

# 遠隔利用可能なレートメータの開発

中山 和也, 喜多 譲司\*, 鷺山 幸信

## 要 旨

遠隔で利用できるレートメータを開発した。レートの計測には従来から用いられている積分回路というアナログ回路は使用せず、デジタル信号から直接レートを算出する方法を使用している。開発した装置は、放射線のレートを計測する部分と遠隔利用を可能とするサーバ部分とで構成される。レートの計測部分は、計測だけではなく、レートに依存したアナログ電圧を出力する機能に加えて、UART や I<sup>2</sup>C を用いて他のデバイスとシリアル通信する機能をもつ。サーバ部分は、PC を用いてレートを計測する部分からデータを取得し、microSD カードにデータを記録する機能や、ネットワーク経由で離れた場所からデータを確認・取得できる機能を装備している。ネットワーク経由では、SSH、SFTP、HTTP といったプロトコルが使用できる。低価格な量産部品を使用することで、市販のレートメータより多機能でありながら、低価格な装置が開発できた。

## KEY WORDS

Dose rate meter, Digital meter, IoT, Internet

### はじめに

アイソトープから放出される放射線の検出では、放射線の種類によって使用する機器が異なる。核医学診療で用いられる放射性医薬品に対しては、 $\gamma$  線の測定に優れる NaI シンチレーション検出器が放射能強度の測定や汚染検査などで多く用いられている。近年、陽電子放射断層撮影 (PET) など核医学検査の普及もあり、放射性医薬品の研究開発現場では、製造した放射性医薬品の分離や精製の過程において高速液体クロマトグラフ (HPLC) を活用する機会が増えてきている。HPLC は一般的な医薬品の合成後の分取や精製に欠くことの出来ない機器であるが、放射性物質の検出は主な使用目的ではなかったため、HPLC の製造メーカは放射線検出器を装置に組み込んで販売をしていない。そこで HPLC 用に独自に開発された  $\gamma$  線などの放射線の検出器を専用の企業から別途購入して組み込むことになるが、製造企業が少ないこともあり、HPLC 用の放射線検出器は決して安価ではなく、結果、経済的にも大きな負担を生ずる。そこで我々は、全国の大学や研究機関等のアイソトープを取り扱う施設には、管理や教育のために汎用型の NaI シンチレーション検出器が備わっていることに着目した。一般的に設置

されている検出器は単位時間に放出される放射線の計数を測定するための検出器部分と電気回路部分を持ち合わせている。本研究ではこの電気信号をさらに独自に作製した回路で常時計数率 (レート) として出力させることを想定し、既存の汎用型 NaI 検出器から出力される信号を HPLC で利用できるようにレートを算出する装置を開発した。開発した装置にはレートに依存したアナログ電圧を出力する機能や、他の機器とも連携がとれるよう外部接続端子を装備した。さらにネットワーク経由で他の機器との連携を可能とし、動作中の様子も離れた場所から確認できるようにした。本論文では、開発した装置の動作原理、動作確認テストの結果、特性などについて述べる。

### 開発した装置の概要

#### 1. 今回開発した装置の仕様

今回開発した装置の仕様を以下に示す。A. 既存の検出器から、放射線を検出するたびに出力されるロジックパルスをカウントする。B. 得られたデータは1秒毎のカウント値 (cps) または、1分毎のカウント値 (cpm) といったレートに変換する。C. データサンプリング時間を (例

金沢大学医薬保健研究域保健学系

\* 金沢大学医薬保健学域保健学類

例えば 0.1 秒や 1 秒毎など) 変更可能とする。D. 得られたデータは microSD カードなどに保存する。また遠隔地から利用できるようにネットワーク対応とする。ネットワークで使用するプロトコルは Secure Shell (SSH)、SSH File Transfer Protocol (SFTP)、Hypertext Transfer Protocol (HTTP) の 3 つとする。E. パルスが重なる場合 (サムピーク) の数え落としに関する対応はしない。

