

ヘミング工程品質と生産性を両立させる デジタルツインの取組み

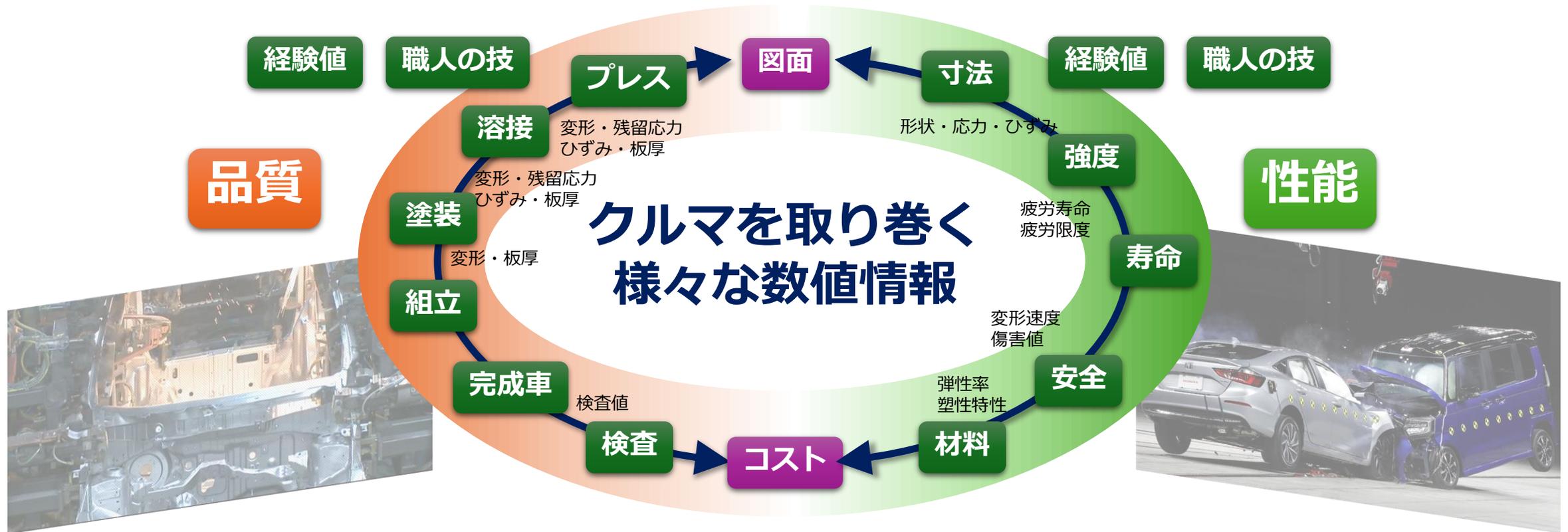
株式会社 本田技術研究所 先進技術研究所
プログレス・テクノロジーズ株式会社
デジタルプロセス株式会社

藤井 隆之
塚田 誠司
伊藤 和人

1. 現状分析
2. 目的/目標
3. ヘミング加工とは
4. ロボットシミュレーションとCAEの連携
5. ヘミング軌跡の探索
6. デジタルツインの検証
7. まとめ

1. 現状分析

- クルマづくりに携わるエンジニアが扱っている数値情報は、**単位**（情報の種類）が異なる
- ムリ・ムダ・手戻りのないクルマづくりを行うため、**単位をつなぐデジタルの仕組み**が大事



※ 画像引用元：<https://global.Honda.jp/kengaku/auto/> , <https://www.youtube.com/watch?v=DNdIp3aIJRA>

物理情報をつなぐ技術をつくり、“品質”と“性能”をいつでも検討できるようにしたい

ヘミング加工

板材の端部の曲げや他の部品と共に折り重ねる技法のこと

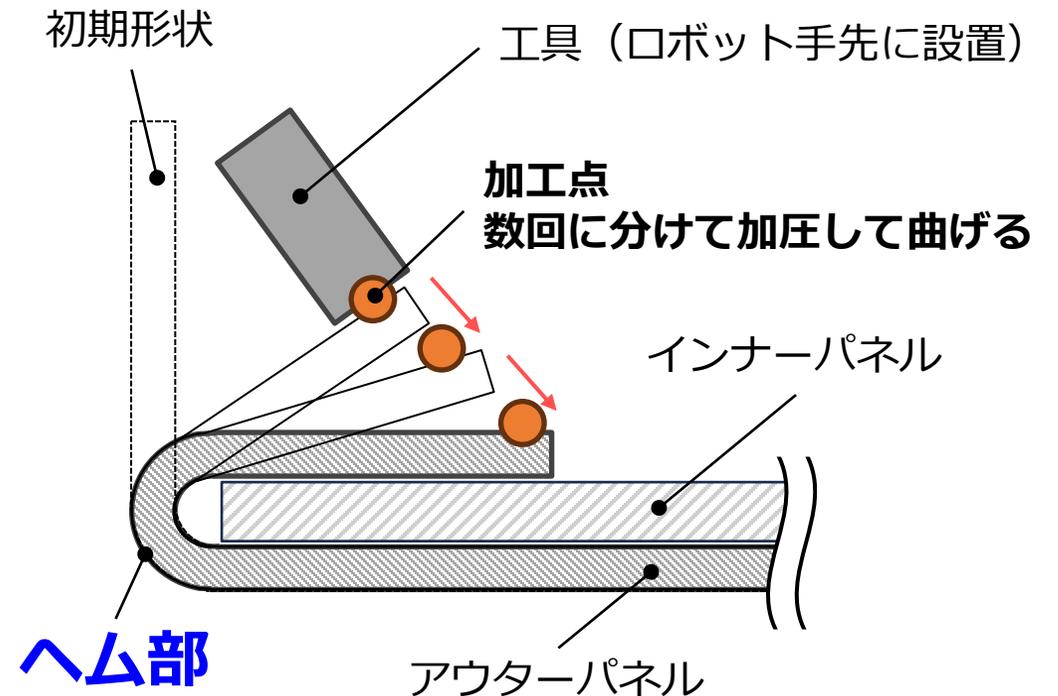
フードやドア等のパネル部品を接合する際に行われ、曲げ部分が鋭利でないため安全性が得られる

例：ロボットによるヘミング加工※



※ 動画引用元：<https://www.youtube.com/watch?v=tu7HdxLGz0>

加工されるヘム部のイメージ図



ロボット手先の複雑な動きがヘム部の品質に直結する

2. 目的／目標

設計手順書にもとづく理想条件
・無理無駄のない情報をロボットに反映



バラツキ/誤差を吸収した現実条件
・現場の知見や経験を設計に反映

リアルとデジタルの差を無くすデジタルツインに取り組む

【目的】ヘミング工程を題材にしたデジタルツインを実現する

- **ヘミング工程を対象とすれば、ロボット制御の技術を習得・理解できる**
- **実際の工場でのトライが可能**
- **評価が容易にできる**

【目標】予測と実機が同じ結果になること

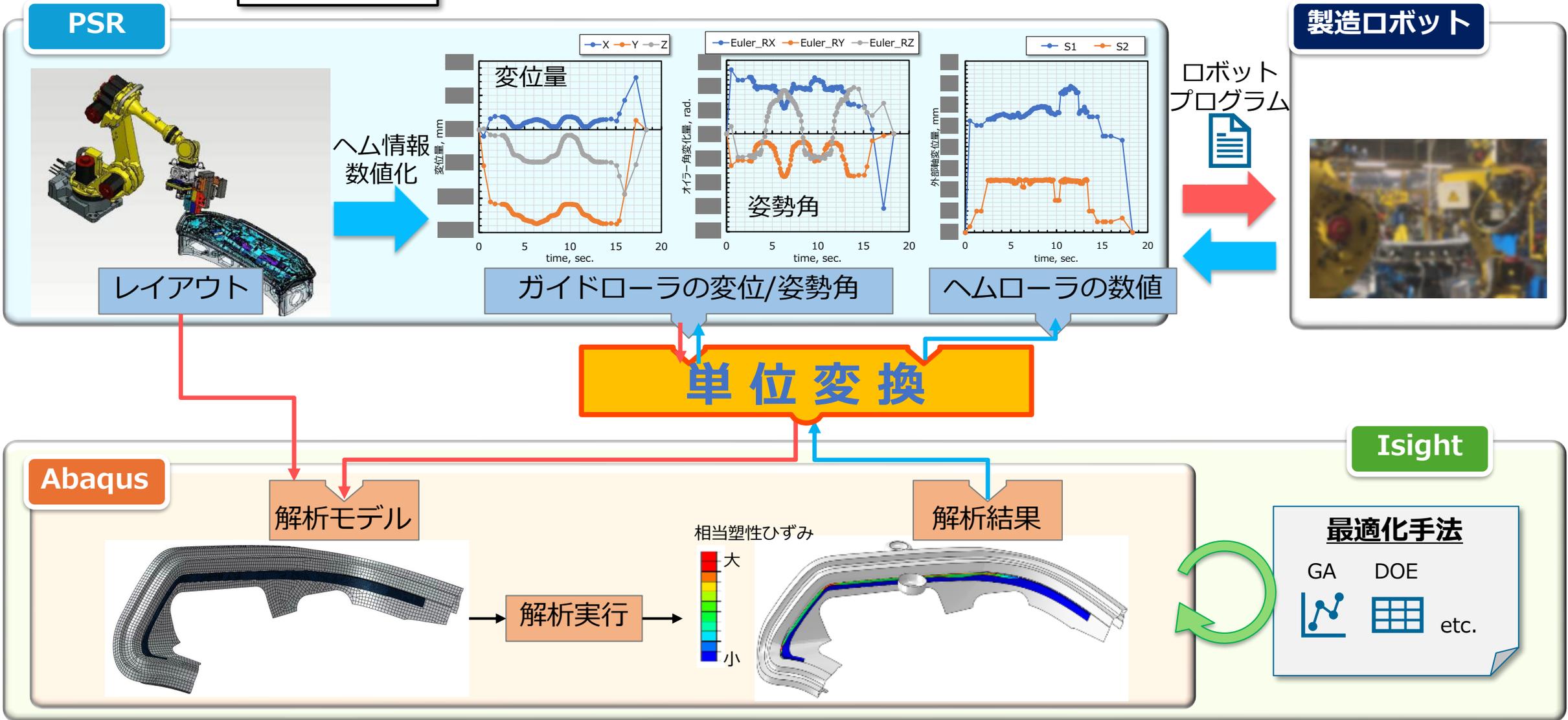
【課題】設計現場と製造現場をリアルタイムで結べること

【取組み】

- ① **CAE⇔PSRの連携技術構築**
- ② **へム軌跡の最適探索**

ワークフロー

← 入力 ← 出力



項目	個別目標	PSR	Abaqus	最適化
ロボットシミュレーション	ロボット動作確認 制御情報の生成を行う	●		
ヘミング成形解析予測	製造条件を取り込んでヘミング 成形予測を行う		●	
ヘミング加工情報の生成	成形予測結果から加工情報を作り あげる		●	●
デジタルツイン	CAE↔PSRを連携させ デジタルツインを検証する	●	●	●

推進には、各分野のエキスパートが不可欠



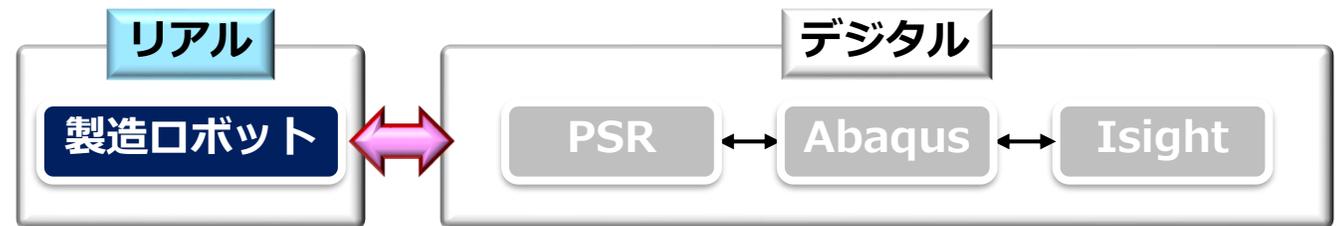
How we move you.
CREATE ▶ TRANSCEND, AUGMENT

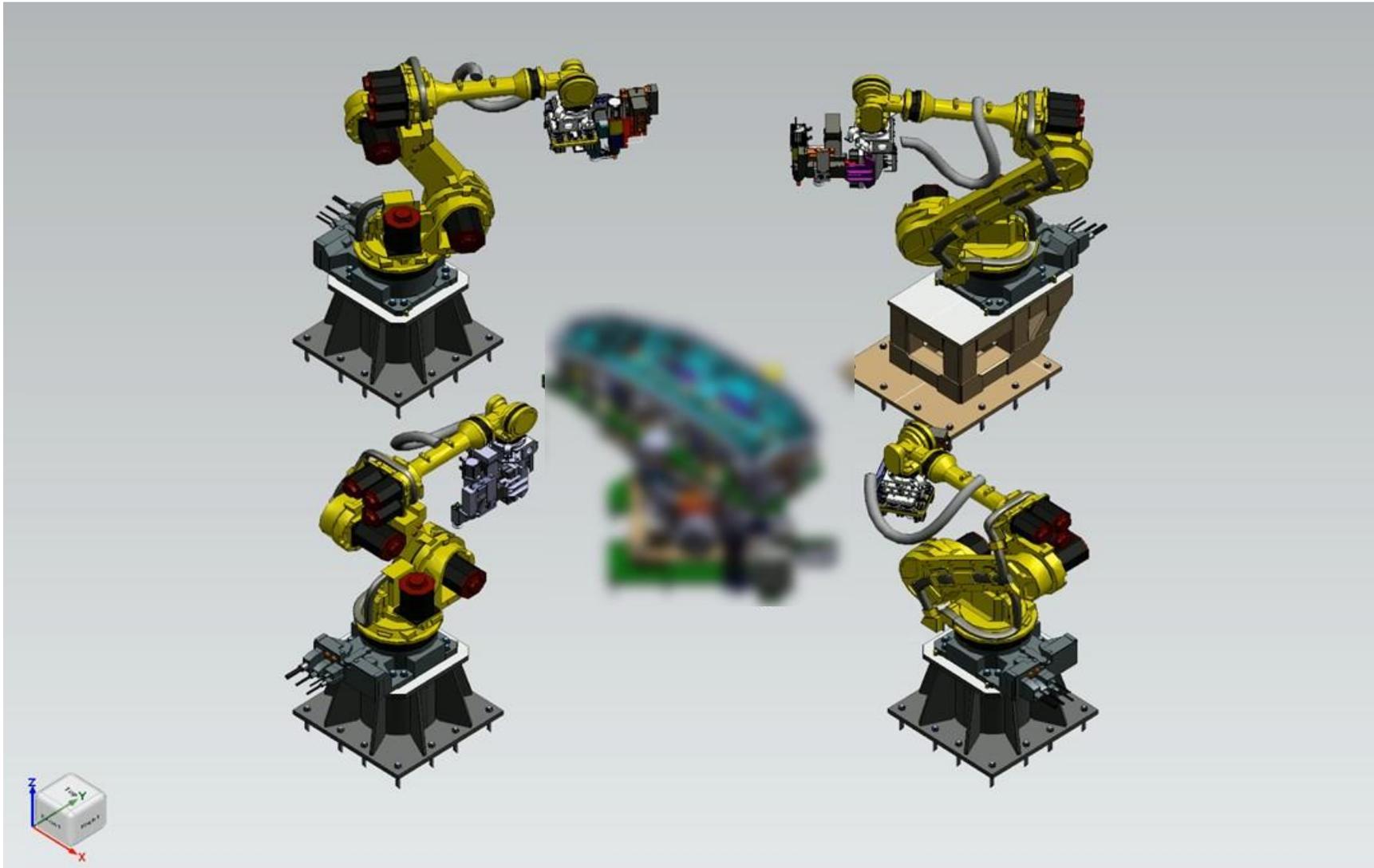
スケジュール結果

		'23年 8月		9月		10月		11月		12月		'24年 1月		2月		3月		
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	
イベント		定例会（全体）																報告会
	試打 現場調査		◆ 製作所			◆ 製作所								◆ 製作所	◆ 製作所		◆ 製作所	
デジタル ステージ	性能/品質 予測	ツール検証			CAEモデル化検討・試解析						評価指標検討		最適化条件化		最適化計算			
				単位変換								サンプリング						
リアル ステージ	ロボット情 報の取得/ 生成			PSR用意			PSRモデル キャリブレーション				PSR用意			PSR用意				
										パス生成		ローラ挙動調査		金型調査				
デジタル ツイン ステージ	CAE↔PSR 連携				キャリブレ整合						PSRパス生成指針							
												試打#1		試打#2		試打#3		

