

生物系統中的自組織現象

(國立臺灣大學哲學研究所 曾威揚研究生)

評論修訂者：國立臺灣大學全球變遷研究中心 李培芬組長

本文對複雜生物系統中的自組織現象做一簡單的介紹，並以白蟻築巢為例，指出其幾個重要的特徵，以及生物與物理系統的不同之處。所依據的是由數位科學家所寫，普林斯頓大學出版社出版的“Self-Organization in Biological Systems”一般系統論 (general systems theory) 於 1950 年代開始流行，如 von Bertalanffy 的“General Systems Theory”即為其代表作。不過因為當時電腦運算能力不足，無法細緻地模擬各種不同的系統，以至於他們所提出的理論骨架無法獲得有力證據的支持，使得討論偏向概括抽象的哲學思維，不足以使這一宏大的理論架構成爲一門嚴格科學。直到電腦運算能力逐漸成熟，才使得系統論的思維方式在混沌理論與複雜理論的名字下再次興起，緊密地與電腦的使用相結合。

一、自組織現象

自組織 (self-organization) 現象所指的是這樣一個過程：一系統宏觀型態 (global pattern) 或秩序的產生純粹是因為低層次局部單元 (local units) 的互動所造成。組成成分的數量通常很多，例如大腦中的神經元，但突現性質的產生與組成成分多寡並沒有一定的關係，只要它們之間的交互作用是非線性的，就會產生自組織的現象。而且，系統組成單元的交互作用規則 (interaction rules) 之執行，完全依賴於局部資訊 (local information)，並沒有參照其所形成的宏觀型態。也就是說，整個系統所呈現的型態 / 形式 / 秩序是一“突現性質” (emergent

property)。沒有系統外的影響力強加一型態於其上。哈肯 (H. Haken) 在他的“協同學” (Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology, p.191) 中做出如下說明：一群工人若是依照領導人 (外部指令) 的指令做事，則這是個 Organization; Self-Organization 則是指領導人不存在，工人依據某種相互了解來協調自己的工作。下面將提到的 Rayleigh-Bernard 對流，和生物系統中的大群螢火蟲發光節奏趨於一致的現象，就是屬於自組織的範圍。

二、生物系統與物理系統的差別

在物理化學系統中，型態的形成完全基於物理定律。例如物理系統中的突現現象 --- Rayleigh-Bernard 對流：把一盤具黏性的油緩緩加熱，到了一定的溫度，會看到六角形圖案的突然生成 (Velarde and Normand, Convection, *Scientific American* 243 (1) : 92-108, 1980)。油分子遵循與表面張力，黏性...等等相關的物理定律。另一方面，生物系統不只是遵循物理定律而已，他們的行爲決定因子還有基因。基因因爲天擇而改變，因此可以逐漸使生物體的行爲模式更具適應性。生物系統組成單元能獲取局部資訊 (local information)，以此反饋 (feedback) 對其行爲作調節。近來對生物體的研究發現，動物群體中複雜的自組織現象，底下所蘊含的行爲模式，可能是非常簡單的，型態的複雜不代表行爲規則的複雜。

三、自組織如何發生：正向反饋 (positive feedback) 與逆向反饋 (negative feedback)

反饋有兩種形式：正向與負向。自組織系統通常由正向反饋造成，並不是一般生物學家比較熟悉的負向反饋。負向反饋常在維持身體機能恆定 (homeostasis) 的機制中看到，以此避免過度的波動。身體血糖的恆定就是如此。血糖過高引致胰島素分泌，使血糖濃度維持在恆定的狀態下。體溫調節是另一個例子。

正向反饋則是同方向地加強原來的微小改變，使之越來越大，人口的爆炸性成長就是如此。

自組織現象的產生利用正向反饋，但是也利用負向反饋的機制使得它得到控制，型態的生成是這兩個機制作用下的結果。

生物系統中的突現現象：一大群螢火蟲聚集在一起的時候，可以觀察到它們發光的節奏從一開始的分散與不協調，變成群體逐漸趨於一致。群體中的每一隻螢火蟲地位是平等的，沒有居於領導地位的個體，會出現同時閃滅的現象，是因為每隻個體都是根據它所鄰近的個體何時發光來決定自己何時發光 (“I signal when you signal.”)。

四、生物如何獲取資訊，以及根據所得之資訊調整自己的行為

1. 從鄰居處獲得：

一生物系統中的個體由其他個體處獲得資訊。如此獲得的資訊又可以分為“signal”和“cue”，前者指的是生物體特別用來傳遞訊息的刺激源，譬如螞蟻走過之後所留下的化學物質。後者是指不是專門用來傳遞訊息的刺激源，只是在特定的環境之下，成為傳遞資訊的媒介

例如鹿走過的足跡對其它的鹿而言就是這樣一個訊息來源。

2. “Stigmergy” (E. O. Wilson, *The Insect Societies*, Harvard University Press)：從局部環境中獲得資訊 (Information gathered from the local environment)，也就是說，在一個“stigmergic”的工作中，個體行為的改變與調整是根據所有群體之前所完成的工作 (即突現結構本身) 而達成，而不是個體間的直接溝通。個體因為感知到環境的改變，使得它們可以循序改變自己的行為，使工作可以逐漸地完成。在以下白蟻築巢的例子中即可以看出這一資訊傳遞方式所扮演的中心角色。

