍。

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。

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 (Beagle-Krause, 2001)，以提昇油污漂移軌跡與擴散範圍的預測。

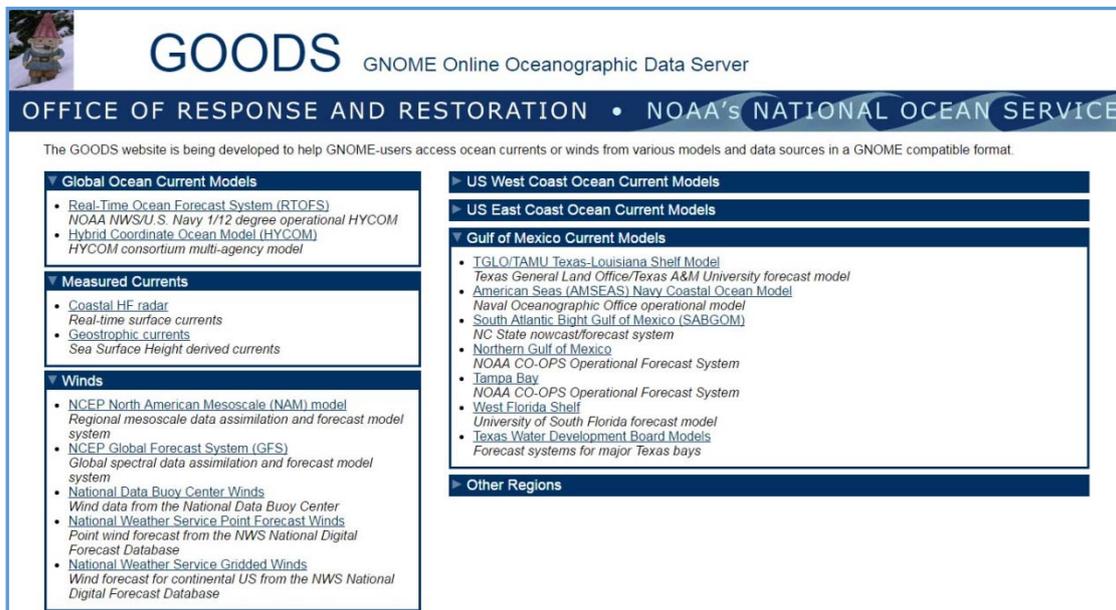


圖 4 GOODS 線上海洋環境資料庫

三、溢油案例模擬

2016年3月10日於新北市石門外海發生「德翔臺北」貨輪擱淺造成溢油的事件，油污嚴重影響當地海岸環境，因此本研究以此為研究案例，應用 SCHISM 模式中的 Lagrangian Particle-Tracking 方法預測油污漂移軌跡以及 GNOME 模式預測油污漂移軌跡與擴散範圍。以下即針對「德翔臺北」實際溢油案例分別作說明與探討。

3.1 SCHISM 油污漂移軌跡預測模組

「德翔臺北」溢油事件發生在新北市石門海岸，近岸地區海流受到地形影響變化較複雜，如能瞭解近岸地區的海流變化趨勢，有助於提昇油污擴散模式的預測精度。因此，本研究採用一套高解析度的三維海洋數值模式 SCHISM 預測石門附近海域的海流，圖 5 為石門外海油污擴散模擬範圍與計算網格系統，以基隆港垂直岸邊往外延伸約 35 公里，水平方向約 70 公里的範圍建置模式計算區域。水平座標系統採用有限元素非結構性三角形網格，最小元素邊長約為 16 m，總計共 118,132 個三角元素，垂直座標系統則採用 21 層的混合 S-Z 座標 (黃等人, 2016)。

SCHISM 預測海流流場需先給定模擬計算區域在外海開放邊界，水位、流速、海水溫度、海水鹽度等邊界資料；海氣交互作用計算所需的海表面氣象資料之邊

界條件，如：海表面氣壓場、風場、太陽輻射通量 (Radiation flux)、空氣的比濕度 (Specific humidity)、海表面的氣溫場等，皆來自於中央氣象局 WRF 模式模擬計算得到 5 公里解析度的資料。同時 SCHISM 模式已成功耦合 WWM (Wind Wave Model) 波浪模式，波浪場的資料由 WWM 模擬計算得到。利用上述海氣象與波浪資料，以 SCHISM 預測石門附近海域海流時序列的資料，同時收集成功大學近海水文中心於「德翔臺北」貨輪發生油污洩漏期間應用 X 波段雷達測得的表面海流，以及台灣海洋科技研究中心 TOROS (Taiwan Ocean Radar Observing System) 於新北市草里設置的高頻雷達 (High Frequency Radar, 簡稱 HF Radar) 海流測站 (地理位置如圖 6 所示) 所監測的海表面徑向海流流速 (Radial Velocity) 做驗證。TOROS 的高頻雷達主要有長距離及標準型雷達測流二種系統，圖 6 所示藍色小方塊為長距離雷達站點，綠色小方塊為標準型雷達站。本研究收集新北市草里測站為標準型雷達測流系統，在徑向方向相鄰兩點間量測海流資料之距離為 1.75 公里。李 (2015) 統計高頻雷達和平站、綠野站、小野柳站與旭海站 2013 年整年徑向海流品質空間分佈，指出高頻雷達實測資料良率達 80% 的區域約從測站到 100~150 公里的範圍，且距離高頻雷達測站越近資料品質越好，由此得知徑向海流資料能描述實際海流流場的特性。本研究將驗證後的預測海流提供

SCHISM 模式系統中 Lagrangian Particle-Tracking 方法，預測「德翔臺北」貨輪發生油污洩漏後，海面上油污的漂移軌跡。

3.2 GNOME 油污擴散模式

另外，本研究亦應用 GNOME 模式以「德翔臺北」案例，預測油污漂移軌跡與擴散範圍。GNOME 模式為首次應用在臺灣實際發生的溢油事件，因此先採用 GNOME 模式中的功能，如從 NOAA 的線上資料庫系統 GOODS 中，下載全球海洋模式 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 所模擬之的海表面海流流場提供給 GNOME 模式。HYCOM 為美國發展全球海洋資料同化試驗 (Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE) 計畫的一部份。HYCOM 為解析度達 1/12 度的海洋三維數值模式，使用混合座標以精進對複雜海洋地形區域的海流模擬。為增加數值模式預測的準確性，HYCOM 也耦合美國海軍海洋資料同化系統 (The Navy Coupled Ocean Data Assimilation (NCODA) system)。NCODA 提供實測的海水溫度、鹽度、流速、密度、垂直速度等變量，同時將衛星通訊設備資料，包含 AVHRR GOES 海溫及 JASON GFO 海面高度 (為海流動量平衡中的重

要參數) 等，運用資料同化技術納入 HYCOM 中，以修正或減少數值參數化方法及非線性項等產生的誤差。

表 1 為 SCHISM 與 GNOME 模式預測「德翔臺北」溢油事件的模擬參數，由表中資料可知，設定溢油時間皆為 2016 年 3 月 26 日 0 時 00 分，地點為北緯 25° 18' 11.2" 及東經 121° 34' 9.5"。總溢油量共為 50 公秉，油品以燃料油 (fuel oil) 為主，溢油持續溢出時間為 1 小時。海流在 SCHISM 油污擴散模式應用 SCHISM 模式預測的海流流場，SCHISM 有近岸高解析度 (海岸的三角形網格元素邊長最小可達 16 公尺) 的近岸預測海流流場，預測時間超過 30 天，所以 SCHISM 可分別進行預測 1 天、3 天、以及 34 天的油污漂移軌跡；GNOME 油污擴散模式則應用 GOODS 系中 HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) 預測海表面海流。HYCOM 模式預測海流的解析度為 1/12° (約 9.26 公里)，由於解析度略顯不足，所以 GNOME 僅分別進行預測 1 天及 3 天的油污漂移軌跡。SCHISM 與 GNOME 風場皆採用中央氣象局富貴角浮標測站量測的逐時風速風向。

