

II-1

ガンマ線を用いた土壌水分量測定の可能性について

北見工業大学大学院 学生員 中野 誠二郎  
 北見工業大学工学部 正員 佐渡 公明  
 北見工業大学工学部 正員 中尾 隆志  
 北見工業大学工学部 正員 海老江 邦雄

1 はじめに 河川流域において、降雨や融雪水による土壌水分量の分布、挙動を把握することは、極めて重要なことである。この情報を広域的に収集するには航空機や衛星によるリモートセンシング手法が有効であると思われる。本研究では $\gamma$ 線の性質を利用し非接触で土壌水分量を算出することを最終目的とし、今回は基礎的実験の一つである野外における現地土壌水分量測定を行った。そして、著者らによって行われた室内土壌水分量測定との比較検討を試みた。また、自然土壌中には自然 $\gamma$ 線が存在するといわれているが、その存在の有無、強度を確認するための測定実験を行い、その利用の可能性について調べた。

2  $\gamma$ 線土壌水分量測定 この測定原理は、 $\gamma$ 線が土粒子や水に吸収される際の質量吸収係数の値を求めて、土壌を通過してくる $\gamma$ 線の強度の減少を測って土壌水分量を求めようとするものである。 $\gamma$ 線強度の土壌による減衰式は土粒子、水、空気の吸収を考えて式(1)となる。

$$N = N_0 \cdot \exp(-k_s \cdot \rho_s \cdot d_s - k_w \cdot \rho_w \cdot d_w - k_a \cdot \rho_a \cdot d_a) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $d_s, d_w, d_a$ :土粒子、水、空気の厚さ(cm)、 $N_0$ :線源の $\gamma$ 線強度、 $N$ :土壌を通過した $\gamma$ 線強度  
 $k_s, k_w, k_a$ :土粒子、水、空気の質量吸収係数( $\text{cm}^2/\text{g}$ )、 $\rho_s, \rho_w, \rho_a$ :土粒子、水、空気の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 水に換算した土壌の等価厚さを $d_e$ とすると、式(1)は

$$N = N_0 \cdot \exp(-k_w \cdot \rho_w \cdot d_e) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$d_e = \frac{k_s \cdot \rho_s}{k_w \cdot \rho_w} d_s + d_w + \frac{k_a \cdot \rho_a}{k_w \cdot \rho_w} d_a \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。ここで $\rho_s / \rho_w \approx 1/1000$ 、 $k_s < k_w$ であるので、線源と検出器の距離が数メートルの場合、空気層による吸収は無視できる。ゆえに、土壌水分量を単位面積当たりの質量で求める式は

$$\rho_w \cdot d_w = (\ln N_0 - \ln N - k_s \cdot \rho_s \cdot d_s) / k_w \approx (\ln N_s - \ln N) / k_w \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $N_s$ :絶乾状態の土粒子を通過した $\gamma$ 線強度 $= N_0 \exp(-k_s \cdot \rho_s \cdot d_s)$

また、片対数グラフで表した $\ln N$ と $\rho_w \cdot d_w$ の直線式は次式となる。

$$\ln N = -k_w \cdot \rho_w \cdot d_w + \ln N_s \quad \dots\dots\dots(5)$$

3 野外土壌水分量測定 これまでに人工 $\gamma$ 線源(Cs-137)を用いて、粒径がほぼ一樣な硅砂を使用し室内で土壌水分量測定を行ってきた。しかし、この測定方法が実際、自然土壌界においても可能なのか、水分量を求めるための水の質量吸収係数 $k_w$ が室内と野外では違いが出てこないのかを調べるために野外実験を行った。また、室内(水道水)と野外(降雨)では同一の含水量において放射線の吸収に違いがあるのかも同時に調べた。

この野外実験でネックとなる点は測定器の検出器である(用語は図1参照)。この実験で使われた検出器のシンチレーター(NaI(Tl)結晶)は温度、温度変化に弱く、温度4~43°C、温度変化3°C/minuteの範囲を超えると結晶に損傷が起き、検出率に問題が出てくる。温度、温度変化には十分な注意を払はなくてはならない。

The possibility of Soil-Water Quantity Measurement by  $\gamma$ -ray  
 by Seijiro NAKANO, Kimiteru SADO, Takasi NAKAO and Kunio EBIE

