

RI 水分・密度計による自動計測システムと 現地圃場の水分変動の測定

上谷富士夫¹・辻 修¹・松田 豊¹

(受理日: 1991年5月31日)

Automatic measuring system of RI probe
moisture-density gauge and the measurement
of soil moisture changing in field

Fujio TSUCHIYA¹, Osamu TSUJI¹ and Yutaka MATSUDA¹

摘 要

現場での土壌水分と密度を直接監視するため、ラジオアイソトープ (RI) を使用した新しい方法が開発され、近年に有効な手段として注目されてきている。この事から、RIプローブ型の計測器を投入し、現場での操作を試みた。RIプローブ計器は、ガンマ線の散乱原理を使用した密度計と中性子水分計から成り立っている。RI装置は次の3つの部分から構成されている: 1) RI線源とガンマ線閃光計数器および中性子に対するヘリウム管検知器, 2) 土壌中に散乱するRIフラックスを検出するスケーラ, そして3) 土壌中のアクセスパイプの内側を自動的にプローブを上下させる昇降機。この昇降機はスケーラから電氣的信号によってコントロールされ、所定の位置に停止すると即座に水分量と湿潤密度の計測が開始し、5回繰り返される。それ故、この自動システムは2ヶ月間の土壌水分の変動を計測することに成功した。RI計器によって測定を良好にするためには、土壌を詰めた大きな容器を用いて校正試験を行わなければならない。この試験によって水分と密度の校正曲線が得られ、曲線の計数は砂質土と火山灰土では大きく異なることも判明した。密度が減少するにつれ、ガンマ線の計数率は指数関数的に増加した。水分量と中性子計数率とはほとんど直線関係にあったので、中性子の計数率の増加は土壌水分の増加を示した。2ヶ月間の現場測定から、降雨量と土壌水分増加量との関係を記述したが、より信頼できる、迅速でそして非破壊的なデータを得ることができた。

キーワード : アイソトープ, 土壌水分, 水収支, γ 線

¹ 帯広畜産大学畜産環境科学科土地資源利用学講座

¹ Laboratory of Land Resource Engineering, Department of Agro-environmental Science, Obihiro University of Agriculture and Veterinary Medicine

I. はじめに

フィルダムや道路建設などの多大な土工事では、多量の現地地盤密度と水分量の測定が必要であり、この作業は不可欠で極めて重要な作業である。従来よりこの測定方法は、砂置換法・炉乾燥法に依存しているが、なるべく現状を維持しなければならない道路建設や各種の土工事では、従来方法による測定作業では対応しきれない困難な場合が多い。例えば、地盤を大きく切削した深い地点で土をサンプリングしなければならない場合、上記の方法は、地盤を大きく破壊してしまう。しかも、測定結果を得るためには、サンプリングした土の炉乾燥を行わなくてはならず、多大な時間と労力が必要とされる。また、現在の施工機械の大型化等により、施工スピードが増加し、測定結果を現地へ反映するためには測定作業の迅速性が求められている。これらの問題を解決するためには、測定がより迅速で容易で、しかも確実な測定方法が要求される。現在これらを満足するものには、最近各分野で用いられるようになってきたR I（ラジオアイソトープ）を利用した水分・密度計による方法があり、現行の方法にとって変わる有効な方法であると言われている¹⁾。

また、農業上では圃場の水収支を考慮するためには土壌水分の変化を的確に追跡する必要がある²⁾、従来法のテンシオメータ法、電気抵抗法、誘電式水分計測法、露天法、熱伝導法、採土乾燥法などはそれぞれの限界と問題点を多数含んでいる³⁾。さらに、寒冷地域では土が冬期に凍結すると、土壌水分分布に変動が生じる。この状態を測定するためには非破壊法が不可欠で、近年R I法の使用が注目され始めている^{3)・4)}。

このR I水分・密度計は放射線障害防止法の規制対象とはならず、取扱いに際しても資格・届出等の必要がなく、高価ではあるが比較的簡単に使用できるものである。R I計器は、昭和35年頃より海外で使用され始め、わが国においても、最近に特にいろいろな土工事に使用されてきている。

この論文の目的は、実際にR I計器を使用してR I計器の特徴と水分・密度測定方法を検討するとともに、自動的に昼夜をとわず、現地圃場で水分量と湿潤密度の変化を探究するシステムを確立することである。そして、現地圃場内で、冬期間でもコンクリートのように硬い凍土内の水分をR I計器を用いて、非破壊状態で計測、検討するものとする。

II. R I水分・密度計の原理

R I水分・密度計の基本原理は、B. Pontecorvoによって1941年に発表され、石油探鉱用に開発されたのが最初である。1950年になると米国のD. J. Belcherらが、挿入型中性子水分計およびガンマ線密度計による土の含水量・密度測定についての研究を発表した。その後、各国において、R Iを利用した水分・密度計の研究が続けられてきた。

日本においては、1957年に建設省土木研究所でR I測定器の実用化試験が開始され、その後研究改良を経て1965年頃から新しい現場含水量・密度の測定法として次第に普及してきた。1968年には土質工学会において、『R I利用研究委員会』が設置され、69年から71年にわたって、在来法との客観的な精度比較のための種々の研究が行われた²⁾。

