



Photo: Masaaki Abe

Index

色覚多様性の意味について……………河村 正二	1
2021国際医用画像総合展 ーThe International Technical Exhibition of Medical Imaging2021ーに出展して ……………	7
〔コラム〕 32th Column 【トリチウムとアイソトープ治療】……………中川 恵一	10
〔テクノルコーナー〕 テクノルウェブセミナーのご紹介……………	11
令和3年度放射線安全取扱部会年次大会 (第62回放射線管理研修会) ……………	14
図説 量子ビーム・放射線利用 ー第12回 放射線のトラックとは何ぞやー ……………岡田 漱平	15
〔サービス部門からのお願い〕 返信用封筒はセロハンテープで確実に封をしてください……………	19

色覚多様性の意味について



河村 正二*

色覚とは

生物種としての人間、つまり学名ホモ・サピエンスのことをカタカナで「ヒト」と表記します。ヒトは生物の中で、背骨をもつ仲間（脊椎動物）に属し、その中の母乳で育つ仲間（哺乳類）に属し、さらにその中のサル仲間（霊長類）に属します。ですので、ヒトの特徴と思っている特徴の多くは脊椎動物共通だったり、哺乳類共通だったり、霊長類共通だったりします。現在の生き物はすべて長い進化の歴史の中で何度も何度も枝分かれ（種分化）をしながら今日に至った者たちです。脊椎動物共通の特徴（例えば背骨）は、脊椎動物が互いに枝分かれしていく前に（共通祖先の時代に）、哺乳類共通の特徴（例えば母乳）は哺乳類の共通祖先の時代に、霊長類共通の特徴（例えば把握に適した手指構造）は霊長類の共通祖先の時代に獲得した特徴ということになります。それぞれ、今も必要な構造・機能としてそのときに獲得された特徴です。ですから、これらの特徴の意味を考えると、現在のヒトだけを見ても正しく理解できないことがあります。

さて、ヒトの色覚はどうでしょうか？色覚は視覚の機能のひとつですので、まずは視覚の話から始めます。ヒトの視覚システムの構造的基盤は魚類を含む脊椎動物で共通しています。つまり起源は脊椎動物の共通祖先に遡ります。脊椎動物は視覚のための光センサー（視覚センサー）として眼球奥の網膜に桿体視細胞と錐体視細胞という2種類の光受容細胞（視細胞）を持ちます。桿体視細胞は薄明視に特化しており、光子一個であっても感知できるほどの究極の高感度光センサーです。錐体視細胞は明るい光に特化しています。そして色覚を担う

のは基本的にこの明るい光に特化した錐体視細胞です。桿体、錐体を問わず、視細胞中で光を感受する物質を視物質と呼びます。視物質は、細胞膜などの脂質二重膜貫通型のタンパク質（オプシンと呼ばれます）と感光物質であるビタミンAアルデヒド（レチナール）から構成されます。哺乳類ではこの感光物質は1種類であり、オプシンの種類数が視物質の種類数となります。また、1個の視細胞に産生されるオプシンは一般に1種類であるため、オプシンの種類数は視細胞の種類数でもあります。

色覚に話を絞ります。ヒトを例にとるとL、M、Sと呼ばれる3種類の錐体オプシンがあり、したがってそれら3種類の錐体視物質、錐体視細胞があります（図1左）。Lはlong wavelengthつまり長波長域、Mはmiddle wavelengthつまり中波長域、Sはshort wavelengthつまり短波長域を感受するという意味です。

色覚とは光を波長構成に基づいて識別する感覚です。感じる波長域が異なる視細胞が2種類以上あれば、ある波長構成の光が目飛び込んだとき、その同じ光に対して、これらの視細胞は異なる強さの応答をすることになります。ヒトを例にとると、L、M、Sのどの視細胞も等しく応答するような光を「白」、Lが最も強く応答するような光を「赤」、LとMが同じくらい強く応答しSが弱く応答するような光を「黄」、Sが最も強く応答するような光を「青」といった具合に、脳が色付けをします（図1右の4例）。つまり、色とは1）異なるセンサーの応答強度（アウトプット）の比です。比のパターンは連続的にとれますので、たった3種類のセンサーしかなくても、ヒトの例では数百万種類の色を識別できると言われています。そして色とは2）脳がもたら

* Shoji KAWAMURA 東京大学 新領域創成科学研究科 先端生命科学専攻 人類進化システム分野

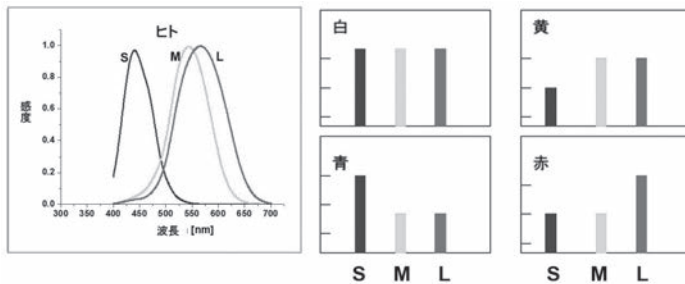


図1

色とは。左はヒトのL、M、S錐体視細胞の感受波長域の概略。右4つの棒グラフはL、M、S錐体視細胞の応答パターンと色の関係を示すイメージ図。色とは、センサーのアウトプットの比であり、物性ではなく脳が「塗った」もの、つまり生物側の感覚の産物といえる。

す感覚の産物であり物性ではないということです。

このことから、錐体オプシンの種類数とそれらのカバーする波長域によって、その生き物の感受できる色世界は異なる、ということがわかります。3種類の錐体オプシンに基づく色覚を3色型色覚と呼びます(図1はその一例)。鳥類、爬虫類、魚類の多くは4種類の錐体オプシンを持ち、そのため4色型色覚という極めて高度な色覚を持っています。このことから脊椎動物の共通祖先も4種類の錐体オプシンを持ち4色型色覚であったと推定できます。4色型とはどんな色の世界でしょうか?第4のアウトプットの強弱が色に反映されている世界ということなのですが、そういう理屈で想像するしかありません。例えば高精細のテレビで景色を映したとき、テレビのモニターはヒトの3色型色覚に合わせて3種類の光源(RGB)で色を再現していますので、モニターと実際の景色を見比べたとき、人間には忠実な再現に見えても、4色型色覚の鳥が見たらモニターは物足りない色使いに見えるはずです。後述しますが、3色型色覚の人が2色型色覚の人を「色覚異常」と言うのならば、鳥からすれば人類は全員色覚異常ということになります。

霊長類の色覚多様性

脊椎動物の共通祖先に起源した4色型からヒトに見られる3色型に至る道筋は単純ではありませんでした。一旦2色型になっているのです。霊長類以外の哺乳類は一般的に錐体オプシンを2種類しか持たず2色型色覚です。中生代の恐竜の時代に夜行性の小動物として生き抜いた私たちの祖先

哺乳類は、夜行性への適応として、4色型色覚を捨て、2色型色覚を選んだといえます。そして恐竜絶滅後の新生代で、森林の樹上世界で大躍進を遂げたのが霊長類です。3色型色覚はその過程で獲得されたのです。図1左のヒトのL視細胞とM視細胞は感受波長域がかなり重なっています。これは霊長類全体の特徴でもあります。これによって霊長類は森林の様々な木の葉の色を一括して(区別せずに)緑と感じ、赤や黄色に熟した果実、赤や黄緑の若葉、肉食哺乳類の体毛色などを緑の背景から容易に見出せるようになったと考えられます。

