

宇宙線と土壌科学

小玉正弘

宇宙線によって大気中で生成された二次宇宙線中性子つまり大気中性子が土壌中を伝搬するとき、土壌成分だけでなく、土壌中に含まれる水分による散乱と吸収の影響を大きく受けて減衰する。大気中性子と土壌水分量との定量的関係を地表からの深さの関数として実験的に求め、前者が後者のリモートセンシングに利用できる可能性を示す。地表面上下附近での大気中性子の振舞を考察しつつ、宇宙線の土壌科学的応用について述べる。

キーワード：宇宙線、大気中性子、土壌水分

1. まえがき

宇宙空間物理学、素粒子・原子核物理学の一環として宇宙線研究の果たしてきた役割、あるいは今後とも深く関わっていくであろう事については今更何言を要しない。一方最近では、宇宙線は環境放射線の主要かつ安定な供給源の一つであることから、放射線障害の安全基準設定や環境モニタリングに寄与する役割を重要視されている¹⁾。つまり基礎科学あるいは応用科学としてのそれぞれ両面に亙る研究が広く行われている。ここで紹介する内容は土壌科学的応用に関するもので、宇宙線そのものを他の物理量測定の道具に利用するという、これまで殆んど未開拓の研究分野に属する。

もともと宇宙線の平均放射線量はバックグラウンドとして無視されるほどの微量であるところから、これを何か他の目的のために利用するという発想はあまりなかった。唯一の例外は考古学的応用で、宇宙線によって物質中に長年蓄積された生成核種（例えば ^{14}C ）の長い半減期を利用することによってその物質の年代測定を行う。また、宇宙物理学に関連しては、もし宇宙線の点源とか非等方的な流れ並びにそれらの時間的変動のからくりが明らかになれば、これらを逆に利用して新しい宇宙空間情報を得ることに役立つだろう。これなどは広い意味での応用研究と言えるかもしれない。より確かなものとしてはまた気象学的応用がある。宇宙線中間子の大気中で

の崩壊を利用した高層気温の推定²⁾や、大気中性子の水による減衰を利用した積雪相当水量の測定つまり宇宙線雪量計³⁾などである。

宇宙線と土壌科学との関わりは上記雪量計開発の過程で生まれた。春の融雪期に入って積雪がゼロになっても大気中性子量はすぐには積雪前のレベルに回復せずなお数日間を要した。この現象は融雪水によって土壌水分量が一時的に増加するため、それによる中性子強度の減衰が長引いたためと考えられた。もしそうだとすれば、両者の定量的関係の如何によっては大気中性子は土壌水分量の測定にも利用できることになる。これは宇宙線と土壌科学（Soil Science）との関わりを示す最初の例である^{4),5),6)}。

この報告では、相当水深60米までの異なる深さの地下における大気中性子強度のモニタリングによって得られた最近の結果について述べ、それらが土壌水分量といかなる定量的関係にあるかを明らかにする。地表面附近における大気中性子の振舞を考慮しつつ、大気中性子のひいては宇宙線の土壌科学的応用について考察する。

2. 宇宙線中性子と大気中性子

一次宇宙線が地球大気に入射したとき、大気中のO, N原子等との相互作用によって生じた二次宇宙線中の中性子成分は、約 200 g/cm^2 以上の深さでは生成と散乱・吸収とが互いにほぼ平衡状態を保つ⁷⁾。このため中性子成分のエネルギースペクトルの形はどの深さでも 0.1 eV 附近に一つのピークを持つ $\sim E^{-1}$ （E：エネルギー）のべ

キ関数で近似される⁸⁾。約1 MeV以上の速中性子つまり宇宙線中性子は、測定点附近の物理的環境に影響されることが少なく、一次宇宙線の変動をほぼ忠実に反映するので、宇宙空間における一次宇宙線変動のモニタリングに広く利用されている。

これに対して1 MeV以下の緩中性子は普通大気中性子と呼ばれ*、測定器周辺の状況や大気状態の変化に左右され易い。従って宇宙線中性子の測定のためにはこの大気中性子は言わば一種のノイズとなるので、宇宙線モジュレーション研究の対象としては宇宙線中性子が主役であり大気中性子は殆ど注目されなかった。しかし観測対象が宇宙空間でなく地表環境ということになれば大気中性子の役割が改めて見直されてくる¹⁰⁾。とくに地表近くでの中性子生成率の急変や中性子の水による大きな減速、吸収効果から、水環境周辺の中性子量の大幅な減衰は逆に水分量のモニタリングに利用できることを示唆する。例えば陸上と湖上での平均の大気中性子量が約1:0.6と大幅に異なるという測定結果¹¹⁾からも減衰効果の大きいことを知る。その際水分量は如何なる相で存在してもよく、常にその絶対相当水量が優先的に効くことが特徴である。

