研究論文

球型プラスチック検出器による宇宙線荷電粒子束密度の測定

占部逸正^{*1}, 小川善弘^{*2}, 義本孝明^{*3}, 辻本 忠^{*3}, 中島敬行^{*4}

(1997年1月20日受理)

(1997年4月19日再受理)

Measurements of Flux Densities of Cosmic-Ray Charged Particles Using a Spherical Plastic Scintillation Detector

Itsumasa URABE,^{*1} Yoshihiro OGAWA,^{*2} Taka-aki YOSHIMOTO,^{*3}
Tadashi TSUJIMOTO^{*3} and Yoshiyuki NAKASHIMA^{*4}

A spherical plastic scintillation spectrometer has been developed for the determination of flux densities of cosmic-ray-charged particles around nuclear facilities. The accuracy of measured flux densities was improved by taking into consideration the pulse-height distribution caused by cosmic-ray photons and by the electro-magnetic interaction between cosmic rays and photomultiplier tube components. From the measurements performed in a natural environment, it became clear that the flux density of cosmic-ray-charged particles varied with the location, and in some cases almost 10 percent of the cosmic-ray-charged particles was shielded by the surroundings of the places monitored.

KEY WORDS : particle flux density, cosmic-ray-charged particle, cosmic-ray photon, plastic scintillation detector, natural environment

I は じ め に

宇宙線は、環境放射線モニタリングの立場から、放射線検出器の応答特性や被曝線量の評価など放射線安全管理の基礎研究の対象として数多く採り上げられてきた¹⁻³⁾。最近では、環境放射線の安全性や宇宙線被曝に対する一般的な関心の高まりから^{4,5)}、特に時間的・空間的变化を考慮して宇宙線線量率を評価することが放射線

安全管理上の課題のひとつとして重視されている。即ち、環境放射線モニタリングの視点からすると、モニタリングの実施される現場で、測定環境の相違やその時間的変動を考慮して宇宙線の線量率を評価することが、施設周辺におけるモニタリング結果の変動要因を理解し、放射線安全管理の信頼性を増すうえで重要な課題となっている。

宇宙線の地域的な相違や時間的な変動を評価するため

^{*1} 福山大学工学部；福山市学園町一番地三蔵 (〒729-02)

Faculty of Engineering, Fukuyama University ; Sanzo, Gakuen-cho 1, Fukuyama-shi, Hiroshima 729-02, Japan.

^{*2} 近畿大学理工学部；東大阪市小若江 3-4-1 (〒577)

Faculty of Science and Technology, Kinki University ; Kowakae 3-4-1, Higashiosaka-shi, Osaka 577, Japan.

^{*3} 京都大学原子炉実験所；大阪府泉南郡熊取町野田 (〒590-04)

Research Reactor Institute, Kyoto University ; Noda, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-04, Japan.

^{*4} 鈴鹿医療科学技術大学保健衛生学部；鈴鹿市岸岡町 1001-1 (〒510-02)

Suzuka University of Medical Science and Technology ; Kishioka-cho 1001-1, Suzuka-shi, Mie 510-02, Japan.

には、測定の簡便性や測定精度の観点から単一の検出器で宇宙線の粒子束密度を評価する方法が適している。単一の検出器による宇宙線の測定は、有機シンチレータを用いて、GOLD や中島らによって試みられている^{6,7)}。有機シンチレータを用いた測定法は、宇宙線荷電粒子成分に着目したもので、大地 γ 線との分離が可能なことや測定系が簡単なことから、測定場所の選択の自由度が大きいことなど宇宙線の空間的・時間的変化の測定に極めて有利な特徴を有している。ここでは、環境放射線モニタリング実施環境における宇宙線荷電粒子束密度の評価を目的として、プラスチックシンチレーションスペクトロメータの宇宙線荷電粒子に対する応答特性を調べ、原子力施設周辺環境での測定に適用した結果について報告する。

