

ラジオロジー

放射線医療と市民のみなさんをつなぐ広報誌

41

2023年

特集◎次世代CT フォトンカウンティングディテクターCT

広島大学大学院医系科学研究科放射線診断学研究室
粟井 和夫(あらい かずお)

■世界の街角から アフターコロナ時代の国際学会

大阪大学大学院医学系研究科重粒子線治療学寄附講座
八木 雅史(やぎ まさし)

■My Hobby 音楽と私

一般社団法人 日本画像医療システム工業会
飯田 泰子(いいた やすこ)

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診るための科学です。エックス線写真からはじまり、日々に進歩しています。

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]

次世代CT フォトンカウンティング ディテクターCT

広島大学大学院医系科学研究科
放射線診断学研究室
栗井 和夫 (あわい かずお)

はじめに

フォトンカウンティングディテクターCT (Photon counting detector CT、以後、PCD-CTと略します)は、新しいタイプのCT装置です。放射線診断の関係者からはPCD-CTの登場によりCTの性能が飛躍的に向上するのではないかと期待されており、次世代CTと呼ばれています。

PCD-CTについて説明するために、まずは従来のCTについてお話ししましょう。CTとは、X線を使用して体の断面を映し出す画像診断装置であり、正式にはコンピュータ断層撮影 (computed tomography) と呼ばれます。現在、CTはあらゆる疾患の診断に利用されており、現代の医療においてはなくてはならない医療機器の一つです。CTは英国EMI社の技術者であったゴッドフリー・ハウズフィールドにより開発され、1972年から臨床応用が始まりました。当初は、患者さんの頭部のみを撮影するのに5分以上かかっていましたが、その後、CT装置は飛躍的に進歩し、現在では最速の機種では頭部から骨盤までの範囲を数秒で撮影でき、さらに開発当初よりも遥かに細かい構造まで画像化できるようになりました。

CTでは、X線の発生源 (X線管球) を患者さんの周囲に一回りさせて患者さんの体にX線を透過させ、それをX線検出器と呼ばれるセンサーによって検出します (図1)。その後、得られたX線の透過データに対して数学的な処理を行って体の断面の画像を作り出します。

CTが開発されてから約50年にわたりX線検出器として「エネルギー積分型X線検出器 (Energy integrating detector CT: EID-CT)」と呼ばれるタイプが使用されてきました。これに対して、PCD-CTでは新しいタイプのX線検出器である「フォトンカウンティングディテクター」(フォトン=光子、カウンティング=数えること、ディテクター: 検出器) が搭載されています。

PCD-CTは2010年頃から研究開発が進められ、ドイツのシーメンスヘルシニア社が先行開発して2021年に商用機を発売しました。その他のCTメーカーも同様の装置を開発中であり、今後、CTの主流がPCD-CTに置き換わる可能性があります。本原稿では、PCD-CTが従来のCTとどのように違うかを解説した後に、PCD-CTの今後の臨床における可能性を述べます。

PCD-CTと従来のCTの違い

PCD-CTと従来のCTの最も大きな違いは、X線フォトンの検出法およびX線フォトンから得られた信号の処理法です (図2)。

比較のために従来CT (EID-CT) のX線検出器を図2Aに示します。従来のCTでは、X線検出器は多数の小さな検出器単位から構成されています。検出器の最小単位のサイズは、機種により異なりますが0.250-1.250mm程度です。これがCTで物質を検出できる最小のサイズに関係します。従来CTのX線検出器は、シンチレータおよび光ダイオード、信号を処理する電子回路から構成されています。X線が検出器のシンチレータにはいると、X線とシンチレータは相互作用を起こし可視光 (通常の光) を発生します。発生した可視光は光ダイオードに到達して電気信号に変換されます。X線の計測の頻度は装置の機種によって異なりますが、350マイクロ秒に一回程度行われています (マイクロは100万分の1)。最小単位の検出器では、隣の検出器に光が漏れないように酸化チタン等で出来た隔壁が設けてあります。それぞれの

