研究論文

923. 居住環境における放射線場の特性, (Ⅱ)

東京都内電車路線での γ 線および宇宙線の線量率分布

長岡 鋭*, 坂本 隆一*,
堤 正博*, 斎藤 公明*, 森内 茂*

(1989年 4月17日 受理), (1989年 7月27日 再受理)

Characteristics of Radiation Field in Living Environment, (Ⅱ)
Distribution of Absorbed Dose Rate in Air due to Gamma and Cosmic Rays
on Train Lines within Tokyo Metropolitan Area

By Toshi NAGAOKA, Ryuichi SAKAMOTO,
Masahiro TSUTSUMI, Kimiaki SAITO and Shigeru MORIUCHI

A series of environmental radiation survey was carried out on train lines within Tokyo metropolitan area to clarify the characteristics of radiation field in living environment. Eleven JR, 18 private and 10 subway lines were surveyed, which cover 97% of whole train lines in Tokyo district in terms of annual number of passengers.

The characteristics of environmental radiation field on train lines were discussed. The mean absorbed dose rate in air due to γ -rays on the subway lines was higher than those on the JR and private lines. It is due to the difference in the radioactivity concentration and the distribution of surrounding materials as the γ -ray sources.

On the other hand, the mean dose rate due to cosmic-rays on the subway lines was lower than those on the JR and private lines. It is due to the shielding effect of the upper materials such as soil or building materials of tunnels.

The mean dose rates for the JR, private and subway lines were calculated using these obtained data. Though the ratio of mean dose rate of γ -rays to that of cosmic-rays for the subway lines was different from those for the JR and private lines, the sum of γ - and cosmic-ray dose rates for the JR, private and subway lines were comparable, 40~50 nGy/h for any of them.

These data will be useful for a precise and realistic evaluation of collective dose, considering the life style of the public and the variation characteristics of environmental radiation.

KEYWORDS: *living environment, natural environment, artificial environment, environmental radiation, train line, gamma radiation, cosmic radiation, radioactivity, dose rates, radiation dose distribution, Tokyo*

I. 緒 言

自然放射線の特性(分布, 挙動, レベル等)は, 環境条件によって時間的, 空間的な変動を示す。したがって, 自然放射線による集団線量(将来的には実効線量当量を含む)を評価する上では, 実際の生活・行動形態を知

り, その居住環境下での放射線の特性を明らかにし, これらを考慮に入れた現実的な集団線量評価モデルの開発および入力データの整備が不可欠である。そのためには, 前報⁽¹⁾に述べた通り, 居住環境放射線場の実

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

態の把握, データの蓄積, これに基づく環境条件と放射線場との関連づけおよび理論解析による確認, 存在場所を介して放射線場, 人口, 存在時間とを結びつける集団線量評価モデルの開発および集団線量の評価, 実測によるモデルの精度評価と改良というステップを踏まねばならない。著者らは, 集団線量評価を念頭におき, 人間の生活・行動のモデル化を行うとともに, 実際の居住環境下における放射線の実地調査を行い, これに基づいて自然および人工環境条件と放射線場との関係を明らかにするための研究を進めている。

自然放射線による集団線量は, 存在場所における線量率, 滞在場所および人口を乗じ, これを対象地域内のすべての存在場所について積算することにより評価される。したがって, まず居住環境における放射線場の特性を把握することが必要である。前報では, 居住環境中における線量率分布の概略を知るとともに, それが環境条件の変化によってどう変動するかを明らかにするという観点から, 代表的な人工環境である東京都内における γ 線および宇宙線の線量率分布を実地調査した結果について報告した。そこでは, 人工環境下での放射線場の特徴について論じ, 環境放射線場の変動要因およびその程度を示した。

