

中子土壤水分計之研究

第一報 — 理論 —

Studies on the Neutron Soil-Moisture Meter

Part I — Theory —

千田勝己*

Abstract

I should like to introduce the problem of the fundamental performance and utilization of Neutron soil moisture meter.

For the management of soil and the control of soil moisture, in irrigation planning, the precise determination of the soil moisture is of major importance. There are several methods for soil moisture determination. Each has its own advantages and disadvantages. Recently the use of neutron soil-moisture meter has attracted the attention of field workers as well as those working on basic principles of soil moisture problems.

I am especially interested in the sphere of measurement and the accuracy of neutron soil-moisture meter.

Therefore, the advantages and disadvantages of the principles of soil moisture measurement using Neutron scattering phenomena, will be described.

The principles in this method of the decrease in radiation intensity when the Neutron beam passes through a medium can be expressed as follows:

$$\frac{dN}{N} = -\mu_0 dl$$

or:

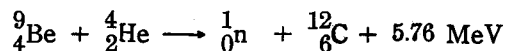
$$N = N_0 \exp(-\mu_0 l)$$

Hydrogen nuclei have a marked property of scattering and slowing Neutrons. The quantity of hydrogen in the soil ranges from zero for dry coarse sand to as much as 8% of the mass of a fine-textured soil with 50% water content when structural water is included in the computation. Most of the hydrogen in soil is associated with water, and lesser amounts with organic matter. This fact is utilized in the determination of soil moisture.

In practice, the amount of scattered neutron reaching the Neutron detector placed at the Neutron source is measured.

The neutron methods utilized for the measurement of soil-moisture are presented as follow:

- 1) Measurement of soil moisture by neutron scattering, Neutron generating sonde:



* 國立臺灣大學農業化學系膠體物理化學研究室。本會正會員。

α -Sources: ^{226}R $t_{1/2}=1,620 \text{ a}$
 ^{238}Pu $t_{1/2}=24,360 \text{ a}$

2) Measurement of bulk density (thickness), structure, moisture (using ^{137}Cs , ^{241}Am) by γ -Ray attenuation.

Lambert-Beer's Law:

$$I/I_0 = e^{-\mu' S} \dots \dots \dots (1)$$

where:

I_0 = initial intensity of γ -beam

I = intensity of the same beam transmitted through a thickness S

S = thickness of the attenuating medium in cm

μ' = linear attenuation coefficient of the medium in cm^{-1} , and

$$\mu' S = \mu_s \rho_s S + \mu_w \rho_w \theta S \dots \dots \dots (2)$$

where:

μ_s = mass attenuation coefficient of the dry soil in cm^2g^{-1}

ρ_s = apparent specific density of the dry soil in g cm^{-3}

μ_w = mass attenuation coefficient of the soil water in cm^2g^{-1}

ρ_w = specific density of soil water in gcm^{-3}

θ = fractional water content of the soil (in volumes)

substituting eq. (2) into (1)

$$I/I_0 = e^{-(\mu_s \rho_s S + \mu_w \theta S)} \dots \dots \dots (3)$$

or logarithmic eq.(4)

$$\ln I/I_0 = -(\mu_s \rho_s S + \mu_w \theta S) \dots \dots \dots (4)$$

and
$$\rho_s = \frac{1}{\mu_s S} \ln \frac{I_0}{I_s} \dots \dots \dots (5)$$

I_s = counts rate through dry soil

also,
$$\theta = \frac{1}{W_s} \cdot \ln \frac{I_s}{I_w} \dots \dots \dots (6)$$

where: I_w = count rate though moist soil

壹、前 言

在旱作物栽培時，實施土壤與土壤水分之連續不斷的合理管理是重要且必要的。

如在旱地灌溉，爲了樹立合理的灌溉用水量，灌溉開始時期，間斷日數等之計劃，首先應盡可能正確且平均地測定出作物根系內之土壤水分以及其變動量。目前雖有多種之土壤水分測定計，但卻都無法十分滿足上述之要求。

