

## 駛上駛下船港口國管制貝葉斯評估\*

張莞莘\*、翁順泰\*\*、陳彥宏\*\*\*

### 摘要

駛上駛下船(Roll-on/roll-off ship, RORO ship)發生海難涉及人員傷亡的件數仍居高不下，且近年海難件數未成減少趨勢。當前就 RORO 船的海事安全研究相對其他船種較少，為有效減少船舶發生海難事故，確保船舶符合國際公約規範，港口國管制是一種重要手段。本研究以貝葉斯方法分析 2015 至 2024 年間於 Tokyo MOU 被記缺失之 RORO 船，分析 RORO 船最容易被記缺失之項目及其滯留風險，並探討導致被記缺失項目或滯留的關鍵因素。分析表明，RORO Passenger 被記人安相關的缺失比例更高，RORO Cargo 則除了人安，包括航安與勞工條件，且 RORO Cargo 比 RORO Passenger 滯留率更高。當 RORO Cargo 被記 Structural Conditions 或 Others 時，以及當 RORO Passenger 被記 Others、ISM 或 Safety of Navigation 時，滯留率都會大幅提升。30 年以上的 RORO 船滯留率明顯提升。

關鍵詞：RORO Cargo、RORO Passenger ship、貝葉斯、港口國管制

### 壹、前言

海事安全一直是備受重視的議題，除了船舶事故肇因分析、船舶航行行為分析、海難事故人為因素分析等研究能有效提升航行安全外，提升船舶港口管制檢查效力、

---

\* 承蒙航港局「船舶智慧檢查管制系統建置案」工作團隊協助下載 Tokyo MOU PSC RoRo 船舶檢查歷史資料，謹申謝忱。

\* 國立臺灣海洋大學輪機工程學系(商船組)博士候選人，學術專長為海事風險評估、商漁船海難事故分析、港口國管制分析、貝葉斯網路模型建構、貝葉斯結構學習、聚類分析。EMAIL: wanhsin@mail.ntou.edu.tw。

\*\* 國立臺灣海洋大學商船學系教授，英國利物浦約翰摩斯大學海運技術博士，學術專長為海事安全、海事風險評估、海難事故分析、貝葉斯網路模型建構、近似推論模型建構。EMAIL: shuntai@mail.ntou.edu.tw。

\*\*\* 英國威爾斯大學海洋事務與國際運輸學博士，台灣海事安全與保安研究會理事長，新台灣國策智庫諮詢委員，國家運輸安全調查委員會諮詢委員，海事仲裁人。EMAIL: solomonyhchen@gmail.com。

減少次標準船，亦有利於促進海事安全。航行安全議題一直是國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 最重視的議題之一，故不斷制定、更新海事安全相關法規公約，為了確保船舶符合國際公約要求規範，締約國須以港口國管制 (Port State Control, PSC) 針對外籍船舶進行檢查，以確保船舶符合國際公約、區域協定、國內相關法規之最低標準，PSC 是一種有效促進船安、人安、貨安的重要方式。

現有海事安全研究多數聚焦在散裝船、雜貨船、貨櫃船、油化船等事故數較多的船種，就駛上駛下船 (Roll-on/roll-off ship, RORO ship) 相關研究相對少。RORO 船在載客、載貨方面具有靈活性，且能更好的與其他運輸方式整合，加快登離船效率 (Emsa, 2018)，使 RORO 船在許多航線佔有一定的市場。然而，由於 RORO 船的設計使該類船舶在駛上駛下作業時存有特定風險 (Emsa, 2018)，根據歐洲海事局 2021 年年報 (Emsa, 2022)，客船傷亡事件中，僅載客之客船 (passenger ships carrying only passengers, OP) 及載客載滾裝貨物之客船 (ships carrying passengers and Ro-Ro cargo, PRC) 的傷亡總數各佔一半。此外，該年報指出，2014 至 2020 年間，貨船發生事故件數超過歷年平均的船種共有 4 種，其中包括駛上駛下船 (RoRo cargo)，且在此期間，該船種每年發生事故件數皆維持在 200 至 300 件，未有下降趨勢。在 Tokyo Mou (2023) 發佈的 Annual Report on Port State Control in the Asia-Pacific Region 2023 中表 5，各類船種之港口國檢查中，RORO Cargo 的滯留率高達 13.64%，排行第二高。

故本研究將以 RORO 船舶為例，以貝葉斯分析 RORO 船舶於港口國管制時最容易被記缺失項目及其滯留風險，並探討導致被記缺失項目的關鍵因素，以提升海事安全，供航政主管機關、船東、貨主等多方參考。

## 貳、文獻回顧

### 一、貝葉斯港口國管制分析

貝葉斯模型是一種海事安全分析常用的方法。該方法能藉由節點間因果關聯，以機率的方式進行推論，能在指定條件下推論船舶發生事故、被記缺失、是否滯留的機率，並能反推論船舶發生事故、被記缺失、是否滯留的關鍵原因及最不利的狀態組合。且具有結合質化及量化的優點，能在基於客觀數據的基礎上結合專家學者意見，使模型更加貼近實務應用。

Hänninen et al. (2014) 以 NPC 演算法 (Necessary Path Condition Algorithm) 及爬山演算法 (Hill-Climbing Algorithm) 建立貝葉斯模型，分析港口國管制檢查中，各種缺失種類之

間的關聯，及各種缺失種類與船舶海難之間的關聯。Yang et al. (2018) 分析 2005 年至 2008 年巴黎諒解備忘錄(Paris MoU)中七個歐洲主要國家散裝貨船的檢驗數據，以樹增強型貝葉斯(Tree Augmented Naive Bays)分析影響 PSC 檢查的風險因素，並預測船舶滯留的機率。Fan, Zhang, et al. (2019) 以貝葉斯模型探討了 PSC 檢查對船舶事故及下次檢查時船舶安全等級的影響，並將船舶的固有屬性和檢查之間的時間間隔納入考量。結果表明，首次檢查的安全等級，顯著影響第二次檢查的時間間隔和安全等級。最好選擇中等檢驗時間間隔的船舶進行檢驗，可有效提升船舶安全品質。Yang et al. (2021) 透過將貝葉斯網路融入理想解相似排序技術(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)方法中，提出了一種新的船舶滯留風險控制方法，並動態地衡量每種策略在降低滯留率的有效性。Fan, Wang, et al. (2019) 透過貪婪演算法(Greedy thick thinning, GTT)學習模型結構，並使用 K 折交叉驗證(K-fold cross validation)、對數似然函數(log-likelihood function, LL)和 AIC 準則(Akaike Information Criterion, AIC)評估各種因素對船舶風險等級和事故後果的影響，研究結果表明，船齡、船種和 PSC 檢驗水準對船舶風險等級的影響最為顯著。