試打数削減率 70%を達成

3. ヘミング加工とは

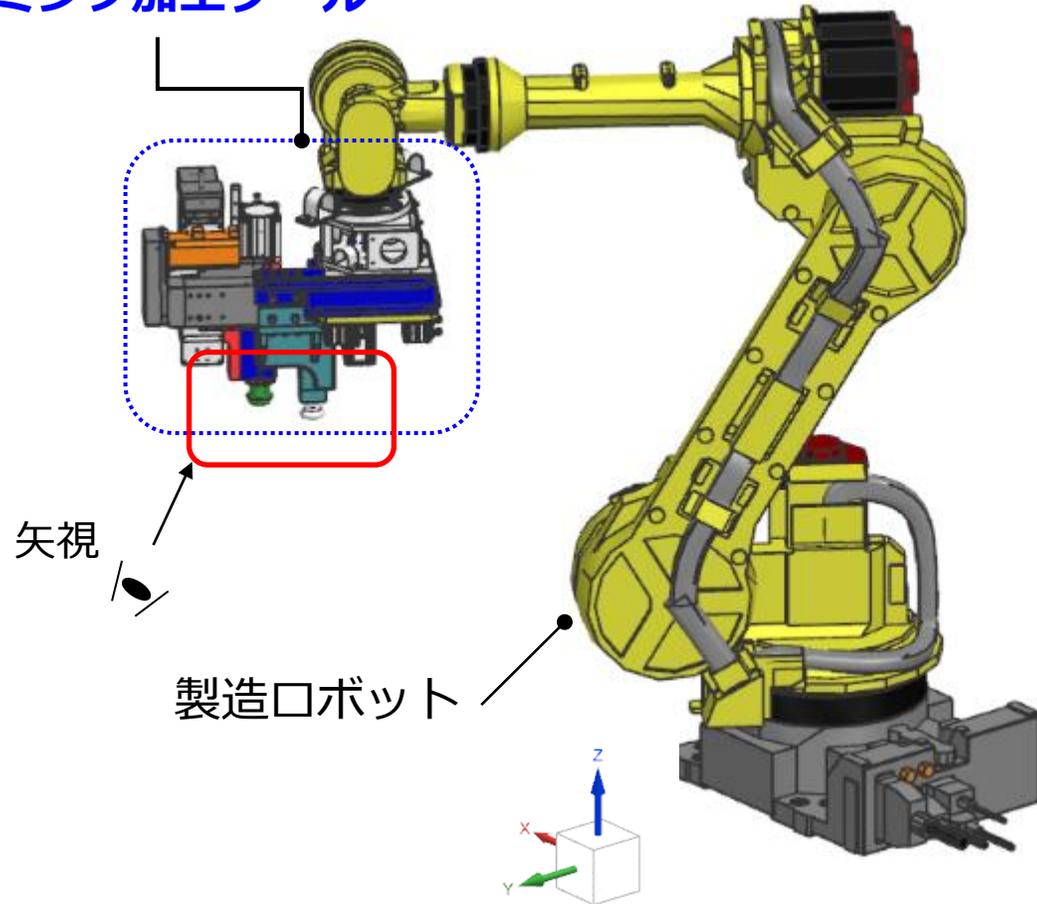




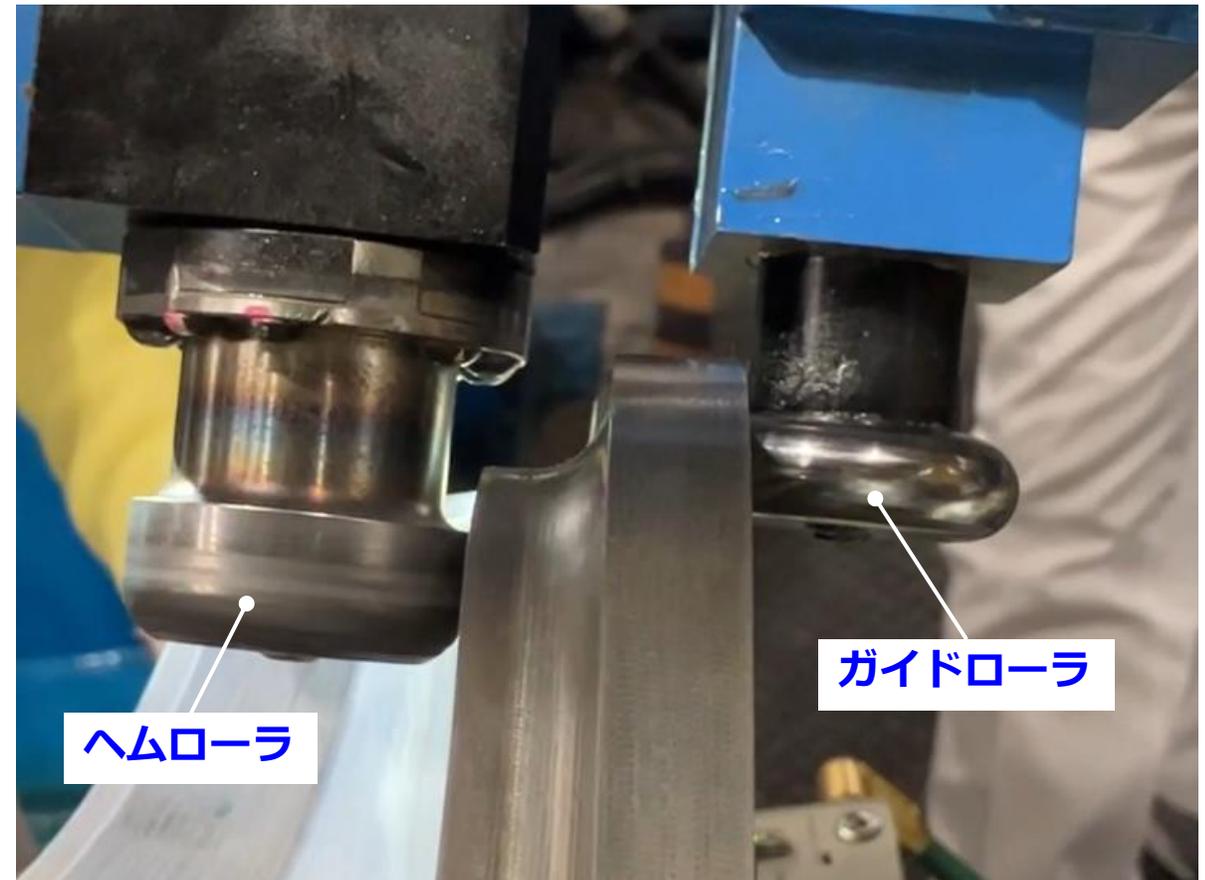
実際のヘミング工程をシミュレーションで表現

製造ロボットとヘミング加工ツール

ヘミング加工ツール

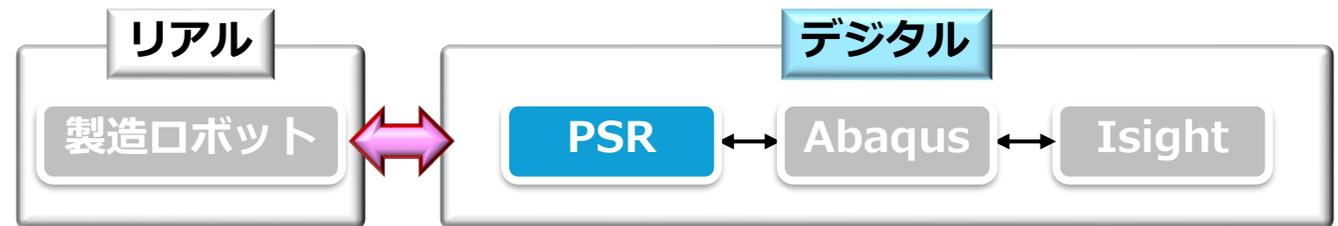


実際のガイドローラとヘムローラ

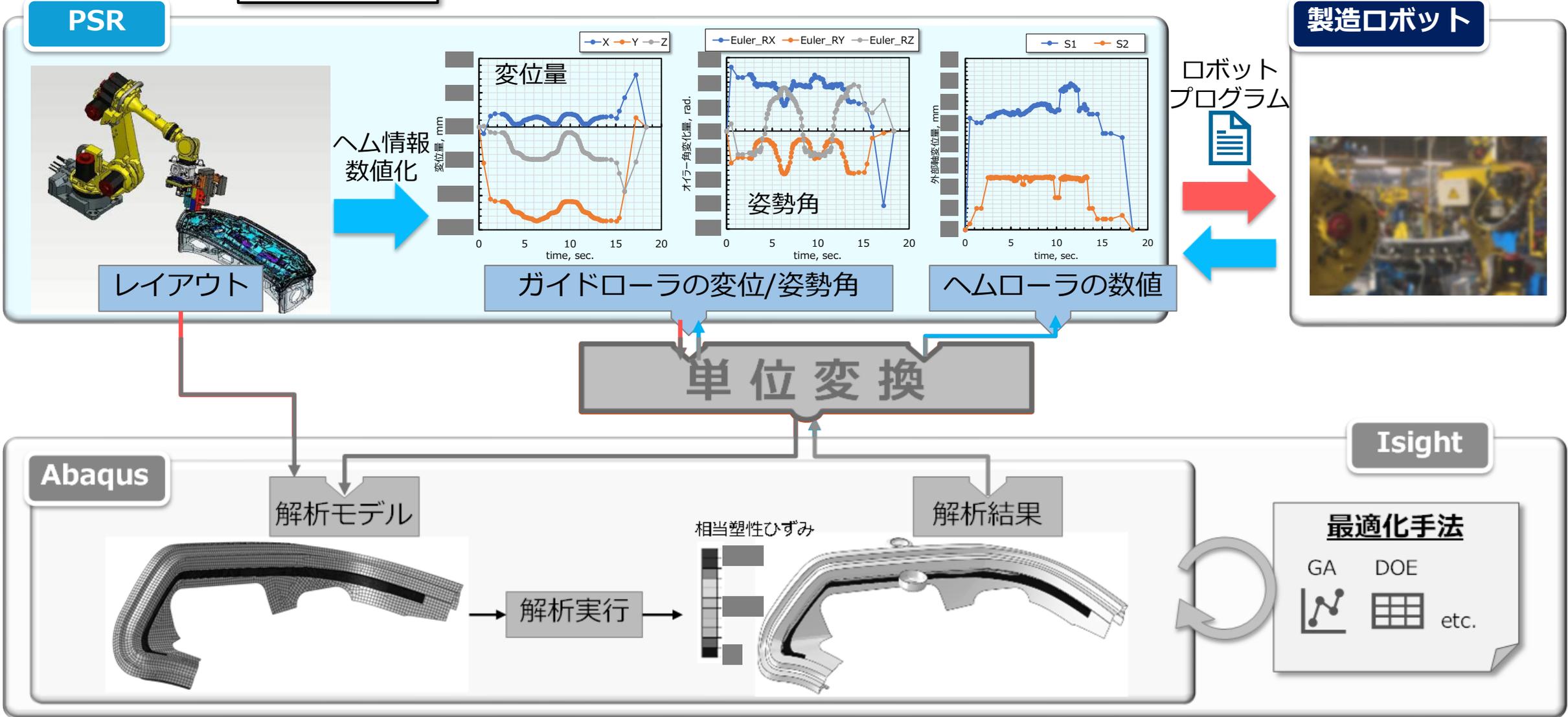


ヘミングは、「ヘムローラ」と「ガイドローラ」の2つの工具を用いる

4. ロボットシミュレーションとCAEの連携 PSRによるロボットシミュレーション



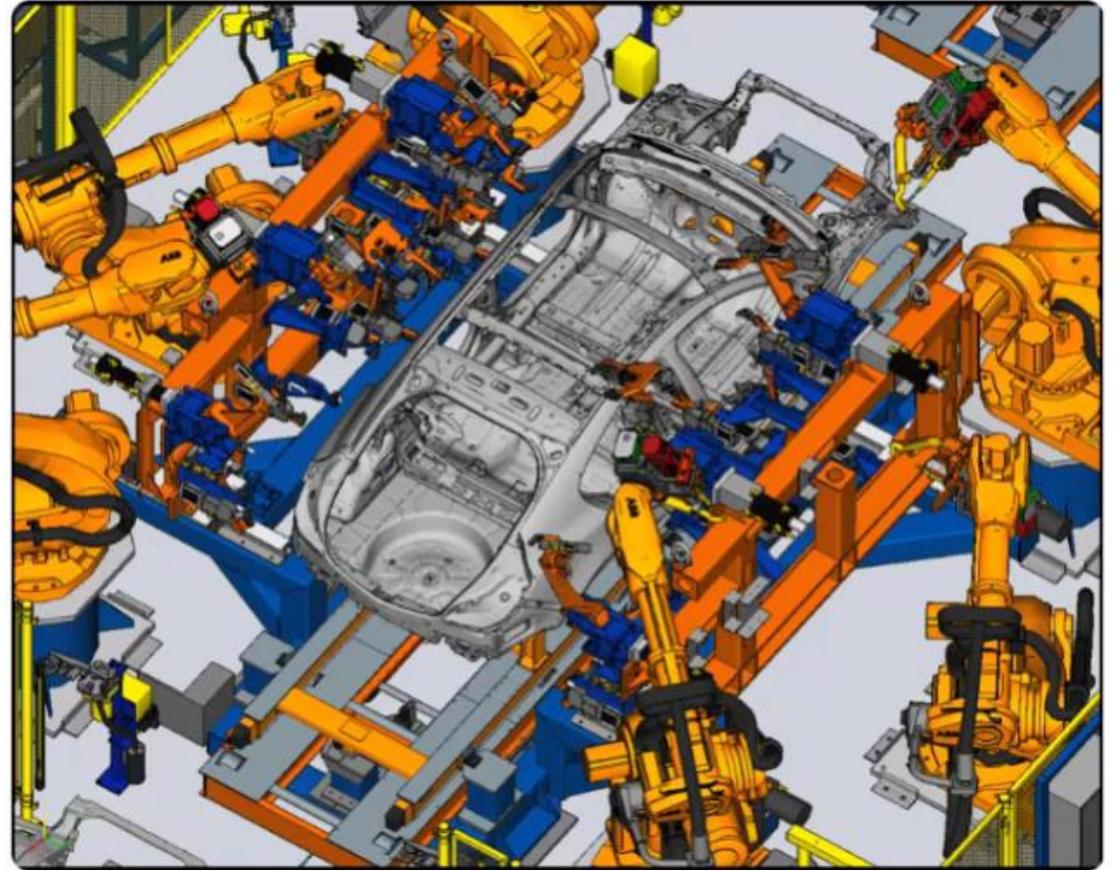
← 入力 ← 出力



PSRは製造工程におけるロボットの運動Sim.を行うツール

PSRで出来ること
(PSR : Process Simulate Robotics)

- 加工パス作成
- 試運転の検証
- サイクルタイム最適化
- ロボット同士の干渉確認
- ロボット配置とリーチ確認
- エンジニアのコラボレーション



※ 動画引用元 : <https://www.youtube.com/watch?v=UcCVfSCOxK8>

製造工程の事前検証を行い、速やかに現場を実現させる

- 教示点の番号
- ガイドローラの位置・姿勢角
- ヘムローラの突き出し量S1と挟み込み量S2

ロボットプログラムの内容

製造ロボット

ボンネット
金型

パスおよびロケーション	Comment	OLPコマンド	X	Y	Z	RX	RY	RZ	Ext1	Ext2	Def Type	Term type	Motion Ty...	Config	Speed	Duration	Utool	Uframe	

ロボットプログラムビューア

ロボット: r1000ia_100f_63A

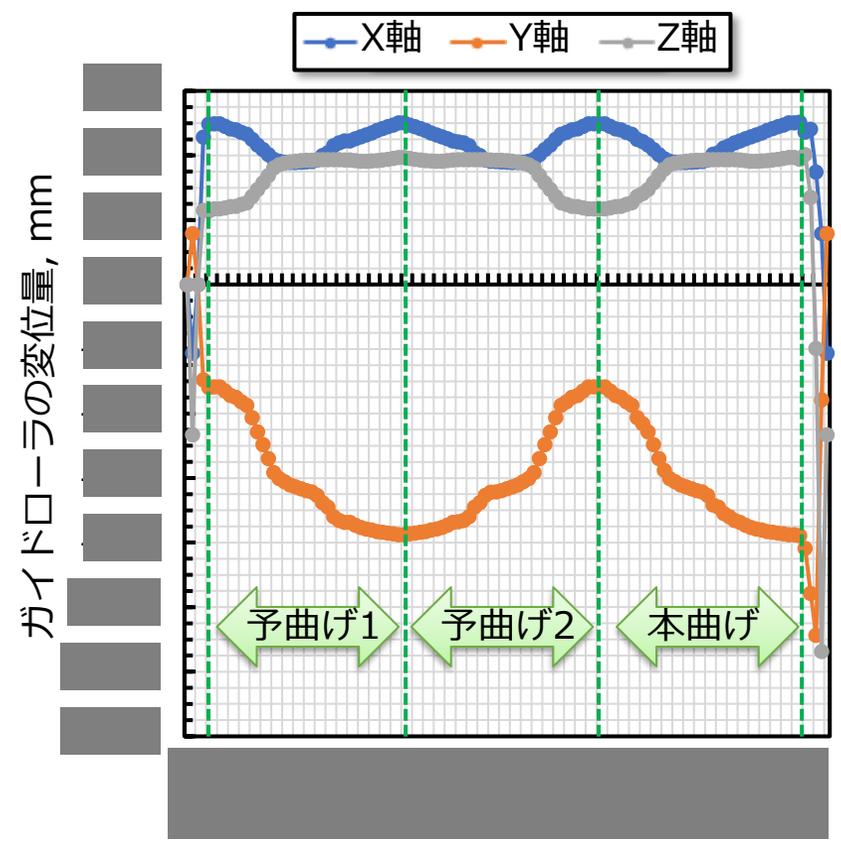
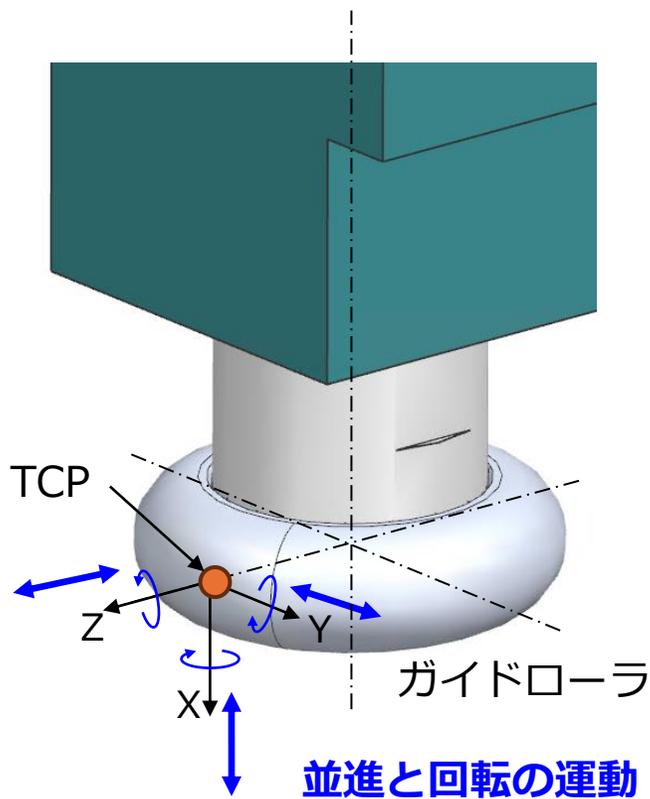
ジョイントステータス