ここからオプシンの遺伝子の話になります。Sオプシン遺伝子は常染色体(ヒトでは第7番染色体)にあり、LまたはMオプシン遺伝子(まとめてL/Mオプシン遺伝子と表記)はX染色体にあります(図2)。霊長類の様々なグループの間で、Sオプシンの遺伝子には大きな違いはないのですが(とはいえ、夜行性の一部の仲間にはSオプシン遺伝子が機能を失って1色型になっているという変わり者がいます:図2最下部)、L/Mオプシン遺伝子の存在様式は大きく異なっています。これにより霊長類は二通りのパターンで3色型色覚を獲得しました。一通りではないことが進化の面白いところです。



図2

霊長類の色覚多様性。矢印はオプシン遺伝子を表す。霊長類の様々なグループの間で、特にL/Mオプシン遺伝子の存在パターンが異なっている。L/MオプシンにはL(図中の横縞矢印)やM(図中の縦縞矢印)とは異なる波長感受域をもつオプシンもある(図中の斜縞矢印)。

中南米のサルの色覚多様性 (L/Mオプシンが3種類の場合の例)

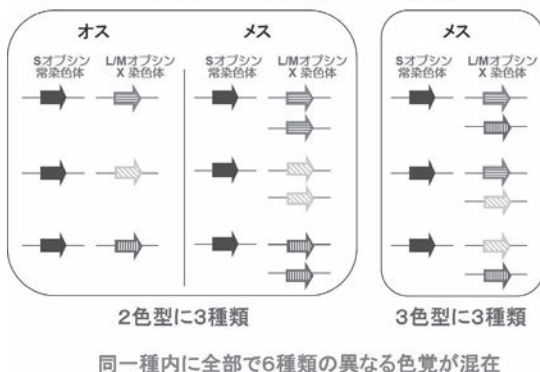


図3

中南米のサルの色覚多様性。矢印はオプシン遺伝子を表す。L/Mオプシンに3種類のアリル（横縞矢印、縦縞矢印、斜縞矢印）がある例を示す。

一つ目はLオプシン遺伝子とMオプシン遺伝子と同じX染色体の上に並べて持つパターンです（図2上部）。X染色体はオスには母由来の1本しかありません。しかし、Lオプシン遺伝子とMオプシン遺伝子の両方が1本の染色体上にあれば、オスもLとMの両方を持つことができます。これに常染色体のSオプシンを加えて基本的に性別によらず3色型となります（「恒常的3色型色覚」といいます）。ヒトはこのパターンですが、他にもいます（図2上部）。類人猿とはチンパンジー、ゴリラ、オランウータン、テナガザルのことです。アジア・アフリカのサルとはニホンザル、ヒヒ、コロブスなど多数の種を含むオナガザル科という分類群です。ヒトを含めてこれらの霊長類のことを狭鼻猿といいます。つまり、このパターンは狭鼻猿の共通祖先で獲得されたことがわかります。これとは別に、中南米のサルの中でホエザルだけは、独自にこのパターンを獲得したことが知られています。

二つ目はLオプシン遺伝子とMオプシン遺伝子を違うX染色体に持つパターンです。この場合の「違う」とは、父由来と母由来という意味です。中南米のサルのほとんどとキツネザルの仲間の一部に見られます。中南米のサルとはリスザル、マーモセット、クモザルなど多数の種からなる広鼻猿という分類群です。キツネザル類とはマダガスカル島にのみ棲息する多数の種からなる分類群です。後で述べるヒトの色覚多様性の理解に重要なので、も

う少し詳しく説明します。

図3はこのパターンの一例です。同じ染色体の同じ場所の遺伝子にこのような多様性があるとき、それらをアリルと呼びます。図3の例ではL/Mオプシン遺伝子に3種類のアリルがあります。オスのX染色体は母由来の1本だけなので、常染色体のSオプシンと合わせて2種類のオプシンを持つことになり、2色型色覚となります。ただし、図3の例では、L/Mオプシンのアリルに3種類あるので、3種類の2色型のオスがいることになります。メスは父由来と母由来の2本のX染色体を持つので、それらが同じ種類のアリルであればオスと同様に2色型ですが、異なるアリルであればSオプシンと合わせて3種類のオプシンとなるため、3色型色覚となります。しかも、アリルの組合せに3通りがあるので、3種類の3色型色覚のメスがいることになります。このように色覚に多様性があることを多型（たけい）色覚と呼びます。

ヒトの色覚多様性

さて、1つ目のパターン、恒常的3色型、に話を戻します。このパターンの場合、性別に関わらず全員が3色型となるはずですが、実際、ヒト以外の狭鼻猿類では例外はほとんど見つかりません。ヒトはこのグループの例外といえます。

図4はヒトに見られるL/Mオプシン遺伝子の多様性を示しています。Lオプシン遺伝子とMオプシン遺伝子が同じX染色体上に並ぶ「原型」から、様々な遺伝子型が「派生」していることを示しています。派生はLとMの融合と一方の欠失に分類できます。矢印の左半分は遺伝子の前半部分、矢印の右半分は遺伝子の後半部分を表します。LオプシンとMオプシンの感受波長域の違いは、遺伝子の主に後半部分の違いによって生じます。したがって、融合遺伝子を持っていても、図4の2)と3)の遺伝子型の場合は、原型3色型と見え方はあまり変わりません。一般に言われる「正常色覚」は、原型だけでなくこれらの派生型も含まれます。

それに対し、図4の4)と5)では、どちらも融合遺伝子と正常遺伝子の後半部分が同じであるため、2つのオプシンの感受波長域の違いがわずかしがなく、一般に言われる「赤緑色弱」に対応します。4)は少しだけLに寄ったほぼMオプシン

ヒトに見られるL/Mオプシン遺伝子と色覚型の多型

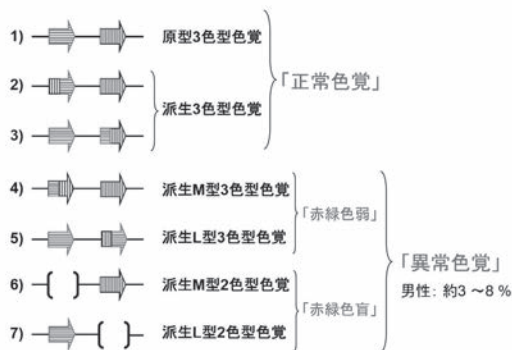


図 4

ヒトの色覚多様性。Lオプシン遺伝子を横線の矢印、Mオプシン遺伝子を縦線の矢印で表している。原型となるパターンから、LとMの融合した遺伝子やLがMの欠失（括弧で表示）が派生し、色覚の多様性をもたらしている。厳密に言えば、Lオプシン遺伝子とMオプシン遺伝子の並びの後にさらにいくつかのMオプシン遺伝子が並ぶことが多いが、基本的に先頭の2つの遺伝子しか使われないため、図では3つ目以降は省略してある。先頭2つがMオプシン遺伝子で3つ目にLオプシン遺伝子があっても、実質的にはLオプシン遺伝子の欠失と同じことになり、先頭2つがLオプシン遺伝子で3つ目にMオプシン遺伝子があっても、実質的にはMオプシン遺伝子の欠失と同じことになる。

