

以混沌理論為基礎探討預測方法、資訊分享、需求模式、與產能緊度對動態供應鏈系統之影響

陳群樺¹ 王維聰^{2*}

摘要

文獻中顯示，混沌理論可應用性於探討現代供應鏈管理領域之議題。目前已有過往相關研究證明供應鏈系統存在混沌現象之事實，但對於供應鏈系統之動態性如何產生混沌行為卻缺乏著墨，此為研究上之缺口。近來許多研究指出，供應鏈相關因素(例如，需求模式、訂購政策、資訊分享、前置時間與供應鏈階層等等)或供應商與顧客之間複雜的互動過程對於供應鏈相關之決策流程會影響供應鏈如何產生系統之動態與混沌。基本上，上述的研究皆強調混沌行為對於有效管理供應鏈之負面影響，但就我們所知，在供應鏈管理領域，尚未找到有文獻探討預測方法之選擇、資訊分享、需求模式、與產能緊度對系統混沌狀態之影響與關係。

因此，在本研究中，試圖調查不同預測方法、需求模式、資訊分享與產能緊度水準所組成之情境下，動態供應鏈系統可能產生之複雜動態與混沌行為。本研究使用知名的啤酒配銷模型，觀察供應鏈動態與混沌如何受到上述各項因素之影響。研究結果將提供供應鏈管理人員在特定之需求模式下，應選擇何種預測方法與採取之資訊分享及產能緊度政策，降低動態供應鏈系統產生混沌行為之可能性，將可達到較佳之供應鏈績效表現。

關鍵詞：動態供應鏈系統、混沌理論、啤酒配銷模型、系統動力學、資訊分享

¹ 國立成功大學工業與資訊管理研究所，碩士

² 國立成功大學工業與資訊管理學系，教授：通訊作者 E-Mail: wtwang@mail.ncku.edu.tw

1. 前言

供應鏈的許多流程存在回饋、交互作用與時間延遲的本質，使得供應鏈成為動態之系統(Hwarng & Xie, 2008)。面對複雜的動態系統，線性分析的限制愈來愈明顯且不適用於研究非線性問題(Kumara, Ranjan, Surana & Narayanan, 2003; Larsen, Morecroft & Thomsen, 1999)。現存之理論模型傾向假設相對簡單的線性關係且不存在回饋，即使模型能反應出真實世界之模式，但實務上通常對其預測之價值抱持存疑之態度(Levy, 1994)。

在傳統的供應鏈管理的研究中，較少以動態或非線性的觀點來研究供應鏈中所發生的問題。混沌理論為研究非線性系統的一種理論基礎，提供另一角度重新思考供應鏈系統追求的目標。如何讓系統達到穩定、平衡狀態，避免劇烈變動與混沌現象的發生一直是過往研究關心與極欲進一步瞭解的議題。在供應鏈管理領域，過去已有多方面研究探討供應鏈因子(包括外部因子與內部因子)或決策流程與供應鏈系統動態現象之間的關係，例如長鞭效應之研究(Chen, Drezner, Ryan & Simchi-Levi, 2000; Sterman, 1989)。此外，關於混沌理論在供應鏈管理領域之應用亦有多篇研究證實非線性動態供應鏈系統存在混沌/混沌行為之事實(Hwarng & Xie, 2008; Larsen et al., 1999; Thomsen, Mosekilde & Sterman, 1992; Simangunsong, Hendry & Stevenson, 2012)。因此，調查供應鏈因子如何造成系統之動態性甚至是混沌現象的發生為本研究欲進行之工作。

混沌系統表現出下列四項基本特徵(Wilding, 1998a; Williams, 1997)：(1)內隨機性；(2)對初始值的敏感性；(3)無序中的有序；(4)自組織或疊代(iteration)。儘管文獻中表示混沌理論可應用於瞭解現代企業問題與供應鏈管理相關問題，然而，在這方面的應用仍是有限(e.g., Hwarng & Yuan, 2014; Larsen et al., 1999; Levy, 1994; Shih, Hsu, Zhu & Balasubramanian, 2012; Stapleton, Hanna & Ross, 2006; Svensson, 2013)。過去這一方面的研究主要是在證明供應鏈系統可能存在混沌行為之事實，或是將不同程度的混沌現象予以分類(Larsen et al., 1999; Ma & Xie,

2018; Mosekilde & Larsen, 1988; Sosnovtseva & Mosekilde, 1997; Thomsen et al., 1992) , 但對於供應鏈系統之動態性如何產生混沌行為卻是研究上之缺口。

此外，預測方法之選擇亦是眾多決定供應鏈績效表現的其中一項重要因素。許多產業已觀察到零售商預測的誤差會以訂單的方式傳遞給供應商，且這誤差會被放大，這個現象被稱為長鞭效應(Lee, Padmanabhan & Whang, 1997a)。Lee, Padmanabhan & Whang (1997b)認為當需求資訊以訂單的形式傳播於供應鏈中時容易遭受扭曲，且愈往上游移動此扭曲的程度會越來越大，導致上游廠商作出錯誤的存貨與生產決策。因此，不正確之預測會引起供應鏈需求變異之發生，使得供給與需求不平衡，因而增加存貨成本與缺貨之可能性，或是銷售損失與顧客滿意度下降。同時，零售商面對的需求模式與供應商產能緊度(capacity tightness)也都會影響資訊分享之價值。此外，環境因子(需求模式)及決策因子(產能緊度、資訊分享)亦有可能對系統貢獻混沌。

有鑑於上述之過往文獻之研究缺口，本研究將要調查上述供應鏈因子與系統混沌之間的因果關係，了解這些系統因子如何對動態供應鏈系統貢獻複雜的動態性與混沌行為。因此，本研究將要進行不同之供應鏈因子水準情境與不同決策參數組合之模擬實驗，以了解供應鏈因子與決策域對系統混沌之影響與貢獻。

2. 文獻評論

2.1 混沌理論

Lorenz (1963)提出的混沌理論指出，非線性系統具有的多樣性和多尺度性，他的理論解釋了決定系統下可能產生之隨機結果，其理論的最大的貢獻是用簡單的模型獲得明確的非週期(aperiodic)結果。此理論認為特定自然或是社會系統是一種對初始條件敏感的系統，即使其他因素固定不變，初始值之微小差異經過每次交互作用而放大，而系統對初始值之敏感性與重複的自我組織(self-organization)過程，將導致「混沌」行為之產生，而使得系統之未來狀態變得不可預測。混沌理論另一項之重大成就是它能證明為何一組簡單且確定關係之系統會產生模式

(pattern)，但卻不可預測且永遠不會重複，亦即，大多數的混沌系統指的是有限的隨機，無序中的有序。Wilding (1998a)將「混沌」定義為「不定期的，在一個確定系統下且對初始值非常敏感，產生有界線的動態變化，並在相空間形成特定結構」。一般而言，混沌指的是確定的混沌(deterministic chaos)，表現出下列四項基本特徵(Hwarng & Xie, 2008; Wilding, 1998a; Williams, 1997)：(1)內隨機性：即使是一些完全確定的系統，它們在混沌區內的行為都表現出隨機不確定性，但此隨機性的來源來自於內部；(2)對初始值的敏感性：由於混沌系統具有內隨機性，初始條件任意微小的偏差都會使兩條原先相近的曲線彼此呈指數分離。此即著名的「蝴蝶效應」；(3)無序中的有序：混沌系統內隱藏一些規則、法則，使得混沌行為縱然不可捉摸，但仍然可以被充分地解釋。它與通常意義下簡單的無序不同，而是一種無序中的有序；(4)自組織或疊代：一個會成為混沌的動態系統必定是一個自組織的系統。所謂自組織，是指系統本身變化的結果成為下一階段影響系統變化的原因。

由於供應鏈系統通常具有如混沌系統之特徵與行為，應用混沌理論來解釋、說明並增加我們對於供應鏈之瞭解為上述研究之目的。由於不可預測性，對混沌系統進行長期預測一般來說是不可能的。不過混沌之放大程度可以 Lyapunov exponent (LE) 來加以衡量(Kocarev, Szczepanski, Amigo & Tomovski, 2006; Williams, 1997)，若指數大於零，我們可依此判定此系統為混沌系統。某種程度上我們可以根據指數的大小知道哪個時間長度內系統的動態性是可被預測的，若超過此時間點則混沌系統又變得無法預測。預測範圍的概念使我們能夠去分辨短期與長期之策略決策。最後，系統它從來不會達到平衡的狀態，來自外部的微小干擾也有可能對系統行為造成巨大之改變(Levy, 1994; Stapleton et al., 2006; Wilding, 1998a, 1998b)。先前的研究結果指出，混沌行為可能來自供應鏈之決策制定流程(Mosekilde & Larsen, 1988)及供應鏈使用之控制系統(Wilding, 1998a)。例如，Hwarng & Xie (2008)調查不同程度的變異性、混沌可能發生在確定的多階供應鏈系統。他們觀察不同的供應鏈因子，例如，需求模式、訂購政策、資訊分

享、前置時間與供應鏈階層，如何造成供應鏈之動態性與對系統混沌。

2.2 資訊流與長鞭效應

傳統供應鏈的特徵是正向的物料流以及逆向的資訊流。要達到供應鏈整合、或稱為同步化(synchronization)，許多學者認為平滑的物料流是改進供應鏈績效且是降低長鞭效應的一項重要原則(Geary, Disney & Towill, 2006)。事實上，企業或供應鏈要達到整個流程都具有平滑的物料流有許多先決要素，其中一項是可見度(Visibility)。許多研究已探討可見度對作業效率或供應鏈績效之影響(Barratt & Oke, 2007; Barratt & Oliveira, 2001; Smaros, Lehtonen, Appelqvist & Holmstrom, 2003)，而可見度是資訊分享的一項結果(Barratt & Oke, 2007)。資訊分享被視為解決長鞭效應問題之重要策略與基礎。

造成長鞭效應發生之因素已被廣泛研究，例如，資訊扭曲(Lee et al., 1997b)、決策過程中的錯誤認知及其回饋(Sterman, 1989)、批量訂購(Cachon & Fisher, 2000)或是前置時間(Chen et al., 2000)等等，然而，目前長鞭效應仍舊是許多供應鏈上的一個嚴重問題。長鞭效應曾被建立在知名的啤酒遊戲中來探討(Mason-Jones & Towill, 1997; Mason-Jones & Towill, 1998; Sterman, 1984)，而啤酒遊戲告訴我們的，即是結構決定了行為，也就是供應鏈之結構(例如，回饋路徑、互動、時間延遲與非線性關係)亦是造成長鞭效應之原因與不可避免之因素。

現代科技的可得性，幫助企業協作組織間的活動並增加供應鏈的效能(Levary & Mathieu, 2004)。資訊科技不只是使資訊能夠分享於跨組織的夥伴間，責任將獲得重新分配(例如，供應商可能得到零售商的存貨水準資料並採取必要的補貨行動)以及使得管理功能策略與企業整體策略的整合更為容易(González-Benito, 2007)。但光靠資訊科技並無法消除供應鏈中的資訊扭曲的可能或決定合適的資訊在供應鏈中流動(Hull, 2002)。