宇宙線中性子と大気中性子とはもともと独立のものでなく同じ親から生まれたものである。両者のエネルギーの相違がそれぞれより対応する現象を変えているに過ぎない。当然一次宇宙線や大気圧変化の影響は共通して現われるが量的には異なる筈である。本来これらはエネルギーの関数として与えられるべきであるが、そのような比較研究はまだ殆どなされていない。

3. アルベド (Albedo) 大気中性子

二次宇宙線の大部分は大気中を下向きに伝搬するが、等方的に二次粒子を発生する核反応 (evaporation等) や散乱もあるので、上向きに走るアルベド二次宇宙線も当然含まれる。とくに大気頂上では大気による吸収が無視できるのでアルベド粒子 (大部分は中性子) は直接宇宙空間に逃出す。これをEAN (Earth Albedo Neutron)¹²⁾

* 二次宇宙線中性子全体を大気中性子と呼ぶ場合もある⁹⁾
 ** 厳密には土壤中で発生した中性子はもはや大気中性子というよりは地下中性子 (ground neutron) というべきであろうが、ここでは特に区別せず大気中性子として扱う。

と言ひ、バン・アレン放射線帯粒子の重要な供給源の一つである。

一方、地表附近では伝搬媒質が空気から土壤へと急変するため、それまでの生成-吸収間平衡状態が崩れると同時に、土壤中で発生または反射された大気中性子が上向きに伝搬するアルベドとなる。これをGAN (Ground Albedo Neutron) と呼び EAN と区別する**。積雪層上での測定によればGANの割合は全大気中性子量の40%に達する¹³⁾。ただし湖上、海上ではGANはより少ない筈で、前述した平均強度の大幅な減衰は下向き成分についてのものと考えられる。従って大気中性子と土壤水分との関係を調べるには、下向き成分だけでなくアルベド中性子の振舞も考慮に入れる必要がある。このことは現象の解釈を複雑にはするが、より幅広い応用へと発展する可能性も含んでいる。

4. 浅い地下における大気中性子

地表から深さ1米ぐらいまでの地層に含まれる水分量は、降雨、蒸発、浸透などの絡みあいで必ずしも常に一定ではなく、しかもその様子は深さや土質によって異なるのが普通である。いきおい含水絶対量並びにその時間的変動の測定はそれ程簡単ではない。

大気中性子がそのような環境測定に役立つかどうかを調べるために、熱中性子から1 MeV領域までほぼ一定の検出効率を持つ中性子検出器¹⁴⁾を異なる深さの地下数地点に設置し、別の方法で測った土壤水分量との関係を調べた。測定は筑波の農業土木試験場内の実験農場で人工散水を繰返して行われた。農場の土質に関する物理化学的データを表1に示す。

表1 実験土壤の諸性質

深さ (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)	真比重	三相の割合 (%)			粒度割合 (%)		
			固相	液相	気相	砂	シルト	粘土
0-13	0.70	2.68	26.2	40.3	33.6	43	18	39
13-34	0.73	2.67	27.2	62.0	10.2	42	25	33
34-46	—	2.71	—	—	—	35	32	33

図1は地表からそれぞれ深さ3 cm、20 cm、40 cmの地点における大気中性子強度の逐日変化を示す。ただし図に示した (Cd) は外部からの熱中性子を除くため、厚さ0.5 mmのカドミウム板でシールドされた検出器による

