

# 中央氣象局 106 年天氣分析與預報研討會 德翔臺北輪化學品污染擴散模擬 Chemical spill modeling of TS Taipei standing event

蔡易庭 李語宸 黃柏憲 張國棟 王樹倫  
國立高雄海洋科技大學海岸水與環境中心

## 摘要

本文以美國應用科學諮詢公司(Applied Science Associate, Inc., ASA)所開發的 CHEMmap v5.2.2 化學品污染擴散模式，內嵌同公司之 HYDROmap v4.7 水動力模式及中央氣象局富貴角資料浮標觀測風速、風向、海溫與氣溫，進行 105 年新台北市石門區德翔臺北輪擱淺事件的化學品污染擴散模擬。其中水動力模式預測值與交通部運輸研究所港灣技術研究中心臺北一站實測海流流速、流向的相似程度，以相似指數 (Index of Agreement, IA) 檢視分別達 0.70 及 0.76，整體在時向上的變化有相當高的一致性。將此驅動力條件配合中央氣象局風力及海溫實測資料，預測 105 年 3 月 10 日德翔臺北輪擱淺事件中，危險性較高的甲苯若洩漏於海水中的傳輸、擴展、溶解及蒸發等物理化學之風化過程，和海水及大氣中的擴散分布結果以可視化界面呈現，提供即時污染應變決策參考。

關鍵字：德翔臺北、化學品污染、CHEMmap

## 一、前言

臺灣地處東南亞海運主要航道，隨著經濟與民生發展，船舶運輸各類原物料及化學品等貨物量與日俱增。相對地，海洋污染風險也隨之增加，任何船舶的意外事件，都可能造成臺灣附近海域及海岸遭受重大油污或是化學品污染災害。民國 94 年 10 月 10 日新竹市外海韓國籍聖荷兄弟(Sambo Brother)事件、103 年高雄港 62 號碼頭香港籍冬女神號事件，及 105 年新台北市石門外海本國籍德翔臺北輪擱淺事件。其中德翔臺北輪船上裝載危害性高且運載量較大的過氯酸鉀 200 公噸及甲苯 182 公噸，引發社會關切[1]。然而，臺灣海域廣闊，應變人力與能量有限，在海洋污染事件發生時，如何有效掌握污染事件的狀況，以進行適當的應變處理，是值得探討的問題。

本研究特以近年倍受關注的 105 年德翔臺北事件作為分析案例，儘管船載危害性高且運載量較大的過氯酸鉀與甲苯皆屬易燃物質，考量甲苯比水輕且易揮發，蒸氣會於大氣中傳播，於環境中污染擴散影響範圍較廣，因此挑選作為探討化學品。

本文首先於第二節簡易介紹研究採用具國際公信力的化學品污染擴散模擬模式 CHEMmap，與以天文潮為主的水動力模式 HYDROmap 流場計算原理，並說明輔以中央氣象局富貴角資料浮標觀測風速、風向、海溫與氣溫的海氣象參數設定[5]。第三節考量流場對化學品於海水中傳展擴散具重大影響力，先藉由 Willmott 等人[4]所提出之相似指數(Index of Agreement, IA)驗證模式流場的結果作討論，再對化學品於海水及大氣中擴散分布與風化結果進行說明。

## 二、研究方法

### (一) 化學品污染擴散模擬模式

本研究使用美國應用科學諮詢公司(Applied Science Associate, Inc., ASA)所開發的 CHEMmap v5.2.2 化學品污染擴散模式執行化學品於海水與大氣中的擴散分布及受海氣象作用的風化結果。CHEMmap 模式計算主要考量化學品受海流與風於海水中的傳輸、擴展、溶解、蒸發、衰減以及於大氣中的飄移等物理化學之風化過程。模式計算參考公式分別如下：

