

富士山頂における科学教育の試行(2) — 学生による宇宙線の測定と重力の測定 —

松澤孝男^{1,2}、関根恵³、大沼侑司⁴、会澤雄基⁴、阿久津達也⁴、森脇滉⁴、中島宏昌⁴、
飯島竜司⁴、矢野倉伊織⁴、八重樫拓也⁴、矢島千明²、保田浩志²

1.東京日本語教育センター、2.放射線医学総合研究所、3.北海道大学院工、
4.茨城高専ラジオ部

I. 宇宙線の測定

1. はじめに

今から100年ほど前、ウィーン大学のヘスは、検電器を気球に積み、高度とともに気体の電気伝導度が増すことから宇宙から来る放射線の存在を初めて明らかにし、1936年にノーベル物理学賞を受賞した。当時、宇宙線の源についてはまだ想像の域を脱しない中、ロッシは単純な実験で独自に開発した同時計数回路¹⁾を組み合わせて宇宙線の成分分離に挑戦した。特に宇宙線粒子が物質中で二次粒子を創ることを示すため、3台のGM管を3角形においてまっすぐ走る一個の粒子は、3つのカウンターを同時に貫くことがないよう工夫した同時計数の実験 (Fig.1) に私たちは注目した。

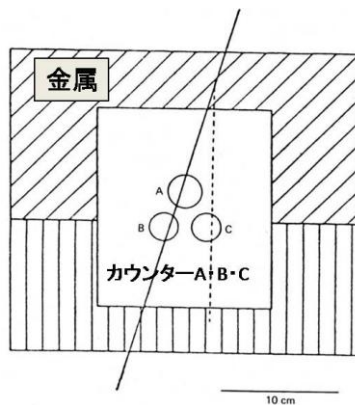


Fig.1 Time coincidence method used by three GM tubes modified by the author¹⁾.

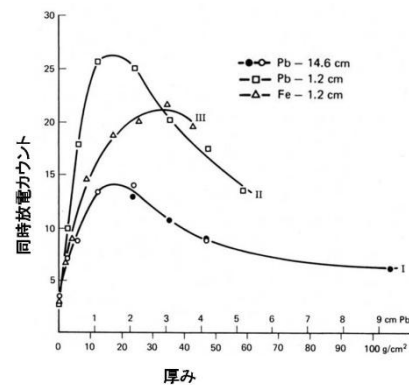


Fig.2 Rossi curve modified by the author^{1,2)}.

3つのGMカウンターを数センチの厚みの鉛で作った箱の中に閉じ込めると、多くの同時放電が得られたが、鉛の箱の一番上のふたを取り払うと放電の数は極端に減ることから、箱の中で起きる同時放電のほとんどは、宇宙線粒子が箱の鉛のふたで起こす少なくとも2つ、おそらくもっと多くの粒子によるものだと考えられた。ロッシによれば、箱の上を覆う鉛を厚くしていくと、Fig.2のようにカウント数はいったん増えて、それからゆっくりと減る。鉛のカーブに着目すると、放電の数が10~20 g/cm²の間で極大に達する。この極大の先では、カーブは透過粒子の吸収曲線よりも、もっと急に落ちる。これが宇宙線の硬成分、軟成分の発見であった^{1,2)}。

私たちは約100年前からの宇宙線研究の歴史を踏まえ、高専の学生でも安価な機器を用いて二次宇宙線が測定できないかと、硬成分・軟成分の分離、 γ 線や高エネルギーを持ち、地上まで到達するミューオン粒子の計測を試みたいと考えた。

文献³⁻⁸⁾によると、宇宙空間では、超新星爆発や太陽活動の天体現象により宇宙線が作られる。宇宙線は主に一次宇宙線と二次宇宙線に大別される。一次宇宙線は宇宙空間に存在する宇宙線のことであり、二次宇宙線は一次宇宙線が地球大気に入射した際、大気中の原子核と衝突して生成される宇宙線である。一次宇宙線はカスケードシャワー現象により大部分が消滅するため、地表で観測される宇宙線はほぼ二次宇宙線であり、その約80%はミューオンである。

