

海難事故肇因關鍵性分析技術之研究

An Approach of Identifying the Criticalities of the Casual Factors Involved in a Marine Casualty

陳世宗 (Shih-Tzung Chen)^{①*}、周毓欣 (Yu-Hsin Chou)^②

摘要

協助主管機關精準地找出造成海難事故發生之關鍵肇因，一直是從事此項課題研究者未曾間斷的努力方向。本研究旨在提出一系統化的分析流程，用以探討海難事故中涉案肇因之關鍵性的問題。本文所研提之方法係應用「因果分析法 (Why Because Analysis, WBA)」解析出涉案肇因以及其間的因果脈絡，並藉由「貝氏網路 (Bayesian Network, BN)」之量化分析功能，進一步探討各涉案肇因之關鍵性及其排序。本研究透過一實際海事案例分析，說明本研究系統化分析流程的操作過程，並藉由質性及量化分析的結果，獲取明確之關鍵肇因及其排序結果，在本文中亦有所著墨，藉以驗證此分析法的實用性。希望能藉由本方法的運用，提供主管機關一項有利於探討事故關鍵肇因的分析工具，以有效地避免類似事故的再次發生。

關鍵字：海事安全、事故分析、因果分析法、貝氏網路

Abstract

Helping the authority to identify the critical casual factors of a marine casualty is always a challenge to the field researchers. This study aims to propose a systematic analytic procedure which applies Why Because Analysis (WBA) and Bayesian Network (BN) to identify the causal factors and their criticalities which

①* 通訊作者，國立臺灣海洋大學商船學系助理教授；聯絡地址：202 基隆市北寧路 2 號，國立臺灣海洋大學商船學系；E-mail: stchen@ntou.edu.tw。

② 國立臺灣海洋大學商船學系碩士。

were involved in a marine accident. To begin with, this procedure figures out the causal factors and the causality amongst them using Why Because Analysis (WBA), and then a Bayesian Network model is established according to the WBA results. Having the BN model of the accident, the criticalities and the ranking of those causal factors can be acquired via a sensitivity analysis process applied to the BN model. A marine casualty is utilized as the case study to demonstrate the analytic procedure as well as to illustrate the usability and applicability of the proposed method. It is expected that the proposed methodology can be a useful tool to help the decision makers to identify the critical causal factors, and hence the similar accidents can be prevented from happening again more effectively.

Keywords: Maritime safety, Accident analysis, Why Because Analysis, Bayesian Network

壹、緒論

當國際貿易日趨頻繁，海上運輸之需求也愈加殷切，而海難事故卻也是海上運輸業界一直揮之不去的夢魘。雖然，隨著科技不斷地進步，航儀設備也日新月異，但海難事故卻還是層出不窮，而且每隔一段時間就會發生一件，其所造成之人命或財產的損失，以及對於環境的負面影響，相較於過去其嚴重程度不減反升的海難事故（例如：韓國世月號 (SEWOL) 之沉沒事件、歌詩達協和號 (Costa Concordia) 之觸礁傾覆事件、中遠釜山 (Cosco Busan) 貨櫃輪之擦撞橋墩事件、以及深海地平線 (Deepwater Horizon) 平台之爆炸洩油事件）。因此，如何找出造成事故的關鍵肇因，並學到教訓以避免類似事故的再次發生，是一項相當重要的課題。有鑑於

海難事故調查的重要性，國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 於 2008 年 5 月採納 MSC.255(84) 決議案通過「海難事故或海難事件安全調查國際標準及建議做法章程 (簡稱海事安全調查章程, Casualties Investigation Code)」(IMO, 2008)，並將其納入「海上人命安全國際公約 (SOLAS)」第 XI-1 章，且已於 2010 年 1 月 1 日生效實施。該章程要求，主管當局必須對於所管轄之海難事故進行深入之調查，以找出並釐清造成事故發生之肇因，以期能有效地避免類似事故再次發生。

然而，如何從事故中錯綜複雜的各項肇因，釐清它們之間的脈絡，並且進一步地解析出這些肇因的關鍵性指標，以作為決策者制定防範措施或亡羊補牢之策的明確參考依據，一直是從事此課題研究者

努力的方向。故，本研究試圖研提一系統分析流程，應用質性分析的「因果分析法 (Why Because Analysis, WBA)」，從微觀的角度找出並釐清造成該海難事故發生的肇因及其因果關係，並藉由「貝氏網路 (Bayesian Network, BN)」的量化分析功能，來深入探討該事故中，各涉案肇因的關鍵性。期盼能藉由本文所研提的方法，協助決策者更精準地釐清造成事故發生的關鍵因素，藉以找出經濟有效的對策，降低類似之海難事故的再次發生，以提升海上航行的安全。

本文共分五個章節，除了前言外，還包括相關文獻回顧、分析方法概述、實際案例分析、結論與建議等。

貳、文獻回顧

2.1 因果分析法

因果分析法 (WBA) 是一項解析事故肇因及其因果脈絡的質性分析技術 (Stanton et al., 2013)，由德國 Bielefeld 大學之 Ladkin 教授及其研究團隊所研發，並已實際應用於眾多之 (陸海空) 交通事故之肇因分析 (RVS, 2016)；其分析結果主要是以一「因果關聯圖 (Why-Because Graph, WBG)」展示所有可能造成事故發生的肇因，及各肇因間之因果關係，並由一具方向性且非循環之圖形 (Directed

Acyclic Graph, DAG) 加以呈現 (Ladkin et al., 2005)。在 WBG 中，每個節點 (node) 都代表一個肇因，而具方向性的箭頭連線 (arrowed link) 或邊 (edge) 則代表肇因之間的「因果關係」，並以「肇因充要測試 (Causal Completeness Test, CCT)」來確認 WBG 中每一個肇因皆符合充分且必要之條件。

2.2 貝氏定理與貝氏網路

2.2.1 貝氏定理

貝氏定理是由英國數學家 Thomas Bayes 於 1763 年所提出，貝氏定理是機率理論的延伸，以「逆機率」的概念來探討樣本空間內條件機率的各種變化。可從「果」推演至「因」，進而找出事後機率 (王双成, 2010)；當已知某一特定事件發生的情況下，為了求取另一事件的機率時，可透過事前機率 (先驗機率) 與條件機率，以推算出事後機率。意即，在已知事件 A 發生的情況下，則事件 B 發生的機率稱之為條件機率，並以 $P(B|A)$ 表示之；同理，當已知事件 B 發生的情況下，事件 A 發生的機率則可以 $P(A|B)$ 表示之，兩者之間的關係如式 (1) 及式 (2) 所示。

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (1)$$

$$P(A|B)P(B) = P(A \cap B) = P(B|A)P(A) \quad (2)$$

其中

$P(A)$ ：事前機率 (先驗機率)
 $P(A|B)$ ：事後機率 (後驗機率)
 $P(B|A)$ ：條件機率
 $P(B)$ ：全機率

在分割定理中，假設事件 A_1, A_2, \dots, A_n 是樣本空間 S 的一個分割，其中 $P(A_k) > 0, k=1, 2, \dots, n$ ，則對任一事件 E ，恆有：

$$\begin{aligned} P(E) &= P(A_1)P(E|A_1) + P(A_2)P(E|A_2) \\ &\quad + \dots + P(A_n)P(E|A_n) \\ &= \sum_{k=1}^n P(A_k)P(E|A_k) \end{aligned} \quad (3)$$

假若在此樣本空間 S 中，已知事前 (先驗) 機率 $P(A_i) > 0, i=1, 2, \dots, n$ ，便可藉以推算事後 (後驗) 機率：

$$\begin{aligned} P(A_i|E) &= \frac{P(A_i \cap E)}{P(E)} \\ &= \frac{P(A_i)P(E|A_i)}{\sum_{k=1}^n P(A_k)P(E|A_k)} \\ &\quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

