

SuperKEKB 加速器における機械学習を用いた ビーム入射調整の高度化



東京大学 理学系研究科 物理学専攻

加藤 臣之輔

Belle II実験 / SuperKEKB加速器

Belle II 測定器

生成・崩壊粒子 (B, τ など)

e^- (HER)

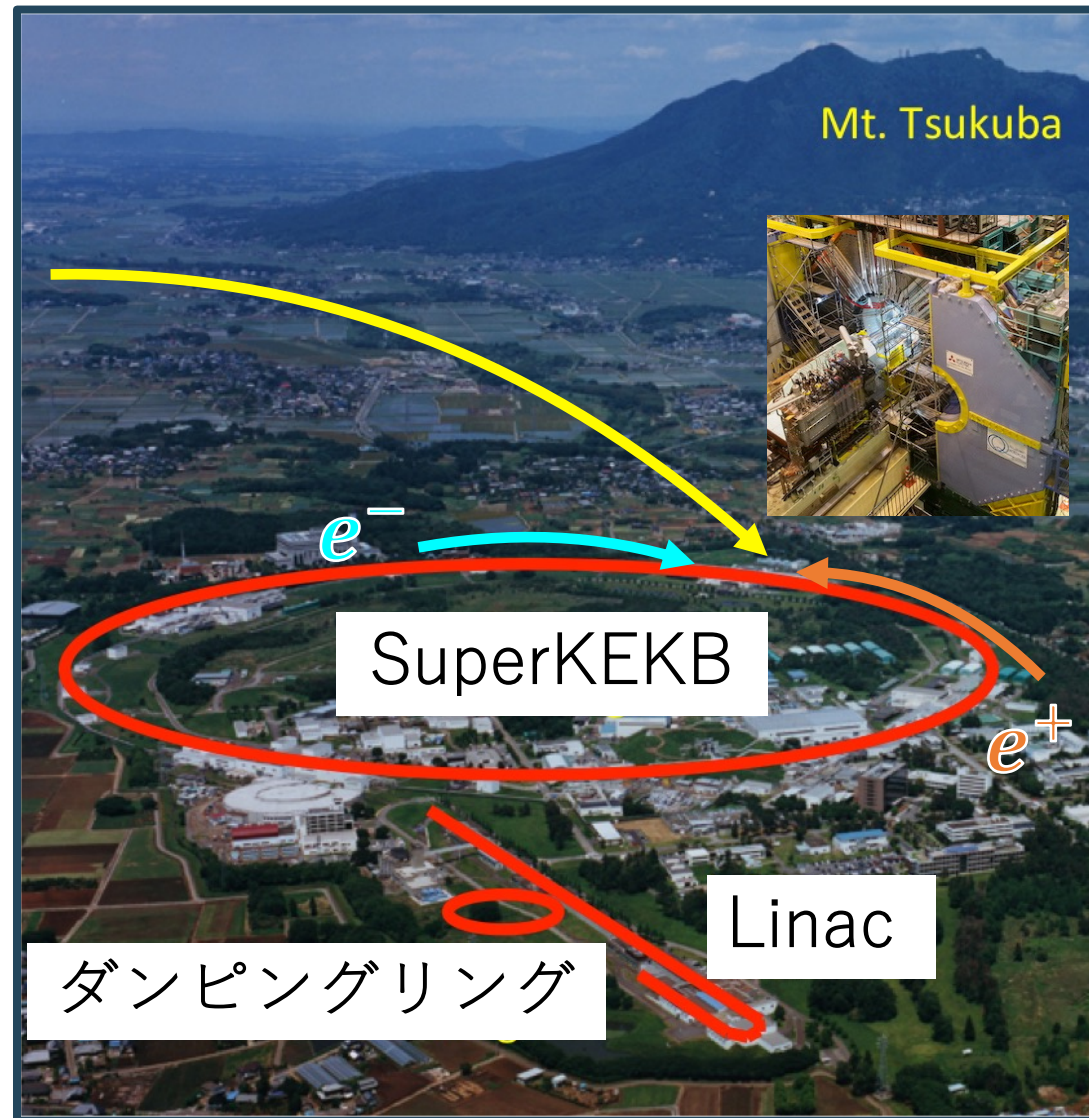
e^+ (LER)

7 GeV

4 GeV

$$N = \sigma [\text{cm}^2] \int L [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] dt [s]$$

新物理の探索には統計を溜める必要あり
→瞬間ルミノシティの向上と長期的安定性を要求



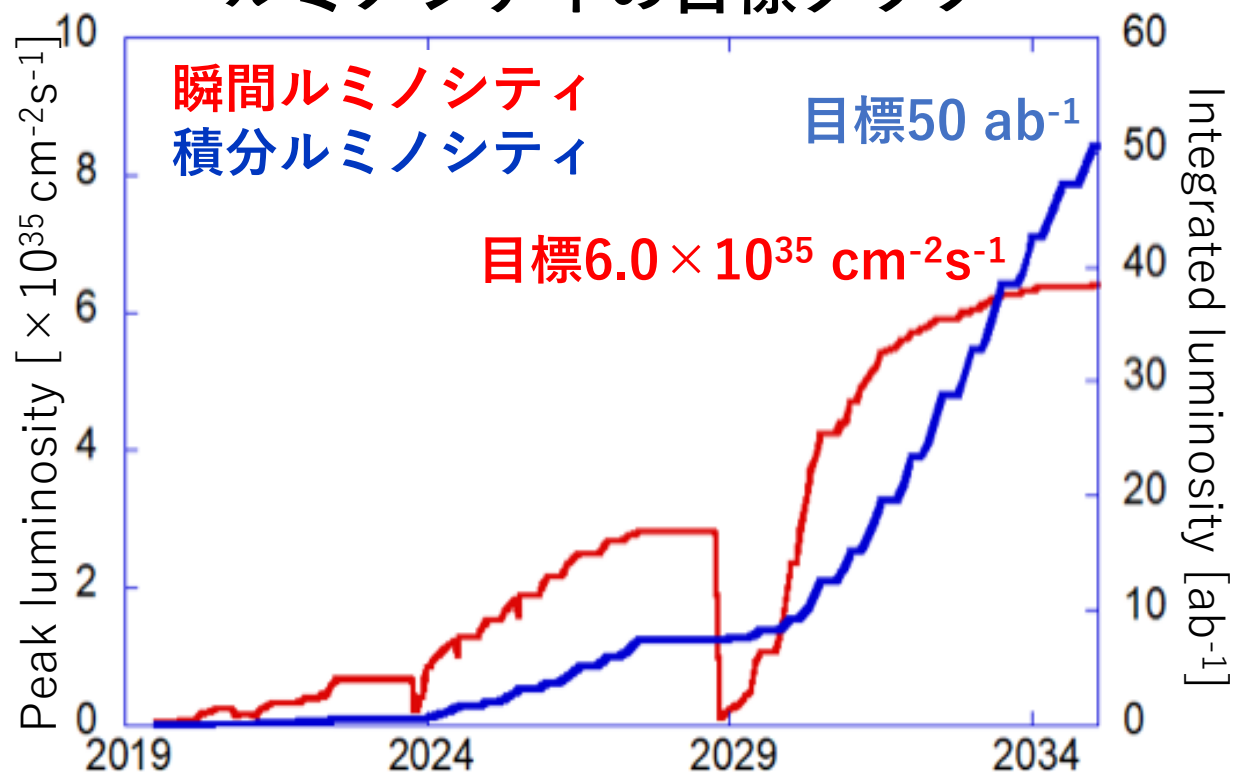
ルミノシティ

2025年2月時点でのルミノシティ記録

瞬間ルミノシティ $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

積分ルミノシティ 575 fb^{-1}

ルミノシティの目標グラフ



ルミノシティはビームの蓄積電流に比例

$$L \propto \frac{I_+ I_-}{\sigma_x^* \sigma_y^*}$$



入射調整の改善で高ルミノシティ化を目指す！

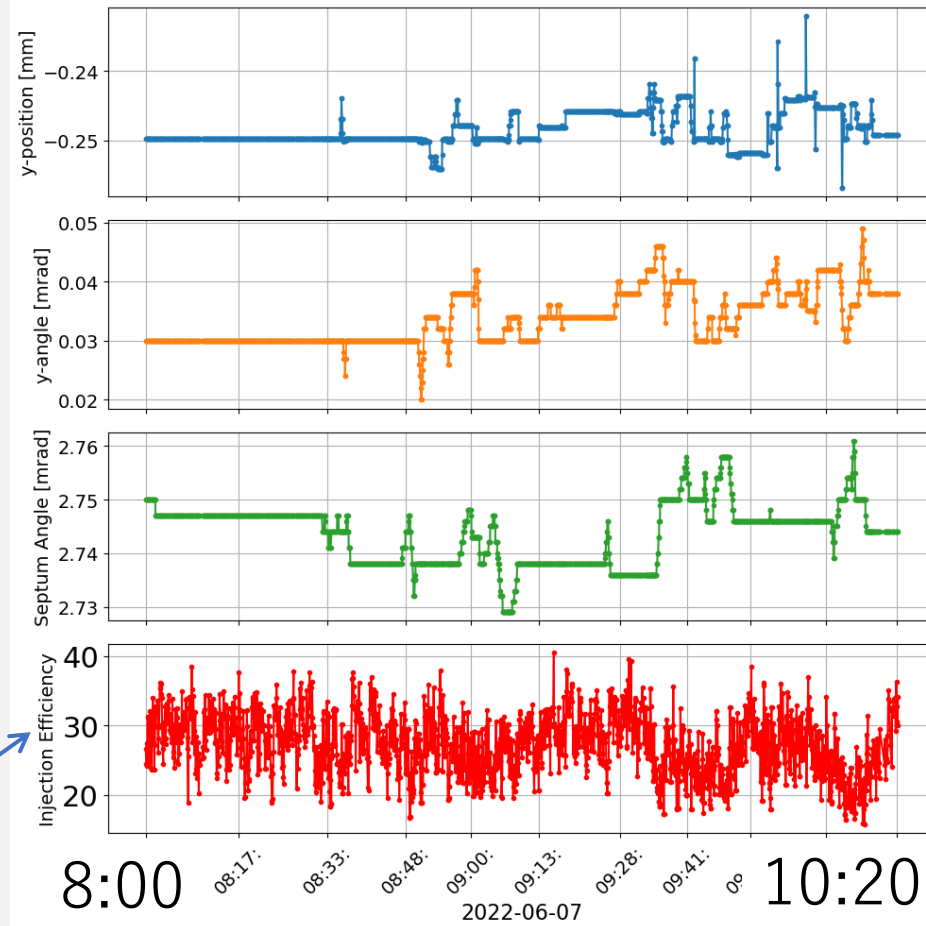
手動によるビーム入射調整の難しさ

■ 苦勞した事例

入射調整
パラメータ

入射効率

30%



2時間手動調整を試みるも
入射効率が改善しない

+

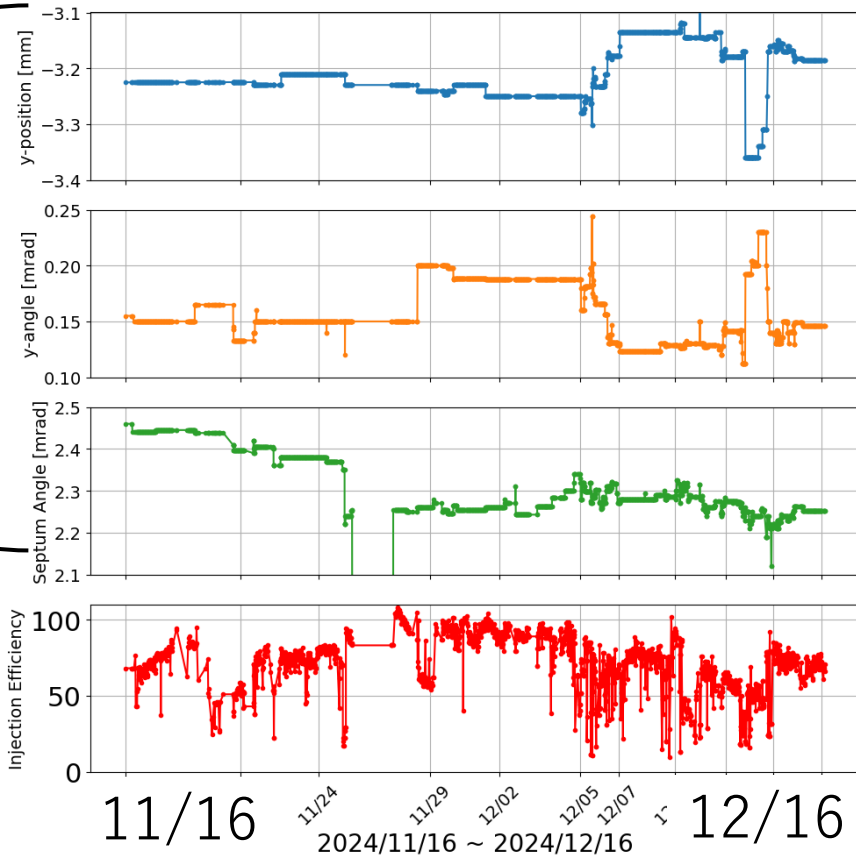
入射調整に経験の
差が出てしまう

自動入射調整ツールを開発して入射調整作業をタスク化させたい！

入射調整の自動化に対する課題

課題1：長期的な入射効率の変動

入射調整
パラメータ

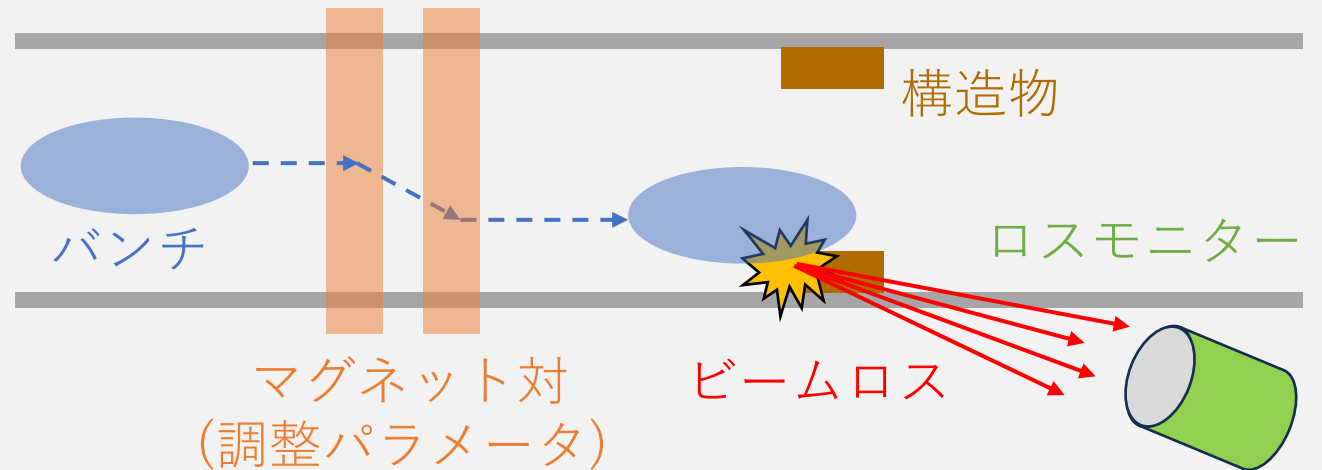


入射
効率

調整パラメータと入射効率の関係に長期的な再現性がなく、過去のデータを参照できない。

課題2：ビームアバート

機器を保護するために蓄積電流を捨てる操作



不適切なマグネットの調整をしてしまった場合

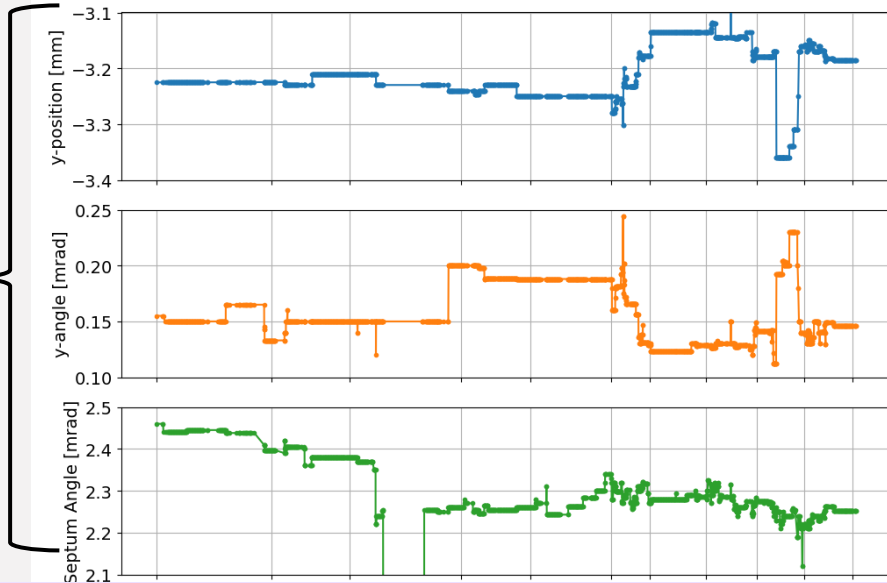
↓
ビームアバート
(電流が0になる)

パラメータ空間を自由に探索することはできない。

入射調整の自動化に対する課題

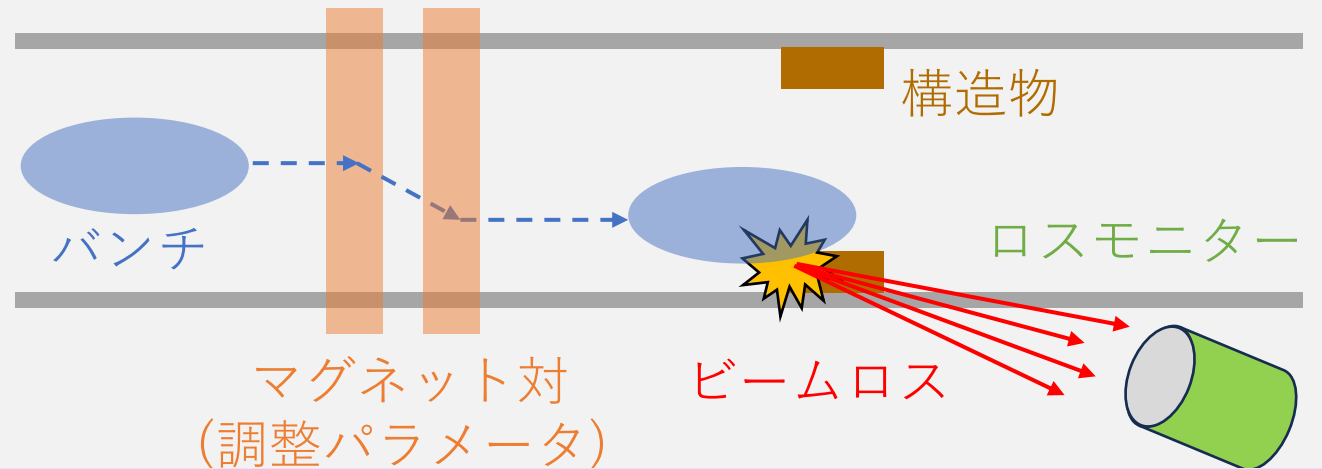
課題1：長期的な入射効率の変動

入射調整
パラメータ



課題2：ビームアバート

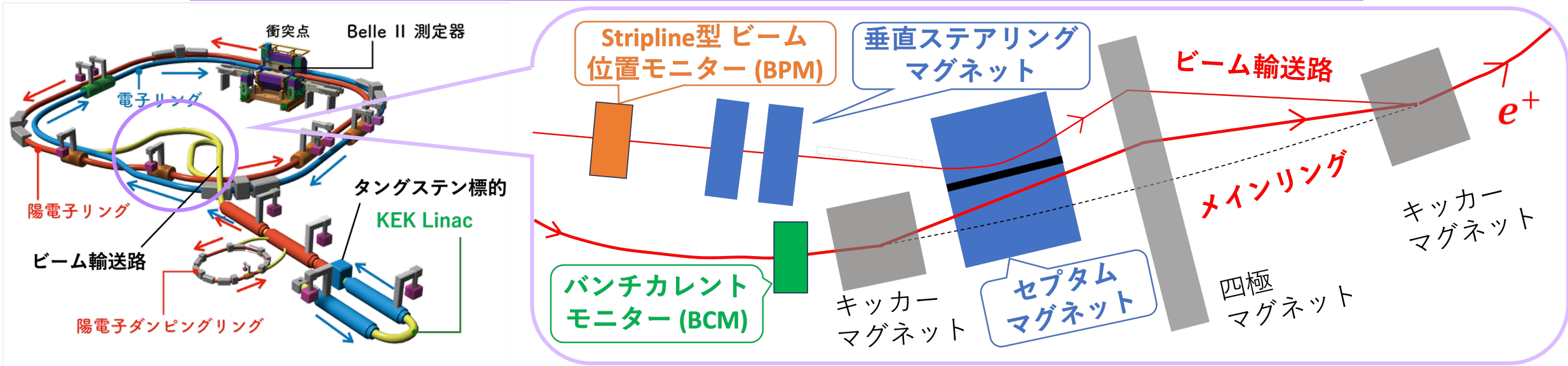
機器を保護するために蓄積電流を捨てる操作



上記の課題に留意した入射調整ツールを作成する。ツールの**目標**は……

- 1. 入射効率の向上：**過去のデータを用いずに入射効率を向上させる。
- 2. 安全性の確保：**ビームアバートを引き起こさず、安全性を担保する。
- 3. 利便性：**オペレータが簡便に操作できる。

SuperKEKB入射調整



以下のパラメータで機械学習を用いた入射調整を行う。

■ 調整パラメータ (3パラメータ)

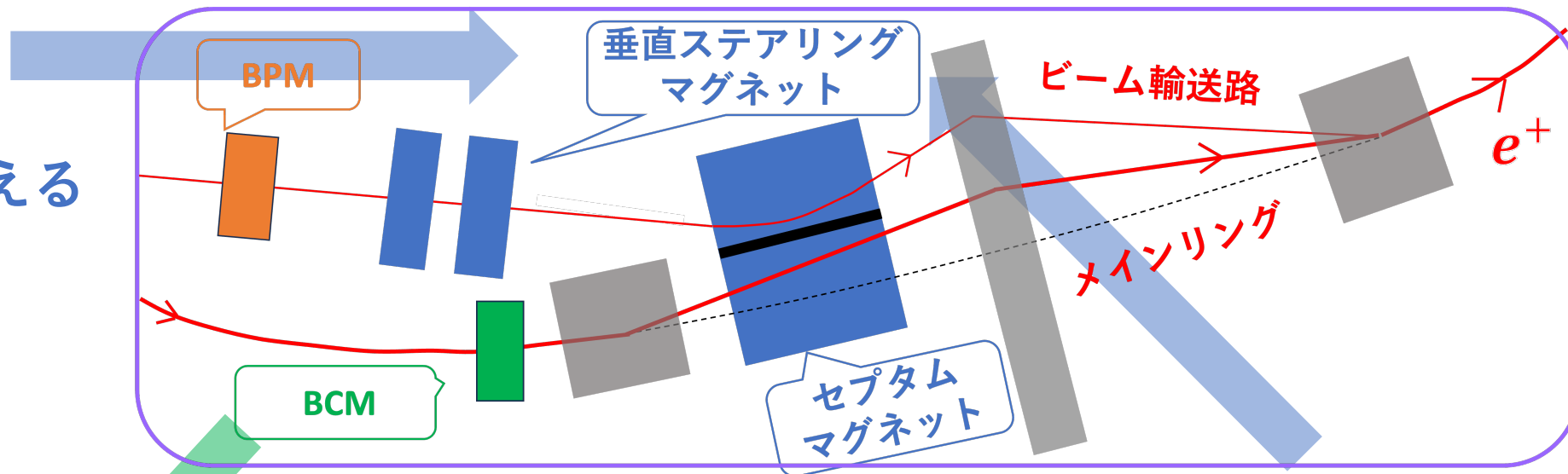
- ① y-position[mm]
 - ② y-angle[mrad]
 - ③ Septum Angle[mrad]
- 垂直ステアリング
マグネットの変数
- セプタム
マグネットの変数

