

珊瑚與共生藻

■ 彭紹恩 · 王立雪 · 黃慧茹 · 陳啓祥

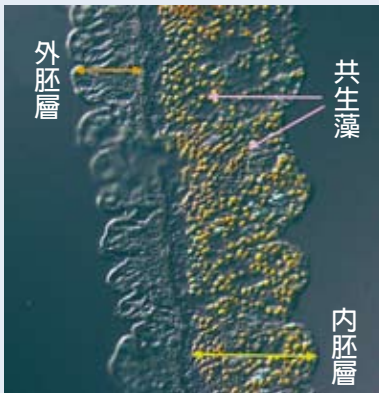
你可知道珊瑚擁有神奇的「太陽能」發電機嗎？
精采的研究逐一揭露珊瑚和共生藻相互依存的奧祕！

細胞內的太陽能發電機

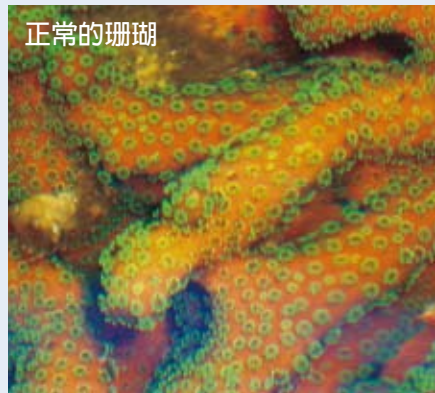
你可知道珊瑚細胞內有著神奇的「太陽能」發電機嗎？這神奇的發電機不僅可以把太陽能轉化成可儲存的能量供珊瑚使用，也可吸收珊瑚的含氮廢物，把它轉換成可利用的養分。更神奇的是，隨著珊瑚的成長，這發電機能自我複製增加數目，以符合長大的珊瑚所需。

有趣的是，如此先進的「發電機」可以直接從珊瑚媽媽傳給珊瑚寶寶，或是在成長過程中自己跑進來。但天下沒有白吃的午餐，要控制管理這群有智慧的發電機，珊瑚寶寶也必須下許多功夫！

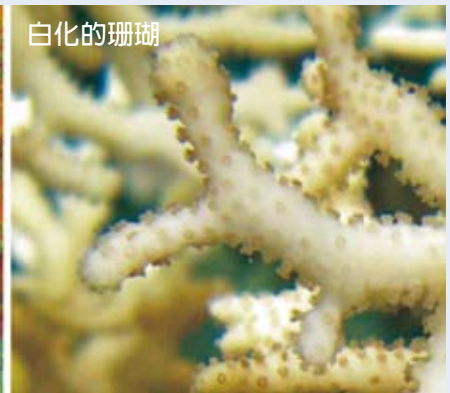
這太陽能發電機到底是啥？我們早就知道動物細胞內都有發電機，那叫做粒線體（mitochondria），而這個「太陽能」發電機又是什麼呢？答案就是一共生藻（*Symbiodinium* sp.）。



火炬珊瑚觸手組織切片



珊瑚會因海水溫度的升高或其他環境變化而白化，雖然看起來也很美麗，但這時珊瑚體內的共生藻已經離開，珊瑚的健康狀況岌岌可危。若無法再與共生藻恢復共生關係，一段時間後，這些珊瑚將因體衰而亡。



動物與植物的親密共生

共生 (symbiosis) 是指兩種生物體為了互助而共同生活在一起，而依照共生的「親密程度」，還可以分為外共生及內共生。

外共生是屬於「普遍級」的關係，共生體與宿主可以靠得很近，但仍限於宿主的表面，大者如海葵與小丑魚，小者如生存在腸道表面的益生菌（腸道菌），都是外共生的例子。內共生則是「限制級」的關係，共生體與寄主的關係非常親密，寄主完全接納「特定」的共生體進到細胞內或組織內的細胞間質中生活。科學家發現，海葵、水母、珊瑚及許多海洋無脊椎動物都能與共生藻進行「限制級」的內共生現象。

