

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26305021

研究課題名(和文) アフリカ・カメルーンにおける自然放射線被ばく調査

研究課題名(英文) Natural radiation exposure survey in Cameroon, Africa

研究代表者

床次 眞司 (Tokonami, Shinji)

弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授

研究者番号：80247254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：アフリカは地下金属資源が豊富にある。その中でもウラン鉱山は、原子力発電に必要な原料であるウランを産出する。その鉱山で働く作業者は放射線のリスクにさらされているため、十分な管理が必要とされる。さらに、その鉱山周辺で生活を営む住民も少なからず放射線被ばくの可能性がある。本研究では、未だに公表されていないアフリカのカメルーンに所在するウラン鉱山周辺地域での住民に対する放射線被ばく線量調査を実施した。外部被ばく評価では、走行サーベイを実施して地域分布を調べた。内部被ばく評価では、吸入摂取と経口摂取による線量を調べた。吸入摂取による線量は世界平均の2倍程度、経口摂取による線量は2倍から7倍程度であった。

研究成果の概要(英文)：Since there are so many mineral resources in Africa, special attention is being paid by the world. Uranium mines there produce uranium ores as the nuclear fuel material. Those miners are exposed to radiation risks, so that sufficient management has to be done for them. In addition, it will be possible for residents around such mines to be exposed to enhanced natural radiation. In this study, therefore, a natural radiation exposure survey was carried out for them living around the mines in Cameroon, whose data have not yet been published. External and internal exposure were investigated. For the external exposure, a car-borne survey was carried out in two areas, i.e., Poli and Lolodorf. Their region distribution could be obtained. On the other hand, the inhalation radiation dose was two times as high as the worldwide average whereas the ingestion dose ranged from two to seven times, compared to the worldwide value.

研究分野：保健物理学

キーワード：放射線被ばく 線量評価

### 1. 研究開始当初の背景

近年、世界はアフリカ大陸の天然資源に注目している。アフリカにはいまだ採掘されていない地下資源が豊富にあると言われている。急速な産業発展に伴うレアメタルの需要増加やエネルギー問題により、アフリカ大陸では地下資源（ウランや希土類金属）の再開発が急速に加速している。中央アフリカに位置するカメルーンでは、ポリとロロドフの2つの地域にウラン鉱床があることが知られており（図1）、その中でも Kintogo-Poli には酸化ウラン ( $U_3O_8$ ) として約 13000t の埋蔵量（0.1%品位として）があると考えられている。このウラン鉱床周辺では、その他の地域に比べて比較的放射線量が高い可能性があるが、これまでに詳細な調査等は行われていない。この地域の自然放射線量と住民が受ける被ばくの実態について明らかにすること、地下資源採掘作業従事者の作業被ばくの実態を明らかにすることは、今後の地下資源探査・開発のためにも重要である。

Saidou らは、ウラン鉱床が分布する地域において、住居内ラドン濃度の予備的調査を行い、Kitongo-Poli では  $30\text{-}2200\text{ Bq/m}^3$ （算術平均値： $294\text{ Bq/m}^3$ ）、Lolodorf では  $24\text{-}4400\text{ Bq/m}^3$ （算術平均値： $735\text{ Bq/m}^3$ ）であることが明らかとなった。この値は極めて高く、健康影響は無視できないレベルにあることから詳細な調査が必要である。

