

ラジオロジー

放射線医療と患者さんをつなぐ広報誌



特集◎核医学検査

東京医科歯科大学放射線診断科
立石 宇貴秀 (たていし うきひで)

■世界の街角から
ミャンマーの小京都 マンダレーとその周辺

公益社団法人 日本放射線技術学会
小寺 吉衛 (こでら よしえ)

■My Hobby

映画鑑賞

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所
赤羽 恵一 (あかはね けいいち)

患者さんに

やさしい放射線医学を求めて…

ラジオロジー(Radiology)とは放射線科学のことです。
ラジオロジーは体の中を切らずに、見ます。エックス線写真からはじまり、ここまで来ました。

日本ラジオロジー協会

「みえる・わかる・なおる」をテーマとして放射線科学は医療に幅広く貢献しております。

[特集]

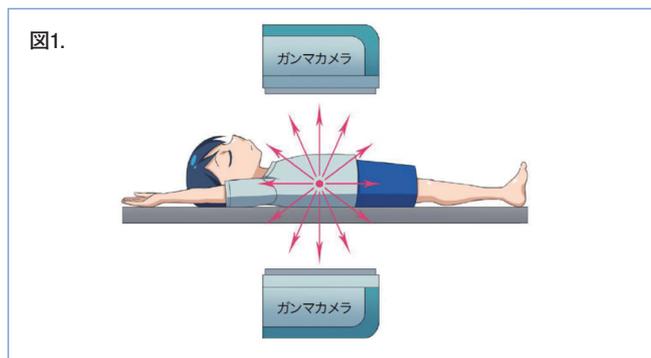
核医学検査

東京医科歯科大学放射線診断科
立石 宇貴秀 (たていし うきひで)

臨床核医学

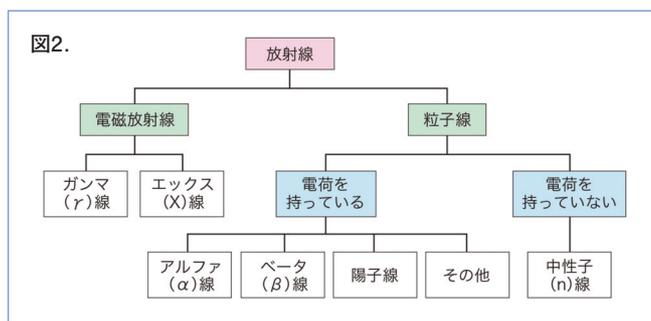
臨床核医学は放射性同位元素を用いる医学で、放射性同位元素をラジオアイソトープ (radioisotope: RI) と言います。核医学診断と核医学治療があり、単一光子放射型コンピューター断層撮影や陽電子放射型コンピューター断層撮影によるイメージングと非密封RI治療 (内用療法) があります。

核医学診断は臓器や組織に親和性のある放射性核種を微量投与して、臓器や病巣に分布した薬剤から放出される放射能を体外のシンチレーションカメラ (ガンマカメラ) で測定・画像化する診断法です (図1)。



放射線

放射線は波としての性質を有する電磁放射線、粒子としての性質を有する粒子線に大別されます。粒子線には電荷を有するアルファ (α) 線、ベータ (β) 線、陽子線があり、中性子線は電荷がありません (図2)。日常臨床で用いられるエックス (X) 線は、電離作用のある電磁放射線です。核医学では、電磁放射線、電荷を持った粒子線を主に利用



します。臨床核医学で使用する主なRI (radioisotope) は、半減期が短めで、エネルギーが必要最小限に高いもの、かつ被ばく線量が低いものが好まれます。

医療被ばくと撮影

核医学の検査は放射性医薬品を使用するため、医療被ばくがあります (図3)。例えば、胸部単純X線が0.05mSv、胃透視が0.6mSv、胸部CTが7mSvであるのに対し、骨シンチグラフィが5mSv、FDG-PETが3-5mSvです。

撮影は、投与する薬剤の分布、ラジオアイソトープ (RI) の半減期をよく考えて行います (図4)。核医学検査は、検査



図4.