次に, 存在場所ごとの滞在時間および人口等人間の行動パターンを知るとともに, 集団線量評価上重要な, 滞在時間が長く, 人口の多い地域における放射線情報を収集する必要がある。前報にも述べたように, 平均的日本人は1日の生活時間の内18~23時間を屋内で過ごしており, 集団線量評価のための情報としては屋内での線量率分布およびレベルが最も重要である。しかしながら, 実際の住居における系統的な測定調査を行う上では, 家屋の構造や建材の多様性, プライバシー問題など多くの困難があり, 屋内放射線場に関する情報は非常に少ない。著者らも現在屋内環境放射線のデータを収集しているが, 十分な量のデータとなるにはまだしばらく時間を要する。

一方, 屋外での生活時間の中では, 移動・通勤・通学に平均約1時間を費やしている⁴⁾。特に都市圏では電車の利用率が高く電車内での放射線情報が必要であるが, 電車路線における線量率分布調査の例は多くない⁵⁾⁶⁾。このようなデータを入手するため, 都内の主要電車路線において γ 線および宇宙線の線量率(ともに空気吸収線量率; 以下同じ)の実地調査を行なった。この調査は, 電車路線上での線量率分布の実態の把握, 集団線量評価モデル開発上必要な情報の入手, および集団線量評価に用いる入力データの整備を主眼におい

て行なった。本報では, 実地調査結果に基づいて, 都内各主要電車路線毎の平均線量率を示すとともに, 電車利用に伴う線量率の変動について考察した。

なお, 本調査では「線量率」を「空気吸収線量率」で表わした。これを「実効線量当量」に変換する手法については著者らも現在研究を進めている段階で, すでにいくつかの典型的な環境中での変換係数は得られており, 近い将来にさらに精密な環境中実効線量当量評価手法が確立されることが考えられる。

II. 測定

1. 測定器および測定方法

測定器および測定方法は基本的に前報¹⁾と全く同じである。測定には, バッテリー駆動式の携帯型線量測定器(DBM型とSWING型)を用いた。検出器は3"φ球形NaI(Tl)シンチレーション検出器である。DBM型, SWING型ともにスペクトル-線量変換演算法($G(E)$ 関数法)に基づいた測定器である。DBM型は検出器からの信号パルスをAD変換し, 電子回路によってパルス波高に対応するエネルギー荷重演算を行う。SWING型は, エネルギー荷重演算をROM(Read Only Memory)に記憶された $G(E)$ 関数と小型コンピュータによって行う。これは多重波高分析器による信号パルスの波高分析と, 波高に対応する $G(E)$ 関数との荷重演算を同時に行うことに相当する。

両型ともに γ 線線量率と3 MeV以上の宇宙線計数率が連続測定データとして得られ, DBM型では測定中に逐次マイクロカセットテープに記録される。またSWING型では一たんコンピュータのメモリーに記録され, 測定終了後に磁気カードへ転送される。測定器はキャリングバッグに収納され, これを携行して電車に乗り込んで測定を行なった。

宇宙線線量率は, 前報と同様に, 日本での宇宙線線量率値が海面レベルで約30 nGy/hであり, 同じ場所における3"φ球形NaI(Tl)シンチレーション検出器の3 MeV以上の計数率(自然環境 γ 線を含まない宇宙線のみ計数率)が90 cpmであることから, 3 MeV以上の計数率90 cpmが30 nGy/hに対応し, 両者の間に比例関係があるとして評価した。

なお, 測定器および測定法の詳細については, 前報を参照されたい。

2. 測定時間

測定は, 測定器を携行して電車に乗り, 測定対象区間内を移動しながら連続測定・記録した。このような測定の場合, 測定値と場所との対応をつけ易くするた

めには測定時間を短く, 統計精度を上げるためには測定時間を長くするという相反する2つの要求があり, バランスのとれた適切な測定時間を設定する必要がある。計数率の統計的変動による標準偏差が十分小さく(γ 線線量率は5%以内, 宇宙線線量率は20%以内を目安とした), かつできるだけ場所の分解能を上げるため, 次の考察から測定時間を設定した。