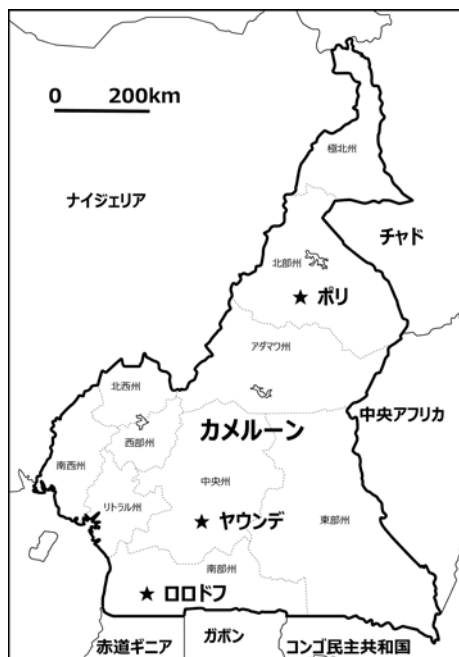


図1 ウラン鉱床のあるポリ地域およびロロドフ地域の位置関係

### 2. 研究の目的

2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故がもたらした一般公衆の最大の不安は、低線量の放射線被ばくが人体にどの程度影響を及ぼすかである。特に福島に在住する人にとっては、一般公衆に対する線量限度であ

る年間  $1\text{ mSv}$  を超えると人体に影響を及ぼすだろうと考えている。これに対して自然放射線源による被ばくを考えると、世界平均で年間あたり  $2.4\text{ mSv}$  であるが、その半分はラドンの吸入による内部被ばくである。一般公衆は無意識に低線量率の長期間にわたる被ばくを受けていることになる。本研究ではラドンに着目し、予備調査において比較的高いラドン濃度が認められたカメルーンのウラン鉱床地域において、トロンを弁別しながら測定することにより、正確な屋内ラドン濃度を測定・評価する。トロンは半減期がラドンに比べて非常に短いために、家屋の床下から侵入する可能性は低い。屋内の建材がトロンの発生源となりうる。

アフリカ大陸初となる本格的なラドン・トロン調査に加え、*in-situ* 測定による環境放射線量調査を実施し、外部被ばくの実態を明らかにし、内部・外部被ばくの実態を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 ロロドフ地域における屋内ラドン・トロンの調査方法

##### 1) 調査対象地域

カメルーンの南西部にあるロロドフ地域において、パッシブ型ラドン・トロン弁別モニタを用いた屋内ラドン・トロン濃度の調査を実施した。ロロドフ地域にはウラン鉱床が存在し、その地域を調査対象とした。この地域の平均気温は、 $25\text{-}26^\circ\text{C}$  で、年2回の雨季と2回の乾期がある。雨季は、9月から11月までと3月から6月までの期間で、これは大西洋から吹く熱帯海洋性気団によって引き起こされる。一方、乾期は、12月から2月までと7月から8月までの期間で、これはサハラ砂漠から吹く熱帯大陸気団によってもたらされる。年間降水量は  $1500\text{-}2000\text{ mm}$  で年間を通じて相対湿度は  $70\text{-}80\%$  程度である。調査地域の土壌型は大きく分けて2種類で、ferralitic 土壌（赤褐色土壌及び赤黄色土壌）と水成土である。

##### 2) パッシブ型ラドン・トロン弁別測定器の概要

ラドン濃度の測定には、研究代表者らが開発したパッシブ型ラドン・トロン弁別モニタ（以下、RADUET、図2）を用いた。RADUETの大きさは、縦  $6\text{ cm}$ 、横  $11\text{ cm}$ 、高さ  $3\text{ cm}$  程度で内容積が約  $30\text{ cm}^3$  と小型である。容器はプラスチック製であり、蓋が容易に外れることなく頑丈であるため多くの国や地域の大規模な調査に用いられている。RADUETは、換気率の異なる2つ容器（一つは低換気率であり、もう一つは高換気率である）を持ち、それぞれの容器の底にCR-39が1枚ずつ張り付けられている。家屋内のラドンは拡散し、容器と蓋の隙を通過して容器内に侵入する。ただし、この隙は肉眼では認められない程度である。一方、トロンの半減期は  $55.6$  秒とラドンの半減期（ $3.824$  日）と比べて非常に短

