

「德翔臺北」貨輪擱淺事件 應用 SCHISM 模擬溢油之擴散

邱啟敏 國立成功大學水利及海洋工程學系博士候選人
莊士賢 國立成功大學海洋科技與事務研究所副教授
黃清哲 國立成功大學水利及海洋工程學系教授兼近海水文中心主任
范揚名 國立成功大學近海水文中心研發組組長
吳立中 國立成功大學近海水文中心助理研究員
蘇青和 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

海上油污事件發生初期時，風與流為主導油污擴散及漂移軌跡的驅動力，若能精確地預測風場與流場之演變，將可掌握並預測油污擴散及漂移的軌跡及分佈範圍，有效地進行油污緊急應變之災情控制、清理、與善後等工作處置。SCHISM 為一套三維跨尺度的海洋數值模式，可結合大氣模式預測之風場，精確地模擬海岸地區海流之演變。2016 年 3 月 10 日於新北市石門外海 0.3

海浬處擱淺的「德翔臺北」貨輪，溢洩出的油污嚴重影響當地的海岸環境與生態。本研究以「德翔臺北」貨輪擱淺溢油事件為案例，應用 SCHISM 進行模擬未來三天油污的擴散及漂移軌跡，經與環保署公布的調查結果進行定性比較，證明本研究建置的油污染擴散模擬程序未來可作為海域油污染緊急應變的參考依據。

一、前言

臺灣的經濟海域是各式大型船舶通航頻繁的區域，發生船舶碰撞或操船不慎而擱淺的風險較大，導致船舶溢洩油事件發生頻繁。1982 年決議的聯合國海洋公約法(United Nations Convention on the Law of the Sea) 認定來自船舶的

污染物是海洋污染的主要來源之一，其中的油污染不只會對海洋生態與經濟活動造成嚴重衝擊，對應的緊急應變作為也影響到國家的海事管理形象。

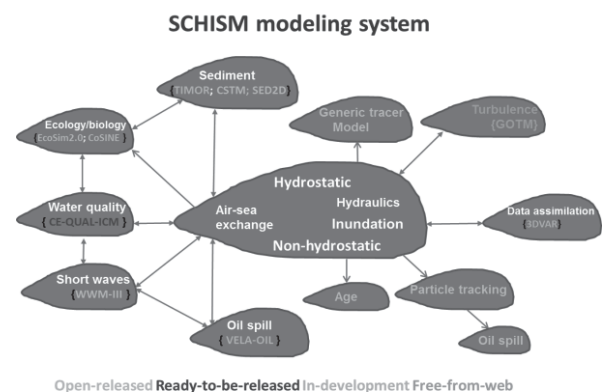
海上運輸工具所載運之油料洩漏，或污水傾倒注入海洋後，海域被這些

物質污染，進而影響生物圈之生態平衡，並造成水產資源的嚴重損失。根據北海行動論壇全球協會 (Bremer Umweltvereins Aktionskonferenz Nordsee) 公布的資料顯示，全球海域每年大約有超過 300 萬噸的廢油漂流於海上，其中有 13% 是來自於船難漏油。臺灣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，尤其是石化工業的興起，油品及化學品的進出口更增加了港灣環境管理的不確定性。此外，臺灣東北海域在冬季受到東北季風強烈的吹拂，惡劣的海氣象造成船舶擱淺於北海岸風險增大，曾造成幾次重大的油污染事件，例如 2016 年 3 月 10 日在新北市石門外海發生本國籍「德翔臺北」貨輪擱淺溢油事件，此溢油事件對石門海域之環境與生態造成重大影響。

油污於海上溢洩後，會產生各種風化過程，包含延散 (spreading)、蒸發 (evaporation)、分散 (dispersion)、乳化 (emulsification)、溶解 (dissolution)、氧化 (oxidation)、沉降與沉入 (sedimentation and sinking)、以及生物作用 (biodegradation) 等複雜的物理及化學作用。在油污事件發生初期，延散、蒸發、分散等現象關係著油污緊急應變決策與油污處理能量配置之重要參考依據。

