

プレスシミュレーションにおける データ同化

計算科学研究センター データ同化研究チーム
坂本 英之、三好 建正

光量子工学研究センター 中性子ビーム技術開発チーム
高村 正人、見原 俊介

2019年11月11日

概要

- 研究背景と目的
- 3点曲げ
 - 試験結果とシミュレーション結果
- パラメーター推定
 - 粒子フィルタ
 - サロゲートモデルを使ったMCMC
- さらなる精度向上に向けて
- まとめ

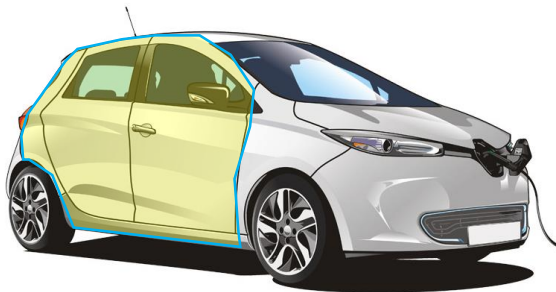
研究背景



軟鋼板よりスプリングバックが大・延性小

プレス部品の難成形化・高精度成形性
予測技術の必要性大

Body Side Outerパネル



割れ、しわ、スプリングバック、ひずみ
プレスによる変形をシミュレーションで予測し、
プレス条件の最適化

研究背景

Numisheet 2011（板成形シミュレーションの国際会議）ベンチマーク問題 BM4 – Pre-strain Effect on Spring-back of 2-D Draw Bending

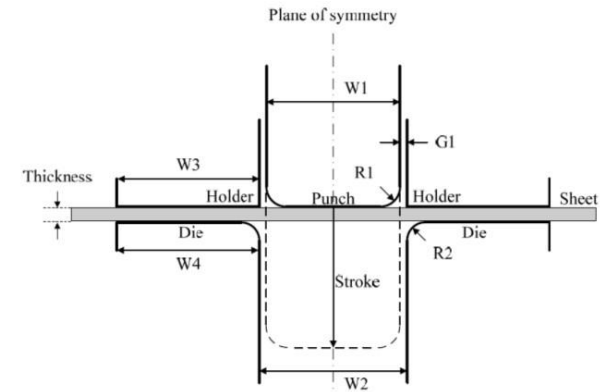
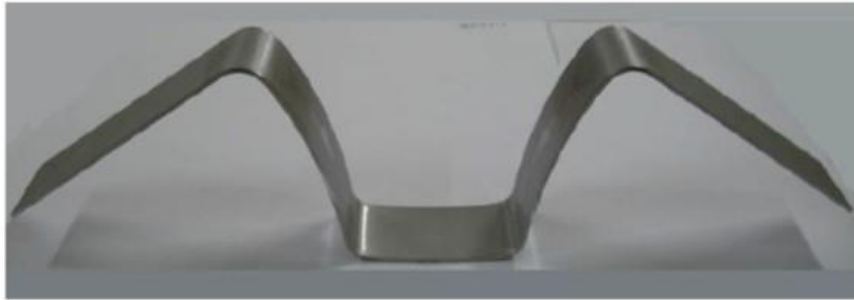


Figure 4.1 Schematic view of tools and their dimensions for the 2-D draw bending test

ベンチマーク参加者によるシミュレーション結果の例

0.02 pre-strain		0.04 pre-strain	
Engineering strain	Engineering stress (MPa)	Engineering strain	Engineering stress (MPa)
0.00000	0.00	0.00000	0.00
0.00044	84.87	0.00093	179.80
0.00088	168.31	0.00183	334.60
0.00132	247.69	0.00273	437.39
0.00176	321.48	0.00363	492.22
0.00220	382.73	0.00453	522.88
0.00264	428.18	0.00543	542.80
0.00309	462.34	0.00632	558.15
0.00353	486.80	0.00722	572.04
0.00397	505.24	0.00812	584.96
0.00441	518.77	0.00902	596.79
0.00485	529.76	0.00992	607.96
0.00529	539.83	0.01082	618.27
0.00573	548.49	0.01172	628.17

多岐にわたる材料試験の
詳細なデータが提供される

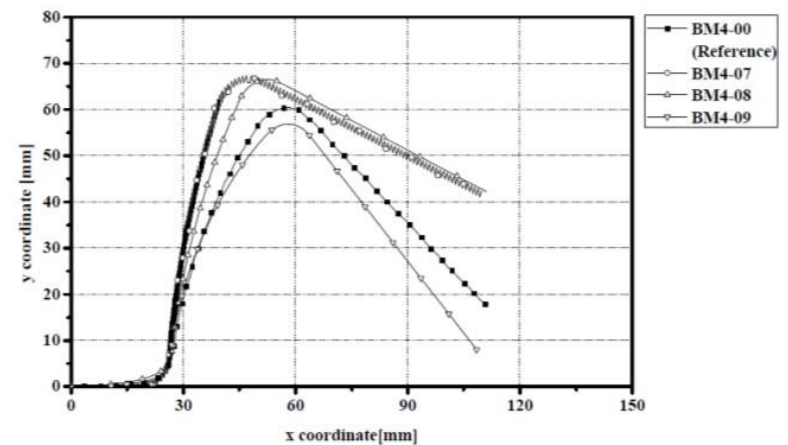


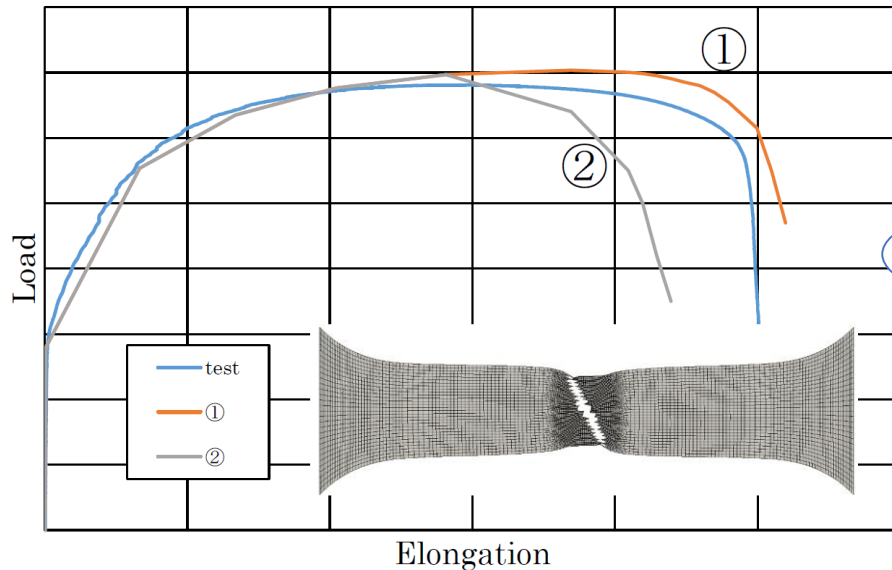
Figure 4.1.27 Spring-back profile after the draw bending process with 8% pre-strain

詳細な材料試験結果が提供されているが、シミュレーション結果は大きくばらつく

単軸引張試験による応力-ひずみ同定

「単軸応力状態」「一様分布」「体積一定」を仮定

異なるSwiftパラメータを用いた引張試験
シミュレーション

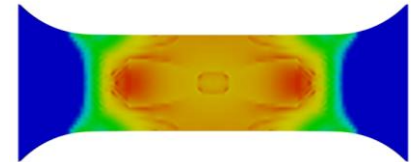


仮定が適用できない領域は
同定できない

- ・くびれ発生以降

仮定適用可とされる領域でも
厳密には成り立っていない

- ・応力分布の不均一
- ・完全に単軸応力状態ではない



応力-ひずみ曲線には誤差がある

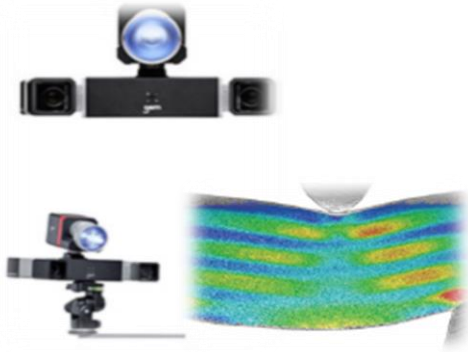
フィッティング結果にはさらに誤差がある

➡より正確な“パラメーター”を推定する事で、スプリングバックの
予測精度を上げられないか？

研究目的

データ同化によるスプリングバック 予測精度の改善

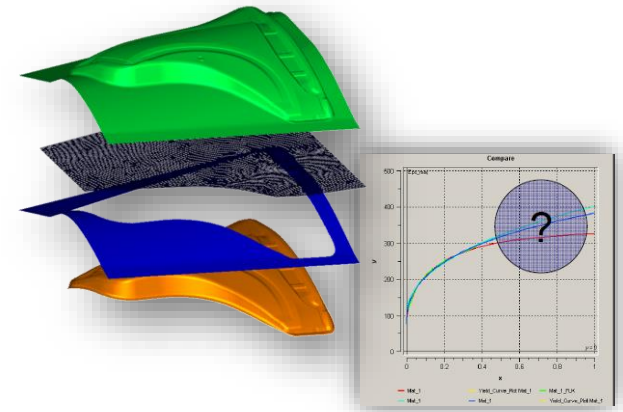
観測



ARAMISで得られる表面歪み値



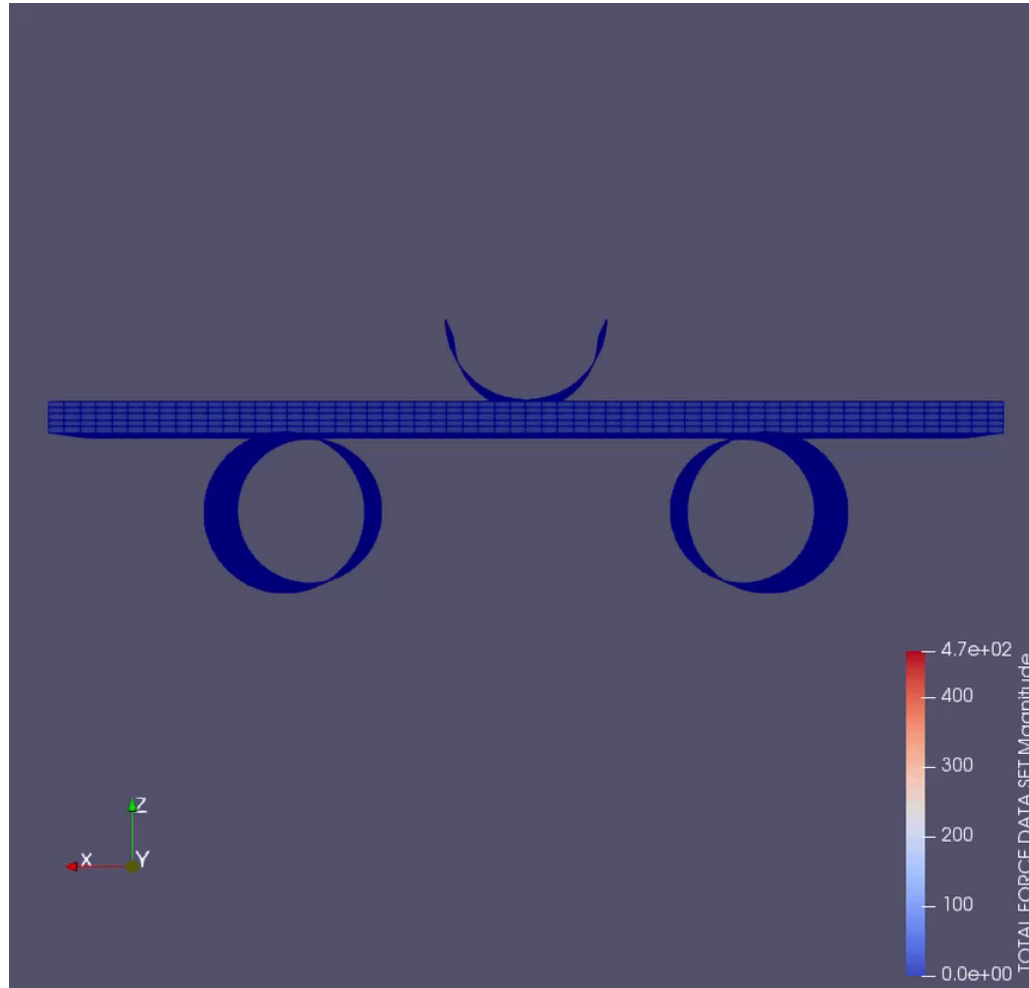
シミュレーション



応力-ひずみ関係

3点曲げ

簡単な問題から始めました



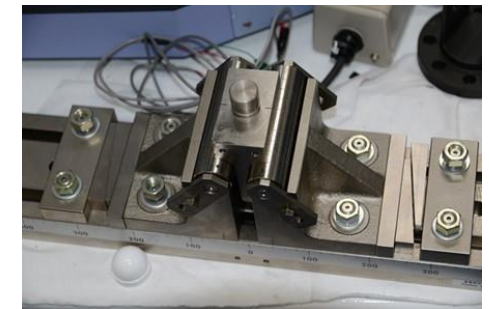
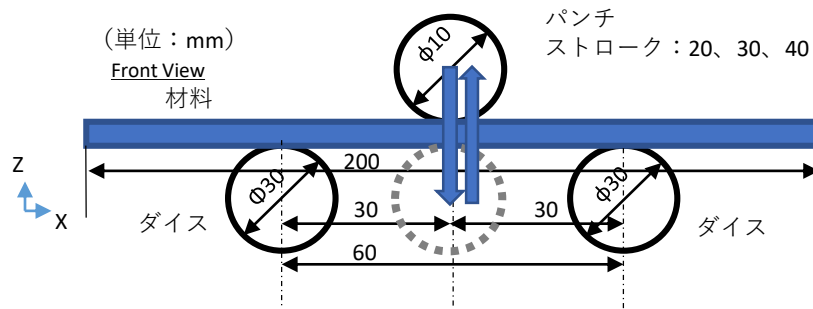
ソルバー: RIKEN V-Stamp
可視化ソフト: ParaView

3点曲げ試験

- 場所：中性子工学施設
- 使用機器：島津製オートグラフAG-X50kN
- 材料
 - A) JSC340H 50 × 200 × 0.60t
 - B) JSC590R 50 × 200 × 1.21t
 - C) JSC1180Y 50 × 200 × 1.21
- 試験条件
 - 左右のダイスは固定、中央のパンチが上昇、下降する
10mm/minで下降 → 10秒停止 → 20mm/minで上昇
 - パンチストロークは、20mm、30mm、40mmの3パターン