**3-1 測定方法** 本実験で用いた実験装置の概要を図1に示す。実験場所は北見工業大学土木開発工学科土質実験室前に設置し、縦90cm、横170cm、深さ30cmの穴を掘り、土を三層に分け締め固めを行い土を埋め戻す。人工線源④ ( $\gamma$ 線源Cs-137、1.13MBq)を10cmの深さに埋め、地面から9cmの高さに①a ( $\gamma$ 線測定器シンチレーター、 $N^+$ イロ製3"  $\phi$   $\times$  3" NaI(Tl)結晶)の検出器を設置し測定を行う。その過程で散乱を起こした $\gamma$ 線を検出しないように検出器の前に②(鉛製のコリメーター)を置き、 $\gamma$ 線を細いビーム状のようにし、吸収散乱されなかった $\gamma$ 線のみを検出するようにした。検出された $\gamma$ 線は①e ( $\gamma$ 線測定器)のスペクトル分析器によって波形分布を示す。その波形分布からCs-137における光電効果を示す661keVのピークに対して、半値幅(FWHM)にわたる総カウント数を $\gamma$ 線強度Nとした。測定期間は11月1日から14日まで11回(測定時間1時間、検出器の温度範囲が4~43°Cなので気温5°C以下では測定を行っていない)測定を行った。また、同時に3点の土壌試料を採取し、土の含水比 $\omega$ を求めた。

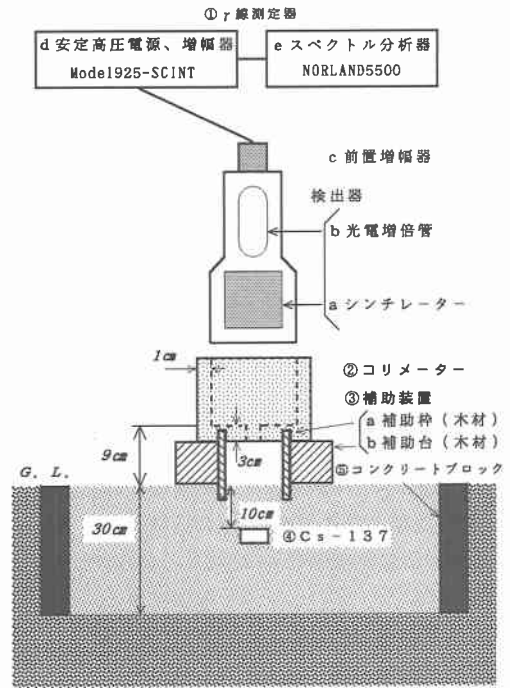


図1  $\gamma$ 線測定器

**3-2 測定結果** 測定された波形分布の一例を図2に示す。また、原因はわからないが波形が乱れたデータ(11月3,6,7,8,12日)が出てきたのでその一例を図3に示す。この5点を取り除いた残り6点の $\gamma$ 線強度Nと含水比 $\omega$ を比較したものを図4に示す。観測データの含水比 $\omega$ を水の高さ $d_w$ に換算するため、土粒子の密度試験を行った結果、土粒子の密度 $\rho_s = 2.411(\text{g}/\text{cm}^3)$ が得られた。さらに、期間中の間隙率を得るため、砂置換法による土の単位体積重量試験を行った。結果、間隙率 $n = 53.7\%$ が得られた。この $\rho_s$ と $n$ を用い、また、土の乾燥密度 $\rho_d$ に変化がないと仮定し、 $n = (d_w + d_s) / (d_s + d_w + d_s) \cdot 100 = \text{const}$ 、 $\rho_d = (G_s \cdot \rho_w \cdot d_s) / (d_s + d_w + d_s) = \text{const}$ より、 $d_w = \omega \cdot G_s \cdot \rho_w \cdot d_s / 100 = 0.112 \cdot \omega$  (cm)となり、この結果から $d_w$ とNとの相関を調べた(図5参照)。

