

散乱型中性子水分計の使用に関する問題

Problems on Using of a Neutron Scattering Moisture Meter

開発 一郎*・佐倉 保夫**

Ichiro KAIHOTSU and Yasuo SAKURA

1 はじめに

中性子水分計が考案されてから、すでに40年近くが経過し、その間、計器の単純化・安全性・精度等の改良は著しく向上した。中性子水分計は1960年代にはいると、本邦において新しい土質施工管理技術としてかなり普及し、同時に農学の分野においても土壌水分量を求めるための有効な手段として使用され始めた。また、中性子水分計の普及に伴って、水文学においても、地下水の涵養機構の解明の立場から、中性子水分計が有力な測器として活用されだした。中性子水分計の有効性については Bell and McCulloch(1969) や Cho et al. (1977)¹⁾ 等に詳しいが、いずれもそれを野外観測において重要な測器として利用している²⁾。

さて、中性子水分計は他の方法（電気抵抗法等）よりも、以下の点で水分量の測定に有利である。

- 1) 測定値が土性に左右されない。
- 2) 他の方法（サンプリング法を除く）より高い精度で水分量が測定できる。
- 3) 現場の土壌をほとんど乱さずに測定できる。
- 4) 測定器の操作が簡便である。
- 5) 繰り返して短時間に同一地点で測定できる。
- 6) 測定器を移動させることにより多地点の測定が可能である。

以上が主要な長所であるが、一方、放射線障害のほか安定性・管理そしてキャリブレーション等

に関する短所も多い。しかし、前述の長所と短所を公平に比較してみると、現在、野外における中性子水分計の使用は他の方法よりも非常に勝れた方法と思われる。

このように、中性子水分計の利用の意義は高いが、実際の使用にあたってはキャリブレーションのわずらわしき等がついてまわり、意外に面倒なことが多い。しかも、測定に関する誤差をどのように評価するかという問題が生じ、そのためには測定上の誤差要因をどこまで知り得るかということが重要となってくる。考えられる主要な誤差要因としては、以下のようなものが挙げられる。

- (a) 放射線壊変の統計的変動
- (b) 測定器内部の電子回路の安定性
- (c) 回帰式の不正確さ
- (d) アクセスタブのクリアランス
- (e) 土壌中の中性子の減速作用をもたらす元素の存在
- (f) 温度効果
- (g) スタンダードの的確な選定の困難さ
- (h) 線源強度の影響
- (i) 結晶水の影響
- (j) 土壌密度の空間的变化

中性子水分計を使用するに際し、前述の諸要因を利用者側からすべて検討することは困難であるが、可能な限り十分な試験を行なって対策を講じる必要がある。そこで筆者らは、要因の(b)(c)(d)(f)に焦点を合わせ、各々実験を行なってそれらの検

*筑波大学、大学院、地球科学研究科、**筑波大学水理実験センター

討を行なった。以下、中性子水分計の原理について簡単に触れた後、それぞれの実験結果を考察しながら論を進めることにしよう。

II 散乱型中性子水分計の原理

中性子と核反応についてはその方面の文献に詳しいので、ここでは簡単に記すにとどめる。

中性子は通常原子核の中に閉じ込められているが、陽子等の粒子が原子核に打ち込まれると、その時に生ずる核反応によって核外へ飛び出す。中性子水分計の中性子源はこの核反応を利用しているが、核反応すなわち中性子と核との相互作用は大別して散乱と吸収に分けられる。散乱には弾性散乱と非弾性散乱があり、吸収には捕獲と核分裂とがある。中性子水分計の場合、中性子源から放出される中性子は主として数 MeV 程度の高速中性子であり、減速材の原子核との衝突の結果熱中性子になる。つまり中性子水分計では、弾性散乱によって高速中性子とその運動エネルギーを失っていく現象を利用していることになる。

熱中性子の速さの分布は Maxwell 分布をなし(厳密には Maxwell 分布からずれる)、それは、

$$n(v) = n_0 A v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \dots\dots\dots(1)$$

