

冷鏈作業風險評估之研究

Assessment of Operational Risks for Cold Chain Logistics

胡寬裕 Kuan-Yu Hu
樹德科技大學行銷管理系

Department of Marketing Management, Shu Te University

(Received May 9, 2011; Final Version December 16, 2011)

摘要：隨著貿易全球化與消費者對於食品的安全與品質高度重視，複雜與長距離的物流過程，對於易腐保鮮商品的品質與安全，形成重大挑戰，促使冷鏈物流 (cold chain logistics; CCL) 受到學術界與產業界的重視。CCL 中潛藏許多危害因子與風險，如何在物流過程中確保商品品質，事前的風險鑑別與管理，對冷鏈績效為一非常重要議題，而以往非常少研究針對此議題，進行探索研究。本研究整合失效模式與效應分析 (dailure mode and effect analysis; FMEA) 與專家系統，建立兩階段風險評估模式，第一階段為風險鑑別，運用 FMEA 分析工具，系統性鑑別冷鏈物流失效模式與其產生效應，進而應用特性要因圖解析失效原因；第二階段為風險推論，將所鑑別失效模式，依其發生的嚴重度、發生度與偵測度三項指標，透過本研究建立的風險推論專家系統，推論失效模式風險優先指數 (risk priority number; RPN)，以提供一個精確的風險評估模式。本研究以生鮮食品冷鏈，進行實際案例探討，研究結果共鑑別出 35 項風險失效模式，其中溫度失控、延遲配送與資訊整合不佳為最嚴重的失效模式；隨著國際環保趨勢要求，節能與碳排放議題亦被鑑別為潛在風險。相較於傳統以質性或量化的風險評估方法，本研究發展風險評估專家系統，可提供一個精確與主動的冷鏈物流風險評估，對於資源有限的組織，可以在有限的資源下，提供冷鏈物流風險，經濟有效的管理。

關鍵詞：冷鏈物流、風險評估、食品安全、專家系統、失效模式與效應分析

本文之通訊作者為胡寬裕，e-mail: kyhu@stu.edu.tw。

作者衷心感謝國科會補助經費 (NSC100-2410-H-366-011)，以及兩位匿名評審與主編惠賜寶貴建議，特此致謝。

Abstract : With the rapid growth of global trade and increasingly high consumer expectations of food safety and quality, maintaining freshness during long-distance distribution of perishable goods is an important topic. In recent years, the key drivers of cold chain logistics (CCL) have received increasing attention from both academics and industry managers. The cold chain is a special type of supply chain that links parties with numerous embedded risks across the entire supply chain. Risk assessment plays a crucial role in improving the performance of cold chain logistics. However, very little literature has been devoted to exploring this vital issue. To address this research gap, the current study integrated failure mode and effects analysis (FMEA) and risk inference expert systems to develop a two stage risk assessment model. The first stage systematically identified potential risks in CCL, employing the FMEA method. Further applying Ishikawa cause-and-effect diagram analysis causes for every identified failure mode were documented. The second stage evaluated risk by using a risk inference expert system, developed in this study, to obtain the risk priority number (RPN). The RPN of a given failure mode was evaluated using three indexes: degree of severity, frequency of occurrence, and chance of detection. Finally, a fresh food supply chain was used to demonstrate the proposed model. Thirty-five failure modes were identified in the sample cold chain. The most serious failure modes included: temperature out of control, delivery delay, and poor integration of chain. Notably, the issue of environmental consciousness, related to energy saving and carbon emissions, was also identified in this study. In contrast to the traditional risk assessment model, the current study provides an accurate proactive method of assessing high-risk events in uncertain environments for CCL. This approach enables firms to expend resources focusing on high risk events, rather than across the spectrum of potential events, thus achieving increased economic efficiencies.

Keywords: Cold Chain Logistics, Risk Assessment, Food Safety, Expert System, Failure Mode and Effects Analysis

1. 導論

隨著貿易全球化與消費者對便利性的重視，使得冷藏與調理食品 (pre-meal) 需求快速增加，而易腐保鮮商品 (perishables and temperature sensitive products; PTSP) 的長途運輸與配送保鮮與安全議題，對於冷鏈物流 (cold chain logistics; CCL) 形成重大挑戰，促使CCL受到學術界與產業界的重視。PTSP商品主要包括食品、農漁產品、醫藥品及一些特殊原物料等，物流過程需溫度控制條件。根據Datamonitor (2008) 研究資料，2008年全球冷凍食品市場為1,182億美元，2009年市場規模可達1,284億美元。

所謂冷鏈物流，係指產品在生產、儲藏、運輸、銷售，各個活動中，產品始終處於溫度控制環境中，以確保產品品質與安全的一項系統工程 (Bogataj, 2005)。相較於常溫物流，冷鏈物流系統複雜，需要更多專業人才與知識，且過程中潛藏許多環境、人員、設備、資訊溝通等風險因子 (Sanchez-Rodrigues *et al.*, 2010; Tuncel and Alpanm, 2010)，由於未能適當鑑別並加以管理，以致造成商品在物流過程中品質變異、損壞與超過保存期限等現象。根據統計，目前約有30%生鮮食品，由於物流處理不當造成損壞 (Montanari, 2008)；根據中國食品工業協會統計顯示，在中國每年約有1200萬噸水果和1.3億噸蔬菜的損壞，損失總值達100億美元 (賈凱傑、劉秉鐮，民97)。

鑒於冷鏈物流管理如此重要，近年來，國際間對冷鏈的推動亦展現積極態度，2003年歐洲成立國際冷鏈協會 (cool chain association; CCA) 致力於冷鏈產業整合，並建立冷鏈品質指標 (cool chain quality indicator; CCQI)，進行風險評估與管理，以提升冷鏈效率水準。而在學術界，Bogataj *et al.* (2005) 運用數學模式探討易腐食品運送過程，溫度控制穩定機制；Kuo and Chen (2010) 發展多溫層配送模式，以降低配送本；Abad *et al.* (2009) 導入RFID科技進行商品追蹤與溫度監控，Sanchez-Rodrigues *et al.* (2010) 評估英國物流作業不確定因素，歸納為延遲、配送條件限制、缺乏整合、需求變化與不良的資訊，綜觀以上文獻，目前研究多偏向冷鏈物流效率改善為主，甚少針對冷鏈物流風險議題進行探討。

失效模式與效應分析 (failure mode and effect analysis; FMEA)，是一種系統化風險分析工具，主要協助系統分析，使其在早期發現潛在風險因子及其影響程度，以避免失效之發生或降低其發生時產生之影響。本研究整合 FMEA 與模糊推論 (Fuzzy Inference)，建立風險推論專家系統；從冷鏈系統發生失效模式與產生效應，並以失效模式嚴重度 (degree of severity)、發生度 (frequency of occurrence) 與偵測度 (chance of detection) 三個風險指標，透過模糊推論系統推論出風險優先指數 (risk priority number; RPN)，最後並透過排序 RPN，以了解各失效模式，相對風險值高低，以作為組織改善風險之依據。歸納本研究目的的主要如下：

- (1) 鑑別冷鏈物流失效模式與其效應，
- (2) 評估冷鏈物流風險因子與來源，
- (3) 評估並排序各風險因子風險優先指數，
- (4) 對學術界與實務界，提出冷鏈物流風險管理建議。

本文主要包括5章，在1.導論中說明冷鏈的意義、發展現況與研究目的，2.文獻探討中，針對冷鏈相關研究進行回顧，並針對風險評估技術進行分類探討，3.研究方法中，說明風險鑑別步驟與本研究發展模糊風險推論系統，4.結果與分析說明本研究所獲致的結果，並進一步分析結果，最後5.結論與建議中，針對研究發現，進行歸納整理，最後提出相關建議並指出後續研究方向與限制。

