

標竿智慧港海氣象資訊平臺之探討及國內應用建議

蔣敏玲¹ 林雅雯²

¹交通部運輸研究所 副研究員

²交通部運輸研究所 科長

摘要

隨著全球氣候變遷加劇與供應鏈韌性需求提升，智慧港口(Smart Port)之發展已從單純的作業自動化，邁向利用大數據、人工智慧(Artificial Intelligence, AI)與物聯網(Internet of Things, IoT)建構「數位孿生」(Digital Twin)的高階應用階段，強調海氣象資訊應從傳統「防災參考」轉型為「數據驅動」的核心決策資產。海氣象資訊做為港埠作業安全的基石，對提升港埠營運效率、降低災害風險具有關鍵地位。本研究透過探討國際標竿智慧港口海氣象資訊整合應用案例，並分析海氣象因子對港區作業之具體影響，及審視國內 Trans-SMART 2.0+升級計畫在海氣象資訊應用上的現況、限制與挑戰，提出國內後續應用建議，期以全面加速我國港口朝向更高標準的安全、效率及營運韌性發展。

一、前言

港口是全球供應鏈的關鍵節點，其營運效率與安全性直接影響國際貿易的成本與流暢度。全球航運產業正面臨氣候變遷、能源轉型、供應鏈重組與極端天候頻率上升等多重挑戰。近年來，隨著全球氣候變遷加劇，極端天氣事件發生頻率與強度顯著增加，如颱風、強風、豪雨、濃霧、暴潮及異常浪高等現象，對航道安全、靠離泊作業、貨櫃吊裝、裝卸作業、引水作業等皆構成嚴重威脅，可能導致船舶調度延誤、裝卸作業中斷及設施損壞等問題，港口營運的風險與挑戰日益增加^[1]。根據國際海事組織(IMO)的統計，與氣候相關的延誤和事故佔港口非計劃性停工的重要比例。因此，如何有效地獲取、整合及應用精準的海氣象資訊，已成為現代港口提升營運韌性與競爭力的核心課題。

在此背景下，智慧港概念之興起，正是因應港口在數位化、永續化與氣候調適等多重需求^[1]，以數據驅動、全面感知、高效協同為特徵，旨在利用物聯網、人工智慧、大數據分析與數位孿生等技術，實現港口資源的即時最佳化配置與風險預測。海氣象資訊平臺不僅是智慧港的基礎建設，更是數位孿生在港口環境中進行高精度模擬與預測的關鍵數據來源。

綜上，本研究旨在探討國際標竿智慧港海氣象資訊平臺之發展模式，並提出我國應用與推動之策略建議，本研究採用文獻分析法、案例比較法及訪談資料綜整，透過蒐集研析國內外文獻、港口公開資料及國際組織報告，歸納智慧港口與海氣象應用之關鍵要素，以建構可行之分析架構，並達成以下目的：

1. 瞭解智慧港與數位孿生之定義及發展歷程。
2. 分析海氣象環境因子對港區各項作業之具體影響機制。
3. 探討標竿智慧港口在海氣象資訊平臺的整合應用模式。
4. 檢視國內推動現況，並就國內外發展現況進行比較說明，並對現存問題提出具體優化建議。

二、智慧港與數位孿生

2.1 智慧港定義與發展階段

港口的歷史演變是一個與全球經濟、貿易模式及科技發展緊密交織的過程，港口功能、空間和角色不斷進化。國際上通常將其劃分為 5 個世代，整理詳如表 1。最初，第 1 代基礎港口做為城市中心的停泊點，功能僅限於人力密集裝卸與倉儲；接著，第 2 代工業港口因應工業化浪潮，開始大規模引入重型機械提升作業效率並降低人力成本，環境污染議題也開始浮現。隨後，隨著船舶大型化和貨櫃化(尤其自第 3 代數位港口開始)，港區功能迅速擴展，不僅空間上轉移至城市邊緣，更轉型為提供增值服務與複合運輸整合的現代化物流中心，實現區域物流鏈的數位化整合。進入智慧化時代，第 4 代智慧協同港口的核心在於利用物聯網與大數據，實現跨系統整合與協同調度，目標是減少等待時間並推動港口群的生態體系競爭；而更高階的第 5 代智慧港口則運用 AI、區塊鏈與數位孿生等技術，追求自主化運營和預測式智慧決策，最終成為具備高度韌性、零碳排放潛力的數據驅動型服務樞紐。綜觀而言，船舶大型化與資訊技術進步是港口演變的核心動力，促使其管理範圍從碼頭延伸至全球供應鏈，功能也從單純的貨物吞吐，擴展為資訊流、資金流、人才流的綜合管理。

表 1 港口的演變階段

階段	特徵概要	關鍵技術或轉捩點	目標/驅動力	與城市/腹地關係
第 1 代 基礎港口 (1950 以前)	僅以裝卸、泊位、倉儲、基礎設施為主	人工操作、簡單機械化	提供最基礎的港口功能	港口與城市緊密相連，功能區位於市中心，城市依港而興
第 2 代 工業港口 (1950~1980)	引入更重型機械、起重機、自動化部分裝卸，開始注重附加價值服務。	機械起重設備、自動堆高機等	提升作業效率、降低人力成本	港口向城市外緣延伸，工業區出現；開始面臨港城衝突
第 3 代 數位港口 (1980~2005)	強調國際物流鏈整合，導入資訊系統、電子作業、資料交換	港口管理資訊系統(PMS)；數位化流程；資訊平臺；資料交換與共享	成為區域物流中心；推動數位化與資訊共享	功能向腹地延伸；老舊港區啟動城市再生
第 4 代 智能協同港口 (2005~2012)	不僅是數位化，更是系統協同、資料整合、決策支援	物聯網、大數據、優化演算法	提升效率、降低等待時間、實現協同調度	與全球物流網路深度整合；從單一港口競爭轉向港口群/生態系競爭；強調智慧化管理與環境友好
第 5 代 智慧港口 (2012~)	實現自主化、智慧決策、數位孿生、全程監控	人工智慧、機器學習、區塊鏈、數位孿生	實現自主調度、預測維運、達成資源最優化	成為城市與腹地復興的新引擎；港區與城市智慧基礎設施整合；強調資訊流、物流流的核心價值

智慧港口係以資料為驅動核心，透過資訊與通訊技術高度整合海事、物流、基礎設施與環境資訊的複雜系統^[6]；透過應用物聯網、大數據、雲端計算、人工智慧、5G 通信、自動化等新興技術，對港口所有核心環節(包括碼頭、作業流程、設備、腹地)的關鍵資訊進行全面感知、智慧決策、協同運作，從而實現營運效率最大化、資源配置最佳化、環境影響最小化，並提供增值服務的現代化港口生態系統。

智慧港目標不只是自動化(Automation)，更是進而實現自主化(Autonomy)和認知化(Cognition)。自主化要求系統能夠在預先定義的規則和模式指導下，無需人為干預執行決策和操作，例如根據海氣象預報自動調整橋式起重機的工作限速。認知化則代表系統具備自我學習、情境感知和風險預測的能力，能夠在面對極端海氣象事件時，推演出最佳的應變策略。