此特性將被應用於本文所研提之方法，並配合靈敏度分析技術，以作為探究肇因之關鍵性 (或者是安全防護中破洞之大小) 之工具。

2.2.2 貝氏網路

貝氏網路 (BN) 係由機率論 (Probability Theory) 及類圖理論 (Graphed Theory) 的結合所構成。在類圖理論上，貝氏網路建構在一個具方向性且非循環的圖形上 (DAG)，並以條件機率 (conditional

probability) 表達各節點 (node) 之間的影响程度，節點係表示 BN 中之隨機變數或是事件中的肇因，邊 (edge) 則顯示節點間的因果關係 (Pearl, 1988)，意即：

貝氏網路 $BN = (G, \theta)$ ， $G = (V, E)$ 為一圖形， θ 則為條件機率的分布； $G = (V, E)$ 為具方向性且非循環圖形，其中 V 為節點，代表隨機變數， E 為有向邊 (edge) 代表變數之間的機率依賴關係。

此外，貝氏網路還可藉由圖形化的結構來得知資訊的流向，以及推理過程中事件之間的相依性 (Dependent) 與獨立性 (Independent) 關係。Ren et al. (2008, 2009) 指出 BN 具有下列特性：

1. 具有反向推論 (inference inversely) 的功能；
2. 具有可將觀察到的新狀況更新現有 BN 的功能；
3. 其因果及機率語意 (probabilistic semantic) 之特性，可在資料不完整的情況下處理問題；及
4. 以圖形的方式顯示整體的前因後果脈絡。

2.3 事故分析方法之相關文獻

「系統事件之分析方法 (Systemic Occurrence Analysis Methodology, SOAM)」係由 EUROCONTROL 所發表，主要是用來針對在歐洲發生的空難事故，作為初步分析調查的一項工具 (EUROCONTROL,

2005)。該技術不僅能將「瑞士乳酪模型 (Swiss Cheese Model, SCM)」(Reason, 1997) 層級的理念付諸實現之外，亦能將事故調查中所挑選出的人為因素，依據該人因所屬層級，以及各肇因間的因果關係，以圖解的方式呈現；意即「SOAM 關聯圖 (SOAM chart)」。該圖將原本錯縱複雜的前因後果用一張圖和扼要的文字加以描述，是該技術的一大特點；從事故發生的時間及地點為源頭，再利用這項技術中所定義的人因架構，配合各肇因間的前因後果，將其脈絡以關聯圖的方式呈現。

從所蒐集之期刊中，可發現研究分析海難事故者，大致可分成兩類；一類是針對單一個案深入探究其前因後果，另一類則是概覽數十件甚至上百件之案例，試圖找出這些案例之趨勢及類群。前者有 Chen et al. (2013) 將 WBA 導入「因果子集」之概念後，所調整修改之分析法，針對發生於 1987 年的「自由使者企業號 (Herald of Free Enterprise)」再次進行質性分析。除了分析結果與事故調查報告 (DoT, 1987) 相符外，以簡明扼要之圖表呈現肇因 / 人因間之因果關係是其特點。Akyuz (2017) 則是藉由「Analytical Network Process (ANP)」技術與「Human Factors Analysis and Classification System (HFACS)」之結合，量化分析某造成嚴重液化石油氣洩漏事件之肇因 / 人因，並根據分析結果計算這些因素之優先權重 (priority weight)，再據此提出「事故預防計畫 (accident preven-

tion plan)」之建議，以提供給主管機關作為制定亡羊補牢之策的參考。對於多案例之趨勢及類群之探討，則有 Chauvin et al. (2013) 之研究可作為近期代表；該研究係藉由「Multiple Correspondence Analysis (MCA)」、「Hierarchical Clustering (HC)」以及「Classification Tree (CT)」等量化分析工具，針對 29 件共有 39 艘船舶涉入之碰撞事件進行分析，以解析出造成這些事故之人為因素間的相關性，進而區分出這些事故人因組合的三種樣態 (patterns)。

另外，由於貝氏網路 (BN) 具有強而有力的因果推論功能，故已被廣泛應用在許多領域安全議題的探討 (Li et al., 2014)。在海事安全方面，Eleye-Datubo et al. (2006) 曾使用 BN 來探討在一個危急的情境中，自傳統船舶撤離的存活機率。Trucco et al. (2008) 也試圖藉由整合組織之人因 (Human and Organizational Factors, HOFs) 於風險系統來建構一個海事交通系統之 BN 模型，並根據專家意見所獲得之條件機率值來探討海事風險。Ren et al. (2008) 則是整合 Reason (1997) 的「瑞士乳酪模型 (SCM)」於 BN 中，來評估離岸工作平台的安全問題。Goerlandt and Montewka (2015) 曾利用 BN 建構一模型來探討海事交通系統之風險，並以一個兩船碰撞的實例來驗證此模型。其過程分為兩個階段：(1) 先以質性資料及 BN，結合預防 (precautionary) 及不確定 (uncertainty-based) 觀點確立事件的脈絡，加上藉由專

家意見所獲得之條件機率值，建構此交通風險模型，並利用靈敏度分析，以獲取變數之優先權 (priority) 資訊；(2) 再以該模型進行 “what if” 的試驗，以質性的證據改變某些變數之機率值，以探討對於事故發生後，所造成之後果影響的量化問題。然而，Zhang and Thai (2016) 不諱言指出，雖然 BN 已被廣泛地應用在海事安全議題的建模與探討組織人因 (HOFs) 的影響，但是因為客觀資料來源的貧乏或不相容，往往得求助於專家意見以填補其空缺，但也因此而導入了不確定性 (uncertainty) 與偏見 (biases) 的問題。

有鑒於上述之議題，而且國內少有應用 WBA 及 BN 等結合質性及量化技術針對海難事故之肇因進行分析的研究。故本研究提出一個，除了可清楚顯示個別事故中各肇因及其因果關係等細節外，亦能解析涉案人因關鍵性的系統化分析流程。希望藉由本文所研提之分析法，能對於此一議題提供些許研究能量。

參、分析流程

本文所研提之分析法，係以 Chen and Chou (2012)、Chen et al. (2013) 及周毓欣 (2013) 所研提之系統化分析流程為基礎，增加「肇因關鍵性分析」的功能。希望能藉由系統化的分析步驟及一目瞭然之圖表的展示，除了可讓個別意外事故之肇因，

及其間的因果關係更為明確以外，亦可協助相關人員解析出肇因關鍵性之指標，以協助主管機關制定合宜有效的防範措施，進而有效地避免類似事故的再次發生。由於，本法係屬於「事後探討 (reactive)」之工具，故相當適合將其作為《海事安全調查章程 (CI Code)》，以及《調查海難事故中人為因素之指南，IMO MSC.884(21)》的輔助工具之一。本法之分析流程可概略分成兩階段 (如圖 1 所示)，分別是：「因果分析 (WBA)」以及「肇因關鍵性分析 (Causal Factors Criticality Analysis, CFCA)」。

本法之運用，除了系統化分析流程之外，還需藉助海事專業之領域專家 (Subject Matter Experts, SMEs) 以協助分析並提供建議；協助從所蒐集的資料及證據解析出造成事故的肇因，並判定這些肇因之間的因果關係，以及肇因間之條件機率值，以建構量化分析所需之案例 BN 模型。

1. 第一階段之「因果分析 (WBA)」

此分析階段之目的為解析出造成事故之肇因，及各肇因之間的因果關係。其程序為當資料蒐集完畢後，便依據「是否與事件的發生有關」為原則，將其內容轉換成「陳述說明」，再依據「只包含單一肇因」的準則，將其精簡為「肇因表列 (List of Factors, LoFs)」(範例如表 5 所示)，接著再進行「因果子集 (含驗證) 之分析」，以釐清肇因間的因果關係，並確保篩檢出的肇因均符合充分且必要的條件。分析完畢後，還會產出一張「因果關聯圖 (Why-