1. ガンマ線による密度測定の原理

散乱型R I計測器による密度測定は、あらかじめ地盤に埋設したアクセスパイプ内にプローブを挿入し、測定する地点の深度まで下降し、プローブから放出されるガンマ線が土粒子と散乱して生じた一部のガンマ線を計数して、その計数率から密度を求めるものである。いかなる原理を使いガンマ線で密度が求まるかを理解するためには、ガンマ線と物質の相互作用について理解する必要がある。ガンマ線が物質を透過するとき、その物質の分子や原子と相互作用を起し、そのエネルギーを失う。相互作用の主なものに光電効果、コンプトン効果および電子対生成の3つがあるが、これらのうちコンプトン効果を利用することにより、密度測定が可能となる。

コンプトン効果とは、ガンマ線が電子にそのエネルギーの一部を与えて散乱される現象をいう。ガンマ線のエネルギーが0.5MeV程度以上になると、電子に当たったガンマ線は、そのエネルギーの一部を電子に与え、自らそれよりも小さなエネルギーとなり、その方向を変える。吸収物質が充分厚ければ、ガンマ光子は何回も散乱され、そのつどエネルギーは減少していく。エネルギーが減ると光電効果の確率が高くなり、もしガンマ光子が吸収物質から抜け出さなければ、最終的には光電効果によって吸収されてしまう。

このように密度が高くなれば、それだけガンマ光子の吸収量が多くなる。ガンマ線が土と散乱して、吸収せずに返ってきたガンマ光子数を計数することにより

密度を求めることが可能となる。

このように、R I 計測器を用いての密度測定はコンプトン効果によるところが多い。次にガンマ線が物質を透過する際の減衰の割合を考える。ガンマ線源、コリメータ、吸収体およびガンマ線検出器を一直線上に配置したものを想定することにする。ここで、吸収体の厚さを順次変えて検出器に入射するガンマ線の強度を測定する。

吸収体の厚さ x としたときの検出器で測定しガンマ線強度を I とする。いま、吸収体の厚さ x から dx だけ増やすと、この増加した吸収体内でのガンマ線と物質との相互作用により、 I はある量 $-dI$ だけ減衰する。

吸収物質密度を ρ (g/cm^3)、原子量を A 、アボガドロ数を N_0 とし、光電効果、コンプトン効果および電子対生成の原子 1 個あたりの散乱断面積をそれぞれ σ_{ph} 、 σ_c 、 σ_{pa} とすると、吸収体 dx 中でのそれぞれの寄与は、断面積 (原子 1 個あたり) \times 厚さ dx の吸収体のガンマ線の入射方向に対する単位断面積当たりに含まれる原子の個数と表せることから、

光電効果に対して

$$-dI_{ph} = \sigma_{ph} \cdot (\rho N_0/A) \cdot I dx \quad (1)$$

コンプトン効果に対して

$$-dI_c = \sigma_c \cdot (\rho N_0/A) \cdot I dx \quad (2)$$

電子対生成について

$$dI_{pa} = \sigma_{pa} \cdot (\rho N_0/A) \cdot I dx \quad (3)$$

となる。よって強度の減衰は、

$$\begin{aligned} -dI &= (-dI_{ph}) + (-dI_c) + (-dI_{pa}) \\ &= (\rho N_0/A)(\sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pa}) \cdot I dx \quad (4) \end{aligned}$$

となるが、

$$\mu = (\rho N_0/A) \cdot (\sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pa}) \quad (5)$$

とおくと、

$$dI = -\mu I dx \quad (6)$$

と表わせる。この μ のことを線吸収係数と呼んでいる。

線吸収 μ は、同一物質に対しても密度が異なれば、異なった値となるので、 μ を密度 ρ で割ったである質量吸収係数 μ_m がよく用いられる。したがって、 μ_m は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \mu_m &= \mu / \rho \\ &= (N_0/A) \cdot (\sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pa}) \quad (7) \end{aligned}$$

また、 $dI = -\mu I dx$ を積分すると、

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu I dx) \quad (8)$$

ただし、 I_0 は入射時のガンマ線強度であり、 I は

吸収体の厚さ x におけるガンマ線強度となり、この式に $\mu_m = \mu / \rho$ を代入すると

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu_m \rho x) \quad (9)$$

で表される。

しかし、これは散乱ガンマ線を含まない、狭いビームのガンマ線に限られている。

実際には、透過物質の厚さはかなり厚く、広がりをもって入射するので、散乱されたガンマ線も検出器に入射されることになる。

このような散乱の影響は、一般に、ビルドアップ係数 B を設定してそれに含める。

したがって、 I は、

$$I = B \cdot I_0 \cdot \exp(-\mu_m \rho x) \quad (10)$$

となる。

ここで、ビルドアップ係数 B は、ガンマ線のエネルギー、吸収係数、検出器の種類等の種々の条件によって異なるので一般的表式として求めることはできない。

コンプトン効果が圧倒的に効いているガンマ線のエネルギー範囲においては、式 (7) は次のように書いてもさしつかえない。

$$\mu_m \approx (N_0/A) \cdot \sigma_c \quad (11)$$

また、原子 1 個あたりのコンプトン断面積 σ_c は、その原子に属する電子の数、すなわち原子番号 Z に比例するので、式 (11) は、

$$\mu_m \approx (N_0/A) \cdot \sigma_c N_0 (Z/A) \cdot \sigma_{ec} \quad (12)$$

ただし、 σ_{ec} は電子 1 個あたりのコンプトン散乱断面積であるから、(12) 式で表すことができる。

以上のことより、コンプトン効果が圧倒的に効いているエネルギー範囲のガンマ線において、質量吸収係数 μ_m は、土などを構成する軽い物質については物質も種類によらず、ほとんど一定になるという重要な結論が得られる。