放射線検出器の中には、放射線を検出する度に、電圧パルスを出力するものがある。レートメータでは、積分回路を用いて一定時間この電圧パルスを積分し、この積分値よりレート (一定時間あたりの計数値) を算出している<sup>12)</sup>。このため測定精度は、この積分回路の精度に強く依存している。本研究では積分は行わず、カウンタ、タイマ機能を有するマイクロコントローラで本機能を実現する。アナログ信号ではなく、デジタル信号を取り扱うことで、高精度なアナログ回路が不要となり、ノイズに強く安価な回路が実現可能となる。この点が本研究の特長の 1 つである。次の特長は、サーバ機能を備えたワンボードマイコンとの併用である。ネットワーク対応であるサーバ機能を備えた装置を使用することで、ネットワークを経由して測定結果を確認することが可能になる。

次に本研究で使用した放射線検出器などについて説明

する。放射線検出器は、金沢大学学際科学実験センターアイソトープ総合研究施設で学生や研究者の実習に用いられる汎用型のアロカ製の井戸型 NaI (TI) シンチレーション計数器 (プローブ: NDW-351F + ハンディスケラ: TDC-103 + タイマ: T-101B) を使用した。プローブ内の光電子増倍管に対する印加電圧には 1200V を選定し、使用した RI の主要  $\gamma$  線が十分に検出できるようにした。本計数器からは、放射線を検出する度に TTL レベル (5 V) の負論理ロジックパルスが PHS OUT 端子 (PHS: Pulse-Height Selector) から出力される。本研究では、この負論理ロジックパルス信号からレートを算出した。今回使用した PSoC の電源電圧は 5 V であり、デジタル入力端子も 5 V であったため、PHS OUT 端子からの信号を直接 PSoC に入力している。

## 2. 開発した装置

開発した装置のブロック図を図 1 に、装置の写真を図 2 に示す。装置は、レートを計測する部分とサーバ部分とで構成される。レートの計測部分には Cypress 社製の PSoC (Programmable Embedded System-on-Chip)、CY8C29466 を使用し、デジタル計測を実現している。PSoC は一般的なマイクロコントローラと異なり、任意に指定できるアナログブロックとデジタルブロックを内蔵している<sup>3)</sup>。通常、一般的なマイクロコントローラは、8 ビットの DAC (Digital to Analog Converter) が

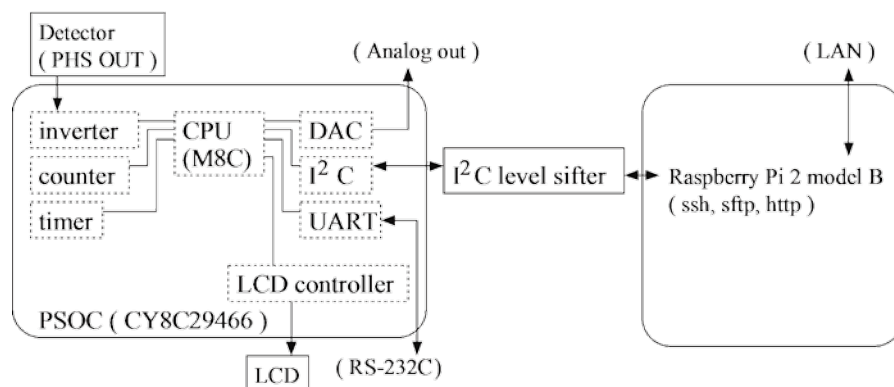


図 1 開発したレートメータのブロック図



図 2 開発したレートメータ

1つ内蔵されているとすれば、その個数やビット数を後から変更することはできない。これに対して PSoC では（仕様の範囲内で）任意に変更が可能である。したがって用途によって内部構造を変更することができ、周辺部品の削減が可能となる。本装置ではこの機能を使用し、図 1 に示すような構成（カウンタ、タイマブロック）を構築した。またレートに依存したアナログ電圧を出力するために 8 ビットの DAC を準備した。レート値（計測値）の表示用に LCD（液晶ディスプレイ）コントローラを準備し、16 文字×2 列の LCD を駆動してレートなどを表示するようにした。PSoC と外部デバイスとの通信には I<sup>2</sup>C（Inter-Integrated Circuit）と UART（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter）を準備した。PSoC とサーバ部分は電圧（ロジックレベル）が異なるため、I<sup>2</sup>C 用のレベルシフタを介することによって通信を可能とした。また UART を装備することで、ADM232AN などのインターフェース IC（Integrated Circuit）を経由してパーソナルコンピュータとの通信が可能である。

