

2023年度ロボット学会オープンフォーラム OF-15 製造・加工業における熟練者技術のDX化～AI化

研削加工の熟練者の技をAI化する

2023年9月11日

株式会社ナガセインテグレックス

常務取締役製造本部副本部長

板津 武志

研究開発の背景

(1) 研削加工の現状

- ・ 研削加工は他の機械加工よりも非常に高い加工精度、面品位、安定性が要求される。
- ・ 研削加工特有の砥石状況の変化が加工異常に直結し、加工中に加工者がマシンから離れられない。

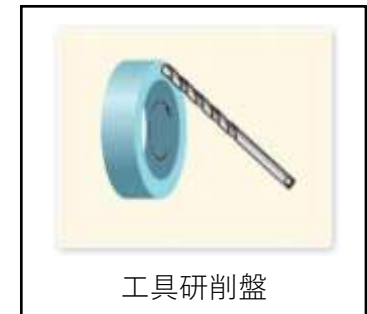
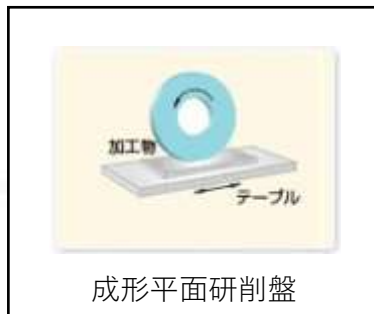
(2) 研削加工の課題

- ・ 研削加工に適用できる加工支援システムが存在せず、加工精度等の加工要求から研削条件を含む加工システムを構築するためには素材、砥石等の幅広い知識と多くの経験が必要であり、技能習熟までに10年間程度の長い時間を要する。
- ・ 加工状況の変化を効果的に検出できるシステムが存在しないため、熟練者の感覚に頼っている。

研削加工とは？

- 研削加工とは、様々な材料を砥石を使用して加工する加工方法である。
- 今回は、材料の種類が形状的には2種類で、加工方法などの組み合わせで4パターンある。
- 以下にその代表的な例を示す。

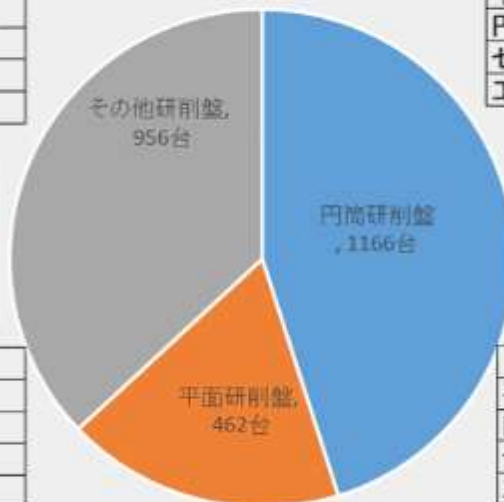
各社の代表的な加工内容



研削により加工されている部品

2020年数値制御研削盤生産台数

電機・電子・メカトロニクス	
平面研削盤	金型、モーターコア、電池
円筒研削盤	シャフト
センタレス研削盤	シャフト、ピン
工具研削盤	専用工具



電気自動車	
平面研削盤	金型、モーターコア、電池
円筒研削盤	シャフト
センタレス研削盤	シャフト、ピン
工具研削盤	専用工具



航空宇宙	
平面研削盤	タービンプレード、
円筒研削盤	ハウジング
センタレス研削盤	シャフト、ピン
工具研削盤	専用工具

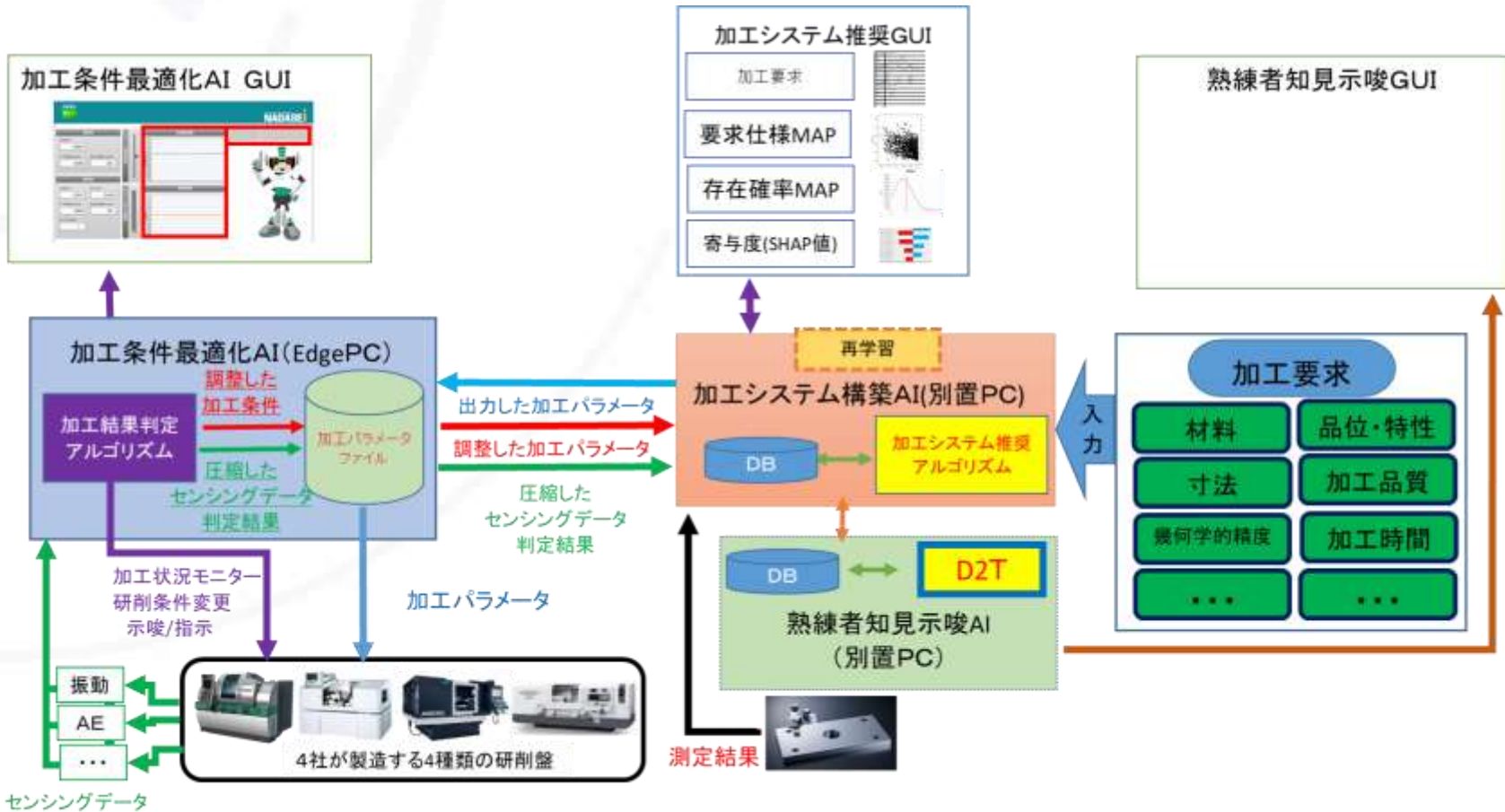
鉄道	
平面研削盤	歯車、金型
円筒研削盤	ハウジング
センタレス研削盤	シャフト、ピン
工具研削盤	専用工具