γ 線の場合, DBM型では測定線量率 D_D (nGy/h)および標準偏差 σ_D (%)は次式で計算される。

$$D_D = n \cdot K \quad (1)$$

$$\sigma_D = 100 / (nT)^{1/2} \quad (2)$$

ここで, n : DBM式エネルギー荷重回路を通過したパルスの計数率(cpm)

K : [通過パルス計数率-線量率]換算係数

T : 測定時間(min)

今回使用した測定器では, $K=0.034$ nGy/h/cpmとなるよう調整した。測定対象 γ 線線量率を, 都内の屋外平坦地での実測値が10~30 nGy/hであることを考慮して20 nGy/hとすると, 計数率は580 cpmで, 60 s測定での標準偏差は約4%となる。

一方, SWING型の場合には測定 γ 線線量率 D_s (nGy/h)および標準偏差 σ_s (%)は次式で計算される。

$$D_s = \int N(E)G(E)dE \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{\left(\int N(E)G(E)^2 dE / T \right)^{1/2}}{\int N(E)G(E)dE} \times 100 \quad (4)$$

ここで, E : パルス波高(MeV)

$N(E)$: パルス波高分布スペクトル
(cpm/MeV)

$G(E)$: スペクトル-線量変換演算子
(nGy/h/cpm)

測定対象 γ 線線量率が20 nGy/hの場合には, 30 s測定で標準偏差が約4%となる。

宇宙線の場合は, 前述のように3 MeV以上の計数率から線量率換算している。したがってDBM, SWING型ともに標準偏差 σ_{CR} (%)は次式で表わされる。

$$\sigma_{CR} = (C_{3MeV})^{1/2} \times 100 \quad (5)$$

ここで, C_{3MeV} : 3 MeV以上の計数率

3 MeV以上の計数率は, 屋外では約90 cpm(30 nGy/h), 高層ビル内や地下ではこれより低く, 通常30~60 cpm(10~20 nGy/h)である。いま3 MeV以上の計数率を45 cpmとすると, 標準偏差は60 s測定では約15%, 30 s測定では約20%となる。

以上の考察から, 1データ当りの測定時間をDBM型は60 s, SWING型は30 sと設定した。

3. 単位

従来, γ 線の線量率は照射線量率(単位: μ R/h)として表わされてきた。また, 荷電粒子を主な成分とするため μ R/h単位で表示できない宇宙線線量率についても, 便宜的に電離量を仲介にして μ R/h eq.(相当)という単位を用いていた。しかしSI単位への移行に伴ってR単位は用いられなくなり, 代ってC/kgやGyで表わすようになってきている。本報では, γ 線および宇宙線の線量率を空気の吸収線量率で表わすこととし, 単位はnGy/hを用いる。ただし, 宇宙線の中性子成分は除外している。なお, 1 μ R/hは8.7 nGy/hに相当する。

4. 測定対象路線の概要

今回測定した路線および測定距離は, JRが11路線・380 km, 私鉄が18路線・200 km, 地下鉄が10路線・200 kmであった。これは都内の全路線ではないが, 観測した路線を年間乗車人数⁽⁵⁾から見ると, 都内全JR路線の99%, 全私鉄路線の92%, 全地下鉄路線の100%, 全体では97%に相当し, ほぼ全路線を網羅していると考えられる。

東京都内の輸送機関の利用状況⁽⁵⁾をTable 1に示す。今回測定対象としたJR, 私鉄, 地下鉄の利用が圧倒的に多いことがわかる。また, 年間乗車人数の内の定期券利用者は, JR, 私鉄, 地下鉄のいずれも約65%であり⁽⁵⁾, 日常的に電車を利用する人数が全体の約%を占めている。このことは, 一過性の利用より通勤・通学での利用の割合が高いことを示しており, 人間の行動形態モデルを開発する上で有用な情報となろう。

Table 1 Utilization of public transportation within Tokyo metropolitan area, 1985 (after the Tokyo statistical yearbook)

Transportation facilities	Number of lines	Annual passengers (million)
JR lines	13	2,648
Private lines	33	2,397
Subway lines	10	2,217
Metropolitan trams	1	2
Metropolitan buses	111	322
Buses for business	-	1,011
Cars for business	-	595
Cars for private use	-	1,565
Domestic airplane lines (Haneda air port)	-	27
Vessel lines (Port of Tokyo)	-	1