図1. CTの基本的な構造

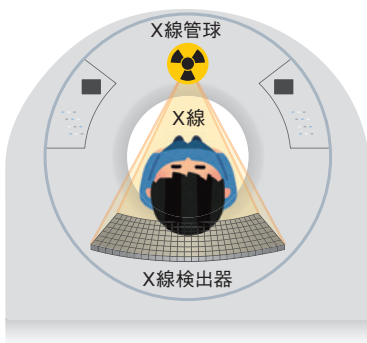


図2. EID-CT (従来型CT) とPCD-CTのX線検出器の比較

図2A. 従来型CT (EID-CT) のX線検出器

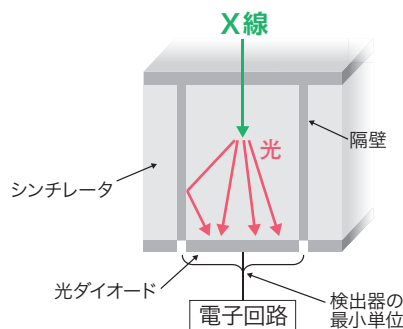
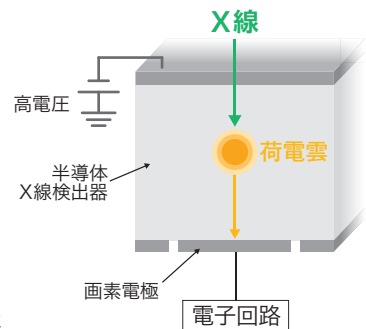


図2B. PCD-CTのX線検出器



検出器単位から発生する電気信号を電子回路に集めて、数学的な処理を加えて体の断面の画像を作り出します。

次にPCD-CTの検出器を図2Bに示します。フォトンカウンティング検出器は、半導体、その裏面に配置された画素電極、信号を処理する電子回路からなり、半導体には数百から千ボルトの直流電圧がかけられています。X線フォトンが半導体に入ると荷電雲を生じます。電子の荷電雲は検出器にかけられた電圧によりプラスに荷電している画素電極に移動させられ電気信号が発生します。その後、電子回路により個々のX線フォトンにより生じた電気信号のエネルギーの大きさが計測されます。フォトンカウンティング検出器では、一つ一つのX線フォトンのエネルギーを計測するため、0.01マイクロ秒程度の極めて短い間隔で電気信号の計測が行われています。PCD-CTが物質を検出できる最小サイズは画像電極のサイズに依存します。現在の画像電極のサイズは0.250mm程度です

以上に述べたように、従来CTのX線検出器ではX線を可視光に変換した後に、さらに可視光を電気信号に変換しますが、PCD-CTではX線を直接に電気信号に変化しています。このため、従来CTのX線検出器を「間接変換型」、PCD-CTの検出器を「直接変換型」と呼ぶことがあります。

従来CTとPCD-CTのX線を検出する原理の違いを、図3のような雨粒を使った模式図で説明しましょう。X線フォトンのひとつひとつは、いろいろなエネルギーの雨粒に例えられます。雨粒の色は、それぞれのX線フォトンのエネルギーに対応します。図3Aのように、従来CTにおけるX線フォトンの計測は、雨粒をバケツにためてその水量を測定するようなものです。バケツに溜まった雨粒はいろいろな色のものが混じり合うため、もとのそれぞれの雨粒の色はわからなくなります(すなわち、個々のX線フォトンのエネルギー情報は失われます)。雨粒をバケツに溜めることは、個々のX線フォトンのエネルギーをすべて足し合わせる(すなわち積分すること)に相当するため、従来のCTの検出器は「エネルギー積分型検出器」と呼ばれます。またバケツに雨粒を溜めて水量を測定すると、どうしても誤差を生じますが、これはX線フォトンのゆらぎによる画像ノイズに相当します。

