

令和 5 年 5 月 9 日現在

機関番号：32309

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K10326

研究課題名（和文）Bluetooth対応簡易形線量計の開発

研究課題名（英文）Development of a simple dosimeter for Bluetooth

研究代表者

齋藤 祐樹（Saito, Hiroki）

群馬パース大学・医療技術学部・准教授

研究者番号：00849341

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：これまで開発してきた簡易形線量計のコスト削減と操作性向上を目指してBluetoothを用いた簡易形線量計を開発した。これまでも無線伝送を用いた半導体測定器は開発されているが、我々はコスト削減のためメモリを使用せず、フォトダイオードの電離電流から電圧に変換し、AD変換後、その都度、Bluetooth送信する方式を試みた。この報告は、Bluetooth対応簡易形線量計（Bluetooth-compatible Simple Dosimeter: BCSD）の開発概要とそのBluetooth通信の信頼性評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Bluetoothを活用し簡易形線量計を開発した。製造業などで利用されている多くのBluetoothの方法は、1時間おき、または1日おきなど測定インターバルが長い。診断用放射線領域のように、短時間（数ms）のパルス応答に対して、Bluetoothが適応できるのなら、診断用X線装置におけるIoTが実現でき、診断用X線装置管理の自動化されビッグデータを活用したAIによる故障予測が実現される。

研究成果の概要（英文）：We used Bluetooth to develop a simple dosimeter for reducing its cost and improving its operability. While several semiconductor dosimeters using radio communication have been developed in the past, these devices first store all the X-ray signals in the memory inside the measurement device and then transmit them through Wi-Fi or Bluetooth, which increases the cost of the device. To reduce costs, our device does not use a memory. Instead, we attempted a method wherein the ionization current from the photodiode is converted into voltage, which is then converted into analog/digital (AD) and transmitted through Bluetooth. In this study, we have developed a Bluetooth-compatible simple dosimeter (BCSD) using previously reported simple dosimeter. Furthermore, the reliability of Bluetooth communication is evaluated.

研究分野：医療管理学および医療系系社会学関連

キーワード：診断用X線装置 半導体線量計 フォトダイオード Bluetooth ESP32 WROOM-32 Web Bluetooth API

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

(1) これまでの診断用 X 線装置の品質管理方法は診療が始まる始業点検と定期点検が行われている<sup>1,2)</sup>。それらのスポット測定では装置故障の予兆をとらえることが難しい。測定器の多くは検出部分と測定値を表示させる部分が 5~10 m 程度のケーブルでつながれているため<sup>3,4)</sup>、診療中の撮影線量を随時取得することができない現状がある。診断用 X 線装置の電気的事象(電圧・電流・照射時間)を自動化して取得できるようになればビッグデータを活用した AI により故障予兆をとらえられる可能性がある。このためには無線技術を利用した線量計の開発が必要であった。

(2) 診断用 X 線装置の管理は直接、X 線を発生させる部品(X 線管)に大きな測定器を接続して高精度に行われてきたが<sup>5)</sup>、近年は半導体検出器の普及により接続させることなく間接的に X 線量と X 線を発生させるための電気的事象(電圧・電流・照射時間)を測定できるようになった<sup>6)</sup>。しかし、これらの測定器は 200 万~600 万円と高額なため、中・小規模の病院では、装置管理を行う測定器を持ち合わせていない病院が未だ多くある。このような中、申請者のグループは 1 万円/台程度のフォトダイオードを使用した簡易形線量計を開発し<sup>7)</sup>、合わせて Web アプリケーションを用いたデータ収集システムを構築することで、地域で連携した組織的な品質管理を行っている<sup>8)</sup>。この申請者グループの研究は世界でも類を見ないグループの一つである。

## 2. 研究の目的

これまで開発してきた簡易形線量計のコスト削減と操作性向上を目指して Bluetooth を用いた簡易形線量計を開発した。これまでも無線伝送を用いた半導体測定器は開発されているが<sup>9,10)</sup>、それらの測定器は X 線の信号を測定器内の記憶装置(メモリ)に蓄えてから、Wi-Fi や Bluetooth により送信されている。我々はコスト削減のためメモリを使用せず、フォトダイオードの電離電流から電圧に変換し、AD 変換後、その都度、Bluetooth 送信する方式を試みた。

