

γ 線の透過・散乱を利用した密度・水分測定法

劉 京南・鷺見 哲雄

Density and Moisture Measurement by Gamma Ray Transmission and Scattering

Jin Nan LIU and Tetsuo SUMI

In conventional nucleonic gauges, density and moisture are measured by gamma rays and neutrons, respectively. The authors have carried out experimental studies, aiming to develop a new technique to measure both density and moisture by using a single gamma ray source. The result shows that there is a possibility of density and moisture measuring by gamma ray transmission and scattering. In the case of the transmission method, a spatial resolution in vertical direction as good as 40 mm is attainable. This performance will be effective for the study of soil nature under heavy rain fall.

1. まえがき

土木分野で、「土の締め固め」という技術¹⁾は道路、アースダムをはじめ、河川堤防、鉄道、飛行場などあらゆる土の構造物の建設に不可欠なものである。そして、その施工管理には土の嵩密度および水分の測定が重要な役割を果たす。また、梅雨期や台風のシーズンの集中豪雨で、土砂崩れによる災害がしばしば発生している。これは地盤内にしみ込む雨水の作用が最大の要因とみられているので、現象の解明には、ある深さにしみ込んだ雨水の量およびしみ込みの速度の測定が必要となる。農業灌漑の分野においても、同様に水分の測定は重要である。

従来、土の嵩密度および水分の測定には砂置換法および炉乾燥法²⁾が慣用されてきたが、これらの方法はかなりの手間と時間を要するばかりでなく、実施する担当者の熟練度によっても結果が左右される。これに代わるものとして γ 線密度計および中性子水分計が1960年代に開発され、土木分野で広く用いられるようになった。すなわち、この方法は測定が迅速で非破壊的であり、個人差のない、新しい測定方法として注目を集め、土の締め固め管理や地盤調査などに多用されるようになった。

筆者はこの放射線法の利点を生かしつつ、この技術を、さらに、発展させることを目指して、 γ 線のみで土の嵩密度と同時に水分を測定する方法に着想し、その可能性を検討した。

2. 測定原理

2.1 物質通過時の γ 線光子の挙動

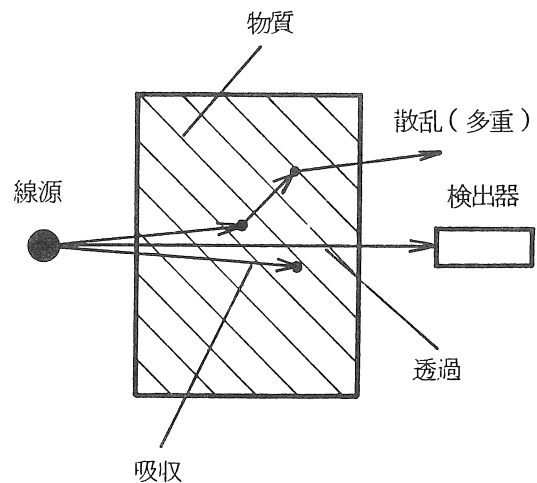


図1 γ 線と物質の相互作用

γ 線が物質を通過するときの γ 線光子の挙動は図1に示す3種類に分類できる。すなわち、光子が物質と相互作用を起すことなく透過する場合、吸収されて通過できなくなる場合および散乱されてエネルギーを減じながら通過する場合である。

いま、吸収も散乱も起すことなく透過する γ 線のみに着目して、これを100%の検出効率の検出器で計数するものとすれば、試料が γ 線源と検出器間に存在するときの計数値と存在しないときの計数値の関係は次の(1)式で表される。

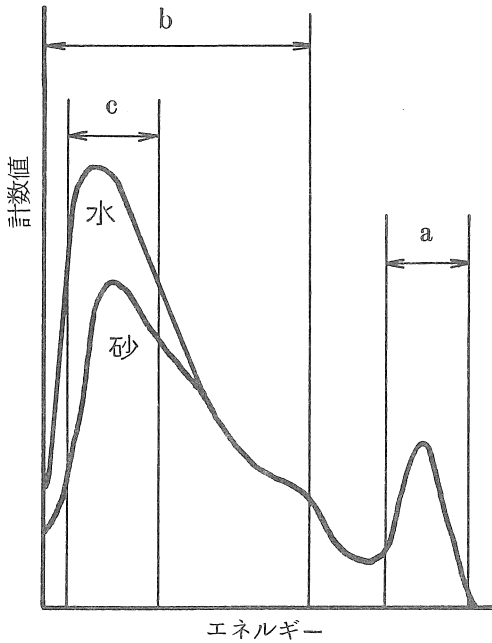


図2 試料透過後のγ線エネルギースペクトル

$$N = N_0 e^{-\mu_m \rho l} \tag{1}$$

ここに

- N : 試料透過後の計数値
- N₀ : 試料がないときの計数値
- μ_m : 質量吸収係数 [cm²/g]
- ρ : 嵩密度 [g/cm³]
- l : 試料厚さ [cm]