と通常のMオプシンによる3色型という意味で派生M型3色型といえます。5)は逆に少しだけMに寄ったほぼLオプシンと通常のLオプシンによる3色型という意味で派生L型3色型といえます。図4の6)と7)は2色型色覚で、一般に言われる「赤緑色盲」に対応します。6)はMオプシンしかないため派生M型2色型、7)はLオプシンしかないため派生L型2色型といえます。これらを合わせたものが一般にいう「異常色覚」に対応します。

様々な人類集団・民族により報告値にばらつきはありますが、その頻度は男性の3~8%、ざっくりと約5%です。約20人に1人、学校の1クラスに1人程度がそうであって不思議ではないわけです。女性でずっと少ないのはX染色体が2本あることで補い合うためです。さらに、図4の2)と3)の派生3色型も含めると融合遺伝子の出現頻度は実は40%近くもあります。いわゆる「正常」の中にも「異常」の中にも大きなバリエーションがあり、「正常」と「異常」の間に明瞭な境界もないのです。このようなことから私には「異常」という用語を使うことに違和感がありました。それが理由でネガティブな用語でなく、図4のような表現を使っています。

このような多様性はヒト以外の他の狭鼻猿にはみられません。なぜヒトだけこうなっているのでしょうか？そのヒントを探るために中南米のサルの調査に乗り出しました。2003年のことです。

コスタリカでの野生サルの調査でわかったこと

中米のコスタリカという国は自然保護に熱心な国で、森林再生が進んでおり、珍しい昆虫の宝庫としても知られています。隣国ニカラグアとの国境近くに位置するグアナカステ自然保護区のサンタロサ地区が私の調査地です。熱帯乾燥森林地帯であり雨季と乾季がはっきりしています。ノドジロオマキザル、クロテクモザル、マントホエザルという3種の広鼻猿が生息しています（図5）。それぞれ科や亜科のレベルで異なる分類群に属し、食性や社会構造が異なり、色覚型が異なります。オマキザルとクロテクモザルは多型色覚、ホエザルは恒常的3色型です（図2）。

そこはカナダ・カルガリー大学のリンダ・フェディガン教授が主宰する調査地であり、私はL/Mオプシン遺伝子の研究を提案し、チームに参加させてもらいました。最初にやったことは行動観察をする彼らについて回ってサルたちの糞を集めることでした。糞にはサルの腸内壁の細胞が剥がれて混ざっているため、日本に持って帰りそこからL/Mオプシン遺伝子をPolymerase Chain Reaction (PCR) という実験方法で単離し、DNA配列を調べました。重要なことは、サルたちには研究者により名前が付け

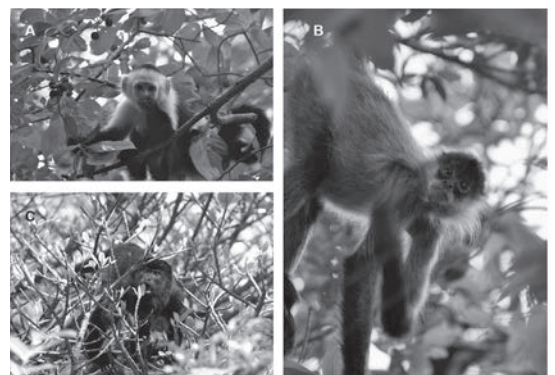


図 5

コスタリカ国グアナカステ自然保護区サンタロサ地区に棲息する野生サル。A) ノドジロオマキザル (*Cebus imitator*)。B) クロテクモザル (*Ateles geoffroyi*)。マントホエザル (*Alouatta palliata*)。

られており、どの個体の糞かがわかっていない状態で採集できるということです。また、1980年代以来の長年の行動観察研究によってサルたちが研究者に無関心（逃げず、近寄っても来ない）となっていることも重要で、これにより接近して観察することができ、落下してくる糞を見つけやすいことになります。

こうしてクロテクモザルとノドジロオマキザルの一頭一頭についてL/Mオプシンの遺伝子型を調べ、色覚型を明らかにしました。それにより両種とも確かに野生の群れの中にL/Mオプシンの多様性があることがわかりました。ついで遺伝子のDNA配列の集団遺伝学的解析によって、L/Mオプシンの多様性が自然選択によって維持されていること、つまりL/Mオプシンが多様であることが彼らの生存繁殖にとって有利であることを明らかにし、専門誌に論文発表しました。

さらに、サルたちが単位時間あたり何個の果実に対して匂いを嗅ぐ、手で触る、顔を近づけて見つめる、齧るなどの「検査」をし、その内何個を食べたかを記録しました。一方、果実とその樹木の葉の光の反射率と森の環境光の波長分布を計測し、サルたちの各色覚型にとって、葉に対する果実の色や明るさの視認性を数値化しました。葉の緑に対して色で視認性の高い果実を顕色系（黄、橙、赤など）といい、そうでない果実を隠蔽系（緑、茶、黒など）と呼ぶことにします。

これらにより、意外なことにクロテクモザルにおいて2色型色覚は3色型色覚と同等な果実採食をしていることがわかりました。さらに、色ではなく、果実と葉の明度の違いが大きい植物ほど果実採食の効率が高いことがわかりました。また、2色型は3色型よりも顕色系果実に対してより頻繁に匂いを嗅ぐ傾向があることがわかりました。また、色覚型によらず葉と明度の違いが小さい（視認性が低い）果実ほど匂いをよく嗅ぐこともわかりました。だからこそ2色型と3色型で採食に差が出ないのだとわかりました。つまり、サルたちは色合いだけでなく、果実の明るさや匂いなど使える情報は何でも手掛かりにして採食をしていることがわかりました。言われてみれば当たり前ですが、色覚こそが重要と考えられていた状況に再考を促したことになります。

シロガオオマキザルについてはクロテクモザルよりも多くの個体を対象とし、長い継続調査を行うことができました。それによりさらに様々な知見を得

ることができました。採食する果実の色は3色型によく目立つ色調であることが多く、3色型は2色型より早く果樹に到着することが多いこともわかりました。さらに、顕色系の果実では検出の正確度と単位時間当たりの摂食量において3色型色覚が勝っていることがわかりました。ただし、興味深いことに、この有利性はサルの幼若期においてのみ顕著で、成長するにつれて解消していました。2色型は匂いや明るさなど他の情報を使うことに習熟し、3色型に追いつくのだと考えられます。

一方で2色型の方が勝っている点も見つけました。シロガオオマキザルは昆虫採食も頻繁に行います。葉や樹木の表面にいる昆虫（すなわち周囲の色にブレンドした昆虫）の時間当たり採食量は2色型の方が3色型色覚よりも有意に高いという結果を得たのです。この発見は当時大きく取り上げられました。劣っていると思われていた2色型の方が優れている局面があることを、厳しい野生の環境で棲息する動物で初めて明らかにしたからです。

霊長類のL視細胞とM視細胞のアウトプットを比較する神経回路は、元々哺乳類に備わっている輪郭視の神経回路に相乗りしています。元々哺乳類では1種類しかないL/M視細胞群からのアウトプットの強弱（つまり明るさの強弱）の情報から物の形状を見えています。L/M視細胞の密度が高く、視神経1個あたりに出力するL/M視細胞が少ないほど高精細な画像を見ることができます。霊長類はL/M視細胞と視神経の対応が1対1という高精細の輪郭視を進化させ、同時に波長感受性の異なるL視細胞とM視細胞を分化させました。同じ神経回路が、明るさでなく波長構成に応じて違うアウトプットをしてくるL-M比色を処理し、従来の明るさによる輪郭視も処理している訳です。言い換えればL-M色覚と輪郭視は競合関係にあります。3色型色覚は輪郭視を犠牲にして成り立っているとも言え、2色型色覚はL-M比色をしない分、輪郭視に敏感となっているともいえる訳です。2色型色覚の昆虫採食における有利性はこのように説明できます。

