

高計数率 X 線分析の壁を超える — 機械学習によるリアルタイムパイルアップ分離計測技術

「PurSamurAI (Pile-up Recovery via Smart Algorithm for Multi-pulse Unmixing and Reconstruction AI)」

これまで当社では、高計数率に対応した計測モジュールを開発・提供してまいりました。しかし、Input Rate が高くなるほどパイルアップの発生確率は急激に高まり、Net Rate(有効計数率)の伸びは鈍化し、やがて頭打ちとなってしまいます。従来の計測モジュールだけでは、この構造的な課題を避けることができませんでした。

SamurAI-DSP は、テクノエーピーが独自に開発したアルゴリズム『PurSamurAI (Pile-up Recovery via Smart Algorithm for Multi-pulse Unmixing and Reconstruction AI)』を用い、機械学習によって高精度なパイルアップ分離推論モデルを生成します。重なり合った波形をこの生成された推論モデルに入力することで、個々のパルスに正確に分離された波形を得ることができます。

これにより、Output Rate 自体の改善はもちろん、それ以上に Net Rate の改善において顕著な効果を発揮します。さらに、この分離処理は PC の GPU 上でリアルタイムに実行されるため、計測を止めることなく、その場でパイルアップを解消しながら高精度なスペクトルを取得できます。SamurAI-DSP は、Input Rate の上昇に見合った実効性能の向上を、リアルタイム計測環境下で実現します。

次のグラフは 従来の Peaking Time 350ns 設定時の、Output Rate と Input Rate の関係を示します。一見 Input Rate を上げるほど Output Rate が上昇していき、計数率を上げれば上げるほど有用な計数が向上しているように見えます。

しかし、この Output Rate はあくまで検出器/計測モジュールが「何らかのイベント」として処理・出力した数に過ぎません。パイルアップによってエネルギー情報が歪んだパルスや、複数パルスが合成されて誤ったチャンネルに計上されたパルスも、Output Rate 上では同じ 1 カウントとして扱われてしまいます。**すなわち Output Rate だけでは、目的のエネルギーの計数が実際に増えているかは判断できません。**

Net Rate と Input Rate の関係を示します(図 2)。高計数率領域ではパイルアップによって本来得られるはずのカウントが失われ続けていることがわかります。図 1 と図 2 を並べて比較して初めて、この「見かけと実態の乖離」が明らかになります。

