

# 可攜式土壤總體密度量測系統 之研究與發展

**Research and development of portable soil bulk density  
measuring system**

國立中興大學生物產業機電工程學系

指導教授：蔡耀全 博士

研究生：林秉科



# 目錄

- 研究動機和目的
- 文獻回顧
- 材料與方法-理論公式
- 材料與方法-可攜式總體密度量測系統
- 土壤總體密度感測器性能評估
- 實驗室量測
- 場域量測
- 結論



# 研究動機和目的

## □ 研究動機

- 智慧農業的興起：




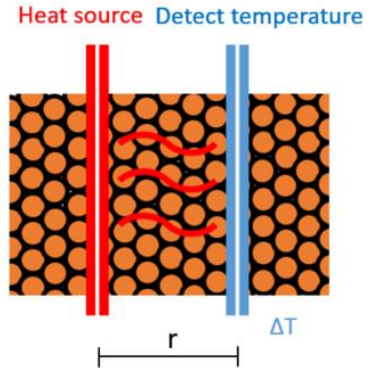
溫溼度感測器	量測大氣的溫度和濕度
光量子感測器	量測太陽光
土壤水分張力計	量測土壤的含水率
酸鹼值感測器	量測土壤的酸鹼值

- 土壤總體密度的重要性：影響土壤的透水性和可壓縮性
- 量測土壤總體密度的方式

直接量測	環刀法、開挖法
間接量測	射線衰減技術、熱脈衝技術

## □ 目的

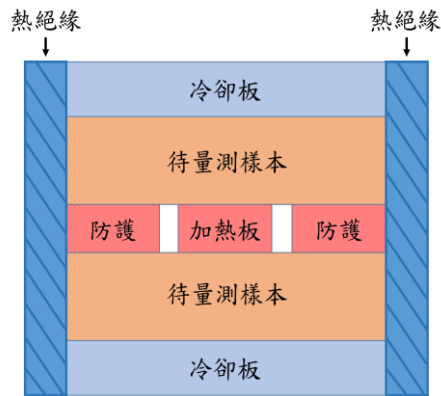
- 製作在場域可即時量測的土壤總體密度量測系統
- 未來應用：進一步探討土壤密度與作物關係

環刀法	開挖法
	
射線衰減技術	熱脈衝技術
	

# 文獻回顧-量測土壤熱性質

## Steady state heat flow method

1983



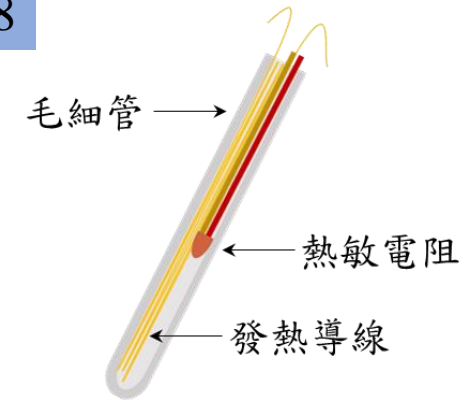
使用熱盤法量測粉末的導熱係數，但之後有學者發現在不飽和的土壤中進行量測，長時間的加熱會導致水分在土壤中重新分布造成量測誤差

### □ 土壤熱性質介紹

- 土壤體積熱容量( $\text{MJ m}^{-3} \text{C}^{-1}$ ): 描述每單位體積土壤所儲存的熱量
- 土壤導熱係數( $\text{W m}^{-1} \text{C}^{-1}$ ): 描述土壤傳輸熱量的能力
- 土壤熱擴散係數( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ): 描述溫度不均勻的土壤中溫度均勻化的速度

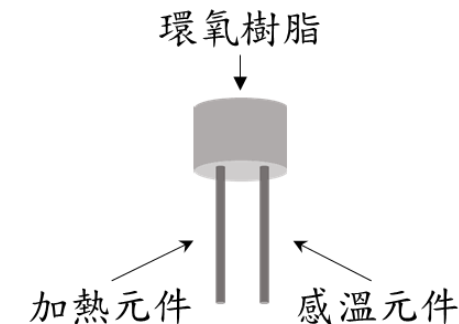
## Transient method

1958



開發出單探針形式量測土壤熱性質的感測器雛形，可以有效量測土壤導熱係數，但是無法準確量測土壤體積熱容量和土壤熱擴散係數

1990



開發出使用雙探針形式量測土壤熱性質的感測器雛形，可以量測土壤導熱係數、體積熱容量和熱擴散係數

# 文獻回顧-熱脈衝感測器

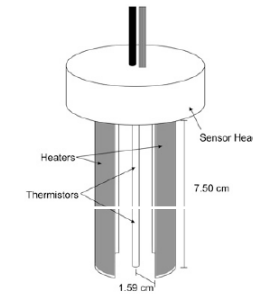
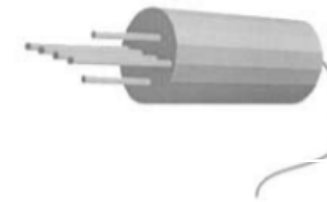
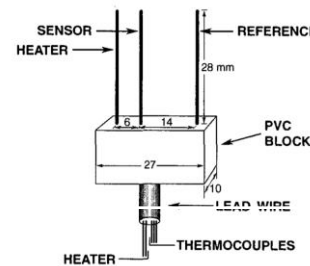
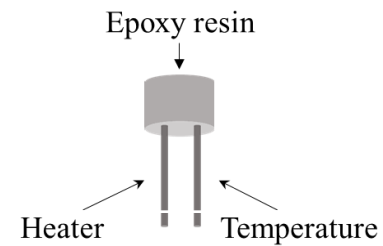
Sensor

1991

1993

2003

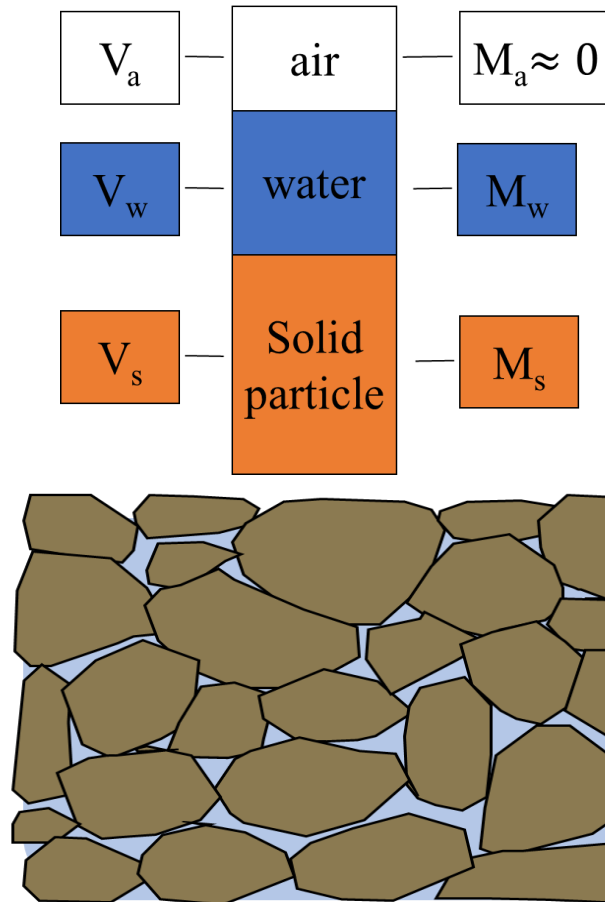
2007



探針數量	2	3	6	1
探針直徑(mm)	0.813	0.813	1.27	2.79
探針長度(mm)	28	28	26	75
加熱導線電阻( $\Omega$ )	38	31.9	21.3	8.1
加熱時間(s)	1-8	8	8	8
間距(mm)	6	6,20	6	15.9

# 材料與方法-理論公式

## □ 土壤組成成分



## □ 土壤常見成份和體積熱容量

土壤成分	密度 $\text{Mg m}^{-3}$	比熱 $\text{MJ Mg}^{-1} \text{K}^{-1}$	導熱係數 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	體積熱容量 $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$
石英	2.66	0.8	8.80	2.13
黏土礦物	2.65	0.9	2.92	2.39
有機物	1.30	1.92	0.25	2.50
水	1.00	4.18	0.57	4.18
空氣(20°C)	0.0012	1.01	0.025	0.0012

$$C = (\rho c)_s \phi_s + (\rho c)_w \theta \quad \Rightarrow \quad \rho_b = \frac{C - C_w \theta}{c_s}$$

