

探索恐龍化石的顯微世界

Open a Window for Investigating Jurassic Dinosaur Fossil by a Perspective View of Synchrotron

江正誠、黃佩瑜、陳慶日、李耀昌

Cheng-Cheng Chiang, Pei-Yu Huang, Ching-Iue Chen, Yao-Chang Lee

臺灣古生物研究團隊利用臺灣光源同步輻射紅外光譜顯微術及薄如蟬翼的化石試片製作技術透視侏羅紀祿豐龍的胚胎化石內部的成分及陸地上生物鏈頂端的肉食恐龍如霸王龍及鯊齒龍如牛排刀的尖鋸齒結構發展。依據二維紅外光譜影像及次其微米結構的結果，除了推翻化石內不可能保存有機物殘留物的推論之外，而且還提出肉食恐龍尖鋸齒結構形成的新概念。此研究獲得國際古生物界的重視，也將臺灣的古生物研究推向國際舞台。

Synchrotron-radiation-based infrared microspectroscopy and the technique of ultrathin sectioned fossil making in Taiwan Light Source open a new window of paleontology in unfolding mysterious Jurassic embryology and development of serrated teeth of carnivorous dinosaur. Taiwan paleontologists proved the paleontological possibility to reality of preservation of organic remain within 195 Myrs Lufengosaurus embryos, and proposed a novelty of serrated teeth development based on the investigations by using infrared microspectroscopy.

一、許氏祿豐龍與對日抗戰的不解之緣

對日抗戰初期在民國 27 年 10 月，當時日本帝國佔領整個中國的東南沿岸地區，雲南省主席龍雲建議蔣介石從中國昆明出發經雲南西部到緬甸北部建築一條到緬甸和印度的滇緬公路，兩年後在修築滇緬公路祿豐段發現了恐龍化石⁽¹⁾。其實中國的恐龍研究早在清朝光緒 28 年 (西元 1902) 就已經開始，但大多是外國人主導，又當時的地質古生物學家楊鍾健先生早年在參加法國古生物考察大隊時，曾受到羞辱早就試圖要改變中國當時在古生物界的窘境。在修築滇緬公路祿豐段時發現恐龍化石，當時的地質古生物學家卞美年先生趕赴祿豐進行調

查，並與楊鍾健先生成立了工作大隊進行正規的發掘和研究工作，卞美年先生首先測量了祿豐盆地的地層並作了詳細的地質圖，祿豐盆地地理位置於雲南省會昆明市西北 90 公里處，算是較小型的內陸盆地，地層裡有陸相沉積岩石厚達 1000 公尺左右，分為下部祿豐組地層與上部祿豐組地層。工作大隊在祿豐大洼發掘到一具完整程度達 80% 以上的恐龍遺骸化石及其他 84 具的恐龍化石。楊鍾健先生在昆明瓦窯村仔細研究這些在祿豐出土的恐龍化石，歷時兩年完成第一具由中國人自行挖掘、研究及組架的恐龍化石，並取名為許氏祿豐龍 (*Lufengosaurus huenei*)，這些恐龍化石和其它一些古生物化石統稱為「祿豐蜥龍動物群」，這奠定了恐龍化石的研究基礎為中國恐龍研究立下劃



圖 1. 雲南省楚雄州祿豐縣的大洼恐龍山佇立著古脊椎動物學奠基者—楊鍾健先生之雕像，雕像後方的小土嶺就是第一具出土的祿豐龍化石發掘點。

時代的里程碑，後人為了緬懷楊鍾健先生的成就在恐龍山豎立了一座雕像 (圖 1)。許氏祿豐龍的骨骼結構及體型和德國古生物學家在晚三疊紀地層中發現的板龍相當近似，故將許氏祿豐龍歸類於板龍科 (*Plateosauridae*)⁽²⁾。後來在南非侏羅紀的地層出土的原蜥腳類恐龍—大椎龍 (*Massospondylus*) 與祿豐龍之骨骼結構及體型更為相似⁽³⁾，因此近幾年部份古生物學家則將許氏祿豐龍歸類於大椎龍科 (*Massospondylidae*)⁽⁴⁾。許氏祿豐龍的體長平均為 4.5 公尺，而巨型祿豐龍骨架最長可達 6 公尺，而葛瑞格利·保羅 (Gregory S. Paul) 則進一步將骨頭間的軟組織納入估算，結果推測許氏祿豐龍的身長可能約 9 公尺，體重約為 2.9 公噸。但從形體分析的結果只能說明兩者之間除了體型的大小不同外，在形體上並無明顯的差異⁽⁵⁻⁸⁾。(圖 2)。近年來



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2. 中國雲南省楚雄州彝族自治州博物館與恐龍谷展示 (a, c) 祿豐龍及 (b, d) 雙脊龍。

