

第19回日本加速器学会年会 (2022年10月18日)

# SACLAにおける 機械学習による故障予知・異常検知 アプリケーションの試作

佐藤 悠史<sup>A, B)</sup>, 清水 俊吾<sup>A)</sup>, 上條 慎二<sup>A)</sup>, 岩井 瑛人<sup>B, C)</sup>, 前坂 比呂和<sup>B)</sup>

A) 中央電子(株), B) 理研, C) 高輝度光科学研究センター

# 取り組みの背景

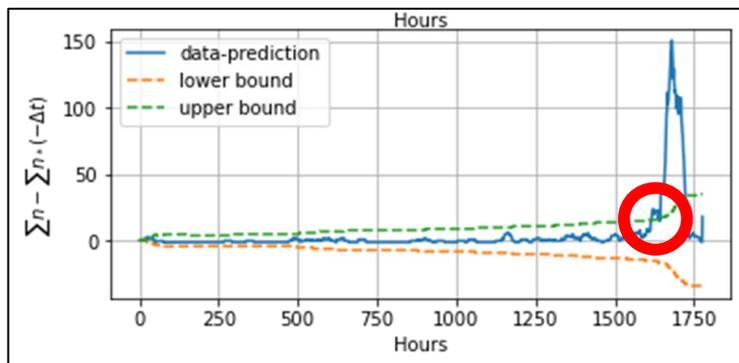
- **SACLAのメンテナンス性向上や点検効率化のため機械学習を用いて何かできないか？**
- SACLAでは大量のセンサー・計器類が設置されており、安定稼働に役立てられている
  - 現状、閾値逸脱およびステータスビット監視による異常検知が大きく貢献
  - 大部分はデジタル化されており、データベースに蓄積
  - 一部、流量計などのアナログ計器が存在
  - 長年の運転実績から多くのノウハウが得られている
- **膨大な点数のこれらを基に、機械学習による性能向上を目指す**
  - 時系列データで未然に異常を予測する
  - 自動化により作業を効率化する など

# 調査により至った取り組み対象

機械学習を用いた故障予知・異常検知による改善を見込む三つのテーマ

## 取り組み① サイクロンの 余命推定

- 計画的なメンテナンス
- 自爆回数等のベイズ学習

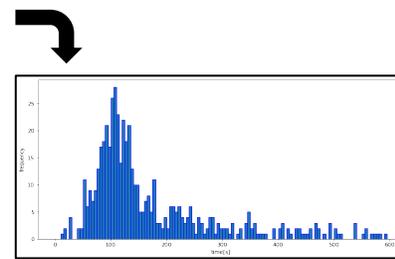


## 取り組み② 装置運転停止時の ユーザー待機時間の推定

- 自動連絡によるユーザビリティ向上
- アラーム情報を基にした回帰

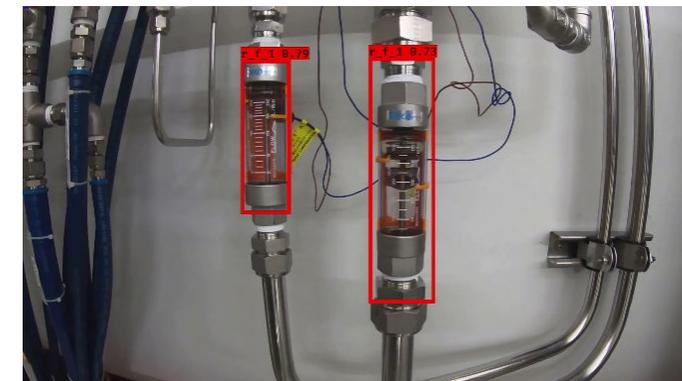
SR/XFEL MDAQ(DMZ) ver 1.6.13

Alarm Name	Alarm	Event	Start	End	Event Name
shf_img_ps_4_sdm_36status	0x0	2021/09/21 16:25:17	2021/11/24 09:25:15	alarm-0801	
shf_img_ps_4_sdm_20status	0x0	2021/09/21 16:25:22	2021/11/24 09:25:15	alarm-0802	
shf_img_monitor_ext_sw_1status	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	alarm-0803	
shf_img_monitor_ext_sw_2status	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	alarm-0804	
shf_img_monitor_ext_sw_3status	0x4	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	alarm-0805	
shf_of_0b11_3_0b1status	0x11	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	alarm-12	
shf_of_0b11_3_1b_1b1change	0x0	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	alarm-12	
shf_of_0b11_3_sw_3_alarm/status	0x0	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:34	alarm-12	



## 取り組み③ アナログ流量計の 数値読取り

- 点検作業の自動化
- CNNによる画像認識



# 取り組み①：サイラトロンの余命推定

## 背景と目的

### • 背景

- サイラトロンは加速器各部で使用される高速な大電力スイッチ部品
- 消耗品だが非常に高価なため、可能な限り長時間使用したい
  - 平均2~3万時間程度の寿命であり、SACLAでは毎月1~2個交換している
- 故障によるトラブルを未然に防ぎたい
- 長年の運用によるノウハウ、また、データの蓄積がある

