

データ駆動型金属加工プロセスの開発

権藤 詩織

産総研 次世代ものづくり実装研究センター 加工プロセス制御研究チーム 主任研究員

目次

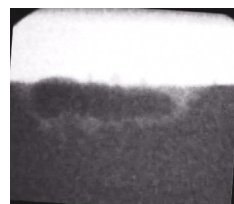
1. 加工プロセス制御研究チーム紹介
2. データ駆動型金属加工プロセスの開発

加工プロセス制御研究チーム 紹介

Mechanism

[溶融]

- 凝固中固液共存状態での強度変化・凝固割れ挙動解明
- L-PBFやレーザー溶接中のX線透視による金属内部の挙動計測



[溶接]

- レーザ溶接モニタリング

[機械加工]

- 画像観察による工具摩耗の検出

Modeling / Process Informatics

[溶融]

- 合金設計サポートシステム開発

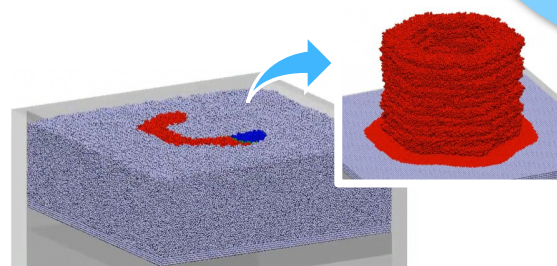
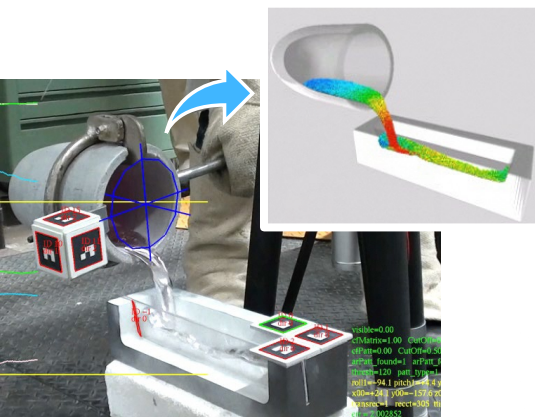
[塑性加工]

- プレスモーションや逐次成形工具パスの設計支援ツール



[casting・金属積層]

- 粒子法を用いた数値シミュレーション



Modeling / Simulation

[金属積層]

- DED積層材の耐久性検証
- ワイヤDEDを使った機器部品のリペア試行



Remanufacturing

データ駆動型金属加工プロセスの開発

回転している金属板・パイプに、ロール(工具)を押し当て、
局所的かつ逐次的に変形させる板成形の技術

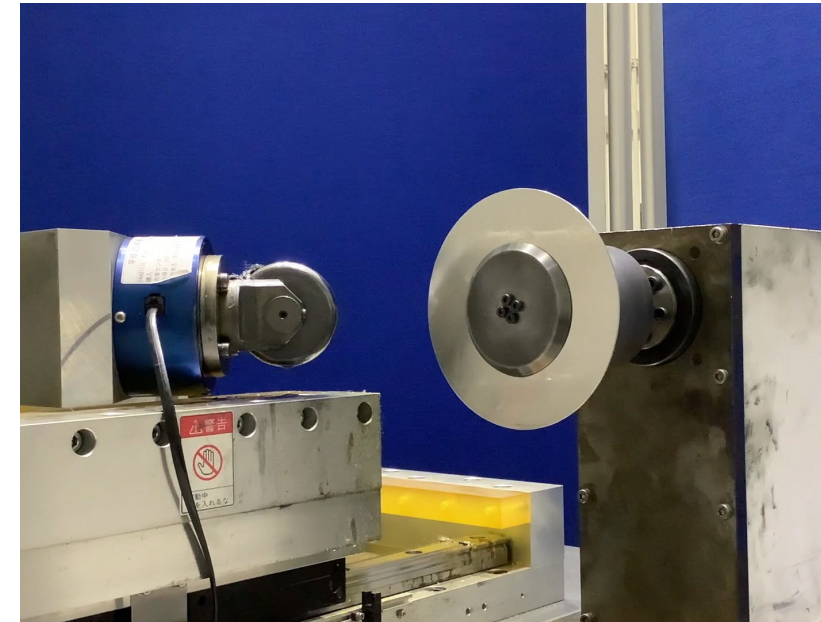
手動



教示再生式



NC制御





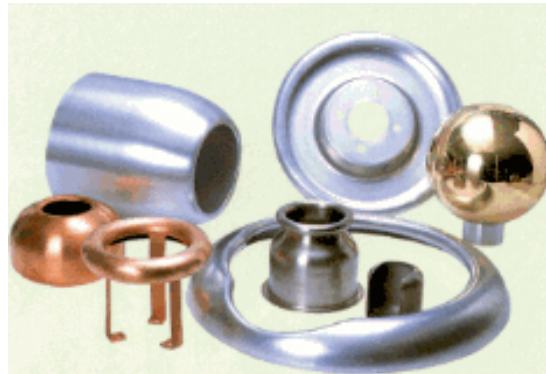
航空・宇宙



建築・工芸



燃料電池車 水素容器



重電・原子力



半導体・医療

	一般的な塑性加工 Ex. プレス加工	スピニング加工
工具の動き	単調	自由自在
変形	1工程あたりの 変形量 大	局所的・逐次的
金型	工程ごとに 金型が必要	最終形状の 成形型のみ
装置	大型	小型
加工のみに かかる時間	短い	長い



—— 長所 ——

変量生産にて
製造コストが低い

	一般的な塑性加工 Ex. プレス加工	スピニング加工
工具の動き	単調	自由自在
変形	1工程あたりの 変形量 大	局所的・逐次的
金型	工程ごとに 金型が必要	最終形状の 成形型のみ
装置	大型	小型
加工のみに かかる時間	短い	長い



— 長所 —

変量生産にて
製造コストが低い

一体で複雑形状に
成形できる

	一般的な塑性加工 Ex. プレス加工	スピニング加工
工具の動き	単調	自由自在
変形	1工程あたりの 変形量 大	局所的・逐次的
金型	工程ごとに 金型が必要	最終形状の 成形型のみ
装置	大型	小型
加工のみに かかる時間	短い	長い