サーバ部分には、ラズベリーパイ財団<sup>4)</sup>が開発した、Raspberry Pi 2 Model B（以下、ラズパイと省略）を使用した。ラズパイはシングルボードコンピュータであるが、USB 端子や、RJ45(LAN)端子、HDMI(High-Definition Multimedia Interface) 端子を備えている。よって、これらの端子にキーボード、マウス、モニタ、LAN を接続するとコンピュータ（やサーバ）として使用できる。Linux ディストリビューション（OS）には Raspbian 8.0（kernel は 4.4.34-v7）を使用した。SSH、SFTP、HTTP サーバとして必要なソフトウェアは Raspbian 8.0 に標準で含まれるものを使用した。

### 3. 動作原理

計数器から出力される負論理パルス数を PSoC のカウンタで数える。タイマにより指定された時間間隔ごと（例えば、1 秒ごと）に割り込みが発生し割り込み処理が行われる。この割り込み処理では、カウンタで数えられた数を読み出し、この値をレートに変換する。求められたレートの値を LCD に表示させ、I<sup>2</sup>C や UART を介して PSoC 外にデータを送る。また、レートに依存したアナログ電圧を出力する機能も用意した。このアナログ電圧により、他の装置（後述するようなグラフ作成装置など）を動作させることが可能である。レートに応じて本研究では 0 から 1.3 V まで電圧が変化するようにした。サーバ部分には I<sup>2</sup>C を介して、PSoC からデータ（レート）が送られ、このデータを microSD カードに保存する。保存されたデータは、SSH、SFTP などを用いて（ネットワーク経由で）別のコンピュータからアクセスし、内容を確認し使用することができる。また ccchart<sup>5)</sup> などといったライブラリを使用し、データをグラフ化して HTML ファイルに取り込み、Web 上で確認することも可能である。

### 結果

装置の動作試験では、テクトロニクス製の任意パルス発生装置 AGF3052C を用いてアイソトープ由来の放射線と同等の擬似パルスを発生させて利用した。図 3（a）には実際のアイソトープを用いた場合に計数器の PHS OUT 端子から出力される負論理 TTL ロジックパルスを示す。パルス発生装置は、アイソトープがなくても計数器から出力される信号を模擬的に再現（図 3（b））することができる。実際のパルスと模擬パルスのグランドラインがずれているが、動作試験には支障が無い。また今回開発したレートメータでは、PHS OUT 端子から出力

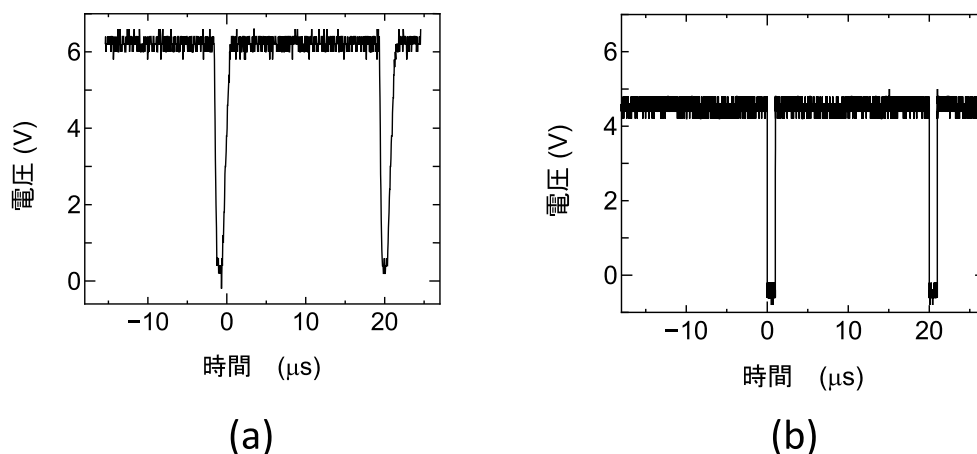


図 3 (a) 検出器から出力される負論理電圧パルス。図 3 (b) 任意パルス発生器で作成した模擬パルス

された信号は PSoC 内部でインバータに入力されてからカウンタに送られる。インバータは簡単なバッファと波形整形（波形のなまり対策）としての効果が期待できる。図 3 (a) のような波形では不要だが、念のため挿入した。