1930年代、ミューオンはアンダーソンらによって宇宙線の霧箱写真の中から発見された。そのフラックスは、水平面積 cm^2 あたり、1分間に約1個である。ミューオンは、質量が電子の約200倍である点を除いて電子と同じ振舞いをする粒子である。電子に比べ質量の大きい分、制動放射が起こりにくくエネルギー損失の主要過程は電離によるものである。そのため銀河宇宙線のエネルギーを反映し、大気上層部で生成するミューオンは物質の奥深く、例えば100 GeVミューオンは地中約200 mまで到達する貫通力を持っている。ミューオンは宇宙線の中で減少率が他に比べてはるかに低く、安定な硬成分である。ミューオンの平均寿命は $2.2 \mu\text{s}$ で電子と反電子ニュートリノと μ ニュートリノに崩壊する。私たちは、地上で観測される荷電粒子でGM管を2台同時に突きぬけられる高エネルギーの粒子はミューオンであると考へ、同時計数回路の作製を試みた。

2. 地表における、同時計数回路の計数率の鉛厚さ依存性およびミューオンの測定

ミューオンの測定方法⁹⁻¹⁰⁾

ミューオン計測機器はGM管2台をAND回路でつないだもの(RM-80, Aware Electronics Corp. USA)を用いた。同時と感じる時間幅は $50 \mu\text{s}$ である。2台のGM管の間に鉛1 mmの遮蔽板を置いた。天頂角 θ から飛来する宇宙線強度を考える。 θ が大きい時には地上に飛来するまでにより厚い空気の層を通過する。宇宙線の強度が $\cos^n \theta$ に比例すると仮定すると、空気によって減衰しやすい宇宙線成分は斜めからよりも真上から来る量が多いため、 n が大きく、減衰しにくい成分は n が小さくなる。宇宙線の成分ごとの n は実験的にミューオン ~ 2 、電子 ~ 3 、核子成分 ~ 8 と知られている¹¹⁾。

GM管を2個重ね、2台のGM管を同時に通過する高エネルギー粒子(ミューオン)の測定を試みた(Fig.3)。鉛の厚さと透過する放射線を同時計数した計数率の関係を Fig.3 に示す(2007年)。鉛の厚さに対する計数率の変化を調べたが、Fig.2のようなロッシン曲線のピークは測定できなかった。装置を天頂に対して傾けて計数率の変化を調べた。横軸を $\cos^2 \theta$ にして計数率を描いたものを Fig.4 に示す。天頂角 $\cos^2 \theta$ における計数率の値が直線に乗り、宇宙線のミューオン成分の $\cos^2 \theta$ 則にほぼ対応していると思われる。

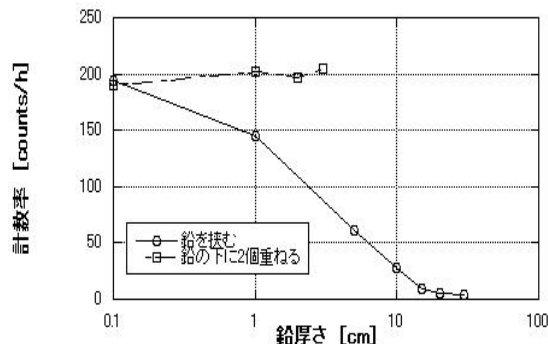


Fig.3 Correlation of the Pb thickness AND counts correlation rate obtained by the coincident measurement circuit^{9,10)}.

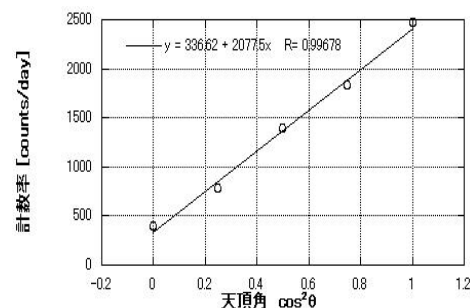


Fig.4 Zenith deviation $\cos^2 \theta$ plot with counting rate^{9,10)}.

3. 自作 GM 計数管 2 台を用いた同時計数装置の試作

上の2.では米国 Aware 社の既製の同時計数回路による宇宙線の測定結果を報告したが、自分たちでも同時計数装置を作製したいと考へ、GM計数装置を2台同時に高エネルギー粒子(ミューオン)が通過するときだけにカウントをする同時計数装置の試作に挑戦した。作製に用いた日本のストロベリー・リナックス社のGM計数装置(USB-GM)は、パソコンからUSBを通して外部電源を得て動作し、主に γ 線のカウント数をパソコンに表示・記録できる。GM管の中心のワイヤ近傍にかかる電界は極めて強くなっているが、放射線が入射すると電界は著しく下がる動作原理である¹²⁾。

