

『看見』看不見的土壤與地下水世界

— 微米級 X 射線電腦斷層掃描於農業、水資源與民生議題的應用

黃群展 國立台灣大學生物環境系統工程學系博士生

林子閔 工業技術研究院材料化學研究所微結構與特性分析研究室研究員

簡士濠 國立屏東科技大學水土保持系教授

許少瑜 國立台灣大學生物環境系統工程學系副教授

1. 動機

日前環保署與各縣市環保局在松山文創一連 6 天，熱鬧舉辦土壤及地下水污染整治法 20 週年特展。主辦單位特別稱這次特展主角『土水』——地表土壤水與埋藏於地底的地下水——為『看不見的水』，凸顯了此類水資源的特色與管理上的困境。地下水佔地球上有限可利用的淡水資源的 95%，土壤水的質與量更與糧食生產以及食品安全息息相關。但由於難以肉眼直接透視，絕大多數的情況下，人們是看不見這些深藏在土壤、岩石與各種孔隙介質縫隙中的珍貴水資源。這限制了大眾對於土水資源的關注，也增加探索與理解的難度。近年來，隨著 X 射線電腦斷層技術的精進，終於有機會能一探土壤孔隙間的微小世界，進而呈現『看不見的水』在地底下的原生樣態。

土壤水或地下水都是流動與儲存在土壤與岩石等固體介質的孔隙之間，這些含有大小孔洞的固體稱之為孔隙介質、多孔介質或多孔材料(porous media)。根據成因，孔隙介質可為人造與天然介質。人造孔隙介質包含水泥、磚瓦建築材料以

及濾網等人造材料。而天然孔隙介質則可區分為土壤、岩石等非生物類孔隙介質以及植物根、莖與動物的肝、肺組織等生物類孔隙介質。多孔介質具備儲存與傳輸流體的功能，除了上述的水土資源外，多孔介質內的流體運動也是動植物水分與營養傳輸、水質淨化、空氣清淨過濾、石油開採、地質碳封存等多個科學與工程領域的核心議題。如何觀測孔隙介質的內部結構，以及各種流體在狹小孔隙間運動的現象與機制，是長久以來此領域學者欲克服的議題。

由於多數孔隙介質不具透光性，欲觀測介質的內部結構，多半需採取破壞式的方法，也就是需要破壞固體結構才能觀測到內部的細節。加上孔隙結構微小，對於觀測方法的空間解析度有極高的要求。學者使用聚焦離子束 (Focused ion beams, FIB) 搭配掃描電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 可以獲取非常高解析度的三維孔隙介質影像。然而 FIB- SEM 技術需將已掃描之樣品平面利用聚焦離子束移除，才能接著掃描下一層樣本平面。此類『破壞式』的觀測方法，雖然可適用於如黏土、頁岩等顆粒非常細的材料，但並無法用於觀測孔隙中流體的分佈與流動過程。近年隨著高解析度電腦斷層掃描技術的快速發展，硬體設備的普及，微米級 X 光斷層掃描 (X-Ray micro CT) 成為一種能直接觀察孔隙結構與內部流體的非破壞式技術，在歐美已經廣泛應用於能源開發以及地質土壤檢測。幫助學者在破壞介質本身結構下，探索孔隙間的微觀世界，並觀察流體運動與物質傳輸過程。這研究有助於我們面對地下水污染整治、強化石油開採、地質碳封存、地質安全問題等。涉及層面涵蓋了農業、土壤、環境與能源等議題。

2. X 光斷層掃描發展簡史與現況

從 1895 年 Wilhelm Röntgen 發現 X 射線後，經過超過半世紀技術發展，到 1960 年代後期 3D 成像技術逐漸成形。然而當年的掃描解析度尚未能滿足觀測孔隙結構的需求。一直到 1980 年代，X 射線電腦斷層掃描技術才進入到毫米級解析度。研究文獻顯示約在 1990 年代已有零星研究利用此技術解析多孔介質的孔隙結構。直到二十一世紀初期，大量資源湧入相關研究。現今已發展至微米甚至奈米級空間尺度解析能力，足以觀測孔隙介質的結構與流體分佈，同時掃描所需時間也大幅縮短。

隨著掃描技術逐漸成熟，微米級 X 射線電腦斷層掃描技術從 2000 年代起開始被廣泛應用於分析岩石內流體運動與強化石油開採技術的研發，協助分析三維掃描影像的商業化或者開放工具也如雨後春筍般的浮現。進入 2010 年後，水資源與農業土壤領域的科學期刊開始出現文章統整與介紹 X 射線電腦斷層掃描的技術與應用實例。Wildenschild and Sheppard (2013) 整理了各式 X-Ray micro CT 技術，包含斷層影像分析技術，以及孔隙介質與流體運動方面的分析。圖 1(i) 顯示不同解析度下的土壤結構的呈現；圖 1(ii) 與 (iii) 呈現均勻圓珠所建構孔隙介質中，膠體顆粒與微生物膜傳輸與生長過程；圖 1(iv) 呈現注入土體內的超臨界二氧化碳與沈積物的化學反應；圖 1(v) and (vi) 則顯示如何利用 X 光斷層掃描技術量測孔隙介質中，液體分佈、介面的曲率與連接度。上述成果顯示，透過 X-Ray micro CT 技術與相對應的影像分析技術，可以建構孔隙結構斷面、拓譜結