II 宇宙線荷電粒子束密度の評価法

検出器として球型シンチレータを使用した場合、検出器によって得られる波高分布は主に大地 γ 線と宇宙線荷電粒子によって構成され、これらに僅かではあるが天然の放射性核種からのベータ線や宇宙線光子などの寄与がある。ここでは、宇宙線荷電粒子束密度の評価に、GOLD や中島らの用いた方法を採用した^{6,7)}。即ち、球型放射線検出器を荷電粒子が透過した際に生じるエネルギー付与の頻度分布は $0 \sim E_{\max}$ で三角形の分布になり、粒子フルエンス Φ は以下の方法で求められる。

$$\Phi = \int_0^{E_{\max}} \frac{dN_c/dE}{\pi r^2} dE$$

ここで、 dN_c/dE は $E \sim E + \Delta E$ の吸収エネルギーを引き起こした荷電粒子数を示し、 r は球型検出器の半径、 $E_{\max}$ は検出器の中央を通過した際の吸収エネルギーを示す。つまり、宇宙線荷電粒子による波高分布が得られれば、これを積分して粒子フルエンスが得られ、粒子束密度はこれを測定時間で除すことにより決定することができる。

しかし、単一の測定器による実際の測定では、大地 γ 線や宇宙線光子の影響により、上式の dN_c/dE をすべての吸収エネルギー領域に渡って決定するのは困難である。ここでは、宇宙線に起因すると考えられる波高分布から光子成分の寄与を除去し、さらにあらかじめ同時計数法で全エネルギー領域にわたって決定した宇宙線荷電粒子の波高分布情報を使用して粒子フルエンスを決定した。実験的に求めた粒子フルエンスを $\Phi_{\exp}$ で表すと、その評価方法は以下の通りである。

$$\Phi_{\exp} = \frac{k}{\pi r^2} \int_{E_{\text{dis}}}^{E_{\max}} \left[\frac{dN_M}{dE} - \frac{dN_P}{dE} \right] dE$$

ここで、 dN_M/dE は単一の検出器による宇宙線の観測波高分布を示し、 dN_P/dE は観測された宇宙線の波高分布に含まれる宇宙線光子成分の波高分布を示す。 $E_{\max}$ および E_{dis} は確実に宇宙線による波高分布と考えられる領域の最高および最低波高値に対応し、 k は同時計数法による波高分布に基づくもので、 $E_{\max} \sim E_{\text{dis}}$ の波高分布か

Fig. 1 Block diagram of the coincidence counting system used for determination of pulse-height distribution caused by cosmic-ray charged particles. P.M., photomultiplier tube; P.A., preamplifier; L.V., low voltage power supply; H.V., high voltage power supply; S.C.A., single channel analyzer; P.H.A., pulse-height analyzer; PC-98, personal computer.

ら全エネルギー領域の粒子フルエンスを得るための換算係数である。

III 実 験

3.1 実験装置

本研究では宇宙線荷電粒子束密度の測定に球型プラスチックシンチレーション検出器（以後球型プラスチック検出器と呼ぶ）を使用した。シンチレータは応用光研製の NE102A (1.032 g cm^{-3}) で、その直径は 7.6 cm である。光電子増倍管の出力は温度補償型プリアンプに接続されている。検出器全体はアルミニウムケースで覆われている。球型プラスチック検出器による宇宙線荷電粒子の全エネルギー領域の波高分布は、宇宙線の物質透過力を利用して同時計数法により決定した。本研究に使用した同時計数系を Fig. 1 に示す。図に示すように同時計数のゲイト信号には直径 20 cm^φ 厚さ 2 cm^t の平板型プラスチックシンチレーション検出器（以後平板型プラスチック検出器と呼ぶ）を使用した。平板型プラスチック検出器の出力は波高弁別器 (OKEN 706-1C) を通してゲイト信号とした。球型プラスチック検出器の出力は対数増幅器 (OKEN S-10588) を通した後、遅延増幅器 (OKEN 719-1) を通して ADC (Labo: 2201A) の入力信号とした。全体は MCAWIN (Labo) を搭載したパーソナルコンピュータ (NEC 98noteNA) により制御した。