國際航運界普遍將智慧港口的發展劃分為 3 個階段^[6]，各階段差異詳如表 2。智慧港埠的發展歷程，係依循國際貿易模式與資通訊科技的迭代更新，從基礎的數位轉型邁向生態系協作。初期階段「效率港埠」著重於港區內部營運流程的優化，透過導入貨櫃碼頭作業系統與局部自動化設施，追求作業效率極大化及船舶週轉率的提升。進階至「協同港埠」階段，關鍵在於資訊整合，藉由建置港口社群系統(Port Community System, PCS)等中立平臺，實現與海關、航商、報關行、內陸運輸業者等供應鏈節點的資訊共享與流程協作，大幅提升物流可視性及服務可靠度。最終，智慧港的目標是成為「韌性港埠」，此階段聚焦於導入人工智慧、5G 通訊、數位孿生等新興技術，不僅達成高階自動化與智慧決策，更關鍵的是建構風險應變機制、落實淨零碳排放與永續發展，確立其在全球供應鏈中樞紐節點的領導地位。

表 2 智慧港發展階段

階段	第一階段：效率港埠	第二階段：協同港埠	第三階段：韌性港埠
發展核心	數位化(Digitization)	整合化(Integration)	認知化/智慧化(Cognitive/Smart)
關鍵目標	單一流程電子化、無紙化	打破資料孤島、系統協同	預測性決策、自主優化、自我學習
關鍵技術	RFID、OCR、EDI、基本 VTS	港口社群系統(PCS)、雲端運算	人工智慧、機器學習、數位孿生、物聯網
資料特徵	資料分散、格式不一	資料標準化交換、平臺介接	大數據資料即時分析、資料同化
決策模式	依賴人工經驗、事後檢討	依賴規則庫(Rule-based)、即時反應	依賴數據預測(Data-driven)、主動規劃
核心特徵	專注於港口內部作業的效率提升，優化單一環節或設備的使用	專注於與供應鏈夥伴的資訊共享與協同合作，實現端到端優化	專注於港口做為創新中心，實現系統的永續發展和對衝擊的韌性應對能力
策略目標	降低成本、縮短船隻停泊時間、提升吞吐量。	提供供應鏈可預測性與可靠性，減少不確定性，提供增值服務	增強港口對氣候變遷與網路攻擊的韌性，實現零碳排放目標，成為區域經濟的新驅動
核心差異	著重於內部成本與效率的提升	轉向外部客戶服務與協作，強調供應鏈的整體優化	追求永續性、風險應對能力和自我學習的最高境界

2.2 商港數位孿生之發展案例

數位孿生是第 5 代智慧港口的關鍵技術，能將實體港口的狀態、營運數據、環境資訊等，即時複製到虛擬世界中，進行模擬、優化和預測。數位孿生係指透過整合物聯網感測技術、大數據分析與人工智慧，為實體系統、資產或流程建構出即時且高擬真的虛擬數位分身。此虛擬數位分身能夠與實體世界雙向互動，不僅能即時反映實體狀態、歷史數據及環境參數，更可藉

由模擬與預測分析，協助決策者在虛擬環境中進行情境推演、優化排程與預測性維護，從而顯著提升系統的營運效率、可靠度與韌性。商港數位孿生的效益已從單純的「可視化」提升到「可預測」和「可優化」，核心價值在於實現營運決策的智慧化、資產管理的韌性化與環境永續性的實踐^[10]，分述如下：

(一)效率與生產力的優化

數位孿生系統提供即時模擬與情境推演功能，結合 AI 演算法，能動態優化船舶靠泊時間、貨櫃裝卸機具的路徑規劃及堆場配置，確保複雜的作業流程始終在最適化配置下運行。透過對船舶、貨櫃和卡車的即時追蹤與預測分析，數位孿生能精準預估各節點的等待時間，有效縮短船舶週轉時間，大幅提升港埠的整體產能與服務水準。

(二)資產管理與維護的升級

數位孿生持續監測橋式起重機、吊車、碼頭結構等關鍵基礎設施的振動、溫度與應力等數據，藉由大數據分析，系統能夠精準預測潛在的設備故障點與剩餘使用壽命，提前發出維護示警，使港務單位能進行計畫性維護而非反應性維修，有效避免關鍵設備因突發故障而導致之營運中斷，進而降低維護成本。

(三)營運韌性與風險管理

數位孿生允許管理單位在虛擬環境中對極端海象、網路攻擊或緊急事故(如油污、火災)進行情境推演與壓力測試，此將有助於制定和測試最有效的應變和恢復方案；透過整合海氣象參數、船舶動態與資安狀態等異質資訊，數位孿生提供全方位的可視化與可預測性，確保面臨複雜或高風險決策時，能獲得科學且即時的數據支持。

(四)綠色港埠與永續發展

數位孿生能模擬港區內能源流動，如岸電設施的使用排程、電動或氫能車輛的調度，以找出最佳節能策略。透過數位孿生追蹤並預測船舶與設備的碳排放和空氣污染擴散模式，協助港埠管理單位有效執行減排措施，推進淨零碳排目標的實現，符合國際 ESG 趨勢。

以下針對數個目前國際上商港數位孿生發展較具代表性之案例，說明其核心應用與效益。

(一)鹿特丹港：

鹿特丹港被視為全球智慧港與數位孿生的先驅，其核心做法是將港區地理資訊、即時海氣象數據、航道交通流(AIS)與船舶靠離泊規則進行整合，形成一套 4D 動態虛擬港區；並透過密佈的 IoT 感測器，即時匯集水文、氣象、潮汐等環境參數。此數位孿模型結合 AI 演算法，為引水人和港務單位提供精確的船舶抵達與離港時間預測及航道風險評估；效益在於顯著提升船舶週轉率與航行安全，並能優化引水排程，有效減少因環境不確定性造成的延誤與燃料消耗。該數位孿生平臺亦透過 API 對外開放，支援航商、堆場營運商與氣象服務業者之應用，展現高度標準化與可擴展性^[9]。

(二)新加坡港：

新加坡港為全球最繁忙的樞紐港之一，其利用數位孿生技術，核心在於整合航行資料、雷達、海象觀測、船公司作業資訊與港口排程，利用機器學習修正船舶到達時間，大幅降低靠泊等待時間並提升拖船與引水調度效率。新加坡模式著重資料治理、資料標準化、跨機關協作，使數位孿生成為國家層級海事決策的重要基礎。另外也專注於關鍵基礎設施的資產管理與健康監測，整合碼頭、橋樑、軌道及港口建築的結構數據和感測器回傳的振動、應力資訊。系統透過深度學習分析，建立資產的壽命預測模型，能提前數週或數月識別潛在的設備故障點，實現預測性維護。此應用顯著降低突發性停機風險，延長設施使用壽命^[4]。

(三)漢堡港：

透過港口管理平臺，系統整合物聯網感測數據、潮汐資料、河川流速預測模型與船舶動態模型，此模型可精準預測船流壅塞狀況，特別是針對易淤積河段的通行情況，進而提供最佳航道通行時窗(Time Window)，有效協助引水人與航商降低船舶延誤。此外，漢堡港數位孿生的獨特之處在於其水路-陸路鏈結的整合，系統將橋梁開啟時程、卡車進場資訊與堆場排程等數據納入模型，實現河港複合運輸(水路與陸路)的精確協調^[3]。

在能源管理方面，該系統能夠模擬整個港區的能源流動與消耗模式，包括岸電設施的負載、電動運輸工具的充電排程，以及再生能源的產出進行全面監控，系統依據即時數據進行能源供需預測與最佳化調度，不僅能有效降低港區的總體電力成本，更有助於量化追蹤與控制碳排放，為港口達成淨零碳排的永續目標，提供了科學化的管理工具。