若能在溢油事件發生初期即時掌

握油污的擴散及漂移軌跡，將能有效降低油污染對自然環境的衝擊。溢油事件發生地區之預測風場與流場，關係著油污擴散及漂移軌跡的變化。SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) 模式系統以海洋流體動力模式為主體 (如圖 1)，並耦合油污擴散、水質擴散、漂砂、波浪等模式。本研究應用 SCHISM 之海洋流體動力模式，結合大氣模式預測風場以及 WWM 波浪模式，來提昇近岸流體動力現象的預測精度，此結果可提供溢油擴散模式預測海面上油污擴散與漂移軌跡，做為油污緊急應變處置之重要參考依據。本研究以「德翔臺北」貨輪擱淺造成油污染事件案例，進行海域油污監測與擴散模擬，並探討油污在新北市石門外海的擴散與傳輸現象。



摘自：<http://ccrm.vims.edu/schismweb/>

圖 1 SCHISM 海洋數值模式系統

二、海洋數值模式

本研究應用之海洋數值模式包含

海洋流體動力與油污擴散模式，以下針

對此二套數值模式分別做說明。

2.1 海洋流體動力模式

SCHISM 海洋數值模式 (2014 年 12 月 13 日前稱為 SELFE) 是由 Zhang 與 Baptista (2008) 以 ELCIRC (Eulerian-Lagrangian CIRCulation) 模式為基礎修改而成，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流體動力數值模式。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 (continuity equation)、自由液面運動方程式、及動量方程式可分別寫為

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

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

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

其中， $\mathbf{f} = -f \mathbf{k} \times \mathbf{u} + \alpha g \nabla \psi \cdot \mathbf{k}$ 是 z 方向的單位法向量， z 是垂直曲面向外方向。鹽度及溫度傳遞擴散方程式可分別表示如下：

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

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q}{\rho_0 C_p} \quad (5)$$

以上方程式中之符號標記說明如下：

(x, y) ：水平卡式座標(m)； z ：垂直座標，向上為正(m)； $\nabla : (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ； $\eta(x, y, t)$ ：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 $(u, v)(\text{ms}^{-1})$ ； w ：垂直速度 (m/s) ； f ：科氏力參數； g ：重力加速度 (ms^{-2}) ； $\psi(\phi, \lambda)$ ：地球潮汐位能(m)； α ：有效地球彈性因子(=0.69)； ρ_0 ：水密度為 $1,025(\text{kg m}^{-3})$ ； P_A ：自由液面的大氣壓力 (N m^{-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 $(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$ ； Q ：太陽輻射的吸收率 (W m^2) ； C_p ：水的比熱 $(\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$ 。

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；垂直網格可採用結合 S (terrain-following generalized s-coordinates; Song and Haidvogel, 1994) 座標與 Z (z coordinates) 座標，簡稱 SZ 座標系統。另外，陡變地形是許多海洋數值模式的一項重要挑戰，地形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 LSC^2 (Localized Sigma Coordinates with Shaved Cells) 座

標系統是 SCHISM 模式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，其優點含括了 Rodi (1984)、Wilcox (1998)、及 Mellor and Yamada (1982) 等紊流閉合模式。

SCHISM 為一套三維跨尺度的海洋數值模式，已成功應用在全世界超過 40 個以上水深地形變化複雜的海岸、潮間帶、河川、以及湖泊等地方，可快速及精確的求解海洋流體動力與物理現象之變化。

2.2 油污擴散模式

SCHISM 模式系統中模擬油污擴散的模式有二套，一為採用質點追蹤 (Lagrangian Particle Tracking) 方法，另一為耦合葡萄牙國家土木實驗室 (National Laboratory of Civil Engineering) 團隊所發展 Eulerian-Lagrangian Method (ELM) 的三維油污擴散與傳輸模式 (2D/3D VOILS)，以描述油污在海洋、海岸以及河川的擴散與傳輸現象。本研究主要針對溢油事件發生初期，為能快速掌握油污擴散及漂移軌跡，故選用 Lagrangian Particle Tracking 的油污擴散模式，可在短時間內預測油污擴散及漂移軌跡之變化。油污質點漂移的軌跡在油污擴散模式中是採用隨機位移模式 (random displacement model)，可較精確的描述海面上油污質點的漂移軌跡，方程式可表示如下。

