研究論文

我が国における宇宙線からの線量評価

藤元 憲三^{*1}, Keran O'BRIEN^{*2}

(2001年10月17日受理)
(2002年12月11日再受理)

Estimation of Dose Due to Cosmic Rays in Japan

Kenzo FUJIMOTO^{*1} and Keran O'BRIEN^{*2}

Dose rates due to cosmic rays at all municipalities in Japan are estimated using a computer code (PLOTINUS) developed by K. O'BRIEN. Latitude, longitude and altitude data for all municipalities are assumed to be represented by the location of the city office and categorized into 417 data sets every degree for latitude, every two degrees for longitude, and every 50-m for altitude as input data for computation. The outputs for each cosmic ray component are grouped into two categories, ionizing component including photons and neutron component. The population weighted average dose in Japan is estimated to be 29.2 nSv h⁻¹ for the ionizing component, 6.1 nSv h⁻¹ for the neutron component and 35.3 nSv h⁻¹ for the total. The highest value among prefecture averages is found in Nagano Prefecture to be 44.0 nSv h⁻¹ although it is not located at the highest latitude but at the highest altitude. Based on the assumption in the UNSCEAR 2000 Report for dose estimation due to cosmic rays, the doses in Japan are estimated to be 0.21 mSv a⁻¹ for the ionizing component, 0.045 mSv a⁻¹ for the neutron component and 0.26 mSv a⁻¹ for the total.

KEY WORDS: cosmic rays, dose estimation, ionizing component, neutron, population dose

I 緒 言

世界中の人々が受けている放射線のほとんどは自然放射線である。国連科学委員会においてもその設立当初より自然放射線からの線量評価を行ってきた¹⁾。我が国においても自然放射線からの線量を評価するため、大地からの自然放射線線量の測定²⁾や、吸入被ばくをもたらすラドン濃度の測定が行われてきた^{3,4)}。しかしながら、自然放射線の中の重要な構成要素である宇宙線からの線量評価は散発的な測定や線量評価しかなされてきて

いない。自然放射線からの被ばくを考えると宇宙線からの被ばくを無視するわけには行かない。1970年代の我が国の宇宙線からの線量評価は主として1966年の国連科学委員会の報告書⁵⁾に掲載されたデータを用いたかなり曖昧な評価がなされていた。そのデータは地磁気緯度の高い欧米地域の測定および計算結果をもとにしたものであった。北磁極が78.36° N, 69.12° Eと北極からずれているため、我が国の地磁気緯度は地理緯度と比べおよそ10度低い値となり、北海道で35度、本州中部で25度、沖縄で15度程度となる。この地磁気緯度25度を手がかりに、国連科学委員会報告書のデータより、初期には我が国の宇宙線線量は3.4 μR h⁻¹と推定されていた。そして、我が国南北での差異は±0.1 μR h⁻¹と評価されてきた⁶⁾。この値は現在の単位では30 nGy h⁻¹に相当する。1981年には放医研の委託事業として放射線影響協会がシリーズで実施している国民線量推定のための基礎

^{*1}放射線医学総合研究所防護体系構築研究グループ；千葉市稲毛区穴川 4-9-1 (〒263-8555)

Environmental Radiation Protection Research Group, National Institute of Radiological Sciences; 4-9-1, Anagawa, Inage-ku, Chiba 263-8555, Japan.

^{*2}Northern Arizona University; Flagstaff, Arizona 86011-6010, U.S.A.

調査において、我が国全国の詳細な宇宙線からの線量評価が行われた⁷⁾。しかしながら、この線量評価においては国連科学委員会のおおざっぱな緯度効果グラフ⁵⁾を用いて、しかも高度を100 m刻みとし、0~99 mを0 mとして線量を評価している。その後、我が国においても幾つかの測定がなされ、海面レベルでの宇宙線線量率が実測によって確かめられてきた^{8~10)}。また、高度依存性を評価した測定結果も求められ^{11~13)}、モデル計算結果を検証出来る素地が出来上がってきた。一方、中性子成分による線量寄与の評価は線量寄与の相対割合が低く、また、測定が難しく、地上での線量評価に用いることの出来る測定結果は大変数が少ない¹⁴⁾。しかしながら、中性子の放射線荷重係数がICRP Publ. 60の勧告により以前の2倍になったこともあり¹⁵⁾、宇宙線線量における中性子成分の割合が大きくなり、中性子成分を含めた宇宙線からの線量再評価の必要性が高まってきた。本論文においては、O'BRIENの開発したコンピュータコード(PLOTINUS)^{16,17)}を用いて、新しい放射線荷重係数による我が国の各市町村別の宇宙線線量を求めた。