いため、容器内には殆ど侵入しない。したがって、低換気率容器内の CR-39 ではほとんどがラドンによる  $\alpha$  線を検出することになる。一方、高換気率容器には側壁に直径 6 mm の穴が等間隔に 6 つ開けられているためラドンとトロンは容易に容器内に侵入し、それらから放出する  $\alpha$  線は CR-39 の表面にトラックを形成する。さらに、高換気率容器の内壁には導電性スポンジが設置されており、塵やゴミが容器内に侵入しないように工夫されているとともに内外壁の電荷を同一に保っている。本調査では、RADUET を 70 家屋に 2 か月間設置した。壁から発生するトロンは空間分布を持つことが報告されているため、設置場所は壁から 20 cm 程度離し、床からは 1~2 m 離して設置した。同時、屋内外の空間線量率をサーベイメータ (Graetz X5 DE, Germany) で測定した。

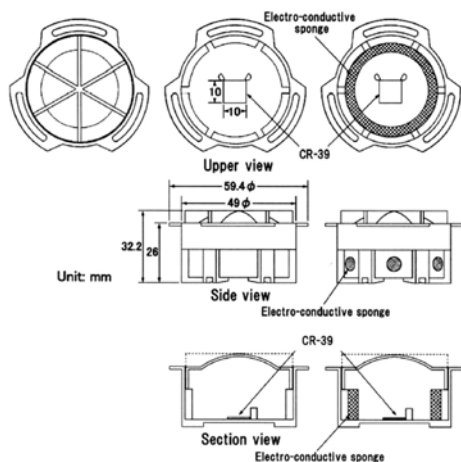


図 1 RADUET の概観

### 3) エッチング処理及びエッチピットの読み取り

曝露後の CR-39 は 90°C の 6.25 M NaOH 溶液に 6 時間浸し、化学エッチングを行った。エッチング後の CR-39 は専用の読み取り装置を用いて CR-39 に形成されたトラック密度を評価した。得られたトラック密度からラドン及びトロン濃度の算出は(1)式より行った。

$$\begin{aligned} N_L &= X_{Rn} \cdot CF_{Rn1} \cdot T + X_{Tn} \cdot CF_{Tn1} \cdot T + B \\ N_H &= X_{Rn} \cdot CF_{Rn2} \cdot T + X_{Tn} \cdot CF_{Tn2} \cdot T + B \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $N_L$  は低換気率容器のトラック密度 ( $\text{tracks mm}^{-2}$ )、 $N_H$  は高換気率容器のトラック密度 ( $\text{tracks mm}^{-2}$ )、 $X_{Rn}$  はラドン濃度 ( $\text{Bq m}^{-3}$ )、 $X_{Tn}$  はトロン濃度 ( $\text{Bq m}^{-3}$ )、 $CF_{Rn1}$  は低換気率容器のラドンの換算係数 ( $\text{tracks mm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$ )、 $CF_{Tn1}$  は低換気率容器のトロンの換算係数 ( $\text{tracks mm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$ )、 $CF_{Rn2}$  は高換気率容器のラドンの換算係数 ( $\text{tracks mm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$ )、 $CF_{Tn2}$  は高換気率容器のトロンの換算係数 ( $\text{tracks mm}^{-2} (\text{kBq m}^{-3} \text{ h})^{-1}$ ) である。

### 4) ラドン・トロンの吸入摂取による内部被ばく線量評価方法

ラドン及びトロンの吸入摂取による内部被ばく線量  $E$  は(2)式により評価した。

$$E = [(C \cdot F_{eq} \cdot CF)_{Rn} + (C \cdot F_{eq} \cdot CF)_{Tn}] \cdot F_{occ} \cdot t \quad (2)$$

ここで、 $C$  はラドン及びトロン濃度の中央値、 $F_{eq}$  はラドン及びトロンの平衡係数 (ラドン: 0.4、トロン: 0.02 とした)、 $CF$  は線量換算係数 (ラドン:  $9 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$ 、トロン:  $40 \text{ nSv}/(\text{Bq h m}^{-3})$ )、 $F_{occ}$  は所在係数で 0.6 とした。また、 $t$  は屋内の滞在時間である。