1台のGM計数装置は、電源回路から常に5V供給されていて、放射線が入ると0V(LO)となり、1カウントと動作する。入力A・B両方とも信号LOを出力するときに出力Cから信号LOを取り出すAND回路を作製するため、シリコンゲートCMOS技術を用いた高速CMOS2入力ORゲートTC74HC32A DIP14-P(以下IC)を用いた(Fig.5)。GM管は放射線を検出すると芯線の電圧が下がるため負理論で考へ

る。そのため、AND 回路と言いながらロジック IC の OR 回路を利用した。真理値表を Table.1 に示す。GM (ガイガーカウンター) 1 と GM2 の同時計数の値を GM3 に出力してパソコンへ記録する。GM1、GM2 はパソコンの信号取り出し部分を使わずに放射線を測るセンサー部分のみを使用した。逆に GM3 はパソコンへの信号取り出し部分のみを使用した。

Table.1 Truth table.

入力A	HI	LO	HI	LO
入力B	HI	HI	LO	LO
出力C	HI	HI	HI	LO

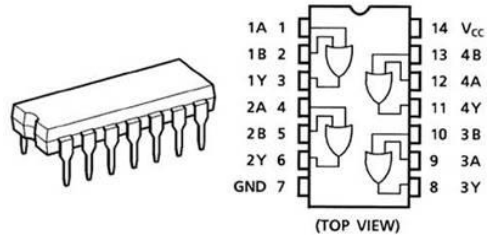


Fig.5 TC74HC32APDIP14-P.

今回使用する GM 計数装置内の電源が IC の使用電源範囲内(2~6V)なので、IC に使う電源は GM 計数装置の電源を使用した。また、使用した IC の誤動作を防ぐためにバイパスコンデンサ (積層セラミックコンデンサ 0.1 μ F) を IC の電源部分 (GND(7)と Vcc(14)) に取り付けました。同時計数装置の接続概略図を Fig.5 に示す。

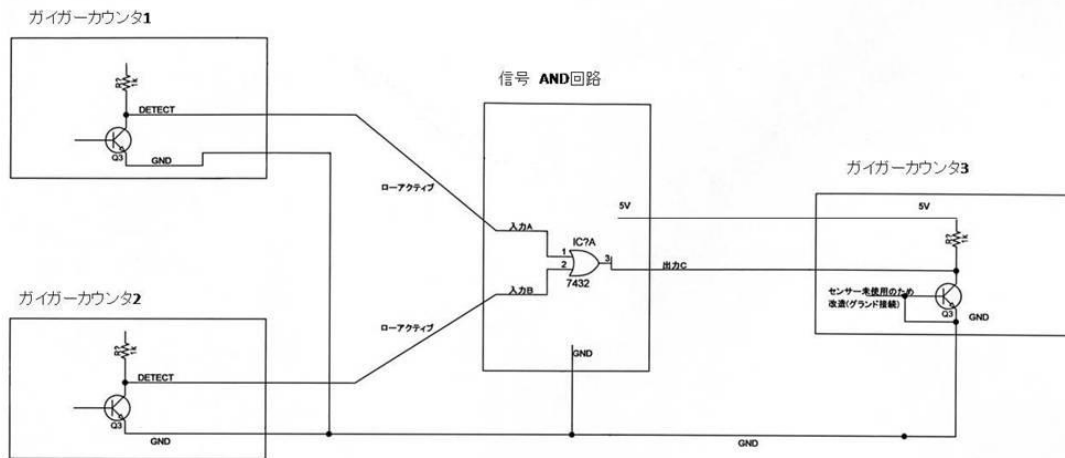


Fig.6 Diagrammatic illustration of coincidence counter tube.

Fig.6 の GM1 を例に回路の動作説明をする。放射線が入射するとトランジスタで GND(-)方向に電流が引かれ、DETECT 線は 0 V となる。GM1 と GM2 に放射線が入射した場合、それぞれの DETECT が 0 V となる。AND 回路の入力 A・入力 B に同時に信号が入れば、出力 C へ信号が出るため、GM3 へ 1 カウント出力される仕組みである。Fig.7 に回路の実体配線図を示す。GM1 の配線に関してはパソコンへの信号取り出し部が必要ないため、センサーから来た信号を DETECT から IC の 1A(1)へ接続した。次に GM2 の配線に関しては、GM1 と同じく DETECT から IC の 1B(2)へ接続した。富士山への登山時の測定を考慮し、電源は軽く、取り換えが簡単な単三電池(4本)の電池ケースを、Fig.7 のように GM1、GM2 へ取り付けました。このようにして、自作 GM 管 2 台で同時計数装置を作製した。

