

高自然放射線地域住民の 低線量慢性被ばく放射線の健康影響研究

普通の生活環境の中で放射線以外の変異原(タバコ、化学物質、活性酸素などの代謝産物)により誘発される染色異常の量は多く、またその個人差が大きい。それは普通の地域のバックグラウンド自然放射線より3から5倍高い高バックグラウンド自然放射線の影響が埋れて見えなくなるほどである。[日中共同による染色体解析研究は2004年度 日本放射線影響学会誌寺島記念論文賞を受賞]

■はじめに

中国広東省の陽江地域には自然放射線がその他の地域より3から5倍高い地域がある(Morishima, Koga et al., J. Radiat. Res. 41, suppl.9-23, 2000)。この地域の疫学的研究が1992年から(財)体質研究会の企画で日中共同により実施されている(Wei and Sugahara, J. Radiat. Res. 41, suppl, 1-7, 2000)。12万人を超える高バックグラウンド放射線地域(HBRA)と対照地域(CA)の住民についての疫学的調査の結果、悪性腫瘍やその他の致死性疾患の頻度に両群で有意差が認められる疾患もあったが、それらはいずれも高バックグラウンド放射線によるものではなく、高バックグラウンド放射線による健康影響は認められていない。(Tao, Sun, Akiba et al., Chinese J. Radiol. Med. Protect. 24, 143-148, 2004, Zou, Tao, Sun, Akiba et al., Excerpta Medica Internat. Con. Ser. 1276, in press)。

■染色体解析

日中共同でこの高バックグラウンド自然放射線地域(HBRA)住民の染色体研究を行うために、冷却遠心器、インキュベーター、クリーンベンチ、オートステージ付蛍光顕微鏡などの機器類、および培養用試薬類、染色体着色用DNAプローブなどすべてを日本から中国に送り、染色体研究室を現地近くの病院と北京の共同研究実施研究所に設立した。染色体標本の作成と染色体分析は3名の若手中国人研究者を日本に招聘して技術のトレーニングをし、日中共同で実施した。

合計101,395細胞の末梢血リンパ球の染色体解析の結果、放射線に特異的な不安定型染色体異常(2動原体と環状染色体)が高バックグラウンド放射線地域の成人では対照地域の成人より有意に多く検出され、高バックグラウンド自然放射線の影響が確認された(図-1. Jiang, Chen, Hayata* et al., J. Radiat. Res. 41 : suppl. 63-68, 2000. *:対応著者)。

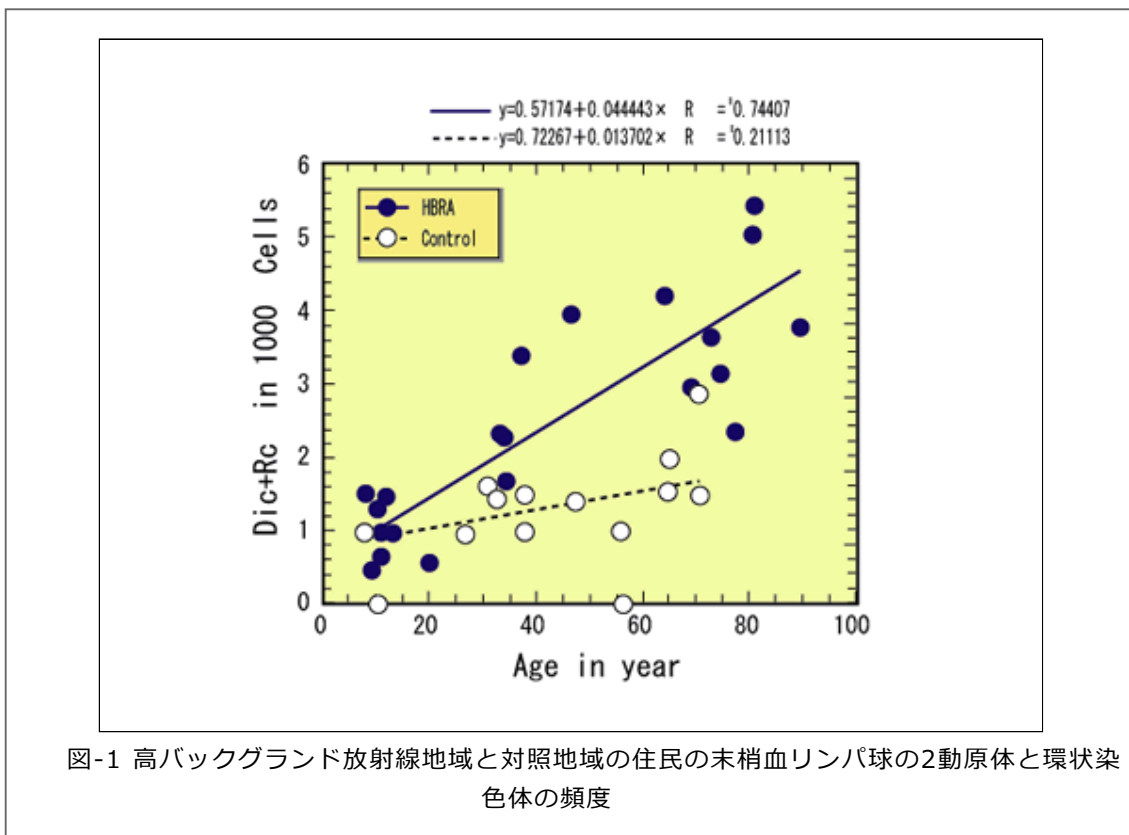


図-1 高バックグラウンド放射線地域と対照地域の住民の末梢血リンパ球の2動原体と環状染色体の頻度

染色体異常は悪性腫瘍や先天性疾患と強く関連するものである。従って、この細胞遺伝学的研究結果は疫学的研究結果と矛盾すると思われた。そのため、化学物質や活性酸素および放射線など全ての変異原の影響を反映する安定型染色体異常(転座)を解析することになった。

合計312,887細胞の解析の結果、安定型染色体異常は不安定型染色体異常よりはるかに多く検出され、個人差も大であった。放射線により不安定型染色体異常と安定型染色体異常はほぼ同じ割合で誘発される(Kanda and Hayata, *Int. J. Radiat. Biol.* 69, 701-705, 1996. Zhang and Hayata*, *J. Hum. Genet.* 48, 531-534, 2003.)。従って、高バックグラウンド放射線由来の染色体異常の増加は全ての変異原によって誘発される染色体異常量の個人差の範囲内程度でしかないことが明らかとなった(図-2.Zhang, Wang, Chen, Minamihisamatsu, Hayata* et al., *J. Radiat Res.*, 44, 69-74, 2003. Hayata et al., *Cytogenet. Genome Res.*, 104, 237-239, 2004)。

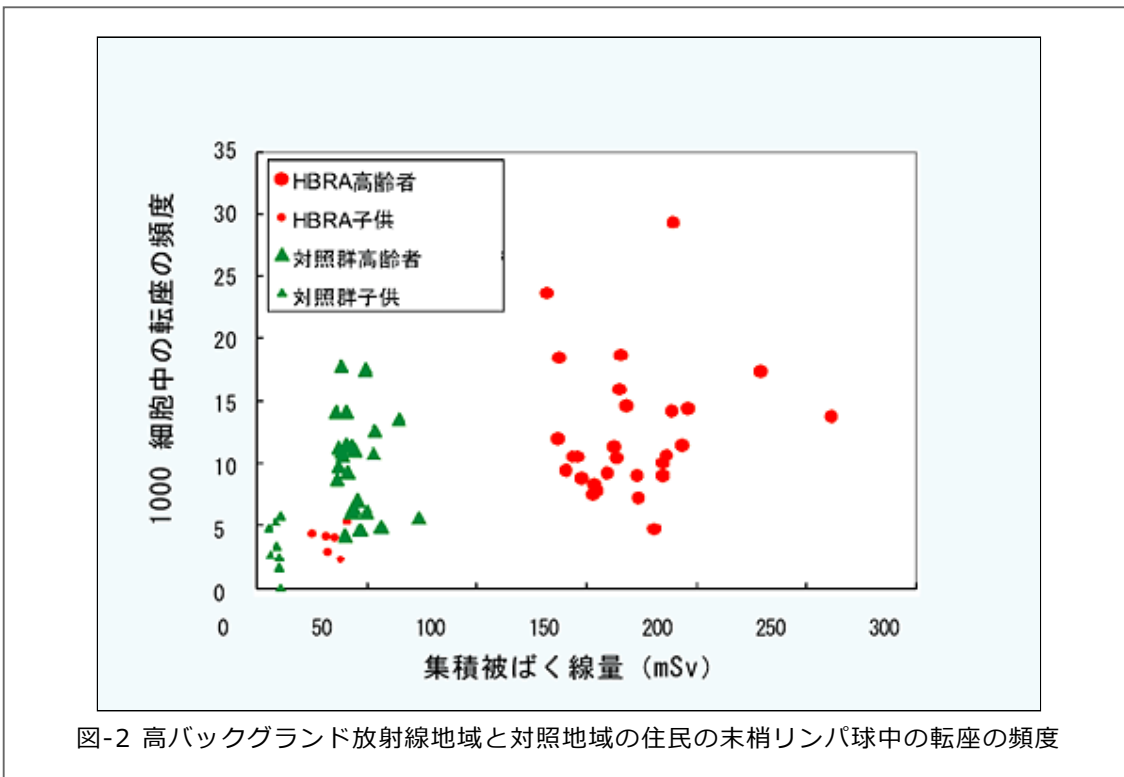


図-2 高バックグラウンド放射線地域と対照地域の住民の末梢リンパ球中の転座の頻度

このような結果をもたらす変異原を探るために、両地域において合計 216,182 細胞につき転座を解析して喫煙と高バックグラウンド放射線の影響を比較したところ、喫煙が高バックグラウンド放射線より有意に多くの染色体異常を蓄積させることが明らかになった(図-3.Zhang, Wang, Chen, Minamihisamatsu, Hayata* et al., J.Radiat. Res. 45, 441-446, 2004)。

