

# 生物工廠—以細菌生產奈米纖維素

## 回顧與展望

◎文、圖/林業試驗所森林利用組·林柏亨 (afarmer@tfri.gov.tw)

◎林業試驗所木材纖維組·徐健國

### 地表最豐富的多醣

纖維素是現今地球上最豐富的多醣，除了在木材、棉花、麻等植物性材料作為支撐植物結構外，像是藻類、海鞘、細菌等都被發現可以合成纖維素。過去幾十年，人們過度依賴石化產物造成無法分解的物質危害地球上每一個角落。現在，科學家將注意力轉移到像是纖維素類的環保材料，此類材料具有生態友善及汙染最小化之特性。奈米纖維素即是符合上述精神之材料，通常使用富含纖維素物質解纖後之纖維與天然樹脂混合製造而成的奈米纖維素複合材，具有高比強度、高彎曲性、熱膨脹係數小等特性，經過特殊處理還可製成透光性高之薄膜，最重要的是，它可以被微生物分解。

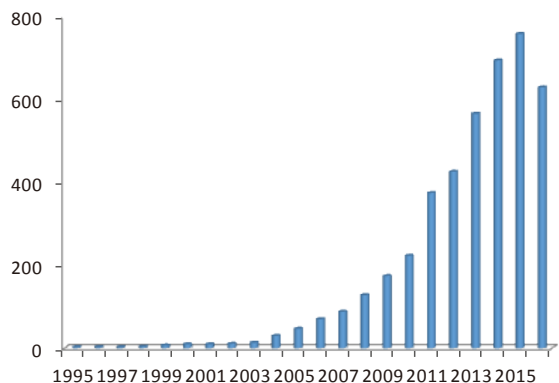
### 奈米纖維素研究發展歷程

奈米纖維素研究先河為法國Chanzy氏和Cavaille氏，他們在1995年正式發表第一篇有關奈米纖維素為主題的論文，而後他們的研究團隊領導這個領域直至2000年，之後越來越多學者投入這個領域。奈米纖維素複合材料會因為不同的製造過程而影響其特性，所以，奈米纖維素複合材料的研究與發展是未來進步的一個必要部分。因為奈米纖維極易溶解於水中，相關研究發展從水溶性、疏水性聚合物與奈米纖維素混合之溶液澆鑄法(Solvent casting)開始。2005年日本Yano氏研究團隊創下另一個重要突破-利用熱固性聚合物浸染(Impregnation)法製成奈米纖維紙，其機械

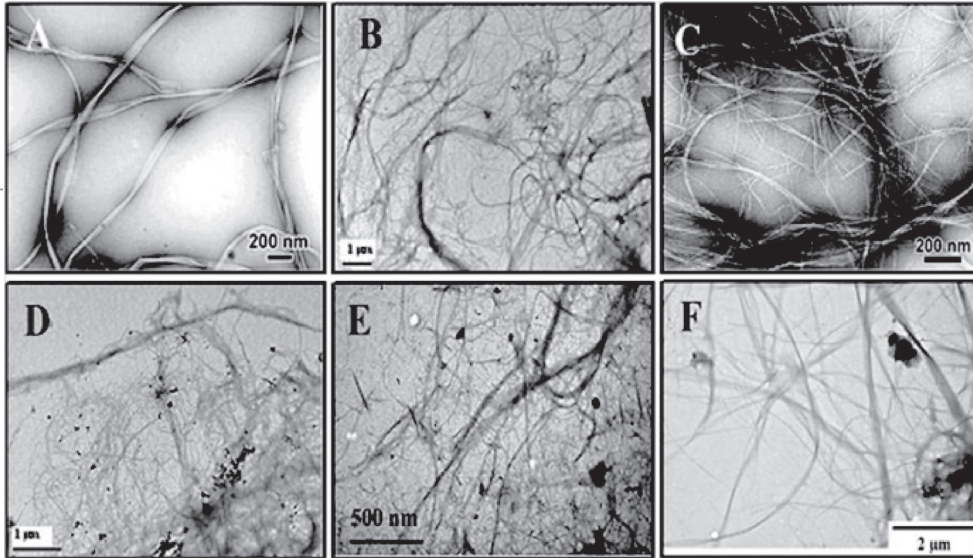
性質比起以澱粉或乳膠為基底之材料來的更好。同一時間，Oksman氏研究團隊使用雙螺桿擠壓法(Twin-screw extrusion)混合不同熱塑性聚合物與奈米纖維素混合而製成的奈米纖維素複合材料。至此開始，有關奈米纖維素的相關研究成指數般成長，截至今年九月底已經發表超過5,000篇相關學術報告。不過大部分的研究都是在強調如何從不同的原始材料分離出奈米纖維素和奈米材料的結構與性質。

