Title	放射線走行・歩行サーベイ測定実験	
Sub Title	An experiment on patrol survey for radiation	
Author	向井, 知大(Mukai, Tomohiro)	
	大場, 茂(Oba, Shigeru)	
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会	
Publication year	2014	
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural	
	science). No.55 (2014. 3) ,p.1- 19	
JaLC DOI		
Abstract	野外における放射線強度を,車での走行あるいは歩きながら調査するシステムを試行した。これは 簡易型ガイガーカウンター(インスペクター)をPCにつないで放射線強度を3秒ごとに記録し,また GPSアンテナで位置情報も同時に取り込むものである。定点観測ならびに走行・歩行実験を行い, 測定条件やデータの解析方法について検討した。その結果,統計変動を抑えるためには, 30秒間の積算計測数を用いてγ線にもとづく空間線量率を求めるのが妥当であること, また検出器の高さを地上1mから0.35mに下げても, 空間線量率は8%程度しか増えないことがわかった。	
Notes	研究ノート	
Genre	Departmental Bulletin Paper	
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20140331-0001	

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって 保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

Hiyoshi Review of Natural Science Keio University No. 55, 1–19 (2014)

# 放射線走行・歩行サーベイ測定実験

# 向井知大・大場 茂

An Experiment on Patrol Survey for Radiation

Tomohiro Mukai and Shigeru Ohba

# 概要

野外における放射線強度を、車での走行あるいは歩きながら調査するシステムを試行した。 これは簡易型ガイガーカウンター(インスペクター)をPCにつないで放射線強度を3秒ごと に記録し、また GPS アンテナで位置情報も同時に取り込むものである。定点観測ならびに走 行・歩行実験を行い、測定条件やデータの解析方法について検討した。その結果、統計変動を 抑えるためには、30秒間の積算計測数を用いてy線にもとづく空間線量率を求めるのが妥当 であること、また検出器の高さを地上1mから0.35mに下げても、空間線量率は8%程度し か増えないことがわかった。

# 1. はじめに

福島での原発事故から数年が経過したが,自然環境における放射能汚染の深刻さはあまり変 わっていない。これは、半減期が 30 年と長い<sup>137</sup>Cs などの影響が尾を引いているためである。 現状を把握するために、空間放射線の強度測定が行われている。それには、定点でのモニター 測定と走行サーベイとがある。走行サーベイは、放射線検出器を車に積んで、道路を走りなが ら空間線量率を測定し、強度分布を調べるものである。福島県ならびに近隣各県を含めた広範 囲な地域において、これまで走行サーベイが 2011 年 6 月と 12 月および 2012 年 4 月<sup>1)</sup> とそれ 以降<sup>2)</sup> も継続的に行われ、その結果が発表されている。このように国が主導して、放射能汚染

慶應義塾大学自然科学研究教育センター(〒 223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1): Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. [Received Aug. 1, 2013]

に対する監視のための測定が,高性能な装置を用いて行われている。しかし,それとは別にも っと簡便な器具を使って,自分たちの身のまわりにおける放射線量率がどのくらいのレベルか を,必要に応じて確認することが安全対策として望まれる。

著者らは化学の学生実験において、「自然放射線と放射能鉱物」というテーマを 2011 年に開始した。この実験では、S.E. International 社製のインスペクターという、簡易型ガイガーカウンターを用いている。これは、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 線をすべて合算した形で放射線強度を計測する。 KCl などから検出される放射線のうち何が主かは、サンプルと検出器との間に遮蔽材を入れ、 その強度減衰の程度を調べれば、おおまかに判別することができる<sup>33</sup>。  $\alpha$ 線と $\beta$ 線を分別し、 同時に計測可能なシンチレーションカウンターを導入することで、紙1枚でも遮蔽され、また 空気中の飛程が数センチ程度しかない $\alpha$ 線の存在を、確認することができた<sup>4)</sup>。今回は野外に 目を向け、上述したように環境放射線を走行あるいは歩行しながら、簡便に調査するシステム を導入し、その使い方を検討した。

# 2. 走行・歩行サーベイシステム

2-1. 放射線強度の換算

放射線の被曝による影響の強さを表す物理量として、吸収線量がある(表1)。物質でも生体でも、その1kg あたり吸収した放射線のエネルギーが1Jのとき、その吸収線量は1Gy(グレイ)と定義されている。ただし、人体に関しては臓器の感受性が異なり、また放射線の種類によっても体に与える影響の強さがちがう。そこで、国際放射線防護委員会(ICRP)が1990年の勧告において、防護量という新たな概念を導入した<sup>5)</sup>。すなわち、放射線がX線やy線のときを基準にとり、1Gyの被曝があったときを1Sv(シーベルト)と表すことにした。物理量の単位と同じ名前にすると混乱するので、防護量の単位を別の名前にしたのである。そしてICRPでは、 $\alpha$ 線および $\beta$ 線の影響について、y線に比べてそれぞれ20倍および1倍と規定している。ちなみに、中性子については、そのエネルギーに応じて倍率が定められている(2.5~20倍)。このようにして、放射線がすべてy線であるときの影響の強さに換算した値を、等価線量という。さらに、人体の各臓器の等価線量に、臓器固有の荷重係数を掛けて合計したものを、実効線量とよぶ。これは、全身に対する放射線の影響を見積もった値に相当する。このように防護量は、被曝の影響の程度を示す仮想的な概念であり、数値は計算できるが測定はできない。

そこで、国際放射線単位および測定委員会(ICRU)が、実用量という概念を導入した<sup>6)</sup>。 これは、外部被曝に対して、防護量と同等あるいはそれ以上の値を推定するように考案されて いる。この指針に従い、検出器を校正することで、放射線モニターとして使えるというわけで ある。ただし、前述したように、Sv は通常の物理量を表す単位とはちがうことに注意しなけ ればならない。これは、放射線による生体への影響を示す仮想的な単位である。いずれにして も、浴びる放射線量が多くなるほど、エネルギーの吸収量も増えるため、体にとってそれだけ