結果である。図の下方には水分張力計 (Tensiometer) で測った10 cm、40 cm 深での土壌水分量 (重量比%) が

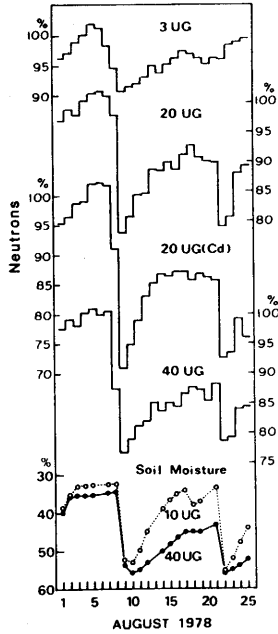


図1 中性子相対強度と土壌水分量 (重量比%) の逐日変化。数字は地表からの深さ(単位は cm)。UGは地下の、また Cdはカドミウムシールド検出器の意。

示される。散水は8月8日と22日に行われ、その直後に大気中性子は急速に減衰し、以後土壌水分量の減少に逆比例して徐々に回復した。時間単位の変動記録によれば両変動の間には時間的な遅れは殆ど無い。この測定結果について注目すべき点は次の3つである。

- a) 大気中性子量の土壌水分量変化へのレスポンスは深さ20 cmあたりで最大となる。
- b) 20 cm、40 cm 深での大気中性子量変化はそれぞれの深さでの土壌水分量変化と最も良い相関を示す。
- c) 熱中性子の土壌水分量へのレスポンスは緩中性子のその半分以下である。

これらの特徴は次のように解釈される。図2は異なる深さ1、2、3における中性子検出器の配置を模擬的に示した断面図で、点線の円半径は緩中性子の水中での diffusion length の程度であるとする。大気中からの下向き中性子成分Dを実線で、土壌中での生成または反射によるアルベド中性子Aを破線で示す。また土壌中で中性子を生成させた親粒子を NPR (Neutron Producing

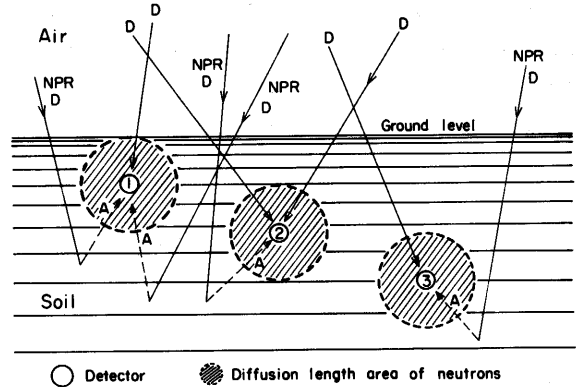


図2 地下設置の検出器と大気中性子との関わりを示すモデル図。1、2、3は中性子検出器、斜線部は中性子の平均自由行程内の領域を示す。AとDはそれぞれ上向きおよび下向き中性子の伝搬方向を示す。NPRは土壌中で中性子を発生する親粒子。

Radiation)* とする。土壌水分量が増加したとき、深さ1では主としてA成分の、深さ2、3ではDとA両成分の減衰がそれぞれ起こる。一方 NPRは常に減衰を受ける。従って深さ2、3での減衰量は深さ1よりも大きくなる。しかし深さ3ではDやNPR自身の減衰がより大きいので検出器まで到達しない確率が増えてくる。この結果、a)のようにある一定の深さ(ここでは深さ2)で中性子減衰量の極大が現われる。

一方、検出器に捕捉される直前のA、D成分の減速に最も効率的に寄与するのは、地表から検出器設置点までの土壌に含まれる水分量よりは、検出器に最も近い破線円で示した領域内の水分量の筈である。これが上記 b)の結果をもたらしたものと考えられる。このことは土壌水分量の深度別推定の可能性を示唆する。また、熱中性子に及ぼす効果はN、C核などによる吸収が主であり、速・緩中性子に有効な減速効果に比べて水分変化へのレスポンスは小さい。c)はこの性質に基づくのであろう。

図1から大気中性子量と土壌水分量との定量的関係が求められる。表2はその計算結果で、深さ10 cm毎の水分量に対して得られた相関係数である。これらの値から、どの深さにおいても検出器設置点における水分量が大気中性子に最も影響を与えることが分る。この検出器による最大レスポンスは深さ20 cmで得られ、水分量の1%

*その主成分は nucleon であるが muon も若干含まれる。

表2 大気中性子強度と土壌水分量の相関係数/効果係数(全部負値)

中性子検出器 種類	設置点 の深さ	水分計設置点の深さ (cm)			
		10	20	30	40
HP	3 cm	0.55/0.16	0.55/0.16	0.55/0.16	0.58/0.17
BP-1	20	0.83/0.59	0.93/0.62	0.95/0.71	0.94/0.69
BP-2(Cd)	20	0.73/0.77	0.86/0.91	0.91/1.00	0.90/0.98
BP-3	40	0.83/0.45	0.93/0.50	0.96/0.55	0.97/0.54