II 計 算 方 法

市町村毎の宇宙線線量を評価するため、その代表地点として各市町村の市役所、町役場、村役場、政令指定都市については区役所の経度、緯度、高度のデータを収集した。経度、緯度は経緯度一覧のデータを利用し¹⁸⁾、高度については5万分の1地勢図¹⁹⁾を用いて市町村役場の高度をm単位で読みとった。人口は平成11年の全国市町村要覧のデータを利用した²⁰⁾。近年市町村の合併が頻繁になされ、市町村数が減少しているが、ここでは緯度、経度のデータが平成4年度版の市町村区分に基づいているため、人口データは平成11年度版を用いているが市町村区分は平成4年度版をそのまま継承した。したがって、対象となる市町村数は現在よりも多い3,372カ所である。但し、この数には政令指定都市の区の数が含まれている。そのそれぞれの地点における宇宙線からの線量を求めることとした。しかしながら、一地点の計算に約2分の計算時間が必要となるため、総ての市町村に対して計算することを諦め、緯度は1度毎、経度は2度毎、高度は50 m毎のメッシュに分割し417データセットを作成し、仮想の417地点について宇宙線線量計算を行った。計算対象とした緯度は北緯24度から43度、経度は東経124度から146度、高度は海拔0~1,200 mである。O'BRIENのコンピュータコードでは入力地磁気緯度経度ではなく、通常の緯度経度が用いられているの

で、上記の値をそのまま入力値とした。その他の入力データとして必要とされるものは、太陽磁場強度、気温、気圧、大気圧である。気温、気圧は摂氏0度、標準1気圧が入力値として要求された。日本の地磁気緯度では地表上では太陽磁場強度による影響が小さいことが以前の計算結果より判明していたため、長期的に見ると太陽磁場強度は大きく変化しているが、今回は最近10年間の平均的な値600 MVを入力値とした²¹⁾。高度は大気圧として入力する必要があるため、米国で標準大気として示している次式の高度と大気圧の関係を用いて換算を行った²²⁾。

alt. が36,089 feet 以下の場合

$$P = p_0 (1 - 6.87 \times 10^{-6} \times \text{alt.})^{5.26} \quad (1)$$

alt. が36,089 feet 以上の場合

$$P = p_0 \times 0.223 \times \exp(-4.81 \times 10^{-5} \times (\text{alt.} - 36,089))$$

$$p_0 = 1,013.25 \text{ mbar}$$

$$H = P / 0.98,$$

ここで P : mbar

$$H : \text{g cm}^{-2}$$

$$1 \text{ m} = 1/30.48 \text{ feet}$$

O'BRIENのコンピュータコードによる計算結果では μ 粒子、 μ 粒子の壊変、 π^0 粒子壊変、 π^+ 粒子、 π^- 粒子、陽子、中性子、金属原子からの実効線量率が計算され出力される。但し、ここで用いられている金属原子はヘリウムを含めた中性子と陽子を複数個以上持っているものを指している。また、中性子からの線量評価は10 TeVまでを対象としている。ここでは、便宜上、中性子成分のみを分け、それ以外の成分として電離粒子とフォトンを一括りにして線量を求めた。ここでは便宜上フォトン成分も含めて電離成分と呼ぶこととした。この区分は国連科学委員会の2000年報告書²³⁾の取り扱いと同じである。

上記の線量計算結果の出力のみならず、 μ 粒子、フォトン、 π 粒子、中性子、陽電子、電子、陽子のエネルギースペクトルを出力するための計算も実施した。中性子からの線量は地表に到達した中性子のエネルギー毎に放射線荷重係数が定められ、吸収線量に乗じることによって実効線量が求められている。ただし、地表からの中性子のアルベドは計算されていない。また、放射線荷重係数はICRP Publ. 60¹⁵⁾に準拠した値を用いている。各都道府県の平均や日本全国の平均の算出に当たっては各市町村の人口で重みを付けた人口荷重平均を計算した。

III 計算結果と議論

O'BRIEN のコンピュータコードを用いて 417 データセットについて求めた計算結果は 18,243 行のテキストとして出力された。この出力結果から 3,372 市町村の線量を緯度、経度、高度をもとに計算した。宇宙線の μ 粒子、電子・光子、陽子、 π 粒子、中性子、金属原子からの海面レベルにおける線量寄与の相対的な割合には日本各地の緯度、経度による差異が余り認められず、それぞれの割合は、65, 12, 4, 1, 17, 0%であった。しかしながら、高度による変化は大きい。300 m では 60, 13, 5, 2, 20, 0%, 600 m では 55, 13, 6, 2, 24, 0%, 900 m では 51, 13, 7, 2, 23, 0%, 1,200 m では 46, 13, 9, 2, 30, 0%と高度が高くなるほど μ 粒子の寄与が減り、中性子からの寄与が大きくなる。また、陽子の寄与が若干増加する傾向を示すが、電子・光子、 π 粒子の寄与にはほとんど変化がなく、金属原子の寄与は 1,200 m まではまったく認められなかった。