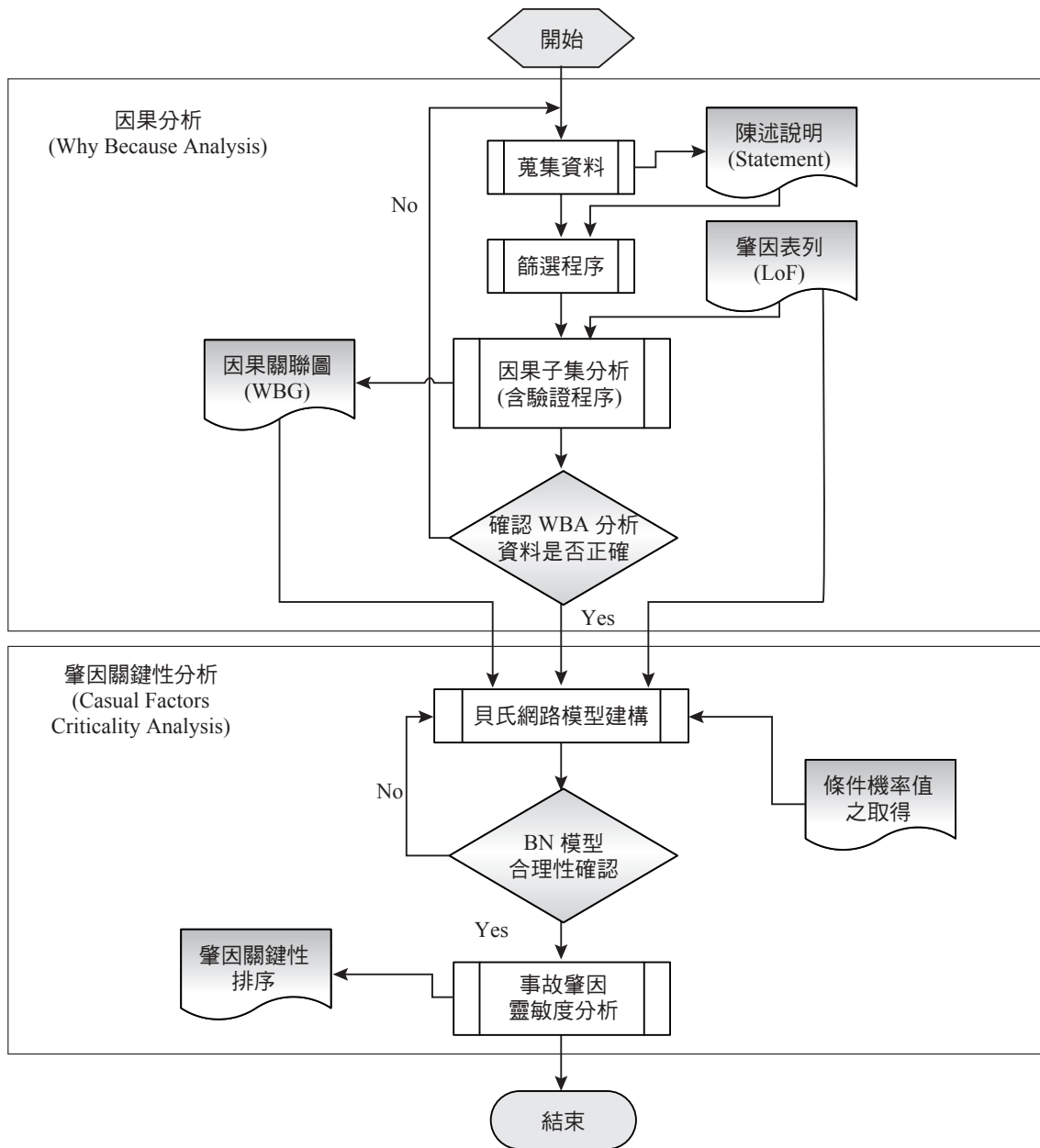


圖 1 肇因關鍵性分析流程

Because Graph, WBG)」（範例如圖 7 British Mallard 之因果關聯圖）。如果上述的圖表仍無法說明整個事故的全貌，就要再回到上述之「篩選程序」，甚至要回到「資料

蒐集」的步驟，以確保此步驟之分析結果能清楚呈現事故的脈絡。詳細內容請參考 3.1 及 4.1 節。

2. 第二階段為「肇因關鍵性分析 (CFCA)」

建構一個代表該事故，內含所有涉案肇因之案例 BN 模型，作為後續量化分析之工具。藉由上一階段之分析結果，依據「因果關聯圖 (WBG)」與「貝氏網路之 DAG」兩者間具方向性且非循環的共通特性，便可一對一將 WBG 中，代表肇因之節點 (nodes) 與代表脈絡 (或因果關係) 的箭頭連線 (arrowed link) 映射成 DAG，當填入肇因間的條件機率值後，便可建構此事故之 BN 模型，得出涉案肇因之關鍵性數值作為指標，來提供主管機關需優先改善之缺失的資訊。分析流程請參考 3.2 及 3.3 節，詳細之範例說明請參考 4.2 節。

3.1 事故肇因之因果分析 (WBA)

本文所運用之因果分析係利用 Ladkin et al. (2005) 所提出之「因果分析法 (WBA)」為藍本，導入「因果子集 (Why Because subset)」之概念及其充要條件驗證機制，修改調整「因果關聯圖 (WBG)」之生成步驟，以解析釐清事故中各肇因之間的因果關係。以 $A_1 \cdots A_m$ 及 B 所組成之「因果子集 (WB subset)」為例，假設 $A_1 \cdots A_m$ 為導致事件 B 發生的「因」，而 B 則為該子集的「果」。當肇因 $A_1 \cdots A_m$ 均已發生時，則事件 B 必定發生，表示 $A_1 \cdots A_m$ 滿足 B 之肇因充分的條件；但是當其中某一肇因 A_k 不發生，卻會導致事件 B 不發生，則可確認 A_k 亦是 B 之「必要肇因」。

上述步驟便是「肇因充要測試 (Causal Completeness Test, CCT)」之驗證機制，以確保該因果子集之所有肇因皆符合充要條件之要求。在 WBG 中的每一節點都須透過此驗證程序，以確認 WBG 中各子集皆具備充分且必要的條件。最後將所有的充要子集彙整，便可繪製成該事故的 WBG。

在此分析階段，可分成三個步驟，各個步驟可獲得之分析結果分別是：「陳述說明」、「肇因表列」及「因果關聯圖」，各項分析結果之說明如以下所述。

1. 陳述說明 (Statement)

將蒐集到的事故調查資料轉換成分析時所需之概要性敘述，在此轉換的過程中應遵循「與事件相關與否」之原則；陳述說明並無字數長短的限制，但必須保持內容的原貌，不應有任何的修改 (包括錯別字)。此步驟的主要目的是從繁雜之調查資料中，整理出分析階段時所需的概要性敘述，以利後續分析之用。

2. 肇因表列 (List of Factors, LoF)

本步驟之目的在於，從陳述說明中篩選整理出造成事故的肇因，並用簡要的文字呈現 LoF。由於陳述說明中，可能存在一段陳述說明敘述多個肇因或多段陳述說明皆說明同一肇因。故在建立「肇因表列 (LoF)」前需透過篩選程序，將「陳述說明」依據「只包含單一肇因」的原則，利用唯一代號及簡明扼要的文字來組成 LoF，且須在 LoF 中的每一項肇因欄位註明其資

料出處。

3. 因果關聯圖 (Why-Because Graph, WBG)

係一個具方向性且非循環的圖形，因果關聯圖 (WBG) 是由「節點」與「箭頭連線」所組成，每一個節點代表一個肇因，每一節點的箭頭連線則說明各肇因間之因果關係。在進行本步驟前，必須先確認造成事故發生的頂部事件 (Top Event, TE) 為何。當 TE 確認後，便可從肇因表列中，經由「因果集 (含驗證)」之分析機制，逐一篩選出所有可能造成 TE 發生之肇因，以建構事故案例之 WBG。