と表現できる。ここで、 n は単位体積当りの中性子密度、 n_0 は単位体積当りの中性子数、 m は中性子の質量、 k は Boltzman 定数、 T は絶対温度 ($^{\circ}K$)、 v は中性子の速さであり、

$$A = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(2)$$

である。また、中性子の平均の速さ \bar{v} は、

$$\bar{v} = \frac{\int n(v) v dv}{\int n(v) dv} \dots\dots\dots(3)$$

であり、 $n(v)$ は速さ v の単位速度範囲の中性子数である。よって、(1)(2)(3)式から、

$$\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(4)$$

を得る。Maxwell 分布の最大値での速さ v_p は、(1)式より、

$$v_p = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(5)$$

従って、

$$\frac{\bar{v}}{v_p} = \frac{2}{(\pi)^{\frac{1}{2}}} \simeq 1.128 \dots\dots\dots(6)$$

となる。温度が $20^{\circ}C$ であれば v_p は (約 $2200m/sec$) であり、そのエネルギー E_p は、

$$E_p = \frac{1}{2} m v_p^2 = kT = 8.617 \times 10^{-5} T \dots\dots\dots(7)$$

$T = 273.16 + 20 (^{\circ}K)$ より、

$$E_p \simeq 0.0252 (eV) \dots\dots\dots(8)$$

となる。

このようにして、中性子水分計の線源から放出された高速中性子は多孔質媒体中の H 原子と弾性的に衝突を繰り返し、熱エネルギー ($E_p \simeq 0.025 eV$) まで減速して熱中性子となるが、それは多孔質媒体中を拡散していくだけになる。よって、中性子密度 n の時間的変化の割合は次式で表わせる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\text{div} \mathbf{J} - \Sigma_a \phi + S \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 \mathbf{J} は熱中性子流 ($= -D \text{grad} \phi$)、 ϕ は中性子束 ($= n v$)、 Σ_a は吸収の一括断面積、 S は中性子の発生項、 t は時間、そして D は拡散係数である。この拡散方程式は、結局中性子の収支式であり、もし D が一定ならば、

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \text{div}(\text{grad} \phi) - \Sigma_a \phi + S \dots\dots\dots(10)$$

となる³⁾。今、系が定常なら、

$$\text{div}(\text{grad} \phi) - F^2 \phi = 0 \dots\dots\dots(11)$$

となり、

$$F^2 = \frac{\Sigma_a}{D} = \frac{1}{L^2}$$

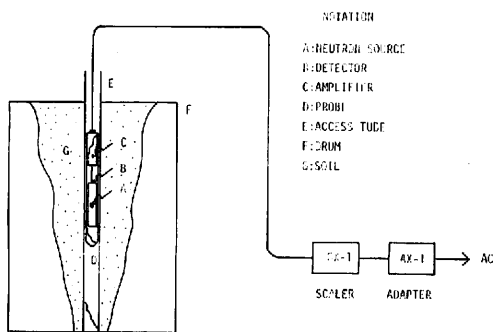
となり、ここで L は拡散距離 (高速中性子が熱中性子になるまでの平均距離で、含水量によって変る) と呼ばれる。

以上の原理から、結局、熱中性子の密度を検出器で測定して水分量を求めることになる。

III 実験方法

1) 実験装置と試料

使用した散乱型中性子水分計は、筑波大学水理実験センターが所有している日本ETL社製のSX-8n挿入型で、放射線源は $50\mu\text{Ci}$ の ^{252}Cf であり、検出器にはHe-3計数管が用いられている。測定範囲および使用温度範囲は各々 $0.05\sim 1.00\text{g}/\text{cm}^3$ と $-10\sim +50^\circ\text{C}$ (メーカー・カタログ)である。スケラーはデジタル表示の日本ETL社製のCX-1型を用い、電源はAC100Vを使用した(第1図参照)。



第1図 散乱型中性子水分計の構造と計測系

アクセスチューブは、外径55mm内径48mm(クリアランスI, 2.5mm)と外径52mm内径45mm(クリアランスII, 4.0mm)の2種類のアルミニウム製を用い、キャリブレーションの試料として砂、ベントナイトおよび関東ローム(野外キャリブレーション)を採用した。水は普通の水道水を使用した。試料を入れる容器は市販の鉄製ドラム缶⁴⁾(60cm ϕ ×90cmH)を使い、その中に試料を密度が極力一定になるように詰めながら、同時にアクセスチューブを埋設した(第1図参照)。

2) 実験手順

(1) 室内キャリブレーション

キャリブレーションの実際については山本ほか(1968)と大体同じ方法なので、ここでは簡単に記す。

砂およびベントナイトに水を加え、空間的に均等にある一定の水分状態に混ぜ合わせ、それをドラム缶に約20cmの層厚毎に一定の仕事量(約18kg \cdot m)で詰めながらアクセスチューブを中央に埋