### 奈米纖維素原料

提供植物機械支撐能力主要為纖維素，尤其是木本植物。在1980年代Herrick氏和Turbak氏等人使用機械萃取法-紙漿通過迴流式高壓均質機而製造出MFC(Microfibrillated cellulose)。而產物MFC膠狀物為高度糾結和不規則網狀之纖維素所組成。根據Siro氏指出，研究MCF製程通常是以漂白後的牛皮紙漿作為研究用之材料。



奈米纖維素相關主題歷年發表數量圖，橫軸代表年度，縱軸代表報告數量(資料來源：Web of science, 林柏亨 製圖)



分離自不同來源奈米纖維素之穿透式電子顯微鏡圖：A細菌纖維素，B蔗渣，C香蕉，D稻草，E麻，F紅麻。  
(圖片引用自Jonoobi et al. 2015)

然而木材除了做成紙漿外，尚可作為結構用材、家具甚至燃燒提供能量等用途，且將木材變成奈米纖維素相當的耗能，成本的增加意味消費者可能無法在合理的價格取得足夠的奈米纖維素產品。因此，科學家將目光轉移至較低木質素含量、製備過程比較不需要漂白（意味對纖維的傷害較小）的草本植物或是種植稻米、甘蔗、香蕉等農業廢棄物。農業廢棄物主要以燃燒方式處理，或是做為畜牧飼料、生質燃料等低附加價值產品。值得注意的是，農業廢棄物初、次生壁之微纖維跟木本植物相較起來鬆散許多，因此製成奈米纖維素的過程損耗較少的能量。非木本植物奈米纖維素來源像是麥稈、甜菜渣、大豆皮、馬鈴薯漿、仙人掌、香蕉等都已經被學者廣泛研究。

近年來，會分泌纖維素的微生物引起學者的注意，像是醋酸桿菌屬(*Acetobacter*)、膿桿菌屬(*Agrobacterium*)、產鹼桿菌屬(*Alcaligenes*)、假單胞菌屬(*Pseudomonas*)等。細菌纖維素和一般從木材分離的纖維素在結構上有很大的不同，細菌纖維素是由2~4奈米的奈米纖維組成寬度小於100奈米之帶狀纖

維。與現行製備奈米纖維素之製程比較，不論來源是木材或是農業廢棄物，大部分都是機械或是化學製程為主，細菌纖維素則是以生物合成方式產生微纖維(microfibrils)。同在微纖維層級比較，細菌纖維素具有高結晶性之特性(最高84~98%)，因而導致比一般天然纖維還要高之彈性模數等優秀的性質，甚至已經與玻璃纖維達到相同等級。與從木材分離出的纖維素去做比較，細菌纖維素具有較高的保水力、高聚合度、緻密的網狀結構。另外，細菌纖維素幾乎是純的纖維素薄膜，所以幾乎不需要利用化學方式處理去除木質素及半纖維素。

### 細菌纖維素發展潛在優勢與應用

細菌纖維素具有環境友善之特性，可應用於多種不同產業上，評估未來需求量將逐年增加。選擇微生物作為細菌纖維素生產無非考慮到微生物生長速度快、高產量以及不受天候引響等因素。

