日本における環境中性子線量率の 高度及び緯度等による変化

長岡 和則^{*1}, 古渡 意彦^{*2}, 佐藤 昭二^{*1}
虻川 成司^{*1}, 樋口 英雄^{*1}, 中村 尚司^{*3}

(2004 年 3 月 19 日受理)

(2004 年 8 月 13 日 再受理)

Altitude and Latitude Variations in the Environmental Neutron Dose Rate in Japan

Kazunori NAGAOKA, ^{*1} Munehiko KOWATARI, ^{*2} Shoji SATO, ^{*1}
Johji ABUKAWA, ^{*1} Hideo HIGUCHI ^{*1} and Takashi NAKAMURA ^{*3}

Field measurements of the cosmic-ray neutron dose rate on the ground using the neutron dose-equivalent counter developed by Nakamura were conducted in order to allow an understanding of neutron dose rate distribution in Japan. The effects of altitude, geomagnetic latitude, snowfall and rainfall on the neutron dose rate were confirmed from the results of the field measurements. Altitude variation can be fitted to an exponential function ($e^{\alpha Z}$), where Z is altitude (km). The α value for the neutron dose rate increased with increasing geomagnetic latitude, 0.6–0.8 (km^{-1}) at latitudes 20°–40°. Roughly, $\alpha=0.01 \times L + 0.4$ (for Z under 2 km), where L is the geomagnetic latitude(°). The effect of geomagnetic latitude on the neutron dose rate was approximately 2% per degree(°) at latitudes 20°–40°. Reductions in neutron dose rate due to snowfall and rainfall are caused by a decrease in component backscattering from wet ground surfaces. The neutron dose rate ($H^*(10)$) at sea level at a geomagnetic latitude near 25° in 2002 was approximately 4 nSv/h, and the neutron dose rate obtained from the neutron energy spectrum up to 400 MeV with the Bonner sphere counter developed by Uwamino was 5.7 nSv/h. This difference may be due to the low sensitivity of the dose-equivalent counter to neutrons with energies above 15 MeV.

KEY WORDS: neutron, environmental radiation monitoring, cosmic rays, altitude, latitude

I 緒 論

環境には自然の放射線が存在しており, 私たちは日々の生活の中で絶えず放射線を浴びている。自然の放射線は, 宇宙線, 大地 γ 線, 大気中ラドン, 食品や人体中にある放射性物質からの放射線等で構成されており, それ

ぞれの放射線量(以下「線量」という。)が国連科学委員会¹⁾等で纏められている。その中で宇宙線起源の中性子の線量は, 線量寄与割合が小さく, またその測定が難しいことから, 測定結果の報告は極めて少ないのが現状である。しかし, ICRP 1990 年勧告²⁾において中性子の放射線荷重係数が大きくなり, 相対的に重要性が増した。

^{*1} 日本分析センター; 千葉県千葉市稲毛区山王町 295-3 (〒263-0002)

Japan Chemical Analysis Center; 295-3, Sanno-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-0002, Japan.

^{*2} 日本原子力研究所; 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4 (〒319-1195)

Japan Atomic Energy Research Institute; Tokai-mura, Ibaraki 319-1195, Japan.

^{*3} 東北大学; 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 (〒980-8579)

Tohoku University; Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan.

また、中性子は高度の増加とともに増加するため、標高の高い地域や航空機高度ではさらに中性子の寄与割合が増加することになる。ICRP 1990 年勧告の国内制度等への取入れの際には、放射線審議会が航空機内の中性子線量評価等についてより詳細な調査・検討の必要性を指摘するなど、環境の中性子が注目されてきている。世界的には宇宙線線量の計算コード³⁻⁵⁾の開発等も行われており、日本における線量も評価報告されている⁶⁾。

しかし、計算の確かさを実証するという観点からも実測データの充実に期待されているが、測定による報告例は依然として少なく、特に日本の緯度付近における測定結果は非常に少ない。このような状況に鑑み、日本分析センターでは文部科学省の委託を受け、我が国における中性子の線量率レベル及び変動範囲を把握することを目的として全国調査を実施している。ここでは、平成13年度及び14年度の調査結果並びにその結果を基に検討を行った高度、緯度、降雨、積雪あるいは建物の中性子線量率への影響等について報告する。

II 測定方法

1. 概要及び測定装置

日本全国の14道府県（北は北海道、南は鹿児島県）に

おいて原則として5地点/府県の割合（北海道のみ約10地点）で減速型中性子線量計⁷⁾（中性子レムカウンタ；以下「レムカウンタ」という。）を用いた中性子線量率測定、電離箱線量計及びNaI(Tl)シンチレーション検出器（以下「NaI検出器」という。）を用いた宇宙線電離成分の測定を行った。

