

二次宇宙線と空気中ラドンとの相関

小林恒夫

福島県立医科大学医学部自然科学講座（物理学）

地上に達する二次宇宙線による被曝は自然放射線による被曝の原因のうち約 15%を、一方、空気中ラドンは約 50%を占める。これらの二つの種類の自然放射線に何か関連はないものかと思い立ち、相関分析を行ったところ、有意な負の相関がみられた。この相関に物理的意味があるのかについて考察を加えた。相関解析の結果、二次宇宙線の気圧効果で説明が可能であること、さらには二次宇宙線の負気温効果を示唆する相関もあることが分かった。時系列解析の結果、まず、空気中ラドンは $1/f$ ゆらぎ、二次宇宙線は $1/f^2$ ゆらぎ、気圧は $1/f^3$ ゆらぎと、この順に規則的な変動へとなっていることが分かった。次に、自己回帰モデルによる周期性探索の観点からは、二次宇宙線、空気中ラドン、および気圧は似通ったパワースペクトルとなることが分かった。さらに、モデルの次数の選択の過程で、本来 27 日周期である太陽の自転に対応する時系列のゆらぎは、しばしば 20 日前後の周期性として現れることが分かった。

Received 8 August 2012, Accepted 25 September 2012

1. はじめに

自然放射線による被曝は世界平均で年間 2.4 mSv、日本の平均では 1.5 mSv とされている[1]。実は 1982 年の国連科学委員会（UNSCEAR）で、空気中ラドン（Rn-222 および Rn-220）の吸入による内部被曝が 40%を占めることが指摘されるまでは、空気中ラドンによる被曝が数えられておらず、一見突然に公衆の受ける被曝線量がほぼ 2 倍になったという経緯があった [2]。

二次宇宙線による外部被曝は、ラドン以前から自然放射線による被曝の中に数えられていた。二次宇宙線の主成分はミューオン（3/4、硬成分とよばれる）と電子（1/4、軟成分とよばれる）である。他に陽電子、中間子、ラムダ粒子をはじめ多くの素粒子が発見され、素粒子物理学の発展に寄与してきた [3]。

これら二つの種類の自然放射線は、放射線防護上重要な構成因子であるので、筆者は長年測定を継続してきた [4]。

これまでの筆者の研究の結果、筆者の環境では空気中ラドンは気圧と正の相関をもつことが分かっていた。ところで、二次宇宙線には気圧効果という有名な現象があり [3]、気圧が高くなると地上に到達する二次宇宙線が少なくなることが知られていた。これらのことから、二次宇宙線と空気中ラドンとの相関があるとすると、負の相関があるはず、との予測が立った。これが本研究の動機である。

はたして有意な相関が得られるのか、あるとすれば物理的に意味のある相関なのか。これらのことを相関解析、時系列解析を中心に検討した結果、十分に物理学的な意味を有する相関であることが分かった。

2. 材料と方法

本論文では、2006 年に 1 年間筆者の行った二次宇宙線等の測定結果と、気象庁のアメダスによる気象データ [5] および国土地理院による青森県

三沢での地磁気観測データ [6] を使った。

二次宇宙線の測定には直径 2" 長さ 2" の円筒状の NaI (TI) を検出器とするシンチレーションカウンター (SEIKO EG&G, AAB-4100, HMB-4200, EMCA) を用い、3 MeV 以上のエネルギー部分をカウントするという簡易的な方法を採用した [7]。Figure 1 に典型的な二次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。図中に示したように K-40 (1.46

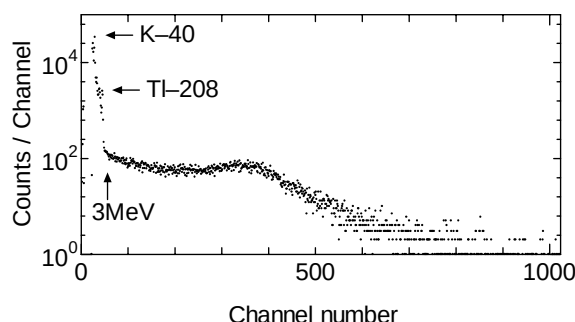


Figure 1. 典型的な二次宇宙線のエネルギースペクトル。K-40 (1.46 MeV) と TI-208 (2.61 MeV) のピーク位置を外挿して 3 MeV のチャンネルを決定し 3 MeV から 50 MeV のエネルギーを持つ放射線の計数率を求めている。