Donini氏等人為了要確認以微生物生產纖維素之優勢，比較微生物與植物生產纖維素之產能。他們以面積為一公頃，年平均生長量為

生產細菌奈米纖維素碳源、產量、條件、菌種表(資料引用自Jozala et al. 2016)

| 碳源                  | 細菌奈米纖維素產量(g/L) | 生產方式                      | 菌種                                    |
|---------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 含1%木質磺酸鹽HS培養基       | 16.32          | 28°C, 靜置培養, 168小時         | <i>G. xylinus</i> IFO 13693           |
| 蔗糖                  | 3.83           | 30°C, 靜置培養, 96小時          | <i>G. xylinus</i> ATCC 53524          |
| HS培養基添加柳橙汁          | 5.9            | 30°C, 靜置培養, 96小時          | <i>Acetobacter xylinum</i> NBRC 13693 |
| 葡萄糖加MCP-1           | 1.2            | 30°C, 攪拌培養, 288小時, 125rpm | <i>Acetobacter xylinum</i> JCM 9730   |
| 添加醋酸之糖蜜、玉米漿         | 3.12           | 30°C, 攪拌培養, 168小時, 200rpm | <i>Acetobacter</i> sp. V6             |
| 葡萄糖                 | 2.7            | 30°C, 靜置培養, 96小時          | <i>G. sacchari</i>                    |
| 葡萄糖(添加在含正丁醇之HS培養基中) | 1.33           | 30°C, 靜置培養, 144小時         | <i>A. xylinum</i> 186                 |
| HS培養基添加酒粕液          | 10.22          | 30°C, 靜置培養, 168小時         | <i>G. xylinus</i> (BCRC 12334)        |
| 生產橄欖油殘渣             | 1.28           | -                         | <i>G. sacchari</i>                    |
| 糖蜜                  | 1.64           | 靜態半連續培養, 168小時            | <i>G. xylinus</i> (FC01)              |
| 超音波處理後啤酒酵母殘渣        | 7.02           | 30°C, 攪拌培養, 150rpm        | <i>G. hansenii</i> CGMCC 3917         |
| 腐爛水果                | 60             | 30°C, 靜置培養, 96小時          | <i>G. xylinus</i> ATCC 53582          |
| 木材熱水抽出物             | 0.15           | 28°C, 靜置培養, 672小時         | <i>Acetobacter xylinum</i> 23769      |
| 水解蜜棗的廢水             | 2.25           | 30°C, 靜置培養, 144小時         | <i>G. xylinus</i> CGMCC 2955          |
| 檸檬汁與蔗糖              |                | 30°C, 靜置培養                | <i>G. sp. gel_SEA623-2</i>            |
| 脂質發酵廢水              | 0.66           | 28°C, 靜置培養, 120小時         | <i>G. xylinus</i> CH001               |

註：HS指的是Hestrin和Schramm培養基，MCP-1指的是1-甲基環丙烷

50立方公尺的桉樹做為比較，並假設密度為每立方公尺500公斤，換算起來這片試驗地年平均生長量為每公頃每年公噸。這片試驗地經過七年的栽培，其纖維素含量約為45%，所以總共生產約80公噸的纖維素。如果以微生物來生產相同的纖維素產量，大約培養22小時後每公升發酵液達到含有15公克之纖維素，這種產能應用在500立方公尺的發酵槽發酵22天即可達成。這證明了此種方式是一種有效率生產高純度與兼顧生態永續性纖維素的方式。

目前主要有兩種利用微生物生產細菌纖維素方式：靜態培養與動態攪拌培養。所謂靜態培養，係將於培養基與空氣接觸面累積形成白色細菌纖維素薄膜；動態攪拌培養，細菌纖維素以不規則的顆粒或纖維懸浮散布培養基中。兩種生產方式將形成完全不同型態、物理、機械性質之細菌纖維素，所能應用在產業的領域也不同。大致來說，動態攪拌培養出細菌纖維素與靜態培養比較具有較差的機械性質而且突變的可能性較高，造成總生產量較低。另外，靜態培養需要較多的