この報告は、Bluetooth 対応簡易形線量計(Bluetooth-compatible Simple Dosimeter: BCSD)の開発概要とその Bluetooth 通信の信頼性評価を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) BCSD の開発

#### 電圧-線量変換式の校正

X 線がフォトダイオードに入射すると線量に応じた電子が生成され、47 k $\Omega$  の抵抗を介して電圧に変換した。この電圧と線量との関係である電圧-線量変換の校正式を求めるために、X 線装置は KXO-50SS : TOSHIBA、X 線管総ろ過は 2.7 mm Al を使用した。電圧と負荷時間の測定に BCSD、空気カーマの測定に電離箱線量計の SFD chamber Type 34060 ; PTW (PTW) を使用した。測定条件は焦点線量計間距離を 100 cm として、交互照射にて管電圧を 40 - 120 kV、管電流を 100 - 400 mA、負荷時間を 10 - 500 ms に変化させたときの空気カーマ、積算電圧、平均電圧および負荷時間を 2 回測定した。これを空気カーマと積算電圧および空気カーマ率と平均電圧の散布図より近似式を求め換算式とした。空気カーマ率は空気カーマを負荷時間で除した。

#### Bluetooth の受信信号強度試験

電波は金属を通しにくい性質があるため、金属ケースとプラスチックケースを用いたときの Received Signal Strength Indicator (RSSI) を測定した。撮影室内の X 線管装置の直下に BLEED を配置し、撮影室の扉を閉めた状態でスマートフォン (PH-1: Essential Phone) の受信距離を 5 ~ 12 m に変化させたときの RSSI を測定した。X 線装置の負荷条件は 80 kV, 200mA, 50ms で、RSSI の測定は新たにもう一つ ESP32 WROOM-32; Espressif Systems を用意し、受信端末として Arduino 1.8.19 がインストールされている PC に接続し、シリアルモニタに RSSI を表示させた。これを 3 回繰り返して平均値を得た。統計解析は R version 4.1.2 を使用した。

#### BCSD の電圧と管電圧波形の比較

開発した BCSD はフォトダイオードの電離電圧を Bluetooth 送信し HTML に波形として表示できる。この電圧波形が管電圧波形と同等であれば装置の状態を把握できる。X 線装置の管電圧波形は AB-2105E; TOREX を使用し、その出力をオシロスコープ: DS5105B; IWATSU で測定した。照射条件は 80 kV, 200 mA, 50 ms に設定した。

### (2) BLEED の 2.4 GHz 電波干渉試験

Bluetooth は 2.4 GHz 帯の電波を使用して通信が行われる。診療で使用される無線機器に Flat Panel Detector (FPD) の Wi-Fi がある<sup>12,13)</sup>。FPD は 2.4 GHz と 5 GHz 帯域が使われているため、Bluetooth の電波と 2.4 GHz 帯の電波が干渉する恐れがある。そこで、開発した BCSD の電波干渉性を試験するために、(1) で使用した PC と ESP32 WROOM-32 を Bluetooth で通信 ("Hello World"; 88 bit を 100  $\mu$ s 間隔で送信)させたとき、BCSD からの送信された平均電圧、負荷時間および送信パケット数 (length) を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) BCSD の開発

#### 電圧-線量変換式の校正

Fig. 1 に電圧の積算値と空気カーマ (a) および平均電圧と空気カーマ率 (b) の散布図を示す。空気カーマ (空気カーマ率) の測定レンジは最小で 12  $\mu\text{Gy}$  (1450  $\mu\text{Gy/s}$ ), 最大で 11 mGy (45 mGy/s) であった。(a) は積算電圧 100 V 以上から積算値と線量とのバラつきがあるものの 2 次関数で近似され, 決定係数は 0.94 であった。(b) は 0.8 V および 1 V 付近にバラつきがあるものの 1 次関数で近似され, 決定係数は 0.99 であった。