構與生成孔隙網絡、並取得孔隙中的孔隙率、流體比率、面積與液體介面曲率估算。Cnudde and Boone (2013) 回顧 X-Ray CT 在地質領域的應用如：多尺度影像應用、結構動態監測、化石研究、礦物分析等。在美國國家科學委員會的支持下，Prodanovic 等人成立數位岩石(Digital Rock)開放資料平台，目的建構全球三維岩石影像與相關實驗資料庫，加速孔隙介質流在科學探索與工程應用上的發展(Prodanovic et al., 2015)。

農業應用方面，多關注於土壤孔隙率(porosity)、孔隙大小分布 (pore size distribution) 及連續性 (pore continuity) 等特性。因為土壤孔隙率、孔隙大小分布及連續性決定水、養分、氣、熱等介質在土壤中的傳輸途徑與植物根系在土壤中的延伸的關鍵土壤物理性質。倘若能充分了解土壤中孔隙結構特性將可提供更有效率之農業水分管理策略。以往土壤孔隙的測定方式，現地測定可利用張力入滲計 (tensiometer)，測定局部土壤的孔隙率與孔隙大小分布。此外，亦可由土罐(soil core) 或鋁製方盒 (kubina box) 於現地採集土塊 (soil clods)，攜回實驗室分析測定總體密度 (bulk density) 及顆粒密度 (particle density) 換算總孔隙率，或將土塊注入環氧樹脂 (epoxy resin) 加以固化，磨製為薄切片 (thin section)後，以偏光顯微鏡或電子顯微鏡觀察土壤微結構 (micro-structure) 或微形態 (micromorphological features)，並以 2D 方式評估土壤孔隙大小與分布 (圖 6)。自西元 2000 年以後，CT 技術的發展及農業上的應用，使得土壤中孔隙得以 3D 的方式呈現與計算，使土壤中水分、氣體或熱的流佈能更明確的呈現與精準的預測。

除農業以外，以 CT 技術模擬土壤中孔隙的形狀與分部亦可協助預測環境污染物於土壤中隨水分的流佈而加以制定適當之整治方法。

如中國大陸學者王恩妲等(2014)針對東北典型黑土區的耕地土壤，採用室內類比凍融以及 CT (Computerized tomography)掃描相結合的方法，通過大孔隙 (≥ 0.05 mm) 數目、平均面積、以及成圓率的量化分析，解釋東北地區反覆凍融現象對耕地表層土壤的大孔隙結構並無產生影響，卻能顯著降低黏聚層 (40-80 cm) 內平均 46.72%之大孔隙面積，且以 1-2 mm 和 ≥ 5 mm 的孔隙的變化最為顯著，季節性反覆凍融後，分別降低 9.58%和 42.19% ($p < 0.05$)。該研究中，CT 對孔隙結構的分析結果證明季節性凍融變化導致孔隙變化，使黏聚層抗蝕性削弱以及影響保水性是導致中國大陸黑土區地表侵蝕與溝蝕的主要原因。

密西根州立大學的研究團隊 Kravchenko et al. (2019)將農地依作物類型及用途分成 5 大作物系統，再利用 X 射線微斷層掃描技術 (X-ray micro-tomography) 判斷土壤顆粒之間的孔隙大小與結構，並以微酵素圖譜 (micro-scale enzyme mapping) 檢測不同孔隙大小所含的微生物酵素活性。在歷時長達 9 年的研究後，研究團隊找出在生物與環境交互作用下，影響碳物質循環的重要證據。研究團隊發現，有別於以往學界所認為影響土壤碳儲存能力的關鍵，並非由土壤顆粒聚集的型式 (cluster of soil particles) 所造成，而是在於土壤顆粒間生成的孔隙大小及結構。研究結果發現，土壤顆粒間孔隙介於 30-150 μm 是微生物生長的良好微環境，在這樣的情況下可檢測到較高的生物酵素活性。