さらに、フェディガン教授によるサンタロサ地区でのノドジロオマキザルに対する30年近くに及ぶ長期行動観察データとの照合から、3色型色覚と2色型色覚には生存繁殖に差がないことも報告しました。また、調査地のマントホエザルやベリーズ国の近縁ホエザル種を調べた結果、中南米のサルの

中で唯一恒常的3色型を獲得したホエザル(図2)でも、LオプシンとMオプシンの融合遺伝子をもつことがわかりました。10%程度の高頻度でした。この融合パターンはヒトに一般的に見られる融合パターン(図4)とは異なるもので、融合オプシンの感受波長域はLとMのちょうど中間になります。ホエザルはせっかく色解像度の高いLとMオプシンによる恒常的3色型色覚を獲得したというのに、わざわざ色解像度の劣る派生3色型色覚を作り出していたことになります。

中南米のサルに対するこれらの研究結果から、3色型色覚の優れた赤-緑色彩視の能力は、2色型が他の様々な感覚に補われるため、単純に生存繁殖の上で優越するとは限らないことがわかりました。L/Mオプシンが多様であることが彼らの生存にとって有利であるという意味は、3色型色覚が有利という意味ではないということになります。隠蔽色資源の採食に得意な2色型と顕色系資源の採食に得意な3色型が同じ集団に共存することで、互いの生存に有利に働く、ということではないかと考えています。

一方、ヒトを除く狭鼻猿類では色覚の種内多様性は極めて低く、2色型色覚に有利性があるとしても、ヒトを除く狭鼻猿類においては3色型色覚の有利性がそれを遥かに凌ぐものであることが推測できます。この違いは中南米とアフリカ・アジアの季節性、植生、霊長類の食性などの違いが関係すると考えられますが理由は未解明です。ひとつ確実に言えることは、3色型色覚の優位性は環境・生態条件に依存するのであり、絶対的なものではないということです。

ヒトにおける色覚多様性の意味の再考

ヒト以外の狭鼻猿の状況を考えて、ヒトにおいては図4の原型3色型色覚を維持する自然選択が緩んでいるといえます。一般にはそれは近代的な社会からと考えられているかもしれませんが。しかし実はヒトの進化史のいつからこのように色覚多型が顕在化したかは明らかではありません。霊長類の3色型色覚はそもそも森林環境への適応として進化したのだとすれば、約200万年前から森林を離れサバンナを主な生活の場として狩猟採集者として進化してきたホモ属には3色型色覚への選択圧はす

でにその時点で緩んでいた可能性が考えられます。さらに、獲物となる小動物や捕食者となる肉食獣、また屍体の検出において、2色型色覚の隠蔽色視・輪郭視における優越性を考慮すれば、2色型色覚はむしろ積極的に維持されてきた可能性も考えられます。つまり、2色型も含めた多様な色覚があったおかげで人類の祖先は生き延びてこられた可能性もある訳です。

現代においてはどうか？高緯度では「色覚異常」の頻度が高い傾向が報告されています。高緯度は日照時間が短く、日中の光量も低いため、まずは物の輪郭を認識することが最優先で、赤・オレンジ・黄・緑といった色合いを区別することは二次的なかもしれません。そもそも「色覚異常」が認識され始めたのはいつなのでしょう？私は産業革命以降の印刷、照明などの技術の発達以降ではないかと推察しています。交通信号や道路標識の色は人工産物です。顔色の変化や血の色は2色型にはわかりにくいとよく言われますが、人の感情や健康状態や動物屍体の腐敗の程度などを知るのにL-M系色の違い以外でも情報はいろいろ得られます。「色覚異常」が問題となるのは人間社会が多数派の色覚型に合わせた色調を作り出しているからなのではないか、という視点から「カラーユニバーサルデザイン」という考え方が生まれました。色情報だけでなく、模様や形状、説明ラベルの位置などを少し工夫するだけで色覚型によらず、より多くの人に情報を正しく伝えることができるはずです。私が4色型色覚の鳥や多型色覚のサル達から学んだことは、色覚多様性は「異常」ではないということです。

著者プロフィール

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。1992年米国シラキュース大学ポスドク研究員、1996年東京大学・大学院理学系研究科 助手、1999年東京大学大学院新領域創成科学研究科 助教授(2007年准教授改称)、2010年より同研究科 教授、先端生命科学専攻・人類進化システム分野。ONLINE「Webナショジオ：研究室に行ってみた」(「正常色覚」が本当に有利なのか)：「色覚の進化」Newton別冊「感覚—驚異のしくみ：眼、耳、鼻、舌、皮膚など人体に備わる高性能センサー」など研究紹介記事掲載、取材協力、テレビでの解説なども多数。

2021国際医用画像総合展 —The International Technical Exhibition of Medical Imaging2021—に出展して

線量計測技術課 澤井 千秋

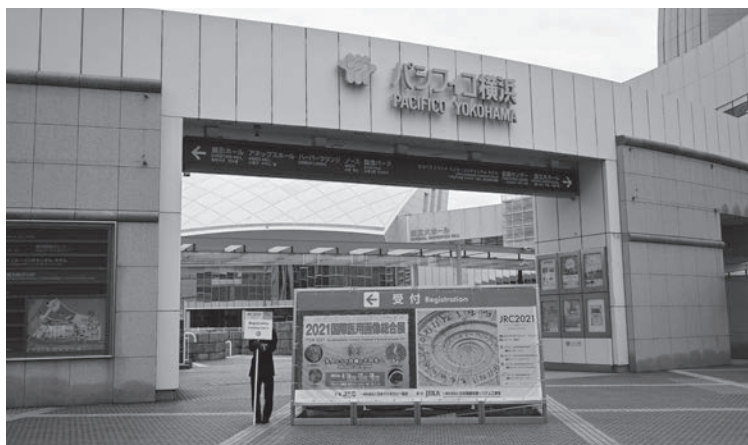
一般社団法人日本ラジオロジー協会（JRC）が主催しているJRC2021の一環として国際医用画像総合展（ITEM：The International Technical Exhibition of Medical Imaging）が2021年4月16日（金）から3日間、パシフィコ横浜で開催されました。弊社からは放射線治療関連機器、ガラス線量計システムや各種線量測定機器、感染症対策製品を出展しました。

JRCは、公益社団法人日本医学放射線学会（JRS）、公益社団法人日本放射線技術学会（JSRT）、公益社団法人日本医学物理学会（JSMP）、一般社団法人日本画像医療システム工業会（JIRA）の4団体により構成され、毎年4月に各学会の学術集会和、ITEMを合同開催しています。弊社は例年ITEMに出展していますが、昨年は新型コロナウイルス感染症の影響でWebのみの開催となったため出展しませんでした。今年はパシフィコ横浜およびWeb（4月28日（水）～6月3日（木）まで）

のハイブリッド開催となりました。新型コロナウイルスの流行は依然収まっておらず、例年より出展社数・来場者数は少なかったですが、様々な方と実際にお会いしてお話できる貴重な機会であり活気づいていました。

会場入り口には非接触式の手指消毒用アルコールスプレーが置かれており、サーモグラフィーによる体温測定が実施されていました。また、そのほかにもさまざまな新型コロナウイルス等感染症予防および拡散防止対策が行われていました。

