

ガンマ線透過型水分計による土壌水分測定について

山 本 太 平・長 智 男

(鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設水文・かんがい部門)

The Measurement of Soil Moisture Content with Gamma-Attenuation Soil Moisture Detection Apparatus.

Tahei YAMAMOTO and Tosio CHO

(Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute,
Faculty of Agriculture, Tottori University)

Gamma-ray attenuation measurement of wet density was made with a 100-mC. ^{137}Cs and 3.8cm dia. NaI(Tl) scintillation crystal. The apparatus was designed for the measurement of vertical soil moisture content of dune sand in the laboratory.

1. By collimating the beam at the source and at the detector, the vertical resolution of this apparatus was improved by 8mm.

2. The relation of the attenuated beam intensity $I(\text{cps})$ and the soil moisture content $\rho_w (g/\text{cm}^3)$ are given in the following equation by deriving the gamma-ray attenuation theory :

$$\rho_w = (\log_e I_0 - \log_e I) / \mu_w t \quad (1)$$

Where I_0 = attenuation beam intensity of the dry density(cps) ; μ_w = attenuation coefficient of water (cm^2/g) and t = gamma-pathlength of the sand column (cm). The soil moisture content ρ_w obtained by the calculation of equation (1) agreed approximately with the result of the soil sampling method. By substituting I for thickness of the sheet iron t , one calibration curve was obtained.

3. Accuracy of this apparatus was $\pm 0.01 (g/\text{cm}^3)$ when the gamma-pathlength of the sand column was 10~13cm.

1. はじめに

わが国においては、ほ場における土壌水分測定に、採土炉乾法のほかに、テンシオメータ法、吸湿体による電気抵抗法¹⁾²⁾などが主としてもちいられている。これらに対し、放射線を利用する方法として、中性子散乱による挿入型³⁾⁴⁾および表面型⁵⁾の水分計が土壌水分測定に用いられ、またガンマ線の散乱⁶⁾または透過⁷⁾による

密度計が土壌密度測定に用いられている。これら放射線による測定法は、土壌中に直接感体を埋設することがなく、土壌構造を破壊せずに、比較的高い精度で、時間の遅れや、ヒステリシスがなく、連続的に測定できる特点を有する。

しかし、中性子水分計は、その原理上、線源を中心とする球体または半球体の土塊の水分量を測定し、その球

体の半径が、水分量の多少につれて変化し、しかも半径が比較的大きいので、鉛直分布のめんみつな測定はむずかしい。

これに対し、ガンマ線透過型はコリメータによってビームを細束状にしぼり、放射面積を小さくすることができるので、鉛直分布を詳細に測定することができる。土壤透過後のガンマ線の強さは、土壤の仮比重および水分量により大きく変化する。したがって仮比重の経時変化がなければ、線源と検出器を厳密に平行移動させることによって、限られた部分の水分量を測定できる。

このガンマ線透過型水分測定装置を、ほ場に適用すれば、中性子水分計の有する欠点を補うことができるが、線源の強さや、平行移動などの装置上問題があり、実用化にはむずかしい点が多い。したがってこの種の装置は諸外国においても、室内で、容器中の土柱内の水分移動をめんみつに測定するために使用される例^{9)~10)}が多い。

わが国では、このような装置を室内土柱における水分変化の測定に用いている例は少ない。著者らは、砂丘砂柱の水の運動に関連する基礎的実験を行なうために、この装置を試作し、装置に関する二三の実験を行なったので、ここに報告する。

2. 土壤透過中におけるガンマ線の減弱

narrow beam のガンマ線が厚さ t (cm) の土壤体にて I_0 の強さで入射し、透過した場合、透過ガンマ線の強さ I (cps) は、次のような減弱の式で示される⁸⁾。

$$I = I_0 \exp - (\rho_s \mu_s + \rho_w \mu_w) t \quad (1)$$

ここで、 ρ_w : 土壤水分量 (g/cm^3)、 μ_w : 水の質量吸収係数 0.0862 (cm^2/g)、 μ_s : 土壤の質量吸収係数 (cm^2/g)、 ρ_s : 土壤の乾燥密度 (g/cm^3)、である。(1)式より、次式が導びかれる。

$$I = I_0' \exp - (\rho_w \mu_w t) \quad (2)$$

$$I_0' = I_0 \exp - (\rho_s \mu_s t) \quad (3)$$

ここで、(3)式の I_0' は乾燥した土壤体を透過した放射線の強さ (cps) を示す。(2)式より、

$$\rho_w = (I_n I_0' - I_n I) / \mu_w t \quad (4)$$

が得られる。ここで I_n は、自然対数である。(4)式において、乾燥密度が一定の場合、 I_0' は定数であるため、土壤体の厚さ t が一定の場合、土壤水分量 ρ_w は、透過した放射線の強さ I を測定することにより、求めることができる。