効果係数の単位は%対%の比

増加に対して大気中性子量の1%減少で与えられる。このとき重量比33%—52%の土壌水分量の変化範囲内で両者の関係はlinearである。

5. 深い地下における大気中性子

前述したように、ある深さ以上の地下では大気中性子の土壌水分量への反応は次第に小さくなる。これは中性子絶対線量だけでなく土壌水分相対量(重量比)も深さとともに急速に低下していくためであると考えられる。それを確かめるため富士川地殻変動観測所(山梨県富沢

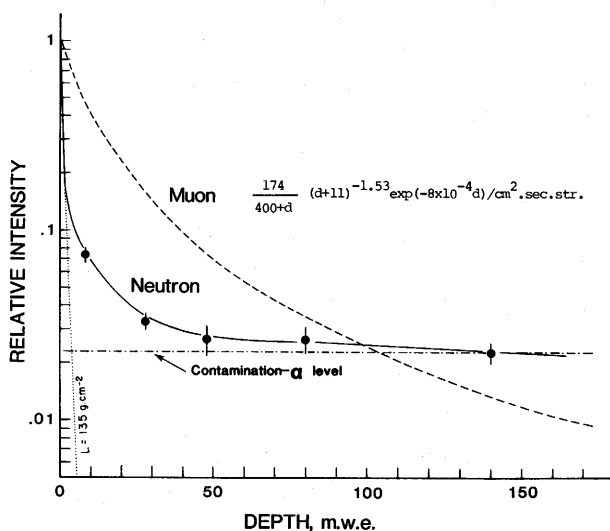


図3 地下における大気中性子およびミュー中間子の強度—深度曲線。横軸の深度は水深相当換算値、黒丸は今回のトンネル内測定値。点線は水深1.5mまでの測定結果の延長線、鎖線は計数管のバックグラウンド(Contamination アルファ線)レベル。

町)の地下トンネルを利用して、相当水深140m (140 mwe)*の深さまでの大気中性子(厳密には地下中性子)の深度分布が測定された。図3は得られた強度—深度曲線である。ただし深さ5 mweまでの直線は水中での測定結果³⁾で、黒丸のトンネル値とは地表点で基準化してある。大気中性子の強度—深度曲線は破線で示したミュー中間子のそれ¹⁵⁾に比べて途中から急速に緩くなり、かなりの生き残り中性子が観測された。しかしこれらがすべてトンネル外からそのまま透過してきた核子成分とは先ず考えられない。理由の一つは大気圧効果である。図4は深さがそれぞれ20 cm、5 mwe、60 mweにおける大気中性子と大気圧との相関図であるが、核子成分の標準気圧効果~0.7%/mbを示すのはAだけで、Cでは殆どゼロ、Bでは半分の効果しかない。ということは大気中性子の寄与は5 mwe深では約1/2、60 mwe深では殆ど0であることを意味する。これは大気の深さ10 mweの全物質質量に占める割合を考えれば説明がつく。また、この計数管自身に含まれるバックグラウンドアルファ線による計数値(1.9/min)¹⁶⁾以上が大気中性子による分なので、10—30 mweの範囲では浅い地下からの延長線を超え

る。この中性子は一体何であろうか? 大気効果殆どゼロから推して熱中性子かミュー中間子捕捉による中性子ではないかとも考えられるが、他にバックグラウンドガンマ線の寄与もあるかも知れない。いづれにしてもトンネル外からの大気中性子はせいぜい深さ30 mwe位までにしか到達しないと考えてよいだろう。