式 (10) において、検出器と線源の幾何学的条件などを一定にしておけば、物質の密度はガンマ線強度の関数になる。したがって、線源から検出器に達する単位時間あたりのガンマの数を計数することにより、物質の密度を知ることが可能となる。

R I 計器を用いて地盤の湿潤密度を測定するためには、あらかじめ密度既知の供試体を作成して、ガンマ線の計数率 (1 分間当たりのガンマ線の数, cpm) と湿潤密度 (g/cm^3) の関係を求めておかなければならない。この関係を求める試験を校正試験と呼び、求められた実験式を校正式と呼んでいる。このガンマ

線計数率と湿潤密度の関係から地盤の密度を求めるのである。

一般に、ガンマ線計数率が低くなると湿潤密度が高くなる傾向をもつ。

2. 中性子による水分測定の実理

挿入型R I計器による水分測定は、密度測定と同様に、あらかじめ地盤に埋設されたアクセスパイプ内にプローブを挿入し、水分測定を行う地点の深度まで降下させる。プローブに装備された線源から放出した中性子線が土中の水素原子と散乱して、生じた熱中性子の数を計数することにより水分量を求めるものである。

中性子は電気的に中性で、物質の電子によって影響を受けない。したがって、原子を励起や電離することによってエネルギーを失うことはないが、中性子は原子核との核力によって強く相互作用するために、物質中を進むと次第に減速され、また散乱される。相互作用には、弾性散乱、非弾性散乱、核反応および核による中性子捕獲などがあるが、エネルギーによりその様相が異なっているために中性子はそのエネルギーによって高速中性子、熱外中性子、熱中性子などに分類されている。

数MeVのエネルギーの中性子が最もよく起こす原子核との相互作用は弾性散乱である。プローブに装備されている熱中性子線源から放出される中性子の平均エネルギーは、2.35MeVであるので、原子核との相互作用はそのほとんどが弾性散乱となる。

原子核が中性子との衝突によって受け取る平均エネルギー(原子核の反跳エネルギー)、すなわち、中性子が失うエネルギー E_r は、次の式によって表される。

$$E_r = 2A \times E_0 / (A + 1) \quad (13)$$

ただし、 E_0 は中性子が衝突前に持っていた運動エネルギーであり、 A は原子核の質量数である。

式(13)より、原子核の反跳エネルギーが最大となるのは、 $A = 1$ 、すなわち、水素の原子核と衝突したときであり、原子核が重くなるにつれて反跳エネルギーは減少していくことが分かる。したがって中性子が水素の原子核に衝突した時に最もその運動エネルギーが減り、減速されることを意味する。

中性子が物質中を散乱し、散乱を繰り返すたびにどんどん運動エネルギーを失い続け、これ以上エネルギーを失うことがなくなる点まで達する。この状態の中性子を熱中性子と呼ぶ。中性子は、速中性子線から放出さ

れた時のエネルギー状態から熱中性子になるまでには、物質中で何回となく衝突および散乱を繰り返す。この回数は、水素では平均18回で、それ以外の元素ではこの回数よりもはるかに多い回数となっている。また、ある物質が速中性子を減速される能力のことを減速能というが、この減速能は、水素原子がほかの原子よりも飛び抜けて高いことが分かっている。このことから、水素が他の元素に比べて速中性子を減速されるのに優れているのが分かる。

プローブ内の線源から放出される速中性子によって、土中で生成される熱中性子はそのほとんどが土中の水素原子によるものと考えられている。一般に土中の水素原子は水分量に対応するので、熱中性子数を計数して土中の水分量を間接的に求めることができるのである。実際は熱中性子検出管で検出されスケアラで計数される熱中性子の計数率(1分間当たりの熱中性子の数、cpm)と含水量(g/cm^3)の関係は、含水量の既知供試体を作成して求める。この作業をガンマ線密度試験と同様に校正試験と呼び、求められた実験式を校正式と呼んでいる。一般に、中性子計数率が高くなると含水量が増大する傾向にある。

3. 校正試験

R I水分・密度計を用いて土の湿潤密度と含水比を測定するためには、あらかじめガンマ線計数率と湿潤密度、および中性子計数率比と含水比の関係を求めておくことが必要となる。湿潤密度の校正式は、

$$\rho_w = a + b \cdot \ln R_g \quad (14)$$

ここに、 ρ_w は湿潤密度(g/cm^3)で、 R_g は計数率比である。ここに、 R_g は $R_g = n / N_0$ であり、 n は現場ガンマ線計数率(cpm)で N_0 は標準体ガンマ線計数率(cpm)で与えられている。

次に、含水比(ときには含水量)の校正式は、一般に次式で表される。

$$\omega = a + b \cdot R_n \quad (15)$$

ここに、 ω は含水比(%)で、 R_n は中性子計数率である。ここに、 R_n は $R_n = n / N_0$ であり、 n は現場中性子計数率(cpm)、 N_0 は標準体中性子計数率(cpm)を用いる。