(四)青島港：

在青島港全自動化貨櫃碼頭的營運中，數位孿生系統扮演著虛擬控制塔的核心角色，該系統能夠即時且三維可視化地追蹤所有自動化設備(如：橋式起重機、門式起重機及自動導引車等)的實際動態。主要功能在於人工智慧調度系統提供一個高精度的虛擬環境，AI 能夠進行高頻率的情境推演與路徑優化，以驗證和執行無人化作業流程；這項機制確保在追求極致效率之際，碼頭作業亦能維持極高穩定性與最大產能，從根本大幅降低潛在的作業衝突、安全風險與人為錯誤，是實現全天候、高效率自動化運營的關鍵技術^[10]。

(五)安特衛普-布魯日港：

安特衛普港打造的數位孿生系統係以港區安全與環境風險管理為核心，整合港區 CCTV、感測器、化學品儲槽監測數據、海象資料與船舶位置，建構出一個全域性的「安全操作孿生」。透過高精度事件模擬功能，此系統能夠精準預測危險品洩漏、火災煙流擴散、油污擴散等緊急情境的發展趨勢。同時能即時提供最佳緊急應變路線及資源配置建議，大幅縮短決策時間。此外，該港口更導入 AI 影像分析模組，用於自動偵測漂浮物、非法排放等行為，成功將數位孿生的應用擴展至 ESG 與環境監管領域，這項舉措大幅提升港區的風險應變速度與跨部門協同效率，從而有效降低高風險作業帶來的災害損失與社會衝擊^[7]。

三、智慧港之海氣象整合應用

3.1 港區作業受海氣象影響之分析

海氣象條件是影響港口營運連續性、安全性與效率的決定性因素，精確瞭解海氣象與作業之間的相關性及影響程度，特別是示警或決策臨界門檻值，更是建立智慧化平臺的基礎。

表 3 詳列從船舶導航、裝卸貨物到後勤支援等各項港區核心作業，與颱風、強風、湧浪、低能見度、豪雨等關鍵天氣因素間的關係。瞭解這些交互作用至關重要，因為惡劣天氣不僅會造成作業延誤，一旦超出臨界閾值，更可能導致船舶碰撞、貨物毀損、系統癱瘓乃至人員傷亡等嚴重後果。

因此，對海氣象因素的預警與風險管控是港口管理的首要任務。影響港區作業的海氣象條件可分為以下幾類：

- (一) 強風(強風/颱風/季風)：導致船舶操控困難及裝卸機具(橋式起重機)必須停止作業，可能造成貨櫃擺盪掉落、空櫃吹倒或港區揚塵。颱風、暴風皆可能迫使港口全面停工、船舶撤離避風，甚至封港；故應量化閾值(如風速超過進港條件之具體數值)，以精準預測對引水作業之衝擊。
- (二) 波浪(湧浪/長浪)：主要影響船舶穩定性與繫泊安全。湧浪會造成引水作業困難，並使繫泊中的船隻產生劇烈搖晃或前後移動，極易導致斷纜；另即使當地風平浪靜，但遠洋長浪(湧浪)仍可造成碼頭船體晃動，影響貨櫃吊運。
- (三) 海流：主要影響船舶操控性和靠泊精度，強勁橫流會要求加派拖船或暫停進出港；同時也影響水下設施定位與清淤作業。
- (四) 潮位：影響船舶吃水深度與通航安全，極端低潮位時可能造成大型船隻觸底擱淺；大潮差則影響碼頭繫泊高度和裝卸效率；故應結合氣候變數擴大至暴潮預警模型，分析未來趨勢對低窪港區的長期影響。
- (五) 能見度：能見度低主要由濃霧或豪雨造成，會嚴重影響船舶進出港的視線安全，迫使停止航行，同時也限制港區陸上車輛的行駛速度與堆場作業的定位。
- (六) 豪雨：導致能見度急降，迫使陸上車輛減速甚至停駛；同時造成港區積水、倉庫滲水和散貨受潮變質，影響作業和貨物安全。
- (七) 高溫：極端高溫會導致碼頭機械過熱停機，降低設備可靠性，增加戶外作業人員中暑風險，並增加冷凍貨櫃和空調的電力負荷，對港區能源調度構成挑戰；故應納入熱浪頻率分析，預測對人員健康與精密設備之影響。

表 3 港區作業受海氣象影響

分類	作業項目	海氣象條件	影響內容	影響結果與風險
港航船舶運作	1.船舶進出港	強風 風浪/湧浪 能見度 海流	<ul style="list-style-type: none"> 強風：導致船舶難以進出港或靠泊，甚至暫停進出港管制。 浪高：湧浪使引水艇垂直搖晃過大，引水人無法安全攀爬船舷繩梯。 低能見度(霧/雨)：引水與航道安全降低。 強流/逆流：影響船舶操控與靠泊精度。 	<ul style="list-style-type: none"> 港口暫時封閉(封港)，船舶無法進港避風或離港。 引水人落海或在登梯時受傷。 發生擱淺、碰撞事故。
	2.碼頭靠泊/離泊	強風(側風) 潮差 港內靜穩度	<ul style="list-style-type: none"> 側風：導致船舶晃動，繫纜易斷裂或難固定。 潮差：潮差大時，影響機具吊具與船艙高度差異，影響裝卸效率。 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶猛烈碰撞碼頭或橋式機，造成結構毀損。 裝卸機具無法順利對位，作業效率下降、船舶延誤，增加運營成本。
裝卸與倉儲	3.貨物裝卸作業	強風 降雨、雷電 高溫	<ul style="list-style-type: none"> 強風：將吊掛中的貨櫃像鐘擺一樣劇烈晃動，無法精準對位，且危及下方人員。 雷電/雷雨：機具需停止運作，人員撤離。 高溫：影響設備運轉與人員安全。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業人員撤離、裝卸停擺、船期延誤。 貨櫃掉落，機具結構受損。
	4.堆場作業	強風 大雨、積水 能見度低	<ul style="list-style-type: none"> 強風：吹倒空貨櫃，造成堆場安全隱憂。 大雨：遇水即損的貨物(如水泥、穀物)必須緊急關艙，造成作業頻繁中斷。 積水：地面濕滑，車輛作業受阻。 濃霧：影響堆場車輛視線與吊具定位系統。 	<ul style="list-style-type: none"> 堆場安全風險增高，發生碰撞事故。 影響貨櫃提領與交付的效率。
	5.倉庫作業	濕度、溫度 豪雨、颱風	<ul style="list-style-type: none"> 高濕度/溫差：造成貨物受潮、變質。 颱風：颱風期間電力中斷，影響設備運作。 	<ul style="list-style-type: none"> 貨物發霉、損毀，導致財損。 斷電導致冷凍/冷藏貨物報廢。
陸運與設施	6.港區陸上運輸	大雨、積水 強風 低能見度	<ul style="list-style-type: none"> 積水：積水影響車輛行駛安全與速度。 強風：影響貨櫃車輛穩定性。 能見度：濃霧時無法看清路口、交會點或碼頭邊緣，極易發生碰撞或衝出碼頭。 	<ul style="list-style-type: none"> 造成交通壅塞、調度延誤，影響裝卸銜接。 交通事故風險增加。
	7.港區電力與通訊設施維護	雷擊、暴雨 海水倒灌	<ul style="list-style-type: none"> 雷擊/暴雨：導致設備損壞或中斷，影響整個港區作業。 海水倒灌：危及電力及通訊設施安全。 	<ul style="list-style-type: none"> 設備損壞或中斷致港區作業癱瘓。 海關、VTS 中斷，無法執行清關與調度。
	8.雜項/人員作業	高溫 豪雨、強風	<ul style="list-style-type: none"> 高溫：影響設備運轉效率與人員健康安全。 豪雨/強風：影響戶外維護和檢查作業。 	<ul style="list-style-type: none"> 人員熱衰竭中暑，工安風險提升。 維護延期，影響設施使用壽命。