分類	種別	重別 概要		単位
物理量	理量 吸収線量 物質1kgあたり吸収した放射線エネルギー		0	Gy
<b>丹·諾 르</b> .a)	等価線量	特定の臓器に対する放射線の影響	×	
Ŋ弢里	実効線量	全身に対する放射線の影響	×	
	周辺線量当量	特定の場所における放射線の影響の強さ(防護量)を見		Sv
実用量 <sup>b)</sup>	方向性線量当量	積もる。		
	個人線量当量	外部被曝を個人線量計で見積もる	0	

表1. 放射線の線量

<sup>a)</sup> 防護量は,国際放射線防護委員会(ICRP)によって導入された概念であり,計算方法がそこで決められている。

<sup>b)</sup> 実用量は、国際放射線単位および測定委員会(ICRU)によって考案された概念であり、線量計による測定をもとに防護量を適切に推定するために導入された。

<sup>c)</sup> 周辺線量当量は,放射線の影響の入射方向依存性がない場合である。放射線の入射方向によって影響の度合が異なる場合には,方向性線量当量を用いる。

<sup>d)</sup> 放射線検出器で,方向性線量当量率が測定できる。

N (cpm)	$I  (\mu  \text{Sv/h})$
33.4	0.10
50.1	0.15
66.8	0.20

表 2. インスペクターにおける放射線強度の換算<sup>a)</sup>

a) <sup>137</sup>Csから発せられる y 線であるという仮定にもとづく。

衝撃が強くなるということを意味する。場のモニタリングの実用量としては、周辺線量当量が 用いられる(表1)。通常は、体の表面から1 cm の深さにおける放射線エネルギーの吸収量を、 外部被曝の見積もり対象としている<sup>6)</sup>。  $\alpha$ 線や $\beta$ 線は透過力が弱いため、皮膚の中までは入ら ない。したがって、環境放射線モニターの測定対象は $\gamma$ 線にしぼられている。

インスペクターで測定できるのは、単位時間あたりのカウント数であり、αとβおよびγ線 が合算した形で計測される。カウント数は直接的な測定データであり、いちばん信頼ができる。 しかし、今回のように環境放射線を議論するためには、測定器の仕様や感度には依存しない、 統一的な単位へ変換する必要がある。インスペクターでは、放射線が<sup>137</sup>Cs から出ているγ線 であると仮定して、外部被曝の大きさをμSv/hr という単位に換算している<sup>70</sup>。

 $I(\mu \,\text{Sv/hr}) = N(\text{cpm})/334 \tag{1}$ 

つまり、1 分間あたり 33.4 カウントで 0.10  $\mu$  Sv/hr ということになる(表 2)。線量率の換算 に際して、測定対象が  $\gamma$ 線であることを仮定していることから、検出器に  $\alpha$ 線と $\beta$ 線が入り込

3

まないようにする必要がある。このためインスペクターでは、ステンレス製のワイプテストプレート(これ以降は鉄板とよぶ)を検出窓にはめることで、 y 線だけの測定ができるようになっている。

2-2. 検出器の校正

環境放射線を調査するにあたって、検出器が正常にはたらくことが前提となる。このため、 少なくとも年1回は校正することが求められている。正式な方法としては、<sup>137</sup>Cs などの線源 に対して特定の条件下(距離および方向や遮蔽材)で、検出器が妥当な範囲の数値を示すか調 べ、必要に応じて校正係数を掛けて補正する。一般に市販されている放射線測定器について、 誤差の許容範囲は±15%と定められている。インスペクターの販売店に確認したところ、メ ーカーは出荷前に<sup>137</sup>Cs から発せられる γ線(662 keV)を使って校正している、とのことで あった。校正に際しては、もちろんαおよびβ線は遮断されている。

インスペクターは、電子的校正も可能である<sup>7)</sup>。これは、完全な校正というわけではないが、 電子回路の経年劣化をチェックするのには有効である。ガイガー・ミュラー (GM) 管に放射 線が入ると、中のアルゴンなどの気体が電離し、それにより GM 管内部の電圧の変化が生じ る<sup>5)</sup>。このパルス信号を電子回路で波高分析してパルスの数を求め、また数え落しの補正をし て計測値が表示される。1 個のパルスを受けてから、次のパルスを受けつけられるようになる までの時間を、分解時間という。これを $\tau$  (s) とすると、真の計数率  $N_{\rm T}$  (cps) は、実測値 N (cps) を用いて次式のように表される。

$$N_{\rm T} = N/(1 - N\tau)$$
 (2 a)

この式を変形すると、

 $\tau = 1 / N - 1 / N_{\rm T}$  (2 b)

電子的校正について具体的には、インスペクター側面にあるジャックを通して、外からパル ス信号を送り、正しく計測できるか調べるものである。インスペクター専用のパルスジェネレ ーター(米国製)を用いて、電子的な作動のチェックを行ってみた(表 3)。全部で16台、そ

パルス発生器から	インスペク	ム粉	
の入力 (ppm)	理想值	実測値	百奴
		$66.92 \sim 66.95 \times 10^3$	1
50 225	66,800	$66.95 \sim 66.97 \times 10^3$	3
09,000		$67.03 \sim 67.05 \times 10^3$	10
		$67.05 \sim 67.08 \times 10^3$	2

表3. インスペクターの電子的作動の確認

のうち購入後半年以内のもの5台である。その結果,表示値(cpm)の誤差は0.4%以内であ り、パルスの計数回路は購入後6年を経過した個体でも劣化していないことが確認でき、校正 係数の修正は不要であった。表3の値を用いて、(2b)式から分解時間を計算すると、τ = 11.3 ms と仮定していることがわかった。