3.2 宇宙線荷電粒子の波高分布の測定

球型プラスチック検出器により観測されたスペクトルはパルス波高分布であり、波高値を吸収エネルギーで表現する必要がある。有機シンチレーション検出器では全エネルギー吸収ピークを得ることが出来ないため、コンプトン散乱による電子の吸収エネルギースペクトルを使用して吸収エネルギー対波高値の関係を決めることができる。ここでは、波高分布のピークの高さ（計数値）の半分の高さとなる波高値がコンプトン端のエネルギーに相当する考え方を採用した⁷⁾。エネルギー校正には自然環境での測定を考慮し、²²Na, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²⁰⁸Tl から放射される γ 線を利用した。

球型プラスチック検出器による宇宙線荷電粒子の波高分布は、平板型プラスチック検出器との同時計数法により、京都大学原子炉実験所倉庫内測定室 (laboratory 1)、研究棟低バックグランド室内 (low BKG) および福山大学工学部測定室 (laboratory 2) で測定した。宇宙線の組成は測定場所により異なるが、京大炉では特に同時計数に寄与する自然環境 γ 線の影響を検討するために、測定室内と γ 線の寄与の少ない低バックグランド室 (鉄遮蔽厚 20 cm) 内での測定を行った。また、福山大実験室内で

は偶然同時計数の影響を最小限とするため、ゲイト幅を入力信号に応じた自動設定から固定の 5 μ s に変更した場合の測定も実施した。さらに、光電子増倍管の発光の影響を知るために検出器のシンチレータを取り除いた状態でも同時計数の測定を行った。

3.3 環境放射線モニタリング機器設置環境における測定

環境放射線モニタリングの行われる地点は、社会的な条件等を考慮する必要性から、平坦な所のみならず小高い丘の麓や建物の側などの地理的に複雑な場所が選ばれる場合がある。したがって、これらのモニタリング地点の線量率分布を正しく評価するためには、それぞれの地理的条件に依存した自然環境放射線の寄与を詳しく知っておく必要がある。ここでは、球型プラスチック検出器による宇宙線荷電粒子成分評価法の自然環境中での測定への適用性を検討するとともに環境放射線モニタリング機器設置環境の宇宙線荷電粒子成分の場所による相違を知るために、若狭地方の数カ所を選んで測定を行った。測定点の地名を略号で Table 1 に示す。表の障害物の欄に示した印は目視による宇宙線の遮蔽要因の大きさを表し、◎ はほとんど障害物がない状態を示し、△ は比較的障害物の多い環境条件を示している。

測定は、1995 年 8 月 10 日から 12 日にかけて行った。測定の際、増幅器、波高分析器等の測定器はワゴン車に搭載し、プラスチック検出器との接続には約 50 m のケーブルを使用した。各測定点での測定時間はゲインの変動を考慮し 5000 秒を基本とし、同一地点で複数回の測定を行った。

Table 1 Measuring points of cosmic-ray charged particles.

Location	Time	Environment	Obstacle
Suga	9:20~	near Sukama shrine	○
Mika	15:03~	Furusato hall	△
Ushi	9:00~	foot of a small hill	○
Obam	13:20~	Obama training center	◎
Kawa	17:15~	Kawakami branch school	△
Naka	9:55~	near a fire station	△
Ohi	14:40~	Ohi public center	◎

* The locations are shown in the abbreviated form of the city name.