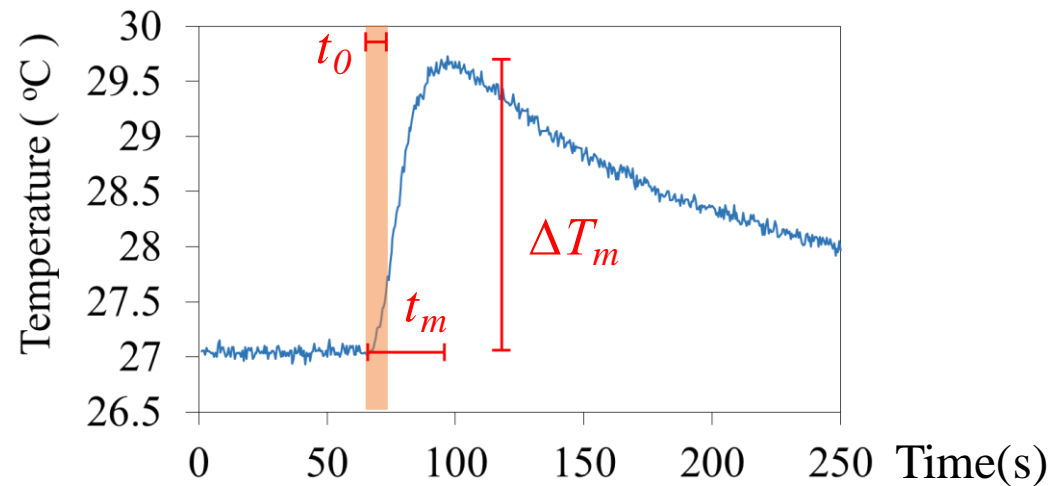
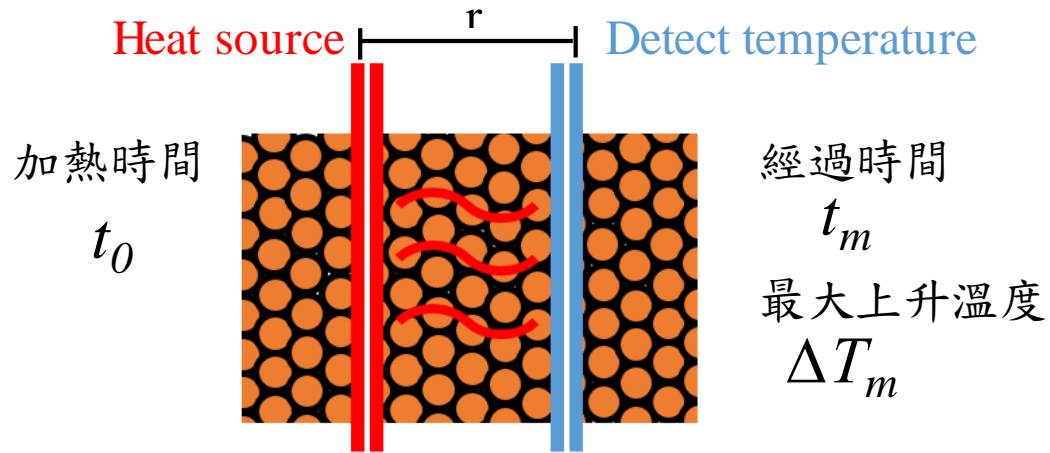
$C$ : 土壤體積熱容量  
 $(\rho c)_s$ : 土壤固體比熱  
 $\phi_s$ : 土壤固體體積百分比  
 $(\rho c)_w$ : 水分比熱  
 $\theta$ : 水分體積百分比  
 $\rho_b$ : 土壤總體密度  
 $c_s$ : 土壤固體比熱

$\rho_b$  總體密度  $\text{Mg m}^{-3}$   
 $C$  土壤熱容量  $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$   
 $C_w$  水分熱容量  $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$   
 $\theta$  含水率 %  
 $c_s$  土壤固體比熱  $\text{MJ Mg}^{-1} \text{K}^{-1}$

✓ 在得知土壤顆粒的比熱和體積含水率的前提下，透過量測土壤體積熱容量可以間接估算土壤總體密度

# 材料與方法-理論公式

## □ 熱脈衝原理



## □ 計算體積熱容量(C)和熱擴散係數( $\kappa$ )

$$C = \frac{\alpha q'}{4\pi\kappa\Delta T_m} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t_m}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t_m - t_0)}\right) \right]$$

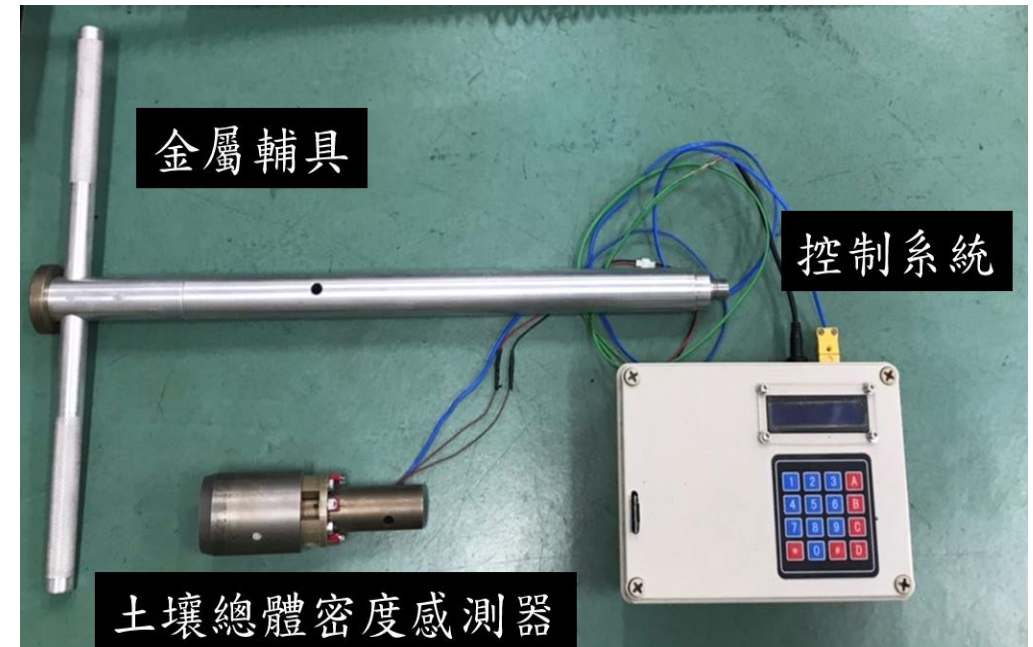
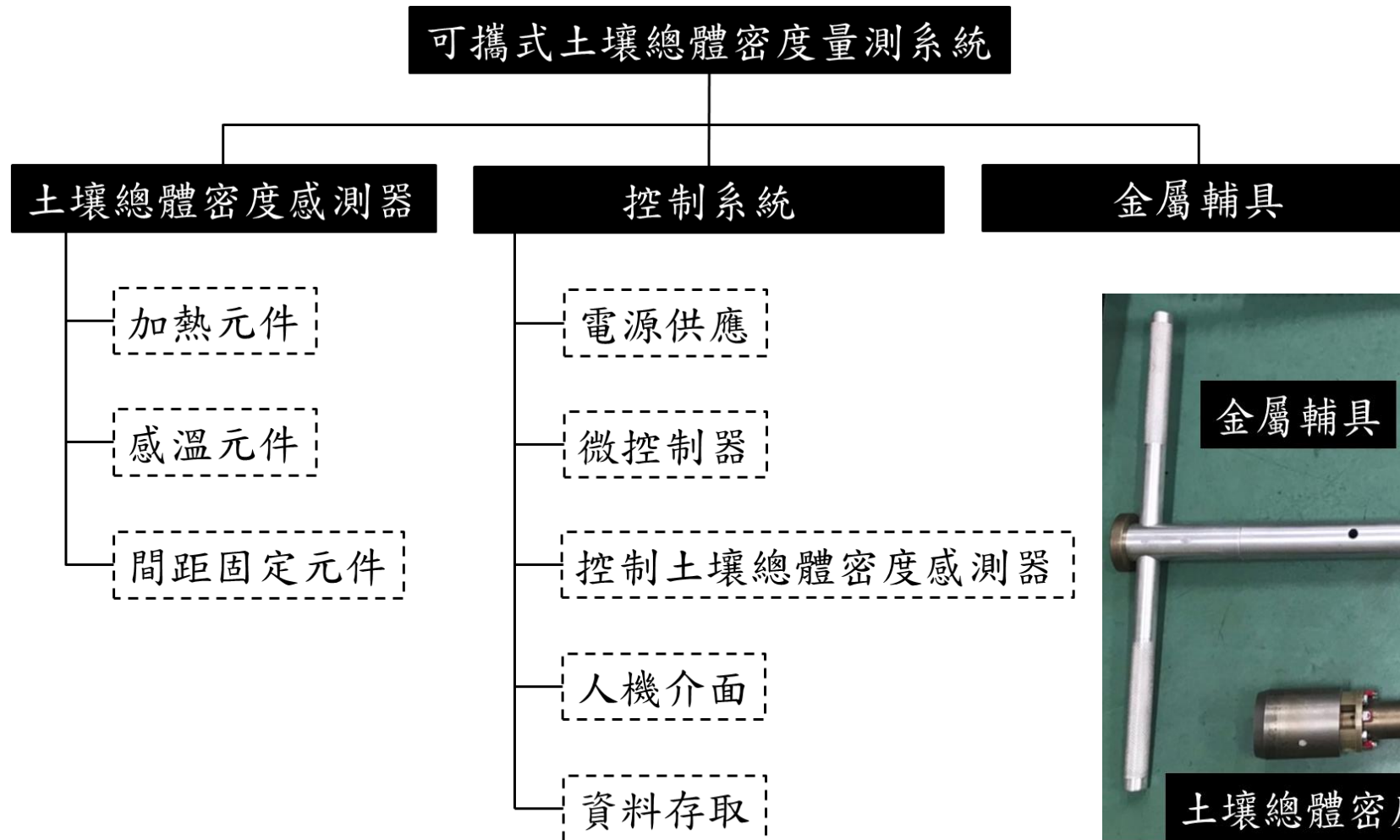
$$\kappa = \frac{r^2}{4} \left[ \frac{1}{(t_m - t_0)} - \frac{1}{t_m} \right] / \ln\left[\frac{t_m}{t_m - t_0}\right]$$

$\alpha$ 熱損耗係數	量測
$q'$ 功率 ( $\text{W m}^{-1}$ )	給定
$r$ 探針間距 (m)	給定
$\Delta T_m$ 溫度變化 (K)	量測
$t_m$ 最高溫度發生的時間點(s)	量測
$t_0$ 加熱的時間 (s)	給定