式(14)および式(15)において、上の湿潤密度や含水比を算出するのに現場計数率 n でなく、計数率比 R_g 、 R_n を用いる理由を次に説明する。

放射線の強度は、時間の経過にもなまって減衰していくので、同じ湿潤密度のものを測定しても日数がた

てば計数率は校正時に比べて減少している。このため、計数率比を用いて放射線強度の時間変化に対する補正を行わなくてはならない。

具体的には、時間経過によって、形状、重量、組成が変化しない物質を選定して、これを標準体（ここでは、プローブ収納箱）とする。この標準体の中にプローブを挿入してガンマ線計数率および、中性子計数率を計測した値を標準体計数率とする。例えば、数カ月後に放射線強度が $4/5$ に減少したとすると、その時点での標準体および校正時と同じ湿潤密度のものを計測すると、計数率比 R_g は、

$$R_g = (n \cdot 4/5) / (N_0 \cdot 4/5) = n / N_0 \quad (16)$$

となり、校正時と同じ計数率比になる。

したがって、計数率比で校正しておけば、放射線強度の減衰による誤差は考えなくてもよくなる。

4. RI計器の誤差要因

放射線が最初の個数の半分に減少するのに要する時間を半減期と呼び、放射性同位元素として利用できる期間の日安となる。

計器は校正試験にあるように計数率比で補正するので、線源強度の減衰による計数率の低下にともなう誤差は考える必要がないが、精度に影響するので、放射線計数値があまり小さくならないようにする必要がある。

原子核の崩壊は、統計的に起こっているから原子核からの放射線の数も確率的に変動している。同じ物質をほとんど同時に同条件で測定したとしても、単位時間当りに計数される放射線の数は一定ではなく、統計的なゆらぎを持ち平均値のまわりに分散する。

測定した計数率を N 、測定時間を t (分) とすると、前述のように計数率は、 N/t を中心にしてばらつきを持つ。そのばらつきの程度は標準偏差 σ (cpm) で表すと、

$$\sigma = N / t \quad (17)$$

となる。

したがって相対精度は、 $100 / \sqrt{N} \cdot t$ (%) となるので、測定時間を長くすれば精度が良くなることが分かる。

すでに述べたように線源強度の減衰による放射線計数率そのものの減少は、精度に影響するので、放射線計測の精度を維持するためには、同一地点での計測を数回行い、その平均を取り計数精度を上げてやる必要がある。

中性子水分測定の原理から、土中の自由水や結晶水および有機物を構成する水素原子とを区別することはできない。有機物を多く含む土の含水比を測定しようとする場合は、この点に注意して計器を校正しなければならない。

土中に、ほう素、塩素、マンガン等の熱中性子をよく吸収する元素を多く含む場合には、土中で生成した熱中性子の一部がこれらの物質等に取り込まれる割合が高くなるので、計器が計測する熱中性子計数率が減少してしまい、あたかも土中の含水比が少ないように見える。特に、塩分の多い材料については、この点に注意しなければならない。

プローブを挿入するアクセスパイプの内径は、プローブ外径に近いほど測定感度が良くなる。孔径があまり大きくなると、プローブに偏りが生じるので誤差要因となる。

そして、孔壁とアクセスパイプ間の空隙が大きいと誤差要因となる。計器は空隙の乱れも計測していることになるので、空隙は開けないことが望まれる。

III. 実験装置と方法

1. 挿入形RI水分・密度計と自動昇降機

使用したRI計器は、フィールドテック社製挿入型RI水分・密度計 (PB-205) である。その構造仕様の特徴を述べると、重さ4.1kgで外径 ϕ 38mm、長さ1029mmのプローブからなり、10気圧防水構造になっている。そして150 \times 150mm角、長さ1160mm、重さ16.5kgのプローブ収納庫があり、これを標準体として利用する。

湿潤密度の測定方式にはガンマ線後方散乱型が採用されており、その線源に、半減期5.25年の70 μ Ci、2.59MBqのコバルト60 (Co-60) が用いられている。他方、水分量の測定方式には中性子後方散乱型が使用され、その線源には半減期2.65年、30 μ Ci、1.11MBqのカリフォルニウム252 (Cf-252) が用いられている。いずれも、ステンレス製の2重カプセルに封印されている。ガンマ線用の検出にはシンチレーション・カウンタが用いられ、他方中性子線の検出にヘリウム (He-3) 管が用いられている。電子回路仕様から見ると、いずれも20dBの前置増幅器が使われている。プローブの構造と線源や検出器の相対位置を図1に示す。プローブに装備されているCo-60から放出されるガンマ線が、上粒子と散乱を繰り返し、散乱によ

て生じたガンマ線を、プローブ内のシンチレーション・カウンターにより計数し、ケーブルを通じてスケーラ上に印字するようになっている。同様にプローブに装備されているCF-252から放出されている中性子線