次に上記3つの深さでの大気中性子量と降雨量との関係を調べてみよう。図5から分かるように、前者の後者

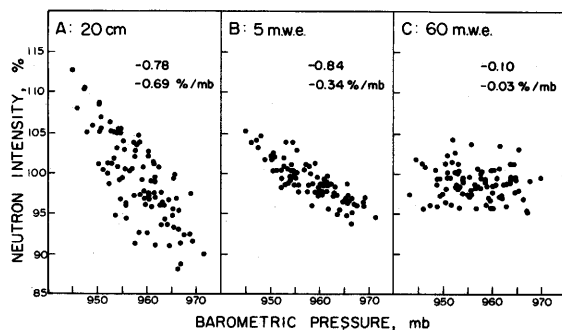


図4 異なる3つの深さ(A: 20 cm, B: 5 mwe, C: 60 mwe)の地下における大気中性子と気圧との相関図。数字は上が相関係数、下が効果係数。

* 山の形状が平らでないのでこの値は正確なものではない。

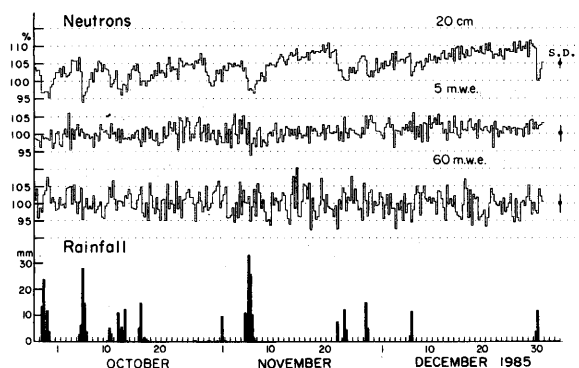


図5 図4の3つの深さA, B, Cにおける大気中性子強度の時間変化。最下端は降雨量変化を示す。

へのレスポンスは20 cm深では勿論明瞭だが、60 mwe深では全く見られず、5 mwe深では長期変化(冬の乾燥期への移行とともに中性子レベルは徐々に上昇)にのみ僅かに見られる程度である。このことから、60 mwe深での計数は外界条件変化には全く左右されないようなバックグラウンドと考えられる。

5 mwe深ではCdシールド型検出器が使用されたにも拘らず、降雨量へのレスポンスは浅い地下でのそれより遙かに小さく、図4からの期待値(効果係数で約1/2)を下まわる。これは雨量がそのような深い地下にまで浸透していない事を意味する。もしそこまでつまりdiffusion length以内に浸透していれば当然検出器に反応する筈だからである。もちろん浅い地下にはそれだけの雨量は蓄積されているが、それが5 mwe深での上半球物質に占める割合がかなり小さいということであろう。

6. 地表面近くの大気中性子の振舞

先に述べたように、地表付近で観測される大気中性子は空気中および土壌中(海水中)の両方で生成され、それぞれ異なる拡散、吸収を受けるためにair-ground境界効果^{10),11)}を生ずる。この効果を実験的に調べる研究は数多くなされており、表3に関連定数を空気に対する相対値で示す^{10),16),17)}。しかしこれらはすべて平均的な値であって下向き成分とアルベドとの区別はごく一部を除いてまだなされていない。

地表面近くの大気中性子の振舞を考えると、陸上で約40%を占めるアルベド中性子の寄与が重要となる。水上(海上)での全線量が陸上の0.6となるのは、表3に

見るように、水中でのより小さい生成率や伝搬距離、大きな吸収率のためアルベド中性子量が少なくなるためである。つまり水は中性子に対して最も効率的な吸収材である。従って土壌中の水分も同じ働きをする。ただしそ

表3 土壌中および水中における大気中性子の諸性質(空気中での値をすべて1として示す。)

特 性	乾燥土*	100%含水土*	水
減速効率 (速中性子→熱中性子)	3.09	5.45	(7.4)
吸収断面積(熱中性子)	0.088	0.134	(0.18)
生成率($\sim A^{1.4}$ に比例)	1.13	1.03	0.92
伝搬距離(rms) (2 MeV→1 eV)	0.58	0.42	(0.26)
Cd比	1.29		1.23

()は推定値

*組成がH : O : Si : Al = 0.90 : 2.38 : 1 : 0.21の比の場合

れが含水量に大きく依存することは表3から推定できる。

しかしながら土壌水分が単なる吸収材としての役割だけでなくしかもアルベドがゼロならば、地下の中性子量は深さとともに一様に減衰していくだけで、図1のような結果は期待できない。例えば図2で深さ2の場所にだけ水分が蓄積されていたとすると、深さ3では2と同じだけの変化が現われ、深さ1では殆ど変化しない筈である。実際には深さ2で最大の減衰がそして深さ1でも減衰が現われる。これはアルベドの寄与と水中での短い拡散距離のせいである。そのアルベド量はエネルギーと深さの関数の筈であるがまだそのような測定はない。

大気中性子を利用して土壌水分量を推定するという試みが成功するかどうかは、どの程度の精度で深さ別測定が可能になるかどうかにかかっている。それには大気中性子のair-ground境界効果に関するまだまだ多くの基本的情報が必要であり、その意味では応用研究は常に基礎研究と表裏一体であることは論をまたない。