### 3.2 ポリ地域とロロドフ地域における表層土壌及び食物試料中の天然放射性核種濃度の調査方法

#### 1) 調査対象試料

ポリ地域のウラン鉱床周辺から、表層土壌試料を 20 地点から採取し、食物試料としてトウモロコシ粉、ピーナツペースト、牛肉、バオバブの葉、豆を収集し分析対象とした。

ロロドフ地域のウラン・トリウム鉱床周辺から、表層土壌試料を 15 地点から採取し、食物試料として料理用バナナ、ピーナツ、キャッサバの葉と根、タロイモを収集し分析対象とした。

#### 2) 試料の分析方法

ポリ地域及びロロドフ地域で採取した土壌及び食事試料中の  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ )、 $^{228}\text{Ra}$  ( $^{232}\text{Th}$ ) 及び  $^{40}\text{K}$  濃度は高純度 Ge 半導体検出器を用いた  $\gamma$  線スペクトロメトリーによって評価した。さらに、ポリ地域で採取した食事試料中の  $^{210}\text{Pb}$  及び  $^{210}\text{Po}$  はプレーナ型シリコン半導体検出器を用いた  $\alpha$  線スペクトロメトリーによって評価した。

### 3.3 自動車走行サーベイによる空気吸収線量率の分布の取得方法

自然放射線の実態を把握することを目的に、自動車に放射線測定器を搭載して、走行しながら放射線量を計測する手法である走行サーベイをポリ地域および首都であるヤウンデ市内において実施した。

走行サーベイには 3 インチの NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータ (EMF-211, EMF-Japan) を使い、30 秒間隔で車内の計数値を得た。車内で得られる計数値から屋外の地表面から 1 m の高さにおける空気吸収線量率に換算する必要がある。そこで本調査では、計数率から空気吸収線量率への換算係数と自動車の車体による  $\gamma$  線の遮蔽係数を評価した。

計数率から空気吸収線量率への換算係数を評価するために、地表面から 1 m の高さに NaI(Tl) シンチレーションスペクトロメータを設置し、15 分間の計測を行うことで  $\gamma$  線波高分布を得た。測定はポリ地域及びヤウンデ市内の 19 カ所で行った。得られた  $\gamma$  線波高分布は 22 行  $\times$  22 行の応答行列によりアンフォーリングし、空気吸収線量率を評価した。自動車の車体による  $\gamma$  線の遮蔽係数の評価

は、ポリ地域およびヤウンデ市内の9地点において、車内と車外で計数値とそれぞれ30秒間隔で2分間測定した（それぞれで4データずつ取得）。車内と車外の計数率の算術平均値を求めそれぞれの値をグラフにプロットすることで、その回帰式を求め、その傾きを遮蔽係数とした。

なお、高自然放射線地域との比較のため、ヤウンデ市内においても走行サーベイを実施した。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 ロロドフ地域における屋内ラドン・トロン濃度と線量評価

有意なラドン及びトロン濃度は、それぞれ70家屋及び43家屋において得られた。ラドン濃度の算術平均値±標準不確かさ、幾何平均値及び中央値は、それぞれ $96 \pm 4 \text{ Bq/m}^3$ 、 $77 \text{ Bq/m}^3$ 及び $71 \text{ Bq/m}^3$ であった。一方、ラドン濃度の算術平均値±標準不確かさ、幾何平均値及び中央値は、それぞれ $251 \pm 18 \text{ Bq/m}^3$ 、 $211 \text{ Bq/m}^3$ 及び $237 \text{ Bq/m}^3$ であった。図2及び図3に示すように屋内ラドン及びトロン濃度は対数正規分布を示した。