** ◎ and △ means that there were few obstacles and some shields around the measuring points, respectively.

IV 結果および考察

4.1 吸収エネルギー対波高値

エネルギー校正では ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{208}Tl などの γ 線に対するコンプトン端のエネルギーと波高値の関係から, 少なくとも 0.5 MeV~数 MeV の範囲で吸収エネルギー対波高値の直線性を確認することができた。

宇宙線の波高分布の測定は, 長時間厳しい環境のなかで実施されるため出力に変動が生じる可能性が高い。このことから, エネルギー校正を測定ごとに行い宇宙線計数率の測定精度を改善する必要がある。自然環境中の測定では, 大地放射性核種である ^{40}K および ^{208}Tl による波高分布が顕著に形成されるため, これらのふたつの波高分布と対応する γ 線のコンプトン端のエネルギーから吸収エネルギー対波高値の関係を決定した。

4.2 宇宙線荷電粒子の波高分布

球型プラスチック検出器による測定で, 平板型プラスチック検出器との同時計数を行った場合とそうでない場合の波高分布の例を Fig. 2 に示す。図の波高分布で, 同時計数によらない結果には ^{40}K や ^{208}Tl によるコンプトン電子のピークがみられ, 同時計数による結果とは低エネルギー側で大きく異なるのが分かる。得られた同時計数による波高分布では, 宇宙線荷電粒子による計数, 宇宙線光子の同時計数, 低エネルギー光子や対数増幅器の熱雑音による偶然同時計数, 光電子増倍管と宇宙線の相互作用による計数などが考えられる。熱雑音と光電子増倍管に起因する計数は, 球型検出器のシンチレータを取

り除いた状態で実験的に検討した。その結果, 検出器を横に置くと顕著に波高分布が観測され, 逆に, 縦に置いた場合に殆ど信号が観測されないことがわかり, 検出器の配置条件によりその寄与を著しく小さくできることが明らかとなった (検出器を横に置く条件では, 宇宙線と光電子増倍管の相互作用の立体角が増大するため, 宇宙

Table 2 Conversion factors from the counts observed above the absorbed energy of 3 MeV or 3.5 MeV (>3 MeV or >3.5 MeV) to the cosmic-ray charged particle fluence (Fluence) which were determined on the basis of the pulse-height distributions by the coincidence counting method.

Places	Fluence/ >3 MeV	Fluence/ >3.5 MeV
laboratory 1*	1.14	1.17
low BKG 1*	1.11	1.13
low BKG 2*	1.14	1.16
laboratory 2**	1.11	1.13

* Measurements were carried out at KURRI. "low BKG 1" and "low BKG 2" mean that the spherical plastic counter was placed perpendicularly to the earth surface and in the horizontal position, respectively.

** Measurements were carried out at Fukuyama university with the coincidence gate period of 5 μs .

Fig. 2 Pulse-height distributions by the spherical plastic scintillation spectrometer.

The upper and the lower results were obtained without and with the coincidence counting method using 20 cm diameter and 2 cm thick flat plastic scintillation counter, respectively. The lower energy part of the upper spectrum was mainly caused by terrestrial gamma-rays. The lower spectrum and the higher energy part of the upper spectrum were originated in cosmic-rays.

線と光電子増倍管の構造材との相互作用による計数が有意になったと考えられる)。また、宇宙線光子の同時計数や偶然同時計数の寄与は、鉄遮蔽された低バックグラウンド室内外の測定で、宇宙線の強度差を考慮すればほぼ類似した形状の波高分布が得られたことから、これらによる分布の歪みの可能性もきわめて小さいと考えられる。

測定室及び低バックグラウンド室の測定結果から、吸収エネルギー 3.0 MeV と 3.5 MeV に宇宙線と大地ガンマ線の区分レベルを設定した場合の宇宙線の計数率から粒子フルエンスへの換算係数 $k_{3.0}$ と $k_{3.5}$ を Table 2 に示す。測定室と低バックグラウンド室の全計数率は、最大で 40% 程度の相違があったが、表の換算係数にはこの違いが系統的には現れなかった。また、表の換算係数で測定室 (laboratory 2) と低バックグラウンド室 (low BKG 1) ではほぼ同じ結果になっていることから、屋内環境でもゲイト幅を最小限にすることにより大地 γ 線による偶然同時計数の少ない宇宙線荷電粒子成分の波高分布の得られることが明らかとなった。