これに対して、図3BのPCD-CTでは、雨粒の一つ一つを観察して個々の雨粒の色を判断します。このため、PCD-CTでは、個々のX線フォトンのエネルギー情報は失われません。またPCD-CTでは、雨粒をひとつひとつ計測することで計測の不確かさを除くことができ、これは画像ノイズの除去、ひいては検査に必要なX線の照射量の低減に役立ちます。

フォトンカウンティングディテクターCTにおいて期待されること

1) 被ばくの低減

PCD-CTでは、CT検査の時の患者さんの放射線被ばくを減らせることが期待されています。PCD-CTでは現在の標準的なCT装置よりも30-50%程度の被ばく低減ができるのではないかと期待されています。

放射線被ばくを減らすことができる理由はいくつかありますが、まずPCD-CTではCTの電子回路から発生する電気ノイズをカットできることが挙げられます。図4は、X線フォトンによる電子信号を示したもので、図の中の点線で囲んだ大きなスパイクがそれぞれ一つのX線フォトンにより生じる電気信号です。大きなスパイク以外の基線の部分には小さなスパイクが多数見られますが(図の薄墨をつけた部分)、これはCTの電子回路から発生する電気ノイズ(回路ノイズ)です。このノイズは、撮影時の放射線量が多いときはX線フォトンのゆらぎにより生じる量子ノイズよりはるかに小さいので問題となりませんが、放射線量が少ないとき、すなわち低放射線量で撮影した時には相対的に大きなノイズと

図3. EID-CT (従来型CT) とPCD-CTについて X線フォトン如雨粒に例えた模式図

図3A. EID-CT (従来型CT)

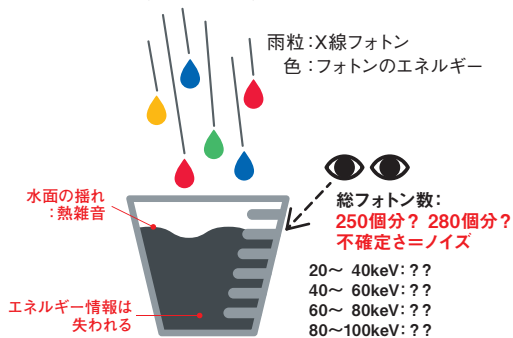
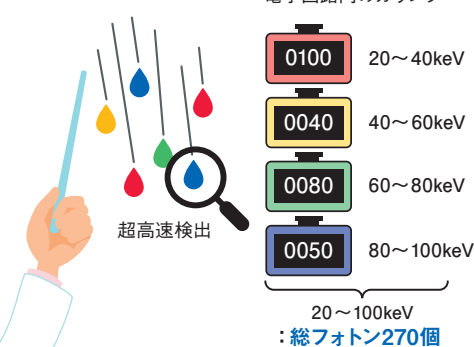


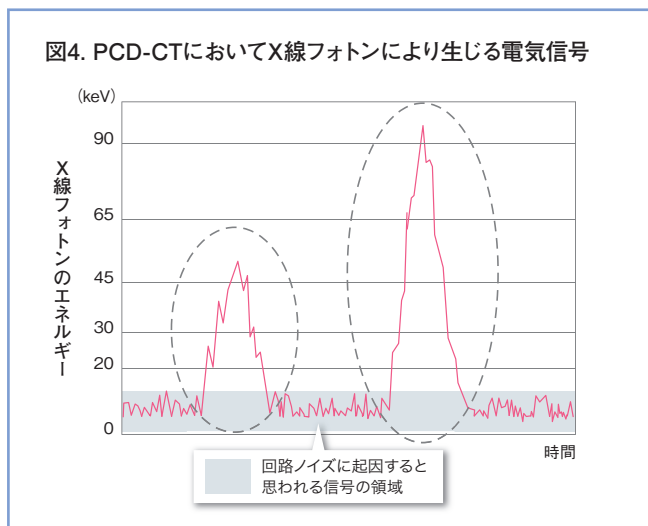
図3B. PCD-CT



メジカルビュー社「臨床画像2023年2月号」
p225-231 西島輝、塚越伸介「PCD CTの今後の技術的
方向性」より著者および出版社の許可を得て引用



なり画質が劣化する原因となります。回路ノイズの高さは概ね20keV未満です。PCD-CTは、個々の光子から生じる電気信号の高さを計測しますが、その際に20keV未満の電気信号をカットすることにより、回路ノイズを除去することが可能となります(図4)。