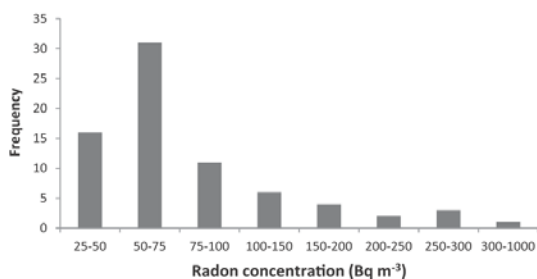


図2 ロロドフ地域における屋内ラドン濃度の分布

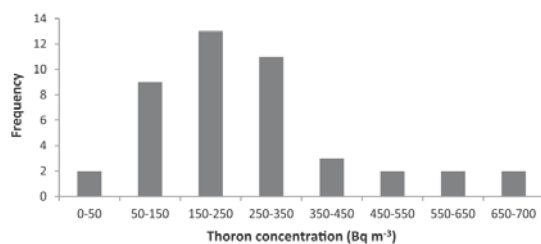


図3 ロロドフ地域における屋内トロン濃度の分布

国際放射線防護委員会（ICRP）では、屋内ラドン濃度の参考レベルとして $300 \text{ Bq/m}^3$ を報告している。本調査を実施した家屋の2%以下程度がICRPの参考レベルを超えていた。ラドン・トロンの発生源は床材と建材の両者であるが、この地域の家屋の建材殆どが地元の土壌を使用している（図4）。

図5に屋内ラドン及びトロン濃度と空間線量率との関係を示す。両者の間には顕著な相関関係は認められなかったものの、空間線量率が最大値（ $1800 \text{ nSv/h}$ ）を示した家屋のラドン及びトロン濃度はそれぞれ最大値を示

し、 $937 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$ 及び $700 \pm 128 \text{ Bq m}^3$ であった。



図4 ロロドフの家屋例

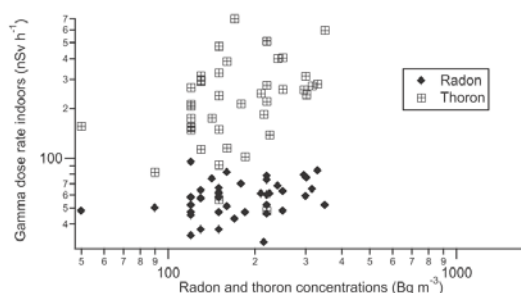


図5 屋内ラドン及びトロン濃度と空間線量率との関係

ラドン及びトロンの吸入摂取にともなう内部被ばく線量は、それぞれ $0.6\text{-}17.7 \text{ mSv/y}$ 及び $0.2\text{-}3 \text{ mSv/y}$ であった。また、算術平均値は、それぞれ $1.4 \text{ mSv/y}$ 及び $1 \text{ mSv/y}$ であった。ここで、吸入摂取による線内部被ばく線量に対するトロンの寄与は15-79%であり、算術平均値でも47%であった。したがって、ウラン鉱床のあるロロドフ地域では、ラドンだけでなく、トロンによる被ばくは無視できない。

##### 4.2 ポリ地域とロロドフ地域における土壌及び食物試料中の天然放射性核種濃度

ポリ地域とロロドフ地域で得られた表層土壌中の天然放射性核種濃度（ $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 及び $^{40}\text{K}$ ）を表1に示す。さらに、この表中には原子放射線に関する国連科学委員会の報告書で示されているそれぞれの天然放射性核種濃度の世界平均値と幅を示す。ポリ地域で採取された土壌中の天然放射性核種濃度はいずれも世界平均値と比べて低かった。これは、ウランは大分深いところに堆積していることが示唆された。一方、ロロドフ地域で採取された土壌中の天然放射性核種濃度の平均値は世界平均値と比べて高かった。 $^{238}\text{U}$ 濃度が $270 \text{ Bq/kg}$ と最大値を示した地点の $^{232}\text{Th}$ 濃度は $700 \text{ Bq/kg}$ と最大値を示した。したがって、ロロドフ地域のウラン・トリウム鉱床周辺の土壌には比較的表層に近い浅い場所にウランやトリウムが堆積している可能性が示唆された。