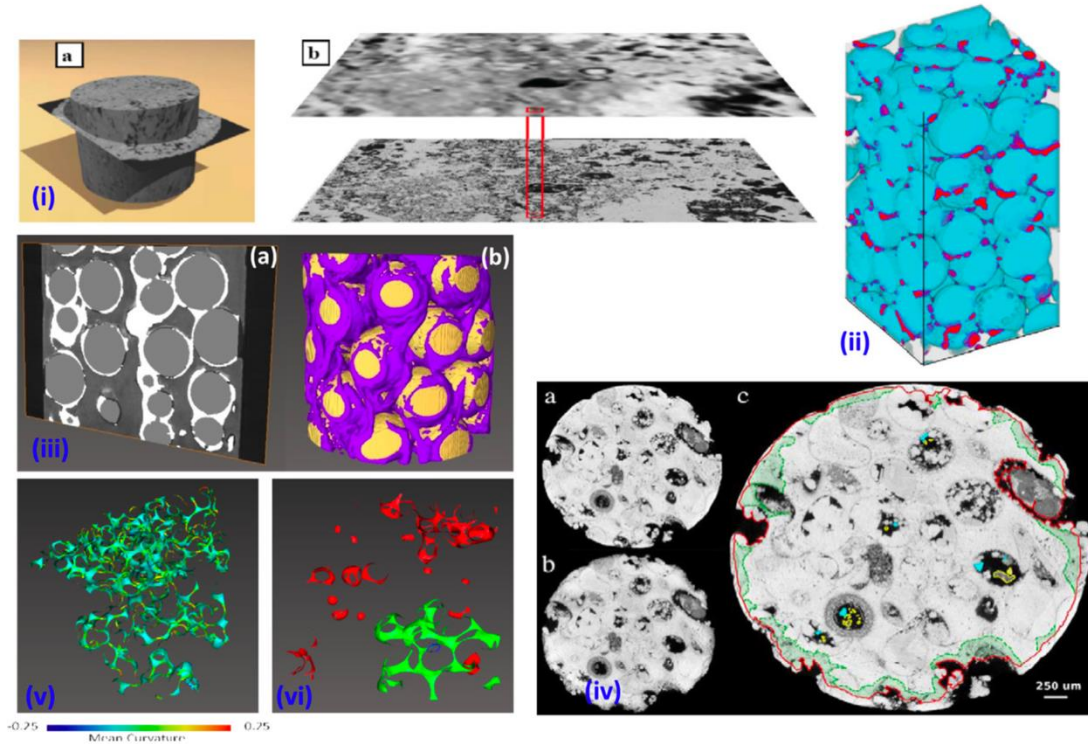


圖 1. (i) 多重解析度影像；(ii) colloids 膠體；(iii) 生物膜；(iv) 反應傳輸；(v) 曲率估計；(vi) 流體連接程度。(Wildenschild and Sheppard, 2013)

3. X 光斷層掃描解析度

根據 X 光斷層掃描的空間解析度，掃描設備大致上可以分為三種等級。工業級 X 射線管 (industrial X-Ray tube)、醫療級掃描器 (medical scanner) 以及同步輻射為光源的微米級 (micro)/奈米級(nano)X 光斷層掃描，近期由於光源科技的改善，實驗室也能夠配備微米級(micro)/奈米級(nano)X 光斷層掃描。針對儀器解析度的不同，可量測的目標尺度以及相對應的物理量也有顯著的差異。工業與醫療級的 X-Ray CT 系統，雖然解析度較低，但是掃描速度快，適用於巨觀的介質特性，例如大孔隙(macro-pores) 與裂縫 (cracks)、植物根部生長對於土壤的影響，岩體裂隙發展，非穩定指狀流以及孔隙流體堵塞 (pore water blockage) 等。此外，

如果孔隙介質樣本的體積較大，則多半採用掃描時間較短的醫療級 X 光斷層掃描系統。

4. X 光斷層掃描孔隙影像分析與模擬技術

雖然掃描的真實孔隙影像對於孔隙介質流體研究非常有幫助，但過於複雜孔隙結構與資訊卻反而造成分析工作的重大負擔。因此，許多研究將孔隙結構做了大幅度簡化，如使用毛細管束或者雙通道模型描述或者解釋複雜的流體行為。這些簡化的孔隙模型讓人們方便理解孔隙尺度與巨觀尺度關聯性。但這些簡化的模型往往與實際土壤、岩石中的孔隙結構相去甚遠。此外，部分孔隙介質流特性，在難以利用直接實驗獲得的情況下，則可以直接採用掃描孔隙影像，基於流體力學機制進行數值模擬（稱為直接數值模擬，direct numerical simulation, DNS）如圖 2。但也容易因為孔隙結構過於繁雜，造成龐大的數值模擬負擔。因此，孔隙網絡模式（pore network model，如圖 3）就成了介於簡化模型與真實結構之間另一種有效率的替代方案。此外，近年來，微流道與相關微米尺度物理實驗技術也被用於研究孔隙介質流，光斷層掃描孔隙影像就成了設計真實孔隙結構微流道模型的重要參考依據。如何獲取、生成孔隙結構也成為一個重要的研究主題。