つぎに、この種の水分計の誤差を検討するため、(2)式

から導びかれた次式を利用した。

$$d\rho = (dI/I) / \mu_w t \quad (5)$$

ここで、 $d\rho$: 土壤水分量で表示される誤差 (g/cm^3)、 dI/I : 計数率の誤差、である。(5)式において、 μ_w は定数であるため、 t が一定の場合、 $d\rho$ は、 dI/I によって左右される。一般に、放射線強度 I の測定においては、(i) 比例型誤差、(ii) 統計的誤差、(iii) 関数型誤差、(iv) 検出器および電子回路部による誤差、などがあげられる。シンチレーション計数管方式では、(i) ~ (iv) によって生ずる計数率の誤差 dI/I は、1 (%) 以内を示している。誤差の最大値の1 (%) と $\mu_w = 0.0862$ (cm^2/g)¹¹⁾ をもちいると、(5)式は、

$$d\rho = 0.116/t \quad (6)$$

となる。(6)式は、仮比重および土壤水分量が一定である土壤中にガンマ線を放射した場合、水分量で表示された場合の誤差を求める式であり、土壤体の長さ (ガンマ線の透過距離) と反比例の関係にあることを示している。

3. ガンマ線透過型水分計の装置および操作方法

試作したガンマ線透過型水分計の測定原理の模式図を図-1に、実験装置を図-2に示す。線源は、0.662 Mev のガンマ線を放射する ¹³⁷Cs (100mC) をもちい、遮へい容器①に格納されている。ロータリーシャッタ②を回すことにより、鉛のコリメータ③の孔 (直径10mm×長さ75mm) を通してガンマ線が放射される。検出器④には、シンチレーション計数管 (NaI (TI), 直径38.1mm) をもちいた。また、検出器の前面にもコリメータ⑤ (たて10cm×よこ8cm×厚さ3cm) が取付けられ、そのスリット巾が0~20mmの間で調節される。図-2に示すように、線源容器と検出器とは、60cmの間隔で架台に固定されており、この間を試料台⑥が上下に移動する。試

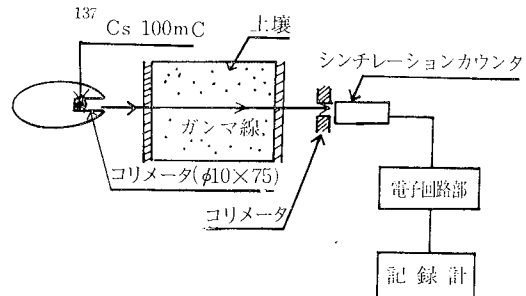


図-1 ガンマ線透過型水分計の原理

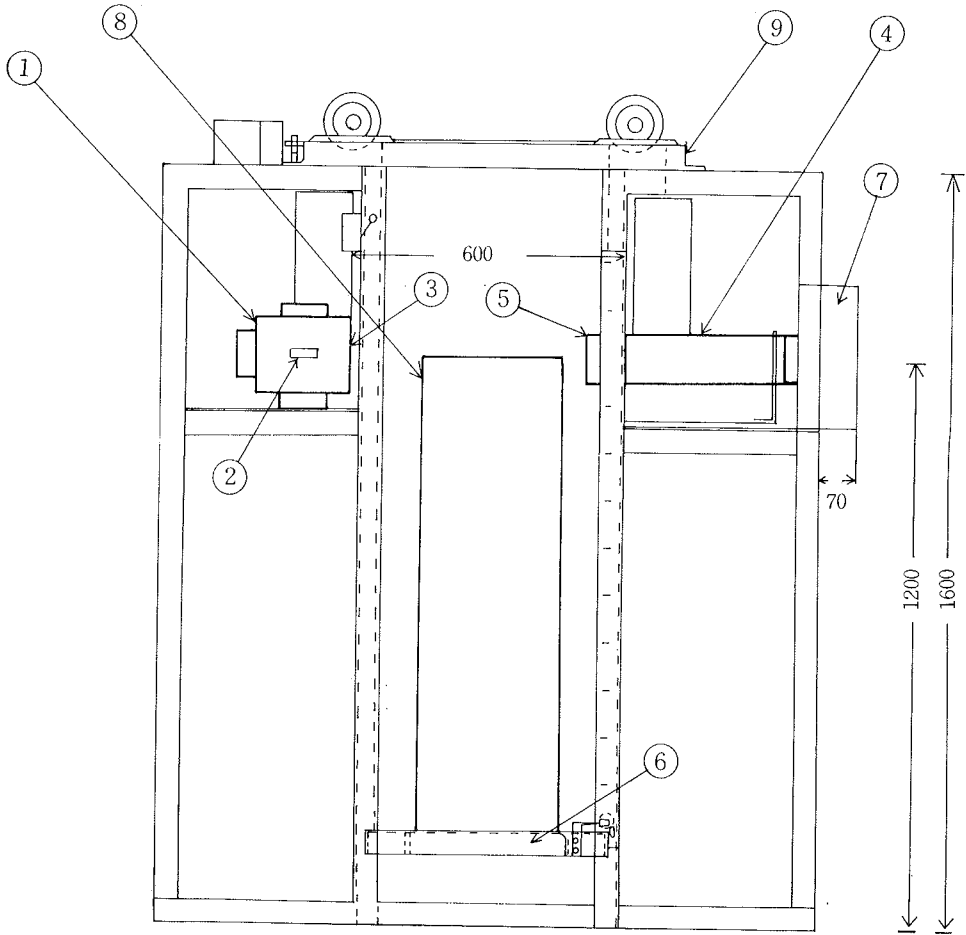
料台の昇降速度は、4 mm/s であり、台は 1 mm 以内の精度で停止させることができる。