中子土壤水分計是利用中子射線能的衰減，來測定土壤水分之土壤水分計。較以往之土壤水分計可測定更廣泛之範圍。再者，幾乎不受土壤之構造，組成等不同的影響，除了能連續測定外，而且有迅速得到實驗結果之好處。不過中子土壤水分計，在歐美開始

使用還不到二十年，有關此之研究及實用性之研討等尙嫌不足，雖然具有這麼多之優點，但是似乎還不能確立一個合理的使用方法，以顯出其特點。

貳、中子土壤水分計之測定原理和中子截面積

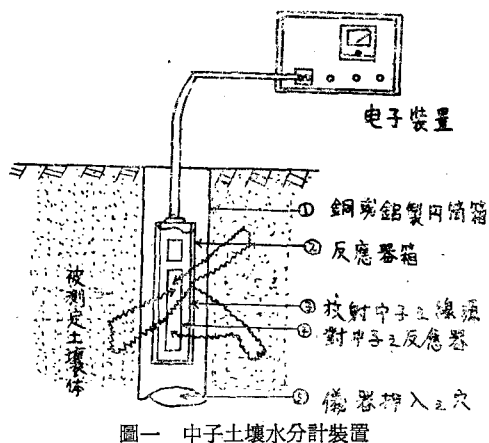
從鐳、鎂放射出來的高速中子與氫原子相撞時，則將放射能給與氫原子而速度逐漸地減小。

將放射線源，埋於土壤中，並在其附近，或者在土壤表面放置一個感應慢的中子感應器，則土壤中之水分，可以由此感應器所測的慢中子數之變化量求得。雖然此種儀器裝置極爲複雜而昂貴，且測定時易發生危險，但其特點是不論土壤的粗細，均能連續地測定其水分含量。

表一 各種土壤水分計之比較

名 稱	測定原理	可測水分範圍	非破壞性測定	連續測定	田間適用性	準確度	特 徵	經濟性及改良方向
1. 中子水分計使用法	計測熱中子化程度	飽和~烘乾	4	5	5	5	• 土壤水分之絕對量 • “ 平均值	• 表面 cd 之改良 • 依中子計測範圍之縮少
插入型			(4)	(5)	(5)	(5)	• 危險性	• 校準曲線之設定
表面型			(5)	(5)	(5)	(5)	• 土壤之種類，組織，組成，濕度，鹽類不影響	• 小型化 • 儀器複雜，昂貴危險
2. 普通爐乾法	土壤水分重量變化	飽和~烘乾	—	—	3	5	• 採土之問題變化大 • 測定簡單	• 經濟性好
3. 多孔質法 plug 法	土壤水分吸水重量變化	PF 3~4.2	3	3	3	3	• 連續非破壞測定 • 平衡時間長 • Plug 與素燒體之接觸性問題	小型化
4. 熱傳導度法	熱傳導度之變化	飽和~烘乾	3	4	4	3	• 連續加熱型 • 斷續加熱型 • 熱擴散型	連續自動記錄 連續加熱型
5. 離心機分離法	離心力所分離的土壤水分量	PF (1.0)~4.2	1	5	—	5	• 採土量之問題	供試土壤體積增加 應準備基準水面
6. Tensiometer 法	水分張力之變化	飽和~PF2.8	4	4	4	4	• hysteresis • 溫度之影響	• 改良 cup • manometer • 自動記錄
7. 電磁測定法	田電阻之變化 測定土壤水分變化	PF3~4.2	4	5	4	3	• 多孔質被覆物質之影響大 • 溫度及鹽類之影響 • timelag, hysteresis等	多孔質被覆物質發展 溫度補償配電線路之問題並校準曲線之設定 電極位置形狀改良
多孔質被覆物	Gypsum Nylon布							
8. 吸引法	眞空時水壓平衡土壤水分量	飽和~PF(3)	1	4	—	3	• 平衡時間長	• 儀器之問題
9. 壓膜法	壓力差	PF 2~5.2	1	4	—	3	• 平衡時間長 • 可測範圍大	• 改良 cup

