



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

中華民國106年09月13日

大綱

一 前言

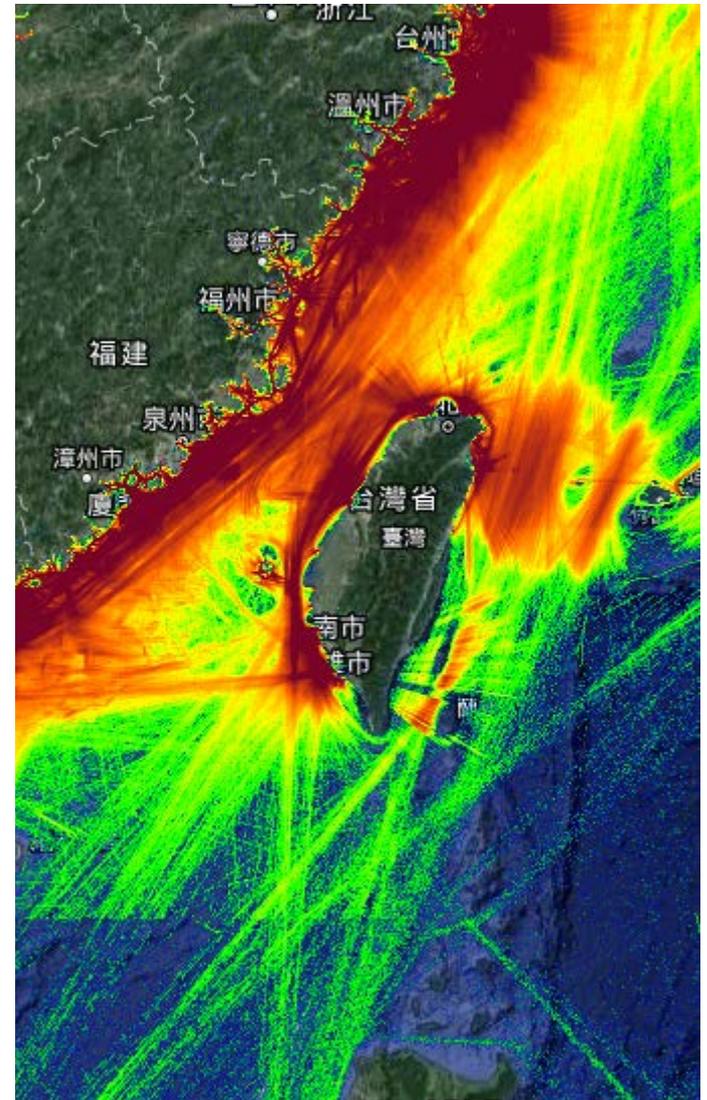
二 研究方法

三 結果與討論

四 結論

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染或是化學品污染災害。



前言

- 94年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
 - 105年新北市石門外海本國籍德翔臺北輪擱淺事件。
- 分析案例
- 臺灣海域廣闊，應變人力與能量有限，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。

苯



三湖兄弟號化學輪

AeroFoto by Chi Po-lin

混合芳烴樹脂油



自由時報黃志源攝

過氯酸鉀、甲苯



研究方法

■ 化學品污染擴散模擬模式

- 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
- 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

傳輸 (Transport)	溶解 (Dissolution)	衰減 (Degradation)
$X_t = X_{t-1} + \Delta t (U_t + D_t + R_t)$	$N_{i,d} = \frac{dN_{i,d}}{dt} = K_d (x_i C_i^s - C_i^w) A$	$M_t = M_o e^{-kt}$
擴展 (Spread)	蒸發 (Evaporation)	大氣中濃度 (Atmospheric Concentrations)
$\frac{dA}{dt} = K_1 A^{1/3} (V / A)^{4/3}$	$E = K_e MW P_{vp} / RT$	$X_t = X_{t-1} + \Delta t U_t + x_h + x_v$ $C_i = M_{air} / (A \times H)$