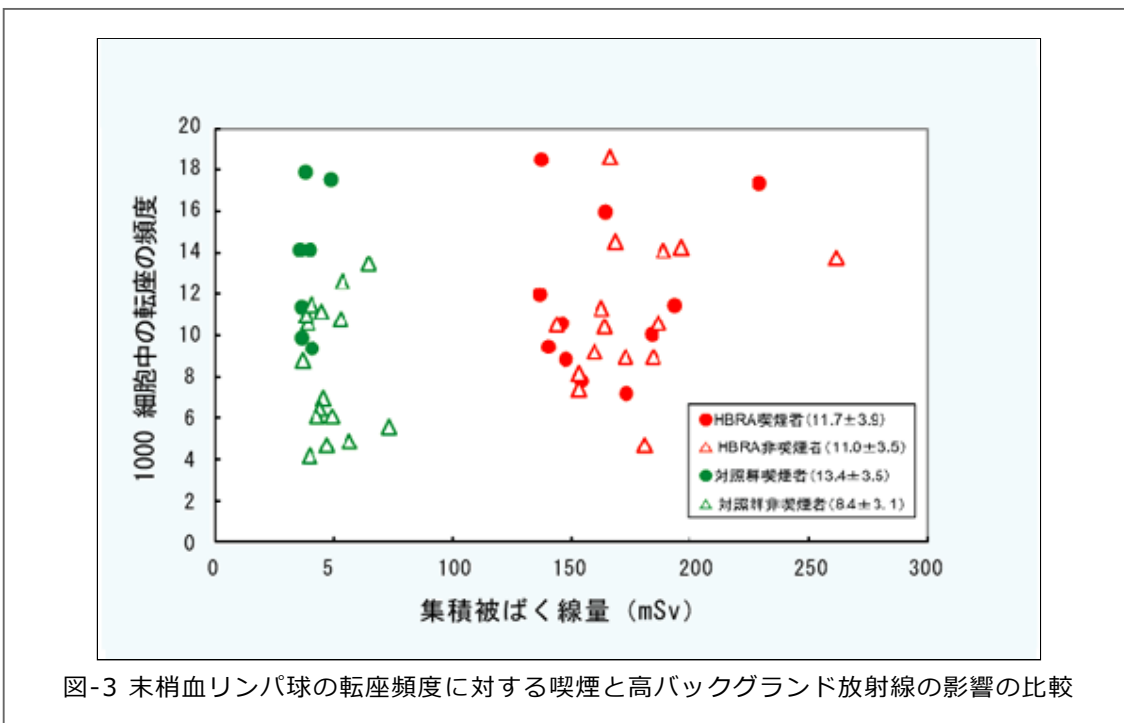


図-3 末梢血リンパ球の転座頻度に対する喫煙と高バックグラウンド放射線の影響の比較

■ 閾値問題の考察

最近、末梢血リンパ球中の転座の頻度が喫煙(Ramsey et al.: Mutat. Res. 338, 95-106, 1995)や大気汚染(Sram et al., Toxicol. Lett. 49, 335-344, 2004)で高くなることやリンパ球中の染色体異常の頻度が高いと発ガンリスクが高いことなどが明らかにされ(Bonassi et al., Cytogenet. Genome Res. 104, 376-382, 2004)、末梢血リンパ球の染色体異常の頻度が環境変異原の健康影響の指標となることが明らかになってきている。今回の研究により自然放射

線の3-5倍程度の放射線による健康への影響は、普通に生活している中で環境から受ける非放射線変異原による健康への影響の個人差の範囲内と考えられる。

さらにこの研究で明らかになったことに閾値の問題がある。放射線の影響には閾値があるか無いかについて長い間論争が続いているが、高バックグランド自然放射線地域のような低線量率の下で染色体異常の増加が認められたことは、放射線の影響には閾値が無いことを意味する。つまり、普通の地域では一般人は年平均約2.4ミリシーベルト被ばくする(UNSCEAR 2000)が、この線量は体中のすべての細胞に年平均1飛跡の放射線が通過する線量である。中国の高バックグランド放射線地域では年平均10ミリシーベルト以下の被ばくであるため、すべての細胞に年平均4飛跡以下、換言すると3ヶ月に平均1飛跡以下の放射線が通過することになる。

高バックグランド放射線地域住民の染色体解析により、放射線の影響には絶対閾値は無いが相対閾値があることが明らかになった。(本稿は平成17年3月9-10日、東京フォーラムで開催された(財)放射線影響協会 2004年度放射線疫学情報シンポジウムにおける講演要旨をもとに作成した。)

(放射線安全研究センター長 早田 勇)

天国に行くにはどうするか・・・

ある不思議な世界があり、ここでは人が死ぬと天国か地獄に行くことになっています。どちらに行くかは大変変わっており、次の様になっています。

1. 人が死ぬとひきかえすことのできない 一本道を歩いていきます。
2. 途中、道が二本に分かれ一方は天国へ他方は地獄へ行く道です。
3. そこには全く同じ姿をした悪魔と天使が 立っています。そしてどちらもどの道が天国または地獄へ行く道かを知っています。
4. どちらかに質問すると「yes」または「no」とだけ答えてくれます。
5. 天使は必ず正しい答えをし、悪魔は必ず嘘の返事をしなければなりません。
6. 質問はどちらか一方に一回だけする事ができます。
7. 質問は「yes」または「no」と答えられれば、どんな複雑な質問でもゆるされます。

さてもし貴方が天国へ行きたいとした場合、どの様な質問をすれば天国へ行く道がわかるのでしょうか？

(加速物理工学部 藤澤 高志) (答えは[最後のページ](#))

多数のヒトがん由来培養細胞株の 放射線感受性を指標とした分類

通常、培養された哺乳類細胞の放射線感受性はコロニー形成法で評価されます。照射線量の増加に伴って放射線照射された細胞のコロニー形成能は減少します。それで、非照射細胞のコロニー形成能に比べて被照射細胞のコロニー形成能がどれだけ減少したかを比べることによってその細胞の生存率を求めます。

40数年も前にEikindらは、低LET放射線を照射した細胞の線量-生存率を片対数グラフにプロットすると、その反応曲線は非線形モデルに非常によくフィットすることを見出し、そのモデルが次の近似式で表されることを発表しました(Radiation Research, 13, 556-593, 1960)

$$S (\%) = 100 [1 - (1 - e^{-D/D_0})^n]$$

この式から細胞の放射線感受性を比較する上で非常に便利な生存率指標が得られます(図-1)。通常、次の3個の指標で放射線感受性を比較します。

D_0 値: 生存率曲線の直線部分において、生存率を37%までに減ずるに必要な線量です。上記近似式において、 $e^{-D/D_0} = e^{-1} = 0.37$ (即ち、 $D=D_0$)から考えられました。