が土中の水分と散乱し、それにより生じた熱中性子を、プローブ内の ^3He 管で計数し、スケーラ上に印字するようになっている。

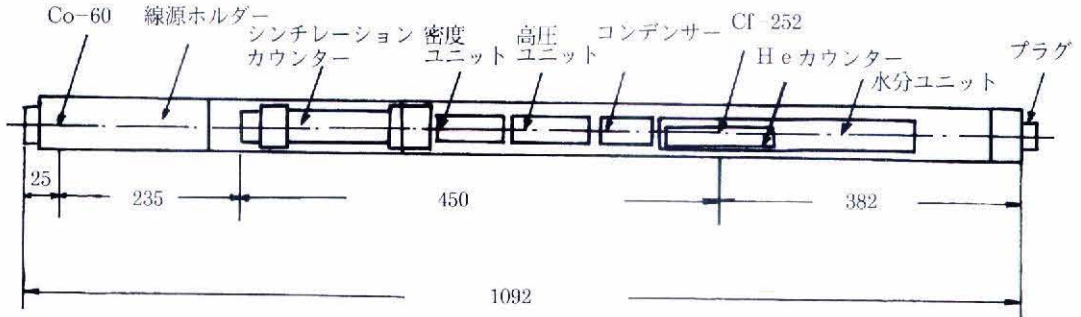


図1 プローブの構造と線源・検出器の位置

ここで用いるスケーラはSC-3型とよばれるもので、プローブと同軸4芯ケーブル30mで接続されて使用される。スケーラはプローブの電源供給と水分・密度検出器の信号を計数する機能、計測タイマーと連動して、昇降機の起動・停止の制御機能を持つ。また、計測データは大型液晶板に表示されるとともに、24桁ドットマトリックス方式の印字機能を持つプリンタから出力され、さらにデータをメモリに集録してRS-232Cインターフェイスでコンピュータに出力することが可能である。

昇降機は図2に示す構造からなり、地盤に埋設され

た塩化ビニール管内を自動的に挿入型RIプローブを昇降させる装置である。プローブの昇降は手動でも可能であるが、スケーラ・コントローラを通じて遠隔操作を行う。昇降範囲は0～5mで、1cmのピッチで測定点の起動・停止が可能であり、自動繰り返し計測ができ、計測時間は自由に変えることができるシステムになっている。

2. 校正試験の方法

この試験では、音更町長流枝内の採取された凍上抑制層用の帯広砂質土（仮称）と工学実験圃場から採取した畜火火山灰土の2つの試験土を用いて行った。試験を始める前にプローブを標準体に挿入したままで、ガンマ線および中性子標準体計数率を計測する。校正試験終了後にも同様な標準体計測を行う。

校正試験を行うにあたり、ビニールシート上に試験土を約500kg用意し、噴霧器で加水し含水比を調整する。秤量計で試験土を40kg正確に計り分け、各40kgずつに供試体作成用のモールド（全高さ120cm、内径90cmで、下から30cm、60cm、90cmで分割できるようになっている）の中にアクセスパイプとなる塩化ビニールパイプ（外径60mm、内径50mm）をその中央に立てたまま試験土を投入する。供試体作成用ランマーで密度が均一になるように締め固め続ける。この作業を、試験土の高さが約90cmになるまで繰り返す。試験土の投入回数から供試体の重量を求め、さらに供試体の高さを

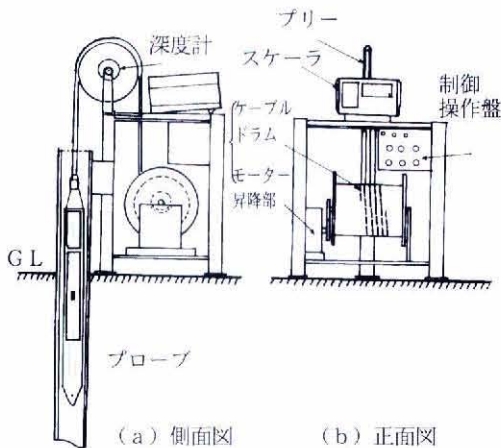


図2 自動昇降機の構造

金製巻尺を用いて求め、その湿潤密度を計算により求める。

プローブをウインチに連動しているワイヤーにつき、アクセスパイプ内にプローブを挿入しガンマ線計数率と中性子計数率を計測していく。

供試体内での計測位置は、ガンマ線計測では、下から10cm, 33cm, 50cmで、中性子計測では、下から10cm, 20cm, 30cmの各点で、それぞれ5分間（5回）計測を行った。そして各点で得た計数率の平均を求めて、それをガンマ線計数率および中性子計数率とした。

計測が終了したら、供試体からランダムに5箇所、約60gの土を採取して100mlビーカーに入れ、炉乾燥して含水比を求める。

こうして、1個の供試体の計測が終ると、また同じように試験土に加水して含水比を変えて供試体を作成してまた計測を行っていく。

3. 畜大圃場での現地RI測定の方法

実験圃場に直径約7cmの穴を1.5cm（現在は深度5m）切削し、その中に校正試験で用いたのと同質、同径のアクセスパイプを埋設し、昇降機でその中に挿入したプローブを所定の位置に降下して、ガンマ線計数率と中性子計数率比を計測した。計測した深さは、ガンマ線では深さ90cmの地点で、中性子では30cmの点である。各点を、それぞれ5分間（5回）計測を行って、その平均値を採用してガンマ線計数率および中性子計数率比とした。測定を行う前と測定を行った後にそれぞれ、標準体計数率の計測を行った。

この測定は、1989年11月から開始したが、現地の凍結のため、凍上試験区に対して行われた。そして翌90年5月まで測定した凍上内の測定結果は別の機会に報告するとして、ここでは標準体の計数率の衰退のみ扱うとする。現地圃場の測定は、1990年10月25日から12月25日の2カ月間にわたって行った。