長所

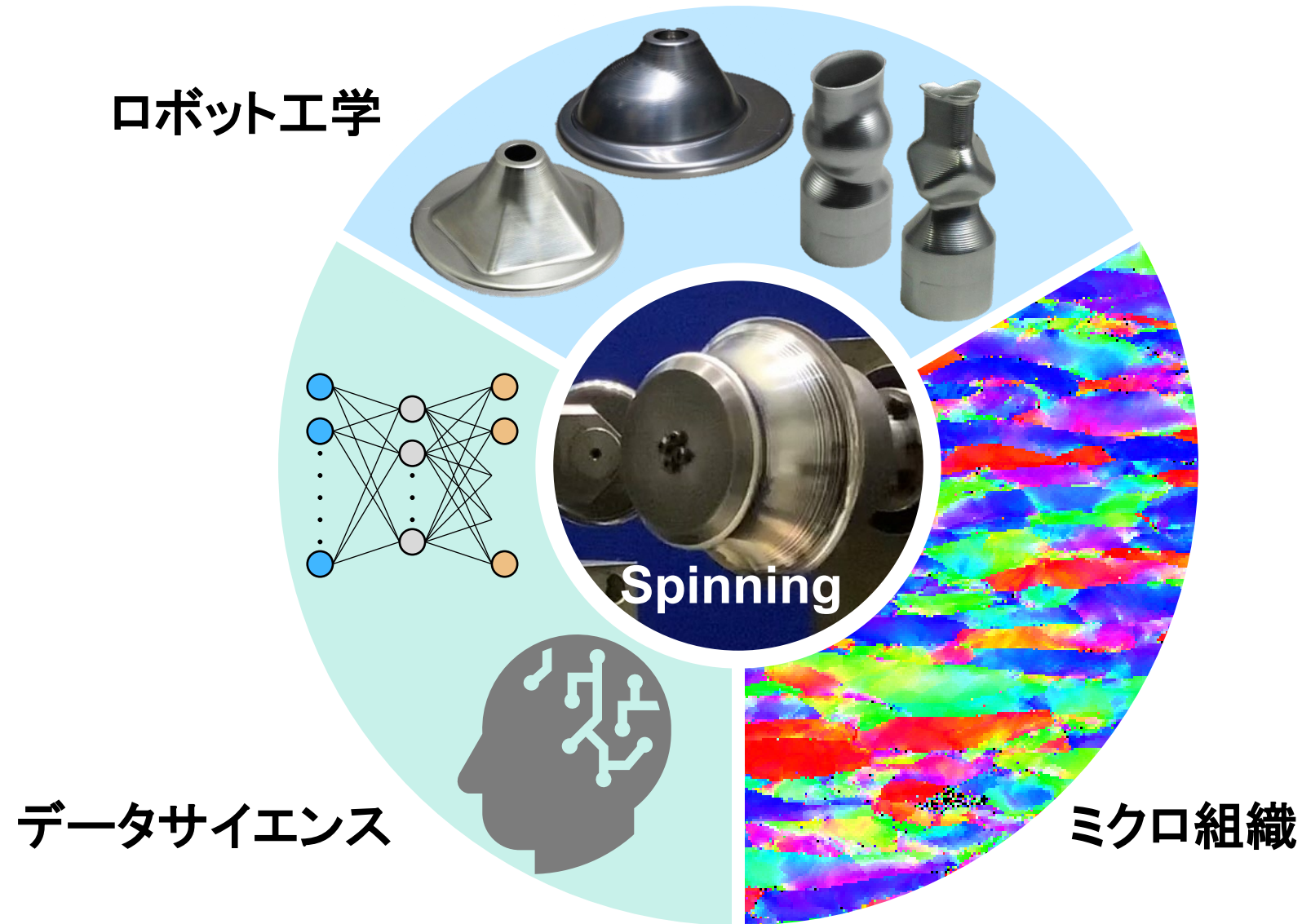
変量生産にて
製造コストが低い

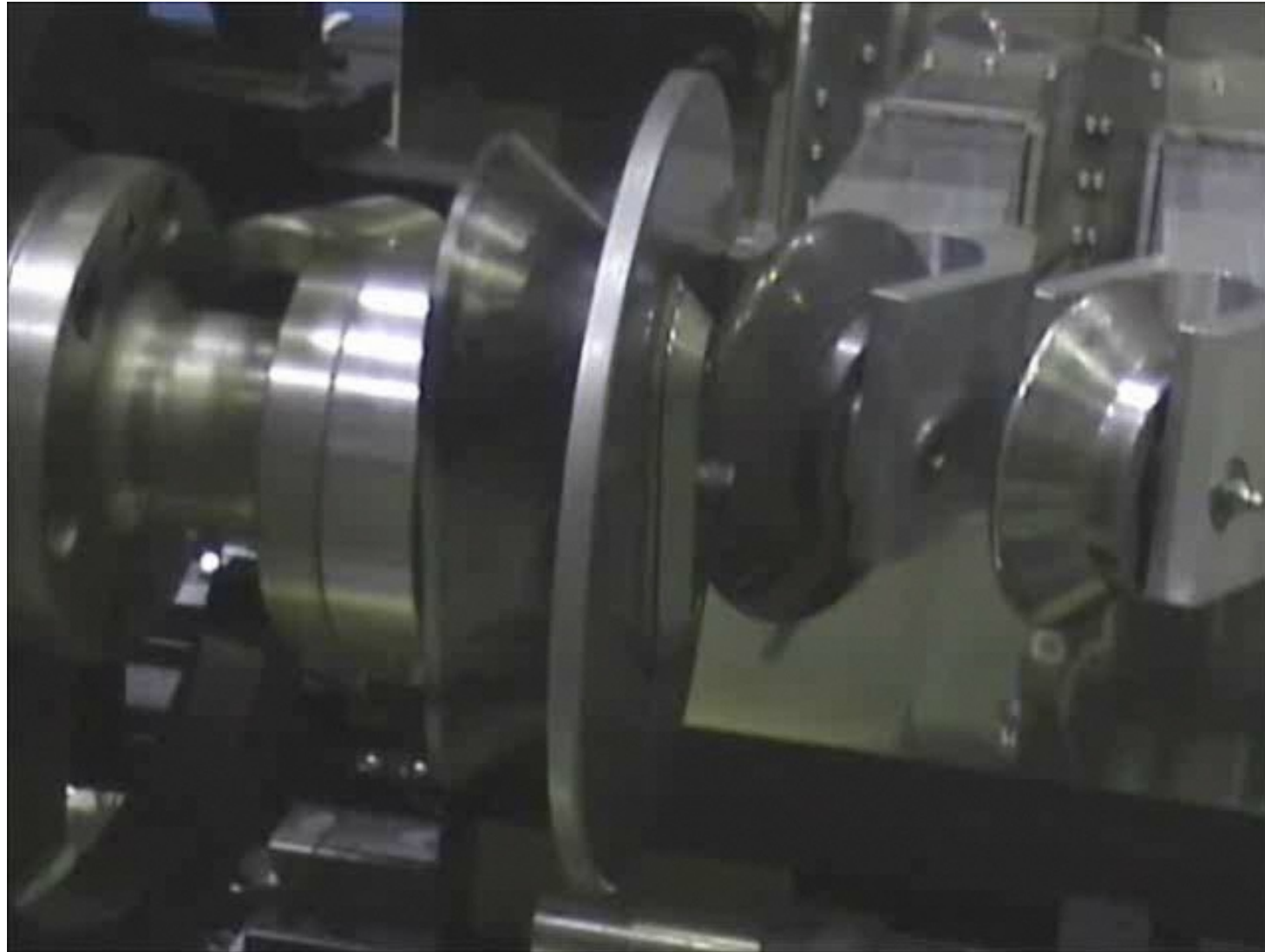
一体で複雑形状に
成形できる



短所

ロールパス設計は
試行錯誤





力制御スピニング

異形状の成形型に倣うように、
ロールを動かす



断面形状が円形でない形状の
成形を可能に



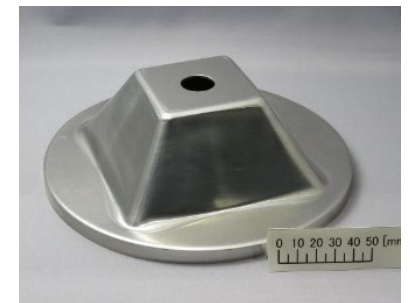
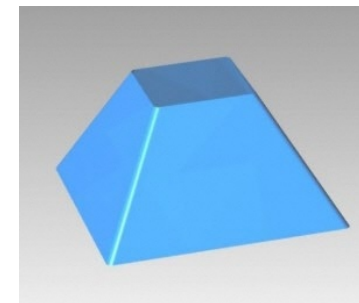
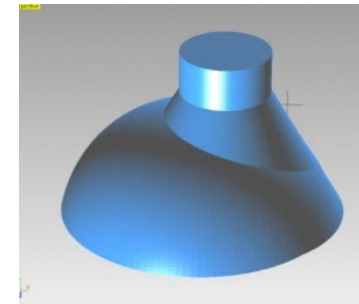
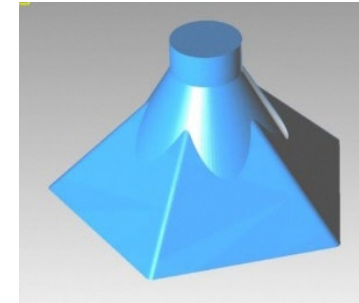
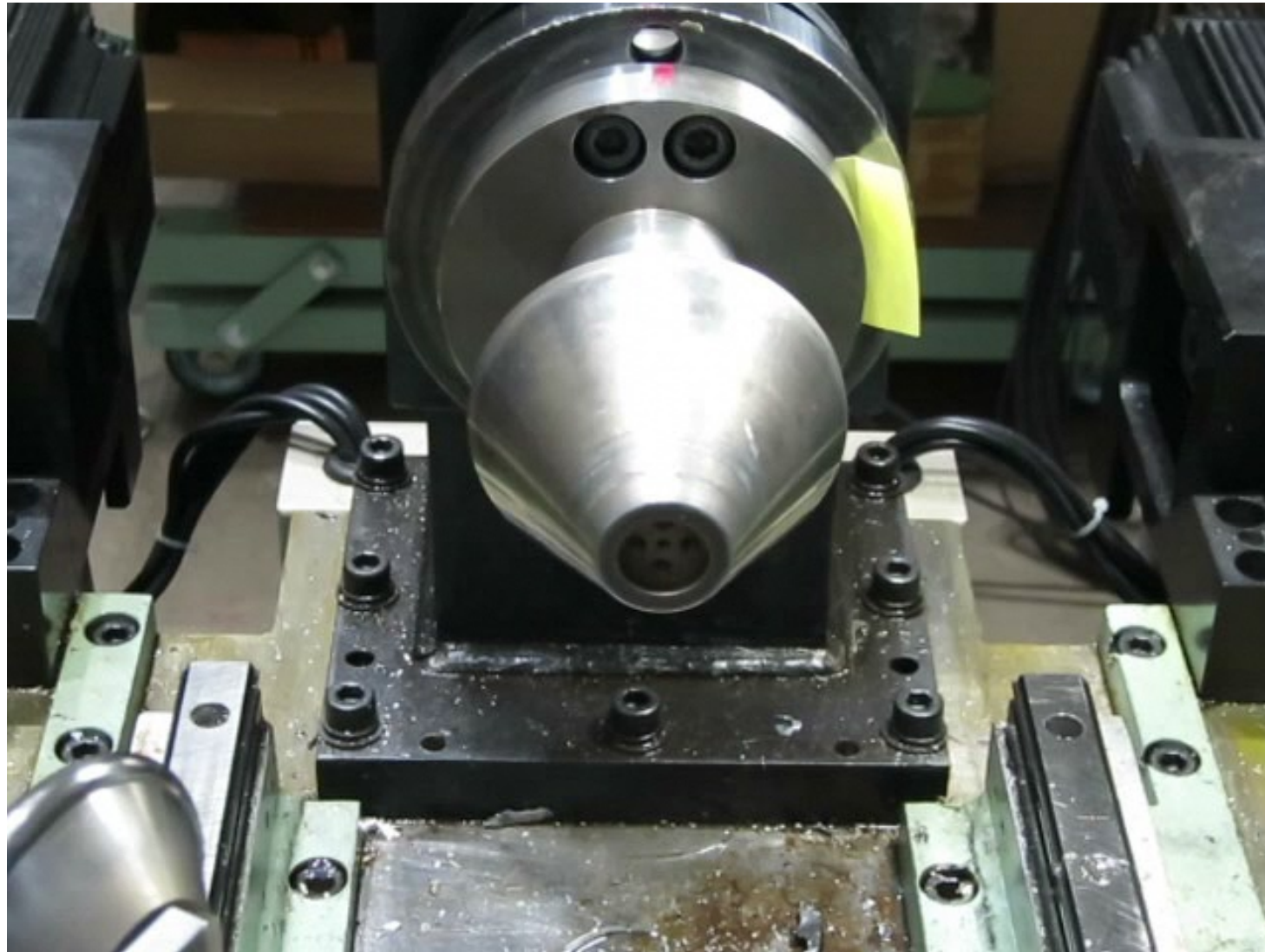
同期スピニング

成形型の回転に同期して、
ロールを水平方向に動かす

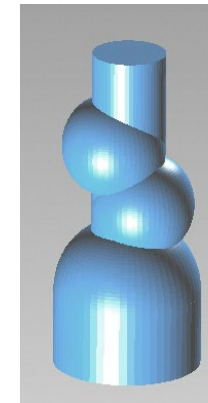
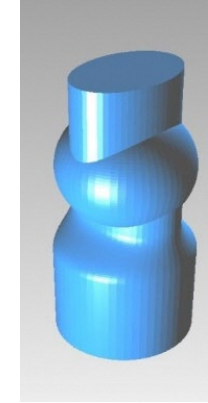


断面形状が円形でない形状の
成形を可能に

軸方向に断面形状が変化する複雑な形状に成形が可能



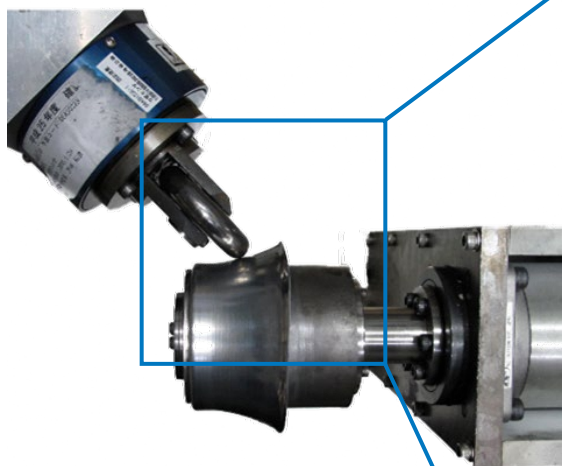
軸方向に断面形状が変化する複雑な形状に成形が可能



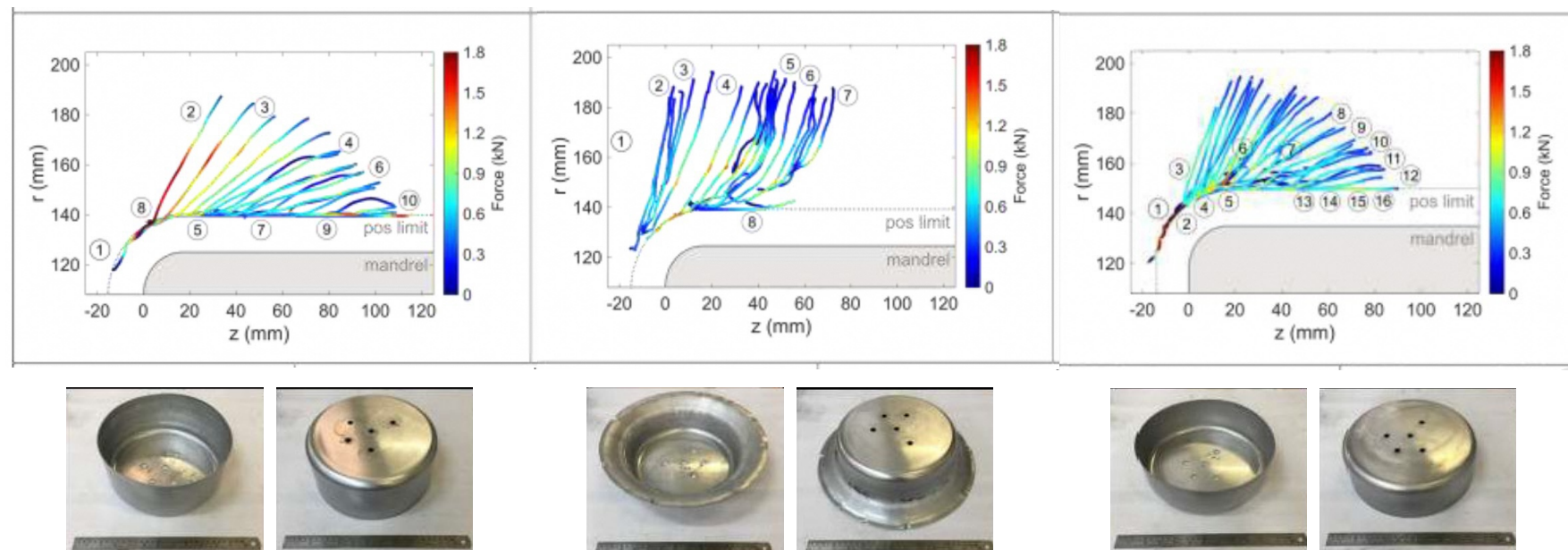
“スピニング × AI = データ駆動型スピニング加工” による加工精度向上

ロールパス設計は試行錯誤

加工中の材料流動はロールパスに敏感 → 見た目の大まかな形状の制御はできていても、
細かな寸法の制御が容易でない



これらはあくまで手動で加工した際の結果^[3]であるが、



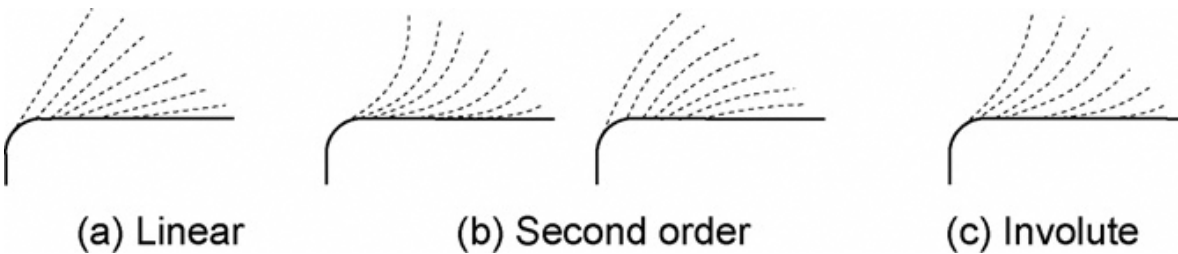
形状・寸法はロールパスの影響を強く受けるとわかる

- ① ロールパスが板厚に及ぼす影響についての知見は**限定的**
- ② ロールパスを含め、様々なパラメータが**同時に変化した場合の影響を網羅できていない**
- ③ 得られる知見はあくまで“傾向”で、実際の加工では**パスの微調整が必要**

過去の取り組みにおける3つの課題

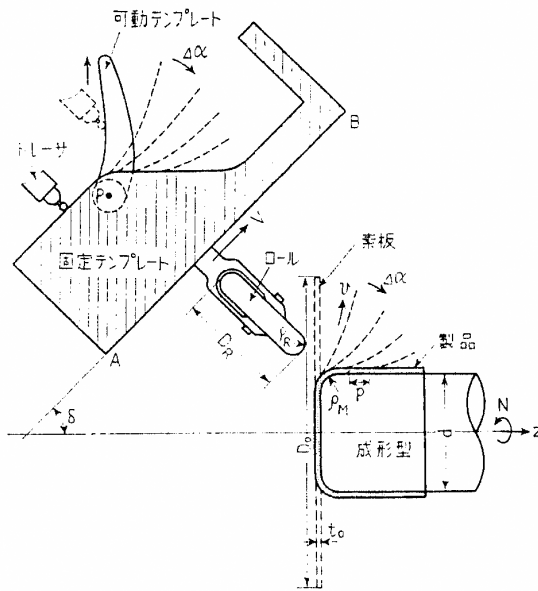
① ロールパスが板厚に及ぼす影響についての知見は限定的

課題



- 直線
 - 二次曲線(凸型, 凹型)
 - インボリュート線 ...etc.
- の違いで, 板厚に差が生じるかの検証に
留まっている^[4-6]

解決策



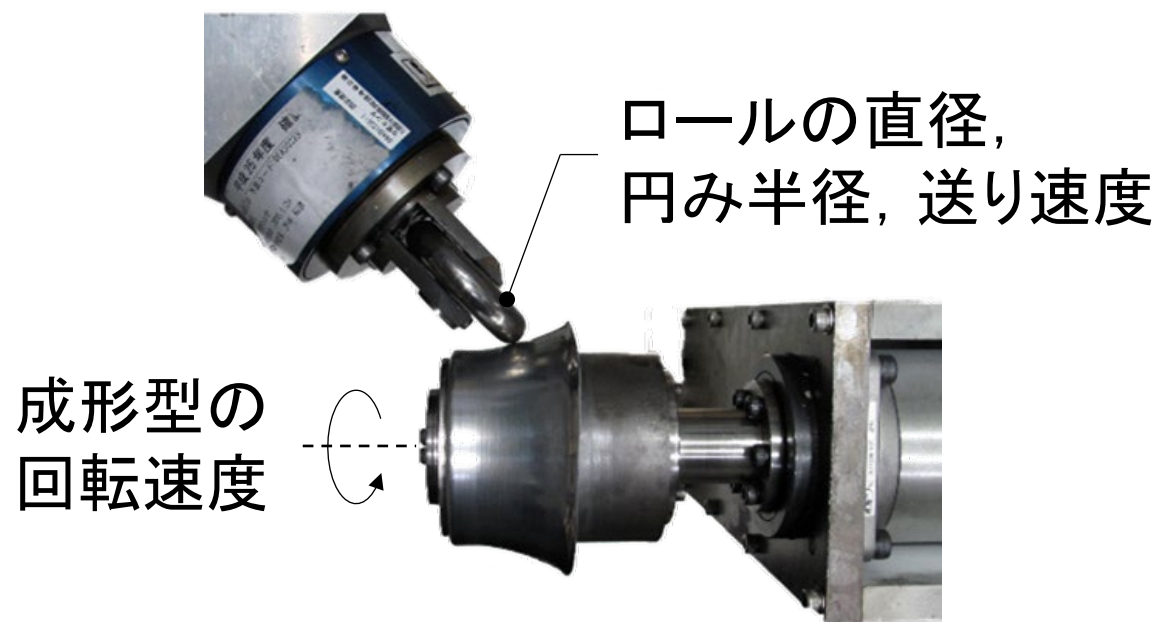
ロールパスを
テンプレート化
(パラメータ化)し,
限界絞り比に及ぼす
影響を検討した
事例あり^[7]



ロールパスを**パラメータ化**し, 各パラメータが
板厚に及ぼす影響を把握する!

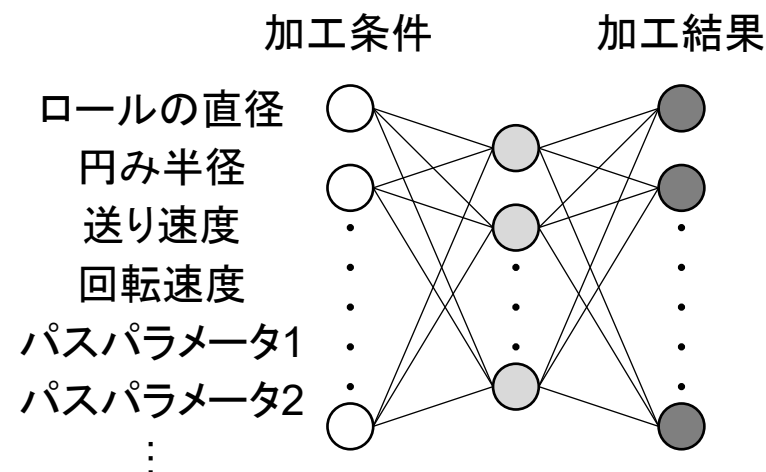
- ② ロールパスを含め、様々なパラメータが**同時に変化した場合の影響**を網羅できていない

課題



同時に変動させると
どのような結果が得られるのか？

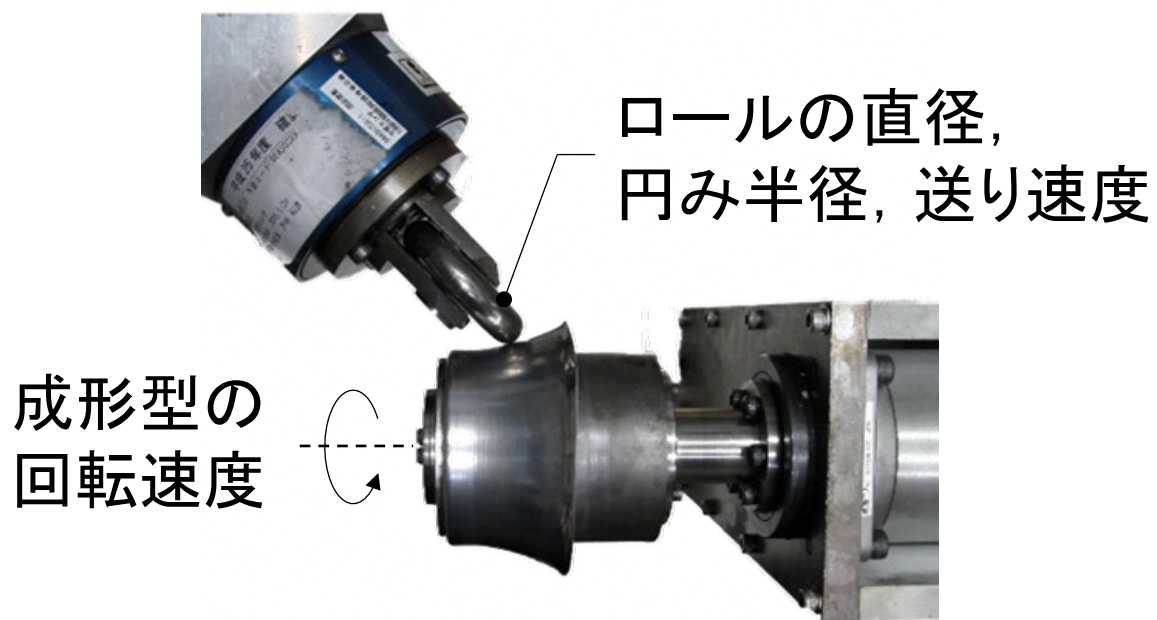
解決策



様々な加工条件が相互に作用し、
人間では結果の予測が難しい加工では、
既知の特徴に基づいて予測する**機械学習**
が役立つのではないか!?

