理科教材としての環境放射線測定

樋之口　仁*・木下　紀正**

（1995年10月16日　受理）

Measurement of Environmental Radiation Exposure as Teaching Material for Science Education

Hitoshi HINOKUCHI and Kisei KINOSHITA

Physics Department, Faculty of Education, Kagoshima University

Abstract

A brief review of researches on environmental radiation surveys as teaching material is given, including several researches of environmental radiation survey on health physics. Methods of radiation survey, several aspects of environmental radiation field and the usefulness of the survey in science education are discussed. Environmental radiation survey as teaching material is expected to make fair concepts of radiation and radioactivity without unscientific and excessive fear.

Keywords: Environmental radiation survey, Radiation exposure, Nuclear energy education

1　は　じ　め　に

原子力の平和利用を原子力基本法にうたっている我が国にとって原子力についての教育は重要なことであり，原子力発電所が立地する本県において特に適切な教育が望まれる。しかし，1990年の科学技術庁の世論調査[1]にみられるように原子力発電を安全と感じている国民は41.2％，こわいと感じている国民は97.7％である。このこわさの一番の原因は，表1，2の総理府が行った「原子力に関する世論調査」[2]（1990年）からわかるとおり，放射線，放射能についての不安である。したがって，原子力教育にとって，放射線や放射能を正しく理解させることは重要である。

* 鹿児島大学教育学部物理学教室（鹿児島県立松陽高等学校勤務）
** 鹿児島大学教育学部物理学教室

表1　原子力に対する不安の原因[2)]

	%
①放射線（能）が人体や子孫に与える影響	43
②事故や故障による放射線（能）漏れ	39
③放射性廃棄物の管理や処理・処分	39
④事故や故障などの状況をよく知らされない	31
⑤放射線（能）は目に見えない	28

表2　原子力について知りたいこと[2)]

	%
①放射線（能）の人体や環境への影響	48
②放射性廃棄物の処理処分の方策	43
③原子力発電所の安全対策	43
④原子力発電所の故障トラブルの状況	31
⑤原子力発電所の必要性	25

しかし，初等・中等教育の中で，現行の文部省指導要領[3~4)]，指導書[5~7)]や教科書から，原子力関連分野の教育内容をみると，次のような3つの問題点がある。

①小学校から高校までの初等・中等教育において，「放射線」「放射能」を必修として社会科では扱う機会があるが，必修として理科で扱う機会がないこと。なお理科では高校で初登場するが，物理，総合理科などの選択科目で扱うことになっている。

②小・中学校の義務教育に限ると，原子力に関する用語は，理科の教科書には資源とエネルギーの所だけしかない。一方，社会科の教科書には歴史と公民の分野で必ず扱われ，しかも「放射線」「放射能」「被ばく」といった言葉が核兵器や被ばく地の悲惨さといった軍事利用に関連した所に記述されており，発電，医療，農業，工業などに広く利用されている記述は，ほとんど見られないこと。

③資源とエネルギーについては中学地理だけでなく中学理科でも扱われているが，資源の枯渇に伴う代替エネルギーとして原子力の長所と短所を教えるにとどまる内容になっており，原子力の果たしている役割，その仕組みや安全対策について触れるように扱われていないこと。

そこで本研究では，放射線と放射能を正しく理解させる教材として，環境放射線測定に注目した。その理科教材として優れている点を次に挙げる。

①放射線は，核兵器に伴う特殊で危険なものという知識しか教えられていない生徒にとって，放射線，放射能を理解させる上で，我々は自然放射線に身近にさらされており，この様なレベルの低い線量の放射線について過度に恐がる必要がないものであるという概念形成にふさわしい実験になること。

②放射線源を購入することなく，安価で，簡単に生徒が実験できること。

③生徒実験の際の放射線防護の必要がないこと。

④ミクロな原子からのメッセージとして放射線をとらえると，1個1個の原子の存在を実感できる唯一の実験教材であること。このことはトレーサの働きを知ることにもつながる。

⑤地球上に存在するU，Th，Rn，Poなどの放射性元素の存在を実感できること。

⑥宇宙線や岩石，土壌からの放射線から，宇宙の起源や地球の誕生について展開できること。

⑦放射線の生物への影響について考えさせるバックグラウンドになること。

⑧環境放射線を空間放射線量として定量的に測りデータを蓄積すると，自然放射線の地域特性やその地方の被曝線量の把握につながり，環境放射線モニタリングの学術的基礎データになり得ること。

一方，環境放射線の教材化については，椿[8]，岡[9]，竹中[10]，八木[11]，大城[12]，杉[13]，筆者の１人（樋之口）[14] などの放射線メータ「はかるくん」やGM管を使った放射線量測定の報告がある。また，環境放射能の利用として矢野の陶芸用粘土[15]やモナズ石[16]の利用，東京都理化教育研究会物理専門委員会の乾燥昆布[17]の利用，金柿他[18]の環境ラドン測定など興味ある結果が報告されている。

ここでは，まず環境放射線測定の基礎として自然環境における放射線の分布と変動を２で概観し，３に環境放射線の測定法と留意点，４に筆者の１人（樋之口）の環境放射線測定データを中心に，他の研究のデータも参考にしながら，教材としての利用法について検討し，最後に５で環境放射線測定と原子力教育について考察する。

2　自然環境における放射線の分布と変動

2.1　概　　論

我々の周囲の環境は，多くの様々な放射線が存在している。これを線源で分類すると，宇宙から降りそそいでいる放射線（宇宙線）と，大地や地表付近の大気に含まれる放射性核種からの放射線の２つがある。大地の放射性核種は，主に土壌や岩石に含まれる酸化ウラン，酸化トリウムに含まれる ^{238}U，^{235}U，^{232}Th を出発物とするウラン，アクチニウム，トリウム系列の核種とカリウムの中に同位体として0.0117％含まれる ^{40}K である。

2.2　根元的な放射線源と巨視的な特徴

大地の放射線の源は約45億年前地球の形成期に取り込まれた，地球内部に含まれる放射性核種である。原始の地球が，次第に冷えて固体になるにつれて重力分離が進み，比較的軽い酸化ウラン，酸化トリウム，カリウムなどが地表近くに集中する。したがって古くから地殻を形成した大陸にはそれらが濃縮されている。一方，低濃度ながらマントルにも放射性核種が残され，地表へのわき出し口から海洋性地殻が新たに生成供給され続けている。したがって海洋底の放射性核種濃度は低い。このような地球の歴史に基づき，次のことがいえる[19]。

①一般に放射性核種濃度は大陸性の地質において高く，海洋性の地質において低い。

②古い地質ほど放射性核種濃度が高く，新しいものほど低い。

日本周辺の地質についていえば，朝鮮半島は完全に大陸性の地質を持ち，小笠原諸島は海洋性の地質をもつといえるが，本州島は両者の性格が混ざっている。東北関東などの東日本は海洋的であり，中国近畿などの西日本は大陸的である。したがって，日本の放射線量の分布は大まかに東日本が低く，西日本が高い西高東低の傾向がある（図１参照）。