2. 文獻探討

2.1 冷鏈物流

冷鏈是一種商品自生產、儲存、配送到零售商店整個過程中，始終保持於恆定溫度狀態的供應鏈體系 (Stringer and Hall, 2007)，常見於食品與藥品產業物流中。冷鏈為一種特殊供應鏈，相較於常溫物流，更需在物流鏈中，維持溫度的控制以確保商品品質的穩定的特性。因此，對於物流鏈中潛在風險，許多學者從不同觀點，去鑑別風險，Tang (2006) 將供應鏈風險來源分成四類供給管理、需求管理、資訊管理與產品管理；Mason-Jones and Towill (1998) 從物流鏈成員觀點，將風險來源區分為供給端、製造過程、需求端與控制系統四類，Sanchez-Rodrigues *et al.* (2008) 進一步，將物流鏈中不確定因素來源，歸納成五類如圖1所示，其中：(1)托運者 (Shipper)：包括原物料供給、生產製造物流過程中的不確定因素；(2)運送者(Carrier)：包括物流中心中各種人員、設備、作業流程等因素；(3)顧客：包括訂單訊息、配送要求與限制等因素；(4)控制系統：包括資訊系統、監控設備等因素；(5)外部不確定因素：如天災、罷工、政府政策、油價上揚等。

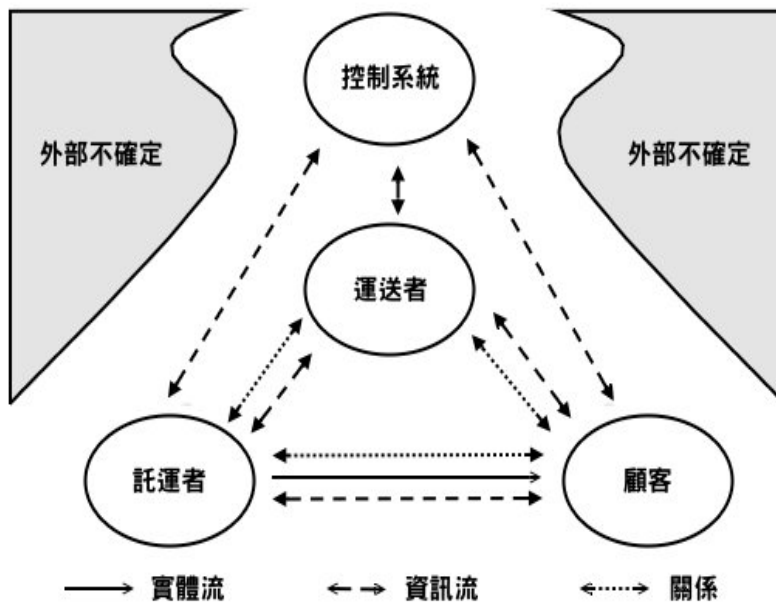


圖 1 物流不確定因素來源模式

資料來源：Sanchez-Rodrigues *et al.* (2008)

Tuncel and Alpanm (2010) 以流程觀點，運用FMEA評估供應鏈風險，將風險歸納為四個部份：(1)供應商風險：包括與供應商關係降低、與供應商談判強度降低、採購商品品質不佳、原物料稀少等因素；(2)進貨/出貨風險：包括人為錯誤、車輛、搬運機具故障、交通壅塞等因素；(3)製造商風險：缺乏勞工、人員錯誤、技術問題；(4)顧客風險：顧客需求變動、顧客期望快速變化、市場占有率流失。Chopra and Manmohan (2004) 認為風險來源可以歸納成五類；(1)環境風險：包括政治、政府政策、總體經濟、社會環境等因素；(2)產業風險：包括原物料來源、製造商與競爭狀況等因素；(3)組織風險：代理商、信用評等、負債狀況、作業方式等因素；(4)特定問題風險：風險之間關係、目標與限制條件與工作的複雜度等因素；(5)決策者風險：包括決策者知識、技術、有限理性與偏誤等。Dahlenburg (2001) 探討零售端，食品冷鏈物流重要因素包括：(1)冷鏈的整合；(2)了解供應鏈：分析物流過程中從製造商到消費者的特性，並鑑別事件對產品溫度的影響；(3)食品安全：維持配送過程食品溫度；(4)溫度監控；(5)商品種類：不同商品有其不同儲存條件與使用設備。Oliva and Revetria (2008) 指出由於人員粗心、不佳的流程與不適當設備，進一步，將冷鏈商品風險失效模式，歸納出溫度36.3%、延遲30.8%、商品混雜14.8%、倉儲作業不當5.9%、包裝不適當3.3%、遭竊3.1%、受潮0.8%、其他等。國際冷鏈協會於2009年7月發行冷鏈品質指標標準 (cool chain quality indicator standard, CCQI)，透過標準的建立，以提供物流鏈風險的控管，進而提升品質水準，其間相關因素如圖2所示。

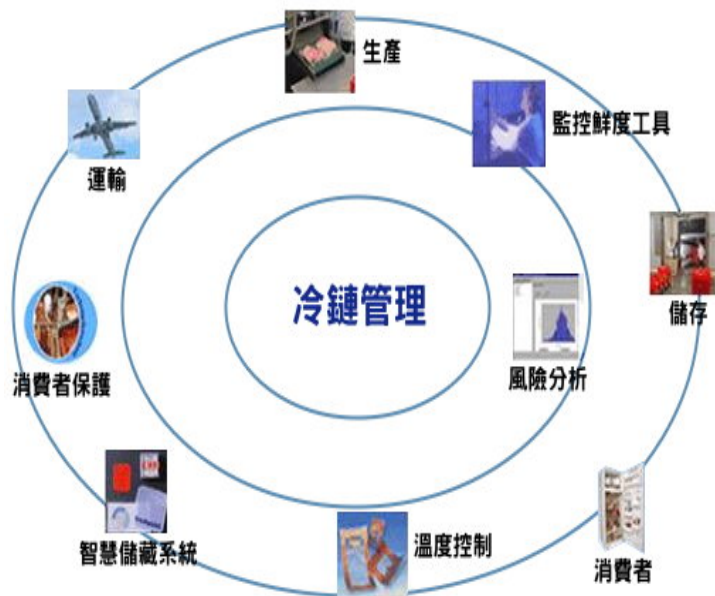


圖 2 冷鏈管理因素

資料來源：<http://www.coolchain.org/>

從以上研究顯示，冷鏈管理議題逐漸受到學術與實務界重視，而引起冷鏈過程風險因子複雜，涉及物流成員、資訊溝通、人員、作業方式、設備、商品與環境等因素。

2.2 風險評估

冷鏈物流面對不確定環境，使得風險評估活動日益重要，雖然對風險有許多不同定義，然一般風險被視為是對於潛在不可預期事件的實現。而對於風險的定義一般歸類為兩大類，第一類將風險視為一種損失 (Koivisto *et al.*, 2009) 第二類將風險視為一種發生損失的機率 (Risk Management Standard AS/NZS 4360, 1999; Kartam and Kartam, 2001)，而當事件發生的機率無法量測時，則被稱為不確定，須透過主觀意識方法，去評估其風險。

風險評估方法與技術，依據研究取得資料內容，主要可被歸納為質性與量化兩種類型 (Bennett, 1996)，在量化技術中必須大量依賴數量統計方法，如 Monte Carlo simulation、fault and event tree analysis、sensitivity analysis (Bennett, 1996; White, 1995)、迴歸分析 (Petrovic, 2006) 等，量化風險衝擊與影響性。在許多真實狀況中，由於量化資料很難取得或資料僅侷限於研究問題的一小部分，使得資料無法呈現事件原貌或趨勢，再者，數量資料呈現形態並非研究所需型式；而質性技術中，大量依賴人類判斷、感覺、經驗去鑑別、分析與了解風險因子與其效應，然此人為主觀意識判斷，受到個人偏誤、偏好與專長所影響。然不管是質性或量化方法，皆有其優缺點，必須視研究性質而定。