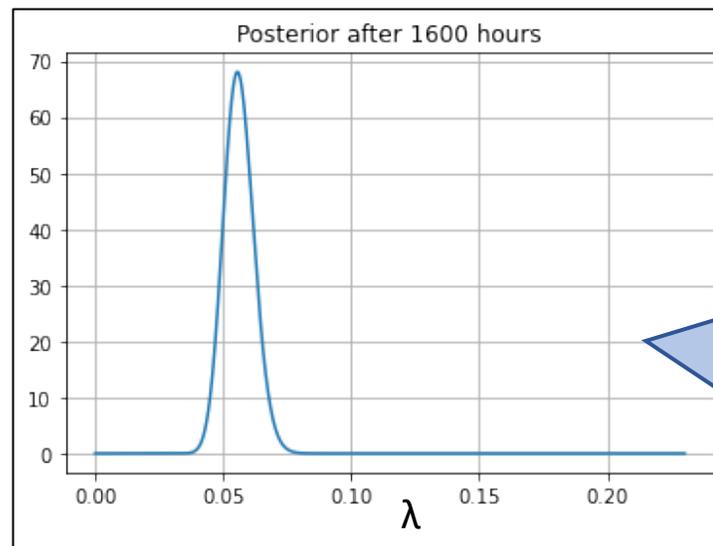
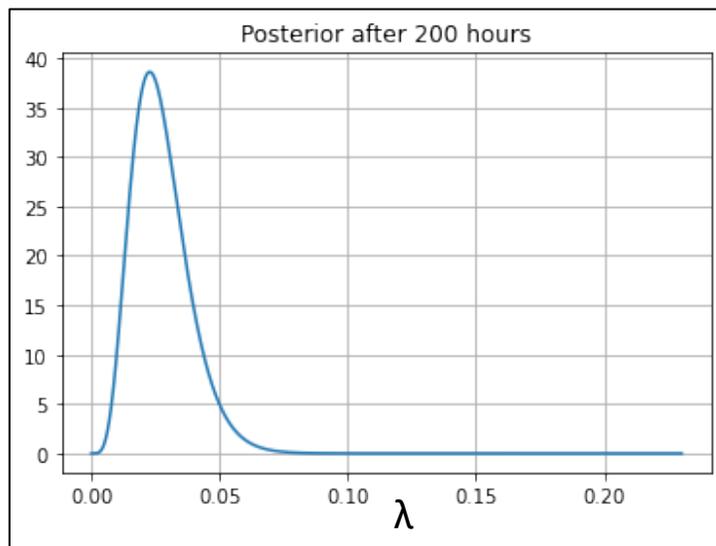
### • 目的

- 機械学習でサイラトロンの余命を推定すること
  - 計画的なメンテナンスを実現
    - 故障前の交換による装置ダウンタイム削減
    - 個体ごとの可能な限りの長時間使用
    - 事前の予備品の確保 など

取り組み①：サイラトロン<sup>®</sup>の余命推定

# 今回使用したベイズ推定モデル

- $p(\lambda | x) \propto \text{Poisson}(x | \lambda) \text{Gamma}(\lambda | \alpha, \beta)$ を用いて、自爆回数の増加傾向への変化を基に故障予兆を検知する
  - 事前分布：ガンマ分布、尤度：ポアソン分布
  - 学習データ(x)：毎時の自爆回数
  - **サイラトロン毎に異なる平均発生回数パラメータ( $\lambda$ )を観測した毎時の自爆回数を基に確率分布を更新するモデル**



毎時の自爆回数が  
増加傾向になると  
平均発生回数が増加した  
事後分布が得られる

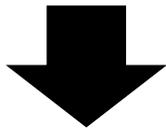
# 取り組み①：サイラトロンの余命推定 試作アプリケーション

- サイラトロンを設置したユニットごとにDBから毎時の自爆回数を収集
- 得られた事後分布を基に、閾値上限を超えたユニットのデータを出力

## データ収集

```

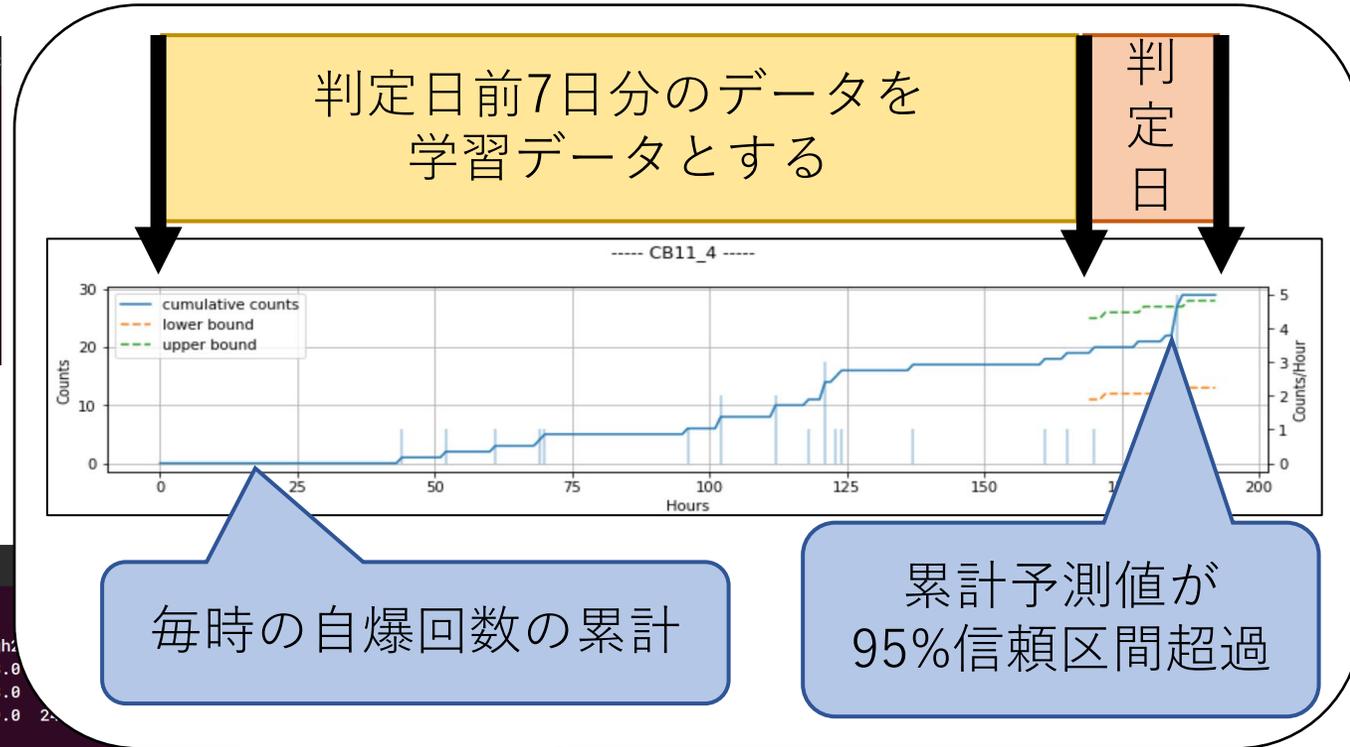
cecal@cecal-System-Product-Name: ~/Desktop/theme_t
(mdaqweb) cecai@cecai-System-Product-Name:~/Desktop/theme_thy_trial$ ls -l ./report/input/20220425
合計 35000
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 139182 4月 26 09:39 raw_data_cb01_1_cnt.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 277150 4月 26 09:39 raw_data_cb01_1_run_time.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 139182 4月 26 09:39 raw_data_cb01_2_cnt.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 277166 4月 26 09:39 raw_data_cb01_2_run_time.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 139182 4月 26 09:39 raw_data_cb01_3_cnt.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 288238 4月 26 09:39 raw_data_cb01_3_run_time.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 139182 4月 26 09:39 raw_data_cb01_4_cnt.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 288238 4月 26 09:39 raw_data_cb01_4_run_time.pickle
    
```



