

中性子水分計

桂山 幸典*

Neutron Moisture Meter

Kosuke KATSURAYAMA

Reserch Reactor Institute, Kyoto University

I 原 理

中性子水分計は、中性子源から放射された速中性子 (fast neutron) が周囲の水の水素原子と弾性的に衝突を繰返し減速されて、ついに熱拡散速度のエネルギー ($E = \frac{1}{2}mv^2 = 0.025 \text{ eV}$) を持った熱中性子 (thermal neutron) となる。この速中性子から熱中性子になる割合は、中性子源の周囲に存在する水素原子量すなわち水分量に比例する。したがって、熱中性子の量を測定することによって水分量を知ることができる。

中性子と物質との相互作用は、1) 弾性散乱、2) 中性子捕獲、3) 非弾性散乱、4) 核分裂、に大別されるが、水素原子のような弾性散乱による減速作用のすぐれた元素として、重水素、ベリリウム、炭素などがある。

土壌中には有機物としての炭素が存在し、これは中性子水分計における測定誤差の一つの要因となる。

中性子源から放出された速中性子 (エネルギー E_f) は、水中で水素原子と衝突し、ジグザグな経路を進むが、平均18回の衝突で 2 MeV 程度の速中性子が熱中性子 (エネルギー E_t) になる。炭素では同様平均114回の衝突回数となる。このように速中性子が熱中性子になるに要する平均直線距離を、高速中性子の拡散距離 (fast diffusion length, L_f) と呼び、 $(L_f)^2$ を年令 (τ) と呼んでいる。Fermi によれば次式で表わされる。

$$\tau = L_f^2 = \lambda_t \cdot \lambda_s \cdot C/3$$

ここに

λ_s ; 平均自由走行距離 $\lambda_s = 1/\Sigma_s$

Σ_s : 巨視的散乱断面積, (水の場合約0.285)

$$\Sigma_s = N\delta_s$$

λ_t ; 平均自由移行距離 $\lambda_t = \lambda_s/(1 - \cos\theta)$

原子核の質量を M とし, $\cos\theta = 2/(3M)$

C ; 平均衝突回数 $C = \log_e(E_f/E_t)/\xi$

(水の場合18)

ξ ; 平均エネルギー損失 $\xi = \log_e \bar{E}_0 - \log_e E$

水の場合 $\xi = 1$

したがって、水の場合 $(L_f)^2 \approx 2.15$ となり、約 4.7cm もはなれば、ほとんど熱中性子になる。土壌が完全に水で飽和しており、間ゲキ率を 0.4 とすれば、 $L_f \approx 11.8 \text{ cm}$ である。このように熱中性子になるに要する平均拡散距離は含水量により変わることがわかる。

また、熱中性子になってから吸収されるまでに運動する距離の平均を、熱拡散距離 (thermal diffusion length L) と呼び L は次式で表わされる。

$$L = \sqrt{\frac{\lambda_s \cdot \lambda_a}{3}} = \frac{1}{\sqrt{3 \Sigma_s \Sigma_a}}$$

ここに

Σ_{1a} : 巨視的吸収断面積, $\Sigma_{1a} = N\sigma_a$ (水の場合、約 0.028)

すなわち、水の場合 $\sigma_a = 0.33 \text{ barn}$ として、 $L \approx 6.7 \text{ cm}$ である。

以上のことから、中性子水分計における中性子源と熱中性子検出器の幾何学配置において最も効率のよい配置は、平均的な土壌含水比に対して最小 L_{f1} 、最大 $L_f + L$ の範囲にあることがわかる。

今中性子水分計で土壌水分を測定するとき、誤差の要因になり得る元素とその断面積を表一に示す。

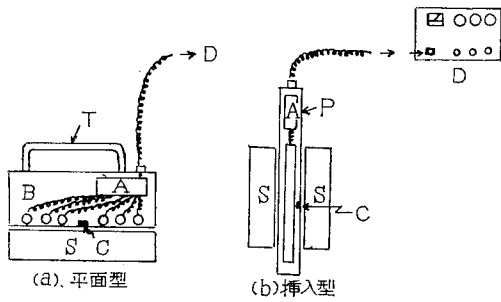
表一 熱中性子の断面積

元 素	断面積 (barn), ($\times 10^{-24} \text{ cm}^2$)	
	散乱断面積 δ_s	吸収断面積 δ_a
H	38	0.33
Be	7	0.01
B	4	750
C	4.8	0.0045
O	4.2	0.2×10^{-3}
Fe	11	2.43
Cd	7	2,400

II 構 造

中性子水分計の構造は、図一に示すように平面型と

* 京都大学原子炉実験所



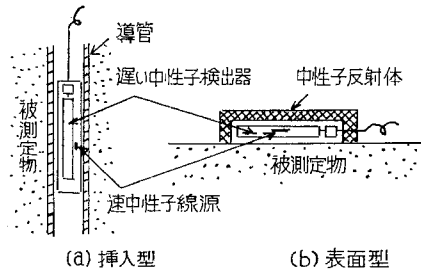
図一 中性子水分計 (A:前置増幅器, B:検出器 (BF₃), C:線源 (AmBe), D:計数装置, S:しゃへい(ボロン入りパラフィン) P:プローブ, T:取手

挿入型とがあるが、いずれも中性子源、検出器および前置増幅器を収納したプローブと計数装置とから成り、使用しないときの中性子線防護のためのしゃへい体がつけられている。

中性子源には、 $(\alpha-n)$ 反応を利用したアイソトープ線源が主に用いられ、 R_dD-B_e 、または $^{241}Am-B_e$ の 5~20mci が用いられる。検出器は、熱中性子に感度の良い BF₃ 比例計数管が用いられる。これは、熱中性子とホウ素との核反応で出てくる α 粒子の電離作用を利用したもので感度が良い。前置増幅器、計数装置は、検出器での電離電流を電圧パルスとして計数するものである。

III 使用の方法および使用上の注意

中性子水分計は、その原理および構造からわかるように、一定体積内の水分量の容積比に対応するものである。したがって、土壌の仮比重が近似的に一定と見なせるかまたは、別に仮比重が測定されていることが必要で



図一 中性子水分計のプローブ

ある。また、含水比との対応では、仮比重一定の条件下で、含水比を変え実験的にそれに対応する計数值曲線、すなわち、キャリブレーションカーブを作成しておく必要がある。この実験には、 $2(L_f+L)$ 以上を一辺とする体積を有することが必要である。

実際、野外での測定は、平面型は地表面を平らにして検出器を置き、単位時間の計数值を測定する(デジタル)か計数率計出力(アナログ)を自記させる。この場合の有効計数領域は近似的に中性子源と BF₃ 計数管の有効長とを半径とする半球状の土壌となる。挿入型は、土壌中の水分の垂直分布や表面からの任意の深さの水分測定に便利なように円筒形プローブに収納されているが、図一に示すような導管が必要である。導管は、プローブとはなるべく密着した内径とし、材料的には、中性子に対して吸収が少くかつ核反応の起りにくいことが必要で、一般にアルミのパイプが用いられる。この場合の有効計数領域は当然のことながら 4π の形で、その直径は平面型と同様に考えることができる。当然のことながら、使用に先立って放射線防護の立場から、法的な届出、管理区域の設定、保管場所の設定など必要な措置をとらなければならない。