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

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

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

以上方程式中符號標記說明如下：

X 、 Y 及 Z ：表示 x 、 y 、 z 方向之油污質點；水中流速在 x 、 y 、 z 方向之分量可分別表示為 U 、 V 及 W ； n ：時間步長； $n+1$ ：下一個時間步長； $*$ ： $n+1/2$ 步長； Δt ：時間步長之平均； R ：均勻隨機參數 (uniform random number) $[-1,1]$ ； x 、 y 、 z 方向之紊流擴散係數 (turbulent diffusion coefficients) 分別為 K_x 、 K_y 及 K_z ； x 與 y 方向之風阻速度 (wind dragging speeds) 分別為 W_x 與 W_y ； $W_i = c_d \times W_{vel_i}^{10}$ ， c_d ：阻力係數 (dragging coefficient)，一般設定 0.03； V_r ：水中浮力造成的油污質點上升速度，可由以下經驗式求得：

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

經驗式中符號標記說明如下：

g ：重力加速度 (ms^{-2})； d_i ：油滴直徑 (oil droplet diameter)； ρ_o 與 ρ_w 分別為油與水的密度。

SCHISM 模擬油污於海面上擴散的情況，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、海水鹽度等海洋環境資料。另外，海表面氣象資料則有海表面氣壓場 (pressure reduced to mean surface level)、風場 (wind field)、太陽輻射通量 (radiation flux)、空氣的比濕度 (specific humidity)、海表面的氣溫場等。海洋環境資料可應用全球海洋數值模式 (Hybrid Coordinate Ocean Model, HYCOM) 模擬結果，做為 SCHISM 模擬計算區域外部輸入的初始邊界條件。模擬計算區域的海表面氣象初始條件，可自美國國家環境中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 的氣象預報系統 (Climate Forecast System, CFS) 或是中央氣象局高精度天氣預報

模式 (Weather Research and Forecasting Model, WRF) 取得。本研究海表面氣象初始條件來自於中央氣象局 WRF 氣象模式，由 5 公里高解析度網格模擬得到的結果。

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，經由 SCHISM 模擬石門附近海域流體動力演變的時序列資料，可大幅提昇近岸流體動力現象的模擬精度，也較符合真實海洋環境流體動力的變化現象。將模擬近岸流體動力結果提供油污擴散模式，再預測海面上油污擴散及漂移軌跡，更能精確掌握油污在海面上的狀況。

本研究針對「德翔臺北」貨輪擱淺發生溢油後，利用 SCHISM 模擬未來三天海面上油污擴散及漂移軌跡，提供後續災害應變決策及油污處理能量配置規劃之參考。

三、結果與討論

針對 2016 年 3 月 10 日於新北市石門外海發生「德翔臺北」貨輪擱淺造成溢油事件，本研究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，建置油污擴散模擬網格系統(如圖 2)。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 SZ 座標。

進行油污擴散模擬前，需先模擬水位及潮流的演變，模擬期間自 2016 年 3 月 1 日至 4 月 30 日。圖 3 為麟山鼻潮位站地理位置圖，由圖中顯示麟山鼻潮位站 (圖中 Lin. Tide Gauge 之標示) 距「德翔臺北」擱淺位置 (圖中 T.S. Taipei 之標示) 很相近，也在模擬範圍內，故可做為預測水位之驗證。圖 4 為 2016 年 3 月 16 日 31 日期間，麟山鼻實

