

第21回日本加速器学会年会（2024年7月31日）

SACLAにおけるグリッド電圧波形 データを用いたサイクロトロン の異常検知ソフトウェアの開発

佐藤 伸行^{A)}, 岩井 瑛人^{B), C)}, 前坂 比呂和^{C), B)}, 安留 健嗣^{C)}, 近藤 力^{B), C)},
稲垣 隆宏^{C), B)}

A) 中央電子(株), B) 高輝度光科学研究センター, C) 理研RSC

中央電子株式会社 会社概要

設立
資本金
事業目的

1960年4月

4億円

工業用・医療用・民生用・光学用、その他の電子機器、システム機器の設計・製造・販売、並びにソフトウェアの作成・販売、およびこれに付帯する業務

社員数
本社
量産工場
営業拠点

約250名 **(約2/3が技術者)**

東京都八王子市 (開発・試作)

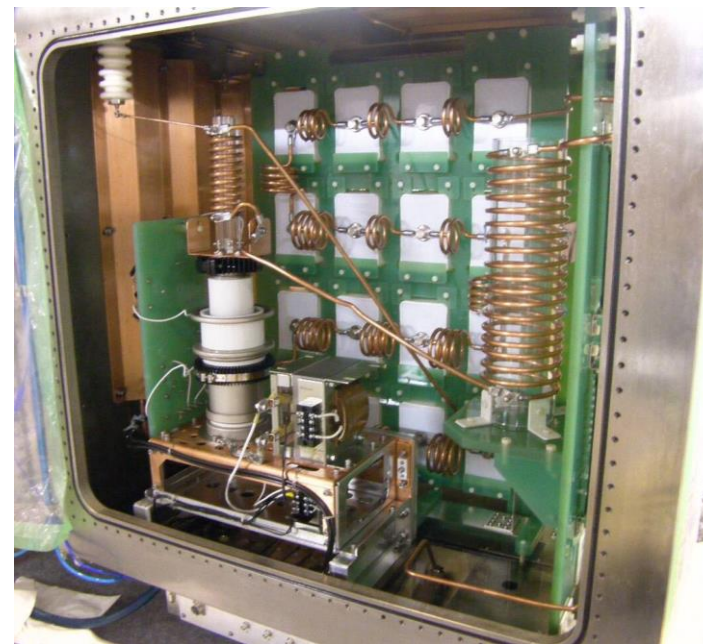
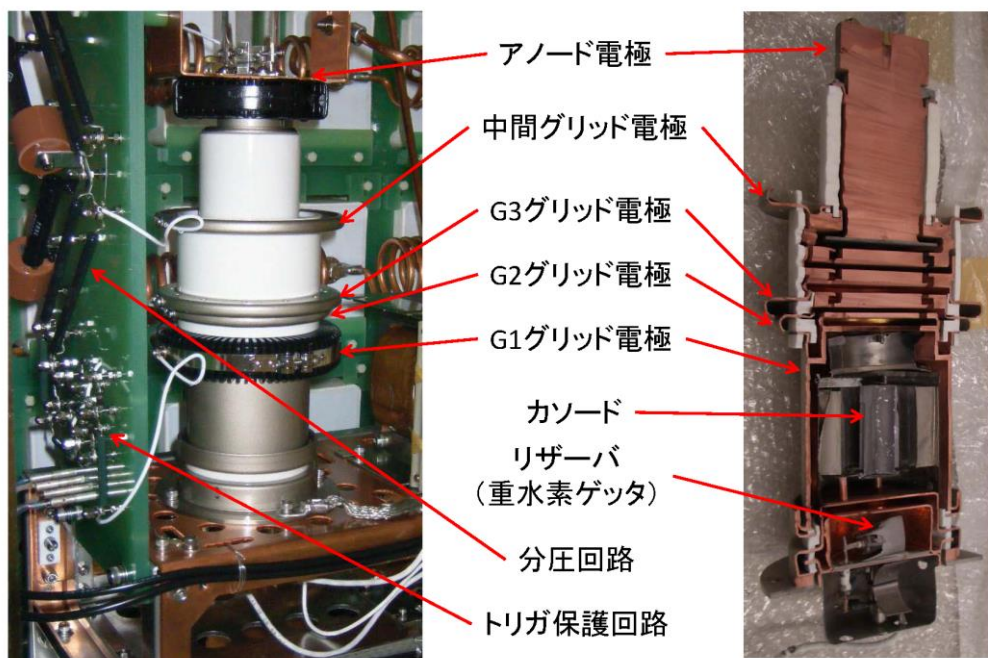
山梨明野事業所、藤野製作所

仙台、八王子、大阪、九州



大電力スイッチ素子：サイラトロン

- 高電圧 (70kV)、大電流 (10kA)、高速 (10kA/ μ s) のため、パルス電源で有効
- (重) 水素ガスをうすく充填
- 1kVのトリガパルスで水素ガスをプラズマ化させ、大電流を流す
- スイッチOFFはできない。電流が途絶えると、プラズマが再結合してOFFになる



取り組みの背景

- 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
 - 高価であるが、寿命が数万時間と比較的短く個体差が大きい
 - 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
 - 原価高騰と為替変動によりここ数年で費用が倍になっている
- 故障によるトラブルを未然に防ぎつつ、永く使いたい
 - メンテナンス時、稼働時間、自爆回数、クライストロン電圧(Vk)波形、グリッド電圧波形を参考にして交換を行う
 - 劣化すると、グリッド電圧波形の変化がある
 - 残留電圧変動、立ち上がり最大値の増加と立ち下がりの発生、サージ電圧の増加、着火ディレイおよびジッタの増加