## 判定結果

```

cecal@cecal-System-Product-Name: ~/Desktop/theme_thy_trial
(mdaqweb) cecai@cecai-System-Product-Name:~/Desktop/theme_thy_trial$ python3 ./app/output/run_output.py 2022/04/25 7
===== UNIT: cb13_4 =====
   time hrs cnt diff  a    b    E    low    high    pred    dcnt  low2  high2
188 2022-04-25 19:57:16.442 188 33 1 34.0 208.0 0.163462 0.128721 0.200259 30.730769 2.269231 24.0 38.0
189 2022-04-25 20:57:12.187 189 33 0 34.0 209.0 0.162679 0.128105 0.199301 30.746411 2.253589 24.0 38.0
192 2022-04-25 23:57:10.570 192 34 1 35.0 212.0 0.165094 0.130493 0.201715 31.698113 2.301887 25.0 39.0
===== UNIT: cb14_3 =====
   time hrs cnt diff  a    b    E    low    high    pred    dcnt  low2  high2  pred3  low3  high3
175 2022-04-25 06:55:29.109 175 8 5 9.0 195.0 0.046154 0.027859 0.066640 8.076923 -0.076923 5.0 12.0 3.723404 1.0 7.0
176 2022-04-25 07:55:28.639 176 8 0 9.0 196.0 0.045918 0.027717 0.066300 8.081633 -0.081633 5.0 12.0 3.744681 1.0 7.0
    
```