また、前述したように従来CTでは、一つの検出器素子に発生した光が隣接する検出器素子に影響を与えないようにするために隔壁が存在しますが、隔壁部分はX線の受光に関与しないのでX線の利用効率が落ちてしまいます。これに対して、PCD-CTは検出器に高電圧をかけてX線により生じた電子の荷電雲を画素電極に移動させるため隔壁が不要であり、X線の利用効率を上げることができます。さらに、検出器が直接変換型であることもX線の利用効率向上に寄与しています。

2) 空間分解能の向上

空間分解能とは、画像上でどのくらい細かな構造物が見えるかという指標です。前述したように、PCD-CTでは、検出器の最小単位(画素電極)を小さくすることが出来ます。ただし、画素電極を小さくしすぎると、電荷が隣接する画素電極に漏洩し画質の劣化を招くことがあるため、検出器の適切な設計が必要となります。

図5は、細い板を櫛状に配列したモジュールを含む模型(Catphan700,CTP714 High resolution module)をPCD-CTで撮影した画像です。PCD-CTの高分解能モード(画像の作成に高周波強調関数を使用する場合)では、29-30lp/cm(櫛と櫛の間隔が0.0167-0.0172cm)のモジュールまで明確に描出が可能となっています。これは従来型CTの空間分解能の2倍程度と考えられます。PCD-CTの高分解能モードを使用すれば、耳小骨などの小さな構造物の病変の診断が従来よりも進むのではないかと期待されます。

3) 画像のコントラストの改善

PCD-CTでは、検出器が直接変換型で放射線の利用効率が良いのに加え、前述したように回路ノイズをカットすることができるため、画像ノイズの少ない画像を得ることが出来ます。図5に、従来のEID-CT及びPCD-CTで、水を満たした円柱状の模型(直径400mm)を低い線量(管電流時間積25mAs)で撮影した画像を示します。画像上で、ザラザラと粒状に見えるのが画像ノイズです。この画像ノイズの量を測定すると、EID-CTでは350であるのに対してPCD-CTでは176とほぼ半減しているのがわかります(図6)。

一般に、画像においてある物質の見え方はその物質のコン

図5. PCD-CTにおける空間分解能

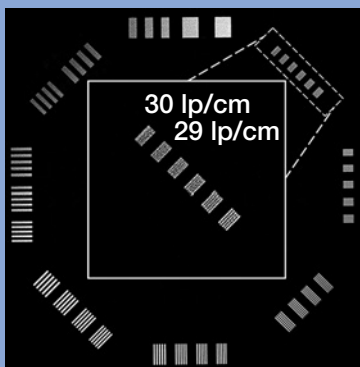
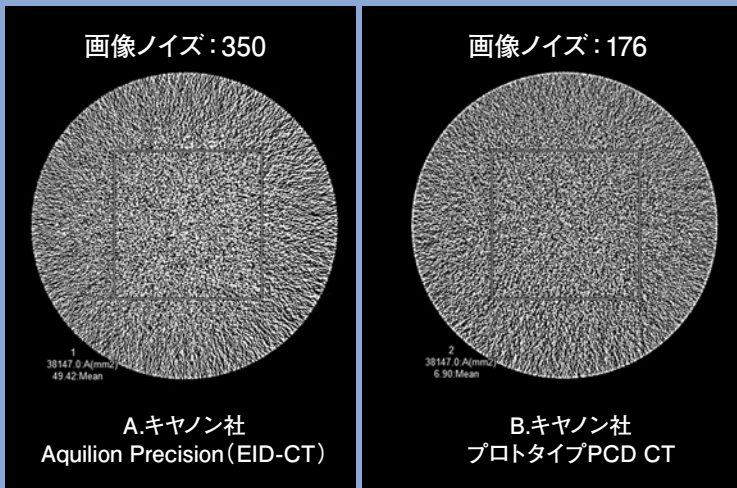