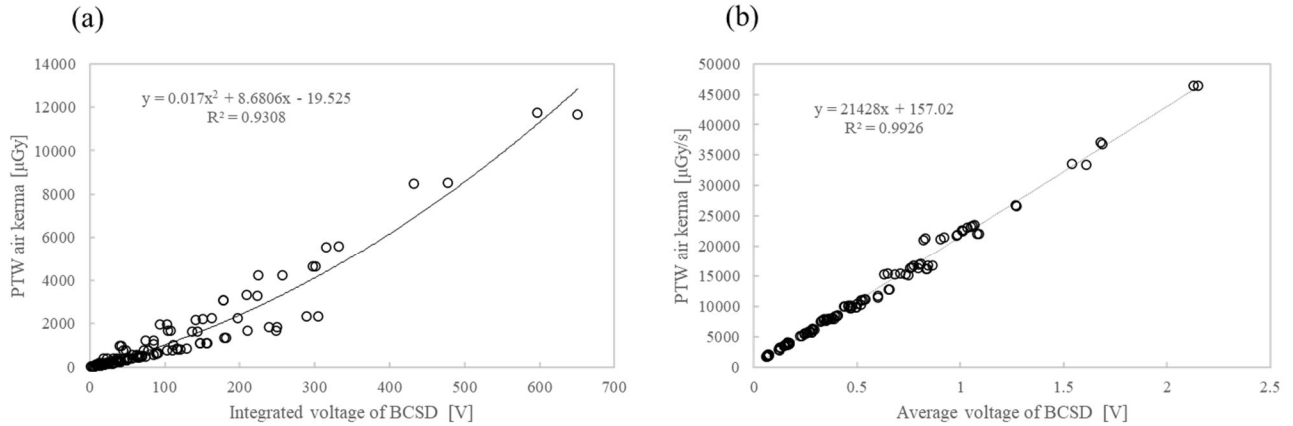


Figure 1 Calibration of voltage-to-dose conversion equations

Fig. 1(a)の結果のバラつきは,同じ設定照射時間でも Bluetooth 送信のパケット数が異っていたためである。従来の方式<sup>7)</sup>と同様に積算電圧で BCSD を校正したならば,電波の状況に応じてパケット数が異なるため,積算値に変動を生じて線量計の誤差が大きくなることが明らかになって。これより無線電波が環境に依存しない Fig. 1 (b)を採用することで測定器の誤差を小さくすることが可能となった。管電圧-管電流特性の電離箱 (PTW) との比較相対誤差は従来のもの<sup>7)</sup>と同等で,誤差の四分位範囲は-2.4 ~ +3.4%であった。しかし,低線量の 150  $\mu\text{Gy}$  以下では誤差が大きくなっていった。また,管電圧が 70, 80 kV, 管電流が 320, 400 mA のときは +5%以上の誤差があった。このことから BCSD は 50 kV 以上で使用することを推奨する。

#### Bluetooth の受信信号強度試験

X 線診療室の構造は医療法により漏れ X 線の影響を少なくするため鉛で遮蔽されている<sup>14)</sup>。この自由空気空間が Bluetooth の無線にどのように影響するかを確認した。Fig. 2 に受信距離を変えたときの BLED からの RSSI を示す。平均 RSSI は金属ケースで -91.41 dB, プラスチックケースで -79.96 dB でありプラスチックケースの方が大きかった ( $p = 6.4E-4 < 0.05$ )。金属ケースの RSSI は 8 m 以降測定できなかつたが,プラスチックケースは受信距離が長くなっても大きな変動はなかつた ( $R^2 = 0.11$ )。プラスチックケースを使用した方が受信距離を大きくしても信号強度に大きな変化が見られなかつた。よってプラスチックケースを使用することで受信距離による Bluetooth の無線電波の減少を少なくすることを明らかにした。