D_q 値: 生存率曲線の直線部分が、生存率100%の横軸と交わるまでの線量、即ち、生存率曲線の肩部分に相当する線量を示します。

D^{10} 値: 生存率を10%にまで減少させるのに必要な線量を示します。

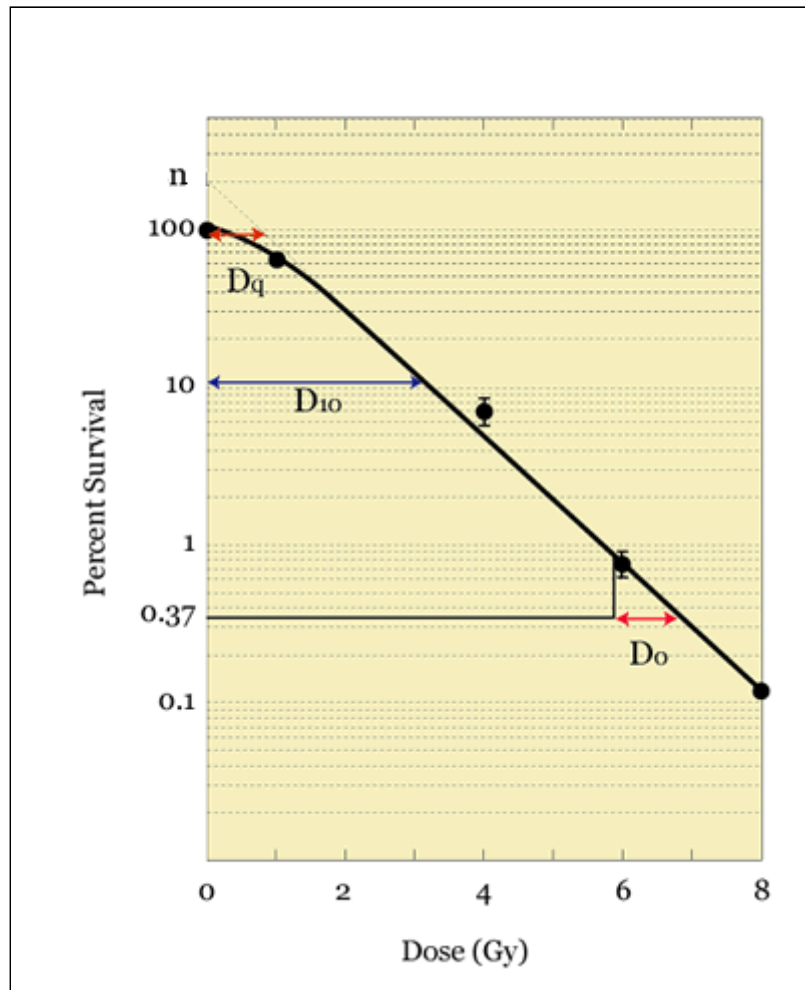


図-1 線量-生存率を非線形モデル、 $S (\%) = 100 [1 - (1 - e^{-D/D_0})^n]$ にフィットさせた場合における生存率指標(D_0, D_q, D_{10})と n 値の位置

なお、上記近似式において、 n 値は生存率曲線の直線部分を延長して、 Y 軸と交差するところの値(生存率が100%のポイントを1として求めます)を示します。 n 値は、標的理論における細胞内標的数に相当すると考えられています。高LET放射線では n 値が1に近づくと考えられており、高LET放射線照射後の線量-生存率反応は、 $S (\%) = 100e^{-D/D_0}$ の近似式に近づきます。

ヒト放射線感受性関連遺伝子を網羅的に検索するための研究の一環として、放射線感受性の異なる培養細胞に放射線を照射した場合に、発現が変動する遺伝子群をマイクロアレイ技法を用いて選び出す研究が計画されました([放医研NEWS2005年1月号フロンティア研究情報シリーズ-1参照](#))。今回は、多数のヒト癌由来培養細胞株を放射線高感受性から抵抗性までを分類した結果を紹介します。

用いた細胞は、食道癌由来細胞31株、乳癌由来細胞5株、膵臓癌由来細胞3株、子宮頸癌由来細胞5株、大腸・直腸癌由来細胞7株、脳腫瘍由来細胞3株の計54細胞株です。種々の予期せぬバイアスを出来るだけ除くために、細胞の継体と生存率アッセイに用いた培養液は単一口ットの10%胎牛血清を添加した α MEM培養液で統一し、すべての作業は筆者一人で行いました。各細胞株について3~8回の繰り返し実験を行い、その平均値と標準偏差値から線量-生存率曲線と3種の生存率指標(D_0 値、 D_q 値、 D_{10} 値)を求めました。

例として、乳癌由来細胞5株の線量 - 生存率曲線を[図-2\(a\)](#)に示します。HCC1937細胞はBRCA1遺伝子に突然変異を持つことが知られており、BRCA1たんぱく質を発現して

いないことを免疫染色法で確認しました(図-2(b))。BRCA1たんぱく質は、放射線照射によって誘発されるDNA二本鎖切断(DSBs)に対する相同組み換え修復系(HR)で主要な働きをしています。このたんぱく質が欠損するとDSBsが修復されないためにその細胞は放射線に高感受性となります。

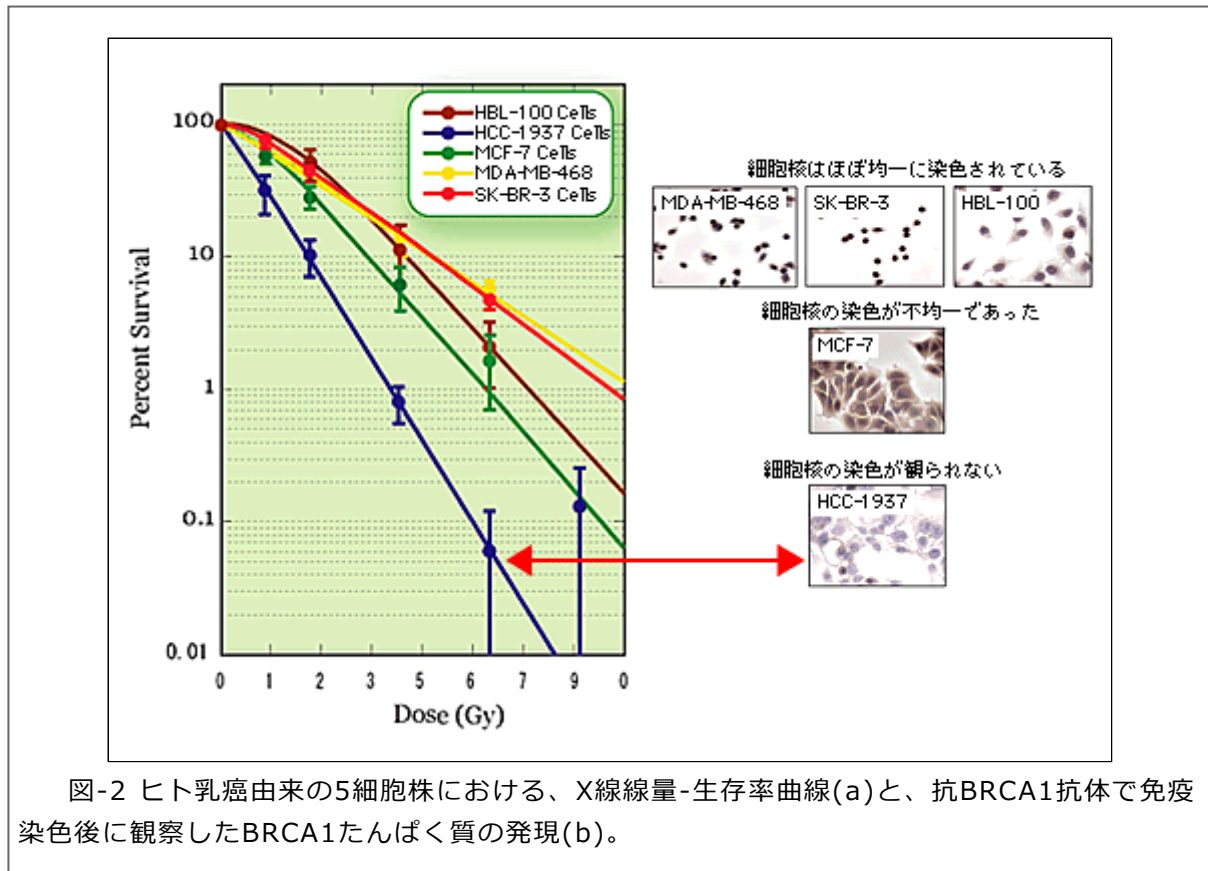


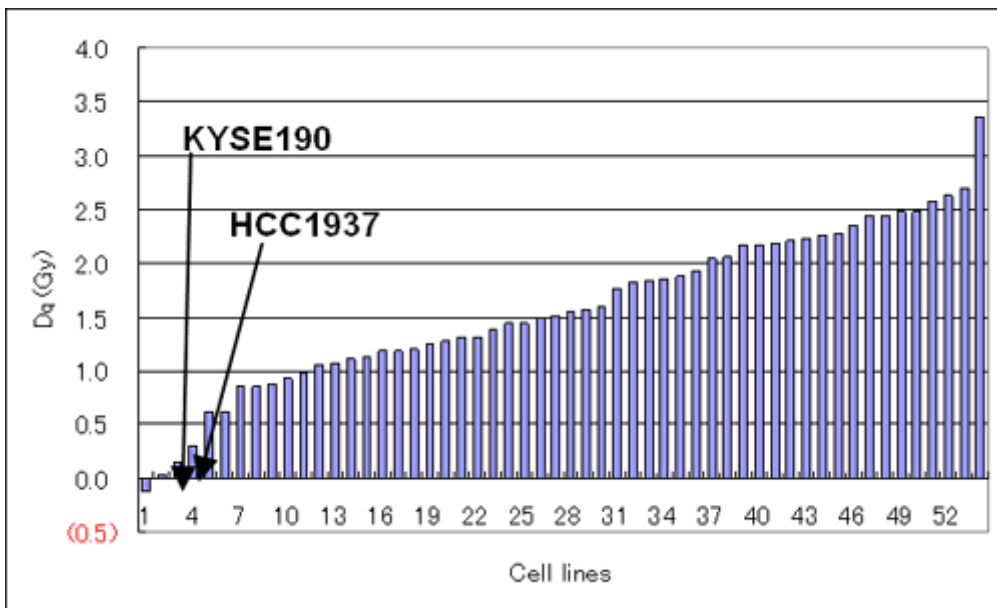
図-2 ヒト乳癌由来の5細胞株における、X線線量-生存率曲線(a)と、抗BRCA1抗体で免疫染色後に観察したBRCA1たんぱく質の発現(b)。