#### 1. 傳輸 (Transport)

化學品洩漏至海水中的傳輸擴散，依據 Lagrangian 演算法將化學品定義成質點，計算質點於海水中不同時間下的三維空間分布位置，計算式如式 1：

$$X_t = X_{t-1} + \Delta t (U_t + D_t + R_t) \dots\dots\dots \text{式 1}$$

式中  $X_{t-1}$  為質點在  $t-1$  時間的位置， $\Delta t$  為時間間隔(sec)， $U_t$  考量風吹流及海(潮)流對質點的傳輸作用力， $D_t$  為質點在三維空間的擴散速度， $R_t$  則是質點於海水中的上浮與下沉速度。

#### 2. 擴展 (Spread)

洩(溢)漏至海水中的化學品受重力、慣性、黏度、表面張力及海(潮)流應力影響會於海表面擴展，化學品於海表面的擴展變化率參考 1980 年 Mackay 等人的研究，計算如式 2：

$$\frac{dA}{dt} = K_1 A^{1/3} (V / A)^{4/3} \dots\dots\dots \text{式 2}$$

式中  $A$  為海表面擴散面積( $m^2$ )， $K_1$  為擴散係數( $sec^{-1}$ )，

V 則為於海表面擴散的化學品總體積(m<sup>3</sup>)。

### 3.溶解 (Dissolution)

參考 1977 年 Mackay 與 Leinonen 的研究,藉由浮在海表面的化學品擴散面積,及化學品於親油性有機溶劑與水溶液中的溶解度,可求得化學品於海水中的溶解度,溶解度隨時間變化量的公式如式 3:

$$N_{i,d} = \frac{dN_{i,d}}{dt} = K_d (x_i C_i^s - C_i^w) A \dots\dots\dots \text{式 3}$$

式中 N<sub>id</sub> 為某化學品在水中溶解速率(moles/sec), K<sub>d</sub> 為分配係數(cm/sec), x<sub>i</sub> 為某化學品在親油性有機溶劑中溶解的莫耳分率, C<sub>i</sub><sup>s</sup> 與 C<sub>i</sub><sup>w</sup> 分別為化學品於親油性有機溶劑與水溶液中的溶解度(moles/cm<sup>3</sup>), A 則為浮在海表面化學品的擴散面積(cm<sup>2</sup>)。

### 4.蒸發 (Evaporation)

依據拉午耳定律(Raoult's Low),參考化學品蒸發係數、分子量、蒸氣壓等參數,1973 年 Mackay 與 Matsugu 等人推導出每單位時間及面積的化學品蒸發率,如式 4:

$$E = K_e MW P_{vp} / RT \dots\dots\dots \text{式 4}$$

式中 K<sub>e</sub> 為化學品蒸發係數(m/hr), MW 為分子量(g/mole), P<sub>vp</sub> 為化學品蒸氣壓(atm), R 為氣體常數((8.206 × 10<sup>-5</sup> atm·m<sup>3</sup>)/(mole·K)), T 為溫度(K)。

### 5.衰減 (Degradation)

化學品衰減的計算參考 1992 年 Mackay 等人推導出的計算式,公式推導假設同一化學品於海水中、海表面、大氣中,抑或是其他任何可能存在化學品的空間中,其衰減係數是一常數,衰減量計算式如式 5:

$$M_t = M_0 e^{-kt} \dots\dots\dots \text{式 5}$$

式中 M<sub>t</sub> 為化學品經過 t 時間後的剩下的質量, M<sub>0</sub> 為化學品最初質量, k 為化學品每日衰減係數, t 則為經過時間(day)。