中性子以外を便宜上電離成分と呼んでいるが電離成分と中性子の比は海面レベルでは 83:17 であったが、高度が上がるほど中性子の割合が増え、1,200 m では 70:30 であった。417 データセットの計算結果を電離成分と中性子成分に分けて緯度、高度別に分類して示した結果が Fig. 1 と Fig. 2 である。参考までに一部のデータについて、同じ高度のデータを曲線で結んである。まず、電離成分の方が緯度による変化が中性子成分より若干大きいことが分かる。一方、高度による変化は電離成分よりも中性子成分の方が変化割合が大きいことも分かる。この

グラフでは経度の差異は区別せず記載されており、図の同じ記号の重なりが経度による線量率の差異を示している。即ち、経度による差異は緯度や高度に比べ無視できる程度であることが分かる。

Fig. 1 と Fig. 2 に示された各データ間の差異は 417 データセットより各市町村の値を求める際の補間の必要性の判断材料となる。経度については 2 度ごとのメッシュとして計算しているがその差異は図から分かるように小さく補間の必要性はまったくないと判断される。一方、緯度については 1 度ごとに、高度については 50 m ごとに計算しているが、電離成分の場合、緯度、高度のメッシュ間の変化はそれぞれ約 2%, 1% である。もとのデータは各メッシュに分類するため四捨五入していることを考えると、メッシュによる影響は上記の半分の 1%, 0.5% 程度と見られる。中性子成分の場合には緯度、高度ごとの変化はそれぞれ約 1%, 5% であり、同じく四捨五入を考慮すると、メッシュによる影響は 0.5%, 2% 程度と見積られる。中性子成分の方が若干誤差が大きいけれども、中性子成分の線量割合が全体の約 20% 程度であるため、宇宙線からの線量全体への影響はそれほど大きくない。これらの判断より、3,372 市町村の値を求めるに際して内捜により求める方法は用いずに 417 データセットのいずれかに分類し、その値をその市町村の代表値とした。

Fig. 3 は各都道府県の人口荷重平均を都道府県内の最大値、最小値と共に示している。また、中性子成分も図中に併記した。電離成分の寄与は平均から中性子成分を差し引いたものとなる。図の横軸には各都道府県を平均

Fig. 1 Dose rates due to ionizing component of cosmic rays.

Fig. 2 Dose rates due to neutron component of cosmic rays.

緯度の高い順に並べてある。全体的な傾向として線量率は右下がりの傾向を即ち、南の県ほど低い値を示している。これは緯度の低下に伴い線量率が減少していることを示すものである。但し、その中で右下がりの傾向より大きなずれを示している県として長野県と山梨県がある。それぞれの線量率は 44.0 nSv h^{-1} , 40.5 nSv h^{-1} である。ちなみに北海道は 39.1 nSv h^{-1} , 沖縄県は 31.3 nSv h^{-1} である。日本全国の人口荷重平均高度が 54 m であるのに対して、長野県、山梨県の平均高度はそれぞれ 566 m , 386 m であり、この高度差による線量率の上昇が大きく現れていることを示している。各都道府県の最大値はかなりの変動を示しているが、その原因は同じく高度の影響である。いくつかの市町村については名前と共に高度を記載した。一方、最小値と平均値にはあまり大きな差異が存在しないが、全体の傾向からずれている最小値として東京都の値がある。これは東京都に緯度の低い小笠原村が含まれていることを反映している。一方、中性子成分は全体の線量への割合が 17% から 23% であり、また、あまり地域による差異がないことも図から読み取れる。但し、宇宙線の全体の線量率で認められた特異な傾向と同じように長野県と山梨県が少し高い値を示しており、高度の影響が中性子成分においても現れている。Table 1 は Fig. 3 の数値を示したものである。

各市町村の線量率の電離成分は最小値 24.8 nSv h^{-1} から最大値 41.8 nSv h^{-1} , 中性子成分が 5.3 nSv h^{-1} から 17.7 nSv h^{-1} , 合計は 30.1 nSv h^{-1} から 59.4 nSv h^{-1} の範囲にあった。最大値の最小値に対する割合を比べてみると、電離成分では 169% , 中性子成分では 333% , 合

計では 197% となっている。電離成分の線量率の広がりに対して中性子成分のそれは約 2 倍大きく、高度による線量率変化の大きさの違いを表している。電離成分、中性子成分が一番低い地点は同一地点で沖縄県の石垣市（東経 124 度 9 分 19 秒, 北緯 24 度 20 分 6 秒, 高度 22 m ）、竹富町（東経 124 度 9 分 15 秒, 北緯 24 度 20 分 3 秒, 高度 20 m ）、与那国町（東経 123 度 0 分 15 秒, 北緯 24 度 27 分 45 秒, 高度 7 m ）であった。一方、線量率が最大の地点は群馬県草津町（東経 138 度 35 分 58 秒, 北緯 36 度 37 分 4 秒, 高度 $1,179 \text{ m}$ ）で線量率は上記の最大値を示した。次が長野県川上村（東経 138 度 34 分 54 秒, 北緯 35 度 58 分 20 秒, 高度 $1,200 \text{ m}$ ）で電離成分、中性子成分がともに最大値より若干減少し、 41.2 nSv h^{-1} , 17.5 nSv h^{-1} であり、合計は 58.7 nSv h^{-1} であった。