2.3　直接の放射線源である土壌について

多くの場合，大地の放射線の直接の源は土壌である。土壌に含まれるウラン系列，トリウム系列，

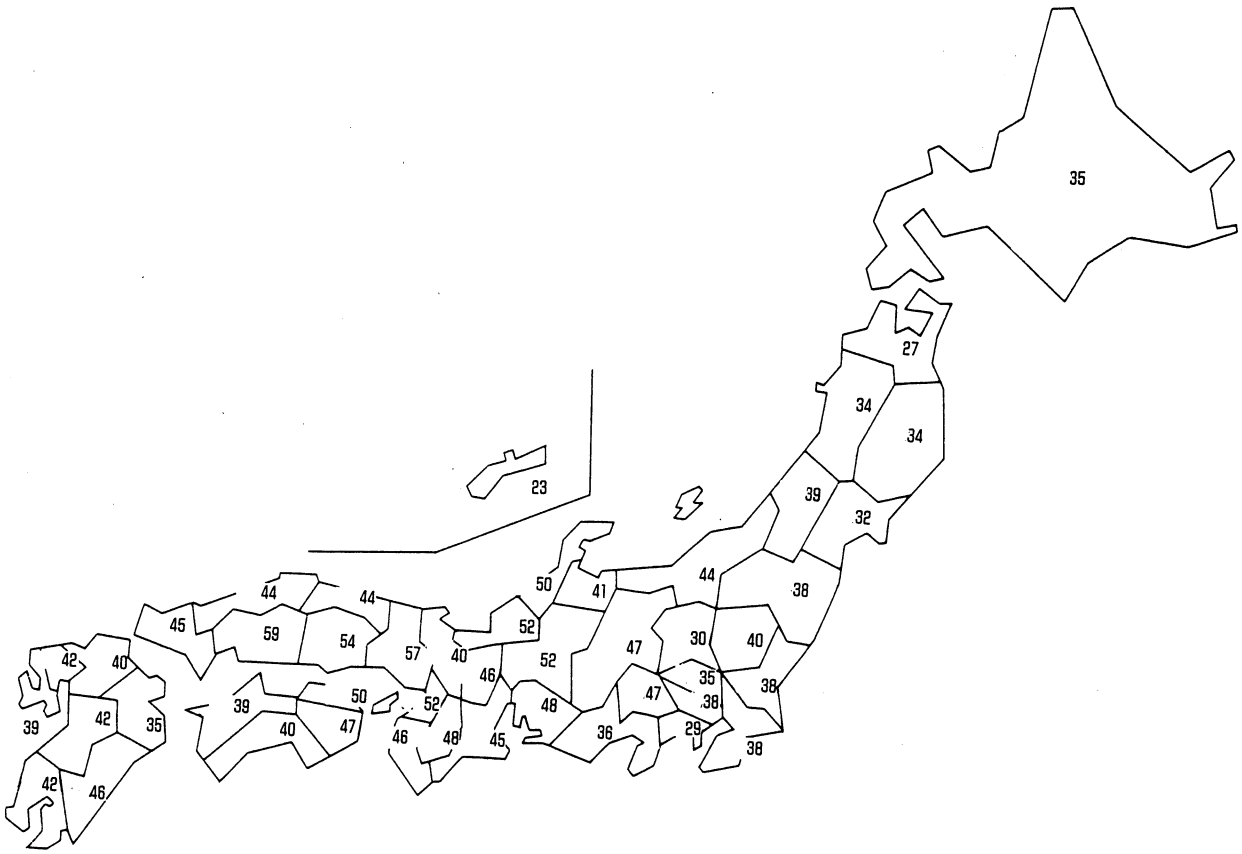


図1　屋外での放射線量率による測定値の都道府県別平均［nSv/h］[20]

カリウムなどが主な源である。中でも最大の寄与は^{40}Kからのものであり，それにウラン系列の^{214}Pb，^{214}Bi，トリウム系列の^{208}Tlからの放射線の放出が加わる。ここでカリウムは，ウラン，トリウム，ケイ素などとともに酸素と結合し易い親石元素であるため，いずれも似たところに集まる傾向にある。したがって，ケイ酸塩濃度が大きいほど，放射性核種濃度が大きい可能性が高い。

土壌からの放射線の放出は，深さにすると土柱重量でせいぜい50 g /cm^{2}程度までと推定されている。仮に土壌密度として最も広く用いられている1.6 g /cm^{2}という数値を取れば深さ30cm程度までということになる[19]。これは比較的浅い部分であるから，表面土壌に含まれる有機物の状態や農耕の有無，水分などによって放射線のレベルは大きく変動する。それだけ局地的なばらつきが大きい。

土壌の成因は複雑であるが，岩石の風化が大きな位置を占めていることは間違いないため，土壌の巨視的な特徴は母岩によって与えられると考えられる。

2．4　間接的な放射線源である岩石について

すべての岩石の母体となるのは火成岩である。各種の火成岩のケイ酸塩濃度を比べると，明らかにケイ酸塩濃度が高いほど，岩石に含まれる放射性核種濃度も高いことがわかる。（表3参照）

表3　岩石中に含まれる放射性核種濃度[21)]

岩石の種類		岩石中の放射性核種濃度（Bq/kg）		
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K
火成岩	酸性岩（花崗岩等）	59	81	1000
	中性岩（閃緑岩等）	23	33	700
	塩基性岩（玄武岩等）	11	11	240
	超塩基性岩（かんらん岩）	0.37	24	150
堆積岩	頁岩	32	44	700
	砂岩	19	11	370

最も濃度の高い火成岩は花崗岩であるが，これは大陸表面の50％を覆う大陸性の岩石である。逆に低い火成岩はかんらん岩や玄武岩である。したがって，一般に火山岩すなわち低濃度という関係が成立する。

岩石には火成岩の他に堆積岩や変成岩があるのだが，それらの性質は母岩たる火成岩の性質が反映される。また，一般に堆積岩の放射性核種濃度は火成岩より低い。

2．5　日本における大地起源の放射線源について

日本では火山灰に起源を持つ岩石土壌が多く，関東平野のような沖積平野は約10ｍを越す厚い火山灰土壌（関東ローム層）に覆われている。火山灰は玄武岩質の火山岩が砕かれたものと考えられ，その放射性核種濃度は低い。したがってそのような地域の空間放射線レベルも当然低い。

地質と放射線の関連を極めて簡単化していうと次のようになる。赤色の土壌は鉄分が多く，このような場所は概して放射線が低線量率である（小笠原諸島など）。また，黒色の火山岩は概して玄武岩質であって低線量率である（富士山麓の溶岩）。逆に白色のもろい岩石は花崗岩類の可能性が高く，高線量率の可能性が高い（瀬戸内地方にみられる山砂など）。花崗岩類はもろく風化を受け易いため，局地的なばらつきが見られる。

2．6　宇宙線について

宇宙線は，起源によって銀河宇宙線と太陽宇宙線に分けられる。銀河宇宙線は恒星の死にあたる超新星の爆発に伴って加速された粒子群といわれ，銀河の中ではほぼ均一にかき混ぜられている。その約90％は陽子であり，６％がHe原子核（α粒子），１％がもっと重い原子核で占められる。宇宙空間における銀河宇宙線の代表的な運動エネルギーはGeVからTeVの範囲にある。一方，太陽宇宙線は，太陽表面の間欠的な爆発に伴って発生するもので，その代表的な運動エネルギーは，MeVのオーダーである。しかし，地表での線量として問題になるほとんどの場合は銀河に起源を持つ宇宙線の方である。いずれの起源であるかを問わず，これらを１次宇宙線とよぶ。大気圏の頂上（約1,000kmの高さ）における１次宇宙線の線束密度は約１/cm^2/sであり，その角度分布はほぼ

等方的である。1次宇宙線のほとんどは荷電粒子であるため，地球磁場の影響を受けて突入路が曲げられて，高緯度ほど宇宙線強度が強い緯度効果がある。

1 GeV 以上のエネルギーをもつ1次宇宙線が大気に侵入すると，空気の原子や分子をイオン化するだけでなく，その原子核と衝突してπ中間子などの2次粒子を多数発生し，2次粒子や生き残りの核子がなお十分高いエネルギーを持っていればさらに衝突を繰り返して孫粒子をつくり増加する。この過程を核子カスケードという。この際，多重発生したπ^0中間子は速やかに崩壊して2つの光子を生み，電子対生成・制動放射・コンプトン散乱を繰り返す電磁カスケードを発達させ，多くの電子成分をつくる。一方$\pi^{\pm}$やK中間子の崩壊は，μ粒子を多数つくる。μ粒子は中間子に比べ寿命が長いので，相対論的効果による寿命の延びもあって地上に到達する。また，強い相互作用もないので，地下深くまで貫通する。また一部のμ粒子は崩壊し電子とニュートリノ（ν_μ, $\overline{\nu_e}$）になる。先に述べた核子カスケードを軸にし，電磁カスケードやμ粒子の生成を伴う一連の現象を空気シャワーという。シャワー中のカスケード過程では，生じた光子による電子対生成と，生じた電子による制動放射，コンプトン散乱といった光子の生成が繰り返される複雑な機構が働いている。このような過程を経て，1次宇宙線の運動エネルギーは，数多くの2次粒子に分割されて粒子1個当たりの平均運動エネルギーは小さくなる。粒子の総数は海抜10～15km付近でピークになる。これらの粒子をまとめて2次宇宙線という。地表で観測される宇宙線のほとんどは2次宇宙線である。また，2次粒子発生に伴って^{14}C, ^{7}Be, ^{3}Hのような様々な核種が作られる。

宇宙線の計測には電離箱やシンチレーション・スペクトロメータが利用できるが，線束密度が小さいため，かなり大型のものでないと容易でない。大地起因のγ線のエネルギーの上限値が2.6 MeV 程度であり，逆に宇宙線にとってはその下限値に近いことを利用して，スペクトロメトリーでは通常3 MeV より大きい部分はすべて宇宙線であると仮定する。また，海面や湖水面にボートを浮かべ，大地の寄与を水で遮蔽する方法でも測定が行われる。日本における値は海面高度で約30nGy/h[22]程度である。

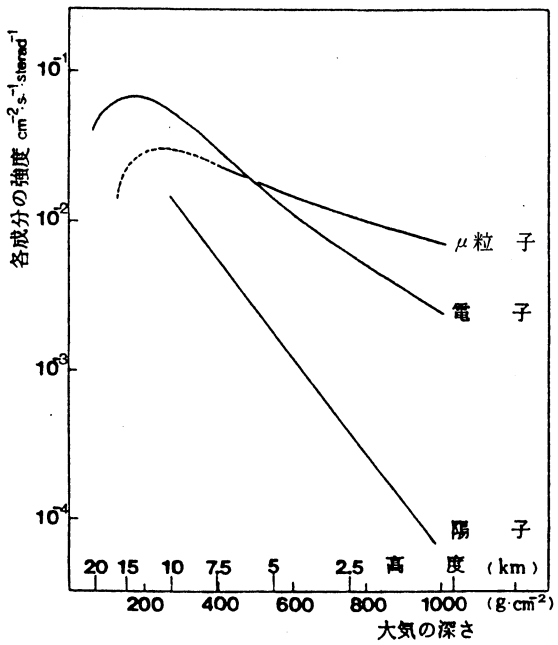


図2　宇宙線の各成分の高度変化[19]

