

報酬遞增理論對聚落體系影響之電腦模擬實驗

于如陵¹、賴世剛²

摘要

本文是探討報酬遞增理論對都市聚落體系空間分布之影響，試圖解釋何以都市聚落體系會形成冪次現象(Power law)。所謂的冪次法則是指事物出現的規模與頻率間的關係：物體的規模S和其出現次數，呈 $S^{-\alpha}$ 的比例關係，而形成一個自成組織的體系。在先前的研究中曾指出，根據報酬遞增理論所設計的電腦模擬中，在均質平面平面的假設下，會呈現出高度符合冪次現象的都市體系(于如陵，賴世剛，2001)。本文在此一基礎上，將模型的假設條件放寬，使其不限於均質平面，並加入遷移行為的考量，以求得更為真實及一般化的結論。

模擬結果顯示，在放寬假設後，所形成的聚落體系仍高度符合冪次現象，並不因加入遷移行為及非均質平面而改變。此外模擬結果顯示，考慮遷移行為後，往往有使大都市加速發展之趨勢。而非均質平面的模擬中則顯示，地理優勢只是影響都市區位的因素之一，小事件的發生加上報酬遞增效應，往往使得某些區位被鎖定而成為大型聚落，不能完全以區位優勢來解釋都市之發生。此發現與 Arthur (1990)的廠商區位選擇理論的結論一致。另一方面，去除報酬遞增機制後的模擬結果顯示，其所形成之聚落體系之型態與真實世界相差甚遠。因此吾人猜測報酬遞增現象極可能是形成聚落體系冪次現象的機制之一，確切的結論需進一步理論上的驗證。

關鍵詞：聚落體系、報酬遞增、冪次法則

¹ 國立成功大學都市計劃研究所博士候選人、崑山科技大學不動產經營系專任講師
台南縣永康市大灣路 949 號，TEL：(06)2710834-13，E-mail：juling@mail.ksut.edu.tw

² 國立台北大學地政系教授兼地政研究中心主任
台北市民生東路三段 67 號，TEL：(02)25021520-7595，E-mail：lai@mail.ntpu.edu.tw
投稿日期：2003 年 10 月 20 日；接受日期：2003 年 12 月 10 日

How Increasing Returns Mechanisms Form Settlement Systems: The Computer Experiments Method

Ju-Ling Yu, Shih-Kung Lai

Department of Urban Planning, National Cheng Kung University; Department of
Real Estate Management, Kun Shan University of Technology

Center for Land management and Technology, National Taipei University

Abstract

The paper investigates the influences of increasing returns on the spatial distribution of urban settlement systems and attempts to interpret why urban settlement systems exhibit the power law distribution. The so called “power law” is referred to as the relationship between the scale and frequency of objects. That is, the number of objects whose sizes exceed S is proportional to $S^{-\alpha}$, and then the system forms an organization automatically. The former research indicated that, based on the computer simulations designed on increasing returns, under the hypothesis of an uniform plane, the urban settlement systems highly conformed to the power law (Yu and Lai, 2001). Based on the ground, the paper relaxes the hypothetic restrictions of the model, so that it will not be constrained by the uniform plane and adds the consideration of migration behavior, for the purpose of making a more common, realistic conclusion.

The outcome of the simulations shows that, after the restrictions are relaxed, the settlement systems still closely conform to the power law; it does not change for adding migration behavior and non-uniform plane. Conclusive claims must be backed by deductive evidence. The result also shows that, after migration behavior is taken into consideration, it often accelerates the tendency of big cities growing up. While the outcome of the non-uniform plane indicates that geographical advantage is merely one of the factors that influences the location of a city, the occurrence of small events with the effect of increasing returns often make some locations become big settlements, so we can not totally use geographical advantage to interpret where the city will be formed. This finding is consistent with Arthur’s insight into the location choice theory of firms. On the other side, the result of simulation model show that after the mechanism of increasing returns is lifted, the formulated settlement system is far away from the real world. Therefore we argue that increasing returns would be one of the underlying mechanisms through which the power law relationship of urban settlement systems emerges.

Keywords: Settlement Systems, Increasing Returns, Power Law

一、前言

所謂的「都市階層」「都市體系」普遍存在於各地，大小聚落之間存在的秩序，彷彿是經過人為精心的安排。早在1933年德國地理學家克里司徒納(Walter Christaller)提出他有名的中地理論(Central place theory)，而1949年威普夫(Zipf)，提出等級大小法則(Rank-Size rule, 1949)，這兩位學者可算是都市聚落體系的理論的啓蒙者。

近年來，複雜科學(Sciences of Complexity)逐漸被引入各學門中（例如，Kauffman, 1995；Simon, 1998；Batten, 2001；林和，1991及齊若蘭，1994），複雜科學強調的是總體是由個體所構成的，而整體系統之所以複雜難測，是因為個體間的互動所致。都市是由眾多組成份子互動所形成的，無疑的，都市是一個複雜系統。複雜科學中提到，許多自然界與社會科學中的複雜系統，都具有自我組織(self-organization)的特質，該理論認為系統在某些情況下會從混亂中自發地呈現某些秩序。而秩序的起源並非源於某些物理學或經濟學的定理原則，而是由系統中組成分子互動所產生的。而所謂冪次現象(Power law)就是系統呈現自我組織的證據之一，冪次現象是指事物出現的規模與頻率間的關係：物體的規模 S 和其出現之次數，呈 S^{-q} 的比例關係，亦即規模大的事物出現的頻率低，而規模小的事物出現的頻率高，而形成一個自成組織的體系。在自然界如地震、隕石撞擊，在社會科學界如股市漲跌等，都呈現出冪次現象。

在先前的研究中曾指出，根據報酬遞增理論所設計的電腦模擬中，在均質平面的假設下，會呈現出高度符合冪次現象的都市體系，因此吾人猜測報酬遞增可能是形成冪次現象的機制之一(于如陵，賴世剛，2001)。由於在該項研究中，採取的是將真實世界大幅簡化後所建立的模型，雖然獲致了一些重要的結論，但畢竟限制仍多，與真實世界仍有相當差距，所得的結論不夠完整。本文在此一基礎上，將模型的假設條件放寬，使其不限於均質平面，並加入遷移行為的考量，使得模擬過程及結果，能更接近真實世界，以求得更為一般化的結論。