註：1~5 之數字表示測定上的適用之程度



除了中子射線外 γ 射線亦可使用。由 γ 射線所測得水分之關係式：

$$d_{(cm)} = (\log I_0 - \log I) / \mu_p \dots \dots \dots (1)$$

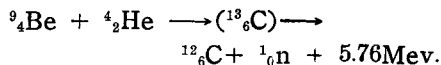
I_0, I : 各表前後通過土層之 γ 射線強度

μ_p : 質量衰減係數 (0.062cm^{-1})

但現在不討論 γ 射線所得土壤水分，而討論中子土壤水分計。

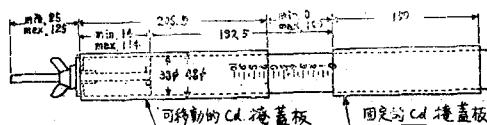
關於中子土壤水分計之測定原理，和中子截面

積，首先考慮 n^1_0 -source 之來源；在中子土壤水分計內， ^9_4Be 等輕元素，遇到 γ 射線 ^4_2He 時，就產生中子 (^1_0n)，亦即

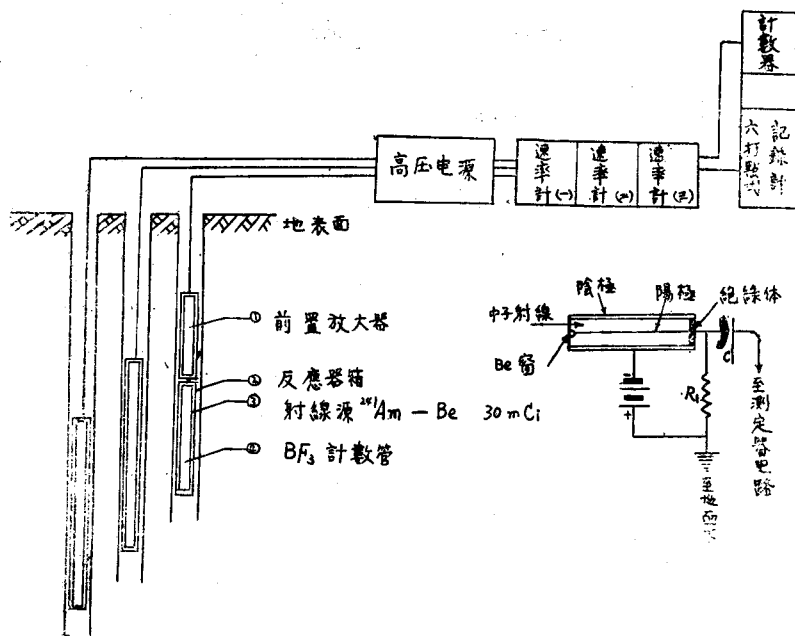


從射線源 ($^{241}\text{Am} \rightarrow \text{Be}$, ^{30}mCi 等)，放射出來的中子與元素之原子核相撞時，其放射能慢慢地減速，能量減少之程度，依原子核之質量及碰撞準確率（中子散射截面積 σ_s ）而定，亦即，如原子核之質量與中子之質量越相近，且中子散射截面積 σ_s 大時，中子散射之速度越慢。

放射能減少之中子（以熱中子為主），被截面積 σ_a 大之元素所吸收，大部份中子土壤水分計其熱中子之檢驗器均用 BF₃ 計數管（proportional counter），乃是因為 ¹⁰B 之中子吸收截面積 σ_a 遠大於其它元素之故。