■ 評価パラメータ

$$\text{入射効率} = \frac{\text{リングで増えた電流(BCMで測定)}}{\text{リングに入れる電流(BPMで測定)}}$$

機械学習（ベイズ最適化）による入射調整

① マグネットの
パラメータに
初期条件を与える

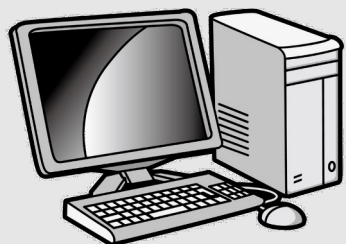


① 入射効率
を記録

①~③を繰り返す
(1トライアルと呼ぶ)

③ パラメータ
を再設定

ベイズ最適化



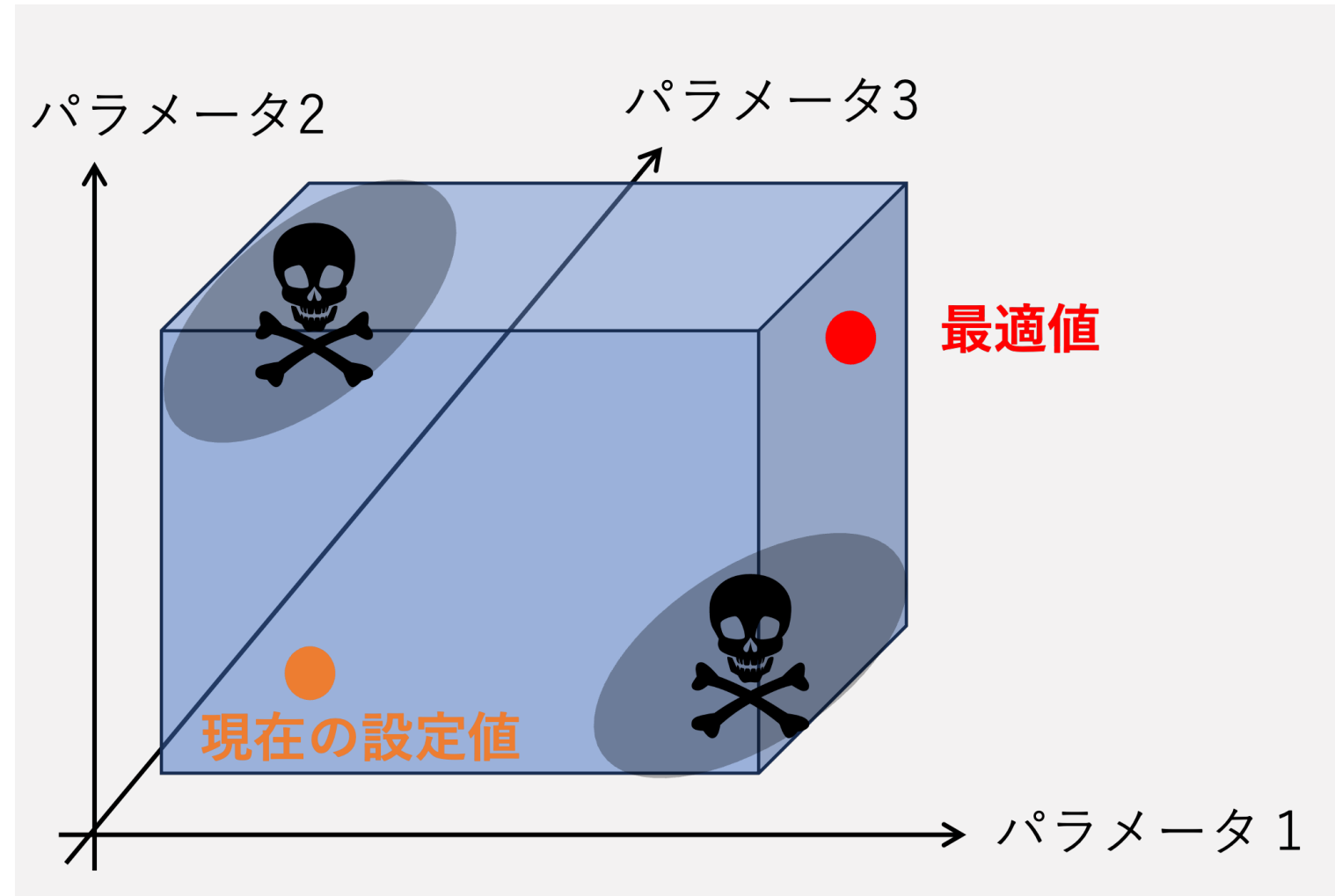
データを更新
初期条件 $\theta_0 \sim \theta_n \leftrightarrow E$
トライアル1 $\theta'_0 \sim \theta'_n \leftrightarrow E'$
⋮
⋮
⋮

予測分布
を更新

② 入射効率を最大化
するマグネットの
パラメータを推定

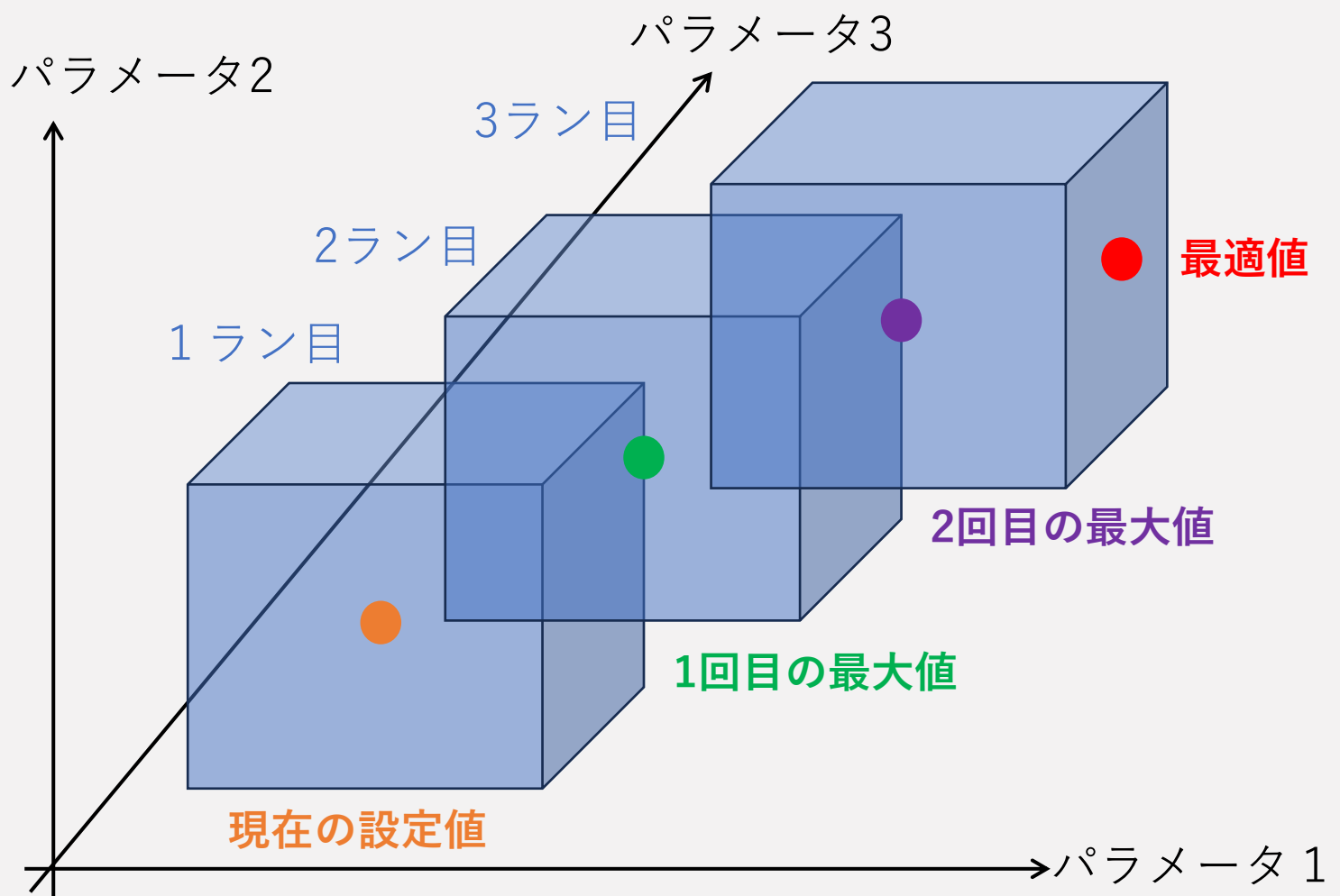
安全な最適化のための手法

定義域を大きくとるとビームロスの多い領域が含まれてしまう



安全性確保のための最適化手法

小分け最適化



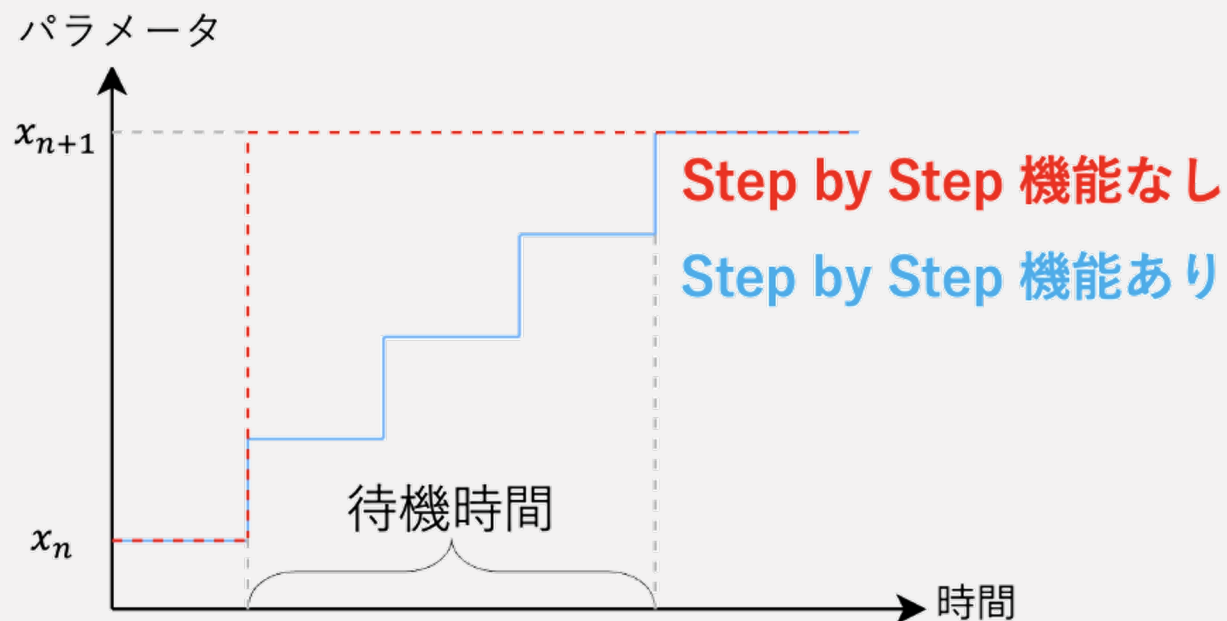
- ビームアバートを避けるため、現在の設定値を中心に小さな定義域で最適化を繰り返す手法
- 入射効率が良い方向に定義域を伸ばしていく。
- 入射効率が向上する際にはビームロスが減少するという経験則に基づいている。

安全性確保のために必要な機能の実装

- パラメータの急激な変動はビームアボートを促す。
- 下記の機能を導入することでアボートを回避し、最適化時間を短縮できる。

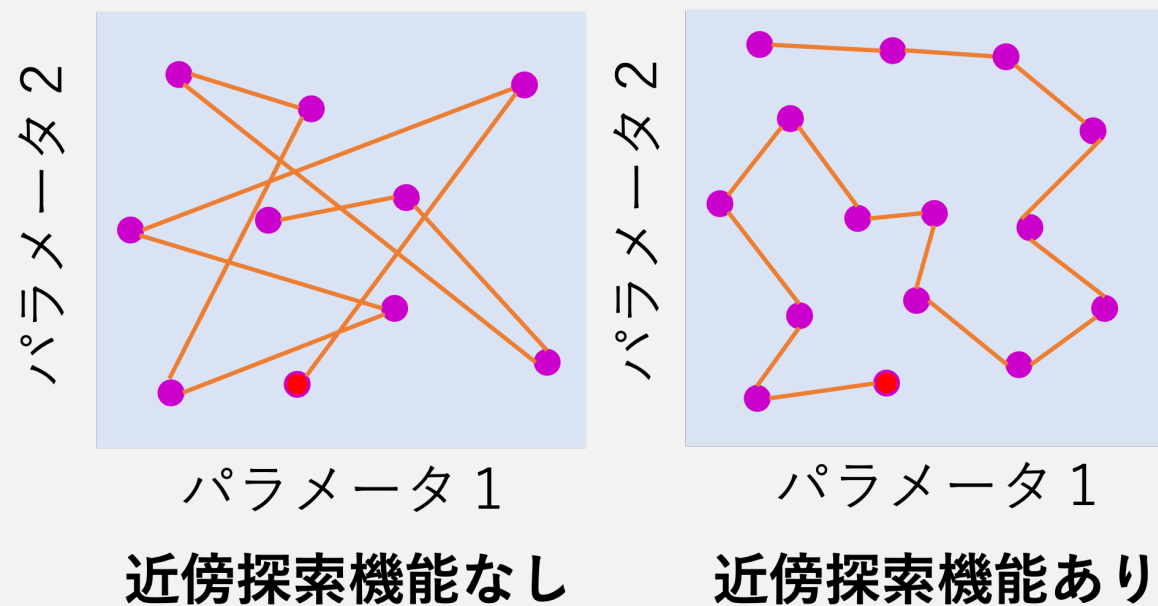
■ Step by Step機能

→待機時間は増えるがパラメータの変化幅を小さくできる。



■ 近傍探索機能

→Step by Step機能で生じた待機時間を削減することができる。



利便性向上のためのGUIの作成

入射調整を簡便に行うことができるツールのGUIを開発した。

The screenshot displays a software interface with three main sections:

- Parameter settings:** A table with columns for 'Enable/Disable', 'Parameter', 'Present value', 'Min', and 'Max'.

Enable/Disable	Parameter	Present value	Min	Max
<input checked="" type="checkbox"/>	y-position	1.301e-03	1.290e-03	1.310e-03
<input checked="" type="checkbox"/>	y-angle	-1.760e-05	-3.000e-05	-1.000e-05
<input checked="" type="checkbox"/>	Septum angle	8.706e-01	8.600e-01	8.800e-01
- Initialization settings:** Includes buttons for 'Set' and 'Load', and input fields for 'ntrial' (40.0), 'ninit' (10.0), and a file path: '/home/skboper/MLTool/Kato/MLSuperKEKB/Injection/ini/Initialization_HER.i'. A 'Save' button is also present.
- Optimization buttons:** A row of buttons labeled 'Start', 'Pause', 'Resume', 'Set the best and Finish', and 'Quit'.

SuperKEKB制御システムに実装済

運用のセットアップ

2024年11, 12月に e^+ リングで21ラン、 e^- リングで19ランを運用した。

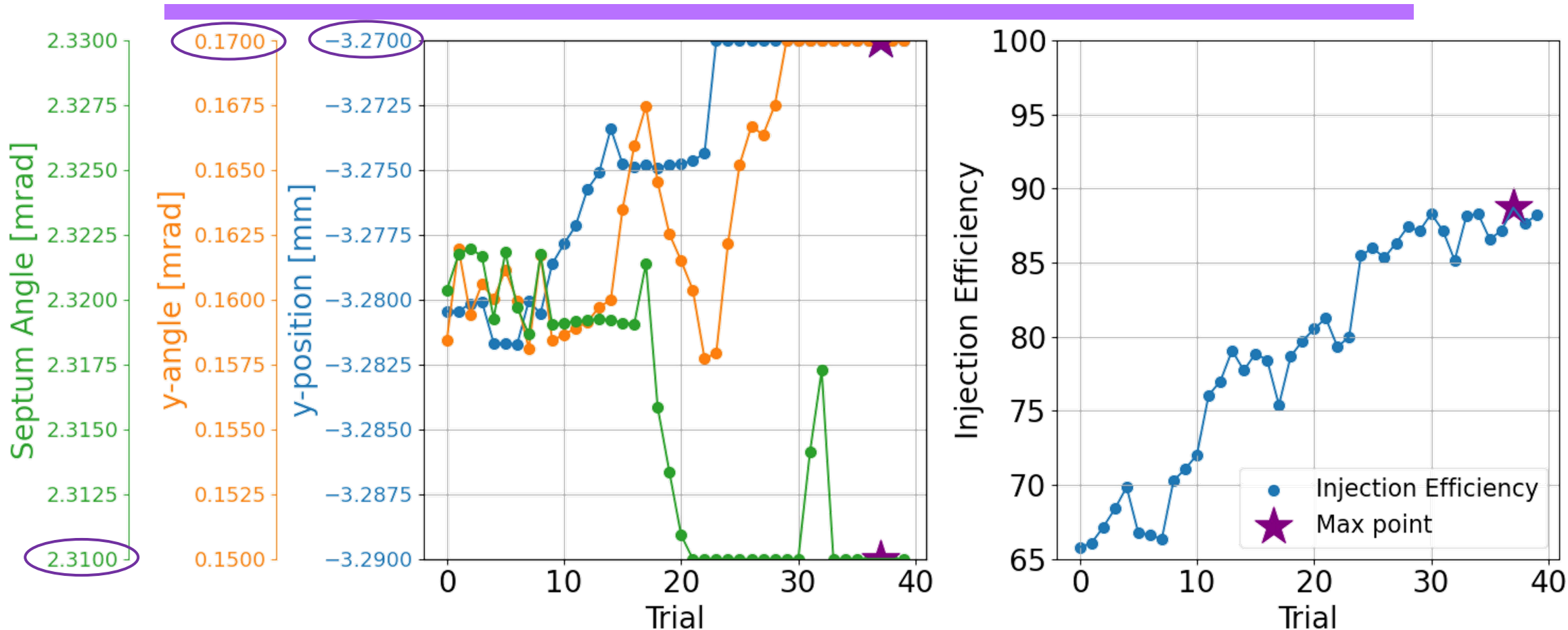
共通条件

- 40トライアルを1ランとする。
- 初期条件として、調整前のパラメータセットを基準に定義域の上下10%の範囲内でランダムに点を生成した。
- ほとんどのランは物理運転中に入射調整を行なっている。
- 1ランにかかる時間は25分程度である。

調整パラメータ	y-position	y-angle	Septum Angle
1秒あたりに動かす幅	0.0015 mm	0.0015 mrad	0.0015 mrad
1ランの定義域の幅	± 0.01 mm	± 0.01 mrad	± 0.01 mrad

手動調整での変化幅は $\pm 0.02 \sim 0.03$ ぐらい

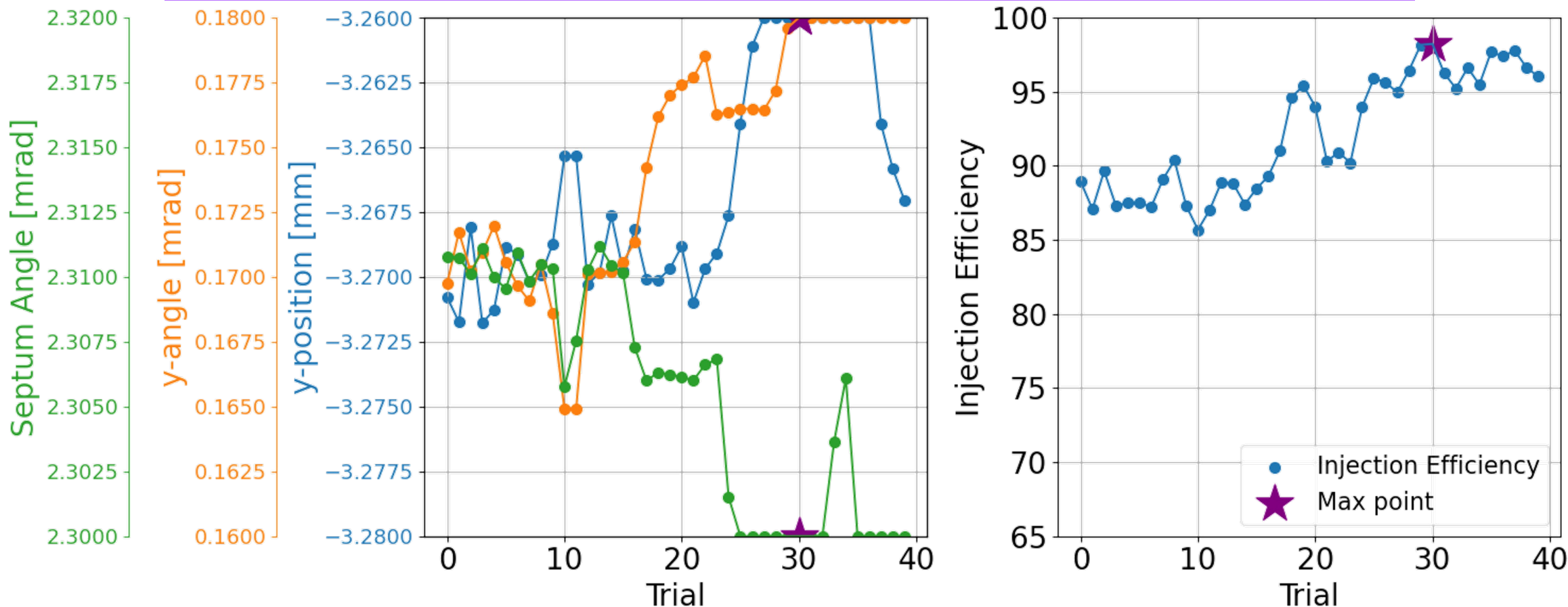
運用の一例 (12月5日 e^+ リング最適化 1ラン目)



トライアルごとのパラメータ変化と入射効率 (1ラン目)