二、都市聚落體系與冪次定律

1949年Zipf提出等級大小法則(Rank-Size rule)以說明都市規模與其等級的相關性。 $P(r)$ 表示第 r 級都市之人口數， q 表示為常數，以數學式表現則為：

$$P(r) = K * r^{-q} \quad (1)$$

其公式符號定義為： K 為最大都市人口數， $P(r)$ 係第 r 級冪次定律序列之人口， q 為稱為Zipf force (通常均假設等於1)。依據該規則若將都市排序及都市規模均以

對數化 (logarithm) 處理，則可產生線性關係 (Savage, 1997, Black, 2001)。吾人可以發覺其實幕次法則普遍存在於都市系統中，它的概念與先前學者所提出的等級大小法則不謀而合。即規模越小或排序越低者其等出現的頻率越多，反之，規模越大或排序越高者其等出現的頻率越少。只是等級大小法則是一個觀察歸納的結果，在當時還沒有提到所謂自我組織這樣的概念。如前所述，Krugman (1996) 曾以美國都市的實際統計資料進行統計分析，亦得到同樣的幕次關係。由於幕次法則是先區分規模，再觀察規模與頻率的關係，牽涉到如何分組的問題。Krugman 提出的方式是將城市依規模大小「排序」，再將「排序」與「規模」皆取對數，發現其亦呈現線性的關係。Krugman (1996) 在其 *The self-organizing economy* 一書的論述中論及幕次定律與規模關係指出，都市人口與其都市排序取對數後呈反向比值的關係。Krugman 由實證中發現：美國 130 個都市於一百年 (1890-1990) 間其所形成之幕次定律模式竟有逼近於 -1 斜率的線性關係。

Zipf 所提出的大小等級法則時，設定其指數之係數 (q) 為 1，此一係數即為幕次定律中斜率值，其函數型態完全相同。而此一斜率值經美國都市的實證研究，認定其趨近於 -1，且在一百年間其斜率值均相當穩定。儘管學界對此一現象形成的原因，仍未能有完整的解釋，但在文獻上顯示此一現象確實存在，但其成因猶待探討。

幕次定律所運用的公式與 Zipf's law 雷同，在使用在都市發展與人口分布上則多驗證指向 q 為 1。

雖然 Krugman (1996) 曾以 Simon 所提出都市隨機成長模型 (random growth model) 以解釋都市發展的幕次定律，但對於指數 q 的穩定性仍未能提出確切證明。即其模型假設都市成長以區塊 (lump) 方式形成，並且區塊成長的頻率密集；任一區塊之發展隨其內人口的選擇或將併從相鄰較大都市或另獨立發展，因此 Simon 設其區塊發展機率值為一固定值 π ，其推導出 α 應等於 $1/1-\pi$ (α 乃指幕次定律的 q 值，1 代表該區域發展的常數值)。由於因 $\alpha = q = 1$ ，則在幕次定律的假設下，現實世界的觀察中小城市的出現頻率密集而且必然，然 $\alpha = 1$ 時， π 值必為 0，顯然與事實相矛盾。然而在都市發展實務過程中確然發現小區塊的成形 (如市集) 與消失 (併入相鄰城市) 狀況，此一矛盾現象 Krugman 及 Simon 未能檢證 (于如陵、賴世剛 2001)，殊為可惜。

三、報酬遞增理論與區位選擇

在市場競爭中，我們可以看到由於「正回饋」與「報酬遞增」而導致市場鎖定於某種產品或規格的情況。以錄影機規格的 Beta 和 VHS 之爭就是一個好例子，由於「正回饋」效應，每個人都有比較強的誘因跟隨市場領導者的步伐，以致市場主流系統最後席捲市場，大獲全勝。報酬遞增的觀念強調當使用者加入一個規模較大的陣營時，隨著該陣營規模的擴大，對陣營內的每個使用者都帶來更大的利益。在商品的銷售上，

陣營可以代表不同規格的产品（如錄影帶規格的 VHS 和 Beta 之爭）；在都市系統中，陣營代表的則是不同區位的都市。都市的選址也是類似的情況，英國殖民者群集於寒冷、多風暴且多岩石的麻薩諸塞灣，只是因為那是當初第一條船五月花號停靠的地點，而且還是在迷路的情況下。初始的區位一旦被鎖定，由於報酬遞增，往往就不會再變動了。都市的發展受到早期零售業區位選擇的影響便是常見的例子。

就空間的聚集行為而言，Arthur 認為這是一種報酬遞增的現象。廠商因為生產條件的考量都會具區域偏好，接著進入的廠商會優先選擇於現有廠商的周圍，可以減少開發成本獲得較多利益，這就是聚集經濟效果。利用數學式子可以表示如下 (Arthur, 1990)

$$\pi_i + g(N_i) \quad (2)$$

式中 π_i 表示區域 i 提供之地理資源優勢， $g(N_i)$ 表示區域 i 內存在 N_i 家廠商時所得到的聚集利益。因此當廠商家數增加時，該區域的聚集利益亦隨之增加。Arthur (1990) 曾透過理論的推導指出，假如聚集利益沒有上限 (unbounded)，最終會有區位獨占所有產業，但未對最終區位的空間結構加以說明。

筆者曾在 Krugman 和 Arthur 的理論架構基礎下，從報酬遞增的觀點，設計一個二維空間的電腦模擬，以探討報酬遞增是否為形成都市體系冪次定律的成因 (于如陵，賴世剛，2001)。該模擬的邏輯基礎是將聚落體系形成的過程視為一隨機成長過程 (random growth process, Krugman, 1996)。將報酬遞增模型設計為三種不同的模式進行模擬，分別為「相鄰關係模式」（指區域選擇受周邊相鄰單元影響）、「規模吸引模式」（指聚落規模越大，對住戶的吸引力越強）及「相鄰與規模混合吸引模式」，以電腦模擬來探討在報酬遞增情況下，都市區域的聚落體系是如何形成的。結果顯示，在都市為均質平面的假設下（即空間上並不存在地理資源優勢，在 Arthur 模型中表示 π_i 為 0），且不考慮遷移行為的簡化模型之下，前述三種模式均能產生符合冪次定律之聚落系統。由模擬的結果來看，經由「報酬遞增」原則所形成的聚落體系，與冪次法則呈高度吻合（相關係數已趨近於 1），因此吾人猜測，「報酬遞增」可能是形成聚落體系冪次法則的機制之一。