Fig. 4（カラー口絵 p. 259）は推定したすべての市町村の宇宙線線量率を 6 段階に色分けして示したものである。但し、政令指定都市は区の値の人口荷重平均を市の値として表示した。できるだけ 6 段階に市町村数が均等配分されるように色分けの線量率範囲を設定した。暖色側は線量率が日本の中央値を含み、中央値より高い方を、寒色側は中央値より低い方を示している（中央値は 35.4 nSv h^{-1} ：詳細は後段で記載）。各市町村の宇宙線からの線量は図に認められるように、大地放射線の場合²⁾と異なり、地域による変化は滑らかで、高度の高いところ、緯度の高いところが線量率の高い地域として示されている。しかし、市制が広範囲にひかれている地域では市役所をその市の代表点としているため、静岡市のように近隣の市町村との線量率が不連続になっている部分

Fig. 3 Average dose rates due to cosmic rays in each prefecture with maximum and minimum and neutron dose rates.

も若干ある。全体としては北に高く、南に低くなる緯度効果の傾向が現れ、その大きな傾向の中に高度による影響がより大きな要因として重なる様相が示されている。

経度の差異は北磁極と北極のずれによる緯度と地磁気緯度の一次関係を補正する程度で、わが国の緯度・経度の変化範囲内では経度による影響はほとんど無視できるレ

Table 1 Population weighted average dose rates of ionizing component, neutron component and total in each prefecture with maximum and minimum (nSv h^{-1}).

Pref. Code	県名 (Prefecture)	Population weighted average dose rate (nSv h^{-1})			nSv h^{-1}	
		Ionizing component	Neutron	Total	Maximum	Minimum
1	北海道 (Hokkaido)	32.3	6.8	39.1	45.4	37.1
2	青森 (Aomori)	31.2	6.3	37.5	39.4	36.5
5	秋田 (Akita)	30.6	6.2	36.8	40.4	36.0
3	岩手 (Iwate)	31.1	6.6	37.7	42.8	36.0
6	山形 (Yamagata)	30.7	6.6	37.3	39.1	36.0
4	宮城 (Miyagi)	29.9	6.1	36.0	40.7	35.5
15	新潟 (Niigata)	29.7	6.0	35.7	43.8	35.0
7	福島 (Fukushima)	30.8	7.1	37.8	51.4	35.1
17	石川 (Ishikawa)	29.2	5.9	35.0	42.3	34.6
16	富山 (Toyama)	29.4	6.0	35.3	43.3	35.0
9	栃木 (Tochigi)	30.1	6.6	36.7	46.9	34.7
10	群馬 (Gumma)	30.2	6.8	37.0	59.4	34.7
20	長野 (Nagano)	33.9	10.1	44.0	58.7	38.5
8	茨城 (Ibaraki)	29.2	6.0	35.1	37.9	34.7
18	福井 (Fukui)	29.0	6.0	35.0	41.5	34.2
11	埼玉 (Saitama)	29.1	5.9	35.1	40.7	34.7
13	東京 (Tokyo)	29.3	6.1	35.3	44.3	32.1
12	千葉 (Chiba)	28.9	5.8	34.8	37.0	34.3
19	山梨 (Yamanashi)	32.0	8.5	40.5	52.7	35.6
21	岐阜 (Gifu)	29.4	6.5	35.9	53.2	34.2
31	鳥取 (Tottori)	28.7	5.9	34.6	38.4	34.2
14	神奈川 (Kanagawa)	28.9	5.9	34.8	37.5	34.3
32	島根 (Shimane)	28.7	6.0	34.7	40.9	34.2
25	滋賀 (Shiga)	29.3	6.4	35.8	38.5	35.5
23	愛知 (Aichi)	28.7	5.9	34.6	45.8	34.2
26	京都 (Kyoto)	28.8	6.0	34.8	37.7	34.2
22	静岡 (Shizuoka)	28.8	6.0	34.8	41.0	34.3
28	兵庫 (Hyogo)	28.7	6.0	34.7	39.2	33.8
24	三重 (Mie)	28.6	5.9	34.5	37.0	33.8
33	岡山 (Okayama)	28.7	5.9	34.6	42.7	33.8
27	大阪 (Osaka)	28.5	5.8	34.3	40.1	33.6
29	奈良 (Nara)	29.1	6.3	35.4	48.4	34.9
34	広島 (Hiroshima)	28.4	6.0	34.4	45.6	33.7
37	香川 (Kagawa)	28.2	5.8	34.0	37.2	33.8
36	徳島 (Tokushima)	28.2	5.8	34.0	40.4	33.8
30	和歌山 (Wakayama)	28.3	5.8	34.1	48.4	33.4
35	山口 (Yamaguchi)	28.2	5.8	34.0	39.5	33.7
38	愛媛 (Ehime)	28.2	5.9	34.1	44.1	33.3
40	福岡 (Fukuoka)	28.1	5.8	33.9	39.9	33.3
39	高知 (Kochi)	28.1	5.9	34.0	43.1	33.3
41	佐賀 (Saga)	27.8	5.8	33.5	39.9	33.3
44	大分 (Oita)	28.1	6.0	34.1	42.6	33.3
42	長崎 (Nagasaki)	27.7	5.7	33.4	35.2	33.3
43	熊本 (Kumamoto)	27.9	6.0	33.9	44.5	32.9
45	宮崎 (Miyazaki)	27.8	6.0	33.8	42.6	32.5
46	鹿児島 (Kagoshima)	27.2	5.8	33.0	37.0	31.0
47	沖縄 (Okinawa)	25.6	5.7	31.3	32.0	30.1
	全国 (All Japan)	29.2	6.1	35.3	59.4	30.1