✓ 使用感測器收集最大上升溫度和經過時間可以計算以上所需的參數



# 材料與方法-可攜式總體密度量測系統

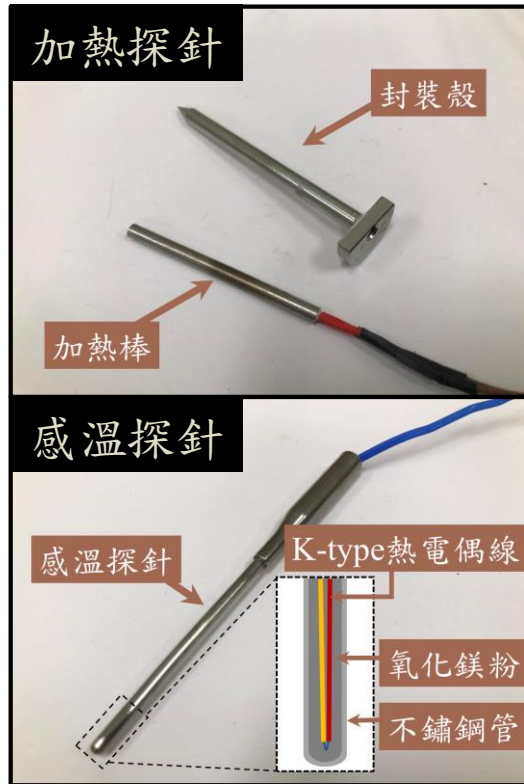




# 材料與方法-可攜式總體密度量測系統

□ 土壤總體密度感測器：透過量測土壤熱性質間接量測土壤總體密度

□ 加熱探針和感溫探針



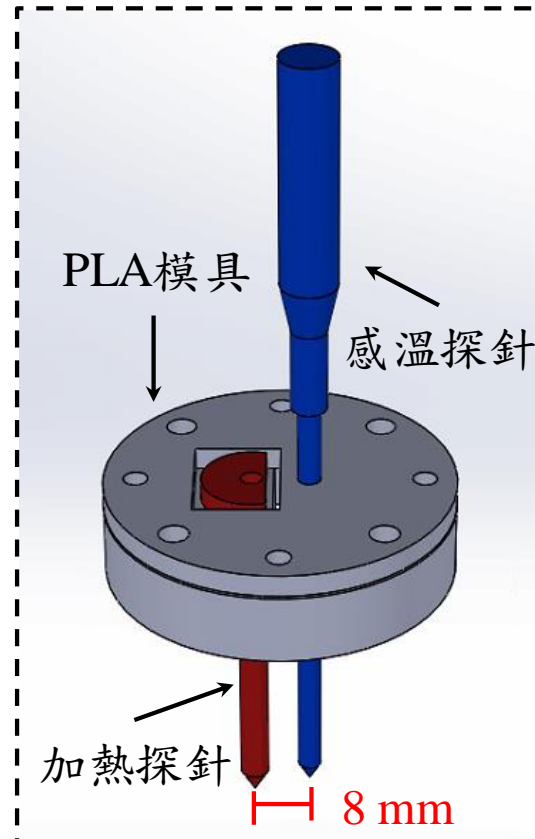
- ✓ 加熱探針釋放熱脈衝
- ✓ 感溫探針量測溫度

	加熱棒
長度 (mm)	40
外徑 (mm)	3
電阻 (Ω)	18.36

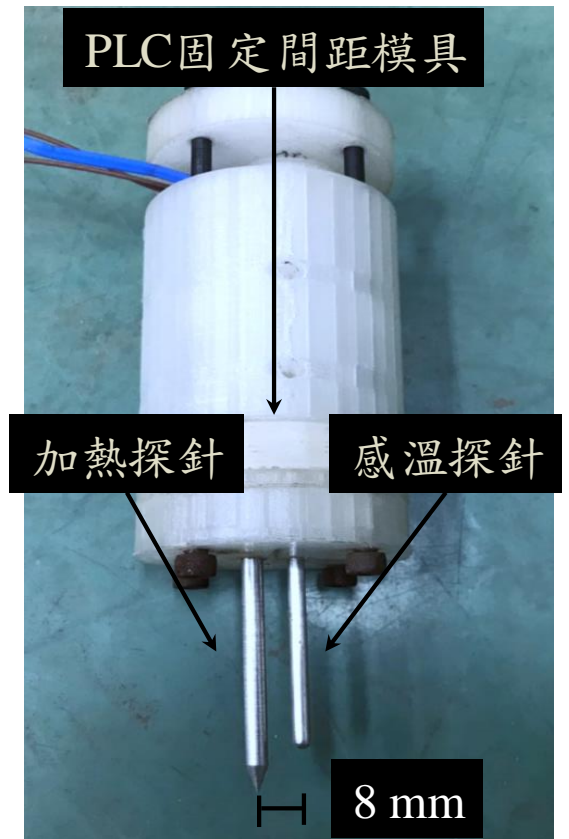
	封裝殼
長度 (mm)	50
外徑 (mm)	4.0
內徑 (mm)	3.0

	感溫探針
長度 (mm)	60
外徑 (mm)	3.2