Ⅲ. 結果および考察

1. 線量率分布のパターンと特徴

電車路線における主な γ 線線源は、周辺大地の土壌や線路設備構造物(線路下に敷設した砂利, トンネル, プラットホーム, 土留壁等)に含まれる放射性物質である。一部の路線は繁華街の中を通過しており, コンクリートビル等の建材中放射性物質が有為な γ 線線源となることもありうる。電車内の放射線場は, これら γ 線線源の濃度や分布状態の変化, 車体による遮蔽状態の違い, 高架, トンネル, 地下など走行状態の変化に伴う周辺物質に対するジオメトリーの変化などの要因によって変動する。例えば, 大きな河川に架かる鉄橋上を走行する時は地殻 γ 線が河川水で遮蔽され γ 線線量率

は下がる。またトンネル内に入ると, ほぼ全方向を線源としてのトンネル壁に囲まれ線量率は上がる。

一方宇宙線は, 主に緯度, 高度および遮蔽状態によって変動する。東京都内という比較的狭い地域内では, 緯度と高度による変動は小さく, 遮蔽状態が最も大きな変動要因である。特に地下走行やトンネル内走行時には, トンネル建材や上部の土等により宇宙線が遮蔽され, 地上とは顕著な差が観測される。

以上の点に留意しながら, JR, 私鉄, 地下鉄における測定から1例ずつ挙げてその線量率分布パターンを見てみる。Fig. 1に, JR武蔵野線での線量率分布を示す。縦軸は線量率, 横軸は連続測定・記録したデータの番号を表わす。ここで, 1データ当りの測定時間は30 sに相当する。

Fig. 1 Distribution of absorbed dose rates in air due to γ - and cosmic-rays on JR Musashino line

γ 線線量率は, 西船橋を出発後所々で上昇した。上昇箇所は図に示すように, 駅(プラットフォーム)やトンネル(切通しを含む)を通過する時期と一致している。このことから, 駅やトンネルに用いた建材中の放射能濃度が通過地域の土壌よりも高いこと, 下方だけでなく上方・左右にも線源が存在するという線源分布の違いによっても γ 線線量率の変化が生じていることが推察される。全体的には, 自然環境に近い郊外平坦地走行時には約10 nGy/hで, プラットホームやトンネルなどにより10~20 nGy/hの上昇を示す形である。

一方宇宙線は, その大半が上方向から入射するた

め, 上部に遮蔽物が存在すると減衰され, 線量率レベルの変動(下降)が生ずる⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。例えば, ある12階建てコンクリートビル内の1階では, 屋上の約1/2に減衰する⁽⁷⁾。武蔵野線の各駅は, 切通しの下部にある船橋法典駅など一部を除いて, 上部に宇宙線遮蔽体となるほどの構造物はなく, 駅での顕著な変化は見られない。しかし, トンネル内ではトンネル上部の土が宇宙線遮蔽体となるため, 線量率が明確に下がる。その結果, γ 線線量率については駅でもトンネルでも同様の変動傾向が見られるが, 宇宙線線量率については駅とトンネルとで変動傾向が異なり, 線源または遮蔽体として

の周辺物質の分布状態の違いにより γ 線と宇宙線の線量率の変動パターンが異なることを示している。

Fig. 2 に、京王井の頭線での線量率分布を示す。吉祥寺駅と渋谷駅で γ 線線量率が若干高く、渋谷駅手前のトンネルで宇宙線線量率が低くなることを除き、 γ 線、宇宙線ともにほとんど一定の値であった。この路線は主に住宅街を走行し、環境条件の変化が非常に少

ないため、線量率の変動も小さいものと考えられる。また、他の路線では駅のプラットフォームの建材中放射性核種濃度が他の部分より相対的に高く、駅到着のたびに γ 線線量率が上昇することが多いが、この路線では明確な上昇は見られなかった。この理由は、プラットフォームの建材中と線路周辺地域大地中との放射性核種濃度が同程度であったためと考えられる。