設した。低水分領域(体積水分率で約30%以下)は砂のみで、中高水分領域は砂とベントナイトを混ぜ合わせて試料とし、2種類のアクセスチューブ各々についてキャリブレーションを行なった。

(2) 野外キャリブレーション

室内で得られたキャリブレーションの結果と比較するために、水理実験センター内の圃場の関東ローム地にて野外キャリブレーションを実施した。アクセスチューブはこの場合、クリアランスが2.5mmの物のみを用い、体積含水率 θ は室内キャリブレーションと同様に、定積 (100cm^3) 土壌サンプラーで同深度にて平面的に3~5個採取し、その後炉乾燥法によって求めた。

(3) 大型恒温恒湿室内のスタンダード計測

大型恒温恒湿室(407W×210H×302Dem, 田葉井社製)に散乱型中性子水分計を入れ、スタンダード計測を収納箱(パラフィンしゃへい)にプローブを入れて行なった。測定温度範囲は $-5\sim +40^\circ\text{C}$ まで約 10°C 毎に一定の温度下で計測を開始した。

計器内部の電子回路の温度に対する影響も調べるため、スケラーと電源器を恒温恒湿室に入れた場合とそうでない場合について各々計測した。恒温恒湿室の温度と計器類のそれとを平衡状態にさせるため、計測を行なうべき温度になってから2時間以上経過後に計測を始めた。

IV 結果と考察

室内キャリブレーションによって、深度10cmおよび20cm以下についての回帰式が次のように求められた。

深度10cm用

$$\theta = 21.024 \times (c. r.)^2 + 60.686 \times (c. r.) + 2.347 \dots \dots \dots (13)$$

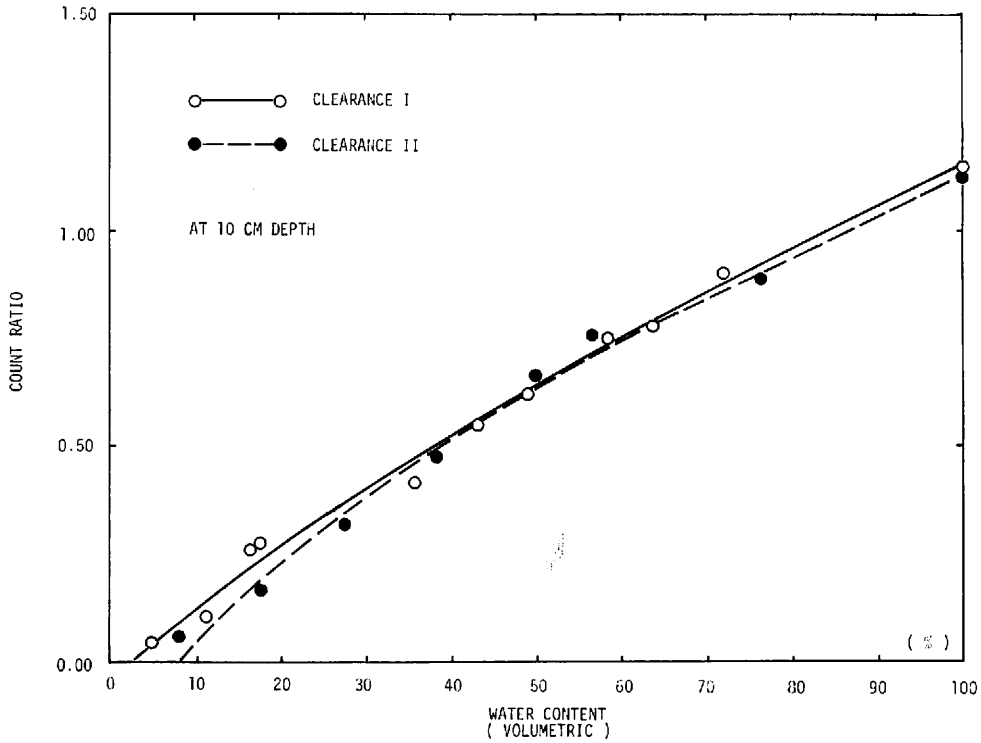
(クリアランスI)

$$\theta = 33.155 \times (c. r.)^2 + 44.792 \times (c. r.) + 8.025 \dots \dots \dots (14)$$

(クリアランスII)