## 二、考量 RORO 船之港口國檢查分析

雖然較少研究專注於 RORO 船的 PSC 檢查分析，然而仍有諸多研究分析多船種的 PSC 檢查，這些研究中，部分研究將 RORO 船納入考量。Şanlıer (2020) 分析了 2012 年至 2017 年在黑海備忘錄(BS MoU)PSC 檢查中發現的船舶缺陷和滯留記錄。研究發現，滯留的主要因素是船齡，且船型、船旗國、RO 及檢驗機構的影響顯著。Cariou et al. (2008) 使用瑞典海事管理局(1996-2001)資料分析船舶特徵如何影響兩次港口國控制檢查(PSC) 之間的時間間隔以及 PSC 期間的缺失數量，研究表明船齡、船舶類型和船旗似乎是重要的預測因子，該文獻提及客船和滾裝客船(RORO Passenger)更常接受重複檢查，且與其他船舶類別相比，客船和滾裝客船似乎也表現出更多的缺陷。Cariou et al. (2007) 利用瑞典海事管理局 1996 年至 2001 年期間 PSC 報告分析影響船舶缺失的因素，並發現檢查時的船舶年齡、船舶類型和船旗是決定性的三個主要因素。此外，該文獻提及客船和滾裝客船的缺陷較多，且多數缺陷出現在船齡約為 22 年的滾裝客船上。Kim et al. (2014)透過分析 Tokyo MOU 及韓國海洋漁業署之 PSC 檢查資料分析船舶被記缺失率及滯留率。研究表明被記缺失率及滯留率皆成減少趨勢，然而超過 30 年的船舶、權宜船、RORO 船及雜貨船、1000 噸以下船舶的被記缺失率及滯留率高居不下。

## 參、方法論

本研究先採用貝葉斯網路分析變量之間因果關係及影響，評估導致駛上駛下船被記缺失及滯留之影響因素，參考相關文獻之節點關聯建立模型結構，並以專家學者意見酌修。建構駛上駛下船港口國管制貝葉斯評估模型，可用貝葉斯推論邊際機率機制得出船舶滯留機率及被記各項缺失之機率，並以後驗機率機制找出被記缺失及滯留的關鍵原因，以及針對特定船舶實施情境分析得出滯留機率及被記各項缺失之機率。

## 一、資料收集

收集 Tokyo MOU 中，2015 年至 2024 年被記缺失之 RORO Cargo 及 RORO Passenger 船舶之總缺失數，並包含 8 個項目，即船舶缺失項目(Defective Item)、是否滯留(Detention)、被記缺失數(Number of deficiencies)、檢查類型(Inspection Type)、被認可組織之表現(Performance of Recognized organization(RO))、總噸位(Gross Tonnage)、船齡(Ship Age)、船舶風險等級(Ship Risk Profile, SRP)。2015 年至 2024 年間，RORO Cargo 受檢船舶(Individual ship)共 239 艘，檢查次數 1115 次，被記缺失計 5917 件；RORO passenger 受檢船舶(Individual ship)合計 83 艘，檢查次數 1359 次，被記缺失計 4783 件。表 1 及表 2 分別為 RORO Cargo、RORO Passenger ship 課題變數與狀態。

根據被記缺失船舶之被認可組織，對應 Tokyo Mou (2023)發佈的 Annual Report on Port State Control in the Asia-Pacific Region 2023 中表 13 之被認可組織之表現(Performance of Recognized Organization)進行分類，被認可組織之表現共分為低(Low)、中(Medium)、高(High)三類，部分 RO 不在該表計算範圍內，本模型將其列為 NA。此外，依據 2015 年至 2024 年被記缺失之 RORO 船舶中，未包含 RO 表現為低(Low)之數據，故本模型之被認可組織之表現僅包括高(High)、中(Medium)、NA。

船舶缺失項目係依照 Tokyo MOU deficiency codes 進行劃分，共包含 17 個大項：

- |   |  |
|---|--|
| 01 Certificate & Documentation<br>證書及文件     | 06 Cargo operations including<br>equipment 包括設備在內的<br>貨物操作 |
| 02 Structural Conditions 船舶結<br>構狀況條件       | 07 Fire safety 消防安全  |
| 03 Water/Weathertight<br>condition 防水/防風雨狀況 | 08 Alarms 警報   |
| 04 Emergency Systems 應急系<br>統               | 09 Working and Living<br>Conditions 工作生活條件                 |
| 05 Radio Communications 無線<br>電通訊           | 10 Safety of Navigation 航行安<br>全                           |

- |    |  |    |                        |
|----|--|----|------------------------|
| 11 | Life saving appliances 救生設備                | 15 | ISM 船舶安全營運與污染防止國際管理章程  |
| 12 | Dangerous goods 危險品                        | 18 | Labour Conditions 勞動條件 |
| 13 | Propulsion and auxiliary machinery 推進和輔助機械 | 99 | Other 其他               |
| 14 | Pollution prevention 污染防治                  |    |                        |

為了有效分析模型，所建構之模型皆依據數據特徵對節點狀態進行調整，將樣本數較少的節點狀態進行合併，在 RORO Cargo 港口國管制貝葉斯模型中，將 6-Cargo operations including equipment、8-Alarms、12-Dangerous goods、99-Other 進行合併，在 RORO Passenger ship 港口國管制貝葉斯模型，將 5-Radio Communications、8-Alarms、12-Dangerous goods、99-Other 進行合併。