圖二 使用 Cd shield 的改良型深度探測計器



圖三-1 浸透水追跡用中子水分計之構成圖

圖三-2 比例計數器(BF₃計數管)與其基本電路配置

故以土壤水分計測定時，測定範圍內各種元素之中子截面積，具有重要的意義。

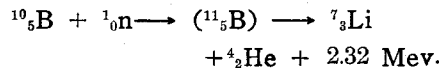
表二、表示主要元素之中子截面積值

Element	Mass No.	Ratio	Thermal Neutron		Fast Neutron
			σ_s	σ_a	σ_s
H	1	99.99	3.8×10	3.3×10^{-1}	2.6
B	10	18.7	4.8	4.0×10^3	1.6
	11	81.3		5×10^{-3}	
C	12	98.29	1×10	3.2×10^{-3}	1.0
N	14	99.64	4.2	2×10^{-4}	1.5
O	16	99.76	4.0	5.2×10^{-1}	2.6
Na	23	100.00	1.4	2.3×10^{-1}	2.5
Al	27	100.00	1.7	1.3×10^{-1}	3.2
	28	92.18		1.1×10^{-1}	
	29	4.71		3.3×10	
Cl	30	3.12	1.6×10	5.6×10^{-1}	2.7
	35	75.53		3.3×10	
	37	24.47		5.6×10^{-1}	
F.	54	5.84	1.1×10	2.8	1.3×10
	56	91.68		2.5	
	57	2.17		0.2	
Cd	110	12.39	1.1×10	3×10	1.3×10
	111	12.75		2.0×10^4	
	112	24.07		1.1	
	113	12.26		1.5	
	114	28.86			
	116	7.58			

表二 主要元素之中子截面積數值 (barns)

氫原子之散射截面積是 38 barns (10^{-24}cm^2)，比其他元素大，所以散射中子的機率大。還有氫原子之原子核質量與中子之質量很相近。所以碰撞後之中子減速效果也大。由熱中子量之多少，即可表示氫原子之多少；因此，將土壤以快速中子照射，而測定熱中子之量，即可表示土壤中之水分量。

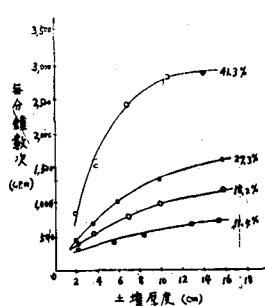
此外， ^{10}B 、 ^{113}Cd 之吸收截面積之大，亦被人所注意，其中 ^{10}B 用以檢驗熱中子，而測定熱中子之量是



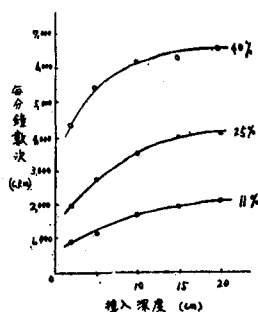
叁、中子土壤水分計基本性能曲線

1. 表面型土壤水分計之基礎性能曲線

對於表面型土壤水分計的基礎性能試驗，首先需要知道計數值與土壤水分含量之關係。測定時，使土壤表面和土壤水分計之底面密接，然後轉向 180° ，測定二次，而求得兩者的計數平均值。結果如圖四。



圖四 由表面型測定所得的土壤水分—土壤厚度—計數率之曲線



圖五 由插入型測定所得的土壤水分—插入深度—計數率之曲線

從圖四，可以看到：

- ①計數值隨土壤的厚度增大而增加，而趨近於一定值。
- ②依土壤水分百分比的不同，各水分曲線之斜率與計數率的相差很大。所以爲了得到安定的土壤水分和計數值的關係，土壤水分越少，必須有大的土壤厚度。其原因是中子射線衰減 (decay) 由土壤的水分而起，所以土壤水分越少，中子線所到達的距離也越長。