培養空間及較長的培養時間。

許多研究團隊目前致力於研發大規模量產之方法及最佳參數，就是為了使生產成本達到經濟效益可行性。其中最重要的影響因素即為培養基成本，其就佔了整個細菌纖維素生產流程30%以上成本，如何可以降低培養基之成本和增進細菌纖維素生產是目前主要研究方向主軸。培養基除了基本的碳、氮源外還需要微生物生長所必需之營養素，像是磷、鉀、鎂等，這些組成也是影響微生物合成纖維素型態、結構、機械性質、產量之因素。生產細菌纖維素最常用的培養基為1954年Hestrin和Schramm氏開發之HS培養基，但其配方將造成整體製程成本增加不利於商業化生產。為此，Jozala氏等人回顧近十年來生產細菌纖維素生產參數、替代碳源與不同的培養基組成，並綜整生產細菌奈米纖維素阻礙的因素：

1. 細菌纖維素產量低可能是葡萄糖脫氫酶 (glucose dehydrogenase) 的存在，這種酵素將葡萄糖轉化為葡萄糖酸，降低培養基酸鹼值，進而影響細胞膜上細菌纖維素合成。



市售椰果相關產品。

2. 培養基的含氧量是影響合成細菌纖維素重要因素之一，氧氣供應不足將對合成細菌纖維素產生負面影響。增加與空氣接觸表面積與增加培養基總量有益於細菌纖維素生產，但這就意味著成本提高及拉長生產時間。
3. 培養方式是非常需要被討論的重要參數，目前常用方法為靜態培養，氣舉式或搭配攪拌棒改良氣舉式培養，這些都需要更多在生物合成上優劣的研究，或許相關成果未來可以推動整個生物材料產業發展。

細菌奈米纖維素具有高純度、高結晶度、高密度、高保水性、高比表面積等特性，可應用在紡織業、造紙業、食品工業、醫藥、廢棄物處理、礦業等產業。其中，短鏈的細菌奈米纖維素在造紙上有應用潛力，特別可以生產柔性/耐用紙和高密度填充，這些性質作為鈔票用紙特別理想。另外也有學者提出細菌奈米纖維素可作為造紙的結合劑來使用、細菌奈米纖維紙適合作為超過濾所用、開發以細菌奈米纖維紙為基礎的環境友善儲能裝置。純的纖維素可在食品加工中作為增稠劑和穩定劑使用，或用於促進凝膠化與水的結合。此外，細菌奈米纖維素作為膳食纖維在1992年就被美國FDA認定為安全食物。菲律賓利用細菌奈米纖維素做成我們市面上常見的“椰果”，這種食物是東南亞傳統甜點之一，而其口味取決於培養基的組成。由於細菌奈米纖維素具有獨特的3D網狀結構，研究發現適合做為組織天然再生支架材料。另外細菌奈米纖維素還具有生物相容性、貼

合性、彈性、透明性、保持濕潤、吸收組織滲出液等功用，因此在生醫方面亦可應用在傷口包紮材料、人造皮膚、組織支架材料、人造血管、醫療用墊和牙床填入物等方面。

## 未來發展趨勢

奈米纖維素發展至今20餘年，科學家嘗試從木本植物、草本植物、農業廢棄物甚至到細菌直接合成作為奈米纖維素原料來源。為使其可應用至更多領域，科學家著重在研發與疏水性物質混合製成奈米纖維素複合材料，目前以溶液澆鑄法及浸染法最為廣泛使用，未來研究趨勢將朝大規模生產製程方向，希望應用至更多不同領域。至於細菌奈米纖維素，許多學者從自然界分離出表現生產纖維素高效率之菌株，也發現添加之碳氮源會增加細菌纖維素總生產量。不過大部分的研究都以 *Gluconacetobacter xylinus* 來探討相關性質，未來仍還需要從自然界分離更多元及高產量之菌種。此外，關於培養基的成本效益研究也是非常重要的研究方向，這可增進細菌纖維素產量和生產率，進而朝向大規模商業生產。因為細菌奈米纖維素是一種未來可以廣泛應用在各種產業之材料，有必要進一步研究使這種生物材料在競爭力 and 經濟效益上可行。已有一些研究討論細菌奈米纖維素的應用層面，但仍需要更多的研究探索生物技術生產的可行性，尤其是如何降低培養基的成本。隨著人類社會發展，特別是細菌纖維素應用在奈米技術(奈米顆粒藥物輸送、化妝品和食物)和環境(有機溶劑或金屬減量)方面上，將扮演更重要的角色。☀