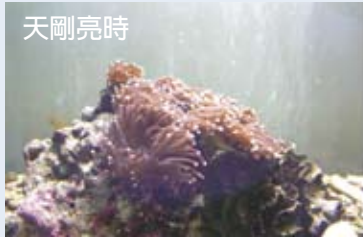
以珊瑚為例，珊瑚是二胚層動物，身體的組織只有外胚層與內胚層，在珊瑚成蟲體內，共生多發生在內胚層，共生藻幾乎占據了整個內胚層。共生藻在珊瑚體內依然能進行光合作用，並把產物供給

珊瑚使用，是珊瑚成長所需養分的主要來源。

珊瑚的白化是因為與共生藻間的親密關係遭到破壞，以致共生藻離開了珊瑚，而長期失去共生藻的珊瑚會漸漸地走向死亡。由此可知，維持與共生藻的親密關係，對於珊瑚的健康及命運是非常重要的，深入了解牠們之間的親密關係，有助於對保育及海洋生命科學的應用提供重要策略。

近年來許多國家遭到糧食供應不足的困擾，飼料玉米等農作又拿去生產生質能源，造成養殖業者的成本節節升高，肉類價格因而飆漲。有人曾幻想，如果養豬養雞能像種菜一樣，給牠陽光、空氣和水就可以長大，該有多好！有識之士對這種幻想可能會嗤之以鼻，但神奇的是，珊瑚竟然辦到了！珊瑚能命令一群居住在體內的房客（共生藻）交出90%以上的光合作用產物當作「房租」，因此只要每天定時做做日光浴，記得收房租，就衣食無缺了。

珊瑚的白化是因為與共生藻間的親密關係遭到破壞，以致共生藻離開了珊瑚，而長期失去共生藻的珊瑚會漸漸地走向死亡。

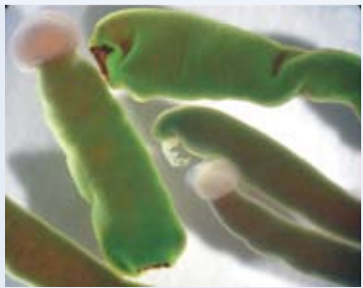


天剛亮時



日正當中

珊瑚與共生藻進行「細胞內」的共生，把共生藻收納到自己的細胞內，白天伸長觸手讓所有的共生藻儘量曝曬在陽光下進行光合作用，天黑時把觸手緊緊縮回保護著共生藻不被掠食者吞食，非常細心溫柔地照顧著共生藻。



火炬珊瑚的觸手浸泡在黏液溶解劑中後，含有綠螢光蛋白的外胚層就有如褪皮般脫落，這項技術可以取得含有大量共生藻而呈現褐色的內胚層組織。

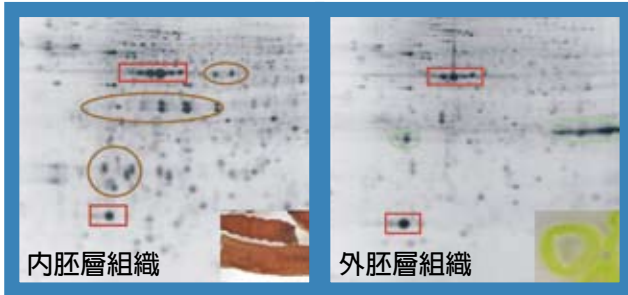
但房租這麼高，共生藻不會抗議嗎？房租又是怎麼計算的呢？會隨環境物價波動嗎？珊瑚又如何避免共生藻呼朋引伴白吃白住呢？牠們又是如何溝通對話以維持互利的共生關係呢？這些問題都是我們所好奇的。答案若能揭曉，不僅能夠使珊瑚不會因環境變遷而白化死亡，甚至可能製造出「綠巨人」，或衍生出創新的生物科技應用喔！

破解珊瑚親密對話之鑰

戀愛中的男女可以透過溫柔的言語及親密的肢體動作溝通愛意，馴獸師可以利用食物及鞭子駕馭勇猛的獅子，珊瑚與共生藻又是怎麼溝通的呢？牠們之間如何交流呢？這有點困難了！因為牽扯到複雜的動物細胞與植物細胞間的交互作用，尤其是珊瑚！