島津オートグラフ
AG-X 50kN

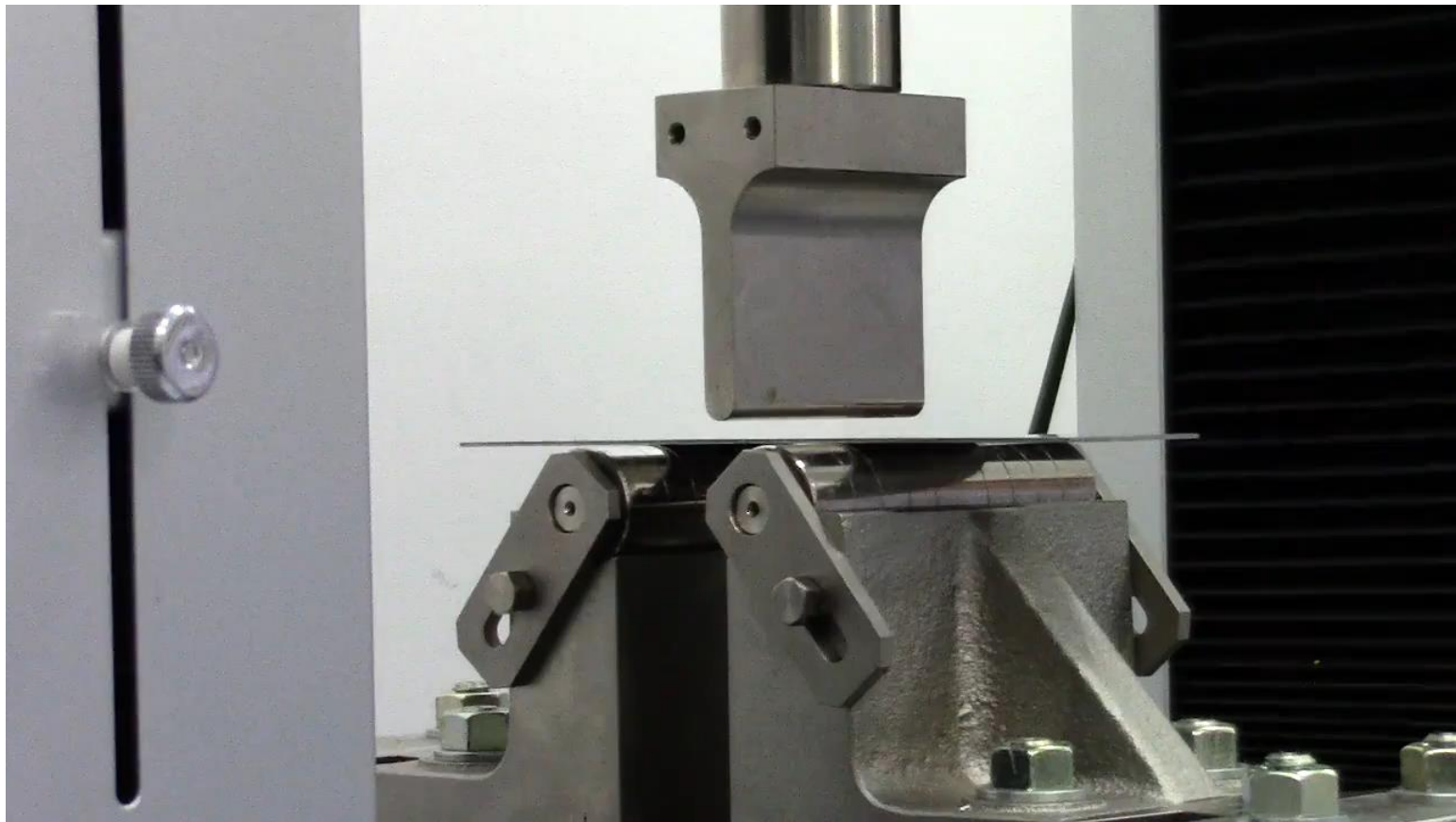


3点曲げ用治具

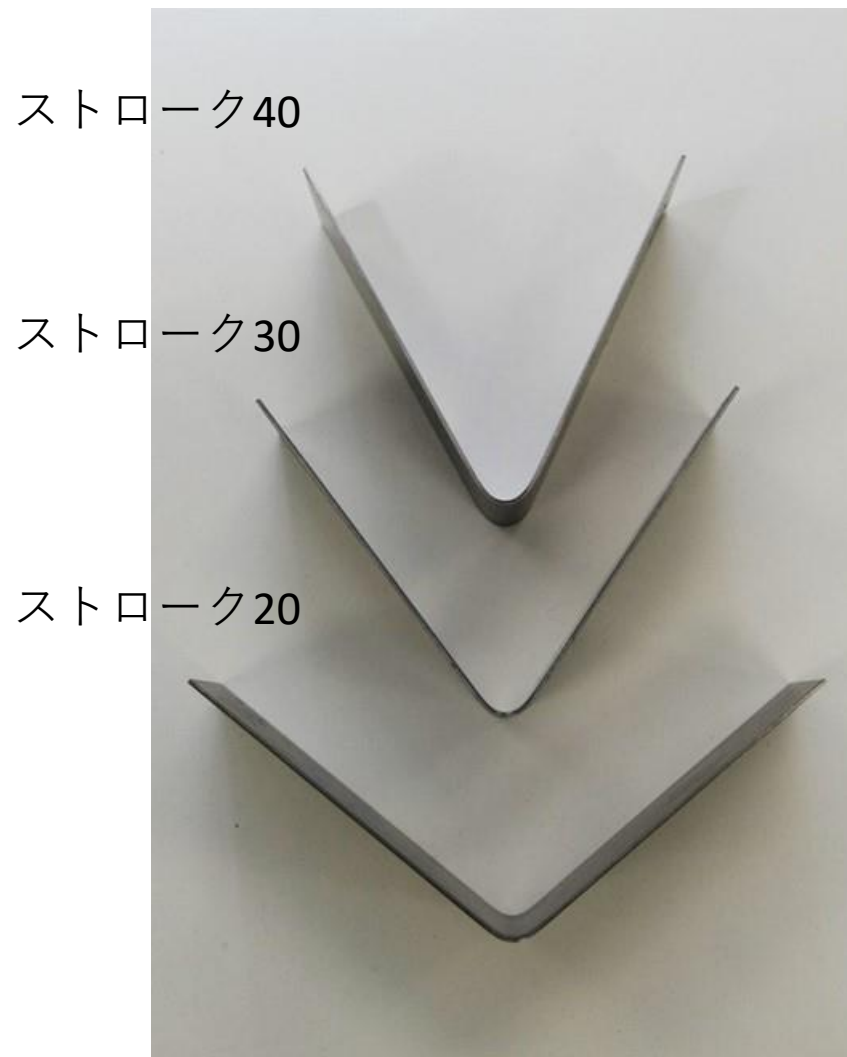
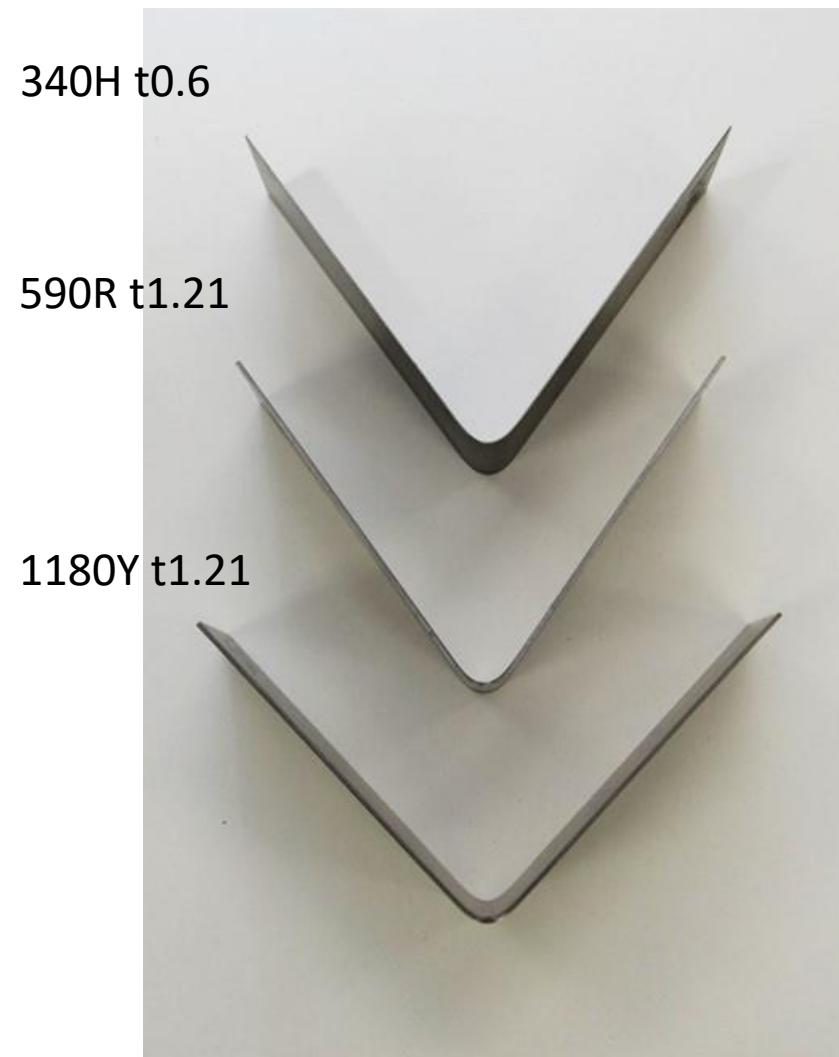
- 取得データ
 - パンチの荷重-ストローク（サンプリングレート100Hz）

実験の動画

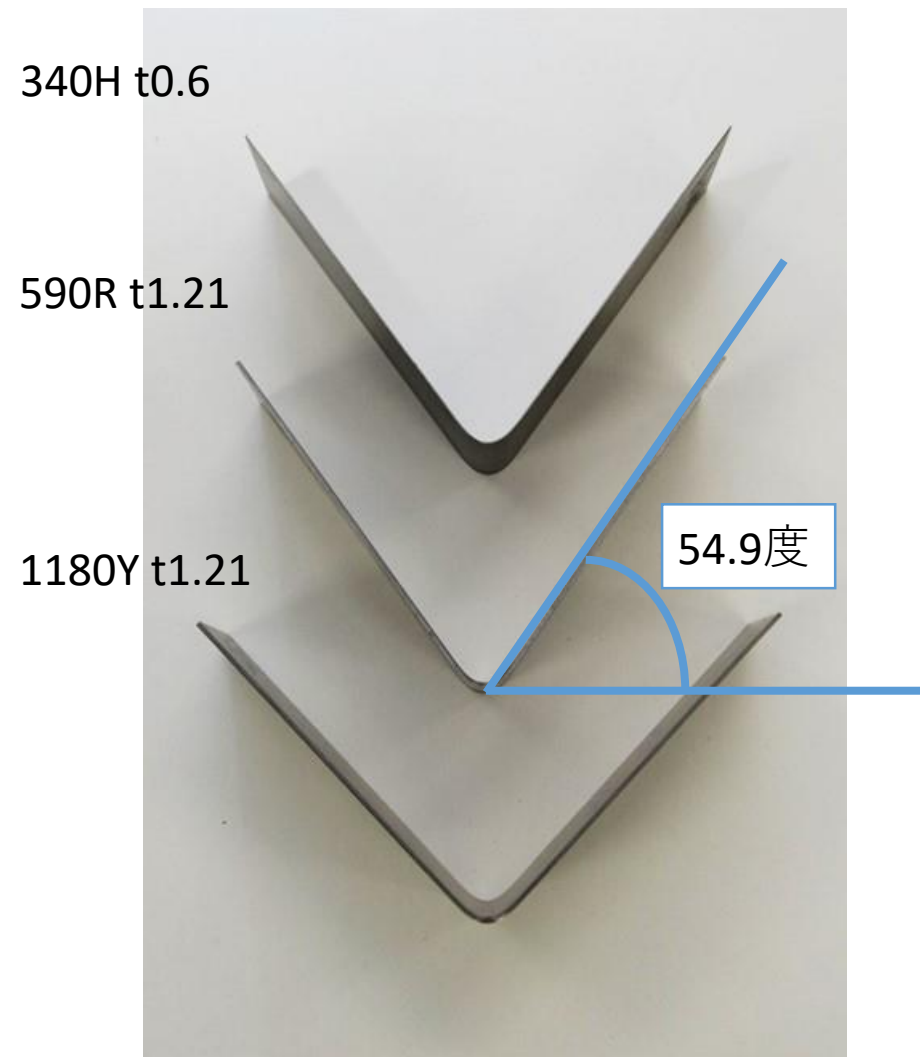
16倍速



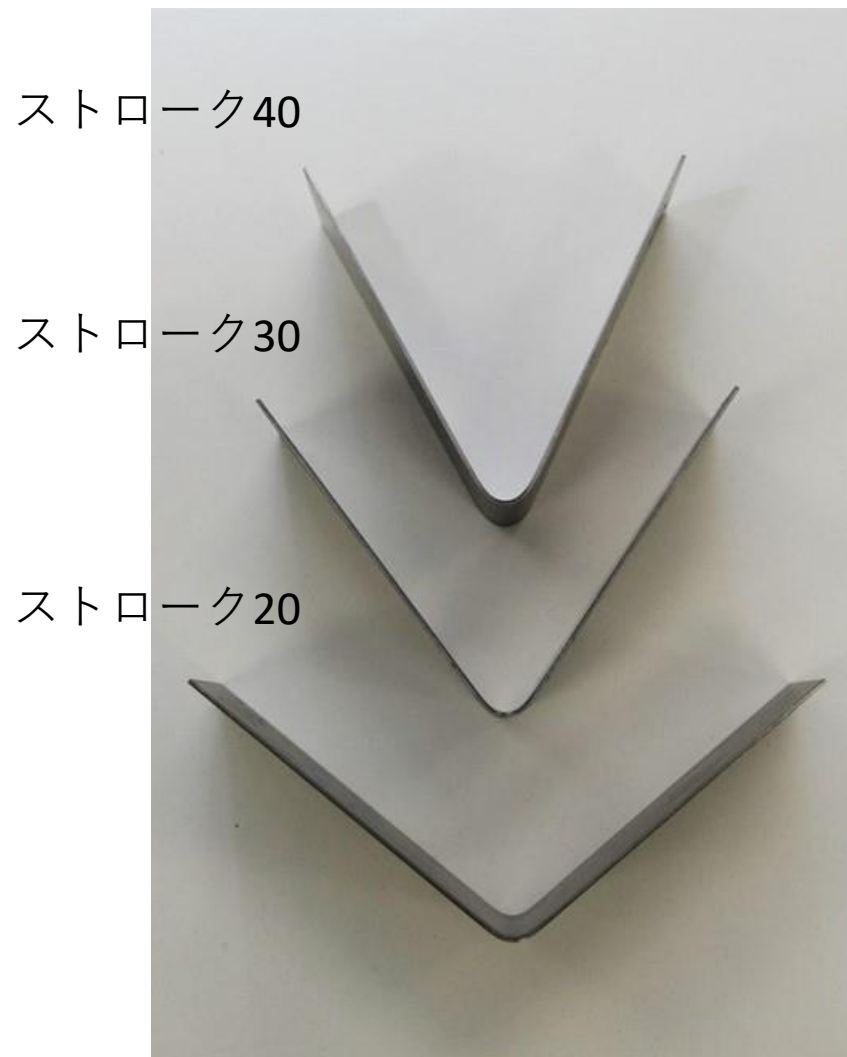
3点曲げ試験結果



3点曲げ試験結果



ストローク30mm



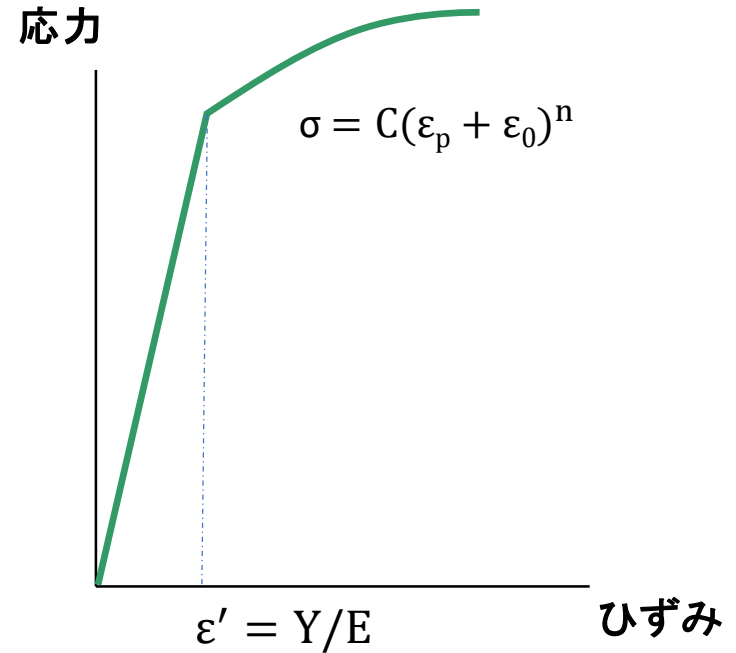
材料：590R t1.2

3点曲げシミュレーション結果

以下の参考値を使って、板角度を計算した

パラメーター	参考値
ヤング率, E	210000
ポアソン比, PR	0.3
初期降伏応力, Y	460
Swift ε_0 (固定)	0.0095987
Swift n	0.13658
ランクフォード値, r	0.916
摩擦係数, μ	0.1

応力ひずみ曲線

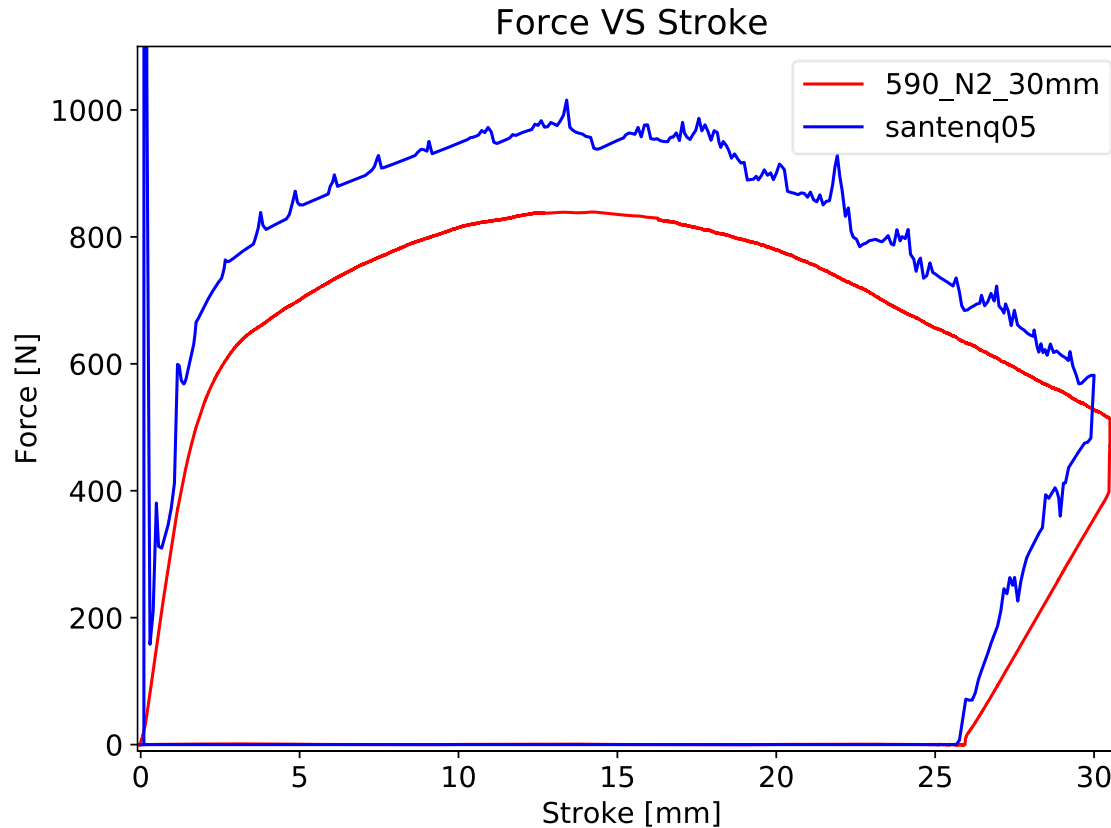


板材の角度

シミュレーション	53.95°
実測値	54.9° ± 0.1°

シミュレーションの方が約1° 小さい
(スプリングバックが大きい)

荷重－ストローク曲線の比較



- 荷重に大きなずれが見られた．（シミュレーション＞実測値）
- ➡ 観測値（荷重）を使って、より正確なパラメーターを推定しよう！

データ同化

- シミュレーションと観測をつなげる役割で、主に気象の分野で用いられる手法
- 大気モデル
 - カオス系（初期値鋭敏性を持つ）
 - 誤差が時間を追って大きくなる
 - 予測が難しい
- 加工成形モデル
 - パラメーターの最適化問題に帰着される。
 - パラメーターが多数（モデルによっては20個程度）
あるため、よく使われる手法（実験計画法等）でも簡単に収束解を得られない。