- ・原則、オンラインによる参加登録
- ・入退場管理システムによる、会場全体の人数管理
- ・出展ブースの面積に応じたブース内人数の制限
- ・休憩スペースにはアクリル板の設置
- ・会場通路が広くとられている など



パシフィコ横浜

弊社ブース内でも、ブース内にいる展示員数の調整、機器などの説明の際の来場者の方との間隔の維持、対応毎に展示品をアルコールで拭くなどの対策を行いました。

今回の出展製品で一番話題となったのは眼の水晶体用線量計DOSIRIS（ドジリス）です。2021年4月の法令改正により眼の水晶体の等価線量限度が『年間150mSv』から『年間50mSv かつ5年間で100mSv』に引き下げとなりました。眼の水晶体の線量をより正確に評価するためには、眼の近傍で測定ができる線量計を装着する

必要があります。DOSIRISは眼のすぐ近くに装着することができ、防護メガネの内側の線量を測定することができます。皆様関心を持たれていて、DOSIRISの展示を見つけるとすかさず近寄ってご覧になる方が多くいらっしゃいました。

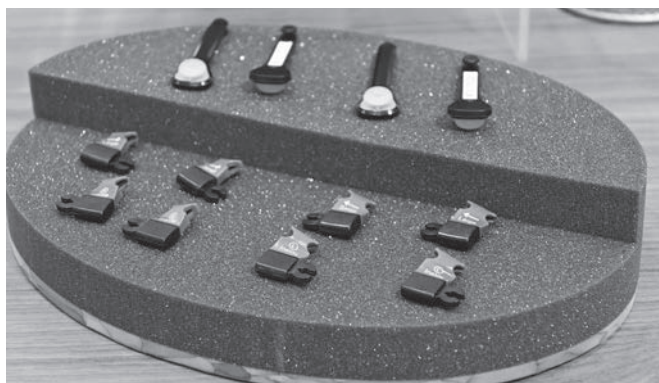
まだDOSIRISをご使用されたことがないお客様に実際に手にとってご覧いただき、「思っていたより小さかった」「視界に入らず、ほとんど気にならない」などの感想をいただきました。過去にDOSIRISをご使用いただいたことがあるお客様には、FBNews No.518（2020



広い会場通路
3m以上の通路幅となっているとのこと



弊社ブース



DOSIRIS(上段)と防護メガネ取り付け用アタッチメント(下段)
アタッチメントは左右どちらに装着するかとメガネのツルの太さの大小に応じて計4種類あります



DOSIRISご使用のイメージ
目じりに合わせて角度や位置を調節いただくことができます

年2月号)で紹介しております“DOSIRIS用防護メガネ取り付けアタッチメント”の実際の装着感をお試しいただき、使い勝手に関するご意見をいただきました。

その他、「不均等用のバッジを使用中だが、DOSIRISを装着する基準はどう考えればいいか」というご質問を多く頂戴しました。また、同時開催の学会でも新しい線量限度について議論が交わされたとのことで、線量管理に関する考え方の確認のため展示ブースにお越しいただく方もいらっしゃいました。

コロナ禍の中、展示会場にお越しいただいた方の人数はいつもより少なかったですが、貴重なご意見やご質問、ご要望をいただくことができました。誠にありがとうございました。

今回の展示品

- ①高線量率密封放射線治療装置用アプリケーション「VCMC」
- ②放射線治療用 QA 製品「Exradin チェンバ」
- ③ガラス線量計小型素子システム「Dose Ace」
- ④個人放射線被ばく線量測定サービス「ガラスバッジ」
- ⑤眼の水晶体用線量計「DOSIRIS」
- ⑥ウイルス抑制・除菌用紫外線照射装置「Care222」
- ⑦定位放射線治療用加速器システム「ZAP-X ラジオサージェリーシステム」

コラム
32th
Column

中川 恵一

東京大学医学部附属病院

トリチウムとアイソトープ治療

福島第一原子力発電所で増え続けるトリチウムを含んだ水の海洋放出が正式に決まりました。

水素の同位元素であるトリチウムは、宇宙線によって自然に発生しています。天然由来のものよりずっと少ない量ですが、原子力発電所でも発生しています。

震災前も、全国の原子力発電所から、年間で計380兆ベクレル前後に相当するトリチウムが海に放出されていました。

国の放出基準は1リットルあたり6万ベクレル。この濃度の水を生まれてから70歳になるまで毎日2リットル飲み続けた場合でも、1年あたりの被ばく量は1ミリシーベルトにもなりません。

日本では、飲料水についての規制値はありませんが、WHO（世界保健機関）は、トリチウムの飲料水中の濃度限度を1万ベクレル/リットルとしています。

ベクレルとシーベルトの数字の巨大なギャップのわけを考えてみます。

ご存じのとおり、ベクレルは放射能の単位で、1秒間に出る放射線の数をさします。一方、シーベルトは発がんなど、臓器や体へのダメージの単位。もちろん、シーベルトの方が大事に決まっています。

ベクレルが示す放射能はあくまで、放射線が出る頻度にすぎません。トリチウムの場合、非常にエネルギーの弱いベータ線が放射されます。人体内で到達できる距離（飛程）は、平均でわずか0.56ミクロン（1ミリの千分の一）、最大でも6ミクロン。細胞の大きさは10ミクロン程度ですので、体への影響はきわめて小さくなるのです。

福島第一原子力発電所事故で一番問題となったセシウムでは、透過性の高いガンマ線が放出されます。1本の放射線が多数の細胞にダメージを与えるため、同じ放射能でも、

シーベルトで表す被ばく量ではトリチウムの1,000倍近く（成人の場合）になるわけです。

今回の海洋放出では、放出基準の40分の1まで薄めることにしていますから、環境や人体への影響は極めて少ないと言えるでしょう。国際原子力機関（IAEA）も「科学的に妥当で環境影響はない」との見解を示しています。

一方、喫煙や大量飲酒は1,000～2,000ミリシーベルト、野菜不足が100～200ミリシーベルトに相当する発がんリスクをもたらします。海洋放出の影響がいかに限定的か分かります。

もちろん、環境モニタリングや風評被害対策に十分取り組んでいく必要があることは言うまでもありません。

なお、トリチウムのような放射性同位元素はがんの放射線治療の現場でも大いに使われています。

コバルト60は原子炉内で人工的に作られ、強いガンマ線を放出します。私が医者になった36年前、これが放射線治療の主役でした。今でも、コバルト60を200個程度、半球状に並べて、細いガンマ線を1点に集中させ、ピンポイント照射を行う「ガンマナイフ」に使われています。

子宮頸がんの放射線治療では、子宮の内部に線源を挿入して照射する「腔内照射」が欠かせません。東大病院では、イリジウム192線源から出るガンマ線を使っています。

放射線同位元素を注射したり、内服したりする治療も行われます。前立腺がんの骨転移では、「アルファ線」を出すラジウム223を注射します。甲状腺機能亢進症や甲状腺がんでは、ヨード131のカプセルを内服する治療が広く行われています。

ただ、日本では放射性物質の取り扱いに法的な制限があり、「核医学治療」の普及が遅れています。海外の承認から遅れて日本で承認される「ドラッグラグ」の問題は、核医学治療の分野においては、まだまだ、解消されていません。

テクノロナー

テクノウェブセミナーのご紹介

新型コロナウイルスの流行により、各学会や講習会が中止や延期、規模縮小となりました。

情報収集をする機会が以前より少なくなり、昨年の医療法施行規則改正や、今年の水晶体の等価線量限度引き下げなど、各種関連法令の改正が続き「法令の何が変わったのか知りたい」「法令が変わったことは知っているが、具体的に何をすればいいのか分からない」などお困りの方もいらっしゃるのではないのでしょうか。