図6. EID-CT(従来型CT)とPCD-CTの画像ノイズの比較



データ提供:キヤノンメディカルシステムズ

トラストノイズ比で規定されます。コントラストノイズ比とは、その物質と周囲の物質のX線吸収度の差を画像ノイズ値で除したものです。たとえX線吸収度の差が同じ場合でも、画像ノイズ値が小さくなるとコントラストノイズ比は大きくなります。したがって、PCD-CTにより画像ノイズを低減することにより、画像のコントラストを改善することが可能となります。

またここでは詳細は割愛をしますが、画像を作成する時にX線フォトンエネルギーごとに荷重係数を変えることによりコントラストが改善できる可能性があります。

4) マルチエネルギーイメージング

前述したように、PCD-CTではX線検出器に入る個々のX線フォトンエネルギーを計測します。具体的には、エネルギーの測定は1段階から6段階程度に分けて行われます(エネルギーを分ける段階は機種により異なります)。ここでは詳細は割愛しますが、各エネルギー帯にどのくらいのフォトンが存在するかという情報を使うことにより、CT画像において基準となる物質のみを抽出した画像、すなわち基準物質画像を作成することができます。これらの基準物質画像としては、水成分のみを抽出した水画像、ヨードのみを抽出したヨード画像、カルシウムのみを抽出したカルシウム画像などがあります。またこれらの基準物質画像を基に、電子密度画像や実効原子番号画像等の今までなかった画像も作成することが出来ます。基準物質画像を使用すると、血流がない組織の特定や、逆に組織の血流量の正確な測定ができる可能性があります。

日常の臨床においては、CT用の造影剤(体内の臓器や病変のコントラストを増強する薬品)を静脈から投与することがしばしば行われています。現在はCT用造影剤とし

てはヨード製剤のみが使用されていますが、マルチエネルギーイメージングを用いれば金、ビスマス、イッテルビウム、プラチナ等の金属を使った新しい造影剤を開発できる可能性があります。また、このような金属を、酵素や細胞などに特異的に取り込まれるナノ粒子に標識として結合させることにより、新たな分子イメージングができるのではないかと期待されています。動物実験レベルでは、扁平上皮癌に結合する抗EGFR抗体を金のナノ粒子で標識した化合物や動脈硬化プラーク内のフィブリンに結合するイッテルビウムで標識されたナノコロイドなどが研究されています。これらはPCD-CTの新たな可能性を開拓するものですが、残念ながら、いろいろな事情からこれらが臨床において実用化されるのは10年程度先になるのでしょうか。

臨床例の提示

ここでは、キヤノンメディカル社製のプロトタイプPCD-CTで撮影された症例を2例提示します(画像はいずれも、国立がん研究センター東病院 放射線診断科長 小林 達伺 先生のご提供による)。

図7は肺がん疑いの胸部CTです。右肺上葉に限局性のすりガラス陰影が認められます。肩甲骨が含まれるレベルのCTでは肩甲骨より生じる線状の偽像(アーチファクト)がしばしば見られますが、この画像は撮影範囲内に肩甲骨が含まれているにもかかわらず偽像がほとんど認められず、非常に良好な画像が得られています。

図8は、胸部および上腹部が含まれる体幹部の造影CTですが、ノイズの少なくコントラストが良好な画像が得られています。

おわりに

今まで述べてきたようにPCD-CTの空間分解能、コントラスト等の基本的な画質は従来のEID-CTよりも優れており、今後、PCD-CTがCTのプラットフォームとして普及することが期待されます。一方で、PCD-CTによる新たな造影剤の開発や分子イメージング等は非常に興味深いものですが、臨床的有用性や安全性の検証が必要となるために実用化にはまだ時間がかかりそうです。