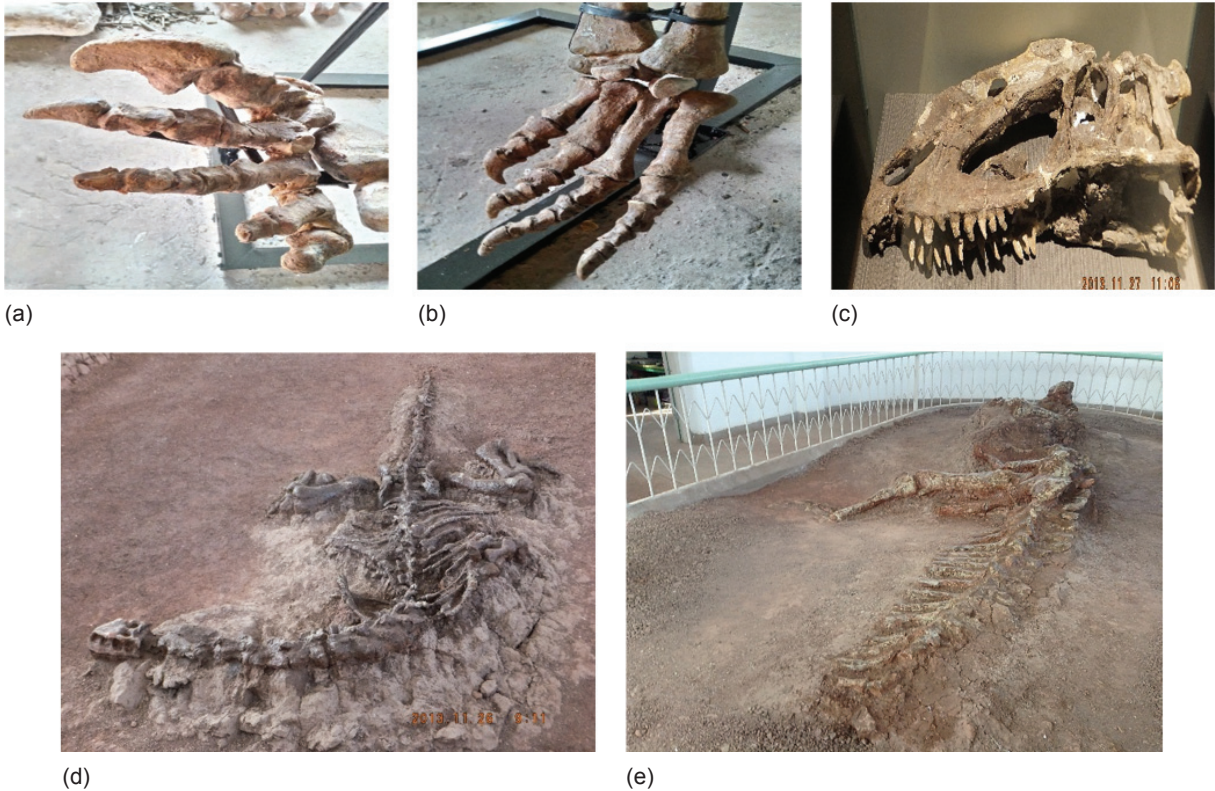


圖 3. 保存於中國雲南省祿豐縣恐龍博物館內的祿豐龍化石，(a) 祿豐龍的前肢巨爪，(b) 後肢巨爪，(c) 祿豐龍的部份頭顱及牙齒化石，(d) 大洼恐龍山 1 號展館展示俯臥在地上的祿豐龍化石，(e) 大洼恐龍山 2 號展館展示缺了頭顱的祿豐龍化石。

在中國雲南省出土的早侏羅紀恐龍化石，較大型的有原蜥腳類黃氏雲南龍 (*Yunnanosaurus huangi*) 及蜥腳類武定昆明龍 (*Kunmingosaurus wudingensis*) 和尚未分屬的金沙江龍 (*Chinshakiangosaurus chunghoensis*) 等。

原蜥腳類 (*Prosauropoda*) 恐龍，在晚三疊世繁衍相當強盛，成為當時強勢物種。由於原蜥腳類恐龍在早侏羅紀地層鮮少被發現，而且近期的研究證據顯示此類恐龍已在早侏羅紀結束前就已經滅絕了⁽⁹⁾。由於祿豐龍的頭骨化石較小，卻擁有短而尖的牙齒，眼眶大且呈圓形，鼻孔則呈三角型，拇指的指爪也顯得特別大⁽¹⁰⁾。依據楊鍾健先生的研究結果顯示兩種祿豐龍均屬於雜食性的恐龍，主要的食物是湖岸和沼澤周圍森林裡的植物、水中的螺螄或蚌殼等的小型動物⁽¹¹⁾。與其他原蜥腳類相比，巨型祿豐龍的頸部相當長，脊椎發達粗壯且前肢也不是很短小，不像一般單純以兩肢行走的恐龍⁽¹²⁾ (圖 3)。

二、一個偶然開啟了國際古生物研究團隊的合作契機

2010 年雲南省祿豐縣恐龍博物館的工作人員在大洼恐龍山進行例行性的田野探勘，偶然發現一些動物小肢骨化石，這些小肢骨經由古生物學家的鑑定，極可能是恐龍的胚胎化石。為更進一步了解這些化石的由來，祿豐縣恐龍博物館在大洼恐龍山附近進行持續性田野探勘，另外一方面博物館對外也積極的尋求合作，並於 2011 年組成國際古生物研究團隊，成員包含來自台灣國家同步輻射研究中心、加拿大多倫多大學、國立中興大學、國立中央大學、國立成功大學、雲南省楚雄彝族自治州博物館及祿豐博物館的研究人員。研究團隊則正式開始在雲南省楚雄州祿豐縣大洼恐龍山進行田野探勘與化石研究工作。