ベルである。

本論文での宇宙線線量計算においては太陽磁場強度を 600 MV として計算した。我が国における太陽磁場強度の影響を求めるため、高度 50 m において太陽磁場強度を 200 MV と 1 GV に代えた計算も行った。その結果では 600 MV に対する値に対して電離成分、中性子成分ともに 4% 弱の変動を示すに過ぎなかった。100 MV 当りの変化では共に 1% 程度の変化に過ぎない。最近 10 年間の太陽磁場強度の変動幅は 1990 年から 2000 年までは比較的安定で 500 MV から 700 MV の範囲を変動していたが、最近の数年間は大きく上昇し、1 GV 近くに上昇している²¹⁾。さらに長期的な変動を見ると太陽磁場強度は 200 MV から 1 GV の範囲を周期的に変動している²⁴⁾。ここで求めた計算結果からこれらの変動に対して宇宙線線量が数パーセント程度変動すると判断される。これに対して国連科学委員会報告では高緯度での変動を反映して電離成分では 10% 程度の太陽活動による変動を示唆している^{23,25)}。我が国の変動はこの値よりも小さな変動となることを計算結果は示している。この太陽活動による変動は我が国においては、他の変動要因、誤差を考えると無視できる程度であると考えられる。

中性子成分の緯度効果については国連科学委員会 2000 年報告では限られた実測結果とシミュレーション結果をもとに北緯 20 度で 4 nSv h^{-1} 、北緯 50 度で 9 nSv h^{-1} であると、比較的大きな緯度効果を示している²³⁾。しかしながら、O'BRIEN の計算では Fig. 1 に示されているように、そのような大きな緯度効果は見出されていない。地表付近の宇宙線中性子のエネルギー Spektrum は低エネルギーのフラックスが大半を占めるが、高いエネルギーの中性子も存在しており、われわれの計算においては 10 TeV までを対象としており、100 MeV 以下の中性子は線量寄与が殆どなく、更に高い GeV 以上のエネルギーの中性子が線量の 50% を担っている²⁶⁾。このことを考慮すれば、測定においてこの領域を正しく計測しない限り、緯度効果について正確な推定ができないこととなる。また、国連科学委員会報告において引用されているシミュレーション計算結果²⁷⁾では単一の鉛直方向の硬さを用いた計算をしているが、O'BRIEN のプログラムでは緯度の関数として定義された鉛直方向の硬さを用いたより詳細な計算を行っているために両者の間に差異が生じているのかもしれない。いずれにしても、線量寄与の大きなエネルギー領域の中性子を計測可能な測定が今後行われ、海面レベルでは緯度効果が現在指摘されているほど大きくないことが実証されるものと思う。

O'BRIEN のコンピュータコードはもともと航空機による宇宙線線量を評価するために開発されたものであるため、中性子の大地からの跳ね返りによる増加（アルベド効果）については考慮されていない。この効果がどの程度であるかは対象とする地点の土壌中の水分含有量にも影響を受けるため、同一地点においても気象条件によって変化する。これまでの研究によれば水分が増えれば減少し、水分が減少すれば増加する。通常の土壌ではその変化は 10~20% 程度と見積もられる^{27,28)}。ただし、本論文の計算ではアルベド効果がまったくない条件における線量評価であり、若干過小評価をしているかもしれない。しかしながら、中性子成分による線量の割合が電離成分に比べ小さいこともあり、宇宙線からの線量全体への影響は小さいものと考えられる。