考量多數船舶被計缺失總數集中於 5 項以下，故 5 項內分為 1-3 次、4-5 次而後為 6-10 次、11-15 次、16-20 次、超過 20 次。檢查種類分為初次檢查(Initial)及追蹤檢查(Follow-up)，此分類包含遠端初次檢查及遠端追蹤檢查。滯留分為是、否兩種狀態。船齡及總噸位則根據兩種船舶的數據分佈劃分，將數量較少者合併、將分佈較密集者再細分，如 RORO Cargo 船齡 30 以上，再分為 31-35 年及超過 35 年。船舶風險等級分為高風險船舶(High Risk Ship)、中風險船舶(Standard Risk Ship)、低風險船舶(Low Risk Ship)及未記錄(None)。

表 1 RORO Cargo 課題變數與狀態

Node	States						
Nb of deficiencies	1-3	4-5	6-10	11-15	16-20	Over 20	
Defective item	Fire safety	Safety of Navigation	Labour Conditions	Certificate & Documentation	Life saving appliances	Propulsion and auxiliary machinery	Water/Weatheright conditions
	Emergency Systems	Pollution prevention	ISM	Structural Conditions	Radio Communications	Working and Living Conditions	Others(Other/DG/Alarms /Cargo operations)
Inspection Type	Follow-up	Initial					
Detention	No	Yes					
Performance of RO	High	Medium	NA				



Node	States						
Ship Age	0-10 years	11-15 years	16-20 years	21-25 years	26-30 years	31-35 years	Over 35 years
Gross Tonnage	0-5000	5001-10000	10001-15000	15001-20000	Over 20000		
Ship Risk Profile	High Risk Ship	Standard Risk Ship	Low Risk Ship	None			

表 2 RORO Passenger 課題變數與狀態

Node	States						
Defective item	Cargo operations including equipment	Certificate & Documentation	Emergency Systems	Fire safety	ISM	Labour Conditions	Life saving appliances
	Pollution prevention	Propulsion and auxiliary machinery	Safety of Navigation	Structural Conditions	Water/ Weathertight conditions	Working and Living Conditions	Others(Radio Communications / Alarms/DG)
Nb of deficiencies	1-3	4-5	6-10	11-15	16-20	Over 20	
Inspection Type	Follow-up	Initial					
Detention	No	Yes					
Performance of RO	High	Medium	NA				
Ship Age	0-10 years	11-15 years	16-20 years	21-25 years	26-30 years	Over 30 years	
Gross Tonnage	0-10000	10001-15000	15001-20000	20001-25000	25001-30000	30001-35000	Over 35000
Ship Risk Profile	High Risk Ship	Standard Risk Ship	Low Risk Ship	None			

## 二、貝葉斯模型建構

依照 Tokyo MOU 中，2015 年至 2024 年 RORO 船舶被記缺失之總件數，建構 RORO Cargo 港口國管制貝葉斯模型及 RORO Passenger ship 港口國管制貝葉斯模型。貝葉斯模型包含 8 個節點，各節點關聯係參考專家學者意見及國際相關文獻(Dinis et al., 2020; Fan, Zhang, et al., 2019; Hänninen et al., 2014; Jiang et al., 2023; Wang et al., 2021; Yang et al., 2018)建構，並由專家學者意見進行最終修訂。

貝葉斯推論(Bayesian inference)是一種基於貝葉斯定理、以機率表示的方法。該方法是一種基於事件的前置信念(Prior belief)，並藉由獲得新的證據(Evidence)不斷更新模

型的方法。前置信念可為歷史數據或專家學者主觀信念，前置信念構成先驗機率，再根據節點間因果關係構成條件機率(Conditional probability)、聯合機率(Joint probability)、邊際機率(Marginal probability)，藉由貝葉斯推論可獲得後驗機率(Posterior probability)。貝葉斯網路圖為有向無環圖(Directed acyclic graph, DAG)，隨機變數以節點(Node)表示，以弧(Arc)表示兩者之間的依賴關係，由母節點(因)指向子節點(果)。

令 $y_j$ 代表第 $j$ 個母節點， $n$ 表示母節點狀態，母節點 $y_j$ 共有 $N$ 種狀態， $P(y_j)$ 表示第 $j$ 個母節點之先驗機率。令 $x_i$ 代表缺失的項目， $x_i$ 受 $J$ 個母節點影響，當 $x_i$ 屬於第 $i$ 種狀態( $i$ 可為 Fire safety、Safety of Navigation 等)時之邊際機率值可用第(1)式取得。

$$P(x_i) = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N P(x_i|y_{jn})P(y_{jn}|y_j)P(y_j) \quad (1)$$

$P(x_i|y_{jn})$ 表示第 $j$ 個母節點在第 $n$ 種狀態條件下，缺失項目為第 $i$ 種狀態時之條件機率； $P(x_i)$ 為所有母節點在缺失項目 $x_i$ 時之邊際機率。

若缺失項目百分之百為第 $i$ 種狀態時，則由第(2)式可得知第 $j$ 個母節點在第 $n$ 種狀況時造成缺失項目百分之百屬於第 $i$ 種狀態之貢獻程度，即該節點對於 $x_i$ 完全屬於第 $i$ 種狀態之後驗機率。

$$P(y_{jn}|x_i) = \frac{P(x_i|y_{jn}) \cdot P(y_{jn})}{P(x_i)} \quad (2)$$

$P(y_{jn})$ 表示母節點 $y_j$ 在第 $n$ 狀態時之先驗機率； $P(x_i|y_{jn})$ 表示母節點 $y_j$ 在第 $n$ 狀態時，缺失項目 $x_i$ 在第 $i$ 種狀態之條件機率； $P(y_{jn}|x_i)$ 表示在缺失項目為第 $i$ 種狀態時，母節點 $y_j$ 在第 $n$ 狀態之後驗機率。

本研究藉由分析包括一次檢查中被記缺失數、檢查類型、被認可組織之表現、總噸位、船齡、船舶風險等級，可以第(1)、(2)式之貝葉斯推論得出船舶被記各項缺失的可能性，並反推後驗機率，得出造成這些缺失項目的變數組合及關鍵因素，即遴選出高風險船舶。此外，藉由後驗機率分析，本研究可針對特定船舶依據其檢查類型、被認可組織之表現、總噸位、船齡、船舶風險等級等背景資訊實施情境分析，可即時推論船舶被記各項缺失及滯留的可能性。