所以對於各土壤水分、土壤厚度，須超過某種厚度，計數值到某一定的範圍，才具有意義。

2. 插入型土壤水分計之基礎性能曲線。

對插入型土壤水分計之計數值與土壤水分含量之關係，亦與表面型者類似。但種種的土壤水分值爲測定插入土壤深度改變時的計數率之變化。其結果如圖五。

從圖五，可以看到：

- ①土壤水分越少時，爲了得到一定值，必須有大的土壤厚度。
- ②插入深度 0.6m 的時候，也能得到標準計數之 1 程度的計數，而計數值與水分含量間成直線關係。
- ③土壤厚度小時，厚度與 c. p. m 成正比。

所以適當的補正或做各深度的補正曲線以後，由平均斜率，求出補正曲線。

肆、測定範圍與精度

1. 以往有關測定範圍之研究

據 Gardner 等氏 (1952 年 soil sci.) 早期的研究，係將半徑 20cm 之土塊，以半徑 40cm 者代替之，其計數增加率僅爲 8%，因此認爲以大約 30 cm 之球體爲測定範圍即可。

Van Bavel 等氏 (1956 年 soil sci.) 依土壤

水分之多少，表示測定範圍會變化：

$$R = 15 \times \sqrt[3]{\frac{100}{\theta}} \quad (\text{cm}) \dots\dots\dots (2)$$

R : 測定範圍 (半徑 cm)

θ : 含水百分率 (%)

亦即，該式係假定測定之體積與土壤水分成反比，而係數 15 是土壤水分 100% 時之測定半徑。這種數字之使用，其後並無任何進展。

現在據說一般表面型者，深度爲 15~20cm，又插入型之測定範圍爲半徑 20~30cm 之土球體。然而，這些研究都是對於土壤水分，由均一水分分佈的土壤所作的，關於不均一水分分佈狀態所及之影響，並不明確。

2. 以往有關精確度之研究

據 Gardner 等氏 (1952 年 soil sci.) 報告，以 (3) 式表示平均誤差：

$$\bar{e} = 0.67 n^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

n : 測定計數值

亦即，認爲測定精確度隨計數之增加而增大，因而測定時間愈長或射線強度愈強，則精確度愈高。

此後，Merriam 等氏 (1961 年 soil sci.) 依土壤水分與計數之相關關係，而論精確度時其誤差爲：

$$E = \pm k \sqrt{\frac{P_v}{st}} \dots\dots\dots (4)$$

P_v : 土壤水分

s : 補正曲線斜率

t : 時間 (min.)

k : 標準偏差數

但，Van Bavel 等氏却與 Merriam 等氏對立，認爲其誤差爲：

$$V = a \times s \times \sigma_0^2 \dots\dots\dots (5)$$

a : 計數效率 (cpm/mCi)

s : 射線強度 (mCi)

σ_0^2 : 標準偏差

此兩者的想法根本上的不同是 Merriam 等氏以補正曲線斜率來計算，而 Van Bavel 等氏則以射線強度爲重要因子。

論及讀數，所生之誤差，只不過是要求讀數之精確度而已，但是測定上最大的問題，乃是由於土壤條件之不同，而引起之誤差：譬如說，所定之土壤，測定的範圍大小，土壤水分不均勻，以及除土壤水分外之其他甚多的因子所產生之誤差等等，在求實際的測定精確度，均應加以考慮。

3. 依精確度來測定範圍之表示方法

欲知中子土壤水分計基礎性能，被要求測定範圍與精確度之密切關聯的考察方法。首先，對土壤水分的計數狀態來看，如從圖四，圖五所見之土壤厚度，或插入深度減少之程度等因子來考慮，則可發現雖為同一水分，其計數漸減之現象。此即為中子土壤水分計所具有之特性。因之依分析計數減少之現象，可試得中子土壤水分計的測定範圍和精確度之關係。

一般說來，如果土壤水分均一時，中子射線密度減少之程度與土壤厚度 dl 成比例，所以可表為

$$\frac{dN}{N} = -\mu_0 dl \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{又, } N = N_0 \cdot \exp(-\mu_0 l) \dots\dots\dots (7)$$

dl : 土壤厚度 (cm)