➡ データ同化による材料パラメーターの推定

粒子フィルタとMCMC（マルコフ連鎖モンテカルロ法）を試した

粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



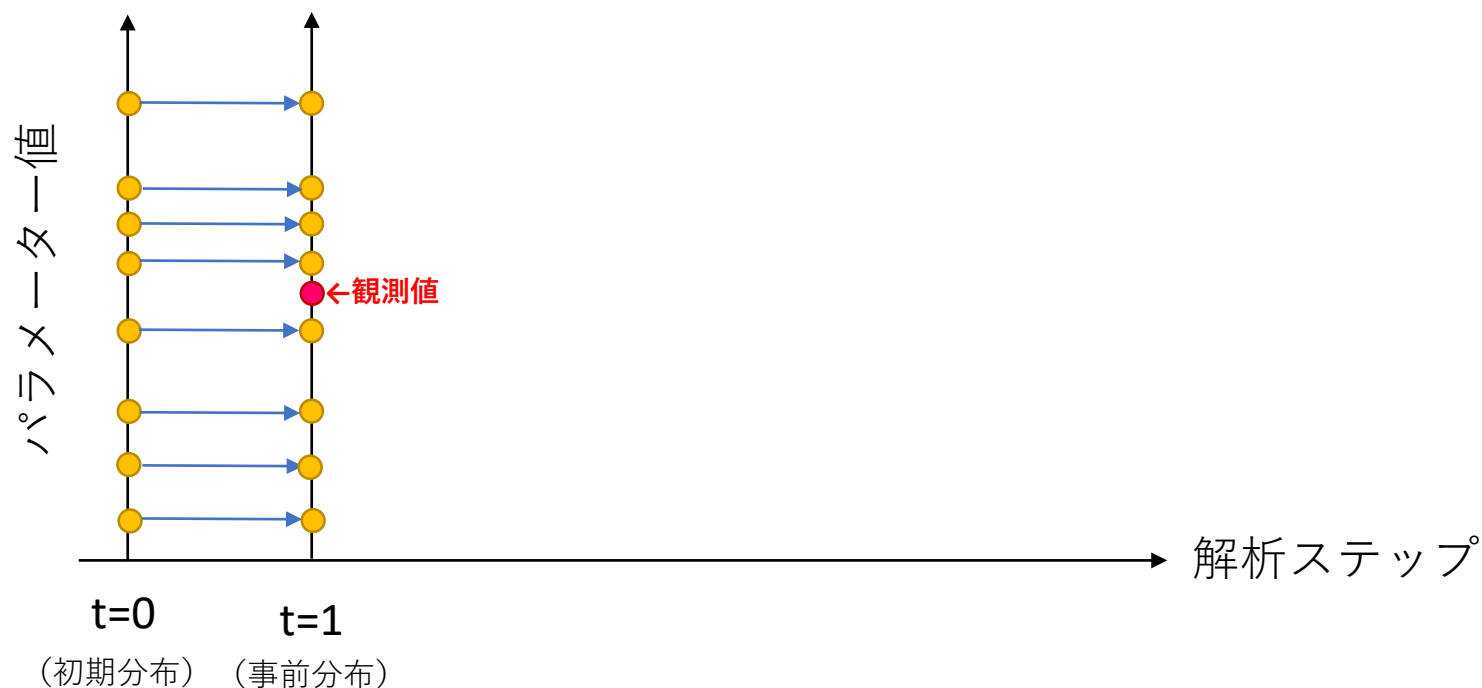
粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



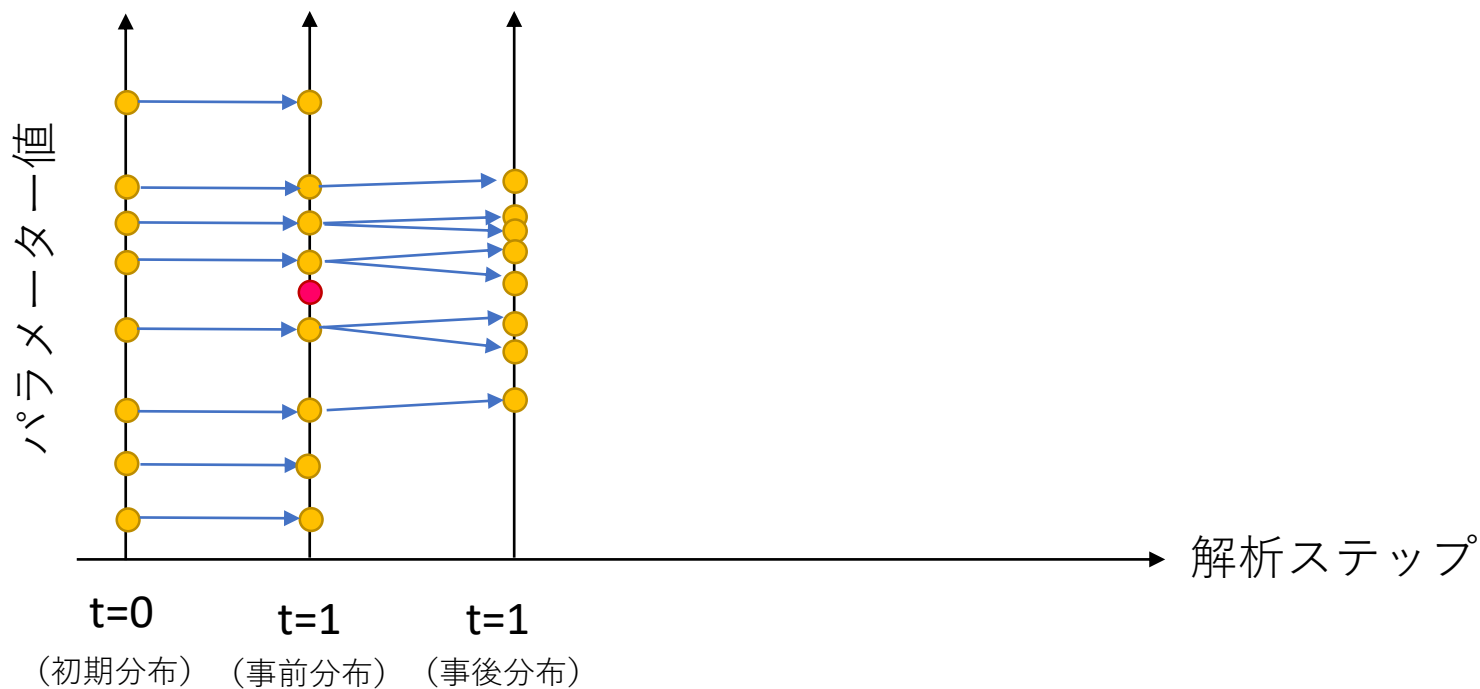
粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



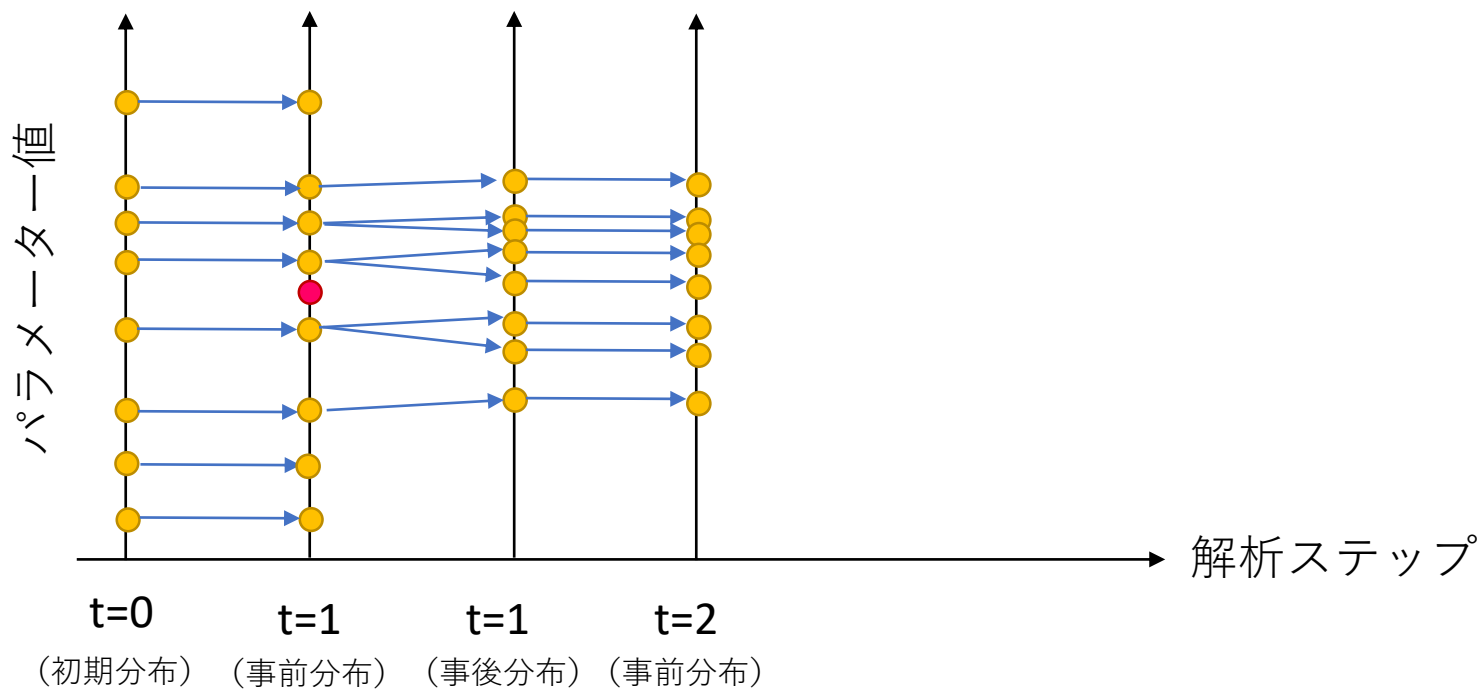
粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



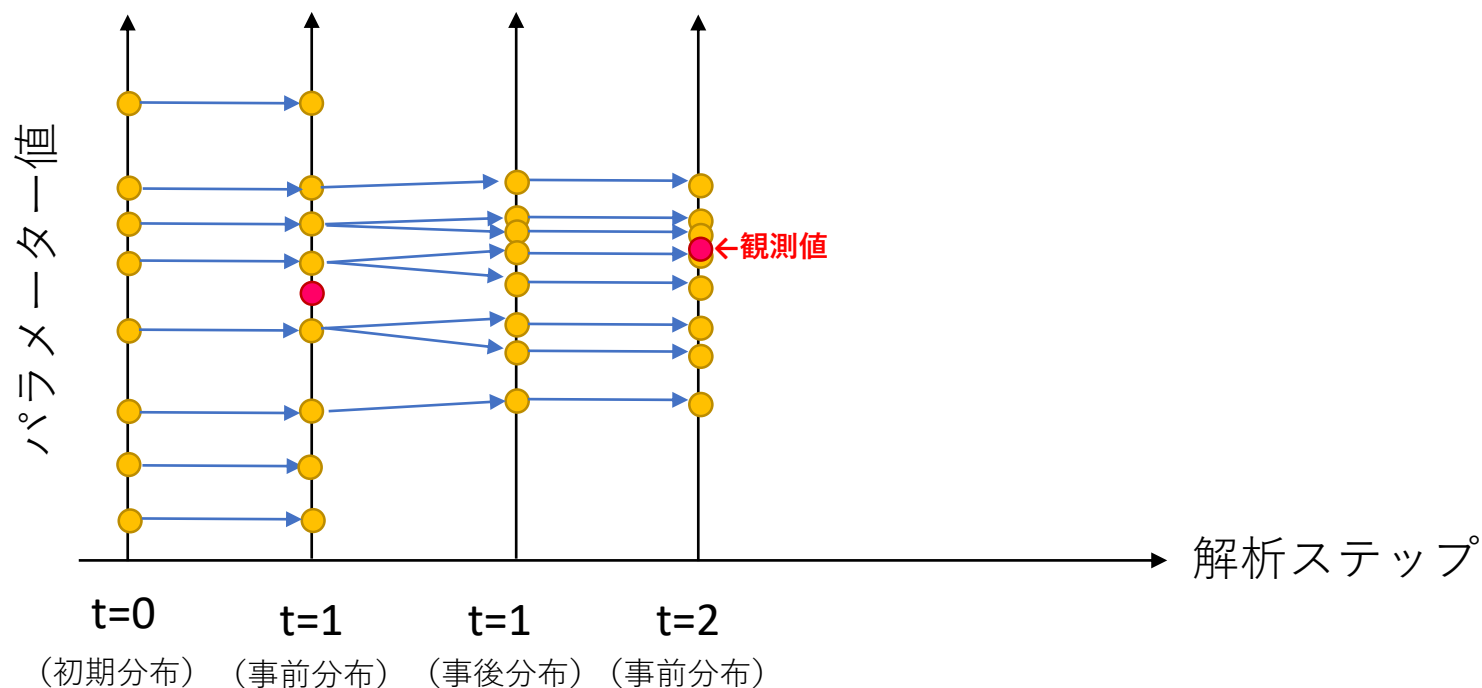
粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



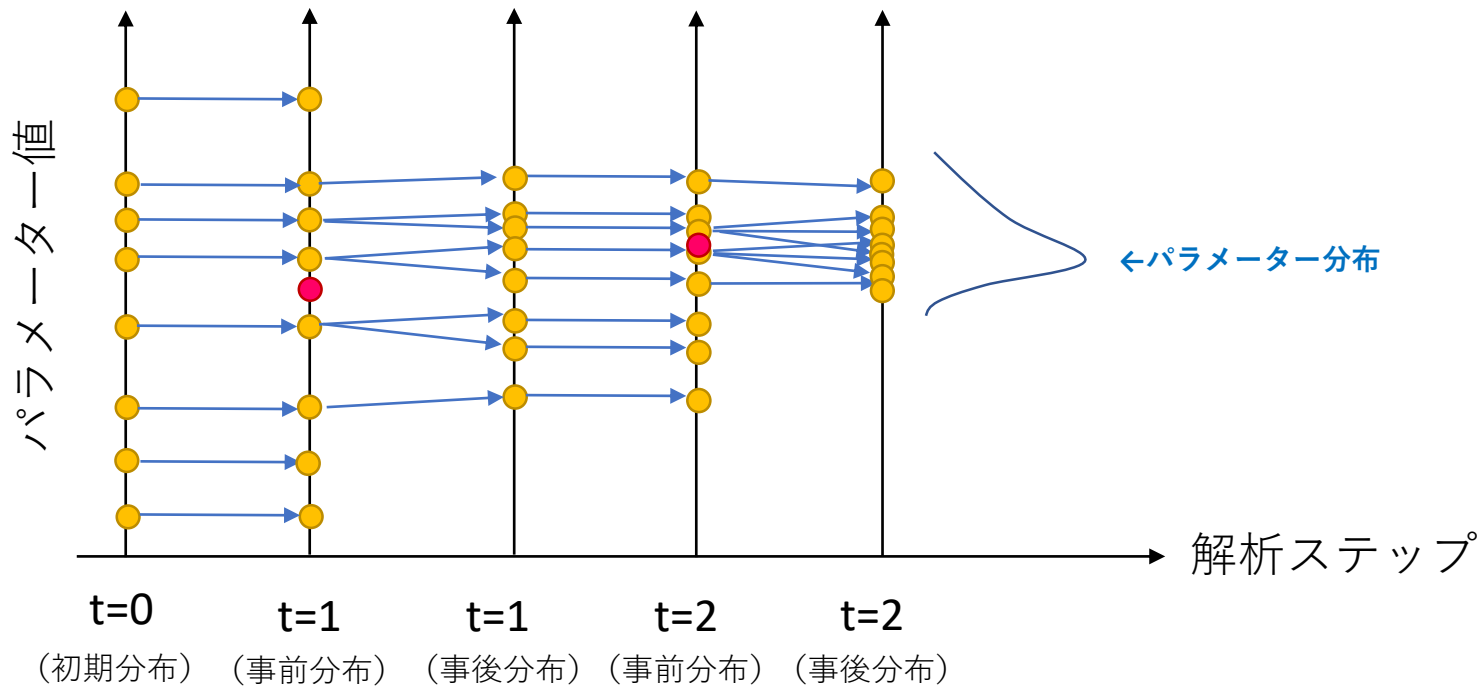
粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる



