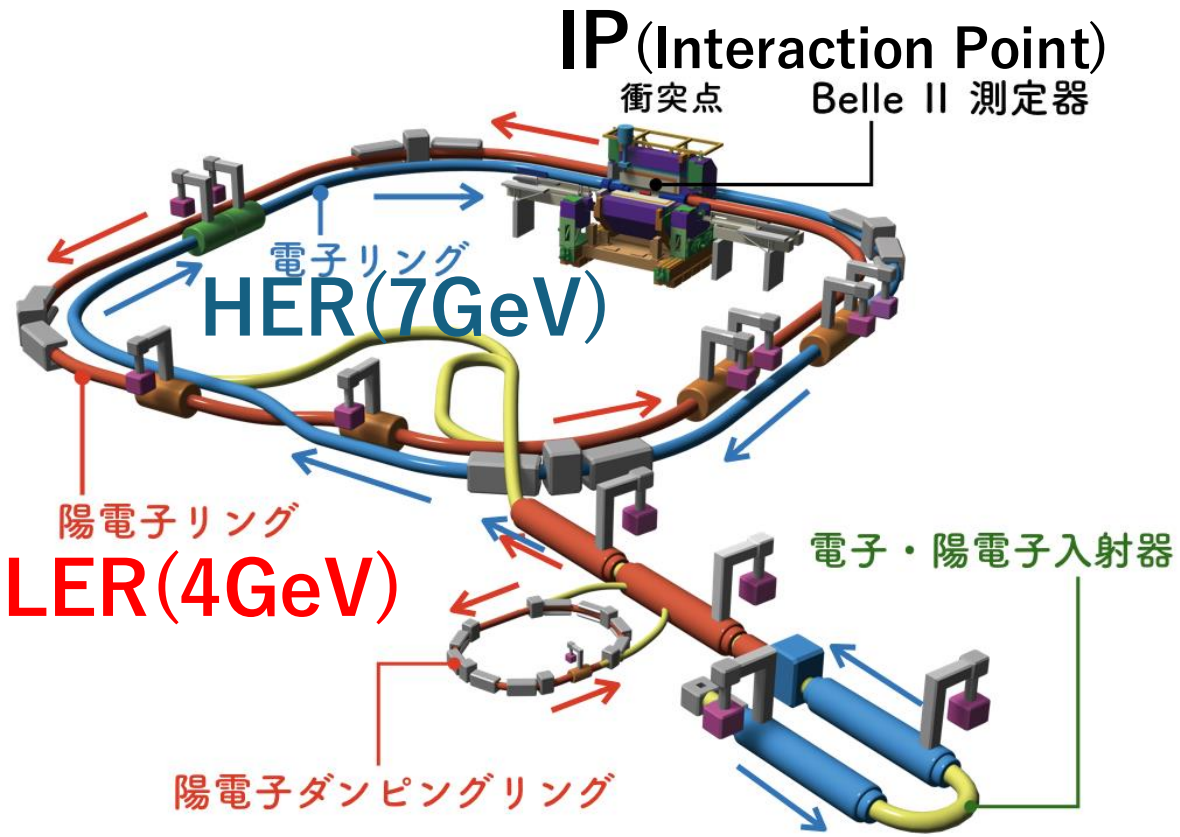
# SuperKEKB加速器における ビーム衝突パラメータ調整の高度化

瀧澤陸[A], 原康二[B, C], 住澤一高[B, C, D], 中山浩幸[B, C], 後田裕[A, B, C]

東大理[A], KEK素核研[B], 総研大[C], 奈良女大[D]

# Belle II 実験とSuperKEKB加速器について

## Belle II 実験とSuperKEKB加速器




**Belle II 実験**は現在世界最高のLuminosityを誇る**SuperKEKB加速器**を用いた電子陽電子衝突実験

$$N = \sigma \int L\, dt$$

事象数　散乱断面積　Luminosity

事象数$N$は散乱断面積$\sigma$とLuminosity $L$の積で決まる。
物理事象を精密測定するために、 $L$の向上が不可欠

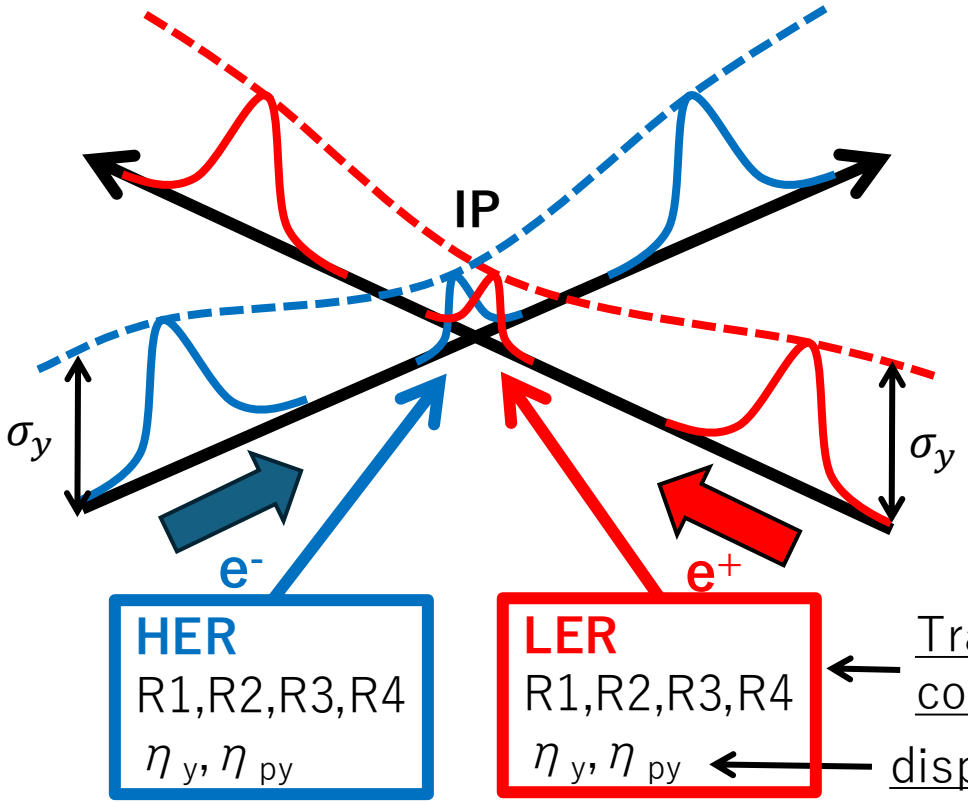
**Long Shutdown(2032年)までの目標Luminosity :**