研究團隊在祿豐大洼恐龍山發現一些成龍的肢骨殘片化石與極為罕見的胚胎化石，從這些不同大

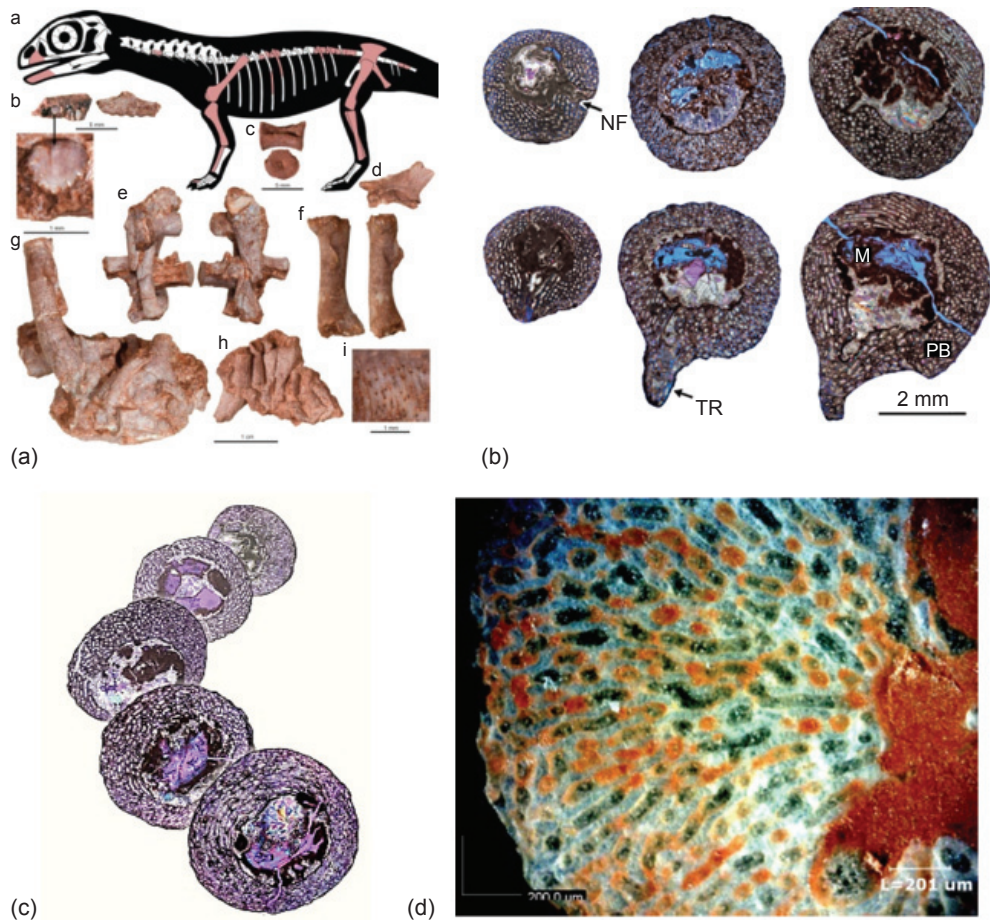


圖 4. (a) 禄丰大洼恐龍山發掘出極為罕見的禄丰龍胚胎化石，(b) 禄丰龍胚胎股骨化石上段切片，(c) 禄丰龍胚胎股骨化石中段切片，(d) 禄丰龍胚胎股骨化石中段切片細部放大圖。

小的肢骨及部位拼湊出胚胎的完整形貌，經地層研判及部位形貌特徵的比對，尤其是以胚胎上頷骨和其齒列內形態和蜥腳亞目 (*Sauropodomorpha*) 的相比顯示具體相似之處。在禄丰大洼恐龍山發現的胚胎化石經由類似於電子顯微術的試片製作方法呈現化石的內在結構，最特殊的是在胚胎脊椎骨試片中發現有大脊索腔，此一現象顯示胚胎脊索管道處於發育階段，這是一般脊椎動物離開胚胎階段後不會有的特徵，依據這些特徵作為鑑定胚胎標本是否歸屬於禄丰龍。

探討禄丰龍在胚胎時期中的生長速度及其骨骼發展的過程，瞭解禄丰龍在胚胎時期的肋骨與腿骨的發展，恐龍胚胎股骨直徑及對稱性隨著時間而變化，愈接近孵化，股骨直徑不只變大，形狀也越來

越不對稱。研究團隊認為這是恐龍胚胎因胎動時股骨受到肌肉的牽引所造成的骨骼不對稱性的發展，此行為類似於人類的嬰兒在母體中的胎動所造成骨頭的不對稱性的發展 (圖 4)。

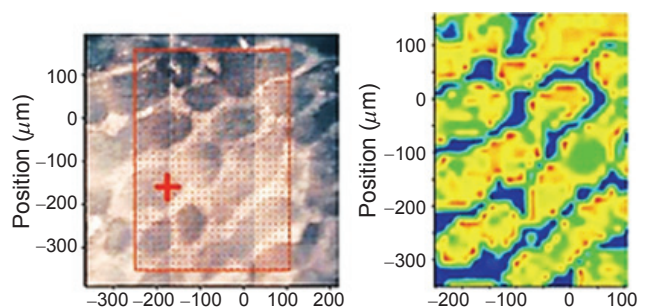


圖 5. 禄丰龍胚胎股骨化石試片中的有機殘留物的紅外光譜顯微影像。



(a)



(b)



(c)

圖 6.

(a) 研究成果獲選 Nature 期刊的封面故事，(b, c) 歸還中國雲南省楚雄州彝族自治州博物館的祿豐龍胚胎化石及試片標本。

研究團隊針對祿豐龍在胚胎時期中的生長速度及其骨骼發展的過程中利用國家同步輻射紅外光譜顯微術直接對不同時期的化石進行顯微紅外吸收光譜的分析。竟然在一億九千五百萬年前的祿豐龍化石中，得到相當珍貴的有機殘留物質在骨質中之證據(圖 5)，此研究成果已發表在 Nature 期刊⁽¹³⁾，並獲選為當期的封面故事，這些研究後珍貴的祿豐龍胚胎化石於 2013 年 11 月 28 日正式歸還並珍藏在中國大陸雲南楚雄州彝族自治州博物館中(圖 6)。

三、恐龍化石簡史

古生物學家發現在白堊紀時地球上曾發生一次大規模物種滅絕事件(約在 6,550 萬年前)，當時地

球上大部分的動、植物歷經巨大的災難後死亡，當然恐龍也沒有倖免於難。當這些恐龍的遺骸被掩埋在泥沙塵土中甚至水中，遺骸中的有機物質除了被自體的蛋白分解酵素消化之外，還受到食物鏈底層的昆蟲及細菌吞噬與分解，最後所剩下較堅硬的外殼或骨頭也受到經年累月雨水的沖刷、地下水的滲透及侵蝕，同時伴隨著骨骼在環境中碳酸鹽化或矽酸鹽化的礦化作用，在礦化過程中的礦物質的溶解、取代、再結晶等物理作用及化學反應等，成為我們現在發現的恐龍化石。發現的恐龍骨頭化石的內部結構可能在特殊的環境中保留了當初原有的細部結構，這恰好提供古生物學家進一步探討恐龍與現生動物之間的演化過程以及為何擁有如此巨大的身軀的證據，同時推測當時地球可能的環境變遷。

四、同步輻射紅外光譜顯微技術－化石研究發展的新契機

臺灣光子源同步輻射紅外光譜顯微技術主要是利用電子束被加速至相對論速度後儲存在電子儲存環中(圖 7(a))，當電子束通過雙極磁鐵時釋放出的高輝度 (high brightness) 的同步輻射光源，經由麥克森干涉儀 (Michelson Interferometer) 對同步輻射紅外光進行頻率調制 (frequency modulation)，並將調制後的同步輻射紅外光引入紅外共軛焦顯微鏡中聚焦。將聚焦的 10 微米 × 10 微米的紅外光點在化石試片上進行非破壞式的吸收光譜量測及光譜影像的掃描(圖 7(b))。化石的紅外吸收光譜是藉由化石成分中的化學鍵結組成原子核間振盪時，因原子核相對位置的改變所感應產生的週期性振盪電場頻率與中紅外光的週期性振盪電場頻率相同時將使得化學鍵的電場振盪與中紅外光的能量產生交互作用而造成能量共振吸收。其中化石被製作成極薄的試片(厚度約 30–20 微米)，再利用紅外光譜顯微技