元素の名前	半減期	ガンマ (γ) 線エネルギー
テクネシウム99m [^{99m} Tc]	6.0時	141keV
ヨウ素123 [¹²³ I]	13.2時	159keV
タリウム201 [²⁰¹ Tl]	72.9時	70.8keV
ガリウム67 [⁶⁷ Ga]	3.2日	93.3keV
キセノン133 [¹³³ Xe]	5.2日	81keV
ヨウ素131 [¹³¹ I]	8.0日	364keV
ヨウ素125 [¹²⁵ I]	59.4日	31keV
フッ素18 [¹⁸ F]	110分	511keV

・半減期が長い=時間が経っても検出が可能、被ばくが増える
・エネルギーが高い=画質が良い、被ばくが増える

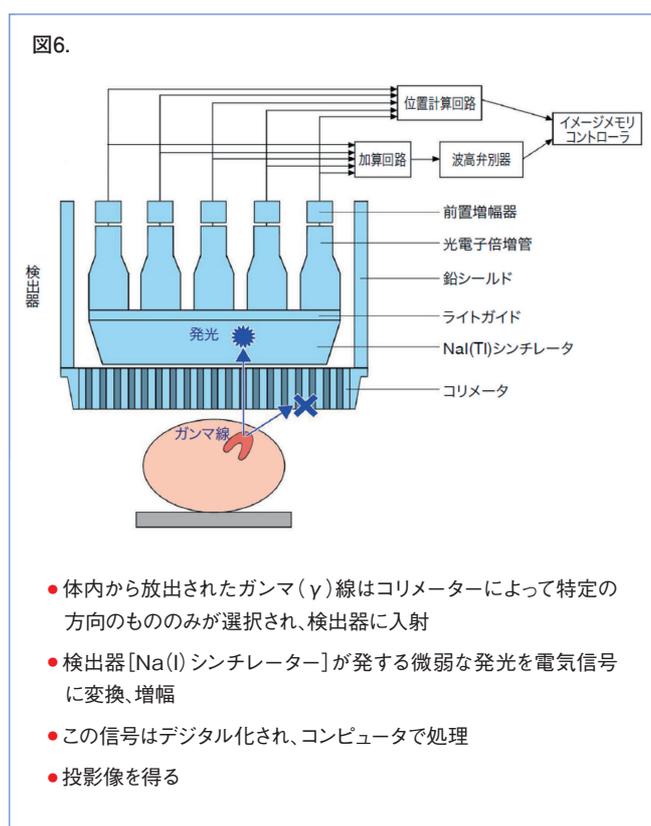
時間が長いので、緊急性のある疾患には向いていません。これは収集時の体位保持が必要なためで、疼痛が強い・意識障害がある・小児の場合は注意が必要です。RI薬剤の準備が予め必要で、薬剤の放射能が減衰するため検査の延期はできません。検査の中止により薬剤は無駄になる場合があるなどの注意が必要です。

一般核医学検査

核医学の検査は用途ごと、臓器ごとに細かく分かれています(図5)。一例として、テクネチウムはジェネレーターという合成装置から毎回抽出して使用します。原料はモリブデンであり、生理食塩液が真空中に引かれてカラムを通過して真空バイアルに流れ込む過程で^{99m}TcO₄⁻が溶出されます。これで化合物を標識し、製剤として投与します。

図5.

臓器	検査の種類
脳	脳血流シンチグラフィ、脳ドパミントランスポーターシンチグラフィ、FDG-PET、神経内分泌腫瘍シンチグラフィ
肺	肺血流シンチグラフィ、肺換気シンチグラフィ
心臓	心筋血流シンチグラフィ、脂肪酸代謝、FDG-PET
内分泌	甲状腺シンチグラフィ、副甲状腺シンチグラフィ、副腎皮質、副腎髄質
消化器	唾液腺、肝コロイド、肝胆道、肝受容体、蛋白漏出、消化管出血
泌尿生殖器	腎動態、腎静態、精巣、腎レノグラム
骨	骨シンチグラフィ
血液造血器	骨髄、脾、センチネルリンパ節
腫瘍・炎症	ガリウム、タリウム、FDG-PET、ソマトスタチン受容体シンチグラフィ



装置

撮影に用いるカメラをガンマカメラと言います。ガンマカメラに垂直に飛び込むガンマ(γ)線だけを測定することができます(図6)。コリメータ(小さな孔が稠密にあいている厚板)を通過して入射したガンマ線が検出器へ届き、ガンマ線の光子1個1個のカメラへの入射位置とエネルギーを測定することができます。臨床核医学で使用する装置は、単一光子放射型コンピューター断層撮影(Single Photon Emission Computed Tomography)を略してSPECTと呼びます。ガンマカメラを人体の周りに回転させて、投影像から画像を再構成して断層像を得ることができます。