$$\mathbf{2\times10^{35}[cm^{-2}s^{-1}]}$$

**現在の最高Luminosity:**

$$\mathbf{5.3\times10^{34}[cm^{-2}s^{-1}]}$$

# SuperKEKB加速器のビーム衝突パラメータ調整




**ビーム衝突パラメータ（IP knob parameters）**

ビーム衝突パラメータ調整は
**バックグラウンドを抑えつつ、ルミノシティが最大化**
ように行われる




**1パラメータずつ調整**
・全パラメータ空間の一部しかスキャンできていない
**オペレーターが手動で調整**
・オペレータの時間を消費している

**→多次元同時スキャンの自動化**

# ベイズ最適化について

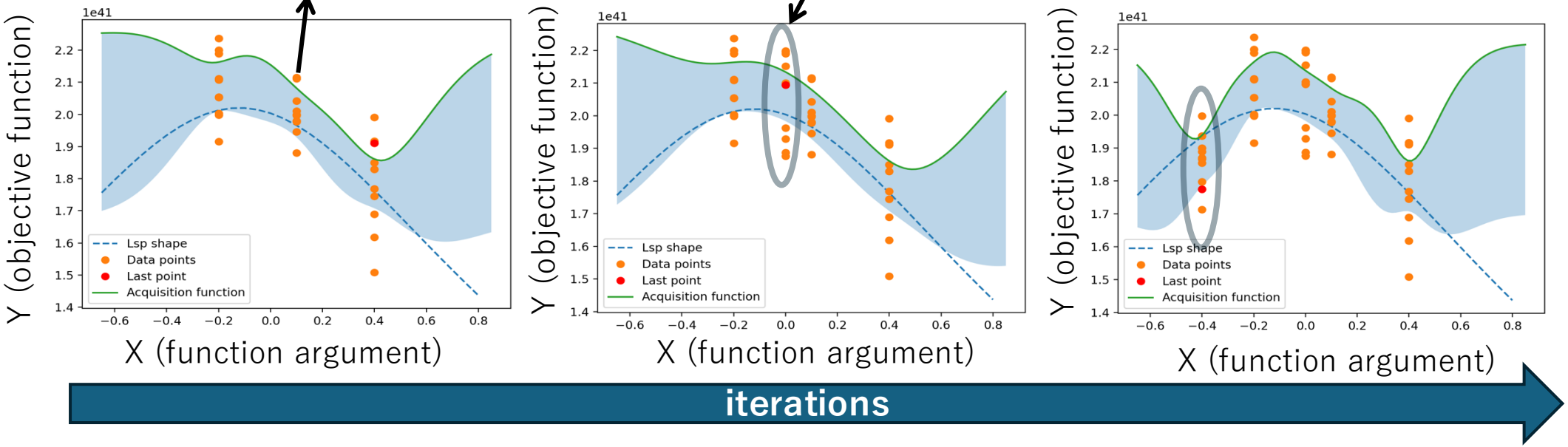
多次元同時スキャンをグリッドスキャンで行うと時間がかかりすぎる($O(N^{\text{input dim}})$)

本研究で採用した多次元同時スキャン手法：**ベイズ最適化**

**1.** ガウス過程回帰
**2.** 獲得関数の計算

**3.** 次の点をスキャン

繰り返しの中でガウス過程回帰の出力が変化していく




事前学習が必要なく、局所的な最適解にもトラップされにくい（他の調整への導入実績もある）

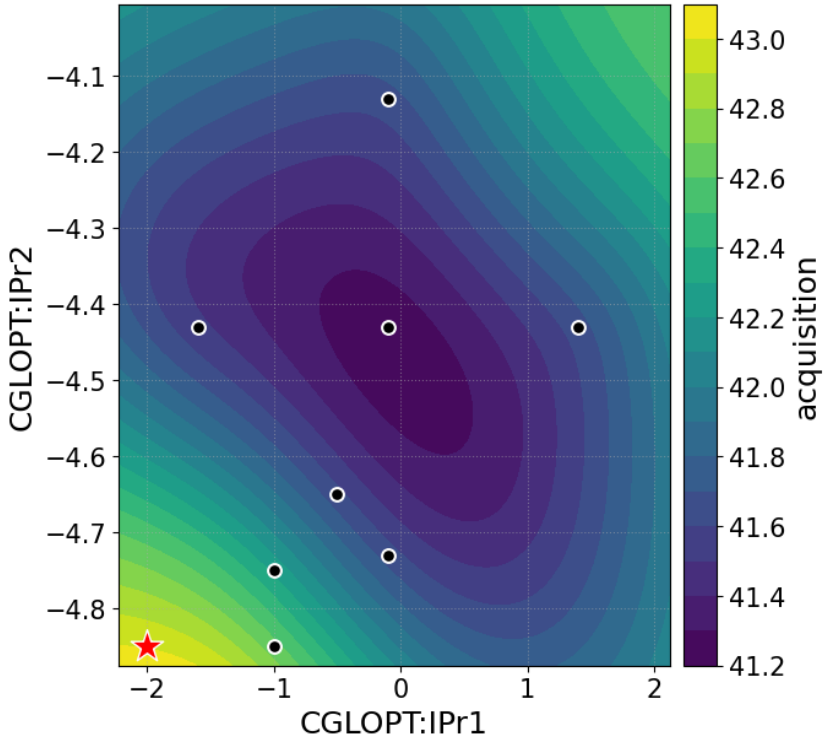
10.1103/g523-xdgf
10.1103/PhysRevAccelBeams.26.034601

# SuperKEKBでの二次元同時スキャンの実施

ベイズ最適化を行う目的関数：**Lsp**

（Luminosityよりも衝突性能を見ることが可能）

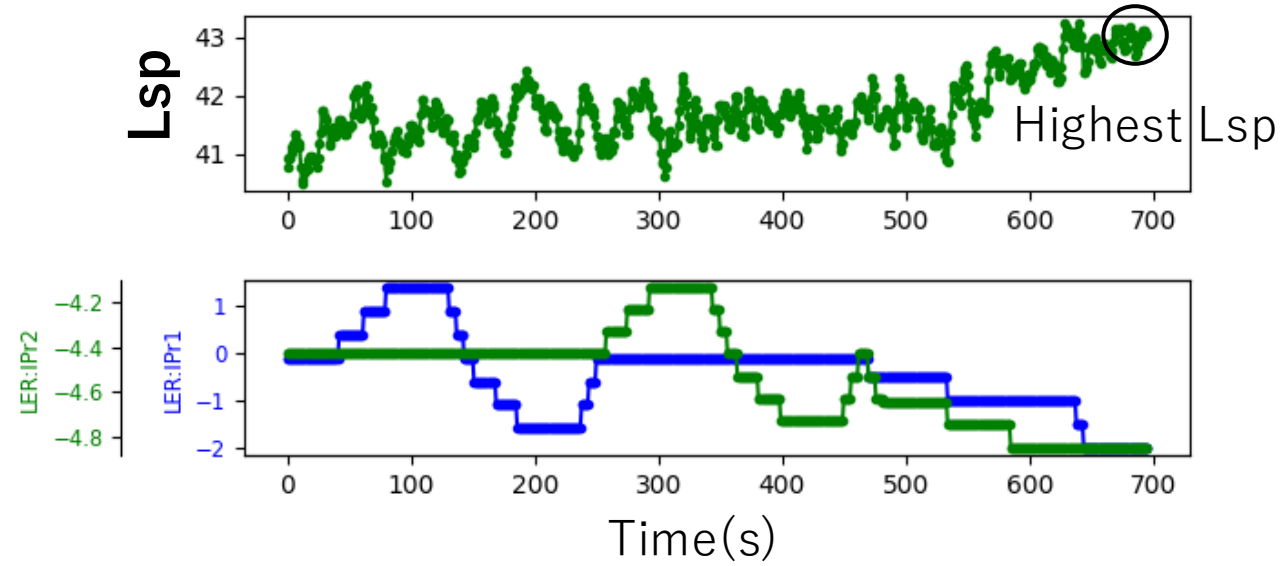
二次元スキャンの実施結果(6/26)




**Specific Luminosity(Lsp)** :

$$Lsp := \frac{L}{I_{b+} I_{b-} N_b}$$

( $I_{b+}$ / $I_{b-}$ : bunch current $N_b$ : number of bunch)