多くの人が住む海抜5,000 m 以下の所で最も卓越する宇宙線成分はμ粒子である。以下，電子，陽子，中性子，π中間子の順になる。特に海面高度では全体の約80％はμ粒子，残りの20％が電子である。このため近似的に環境中の宇宙線はμ粒子によって記述できる。そのエネルギースペクトルは1 MeV～1 TeV に分布するが，大半は1 GeV 付近にある。したがって，μ粒子そのものと人体やその他の物質との相互作用は小

さい。直接に人体にとって有害なのはμ粒子に起因した電子の低エネルギー化したものと考えられる[19]。

3　環境放射線測定について

3．1　測定装置について

昨今の半導体技術の進歩により，安価で小型軽量の携帯型放射線計測器が多く開発されている。またガイガーカウンターキットが市販されており，自作もできる。さらに，科学技術庁と放射線計測協会が放射線メーター「はかるくん」を学校現場に無料で複数台貸し出しを行っているために予算の少ない小規模校でも生徒実験ができるようになっている。4に述べる測定に使用した放射線計測器は次の4つである。

掘場製「はかるくん」(DX-200)，アロカ製の半導体式ポケット線量計（PDM-101)，簡易型GM放射線カウンター，浜松フォトニクス製GM管（D4345）である。

「はかるくん」は，科学技術庁・財団法人放射線計測協会が無料で貸し出しているCsIシンチレーション検出器で，空間放射線量率を［nSv/h］単位で計る。測定時間は1分，測定エネルギー範囲は図3の実線部のようにウラン系列・トリウム系列や^{40}Kの出すγ線のレベルであるため，測定される放射線の大部分は地表からのγ線であり，宇宙線に対する感度は低い。

半導体式ポケット線量計は，個人の被曝線量測定用で表示が積算値である。シリコン半導体を利用するため，エネルギー依存性が低く，高エネルギーでも感度がよい，空間線量の測定も可能である。しかし，生徒実験用に数台そろえるには少々高価である。

簡易型GM放射線カウンターは，教育用に日本原子力研究所原子力総合研修センターが開発したもので，直径15㎜長さ40㎜の端窓型GM管（米国LND社製712型）を用い，相対感度は図3の破線のようになりβ，γ線，宇宙線が計測できる。環境放射線を測定する際は，腕時計の夜光塗料からのβ線への注意が必要である。

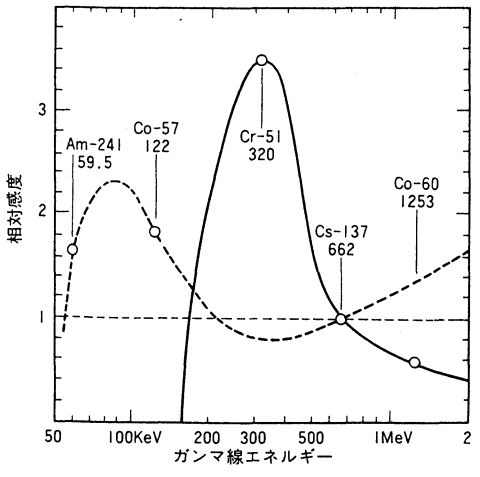


図3　「はかるくん」と「簡易型GM放射線カウンター」の1㎝線量当量に対する相対感度[13]

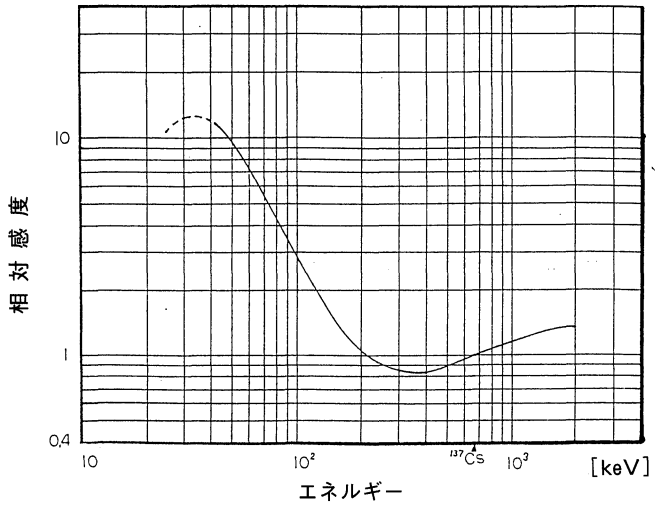


図4　浜松フォトニクス製GM管の相対感度

浜松フォトニクス製GM管は，直径24mm長さ200mmの大型GM管である。端窓型ではないので相対感度は図4のようになり，高エネルギーβ線，環境γ線，宇宙線が計測できる。

図3，4のように，GM管と「はかるくん」は放射線のエネルギーによって，相対感度が異なる。環境γ線に対しては「はかるくん」が優れているが，高エネルギーの宇宙線に対してはGM管が優れている。このことから，GM管計測器と「はかるくん」を併用しデータを検討することによって，環境放射線の中の環境γ線と宇宙線の量の変化がわかることが杉[13]によって報告されている。

3．2　環境放射線測定の留意点

環境放射線測定の留意点を次に挙げる。

①検出器によって放射線の測定するエネルギー範囲や放射線の種類が異なること。特に簡易型GM管や「はかるくん」のような簡易測定器には，精度や感度の限界があること。

②土壌からの放射線の主要な寄与は深さ30cm程度（50 g/cm²）までの表面土壌なので，表面の土壌に含まれる有機物の状態や農耕の有無，水分によって放射線レベルは局地的なばらつきが大きいこと（図5参照）。

③建造物からの放射線量の主要な寄与も土壌と図5のように，コンクリートの場合20cm，木材の場合80cm程度である。また，建造物によるビルトアップ効果がみられること。

④降雨，風速，大気安定度などの気象条件に伴う大気中のRn娘核種濃度の変動があること。

⑤大地起源の放射線について河川の増水，積雪による遮蔽効果がみられること。

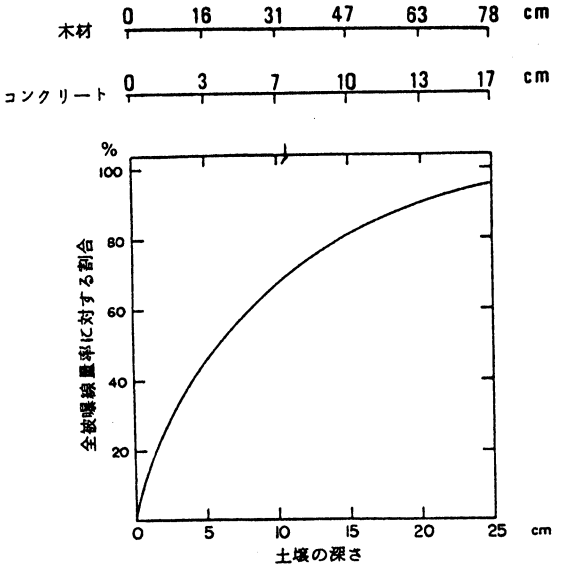


図5　土壌の深さ毎に計算した地上1mにおける全被曝線量率に対する天然放射性核種の相対寄与[19]

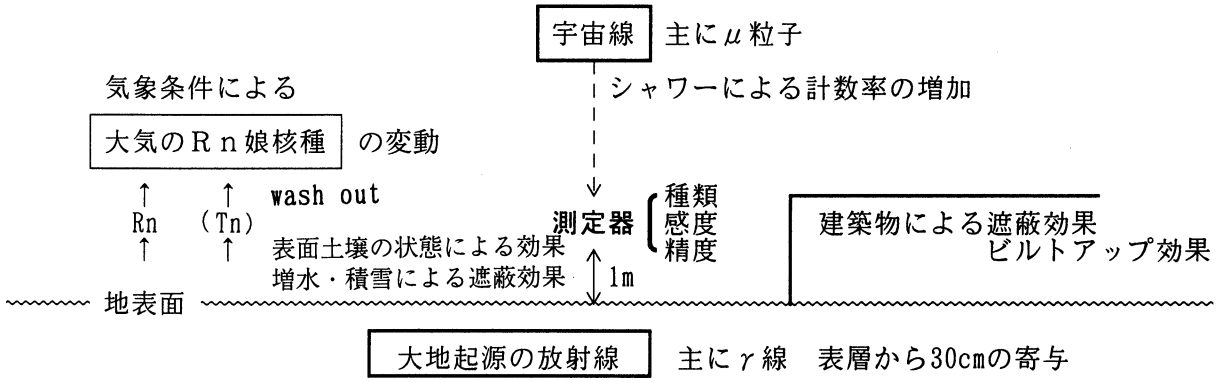


図6　地上1mにおける環境放射線測定の留意点

⑥宇宙線についてはシャワーによる計数率増加の問題が考えられること。

以上のことを元に地上１ｍでの環境放射線の測定の際の留意点を図６にまとめた。

4　様々な環境放射線の測定

4．1　大地からの放射線と宇宙からの放射線

図７は，大城が50ｍの鉄塔で測定したものである[12]。大地（放射線源）からの距離（高度）が増えるにつれて，放射線量が減ることがわかる。図８の旅客機での測定でも離陸直後から減少が見られ，離陸後２分ほどで最小値になる。「はかるくん」は図３のように，大地からγ線（以後大地γ線とよぶ）には感度が高いが，宇宙線の感度は低いので，高度に伴う大地γ線の減少は，大気による遮蔽効果と距離による効果が原因と考えられる。