□ 間距固定示意圖

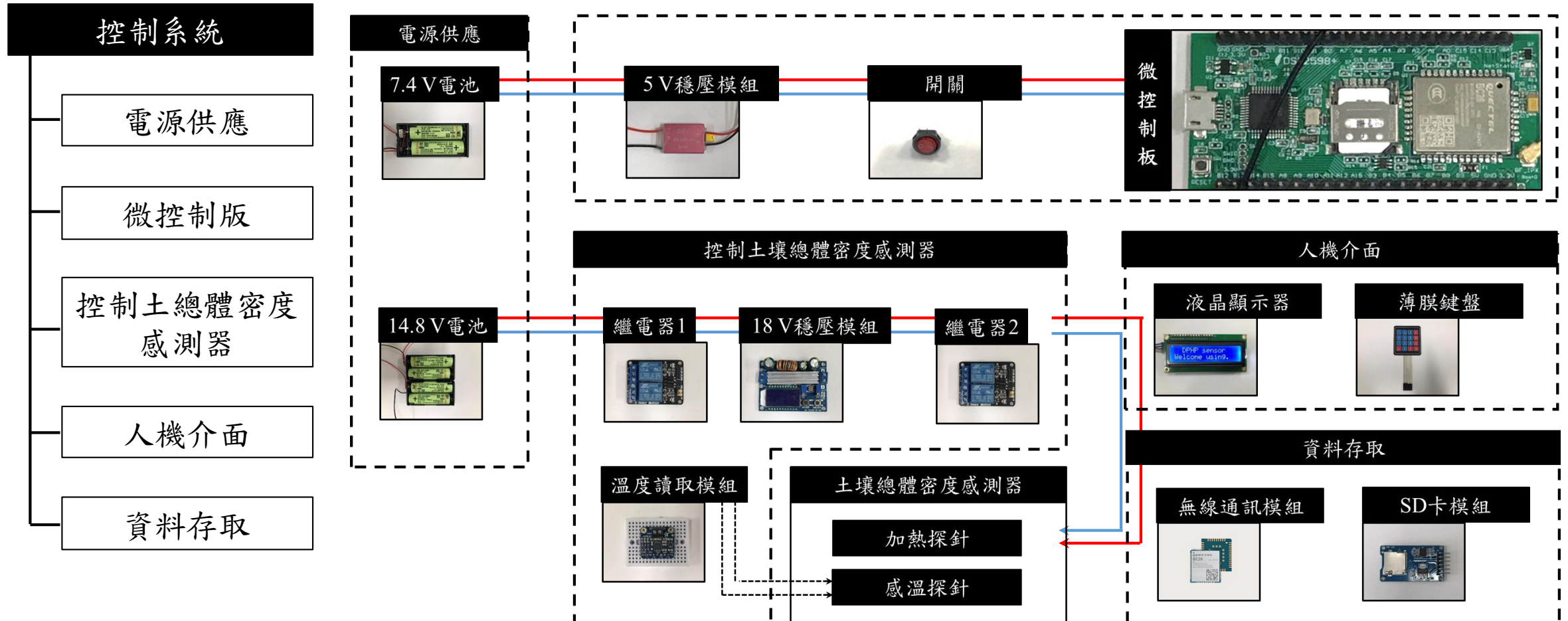


□ 土壤總體密度感測器

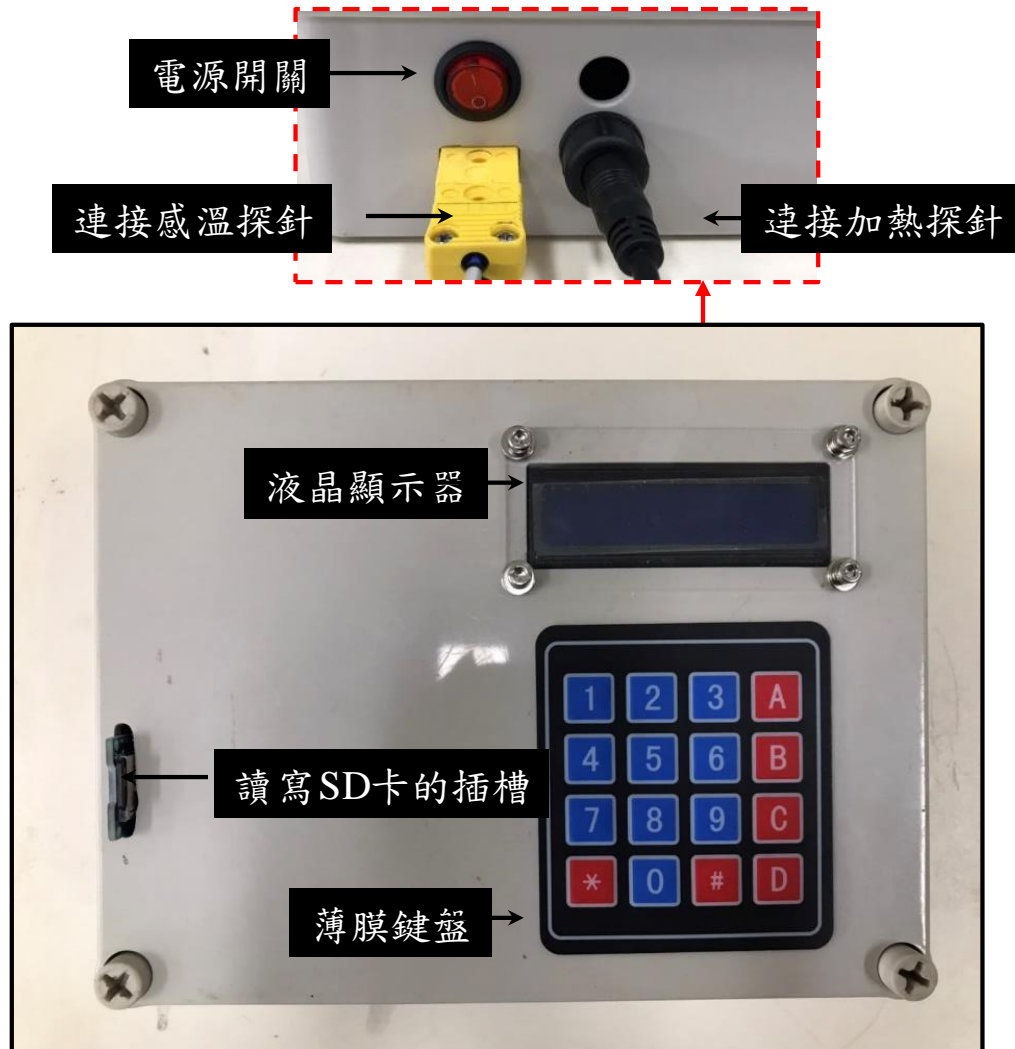


# 材料與方法-可攜式總體密度量測系統

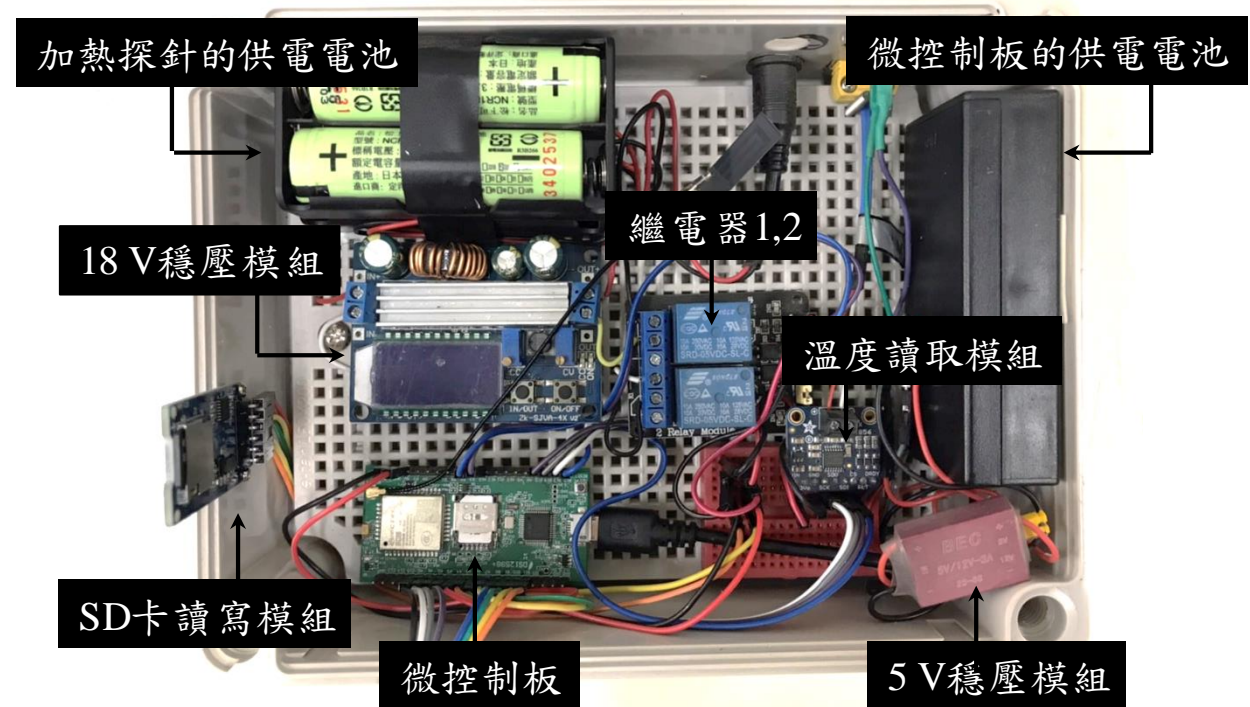
□ 控制系統使用微控制板作為核心進行整合，整合的元件可分類成五部分



# 材料與方法-可攜式總體密度量測系統



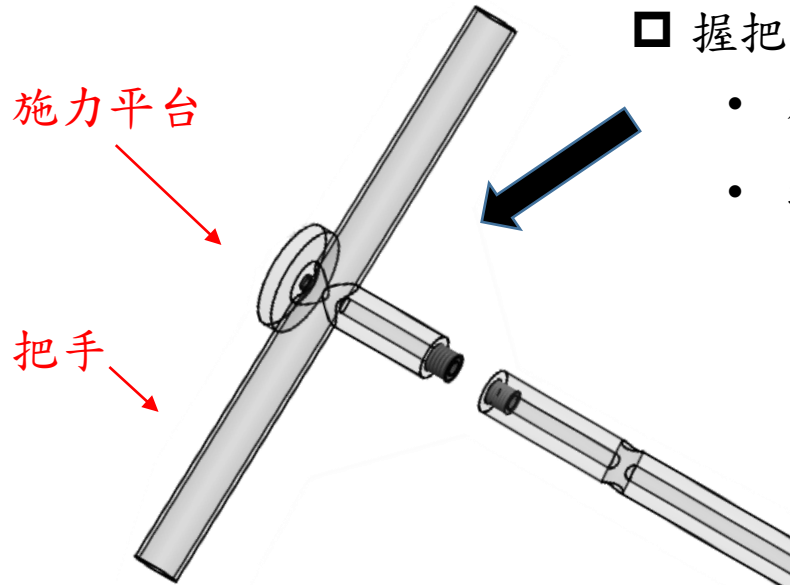
- ✓ 控制系統放置於長 20 cm / 寬 15 cm / 高 8 cm 的封裝殼中以方便攜帶進行場域實驗
- ✓ 控制系統的部分元件位於封裝殼外部以供使用者操作，其他元件則位於封裝殼內部以達到防水防塵的目的