# 2-3. サーベイシステムの構成

インスペクターの製造元である米国 S.E. International 社から, PC へのデータ取り込み用 ソフト GeigerGraph も販売されている。これは定点観測を念頭に置いており,計数率の時間 変化をグラフで表示するなどの機能をもつ。なお,インスペクターは 2013 年に Inspector+ から InspectorUSB ヘモデルチェンジし, PC へのデータ表示用ソフトも無料でダウンロード できるようになった。それに対して,(株)ミストラル社からは,GPS アンテナも組み合わせ た放射線量サーベイシステムが発売された。これは,GeigerGps Tracker というソフトを使 って,インスペクターおよび GPS アンテナから 3 秒ごとにデータを読み込み,PC に記録する。 そのデータがあれば,後から地図上に放射線強度分布を色分けして表示させることも可能であ る。ソフトウェアとともに,GPS アンテナと RS-232C ケーブルがセットになって販売されて いるが,インスペクターや PC などはユーザーが用意する必要がある。

器具の構成を図1に示す。PCについては、ノート型でももちろん使えるが、バッテリーが 1時間程度しか持たないこと、ならびにハードディスクは振動や衝撃に弱いという問題がある。 そこで、USB 端子つきのタブレット型 PC (DELL Latitude 10)を使うことにした。インスペ クターから RS-232C ケーブルを通して、放射線強度データが PC に送られる。また、GPS ア ンテナは USB を介して PC から電気の供給を受けながら、PC へ位置情報を送る。これらの測 定器具をバックパックに入れて歩行することを考え、大型のタッパーウェア(容量 8.5 L)を 購入した。この限られた空間内に PC も含めて器具を無理なく収納し、また歩行中に端子やコ ードに負荷がかからないようにしなければならない。そこで、USB コードを自在な方向に動 かすことができるようにするため、3D の USB アダプターを PC 側に入れた。また、インスペ



ファイル	内容 <sup>a)</sup>	
PC に取り込まれる生データ (3 秒ごと), csv 形式	Date Time, Flg/PT, NOS, Lati., Long., Alti., ① 03 s CPM CPS $\mu$ Sv/h mR/h; ② 30 s CPM CPS $\mu$ Sv/h mR/h; ③ 60 s CPM CPS $\mu$ Sv/h mR/h	
Visual Basic 入力用データ (各点), xlsx 形式	Date Time, Long., Lati., Alti., 30 s $\mu$ Sv/h	
Google Earth 表示用データ (各点), kml 形式	Date Time, Long., Lati., Alti., 30 s $\mu$ Sv/h, #No.	

表4. データファイルの形式と内容

<sup>a)</sup> Flg/PT は測位状態で、1 が正常、0 は測位不能、負は起動直後で無効であることを意味する。NOS は測位に使用した衛星数。Lati (tude) は緯度、Long (itude) は経度、Alti (tude) は標高。①は 3 秒間の計測数にもとづく放射線強度データ、②③はそれぞれ 30 秒間および 60 秒間の計測数にも とづく放射線強度データである。#No. は線量率を色分けして示すためのレベル番号。

クター側にはヘッドホン延長コードを入れ,ジャックのコードの方向を 90°曲げることで, せまい空間にも無理なく収納できるようにした。

ソフトウェア GeigerGps Tracker は、Windows 8 でも問題なく動くことを確認した。この 他に、GPS アンテナと RS-232C 用のドライバーを PC にインストールしておく必要がある。 データファイルの形式と内容を表4に示す。インスペクターからは放射線強度データが、そし て GPS アンテナからは位置情報が3 秒ごとに PC に送られ、csv 形式のファイルとして記録 される。

GoogleEarth上に情報を表示するためには、kml形式で記述されたファイルが必要である。 これは、.kmlという拡張子をもつテキストファイルであり、手入力でもつくれる。たとえば、 Google Earth上に1つのアイコンと放射線強度の数値を表示させるには、表5のように記述 する。<Placemark>から</Placemark>までが、位置1個分の情報である。走行・歩行サ ーベイでは、この部分が膨大な数だけくり返されることになる。それらをすべて手作業で入力 するわけにはいかない。そこで、GeigerGps Tracker が出力した csv 形式のデータファイル から、必要な情報のカラムだけを Excel ファイルにコピーして、それを Visual Basic for Applications (VBA) で書いたプログラムを使って kml 形式に変換することにした。放射線 強度レベルによって異なるアイコンを割り当てる命令も、VBA のプログラムに組み込んだ。

アイコンとして,色のちがうマーク5種類を用意した。これは30×30ピクセル程度の大き さで,背景が透明のpng形式のファイルである。なお,放射線のレベル表示の区切りを,ど のように設定するかが問題である。放射線の実用量(μSv/h)は,あくまでも仮想的な量の 推定値であることから,インスペクターが実際に野外で表示する値に則して,安全なレベルの 範囲を見極める必要がある。これについては実験の項で述べる。

# 表 5. kml 形式ファイルの内容

```
(GoogleEarth 上に1つのアイコンと放射線強度の数値を表示させるときの例)
```

```
<?xml version= "1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://earth.google.com/kml/2.1">
<Document><open> 1 </open>
<Style id="アイコンの名前"><IconStyle><Icon><href>アイコンファイルのア
ドレス</href></Icon></IconStyle></Style>
<Placemark>
<name> 放射線強度 </name>
                                  ...(1)
<description> 日時 </description>
                                  ...(2)
<styleUrl> アイコンの名前 </styleUrl>
<Point>
<altitudeMode> 標高モード </altitudeMode>
<coordinates> 経度, 緯度, 標高 </coordinates>
</Point>
</Placemark>
</Document>
</kml>
```

(注) GoogleEarth 上で放射線強度の数値を表示させない場合は、①の行を削除する。なお、②の行で、<description> と </description> の間に、日時だけでなく放射線強度の数値を入れておけば、アイコンをクリックしたときに、それらの情報を表示させることができる。