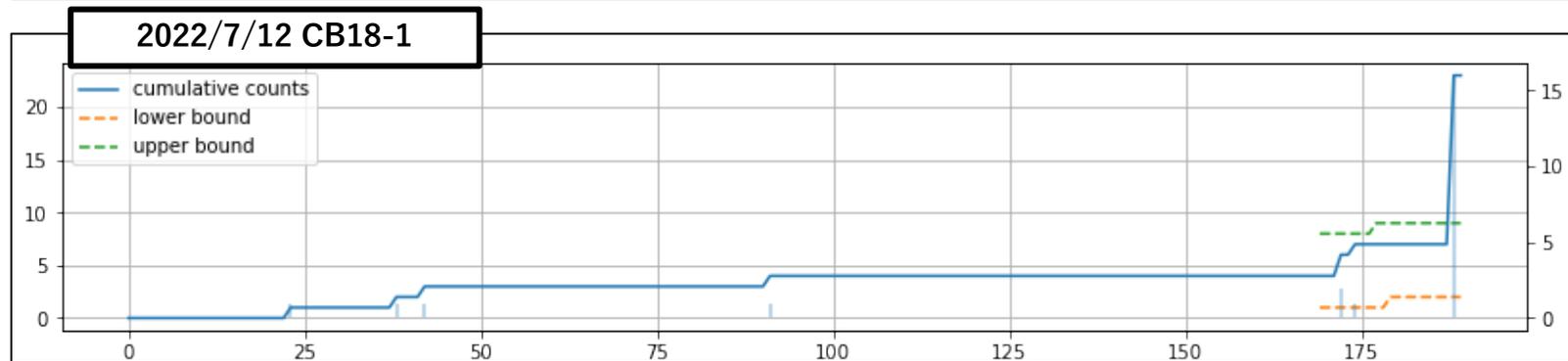
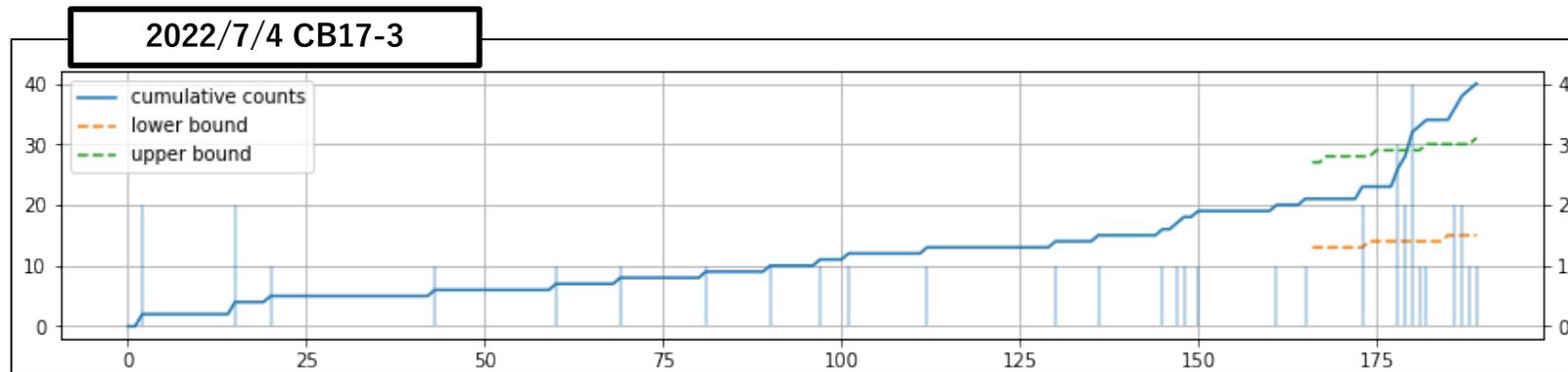
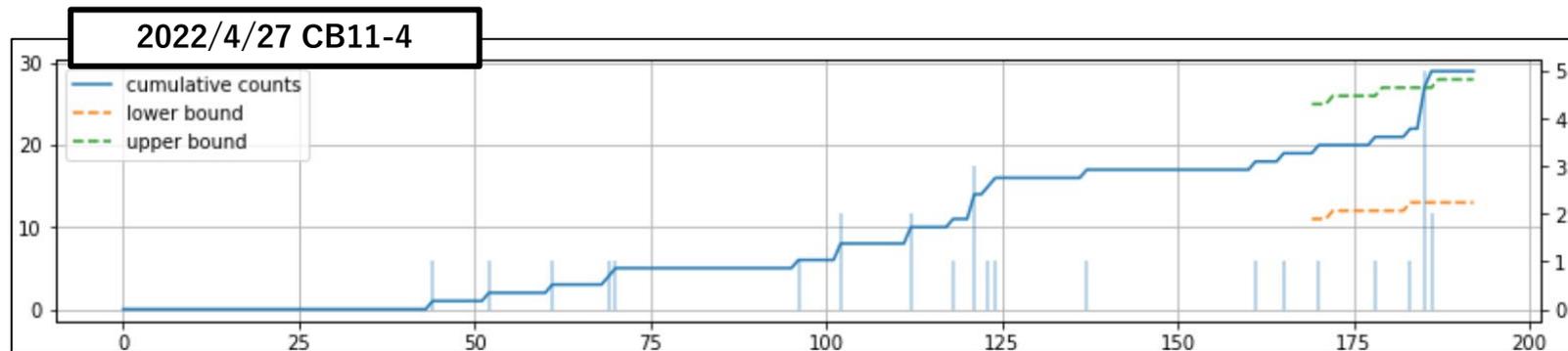
## 取り組み①：サイラトロン之余命推定

# 2022年4月～8月運転期間中の動作結果

- 総検知数123件中のべ10件を故障前に検知
  - 全74ユニット、サイラトロン総数86本
  - 右図は故障前検知時のグラフ
    - 縦軸：毎時自爆回数の累計、横軸：時間 [h]
- 誤報は多いものの自爆回数の増加傾向を検知
- 閾値調整による検知精度改善が今後の課題
  - 信頼区間、閾値を作る基準時点 など

判定日	95%信頼区間を超えたユニット
2022/4/18	CB11-2
...	
2022/4/27	CB03-2, <b>CB11-4</b>
...	
2022/7/4	CB03-1, <b>CB17-3</b>
...	
2022/7/12	CB03-1, CB17-3, <b>CB18-1</b>
...	
2022/7/31	CB16-2

2022/4/18～8/1検知結果抜粋。太字は故障前検知



# 取り組み②：装置運転停止時のユーザー待機時間の推定 背景と目的

## 背景

- トラブルにより加速器運転が停止した際、実験ユーザーに待機時間が発生する
- 特に、停止が長くなるような場合は復旧までの時間が知りたい
- アラーム発報状況をデータベースから取得できる

