

# 都市複雜空間系統自我組織臨界性之初探

賴世剛\* 高宏軒\*\*

## Self-organized Criticality in Urban Complex Spatial Systems

by

Shih-Kung Lai\* Hong-Hsen Gao\*\*

### 摘要

本研究假設都市空間中的土地使用變遷主要為空間單元與周圍相鄰單元開發決策互動的結果；並視都市為一複雜空間系統，且空間決策者具有有限理性(bounded rationality)，藉由二維細胞自動體(cellular automata)進行土地使用變遷的電腦模擬。實驗設計中將都市每一宗土地視為一細胞(cell)，其土地使用型態的轉變是依據周遭的狀況從一組開發決策篩選進行。開發決策則由問卷方式取得，作為模擬實驗中開發決策庫建立的基礎。經由實驗結果顯示，系統中相同使用類別(如住宅使用)的宗地聚集規模與頻率呈現出冪次法則(power law)的自我組織(self-organization)現象。

關鍵詞：複雜、有限理性、細胞自動體、自我組織。

### ABSTRACT

The research is grounded on the hypothesis that land use change in urban space is affected by the interaction of development decisions in local, surrounding land. We consider cities as complex spatial systems; assume spatial decision makers' behaviors are a manifestation of bounded rationality; and through two dimensional cellular automata proceed computer simulations on land use change. In the simulations, the research considers each parcel of land in a city as a cell in which the transformation of land use type is determined by its neighboring cells according to a set of development decision rules. The development decision rules are collected through a questionnaire survey to form a development decision rules database for the computer experiments. The result of the experiments indicates that clusters of parcels of land in the spatial complex systems, given a particular type of land use, tend to self-organize into a power law, or self-organized criticality.

Keywords: complexity, bounded rationality, cellular automata, self-organization

民國89年6月14日收稿。民國89年8月2日通過。

\* 國立台北大學地政系教授兼地政研究中心主任

\*\* 中興大學都市計畫研究所碩士

\* Professor and Director, Department of Land Economics and Administration and Center for Land Management and Technology, National Taipei University.

\*\* Master of Urban Planning, Graduate Institute of Urban Planning, National Chung Hsing University.

## 一、前言

都市的發展是都市中許許多多的部門及個人在錯綜複雜的決策行爲(decision making behavior)下，交互作用及影響所產生的綜合現象。而過去相當多的規劃邏輯及空間模型是建立在傳統的經濟理性基礎上，如假設經濟人(economic man)追求最大利潤或效用的特質，及資訊蒐集的完全充分(perfect information)等。以這些為基礎所發展出來的都市空間模型雖然描述了一些都市發展的現象，但和真實生活中的狀況不免有一些差距存在。又近年來以經濟計量分析方法為基礎的都市經濟學以Lagrange法尋求個人最大效用(或利潤)與限制式之間的平衡，其背後亦存在著經濟學中個體為最大效用或利潤追求者的理性假設；且即使在行爲決策領域中，以效用最大化為基礎的純理性假設，在敘述性決策領域中亦受到質疑(Robin & Melvin, 1987)。

基於以上的想法，本研究嘗試以空間演化的觀點觀察都市的變遷，藉由「由下而上」(bottom-up)的探討方式，強調組成分子之間的差異性，從個體分子為有限理性(bounded rationality)的角度，對都市的變遷與發展的形態藉由複雜理論以探討都市中的自我組織現象。並以細胞自動體(cellular automata, 或CA)為工具，透過都市中宗地開發的動態模擬，尋求都市空間演化過程中的規律。

細胞自動體的概念應用到都市系統的模擬可追溯到都市系統模擬發展的初期。例如Chapin在模擬土地開發的過程中，其土地使用的改變即以其受到周圍土地使用變動的函數所影響，這和CA中的鄰里效果(neighborhood effect)是類似的(Chapin & Kaiser, 1979)。然而完整的CA概念應用到空間演化的模擬則應追溯至純理論計量地理。Tobler在1979年以底特律的發展為背景建構了細胞—空間模型，其在"Cellular geography"一文中描述了如何將CA概念應用到地理空間系統。1980年代後期，隨著電腦影像處理技術的進步，及相關理論如碎形(Fractal)、渾沌(Chaos)及複雜(Complexity)等的進一步發展，CA應用在都市空間演化的模擬有了更進一步的進展。

例如，White和Engelen(1993)以CA模擬都市土地使用變遷的演化過程中，發現一些呈現冪次法則(power law)的現象。其土地使用變遷的轉換規則是建立在一組數學式及加權矩陣，模擬範圍為縱橫50×50總共2500筆宗地，使用種類設定為空地、住宅、工業及商業四種。且其土地使用間的轉換只允許低階的土地使用變更成高階的土地使用種類(如空地可轉換為住宅，但住宅不可轉換為空地)，其土地使用轉換方程式則以機率數學模式加以建構作為二維CA的轉換規則。並透過實際資料整理出各種土地使用轉換的參數值。

其模擬結果發現商業用地的聚集規模和其頻率次數逐漸呈現反比的冪次關係。且其由實際資料統計發現美國1960年的四個都市(Atlanta、Cincinnati、Houston及Milwaukee)中的商業使用土地的聚集規模和其頻率次數也同樣呈現反比的冪次關係。White及Engelen認為這樣的關係(取對數之前或之後)若呈現線性，則其空間結構將具有碎形的特徵(Bak等, 1989)。

本研究首先從複雜科學近年來的發展及其主要的特徵與意涵，作為探討空間向度中複雜現象描述的基礎；再經由對傳統空間區位模式所提出完全理性(perfect rationality)假設其真實性的補充，以近年來經濟學中有限理性(bounded rationality)及適應性(adaptive)系統的應用與發展為基礎，嘗試將其與空間區位演變電腦模擬結合；最後再以近年來細胞自動體(cellular automata)應用在都市空間演化模式中探討自我組織現象的發展，作為研究設計的參考，並以電腦模擬為工具，觀察具有上述空間行為特性之系統，其空間演化的規律或秩序。

## 二、複雜科學與自我組織

本研究擬從空間演化的角度觀察空間結構其秩序的產生是否有可能為複雜科學中的自我組織(self-organization)現象。自我組織存在於複雜系統之中，該理論認為系統在某些情況之下會從混亂中自發地呈現某些秩序。而秩序的形成並非起源於某些物理學或經濟學等學科所描述的定理法則，而是由系統中組成分子互動所產生的。亦即，可觀察到有規律的系統形態其形成之原因無法單就個別組成分子行為的了解而明瞭；此為兩種不同層次的問題。要判斷一個系統是否呈現自我組織的現象只要觀察系統所呈現出的秩序是否經由「由下而上」的規則演化所形成。系統具有自我組織的現象通常有幾項特質：

### (一) 個體間的互動(Local interaction)

系統由許許多多的個體組合而成，單一個體的行爲不但受到其他個體的影響，其本身也會影響其他的個體行爲，最後系統的整體型態是受到個體間不斷互動所達成的結果。不同系統中個體互動的誘因或源由亦不盡相同。例如原子及分子的互動源於作用力，而經濟個體的互動誘因在於從交易中獲取利潤。就土地開發而言，其互動的因素則包括相鄰開發基地因空間性及機能性所造成之相互影響。這些相互影響過程在本文中為便於概念陳述，通稱之為「互動」。互動也同時產生突現，也因此複雜系統中整體會大於所有組成分子的加總(The whole is greater than the sum of the parts)。