また、全国調査を実施している期間の太陽活動に伴う変動を把握するため、定点（日本分析センター；千葉市）において中性子線量率等の連続測定を行った。また、上巻らの開発した多減速材付中性子検出器（ボナーカウンタ⁸⁾）を用いて中性子スペクトルの測定を行い、解析エネルギー範囲、線量単位等について検討を行った。

使用した測定装置の一覧を Table 1 に示す。

レムカウンタとしては、中村らが開発⁷⁾したものを採用したが、市販品（富士電機製）は軽量化のためポリエチレン減速材を2cm薄くしていることから、当初の構造にするために2cm厚のポリエチレンカバーを被せ、全国調査に使用した。カバーを被せたレムカウンタが15 MeV まで満足のいくレスポンスであることを東北大学等での照射試験において確認した。

宇宙線が地上のおよそ1/200である金沢大学低レベル放射能実験施設尾小屋地下測定室^{9,10)}において測定を行

Table 1 Measurement devices.

	中性子	宇宙線電離成分	気圧
全国調査 (全国13道府県)	サーベイメータ型レムカウンタ 富士電機社製 NSN21011+ カバーモデル レータ (ポリエチレン2cm厚) 検出器：LND 社製2インチφ5気圧 ³ He 比例計数管 減速材：ポリエチレン 内部吸収材：ホウ素化合物 中性子感度：約3 cps/(μSv/h)	空気等価型電離箱線量計 ネスコ社製 808-MR20 STD V 壁材：フェノール樹脂 Z=6.4 $\rho = 1.34 \text{ g/cm}^3$ 大きさ：310 mmφ × 320 mm 21 L NaI スペクトロメータ 検出器：応用光研社製3インチφ球形 NaI (Tl) シンチレーション 検出器 MCA：EG&G ORTEC 社製 DART	気圧計 東邦マーカンタイル社製 MODEL760-16B 大気圧計 方式：水晶振動式圧力変換 精度：0.01% 気象庁による検定品
定点測定 (千葉市)	エリアモニタ型レムカウンタ 富士電機社製 NDN4NA11 検出器：LND 社製5インチφ5気圧 ³ He 比例計数管 減速材：ポリエチレン 内部吸収材：ホウ素化合物 中性子感度：約20 cps/(μSv/h)	NaI 連続モニタ 検出器：応用光研社製3インチφ球形 NaI (Tl) シンチレーション 検出器 測定部：アロカ社製フィールドモニタ	同上
中性子スペクトル測定 (千葉市)	ボナーカウンタ 5種類の厚さのポリエチレン減速材 を使用 検出器：LND 社製2インチφ5気圧 ³ He 比例計数管 外径：bare, 8, 11, 15, 23 cmφ	—	同上

い0.1 nSv/hの測定値が得られたことから, 使用したレムカウンタのセルフドーズ(中性子が無い状況での測定値)は0.1 nSv/h以下であると考えられる。

2. 校正及びレスポンス確認のための照射

レムカウンタは, 日本原子力研究所放射線標準施設棟において ^{252}Cf を用いた照射によって校正した。測定量は周辺線量当量 ($H^*(10)$) とした。また, レムカウンタやボナーカウンタのエネルギーレスポンスを把握するため, 日本原子力研究所において ^{252}Cf (2.3 MeV) 及び熱中性子 (0.025 eV) を用いて, 東北大学高速中性子実験室において250 keV～15 MeVの単色中性子¹¹⁾を用いて照射試験を行った。

電離成分測定用の電離箱線量計は, 産業技術総合研究所において ^{226}Ra γ 線源を用いて校正した。

3. 測定場所

府県内の5測定地点の内1地点は線量評価上重要な人口密集地とし, 他の地点は高度及び地磁気緯度(以下「緯度」という。)の異なる場所を選定した(北海道は2県分に相当)。中性子線量率等の測定場所は, 周辺の影響を受けないできるだけ開かれた平坦な場所とした。検出器の高さは約1 mとし, 測定は車(幌付軽自動車)内で行った。

4. 測定方法

環境の中性子線量率のレベルが低い原則として9台のサーベイメータ型レムカウンタを用いて測定を行った。計数誤差がおよそ3%以下となるように測定時間を設定し積算測定を行った。そのため中性子線量率が最も低くなる海面レベルでは5時間以上の測定となった。測定値は9台の平均とし, 誤差は9台の総計数を基に計数誤差として評価した。9台のレムカウンタは個々に校正しているため, 測定を行う際には散乱や吸収などレムカウンタ相互の影響をできる限り少なくする必要がある。そのため環境場での測定において相互の影響が10%以下となるよう9台はそれぞれ10 cm程度の間隔を空けて測定を行った。