珊瑚雖然只有兩個胚層，但組織細胞奇特複雜，並無明顯特化的器官。共生藻又只躲在內胚細胞中，若用傳統的萃取法進行生化分析，經常受到外胚層組織細胞的干擾，而無法看清楚內胚層細胞與共生藻間的生化反應。不論是以蛋白質體學策略比較蛋白質的變化，或以基因體學策略分析基因表現的差異，外胚層大量表現的基因及蛋白質產物，

往往掩蓋了共生藻與珊瑚的對話訊號，這個瓶頸一直糾纏著研究珊瑚共生機制的科學家。



蛋白質二維凝膠電泳圖譜能呈現內外胚層蛋白質的差異，圖中的每個黑點代表一種蛋白質。由圖中相對的位置可見，內外胚層有許多相同的蛋白質（方框處），也有許多不同的蛋白質（圓圈處），惟有在胚層完全分離的狀況下才能如此區別。

在國內，這方面的研究似乎漸露曙光。國立海洋生物博物館有一群來自不同專業背景的研究人員，透過同心合力的團隊合作，帶領著東華大學海洋生物科技研究所的學生，開始有效率地探索及解答珊瑚共生的奧秘。

最近，在研究團隊的努力下，終於建立了珊瑚胚層的分離技術，暫稱為「珊瑚人工褪皮技術」。利用這項技術萃取蛋白質或分析基因表現時，可以使外胚層褪下分開，不再受到它的干擾，因此能準確地分析共生細胞的基因表現變化，加速調控共生機制分子機轉的研究。同時，在團隊合作以及充分應用台灣豐沛的海洋資源和各式分析儀器下，已漸漸發現許多珊瑚與共生藻從前不為人知的秘密。

共生藻在珊瑚體內的旅程

珊瑚的生殖方式通常是分裂生殖（無性生殖），只有在特定時期才行有性生殖，即產生配子（精、卵）。當珊瑚把配子放出體外時，這些

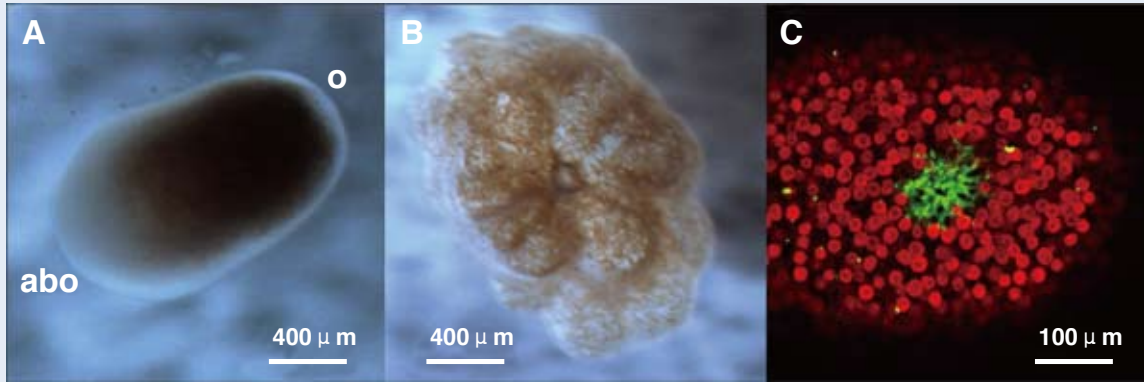
精子和卵子在湛藍的海洋中邂逅結合，然後吸收共生藻一同發育成新的珊瑚個體。然而像火炬珊瑚（*Euphyllia glabrescens*）等對後代有更貼心的照顧，牠們讓精子與卵子在體內先結合發育成胚胎，並給予共生藻，等到發育成幼苗時再釋放到海洋中，在這個時候，共生藻就已經存在於火炬珊瑚幼苗體內了。