## 目的

- 装置運転停止時のアラーム発報状況から停止時間を推定する
  - 自動連絡によるユーザービリティ向上

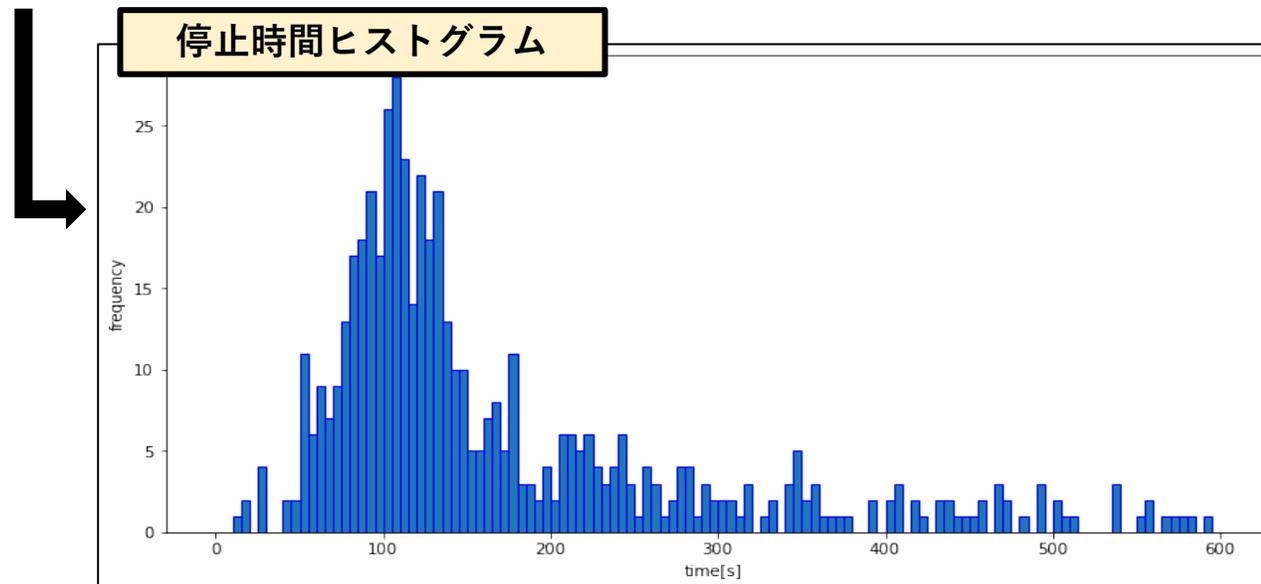
アラーム履歴

SR/XFEL MDAQ(DMZ) ver 1.6.13

Home Plot Waveform Image Search Host list SR Alarm Management

From: 2021/11/15 05:52:21  
To: 2021/11/15 05:53:01  
alarm level: alert  
alarm status: all

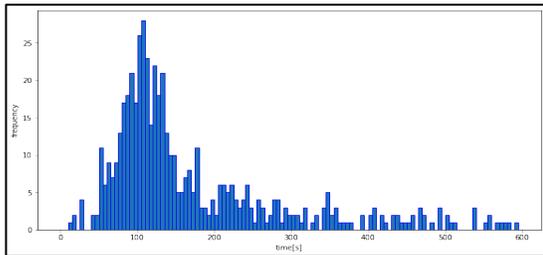
Signal name	Status	Normal	Begin	End	Host name
xfel_mag_ps_q_xsbt_26/status	0x0	0x0	2021/09/21 16:25:17	2021/11/24 09:25:15	xfmag-xsbt-01
xfel_mag_ps_q_xsbt_28/status	0x0	0x0	2021/09/21 16:25:22	2021/11/24 09:25:15	xfmag-xsbt-01
xfel_tmg_master_opt_sw_1/status	0x1	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	xftmg-xcr-01
xfel_tmg_master_opt_sw_2/status	0x1	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	xftmg-xcr-01
xfel_tmg_master_opt_sw_3/status	0x1	0x4	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	xftmg-xcr-01
xfel_vac_xsbt_2_vv_2/status	0x0	0x1	2021/09/25 16:10:52	2021/11/24 09:25:15	xfvac-xcr-04
xfel_rf_cb11_3_ctrl/status	0x113	0x7f	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	xf-rf-xcr-12
xfel_rf_cb11_3_kly_vk/voltage	97	100	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	xf-rf-xcr-12
xfel_rf_cb11_3_pa_3_alert/status	0x1	0x0	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:34	xf-rf-xcr-12



# 取り組み②：装置運転停止時のユーザー待機時間の推定 使用する機械学習モデル

- アラーム情報のビットデータを1本のベクトルにする
- 主成分分析(PCA)またはオートエンコーダー(AE)で次元削減する

## 学習データ

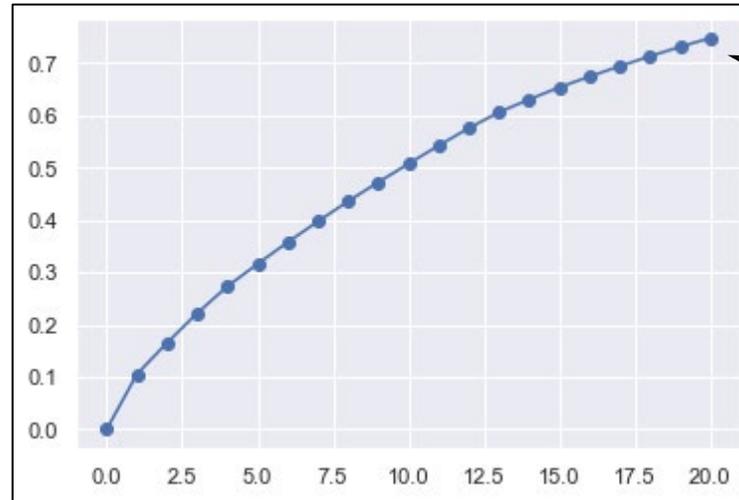


停止時間1件に対応する  
アラーム履歴(計570件)

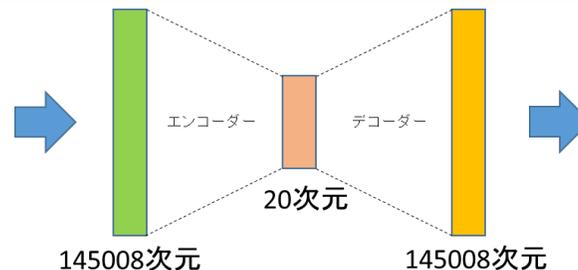
SR/XFEL MDAQ(DMZ) ver 1.6.13

Signal name	Status	Normal	Begin	End	Host name
xfel_img_ps_u_xcbl_26/status	0x0	0x0	2021/09/21 16:25:17	2021/11/24 09:25:15	vfmimg-xcbl-01
xfel_img_ps_u_xcbl_28/status	0x0	0x0	2021/09/21 16:25:22	2021/11/24 09:25:15	vfmimg-xcbl-01
xfel_img_master_opt_sw_1/status	0x1	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	vftmg-scr-01
xfel_img_master_opt_sw_2/status	0x1	0x5	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	vftmg-scr-01
xfel_img_master_opt_sw_3/status	0x1	0x4	2021/09/22 15:42:56	2021/11/24 09:25:15	vftmg-scr-01
xfel_img_vcb_1_w_2/status	0x0	0x4	2021/09/25 16:16:53	2021/11/24 09:25:15	vfac-scr-04
xfel_rf_cb11_3_ctr/status	0x113	0x7f	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	efxcr-12
xfel_rf_cb11_3_kly_vk/voltage	97	100	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:44	efxcr-12
xfel_rf_cb11_3_pa_3_alert/status	0x1	0x0	2021/11/15 05:52:24	2021/11/15 05:52:34	efxcr-12