### 6.大氣中濃度 (Atmospheric Concentrations)

化學品蒸發至大氣中後,受風應力影響於大氣中擴散飄移,於大氣中的飄移軌跡亦採用 Lagrangian 演算法將化學品定義成質點,計算質點於大氣中不同時間下的三維空間分布位置,計算式如式 6:

$$X_t = X_{t-1} + \Delta t U_t + x_h + x_v \dots\dots\dots \text{式 6}$$

式中 X<sub>t-1</sub> 為質點在 t-1 時間的位置, Δt 為時間間隔(sec), U<sub>t</sub> 考量風應力(m/sec), x<sub>h</sub> 與 x<sub>v</sub> 分別代表垂直向與水平向的擴散距離(m),主要考量大氣穩定度作計算。同時模式藉由 A 網格式面積、H 追蹤質點高度及計算網格式內的 M<sub>air</sub> 化學品質量,計算 C 化學品於大氣中濃度如式 7:

$$C_i = M_{air} / (A \times H) \dots\dots\dots \text{式 7}$$

### (二) 水動力模式

本文採用同為 ASA 公司研發,以天文潮為主的 HYDROmap 模式模擬海流,作為化學品於海水中污染擴散的水動力。HYDROmap 藉由有限差分網格式結構的 SCVR(Stepwise-Continuous-Variable-Rectangular)網格式系統定義水陸網格式(Hydrodynamic grid),可將網格式細切成 6 層不同

解析度(網格式細度),採用 TPXO 全球潮汐模式作為邊界條件(Open boundary),可模擬全球任一區域的八大分潮(M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub>)、兩個長週期分潮(Mf, Mm)和三個非線性分潮(M<sub>4</sub>, MS<sub>4</sub>, MN<sub>4</sub>)的潮流。同時可導入風應力,建立包含潮汐驅動力(Tide-driven force)與風驅動力(Wind-driven force)的流場。

HYDROmap 採用三維非線性動量方程式與連續方程式作為流體動力控制方程式,將時間與空間係數依海流隨水深變化函數展開,求得控制方程式解,連續方程式與動量方程式如式 8 至式 11 所示:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} v dz = 0 \dots\dots\dots \text{式 8}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( N \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots\dots \text{式 9}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( N \frac{\partial v}{\partial z} \right) \dots\dots \text{式 10}$$

$$w(z) = \frac{\partial}{\partial x} \int_z^h u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_z^h v dz \dots\dots\dots \text{式 11}$$

其中 x、y、z 為笛卡爾坐標的坐標軸, z 代表垂直軸由靜止水面至不透水邊界的深度(m), x、y 坐標為水平軸兩相垂直的坐標。t 為時間(sec), η 為自由液面(m), h 為靜水深(m), u、v、w 分別代表海流在 x、y、z 方向的分量。N 為垂直邊界的黏性, f 代表科氏力係數(sec<sup>-1</sup>), g 為重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)。

### (三) 參數設定

105 年 3 月 10 日德翔臺北輪閣淺事件發生後,相關單位於 3 月 14 日時徹查貨櫃輪上裝載貨物清單,發現船上運有危害性高且運載量較大的過氧酸鉀 200 公噸及甲苯 182 公噸。儘管過氧酸鉀與甲苯皆屬易燃物質,考量過氧酸鉀密度比水大且溶於水體中,於水域物理行為模式中為溶解/下沉物(SD),而甲苯比水輕且易揮發,蒸氣會於大氣中傳播,於水域物理行為模式中為漂浮/蒸發物(FE),於環境中污染擴散影響範圍較廣,因此本次挑選作為探討化學品。

模擬假設於 105 年 3 月 14 日 18:00 通報船上裝載高危險性化學品一甲苯發生洩漏事故。模式情境假設自德翔臺北輪閣淺位置(25°18'5.4"N 121°34'35.5"E),持續 1 小時洩漏甲苯 182 公噸,海氣象條件採用 HYDROmap 模式模擬流場、交通部中央氣象局富貴角資料浮標站觀測風速(5.1m/s)、風向(東風)、海溫(17°C)與氣溫(15°C)作為參數[5],執行甲苯於 24 小時內在海水及大氣中污染擴散模擬,相關參數設定如表 1 所示。