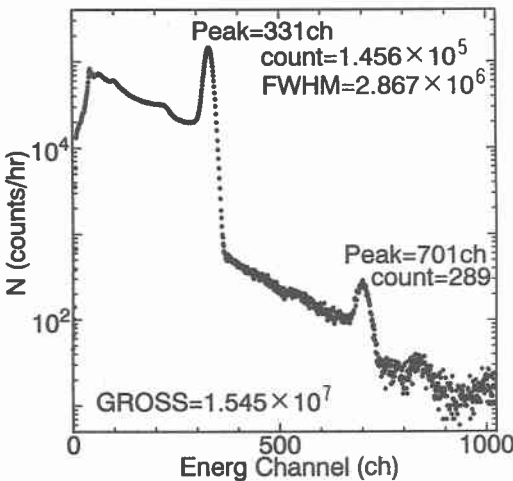


図2 一般的な波形分布

11月1日,晴れ,11.0°C,含水比 $\omega = 13.57\%$

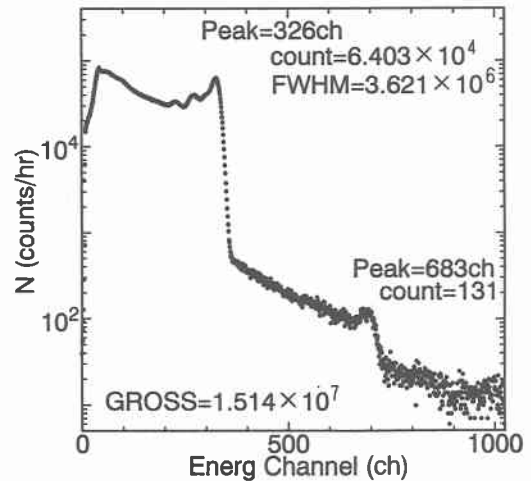


図3 乱れたときの波形分布

11月7日,曇り,13.0°C,含水比 $\omega = 11.64\%$

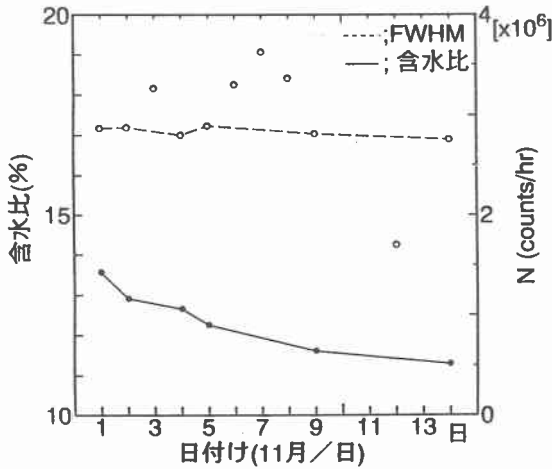


図4  $\gamma$ 線強度Nと含水比 $\omega$ との比較

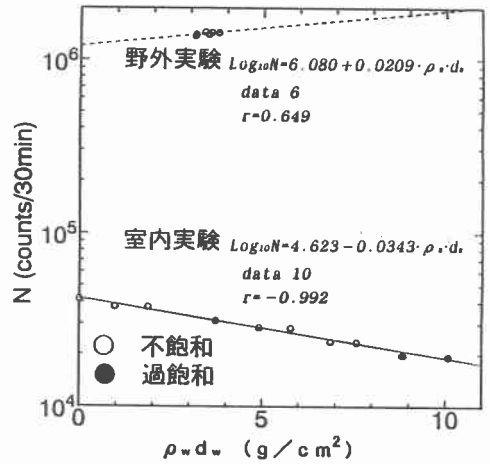


図5 室内と野外の質量吸収係数 $k_w$

**4 室内実験との比較検討** 著者らによって、室内における①土粒子の質量吸収係数 $k_s$ と②土壤水分量を求めるための質量吸収係数 $k_w$ を得た(参考文献,2)より)。①の実験方法は絶乾状態の試料を0gから1400gまで100g毎に詰め、そのときの $\gamma$ 線強度Nを測定し回帰直線を求め、その傾きから $k_s$ を求めるものである。その結果、 $k_s=0.0701\text{cm}^2/\text{g}$ と得られた。今回式(5)を用い、線源と検出器の高さ58cmにおける $N_0$ と絶乾状態の一定量の土粒子のときの $\gamma$ 線強度 $N_s$ 及び、土の乾燥密度 $\rho_s$ 、土の高さ $d_s$ から $k_s$ を求めると $k_s=0.0713\text{cm}^2/\text{g}$ と得られた(ここで $N_0$ と $N_s$ は回帰直線の縦軸の切片を用いた)。この値を比較すると近いことから二つの方法から $k_s$ が求まることがわかった。②の実験方法は絶乾状態における一定量の土粒子から水を加えていき、そのときのNを測定し回帰直線を求め、その傾きから $k_w$ を求めたものである。その結果、 $k_w=0.0790\text{cm}^2/\text{g}$ と得られた。それに対して今回の野外実験の場合、測定期間が短かったため、含水量にあまり変化がなかった(降雨量が少なかったため)。そのため、絶乾状態から飽和状態における広い範囲の $\rho_w \cdot d_w$ が得られず、理想的な $k_w$ が得られなかった。図5の室内実験との比較において、Nに違いが見られるがこれは線源と検出器の距離が室内実験よりも野外実験のほうが近く、立体角の影響から野外実験の方が検出器が拾う放射線の角度が広く、Nが大きくなって出てきた。しかし、これは問題でなく質量吸収係数(=傾き)に問題がある。室内実験の直線上に測定結果がのると仮定すると狭い範囲の測定結果であることがわかる。従って、この6点のみで質量吸収係数 $k_w$ を求めることはできない。