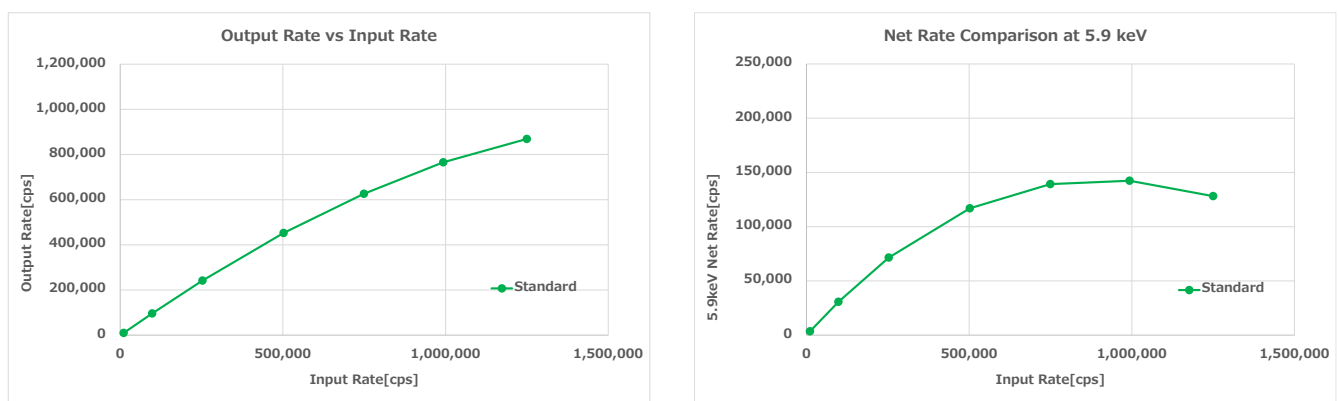


図1. Output Rate 及び Net Count Rate と Input Rate の関係

X線・ γ 線検出器で観測されるパルスの到来間隔はポアソン分布に従うランダムな事象です。

計数率 r が上がるほど、2つ以上のパルスが検出器の応答時間内にほぼ同時に飛び込んでくる「パイルアップ」が避けられない頻度で発生します。

計数率を r [cps]、peaking time(risetime+flattop)を τ [s] とすると、

$$\mu = r \cdot \tau$$
$$P_{\text{pileup 全体}}(r, \tau) = 1 - e^{-\mu} = 1 - e^{-r\tau}$$

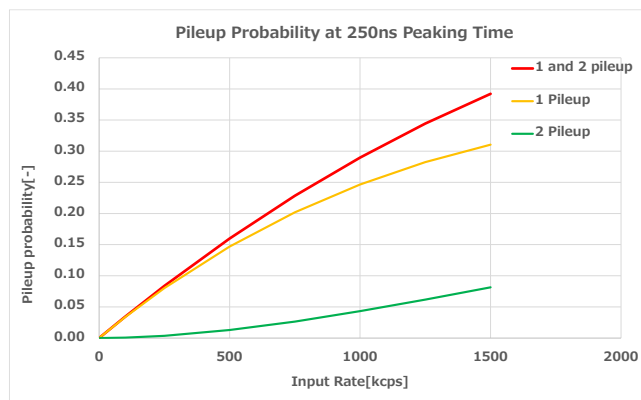


図2. パイルアップ確率

上のグラフは、Input Rate の上昇に伴う 1pileup（2波形重なり）・2pileup（3波形重なり）の発生確率を示しています。Input Rate を上げると Output Rate は見かけ上増え続けますが、これは表面的な変化に過ぎません。

グラフの通り、Input Rate の上昇と同時にパイルアップ確率も増加します。パイルアップしたイベントは正しいエネルギー情報を持たない「使えないカウント」であり、Output Rate の増加分にはこれが着実に混ざり込んでいきます。

Input Rate の上昇と共にパイルアップ確率も増加し続けるため、パイルアップによる損失が Input Rate の増加分を上回るようになる。Net Rate が頭打ちとなり、やがて Input Rate を上げるほど減少に転じるという結果は、このパイルアップ確率のグラフからも同様に裏付けられます。

このように高計数率で必ず発生するパイルアップは、ポアソン統計が示す通り計数率とともに避けられない頻度で増加し、従来のパイルアップ除去(PUR)ではその波形をまるごと廃棄するしかありませんでした。SamuraiAI-DSP は、機械学習によってパイルアップ波形を個々のパルスへ分離する専用モデルを構築し、この課題に取り組みました。