二次元スキャンではベイズ最適化が問題なく機能することを確認

このテストでは2回の一次元のスキャンでは到達できない点が最適値だった

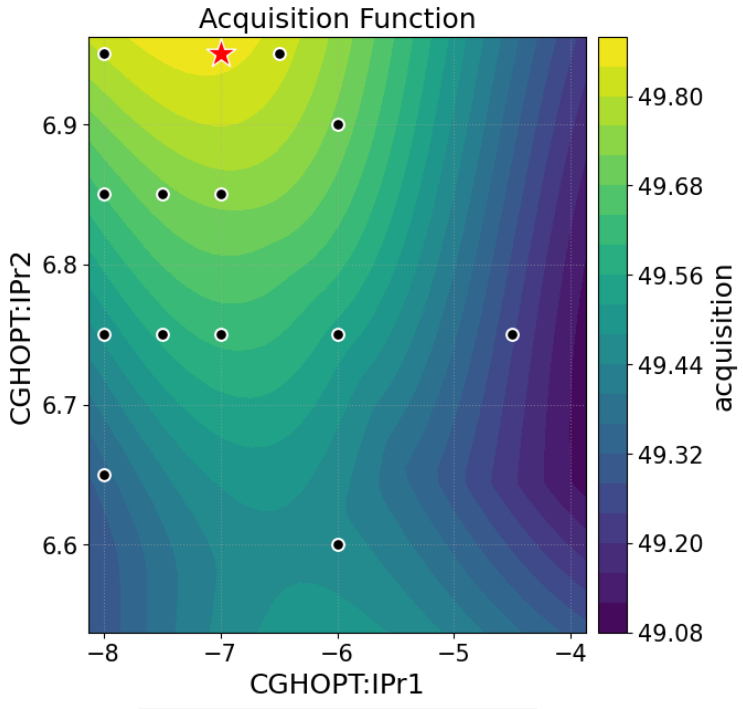
# SuperKEKBでの四次元同時スキャンの実施

## ベイズ最適化を行う目的関数：**Lsp**

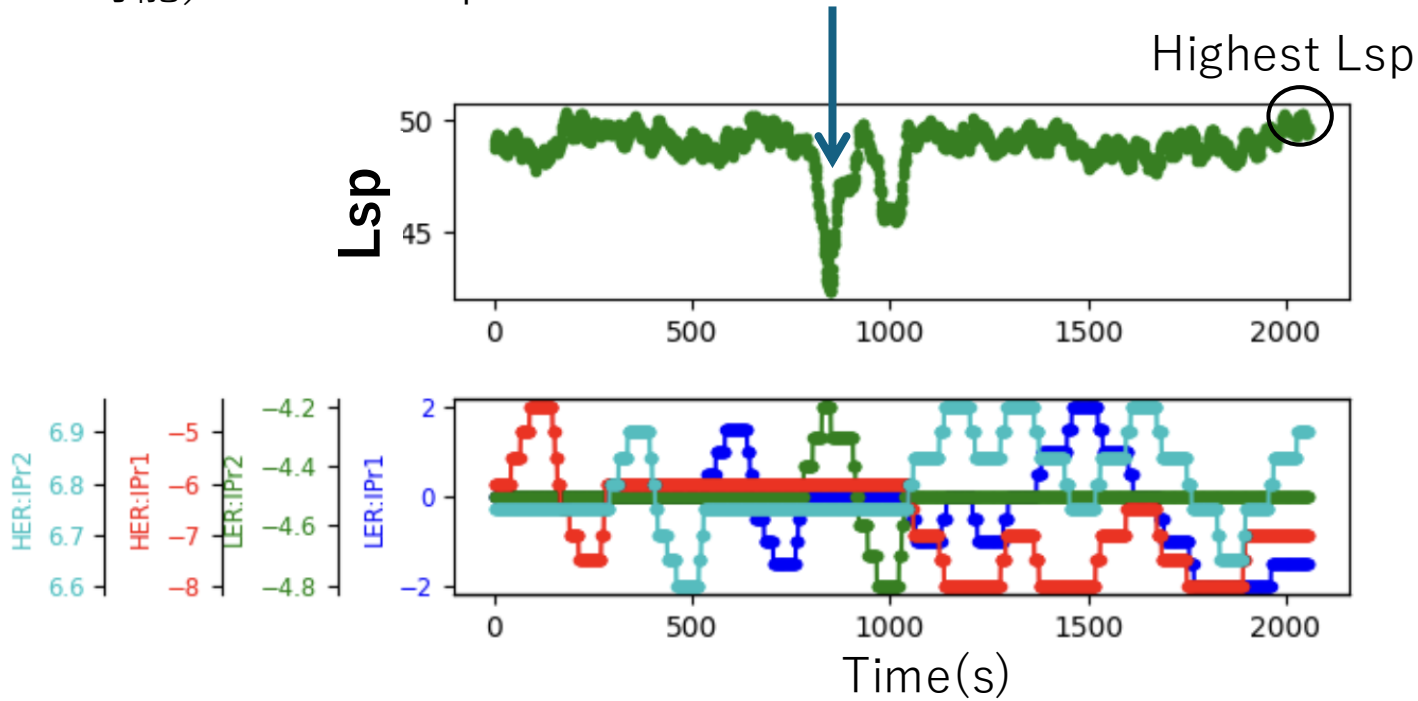
（Luminosityよりも衝突性能を見ることが可能）

四次元スキャンの実施結果(6/18)