2.3 資訊分享與預測

大體而言，資訊分享在供應鏈管理的研究中已受到極大的注意，並且被視為

是許多供應鏈作業問題的解決途徑 (Bailey & Francis, 2008; Cachon & Fisher, 2000; Dejonckheere, Disney, Lambrecht & Towill, 2004; Huang & Gangopadhyay, 2004; Lee & Whang, 2000; Raghunathan, 2003; Sahin & Robinson, 2005)。在過去，許多研究相信當組織能更快速地分享資訊時，企業可以消除需求的虛增現象 (Forrester, 1961; Lee et al., 1997a; Lee et al., 1997b; Towill, 1996)。在供應鏈管理文獻中，供應鏈成員間的資訊分享被視為是對付長鞭效應的主要可行策略 (Cachon & Fisher, 2000; Dejonckheere et al., 2004; Lee & Whang, 2000; Lee et al., 2000)。例如，Raghunathan (2003)探討零售商的需求在某段期間內可能是相關的條件下資訊分享之利益，並發現需求相關程度的高低對供應鏈資訊分享的價值以及意願有所影響。Huang & Gangopadhyay (2004)探討資訊分享的有效性，並且發現配銷商和批發商在最終存貨和訂貨數量都能從資訊分享方面獲得好處。資訊分享利益的實現將有助於供應鏈各階層有較高的意願去分享他們的資訊。

許多因素決定供應鏈之績效表現，預測是其中一項重要之因素。許多產業已觀察到零售商預測的誤差會以訂單的方式傳遞給供應商，且這誤差會被放大，這個現象即為長鞭效應 (Lee et al., 1997a)。Lee et al. (1997b)認為當需求資訊以訂單的形式傳播於供應鏈中時容易遭受扭曲，且愈往上游移動此扭曲的程度會越來越大，導致上游廠商作出錯誤的存貨與生產決策。因此，不正確之預測會引起供應鏈需求之變異，使得供給與需求不平衡，因而可能導致各類銷售與生產相關問題。

有效管理供應鏈之其中一項重要之構成要素是需求規劃，但是由於每一個顧客購買某項特定商品都會有其考量之因素，要了解與預測每一顧客之購買決策流程將會變得非常困難。在過去供應鏈管理領域有關於預測之研究，一些時間序列之方法，例如，指數平滑、Holt's model、Winters' model 以及 ARIMA 等方法已被頻繁地使用。許多研究亦評估在不同的需求流程下以及使用之預測方法，供應鏈變異被誇大之程度 (Chen et al., 2000; Chen, Ryan & Simchi-Levi, 2000)。不同之預測方法會產生不同之預測誤差，然而，由於需求之不確定性，在某些時候即使我們使用之預測方法能得到較高之正確性，但卻造成較高之供應鏈成本與不穩定

性。因此，預測方法之選擇會顯著影響供應鏈之績效。

為了改進供應鏈之績效，相關研究建議供應鏈之成員應該進行資訊分享以及協調訂單(Lee & Whang, 2000; Sahin & Robinson, 2005; Tang & Nurmaya Musa, 2011; Wu, Huatuco, Frizelle & Smart, 2013; Zhao, Xie & Zhang, 2002)。例如，Zhao, Xie & Leung (2002)在一個具有產能緊度的供應商與多個零售商之模型中，說明不同預測模型之選擇如何影響供應鏈之績效以及資訊分享之利益。Byrne & Heavey (2006)以真實產業的供應鏈結構與參數實證研究資訊分享以及預測模型選擇對供應鏈績效之影響，這個供應鏈包含多個顧客、配銷商以及產品，此外廠商與配銷商各自面臨不同的需求模式與相關成本，研究顯示透過改進資訊分享方法與預測技術將可達到先前以模型為基礎之研究所宣稱之利益。Sohn & Lim (2007)使用蒙地卡羅模擬高科技產業多世代(multi-generation)產品在不同預測模型與資訊分享政策下在同一市場相互競爭之情況。他們的模型中考慮季節性、價格敏感性與供應商之產能政策並試圖找出最理想之資訊分享政策和預測模型組合能產生之最大之利潤與服務水準。

一般來說，上述之研究探討包含一個供應商與多個零售商之供應鏈。這些模型提出且評估零售商與供應商之間資訊分享與使用之不同的需求預測技術。在此情境中，供應商假設是具有固定產能之製造商，生產單一產品予零售商。所有的零售商被假定符合每一期具有相同平均需求水準之特定需求分配。他們的研究透過電腦模擬來評估供應鏈之相關成本，包括單一供應商以及多個零售商之個別成本。這些文章分析在不同之需求模式與產能緊度下，零售商之需求預測、補貨決策以及供應商之生產決策之影響。他們的結論是預測模型之選擇、資訊分享方法、零售商面臨之需求模式與供應商之產能政策會顯著影響整個供應鏈之績效。

2.4 小結

為了要調查供應鏈系統存在混沌行為以及混沌行為之形成，許多研究採用限制參數為確定數值之作法(Coppini, Rossignoli, Rossi & Strozzi, 2010; Hwarng &

Xie, 2008; Larsen et al., 1999; Mosekilde & Larsen, 1988; Sosnovtseva & Mosekilde, 1997; Thomsen et al., 1992)。這些研究通常使用啤酒配銷模型(beer distribution model)作為實驗設定並以 Stermann (1989)提出的錨定和調整啟發法(anchoring and adjustment heuristic)作為其訂購決策之準則。但大多數這一方面的研究仍停留在證明供應鏈系統可能存在混沌行為之事實，或是將不同程度的混沌現象予以分類(Larsen et al., 1999; Mosekilde & Larsen, 1988; Sosnovtseva & Mosekilde, 1997; Thomsen et al., 1992)，對於供應鏈系統之動態性如何產生混沌行為卻是研究上之缺口(Hwarng & Xie, 2008)。有許多會發生在動態供應鏈系統的非線性動態現象已被提出，例如，不同週期震盪的有限循環與確定混沌、穩定、週期、半週期(quasiperiodic)、混沌以及超混沌(hyperchaotic)行為等等，他們同時也發現混沌/超混沌行為會比穩定/週期行為產生較高之成本(Larsen et al., 1999; Mosekilde & Larsen, 1988; Sosnovtseva & Mosekilde, 1997; Thomsen et al., 1992)。基本上，上述之研究皆強調混沌行為對於有效管理供應鏈之負面影響，但同樣的，我們還是不了解混沌行為是如何發生以及它跟動態供應鏈之間的關係。

本研究進行之研究工作與 Hwarng & Xie (2008)之工作類似，皆是想了解供應鏈之因子如何造成供應鏈之動態性，以及供應鏈之動態性與系統混沌之關係。透過文獻回顧，我們發現在供應鏈管理領域中，預測對於系統混沌之影響尚未被檢視。本研究採用與 Hwarng & Xie 以及過去探討混沌在動態供應鏈系統相關研究相同之作法，即以混沌理論為觀點，採用系統動力學途徑，使用啤酒配銷模型以及 Stermann (1989)提出之訂購決策法則，來達到研究供應鏈因子如何造成供應鏈之動態性以及混沌行為之目的。本研究與 Hwarng & Xie 的研究之差異在於資訊分享與需求模式之水準不同。過去在供應鏈管理與 Hwarng & Xie 的研究結果皆指出在某些情況下供應鏈分享需求資訊帶來的壞處可能會大於好處(Zhao, Xie & Zhang, 2002)。Hwarng & Xie 的研究界定出在某些決策域適合或不適合資訊分享，本研究將更進一步探討在適合資訊分享的條件下，供應鏈應該採用何種資訊分享政策。在需求模式方面，即使在傳統的啤酒遊戲採用與 Hwarng

& Xie 研究中所使用之需求模式就能模擬出長鞭效應與混沌行為。但過去的研究指出需求模式與預測有很大的關係，因此本研究的需求模式將考量一隨機但較真實的特定需求分配。我們想了解的是，過去於啤酒遊戲中所使用之需求模式是不是會過度誇大變異行為的發生，一隨機的需求分配是否會有機會增加供應鏈波動的程度，但同時由於其隨機性，卻又較易導致混沌狀態。另外，傳統的啤酒配銷模型是假定無限產能(亦或產能調整的時間趨近於零)，亦即在最上游階層，每次都能滿足要求生產的數量。這一假設不太合乎現實生活供應鏈的運作狀況，本研究將要對啤酒配銷模型進行部份的修改以利本研究探討產能緊度對供應鏈行為以及系統混沌的影響。本研究與 Hwarng & Xie 的研究最大的不同處在於本研究將探討預測與混沌之關係。藉由 LE 之計算(Kocarev et al., 2006; Williams, 1997)，將可以了解哪些預測方法是較容易產生混沌資料。

3. 研究模擬模型

3.1 啤酒配銷模型

啤酒遊戲為知名在紙板上進行的管理遊戲，為 MIT System Dynamics Group 於六零年代發展的一套模擬供應鏈運作的情境遊戲。啤酒遊戲是一個適於研究系統構造(個別行為與某些情境下之決策)如何對供應鏈動態性產生影響之實驗(Mosekilde, 1996; Sterman, 1984; Sterman, 1989)。基本上，基於啤酒遊戲設定所建立之啤酒配銷模型是一個包含零售商、中間商、配銷商以及工廠的四階層鏈狀生產—配銷供應鏈。每一期(一週)，顧客會向零售商購買商品(這裡指的是單一品項啤酒)，零售商以存貨滿足顧客的需求，但如果存貨不足則視為缺貨訂單。在啤酒遊戲中假設整個市場只有一家零售商，且為訂單式生產(Make-to-Order)的供應鏈(只限工廠有生產能力)。零售商向它的供應商，即中間商發出訂單，同樣地，如果有足夠的庫存，中間商以存貨來滿足零售商的訂單。配銷商與中間商執行相同的功能。最後，在工廠階層則根據下游訂單生產所需要的啤酒數量。每一階層

間(除了零售商與顧客之間)都存在著前置時間，這包括上游階層接到訂單的兩期、訂單處理延遲與下游收到貨物的兩期運送延遲，工廠階層則需要花三期的製造週期時間來生產啤酒，並且假設產能的調整沒有限制(沒有設備、人力或原物料供應不足的情況)，因此，工廠每次實際生產的數量都會等於其要求生產的數量。

每一供應鏈階層均由一個遊戲參與者予以管理，一個階層要管理的項目包含存貨與其與下游之間的在途存貨。每一期每一階層的存貨都有可能會被消耗殆盡，因此參與者需要補充存貨以維持需要的安全存貨水準。在這裡同時假設倉庫的儲存沒有上限，訂單、運輸無法取消或折回，工廠除了上述所假設無產能緊度之外，來自其供應商的原物料供應亦假設沒有限制。遊戲的目標在於使總成本(四個階層)最小化。每一期，相關的成本包括存貨持有成本每一單位(箱)\$0.50 以及缺貨成本每一單位\$1.00。對於所有階層而言，決策變數是該向自己的上游發出多少訂單，才不會積壓多餘的存貨，同時又能保持在某一顧客服務水準下盡量降低缺貨所造成的損失。

當遊戲要進行的時候，初始的設定如下所述：每一階層的存貨皆包含 12 個單位，每一個訂單延遲、運輸延遲以及生產延遲皆包含 4 個單位。在遊戲一開始的前四期，顧客需求是固定為每期 4 單位，然後在第五期的時候需求突然倍增至每期 8 單位並持續到遊戲結束 (Sternan, 1989)。在啤酒遊戲中每一參與者都是獨立運作，不允許溝通、協同，就如同現實供應鏈的運作方式。唯一的互動是接到訂單並運送存貨給顧客，然後向供應商發出訂單並且收到存貨。因此，每一階層之參與者在任何時間對於其他階層持有之存貨水準並無太多之資訊。典型啤酒遊戲的結果其特徵是每一階層的訂單、存貨會上下劇烈的波動(oscillation)。由下游階層往上游階層觀察時，此波動會放大(amplification)且上游波動循環的波峰與波谷會傾向落後於下游波動循環的波峰與波谷，此現象稱為相位滯後(phase lag)。參與啤酒遊戲的隊伍在供應鏈的各階層產生震盪、放大以及滯延的作用，例如，訂單(需求)的變異，在往在上游傳遞的過程中，很明顯地有被誇大的現象，這個模擬結果證實長鞭效應的存在。