3.2 各國智慧港對海氣象資訊之應用

傳統港口資訊系統多著重於貨櫃作業、船舶調度與關務處理，對於「海氣象資訊」的整合與決策支援仍顯不足。實際上，港口作業高度仰賴即時且精確的風、浪、潮、能見度、降雨與氣象預報資訊，若缺乏完整的整合平臺，將極易導致營運決策延遲，並升高船舶進出港及碼頭作業的安全風險^[1]。為此，國際主要智慧港口正積極應對此挑戰。透過整合實際海氣象數據與人工智慧/數位孿生技術，成功地將傳統上視為不可抗力的「天氣影響」，轉化為「營運可控變數」。這項轉變使得港口能夠全面智慧化提升效率、安全與永續性，整理詳如表 4，並分述如下：

(一)海氣象數據應用的核心目標與技術趨勢

智慧港口對海氣象數據的應用，已從早期的單純警示，進化到高階的預測與決策優化，其核心目標與趨勢實現以下兩方面：

1. 提升營運效率與通航安全：多數港口利用海氣象數據直接優化其核心作業流程。例如，鹿特丹港和天津港將風速、浪高與潮位整合至數位孿生模型，用於進港營運模擬與靠泊安全模型，從而保障船舶安全和精準排程。特別是對於位於河口地區的港口(如鹿特丹港、廣州

港)，需納入潮汐與河流流量影響，以支援靠泊排程與內陸接駁決策。深圳港則依賴即時風浪與能見度資訊，直接做為引水與靠泊決策的限制判定。

2. 應用 AI 預測模型與數位孿生：高階智慧港口將海氣象數據視為數位孿生系統的關鍵輸入變數。上海港將多種海氣象參數整合至 AI 預測模型，用以支援靠泊排程、起重機作業安全閾值及颱風/暴雨等應變決策。歐洲 4 大港口(鹿特丹、安特衛普等)共同利用海象參數建立聯合數位孿生，以支援防洪管控與能源/碳排模擬。這些皆說明海氣象應用已從被動的輔助決策，邁向智慧系統的自主預測與模擬的關鍵性轉型。

(二)海氣象應用於韌性管理與永續發展

智慧港口的海氣象應用不僅關乎效率，更是其在極端氣候下維持營運韌性與達成永續目標的關鍵。

1. 強化風險應變與韌性管理：海氣象數據是港口應對緊急事件的生命線。例如寧波-舟山港開發海霧/能見度監測系統，配合自動氣象站，支援船舶交通服務系統之航行警示，以降低濃霧造成的交通風險。釜山港將海流、風場等參數納入停泊與靠泊模擬，旨在提升靠泊安全與航次時間預測精準度，確保在多變環境下的可靠性。
2. 跨領域整合與綠色能源調度：海氣象數據應用亦成為港口實踐永續目標的工具。青島港的案例最具代表性，該港將海況(潮位、波高)與港內能源管理系統進行連動，用以調度綠色能源(岸電/微電網)，並做為設備作業安全閾值的依據。這種跨領域整合，使得港口能夠在保障作業安全的同時，優化能源使用，推進淨零碳排的目標。

總體而言，全球智慧港口已將海氣象數據視為其智慧化營運的核心資產。從基礎的即時資訊獲取，到利用 AI 與數位孿生進行全方位、多層次的預測與模擬，海氣象應用已成為提升港口競爭力、保障供應鏈連續性與實現永續發展的決定性要素。

3.3 標竿智慧港海氣象環境資訊平臺案例

全球主要航運國家在智慧港發展過程中，無不將「海氣象資訊整合」視為提升港區營運效率與航行安全的重要數位基礎設施。隨著極端氣候事件頻率增加，整合性的海氣象數據已成為保障供應鏈韌性的先決條件。海氣象環境資訊平臺的功能已從單純數據展示，升級至涵蓋即時監測、高解析度數值模式預報、智慧航行決策支援、港區作業風險動態管理及數位孿生模擬驗證等多元複雜功能。這些平臺透過數據科學賦能，使港口能夠由傳統的被動應對，轉向主動預測與調度。本節選取國際具代表性之標竿案例，包括鹿特丹港、西班牙 PORTUS 網站、日本 NOWPHAS 網站、美國海洋天氣網站等，綜整其海氣象資訊平臺的架構設計與應用特色，供臺灣未來推動智慧港建設之參考。

表 4 全球智慧港口海氣象應用

港口	核心海氣象應用目標	具體技術與數據整合內容
鹿特丹港	支援進港運營模擬與船舶自動航行測試。	將海氣象資料(風速、浪高、潮位)整合到數位孿生模型中。
新加坡港	用於自動靠泊調度、航道風險評估與能源/燃料最佳化決策，建立中央管理平臺模式，整合所有港口數據，優化全國港群資源分配與管理效率。	整合潮汐、海浪、海流和航跡資料。
上海港	支援靠泊排程、起重機作業安全閾值與颱風/暴雨應變。	將風速、浪高、潮位、能見度及港務作業資料整合進入 AI 預測模型。
寧波-舟山港	支援 VTS/航行警示，降低濃霧造成交通風險。	開發海霧/能見度監測系統，建立自動氣象站與海象觀測。
深圳港	供引水、靠泊決策與岸面作業限制判定。	即時風浪、能見度資訊。
青島港	連結能源管理系統，進行靠泊模擬、設備安全閾值與綠能(岸電/微電網)調度。	將海況(潮位、波高)與港內能源管理系統連動。
廣州港	港口調度系統決策輸入，支援靠泊排程與內陸接駁。	將港區潮汐與風浪資訊整合入港務調度系統；納入河口潮汐影響與颱風應變。
釜山港	提升靠泊安全與航次時間預測精準度。	將海流、風場、潮汐等參數納入停泊與靠泊模擬。
天津港	納入港區調度與靠泊安全模型。	整合 IoT、數位孿生與 VTS，將風速、潮位、浪高納入系統。
俄亥俄里港(杜拜)	進行靠泊與通關排程；在智慧堆場與靠泊優化時考量海氣象為運營限制條件。	港務管理系統納入海象/潮汐。
巴西亞馬遜港	輔助航道通行與靠泊安全的決策參數。	港區資訊化系統(PCS)開始整合海氣象與潮汐資料。
鹿特丹/安特衛普/漢堡	支援靠泊模擬、堤防/閘門控管與能源/碳排模擬，導入雲端 VR 平臺，讓端端用戶亦可測試海氣象模擬情境，提升技術可用性。	將多個歐洲港口的海象參數(潮位、流速、風浪)與空間感測器整合進數位孿生。
洛杉磯港	提升港口運營效率與安全性。	與 IBM 合作數位化平臺，整合即時海象數據。

(一)鹿特丹港(網址：<https://weather-tide.portofrotterdam.com/>)

荷蘭鹿特丹港所提供之天氣及潮位儀表板網站，為其智慧港營運核心的水文與氣象資訊服務平臺。該平臺旨在整合港區內即時觀測資料與模式預報結果，提供水位、潮流、風速風向、浪況、能見度與水深等關鍵環境參數，協助港務管理單位、引水與拖輪服務、航運公司及航道管制人員掌握最新海象條件。其功能涵蓋即時監測、氣象與水文預報、天文潮汐資訊以及航道水深查詢，使用者得以依據當前與預報之環境條件評估船舶進出港、靠離泊、引水操作與拖輪調度等作業風險。此整合性環境資訊服務不僅強化港區營運安全，亦提升航行效率，並做為鹿特丹港推動數位孿生與智慧化決策支援架構的重要基礎設施。