研究方法

- **水動力模式** 以天文潮為主的 HYDROmap 水動力模式
 - **水陸網格**
 - 有限差分網格結構的網格系統定義水陸網格
 - **邊界條件**
 - TPXO全球潮汐模式作為邊界條件（Open boundary），可模擬以天文潮為主的海流
- **風應力**
 - 可導入，建立包含潮汐驅動力(Tide-driven force)與風驅動力(Wind-driven force)的流場。

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

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

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

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

研究方法

■ 參數設定

- 事件說明：105年3月10日德翔臺北輪擱淺事件發生後，相關單位於3月14日時徹查貨櫃輪上裝載貨物清單
- 貨物清單：

過氯酸鉀 200 公噸

甲苯 182 公噸

危害性高、運載量較大

乙氧基丙酸乙酯 195 公噸

環氧樹脂 181 公噸

氫氧化鈉 85 公噸

	過氯酸鉀	甲苯
易燃性	易燃物質	易燃物質
水域物理行為	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	漂浮/蒸發物(FE)
影響範圍		比水輕
	溶於水體中 僅影響海水中環境	易揮發 蒸氣會於大氣中傳播

研究方法

■ 參數設定

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	HYDROmap模式模擬八大天文潮潮流
海溫	17°C
風場	固定風速風向；風速5.1m/s；東風
氣溫	15°C

結果與討論

■ 流場驗證

- 流場對化學品於海水中傳展擴散具重大影響力
- Willmott所提出之相似指數(Index of Agreement , IA)驗證流場
- 驗證測站名稱及時間範圍：
 - 交通部運輸研究所港灣技術研究中心臺北一站
 - 105年01月21日18:00時至105年01月31日18:00時

0

相關性差

1

趨勢吻合

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

Willmott (1985)

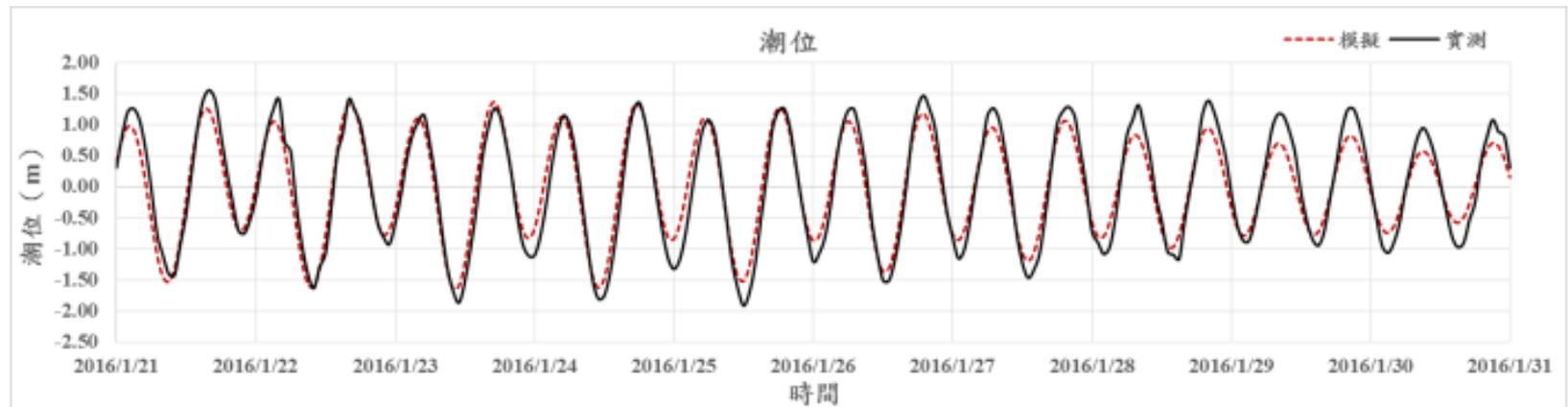
結果與討論

■ 流場驗證 — 潮高

- 本研究所選定之時間內模擬數據，皆落在歷史數據範圍內。

	歷史文獻 ^註	模式	觀測
平均潮差	2.10 m	2.09 m	2.49 m
最大潮差	3.60 m	3.00 m	3.38 m

註：台北港港口區域潮汐及海流特性研究 (2003)