本研究では、HCC1937細胞を放射線高感受性のコントロール細胞としました。図-3は、3種の生存率指標の大きさ順に、54細胞株を並べた結果を示します。細胞培養、放射線照射、生存率評価の一連の作業・基準を可能なかぎり同じにして放射線感受性の評価を行ったにもかかわらず、いずれの指標においても非常に大きな変動が見られました。しかも、その変動は段階的に移行します。すなわち、前述のHCC1937細胞のようないくつかの例外を除いて、各細胞株の放射線感受性は複数の遺伝子(群)によって決定されていることが示唆されます。図-4に、 D_q 、 D_0 、 D_{10} 間の相関を調べました。 D_0 、 D_{10} 間には弱いながらも相関関係があります。しかし、 D_q は D_0 と D_{10} のいずれとも相関関係が認められません。その理由は、 D_q が低線量域の指標であるのに対して、 D_0 および D_{10} が高線量域の指標であるからです(図-1)。 D_q は低線量域の指標であることから、いわゆる亜致死損傷とその修復を反映する指標であると考えられます。即ち、小さい D_q 値を持つ細胞ではDSBsの修復機構が欠損あるいは低下していることが示唆されます。小さい D_q 値を持つグループにKYSE190細胞が含まれていました。それで我々は、DSBs修復系での主遺伝子であるATMとDNA-PKcsの塩基配列を調べました。驚いたことに、ATMの5箇所と、DNA-PKcsの1箇所にアミノ酸置換を伴う突然変異のあることがわかりました。ウエスタンブロッティング法で両たんぱく質を調べたところ、正常なサイズのDNA-PKcsが産生されていましたが、ATMたんぱく質は正常サイズよりも短くなっていました。KYSE190細胞のドナー患者は放射線高感受性疾患として知られる毛細血管拡張運動失調症(ATMが原因遺伝子として知られている)とは診断されていないので、KYSE190細胞が由来した食道癌の発生・進展のどこかのステップでATMに突然変異が起こったと考えられます。このATMたんぱく質が機能を失っていることは、放射線照射後のChk2たんぱく質がリン酸化されないことで確認しました。ここでは詳述しませんが、

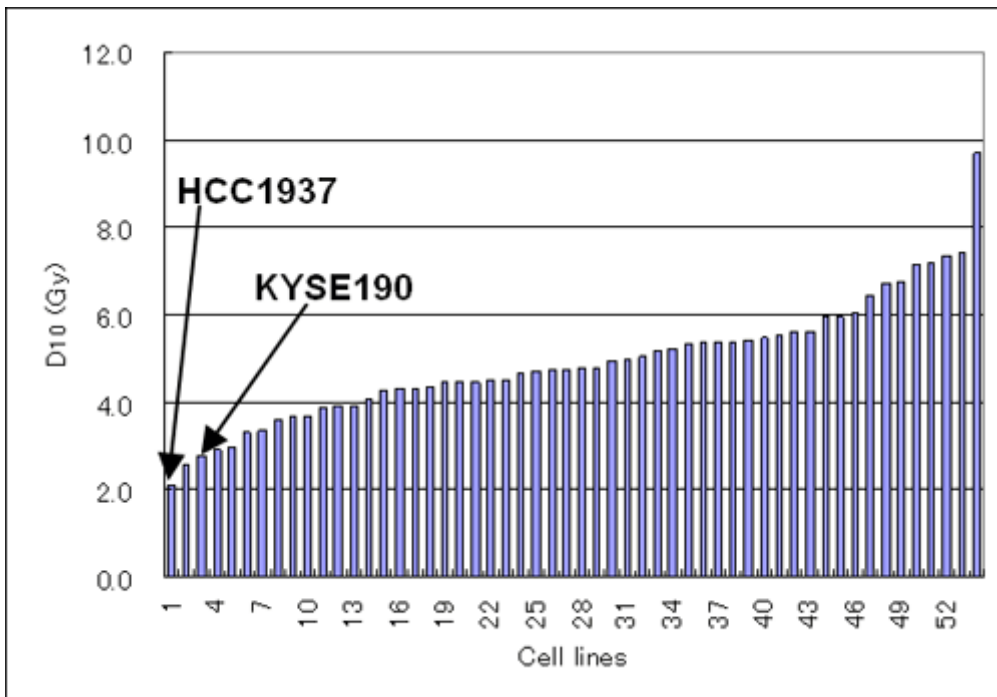
乳癌由来細胞は小さい D_q 値を持ち、ミスマッチ修復遺伝子(MMR)に突然変異を持つ細胞は小さい D_q , D_0 , D_{10} を持つ傾向にありました。以上のように、正確な線量-生存率曲線を求めることによって細胞生存率に関する重要な情報が得られます。

さて、[図-3](#)、[図-4](#)中で、DSBs修復系に関わる既知遺伝子(BRCA1, BRCA2, MMR)に突然変異を持つ細胞が9株ありました。これらの9株以外の細胞株の放射線感受性にも大きな変動があり、それらの変動には複数の遺伝子群が関わっていると思われます。放射線感受性の異なるヒト癌由来細胞を用いての、網羅的な遺伝子発現解析による放射線感受性関連遺伝子の検索については次回の本ニュースで紹介されます。

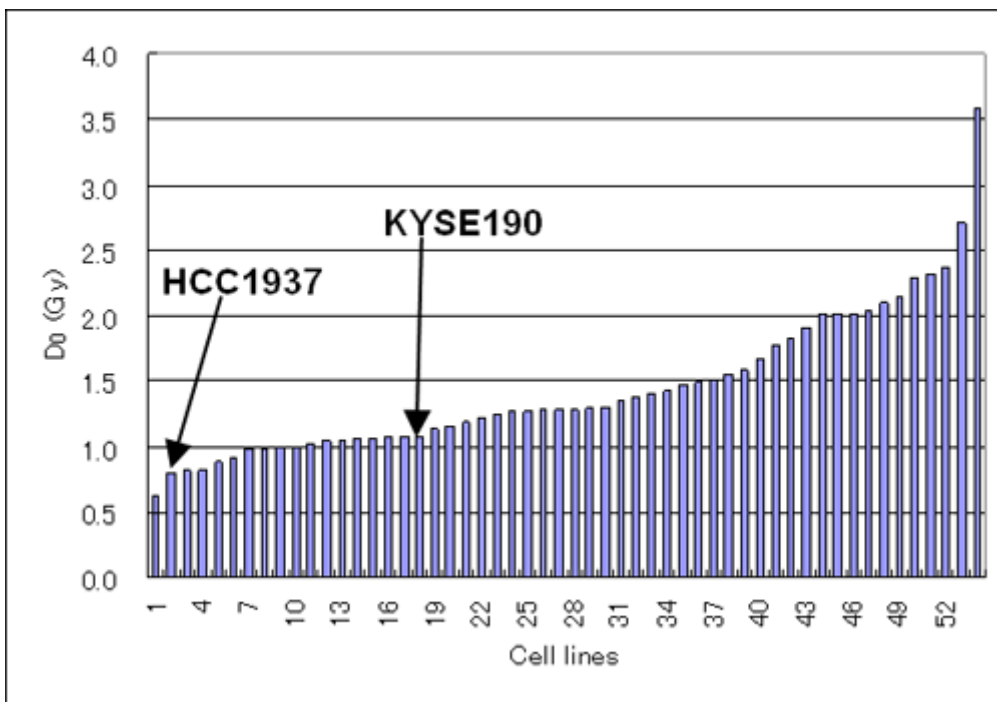
(フロンティア研究センター 放射線感受性遺伝子研究プロジェクト
フロンティア研究員 伴 貞幸)



(a)

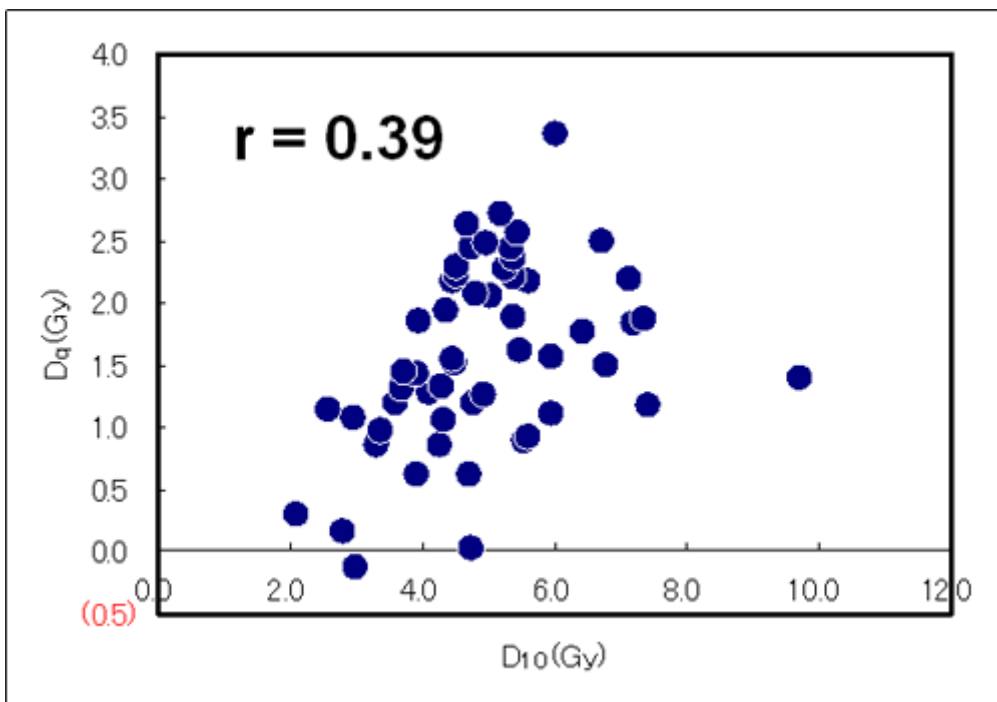


(b)