気圧の変化による線量率の差異は高度による線量率の変化より推定することができる。10 ヘクトパスカルの気圧の減少は 1 式より約 80 m 上昇することに相当し、Fig. 1 と Fig. 2 より電離成分で 2%、中性子成分で 10% の増加に対応すると推定される。但し、年間の平均的な線量を評価するに当たっては気圧変化による変動は平均化されるため無視することできる。

わが国の宇宙線からの線量の人口荷重平均は電離成分について、 29.2 nSv h^{-1} 、中性子成分について 6.1 nSv h^{-1} 、合計が 35.3 nSv h^{-1} と推定された。この値には高度による影響、緯度による影響が既に含まれたものとなっている。参考までに人口荷重しない場合の市町村の線量率の単純平均では電離成分が 29.7 nSv h^{-1} 、中性子成分が 6.6 nSv h^{-1} 、合計が 36.3 nSv h^{-1} であった。また、総市町村値の中央値は電離成分が 29.2 nSv h^{-1} 、中性子成分が 6.1 nSv h^{-1} 、合計が 35.4 nSv h^{-1} であった。単純平均は電離成分も中性子成分も人口荷重平均よりも高い値となった。一方、中央値は人口荷重平均と殆ど同じ値となった。参考までに平成 2 年度、平成 8 年度の人口統計を用いた人口荷重平均を求めたが上記の値と全く同じ結果を示した。一方、北海道 39.1 nSv h^{-1} 、沖縄県 31.3 nSv h^{-1} 、長野県 44.0 nSv h^{-1} の線量率と日本の平均を比べると 111, 89, 125% であり、県平均として地域により 25% までの差異があることが分かる。

我が国の人口荷重平均高度は 54 m、人口荷重平均緯度は 35.4 度、人口荷重平均経度は 136.8 度である。緯度 35 度、経度 136 度、高度 0 m の線量率は電離成分が 28.5 nSv h^{-1} 、中性子成分が 5.7 nSv h^{-1} であり、我が国の平均高度による海面レベルからの線量率の上昇分を算出すると電離成分では約 2%、中性子成分では約 7% の増加

となる。国連科学委員会の2000年の報告書における世界平均の電離成分からの推定線量では、海面レベルでの線量率として 31 nSv h^{-1} を、高度による線量増加割合を1.25と見積もっている。中性子成分については海面レベルでの線量率として 5.5 nSv h^{-1} 、高度の影響を2.5としている。この国連科学委員会の推定値は世界の人口の緯度、高度分布を考慮して求められたものである。電離成分に対しては高緯度地域の測定では 32 nSv h^{-1} 、緯度30度以下では 30 nSv h^{-1} であろうと推定している。太陽活動による11年周期変動によって約10%の変動が生じると考えており、上記の値はこの変動を平均したものとして与えられている²³⁾。一方、中性子成分については地磁気緯度50度の海面レベルでの線量率は 9 nSv h^{-1} と推定し、上記の世界平均を求めるための緯度効果としては比較的大きな緯度効果を仮定している。以上より、我々の計算結果は中性子の緯度効果を小さく評価しているものの国連科学委員会報告書のデータと比較して矛盾しない範囲に収まっているといえる。また、これまでの日本における宇宙線線量の推定値と比較しても電離成分については、高度依存性も含めて、誤差の範囲内で一致している。但し、中性子成分についてはICRP Publ. 60¹⁵⁾の放射線荷重係数に基づいた線量評価結果が無く、正確な比較が出来ないが、以前よりも2倍となった放射線荷重係数の影響を受けて、線量推定値も2倍近い値となっている。

ここで国連科学委員会²³⁾に用いられている同じファクター、即ち、建物の遮蔽、および居住係数を用いて宇宙線からの線量を計算する。但し、中性子成分に対する遮蔽効果は不確かで、10%から20%の遮蔽効果が見られると推定しているが、最終的な線量評価計算では電離成分と同じ値20%を用いている。一年間の時間数8,760時間、屋内における建物の遮蔽を0.8、居住係数を0.8とすると電離成分による屋内での年間被ばく線量は 0.16 mSv a^{-1} 、屋外では 0.05 mSv a^{-1} 、合計が 0.21 mSv a^{-1} となる。一方、中性子成分からの線量寄与は屋内、屋外がそれぞれ 0.034 、 0.011 mSv a^{-1} 、合計は 0.045 mSv a^{-1} と求められる。この結果宇宙線からの線量の合計は 0.26 mSv a^{-1} と求められる。これに対して、国連科学委員会の年間線量推定値は電離成分に対して 0.28 mSv a^{-1} 、中性子成分に対して 0.10 mSv a^{-1} 、合計として 0.38 mSv a^{-1} である。藤高等の論文²⁹⁾によれば建物による宇宙線線量の減少割合はコンクリートの建物においては数十%の遮蔽効果が見いだされることがあるが、木造家屋による遮蔽効果は無視できる程度であると推定されている。した