(二)西班牙 PORTUS 網站(網址：<https://portus.puertos.es/>)

PORTUS 網站是針對西班牙全國港口系統所建立的「海洋海氣象環境資訊整合平臺」，主要目的提供港口設計與營運所需之海象、氣象、潮位、洋流、波浪等關鍵資料，以提升港口安全性、運作效率、永續性與防災韌性。平臺內容包含以下幾大部分：

1. 即時觀測資料：來自浮標、潮位站、高頻雷達、岸基氣象站等，測量浪高、潮位、流速、水溫、風速風向等環境資訊。

2. 數值模式預報：提供浪況、潮流、水位、氣象等短期(數小時至數日)預報，並提供港口靠泊、拖船、施工調度等使用。
3. 歷史與氣候資料庫：包括長期海象/氣象觀測資料與氣候模擬資料集，可用於港口規劃、防洪防潮、氣候變遷評估等長期研究。
4. 視覺化 Web-GIS 介面與公開存取：使用者可透過地圖查看即時/預報/歷史資料，也可下載格式化資料，支持研究、規劃、決策與公眾資訊透明性。

(三)日本 NOWPHAS 網站(網址：<https://nowphas.mlit.go.jp/>)

日本國土交通省港灣局所維運之 NOWPHAS 為針對全國港埠所建構之「沿岸/海洋波浪與潮位資訊整合平臺」，旨在提供港口管理、航道安全、沿海防災及海象研究所需之即時與歷史波浪、水位、潮流等海洋條件資料。該平臺即時發布「有義波高、潮位、水面平均水位」等觀測數據，並允許使用者下載展示。1970 年代以來的長期海象資料，以支援防災評估、港區規劃、設施設計及學術研究。透過 NOWPHAS 網站，各港務當局、引水人、拖輪公司、航運業者與學研單位得以依據可靠海象資料，判斷港區現況、預估風浪與潮位變化，進行靠泊、拖輪安排、碼頭作業及沿岸防護決策，有效提升航港安全與營運韌性。

(四)美國海洋天氣網站(網址：<https://www.weather.gov/lox/marine>)

位於洛杉磯的海洋預報辦公室所提供之海洋天氣網站，係針對沿岸與離岸水域提供即時觀測與預報資訊的綜合性平臺。該平臺整合浮標、潮汐站資料、氣象觀測與數值模式預報結果，對外提供包含風速/風向、浪高、浪向、海浪時序、水面潮位與海況警示等資訊。使用者包括航運公司、船長、拖船與引水服務、漁業從業者，及港口與港務管理單位，可據此判斷航道通行條件、船舶進出港安全性、靠泊與作業風險，做出更安全、有效率的調度與決策，是美國沿海海域海象整合與智慧海事管理的重要資訊基礎設施。

四、國內智慧港推動現況與未來建議

4.1 Trans-SMART 2.0+升級計畫推動現況

為因應全球海運環境的劇烈變革及數位轉型浪潮，繼 2018 年啟動的 Trans-SMART 臺灣港群智慧轉型計畫後，臺灣港務股份有限公司(以下簡稱港務公司)自 2021 年起，以「導入創新科技、加速數位轉型」的發展思維，擘劃並啟動為期多年的「Trans-SMART 2.0+升級計畫」，為臺灣港群邁向 2030 年智慧港口的發展藍圖，透過數位科技解決港口營運管理關鍵課題，導入各項創新科技應用，建構港口創新科技試驗場域與提供數位轉型獎勵方案，攜手產業共同合作，發揮「SDG17 夥伴關係」精神，旨在透過全面導入新一代數位科技，建構一個兼具「作業安全」、「營運效率」、「服務品質」與「永續發展」的現代化智慧港口生態圈。「Trans-SMART 2.0+升級計畫」目前推動現況(如圖 1)，說明如后。

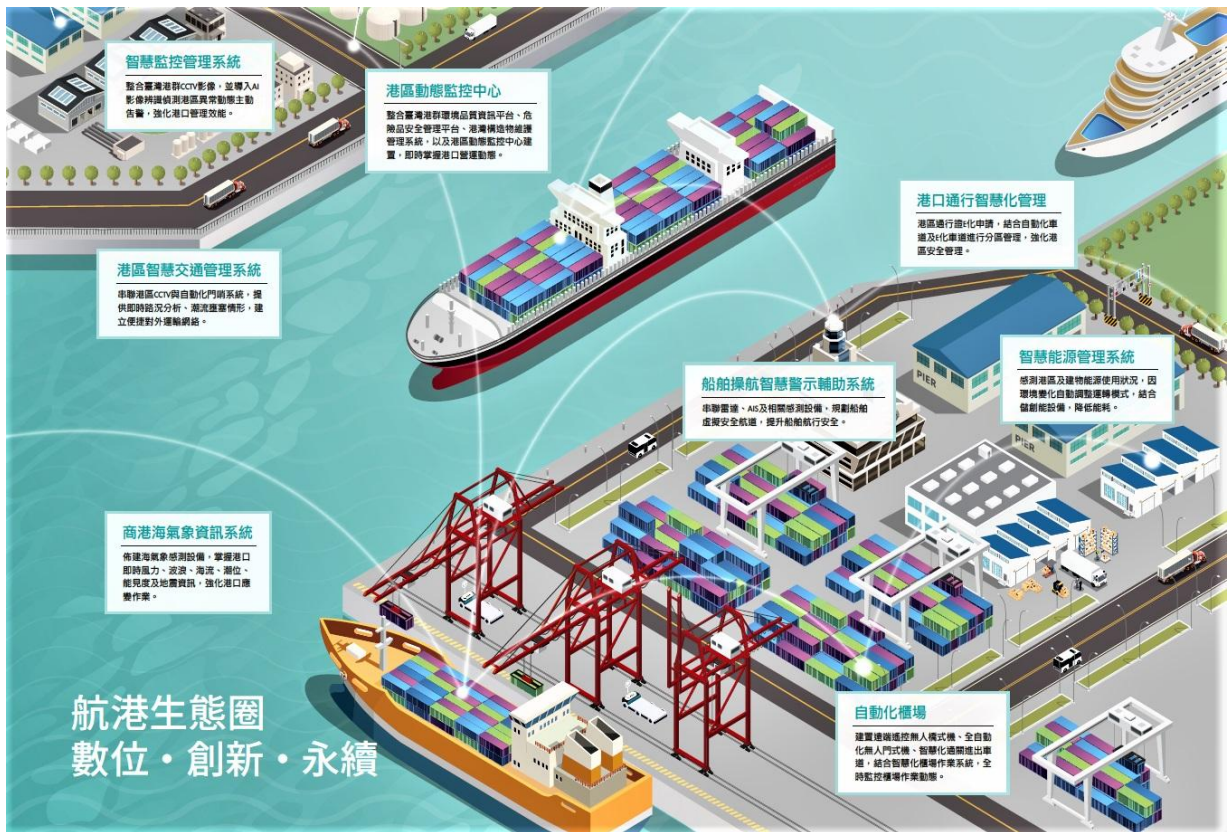


圖 1 「Trans-SMART 2.0+升級計畫」目前推動現況^[17]