#### 3. 実験

#### 3-1. 空間線量率の測定条件

放射線の空間線量率の測定では、通常は地面から1mの高さで、検出部を地面に平行に向 けて測定することになっている<sup>8)</sup>。そこで、走行サーベイで空間線量率を測定する際に、標準 の条件として検出窓が地面から1mの高さになるように、インスペクターを車の中で保持す ることにした。これは、運転席の後ろにビニール袋をかけ、それに検出器を入れることで、簡 便に行うことができる。インスペクターには鉄板を必ずはめることにした。また、歩行のとき は、インスペクターや PC などを大型のタッパーウェアに収納し、それをバックパックに入れ て、検出窓を地面に平行に保てるようにした。なお、局所的に y 線が異常に強い場所(ホット スポット)がないことを確認するのが目的であれば、検出窓をできるだけ地面に近づけるべき であろう。そこで、インスペクターを車のフロア(地面から 0.35 m)に置くオプションも考 えることにした。また、車内温度がいつでも計れるように、後部座席にデジタル温度計を置い た。 3-2. 統計変動(地上1m)

自然放射線は弱くて変動が激しいため、走行中の各地点における測定データに差異があった としても、それが統計的にどれだけ意味があるのか、すぐには判別がつかない。そこで、時間 による統計変動の幅を調べるために、著者の自宅(日吉近郊)の駐車場に車を止めて、地面か ら1mの高さで定点観察を行った(表6)。夜間の連続測定により、PCのバッテリーは1回の 充電で7~8時間もつことがわかった。比較のために昼の測定も試したが、日射により車内温 度が40℃以上に達し、PCが自動停止してしまった。このため、昼の時間帯の測定は1回だけ でやめ、夜間の定点観測を3回くり返すことにした。

表6の夜②のデータを例にとり、図2に(a)3秒間のカウント数および(b)30秒間のカ ウント数の頻度分布を示した。3秒間にまったく計測なしという場合がけっこう見られ、その 一方で7~8カウントという場合も起こりうる。このように、放射線の検出は、時間に対して 非常に不均一である。この3秒間のカウント数を20倍して1分間あたりのカウント数(cpm) とし、(1)式から放射線量率を計算すると0~0.48  $\mu$ Sv/h と予想してしまう。これでは、測 定精度が悪い。そこで、30秒間のカウント数にもとづく放射線量率を使うことにした。こち らのほうは、図3に示すように、0.03~0.20  $\mu$ Sv/h の範囲におさまっている。なお、図3の 頻度分布において、山がところどころ窪んでいる。これは、(1)式で放射線量率を計算して小 数第3位を四捨五入したときに、0.03  $\mu$ Sv/h の倍数になる確率が他のときの半分という理由 による。たとえば、0.10  $\mu$ Sv/h になるのは、30秒間あたり 16 あるいは 17 カウントのときで あるが、0.09  $\mu$ Sv/h になるのは 15 カウントのときだけである。

各データセットについて放射線量率の最小,最大,および平均値を求めた(表6)。地上

区八	口時 (2012年)	放射線量率 (μSv/h) <sup>b)</sup>		
区方	口时(2013 平)	最小	最大	平均
夜①	$5/2$ 21:52 $\sim$ 5/3 05:45	0.02	0.19	0.095
夜2)	$5/3$ 20: 34 $\sim$ 5/4 03: 52	0.03	0.20	0.100
夜③	$5/4$ 20:36 $\sim$ 5/5 03:53	0.02	0.19	0.100
昼①	$5/3  \begin{array}{c} 9:51 \sim 13:40 \\ 15:05 \sim 17:01 \end{array}$	0.01	0.20	0.102
走行	5/8	0.02	0.21	0.118
走行	5 / 13	0.05	0.21	0.118
走行	5 / 24	0.01	0.20	0.114
步行 <sup>c)</sup>	5 / 29	0.04	0.20	0.107

表 6. 定点観測ならびに走行サーベイ結果の概要(地上1m)<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> 定点観測は日吉近郊。走行は日吉と三田キャンパス間の往復(計約100分)。 <sup>b)</sup> 30 秒間の計測値にもとづく放射線量率の値。

30 伊间の計測値にもとうく成別線重率の値。

<sup>c)</sup> 歩行は日吉キャンパス内(約 40 分)で,検出窓は地上から 0.94 m。



図 2. (a) 3 秒間, (b) 30 秒間における計数値の頻度分布。定点観測(表 6,夜②,地上 1 m)のデー タにもとづく。



図 3. 30 秒間の計数値から求めた線量率の頻度分布。定点観測(表 6,夜②,地上1m)のデータに もとづく。

l m の定点測定において,放射線量率の分布の中心が 0.10  $\mu$  Sv/h であり,その裾野が 0.20  $\mu$  Sv/h あたりまで広がっている。このことから、30 秒間の平均で 0.20  $\mu$  Sv/h までの範囲であ ればまず安全であり、0.21  $\mu$  Sv/h 以上であれば、やや要注意なレベルといえる。バックグラ ウンドの強さは、昼夜のちがいはほとんどなく、また雲や風などの天候にもあまり影響されな いといえる。放射線量率のレベル設定は、数値の区切りがよいように、0.21 ~ 0.50  $\mu$  Sv/h の 範囲は 0.10 刻みにすることにした。これを他の報告例と比較して表 7 に示す。今回は、放射 線量率がとくに高いところを調査の対象には考えていないので、最高レベルは 0.51  $\mu$  Sv/h 以 上とすることで十分と思われる。

テストケースとして,三田キャンパス(東京都港区)に用事があるたびに,日吉キャンパス (横浜市港北区)から車で往復して,走行データを何回か測定してみた。その結果を表6に示 した。測定日によるちがいは非常に小さい。空間線量率は最大で瞬間的に 0.21 μSv/h となっ ているが,これは安全な範囲内とみなせる。なお,原発事故による放射能汚染の影響が出る前