既存研究： 自爆回数によるサイラトロンの余命推定

- サイラトロンの毎時自爆回数を測定し記録する
- ベイズ推定により、自爆回数の増加傾向を検知しユニット名を出力する

データ収集

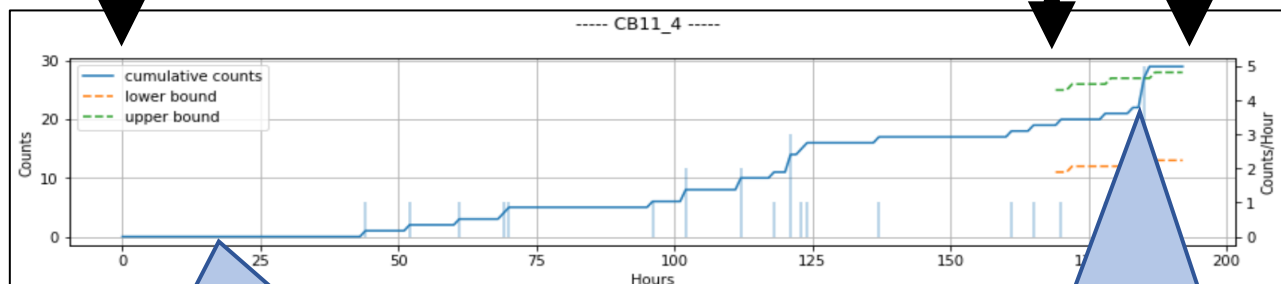
```
cecai@cecai-System-Product-Name: ~/Desktop/theme_t
(mdaqweb) cecai@cecai-System-Product-Name:~/Desktop/theme_thy_trial$ ls -l ./report/input/20220425
合計 35000
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 139182 4月 26 09:39 raw_data_cb01_1_cnt.pickle
-rw-rw-r-- 1 cecai cecai 277150 4月 26 09:39 raw_data_cb01_1_run_time.pickle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