- j1
- j2
- j3
- j4
- j5
- j6
- rhem_t_types1
- rhem_t_types2

PSRで対象とするヘミング加工の情報（軌跡、角度、位置）を取得した

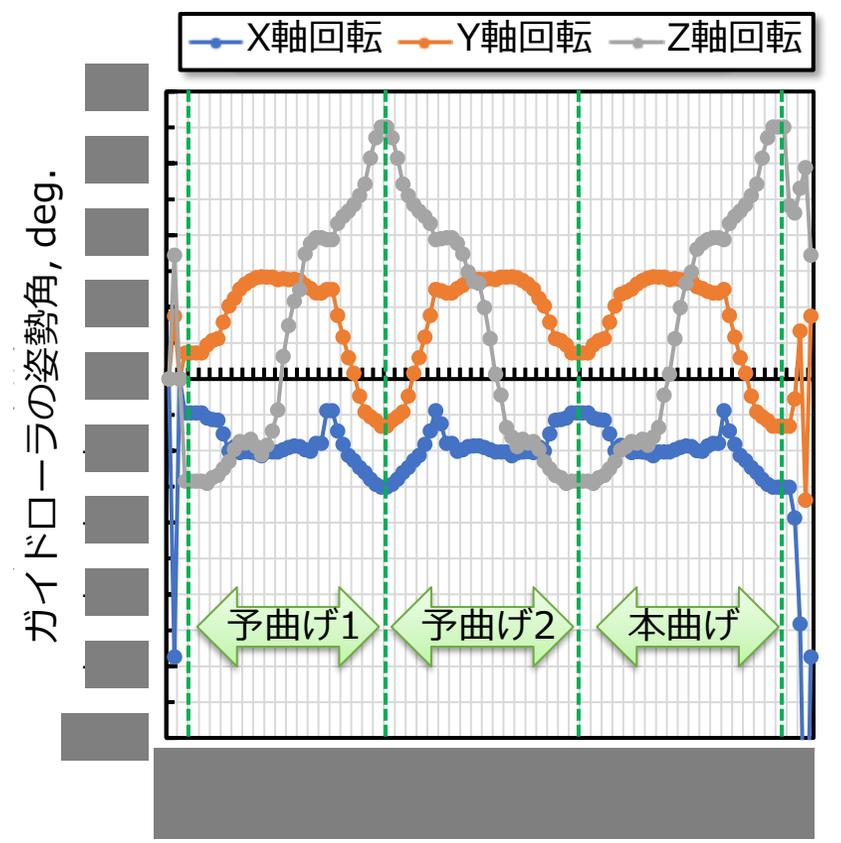
PSRで可視化したガイドローラの制御情報

★教示点とは
ロボットが作業する場所・姿勢をロボットに
教えた空間上の位置のこと (= 制御点)



教示点 (時刻歴変化)

ガイドローラの並進運動



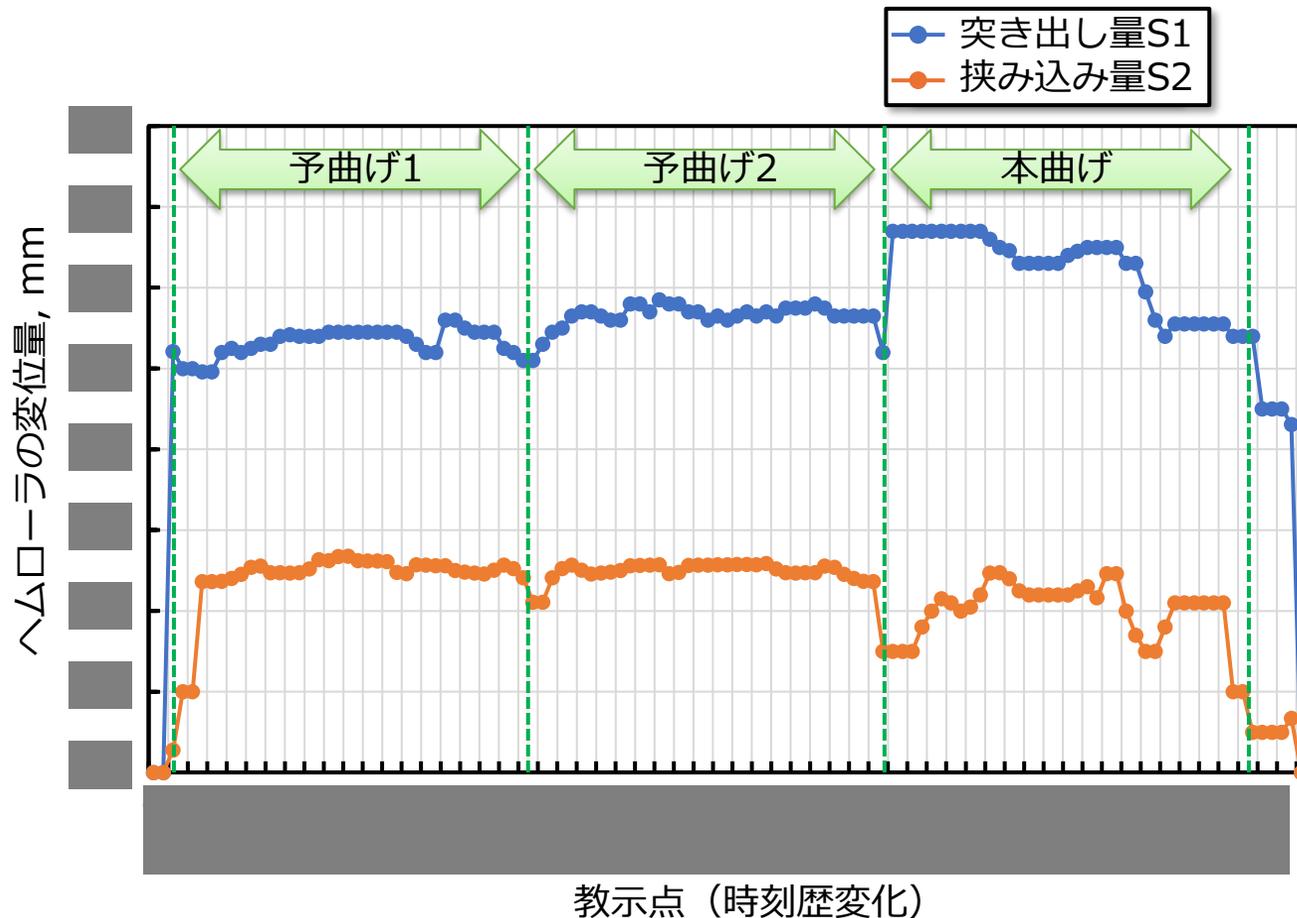
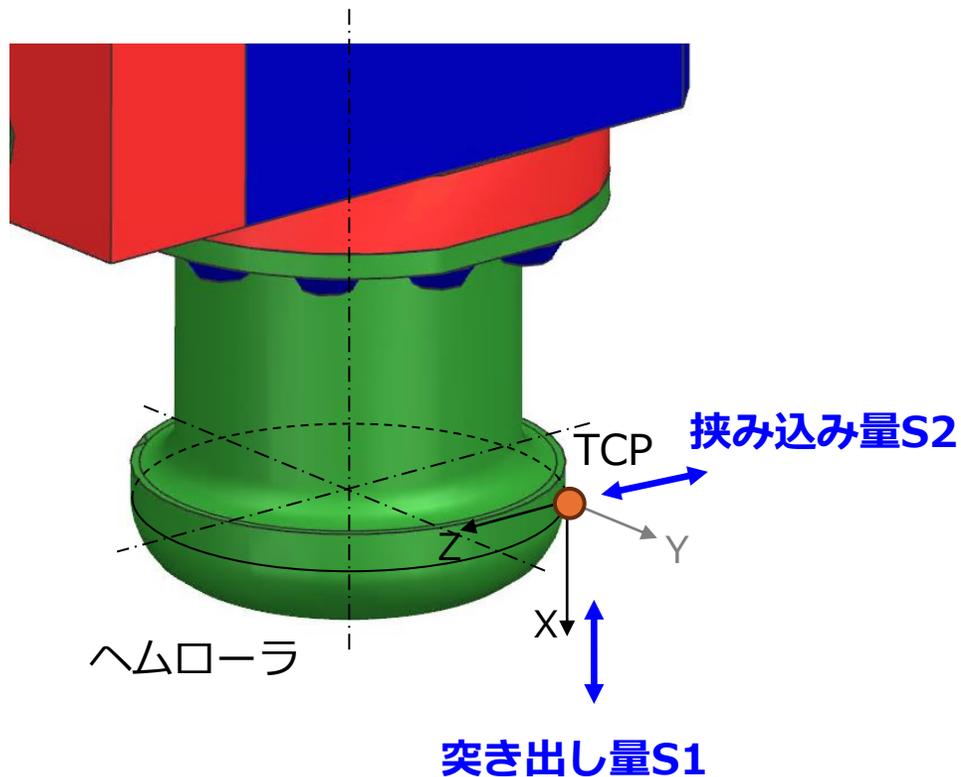
教示点 (時刻歴変化)

ガイドローラの回転運動

※TCP (Tool Center Point) : 制御の基準点

実際のガイドローラは複雑な動作をしていることがわかる

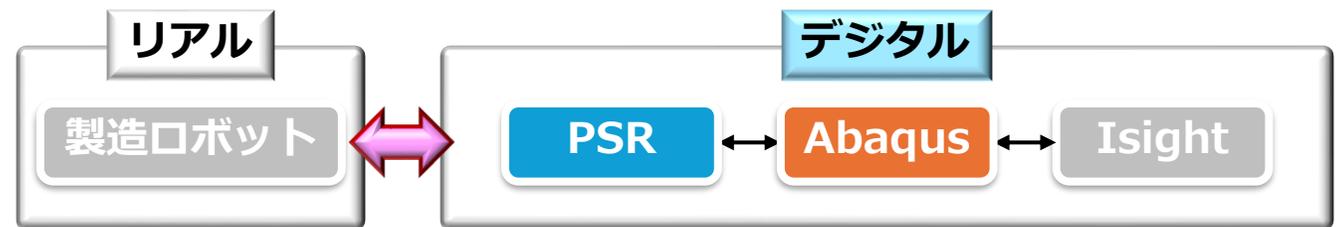
PSRで可視化したへムローラの制御情報

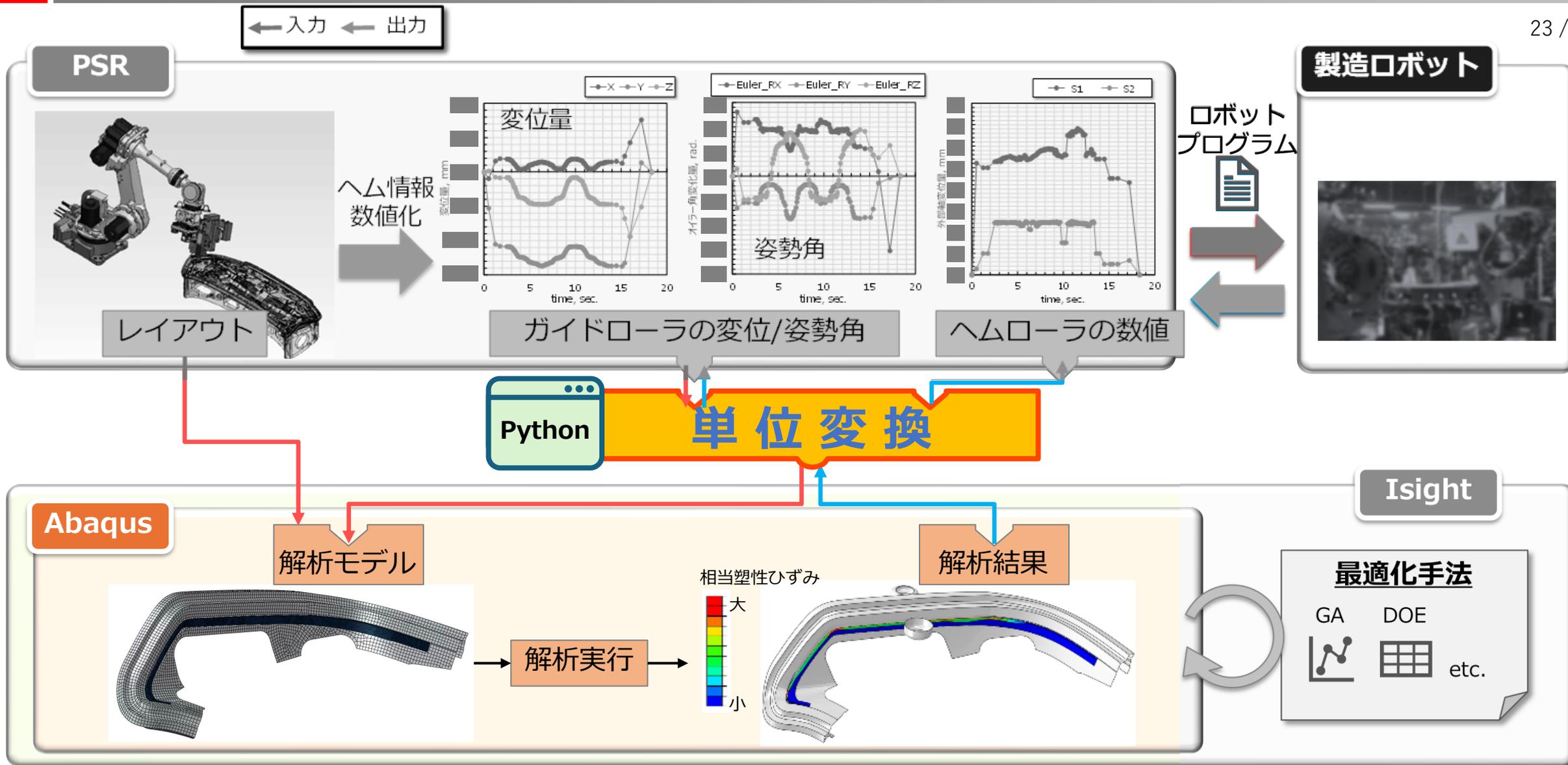


へムローラの突き出し量S1と挟み込み量S2

現場では、突き出し量と挟み込み量 を変化させながらへミング品質を安定させている

4. ロボットシミュレーションとCAEの連携 Abaqusによるヘミング加工解析



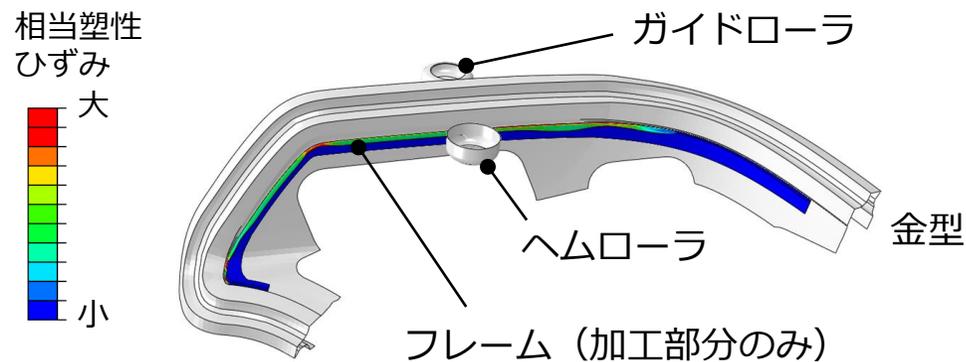


Abaqusは様々な部材の変形状態を算出する構造解析ツール

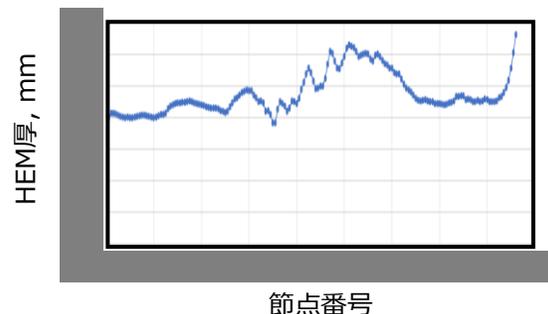
Abaqusで分かること

- 加工後のへム形状
- 加工中の応力/ひずみ
- 生成されたへムの総厚
- へムの波打ち
- 接触面圧/接触力 etc.