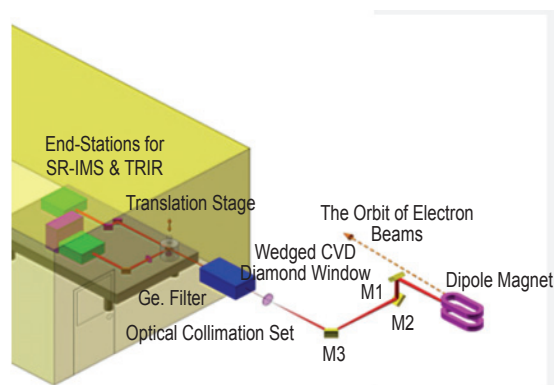
術量測化石中有機殘留物質之紅外吸收光譜的影像，其影像呈現出有機物被保留在億萬年的石化骨質中。而目前用來分析古生物化石的方法無非採用所謂的破壞式研究方法，也就是將化石中的碳酸鹽類、矽酸鹽及磷酸鹽之無機礦物質去除後萃取剩餘的殘留物，再利用一系列生物化學的分析方法及精密的串聯式質譜儀進行有機物的分析，但萃取的步驟繁瑣且容易受到人為及環境的污染，所得到的證據易受到國際上的質疑及挑戰。因此，以同步輻射設施的科研技術進行非破壞式的研究方法在古生物研究上是具有相當的優勢⁽¹³⁾。

五、薄如蟬翼的化石試片製作

由於被發現的古生物化石幾乎都是被堅硬的泥岩所包覆，傳統的化石清理除了必須去除化石外的圍岩，為了讓化石的細微的骨骼結構再現時還需以化學酸蝕法將骨骼的裂縫及腔體中的圍岩去除，化石中遺缺的骨骼再以複製的方式以補足遺缺的



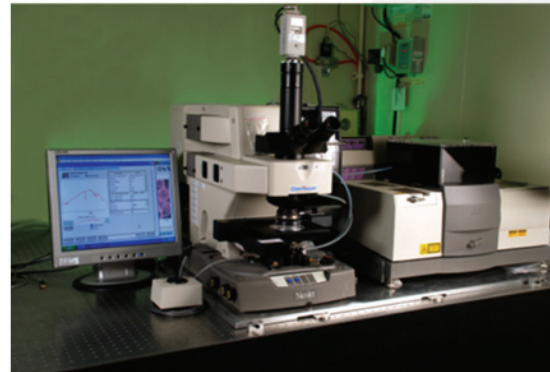
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 7. (a) 臺灣光源及臺灣光子源之電子儲存環鳥瞰圖，(b) 紅外光束線光路示意圖，(c) 引出同步輻射光源的準直鏡箱，(d) 紅外光譜顯微術實驗站 BL14A1。

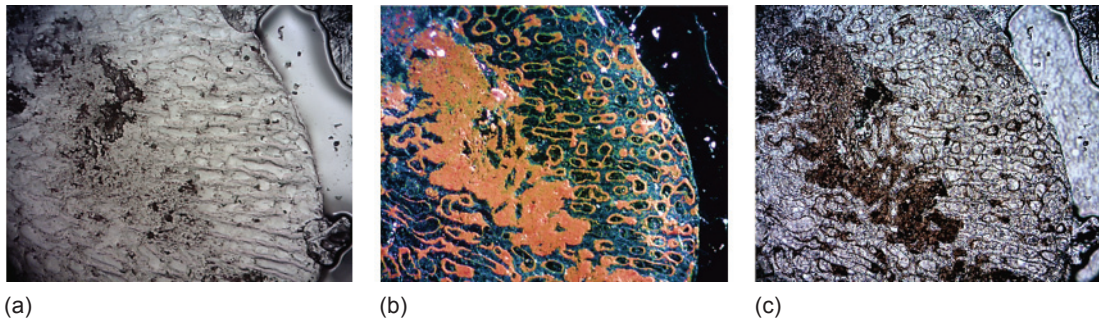


圖 8. (a) 許氏祿豐龍胚胎股骨化石試片之反射式明場顯微影像，(b) 祿豐龍胚胎股骨化石試片之暗場顯微影像，(c) 祿豐龍胚胎股骨化石磨製為 30-20 微米左右薄片之穿透式明場顯微影像。

骨架，最後才能以骨架的型態重見世人。然而為了進一步研究古生物化石內部的骨骼結構，臺灣團隊將化石切開並利用反射式光學顯微鏡觀察化石斷面上的紋理結構，但部份骨骼化石內部碳酸鈣 (carbonation) 的情形相當嚴重甚至已經有碳酸鈣的再結晶的現象，因此化石斷面上均為碳酸鈣化的灰白色影像，不易呈現出其內部結構的紋理 (圖 8(a))。因此，我們利用暗場顯微鏡進行化石內部結構的觀察，其所呈現的化石內部的紋理結構相當清楚 (圖 8(b))。

為了進一步利用臺灣光源紅外光譜顯微術進行化石成分的分析，化石試片製備的過程均需要戴口罩及手套避免污染化石試片，再以鑽石砂紙並利用蒸餾水進行試片的研磨，在最後磨製試片的步驟則需以無水酒精取代蒸餾水進行研磨直至試片厚度達 30-20 微米的厚度，研磨過程中均藉由暗場顯微鏡進行觀察。製作完成的化石試片，經紅外光譜量測試片之厚約為 30-20 微米，此厚度除了能以暗場顯微觀察到化石內部結構，如樹木年輪一般的年輪結構 (圖 8(c)) 且能利用紅外光譜顯微術進行分析。骨骼化石經過億萬年的礦化後變硬變脆，切片越薄越容易碎裂，不易製作完整大面積的優質薄試片。化石薄試片製作技術是進行同步輻射紅外光譜顯微研究的關鍵技術之一⁽¹⁴⁻²⁰⁾。

清晰的骨骼化石暗場顯微影像來自於對試片的製作嚴苛的要求。試片製作首先必須使用較為精細的研磨材料及拋光材料進行化石試片研磨製作，化石試片表面的平整度愈高愈能凸顯骨骼化石上細緻

的骨骼紋理結構。利用暗場顯微鏡觀察恐龍化石將更能呈現礦物的色彩，其中骨骼中縱向血管通道的哈氏管 (Haversian canal)、橫向血管通道的弗氏管 (Volkmann's canal) 和骨細胞的骨陷窩 (Lacunae) 均能清楚呈現 (圖 9)。有趣的是使用更高倍率的觀察時，骨細胞的骨陷窩在化石內仍保留的型態居然與現生動物的骨陷窩一樣，其圍繞在哈氏管旁的骨陷窩及骨陷窩向外伸張栩栩如生的偽足觸絲 (圖 10)。