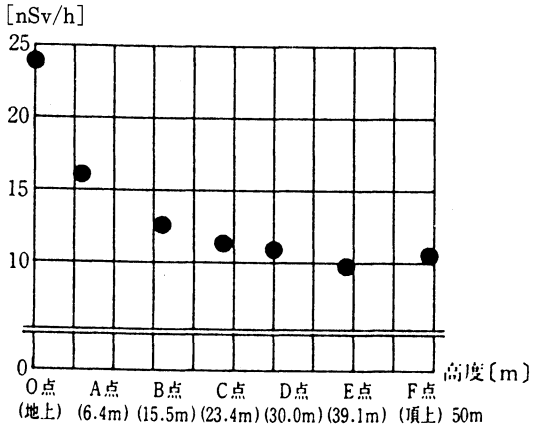


図７　大地からの放射線量率の高度依存性[12]
1991．8．7「はかるくん」による沖縄電力鉄塔

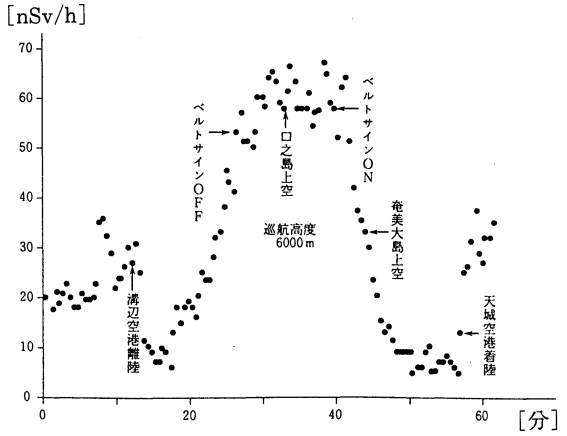


図８　旅客機座席での放射線量率[23]
1991．8．18　10：30～「はかるくん」による鹿児島→徳之島　JAS525便 M81機

図８，９から，杉[13]が報告したGM管と「はかるくん」の宇宙線への感度の違いが伺える（図３参照）。図８では，離陸して主に大地γ線である線量が減少し約２分後に最小値をとった後，高

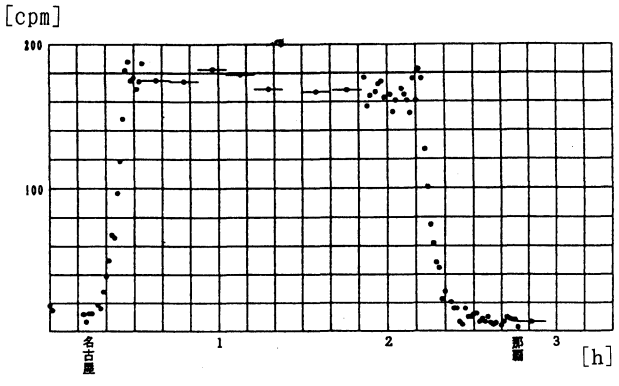


図９　旅客機座席での放射線量率[10]
測定器「簡易GM管」名古屋→沖縄

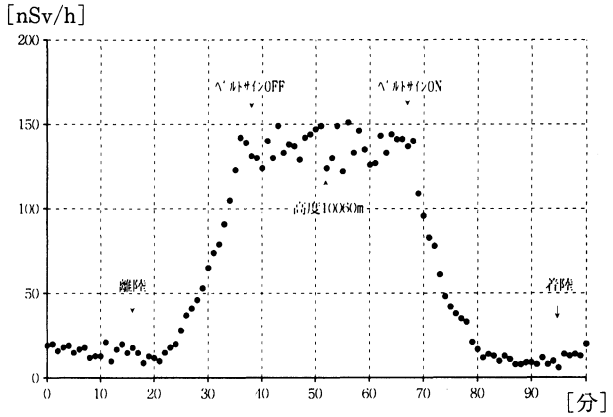


図10　旅客機座席での放射線量率
測定器「はかるくん」1992．3．20　鹿児島→羽田 ANA628便スーパージャンボ機

度が上がるにつれ宇宙線の影響をうけ線量が上がり，水平航行に移るとほぼ平衡した最大値をとり続ける。しかし，図9では最小値が見られない。これは「はかるくん」に比べ簡易型GM管では大地γ線の減少よりも宇宙線の高度による増加分の寄与が大きく働いたためと考えられる。また「はかるくん」でも図10の羽田空港着陸時のように最小値がはっきりしない場合がある。これは羽田空港のような埋め立て地の大地γ線が低いことが原因であろう。

1993年8月2日の旅客機による「はかるくん」とアロカ製PDM101との測定データから両測定器の宇宙線に対する感度を推定する。徳之島－鹿児島間の高度6,900m（水平飛行23分間）の積算値は，PDM101が130nSv,「はかるくん」の積算値は21.5nSv，したがってPDM101に比べ「はかるくん」は約16%の感度である。図11より6,900mでは約500nSv/hとなる。PDM101の値は340nSv/hなので機体による遮蔽・ビルトアップ効果などを無視すると，小型の検出器ながら検出感度は7割の感度になっている。一方,［はかるくん」は検出感度は約10%と推定される。

また，図9，10，11から，簡易型GM管と「はかるくん」の宇宙線に対する感度を推定できる。図9は10,700m，図10は10,060mであるが，図11よりいずれも1,500nGy/hぐらいになる。「はかるくん」の感度は約10%（9.3%）になる。それぞれの検出器での大地と高度10,000mの放射線量の比から,「はかるくん」に比べ，簡易型GM管の宇宙線に対する感度は約3倍と推測されるので，簡易型GM管の感度は，おおまかに30%ぐらいであろう。

このデータの測定は，宇宙線と大地からの放射線の存在，それらの放射線の高度効果について理解する上で定性的な非常によい教材になる。地球や宇宙環境の理解，航空機利用や宇宙開発などに伴う放射線防護の必要性を考えさせるなど様々な方向への発展も期待できる。

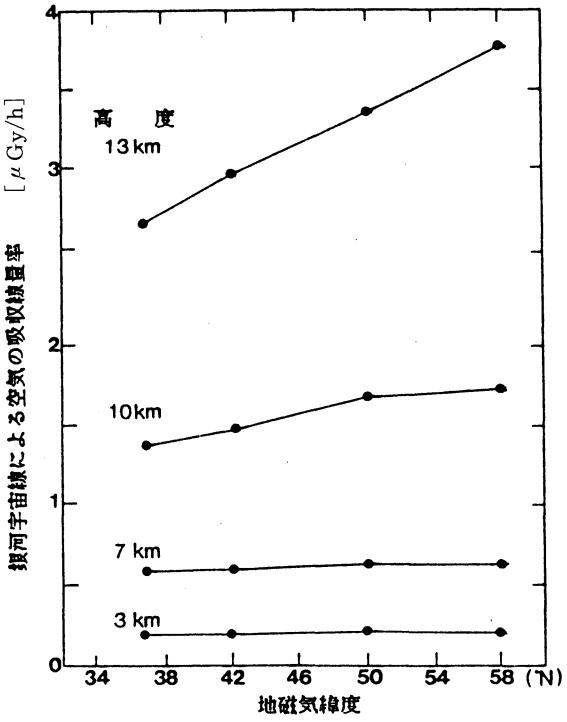


図11　宇宙線の地磁気緯度分布[19]

4．2　放射線の基本的性質であるランダム性と年間放射線当量の推定

図12，13は，筆者の1人（樋之口）が前任校でクラブの生徒と校庭での空間放射線量率の測定をした結果である。

図13からわかるとおり，線量率の度数分布はほぼ正規分布しており，平均22nSv/h，標準値差は3.5nSv/hであった。また，線量率の最高値は，6月7日の雨天時の29nSv/h，一方，最低値は6月16日の曇天時の17nSv/hであった。宇宙線による線量率を30nSv/h[22]とすると，「はかるくん」