失效模式與效應分析 (FMEA) 於 1960 年代由美國太空總署 (NASA) 發展出來，是一種用於調查與分析產品與製程潛在失效的系統性工具，由於 FMEA 具有系統性偵測失效風險，透過量化評估活動失效發生的發生度、嚴重度、偵測度，進而產生 RPN，如公式(1)，透過風險等級分類來決定資源投入的優先順序，並提出適當之改善作業，如此能以最經濟的成本，來獲得最佳的改善效益，並且有效防止失敗事件發生，由於其強調預防管理的特性，因此，已廣泛被應用在工程設計、品質與風險管理中 (Gilchrist, 1993; Ebeling, 2000)。雖然 FMEA 擁有許多優點，然其 RPN 產生方式，仍有一些缺陷，如相同的 RPN 值，可能來自不同嚴重度、發生度與偵測度的組合，且評估過程視三個風險指標為相同權重；再者當評估資訊是不明確、模糊時，也可能導致不適當的風險評估。

$$RPN_i = P_i \times S_i \times D_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

人工智慧專家系統，可不受限於傳統統計資料，許多假設限制與容易修改、彈性的優點，非常適合於處理資料不精確與面臨不確定性環境問題。從 1960 年代發展以來，被廣泛應用於工程與預測中，Hsu and Shu (2008) 使用模糊推論以不精確資料，評估製程能力，Turan and Yurdusev (2009) 使用模糊推論去模式化水資源工程系統，Wu *et al.* (2007) 使用模糊推論進行工程錯誤診斷。從

以上研究可發現，許多研究應用或發展數量、質性或整合兩種方法，進行風險評估。近年，隨著電腦科技進展，整合專家智慧的專家系統，已成為風險預測與評估的一種良好方法。

3. 研究方法

在研究方法上，本研究採用兩階段風險評估，第一階段為風險鑑別，運用FMEA分析冷鏈物流系統失效模式與其產生效應，進而鑑別出風險因子。並將鑑別出風險因子，依三個風險指標進行評估，以了解其風險高低，第二階段為風險推論，將第一階段所鑑別風險因子，依其在不同指標評估結果，進一步運用風險推論專家系統，推論風險因子風險值，以提供一個精確的風險評估，整體研究流程，如圖3，以下分成二個部分，說明本研究所使用研究方法：

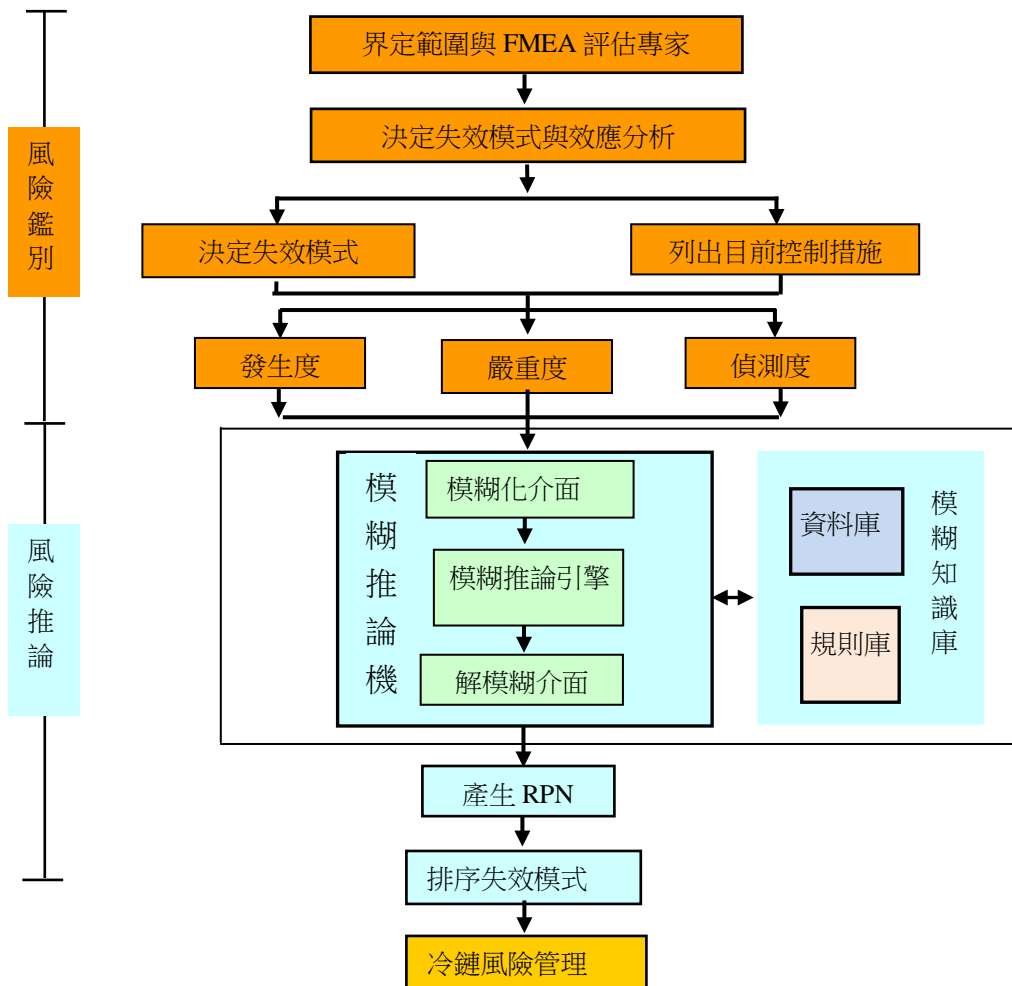


圖 3 研究流程

3.1 風險鑑別

風險評估首要步驟為風險鑑別 (Lai *et al.*, 2002)，本研究應用 FMEA，系統性分析冷鏈可能失效模式，並對這些失效模式所可能造成的影響，評估其影響性，並解析引起原因。FMEA 依據其應用之領域不同，有許多不同執行步驟，學者可依據其研究領域修改應用步驟，本研究綜合 Pillay and Wang (2003)、Chin *et al.* (2009) 等有關 FMEA 作業的規定及內容，將 FMEA 作業實施的步驟，具體歸納成下列步驟：

(1) 界定研究範圍與風險評估專家

在實施冷鏈風險評前，必須界定研究範圍與劃分子系統，以利系統性評估作業，本研究依物流程序，將冷鏈系統劃分為若干子系統，並邀請冷鏈物流業界專家與學者，組成風險評估小組，以進行後續相關作業。

(2) 決定潛在失效模式與效應

列舉潛在失效模式是 FMEA 分析中最重要的步驟，因 FMEA 是針對失效模式進行解析，而沒有列舉到的潛在失效模式無法進行評估，本研究應用失效模式與效應分析表 (表 1) 協助，將所列舉的失效模式，進一步評估其產生效應。

(3) 決定失效因子

依據上階段分析所得的潛在失效模式與其效應，本研究考慮鏈結的對象包括人員、設備、商品、方法、資訊溝通與環境等，配合特性要因圖的使用，列舉失效模式要因，進一步，決定失效因子。

(4) 風險指標評估

風險指標包括三項指標，發生度是指在失效模式發生的機率；嚴重度是指失效模式發生的影響；偵測度是指失效模式發生前，被察覺出來的機會。在評估尺度上，本研究參考 Chin *et al.*

表 1 失效模式與效應分析表

團隊名稱：_____ 編號：_____

過程/部門：_____ 評估日期：_____

團隊負責人：_____ 頁次：_____

| 活動/功能 | 潛在失效模式 | 潛在失效效應 | 潛在失效原因 | 現行控制方式 | 發生度 | 嚴重度 | 偵測度 | RPN |
|-------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|
|-------|--------|--------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|

(2009)、Pillay and Wang (2003) 之分類評估準則，將評估尺度從非常高到非常低，共分為五個等級，相關評估指標準則，如表2所示。其中政府法令與攸關生命安全議題，關係重大，因此將其列入非常高等級，另偵測度的發現程度，涉及現行作業管制方式，亦即若目前管制方式是嚴謹，則相對而言風險事件被偵測的機會較高。