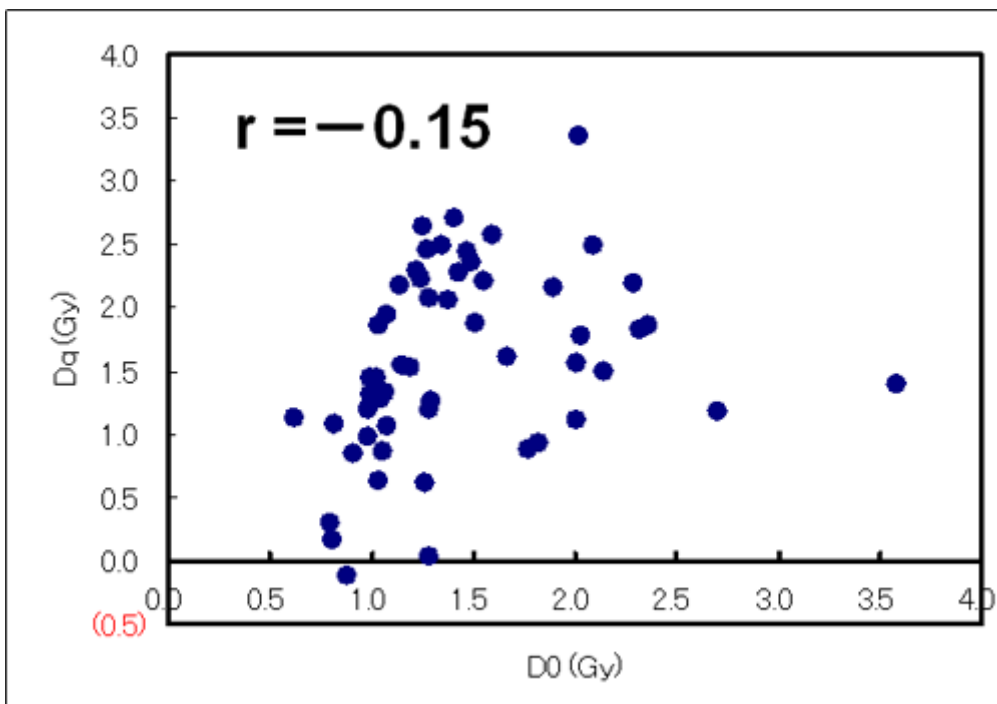


(c)

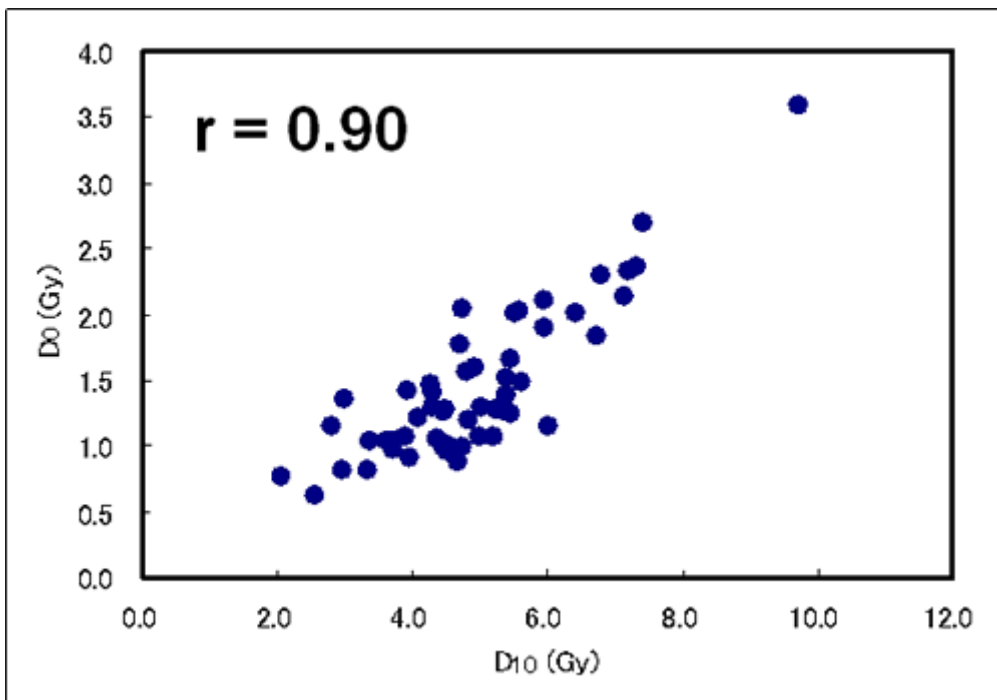
図-3 ヒト癌由来培養細胞54株の、放射線感受性の大小を指標としての分類。(a) D_q 値による分類, (b) D_{10} 値による分類, (c) D_0 値による分類



(a)



(b)



(c)

図-4 3種の放射線感受性指標間の相互関係。(a) D_{10} 値と D_q 値間の比較。(b) D_0 値と D_q 値間の比較。(c) D_{10} 値と D_0 値間の比較。 r は相関係数を示す

紹介コーナー

緊急被ばく医療研究センターの研究・業務

▼ 3月11日(金)「第14回医療支援構築委員会」に委員として出席

(財)原子力安全研究委員会にて開催された上記委員会に当センター職員が委員として出席し、開催報告及び平成16年度報告書(案)についての検討に参画した。3月15日(火)～16日(水)「Philippine Nuclear Research Institute」を訪問当センター職員が上記研究所を訪問し、相互の緊急被ばく医療について議論を行った。

▼ 3月16日(水)「平成16年度第2回物理学的線量評価ネットワーク会議」の開催

茨城県で開催した上記会議において、放医研への患者受入の基本方針に基づく線評価測定法の課題について議論を行った。

▼ 3月16日(水)「平成16年度緊急被ばく医療関連情報連絡会」に講師として参加

茨城県で開催された上記連絡会に当センター職員が講師として参加し、三次被ばく医療機関の役割等について講演を行った。

▼ 3月17日(木)「平成16年度原子力防災研修事業 救護所活動講座講師連絡会」に出席

(財)原子力安全技術センターにて開催された上記連絡会に当センター職員が出席し、平成16年度原子力防災研修講座の実施状況等について議論を行った。

▼ 3月17日(木)「第3回緊急被ばく医療対策専門委員会」に委員として出席

航空会館にて開催された上記委員会に当センター職員が委員として出席し、平成16年度「緊急時対策総合技術調査」事業のとりまとめについて議論を行った。

▼ 3月17日(木)「第2回被ばく医療関係者実務研修調査専門委員会」に委員として出席

航空会館にて開催された上記委員会に当センター職員が委員として出席し、平成16年度「緊急被ばく医療関係者実務研修事業」のとりまとめについて議論を行った。

▼ 3月18日(金)～21日(月)「Institute Superiore di Sanita」及び「APAT(National Agency for Environmental Protection and Technical Services)」を訪問

当センター職員が上記2つの研究所を訪問し、放射線関連研究の現状と、イタリアでの原子力防災体制、緊急被ばく医療体制を調査した。

▼ **3月18日(金)「平成16年度防災訓練の実施調査 第5回緊急被ばく医療に係る防災訓練のあり方検討委員会」に委員として出席**

(財)原子力安全技術センターにて開催された上記委員会に当センター職員が委員として出席し、平成16年度成果報告書(案)について議論を行った。

▼ **3月18日(金)「茨城県地域緊急被ばく医療連携協議会(打ち合わせ)」を開催**

放医研が茨城県で開催した上記協議会で、放医研と茨城県緊急被ばく医療体制整備の進め方、放医研における患者受入の基本方針の概要を説明し、今後の協議の進め方について議論を行った。

▼ **3月18日(金)「平成16年度第3回原子力防災研修部会」に委員として出席**

(財)原子力安全技術センターにて開催された上記研修部会に当センター職員が出席し、平成16年度原子力防災研修の実施結果及び平成17年度防災研修事業予定について検討を行った。

▼ **3月21日(月)「平成16年度福井県原子力防災訓練」に参加**

福井県で開催された上記訓練に当センター職員が参加し、緊急被ばく医療措置訓練への技術的助言を行った。

▼ **3月23日(水)「原子力安全委員会委員 久住静代委員」放医研を視察**

久住委員が来所され、当センター緊急被ばく医療施設を視察し、緊急被ばく医療研究の取り組みについて緊急被ばく医療関係者と意見交換を行った。

▼ **3月23日(水)「宮城県 原子力防災緊急時医療活動マニュアル研究会」に出席**

宮城県にて開催された上記研究会に当センター職員がオブザーバーとして出席し、三次被ばく医療体制の現状、放医研における患者受入の基本方針の概要を報告した。

▼ **3月23日(水)「宮城県地域緊急被ばく医療連携協議会(打ち合わせ)」を開催**

宮城県で開催した上記協議会で、放医研と宮城県緊急被ばく医療体制整備の進め方、放医研における患者受入の基本方針の概要を報告し、今後の協議の進め方について議論を行った。