③ 得られる知見はあくまで“傾向”で、実際の加工では**パスの微調整が必要**

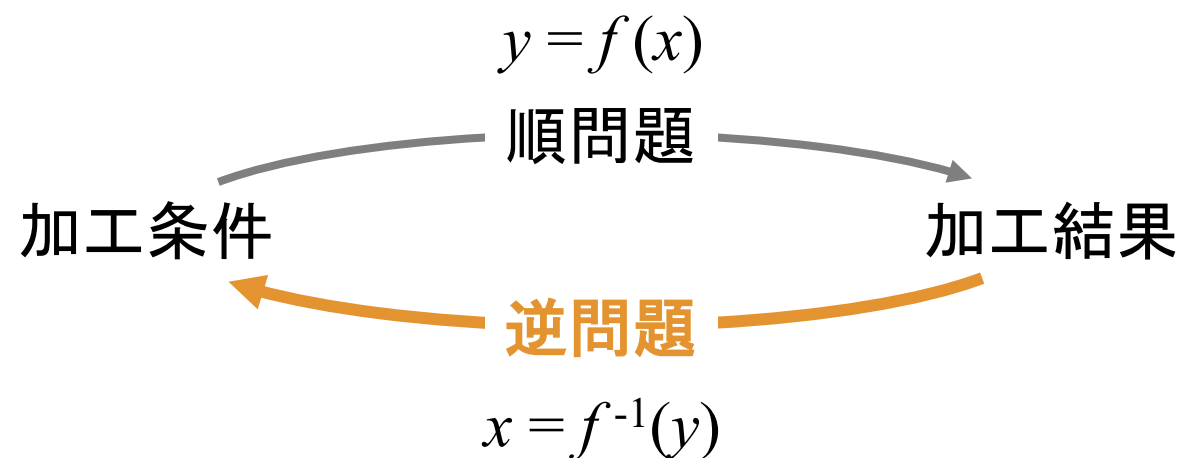
課題



例) 円み半径 大

→ 板厚分布が均一になる傾向^[8]
具体的に円み半径はいくつが良いのか？

解決策



順問題を解き、予測するだけでなく、
逆問題を解き、加工条件を最適化する

目標板厚を達成するための最適ロールパスを導く, **データ駆動型スピニング加工の開発**

Step 1. 加工条件（ロールパス）と加工結果のパラメータ化と教師データの取得

加工条件：入力 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_i)$

加工結果：出力 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_j)$

Step 2. 入出力関係を表現するモデル構築

$f(\mathbf{p}) = \mathbf{q}$ を満たす f の構築

Step 3. 目標の出力を得るための入力値の算出（最適化）と実証

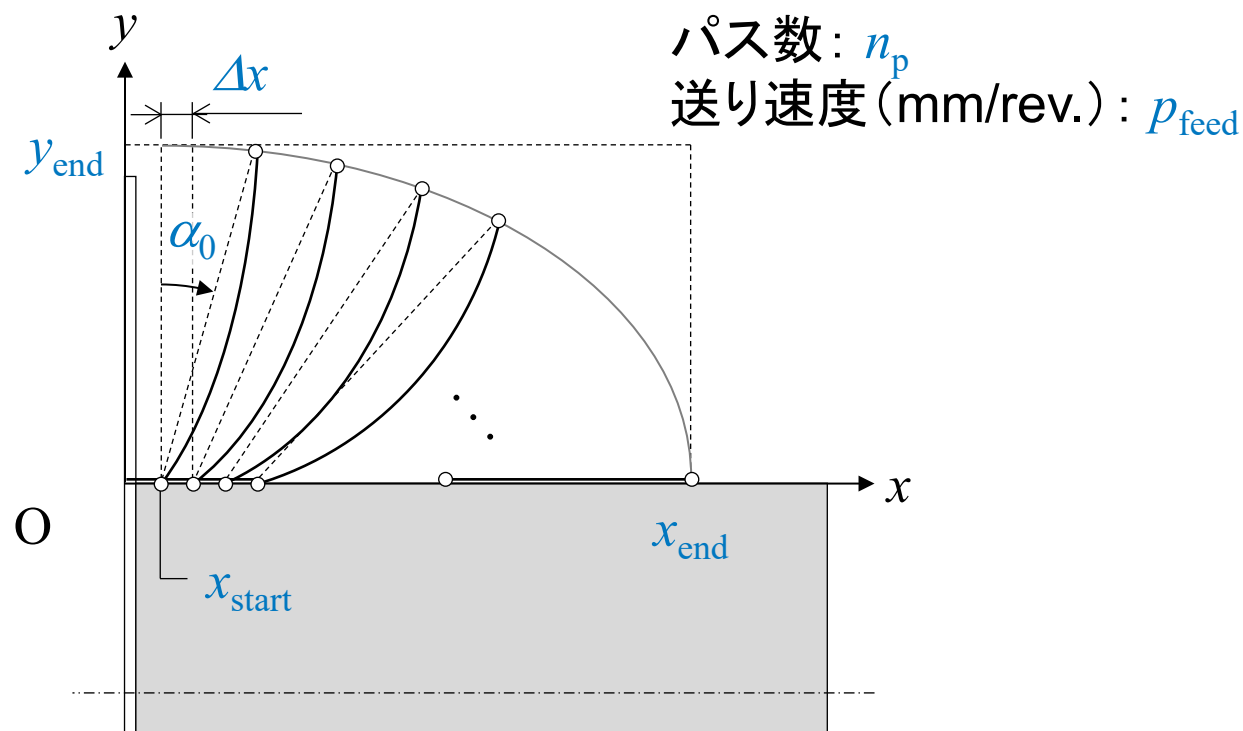
$f(\mathbf{p}) = \mathbf{q}_d$ を満たす $\mathbf{p}$ の算出

Step 1. 加工条件(ロールパス)のパラメータ化

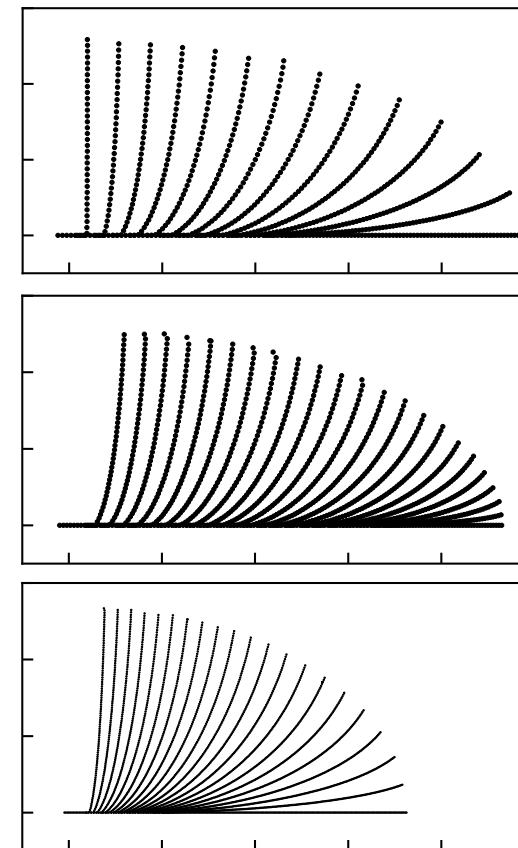
7つのパラメータを
変動させるパラメータ(説明変数)として扱った



7パラメータの組合せで、
様々なローラーパスを表現できる



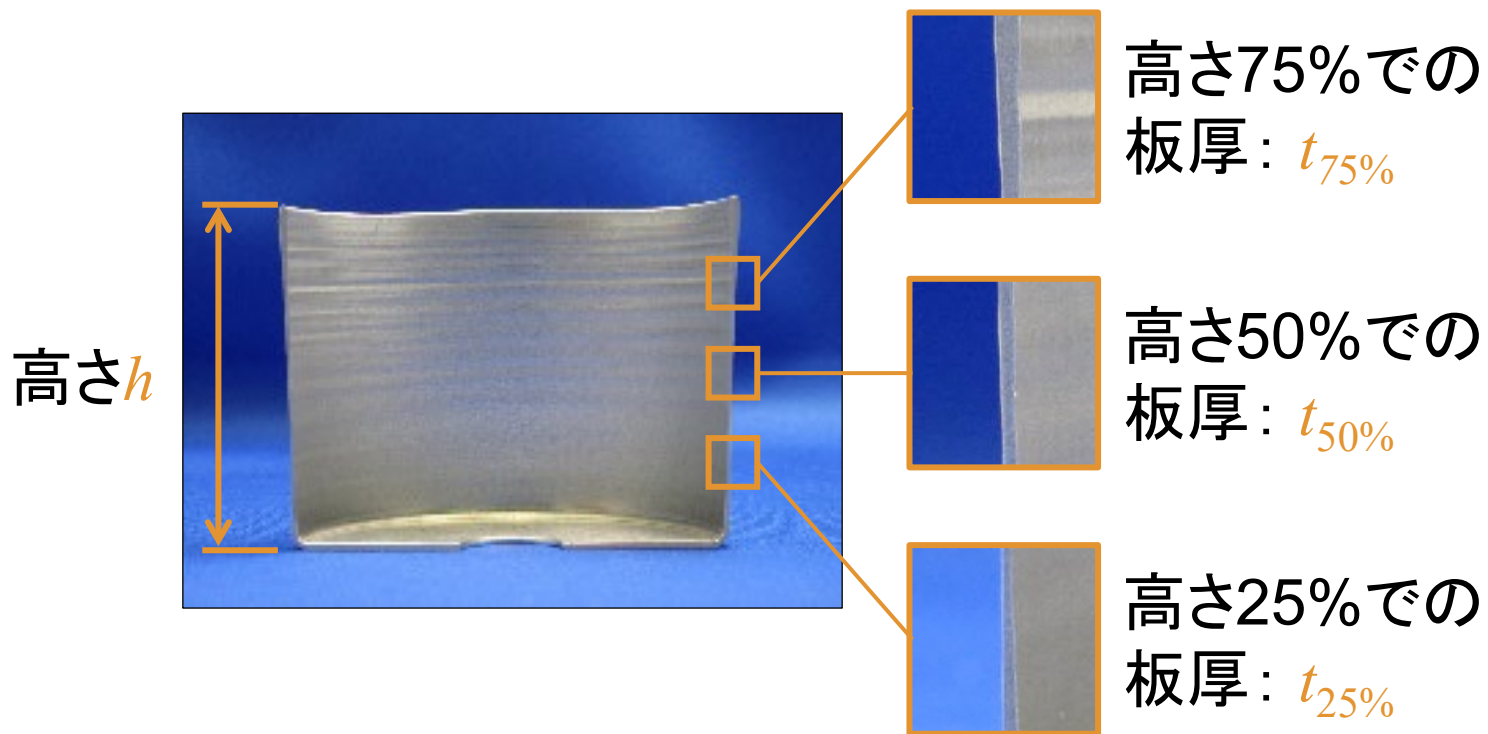
ロールパスの例



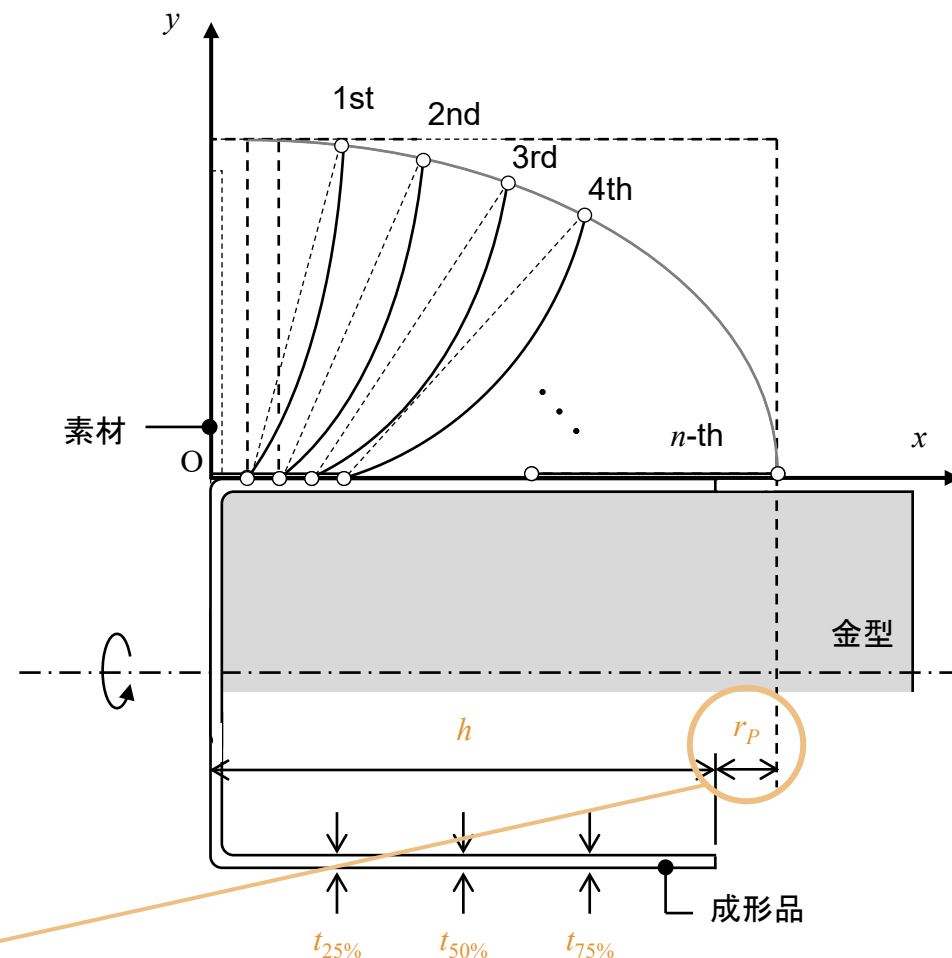
$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= (p_1, p_2, \dots, p_i) \\ &= (n_p, x_{\text{start}}, x_{\text{end}}, \Delta x, y_{\text{end}}, \alpha_0, p_{\text{feed}}) \end{aligned}$$