表 1 ポリ地域とロロドフ地域で採取した表層土壌中の天然放射性核種濃度

Study area	Radionuclide	Mean activity (Bq kg <sup>-1</sup> )	Range (Bq kg <sup>-1</sup> )
Poli	<sup>238</sup> U	23.6	12.4 - 57
	<sup>232</sup> Th	28	14.6 - 58
	<sup>40</sup> K	506	112 - 1124
Lolodorf	<sup>238</sup> U	130	60 - 270
	<sup>232</sup> Th	390	100 - 700
	<sup>40</sup> K	850	370 - 1530
World(UNSCEAR)	<sup>238</sup> U	33	16 - 110
	<sup>232</sup> Th	45	11 - 64
	<sup>40</sup> K	420	140 - 850

ポリ地域とロロドフ地域で得られた食事試料中の天然放射性核種濃度を表 2 に示す。ロロドフ地域ではα線スペクトロメトリーによる放射能分析をしていないので、高純度Ge半導体検出器によるγ線スペクトロメトリーの結果のみを示す。ポリ地域で採取されたバオバブの葉から最大の<sup>210</sup>Pb及び<sup>210</sup>Po濃度(それぞれ28 Bq/kg及び30 Bq/kg)が検出された。<sup>210</sup>Pbや<sup>210</sup>Poはラドンの子孫核種である。ポリ地域のウラン鉱床周辺の大気中に存在する比較的高濃度のラドンの子孫核種が大気降下物として葉の表面に沈着したと考えられる。

表 2 ポリ地域とロロドフ地域で収集された食事試料中の天然放射性核種濃度

Study area	Radionuclide	Activity concentration range (Bq kg <sup>-1</sup> )
Poli	<sup>226</sup> Ra	0.04 - 2.3
	<sup>210</sup> Pb	1.9 - 29.7
	<sup>210</sup> Po	0.24 - 28
	<sup>40</sup> K	94 - 677
Lolodorf	<sup>226</sup> Ra	0.04 - 11
	<sup>228</sup> Ra	0.2 - 13
	<sup>40</sup> K	48 - 234

いくつかの食事試料中に比較的高い<sup>40</sup>K濃度が検出されたが、人体中に経口摂取で取り込まれても、ホメオスタシス(恒常性)によって一定に保たれるため、<sup>40</sup>Kによる被ばく影響は無視できる。

ポリ地域及びロロドフ地域で得られた食事試料の経口摂取にともなう内部被ばく線量は、それぞれ2.2 mSv/y及び0.7 mSv/yであり、原子放射線の国連科学委員会によって報告された世界平均値(0.3 mSv/y)と比べて高かった。

#### 4.3 ポリ地域における自然放射線分布

図 6 に本調査で用いた検出器における計数率と空気吸収線量の関係について示す。ここでは、両者の関係から換算係数  $1.7 \times 10^{-3}$  (nGy/h<sup>1</sup>/cpm) が得られた。

また、本調査でも用いた自動車(ランドクルーザー、TOYOTA)の車体遮蔽係数は1.46であった(図 7)。したがって、車内において30秒間隔で得られた計数率を2倍し、1分間当たりの計数值(cpm)とし、その値に  $1.7 \times 10^{-3}$  を乗じることで車内の空気吸収線量率に換算できる。さらに、車内の空気吸収線量率

に1.46を乗じることで地表面から1mの高さにおける屋外での空気吸収線量率に換算される。車内計数率  $N_{in}$  から屋外の地表面から1mの高さにおける空気吸収線量率  $D$  は(3)式から求められる。