宇宙線電離成分としては2種類の測定を行った。1つは電離箱線量計を用いた。電離箱線量計の測定値は宇宙線電離成分, 大地 γ 線線量及びセルフドーズ等の合成されたものであることから, 測定値から大地 γ 線線量及びセルフドーズを減じて宇宙線電離成分を評価した。その場の大地 γ 線線量はNaIスペクトロメータにより評価し, セルフドーズは地下実験室¹²⁾における遮蔽箱中での測定結果から算出した。他の1つは, 大地からの γ 線のほとんどが3 MeV以下のエネルギーであり, 3 MeV以上

のエネルギー領域の計数率(以下「>3 MeV 計数率」という。)が宇宙線に起因することから, NaI スペクトロメータにより >3 MeV 計数率を測定した。

III 結果及び考察

1. 高度効果

環境における中性子は宇宙線由来であることから, 高度が高い程, 中性子線量率が高くなることはよく知られている。北海道(地磁気緯度 34°)及び富士山周辺(同 26°)における中性子と宇宙線電離成分の高度分布をFig. 1に示す。Fig. 2は海面レベルとの比較で, 高度分布を指数関数($e^{\alpha Z}$)として表した。 Z は高度(km)である。 α の数値(km^{-1})が高度の影響の度合いを表しており, 中性子($\alpha=0.69, 0.80$)の方が電離成分($\alpha=0.34, 0.35$)よりも高度による変化が大きいことが分かる。

また, 中性子においては, 緯度の高い地域程, 高度による変化が大きい(α の値が大きい)傾向が認められた。高度2 km以下のデータを用いて14道府県それぞれで求めた α について緯度との関係をFig. 3に示す。その関係は次式で近似された。

$$\alpha = 0.01 \times L + 0.4$$

ただし, α の単位は km^{-1} , L は地磁気緯度($^\circ$)である。 α が1.0の場合には高度2,000 mにおける値は海面レベルの約7倍にもなるのに対し, α が0.8では約5倍, α が0.6では約3倍になるにすぎない。UNSCEAR¹⁵⁾では, 緯度に関係なく α の値を1.0としているため, 日本のような低緯度地域にその値をそのまま適用してしまう

Fig. 1 Altitude variation of cosmic-ray neutron and ionization component dose rates at two geomagnetic latitudes (34° and 26°). Altitudes were calculated from observed atmospheric pressures assuming a standard atmosphere.

Fig. 2 Altitude variation of cosmic-ray neutron and ionization component dose rates fitted to an exponential function of $e^{\alpha z}$. Altitudes were calculated from observed atmospheric pressures assuming a standard atmosphere.

Fig. 3 Effect of geomagnetic latitude on the α value for the neutron dose rate. The α is a fitting parameter of the altitude distribution; $e^{\alpha z}$.

と、高度による変化を過大評価してしまうことになるので注意が必要である。中性子の高度分布が緯度によって変化することは、TOMMASINO¹⁶⁾やWILSONら¹⁷⁾によっても指摘されている。

一方、我が国における中性子線量率の高度分布については、航空機による測定が中村ら¹⁸⁾によって、富士山での測定が松本ら¹⁹⁾によって実施されたが、高い感度を持つ中性子レムカウンタ9台を用いた長時間測定による精密な測定は今回が初めてである。また、日本のような低緯度地域(25°付近)での評価は世界的にも少ないことから、今回得られた結果は有益なものと考えられる。

中性子線量率の高度による変化は大気による減弱であることから、本来大気の厚さを表す気圧(hPa、または大気深度;g/cm²)による変化として評価すべきものである。そのため、ここでは高度分布を評価するにあたって、実際の地理上の高度ではなく、その場で測定した気圧から換算した高度を用いた。換算にあたって、海面レ

Fig. 4 Effect of atmospheric temperature on the altitude distribution of the neutron dose rate. Each altitude was calculated from measured atmospheric pressure assuming several sea level temperatures.