IC の同時計数動作を確認するため、 ^{22}Na 密封線源からの陽電子消滅 γ 線(0.511 MeV)を用いた。 ^{22}Na が β^+ 崩壊する時に陽電子(β 線)を放出し、原子の周りの電子と結合して両電子が消滅(陽電子消滅)する際、その全エネルギーに等しい消滅 γ 線が 180 度反対方向へ同時に 2 個放出することを利用して自作同時計数回路の特性を調べた。水平面内の一直線上で線源をはさみ、距離 5 cm をおいた左右に GM1、GM2 を設置し、GM 管の窓方向を線源へ向け、オシロスコープを用いて IC 入出力部分の整形波形を測定した。 ^{22}Na で発生した 2 個の γ 線は、GM1、GM2 の GM 管で検出され IC に入力(入力 A・入力 B)後、パルスの重なる部分がひとつの矩形ピーク(出力 C)として認識された (Fig.8)。

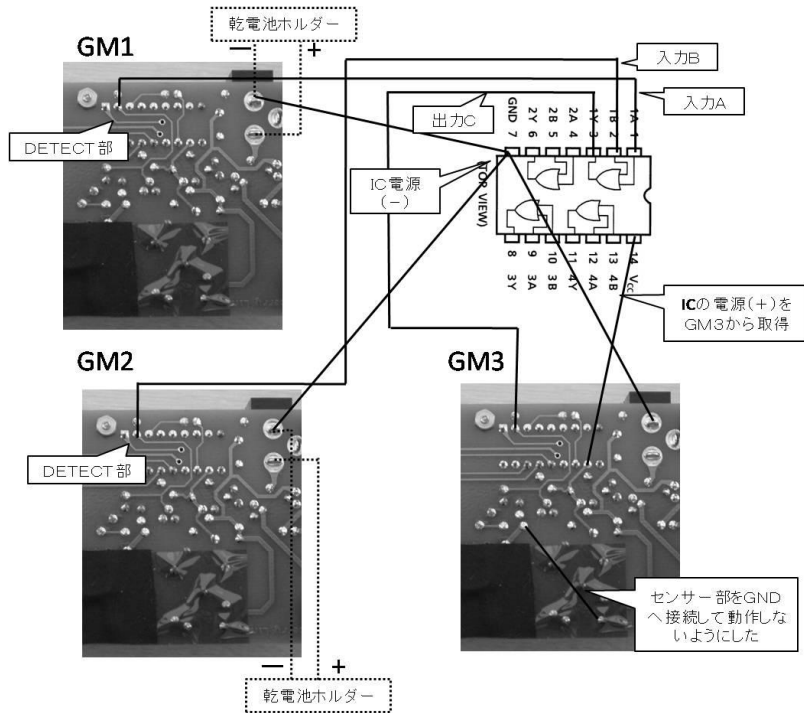


Fig.7 Schematic diagram of time coincidence circuit.

天頂角および方位依存性を測定するため、自在万力で装置を固定した。2 台の GM 管の間には 1 mm の鉛の遮蔽板を入れた。富士山において自作同時計数装置や Aware 社で販売している同時計数機器、そして地表において自作同時計数装置で測定した結果を示す。市販の同時計数機器と自作の同時計数装置ではほぼ同じ傾きで $\cos^2 \theta$ 則を満たし、富士山頂でミュオン測定に成功したと考えられる。

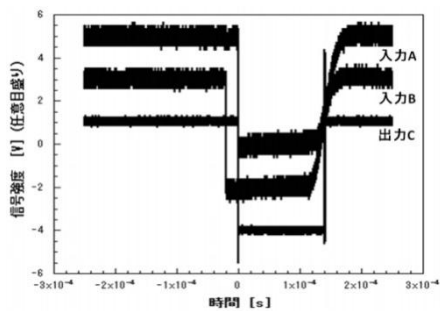


Fig.8 Signal of time coincidence circuit produced by 511 keV annihilation photon.

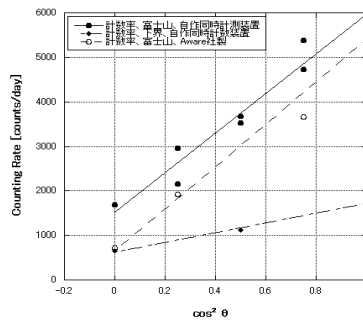


Fig.9 Comparison with two kinds of time coincidence equipment¹⁰⁾.