圖 2 所示之範例，係由兩組因果集所組合而成的 WBG；分別是由代表「果」之 TE 以及直接導致其發生的「肇因」A、B 及 C 所組成，另一子集則為代表「果」之 B 以及直接導致其發生的「肇因」D 及 E 所組成。B、D 及 E 所組成之子集，係因為當辨識出 B 為導致 TE 發生之直接因素之後，進一步發現 D 及 E 係導致 B 發生之直接因素，因而將原本僅有 TE、A、B 及 C 所組成之 WBG 進一步擴大成為圖 2 所示之版本。此過程有如拼圖一般，先從角落的一塊拼圖開始，當找出相鄰的拼圖塊一一接上之後 (此時，可將這些拼圖塊視為一因果集)，便進一步再根據已找出並拼接上之拼圖塊，逐一地找出與其相鄰的拼圖塊 (而且每一組都是一個因果集)，依此類推直到完成這些拼圖塊的拼接。過程中，每當完成一因果集的辨

識，便進行「肇因充要測試 (CCT)」以確保該子集之所有肇因皆符合充要條件之要求。如此一來，當 WBG 中之每一因果集均通過 CCT 之測試，則可確保整合所有因果集之 WBG，其所包含之所有節點亦符合充分且必要之條件。最後，輔以「肇因表列 (LoF)」，便可達到以一目瞭然的方式呈現造成事故發生的肇因及其脈絡的目的。

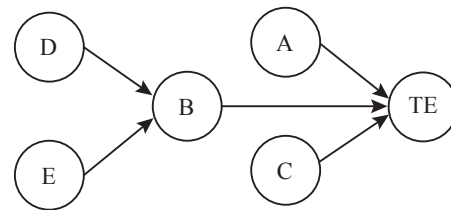


圖 2 因果關聯圖 (WBG) 之範例

另外，藉由 WBG 對於涉案肇因及其間因果關係的呈現，不但看出涉案肇因間的因果關係之外，亦可直觀的看出有哪些造成事故發生的「機會之窗 (Window of Opportunity, WoO)」；WoO 係 Reason (1997) 所創之「瑞士乳酪模型 (SCM)」理論中，造成重大事故發生的要件。此「機會之窗」闡明：「重大意外事故之發生絕非單一個人的嚴重過失所造成，而是因為組織 (系統) 中不同層級之若干人，在不同時空下所犯之大大小小的疏失，造成各層級之安全防護上的破洞，但是這些破洞並不會立即發生負面效應，而是當它們排列成一直線而使得安全機制失去原有的防護

功能時，WoO 便因而生成，再加上當危害 (hazards) 發生時，便使得系統因而受到不同程度的損害」。依此道理，本研究主張，在因果關聯圖 (WBG) 中，由最左側之肇因向右經過各節點，最後到達 TE 的各路徑，都可被視為是一個造成此事故發生之「機會之窗」。

3.2 建構事故案例之貝氏網路 (BN) 模型

由於 BN 係由「指向性非循環圖 (DAG)」與「條件機率表 (Conditional Probability Table, CPT)」所組合而成，再加上 DAG 與 WBA 所解析出之「因果關聯圖 (WBG)」的共通性，故可將其一對一轉換成 BN 之 DAG；而 CPT 之條件機率值，於本研究中則主要源自於專家意見。轉換步驟如下：

步驟一：先將 WBG 轉換成 BN 之指向性非循環圖 (DAG)，亦即 WBG 中有多少節點以及各節點間之因果關係為何，可如實地在 BN 之 DAG 中呈現。兩

者最大差異為 WBG 僅能提供質性的分析與探討，而 BN 之各節點當加入條件機率值後，便可進行量化分析。在圖 3 所示之 WBG 範例中，共有 A、B、C、TE 四個節點，TE 的發生，係直接受 B 及 C 兩肇因所致，而肇因 A 則是直接影響 B 及 C，進而間接影響 TE。

步驟二：將轉換後之 DAG 的各節點依照肇因表列 (LoF) 的內容來定義節點內的狀態，並整理各節點之條件機率表 (CPT) 及給定條件機率值後，便可完成該案例之 BN 模型的建構。若 CPT 的機率值，無法自統計資料獲得，可求助於專家所提供的意見，轉化成條件機率值。最後，逐一將 CPT 內的數值輸入至如 Netica 之 BN 軟體以計算此 BN 之各節點的全機率值。範例如圖 4 所示，圖中各節點之 CPT 請參表 1 ~ 表 3，計算式如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned}
 P(TE) &= \sum P(TE | B, C)P(B, C) \\
 P(B) &= \sum P(B | A)P(A) \\
 P(C) &= \sum P(C | A)P(A)
 \end{aligned} \tag{5}$$

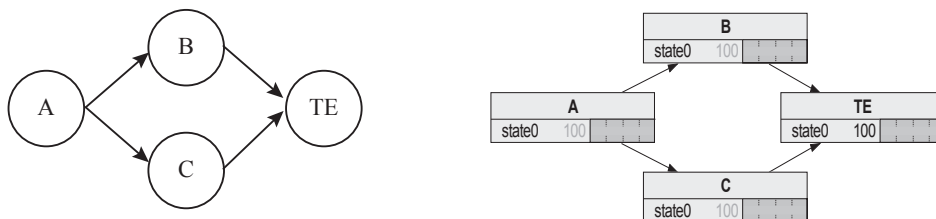


圖 3 因果關聯圖 (左) 與 BN 之 DAG (右) 之示意圖

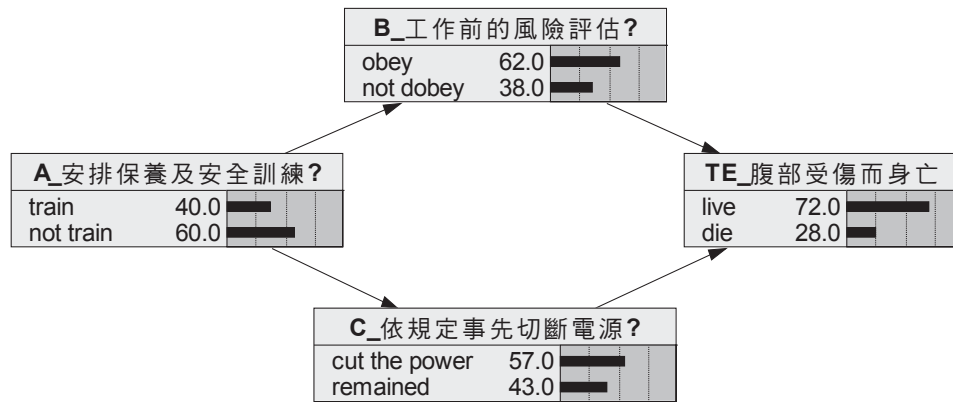


圖 4 範例之貝氏網路模型

表 1 節點 B 之條件機率表

		B (工作前的風險評估?)	
		Obey (B_1)	Not Obey (B_2)
A	Train (A_1)	0.8	0.2
	No Train (A_2)	0.5	0.5

表 2 節點 C 之條件機率表

		C (依規定事先切斷電源?)	
		cut the power (C_1)	remained (C_2)
A	Train (A_1)	0.9	0.1
	No Train (A_2)	0.35	0.65

表 3 節點 TE 之條件機率表

		Obey(B_1)		Not Obey(B_2)	
		cut the power (C_1)	remained (C_2)	cut the power (C_1)	remained (C_2)
TE	live (TE_1)	0.9	0.75	0.65	0.4
	die (TE_2)	0.1	0.25	0.35	0.6

各節點之條件機率如下：

1. A_1 (公司有提供保養及安全訓練)，

$$P(A_1) = 0.4$$

2. A_2 (公司沒有提供保養及安全訓練)，

$$P(A_2) = 0.6$$

以 TE_{die} 為例，其全機率之求解如式 (6) 所示

$$P(TE_2) = \sum P(TE_2 | B, C)P(B, C) \quad (6)$$

因肇因 B 及 C 互為獨立，故

$$\begin{aligned} P(TE_2) &= 0.1 \times P(B_1, C_1) + 0.25 \times P(B_1, C_2) + \\ &\quad 0.35 \times P(B_2, C_1) + 0.6 \times P(B_2, C_2) \\ &= 0.27584 \end{aligned}$$

同理可得

$$\begin{aligned} P(TE_1) &= 0.9 \times P(B_1, C_1) + 0.75 \times P(B_1, C_2) + \\ &\quad 0.65 \times P(B_2, C_1) + 0.4 \times P(B_2, C_2) \\ &= 0.72416 \end{aligned}$$