## (二) 非線性動力學 (Nonlinear dynamics)

複雜系統中的組成分子間息息相關，小騷動不會一直維持其小騷動。在適當條件下，小小的不確定會膨脹擴大，使得整個系統完全無法預測。自我組織現象存在於具有正回饋 (positive feedback) 的互動系統中 (Arthur, 1990)，而一個蘊含正回饋的系統僅能藉由非線性方程式來描述。這些方程式通常很難處理，但在計算機功能逐漸發達後，便可藉由電腦來探討許多非線性的動態過程。

## (三) 數量龐大的「作用體」 (Many agents)

自我組織現象是建立在系統中組成分子連結 (connections)、互動 (interaction) 及回饋 (feedback) 的基礎上。也就是說呈現自我組織現象的複雜系統中必定存在著數量龐大的作用體 (agents)。作用體可能是分子、神經元、或消費者，甚至企業。無論他們是什麼，作用體由於相互影響都會逐漸不斷地自我組織或重組成巨大的結構。因此分子會形成細胞、神經元會形成頭腦、物種會形成生態體系、消費者和企業會形成經濟體，新產生的整體結構都會形成不同層次的行為模式。

## (四) 突現 (Emergence)

此論點認為系統整體會大於組成分子的加總，而整體型態所呈現出的結構與秩序是在組成分子互動之下產生的。突現也意涵著複雜系統所表現出的結構與秩序並非與較低階組成分子的個別演化規則相同 (Green, 1993)。因此有機體在共同演化中合作或競爭，形成協調的生態系統；人們為了滿足物質需求彼此交易物品，而創造了市場的突現結構等都是突現的例子。

## (五) 巨觀與微觀的互動 (Global-local interactions)

突現的論點也同時點出了自我組織系統中的巨觀與微觀之間的相互影響效果。微觀角度下的個體之間的互動形成巨觀下整體組織的結構與型態，這樣的結構又影響到個體的行為而產生不同的相互影響關係。

在複雜科學的基礎之下，Bak及Chen(1991)發展了一個概念來解釋自然及人為複合系統 (composite system) 的行為。在這個系統中有數以百萬甚至無以計數的單位組成並在有限的期間內互動。他們提出自我組織臨界性 (self-organized criticality) 的概念：許多複合系統自然演化到一個臨界狀態，而處於這個狀態之下，細微變化可能產生連鎖反應並導致大變動進而影響了系統中的每一個組成分子。根據這個理論，導致小事件和大變動發生的機制是相同的。進一步說，複合系統最終不會有均衡狀態的產生，但是可形成幾近穩定 (metastable) 的狀態持續進化。

Bak & Chen(1991)藉由砂堆 (sand-piles) 實驗觀察並解釋自我組織的現象。其將實驗儀器以固定的頻率一次將一

粒砂子從相同高度任其掉落至平面上，一段時間後，砂堆逐漸形成並開始呈現出一個大致穩定的狀態。雖然砂粒持續掉落而影響到砂堆上其他已靜止的砂粒，因而造成一些規模不等的崩塌，整個砂堆表面基本上仍維持相同的斜率，且崩塌規模與頻率呈現冪次法則 (power law)。亦即特定規模的崩塌頻率與其規模的某些次方成反比。砂粒從高處落下除非達到一靜止的位置否則會繼續滑落，又雖然靜止了也可能會受到其他的砂粒撞擊而開始移動。這樣的連鎖反應不斷地進行，就每一粒砂子而言，其何時會受到其他砂子的撞擊影響而產生崩塌是不確定的。但整個系統卻似乎自行呈現一種幾乎穩定的狀態，稱之為自我組織臨界性 (self-organized criticality)。此觀念說明事件的發生並非都是由於直接的原因，而是源於許多其他事件交互作用的連鎖反應所造成的。

## 三、有限理性行為

迄今為止，已有許多有限理性的定義，其中Simon的定義如下 (引自Kreps, 1990)：有限理性行為 (bounded rational behavior) 是指主觀上期望合理，但客觀上受到限制的行為。也就是說，主觀上期望達到某些目標，但是追求這些目標的方式反映出個人認知能力的侷限性 (cognitive limitation) 與計算能力的侷限性 (computational limitation)。修正純理性假設而衍生出來的行為決策理論有許多；其中Arthur(1994)在探討經濟理論中的複雜現象時，以有限理性描述個體的決策行為，作為修正完全理性在敘述性行為決策理論解釋上的不足。他認為有兩個因素使得個體在作決策時無法保持完全理性：

1. 隨著所面對問題的情境愈趨複雜，邏輯思維的能力將逐漸降低。例如玩井字遊戲時，可以很輕易的知道下一步該怎麼進行。但是隨著遊戲愈來愈複雜如象棋或西洋棋，要判斷該如何佈局便非易事。
2. 行為者在作決策時其實就是處於一賽局 (game) 情境中研擬最佳對策。但由於無法確切知道其他人會作出何種決策，所以只好去「猜」其他人的行為以作出反應。

Arthur(1994)引用現代心理學的概念認為人類在應用推論邏輯時只能算是適應理性的。我們只能在某一程度下擁有完全理性，但當面對複雜的問題時，行為者首先嘗試將問題簡化並在心中建構自己的一套假設邏輯或模型 (此階段尚屬於完全理性)，待結果呈現後行為者將依據結果的好壞鞏固其原先假設所持信念或修正該信念 (此階段則進入有限理性的情境)。也就是說當問題複雜得使決策者無法善用其推論邏輯 (deductive) 時，將改以歸納 (inductive) 的方法。同樣以下棋為例，棋手往往是先瞭解

彼此的佈局之後再試著回憶或歸納判斷對手的棋步，作為研擬下一步的依據。

根據前揭概念，Arthur設計一電腦實驗，以模擬人們在有限理性的假設下，於一簡化的複雜系統中從事決策，並觀察該系統演化的特性。其模擬設計及假設歸納如下：

1. 有100個人喜歡在每個週末夜晚去固定的一家酒吧，如果每次酒吧裡的人數少於60人，表示不太擁擠，則去消費的每個顧客可以獲致較大的滿足。
2. 每個顧客無法預測下一週末酒吧會有多少人，只能猜如果下一次人數過多(大於60人)就不會去，反之就會去。
3. 沒有勾結(collusion)的情況發生，也就是顧客彼此間不會事先約定安排去酒吧的時間。
4. 每個顧客所擁有的唯一訊息是先前去酒吧的消費人數。

因此想要在這個週末到酒吧的顧客都會先『預測』酒吧中可能的人數：某甲也許認為和上個星期一樣是35人、某乙則認為是過去四個星期的平均數49人、某丙則認為和五個星期前的週末人數相同(五週一次循環)為76人等。而每個決策者要採用哪一種預測方式則是從其經驗中選取表現最佳的預測方式。當某甲預測週末會有35個人至酒吧消費，低於擁擠認知的門檻60人，而實際上週末酒吧裡的確少於60人，則某甲下一次仍會採用相同的預測方式：和上個星期一樣的人數。若酒吧中實際的消費人數超過60人，和其低於60人的預測不同，則某甲下一次將改採其他的預測方式。

藉由電腦的模擬，Arthur的複雜系統呈現一規律性：到酒吧消費的人數變化呈現一穩定的波動，且平均出席人數維持在60人左右，而這些出席的顧客並非固定的一群人。預測下次出席人數超過60人的約占60%，低於60人的約占40%。也就是說消費者個別的預測行為使整個出席人數呈現自我組織的動態均衡。此種60/40比例可視為複雜系統中的吸子(attractor)或是臨界點(critical state)，以賽局理論的觀點來看或許可算是一種納許解(Nash equilibrium)(參見圖1)。雖然從總體的角度來看，我們很輕易就可以預知酒吧顧客應該就是維持在60人左右。但若從個體的角度