散乱されて、エネルギーが減少したγ線光子も検出器に入射して計数される場合は、計数値Nは(1)式で与えられる値より大きくなり、いわゆる、ブロードビームの関係として次の(2)式で表される³⁾。

$$N = N_0 B e^{-\mu_m \rho l} \tag{2}$$

ここに

B : ビルドアップ係数 (B > 1)

2.2 密度および水分の測定原理

本研究で使われる¹³⁷Csからのγ線の場合、γ線光子の散乱はコンプトン散乱によるものであり、その確率は特に水素の場合大きい値を示す。したがって、水素原子の割合が大きい水の場合は土や砂等の場合より散乱線が多くなって、検出器の入力は図2のようなスペクトルになることが予想される。

図2においてaの範囲のγ線のみ、すなわち、光電ピークのみを検出すれば、計数値は(1)式に従う。(1)式において質量吸収係数μ_mの値は¹³⁷Csからのγ線、すなわち、0.662MeVのγ線に対しては図3⁴⁾からわかるように物

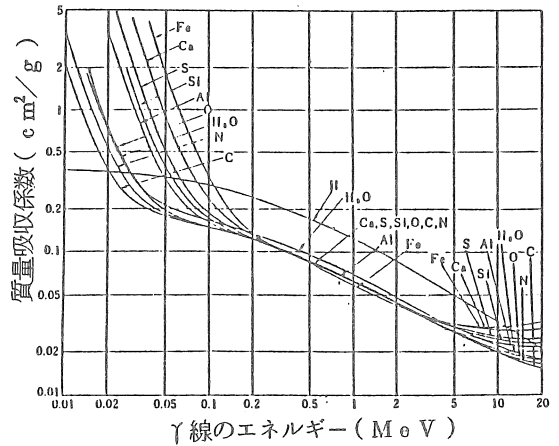


図3 土の主要元素に対するγ線の質量吸収係数

質によってほとんど変わらないので、試料厚さlが一定であれば、(1)式のNは密度ρのみの関数となり、密度測定用の信号として利用できる⁵⁾。一方、図2においてcの範囲のγ線を検出すれば、その計数値は水分によって変わるので、水分測定用信号として利用できるはずである。

以上の関係から図2における二つの信号、すなわち、aおよびcの範囲の計数値から密度および水分の二つの量の測定が可能となる。

実際の測定では図4に示すようなγ線源と検出器の配置が考えられる。実用上、γ線源としては¹³⁷Csまたは⁶⁰Coが、また、検出器としてはNaIシンチレータが適当と思われる。

2.3 本研究に必要な関係式

前述の(2)式における計算値Nは図2において、aおよびbの範囲のγ線をすべて検出して計数する場合の値であり、ビルドアップ係数Bは近似的に次の(3)式で表されることが多い⁶⁾。

$$B = 1 + \mu_m \rho l \tag{3}$$

この(3)式においては右辺の1が光電ピークのみ、すなわち、aの範囲に対応し、μ_mρlが散乱線のみ、すなわち、bの範囲に対応する。

本研究では図2において、cの範囲のγ線を利用することになるので、(3)式からの類推で補正係数Cを導入して、(1)~(3)式から以下のような関係式を導く。

$$N = N_t + N_s = N_0 (1 + C \mu_m \rho l) e^{-\mu_m \rho l} = N_0 e^{-\mu_m \rho l} + N_0 C \mu_m \rho l e^{-\mu_m \rho l} \tag{4}$$

ここに

- N_t : 光電ピーク (図2 aの範囲) の計数値
- N_s : 特定エネルギー領域 (図2 cの範囲) の計数値
- C : 補正係数

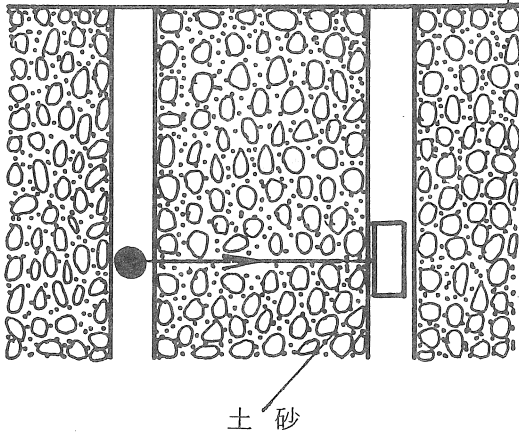


図4 測定装置の配置



(4)式は次の二つの式に分けることができる。

$$N_t = N_0 e^{-\mu_m \rho l} \quad (5)$$

$$N_s = N_0 C \mu_m \rho l e^{-\mu_m \rho l} \quad (6)$$

したがって

$$N_s / N_t = C \mu_m \rho l \quad (7)$$

(5)式における N_t から密度 ρ および $\mu_m \rho l$ を求めることができる。さらに、 N_s が求まれば(7)式にしたがって補正係数 C を求めることができる。 C は水分によって変わるので、予め各水分について C の値を実験的に求めておけば、(7)式から得られる C の値から水分が求められる。