プレート実験を行ない、水分計の動作電圧を 1.35 (kv) に設定した。また時定数は、4 秒と 50 秒の 2 段切換であるため、 $\pm 0.022 (g/cm^3)$ と $\pm 0.006 (g/cm^3)$ の統計変動を示す。したがって、計数率の統計変動による誤差を最小にするため記録計に、それぞれの時定数以上

になるように計数率を記録させ、記録紙にあらわれた変動中の中心を読み、この値をその時の計数率とした。

4. 分解能

ガンマ線透過型水分計の鉛直方向の分解能を測定するため、図-2 に示す装置の試料台に円筒容器 ($\phi 13.4cm \times$ 高さ $50cm$) を置き、その容器の $\frac{1}{2}$ 程度まで水を入れ、



- | | | |
|--------------------------|------------|------|
| ① : 遮へい容器 | ⑥ : 試料台 | 単位mm |
| ② : ロータリーシャッタ | ⑦ : 遮へい用鉄板 | |
| ③ : コリメータ | ⑧ : 土壌容器 | |
| ④ : 検出器
(シンチレーション計数管) | ⑨ : 捲土機台 | |
| ⑤ : コリメータ | | |

図-2 ガンマ線透過型水分計の実験装置

容器を1mmきざみで移動させて、空気と水の界面付近の計数率の変化を測定した。コリメータ⑥の無い場合と、コリメータのスリット巾を20mmと10mmに調節させた場合の測定を行なった。これらの測定結果の一例を図-3に示す。

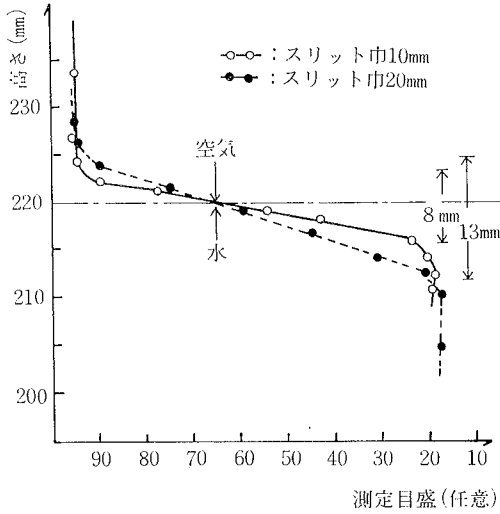


図-3 鉛直方向の分解能

スリット巾を20mmから10mmに縮めるにともない、鉛直方向の分解能は、13mmから8mmに高めることができた。また、コリメータがない場合でも17mmの分解能を示した。コリメータ③の出口は、直径10mmの円であるため、この水分計の水平方向の分解能も約17mmを示すものと考えられる。

つぎに、コリメータ⑤のスリット巾を10mmに固定し、被測定物に一定密度(7.8g/cm³)の校正用鉄板をもちいて、計数率 I' (cps) と鉄板厚 t' (mm) の関係を測定した。この結果を図-4に示す。