入射効率が66% → 88%に向上した

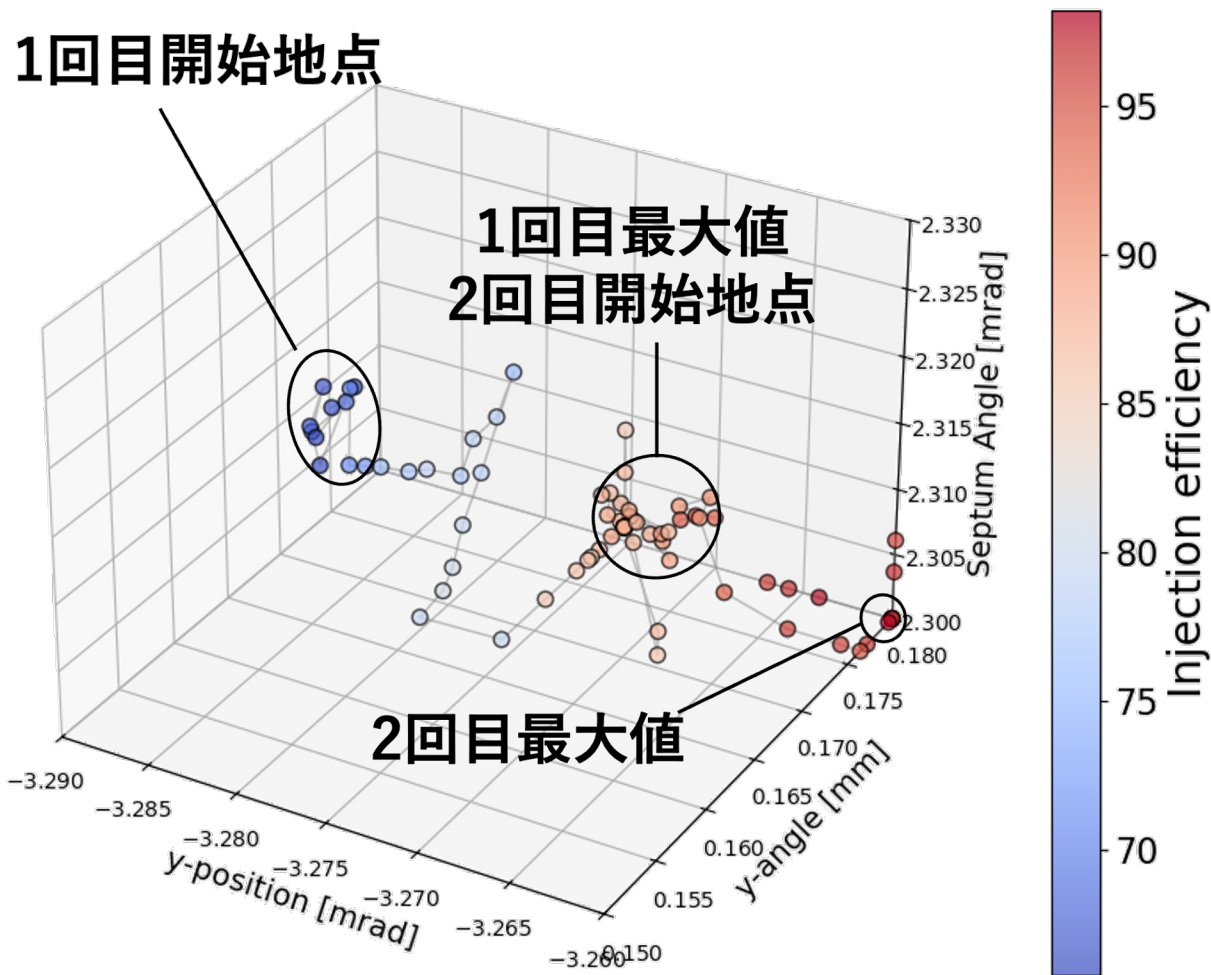
運用の一例 (12月5日 e^+ リング最適化 2ラン目)



トライアルごとのパラメータ変化と入射効率 (2ラン目)

入射効率が88% → 98%に向上した

運用の一例 (12月5日 e^+ リング最適化)



2回のランを合計した3次元プロット

- 2回のランで入射効率が66%→98%に向上した。
- 入射効率の向上によって蓄積電流が増大し、瞬間ルミノシティも向上した。

LER 蓄積電流	HER 蓄積電流	瞬間ルミノシティ
1000 mA	800 mA	$2.01 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
1300 mA	1140 mA	$3.44 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

全21ラン

運用実績 (e^+ リング)

入射効率の測定の
標準偏差は2.3%

番号	測定日	最適化回数	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量
1	11月15日	2	86.3% / 90.8%	4.5%
2	12月05日	3	65.8% / 98.2%	32.4%
3	12月06日	2	71.9% / 76.9%	5.0%
4	12月11日	3	61.7% / 64.4%	2.7%
5	12月13日	5	77.5% / 82.0%	4.5%
6	12月14日	2	69.0% / 77.8%	8.8%
7	12月17日	1	59.8% / 69.1%	9.3%
8	12月25日	3	54.5% / 68.4%	13.9%

8日の運用の内、**4日間は入射効率を有意 ($3\sigma = 7.0\%$ 以上) に向上させることができた**

全19ラン

運用実績 (e-リング)

入射効率の測定の
標準偏差は2.5%

番号	測定日	最適化回数	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量
1	11月14日	3	59.4% / 70.2%	10.8%
2	11月17日	2	20.7% / 26.8%	6.1%
3	12月07日	9	68.2% / 71.1%	2.9%
4	12月14日	5	58.4% / 68.5%	10.1%

4日の運用の内、**2日間は入射効率を有意 ($3\sigma = 7.5\%$ 以上) に向上させることができた**

運用実績

- e^+ リングでの21ラン、 e^- リングでの19ラン、合計40ランの結果、
 - 両リングにて、実施日のうち半数で有意な向上が確認された。
 - 調整後に調整前よりも入射効率が低くなることはなかった。
 - 入射由来のビームアボートは一回もなかった。
 - 職員やオペレータが単独でGUIを用いて入射調整ツールを運用できた。

入射効率の向上：過去のデータを用いずに入射効率を向上させる能力を有すること。

安全性の確保：ビームアボートを引き起こさず、安全性が担保されていること。

利便性：オペレータが直感的かつ簡便に操作できること。

3つの目標を全て達成することができた

まとめと展望

◆まとめ

- 機械学習（ベイズ最適化）を用いたSuperKEKB加速器の入射調整ツールを開発した。
- 入射調整ツールの運用の結果は、
 - ①両リングの運用の半数において入射効率が有意に向上した。
 - ②入射調整ツールは高い安全性を有する。
 - ③入射調整ツールは利便性を有する。
- **衝突型加速器における機械学習を用いた入射調整は世界で初めての事例である。**

◆展望

- 調整パラメータを追加して、最適化性能を向上させる。
- ビームロス値を参照しながら入射効率の最適化を用いた運用を行う。

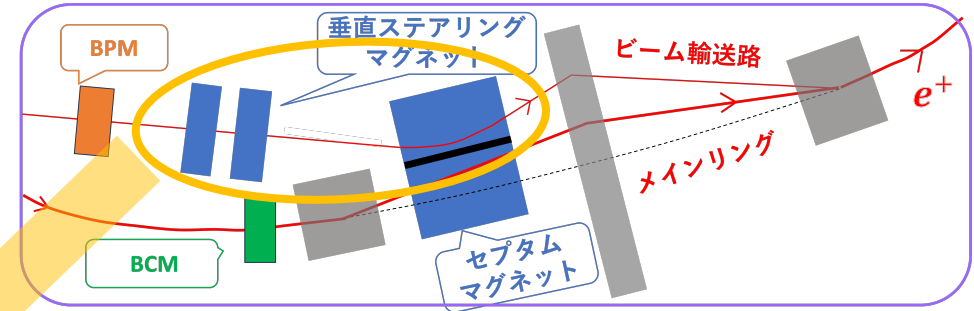
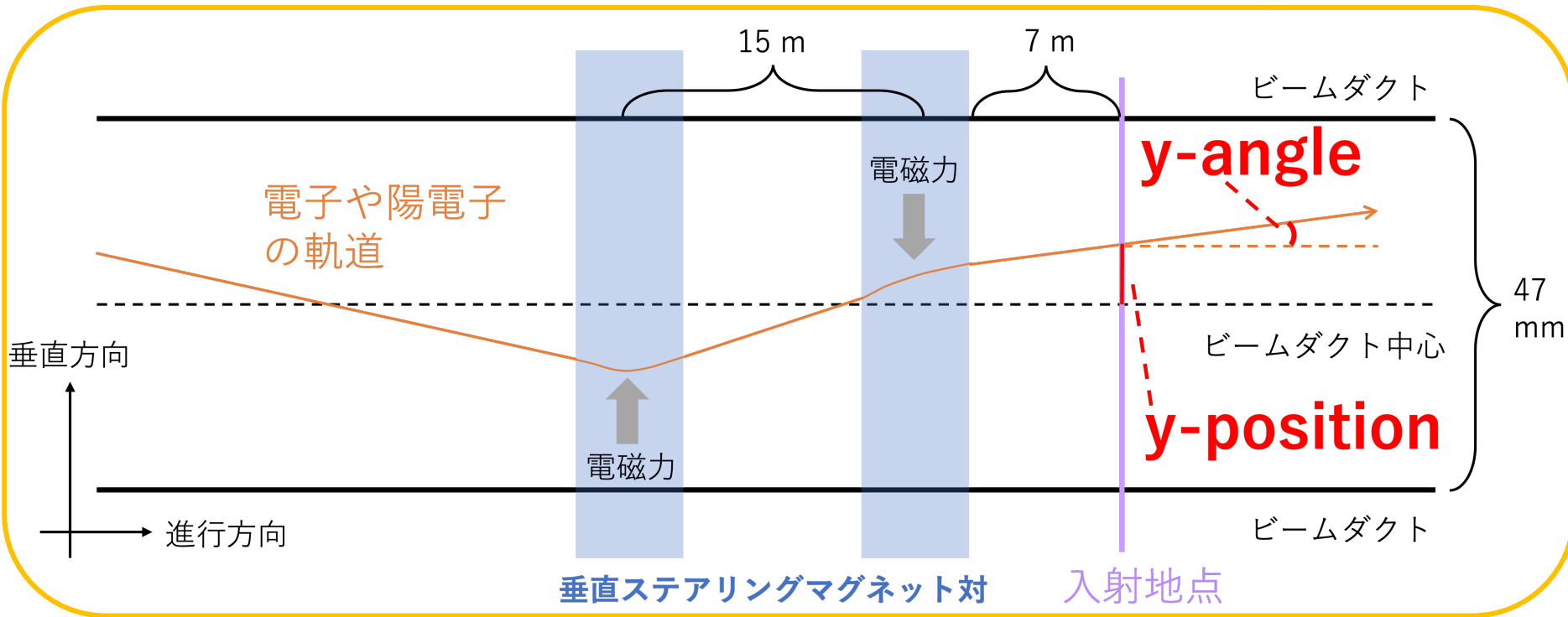
Backup

垂直方向の調整パラメータ

① y-position ② y-angle

入射地点に到達した時のビームダクト中心からの垂直距離, 垂直角度

ビーム垂直-進行方向から見た図



ビーム水平-進行方向から見た図

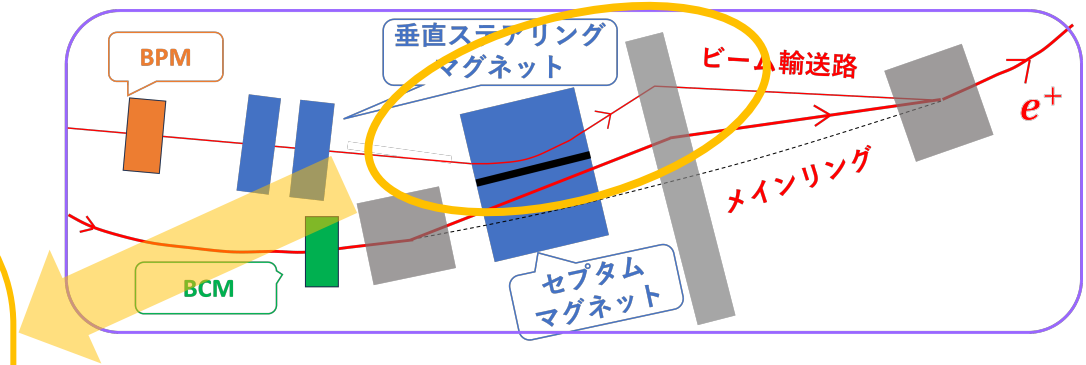
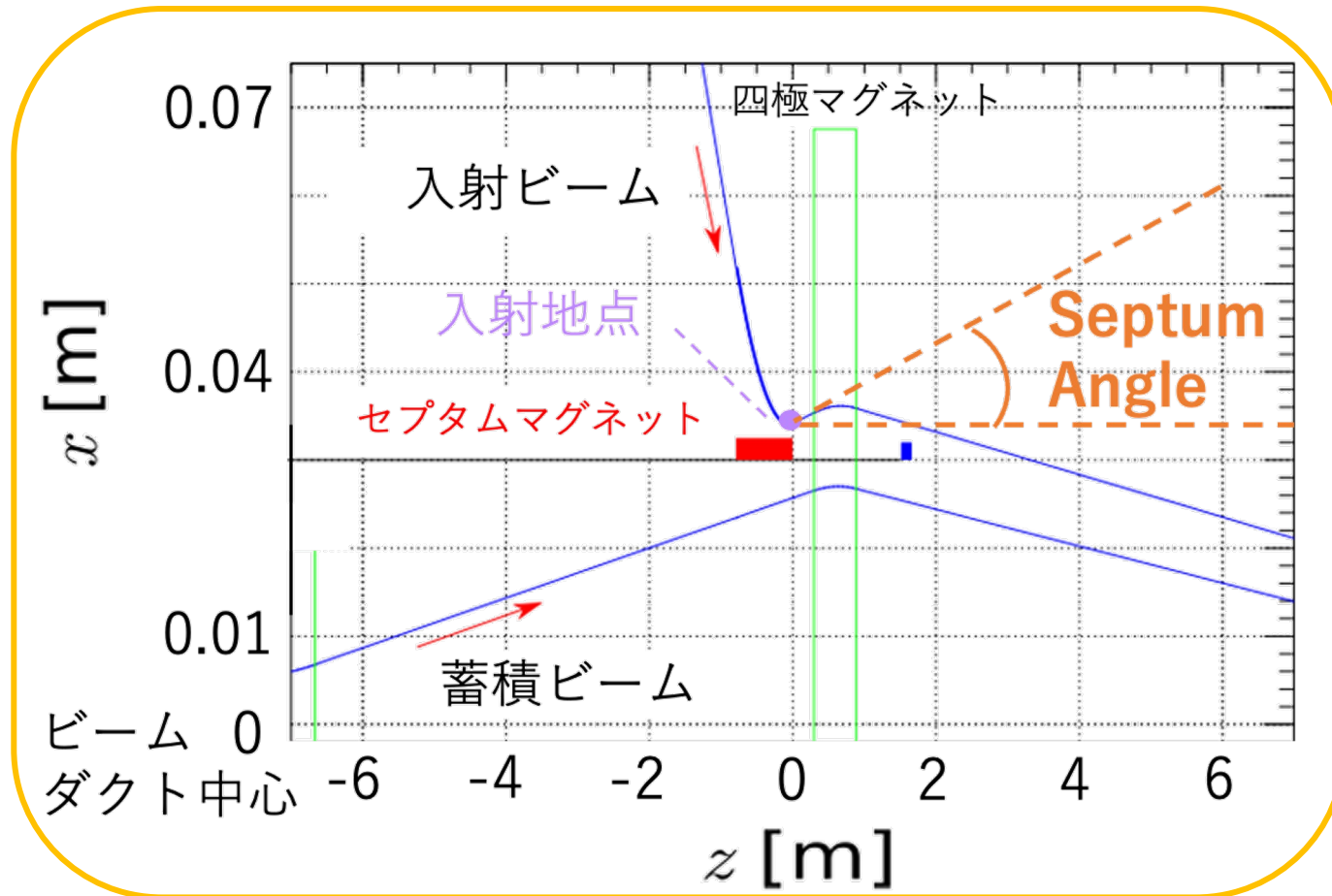
垂直ステアリングマグネット



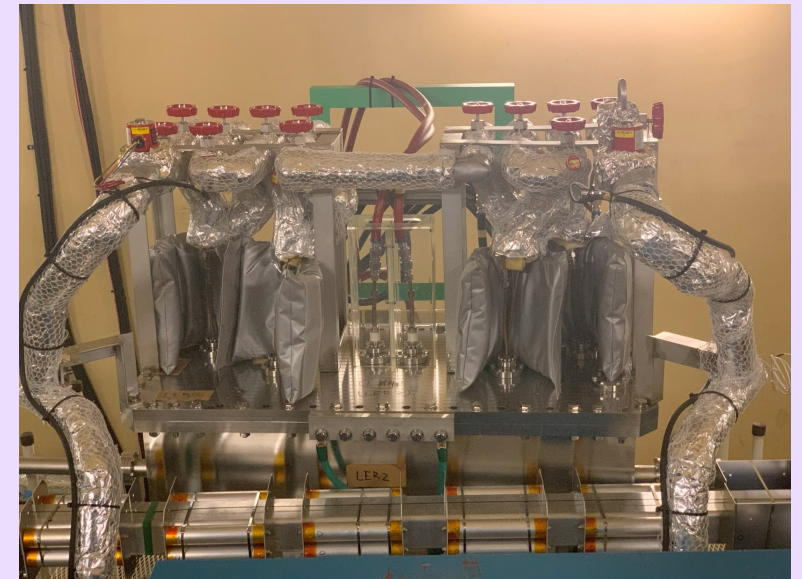
水平方向の調整パラメータ

③ Septum Angle

入射地点でのビームダクト中心からの水平角度



セプタムマグネット

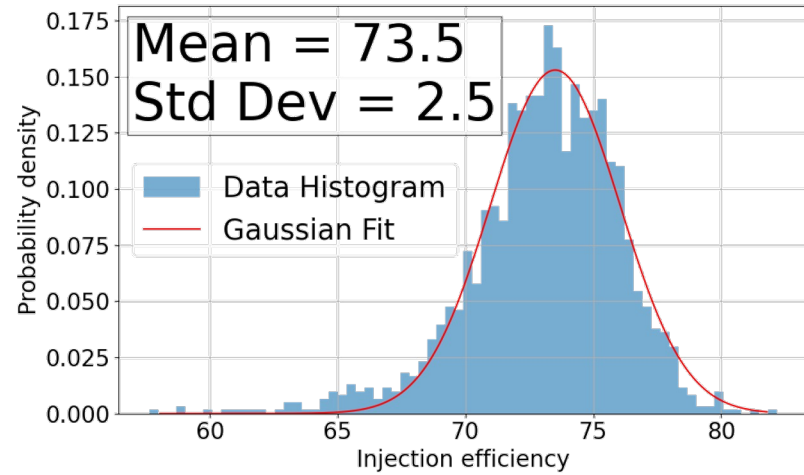


入射効率

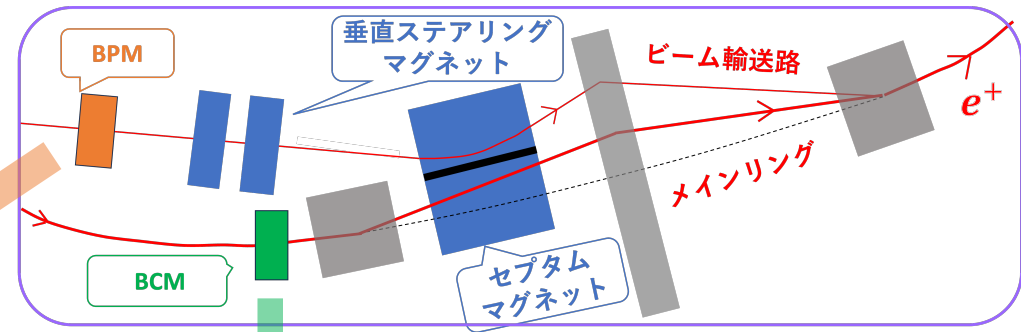
■ 入射効率 = $\frac{\text{リングで増えた電流 (BCMで測定)}}{\text{リングに入れる電流 (BPMで測定)}}$

30回測定し、中央値を採用する。

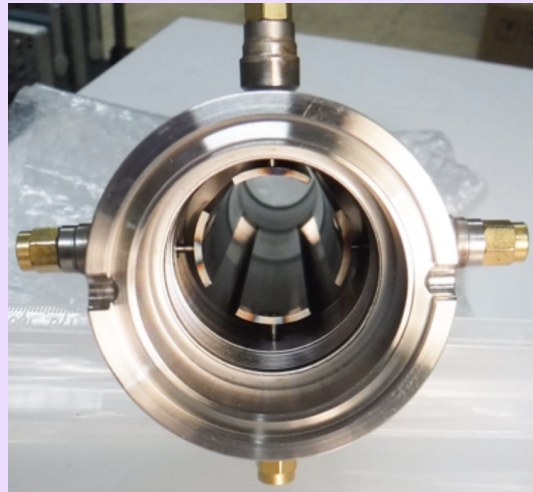
ビームのふらつきと測定誤差を合わせた標準偏差は、LERで2.3%, HERで2.5%



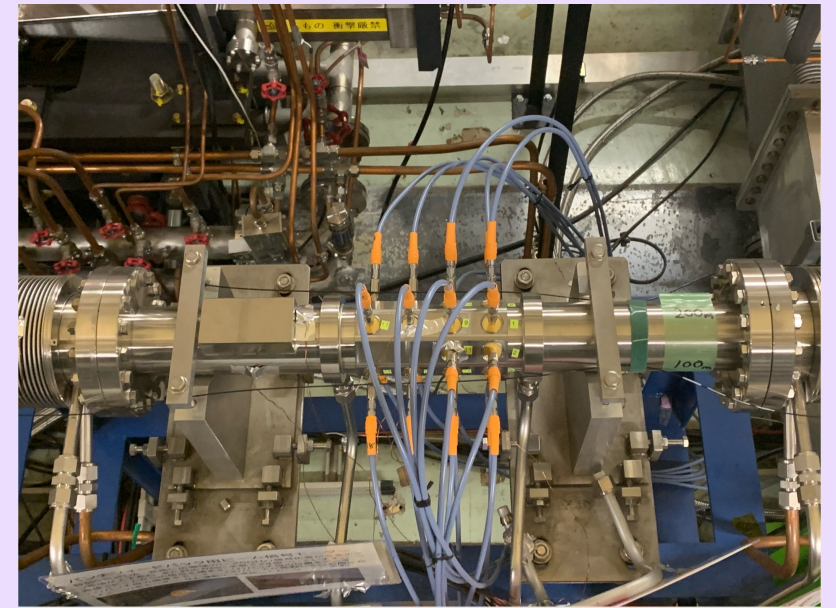
ビーム条件を固定したHER入射効率の30分間のヒストグラム



Stripline型ビーム位置モニター (BPM)