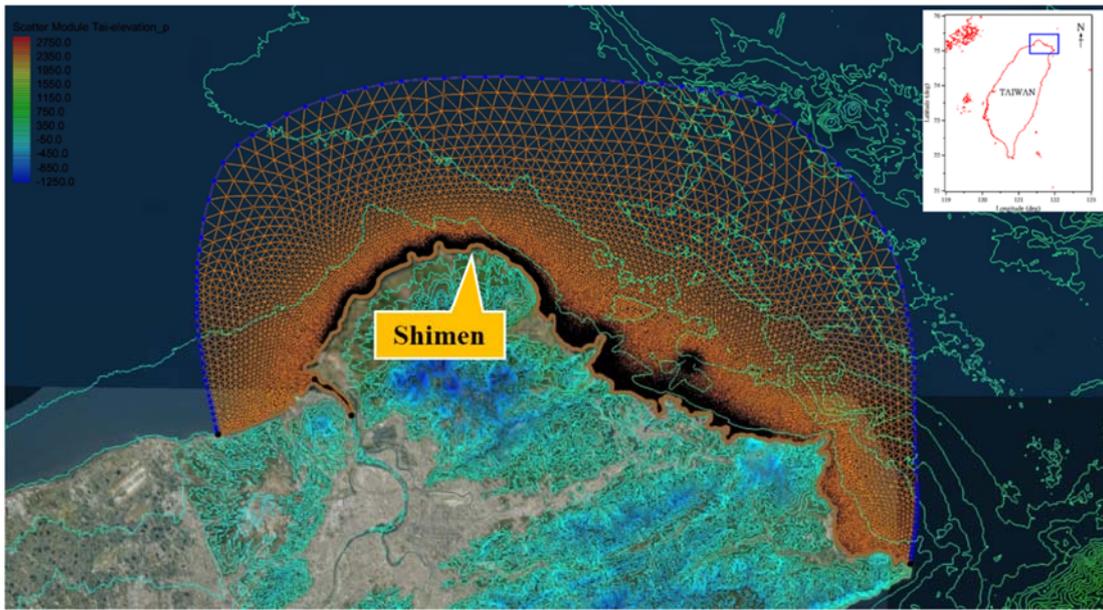


圖 5 石門外海油污擴散模擬範圍與計算網格系統

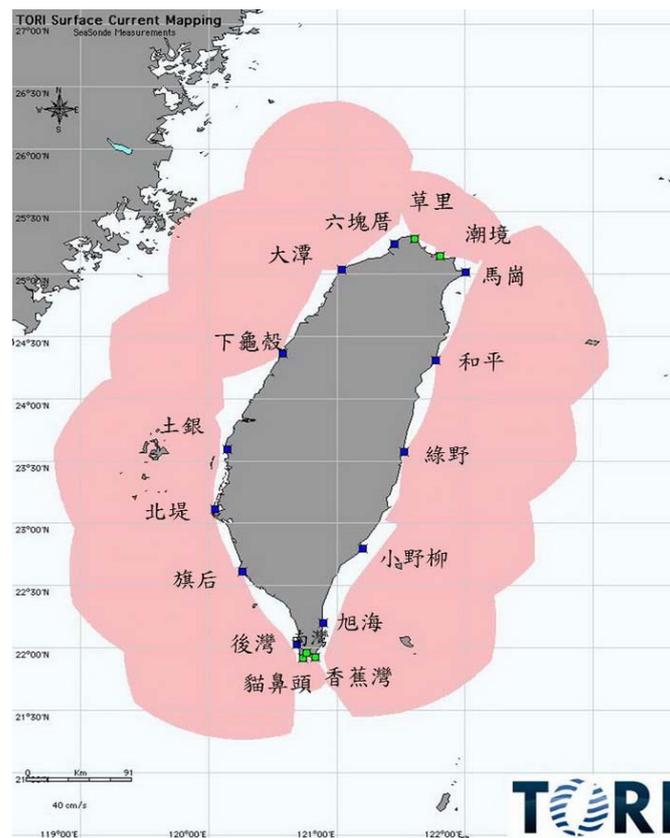


圖 6 台灣海洋科技研究中心長距離及標準型雷達系統位置及量測範圍圖
(藍色小方塊：長距離雷達站，綠色小方塊：標準型雷達站)
(摘自：<http://med.tori.narlabs.org.tw/TOROS/>)

表 1：SCHISM 與 GNOME 模式模擬「德翔臺北」溢油事件所用的參數

SCHISM 模式模擬參數設定	GNOME 模式模擬參數設定
發現不明油污時間：2016/ 03 / 26 00:00	發現不明油污時間：2016/ 03 / 26 00:00
發現不明油污地點：Latitude：25° 18' 11.2" N；Longitude：121° 34' 9.5" E	發現不明油污地點：Latitude：25° 18' 11.2" N；Longitude：121° 34' 9.5" E
油污種類：燃料油 (fuel oil)	油污種類：燃料油 (fuel oil)
油污溢洩量：50 公秉	油污溢洩量：50 公秉
風場：中央氣象局富貴角浮標測站量測的逐時風速風向	風場：中央氣象局富貴角浮標測站量測的逐時風速風向
流場：SCHISM 預測海流	流場：HYCOM 預測海流
預測時間：1 天、3 天、34 天	預測時間：1 天、3 天

四、結果與討論

本研究採用二套油污擴散模式，並以「德翔臺北」溢油事件來評估在臺灣的適用性，第一套為 SCHISM 模式系統中的質點追蹤法，第二套則為美國 NOAA 發展的 GNOME 油污擴散模式。以下即分別說明此二套模式的預測結果並做討論。

4.1 SCHISM 油污漂移軌跡預測結果

在應用 SCHISM 模式預測油污漂移軌跡前，需先瞭解石門附近海域水位及海流的演變。圖 7 為新北市石門附近海域地裡位置圖，依據圖中標示的相關地裡位置得知麟山鼻潮位站（圖中標示的 Linshanbi Tide Station）距「德翔臺北」（圖中標示的 T.S. Taipei）擱淺貨輪約 6.8 公里，富貴角浮標 (Fugui Cape Buoy) 距「德翔臺北」擱淺貨輪約 4.2 公里，X 波

段雷達架設在「德翔臺北」擱淺貨輪擱淺位置的南邊約 1 公里，草里 (Caoli) 高頻雷達測站在「德翔臺北」貨輪擱淺位置的南邊約 3.5 公里。本研究收集麟山鼻潮位站量測的水位資料，以及 X 波段雷達監測的海表面海流流速流向與 HF Radar 監測的海流表面徑向海流流速等資料，做為 SCHISM 模式預測水位及海流之驗證。圖 8 為麟山鼻實測與 SCHISM 模式預測水位比對歷線圖，比對期間為 2016 年 3 月，圖中藍色實線為麟山鼻實測水位資料，紅色虛線為 SCHISM 模式預測水位，由比對結果顯示實測與預測的結果相當一致。SCHISM 模式預測石門附近海域海流流場如圖 9，圖中箭矢方向表示海流流向，箭矢長度表示海流流速，底圖顏色表示海表面水位的變化，由預測海流結果顯示石門附近海域的海流流向呈現與海岸平行方向流動。為了因應新北市石門外海的「德翔臺北」貨輪擱淺及溢油

事件，成功大學近海水文中心於溢油事件剛發生時，立即前往現場以 X 波段雷達進行油污擴散監測。圖 10 為雷達監測影像經由影像分析處理技術得到的表面流場分佈圖，由圖中顯示表面流速約 1 m/sec，流向為沿著海岸方向平行流動。另外圖 11 為 SCHISM 模式預測的表面海流與雷達監測結果比對，圖 11 中上圖為海流流速比對，而下圖為海流流向比對，結果顯示於 3 月 26 日 06:00 至 16:00 期間，監測與預測的海流流速與流向之趨勢皆非常一致。