## 次元削減



PCAの結果  
主成分数20で  
累積寄与率が0.75  
でほぼ停滞



決定木回帰  
による  
停止時間推定  
モデル

# 取り組み②：装置運転停止時のユーザー待機時間の推定 試作アプリケーション

- 電子銃のステータス信号を監視して停止を検知する
- アラーム情報から停止推定時間と要因のユニットを表示する

運転状態

停止日時: 2021/06/12 14:41:43

## 停止時間推定 (PCA)

運転状態

停止日時: 2021/06/12 14:41:43

復帰までの推定時間: 100秒

サブグループ状態

xfel_rf_cb01_1	xfel_tf_cb01_2	xfel_rf_cb01_3	xfel_rf_cb01_4	xfel_rf_cb02_1	xfel_tf_cb02_2	xfel_rf_cb02_3	xfel_rf_cb02_4
xfel_rf_cb03_1	xfel_tf_cb03_2	xfel_rf_cb03_3	xfel_rf_cb03_4	xfel_rf_cb05_1	xfel_tf_cb05_2	xfel_rf_cb05_3	xfel_rf_cb05_4
xfel_rf_cb06_1	xfel_tf_cb06_2	xfel_rf_cb06_3	xfel_rf_cb06_4	xfel_rf_cb07_1	xfel_tf_cb07_2	xfel_rf_cb07_3	xfel_rf_cb07_4
xfel_rf_cb08_1	xfel_tf_cb08_2	xfel_rf_cb08_3	xfel_rf_cb08_4	xfel_rf_cb09_1	xfel_tf_cb09_2	xfel_rf_cb09_3	xfel_rf_cb09_4
xfel_rf_cb10_1	xfel_tf_cb10_2	xfel_rf_cb10_3	xfel_rf_cb10_4	xfel_rf_cb11_1	xfel_tf_cb11_2	xfel_rf_cb11_3	xfel_rf_cb11_4
xfel_rf_cb12_1	xfel_tf_cb12_2	xfel_rf_cb12_3	xfel_rf_cb12_4	xfel_rf_cb13_1	xfel_tf_cb13_2	xfel_rf_cb13_3	xfel_rf_cb13_4
xfel_rf_cb14_1	xfel_tf_cb14_2	xfel_rf_cb14_3	xfel_rf_cb14_4	xfel_rf_cb15_1	xfel_tf_cb15_2	xfel_rf_cb15_3	xfel_rf_cb15_4
xfel_rf_cb16_1	xfel_tf_cb16_2	xfel_rf_cb16_3	xfel_rf_cb16_4	xfel_rf_cb17_1	xfel_tf_cb17_2	xfel_rf_cb17_3	xfel_rf_cb17_4
xfel_rf_cb18_1	xfel_tf_cb18_2	xfel_rf_cb18_3	xfel_rf_cb18_4				

復帰までの推定時間: 100秒

xfel\_rf\_cb02\_3    xfel\_rf\_cb02\_4

運転停止時のブラウザ表示

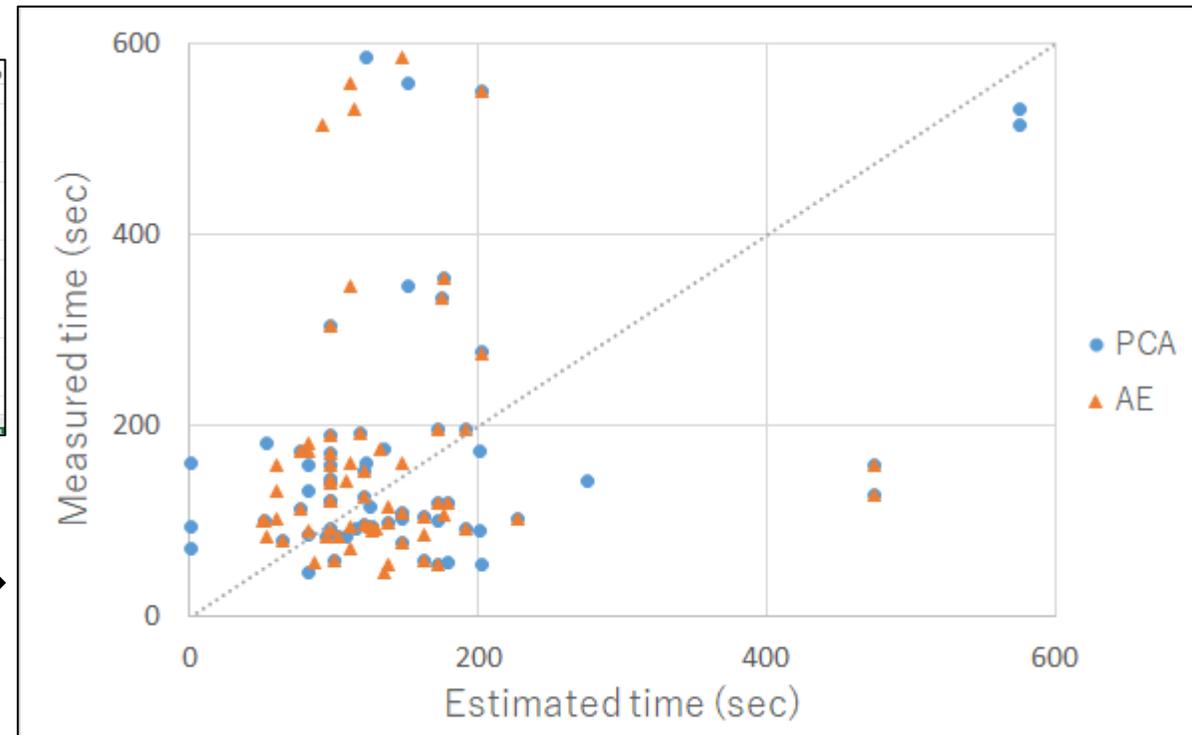
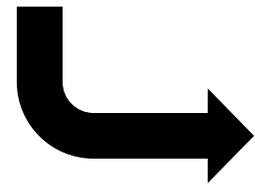
## 取り組み②：装置運転停止時のユーザー待機時間の推定 運転中の停止時間推定の実験