五、例子：白蟻築巢各個階段與特徵

(一) 兩個階段

Grasse (The construction of nests and the individual coordinations with *Bellicositermes natalensis* and *Cubitermes*, *Insectes Sociaux* 6: 41-83) 描述了白蟻建造巢穴的過程，區分出兩個明顯不同的階段：

1. 不協調階段 (phase of incoordination)

最初的時候，白蟻隨機地在各處堆積材料，各個個體獨立地而且不協調地作自己的工作，不關心其他個體的活動。其中一個個體堆積在一處的材料，可能被其他個體給移走，搬到別的地方去，接下來又可能被另一個體給搬回原處。

2. 協調階段 (phase of coordination)

第一階段的隨機波動 (random fluctuation) 被正向反饋的機制所放大，創造出型態出來。某個地方因為堆積的材料較多，達到一定密度後，對其它白蟻形成一個吸引源，吸引其它白

蟻也把泥土堆在這個地方，也就是所謂的正向反饋。但是就算是在這個階段，白蟻的行為也不是根據其他個體所直接傳來的資訊而行動的，而是根據“stigmergy”。到了這個階段，群體的行爲外表看起來就是有組織且朝向某一個目的行動的，但其中並沒有一個資訊集中於其上的控制領導個體，就算是蟻后，也沒有能力處理這麼大量的資訊，協調所有白蟻的行動。

(二) 三個特徵

1. 沒有中心領導者協調所有建築者的活動與進度，因為：
 - (1) 所需資訊量太大
 - (2) 處理龐大資訊需大量時間蟻巢的大小是任一個體的幾百倍甚至上千倍，要建好一個完整的巢穴需要好幾代的時間，以中心領導者規範群體的行爲是不可能也無效率的方法。
2. 建築者的基因中沒有攜帶“建築藍圖”，因為：
 - (1) 資訊量太大。基因所能編碼的資訊量並不多，建造蟻巢的資訊量不能全部編碼到基因中。
 - (2) 如此一來不能對環境之變化做出有彈性的調整。
3. 不是僵化且無反饋地跟隨既定的步驟 (recipe)。

六、自組織系統的特徵

(一) 動態 (Dynamic)

爲了創造與維持本身的結構，組成單元必須不斷地進行交互作用。一個不是在時間中演化的系統不會展現自組織現象。另外，能量必須從系統外部不斷輸入，使系統本身能趨疲 (entropy) 下降，維持自身的結構，或者更趨

向複雜化。

(二) 展現突現性質 (emergent properties)，爲一耗散系統 (Dissipative system)

耗散系統的意思是指一個有能量不斷從外界輸入的開放系統 (因此 entropy 下降)，系統中的交互作用發生在遠離均衡 (equilibrium) 態的時候，且宏觀秩序因組成單元的非線性交互作用 (nonlinear interactions) 而產生。

(三) 去中心化控制 (decentralized control)

沒有資訊階層 (information hierarchy) 或控制階層 (control hierarchy)，全體組成單元在資訊的獲得與控制上處於平等的地位，和人類的軍事階級結構嚴密的資訊控制階層不一樣。

(四) “dense heterarchy”

“heterarchy”這個字從希臘文來，由“hetero-” (不同的，異質的) 和“archy” (統治) 組合而成，指明一個系統的高階性質可以影響低階組成單元的活動，且組成單元的改變後的活動，又會再度反饋 (feedback) 到高階層去，改變所形成的高階型態。“dense”指的是組成成分形成一個緊密結合的網絡，交互作用頻繁。

七、自組織系統中突現性質的結果

(一) 適應性 (adaptability / flexibility)

使得一個生物系統可以對環境的變化做出調整，在環境中生存下來。自組織系統一方面不是如水晶晶體結構一般完全的規律，另一方面，也不是完全的混亂。它是處於秩序與混亂之間，具有最大適應性的系統。

(二) 行爲規則的簡潔性

(Economy of behavioural complexity)

不需要複雜的行爲規則，就可以適應變動

的環境。也就是說基因所攜帶的生物本能行為模式可以大大地減少，不必每一種只有些微差異的環境都得有全新的行為模式與之相應。

八、系統論研究方法

對生物系統的研究可以分為下列六個步驟：

1. 實際觀察 (Empirical Observations)
2. 確定系統組成單元為何 (Identify its subunits)
3. 以經驗研究確定交互作用規則為何 (Determine through empirical study the nature of their interactions)
4. 提出假設性的數學模型 (Formulation of mathematical models)
5. 以此模型對系統做出預測 (Generation of predictions of the model)
6. 看看此模型所做出的對系統的預測與實際觀察結果是否吻合 (Comparison of the predictions with the collective process)

九、三種不同的數學模型

1. 微分方程模型

(Differential Equation Models)

精確，時間為連續 (continuous)，且為決定性 (deterministic) 模型，但比較難以寫出這樣的方程式。可能無解析解 (analytic solutions)。

2. 蒙地卡羅模擬 (Monte Carlo Simulations)

比較好做，只要指定各項行為規則發生的機率是多少，但也因此比較不精確。

3. 格狀自動機模型

(Cellular Automaton Models)

時間為離散 (discrete)。可以視覺化 (visualization)，在電腦螢幕上顯示圖形是其最大的優點。

參考文獻

Scott Camazine *et al.*, *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press

Lars Skyttner, *General Systems Theory*, World Scientific Press