由該項研究中，吾人可以歸納出以下結論：

在均質平原的假設下，電腦模擬確能產生符合冪次定律的聚落分布型態，且規模及排序取對數後的相關係數高達 0.95 以上。

隨著聚集強度的增加，其首要都市規模及平均聚落規模均有逐漸擴大之趨勢，表示當我們如果對相鄰現有聚落之區位給與較高的發展潛力值時，確實會強化住戶集中的趨勢，從而產生較大規模的聚落以及較少的聚落數目。

當聚集強度提高時，呈現迴歸方程式中斜率趨緩的趨勢（將「都市排序」置於 Y 軸，「都市規模」置於 X 軸）。迴歸方程式的斜率，代表的是不同規模間其城市排行的平均差距，因此斜率趨緩代表一種「極化」的現象，亦即都市發展集中於較少數的大城市，大小

城市間的差距擴大。斜率隨著聚集強度提高而減少的趨勢，代表當我們如果對相鄰現有聚落之區位給與較高的發展潛力值時，確實會強化住戶集中的趨勢，而且此種集中趨勢和發展潛力值提高的幅度成正比。

模型的相關係數並不隨時間增加而增加，我們可以這樣解釋，這顯示冪次定律存在的普遍性與穩定性，不管在任何時間點的聚落分布都符合此一特性，而非以「逐漸趨近」的方式來達到冪次定律的分布型態。

由於在該項研究中，採取的是將真實世界大幅簡化後所建立的模型，雖然獲致了一些重要的結論，但畢竟限制仍多，與真實世界仍有相當差距，所得的結論不夠完整。因此本文乃延續先前探討的架構，並將重點放在遷移行為與不均質平面下，是否會對冪次法則的都市體系造成影響。換言之，本文是嘗試將原先的假設(無遷移行為的均質平面)予以放寬，在一個更一般化的情況下來看待這個問題，以獲得一個較為完整的結論。

四、研究設計與方法

本研究是由從報酬遞增的觀點，設計一個二維空間的電腦模擬。模擬的邏輯基礎是將聚落體系形成的過程視為一隨機成長過程(random growth process, Krugman, 1996)。在我們的電腦模擬中，沿用了 Arthur 的分析架構，把區位的吸引力區分為區位本身的特性與聚集利益兩部分。另外在 Arthur 的模型中，區域的數目及區域劃分是預設的，而在我們所設計的電腦模型中，聚落的數目是由系統內生而決定的，而每個聚落的聚集利益和聚落規模成正比，因此每個聚落就等於是一個小區域。

(一) 原始的模型說明

原始的模型是指依照筆者先前研究中所設計，限制在一均質平面上，且不考慮遷移行為的狀況(于如陵、賴世剛，2001)。

在這個電腦模擬中，將平面空間分為相同規模的方格(grid)，每一個方格代表一個細胞(cell)，而這個細胞代表一個最小的土地開發單元。這個細胞的概念是由細胞自動機(cellular automata)而來，雖然本文並未用到細胞自動機的理論，只是考慮二維的格子狀腹地，但仍然借用細胞這個名詞來代表一個最小的土地開發單元。細胞的狀態只有兩種情況：「未發展」與「已發展」。在初始狀態下，每個細胞均為未發展狀態，然後依照模擬規則，某些未發展細胞會轉變成為已發展的狀態。

本模擬存在以下的基本假設，茲說明如下：

在本實驗中細胞的開發是不可逆的，即一個細胞由未發展狀態轉為已發展狀態後，除非發生遷移行為，否則不可能回復為未發展的狀態。在真實世界中，這代表土地開發行為是不可逆的，土地一旦被開發，若未發生遷移行為，就不會回復到原先的初始狀態。

初始狀態下，區域皆為未發展細胞，之後每增加一回合，便固定新增一個已發展細胞加入區域內，而不論該細胞為系統內生或自外界遷入，因此每回合的已發展細胞增量固定為一，重點是其區位選擇於何處。在真實世界中，代表的是固定的人口成長，不論其為自然增加(出生)或社會增加(遷入遷出)。

本研究之方法主要以二維細胞自動機為架構，將每一細胞視為平面上的一宗土地，可以容納一個住戶單元。當細胞數目越多時，相對的運算時間會隨之增加，但基於統計的觀點，大樣本將具有較高的可信度，因此本研究參照歷年相關的電腦模擬，在電腦運算時間能夠忍受的程度下，將模擬空間的細胞數大幅提高。本模擬設計一個縱橫各為兩百格的方格矩陣，總計為四萬個細胞。在每一回合中，會有一個已開發細胞進入本區域，選擇一個居住區位，被選擇的區位將由「未發展」轉為「已發展」狀態。因此每經過一個回合，「已發展」細胞便增加一個，如此進行二千回合的電腦模擬，以觀察這些細胞所形成的聚落體系。

(二) 加入遷移行為的考慮

由於先前的研究是假設住戶一旦選定區位後，便不再遷移，而永遠定居於該地。這似乎與真實狀況有所差距，即使一個住戶起初選擇獨自居住，他在日後也有可能遷往較大聚落的想法與可能性。因為當聚落的規模增大時，由於聚集經濟的關係，居民能享受到更高層級的設施與服務，而使其生活品質提高。當遷移到較大聚落的利益高於遷移成本的話，住戶便會採取遷移的行動。對遷移所獲得利益之衡量，本模型是採取遷移前後聚落的規模差距來衡量，以顯示規模不同所造成的利益差異，如下式所列：

$$\text{遷移所獲得之利益} = \text{遷移後之新聚落規模} - \text{遷移前原聚落規模} \quad (3)$$

而對遷移成本之衡量，則是以距離為代表。在模型的運作上，是以遷移距離的平方視為遷移成本，將距離以平方加權的理由是，根據模擬結果，若以線性的距離作為成本，則都市會呈現如八爪章魚般的向外擴散，都市有形成不正常線性發展的趨勢。雖然線性與同心圓兩種形式之都市均存在於真實世界之中，然而吾人認為其線性發展之趨勢已達到不正常的程度，有必要加以適度抑制。因此將距離以平方加權，以抑制遠距離的遷移，避免都市不正常的擴張，產生較符合真實世界的模擬結果，此外傳統的重力模式亦是以距離的平方作為兩聚落互動程度的影響因素之一。