図7. PCD-CTで撮影された胸部CT



図8. PCD-CTで撮影された体幹部造影CT



国立がん研究センター東病院 放射線診断科 小林達伺 先生 ご提供

世界の街角から

アフターコロナ時代の国際学会

大阪大学大学院医学系研究科重粒子線治療学
寄附講座 八木 雅史 (やぎ まさし)

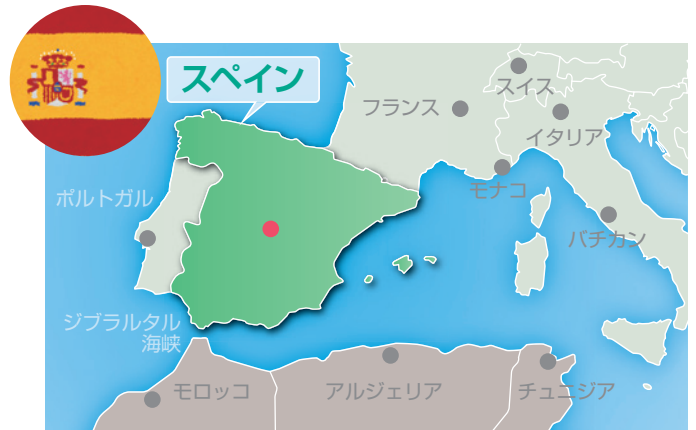
新型コロナウイルス感染症(COVID-19)が猛威を振るって数年が経ちました。今回国際学会に参加する機会があり、現在の国際学会の様子を見ることができました。これまで学会でのコミュニケーションは対面で行うのが一般的でしたが、コロナ禍ではビデオ会議ツールを利用して開催されていました。今、世界中で行動制限が緩和されつつあります。国際学会も「アフターコロナ」の様相を呈しています。私自身5年ぶりの現地での国際学会参加でした。

海外渡航につきものが入出国に関連する審査です。特に日本の入出国手続きが大きく変わりました。入出国審査、検疫審査、税関検査がデジタル化され手続きがスムーズになりました。日本人の出国・入国審査は入国審査官と接することなく、パスポートを機械にかざすだけで完了します(出入国スタンプの押印は希望制)。帰国便機内で配られる携帯品・別送品申告書(黄色のカード)に記入することはなくなりました。さらにVisit Japan Webというサイトで検疫審査と税関検査に必要な手続きを完了させれば、並ぶことも検疫・税関係官に接することもなく入国できます。



図1. スペインの国際学会での筆者のポスターセッションの様子。モデレータは筆者の研究分野で著名な人でした。多くの人が聴講し、質疑も活発に行われていました。

2022年10月にアメリカ、12月にスペインで開催された国際学会に参加してきました。学会場はコロナ前と変わらない様子で、会場のあちこちで顔を突き合わせて活発に議論がされていました(図1)。ポスター発表は録音した音声を埋め込んだスライドをディスプレイに表示させるe-poster形式(e-posterの前での口頭発表形式もあります)、口頭発表は現地とオンラインのハイブリッド形式で演者の都合に合わせて選択されているようでした。参加も現地とオンラインの



ハイブリッド形式ですが、ほぼ現地参加でした。発表後に質疑時間内にやりきれなかった議論をしたり、論文などに出てくる著名な研究者とランチをしながら直接話ができたりするのはオンライン参加では難しく、やはり現地参加の醍醐味だと再認識できました。学会の演題やイベントの予定は冊子ではなく全てウェブサイトやアプリで管理や参照ができるようになっていたので、スケジュールの把握や演題内容の確認がしやすいです。演題はオンデマンド配信され、聞き逃した演題や再度聞きたい演題を帰国してから聴講することもできます。またどの国際学会もSNSを活用しているのが印象的でした。学会開催前から学会期間中の注目セッションや演題の情報共有に始まり、学会期間中は次のセッションのアナウンスや参加者のインタビュー、学会参加者が発信する参加学会に関するSNSへの投稿の紹介など、自分がいる会場外で起きている情報が手に取るように分かりました。