測與利用 SCHISM 模擬所得預測水位的比對歷線圖，雖實測水位部份時間有缺損資料，但由結果得知實測與預測的變化趨勢非常一致。

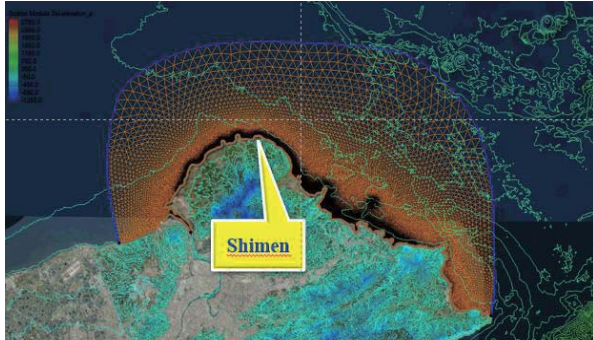


圖 2 石門外海油污擴散模擬網格建置



圖 3 麟山鼻潮位站地理位置圖

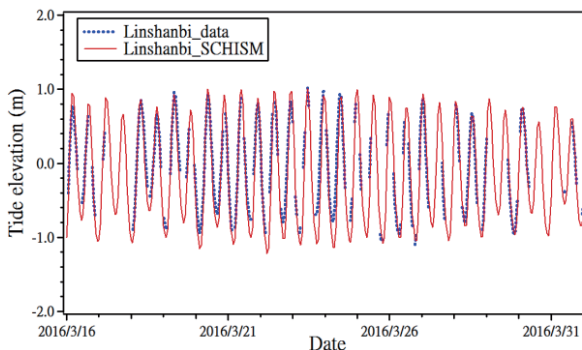


圖 4 2016 年 3 月 16 日至 31 日麟山鼻實測與預測水位之比對歷線圖

石門附近海域海流流場模擬結果如圖 5，圖中箭矢方向表示海流流向，箭矢長度表示海流流速，而背景顏色顯示漲退潮水位之變化。雖然石門海域無長期海流觀測資料可進行比對，但董等人(2014)的研究結果顯示在富貴角離岸 2 公里外的海域，其海流平均流速有超過 70%時間大於 1m/s，觀測期間最大達 3.92 m/s (如圖 6)，而在海流流向部份則呈現與海岸平行方向流動。由上述結果可知，經由 SCHISM 模擬結果得到石門海域海流與圖 6 觀測海流資料比對，在定性比較上有合理性的依據。

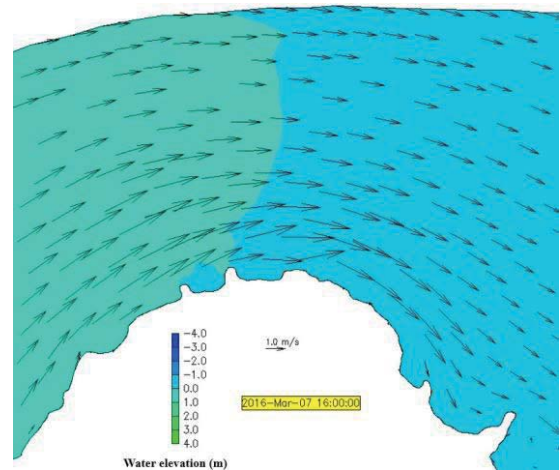
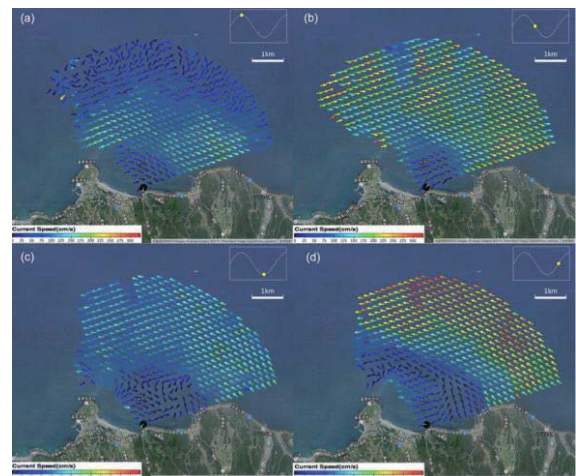