如前所述，當遷移的利益高於成本時，也就是說當遷移行為會產生淨利益時，住戶會採取遷移的決策。由於本模型是設定在報酬遞增的基礎上，而且並不存在任何聚集不經濟的限制(如擁擠、污染的增加等)，在此機制下，遷移的方向為單一方向，僅由小聚落遷移往大都市，而不會有反向的遷移行為。而且在理論上任何住戶都有移往較大都市，尤其是首市之傾向，這與真實狀況有相當差距。在真實世界中存在有大都市的聚集不經濟與鄉土情感等因素，住戶不會非常熱衷於遷往大都市。所以假設每個住戶都隨時可以遷移的行動的話，這個都市體系可能會崩解到只剩下一個首要都市，這是在報酬遞增下(且不存在聚集不經濟的情況)，使全體居民獲利最大的方式(全部的

居民均居住在同一個城市)，但這顯然與真實世界不合。真實世界中有一定的遷移率存在，因此在本模型中也設定每一回合中，只隨機抽樣檢查固定比率的住戶是否會採取遷移的行動(本模型參酌真實世界的遷移率，並考慮電腦運算時間的忍受程度，將該比率設定為 5%)，而非假設每個住戶都隨時可以遷移的行動，以避免整個都市體系的崩解

(三) 打破非均質平原的假設

由於先前的研究是以均質平原作為假設，如果把這個條件解除，對於聚落體系的累次法則有何影響，是本文探討的重點之一。本研究對於非均質平面是以「預設」方式處理：如地理區位或是礦藏分布等。這種非均質狀態是在住戶進入前便已存在，且在整個模型的運作中都此種非均質狀態都不會改變。

在非均質平面的情況下，某一特定區位是否能轉化為「已開發」是由「該基地之地理區位發展潛力」加上「因報酬遞增所帶來之效益」所決定，亦即兩者相加後的分數越高，代表該基地在下一階段發生轉換的機率越高。而在均質平面的情況時，吾人僅需考慮「因報酬遞增所帶來之效益」此一因素。

(四) 模型操作過程

1. 吸引模式設計

吾人認為，形成都市的動力可能來自兩方面：首先由於人類是群居的動物，故人們有選擇與鄰居相鄰居住的習慣，我們稱為「相鄰關係」，以該細胞緊鄰週邊八格中有多少已發展細胞來衡量該區位在「相鄰關係」之吸引力。而所謂「規模吸引」是指該都市對新聚落的吸引力與該聚落的規模成正比，這是基於報酬遞增的精神而設計的。此種區位決策的方式和前面所提的「相鄰關係」相比，顯然其考慮的範圍加大了，由緊鄰的細胞而擴展到緊鄰都市的規模。若某區位緊鄰一個規模為M的聚落，則本模型設定其發展潛力值將提高為M*N，其中的N值，本研究稱為「聚集強度係數」，是指因鄰近一個已發展細胞，而導致該區位發展潛力因而提高之數值。

某區位對新細胞的吸引力(發展潛力值) = 聚集強度係數 * $\sqrt{(\text{該細胞周圍八個細胞的已發展細胞數} * \text{該細胞周圍緊鄰的最大聚落之規模})}$ (4)

2. 操作步驟說明

本模型詳細的操作步驟如下：

步驟一：在「非均質平面」狀態下，細胞的發展機率已有先天之差異，在具有區位優勢之地區，其發展潛力值之得分將設定為高於1，而其他地區之發展潛力值為1，因此發展潛力值總分將超過四萬(二百乘二百為四萬，此為均質平面初始狀態下的發展潛力值總分)，若區域內發展潛力值總得分為五萬，則某些區位的發展潛力為五萬分之一，但某些較佳區位的發展潛力將為五萬分之N(N為大於1之正整數)，N值大小視程式之設定決定。在此一步驟所顯示的是「非均質平面」對地區發展之影響，此即為前述Arthur公式中 $\pi_i + g(N_i)$ 的 π_i 部分。

步驟二：以隨機亂數方式(蒙地卡羅模擬)，選取某一「未發展」細胞轉變為「已發展」。

若該細胞周邊均為「未發展」細胞時，該細胞本身即構成一個規模為一的聚落。然後該聚落鄰近細胞的發展潛力值會增加一特定數值(如前面公式(4)之計算結果)。此即為前述Arthur公式中 $\pi_i + g(N_i)$ 的 $g(N_i)$ 部分。另外，若該細胞轉變為「已發展」後，其發展潛力值便設定為零，表示該區位在後續階段被重複選取的機會為零。

步驟三：第一個細胞選取位置時，考慮的只有地理優勢所造成的非均質狀態。但當第一個「已發展」細胞發生後，整個區域中發展潛力值又有了變化，在「已發展聚落」周邊將具有較高的發展潛力值，發展潛力值的計算公式如前面公式(4)。所謂的「已發展聚落」是由「已發展」細胞相鄰聚集所構成的獨立區塊。此時，影響某細胞再下一階段是否會轉變的「發展潛力值」(發展潛力值越高，發生轉變的機率越高)，是由兩部分所構成：是否存在先天的地理優勢，與聚集利益所造成的影響。此即為Arthur所提的理論架構： $\pi_i + g(N_i)$ ，式中 π_i 表示區域*i*提供之地理資源優勢， $g(N_i)$ 表示區域*i*內存在 N_i 家廠商時所得到的聚集利益。

依照前述的邏輯，爾後進入區域的細胞，發生在發展潛力值高的區位的機率會提高。而且發展潛力值的高低則取決於該區位是否有先天的區位優勢(非均質平面)與該區位聚集利益之大小，而該區位聚集利益之大小則與該區位緊鄰聚落的規模及該細胞周圍八個細胞的已發展細胞數成正比。