```
cecai@cecai-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
```

判定日前7日分のデータを学習データとする

判定日



毎時の自爆回数の累計

累計予測値が95%信頼区間超過

引用： Y. Sato *et al.*, “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”, PASJ2022

取り組みの目的と方法

- 目的: グリッド電圧波形からサイラトロンの劣化の進み具合を推定
 - 計画的にサイラトロンの交換作業を行う
 - 突然の故障によるダウンタイムを低減する
 - より精度の高い余命推定を行う
 - サイラトロンを可能な限り永く使う
- 方法: 機械学習により、サイラトロンの劣化度を推定できるか検討
 - 主成分分析によるグリッド電圧波形データの次元削減と分析
 - データの特徴を捉える
 - 複数の手法による異常検知
 - ロジスティック回帰、サポートベクターマシン、線形回帰
 - 劣化度と推定稼働時間を出力するソフトウェアを開発
 - 劣化度の指標化、可視化

学習・検証に使用するデータ

• データは3種類用いる

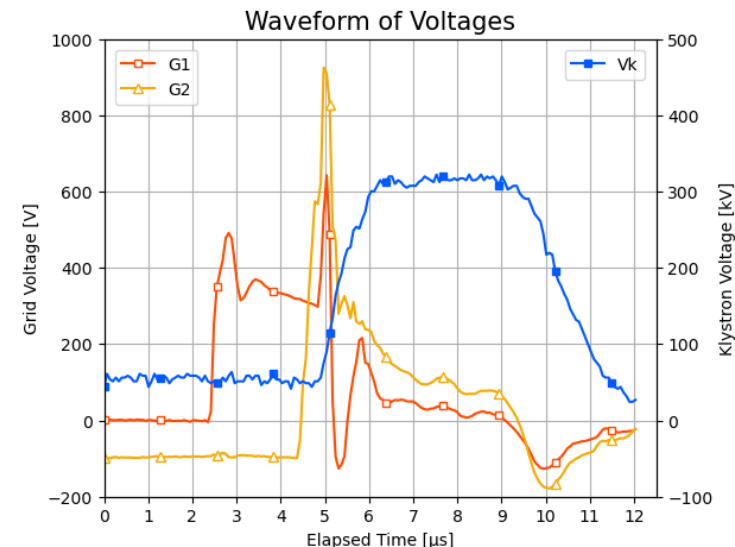
- G1グリッド電圧波形(入力1)
- G2グリッド電圧波形(入力2)
- クライストロン電圧(Vk)波形(出力)

• サイラトロンの蓄積データを用いる

- 各個体につき約100ショット分のデータ※
- 自爆回数が多い個体を除く
- サージが顕著な個体を“故障”、それ以外を“正常”とラベル付けする

• パルス印加直後のデータのみ使用

- サンプリング：14.875 MHz (約67ns)
- 約12 μ sまでのデータ (先頭を除く)