圖 5 石門附近海域之預測海流流場



(摘錄自董等人(2014))

圖 6 富貴角海域各潮時流速分佈圖

另外，本研究團隊於溢油事件剛發生時，立即前往現場以 X-Band 雷達進行表面海流流場及油污擴散監測。圖 7 為 X-Band 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，圖 8 則為 X-Band 雷達監測海流流速與流向之結果，由圖 7 及圖 8 顯示表面流速約 1 m/sec，流向為沿著海岸方向平行流動。

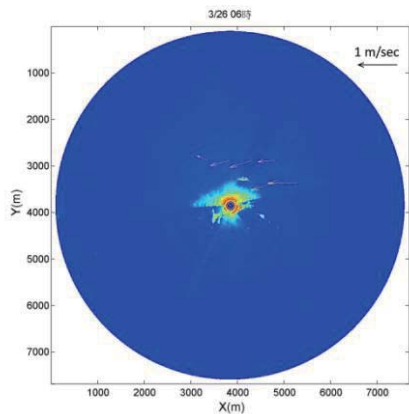


圖 7 X-Band 雷達監測之表面海流分佈圖

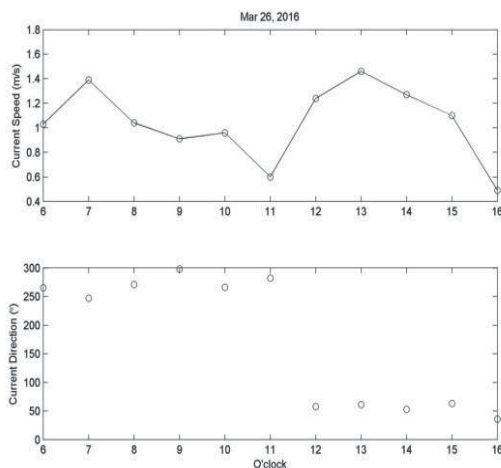


圖 8 X-Band 雷達監測海流流速與流向之結果

溢油初期海面上油污擴散及漂移軌跡除受海流影響外，風也是主要的趨動力，若油污靠近海岸邊且風速小於 10 km/h 時，油污擴散與移動的方向主要受表面流的影響；而在開放的海域，風速大於 20 km/h 時，風會主導油污的擴散 (Fingas, 2014)。「德翔臺北」溢油事件發生期間，同時檢視溢油事件發生位置鄰近中央氣象局富貴角資料浮標的風速資料，觀測資料顯示於 3 月 24 日 17:00 至 3 月 26 日 11:00 期間三秒陣風超過 20 km/h (如圖 9)，依此結果初判油污擴散初期 (1~2 天內) 皆由風所主導。

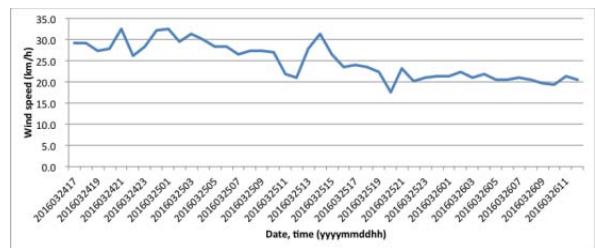


圖 9 中央氣象局富貴角資料浮標三秒陣風時序列圖

本研究模擬案例為參考環保署公布的資訊，假設有 50 公噸燃料油溢洩，以 WRF 氣象模式預測之風場進行溢油擴散模擬。圖 10 為應用 WRF 氣象模式預測之風場，進行溢油擴散模擬三天後結果，圖中紅色表示油污擴散及漂移軌跡的方向，流矢箭頭表示海流流動方向，流矢長度表示海流速度，因「德翔臺北」擱淺位置離岸僅約 300 公尺，由模擬結果顯示，油污受到強烈東北風的影響，快速抵達及影響石門海岸(如圖中