五、模擬結果分析

本研究之電腦模擬，係由Microsoft Visual Basic 6.0(簡稱VB)程式語言為工具，自行撰寫模擬之程式。為了使不同模式及不同參數間的模擬結果能相互比較，在不同模型不同參數的模擬時，採出現順序固定的亂數序列，亦即該數列是符合亂數的隨機性，但每次出現數字的順序是相同的。因此若以相同的參數來進行兩次模擬，將得到完全相同的結果。這樣設計的目的是因為本模擬主要是探討聚落體系之變化，而非參數的影響，參數的大小只有在相對比較下才有意義，本身並無單位或特定意義(如聚落規模、遷移成本等)。

(一) 遷移行為對聚落體系之影響

為了探討遷移行為對聚落體系之影響，本模型嘗試在均質平原的設定下，以不同的遷移成本及聚集強度係數的組合來進行模擬，模擬所得之都市體系，將「都市排序」取對數為Y，「都市規模」取對數為X，進行線性迴歸，迴歸之相關係數及迴歸係數(斜率)見表一。

由模擬結果，可歸納為以下結論：



在各次模擬中，模型的相關係數均高達 0.93 以上(詳見表 1)，顯示在遷移行為下的模型仍高度遵循冪次法則，亦即遷移行為並不影響冪次定律是否發生。

當同時考量聚集強度與遷移成本，在這兩個向度所構成的平面中，有兩個角落特別值得注意：當聚集強度小而遷移成本高時，將導致產生較多的小規模聚落（首市規模低於 200）。當聚集强度高而遷移成本低時，將導致產生「首市獨大」的現象(首市規模大於 1000)。如圖 1、圖 2 所示。在圖 1、圖 2 中顯示的是經歷 2000 回合後的「最終結果」，如果將中間過程亦顯示出來，將可觀察在時間軸上的變化，但由於篇幅有限，故本文中均以顯示「最終結果」的方式來呈現模擬成果。

不管聚集強度為多少，當遷移成本提高時，模型的係數值(斜率)都有增大之趨勢，顯示遷移成本越低，越容易造成人口的集中，從而擴大各聚落間的人口差距。而遷移成本越高，則聚落間的差距越小，越接近原本不考慮遷移行為的模型。

由於遷移行為會導致聚落規模差異的擴大化，如果要達到符合真實世界觀察到的模型迴歸係數約為 1.0 的情況，所需的聚集強度將較原先無遷移行為的版本為低。在先前的研究中顯示，在不考慮遷移行為時，大約聚集強度係數為 40 時，模型迴歸係數最接近 1.0，而在有遷移行為的模型中，則聚集強度係數為 20 的狀態下，其模型的迴歸係數相當接近 1.0。表示距離成本及遷移行為確實對聚落體系的空間分佈有所影響。

有一點值得注意的是，在本模型中，並不存在之「通勤」的概念，也無法區分居住地點與工作地點是否相同，因此所導引出的結論是遷移成本越低，將越有助於大都市的成長，此點可能不完全符合真實世界的狀況。

另外我們由兩個方向來觀察所得的模擬結果：首先，當「聚集強度」不變，而「遷移成本」變化時，隨著遷移成本的減少，首市規模有「增加的趨勢」，表示低遷移成本有助於大都市的成長，但在此處不保證遷移成本減少時，首市規模必定增加，因本實驗中仍存有相當機率性的變異會影響最終結果，故只能說有增加之趨勢。其次，當「遷移成本」不變，而「聚集強度」變動下，隨著聚集強度增加，首市規模亦有增加之趨勢，表示較高的聚集強度有利於大都市產生，但在此處不保證聚集強度增加時，首市規模必定增加，理由同前。

表 1 不同遷移成本與聚集強度係數模擬結果比較表

遷移成本	結果數值	聚集強度 10	聚集強度 20	聚集強度 30	聚集強度 40	聚集強度 50	聚集強度 70	聚集強度 100
0.1	首市規模	420	606	903	1466	1380	1760	1237
	相關係數	0.932591	0.980325	0.935432	0.958202	0.917663	0.948707	0.976568
	迴歸係數	-0.6176	-0.71033	-0.61554	-0.56904	-0.52624	-0.36782	-0.61605
0.2	首市規模	238	878	616	687	397	1427	427
	相關係數	0.993957	0.98384	0.988985	0.979326	0.948127	0.9751	0.936313
	迴歸係數	-0.90717	-0.75422	-0.74593	-0.66084	-0.81621	-0.6021	-0.71539
0.3	首市規模	143	416	197	281	308	1124	454
	相關係數	0.981713	0.993861	0.962127	0.958259	0.984123	0.97083	0.968115
	迴歸係數	-0.97316	-0.82216	-0.83703	-0.74503	-0.82362	-0.69919	-0.81131
0.5	首市規模	106	111	164	347	400	823	417
	相關係數	0.980283	0.978255	0.964154	0.982535	0.974968	0.98615	0.973325
	迴歸係數	-1.25166	-0.98248	-0.97769	-0.83319	-0.8323	-0.81779	-0.74718
0.7	首市規模	87	134	140	262	350	642	597
	相關係數	0.983915	0.980583	0.959887	0.986458	0.979578	0.972401	0.967928
	迴歸係數	-1.29662	-0.9892	-0.86739	-0.89773	-0.90727	-0.82136	-0.76949
1.0	首市規模	71	103	184	423	209	592	545
	相關係數	0.977088	0.962008	0.96308	0.989057	0.988983	0.974773	0.937811
	迴歸係數	-1.26113	-1.05846	-0.97435	-0.94166	-0.94976	-0.83692	-0.90033
不能遷移 (原始模型)	首市規模	31	88	202	172	238	448	812
	相關係數	0.9546	0.9598	0.979177	0.971	0.9724	0.9836	0.928
	迴歸係數	-1.6155	-1.1812	-1.07627	-0.992	-0.8781	-0.84	-0.7814

由於將遷移行為納入模型後，並不會破壞都市體系的冪次現象，且較為接近真實世界的狀況，因此後面關於非均質平面之探討，均建立於存在遷移行為的模型之上，以求得一個較一般化的完整模型。