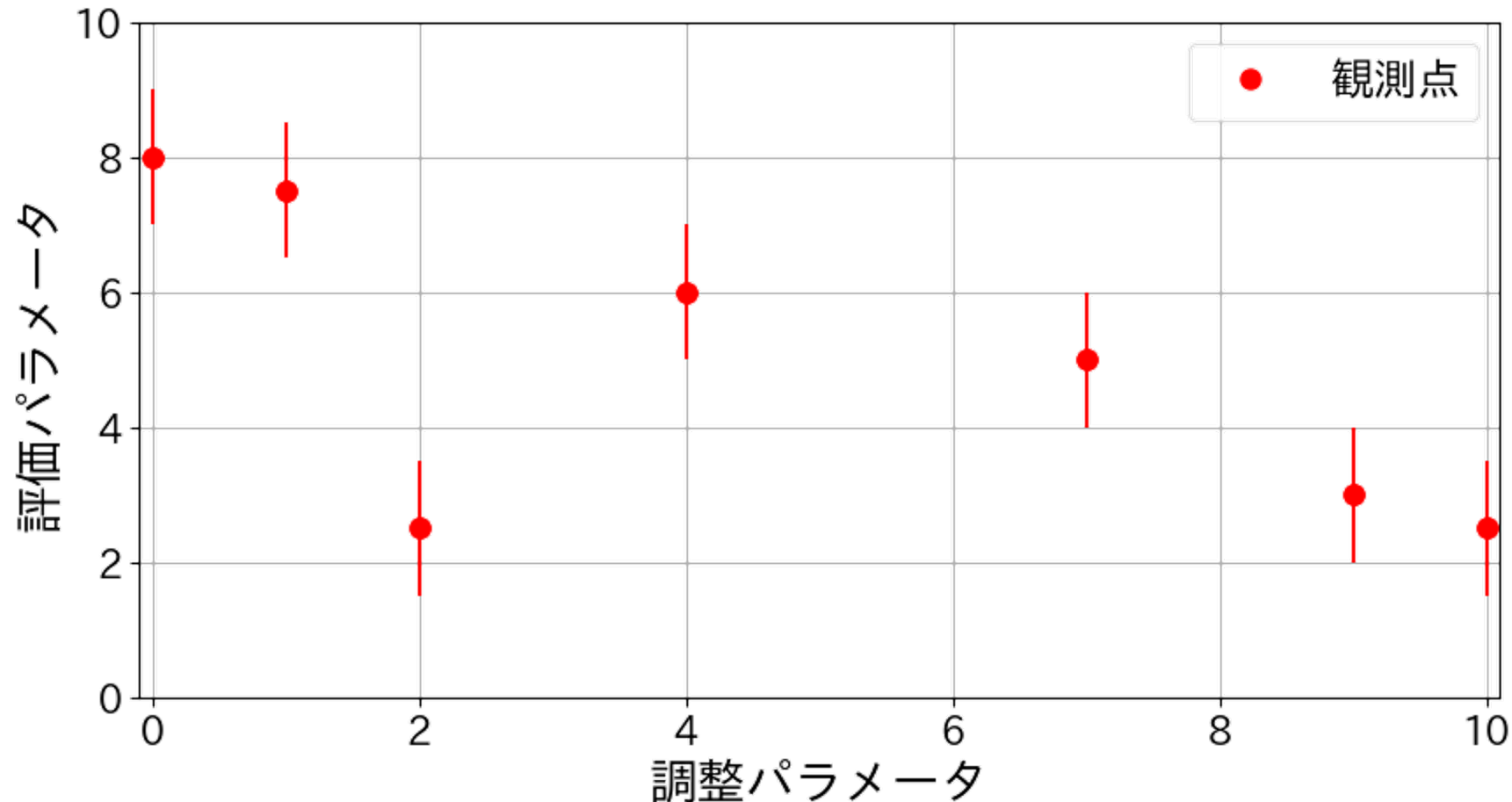


バンチカレントモニター (BCM)



ベイズ最適化 (ガウス過程回帰法)

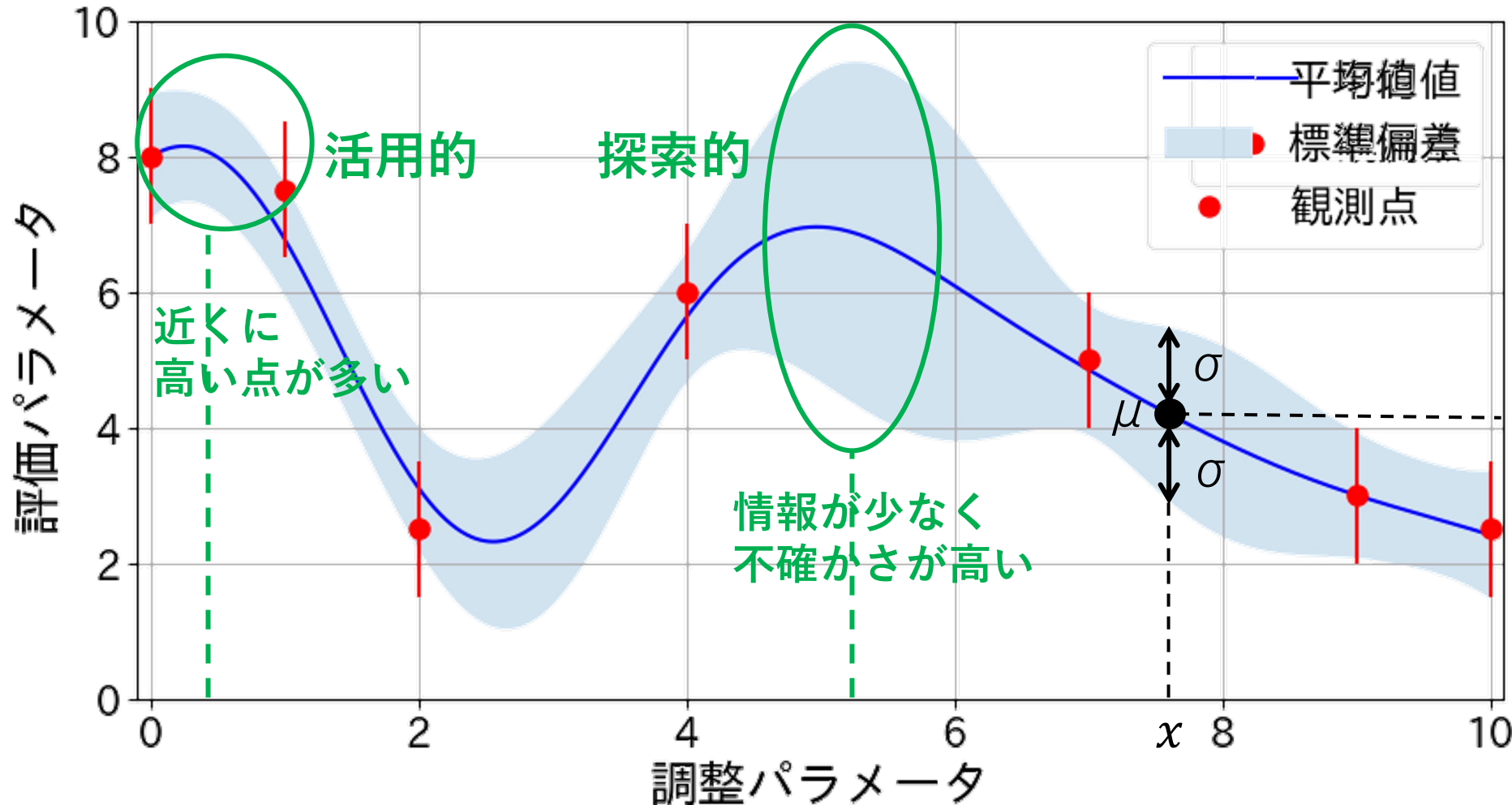
- 入射効率は
- ① 関数の具体形が予測できない
 - ② 現実に従うシミュレーションがない



観測点の情報をもとに
最大値を効率よく探すには
どうすればよいか？

ベイズ最適化 (ガウス過程回帰法)

■ **ガウス過程回帰法** 測定点の情報をもとに回帰分布を作成する手法



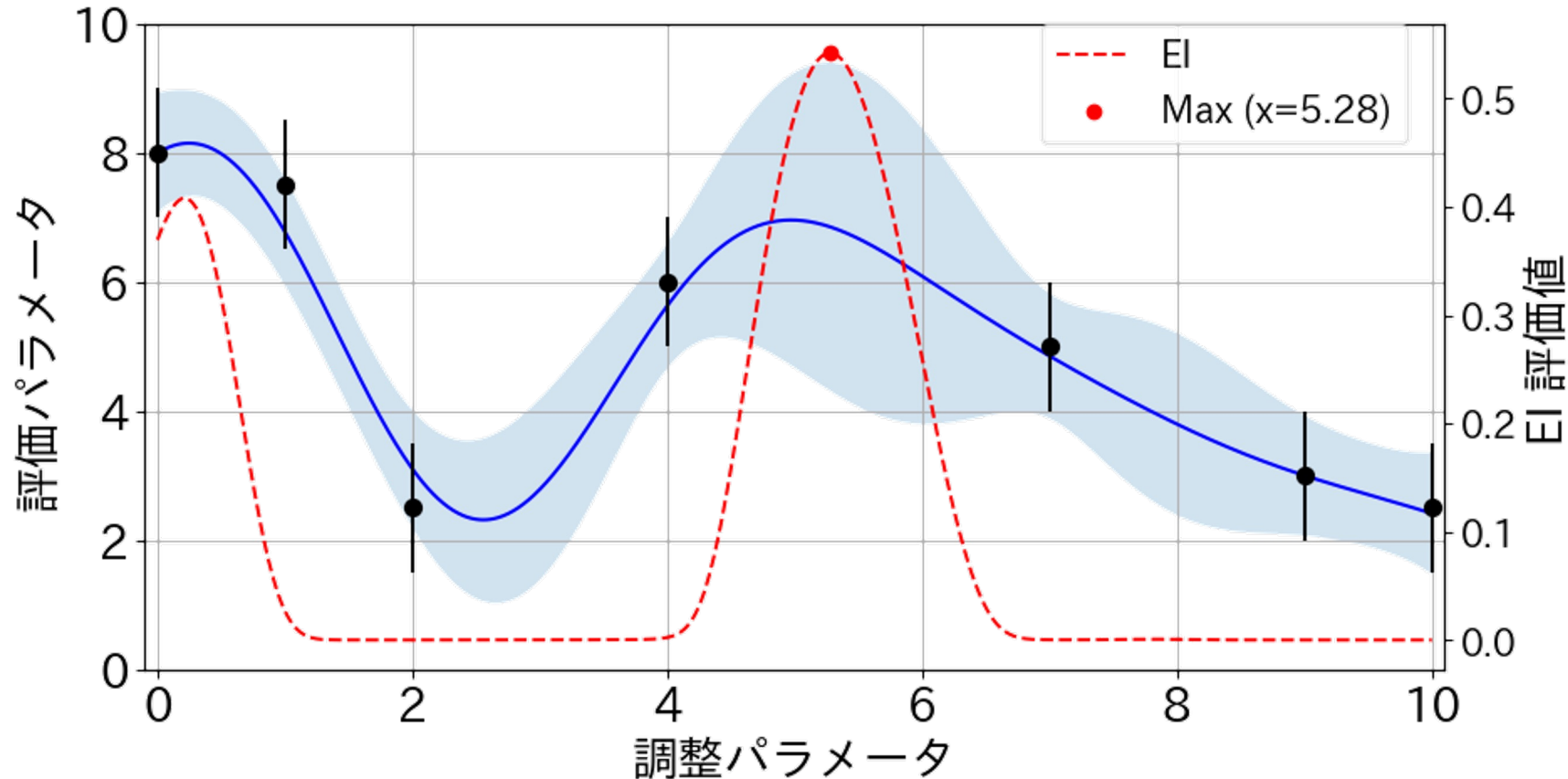
$$f(x) = \mathcal{N}(\mu, \sigma)$$

関数上の任意の点を
正規分布で補間

ベイズ最適化 (獲得関数)

■ 獲得関数

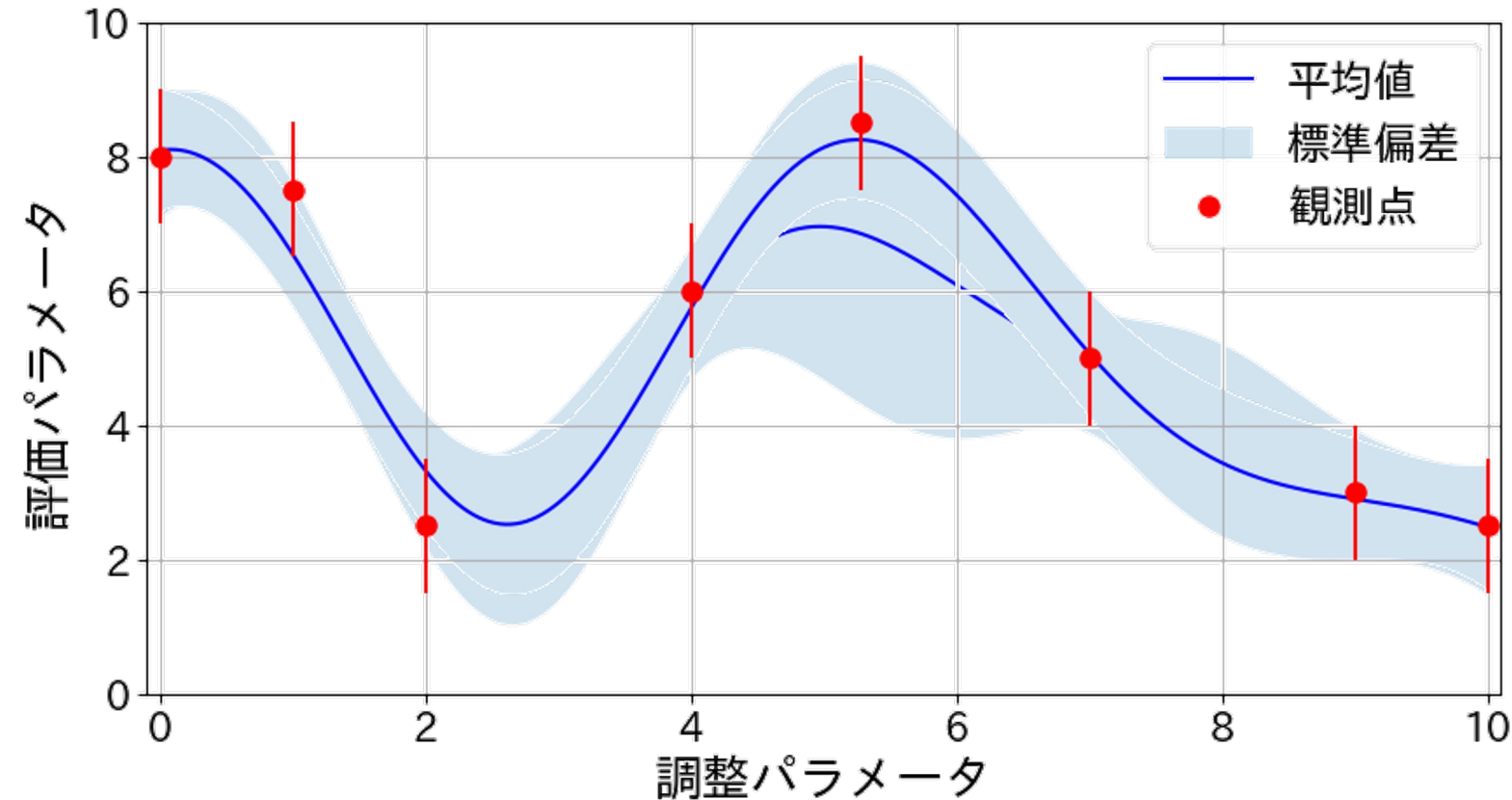
ガウス過程回帰法で作成した分布において最も最大値らしい点を表す関数
本研究では獲得関数として探索的なEI (Expected Improvement)を採用



EIは $x = 5.28$ が最も
最大値らしいと推定

ベイズ最適化

獲得関数の最大値である $x = 5.28$ を測定した。



1. 点が増えたらガウス過程法の予測分布も形を変える。
2. 予測分布が変われば獲得関数が最大となる点も変化する。
3. その点を再度測定する。

ベイズ最適化では上記の試行を反復的に行う。

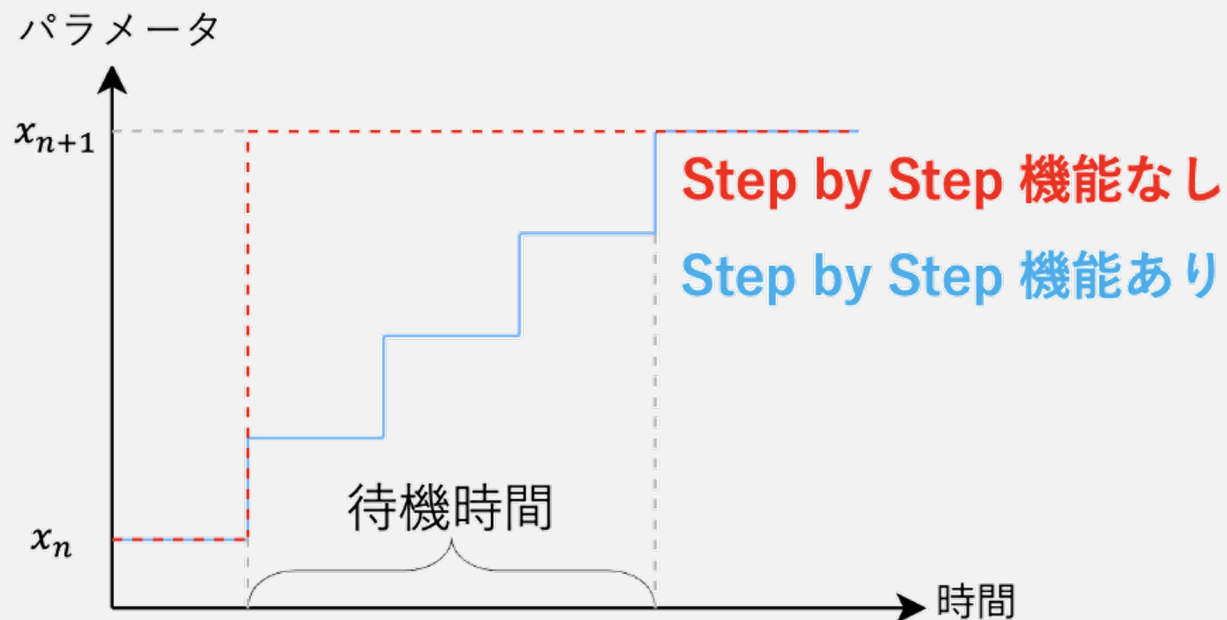
観測すると点の情報が増えて分布の精度が向上する

安全性確保のために必要な機能の実装

- パラメータの急激な変動はビームアボートを促す。
- 下記の機能を導入することでアボートを回避し、最適化時間を短縮できる。

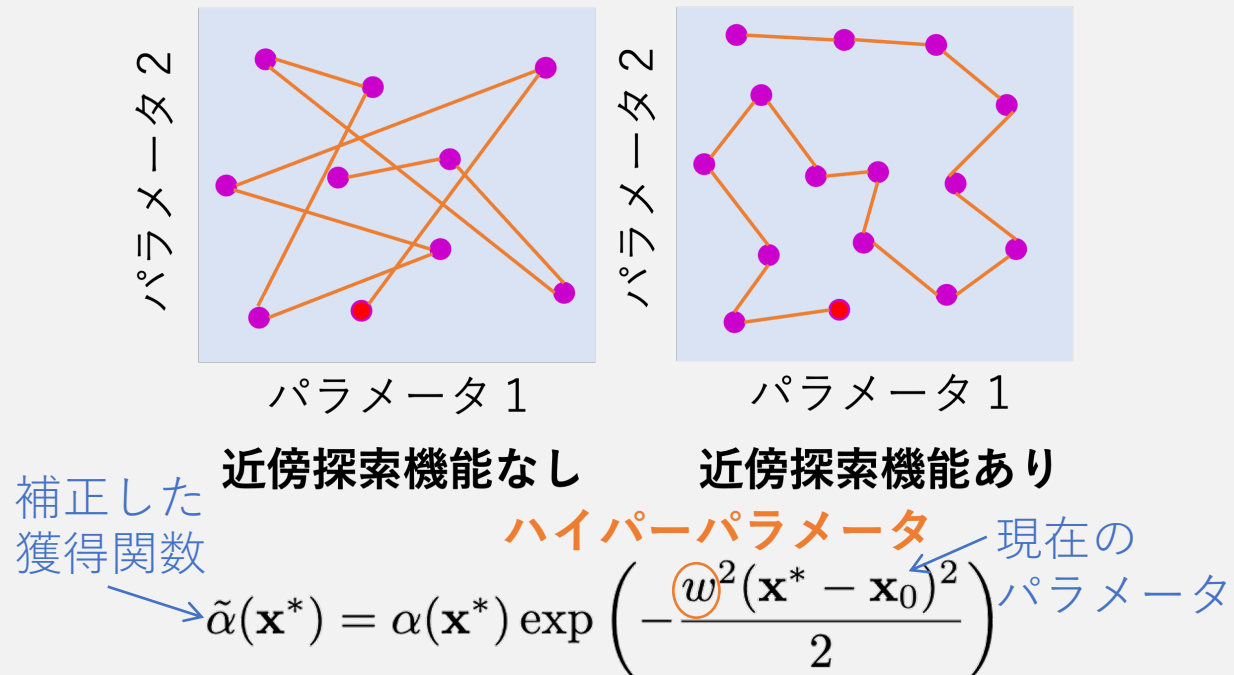
■ Step by Step機能

→待機時間は増えるがパラメータの変化幅を小さくできる。



■ 近傍探索機能

→Step by Step機能で生じた待機時間を削減することができる。



本研究内容

• 入射調整ツールの開発

- 入射調整のセットアップと調整パラメータ
- ベイズ最適化
- ベイズ最適化を入射調整に適応する際に実装した機能

• 入射調整ツールの運用結果

- 運用のセットアップと運用例
- 運用実績
- **考察**

① **パラメータ重要度**

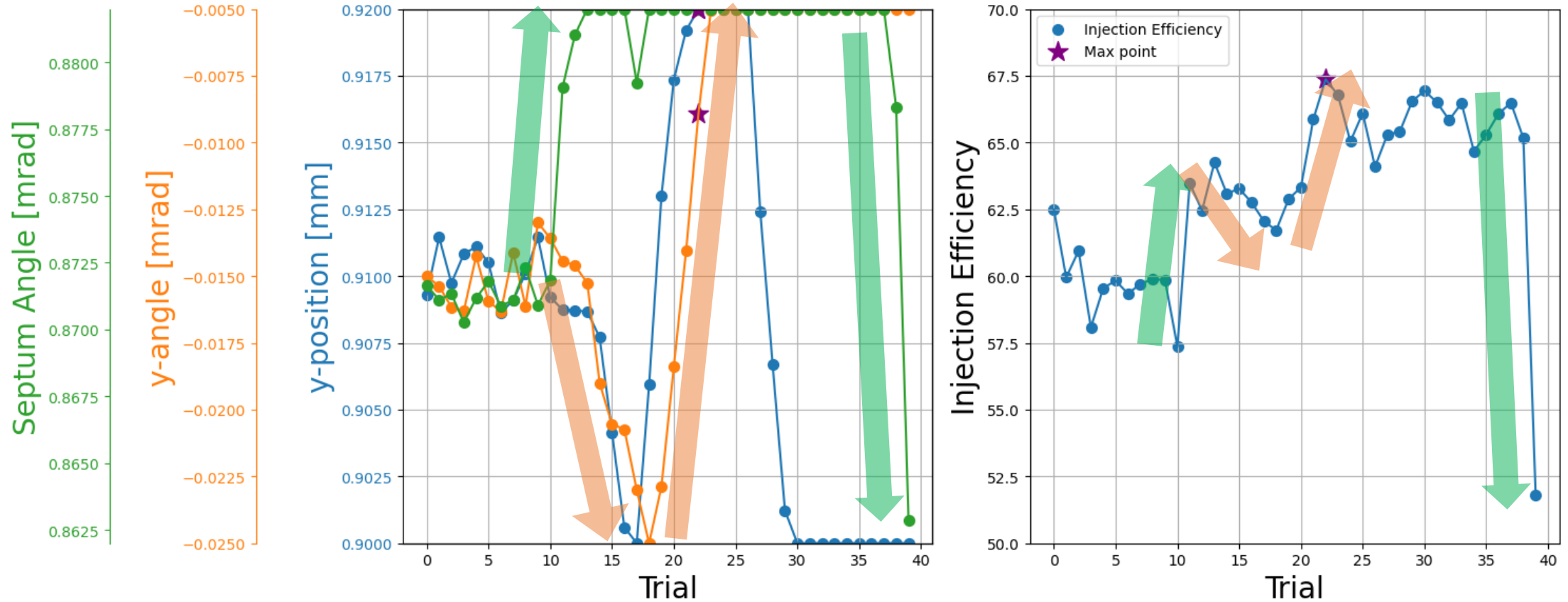
② **再現性の確認**

③ **近傍探索機能**

④ **獲得関数**

①パラメータ重要度

12月14日 HER最適化 3ラン目



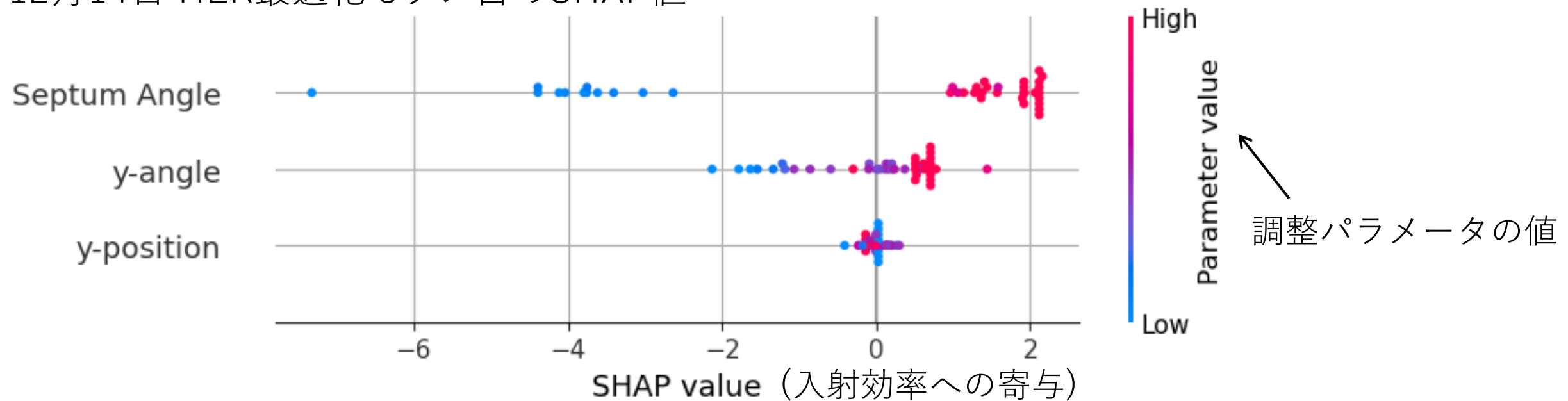
y-angleと**Septum Angle**は入射効率と強く相関していそう。**y-position**はあまり効かない？

