

# 跨越蠶桑產業－以蠶絲蛋白 作為超級材料的應用與發展

作者：林孟均（副研究員）  
電話：（037）222111 # 334

## 前言

絲(silk)為昆蟲產製的纖維性蛋白，昆蟲產絲多用來固定位置、纏繞獵物或保護自身等功用，目前已知可以產絲的昆蟲逾400種，但僅有少數的昆蟲可商業化量產絲來做利用，其中蠶絲是最早開發為人類使用的動物纖維蛋白，操作歷史已超過4,000年以上。蠶絲為家蠶(*Bombyx mori* L.) 經由絹絲腺體所分泌的動物性蛋白，佔熟蠶體重的40-50%，蠶絲依照結構可分為絲膠(sericin)及絲質(fibroin)，過去蠶絲由於透氣、吸濕、保暖及輕薄等特性廣泛地製成紡織品，但隨著石化業的興起，便宜多樣化的人造纖維出現，使得產業沒落。所幸近年隨著材料科學及生物技術的興盛，這項特殊的動物性蛋白質，再度受到重視，在這些材料研究中指出絲質蛋白具有極佳的穩定（圖一）、機械力及生物親和等特性，使用在醫療及生活用品的開發上，有著人造材料無可取代的優勢；此外，過去被視為廢棄物的絲膠蛋白，也發現具有抗氧化、抗UV及保濕等等的



圖一、蠶絲具有生物蛋白中少見的高度穩定性。

特性，並且陸續被開發使用在美容保健等產品上。

因此，本文跨越傳統的蠶桑產業，摘錄近年來蠶絲如何化身為「超級材料」，活躍於醫療、美容保健、食品科學、生活用品及電子科學等領域，也期望透過他國的研發成果，激盪出新的思維，結合其他產業的多元化創意發展，拓展蠶絲的應用廣度及產業價值。

## 高透明度的蠶絲蛋白是良好的眼藥佐劑

2018年德國Max Bergmann生物材料中心Philipp博士指出，由於絲質蛋白有良好的藥物承載性及低排斥性，且可製成高透性的材料，用於需要高度透明度的眼部治療有相當好的成效，包括做為載體承載角膜纖維細胞、上皮細胞、眼睛纖維節及視網膜色素細胞等，或者將高細胞貼附性的精胺酸-甘胺酸-天冬胺酸(Arg-Gly-Asp, RGD)胺基酸序列結合絲質蛋白，移植到眼部，可提高眼內血管及神經的再生效率。此外，美國Matthew博士指出，眼睛角膜的相關疾病是造成失明的主要原因，影響全世界約2,700萬以上人口，角膜移植是唯一的治療方式，除了角膜的器捐，現今較佳的角膜替代品為人類羊膜，但卻有機械強度差、非全透明及潛在疾病傳染的風險。美國康乃爾大學醫學院Rosenblatt醫師團隊比較人類羊膜及絲質蛋白所製成的替代角膜，指出絲質蛋白擁有較高的透明度及操作性，但角膜上皮細胞在人類羊膜上生長速率還是比較快，且貼附性較高，推測絲質蛋白應具有發展成替代角膜的潛力，但還要進行成分及材質的調整。

## 絲膠是良好的皮膚保濕產品

蠶絲中的絲膠位於絲質外部，用來包圍及固定絲質，通常是紡織工業中的抽絲完的廢棄物，近年來絲膠的應用被廣泛的討論，也興起了許多的商業用途。2016年巴西的Brancahlo教授團隊指出，在蠶桑業發達的中國、印度及巴西等地，每年約有5萬噸的絲膠蛋白流放廢水，造成嚴重的水汙染。隨著環保意識上升，目前正積極開發絲膠蛋白的應用，研究指出在化妝品或保養品中使用絲膠蛋白，可促進保養品的水合反應(hydration)加乘保養品的效果，此外，高疏水性的胺基酸組成，可提高保濕及抗氧化的效果，甚至可作為傷口癒合的保濕成分。

印度Padamwar教授團隊研究指出，使用含絲膠蛋白之保養品可提高的肌膚羥脯胺酸(hydroxyproline)含量，與人體表皮細胞產生水合反應，可減少經皮水分散失，並指出絲膠蛋白因為具有與表皮重要的保護層-纖聚蛋白(filaggrin)相似的胺基酸序列，可作為皮膚保濕劑。2012年韓國Cho教授團隊更進一步於《英國營養學雜誌》(British Journal of Nutrition)指出，在飲食中加入1%的絲膠蛋白，可刺激纖聚蛋白表達，改善乾性皮膚，未來有機會開發為異位性皮膚炎(atopic dermatitis)的替代療法。