結果與討論

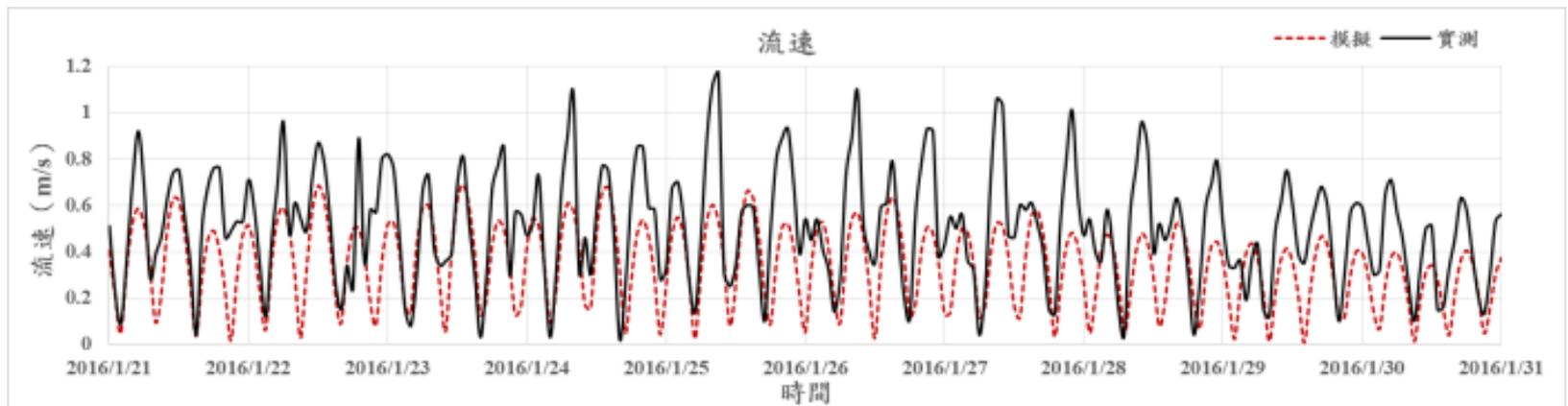
■ 流場驗證 — 流速

	歷史文獻 ^註	模式	觀測
月平均最大流速	1.26	相差 0.16 m/s	
平均流速	0.36	0.35	0.50

註：台北港港口區域潮汐及海流特性研究 (2003)



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。^註



註：風驅流對臺中港北防波堤鄰近海域表層海流之影響 (2014)