表2 風險指標評估尺度

| 尺度 | 嚴重度 | 發生度 | 偵測度 |
|-----|--|--|---------------------------------------|
| 非常高 | 1. 人身安全產生重大危害 2. 不符合政府法規 3. 商品損壞報廢 4. 物流系統停擺 5. 顧客極端不滿意 | 1. MTBF < 1 week 2. PR > 0.05 | 1. 現行管制措施無法檢測失效模式 2. 可偵測比例0-5% |
| 高 | 1. 人身安全產生危害 2. 商品品質重大惡化 3. 物流系統局部作業停擺，須由外部進行修復 4. 設施故障MTTR > 3天 5. 顧客非常不滿意 | 1. MTBF < 1-4 weeks 2. PR > 0.01 | 1. 現行管制方法檢出能力非常小 2. 可偵測比例6-20% |
| 中等 | 1. 影響商品品質惡化 2. 物流系統作業局部停擺，可由內部進行修復 3. 設施故障MTTR 1-3天 4. 顧客不滿意 | 1. MTBF < 1-6 months 2. PR > 0.005 | 1. 現行管制方式有低度檢測能力 2. 可偵測比例21-50% |
| 低 | 1. 影響商品品質輕度 2. 物流系統作業局部受到影響，可由內部進行修復 3. 設施故障MTTR < 1天 4. 顧客輕微不滿意 | 1. MTBF < 6-12 months 2. PR > 0.001 | 1. 現行管制方式有中高度的檢測能力 2. 可偵測比例51-85% |
| 非常低 | 1. 影響商品品質微小 2. 物流系統作業局部受到輕微影響 3. 設施故障MTTR < 1小時 4. 顧客可能不會注意。 | 1. MTBF > 1 year 2. PR ≤ 0.001 | 1. 現行管制方式有非常高的檢測能力 2. 可偵測比例86-100% |

1. 平均故障間隔時間 (mean time between failures; MTBF)

2. 平均故障排除時間 (mean time to repair; MTTR)

3. 發生機率 (probability; PR)

3.2 風險推論專家系統

模糊推論專家系統主要作為風險因子風險值推論機制，系統主要包括四個部分，如圖 4，第一部分為系統輸入項，包括三項風險評估指標，失效模式發生的嚴重度 (S_i)、發生度 (P_i)與偵測度 (D_i)，作為模糊推論系統的輸入項；第二部分為知識庫，知識庫主要包含兩個子知識庫，(1)規則庫，存放由專家知識形成的推論規則。(2)資料庫，主要存放各集合的歸屬函數；第三部分為模糊推論，此部分為系統核心，主要由推論引擎構成，負責將輸入集合，依據知識庫中規則與集合、參數定義，推論出適當結論，再透過解模糊，將模糊值轉換為明確值，第四部份為產出部分，此部份為經推論引擎推論結果，經解模糊後，以得到 RPN。而模糊推論系統運作，主要包括以下幾個過程：(1)模糊化；(2)建立模糊規則；(3)模糊推論；(4)解模糊。以下說明各步驟做法：

(1) 模糊化

模糊化是將輸入集中明確數值，依據歸屬函數轉換為模糊數值。常用的歸屬函數包括三角函數、梯形函數與高斯函數，各種歸屬函數，各有其適用之處，而三角函數為最簡單可行模式 (Pedrycz and Gomide, 2007)，基於此，本研究歸屬函數採用三角函數。對於每個輸入變數，依據其強弱程度不同，分為非常低、低、中等、高、非常高五個等級，各級所屬模糊語意值，定義如表 3 所示。

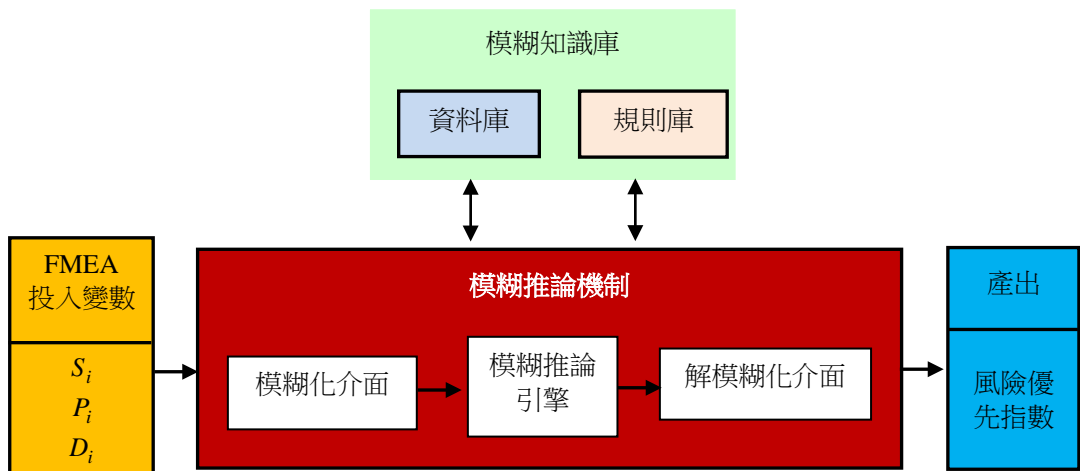


圖 4 風險推論專家系統架構

表 3 語意變數歸屬函數定義

| 語意變數 | 非常低 | 低 | 中等 | 高 | 非常高 |
|---------|----------|---------|---------|---------|----------|
| 模糊語意值區間 | 【-1 1 3】 | 【1 3 5】 | 【3 5 7】 | 【5 7 9】 | 【7 9 11】 |

(2) 模糊規則

在規則式專家系統中，將專家知識以一系列“**If-Then**”規則表示，其中“**If**”是事件的原因，亦即模糊推論系統中輸入變數；“**Then**”指的是結果，亦即模糊推論系統中的輸出結果。透過推論引擎觸動 (fire) 所有規則，以進行平行推論 (parallel inference)。在模糊 FMEA 方法中，大量規則可以提供較佳的預測效果 (Chin *et al.*, 2009)。而本研究輸入變數共分為五個等級，如表 3，有三個輸入變數 (嚴重度、發生度與偵測度)，因此將有 125 種組合狀況，基於此，本研究產生 125 條規則，如公式 2 所示，以供系統完整推論。

例如：

$$R_i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{ij} \text{ and } x_2 \text{ is } B_{ij} \text{ Then } y \text{ is } C_{ij} \quad (2)$$

其中 x : 輸入語意變數、 A : 輸入語意值、 y : 輸出語意變數、 C : 輸出語意值

$i=1,2,3,\dots,n$ 規則總數； $j=1,2,3,\dots,m$ 語意變數個數

(3) 模糊推論

模糊推論以模糊邏輯為基礎，為系統的核心，透過整合集合運算元 (operator)，如交集、聯集與關係合成運算 (Composition)，將輸入集合轉換成產出集合。而模糊推論相較於傳統數理模式，面對不確定環境，可以處理不精確資料、容易修改與彈性優點。常見的模糊推論系統，可以分為二類，包括 TSK (Takagi-Sugeno-Kang) 函數式模糊規則與 Mamdani 語意式模糊規則，由於本研究採語意式規則，採用最大-最小合成運算 (max-min operation)，其原理為推論時，對個別規則於模糊規則成立時，取最小值運算，而各規則的結論，則採最大值運算，如公式(3)：

$$u_{C_0}(y) = [u_{A_1}(x_1) \wedge u_{B_1}(x_2) \wedge u_{C_1}(y)] \vee [u_{A_2}(x_1) \wedge u_{B_2}(x_2) \wedge u_{C_2}(y)] \quad (3)$$

其中， A_i 、 B_i 和 C_i 相對應的歸屬函數為 u_A 、 u_B 和 u_C ，而 \wedge 是 Min 運算、 \vee 是 Max 運算，推論過程圖示如圖 5。