3. 実験方法

実験は実際の使用状態での幾何学的条件、すなわち、図4に示した配置で行うのが理想的であるが、そのためには標準試料の作成に大変な手間がかかる。そこで、まず、図5に示す構成の実験装置で基礎データを取り、次に実際の使用状態に近づけた配置、すなわち、図6に示

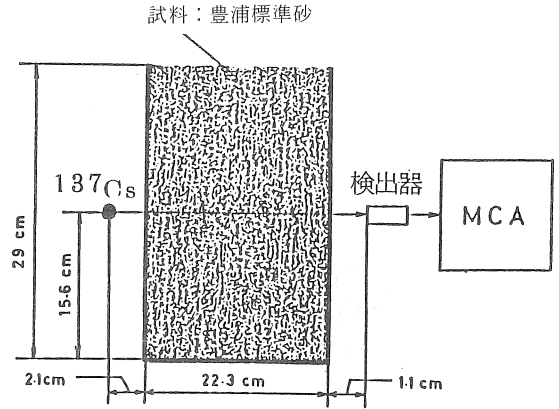


図5 実験装置の構成(その1)

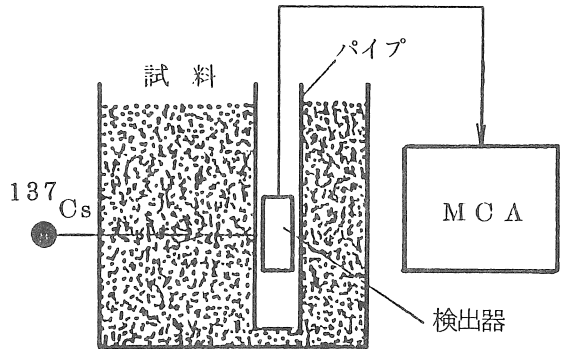


図6 実験装置の構成(その2)

すように検出器のまわりを試料が取巻くような配置で実験を行った。

図5に示すように試料を直径22.3cm、高さ29cm、厚さ0.06cmの鉄板製の容器に入れて、 ^{137}Cs (40 μCi)線源からのγ線を容器中の試料に透過させた。そして、シンチレーション検出器(2"φ×2"NaI)で透過および散乱後のγ線を検出して、MCA(マルチチャンネルアナライザ)でスペクトル分析し、その結果から計算によって含水比(試料中に含まれる水の重量と乾燥後の試料重量の比)¹⁾と嵩密度に対応する値を得るようにした。しかし、図5の配置では検出器の背後に散乱体がないことから、この部分からの散乱γ線が入射しないことにより検出器に入射する散乱成分が少なくなっている。これを補う実験として図6の配置を取り入れた。図6では、体積40×30×53cmのプラスチック容器に試料をつめこんで、適当な位置にアクリル製パイプを打ちこみ、パイプの中にそう入した検出器による測定結果を前の結果と比較できるよう

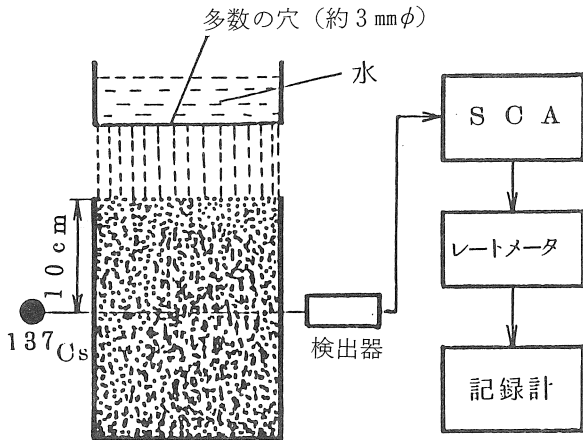


図7 砂に水をしみ込ませる実験

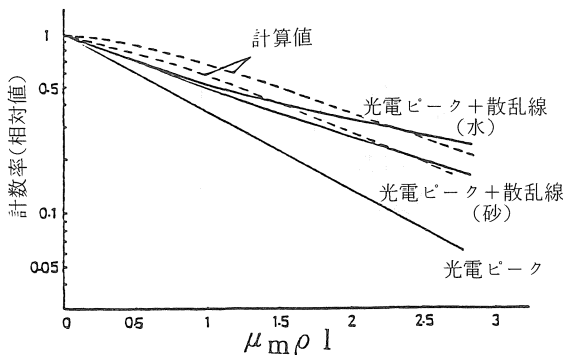


図8 水と砂による吸収曲線

にした。

さらに地盤への雨水の浸透および浸透速度を測定するための模擬実験として図7の構成で嵩密度一定の条件で、試料の砂の中に水をしみ込ませたときの光電ピークの計数率の変化を記録する実験を行った。検出器の出力から SCA (シングルチャンネルアナライザ) で光電ピークのみを取り出し、レートメータで直流電圧に変換して記録させるものである。