プロジェクトの特徴

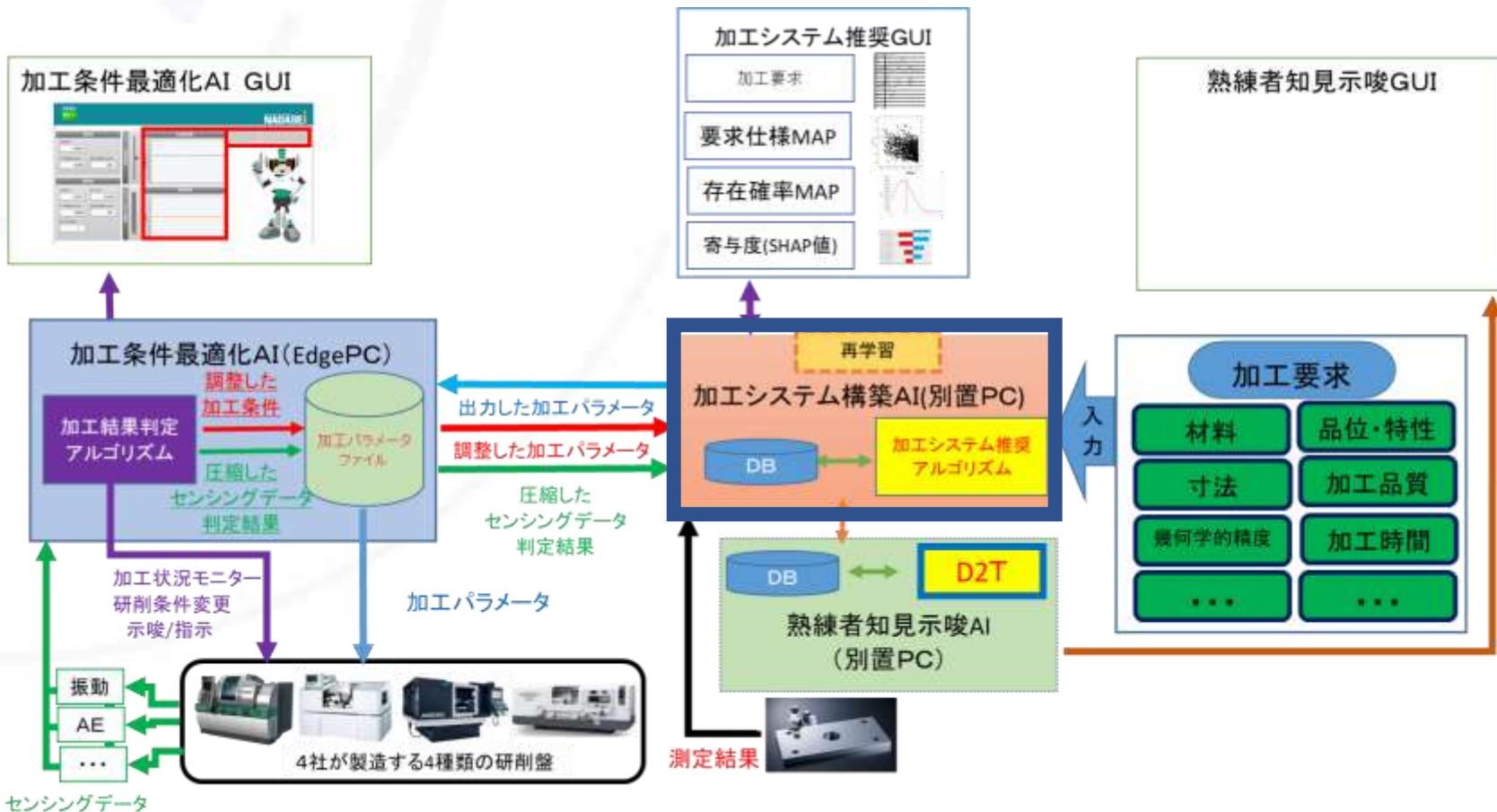
- このプロジェクトでは、工作機械メーカー4社と研究機関2機関でAI技術の開発を進めている。
- 最大の特徴は、機械装置は異なっても共通に使用できるシステムとして、開発を行っている点にある。それぞれの材料に対する、加工精度、品質などの加工要求項目に対して、予め各社でデータベースのひな形を作成することで、それぞれの機械装置に合わせたAIとして機能するシステムとなっている。
- また、要求仕様項目を設定して探索を行った結果として、加工に影響力のある項目から順に表示することで、加工について初心者でも、加工に対する影響力のある項目が加工を行う前に、学習できる。
また、要求仕様項目を選択し、項目値を変更することで、加工がどの様に変化するかについても、調整ができる。
- このことは、熟練者においても加工結果と加工時間の様な相反する項目に対して、最適値を探る手助けとなる。