(一)核心行動方案與系統建設：

Trans-SMART 2.0+計畫聚焦於解決港口營運管理上的關鍵課題，將創新科技應用於各項作業流程，主要智慧行動方案如下：

1. 提升安全與環境預警能力：

- 船舶操航智慧警示輔助系統：提供船舶超速示警、船舶偏航示警、船舶走錨示警、船舶碰撞示警、船舶碼頭碰撞示警、船舶入侵示警及整合各類感應器等 7 大智慧化功能，當船舶於異常狀態航行時，可透過聲音與閃光警示提供 VTS 人員即時掌握船舶即時動態，立即通知船方採取避碰措施，以維護船舶航行安全及港口正常營運。
- 商港海氣象資訊系統：委託交通部運輸研究所規劃開發，透過建置海氣象監測儀器蒐集波浪、潮汐、海流、風速等觀測資訊，強化港口於短時而劇烈天氣災變下的應變能力，提供港務單位作為港區船舶作業安全資訊以及船舶航行規劃與離港疏散之參考依據。
- 智慧監控管理系統：建置全港區智慧化監控網路，整合各港共超過 2,700 支監控攝影機 (CCTV)，完成建置「智慧監控管理系統」，即時掌握港口動態，強化安全監理能力。透過影像辨識異常事件提供自動告警通知，以及建置線上執行災害通報流程，快速通報港區相關公民營單位，提升緊急應變時效，讓港口的突發事件能提前預警、即早應變處置。

2. 優化效率與數據整合

- 3D 智慧營運管理平臺：導入數位孿生概念，推動 3D 智慧營運管理平臺，整合港區公共管線圖資(電信、電線、自來水等)、港口水深資料，以及港區地面設備和建物模型圖資。透過 3D 影像技術呈現港口各種建築物和管線的位置，有效減少挖掘地下管線的衝突，提升營運效率，實現港區資產的精細化與可視化管理。
- 港務 168-港區路況即時資訊服務網：提供高雄港區路況資訊查詢，以地理資訊系統技術整合各式路況資訊於港區地圖。同時導入智慧影像辨識以及結合人工智慧技術，使用者可隨時查看港區即時路況、CCTV 即時影像、進出貨櫃中心時間、櫃場外停等車輛數，以及往返貨櫃中心等時間預測資訊，讓使用者更快進出港口、更方便調度車輛，建立便捷的交通服務網。

(二)核心行動方案與創新試驗場域實踐：

計畫的推動現況展現多項具體成果與創新試驗，涵蓋海側、陸側與管理 3 大維度：

1. 無人載具智慧巡檢：使用無人機、無人船、水下海事機器人等無人載具巡檢，搭配 5G 企業專網傳輸、AI 智能分析平台及建置 UTM 無人載具智慧監管平台，進行港區非法釣客告警、環境變異分析、碼頭防舷材檢測、水中油污及水深監測，以及水下岸壁檢測等項目，全面掌握港區狀況，協助人員進行監測管理作業、提升巡檢效率；另利用無人機監測堆儲場地風速，適時調整空櫃堆疊高度預警，降低風損風險。
2. 自駕巴士與區塊鏈物流服務：導入智慧化物流運輸車輛，並搭配智慧交通(AI 監控、車輛追蹤)、港區車聯網系統、數位雙生管理介面及 5G 環境建構，輔助港區環境管理、車輛動態管控、文件物流運送及道路資產巡檢等工作。
3. 無人機後勤補給：無人機物流運送兼具快速及安全之兩大特點，可提供港口緊急物資或小型維修零件傳遞之服務，國際港口如荷蘭鹿特丹港及新加坡港，近期均已完成無人機物流運送試驗或投入實際運用。
4. 橋式機貨櫃裝卸 AI 影像辨識：應用 AI 結合 OCR 辨識技術進行貨櫃車號及貨櫃櫃號封條辨識、船邊車輛定位導引、採用 CCTV 進行櫃損辨識，期藉由 AI 影像分析技術提升貨櫃裝卸管理效率，以及完成櫃損辨識提供影像調閱服務，優化港口裝卸作業營運效能。後續可擴大至高雄港第七貨櫃中心之櫃損偵測，結合豪雨數據自動暫停吊裝，降低貨損率。
5. 產業數位轉型獎勵：為帶動航港產業整體智慧化，港務公司持續提供獎勵與補助方案，鼓勵港區業者導入數位化創新服務，促進生態系共同升級。

(三)里程碑與永續發展的落實：

高雄港第七貨櫃中心正式啟用，是 Trans-SMART 2.0+計畫在實體建設的重要旗艦成果，於 2023 年 5 月正式啟用。具備 5 座可停靠 2.4 萬 TEU 大型貨櫃輪的深水碼頭(水深 18m)，儲

運能量可達每年 450 萬 TEU，遠期目標為 650 萬 TEU/年，說明我國港群在處理超大型貨櫃輪與高效率自動化作業方面的國際競爭力已大幅提升。後續建議導入 AI 影像辨識進行櫃損偵測，並強化 VTS 與海氣象連動之碰撞預警功能。

在永續發展方面，臺灣港群積極因應國際減排趨勢，已提出減碳策略與藍圖。目前，臺灣七大國際商港已全數取得歐洲生態港(EcoPorts)認證，並持續推動能源轉型，落實相關減排計畫與措施，確保智慧港口的發展與低碳綠色港群的目標協同並進。

綜上，臺灣港群發展重點正從傳統的資訊化升級至數據驅動的智慧化運籌，透過系統建設與創新試驗場域的並行推進，正積極轉型且以科技力量應對氣候變遷與全球供應鏈變局，確保其在全球航運網絡中的核心競爭力與韌性。此外，就目前推動現況與國際標竿對比，國際港口已進入預測式決策階段，而我國 Trans-SMART 2.0+ 雖在監控與自動化取得進展，但在「跨部門數據治理」與「機器學習自主優化」上仍有強化空間。

4.2 海氣象資訊應用之問題與挑戰

臺灣地處亞熱帶，四面環海，身處颱風路徑與季風交替區域，港口營運深受東北季風(冬季)與颱風(夏秋季)兩大因素影響，在惡劣海象下，港口常面臨吊裝作業中斷、航道淤積及船舶繫泊安全風險等挑戰。

各港口因地理位置、地形特性與氣候條件差異，所面臨的主要海氣象問題亦不相同。臺灣港口的挑戰可依據區域特性，劃分為 2 大類：「泥沙淤積」與「強風作業限制」的西部/西南部沙岸；以及「長浪衝擊」與「港池共振」的北部/東部岩岸。隨著氣候變遷，所有港口均需提升對暴潮淹水與極端風浪的防災韌性，以確保航運效率與設施安全。本研究綜整主要商港海氣象影響與挑戰分析，如表 5 所示，並分述如下：

(一)北部與中部海岸：主要受東北季風與湧浪影響，造成作業中斷、作業天數減少與安全挑戰

1. 基隆港：雖為天然峽灣港，但開口朝向迎浪面，季風湧浪易透過傳遞與繞射進入內港，造成船體劇烈搖晃，引發繫泊纜繩斷裂風險，嚴重影響裝卸效率與安全。
2. 臺北港：作為突出於海岸線的離岸式人工港，缺乏天然屏障，需直接承受冬季強勁長浪衝擊，導致冬季可作業天數較低。
3. 臺中港：核心挑戰為強勁東北季風與漂沙，需建立高解析度海流模型預測漂沙動態，風力常逾 7-8 級以上，造成引水人登輪困難，導致冬季引水封港機率升高。此外，沙岸地形使臺中港面臨漂沙淤積的課題，航道必須定期進行疏浚。

(二)東部海岸：太平洋長浪與港池共振的隱性威脅

1. 花蓮港：面臨特殊的港池共振挑戰。當外海長浪週期與港池的固有週期吻合時，會產生駐波並將波高放大數倍；即使港區水面看似平靜，繫泊船隻仍可能發生劇烈且低頻的移動，是造成船體撞擊碼頭和繫泊失效的「隱性殺手」。