結果與討論

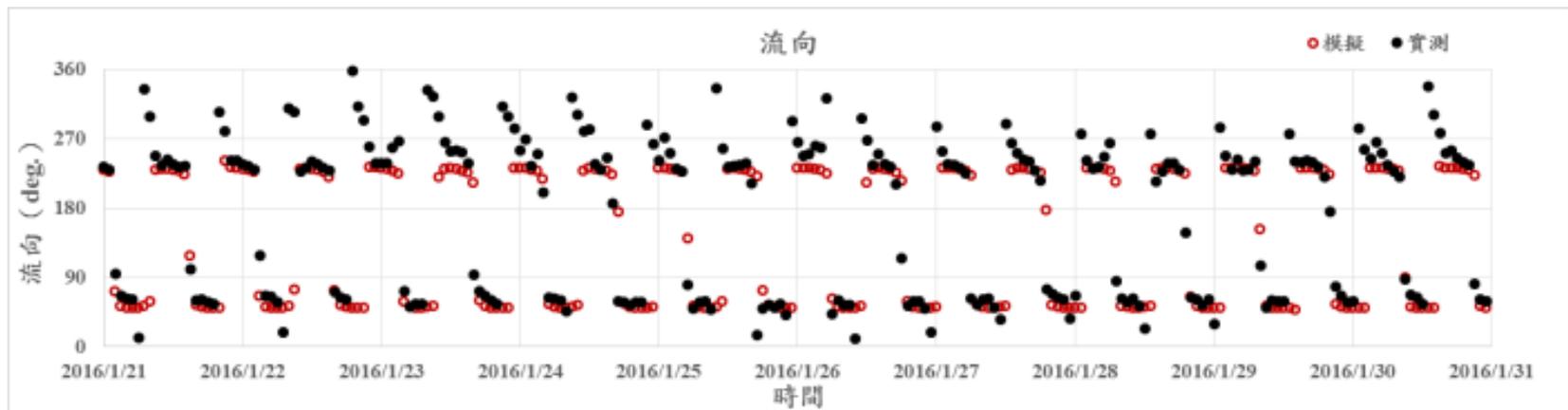
■ 流場驗證 — 流向

■ 歷史文獻（民國 85 年至 91 年） 註：台北港港口區域潮汐及海流特性研究 (2003)

■ 漲潮時流向西南，退潮時流向東北

■ 模式模擬海流流向與實測流向趨勢與文獻相符

■ 模式與實測流向於漲退、潮轉換時向皆相當一致



結果與討論

■ 流場驗證 — 總結

■ 潮高

- IA 值可達0.98，具相當良好相關性

■ 流速

- 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

■ 流向

- 流向 IA 值為 0.76，顯示流向在時向上趨勢一致性佳

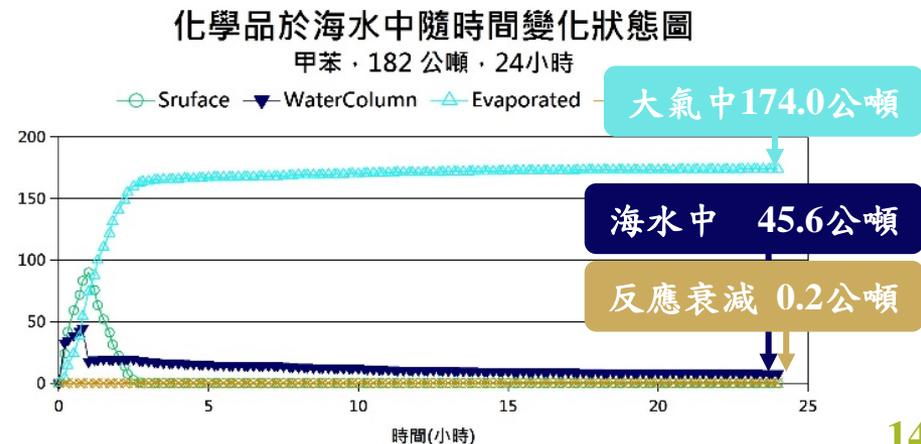
- 透過 IA 值探討 HYDROmap 與實測數據的相似程度良好，作為化學品污染擴散模擬水動力有相當程度之可信度。