另外，圖 12 為高頻雷達草里測站地理位置及預測與實測海流驗證的選取位置，圖中紅點為高頻雷達監測範圍所量測海流資料的位置點，本研究選取其中三個位置的海流資料與模式預測海流作比對及驗證，選取比對的位置點分別為 C-P1、C-P2 及 C-P3。圖 13 至圖 15 分別為高頻雷達位於 C-P1、C-P2 及 C-P3 等位置於 2016 年 3 月的實測海流徑向流速與 SCHISM 預測海流徑向流速之比對歷線圖，比對期間為 3 月 1 日至 31 日，圖中藍色實線為高頻雷達監測的海流徑向流速，紅色點線為 SCHISM 預測海流轉換成海流徑向流速，轉換公式如下式：

$$Vrd = u \sin \alpha + v \cos \alpha \quad (12)$$

式中 Vrd 為 SCHISM 模式預測表面海流轉換成徑向流速的結果， u 為 SCHISM 模式預測的東西方向 (east-west) 分量， v

為 SCHISM 模式預測的南北方向 (north-south) 分量， α 為高頻雷達監測海流資料的徑向方向。圖 13 至圖 15 中縱座標的徑向海流流速有正負值，此表示徑向海流流向向內 (往岸邊方向) 為正值，流向向外 (離岸邊方向) 為負值 (李，2017)。由比對結果可知，三個比對位置點預測與實測的海流徑向流速隨時間變化趨勢相當一致，僅 C-P1 位置點在量值上呈現較小之趨勢。其可能原因為高頻雷達測站觀測 C-P1 的徑向方向與海岸線接近垂直，且近岸地區海流皆沿著海岸線平行方向流動，因此在 C-P1 預測的流速方向與高頻雷達量測海流的徑向方向接近垂直，所以預測海流轉換成徑向流速時，其海流流速度量值會有偏小的趨勢。

綜合上述結果可知，SCHISM 模式預測的水位及海流與實際觀測的結果相當一致，因此將海流輸入至 SCHISM 油污漂移軌跡模組，風場則輸入富貴角浮標測站量測的逐時風速風向。圖 16 至圖 18 為「德翔臺北」溢洩油後，SCHISM 模式所預測的 1 天、3 天、以及 34 天後的油污漂移軌跡，圖中紅色線條為油污漂移的軌跡；藍色色階為顯示石門附近海域的水深地形；黑色箭矢長度表示海流流速大小，黑色箭矢方向為表示海流流向。由圖 16 的結果得知油溢洩 1 天後，已有油污黏附在石門海岸附近；圖 17 的結果顯示在油溢洩 3 天後，由於油污持續受到東北風的影響，油污往船擱淺位置的左方海岸漂移，抵達石門洞附近 (相關地理位置請參

考圖 22)；圖 18 的結果顯示在油溢洩 34 天後，油污往左方海岸最遠漂移到老梅綠石槽，往右方海岸最遠漂移到草里海岸。同時檢視溢油事件發生位置鄰近富貴角資料浮標的風速資料，圖 19 為富貴角資料浮標 2016 年 3 月 22 日至 31 日三秒陣風時序列圖，資料顯示於 3 月 26 日期間三秒陣風接近 20 km/h，且風向以東北風為主。在開放的海域，風速大於 20 km/h 時，風會主導油污的擴散 (Fingas, 2014)，依此結果初判油污擴散初期 (1~2 天內) 皆由風所主導。

圖 20 為國家災害防救科技中心 (黃等人, 2016) 自「德翔臺北」擱淺後到 2016 年 5 月 10 日，在石門海岸附近進行調查後所製做的「德翔臺北」貨輪擱淺溢洩油可能影響範圍，圖中標示石門海岸受到油污影響的範圍。比較圖 18 (2016 年 4 月 30 日) 與圖 20 (2016 年 5 月 10 日) 的結果可知，SCHISM 所預測的受油污影響的海岸範圍與實際調查結果非常接近。由於實際調查的日期較模式預測日期晚了 10 天，所以油污影響範圍稍大。

4.2 GNOME 油污擴散模式預測結果

本研究為確認 GNOME 模式預測結果的可靠性，也選擇「德翔臺北」溢油事件，進行溢油漂移軌跡與油污擴散範圍的預測。GNOME 模式模擬所用參數設定如表 1，與 SCHISM 模式模擬參數設定比較，僅海流資料來源不同。GNOME 模式

中應用 HYCOM 模擬海流，風場來源與 SCHISM 模式一樣，皆採用富貴角浮標測站量測的逐時風速及風向。圖 21 與圖 22 分別顯示「德翔臺北」溢油 1 天與 3 天後預測結果，GNOME 模式有考慮風與海流的不確定性，所以有紅色與藍色二種油污擴散的範圍，紅色質點擴散範圍表示預測的油污擴散範圍有 90% 可靠性，藍色質點擴散範圍表示預測的油污擴散範圍則為最佳預測結果 (Zelenke et al., 2012a)。由於「德翔臺北」擱淺位置離石門外海約 300 公尺，因此當發生油污溢洩時，受到東北季風的影響，油污約在 1 小時內抵達石門海岸。由圖 21 的結果可看出在油溢洩 1 天後，石門西邊十八王公廟往東邊至麟山鼻漁港都受到油污的影響。而圖 22 的結果顯示油溢洩 3 天後，大部份的油污皆往外海方向漂移，而在海岸線自老梅綠石槽至富基漁港附近都有受到油污的影響。表 2 為 GNOME 模式預測「德翔臺北」發生溢洩油 1 及 3 天後油污於海面上風化結果，由表中資料可知，發生溢洩油 1 天後溢洩油總量為 50 公秉、油污漂浮在海面上數量為 33.8 公秉、油污抵達岸邊為 5.7 公秉、油污蒸發與分散的數量為 10.5 公秉。發生溢洩油 3 天後，油污漂浮在海面上數量為 26.7 公秉、油污抵達岸邊為 6.0 公秉、油污蒸發與分散的數量為 17.3 公秉。上述油污風化結果是針對本研究案例設定所得出的結果，若模擬參數設定不同，油污風化結果亦會隨著改變。拿圖 21 及圖 22 的結果與圖 16 及

圖 17 的結果比較可知，油溢洩 1 天及 3 天後，GNOME 所預測的受油污影響的海岸範圍與 SCHISM 所預測的結果一致。

4.3 討論

本研究以「德翔臺北」溢油事件為案例，分別應用 SCHISM 與 GNOME 二套油污擴散模式，預測油污漂移軌跡與擴散範圍。探討此二模式應用在臺灣近岸海域的可行性，由上兩節的結果可知，這兩個模式預測結果與現場調查的結果相符；不過二者各有其特色與優點。

SCHISM 模式預測的海流流場有考慮海表面海氣交互作用、波浪、以及海水溫度與鹽度的變化，較符合真實的海洋環境，且與 X 波段雷達及高頻雷達監測的海流結果相當一致。可見 SCHISM 模式預測的海流流場有助於提昇油污擴散模式的預測精度。SCHISM 模式的質點追蹤方法主要是預測油污的漂移軌跡，而海上

油污其他風化結果則需應用 2D/3D VOILS 的油污擴散模式才能計算。

GNOME 模式有考慮油污漂浮在海面上、抵達岸邊、以及蒸發與分散等油污的風化結果，這些風化作用在油污事件發生初期（一周內），足以提供政府在現場緊急應變之需求。GNOME 模式可輸入不同海洋數值模式預測的海流流場，本研究案例初步採用 HYCOM 預測的海表面流場解析度為 $1/12^\circ$ （約 9 公里）。此流場解析度用來預測近岸油污漂移軌跡與擴散範圍略顯不足，因此只模擬油溢洩 3 天後的結果。針對此問題未來可輸入 SCHISM 模式預測的海流流場，以提昇油污漂移軌跡與擴散範圍的精度。不過，相較於 SCHISM 模式，GNOME 模式可提供較完整的油污擴散範圍及油污量，在緊急應變時這些都是相當重要的資訊。此外，GNOME 模式所得油污溢洩 1 天及 3 天後影響海岸範圍，基本上與 SCHISM 所得結果一致。