①パラメータ重要度

■ SHAP (SHapley Additive exPlanations)

調整パラメータと評価パラメータの相関関係を解釈するツール
SHAP値は入射効率に寄与した度合いを表す。

12月14日 HER最適化 3ラン目のSHAP値



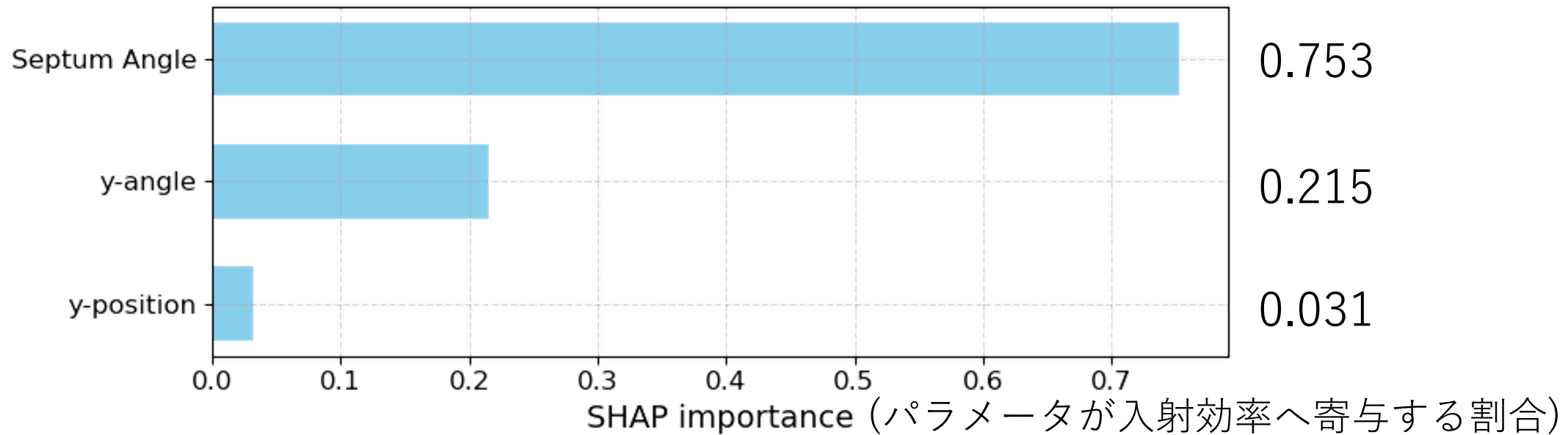
y-angleと**Septum Angle**は正負の両方に寄与が大きい。**y-position**は寄与が小さい

①パラメータ重要度

■ SHAP (SHapley Additive exPlanations)

調整パラメータと評価パラメータの相関関係を解釈するツール
SHAP値は入射効率に寄与した度合いを表す。

12月14日 HER最適化 3ラン目のSHAP importance



y-angleと**Septum Angle**は正負の両方に寄与が大きい。**y-position**は寄与が小さい

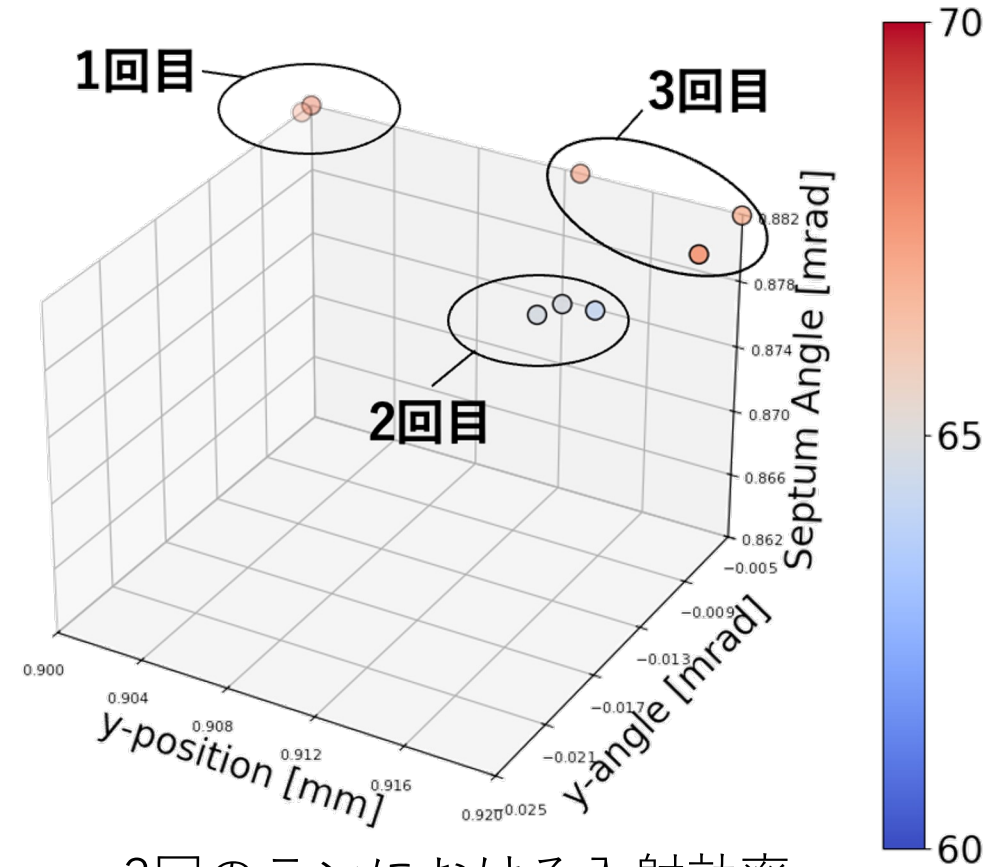
① SHAP importance (LER)

番号	測定日	入射効率 向上量	y-position	y-angle	Septum Angle	備考
1	11月15日	4.5%	0.12	0.60	0.28	
2	12月05日	32.4%	0.62	0.23	0.15	
3	12月06日	5.0%	0.13	0.31	0.56	
4	12月11日	2.7%	0.31	0.37	0.32	
5	12月13日	4.5%	0.19	0.54	0.27	再現性スタディ
6	12月14日	8.8%	0.22	0.18	0.60	
7	12月17日	9.3%	0.12	0.43	0.45	
8	12月25日	13.9%	0.10	0.72	0.18	片リング運転 比較スタディ

入射効率が向上するケースにおいて、全てのパラメータが向上に寄与する可能性を持つ

②同ビーム条件での再現性の確認

- ビーム条件が変わらないと思われる2~3時間の間に、同じ定義域、同じパラメータ設定で最適化を複数回繰り返し、最適化結果を確認した。



3回のランにおける入射効率
上位3点の3次元プロット

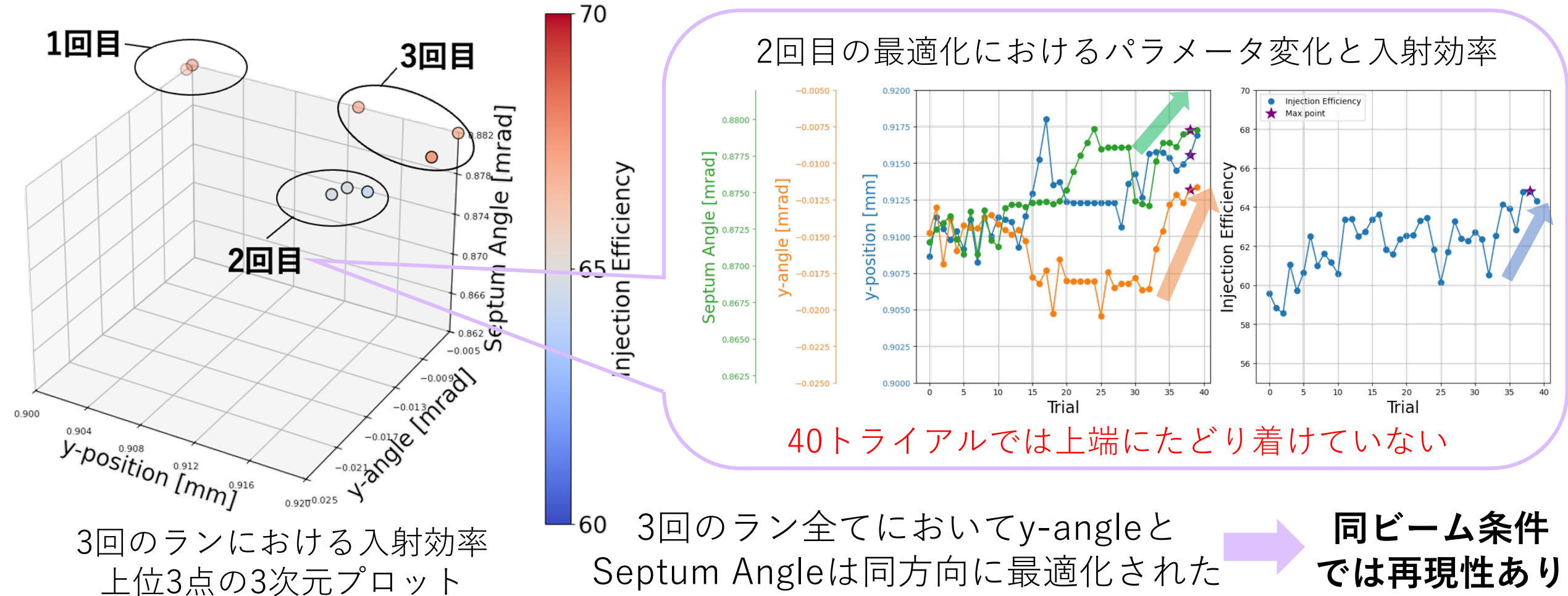
この時のSHAP importanceは
y-position : 0.05, y-angle : 0.16, Septum Angle : 0.79

予想

- Septum Angleは3回とも同じ方向に最適化されそう
- y-positionは入射効率にあまり寄与しないので最適化方向がバラバラになりそう

②同ビーム条件での再現性の確認

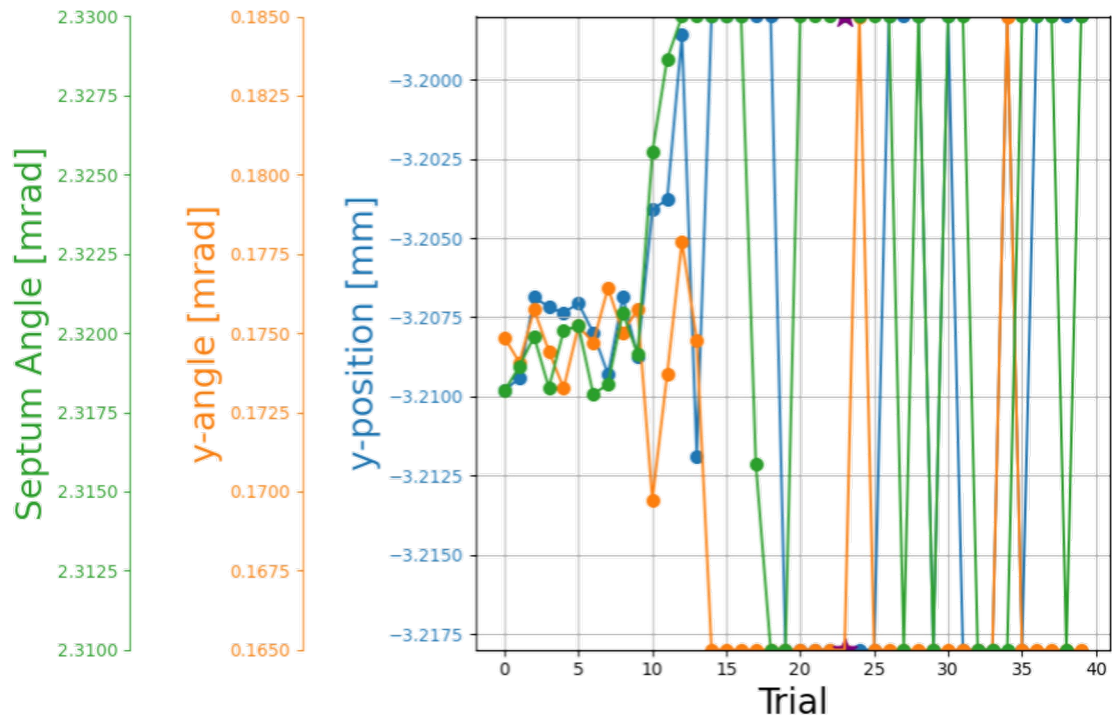
- ビーム条件が変わらないと思われる2~3時間の間に、同じ定義域、同じパラメータ設定で最適化を複数回繰り返し、最適化結果を確認した。



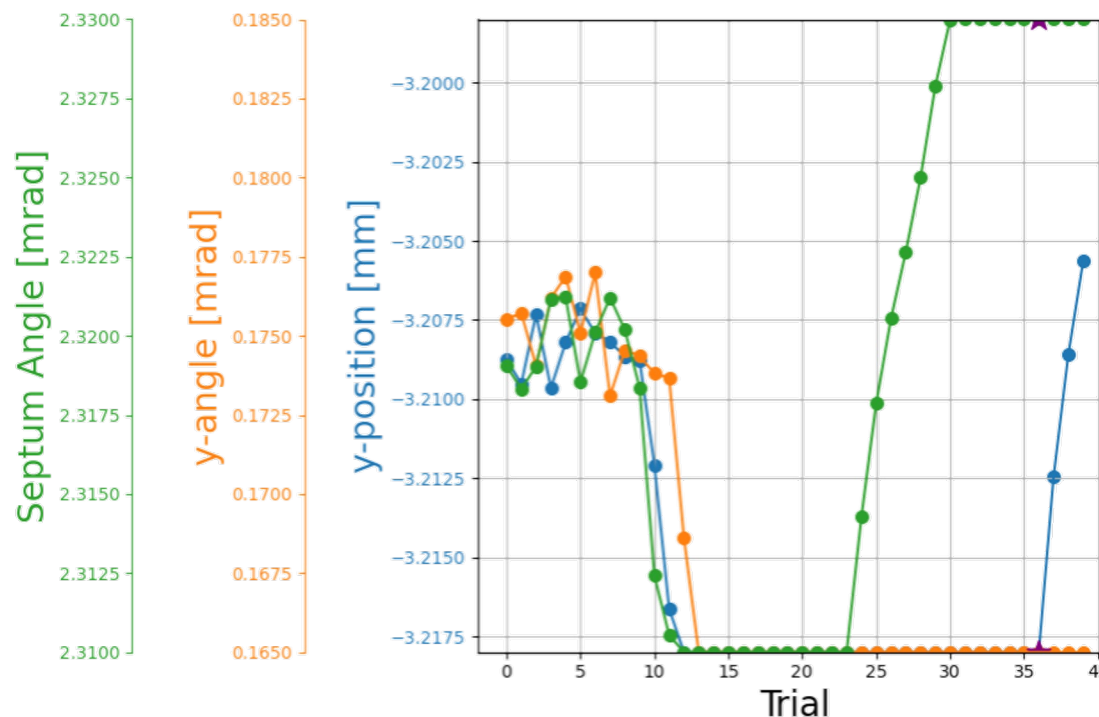
③近傍探索度の比較

近傍探索度

- 近傍探索度を0と5で比較した。(獲得関数はEIで固定) $\tilde{\alpha}(\mathbf{x}^*) = \alpha(\mathbf{x}^*) \exp\left(-\frac{w^2(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}_0)^2}{2}\right)$



近傍探索度0 (最適化時間**29分**)



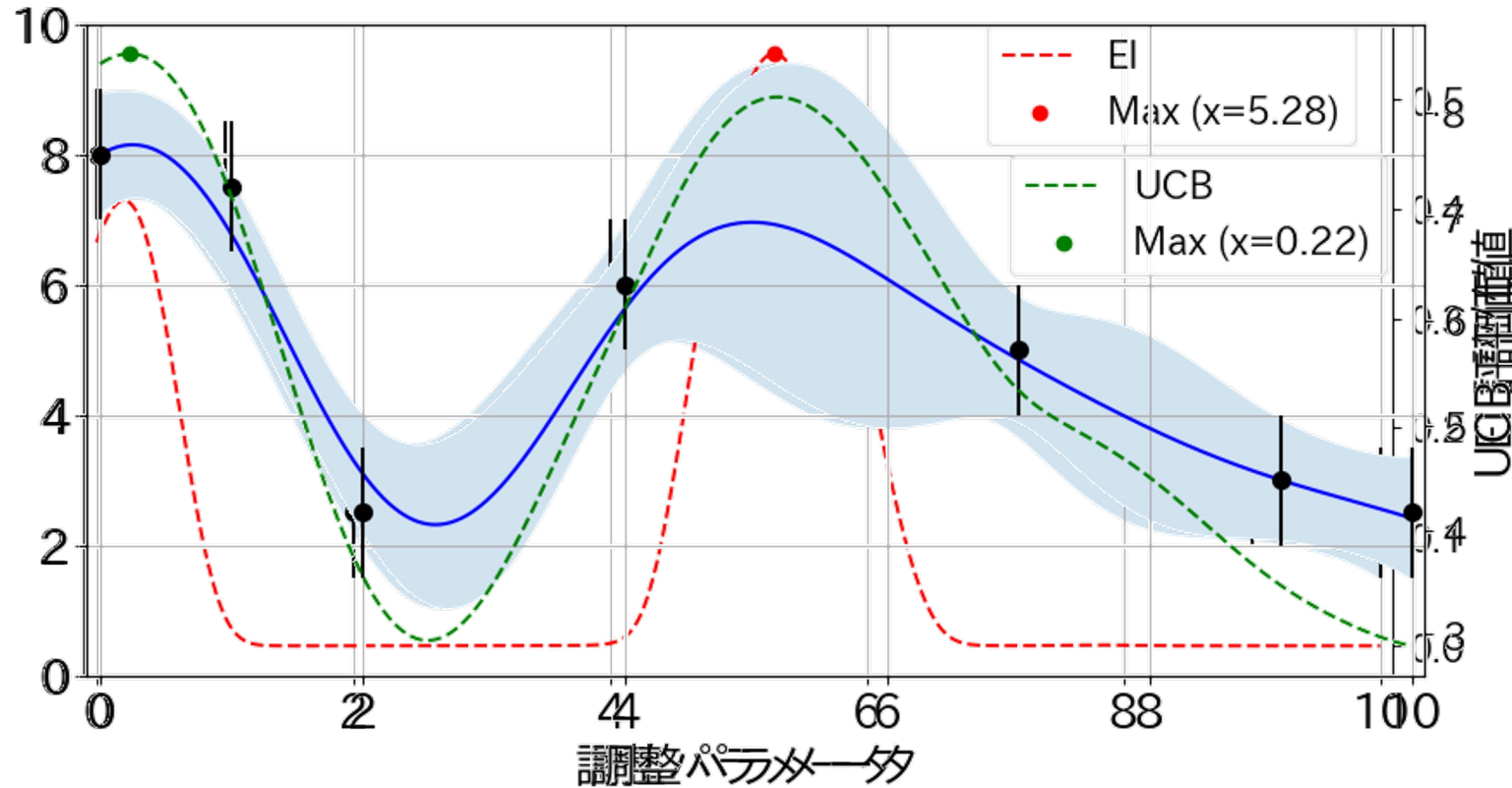
近傍探索度5 (最適化時間**24分**)

➡ 近傍探索機能を課すことによって最適化時間を5分間短縮した。(調整値は同じ点)