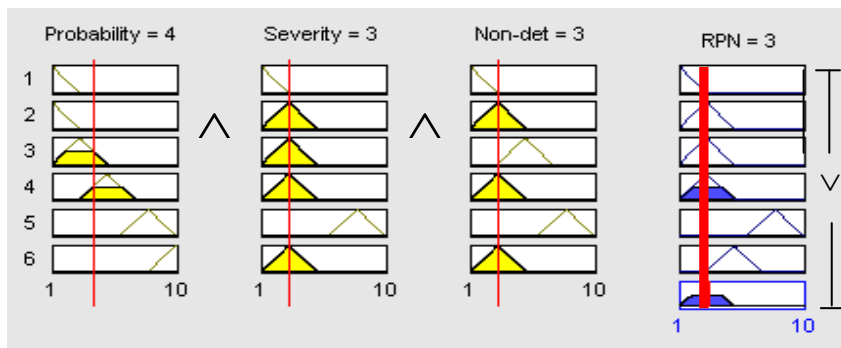


圖 5 模糊推論過程

(4) 解模糊 (Defuzzification)

模糊推論系統中最後步驟為解模糊，將由推論系統所獲得模糊值，透過解模糊將其轉換為明確值。有許多解模糊的方法，如重心法 (centre of gravity)、最大平均法 (mean of maxima)、中心平均法 (modified center average) 等 (Marcelloni and Aksit, 2004)，其中重心法廣為運用在離散型資料中，其運作如公式(4)。

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^L u_C(y_i) \times y_i}{\sum_{i=1}^L u_C(y_i)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, L \quad (4)$$

u_C : 歸屬函數

4. 研究結果與分析

為驗證研究模式的正確性與探索冷鏈物流風險，本研究以生鮮食品冷鏈進行個案研究，由於冷鏈系統複雜，因此本研究依據相關文獻與研究方法，依冷鏈價值創造觀點，將冷鏈依程序，分成五個次系統，為製造商、物流中心、零售商店、控制系統與外部環境，如圖 6 所示，各次系統涵蓋範圍與活動，說明如下：

製造商：任何物流風險由產品製造商引起，直接影響物流績效的因子。包括主要活動中進料、製造或出貨運輸各項作業與輔助活動中人力資源、採購、基礎設施等。

物流中心：任何風險由物流中心產生而直接影響配送過程，物流中心活動包括訂貨、進貨、儲存、揀貨、出貨與配送過程等與輔助活動中人力資源、採購、基礎設施等。

零售商店：任何風險由零售商店產生，在冷鏈過程中，零售商店負責產品銷售，包括訂單預測、配送要求、零售端的卸貨作業與商品儲存、陳列上架等。



圖 6 冷鏈物流程序

控制系統：任何風險起因於冷鏈中管理機制。包括資訊傳遞、系統管理或流程監控等議題。

外部環境：風險起因於外部無法控制因素所引起，包括政治、法律、經濟、社會、文化、科技等層面。

由於 FMEA 是種群體思考決策工具，加上模糊推論系統建立時，需要龐大專家知識進行判斷，因此，本研究由業界專家與學者，組成風險評估小組，小組成員涵蓋冷鏈中製造商、物流中心與零售商店中，物流、工務、採購部門主管與學者，透過小組多次討論，以進行冷鏈物流失效模式與風險來源鑑別與風險程度評估。本研究主要應用歷史資料並考慮生命週期與分配原則，其中歷史資料包括各部門每日/月工作紀錄單、保險、各部門工作紀錄單，由於研究個案中製造商已通過 ISO 140001 國際環境管理系統驗證，因此作業已建立標準程序，本研究列出目前個案公司相關控制措施，作為公司偵測或監控風險因子，以避免失效模式發生，以上三個指標評估標準，整理如表 2 所示。

4.1 研究結果

本研究透過風險評估小組，系統性鑑別出 35 種失效模式，如表 4 所示，從表中可發現失效模式普遍存在冷鏈過程中，其中物流中心包含 12 項失效模式，製造商 6 項，零售商 6 項、控制系統 5 項與外部環境 6 項，以下針對各次系統失效模式進行說明：

(1) 製造商

製造商中共鑑別出包括接單錯誤、供應中斷、溫度控制失效與運輸作業錯誤等 6 種失效模式，如表 4 所示，其中以溫度控制失效，風險值 7.67，排名第 5，顯示在製造端，從原物料進貨、製造到成品的製造物流階段中，溫、濕度控制的重要性，其中生鮮原物料的保鮮；除了溫度控制因素外，溼度的控制亦為重要因素；其次為不當儲存，風險值 6.09，排名第 13，由於不同原物料儲存條件不同，儲存不當會影響溫度的穩定性，甚至引起商品之間交互污染，因此被鑑別為高風險失效模式；另外接單作業錯誤，顯示，訂單源頭管理的重要性，唯有正確無誤的顧客需求確認，才有可能產生滿意顧客；另外也鑑別出包括供應中斷、缺少員工則會製造延遲，進而可能產生配送延遲，影響配送規劃，進而使成本增加。

(2) 物流中心

物流中心共鑑別出包括溫度控制失效、不適當儲存、包裝、溫度設定與訂單內容複雜等 12 種失效模式，如表 4 所示，其中溫度控制失效，風險值 8.81，排名第 1，顯示溫度失控因素，成為冷鏈物流中心最重要風險因素，突顯溫度控制對於冷鏈的重要性；除了前述溫度失控外，不適當的儲存，風險值 7.94，排名第 3，顯示商品儲存環境的重要性，由於物流中心處理商品種類眾多，每種商品儲存條件不盡相同，再者許多商品間，可能會交互感染，因此稍有不慎，可能就會發生品質下降，甚至損壞情形；而不適當作業流程，風險值 7.33，排名第 6，商品在裝卸貨

過程中，若作業流程設計不當，可能造成商品遠離冷源過久，造成品質下降，甚至損壞情形。而不適當溫度設定，風險值 6.54，排名第 9，商品在冷鏈過程中，在物流中心儲存或配送階段中，包括不同商品，期間溫度條件可能不同，因此可能造成溫度設定不適當情形；而隨著消費者需求的多樣化與市場競爭激烈，對於物流中心的商品處理，亦構成相當程度的挑戰，因此訂單內容複雜失效模式其風險值 6.39，排名第 11；另外還包括無效率車輛途程規劃，除造成成本上升、配送延遲外，亦可能提升商品品質損壞的風險；而面對動態物流環境，銷售與物流功能欠缺連結、司機與物流中心溝通不良，除了可能造成配送延遲外，亦可能產生存貨、成本上升。

(3) 零售商

零售商店中共鑑別出 6 項失效模式，從表 4 中，可發現溫度監控失效，風險值 8.30，排名第 2，由於零售商店商品上架販賣，商品陳列於開放式貨架上，如此可能造成溫度失控；另外不適當儲存，風險值 7.82，排名第 4，由於零售商店儲存空間侷限，造成許多商品存放無法做到，依商品特性進行儲存，因此可能引發品質下降或損壞的風險；另外嚴格的配送時段限制，造成許多緊急配送，促使成本上升；作業錯誤與卸貨設施壅塞，可能引起溫度失控與配送延遲現象。

(4) 控制系統

控制系統中共鑑別出 5 種失效模式，包括不同運輸作業模式欠缺標準配適，風險值 6.17，排名第 12，造成原因為冷鏈中欠缺共同標準，以致在冷鏈系統不同階段中，由各自物流主體決定作業模式與溫度管控標準，如此管制標準不一，造成效率不佳，甚至全程溫度控制不易；另外訂單預測準確度低，風險值 6.97，排名第 7，由於銷售受到許多不確定因素影響，造成零售端預測準確度低，透過長鞭效應 (bullwhip effect)，使得後端的物流中心、製造商，產生更大的訂單預測誤差、造成存貨失控、配送延遲等現象；另外冷鏈的資訊溝通不佳，如製造商與物流中心、物流中心與零售商溝通不良，顯示冷鏈中資訊即時溝通的重要性，由於資訊未能及時回饋，因而造成失效狀況。