紅色箭頭)，接著受到海流影響，油污沿著東西方向往返黏附在岸邊。另外，圖 11 為環保署公告之油污染範圍（黃等人，2016），圖中石門沿岸深棕色為油污污染海岸的範圍。由圖 10 及圖 11 之比對結果顯示，SCHISM 模擬之油污擴散及漂移軌跡與環保署公告之油污影響海岸之範圍非常相符，此也驗證 SCHISM 油污擴散模式之可靠性。

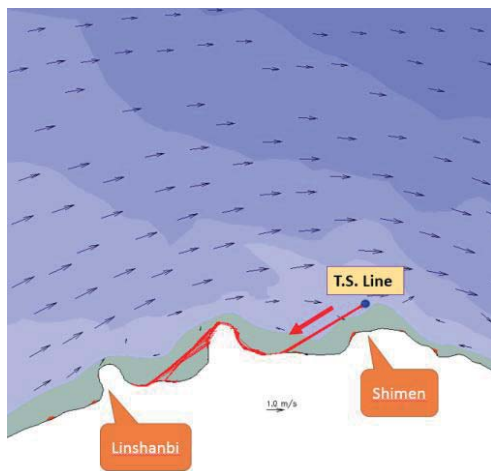


圖 10 「德翔臺北」溢油發生後三天後油污分佈模擬結果，圖中沿岸紅色線表示油污軌跡。



圖 11 「德翔臺北」溢洩油污可能影響範圍（摘錄自黃等人 (2016)）

五、結論與建議

本研究成功應用 SCHISM 模式模擬「德翔臺北」溢油事件油污之擴散，其結果與環保署公布之結果相符。在油污事件發生時，SCHISM 模式可應用中央氣象局 WRF 預測風場，進行油污擴散模擬，以精確掌握油污擴散及漂移軌

跡。另外，SCHISM 模式結合大氣資料與海洋環境資料做為邊界初始條件，同時耦合 WWM 波浪模式，可得到高精度的海洋流體動力現象。未來若海岸及港灣地區發生油污染事件，SCHISM 模式能快速掌握海洋流體動力變化與油污

擴散及漂移軌跡，提供政府相關機關做緊急應變決策及油污處理能量配置之參考依據。

本研究已成功應用 SCHISM 模式中 Lagrangian Particle Tracking 方法，模擬海面上油污擴散與傳輸的演變情況。SCHISM 模式系統中有另一套葡萄牙

的 2D/3D VOILS 油污擴散模式，此模式可較完整描述在海表面與水團中油污的物理、化學、以及與生物作用之風化現象，未來將再進一步應用 2D/3D VOILS 油污擴散模式，可較精確地描述近岸或港灣地區油污擴散與傳輸的演變情況。

參考文獻

1. 黃暄穎、張君名、張志新，(2016)，「船舶擱淺引致近岸油污染衝擊評估 -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。
2. 董東璟、蔡政翰、陳盈智、顏志偉、馬名軍，(2014)，「應用岸基微波雷達量測近岸海流空間分布」，航測及遙測學刊，第 18 卷，193-1204。
3. Fingas, M., (Ed.), (2014), Handbook of oil spill science and technology. John Wiley & Sons.
4. Mellor, G.L., Yamada, T., (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys, 20, 851-875.
5. Rodi, W., (1984), Turbulence models and their applications in hydraulics: a state of the art review. International Association for Hydraulics Research, Delft, The Netherlands.
6. Song, Y. and Haidvogel, D., (1994), A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography -following coordinate system. J. Comput. Phys., 115, 228-244.
7. Umlauf, L. and Burchard, H., (2003), A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. J. Marine Res, 61, 235-265.
8. Wilcox, D.C., (1998), Reassessment of scale determining equation for advance turbulence models. AIAA J, 26, 1299-1310.
9. Zhang, Y., Baptista, A.M., (2008), SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. Ocean Modelling, 21, 71-96.
10. Zhang, Y. J., Ateljevich, E., Yu, H. C., Wu, C. H., Yu, J. C.S., (2015), A new vertical coordinate system for a 3D unstructured-grid model. Ocean Modelling, 85, 16-31.