千代田テクノでは昨年より『テクノウェブセミナー』として、法令やガイドラインの解説などお客様の立場に寄り添った実践的なセミナーや新商品の紹介等を不定期に開催しています。弊社ホームページから会員登録していただいた方に、開催日やセミナーの内容をメールにてご案内します。会員登録・セミナーへのご参加は無料です。情報収集にお役立ていただければ幸いです。

【テクノウェブセミナー会員登録方法】

①千代田テクノのホームページにアクセスします。

<https://www.c-technol.co.jp>

②トップページ上部の線量計測事業（ガラスバッジ）をクリックしてください。



③ **会員申込** テクノルウェブセミナーをクリックしてください。



④ 申込フォームが開きます。

テクノルウェブセミナーご参加の流れ

- ① 会員登録された方に開催内容・開催日時をメールにて配信いたします。ご興味のある内容・ご都合のつく開催日時があればお申し込みください。
各セミナーは1回あたり40～60分です。同一のプログラムで複数回開催していますので、ご都合のよい回を選んでご参加いただけます。複数回のお申し込みも可能です。
- ② セミナーへご参加のお申し込みをいただいた方に、開催日前に「開催のお知らせ」を配信いたします。
「開催のお知らせ」には下記の内容が含まれます。
 - ・当日のZoomリンク
 - ・配布資料（ある場合）
 - ・セミナーの参考資料へのリンク
 - ・テクノルウェブセミナー参加マニュアル
- ③ 開催時刻になりましたらZoomリンクをクリックしてご参加ください。
開催時刻前には弊社の新商品などのご紹介を配信しています。ぜひご覧ください。
- ④ セミナー終了後、アンケートを配信しています。今後のセミナー運営およびサービス向上の参考にさせていただきますので、よろしければご協力ください。
また、セミナーの内容に関するご質問も受け付けております。

これまでに開催したセミナー

①『医療法施行規則改正の概要』

改正により必要になった以下の点について紹介・解説を行いました。

- ・安全管理責任者の配置
- ・指針の策定
- ・職員研修の実施
- ・医療放射線の線量管理/線量記録
- ・事例発生時の対応に関する基本方針
- ・情報共有に関する基本方針

②『眼の水晶体被ばく線量限度引き下げ』

線量限度引き下げについて、その経緯や改正内容について解説を行いました。

- ・眼の水晶体の等価線量限度の変更
- ・眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン
- ・眼の水晶体用線量計「DOSIRIS」

③『眼の水晶体線量限度の変更対策』

各ガイドラインを元に、眼の水晶体線量管理を実際にどうすればいいかについて解説を行いました。

- ・眼の水晶体等価線量限度の変更
- ・眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン
- ・眼の水晶体の線量当量の測定と等価線量の算定方法に関するQ&A
- ・医療スタッフの放射線安全管理に係るガイドライン

④ 6月12日(土)に開催した『第15回 テクノル技術情報セミナー』の講演内容を配信しています。

(7月、8月開催予定)



図説 量子ビーム・放射線利用 —第12回 放射線のトラックとは何ぞや—

大洗研究所 所長 岡田 漱平

1. はじめに

本シリーズの第8回目「何を今さらLET」では、放射線防護の分野でも放射線利用の分野でも重要な概念である「linear energy transfer (線エネルギー付与)」や「LET」の定義が、ジャンルや年代によって異なる、ということ述べた。実は、同様なことが、やはり放射線分野で重要な概念である「トラック (track)」でも起こっている。

表1は、放射線防護分野のバイブルとも言えるICRP (国際放射線防護委員会) の報告書 (Publication; 以下‘Publ.’と略す)¹⁾ におけるトラックに関わる定義と、放射線化学分野の新旧いくつかの文献²⁻⁵⁾ から選んだ代表的な定義を並べたものである。なお、ICRPの原著の和訳に関しては、ICRP勧告翻訳検討委員会 (日本アイソトープ協会が翻訳書を発行) によるものを参考にさせていただいた。

お断りしておくが、これらの定義は、それぞれのジャンルにおいては正統的なもので

ある。しかし、このふたつを並べてみると、言葉に対して神経質な筆者は、なんとなく違和感を覚えるのである。

2. 放射線防護分野における定義

文献[1]のPubl. 1 (1958) からPubl. 137 (2017) までの原著を調べると、“track” (和訳は「飛跡」) という語の初出はPubl. 4 (1953-1959) で、その後随所に登場するのだが、この言葉自体の定義は見当たらなかった。“along the track of a particle” とか “at the end of the track” といった使われ方が多く、「放射線が通った跡」というような、どちらかと言えば抽象的な概念として用いられている。視覚的なイメージにつながる“track detector”、“neutron track”、“ α -track”、“short track”などの用法もあるが、具体的な“track”の定義はされていない。

具体的な定義が登場するのは“track structure”についてであり、表1に記したものである。「飛跡構造」の定義の中に「飛跡」

表1 放射線防護及び放射線化学それぞれの分野における放射線の「トラック」に関連する定義。

ジャンル	定義	出典
放射線防護分野	GLOSSARY Track structure Spatial patterns of energy deposition in matter along the track from the passage of ionising radiation. 【訳文】 用語解説 飛跡構造 電離放射線の通過による、飛跡に沿った物質中でのエネルギーの沈着のタイプ。	文献[1] Publ. 103 (2007)
放射線化学分野	イオンなど荷電粒子の飛跡のことをトラック(track)といい、励起・イオン化あるいはそれらにより生じる活性種の空間分布のことをトラック構造という。	文献[2]

という言葉が含まれている。感覚的な感想で申し訳ないが、なんだか『飛跡構造とは飛跡の構造のことである』と言っているように感じてしまう。論理的には循環論の一種とされる「再帰的定義（定義文の中に定義されるべき言葉が入っている）」そのものではないが、それに近い。「マルイはどこ、駅のそば。駅はどこ、マルイのそば」というやつだ。最初に「飛跡」という概念を明確に定義しておけば、このような曖昧さは避けられるのではないかと思う。

3. 放射線化学分野における定義

3.1 特別な意味を持つ「トラック」

一方、放射線化学分野では、「トラック (track)」という言葉が、放射線防護分野とは違って、きわめて具体的な意味を持っているようである。まず、放射線防護分野における「飛跡構造」の説明は「電離放射線の通過による…」となっているのに対して、放射線化学分野における「トラック構造」の説明は「イオンなど荷電粒子の…」となっているところが異

なる。これも気になるところではあるが、その後が続く文章を部分的に切り出してみるともっと気になることが出てくる。『飛跡のことをトラック (track) といい』となるのだ。

“track”を「飛跡」と和訳した立場の人から見ると、この文章は、うっかりすると『飛跡のことを飛跡といい』に見えるのではないか。勿論これは、文章の一部を切り出したからであり、また、それぞれの分野の中にはそれぞれ考え方に矛盾はない。このようなことが起きるのは、放射線化学分野では「トラック」という言葉が明確な描像を持った概念として位置づけられているからなのである。では、それはどのようなものなのか、以下に見ていくことにする。

3.2 スパーという概念

水の放射線分解を例にとり、放射線化学反応の説明に登場する粒子や化学種などの凡例を図1に示す。なお、以後の説明や図は、それぞれ若干ニュアンスの異なる文献 [2] ～ [5] の記述を参考にし、最大公約数的に整理したものである。