- 実験中にCSVログに残した推定値と実測値を比較
- 現状、実データでは推定精度が低い

### [今後の改善方針]

- 実験中に停止データを収集しているため、これを追加で学習に使用する
- 設定の近いアラーム状態の設備とデータを入れ替えることで人工的に増やしていく

	A	B	C	D
567	2022/6/15 3:14	175	333	
568	2022/6/15 13:09	98	158	
569	2022/6/16 0:21	98	141	
570	2022/6/16 4:17	121	97	
571	2022/6/16 19:45	201	174	
572	2022/6/16 20:46	191	196	
573	2022/6/17 18:05	575	531	
574	2022/6/17 22:59	54	181	
575	2022/6/18 7:03	98	122	
576	2022/6/18 18:00	103	84	
577	2022/6/19 13:33	172	1402	
578	2022/6/21 16:56	172	120	
579	2022/6/22 12:25	148	102	
580	2022/6/22 23:27	82	158	
581	2022/6/23 10:53	191	93	
582	2022/6/23 11:16	1	95	
583	2022/6/23 16:10	64	80	



## 取り組み③：アナログ流量計の数値読取り 背景と目的

### • 背景

- 数値読取りを目視で行うアナログ計器類が多数存在している

### • 目的

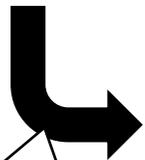
- 画像認識したアナログ流量計の数値読取りによる点検の自動化
  - 最終的には、線量の高いトンネル内部を巡回するロボットと組み合わせた利用も想定



# 取り組み③：アナログ流量計の数値読取り 物体検出 + 浮き位置の読取り

## • 物体検出

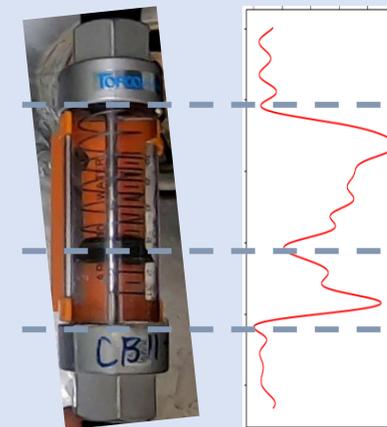
- YOLOv3を使用
- カメラ画像をアノテーションして学習データを作成（画像は約3400枚準備）
- 作成した物体検出モデルは学習データと似た画像（計器の向き、明るさ）であれば検出可能



流量計を  
切り出した  
画像

## • 浮き位置の読取り

- 画像の輝度値を横方向に積分する
- 窓部分の上端を100, 下端を0として  
浮き位置を100分率で読み取る



# 取り組み③：アナログ流量計の数値読取り 試作アプリケーション

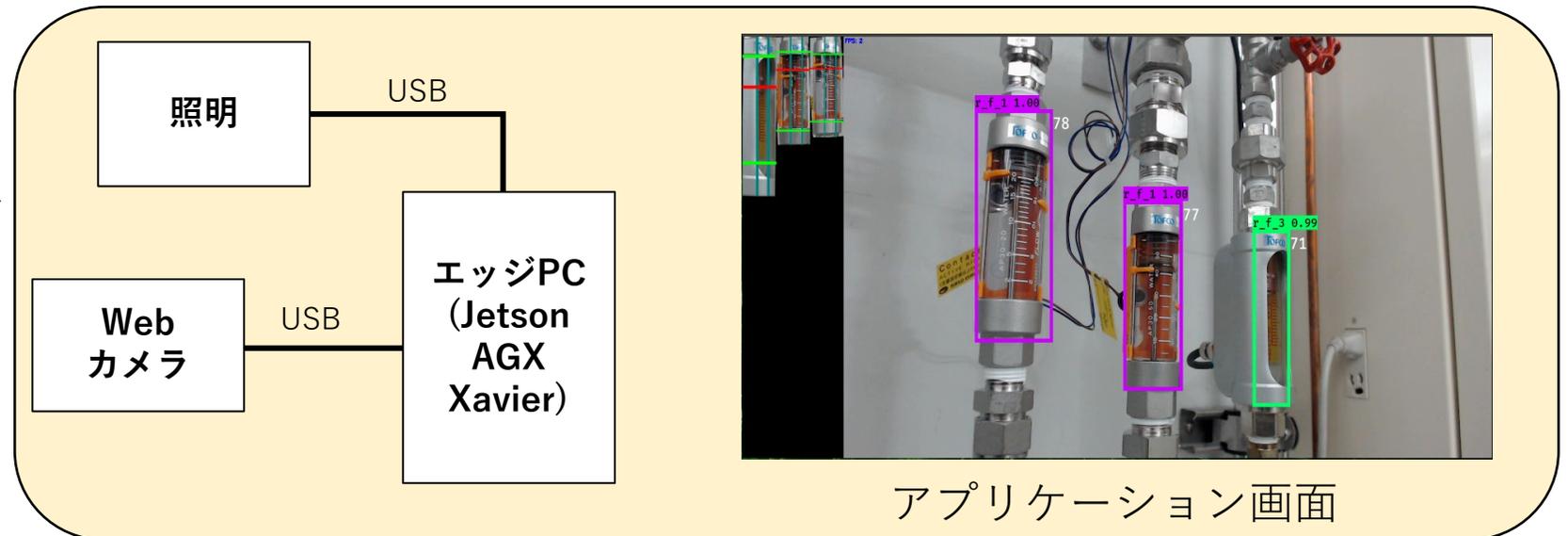
- 要素技術を組み合わせ、SACLA棟内にwebカメラ、照明、エッジPCを設置
- 画像内の計器の座標ごとに読取り結果を分けて毎分記録する