撮影方法

Static ImageはRI(radioisotope:ラジオアイソトープ)が全身に行き渡った状態でデータを収集します。静的画像のことで、体内分布が緩やかに変化するか特定組織に蓄積する薬剤を用いた画像です。この手法が汎用されています。

Dynamic ImageはRIを投与直後から連続してデータを収集します。動的画像のことで、体内分布が速やかに変化する薬品を用いた検査で、経時的局所動態機能を表します。

時間-放射能曲線(Time Activity Curve)が得られます。こちらは精査といえます。動態解析では、放射能の生体組織における経時経過を数学的な式で表します。脳血流以外にも応用が効きます。方程式を解いて、血流、酵素活性、受容体など因子(未知数)を推定します。

放射能は組織内でいくつかのコンパートメントのどれかに分布し、コンパートメント間の移動は速度定数(k値=単位時間の移動率)で行われます。動態解析では、コンパートメントモデルを用いて未知数を推定します。

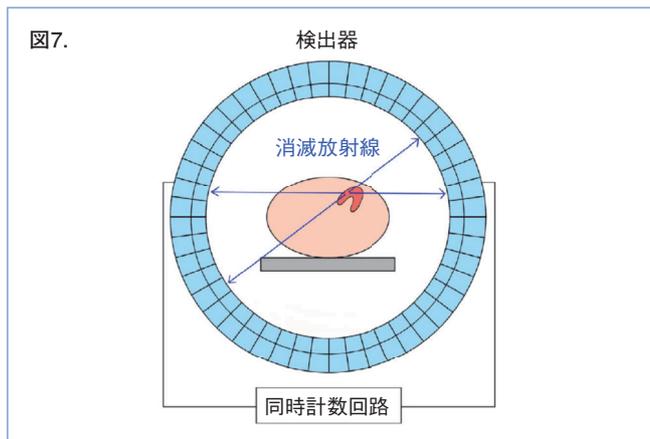
表示方法

表示方法はRI(radioisotope:ラジオアイソトープ)の集積度合いをグレースケールで表示することが多く、集積度合いを視覚的に評価できます。集積を定量化する技術もあります。例えば、脳血流SPECTでは、血流が豊富だと赤色、血流が乏しいと緑色に表示されます。また、心筋SPECTでは血流が豊富だと赤色に表示されます。心筋梗塞では青色～黒色に表示されます。

PET

陽電子放射型コンピューター断層撮影(positron emission tomography:PET)では、用いる放射性同位元素は自然界に存在しないため、サイクロトロンで合成します。合成した放射性同位元素を化合物に標識して用います。PETで使用する放射性同位元素は陽電子を放出します。これは

周囲にある電子と容易に衝突して消滅します。この時、180°方向に2本のガンマ(γ)線を放出します。これを消滅放射線と呼びますが、PETで撮影すると光って見えます(図7)。



エックス(X)線は熱電子がターゲットである陽極に衝突して発生します。一方、陽電子放出核種は、サイクロトロンによって加速された荷電粒子をターゲットに衝突して発生します。放射性同位元素の合成はターゲット材料を閉じこめ、照射するシステムを使用します。ターゲットには気体、液体、固体があります。ビーム照射による励起、発熱のため、照射ロスのない耐圧設計、冷却効率を要します。PETでのガンマ(γ)線計測方法は特徴的です。

ポジトロン放出核種から出る陽電子は電子と結合し、同時に2本のガンマ線を放出します。どの核種でも511keVのガンマ線が180°方向に出ます。陽電子放出核種(ポジトロン核種)は数種類知られています。それぞれ半減期や製造方法が異なります。

PETの検出器は電子的なコリメーションで高感度です。前後に2つの検出器が配置されるため、同時にガンマ(γ)線を検出でき、かつ2つの検出器を結ぶ線上に線源が存在します。この同時計測線をline of response (LOR)と呼びます。検出器はブロック検出器で、シンチレータとフォト・マルチプライアーから成り立っています。

クリスタルには、BGO:ゲルマニウム酸ビスマス $[Bi_4Ge_3O_{12}]$ 、LSO:ケイ酸ルテチウム $[Lu_2SiO_5]$ 、GSO:ケイ酸ガドリニウム $[Gd_2SiO_5]$ などが用いられています。