# 材料與方法-可攜式總體密度感測系統

## □ 量測用金屬輔具



- 施力平台：將感測器敲打入土壤
- 把手：將感測器拉出土面

## □ 長桿

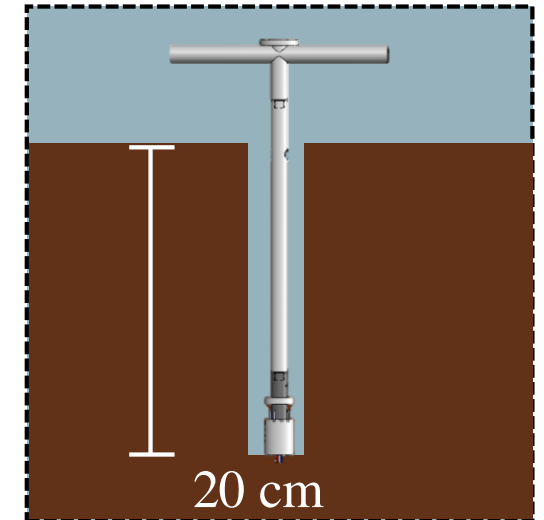
- 方便感測器量測不同深度的土壤

## □ 感測器

- 內部包含加熱探針和感溫探針
- 探針使用PLA材質固定間距
- 外部使用金屬薄環加固感測器本體，並和輔具連接

量測深度大致分為0-10 cm的表層土壤和深度10 cm以下土壤，為了因應不同的量測深度，各部件使用螺旋機構進行連接，以方便長桿進行拆卸

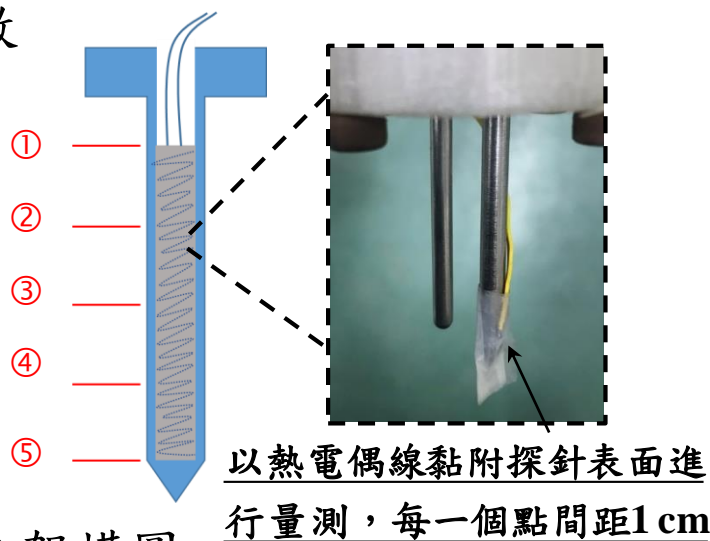
## 量測深度20 cm土層



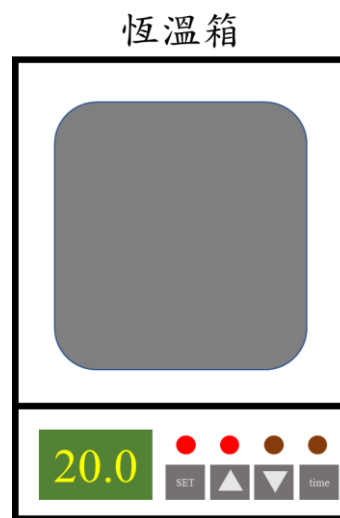
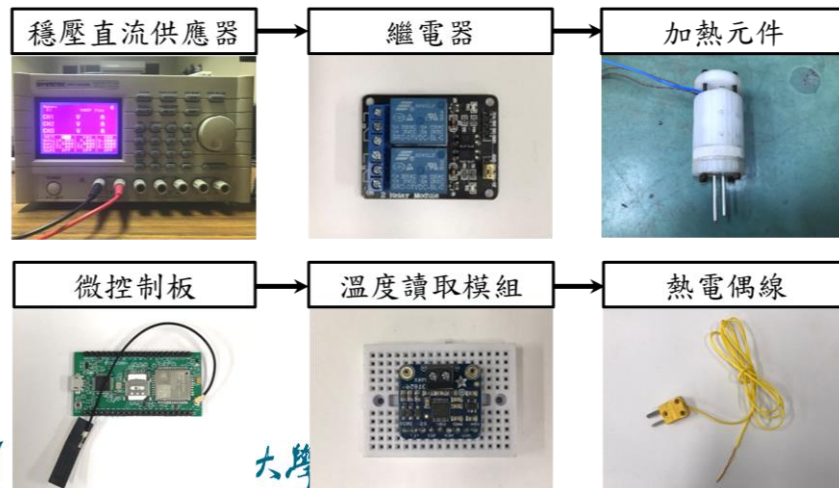
# 土壤總體密度感測器性能評估

## □ 評估加熱能力的設定參數

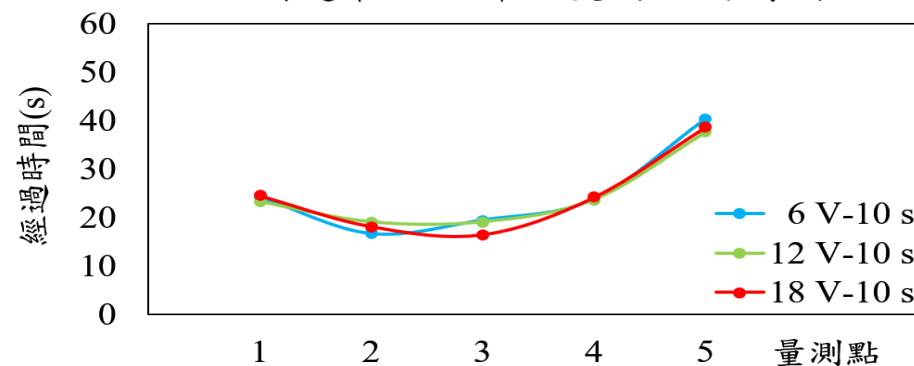
施加電壓 (V)	加熱時間 (s)
6	10
12	10
18	10



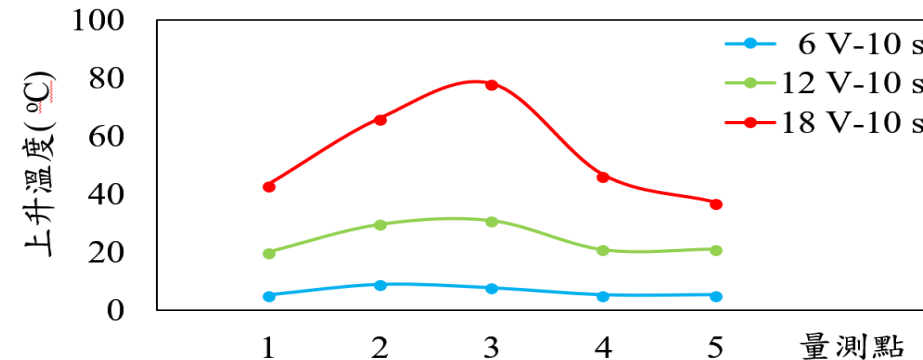
## □ 評估加熱探針性能的實驗架構圖



到達最大上升溫度的經過時間



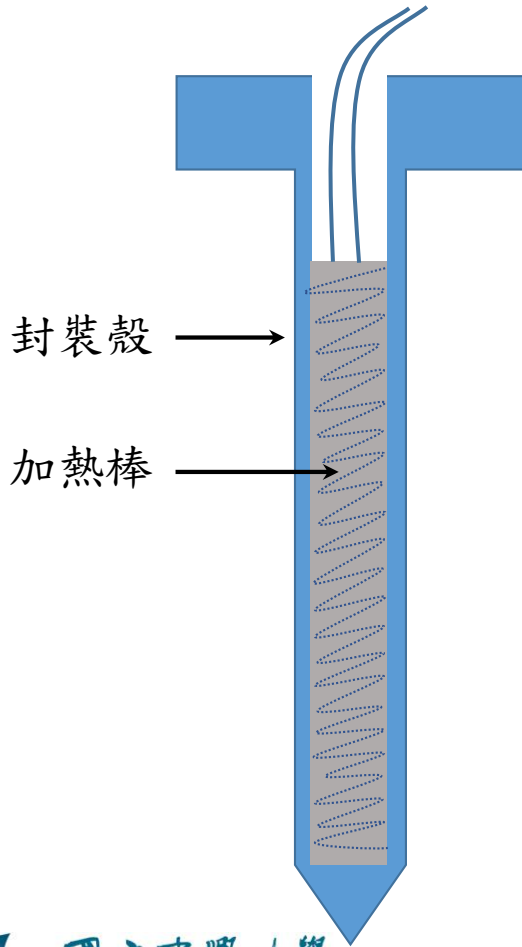
最大上升溫度



- ✓ 在探針有限長度下，探針中間會較快到達最高溫度，並且上升溫度也會較大
- ✓ 使用 18 V-10 s 作為釋放熱脈衝的參數設定

# 土壤總體密度感測器性能評估

## □ 加熱探針量測損耗係數

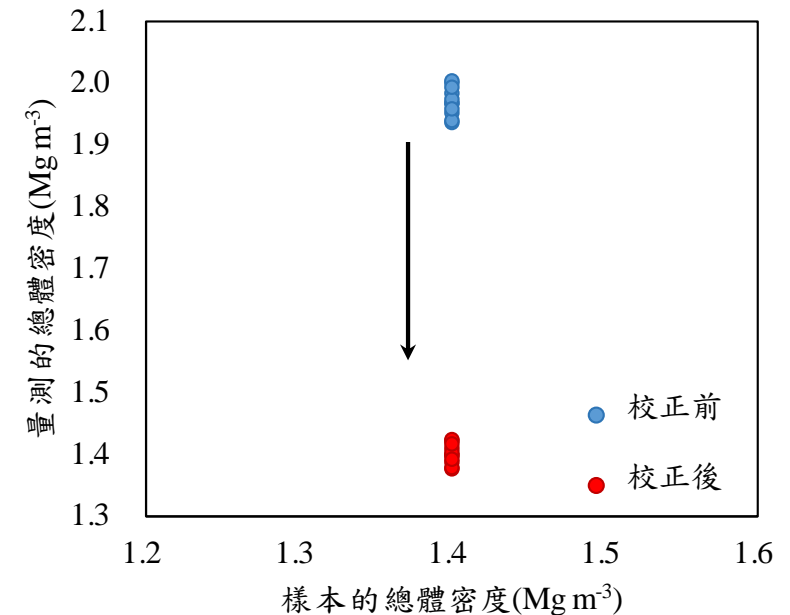


損耗係數為0.71

$$C = \frac{\alpha q'}{4\pi\kappa\Delta T_m} \left[ E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa t_m}\right) - E_1\left(\frac{r^2}{4\kappa(t_m - t_0)}\right) \right]$$

### • 量測相關參數

樣本的總體密度 $\rho_b$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1.4
樣本的含水率 $\theta_v$ (%)	0
樣本比熱 $c_m$ (MJ Mg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	0.68
探針的間距 $r$ (mm)	8
加熱探針單位長度釋放熱量 $q'$ (J m <sup>-1</sup> )	440
加熱時間 $t$ (s)	10





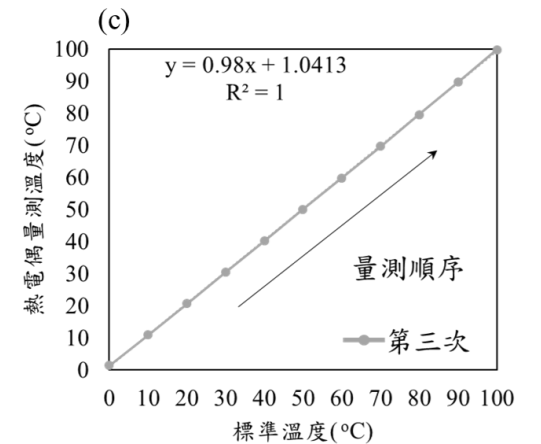
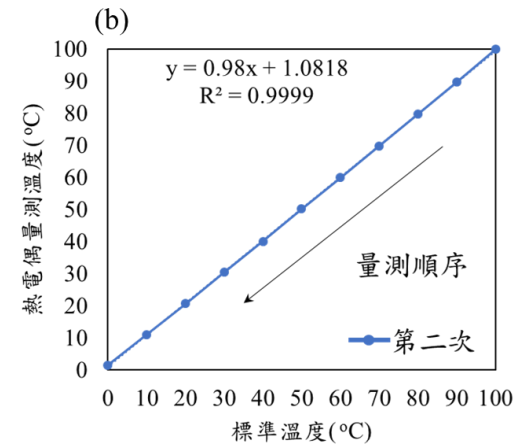
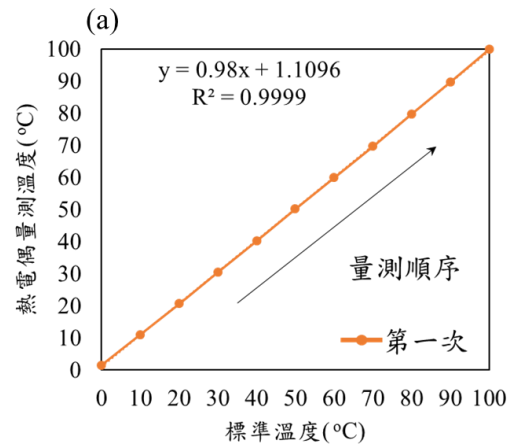
# 土壤總體密度感測器性能評估