IV. 実験結果と考察

1. 標準体計数率の減衰

一般にR Iの計数率は時間の経過とともに減衰して行く。1日の試験前後には必ず標準体の計測を行ったことから、各月ごとの標準体計数率の減少の傾向が明白に見られた。この傾向を図3に示したが、両者とも経過時間とともに直線的に衰退し、中性子計数率では相関計数Rは、 -0.985 と良好な関係が得られたものの、ガンマ線計数率では -0.726 と低い値となった。

これは、4月に若干のバラツキが大きくなったためであり、標準体計測時にコンクリート壁などの避けい物に近接させたためであり、ガンマ線測定時にプローブを避けい物から最低3m以上を離して計測すべきであった。R Iの崩壊はそれぞれ固有な確率によって生じ、単位時間内に崩壊する原子数はそのとき存在するR Iの原子数に比例することが知られている。したがって原子核の数は、時間とともに指数関数的に減少するものの短期間では直線に近似できるものとする。各月あたりの減衰割合は、ガンマ線では計数値が約3.6、中性子では90程度の低下と算定された。

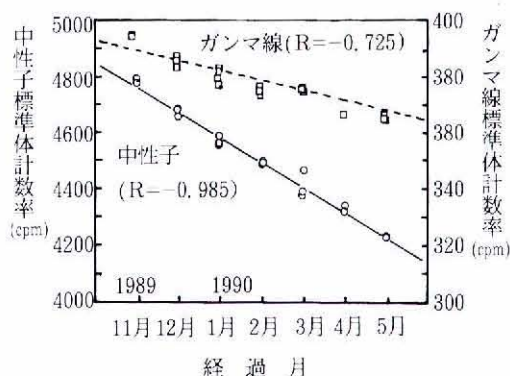


図3 中性子およびガンマ線の減衰

2. 校正試験による校正式の算定

室内で行った校正試験から湿潤密度および含水比とR I測定値との関係を求めるため、帯広砂質土の湿潤密度とガンマ線計数率比の関係を図4に、そして畜大火山灰土の湿潤密度とガンマ線計数率比の関係を図5に示した。結果みると、湿潤密度はガンマ線計数率比が高くなると指数関数的に低下する傾向があることが分かる。他方、帯広砂質土の含水比と中性子計数率比の関係を図6に、そして畜大火山灰土の含水比と中性子計数率比の関係を図7に示した。逆に、中性子計数率比が高くなるほど含水比が直線的に増大することがわかる。すなわち、ガンマ線は土の粒子が密に詰まるほど散乱を繰り返し、散乱過程でガンマ線が吸収され、その光子の数が減少する。ガンマ線光子のカウント数が小さければそれだけ土の密度が大きくなる。

図4に示すように、帯広砂質土ではガンマ線計数率比が0.3増加すると湿潤密度が約0.03 (g/cm³)減少し、図5の畜大火山灰土では、ガンマ線計数率比が0.

3増加すると湿潤密度が約0.05 (g/cm³) 増大することが分かる。このように校正式は上の種類によっても異なることから、R I計器の普及の問題点のひとつである。

わが国の土壌は、一般に変化に富み各種の特殊な火山灰土が広く分布している。一ヶ所でも2、3種の土層に遭遇するため、それぞれの土壌に対して校正しなければならぬ問題が生じる。

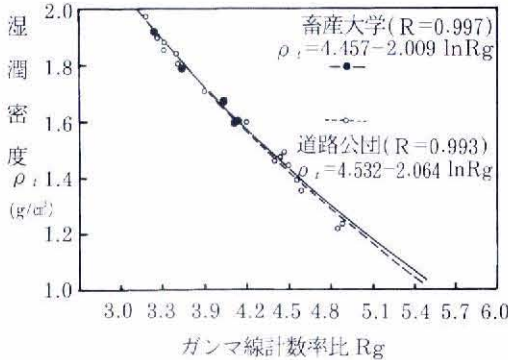


図4 帯広砂質土の湿潤密度とガンマ線計数率比

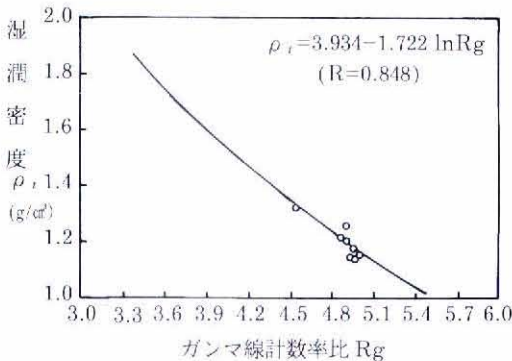


図5 畜大火山灰土の湿潤密度とガンマ線計数率比

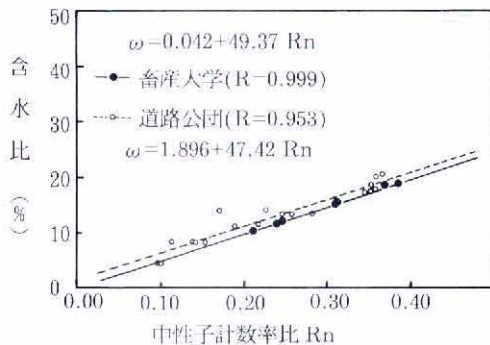


図6 帯広砂質土の含水比と中性子計数率比

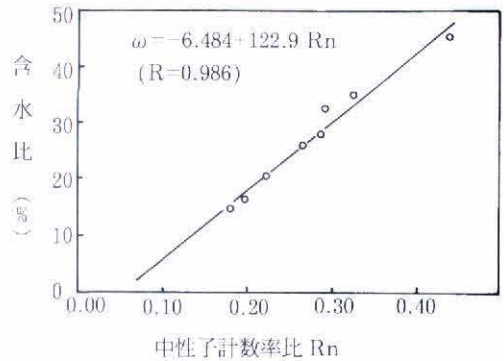


図7 畜大火山灰土の含水比と中性子計数率比

他方、プローブに装備されているCf 252から放出される速中性子が土との相互作用により生成される熱中性子は、そのほとんどが土中の水素原子によるものと考えられるので、速中性子が土中で散乱して行くにしたがって生成した熱中性子のカウント数が多いとそれだけ土中の水分量が多いことになる。