訪れた街々では公共交通機関でのみマスクを着用するなど、最低限の感染症対策の基で行動制限のないコロナ前の生活が取り戻されている印象を受けました。訪れた街々の観光名所、名物料理や人々とのコミュニケーション、それらを取り巻く雰囲気を楽しめるのも現地参加のいい所の一つです。アメリカで訪れたアラモ伝道所では、スペインの植民地時代の布教、アラモの戦いといった歴史を肌で感じられました。スペインのサグラダ・ファミリアでは1882年から建築が始まりまだ完成を見ない、スケールの大きさと息をのむ造形美に圧倒されました。テキサス名物のステーキは肉厚でこれぞステーキという食べ応えがあり、スペインで食べた有名店のパエリアは魚介の味がしみ込んだ濃厚な味わいでした。開催地をはじめとした海外の歴史や文化を知ること、国際的な視野がより広がったように思います。

最後になりましたが、本稿への投稿機会を与えてくださった大阪大学大学院医学系研究科医療画像技術科学分野生体物理工学講座の西尾禎治先生に厚く御礼申し上げます。

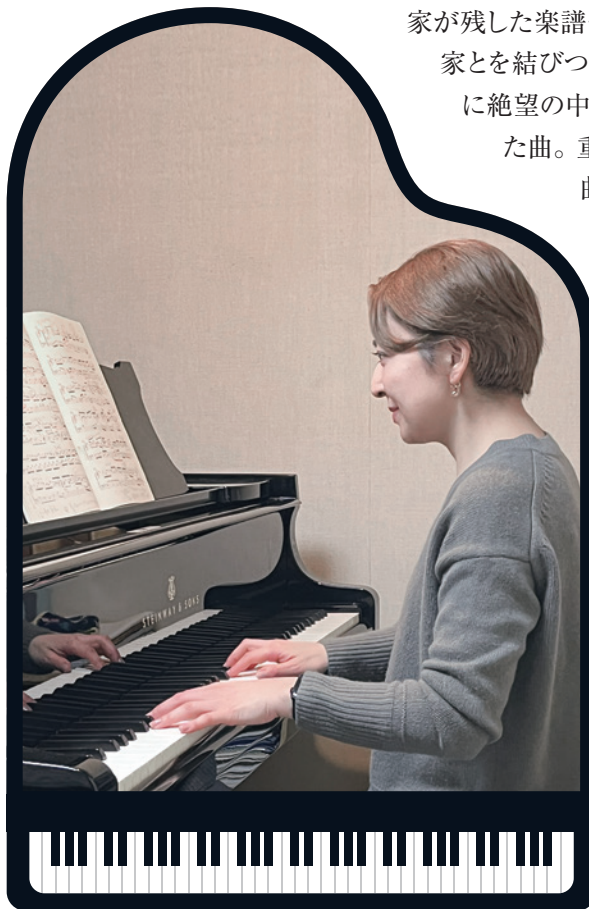
My Hobby

音楽と私

一般社団法人 日本画像医療システム工業会
飯田 泰子(いいだ やすこ)

4歳の頃、友人のお姉さんがピアノを練習する姿を見て、一瞬にして心を奪われました。そして「私もピアノを弾きたい!」と思ってから、音楽との付き合いは約40年になります。幼少期に初めてピアノに触れた時から幸運にも良い先生がたに恵まれて、大学と大学院もピアノを専攻しました。今ではなかなか練習が進まず鑑賞専門になりつつありますが、時間がある時には鍵盤に触れるようにしています。

ひとつの曲に感情を込めて演奏するには地道な練習がつき物です。この過程を楽しめれば良いのですが、なかなかどうして孤独な闘いです。しかし、イメージした通りに演奏できたときにはじんわりと満足感が込み上げてきますので、その瞬間を味わうために苦しい坂道を上るように練習しているのかもしれない。最近ではソロで弾く以外にも、大学時代の友人と連弾(1台のピアノを2人で演奏する)を楽しむこともあります。演奏曲は多くの作曲家が残している連弾のための曲から選びます。友人とは好みが似ているので曲選びも楽しみです。ソロ演奏は1人でピアノと向き合うので、じっくりと音楽に浸って演奏しますが、2人での演奏はひとつの音楽を作り上げる充実感を分かち合うことができます。音大で学んでいたときは、上手に弾きたいという思いが先走って心から楽しめないこともあったのですが、そのような時に大学時代の師が、「道端