## 感溫探針校正



標準溫度校正儀器 TC-2000

標準溫度	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
量測	11.03	20.67	30.43	40.14	50.16	59.92	69.78	79.68	89.68	99.85
標準溫度	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
量測	89.66	79.63	69.72	59.89	50.14	40.24	30.44	20.67	11.03	1.53
標準溫度	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
量測	10.99	20.66	30.40	40.21	50.05	59.86	69.69	79.60	89.64	99.80



# 實驗室土壤製備

□ 目的：為了在實驗室的環境使用土壤總體密度感測器進行量測，需要製備標準土壤樣本

## 製作標準土壤樣本的流程

### 1. 烘乾去除水分

(烤箱 105°C and 24 hour)



### 2. 製成粉末狀

(磨損試驗儀 30 rpm 10 min)



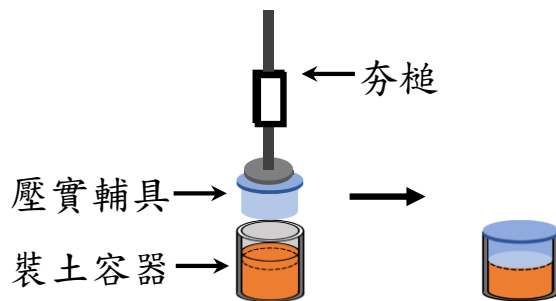
### 3. 秤取特定重量的土壤和水分

使用攪拌器混合均勻



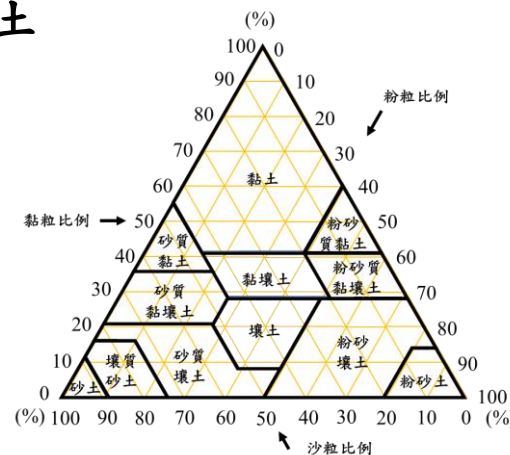
### 4. 填充至容器內並將樣本壓實

(容器直徑5cm、體積100cm<sup>3</sup>)



## 土壤種類：壤土和砂質黏壤土

土壤種類	壤土	砂質黏壤土
砂粒(%)	42.62	55.14
粉粒(%)	44.71	12.59
黏粒(%)	15.41	29.45



## 製作不同樣本所需要的土壤和水分重量

土壤總體密度 g cm <sup>-3</sup>	1.2	1.4	1.6
土壤重量 g	120	140	160
土壤體積含水率 %	10	20	30
水分重量 g	10	20	30

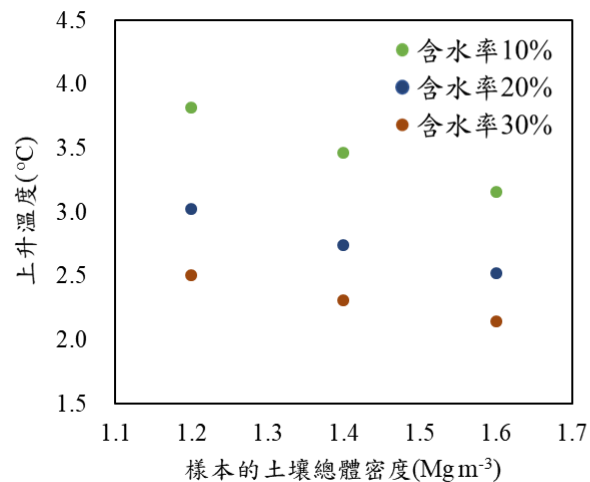
# 實驗室量測結果

## 壤土

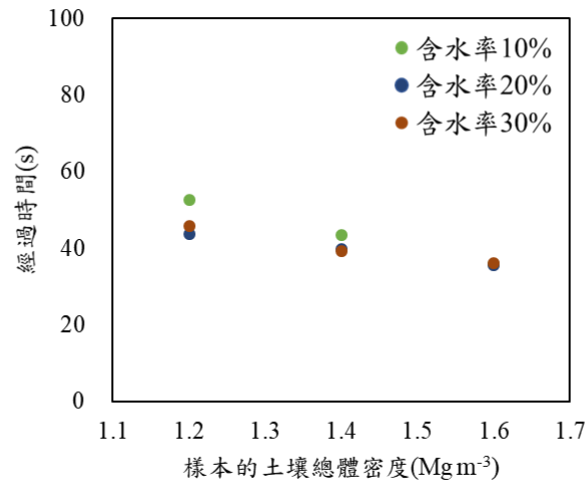


$c_s$  為  $0.90 \text{ MJ Mg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

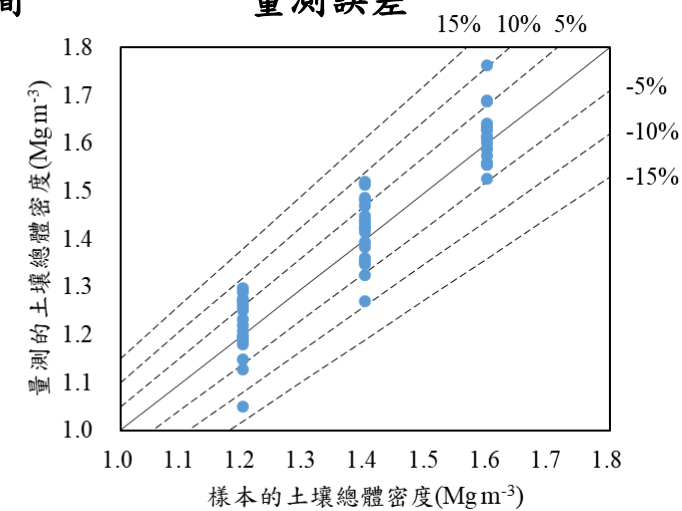
### 最大上升溫度



### 到達最大上升溫度的經過時間



### 量測誤差

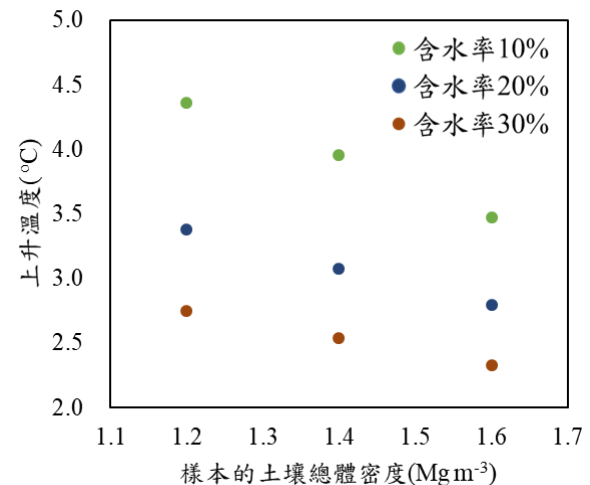


## 砂質黏壤土

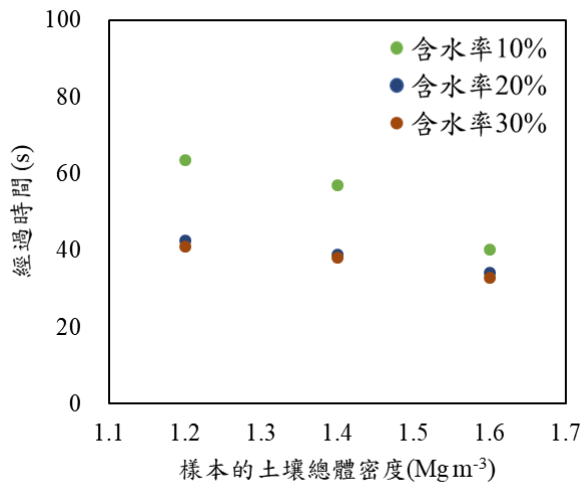


$c_s$  為  $0.75 \text{ MJ Mg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