**5 土壌からの自然 $\gamma$ 線** 土壌中には自然 $\gamma$ 線が存在するといわれている。この自然 $\gamma$ 線を用いて、土壤水分量を測定するには、まず、その有無及び、強度を確かめなければならない。自然 $\gamma$ 線を検出するため、学内及び、層雲峡付近5ヶ所での土壌を収集し、室内において自然 $\gamma$ 線の測定実験を行った。その結果を表1に示す。表より明らかに土壌がない場合(Back Ground)とほぼ同一の結果になった。また、測定結果の一例を図6に示すとバックグラウンドではない自然 $\gamma$ 線を示すピークが現れなかった。しかし、いずれの場合にも700ch付近にピークが出てきた。これはCo-60とCs-137の人工線源を用いたエネルギー校正の結果からK-40と予想される。

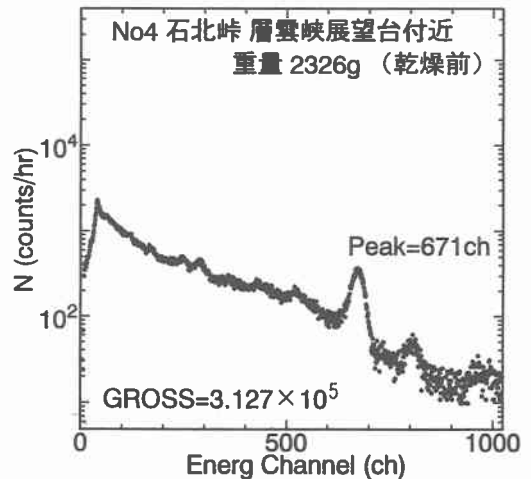


図6 自然土壌での波形分布の一例

表1 自然 $\gamma$ 線の測定結果

Back Ground		重量(g)	gross	重量(g)	gross		
No.1	(12/14 2:30 雪) 上川営林署 清川アトマツ採種園	乾燥前	2003	310451	乾燥後	1507	306424
No.2	(12/14 3:00 雪) 石北峠 層雲峡小学校入口前	前	2000	311783	後	1651	309890
No.3	(12/14 3:30 雪) 石北峠 大函発電所前	前	1127	311322	後	294	304647
No.4	(12/14 4:00 雪) 石北峠 層雲峡展望台付近	前	2326	312686	後	1653	311056
No.5	(12/14 4:30 雪) 石北峠り口 富士見橋付近	前	3412	316443	後	3045	314282
No.6	(12/19 2:00 晴れ) 北見工業大学 土質実験室前	前	1742	306910	後	1345	308270

6 結論 本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

1) 土粒子の質量吸収係数が二つの方法から求められた。

実験の手間暇を考えるとどちらが良いとはいえないが、今後はこの二つの信頼性について検討していきたい。

2) 現地土壌水分量測定において理想的な傾き(質量吸収係数)が得られなかった。

今回、実験期間が11月と冬季に行い測定期間が短かったが、今後は絶乾状態から飽和状態まで広い範囲の含水量d<sub>w</sub>が得られるよう長期間測定を行い、再度室内実験と比較検討を行いたい。

3) 土壌からの自然 $\gamma$ 線を検出する測定実験において自然 $\gamma$ 線を示すピークが現れなかった。

考えられる原因の一つとして測定方法が上げられる。Back Ground(宇宙線)が自然 $\gamma$ 線(大地放射線)よりも強く、宇宙線に喰われてしまって、ピークが出てこなかったと予想される。これをクリアーするためには鉛などで覆った密封の容器に試料と検出器を入れて測定を行う測定方法が考えられる。

4) Back Groundや自然土壌の波形にK-40と予想されるピークが出てきた。

このピークがK-40なのか解明しなくてはならない。K-40というのは崩壊系列をつくらない天然放射性物質であり、大気、地面、建物、食べ物や人間の体をつくっている一つ一つの細胞のなかなどあらゆる所に存在するといわれている。また、これがK-40であるとすれば、これを利用することも一つの手法である。例えば、検出器を上向きGround Levelにおき、その上の吸収層の変化における $\gamma$ 線強度の変化を利用する方法が上げられる。

#### <謝辞>

本研究は平成6年度財団法人北海道河川防災研究センターの研究助成のを受けて遂行された。ここに記して感謝する

#### <参考文献>

- 1) Elmer L. Offenbacher and Samuel C. Colbeck: Remote Sensing of Snow Covers Using the Gamma-Ray Technique, CRREL REPORT, pp18, 91-9, 1991.
- 2) 中野誠二郎、佐渡公明、中尾隆志、海老江邦雄: ガンマ線を用いた土壌水分量に関する基礎的研究、水門・水資源学会1994年度研究発表会要項集, p82-83, 1994.
- 3) 小川 岩雄著: 放射線, コロナ社, pp295, 1992.
- 4) 東 晃著: 寒地基礎論, 古今書院, p97-102, 1981.
- 5) 関口 岩雄著: 放射線測定概論, 古今書院, p97-102, 1981.