宇宙線信号の波高値の区分レベルの設定は、荷電粒子束密度の測定精度に大きな影響を与える。実験室での測定では、気温等の影響による利得の変動が小さいことから、区分レベルが 3 MeV でもその影響は小さい。しかし、モニタリング機器設置環境等の自然環境中では、環境条件の変化も大きく、利得の変動が相対的に大きくなることで見かけの分解能が悪くなる可能性がある。したがって、ここでは屋外環境での測定を考慮して吸収エネルギー 3.5 MeV を大地 γ 線と宇宙線信号の区分レベルとした。

以上のことより、縦置き光電子増倍管の使用条件で、宇宙線荷電粒子の波高分布の 3.5 MeV 以上の計数率から粒子フルエンスへの換算係数として、 $k=1.13\pm0.02$ が得られた。誤差は、エネルギー校正や電子による波高分布等に含まれる誤差等を考慮したものである。さらに Table 2 から、宇宙線荷電粒子の組成が幾分変化しても波高分布の形には極端な変化を生じないことがわかる。このことは、逆に、ここで得られた波高分布の適用性の広さを示すもので、上記の結果は、地上の幾つかの環境下で得られる波高分布を比較的広い範囲にわたって代表しているものと考えられる (ただし、波高分布を歪める低エネルギー電子の影響については、今後更に詳しく検討する必要がある)。

4.3 宇宙線光子成分の寄与

Fig. 2 から分かるように、同時計数によって得られた波高分布とこれによらないで単一の検出器によって得られた波高分布では、立体角の補正を試みた後でもその形

Table 3 Physical quantities for the calculation of counting rates by cosmic-ray photons.

Effective length	5.5	cm
Density (ρ)	1.03	g cm^{-3}
Mass attenuation coefficient (μ/ρ)	$2.9\sim1.7\times10^{-2}$	$\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$

が相違する可能性が高い。これは後者の測定結果には同時計数では計数されなかった荷電粒子や光子に起因する計数が得られたためと考えられる。特に、光子は波高分布の形が荷電粒子のそれと異なることから、荷電粒子束密度の測定誤差の原因となる可能性が高い。ここでは、荷電粒子束密度を評価する際、基本となる 3.5 MeV 以上の波高分布に寄与する光子の計数率を評価した。

宇宙線光子の地上付近におけるエネルギースペクトルは、Y.R. AKHMAD & Y. NAKASHIMA によって検討され、4.3~24 MeV の領域の強度が $1.5\times10^{-2} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と報告されている⁸⁾。ここでは、各光子に対するコンプトン反跳電子の分布が一樣であることを仮定して、4.3 MeV 以上の光子が吸収エネルギー 3.5 MeV 以上の領域に波高分布を生じる確率を計算した。計算条件を Table 3 に示す。シンチレータの質量減弱係数としてはメタクリル樹脂の値を使用した。計算の結果、光子の計数率はエネルギーによって異なるが、平均的には球型プラスチック検出器に対し 10% 程度の効率を有し、4.3 MeV~数十 MeV の宇宙線光子 ($1.5\times10^{-2} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) の場合、計数率が $8.2\times10^{-4} \text{ counts cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度になることが明らかとなった。この値から検出器の大きさと測定時間を考慮すると、宇宙線による 3.5 MeV 以上の計数率の約 3.8% が光子の寄与によるものと推定された。他方、同時計数を行った場合の宇宙線の波高分布とそうでない場合の波高分布の差がほぼ連続になるよう補正した結果、差の波高分布の 3.5 MeV 以上の計数率は同じエネルギー領域の宇宙線の全計数率の 8% 程度になった。この領域には光子と同時計数を逃れた電子による波高分布が生じると思われるが、3.5~15 MeV の領域で、低エネルギー電子の寄与を $5\times10^{-4} \text{ electrons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と考えると⁹⁾、光子の寄与は 4~5% 程度と推定することができる。以上の検討より、ここでは宇宙線波高分布の 3.5 MeV の領域の計数率に対する宇宙線光子の寄与を 4% として以後の計算に使用した。