六、恐龍牙齒與地球自然環境相關的分析

此研究由加拿大多倫多大學古生物學系 Robert R. Reisz 教授提供的三種肉食性恐龍牙齒化石，霸王龍 (*Tyrannosaurus rex indet-Alberta*, ROM-57983)、(ROM30582) 和鯊齒龍 (*Carcharodontosaurus*, RHM 101033) 進行紅外顯微光譜分析，用來掃描化石的同步輻射紅外光點大小為 10 微米 × 10 微米 (大約是一般人類頭髮直徑的十分之一左右)，以取得牙齒化石的紅外光譜及其紅外光譜影像⁽²¹⁾。

七、肉食性恐龍牙齒化石的顯微結構

霸王龍和鯊齒龍可能是地球上最凶猛的肉食性恐龍，想像一下為何這些恐龍張嘴撲向獵物時，如何輕易咬住並撕咬這些獵物呢？這些巨大的牙齒不

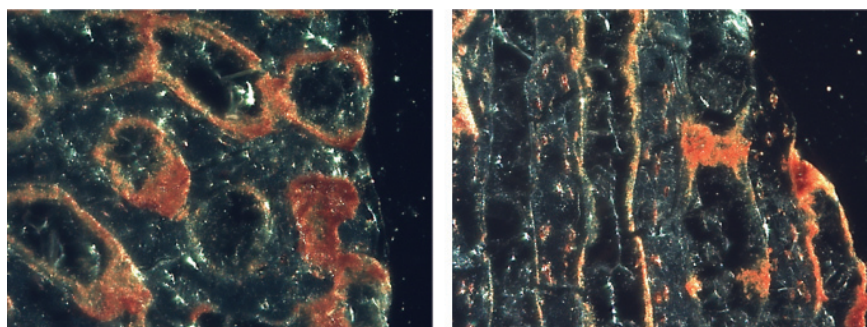


圖 9. 光學顯微鏡下化石呈現的礦物色彩，清楚呈現骨骼中縱向血管通道的哈氏管、橫向血管通道的弗氏管之結構，這些影像可以協助了解內部結構的正確位置，(a) 許氏祿豐龍胚胎股骨化石橫切試片暗場顯微影像，(b) 許氏祿豐龍胚胎股骨化石縱切試片之暗場顯微影像。

但長且有著特殊的形狀，牙齒化石製成的試片在顯微鏡底下觀察，居然有像牛排刀般具有一整排鋸齒狀的小齒，這些鋸齒狀的小齒可以幫助肉食性恐龍輕易的咬住獵物並大快朵頤一番 (圖 11)。

進一步我們在恐龍牙齒化石中發現兩種不同的取代位置的碳酸鹽，一種是取代羥基磷灰石中的羥基 (OH^-) 的 A 型碳酸鹽，另一種為取代羥基磷灰石中磷酸根 (PO_4^{3-}) 的 B 型碳酸鹽。依據分析結果，我們推測恐龍牙齒碳酸鹽化的可能原因，其中之一是二氧化碳與牙齒琺瑯質的羥基反應，另一種則是大氣環境中高濃度的二氧化碳造成富含大量碳酸鹽的地下水，化石經過積年累月的掩埋、浸泡及侵蝕而造成該現象。恐龍生活的中生代，大氣中的

二氧化碳的含量確實是比較高的，這可能說明恐龍能適應於高濃度二氧化碳的大氣環境。

基於這樣的結果，我們提出一個「碳酸化隔離 (carbonate matrix isolation)」理論的埋藏學，在富含高濃度二氧化碳或碳酸鹽的地下水侵蝕恐龍牙齒時，部分二氧化碳或碳酸鹽與牙齒的主要成分碳酸化羥基磷灰石的羥基產生強烈的物理吸附於琺瑯質，隨後反應形成 A 型碳酸鹽。其餘部分的二氧化碳則從牙齒琺瑯質表面擴散到更深層的象牙質中，進一步取代羥基磷灰石的羥基 (OH^-) 而化學吸附在象牙質中，然而在所有牙齒化石的壺腹內二氧化碳的化學吸收卻不明顯。這現象可能是在這個區域的牙齒的羥基可能早已被碳酸化，因而無法再繼

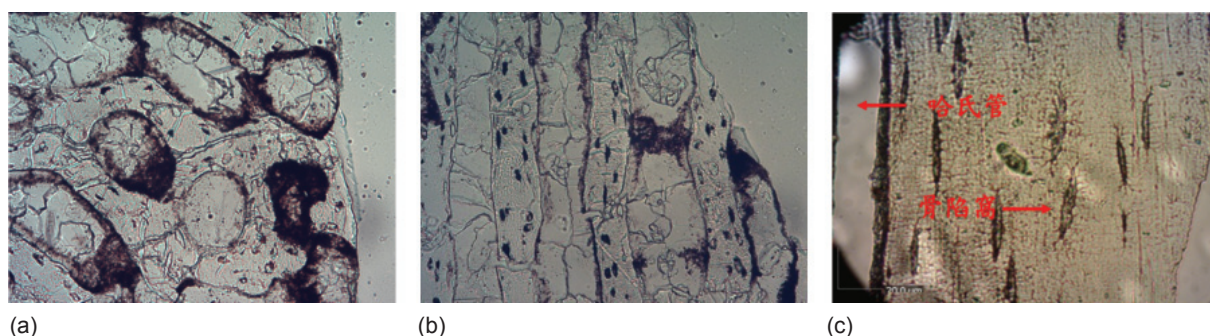


圖 10. 許氏祿豐龍胚胎股骨化石在 200 倍的穿透式明場光學顯微影像 (a) 許氏祿豐龍胚胎股骨化石橫切的顯微影像，(b) 縱切的顯微影像，以及 (c) 現生雞大腿骨縱切切片，這些影像清楚展現縱向血管通道的哈氏管、和圍繞在哈氏管旁骨細胞的骨陷窩之細微結構。