MeV) と TI-208 (2.61 MeV、大地からのガンマ線のうち最大エネルギーのもの) のピーク位置は明瞭なので、これらを外挿して 3 MeV のチャンネル位置を決定した。最大測定エネルギーは 1023 チャンネルで約 50 MeV であった。このシンチレーションカウンターは、昼間には学生へのデモンストレーション等に使用していたので、二次宇宙線の測定は、20 時から翌日 8 時までの夜間 13 時間に取得したデータを使用した。

空气中ラドンは、屋外と屋内について測定を行った。屋外のラドン濃度は屋内と比べて著しく低いので、18.5 L と大きなサイズのルーカスチェンバーを有する通気式静電捕集法 (エネルギー非弁別型、Pylon, TEL) [8] によるモニターを使用し、屋外から内径 1 cm、長さ 4 m のビニールチューブを介して検出器に導入した。長いチューブを介することにより、トロン (Rn-220) の介入影響を避ける効果も期待できる。

屋内の測定場所は 4 号館 (コンクリート 5 階建て) の 4 階で人の出入りの少ない部屋とした。

屋内では、屋内空気用ラドン測定器 (通気式静電捕集法、エネルギー弁別型、DurrIDGE、RAD7) [8]、ラドン・トロン子孫核種測定器 (フィルター捕集型、エネルギー弁別型、Pylon、WLx) [8] も設置し、同時平行・連続測定を行った。

データの解析には S-PLUS [9] および SPSS [10] を使用した。

3. 結果と考察

3.1 相関解析

Figure 2 に屋外空气中ラドンと二次宇宙線の相関を表す散布図を示す。図中の直線は最小 2 乗法によるもので、明らかに負の相関である。

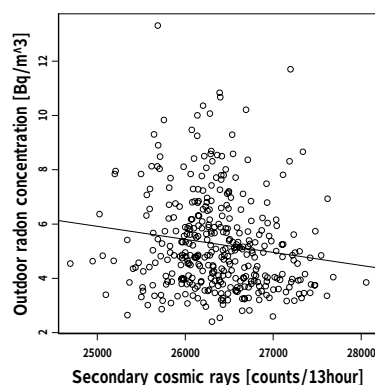


Figure 2. 二次宇宙線と屋外ラドン濃度との相関をあらわす散布図。図中の直線は最小 2 乗法によるものである。この相関の検定での有意確率は 3 種類の相関係数 (本文参照) ですべて $p < 0.01$ であった。

ラドン濃度は空間的にも時間的にも対数正規分布となることがよく知られている [11]。一方、二次宇宙線の計数値は正規分布である。従って、相関が有意かどうかの検定は Pearson の積率相関係数、Kendall の順位相関係数、Spearman の順位相関係数の 3 種類について行った。その結果、いずれの相関係数についても、検定の有意確率 p の値は $p < 0.01$ となり、危険率 1% で有意な負の相関となることが分かった。以下に登場する相関解

析ではすべて、これら3種類の相関係数についての検定を行った。

この相関は果たして物理学的に意味のあるものであろうか。

まず、二次宇宙線には有名な気圧効果がある。

これは、気圧が増大すると空気層での吸収が増え、地上に到達する二次宇宙線の量が減ることによる。実際、3種類の相関係数・検定を行ってみると、二次宇宙線と気圧の間には有意な負の相関があった。

次に、ラドンと気圧との相関は、一般に環境によって正にも負にもなりうる。そこで、筆者の屋外ラドン濃度のデータと、気象庁のアメダスによる気圧のデータの相関をとってみると、3種類の相関係数・検定の結果、有意な正の相関が得られた。従って、ラドンと気圧とは同じ傾向にあり、Figure 1 に示されたラドンと二次宇宙線の相関は気圧効果で説明できることが分かる。