獲得関数の一部




Lspが低すぎるところはスキャンしない




四次元スキャンでは探索時間が長くて収束しなかった

40分以上かかったのでプロセスを中断

# より高次元スキャンを可能にするツールの構造

## 次期の運転に向けた高次元スキャンの課題

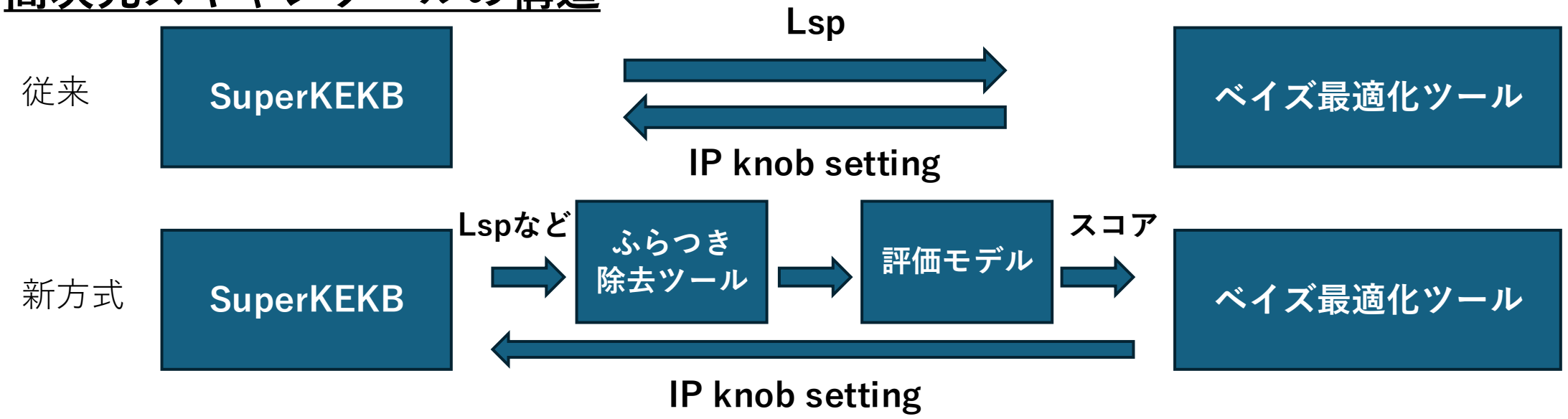
**1. パラメータ空間が増大するのでスキャンに時間がかかる**

→他の要因による衝突性能のふらつきを拾いやすくなってしまう　→**ふらつきを除去するツール**が必要

**2. より多くのパラメータを動かすことによりビームが不安定化する可能性が高くなる**

→**スキャン点をLsp以外のパラメータも見て評価するモデル**が必要

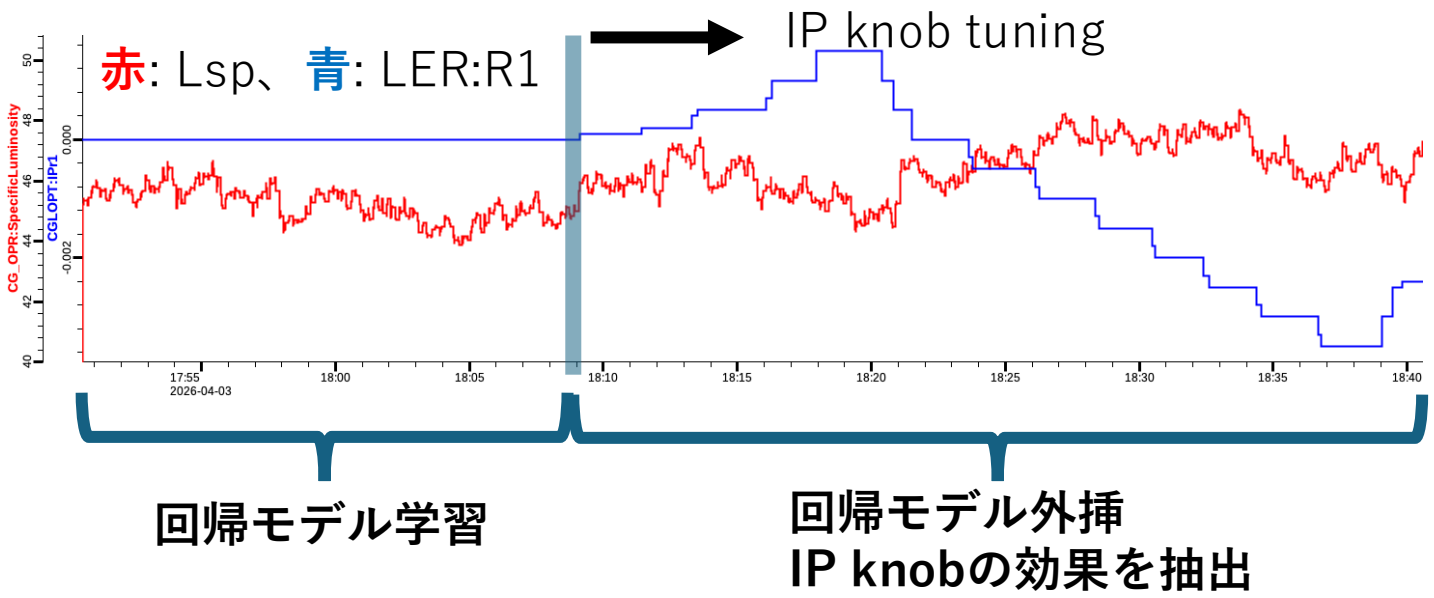
## 高次元スキャンツールの構造



# 外的要因による衝突性能のふらつきを除去するツールの開発

**測定されるLspの変動**
スキャン外：**本来のLspの値** + **外的要因によるふらつき**
スキャン中：**本来のLspの値** + **外的要因によるふらつき** + **IP knobを動かした影響**

**外的要因によるふらつき**を除去したいが、これ単体を抜き出すのは難しい
→(**本来のLspの値** + **外的要因によるふらつき** )を回帰して、これをスキャン中に外挿し
**IP knobを動かした影響**を抜き出す




**回帰モデル学習**
・選定されたパラメータを用いて
Lspを回帰
→外的要因による変動を学習

**回帰モデル外挿**
・IP knob tuning中に学習したモデルを
使って予測Lspを出力

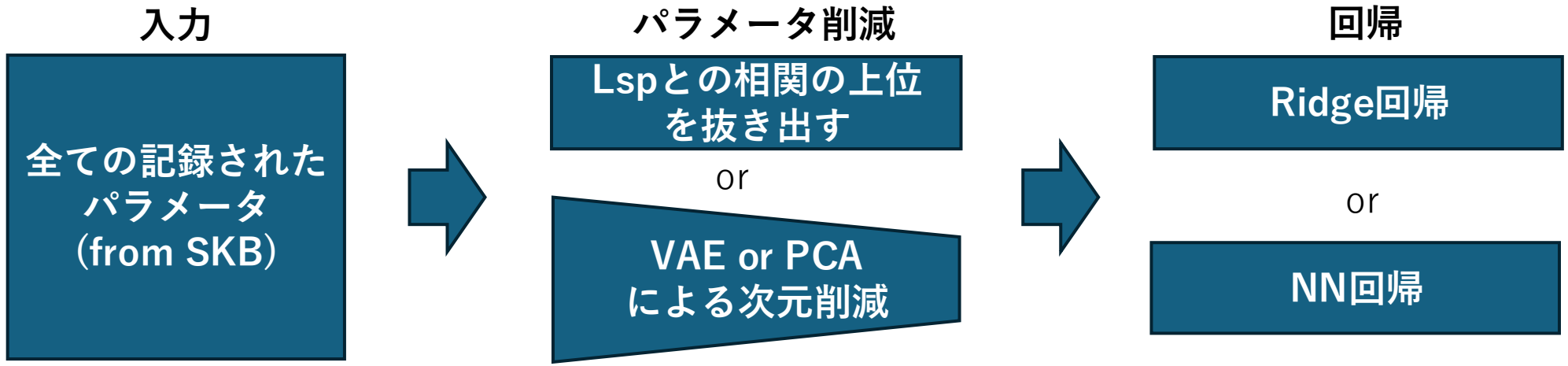
**IP knobの効果を抽出**
・予測Lspと実際のLspの比からIP knobの
影響を抽出