啤酒配銷模型中，管理者唯一要作的決策是決定該向上游階層發出多少的訂單數量。關於每一階層使用之訂購法則，Sternan (1989)在其決策實驗中提出且評估錨定與調整啟發法(anchoring and adjustment heuristic)訂購法則。所謂錨定與調整啟發法，錨指的是預期需求，調整則包括對此一階層實際存貨與期望存貨差距的修正以及對此一階層實際在途存貨與期望在途存貨差距的修正。在此一決策法則中，簡單指數平滑法被使用來預測錨的預期需求，另外兩項調整則是基於實際存貨水準超出或少於目標值的差額。此一決策法則假定決策者僅使用手上可得的資訊，例如，來自下游的訂單、即將收到的貨物、存貨與在途存貨水準以及缺貨情形等局部資訊(local information)，同時假設每一階層的決策者並不具備了解整個系統的結構的整體知識(global knowledge)。這樣的訂購法則方式可以有效解釋多數遊戲參與者的訂購行為，Sternan (1989)發現多數的遊戲參與者並沒有足夠計算或者重視在途存貨的狀況，並低估從發出訂單到收到貨物之間的時間延遲所造成的影響。Sternan 稱此決策行為為“系統之非理性行為”(system irrational behavior)或“回饋的錯誤感知”(misperception of feedback)。Sternan (1989) 提出且評估之錨定和調整啟發法定購法則。在此訂購法則下，訂單可以被公式化如下：

$$O_t = \text{Max}(0, IO_t) \quad (3.1)$$

在這裡的 O_t 是在時間 t 訂購之數量，而 IO_t 指的是期望訂單(indicated orders)。當 IO_t 小於零時則我們會取 O_t 的下限值。否則，訂購的數量就等於期望訂單。期望訂單是根據上述之準則並且可被公式化為下列三項之相加(Sternan, 1989)，如下等式：

$$IO_t = \hat{L}_t + AS_t + ASL_t \quad (3.2)$$

在這裡的 $\hat{L}_t$ 指的是預期需求， AS_t 是對存貨差距的調整，而 ASL_t 是對在途存貨差距的調整。預期需求表示是對下一週預測即將接收到的訂單。它被視為是在我們行為決策法則中的錨，而 AS_t 與 ASL_t 即是所謂的調整機制。預期可以以很多方式來將它公式化，在我們的模型中我們假設所有的決策者具有可適應的預期

(adaptive expectation)，即簡單指數平滑法：

$$\hat{L}_t = \theta L_{t-1} + (1-\theta)\hat{L}_{t-1} \quad 0 \leq \theta \leq 1 \quad (3.3)$$

在這裡時間 t 之預期需求被表示為訂單接收量(即實際需求) L_{t-1} 與預期需求 $\hat{L}_{t-1}$ 之加權總合，此兩項皆是在時間 $t-1$ 評估。參數 θ 是一常數，它決定預期多快被更新。假如 $\theta=1$ ，表示預期每週會被更新使它每週都等於前一週要求之數量。另一方面，假如 $\theta=0$ ，則表示目前的預期並不會改變且從不考慮實際的需求，每週預期仍然等於前一週之預期。對於存貨之調整則可被公式化如下：

$$AS_t = \alpha_s (S_t^* - S_t) \quad (3.4)$$

在這裡 S_t^* 是期望達到之存貨水準目標，而 S_t 是實際存貨。 S_t^* 和 S_t 之差距表示現在的存貨不是均衡的狀態，而參數 α_s 代表的是此一不平衡被修正之速度。例如， $\alpha_s = 0.25$ 表示我們傾向在四週內移除任何存貨上的差異。極端的數值是 $\alpha_s = 0$ ，它表示此訂購法則並不在意存貨的變動(即，調整的速度是零)。

上述之公式(等式(3.1)-(3.4))與先前之研究所使用的公式相同(Thomsen et al., 1992)，但在這裡有些例外。先前在啤酒遊戲中期望存貨是被假定為一固定常數。這個假設是可以被更動的，因為參與者可能會根據產品的流量而重新評估它的期望存貨水準。在本研究將採取如同 Larsen et al. (1999)與 Hwarng & Xie (2008)之作法，期望存貨 S_t^* 將會是預期訂單流量(即預期需求)的一個比例，這比例則取決於期望覆蓋 δ (即，該持有多少存貨滿足幾週的預期需求)，此一常數在 Hwarng & Xie (2008)的研究將它視為前置時間：

$$S_t^* = \delta \hat{L}_t \quad (3.5)$$

接著在此一訂購啟發法之最後的部份是調整在途存貨之誤差。其公式之設定與等式(3.4)、等式(3.5)相似：

$$ASL_t = \alpha_{sl} (SL_t^* - SL_t) \quad (3.6)$$

在這裡 SL_t^* 是時間 t 期望之在途存貨， SL_t 是實際在途存貨，而參數 α_{sl} 則決定期望與實際的在途存貨之差異多快會被消除，當 α_{sl} 愈小，即表示參與者愈低估在途存貨的存在，因此參與者愈有可能會重複發出訂單。參數 α_{sl} 扮演的角色跟等式 (3.4) 中之 α_s 相同。與等式 (3.5) 類似，期望的在途存貨也可以被公式化為：

$$SL_t^* = \gamma \hat{L}_t \quad (3.7)$$

在這裡 γ 是訂購與取得商品之間預期的(或意識到的)延遲。這一公式使得期望在途存貨會是運輸延遲的一個比例。假如此項延遲增加，則訂單必須要加速增加以適當管理商品之流動。

期望存貨與期望在途存貨被視為是動態的變數，且在模擬的過程中會根據產品流動之變動而予以調整。新修正之公式將比過去研究在啤酒遊戲中假設為固定常數值更為合適。而這樣更符合現實存貨管理過程的決策法則可能比過去研究使用簡單之決策法則產生更多複雜的供應鏈動態行為(Larsen et al., 1999)。此外，本研究使用之訂購法則(錨定和調整啟發法)能真實反映實際供應鏈管理人員之訂購與補貨決策(Sterman, 1989)。藉由改變參數 α_s 與 α_{sl} ，此一訂購法則可以展示許多可能的訂購決定。因此，多樣化的訂購決定可以反應許多真實的決策情形並且幫助我們了解供應鏈因子對系統行為之影響(Hwarng & Xie, 2008)。

3.2 供應鏈因子

3.2.1 需求模式

零售商面對的顧客需求模式會產生訂單資訊，並且影響供應鏈其他階層之產能與存貨政策。顧客的需求是外部變數，我們即將考慮兩種需求型態，即 step function(SF)以及常態需求分配(ND)。在建構動態系統模型的過程中，有時候需要測試某項輸入變數發生不連續變動時系統可能會產生的反應模式，step function 指的即是需求原先停留在某一水準，但在某一時間點突然增加至另一水

準並且持續到最後(有關於 step function 的所有模擬中,它包含每週 4 單位的固定需求,直到第五週需求會倍增至每週 8 單位並維持這一水準直到模擬結束)。然而,我們懷疑在傳統的遊戲中所使用的 step function 較不真實且可能過度誇大變異之程度。因此,本研究亦考慮在一個比較常見的需求環境下,系統的行為會如何表現。本研究將要模擬一個隨機但較真實的需求模式,即常態需求分配。這一常態需求分配將包含平均數為 3 以及標準差為 0.333 的母體參數。由於常態需求分配相對而言是一隨機的需求分配,因此系統的變異與波動程度有可能改變,且其隨機性讓我們想了解是否較易產生混沌現象。

3.2.2 資訊分享

在傳統的啤酒遊戲中,資訊分享是不可能被考慮的。但由於今日資訊與通訊科技的快速進展與普遍性,這一項限制應該被重新考慮其合適性。本研究根據資訊被分享的程度,將資訊分享政策區分為以下三種型態:分散式(decentralized)政策(DEP)、集中式(centralized)政策(CEP)以及個別(separated)政策(SEP)。首先,在分散式政策下,零售商並不將資訊分享給其他供應鏈階層。每一階層只能從其下游階層接收到的訂單作決策。其次,在集中式政策下,資訊將會被完全地分享。零售商分享他們接收到的顧客訂單資訊予供應鏈的其他階層,然後上游階層根據這些資料預測未來的訂單狀況。最後,在個別政策中,零售商並不將顧客需求資訊分享給其他供應鏈階層,但每一階層可跟其上游階層或下游階層分享訂單或銷售資訊。上述三種資訊分享政策模型化需要適當變更模型之結構(新增變數或改變資訊流)將被包含至我們的模擬實驗中。

3.2.3 預測方法

在啤酒遊戲中,每一階層皆會使用其預測方法對其直接下游進行預測訂單或需求,並根據預測結果生產或決定訂購數量。為了簡化分析,本研究假設每一階層皆使用相同之預測方法。在每一種資訊分享政策下,我們將要多探討兩種不同

預測方法對供應鏈系統之影響。新考慮的預測方法是簡單移動平均(Simple Moving Average, SMA)，而原來之啤酒遊戲使用的是簡單指數平滑法(Simple Exponential Smoothing, SES)。在原来的啤酒配銷模型中，簡單指數平滑法使用之平滑常數為 0.25。而在新檢視的預測方法中，我們將以過去 3 期歷史資料作為下一期預期需求之預測基礎。

3.2.4 產能緊度

供應商的產能政策會影響供應鏈之績效與資訊分享的價值。因此工廠階層面對到的產能緊度(capacity tightness, CT)亦被包含在我們的模型中。本研究將工廠的產能視為其中的一項因子，以了解每一週可得的產能。產能緊度指的是所有可得的產能與所有需要的產能(即工廠接收到的所有訂單或需求)的一個比率。因此，每週所有可得的產能等於所有需求乘上 CT 因子。三種水準的 CT 因子將被本研究考慮在內：低(LO)(1.33)、中(ME)(1.18)以及高(HI)(1.05)(Zhao, Xie, & Leung, 2002)。根據產能利用率 $= (1/CT) * 100\%$ ，低、中、高緊度對應到的產能利用率，分別是 75%、85%以及 95%。原來的啤酒配銷模型並不包含產能的部份，因此本研究將對此模型進行部份修改。我們將在原來的啤酒配銷模型新增的產能部分增加一個外部變數來限制工廠每週的可得產能。在原来的啤酒遊戲中，工廠的產能只有生產延遲的限制，但並無有限產能的假設，表 1 摘要本研究所描述之供應鏈因子。

《表 1》 供應鏈因子摘要

供應鏈因子	因子名稱	縮寫	水準	數值
1	需求模式	DP	2	SF, ND
2	資訊分享	IS	3	DEP, CEP, SEP
3	預測方法	FM	2	SES, SMA
4	產能緊度	CT	3	低(1.33), 中(1.18), 高(1.05)

