



# 電腦斷層掃描於 井孔岩芯上之應用 — 以成大資源工程系教學井為例

郭慶利／國立成功大學資源工程學系 大學專題生

吳泓昱／國立成功大學資源工程學系 助理教授

陳靜玟／成大醫院影像醫學部 組長

岩芯 (core) 是指由鑽探取得的圓柱狀岩石樣本，提供同一區域在沈積環境時間序列上的地層的變化資訊，是了解地層性質最直觀的研究方法之一。岩芯最初應用於油、氣田的探勘開採，透過分析岩芯的組成、密度及孔隙率，便可知悉地層的構造、物化性質和所含流體情況，從而應用於地質調查、儲集層探勘等。國立成功大學資源工程學系在成功大學工學院的協助下，於系館周圍鑽取了三口研究井及一口研究教學井，以供研究及教學上的使用，在全程取岩芯的設計下，我們使用了研究教學井之深層岩芯分析臺南台地之地層環境，並使用了醫學上之電腦斷層掃描。

## 岩芯分析方法

在岩芯的分析上，密度及孔隙率是影響地層性質的重要參數，傳統上會採用 MAD 法 (Moisture and Density) 實際對沉積物進行採樣，藉由測量乾、濕重等數值計算出密度及孔隙率，但此種方法必須對岩芯進行樣本的採樣，且此破壞性的測量方法會損壞岩芯的完整性，產生的誤差也可能在 10% ~ 20%<sup>[1]</sup>。在某些特殊的狀況下，外在環境的改變會對岩芯內部結構造成影響，因此最重要的便是在岩芯回收後、內部性質未曾改變前盡快分析取得其物理性質的資料。例如內含天然氣水合物 (gas hydrate) 的岩芯，由於天然氣水合物會因環境溫度、壓力的改變而迅速氣化而散失，導致岩芯的密度及孔隙率會在數小時內快速改變，故分析的過程便刻不容緩。有鑑於此，近年來具備快速且非破壞性的 X 光電腦斷層掃描技術已逐漸成為地質材料分析的主要方法。

## XCT 簡介

X 光電腦斷層掃描 (X-ray Computed Tomography, XCT) 是一種非破壞性及非侵入性的成像技術，最初是作為醫療用途所研發，藉由量測多角度 X 光入射物體後的衰減程度，獲得二維的橫截面圖像，更可進一步重建三維的內部結構。而在地球科學的研究上，同樣可從連續 XCT 圖像中密度及原子的組成變化，還原出材料的內部結構。X 光的強度會隨著入射的路徑長及線性衰減係數 (linear attenuation coefficient, LAC) 而改變。線性衰減係數是指 X 光在穿越每單位厚度的材料時因吸收或散射所造成的光子數衰減比例，其數值受材料的化學組成及密度所影響，而被量化後的線性衰減係數即為亨氏單位 (Hounsfield unit, HU)，亦即 CT 值 (CT number)，定義如式 1：

$$CT\ number = \left( \frac{\mu_r - \mu_w}{\mu_w - \mu_a} \right) \times 1000 \quad (1)$$

$\mu_t$  為材料之線性衰減係數， $\mu_w$  及  $\mu_a$  則分別為水和空氣之線性衰減係數，由於空氣的線性衰減係數趨近於零，故式 1 可簡化為式 2：

$$CT\ number = \left( \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} \right) \times 1000 \quad (2)$$

因此，CT 值可看作是材料相對於水的衰減程度 ( $CT_{water} = 0$ )，當 CT 值為正時，代表 X 光在材料中的衰減程度比在水中要來的大；反之，CT 值為負代表其衰減程度較小，譬如空氣的 CT 值即為 -1000。

在對材料進行 XCT 掃描後，便會將各類 CT 值以黑白的灰階形式呈現。在一般情況下，CT 值會與材料密度呈正比，密度愈小者，其 CT 值愈小（負值），顏色會愈黑，而密度越愈大如堅硬岩顆粒則會呈現白色（CT 值 > 2000）（圖 1），如此便可對岩芯的密度及孔隙率做初步的估算。