▼ **3月25日(金)「第3回静岡地区 緊急被ばく医療ネットワーク調査検討会」に出席**

静岡県にて開催された上記調査検討会に当センター職員がオブザーバーとして出席し、静岡県立総合病院マニュアル(案)、県地域防災計画の改訂等について検討を行った。

▼ **3月25日(金)「平成16年度青森県原子力防災訓練(六力所再処理施設対象)に係る事後連絡会議」に出席**

青森県で開催された上記会議に当センター職員が出席し、平成16年度青森県原子力防災訓練(六力所再処理施設対象)の反省等を行った。

▼ **3月25日(金)「青森県地域緊急被ばく医療連携協議会(打ち合わせ)」を開催**

青森県で開催した上記協議会で、放医研と青森県緊急被ばく医療体制整備の進め方、放医研における患者受入の基本方針の概要を報告し、今後の協議の進め方について議論を行った。

▼ **3月28日(月)「北海道地域緊急被ばく医療連携協議会(打ち合わせ)」を開催**

北海道で開催した上記協議会で、放医研と北海道緊急被ばく医療体制整備の進め方、放医研における患者受入の基本方針の概要を報告し、今後の協議の進め方について議論を行った。

▼ **3月29日(火)「原子力体験セミナー」に講師として参加**

日本原子力研究所にて開催された上記セミナーに講師として参加し小・中・高の教職員を対象とした「放射線の人体への影響と防護」について講演を行った。

▼ **3月29日(火)「福島県地域緊急被ばく医療連携協議会(打ち合わせ)」を開催**

福島県にて開催された上記協議会で、放医研と福島県緊急被ばく医療体制整備の進め方、放医研における患者受入の基本方針の概要を報告し、今後の協議の進め方について議論を行った。

▼ **4月5日(火)「千葉県原子爆弾被爆者健康管理手当等認定委員会」に委員として出席**

千葉県で開催された上記委員会に当センター職員が委員として出席し、原子爆弾被爆者に対する健康管理手当等の審査を行った。

▼ **4月9日(土)「平成17年度JCO事故関連周辺住民等の健康診断等の実施」に参加**

茨城県で開催された上記健康診断にて当センター医師が診断を行った。

▼ **4月10日(土)「平成17年度JCO事故関連周辺住民等の健康診断等の実施」に参加**

茨城県で開催された上記健康診断にて当センター医師が診断を行った。

(緊急被ばく医療研究センター 調整管理室)

お知らせ

ジャーナルに紹介された放医研・研究者の発表論文(共著も含む)

発表原著論文のうち2月ジャーナルに掲載された論文は以下のとおりです。

タイトル	発表者	ジャーナル	巻	頁	年
Contribution of synchrotron oscillation to spill ripple in RF-knockout slow-extraction	Takuji Furukawa, Kouji Noda	Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A	539	44-53	2004
Research on potential radiation risks in areas with nuclear power plants in Japan: leukeamia and malignant lymphoma mortality between 1972and 1997 in 100 selected municipalities	Yasuhiko Yoshimoto, Shinji Yoshinaga, Kazuhide Yamamoto, Kenzo Fujimoto, Kanae Nishizawa, Yasuhito Sasaki	Journal of Radiological Protection	24	343-368	2004
Role of Keratinocyte-Derived Factors Involved in Regulating the Proliferation and Differentiation of Mammalian Epidermal Melanocytes	Tomohisa Hirobe	Pigment Cell Research	18	2-12	2004
The Effects of Nutrient Uptake by Plant Roots on the Aluminum Behavior in the Rhizosphere of Soybean	Yasuo Nakamaru, Shigeo Uchida	Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition	76	15-20	2004

Severe growth retardation and short life span of double-mutant mice lacking Xpa and exon 15 of Xpg	Naoko Shiomi, Masahiko Mori, Seiji Kito, Yoshinobu Harada, Kiyoji Tanaka, Tadahiro Shiomi	DNA Repair	4	351-357	2004
Mobile Wireless DICOM Server System and PDA with High-Resolution Display: Feasibility of Group Work for Radiologists 1	Norio Nakata, Susumu Kandatsu, Naoki Suzuki, Kunihiro Fukuda	Radiographics	25	273-283	2004
Nucleosomal structure of undamaged DNA regions suppresses the non-specific DNA binding of the XPC complex	Takeshi Yasuda, Kaoru Sugasawa, Yuichiro Shimizu, Shigenori Iwai, Tadahiro Shiomi, Fumio Hanaoka	DNA Repair	4	389-395	2004
Electron-Transfer Mechanism in Radical-Scavenging Reactions by a Vitamin E Model in a Protic Medium	Ikuo Nakanishi, Tomonori Kawashima, Kei Ohkubo, Hideko Kanazawa, Keiko Inami, Masataka Mochizuki, Kiyoshi Fukuhara, Haruhiro Okuda, Toshihiko Ozawa, Shinobu Itoh, Shunichi Fukuzumi, Nobuo Ikota	Organic & Biomolecular Chemistry	3	626-629	2004

お知らせ

職員の公募

● 任期付研究員の公募

所属・職名:

重粒子医科学センター医学物理部
ビーム測定・開発室研究員(任期付)1名

業務内容:

- 1)光子線治療での品質管理及び品質保証に関する研究・開発。
- 2)重粒子線治療での品質管理及び品質保証に関する研究・開発。
- 3)上記研究に関する研究技術やノウハウの継承。

報酬:

当研究所が独自に定めた、一般職の国家公務員と同等の給与体系(一般職の任期付研究員(若手育成型)と同等の処遇)による。

応募資格:

- 1)光子線治療での品質管理業務経験を有すること。
- 2)任用時において博士の学位を有すること。
- 3)任用時において原則年齢35歳未満であること。
- 4)医学物理士及び放射線治療品質管理士の資格を有することが望ましい。

提出書類:

- 1)履歴書(別紙様式)
- 2)推薦書
- 3)主要業績概要(A4版2千字以内)
- 4)今後の研究の抱負(A4版2千字以内)
- 5)研究業績目録(原著、総説、学会発表別)
- 6)主要論文別刷5編以内(コピーでも可)

応募締切:

平成17年5月31日(火)

任用予定期間:

平成17年7月1日以降のなるべく早い時期から3年間

(当研究所は、任期終了前に厳格な業績評価を行い、終身職への採用を検討することとしています)

書類提出先:

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1

放医研 総務部 総務課 人事係 TEL043-206-3005(ダイヤルイン)

問い合わせ先:

重粒子医科学センター医学物理部長 金井 達明

(職務内容) E-mail kanai@nirs.go.jp

※ 郵送は書留とし、封書に「重粒子医科学センター医学物理部ビーム測定・開発室任期付研究員応募書類在中」と朱書き願います。

● 技術職員の公募

所属・職名:

重粒子医科学センター医療情報室 主任技術員または、技術員1名

業務内容:

- 1)医療情報システム及び画像管理システムの設計・構築・管理。
- 2)臨床データや医療情報に関するデータベースのスキーマの設計及びデータの入力設計。
- 3)医療情報システムのデータ解析及び治療効果判定の研究。

報酬:

当研究所が独自に定めた、技術職の給与体系(一般職の国家公務員(研究職)とほぼ同等の給与体系)による。

応募資格:

- 1)医療情報システム及び医用画像管理システムに関する専門的知識と3年以上の経験を有すること。
- 2)医療情報技師か情報処理技術者または同等の資格を有すること。

提出書類:

- 1)履歴書(別紙様式)
- 2)推薦書
- 3)主要業績概要(A4版2千字以内)
- 4)今後の抱負(A4版2千字以内)
- 5)業績目録(原著、総説、学会発表別)
- 6)主要論文別刷5編以内(コピーでも可)

応募締切:

平成17年5月31日(火)

任用予定日:

平成17年7月1日以降のなるべく早い時期

書類提出先:

〒263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1

放医研 総務部 総務課 人事係 TEL043-206-3005(ダイヤルイン)

問い合わせ先:

重粒子医科学センター医療情報室長 安藤 裕

(職務内容) E-mail ando_y@nirs.go.jp

※ 郵送は書留とし、封書に「重粒子医科学センター医療情報室主任技術員または技術員応募書類在中」と朱書き願います。

固体中における高速多価イオンの電子励起状態

■ はじめに

加速器等で加速された高速多価イオンは、固体に入射した後、物質との相互(電離/捕獲等)作用を多数回繰り返して、その電荷状態が平衡に達します。このような過程を経た後の、つまり固体を出た高速多価イオンの電離状態(何個の電子が付いているか)は、主にイオンの「原子番号と速度」及び物質の密度から予測することが可能です。さらに、電磁石等で分析すれば、その詳細情報が分ります。しかし、励起状態は容易には判定できません。何故なら、電子が内殻(基底状態)に居ても外殻(励起状態)に居ても、帰属するイオンの電荷としては同じだからです。