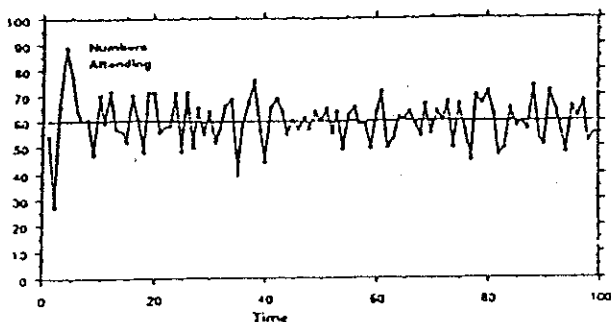


圖1 Arthur酒吧實驗顧客人數變動圖

度來看，由於沒有「勾結」，且每個人的預測方式是有限理性，是很難預知會有什麼樣的吸子出現的。

Arthur的電腦模擬其主要貢獻在於將個人有限理性之行為及其間的互動關係以一簡化的複雜系統表示。令人好奇的是，即使在這種機率性的行為假設下，由於個人之間的自我調整，竟使得系統整體的演化呈現某種自我組織的規律性現象。然而Arthur的實驗設計並未考慮空間因素。如果決策行為具有空間性，如土地開發，或許複雜空間系統在類似的行為假設下，其演化會呈現某種自我組織的規律。此亦為本研究設計的主要考慮因素之一。此外，Casti(1999)亦引用Arthur有限理性的模擬，作為未來視都市為複雜適應性系統電腦模擬系統建置的方向之一。

有限理性表現在土地開發行為中，可藉由資訊收集及財產權操弄的過程說明之。亦即開發者由於資訊不完全，透過對開發基地周遭環境進行資訊收集，作為制定開發決策的依據，其目的無非企圖在公共領域(public domain)中，藉由土地或不動產交易以獲取最大之財產權(Lai, 1998)。本文雖未能完全將此種土地開發經濟意義表現在電腦模擬中，但研究設計已將類似的有限理性概念寫入程式中，以符合真實情況。例如，開發基地僅與都市鄰近基地互動，表示開發者的資訊有限性。

#### 四、研究設計

本研究將有限理性及適應性兩項特質納入考量，設計一二維平面的土地開發行為電腦模擬實驗。經由問卷設計及調查獲得基本的開發行為描述，作為模擬實驗中土地開發行為的決策規則；開發行為決策規則的選取標準是透過問卷調查所獲得的簡化之相鄰環境損益，或報酬(payoff)矩陣，作為開發行為中適應性特質的考量。

本研究主要在探討複雜空間系統演化中的自我組織現象，而非進行實際都市空間演化模式的建立，因此在模擬實驗中簡化了部分現實中的土地開發情境；亦即空間組構(spatial configuration)假設為格子狀基地。但這應不影響對基地使用變遷演化過程的解釋能力，因為格子狀基地與不規則基地在模擬建構的概念上，並無甚大差異(例如其均可以臨接矩陣(contiguity matrix)來表示空間單元間相鄰的狀況)。此外，本研究將Arthur對個體行為的解釋應用於土地開發行為的描述，即開發個體決策過程隨著時間的改變具有篩選較佳策略的歸納學習能力。為了比較不同開發行為的基本假設，本研究也考慮固定開發規則與隨機開發策略兩種情況。

為考量空間型態上的演化，本研究之方法主要以二維細胞自動體為架構，將每一細胞視為平面上的一宗土地。

為避免過於複雜，每一期模擬步驟單一宗地的開發型態僅考慮住宅與商業兩種；又演化規則是以Arthur建議之有限理性的行為模式為基礎(即個別開發者透過歸納式的推理，具有學習的能力)，與傳統細胞自動體的單一演化規則不同，據以撰寫電腦模擬程式，作為實證分析的工具。

由於宗地數量的考量過多將延長模擬時間且增加不必要的複雜性，在參考White與Engelen(1993)的模擬設計後，本研究設定模擬的範圍為縱橫各50筆宗地，總共2500筆宗地。每一筆宗地當期的開發型態決定於上一期的狀態及相鄰宗地的整體開發型態，而開發決策規則由問卷獲得建立在開發決策資料庫中。至於下一期是否要維持原來的開發決策則取決於每一筆宗地原先採取開發決策根據損益矩陣計算所得的滿意度。在獲得模擬實驗結果之後，除觀察各時點(期)住商比例的變化趨勢，另從其演化發展的型態，測度是否呈現碎形(fractal)的結構。並和複雜理論中所描述的各项特徵進行比較，以判定所建構之複雜空間系統中可能出現的自我組織現象。

本研究雖以Arthur的模擬實驗為基礎，所不同的是本研究在實驗中進一步考慮空間因素。為了對照有限理性的決策思考模式，本研究擬以隨機猜測的決策模式及固定性

決策模式進行空間演化實驗，將其結果與有限理性模式進行比較，冀望在空間型態的演變上得到差異點，以評估自我組織臨界性產生的可能原因。具體而言，假設在一平面上每一宗土地的開發決策是根據土地開發者就其宗地所面對不同的週遭環境而擬定。初始時由某特定週遭環境所對應該組開發決策中隨機選取一開發決策進行開發，開發後計算周圍環境開發行為與該基地互動之報酬總和作為回饋。開發者再視回饋評斷下次面對同樣環境型態時，保留原來開發決策或重新由資料庫中隨機選取另一開發決策。其流程如圖2所示。

為簡化起見，以及考慮程式撰寫的困難度，本電腦模擬基本限制如下：

1. 開發行為的模擬限制在二維平面互動關係，故不考慮立體空間的處理。
2. 每宗土地為同質的，且有相同的型態與大小，故以相同大小網格表示。其間網格線段即代表聯絡道路，因此每一宗土地有八筆相鄰宗地。
3. 開發行為的類別限制在兩種：住宅使用與商業使用。
4. 系統為封閉的且其互動係自發性，不受外力干預。由於開發過程的規則選取係採問卷方式進行，以上的限制不