- 蘇澳港：挑戰主要來自於颱風湧浪的繞射作用，雖地形具備一定遮蔽性，但特定方向的颱風長浪仍能繞射入港區，降低港內靜穩度，使得港口避風功能在極端狀況仍可能受到限制。

(三)南部與離島：極端氣候與地質環境考驗

- 高雄港：近年來開始關注長週期波對超大型貨櫃輪繫泊的影響。此外，由於部分港區地勢較低，颱風期間的暴潮與海水倒灌是其主要的防汛挑戰。
- 安平港和布袋港：為臺灣西南部沙岸的代表，核心挑戰是持續性的泥沙淤積，沿岸流將大量泥沙帶至航道口，必須定期進行疏浚以維持船舶吃水深度。布袋港更深受冬季強勁季風之苦，是往返澎湖「藍色公路」客運中斷的主要原因。
- 澎湖港(馬公)：冬季季風極端風速常導致海運交通完全中斷。此外，強風攜帶的高鹽分鹽霧造成港口設施嚴重的鹽害腐蝕，大幅縮短碼頭與防波堤壽命。

臺灣商港的挑戰正從傳統的「抗風抗浪」轉向複雜的「泥沙管理」與「靜穩度維持」。未來，港口建設必須納入更嚴謹的氣候變遷調適策略，特別是在防波堤高度、碼頭後線排水系統，以及應用先進的長週期波預警系統，現有系統對長浪與共振的量化預警仍需結合衛星數據以提升精準度，確保航運業在全球極端氣候趨勢下的營運韌性與安全。此外，臺灣港口面臨之挑戰除地形淤積與強風外，尚缺乏針對低能見度(濃霧)的擴散模擬模型。

表 5 臺灣主要商港海氣象影響與挑戰分析

港口	地理特徵	海氣象影響	具體問題與現象	面臨的營運與工程挑戰
基隆港	北部岩岸峽灣，開口朝北	東北季風湧浪、颱風長浪	• 湧浪易傳遞至內港，造成船隻劇烈搖晃；冬季多雨霧。	• 繫泊安全：湧浪常導致斷纜事故。 • 裝卸效率：船體晃動使貨櫃裝卸中斷。
臺中港	中部沙岸人工港缺乏天然屏障	強烈東北季風與漂沙	• 冬季風力極強 • 強風攜帶大量漂沙。	• 引水安全：冬季強風常導致無法領港，造成封港。 • 航道維護：需高頻率疏浚以對抗漂沙淤積。
高雄港	西南部瀉湖地形，擁有雙入口	颱風暴潮、長週期波	• 港內長週期波會導致大型船舶發生低頻運動； • 地勢低平，颱風期間有暴潮風險。	• 大型船繫泊：需解決長週期波引起的纜繩張力劇烈變化。 • 淹水風險：極端氣候下，低窪碼頭面臨海水漫淹。
花蓮港	東部斷層海岸，直接面臨太平洋	太平洋長浪、港池共振	• 外海長浪週期與港池固有週期接近，產生共振放大波高。	• 船舶碰撞：共振使船隻在看似平靜時仍大幅移動，撞擊碼頭。 • 作業中斷：因共振效應，裝卸作業常被迫暫停。
臺北港	北部(填海造陸)突堤式離岸港	強烈東北季風、西北颱風浪	• 突出海岸線，缺乏遮蔽，風浪直接作用於防波堤。	• 營運利用率：冬季海象惡劣天數多，影響可工作天數。 • 防波堤穩定性：設計標準要求極高，需抵禦巨大波浪能量。
蘇澳港	東北角(岩岸)，開口朝東南	颱風湧浪、季風之繞射波	• 特定方向的颱風長浪易繞射入港，造成港池振盪。	• 避風功能受限：在特定路徑颱風下，港內靜穩度不足，船隻需出海避風。
安平港	西南部(沙岸)，平原沙岸	西南氣流、沿岸漂沙	• 受沿岸流影響，航道口泥沙淤積嚴重；颱風暴潮倒灌風險。	• 航道疏浚：需定期投入高額經費清淤。 • 港區淹水：地勢低平，暴潮引發淹水災害。
布袋港	中南部(沙岸/瀉湖)	東北季風、潮差與漂沙	• 位於淺灘區，泥沙來源豐富，航道易淤積；冬季強風。	• 客運中斷：冬季因風浪過大，往澎湖客輪常被迫停航。 • 吃水限制：因水淺與淤積，僅能操作中小型船舶。
澎湖港	離島(群島岩岸)，無高山屏障	極端風速(季風)、鹽害	• 冬季東北季風毫無遮蔽，風速極強；強風挾帶高濃度鹽霧。	• 孤島效應：海象惡劣時，海運完全中斷，物資補給受阻。 • 設施壽命短：嚴重鹽害腐蝕，設施維修頻率高。

(一) 因應各商港獨有海氣象問題的客製化策略

為提升臺灣港群的營運韌性與安全，必須針對各商港獨有的地理特性與海氣象問題，採取客製化、精準化的技術解決方案：

1. 長浪與港池共振預警：針對基隆港、花蓮港、高雄港等面臨湧浪或長週期波威脅的港口，必須建置高精度的長週期波預警系統，並整合至數位孿生模型。利用數位孿生系統在虛擬環境中模擬波浪的傳遞與共振效應，以即時預測船隻的低頻移動，提前向引水人和港務單位發出警示，降低船體撞擊碼頭或斷纜的風險，從而維持裝卸作業的穩定度與繫泊安全。基隆港應整合即時警報自動調整靠泊順序；花蓮港應強化地震與海嘯之數位孿生應變模擬。
2. 微氣象風場預測：針對冬季東北季風對臺中港和離島港口造成的關鍵影響，開發高解析度風場預測與作業閾值模型，有助提升引水作業、船舶登輪的安全作業，優化冬季封港決策的精準性，並為橋式起重機等高架設備提供動態安全作業閾值。臺中港應結合海流數據建立「預測性疏浚排程」以優化資源分配；離島港口應將海氣象數據整合至客運排程，改善旅客體驗。離島港口應將海氣象數據整合至客運排程，改善旅客體驗。
3. 淤積與航道優化管理：針對臺中港、安平港、布袋港等面臨嚴重泥沙淤積問題的港口，應整合潮汐、海流、河川流速預測與海象觀測等數據，運用 AI 模型建立泥沙漂移與淤積預測模型，優化航道疏浚作業的排程與效率，將高成本疏浚轉為計畫性維護，確保船舶吃水深度與通航安全。
4. 供應鏈協同與 ESG(全國)：建置「Port 智慧 IP」與航商共享預報資訊，優化船舶到港時間，減少等待本；擴大 ESG 指標追蹤海氣象相關碳排放，符合 IMO 要求；追蹤海氣象相關之碳排放與能源調度(如岸電使用優化)。
5. 危機管理：開發包含流程圖的「海氣象應變手冊」，提升在暴潮或極端天氣下的決策速度。

(二) 深化與優化海氣象環境資訊整合平臺功能

我國港群應以現行商港海氣象資訊系統為基礎，借鏡國際標竿港口(如鹿特丹港網站、西班牙 PORTUS 網站、日本 NOWPHAS 網站)經驗，將其功能從單純的資料視覺化，深化為具備資料互通與高階預報服務能力的決策支援中樞。