ベルの大気を標準大気(15°C, 1013.3 hPa)、湿度0%と仮定した。計算式を以下に示す。

$$h = h_0 + 0.0036610 t_v \cdot h_0$$

$$h_0 = 18410 \log_{10} (P_0/P)$$

ただし、 h は高度(m)、 t_v は高さ h の気柱の平均仮温度(°C)、 P_0 は1013.25(hPa)、 P は気圧(hPa)である。高度11 kmまでの気温変化率は-6.5°C/kmとした。

静岡県でのデータを使って仮定する温度を変えた場合の高度分布をFig. 4に示す。-15°Cから30°Cまでの範囲で(空気密度の変化に対応して) α の値は0.78から0.66(km⁻¹)まで変化した。中性子線量率の高度分布を示す場合には、大気の厚さに直接影響する気温も重要な要素といえる。高度を算出する際、湿度の影響は非常に小さいため、ここでは0%とした。

宇宙線電離成分は μ 粒子、電子・光子及び陽子等で構成され、その割合は高度等によって変化する²⁰⁾が、地上付近では μ 粒子が主成分である。宇宙線電離成分については、電離箱の測定値からその場の大地 γ 線等による線量を減じて評価するとともに、NaIスペクトロメータの>3 MeV計数率から換算して評価を行った。

高度によって宇宙線電離成分の組成やエネルギーが変化するため、厳密には>3 MeV計数率を宇宙線電離成分とするのは間違いであるが、高度2 km程度までであれば、電離箱線量計等で評価した宇宙線電離成分と>3 MeV計数率は良い相関を示しており(Fig. 5)、>3 MeV計数率が宇宙線電離成分の指標として使えると判断した。

>3 MeV計数率から宇宙線電離成分を評価するには、Fig. 5の相関関係から以下の式を用いた。

$$Di = 0.35 \times C_{>3\text{MeV}} - 0.64$$

ただし、 Di は宇宙線電離成分(nGy/h)、 $C_{>3\text{MeV}}$ は3インチ球形NaI検出器による>3 MeV計数率(cpm)である。

Fig. 5 Correlation between count rates over 3 MeV as measured by the NaI(Tl) scintillation counter and cosmic-ray ionization component measured using the ionization chamber.

Fig. 1 及び **Fig. 2** には, 電離箱により評価した値ではなく, 測定精度の高い $>3\text{ MeV}$ 計数率から換算した宇宙線電離成分を示した。

2. 緯度及び経度効果

環境における中性子線量率は赤道付近では低く, 極点付近では高いことがよく知られている。日本においても緯度が高い程, 中性子線量率は高い傾向を示すことが確認された。高度の影響が5%以下と考えられる70 m以下でのデータ(積雪のあった地点での測定値及び近くに建造物があった場合の測定値を除く)についての緯度効果を **Fig. 6** に示す。中性子線量率は1気圧に相当する値に補正し, 降雨の有無を区別して示した。また, 太陽活動の補正を行った。地上における中性子線量率は太陽活動に伴って変動し, 日本分析センターでの連続測定においてもその傾向が確認された。2002年1年間で平均±約7%の変動が見られた。測定結果は1日の平均値として評価したため, 短時間での変動は不明であるが, 時期は海外での中性子計数率の観測結果(カナダや南極での観測; Bartol Research Institute)とほぼ一致しており, 太陽活動が盛んな時期に地上の中性子が減少するという地球規模での変動であった。日本分析センターでの中性子線量率の連続測定の結果を用いて, 1年間の平均値に対する1日毎の測定値の比を求め, その逆数をその日の補正係数として, 全国調査の測定値を補正した。

日本における中性子線量率への緯度の影響は, 18° から 36° でおよそ 3.5 nSv/h から 5.0 nSv/h と約40%変化しており, 緯度 1° あたり約2%の変化であった。この値は, 加藤²¹⁾ が示した 1° あたり8.7%よりもかなり小さく, UNSCEAR¹⁾ に示された緯度効果 (20° で 4 nSv/h , 50° で 9 nSv/h) と比較しても小さい。UNSCEARは「信頼性の高い測定による定量化はまだ不十分である」としていることから, 将来的には同じ種類の測定器を用いた広い緯

Fig. 6 Effect of geomagnetic latitude on the neutron dose rate at sea level. Each neutron dose rate was corrected for atmospheric pressure and solar modulation.

Fig. 7 Geomagnetic variations of cosmic-ray neutron and ionization component dose rates that are normalized to average values.