粒子フィルタ(SIR)の概要

粒子数8個の場合で考えてみる

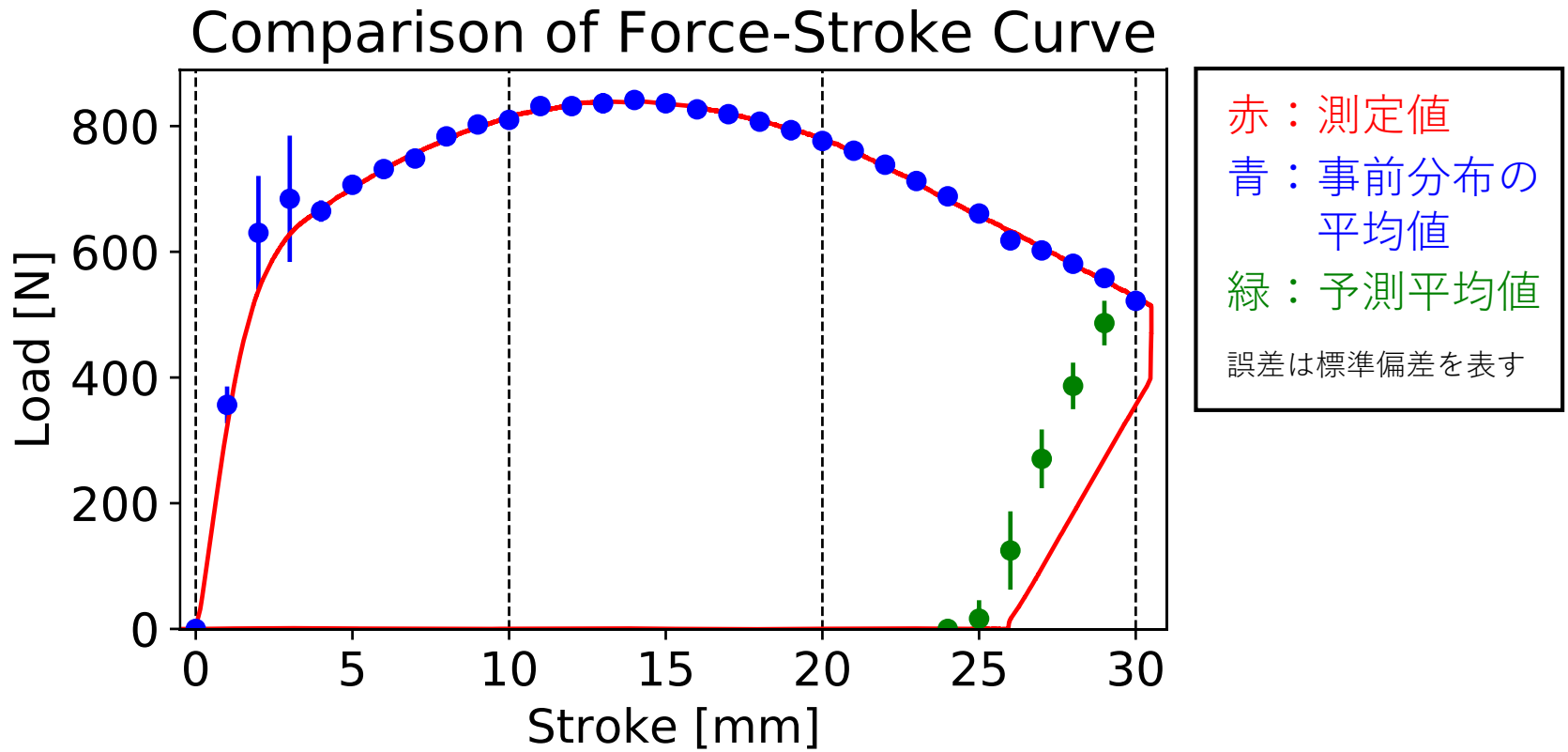


多数の粒子をモデルに従って時間発展させる。
各時間ステップで観測データに近い粒子に寄せていく。

粒子フィルタ(SIR)による材料パラメーターの推定

2019/3/15

- 粒子数 100
- パラメーター数 6個
- 観測値 1mmストローク毎の荷重値。計30個。
- 結果



粒子フィルタ(SIR)による材料パラメーターの推定

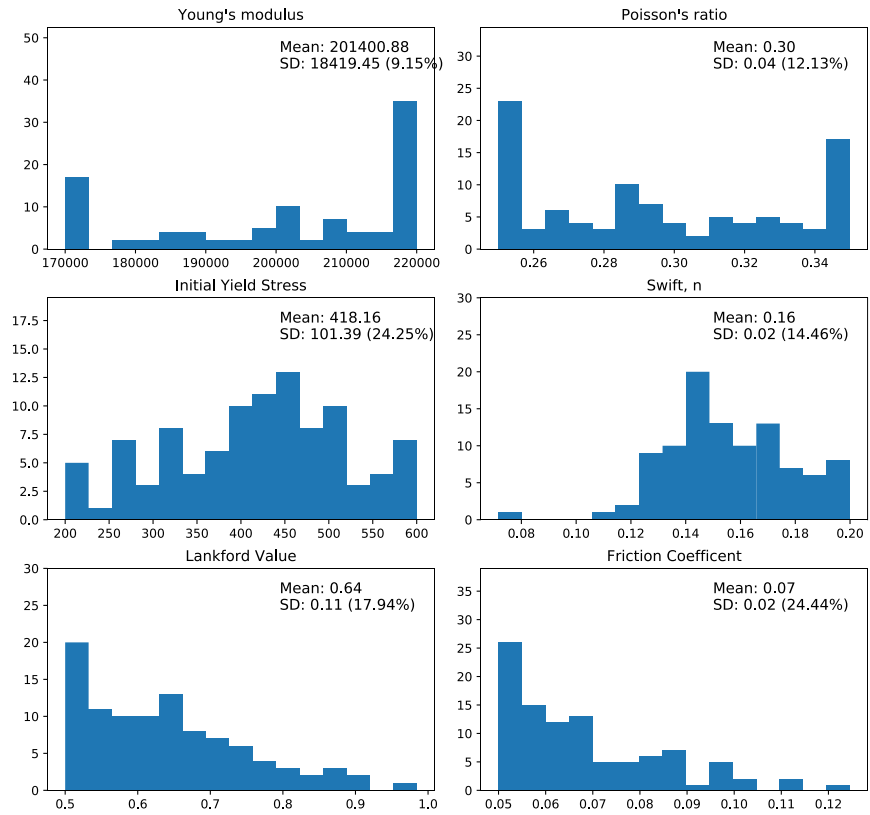
2019/3/15

- 粒子数 100
- パラメーター数 6個
- 観測値 1mmストローク毎の荷重値。計30個。
- 結果

分布の平均値

パラメーター	平均値	参考値
ヤング率	201400	210000
ポアソン比	0.30	0.3
初期降伏応力	418.16	460
Swift ϵ_0 (固定)	0.0095987	0.0095987
Swift n	0.16	0.13658
ランクフォード値	0.64	0.916
摩擦係数	0.07	0.1

Parameter Distribution at dz=-30mm

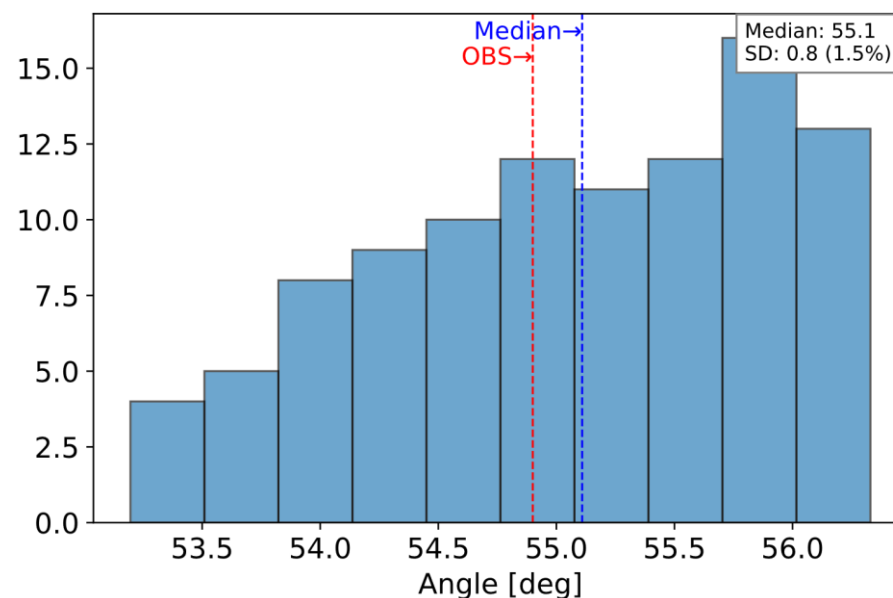


粒子フィルタ(SIR)による材料パラメーターの推定

2019/3/15

- 粒子数 100
- パラメーター数 6個
- 観測値 1mmストローク毎の荷重値。計30個。
- 結果 板材の角度

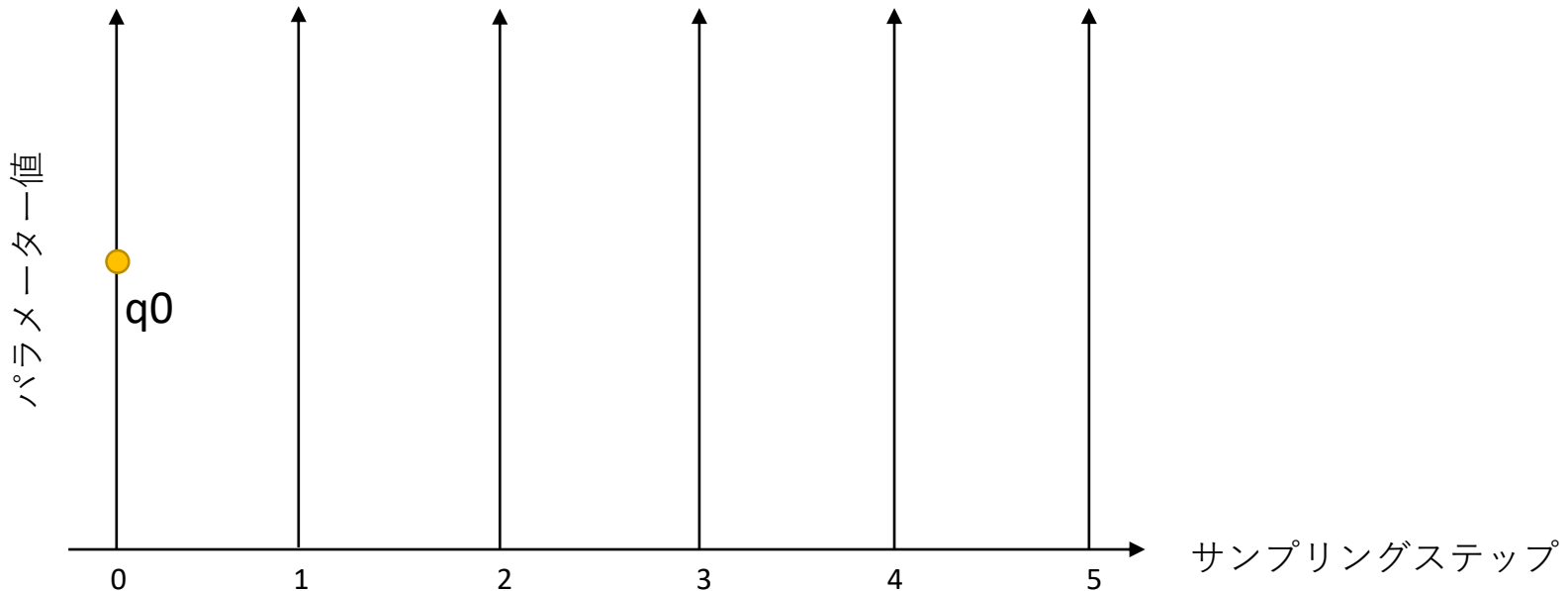
	PF/SIR	参考値	実測値
板材の角度	$55.1 \pm 0.8^\circ$	53.95°	54.9°
実測値とのずれ	+0.2度	-0.95度	-



中央値は誤差範囲に入っているが、誤差が大きい

MCMCによる材料パラメータの推定

MCMCの概要

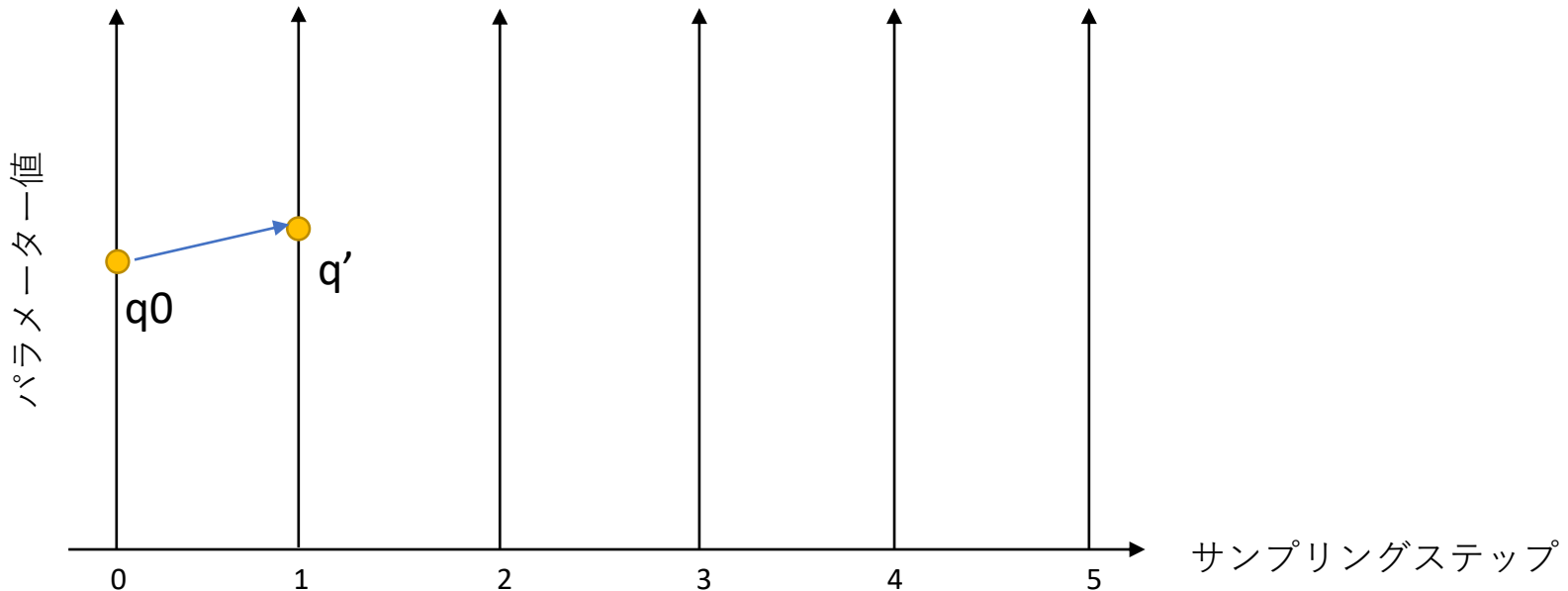


メトロポリス・ヘイスティンクス法

1. 適当な初期パラメータ q_0 を設定する。
2. 尤度 $L(q_0)$ を計算する。パラメータと観測量が決まれば計算できる。

MCMCによる材料パラメーターの推定

MCMCの概要

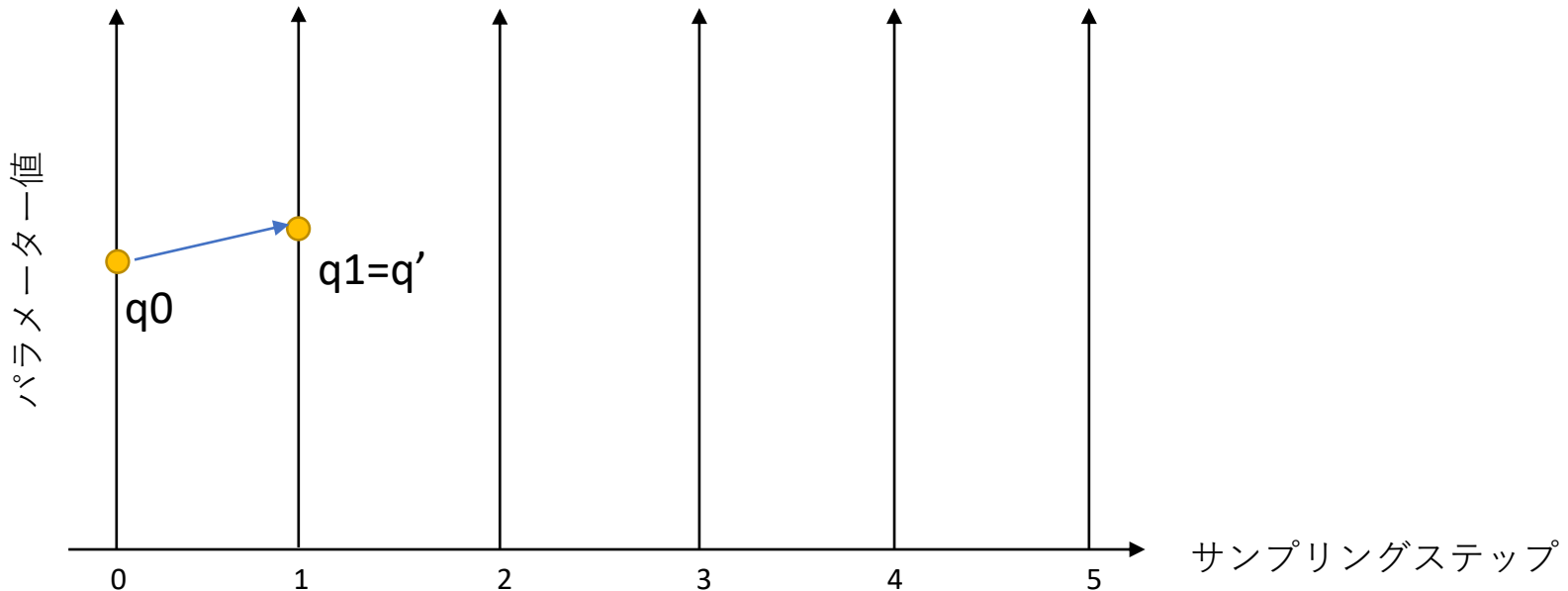


メトロポリス・ヘイスティンクス法

1. 適当な初期パラメーター q_0 を設定する。
2. 尤度 $L(q_0)$ を計算する。パラメーターと観測量が決まれば計算できる。
3. パラメーターを少し変える。 ($q' = q_0 + \alpha$)
4. 新パラメータ q' で尤度 $L(q')$ を計算する。

MCMCによる材料パラメーターの推定

MCMCの概要

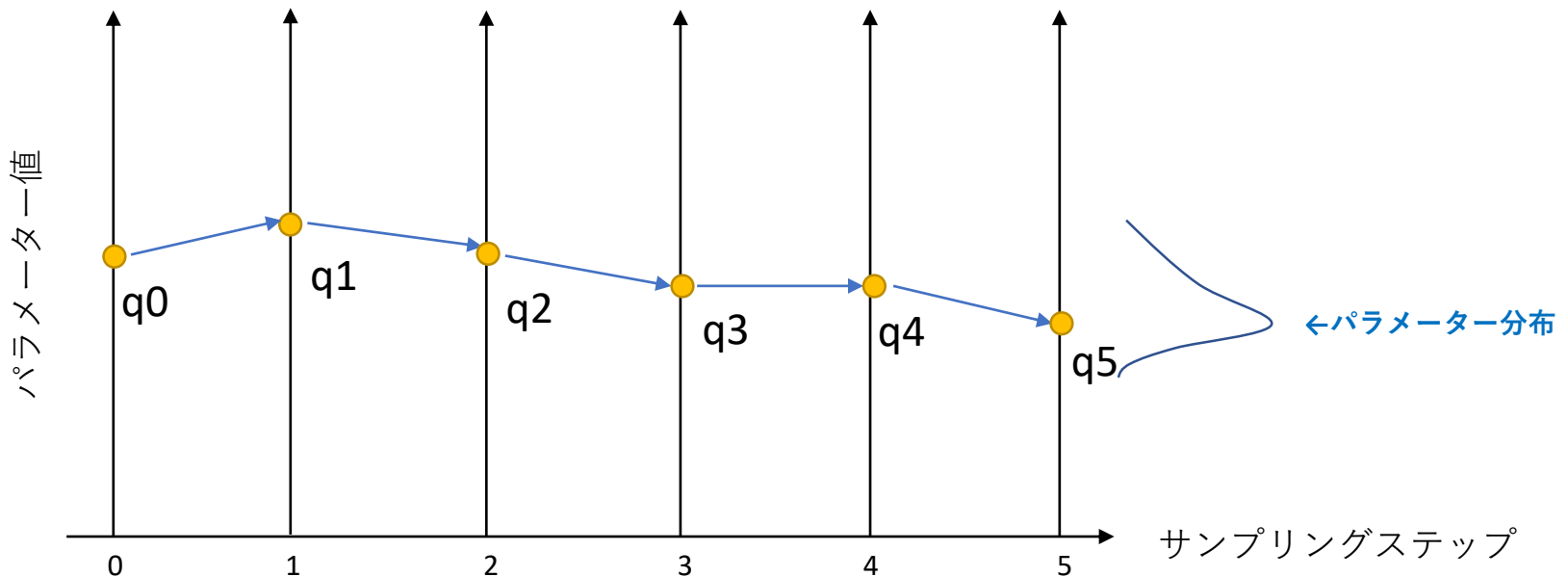


メトロポリス・ヘイスティングス法

1. 適当な初期パラメーター q_0 を設定する。
2. 尤度 $L(q_0)$ を計算する。パラメーターと観測量が決まれば計算できる。
3. パラメーターを少し変える。 ($q' = q_0 + \alpha$)
4. 新パラメータ q' で尤度 $L(q')$ を計算する。
 1. $L(q') \geq L(q_0)$: $q_1 = q'$ として、ステップ3に進む。
 2. $L(q') < L(q_0)$: 確率 $r \geq L(q')/L(q_0)$: $q_1 = q'$ として、ステップ3に進む。
確率 $r < L(q')/L(q_0)$: $q_1 = q_0$ として、ステップ3に進む。