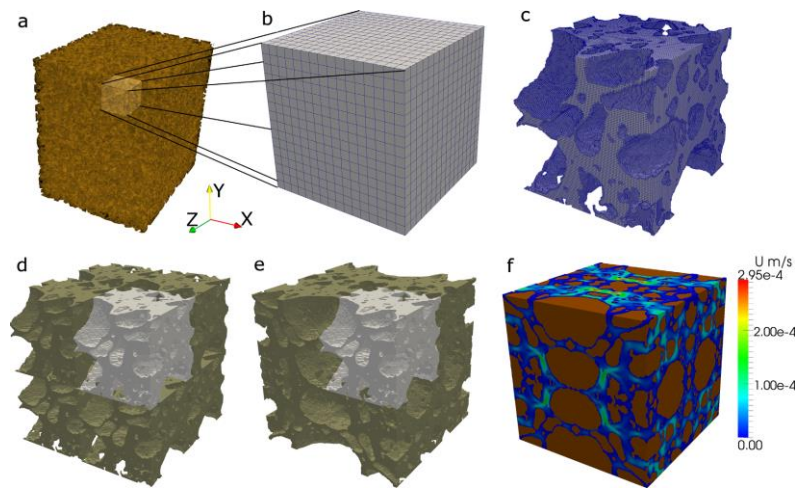


圖 2. 利用微觀孔隙結構，模擬介質特性 (Tracy et al., 2015)

5. X 光斷層掃描技術用於農業與水資源領域的近況

過去幾年，台灣 X 光微電腦斷層掃描設備多數用於進行醫學或者生物的實驗，或者是用於工業領域製程方面的檢測。在科技部支持下，國內數位地下水研究學者與波蘭農業物理研究所合作，採用該國農業物理研究所的微米級 X 光電腦斷層掃描設備，針對數個台灣岩石樣本進行三維電腦斷層掃描影像(伍韻安, 2018)。透過影像分析與網路結構生成技術，獲取該樣本的孔隙網路結構如圖 3。利用網路萃取演算法，找出代表的孔隙結構，並且以「節點-棍棒」組成網路如圖 4。一般將棍棒代表著孔頸，也就是一通道中最狹窄的位置；而節點放置於孔體。通常具有相對較大的通道尺寸會連結數個孔頸。透過演算法決定出孔隙通道代表位置，以及各個位置連通的通道數量，進而決定出孔體與孔頸。為了精進模式，「節點-棍棒」也賦予許多幾何參數如基本的長度、半徑，基於 X-ray 影像計算表面粗糙度、周長截面積比等等。並且用於推估排水過程毛細壓力與含水量關係曲線如圖 5，也就是決定土壤水分移動極為重要的土壤保水曲線。

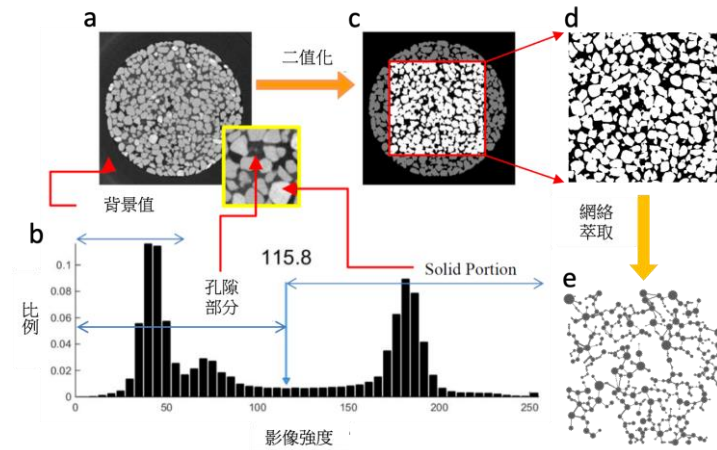


圖 3. 網絡萃取大致流程。(黃群展、許少瑜，2016)