がって、建物による宇宙線に対する遮蔽効果は我が国の場合、木造家屋の割合がなお多いことを考慮すると国連科学委員会が用いている値0.8よりも1.0に近い値であるかも知れない。したがって、我が国の宇宙線からの線量は上記の値より遮蔽効果がないとした場合の値（電離成分： 0.26 mSv a^{-1} 、中性子成分： 0.053 mSv a^{-1} 、宇宙線の合計： 0.31 mSv a^{-1} ）へと若干ずれた値となるのかも知れない。但し、ここでは上記の国連科学委員会の計算方式で求めた値を日本の代表値とする。

一方、大地放射線からのわが国における線量推定値は 0.32 mSv a^{-1} と推定されている²⁾。この値に今回の宇宙線からの線量を加え合わせるとわが国における自然放射線による外部被ばく線量は 0.58 mSv a^{-1} と推定される。この値は、世界の平均 0.86 mSv a^{-1} と比べて33%低い値となっている。また、我が国の外部被ばくのなかで宇宙線線量の占める割合は45%で、国連科学委員会の世界の平均（44%）と比べ宇宙線の線量寄与の割合は同じ程度となっている。

これまでの線量評価はほぼ同一地点の屋内屋外の線量より年間線量を推定して来たが、個人の線量を考えると、移動を考慮しなければならない。東西方向の移動は経度の影響が小さいため無視することが出来る。南北の移動についてはFig. 1, 2の緯度による変化を見ると、若干下に凸のカーブを示しているものの、直線と大きな差異がないため南北方向の動きの平均がゼロであることを反映して、線量としても南北の移動による寄与は無視できると考えられる。次に高度による移動であるが、この場合には変化の割合が一番大きいことと、日本の平均高度が54mと小さな値を示し、下方には0mまでの変化しかないが、上方へは数キロメートルの変化が可能であることを考慮に入れると、上下方向の移動による影響は線量を高める方向に働くことがわかる。その増加の割合は上下方向移動のデータが存在しないため定量的には推定できないが、特別な個人は別として相対的には影響は小さいものと思われる。ここでは対象範疇外であるが、それよりも、ニューヨーク往復で $0.13 \text{ mSv}^{30)}$ あるいは $0.086 \text{ mSv}^{31)}$ に相当すると推定されているように、航空機を利用した海外旅行による宇宙線からの被ばくによる線量増加のほうが大きく寄与するものと思われる。

IV 結 論

O'BRIENの計算コードを用いて我が国の全市町村の宇宙線線量を推定すべく、3,372市町村の経度、緯度、高度求め、それらのデータを経度は2度毎、緯度は1度毎、

高度は 50 m ごとに分類し、417 セットのデータセットを作成し、線量推定計算を実施した。計算結果は便宜上、電離成分およびフォトンを含めた成分と中性子成分に分けて評価した。代表値を求めるための計算には各市町村の人口による重み付け平均を用いた。この結果、我が国の宇宙線線量率の平均は電離成分が 29.2 nSv h^{-1} 、中性子成分が 6.1 nSv h^{-1} 、合計が 35.3 nSv h^{-1} と推定された。市町村で一番高い値を示したところは群馬県草津町で 59.4 nSv h^{-1} 、都道府県別の平均では一番高い値を示したのが長野県で 44.0 nSv h^{-1} であった。それぞれは日本の平均より 168, 125% 大きな値となっている。これは高度による影響が緯度による影響よりも大きく現れた結果である。一方、北海道は 39.1 nSv h^{-1} 、沖縄県は 31.3 nSv h^{-1} と求められた。これらの線量率より国連科学委員会と同じ仮定の下に年間平均線量を求めるとわが国の宇宙線からの線量は電離成分からの線量が 0.21 mSv a^{-1} 、中性子成分からの線量は 0.045 mSv a^{-1} 、合計は 0.26 mSv a^{-1} と求められた。この値はわが国の自然放射線からの外部被ばくの 45% を占めることとなる。但し、この計算では中性子に対する大地のアルベド効果を考慮していないため、中性子成分については若干過小評価をしているかもしれない。中性子成分からの線量評価の正しさを裏付けるためには数 GeV のエネルギーの中性子を正確に計測できる測定器による地上での測定の今後の進展が望まれるところである。