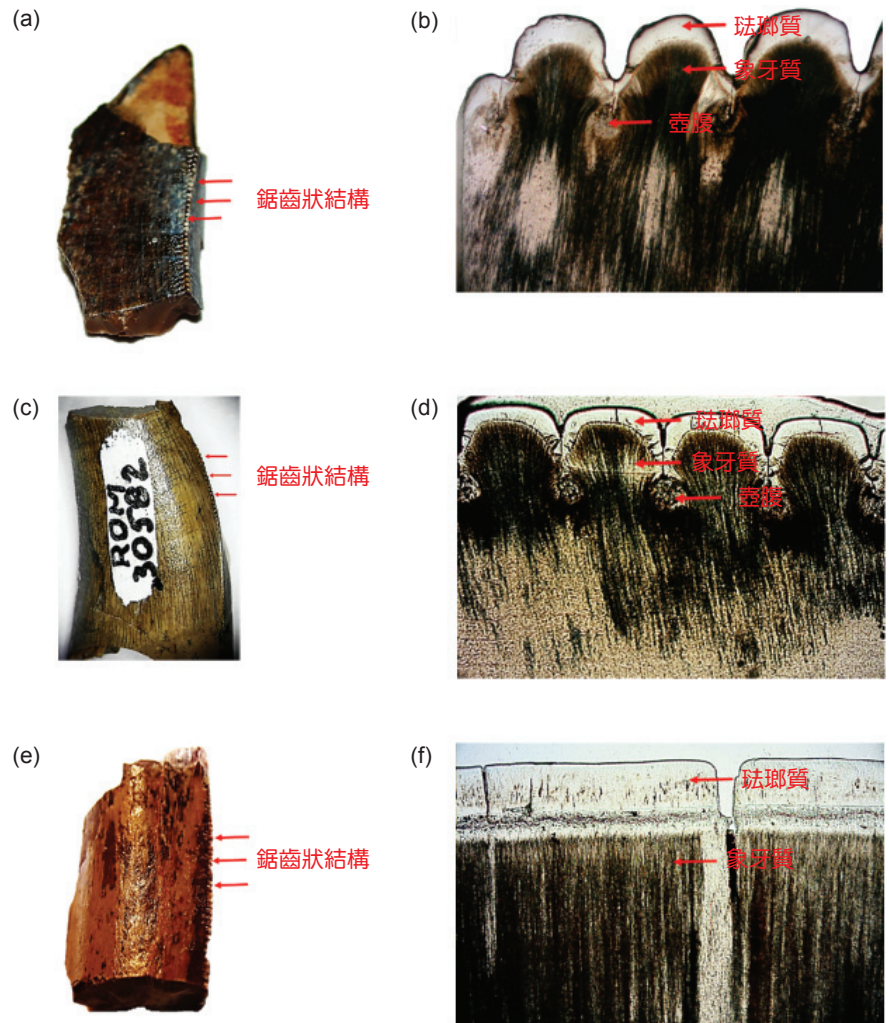


圖 11.

(a) 霸王龍 (ROM-57983)、(c) 霸王龍 (ROM30582) 和 (e) 鯊齒龍的牙齒化石，箭號則為鋸齒狀結構，(b, d, f) 為牙齒化石磨薄後顯微影像，箭號為琺瑯質、象牙質及壺腹結構的相對位置。

續吸附二氧化碳了。經由以上牙齒的一些證據證據我們更相信恐龍的滅跡與大氣的變遷有者密切的相關性，這個千古之謎有待我們繼續抽絲剝繭去揭開謎底。

經由同步輻射紅外光譜顯微術的研究的結果與掃描式電子顯微鏡及組織學所得到的結論一致 (圖 12)。球形牙本質與琺瑯質中高濃度的二氧化碳極可能源自地下水中高濃度的二氧化碳，但原發性牙本質中卻非常的低 (圖 12(c))。

此外，兩種類型的碳酸化羥基磷灰石 (carbonated Hydroxylapatite, cHAP) 也被發現在牙齒內。A 型的碳酸化羥基磷灰石 (cHAP-A)，(圖 12(d)) 是外來的二氧化碳侵入到牙齒並取代碳酸化羥基磷灰石的羥基 (-OH) 所造成的結果，通常存在周圍的齒間褶線及內球型牙本質的空間。而 B 型

的碳酸化羥基磷灰石 (cHAP-B)，(圖 12(e))，它是由碳酸根離子 (CO_3^{2-}) 取代磷酸根離子 (PO_4^{3-})，則是發現在球狀的牙本質中。依據這樣的分析結果，我們推測恐龍牙齒碳酸鹽化的可能原因，其中之一是二氧化碳與牙齒琺瑯質的羥基反應，另一種則是大氣環境中高濃度的二氧化碳造成富含大量碳酸鹽的地下水，化石經過積年累月的掩埋、浸泡及侵蝕而造成該現象。恐龍生活的中生代，大氣中的二氧化碳的含量確實是比較高的，這可能說明恐龍能適應於高濃度二氧化碳的大氣環境。

另外，有趣的是我們在小鋸齒間的褶線區域 (原發性牙本質內) 發現有機物的紅外吸收訊號，但從球形牙本質卻沒有發現有機物的訊號 (圖 12(f-g))。我們認為肉食恐龍的齒縫槽並非是細菌滋生所產生像齶齒一樣的凹洞，(圖 13(b))。