# 回帰モデルの要求性能と構造

**回帰対象**
Lspを5分ごとに平均したもの（リアルタイムの回帰は衝突の統計的揺らぎがあるので困難であるため）

**要求性能**
IP knob tuning以外の時に**±2%程度の精度**を持つこと（IP knobによる変動は大きく見積もって5% 程度）

**モデル構造の候補**
記録されたパラメータは30000以上なので圧縮する必要がある
全てのパラメータを回帰の入力としようとすると学習パラメータが多すぎてうまく学習が進まない

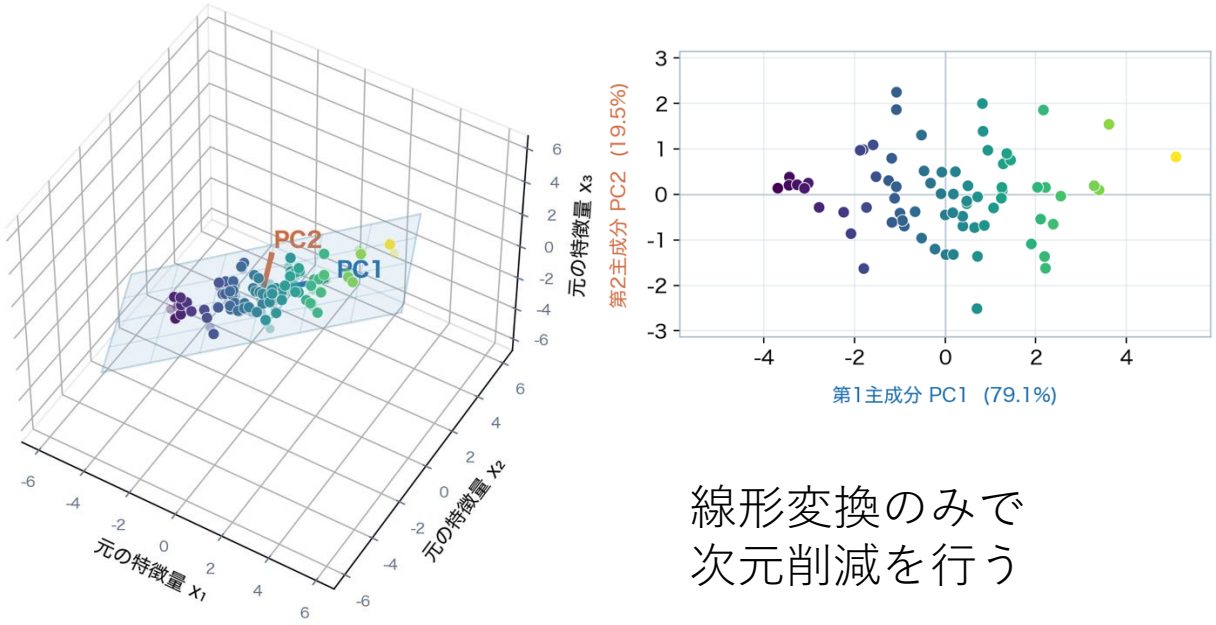


# 次元削減手法のPCAとVAEについて

相関係数の上位を抜き出すだけだと情報を落としてしまうかもしれないので、
情報量をできるだけ変えずに次元数を減らしたい

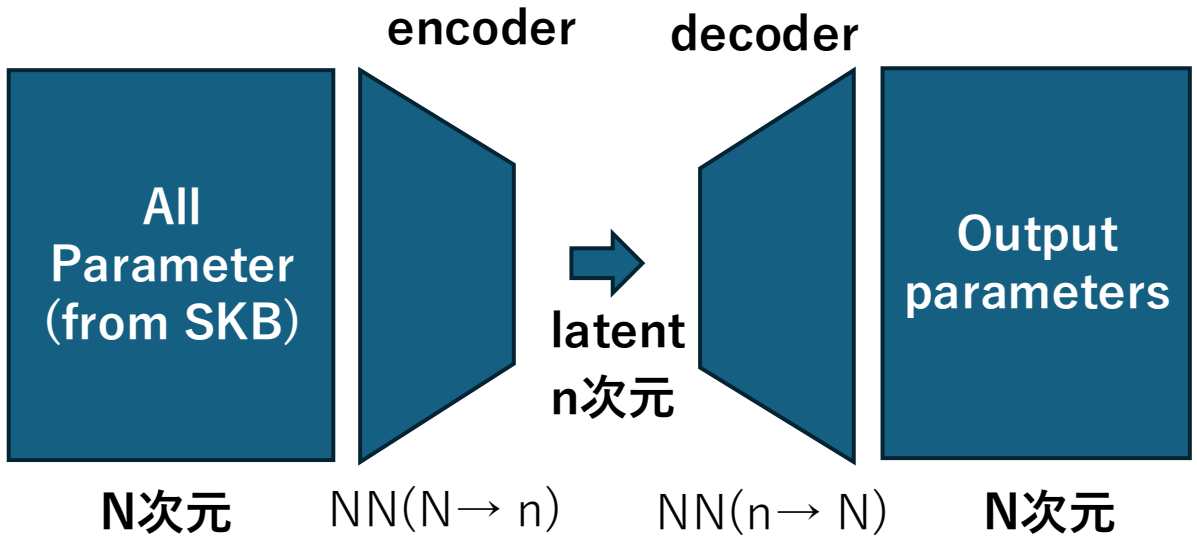
## Principal Component Analysis (PCA)