さて、二次宇宙線には気温効果というものもあり、パイオンの崩壊が起きる高度での気温上昇は地上での二次宇宙線の増加をもたらす（正気温効果）、ミューオンの多いところでの気温上昇は二次宇宙線の減少をもたらす（負気温効果）[3]。この気温効果は、ラドンにも現れているであろうか。

そこで、屋外ラドンと気温の相関をとってみると、弱い負の相関があり、傾向としては地上付近でミューオンの多いところでの気温上昇による負気温効果に対応する傾向がみられた。しかし、この相関解析での有意確率は3種類の相関係数についてすべて $p > 0.25$ で、有意な相関ではなく、負気温効果の表れとの断定はできなかった。

3.2 時系列解析（その1） $1/f$ ゆらぎ

Figure 3 に二次宇宙線、屋外ラドン、および気圧の時系列を示す。

時系列解析 [12] の基礎となるのは、時間領域からフーリエ変換により周波数領域での探索を

行うことにある。さらにその中で基礎となるのはパワースペクトルと呼ばれるものである。太陽の光をプリズムに通すと7色の光に分かれる（虹のしくみ）。もともといろいろな周波数の光が混ざってできていた光を、プリズムで分解すると、どの周波数（色）の光が強く入っていたかを調べることができる。このように一見複雑に見える変動の中でどの周波数成分が強く存在するかをしらべる手法が、周波数領域での探索である。ある周波数 f におけるスペクトルの強さを、パワースペクトル密度 $S(f)$ とよぶ。“パワー”という言葉は、光の強さが電磁波のエネルギーに比例するように、ある周波数成分の変動の強さをエネルギーとして表現する意味で用いられる。

自己相関関数をフーリエ変換したものに、スムージングを施して得られる、ピリオドグラムがよくパワースペクトルとして使われる。

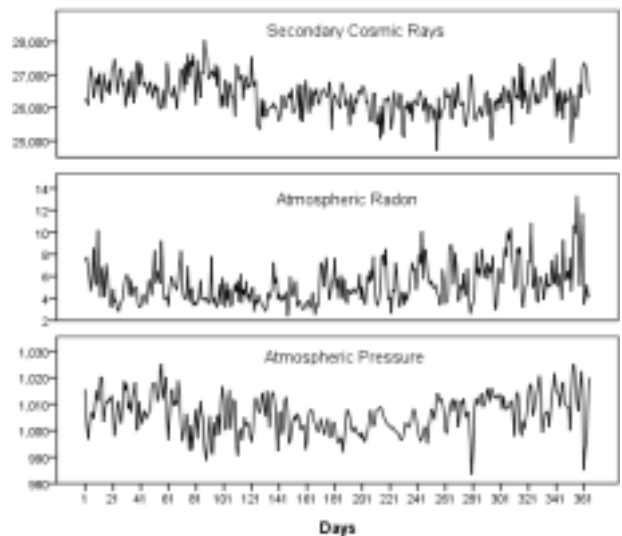


Figure 3. 二次宇宙線、屋外ラドン、および気圧の時系列グラフ。横軸は2006年1月1日を起点とした日数。単位はそれぞれ counts/13hours、Bq/m³、hPaである。

時系列の特徴を表す方法の一つとして、低周波数領域で $S(f)$ を f のべき乗の形に書いたとき、すなわち $S(f) \propto f^{-\beta}$ の形に書いたときの β の値によって分類することが行われる。 $\beta = 1$ となるのが、有名な $1/f$ ゆらぎ（えふぶんのいちゆらぎと読む、英語では one-over- f fluctuation）であり、

生体信号や自然界のゆらぎによく見いだされ、人にとって心地よいゆらぎとして知られている [13]。 $\beta = 0$ は白色雑音的に全くランダムな変動、 $\beta > 2$ は比較的規則正しい変動とされる。

この分類法で、二次宇宙線や空気中ラドンはどうであろうか。 $0.8 < \beta < 1.2$ で $1/f$ ゆらぎとされることが多いので、この基準でいろいろな物理量について、誤差の範囲でこの基準に入るかどうかの判定を行った結果、 $1/f$ ゆらぎと考えられたのは屋外ラドン、屋内ラドン、屋内ラドン子孫核種、気温、相対湿度、風速であり、 $1.2 < \beta$ だったものは二次宇宙線、屋内トロン子孫核種、地磁気、気圧であり、 $\beta < 0.8$ であったものは無かった。