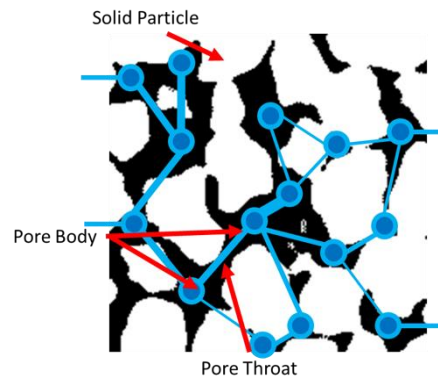


圖 4. 孔體 (pore body) 與孔頸 (pore throat) 以及「節點-棍棒」結構。

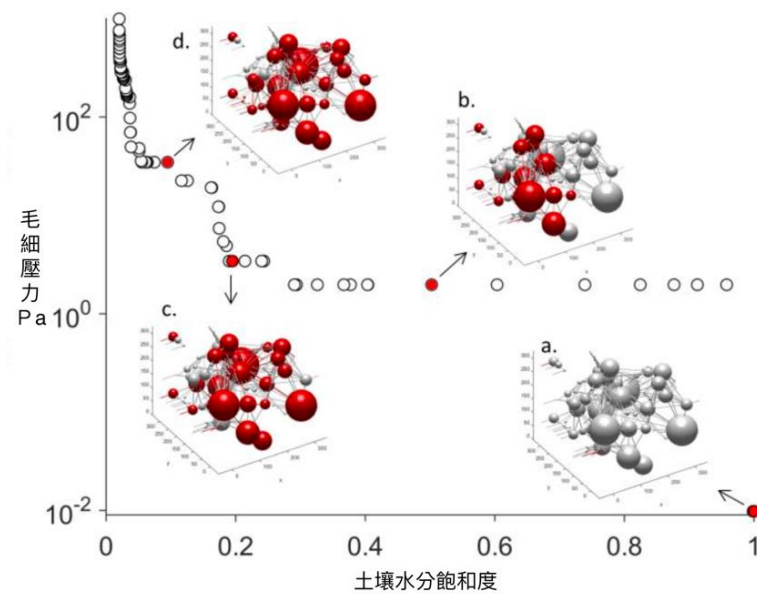


圖 5. 網絡模式模擬土壤排水過程。隨著空氣（紅球）逐漸增加，毛細壓力上升。(黃群展、許少瑜，2016)

臺灣學者簡士濠(2020)亦應用 CT 技術於南部一高風化耕地土壤中(強酸性、質地黏重且排水極度不良)，以生物炭作為改良資材添加至土壤中，以評估土壤中結構與孔隙的變化。圖 7(a)為對照組，即為未添加任何資材的土壤；圖 7(b)為添加 4%的生物炭至土壤中，並於一年後以鋁製方盒採集土塊，以 CT 技術掃描土體(1 cm³)呈現土體內部孔隙結構之 3D 影像，藉以評估資材對土壤構造之影響。影像結果證實，添加該改良資材確實促使土壤組構變化，孔隙率增加 3.9 倍，而孔頸(連接通道)增加 7.3 倍，0.3 mm 孔徑以上的孔隙，顯著高於對照組，顯示大孔隙的增加，同時將可能促進此土壤之結構與水分傳導度。(Jien, 2019)

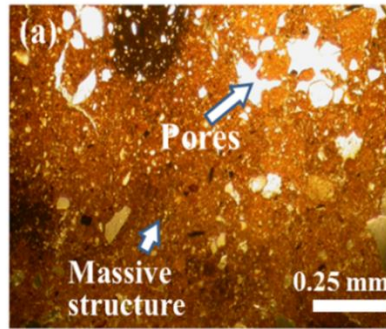


圖 6、土壤薄切片於偏光顯微鏡下的土壤組構與微形態。(Jien, 2019)

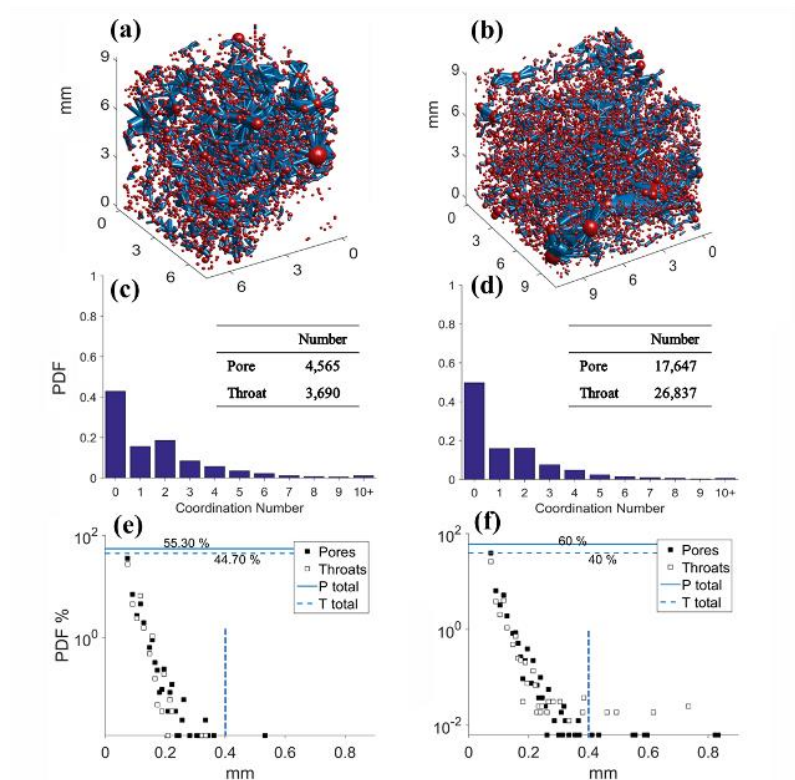


圖 7、高風化土壤中，添加改良資材前後之孔體（pore）與孔頸（pore throat）以及「節點-棍棒」結構變化。(Jien, 2019)