撮影

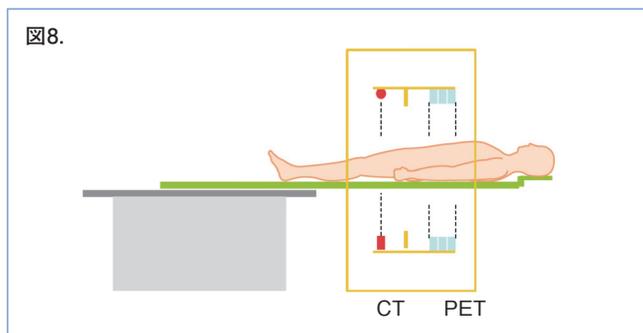
PET/CTでは、PETとCT装置が並列に配置しています(図8)。このため、患者さんは移動することなく画像を取得することができます。全身撮影の方法には2通りあります。ステップ・アンド・シュート法はマルチベッドを用いるため、各々の位置でスキャンと画像再構成を行い、画像をつなぎ合わせます。連続ベッド移動を用いる場合は全体でサイノ

グラムデータを得て画像再構成を行うため、画像をつなぎ合わせることはありません。

PETはSPECTと比較して、

- ①コリメーターは不要
- ②検出感度が高い
- ③バックグラウンドが少なく解像力が良い
- ④吸収補正が容易
- ⑤正確な定量性を得られる

といった点で優れています。



フルオロデオキシグルコース (FDG)

FDGはグルコースのアナログであり、細胞膜のグルコーストランスポーターにより細胞内に取り込まれ、ヘキソキナーゼによりリン酸化されてFDG-6リン酸に変わります(図9)。FDG-6リン酸は、それ以上解糖系で代謝を受けず、細胞膜も透過できないため、細胞内に蓄積されていきます。これをメタボリック・トラッピングと呼びます。

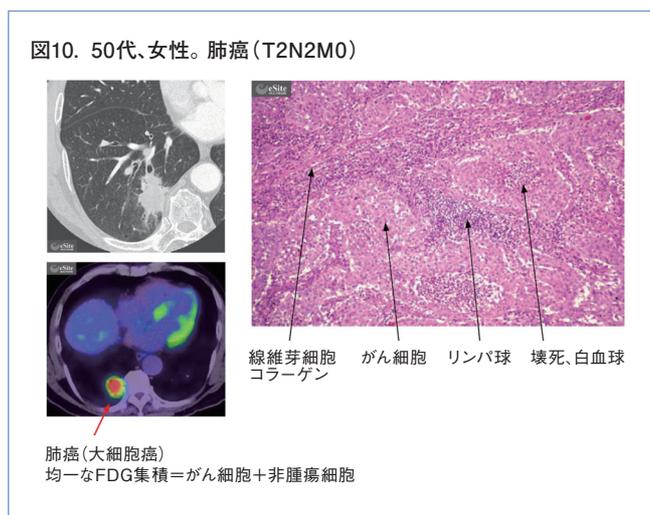
図9.

- ・ポジトロン放出核種(PET製剤)
- ・グルコースの化学構造式とよく似た物質
- ・違いは細胞内に取り込まれた後、FDG-6-リン酸となり、その先の解糖系に移行せずに長期にとどまることができる
- ・ ^{18}F の半減期は110分
- ・**悪性腫瘍(肺癌、乳癌、悪性リンパ腫など)に集積(肝臓癌、前立腺癌、腎臓癌は苦手)**
- ・**炎症(腫瘍、活動性結核、サルコイドーシスなど)にも集積するので注意**

FDG-PET検査は腫瘍の診断に用いられます。PET/CT画像は集積の解剖学的位置を正確に知ることができるので、臨床上的有用性が高いです。特に、悪性度の評価(鑑別診断)、病巣の進展範囲の評価(病期診断)、治療効果判定(残存腫瘍の有無)、治療効果や予後の予測、再発診断、原発巣の検索、がん検診(スクリーニング)に幅広い用途があります。