基底状態以外の状態を一般的には「励起状態」と言い、主量子数(n)に応じて色々なレベルが存在します。通常は、電子軌道間の遷移時に起こる発光スペクトル等を解析して励起状態の情報を得ますが、今回は「荷電分布データから、この励起状態を知ることにもできる」という課題について述べます。

この課題はロシアからの招聘研究者Shevelko氏(理論原子物理学)が中心となり、HIMAC線形加速器で得られた高速(6.0MeV/u)の様々なイオン種の荷電変換データを解析して得られたものです[1]。一つ目の結論を簡単に言えば、「高密度の固体中では高く励起されたイオン状態は存在しない」と言うことです。何故なら、イオンが高く励起されても、原子がビッシリ詰った固体/液体においては引き続き原子との衝突が直ぐ(頻繁)に起ります。高く励起こされた電子は、その電子雲が大きく広がっていて電離断面積が非常に大きい状態となっており、直ぐに剥が(電離)されて高い励起状態が保持されないのです。しかし、全電子が基底状態に居るかと言うと、そうでも無く、二つ目の結論として低く励起された(電離されにくい)状態も含んでいることが分りました。この辺りが、全く別な(新しい)方法から電子励起状態を知る上で、面白い所です。

■ 電荷分布と解析方法

高速多価イオンが固体(薄炭素膜)中を走る際のイオンの電離/励起断面積が、密度効果に大きく影響されることは、既に[2004年3月号\(No. 88\)の放医研ニュース](#)で話しました。方法は、HIMAC入射器(6.0 MeV/u)における多価イオンの荷電変換分布に関する実験結果を、「3-電荷モデル」を用いて解析/検討することでした。イオンの電荷状態は主に3種類で記術出来る事を利用しました。初めて、最新の密度効果理論をHIMAC実験データに準拠する形で議論出来ました。今回は、多電子イオンとして、電子を18個持つArと26個持つFeイオンを考えてみます。Siより軽いイオンでは、6.0 MeV/uにおける荷電変換における最大fractionは全電離イオンになり、C(炭素)イオンでは全電離fractionは98%に達します。同じ速度におけるArの場合、最大fractionを与える電荷はAr¹⁷⁺(1個の電子が付いたH-like ion)に変化し、もはや全電離イオンでは無くなります。Feでは主たるfractionは(なんと)Fe²⁴⁺(2個電子が付いたHe-like)及びFe²³⁺(3個電子が付いたLi-like)やFe²²⁺(4個電子が付いたBe-like)イオン等に分布します[2]。FeイオンのK殻電子は、6.0 MeV/uにおける衝突においては、原子核との

結びつきが非常に強く(ほぼ一体と見なすことが出来て)、ほとんど電離の対象にはなりません。

今回はさらに、密度効果を考慮して計算した多価イオンの平衡電荷分布と実験で得られた電荷分布との比較から、固体中における多価イオンの電子励起状態を特定出来る事を示します。Arイオンの場合、主量子数(n)は1-2、Feの場合は1-4である事が分かりました。占有し得る状態の数は、原子番号の大きい(重いイオン)ほど多くなる事も分かりました。解析方法としては、ArやFeのような多電子原子を精度良く検討するために、4-電荷モデルを用いました。固体を出たイオンの平衡電荷fractionを F_q^∞ とし、放射decay及び多重電離/捕獲過程を無視すると、 F_0^∞ は(1)式のように表せます。

$$F_0^\infty = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{10}} \left(1 + \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{21}} \left(1 + \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{32}} \right) \right)} \quad (1)$$

同様に、 $F_1^\infty = F_0^\infty \sigma_{01} / \sigma_{10}$ 、 $F_2^\infty = F_1^\infty \sigma_{12} / \sigma_{21}$ 、 $F_3^\infty = F_2^\infty \sigma_{23} / \sigma_{32}$ 、 $F_0^\infty + F_1^\infty + F_2^\infty + F_3^\infty = 1$ のように、平衡電荷fractionは、簡単な比例と和の関係にあります。ここで、 σ_{01} 、 σ_{12} 、 σ_{23} 及び σ_{10} 、 σ_{21} 、 σ_{32} は各々電離/捕獲の断面積です。

■ 密度効果と電荷分布

気体とは異なり、固体のような密度の高い物質における電離断面積は、(2)式で表す事が出来ます。(2)式の意味は、固体中電離断面積は「気体中における電離断面積と励起断面積の和」で表せると言う事です。ターゲット密度の増加と共に、電離断面積も増加すると言う事です。電離断面積に励起断面積が直接関与する事は、一見不思議ですが、固体の場合は励起した電子のほとんどが直ちに電離されると考えれば容易に理解出来ると思います。

$$\sigma_{ion}^{DE}(n_0) = \sigma_{ion}(n_0) + \sigma_{ex}(n_0 - n) \quad (2)$$

(2)式による電離断面積の計算においては、幾つかの「電子励起状態」を選ぶ自由度が存在します。そして、幸運な事に、且つ驚くべきことに、ある電子励起状態を選択して計算した電荷分布は、原子物理理論の観点からみた場合、この選択に非常にsensitiveであり、一つ状態を変えただけで電荷分布は大きく変ると言う事を見つけました。僅かな断面積の違いが、多数回の衝突を経た後に得られる電荷分布に大きく影響する事は容易に推測出来ることでしたが、実際は予想外に大きな影響力であり、これが励起状態を評価する上で幸いしました。

解析過程は次のようなものです。我々は、励起状態の数を基底状態から一つ毎、電子励起が起こり得る量子数に向けて、増やして行き、得られる電荷分布と実験値との比較を行って見ました。結果から言いますと、「特定の電子状態まで考慮する事により、実験分布と計算分布に非常に良い一致が観られる、つまり固体から出るイオンの電子状態はある決まった範囲の量子状態を取る」事も見出しました。この過程における励起遷移は、 $n_0 \dot{\nu}_0 \rightarrow n_0 + 1, \dot{\nu}_0 + 1$ において最も起り易い事を用いています。例えば、電子が各々1、2、3個付いたイオンにおいては、

1s → 2p, 2s → 3p, 2p → 3d等が基底状態からの励起断面積としては最も大きな値を与えます。

Arの場合

図-1は、HIMAC線形加速器で得られたAr⁸⁺を炭素(C)薄膜に入射した場合の実験値と上記計算結果との比較です。Curve-1の荷電分布はAr¹⁷⁺、Ar¹⁶⁺、Ar¹⁵⁺に付いている電子群(1、2、3個)が各々(1s, 1s, 2s)の基底状態にのみ捕獲されると仮定した場合で、実験値とは懸け離れています。つまり、励起状態が有り得る事を示唆しています。次に、Curve-2はこれらの電子群が一つ上の励起状態である(2s, 2s, 2p)に捕獲される場合も考慮した場合で、実験値と極めて良く一致します。Curve-3は、更に一つ上の励起状態(2p, 2p, 3s)に捕獲される場合も加えた場合で、今度は懸け離れてしまいました。つまり、Curve-2の時のみ良い一致が得られます。基底状態及び低い励起状態($n \leq 2$)に捕獲される事が分かりました。