### 三、模型驗證

以下兩項公理用於驗證貝葉斯模型之可行性：

公理一：當母節點參數狀態微幅增加或減少時，子節點必定相應增加或減少。

公理二：多個母節點(其狀態具有同質趨勢)狀態同時增加或減少，影響子節點之相應改變量，應大於一個母節點增加或減少所導致之改變量。

本研究將以是否滯留作為驗證之子節點，將檢查種類及被記缺失數作為變動母節點。當檢查種類及被記缺失數微幅增加或減少時，滯留節點之機率變動量及變動趨勢，將用於驗證模型。如第(3)式所示， $P(x_{i,old})$ 表示「被滯留」之模型原始機率， $P(x_{i,new})$ 表示當變動母節點改變後，「被滯留」之更新機率，兩者差的絕對值以 $V(x_i)$ 表示，並以此作為衡量影響子節點之改變量。

$$V(x_i) = |P(x_{i,new}) - P(x_{i,old})| \quad (3)$$

## 肆、案例分析

### 一、駛上駛下船港口國管制貝葉斯評估模型

在所收集 Tokyo MOU 港口國管制被記缺失的船舶資料中，本研究提取 8 個項目用於建構模型，即船舶缺失項目、是否滯留、被記缺失數、檢查類型被認可組織之表現、總噸位、船齡、船舶風險等級。本模型係參考相關文獻(Dinis et al., 2020; Fan, Zhang, et al., 2019; Jiang et al., 2023; Wang et al., 2021)及專家學者建議建構因果關係，如圖 1 所示，此方式建構之模型能更加貼近實務應用。

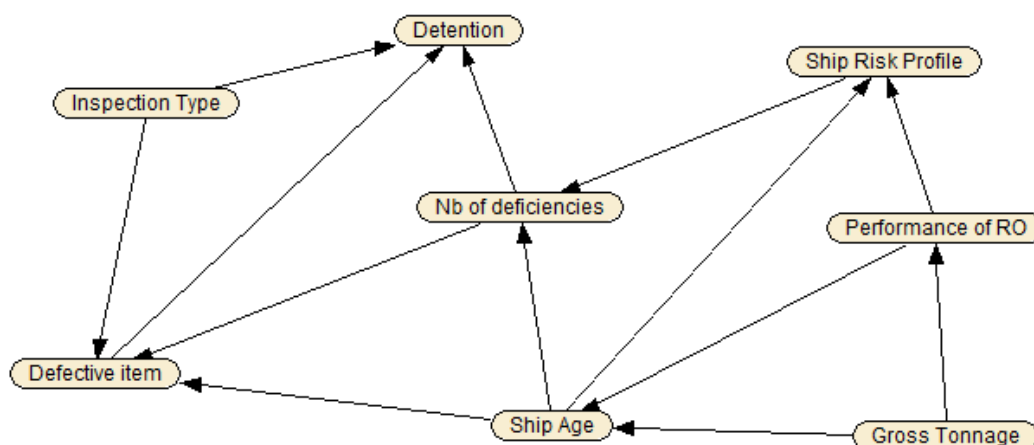


圖 1 貝葉斯因果關聯圖



為了增加模型分析的準確性，本模型研究對象分為 RORO Cargo 及 RORO Passenger，並對此兩種船型分別以歷史數據驅動建立圖 2 及圖 3 的模型。在歷史文獻中，部分基於結構學習的貝葉斯模型中發現，總噸位會影響船齡及 RO 表現；在 Tokyo MOU 對 SRP 的判定標準中即包括 RO 表現及船齡，故 RO 表現及船齡會影響 SRP。船齡越大缺失數量往往越多，故船齡影響缺失數，此外，RO 表現與檢查次數、記缺失數及滯留數有關，故 RO 表現會間接影響船齡分佈。SRP 中，風險越高被記缺失數往往越多，故 SRP 會影響船舶被記缺失數。船舶被記缺失數越多，往往越容易造成滯留，被記缺失數量多寡會影響被記缺失項目。不同船齡被記缺失項目的主因不同，例如船齡越大被記 Propulsion and auxiliary machinery 缺失的比例會整體增加。

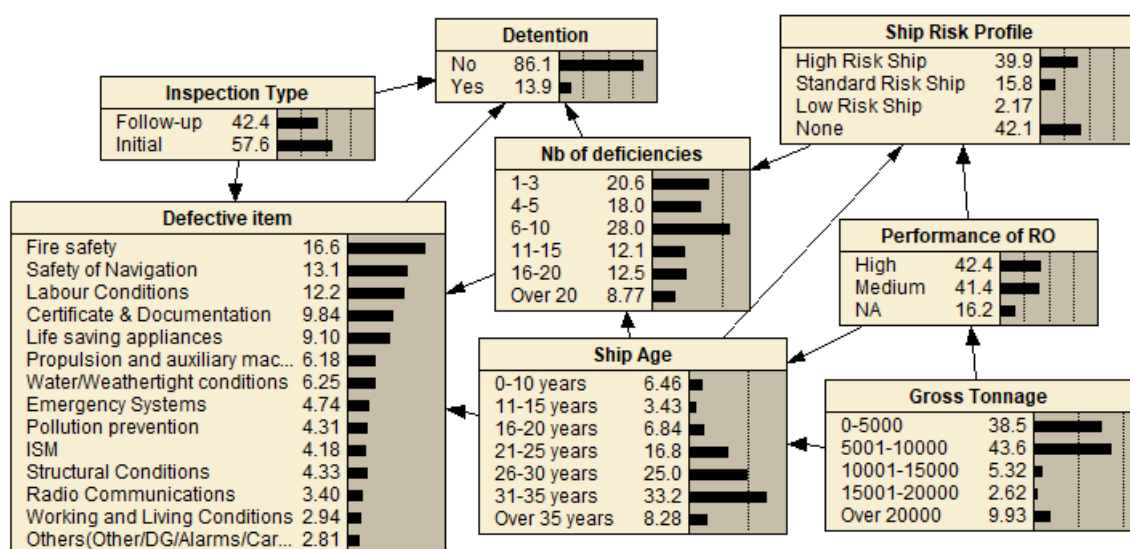


圖 2 RORO Cargo 港口國管制貝葉斯模型

由圖 2 可知，RORO Cargo 的滯留率為 13.9%；主要被記缺失項目包括 Fire safety、Safety of Navigation、Labour Conditions、Certificate & Documentation、Life saving appliances；有六成五左右被記缺失數在 1 至 10 項內；被記缺失的船舶中，高風險船舶及未定義 SRP 的船舶約各佔四成；RO 表現為高、中度的船舶各佔四成；被記缺失的 RORO Cargo 多數為 10000 以下的船舶，且船齡介於 21-35 年。