MCMCによる材料パラメータの推定

MCMCの概要

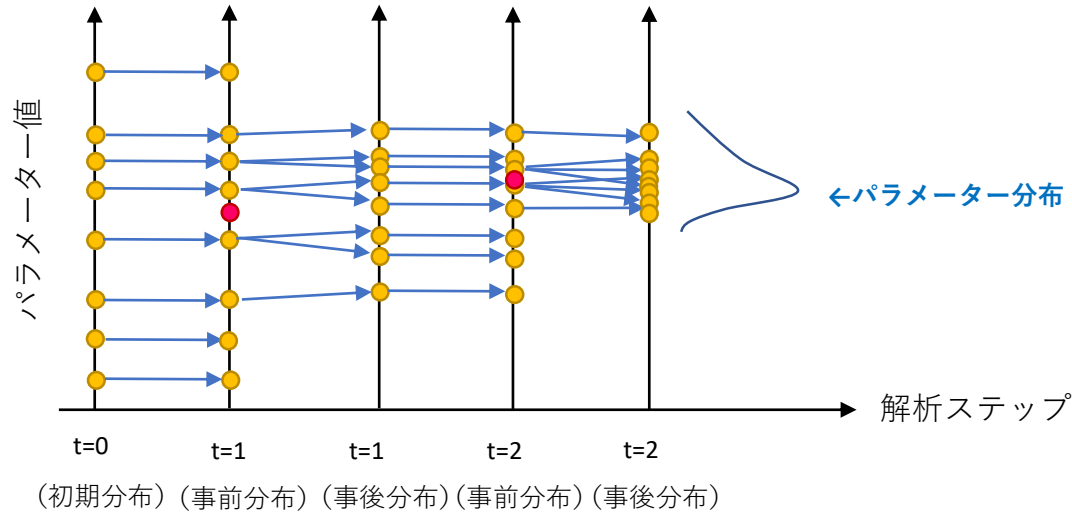


メトロポリス・ヘイスティングス法

1. 適当な初期パラメータ q_0 を設定する。
2. 尤度 $L(q_0)$ を計算する。パラメータと観測量が決まれば計算できる。
3. パラメータを少し変える。 $(q' = q_0 + \alpha)$
4. 新パラメータ q' で尤度 $L(q')$ を計算する。
 1. $L(q') \geq L(q_0)$: $q_1 = q'$ として、ステップ3に進む。
 2. $L(q') < L(q_0)$: 確率 $r = L(q')/L(q_0)$: $q_1 = q'$ として、ステップ3に進む。
確率 $r < L(q')/L(q_0)$: $q_1 = q_0$ として、ステップ3に進む。

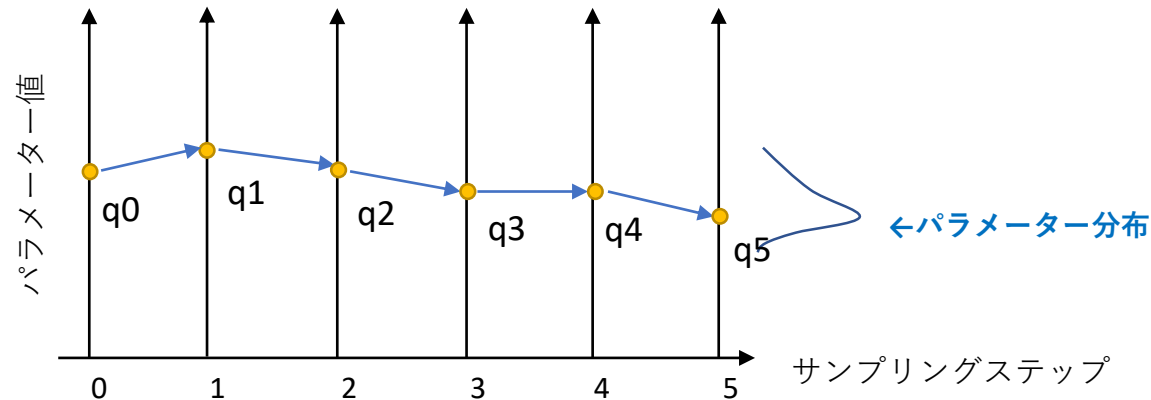
粒子フィルタ(SIR)とMCMCの比較

PF/SIR



モデルに沿って多数個の粒子を
時間発展させていく
尤度は各時刻での観測データ

MCMC



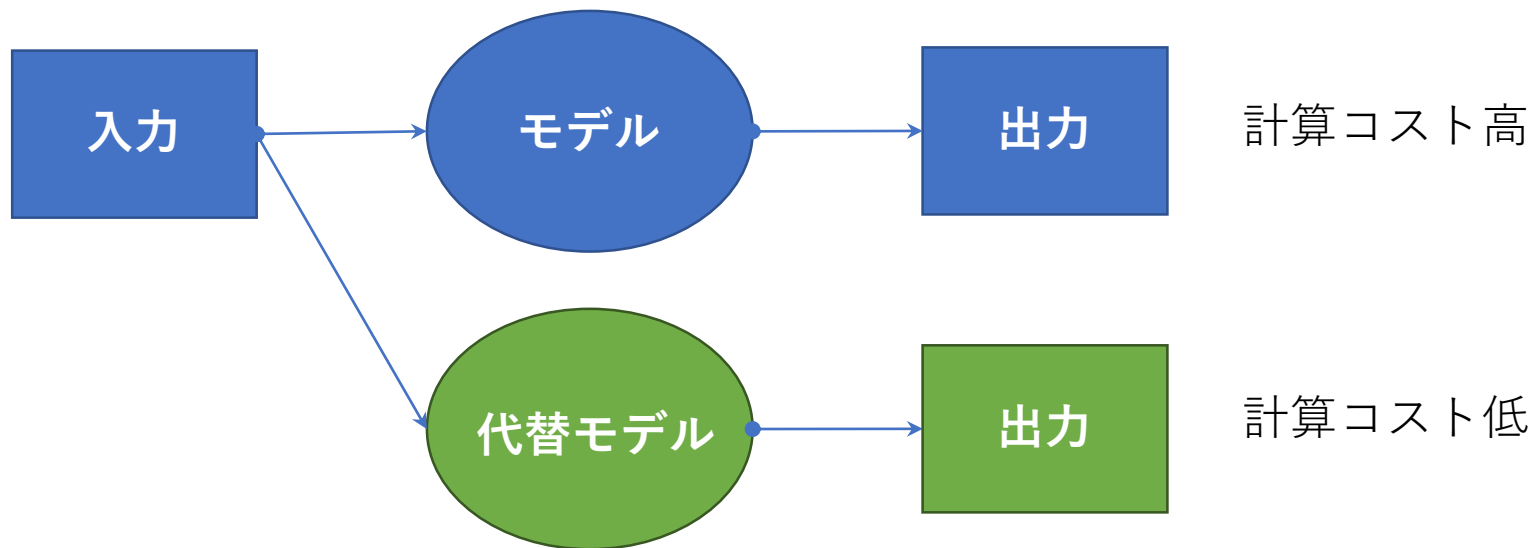
多数回のサンプリングを行う
尤度は観測データ式

MCMCによる材料パラメーターの推定

MCMCでは多数回尤度を計算する必要がある。
しかし、計算コストの高いシミュレーションに対しては難しい...

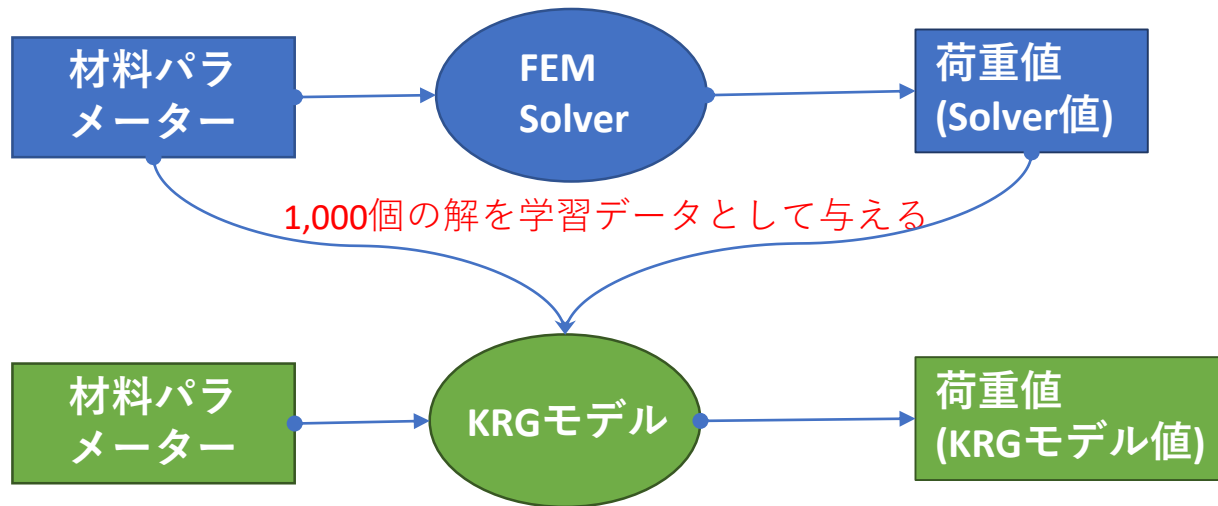
➡サロゲートモデルを作成し、MCMCを実行する！

サロゲートモデル（代替モデル）とは？



モデルを近似する事で、計算コストが低く抑えながら、真のモデルと同等な出力を生成する

サロゲートモデルの作成



SMT: Surrogate Modeling Toolbox

<https://smt.readthedocs.io/en/latest/>

M. A. Bouhlel and J. T. Hwang and N. Bartoli and R. Lafage and J. Morlier and J. R. R. A. Martins.
A Python surrogate modeling framework with derivatives. Advances in Engineering Software, 2019.

Kringing(KRG)モデル

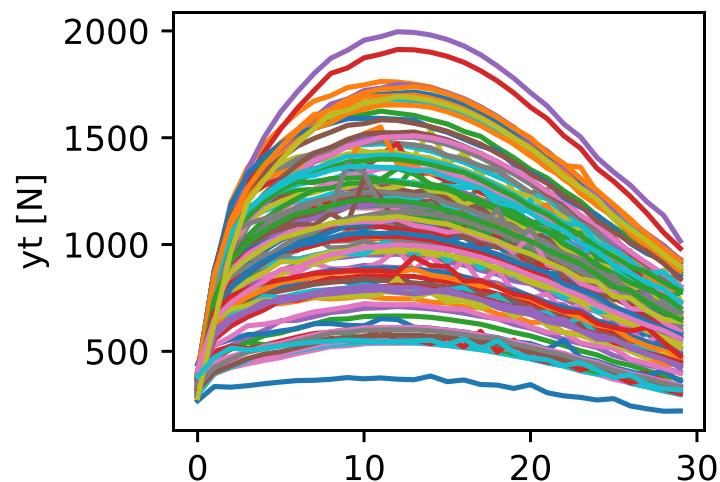
```
from smt.surrogate_models import KRG
sm = KRG(theta0=[0.01]*6)
sm.options["poly"] = "linear"
sm.options["corr"] = "abs_exp"
sm.set_training_values(xt, yt)
sm.train()
```

xt: パラメーターセット
yt: 荷重データセット

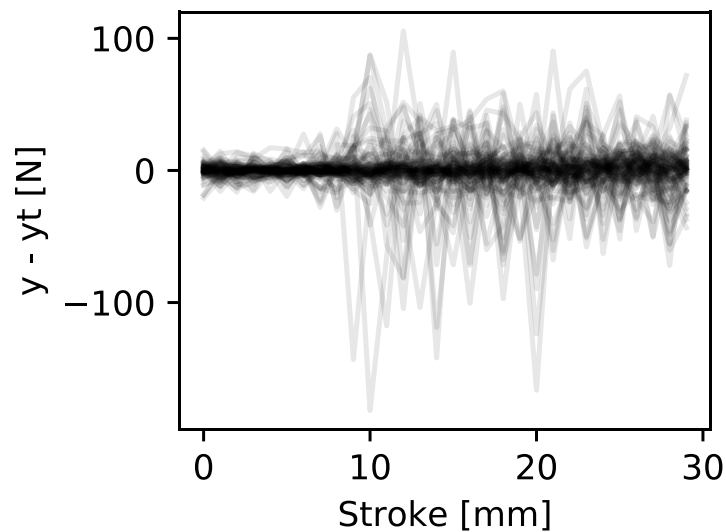
```
y = sm.predict_values(x)
```

サロゲートモデルの評価

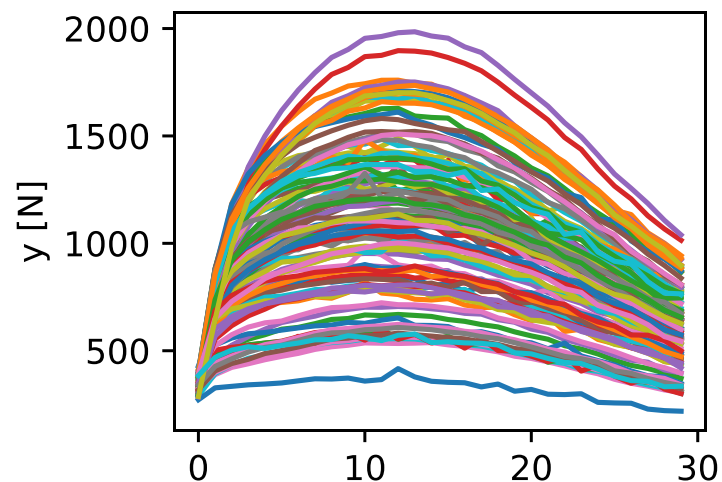
ソルバー出力値



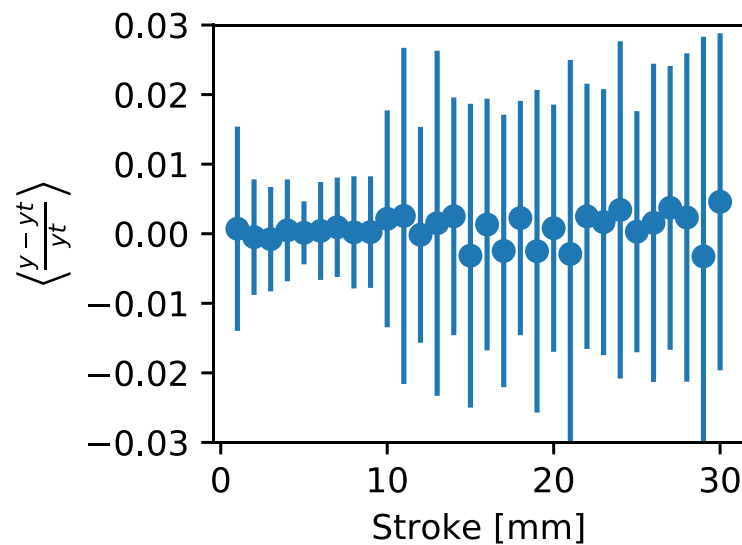
差



サロゲートモデル出力値



差 ÷ ソルバー出力値



MCMCによる材料パラメータ推定



emcee (“Affine不変サンプリング”の実装版)

<https://emcee.readthedocs.io/en/v2.2.1/>

<https://arxiv.org/abs/1202.3665>

<https://msp.org/camcos/2010/5-1/camcos-v5-n1-p04-p.pdf>

Daniel Foreman-Mackey, David W. Hogg,
Dustin Lang, Jonathan Goodman

Jonathan Goodman and Jonathan Weare

```
import emcee
sampler = emcee.EnsembleSampler(nwalkers=12, ndim=6, log_prob_fn, args=(x, y, yerr))
result = sampler.run_mcmc(initial_state, nsteps=100_000)
```

log_prob_fn 事後分布の $\log \propto$ 尤度関数 L x 事前分布

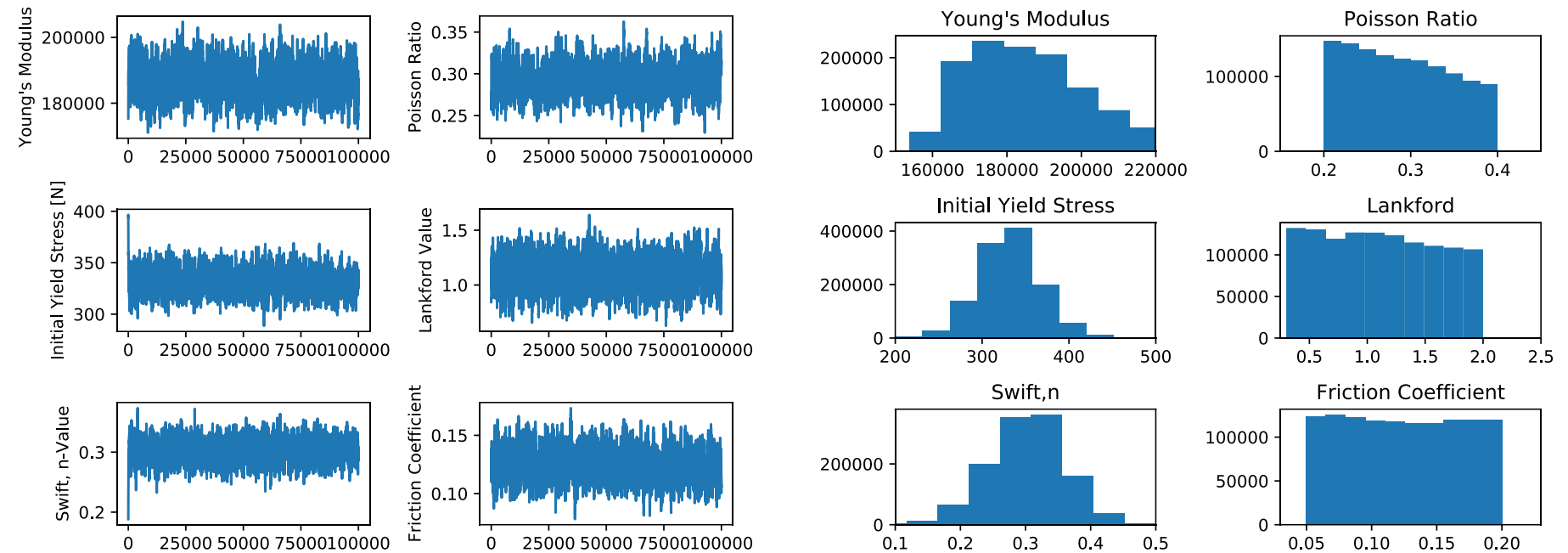
$$\text{尤度関数 } L = \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{30} \frac{(y_{KRG}^{(i)} - y_{OBS}^{(i)})^2}{\sigma^2} + \ln(\sigma^2) \right], \quad \sigma^2 = \sigma_{KRG}^2 + \sigma_{OBS}^2$$