図 4 に、レート計測の動作試験結果を示す。パルスの重なり（サムピーク）が発生しないようにパルスを生成している。横軸はパルス発生器で生成したパルスの周波数を、縦軸はレート（単位は cps : count per second）を示す。本研究では  $10^4$  cps 程度までの測定を想定おり、これに合うようにプログラムした。理論的には 1 Hz のパルスを印加した場合 1 cps となる。なお事前に、プローブ、ハンディスケラ、PSoC 内部のインバータ、カウンタが  $10^4$  cps 程度の測定に問題ないことを実測やデータシートなどで確認している。（パルス周波数に対するレートの）誤差の主要因は、PSoC の内部クロックの誤差である。PSoC のデータシートによれば内部クロックの誤差は  $\pm 5\%$  である。10000 Hz (10000 cps に相当) のパルスを印加したときの誤差は  $2\%$  であった。ただし印加するパルスの周波数が低い場合、時々大きな誤差を示した。例えば、10 Hz のパルスを印加した場合、 $10\%$  の誤差が時々観測された。

HPLC を使用する目的には放射性医薬品の精製があげられる。この場合、純粋に放射性医薬品の画分をえるためにも、レートに依存したアナログ電圧を元にしたグラフを用いて視覚的に確認する必要がある。そのため、8 ビットの DAC を用いて図 5 に示すように 0 から 1.3 V の電圧を出力する機能を準備した。本研究では、3 パターンの電圧出力パターンを準備した。レートに比例する電圧を出力するモード（図 5 (a)、(b)）と、レートの対数に比例して出力するモード（図 5(c)）を準備した。レートに比例するモードは、0 から 20 cps まで（図 5 (a)）と、0 から 200 cps まで（図 5 (b)）の 2 パターン用意した。図 5 (a) の場合は 20 cps で最大電圧が出力されるが、使用する放射能とバックグラウンドの大きさに応じて最大電圧が出力されるレート (cps) はその都度プログラムで変更可能である。

図 6 は測定したデータをネットワーク経由で確認した様子を示す。サーバ部分にログインして、PSoC からのデータを取得するプログラムを起動させると、PSoC からのデータを取得し始める。取得した全データは CSV 形式として microSD カードに保存される。また直前の 10 個のデータは、図 6 (a) に示すように、HTML 形式に変換されブラウザで確認できるようにした。なお図 6 (a) のグラフの作成には、ccchart<sup>5)</sup> という javascript ライブラリを利用している。図 6 (b) は OS が Windows10 であるコンピュータ上で、Tera Term

Ver.4.90 を使用し SSH でログインした様子である。ログイン後、PSoC からのデータを取得するプログラムを起動させると図 6 (b) に示すように、取得したデータを表示するようにプログラムした。Tera Term は通信中のログを保存する機能もあるため、図 6 (b) で示される情報をコンピュータに保存することも可能である。

次に実際のアイソトープを用いて測定した結果を図 7 に示す。この図は、メラノーマ細胞に過剰発現しているメラノコルチン I 型受容体に高い親和性を持つ  $\alpha$ -メラノサイト刺激ホルモンの一つであるペプチド Re (Arg<sup>11</sup>) CCMSH にアイソトープを標識するためのキレート部位を導入した DOTA-Re (Arg<sup>11</sup>) CCMSH に、アルファ放射体の <sup>225</sup>Ac を標識し、HPLC を用いて未反応の <sup>225</sup>Ac と分離精製したときに得られるクロマトグラムである。表記では放射線を 0.2 秒間隔で計測してある。計測値からレートを算出し、レートの対数に比例したアナログ電圧を出力させている。その電圧を別の装置で読み込みレートに換算して表示した結果が図 7 である。図では、測定開始から 3 分と 17 分の付近に放射線由来のピークがある。診断用アイソトープ <sup>68</sup>Ga で標識した DOTA-Re (Arg<sup>11</sup>) CCMSH を HPLC で分離した報告<sup>8)</sup>においても、測定初期と 17 分前後に同様のクロマトグラムがえられており、前半のピークが未反応の <sup>68</sup>Ga を、後方のピークが標識化合物を表すことが知られている。したがって、今回のクロマトグラムからは未反応のアイソトープやアイソトープの標識化合物を含む液体が検出器を通過したことがわかる。