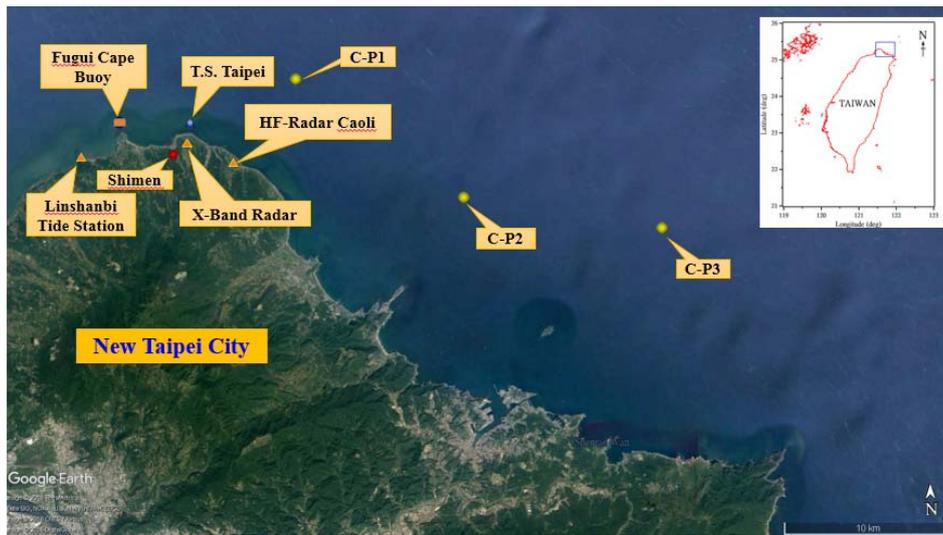


圖 7 新北市石門附近海域地理位置圖

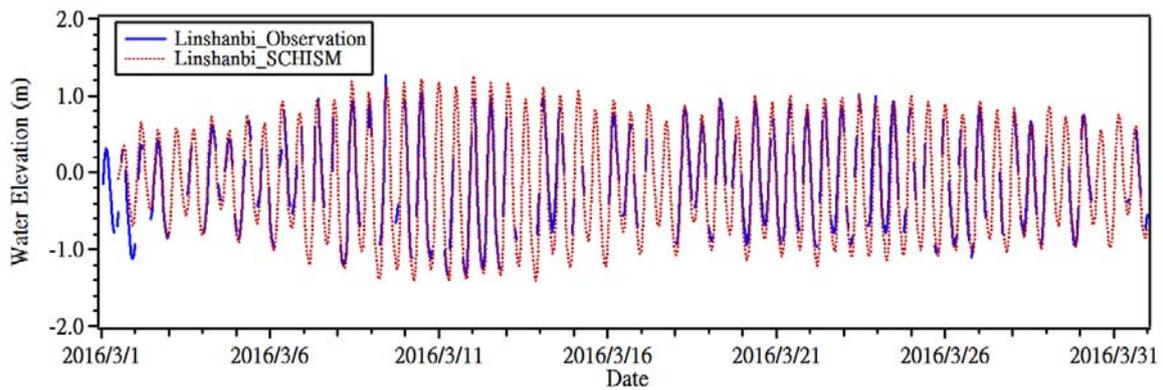


圖 8 麟山鼻實測與 SCHISM 模式預測水位比對歷線圖

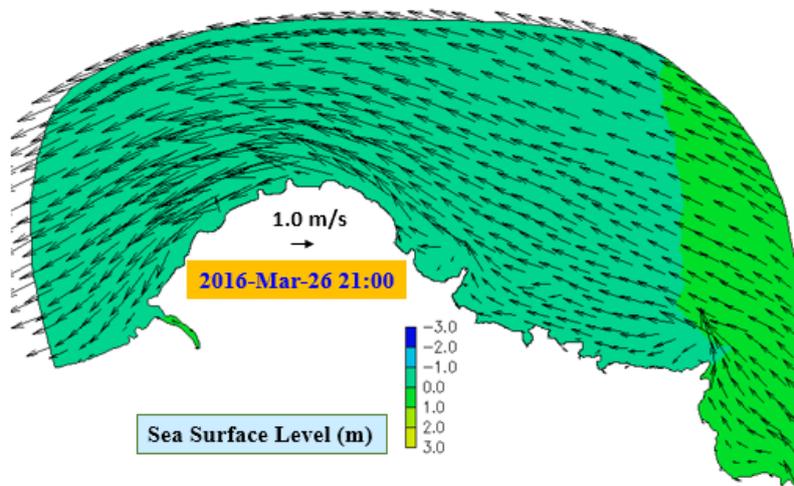


圖 9 SCHISM 模式所預測的石門附近海域的海流流場

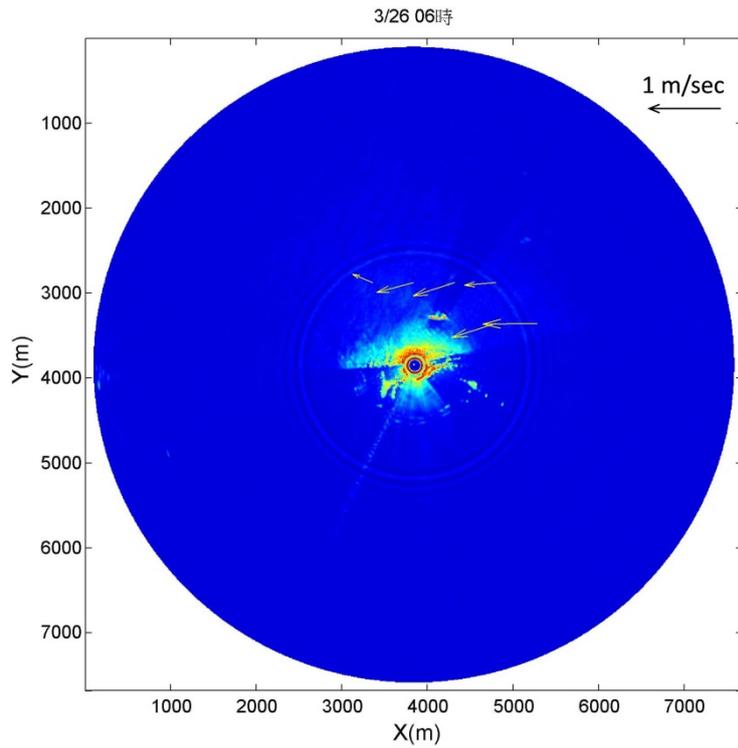


圖 10 X-Band 雷達監測之表面海流分佈圖

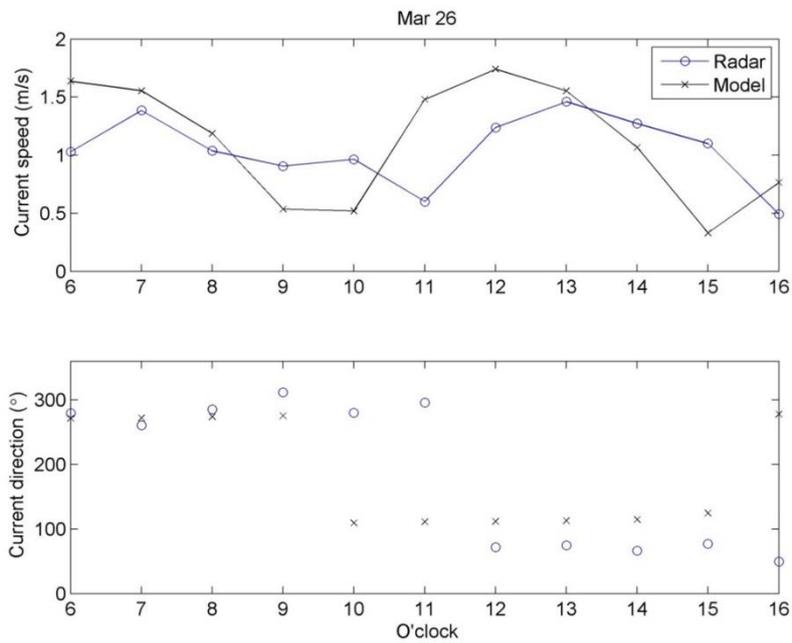