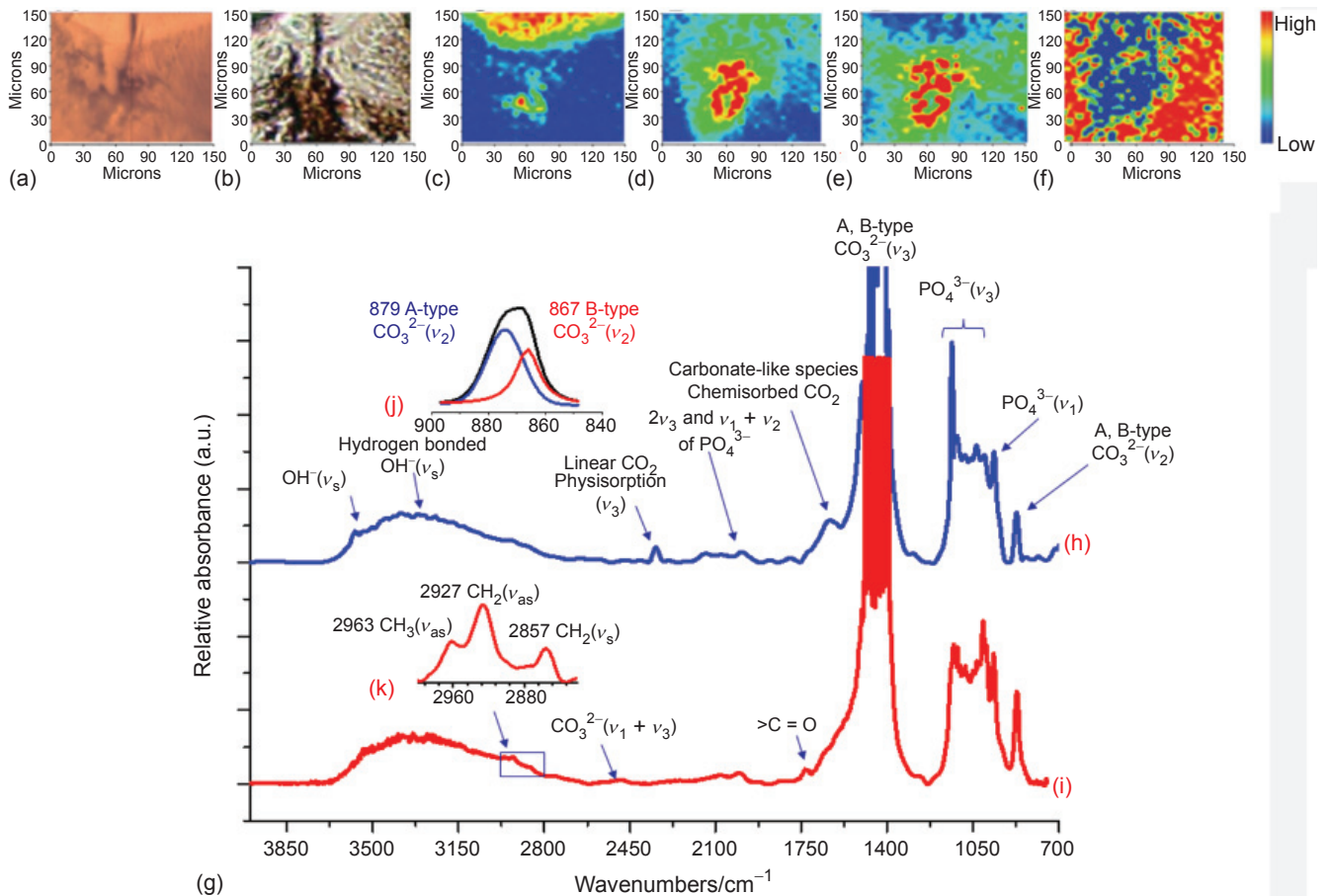


圖 12. 霸王龍牙齒化石 (ROM 30582) 的 SR-FTIR 的琺瑯質和牙本質光譜。A-F, 齒間褶線區域, (a) 可見光光學影像, (b) 可見光反射率影像, (c) CO_2 在光譜位置 2345 cm^{-1} 出現在琺瑯質及齒間褶線區域的吸收的強度。(d) cHAP-A 在光譜位置 879 cm^{-1} 出現在齒間褶的球形牙本質。(e) cHAP-B 在光譜位置 867 cm^{-1} 的紅外吸收影像, 在齒間褶的球形牙本質。(f) Alkyl $3000\text{-}2800 \text{ cm}^{-1}$ 的紅外吸收影像, 表示碳氫有機物質的分佈。最右邊的色表, 藍色表示為吸收強度最低, 紅色為最高。(g) 傅立葉轉換紅外光譜和分配。(h) 琺瑯質的傅立葉轉換紅外光譜。(i) 牙本質的傅立葉轉換紅外光譜。(j) 琺瑯質 cHAP A 型和 cHAP B 型的 Deconvolution 反褶積。(k) 牙本質保存有機物 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 的光譜指派。