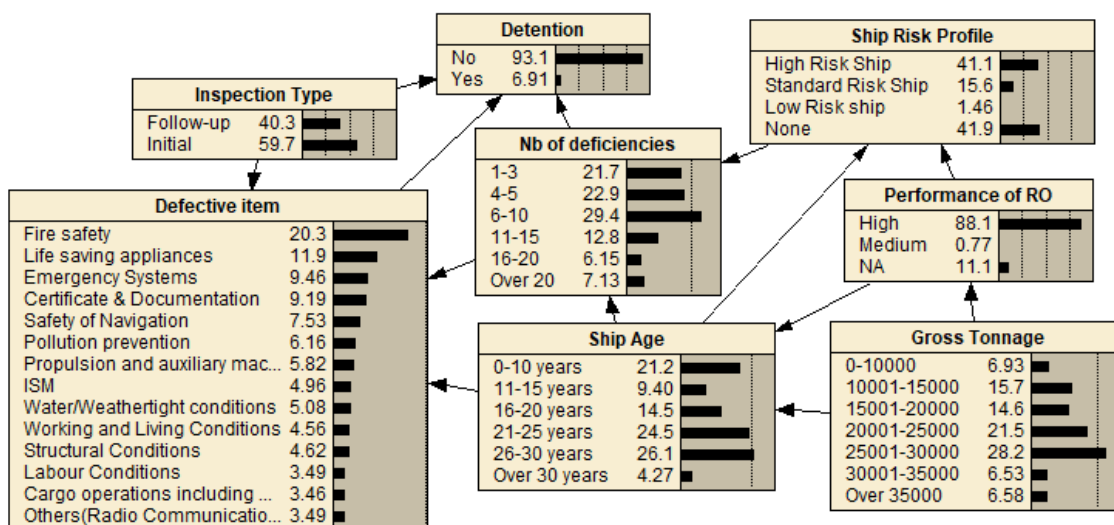


圖 3 RORO Passenger 港口國管制員葉斯模型

由圖 3 可知，RORO Passenger 的滯留率相比 RORO Cargo 大幅下降為 6.91%，且主要被記缺失項目亦不同，主要包括 Fire safety、Life saving appliances、Emergency Systems、Certificate & Documentation。船舶被記缺失數量更集中於 10 項以內，約佔七成；SRP 分佈比例與 RORO Cargo 相似，高風險船及未定義 SRP 船舶各佔四成；RO 表現分佈與 RORO Cargo 迥異，近乎九成為高度表現；總噸位主要介於 20001-30000，約佔五成，其次為 10001-20000，約三成；有五成船齡介於 21-30 年，兩成為 0-10 年。

對比 RORO Cargo 及 RORO Passenger 可知，RORO Cargo 整體船齡大於 RORO Passenger，且滯留率更高、被記 10 項以上缺失的船舶更多、RO 表現中度的數量更多。RORO Passenger 被記缺失項目高比例與人安相關，包括 Fire safety、Life saving appliances、Emergency Systems，而 RORO Cargo 則除了人安，更加注重航安與勞工條件。

## 二、模型驗證

為了驗證模型符合公理一：當母節點參數狀態微幅增加或減少時，子節點必定相應增加或減少；以檢查種類及滯留節點為例，並設立情境一至三，表示當追蹤檢查的機率逐漸增加的情況，及情境四至六，追蹤檢查的機率逐漸減少的情況，如表 3 所示。表 3 包含母節點檢查種類的機率變動，及子節點滯留由模型變動後輸出之機率，最後以第(3)式計算各情境下「被滯留」之變動量。由表 3 可知，當母節點增加或減少之幅度越大，其改變量亦越大，故符合公理一。

表 3 單一母節點改變之滯留節點變動量

Node		Original	Situation 1	Situation 2	Situation 3	Situation 4	Situation 5	Situation 6
Inspection Type	Follow-up	0.4244	0.5	0.8	1	0.3	0.2	0
	Initial	0.5756	0.5	0.2	0	0.7	0.8	1
Detention	No	0.86096	0.87466	0.92905	0.9653	0.83841	0.82028	0.78402
	Yes	0.13904	0.12534	0.070954	0.034699	0.16159	0.17972	0.21598
	Variation	<b>0</b>	<b>0.0137</b>	<b>0.068086</b>	<b>0.104341</b>	<b>0.02255</b>	<b>0.04068</b>	<b>0.07694</b>

公理二指多個母節點(其狀態具有同質趨勢)狀態同時增加或減少，影響子節點之相應改變量，應大於一個母節點增加或減少所導致之改變量，故設立三種情境，如表 4 所示。情境一為被記缺失數為 6 至 10 項的條件，情境二為檢查種類為追蹤檢查的條件，情境三為被記缺失數為 6 至 10 項且為追蹤檢查的條件，情境一、二皆為單一母節點變動的情況，情境三為多母節點變動的情況。對比三種情境，並依據第(3)式計算模型輸出之滯留變動量，可知多母節點變動的情境三之變動量(0.120739)，大於單一母節點變動的情境一(0.02369)及情境二(0.104341)，故符合公理二。

表 4 多母節點改變之滯留節點變動量

Node		Original	Situation 1	Situation 2	Situation 3
Inspection Type	Follow-up	0.4244	0.4244	<b>1</b>	<b>1</b>
	Initial	0.5756	0.5756	0	0
Nb of deficiencies	1-3	0.20619	0	0.20619	0
	4-5	0.17995	0	0.17995	0
	6-10	0.2797	<b>1</b>	0.2797	<b>1</b>
	11-15	0.12096	0	0.12096	0
	16-20	0.12549	0	0.12549	0
	Over 20	0.087702	0	0.087702	0
Detention	No	0.86096	0.88465	0.9653	0.9817
	Yes	0.13904	0.11535	0.034699	0.018301
	Variation	<b>0</b>	<b>0.02369</b>	<b>0.104341</b>	<b>0.120739</b>