空気中ラドンは $1/f$ ゆらぎで風速などと似通った変動であり、二次宇宙線は $\beta = 1.8$ と規則的な変動である。また、気圧は $\beta = 2.8$ とさらに規則正しい変動である。

さて、空気中ラドンは対数正規分布をしている。対数正規分布はいろいろな変量が、かけ算の形で影響をおよぼしている場合に現れる [14]。ラドンに現れる $1/f$ ゆらぎの原因は、断言はできないが、風速、気温、気圧、湿度といった多くの変数が、かけ算の形で影響をおよぼしていると考えれば、説明できる。

気圧が規則的な変動となることは、気団の移動が3~5日程度の周期で、割合予測可能な規則性をもっており、天気予報が成立する大きな要件となっているものと考えられる。地上の気象パラメータ変動の元祖的な存在なのであろう。

二次宇宙線は Shapiro-Wilk の正規性検定 [15] を行ってみると $p > 0.05$ であり、正規分布をしているといえる。これはいわばかなり“自主性の高い”変数ということができる。太陽活動の影響を受けることも知られているので、あまり地上の変動には左右されず、一次宇宙線の動向が主なのかもしれない。その中で、気圧効果・正気温効果・負気温効果といった地上のできごとに少し

反応している、と考えられ、空気中ラドンほどいろいろな要素がかけ合わさってはいないのであろう。以上のように空気中ラドン、二次宇宙線、気圧の順に $1/f$ ゆらぎから $1/f^2$ ゆらぎ $1/f^3$ ゆらぎのように並ぶ理由を推察できる。

3.3 時系列解析（その2）自己回帰モデルによる周期性探索

すでに述べたピリオドグラムの手法は、 $1/f$ ゆらぎかどうかの判定には充分使えるのであるが、時間変動の周期性を探索するのには不向きであり、そこで自己回帰モデル（Autoregressive model, AR モデル）がよく使われる。

AR モデルとは、時刻 t における時系列のデータ X_t として自分自身の過去からの回帰を考えるモデルである。いちばん簡単な1次の自己回帰モデルは、 $X_t = A_1 X_{t-1} + E_t$ と表される。ここに、 X_{t-1} はひとつ前の時系列データ、 A_1 は X_{t-1} からの寄与を表すパラメーター（定数）、 E_t は時刻 t における予測誤差（ランダム変動）である。すなわち、現在の時刻 t におけるデータ X_t はひとつ前のデータ X_{t-1} に大いに関係があって、その度合いを A_1 で表す、また、必ずしも過去の自分に全面的に支配されるのではなく、少しは気まぐれに変化するであろうから、それを E_t で表す。同様に、ふたつ前のデータにまでさかのぼって、現在のデータを考えるのが2次の自己回帰モデルで、 $X_t = A_1 X_{t-1} + A_2 X_{t-2} + E_t$ と表される。 p 個前までの自分にさかのぼって考えるのが最も一般的な p 次の自己回帰モデルとよばれ $X_t = A_1 X_{t-1} + A_2 X_{t-2} + \dots + A_p X_{t-p} + E_t$ と表される。ここに、 A_i は時刻 $t-i$ におけるデータ X_{t-i} からの寄与を表すパラメーター（定数）、また、 E_t は時刻 t における予測誤差（ランダム変動）である。現在の観測値が、過去のいくつかの自身の観測値による帰結（回帰）として表されるとの発想である。

自己回帰モデルによるスペクトル推定法は 1969 年に赤池 [16] により考案されたが、これは 1967 年に Burg [17] によって提案された最大エントロピー法と同等であることがすぐに証明された。自己回帰モデルの次数 p は赤池の情報量基準 (Akaike's Information Criterion, AIC) を最小とするものが採用されることが多い [18]。赤池氏自身は An Information Criterion と提唱したが、現在ではどの論文でも Akaike's Information Criterion と書かれている。