(5) 外部環境

在外部環境中，共鑑別出 6 項失效模式，包括油價上升、環境保護要求、物流科技、政府法規的限制與要求與道路壅塞。其中油價上漲，風險值 6.78，排名第 8 名，油價上升造成運輸成本高漲，對於耗能的冷鏈配送，構成經營管理上相當大的挑戰；而受到氣候變遷、溫室效應影響，環境保護要求，亦成為冷鏈主要風險，世界各主要工業國家於 1997 年 12 月簽訂京都議定書 (Kyoto Protocol)，明定各國對於溫室氣體排放削減管制，各國政府基於對環境保護的要求，除了日趨嚴格的有毒物質排放管制，對於 CO₂ 的排放，亦考慮將其納入法規管制，而物流過程中，消耗大量能源並且排放許多 CO₂，將成為冷鏈物流業者，必須正視的議題，此項結果，呼應 Piecyk and Mckinnon (2010) 針對英國物流專業經理人調查發現，CO₂ 排放議題將成為未來物流重要影響因素；另外物流科技資訊科技對於物流績效有重要的影響，因此適當導入先進物

流科技，除了可以提升效率外，亦可提供 PTST 商品，更佳的保存條件；面對日益嚴重的道路壅塞，使得冷鏈系統產生更多不確定風險，因此也被鑑別出。

從以上結果，冷鏈過程中，溫度控制、商品儲存管理成為冷鏈最重要因素，凸顯冷鏈中，溫度控制的重要性，符合冷鏈從生產者到消費者，嚴格溫度控管理的要求，另外作業流程不當、訂單內容複雜、上下游資訊整合不佳、油價上升、環境保護要求，都成為主要失效模式，本研究調查結果與 Tuncel and Alpanm (2010)、Sanchez-Rodrigues *et al.* (2010)、Oliva and Revetria (2008) 等調查供應鏈風險，發現包括配送延遲、商品混雜、倉儲作業不當、包裝不適當、受潮等風險因子結果相似。較高 RPN 值意謂較高的風險，對於管理者而言，應將有限資源，投注於高風險失效模式，以進行改善。

4.2 結果分析

根據研究發現，本研究歸納失效模式所產生效應，主要包括溫度失控、延遲配送、缺乏資訊分享、環境保護與成本等，因此本研究針對此效應，進一步分析其原因並提出解決之道：

(1) 溫度失控

溫度失控意謂配送過程中，商品儲存環境未能維持恆定條件。由於溫度對於商品品質攸關重大，尤其是 PTST 商品，失控程度輕者商品喪失風味、減低功能，嚴重者產生腐敗，產品完全失效。溫度失控引起原因主要為對商品專業知識不足、商品儲存不當、設備故障。由於物流中心必須處理商品種類繁多，對於每種商品所需維持的溫度，可能無法充分了解；而商品儲存溫度並非是越低越好，必須視商品種類，儲存於適合溫度下，以冰淇淋為例，一般最佳儲存溫度為 -15°C 至 -25°C ，溫度過高會造成冰淇淋溶解，但溫度過低則會造成冰淇淋堅硬，嚴重影響風味。

商品在物流中心、配送車輛中，因儲存不適當，可能造成儲存空間內空氣循環不當，一端溫度可能過高另一端溫度則過低，溫度不均勻現象；而某些特定商品不可存放在一起，例如海鮮食品與藥品類，否則可能會產生交互感染、受潮現象，影響商品品質。另外對於商品在配送與儲存時溫控設備故障，亦為主要風險因素，雖然定期保養，可以解決部分失效原因，然面對溫度監控科技不斷更新，溫度控制技術與設備的更新投資，亦為解決的重要方法。

(2) 配送延遲

配送延遲意謂配送無法達到原定的時程，對於冷鏈影響層面，可以歸納為三個層面，就物流中心而言，配送延遲可能進一步產生漣波效果 (ripple effect)，導致冷鏈中訂單履行週期 (order fulfillment process; OFP) 時間過長，進而影響到冷鏈配送系統的信賴度；就製造商而言，由於產品保存期限有限，延遲的配送意謂較長的配送期間，產品的品質可能下降，從統計機率理論，

其產品失效的機會也增加，而就銷售商而言，可供產品上架陳列的銷售日期也縮短，可能減少銷售機會。

而引起配送延遲原因，普遍存在冷鏈過程中，包括在外部環境部分中道路壅塞、零售商配送限制條件、物流中心作業流程不當等。配送限制條件為配送過程中的限制式，包括嚴格的配送時段、緊急的配送等，會影響正常配送。其引起主要原因包括零售商店端有限的卸貨設施，使得配送車隊必需排隊進行卸貨作業，引起配送車輛延遲返回物流中心；另外零售端特定的配送模式與時段，減少物流中心配送的彈性，而有限的儲存空間，使得物流車輛必須進行密集的配送，由於配送條件限制，會產生配送車輛與司機的等待，進而產生漣波效果此舉都使得物流成本上升。

近來，導入資訊與通訊科技 (information and communication technology; ICT)，如全球定位系統 (global positioning system; GPS)、地理資訊系統 (geographic information system; GIS)、智慧型車輛系統 (intelligent vehicle system; IVS)、無線射頻辨識系統 (radio frequency identification, RFID)，來強化車輛途程與作業效率。

(3) 上下游整合弱

冷鏈過程鏈結許多物流組織，主要包括資訊與作業整合兩個層面，就資訊溝通而言，資訊整合弱，亦調整條冷鏈資訊透明度不佳，主要失效效應包括訂單預測不準確、上下游欠缺溝通等，造成存貨失控與配送效率不佳與成本上升等現象，分析其原因，歸結來自鏈中欠缺資訊透明度與能見度，由於資訊溝通方式或欠缺標準溝通模式，導致溝通效率不佳；就作業層面而言，許多作業規範，例如商品保存溫度設定不同，除了造成商品溫度控制標準不一、影響品質外，而上下游業者，特定的作業模式，亦造成配送過程銜接不易，影響配送效率。

(4) 環境與成本要求

受到溫室效應、氣候變遷的影響，國際間體認管制溫室氣體排放的重要性，根據 Stern (2006) 報告指出運輸作業約佔全球溫室氣體排放的 14%，其中陸上運輸約佔整體運輸的 3/4，由此可發現物流活動對於溫室氣體排放的重要性；而近年高漲的油價，將促使業者更加注重節能的投資，此舉有助於減少二氧化碳的排放，可預見的未來，環保議題將成為冷鏈物流重要影響因素。