1. 落實資料標準化與跨域互通：平臺必須超越現有的資料匯流功能，著重於解決跨域資料孤島問題，與中央氣象署、海洋委員會及學術界等單位，及港務公司內部營運系統達成標準化交換協議，建立統一的數據治理體系。並優先導入國際海事組織(IMO)的標準，做為海氣象數據的交換骨幹，確保即時彙集來自各測站的觀測數據，包括浪高、潮位、流速、風速、風向等關鍵環境參數，實現高階資料的即時分析與品質管理。
2. 整合高解析度與多時間尺度預報服務：在現有系統的基礎上，應積極整合高解析度數值模式預報結果(如浪況、潮流、水位)，將其做為多層次服務的核心。短期(數小時至數日)預報

服務應著重於導入極高解析度、針對特定微區域的高精度預報，以支援港口靠泊、拖船調度及施工安全等即時營運決策。長期服務則須建立更精確的歷史與氣候資料庫，用於港口基礎設施的耐受性設計、防洪防潮規劃及氣候變遷風險評估。

3. 建置開放式標準 API 服務：為實現與下游營運系統的機器對機器(M2M)自動化連動，平臺必須提供具備高度標準化與可擴展性的 API 介接服務。這確保海氣象資訊能無縫、即時地傳輸至船舶自動化導航、裝卸設備控制及其他業務系統。

(三) 導入 AI 演算法與數位孿生實現預測性決策

應將海氣象數據視為數位孿生系統進行高精度模擬與預測的關鍵數據源，並結合 AI 演算法，促使港口決策模式從傳統依賴「規則庫(Rule-based)」進化到「數據驅動(Data-driven)」的主動規劃模式。

1. 高階預測與營運優化：應用 AI 演算法(如上海港案例)，將風速、浪高、潮位、能見度等參數與港務作業資料整合，用以支援動態優化船舶靠泊時間，並根據即時海氣象條件，為引水人和港務單位提供精確的航道風險評估；並實現橋式起重機的作業自主化，根據海氣象預報自動調整工作限速與作業安全閾值，以有效降低強風造成的風險並提升作業穩定度。
2. 強化航行與資產安全：仿效寧波-舟山港模式，開發或整合海霧/能見度監測系統，配合自動氣象站，強化 VTS 的航行警示功能，以降低濃霧或豪雨造成的交通風險。另外，利用數位孿生系統的模擬能力，在虛擬環境中對極端海象(如颱風、暴潮)進行情境推演與壓力測試。這將有助於港口制定和測試最有效的應變和恢復方案，提升營運韌性。

(四) 連結海氣象數據至永續發展與韌性管理

將海氣象數據的應用延伸至實現港口淨零碳排目標與營運韌性，分述如下：

1. 綠色能源智慧調度：借鑒青島港的經驗，將海況數據(如潮位、波高)與港內能源管理系統連動，透過數位孿生系統模擬港區能源流動與消耗模式，優化岸電設施使用排程，做為設備作業安全閾值的依據，並協助量化追蹤與控制碳排放，實現淨零碳排目標。
2. 韌性風險監管：參考安特衛普港的「安全操作孿生」模式，利用數位孿生整合海氣象參數、船舶動態與資安狀態等異質資訊，提供全方位的可視化與可預測性，有助於面對複雜或高風險決策時，確保獲得科學且即時的數據支持。

五、結論與建議

隨著全球氣候變遷加劇與供應鏈韌性需求的提升，智慧港口的發展軌跡已從作業自動化，邁向利用大數據、人工智慧與物聯網建構「數位孿生」的高階應用階段。海氣象資訊做為港灣作業安全的基石，其整合應用對於提升港埠營運效率、降低災害風險具有不可取代的關鍵地位。國際標竿智慧港口已普遍將海氣象數據視為智慧化營運的核心資產，透過整合至 AI 預測模型

和數位孿生系統中，實現全方位、多層次的預測與模擬，這不僅保障了供應鏈的連續性，更是港口實現永續發展的基礎。本文藉由探討智慧港口發展趨勢及國際標竿案例，清晰地驗證了海氣象資訊已從單純「防災參考」，轉變為提升港口營運效率與國際競爭力的核心策略資產。未來應強化數據驅動之決策模式，並納入投資回報(ROI)評估，證明海氣象平臺對於燃料節省（如鹿特丹港案例）與提升營運韌性的實質經濟效益。

臺灣位處氣候複雜區域，推動 Trans-SMART 2.0+ 升級計畫時，應更著重軟實力與數據治理體系的建構，透過下述策略期能有效提升安全、效率與永續韌性，全面達成智慧港口願景。

- (一) 打破數據孤島：建立統一的數據共享平臺，整合海側(航行、氣象)、陸側(交通、倉儲)與管理數據。藉由打破數據孤島與建構客製化策略，臺灣港群將能有效應對極端氣候挑戰，成為具備國際競爭力的智慧韌性港口。
- (二) 導入 AI 預測技術：應用 AI 深度學習，開發針對長週期波共振、泥沙淤積速率以及極端氣候封港預警的高精度預測模型。
- (三) 建立決策支援系統：打造以作業情境為導向的智慧決策支援系統，將預測結果直接轉化為具體的調度建議(例如繫泊調整、裝卸中斷時機等)。
- (四) 量化效益：如燃料節省、事故率下降及船舶週轉率提升之營收增加，證實海氣象平臺之社會與經濟價值，吸引更多國際航商對我國港口的黏著度。

參考文獻

1. Chang, C. H., & Huang, Y. C.(2023), “Integrating marine meteorological data for smart port operations: A Taiwan case study”, *Journal of Coastal and Ocean Engineering*, 45(2), 87–101.
2. IMO(2021), “Guidelines for port resilience and climate adaptation”, International Maritime Organization.
3. Kulkarni, S. (2021), “Digital twin applications in river ports”, *Transportation Research Part C*.
4. Low, J., & Ng, A. (2021), “Smart port and digital twin applications in Singapore”, *Maritime Policy & Management*.
5. Maritime and Port Authority of Singapore(2022), “Digitalisation blueprint & VTMS development”.
6. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD)(2020), “The future of ports: The digital challenge”, OECD Publishing.
7. Port of Antwerp-Bruges(2022), “Digital twin & safety management whitepaper”.
8. Port of Rotterdam(2022), “Digital twin applications for port operations”, Port Authority Report.
9. Port of Rotterdam Authority(2020), “PortXchange & digital twin development”.
10. Shi, Y., & Li, M.(2021), “Digital twin-enabled smart port operation and management”, *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Port*.
11. UNCTAD(2021), “Review of maritime transport 2021”, United Nations Conference on Trade and Development.

12. Wang, Z., Zhang, J., Guo, J., & Zhang, J. (2023), "Digital twin-driven control system for automated container terminal", *Journal of Advanced Transportation*, 2023.
13. World Bank(2022), "Resilient ports and sustainable logistics".
14. 國家災害防救科技中心(2021), 極端氣候下臺灣沿海地區暴潮溢淹風險評估與調適策略。
15. 臺灣港務股份有限公司臺中港務分公司(2022), 臺中港航道淤積與維護工程報告。
16. 劉昆哲(2022), 因應科技創新發展智慧港埠之策略(碩士論文), 國立臺灣海洋大學。
17. 臺灣港務股份有限公司智慧港口專區, <https://www.twport.com.tw/smartport/>。
18. 陳姿瑩(2024), 臺灣與日本發展智慧港口關鍵影響因素(碩士論文), 國立臺灣海洋大學。
19. 蔡仁杰(2024), 自動化港口作業:臺灣自駕船舶及智慧港口現況與未來發展(碩士論文), 國立臺灣海洋大學。