	(1	
本実験	走行サーベイ報告 <sup>1)</sup>	福島県山岳環境 モニタリング <sup>9)</sup>
(1) $0 \sim 0.10$	(1) $0 \sim 0.10$	(1) $0 \sim 0.50$
(2) $0.11 \sim 0.20$	(2) $0.11 \sim 0.20$	
(3) $0.21 \sim 0.30$ (4) $0.31 \sim 0.40$ (5) $0.41 \sim 0.50$	(3) $0.21 \sim 0.50$	
	(4) $0.51 \sim 1.00$	(2) $0.51 \sim 1.00$
	(5) $1.01 \sim 1.90$	(3) $1.01 \sim 2.00$
(6) 0.51 以上	(6) $1.91 \sim 3.80$	(4) $2.01 \sim 3.00$ (5) $3.01 \sim 4.00$
	(7) $3.81 \sim 9.50$	(6) $4.01 \sim 5.00$
	(8) $9.51 \sim 19.0$	(7) 5.01 以上
	(9) 19.1 以上	

表 7. 放射線量率 (μSv/h) のレベル設定例 (地上1m)

は、花崗岩の多い西日本は日本国内でも自然放射線量がやや高く、火山灰で覆われている東日本は低いという傾向が知られていた<sup>10)</sup>。ただし、アスファルトで舗装された道路の上では、空間線量率の地質によるちがいは出にくいと思われる。ちなみに、文部科学省による走行サーベイ(第4次、2012年8~10月)の測定<sup>11)</sup>によると、東京都港区周辺は 0.1  $\mu$ Sv/h 以下となっているが、今回得られた日吉~三田間の空間放射線量率の平均値 0.12  $\mu$ Sv/h はそれよりやや高めの値となっている。

3-3. 統計変動(地上0.35 m)

放射線検出器の位置を低くすることによって、地面から放出されるy線に対する感度が上が ると期待される。そこで、測定条件のオプションとして、インスペクターを車のフロア(地面 から 0.35 m) に置いたとき、測定結果がどのように変わるかを調べた。まず、自宅(日吉近郊) の駐車場に車を止めて、定点観察を行った。車体によるy線の遮蔽率が、フロアの位置によっ て異なる可能性もある。そこで、後部座席の右側ドア付近(R)と左側中央寄り(L)の2カ 所で、同時にデータ収集を行ってみた(夜④、⑤)。その集計結果を表8に示す。地上1mの ときと比べて放射線量率の変動幅がやや広がったものの、平均値はまったく増えていない。ま た、観測位置RとLによる差も、無視できるほど小さい。

地上 0.35 m という測定オプションを用いて、日吉と三田キャンパス間を走行サーベイした 結果を表 8 に示した。地上 1 m での測定に比べて、放射線量率が平均値として 0.114 から 0.123 µSv/h へと、約 8 % 増加している。図 4 は、5 月 24 日 (5 / 24) の走行サーベイデータ を地図上に示したものである。日吉~三田間の道路は、北東方向にほぼ直線的に伸びているこ とがわかる。なお、走行 5 / 27 で、車の中央寄り(L)の放射線レベルが異常に高く、最大で

区八 口哄 (2012 年)		観測	放射線量率 $(\mu Sv/h)^{b}$		
区力	区方 日時 (2013 年)		最小	最大	平均
龙	$E/2E = 20 \cdot 2E = E/2C = 04 \cdot 18$	R	0.01	0.29	0.098
12(4)	$5/25$ 20:25 $\sim$ 5/26 04:18	L	0.00	0.19	0.095
市同	$E/26 = 20 \cdot 20 = E/27 = 02 \cdot 42$	R	0.02	0.22	0.102
120	5/20 20:30 ~ $5/21$ 05:42	L	0.03	0.20	0.100
走行	5 / 24	L	0.04	0.26	0.124
土石	5 / 97	R	0.04	0.24	0.128
疋1]	5/21	L	0.06	0.41 <sup>e)</sup>	0.164 <sup>e)</sup>
土石	6 / 10	R	0.04	0.22	0.119
疋1]	0/10	L	0.04	0.21	0.122
步行 <sup>d)</sup>	5 / 29		0.04	0.28	0.120

表 8. 定点観測ならびに走行サーベイ結果の概要(地上 0.35 m)<sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> 定点観測は日吉近郊。走行は日吉と三田キャンパス間の往復(計約100分)。

<sup>b)</sup> 30 秒間の計測値にもとづく放射線量率の値。

<sup>c)</sup> 観測位置 R は,車体後部右側ドア付近,L は後部左側中央寄り。

<sup>d)</sup> 歩行は日吉キャンパス内(約40分)で、検出窓は地上から0.20m。

<sup>e)</sup> 高温によりインスペクターの計測異常が起こった(図5)。



図4. 日吉(横浜市)~三田(東京都港区)間の走行サーベイの結果(©2009 Google, Map Data ©2013 ZENRIN, Gray Buildings ©2008 ZENRIN)。左下が日吉で,右上が三田であり,右側 に見える黒い部分が東京湾である。丸いマークの各点が3秒ごとの位置を,またマークの色が 空間放射線量率(地上0.35 m)のレベルを示す。ほとんどが0.20 μSv/h以下の黄色または白 いマークである。GoogleEarth上で地図を拡大すると,往路と復路の測定点が道路に沿って並 んでいる様子がわかる。



図5. 高温により異常になったときの3秒間における計数値の頻度分布。破線と実線はそれぞれ、走 行サーベイ(表8,5/27L)の往路と復路のデータである。

0.41 µSv/hにもなった。ただし、同時に測定していた、すぐ横の検出器(R)では、このような高い値にはなっていない。このデータについてさらに詳しく検討したところ、5/27 Lについて復路の値は正常で、異常に高いのは往路に限られていることがわかった。3 秒間の計測数の頻度分布を図5 に示す。偶数のカウント数が奇数に比べて明らかに頻度が高いという奇妙な分布となっている。よく見ると、0 カウントの頻度は往路と復路でほとんど同じであり、山の裾野が復路では8 カウントあたりで止まっているのに対して、往路では 14 カウントあたり まで伸びている。これは、高温によりインスペクターが誤作動し、1 つのパルスを2 倍にカウントする状態が生じたためと推定される。この日は陽差しが強く、往路が午後2 時ごろで車のエアコンをつけても後部座席は 28℃ぐらいであった。そして右側ドア付近(R)に比べ、左側中央寄りの位置(L) はドアのガラス窓を通して南側からの太陽光にあたりやすい状況であった。