3.3 量化分析案例之關鍵肇因

當案例之貝氏網路 (BN) 建構完成

後，藉由 BN 的「漸次推演 (propagation)」(或稱信度傳遞；Belief Propagation, BP) 的推論功能，進行「靈敏度分析 (Sensitivity Analysis, SA)」，以解析出肇因的「改善後事故發生率 (Post Remedial Occurrence Probability, PROP)」與靈敏度斜率等資訊，以作為關鍵性排序之指標；計算靈敏度參式 (7)。

$$V(X) = \frac{P(E | M, X_{occur})}{P(E | M, X_{not})} \quad (7)$$

X ：改變狀態之節點 (i.e. 輸入節點)；

M ：除了 X 以外的其他節點；

E ：欲觀測之節點 (i.e. 輸出節點)。

「靈敏度」是指當單獨某一輸入節點狀態的改變，對於輸出節點狀態改變的影響程度。在本法中，係藉由 SA 將各肇因 (視為輸入節點) 逐一改變其狀態，並觀察其對於被視為輸出節點之「頂部事件 (TE)」所造成的影響程度來進行排序。PROP 係指該節點所代表之肇因，當其「負向作為」的影響已調至 0% (i.e. 等同於「正向作為」的機率值調至 100%)，然後觀察 TE 節點之變化，並記錄其值。而「漸次推演」則是將某一節點之機率值以手動方式輸入給定，作為發現新事證 (evidence) 後之調整，並藉由 BN 中的各節點與鄰近節點的因果關係及條件機率，重新評估 BN 中各節點之全機率值的演算。肇因關鍵性排序執行步驟如下所述：

步驟一：利用案例 BN 中的漸次推

演功能，以頂部事件 (TE) 為輸出節點，並以案例 BN 模型中每次以一個肇因節點作為輸入節點，進行靈敏度分析，以獲得「改善後事故發生率 (PROP)」及「靈敏度斜率」等分析結果。

步驟二：將步驟一所得之結果，依「PROP 為主，斜率為輔」之準則，進行肇因關鍵性排序；PROP 越低者排序越高，但斜率值越高者排序越高。該準則之優點在於，除了考量該肇因對於系統安全之影響的效率外 (i.e. 斜率)，亦同時考量對於系統安全之影響的效果 (i.e. PROP)。

以下段落將以圖 5 所示之範例的 BN 模型，說明此關鍵性解析的流程。圖 5(a) 係將節點 B 的「正向作為 (B_{obey})」機率值由 62% 調整至代表已修正的 100%，以代表人員已依照規定，於工作前施行風險評估，並觀察對於代表頂部事件之節點 TE，其「負向作為 (TE_{die})」之機率值的影響程度。可以發現， TE_{die} 之全機率值已從原先之 28% 降低至 15.5%，此數值亦代表節點 TE 之 PROP 相對於節點 B 狀態之變化所做的改變。而當給定節點 B 「負向作為 ($B_{not\ obey}$)」的機率值，由 38% 調整至代表非常負面的 100% (參圖 5(b))，可觀察到 TE_{die} 之全機率值則上升至 48.4%。藉由計算此兩數值，可得知節點 B 相對於節點 TE 的靈敏度 (可藉由此斜率的絕對值 0.329 作為代表)。當藉由此 BN 模型，整理出各節點相對於節點 TE 的 PROP 以及靈敏度數據後 (參圖 6)，便可依據「PROP

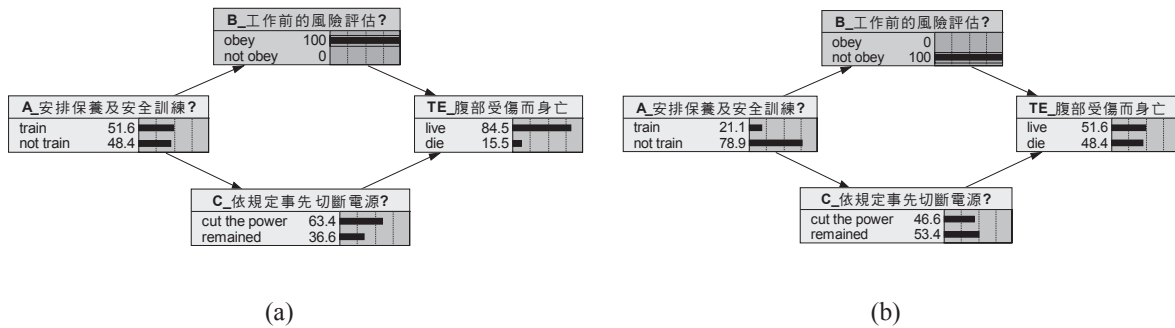


圖 5 節點 B 關鍵性解析的流程

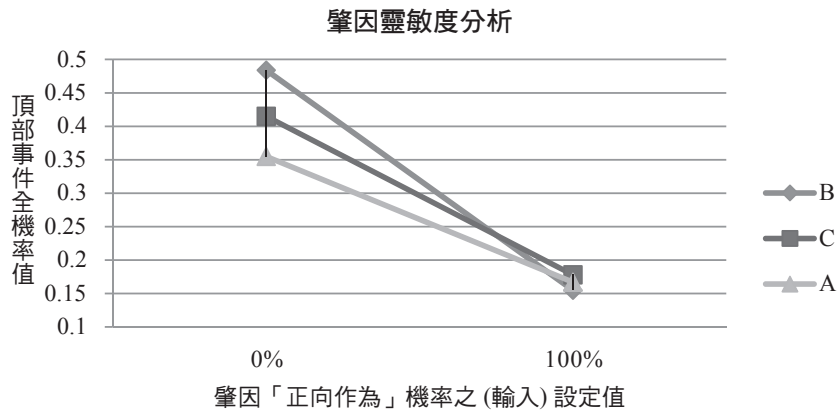


圖 6 肇因靈敏度分析結果

為主，斜率為輔；PROP 越低者排序越高，但斜率值越高者排序越高」之準則，進行肇因關鍵性排序；其結果如表 4 所示。

當依照斜率大小加以排序 (參表 4 左

半邊)，可以看出節點 A、B、C 各自的斜率為 0.188、0.329、0.237；其依斜率大小排序結果如下：

$$B > C > A$$

表 4 肇因關鍵排序表

依照斜率絕對值大小排序				依照 PROP 高低排序			
	0%	100%	斜率		0%	100%	斜率
B	0.484	0.155	0.329	B	0.484	0.155	0.329
C	0.415	0.178	0.237	A	0.355	0.167	0.188
A	0.355	0.167	0.188	C	0.415	0.178	0.237

但是因斜率 (or 效率) 最大之肇因，並不一定為降低事發機率值最有效果之因素。故當考慮以「改善後事故發生率 (PROP)」作為評判標準時，意即 PROP 較低者即為較具關鍵性人因 (參表 4 右半邊)，其排序結果如下：

$$B > A > C$$

肆、案例分析

本章內容係運用第三章所述之系統化分析方法，以 British Mallard 事故為例進行分析，以說明本文所研提方法之應用。本案例之資料來源為澳洲運輸安全局 (Australian Transport Safety Bureau, ATSB) 的事故調查報告，應用第三章所述之方法先得出因果分析 (WBA) 之結果，再將其轉換成貝氏網路 (BN) 以建構出該案例之量化分析模型。接著依照「肇因關鍵性排序」之原則，透過案例 BN 模型的靈敏度分析，先解析出關鍵性排序所需資訊，再進行關鍵性排序，以作為主管機關建構防範之道或亡羊補牢之策的明確指標。本章共分三個部分：4.1 節係以該案例之事故調查報告為資料來源，概述事故的經過並進行該案例的質性分析；4.2 節為利用貝氏網路 (BN) 的量化分析功能，進行涉案肇因的關鍵性分析；4.3 節則小結本章的分析結果。