### 三、駛上駛下船港口國管制貝葉斯評估模型因果推論

貝葉斯模型可用於因果推論，可藉由指定船舶特徵推論最可能被記缺失之項目，以圖 4 實際案例為例，船名 STENA EGERIA(IMO number：9243447)的船舶，總噸位 24418、船齡 17 年初次檢查，最可能被記 6-10 項缺失，且最可能被記的缺失為 Fire safety、Certificate & Documentation、Life saving appliances，滯留率為 10.1%，且該類船舶 SRP 最可能為高風險。該船舶實際於 2017 年 3 月 30 日初次檢查，被記 7 項缺失，包括 2 項 Fire safety、2 項 Certificate & Documentation、2 項 Life saving appliances、1 項 Water/Weathertight conditions，該船舶在檢查記錄中為高風險船舶。

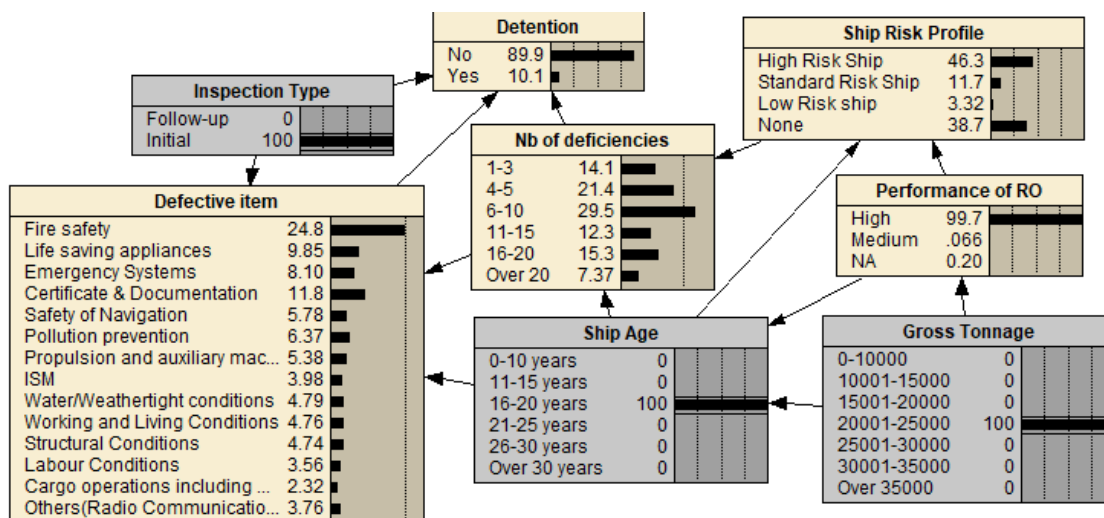


圖 4 RORO Passenger 貝葉斯推論案例

貝葉斯模型亦可由滯留反推論最有可能被滯留之船舶特徵，以圖 5 為例，被滯留的 RORO Cargo 往往於初次檢查時被滯留，且常會同時被記 16-20 項缺失，最常因 Fire safety、Safety of Navigation、Certificate & Documentation、Labour Conditions、Life saving appliances 被滯留，被滯留的 RORO Cargo 最有可能是 31-35 年、5001-10000 總噸位的船舶，其 RO 表現多為中。以其中一件實際案例為例，船名為 SUN RIO(IMO number：9030644)的船舶於 2022 年 4 月 11 日初次檢查時，被記 26 項缺失，並因 1 項 ISM、1 項 Pollution prevention、2 項 Fire safety、3 項 Safety of Navigation、4 項 Certificate & Documentation、1 項 Life saving appliances 缺失而滯留，該船受檢時為 31 年、總噸位 7580 的高風險船舶。

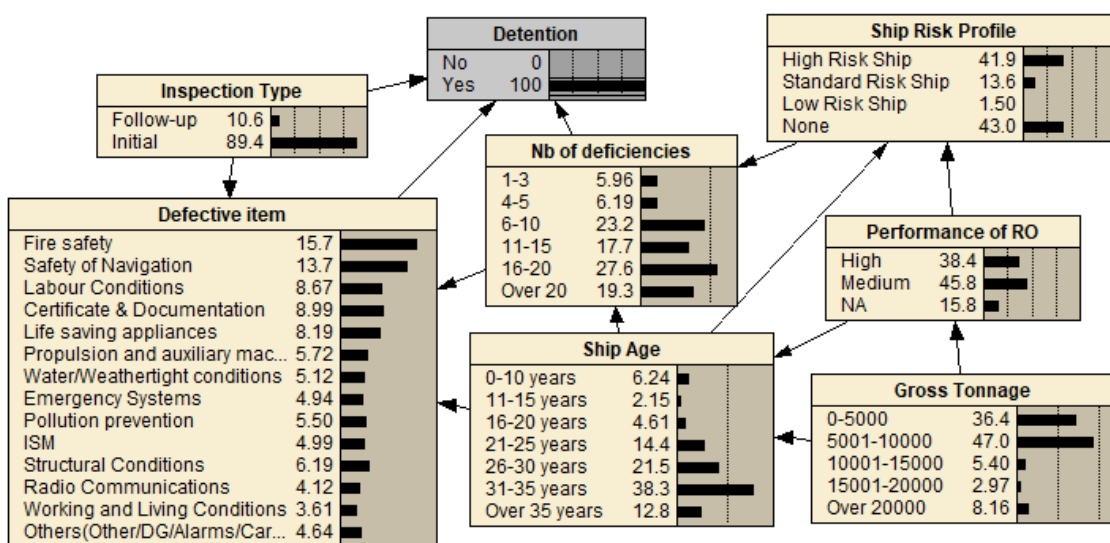


圖 5 RORO Cargo 貝葉斯推論案例

經由上述案例分析可知，貝葉斯模型能有效對模型進行因果推論，對特定船舶特徵推論滯留或被記缺失機率，亦可反推論導致滯留或被記缺失之船舶特徵。以下藉由貝葉斯模型對 RORO Cargo 及 RORO Passenger 各個節點進行推論與反推論，可知兩種船型通常都是在初次檢查時滯留。追蹤檢查時，RORO Cargo 及 RORO Passenger 被記 ISM、Certificate & Documentation 的機率提升幅度最顯著。