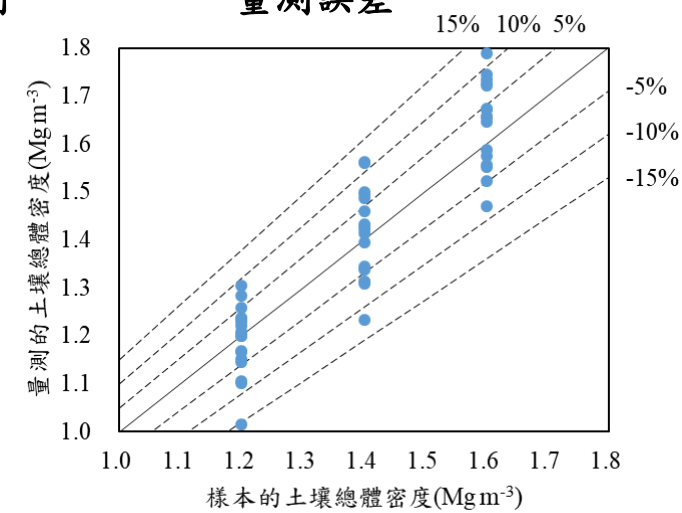
### 最大上升溫度



### 到達最大上升溫度的經過時間



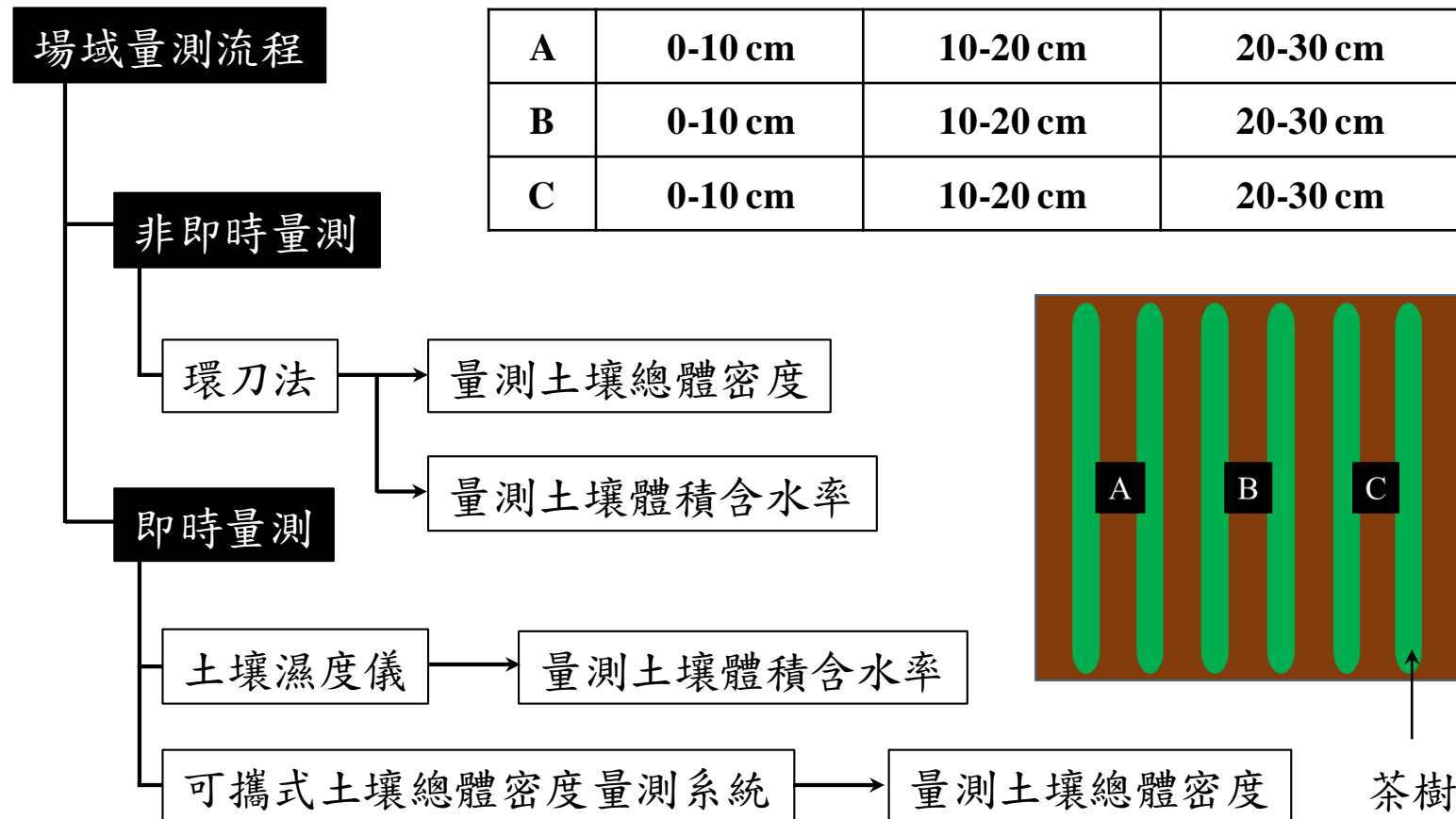
### 量測誤差





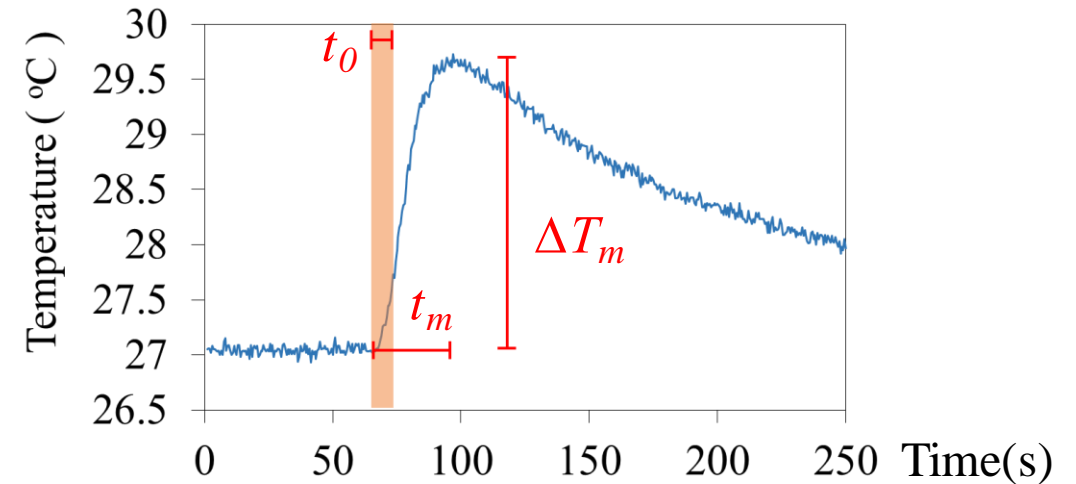
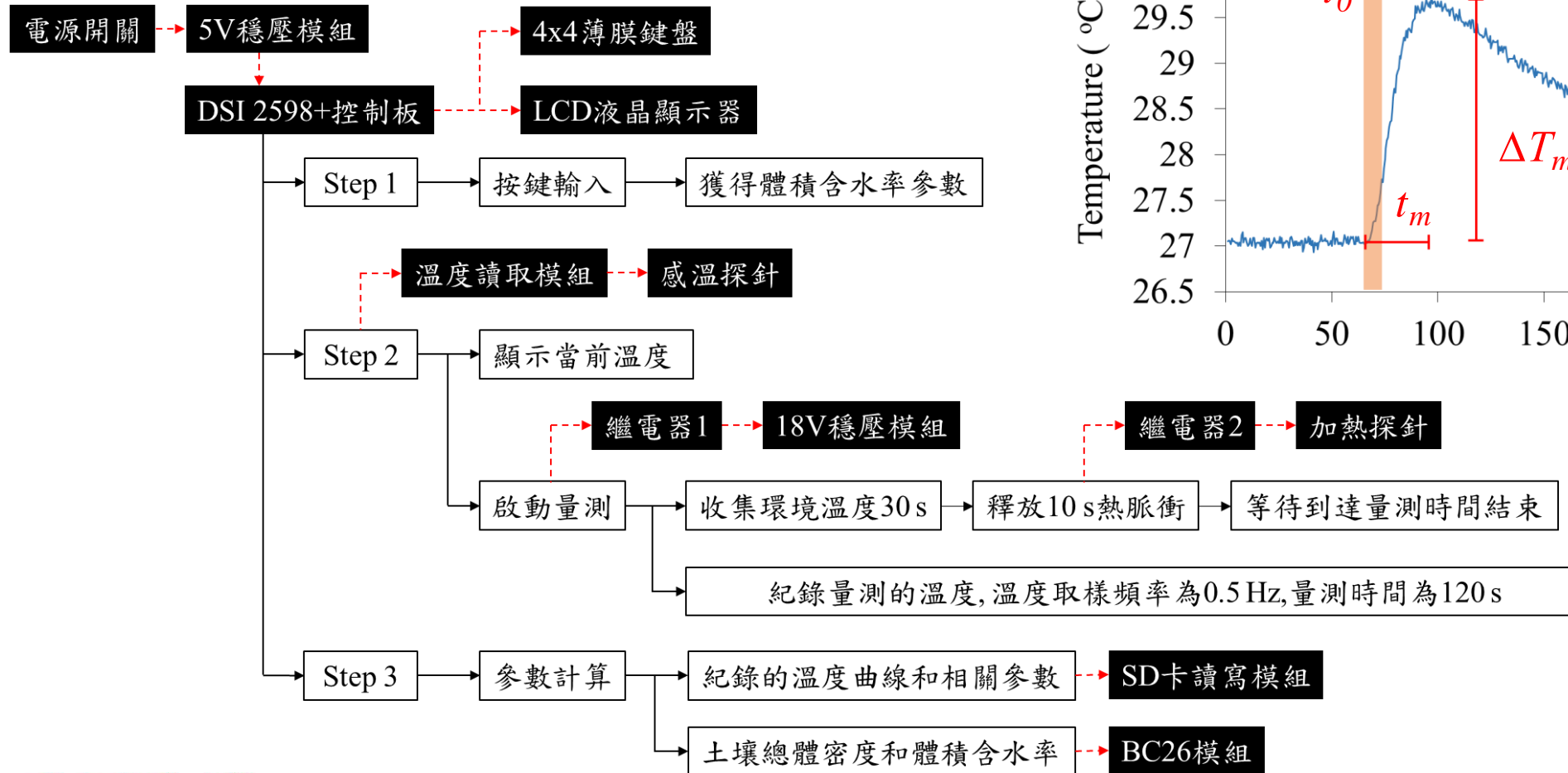
# 場域實驗流程