4.1 British Mallard 個案概述及因果分析 (WBA) 結果

British Mallard 是一艘註冊於開曼群島的雙層船殼油輪，為 Jalouise Ltd 公司所有。依據 ATSB 的調查報告，2007 年 1 月 27 日該船的電氣技師，在維修船上的升降機時，因升降機意外地上升，而被夾死在豎井內。當局已從該事件的調查發現許多安全上的問題，而且為防止類似事件的再次發生，當局已採取了若干作為，如提供一個安全的建議和發布兩個安全建議的佈告 (safety advisory notices)。

當天該船抵達並停靠在西澳英國石油公司 (BP) 位於 Kwinana 的石油煉油碼頭進行裝卸貨。當天上午，船上輪機人員接到升降機故障的通知，電氣技師大約在 17:50 前往維修。當時，電氣技師踩在豎井內的梯子上，微調第二層甲板豎井門的開關，並要求大管將豎井門關上。門關閉後不久升降機便開始向上移動，但只維持幾秒鐘後便停止了。升降機停止後，大管試圖打開第二層甲板的豎井門，但卻無法開啟。他用手上的無線電呼叫二管，請他到第二層甲板，並且再次嘗試打開豎井門，但依然沒有成功。隨即，兩人上樓打開主甲板的豎井門。當他們探頭往下看時，看到電氣技師已被升降機廂困在豎井內，而且似乎失去知覺。大管立刻啟動了一般警報 (General Alarm)。

當船員試圖將電氣技師從升降機救出的同時，船長亦向煉油廠廠方報告此起意外。岸上的人員大約在 19:20 上船援助，但是煉油廠的醫生經診斷電氣技師的狀況，確定他已身亡 (ATSB, 2007)。

將所蒐集之事故資料，藉由 3.1 節所述之步驟，整理成「陳述說明」之後，便可依據「只包含單一肇因」準則，整理出如表 5 所示的「肇因表列」。待確立所欲分析的「頂部事件 (TE)」後，便可應用因果分析法 (WBA) 之「因果因子集分析 (含驗證程序)」，將事故資料整理成若干個因果因子集，並確認子集中的各節點是否皆符合充分且必要的條件。最後，彙整所有的因果因子集，便可畫出該事故的「因果關聯圖

(WBG)」，如圖 7 所示。如果上述的圖表仍無法說明整個事故的全貌，就要再回到流程圖所述之「篩選程序」，甚至要回到「資料蒐集」的步驟，以確保此分析結果能清楚呈現事故的脈絡。

4.2 事故案例之量化分析

此階段主要由兩個程序所組成：「案例 BN 模型之建構」(參 4.2.1 節) 以及「肇因關鍵性之解析」(參 4.2.2 節)，並以一個「案例 BN 模型」以及「肇因關鍵性排序」資訊，作為本階段之最終分析結果。

4.2.1 建構事故案例之 BN 模型

依照 3.2 節所述之流程，案例貝氏網路 (BN) 模型之建構步驟主要有二：

表 5 British Mallard 案例之肇因表列

編號	內容
TE	電氣技師被升降機擠壓後導致腹部受傷而身亡。
E1	升降機突然上升。
E2	豎井門正常的關閉後，升降機的控制系統會重新設定，使得升降機會因呼叫而向上移動。
A1	電氣技師在微調升降機門的開關後，危險地站在豎井內的梯子上。
A2	電氣技師在進行此作業前，為了要追蹤升降機門的故障，並未按規定事先關閉升降機電源。但維修保養手冊上規定，升降機在維修保養前應要先關閉主電源，以防止它無預期的移動。
A3	電氣技師在執行升降機第二甲板門開關之維修工作前，沒有完成工作許可的申請和風險評估。
A4	電氣技師進入豎井內維修，沒有把升降機的緊急停止按鈕按下，也沒有把升降機狀態改成「檢查」模式。
P1	電氣技師、輪機人員沒有接受任何升降機系統及其安全實務的訓練。
P2	船上的升降機使用說明書，沒有提供船員詳細和明確的安全指導。
P3	在此事件發生之前，船上的安全管理系統 (SMS)、風險最小化策略都沒有落實，包括：工作許可制度與風險評估。
S1	公司沒有安排升降機維修保養及安全的訓練。
S2	大管、二管在升降機維修工作前，沒有監督電氣技師來完成工作許可制度和風險評估。
S3	大管與電氣技師在執行升降機維修工作前，沒有檢查電氣技師是否已將升降機及其控制系統斷電。
O	公司沒有提供足夠的指導或指令給船上的船員，幫助他們確定哪些工作需要風險評估。

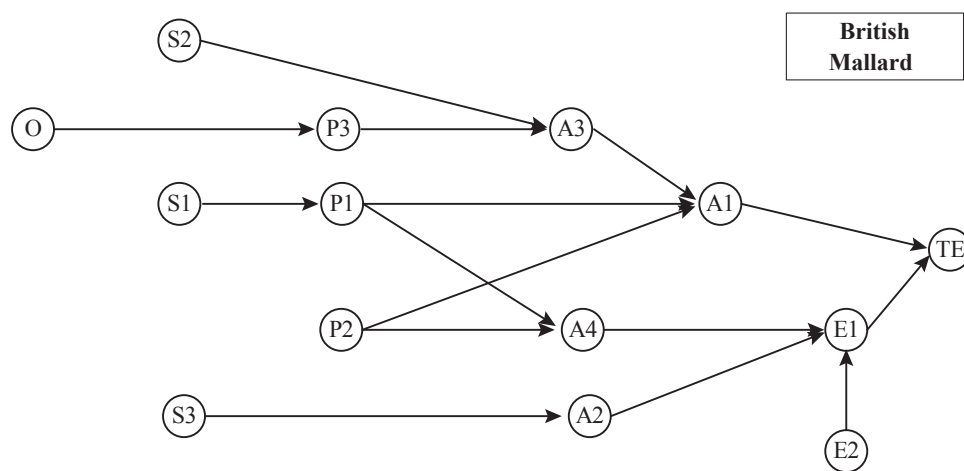


圖 7 British Mallard 之因果關聯圖

步驟一：將因果分析法 (WBA) 所得之因果關聯圖 (WBG) 轉換成貝氏網路 (BN) 之指向性非循環圖 (DAG)。

步驟二：經轉換後的 DAG，各(肇因)節點將依照肇因表列 (LoF) 的內容來定義各節點之兩種狀態，並整理各(肇因)節點之條件機率表 (CPT)，再藉由 Netica 軟體，建構此案例之 BN 模型並進行各節點之全機率值計算。

依據上述兩步驟，British Mallard 之 BN 模型如圖 8 所示，各節點之 CPT，係委請一位具有超過十年海上資歷之船長，提供專家意見所建構而成。

4.2.2 解析事故案例之關鍵肇因

當案例之 BN 模型建構完成後，便可利用其具有的推論 (inference) 功能，評估涉案肇因對於系統安全的影響程度，藉由 BN 的漸次推演 (propagation) 功能，對每

一項肇因進行靈敏度分析 (SA)，以得出每一肇因的「改善後事故發生率 (PROP)」與靈敏度斜率等資訊，作為後續關鍵性排序分析之用。依照 3.3 節所述之流程，以案例 BN 模型中之節點 TE 為輸出，每次以模型中之單一節點為輸入，逐一對各節點進行靈敏度分析，並將結果彙整，再分別依照 PROP 以及斜率等資訊加以排序，如表 6 所示。