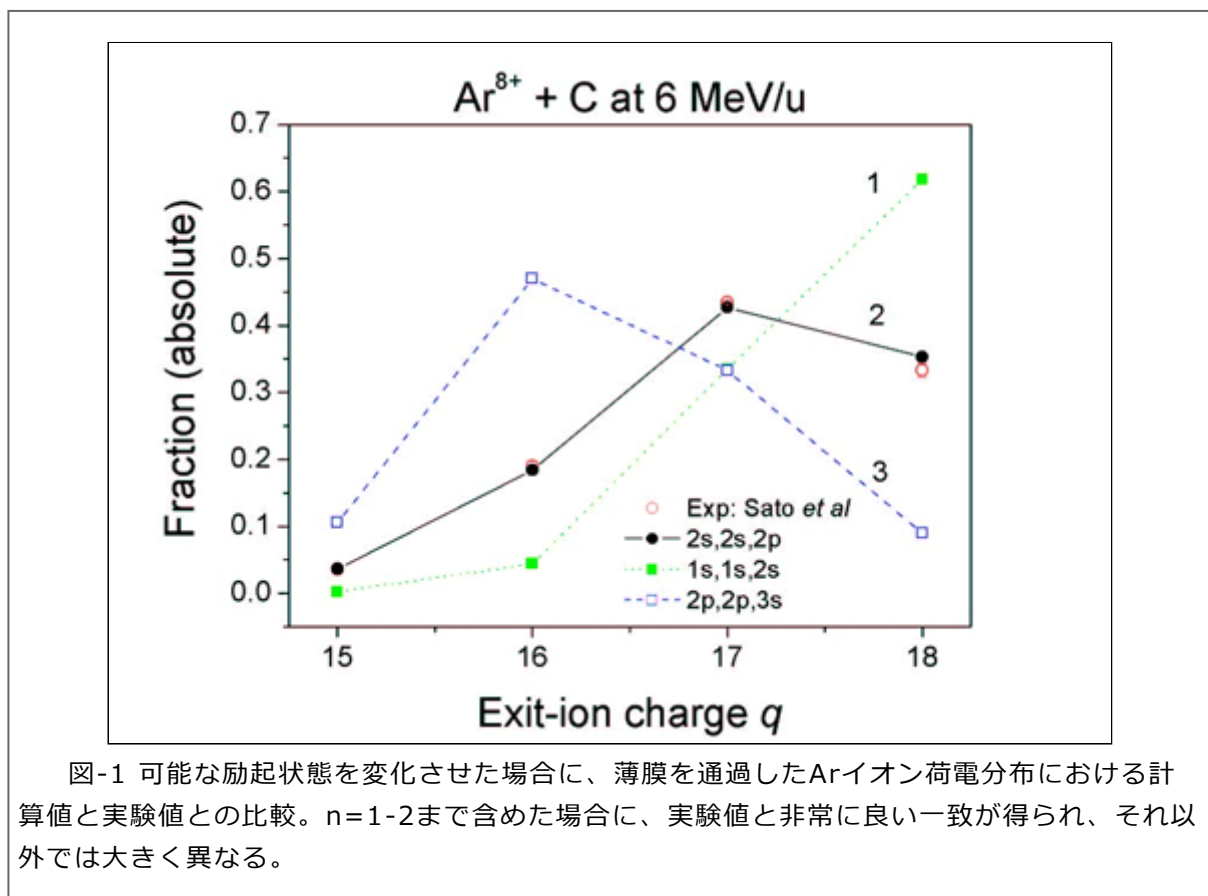


図-1 可能な励起状態を変化させた場合に、薄膜を通過したArイオン荷電分布における計算値と実験値との比較。n=1-2まで含めた場合に、実験値と非常に良い一致が得られ、それ以外では大きく異なる。

Feの場合

図-2は、Fe⁹⁺入射の場合です。Curve-2の荷電分布はFe²³⁺、Fe²²⁺、Fe²¹⁺に付いている電子群(3、4、5個)が(3s, 3s, 4p)以下に捕獲されると仮定した場合に得られるもので、実験値と良く一致しています。しかし、捕獲限度レベルを一つ上げても(Curve-3)、あるいは下げても(Curve-1)実験値とは懸け離れてしまいます。つまり、Feの場合もCurve-2の時のみ良い一致が得られます。つまり、 $n \leq 4$ の状態に捕獲される事が分かりました。

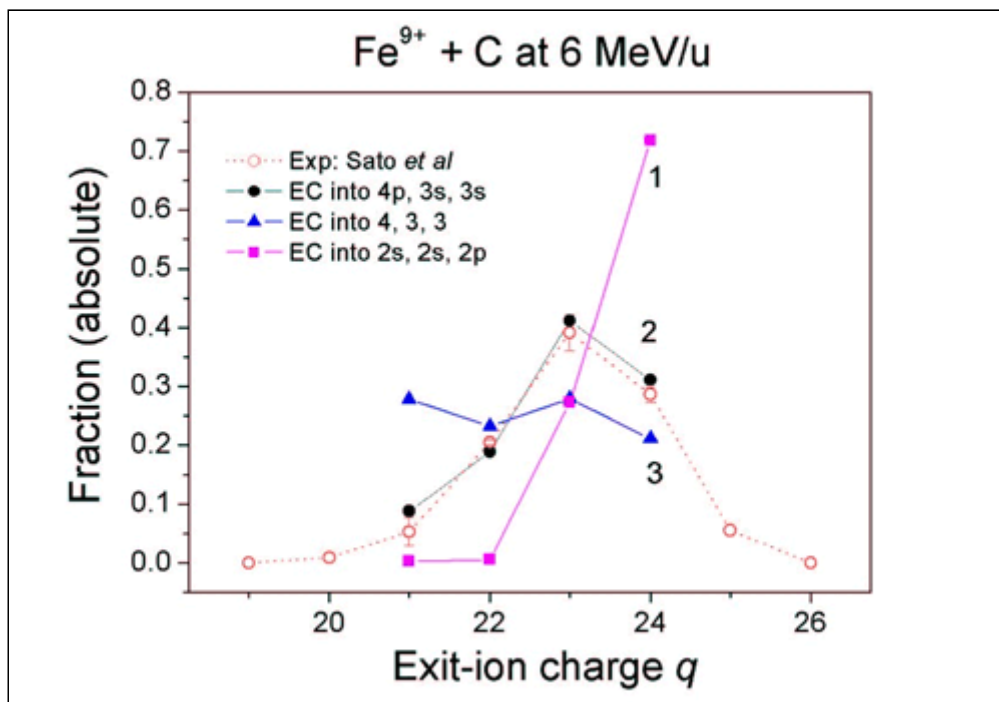


図-2 可能な励起状態を変化させた場合に、薄膜を通過したFeイオン荷電分布における計算値と実験値との比較。n=1-4まで含めた場合に、実験値と非常に良い一致が得られ、それ以外では大きく異なる。

[参考文献]

1. V. P. Shevelko, H. Tawara, O. V. Ivanov, T. Miyoshi, K. Noda, Y. Sato, A. V. Subbotin and I. Yu. Tolstikhina, HIMAC report 101, Dec. 2004.
2. Y. Sato, T. Miyoshi, T. Murakami, K. Noda, V.P. Shevelko and H. Tawara, Penetration of 4.3 and 6.0 MeV/u Highly Charged Heavy Ions through Carbon Foils, Nucl. Instrum. and Meth. B 225 (2004) 439-448.

(佐藤 幸夫¹、三好 智広²、V. P. Shevelko³ ¹加速器物理学、²AEC(株)、³Lebedev 物理学研究所 (Moscow))

エッセイ・ぱるす NO.42 「放送大学を卒業して」

写真は去る平成17年3月12日、平成16年度の放送大学学園学位授与式でのひとこまです。平成7年4月入学から実に9年と半年(16年度前期に既に修了しておりました)の人一倍以上の長い年月を経てやっと良き日を迎えることが出来、感激もひとしおでした。

放送大学について説明しますと、主にテレビとラジオで学ぶことが特徴です。入学試験はなく、全国各地にある最寄りの学習センターで半年毎に単位認定試験を受け合格して得た単位と、面接授業と言って、各学習センターで行われる講義の中から受講したい科目の教室に向いて講師から直接授業を受けて得た単位を合わせて必要単位を満たすことが求められます。4年以上在学後、「学士(教養)」の学位を取得する学生と、1~数科目を6ヶ月~1年間履修する学生もいます。年齢も20代から80代まで、職業も様々です。

通信授業とはいえ、単位認定試験や面接授業などは平日になることもあり、休暇を取らせていただいて学習センターに向かうこともありました。そんな時に職場の方が「がんばって」という励ましの言葉とともに快く送り出して下さったことも学び続けるうえで大きな支えになりました。この場を借りて御礼申し上げます。

面接授業の一環では、バスに乗って校外学習に出かけたり、科学の実習では慣れない手で実習器具を扱ったり、またそこに集まるさまざまな職業や年齢の学生の熱心に取り組む姿に刺激を受けたり、ときにはテキストを開くと睡魔に襲われたりもしましたが、学生ならではの貴重な経験と知識を得ることが出来ました。そしてなにより、歩みは遅かったながらも卒業というひとつの大きな目標を達成することができたことは私にとって大きな達成感と今後の自信につながったと思います。

最後に、放送大学はそのモットーに掲げるように「いつでも・どこでも・だれでも」が学ぶことの出来る正規の大学です。何かを始めるのに遅すぎることはないと思います。そして夢を常に持ち続ければいつかはかなえられると信じております。もしご興味を持たれましたらまずは放送を視聴されてはいかがでしょうか。ちなみに大学院も開校しています。

■ 東京地域:

テレビ:UHF16チャンネル、SKYPerfect TV! ケーブルテレビ

ラジオ:FM 77.1 MHz

放送時間:毎日朝6時~夜11時45分



晴れなる卒業式会場の前で
(東京ベイNKホール)

(研究推進部 研修課 研修業務係 田村 奈美子)

◆ 答え ◆

一本の道を指さし天使(または悪魔)に次の様に質問します。

「もし私が「この道が天国へ行く道ですか」とたずねたら「yes」と答えますか?」

● その道が天国への道の場合:

相手が天使の場合:

天使は「この道が天国へ行く道ですか」の質問に対しては「yes」と答えます。したがって上の質問の答えも「yes」なのでその道を行けば良い

相手が悪魔の場合:

悪魔は必ず嘘の返事をするので、「この道が天国へ行く道ですか」の質問に対しては「no」と答えます。しかし上の質問では「「yes」と答えますか」と言う質問が追加されています。従ってここで「no」と答えると正しい返事をしたこととなります。したがって悪魔は嘘の返事をするため「yes」と答えるしかありません。従ってその道を行けばよい。

● その道が地獄への道の場合:

上と全く同様に天使も悪魔も「no」と答えることとなりますので、反対の道を行けばよい。

(種本:この問題は「詭弁論理学」と言う本に載っていたと記憶していますが、昔のことなので定かではありません。これを読んだ時、100%嘘を言う相手は100%正しいことを言う相手と同じ程度に付き合い易いと思いました。)