深度20cm以下用

$$\theta = 26.960 \times (c. r.)^2 + 50.900 \times (c. r.)$$



第2図 クリアランスの異なるキャリブレーション曲線(深度10cm用)

$$\div 1.590 \dots \dots \dots (15)$$

(クリアランス I)

$$\theta = 44.649 \times (c. r.)^2 + 44.792 \times (c. r.)$$

$$+ 8.025 \dots \dots \dots (16)$$

(クリアランス II)

ここで、*c. r.* はカウント比である。これらの回帰式は野外で使い易いように、 θ にして0~100%までの範囲を2次回帰式にしてある。

第2図は深度10cmでの θ とカウント比の実験値を示したもので、(15)式を実線で(16)式を破線で示してある。第3図も同様に、(15)式を実線で(16)式を破線にて示してある。これらの図からクリアランスの違いによって、実験値の回帰曲線へのバラツキがかなり異なることがよく解る。すなわち、クリアランスI(2.5mm)よりもクリアランスII(4.0mm)の方がバラツキが大きいことが明らかである。このことは、ここではいって分散値等を算出しなくてもはっきりしており、そのため当然

バラツキの影響が各回帰式の第3項に効いてくるので、低水分領域で誤差が大きくなるという結果を生じる。

そこで、低水分領域については別途にキャリブレーションを行なってその回帰式を求めた。野外において θ が約30%以下という多孔質媒体は、砂および砂礫になるが、ここでは砂のみでクリアランスIIについてキャリブレーションを実行した⁵⁾。その結果以下の1次回帰式が得られた。