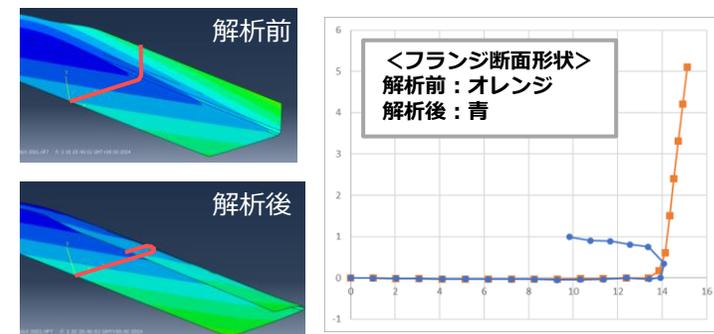
＜加工中の応力/ひずみの分布＞



＜へム厚/波打ちの評価＞



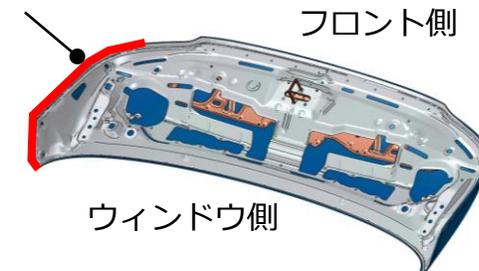
＜逆へム/ヒケの評価＞



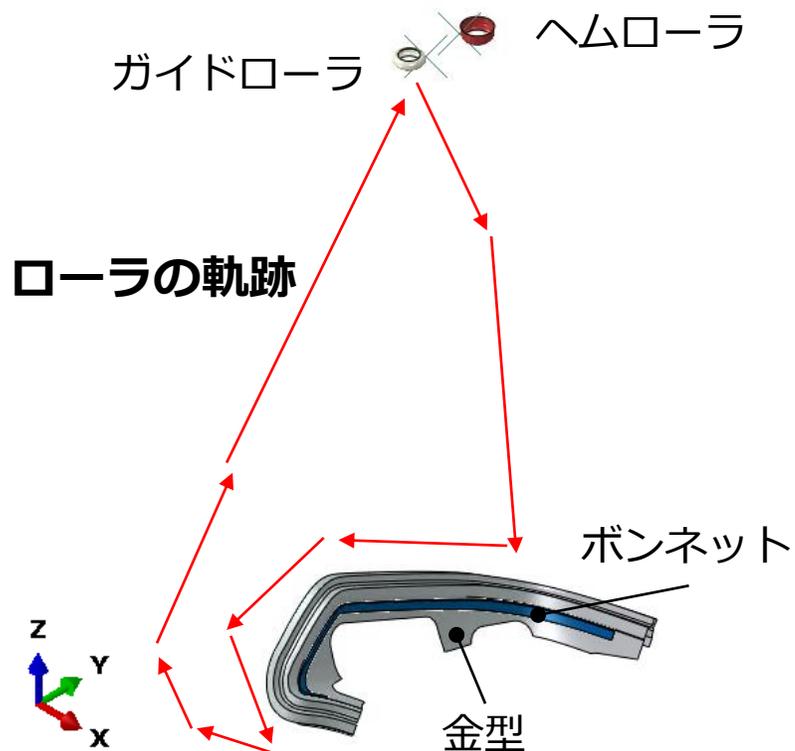
製造条件を用いてへム加工の状態を予測する

- 計算時間を考慮し、ガイド/ヘムローラのみをモデリング
- ガイドローラ/ヘムローラ/金型は剛体
- ボンネットの加工周辺をSHELLモデル化

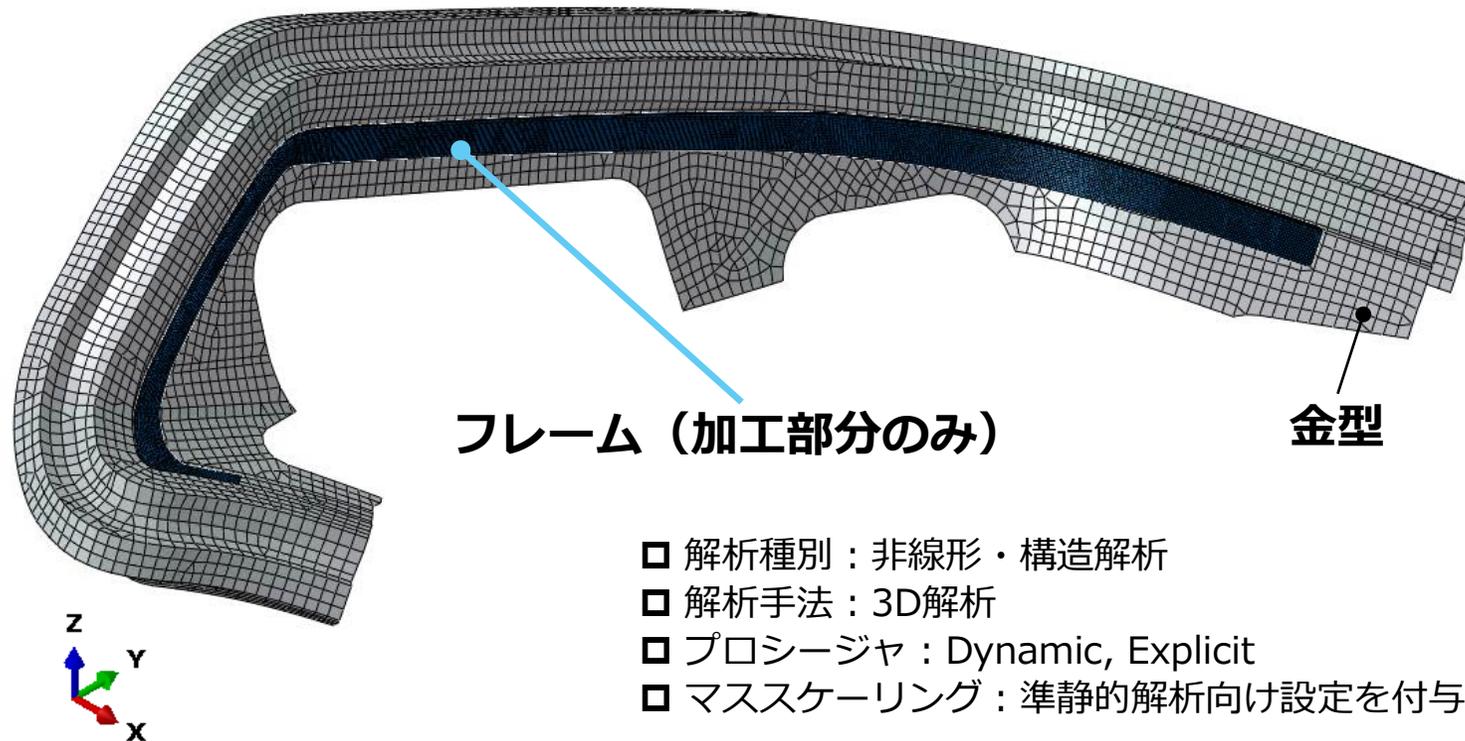
モデル化部位



Abaqusモデル外観図



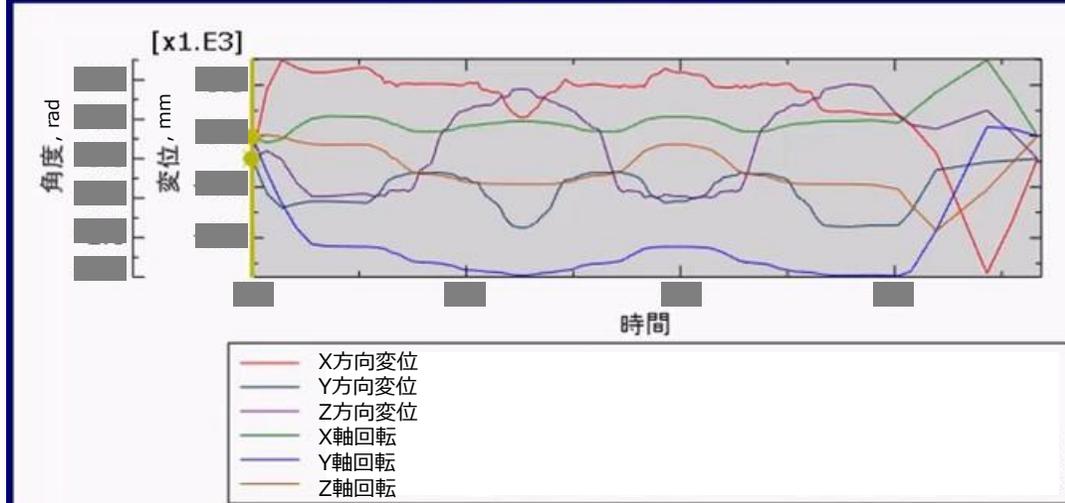
Abaqusモデル拡大図



- 解析種別：非線形・構造解析
- 解析手法：3D解析
- プロシージャ：Dynamic, Explicit
- マススケーリング：準静的解析向け設定を付与

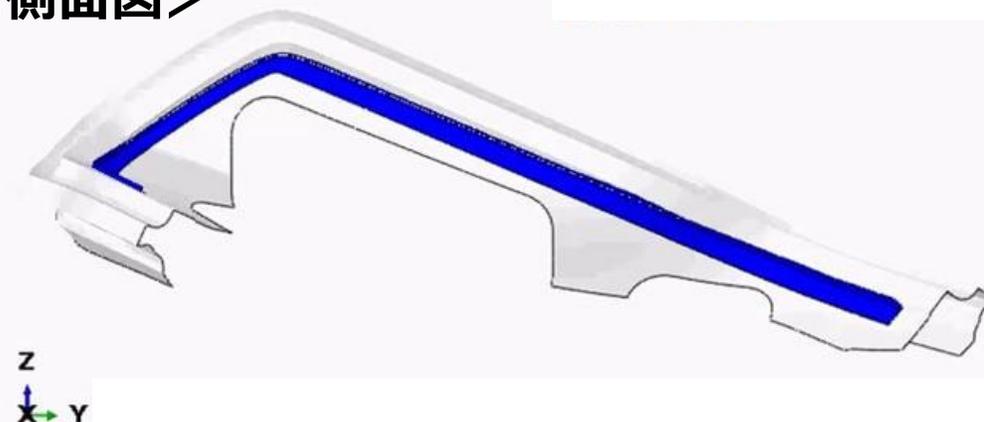
予測精度と計算時間を両立させたリダクションモデルを用意

ガイドローラの変位量・回転角

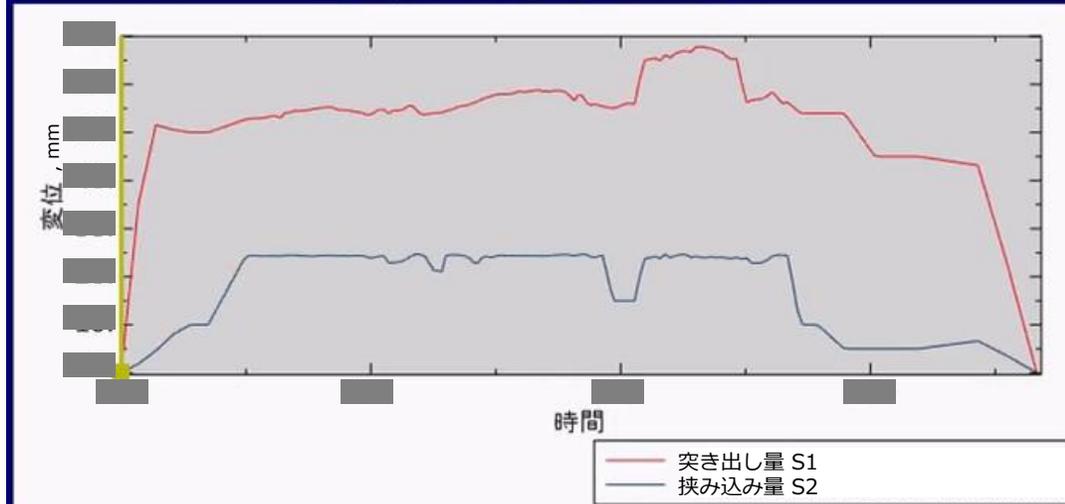


Viewport: 7

<側面図>

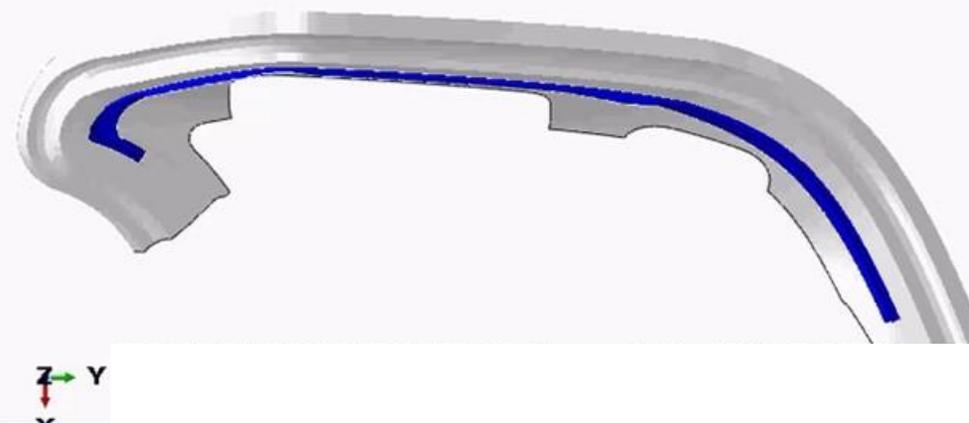


へムローラのS1・S2



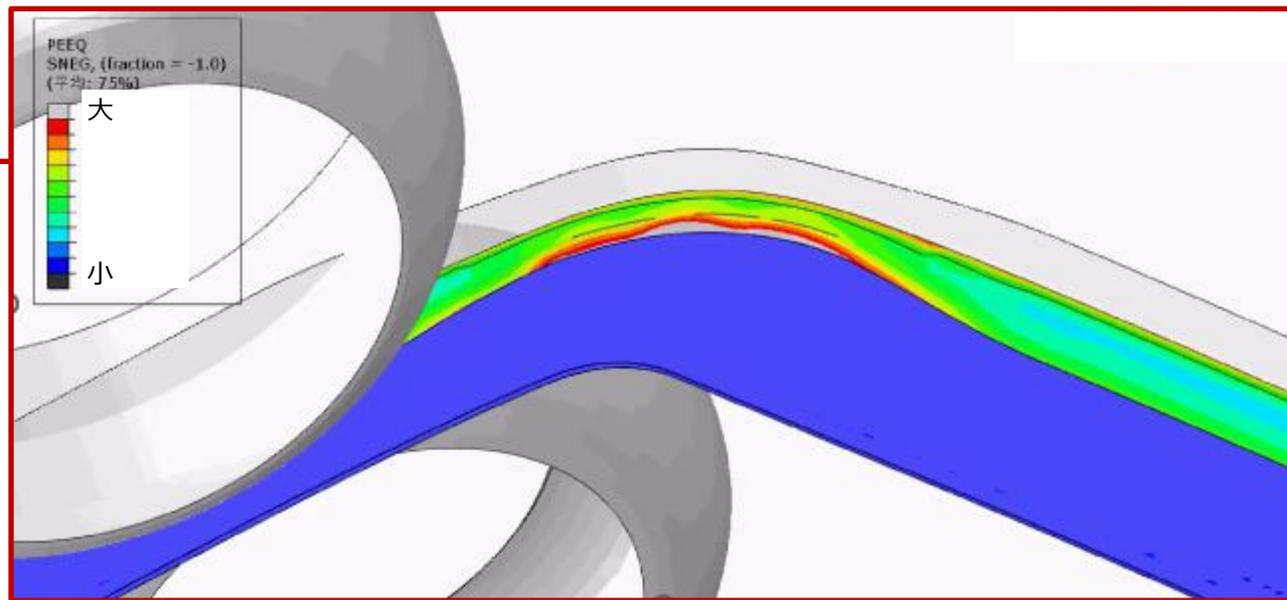
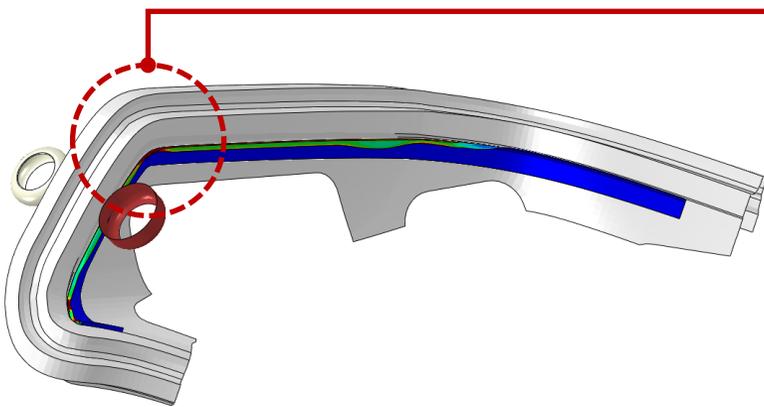
Viewport: 9

<上面図>

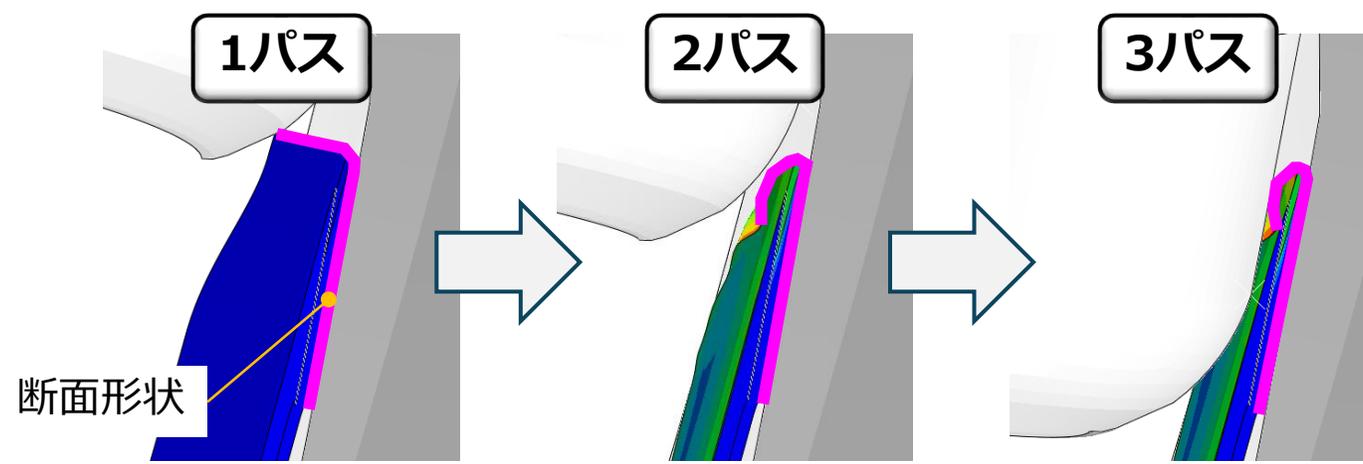
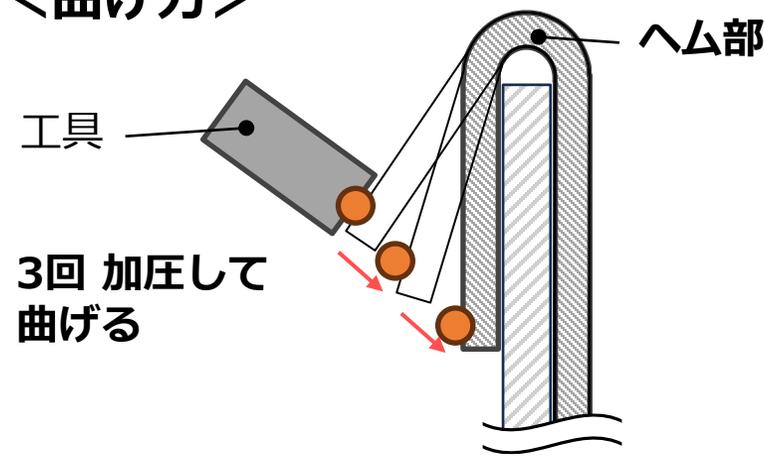