$$D = 2N_{in} \times 1.7 \times 10^{-3} \times 1.46 \text{ (nGy/h)} \quad (3)$$

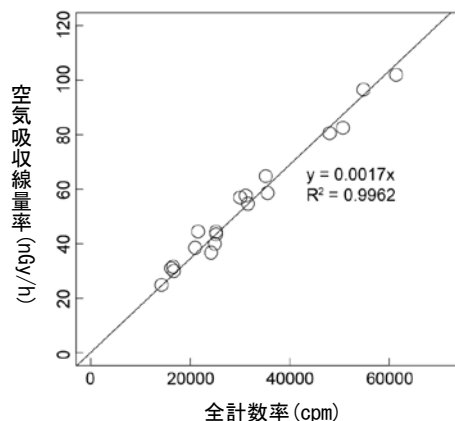


図 6 全計数率と空気吸収線量率との関係

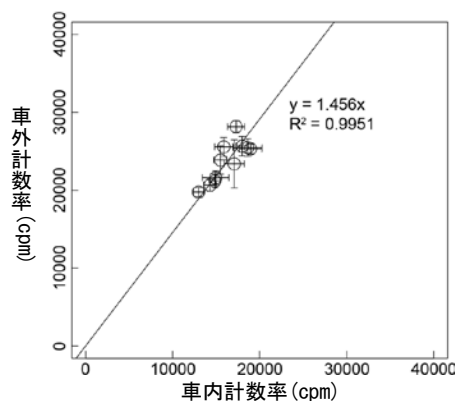


図 7 車内と車外における計数率の比較



図 8 ポリ地域の空気吸収線量率分布

走行サーベイにより得られたポリ地域の空気吸収線量率分布を図 8 に示す。空気吸収線量率 ( $n = 1010$ ) は、12-107 nGy/h の範囲であり、算術平均値 ± 標準偏差は  $30 \pm 6$  nGy/h (中央値: 26 nGy/h) であった。同様に実施したヤウンデ市内における空気吸収線量率 ( $n = 160$ ) は 26-46 nGy/h の範囲であり、算術平均値 ± 標準偏差は  $39 \pm 4$  nGy/h (中央値: 38 nGy/h) であった。最大値としては80

リ地域で 2 倍程度高い傾向にあったものの、突出した高線量地域は認められなかった。一方、*in-situ* ガンマ線波高分析により得られた  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  および  $^{232}\text{Th}$  濃度はそれぞれ 115-777 Bq/kg, 13-52 Bq/kg, 10-67 Bq/kg の範囲であり、空気吸収線量率は 25-102 nGy/h の範囲であった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1) Saidou, Shinji Tokonami, Mirosław Janik, Bineng Guillaume Samuel, Abdourahimi, Ndjana Nkoulou II Joseph Emmanuel, Radon-thoron discriminative measurements in the high natural radiation areas of southwestern Cameroon, *Journal of Environmental Radioactivity*, 150, 242-246 (2015) 査読有
- 2) Saidou, Ele Abiama Patrice, Shinji Tokonami, Comparative study of natural radiation exposure to the public in three uranium and oil regions of Cameroon, *Radioprotection*, 1-7 (2015) DOI: 10.1051/radiopro/2015017 査読有
- 3) Saidou, Shinji Tokonami, Ele Abiama Patrice, Matural radiation survey in the uranium and thorium bearing regions of Cameroon, *Radiation Environment and Medicine*, 5, 53-58 (2016) 査読有
- 4) 赤田尚史, 細田正洋, 床次眞司, アフリカ・カメルーンにおける自然放射線被ばく調査, *保健物理*, 51, 269-272 (2016) 査読有

[学会発表] (計 2 件)

- 1) 赤田尚史, Saidou, 岩岡和輝, 細田正洋, 城間吉貴, 床次眞司, カメルーン・ポリ地域における自然放射線調査, *日本保健物理学会第49回研究発表会*, 弘前, 2016年6月.
- 2) Saidou et al., Car-borne survey in the uranium bearing region of Poli, Cameroon: Comparison between in-situ and laboratory measurement and external radiation dose rate, *8<sup>th</sup> International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material-NORM VIII*, Rio de Janeiro, October 2016.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
床次眞司 (Tokonami, Shinji)  
弘前大学・被ばく医療総合研究所・教授  
研究者番号：80247254

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者

古川雅英 (Furukawa, Masahide)  
石川徹夫 (Ishikawa, Tetsuo)  
赤田尚史 (Akata, Naofumi)  
秋葉澄伯 (Akiba, Suminori)  
Saidou (Saidou)