Step 1. 加工結果(カップ板厚分布)のパラメータ化

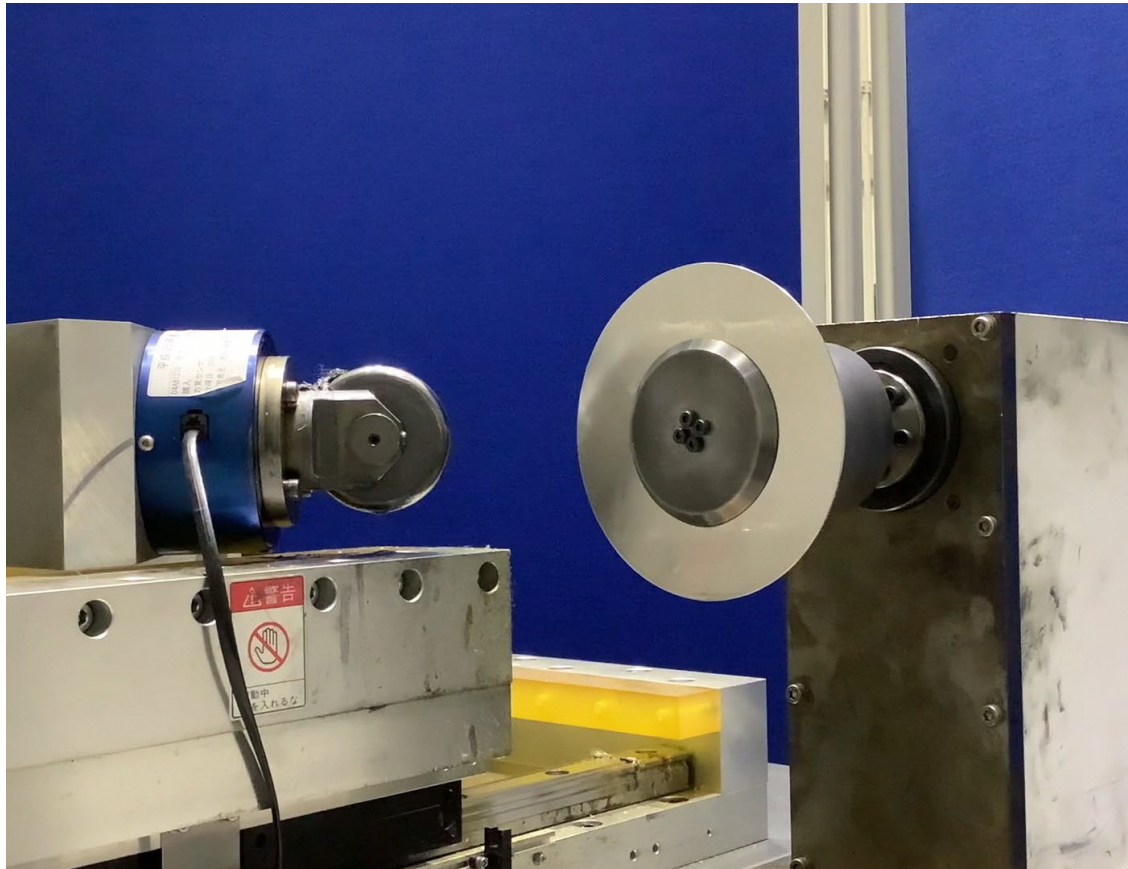
カップの板厚分布として, 3か所を制御対象(目的変数)とした



$$\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_i) = (h, t_{25\%}, t_{50\%}, t_{75\%}, r_p)$$



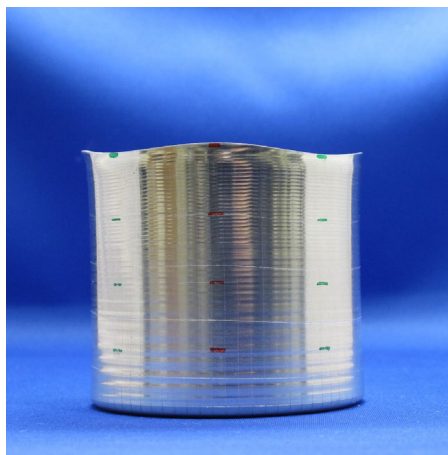
36条件下で加工



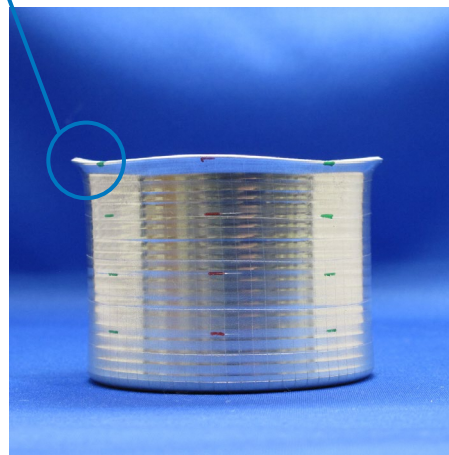
- ブランク材
純アルミニウム (A1050P-O)
 ϕ 150 mm, t 1.5 mm
- ロール
合金鋼 (SKD11)
 ϕ 70 mm, r 8 mm
- マンドレル
焼き入れ鋼 (S45C)
 ϕ 85 mm

教師データとして使用

成功



小さいフランジ



不良品

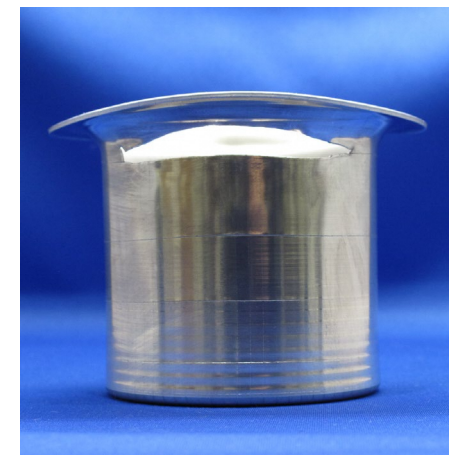
フランジ



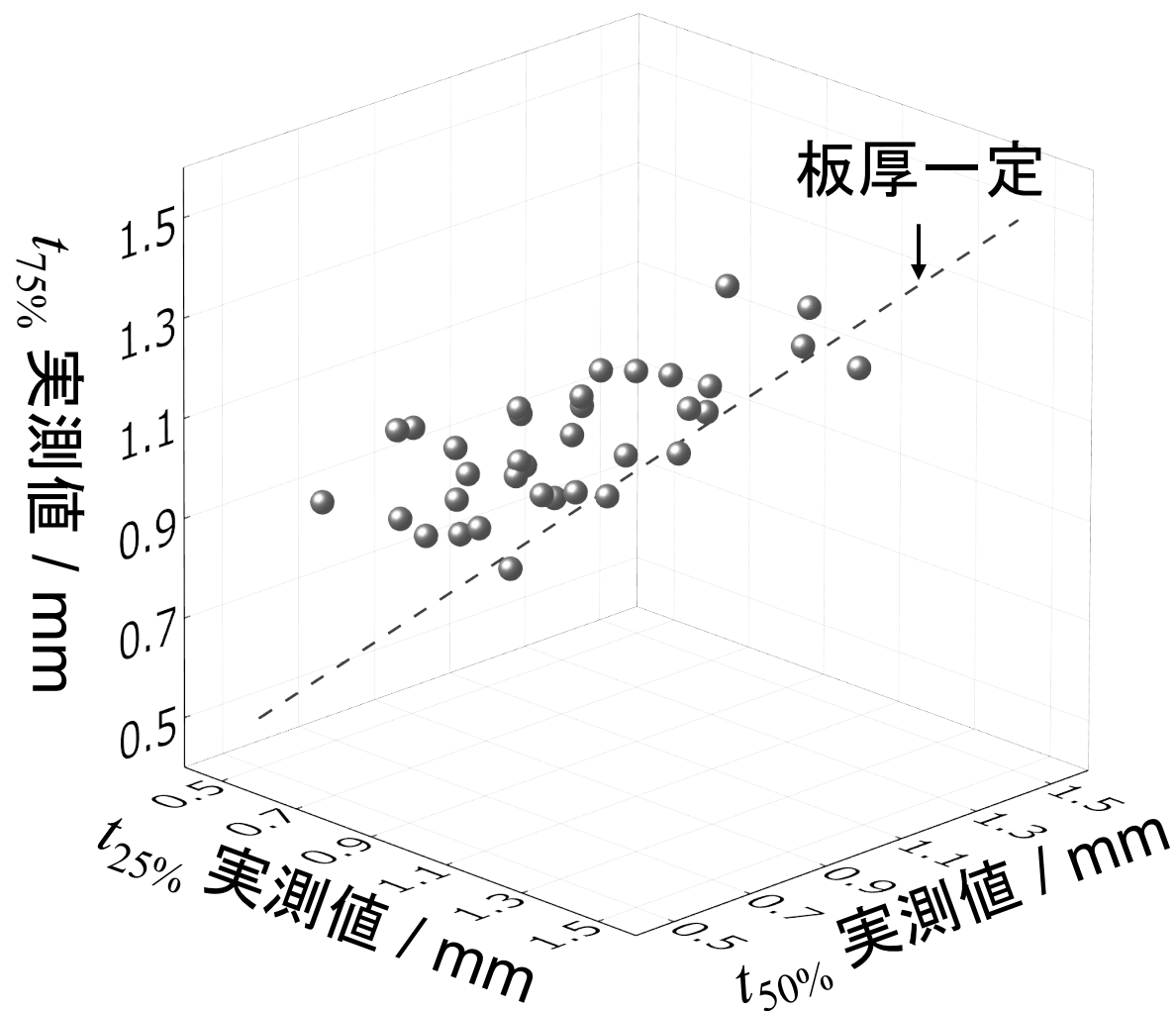
しわ



われ

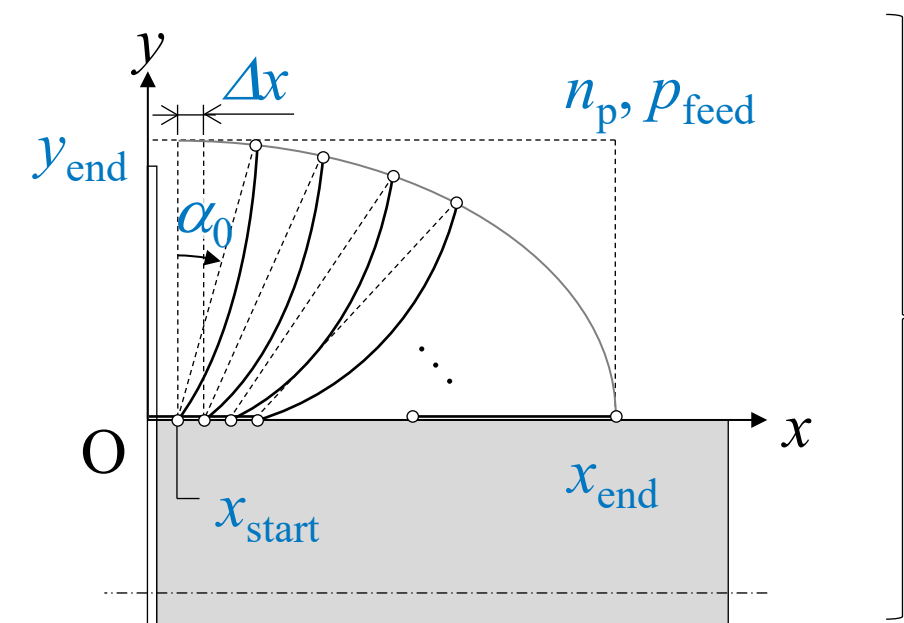


サンプルのほとんどが、高さ方向に不均一な板厚分布.
これらをニューラルネットワークモデルの教師データと・検証データとする

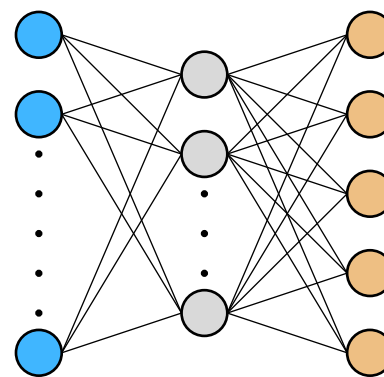


Step 2. 入出力関係を表現するモデル構築

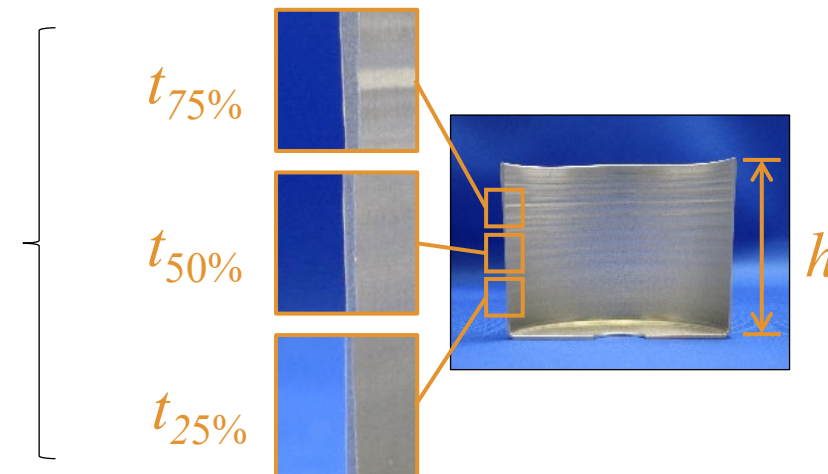
7つのパスパラメータを入力, 高さ, 3箇所の板厚, 高さとパス長の差を出力とし,
1層の隠れ層を有するニューラルネットワークモデルを構築