PSRから得られた製造情報を用いて、Abaqusでへミング解析を確認

Abaqus解析結果の例



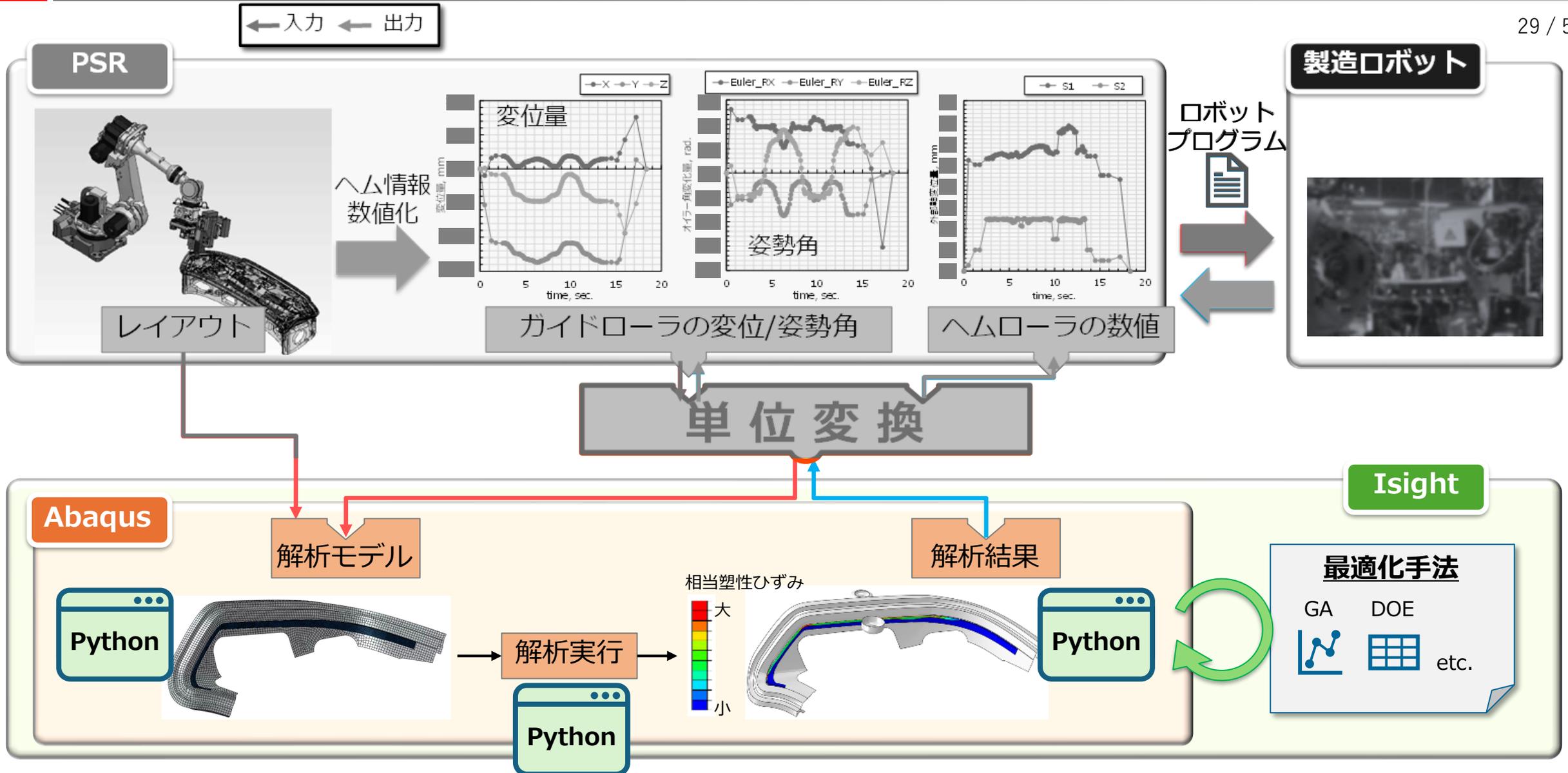
<曲げ方>



実際の製造と同じ工程で端部に塑性を与えてヘミング曲げを再現できた

5. ヘミング軌跡の探索 最適化技術を取り入れたヘム軌跡の探索





Isightは解析プロセスの統合化/自動化/最適解探索を行うツール

ポイント1：統合/自動化、実行機能

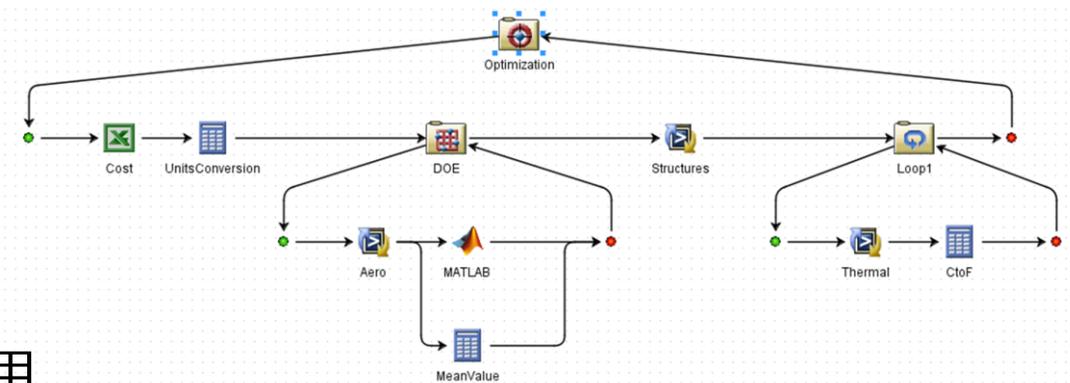
- 複数の市販解析ソフトや内製ツールなどをシミュレーションワークフローに統合
- ワークフローを自動的に実行、進捗管理、結果分析や結果データの管理機能

ポイント2：最適化機能

- 設計探索を行う様々なアルゴリズムを簡単に切り替え可能
 - サンプルング（3種類手法×10種類確立分布）
 - 実験計画法(11種類)
 - 最適化手法(17種類)

ポイント3：結果分析/活用機能

- 計算結果を分析するための豊富な分析機能
- 近似モデル（サロゲートモデル）による結果再活用

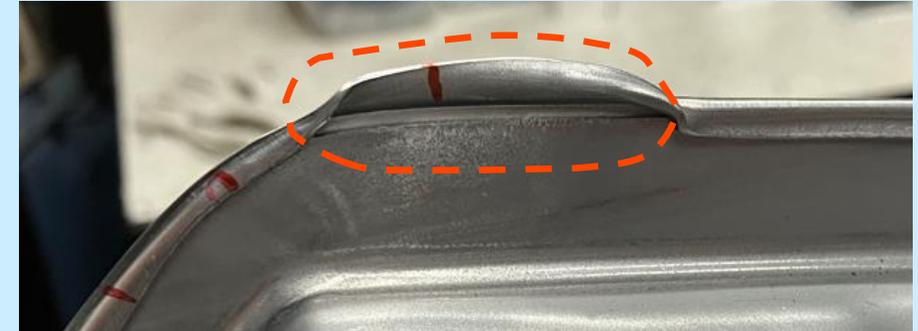


◆ 4事象の選定

1 : ヘミング厚さ



3 : 逆ヘミング



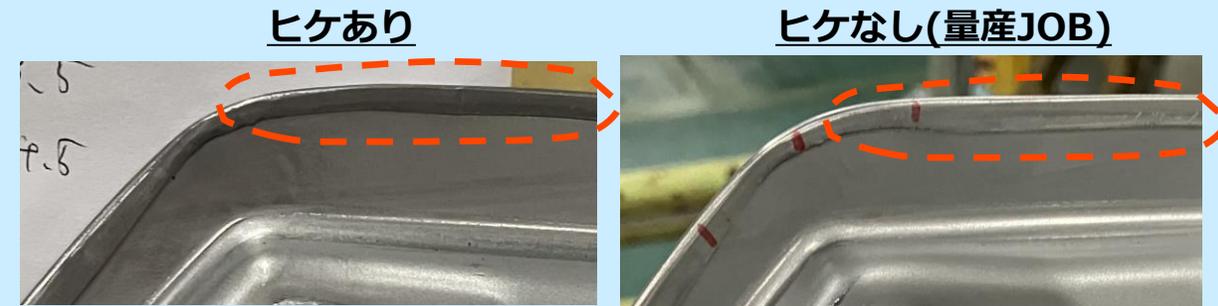
フランジが逆側に加工された状態

2 : 波打ち



重なり量の不安定さ

4 : ヒケ

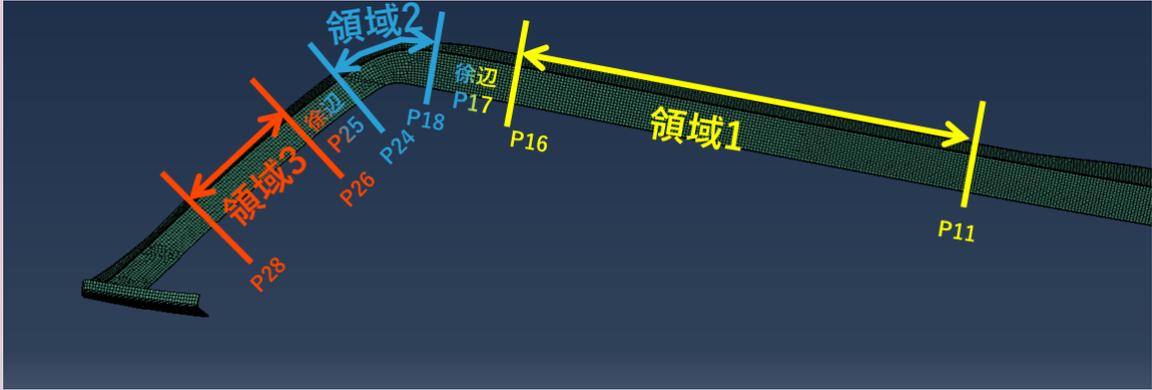


挟み込み不足

現場エキスパートの意見をもとに、性能/品質に影響する4事象を決定

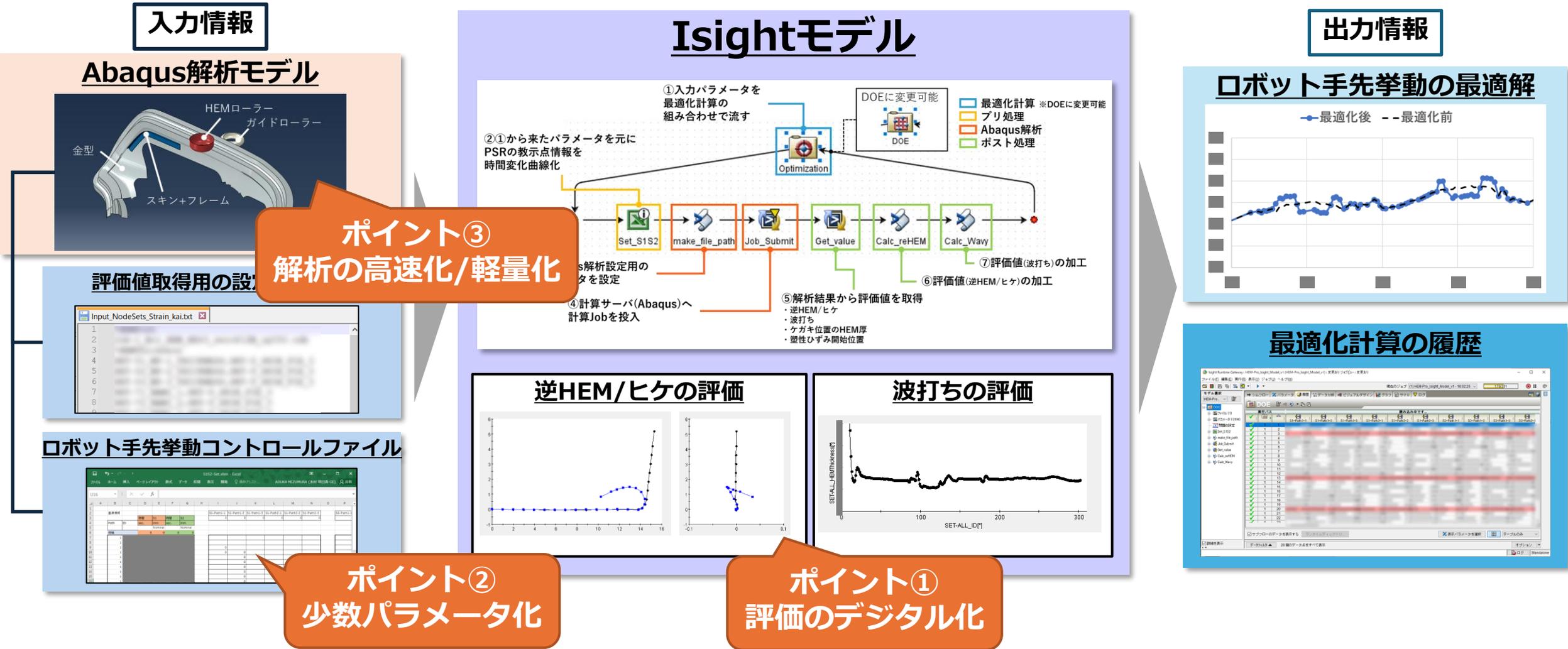
◆最適化の計算条件

現実で大きな問題を起こす逆へムを回避する解を探索する

項目	内容	備考	
目的関数	今回は設定なし		
制約条件	逆へミング: 0.8以下をNG	・ 解析モデル内の10か所で制約条件を評価	
入力パラメータ	S1-Path1-1: S1-Path1-2: S1-Path1-3: S1-Path2-1: S1-Path2-2: S1-Path2-3:	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 実ロボットの 加工範囲を使用 </div>	 <ul style="list-style-type: none"> ・ ロボット手先挙動(S1/S2) の加工パス1/2のコントロール点(教示点)情報の変化値を領域1~3で調整 ・ パラメータ範囲は、現実の工場加工可能な範囲を確認/設定
	S2-Path1-1: S2-Path1-2: S2-Path1-3: S2-Path2-1: S2-Path2-2: S2-Path2-3:	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> 実ロボットの 加工範囲を使用 </div>	

大域的な分析を行うため、今回はDOEの最適ラテン超方格法実験を実施

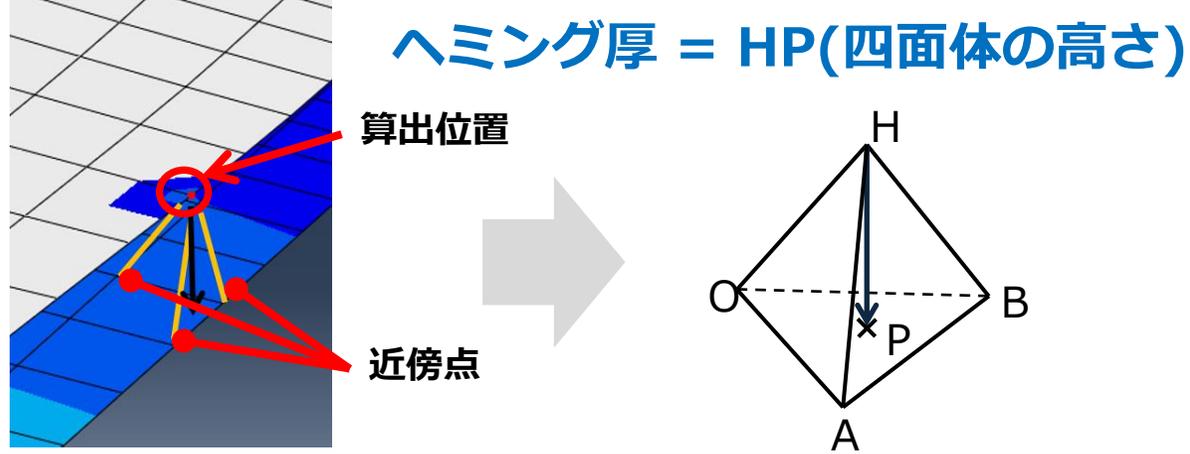
Abaqus解析と3種類の内作ツールを一つのワークフロー (Isightモデル) に統合