## 用絲質蛋白作為食物保鮮劑

2016年由美國塔夫斯大學Omenetto教授團隊在權威性《科學報導》(Scientific report)發表，他們將絲質蛋白與園產品的採後處理進行結合。將絲質蛋白進行分離及純化後，運用浸塗處理(dip coating)及包覆晶化(coating crystallization)的方式，在果實外部加上一個保鮮層(圖二)，藉此降低水果的呼吸作用並降低水蒸氣蒸散，來提高果實的儲架壽命。研究指出，以絲質蛋白所做的無毒可食用性保鮮層，使用在新鮮草莓上，透過不同的二級結構堆疊浸塗，可有效降低水蒸氣滲透係數(Water vapour permeability coefficient)達5倍以上，並降低果實氣體擴散係數(gaseous diffusion coefficient)達2倍，相較於未處理組草莓在14天後喪失約70%的水分重量(保存環境溫度22°C及相對濕度38%RH)，經58%二級結構蠶絲蛋白浸塗的草莓處理組僅有約20%重量損失，顯示可以有效保鮮草莓長達2周以上，使用在香蕉上亦有降低外皮褐化及軟化速度的保鮮效果。

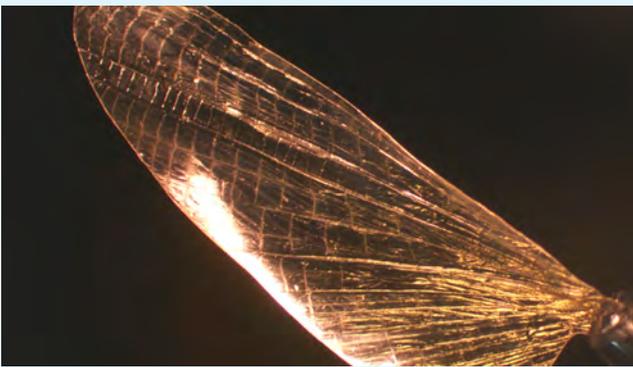
## 合成絲質蛋白製成仿生材料

美國哈佛大學生物工程Donald Ingber教授團隊仿造昆蟲外殼構造(圖三)，發展出一種名為Shriik的仿生材料，並登上《先進材料》



圖二、浸塗上絲質蛋白的草莓可延長保鮮度。  
(圖片來源：  
<https://www.nature.com/articles/srep25263>)

(Advanced Materials)期刊封面，它是一種結合蝦殼殼聚醣及絲素蛋白特性所合成的新材料，合成的Shrilk韌度是原本殼聚醣的1.5倍，強度則提升了2倍，Shrilk的強度與韌性與合金相似，但只有一半的重量，還可被微生物快速降解，由於殼聚醣及絲素蛋白皆為美國FDA認可上市的材料，未來Shrilk可望取代傳統塑料用在包裝或飲料容器等生活用品上，甚至使用在醫學工程上，進行組織修補或再生支架等用途。



圖三、哈佛大學利用Shrilk打造蚱蜢翅膀仿品。

(圖片來源：<https://asknature.org/idea/shrilk-composite-film/>)

## 絲質蛋白可優化穿戴式電子監控裝置

中國清華大學張瑩瑩教授團隊於2019年在《先進功能性材料》(Advanced Functional Materials)期刊發表了一項結合蠶絲及石墨烯的穿戴式電子紋身(E-tattoos)，透過溫度及汗水中的代謝物所傳遞的電子信號，監測穿戴者的體溫、呼吸及其他生理徵狀。電子紋身由於重量輕且可緊貼人類皮膚，是未來穿戴式裝置開發的發展重點，但由於貼附在皮膚上，常受到外力的彎曲、擠壓或切割等造成故障。團隊運用了絲素蛋白具有防水性、高機械拉力、及高肌膚親和性等特性，提高了電子紋身的親膚性、柔軟度及穩定性，並且運用了結合石墨烯、絲質蛋白及鈣離子的複合材料，發展出具有自癒能力的電子紋身(圖四)，損壞的部位

透過加水後氫離子配位鍵會重新鍵結，可在0.3秒內100%修復損壞的紋身，提高了電子紋身的實用性，使上市量產跨近了一大步。



圖四、破損的石墨烯/絲質蛋白複合電子紋身可用水迅速修復。

(圖片來源：<https://www.pexels.com>)

## 結語

過去臺灣曾是蠶絲出口大國，隨著人工成本增加、國際競爭及政府政策，傳統的蠶桑業逐漸式微，隨著產業結構的改變，不可能再回到過去勞力密集的传统栽桑養蠶產業，所幸隨著生物科技的崛起，蠶絲除了紡織外，在其他領域再度受到重視及開發。本場自日治時代保有136個品系(種)家蠶種原庫，擁有豐富的蠶絲資源，近年來也積極開發蠶絲蛋白的新用途，目前已在醫學用品方面有所突破，不僅篩選出適合運用在醫療領域的蠶絲種類，也發展出可穩定緩釋藥物的載體，對於半衰期短的藥物可延長其活性達18倍以上，並可做到精準投藥的治療效果，也期待未來能有更多各領域專家投入共同合作，開發出其他突破性的產品，讓臺灣的蠶桑產業，以全新風貌再度躍上國際舞臺。