當被滯留為 100%時，以貝葉斯推論可知，最容易被滯留的 RORO Cargo 特徵為 5001-10000 總噸位、船齡 31-35 年、RO 表現中度、未定義 SRP、被記 16-20 項缺失，此時最可能被記缺失包括 Fire safety、Safety of Navigation、Labour Conditions、Certificate & Documentation、Life saving appliances；最容易被滯留的 RORO Passenger 特徵為 25001-30000 總噸位、船齡 26-30 年、RO 表現高、未定義 SRP、被記超過 20 項缺失，此時最可能被記缺失包括 Fire safety、Safety of Navigation、Others、ISM、Life saving appliances。

在不指定其他節點狀態而只考慮缺失項目的條件下，當 RORO Cargo 被記 Structural Conditions 或 Others 時，滯留率提高至約 20%，當 RORO Passenger 被記 Others、ISM 或 Safety of Navigation 時，滯留率提高至 10%以上。在不指定其他節點狀態而只考慮船齡的條件下，船齡介於 31-35 年或超過 35 年的 RORO Cargo 滯留率皆大幅提升，當船齡超過 35 年時滯留提高至 21.4%，高於其他年齡層，且被記 16 項以上缺失數機率約 45%，最可能是 RO 表現中度的 5001-10000 的船舶，被記 Safety of Navigation、Fire safety、Certificate & Documentation、Labour Conditions 的機率最高，被記 Structural Conditions 的機率大幅提升。在不指定其他節點狀態而只考慮船齡的條件下，超過 30 年的 RORO Passenger 滯留率提高至 18%，高於其他年齡層，且被記 20 項以上缺失數機率約 28.7%，最可能是 RO 表現高或 NA 的 0-15000 的船舶，被記 Working and Living Conditions、Fire safety、Certificate & Documentation 的機率最高，被記 Working and Living Conditions、ISM、Others 的機率大幅提升。由此，船齡超過 30 年會顯著提升 RORO 船的滯留率。

## 伍、結論與建議

港口國管制是一種提升航安的有效方式，現有針對 RORO 船的港口國檢查研究較少，然而依據 Tokyo Mou 2023 年報指出 RORO Cargo 的滯留率高居第二，根據歐洲海事局 2021 年年報，客船傷亡事件中有一半屬於 RORO Passenger。故本研究以貝葉斯模型分析 RORO 船之港口國管制模型，以利於強化 RORO 船港口國管制有效性、提升航安、提供航政主管機關及船東參考。



2015年至2024年Tokyo MOU中，RORO Cargo共被記5917件缺失，RORO passenger共被記4783件缺失。對比RORO Cargo及RORO Passenger可知，RORO Cargo整體船齡大於RORO Passenger，且滯留率更高、被記10項以上缺失的船舶更多、RO表現中度的數量更多。RORO船最常被記的缺失包括，Fire safety、Certificate & Documentation，RORO Passenger主要被記缺失項目還額外包括Life saving appliances、Emergency Systems，由此可知RORO Passenger被記缺失項目高比例與人安相關，RORO Cargo則除了人安，還更加注重航安與勞工條件，如RORO Cargo最常被記缺失項目還包括Safety of Navigation、Labour Conditions、Life saving appliances。

由貝葉斯模型推論可知，RORO船若被滯留往往在初次檢查時，而追蹤檢查時被記ISM、Certificate & Documentation的機率顯著提升。以貝葉斯推論可知，最容易被滯留的RORO Cargo特徵為5001-10000總噸位、船齡31-35年、RO表現中度、未定義SRP、被記16-20項缺失者，而RORO Passenger為25001-30000總噸位、船齡26-30年、RO表現高、未定義SRP、被記超過20項缺失者。

當RORO Cargo被記Structural Conditions或Others時，以及當RORO Passenger被記Others、ISM或Safety of Navigation時，滯留率都會大幅提升。在不指定其他節點狀態而只考慮船齡的條件下，船齡超過30年會顯著提升RORO船的滯留率。船齡超過35年的RORO Cargo滯留率提高至21.4%，被記Structural Conditions的機率大幅提升，同樣地，船齡超過30年的RORO Passenger滯留率提高至18%，記Working and Living Conditions、ISM、Others的機率大幅提升。

## 陸、後記

在2024.01.31，船舶智慧檢查管制系統－PSC資料運用的工作推進過程中，查詢過去5年(2019~2023)有關以PSC檢查數據為基礎的學術論文發現計有19篇文章，關鍵字包括：Bayesian Network Model、Data Mining、TOPSIS、Game Model、Artificial Intelligence Model、Domain Knowledge，其中運用貝葉斯網路模型為工具的就有五(1, 3, 4, 6, 14)篇。

貝葉斯模型的特性包括：

1. 貝葉斯網路提供了一種方便的框架結構來表示因果關係，能直觀的了解各節點間的關係。

2. 貝葉斯網路圖能有效清楚表達因果關係。由某節點指向其他節點者，稱為母節點(Parent Node)，並在節點關係中代表「因」。母節點的下一層節點稱為子節點(Child Node)，並在節點關係中代表「果」。
3. 在貝葉斯網路圖中，每個節點代表隨機變數，以弧表示兩者之間的依賴關係，並以條件機率表表示節點間的關係強度。

貝葉斯模型的缺點有：

1. 對訓練資料的依賴性很強，如果訓練資料誤差較大，那麼預測出來的效果就會不佳。
2. 節點能代表多種狀態，並不受限於二元狀態，但條件機率表會隨變數增加呈指數增長，導致計算過於繁重無法收斂。
3. 需要知道先驗概率，且先驗概率很多時候是基於假設或者已有的訓練資料所得的，這在某些時候可能會因為假設先驗概率的原因出現分類決策上的錯誤。

2024.05.31，重新查詢貝葉斯網路模型在 PSC 的運用)發現有下列十篇期刊論文，研究領域包括：與 PSC 有關的檢查情形、風險、船舶事故、環境影響因子、碳中和、船舶留滯、提升檢查效率、動態檢查紀錄等等。這十篇文章分別是：