 - G1は160サンプル、G2,Vkは140サンプル



稼働時間	“正常”	“故障”	計
0～5000時間	13個	0個	13個
5000～10000時間	4個	0個	4個
10000～15000時間	2個	1個	3個
15000～20000時間	0個	5個	5個
20000～25000時間	0個	7個	7個
25000～30000時間	0個	1個	1個
30000～35000時間	0個	3個	3個
計	19個	17個	36個

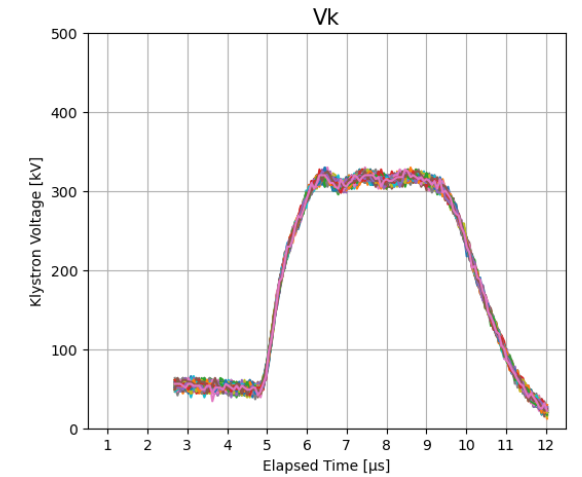
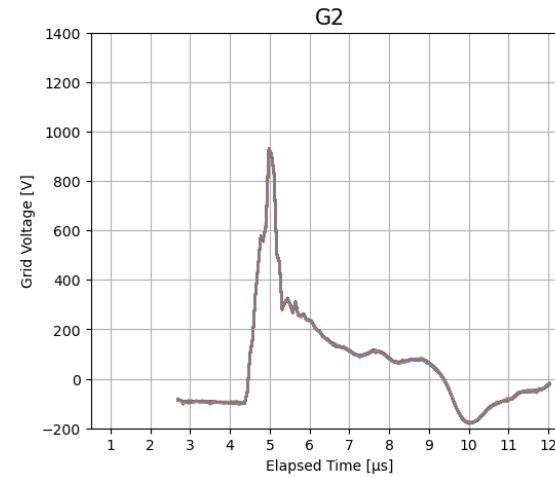
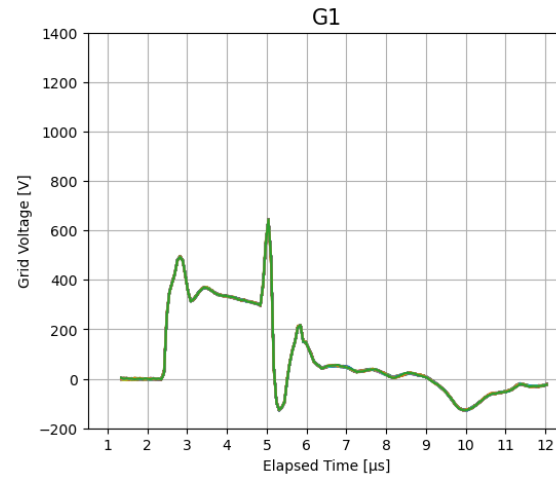
※正常に測定できなかったデータ(ジッタ、テストスタンド由来のノイズ等)は、除いた(平均10%程度)

波形の分析 — 主成分分析

- データのどの部分に着目するか自動で決定する
 - 手順1： 主成分の係数（着目するポイント）を計算する
 - 手順2： 主成分を計算する（少数の値になる→次元削減）
- 全個体の半数を学習データ、残りを検証データとする
 - “正常”と“故障”がバランスよく含まれるようにする
- 学習データで主成分分析を行う
 - 主成分の係数を計算（後のスライドで詳細説明）
 - 主成分の計算、次元削減(160/140サンプルから数サンプルへの変換)
→主成分数6で充分と判断(累積寄与率90%超過)

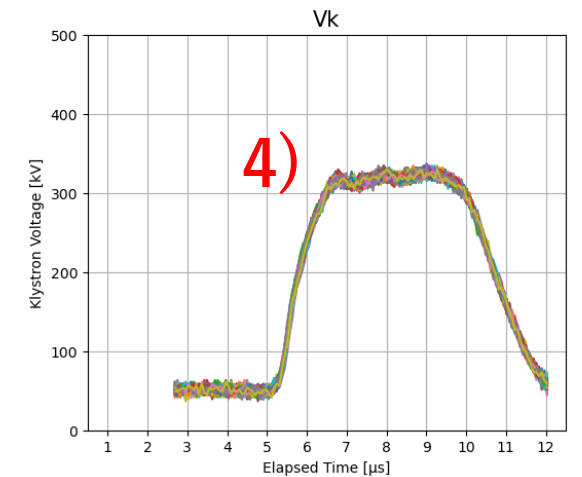
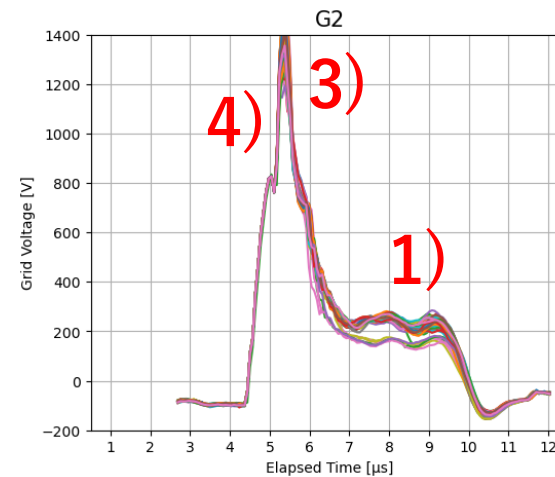
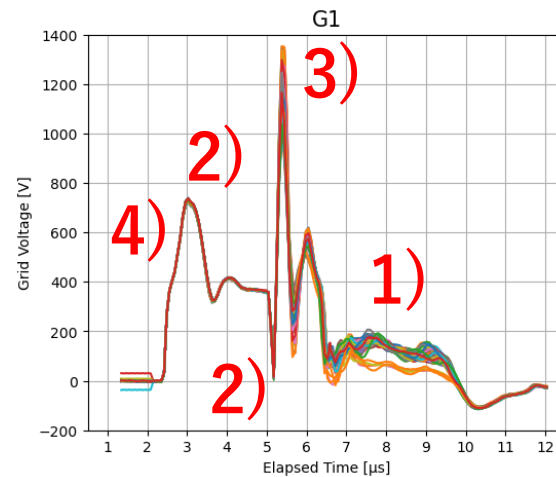
典型的なデータの例

- 新品
 - 0時間



- 劣化品
 - 13700時間