分散を最大化(情報量を維持)するように
パラメータを混合しながら次元削減




線形変換のみで
次元削減を行う

## Variational Autoencoder(VAE)

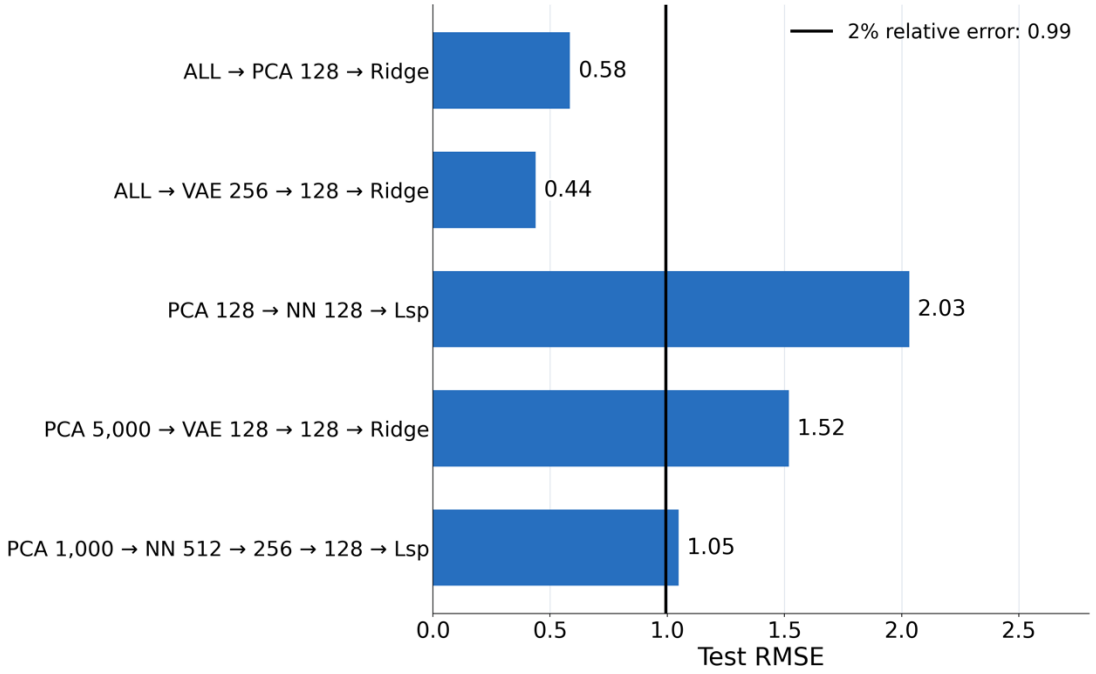



教師データは入力データとして、
圧縮→復元をした後に復元できるように圧縮を行う

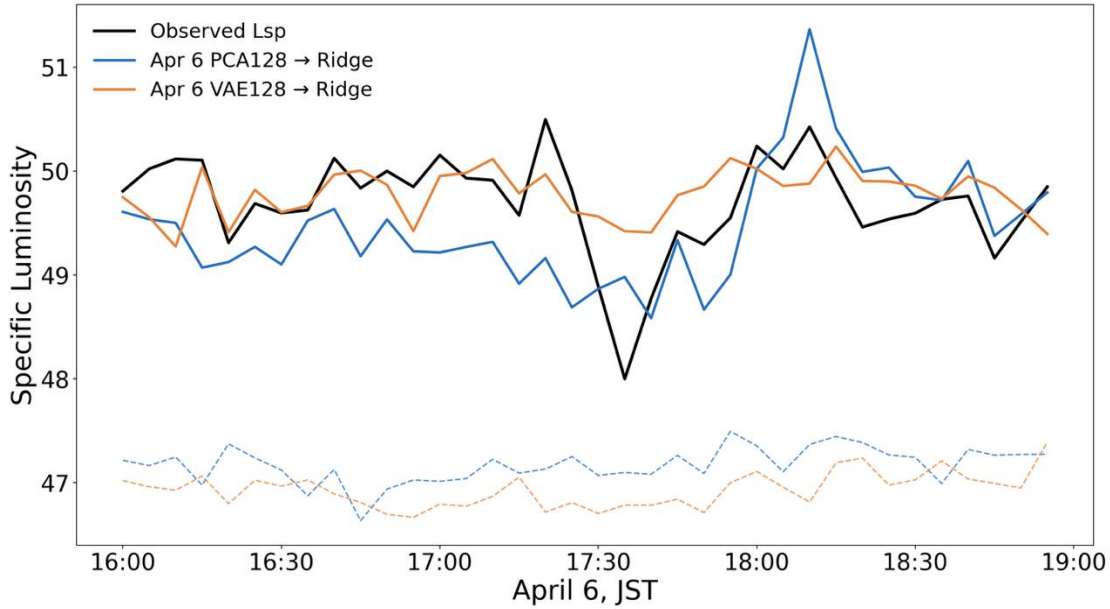
復元が完全ならlatentは入力と同じ情報量を持つ

# 回帰モデルの適用結果

いくつかのモデルが目標性能を達成

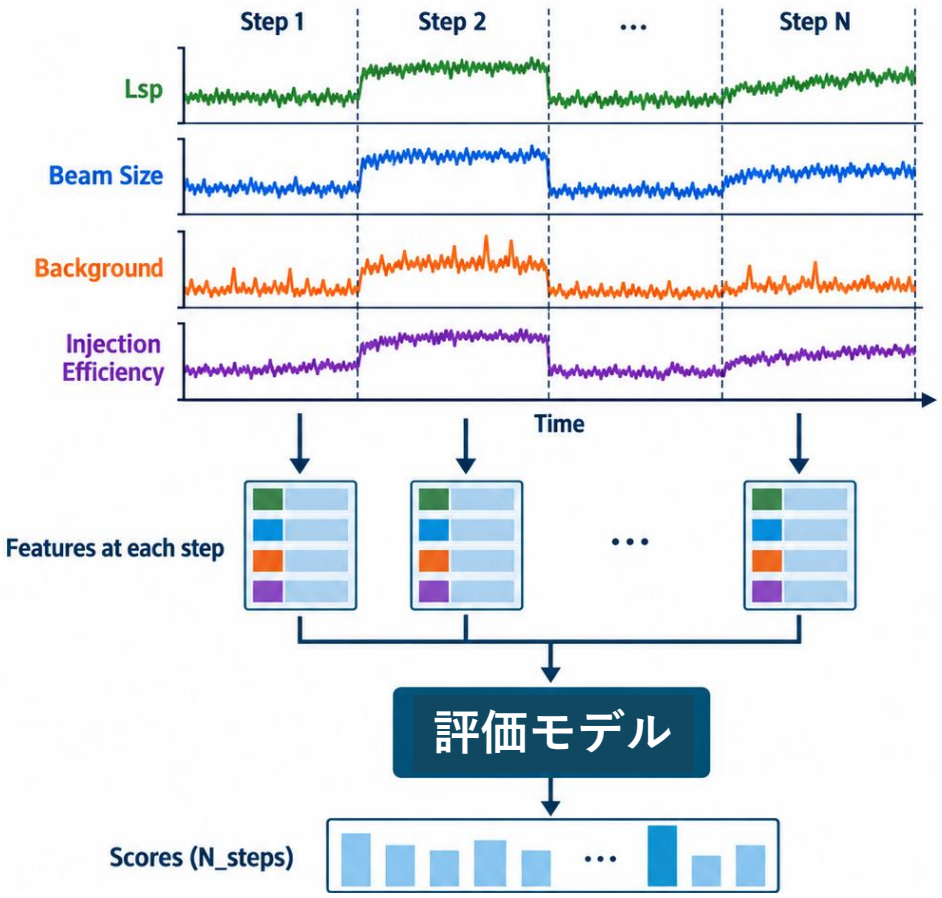



**学習期間**：4/2,4/3,4/6(0:00-14:00)
**評価期間**：4/6(14:00-19:00)




- 薄い線は4/2,3のデータでのみ学習した結果
  →**学習期間から離れると回帰性能が失われる**
- **単純なモデルの方が性能が良い傾向がある**
  →データを効率よく使用できていない可能性

# 評価モデルの開発




・明文化した評価基準が存在しない.
→過去のスキャン結果を参考に**評価基準**を制定する必要がある

**評価基準の定義**

・各stepごとに各パラメータから計算される一つの値

**入力：**

各ステップごとに

{IP knob; Lsp, BackGround, BeamSize, injection efficiency}$_i$
$(1 \leq i \leq N_{steps})$

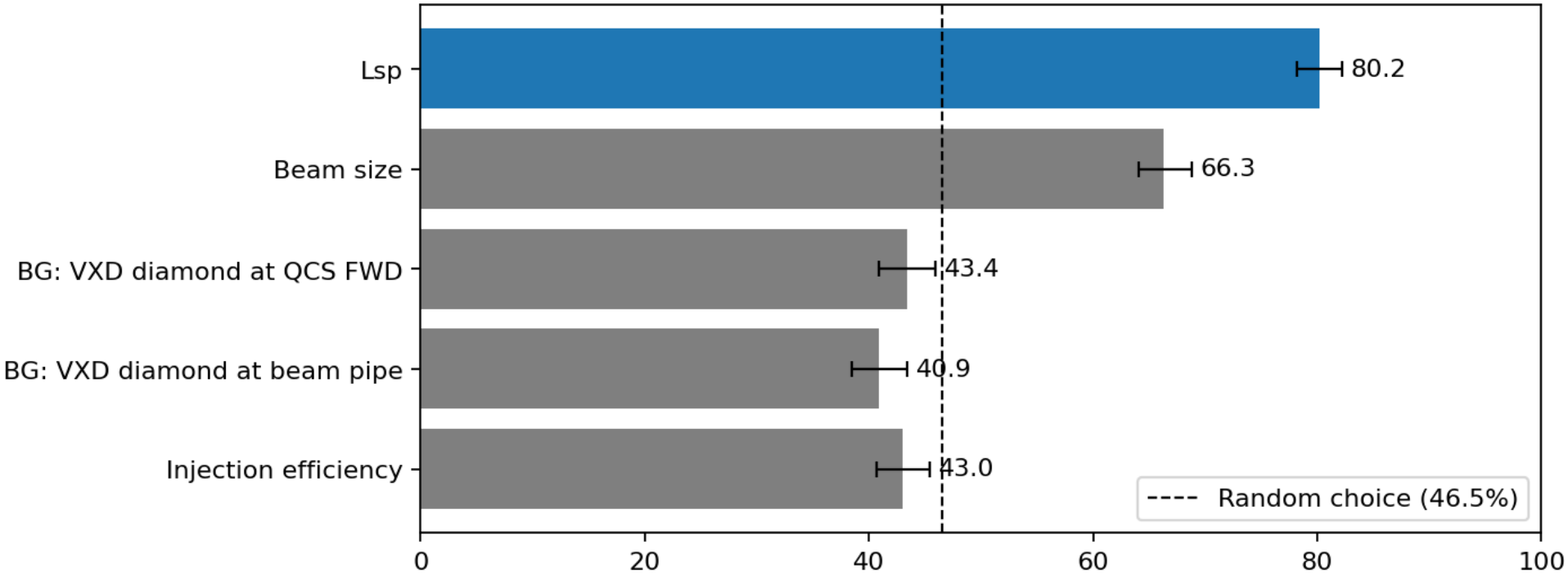
**出力：**

各ステップごとに一つの値

**データセット：**

2024年と2025年の全てのIP knob tuning (~2,000 samples)