圖 11 2016 年 3 月 26 日 06:00 至 16:00 雷達監測與 SCHISM 模式所預測海流流速 (上圖) 與流向 (下圖) 之比較

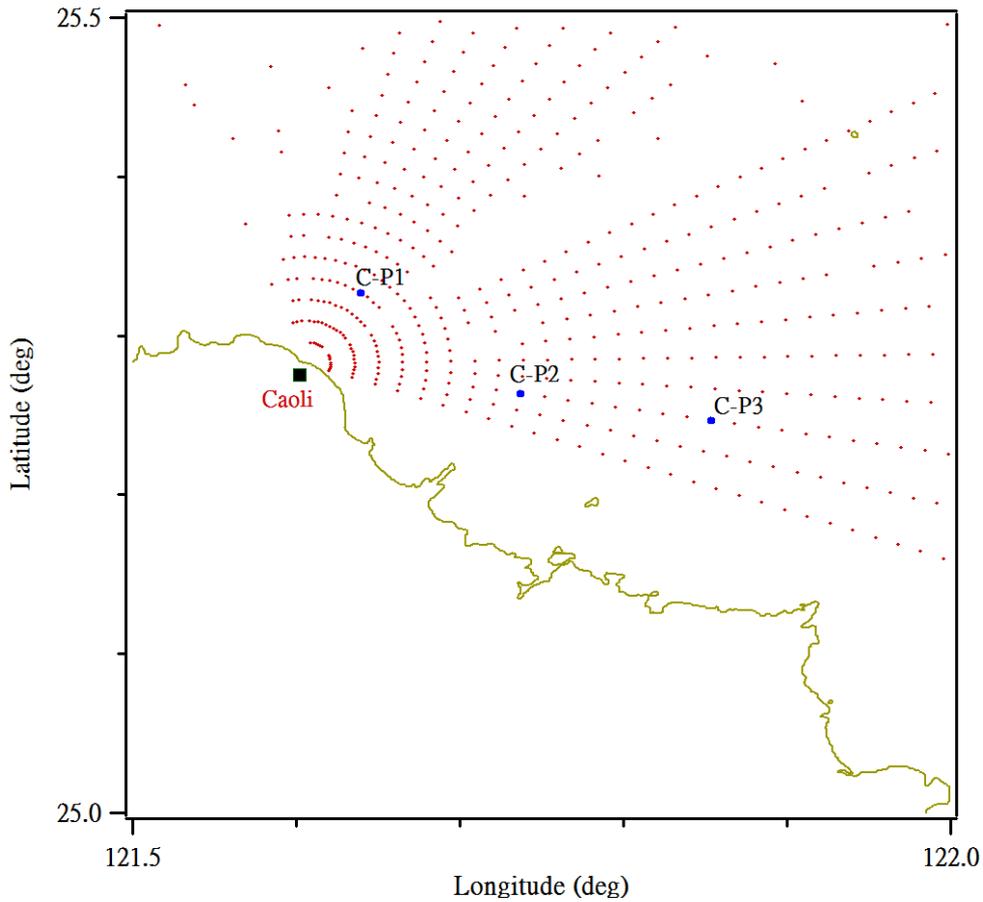


圖 12 高頻雷達草里 (Caoli) 測站地理位置及預測與實測海流驗證點

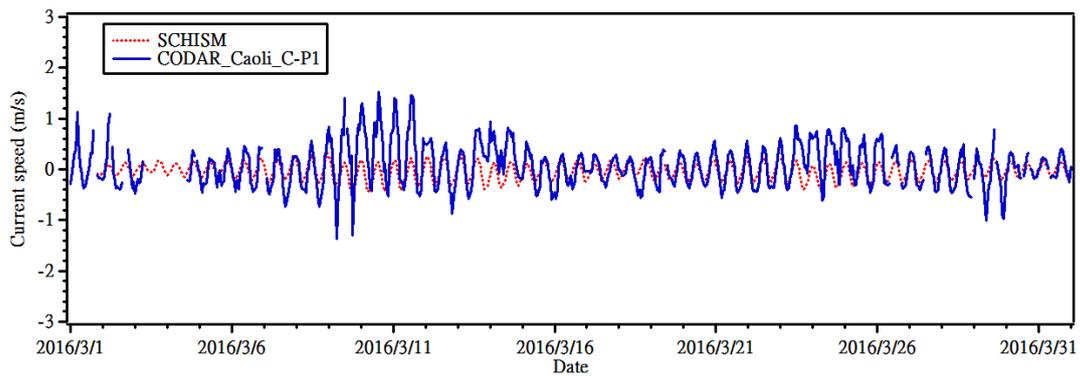


圖 13 2016 年 3 月石門外海 C-P1 預測與實測海流徑向流速比對歷線圖

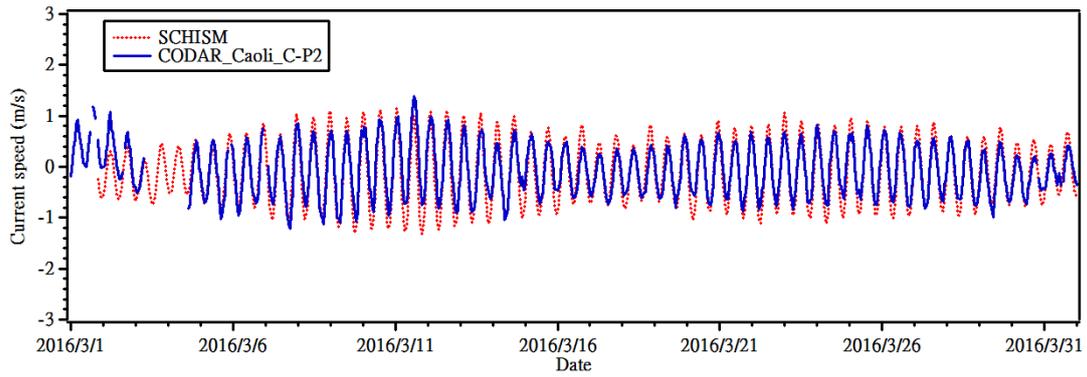


圖 14 2016 年 3 月石門外海 C-P2 預測與實測海流徑向流速比對歷線圖

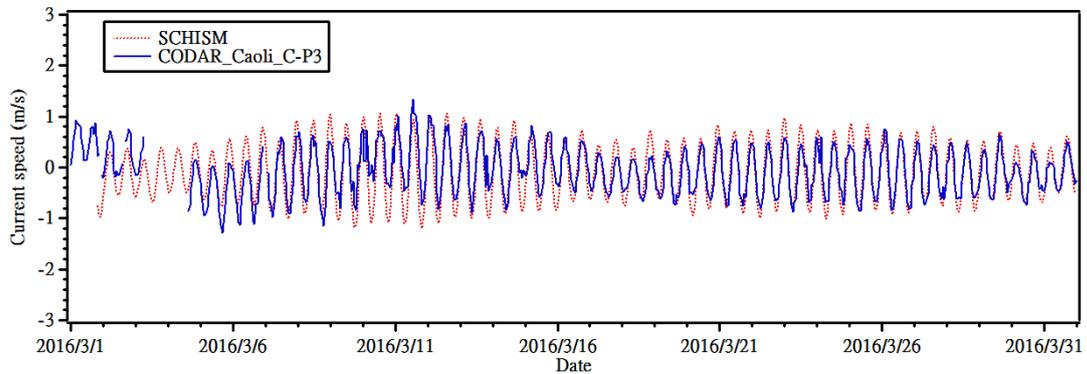