(二) 非均質平面對聚落體系之影響

對於非均質平面的電腦模擬，均係建立於存在遷移行為的模型之上，故須將參數先加以固定，以便比較模擬結果。由於依據美國都市的實證資料顯示，冪次定律的係數趨近於-1，故由表一中挑選聚集強度係數 20，遷移成本為 0.5 的這組參數（其迴歸係數為-0.98248），可能是最接近真實世界的聚落分布型態（見圖 3），後續的非均質平面電腦模擬，均建立於此參數上。

預設的非均質平面有兩種可能：一個是「發展潛力」，一個是「發展限制」。「發展潛力」是指某些區位先天具有較佳的发展潛力，如優良的地理區位或有礦藏分布。而「發展限制」是指某些區位先天具有發展上的困難：如山坡地顯然較平原不利於聚落發展，此即為發展之限制。其實以相對的概念而言，設置某些地點為高發展潛力，或設置某些地點具有發展限制，其實並無差別，本模型是採取設置高發展潛力區域的方式來表達非均質平面。

以下就非均質平面分為幾種情況加以說明：



1. 某「一個大範圍」內有稍高的地理區位發展潛力

假設在空間中，某一個範圍內具有稍高的發展潛力(比如說土壤特別肥沃，具有特殊礦藏資源，地勢平坦等等)，本模型中是隨機設定在半徑 50 單位的範圍內，其發展潛力值為 2(其他地方發展潛力值為 1)，高潛力區範圍如圖 4 中圓圈範圍所示。

模擬的結果如下：

- (1) 在三次參數值相同而隨機設定不同高潛力地區的模擬中，其對冪次定律的迴歸係數值均在 0.98 以上(詳見表 2)。顯示非均質平面下的聚落體系仍高度符合冪次定律，亦即非均質平面並不會影響聚落體系冪次法則是否發生。
- (2) 由聚落的分布而言，高潛力地區發生聚落的機率會提高，首市出現在高潛力地區的可能性非常大。由於高潛力地區分布在一個較大的範圍，我們可以斷言在這個區域內一定會產生聚落，但無法事先確知聚落發生的確實地點，也就是說聚落的發生仍有相當的隨機性，尤其是會受到先進入本地區住戶對區位選擇的影響。
- (3) 由迴歸係數來觀察，非均質平面下的迴歸係數普遍較原先的模型為小，顯示當平面為非均質時，聚落間規模的差異有擴大之趨勢。

2. 某「多個小範圍」內有較高的地理區位發展潛力

假設在空間中，某幾個小範圍內具有較高的發展潛力(比如優良的地理區位：河流、道路的交會點等)，高潛力區範圍如圖 5 中圓圈範圍所示。

模擬的結果如下：

- (1) 在多次參數值相同而隨機設定不同高潛力地區的模擬中，其對冪次定律的迴歸係數值均在 0.98 以上(詳見表 2)。顯示非均質平面下的聚落體系仍高度符合冪次定律，亦即非均質平面並不會影響聚落體系冪次法則是否發生。
- (2) 當高潛力區域的數目很少時，例如三個，則吾人可以斷言，這幾個區域都能產生一定規模的聚落，但無法於事先斷言首市會出現在何地，所以雖然這幾個地點具有相同的發展優勢，但首市的發生地點仍具有相當的隨機性。
- (3) 當高潛力區域數目較多時，例如六個，則雖然每個高潛力區域都有很大的機會發展為聚落，但在這些聚落中規模的差距卻相當大，最大與最小間規模差距可能超過十倍。這再次說明了，雖然這些地點具有相同的發展條件，但實際發展的狀況仍身受歷史因素與機遇性影響，而形成不同的發展結果。

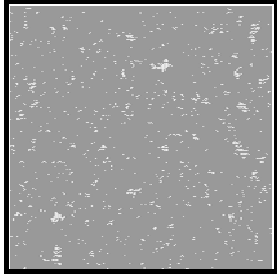


圖 1 聚集強度 10，
遷移成本 1.0 之模擬結果

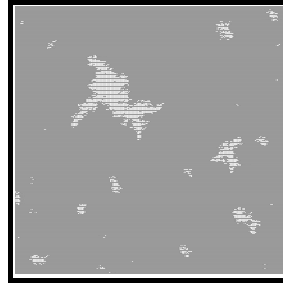


圖 2 聚集強度 100，
遷移成本 0.1 之模擬結果

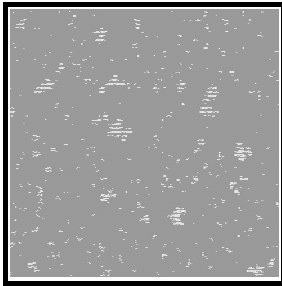


圖 3 聚集強度係數 20，
遷移成本 0.5 之模擬結果圖

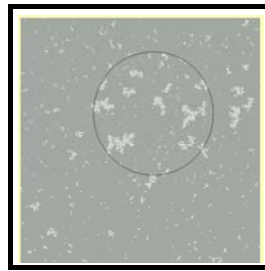


圖 4 大範圍非均質平面
模擬結果圖

表 2 非均質平面模擬結果整理表

型態	說明	相關係數	迴歸係數	首市規模
一個大範圍 (預設的非均質)	一處半徑為 50 單位長度	0.984997	-0.90018	214
	一處半徑為 50 單位長度	0.982964	-0.91679	182
	一處半徑為 50 單位長度	0.989845	-0.89113	623
多個小範圍 (預設的非均質)	三處半徑為 10 單位長度	0.997309	-0.78992	610
	三處半徑為 10 單位長度	0.987415	-0.75587	303
	三處半徑為 10 單位長度	0.988671	-0.76995	391
	三處半徑為 10 單位長度	0.990397	-0.81793	395
	六處半徑為 7 單位長度	0.983581	-0.78944	306
	六處半徑為 7 單位長度	0.982032	-0.82851	235
	六處半徑為 7 單位長度	0.986067	-0.73867	423
	六處半徑為 7 單位長度	0.992041	-0.86598	331