表1 模式參數設定表

參數名稱	設定值
洩漏位置	25°18'5.4"N 121°34'35.5"E
洩漏時間	105/03/14 18:00
模擬時長	24 小時
模擬間隔	10 分鐘
污染物	甲苯 (Toluene)
洩漏量	182 公噸
持續洩漏時長	1 小時
風因子係數	3.5%
流場 <sup>1</sup>	HYDROmap 模式模擬八大天文潮潮流
海溫 <sup>2</sup>	17°C
風場 <sup>2</sup>	固定風速風向；風速 5.1m/s；東風
氣溫 <sup>2</sup>	15°C

註1：八大天文潮為M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub>

註2：資料來源交通部中央氣象局富貴角資料浮標站

### 三、結果與討論

#### (一) 流場驗證

為驗證 HYDROmap 模式模擬每(潮)流的可信力，提取交通部運輸研究所港灣技術研究中心臺北一站實測海流流速、流向[6]，與模式模擬流速、流向進行比對。本文參考 Willmott 等人[4]所提出之相似指數(Index of Agreement, IA) 為指標，探討模擬與實測數據的相似程度，IA 值介於 0 至 1 之間，當 IA 值越接近 1 時代表兩數據趨勢吻合；反之，當 IA 值越接近 0 時代表兩數據間相關性越差，如式 12 所示，式中 i 為資料筆數；x<sub>i</sub>、y<sub>i</sub> 分別為預測值及觀測值； $\bar{y}$  為觀測值之平均值。

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|x_i - \bar{y}| + |y_i - \bar{y}|)^2} \dots\dots\dots \text{式 12}$$

本文臺北一站位於臺北港北側外海(坐標 25°10'58.91"N，121°22'34.82"E)，截取 105 年 01 月 21 日 18:00 時至 105 年 01 月 31 日 18:00 時之一個月潮高、流速與流向作比對。

根據蘇青和等人[2]統計分析臺北港民國 85 年至 91 年之海流數據結果顯示，臺北港地區平均潮差約為 2.10m，最大潮差可達約為 3.60m。考量模式與實測潮位基準水位不同，比對時扣除兩組原始數據之平均水位，以除去基準水位不同造成的誤差，如圖 1。本研究選定之時間內模擬數據平均潮差為 2.09m，最大潮差可達 3.00m，觀測數據平均潮差為 2.49m，最大潮差可達 3.38m，皆落在歷史數據範圍內。

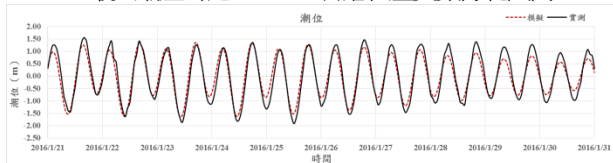


圖 1 臺北港外模式與實測潮位比對圖

前敘統計數據指出臺北港地區海流平均流速為 0.36m/s，平均月最大流速可達 1.26m/s，本研究選定時間內模擬每流平均流速為 0.35m/s，觀測數據平均流速為 0.50m/s，

流速分布在合理範圍內，且模式與實測流速於漲退潮轉換(流速最小)或流速最大時之時向皆相當一致，如圖 2。值得注意的是，流速數值平均流速有約 0.16m/s 之落差，依據蘇青和等人[2]研究指出臺北港地區海流以潮流為主，但本研究選定比對時間內，於 01 月 23 日曾出現風速約 14.8m/s 之北北東風，且大於 9.0m/s 以上之風持續吹拂超過 20 小時(01 月 22 日 22 時至 01 月 23 日 18 時)，若以蔡立宏等人[3]提出之風驅流流速約為表面風速 1.9% 的經驗式估算，當時之風驅流約為 0.17m/s 至 0.28m/s，推測風驅流對當地當時之海流仍有相當程度影響。因此，模式模擬流速可能原因為本研究之模擬海流僅計算天文潮，未考慮到風驅流、洋流及沿岸海流等影響而低估。