表4 風險指標評估尺度

| 次系統 | 潛在失效模式 | 潛在失效效應 | 嚴重程度 | 潛在失效原因 | 發生程度 | 偵測度/現行管制措施 | Fuzzy RPN | 排名 |
|------|-------------|-------------|------|--------------------|------|---------------|-----------|------|
| 製造商 | 接單錯誤 | 製造錯誤、配送延遲 | 6.7 | 流程設計不當、缺乏訓練 | 2.5 | 人員教育訓練、標準作業流程 | 3.42 | 34 |
| | 供應中斷 | 配送延遲 | 6.5 | 顧客關係不佳、供應規劃、進貨掛程錯誤 | 2.5 | 與原物料供應商資訊分享 | 3.85 | 33 |
| | 缺少員工 | 配送延遲 | 3.8 | 員工請假、罷工 | 2.0 | 激勵措施 | 2.5 | 35 |
| | 不當儲存 | 溫度失控、商品交互污染 | 7.5 | 專業知識不足、人員疏失 | 4.8 | 標準作業流程 | 4.3 | 13 |
| | 溫度失控 | 溫度、溼度監控失效 | 8.7 | 專業知識不足、人員疏失 | 5.2 | 儀器量測、人員教育訓練 | 6.1 | 5 |
| | 運輸作業錯誤 | 成本上升、配送延遲 | 6.2 | 缺乏訓練、車輛設備維護不確實 | 3.5 | 標準作業流程 | 3.2 | 31 |
| | 配送車輛故障 | 配送延遲、溫度失控 | 4.8 | 車輛老舊、保養不確實 | 6.5 | 車輛投資、定期保養 | 2.1 | 4.08 |
| 物流中心 | 司機短缺 | 配送延遲、成本上升 | 6.5 | 罷工、勞動力短缺 | 2.5 | 激勵措施、勞資關係管理 | 2.3 | 4.24 |
| | 存貨短缺 | 存貨失控 | 7.3 | 資訊溝通不當 | 2.8 | 存貨管理 | 2.1 | 4.48 |
| | 訂單內容複雜 | 配送延遲 | 6.9 | 顧客需求 | 5.9 | 促銷活動、訂單預測 | 5.6 | 6.39 |
| | 不適當作業流程 | 配送延遲、溫度失控 | 7.8 | 流程設計不佳 | 7.1 | 作業流程分析 | 5.2 | 7.33 |
| | 不適當儲存 | 溫度失控、商品交互污染 | 8.2 | 商品知識不足、倉儲空間有限 | 7.2 | 標準作業規範 | 5.6 | 7.94 |
| | 不適當包裝 | 溫度失控 | 6.3 | 商品知識不足 | 4.5 | 標準包裝作業規範 | 5.6 | 4.29 |
| | 不適當溫度設定 | 商品損壞 | 8.2 | 商品知識不足，作業疏失 | 3.5 | 標準作業規範 | 5.5 | 6.54 |
| | 溫度失控 | 溫度、溼度監控失效 | 9.3 | 商品知識不足、設備故障 | 7.6 | 定期保養、校正 | 6.8 | 8.81 |
| | 無效率車輛途程規劃 | 配送延遲、成本上升 | 6.6 | 配送專業技能不足、 | 4.6 | 車輛途程分析 | 3.2 | 4.52 |
| | 銷售與物流欠缺連結 | 配送延遲 | 6.7 | 流程設計不當 | 5.1 | 銷售資訊與物流活動連結 | 4.5 | 5.12 |
| | 司機與物流中心溝通不良 | 配送延遲 | 6.0 | 司機與物流中心欠缺足夠溝通 | 7.3 | 資訊溝通分享 | 3.8 | 5.89 |

表 4 風險指標評估尺度(續)

| 次系統 | 潛在失效模式 | 潛在失效效應 | 嚴重度 | 潛在失效原因 | 發生度 | 偵測度/現行管制措施 | 偵測度 | Fuzzy RPN | 排名 |
|--------|---------------------------|-----------|----------------------|---------------------|-----------|----------------|------|-----------|----|
| 零售商店 | 需求劇烈變動 | 存貨失控 | 8.2 | 市場高度競爭、不佳顧客關係 | 3.5 | 訂單預測、存貨管理 | 2.3 | 5.78 | 17 |
| | 作業錯誤 | 配送延遲、溫度失控 | 4.3 | 人員疏失、作業方式錯誤 | 4.8 | 人員教育訓練, 標準作業流程 | 3.1 | 4.25 | 29 |
| | 卸貨端設施壅塞 | 配送延遲 | 4.5 | 特定運輸模式或時段 | 5.8 | 卸貨作業排程 | 3.8 | 4.89 | 25 |
| | Rigid deliver time window | 配送延遲、緊急配送 | 6.6 | 特定運輸模式或時段 | 6.5 | 資訊溝通 | 4.1 | 5.43 | 20 |
| | 不適當儲存 | 溫度失控 | 8.2 | 儲存環境不佳、倉儲空間有限 | 6.5 | 標準作業規範 | 5.2 | 7.82 | 4 |
| | 溫度控制故障 | 溫度監控失效 | 8.2 | 商品知識不足、設備故障 | 6.8 | 標準作業規範 | 5.7 | 8.30 | 2 |
| 控制系統 | 需求預測準確度低 | 存貨失控 | 7.5 | 預測技術不佳、資訊溝通不當 | 6.7 | 市場分析、預測技術 | 5.1 | 6.97 | 7 |
| | 資訊系統故障 | 配送延遲、溫度失控 | 7.7 | 系統老舊、欠缺維護 | 2.5 | 定期維護、資訊系統投資 | 2.5 | 5.16 | 22 |
| | 運輸作業模式欠缺配適 | 溫度失控、配送延遲 | 7.6 | 特定運輸模式、溫度要求, 欠缺共同標準 | 3.5 | 標準作業規範 | 4.8 | 6.17 | 12 |
| | 製造商與物流中心欠缺溝通 | 配送延遲 | 5.4 | 資訊系統不相容、資訊溝通流程不當 | 6.7 | 資訊溝通分享 | 3.3 | 5.15 | 23 |
| 環境 | 物流中心與零售售商欠缺溝通 | 配送延遲 | 7.8 | 資訊系統不相容、資訊溝通流程不當 | 6.5 | 資訊溝通分享 | 2.8 | 5.56 | 18 |
| | 政府法規 | 成本上升 | 8.5 | 經濟、環保、健康議題 | 2.0 | 環境掃描、市場分析 | 2.0 | 5.50 | 19 |
| | 道路壅塞 | 配送延遲 | 5.8 | 特定運輸模式或時段 | 5.5 | 車輛途程分析 | 5.5 | 5.84 | 16 |
| | 環境保護要求 | 成本上升 | 8.1 | 高耗能配送模式 | 7.2 | 資本投資、技術研發 | 3.5 | 6.46 | 10 |
| | 天然災害 | 配送延遲、溫度失控 | 8.2 | 颱風、地震預測 | 2.1 | 環境掃描、市場分析 | 1.5 | 5.21 | 21 |
| | 油價上升 | 成本上升 | 7.5 | 經濟、環保議題 | 7.1 | 環境掃描、市場分析 | 4.5 | 6.78 | 8 |
| 物流科技落伍 | 溫度失控、配送延遲、成本上升 | 8.0 | 溫度控制、資訊科技、運輸、搬運等設備落伍 | 3.5 | 資本投資、技術研發 | 4.5 | 5.86 | 15 | |

5. 結論與建議

5.1 結論與建議

隨著供應鏈全球化與消費者行為改變，複雜與長距離的物流過程，對於易腐保鮮商品的品質與安全，形成重大挑戰，冷鏈物流過程充滿許多潛在風險因子，造成物流系統失效，導致商品變異損壞，甚至造成商譽損失。因此，如何進行事前失效預防管理，成為重要的管理議題。

本研究結合 FMEA 與模糊推論，建立模糊推論專家系統，針對冷鏈中潛在失效模式，進行風險值推論。研究結果發現，冷鏈過程中溫度失控為最重要失效模式，顯示冷鏈系統中，如何維持溫度的穩定性，成為冷鏈管理首要課題；另外研究結果亦指出，冷鏈物流上下游欠缺作業標準、即時、有效資訊溝通，為冷鏈系統重要失效模式，因此建立冷鏈物流的作業標準與資訊分享機制，成為提高冷鏈績效的重要議題；而近來受到氣候變遷，國際間著手管制溫室氣體排放，因此冷鏈業者必須體認到此趨勢，逐漸將節能減碳議題列入經營管理中。

本研究發展模糊推論系統評估風險，由於系統可不受限於傳統統計資料，許多假設限制與容易修改、彈性的優點，有別傳統數量模式與主觀經驗的風險評估模式，可提供一個精確與主動的冷鏈物流風險評估，對於組織，可以在有限的資源下，提供冷鏈風險，經濟有效的管理。針對研究結果與發現，本文最後提出一些建議，以作為改善冷鏈績效的參考：

(1) 標準建立

合理與效率化的流程，可以減少商品流動時間，減少失溫的機率及電力的耗費；正確的作業標準則可以降低錯誤機會，確保商品的信賴度。冷鏈過程可能跨越多個物流夥伴使用多重作業模式，若能制定整個冷鏈共同標準，例如擬定上下游間商品交驗方式與標準，制訂相同商品保鮮方法與條件，則可提高效率、減少成本。