	六處半徑為 7 單位長度	0.979695	-0.74247	261
	六處半徑為 7 單位長度	0.989516	-0.88435	251
預設的道路 (預設的非均質)	兩條道路垂直交叉於中心點	0.994591	-0.74863	898
	兩條道路垂直交叉於中心點	0.962720	-1.02189	153
	兩條道路垂直交叉於中心點	0.970412	-0.85133	325

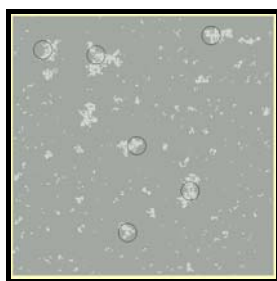


圖 5 小範圍非均質平面模擬結果圖

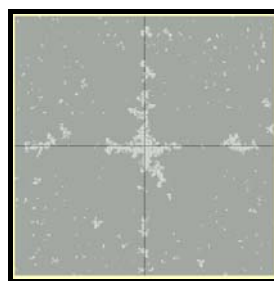


圖 6 預設的道路模擬結果圖

3. 預設的道路

假設平面中有兩條預設的道路，如圖六所示。則道路沿線由於可及性提高，設定給與較高的發展潛力值。

模擬結果如下：

- (1) 三次參數值相同而隨機設定不同高潛力地區的模擬中，其對冪次定律的迴歸係數值均在 0.97 以上（詳見表 2）。顯示非均質平面下的聚落體系仍高度符合冪次定律，亦即非均質平面並不會影響聚落體系冪次法則是否發生。
- (2) 路兩側發生聚落的機會提高，首市出現在道路上的機會非常大，顯示道路確實對聚落發生的區位造成影響。

六、討論

（一）不存在報酬遞增機制的隨機成長模型

本文探討的重點在於「報酬遞增」機制與冪次法則的關係，結果顯示，在報酬遞增機制下，確實會產生高度符合冪次法則的系統。然而若報酬遞增機制不存在的純粹隨機成長模型，是否仍將遵循冪次法則？是本節探討的重點。

報酬遞增機制不存在，便是將電腦模擬模型中的「聚集強度係數」設為零，其模擬結果見圖 7、圖 8 所示。圖七所示為在均質平面狀態下，若報酬遞增機制不存在的模擬結果，由圖中可以看出，型態相當分散，由肉眼幾乎很難辨識出有聚落存在。將此一結果套入冪次法則的迴歸分析來演算，仍然是高度符合冪次法則，相關係數達 0.97，而冪次法則的斜率為 -4.0，此一斜率顯然與 Zipf's Law 的 -1 相差甚遠。

由以上的模擬結果，我們可得到以下結論，雖然不存在報酬遞增機制的純隨機成長模型亦能吻合冪次法則，但其型態與真實世界相比，顯得過於分散。非均質平面的狀態下，略有改善，但非均質平面影響的主要是區位分布，對整體型態的影響有限。因此我們認為，若系統中不存在「報酬遞增」機制，提供系統足夠的聚集動力，則此一系統不可能達到真實世界聚落體系那樣強的聚集程度（冪次法則的斜率約為 -1 的狀態），尤其是在聚落體系成形的初期階段。因此我們認為，若將討論的範圍限定於「都市體系的冪次現象」，則報酬遞增機制仍是促成此種型態的必要條件。

（二）都市的區位是如何決定的。

由本模型我們可以看出，「非均質平原不影響冪次定律的發生，只影響都市發生的區位」。如果是非均質平原，冪次現象還是同樣存在。只是都市的區位會優先發生於發展潛力較高的區位。

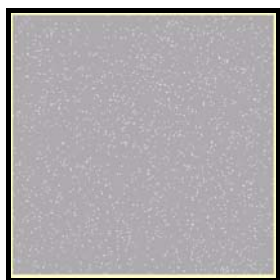


圖 7 均質平面的純隨機成長
模型模擬結果圖

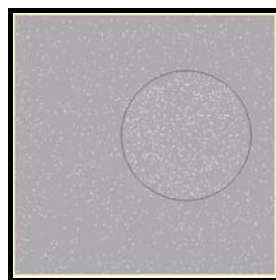


圖 8 非均質平面的純隨機成長
模型模擬結果圖

在某種意義來說，都市的發生有其必然性與機率性。當某些區域有良好的條件，會發生都市的機率相對提高，這有其必然性。傳統的地理學都是如此解釋都市的發生，但是在一個大範圍的優良區域中，都市產生的確切位置，卻是機率性的。初期的先民的選擇，會影響後續的都市形成，也就是說我們不能預先知道都市發生的確切地點，但是知道它會一定發生於某些區域。

而當高潛力地區為數個小區域時，則雖然都市發生在高潛力地區的機會大為提高，但我們並無法事先指出這些具有相同條件的區域，那一個會是未來的首市，因此都市發生的區位並非全然是能夠以區位條件來解釋，機遇性因素與歷史背景仍佔有重要之影響。

所謂「機遇性因素」是指在此一聚落體系形成的過程中，哪一個區位會形成大型聚落，除了區位上的優勢以外，相當程度決定於一些小事件（small events），因此整個過程是路徑相依的（path dependent），也就是說前面的決定會對後面的結果造成累積性的影響。在不同的模擬過程中，也許剛開始時的發展軌跡非常類似，但卻可能演化成完全不同的結果，有時候就是一點小事件的發生，卻使得整個歷史完全改觀。兩個有著相同優勢地理條件的區位，為何到最後聚落的規模差異甚大，也是歸因於此，小事件的發生加上報酬遞增效應，使得某些區位被鎖定而成為大型聚落。因此傳統上以「區位優勢」來解釋都市的發生，其實並不能完全解釋都市為何發生於此。以美國西岸高科技集中地矽谷為例，矽谷何以發生於此？固然我們可以解釋說，因為矽谷週邊有許多優良學府，提供了優質的研發人力，因而吸引了大批高科技廠商聚集於此。但問題是，在同一時間點上，與矽谷具有類似條件的區位絕不只一處，但最後能發展成矽谷這樣的規模的，只有一處，這就不能完全以區位優勢來解釋，小事件的發生加上報酬遞增效應，決定了矽谷落腳於美國西岸。英國殖民者群集於寒冷、多風暴且多岩石的麻薩諸塞灣，也是一個歷史的偶然，造就了美國東北部的都會帶。