珊瑚本身在可見光下並沒有明顯的體色，共生藻則呈現深褐色，從外觀可以看到共生藻在珊瑚幼苗體內有特定的分布。在接近口部處密度最高，越往底部共生藻越少，而且當這些幼苗著床之後，觸手就由原先共生藻集中的位置，即口的周圍，開始分化出來。經由螢光顯微鏡觀察，可以看到共生藻呈現紅色螢光（葉綠素的螢光），而口部具有強烈的綠色螢光（綠螢光蛋白）。在胚胎發育的過程中，當口的結構形成，表示胚層的翻轉已經完成時，胚胎的內、外胚層的結構已然成形。

由組織切片發現，有別於一般珊瑚成蟲，火炬珊瑚幼苗除了內胚層有共生藻，外胚層也有共生藻存在。尤其在幼苗剛放出體外的第1天，幾乎80%左右的共生藻存在於外胚層。隨著幼苗的成長，在外胚層的共生藻數量逐漸減少，在內胚層則漸漸增加。直到幼苗開始著床分化出觸手後，共生藻幾乎都在內胚層了。

這說明或許外胚層不適合共生藻長期生存，因此可能經由中膠層逐漸轉移到內胚層，內胚層則是最適合共生藻生存的地方，因此生長較快。由此觀之，共生藻在珊瑚的體內可能是不斷地旅行，尋覓合適的棲所。

由於共生藻是植物，其生理狀況受到光線的影響非常大，不論是進行光合作用或細胞分裂的調控，都直接與光線有關。在正常光暗周期下的珊瑚



火炬珊瑚幼苗。(A) 漂浮期的幼苗 (o：口部，abo：底部)；(B) 已著床開始發育觸手的幼苗（褐色小點就是共生藻）；(C) 在螢光顯微鏡觀察下的著床幼苗（綠色的部分是口器，共生藻因自體螢光而呈現紅色）。

幼苗，在6天後僅剩10% 的共生藻還停留在外胚層。但若是以暗處理或施以藥劑干擾共生藻的光合作用，多達40~50%的共生藻仍停留在外胚層，無法遷移。

研究人員推測，珊瑚外胚層大量的綠螢光蛋白就好像一層太陽眼鏡，可以遮掉過量的紫外光及藍光。當幼苗在母體中時，有母體綠螢光蛋白的保護，可藉以調控內胚層中的共生藻。但離開母體後，就直接暴露在陽光下了，因此幼苗外胚層中的共生藻可能為了避免過強的光線照射，開始遷移到內胚層。也或許是珊瑚幼苗為了保護或調控共生藻，而主動把它搬移到內胚層。這些微妙的機制，顯示出珊瑚與共生藻之間有奇特的生命聯結。

向共生藻打暗號

在最新的研究中還發現，珊瑚綠螢光蛋白的功能除了遮蔽強光外，可能還扮演控制共生藻細胞分裂的角色！在實驗室裡，共生藻可以由珊瑚組織中分離出並單獨培養，這時的共生藻是處於非共生狀態。非共生狀態的共生藻平