## 考察

現在市販されているレートメータは、レートの算出に、積分回路を使用する場合が多く、本研究のように信号をデジタル処理する製品は高額で一部に限られている<sup>6,7)</sup>。また得られたデータをネットワーク経由で確認、取得できる装置はないと思われる。この点が、本研究で開発したレートメータの大きな特徴の一つである。この特徴は、高い線量を示す材料を扱う時（HPLC を用いた放射性医薬品の分離や精製など）など、被ばくが心配されるような状況では大きな利点となる。また複数の個所（機械）で同時に測定を行う場合でも、データが一元的に管理できる。また、レートメータ部分とサーバ部分の両方とも、外部装置とのやり取りをおこなう IO (Input/Output) 端子に空きがあるため、別の装置を連動させることも可能である。昨今、さまざまな機器をインターネットに接続し (IoT : Internet of Things)、遠くにいながらにして情報を収集し、これらの機器を制御することが可能になってきている。本装置はサーバ部分が LAN に接続可

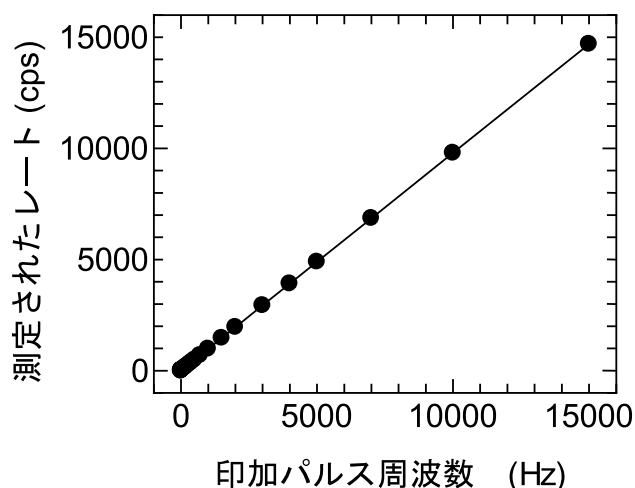


図4 印加パルスの周波数とレートの関係

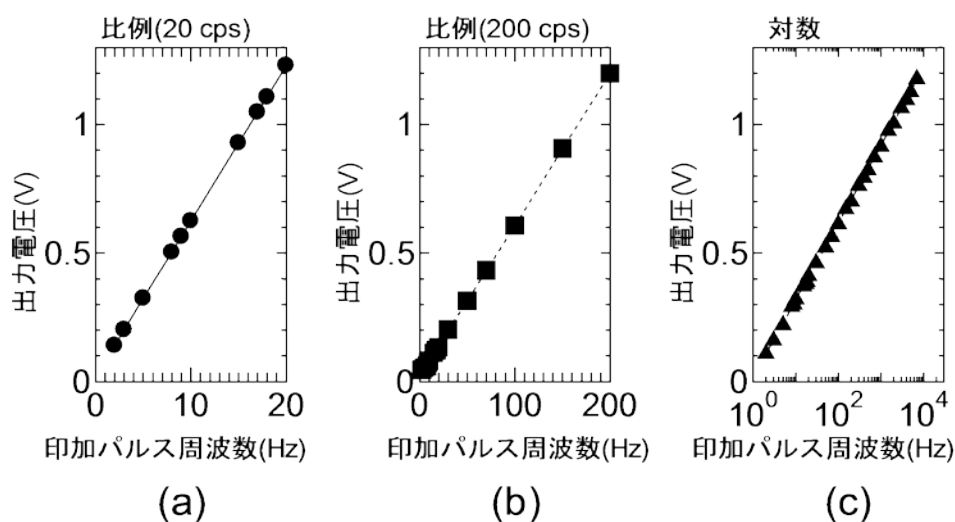
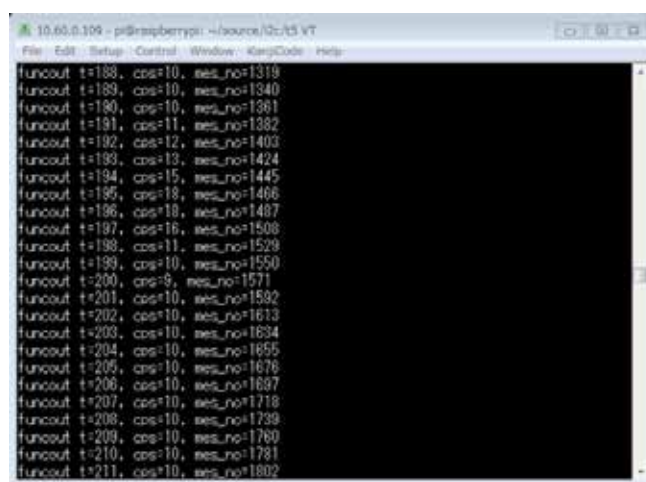