以上の実験に使った試料の砂は豊浦標準砂で、含水比は0~21%にわたるものである。

4. 実験結果

含水比を測定するためには、まず、 γ 線に対して水と砂による散乱線にどの程度の差があるか、また、前述の関係式による計算値と実測値がどの程度、一致するかについて、あらかじめ調べておく必要がある。図8は砂と水について、試料の厚さと計数率の関係を求めたものである。図5の装置を使用し、 γ 線は垂直方向に通過するよう

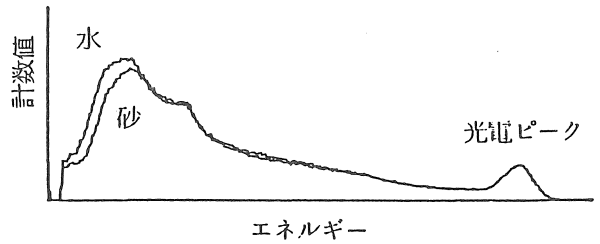


図9 試料透過後の γ 線スペクトルの一例 (図5の配置による実測)

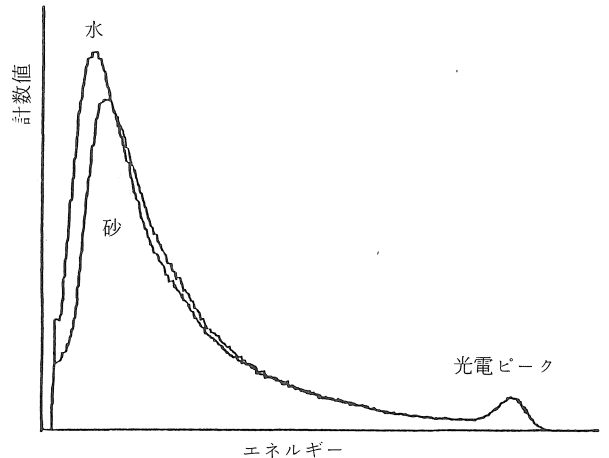


図10 試料透過後の γ 線スペクトルの一例 (図6の配置による実測)

に線源と検出器を配置して、試料の嵩密度を一定に保ちながら、厚さ l を変化させた。横軸を $\mu_m \rho l$ の値で表わしたとき、光電ピークについては砂と水で差はないが、光電ピークに特定エネルギー領域(20~75keV)の散乱線を加えたときの計数率には、図示のような差が認められた。なお、(4)式を使って求めた計算値も併記した。図9および図10は図5および図6の装置をそれぞれ使用して、 γ 線光電ピークによる計数値を同じにする条件で試料透過後の γ 線スペクトルを測定した結果である。横軸はMCAのチャンネル番号から求められた γ 線のエネルギーであり、縦軸はチャンネルあたりの計数値を示す。

図11は含水比の異なる試料を用いてそれぞれ嵩密度を変えながら、図5の装置により、(5)式における N_t および(6)式における N_s を測定し、(7)式から $\mu_m \rho l$ と C の関係を求めたものである。乾いた砂の含水比を0%と仮定して最初のデータを取り、次に含水比を3%ずつ増やしていったが、それに伴って C も段々大きくなる結果が得られた。21%以上になると、すき間へのしみ込みがとまり、水は