効率よく最適なロボット手先挙動の探索が可能になった

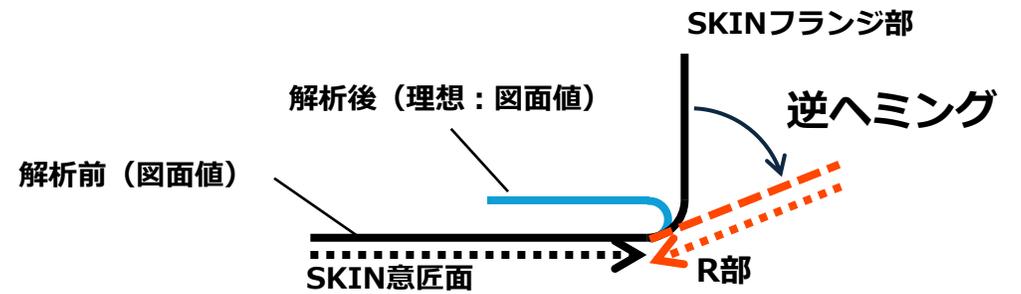
◆4事象の評価モデル化

1：ヘミング厚



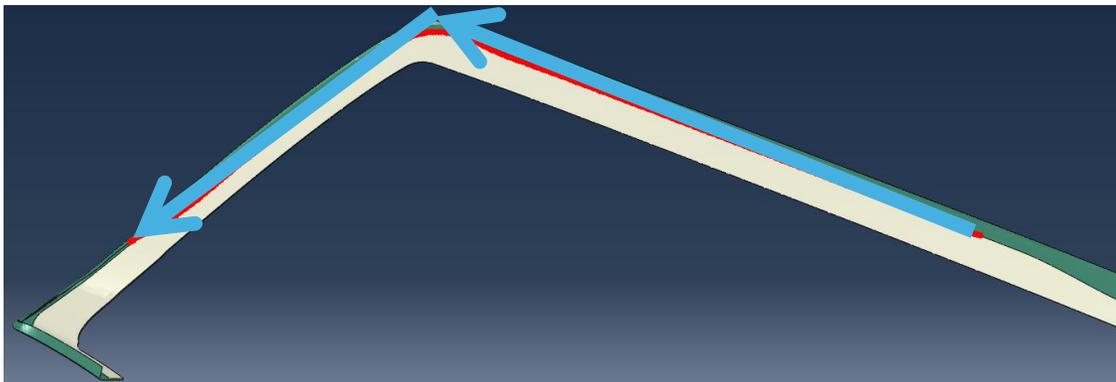
3：逆ヘミング

意匠面とフランジのベクトルの内積



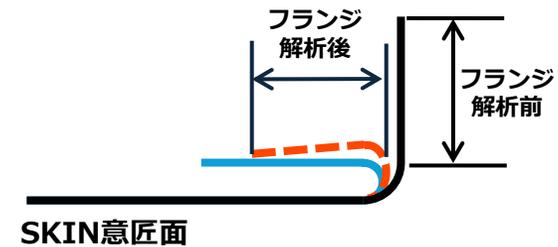
2：波打ち

矢印の節点で連続的にヘミング厚を測定



4：ヒケ

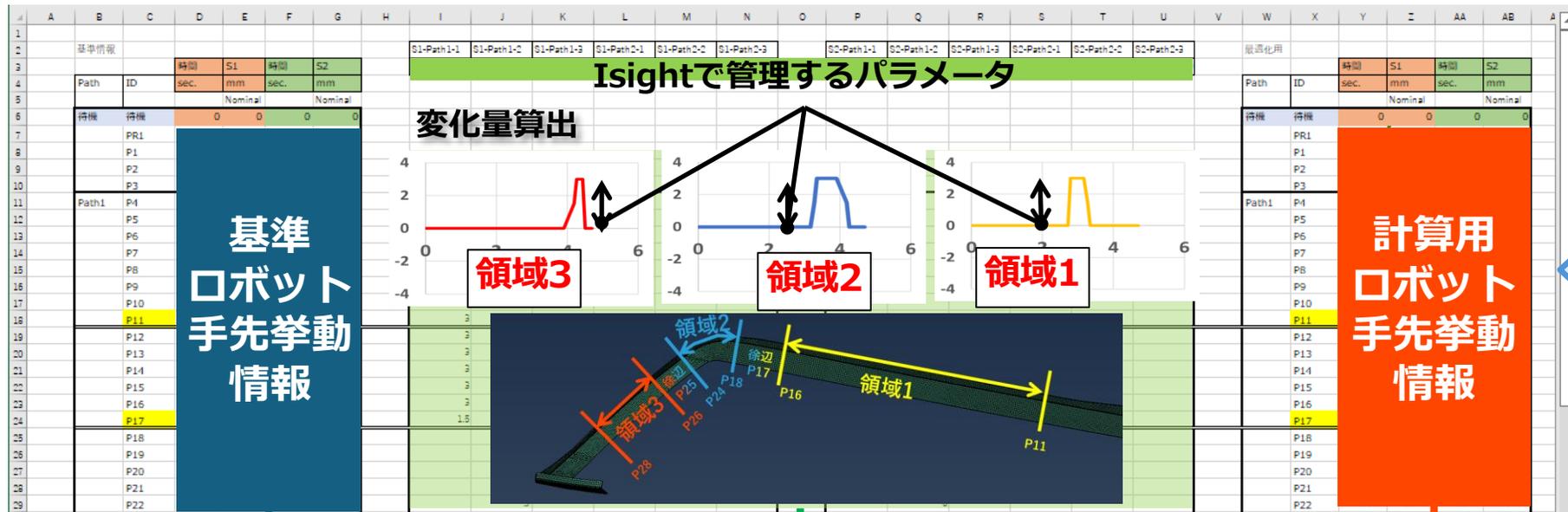
フランジ長さ = 解析後 - 解析前



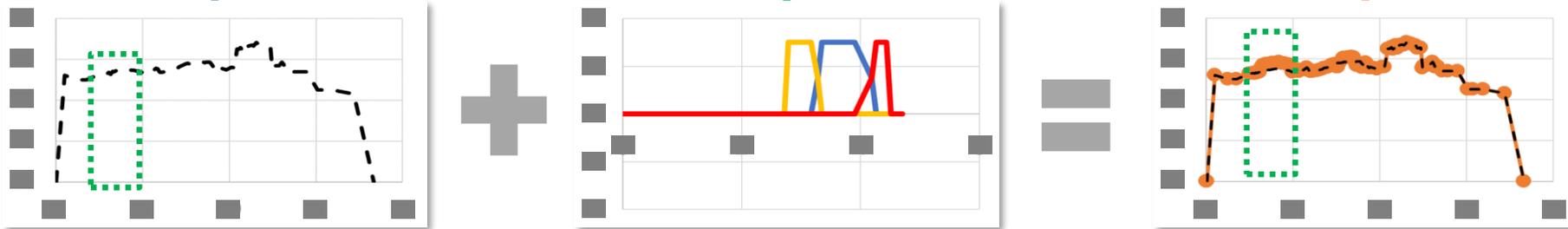
評価値を算出できるモデル技術により、最適化計算に適用

問題点： 時系列データの最適化は、計算回数と結果解釈の観点から運用が困難

解決策： 領域分割により少数パラメータで計算する仕組みを考案



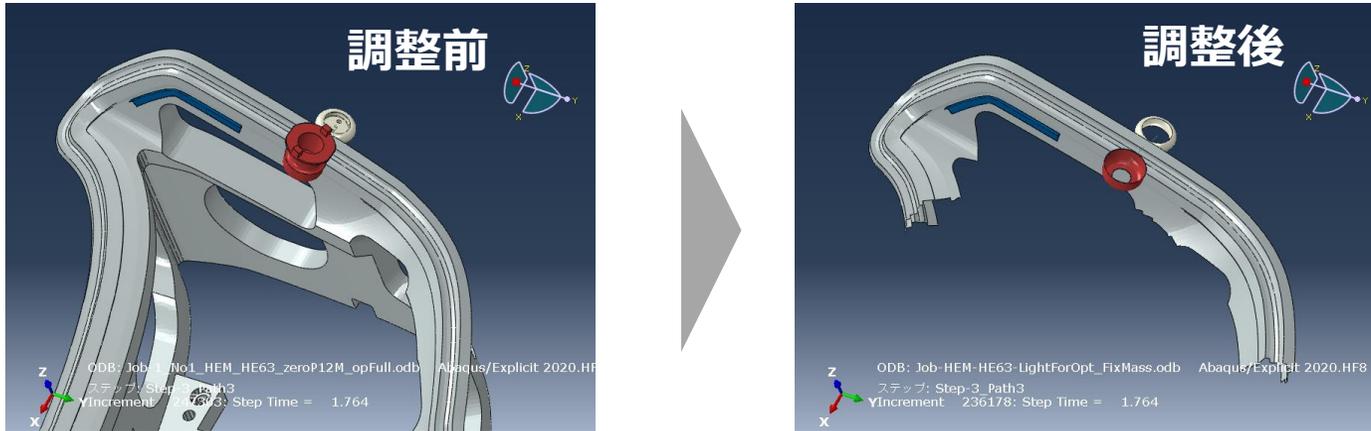
160の時系列データを12パラメータの調整でコントロール可能



ロボット手先挙動の時間変化曲線としてAbaqus解析へ

膨大な時系列データを少数のパラメータでコントロールすることで現実的な運用を可能にした

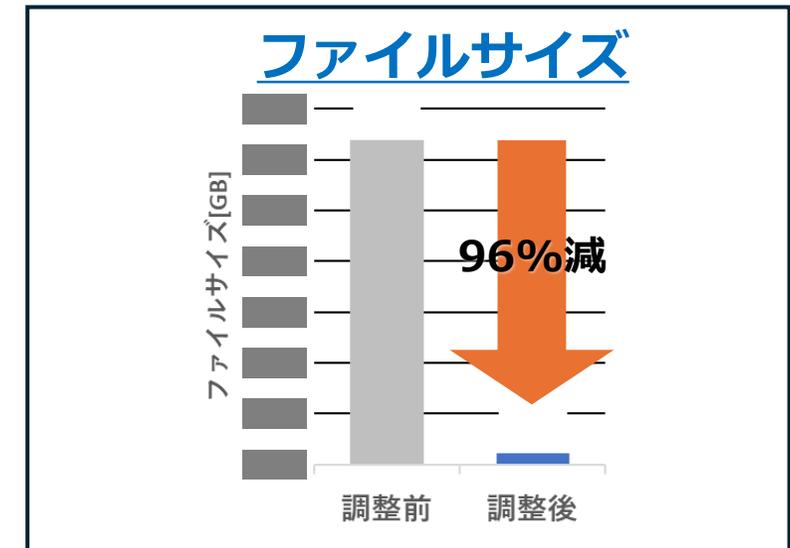
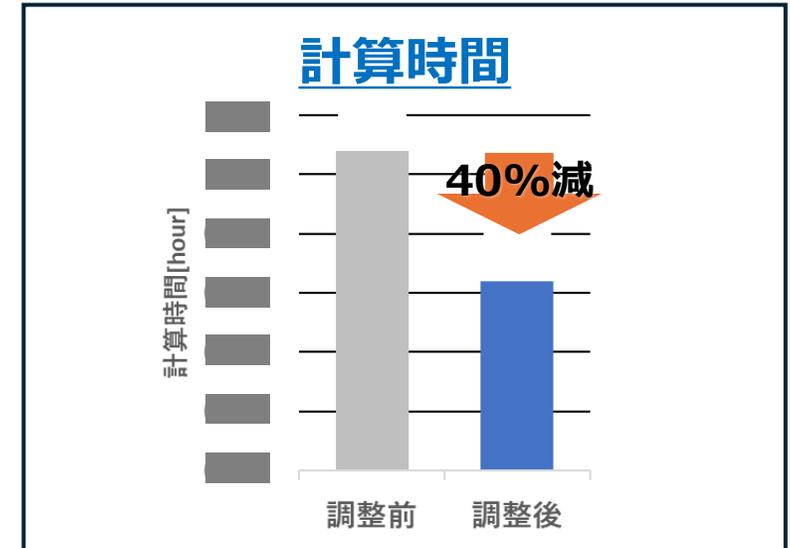
モデル外観



- ・ 精度に影響しない部位の要素を削除
- ・ 結果出力頻度1/10に削減

◆高速化の重要ポイント

- ・ **最適化全体の計算時間や保存領域の検討**
→ 「最適化が終わらない・・・」や「保存領域不足」を防ぐ
- ・ **精度保証が可能な範囲を決める**
→ 「結果が変わるほどメッシュを粗くする」等はNG



事前に最適化全体を俯瞰して 1 計算の高速化や軽量化の検討を行うことが重要

50回の繰り返し計算を実施

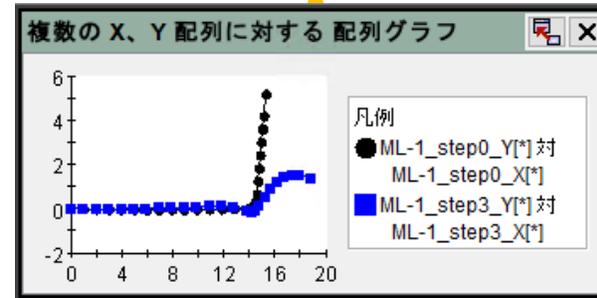
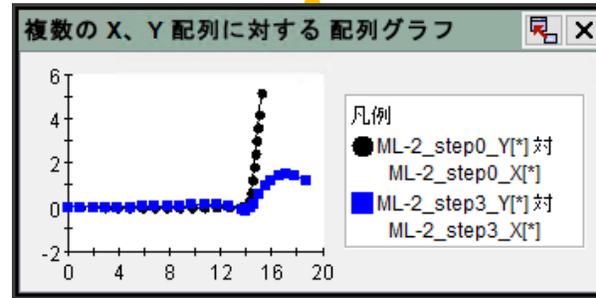
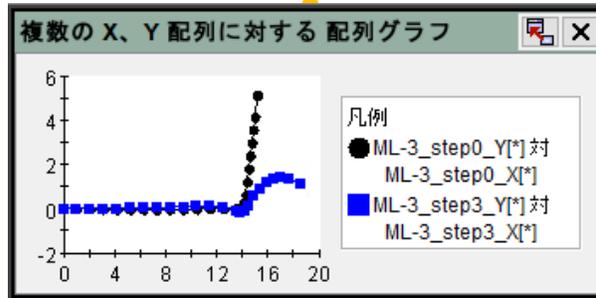
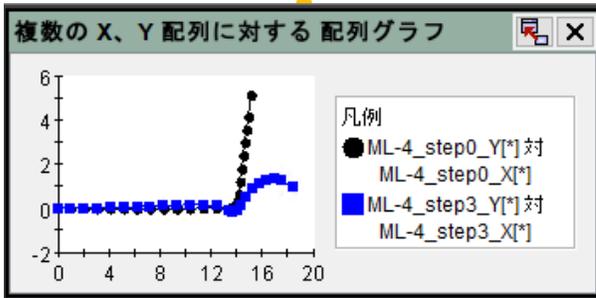
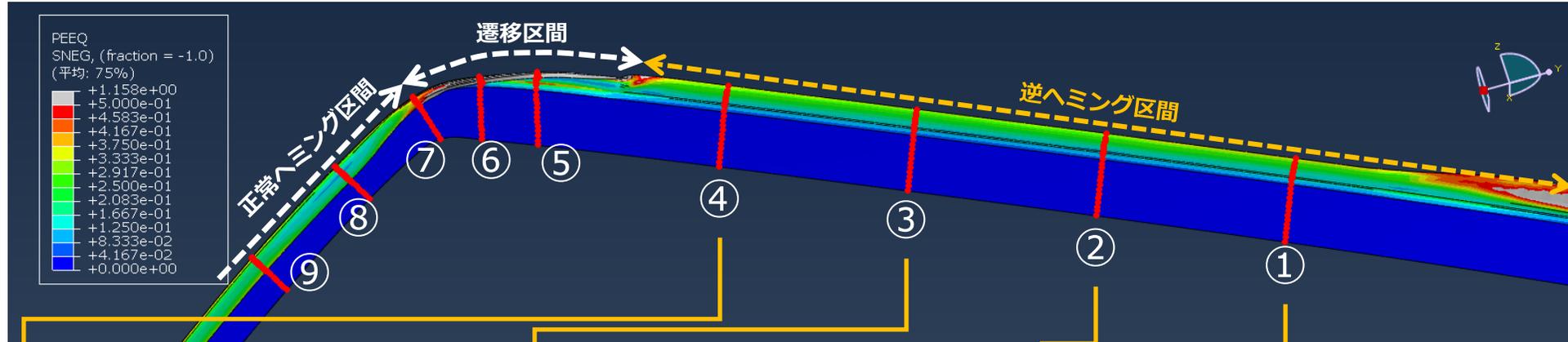
赤色
逆ヘミングが発生したことを示す

The screenshot displays the Isight Runtime Gateway interface for a DOE (Design of Experiments) simulation. The main window shows a table of execution results for 50 runs. The 'Run #' column lists runs from 1 to 28. The '実行パス' (Execution Path) column shows the sequence of steps for each run, including S1-Path1-1 through S2-Path2-2. The table is filtered to show only the first 28 runs. The status of each run is indicated by a green checkmark in the first column. The 'Run #' column has red highlights for runs 3, 13, 20, and 28. A callout box points to these red highlights, stating '赤色 逆ヘミングが発生したことを示す' (Red color indicates that reverse hemming has occurred). Below the table, there is a checkbox for 'サブフローのデータを表示する' (Show sub-flow data) and a button for 'ランタイムディレクトリ...' (Runtime Directory...). At the bottom, there is a yellow warning bar that reads 'ジョブを実行中に警告が出されました。詳細については[ログ]タブを参照してください。' (A warning was issued during job execution. For details, please refer to the [Log] tab.)