図5 印加パルスの周波数と出力電圧の関係。(a) レートに比例した電圧が出力される (0から20cpsのレートで、0から1.3Vの電圧が出力されるモード)。(b) レートに比例した電圧が出力される (0から200cpsのレートで、0から1.3Vの電圧が出力されるモード)。(c) レートの対数に比例した電圧が出力されるモード。



(a)



(b)

図6 (a)データをHTML形式のグラフとして表示させた結果。図6(b) SSHでサーバにログインし、プログラムを起動した結果(計測されたレートが文字として表示される)

能であるため、IoT にも対応している。この点も大きな特徴の一つである。得られたデータの取得(確認)方法は、SFTP によるファイル取得や図 6 (a) に示すようなブラウザでの確認方法などを用意し、ユーザの使用方法に幅を持たせた。保存できるファイルサイズ(データ数)は microSD カードの容量に依存するが、数値と文字だけの情報を CSV 形式で保存するためファイルサイズはさほど大きくない。図 6 (a) では、直前の 10 個のデータをグラフ化しているが、このデータ数は変更可能である。

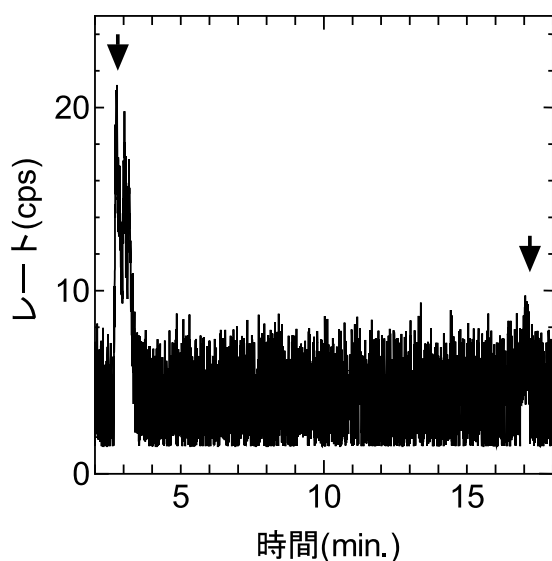


図 7 実際の放射性同位元素を測定した結果

どの程度のデータ数で作成すべきか、サーバの負荷はどの程度かなどについては今後の課題である。

現在、レートメータは海外メーカしか製造しておらず、その価格は少なくとも 30 万円以上と決して安価ではない。本研究で開発した装置は、レートメータ部分(図 1.2 の左の部分)のみで 5000 円程度、サーバ部分を合わせても 1 万円程度で、レートの計測、レートに依存したアナログ電圧の出力、シリアル(UART)通信を使用してコンピュータなど他の機器へのデータ送信、レートの時間変化の microSD カードへの保存、ネットワークを経由してのデータの確認と取得が行える。安価に作製できた理由は、信号をデジタル処理し高精度なアナログ回路が不要になった点、任意にプログラム可能なアナログブロックやデジタルブロックを持つマイクロコントローラ PSoC を使用した点、サーバ部分に安価なラズパイを用いた点などである。

本装置では、前述したように、レート測定の実験結果で誤差が確認された。これは時間を計測するクロック部の誤差であり、従来の積分回路を用いた装置でも発生する可能性がある。本装置では、PSoC 内部のクロックの誤差が原因である。今回用いた部品では、理論値に対して 2% 程度低いレートを示していたため、タイマの誤差は -2% 程度と推測できる。データシートによれば、PSoC 内部クロックの誤差は  $\pm 5\%$  以内である。この 5% の誤差が問題になる場合は、PSoC 外部に水晶発振素子など高精度な素子を接続することで容易に改善できる。他の誤差要因としては、検出器に放射線が同時に入射した場合の数え落とし(パルスが重なり正しくカウント