# 評価モデルの教師について

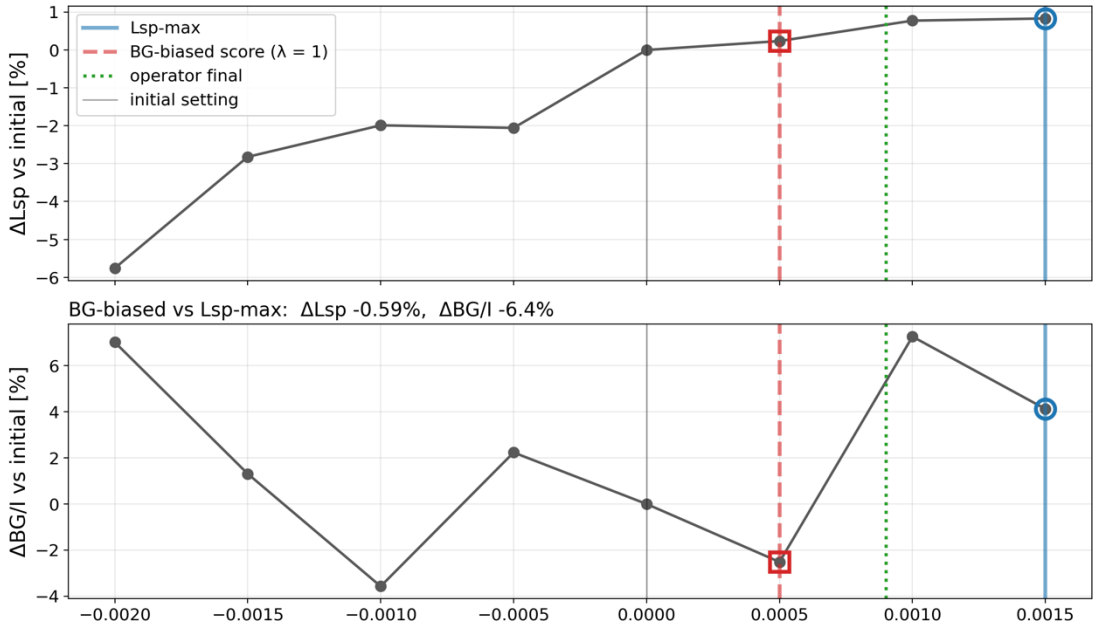



最小値を選んだ時に誤差が±1ステップ以内だった割合(%)

$L_{sp} \propto \frac{1}{\text{衝突点でのビームサイズ}}$ なので、ビームサイズとルミノシティはほぼ同一の変動をすることを考えると
基本的に過去のオペレーションではルミノシティ以外見ていない
→Lsp以外のパラメータを参照した評価モデルの作成には過去のオペレーターの判断は直接使用不可

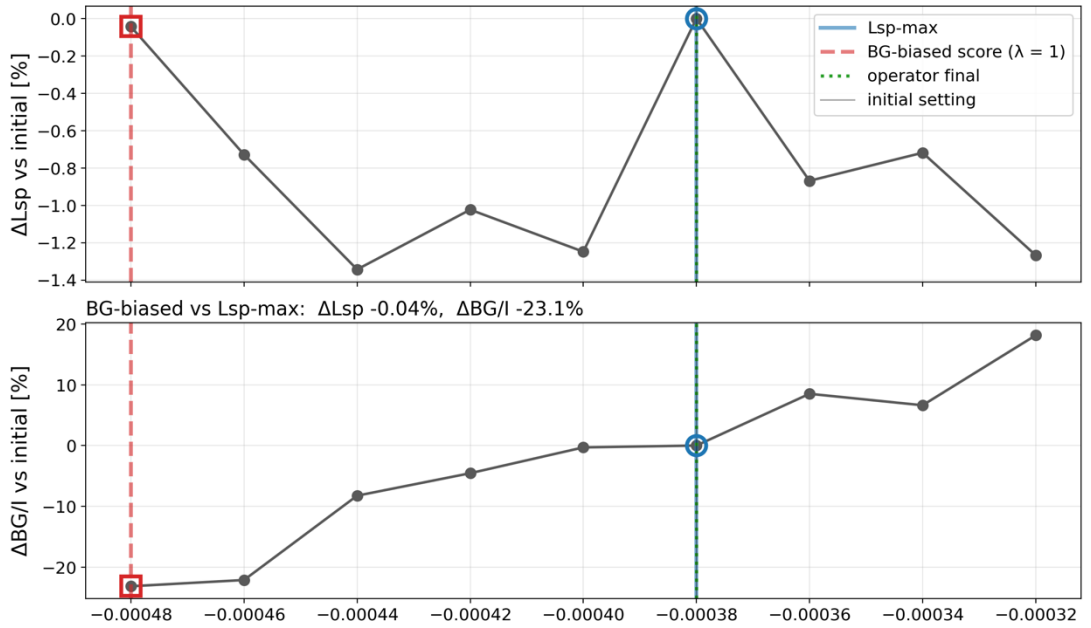
# 評価モデルの一例：減点方式

典型例




HER:R1

Backgroundの変動が顕著な例




HER: $\eta$ py

**評価関数：(Lspがどのくらい上がるか)- λ (Backgroundがどのくらい上がるか)**

左図：Lspに影響があるIP knobを動かした例　：　1%のLspを引き換えに**5%**のBackground削減

右図：Backgroundに影響があるIP knobを動かした例　：　Lspはほぼ同じで**20%**のBackground削減

→基本はLsp優先としてもBackgroundの状況を見てこの評価関数に切り替えるという選択肢が可能

# まとめ

・SuperKEKB加速器におけるビーム衝突パラメータ調整に対して
**ベイズ最適化による多次元同時スキャンツールの開発および実機を用いたテスト**を行った。
→二次元同時スキャンまでは正常に動くことを確認

・多次元同時スキャンを安定させるために、
**1. 外的要因によるふらつきを除外するツール**
**2. Lsp以外のパラメータも参照する評価モデル**
が必要になってくる

・現在制作したものを組み合わせると、
**±2%の精度でknobを動かしていない時のLspを外挿し、**
**オプションで1%程度のLspをコストに5%程度のBackground削減を行うことが可能**