表 6 左半邊係依照斜率大小排序，可看出肇因 A1、A2 與 A4 係影響頂部事件 (TE) 的前三名，各肇因依「斜率」之排序如下：

A1 > A4 > A2 > A3 > S3 > P2 > P1 > S1 > P3 > S2 > O

但斜率最大者，不見得對 TE 的影響效果最大。因此，當考量以「改善後事故發生率 (PROP)」的高低作為排序標準時

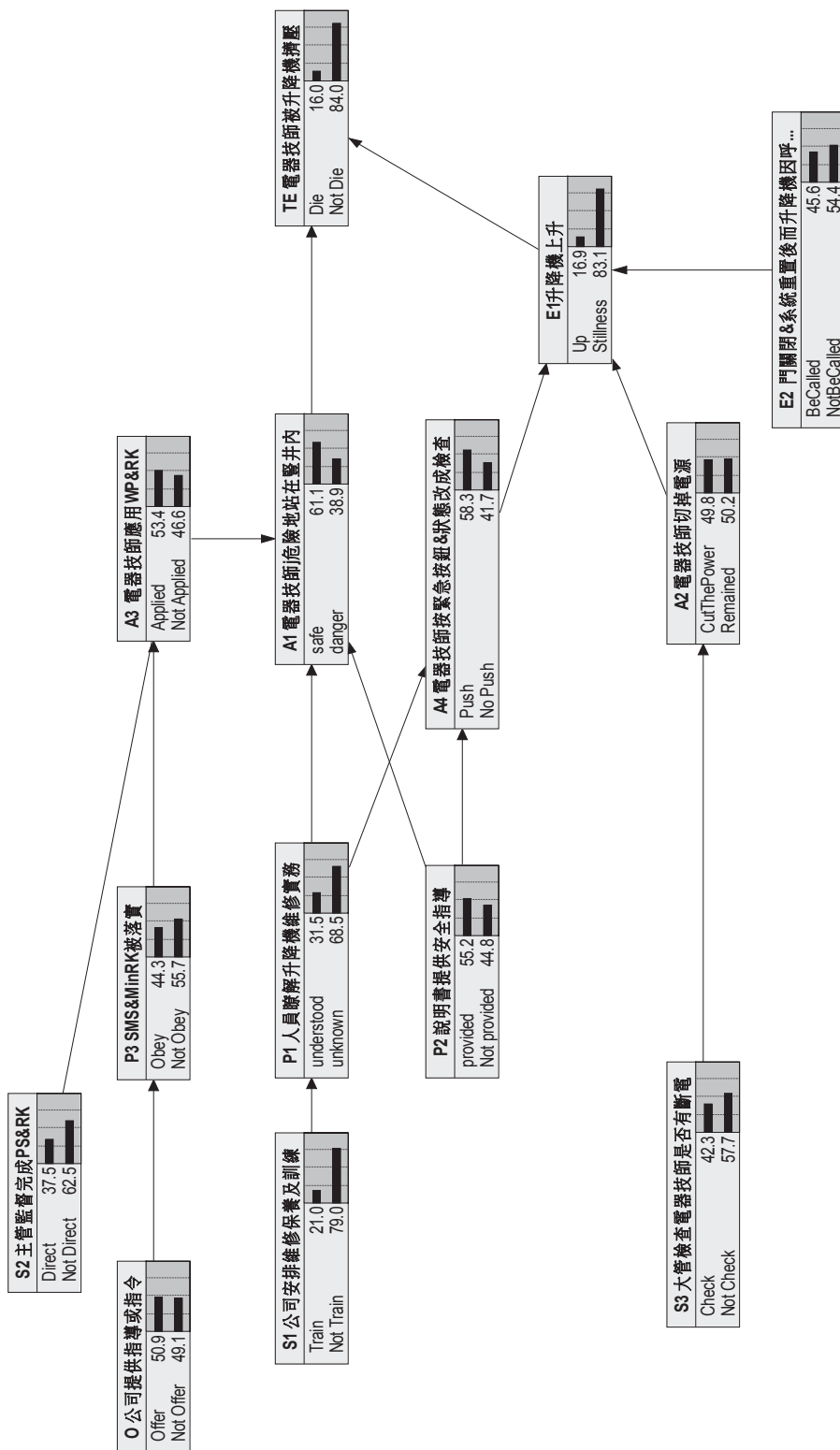


圖 8 British Mallard 之貝氏網路模型

表 6 案例之人因靈敏度排序分析表

依照斜率絕對值大小排序				依照 PROP 高低排序			
	0%	100%	斜率		0%	100%	斜率
A1	0.301	0.070	0.231	A1	0.301	0.070	0.231
A4	0.248	0.097	0.151	A2	0.223	0.096	0.127
A2	0.223	0.096	0.127	A4	0.248	0.097	0.151
A3	0.213	0.113	0.100	P1	0.188	0.099	0.089
S3	0.199	0.107	0.092	S3	0.199	0.107	0.092
P2	0.201	0.127	0.074	A3	0.213	0.113	0.100
P1	0.188	0.099	0.089	P2	0.201	0.127	0.074
S1	0.172	0.115	0.057	S1	0.172	0.115	0.057
P3	0.180	0.135	0.045	P3	0.180	0.135	0.045
S2	0.174	0.138	0.036	S2	0.174	0.138	0.036
O	0.169	0.152	0.017	O	0.169	0.152	0.017

(PROP 較低者排序較高)，其結果如表 6 之右半邊資料所示，各肇因依「PROP」之排序如下：

A1 > A2 > A4 > P1 > S3 > A3 > P2 > S1 > P3 > S2 > O

雖然，肇因 A1 (電氣技師危險地站在豎井內的梯子上)、A2 (電氣技師在進行作業前未按規定事先切掉電源)、A4 (電氣技師沒有把升降機的緊急停止按鈕按下，也沒有把升降機狀態改成「檢查」模式)，均為第一線工作人員的失誤，在兩種排序中也處於前三名的地位。代表著案例中的電氣技師若能安全地執行工作，則應該可以大幅下降事故發生的可能性。但是，當我們深入去探討是何原因造成電氣技師發生 A1、A2、A4 等失誤時，從 WBG 可以發現是 P1 (電氣技師、輪機人員沒有接受任何升降機系統及其安全實務的訓練) 及

S3 (大管沒有檢查電氣技師實際上是否已將升降機及其控制系統斷電) 等兩項潛因 (latent conditions) 所致。從 PROP 的排序結果亦反映出這兩者的關鍵性，因為它們攸關電氣技師之不安全作為的發生與否，不管是違規還是失誤類型。換言之，這兩個潛因支配著電氣技師會不會失誤 (因為已知道有何危險需避免)，或者能不能違規 (因為大管會要求先斷電) 的先決條件。從加強系統安全防護機制的觀點，這兩個因素必須加以特別關注。因為，訓練與監督這兩個防護機制，是不管換哪一個電氣技師上場，都能有效避免類似事故發生的關鍵因素。

4.3 本章小結

本章運用第三章所述之系統化分析流程，以 British Mallard 案例來示範本文所研提之關鍵肇因分析方法。該案例

依本法分析後所得的結果包含：以因果分析法 (WBA) 所辨識出之涉案肇因表列 (LoFs)，以及顯示其因果關係的因果關聯圖 (WBG)，並經由此質性分析結果轉換而成的貝氏網路 (BN) 模型，再透過該模型解析出各涉案肇因之關鍵性排序。本案例經本法解析後，所得之結論有二：

1. 本研究之質性分析結果與 British Mallard 案例調查報告之結論相符。其中，事故調查報告之第三點 (相關人員沒有警覺船舶升降機豎井工作可能帶來的危險) 及第五點 (電器技師未採取正確的防護措施以維修升降機) 需要加以關注。其原因為上述二項結論均涉及 A1 (在微調升降機門的開關後，電氣技師危險地站在豎井內的梯子上)、A2 (維修保養手冊上規定，升降機在維修保養前應要先關閉主電源，防止它無預期的移動。但電氣技師在進行此作業前，為了要追蹤升降機門的故障，並未按規定事先切掉電源，卻留下升降機的電力) 以及 A4 (電氣技師進入豎井內維修，沒有把升降機的緊急停止按鈕按下，也沒有把升降機狀態改成「檢查」模式) 這三項人因。並依關鍵性排序後發現這三項肇因的關鍵性排名皆在前三名內，更加確定肇因 A1、A2、A4 是造成這起事故發生的關鍵因素。經由分析結果與事故調查報告結論之比較，顯示本系統化分析方法具有相當的實用性。
2. 從本文之案例中所檢驗出的關鍵肇因前三名 A1、A2、A4，可以看出第一線工作人員的違規或失誤的不安全行為，往往都是造成事故發生的直接因素，但是主管機關亦不可忽視造成不安全行為的潛在肇因。因為，要有效避免類似事故的再次發生，安全機制上的防護尤其重要 (例如：本案例中之 P1 (訓練) 及 S3 (監督管理))，不能只單靠第一線工作人員這道最後防線來防災，才能避免因人為疏失而釀成大禍。故此，藉由本研究的 WBA 分析與 BN 的量化結果，應可為主管機關提供相關的事故脈絡與因果關係，以及影響系統安全的關鍵性肇因資訊。