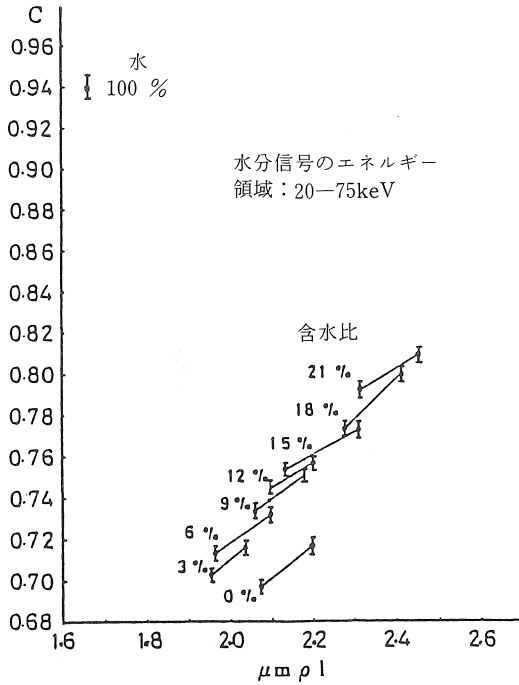


図11 水分及び嵩密度とCの関係

上部に溢れるようになるので、それ以上、水を加えても意味のあるデータは得られなかった。なお、水についての値も併記した。

本研究による測定法では図4からも分るように、拡がりをもった試料の一部を測定することになるので、含水比および嵩密度の測定に寄与する試料の体積を調べておく必要がある。その目安を得るため、図5の装置を使用して実験を行った。最初は試料なしの空容器とし、次に砂の高さを増しながらデータをとった。その結果を図12に示す。横軸は砂の高さを示し、縦軸は付記したエネルギー領域に対応する計数率を示す。592~717keV, すなわち、光電ピークに対しては高さ14~18cmの間で計数率の変化が現われている。20~75keVについては、高さ30cmに近づいたとき、計数率は一定の値に落つている。203~256keVについては、高さ26cmに近づいたとき、計数率も一定の値に落つている。

水の浸透のみで嵩密度が変化する場合についても実験を行った。図7の装置を使い、嵩密度の一定の条件で試料の中に水をしみ込ませたときの光電ピーク計数率の変化を記録した。雨量35mm, 40mm, 45mmおよび50mm相当の注水を行ったときの結果を図13に示す。時間軸は注水開始時を0とした。光電ピーク計数率の減衰はそれぞれ12.6%, 26.8%, 38.8%および42.3%となった。また、注水を始めたときから光電ピーク計数率の減衰を生

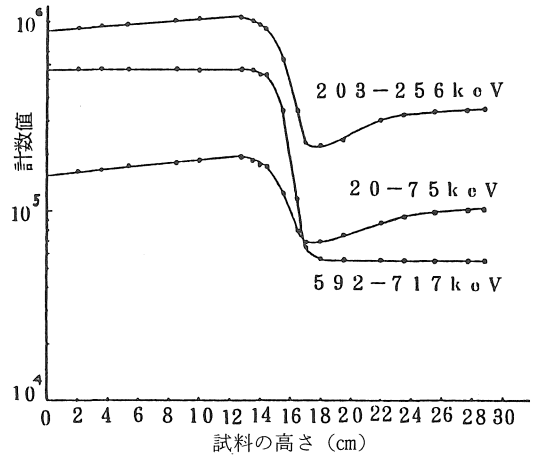


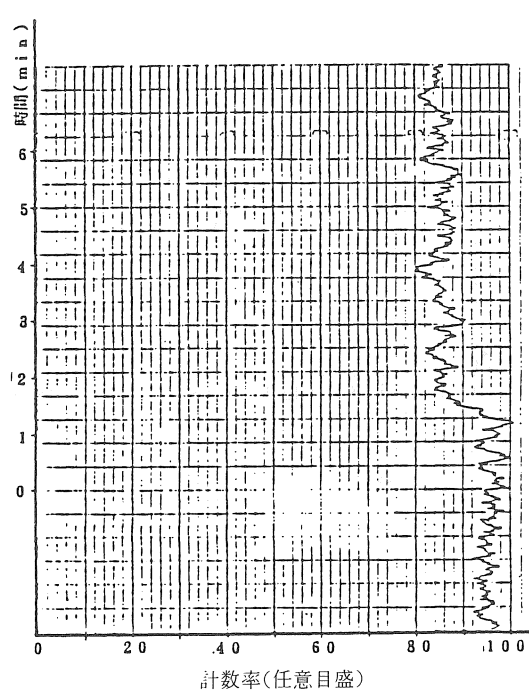
図12 試料高さ と 計数値の関係

じたときまでの時間はそれぞれ1分25秒, 1分15秒, 1分5秒および1分2秒となった。50mm雨量相当以上の注水を行っても、計数率はほとんど変らなかった。なお、この実験に使用した砂の真密度は2.70g/cm³, 嵩密度は1.52g/cm³であった。