非均質平原是影響了都市的發生地點，使其更容易預測，但不影響都市體系層次體系是否形成。在一個均質平原上，都市的發生點是完全機率性的，不可預測的。但無論是否為均質平原，並不影響層次定律是否發生。

七、結論

層次法則是一個普遍存在於自然界與社會科學界的現象，在都市體系中亦可觀察到此一現象，Krugman(1996)曾對此現象加以說明。但層次法則形成的機制是如何？至今學界尚無法提出明確的解釋。在先前的研究中曾指出，根據報酬遞增理論所設計的電腦模擬中，在均質平面平面的假設下，會呈現出高度符合層次現象的都市體系（于如陵，賴世剛，2001）。本文在此一基礎上，將模型的假設條件放寬，使其不限於均質平面，並加入遷移行為的考量，以求得更為一般化的結論。

1. 本研究基於報酬遞增原理，設計電腦程式來模擬都市聚落體系之形成，由電腦模擬結果，可歸納為以下幾點結論：
2. 在考慮遷移行為後，遷移成本的高低對聚落體系有相當之影響，當遷移成本越低時，居民有朝向大都市移動之趨勢，促使大都市加速成長；反之，當遷移成本較高時，則會形成較多的中小型聚落，但兩者皆高度符合層次現象。
3. 非均質平原不影響聚落體系層次定律的發生，只影響都市發生的區位，都市的區位會優先發生於發展潛力較高的區位。在一個均質平原上，都市的發生點是完全機率性的，不可預測的。
4. 都市發生的區位並非全是能夠以區位條件來解釋，機遇性因素與歷史背景仍佔有

重要之影響。本研究認為每個都市的發生區位雖能於事後尋求合理的區位條件解釋，但並非由區位條件所能完全解釋的確定性行為。

5. 當報酬遞增機制不存在時的隨機成長模型，雖然仍然符合冪次現象，但其型態表現相當分散，冪次的斜率遠陡於 Zipf's law 的 -1 。即使存在非均質平面，其對於聚落型態的影響主要在於區位，對於型態的影響有限。因此我們相信，若無報酬遞增機制提供的聚集動力，將無法產生接近真實世界的聚落體系型態（冪次斜率約為 -1 的型態）。

本研究顯示基於報酬遞增法則下所產生的聚落體系，即使在加入遷移行為與非均質平面之考量後，仍與冪次法則呈高度吻合，其產生的聚落體系型態與真實世界非常接近。此外，相關的實證研究亦顯示報酬遞增在解釋廠商聚集過程的合理性（賴世剛及陳增隆，2002）及冪次現象的普遍性（薛明生及賴世剛，2002）。因此報酬遞增極有可能是形成都市體系冪次法則的推動機制。

謝誌

本文部分內容曾發表於 2002 崑山科技大學管理學院第一屆資訊時代管理研討會，作者感謝與會者的意見。

參考文獻

- 于如陵，賴世剛，2001，〈聚落體系形成之電腦模擬實驗—以報酬遞增觀點為基礎之探討〉，《台灣土地研究》（第三期）：頁 83-106
- 賴世剛，高宏軒，2001，〈都市複雜空間系統自我組織臨界性之初探〉，《國立台灣大學建築與城鄉研究學報》，（第十期）：頁 31-44。
- 賴世剛，陳增隆，2002，〈廠商聚集的區域鎖定效果：遞增報酬的模擬觀察〉，《地理學報》，第三十一期，頁 17-34。
- 薛明生，賴世剛，2002，〈人口時空分布冪次定律的普遍性與恆常性—台灣本島實證研究〉，《台灣土地研究》，（第五期）。
- 葛雷易克著，林和譯，1991，〈混沌〉，《天下文化出版社》。
- 沃德羅普著，齊若蘭譯，1994，〈複雜〉，《天下文化出版社》。
- 陳伯中，1983，〈都市地理學〉，《三民書局》。
- 葛雷易克著，林和譯，1991，〈混沌〉，《天下文化出版社》。
- 劉錚錚，1974，〈都市經濟學選論〉，《中央研究院經濟研究所》。
- 于如陵，2002，〈由電腦模擬模型論都市發生之區位〉，《2002 崑山科技大學管理學院第一屆資訊時代管理研討會》。
- Arthur, W. Brian, 1990, 'Silicon Valley' locational clusters: When do increasing returns imply monopoly?, *Mathematical Social Sciences*, Vol. 19, 235-251.

Arthur, W. Brian & Yu. M. Ermoliev & Yu. M. Kaniovski, 1987, Path-dependent processes and the emergence of macro-structure, *European Journal of Operational Research* , Vol. 30, 294-303.

Bak, P. 1991, Self-organizing criticality, *Scientific American* (January), 26-33.

Batten, David F. 2001, Complex landscapes of spatial interaction, *The Annals of Regional Science*, Vol. 35, 81-111.

Charles T. Stewart, Jr. 1958, The size and spacing of cities, *Geographical Review*, Vol. 48, No.2

Savage, Stephen H. 1997, "Assessing Departures from log-normality in the rank-size rule" , *Journal of archaeological Science*, vol.24 pp. 233-244.

Simon, H.A. 1955, On a class of skew distribution function, *Biometrika* 52: 425-440.

Arthur, W. Brian 1994, *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, Ann Arbor, Michigan: The University of Michigan Press.

Bureau of the Census 1989 , *Historical statistics of the United States, colonial times to 1970*, Kraus International Publications, White Plains, N.Y.

Heinz, Otto Peitgen Hartmut Jurgens Dietman Saupe 1992, " Fractals for the classroom " Springer-Verlag N.Y. Inc.

Kauffman S, 1995, *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, New York: Oxford University Press.

Krugman, Paul , 1996, *The Self-Organizing Economy*, Cambridge, Massachusetts: Blackwell Publishers Inc.

Simon, Herbert A. 1998, *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Zipf, G. K. 1949, *Human Behavior and the Principle of Least Effort*, New York: Addison-Wesley Press.

Chen, Hsin-Ping 2000, Zipf's Law and the spatial interaction models, 中華民國區域科學會八十九年度論文研討會, A1-III-1-30