研究開発概要



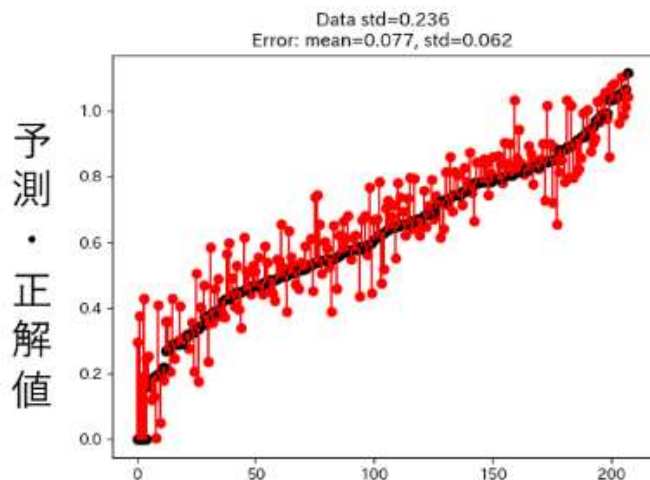
加工システム構築AI



- 要求仕様の入力に対して、加工システム（加工装置、加工条件、...）を出力するシステム。
- このAIシステムでは、探索した結果として、要求項目ごとに、寄与度（加工に大きく関与する順番）の順番に項目を表示する。
これらのパラメータは、値を変更することが可能で、熟練技術者はそれらの値を変更する事で、さらに良い推奨値の確認ができる。
また、非熟練技術者においては、パラメータの値を変更することで、加工結果にどの程度反映されるのか検討が付けられる。