入力層 隠れ層 出力層

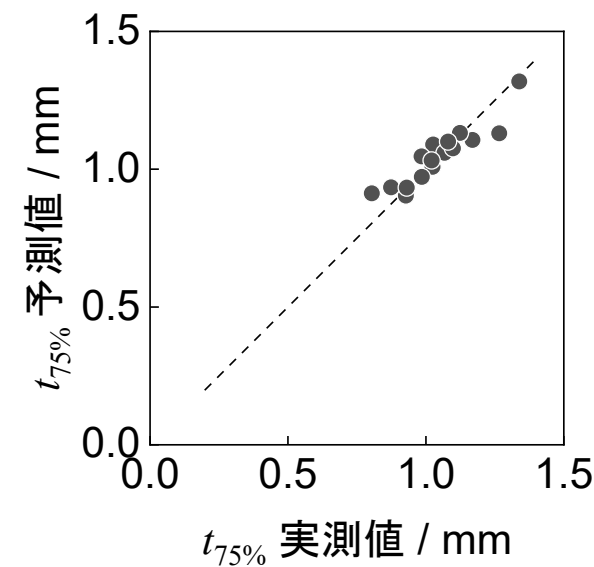
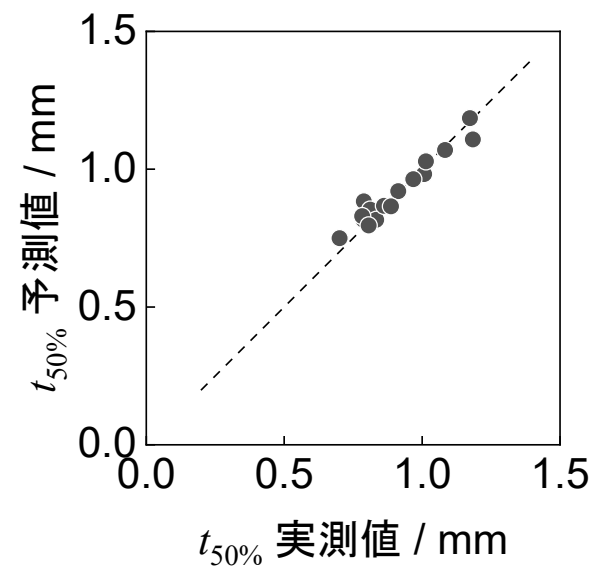
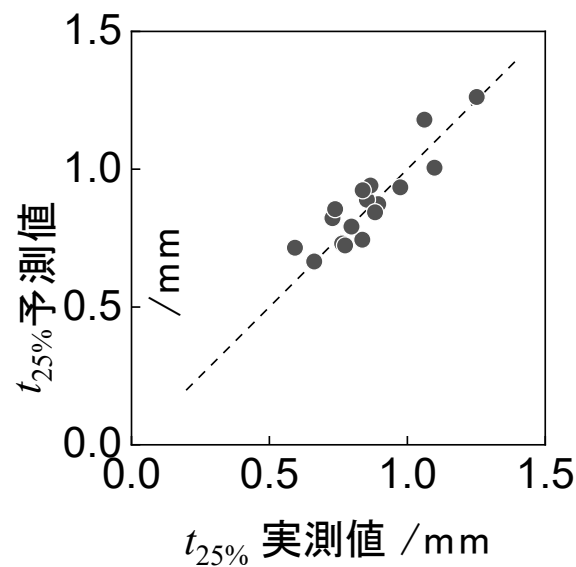
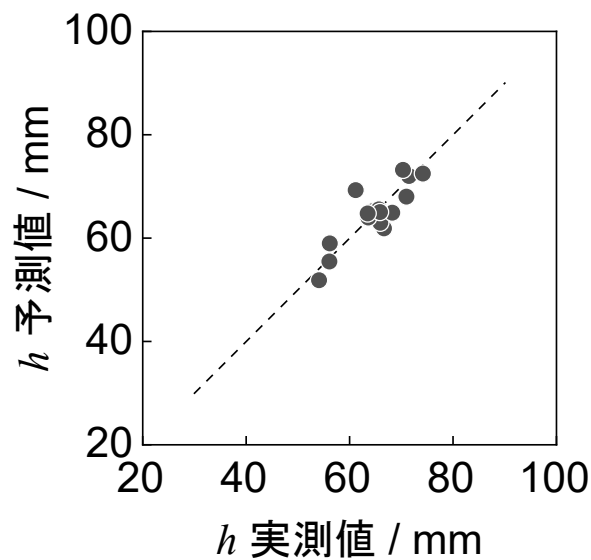
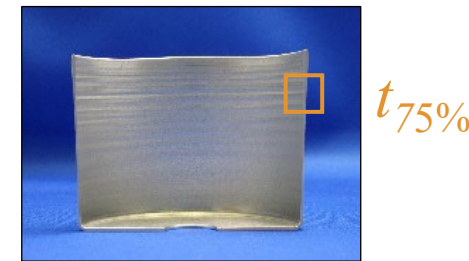
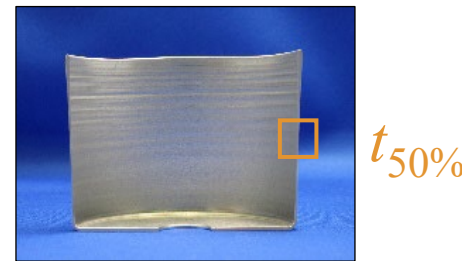
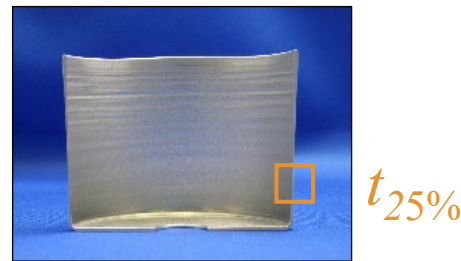
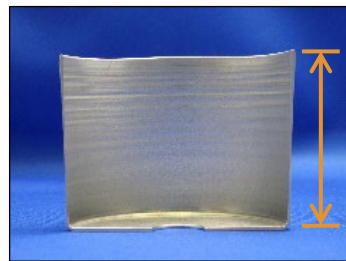


$$f(p) = q$$

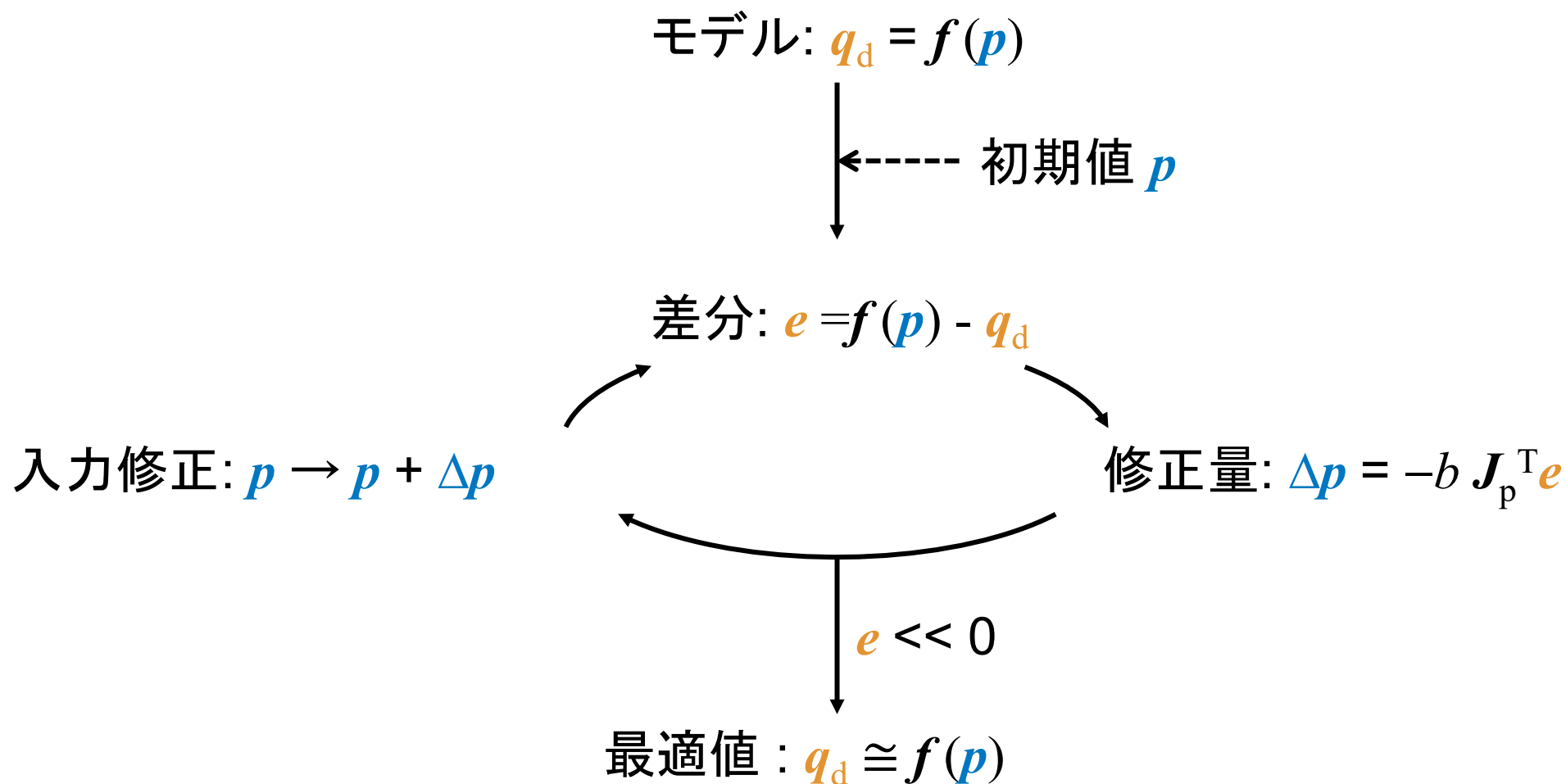


Step 2. 入出力関係を表現するモデル構築

ニューラルネットワークモデルを使って、パスパラメータから、高さ、板厚を精度よく予測できた



Step 3. 目標の出力を得るための入力値の算出(最適化)



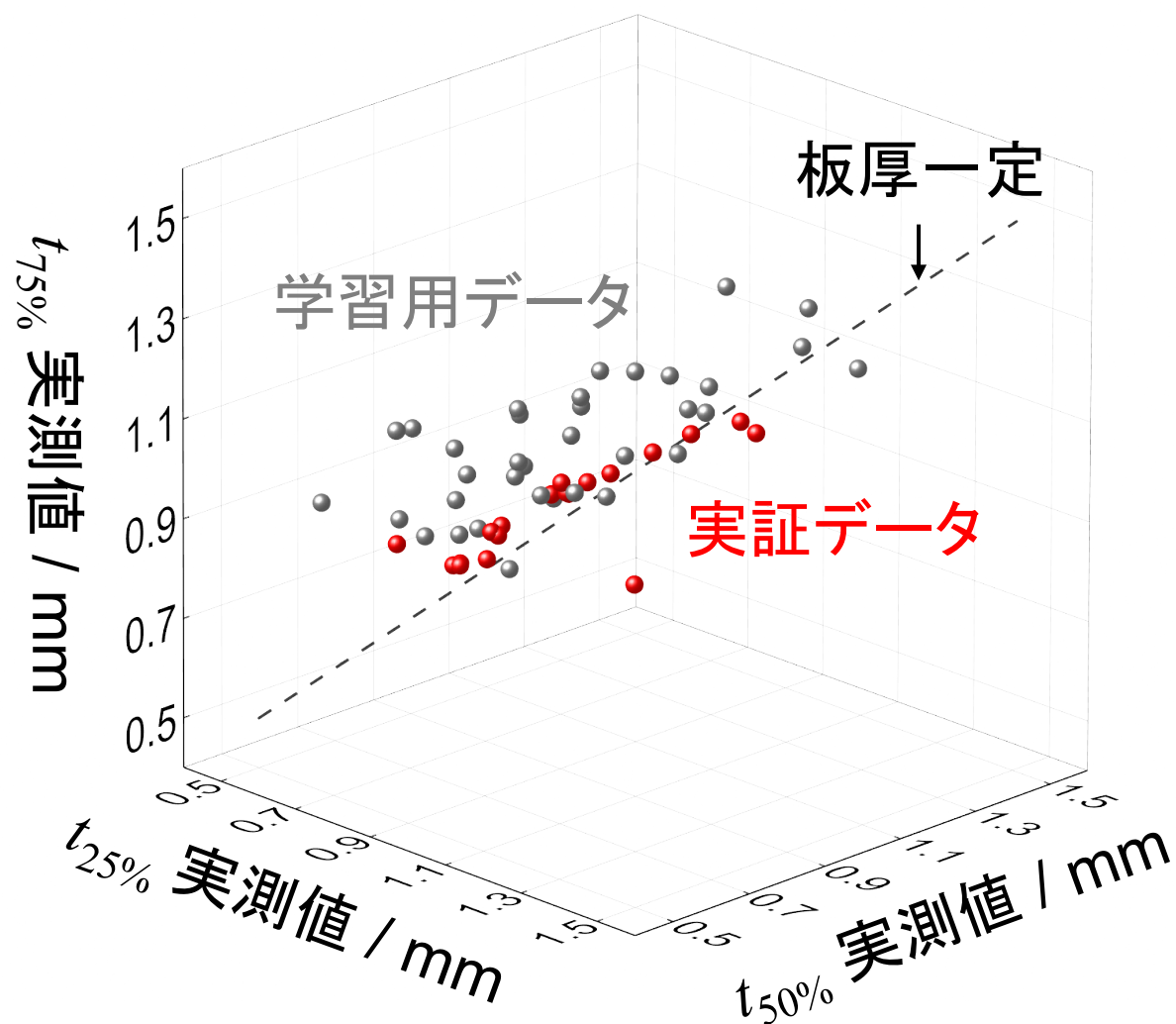
Step 3. 目標の出力を得るための入力値の算出(最適化)

板厚の目標値: $t_{25\%} = t_{50\%} = t_{75\%} = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2 \text{ mm}$ 一定

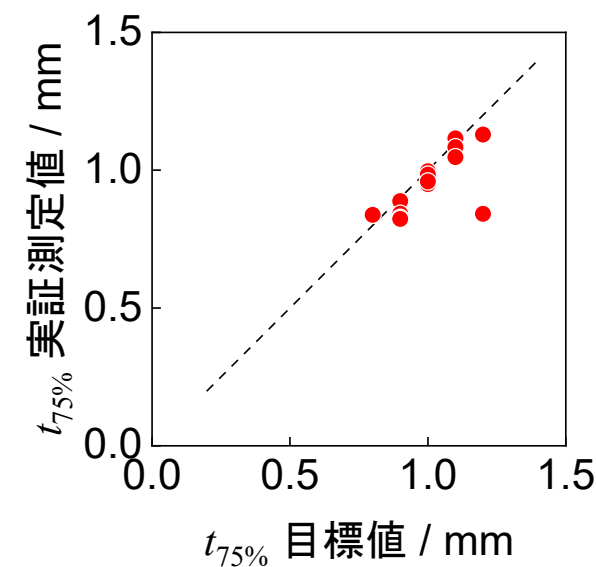
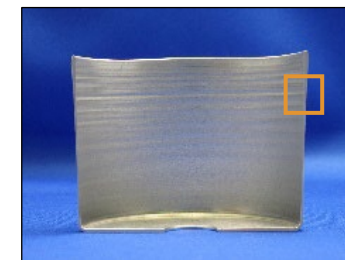
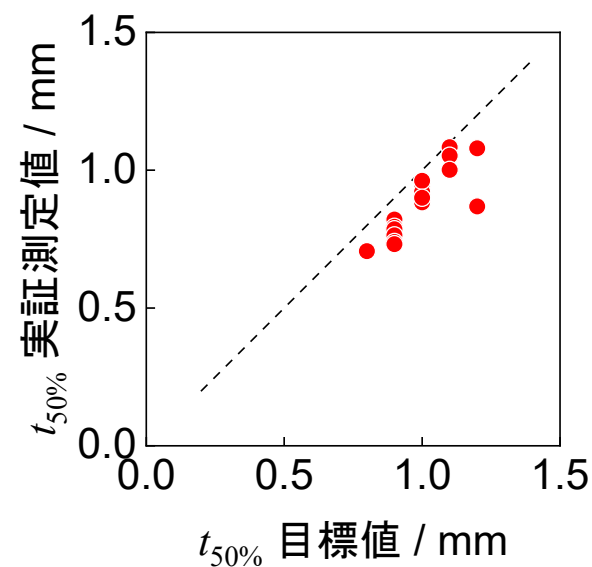
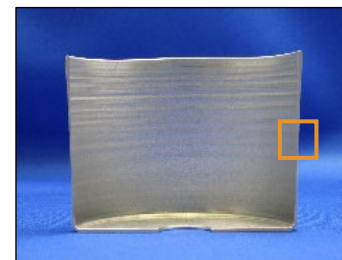
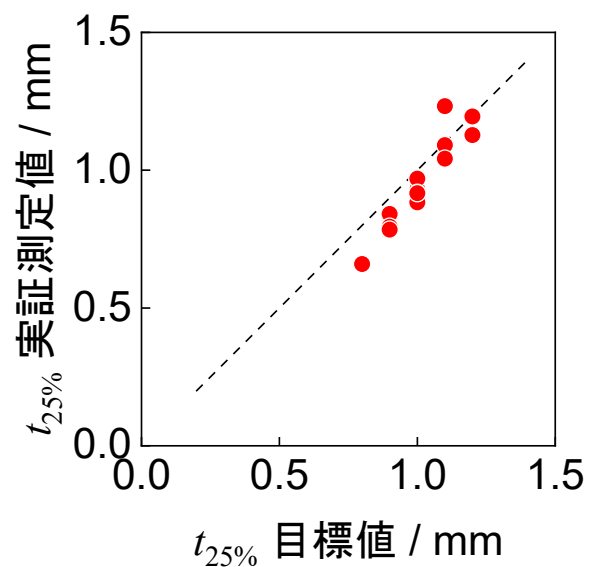
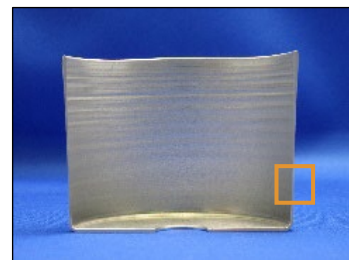
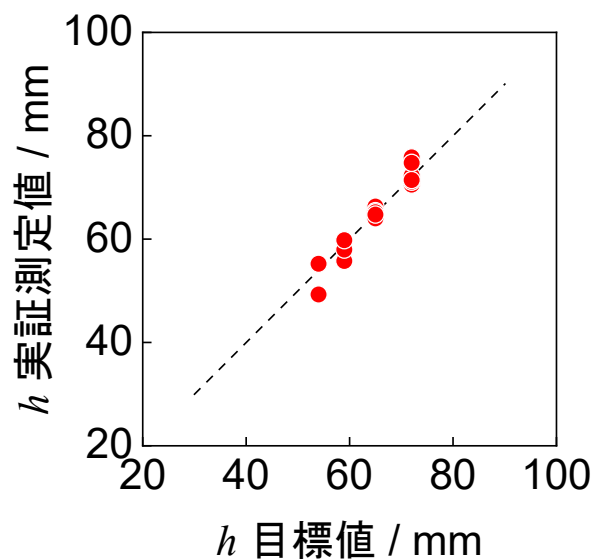
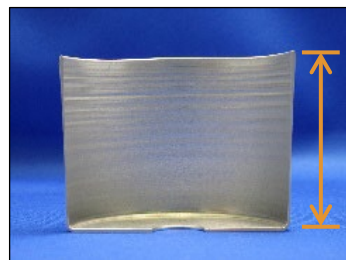
【反復解法によって得られたパラメータの例】
板厚1.0 mm一定とするために,

n	x_{start}	x_{end}	y_{blank}	α_0	Δx	p_{feed}
21	45.1	113.1	55.6	7.03	0.82	0.93
12	46.9	110.9	49.3	0.01	1.00	0.93