④獲得関数について復習

■ 獲得関数

ガウス過程回帰法で作成した分布において最も最大値らしい点を表す関数



- **EI (Expected Improvement)**

$$EI(\mathbf{x}) = \mathbb{E}[\max(0, y(\mathbf{x}) - y_{\max})]$$

- **UCB (Upper Confidence Bound)**

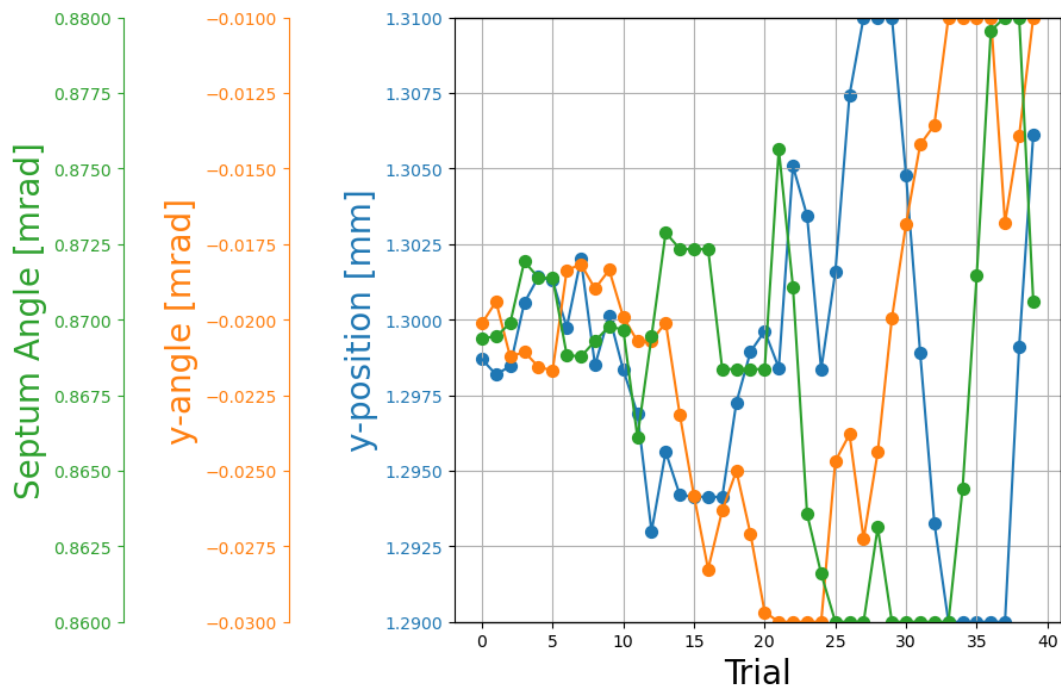
$$UCB(\mathbf{x}) = \mu_n(\mathbf{x}) + \beta\sigma_n(\mathbf{x})$$

β はハイパーパラメータ
大きくするほど探索を重視する

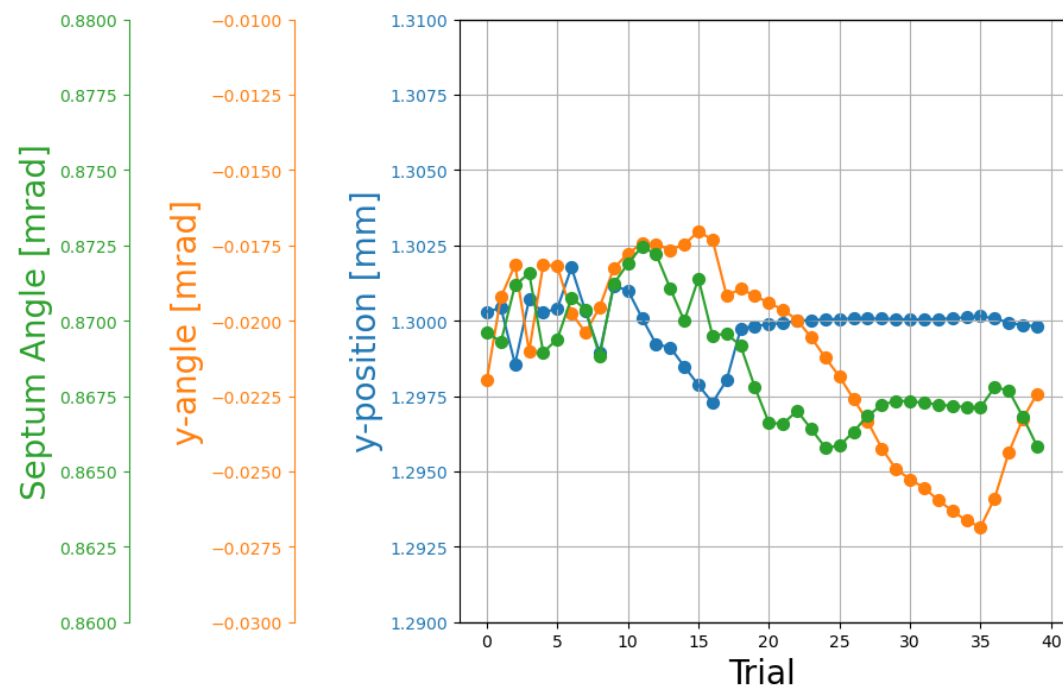
獲得関数についてEIとUCB ($\beta=2$)で比較を行った

④獲得関数の比較

- 獲得関数はEIとUCB ($\beta=2$)のどちらが小分け最適化に適合するかを比較した。(近傍探索度は5で固定)



EIのパラメータ変動



UCB ($\beta=2$)のパラメータ変動

➡ 最適値が定義域の外にあることが多い小分け最適化においてはEIの適合性が高い

まとめと展望

◆まとめ

- 機械学習（ベイズ最適化）を用いたSuperKEKB加速器の入射調整ツールを開発した。
- 衝突型加速器における機械学習を用いた入射調整を世界で初めて実現した。
- 入射調整ツールの運用の結果は、
 - ①両リングの運用の半数において入射効率が有意に向上した。
 - ②入射調整ツールは高い安全性を有する。
 - ③入射調整ツールは利便性を有する。
- 小分け最適化における、獲得関数EIと近傍探索機能の有効性を確認した。

◆展望

- 調整パラメータを追加して、最適化性能を向上させる。
- ビームロス値を参照しながら入射効率の最適化を用いた運用を行う。

謝辞

- 本研究の遂行にあたり、データ取得において多大なご協力をいただきました**KEK加速器施設の皆様、加速器オペレーターの皆様**に深く感謝申し上げます。
- また、多大なるご指導とご助言を賜りました**東大後田研/総研大Bファクトリー研スタッフの皆様**に、心より御礼申し上げます。
- 同期や先輩後輩のみんな、色々ありがとう！

ご清聴ありがとうございました。

全19ラン

運用のセットアップ (HER)

番号	測定日	最適化回数	獲得関数	近傍探索度	備考
1	11月14日	3	EI	5	
2	11月17日	2	EI	5	LER電流減少中
3	12月07日	1×9	EI, UCB($\beta = 2$), UCB($\beta = 5$)	0, 1, 5	比較スタディ
4	12月14日	1×5	EI	5	再現性スタディ

HER入射効率の測定の
標準偏差は2.50%

運用実績 (HER)

11/16にオフセット
の値が変化

番号	測定日	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量	y-position [mm]	y-angle [mrad]	Septum Angle [mrad]	備考
1	11月14日	59.4% / 70.2%	10.8%	1.253	-0.015	0.272	
2	11月17日	20.7% / 26.8%	6.1%	1.219	-0.019	0.929	LER電流減少中
3	12月07日	68.2% / 71.1%	2.9%	1.300	-0.020	0.869	比較スタディ
4	12月14日	58.4% / 68.5%	10.1%	0.900	-0.005	0.882	再現性スタディ

4日の運用の内、**2日間は入射効率を有意 ($3\sigma = 7.50\%$ 以上) に向上させることができた**

SHAP importance (HER)

番号	測定日	入射効率 向上量	y-position	y-angle	Septum Angle	備考
1	11月14日	10.8%	0.12	0.15	0.73	
2	11月17日	6.1%	0.33	0.41	0.27	LER電流減少中
3	12月07日	2.9%	0.22	0.41	0.37	比較スタディ
4	12月14日	10.1%	0.05	0.16	0.79	再現性スタディ

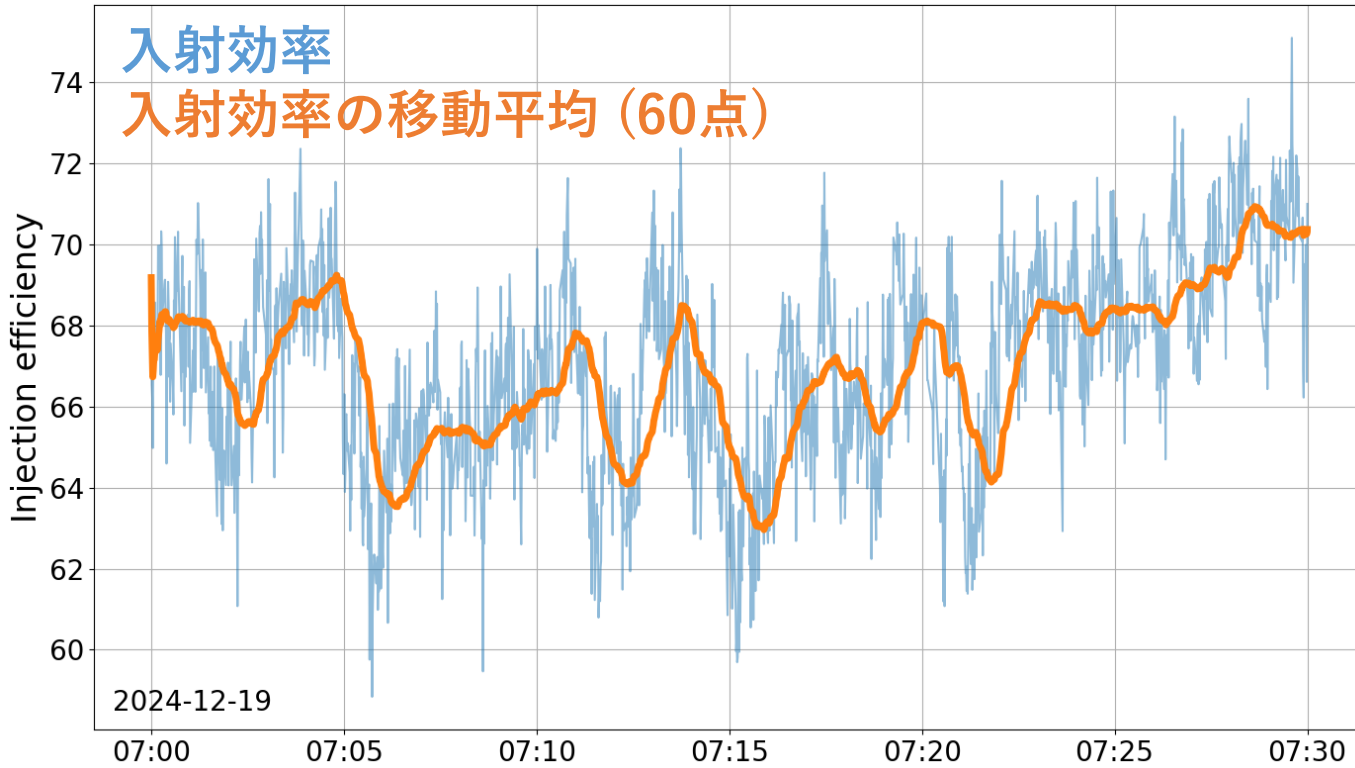
LER入射効率の測定の
標準偏差は2.32%

運用実績 (LER)

番号	測定日	調整前/後 入射効率	入射効率 向上量	y-position [mm]	y-angle [mrad]	Septum Angle [mrad]	備考
1	11月15日	86.3% / 90.8%	4.5%	-3.219	0.143	2.454	1バンチ目
2	12月05日	65.8% / 98.2%	32.4%	-3.260	0.180	2.300	1バンチ目
3	12月06日	71.9% / 76.9%	5.0%	-3.174	0.138	2.300	
4	12月11日	61.7% / 64.4%	2.7%	-3.179	0.141	2.275	
5	12月13日	77.5% / 82.0%	4.5%	-3.170	0.134	2.210	再現性スタディ
6	12月14日	69.0% / 77.8%	8.8%	-3.178	0.140	2.252	
7	12月17日	59.8% / 69.1%	9.3%	-3.275	0.169	2.241	
8	12月25日	54.5% / 68.4%	13.9%	-3.218	0.165	2.330	片リング運転 比較スタディ

8日の運用の内、**4日間は入射効率を有意 ($3\sigma = 6.96\%$ 以上) に向上させることができた**

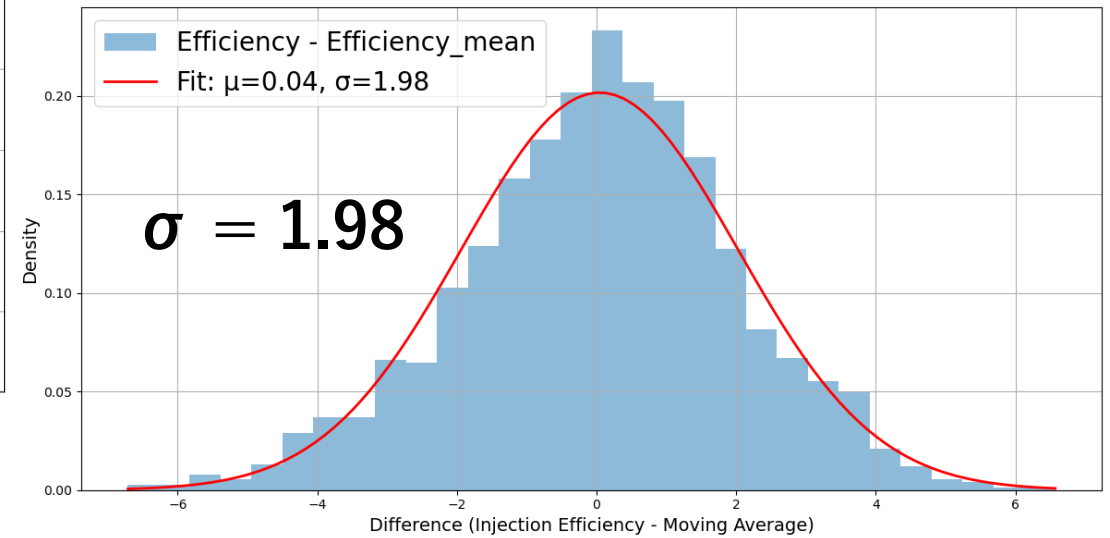
ビームのふらつきと測定誤差



ビーム状態を固定した時の30分の入射効率

測定誤差とは別にビーム電流がふらついていることがわかる

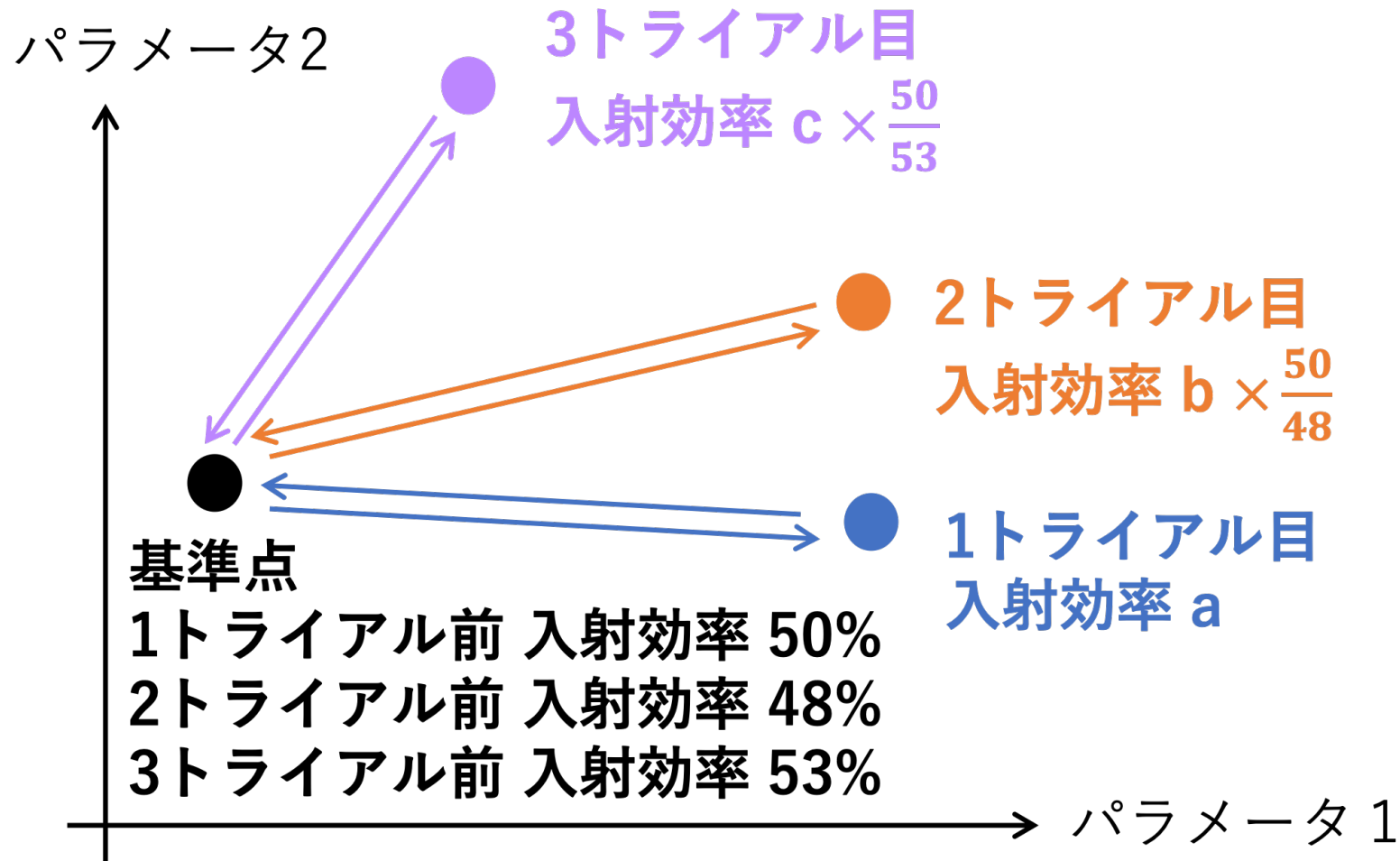
移動平均をビームのふらつきだとして、測定誤差を **入射効率 - 移動平均** と考える



入射効率 - 移動平均のヒストグラム

測定誤差 ($\sigma = 1.98$) は30回の中央値をとればビームのふらつき ($\sigma = 2 \sim 3$) に対して小さい?