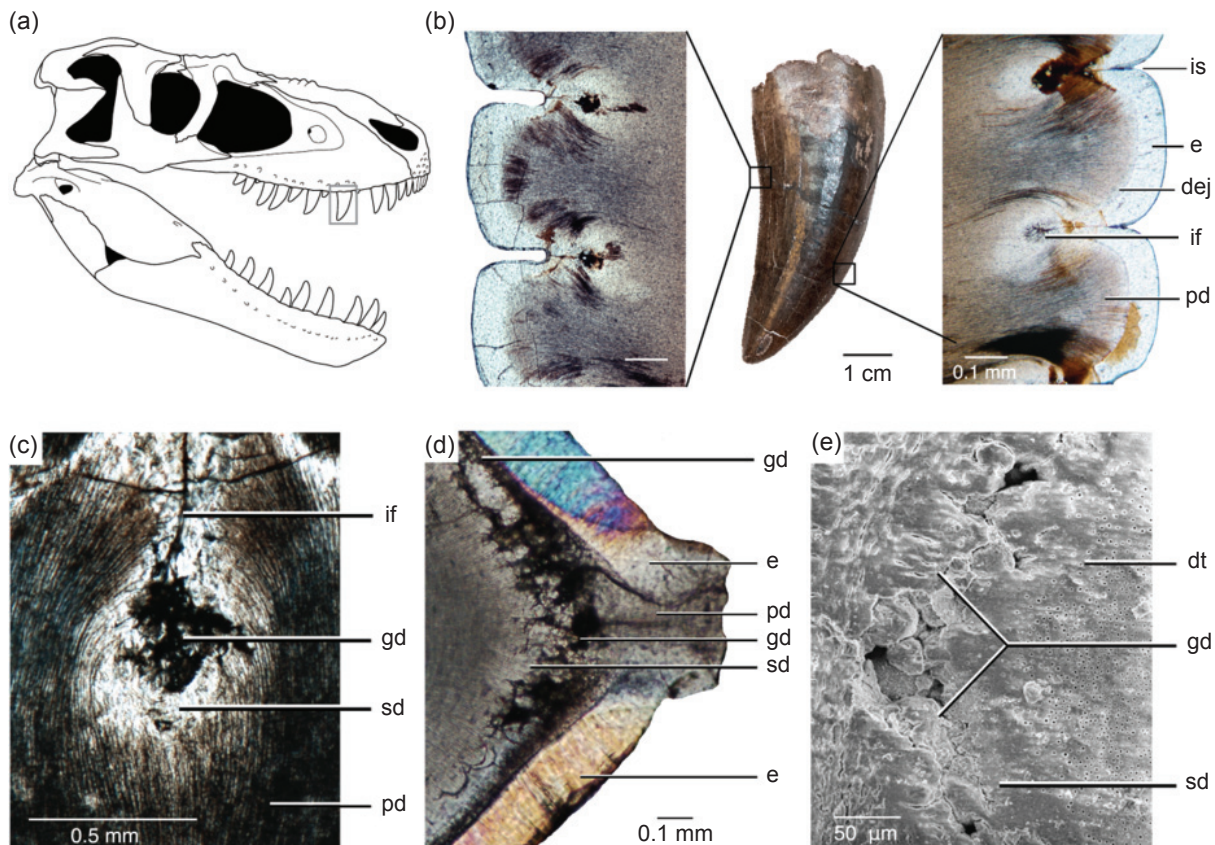
八、結語

以往古生物學研究除了呈現古生物外表形貌及利用傳統的可見光顯微鏡的分析研究之外, 並無法進一步探索化石內部結構。近年來隨著前瞻科技技術的導入使得解開古生物神秘面紗的方法更是日新月異, 雲南擁有豐富化石資源及眾多專業研究人員和熱心有遠見的行政人才, 臺灣研究團隊擁有台灣國家同步輻射研究中心提供的高輝度的中紅外光區的光源、不同技術功能的實驗站、暗場顯微技術及高超的化石試片製作技術, 將有機會一起解開千萬年甚至億萬年前恐龍的神秘面貌的新機會。未來

結合國際古生物各領域專業科學家, 及世界頂尖的高亮度光源, 將有助於古生物界開啟新的古生物學的研究領域, 促使海峽兩岸學術研究更臻國際頂尖水準, 希望創造二十一世紀古生物的科研奇蹟。

參考文獻

1. 王端正, 見龍在田-恐龍現形記, (2002).
2. C. C. Young, *Acta Geologica Sinica*, **20** (3-4), 235 (1940).
3. M. Cooper, *Occasional Papers of the National Museums and Monuments of Rhodesia Series B Natural Sciences*, **6** (10), 689 (1981).
4. D. Peter, B. Brooks, C. Kenneth, F. Catherine, A. Gillette,



Dej : 牙本質與琺瑯質交界處, dt : 牙本質小管, e : 琺瑯質, gd : 球狀的牙本質, if : 齒間褶線, is : 齒縫槽, pd : 原发性牙本質, sd : 硬化牙本質。

圖 13. 獸腳類恐龍尖鋸形牙齒顯微解剖。蛇髮女怪龍 (*Gorgosaurus libratus*, ROM 57981) 屬暴龍科 (a) 頭蓋骨、(b) 上頰牙齒整個矢狀薄片包含齒隆線內側及彎側。鯊齒龍 (ROM 52037) (c) 牙齒的牙本質與琺瑯質交界處 (Dej) 下方齒間褶線矢狀面薄片, 齒隆線在上。(d) 上頰牙齒 45 度角斜切橫向薄片, 通過鋸齒的齒間褶線, 齒隆線向右, 牙髓腔向左。以及蛇髮女怪龍 (e) 上頰牙齒冠狀部位橫切齒間褶線在掃描電鏡的圖像。

- D. David, M. A. Norell, G. O. Ishevsky, J. M. Parrish, D. B. Weishampel, *Publications International, LTD.*, 38.
5. C. C. Young, *Palaeontologia Sinica, New Series C*, **12**, 1 (1947).
6. T. Sekiya, Z. Dong, *Acta Geologica Sinica*, **84** (1), 11 (1941).
7. M. Cooper, *Occasional Papers of the National Museums and Monuments of Rhodesia Series B Natural Sciences*, **6** (10), 689 (1981).
8. G. S. Paul, *Princeton University Press*, 135 (2010).
9. P. C. Sereno, *Science*, **284**, 2137, (1999).
10. P. M. Barrett, *Evolution of Herbivory in Terrestrial Vertebrates*, (2000).
11. C. C. Young, *Palaeontologia Sinica, New Series C*, **7**, 1 (1941).
12. P. M. Barrett, P. Upchurch, W. X. Lin, *Journal of Vertebrate Paleontology*, **25** (4), 806 (2005).
13. R. R. Reisz, T. D. Huang, E. Roberts, S. R. Peng, C. Sullivan, K. Stein, A.L. Blanc, D. B. Shieh, R. S. Chang, C. C. Chiang, C. W. Yang, S. M. Zong, *Nature*, **496**, 210 (2013).
14. S. J. Klepeis, *Mater. Res. Soc. Proc.115, Pittsburgh, PA USA*, 179 (1987).
15. J. P. Benedict, *EMSA Bulletin*, **19** (2), 74 (1989).
16. J. P. Benedict, *Mater. Res. Soc. Proc.199, Pittsburgh, PA USA*, 189 (1990).
17. R. Anderson, *Mater. Res. Soc. Proc.254, Pittsburgh, PA USA*, 141 (1992).
18. R. Anderson, *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Microbeam Analysis Society, ed. E. Etz*, 135 (1995).
19. R. Anderson, *Mater. Res. Soc. Proc. 480, Pittsburgh, PA USA*, 187 (1997).
20. South Bay Technology Inc. <http://www.southbaytech.com/index.shtml>
21. Y. C. Lo, C. I. Chen, C. H. Chang, C. Wang, K. L. Tsang, *AIP Conf Proc*, **705**, 478 (2004).



江正誠先生為國立成功大學管理碩士，現任國家同步輻射研究中心研究助理。

Cheng-Cheng Chiang received his M.S. in Management from National Cheng Kung University. He is currently a research assistant at National Synchrotron Radiation Research Center.



黃佩瑜小姐為國立成功大學醫學工程碩士，現任國家同步輻射研究中心研究助理。

Pei-Yu Huang received her M.S. in biomedical engineering from National Cheng Kung University. She is currently a research assistant at National Synchrotron Radiation Research Center.



陳慶曰先生為師範大學物理碩士，現任國家同步輻射研究中心副研究員。

Ching-Iue Chen received his M.S. in physics from National Taiwan Normal University. He is currently an associate scientist at National Synchrotron Radiation Research Center.



李耀昌先生為國立清華大學化學博士，現任國家同步輻射研究中心助研究員。

Yao-Chang Lee received his Ph.D. in chemistry from National Tsing Hua University. He is currently an assistant scientist at National Synchrotron Radiation Research Center.