圖 15 2016 年 3 月石門外海 C-P3 預測與實測海流徑向流速比對歷線圖

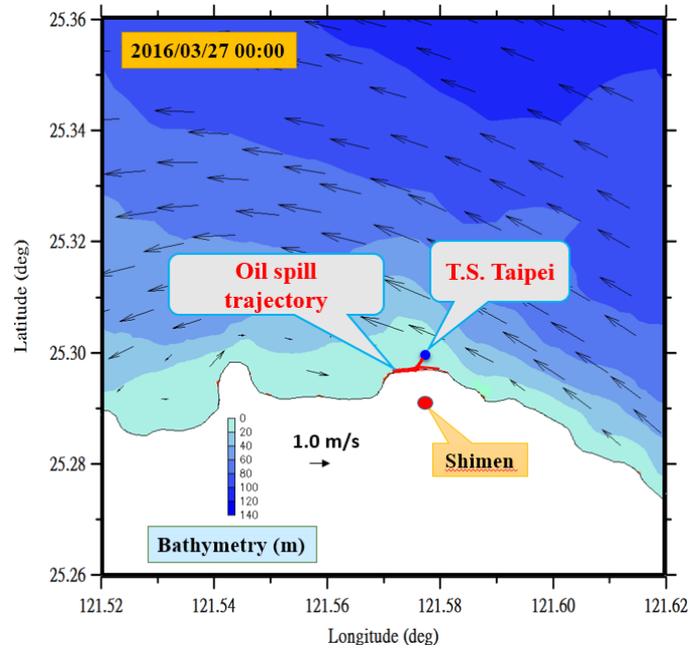


圖 16 SCHISM 模式預測的「德翔臺北」溢油 1 天後的油污軌跡

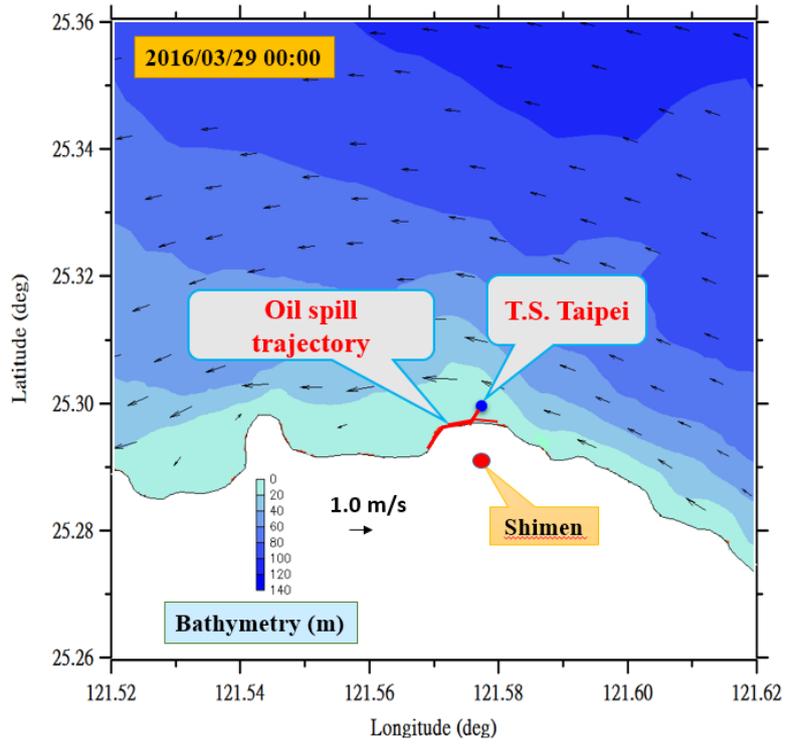


圖 17 SCHISM 模式預測的「德翔臺北」溢油 3 天後的油污軌跡

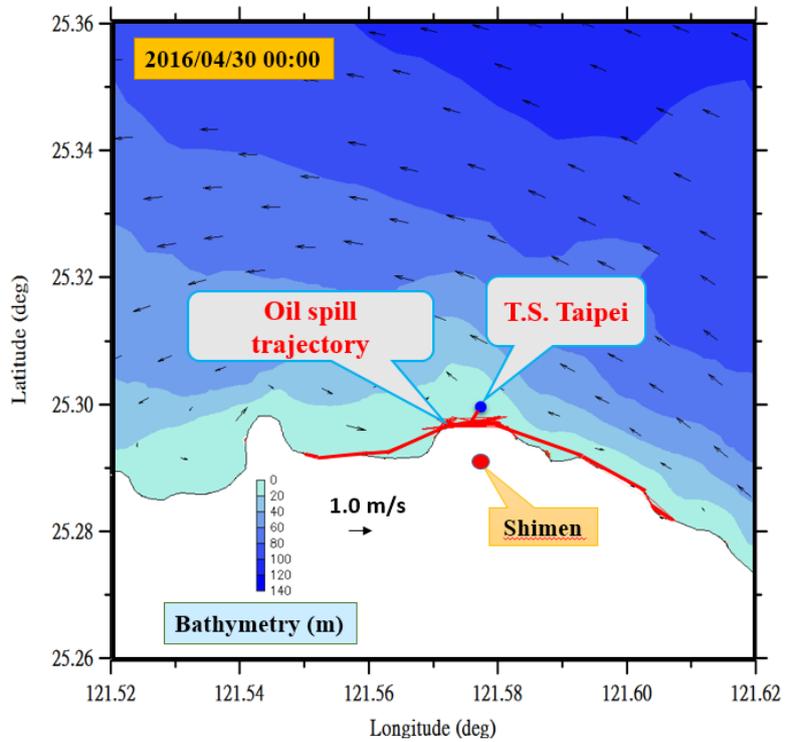


圖 18 SCHISM 模式預測的「德翔臺北」溢油 34 天後的油污軌跡

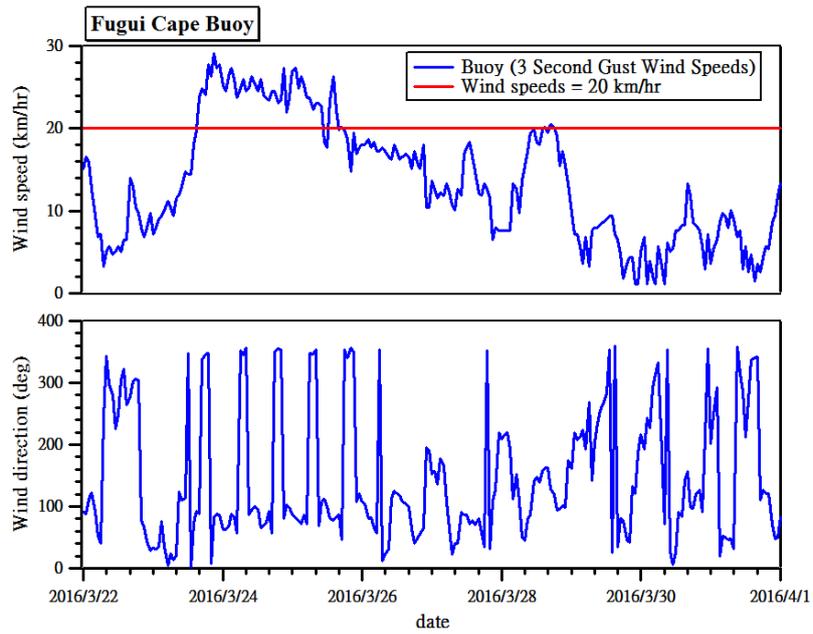
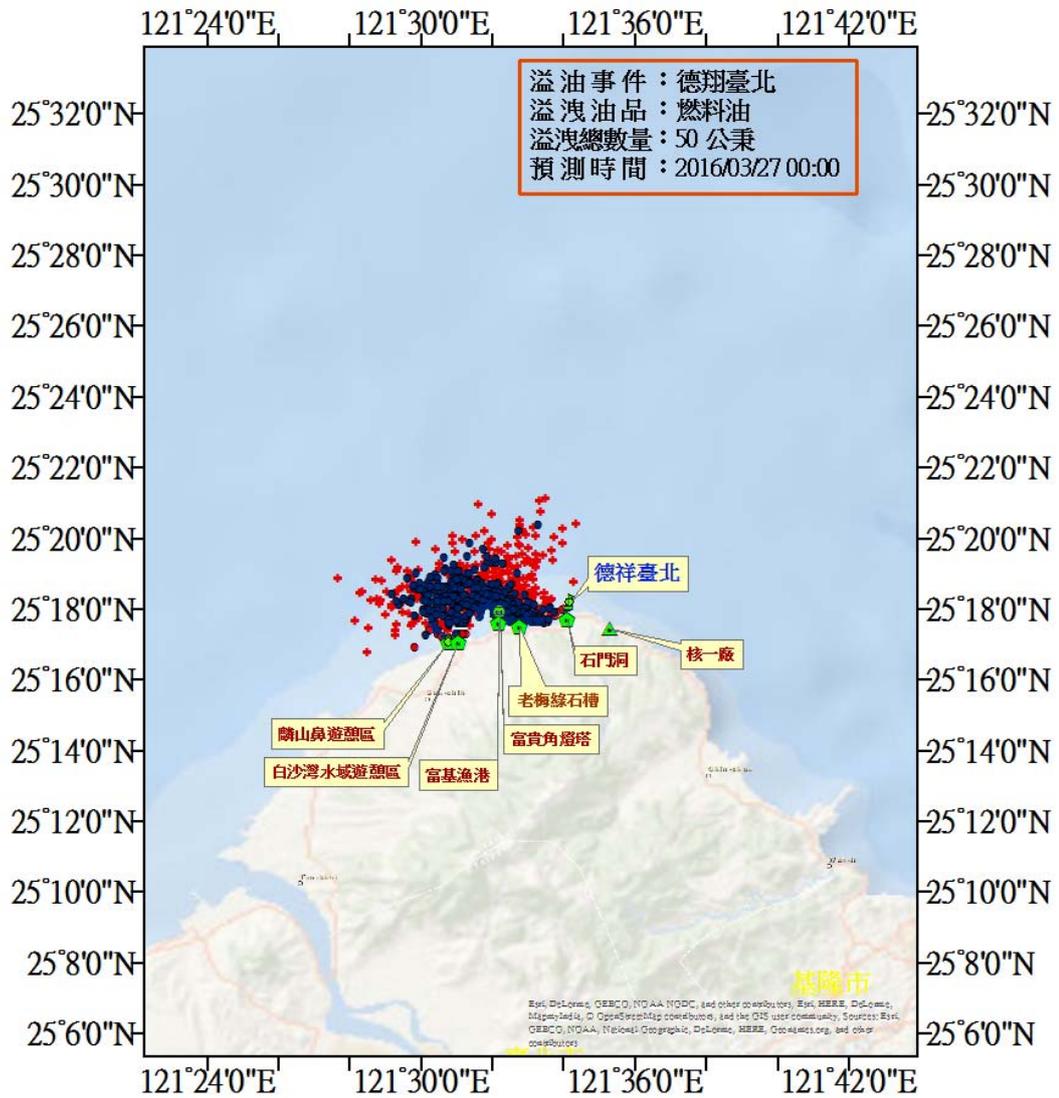