機械学習から計測までを簡単に紹介します。

1. 計測準備

検出器を接続し計測パラメータをセットします。
任意の信号を入力しワンクリック機械学習をスタートします。

2. ワンクリック機械学習と AI ビルド

“ワンクリック機械学習”を実行することで、以下の①～③の機械学習によるモデル学習から、推論用エンジン(実行ファイル)のビルドまでを自動実行します。

① 台形整形の生波形を学習用に取得

学習には、理想的な波形関数モデルやノイズのないものではなく、検出器の特性やノイズ、その場の環境まで含んだ実際の『単発波形』を用います。

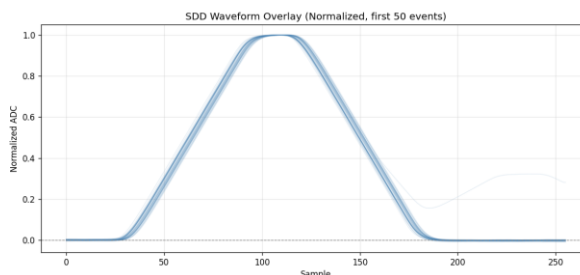


図3. 教師データ用の波形取得

② 学習用データの生成と機械学習

①で取得した単発波形を用い、PurSamurai エンジンによる機械学習を開始します。

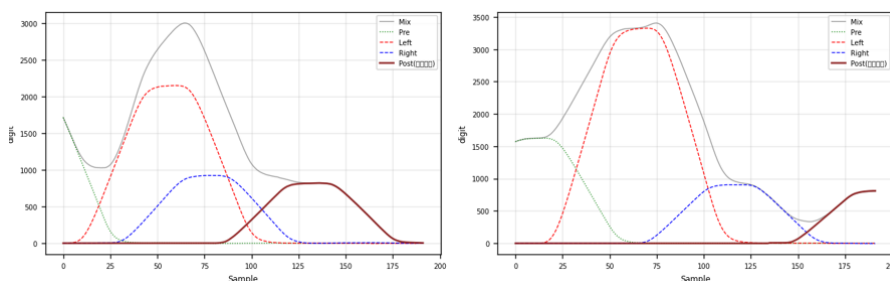


図4. 機械学習用データの生成

③ 推論エンジンへの変換

学習済みモデルを、搭載 GPU 向けに最適化された推論エンジンへ変換し、使用するアプリケーションに自動セットします。

3. 計測

計測を開始します。開始時に推論エンジンが GPU へ展開されます。

計測中は、10G イーサネットの高速伝送によってパイルアップ波形を瞬時に取り込み、GPU 上でリアルタイムに推論・分離します。

GPU の推論では二乗平均平方根誤差 (RMS) を自動計算し採用と除外を判定します。その後スペクトルへと描き出します。

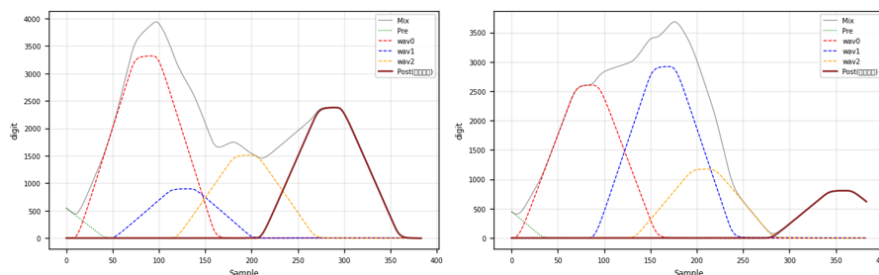


図5. 実際に SamurAI-DSP で分離された生波形例

4. 繰り返し計測

同じ計測パラメータであれば、構築した推論用エンジンを再利用できます。パラメータに変更がある場合は、条件に応じた専用エンジンを切り替えて計測を開始できます。

実測データを示します。先に示した Input Rate に対する Output Rate と Net Rate の比較です。
従来の評価基準である Output Rate については 115% 向上、特に本来必要な Net Rate においては、1Mcps Input Rate 領域において 166% も計数率が向上していることがわかります。