実行パス	Run #	S1-Path1-1	S1-Path1-2	S1-Path1-3	S1-Path2-1	S1-Path2-2	S1-Path2-3	S2-Path1-1	S2-Path1-2	S2-Path1-3	S2-Path2-1	S2-Path2-2
✓	1	1										
✓	1	2										
✓	1	3										
✓	1	4										
✓	1	5										
✓	1	6										
✓	1	7										
✓	1	8										
✓	1	9										
✓	1	10										
✓	1	11										
✓	1	12										
✓	1	13										
✓	1	14										
✓	1	15										
✓	1	16										
✓	1	17										
✓	1	18										
✓	1	19										
✓	1	20										
✓	1	21										
✓	1	22										
✓	1	23										
✓	1	24										
✓	1	25										
✓	1	26										
✓	1	27										
✓	1	28										
✓	1	29										
✓	1	30										

逆ヘミング

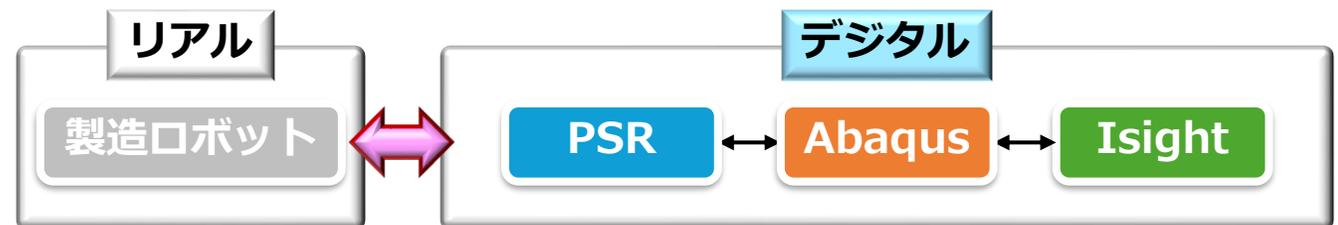
【ヘミング予測結果】



評価ポイント①～④は判定基準に従い、逆ヘミング発生と判定

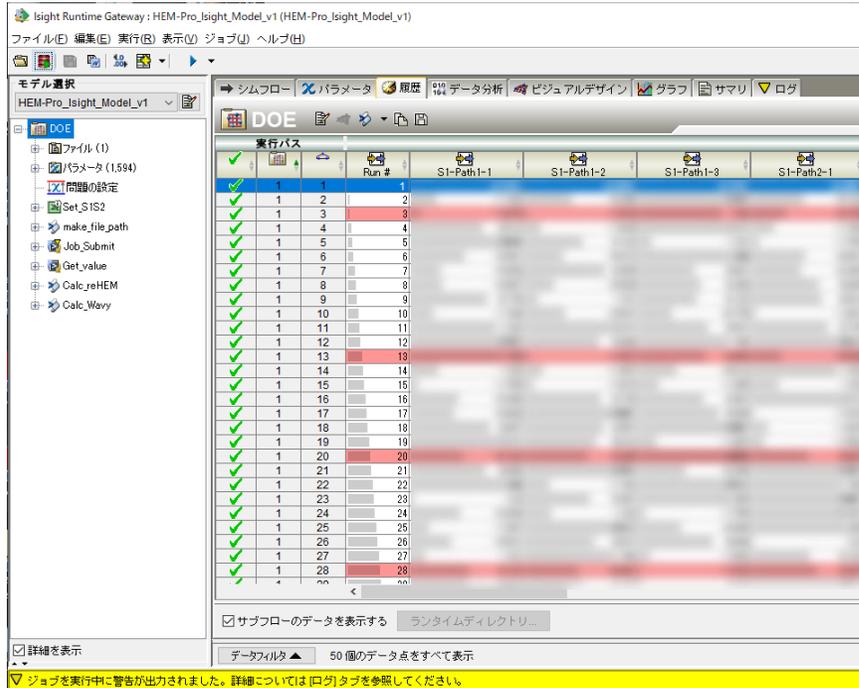
解析結果から、本システムで逆ヘミング発生の有無を自動的に評価できる

5. ヘミング軌跡の探索 へム軌跡探索結果の活用



領域2の加工パス2においてパラメータの偏りを確認（黒枠部）

計算結果50回

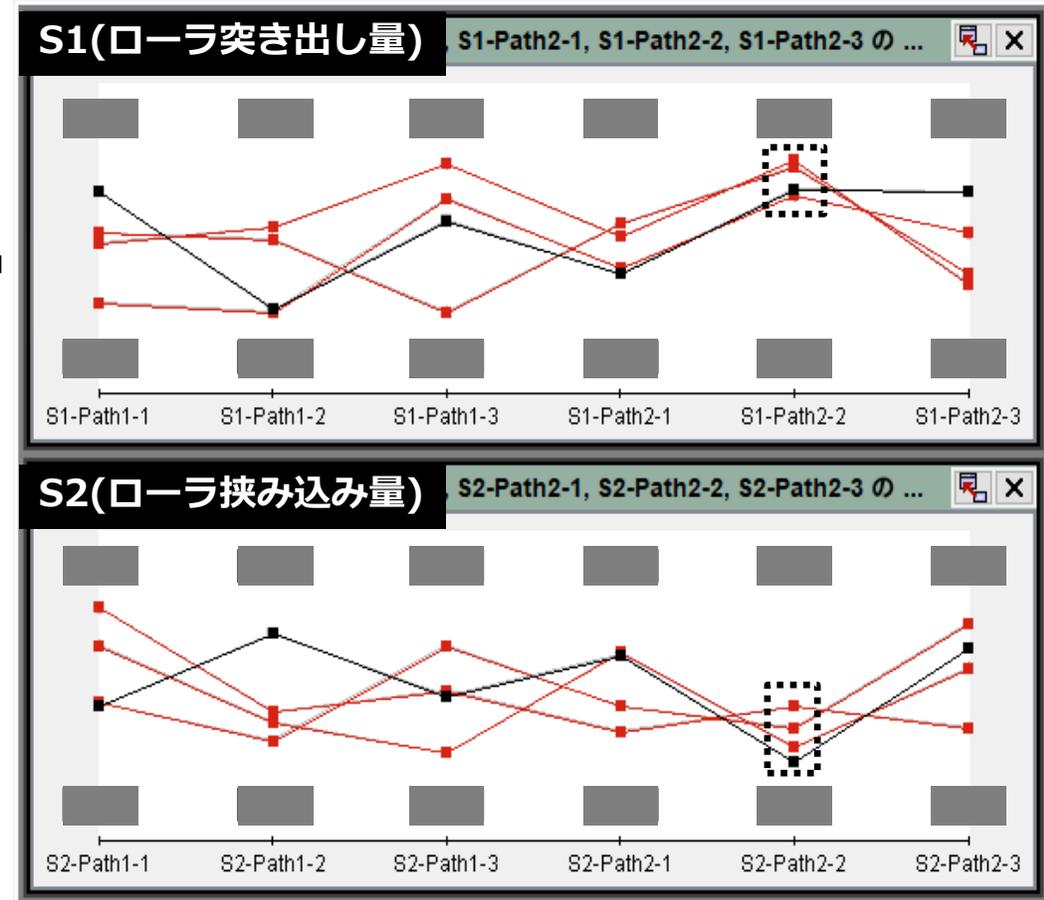


逆ヘミングの計算結果を抽出



平行座標グラフ化

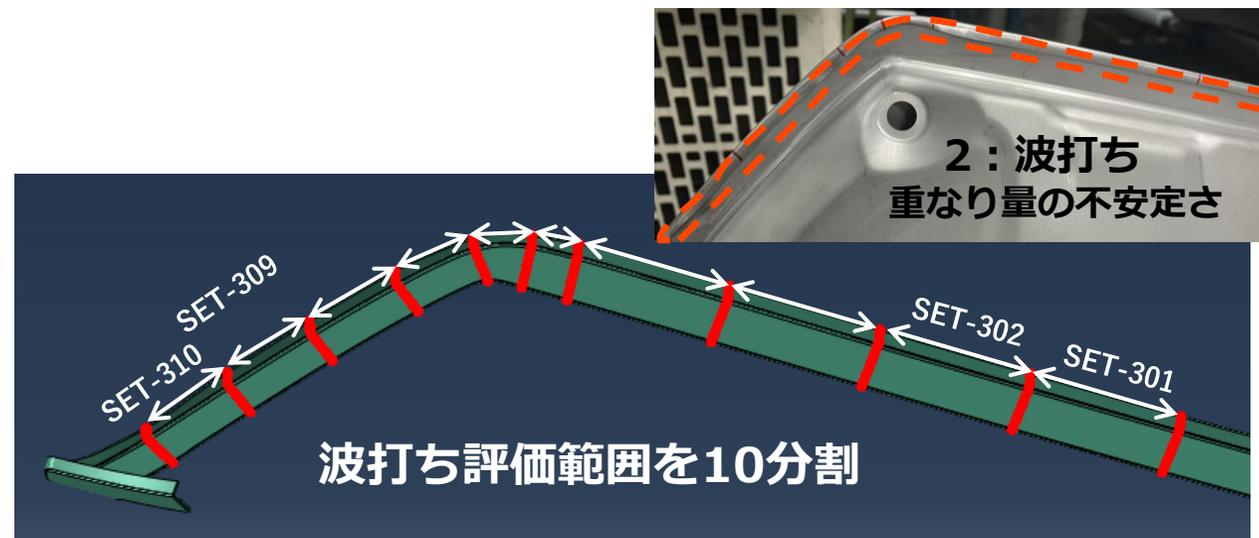
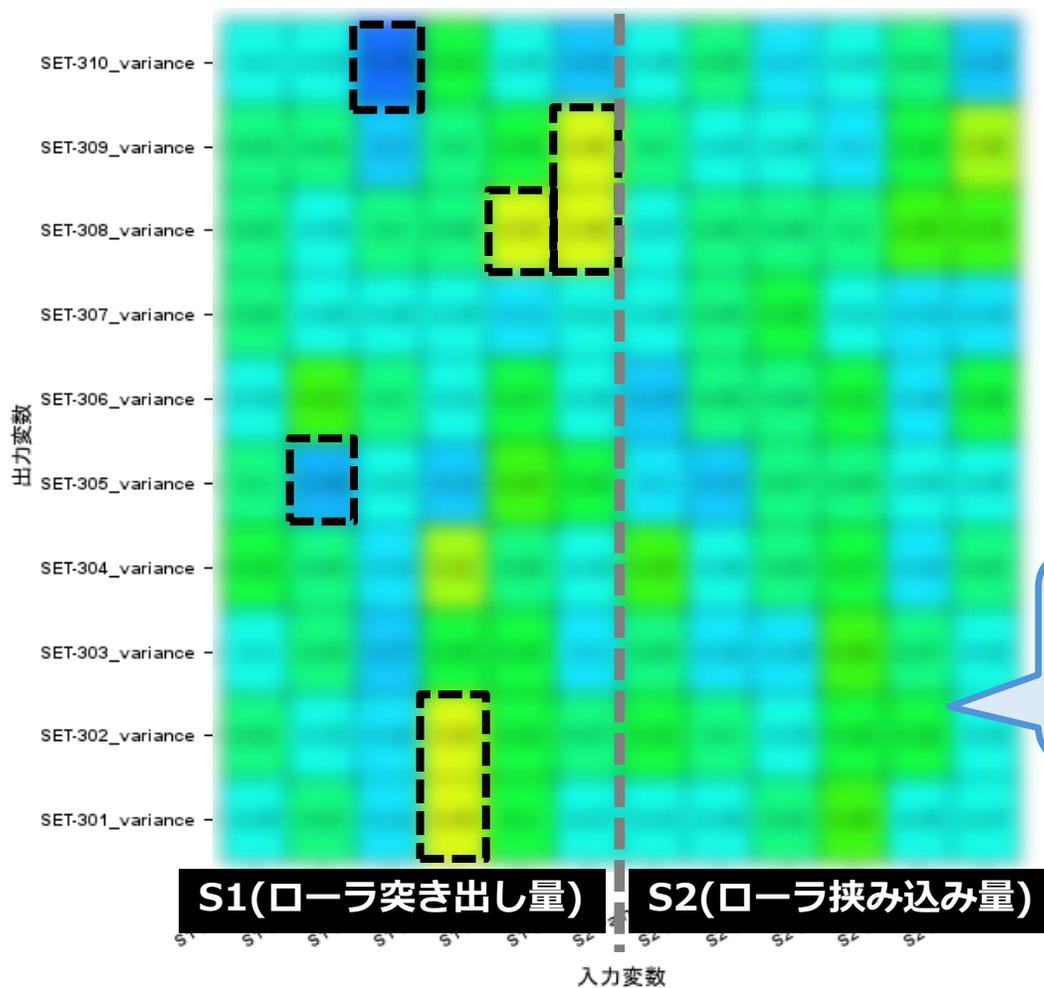
入力パラメータ



※平行座標グラフ：
計算番号ごとにパラメータを線で結んだグラフ
パラメータの傾向や偏りを確認する際に活用する

計算結果を利用し、対象事象の発生要因を分析することができる

波打ち評価範囲を10分割し、分割部の分散 と S1/S2 の相関関係を可視化



- 波打ちの相関図から
「S1ローラ突き出し量」は影響有
「S2ローラ挟み込み量」は影響ほぼ無

1	正の相関
0	無相関
-1	負の相関

分散の評価を行うことで波打ちを抑制するパラメータを抽出することが可能

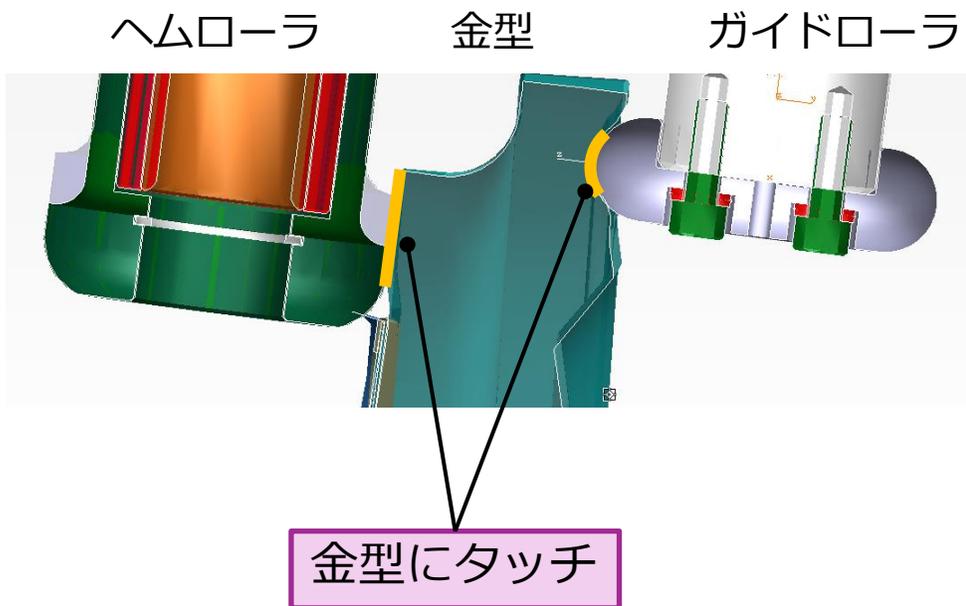
6. デジタルツインの検証



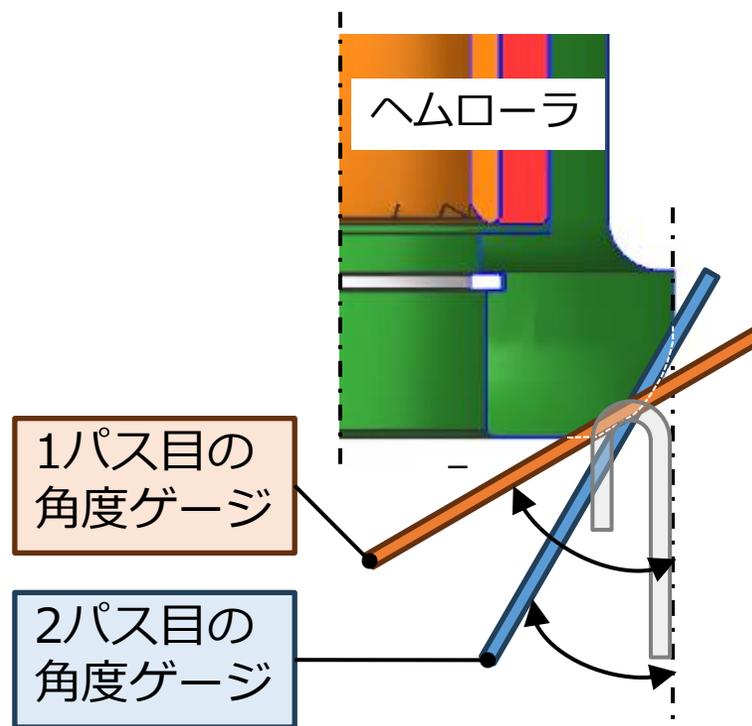
PSRで加工パスを作成する指針

- ◆ 指針① ガイド／ヘムローラは金型にタッチさせる
- ◆ 指針② 1パス・2パスの曲げは、曲げ角度を決めてヘムローラを配置する
- ◆ 指針③ 3パス目曲げは、ヘミング厚さを基にヘムローラを配置する