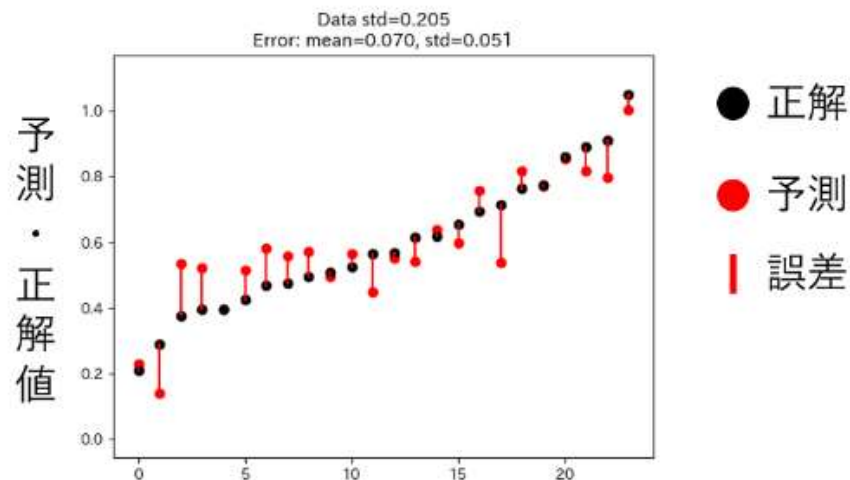
学習結果

訓練データ



データ番号（正解の値でソート）

テストデータ



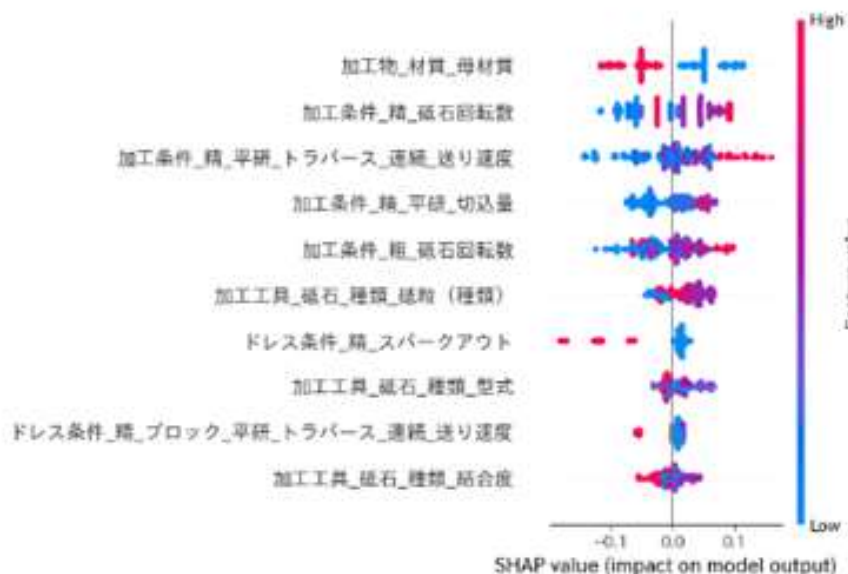
データ番号（正解の値でソート）

※図上のData stdはデータ全体の標準偏差， Error: mean, std はそれぞれ予測誤差の平均，標準偏差

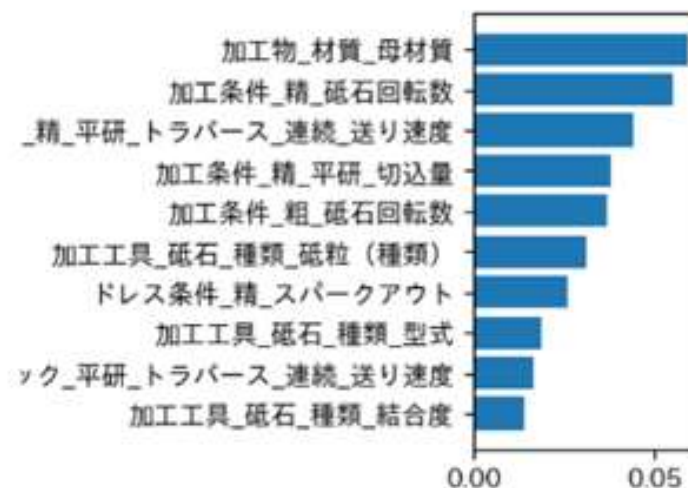
SHAP値による寄与度の算出

Shapley value (SHAP値) による寄与度

SHAP値



SHAP値：絶対値の平均



要求仕様の入力



精度 [戻る](#)

真円度 μm

精度

円筒度 μm

精度

表面粗さRa μm

精度

真直度 μm

精度

直角度 μm

精度

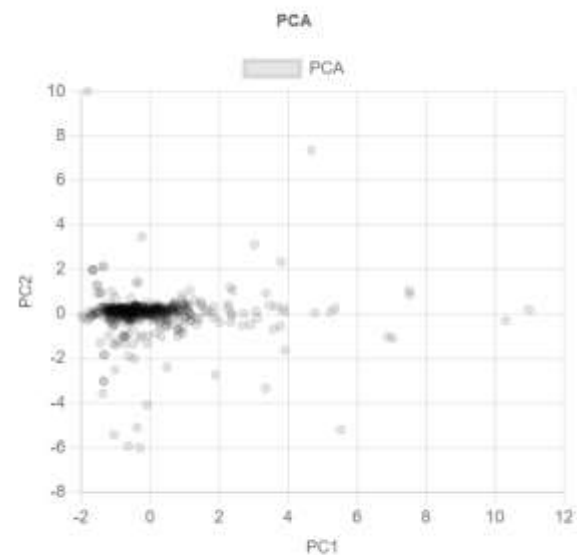
寸法バラツキ μm

能率

加工回数 回


能率

サイクルタイム s



加工結果予測（パラメータの修正、確認機能）





加工システム推奨AI

ホーム 学習データ / 加工データ / 要求仕様入力 user02 (ミクロン精密) ログアウト

影響度調整パラメータ

加工条件.研削条件 > 調整砥石回転数:

0 10.00 10

密与度: 0.4438

加工条件.GW詳細 > GW粒度:

0 10.00 10

密与度: 0.3717

加工条件.加工物 > 外径:

0 10.00 10

密与度: -0.1938

加工条件.加工物 > 全長:

0 10.00 10

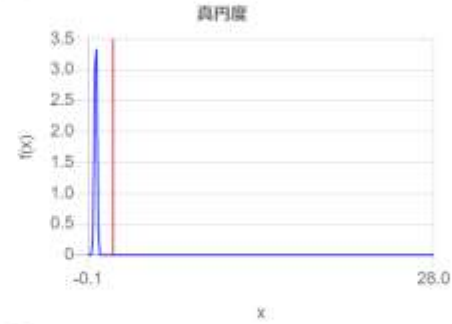
密与度: -0.1360

加工条件.仕上げ条件.粗減比:

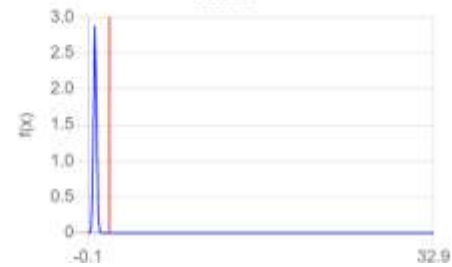
保存 戻る

加工結果推定グラフ

真円度



円筒度

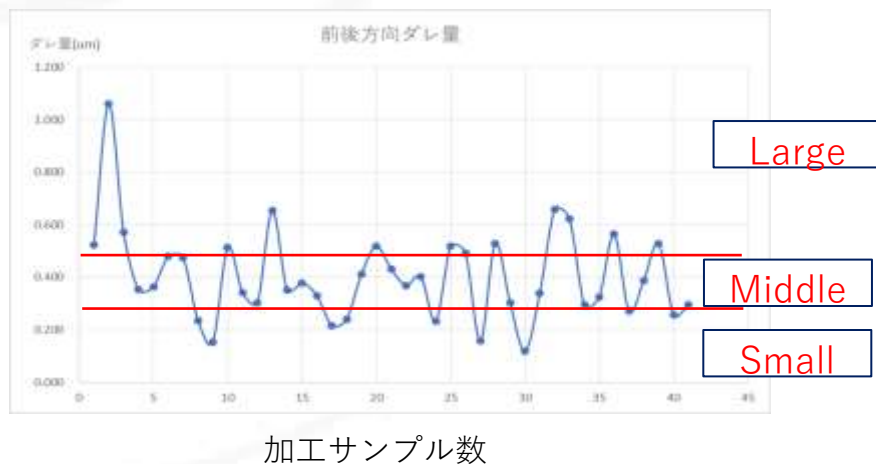


加工条件最適化AI

- 加工条件最適化AIの項目は、センシングとセンシングデータのAI処理、そして加工システムからのデータ処理などから成り立っている。
- 加工条件は、前述の加工システム構築AIより出力される。
- この加工条件により加工を行うと、センサーがその状況を監視する。
- そのデータをリアルタイムに判断することで、機械上で起きている現象が判断できる。
- 加工結果や信号の状況をまとめた物を、工条件最適化AIへフィードバックする。