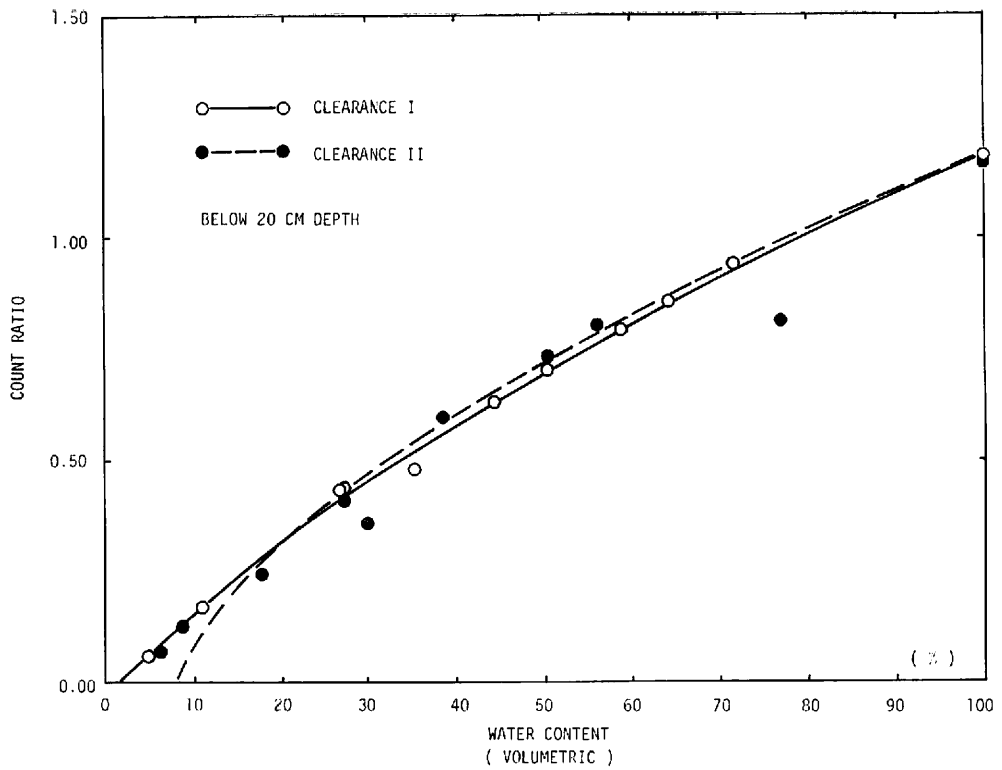
深度10cm用

$$\theta = 85.91 \times (c. r.) + 2.43 \dots \dots \dots (17)$$

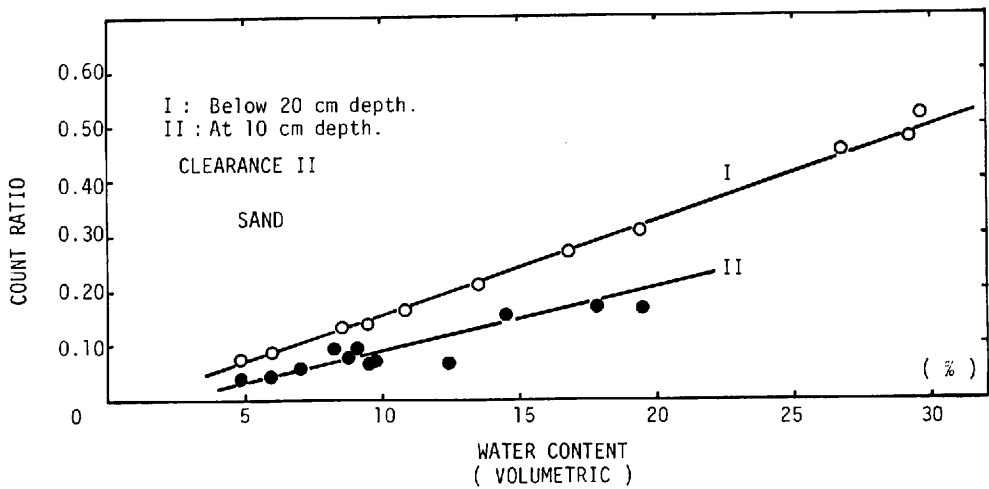
深度20cm以下用

$$\theta = 56.32 \times (c. r.) + 1.34 \dots \dots \dots (18)$$

θ とカウント比の関係は第4図に示されている。深度20cm以下についてはバラツキがほとんど見られないが、深度10cmについては大気の影響を受けるためバラツキが大きくなっている。いずれにしても低水分領域では直線回帰が妥当と思われる



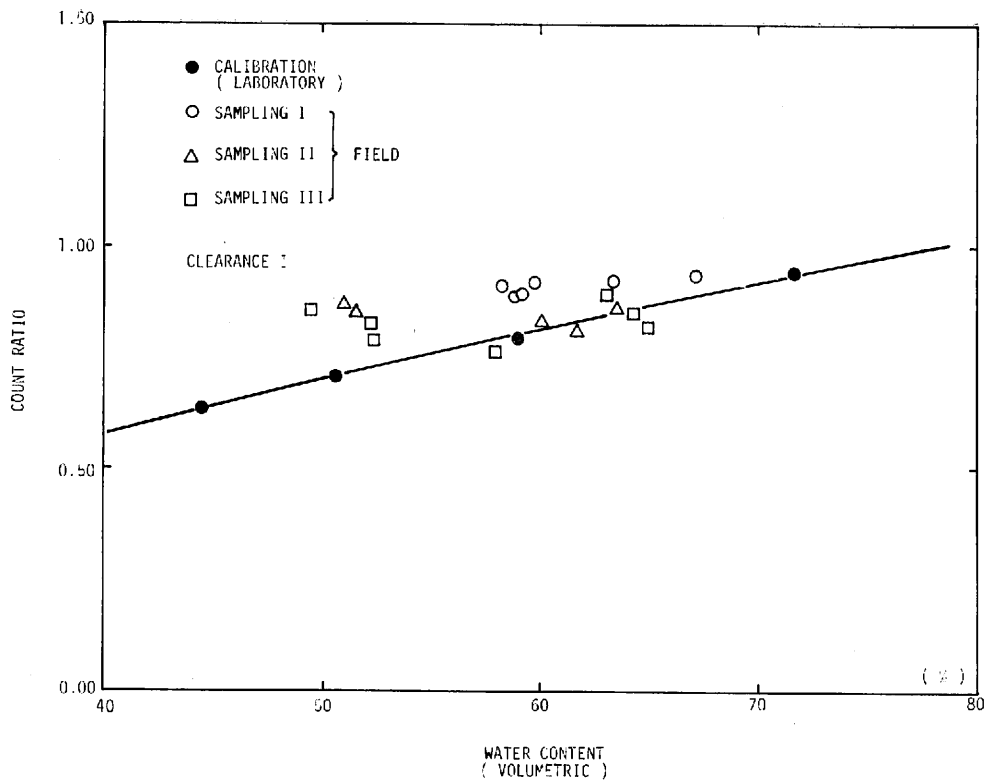
第3図 クリアランスの異なるキャリブレーション曲線(深度 20cm 以下用)