ふらつき補正機能

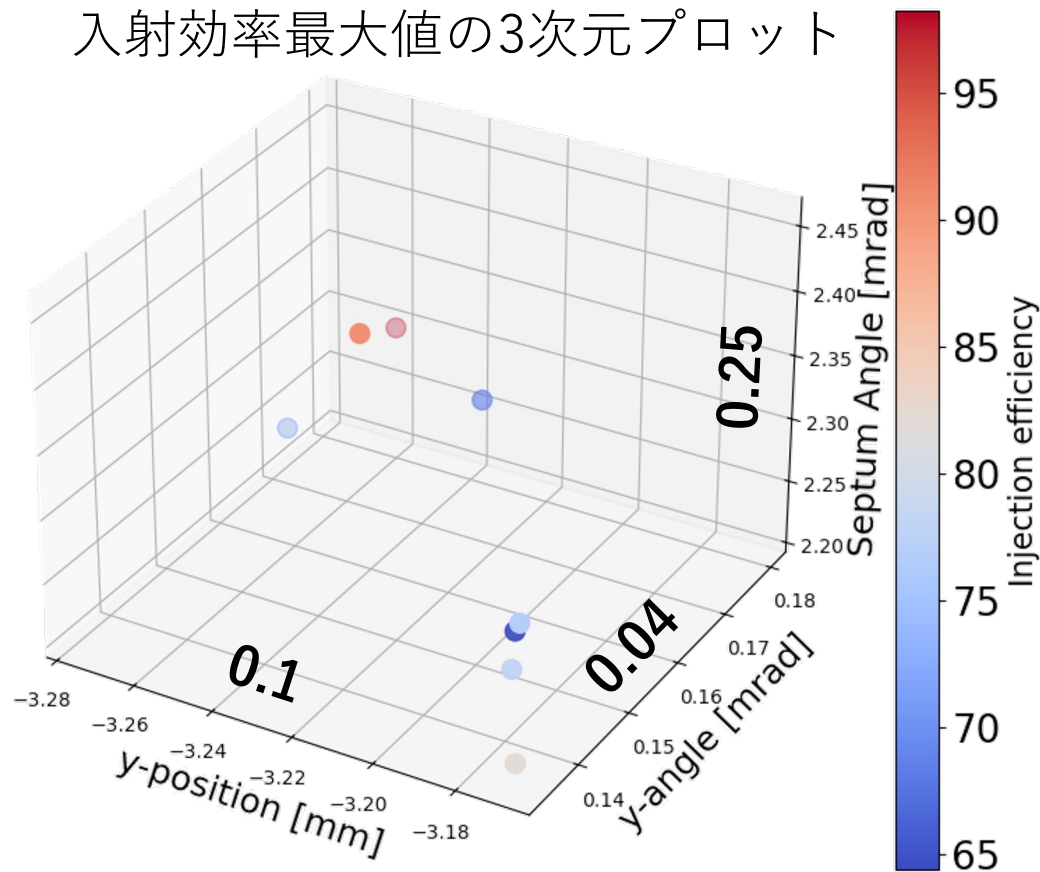


調整パラメータ上に基準点を決め、ふらつきの効果を補正する

期間は2024年
11/15~12/25

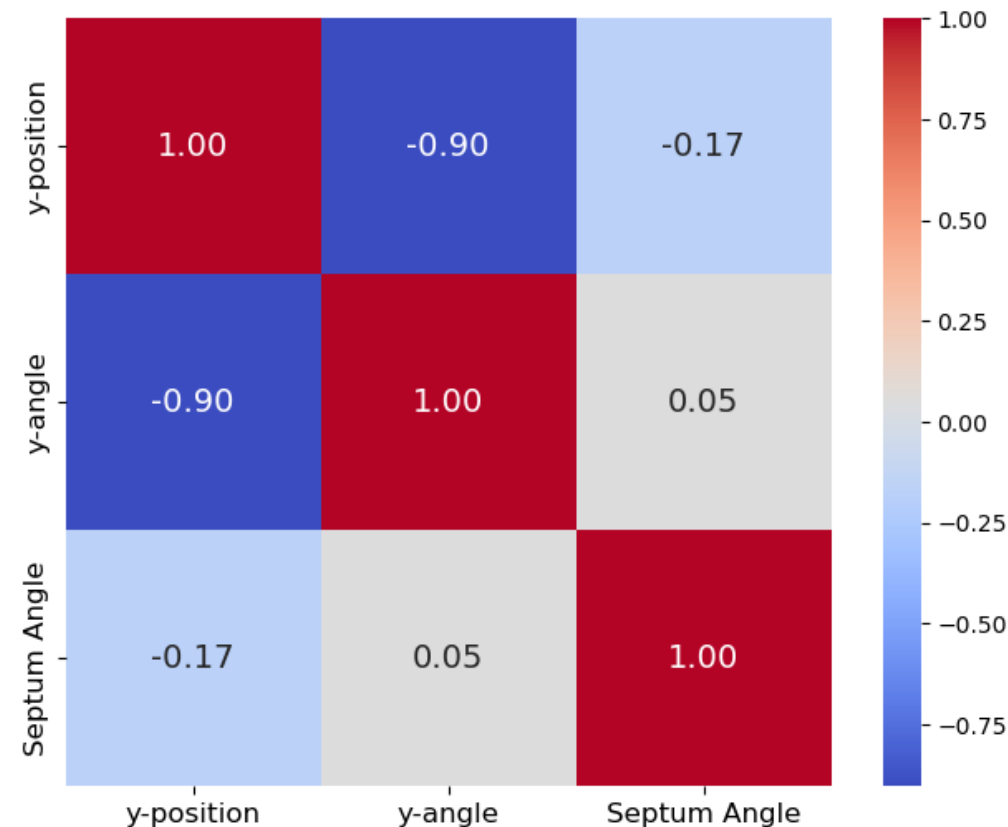
考察 入射効率が最大となる点

LERの8日間の運用における各測定日の
入射効率最大値の3次元プロット



y-angleは入射効率最大値の変動が小さい
Septum Angleは変動が大きい

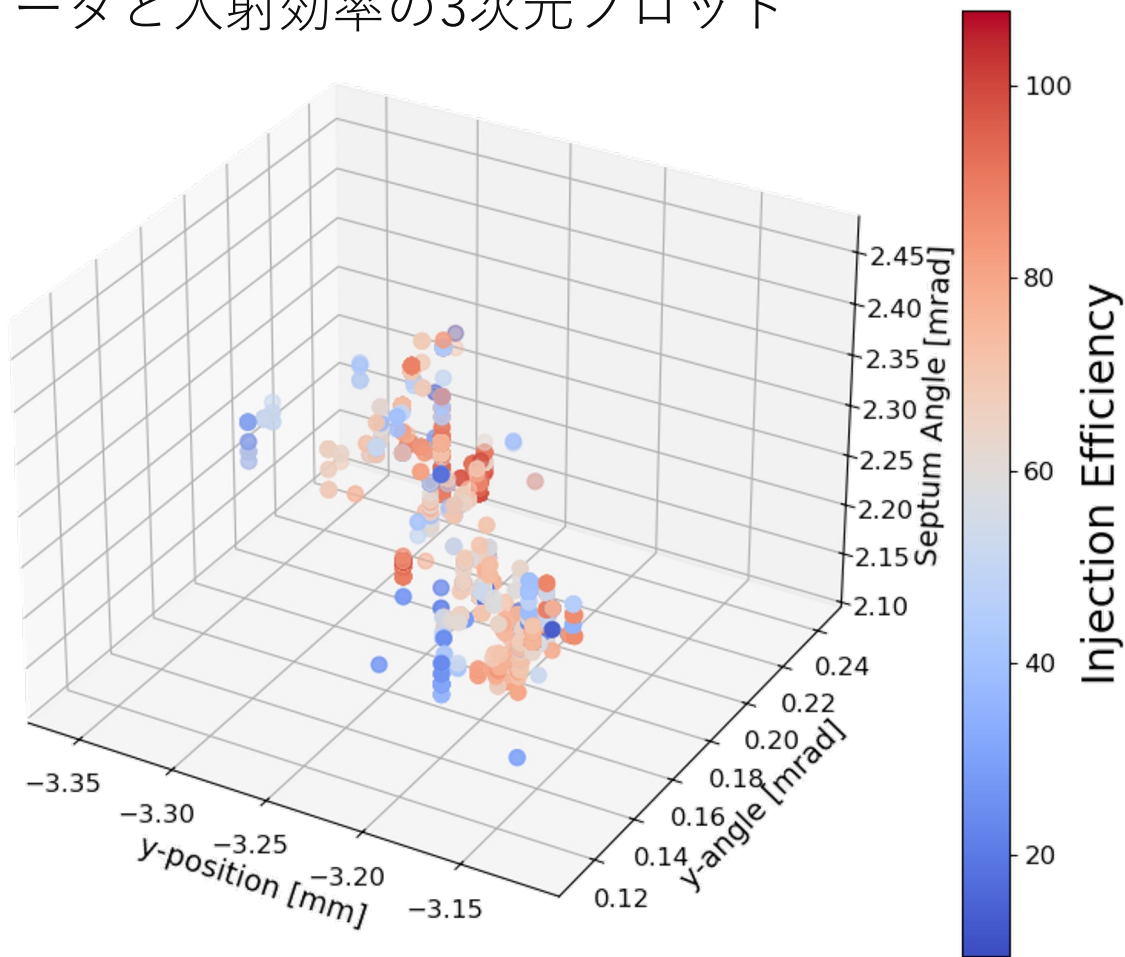
LERの8日間の運用における各測定日の
入射効率最大値の共分散行列



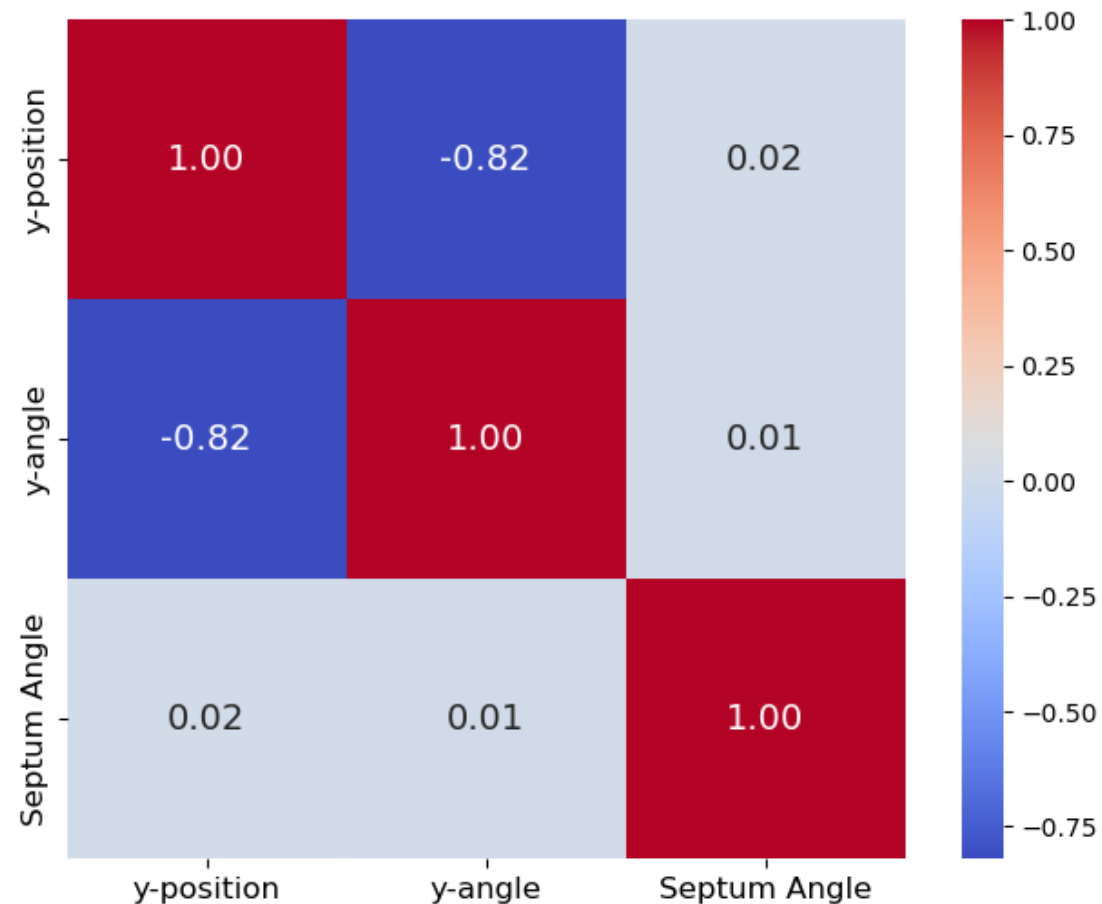
y-positionとy-angleの相関は強い
y方向パラメータとSeptum Angleの相関は弱い

1ヶ月間の入射効率と共分散行列

11/16~12/16における3つの入射調整パラメータと入射効率の3次元プロット



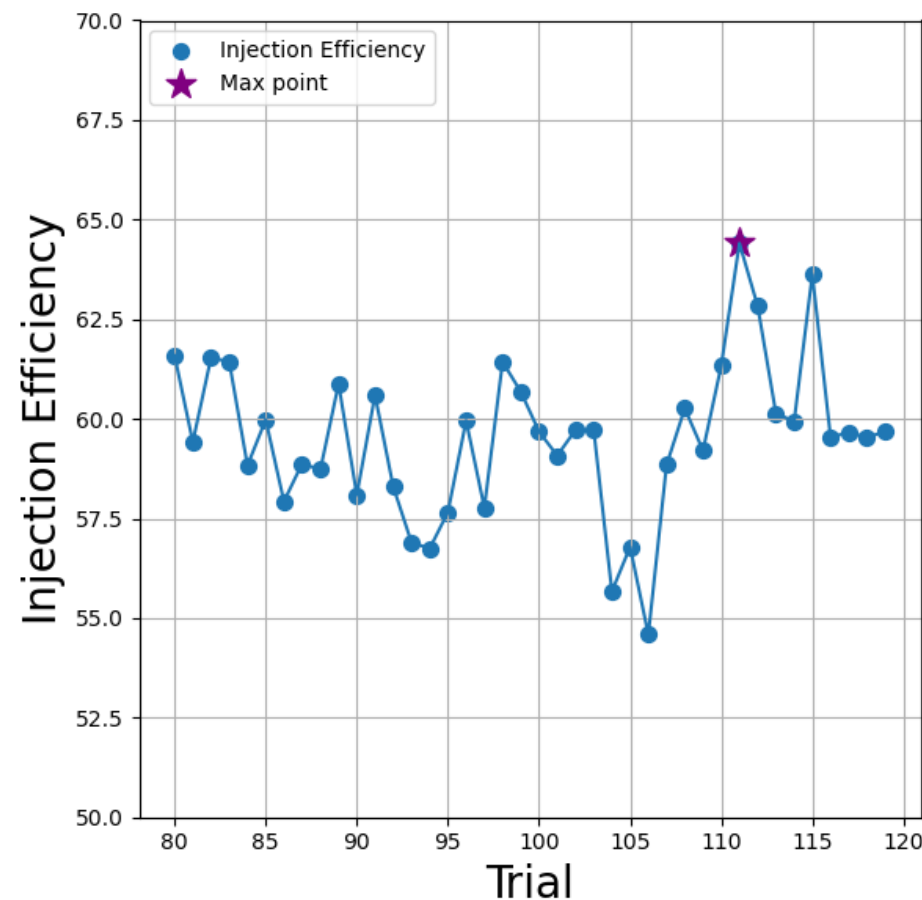
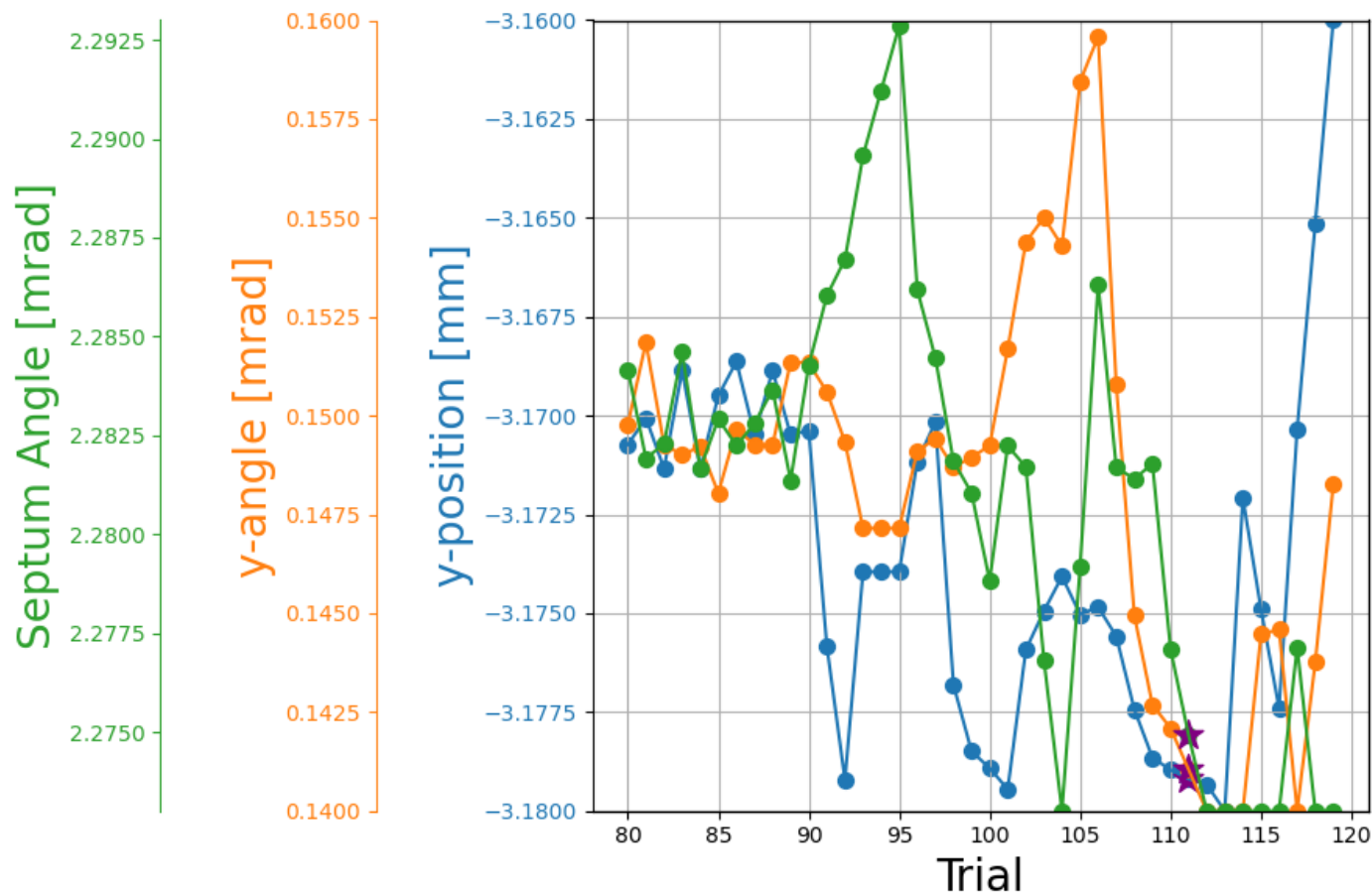
11/16~12/16における3つの入射調整パラメータの共分散行列



最適化がうまくいかなかったケース

12月11日 LER最適化

入射調整向上量2.7%



ガウス過程回帰法

■ ガウス過程回帰法

$$p(y^* | \mathbf{y}, \mathbf{K}, \mathbf{x}^*) = \mathcal{N}(\mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{y}, k_{**} - \mathbf{k}_*^T (\mathbf{K} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{k}_*) \quad \text{予測分布の式}$$

ここで、

$$\begin{cases} \mathbf{K}_{nn'} = k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_{n'}) \quad (n, n' = 1, 2, \dots, N) \\ \mathbf{k}_* = (k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_1), k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_2), \dots, k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_N))^T \\ k_{**} = k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}^*) \end{cases} \quad \sigma : \text{ノイズ標準偏差}$$

k はカーネル関数といい、この関数をどうするかで予測分布の性質が変わる。

- **RBFカーネル** (任意の点が連続で無限回微分可能)

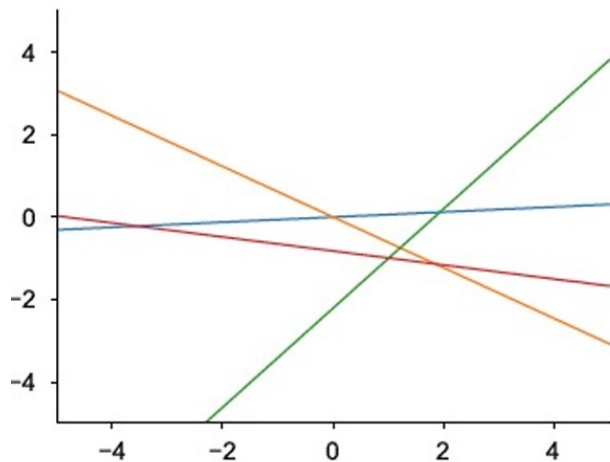
$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \theta_1 \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}'\|^2}{\theta_2}\right)$$

θ はハイパーパラメータ

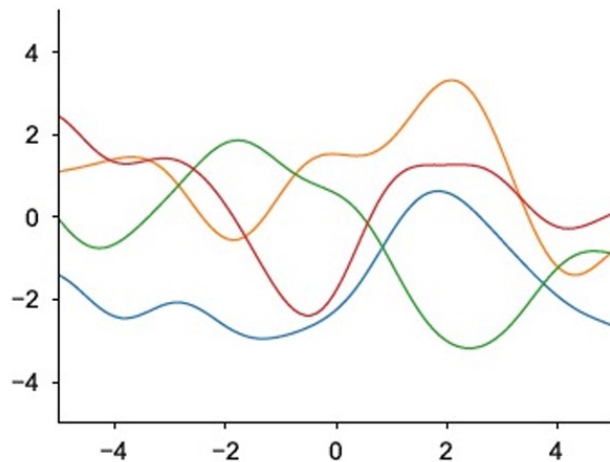
θ の最適化は、各トライアルごとに尤度 L を最大化するように設定する。

$$L = \log(p(y|x, \theta))$$

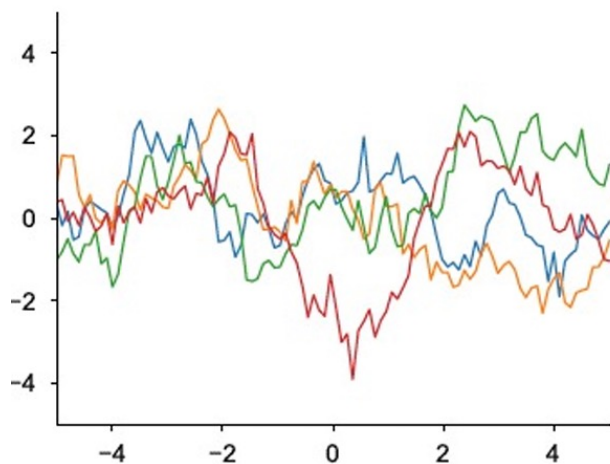
カーネル関数による分布の変化



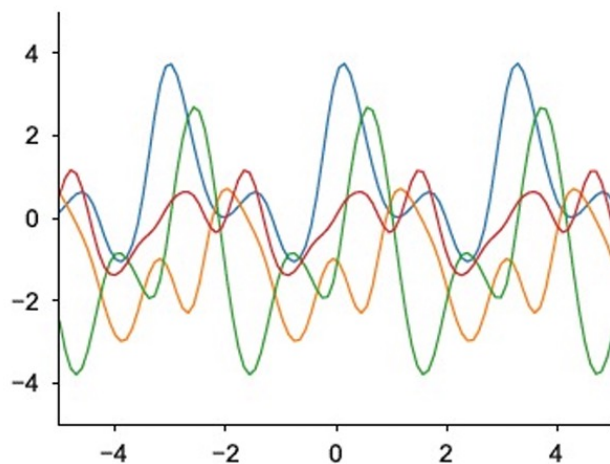
(a) 線形カーネル: $x^T x'$



(b) ガウスカーネル: $\exp(-|x - x'|^2/\theta)$



(c) 指数カーネル: $\exp(-|x - x'|/\theta)$



(d) 周期カーネル: $\exp(\theta_1 \cos(|x - x'|/\theta_2))$

カーネル関数を変化させると
分布の振る舞いが変わる

カーネル関数は足して表現性を
高めることもできる

ガウス過程と機械学習, 講談社, 2019
持橋大地 (統計数理研究所)
大羽成征 (京都大学)

ベイズ最適化

■ 強化学習としての文脈でのベイズ最適化

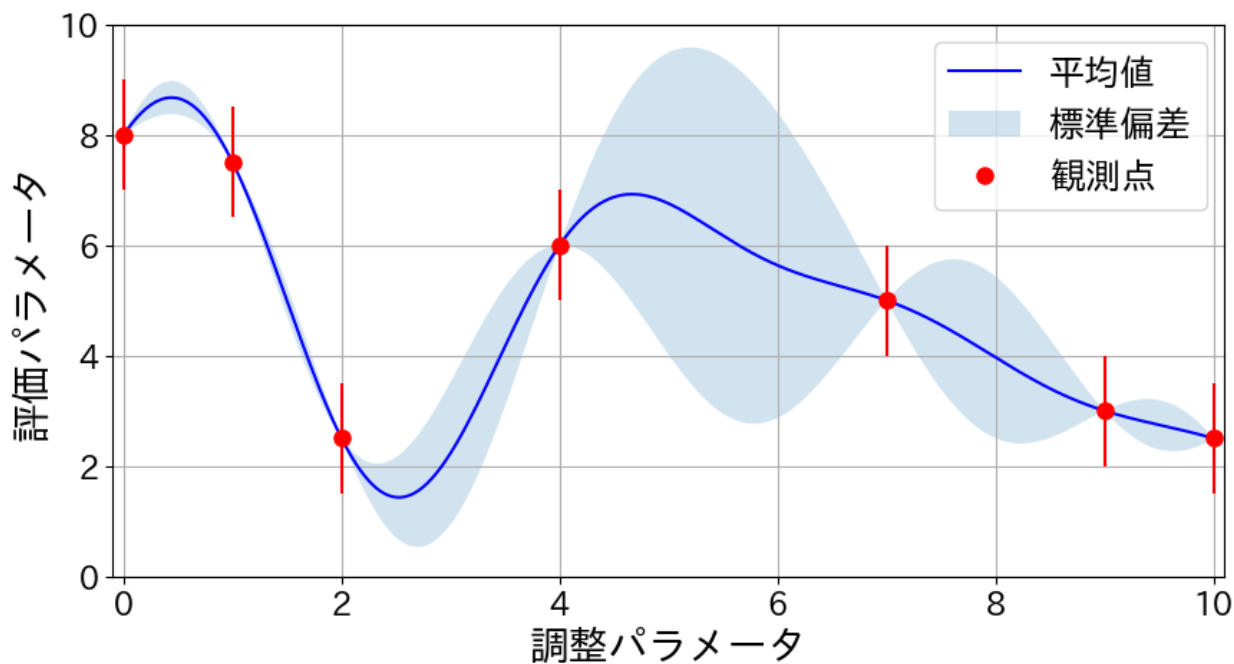
- エージェント：ガウス過程回帰法と獲得関数
- 環境：ブラックボックス関数
- 状態：過去の調整パラメータと評価パラメータの値
- 報酬：評価パラメータの値
- 方策：獲得関数

■ 教師あり学習としての文脈でのベイズ最適化

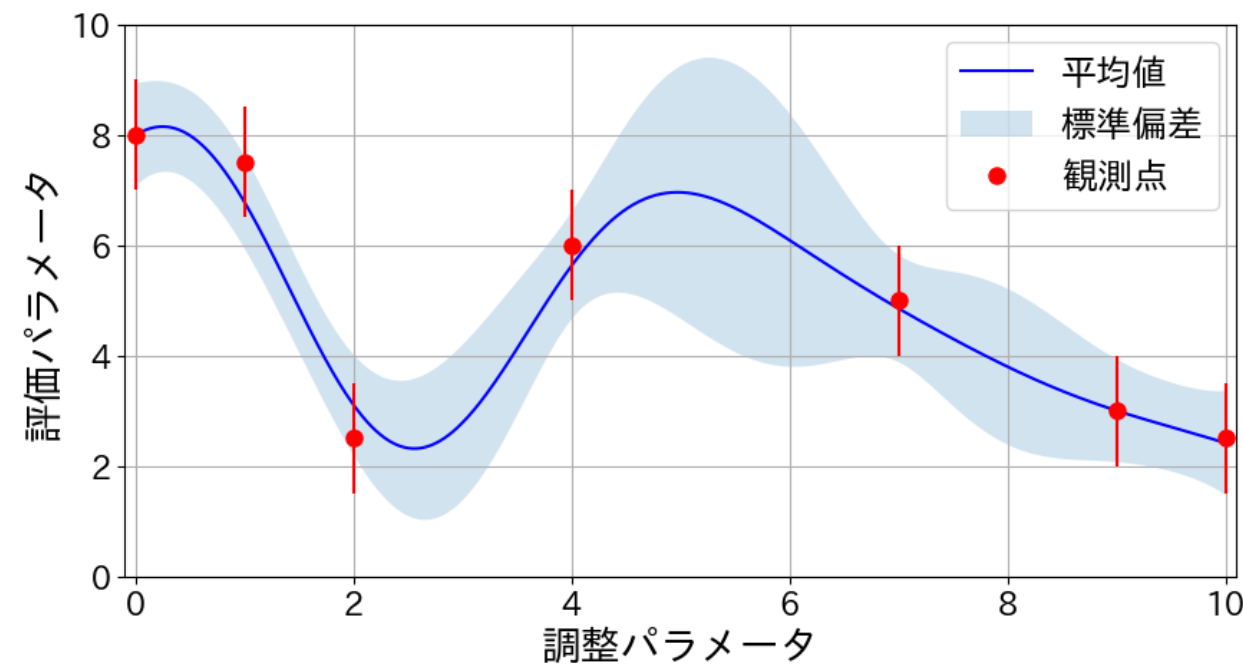
- 入力パラメータ：調整パラメータ
- 出力パラメータ：評価パラメータ
- モデル：ガウス過程回帰法