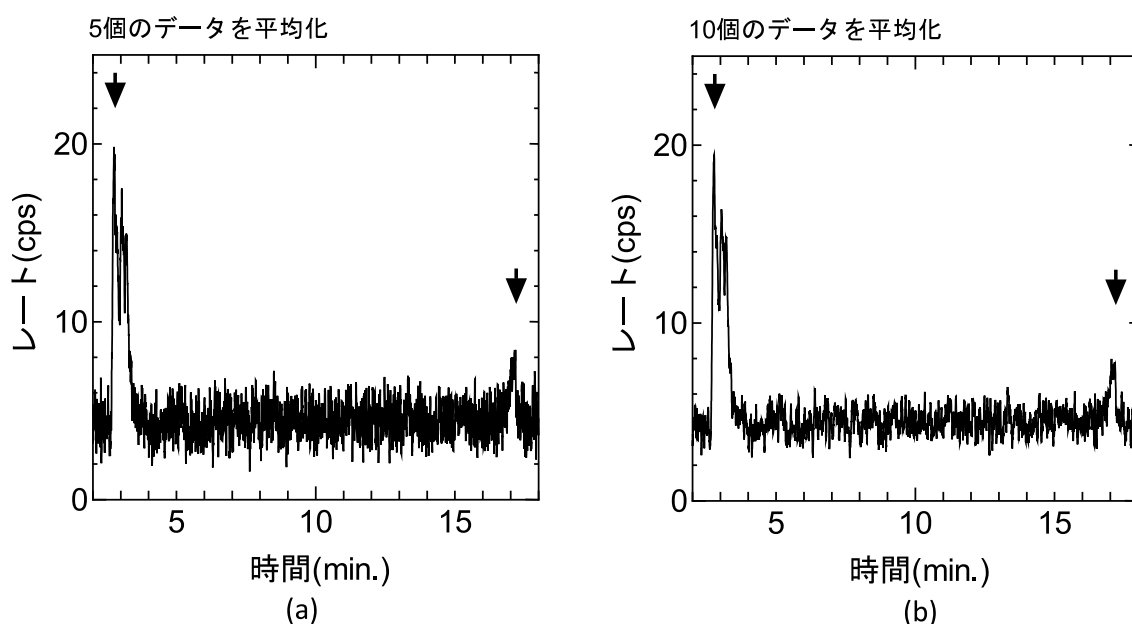


図 8 放射性同位元素の測定結果(図7)を平均化処理した結果。(a) 5個のデータを平均化した結果。(b) 10個のデータを平均化した結果。

できなくなる)ことが懸念される。この数え落としには本研究で開発したレートメータは対応していない。特に、高 cps の場合に発生しやすいと思われるが、本研究では、放射線医薬品の分離や精製時の使用を想定しており、本目的では問題がない。

本研究では、レートに依存したアナログ電圧を出力する機能も準備した。本研究でこのアナログ電圧を記録する装置と使用した PSoC の仕様から、1.3V の電圧を 128 階調 (8 ビットの半分) で出力するようにプログラムした。この階調数が小さく量子化誤差が問題となる場合には、PSoC 外部に別途 (16 ビットなどの) DAC を接続すれば量子化誤差は軽減できる。

また、図 7 の 17 分付近のピークのように、バックグラウンドと比較して大きくないピークの観測には、平均化処理が有効な場合がある。本研究では用意しなかったが、例えば 0.2 秒間隔で収集しているデータを 5 個 (1 秒相当) や 10 個 (2 秒相当) 単位で平均化すると図 8 のようになり、ピークが観察しやすくなる。平均化するデータ数を多くするとさらにバックグラウンドが小さくなるが、その分ピークもなだらかになる。何個のデータを平均化するかは、バックグラウンドと観察対象の材料の放射能の強さ (図 7、8 のピークの高さ) によって調整が必要である。レートをその場 (実時間で) で確認する場合、今回用意した 16 文字 × 2 列の LCD では、平均化しない値と平均化した値の両方を表示させるには文字数に制約があるため、どちらか一方の表示となる。平均化処理や LCD にどのような値を表示させるかに関しては、その仕様が確定すれば、PSoC のプログラムを書き換えることで対応できる。このように柔軟性は高いが、プログラムの書き換えには PSoC の開発環境をインストール