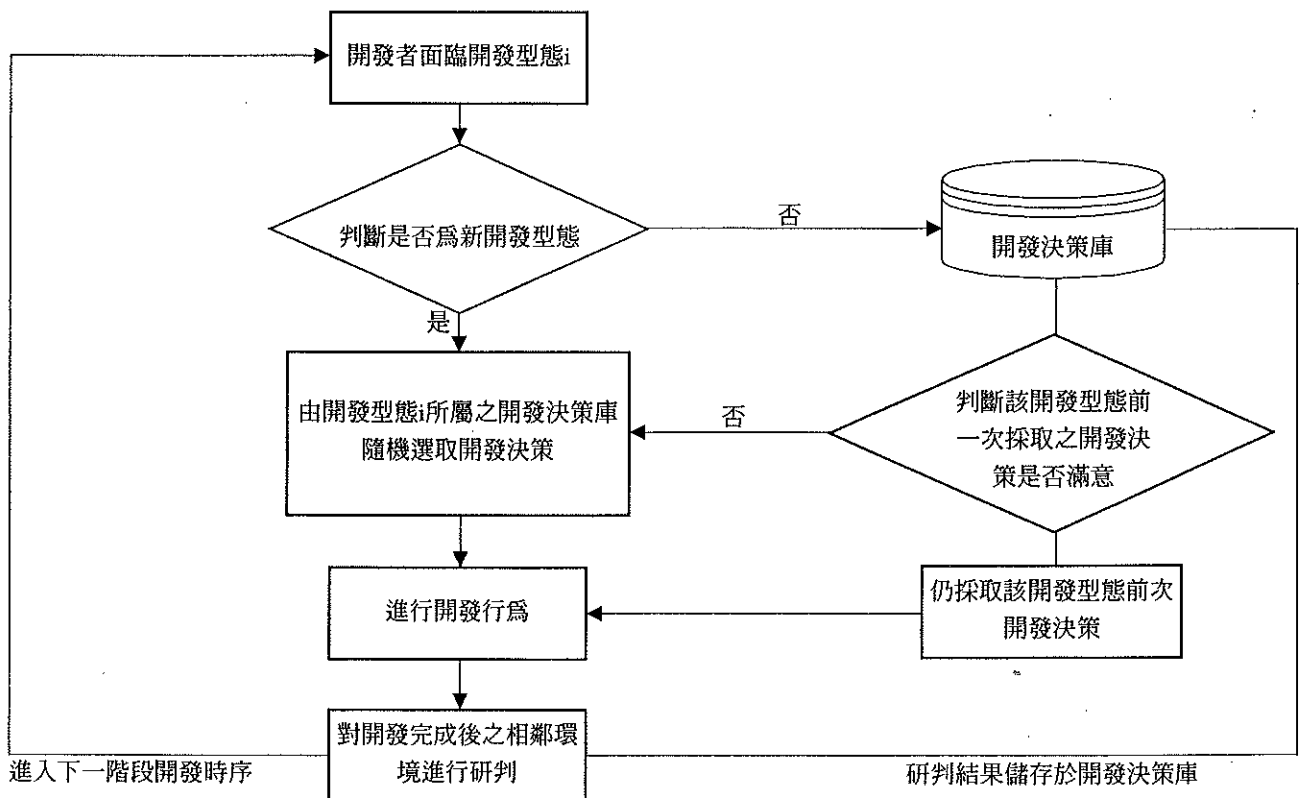


圖2 有限理性決策模式之土地開發模擬細部流程

應完全否定模擬結果對真實都市空間演化的解釋能力。

又每一宗土地和周圍開發行為不斷相互影響演化過程的基本假設如下：

1. 每一種開發型態的開發決策是否保留視周圍的環境而定。例如某一開發者採 $j$ 開發決策後，經開發損益矩陣的計算(損益矩陣的建立如後敘)，其與周圍鄰里宗地互動的得分和若低於其周圍鄰近宗地損益得分計算之平均值，則其將重新選取開發決策；反之則維持原開發決策，表示其對該開發決策感到滿意。
2. 開發者無法預知下一期周圍的開發環境型態，其只能從決策庫中(決策庫的建立見如後敘)擇一作為其開發決策或沿用原有開發決策。如在 $t$ 期遇到某一特定開發型態(如相鄰八筆宗地有三筆為住宅使用，五筆商業使用)，其決定從開發決策庫中選擇 $j$ 開發決策。待開發完成後評估結果若為滿意(參考第一項假設)，則下一期若遇到同樣的開發環境型態，將仍採 $j$ 開發決策，否則將重新由決策庫中隨機選取另一開發決策。
3. 同樣沒有勾結的情況發生，也就是開發者彼此間不會事先約定如何進行開發。
4. 每個開發者所擁有的唯一訊息是過去一期的開發環境型態的開發結果。

至於每一宗土地當期是否採用前一期的開發規則，則是依據一開發損益矩陣計算而得。此係根據Nowak及May (1993)將囚犯困境結合二維細胞自動體之作法。其乃是先簡化囚犯困境模式得分矩陣，再由每一細胞(即一宗土地)分別與其固定距離 $r$ 之鄰近細胞互動，而鄰近細胞再分別與其距離 $r$ 之鄰近細胞互動，其互動結果以囚犯困境的得分報酬計算。如圖3所示，就 $a_1$ 而言若設定其鄰近細胞數為 $n=4$ ( $a_2, a_3, a_4, a_5$ )總共為5個細胞，其得分高低決定下一刻 $a_1$ 所應採取的策略。每一細胞其本身與鄰近細胞分別與其本身及最鄰近之上、下、左、右的細胞彼此互動，並根據囚犯困境模式得分矩陣計算出 $a_{s1}$ 、 $a_{s2}$ 、 $a_{s3}$ 、 $a_{s4}$ 、及 $a_{s5}$ 之得分總和。若 $a_{s5}$ 之得分總和為最高，且 $a_{s5}$ 所採取的策略為合作，則 $a_1$ 下一刻所採取的策略便為合作(賴

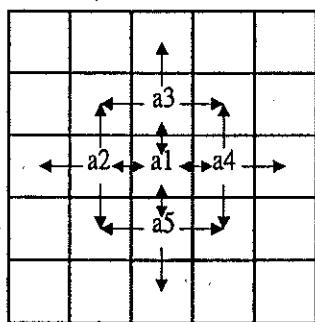


圖3 Nowak及May之細胞互動範圍

世剛及陳建元，1996)。

本研究參考Nowak及May的作法，設定互動範圍 $r=1$ ，即每一細胞分別與其相鄰8個細胞互動，則對每一細胞來說，總共有 $a_{s1}$ 、 $a_{s2}$ 、 $a_{s3}$ 、 $a_{s4}$ 、 $a_{s5}$ 、 $a_{s6}$ 、 $a_{s7}$ 、 $a_{s8}$ 、及 $a_{s9}$ 九個得分總和(參見圖4)。每一期演化結束若宗地本身之得分總和 $a_{s1}$ 高於相鄰宗地之得分總和平均值，表示該開發決策為成功的決策，下次若遇到同樣的開發環境型態則仍採原來之開發決策，否則將從決策資料庫中隨機選取另一開發決策。

如前所述，White及Engelen模擬都市演化的結果得到商業用地聚集規模和其頻率次數呈現負斜率的冪次關係，且其從美國1960年四個都市實際的土地使用資料中也獲得商業用地聚集規模和其頻率次數關係呈現冪次法則的規則。Bak及Chen (1991)認為冪次法則是系統呈現自我組織臨界性的證據，因此都市中商業用地聚集規模和其頻率次數呈現負斜率的冪次關係相信也是自我組織臨界性的證據之一。然而，White及Engelen的模擬實驗所採用的規則是依實際資料整理後主觀判斷之轉換參數矩陣。雖然其後來重新以1960年Cincinnati市實際土地使用資料校估該矩陣，並得到同樣的冪次法則結果，但由於這樣的方式其規則為決定性(deterministic)及固定的，無法表現出個體的選擇行為學習之特性。因此本研究擬以個體有限理性模式作為轉換規則，嘗試探討其演化結果整體型態中是否同樣出現商業用地聚集規模和其頻率次數之間負斜率的冪次關係，亦即開發決策的轉換規則是可隨情況改變的，而轉換規則資料庫建立之步驟如后：

### (一) 轉換規則的問卷設計

依據上述觀點，本研究以問卷方式列出模擬實驗假想的空間情境，調查受訪者的空間偏好，作為本研究土地開發決策資料庫的基礎。首先依據模擬實驗假想之空間情境，在不考慮空間分布差異下，列出井字單元九種相鄰宗地情況，如表1所示。