本論文のための入力データの作成、計算出力の解釈に当たっては、放射線医学総合研究所宇宙放射線プロジェクトの藤高和信博士と山口寛博士の助言を頂いた。また、6 段階に色分けした日本地図は防護体系構築研究グループの磯田直子客員技術員の力作である。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) UNSCEAR 1958 年報告書 放射線の影響, 日本学術振興会 学術月報別冊資料, 第 3 号 (1958).
- 2) S. ABE, K. FUJITAKA, M. ABE and K. FUJIMOTO; Extensive Field survey of natural radiation in Japan, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **18**, 21-45 (1981).
- 3) 藤元憲三, 小林定喜, 内山正史, 土居雅広, 中村裕二; 屋内ラドン濃度全国調査, 保健物理 **32**, 41-51 (1997).
- 4) T. SANADA, K. FUJIMOTO, K. MIYANO, M. DOI, S. TOKONAMI, M. UESUGI and Y. TAKATA; Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan, *Env. Radioact.*, **45**(2), 129-137 (1999).
- 5) UNSCEAR; Report of the United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation, United Nations, New York (1966).
- 6) 日本原子力学会; 環境被曝線量評価, 「環境被曝線量評価」研究専門委員会 (1975).
- 7) 放射線影響協会; 国民線量推定のための基礎調査 (V), (1981).
- 8) I. URABE and K. KATSURAYAMA; Free-air ionization intensity in the lower atmosphere due to cosmic-rays, *Hoken Butsuri*, **14**, 151-161 (1979).
- 9) S. MINATO and S. MINAKUCHI; Measurement of cosmic-ray exposure rate perturbations by building materials, *Health Phys.*, **46**, 1134-1136 (1984).
- 10) T. NAGAOKA; Distribution of gamma and cosmic ray exposure rates in a 12-storied concrete building, *Radiat. Prot. Dosim.*, **18**, 221-228 (1987).
- 11) 古川雅英, 松本雅紀, 床波真司, 藤高和信, 岡野真治; 富士山における宇宙線強度の高度変化, *Radioisotopes*, **44**, 19-21 (1995).
- 12) M. FURUKAWA, K. FUJITAKA and M. OKANO; Investigation of cosmic ray intensity at sea level between Tokyo Bay and Indian Ocean, Proc. of International Congress on Radiation Protection in Vienna (IRPA9), **2**, 265-267 (1996).
- 13) 松本雅紀, 古川雅英, 床波真司, 藤高和信, 中村尚司; 富士山における宇宙線中性子の高度分布, *Radioisotopes*, **44**, 33-34 (1995).
- 14) T. NAKAMURA, Y. UWAMINO, T. OHKUBO and A. HARA; Altitude variation of cosmic-ray neutrons, *Health Phys.*, **53**, 509-517 (1987).
- 15) 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).
- 16) 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, 20-24 May, Rhodes, Greece (2002, in press).
- 17) K. O'BRIEN; Calculated cosmic ray ionization in the lower atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **75**, 4357-4359 (1970).
- 18) 建設省国土地理院; 日本の市区町役所・役場経緯度一覧 (平成 4 年度版) 国土地理院技術資料 E・1-No. 210, 日本地図センター (1992).
- 19) 建設省国土地理院; 5 万分の一の地形図, 日本地図センター (1991).
- 20) 市町村自治研究会編集; 平成 11 年版全国市町村要覧, 第一法規 (1999).

- 21) W. FRIEDBERG; Cari-6, Civil Aerospace Medical Institute, Federal Aviation Administration, P.O. Box 25082, Oklahoma City, OK 73125-5066, USA.
- 22) M.J. MacCALL; Development and Validation of a Predictive Code for Air Crew Radiation Exposure (PC-AIRE): Royal Military College of Canada.
- 23) UNSCEAR 2000 年報告書 放射線の線源と影響, 実業公報社, 東京 (2002).
- 24) 櫻井邦明; 太陽活動の変遷, 太陽活動の変遷と地球環境シンポジウム, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 2月12-13日 (2001).
- 25) A. BOUVILLE and W.M. LOWDER; Human population exposure to cosmic radiation, *Radiat. Prot. Dos.*, **24**, 293-299 (1988).
- 26) K. O'BRIEN; Origin of "step" in Leeds cosmic ray spectrum, *Nat. Phys. Sci.*, **244**, 88, 1973.
- 27) M. FLOREK, J. MASARIK, I. SZARKA, D. NIKODEMOVA and A. HRABOVCOVA; Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude, *Radiat. Prot. Dos.*, **67**, 187-192 (1996).
- 28) 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).
- 29) K. FUJITAKA and S. ABE; Effect of partition walls and neighboring buildings on the indoor exposure rate due to cosmic-ray muons, *Health Phys.*, **51** (5), 647-656, 1986.
- 30) W. FREIDBERG, K. COPELAND, F.E. DUKE, K. O'BRIEN and E.B. DARDAEN Jr.; Guidelines and technical information provided by the US federal aviation administration to promote radiation safety of air carrier crew members, *Radiat. Prot. Dos.*, **86**, 323-327 (1999).
- 31) M. KAI, K. DOBASHI and T. KUSAMA; Cosmic radiation doses to commercial aircrew members in Japan, *Hoken Butsuri*, **27**, 289-294 (1992).

藤元 憲三 (ふじもと けんぞう)

京都大学理学部卒, 東京大学原子力工学科学学位取得。環境放射線および緊急時対応研究に従事。原子力安全委員会専門委員, Journal of Radiological Protection 誌の国際編集顧問。