	潮高	流速	流向
IA 值	0.98	0.70	0.76

結果與討論

■ 化學品於海水中擴散分布

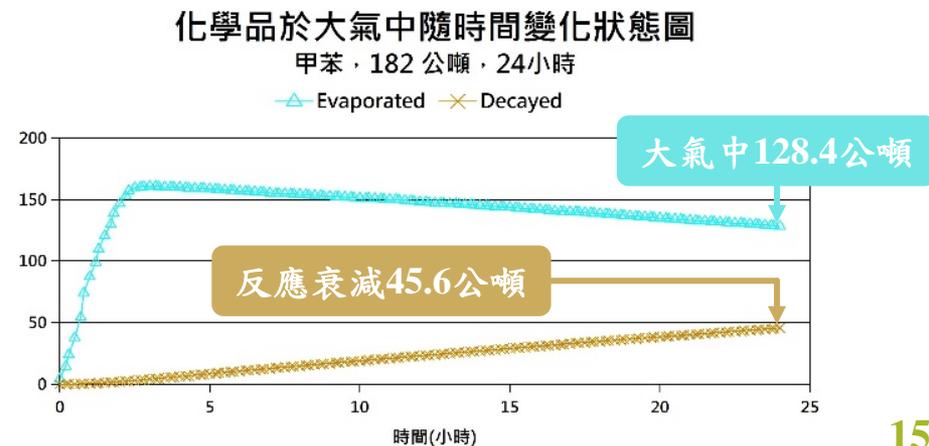
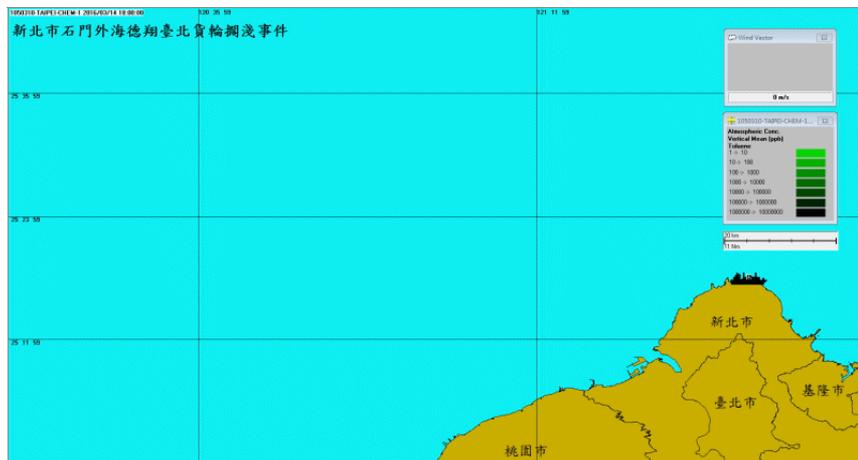
- 甲苯擴散路徑受沿岸往復潮流影響於海表面漂移，但因甲苯屬易揮發物質，洩漏約2小時50分鐘後，因甲苯比水輕且易揮發，大部分（約 89.9 %）蒸發至大氣中，僅少量（約 9.9 %）因海氣象擾動溶於海水中，與甲苯物理化學特性相符。
- 甲苯洩漏於海水中後應尤其注意甲苯於大氣中擴散分布狀況。



結果與討論

■ 化學品於大氣中擴散分布

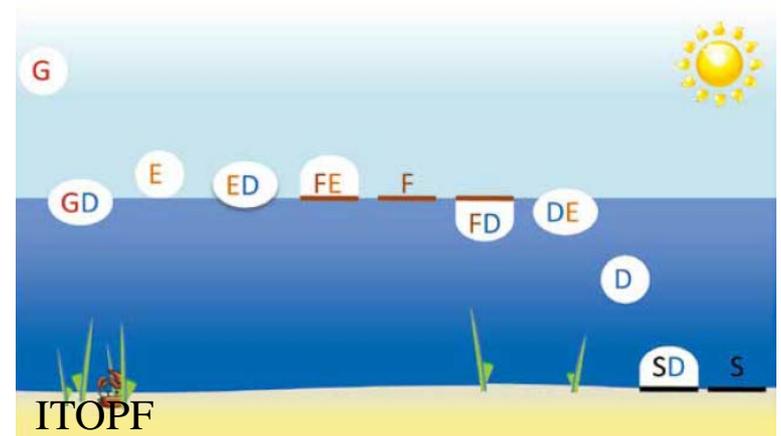
- 以應變期間即時觀測數據（5.1 m/s東風）作預測風場執行模擬
- 甲苯屬容易揮發物質，自洩漏約 2 小時 50 分鐘後，89.9 % 甲苯蒸發至大氣中，並受東風影響朝洩漏位置西方擴散消逝。
- 因甲苯蒸氣易燃且微溶於水，為確保應變人員安全，建議於現場下風處執行水霧防護。