インスペクターのマニュアルにも、直射日光に長時間あてると計測値が異常に高くなるとの 注意が書かれている<sup>7)</sup>。ただし、今回、インスペクターの検出窓は鉄板で覆い、また車のフロ アに向けているので、雲母の薄膜を通過して GM 管に光が入ったとは思えない。インスペク ターをビニール袋に入れていることもあり、ここでは日光があたることによる温度上昇の影響 と推定される。ちなみにインスペクターの電源は、9 V アルカリ電池1 個であるが、GM 管に は約 400 V の電圧がかかっている。管電圧が多少変化しても、放射線計測効率があまり変わら ない領域(プラトー)を使用しているはずなので、温度による電圧変動の影響は少ないと考え られる。

3-4. 走行サーベイでの異常検出限界

もし道路に放射線を強く発する物体が落ちていたときに、走行サーベイでどの程度感知でき るか、興味のあるところである。点状 y 線源からの強度は距離の2乗に反比例することから、 地面から検出窓までの距離を1mから0.35mに縮めたことにより、単純に考えると約8倍だ



図 6. 日吉キャンパス(横浜市)における歩行サーベイの結果(© 2009 Google, Map Data © 2013 ZENRIN, Gray Buildings © 2008 ZENRIN)。左上隅が日吉駅で、そこから横に伸びているの がイチョウ並木である。丸いマークの各点が3秒ごとの位置を、またマークの色が空間放射線 量率(地上 0.94 m)のレベルを示す。0.10 μSv/h以下は白、0.11 ~ 0.20 μSv/h は黄色のマー クであり、0.21 μSv/h以上の場合はなかったことがわかる。

け感度を上げたことに相当する。学生実験で使用している放射能鉱物標本(ユークセン石,モ ナズ石,ベタフォ石)のうち、y線強度が強いのはベタフォ石である。この産地はマダカスカ ルで,成分としてUが含まれている。小石程度のベタフォ石の中で、y線がいちばん強いも の1個をビニール袋に入れ、その上を車で通過して検知できるか試してみた。インスペクター をフロア(地上35 cm)に置き、車の速度は時速20 kmとし、5回通過してみたが、空間線量 率のマップは平坦であり、まったく痕跡すら捉えることはできなかった。後で考えると、それ は当然のことであった。図5からわかるように、異常な値として認識するには、3秒間で最低 でも10カウントは必要である。このベタフォ石について、y線強度の距離依存性データを以 前測定している<sup>33</sup>。それによると、検出窓を15 cmよりも接近させないと、3秒間あたり10 カウントを超えない。ましてや走行中となれば、検出はさらに困難といえる。

# 3-5. 歩行サーベイの測定例

検出器ならびに PC をバックパックに入れて日吉キャンパス内を歩行し,データを測定した。 その際,バックパックを背負ったときと(検出窓の高さは地面から 0.94 m),手にもったとき (地面から 0.20 m)を同時に試した。なお,建物や木などの側面から出ている自然放射線の影 響を避けるために,それらになるべく近づかないようにした。この歩行実験によって収集した 放射線強度(地上0.94 m)を,GoogleEarthを使って表示すると,図6のようになった。丸 いマークの位置が3秒ごとにデータ収集した地点であり,マークの色で放射線のレベルの高さ を示している。歩行したコース内では,どの地点も約1mの高さでは0.20 μSv/h以下であっ た(表6)。地上0.20mで測定したときの放射線量は,それよりも平均で約10%ほど高かっ た(表8)。GPS アンテナ(型式 BU-353S4)による位置データの標準偏差は,5m程度とさ れている。大きいビルの陰では,衛星からの電波が反射して,位置の情報が大きくずれてしま う。日吉キャンパス内に関しては,衛星からの電波を妨害するほどの高いビルは近くにないの で,歩行コースが比較的忠実に再現されている。GPS アンテナで受信した衛星の数は,歩行 中6~8個であった。

## 4. 考察

# 4-1. 測定条件

自然放射線の空間線量率を測定する際に、検出窓を地面に向け、そして標準条件では高さを 1 m とする。また、 y 線だけ測定する。これで検出される環境放射線は通常、地面に存在する 放射性元素、空気中の気体状放射性核種、および宇宙線の影響である。それに、原発事故によ る放射能汚染の影響が加わった。原子炉の中で<sup>235</sup>U が核分裂する際に、いろいろな放射性核 種が生じる。その中で、放射能汚染でとくに注意を要する核種の情報を表9にまとめた。空間 線量率に対していちばん影響が大きいのは、土壌中の放射性 Cs に由来する y 線である。農林 水産省が、平成 23 年 11 月時点における農地土壌の放射性物質濃度分布図を作成し、公表して いる<sup>12)</sup>。福島県およびその周辺の地域で、深さ約 15 cm までの土壌を計約 3,400 カ所で採取し、 放射性 Cs の濃度を測定した。その結果、農地での 1 m の高さの空間線量率と、農地土壌中の 放射性 Cs 濃度には、一定の相関関係が見いだされている。その理由を考えてみよう。なお、 原発事故からすでに 2 年以上が経過しているので、半減期が 30 年と長い<sup>137</sup>Cs が今後の警戒 対象ということになる。

<sup>137</sup>Cs は $\beta^{-}$ 崩壊により<sup>137</sup>Ba へ変化する(図7)。その際に、94.4%の確率で準安定な核種 <sup>137m</sup>Ba(半減期2.55分)を経由する<sup>14)</sup>。これがより安定な<sup>137</sup>Ba へ変わるときに、 y 線を放出 する。ただし、すべての y 線が外に出てくるわけではなく、そのうちの9.9%は内殻電子に吸 収され、そしてその電子が飛び出してくる。この現象を内部転換という。したがって、<sup>137</sup>Cs が崩壊したときに y 線を出すのは、厳密にいうと娘核種の<sup>137m</sup>Ba であるが、その放出確率は 0.944 × 0.901 = 0.85 ということになる。

y線の測定を考える場合,まず基本となるのは、y線源からの放射線強度の距離依存性である。Q (MBq)の点状y線源から距離r (m)における実効線量率E' ( $\mu$ Sv/h)は、次式で表される<sup>5)</sup>。なお、Bq (ベクレル)とは1秒間の崩壊数であり、M (メガ)は10<sup>6</sup>を表す記号である。