在問卷中就這九種型態依序詢問受訪者當面臨該情況

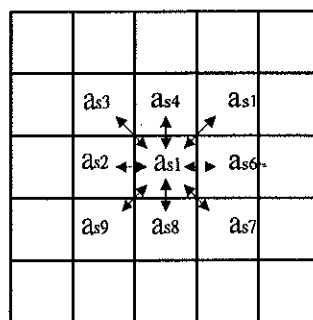


圖4 電腦實驗開發損益矩陣示意圖

表1 模擬實驗相鄰宗地情況

	型態0	型態1	型態2	型態3	型態4	型態5	型態6	型態7	型態8
周圍相鄰 商業宗地數	0	1	2	3	4	5	6	7	8
周圍相鄰 住宅宗地數	8	7	6	5	4	3	2	1	0

時，其下一期的開發偏好為住宅或商業，及其偏好所依據的原因，再將所有受訪者的偏好及原因編碼整理成開發決策庫。例如當所面臨的情況為型態三(周圍相鄰宗地有三筆為商業，五筆為住宅)，若受訪者的偏好為「當周圍商業宗地數介於3筆及5筆之間將開發為商業」，則決策資料庫中型態三將紀錄(3, 5)以供程式的讀取。本問卷共發出60份，回收48份，其中有效問卷40份。為求代表性，具規劃背景及非規劃背景者各占20份。所謂規劃背景者為曾受過規劃教育或正從事規劃工作者，包括在建設公司及顧問公司任職者。而不具規劃背景者則以一般民眾為填答對象(原始問卷內容可參考高宏軒, 1998)。

## (二) 電腦實驗開發損益矩陣的建立

電腦實驗中，每一宗土地下一期是否採用當期的轉換規則或決策，乃依據開發損益矩陣計算得分總和而定。損益矩陣的建立係在問卷中列出開發者可能面臨的情況，如本身是商業使用而他人是住宅使用，或本身是住宅使用而他人是商業使用等四種狀況，請受訪者填寫其偏好(最高4分，最低1分)，再將所有受試者填寫分數加以平均，得一各種相鄰情況之平均偏好矩陣，作為模擬實驗每一宗土地計算得分總和之依據(參見圖4及其說明)。

因此，每一筆宗地每一期皆須經如下的損益判斷流程：

$$\text{if } a_{i1} > \frac{a_{i2} + a_{i3} + a_{i4} + a_{i5} + a_{i6} + a_{i7} + a_{i8} + a_{i9}}{8},$$

then採原來之開發決策

else重新選取一組開發決策，

其中 $a_{i1}$ 、 $a_{i2}$ 、 $a_{i3}$ 、 $a_{i4}$ 、 $a_{i5}$ 、 $a_{i6}$ 、 $a_{i7}$ 、 $a_{i8}$ 、及 $a_{i9}$ 為各相鄰宗地得分總和。

經由以上的相鄰宗地得分大小比較之決策規則，作為本研究個別開發行為中，規則保留或重新選取的基準。

## 五、模擬結果分析

本研究之電腦模擬，主要以Microsoft Visual Basic 4.0(簡稱VB)程式語言為工具，撰寫土地開發行為的模擬實驗

(原始程式可參考高宏軒, 1998)。由於VB具有物件導向(object oriented)的特性，因此將程式分為三部分：模擬初始狀態的隨機設定、土地開發決策資料庫、與土地開發決策的擬定。而每一期每一宗土地的土地開發決策是經由程式的決策擬定部分，經由問卷獲得之開發損益矩陣評估前一期之開發情況後，進行篩選儲存於Microsoft Excel 7.0中，作為宗地使用轉換的依據。至於模擬邊界的處理，則是採用一般CA的方式，即上面邊界與下面邊界互相連接，左邊邊界與右邊邊界互相連接的方式。模擬結果如下所示(圖5至圖9)。圖中左方顯示空間結構(灰色為商業使用，白色為住宅使用)，右方為住宅使用細胞聚集(clusters)分布(縱軸為頻率而橫軸為聚集細胞個數，皆取對數)。細胞聚集指的是同一種使用細胞具相鄰邊而構成的獨立區塊。以圖5為例，右上方為迴歸方程式，橫軸LOG\_C表細胞聚集數取對數，縱軸LOG\_T0表細胞聚集區塊在時間T0出現的個數取對數，而圖中的圈點則表示根據左圖所描繪的細胞聚集分布。其中斜線部份係以線性迴歸方程式求得，即 $x = \text{LOG\_C}$ ， $y = \text{LOG\_T0}$ ，故與實際資料有所出入。

由以上模擬結果可以看出從一開始的隨機散佈，隨著期數的增加，住宅宗地開始呈現某些區塊的聚集。從每一期的住宅宗地聚集數與其頻率之對數關係圖來看，僅在宗地聚集數較小的情形有類似等級一規模(rank-scale)的分布情況，隨著宗地聚集規模愈大，此現象就較不明顯。在觀察住宅與商業宗地數量的長期變化方面(圖10)，則得到類似Arthur在酒吧實驗的結果(參見圖1)，即形態上雖有改變，但宗地數的變化大致在穩定的範圍內變動。

此外，若以都市等級大小分布的例子為基礎，將模擬結果宗地(細胞)聚集亦予以分級如表2。

以表2之分類基礎，統計各期模擬結果，觀察各期的聚集規模與其頻率之間是否合乎冪次模式，即 $Y = b_0 \cdot t^{b_1}$ 模式，其中 $t$ 為時間， $b_0$ 及 $b_1$ 為參數。再將聚集規模與頻率取對數，以對數分布圖和相關統計數據表來判讀其是否呈現自我組織臨界性的冪次分布特性。圖中的符號說明與圖5同，所不同的是橫軸LOG\_C在此為表2之等級取對數。

從以上各期對數分布圖來看，令人驚訝地發現各組資料的整體形態逐漸趨近線性迴歸方程式的直線形態。且從各期線性迴歸式的判定係數(即迴歸相關係數R與修正係數

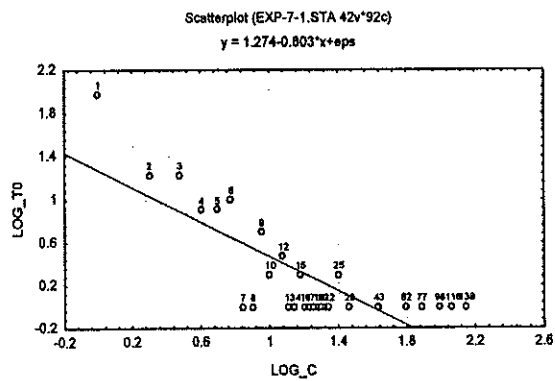
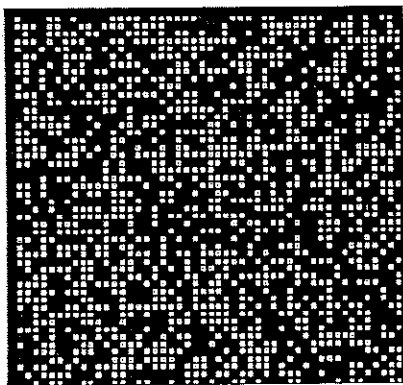


圖5 有限理性決策模式模擬結果(第0期)

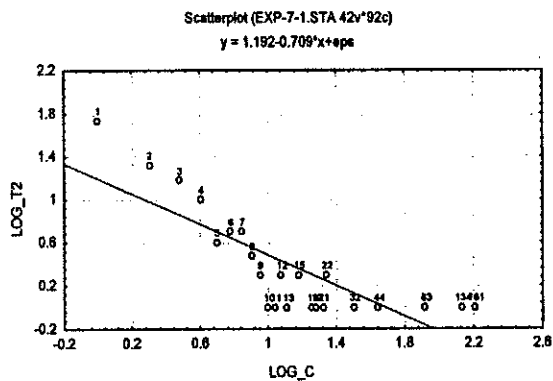


圖6 有限理性決策模式模擬結果(第1期)