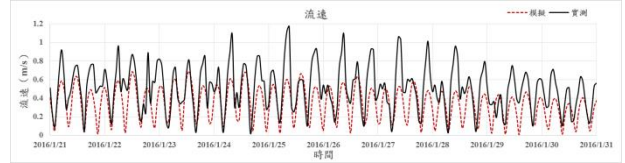


圖 2 臺北港外模式與實測流速比對圖

蘇青和等人[2]的文獻指出臺北港地區之海流為漲潮時流向西南，退潮時流向東北。模式模擬每流流向與實測流向趨勢與文獻相符，流向時序列比對結果如圖 3 所示，模式與實測流向於漲退、潮轉換時象皆相當一致。

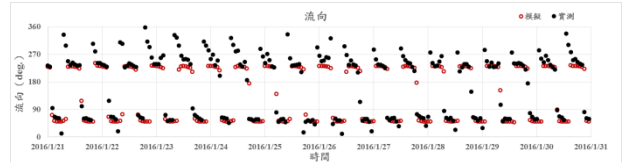


圖 3 臺北港外模式與實測流向比對圖

綜合前述比對結果，模式與實測潮位 IA 值可達 0.98，具相當良好相關性；雖然流速平均值相差約 0.16m/s，但 IA 值亦可達 0.70，顯示模式與實測流速趨勢相似度高；而流向 IA 值為 0.76，顯示流向在時向上趨勢一致性佳。整體而言，透過 IA 值探討 HYDROmap 與實測數據的相似程度良好，作為化學品污染擴散模擬水動力有相當程度之可信度。

#### (二) 化學品於海水中擴散分布

假設甲苯洩漏於海水中，受東風及適逢退潮時段影響，先朝洩漏位置偏東南方擴散，如圖 4 所示。約 105/03/14 20:20 時受朝夕轉置影響，海流轉為流向向西南一漲潮流，甲苯擴散路徑亦隨海流流向轉往洩漏位置偏西南方漂移，但因甲苯屬易揮發物質，洩漏約 2 小時 50 分鐘後，因甲苯比水輕且易揮發，大部分(約 89.9%)蒸發至大氣中，僅少量(約 9.9%)因海氣象擾動溶於海水中，與甲苯物理化學特性相符。第 24 小時後約有 7.8 公噸甲苯溶於海水中、174.0 揮發至大氣中，及 0.2 公噸反應衰減消掉掉，於海水中最大擴散面積為 57.76 平方公里，化學品隨時間變化狀態圖，如圖 5 所示。因此甲苯洩漏於海水中後應尤其注意甲苯於大氣中擴散分布狀況。