通常、がん細胞などの悪性度の高い細胞には、強いFDG集積が認められます。

いろいろながん種で病変部の集積と病理学的所見の比較が行われてきた。詳細な検討の結果、この集積に一致した部分には、がん細胞のほか、線維芽細胞、リンパ球、白血球、コラーゲン、壊死などが存在し、不均一であることがわかっています。注目すべきは、がん細胞だけにFDGが集積するのではなく、大部分ががん細胞であるものの、それ以外の細胞にも集積が少なからずあることを知っておく必要があります(図10)。



FDG-PET/CTは腫瘍の診断に重要な検査ですが、苦手ながん(癌)があるため、注意が必要です。

- ・消化管粘膜内癌、スキルス胃癌、ムチン産生腫瘍
- ・カルチノイドを含む神経内分泌腫瘍
- ・高分化型肝細胞癌
- ・腎癌、尿管癌、膀胱癌
- ・脳転移
- ・硬化性骨転移

これらの疾患は細胞密度が低い、生理的集積(排泄像)の近傍、FDGが蓄積しにくいなどの理由により偽陰性となりうるため、注意が必要です。

FDG以外の薬剤

^{15}O -酸素(^{15}O)を標識したPET製剤も存在します。これには酸素ガス、一酸化炭素ガス、二酸化炭素ガス、水があり、古くから研究に使用されています。それぞれ対象臓器が異なり、酸素代謝や血流などを知る目的で使用されます。 ^{15}O H_2O を用いると、脳の全体血流(CBF:cerebral blood flow)、酸素消費率(OEF:oxygen extraction fraction)、酸素代謝率(CMRO $_2$:cerebral oxygen metabolic rate)、血流量(CBV:cerebral blood volume)がわかります。

^{11}C -メチオニン(Met)はアミノ酸のメチオニンに放射性同位元素で標識した物質で、アミノ酸代謝を知ることがで

きる薬剤です。アミノ酸輸送の亢進はタンパク合成の亢進、メチル基転移・アミノ酸代謝の亢進を示すため、細胞増殖・分泌機能などを反映しています。FDGが脳の神経細胞に生理的に強い集積を示す一方で、アミノ酸はわずかな集積にとどまります。これは脳の神経細胞のエネルギー源がグルコースであるためです。この性質を利用するとグリオーマなどの脳腫瘍の診断にメチオニンの方が検出感度が高いことが知られています。

認知症

アルツハイマー病(Alzheimer disease:AD)は、記憶・認知機能の低下を特徴とする進行性の神経変性疾患です。高齢化に伴い、患者数の増加が懸念されています。多くの治療薬開発が行われていますが、いまだ特効薬は存在しません。一方で、治療方針決定に有効な診断法の確立が求められています。

ADの脳には、 β シート構造をとったアミロイド β ペプチドである老人斑と、過剰リン酸化されたタウタンパクの神経原線維変化が認められます。アミロイド β ペプチドである老人斑と過剰リン酸化されたタウタンパクの神経原線維変化が存在すると、すぐに症状を発症するものではありません。

通常は認知機能低下まで数十年の経過があります。一度、発症すると有効な根治療法はないため、現在は発症以前からスクリーニングを行い、進行を遅らせることが考えられています。

老人斑、神経原線維変化を標的にしたADの早期診断用PET製剤の開発が行われました。アルツハイマー病(AD)の早期診断用イメージング薬の開発が進み、現在では4剤が臨床応用可能となりました。

結語

画像診断には放射線診断、超音波診断、磁気共鳴診断、サーモグラフィなどが含まれており、広範囲に及びます。このうち核医学では、電磁放射線、電荷を持った粒子線を主に利用します。核医学検査で使用する主なRI (radioisotope)は、半減期が短めで、エネルギーが必要最小限に高いもの、かつ被ばく線量が低いものが利用されています。極めて少量のRIを投与し、シンチグラフィ(プランナー像、SPECT像)やPET/CTによる高感度の画像撮影による定量可能な臨床上重要な検査です。

最後に、本稿でお示した内容は、次に示す図書より販売元の許可を得て掲載しています。

(立石宇貴秀著 医療系のための画像診断・核医学検査ベーシック 2018年刊 イーサイトヘルスケア株式会社)

世界の街角から

ミャンマーの小京都 マンダレーとその周辺

公益社団法人 日本放射線技術学会
小寺 吉衛 (こでら よしえ)