6. 台灣 X 光斷層掃描技術用於醫療民生領域應用

如大家所知，X 光斷層掃描 (Clinical Computed Tomography) 系統在醫療以及各領域的應用都非常受到重視。在 2017 年光是斷層掃描儀的市場就有 40 億美金。在臨床中斷層掃描技術 (Medical Computed Tomography) 常用來診斷疾病，

例如斷層掃描技術在骨科牙科的診斷與治療上佔有非常大的地位。在健康檢查中低劑量斷層掃描能用於發現早期肺癌。隨著顯影劑與影像技術的進步，對比增強電腦斷層掃描 (Contrast Enhanced Computed Tomography, CECT) 應運而生更提供了斷層掃描的應用領域，也能夠使用於心血管檢測與多種癌症檢測上。

而這項技術回到基礎研究近年來也廣受歡迎。高解析度的微米級斷層掃描技術 (micro-CT) 發展於 1980 年代，而在 2010 初期，解析度已經進步到 5-50 μm ，而現在隨著 X 光光管的進步，從高效率微米聚焦光管道、高效率奈米聚焦光管，奈米斷層掃描技術 (nano-CT) 在歐美也廣受歡迎，在台灣主要用在材料開發、醫材開發以及電子業精密檢測。

而在生物醫學上，這項技術也可以應用於動物的活體試驗以及包括臨床前的新藥開發與細胞治療、基因治療開發，生物醫學領域中常用到的顯微斷層掃描儀系統，如同臨床應用上，醫療團隊們會搭配顯影劑採取對比增強電腦斷層掃描技術 (CECT; contrast enhanced computed tomography) 進行造影，這樣能廣泛應用於癌症檢測 (肺癌、大腸直腸癌、骨轉移癌症為主)，骨科應用研究 (骨質疏鬆症、骨關節炎與風濕性關節炎) 與多樣牙科應用等等。同時醫學單位會搭配高解析度核磁共振儀 (micro-MRI) 以及正子造影 (microPET) 系統，這樣更能夠針對廣泛動物疾病模式檢測例如腦癌、胰臟癌以及腎臟疾病，而協助進行後續的新藥和醫材開發。另外在新穎醫材與牙科材料的開發上非常受歡迎，因為可以直接知道骨骼跟骨釘之類材料的共存狀態以及生長狀態 (圖 8)。例如因應近期新型冠狀病毒疫情，

許多針對難解的肺臟纖維化(俗稱菜瓜布肺)的新治療方法急需開發。台大醫療團隊透過整合工研院奈米斷層掃描實驗室，使用顯微斷層掃描(Bruker Skyscan 1176)與奈米斷層掃描儀(Bruker Skyscan 2211)系統，進行了新藥開發的動物試驗 (圖 9)，並發表在國際知名期刊 Nature Communications，希望未來能夠根治這類疾病。

高穿透高解析度顯微斷層掃描技術以及近年來土壤、岩石研究以及相關的化石研究，隨著能源開發的熱門需求在歐美受到廣大歡迎。如前面所提到，斷層掃描系統可以提供非破壞性的 3D 影像資訊，研究者可以接下來使用孔隙計算去進行其孔隙流通狀況的檢測，這在生物醫學檢體開發中常常用到，用來模擬細胞以及液體的流動現象 (圖 10)。這項技術在地質土壤的研究中也常被用到，尤其是能源業中的探油，研究員需要模擬可能的液態/氣態能源的流向來進行探勘與開採前的判斷。

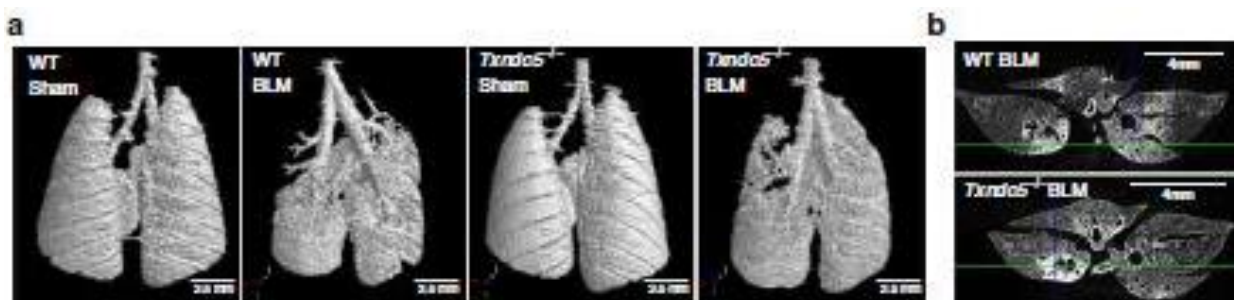


圖 8. 動物顯微斷層掃描可以觀察到動物內的肺空腔和治療狀況(a)，以及奈米斷層掃描也可以直接觀察到肺臟纖維化狀況和治療趨勢(b)。(Lee et al., 2020)