3.4 混沌衡量

一般來說，我們可以以圖形的方式或是量化的方式來確認混沌或判定系統為

穩定、週期、半週期或混沌狀態。在這裡我們根據先前之研究建議(Hwarng & Xie, 2008; Wilding, 1998a; Wilding, 1998b), 採用量化的方式來衡量系統之狀態。LE 被廣泛使用且被證明為一合適之判定以及區分非線性系統行為之衡量指標(Wolf, Swift, Swinney & Vastano, 1985)。LE 是用來量測動態系統中任何兩個相鄰的兩點以多快的速率彼此遠離, 關於 LE 之計算, 第 i 個 LE 的公式為:

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2 \frac{p_i(t)}{p_i(0)} \quad (3.8)$$

其中 λ 就是 LE, 表示的是兩個軌跡以時間的指數形式彼此遠離或接近。 $p_i(t)$ 為橢圓主軸在時間 t 之長度; 而 λ_i 是 LE 從最大到最小的依次排序順序。假如至少有一個 LE 或最大的一個 LE 是正的, 則系統是混沌的; 否則, 系統是穩定、週期或半週期 (Hwarng & Xie, 2008)。本研究使用 *MatLab7.0* 來計算最大之 LE。

4. 研究問題與模擬實驗

4.1 研究問題與假設

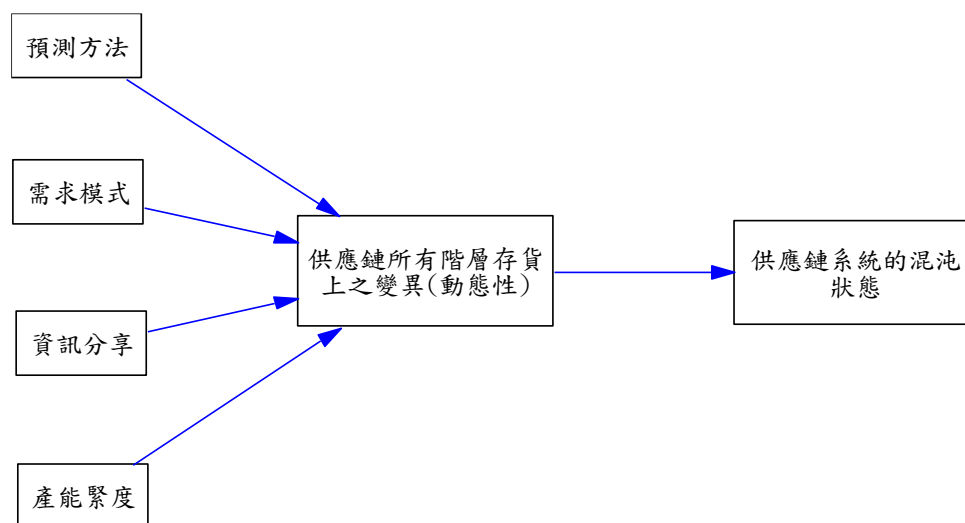
本研究概念上的模型如圖 1 所示。根據前述之文獻回顧, 在傳統供應鏈管理之研究, 預測方法之選擇會影響供應鏈之績效與資訊分享之價值。在此我們將供應鏈視為動態非線性系統, 預測因子會與其它供應鏈因子相互影響並由於回饋機制與非線性關係使得最終供應鏈系統之行為產生動態性, 供應鏈系統將有可能變得不可預測而動態性極有可能使系統發生混沌現象。根據前面所描述, 本研究之研究問題一與二如下:

研究問題一: 在不同供應鏈因子預測方法、需求模式、資訊分享與產能緊度的影響下, 各階層之系統行為為何。

研究問題二: 不同之供應鏈因子如何導致系統之動態性甚至是混沌現象。

本研究依上述發展之研究問題並希望能從啤酒配銷模型之模擬實驗結果驗證下列之研究假設:

假設一: 在不同供應鏈因子預測方法、需求模式、資訊分享與產能緊度的影響下, 各階層會產生不同之系統行為。



《圖 1》本研究之概念模型圖

假設二：不同之供應鏈因子會作用或交互作用且導致不同程度之系統動態性或系統混沌。

若是不同供應鏈因子會對系統之動態性造成不同之影響，而在某些情況下系統之動態性又容易發生系統混沌，我們將可從混沌觀點了解供應鏈因子如何造成系統之動態性以及動態性與系統混沌之間的關係，以及進一步理解如何達到較佳之供應鏈績效表現。

4.2 模擬設計

本研究使用啤酒配銷模型進行模擬實驗以了解系統之行為如何變動。在此模型中，本研究採用原先 Sterman (1989) 使用之初始設定值(詳見表 2)。本研究將使用系統動力學模擬軟體 *Vensim DSS* 作為建構啤酒配銷模型之工具。在所有模擬的實驗中，所有階層使用之參數 θ 皆是固定為 0.25。為了要調查在不同決策域對系統混沌的影響， α_s 與 α_{sl} 在本研究中亦不是固定為常數值，而是在其值域內使用隨機均等分配(random uniform distribution)隨機抽取 200 個參數組合進行模擬。同時，為了簡化研究的目的，每一階層皆設定為相同之參數數值。本研究即將進行模擬 36 種情境，如下表 3，而每一種情境將包含隨機 200 次的模擬結果。本研究將觀察不同階層之有效存貨資料以探討系統之行為。有效存貨之定義是存

貨水準減掉缺貨訂單。在每一次之模擬情境中，我們將要蒐集所有階層之有效存貨資料，然後計算最大之 LE。因此，我們總共會得到 $36 \times 200 \times 4 = 28,800$ 個 LE，而模擬的時間長度為 1000 期。

《表 2》 啤酒配銷模型常數變數值與參數值

變數	初始值	參數	數值
存貨	12	θ	0.25
訂單	4	α_s	0.00~1.00
運輸	4	α_{sl}	0.00~1.00
處理延遲	4	δ	3
運輸延遲	4	γ	2
生產延遲	4		

《表 3》 模擬實驗

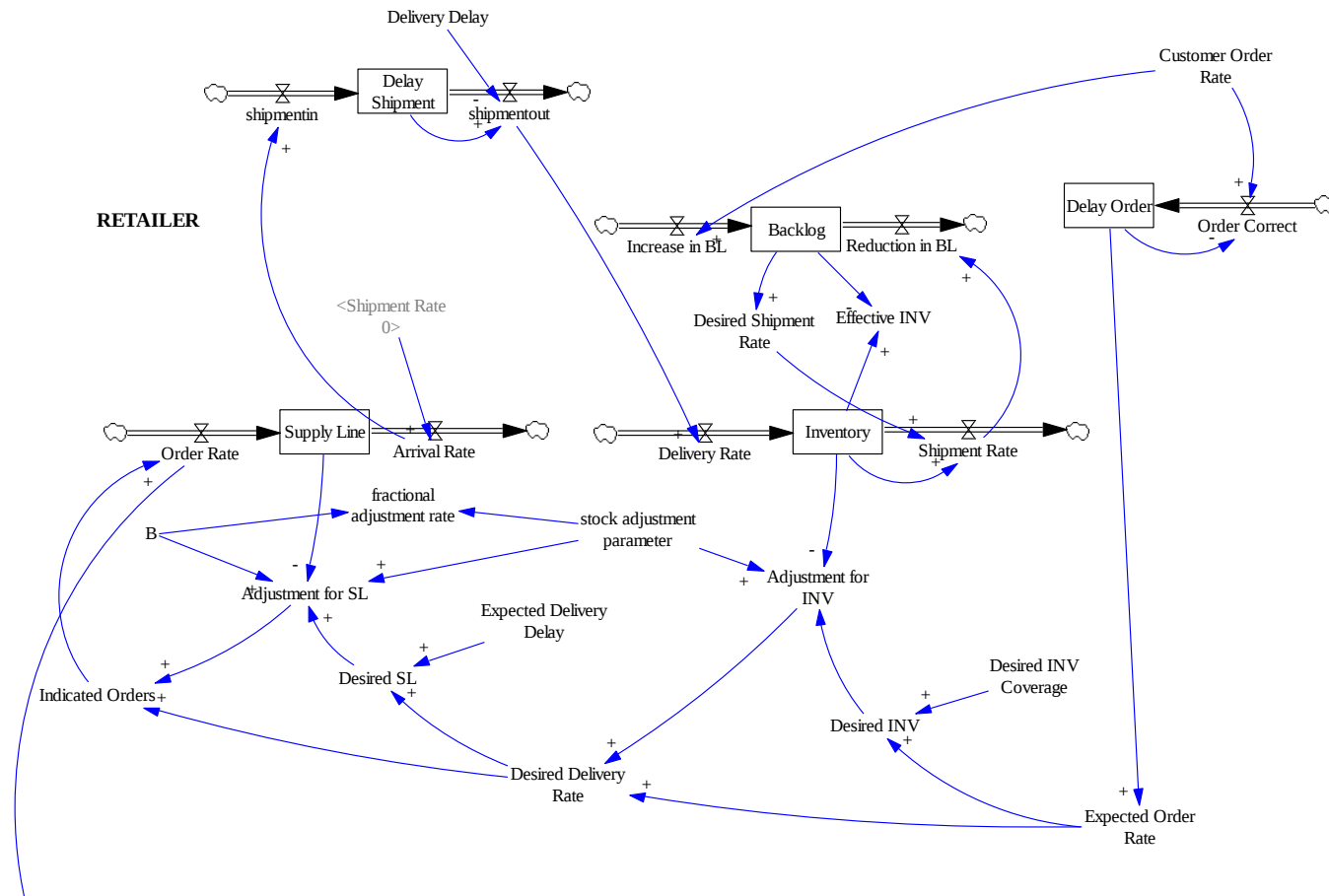
情境	模擬			
	DP	FM	CT	IS
1	SF	SES	1.05	DEP
2	SF	SES	1.05	CEP
3	SF	SES	1.05	SEP
4	SF	SES	1.18	DEP
5	SF	SES	1.18	CEP
6	SF	SES	1.18	SEP
7	SF	SES	1.33	DEP
8	SF	SES	1.33	CEP
9	SF	SES	1.33	SEP
10	SF	SMA	1.05	DEP
11	SF	SMA	1.05	CEP
12	SF	SMA	1.05	SEP
13	SF	SMA	1.18	DEP
14	SF	SMA	1.18	CEP
15	SF	SMA	1.18	SEP
16	SF	SMA	1.33	DEP
17	SF	SMA	1.33	CEP
18	SF	SMA	1.33	SEP
19	ND	SES	1.05	DEP
20	ND	SES	1.05	CEP
21	ND	SES	1.05	SEP
22	ND	SES	1.18	DEP
23	ND	SES	1.18	CEP
24	ND	SES	1.18	SEP

25	ND	SES	1.33	DEP
26	ND	SES	1.33	CEP
27	ND	SES	1.33	SEP
28	ND	SMA	1.05	DEP
29	ND	SMA	1.05	CEP
30	ND	SMA	1.05	SEP
31	ND	SMA	1.18	DEP
32	ND	SMA	1.18	CEP
33	ND	SMA	1.18	SEP
34	ND	SMA	1.33	DEP
35	ND	SMA	1.33	CEP
36	ND	SMA	1.33	SEP