II. 重力の測定

1. はじめに

坪井忠二著「重力」(昭和 16 年)¹³⁾によれば、
『日本に於ける最初の重力測定は Ayrtton, Perry が明治 11 年虎の門なる工部大学で行ったもので、

$$g = 979.74 \text{ [cm/s}^2\text{]}$$

と云う値を得ている。この測定に対しては Hersehel の攻撃的な批評があったが、又それに対する原著者の回答がある。

次いで明治 13 年には Mendenhall が当時の学生 田中館愛橘 氏ほか数名の助力を得て Borda の

振り子によって東京及び富士山頂の重力を測定し

$$g(\text{東京}) = 979.84 \text{ [cm/s}^2\text{]}$$

$$g(\text{富士山頂}) = 978.86 \text{ [cm/s}^2\text{]}$$

を得た。………。何れも精度においては今日のものに及ばないから、茲には唯歴史的測定として記録するに止める。』という記述がある。富士山測候所開設以前の初期の富士山観測登山の歴史としても興味がある。専門外の高専生や教員が今手元にある汎用機器で重力の測定を試みたらどのようなことになるか実際に行ってみた。

現在の専門家の重力測定データの桁数は自由落下の測定による直接測定法では約10桁、振り子を用いる間接測定では約9桁である。理科年表¹⁴⁾では、日本各地の重力実測値として8桁、万有引力と緯度効果を取り入れた遠心力を基に計算する正規重力値も8桁表示されている。

私たちが手元にある汎用の機器で測る場合、歴史的な Mendenhall, 田中館愛橘らの測定に近づけることができるかどうかの試験になる。Borda の振り子の実験では、学生実験を静かな実験室で行っても、有効数字 4~5 桁出すのが精いっぱいであろう。ましてや富士山頂の旧測候所内の一画で高専の低学年のラジオ部員が短時間に測定することは不可能であろう。相対測定よりさらに簡便な方法で、重力加速度の大きさの高度及び緯度による変化を確認する実験を試みた。

2. 実験の方法

標準分銅の重さを電子天秤で測る。

使用した汎用電子天秤: A&D 社製, FX-1200i, 秤量 1220[g], 最小表示 0.01[g]

使用した標準分銅: 1000.000[g], ± 1.6[mg]

電子天秤の表示値(単位[g])を読み取る。数値をそのまま重力単位系[g 重]の力(重力 W)とすれば、重力 $W = mg$ を各測定地点で読み取ることになる。電子天秤および標準分銅の校正場所を産業技術総合研究所のあるつくばと考え、つくばでの重力、重力加速度の大きさをそれぞれ、 W_0, g_0 とすれば、 $g = W/m$ (実際は、 $m=W_0/g_0=w/g$ より、 $g=g_0 \cdot (W/W_0)$)、で各測定地点の重力加速度の大きさ g が相対的に決められる。

3. 結果と考察

私たちの測定値(重量の実測値)を列記する。

地点	測定期日	重量[g]	重力加速度の大きさ[g/cm ²]	重力加速度の文献値[g/cm ²] ¹⁴⁾	重力加速度の文献値のずれ[g/cm ²]
富士山頂	2010/08	999.87	979.82	978.8	1.02
御殿場	2010/08	1000.99	980.92		1.18 (shizuoka 規準)
shizuoka				979.74	
伊那市	2010/09	1000.65	980.59		0.82 (matsumoto 規準)
Matsumoto				979.77	
木曾 (太陽風観測所)	2010/09	1000.37	980.31		0.54 (matsumoto 規準)
札幌市 (北海道大学)	2010/12	1000.41	980.35	980.48	-0.13

測定を始めてから諸問題に遭遇した。温度、気圧、高度、周囲の密度、水平度、風(空気の流れ)による測定値の変化、および経時変化(ドリフト)、さらには、本質的な何を測っていることになるかの迷い等々である。坪井の「重力」解釈の間違いを藤本・友田らは述べている¹⁵⁾。真空中の光速だけでなく、物理定数は一般に値は1つである。ところが、重力加速度は場所ごとに異なる。さらに火山活動や地下のマグマの移動によっても値は変動するため時間変化もあり得る。私たちの方法では現時点で 1[m/s²]の桁の測定が限度である。その範囲で、測定点の水平(南北方向)、鉛垂直方向の移動による重力加速の場所ごとの簡易測定ができることを確認できた。今後、上記、温度、気圧、高度、周囲の密度、水平度、風による測定値の変化及び経時変化(ドリフト)等の問題を把握し、総合的な測定精度の向上を検討する。