度範囲(世界規模)の測定が期待される。

Fig. 6 では降雨時の測定データが若干低い値を示しているようにも見える。日本分析センター屋内での中性子線量率の測定値には降雨の影響がほとんど見られないことから, 上空の雨ではなく測定場所近傍の土壤中水分や水溜りが地表からの反射成分に影響した可能性がある。

中性子線量率及び $>3\text{ MeV}$ 計数率について, 緯度による変化を全体の平均値との比で示したグラフを **Fig. 7** に示す。宇宙線電離成分 ($>3\text{ MeV}$ 計数率) と比較して中性子は緯度による変化が大きいことが分かる。緯度による変化は, 中性子と宇宙線電離成分でほぼ同等であるとするこれまでの評価⁶⁾ とは異なる結果であった。

中性子線量率への経度の影響は, 今回の結果からは認められなかった。

3. 積雪の影響

平成14年3月に実施した青森県での測定では, 場所によって積雪があったことから, 中性子線量率への積雪の影響を調べるため, 平成14年4月に同じ場所において積雪の無い状況で測定を行った。気圧補正を行った測定結

果を **Table 2** に示す。積雪が多い地点程測定値が低く、積雪 20 cm における測定では約 20% 低い値を示した。中性子の地表からの反射成分が降雨時と同様に積雪によって低減されたためと考えられる。地表面の土壌水分等によって中性子線量率が低減することが FLOREK¹⁴⁾ や O'BRIEN²²⁾ らによっても指摘されており、今後はエネルギースペクトルの変化等を把握する必要があると考えている。

4. 測定場所周辺の海等の影響

静岡県御前崎港の岸壁近くで、海からの距離を変えて測定した中性子線量率及び >3 MeV 計数率の測定結果を **Table 3** に示す。計数誤差を考えると明確な結果は得られなかったが、海に近い程中性子線量率が低くなる傾向が見られた。積雪の影響同様、水によって反射成分が低減されたことが考えられる。

5. 建造物等の遮へいの影響

中性子線量率の全国調査はできるだけ開かれた場所で測定を行うこととしているが、都市部では十分に開放された場所を選ぶことの難しいことが多い。建造物等の遮へいの影響を確認するため、ほぼ同緯度において周囲に建造物がある場合と無い場合の中性子線量率を比較した。結果を **Table 4** に示す。都市部において周囲にコンクリートビル等がある場合、中性子線量率が低くなる傾向が認められた。当然のことではあるが、大きな建造物

が近くにある場合ほど遮へいの影響を大きく受ける傾向が見られた。

宇宙線電離成分の指標として測定した >3 MeV 計数率への建造物の影響は、中性子の場合程大きくはなかった。中性子の方が電離成分よりも建造物による遮へいの影響が大きいものと考えられる。

6. 測定エネルギー範囲

全国調査に使用したレムカウンタは、15 MeV まで ICRP Publ. 74 の線量換算係数に近いエネルギー応答を示すことを照射試験により確認した。しかし、それよりも高いエネルギーでは感度が低下すると考えられる。一方、環境場の中性子エネルギースペクトルは 1 MeV 及び 100 MeV 付近にピークのあることが最近の研究で示されている。そこで、日本分析センタープレハブ建家内（千葉市）でボナーカウンタを用いて中性子スペクトルを測定し、解析エネルギー範囲について検討を行った。ボナーカウンタによる計数値から中性子エネルギースペクトルに変換するため、計算コード SAND II を用いて解析を行った。初期スペクトル（解析に先立ってある程度のスペクトルを推定しておく必要がある）は GOLDHAGEN ら²⁴⁾ の地表面のスペクトルを用いた。解析に必要なボナーカウンタの中性子エネルギーに対する応答関数は、文献⁸⁾ に与えられており、照射試験によってもその妥当性を確認した。

Table 2 Effect of snowfall on environmental neutron dose rate.

Measured place	Neutron dose rate (ground surface was covered with snow) (nSv/h)	Snowfall (cm)	Neutron dose rate (without snow) (nSv/h)	Ratio (with snow/ without snow)
Hachinohe city	4.0±0.08	20	5.3±0.14	0.75±0.03
Ooma town	4.1±0.07	10	4.7±0.11	0.88±0.02
Onoe town	4.3±0.07	0	4.4±0.11	0.96±0.03

Measured results were corrected for the atmospheric pressure effect.

Measurements with snow and without snow were carried out on March 2002 and April. 2002.

Results at Onoe town can be used for control of measurements in different time.

Table 3 Measured results near the sea.

Distance from the seaside (m)	Neutron dose rate		Counting rate over 3 MeV		Weather
	(nSv/h)	Relative value	(cpm)	Relative value	
1	3.6±0.11	0.95±0.03	88±1.1	0.98±0.02	little rain
10	3.7±0.10	0.97±0.03	91±1.1	1.00±0.02	cloudy
30	3.8±0.10	1.00±0.03	90±1.1	1.00±0.02	fine
50	4.0±0.11	1.05±0.03	91±1.1	1.00±0.02	fine
200	3.8±0.06	1.00	91±1.1	1.00	little rain

Measured results were corrected for the atmospheric pressure effect.