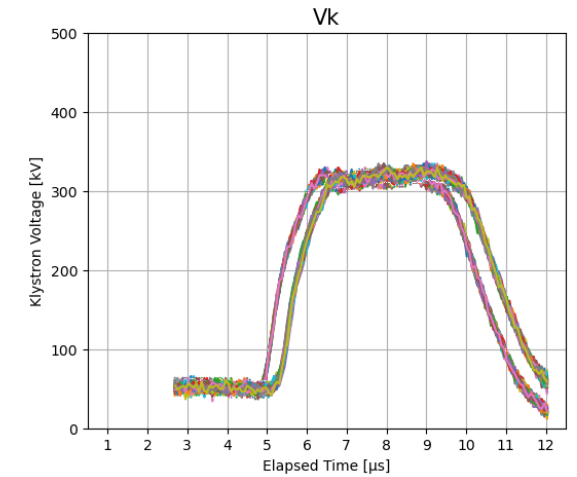
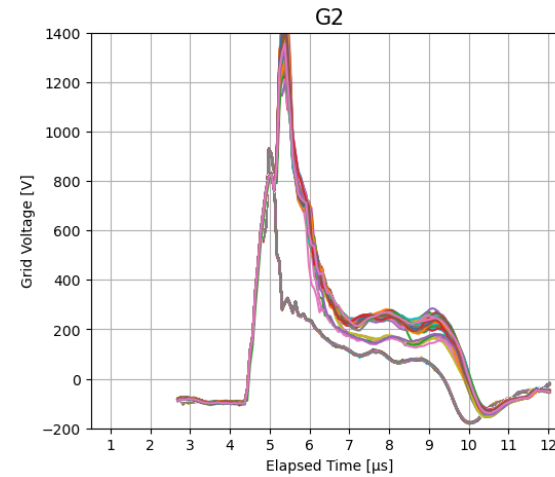
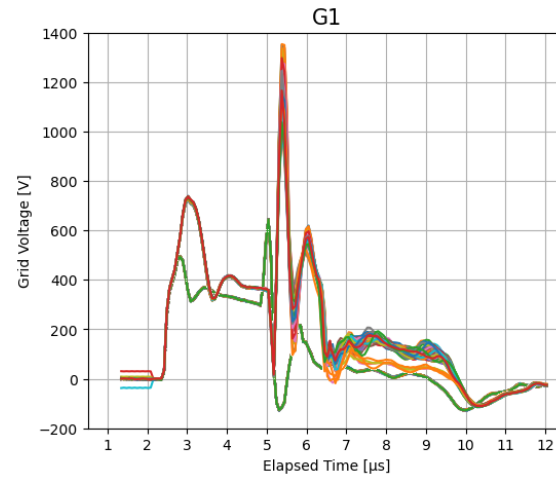
※約100ショットのデータを重畳して表示



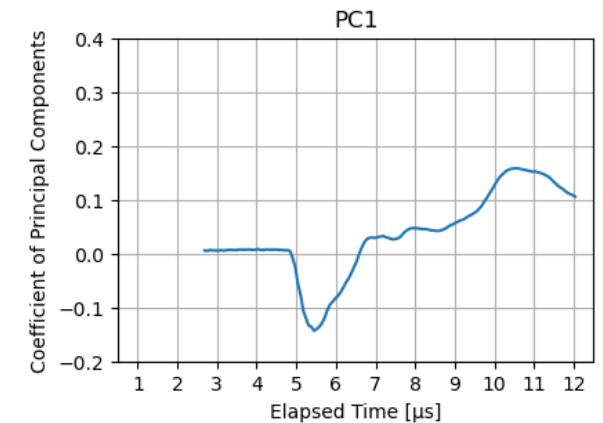
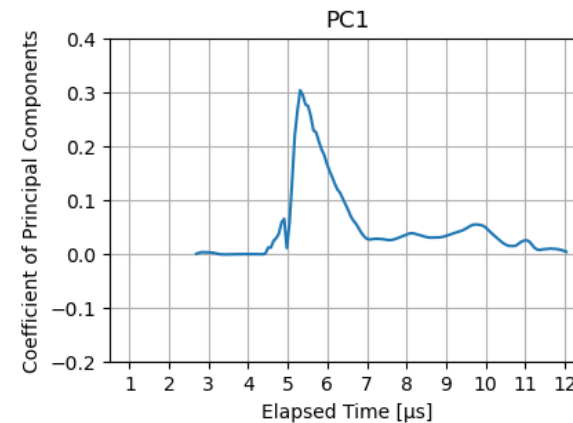
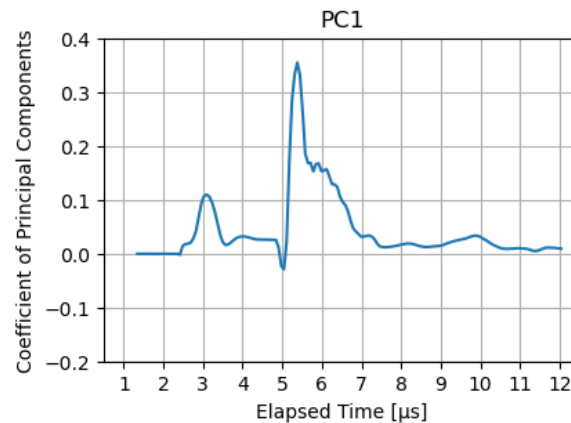
1)残留電圧変動、2)立ち上がり最大値の増加と立ち下がりの発生、3)サージ電圧の増加、4)着火ディレイ・ジッタの増加

主成分分析の結果

- 新品/劣化品
 - 重畳して表示



- 主成分の係数
 - どこが重要な値かを示す

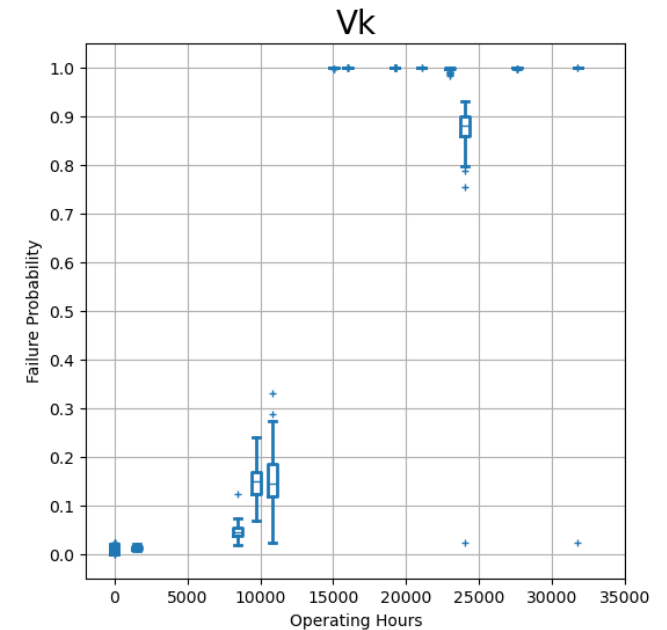
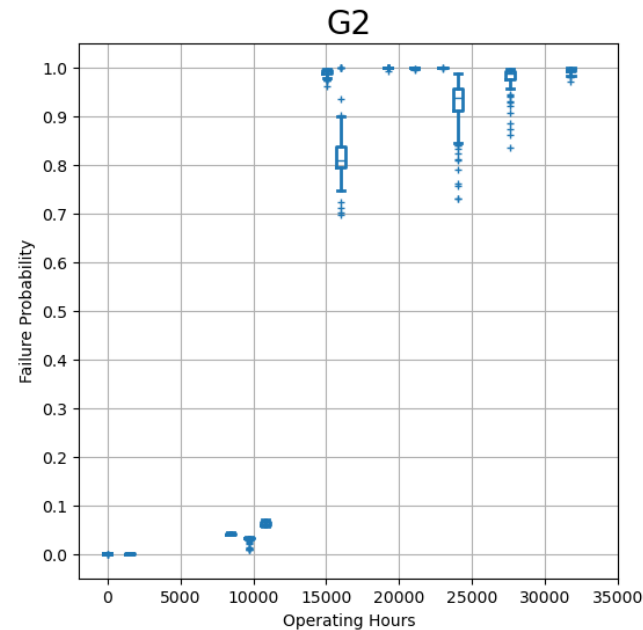
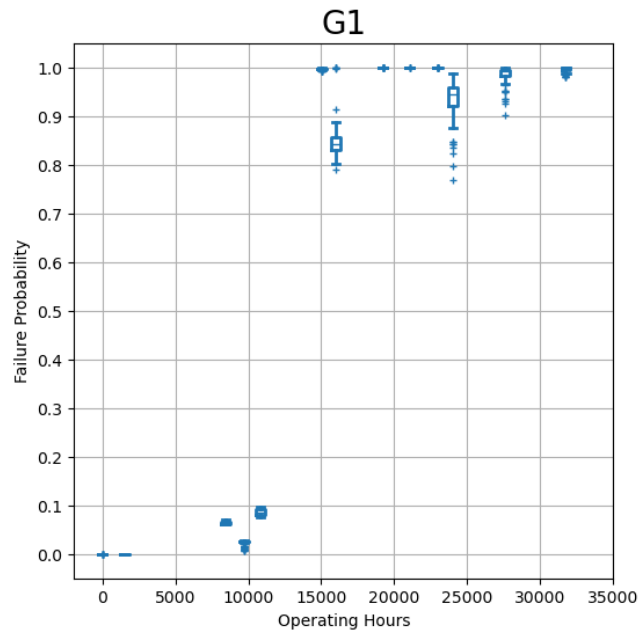


※第2主成分以降は割愛

⇒サージ、立ち上がり最大値、ディレイを重要視していることが分かる

故障の分類1 — ロジスティック回帰

- 主成分からロジスティック回帰で正常/故障の分類を行う
 - グリッドサーチによりパラメータを決定する



検証データの故障確率を箱ひげ図で表す。横軸は稼働時間。

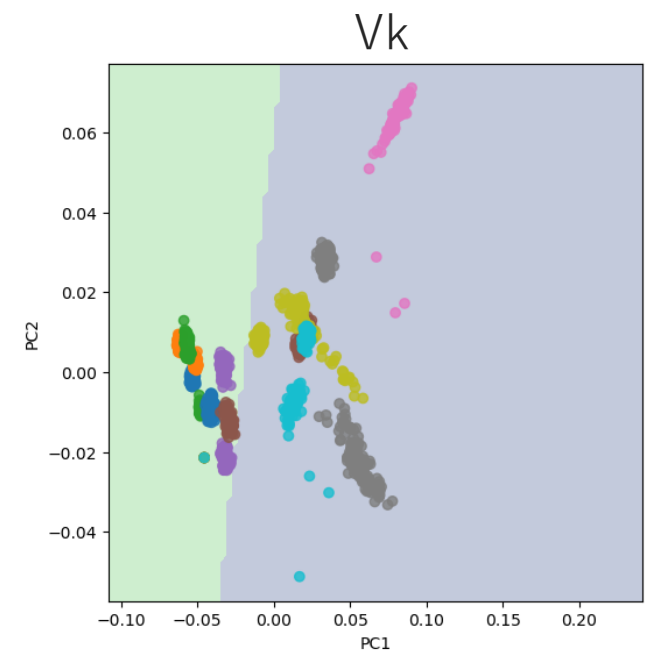
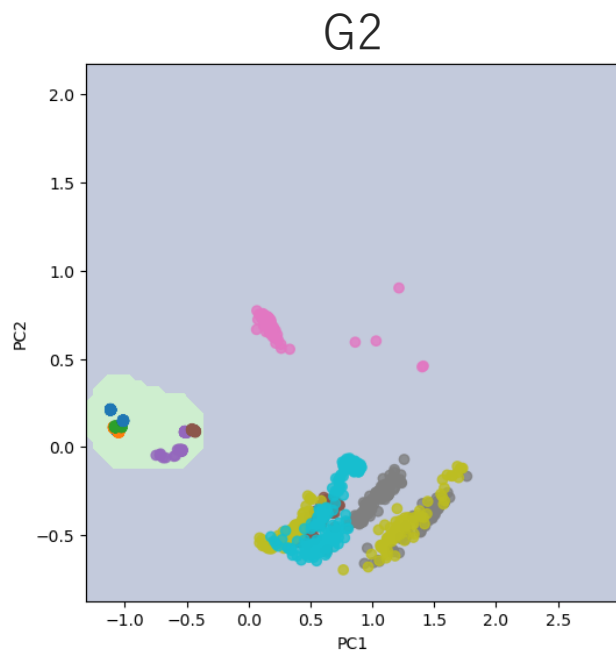
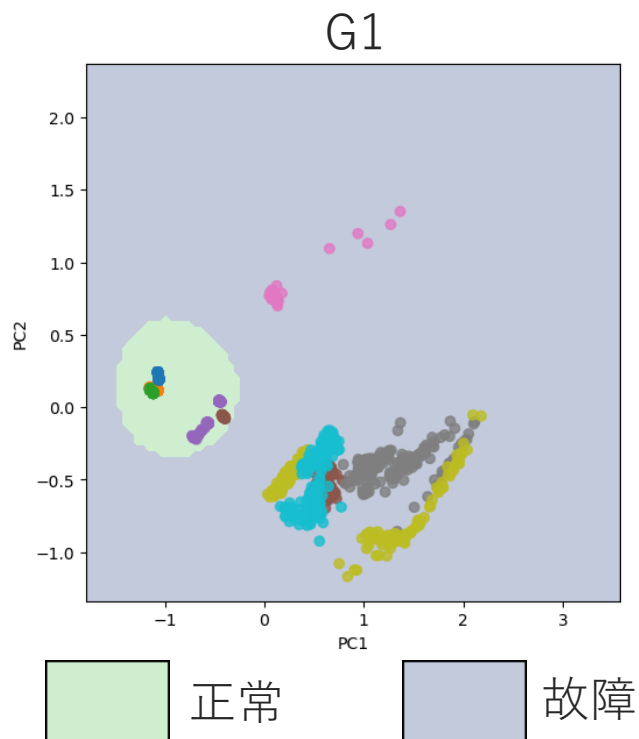
⇒新品は確率0%、15,000時間以上は100%に近く
中間的な時間のものはその間に少し変化している