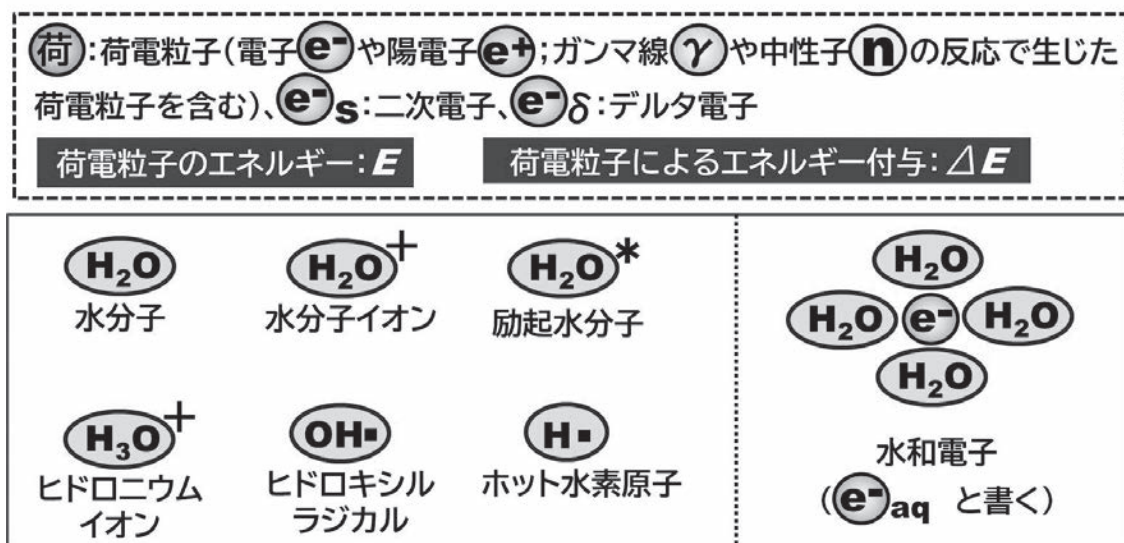


図1 粒子や化学種の表記の凡例。

水分子のイオン化 (①) や励起 (②) における入射荷電粒子からのエネルギー付与が、目安として100eV以下の場合に生起する状態を図2に示す。この場合、入射した荷電粒子は反応後さらに先へ進むが、反応によって生成した二

次電子は水分子イオンや励起水分子とともにエネルギー付与の近傍に留まる (③)。これらは、さらに反応を起こし、ヒドロニウムイオン、ヒドロキシルラジカル、ホット水素原子、水和電子などが生じる (④)。このようにして、エネ

ルギー付与の近傍では、イオン、励起分子、ラジカル、水和電子などの化学的活性種が局所的に高密度で存在することになる。荷電粒子の進路に沿って離散的に生ずるこのような化学的活性種の密集状態をスパー (spur、痕跡) と呼ぶ (⑤)。“spur”という言葉はICRPのPubl.には出てこない。

次いで、荷電粒子によるエネルギー付与が、目安として100eVを超えた場合の状態を図3に示す。この場合も100eV以下の場合と同様な反応が起こるが、イオン化 (①) で生じた二次電子の一部はエネルギー付与近傍に留まらないで飛び出し (②)、自らがイオン化や励起を起こすことによってスパーを形成する (③)。