ここ数年、ミャンマー(往年の方にはビルマという方がわかりやすいでしょうか)に行く機会が増えました。同じ仏教国であることや優しい国民性など、日本人にとって馴染みやすい国です。このことから、近年、訪問される日本人も多いようです。ただ、経済の中心で、かつて首都であったヤンゴンや世界遺産であるバガンには多く行かれますが、そのほかの地域であまり日本人を見かけなかったのは残念です。

図1. 王宮を囲む幅70mの濠
向かって左側が王宮、右側が市街地、
正面遠くにマンダレーヒルが見える



図2. マンダレーヒルから市街地を望む光景
遠方の白く光っているところは王宮を囲む濠の一角

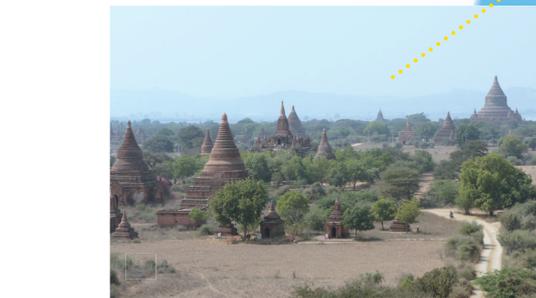


図6. バガンの遺構群

今回ご紹介するマンダレー(Mandalay)は、ヤンゴンに次ぐ第2の都市で、人口は約100万人、イギリスに併合されるまで独立を保った最後の王朝(コンバウン王朝)の首都(1860年~1885年)でした。ミャンマーのほぼ中央でエーヤワディー川の東側に位置し、日本でいえば京都のような古い都です。町の中心に3km四方の濠に囲まれた旧王宮があります(図1,2)。そこにある建物自体は後世に時代検証もなく建てられたものらしく、あまり歴史的意味はないそうです。マンダレー周辺には、かつての王朝時代の遺跡やパゴダ(仏塔)が多くあります。その一つに特異な形状をもつミンゴン(Mingun)のブトードオパゴダがあります(図3)。

これはインワ王朝時代の世界最大級のパゴダですが、

王が亡くなったため未完成のままです。現在の高さは約50mですが、当初の計画では約150mの巨大な寺院になる予定でした。

頂上に上ることができますが、ミャンマーの寺院はすべて裸足でしか入ることができないため、小さなムカデがいっぱいの土の階段を登っていくとエーヤワディー川の景観が望めます。また、すぐ近くには世界最大級の鐘ミンゴンベル(Mingun Bell)もあります。マンダレーは非常に暑いところで、イギリス統治時代には、その暑さを避けるため郊外の海拔1,100mのピンウールイン(Pyin Oo Lwin)に避暑地が作られました。お洒落な別荘や郊外の洞窟寺院ペイチンミャウン、アニサガンの滝などが見所です(図4,5)。



図3. ミングオンのブトードオパゴダ
現在の高さは約50mあるが、当初の計画では約150mの巨大な寺院になる予定であった

図4. ピンウールインの洞窟寺院
ペイチンミャウン

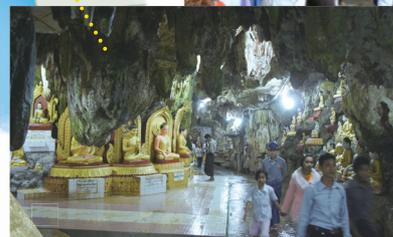


図5.
洞窟寺院の内部

さて、ミャンマーといえば世界遺産バガンを見逃すことはできないでしょう。11世紀にビルマ族がエーヤワディー平原へ侵入してバガン王朝を樹立しました。その中心地の遺構群がバガン(Bagan)です(図6)。パゴダの数は3000を超えられているといわれています。

ミャンマーにはこのほかにもたくさんの遺跡や観光名所があります。そのすべてをお伝えすることができないのは残念ですが、幸いに、10月1日から観光ビザ(査証)が1年間の試験運用で免除されました。

この機会に訪問されてみてはどうでしょうか。

My Hobby

映画鑑賞

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所
赤羽 恵一(あかはね けいいち)

今のようにインターネットがない時代、私の子供の頃は、テレビとラジオが娯楽の大きな部分を占めていました。ラジオでよく聞いていたのは、「夜のスクリーンミュージック」です。映画音楽を流す番組で、映画の内容に合うように作られた音楽に引き込まれ、カセットテープにエアチェックをしながら熱心に聞いていました。また、テレビではゴールデンタイムに映画番組が組まれており、それらもよく見ていました。映画館に行ける年齢になると、時々映画館に出かけては、繰り返し見たものでした。当時の映画館は自由席で、二本立て、あるいは同じ映画を繰り返し上映していたので、食べ物を持参しながら長時間過ごすことができました。