終わりに、本研究に当たって農業土木試験場の小菅孝利氏には実験上の便宜を色々図って頂き、また実験土壌の基礎データを提供して頂いた。トンネル実験では東京大学地震研究所の石井 紘、加藤照之両博士の協力に負うところが大きい。更に電子技術総合研究所の山下幹雄博士には原稿精読の上貴重な意見を頂いた。併せ記して謝辞としたい。

文 献

- 1) 小玉正弘、宇宙放射線 (西村 純編) 共立社、pp. 473—492 (1986).
- 2) 例えば、Kodama, M., M. Mitsumori, K. Imai, A. Inoue and M. Wada, Remote sensing of atmospheric temperature profile using three cosmic ray muon components, *Memoirs Natl. Inst. Polar Res., Special Issue, No. 24*, 105—107 (1982).
- 3) 例えば、Kodama, M., Continuous monitoring of snow water equivalent using cosmic ray neutrons, *Cold Region Sci. Tech.*, **3**, 295—303 (1980).
- 4) 小玉正弘、宇宙線の水利科学的应用、水利科学、**21**, 19—32(1981).
- 5) Kodama, M., S. Kudo and T. Kosuge, Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement, *Soil Sci.*, **140**, 237—242 (1985).
- 6) Kodama, M. and S. Kudo, Response of atmospheric neutron fluxes to soil moisture content, *Sci. Papers I. P. C. R.*, **79**, 99—103 (1985).
- 7) Bethe, H. A., S. A. Korff and G. Placzek, On interpretation of neutron measurements in cosmic radiation, *Phys. Rev.*, **57**, 573—587 (1940).
- 8) Armstrong, T. W., K. C. Chandler and J. B. Barish, Calculations of neutron flux spectra induced in the earth's atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **78**, 2715—2726(1973).
- 9) Preszler, A. M., S. Moon and R. S. White, Atmospheric neutrons, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4715—4722(1976).
- 10) O'Brien, K., H. A. Sandmeir, G. E. Hansen and J. E. Campbell, Cosmic ray induced neutron background sources and fluxes for geometries of air over water, ground, Iron and Aluminum, *J. Geophys. Res.*, **83**, 114—120 (1987).
- 11) Kodama, M., S. Kawasaki, T. Imai, K. Takahashi and M. Wada, Anomalous atmospheric attenuation of cosmic-ray-induced neutrons near the earth's surface, *Natl. Rad. Environ.*, **III**, **2**, 882—895(1980).
- 12) Preszler, A. M., G. M. Simnett and R. S. White, Earth albedo neutrons from 10 to 100 MeV, *Phys. Rev. Letters*, **28**, 982—985(1972).
- 13) Kodama, M., Ground albedo neutrons produced by cosmic radiations, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **52**, 1503—1504(1983).
- 14) Yamashita, M., L. D. Stephens A. R. Smith and H. W. Patterson, Detection efficiency of bare and moderated BF₃-gas-filled proportional counters for isotropic neutron fluxes, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **3**, 343—353(1966).
- 15) 小田 稔、宇宙線、裳華房 (東京)、pp. 251 (1972).
- 16) Fowler, I. L., Very large boron trifluoride proportional counters, *Rev. Sci. Inst.*, **34**, 731—739(1963).
- 17) Yamashita, M., L. D. Stephens and H. W. Patterson, Cosmic-ray-produced neutrons at ground level: neutron production rate and flux distribution, *J. Geophys. Res.*, **71**, 3817—3834(1966).
- 18) 山下幹雄、地表上における宇宙線中性子バックグラウンド、理研シンポジウム講演集、**16**, 13—28 (1980).

Abstract**Cosmic rays and soil science**

Masahiro KODAMA

On the propagation way of cosmic-ray-produced neutrons, that is, atmospheric neutrons in the earth's soil, their fluxes are frequently reduced through their scattering and absorption procedures due to water contents included in soil. Experimental investigations have been carried out for the aim of determining a quantitative relation between neutron fluxes and soil moisture contents as a function of underground depth. It is shown that atmospheric neutrons may serve to estimate the soil moisture content under consideration of behavior of atmospheric neutrons, upward- and downward-moving, near the ground surface. This is an example of showing a relation of interest between cosmic ray physics and soil science.

Department of Physics