N_0 : 初期密度

N : 距離 l 點之密度

μ_0 : 衰減係數

基於(7)式，因被測定土壤體積過小，而計數率會減少，就是因中子土壤水分計之測定範圍之一部份跑出土壤之外(大氣)，一部份中子穿透土壤而發生之衰減現象。又圖四和圖五之曲線，可以用指數曲線來表示。而近似曲線為：

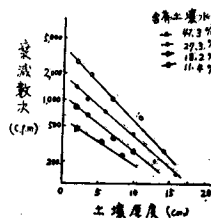
$$y = A - B_0 \cdot e^{-x} \dots\dots\dots (8)$$

y : 計數值 (cpm)

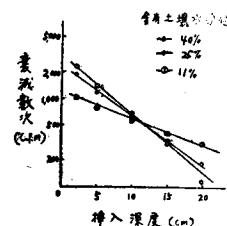
x : 土壤厚度 (cm)

A : 每土壤水分之係數

而求出各土壤水分之係數 A 、 B 、 C 。其中各衰減部份 ($B_0 \cdot e^{-x}$) 如圖六和圖七。



圖六 計數率降低指數曲線 (表面型)



圖七 計數率降低指數曲線 (插入型)

從圖六來看，水分在均一土壤時，可知對於土壤深度計數值大約有指數關係的變化。由此關係可以對測定範圍與精確度的關係得到明確的認識。圖六和圖七，由指數曲線的積分，很容易求其結果和全積分值之比率來，將土壤體積和測定精確度之關係，求各土壤水分。其中，固定精確度99%，95%，90%等結果，以表三表示，

soil moisture content (%)	radius (90% accuracy) (cm)	radius (95% accuracy) (cm)	radius (99% accuracy) (cm)	approximated equation
surface probe				
41.3	11.3	14.7	22.6	$3,200-4,000e^{-0.30x}$
27.3	13.8	17.9	27.6	$1,700-1,900e^{-0.17x}$
18.2	14.4	18.8	28.8	$1,200-1,100e^{-0.16x}$
11.4	17.9	23.3	35.8	$700-600e^{-0.12x}$
depth probe				
40	15.4	20.0	31.1	$7,100-2,800e^{-0.15x}$
25	16.5	21.4	33.2	$4,200-2,300e^{-0.14x}$
11	31.6	41.1	63.7	$2,200-1,200e^{-0.07x}$

表三 土壤(土壤球體)體測定與精確度之關係

Van Bavel's equation		
soil moisture content (%)	$\frac{100}{\theta}$	$R (=15\sqrt{\frac{100}{\theta}})$ (cm)
10	10.0	32.3
20	5.0	25.5
30	3.3	22.4
40	2.5	19.4
50	2.0	17.9

但這精確度 99 % 是全計數中，只能測得 99 % 之意思，而不是計數精確度之意思。近似曲線以表示 $A - Be^{-x}$ 之時，以精確度可以表示下式：

$$\text{精確度} = \frac{\int_0^x Be^{-x} dx}{\int_0^\infty Be^{-x} dx} \times 100\% \dots\dots (9)$$

伍、結 論

圖四，圖五所表示的中子土壤水分計的計數和土壤水分的關係，是依土壤的厚度而變化。本來在曲線上土壤厚度十分大時，由土壤水分與計數值之關係，可做成補正曲線。然而，依補正曲線為基本，仍不能確定中子土壤水分計之測定範圍。因而在圖四，圖五

所示之基礎性能曲線，表示在土壤水分之測定時，需知道土壤之厚度。在計數值之記錄時，同時須記載土壤之厚度。實用上，田間土壤之厚度，一般均超過能得到一定值之厚度，故不必考慮。

又依照基礎性能曲線來表示，則有如下之優點：

- ①以插入型所做之補正曲線，也能對地表附近的測定作補正。譬如，利用圖四時，如果土壤水分均一，則深度 5cm 以內之淺度處亦可測定。
- ②如能知道中子土壤水分計的特性，亦即同時能知道測定範圍的大小和計數率。