学習データ： 全個体の半数(正常/異常個体の割合同等)
検証データ： 残りのデータ

故障の分類2 — サポートベクターマシン

• 主成分からサポートベクターマシンで正常/故障の分類を行う

- グリッドサーチによりパラメータを決定する

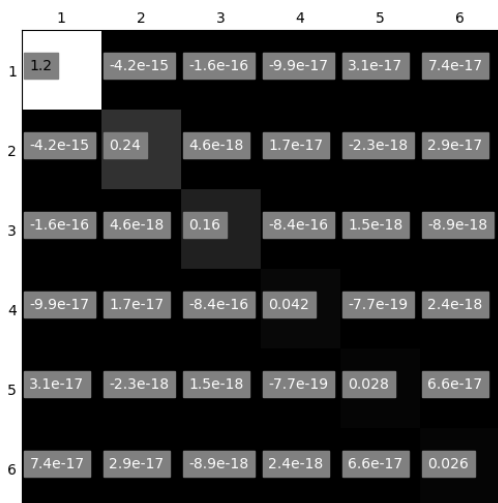


主成分1,2のみを表現した簡易的な図。同じ色の点は同じ個体を表す。

学習データ： 全個体の半数(正常/異常個体の割合同等)
検証データ： 残りのデータ

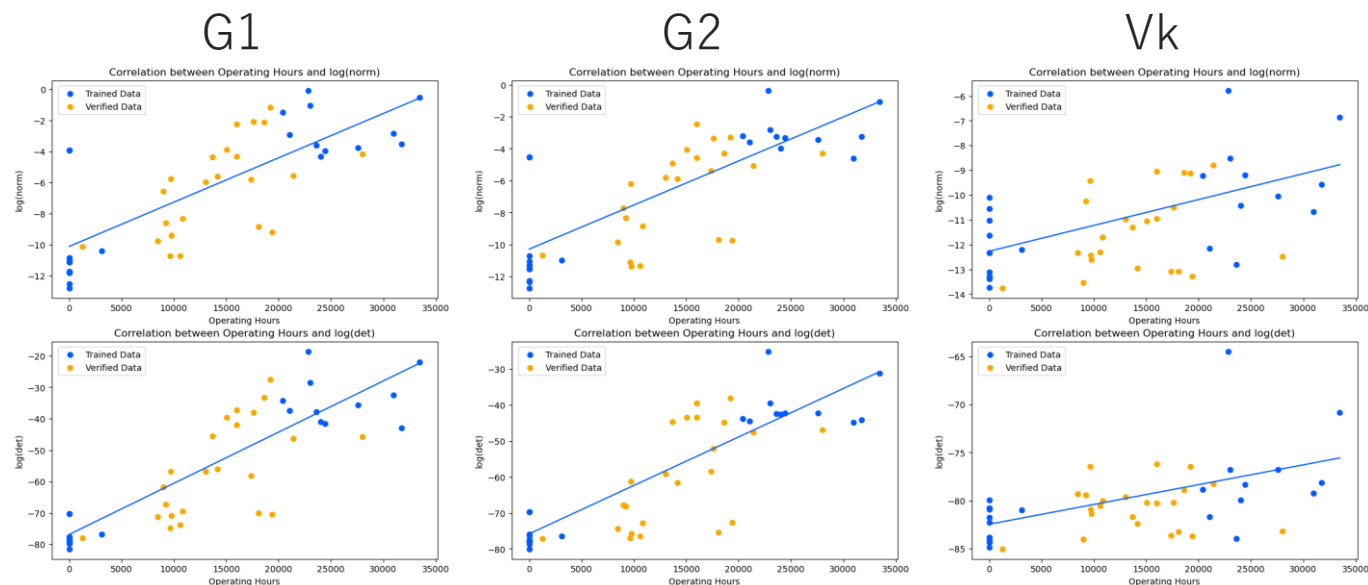
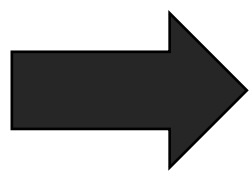
稼働時間推定 — 線形回帰

- 主成分の共分散行列から線形回帰で稼働時間を推定する
 - 複数ショットのばらつき（共分散）を使用する



主成分の共分散行列(G1)

共分散行列の
行列ノルム(L2)
と
行列式
を計算する



上段：行列ノルム(L2)の自然対数 下段：行列式の自然対数
横軸：稼働時間 青点：学習データ 橙点：検証データ

相関係数(学習データ)	G1	G2	Vk
L2ノルムの自然対数	0.83	0.85	0.66
行列式の自然対数	0.95	0.94	0.59

学習データ： 稼働時間が <5000時間、>20000時間の個体
検証データ： 全データ(自爆波形を含む)

開発したアプリケーション(サマリー)

- ディレクトリにデータを格納
- コマンドラインで推論実行
- 推論結果をサマリーで表示**
 - Webブラウザで表示(HTML)
 - 個別結果へのリンク

作成日：2024/06/07

サイラトロングリッド波形解析実行サマリー

サイラトロン個体	判定結果									判定
	故障率回帰			推定稼働時間			SVM故障確率			