結論

■ 化學品污染擴散模擬

- 模式模擬結果與甲苯物理化學特性相符，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，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。



結論

■ 水動力模式

- 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相似程度佳。
- 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運行擴散模擬，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。

	潮高	流速	流向
IA值	0.98	0.70	0.76



參考文獻

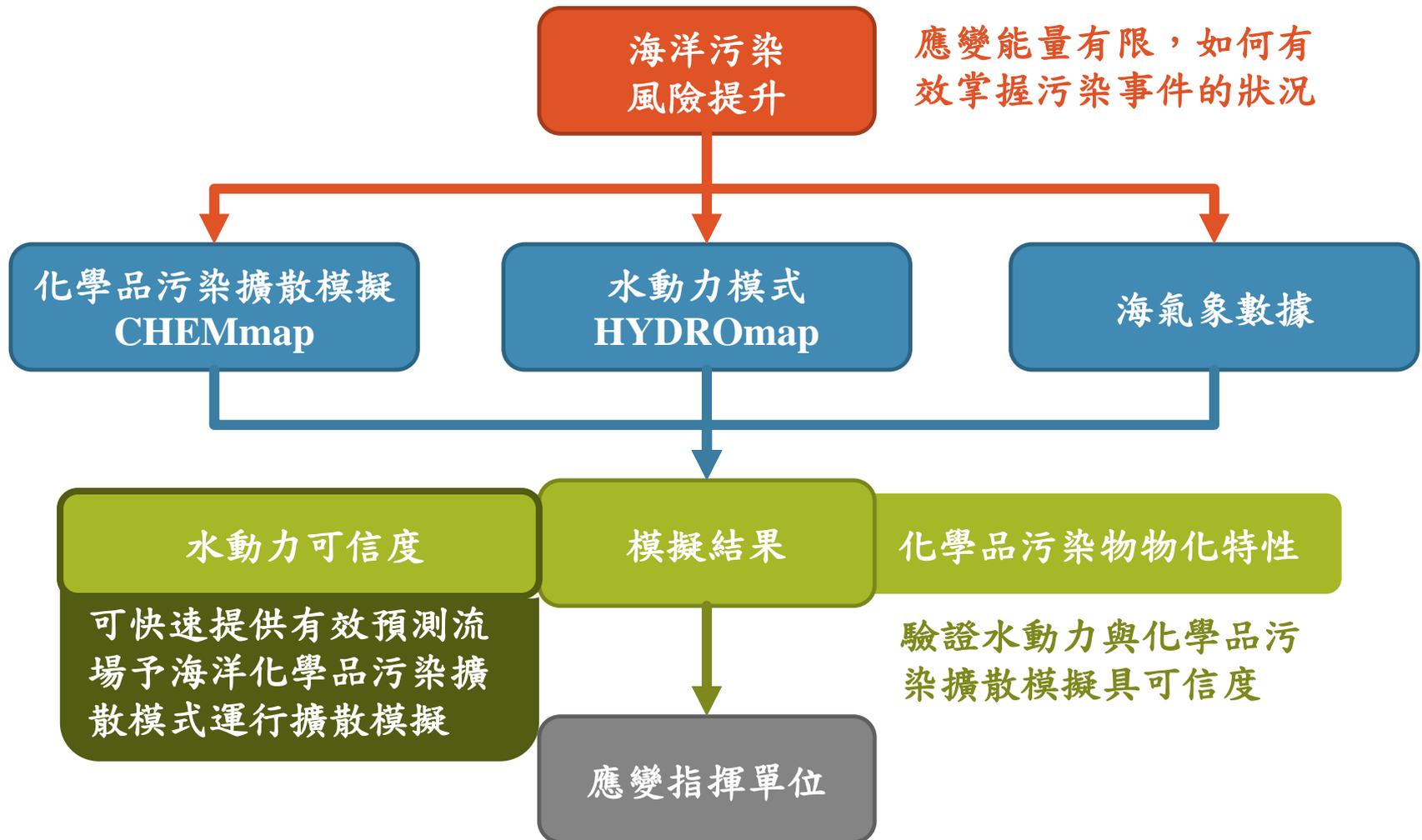
1. 行政院環境保護署，「海洋污染事件緊急應變模擬管控計畫」，行政院環境保護署(2016)
2. 蘇青和、吳基、廖慶堂、徐如娟，「台北港港口區域潮汐及海流特性研究」，第25屆海洋工程研討會論文集，第23-30頁(2003).
3. 蔡立宏、郭晉安、鄭皓元、賴堅戊、錢樺，「風驅流對臺中港北防波堤鄰近海域表層海流之影響」，第36屆海洋工程研討會論文集，第165-170頁(2014).
4. Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, O'Donnell J, Rowe CM., 1985: "Statistics 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>).