研削抵抗による角ダレの検証 (ナガセインテグレックス)

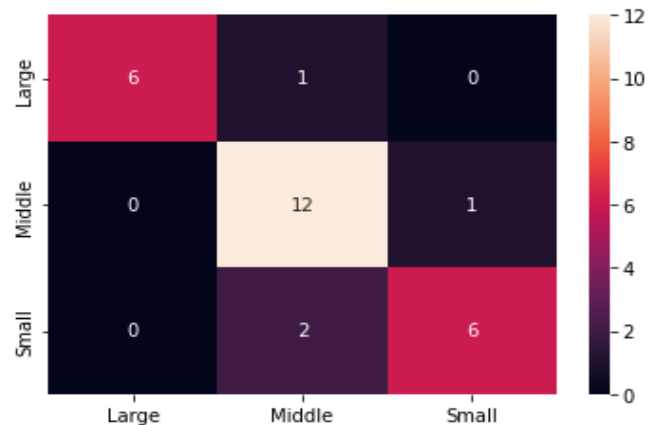
角ダレ量のしきい値決定



学習済みモデルの評価結果

正解率: 0.8571428571428571
適合率: 0.8857142857142857
再現率: 0.8434085934085934

正解率: 85%

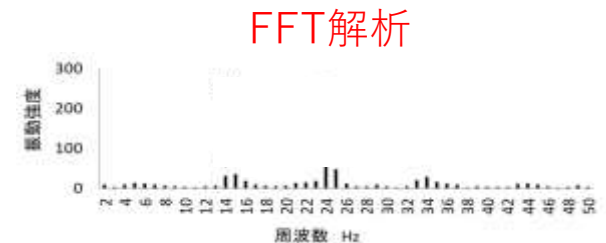
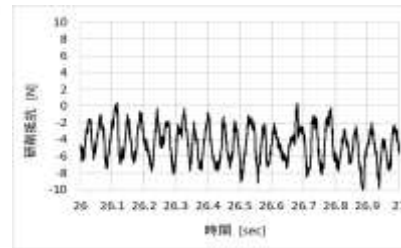
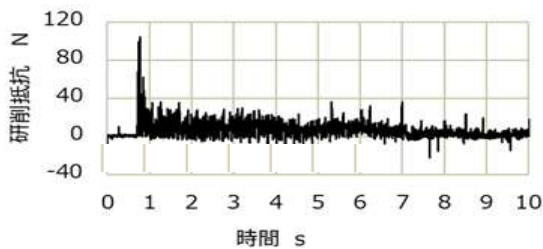


動力計による形状精度の検証 (ミクロン精密)

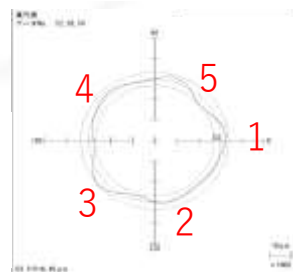
ワーク形状の可視化_加工精度との相関

Φ32外径研削_研削時間13sec 取り代0.2mm

機種 MPC-600C : 加工時の信号をFFT解析し多角形状を調査



加工精度測定結
FFT解析の5山成分と
真円度測定結果五角
形状が一致する

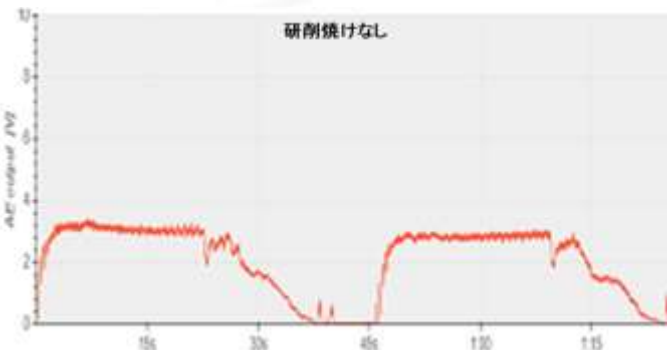
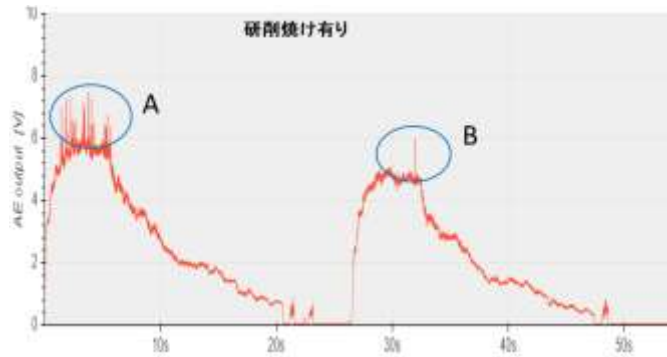


W径 32 mm 3山 × W回転数 = 13.92 Hz
R砥石径 330 mm 5山 × W回転数 = 23.20 Hz
R回転数 27 min⁻¹ G回転数 1256 min⁻¹
W回転数 4.64 Hz 1 ≡ 20.93 Hz

AE波による研削焼けの検証 (シギヤ精機製作所)



対象機械: GPD-20-43 (φ300 CBNホイール、幅30)