又從圖五得知，要得到 90 % 以上的精確度，則需半徑 30cm 程度的土壤體積，而要得到 95 % 以上的精確度，則需半徑 40cm 的土壤體積。這結果與應用 Van Bavel 式所求之結果作比較，一般對於表面型，大約精確度 95~99 %。但對於插入型，則相當於大約可得精確度 90~95 % 之值。所以應用 Van Bavel 式而計算的結果，作測定範圍，即可知在實用上並無多大關係。

又由表面型和插入型的比較，可知道表面型比插入型土壤體積小，就可得到高的精確度。即土壤水分 40 % 時，要得到 90 % 以上的測定精確度，在插入型需要半徑 30cm 以上的土壤體積，但表面型只需 20cm 左右即可。這種傾向，土壤水分越少越明顯。這原因是由大部份構造上之差異而來的。因為表面型為了使中子不在空中散射而設立反射板，還有熱中子檢出器用 BF₃ 計數管 (proportional counter) 4 支，設立在水水平方向 (但插入型，則在鉛直方向設立 1 支 BF₃ 計數管)。

又從圖五得知，中子土壤水分計的測定範圍，即依土壤水分之多少而變化，則土壤從濕潤狀態移動到乾燥狀態時候，其測定範圍會漸次增大。此即表示在旱田中，為了整個土壤水分消耗量的測定，水分之補充或儀器構造上的改良是必要的。

如此，中子土壤水分計的基礎性能曲線，若近似指數曲線，然後分析它的結果之後，以往在經驗上所討論之測定範圍，如今可以一併求得精確度之數值。

陸、誌 謝

本文在國立臺灣大學農業化學研究所洪崑煌教授鼓勵與指導下，始克完成。

初稿並特別承蒙國立臺灣大學農業化學研究所陳振鐸教授與洪崑煌教授細心校閱原稿，並提供寶貴之意見與指正。

研究期間並蒙臺灣大學農業化學研究所博士班研究生王明光先生，賴晉康先生與張宗揚先生熱心協助。特誌謝忱。

柒、參 考 文 獻

- 1) Merriam et. al.: Soil Sci. Soc. 92 pp. 394-395. (1961)
- 2) Van Vavel: Soil Sci. Soc. Amer.Proc., 26 pp. 405-406 (1962)
- 3) O. Ciftcioglu et al.: J. of Soil Sci., 23 No. 1, pp. 32-37 (1972)
- 4) Y. Fujioka et al.; Transaction of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, 27, pp. 33-41 (1969)
- 5) C. A. Black et al.: Methods of soil analysis, part 1, pp. 104-125 (1965)
- 6) 林鴻淇: Nature and use of Radioactive Isotopes in Agricultural Chemistry. 農化研特別演講 (1973)
- 7) 日本放射性同位元素協會: アイソトープ便覽 pp. 424-486 丸善。(1962)
- 8) 工業計測技術大系編集委員會: 濕度，水分測定，日本，日刊工業新聞社，1965
- 9) Dr. Toshiro Ochiai: Application of Radio isotopes in Ground Water Hydrology. Agri. Engi. Research Station Ministry of Agri. and Forestry, Japan, 1969.
- 10) C. A. BLACK, et. al.: Methods of Soil Analysis Part I, Physical and mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling. 1969
- 11) B. D. CULLITY: ELEMENTS of X-RAY DIFFRACTION 中華出版社 1969
- 12) 中村清二他: 物理實驗學 (第十卷) 原子核物理學 河出書店，1940
- 13) 邱承美編著陶金華校訂: 儀器分析原理，科文出版社，1972
- 14) 千田勝己: 二、三個土壤水分測定儀器之有關理論與構造 臺灣大學農業工程研究所，1970
- 15) 千田勝己: 土壤水分特性及其概念之應用 臺灣大學農業工程研究所 1969