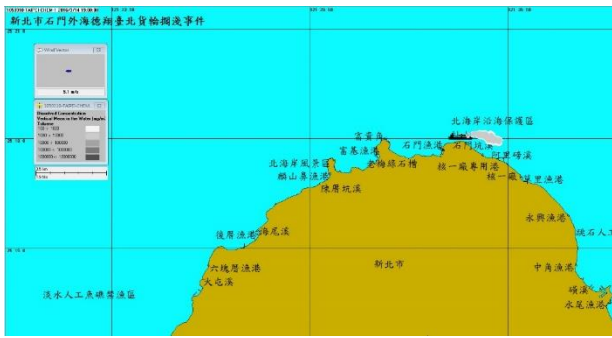


圖 4 甲苯於海水中擴散分布模擬結果  
化學品於海水中隨時間變化狀態圖  
甲苯：182 公噸，24 小時

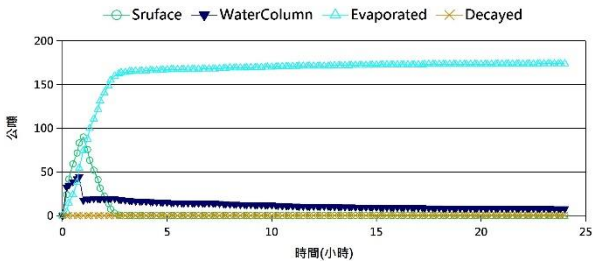


圖 5 甲苯於海水中隨時間變化狀態圖

### (三) 化學品於大氣中擴散分布

承如前敘，由於甲苯屬容易揮發物質，自洩漏約 2 小時 50 分鐘後，89.9% 甲苯蒸發至大氣中，並受東風影響朝洩漏位置西方擴散消逝，如圖 6 所示。第 24 小時化後約有 128.4 公噸甲苯殘留於大氣中，及 45.6 公噸反應衰減消逝掉，於大氣中最大擴散面積為 197.08 平方公里，化學品隨時間變化狀態圖，如圖 7 所示。此情境模擬風場條件以應變期間即時觀測數據作為預測風場執行模擬，因甲苯蒸氣易燃且微溶於水，為確保應變人員安全，建議於現場下風處執行水霧防護。



圖 6 甲苯於海水中擴散分布模擬結果  
化學品於大氣中隨時間變化狀態圖  
甲苯：182 公噸，24 小時

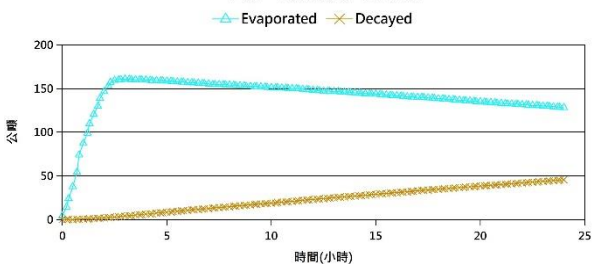


圖 7 甲苯於大氣中隨時間變化狀態圖

## 四、結論

本文以 CHEMmap 針對 105 年德翔臺北輪觸淺事件中運載化學品—甲苯進行化學品污染擴散模擬，查詢甲苯物理化學特性指出，甲苯於水域物理行為模式中屬漂浮/蒸發物 (FE)，模式模擬結果與其特性相符，顯示 CHEMmap 模擬化學品傳輸擴散成效良好，惟 CHEMmap 內建之大氣擴散模組，計算化學品質點於大氣中飄移時，僅採用同一大氣壓 (高度)，且單點觀測的風速與風向，計算結果稍嫌粗糙。儘管如此，事故發生時 CHEMmap 可即時預測化學品於環境中的擴散分布與風化結果，作為緊急應變處置之依據為其最大優勢。

另外，值得一提，HYDROmap 模擬水動力結果與交通部運輸研究所港灣技術研究中心臺北一站實測潮高具 0.98 相似程度，海流流速與流向的相似程度，雖因模擬海流僅計算天文潮，未考慮到風驅流、洋流及沿岸海流等影響而低估，相似程度亦可達 0.70 與 0.76，整體在時間上的變化有相當高的一致性，且未來若不幸發生海洋化學品污染事件，HYDROmap 預測之天文潮潮流，可快速提供有效預測流場予海洋化學品污染擴散模式進行擴散模擬，以預測海洋化學品於海水中的分布狀況與受海氣象作用的風化結果。

## 謝誌

本研究感謝國立高雄海洋科技大學海岸水與環境中心提供本文所需之各項數據及文獻，使得本研究得以順利完成。

## 參考文獻

1. 行政院環境保護署，「海洋污染事件緊急應變模擬管控制計畫」，行政院環境保護署(2016)
2. 蘇青和、吳基、廖慶堂、徐如娟，「台北港港口區域潮汐及海流特性研究」，第 25 屆海洋工程研討會論文集，第 23-30 頁 (2003).
3. 蔡立宏、郭晉安、鄭皓元、賴堅茂、錢樺，「風驅流對臺中港北防波堤鄰近海域表層海流之影響」，第 36 屆海洋工程研討會論文集，第 165-170 頁 (2014).
4. Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'Donnell J, Rowe CM., 1985: "Statistics for the evaluation of model performance", Journal of Geophysical Research 90(C5): 8995-9005.
5. 交通部中央氣象局，  
(<http://www.cwb.gov.tw/V7/index.htm>).
6. 交通部運輸研究所港灣技術研究中心港灣環境資訊網，  
(<http://isohe.ihmt.gov.tw/index.aspx>).