第4図 低水分領域のためのキャリブレーション直線

る。
室内キャリブレーション実施後、野外において
もキャリブレーションを行ない、両者を比較して

みた。クリアランスについての結果が第5図に示
されている。一般に、室内キャリブレーション曲
線と比べると、野外キャリブレーションの値の方

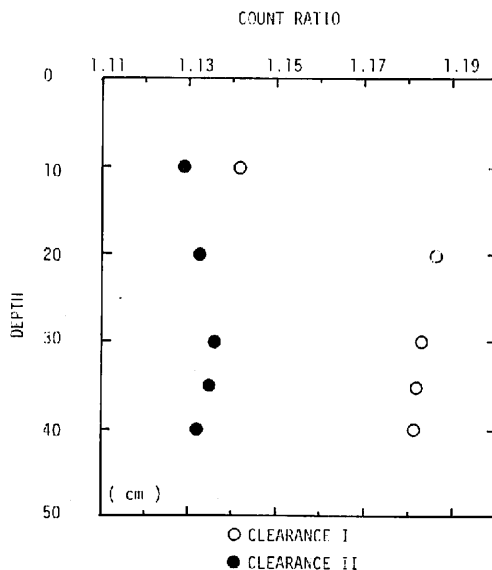


第5図 室内と野外キャリブレーションの比較 (実線は室内で求めたキャリブレーション曲線)

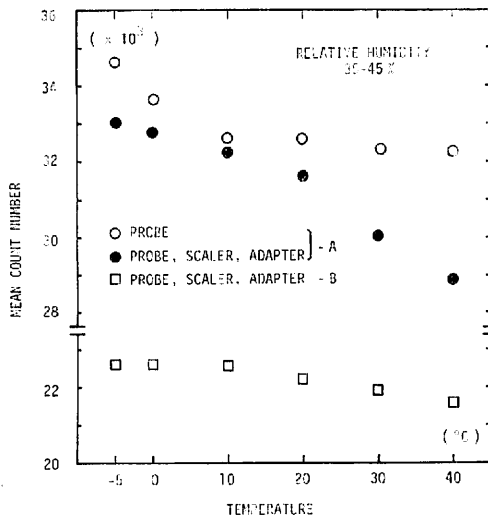
が同じカウント比で θ が低くなる傾向がある。しかし明確な相関は見られない。これは、関東ローム中の有機物や密度の不均一さおよびサンプリングの誤差のためと考えられる。

第6図はドラム缶に水を満たし、クリアランスの違いによるその時の水分プロファイルをカウント比で表わした図である。 θ が全く同一の時でもカウント比に約0.05の差が生ずる点は見逃せない。なぜなら、カウント比の0.05の差は水の場合 θ にして約5%の誤差として計算されるからである。もっとも、 θ が小さくなればその誤差は小さくなるが、任意の θ における誤差を正確に求めることは困難である。つまり、クリアランスIIの方が精度的に若干劣ることが解り、適切な補正を要する。

温度の影響によるカウント数の変化が第7図に示されている。SX-8n型の使用温度有効範囲が



第6図 試料容器に水を満たした場合のクリアランスの違いによる水分プロファイル



第7図 スタンダード計測の温度変化による平均カウント数

メーカー表示で $-10 \sim +50^{\circ}\text{C}$ であるので、一応 $-5 \sim +40^{\circ}\text{C}$ の範囲で試験を行なった。また、その時の湿度は35~45%に調節した⁶⁾。第7図の白丸は、プローブだけを大型恒温恒湿室に入れ、スケーラーとアダプターを室外(約 20°C)に置いて計測した結果であり、黒丸はそれら全部を入れて計測したものである。さらに、□印は筑波大学地球科学系水文学研究室の有する散乱型中性子水分計 SX-8n 型(日本 ETL 社製)について同様に計測を実施した結果である。前者をA、後者をBとして区別した。

さて、第7図からまず白丸が示すように、低温では線源が温度の影響を若干受け、高温にかけて指数関数的に減少することが明らかである。 10°C からはほとんど変化がなく、平常水分計を使用する場合は線源の温度による変化は非常に少ないといえる。しかし、黒丸が示すように、スケーラーやアダプターはそれらの電子回路の半導体の温度特性のためと思われるのだが、高温になるにつれ平均カウント数⁷⁾が減少する。Bの方も変化は小さいがAと同じ傾向にある。変化の度合の違いは、おそらく使用度と製作年月の差によると思われる。いずれにしても、温度の電子回路に対する