・今後は再現性の確認や、回帰モデルの改善などを行う
・ガウス過程回帰をBackgroundに適用することで危険領域を予測できる可能性があり、この検証を行う

# Back up

# Lsp回帰モデルの入力について

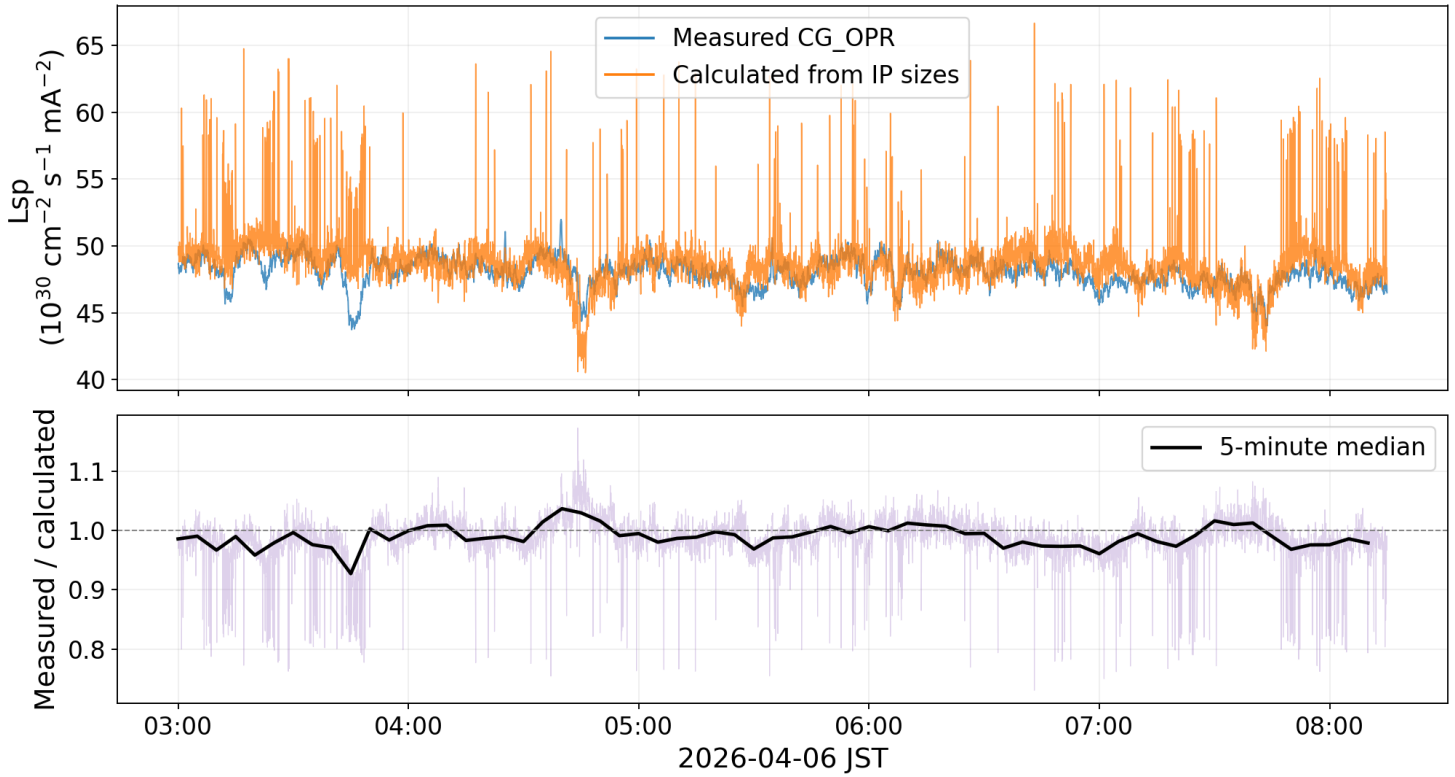
**IP knob tuning で直接動くパラメータ以外**を入力としてルミノシティの回帰を行う

↳ ビームサイズなどのパラメータ

そもそも衝突点のビームサイズは
測定できないので
Luminosityから計算される
なので、ビームサイズを見るような
学習は答えを間接的に見ているのと同じ

右図はビームサイズから計算したLsp

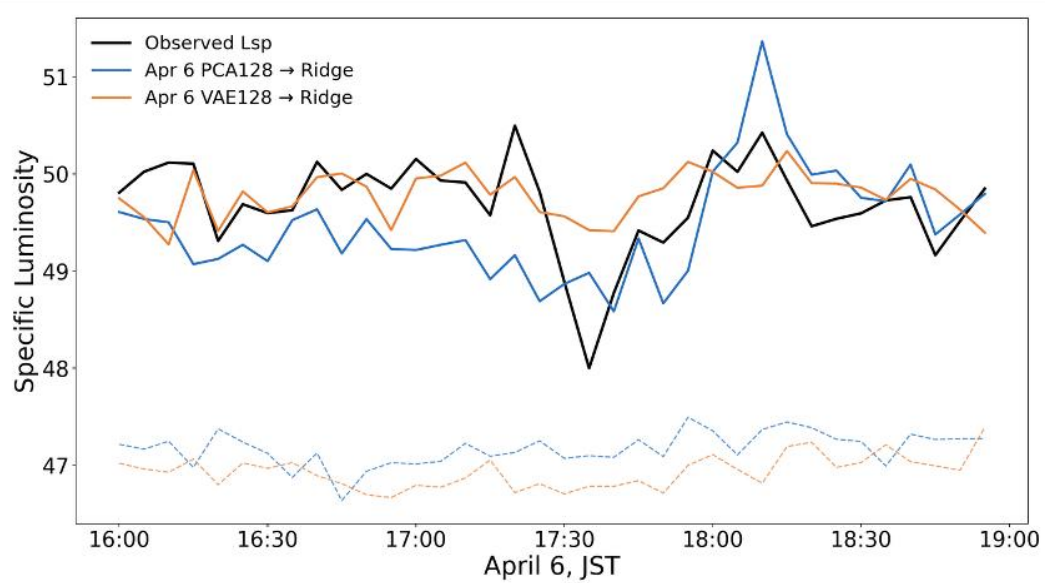
ほぼ合致している



# 回帰モデルの入力の制限

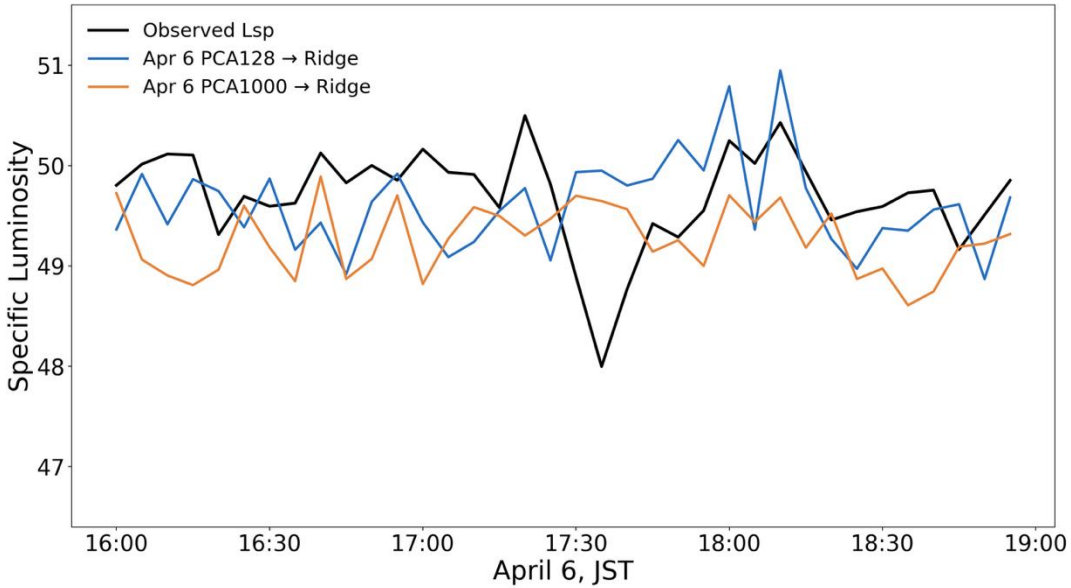
knobを動かすと**skew magnet**が動くので、
これにまつわるパラメータを入力から外して回帰性能に差が出ないことを確認する（VAEはまだ計算未完）

除外前




PCA 128 Test RMSE 0.584

除外後




PCA 128 Test RMSE 0.647

大体合ってるが、形状を捉えていないような振る舞いになっている
今後はもっと変動が激しい期間でテストを行い、定数的な振る舞いをしているだけか否かを確認する