Measurements were carried out on September 2002.

Table 4 Effect of buildings in urban environment on neutron dose rate and cosmic ray ionization component.

Prefecture	Neutron dose rate (nSv/h)			Counting rate over 3MeV (cpm)			Surrounding building in urban (distance)
	Measurements near buildings in urban	Measurements on open ground	Ratio (urban/open)	Measurements near buildings in urban	Measurements on open ground	Ratio (urban/open)	
Hokkaido	4.1±0.06	4.6±0.05	0.89±0.02	93.4±1.2	94.7±1.2	0.99±0.02	Plural concrete buildings (Approx. 30 m)
	4.5±0.06	5.0±0.06	0.90±0.02	94.0±1.2	97.0±1.2	0.97±0.02	Five-storied concrete building (Approx. 20 m)
Fukui	3.3±0.05	4.2±0.06	0.79±0.02	86.0±1.1	91.0±1.1	0.95±0.02	Eight-storied concrete building (Approx. 20 m)
Okayama	3.6±0.06	4.0±0.11	0.89±0.03	89.0±1.1	89.0±1.1	1.00±0.02	Embankment (a few meters)
Ehime	3.4±0.05	3.6±0.06	0.94±0.02	86.0±1.1	90.0±1.1	0.96±0.02	Concrete building (Approx. 10 m)

Measured results were corrected for the atmospheric pressure effect.

Table 5 Analytical results of neutron dose rate (H*(10)) with various upper limit energy with the Bonner sphere, and comparison to the dose equivalent counter result.

Instruments	Upper limits of analytical energy range (MeV)	Neutron dose rate H*(10) (nSv/h)
	17.5	4.0
	55	4.8
Bonner sphere [☆]	100	5.2
	200	5.4
	400	5.7
Dose equivalent counter	—	approx. 4

[☆] Bonner sphere spectrometer.

Initial spectrum: GOLDHAGEN.²⁴⁾

Conversion factor: ICRP Publ. 74,²⁵⁾ SANNIKOV.²⁶⁾

Measurements were carried out at Chiba city on 2002.

計算上の解析エネルギーの上限を 17.5 MeV から 400 MeV まで変化させた解析結果を **Table 5** に示す。17.5 MeV まで解析した結果は 4.0 nSv/h で、全国調査に使用したレムカウンタと同程度の値となった。400 MeV まで解析した結果は 5.7 nSv/h であった。この差は主に 100 MeV 付近の中性子が原因していると考えられる。この結果から判断すると、全国調査に使用したレムカウンタはその場の中性子線量率に対して 3 割程度過小評価していることになる。ただし、後述の線量単位との関連も考慮する必要がある。

7. 線量単位

レムカウンタは測定値を周辺線量当量として示しているが、周辺線量当量は放射線防護上の測定量であり、実効線量と異なる場合がある。そのため、環境中中性子につ

Table 6 Analytical results of neutron dose rate assuming various geometries, and comparison to the dose equivalent counter result.

Instruments	Geometries ¹⁷⁾	Neutron dose rate (nSv/h)
	AP	5.9
	PA	5.1
Bonner sphere [☆]	RLAT	3.8
	ISO	4.1
	H*(10)	5.7
Dose equivalent counter	—	approx. 4

[☆] Bonner sphere spectrometer.

Initial spectrum Goldhagen.²⁴⁾

Conversion factor: ICRP Publ. 74,²⁵⁾ SANNIKOV,²⁶⁾ YOSHIZAWA et al.,²⁷⁾ FERRARI et al.²⁸⁾

Upper limit of analytical energy: 400 MeV.

Measurements were carried out at Chiba city on 2002.

いて、解析エネルギーの上限を 400 MeV として、ICRP 勧告²⁵⁾のいくつかの照射ジオメトリの換算係数を用いて実効線量及び周辺線量当量を評価した。結果を **Table 6** に示す。等方照射 (ISO) で 4.1 nSv/h, 前方照射 (AP) で 5.9 nSv/h となった。

環境での中性子は主に上方から降り注ぐが、厳密には地表からの反射成分 (下方から入射) も考慮する必要がある。実効線量を評価するには環境中中性子の方向性及びエネルギーを把握した上で適切な換算係数を用いる必要がある。しかし、これは現実的には難しく、現時点での評価としては、環境の中性子が一方向のみから入射するとは考えられないので、AP 等よりは ISO が妥当ではないかと考えられる。