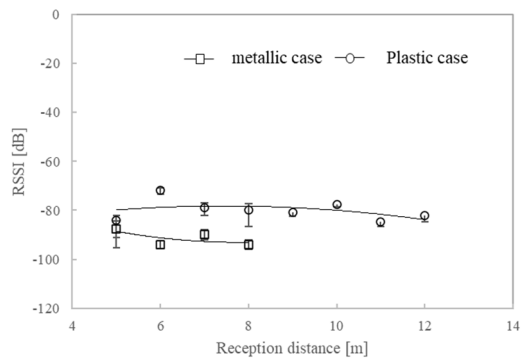


Figure 2 BCSD Received Signal Strength Test

#### BCSD の電圧と管電圧波形の比較

Fig. 3 に管電圧波形 (AB2015E) と BCSD の電離電圧波形をそれぞれの最大値で規格化した波形を示す。両波形ともに立ち上がりは同様の傾きを示していた。定常状態のとき管電圧波形は脈動を観測できるが,BCSD は見られなかつた。オシロスコープのサンプリング間隔が 200  $\mu\text{s}$  であるのに対し,BCSD は約 400  $\mu\text{s}$  である。その影響により脈動を観測できなかつた。また,立下りのとき BCSD は波尾を観測できなかつた。BCSD の AD 変換しきい電圧が関係している。しか

し、BCSD の波形は管電圧波形と同等であることから、およその装置の状態を把握することが可能である。この電離電圧波形の取得が今回開発した我々のコンセプトであるが、パケット数が大きくなり電池の消耗が激しくなる難点もある。これを克服するためにはX線装置から電源を得る方法が考えられるが、使用者(医療従事者)が製造業者に申すことは難しいだろう。しかし、この波形の取得をしないのであればこの問題は解消されるが、この波形からは多くの有益な情報が得られることを追記しておく。

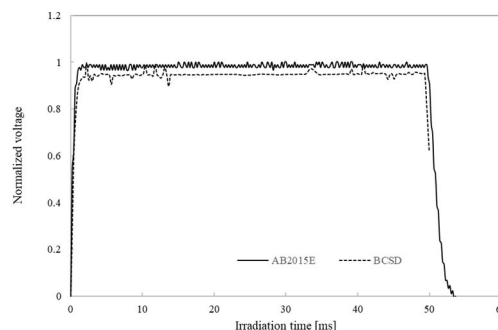


Figure 3 Normalized tube voltage waveform and BCSD ionization voltage waveform

## (2) BLED の 2.4 GHz 電波干渉試験

Table 1 に BLED の電波干渉試験結果を示す。平均電圧、負荷時間およびパケット数の平均値は電波干渉の有無による有意差は見られなかった ( $p > 0.05$ )。BLED では 50 ms の負荷時間に対して 120 前後のパケットで送信が行われていた。これは約 400  $\mu$ s 間隔で送信されたことになり、かなり高い確率で同じ 2.4 GHz の電波が同一空間に存在していたことになる。この状況下でも、平均電圧、負荷時間、length に有意差はなかった。もし、パケットの欠損があるのなら、測定値は過小に表示されることになる。しかし、今回の試験ではそのようなことは見られなかった。これらから検出部にメモリを組み込まなくても Bluetooth 通信の信頼性<sup>15)</sup>を確認できた。ここで、上記で取り上げた波形の問題の追記になるが、BCSD により短時間パルスに対して連続的に Bluetooth 通信が行えることが明らかになったが、これらの総パケットをどのようにして管理していくか、新たな問題も浮上する。品質管理として全データを利用するのであれば大規模な記憶保持装置が必要になる。今回はパルス波形を表示してそのデータを保存までは行っていない。波形画像を静止画として保存する方法もあるがデータ容量が大きくなることが想定される。今回の BCSD の開発によってデータを有効利用するための品質管理方法の構築が新たな課題となる。

Table 1 BCSD radio interference test under 2.4 GHz radio waves

2.4 GHz radio waves	voltage [V]		loading time [ms]		packet number	
	Average	SD	Average	SD	Average	SD
OFF	0.527	0.0100	49.57	1.088	122.6	23.15
ON	0.525	0.0082	50.35	0.568	118.9	18.54
<i>p</i> value	0.225		0.082		0.307	