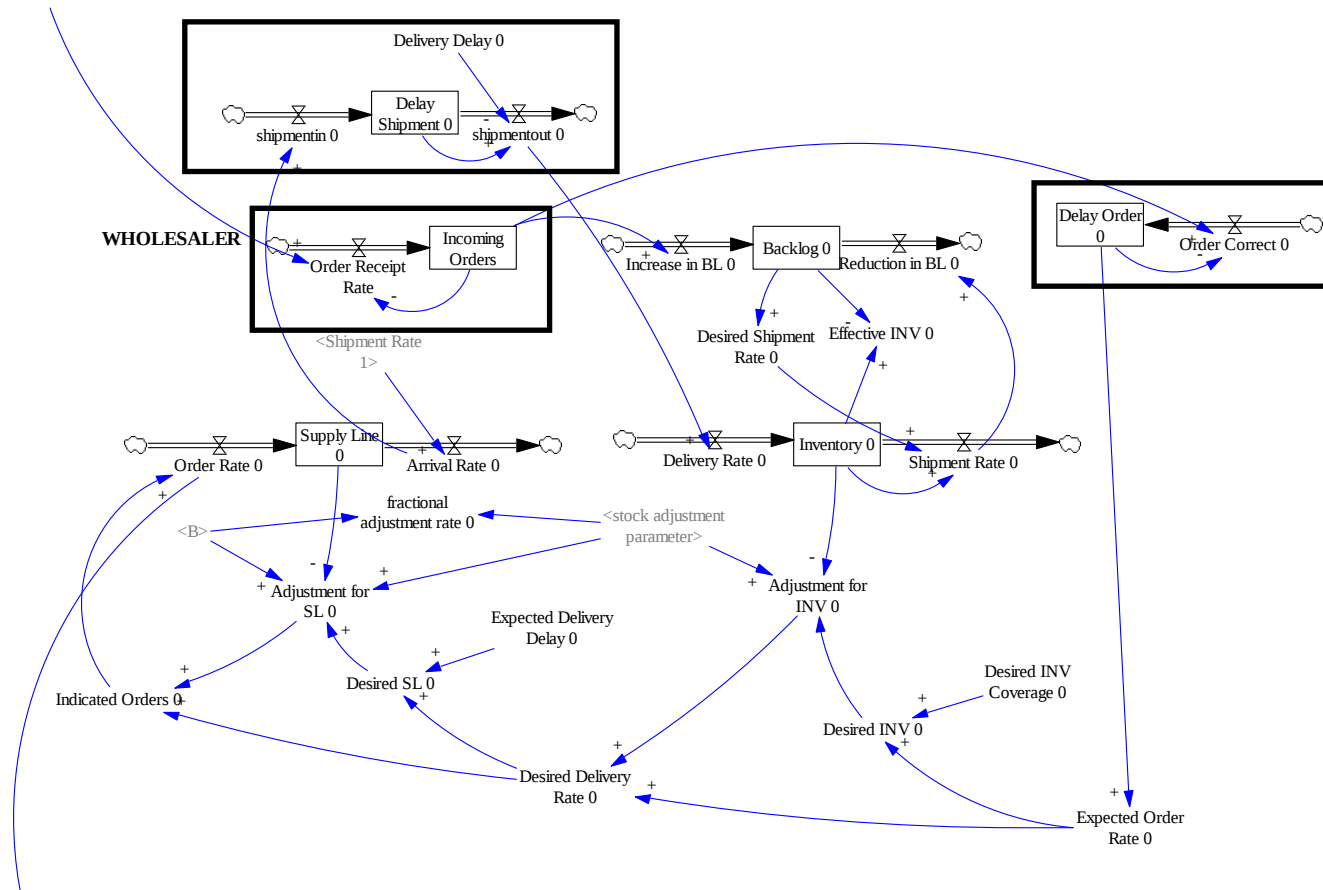
5. 模擬實驗結果

5.1 模型建構

藉由前述關於啤酒遊戲之討論，本研究發展之一階啤酒配銷模型(見圖 2)，此為零售商階層。在這模型流量的部份分為資訊流與物料流。資訊流指的是訂單流程，每一階層會根據上游發出的訂單(此一階層為零售商，收到之下游訂單為顧客訂單)來預測預期訂單(Expected Order Rate)。物料流指的是商品的流動，例如銷售給顧客所產生的運送(Shipment Rate)以及接收來自上游的運輸(Delivery Rate)。在此一般存貨管理模型亦增加缺貨(Backlog)結構。在本研究中，缺貨定義為下游已訂購但上游還沒運送出去的數量。在途存貨則定義為下游已訂購但還尚未接收到的數量。至於時間延遲方面，由上一階層運輸至此一階層的貨物在還沒抵達之前會先累積在存量延遲運送(Delay Shipment)中，貨物在此存量停留兩期的時間是為運輸延遲(Delivery Delay)。另一項是兩期的訂單延遲，下游發出的訂單對上一階層而言是即將到來的訂單(Incoming Orders)，此一尚未到達上游階層但已發送的訂單根據缺貨的定義會增加缺貨存量。但即將到來的訂單還要再延遲一期，即延遲訂單(Delay Order)，才會到達此一階層。此一階層會根據此一兩期延遲的訂單資訊作出預測，再加上存貨與在途存貨的調整決定此期需要發出的訂單大小。關於物料延遲與時間延遲如圖 3 內方框所示。

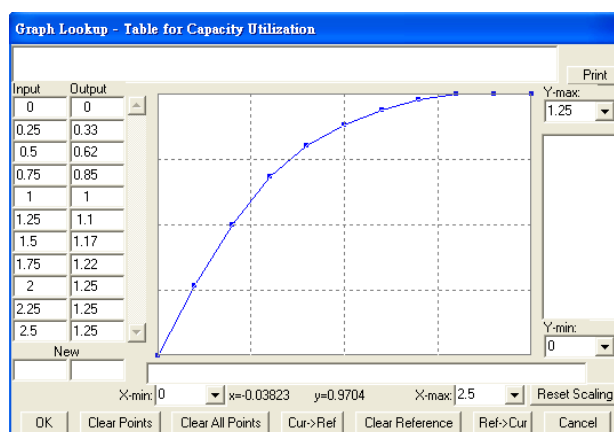


《圖 2》 本研究發展之一階啤酒配銷模型

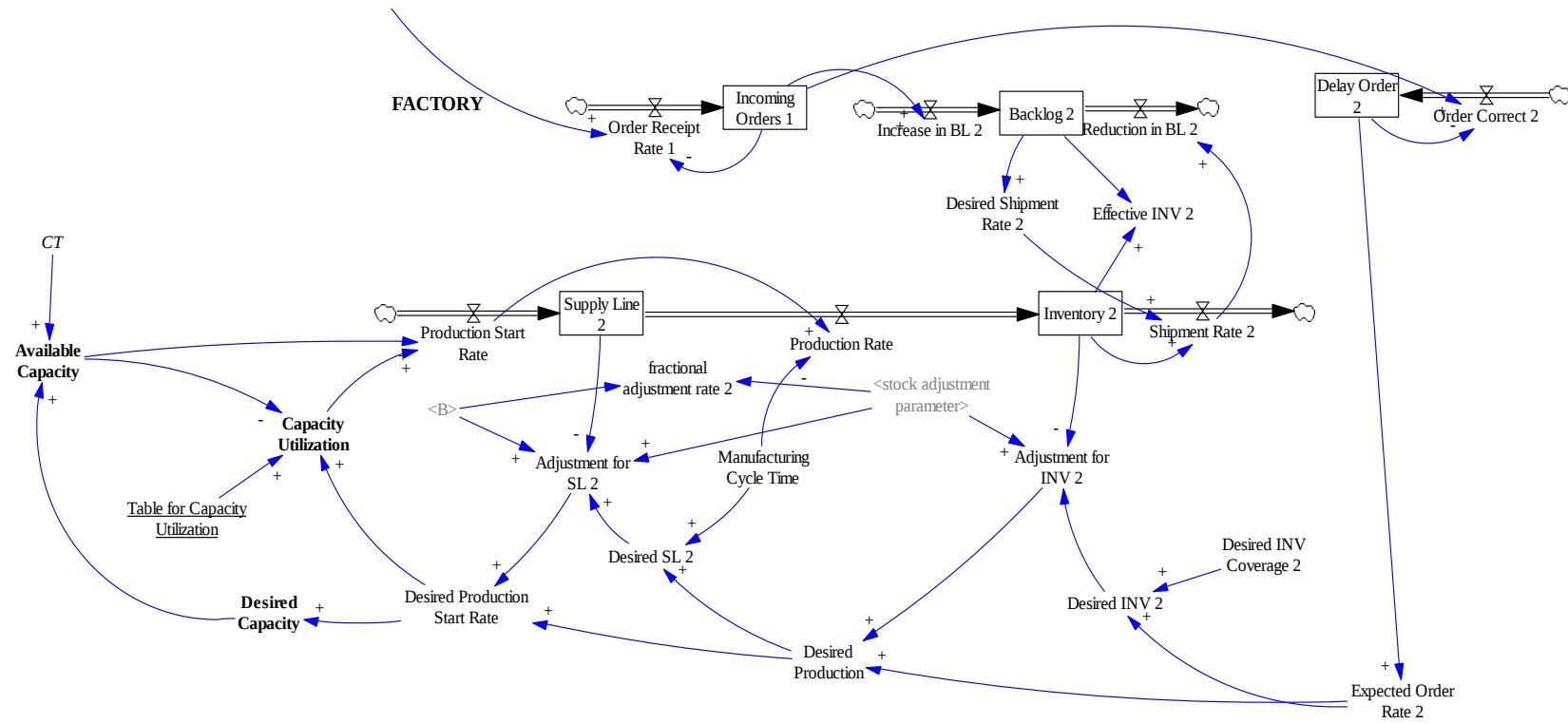


《圖 3》 啤酒模型中之資訊延遲與物料延遲結構

事實上，在過去發展的啤酒配銷模型中每一階層都應包含相同的結構(工廠階層亦是如此)，而四個階層間共存在三階資訊延遲結構與物料延遲結構。此外，由於在本模型中原料供應並無限制，且亦假設啤酒的製造程序合併為一個生產步驟，因此半完成品在經過三期的製造循環時間會成為完成品累積在存貨存量。關於完成品存貨與半完成品存貨的調整結構以及使用的訂購法則與其他階層相同。與其他階層不同的地方在於由下游階層發出的訂單與工廠階層存貨、在途存貨的調整所決定的期望開始生產(Desired Production Start Rate)(同等於其他階層的期望訂單(Indicated Order))並不會直接等於這一階層要開始生產(Production Start Rate)的數量(相對於其他階層的訂單(Order Rate))。在這部份模形新增幾個變數：期望產能、可得產能與產能利用率，使得原來產能沒有限制的假設能夠不成立並允許本研究模擬不同的產能緊度。開始生產將會等於可得產能乘上產能利用率，產能利用率的決定來自於期望開始生產與可得產能的比率(稱為生產計劃壓力或時程壓力(schedule pressure)，衡量管理者應該生產比正常情況多或生產比正常情況少之壓力)，並使用圖形函數(graph function)來描繪生產計劃壓力與產能利用率之間的關係，其相對應的數值如下圖 4 所示。



《圖 4》 本研究使用之產能利用率圖形函數



《圖 5》 本研究發展之工廠階層結構

由上圖之曲線可了解，工廠的產能可能經由某些方式，例如加班，使得最大的產能利用率可以到達 125%。曲線的斜率一開始比較陡表示生產者在產能有可閒置的時候希望多生產一點的傾向，通過(1,1)此參考點(reference point)(期望開始生產等於可得產能)，之後曲線斜率變緩表示邊際生產遞減的現象。整個工廠階層的模型如圖 5 所示。本研究發展模型的次序是由零售商階層逐步擴展至工廠階層。每一階層都可能包含相同之變數，在模型中重複的變數其命名方式依出現順序在變數名稱後面標示 0, 1, 2，例如 Inventory, Inventory 0, Inventory 1, Inventory 2 分別代表零售商存貨、中間商存貨、配銷商存貨與工廠存貨。