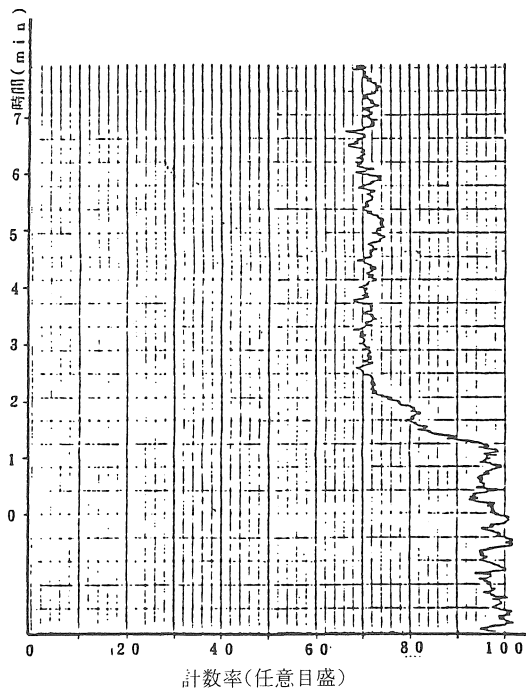
5. 考察

5.1 γ線の透過, 散乱を利用した密度, 水分測定について

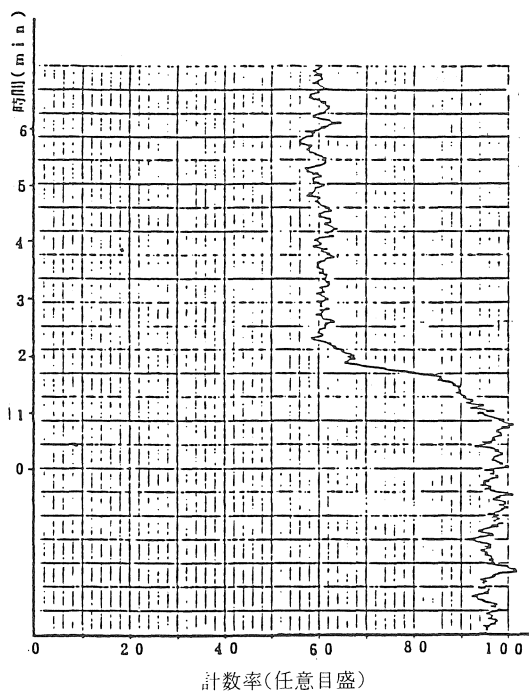
(1) 図8の結果は、水と砂の光電ピーク吸収曲線は同じになるが、散乱線は水の方が砂より大きくなることを示している。そして、その差も試料の厚さの増加に従って大きくなる傾向がある。実際の測定の対象となる湿った砂の吸収曲線は図8に示される乾いた砂の吸収曲線と水の吸収曲線の間であり、その位置は含水比によって変わることが予想される。図9および図10のスペクトルは光電ピークが同じであっても、エネルギーの低い領域で、水の散乱線が砂より大きくなっている。図10は実際の測定における幾何学的条件に近づけたもので、散乱線が図9の場合より大きくなりすぎて水と砂の散乱線との差もかなり大きくなって測定精度の点でも望ましい結果となっている。以上の結果は200keV以下の散乱γ線が水分測定信号になりうることを示唆するものである。なお、図14は図9および図10に対応する理論計算を工業技術院名古屋工業技術試験所で開発されたプログラムを使ってコンピュータで計算した結果である。砂に対応させて、原子番号の比較的近いアルミニウムのデータを用いたが、図9および図10と同じ傾向を示している。なお、