圖 19 富貴角資料浮標 2016 年 3 月 22 日至 31 日三秒陣風時序列圖



圖 20 「德翔臺北」貨輪擱淺溢洩油可能影響範圍 (黃等人, 2016)



(紅色質點：預測的油污擴散範圍有 90% 可靠性；
 藍色質點：預測的油污擴散範圍為最佳預測結果)

圖 21 GNOME 模式預測「德翔臺北」溢油 1 天後的結果

五、結論與建議

本研究應用二套油污擴散模式 SCHISM 與 GNOME，以「德翔臺北」溢油事件為案例，成功預測油污漂移軌跡與擴散範圍，並驗證 SCHISM 與 GNOME 適用於預測臺灣海域的油污擴散。由於 SCHISM 模式的質點追蹤方法為預測油污的漂移軌跡，無法描述海上油污其他風化結果，而 GNOME 模式為美國官方 NOAA 應用在油污事件緊急應變的油污擴散模式，有考慮油污漂浮、油污抵達岸邊、以及油污蒸發與分散等風化結果，這些資訊足以提供政府在油污事件發生時做緊急應變之參考依據。綜合上述的探討，本研究可獲得下述結論與建議：

1. SCHISM 模式預測之海流流場有考慮海表面海氣交互作用、波浪的作用、以及海洋溫度與鹽度的變化，海流流場預測結果較符合真實海洋環境的變化。
2. SCHISM 模式預測之海流流場與 X 波段雷達及高頻雷達監測的海面海流流場進行驗證，結果顯示預測與實測的表面海流結果相當一致，說明 SCHISM 模式預測的海流流場可提供油污擴散模式，以提昇油污漂移軌跡與擴散範圍預測的精度。
3. SCHISM 模式預測的海流流場配合質點追蹤方法，描述「德翔臺北」溢油 34 天後影響海岸範圍，與環保署現場調查結果相符。
4. 本研究應用 GNOME 模式在臺灣的溢油事件，依據 NOAA 的線上資料庫系統 GOODS 系統中下載 HYCOM 的海流流場，並採用中央氣象局富貴角浮標實測的逐時風速風向，進行預測「德翔臺北」溢油 1 天及 3 天後於海面上的漂移軌跡與擴散範圍。本模式所得油污影響海岸範圍，基本上與 SCHISM 所得結果一致。
5. GNOME 模式有考慮油污漂浮、油污抵達岸邊、以及油污蒸發與分散等風化結果，可瞭解溢油事件發生初期（一周內）油污的漂移軌跡與擴散範圍，也較符合政府在油污事件發生時做緊急應變之需求。
6. GNOME 模式可快速更新資料以及重新執行油污擴散的預測，預測結果亦能儲存 KML (Keyhole Markup Language) 資料檔案格式，方便使用者利用電腦或行動裝置上的 Google Earth，展示出油污擴散的預測結果與應變海域相關的風險地圖，可即時提供專業諮詢服務予各級機關與相關單位做緊急應變處置之參考。
7. GNOME 模式可輸入不同海洋數值模式預測的海流流場，本研究案例採用 HYCOM 預測的海表面流場解析度略顯不足，針對此問題建議未來可輸入精度較高的預測海流流場，如 SCHISM 模式預測的海流流場，以提昇油污漂移軌跡與擴散範圍的精度。
8. GNOME 模式亦能輸入實測海表面海流流場，建議未來輸入 X 波段雷

達及高頻雷達監測的海表面海流流場，將有助於油污事件發生時緊急應變之判斷依據。

謝 誌

本論文係交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究計畫「海域油污監測與擴散模擬技術研發(3/3)」(2016)之部份研究成果，承蒙港灣技術研究中心經費補助使本研究成果更臻完善。此外，也非常感謝美國威廉與瑪麗學院 (College of William & Mary) 維吉尼亞海洋研究所 (Virginia Institute of Marine Science) Prof. Y. Zhang 在 SCHISM 模式應用上之協助，以及美國 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 OR&R (Office of Response and Restoration) 在 GNOME 模式應用上之協助。

參考文獻

李宗勇 (2015) 「臺灣東部高頻雷達表面海流觀測之資料品質管理與初步結果」，國立臺灣大學海洋研究所碩士論文。

李啓瑞 (2017) 「應用 SCHISM 模式探討臺灣近岸海流之特性」，國立成功大學水利及海洋工程學系碩士論文。

黃清哲、邱啓敏、莊士賢、范揚洺、吳立中、邱永芳、蘇青和、李俊穎 (2016) 「SCHISM 模式模擬油污染擴散 - 以「德翔臺北」漏油為例」，第38屆海洋工程研討會論文集，第375 - 380 頁。

黃暄穎、張君名、張志新 (2016) 「船舶擱淺引致近岸油污污染衝擊評估 - 以德翔台北事件為例」，105 年天氣分析與預報研討會，A5-9，交通部中央氣象局。

ASA (2004) “Technical Manual, Oilmap for Windows,” Applied Science Associates, Inc., Narragansett, Rhode Island, pp. 54.

ASA (2008) “Simap: Integrated Oil Spill Impact Model System,” Applied Science Associates, Inc., pp. 10.

ASCE Task Committee on modeling of oil spills of the water resources engineering division. (1995) “State-of-the-art review of modeling transport and fate of oil spills,” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 122 (11), pp. 594–609.

Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A., Zhang, J., and Baptista, A.M. (2014) “A cross-scale numerical modeling system for management support of oil spill accidents,” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 80, pp. 132–147.

Beegle-Krause, C. J. (2001) “General NOAA oil modelling environment (GNOME): A new spill trajectory model,” *International Oil Spill Conference*, No. 2, pp. 865–871.

Clift, R., Grace, J.R., and Weber, M.E. (1978) “Bubbles, drops, and particles,” Academic, New York.

Delvigne, G, A. (1993) “Natural dispersion of oil by different sources of turbulence,” *International Oil Spill*

- Conference*, Vol. 1993, No. 1, pp. 415–419.
- Delvigne, G. A., and Hulsen, L. J. (1994) “Simplified laboratory measurement of oil dispersion coefficient - application in computations of natural oil dispersion,” *Environment Canada*, pp. 173–187.
- Delvigne, G., and Sweeney, C.E.. (1988) “Natural dispersion of oil,” *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 4(4), pp. 281–310.
- Fingas, M. F. (1997) “Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: I. The relationship between evaporation rate and time,” *Journal of hazardous materials*, Vol. 56(3), pp. 227–236.
- Fingas, M.F. (1998) “Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products: II. Boundary layer regulation” *Journal of hazardous materials*, Vol. 57(1–3), pp. 41–58.
- Fingas, M.F. (2004) “Modeling evaporation using models that are not boundary-layer regulated,” *Journal of hazardous materials*, Vol. 107(1–2), pp. 27–36.
- Fingas, M., (Ed.). (2014) “Handbook of oil spill science and technology,” *John Wiley & Sons*.
- Fingas, M. and Brown, C. (2014). “Review of oil spill remote sensing,” *Marine pollution bulletin*, Vol. 83(1), pp. 9–23.
- Foreman, M. G. G., Beauchemin, L., Cherniawsky, J. Y., Peña, M. A., Cummins, P. F., and Sutherland, G. (2005) “A review of models in support of oil and gas exploration off the north coast of British Columbia,” *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2612, pp. 1–58.
- French-McCay, D. (2009) “State-of-the-art and research needs for oil spill impact assessment modeling,” In Proceedings of the 32nd AMOP Technical Seminar on Environmental Contamination and Response, Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, Canada, pp. 601-653.
- French McCay, D. P., Jayko, K., Li, Z., Horn, M., Kim, Y., Isaji, T., Crowley, D., Spaulding, M., Decker, L., Turner, C., Zamorski, S., Fontenault, J., Shmookler, R., and Rowe, J.J. (2015) “Technical Reports for Deepwater Horizon Water Column Injury Assessment – WC_TR14: Modeling Oil Fate and Exposure Concentrations in the Deepwater Plume and Cone of Rising Oil Resulting From the Deepwater Horizon Oil Spill,” *DWH NRDA Water Column Technical Working Group Report*. Prepared for National Oceanic and Atmospheric Administration by RPS ASA, South Kingstown, RI, USA.
- Guo, W. J., and Wang, Y. X. (2009) “A numerical oil spill model based on a