AR の具体的な計算には Burg 法と Yule-Walker 法という 2 つのアルゴリズム [19] があるが、データ数が少ないときは Burg 法が有利とされる。

Table 1. 二次宇宙線と屋外ラドン濃度等、10 個の時系列に対し AR モデルによる周期性探索を行った結果。子孫核種を子孫と省略してある。

時系列	周期性 [days]						
二次宇宙線	10	5.1	3.4	2.4			
屋外ラドン	21	9.3	6.6	4.5	3.2	2.7	
屋内ラドン	14	7.0	4.7	3.5	2.7	2.3	
屋内ラドン子孫	16	7.1	4.7	3.5	2.7	2.2	
屋内トロン子孫	7.4						
屋外気温	13	7.9	5.5	4.2	3.4	2.9	2.4
屋外相対湿度	9.1	4.7	3.0	2.4			
気圧	19	9.1	5.9	4.6	3.2	2.6	2.2
風速	15	7.9	4.9	3.6	2.6	2.2	
地磁気	26	13	8.9	6.5	5.0	4.2	3.3

Table 2. Table 1 と同じ変数を、AR モデルの次数を 20 に固定して周期性探索を行った結果。

時系列	周期性 [days]						
二次宇宙線	21	9.3	5.9	4.5	3.5	3.1	2.5
屋外ラドン	21.4	9.3	6.6	4.5	3.2	2.7	
屋内ラドン	15	7.0	4.7	3.5	2.8	2.3	
屋内ラドン子孫	19	7.0	4.7	3.4	2.7	2.3	
屋内トロン子孫	7.6	5.4	3.5	3.0	2.5	2.2	
屋外気温	13	7.9	5.5	4.2	2.9	2.4	2.2
屋外相対湿度	21	9.1	6.1	4.5	3.1	2.7	2.2
気圧	19	9.1	6.0	4.7	3.2	2.7	
風速	16	8.3	4.9	3.6	2.6	2.2	
地磁気	21	9.8	6.7	4.9	4.2	3.3	2.5

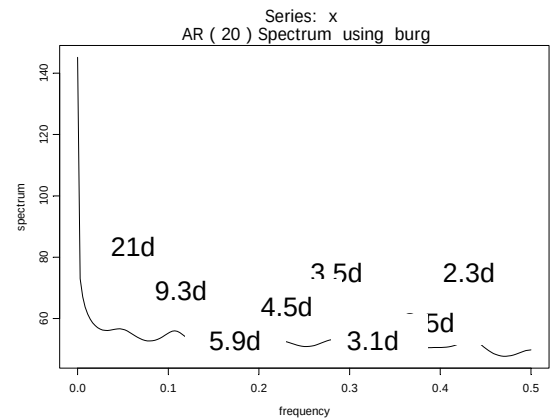


Figure 4. AR モデルの次数を 20 に固定して得た二次宇宙線のパワースペクトル。図中 21d 等は 21 日周期等のピークの意である。

さて、本論文で扱うことのできる時系列は、二次宇宙線、屋外ラドン、屋内ラドン、屋内ラドン子孫核種、屋内トロン子孫核種、気温、相対湿度、気圧、風速、地磁気のちょうど 10 個であるが、これらに AR モデルによる周期性探索を行った結果を Table 1 に示す。AR モデルの Burg 法により、次数は AIC を最小にするものを採用している。

Table 1 で最下段の地磁気に出ている 26 日周期は、明らかに太陽の自転周期 27 日の表れである。この太陽の自転の影響は、ラドンの 21 日、気圧の 19 日のように 20 日前後の周期性として現れることが多いようである [20]。気圧、気温、相対湿度、風速の周期性には、気団の移動が 3~5 日程度であることが表れている。屋内の測定量には人の生活単位である 7 日周期がよく現れる。

Table 1 では AR モデルの次数は先述の AIC を最小にする次数としているが、今回のようにいろいろな変数を比較する場合は次数を固定してみることも意味のあることであろう。そこで、AR モデルの Burg 法により、次数を $p=20$ に固定した場合の結果を Table 2 に、また、Figure 4 に AR モデルの次数を 20 に固定して得た二次宇宙線のパワースペクトルを示す。