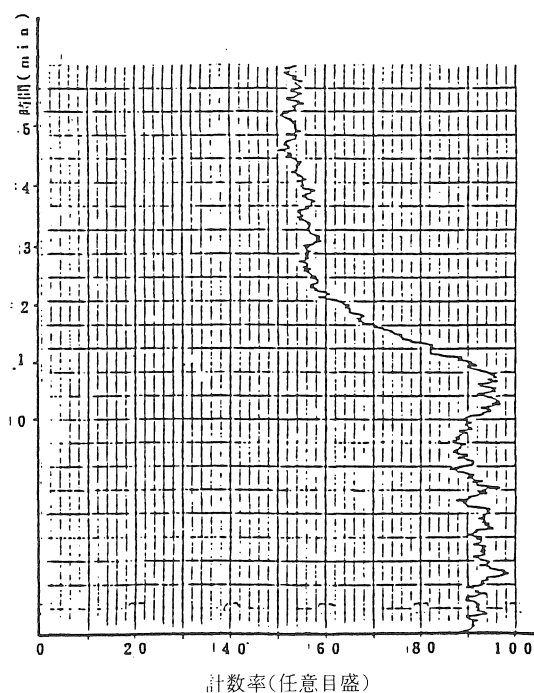
(a) 雨量35mmに相当する注水の場合



(b) 雨量40mmに相当する注水の場合



(c) 雨量45mmに相当する注水の場合



(d) 雨量50mmに相当する注水の場合

図13 砂中への水のしみ込みによる透過 γ 線の変化

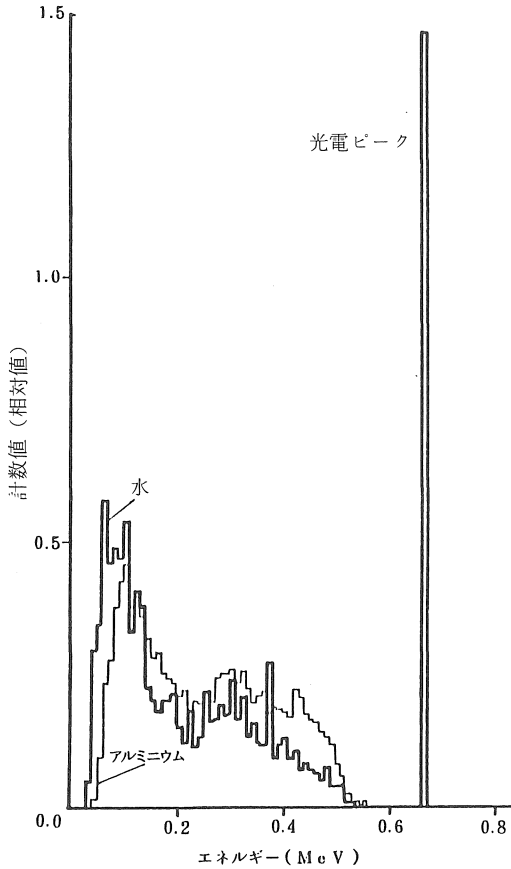


図14 コンピュータによる理論計算の結果

図14の数値は表1に示す。

(2) 図11の結果は、試料の含水比の増加に従って補正係数Cの値も段々大きくなる。これはγ線の透過、散乱現象を利用して、密度と同時に水を測定できる可能性があることを意味する。ただし、今回の実験結果から実用化までには取組まなければならない次の課題があることが判明した。①試料の高密度や材質によって補正係数Cが変わる。②γ線源と検出器の配置、すなわち、幾何学的条件によっても、Cが変わる。③水分測定に利用できるエネルギー領域が低いため、検出器をとりまく物質、すなわち、打込み用パイプ等で吸収されやすい。

(3) 図12の結果から測定に寄与する試料の範囲が推定できる。光電ピーク、すなわち、592~717keVでの計数率は散乱線に無関係であるので、γ線源と検出器の間に存在する試料のみが測定される。図12では幅約4cmとなっている。20~75keVのエネルギー領域の散乱線は高さ30cm付近で一定の値に落つくので、検出器取付高さ16cmとの差14cmの2倍が測定範囲となる。203~256keVの領域では、高さ26cm付近で一定の値に落つくので、10cmの2倍が測定範囲となる。これらの関係を図15に示す。

5.2 嵩密度変化が水のみしみ込みによる場合の測定について

(1) 図13の計数率の変化は砂の空隙部へ浸透した水によるものである。この変化分からγ線源と検出器の間に存在する水の量を理論計算および実験データとの対比によって求めることができる。また、図13の注水時から計

表1 γ線エネルギースペクトル計算結果

(a) 水の場合

```

<BUFDRLF> -- BUILD-UP FACTOR BY DRMC (ALLTAB) --
H2O  E0= 0.662 NH= 10000 IX= 1234 ECUT= 0.03

(XS,YS,ZS)=( 0.0 0.0 -3.0 ) POINT - 2 PAI ISOTROPIC
(XP,YP,ZP)=( 0.0 0.0 25.3 )
DIMENSION XL= 30.0 YL= 30.0 WTL0= 0.856E-01

TO      NFLUX      EFLUX      DFLUX      NTRANS      NALBEDO
22.3    0.966E-04   0.191E-04   0.700E-09   0.138E+00   0.322E+00
GO      0.147E-04   0.971E-05   0.368E-09   0.421E-01
BF      7.59       2.97       2.90

```

--- ENERGY SPECTRUM AT DETECTOR (10 KEV) ---

0.0	0.0	0.0	0.469E-06	0.297E-05
0.343E-05	0.578E-05	0.458E-05	0.491E-05	0.466E-05
0.540E-05	0.328E-05	0.406E-05	0.363E-05	0.223E-05
0.204E-05	0.181E-05	0.205E-05	0.206E-05	0.214E-05
0.149E-05	0.122E-05	0.175E-05	0.113E-05	0.132E-05
0.218E-05	0.161E-05	0.164E-05	0.193E-05	0.173E-05
0.243E-05	0.164E-05	0.212E-05	0.132E-05	0.156E-05
0.122E-05	0.118E-05	0.271E-05	0.899E-06	0.118E-05
0.132E-05	0.905E-06	0.108E-05	0.706E-06	0.880E-06
0.714E-06	0.672E-06	0.512E-06	0.768E-06	0.404E-06
0.401E-06	0.366E-06	0.101E-06	0.265E-07	0.157E-07
0.0	0.679E-08	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.147E-04	0.0	0.0	0.0

84-10-12 15:11 24 SEC

(b) アルミニウムの場合

```

<BUFDRLF> -- BUILD-UP FACTOR BY DRMC (ALLTAB) --
AL  E0= 0.662 NH= 10000 IX= 1234 ECUT= 0.03

(XS,YS,ZS)=( 0.0 0.0 -3.0 ) POINT - 2 PAI ISOTROPIC
(XP,YP,ZP)=( 0.0 0.0 25.3 )
DIMENSION XL= 30.0 YL= 30.0 WTL0= 0.201E+00

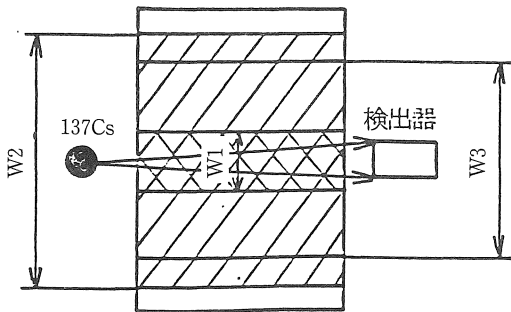
TO      NFLUX      EFLUX      DFLUX      NTRANS      NALBEDO
9.5     0.109E-03   0.269E-04   0.982E-09   0.215E+00   0.399E+00
GO      0.147E-04   0.970E-05   0.368E-09   0.420E-01
BF      8.45       3.77       3.67