10%, 5%, 1%の3通り試した
3%

パラメーター推移と分布

観測誤差=10%

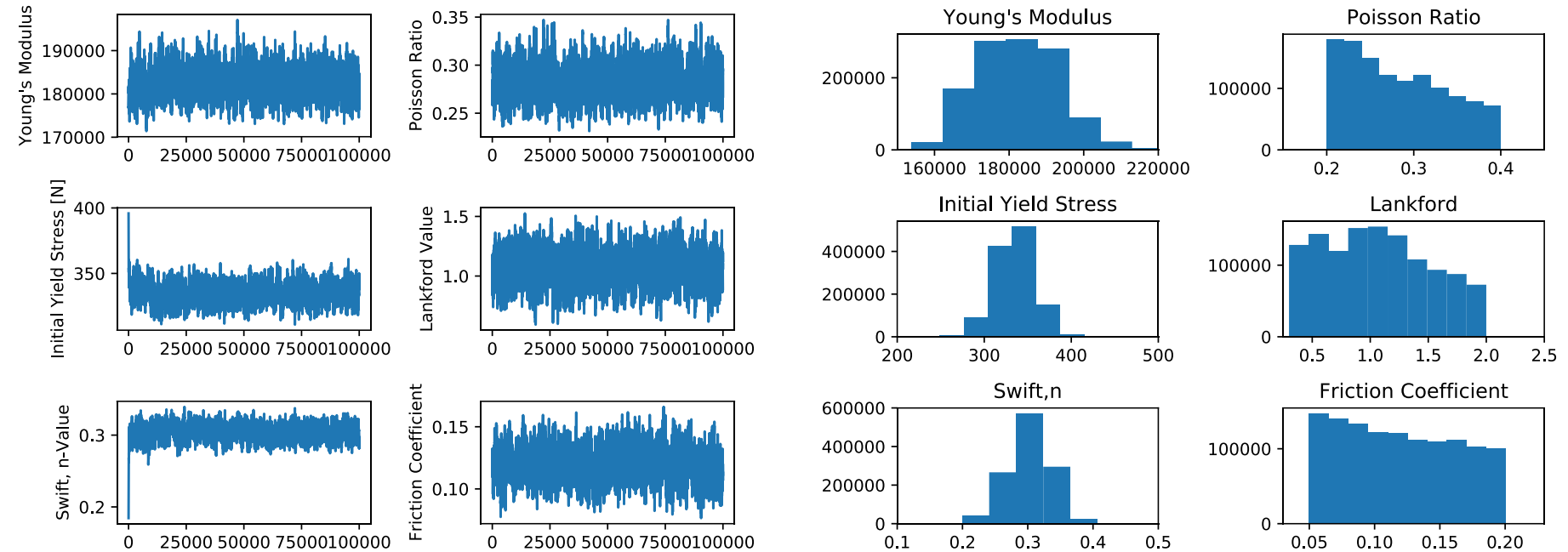
横軸：MCMCステップ
(0 – 100,000)



パラメーター推移と分布

観測誤差=5%

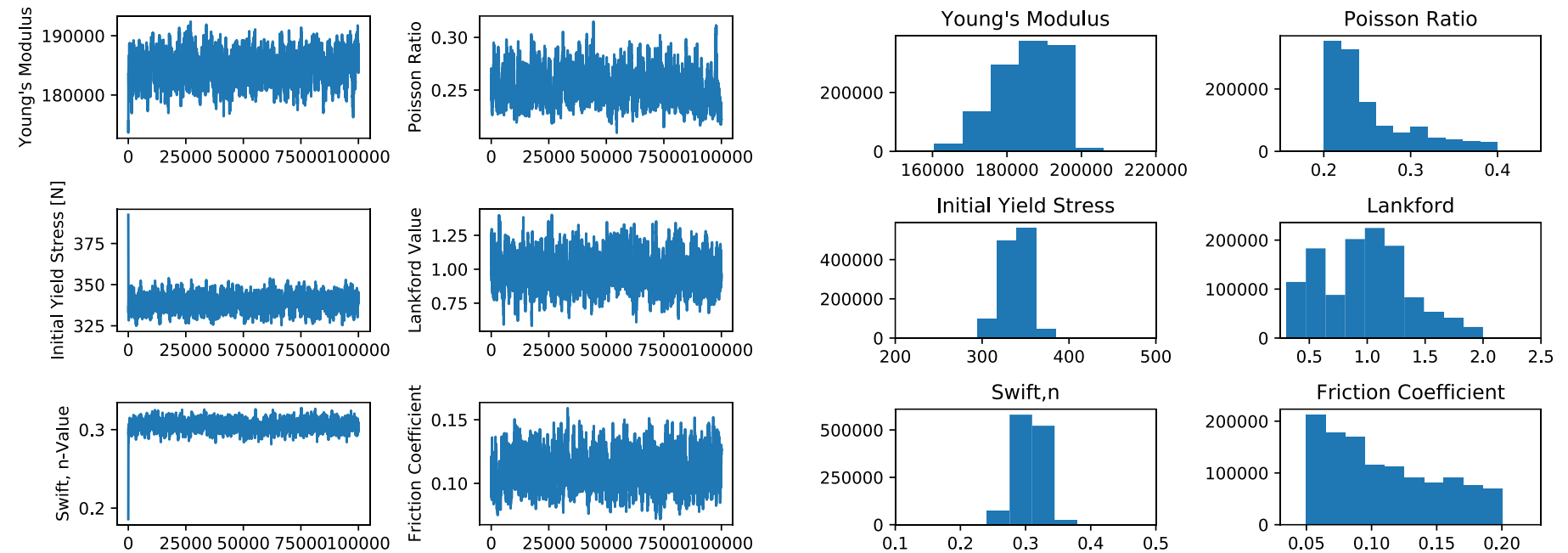
横軸：MCMCステップ
(0 – 100,000)



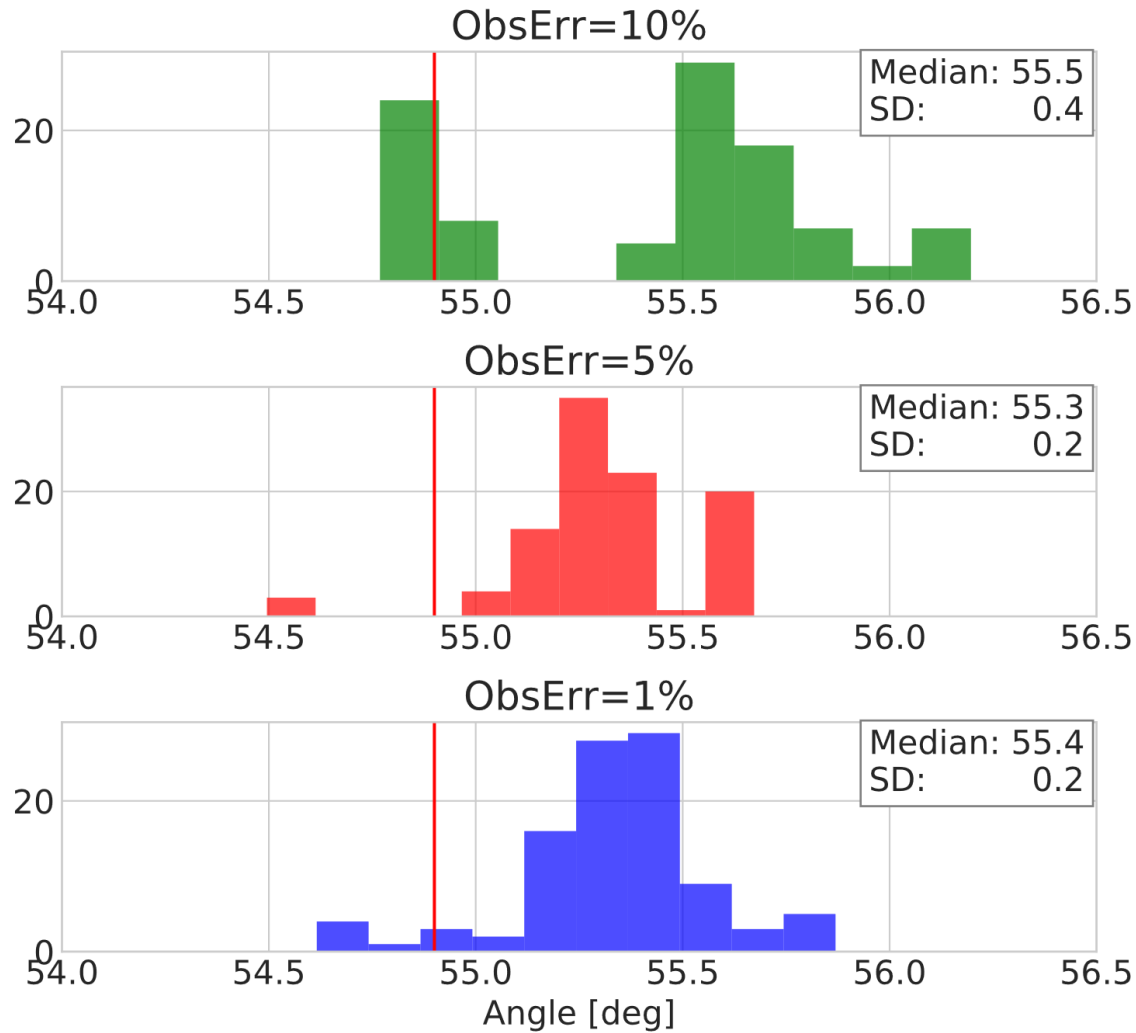
パラメーター推移と分布

観測誤差=1%

横軸：MCMCステップ
(0 – 100,000)