核種の半減期 <sup>11)</sup>	壊変形式	主な放射線のエネルギー (MeV) <sup>a)</sup>		
<sup>131</sup> I 8.04 日	$\beta^{-}$	β <sup>-</sup> 0.61 (86 %) ほか, γ 0.365 (81 %) ほか		
<sup>134</sup> Cs 2.06 年	$eta$ $^{-\mathrm{b})}$	$β^-$ 0.658 (70%) /Ξτ/ν, γ 0.605 (98%), 0.796 (85%) /Ξτ/ν		
<sup>137</sup> Cs 30.0 年	$\beta^{-}$	$\beta^-$ 0.514 (94 %), $\gamma$ 0.662 (85 %) ( <sup>137m</sup> Ba)		

表9. 放射能汚染で問題となる核種

<sup>a)</sup> y 線は固有なエネルギー値であるが, β線は最大エネルギー値である。カッコ内の数字は, 壊変あたりその放射線が放出される割合(%)を示す<sup>13)</sup>。

<sup>b)</sup>  $\beta^{-}$  (99.9997%), EC (0.0003%).



 $E' = \Gamma Q/r^2$ 

(3)

ここで、 $\Gamma$ は実効線量率定数であり、<sup>137</sup>Cs について 0.0779( $\mu$  Sv·m<sup>2</sup>/MBq·h)である。ただ し、この式は真空中を仮定しており、空気などの媒体中を $\gamma$ 線が通過する際の、吸収による強 度減衰を考慮していないことに注意してほしい。

さて、地面に散らばっている<sup>137</sup>Cs からの y 線が、地上に保持したうすい円柱形の検出器で、 どのように測定されるかを次に考えよう。今、話を単純にするために、地面は平坦とし、また 放射性元素として<sup>137</sup>Cs が、面積密度 P (MBq/m<sup>2</sup>) だけ含まれているとする。また、地面か ら深くなるほど、<sup>137</sup>Cs の濃度は指数関数的に下がると仮定する。地面から観測点 M までの距 離を h (m) とし、M の真下の点 O を中心とし、半径 x (m) と x + dx の円の間に囲まれた 領域を W とする。その面積は  $2\pi x dx$  (m<sup>2</sup>) であり、それに含まれる<sup>137</sup>Cs は、 $2\pi P x dx$  (MBq) である (図 8)。検出器は y 線の入射方向による感度依存性はないと仮定する。ただし、セン サー部分は有限な大きさであることから、検出強度は y 線の入射方向に対する検出窓の有効幅 の相対値、 $\frac{h}{\sqrt{x^2+h^2}}$  に比例すると仮定する。そうすると、観測点 M の検出器における、領域 W による実効線量率への寄与は、次のように表される。



図8. (a) 地上 *h* (m) に置かれた検出器 M と, 地面での半径 *x* の微小量 *dx* で示された領域 W, (b) *y* 線の入射方向による検出器 M の有効幅の変化。

$$I(x) = \frac{\Gamma 2\pi P x dx}{x^2 + h^2} \frac{h}{\sqrt{x^2 + h^2}}$$
(4)

これを地面全体について積分すると、次のようになる。

$$I = \pi h \Gamma P \int_0^\infty \frac{2x}{(x^2 + h^2)^{3/2}} \, dx = \pi h \Gamma P \int_{h^2}^\infty \frac{1}{y^{3/2}} \, dy = \pi h \Gamma P \left[ \frac{-2}{y^{1/2}} \right]_{h^2}^\infty = 2\pi \Gamma P \tag{5}$$

つまり,他の放射性核種などからの寄与を無視すると,空間線量率*I*は地面の<sup>137</sup>Cs濃度*P*に 比例することがわかる。放射性元素が地面に均一に分布していて,かつ検出器の感度の入射方 向依存性がないとき,地面からの放射線強度は検出器の高さ*h*にはよらない。

ただし、以上の議論は、前述したように空気による $\gamma$ 線の吸収の影響を考慮していない。 <sup>137</sup>Cs 由来の $\gamma$ 線(0.662 MeV)に対する 25℃の空気(密度 1.18 mg/cm<sup>3</sup>)の線吸収係数 $\mu$ は、 9.07 × 10<sup>-3</sup> (m<sup>-1</sup>) である<sup>15)</sup>。空気中をt (m)進むとき、 $\gamma$ 線の強度 $I_0$  がIになったとすると、 次のように表せる。

$$I/I_0 = \exp \left(-\mu t\right) \tag{6}$$

たとえば t = 1 (m)のとき,  $I/I_0 = 0.991$ となる。よって,近距離であれば空気による吸収の 影響はほぼ無視できることがわかる。しかし,  $t = 1/\mu = 110$  (m)ともなれば,  $I/I_0 = 1/e$ = 0.368と,かなり減衰する。この空気による吸収の影響も考慮に入れて,(5)式のような積 分を求めようとしても、簡単な式にはならない。幸いなことに、すでに同様の理論的考察がな され、数値積分による計算結果が公表されている<sup>15,16)</sup>。それによると、検出器の高されが高 くなるほど、地面の放射性物質に由来する線量率 I が下がる。検出器が地面から遠ざかるほど、  $\gamma$ 線が空気中をより長く通過することになるので、当然の結果といえる。

実際問題として、車を使った定点観測の結果(表 6,8)では、インスペクターの測定窓を 地上1mから0.35mに下げても、ほとんど放射線強度にはちがいが見られなかった。ただし、