```

--- ENERGY SPECTRUM AT DETECTOR (10 KEV) ---

0.0	0.0	0.0	0.219E-08	0.171E-06
0.941E-06	0.234E-05	0.278E-05	0.379E-05	0.428E-05
0.461E-05	0.381E-05	0.396E-05	0.379E-05	0.323E-05
0.292E-05	0.295E-05	0.255E-05	0.246E-05	0.236E-05
0.207E-05	0.223E-05	0.161E-05	0.203E-05	0.199E-05
0.220E-05	0.200E-05	0.249E-05	0.252E-05	0.255E-05
0.262E-05	0.237E-05	0.261E-05	0.226E-05	0.200E-05
0.213E-05	0.219E-05	0.160E-05	0.194E-05	0.188E-05
0.183E-05	0.172E-05	0.225E-05	0.212E-05	0.177E-05
0.171E-05	0.164E-05	0.147E-05	0.135E-05	0.122E-05
0.839E-06	0.639E-06	0.283E-06	0.155E-06	0.340E-07
0.536E-07	0.127E-07	0.611E-08	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.147E-04	0.0	0.0	0.0

84-10-12 15:23 37 SEC



- W1 : 592~717keVの透過 γ 線の測定範囲 (4 cm)
 W2 : 20~75keVの散乱 γ 線の測定範囲 (28cm)
 W3 : 203~256keVの散乱 γ 線の測定範囲 (20cm)
 p.308~327, 日刊工業新

図15 透過および散乱 γ 線の測定範囲

数率変化発生時までの時間差から水の浸透速度が求められる。なお、図13におけるノイズは放射線の統計的変動によるものであり、本実験での $^{137}\text{Cs}40\mu\text{Ci}$ 、レートメータ時定数10秒の条件を変えることにより低減しうる。

(2) 本実験では光電ピークのみを計数するので、図15の結果から縦方向4 cmの範囲の試料が測定される。すなわち、縦方向の分解能が優れているので、特に土中への雨水のしみ込みの測定に有効と思われる。

6. むすび

土の嵩密度および水分を放射線法により測定する場合、嵩密度の測定には γ 線を利用し、水分の測定には中性子を利用するのが一般的である。今後も、この2種類の放射線の使い分けが続くものと思われるが、 γ 線の散乱現象にも水分に関する情報が含まれることに着目した筆者は、その可能性と実用性を見極めるため、実験的検

討を行った。その結果、精度面で中性子を利用する方法には及ばないが、水分の目安を得る程度の測定は可能であることが判明した。実用化のための課題は残されているが、それらが克服されれば、密度測定用の γ 線源を兼用して、一つのプローブで、密度測定のほかに、水分情報を得ることができるという利点が生じる。

雨水のしみ込みのように、嵩密度の変化が空気空隙部への水の浸透によることが事前に明らかな場合は、 γ 線の透過現象を利用する既存技術で、中性子水分計に匹敵する精度の水分測定が可能であることを確認した。しかも、縦方向の分解能がよいので、土中への水のしみ込みの測定には極めて有効であり、実用化のためにハード面での問題はほとんどないので、今後、この技術の活用をはかりたい。

最後に、本研究の妥当性を裏付けるデータとして散乱 γ 線スペクトルのコンピュータ計算を行っていただいた工業技術院名古屋工業技術試験所上西時司氏、放射線法の土木分野への利用について絶えず示唆をいただいた本学土木工学科江川太郎教授、および実験用試料を提供していただいた本学土木工学科の建部英博助教授に深く感謝の意を表します。

7. 参考文献

- 1) 久野悟郎：土の締固め，技報堂，1964.
- 2) 土工管理とラジオアイソトープ，土質工学会，1974.
- 3) 兵藤知典：放射線遮蔽入門，産業図書，1979.
- 4) アイソトープ手帳，日本アイソトープ協会，1982.
- 5) 鷺見哲雄他：工業分析(下)，p.308~327，日刊工業新聞社，1965.
- 6) アイソトープ便覧，日本アイソトープ協会，1979.
- 7) 劉京南，鷺見哲雄： γ 線の透過，散乱を利用した密度，水分測定法に関する実験的検討，第21回理工学における同位元素研究発表会要旨集，p.74，1984.

(受理 昭和60年1月30日)