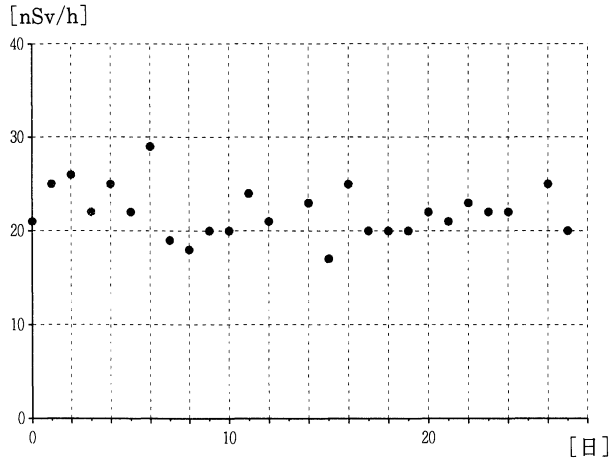


図12　1ヵ月の空間線量率の定点測定[24)]
測定器「はかるくん」1992．6．1 ～ 6．30の12時～13時に定時測定
鹿児島県大島郡伊仙町伊仙　徳之島農業高校校庭

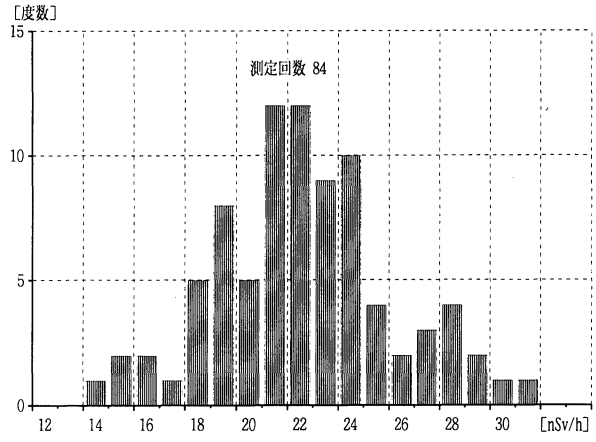


図13　1ヵ月の定点測定の度数分布[24)]

の宇宙線に対する感度は前述したように約10％なので，「はかるくん」の線量率に27nSv/h を加えることにする。したがって，鹿児島県大島郡伊仙町の校庭での，宇宙線を含めた平均的な自然放射線の線量率は49nSv/h となり，先に阿部らが行った全国平均値80nGy/h[22)]より39％ほど低い値であり，下薗らの行った鹿児島県本土の（甑島長島を含む）平均値73nGy/h[21)]より33％ほど低い値である。また校庭における年間の線量当量は，$(22+27)\times24\times365=4.29\times10^5$ (nSv)＝0.43mSv と推定される。

このように，空間放射線量率の定点測定は，放射線の基本的性質であるランダム性やその地域の自然放射線の年間線量当量を理解するよい教材になる。さらに，基本的に同様な調査を行う，原子力施設の監視のための環境モニタリングへの理解の一助になろう。

4．3　放射線測定を移動して行う方法

放射線測定器を移動して測定を行う方法は，広域的な環境放射線の情報を把握する手段としてきわめて一般的である。移動する手段としては，前述した航空機による測定方法（air-borne）や手に持って歩いて測定する方法だけでなく，車で移動しながら測定する方法（car-borne），さらにボートによって水上，水中の測定を行う方法，列車内での環境放射線の測定など，いろいろな移動手段がとられる。よく知られている広域移動測定には，航空機や自動車によるものがあり，ウランなどの天然放射性資源の探査，事故を含め原子力施設の監視に利用されている[25)]。

(1)　列車内での環境放射線の測定

図14，15のような列車内での環境放射線の測定は，岡野により先駆的研究が行われた。新幹線による測定も東海道・山陽，東北，上越と調べられ[26~29)]，日本原子力研究所による環境放射線の線量評価も幅広く行われている[30) 31)]。「はかるくん」による測定は，1990年に岡[9)]により報告されて以来，筆者の１人(樋之口)[14)]を含め多くの報告が全国理科教育大会などにみられる。

列車内での環境放射線測定の特徴としては，移動手段が列車まかせで，時間，場所についての選

択があらかじめ定められていることであり，次のような特徴がある[25]。

①軌道上のライン測定で，路線上の一定範囲の環境放射線情報に限られている。

②路線周辺における環境放射線強度の変動について再現性のよい測定ができ，経年的な変化，測定手段による違いなどの把握に役立つ。

③車輌内の測定位置により，測定値に違いがあり，あらかじめこの点の配慮が必要である。

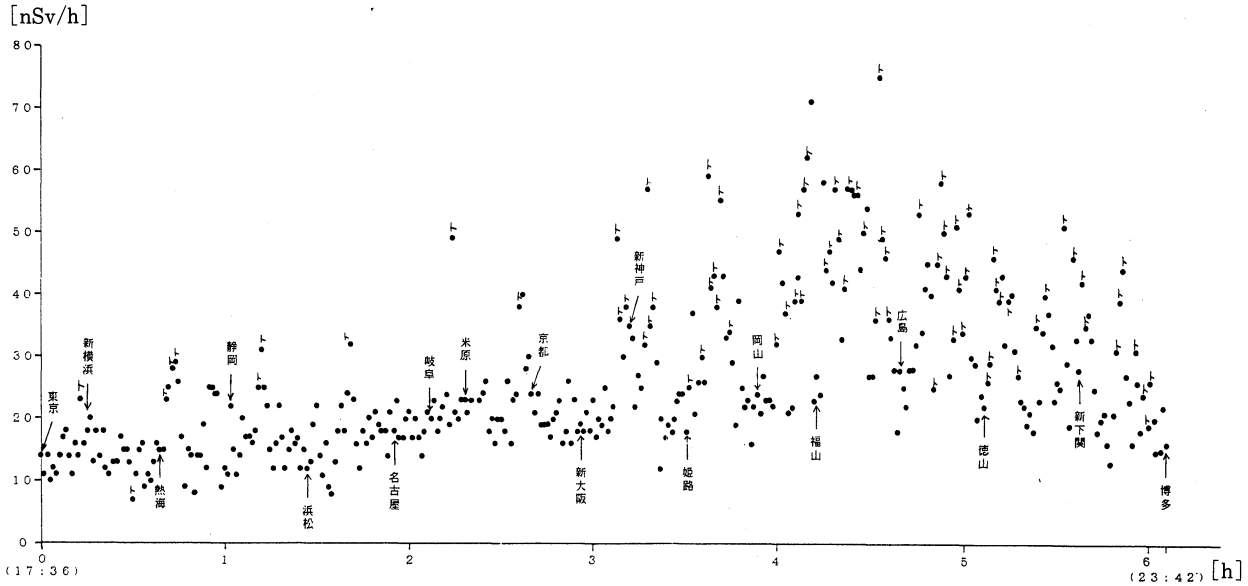


図14　列車内での環境放射線の測定[23]
東海道山陽本線　新幹線ひかり号座席にて　1990.8.24　17：36東京発→23：42博多着「はかるくん」による　図中のトはトンネルを示している。

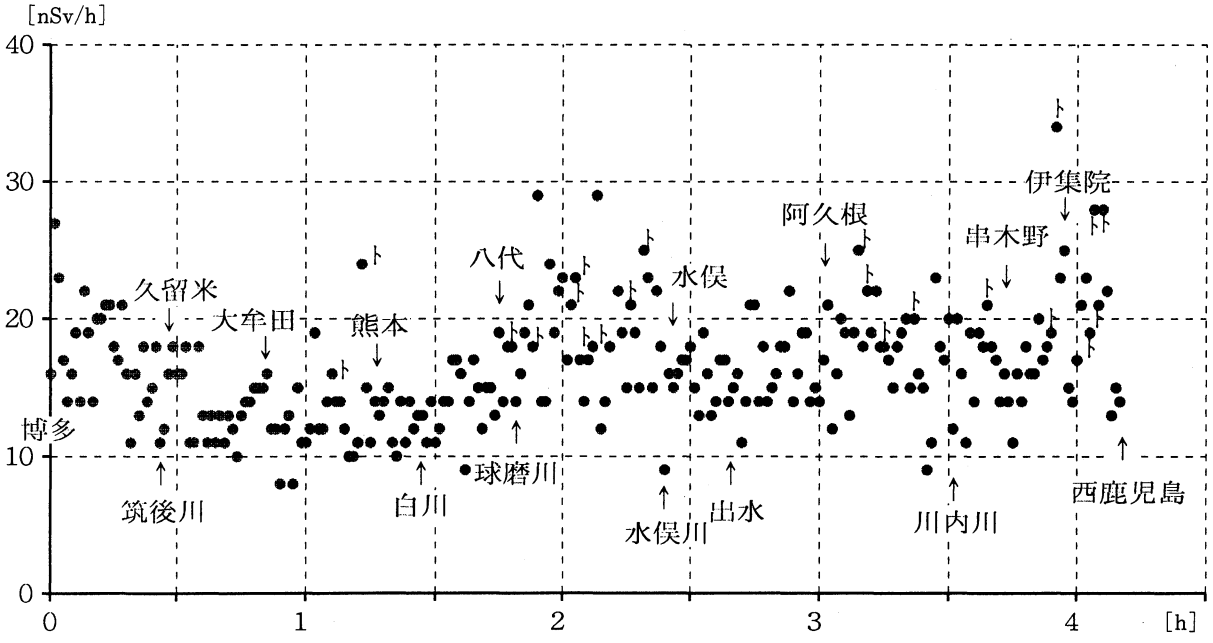


図15　列車内での環境放射線測定[23]
鹿児島本線　特急有明号23号座席にて　1991.12.26　12：17博多発→16：27西鹿児島着「はかるくん」による　図中のトはトンネルを示している。