Table 2 ですぐ気の付くことは、地磁気の 26 日

周期が 21 日となっていることである。筆者自身の長年の疑問が氷解した思いがする。本来 27 日周期である太陽の自転の影響は、時系列解析の仕方によっては 20 日前後の周期性として現れるのである。文献 [20] の 20 日周期は、まさにこのことに言及していたのであろう。本論文のデータで、この太陽の自転に関係した周期性を示しているのは、二次宇宙線の他に屋外ラドン、屋内ラドン子孫核種、屋外相対湿度、気圧、地磁気ということになる。

4. おわりに

二大自然放射線ともいえる二次宇宙線と空気中ラドンとの相関をしらべた。直接的な相関解析では有意な負の相関が得られ、この相関は二次宇宙線の気圧効果で説明できることが示された。時系列解析のうち $1/f$ ゆらぎの観点からは、ラドンは $1/f$ ゆらぎ、二次宇宙線は $1/f^2$ ゆらぎ、気圧は $1/f^3$ ゆらぎとなり、この順に規則性が増すことが分かった。また、自己回帰モデル (AR モデル) による周期性の探索からは、二次宇宙線、ラドン、気圧ともに太陽の自転の影響による周期性がみられ、他の周期性についてもこれら三者が似通った周期性をみせることが分かった。

結論として、二次宇宙線とラドンの有意な相関

は、物理学的に意味のあるものであり、気圧により強く媒介された結果であることが分かった。

引用文献

- [1] 藤元憲三, UNSCEAR 的な観点から見た環境放射線, RADIOISOTOPES, 50, 139S-147S, 2001.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with Annexes, "Ionizing Radiation: Source and Biological Effects."
- [3] 理化学辞典第 5 版, 岩波書店, 1998.
- [4] 小林恒夫, 福島医大における自然放射線の測定, 福島医学雑誌, 52, 1-9, 2002.
- [5] 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/> を参照.
- [6] 国土地理院 <http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/> を参照.
- [7] S.Minato and S.Minakuchi, Measurement of cosmic-ray exposure rate perturbations by building materials, Health Phys., 46, 1134-1136, 1984.
- [8] A.C.George, State-of-the-art instruments for measuring radon/thoron and their progeny in dwellings--a review, Health Phys. 70, 451-463; 1996.
- [9] S-PLUS for Windows Version 8.2J, 数理システム 2012.
- [10] IBM SPSS Statistics 20, Base & Forecasting, IBM Cp., 2011.
- [11] D.E.Martz, R.J.Falco, G.H.Langner Jr., Time-averaged exposures to ^{220}Rn and ^{222}Rn progeny in Colorado homes. Health Phys. 58, 705-713; 1990.
- [12] 北川源四郎, 時系列解析入門, 岩波書店, 2005.
- [13] 武者利光, ゆらぎの世界, 講談社ブルーバックス, 1980.
- [14] 高安秀樹, フラクタル, p.66, 朝倉書店, 1986.
- [15] S.S.Shapiro and M.B.Wilk, An analysis of variance test for normality (complete samples), Biometrika, 52, 3 and 4, 591-611, 1965.
- [16] H.Akaike, Fitting autoregressive models for prediction, Annals Inst Statist Mathem 21, 243-247; 1969.
- [17] J.P.Burg, Maximum entropy spectral analysis, paper presented at the 37th Annual International Meeting, Oklahoma City, OK: Society of Explor Geophys; 1967.
- [18] H.Akaike, Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 2nd International Symposium on Information Theory, B.N.Petrov and F.Csaki (eds.), Akademiai Kiado, Budapest, 267-281, 1973.
- [19] W.N.ヴェルナブルズ, B.D.リプリー, 伊藤幹夫・大津泰介・戸瀬信之・中東雅樹訳, S-PLUS による統計解析, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2001.
- [20] 湊進, 気中ラドン娘核種濃度変動の広帯域スペクトル解析, 下道國・辻本忠編, 環境ラドン, 308-313, 名古屋大学消費生活協同組合印刷部, 1992.