高さ方向に板厚一定となるような入力値で実際に加工すると、確かに板厚一定となった

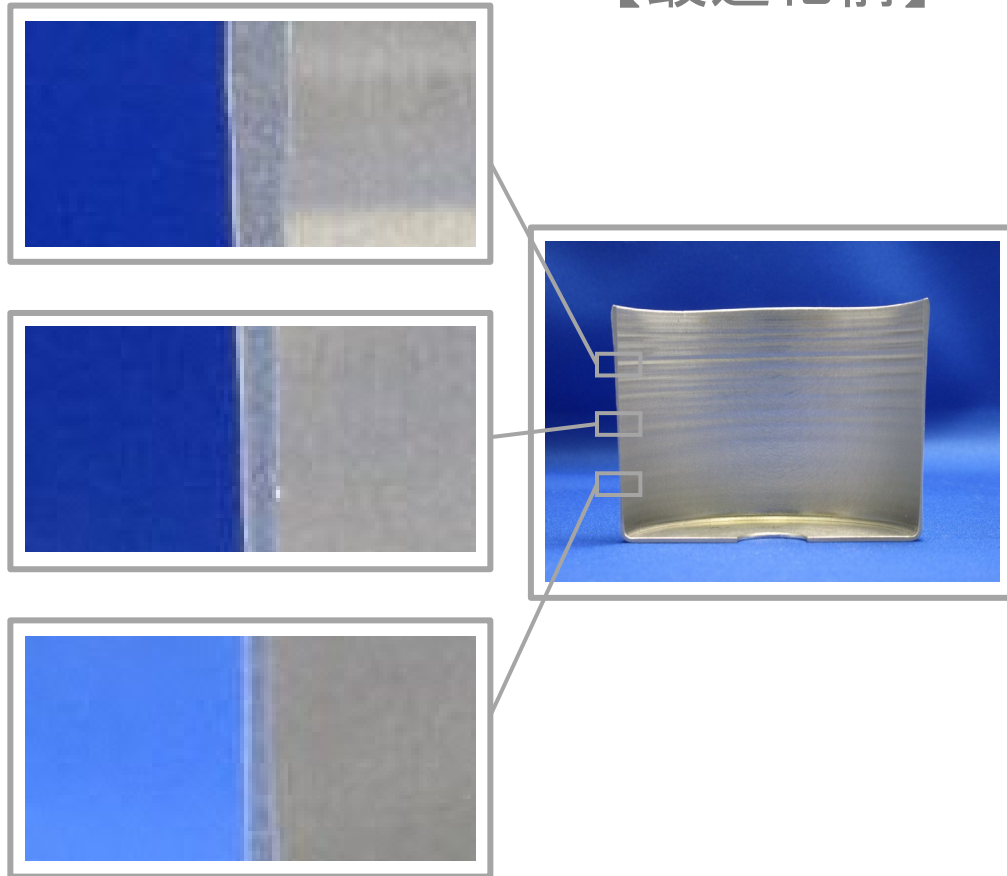


適用範囲の制限はあるものの，精度良く板厚の制御を実現

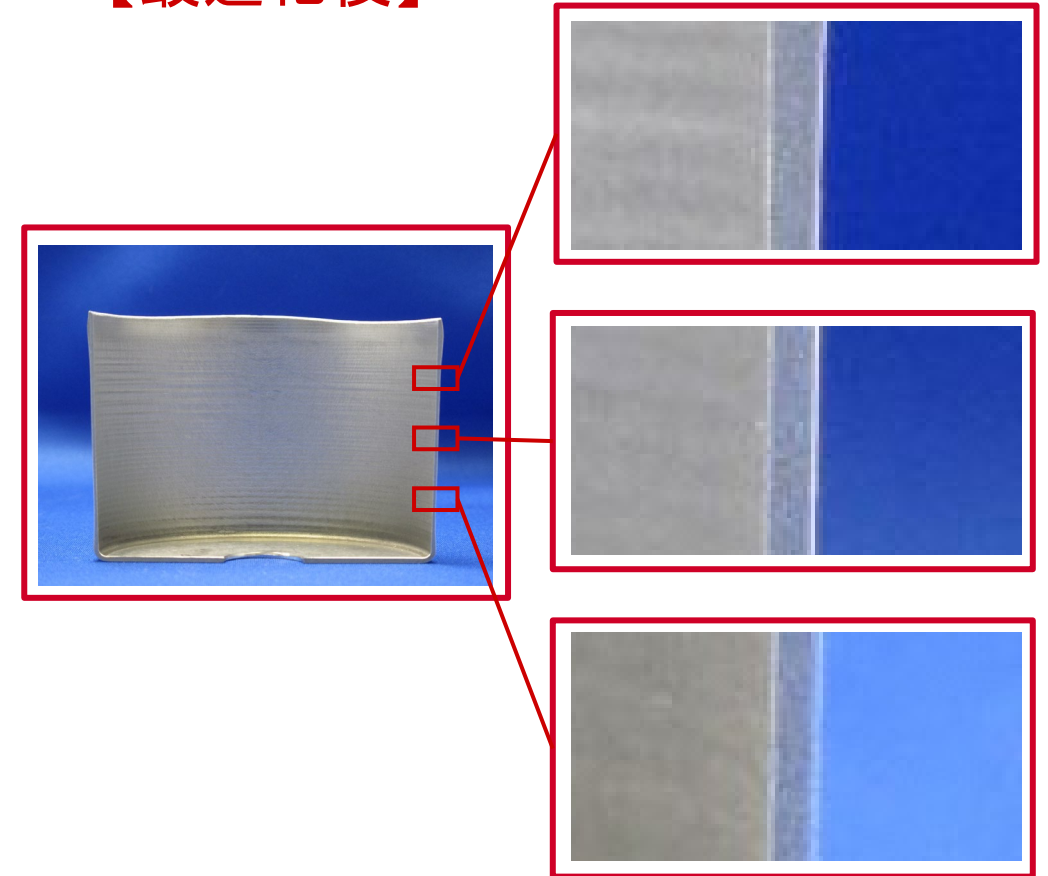


熟達技術者でなくとも、容易に0.1 mm以内の精度で板厚を制御

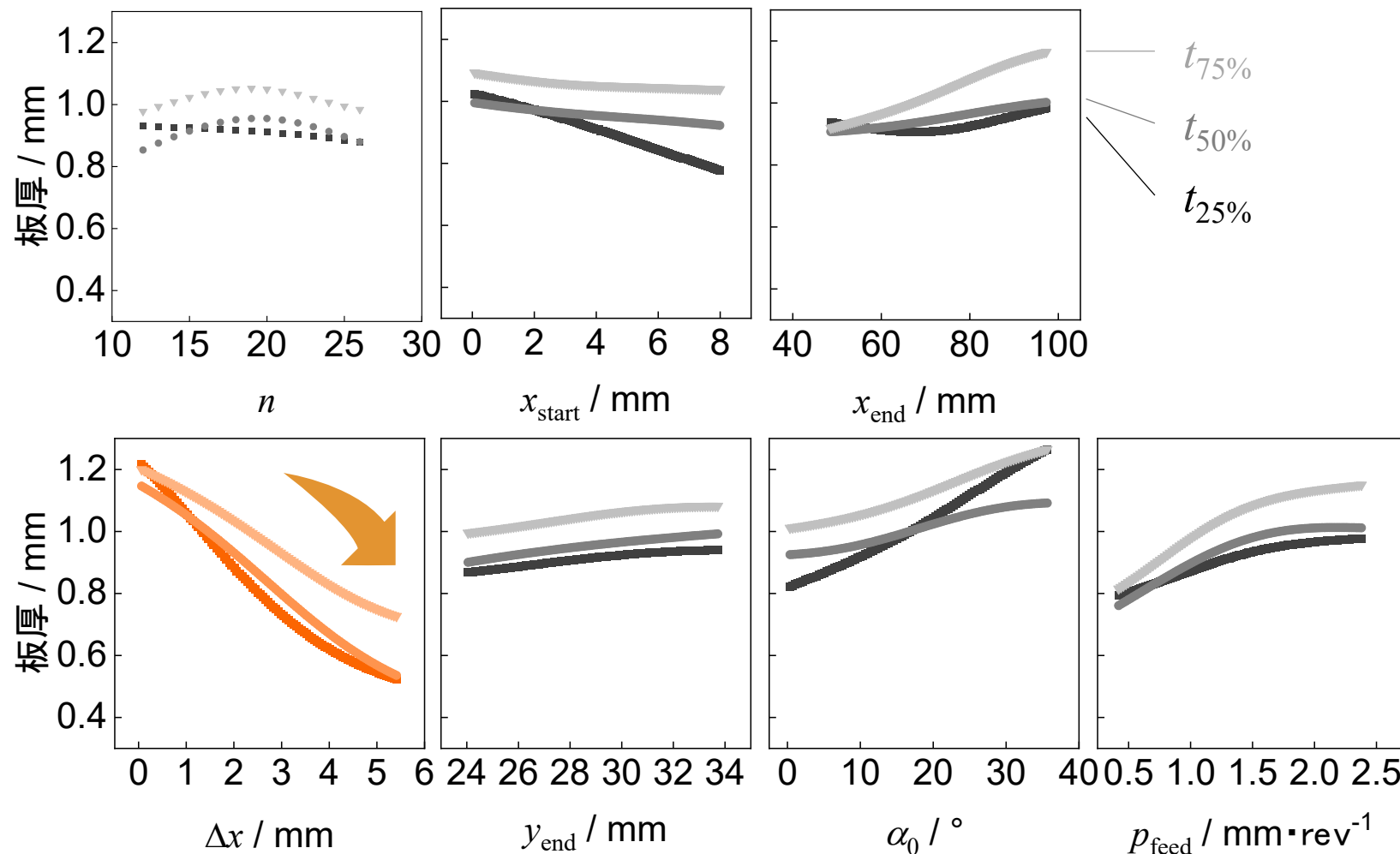
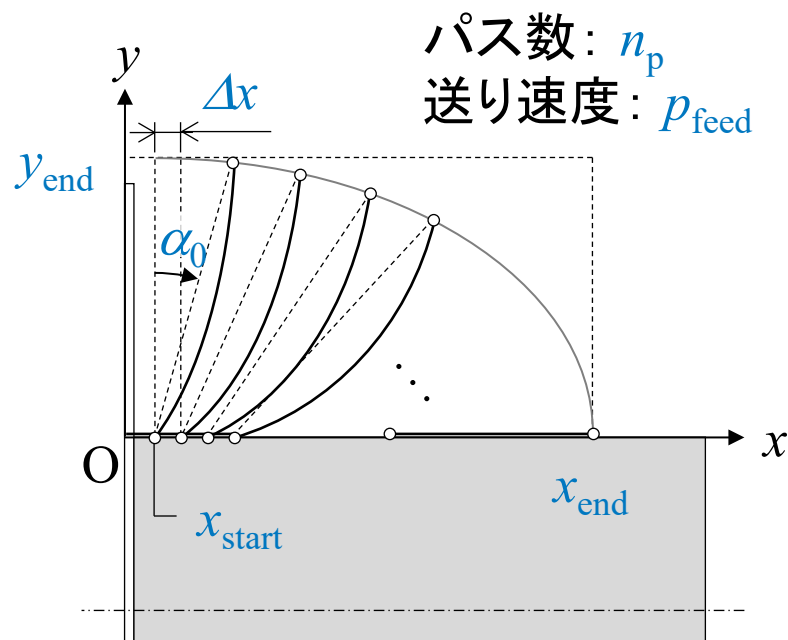
【最適化前】



【最適化後】



実験・数値解析をしなくても、パラメータの影響度を把握できる。
軸方向に進展する長さ(Δx)を大きくすると、板厚が減少し易い。



目標板厚を達成するための最適ローラパスを導く、データ駆動型スピニング加工の開発

絞りスピニング加工に以下をおこない、

目標板厚を達成するための最適ローラパスを導くデータ駆動型スピニング加工を開発した。

- ① 加工条件・加工結果のパラメータ化
- ② 加工条件と加工結果の入出力関係を記述する機械学習モデルの構築
- ③ 目標の加工結果(出力)を得るための加工条件(入力)値の算出(= 最適化)

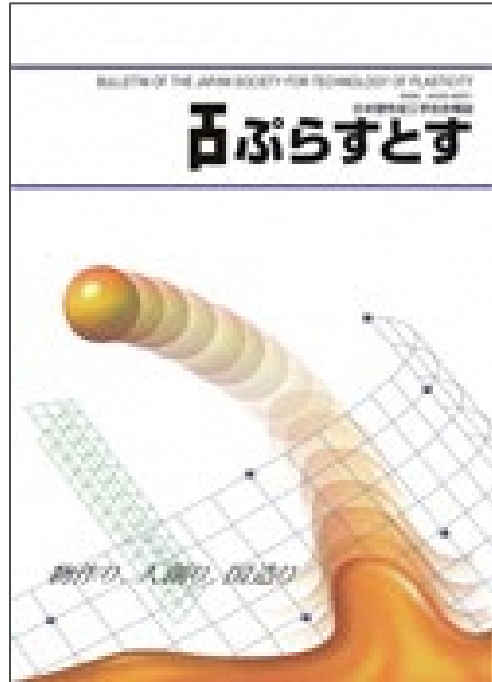
具体的には以下をおこなった。

- ロールパスを**パラメータ化**
- ロールパスパラメータと板厚の関係を**ニューラルネットワーク**でモデル化
- **最急降下法**に基づいた**反復計算**により、所望の板厚を得るためのパスパラメータを算出

得られた条件下での加工では、

経験に寄らず**精度0.1 mm以内で板厚を容易に制御**することを可能とした。

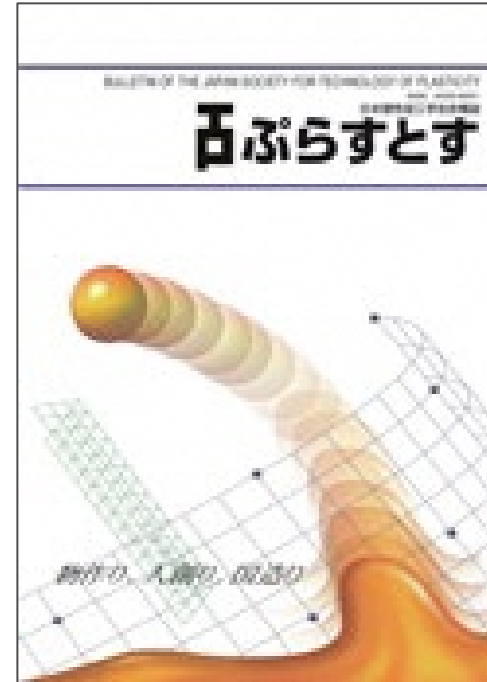
ぷらすとす Vol. 6 No. 067 (2023年7月号)
『データ駆動型絞りスピニング加工による板厚制御』