Fig. 2 Distribution of absorbed dose rates in air due to γ - and cosmic-rays on Keio Inokashira line

この路線での γ 線線量率は20~30 nGy/hの間に入っている。一方、本路線近くの井の頭公園内で測定した γ 線線量率は約20 nGy/hであった。両者の値は同程度であり、電車内での測定値はその走行地域での線量率分布を比較的良好に反映することを示している。

Fig. 3 に、地下鉄丸の内線での線量率分布を示す。JR武蔵野線や京王井の頭線とは逆に、宇宙線よりも γ 線線量率の方が高い。 γ 線線量率レベルは、駅でやや高くなる傾向はあるものの、JR武蔵野線で見られたほど顕著ではなく、むしろ周期の長い変動が見られる。これは主にトンネル建材(地上走行部では線路設備構造物材や地質)の場所的变化、線源としての周辺物質の配置の変化に対応したものと考えられるが、明白ではない。

混雑時には、乗客の身体による相互遮蔽のため、空車時よりも γ 線線量率が下がることが期待される。混雑状態により約10 nGy/hの差を観測したこともある。丸の内線での測定では、南阿佐谷-大手町間は満員で、

大手町で大半が下車した。しかし、このときは、検出器が窓際シート上に置かれていたためあまり明確な差が出なかった。検出器を持ったまま通路中央に立てば、より明確な差を観測できるかも知れない。

宇宙線線量率は、地下部で低く、地上に出ると(四ッ谷および後楽園-茗荷谷)高くなる。地下部では地上値の $\frac{1}{2}$ から $\frac{1}{3}$ に減衰したが、走行深度が深くなければさらに減衰する。

2. 路線間での線量率の比較

今回測定した路線について、 γ 線線量率の平均、最大および最小値、ならびに宇宙線線量率の平均値をFig. 4 に示す。

γ 線線量率の平均値は、JRと私鉄が11~26 nGy/h に対して、地下鉄は29~44 nGy/h と高めであった。これは、JRと私鉄が主に郊外(バックグラウンド γ 線線量率の低い関東ローム層地域)の地上を走行するのに対して、地下鉄では一般に周辺の土壌より放射性核種濃度の高いコンクリート壁のトンネル内を走行し、

線源強度、線源分布ともに線量率をより高くする要因を有するからである。

地下鉄内の γ 線線源は主にコンクリートなどの線路設備建築材料であり、地上屋外線量率を左右する走行地域の地質よりも、建築材料中放射性核種濃度によって γ 線線量率が左右されると考えられる。したがっ

て、建築材料中放射性核種濃度が同程度であれば、他の地方の地下鉄でもほぼこの程度の値となろう。一方、主に地上を走行するJRと私鉄路線では、屋外線量率の高低に従って電車内線量率も変動すると考えられ、例えばバックグラウンド γ 線線量率が比較的高い関西地方では、ここに示した値より高い値となろう。

Fig. 3 Distribution of absorbed dose rates in air due to γ - and cosmic-rays on Marunouchi subway line, Teito Rapid Transit Authority

Fig. 4 Absorbed dose rates in air due to γ - and cosmic-rays on train lines within Tokyo metropolitan area

一方、宇宙線線量率は、JRと私鉄では、地下走行距離の長い新玉川線を除き、平均26~32 nGy/hであるのに対して、地下鉄では6~17 nGy/hとほぼ1/2以下の低い値を示した。これは、トンネル建材や土により宇宙線が減衰するため、地下鉄路線の地上走行区間を除けばさらに低い値となる。