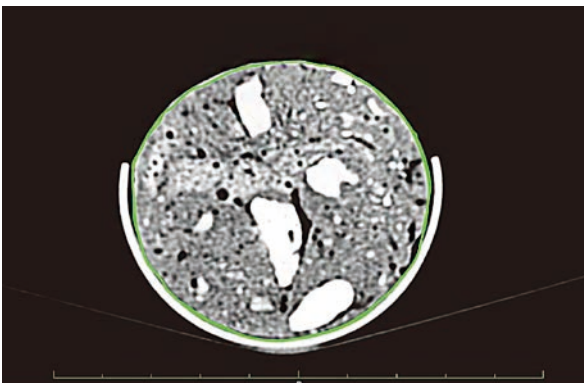


圖 1 岩芯 XCT 圖，其中白色塊狀物則為密度較大的岩石顆粒，黑色部分為孔隙（資源系 BH-1 研究井 0~1 m 岩芯橫截面）。

然而，由於圖像在處理上的複雜性，許多分析技術往往都帶有主觀及偏見，例如，不同的圖像分段方法（segmentation methods）和操作者的偏差都會導致截然不同的結果，尤其圖像分段是影響後續定量分析的重要關鍵 [2]。

### 利用 CT 值估算密度及孔隙率

此處將介紹另一種研究方法，相較於以往針對岩芯的 XCT 圖進行分析，這裡則是採用成像前的原始數據，也就是 CT 值來估算孔隙率及密度，可以更快速、更準確地了解沉積物的性質。以 GE Discovery CT750 system XCT 設備為例，其 X 光電流為 50 mA，電壓

為 120 kV，單次掃描 20 mm 厚的岩芯可得 32 張 XCT 圖的連續成像，故每張圖像所含的岩芯厚度為 0.625 mm，而圖像的生成數據是由 90 mm × 90 mm 截面積上的 X 光線性衰減值所組成，為 512 × 512 像素，也因為每個像素有 0.625 的厚度，因此可以用三維的體素（voxel, 0.176 mm × 0.176 mm × 0.625 mm）來表示（圖 2），每個體素都會因內含的固、液、氣體比例不同而有相異的 CT 值。

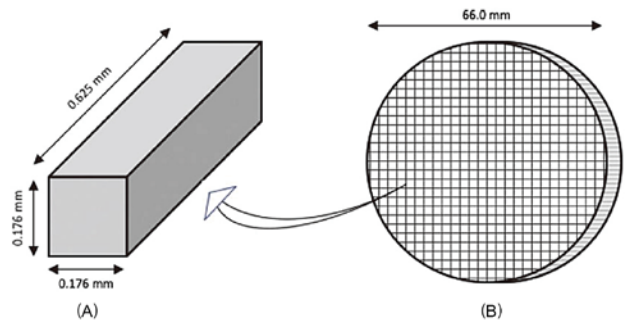


圖 2 由體素組成的岩芯示意圖 [1]

首先，需使用已知平均 CT 值和密度的不同材料進行 XCT 校正，以獲得兩者間的校正曲線，關係式如式 3：

$$Density = \left( \frac{CT\ number}{1250} \right) + 0.9237 \quad (3)$$

值得注意的是，此處不論使用何種材料進行校正，其迴歸方程式的斜率都應為 1/1250，因為 X 射線對靶材的密度影響為常數，不受其他特性影響。如 Ashi [3] 使用六種不同密度（1.6 ~ 2.0 g/cc）的膨潤土（bentonite），（圖 3）Gupta *et al.* [1] 則使用空氣、水、鉛塊製成的岩芯模型及壓克力、木片、岩石等，兩者校正後所得的斜率均為 1/1250，決定係數也都趨近於 1，呈高度相關，再次證明了 CT 值與材料密度呈正比，而截距的值則會因校正材料的密度範圍不同產生小範圍的變動。

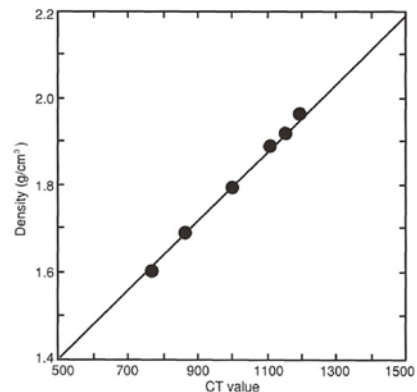


圖 3 Ashi [3] 所得之 XCT 校正曲線

有了式 3，便可在已知平均  $CT$  值的情況下快速估算材料密度。由於所有平均  $CT$  值都是由 XCT 圖中的 ROI 處分析獲得，若 ROI 的圈選區域為異質化學組成，則所得密度即為容積密度 (bulk density)；相反地，若 ROI 內為均值組成，則其密度應為顆粒密度 (grain density) [1]。