【概要】

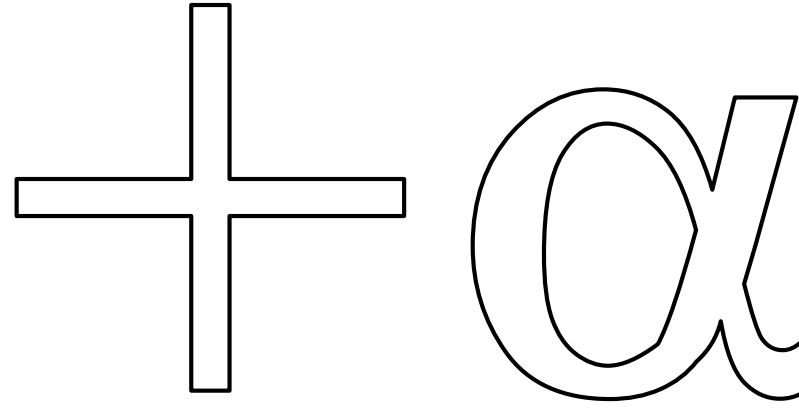
異なる前提条件(blank径 D ,
mandrel径 d)のデータも教師データとして活用

ぷらすとす Vol. 8 No. 087 (2025年3月号)
『ニューラルネットワークモデルによる
スピニング加工条件の最適化』



【概要】

加工条件側も目標値を設定し、
作業環境に応じて最適化を
カスタマイズ



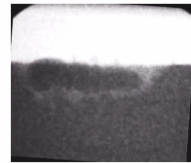
参考情報

鋳造，塑性加工，機械加工，積層造形，溶接...とさまざまな金属加工の範囲を網羅
ぜひ，お気軽なくお問い合わせください！

Mechanism

[溶融]

- 凝固中固液共存状態での強度変化・凝固割れ挙動解明
- L-PBFやレーザー溶接中のX線透視による金属内部の挙動計測



[溶接]

- レーザ溶接モニタリング

[機械加工]

- 画像観察による工具摩耗の検出

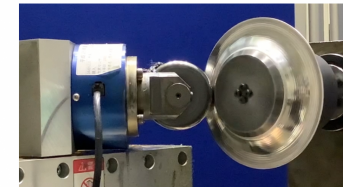
Modeling / Process Informatics

[溶融]

- 合金設計サポートシステム開発

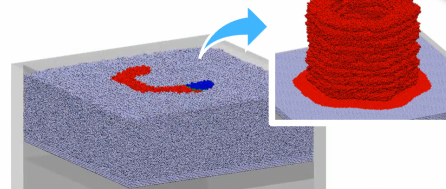
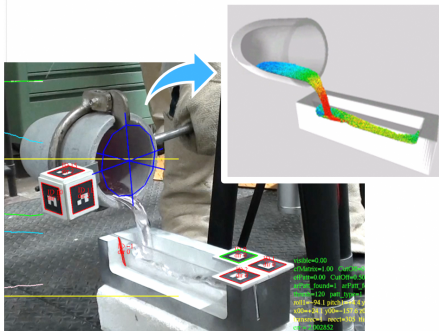
[塑性加工]

- プレスモーションや逐次成形工具パスの設計支援ツール



[鋳造・金属積層]

- 粒子法を用いた数値シミュレーション



Modeling / Simulation

[金属積層]