図6の帯広砂質土について見れば、中性子計数率比が0.05増加することに含水比が約2.5 (%)増大し、畜大火山灰土について見ると、計数率比0.05増加することに6.15 (%)増大しているのが分かる。

上の違いによる校正式の計数の変化は中性子の方が大きく、同じ計数率比において畜大火山灰土の方が帯広砂質土よりも、かなり含水比が高くなっている。これは畜大火山灰土の保水能力が大きいことを示す。

各土についての相関係数は帯広砂質土で、湿潤密度とガンマ線計数率比の関係では0.992、含水比と中性子計数率比の関係では0.999、畜大火山灰土では、湿潤密度とガンマ線計数率比の関係では0.845、含水比と中性子計数率比との関係では0.986である。この相関係数の値を見ると、非常に高い数値となっているので信頼性が高いと思われる。

この校正試験で得られた校正式の信頼性を確認するため、日本道路公団試験所の土工試験室に依頼し、別のR I計器を用いて、帯広砂質土の校正試験を行ってもらった。その結果、図4と図6に小さな白丸でプロットして得られた点が公団で得た値である。校正式の比較を行うと、湿潤密度とガンマ線計数率比との関係では、両者の校正曲線は非常に近似していることが分かる。一方、図7は含水比と中性子計数率比との関係であるが、両者の関係式には多少ずれが生じているが、

そのずれは含水比にして約2%に過ぎなかった。

2つの校正式はいずれも近似していることから、この実験によって求められた各校正式は十分に信頼性ができると確信するものである。

3. 畜大圃場における現地測定の結果

現地圃場で2ヶ月にわたって毎日計測した計数率比から、この実験で求めた係数処理を行い、湿潤密度と含水比の変動を求め、結果を図8に示した。図中には降雨量の棒グラフも示したが、これによると12、16、27、および37日目の含水比の増加傾向が顕著に見られた。この時の降雨量はそれぞれ68、38、19および62mmであった。中性子計数率比の増加は、それだけ降雨による土壌の水分の増加を反映するとを示している。

また、降雨量のない期間を見ると、土壌中の水分が下方に浸透あるいは蒸発に使用されるかのいずれかによって、含水比が低下しているのが分かる。経過日数3日目から10日目、16日目から26日目などの期間は降雨量がなく、経過日数3日目から10日目にかけては約3.7%、16日目から26日目にかけては約4.9%の水分低下が推測される。

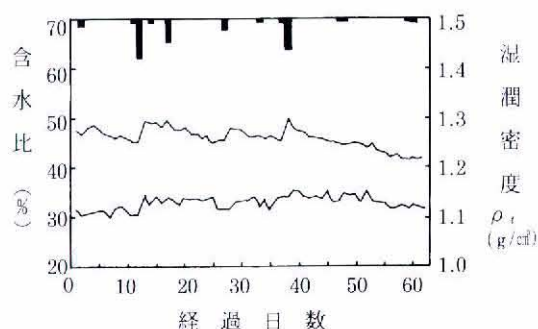


図8 含水比および湿潤密度の変動と降雨量

圃場計測において、中性子計数率比が増加するとガイマ線計数率比が低下することが理解できる。これは土壌の含水比が増加すると増えた水分だけ湿潤密度が大きくなることが明白となる。

経過日数40日目(12月初旬)あたりから中性子計数率比が降雨量があるにもかかわらず低下が見られ、また、ガンマ線計数率比が増加が見られる。経過日数51日目(12月15日)から最終日(12月25日)までは中性子計数率比の低下とガンマ線計数率比の上昇が顕著が現れていることが分かる。この時期から日平均気温がマイナスになって土壌上部が凍結を始めた。土壌凍

結により、凍結上層へ下部の水分が吸い上げられて、土壌下部の含水比が低下したと考えられる。経過日数41日から最終日までの水分変化を算定すると、12月5日に測定した含水比は約45.8%であるから、それから最終日に測定した含水比、約41.9%を差し引くと、3.9%が凍結開始期間に含水比の減少を起すことが分かった。

4. 降雨量の増加にともなう計数率比の変化

降雨の生じた日に、増加水分量によって中性子計数率比がどのくらい増加したかを調べるために、帯広畜産大学が公表した気象データをもとに、降雨の生じた日の雨量を調べ、その間に計測した計数率比の変化量を調べた。図9に、その計数率比の変化量と雨量との関係を示した。降雨量の増大にともなって計数率比が増加していることが明白にわかる。しかし、降雨量10mm以下を見ると、計数率比の変化量が減少していたり、あるいはほとんど変化していない。これは、降雨量が少ないため、計数率比測定点の深さ30cmの点まで水分が到達していないためと推測される。