さらに列車での測定は，列車の運行速度で得られる内容，すなわち測定時間に関係する測定点の特定や統計精度に影響する。これらの点からいわば学問的な内容，さらには科学的なアプローチに欠けることを指摘されるきらいがある。

列車による測定でわかることは，路線上の放射線強度の差を測定できることである。したがって，環境放射線の場所による違いが的確に把握される。つまり，環境放射線を理解するためのよい教材になる。大地の地質の違いによる環境γ線の変化，路線周辺の人工的な構築物の変化，つまり河川による遮蔽効果やトンネルによる立体角効果（四方からくること）などが顕著に見られる。データを蓄積すれば，積雪や河川の増水による遮蔽効果[25]もみられる。図14では，２．２で述べた大地の地質に起因する環境放射線の西高東低の傾向が伺える。また，トンネルでは，トンネルを囲む岩石・土壌やトンネル構造物からの放射線が立体角効果により高線量率になっているのがわかる。さらに河川上では，水による遮蔽効果が見られている。図15でも，トンネルや河川について同様な傾向が見られる。

(2) 自動車内での環境放射線の測定

図14と15からわかるように，地質の変化が環境放射線量の変化に表れるようなモデル的調査地域を特定し，自動車や徒歩で環境放射線を測定できれば，生徒実験としておもしろい材料になる。鹿児島県では比較的高線量地帯と考えられる花崗岩地帯や放射能温泉を中心に考えると，北薩地方の紫尾山，大隅地方の高隈山，南大隅の肝属郡一帯，離島では，甑島，屋久島，奄美大島，徳之島の花崗岩地帯が有望である。また低い線量地帯としては，シラスに代表されるローム層地域である，大隅降下軽石層や桜島噴出の降下軽石（ボラ）のある桜島周辺（垂水や国分など），霧島噴出の降下軽石層のある財部，末吉町など，開聞岳噴出のコラのある南薩地方，県本土の至る所にみられるシラス，黒ボク，赤ボクの厚くつもっている所がある[32]。この中で特に徳之島[33]は，周囲85km余，面積247㎢の小さな島でありながら，図16のように，深成

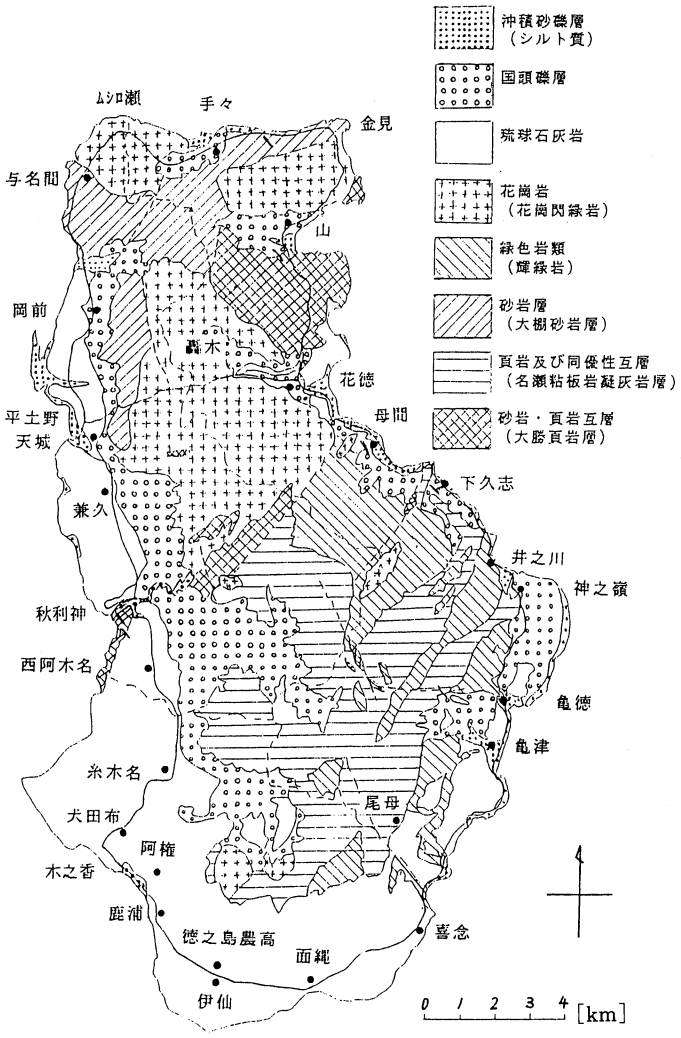


図16　徳之島の地質[32]
図中の実線が自動車内での環境放射線の測定ルート

岩，半深成岩，火山岩，琉球石灰岩，砂岩，頁岩，粘板岩，凝灰岩，火山灰など多くの種類の岩石が見られ，環境放射線の測定には絶好の調査地域と考えられる。

筆者の１人（樋之口）が高校生とともに調査した結果を図17に示す。調査は図16の実線のように，島の１周道路を南端の伊仙町から，反時計回りに自動車で１周して環境放射線を調べた。その結果が図17の●印のプロットである。火成岩地帯が高線量で，海岸や琉球石灰岩の堆積岩地帯が低線量であることがはっきりわかる。調査地点を選べば地質による環境放射線の多様性と特徴を理解するのに非常によい教材になることがわかる。

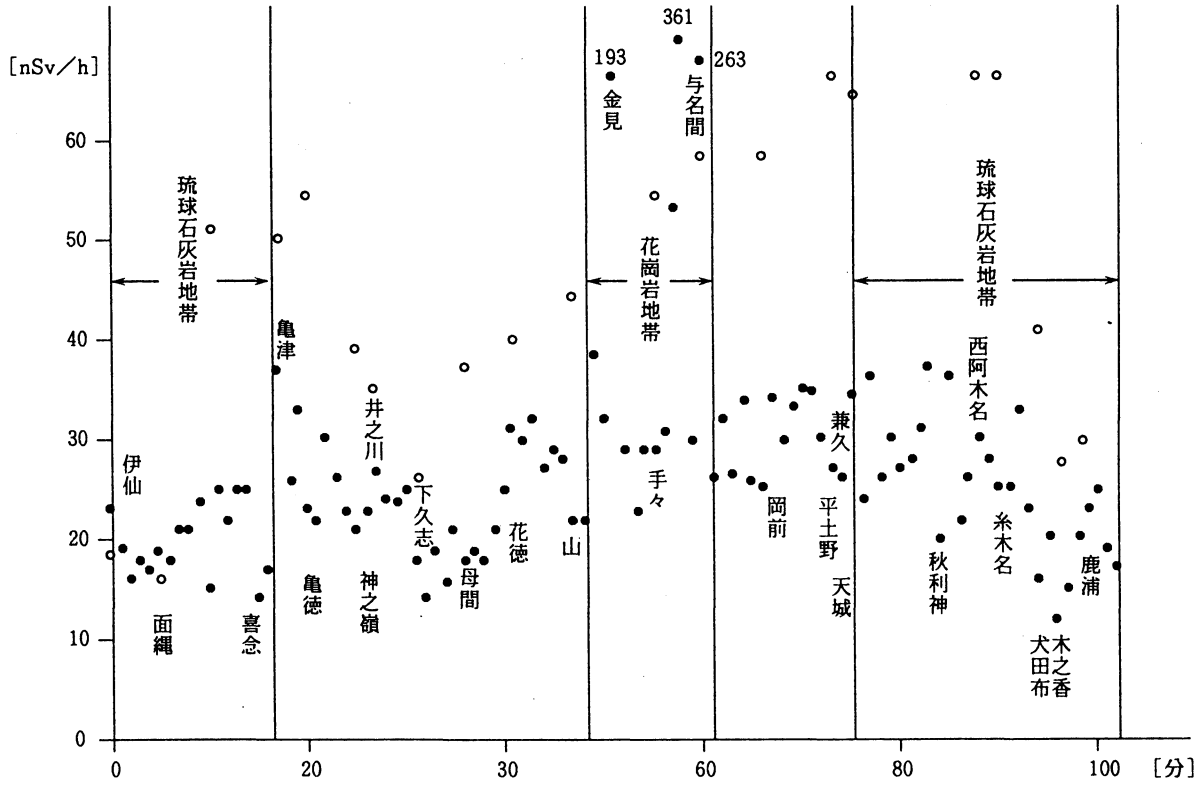


図17　自動車内での環境放射線の測定[24)]
「はかるくん」で測定
●は車の座席での島１周する道路での移動測定　1992. 9 .11　16：00出発
◦は地域の代表点を決めての定点測定1992. 7 .11, 20, 23, 9 .27