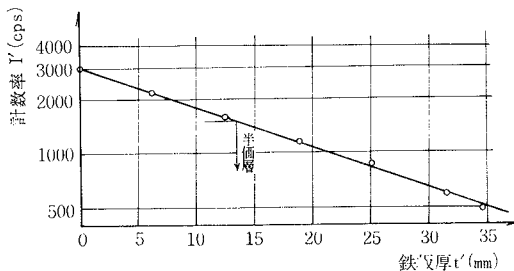


図-4 鉄板の場合の計数率I'と鉄板厚t'の関係

I' と t' は、片対数上直線関係にあり、鉄の半価層 t'_{1/2} が13 (cm)、質量吸収係数 μ_m' が0.068 (cm²/g) を示した。一般的に、t'_{1/2} は12 (cm)、μ_m' は0.074 (cm²/g) である¹¹⁾ とされ、他の研究者たちの装置の場合^{9)~10)} も多少のばらつきを示しながらこの付近の値を示しており、この装置によるガンマ線は、十分コリメートされており、narrow beam とみなすことができる。

5. 較正曲線の作成

砂丘砂の土壤水分量 ρ_w (g/cm³) と計数率 I (cps) の関係を測定するため、次の実験を行なった。アクリル製の円筒(φ13.4cm×高さ50cm、肉厚3.5mm)および箱形(たて10cm×よこ10cm×高さ40cm、肉厚5mm)容器に乾燥砂丘砂を均一につめこみ(仮比重1.35)、定水位条件下で下方より毛管上昇させた。約48時間後に浸潤前線の上昇速度がゆるやかになったので、このとき、コリメータのスリット巾10mmにして、水分鉛直分布を2cmごとに、ガンマ線透過法による測定を行ない、それに対応して採土炉乾法により水分量 ρ_w を測定した。この結果を図-5に示す。

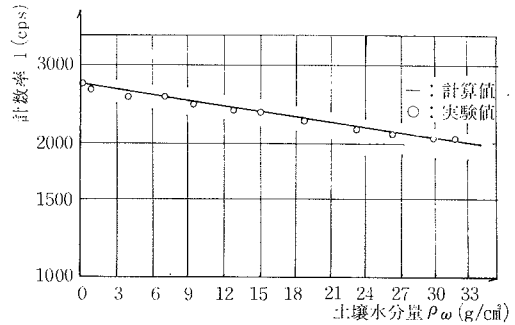


図-5 計数率Iと土壤水分量ρ_wの関係

水の質量吸収係数 μ_w = 0.0862 (cm²/g)、土壌体の厚さ t = 10 (cm) および乾燥砂丘砂を入れた状態の透過放射線の強さ I₀ = 2700 (cps) の値を用いて、(4)式により計算された I と ρ_w の関係を図-5に実線で示した。計算値と実験値とは、採土側の誤差も考慮すれば比較的良好に適合しているといえよう。けれども、この種の装置においては、(i) この電子回路部には、波高弁別器がもちいられていないため、ビームをコリメートしても散乱ガンマ線が、完全に除去されずそのいくらかは計数率に影響していると考えられる。すなわち、①線源と検出器間の土壌体の厚さ、②土壌体への線源からの距離、③土壌柱の形などが変わった場合、その時の線源一

被測定物—検出器の幾可学的配置により、それぞれ異った散乱線が生じ、これが計数率として影響して誤差となる、(ii)線源の減衰および検出器の効率低下が生ずる、などを考慮する必要がある。したがって、前述の(i)および(ii)の変化に対して各々の場合について校正曲線を作成するには手間がかかるので、次のような方法を用いた。まず容器内に乾燥砂丘砂をつめた場合を基準として計数率を測定する。この状態で校正用鉄板を容器の線源側におき、鉄板厚さを増加させながら計数率を測定し、図-4のような鉄板厚 t' と計数率 I' との関係を求めておく。図-5は、これと同じ容器を用い、同じ幾可学的位置における場合に、測定された透過ガンマ線計数率 I と、採土炉乾法で得られた土壤水分量 ρ_w との関係を示したものであるから、ある土壤水分量 ρ_w に対する I をとり、図-4を用いて I に等しい I' に対応する鉄板厚 t' を求め、 ρ_w と t' との関係を示したものが図-6である。図-6の作成にあたっては、箱形容器(土壤厚10cm)と、円筒容器(中心の土壤厚13.4cm)との二つの場合に得られた実験値を用いた。図-6では、以上のように被測定物の容器の形および厚さが異っても、散乱線の影響が除去される。線源の減衰および検出器の効率低下の経年変化に対しては、その測定時に図-4の関係さえ求めておけば、同じ土壤で密度の状態が変わらない限り、図-4と図-6を使用して、土壤水分量を求めることができる。図-4の作成はきわめて簡単であり、土壤水分測定の前に行なえばよく、図-6の校正曲線はこのまま使用できる。