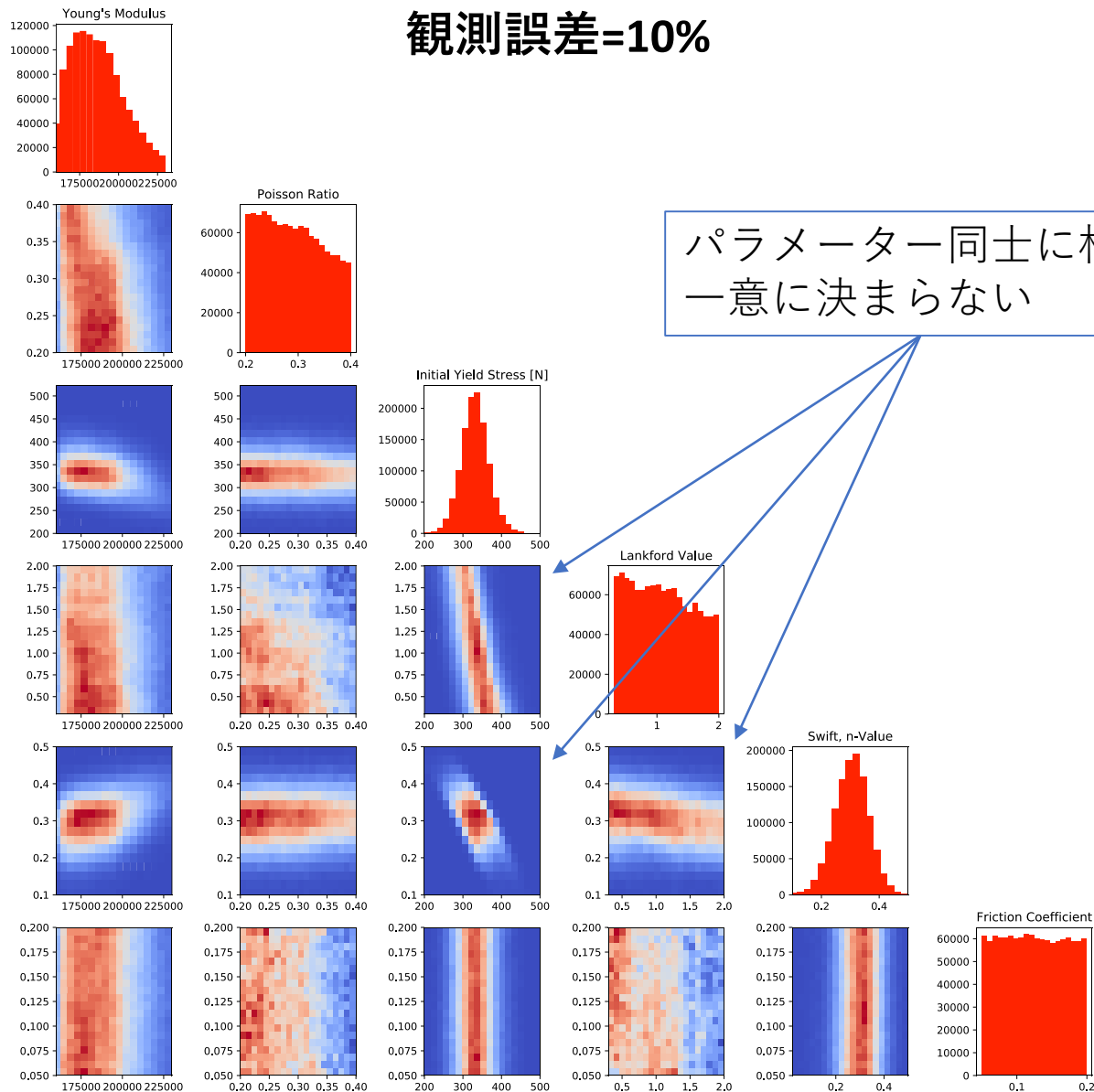
板材の角度分布



- ①観測誤差が小さくなるほど、分布の広がりが狭くなる
- ②中央値が実測データからずれる

パラメーター相関

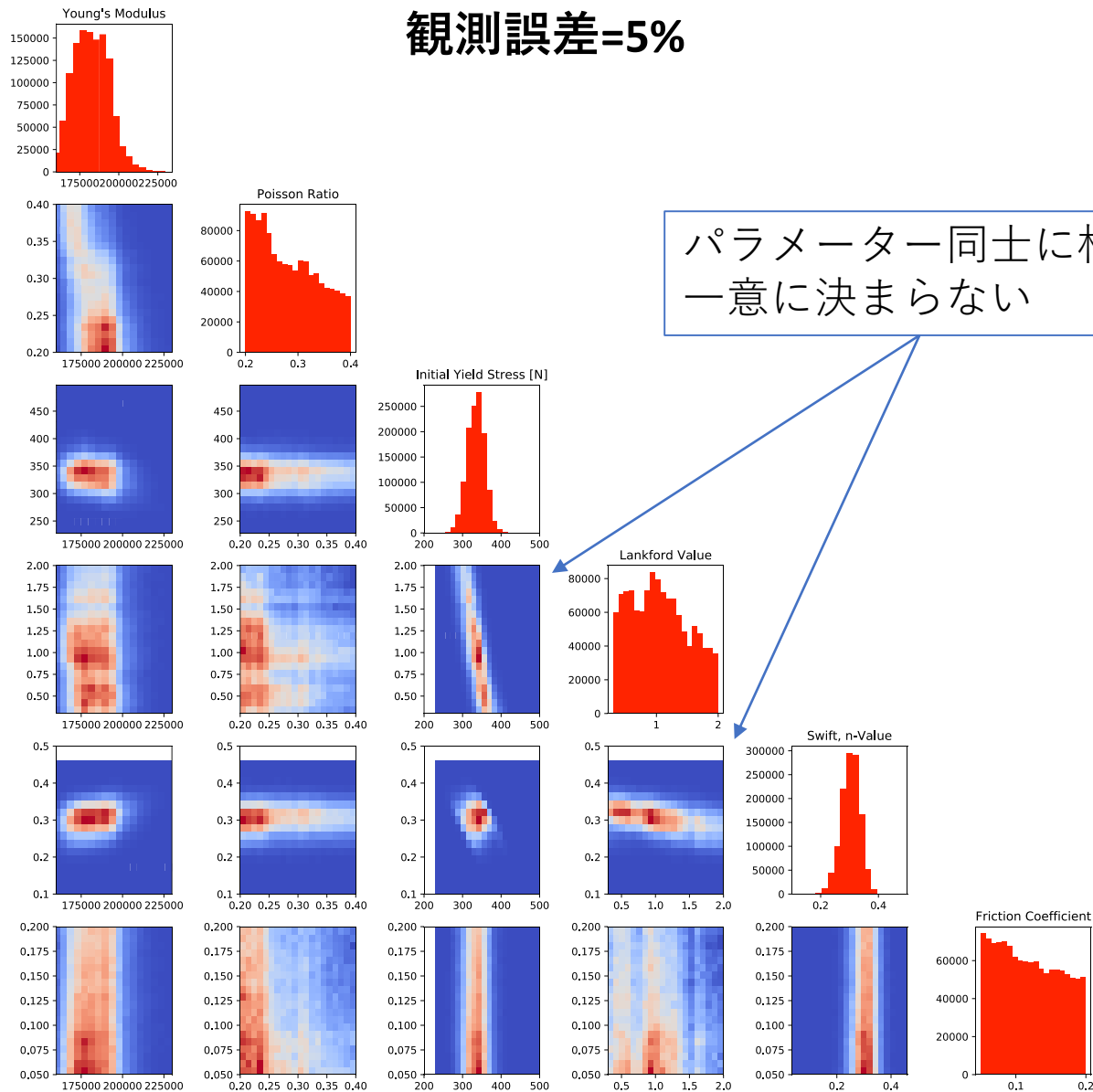
観測誤差=10%



パラメーター同士に相関があるため
一意に決まらない

パラメーター相関

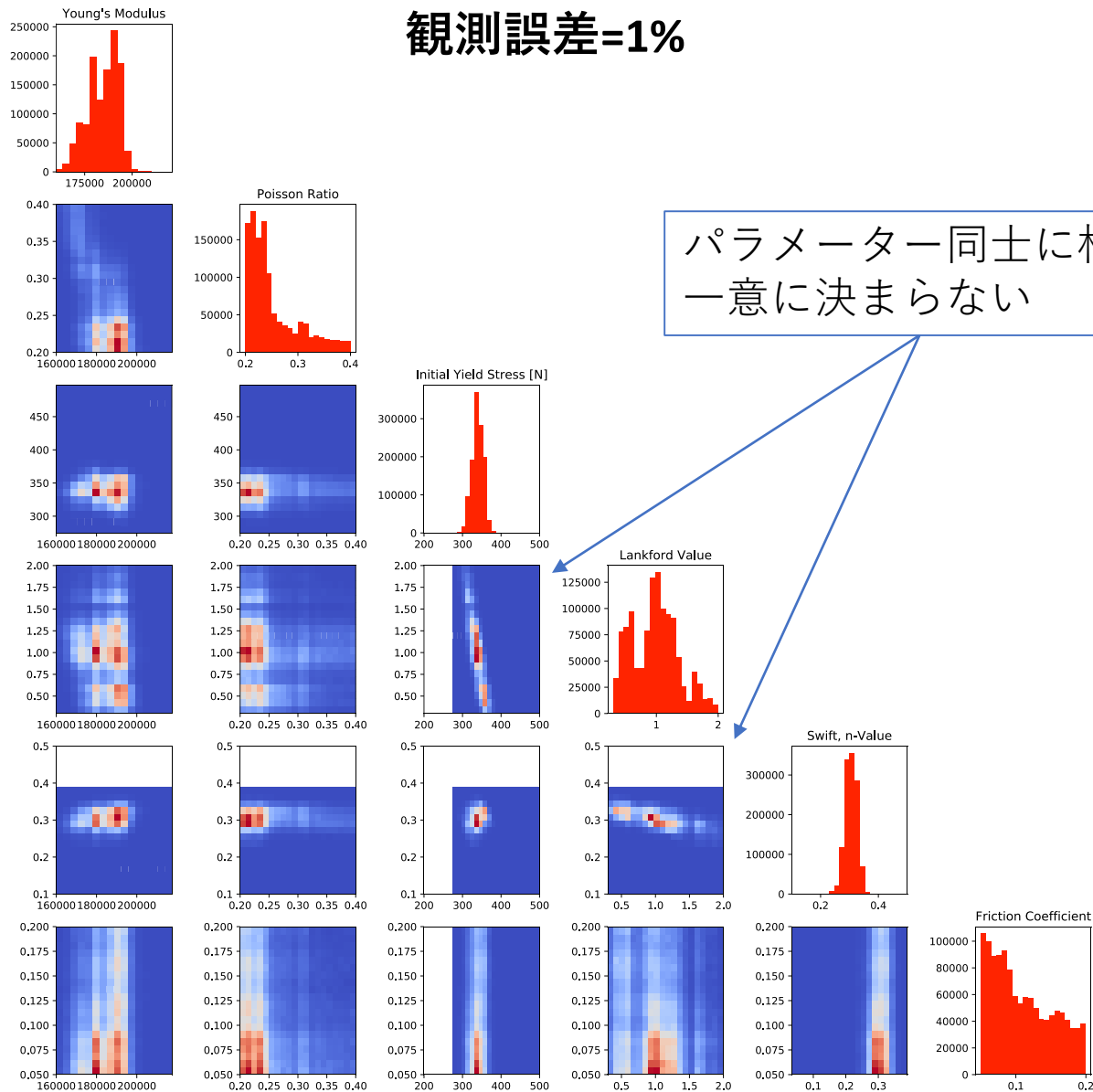
観測誤差=5%



パラメーター同士に相関があるため
一意に決まらない

パラメーター相関

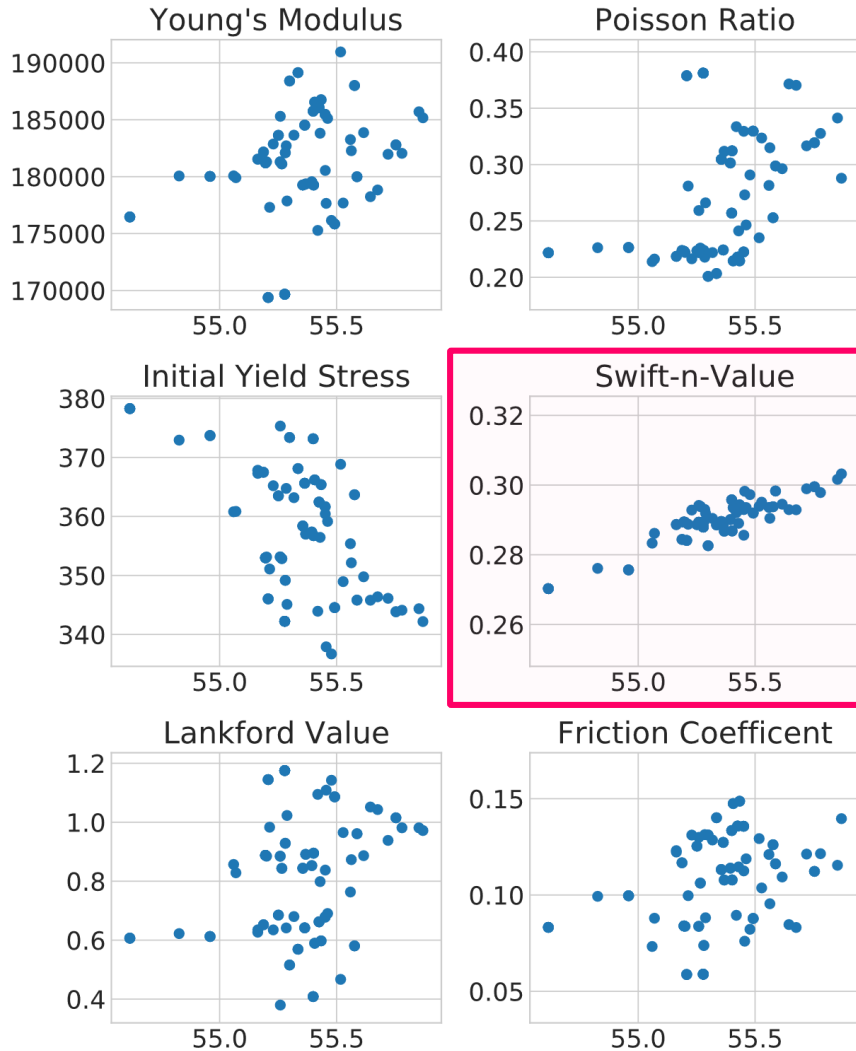
観測誤差=1%



パラメーター同士に相関があるため
一意に決まらない

板角度とパラメーターの関係

観測誤差=1%



Swift-n値は、板角度分布と相関を持つ

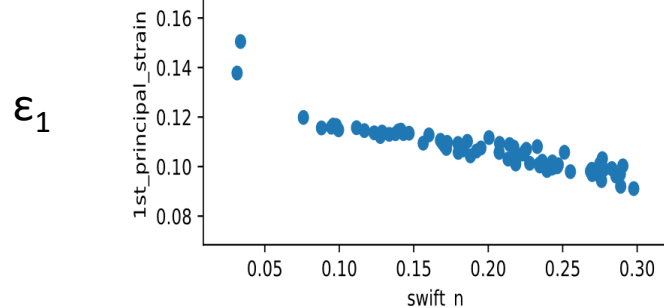
➡ Swift-n値が分かれば角度分布をさらに絞り込める

➡ Swift-n値に感度を持つデータは無いかな？

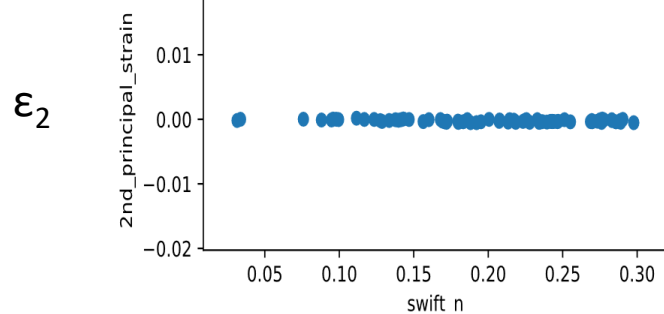
Swift-n値と主ひずみの関係

板下面の中心

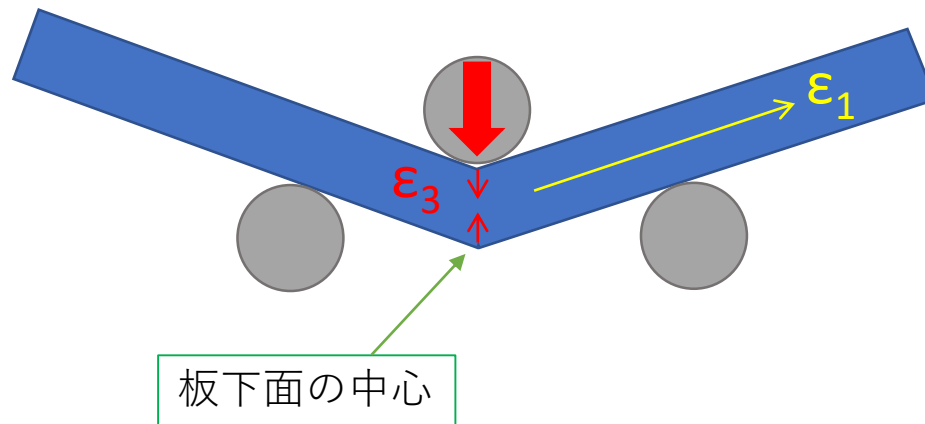
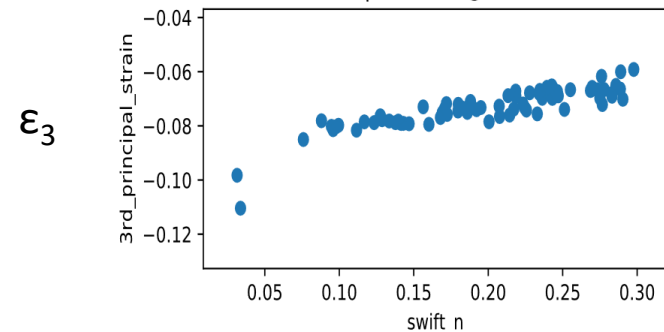
Principal Strain @Botoom