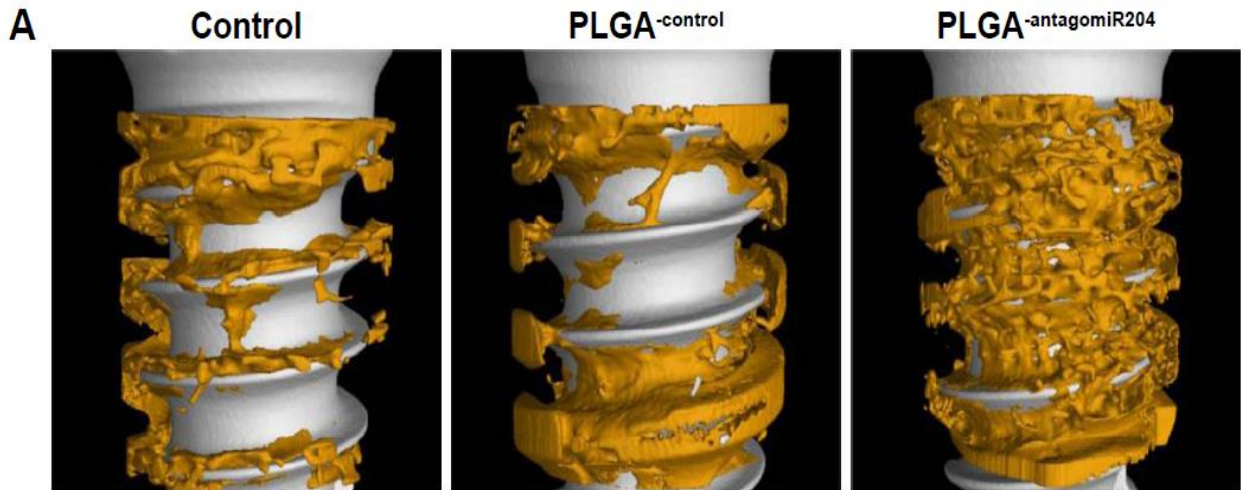


圖 9. 3D 影像示意新穎材料能夠吸引骨骼牢固的長在骨釘上，避免未來在患者體內鬆脫。(Liu et al., 2017)