校正曲線の精度を検討するため、平均偏差を求めた結果、土壤水分量で表わせば、 ± 0.01 (g/cm³)であった。一方、(6)式をもちいて、 $d\rho$ を計算した結果、 $t=10$ cmの場合、 $d\rho=0.012$ (g/cm³)、 $t=13.4$ cmの場合、 $d\rho=0.009$ (g/cm³)となる。これらの結果より、この種の水分計の誤差は、土壤体の厚さが10~13cmの場合、 ± 0.01 (g/cm³)以内であると考えられる。

5. 摘 要

砂丘砂柱の水分鉛直分布の変化をめんみつに室内で測定するために、ガンマ線をコリメートし得る透過型水分測定装置を試作し、その性能に関する基礎実験と校正曲線作成を行なった。

1) 線源には ¹³⁷Cs 100mC をもちい、検出器は、シンチレーション計数管方式とした。

2) 線源および検出器には、コリメータをとりつけて、空気と水との界面付近の計数率変化を測定し、水分

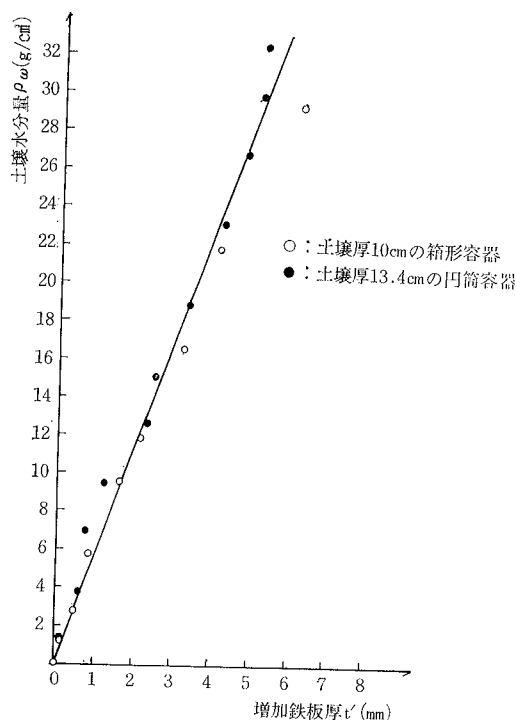


図-6 土壤水分量 ρ_w と増加鉄板厚 t' の関係(校正曲線)

計の鉛直分解能を求めた。コリメータのスリット巾の調節により、8mmまで分解能を高めることができた。

3) 透過後の計数率に対応する採土炉乾法によって求めた水分量とガンマ線減弱式によって、計算された水分量の値とは、比較的よく一致した。

4) 計数率を校正用鉄板厚さにおきかえることによって、一本の校正曲線が得られた。

5) 土壤厚さ10~13cmの場合、この装置の精度は ± 0.01 (g/cm³)以内であった。

本研究は、文部省科学研究費の補助を受けた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 西出 勤：岐阜大学農学部研究報告，27，1—81 (1969)
- 2) 長 智男・矢野友久・山本太平：砂丘研究，18 (2)，9—19 (1972)
- 3) 大野博敬・町田忠夫：物理探鉱，14 (2)，64—76 (1961)
- 4) 長 智男・福島栄二：砂丘研究，10 (1)，43—54 (1964)

- 5) 山本太平・金山和雄・長智男：砂丘研究所報告, **11**, 20—26 (1972)
- 6) 長智男：昭和41年度農業土木学会大会講演要旨, 361—362 (1966)
- 7) 桂山幸典：農業土木研究, **29** (4), 155—164 (1962)
- 8) Reginato, R.J. and van Bavel, C.H.M. : *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28** (6), 721~724 (1964)
- 9) Davidson, J.M., Bigger, J.W. and Nielsen, D. R. : *J. Geophys. Res.*, **68** (16), 4777—4783 (1963)
- 10) Kirkham, D., Rolston, D. E. and Fritton, D. D. : *Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies, I.A.E.A.*, 3—16 (1967)
- 11) 日本放射性同位元素協会：アイソトープ便覧, (1970)

正 誤 表

頁	行	誤	正
9	左側下から4	4. 秋季の光合成と……	3. 秋季の光合成と……
42	Synopsis 1	experiments	experiment
"	" 6	As results,	As a result,
"	" 10	pattern	patterns
131	左側下から9	5. 摘要	6. 摘要