レムカウンタの測定結果 (周辺線量当量) と実効線量

との比較については、レムカウンタの応答関数に関する検討や日本各地での中性子スペクトル測定結果を踏まえて、引き続き検討を進める予定である。

IV ま と め

我が国の環境における中性子線量率レベル及び変動範囲を把握することを目的として全国での測定調査を行っている。現在までの結果から、高度効果、緯度効果、降雨、積雪あるいは建物の影響等について有益な情報を得ることができた。

- ① 高度分布は指数関数 $e^{\alpha Z}$ (Z : 高度(km)) で近似でき、 α の値 (高度の影響の度合いを表わしている) は、中性子の方が宇宙線電離成分よりも約 2 倍大きいことが確認された。

また、中性子の場合、高緯度地域ほど α が大きくなることが確認された。これまで報告されている α の値は高緯度地域のデータが多いため、今回日本の緯度での値が得られたのは有益であると考えられる。UNSCEAR¹⁵⁾ に示された高度 2 km までの中性子に対する α は 1.0 km^{-1} なのに対して、日本での α は $0.6 \sim 0.8 \text{ km}^{-1}$ であった。

- ② 中性子及び宇宙線電離成分ともに高緯度地域ほど高い傾向が認められた。変化傾向は中性子の方が大きく、緯度 1 度あたり中性子が約 2%、電離成分が約 0.3% の変化であった。中性子の緯度効果について、UNSCEAR は「信頼性の高い測定による定量化はまだ不十分である」としていることから、将来的には同じ種類の測定器を用いた広い緯度範囲 (世界規模) の測定が期待される。
- ③ 中性子線量率は、積雪、降雨あるいは建造物等によって低い値が観測され、最大約 20% の影響が認められた。積雪・降雨の影響は地表面での反射成分の低減が原因し、建造物の影響は遮へいによるものと考えられる。宇宙線電離成分の測定では中性子ほど大きな影響は認められなかった。
- ④ レムカウンタの測定結果 (周辺線量当量) は千葉市の海面レベルで約 4 nSv/h であった。ただし、このレムカウンタは環境の高エネルギー中性子 (100 MeV 付近にピークが認められている) に対して十分な感度を有していないため、その場の中性子線量を過小評価している可能性がある。ボナーカウンタを用いて 400 MeV まで解析した周辺線量当量は 5.7 nSv/h であった。
- ⑤ ボナーカウンタを用いて 400 MeV まで評価した実効線量は、等方照射 (ISO) で 4.1 nSv/h 、前方照射 (AP)

で 5.9 nSv/h であった。

将来的には中性子のフルエンス-線量換算係数の変更等の可能性もあり、線量評価は難しい面があるが、今回評価した高度効果や緯度効果についての知見は、太陽活動による影響をさらに考察する必要があるものの将来的にも有益な情報になり得るものと考えられる。今後は、環境における中性子スペクトルの変化等について検討を行うとともに、引き続きデータの蓄積を行い、より正確な評価を行う予定である。

本調査を実施するにあたり、学識経験者で構成する中性子線量率水準調査検討委員会 (委員長: 中村尚司) を設け調査計画等を審議して頂きました。また、測定装置の整備等では理化学研究所上養義朋氏に、照射試験では日本原子力研究所吉澤道夫氏に、セルフドーズのチェックでは金沢大学小村和久教授に、測定地点の選定等では道府県の方に多大なるご協力を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。

なお、本報告は文部科学省の委託により実施した中性子線量率水準調査の結果の一部を利用したものです。

参 考 文 献

- 1) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Sources and effects of ionizing radiation, 2000 report to the general assembly, with scientific annexes, United Nations, New York (2000).
- 2) ICRP Publication 60 国際放射線防護委員会 1990 年勧告, 日本アイソトープ協会 (1991).
- 3) K. O'BRIEN; The theory of cosmic-ray and high energy solar -particle transport in the atmosphere, Radioactivity in the Environment, Book of Abstracts, Seventh International Symposium, Natural Radiation Environment NRE-VII, Rhodes, Greece (2002, in press).
- 4) K. O'BRIEN, W. FRIEDBERG, F. E. DUKE; The exposure of aircraft crews to radiations of extraterrestrial origin, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **45**(1/4), 145-162 (1992).
- 5) J. W. WILSON, L. W. TOWNSEND, W. SCHIMMERLING, G. S. KHANDELWAL, F. KHAN, J. E. NEALY, F. A. CUCINOTTA, L. C. SIMONSEN, J. L. SHINN, J. W. NORBURY; Transport methods and interactions for space radiation, NASA-1257, 519-559 (1991)