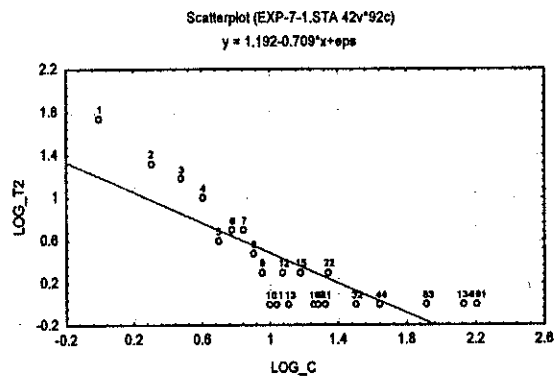
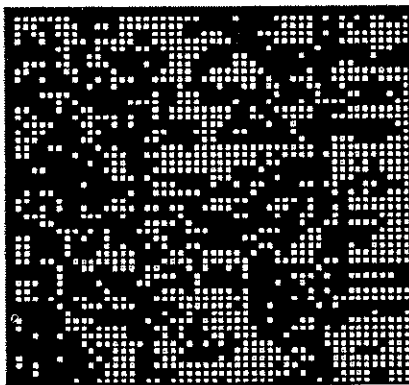


圖7 有限理性決策模式模擬結果(第2期)



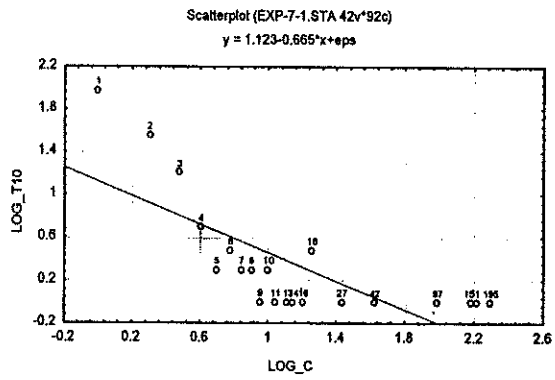
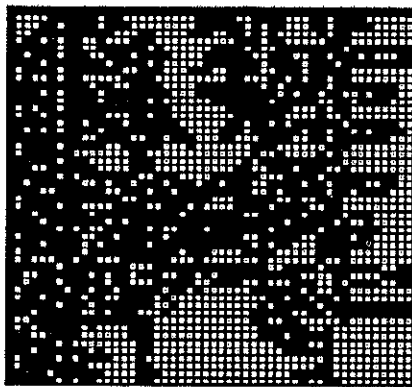


圖8 有限理性決策模式模擬結果(第10期)

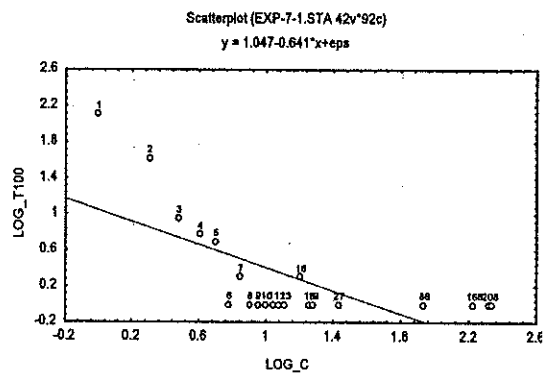
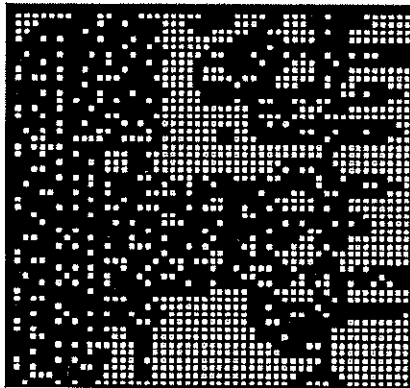


圖9 有限理性決策模式模擬結果(第100期)

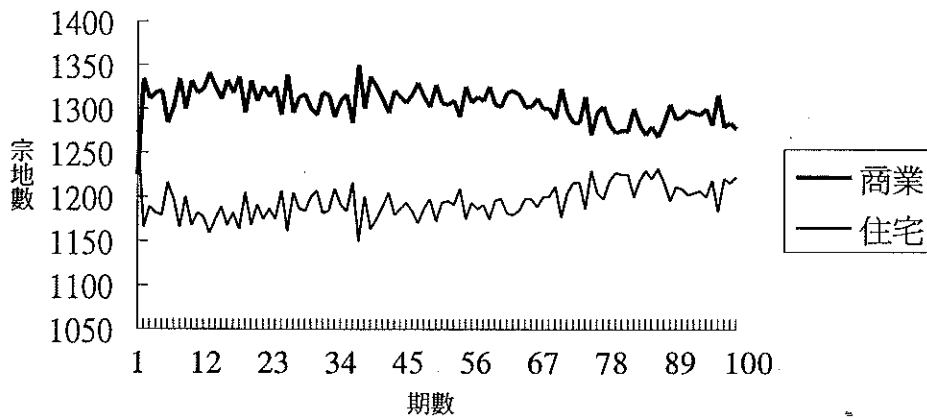


圖10 住商宗地數長期變動趨勢(100期)

表2 宗地聚集規模等級分類表

住宅宗地聚集數	等級
1	1
2~4	2
5~8	3
9~16	4
17~32	5
33~64	6
...	...

Adj-R)之長期趨勢可以看出，空間互動型態有逐漸趨近冪次法則所描述的現象(圖12)。此種現象在另兩種模擬實驗(隨機及固定性決策模式)並未發生。隨機決策模式指的是每一期各開發者任意由決策庫中選取開發策略，而固定性模式指的是開發者無選擇開發策略的餘地，亦即如同傳統CA模式其轉換規則固定不變的。在此兩種極端的行為假設情況下，其空間組織的演化並未如同有限理性模式般逐漸收斂在一個自我組織臨界狀態中(限於篇幅，有關其他兩種模擬結果的分析可參考高宏軒(1998))。