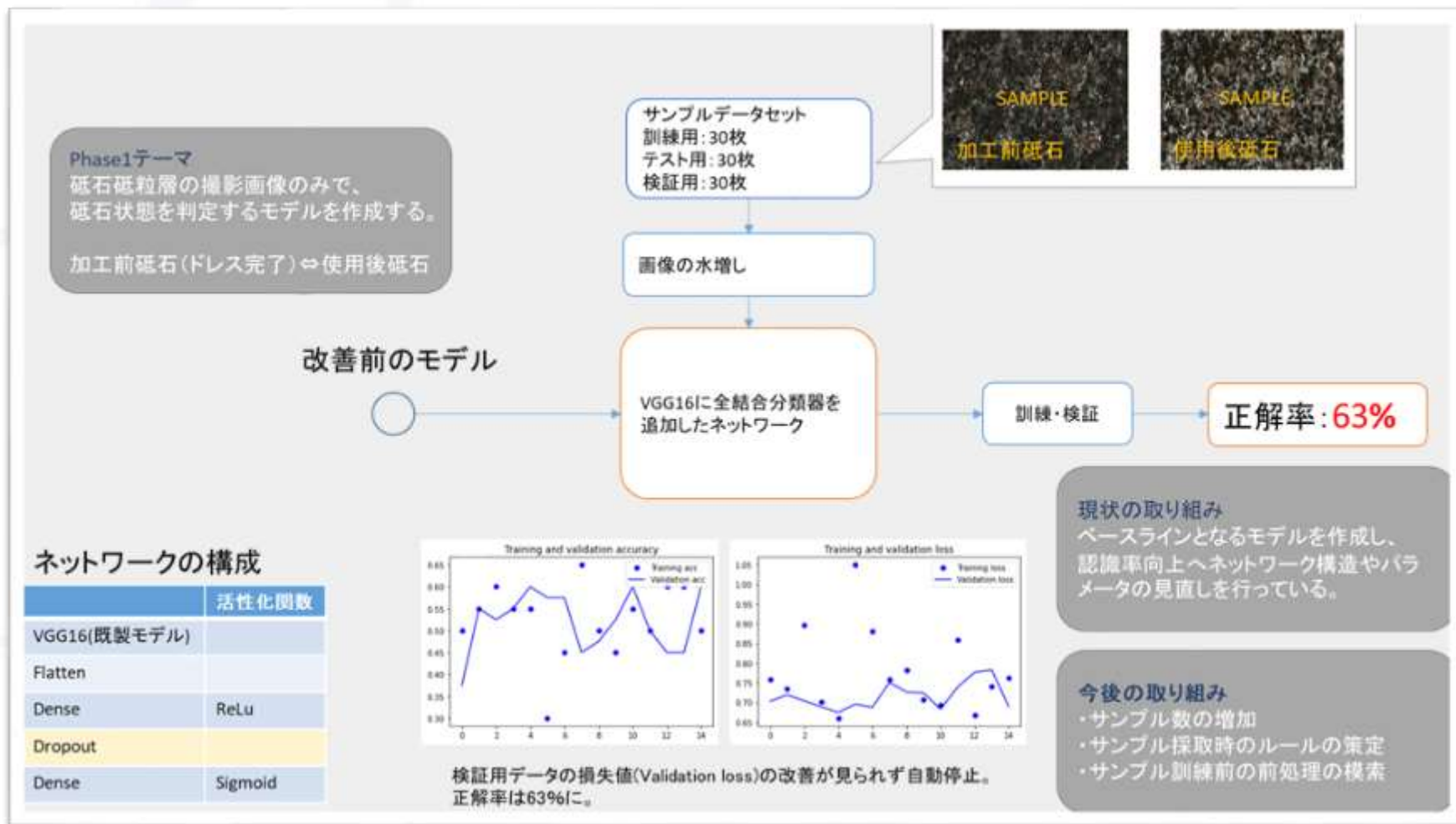
- ① AEセンサ(といし台取付): データロガー(キーエンス)
- ② インバータ電力(といし軸モータ): データロガー(キーエンス)
- ③ 表面粗さ: 粗さ測定器(東京精密)
- ④ 真円度: 真円度測定器(東京精密)
- ⑤ 焼け: 4段階評価
 - 有 1.0 : 研削部位に明らかな変色が見られた場合
 - 有 0.5 : 変色の程度は小さい(薄い)が、一見してそれと分かる場合
 - 有 0.1 : 一見して判別しにくい、よく観察すると変色が確認できる場合
 - 無 0 : 研削部位に変色が確認できなかった場合

- ① 粗研時の波形から特徴を見つける
- ② 基準波形から部分的に大きな値に注目(A)、(B)
- ③ 各種分析処方で見える化(作業中)