同位体と存在比 (wt%)	半減期 (年) <sup>13)</sup>	崩壊数(Bq/mol)
<sup>234</sup> U 0.0055	$2.454 \times 10^{5}$	
<sup>235</sup> U 0.7200	$7.037 \times 10^{8}$	$6.04  imes 10^6$
<sup>238</sup> U 99.2745	$4.468 \times 10^{9}$	
<sup>137</sup> Cs	30.0	$4.41 \times 10^{14}$

表 10. ウランと<sup>137</sup>Csの崩壊数

走行サーベイの結果(表 6, 8)をみると、平均値として約8%増加している。この理由として、 検出器を地上1mの高さにしているときには比較的広い地面をモニターしているが、0.35m にすると検出器直下の地面に近づくので、局所的な情報が強調されるためと推定される。

4-2. 放射線の強さ

土壌中の<sup>137</sup>Cs の濃度が高さ1mにおける空間線量率に反映するのに比べて,ウランを含んでいる放射能鉱物の小石が走行サーベイ(検出器が地上35 cm)では感知できなかった。この理由をさらに考えてみよう。

原子の崩壊は、一次反応である。すなわち、原子Aの濃度が減少する速度は、Aの濃度に 比例する。また、速度定数は半減期 $t_{1/2}$ に反比例することも考慮すると、次のように表すこと ができる<sup>17)</sup>。

$$-\frac{d[\mathbf{A}]}{dt} = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} [\mathbf{A}] \tag{7}$$

よって、原子Aが1モル存在したときの、1秒間の崩壊数は、 $N_A \ln 2/t_{1/2}$ となる。ここで、  $N_A$ はアボガドロ数である。この値を<sup>137</sup>Cs について計算すると、表 10 に示すような値となる。 比較のために、天然に存在するウランの崩壊数も計算してみた。ウランは同位体が3種類存在 し、それぞれの半減期が異なるため、存在比を考慮して積算した。これにより、<sup>137</sup>Cs は U と 比べて、1秒間の崩壊数は 7.3 × 10<sup>7</sup> 倍も多いことがわかる。つまり、<sup>137</sup>Cs はそれだけ強い放 射線源であるといえる。なお、ウランからの放射線の影響を考える場合、崩壊系列全体からの 寄与を考慮すべきであるが、ここでは単純な概算を示したにすぎない。

# 4-3. 危険性の確認

地図上に放射線量のレベルを色で表示するのは非常にわかりやすい。しかし,放射線量の区 切りは任意に設定したものであり,統計変動あるいは日射による検出器の誤作動によってたま たま高い値が出たときに,それがあたかも危険レベルであるような誤解を与えかねない。もし 放射能レベルが高いと思われる地点が見つかったときには,測定の再現性を十分に確認する必 要がある。また,放射線の実用量を議論するためには,β線を遮断するという測定条件を守る ことが重要である。逆に,走行サーベイをして,空間線量率が低いからといって安心はできな い。福島県およびその周辺では、4 車線など幅の広い道路ほど、放射線強度が年々とくに下が っていることが報告されている<sup>2)</sup>。これは、放射性セシウムが降雨や車の往来などにより、路 面の外へ移動しているためと考えられる。

#### 謝辞

慶應吾妻山荘(福島県)ならびにその周辺の登山道における放射線測定の情報を教えていた だき,また有益なコメントをいただいた日比谷孟俊博士(慶應義塾大学大学院システムデザイ ン・マネジメント研究科顧問)に深く感謝する。ここで報告した内容は,慶應義塾大学調整費 からの助成金を用いて行われた。

# 参考文献

- 1) 文部科学省,「走行サーベイによる連続的な空間線量率の測定結果(平成24年3月時点) について」(2012年)。http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6211/view.html
- 日本原子力研究開発機構 福島技術本部,「走行サーベイを活用した道路上の空間線量率の 詳細な分布状況の把握,及びその変化傾向の確認について」(2013 年)。http://www. jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/html
- 3) 大場茂,向井知大,小畠りか,「ガイガーカウンターを用いた放射線強度測定実験」慶應 義塾大学日吉紀要,自然科学 No. 51,43-60 (2012 年)
- 4) 大場茂,向井知大,「シンチレーションカウンターを用いたαとβ線の同時強度測定実験」
   慶應義塾大学日吉紀要,自然科学 No. 53,45-59 (2013 年)
- 5) 「放射線入門」第2版(鶴田隆雄著,通商産業研究社,2008年)
- 6) 平山英夫,中島宏,佐波俊哉,山口恭弘,佐藤理,高木俊治,鈴木敏和,岩井敏,「放射 線防護に用いられる線量概念」KEK Report 2012-44 (2012)
- 7) "Inspector<sup>+</sup> and Inspector EXP<sup>+</sup> User Manual," S.E. International (2006)
- 8) 日本電気計測器工業会 放射線計測委員会,「簡易的な環境放射線測定に関するガイドライン」(2012 年)。http://www.jemima.or.jp/activity/radiation.html
- 9) 福島登高会による山岳環境モニタリング, http://ftk-ac.net/
- 10)「身近な放射線の知識」(佐々木康人著,丸善,2006年)
- 文部科学省、「放射線量等分布マップ拡大サイト/電子国土」(2013年)。http://ramap. jaea.go.jp/map/
- 12) 農林水産省、「農地土壌の放射性物質濃度分布図の作成について」(2012年)。http:// www.s.affrc.go.jp/docs/press/120323.html
- 13)「化学便覧」改訂 5 版基礎編 I (丸善, 2004 年)pp. 38-63
- 14)「Q&A 放射線物理」改訂新版(大塚徳勝,西谷源展著,共立出版,2007年)
- 15)藤原隆男,「空間線量率の計算」(2011年)。http://w3.kcua.ac.jp/~fujiwara/nuclear/air\_ 18

dose.html

- 16) 田崎晴明,「ベクレルからシーベルトへ」(2011年)。http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/ housha/docs/BqToSv.pdf
- 17)「物理化学演習」(伊藤正時,大場茂,茅幸二,仙名保,中嶋敦,藪下聡著,裳華房,1999年) pp. 208-211