- 6) 藤元憲三; 我が国における宇宙線からの線量評価, 保健物理, **37**(4), 325-334 (2002).
- 7) T. NAKAMURA, A. HARA and T. SUZUKI; Realization of a high sensitivity neutron rem counter, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **241**, 554-560 (1985).
- 8) Y. UWAMINO, T. NAKAMURA and A. HARA; Two types of multi-moderator neutron spectrometers: gamma-ray insensitive type and high-efficiency type, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **239**, 299-309 (1985).
- 9) 小村和久; 極低レベル放射能測定最前線, 放射線, **26**(3), 41-57 (2000).
- 10) 小村和久; 極低レベル放射能測定, ぶんせき, **12**, 730-735 (2000).
- 11) M. BABA, M. TAKADA, T. IWASAKI, S. MATSUYAMA, T. NAKAMURA, H. OHGUCHI, T. NAKAO, T. SANAMI and N. HIRAKAWA; Development of monoenergetic neutron calibration fields between 8 keV and 15 MeV, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **376**, 115-123 (1996).
- 12) 山越和雄, 大橋英雄; 微弱放射能測定施設, 一次線共同研究共同利用研究成果報告書, 東京大学宇宙線研究所 (1988).
- 13) A. BOUVILLE and W. M. LOWDER; Human population exposure to cosmic radiation, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **24**(1/4), 293-299 (1998).
- 14) M. FLOREK, J. MASARIK, I. SZARKA; Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **67**(3), 187-192 (1996).
- 15) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation; Sources and effects of ionizing radiation, 1993 report to the general assembly, with scientific annexes, United Nations, New York (1993).
- 16) L. TOMMASINO; In-flight measurements of radiation fields and doses, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **86**(4), 297-301 (1999).
- 17) J. W. WILSON; Radiation safety aspects of commercial high-speed flight transportation. NASA Technical Report Paper 3524 (1995).
- 18) T. NAKAMURA, Y. UWAMINO, T. OHKUBO and A. HARA; Altitude variation of cosmic-ray neutrons, *Health Phys.*, **53**, 509-517 (1987).
- 19) 松本雅紀; 富士山における宇宙線中性子の高度分布, *Radioisotopes*, **44**, 33-34 (1995).
- 20) W. FRIEDBERG, K. COPELAND, F. E. DUKE, K. O'BRIEN 3rd, E. B. DARDEN Jr.; Radiation exposure during air travel: guidance provided by the federal aviation administration for air carrier crews, *Health Phys.*, **79**(5), 591-595 (2000).
- 21) 加藤和明; 低レベル中性子の測定, 「環境放射線」研究専門委員会編, “環境放射線 研究の現状と展望”, 148-156, 日本原子力学会 (1984).
- 22) K. O'BRIEN, H. A. SANDMEIER, 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 (1978).
- 23) P. GOLDHAGEN; Overview of aircraft radiation exposure and recent ER-2 measurements, *Health Phys.*, **79**, 526-544 (2000).
- 24) P. GOLDHAGEN, M. REGINATTO, T. KNISS, J. W. WILSON, R. C. SINGLETERRY, I. W. JONES and W. Van STEVENINCK; Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray induced neutrons aboard an ER-2 high-altitude airplane, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, **476**, 42-52 (2002).
- 25) ICRP Publication 74 (1995) 外部放射線に対する放射線防護に用いるための換算係数, 日本アイソトープ協会 (1998).
- 26) A. V. SANNIKOV and E. N. SAVITSKAYA; Ambient dose equivalent conversion factors for high energy neutrons based on the ICRP-60 recommendations, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **70** (1-4), 383-386 (1997).
- 27) N. YOSHIZAWA, O. SATO, S. TAKAGI, S. FURIHATA, S. IWAI, T. UEHARA, S. TANAKA and Y. SAKAMOTO; External radiation conversion coefficients using radiation weighing factor and quality factor for neutron and proton from 20 MeV to 10 GeV, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **35**(12), 928-942 (1998).
- 28) A. FERRARI and M. PELLICIONI; Fluence to dose equivalent conversion data and effective quality factors for high energy neutrons, *Radiat. Prot. Dosimetry*, **76**(4), 215-224 (1998).

長岡 和則（ながおか かずのり）

1962年横浜生まれ。東京理科大学理学部物理科卒。1987年から日本分析センターにて環境放射線測定業務に従事。1998年はIAEAサイバースドルフ研究所線量計測課に勤務。趣味はテニス、登山。

E-mail: k-nagaoka@jac.or.jp