5.2 供應鏈因子之操弄

對於本研究發展之啤酒配銷模型而言，輸入變數包含本研究欲檢視的供應鏈因子，分別是預測方法、資訊分享、需求模式與產能緊度。在接下來的部份將要介紹如何來模型化這些供應鏈因子，不同供應鏈因子水準將組成本研究所欲進行實驗之模擬情境。

首先是需求模式，在 Base run 中，外部變數顧客訂單量(Customer Order Rate)所使用的是 step function，其方程式為 $4 + \text{STEP}(4, 5)$ 。本研究另一顧客需求模式選擇的是隨機變異的常態需求分配，可使用 Vensim 內建的公式 RANDOM NORMAL，而設定之平均數為 3，標準差為 0.333 之常態需求分配。

其次是關於預測方法之模型化，與需求模式相同，本研究的模型模擬 Base run 使用的是指數平滑法，預期需求更新參數 $\theta = 0.25$ ，表示平均一週更新 1/4 或平均 4 週更新完成，使用的是 SMOOTH(in, stime)函數。方程式中的 in 是實際存量，stime 為延滯時間 4 週。另一預測方法考量的是 3 期的移動平均法，因此本研究發展一三階資訊延遲結構，將過去三期的資料累加平均，以達到模型化此一供應鏈因子之目的。

接下來是屬於資訊分享模型化的部份，這涉及到模型結構上的改變。Base run 中使用的是傳統的分散式政策，亦即每一階層會根據下游階層的訂單資訊來進行

預測(在模型中的變數從下游至上游階層分別是 Delay Order, Delay Order 0, Delay Order 1, Delay Order 2)。第二種資訊分享的方式為集中式政策，每一階層都能取得零售商階層收到的訂單資訊(Delay Order)。最後一種為個別式資訊分享政策，我們假設每一階層都能個別取得其立即下游階層的銷售資訊(Shipment Rate, Shipment Rate 0, Shipment Rate 1)。

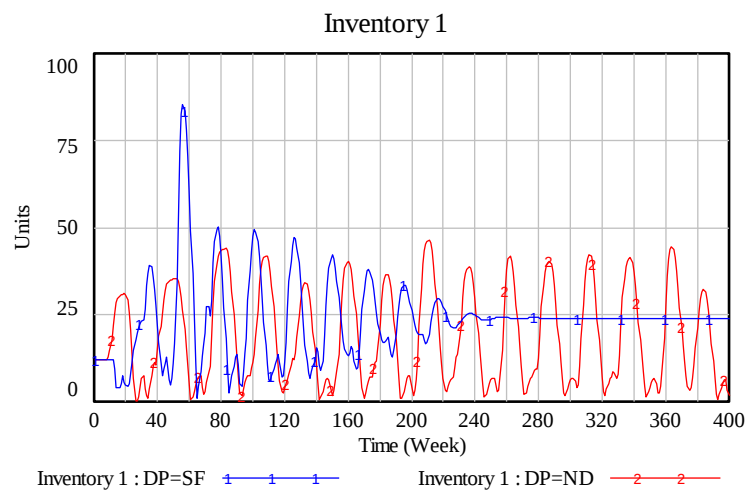
最後關於產能緊度之模型化。由於之前本研究已將模型進行部份之修改，並將產能政策之決策設為外部變數，因此只要將外部變數(CT)設為不同之常數值即可進行模擬不同的產能緊度，分別是 $CT=1.05$, $CT=1.18$, $CT=1.33$ (Zhao, Xie, & Leung, 2002)。

5.3 模擬實驗結果

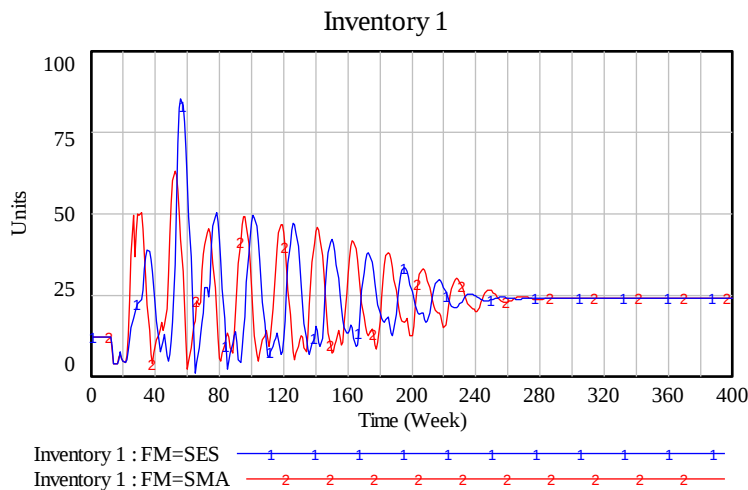
在本研究中，只對決策法則之存貨調整參數 α_s (在模型中為變數 stock adjustment parameter)與在途存貨調整參數 α_{sl} (在模型中為變數 fractional adjustment rate)感到興趣。藉由改變參數 α_s 與 α_{sl} ，本研究使用之錨定與調整訂購法則能展示許多不同的訂購決定，我們將可瞭解在不同的訂購決策下供應鏈因子對系統行為之影響。一組參數 (α_s, α_{sl}) 形成所謂的參數組合，對模型而言是所謂的投入變數。相對對本研究觀察之各階層有效存貨資料來說，可視為模型的輸出變數。本研究使用 Base run 之參數組合 $(\theta=0.25, \alpha_s=0.26, \alpha_{sl}=0.0884)$ 模擬不同之供應鏈因子水準。當我們對特定供應鏈因子進行不同水準模擬時，其他因子固定為 Base model 之水準不變。實驗之結果如下，在此舉配銷商階層存貨(Inventory 1)為例說明，分別參考圖 6、7、8、與 9。

藉由上述之模擬實驗，本研究調查供應鏈因子與系統動態性之間的關係。我們可由實驗結果發現，在固定的決策參數設定下，不同的供應鏈因子水準會對系統造成不同的變異性與不穩定性。例如，在需求模式方面，step function 所形成的系統行為是衰減波動，但對於常態分配的需求模式，可能由於其隨機性，系統的反應卻是呈現不規則、非週期性的震盪。此外，我們亦發現雖然系統受到不同

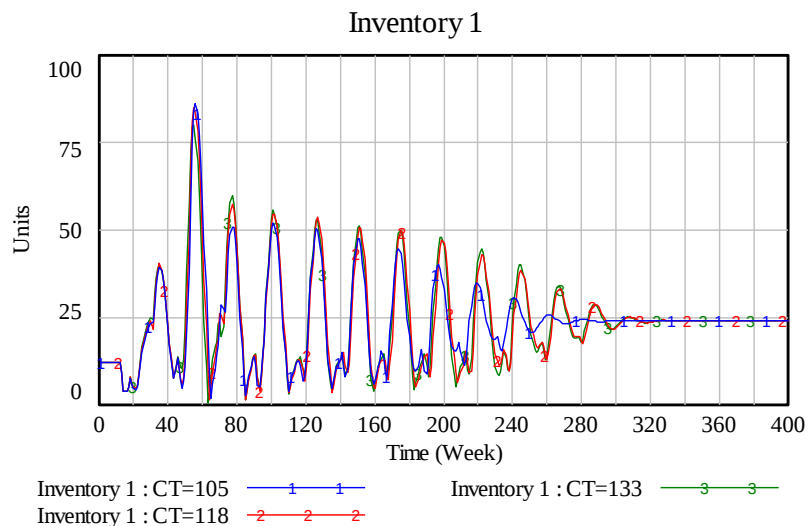
供應鏈因子(預測方法與資訊分享)水準之影響，其行為模式不致太大的改變，但觀察變數的行為在頻率、時間或波動程度上仍有很大之差異。最後，關於產能緊度因子之影響，三種實驗水準(高、中、低)在資料上的表現雖然幾近相同，但在模擬中後期(大約 200 週)仍可看出高產能緊度($CT=1.05$)明顯逐漸與中、低產能緊度($CT=1.18$, $CT=1.33$)分離。



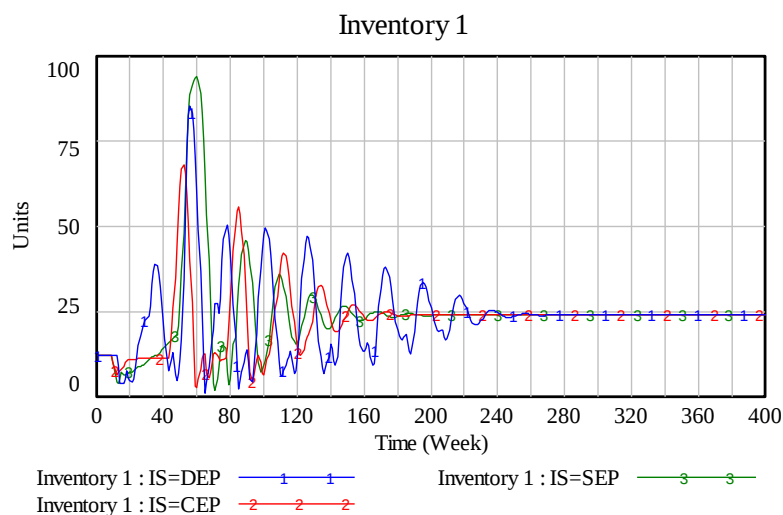
《圖 6》 需求模式



《圖 7》 預測方法



《圖 8》 產能緊度



《圖 9》 資訊分享

5.4 計算 LE 與形成決策域

本研究已完成所有的模擬實驗(表 3)並取得每一階層之有效存貨資料共 $36 \times 200 \times 4 = 28,800$ 筆。藉由 MATLAB 軟體計算最大之 LE 共得 $36 \times 200 \times 4 = 28,800$ 個 LE 值。要處理這麼多的 LE 值並進行分析並不是一件容易處理的事。透過決策域形成，這些 LE 的平均值將較能具有代表性且同時亦方便本研究了解不同供應鏈因子在不同決策域對系統行為之影響。關於將不同參數集合分群至不同決策域，本研究遵循以下兩項準則(Hwarng & Xie, 2008)：(1)在同一決策域之系統行

為應該具有相似性或同質性；(2)決策域之數目應易於管理。本研究以 LE 作為量化與判斷系統狀態之基礎。根據第一項準則，分群至相同決策域之 LE 值表示其值域較相近，因此決策域內之 LE 平均值用來代表此時的系統狀態會較具有意義。接下來，本研究將描述如何決定決策域的數目(準則二)。