Pore analysis and simulation of bio-scaffold

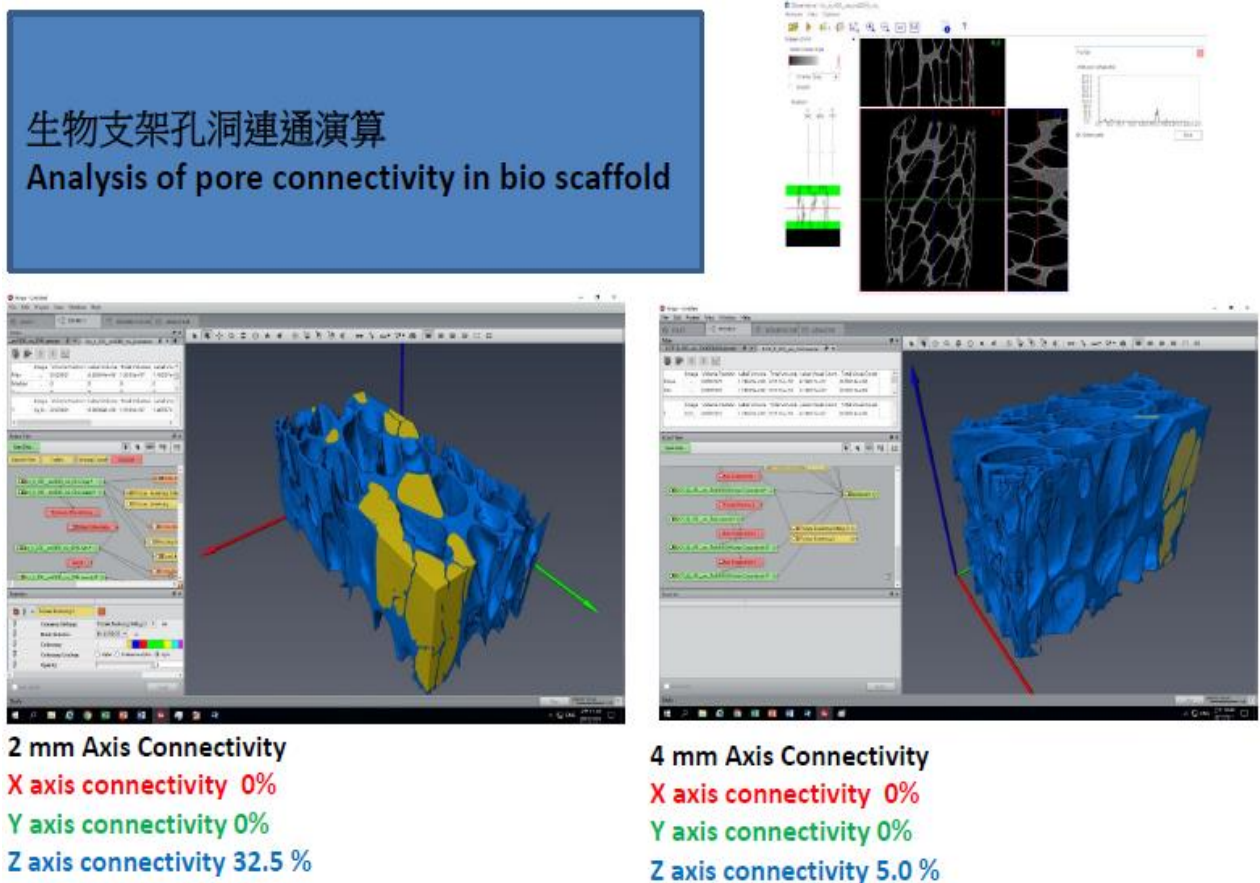


圖 10. 3D 孔隙連通演算示範，左下圖黃色區域代表能夠由上方順利連通到下方的孔隙。(林子閔等, 2018)

7. 結語

這些技術上的突破凸顯近年來此領域需求的快速發展，以及人們對於微小世界的巨大好奇心。科學家對於浩瀚宇宙與極小世界兩個極端的探索從未停止，而有趣的是宇宙起源的答案可能藏在極小的量子世界。

隨著微觀尺度觀測技術的快速發展，高解析度顯微斷層掃描技術在台灣醫療領域已有初步成果。在水土資源方面，我們越來越有能力看清那些藏在孔隙中的微觀世界，看見過去看不見的珍貴水資源，更理解土壤內的生態系統，進一步採取更有效率、對環境更友善的方式運用地表下的土水資源。說不定在不久的未來，人們會在這些微小的孔隙世界中，找到解決水、糧食、能源與氣候變遷等全球尺度複雜問題的方法。

參考文獻

- Cnudde, V., and Boone, M. N., 2013, High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications: Earth-Science Reviews, v. 123, p. 1-17.
- Jien, S.-H., 2019, Physical characteristics of biochars and their effects on soil physical properties, Biochar from Biomass and Waste, Elsevier, p. 21-35.
- Kravchenko, A., Guber, A., Razavi, B., Koestel, J., Quigley, M., Robertson, G., and Kuzyakov, Y., 2019, Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization: Nature communications, v. 10, no. 1, p. 1-10.
- Lee, T.-H., Yeh, C.-F., Lee, Y.-T., Shih, Y.-C., Chen, Y.-T., Hung, C.-T., You, M.-Y., Wu, P.-C., Shentu, T.-P., and Huang, R.-T., 2020, Fibroblast-enriched endoplasmic reticulum protein TXNDC5 promotes pulmonary fibrosis by

augmenting TGF β signaling through TGFBR1 stabilization: Nature communications, v. 11, no. 1, p. 1-20.

Liu, X., Tan, N., Zhou, Y., Wei, H., Ren, S., Yu, F., Chen, H., Jia, C., Yang, G., and Song, Y., 2017, Delivery of antagomiR204-conjugated gold nanoparticles from PLGA sheets and its implication in promoting osseointegration of titanium implant in type 2 diabetes mellitus: International Journal of Nanomedicine, v. 12, p. 7089.

Prodanovic, M., Esteva, M., Hanlon, M., Nanda, G., and Agarwal, P., 2015, Digital Rocks Portal: a repository for porous media images, Volume 2020.

Tracy, S. R., Daly, K. R., Sturrock, C. J., Crout, N. M., Mooney, S. J., and Roose, T., 2015, Three-dimensional quantification of soil hydraulic properties using X-ray Computed Tomography and image-based modeling: Water Resources Research, v. 51, no. 2, p. 1006-1022.

Wildenschild, D., and Sheppard, A. P., 2013, X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems: Advances in Water Resources, v. 51, p. 217-246.

王恩妲、卢倩倩、陈祥伟，2014，模拟冻融循环对黑土剖面大孔隙特征的影响：土壤学报，v. 51, no. 3, p. 490-496

伍韻安，2018，利用 CT 影像分析台灣西部濱海地區砂岩水力參數尺度效應（碩士論文）。國立中央大學，桃園市。

林子閔、王允欣、鄭信民，2018，X 光三維結構整合分析與設計應用—3D 積層醫材與多孔儲能電極開發，工業材料雜誌

黃群展、許少瑜，2016，孔隙網絡建置與數值模擬—以 Quartz Sand Pack 為例，第九屆地下水資源及水質保護研討會暨 2016 海峽兩岸地下水與水文地質應用研討會：台灣