### 孔隙率計算

孔隙率的定義為總流體體積除以總沉積物體積，直觀的計算方法如下。前文提及，XCT 圖中的單個體素的體積為  $0.176 \times 0.176 \times 0.625 = 0.019 \text{ mm}^3$ ，而岩芯的最小體積就相當於是體素的集合體，在 0.625 mm 厚的 XCT 圖中體素總數約為 111000 個，如此便可估算總沉積物體積。另一方面，總流體體積的計算卻面臨較大的問題，體素是由不定比例的空氣、水及沉積物所組成，故需分別測得每個體素中的流體體積才可獲得總流體體積，但由於體素在空間解析度 (spatial resolution) 上的限制，XCT 無法辨識小於 0.176 mm 的結構，因此只得另外尋求方程式解出體素中的固、液、氣體比例關係。然而此法甚為繁複，故需改由已知的  $CT$  值著手求解。

如前所述，每個體素的  $CT$  值會依其內含物比例不同而產生大幅度的變化，經醫學斷層掃描建模軟體 OsiriX 分析得出  $CT$  值後，便可由 EXCEL 的 Pivot Table 統計具有相似  $CT$  值的體素在 XCT 圖中出現的頻率，只要相同  $CT$  值出現的次數越多，其對孔隙率所占的權重影響就越大。接著，在假設岩芯為均值組成的前提下，直接假設或以 MAD 法測得其顆粒密度，並代入校正公式計算只含固體之體素的  $CT$  值 ( $CT_G$ ) (式 4)， $CT_G$  也就是眾體素中最大的  $CT$  值，可以由此來對各體素的  $CT$  值進行權重分配。

$$CT_G = (\text{Grain Density} - 0.9237) \times 1250 \quad (4)$$

在已知  $CT_G$ 、 $CT_{air} = -1000$ 、 $CT_{water} = 0$  的狀況下，我們便可藉  $CT$  值概括地將體素分為三類，流體體素、半流體體素及固體體素。當  $CT$  值為負時，代表體素中充斥著氣體及液體，因此屬流體體素；當  $CT$  值為正但不趨近於  $CT_G$  時，說明體素中同時包含液體及固體，屬於半流體體素；而當  $CT$  值大於或趨近於  $CT_G$  時，則代表體素內幾乎都由固體所組成，為固體體素。

在權重分配方面，因為全由固體組成的固體體素不會對孔隙率造成任何影響，因此只有流體體素及半流體體素會根據其出現次數對孔隙率的影響進行加權，對這些體素而言，「 $CT$  值大於並趨近於零時的權重」會大於「 $CT$  值近似  $CT_G$  時的權重」。計算如式 5：

$$V_w = \left( \frac{CT_G - CT_M}{CT_G} \right) + V_x \quad (5)$$

$CT_M$  是某體素的  $CT$  值， $V_x$  為該體素的出現頻率， $V_w$  則是該體素所占之權重。然後，將所有體素權重的和 ( $\sum V_w$ ) 加上流體體素權重的和 ( $\sum V_{CT_M < 0}$ )，除以總體素數量 ( $\sum V_{all}$ ) 後，即可得到 XCT 圖之基礎孔隙率 (based porosity) (式 6)：

$$\text{Porosity} = \left( \frac{\sum V_w + \sum V_{CT_M < 0}}{\sum V_{all}} \right) \quad (6)$$

### 成功大學資源工程學系教學井

國立成功大學資源工程學系於系館四周設置了三口研究井、一口研究教學井，共計四口教學井，其中研究井深二十公尺，實驗教學井深一百公尺 (圖 4)。

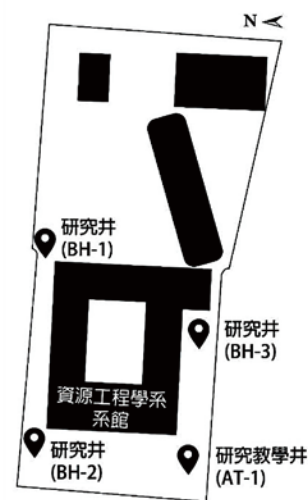


圖 4 成功大學資源工程學系教學井位置分布

教學井除了能進行各式地球物理的相關研究探測，亦成為了課堂上的實習場域，增進學生在研究上的實務經驗。從井中鑽取的岩芯同樣是了解地層的重要材料，如沉積環境分析、地層含水量、滲透率分析等。所有岩芯皆是以一公尺為單位、四公尺為一箱進行存放，如圖 5。並於鑽探完後，就近送往成大醫學院影像醫學部，進行岩芯的斷層掃描量測。