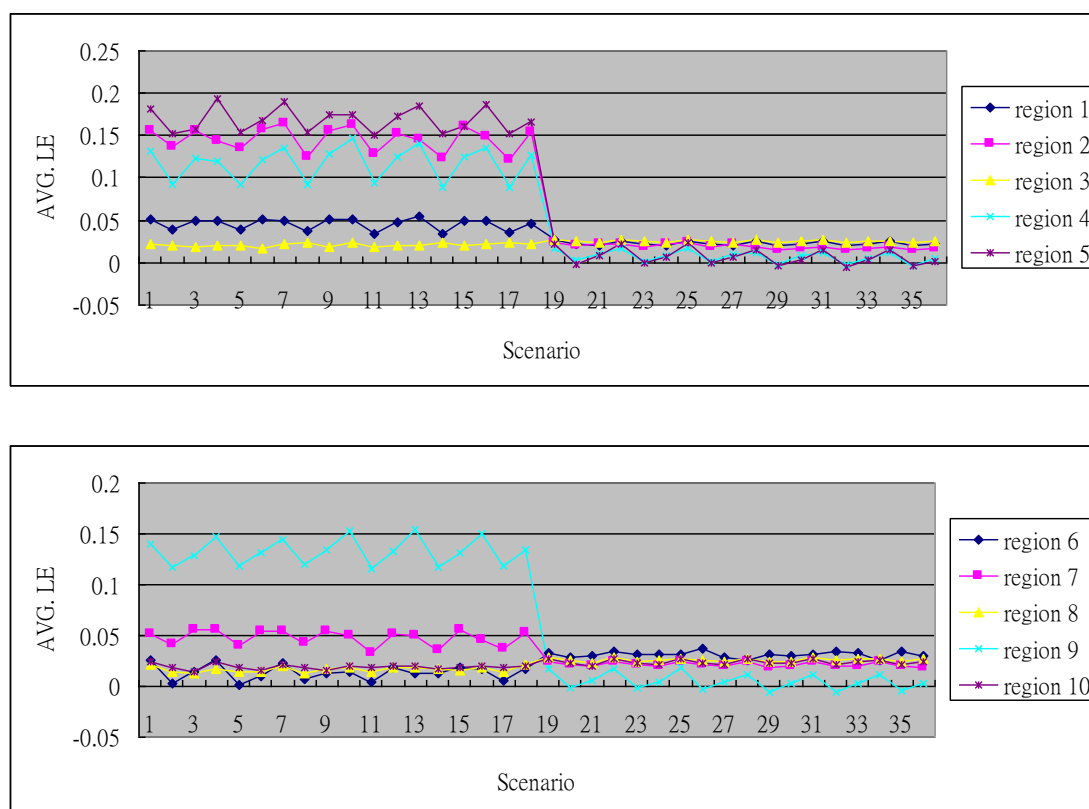
本研究使用 SPSS 15.0 軟體來對所有情境的 LE 值進行集群分析，並使用非階層法的 K-means 主觀決定分群的數目。同時對於每一分群結果使用變異係數(coefficient of variance, CV)衡量每一群組 LE 值的同質性。每一分群決策域 LE 變異係數的計算是決策域內的 LE 值標準差除以 LE 值平均數；當 LE 變異係數計算的結果愈小，表示此決策域內的 LE 值(系統狀態)同質性愈高。關於集群數目之決定，本研究參照 Hwang & Xie (2008)之研究中分群之組數，假定 11 組是在本研究之研究條件下最合適之組數，並逐步測試 10, 12, 13 組之分群效果，且同樣以變異係數作為判斷分群結果好壞之標準。本研究對 10, 11, 12, 13 組分群結果之平均變異係數資料進行變異數分析，以了解多組平均變異係數是否有顯著差異。若是無統計上的顯著差異，本研究權衡及群數與同質性兩者，儘可能找到較少之集群，除了能讓後續之分析更簡便但同時仍能滿足同質性的必要水準。本研究對 10, 11, 12, 13 分群結果之變異係數進行變異數分析，F 檢定之 p Value 在 α 等於 0.05 下並無顯著差異，因此本研究決定分為 10 組決策域。

決定決策域之分群數之後的第二步工作為決定最佳之分群結果。本研究將 36 種情境之每一情境四個階層的平均變異係數值(共 4 筆)再取平均以代表此一情境之分群結果指標，接著找出 36 種情境中最小的平均變異係數值(共 36 筆)，最後在此情境中比較各階層之變異係數值(4 筆)，以最小平均變異係數值此情境此階層之分群結果作為最佳之分群結果。

第三步工作為將此最佳之分群結果(了解每一決策域是由哪些參數組合形成)對每一情境計算其平均 LE 值。同樣地，由於每一情境有四個階層的關係且分為 10 組決策域，我們總共會有 $4 \times 36 \times 10 = 1,440$ 筆平均 LE 值資料，之後我們再對每一階層平均其平均 LE 值表示為在此情境下每一決策域之平均 LE 值。經過這個

步驟，本研究方可調查由四個供應鏈因子所組成之 36 個情境在每一決策域下之系統狀態。資料如圖 11 所示，以了解在各情境以及決策域下之平均 LE 值趨勢。

如圖 11 之資料所呈現，某些決策域(例如，決策域 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10)，幾乎在所有情境的平均 LE 值都是正的，這表示在這些決策域中系統的行為是混沌狀態。但在決策域 4, 5, 9 則在某些情境平均 LE 是負值，因此在這些決策域中，系統的行為亦有可能會出現穩定或週期的狀態。從情境的角度來看平均 LE 值的表現，我們從圖 5-11 可觀察到，即使系統在大部分的決策域皆屬於混沌系統，但對情境 1-18 而言，其平均 LE 值相對於情境 19-36 的平均 LE 值是較大的，這代表著在我們的模擬實驗中，前面編號之情境其混沌程度要較後面編號之情境為高，說明不同供應鏈因子水準對系統混沌之影響。



《圖 11》 不同情境下各決策域平均 LE 值表現

5.5 供應鏈因子之影響

本研究進行因子設計以研究四個供應鏈因子對系統行為之影響。需求模式與

預測方法分別有兩個水準；而資訊分享與產能緊度則各包含三個水準。由於在所有情境中每一決策域僅計算一個平均 LE 值，因此可視為單一重複的實驗設計，且每一個重複共含 $2*2*3*3=36$ 個處理組合。由於本研究因子實驗的因子數目有四個，可推估共有四個主效應、六個二因子交互作用、四個三因子交互作用和一個四因子交互作用。本研究在此採用稀疏效應原則(sparsity of effects principle)，亦即只探討主效應與低階交互作用(二因子交互作用)，三階或以上的交互作用則混合起來，當作誤差估計值忽略不計(Montgomery, 2005)。本研究使用 SPSS 統計軟體進行變異數分析，計算所有情境每一決策域之主效用與二因子交互作用，其結果整理於表 4。F 檢定之 p 值若小於顯著水準 α (亦即: α 等於 0.05)，表示供應鏈因子之主效應與二因子交互作用是顯著的。在這裡本研究了解接受調查的供應鏈因子在不同決策域對於系統動態性或系統混沌之貢獻程度。

觀察表 4 中之 p 值可發現，在主效應方面：(1)需求模式因子(DP)、資訊分享因子(IS)在所有決策域對系統混沌狀態之影響是顯著的；(2)產能緊度因子(CT)則對系統混沌狀態無顯著影響力；(3)預測方法因子(FM)在某些決策域仍會貢獻系統動態性或混沌行為，例如在決策域 1, 2, 5, 7。在二因子交互作用方面：(1)需求模式因子與資訊分享因子之間的交互作用(DP*IS)除了在決策域 8, 10 無顯著貢獻性外，在其餘之決策域仍對系統之狀態有很大之影響力。(2)產能緊度因子與需求模式因子、預測方法因子、資訊分享因子之交互作用(DP*CT、FM*CT、CT*IS)與其主效應一致，對系統狀態無決定性影響能力。(3)預測方法因子與需求模式因子之交互影響效應(DP*FM)、預測方法因子與資訊分享因子之交互影響效應(FM*IS)各自在決策域 4, 7, 9 與決策域 1, 3, 6, 8, 10 與系統會形成混沌行為有很大之關聯。

《表 4》 供應鏈因子之主效應與二因子交互作用 P-Value 值

供應鏈因子	決策域									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FM	0.04	0.01	0.07	0.84	0.01	0.68	0.00	0.18	0.52	0.22

CT	0.69	0.42	0.20	0.24	0.18	0.45	0.26	0.66	0.35	0.91
IS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DP * FM	0.16	0.63	0.13	0.01	0.30	0.66	0.00	0.41	0.00	0.75
DP * CT	0.71	0.45	0.07	0.57	0.20	0.59	0.43	0.30	0.44	0.72
DP * IS	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.39	0.00	0.23
FM * CT	0.82	0.76	0.61	0.30	0.26	0.34	0.36	0.65	0.60	0.40
FM * IS	0.03	0.72	0.01	0.20	0.25	0.00	0.04	0.01	0.20	0.00
CT * IS	0.93	0.15	0.15	0.87	0.52	0.37	0.44	0.16	0.81	0.37

註: DP (需求模式因子)、FM(預測方法因子)、CT(產能緊度因子)、IS(資訊分享因子)

6. 結論

6.1 研究結論

本研究認為不同之供應鏈因子可能由於其變異性或不穩定性會對系統行為造成動態性，並在很多情況下會直接導致系統混沌的發生。藉由文獻回顧，本研究考慮預測方法、需求模式、資訊分享與產能緊度，作為情境實驗之因子並選擇合適之水準進行模擬實驗。實驗結果證實不同供應鏈因子水準的確會有不同程度的系統動態性，而在不同的參數組合下不只會造成供應鏈不同之動態性甚至會讓系統形成混沌，這與過去在供應鏈管理領域關於長鞭效應之研究或是系統動力學觀點在供應鏈管理的研究結果相符。於是本研究才可更進一步探討供應鏈因子如何造成供應鏈系統之動態性甚至是混沌行為。藉由決策域的形成，本研究觀察所有情境在不同決策域之系統狀態。實驗的資料呈現供應鏈系統複雜的動態行為。在決策域 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10，系統在所有情境皆是屬於混沌狀態，而在決策域 4, 5, 9，系統除了表現出混沌行為，亦有可能展示穩定或週期的現象。更進一步，本研究探討不同之供應鏈因子如何作用或交互作用，導致不同程度之系統動態性或系統混沌。需求模式與資訊分享在大部份決策域之主效應測試以及交互作用測試是顯著的，這表示這兩個因子對系統混沌狀態最具影響力。產能緊度可視為是影響力最低之供應鏈因子，其主效應與二因子交互作用之影響均不明顯。預測方法在決策域 1, 2, 5, 7 發生之主效應會顯著影響系統之狀態；在決策域 4, 7, 9 與決策

域 1, 3, 6, 8, 10，其與需求模式、資訊分享之交互作用會發生效應。

本研究之結果可提供兩方面的管理意涵：(1)在某些決策域下(例如，決策域 4, 5, 9)，系統是有可能達到穩定或週期的狀態，供應鏈管理人員可參考這些決策域的值域作為其訂購準則，並了解是在哪些情境以及其模擬之供應鏈因子水準，作為供應鏈因子決策之依據。(2)假定供應鏈管理人員現階段無法改變其訂購行為，可由其採行之訂購參數對應到本研究形成之決策域，進而瞭解各供應鏈因子對系統混沌之影響程度，藉由辨別哪些供應鏈因子具有影響力，將有較高機率避免系統混沌。