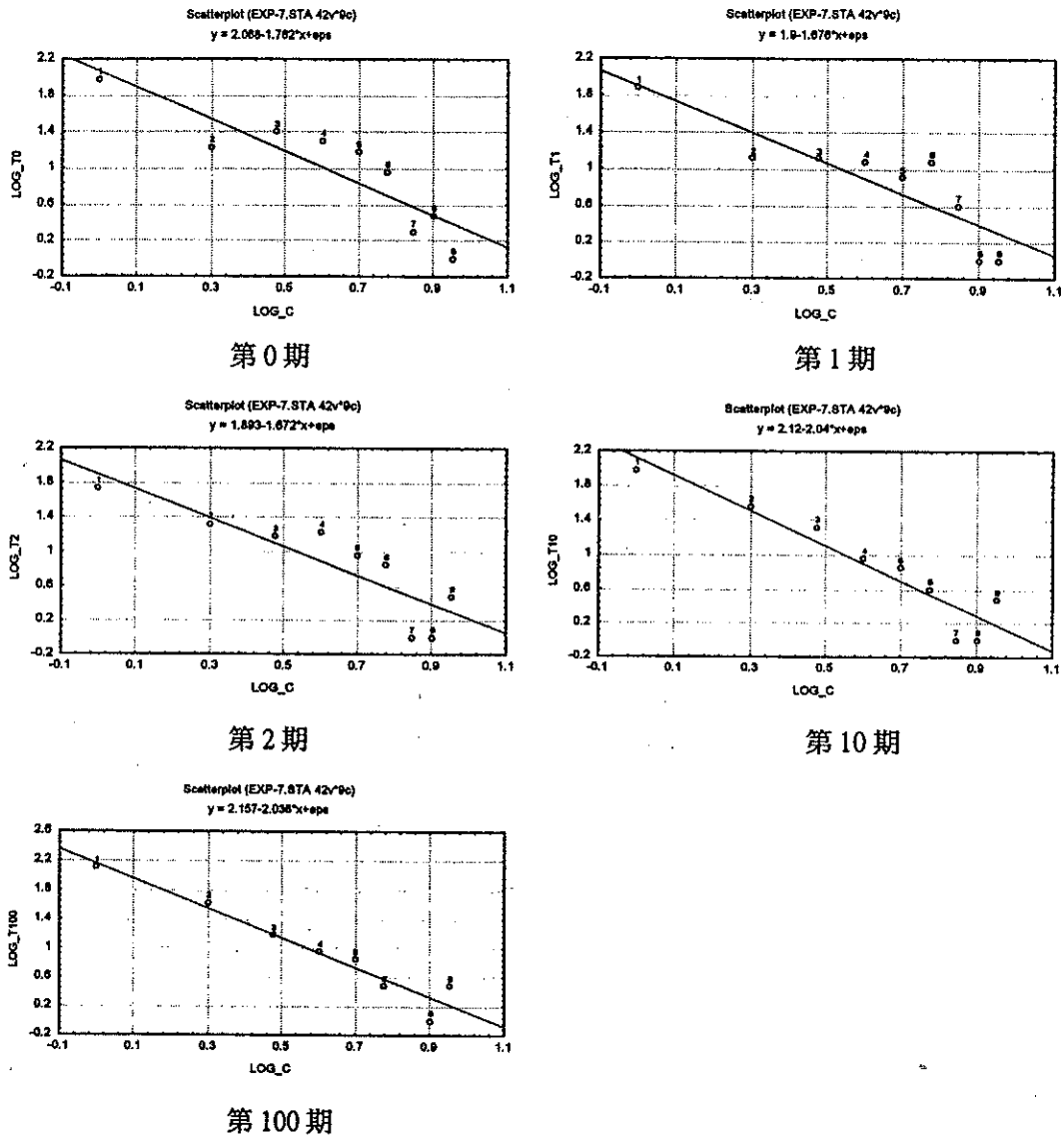


圖11 有限理性決策模式住宅聚集等級規模對數分布圖

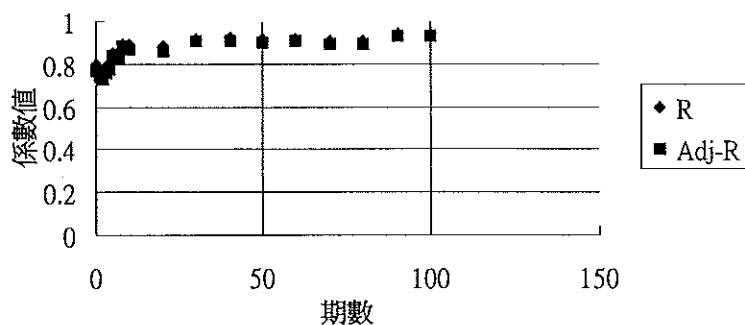


圖12 模擬判定係數變化趨勢

## 六、討論

雖然本研究以簡化的開發行為在簡化的二維細胞自動體嘗試解釋都市空間如何演變，在設計及假說的檢視上，也許有不夠嚴謹之嫌。然而不同於一般實驗設計在於本研究屬於實證之電腦模擬實驗，藉由開發行為與都市空間結構特性的捕捉，從模擬實驗資料及結果中尋找規律，並引伸說明都市空間演變可能的源由。而模擬結果與其他應用實際資料從事類似研究之結果雷同（例如，White及Engelen，1993）。故在研究方法設計及都市理論創作應有所貢獻。

本研究雖以二維空間作為立論基礎，其結果似應可推論至三維空間，因為根據一維空間的理論性探討（例如，Lai，2000）亦認為Wolfram的第四類複雜結構（詳見後述）與自我組織有密切關係，而Wolfram似乎暗示不論維度大小，細胞自動體皆可歸納為此四大類（1994）。至於網格大小與數量，本研究認為網格數量欲多則所獲結果的可靠性欲高。因為複雜系統係由無數個組成分子所形成，而突現現象在龐大複合系統最為明顯。然受限於計算機速度及資料整理的繁複度，本研究將網格數量設定在一般研究二維細胞自動體的規模（即 $50 \times 50 = 2500$ ）。此外，為求研究的真實性，電腦模擬規則採問卷調查方式彙整而成，而非自行設計。問卷填答對象包括具規劃背景之專業土地開發人士及非具規劃背景之一般民眾以反應一般開發特性。問卷內容設計以嚴謹的邏輯及封閉式之簡單形式為基礎，便於規則之彙整。此方式雖不能完成反應開發行為特性，但較一般類似研究自行設計規則更具真實性。而一般開發過程所考慮鄰近環境適應性、經濟聚集性、及開發利得等因素，其實已在本研究中直接或間接涉及，例如地區性互動（local interactions）、細胞聚集（clusters）、及問卷中的損益矩陣等，主要差異在於語彙的不同。

過去數年，地理學及規劃學學者對於都市的形式與成長之思考方式已有重大的改變。以個體決策者為基礎強調

其互動而觀察其整體的型態表現的研究方式已逐漸引起重視。都市的空間結構被視為是由個體互動下突現出自我組織結構的一種範例（Holland，1995）。自我組織結構的特徵：幕次法則，已在很多都市地理相關研究中被提及（例如，Krugman，1996）。本研究則提出以有限理性行為作為空間上個別決策者思考的基礎，強調不再有「資訊蒐集充分」與「完全理性」的經濟人，而採歸納邏輯的有限理性思維作為個體行為模式的基礎。研究結果顯示，在此個體行為的基本假設下，個體間的互動在空間型態上有逐漸朝向自我組織臨界狀態演化的趨勢。自我組織臨界性是描述系統呈現動態平衡的極佳範例，此刻當實質空間上的秩序日趨複雜不易掌握且理性規劃的效果不明確之際，其在空間上及規劃上的意涵或許值得進一步的探究。另外以經濟學為濫觴的純理性思考及分析架構在近年來已逐漸受質疑，思考空間向度的演變或許也應重新考量個體的特質，以較真實的有限理性來描述空間上互動的主體，其結果相信將更趨近真實狀況。然而欲更深入地進行類似本研究之探討，至少應釐清自我組織臨界性的意涵。

Wolfram（1984）將細胞自動體的演化情形歸類為四種：第一類為無論開始時是何種形態的細胞，皆會隨著時間而死亡，最後呈現單一同質的型態；第二類為活細胞和死細胞隨機散置的初始狀態會很快合併成一組靜止的塊狀，其所產生的簡單結構不是一種很固定的結構，就是循環著某種固定結構；第三類為無限制的成長，完全不穩定而無法預測，且不具週期性的混沌狀態；第四類為既不是靜止的死亡狀態，也不是混沌而無法預測，雖然混亂但也存在著某種秩序。