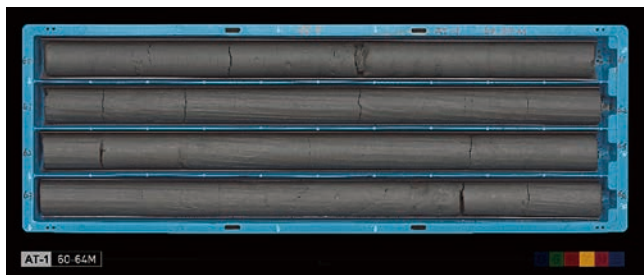


圖 5 資源系 AH-1 研究教學井 60~64 m 岩芯

## 台南地區地質概述

臺南台地主要是由西部麓山帶西側全新世之台南層所構成，可再分為四段。最下段是青灰色泥或粉砂及黃灰色砂質、細粒砂等之互層組成，含豐富有孔蟲及貝類化石；第二段為黃灰至黃褐色之細粒砂及粉砂質組成，含豐富貝類及有孔蟲化石，局部有交錯層理；第三段以交錯層又發達之黃褐色薄層狀砂構成，有少量有孔蟲化石，基底部有時含持續之化石床；第四段則為暗灰色乃至淡黃色之粉砂構成，呈塊狀而無層理，局部夾有灰色硬質粉砂之凸透鏡體<sup>[4]</sup>。

## 教學井岩芯分析

教學井的岩芯同樣可藉由 XCT 進行性質分析。我們將三口研究井的岩芯樣本送交大醫院進行 X 光電腦斷層掃描，使用標準電壓電流 120 kV、40 mA，獲得以一毫米為單位的 XCT 連續圖像，接著使用 OsiriX 圈選 ROI (圖 6)，便可重建出三維的岩芯立體圖像 (圖 7)。

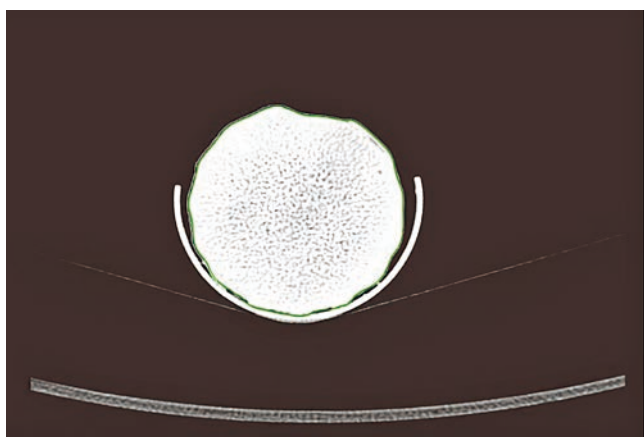


圖 6 圈選出岩芯於橫截面的範圍，亦即 ROI (資源系 BH-1 研究井 10~11 m 岩芯)



圖 7 將連續的 XCT 圖重建為三維岩芯模型 (資源系 BH-1 研究井 10~11 m 岩芯)

## 結論

XCT 除了醫療相關的用途，同時也是地球物理探測上非常實用的材料分析方法，譬如岩芯分析，XCT 可以在不破壞樣本的前提下，於短時間內獲得與傳統分析方法相一致的結果。其中，由體素 CT 值著手的基本性質估算更是兼具快速及高準確性。從岩芯回收後進行 XCT 掃描、以醫學斷層掃描建模軟體圈選 ROI 並進行 CT 值分析、最後套入公式獲得密度及孔隙率，整個流程可在一小時內完成，避免了岩芯性質改變所造成的誤差，大幅地確保數據的準確性。在工程探測上，應可快速的判斷該深度的岩芯狀況，孔隙率與含水量的狀況，作為地盤改良的準確依據。

## 參考資料

- Lallan P. Gupta, Wataru Tanikawa, Yohei Hamada, et al. (2019). Examination of gas hydrate-bearing deep ocean sediments by X-ray Computed Tomography and verification of physical property measurements of sediments. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 108, Pages 239-248 <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.05.033>
- Iassonov, P., Gebrenegus, T., and Tuller, M., (2009). Segmentation of X-ray computed tomography images of porous materials: a crucial step for characterization and quantitative analysis of pore structures. *Water Resour. Res.* 45, W09415. <https://doi.org/10.1029/2009WR008087>.
- Ashi, J. (1995). CT scan analysis of sediments from Leg 146. In: Carson, B., Westbrook, G.K., Musgrave, R.J., and Suess, E. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Vol. 146 (Pt. 1), 191-199.
- 台南市政府 (2008 年 3 月)，變更台南縣將軍漁港 (中心漁港) 開發計畫—基地環境資料分析。