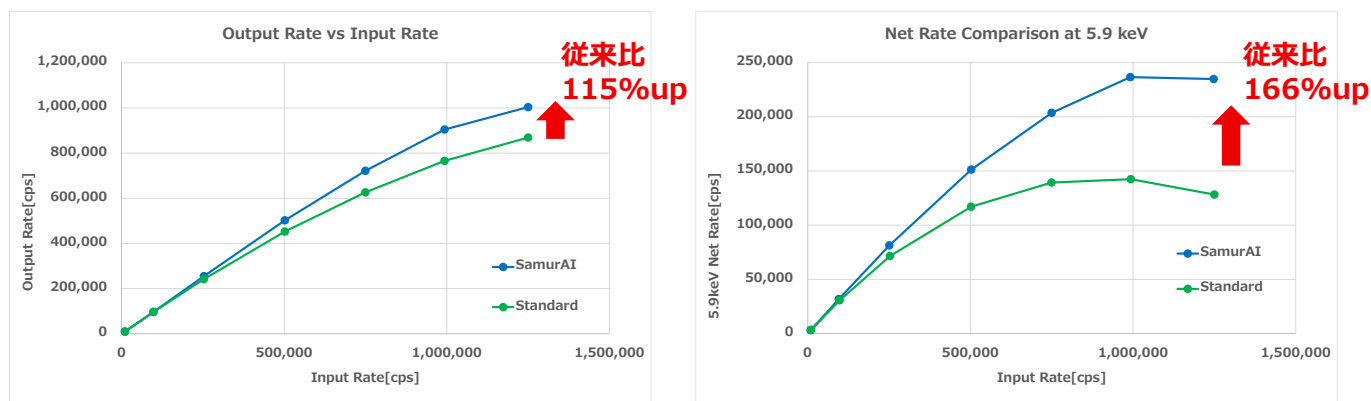


図6. 従来方式と SamurAI-DSP の Output Rate と Net Rate の比較

Input Rate に対する Energy Resolution の比較です。
SamurAI-DSP は従来方式と比較してもパイルアップを分離したにも関わらずエネルギー分解能が維持していることが示されました。