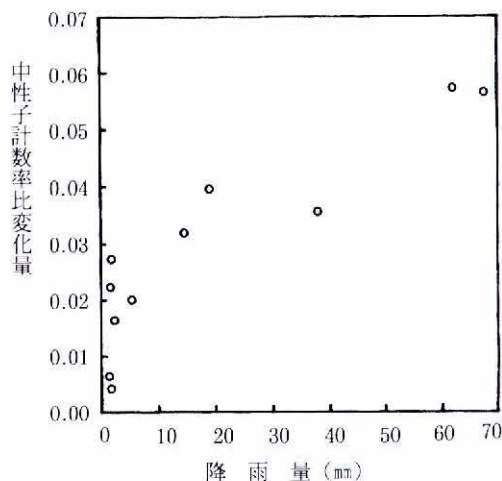


図9 降雨量と中性子計数率比の変化量

降雨量10mm以上の各点を見ると、先の校正試験で求めた畜大火山灰土の校正式をもとに含水比の増加量を調べると、降雨量14.6mmのとき1.4%、19.2mmのときは2.4%、38.2mmのときは1.8%、62.2mmのときは4.6%、67.8mmのときは4.5%と、降雨量による含水比の増加量が求まった。それぞれの降雨量のあった日の土壌状態の違いや降雨継続時間のズレ、また降雨停止時から計数率計測時までの時間的ズレなどが原因となっ

て、降雨量38.2mmと67.8mmの点では、他の点より降雨量が少ない結果となった。含水比増加量のばらつきの原因を考慮に入れると、全体的にはほぼ正確で、迅速で、非破壊で含水比増加量を知ることができたと考える。

V. お わ り に

RI水分・密度計を用いて校正試験を室内で試験するとともに、現地圃場で連続測定を行った。現地測定では、測定土壌の校正式が分かっているならば、降雨による圃場の瞬時の含水比や湿潤密度、また水分量の経時的変化が迅速にしかも、容易に求められることが分かった。また、圃場の含水比と降雨量の関係を調べておけば、圃場の含水比をRI計測器を用いて計測することにより、降雨量の土壌に与える深さ別、時間的遅れの推定が可能となる。従来24時間炉乾燥法での水分や砂置換による密度測定方法では、土壌サンプリングなどの多大な労力と時間を消費する。

また、地盤の深い場所においては、地盤を大きく切削してサンプリングをしなければならないので、地盤を乱さずに現状のまま施工しなければならない土工事において、RI水分・密度計以外の方法では不可能である。したがって、RI計測器を用いた計測方法は大きな利点が多いことが分かった。しかし測定する土の種類が変わるごとに、室内における校正試験を行わなくてはならない点が、労力と時間を費やすの問題である。そこで校正試験を上質ごとに行わなくて済むような管理指標を用いれば、RI計測器の適用について非常に有利となるであろう。この点は今後検討していかなければならない問題である。このように、RI計測器の自動化システムは、地温の測定を行う簡易さと同様に、土壌水分の状態をモニターでき、今後の農地圃場における水収支計算をより正確なものとするに多大な可能性を与えてくれることが判明した。

引 用 文 献

- 1) 高速道路技術センター：ラジオアイソトープによる盛土管理手法の研究、報告書、1984
- 2) 上質工学会：土工管理とラジオアイソトープ、上質工学会、1974
- 3) 福田正己：ガンマー線水分計による凍上中の水分移動の測定、雪氷44-1、1-11、1982
- 4) CHANASKY, D. S. and M. A. NAETH: Mea-

surement of near surface soil moisture with a hydrogenously shielded neutron probe, Can. J. Soil Sci. 68, 171-176, 1988

- 5) FREITAG, D. R. : Methods of measuring soil compaction, Compaction of agricultural soils (edit. ASAE), 55-61, 1971
- 6) HILLEL, D. : Introduction to soil physics, Academic Press, 61-64, 1982

Summary

To monitor soil moisture and density in the field, a new method using radioisotope (RI) has been developed and turned to be effective technique in these days. Hence we attempted to accept the RI probe typed gauge and learned to handle it in the field. RI probe gauge consisted of the density meter used in gamma ray backscattering and the moisture content neutron meter. RI gauge instrument consists of three main components; 1) a probe contained a source of RI and a detector of scintillation counter for gamma ray and of He-3 tube for neutrons, 2) a scaler to monitor the flux of RI scattered by the soil, and 3) an elevator which rises and falls the probe automatically through the access tube in the soil. This elevator was controlled by the electrical sign from the scaler and as soon as the probe was stopped at the desired position, the measurement for both moisture content and wet density was begun immediately and repeated by five times. This automatic system was therefore succeeded to monitor the fluctuation of soil moisture during two months.

To succeed the measurement by RI gauge, the calibration test must be carried out in soil-filled large containers. According to these tests, the calibration curves were obtained for the moisture and the density and it found that the factors of curves were different between sandy soil and volcanic ash soil. As soil density decreased, the count rate of gamma ray increased with the exponential relation. Since a nearly linear relation between neutron count rate and soil wetness was

obtained, the increasing count rate of neutron gave soil moisture content increasing.

From two months' observation of the field, we could obtained the more reliable, more rapid and non-destructive data of the neutron meter that described the relationship between amount of rainfall and increment of soil moisture content.