Principal Strain @Botoom



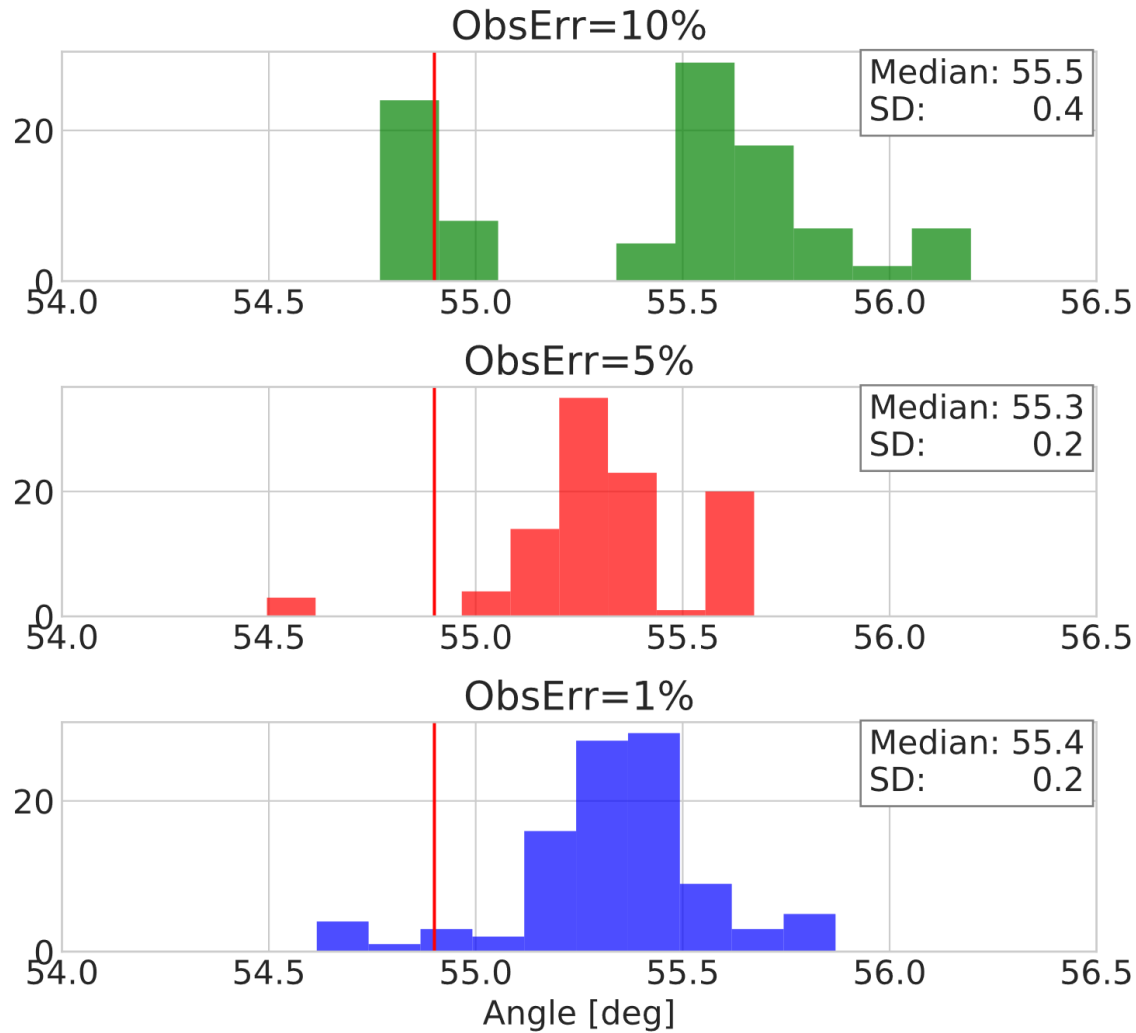
Principal Strain @Botoom



ϵ_1 から、Swift-n値に対して制限を付けられそう

→ ϵ_1 を測ればスプリングバック分布が絞れる！

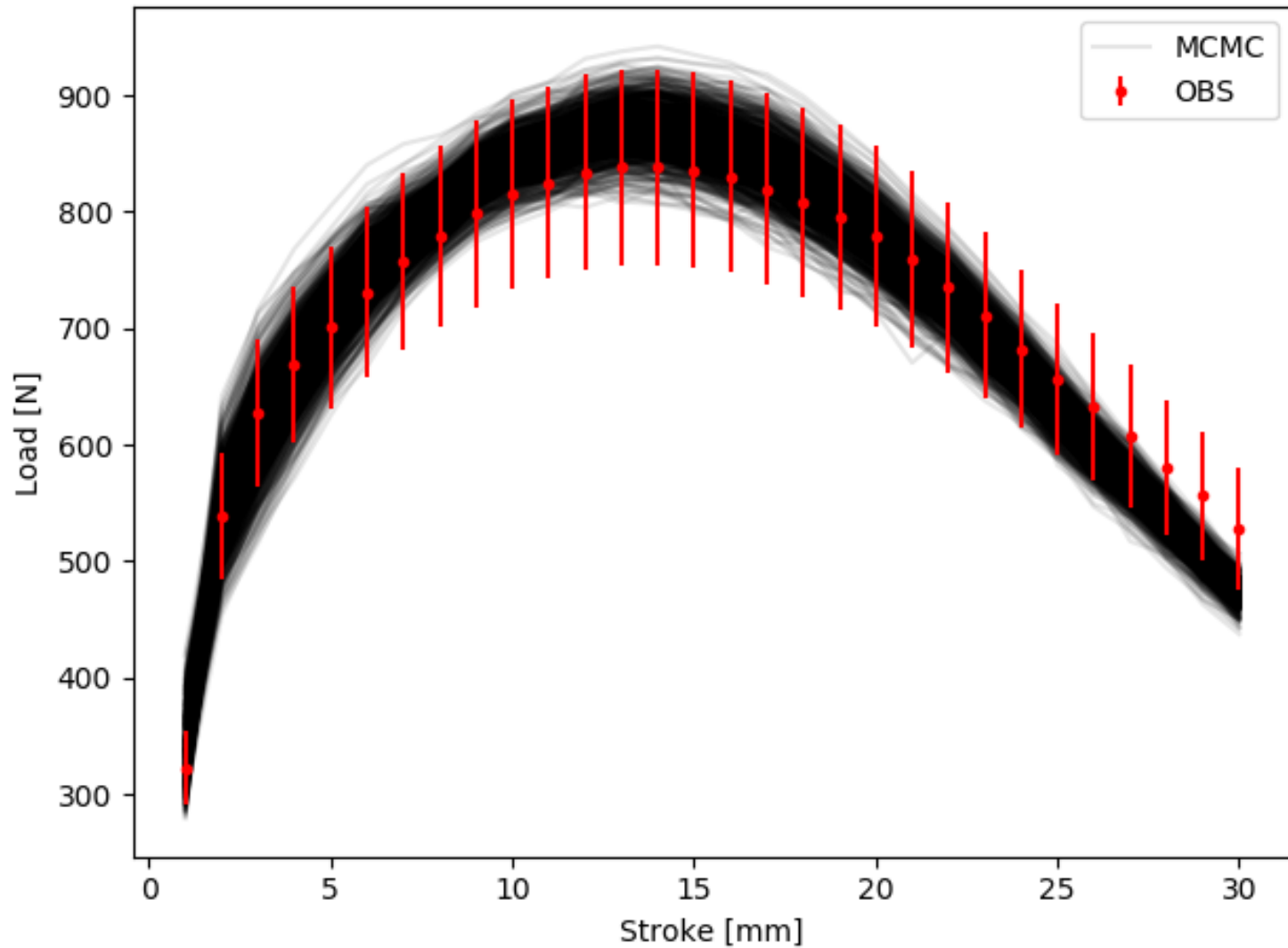
板材の角度分布



- ①観測誤差が小さくなるほど、分布の広がりが狭くなる
- ②中央値が実測データからずれる

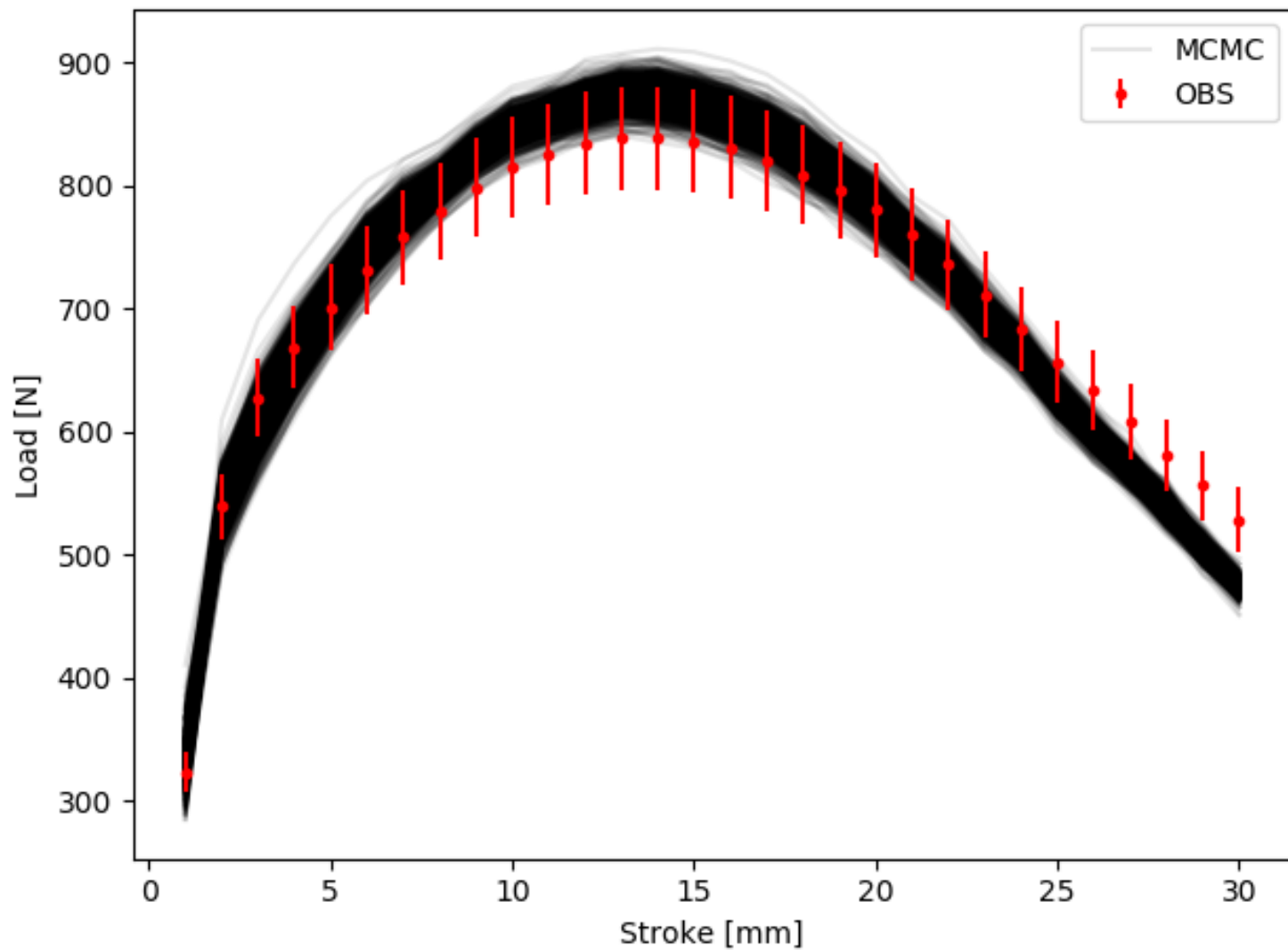
荷重－ストローク曲線

観測誤差=10%



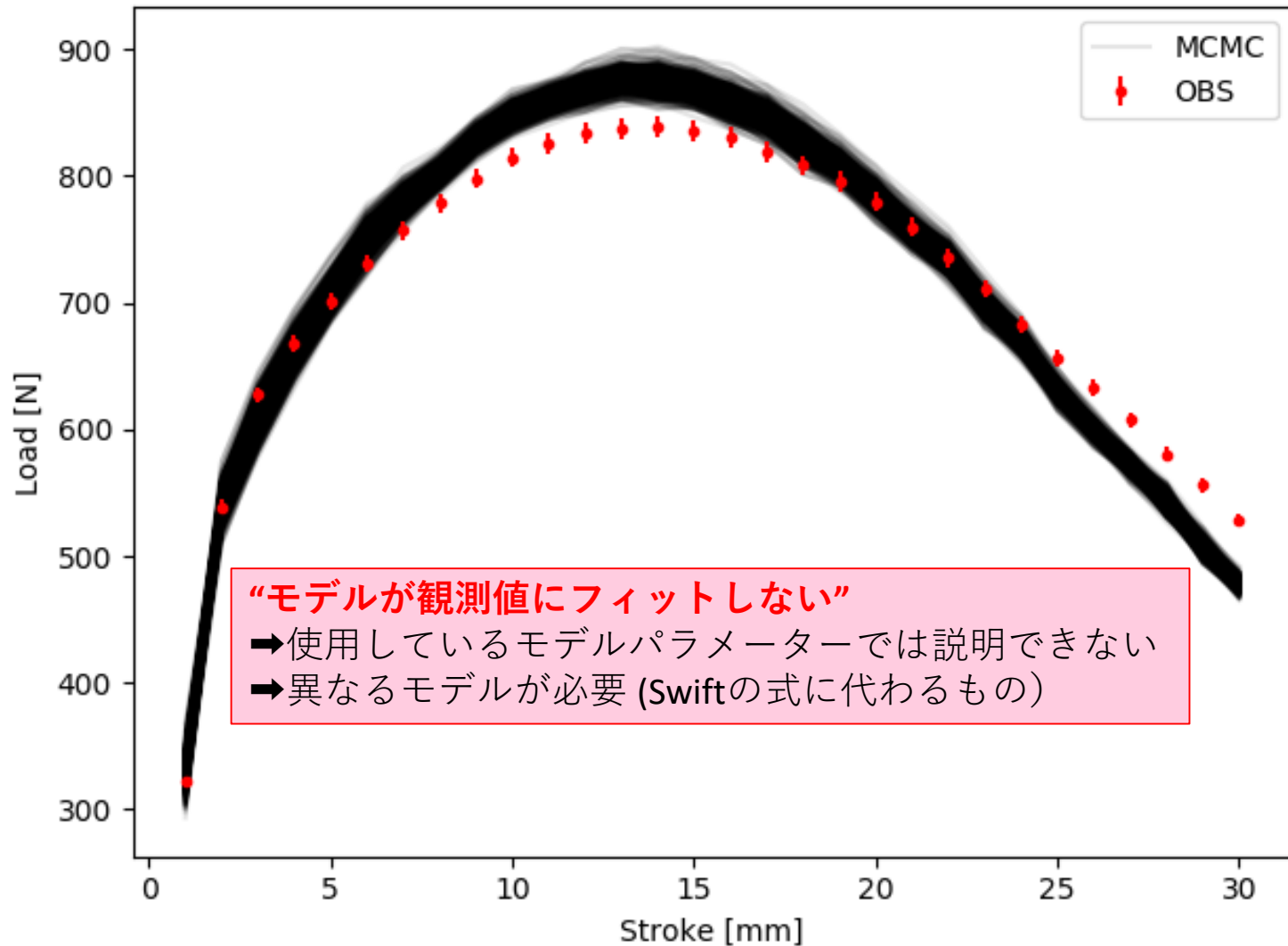
荷重—ストローク曲線

観測誤差=5%



荷重－ストローク曲線

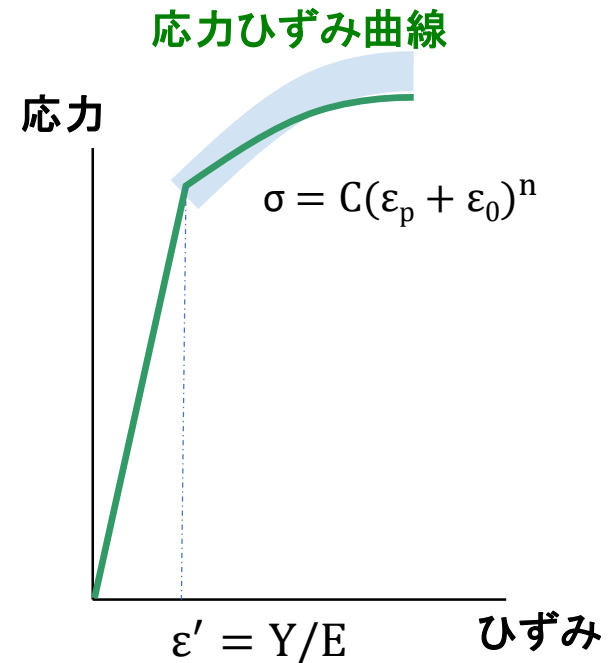
観測誤差=1%



さらなる精度向上に向けて

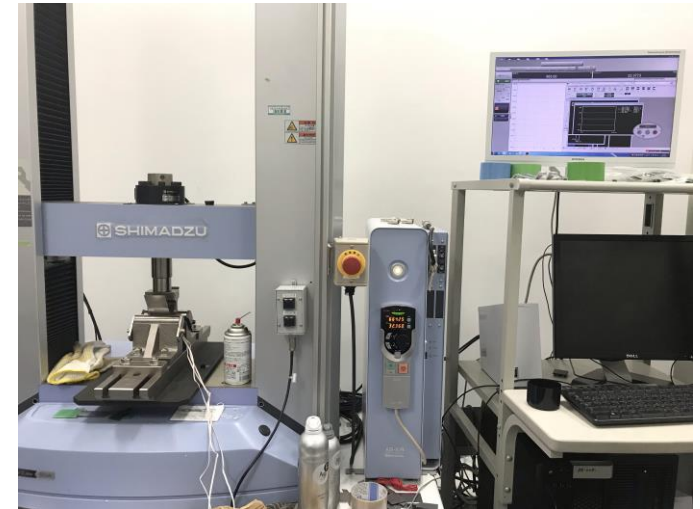
分かったこと & 次のステップ

- ① パラメーター同士に相関がみえた。
角度分布（スプリングバック）に対し、主ひずみが相関を持っていそう
➡ 主ひずみを観測データとして追加すれば、角度分布をさらに絞り込めると期待
➡ 歪み測定
- ② 角度分布の中央値が実測からずれていた。
荷重－ストローク曲線でもずれが見えた。
➡ モデル(Swiftの式)を変更してみよう。
 1. 応力ひずみ曲線を粒子フィルタorMCMCで決める
除荷直前の応力ひずみ分布をより正確に求める
 2. より高度なモデルの適用する
除荷時のヤング率の見かけ上低下する効果を取り込む



3点曲げ実験 + 歪みデータ

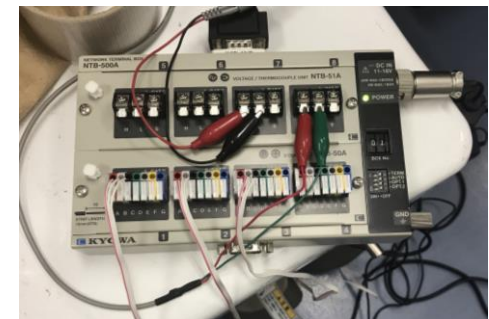
島津オートグラフ AG-X 50kN



ひずみゲージ接着後の試験板

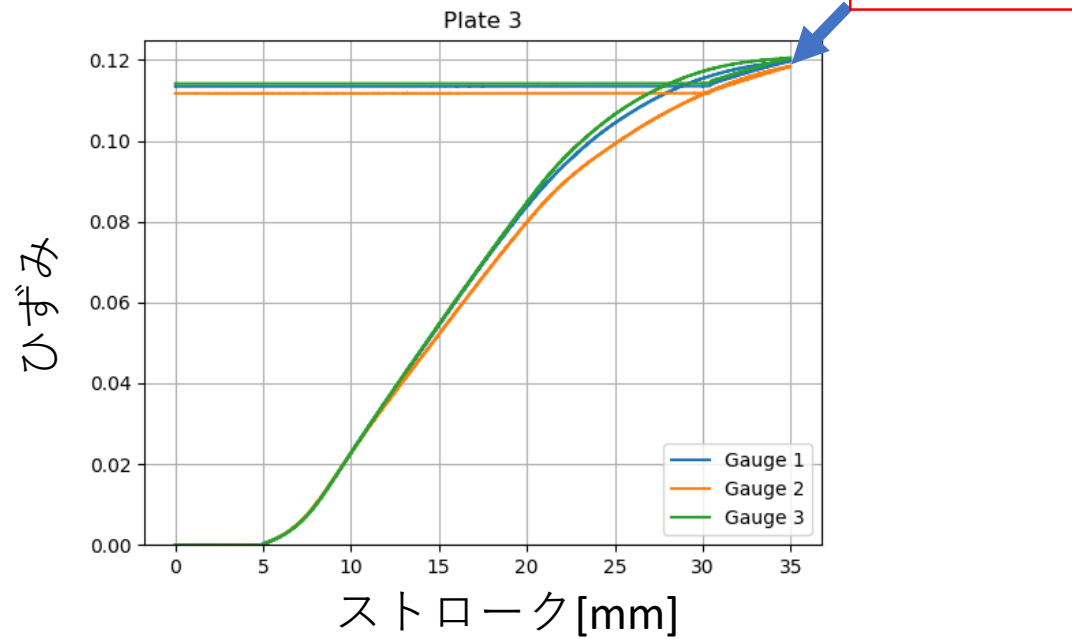


ひずみアンプ

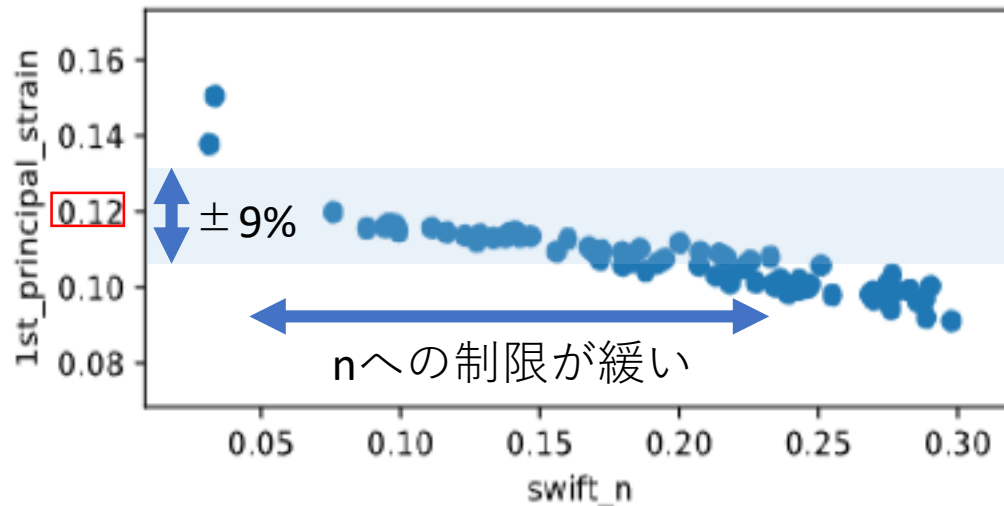


- 場所：中性子工学施設1F
- 使用機器
 - 試験機：島津製オートグラフAG-X50kN
 - ロガー：共和電業製 中速ネットワークターミナル NTB-500A
 - 荷重・ストローク：共和電業製 電圧/熱電対ユニット NTB-51A
 - ひずみ：共和電業製 ひずみユニット NTB-50A
- 材料：JSC590R 50 x200 x1.21t (計5枚)
 - 試験板の3か所にひずみゲージを接着
- 試験条件
 - パンチスピード：下降時(10mm/min),上昇時(20mm/min)
 - パンチストローク：30mm
 - ダイス取り付けネジ：緩めた場合、絞めた場合
- 取得データ
 - 荷重-ストローク (サンプリングレート 100Hz)
 - ひずみ (サンプリングレート 100Hz)
 - 動画
- 取得手順
 - 試験板を治具の中央にセット (ひずみゲージが下側)
 - パンチ位置を試験板から上に5mmの位置にセット
 - ひずみ測定開始
 - ストローク荷重測定開始
 - 動画撮影開始

歪みデータ



主ひずみvs n値@30mmストローク



1000粒子(1000種類のパラメーター)で計算した中で、荷重が実測値と近いものだけを表示したもの

まとめ

- スプリングバックの予測精度の向上に向けて、
加工成形シミュレーションに対しデータ同化の適用を試みている
- 単純な3点曲げについてシミュレーションと実測値を比較する
 - ・ 実測値： $54.9^{\circ} \pm 0.1^{\circ}$
 - ・ シミュレーション： 53.95°
- 前回（3月）の結果：粒子フィルタ(SIR)
 - ・ 板角度： 55.1° （中央値） $\pm 0.8^{\circ}$ （標準偏差）
 - ・ 分布のばらつきについては要検証
- 今回（7月）の結果：サロゲートモデル+MCMC
 - ・ 板角度： 55.4° （中央値） $\pm 0.2^{\circ}$ （標準偏差） @観測誤差1%
 - ・ 分布のばらつき：パラメーター同士に相関があり、一意に決まらないため
 - ・ 歪みデータが使える、Swift-n値に制限をかけられると期待
 - ・ 8月に追加測定を実施した
 - ・ 計測誤差が大きいため、Swift-n値への制限が緩い
 - ・ 中央値のずれ：Swiftの式では説明できないため
 - ・ 異なるモデルを適用してみる

ご清聴ありがとうございました