影響は一般的に、日較差の大きい場所や測定深度(1m以上)の大きい場合には考慮する必要があると思われる。これについては、従来あまり報告が無いので、今後もっと試験を行なって別の機会に報告したい。

V おわりに

キャリブレーションを主体にした実験結果から、散乱型中性子水分計の使用に際し、測定上の誤差を少なくするためには以下の注意が必要であるといえよう。

まず、アクセスチューブのクリアランスの影響が非常に重要であり、工作上の技術的問題もあるが、プローブに密着するくらいが良いと考えられる。したがって当然、クリアランスの違い毎にキャリブレーションを要する。

次に、キャリブレーションによる回帰式は低水分領域と中高水分領域において別々に求め、出来れば対象とする土性によるキャリブレーションも行なうのが良いと思われる。また一般に、全水分量をカバーするためには2次回帰式が、低水分領域には1次回帰式が適当であろう。特に、関東ロームについてのキャリブレーションに際しては、クリアランスの小さい(少なくとも 2.5mm 以下)アクセスチューブを用い、試料を関東ロームとすべきであろう。

最後に、温度変化の影響も気象条件によっては、中性子水分計の性能の低下に注意しながら考慮せねばならない。

以上、散乱型中性子水分計の使用時の注意点を述べてきた。散乱型中性子水分計は、今後さらに改良が加えられ、より使い易いものになっていくと思われるが、水分量の精度を今以上に良くすることはおそらく困難である。しかし、現実にもっと厳密なデータを要する場合も多く、そのためには近年室内実験等に利用されている透過型ガンマ線水分計の開発に目を向けるべきだといえようである。

終りに、本研究について有益な助言を下された榎根

勇助教授・田中正講師・鳥取大学農学部井上光弘助手、ならびにキャリブレーションに協力していただいた学生諸氏に謝意を表します。

尚、本研究は開発が、地球科学研究科の昭和52年度特別研究のために当センターを利用して行なった実験の一部である。

注

- 1) この他多くのレポートがあり、文献の山本ほか(1969)に詳しい。
- 2) 最近では、山本・土弘(1974)のように地下水流速および流向を求めるといふ新しい利用方法もある。
- 3) ここでは等方散乱で中性子束一定の媒質を仮定している。
- 4) 試料容器にドラム缶を選定した理由は、簡便さに加え、ドラム缶の半径 r が30cmであるから $r > L + L_d$ (L_d :熱拡散距離)を満たすので原理的にも十分妥当だと考える。
- 5) 砂に関する非常に厳密なキャリブレーションがInoue et al. (1978)に報告されている。
- 6) 湿度の影響を除くためにこのような乾燥状態にした。
- 7) 平均カウント数は、電源を入れてから連続して10数回の計測後、約30回計測し、これらの平均をとり、さらにこの試験をもう2回行ないその平均をとって算出した。

文 献

- 長 智男 (1965) : 中性子水分計の使用法について、*土壤物理研究*, 2, 35-37.
- 土工管理とラジオアイソトープ編集委員会編(1974) : 『土工管理とラジオアイソトープ』, 土質工学会, 15-63.
- 八木浩輔 (1971) : 『原子核物理学』, 朝倉書店.
- 山本莊毅・榎根勇・平田 重夫 (1968) : 中性子水分計のキャリブレーションについて, 東京教育大学研究報告, XIII, 87-101.
- 山本毅史・土弘道夫 (1974) : 単一井による地層別地下水の流速および流向の測定(その1), 鹿島建設技術研究所年報, 23, 49-54.
- Cho, T., Y. Nomura, T. Yano, S. Shikasho and M. Inoue (1977) : The use of a surface-type and depth-type neutron moisture meter in studies of soil water regimes—water management in a sand dune area. —*A report for the coordinated research programme on the use of radiation and isotope techniques in studies of soil-water regimes*, I. A. E. A., 55-59.
- Bell, J. P. and McCulloch, J. S. G. (1969) : Soil moisture estimation by the neutron method in Britain. *J. Hydrol.*, 7, 415-433.
- Inoue, M., Y. Nomura, T. Yano and T. Cho (1978) : Calibration curves of a depth-type neutron moisture meter in a sand field. *The final report for the coordinated research programme on the use of radiation and isotope techniques in studies of soil-water regimes* I. A. E. A., 5-15.