- hybrid method,” *Marine pollution bulletin*, Vol. 58(5), pp. 726–734.
- ITOPF (2016). OIL TANKER STATISTICS 2015. <http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_S tats_2016.pdf>.
- Jones, R.K. (1997) “A simplified pseudo-component oil evaporation model,” *In: Proceedings of the 20th Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP)*. Technical Seminar. Environment Canada, pp. 43–61.
- Lehr, W.J. (2001) “Review of modeling procedures for oil spill weathering behavior” *Advances in Ecological Sciences*, Vol. 9, pp. 51–90.
- Lehr, W. J., Fraga, R. J., Belen, M. S., and Cekirge, H. M. (1984) “A new technique to estimate initial spill size using a modified Fay-type spreading formula,” *Marine pollution bulletin*, Vol. 15(9), pp. 326–329.
- Lehr, W., Wesley, D., Simecek-Beatty, D., Jones, R., Kachook, G., and Lankford, J. (2000) “Algorithm and interface modifications of the NOAA oil spill behavior model,” *In Proceedings of the 23rd Arctic and Marine Oil Spill Technical Seminar*, Vol. 2, pp. 525–540.
- Li, Z., Spaulding, M. L., French McCay, D., Crowley, D., and Payne, J. (2017) “Development of a unified oil droplet size distribution model with application to surface breaking waves and subsurface blowout releases considering dispersant effects,” *Marine pollution bulletin*, Vol. 114(1), pp. 247–257.
- Mariano, A. J., Kourafalou, V. H., Srinivasan, A., Kang, H., Halliwell, G. R., Ryan, E. H., and Roffer, M. (2011) “On the modeling of the 2010 Gulf of Mexico oil spill,” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 52(1–2), pp. 322–340.
- Mackay, D., Paterson, S., and Trudel, K. (1980a) “A Mathematical Model of Oil Spill Behavior,” Environmental Protection Service, Canada. Report EE-7.
- Mackay, D., Buist, I., Mascarenhas, R., and Petersen, S. (1980b) “Oil Spill Processes and Models,” Environmental Protection Service, Canada. Report EE-8.
- Mackay, D., and Leinonen, P.J. (1977) “Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion. Prepared for Fisheries and Environment Canada” Economic and Technical Review Report EPS-3-EC-77-19, pp. 39.
- Mellor, G.L., and Yamada, T. (1982) “Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems,”

- Reviews of Geophysics*. Vol. 20(4), pp. 851–875.
- North, E.W., Hood, R.R., Chao, S.Y., and Sanford, L.P. (2006) “Using a random displacement model to simulate turbulent particle motion in a baroclinic frontal zone: A new implementation scheme and model performance tests,” *Journal of Marine Systems*, Vol. 60, pp. 365-380.
- North, E.W., Adams, E.E., Schlag, Z., Sherwood, C.R., He, R., Hyun, K. H., and Socolofsky, S.A. (2011) “Simulating oil droplet dispersal from the Deepwater Horizon Spill with a Lagrangian approach,” *Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise*, pp. 217-226.
- NOAA. (2002) “GNOME™ User’s Manual,” National Oceanic and Atmospheric Administration. Office of Response and Restoration, Hazardous Materials Response Division, 94 pp.
- Payne, J.R., Kirstein, B.E., McNabb, Jr. G.D., Lambach, J.L., Redding, R., Jordan, R.E., Hom, W., de Oliveira, C., Smith, G.S., Baxter, D.M., and Gaegel, R. (1984) “Multivariate analysis of petroleum weathering in the marine environment-sub arctic. In: *Environmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf – Final Reports of the Principal Investigations*,” Vols. 21 and 22, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, Juneau, AK, USA.
- Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P. J., Daling, P., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay, D., and Prentki, R. (1999) “Oil spill modelling toward the close of the 20th century: overview of the state of the art,” *Spill Science and Technology Bulletin*, Vol. 5(1), pp. 3–16.
- Reed, M., Daling, P., Brakstad, O., Singsaas, I., Faksness, L., Hetland, B., and Ekrol, N. (2000) “OSCAR2000: a multi-component 3-dimensional oil spill contingency and response model,” *Proceedings, 23rd Arctic Marine Oil Spill Program Technical Seminar*, Vancouver, BC, Canada, June 14–16, 1992. Emergencies Science Division, Environment Canada, Ottawa, ON, pp 663– 952.
- Rodi, W. (1984) “Turbulence models and their applications in hydraulics: a state of the art review,” *International Association for Hydraulics Research*, Delft, The Netherlands.
- Spaulding, M. L. (1988) “A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modelling,” *Oil and Chemical Pollution*, Vol. 4(1), pp. 39–55.
- Spaulding, M. L., Howlett, E., Anderson, E., and Jayko, K. (1992) “OILMAP: a global approach to spill modeling,”

- 15th Arctic and Marine oil Spill Program, Technical Seminar, Edmonton, Alberta, Canada, June 9–11, 1992, pp. 15–21.
- Spaulding, M. L. (2017) “Review State of the art review and future directions in oil spill modeling,” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 115(1–2), pp. 7–19.
- Stiver, W., and Mackay, D. (1984) “Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures,” *Environmental science & technology*, Vol. 18 (11), 834–840.
- Tkalich, P. (2006) “A CFD solution of oil spill problems,” *Environmental Modelling & Software*, Vol. 21(2), pp. 271–282.
- Umlauf, L., and Burchard, H. (2003) “A generic length-scale equation for geophysical turbulence models,” *Journal of Marine Research*, Vol. 61(2), pp. 235–265.
- Visser, A.W. (1997) “Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column” *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 158, pp. 275–281.
- Wilcox, D.C. (1998) “Reassessment of scale determining equation for advance turbulence models,” *AIAA journal*, Vol. 26(11), pp. 1299–1310.
- Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C., Beegle-Krause, C. J., and Eclipse, L. (Eds.). (2012a) “General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation,” U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 40. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA, pp. 105.
- Zelenke, B., O'Connor, C., Barker, C., and Beegle-Krause, C. J. (Eds.). (2012b) “General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) Technical Documentation: Data Formats,” U.S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 41. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA, pp. 49.
- Zhang, Y. J., Ateljevich E., Yu H. C., Wu C. H., and Jason, C. S. (2015) “A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model,” *Ocean Modelling*, Vol. 85, pp. 16–31.
- Zhang, Y., and Baptista, A.M. (2008) “SELFE: a semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation,” *Ocean Modelling*, Vol. 21(3–4), pp. 71–96.
- Zheng, L. and Yapa, P.D. (2000) “Buoyant velocity of spherical and nonspherical bubbles/droplets,” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 126 (11), pp. 852–854.
- Zhao, L., Boufadel, M., Geng, Z., Leeb, L., King, T., Robinson, B., and Fitzpatrick, F. (2016a) “A-DROP: a

predictive model for the formation of oil particle aggregates (OPAs),” *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 106(1–2), pp. 245–259.

Zhao, L., Boufadel, M. C., Lee, K., King, T., Loney, N., and Geng, X. (2016b)

“Evolution of bubble size distribution from gas blowout in shallow water,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 121(3), pp. 1573–1599.