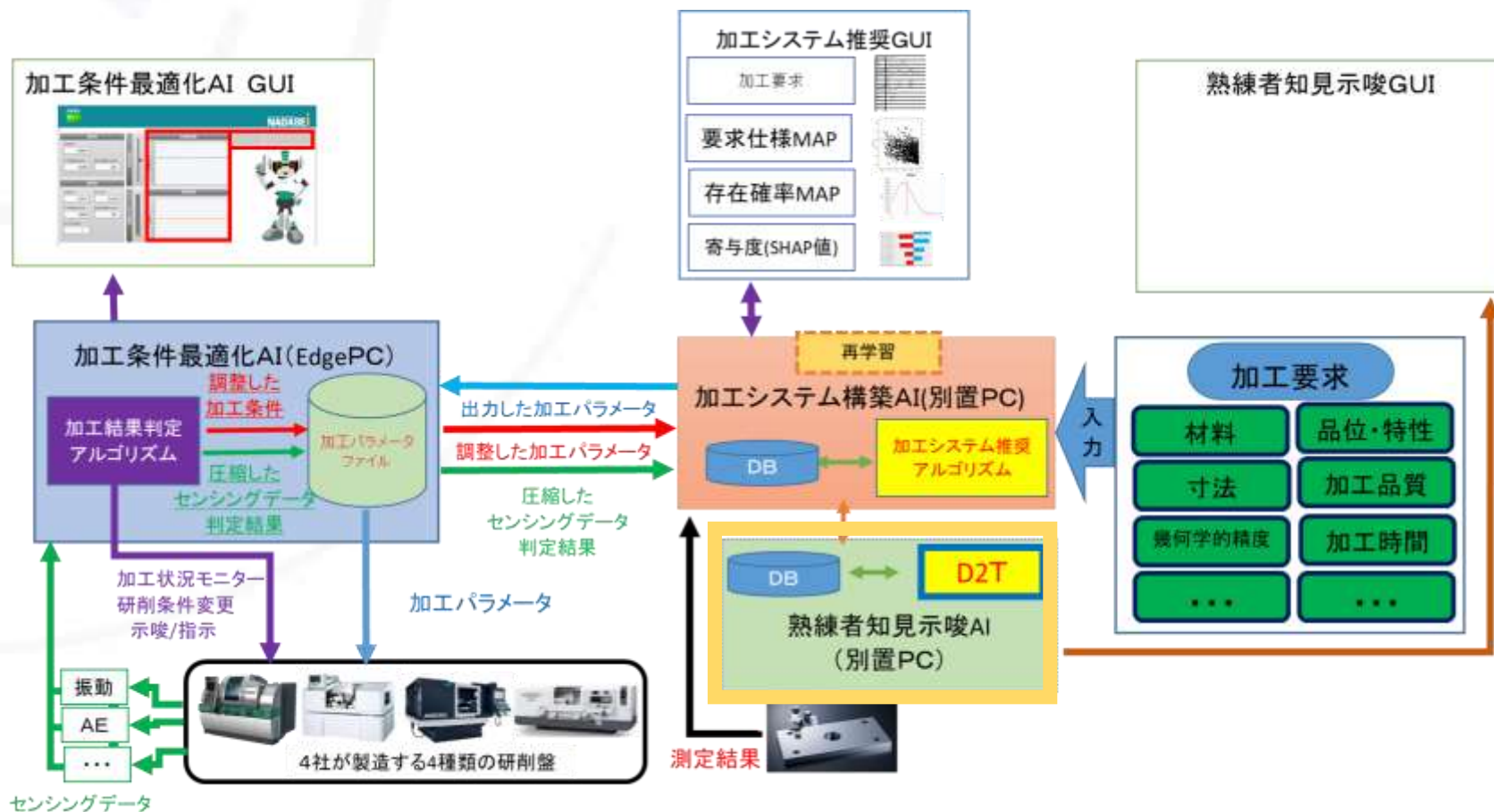
データ分析結果と研削焼け解析モデル評価

- ① 条件53種のうち36種で研削焼け有り(1.0,0.5,0.1)
- ② 教師あり機械学習プログラム開発
- ③ 研削焼け特徴量データをAI学習用に生成
- ④ 教師学習データ作成
- ⑤ 研削焼けAIモデル評価(作業中)

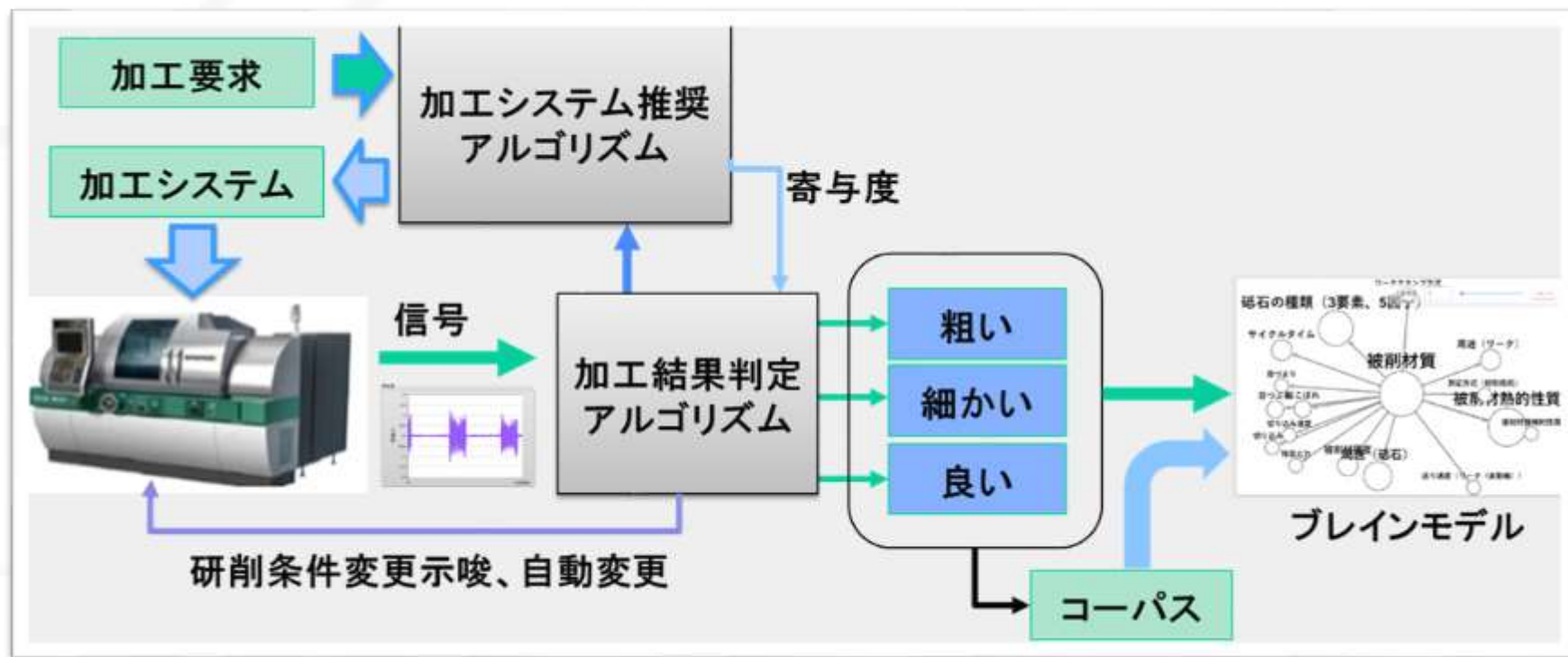
ドレス完了砥石を AI を用いた画像判断の検証 (牧野フライス精機)