4.4 モニタリング機器設置環境の宇宙線荷電粒子束密度分布

Table 4 に環境放射線モニタリング機器設置環境にお

Table 4 Flux densities and air absorbed dose rates by cosmic-ray charged particles.

Location	Flux density (cm ⁻² min ⁻¹)	Absorbed dose rate (nGy h ⁻¹)	Obstacle
Suga	1.44	29.3	○
Mika	1.37	27.7	△
Ushi	1.42	28.9	○
Obam	1.43	29.1	◎
Kawa	1.40	28.3	△
Nata	1.41	28.7	△
Ohi	1.45	29.5	◎

* The locations are shown in the abbreviated form of the city name.
** ◎ and △ means that there were few obstacles and some shields around the measuring points, respectively.
*** The conversion factor from the flux density to the air absorbed dose rate was given by Y. NAKASHIMA and S. FURUTA.⁷⁾

ける宇宙線荷電粒子束密度および空気吸収線量率を示す。結果全体を概観すると Mika, Kawa および Nata で低く, Suga, Obam, Ohi で相対的に高い値が得られている。これらの相違は **Table 1** から分かるように設置環境の条件に依存したもので, 地形よりも機器近傍の建物等の影響が顕著で, 10%程度の違いは主にこれによるものと思われる。

空気の吸収線量率は建物等の遮蔽物の少ないところで 29.3±0.2 nGy h⁻¹ 程度となっている。これらの値は荷電粒子のみに着目したものであり, 宇宙線光子の線量率を約 2.8 nG h⁻¹ 程度と考えると⁸⁾, 電離成分の空気吸収線量率は 32.1 nG h⁻¹ となり, これまでの測定値に比べ比較的高い値となっている^{7,8,11)}。この原因としては今回の測定値に大地 γ 線の影響がなお残っていることとこれまでの測定値で宇宙線光子による空気線量率の評価が過小評価であったことなどが考えられるが, これらの点については, 今後さらに詳しく検討する必要がある。また, 宇宙線強度は太陽活動に依存して変動するが, ここ数年は静穏期にあたり地上での宇宙線強度が強くなる時期に相当する。この太陽活動に伴う強度変動の幅は電離成分で最大で約 10%程度と言われており, 荷電粒子に対して, 我が国では 29.2 nG h⁻¹~32.3 nG h⁻¹ の実測値が報告されている^{7,8,11)}。さらに, 宇宙線光子の変動では, 夏季に強度が弱くなる季節変動のあることも指摘されてい

る¹⁰⁾。宇宙線荷電粒子束密度の測定では基準となる線源がないことから精度の確認が困難であるが, これまでのこうした研究結果を総合すると, 本研究の方法では約 5%以内の誤差で宇宙線荷電粒子束密度を測定していると考えられる。

原子力施設周辺環境では NaI(Tl) 検出器や電離箱を使用して環境放射線モニタリングが行われている。機器の動作確認をこれらの検出器に対する宇宙線に対する感度の相違を持って行う場合もあるが, 以上の結果から, 宇宙線強度の相違が機器設置環境の影響を強く受けることを充分よく理解しておくことが重要である。