4．4　身近な岩石に含まれる放射線量の直接測定

列車や自動車による移動測定では，地質などによる広域的な環境放射線の多様性と特徴を測定するよい教材になりうるが，野外調査になり授業実験には向かない。そこで直接岩石の放射線を測定することで，授業実験が可能になり地質と環境放射線の関係を理解することができる。表４は，岩石園で標本の岩石を測定した八木のデータを，火成岩のそれぞれについてケイ酸塩濃度の高い岩石の順に並べ直したものである。堆積岩については，そのケイ酸塩濃度が不明なため適当に並べてある。

表4　岩石園（屋外）の放射線測定値[11]

No.	岩石名	産地	はかるくん nSv/h	簡易型GM cpm	浜松製GM管 cpm
	火山岩				
1	流紋岩	福井県丹生郡清水町	107	29	179
2	安山岩	奈良県二上山	69	18	165
3	玄武岩	京都府天田郡夜久野町	30	12	109
	深成岩				
4	花崗岩	岐阜県恵那市笠置町	140	28	196
5	閃緑岩	京都府綴喜郡井手町	50	18	149
6	斑糲岩	京都府福知山市雲原	47	16	144
7	カンラン岩	兵庫県養父郡大屋町	19	14	104
	堆積岩				
8	石灰岩	京都府船井郡瑞穂町質志	47	16	129
9	粘板岩	滋賀県大津市外畑町	80	21	167
10	泥岩	和歌山県有田郡湯浅町	61	9	150
11	砂岩	大阪府泉南郡岬町	83	26	167
12	礫岩	和歌山県有田郡湯浅町	41	21	161
13	凝灰岩	兵庫県高砂市	102	23	169
	京都市青少年科学センター庭		58	21	166

場所：京都市青少年科学センターの岩石圏
測定値は岩石の表面で直接測定したものでB.G.を含んでいる。

表4の火成岩（1～7）のデータは，2．4で概説した通りの傾向を示し，火成岩の放射線量のケイ酸塩濃度依存性を明確に示している。特に「はかるくん」のデータは環境γ線に感度が高いため，非常に典型的なデータとして出ている。この実験の場合バックグランドの寄与が十分考えられるので，端窓型GM管を用い実験室で，バックグランド放射線のできるだけ低いところを選び，試料岩石を割るなどして風化の影響を少なくし，測定条件を同じくして岩石表面からの放射線を測定すれば，ケイ酸塩濃度依存性のあるもっと明確なデータが得られると思われる。

堆積岩については，2で述べたようにその母岩である火成岩の放射性物質が濃縮されている場合もあるし，薄まっている場合もある。ウラン鉱床が河川の跡に存在することや特にアフリカのオクロ鉱床の天然原子炉[34]の話題などを含めて考察させることのできるよい教材となろう。

4．5　天然放射性鉱物による直接測定の教材化

天然放射性鉱物を使った授業実験例は，天然ウラン鉱物を使って写真感光や霧箱，箔検電器を使った検出[35]，矢野による陶土用粘土[15]，モナズ石[16]をRn，Tn源として用い，自作の箔検電器・電離箱で検出した興味ある報告がある。また，放射能温泉の沈殿物[35][36]の放射線源としての利用，K，P肥料の測定[17]，試薬のKClの利用[35]，大気浮遊塵のラドン娘核種の測定[37]などU・Thやそれらの娘核種からの放射線の計測については授業実践も含めて多くの報告があるので，ここでは細かな

説明はしない。ただ，これらの放射線実験において単にそれぞれの線源を微弱放射線源という特殊なものと扱うのではなく，大地からの環境放射線源の一部として関連づけて扱えばより環境放射能の理解にふさわしい教材となろう。そういう意味で特に大気浮遊塵のラドン娘核種の測定[37]は，教室内の浮遊塵を掃除機や黒板消しクリーナーにろ紙を取り付け吸引して集めるため，身近な建造物や大地からのU，Thの存在をRn，Tnやその娘核種によって理解させる非常によい教材である。

4．6　海水起源の環境放射線の測定と宇宙線による線量率の推定

表5から分かるように海中の放射能による線量は，大地のそれに比べて2桁は低い。すなわち海上は陸上に比べバックグランドが低いので，ラドン濃度が問題になる。日本列島の場合，陸地から数100km以内の海上では陸地のラドン濃度と大差ない[19]ので，0.9～1.7nGy/h程度の変動成分として寄与する。したがって，海上での測定は主に宇宙線からの寄与が大きくなり，宇宙線による空間線量率が推定できるはずである。そこで，船での環境放射線の測定を行った。場所は，鹿児島湾を鹿児島港から桜島まで横断するフェリー上である。

図18のように，岸壁は厚いコンクリートの構造物なので約40nSv/hと高い値を示すが，港に接岸した船に乗り込むと，すぐ約10nSv/hになる。出航と船内を移動して甲板にでても値はほとんど変化しない。海上では海水からの放射線量は前述した通り2桁も低いので，「はかるくん」の測定限界を下回る。海底からの放射線は海水によって遮られる。したがって，船中での測定値は，船の構造物や積載物からの放射線と宇宙線だけになる。

前述したように船での線量率の測定は，宇宙線の測定に使われる。海面上の宇宙線は30nSv/hなので，鹿児島湾中央の桜島フェリー甲板での平均7.8nSv/h（北緯31.5°）である。徳之島近海でのフェリーあまみ甲板での測定値は7.5nSv/h（北緯28°），沖縄県の石垣島から西表島の間の小型船上では，5.5nSv/h（北緯24.3°）である。これらのデータから小型船より大型船の方が線量率が高いこと，図8の線量率の最小値6nSv/h（高度数百m測定値）より，フェリーの値が高くなることから，船の構造物によるシャワーの計数率増加の影響や船の構造物や積載物からの放射線の寄与が伺える。したがって，それらの効果の少ない小型船のデータから海上における「はかるくん」の宇宙線に対する感度は，18%と推定される。

表5　海水中の放射性核種による空間線量率[19]

核　　種	空間線量率［nGy/h］*
^{40}K	0.50
^{238}U	0.063
^{232}Th	0.008
cf.宇宙線	30[22]

＊ 単位の換算をした。

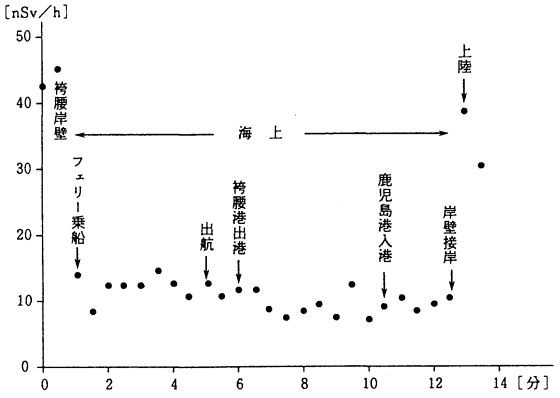


図18　船での環境放射線の測定[23]
測定器「はかるくん」1990．9．23　13：26～

4．7　原子力施設周辺での環境放射線の測定

原子炉から放出される放射性物質のほとんどは気体のクリプトン及びキセノンである。通常は直接には放出せず，原子炉建屋内にとどめ，放射能を弱めてから放出している（^{85m}Kr；半減期4.5時間，^{133m}Xe；半減期2.2日，^{133}Xe；半減期5.3日）。これらは煙突から放出され，風にのって流されるので次のような点に留意すべきであろう。

① 煙突からの最大着地濃度点と考えられる～5 kmの場所で測定する。

② 測定場所が変わると自然放射線レベルが変化するので場所を決めて測定する。

③ 放出されるときは，煙突から空気と共に放出されるため，その測定場所が風下と風上になった場合の測定を有為な差があるか比較する。

④ 降雨時のデータは，ラドン嬢核種による wash out の影響を受け変動することがあるので，使わない。

また我が国の原子力発電所周辺の住民に対する年間の目標値は，0.05 mSv 以下であり，実際にはさらに小さい値になっている。このため，原子力施設周辺では大型の測定器を用いて，敷地内外のモニタリングステーションで連続測定をするとともに，煙突の出口で測定し，気象条件から計算したデータが公開されている。

鹿児島県には九州電力の川内原子力発電所がある。筆者の1人(樋之口)は原子力発電所から約30 km北に位置する阿久根高校に勤務していた。チェルノブイリ原発事故の直後で生徒の関心も高く，実際川内原子力発電所ではどうなのか生徒と距離1 km毎に測定した。生徒の多くが原子力発電所に近づくと放射線量が増すと考えていたが，図19のように原子力発電所からの影響は見られず，自然放射線による変動が大きいことが分かった。鹿児島県の環境放射線データは公開されているのだが，自分たちのデータは説得力があり生徒達の抱いていた過度な不安をやわらげる結果になった。

原子力施設での放射線測定は，県や電力会社の行っている環境放射線モニタリングの意義を理解するためのよい教材になる。また，平常運転時の原子力発電所周辺は非常に放射能汚染されているという誤解を打ち消すよい教材になり得る。