に咲く花を綺麗だなんて眺めるように、音楽を楽しめるといいね」と声を掛けてくださいました。今、趣味として気負いなく演奏を楽しむようになり、その感覚が少しわかるようになりました。

また、音楽の楽しみ方の一つとして、曲に秘められた物語や作曲家自身に思いを馳せて演奏したり、鑑賞したりすることも上げられると思います。すでにこの世にはいない作曲家が残した楽譜やメロディーが、現代の私たちと作曲家とを結びつけてくれます。彼らが喜びの中、ときに絶望の中で紡いだ旋律、愛する人の為に書いた曲。重なり合う音が、長い年月を超えて作曲家たちの言葉となって語りかけてくるようです。実際に演奏する時は悪戦苦闘して、この語らいを楽しむ余裕がないこともありますが、それぞれの曲で心を動かされる瞬間や、いつも触れているメロディーから今までと違う表情を読み取れることがあり、これも音楽の醍醐味のひとつであると思います。

自分の好みも年代によって変化してきていて、10代や20代の頃はショパンやリストといった華やかで技巧的な曲、30代ではブラームスやベートーヴェンといった重厚な曲を好んでいました。最近では原点回帰というのでしょうか、J.S.バッハやモーツァルトを聴いたり弾いたりすることが多くなりました。たくさんの作曲家が無数の美しい作品を残してくれているので、未来の自分がどのような音楽を好んでいるのかも楽しみであったりします。

私が初めてピアノの手解きを受けた恩師は、70代半ばになっても毎日練習を欠かさず、演奏会に定期的に通われて研鑽を積んでいらっしゃいます。時折お目に掛かると鑑賞が専門になりつつある私に、演奏会や最近の演奏家、指揮者のお話しをしてくださいます。この音楽談義では、いつも新鮮な気持ちで音楽と向き合い、その素晴らしさを心から楽しむ恩師の姿に、私もこのように音楽との時間を重ねたいと実感します。

40年以上の付き合いを経て、私にとって音楽は日々の生活に温かさをもたらしてくれるものとなりました。これからも好みや付き合い方は様々に変化していくと思いますが、心を潤してくれる存在であり続けることでしよう。

ナスのMRI



水ナス 丸ナス 長ナス

編集後記

フォトンカウンティングディテクターCT (PCD-CT)は、従来型CTの欠点を全て補って次世代CTとして注目されています。粟井和夫先生には非常に分かりやすく解説していただきました。画質と被ばくはトレードオフの関係で、如何に被ばくを抑えて画質を向上させるかは、放射線診断領域の永遠のテーマであり、これを画期的に変貌したPCD-CTの登場と今後のさらなる開発は楽しみです。

コロナウイルス感染症は予断を許さず、医療現場では未だに多くの施設が規制を引かれています。そのような状況ですが、徐々に学会現地参加者がコロナ禍前に戻ってきました。Face-to-faceでの討論は聞いている参加者も大きな収穫があります。Face-to-faceは言葉だけでは通じないものも伝わってきます。今まで当たり前と思っていたことが不可能になり、また元に戻って来たときにその事実には難味を感じて大事にしていきたいです。

今回のMy Hobbyをご覧になって感銘を受けた方は多いと思います。音楽は自分自身を癒すばかりでなく自分史にもなります。私はサザンオールスターズの熱狂的なファンです。苦境に立たされた時にサザンサウンドを聞いて自分自身を奮い立たせた時代を思い出し、懐かしくもあり、また涙が溢れるほど感動してしまいます。

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 2023年8月25日 第21巻第2号 通巻41号