	G1	G2	Vk	G1	G2	Vk	G1	G2	Vk	
sn2010_33504h	1.00	1.00	0.99	33623	33847	51897	1.00	1.00	1.00	故障
sn2219_17592h	0.44	0.58	0.64	28083	25104	16994	1.00	1.00	1.00	故障
sn2424_28000h	0.95	0.90	0.95	21628	23507	-2070	1.00	1.00	1.00	故障
sn2899_31000h	0.99	0.99	1.00	25236	20769	15286	1.00	1.00	1.00	故障
sn3939_10600h	0.04	0.03	0.03	-2089	-3313	-20	0.00	0.00	0.00	正常
sn4086_13000h	0.08	0.05	0.04	15773	18472	12674	0.00	0.00	0.00	正常
sn4469_1536h	0.00	0.00	0.01	-5893	-7020	-936	0.00	0.00	0.00	正常
sn4557_0h	0.00	0.00	0.00	-10027	-8620	-10649	0.00	0.00	0.00	正常

SVM故障確率のいずれかが0.5超過で個体を「故障」と判定(しきい値は設定可能)

ロジスティック回帰
故障確率の平均

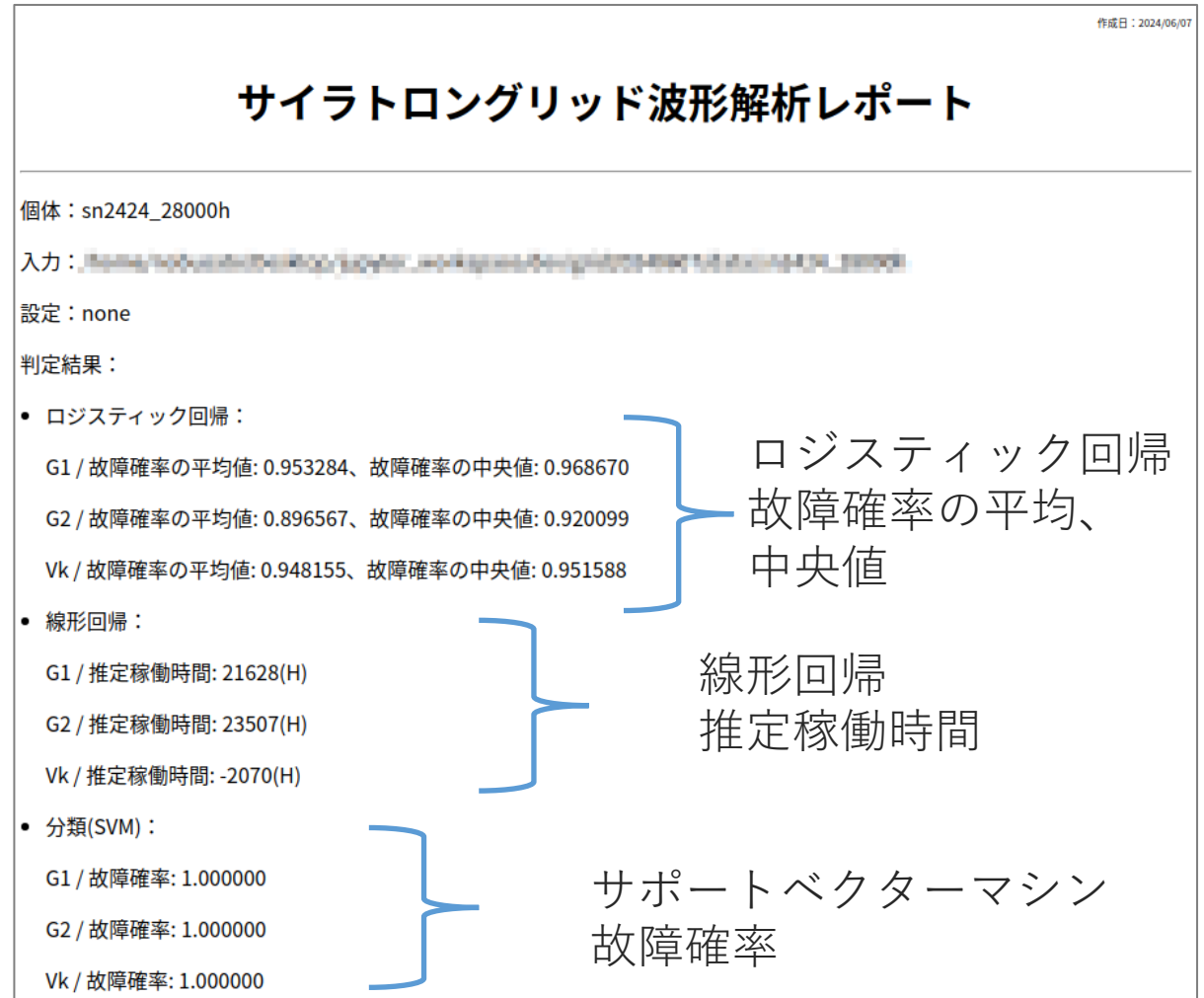
線形回帰
推定稼働時間

サポートベクターマシン
故障確率

開発したアプリケーション(個体別)

• 個体別の詳細画面表示

- 判定結果
- 入力波形
- 主成分の散布図行列
- 稼働時間に対する故障確率
- 分類結果図
- 主成分の共分散行列
- 共分散行列の行列ノルム、行列式
- その他



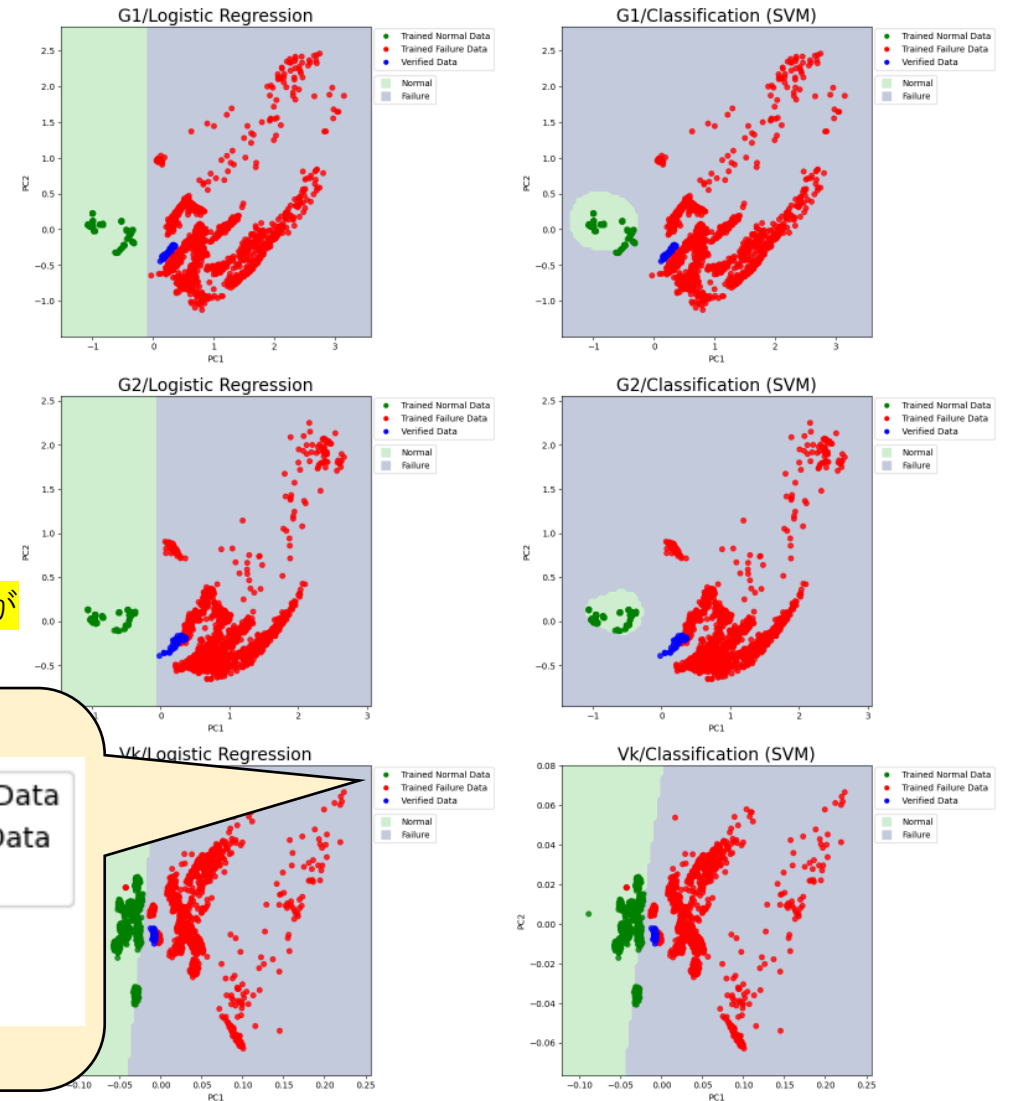