大学に入ると、金銭的な制約はあるものの自由な生活になり、一人で、あるいは友人と映画館に行きました。映画を見たときには、毎回パンフレットを買い、後日もそれを見ながら余韻に浸っていました。就職してからも、見たい映画が来ると、必ず映画館に足を運んだものでした。以前大学教員をしていたとき、近くの映画館で映画を見る際は、同じ建物のラーメン屋でラーメンを食べるのが常でしたが、後日学生から「いつも同じラーメンを食べていますね」というようなことを言われたときは、驚き、少し恥ずかしくなりました。その店でアルバイトをしていたそうですが、こちらは全く気がついていなかったのです。

これまでSF・アクション・サスペンス・ロマンス・ホラー・アニメなど、いろいろなジャンルを見てきました。特に好きなのは、SFではスターウォーズ、スタートレックシリーズです。スウェーデン留学中に、研究所の先生が「スタートレックはSF、スターウォーズはファンタジー」と言われたのを覚えています。スペクタクルものではベンハー、アニメはジブリ映画、アクションではシュワルツェネッガーやスタローン主演映画、カンフー映画が好きでした。近年は、ロードオブザリングやアバター、ディズニー映画、アベンジャーズなどのマーベルシリーズもお気に入りです。

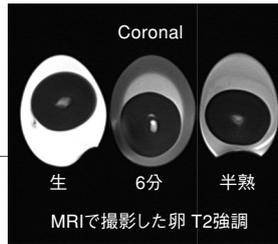
現在は、ネットショッピングサイトの会員になり、会員特典として数多くの映画を見ることができるようになりました。スマートフォンやタブレットに幾つかダウンロードしておき、出張の移動時など、合間に見るのが楽しみになっています。同様に、海外出張時

の飛行機内の映画も、体力的に過度の負担がかからない程度に楽しんでいます。今でも映画館に時々行きますが、ネットで情報を得ることが容易になり、パンフレットを買い出すことはなくなりました。映画は、日常と異なる世界において、登場人物に感情移入することで、様々な出来事を疑似体験できることが魅力です。カタルシスという効果も挙げられるでしょう。やはり映画は、スマホやテレビではなく、映画館の大画面・大音量で楽しむたいものです。

その一方で、自宅にシアタールームを作ることも、私の夢の一つです。



編集後記



“特集”は核医学検査を取り上げ、立石宇貴秀先生に解説をお願いいたしました。核医学検査は、各臓器、あるいは種々の疾患に特異的に集積する医薬品を使用することにより、他の画像検査にはない多くの有用な情報を得ることができます。また、頭からつま先まで全身の情報を容易に取得できることも大きなメリットです。さらに、これまでも核医学検査で開発された医療技術が、他の画像診断にも応用されてきた経緯もあり、近年注目されている生体内での分子プロセスを可視化する分子イメージングの最先端にいる医療技術です。今後の益々の発展が期待されます。

“世界の街角から”は、小寺吉衛先生にミャンマーのマンダレーをご紹介頂きました。ミャンマーは、世界遺産のバガンをはじめとして多くの遺跡のある国ですが、日本人には、あまり馴染みのない国です。しかし、同じ仏教国でもあり、その国民性も日本人に似ているようです。ぜひ、訪問したい国の一つです。

“My Hobby”は、赤羽恵一先生に映画鑑賞について執筆して頂きました。我々も赤羽先生と同じように若い頃に映画に大きな憧れを持っていたことを思い出しました。映画には、我々の人生を豊かにする不思議な力があるようです。

ご意見、お問い合わせなどがございましたらJRC事務局 (office@j-rc.org) までメールでお寄せください。 JRC広報委員



JRC
Japan Radiology Congress

監修 公益社団法人 日本医学放射線学会
<http://www.radiology.or.jp/public.html>

発行 一般社団法人 日本ラジオロジー協会
〒101-0052 東京都千代田区神田小川町3-8
神田駿河台ビル7F
TEL 03-3518-6111 / FAX 03-3518-6139
<http://www.j-rc.org/>

発行日 平成31年2月25日 第17巻第1号 通巻32号