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

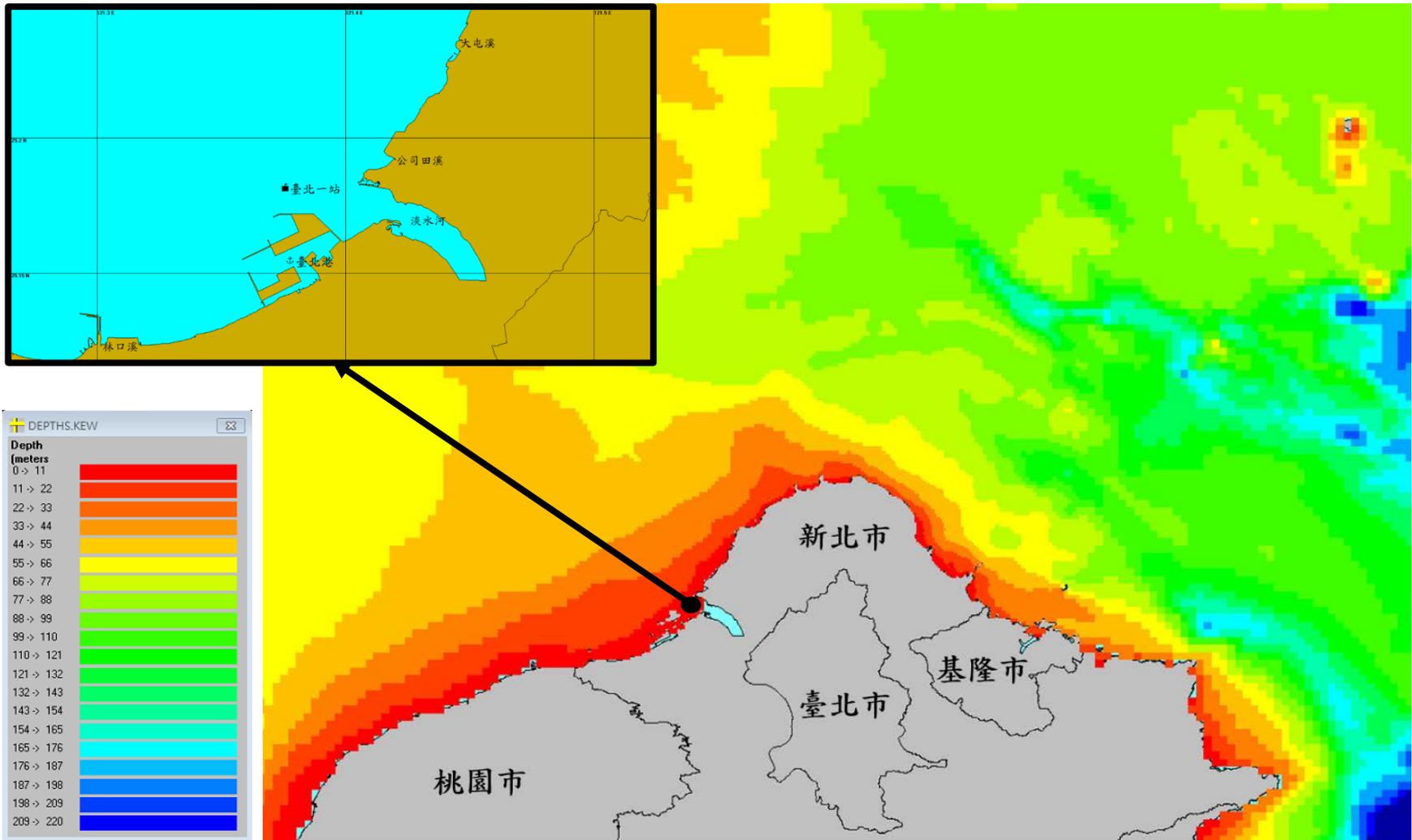
謝謝聆聽

中華民國106年09月13日



提供模擬結果作為應變決策參考

水動力模擬計算範圍、驗證測站位置



德翔臺北輪裝載化學品

過氯酸鉀	甲苯
化學文摘社登記號碼 (CAS NO.) : 7778-74-7	化學文摘社登記號碼 (CAS NO.) : 108-88-3
聯合國編號 (UNNO.) : 1489	聯合國編號 (UNNO.) : 1294
嗅覺閾值：無味	嗅覺閾值：0.16-37ppm (偵測) 1.90-69ppm (覺察)
物質狀態：無色晶體	物質狀態：無色澄清液體
氣味：無味	氣味：芳香族的特性味道
溶解度：0.75% @0°C (水)	溶解度54~58 mg/100 ml (水)
密度：2.52@10°C (水=1)	密度：0.86 (水=1)
沸點：—	沸點：110.6 °C
閃火點：—	閃火點：4.4 °C(閉杯)
蒸氣壓：0	蒸氣壓：22 mmHg @20°C
蒸氣密度：4.8(空氣=1)	蒸氣密度：3.1 (空氣=1)
爆炸界限：—	爆炸界限：1.2%~7.1%
揮發速率：—	揮發速率：2.24 (乙酸丁酯=1)
自燃溫度：—	自燃溫度：480°C
熔點：610°C	熔點：-95°C

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：

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

- X_{t-1} 為質點在t-1時間的位置
- Δt 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。

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：

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

- A 為海表面擴散面積(m²)
- K₁ 為擴散係數(sec⁻¹)
- V 則為於海表面擴散的化學品總體積(m³)。

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：

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

- $N_{i,d}$ 為某化學品在水中溶解速率(moles/sec)
- K_d 為分配係數(cm/sec)
- x_i 為某化學品在親油性有機溶劑中溶解的莫耳分率
- C_s 與 C_w 分別為化學品於親油性有機溶劑與水溶液中的溶解度(moles/cm³)