したコンピュータと書き込み用の専用アダプタが必要であり、やや煩雑な作業である。この点は今後の課題である。

またサーバ部分 (ラズパイ) 上のプログラムは、サーバにログインした後に手動で起動、停止する必要がある。またサーバ部分の停止 (shutdown 処理) も手動で行う必要がある。この点も改良の必要があると感じている。

#### まとめ

既存の汎用型 NaI 検出器を利用できる安価なレートメータを開発した。開発したレートメータは、通常用いられる積分回路を使用せず、信号をデジタル処理してレートを算出している。開発した装置は、レートを測定する部分とサーバ部分に大別できる。レートを測定する部分は、レートに依存したアナログ電圧を出力する機能、UART を用いて他のコンピュータにデータを転送する機能、I<sup>2</sup>C を用いてサーバ部分と通信する機能を有する。サーバ部分は、microSD カードにデータを保存する機能だけではなく、SSH、SFTP、HTTP が使用できるため、遠隔 (ネットワーク経由) でデータ (レート) を確認、取得する機能が備わっている。このように、サーバ部分のプログラムを手動で操作する必要があるなど使い勝手が悪い部分もあるが、安価でネットワークにも対応したレートメータが開発できた。

#### 謝辞

本装置の開発に際してご協力頂いた、中野祥賢氏、安川智美氏に感謝いたします。また、本研究の一部は基盤研究 (C) 23560391、基盤研究 (C) 26461848 による助成を受けている。

# 参考文献

- 1) 山田勝彦、野原弘基：放射線計測学，通商産業研究社，pp.234-235, 1986
- 2) 納富 昭弘編集：放射線計測学，国際文献社，pp.68-71, 2015
- 3) Cypress 社 Web サイト (CY8C29466 データシート)、  
<http://www.cypress.com/file/141026/download>
- 4) ラズベリーパイ財団 Web サイト、<https://www.raspberrypi.org/>
- 5) ccchart Web サイト、<http://ccchart.com/>
- 6) N. Menaa, P.D'Agostino, B.Zakrzewski, V.T.Jordanov:  
Evaluation of real-time digital pulse shapers with  
various HPGe and silicon radiation detectors. Nucl.  
Instrum. Meth. Phys. A 652: 512-515, 2011
- 7) R. C. Farrow, J. Headspith, A. J. Dent, B. R. Dobson,  
R. L. Bilsborrow, C. A. Ramsdale, P. C. Stephenson, S.  
Brierley, a G. E. Derbyshire, P. Sangsingkeow and K.  
Buxton: Initial data from the 30-element ORTEC HPGe  
detector array and the XSPRESS pulse-processing  
electronics at the SRS, Daresbury Laboratory, J.  
Synchrotron Rad. 5: 845-847, 1998
- 8) M. V. Cantorias, S. D. Figueroa, T. P. Quinn, J. R. Lever,  
T. J. Hoffman, L. D. Watkinson, T. L. Carmack, C. S.  
Cutler: Development of high-specific-activity <sup>68</sup>Ga-  
labeled DOTA-rhenium-cyclized alpha-MSH peptide  
analog to target MC1 receptors overexpressed by  
melanoma tumors. Nucl. Med. Biol 36: 505-13, 2009

## Development of a remotely operable digital rate meter for radiation monitoring

Kazuya Nakayama , Jyouji Kita\* , Kousin Washiyama

### Abstract

We have developed and evaluated a remotely operable digital rate meter for radiation monitoring. Conventional rate meters use an analog circuit, while this rate meter computes the rate using digital processing technology. This rate meter consists of a component that measures the rate and a server component. The component that measures the rate computes the rate, outputs an analog voltage depending on the rate, and communicates with other devices using UART and/or I<sup>2</sup>C. The server component acquires data from the rate measurement component using I<sup>2</sup>C, and records the data on a microSD card. Using this server, we can access the data remotely via the network using SSH, SFTP, and HTTP. Although the developed rate meter has many functions compared with the conventional rate meter, its cost is low.