ノイズ標準偏差

予測分布を作成する際に、測定点にどれだけ測定誤差があるかを考慮する値



ノイズ標準偏差なし

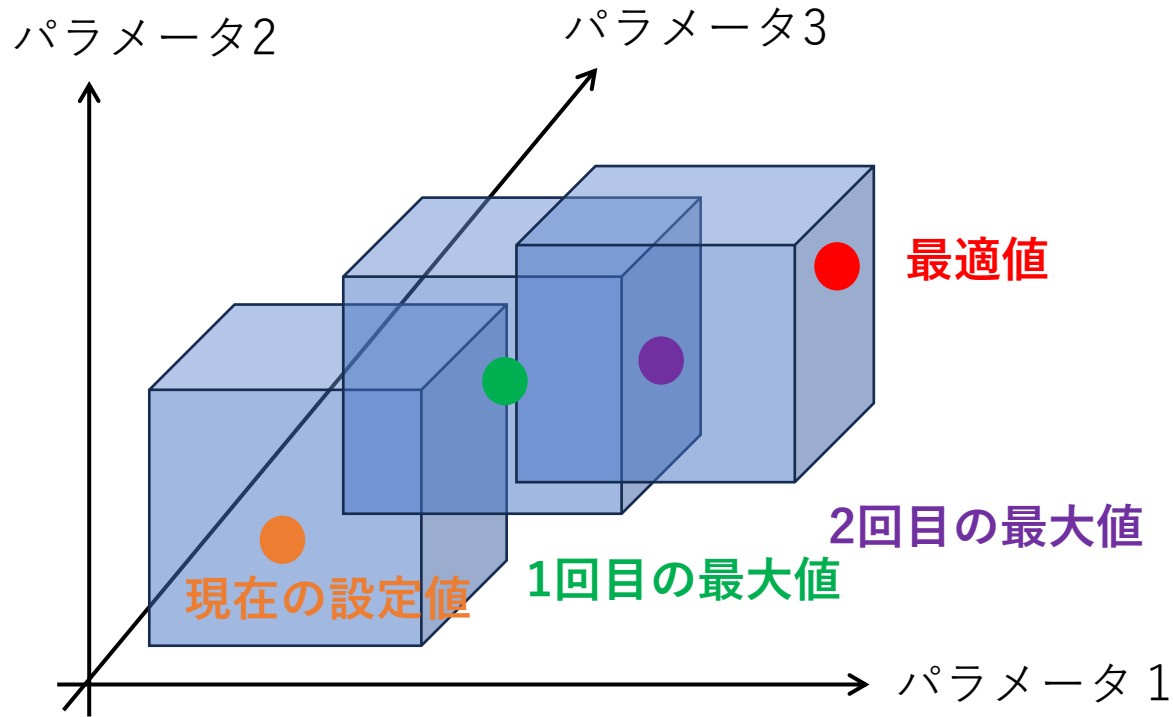


ノイズ標準偏差あり

ノイズ標準偏差を設定しない場合、分布の平均値(青線)が必ず測定点を通るため、オーバーフィッティングをしてしまう可能性がある。

安全な最適化のための二つの手法

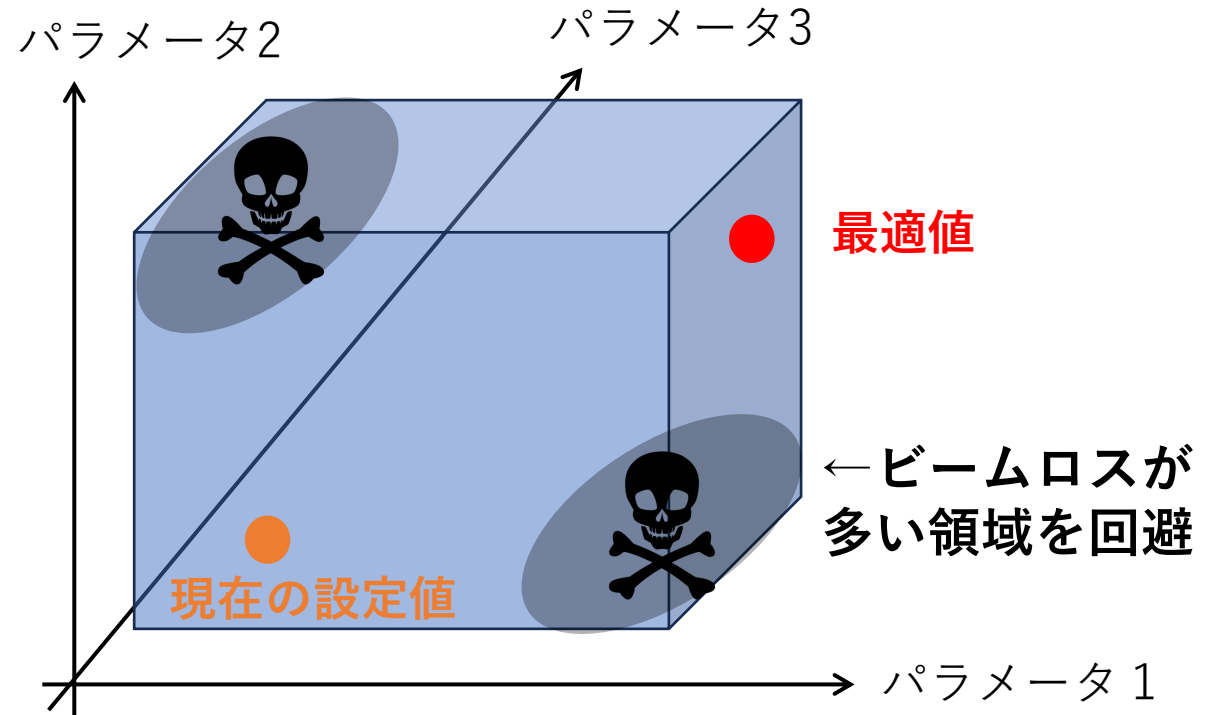
小分け最適化



メリット
デメリット

実装が容易、経験上安全
探索性能は高くない
最適化に時間がかかる

制限付き最適化



メリット
デメリット

探索性能が高い
短時間で探索可能
実装が煩雑、かつ難しい

制限つきベイズ最適化

◆制限つきベイズ最適化

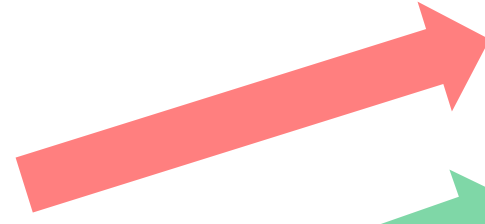
ベイズ最適化



入射効率の
確率分布を作成



ビームロスの
確率分布を作成



ビームロスが閾値以下
の領域において、
入射効率が最も高く
なりそうな点を測定



安全な領域の前情報が
なくとも最適化が可能に

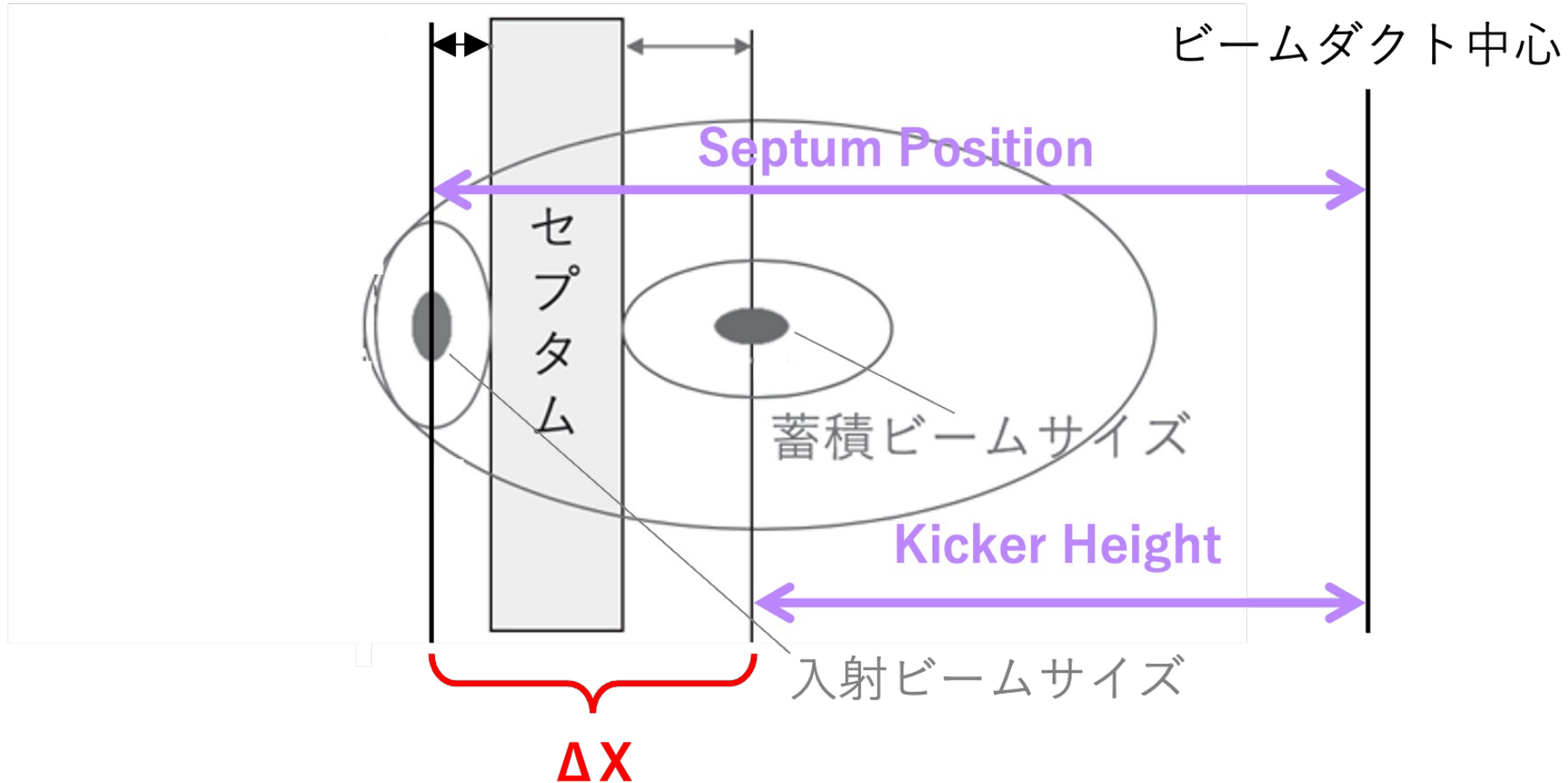
◆実装に対する課題

- どのロスモニターを用いるか？（ビームアポートが起こる場所は複数箇所あり）
- ビームロスの閾値はどうするか？（何mRad/s以下に設定するのが適切？）
- 何%の信頼区間にすれば適切か？（95%の確率で閾値以下ならそれは安全か？）

入射調整パラメータ

名称	パラメータの詳細	
Septum Position [mm]	セプタムマグネット終端を通過する入射ビームのビームダクト中心からの水平距離	急激なビームロスが発生するため不採用
Septum Angle [mrad]	セプタムマグネット終端を通過する入射ビームのビーム進行方向からの水平角度	採用
Kicker Height [mm]	キッカーマグネットによって蹴られた蓄積ビームが四極マグネットを通過する際のビームダクト中心からの距離	急激なビームロスが発生するため不採用
Kicker Jump	蓄積ビームと入射ビームの closed orbit からの振動の比率 (0~1 の連続値で、0 ほど入射ビームが振動する)	普段あまり触らないパラメータ + 振動を変化させ危険なため不採用
y-position [mm]	ビーム輸送路下流の垂直ステアリングマグネット終端を通過する入射ビームのビームダクト中心からの垂直距離	採用
y-angle [mrad]	ビーム輸送路下流の垂直ステアリングマグネット終端を通過する入射ビームのビームダクト中心からの垂直角度	採用
inj. phase [deg]	SuperKEKB のバケット位相に対する入射器全体の RF 位相	採用を検討中

Septum PositionとKicker Height

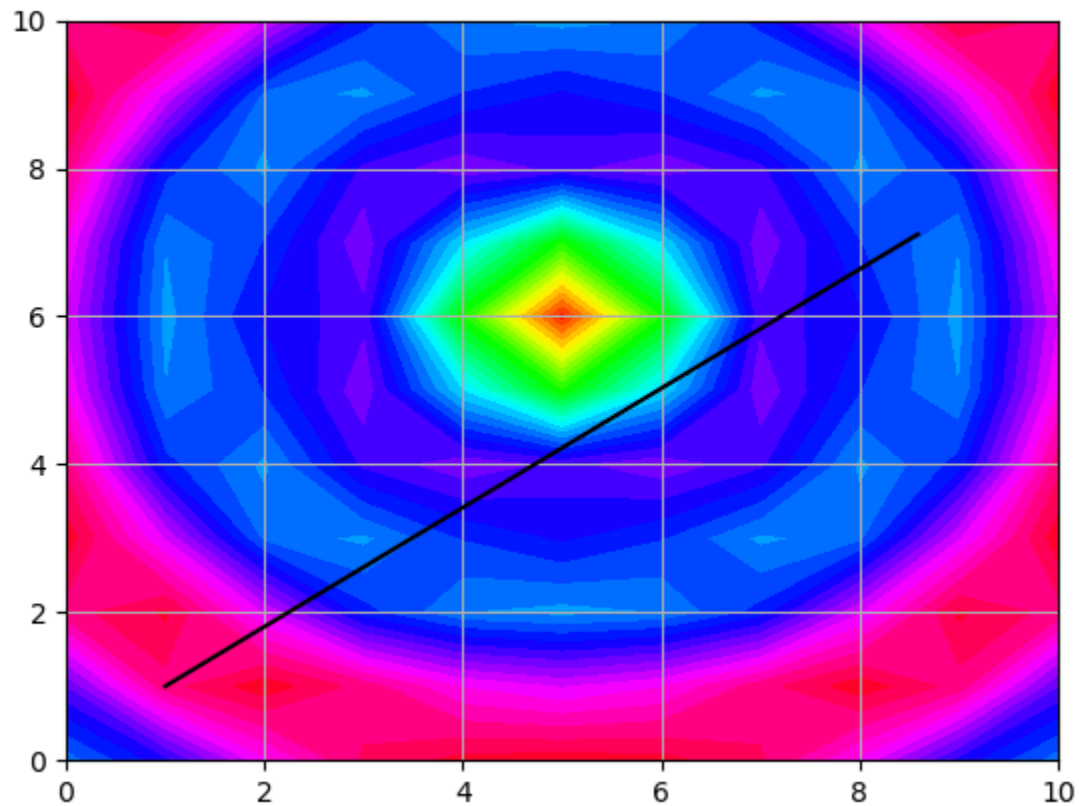


調整を誤るとセプタム隔壁に当たってしまってもってビームロスが急激に増加してしまう

なぜベイズ最適化を用いるか？

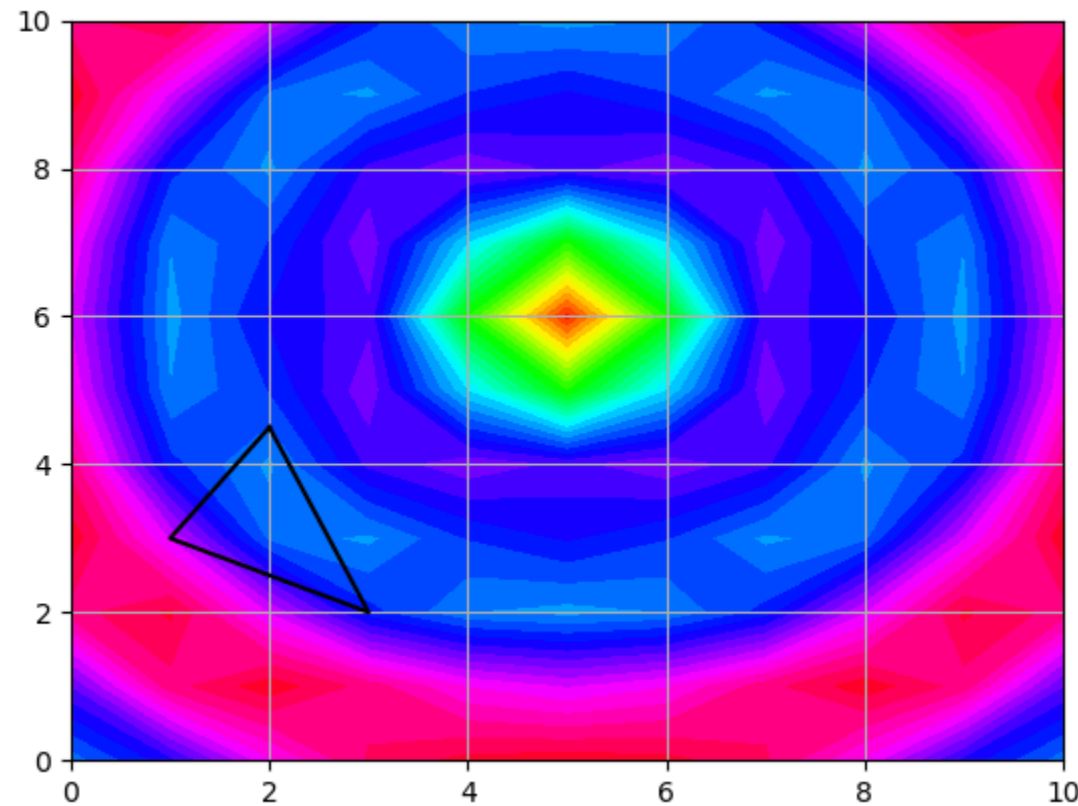
古典的ブラックボックス最適化との比較

夏井氏提供



ベイズ最適化

局所解に陥らずに探索範囲全体の関数を予想するように動く



Downhill simplex法

局所解に陥る可能性もある

ビーム寿命補正式の導出

DCCTのt+1秒での電流値は、

$$\begin{aligned} I_{DCCT}(t+1) &= I_{DCCT}(t) + I_{from-BT}(t) + \frac{dI}{dt}((t+1) - t) \\ &= I_{DCCT}(t) + I_{from-BT}(t) + \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

入射効率は、

$$\begin{aligned} (\text{見かけの入射効率}) &= \frac{I_{DCCT}(t+1) - I_{DCCT}(t)}{I_{BPM}(t)} \\ &= \frac{I_{from-BT}(t) + \frac{dI}{dt}}{I_{BPM}(t)} \end{aligned}$$

よって、

$$(\text{真の入射効率}) = \frac{I_{from-BT}(t)}{I_{BPM}(t)} = (\text{見かけの入射効率}) - \frac{\frac{dI}{dt}}{I_{BPM}(t)}$$

ビーム寿命補正

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{1}{\tau}I(t)$$

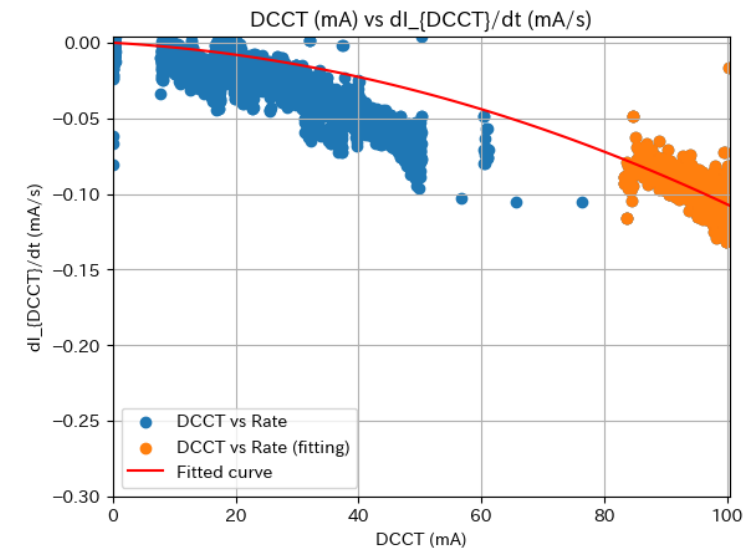
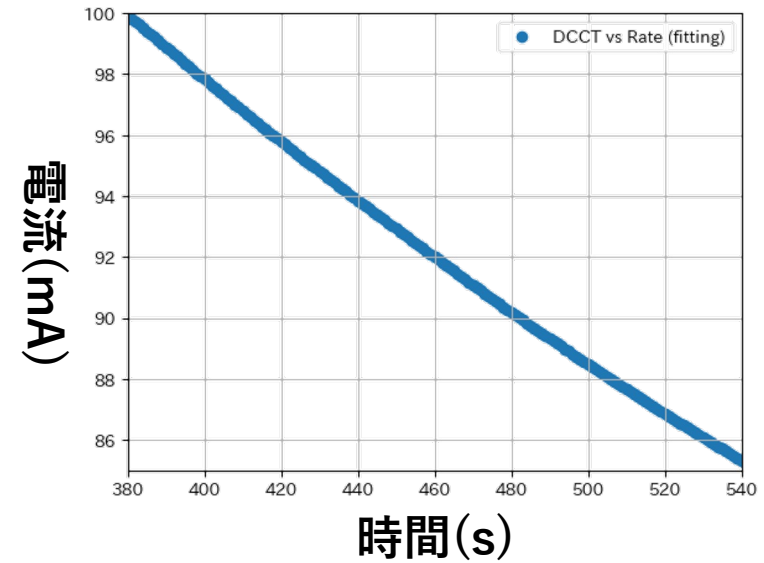
ここで、Touschek起因のビーム寿命の逆数は $I/Nb/\sigma$ に比例する。よって、

$$\frac{1}{\tau} = AI(t) + B$$

これより、

$$\frac{dI}{dt} = -AI^2(t) - BI(t)$$

A, Bを右図よりフィッティングで求める



DCCTとBCM

◆DCCT(DC Current Monitor)

- 蓄積ビームの電流平均値を測定する装置。電流を積めば積むほど減衰する電流も増加するため、**入射効率が低く見積られてしまう。**
- 後述のBCMと比較すると、入射開始直後でも電流の測定ができる。

◆BCM(Bunch Current Monitor)

- 蓄積ビームのバンチ毎の電荷を、Bunch by bunchで測定することができる。DCCTと比較して、入射効率が低く見積られてしまう問題を大きく遮減できる。
- 各バンチの差分を取るため、バンチに電荷がない場合は測定ができない。
(入射開始直後では電流の測定ができない。)

$$\text{入射効率} = \frac{\text{リングで増えた電流}}{\text{リングに入れる電流}}$$

減衰する電流が多いほど
見かけの電流増加量は減る