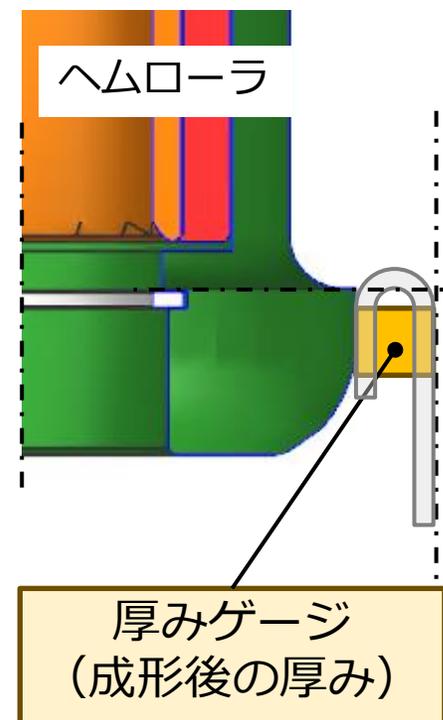
指針①



指針②

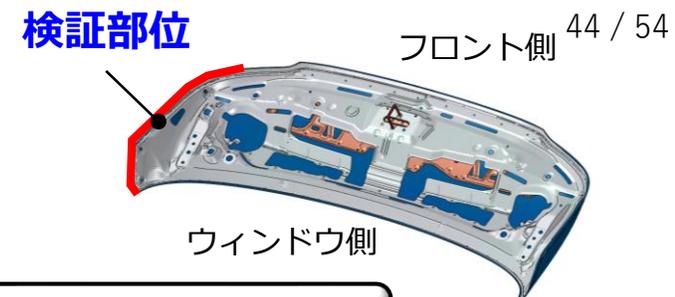


指針③



熟練エンジニアの意思と最適化結果を融合したパス作成指針を策定した

予測ヘム形状と実加工したヘム形状を比較する（一般部）



デジタル

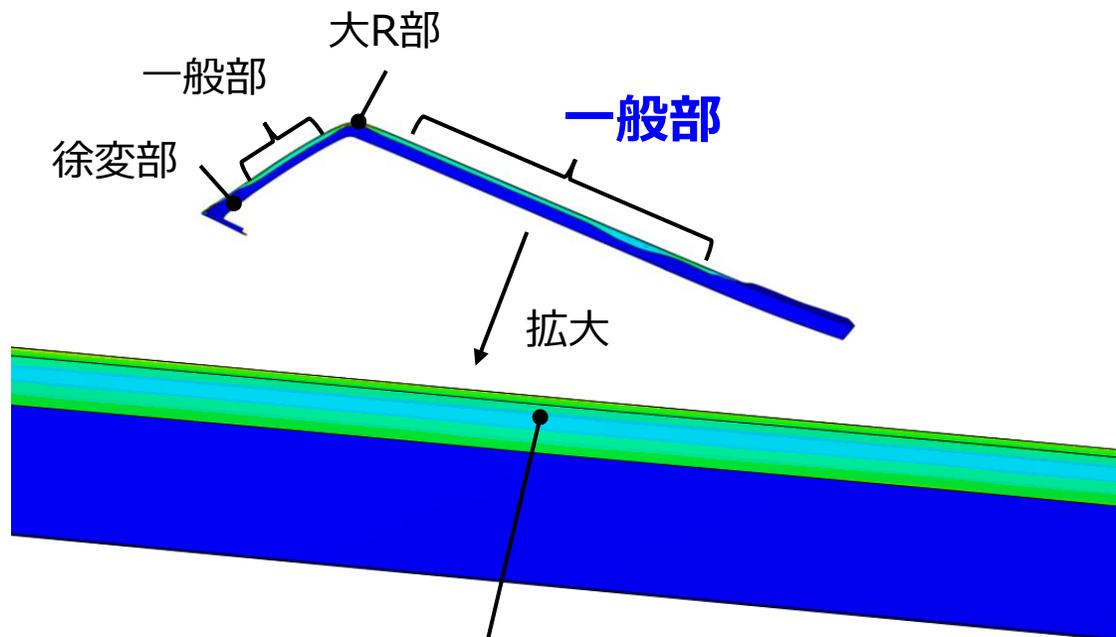
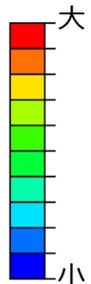
予測結果 最適化計算で予測したヘム形状

CEA→PSR

リアル

加工結果 実際に加工したヘム形状

相当塑性
ひずみ, -



予測では通常のヘムが加工された



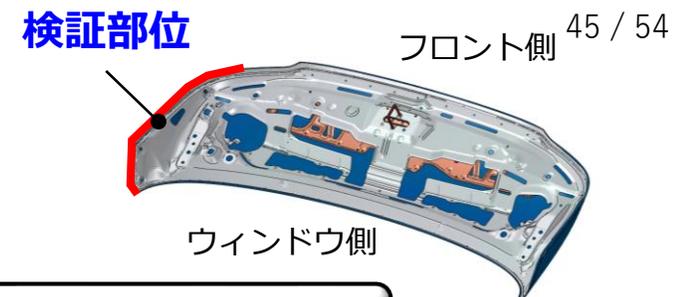
一般部を拡大



予測と同様に、通常のヘムが加工できた

目視・触診でも異常はなく、予測通りの結果となった

予測ヘム形状と実加工したヘム形状を比較する（大R部）



デジタル

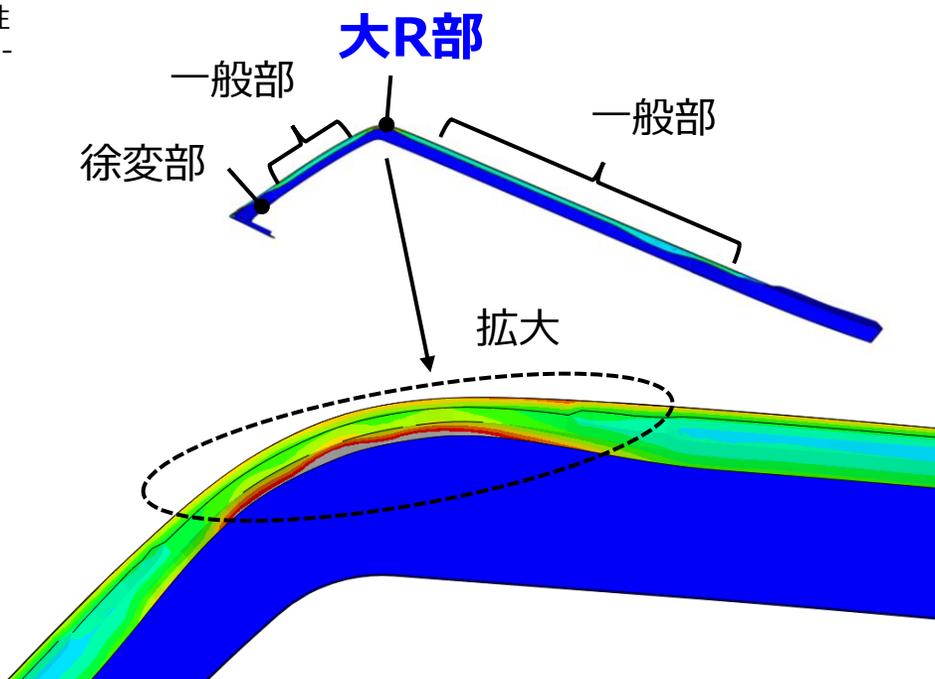
予測結果 最適化計算で予測したヘム形状

CEA→PSR

リアル

加工結果 実際に加工したヘム形状

相当塑性
ひずみ, -



曲げにより、“丸み”を帯びている



大R部を拡大



予測と同様に、“丸み”を帯びている

難しい加工部位でも予測通りの加工結果になった

ケース③：実加工の不具合 → シミュレーション再現

実加工のへム形状を予測で再現する（逆へム部）

検証部位

フロント側 46 / 54



リアル

加工結果 逆へミングが発生

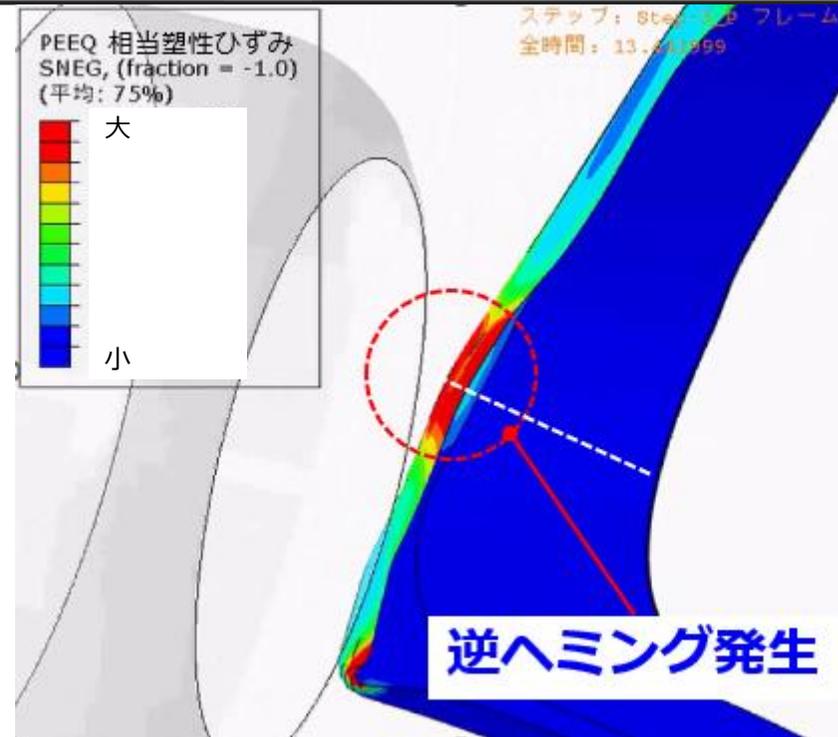
PSR → CAE

デジタル

再現結果 シミュレーションでも逆へミング



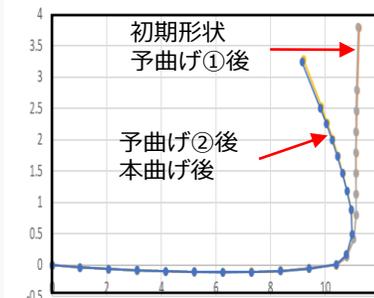
逆へミング発生



逆へミング発生

<メカニズムの推定>
予曲げ①, 本曲げで
十分に曲げられていない

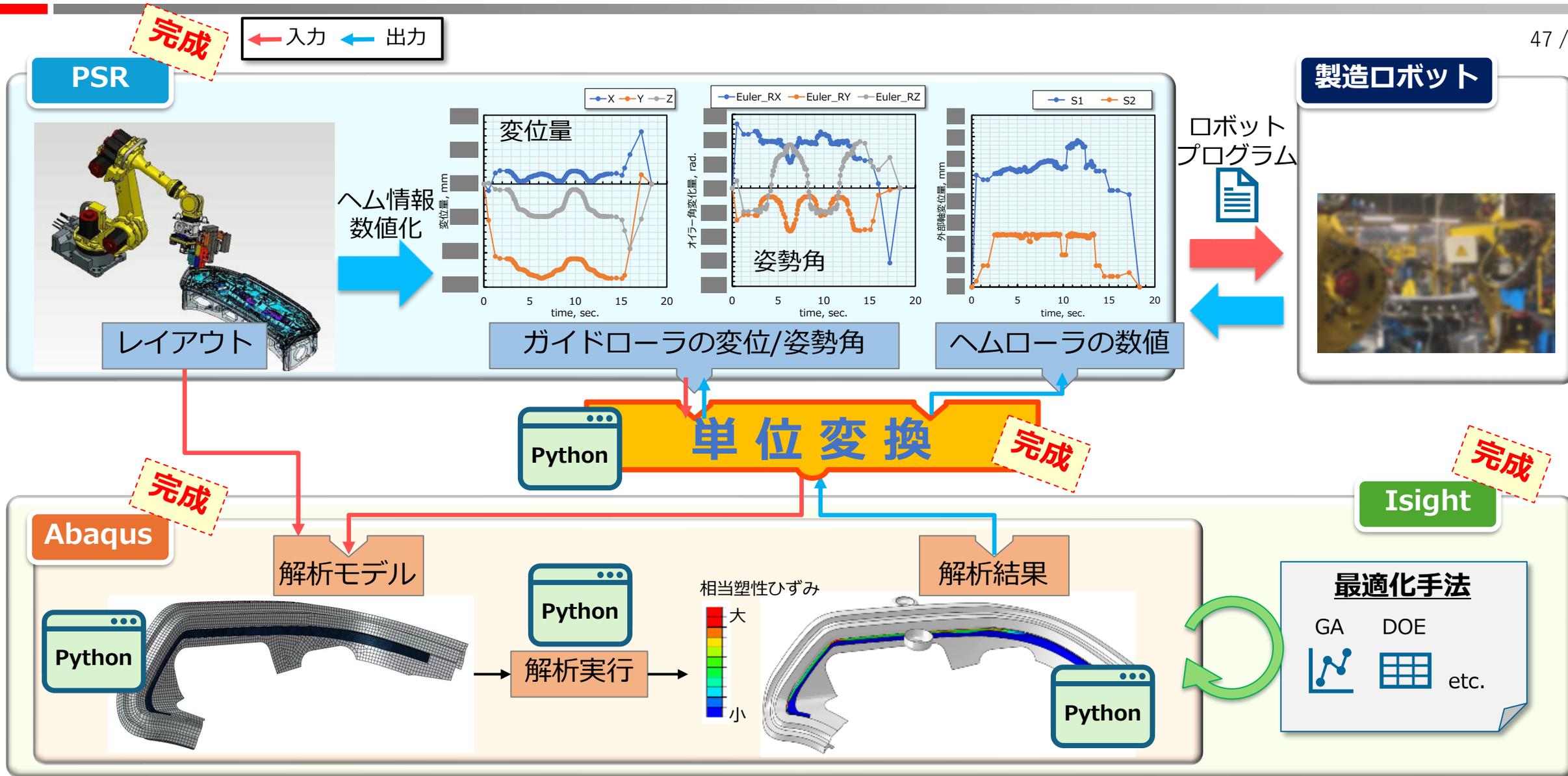
- 初期形状
- 予曲げ①後
- 予曲げ②後
- 本曲げ後



逆へミング部位の断面形状

実際に生じた不具合もシミュレーションで再現できた

CAE ↔ PSR 連携フロー



検証の結果、CAEとPSRの連携フローの証明ができた

7. まとめ

スケジュール（再掲載）

		'23年 8月		9月		10月		11月		12月		'24年 1月		2月		3月		
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	
イベント		定例会（全体）																報告会
	試打 現場調査		◆ 製作所			◆ 製作所								◆ 製作所	◆ 製作所		◆ 製作所	
デジタル ステージ	性能/品質 予測	ツール検証			CAEモデル化検討・試解析						評価指標検討		最適化条件化		最適化計算			
				単位変換								サンプリング						
リアル ステージ	ロボット情 報の取得/ 生成			PSR用意			PSRモデル キャリブレーション				PSR用意			PSR用意				
										パス生成		ローラ挙動調査		金型調査				
デジタル ツイン ステージ	CAE↔PSR 連携				キャリブレ整合						PSRパス生成指針							
												試打#1		試打#2		試打#3		

デジタルとリアルの差異をなくす

時期	現調回数	目的	ロボットシミュレーションへの反映
'23年	①	検具を用いたキャリブレーション	キャリブレーション情報によりPSRのロボット位置を補正
'24年	②	加工パス作成と検証	実際の製造ロボットの機構を調査し、PSR上の加工パス作成ルールを策定
	③	CAD金型データを基にしたPSR加工パス作成と検証	PSRで作成した加工パスの確認 実際の金型を3Dスキャンし、形状差異を吸収
	④	③の加工パスを用いたPSR – Abaqus連携解析の検証	③の結果を受けて、PSR上の加工パスを修正 Abaqusでへム形状を予測し、実際の加工結果と比較

大変だけど現場に出向いて、リアル（製造情報）とデジタル（Sim.モデル）の差を吸収するのが大切

自分事として推進する

相談ではなく提案をしよう

時間を大切に

- ・ 打ち合わせはAMで！
- ・ 作業は遅くても19時で終了しよう



若手主体

年長者の役目

- ・ 成功体験をさせる
- ・ 失敗体験を伝える

異文化への理解

大切なことは会って話そう

◆技術で解決するなら

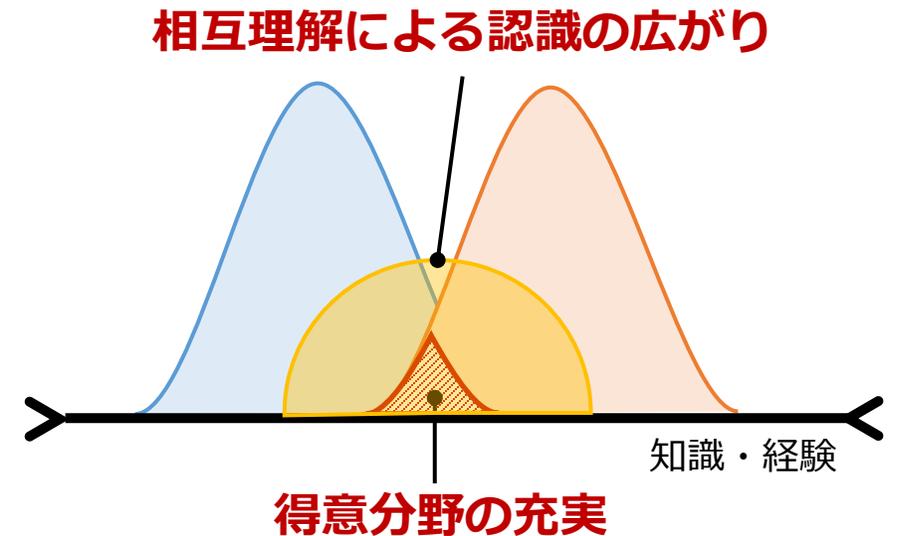
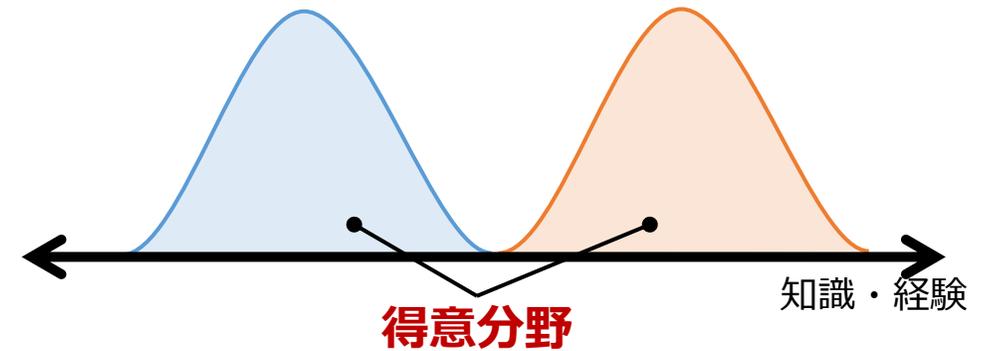
知らないことは興味をもって尋ねる

◆大事なことを伝えたいなら

コミュニケーションを楽しむ

◆上手くできるのか？と問う前に

まず自分が異文化を受け入れる



<良かった点>

- 複数の解析知見を持った方によるディスカッションが早期の精度確保に貢献した
- お互いを尊重し理解しあえた
- 実機（現場）を見て確認することは重要
- 各担当者がそれぞれの役責/役割を全うした

<改善したい点>

- 1回目試打の際に試験の流れを確認するブリーフィングがないため、データがばらばら
→ 相手の前提を確認することは大事（異文化コミュニケーション）
- 実物を測ることを想定した準備が必要
- 専門以外の部分に対してどこまでを理解して、どこまでをお任せするか塩梅が難しい
- 後工程のしわ寄せ問題をどのように対応していくか（事前察知や予防を行うようにしていきたい）
- **上手くいくなら、もっとわがまま言えばよかった**

おわり