## <参考文献>

- 1) IEC 61223-3-1: Evaluation and routine testing in medical imaging departments-Part 3-1: Acceptance tests-Imaging performance of X-ray equipment.
- 2) Rossi, Raymond P., et al.: Performance specifications and acceptance testing for X-ray generators and automatic exposure control devices. Report of the Diagnostic X-ray Imaging Committee Task Group on Performance Specifications and Acceptance Testing for X-ray Generators and Automatic Exposure Control Devices. AAPM Report 14 (1985).
- 3) Wagner, Louis K., et al. "Energy and rate dependence of diagnostic x-ray exposure meters." *Medical physics* 15.5 (1988): 749-753.
- 4) Hill, Robin, et al. "An evaluation of ionization chambers for the relative dosimetry of kilovoltage x-ray beams." *Medical physics* 36.9Part1 (2009): 3971-3981.
- 5) Shigeru Miyazaki : Significance and Measurement of output of X-ray equipment-Part 1. Japanese society of radiological technology, Vol.66 No.3 : 251-259, 2010.
- 6) Hiroki Saitoh, Sinji Abe, Toru Negishi, et al.: Accuracy evaluation of a non-invasive measuring instrument for diagnostic X-ray equipment. *The Journal of Japan Academy of Health Sciences*, 2014, 17.1: 43-50.
- 7) Izumi Ogura, Shinji Abe, Toru Negishi, et al.: Development of a Simple Measurement System for Routine Management of X-ray Equipment. *Japanese Journal of Radiological Technology*, 2014, 70.12: 1403-1412.
- 8) Hiroki Saito, Shinji Abe, Izumi Ogura, et al.: Development of quality control program using a Web application of diagnostic X-ray equipment. *The Journal of Japan Academy of Health Sciences*, 2016, 18.4: 223-230.
- 9) RaySafe: About RaySafe X2 View. Retrieved September 4, 2022, from

- [https://www.raysafe.com/sites/default/files/2021-04/raysafe\\_x2\\_view\\_user\\_manual\\_ja\\_2760.pdf](https://www.raysafe.com/sites/default/files/2021-04/raysafe_x2_view_user_manual_ja_2760.pdf).
- 10) Radcal: WiFi Nugget. Retrieved September 4, 2022, from <https://radcal.com/accu-gold-nugget-wifi-wireless/>.
  - 11) Meditron: Cobia Kits. Retrieved September 4, 2022, from <https://www.meditron.ch/quality-assurance/index.php/dosimetry/product/242-cobia-sense-for-use-with-external-detectors>.
  - 12) FUJI FILM: FUJIFILM DR CALNEO Smart Mobile Solution. Retrieved September 4, 2022, from <https://www.fujifilm.com/jp/ja/healthcare/x-ray/digital-xray-imaging-dr/calneo-s-mobilesystem>.
  - 13) KONICA MINOLTA; AeroDR PREMIUM. Retrieved September 4, 2022, from [https://www.konicaminolta.jp/healthcare/products/dr/aerodr\\_premium/index.html](https://www.konicaminolta.jp/healthcare/products/dr/aerodr_premium/index.html).
  - 14) Enforcement Regulations on the Medical Care Act: Chapter IV Protection of Medical Radiation. Retrieved September 4, 2022, from <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=323M40000100050>.
  - 15) Bluetooth: How Bluetooth® technology provides high reliability in wireless communications. Retrieved September 4, 2022, from <https://www.bluetooth.com/ja-jp/learn-about-bluetooth/key-attributes/reliability/>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 齋藤祐樹、小倉泉、根岸徹、二階堂満、黒澤怜史	4. 巻 2
2. 論文標題 Development of Bluetooth-compatible Simple Dosimeter and the Evaluation of Bluetooth Reliability	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本保健科学学会雑誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤祐樹
2. 発表標題 Bluetooth対応簡易形線量計の開発
3. 学会等名 診療放射線技術学会 第49回秋季学術大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	根岸 徹  (Negishi Toru)  (00259144)	東京都立大学・人間健康科学研究科・准教授   (22604)	
研究分担者	小倉 泉  (Ogura Izumi)  (50204160)	東京都立大学・人間健康科学研究科・客員教授   (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------