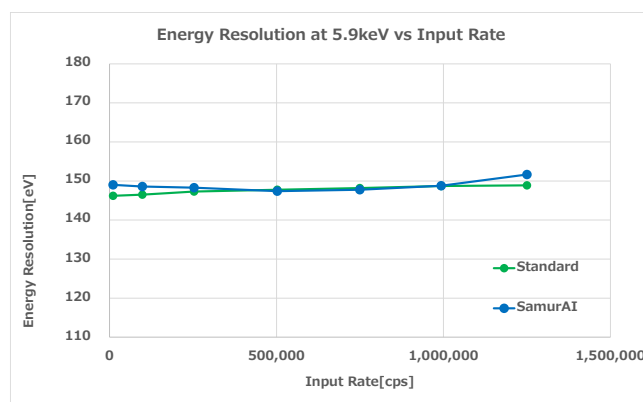


図7. エネルギー分解能と Input Rate

1M Input Rate 時の全体スペクトルを示します。

黒は Standard 設定、青は SamurAI-DSP のスペクトルです。

5.9keV 付近のピークの増加、高エネルギー側のバックグラウンドが減少していることがわかります。

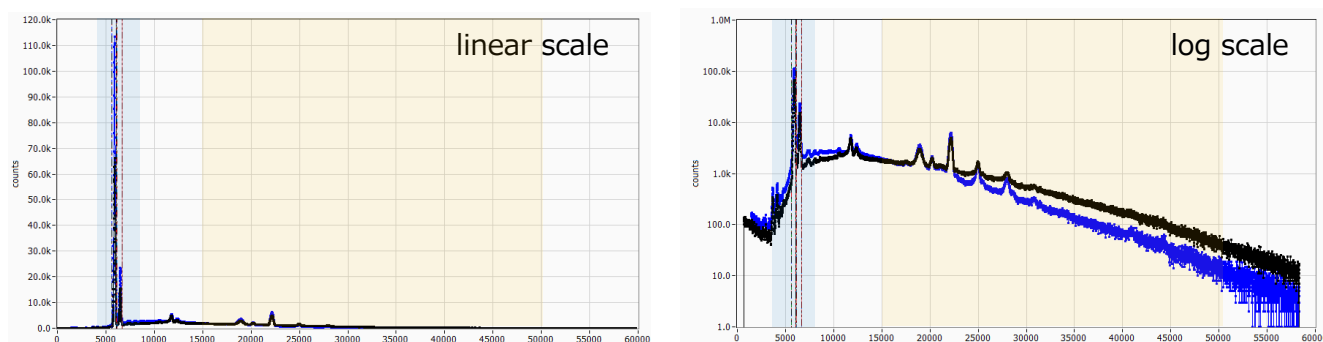


図8. 従来方式と SamurAI-DSP の全体スペクトルの比較

5.9 keV および 6.4 keV のピーク付近、ならびに高エネルギー側のスペクトルを拡大したものです。 SamurAI-DSP の適用により、5.9 keV・6.4 keV のピークにおける Net Rate が大幅に向上する一方で、15 keV 以上の高エネルギー領域ではバックグラウンドの顕著な低減が確認できます。これは、従来パイルアップによって高エネルギー側へ誤って計上されていた信号が、多重パルス分離・再構成処理によって正確に分離され、本来のエネルギーピークへと再構成されたことを示しています。

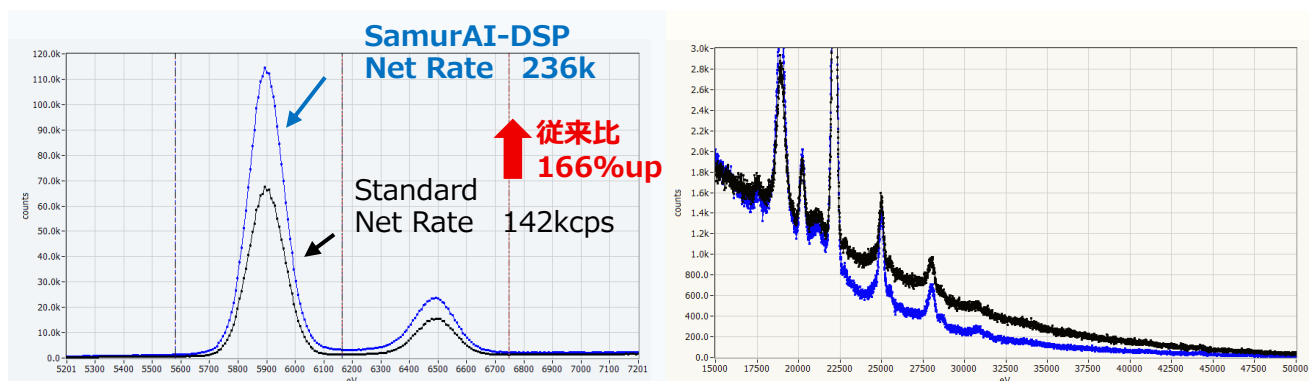


図9. 従来方式と SamurAI-DSP の拡大スペクトルの比較

次の図は、1Mcps Input Rate 計測時における、リアルタイムの Pileup Rate と SamurAI-DSP により分離された Separate Rate を示しています。200kcps 以上のパイルアップ波形をリアルタイムに処理し、345kcps もの分離を実現しています。GPU による高速推論により、分離波形や波高値に加え、分離成功数・失敗数などの情報もあわせて出力されます。

	count	rate(cps)	
reject after hist	5.588M	558.828k	
pileup	2.056M	205.613k	—— Pileup 検出し波形転送された数
Separate	3.453M	345.337k	—— SamurAI-DSP により分離された数

図10. 計測中のパイルアップ処理数

Samurai-DSP は従来のパイルアップ除去で完全に廃棄されていたパイルアップイベントを、実用的な分解能で回収することに成功しました。

計数率を上げるほど失われていく「本当に使えるカウント数(Net Rate)」を、機械学習による波形分離と GPU リアルタイム処理の組み合わせによって取り戻し、高計数率環境での分析性能を根本から引き上げます。

この Net Rate の伸び悩みの正体は、パイルアップによって「捨てられる」「歪んだまま使われる」イベントの増加そのものです。つまり、パイルアップした波形から個々のパルス情報を正確に取り戻すことができれば、これまで失われていたはずの Net Rate を取り戻し、Input Rate の上昇に対してより線形に近い形で有効計数を伸ばし続けることができます。

阻んでいたのは、検出器の限界ではなく「処理の壁」だった。

Samurai-DSP は、その限界の先へと計測を導きます。