□ 地點:南投名間茶園(砂質黏壤土)和中興大學試驗田地(壤土)



# 場域操作可攜式土壤總體密度量測系統

## □ 控制系統操作流程

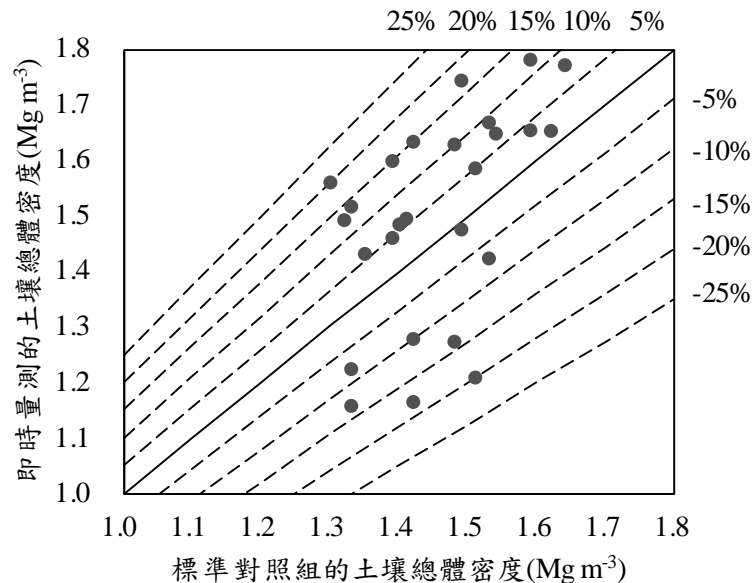


# 中興大學試驗田地的量測結果

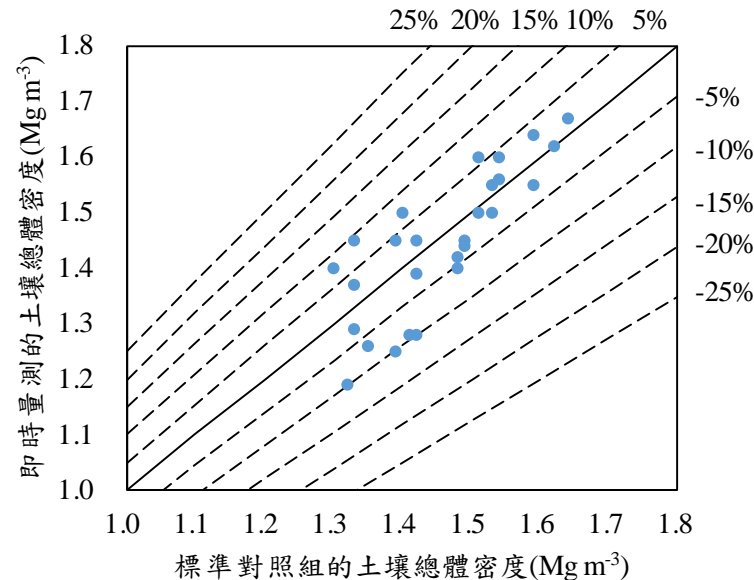
## □ 使用環刀法量測不同深度的密度和含水率的分布情形

	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
總體密度 $\text{g cm}^{-3}$	1.39–1.48	1.49–1.53	1.54–1.64	1.39–1.44	1.30–1.42	1.5–1.57	1.34–1.48	1.49–1.53	1.54–1.62
體積含水率%	22% - 29%	19% - 25%	14% - 17%	24% - 30%	19% - 25%	18% - 19%	22% - 29%	19% - 25%	14% - 17%

## □ 場域即時量測的量測誤差



## □ 在體積含水率準確為前提下的量測誤差



- ✓ 在長期未翻耕且定時灌溉的場域中，表層土壤的總體密度較小，深層土壤的總體密度較大，且會造成水分難以向下滲透
- ✓ 使用市售土壤濕度儀搭配本研究的可攜式土總體密度量測系統的即時量測，其量測誤差為 $\pm 20\%$
- ✓ 將場域數據在實驗室進行分析，發現輸入量測系統的體積含水率為準確的狀況下，其量測誤差為 $\pm 10\%$



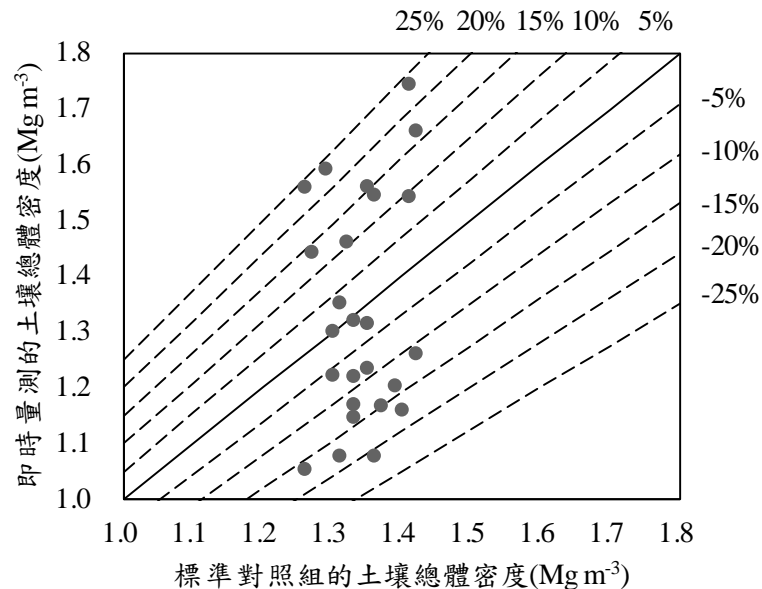


# 南投名間鄉茶園的量測結果

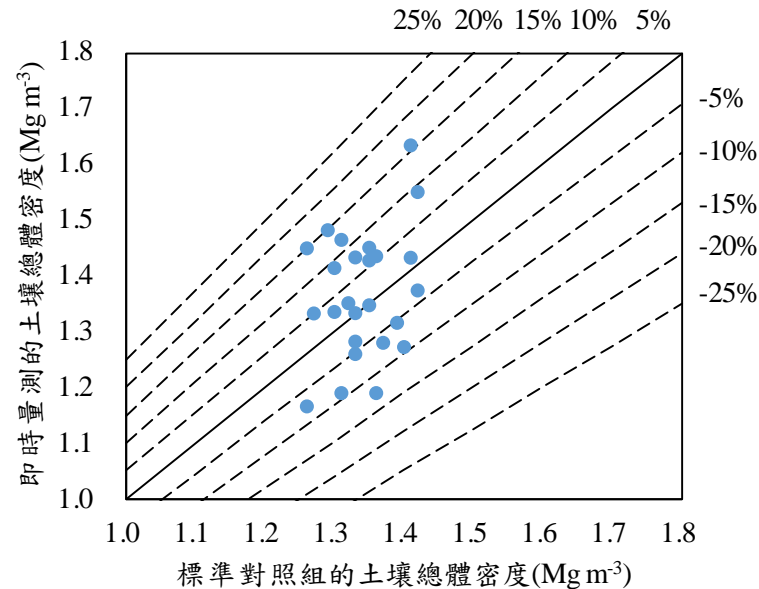
## □ 使用環刀法量測不同深度的密度和含水率的分布情形

	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
總體密度 $\text{g cm}^{-3}$	1.31 – 1.39	1.26 – 1.40	1.31 – 1.42	1.33 – 1.41	1.30 – 1.42	1.33 – 1.40	1.33 – 1.41	1.26 – 1.36	1.29 – 1.35
體積含水率 %	15% - 20%	14% - 17%	16% - 17%	14% - 18%	16% - 18%	12% - 20%	14% - 18%	15% - 16%	15% - 17%

## □ 場域即時量測的量測誤差



## □ 在體積含水率準確為前提下的量測誤差



- ✓ 在定期翻耕且定時灌溉的場域中，表層土壤和深層土壤的總體密度分布區間一致，且不會造成水分難以向下滲透
- ✓ 使用市售土壤濕度儀搭配本研究的可攜式土總體密度量測系統的即時量測，其量測誤差為±25%
- ✓ 將場域數據在實驗室進行分析，發現輸入量測系統的體積含水率為準確的狀況下，其量測誤差為±15%

## 結論

- 成功開發一套可攜式的土壤總體密度量測系統
- 在實驗室中使用量測系統的土壤總體密度感測器進行量測，量測結果顯示土壤總體密度和最大上升溫度為線性關係
- 在場域中可攜式土壤總體密度量測系統具有操作方便和量測快速的優點，相較於傳統方式需要將土壤樣本帶回實驗室處理具有極大的優勢
- 本研究開發的可攜式土壤總體密度量測系統搭配市售土壤濕度儀進行即時量測，在南投名間鄉茶園和中興大學試驗田地進行場域實驗，其量測誤差分別為 $\pm 25\%$ 和 $\pm 20\%$
- 根據場域實驗完的數據分析顯示場域即時量測的部分誤差來自於使用市售土壤濕度儀量測體積含水率的不準確。在體積含水率為準確的前提下，可以有效降低場域即時量測的誤差，分別從 $\pm 25\%$ 到 $\pm 15\%$ 和從 $\pm 20\%$ 到 $\pm 10\%$



*Thanks for your attention*