1. *Effectiveness of port state control inspection using Bayesian network modelling - Maritime Policy & Management, 2022 - Taylor & Francis (被引用 22 次)*
2. *Bayesian network modeling of Port State Control inspection findings and ship accident involvement - Expert systems with applications, 2014 – Elsevier (被引用 144 次)*
3. *Realising advanced risk-based port state control inspection using data-driven Bayesian networks - Transportation Research Part A, 2018 – Elsevier (被引用 170 次)*
4. *Analyzing the influencing factors of Port State Control for a cleaner environment via Bayesian network model - Cleaner Engineering, 2023 – Elsevier (被引用 15 次)*
5. *Using Bayesian network-based TOPSIS to aid dynamic port state control detention risk control decision - Reliability Engineering & System Safety, 2021 – Elsevier (被引用 40 次)*
6. *Impacts of dynamic inspection records on port state control efficiency using Bayesian network analysis - Reliability Engineering & System Safety, 2022 – Elsevier (被引用 10 次)*
7. *The efficiency improvement of port state control based on ship accident Bayesian networks - Journal of Risk and Reliability, 2019 (被引用 27 次)*
8. *Improving the efficiency of port state control using Bayesian Network - Operations Research and*

*Management Science*, 2019 (被引用 2 次)

9. *Development of a non-parametric classifier: Effective identification, algorithm, and applications in port state control for maritime transportation - Transportation Research Part B: Methodological*, 2019 – Elsevier (被引用 93 次)
10. *Pollution prevention of vessels in the greater bay area: A practical contribution of port state control inspection system towards carbon neutralisation using a tree augmented naive bayes approach - Journal of Cleaner Production*, 2023 – Elsevier (被引用 4 次)

航港局「船舶智慧檢查管制系統建置案」在推動建構人工智慧的船舶智慧檢查管制系統時必須認知，人工智能不管是狹隘的 ANI、基本的 AGI、超級的 ASI，基本上都在於「系統正確解釋外部資料，從這些資料中學習，並利用這些知識透過靈活適應達成特定目標和任務的能力」。其成功關鍵在於：

1. 健全的外部資料、分佈、機率；
2. 適當的機器學習、演繹、推理。

有關 AI 的介入方法手段多樣，貝葉斯模型只不過是 AI 在機器學習與資料探勘的一種方式，航港局「船舶智慧檢查管制系統建置案」面臨的問題到不在於演算法的選擇或是與不同的 AI 專家合作，而是必須戒慎恐懼的去思考(1)沒資料、(2)缺資料、(3)偏差的資料的根本問題。從這裡開步走去就是 Intelligence，亂想一堆有的沒的然後持續原地踏步就變成 idiot 了。

本文採用的是資料量相對充裕與相對健康的 Tokyo MOU PSC 檢查資料紀錄，用的是國際知名學刊、學者們多有採用而且廣被引用的貝葉斯模型。航港局「船舶智慧檢查管制系統建置案」未來要做的議題可以思考：

1. 適用於我國漁船(15819 艘)、其他船舶(2521 艘)、工作船(1541 艘)、遊艇(1524 艘)、客船(914 艘)、貨船(420 艘)的健康、全面、完整的檢查表單與詳實的紀錄，而不是只有註記「合格」的這種過於簡單的歷史資料。
2. 採用與 Tokyo/Paris PSC 檢查資料庫對應的檢查方式與表單紀錄。
3. 漁船、小船是我國與 Tokyo/Paris PSC 不一樣的檢查類別與檢查文化，應該從結構、設備、安全、配置、事故等等面相重新思考航港局想看到什麼資訊的表單。

至於航港局「船舶智慧檢查管制系統建置案」的 AI 有開始 I 而且已經走在可以放心的路上就好，躁進的亂 I (Intelligence) 會變成走冤枉路的 I (idiot)，這一點是無庸置疑的。

## 柒、參考文獻

1. Cariou, P., Mejia Jr, M. Q., & Wolff, F.-C. (2007). An econometric analysis of deficiencies noted in port state control inspections. *Maritime Policy & Management*, 34(3), 243-258.
2. Cariou, P., Mejia Jr, M. Q., & Wolff, F.-C. (2008). On the effectiveness of port state control inspections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 491-503.
3. Dinis, D., Teixeira, A., & Soares, C. G. (2020). Probabilistic approach for characterising the static risk of ships using Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 203, 107073.
4. EMSA. (2018). *Safety analysis of data reported in EMCIP – Analysis on marine casualties and incidents involving RO-RO vessels*. Retrieved from European Maritime Safety Agency:
5. EMSA. (2022). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2021*. Retrieved from European Maritime Safety Agency:
6. Fan, L., Wang, M., & Yin, J. (2019). The impacts of risk level based on PSC inspection deficiencies on ship accident consequences. *Research in Transportation Business & Management*, 33, 100464.
7. Fan, L., Zhang, Z., Yin, J., & Wang, X. (2019). The efficiency improvement of port state control based on ship accident Bayesian networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of risk and reliability*, 233(1), 71-83.
8. Hänninen, M., & Kujala, P. (2014). Bayesian network modeling of Port State Control inspection findings and ship accident involvement. *Expert systems with applications*, 41(4), 1632-1646.
9. Jiang, H., Chen, Y., Lou, N., Zhou, Y., Shi, Y., & Qian, C. (2023). *Dynamic Evolution Analysis of Ship's Port State Control Inspection Based on Bayesian Networks*. Paper presented at the 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS).
10. Kim, S.-T., Gang, S.-G., Jeong, J.-Y., & Kim, D.-B. (2014). A Study on Inspection Status of Port State Control and Improvement Measures in Korea. *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 20(6), 671-676.
11. Şanlıer, Ş. (2020). Analysis of port state control inspection data: The Black Sea Region. *Marine Policy*, 112, 103757.

12. Tokyo MOU. (2023). *Annual Report on Port State Control in the Asia-Pacific Region*. Retrieved from
13. Wang, Y., Zhang, F., Yang, Z., & Yang, Z. (2021). Incorporation of deficiency data into the analysis of the dependency and interdependency among the risk factors influencing port state control inspection. *Reliability Engineering & System Safety*, 206, 107277.
14. Yang, Z., Wan, C., Yang, Z., & Yu, Q. (2021). Using Bayesian network-based TOPSIS to aid dynamic port state control detention risk control decision. *Reliability Engineering & System Safety*, 213, 107784.
15. Yang, Z., Yang, Z., & Yin, J. (2018). Realising advanced risk-based port state control inspection using data-driven Bayesian networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 110, 38-56.