- A 則為浮在海表面化學品的擴散面積(cm²)。

蒸發 (EVAPORATION)

- 依據拉午耳定律(Raoult's Law)，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：

$$E = K_e MW P_{vp} / RT$$

- K_e 為化學品蒸發係數(m/hr)
- MW 為分子量(g/mole)
- P_{vp} 為化學品蒸氣壓(atm)
- R 為氣體常數($(8.206 \times 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{m}^3) / (\text{mole} \cdot ^\circ \text{K})$)
- T 為溫度($^\circ \text{K}$)。

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：

$$M_t = M_o e^{-kt}$$

- M_t 為化學品經過 t 時間後的剩下的質量
- M_o 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)。

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，同時計算化學品於大氣中的濃度，計算式如下：

$$X_t = X_{t-1} + \Delta t U_t + x_h + x_v$$

$$C_i = M_{air} / (A \times H)$$

- X_{t-1} 為質點在t-1時間的位置
- Δt 為時間間隔(sec)
- U_t 考量風應力(m/sec)
- x_h 與 x_v 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。
- A 網格面積
- H 追蹤質點高度
- M_{air} 網格內的化學品質量
- C 化學品於大氣中濃度

HYDROMAP水動力模式

- 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下所示：

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

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

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

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

- 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⁻¹)，g為重力加速度(m/sec²)。