3.3 いろいろな「トラック」

荷電粒子がスパーを形成しながら媒質中を進んで行った場合の最終的な状態について、最初の入射粒子が電子の

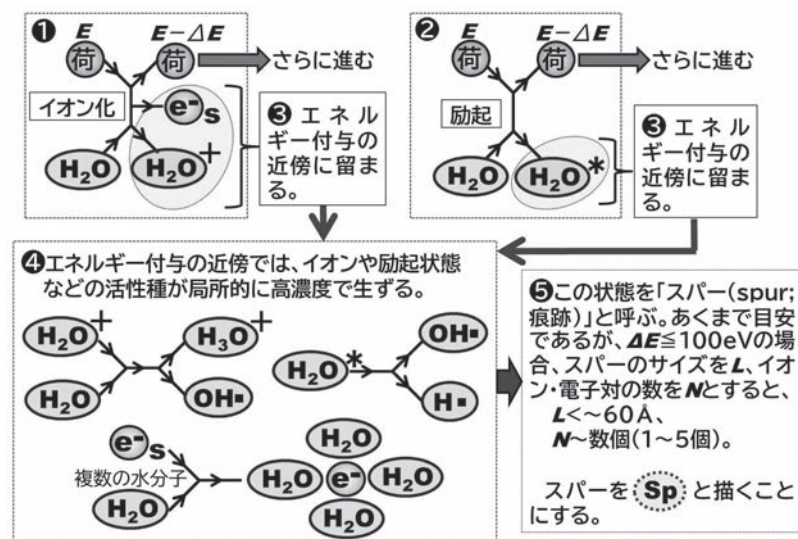


図2 荷電粒子による水の放射線分解においてエネルギー付与が100eV以下の場合に生起する状態のイメージ。

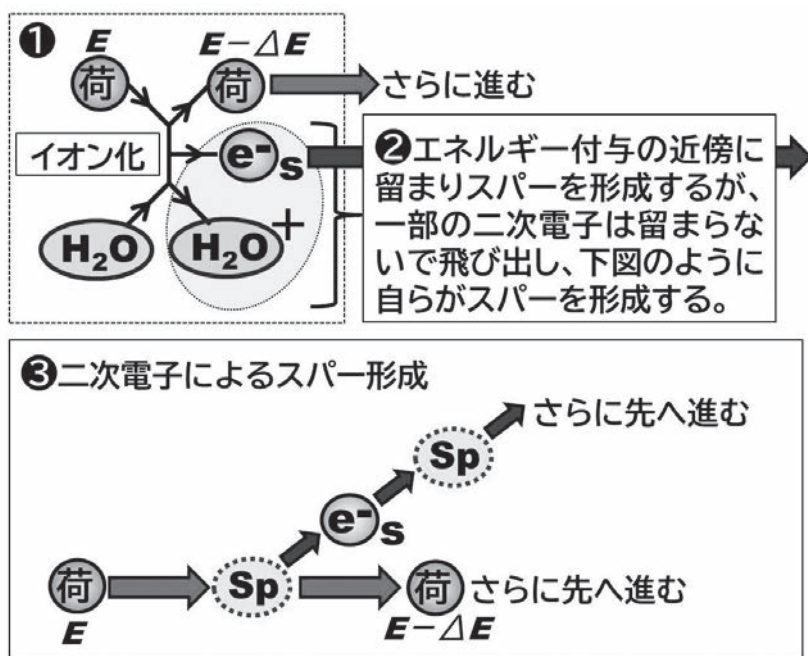


図3 荷電粒子による水の放射線分解においてエネルギー付与が100eVを超えた場合に生起する状態のイメージ。

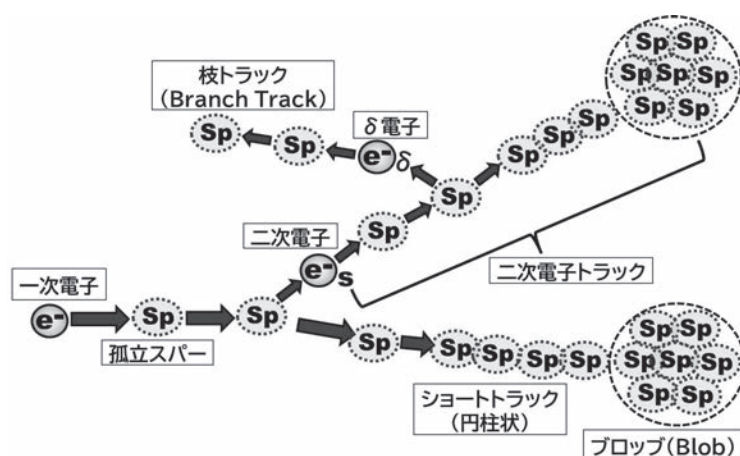


図4 入射粒子が電子の場合の最終的な状態のイメージ。

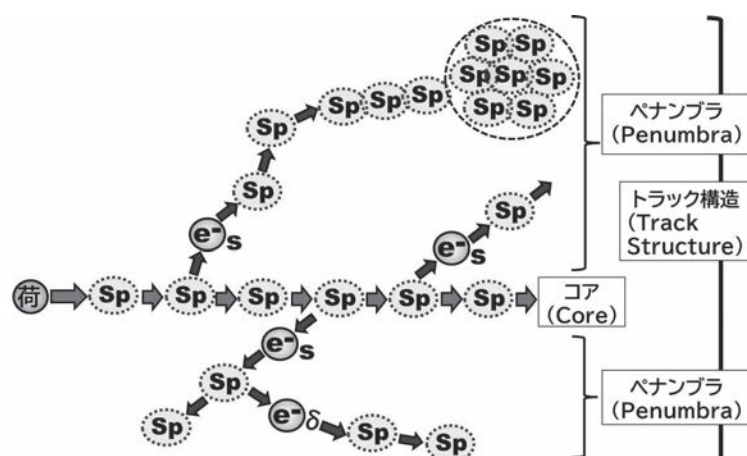


図5 入射粒子が重荷電粒子の場合の最終的な状態のイメージ。

場合を図4、重荷電粒子の場合を図5に示す。

入射粒子が電子の場合、入射電子（一次電子）は孤立したスパークを形成しながら進んで行くが、運動エネルギーが減少していくのに従って円柱状にスパークの重なりが起こる。これを「ショートトラック」と呼ぶ。そして最終的に停止する場所ではスパークが球状に密集した状態を形成する。これを「ブロッブ (Blob)」と呼んでいるが、この言葉もICRPのPubl.には出てこない。また、一次電子の進行途中で生成した二次電子も、一次電子と同様な状態を形成するが、これを「二次電子トラック」、

二次電子の二次電子である δ 電子が形成する状態を「枝トラック (Branch Track)」と呼ぶことがある。

入射粒子が重荷電粒子の場合、入射粒子そのものが直接媒質にエネルギーを付与しながら進んで行く領域を「コア (Core)」という。このコアから分岐して二次電子がスパーク、ショートトラック、ブロッブ等を形成する周辺領域のことを「ペナンブラ (Penumbra)」と呼ぶ。そして、コアとペナンブラから成る状態を「トラック構造 (Track Structure)」と言っている。

4. おわりに

こうして見てくると、ふたつの分野で「トラック」の概念や描像がだいぶ異なることがわかる。「重箱の隅を突くような議論」という見方でも

できるだろう。しかし、学際領域において、近いジャンルの人たちがそれぞれ違う言語で喋っていたのでは、研究の発展にとって効率的ではない、と思うのである。

参考文献

- 1) ICRP Publications: Publ. 1 (1958)~Publ. 137(2017)
- 2) 山下真一, 村上健太, 田口光正: RADIOISOTOPES, 66, 497-505 (2017)
- 3) 室屋裕佐: RADIOISOTOPES, 66, 425-435 (2017)
- 4) 小林慶規, 岡壽崇: 放射線化学, 94, 53-60 (2012)
- 5) 田畑米穂, 放射線化学, 東京大学出版会 (1978)

サービス部門からのお願い

返信用封筒はセロハンテープで確実に封をしてください

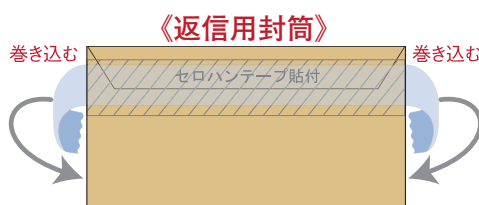
平素より弊社のガラスバッジサービスをご利用くださいまして誠にありがとうございます。

ガラスバッジ測定依頼の際、返信用封筒をご利用のお客様は、セロハンテープで確実に封をしていただきますようお願いいたします。

セロハンテープは「セロハンテープ貼付」と書かれた位置に、封筒を巻き込むようにして、確実に貼り付けてください。

また、ホチキスの使用は、ガラスバッジが傷ついたり、完全に封ができない場合がございますので避けてください。

お客様のご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。



編集後記

- 個人的な意見ではありますが「2021年7月・8月・9月」日本でオリンピックが開催され、新たな学びの場となる事を期待しております。諸外国のお客様が訪日し、コロナ禍での多様性の理解と、様々な背景をお持ちの方々に、正しく日本文化を伝える事の難しさを学ぶ事が出来るチャンスと捉え前向きに期待しております。
- 今回本紙でも「色覚多様性」をスタートに「カテゴリーの違う分野でも言葉の持つ意味が違う」、「正しく伝える」事についてお伝えいたします。
- 東京大学 新領域創成科学研究科 先端生命科学専攻 人類進化システム分野 教授 河村正二先生より「色覚多様性の意味について」ご紹介いただきました。色覚は視覚機能のひとつであり、多様性のひとつであるをご紹介いただきました。生物種により色覚多様性から得る利益が変わり、種を維持するためによりよく見える選択をした種と、よりよく生きるために、見えなく進化した種があるという事を学ばせていただきました。
- 2021年4月16日(金)から開催されました、国際画像総合

展についてご紹介でございます。昨年はWebのみの開催でしたが、今年はWebと、実際の展示を含めた学会へと変遷しております。「感染リスクを下げる」ための感染対策・工夫の一部をご紹介し、弊社展示ブースのご紹介をしています。

- 弊社大洗研究所 岡田瀬平所長より 図説 量子ビーム・放射線利用-第12回 放射線のトラックとは何ぞや-を掲載いたしました。カテゴリーの違う分野で言葉や単位を正しく共有し、利用する事の意味を具体的にご紹介いただきました。
- 東京大学 医学部附属病院 中川恵一先生からは「トリチウムとアイソトープ治療」のお話をお寄せいただきました。風評被害対策へも十分に配慮し取り組んでいく必要がある事のお示しと、単位と量の比較を具体的にご紹介いただき、正しく伝える事の本質を学ばせていただきました。
- テクノルコーナーでは「テクノルウェブセミナー」をご紹介しました。紙面をお読みいただいたお客様の情報収集にお役立ていただければ幸いです。(M. H)

FBNews No.536

発行日/2021年8月1日

発行人/細田敏和

編集委員/新田浩 小口靖弘 中村尚司 金子正人 加藤和明 青山伸 原明

五十嵐仁 藤森昭彦 高橋英典 中本由季 廣田盛一

発行所/株式会社千代田テクノ

所在地/〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル

電話/03-3252-2390 FAX/03-5297-3887

<https://www.c-technol.co.jp/>

印刷/株式会社テクノサポートシステム

—禁無断転載— 定価400円(本体364円)