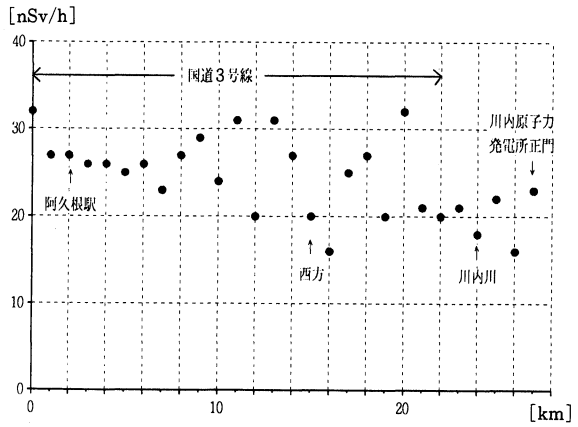


図19　周辺地域から原子力発電所正門までの環境放射線（阿久根市→川内原発正門）[23]
1990．9．8　18：00～車で1 km毎に測定
「はかるくん」による

5　環境放射線測定と原子力教育

4で述べたように，環境放射線測定は，放射線，放射能の科学的概念形成を進めるために非常によい教材になるが，1で指摘したとおり現行の文部省学習指導要領では，原子力関連分野の教育内

容を理科できちんとおさえていない。しかし，学習指導要領は，さまざまな専門家の議論の末にたどりついたガイドラインに過ぎないのであって，指導要領を完璧にすることは不可能である。教える教師が不断の努力によってよい方向にもっていかなければならないし，次回の改訂に向け，提案していかなければならない。

物理・化学の教師を中心に多くの研究報告や授業実践が全国理科教育大会や各学会等で報告されている。しかし，それらの報告はあくまでも物理や化学といった理科の範囲を越えないものであり，原子力に対する国民の不安や疑問に答え，原子力問題を学際的にとらえ直す視点，具体的には核兵器の廃絶，核廃棄物処分を含めた核燃料サイクルといった大きな視点で原子力の利用をどう考えるかという原子力教育の視点が重要である。

次に，原子力教育では何を扱わなければならないかを下岡の「原子力発電に対する推進－廃止の態度決定構造モデル」[38] を参考に提案したい。原子力教育の主題は，原子力発電所の必要（不要）性と安全（危険）性の事実を正確に伝えることである。そのためには次のような7項目を，原子力教育の教育内容としなければならないと考える。

1　放射線とは何か。（物質との相互作用，放射線の検出法，遮蔽効果，人体への影響）

2　放射能とは何か。（半減期，人体や環境への影響（核汚染））

3　原子力発電の原理，事故対策（安全対策）

4　プルトニウムの利用（核燃料サイクル・高速増殖炉）

5　放射性廃棄物の管理とその処理・処分対策

6　原子力発電（核燃料サイクルも含めて）の必要性について

(1)　現在の生活水準を維持するのか。

・経済成長か自然保護か。

・生活の質をどう考えるか。

(2)　現状程度のエネルギーは必要か。

・省エネルギーの評価

・将来の需要予測

(3)　原子力を利用するか。

・新エネルギーの評価（太陽光発電，燃料電池発電，コージェネレーション）

・化石燃料と原子力の廃棄物の環境に対する評価（火力発電の CO_2，SO_x，NO_x と核廃棄物）

・セキュリティーの評価

・コストの評価

7　原子力発電（核燃料サイクルも含めて）の社会的安全性について

(1)　現在の政治・社会体制が信じられるか。…行政や電力会社への信頼感

・政策決定プロセスの評価

・全体主義（管理社会）の抑制

・消費地になぜ原子力発電を作らないのか。

・軍事利用の可能性，有事の際のミサイルの標的としての核関連施設

・情報公開の評価

(2) 安全管理体制が信じられるか。…現場の管理体制や運転者の安全意識に対する信頼感

・情報公開の評価

・運転者の安全意識の評価

(3) 安全技術が信じられるか。…重大事故回避する制御可能性の評価

・安全技術の評価

・大事故時の被害予測

・事故・故障の評価

・高レベル廃棄物の処分の安全評価

これらの項目を現行の教科の中で考えると，1～5までは理科，1と2の人体への影響については保健体育科，6と7は理科，公民科と家庭科は担うことが望ましい。放射線リテラシィや原子力発電のしくみを科学的工学的視点から理科で，放射線の国民の保健に果たした有用性，人体への影響を保健体育で，エネルギーや環境・社会問題という視点から理科，公民科（社会科）で，消費者教育の視点から家庭科教科でアプローチし，これらの科目で学際的に担うことが必要であろう。

参 考 文 献

1) 科学技術庁『原子力に関する世論調査』1989年8～9月実施，1990年2月発表
2) 総理府「原子力に関する世論調査」，1990年9月実施，1991年1月5日発表
3) 中学校学習指導要領，平成元年3月，文部省
4) 高等学校学習指導要領，平成元年3月，文部省
5) 小学校指導書社会編，平成元年6月，文部省
6) 中学校指導書社会編，平成元年7月，文部省
7) 中学校指導書理科編，平成元年7月，文部省
8) 椿　忠彦；自然放射線の測定，日本原子力研究所，セミナー通信，3，5～7（1993）
9) 岡多賀彦；「はかるくん」による環境放射能の測定，日本原子力研究所，セミナー通信，4，8～11（1994）
10) 竹中　功；実験を中心にした放射線教育，日本原子力研究所，セミナー通信，3，11～15（1993）
11) 八木陸郎；自然界の放射線計測の教材化，日本原子力研究所，セミナー通信，6，10～14（1994）
12) 大城　進；自然放射線の測定と分析，日本原子力研究所，セミナー通信，1，4～5（1993）
13) 杉　暉夫；「はかるくん」と原研型簡易GM管の生活環境における測定値の比較，日本原子力研究所，セミナー通信，5，1～5（1994）
14) 樋之口仁；環境放射線測定の教材化，日本原子力研究所，セミナー通信，4，4～7（1994）
15) 矢野淳滋；高校の授業に使える微量放射線の実験，物理教育，35-4，229～232（1987）
16) 矢野淳滋；モナズ石による放射線源，物理教育，41-2，172（1993）
17) 東京都理化教育研究会物理専門委員会，荒川　洋他；身近な放射線の実験ビデオ，日本原子力研究所，セミナー通信，3，8～10（1993）
18) 金柿主税・木下紀正・三仲　啓；環境放射線観測と教育，鹿児島大学教育学部教育実践研究紀要，特別

号1，47～55（1993）
19）財団法人原子力安全研究協会・環境放射線モニタリングテキスト編集委員会；環境放射線モニタリング，実務テキストシリーズNo.4，昭和62年7月
20）科学技術庁・財団法人放射線計測協会；「はかるくん」による自然放射線測定結果，1（平成3年3月）
21）下薗清香・四反田昭二・今村博香・福田大三郎；鹿児島県における自然の空間放射線量分布，鹿児島県環境センター所報，5，101～110（1989）
22）阿部史朗；わが国における自然の空間放射線分布の測定，保健物理，17，169～193（1982）
23）樋之口仁；身のまわりの環境放射線について，鹿児島県高等学校教育研究会理科部会誌，33，38～47（平成3年度）
24）鹿児島県立徳之島農業高等学校科学研究クラブ；鹿児島県高等学校教育研究会理科部会誌，34，81～92（平成4年度）
25）岡野真治；列車内で放射線を測定する，フィルムバッチニュース，177，9（1991）
26）岡野真治；環境放射線スペクトロメータ［開発テーマ］，理化学研究所ニュース58，July（1979）
27）岡野真治；生活環境の放射線とその測定，Isotope news 7月号（1980）
28）岡野真治；東北新幹線車輛内での放射線測定，Isotope news 11月号（1982）
29）岡野真治；上越新幹線車輛内での放射線測定，Isotope news 3月号（1983）
30）長岡　鋭・坂本隆一・堤　正博・斎藤公明・森　内茂；居住環境における放射線場の特性（Ⅰ），日本原子力学会誌，32，4，403（1990）
31）長岡　鋭・坂本隆一・堤　正博・斎藤公明・森　内茂；居住環境における放射線場の特性（Ⅱ），日本原子力学会誌，32，5，507（1990）
32）鹿児島県・鹿児島県地質図編集委員会；鹿児島県地質図縮尺10万分の1，平成2年12月
33）義山彰宏編；徳之島の自然，1973
34）山川　稔；オクロ天然原子炉，日本原子力学会誌，35，11，978～984（1993）
35）財団法人日本原子力文化振興財団；放射線実習の手引き（昭和52年）
36）樋之口仁；放射線・放射性物質実験の教材化について，鹿児島県高等学校教育研究会理科部会誌，35，7～19（平成5年度）
37）北村俊樹；生徒実験用の簡易型放射線検出器と微弱線源，物理教育通信，72，36～39（1993）
38）下岡　浩；原子力発電に対する公衆の態度決定構造，日本原子力学会誌，**35**，2，115～123（1993）