宇宙線線量率については、地上走行区間では30 nGy/hとみなしてよい。ビル内駅で多少下がることもあるが、ビル内駅にとどまる時間よりも屋外を走行する時間の方がはるかに長いから、ビル内駅での変動は無視できる。地下走行部分では、走行深度が深いほど線量率が低くなる。今回測定された宇宙線線量率の中で最も低い値は、半蔵門線永田町駅と千代田線国会議事堂駅で観測された2 nGy/h(30 s測定)であったが、両駅とも営団地下鉄の中で最も深い場所(約40 m: 他は6~24 m)にある。東京の地下鉄路線は、新しく工事するほど深い場所を通る傾向があり、今後さらに低い値が観測されるかも知れない。

Fig. 4に示した各路線ごとの平均線量率と年間乗車人数のデータ⁽⁵⁾を用いて、東京都内の電車路線利用に伴う線量率を試算した。Fig. 4に示した各路線別平均線量率を、それぞれの路線の年間乗車人数で荷重平均した値をTable 2に示す。

Table 2 Mean absorbed dose rates in air on train lines within Tokyo metropolitan area (weighted by the annual number of passengers for each line)

Train lines	Mean absorbed dose rate (nGy/h)		
	γ	Cosmic	γ +Cosmic
JR lines	15	30	44
Private lines	20	30	50
Subway lines	34	12	46
Whole	23	23	46

γ 線、宇宙線線量率ともに、JRと私鉄との間の差がほとんどなかった。走行形態の類似性から考えて妥当な結果であろう。

γ 線線量率は、地下鉄の値がJRと私鉄の値の約2倍で、逆に宇宙線線量率は、地下鉄の値がJRと私鉄の値の約1/2であった。JRおよび私鉄と地下鉄とでは、 γ 線線量率と宇宙線線量率との比が異なるが、両者の合

計値ではいずれも40~50 nGy/hで、結果的にはほぼ同じ値となった。すなわち、東京都内での電車利用時の γ 線と宇宙線を合計した線量率は、平均的には路線によらずほぼ同程度の値であり、集団線量評価モデルの電車利用部分を作成する上で有用な情報となる。

Ⅳ. 結 論

居住環境における放射線場の特性解明の一環として、東京都内の主要電車路線において線量率分布の測定調査を行なった。測定した路線は、JRが11、私鉄が18、地下鉄が10で、年間乗車人数では東京都内全路線の97%に相当する。

今回の測定結果から、電車内環境放射線場の特徴について考察した。 γ 線線量率については、主に郊外の地上を走行するJRと私鉄より、主に地下を走行する地下鉄の方が高かった。これは、線源としての周辺物質が下方だけでなく上方・左右にも存在するという線源ジオメトリの違い、周辺物質中の放射性核種濃度の違いなどによるものである。一方、宇宙線については、地下走行部分の長い地下鉄の方が低かった。これは、土、建材等の上部遮蔽物により宇宙線が減衰するためである。また、これら実測した各路線ごとの平均線量率を年間乗車人数で荷重平均して、電車利用に伴う線量率を試算したところ、 γ 線と宇宙線の合計ではJR、私鉄、地下鉄のいずれも40~50 nGy/hであり、東京都内の電車利用時の線量率は、集団線量評価の上ではどの路線でもあまり差異がないことがわかった。

これらの結果は、人間の生活・行動形態や環境放射線の変動特性を考慮した精密な集団線量評価モデルの開発および線量評価の上で有用な情報となろう。

— 参 考 文 献 —

- (1) 長岡 鋭, 坂本隆一, 堤 正博, 斎藤公明, 森内 茂: 原子力誌, 32[4], 403 (1990).
- (2) 総理府統計局: 昭和61年社会生活基本調査, (1987), 日本統計協会.
- (3) 岡野真治: *Isotope News*, 7月号, 2~7 (1980).
- (4) 北原明治, 他: 東ア研報, 第5号, 35~52 (1988).
- (5) 東京都統計調整課編: 第37回東京都統計年鑑昭和60年, (1987), 東京都統計協会.
- (6) MILLER, K.M., BECK, H.L.: *Radiat. Prot. Dosim.*, 7[1~4], 185~189 (1984).
- (7) NAGAOKA, T.: *ibid.*, 18[4], 221~228 (1987).