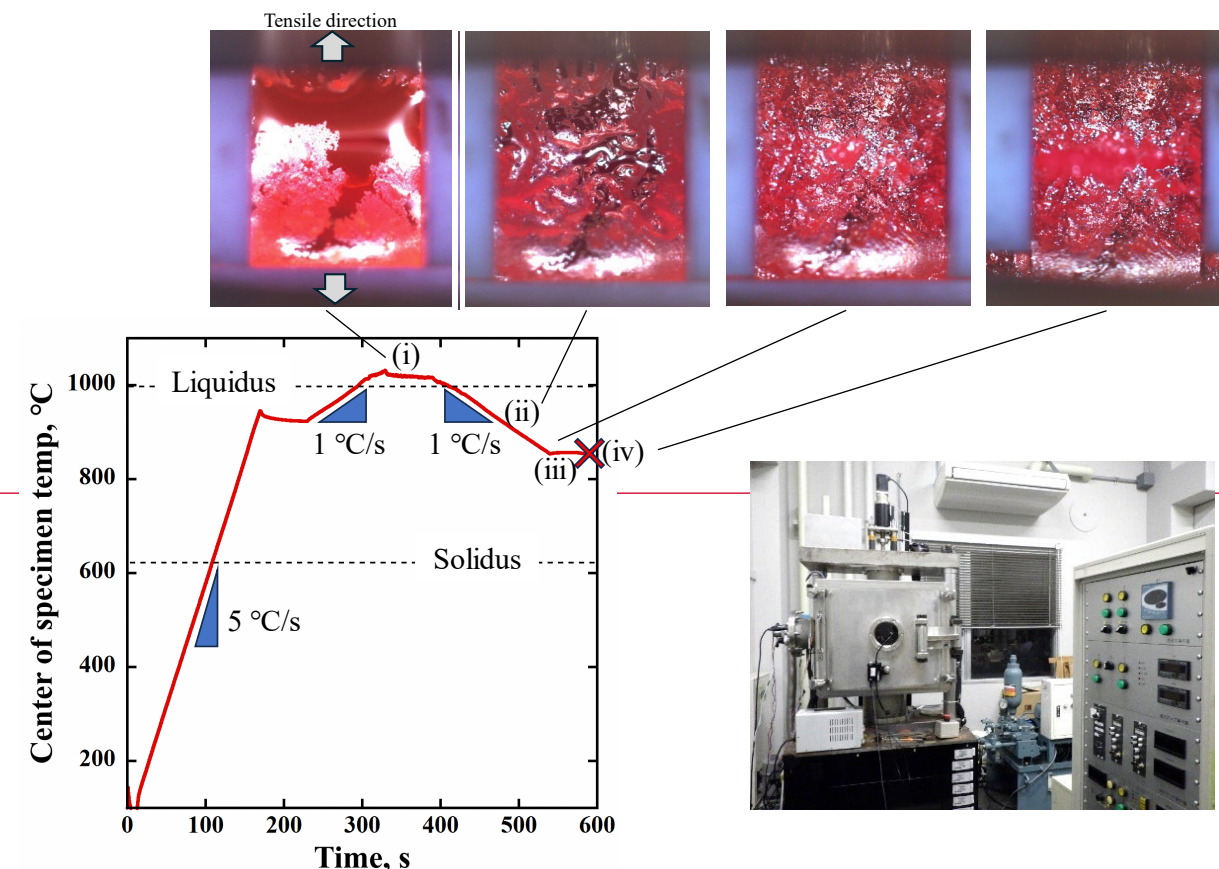
- DED積層材の耐久性検証
- ワイヤDEDを使った機器部品のリペア試行



Remanufacturing

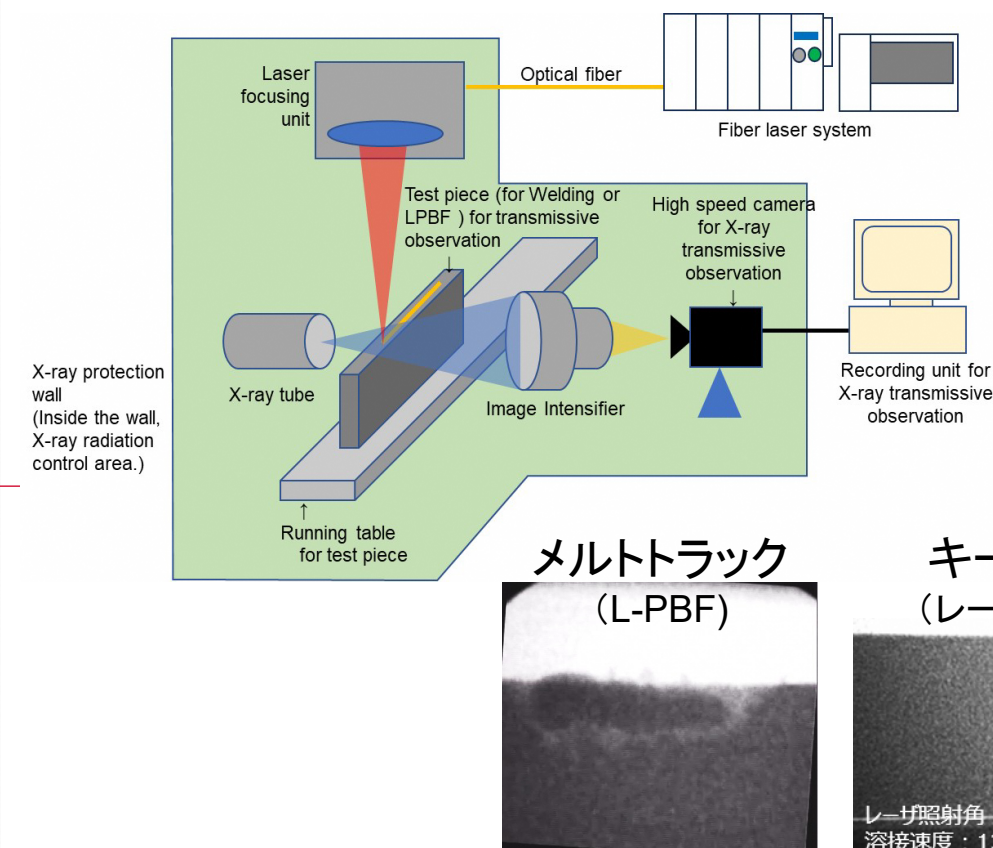
Mechanism

凝固中固液共存状態での強度変化・凝固割れ挙動の解明



- 半溶融・半凝固状態で引張試験ができる装置を開発
- 固液の割合と強度の関係や凝固割れのタイミングを解明
- ➡ 新規合金設計に活用

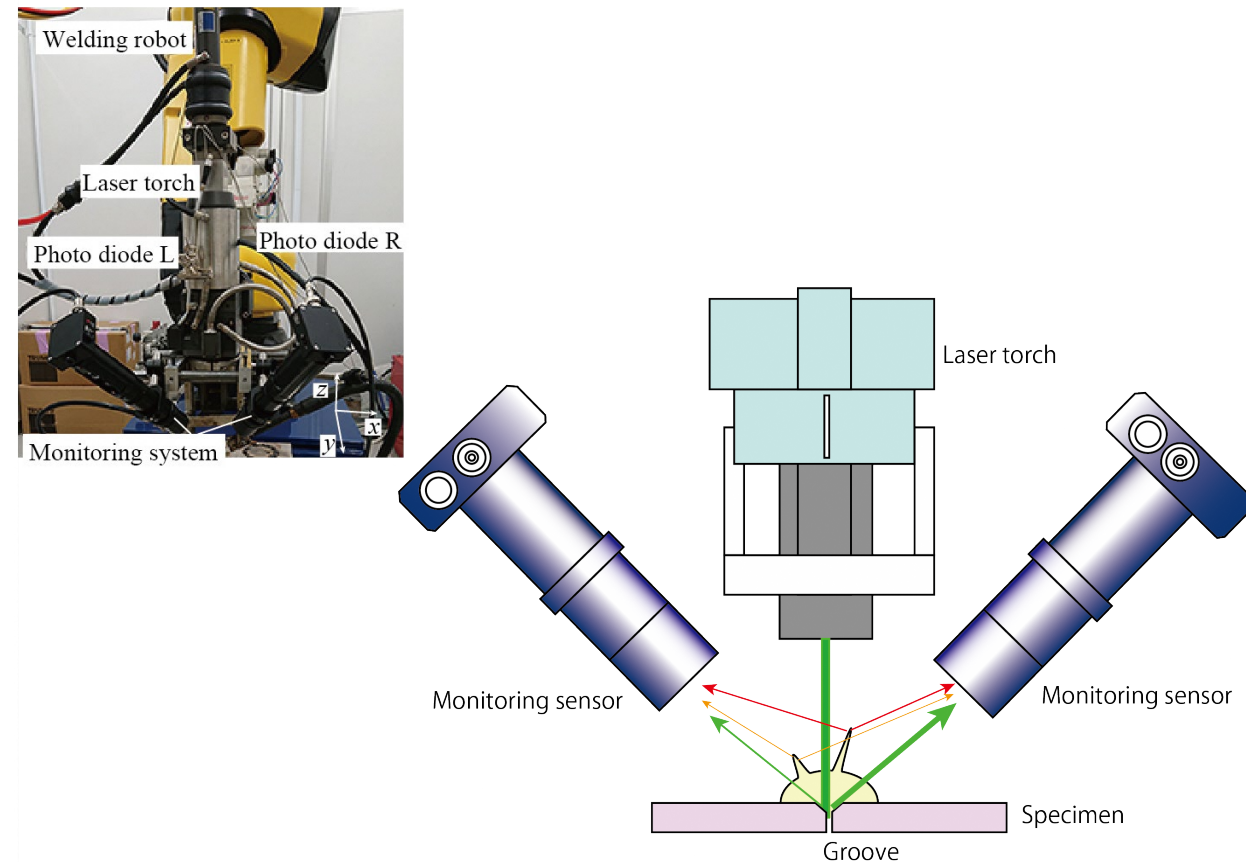
X線透視を用いた金属溶融挙動の計測



- 金属溶融挙動をX線で透視する装置を開発
- メルトトラックやキーホールの様子の可視化に成功
- ➡ 適切なレーザー溶融照射条件選定に活用

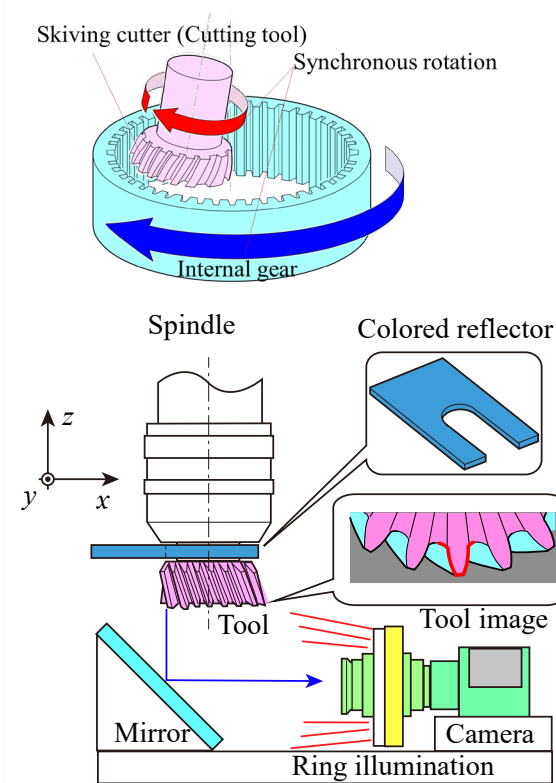
Mechanism

レーザー溶接モニタリングシステム開発

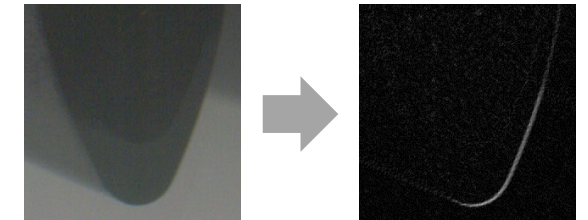


- レーザ溶接時の反射光を検出し、電気信号に変換
- 溶接状態、溶接位置を特定できるシステムを開発
- ➡ ロボットによる溶接位置自動修正システムを構築できる

画像観察による工具摩耗の検出

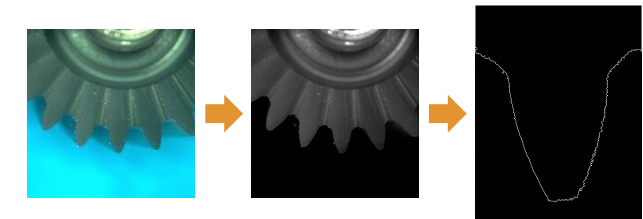


【課題】



工具形状に起因する影などで、輪郭抽出が困難

【解決策】

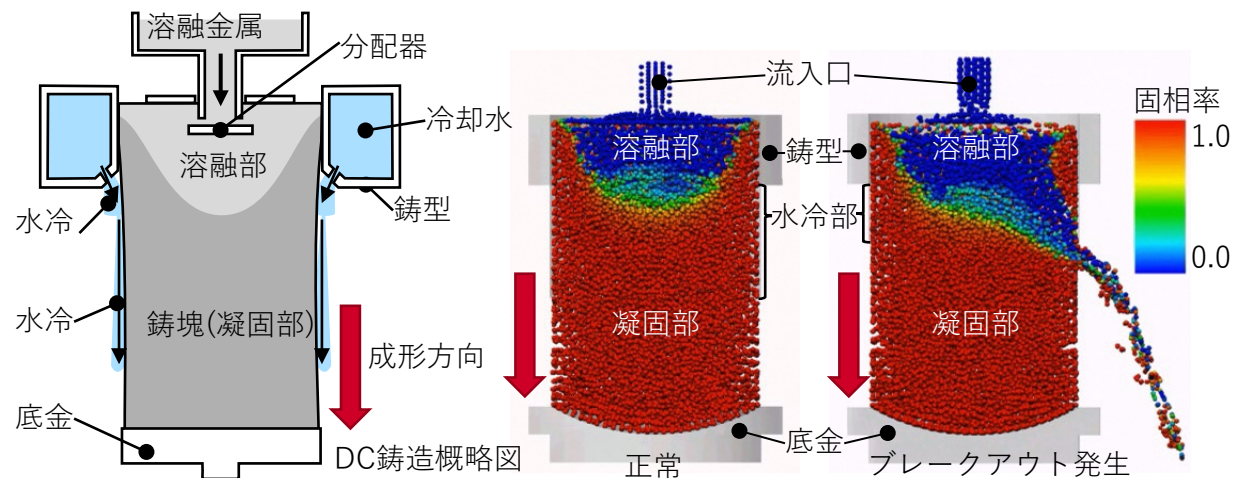


RGBベースで色を分解し、輪郭抽出を可能に

- 機械加工工具刃の摩耗を検出するシステムを構築
- 画像処理により、工具形状の稜線を明瞭化
- ➡ 工具交換時期の最適化などに活用できる

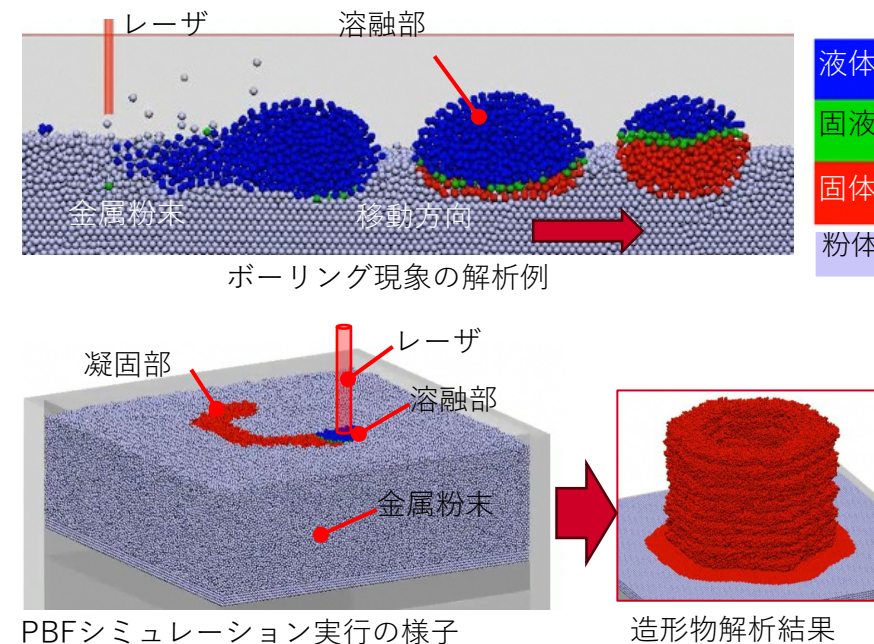
Modeling / Simulation

粒子法を用いた半連続鋳造シミュレーション



- 粒子法を用いて、
 - ・ブレイクアウト(表面から溶湯があふれ出る現象)を表現
 - ・非対称断面形状の鋳造を表現
- できるシミュレーション技術を開発
- ➡ 欠陥が生じない適切な造形条件の探索が可能

粒子法を用いた金属積層造形シミュレーション



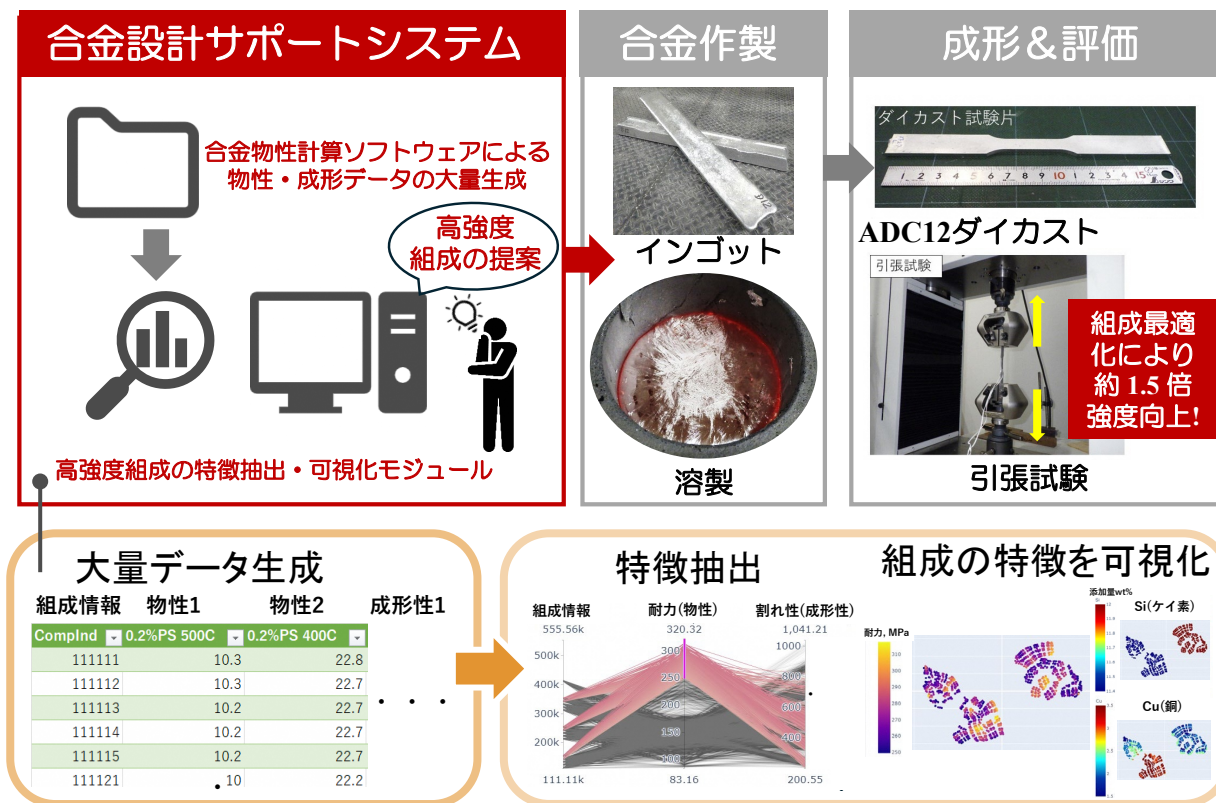
- 要素(粒子)サイズを粉末サイズにしたシミュレーション
 - ・粉末の状態変化
(解析終了まで未溶融粉末を粉として扱える)
 - ・造形物表面状態

を精度よく表現可能

➡ 表面欠陥・形状欠落を防ぐ造形条件の探索が可能

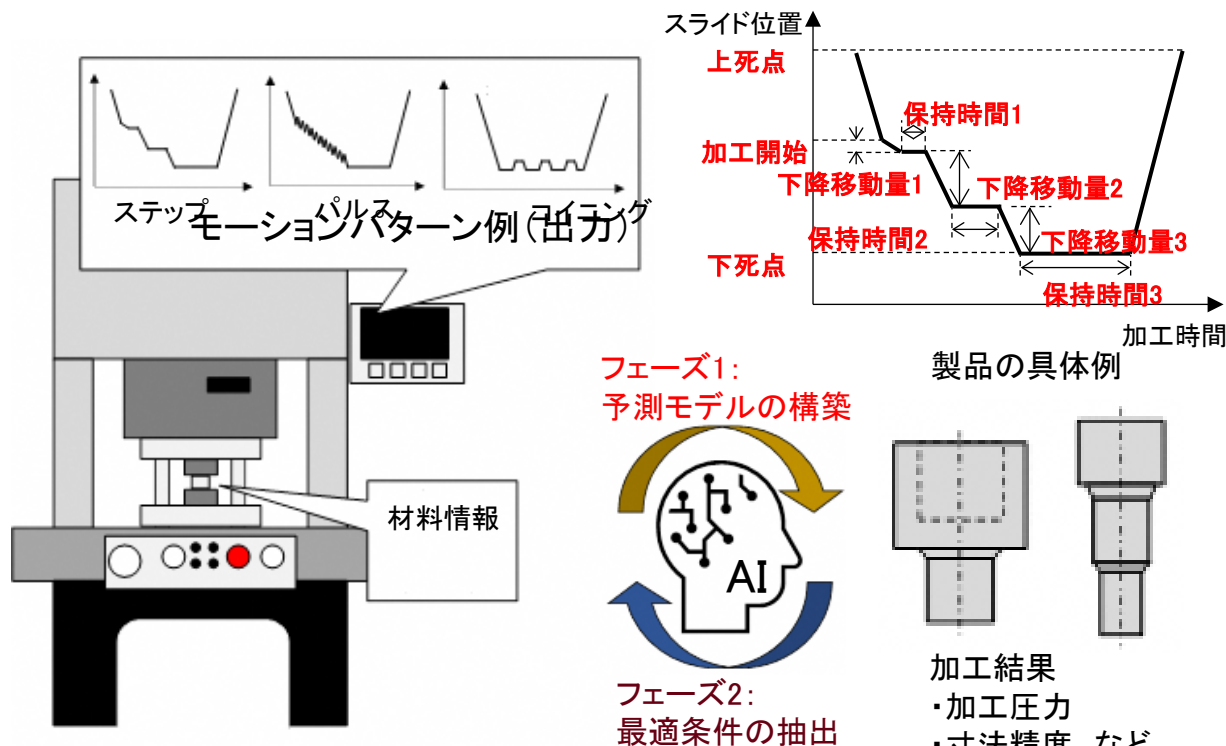
Modeling / Process Informatics

合金設計サポートシステム開発



- 合金物性計測ソフトウェアを用いて,
組成, 物性(耐力), 成形性(割れ性)のデータを大量生成
- これらの特徴抽出
→ 組成最適化による強度向上を実現

サーボプレスモーションの設計支援ツール



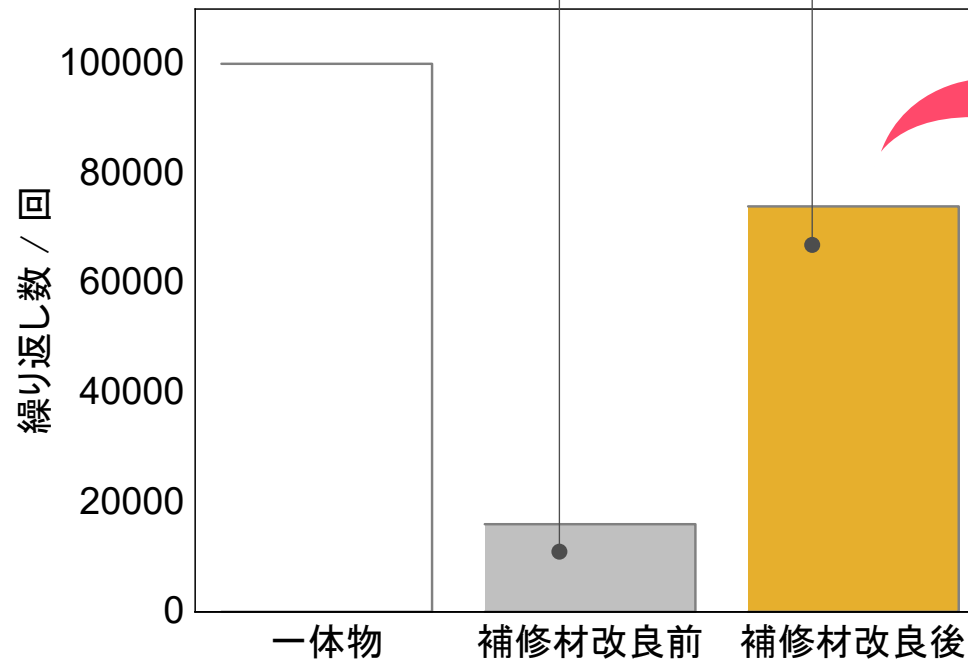
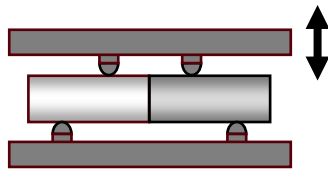
- 加工プロセスをモデル化
 - ・説明変数: スライドモーション
 - ・目的変数: 加工圧力, 寸法精度
- 良品率を高める最適モーション設計(開発中)

Remanufacturing

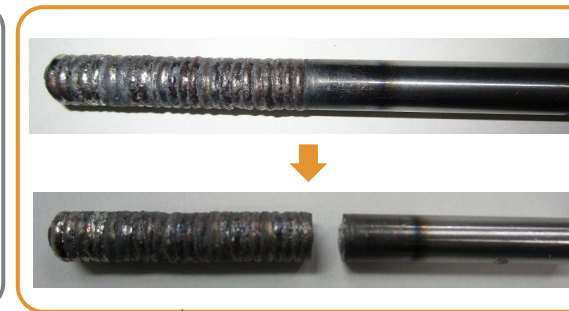
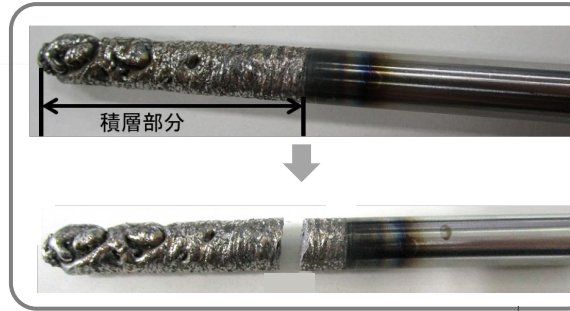
ワイヤDEDによる機器部品の修復

補修

繰返し曲げ試験
(4点曲げ)

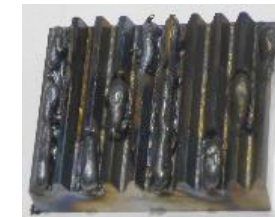


- 中実丸棒端部にDED方式で金属積層造形を施し, 約2倍に長尺化
- 造形条件の変更により, 繰返し曲げの耐久性向上
- ➡ 少しの補修で, (現状) 寿命を1.8倍に伸ばせる



【応用展開】機械部品の補修試行

■ ラックギア



■ パンチ欠損部