まとめ

2006年・2007年・2009年の各8月、私たちは日本最高峰の富士山において γ 線、ミューオン、重力の測定を行い、山のふもとより富士山頂の線量率が増加したことが分かった。一方、重力は減少した。さらに、地表および富士山頂におけるミューオン強度の天頂角 $\cos^2 \theta$ 依存性も確認できた。飛行機内、富士山における宇宙線の実際の測定を通して、二次宇宙線を学生でも簡便な機器で定量的に評価できること、宇宙を望遠鏡ではなくて放射線を通して見る楽しさを知った。また、場所による重力加速度の大きさの変化を電子天秤を用いる簡単な方法で測ることに挑戦した。

今後はミューオンの1日変動、太陽の自転周期との関係、東西効果の観測や3台のGM管の同時計数測定を試みる予定である。富士山頂の気圧は地表の約3分の2である。山頂では100°C以下でお湯が沸き、98°Cを沸騰と認識するセンサー付きの電気ポットが保温に移行せず、貴重な水が蒸発したり、インスタントラーメンの芯が残る等、地表での実験環境と異なる点が多いため、普段当たり前のことが富士山ではそうではなくなる。その特殊性が、学生にとって自然現象と科学を考える理科研究の場に有効である。

謝辞

富士山頂実験の場を提供して頂いたNPO 富士山測候所を活用する会、はかるくんコンクールで丁寧な査読をして頂いた森千鶴夫先生、同時計数回路の特性評価でお世話になった金子純一先生、藤田文行先生、修士課程の坪田陽一君に御礼申し上げます。「高校生のための地域の原子力・エネルギー学習支援」や「原子力人材育成事業」で講師の派遣、見学会の実施、その他予算を頂いた文部科学省に深く感謝します。私たち学生のために遠路お越し頂き、興味深い講義をして下さった多くの先生方、見学や実習の機会を与えていただいた多くの事業所、学校、研究所の皆様にも感謝いたします。それら事業の実務を担当して下さった(株)三菱総研、(財)放射線文化振興財団の担当者の方々、「はかるくん」を貸して下さった(財)放射線計測協会、(財)日本科学技術振興財団担当者の方々にも感謝いたします。また重力の簡易測定のために、玄関や実験室をお貸しいただいた名古屋大学太陽風観測所に感謝いたします。

参考文献

- 1) ブルーノ・ロッシ著、小田稔訳 “物理学者ブルーノ・ロッシ自伝、X線天文学のパイオニア” (中央公論社、東京、1993)、Bruno Rossi, “Moments in the life of a scientist”(Cambridge University Press, New York, 1990)、Bruno Rossi, “Cosmic Rays”, McGraw-Hill, Inc. 1964.
- 2) 近藤健次郎, FB News, No.321 (2003) pp. 1-5.
- 3) 松本雅紀, 古川雅英他, RADIOISOTOPE (1995) pp. 33-34 .
- 4) 古川雅英, 月刊地球・号外 No.22 (1998) pp. 5-62.
- 5) 藤高和信, アイソトープニュース 5月号 (2006) pp. 7-11.
- 6) 村石浩他: <http://www.ahs.kitasato-u.ac.jp/~muraishi/download/H18-abst-miyajima.pdf> (2006).
- 7) 野口邦和, “山と空と放射線” (リベルタ出版, 東京, 1996).
- 8) J. F. Ziegler, IBM Journal of Research AND Development, 42[1] (1998) pp. 117-139.
- 9) 松沢孝男他, 身のまわりの放射線の測定の試行, 茨城高専研究彙報, 42号(2007) pp. 45-52.
- 10) 関根恵他, 「環境放射能」研究会 proceeding (2009) pp. 19-30、第22回放射線夏の学校(2010).
- 11) サマーチャレンジテキスト, 宇宙線を目で見よう:
http://ksc.kek.jp/2nd_2008/gaiyou/sc08/gaiyoufiles/02_text.pdf#search=2
- 12) ニコラス・ツルファニェイス, 放射線計測の理論と演習(上), (現代工学社, 東京, 1986).
- 13) 坪井忠二, “重力” (岩波書店, 東京, 1941).
- 14) “理科年表”, (丸善, 東京).
- 15) 藤本博巳, 友田良文, “重力からみる地球”, (東京大学出版会, 東京, 2000)

*連絡先: 松澤孝男 (Takao MATSUZAWA), matsuzawa_2000@yahoo.co.jp