現地写真



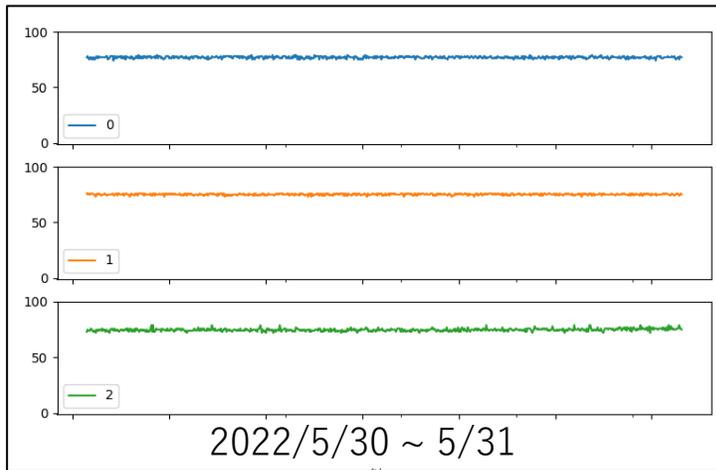
撮影対象



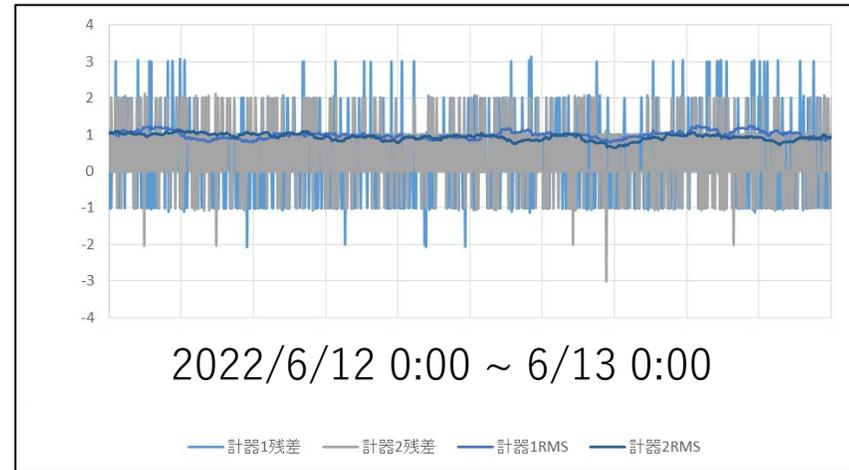
アプリケーション画面

# 取り組み③：アナログ流量計の数値読取り 現地での読取り結果

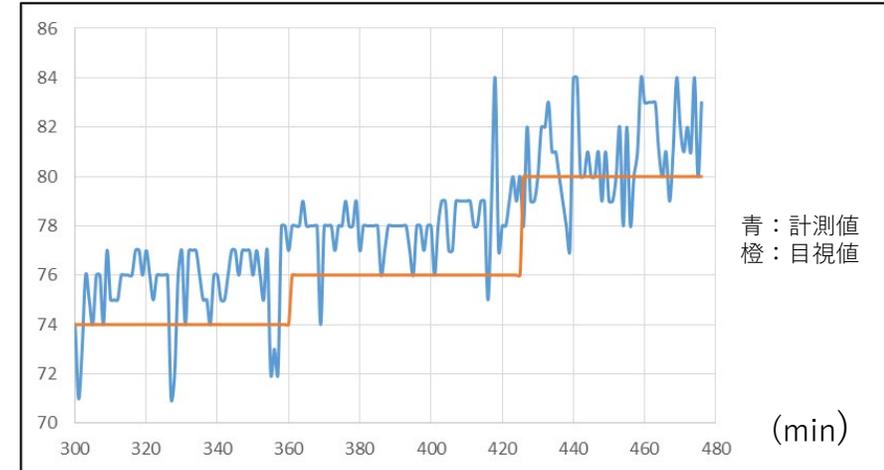
- 読取り値（100分率）のブレ幅は±3%
- 目視値にほぼ変動がない2台はRMS=0.94%、0.86%
- 目視値に変動がある1台は2%程度の変化に追従できている



3台の読取り結果



目視で変動がない2台の残差と  
1時間分の平均値との残差のRMS



目視で変動がある1台の読取り値

# まとめ

- SACLAのセンサー・アナログ計器を対象とした故障予兆・異常検知アプリケーションを試作した
  1. サイラトロン自爆回数のベイズ学習による余命推定（故障予兆検知）
  2. 運転停止時のアラーム発報状況を基にした決定木回帰による停止時間予測
  3. 物体検知を用いて画像認識したアナログ流量計の数値読取り
- 今後は具体的な要件定義を定めて実用化を目指す
  - 現状のモデルの精度改善
    - 未使用のセンサーデータを追加する など
  - 他の機械学習モデルとの比較