V お わ り に

以上の検討の結果, 球型プラスチック検出器を用いた宇宙線荷電粒子成分の評価に関し, 以下のことが明らかとなった。

- ① 同時計数を行う場合, 熱雑音や環境 γ 線との偶然同時計数を少なくするためにゲイト幅を最小限にする必要がある。また, 検出器を縦に置いて使用する限り宇宙線に起因する光電子増倍管からの信号の寄与は少ない。
- ② 同時計数法で得られた宇宙線荷電粒子の波高分布は, 強度が異なってもその形は殆ど変化しない。したがって, 波高分布の一部から全体の強度を推定することは可能である。
- ③ 宇宙線光子は, 4.3 MeV 以上に着目した場合, プラスチック検出器の 3.5 MeV 以上の計数率に対し約 4%程度寄与している。
- ④ 本方法を自然環境中の測定に適用した結果, 宇宙線荷電粒子束密度を約 5%以内の誤差で評価することが可能である。
- ⑤ モニタリング機器設置環境では環境条件により宇宙線荷電粒子束密度に 10%程度の開きを生じる場合がある。

なお, 本研究の一部は関西原子力懇談会の受託研究として行われた。研究の遂行に当たり, 環境放射線モニタリング研究グループの皆様より有益なご助言を頂いた。また, 実験に際しては福山大学工学部および近畿大学理工学部の学生諸氏に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表します。

参 考 文 献

1) K. O'BRIEN ; The cosmic ray field at ground level, The natural radiation environment II, USERDA Report CONF-720805-P1 (ed. by J.S.A. ADAMS,

- W.M. LOWDER and T.F. GESELL), pp. 15-54 (1974), Rice University and University of Texas, Houston.
- 2) 和田雅美, 井上 葵, 奥谷晶子, 坂本恵美子, 高橋一億, 岡野真治, 出雲光一, 加藤武雄, 熊谷秀和, 西田雅美, 天道芳彦, 島 誠, 矢吹英雄, 岡田昭彦, 矢吹貞代, 中谷英夫, 千葉悦也, 田島典夫, 森内 茂, 坂本隆一, 藤高和信, 阿部史朗, 新井清彦, 占部逸正, 山崎敬三, 辻本 忠, 義本孝明, 岡本賢一, 桂山幸典, 青山 巖, 遠山文雄; 1981 年理研航空機実験, 理研報告, **59**, 1-19 (1983).
 - 3) UNSCEAR; Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. General assembly with annex, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, p. 52 (1988), United Nations, N.Y.
 - 4) 草間朋子, 中島敬行; 航空機利用に伴う放射線防護, 平成 4~6 年度科学研究費補助金(総合研究(A)) 研究成果報告書「制御可能な自然放射線に対する放射線防護に関する研究」(研究代表者: 辻本 忠), pp. 29-46 (1995), 京都大学原子炉実験所.
 - 5) 占部逸正; 宇宙飛行に伴う放射線被曝の防護, 同書, 49-56 (1995).
 - 6) R. GOLD; Meson dosimetry for the natural environment, *Radiat. Res.*, **56**, 413-427 (1973).
 - 7) 中島敬行, 古田定昭; プラスチックシンチレーション検出器による環境放射線の測定, 保健物理, **16**, 83-97 (1981).
 - 8) Y.R. AKHAMAD and Y. NAKASHIMA; The air absorbed dose of photons generated from secondary cosmic ray at sea level at Nagoya, Japan, *Radiat. Prot. Dosim.*, **58**, 47-51 (1995).
 - 9) O.C. ALLKOFER; "Introduction to Cosmic Radiation," pp. 106-130 (1975), Verlag K.Thiemig, Munchen.
 - 10) Y. NAKASHIMA and S. FUJISAKA; The annual variation of photons originating from secondary cosmic ray components at sea level at Nagoya, Japan, *Radiat. Prot. Dosim.*, **45**, 387-390 (1992).
 - 11) K. YAMASAKI, I. URABE, T. YOSHIMOTO, K. OKAMOTO, T. TSUJIMOTO and K. KATSURAYAMA; Sea level cosmic ray ionization intensity at middle geomagnetic latitude (25°) in Japan, Proc. IV th Int. Congr. of the IRPA, Vol. 3, pp. 1038-1041 (1984).