6.2 研究限制與未來研究方向

本研究之研究限制可由兩方面來探討，其一是模型層面。啤酒配銷模型過於簡化現實供應鏈，因此可能模擬實驗結果與實務上之運作會有不小之差距。因此，本研究於未來從事相關研究之學者專家提出下列建議。第一為可將模型複雜化，更貼近現實供應鏈之運作方式，例如允許訂單取消或運輸可以折回或是每一階層使用之決策參數可以不一樣。第二則為採用其他供應鏈模型，例如供應鏈管理協會提出的供應鏈作業參考(Supply Chain Operation Reference, SCOR)模型。第三則為適當地修改本研究之研究模型後，可透過調高需求模式之變異程度，來進一步瞭解需求變動相對較大之商品的供應鏈混沌狀況以及其影響。第四則為本研究中關於預測方法之模型化部份，僅參考原始之啤酒遊戲模型的設定而使用了簡單指數平滑法，來用於模型供應鏈各階層對其下階層的需求預測。由於文獻中指出，使用不同之預測方法時(例如: double or triple simple exponential smoothing 與各類不同設定之 Winter's method)，在不同之情況下會造成不同之預測偏差(forecasting bias)與變異程度(以 standard deviation 為觀察指標)，因而對整體供應鏈成本以及製程規劃產生更為複雜之影響(Zhao, Xie, Leung, 2002); 因此，未來研究或可以針對此一議題進行進一步之探討，來協助加強理解在不同的預測方法

設定下，供應鏈系統之混沌狀態之變化。最後則為由於過去這一方面研究大都使用模型為基礎來探討供應鏈因子對供應鏈之影響，未來可以用真實個案討論進行研究，以便以更貼近現實的供應鏈模型來驗證這一方面的研究假設與成果。

參考文獻

- Bailey, K. & Francis, M. (2008), "Managing information flows for improved value chain performance," *International Journal of Production Economics*, 111(1), 2-12.
- Barratt, M. & Oke, A. (2007), "Antecedents of supply chain visibility in retail supply chains: A resource-based theory perspective," *Journal of Operations Management*, 25(6), 1217-1233.
- Barratt, M. & Oliveira, A. (2001), "Exploring the experiences of collaborative planning initiatives," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31(4), 266-289.
- Byrne, P. J. & Heavey, C. (2006), "The impact of information sharing and forecasting in capacitated industrial supply chains: A case study," *International Journal of Production Economics*, 103(1), 420-437.
- Cachon, G. P. & Fisher, M. (2000), "Supply Chain Inventory Management and the Value of Shared Information," *Management Science*, 46(8), 1032-1048.
- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K. & Simchi-Levi, D. (2000), "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information," *Management Science*, 46(3), 436-443.
- Chen, F., Ryan, J. K. & Simchi-Levi, D. (2000), "The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect," *Naval Research Logistics*, 47(4), 269-286.
- Coppini, M., Rossignoli, C., Rossi, T. & Strozzi, F. (2010), "Bullwhip effect and inventory oscillations analysis using the beer game model," *International Journal of Production Research*, 48(13), 3943-3956.
- Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, M. R. & Towill, D. R. (2004), "The impact of information enrichment on the Bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective," *European Journal of Operational Research*, 153(3), 727-750.
- Forrester, J. W. (1961), *Industrial Dynamics*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Geary, S., Disney, S. M. & Towill, D. R. (2006), "On bullwhip in supply chains-historical review, present practice and expected future impact," *International Journal of Production Economics*, 101(1), 2-18.
- González-Benito, J. (2007), "Information technology investment and operational performance in purchasing," *Industrial Management & Data Systems*, 107(2), 201-228.
- Huang, Z. & Gangopadhyay, A. (2004), "A Simulation Study of Supply Chain

- Management to Measure the Impact of Information Sharing,” *Information Resources Management Journal*, 17(3), 20-31.
- Hull, B. (2002), “A structure for supply-chain information flows and its application to the Alaskan crude oil supply chain,” *Logistics Information Management*, 15(1), 8-23.
- Hwarng, H.B. & Yuan, X. (2014), “Production, manufacturing and logistics: Interpreting supply chain dynamics: A quasi-chaos perspective,” *European Journal of Operational Research*, 233(3), 566-579.
- Hwarng, H.B. & Xie, N. (2008), “Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective,” *European Journal of Operational Research*, 184(3), 1163-1178.
- Kocarev, L., Szczepanski, J., Amigo, J.M. & Tomovski, I. (2006), “Discrete Chaos-I: Theory,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 53(6), 1300-1309.
- Kumara, S. R. T., Ranjan, P., Surana, A. & Narayanan, V. (2003), “Decision making in logistics: A chaos theory based analysis,” *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 52(1), 381-384.
- Larsen, E. R., Morecroft, J. D. W. & Thomsen, J. S. (1999), “Complex behaviour in a production-distribution model,” *European Journal of Operational Research*, 119(1), 61-74.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V. & Whang, S. (1997a), “The bullwhip effect in supply chains,” *Sloan Management Review*, 38(3), 93-102.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V. & Whang, S. (1997b), “Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect,” *Management Science*, 43(4), 546-558.
- Lee, H. L. & Whang, S. (2000), “Information sharing in a supply chain,” *International Journal of Technology Management*, 20(3/4), 373-387.
- Levary, R. R. & Mathieu, R. (2004), “Supply chain's emerging trends,” *Industrial Management*, 46(4), 22-27.
- Levy, D. (1994), “Chaos Theory and Strategy: Theory, Application, and Managerial Implications,” *Strategic Management Journal*, 15(SPECIAL ISSUE), 167-178.
- Lorenz, E. N. (1963), “Deterministic nonperiodic flow,” *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.
- Ma, J. & Xie, L. (2018), “The impact of loss sensitivity on a mobile phone supply chain system stability based on the chaos theory,” *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 55, 194-205.
- Mandelbrot, B. B. (1982), *The Fractal Geometry of Nature*, New York, NY: W.H. Freeman and Company.
- Mason-Jones, R. & Towill, D. R. (1997), “Information enrichment designing the

- supply chain for competitive advantage,” *Supply Chain Management: An International Journal*, 2(4), 137-148.
- Mason-Jones, R. & Towill, D. R. (1998), “Time compression in the supply chain: information management is the vital ingredient,” *Logistics Information Management*, 11(2), 93-104.
- Montgomery, D. C. (2005), *Introduction to Statistical Quality Control*, New York, NY: John Wiley & Sons.
- Mosekilde, E. (1996), *Topics in Nonlinear Dynamics: Applications to Physics, Biology and Economic Systems*, River Edge, NJ: World Scientific Pub Co Inc.
- Mosekilde, E. & Larsen, E. R. (1988), “Deterministic chaos in the beer production-distribution model,” *System Dynamics Review*, 4(1-2), 131-147.
- Raghunathan, S. (2003), “Impact of demand correlation on the value of and incentives for information sharing in a supply chain,” *European Journal of Operational Research*, 146(3), 634-649.
- Sahin, F. & Robinson, J. E. P. (2005), “Information sharing and coordination in make-to-order supply chains,” *Journal of Operations Management*, 23(6), 579-598.
- Shih, S. C., Hsu, S. H. Y., Zhu, Z. & Balasubramanian, S. K. (2012), “Knowledge sharing - A key role in the downstream supply chain,” *Information & Management*, 49(2), 70-80.
- Simangunsong, E., Hendry, L.C. & Stevenson, M. (2012), “Supply-chain uncertainty: a review and theoretical foundation for future research,” *International Journal of Production Research*, 50(16), 4493-4523.
- Smaros, J., Lehtonen, J. M., Appelqvist, P. & Holmstrom, J. (2003), “The impact of increasing demand visibility on production and inventory control efficiency,” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 33(4), 336-354.
- Sohn, S. Y. & Lim, M. (2007), “The effect of forecasting and information sharing in SCM for multi-generation products,” *European Journal of Operational Research*, 186(1), 276-287.
- Sosnovtseva, O. & Mosekilde, E. (1997), “Torus Destruction and Chaos-Chaos Intermittency in a Commodity Distribution Chain,” *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 7(6), 1225-1242.
- Stapleton, D., Hanna, J. B. & Ross, J. R. (2006), “Enhancing supply chain solutions with the application of chaos theory,” *Supply Chain Management-an International Journal*, 11(2), 108-114.
- Sterman, J. D. (1984), *Instructions for Running the Beer Distribution Game*: MIT System Dynamics Group.

- Sterman, J. D. (1989), "Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment," *Management Science*, 35(3), 321-339.
- Svensson, G. (2013), "Teleological approaches in supply chain management: illustrations," *Supply Chain Management: An International Journal*, 15(1), 16-20.
- Tang, O. & Nurmaya Musa, S. (2011), "Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management," *International Journal of Production Economics*, 133(1), 25-34.
- Thomsen, J. S., Mosekilde, E. & Sterman, J. D. (1992), "Hyperchaotic phenomena in dynamic decision making," *Journal of Systems Analysis and Modeling Simulation*, 9, 137-156.
- Towill, D. R. (1996), "Industrial dynamics modelling of supply chains," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 26(2), 23-42.
- Wilding, R. (1998a), "Chaos theory: implications for supply chain management," *The International Journal of Logistics Management*, 9(1), 43-56.
- Wilding, R. (1998b), "The supply chain complexity triangle: Uncertainty generation in the supply chain," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 28(8), 599-616.
- Williams, G. P. (1997), *Chaos Theory Tamed*, Washington, D.C.: Joseph Henry Press.
- Wolf, A., Swift, J. B., Swinney, H. L., & Vastano, J. A. (1985). Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica*, 16, pp. 285-317.
- Wu, Y.R., Huatuco, L.H., Frizelle, G. & Smart, J. (2013), "A method for analysing operational complexity in supply chains," *Journal of the Operational Research Society*, 64(5), 654-667.
- Zhao, X., Xie, J. & Leung, J. (2002), "The impact of forecasting model selection on the value of information sharing in a supply chain," *European Journal of Operational Research*, 142(2), 321-344.
- Zhao, X., Xie, J. & Zhang, W. J. (2002), "The impact of information sharing and ordering co-ordination on supply chain performance," *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(1), 24-40.

A Chaos-Theory Perspective to Investigating the Influences of Forecasting Methods, Information Sharing, Demand Pattern, and Capacity Tightness on the Dynamic Supply Chain Systems

Chiun-Hua Chen¹ Wei-Tsong Wang^{2*}

Abstract

Literature indicates that the adoption of the chaos theory is significant in terms of investigating issues related to modern supply chain management. Although there have been studies that investigate the existence of the chaotic phenomena in the supply chain systems, studies that explore how the dynamics of the supply chain systems can lead to the generation of chaotic phenomena are scarce. Some recent studies indicate that supply-chain-related factors, including demand patterns, ordering policies, information sharing, lead time, levels of supply chains, and the complex interaction processes between customers and suppliers can influence the decision making processes of the supply chains and, in turn, influences the dynamics and the chaotic phenomena occurred in the supply chains. In summary, prior studies on this issue investigate and emphasize the negative influences of the chaotic phenomena on the effectiveness of supply chain management. However, to the best of our knowledge, there have not been studies in supply chain management that specifically investigate how the selection of forecasting methods, information sharing, demand patterns, and capacity tightness may influence the occurrence of the chaotic phenomena in the supply chains. Consequently, this study aims to investigate how different forecasting

methods, demand patterns, information sharing, and capacity tightness can affect the occurrence of the dynamic complexity and chaotic phenomena of dynamic supply chain systems. The well-known beer game model was adopted in this study to observe how the factors indicated above can affect the occurrence of the dynamic complexity and chaotic phenomena of dynamic supply chain systems. The research results have provided professionals of supply chain management with guidelines of the combination of forecasting methods, information sharing, and capacity tightness for a particular demand pattern in order to reduce the probability of the occurrence of chaotic phenomena and to achieve better performance in supply chain management.

Keywords: Dynamic Supply Chain Systems, Chaos Theory, Beer Game, System Dynamics, Information Sharing