對於第四類的複雜結構為何僅出現在介於秩序與混沌之間的相變階段，Kauffman（1995）以隨機布爾代數網絡（random Boolean networks）提出了解釋。在此網絡中，每一節點的狀態決定於布爾代數邏輯轉換規則而受制於與其相連結的節點。當某些規則使得一些節點被鎖定在某種固定狀態，於是網絡處於凍結（frozen）狀態，當造成節點被

凍結的規則比例較低時，則網絡基本上是處於混沌狀態。相反地當比例較高時，則網絡將形成靜止或固定週期循環的穩定狀態。若令節點被凍結的規則比例處於某個臨界值使得系統中除了有節點被凍結外，同時也有被凍結節點開始滲透(percolate)而恢復活力的平衡狀態時，系統開始呈現動態穩定且秩序也開始產生。只有系統處於此臨界狀態，其動態演化才得以順利進行，否則系統將除了死亡外，就只有混沌一片。這意味著經由自我組織所呈現的複雜結構決定於秩序與混沌之間的平衡(White及Engelen, 1993)。本研究中衡量自我組織的特性—冪次法則乃是經過資料的轉換，即等級分組之後才顯現出來。可能的解釋為資料經過轉換後，減少了一些雜訊(noise)，但同時也失去了一些訊息(information)，而等級分組的資料轉換方式正好為這兩個因素之間的平衡。

碎形或冪次的分布形態同時也就是系統介於秩序與混沌之間的特徵(Bak及Chen, 1991及1991等; Kauffman, 1996)。本研究在回顧了有關的都市空間研究中，得知除了實際社經資料中都市的發展呈現碎形的分布外，White及Engelen以單核心發展模式進行的都市模擬及本研究從個體為有限理性決策模式的空間互動亦得到演化形態呈現冪次的碎形空間結構。從Kauffman的隨機布爾代數網絡來看都市的演化，或許可以說明都市的空間結構之所以維持在臨界點的相變狀態，乃是因為只有在此種狀態之下都市才能持續地演化。另外，Krugman(1996)在整理美國城市規模與個數關係時，亦得到類似冪次定律的關係；其他尚包括地震規模與頻率的冪律關係。目前學界對於複雜現象的研究似乎僅止於秩序的發現，至於其成因為何，則較少涉及(Simon, 1955除外)。其在經濟上的意義也許在於某一層次，包括經濟、政治、及生態等複雜系統其演變可能朝向自我組織臨界性的吸子進行。

## 七、結論

本研究對都市演化及其自我組織現象提出一研究設計，並以電腦實驗方式進行簡化之都市空間演化之模擬。雖然本研究對土地開發行為及空間結構的假設過於簡化，但研究設計仍著重在個別行為及空間演化的基本特性。研究結果顯示自我組織臨界性的現象是經由下而上的個體互動過程中所產生的，且僅有某些規則特性可形成冪次的碎形空間分布，而有限理性行為應是其中的一種。以土地開發為例，此有限理性意味著開發者無法完全掌握相關資訊，而必須藉由歸納的推理方式，由經驗中學習，以擬訂令人滿意的開發策略。因此，本研究中電腦模擬得到的臨界點冪次分布，與都市空間結構中普遍存在的碎形現象極

為相似，可推論有限理性行為或許就是實際上空間互動個體行為模式的基礎。然而此項推論的驗證尚有待進一步對模擬過程中每一宗地採用規則之轉換情形進行觀察，始能獲得驗證。本研究雖尚未以實際都市空間演變資料作為驗證模擬結果的依據，但林如珍(1998)以碎形維度為基礎檢視三重市及南投縣名間鄉的土地使用混合度之空間分布，亦發現類似冪次定律的關係，可間接支持都市空間結構具自我組織的特定之推理。然而本研究顯示，在無外界干擾的情況下，複雜空間系統若具有自我組織臨界性的傾向，則其土地使用分布將隨著時間逐漸朝臨界點的平衡狀態發展。亦即，該臨界點似為空間演化的吸子。

## 謝誌

本文初稿曾發表於中華民國區域科學學會1999年會以及Computers in Urban Planning and Urban Management國際研討會(威尼斯, 1999)，作者感謝與會者的意見。作者感謝行政院國家科學委員會對本研究的經費補助(計畫編號：NSC87-2415-H-005A-016)以及三位匿名評審的意見。

## 參考文獻

林如珍

1998 <以準碎形空間混合度指標探討都市土地使用形態之自我組織—整體發展受限模式之應用>，碩士論文，國立中興大學都市計畫研究所。

高宏軒

1998 <都市複雜空間系統演化自我組織臨界性之探索—有限理性典範之應用>，碩士論文，國立中興大學都市計畫研究所。

賴世剛及陳建元

1996 <資訊收集對單維細胞自動體中模仿行為的影響：以囚犯困境空間模式為基礎的電腦模擬>，<中華民國都市計畫學會年會論文集>，4/4/14。

Arthur, W. Brian

1990 "Positive Feedback in the Economy", Scientific America Feb: 92-99.

Arthur, W. Brian

1994 "Complexity in Economic Theory: Inductive Reasoning and Bounded Rationality", AEA PAPERS AND PROCEEDINGS 406-411.

- Bak, P. & K. Chen  
1989 "Self-Organization Criticality Phenomenon", Journal of Geophysical Studies 94 : 15635-15637.
- Bak, P. & K. Chen  
1991 "Self-Organized Criticality", Scientific American 1: 26~33.
- Bak, P. K. Chen & M. Creutz  
1989 "Self-Organized Criticality in the Game Of Life", Nature 342 : 780-781.
- Casti, J. L.  
1999 "Would-be Words : The Science and Surprise of Artificial Worlds", Computers, Environment, and Urban Systems 23(3 : 193-203.
- Chapin, F. S. Jr. & E. Kaiser  
1979 Urban Land Use Planning. Urbana, Illinois: University of Illinois Press.
- Green, D. G.  
1993 Complex Systems: From Biology to Computation. Amsterdam: IOS Press.
- Holland, J. H.  
1995 Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. Reading, Massachusetts: Cambridge: Blackwell.
- Kauffman, S.  
1995 At Home in the Universe : The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity. New York : Oxford University Press.
- Kreps, D. M.  
1990 Game Theory and Economic Model. New York : Oxford University Press.
- Krugman, P.  
1996 The Self-organizing Economy. Oxford : Blackwell Publishers.
- Lai, S-K  
1998 "A Property Rights Based Interpretation of Land Development Behavior", Land Economics Annual Publication 9 : 1-11.
- Lai, S-K  
2000 "On Transition Rules of Complex Structures in One-Dimensional Cellular Automata: Some Implications for Urban Change", Complex Systems (in review).
- Nowak, M. A. & R. M. May  
1993 "The Spatial Dilemmas of Evolution", International Journal of Bifurcation and Chaos 3 (1) : 35-78.
- Robin, M. H. & W. R. Melvin  
1987 Rational Choice. Chicago : The University of Chicago Press.
- Simon, H.A.  
1955 "On A Class of Skew Distribution Function", Biometrika 52 : 425-440.
- Tobler, W.R.  
1979 "Cellular Geography", in Philosophy in Geography. ed. S. Gale & G. Olsson, D Reidel : Dordrecht.
- White, R. & G. Engelen  
1993 "Cellular Automata and Fractal Urban Form : A Cellular Modelling Approach to the Evolution of Urban Land-Use Pattern", Environment and Planning B 25 : 1175-1199.
- Wolfram, S.  
1984 "Cellular Automata as Models of Complexity", Nature 311 : 419-424.
- Wolfram, S.  
1994 "Universality and Complexity in Cellular Automata", in Cellular Automata and Complexity. ed. S Wolfram, New York: Addison-Wesley.