伍、結論與建議

涉案肇因的解析與釐清，一直是不幸的事故發生之後，我們必須面對的嚴肅課題。因此如何精準地將涉案肇因 (包括第一線工作人員的失誤，及系統中之潛因) 解析出來，以協助主管機關制定合宜有效的防範措施，來降低 (或避免) 類似事故的再次發生，一直是系統安全上的重要議題。然而，事故的發生並不全然是第一線工作人員的錯，亦應關注隱藏於公司高層的潛因所造成的問題。本研究希望藉由本「事故肇因關鍵性分析法」之運用，搭配因果分析的結果，能對於造成事故中之肇

因有著一目瞭然的呈現；並配合事故 BN 模型及關鍵性排序的資料，協助相關人員較精準地辨識出涉案之關鍵肇因。

5.1 結論

本文藉由一個海難實例，說明如何運用本法進行事故肇因關鍵性分析的流程及步驟。除了驗證本法之實用性之外，亦展示藉由本法所產製之圖、表、及量化分析之結果，對於事故的全貌及脈絡的呈現，以及涉案肇因關鍵性的分析結果，的確比僅以文字說明的調查報告，更能提供一目瞭然的解析功能以及明確的數值及指標，以避免隱藏性的認知差異。意即，每一個肇因之權重值不應等同視之，而且若無量化指標或排序的協助，不同的個人對於肇(人)因的優先順序必有不同之解讀。本法之優點或特點列示如下：

1. **系統化的分析流程，有助於釐清事故肇因、脈絡及其關鍵性。**本法利用 WBA 質性分析以及 BN 量化分析等程序，將事故調查所蒐集到的資料以系統化的步驟進行分析，除可降低主觀意識對分析結果之影響，還可找出深藏於系統中不易發覺之潛在因素。
2. **經因果分析法 (WBA) 所得之質性分析結果，可簡明扼要地呈現涉案肇因及其間之因果關係。**藉由因果關聯圖 (WBG) 與肇因表列 (LoF) 等質性分析結果，除了可讓相關人員在短時間內，釐

清涉案的因素及其脈絡外，亦是建構量化分析模型的基礎。

3. **以貝氏網路 (BN) 作為量化分析工具，可獲得肇因關鍵性的明確參考依據。**藉由 WBG 與 BN 之 DAG 的共通性，可直覺地將質性分析結果轉變為量化分析模型，並對各涉案肇因進行靈敏度分析，以找出這些肇因的關鍵性排序，提供主管機關制定防範措施之優先順序的參考。

5.2 建議

1. 本研究雖應用貝氏網路作為量化分析的工具，但需強調的是，案例之 BN 模型中所表示的機率值，僅可視為造成事故或肇因發生的影響強度或程度，或者是系統中防護機制漏洞的大小，而非事件發生與否的真實機率。雖如此，但由於本法確實可作為海難事故事後分析之工具，故亦可將海事鑑定所蒐集之資料，藉由本法加以分析並參考所得之結果後再下結論，應有助於事故調查或鑑定報告之正確、深入、及完整性。
2. 事件之機率值的取得確實不容易；理論上從統計資料獲得的可靠性最高，但實務上不太可能。故，退而求其次，藉由專家意見的協助以獲取之。目前本法所應用之條件機率值僅來自單一位專家的意見，如果要使專家意見值較具客觀性，則需有多位專家意見加以整合，但

專家合意值 (consensus) 的求解亦是一門功課。使用模糊理論等相關技術以整合多位專家意見，將會是本研究下一階段的努力方向。

參考文獻

- 王双成，2010，貝葉斯網絡學習、推理與應用，第一版，立信會計出版社，中國上海市。ISBN：978-7-5429-2470-4。
- 周毓欣，2013，以 HFACS-MA 架構發展海難事故人因量化方法之研究，國立臺灣海洋大學商船學系碩士論文，基隆市。
- Akyuz, E., 2017. A marine accident analysing model to evaluate potential operational causes in cargo ships. *Safety Science*, 92, 17-25.
- ATSB, 2007. *Independent Investigation into the Crew Member Fatality on Board the Isle of Man Registered Oil Tanker British Mallard while Berthed in Kwinana, Western Australia (Investigation Report: 235)*, Australian Transport Safety Bureau (ATSB). Available at: <http://www.atsb.gov.au/publications> (Accessed 21 April, 2016).
- Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G. and Benoit, J.P., 2013. Human and organizational factors in maritime accidents: analysis of collision at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 26-37.
- Chen, S.T. and Chou, Y.H., 2012. Examining human factors for marine casualties using HFACS-Maritime Accidents (HFACS-MA). *In Proceedings of the 12th International Conference on ITS Telecommunications*, pp.434-439, Taipei, Taiwan, 5-8 November.
- Chen, S.T., Wall, A., Davies, P., Yang, Z., Wang, J. and Chou Y.H., 2013. A Human and Organisational Factors (HOFs) analysis method for marine casualties using HFACS-Maritime Accident (HFACS-MA). *Safety Science*, 60, 105-114.
- Department of Transport (DoT), 1987. *MV Herald of Free Enterprise (Report of Court 8074, Formal Investigation)*, Her Majesty's Stationary Office: London.
- Eleye-Datubo, A.G., Wall, A., Saajedi, A. and Wang, J., 2006. Enabling a powerful marine and offshore decision-support solution through Bayesian network technique. *Risk Analysis*, 26(3), 695-721.
- EUROCONTROL, 2005. *EAM2/GUI8: Systemic Occurrence Analysis Methodology (SOAM) (Edition 1.0)*, EUROCONTROL: Brussels, Belgium.
- Goerlandt, F. and Montewka, J. 2015. A framework for risk analysis of maritime transportation systems: a case study for oil spill from tankers in a ship-ship collision. *Safety Science*, 76, 42-66.
- IMO, 2008. Resolution MSC.255 (84): *Code of the International Standards and Recommended Practices for a Safety*

- Investigation Into a Marine Casualty Or Marine Incident*, International Maritime Organisation (IMO): London, UK.
- Ladkin, P.B., Sanders, J. and Paul-Stüve, T., 2005. *The WBA Workbook*. Available at: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/research/WBA/> (Accessed 23 January, 2017)
- Li, K.X., Yin, J.B., Bang, H.S., Yang, Z.L. and Wang, J., 2014. Bayesian network with quantitative input for maritime risk analysis. *Transportmetrica A-Transport Science*, 10(2), 89-118.
- Pearl, J., 1988. *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann: California.
- Reason, J., 1997. *Managing the Risks of Organizational Accidents*, Aldershot Ashgate: England.
- Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., Xu, D.L. and Yang, J.B., 2008. A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors. *Journal of Safety Research*, 39(1), 87-100.
- Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., Xu, D.L. and Yang, J.B., 2009. An offshore risk analysis method using fuzzy bayesian network. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the Asme*, 131(4), 041101-041101-12.
- RVS, 2016. *The Why-Because Analysis Homepage*. Available at: <http://www.rvs.uni-bielefeld.de/research/WBA/> (Accessed 05 November, 2016)
- Stanton, N.A., Salmon, P.M., Rafferty, L.A., Walker, G.H., Baber, C. and Jenkins, D.P., 2013. *Human Factors Methods: A Practical Guide for Engineering and Design*, Ashgate Publishing Company: Burlington, USA.
- Trucco, P., Cagno, E., Ruggeri, F. and Grande, O., 2008. A Bayesian belief network modelling of organisational factors in risk analysis: a case study in maritime transportation. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(6), 845-856.
- Zhang, G.Z. and Thai, V.V., 2016. Expert elicitation and Bayesian network modeling for shipping accidents: a literature review. *Safety Science*, 87, 53-62.