均每24小時可以完成一次細胞分裂，由1顆分裂成2顆，若環境合適，再過24小時後，2顆就會分裂成4顆。依此類推，很快就會衍生出龐大的共生藻族群。

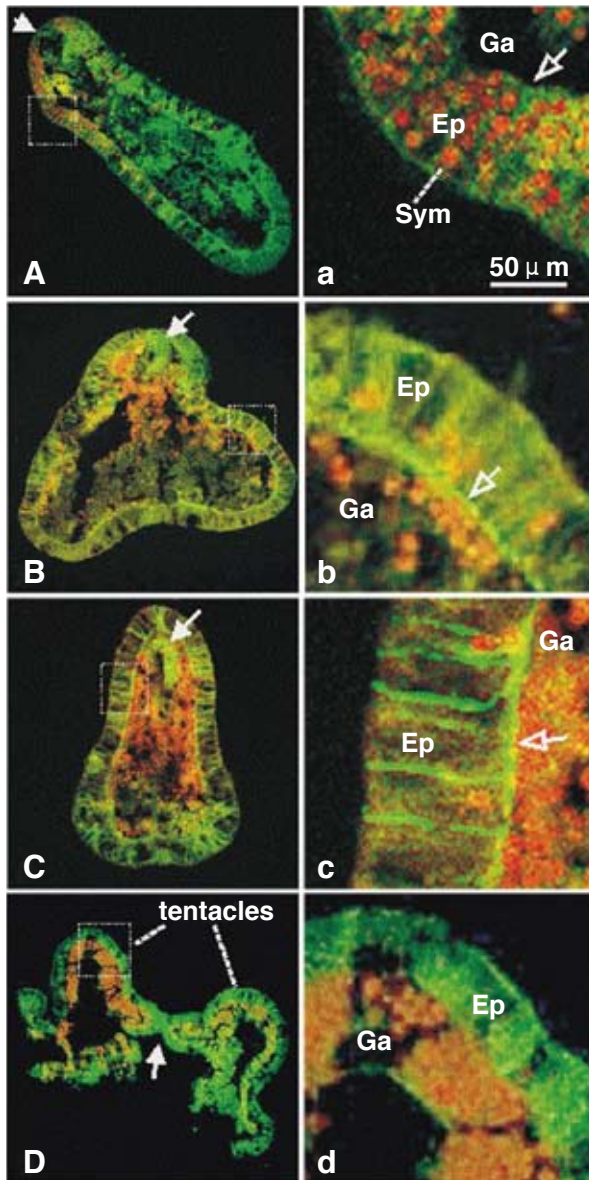
但是在共生狀態時，共生藻就不能毫無限制地分裂了，因為在珊瑚組織細胞內，空間有限，而且珊瑚也不能任由共生藻大量複製而塞爆自己。然而珊瑚是如何控制共生藻的分裂呢？

之前的研究顯示，在珊瑚體內的共生藻族群，僅有約5%在進行細胞分裂，但單獨培養的共生藻族群，則有50%以上在進行分裂。珊瑚究竟是透過什麼機制，只准許5%的共生藻進行分裂呢？除了科學家很早就提出的，珊瑚可能利用養分來控制共生藻細胞複製等假設外，又發現了另外的可能機制！

實驗發現，單獨培養的共生藻只受藍光的刺激而分裂，不受其他波長的光線如紅光等的影響。因此當沒有藍光時，共生藻就無法進行正常的細胞分裂。

更有趣的是，若是以珊瑚的綠螢光蛋白

造礁珊瑚是海洋中珍貴的寶藏，在整個海洋生態系中占有舉足輕重的地位。大部分的造礁珊瑚都與共生藻進行互利的共生現象，而共生現象的和諧與否，則直接影響珊瑚本身的健康。



隨著幼苗發育的時程，紅色的共生藻逐漸自充滿綠螢光蛋白的外胚層遷移到內胚層。(A) 第1天；(B) 第7天；(C) 第14天；(D) 第26天著床 (tentacle：觸手，Ep：外胚層，Ga：內胚層，Sym：共生藻，實心箭號所指是口部，空心箭號所指是中膠層)。

(專門吸收紫外線及藍光而發出綠螢光的蛋白) 來遮蔽或直接加入單獨培養的共生藻時，共生藻細胞分裂的比率就明顯下降。可見珊瑚是用綠螢光蛋白向共生藻打暗號！把刺激分裂的藍光吸收遮蔽，提醒共生藻不能過度地分裂，以維持體內數目的恆定。

研究珊瑚共生的願景

造礁珊瑚是海洋中珍貴的寶藏，雖然在全球海洋裡所占的面積並不多，卻在整個海洋生態系中占有舉足輕重的地位。大部分的造礁珊瑚都與共生藻進行互利的共生現象，而共生現象的和諧與否，則直接影響珊瑚本身的健康。

不僅如此，共生現象也提供了一項非常重要的研究模式，來解答為何一種植物（如共生藻）能夠在動物細胞中生存，並且彼此調控影響。了解這種親密的關係，不但可以讓我們對於動物免疫系統的調控有所領悟，而且有助於了解動物與植物在演化過程中的相互影響。

我們由衷地希望經由多種生物學的層面，從分子、細胞、組織及個體的層次，對珊瑚與共生藻之間的共生現象做更全面且深入的研究。

彭紹恩·王立雪·黃慧茹·陳啓祥

國立海洋生物博物館企劃研究組 /
東華大學海洋生物科技研究所