個体別の判定結果をまとめて表示

開発したアプリケーション(個体別)

• 個体別の詳細画面表示

- 判定結果
- 入力波形
- 主成分の散布図行列
- 稼働時間に対する故障確率
- **分類結果図**
- 主成分の共分散行列
- 共分散行列の行列ノルム、行列式
- その他

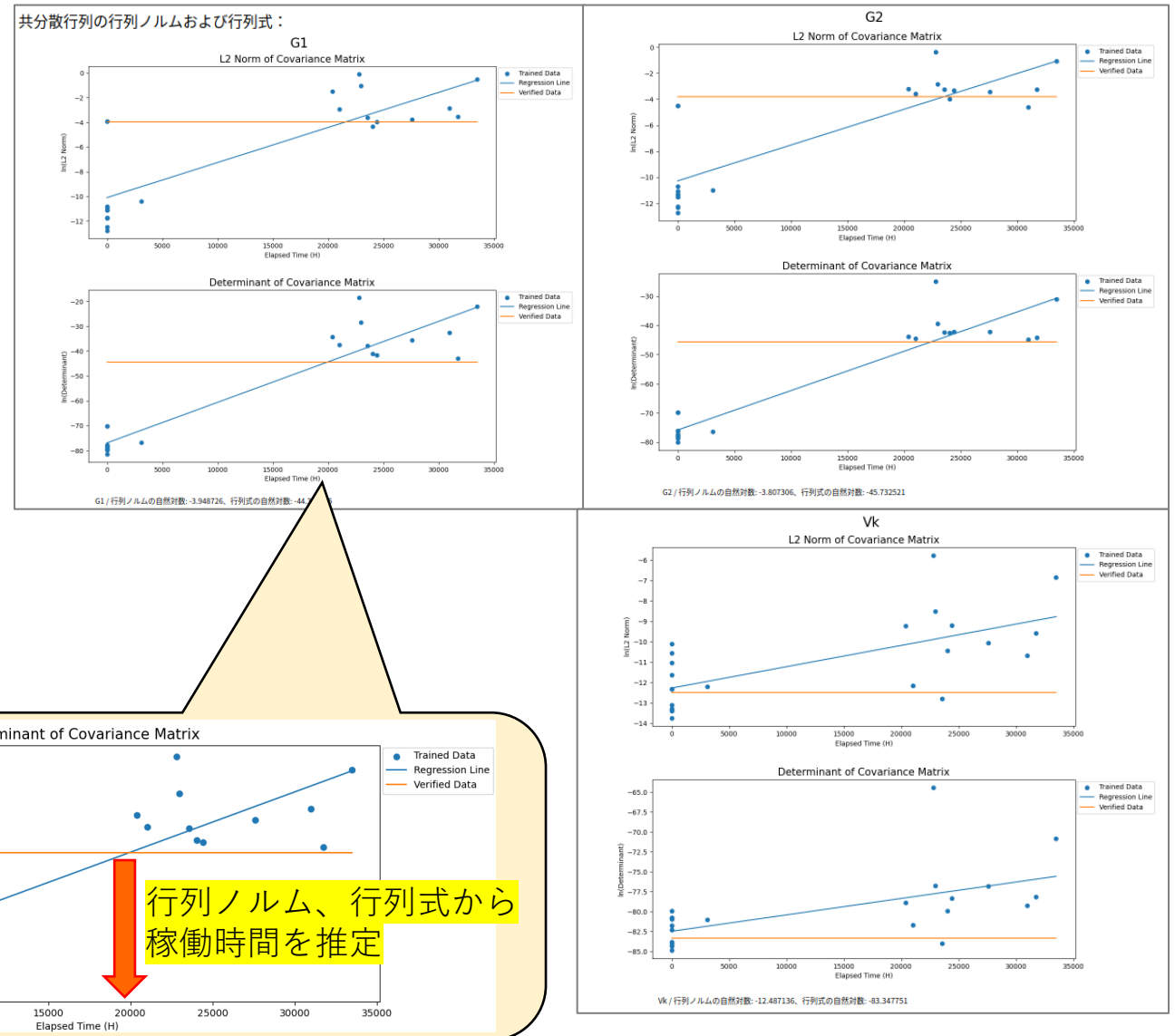
第1,第2主成分の分類：



開発したアプリケーション(個体別)

• 個体別の詳細画面表示

- 判定結果
- 入力波形
- 主成分の散布図行列
- 稼働時間に対する故障確率
- 分類結果図
- 主成分の共分散行列
- 共分散行列の行列ノルム、行列式
- その他



新規データでの動作結果

- SACLAに設置されたサーバーに開発したアプリケーションをインストール
- 現地で新たに取得したグリッド電圧波形データを用いて開発したアプリケーションを動作確認実施(2024/3/7)
 - 個体あたり20秒程度の時間で結果の出力完了
 - 新品と故障品のデータを入力→想定通りに異常を検知できた
 - 新品と故障品の分類成功
 - 故障率、推定稼働時間が想定範囲内
 - 波形の様態と可視化結果が一致

まとめ

- SACLAのグリッド電圧波形データを用いてサイラトロンの異常検知を行うソフトウェアを開発した
 - ロジスティック回帰による正常/故障の分類
 - サポートベクターマシンによる正常/故障の分類
 - 線形回帰による稼働時間推定
 - HTMLによるレポート出力
- 十分な性能が出ることを確認した
 - 新品と故障品をほぼ100%分類できる
 - 十分な精度で稼働時間推定ができる
- 今後、このソフトウェアをSACLAの加速器全体に展開していく
 - 最小限のデータ(G1/G2/Vk)への絞り込み
 - グリッド電圧波形の測定と推定の最適化