(2) 資訊整合

冷鏈中許多商品具有季節性與易腐性，經常發生促銷、囤貨、退貨與報廢等狀況，因此面臨產銷不協調、銷售資訊不透明問題，資訊的透明度、即時性、正確性，就顯得特別重要，整合上下游或合作業者，提升需求預測的準確性，乃至於更彈性的調節存貨，將能降低風險，適度導入資訊科技，建置整合資訊與分享系統，例如冷鏈成員共同導入協同規劃、預測與補貨 (collaborative planning forecasting and replenishment; CPFR) 模式，可減少銷售預測誤差、降低庫存、提高整體冷鏈績效。

(3) 溫度控制

保持商品鮮度與品質是冷鏈極大考驗，商品從製造商、物流中心到商店上架銷售，長期配送，期間溫度控制，對於商品品質造成關鍵性影響。近來許多研究探討導入先進的溫度控制技術，如 RFID 結合溫度感應裝置，以提供量測、警示、保溫的功能來維持商品品質，日後可以結

合 smart shelf、smart box 與各種 sensor，進行各種溫度控管。

5.2 研究限制與未來研究方向

本研究發展模糊推論專家，透過 RPN，以比較各失效模式風險的高低，然 RPN 數值是種相對的概念，企業在應用 RPN 進行風險改善時，應注意 RPN 的高低，在不同狀況下，可能意謂不同意義，進行改善順序排定時，可考慮改善投入成本與獲致效益，避免過度延伸。本研究以專家群組，鑑別出冷鏈潛在風險失效模式與因子，進而針對每個失效模式 RPN，進行量化評比，由於專家系統風險推論，必須依賴大量資料與相關經驗知識，本研究限於資料的取得，對於各項指標的評估，可能無法達到完美，後續研究者可以透過建立數量模式，針對風險因子對於冷鏈績效進行探討，以瞭解不同風險因子對於冷鏈系統的影響。

參考文獻

- Abad, E., Palacio F., Nuin, M., González de Zárate, A., Juarros, A., Gómez, J. M., and Marco, S., “RFID Smart Tag for Traceability and Cold Chain Monitoring of Foods: Demonstration in an Intercontinental Fresh Fish Logistic Chain”, *Journal of Food Engineering*, Vol. 93, No. 4, 2009, pp.394-399.
- Bennett, J. C., Bohoris, G. A., Aspinwall, E. M., and Hall R. C., “Risk Analysis Techniques and Their Application to Software Development”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 95, No. 3, 1996, pp.467- 475.
- Bogataj, M., Bogataj, L., and Vodopivec, R., “Stability of Perishable Goods in Cold Logistic Chains”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 93-94, No. 1, 2005, pp. 345-356.
- Cool Chain Association, <http://www.coolchain.org/>
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Ka Kwai Poon, G., and Yang, J. B., “Failure Mode and Effects Analysis using a Group-based Evidential Reasoning Approach”, *Computers & Operations Research*, Vol. 36, No. 6, 2009, pp.1768-1779.
- Chopra, S. and Sodhi, M. S., “Managing Risk to Avoid Supply-Chain Breakdown”, *MIT Sloan Management Review*, Vol. 46, No. 1, 2004, pp.53-61.
- Dahlenburg A., “Customising the Cold Chain for Your Export Product: A Scientific Perspective”, Chain Logistics Conference, 2001, May 8-10.
- Datamonitor, <http://www.datamonitor.com/>,2008.
- Ebeling, C., *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 3th ed., New York: Tata McGraw-Hill Company Ltd, 2000.

- Gilchrist, W., "Modeling Failure Mode and Effect Analysis", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 10, No. 5, 1993, pp. 16-23.
- Hsu, B. M. and Shu, M. H., "Fuzzy Inference to Assess Manufacturing Process Capability with Imprecise Data", *European Journal of Operational Research*, Vol. 186, No. 2, 2008, pp. 652-670.
- Lai, K. H., Ngai, E. W. T., and Cheng, T. C. E., "Measures for Evaluating Supply Chain Performance in Transport Logistics", *Transportation Research Part E*, Vol. 38, No. 6, 2002, pp. 439-456.
- Kartam, N. A. and Kartam, S. A., "Risk and its Management in the Kuwaiti Construction Industry: Contractors' Perspective", *International Journal of Project Management*, Vol. 19, No. 6, 2001, pp. 325-335.
- Koivisto, R., Wessberg, N., Eerola, A., Ahlqvist, T., Kivisaari, S., Myllyoja, J., and Halonen, M., "Integrating Future-oriented Technology Analysis and Risk Assessment Methodologies", *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 76, No. 9, 2009, pp. 1163-1176.
- Kuo, J. C. and Chen, M. C., "Developing an Advanced Multi-temperature Joint Distribution System for the Food Cold Chain", *Food Control*, Vol. 21, No. 4, 2010, pp. 559-566.
- Marcelloni, F. and Aksit, M., "Fuzzy Logic-based Object-oriented Methods to Reduce Quantization Error and Contextual Bias Problems in Software Development", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 145, No. 1, 2004, pp. 57-80.
- Mason-Jones, R. and Towill, D., "Shrinking the Supply Chain Uncertainty Circle", *Control*, September, 1998, pp. 17-22.
- Montanari R., "Cold Chain Tracking: a Managerial Perspective", *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 19, No. 8, 2008, pp. 425-431.
- Oliva, F. and Revetria, R., "A System Dynamic Model to Support Cold Chain Management in Food Supply Chain", 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, Heraklion, Greece, July 22-24, 2008.
- Pedrycz W. and Gomide F., *Fuzzy System Engineering toward Human-centric Computing*, John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2007.
- Petrovic, D., Xie, Y., and Burnham, K., "Fuzzy Decision Support System for Demand Forecasting with a Learning Mechanism", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 157, No. 12, 2006, pp. 1713-1725.
- Piecyk, M. I. and Mckinnon, A. C., "Forecasting the Carbon Footprint of Road Freight Transport in 2020," *International Journal Production Economics*, Vol. 128, No. 1, 2010, pp. 31-42.
- Pillay, A. and Wang, J., "Modified Failure Mode and Effects Analysis using Approximate Reasoning", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 79, No. 1, 2003, pp. 69-85.

- Risk Management Standard AS/NZS 4360) Risk Management Standard AS/NZS 4360, Standards Association of Australia, Sydney, 1999.
- Sanchez-Rodrigues, V., Stantchev, D., Potter, A., Naim, M. M., and Whiteing, A., “Establishing a Transport Operation Focused Uncertainty Model for the Supply Chain”, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 38, No. 5, 2008, pp. 388-411.
- Sanchez-Rodrigues, V., Potter, A., and Mohamed, M. A., “Evaluating the Causes of Uncertainty in Logistics Operations”, *The International Journal of Logistics Management*, Vol. 21, No. 1, 2010, pp. 45-64.
- Stern, N., *Stern Review: The Economics of Climate Change*, HM Treasury, London, 2006.
- Stringer, M. F. and Hall, M. N., The Breakdowns in Food Safety Group, “A Generic Model of the Integrated Food Supply Chain to Aid the Investigation of Food Safety Breakdowns”, *Food Control*, Vol. 18, No. 7, 2007, pp. 755-765.
- Tang, C. S., “Perspectives in Supply Chain Risk Management”, *International Journal of Production Economics*, Vol. 103, No. 2, 2006, pp. 451-488.
- Turan, M. E. and Yurdusev, M. A., “River Flow Estimation from Upstream Flow Records by Artificial Intelligence Methods”, *Journal of Hydrology*, Vol. 369, No. 1-2, 2009, pp. 71-77.
- Tuncel, G. and Alpanm, G., “Risk Assessment and Management for Supply Chain Networks: A Case Study”, *Computers in Industry*, Vol. 61, No. 3, 2010, pp. 250-259.
- White, D., “Application of Systems Thinking to Risk Management: A Review of the Literature”, *Management Decision*, Vol. 33, No. 10, 1995, pp. 35-45.
- Wu, J. D., Wang, Y. H., and Bai, M. R., “Development of an Expert System for Fault Diagnosis in Scooter Engine Platform using Fuzzy-logic Inference”, *Expert Systems with Applications*, Vol. 33, No. 4, 2007, pp. 1063-1075.