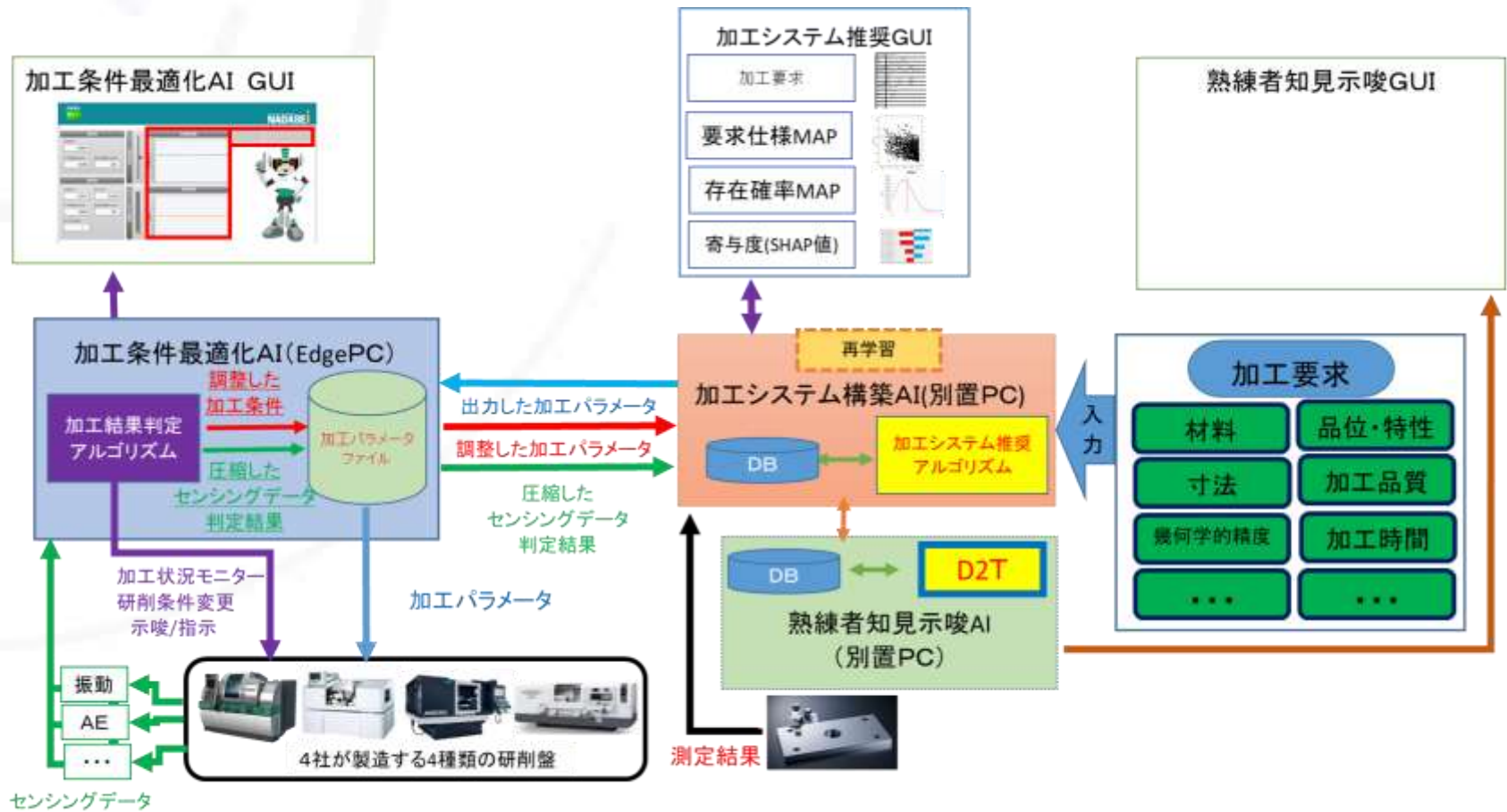
熟練者知見示唆AI



センシングデータから問題点抽出へ



フィードバックされた条件からさらに良い条件を求める



今回の研究で得られた成果

- 加工システム構築AIでは、加工を行うための加工条件算出（通常は、人が条件を考える事）が従来の工程よりも格段に早くなり、従来であれば数+時間かかった加工システムの構築が、たったの数分で終わった例もある。
今後は更なる精度向上を図る。
- 加工条件最適化AIでは、限定的ではあるがセンシングデータを用いて加工状況を把握できるようになった。
今後は条件変更を促す段階に進め、最終的には自動化を目指す。
- 熟達者知見示唆AIは現在も開発中であり、加工結果に問題が発生した際に問題の解決手法を提示できることを目指している。
- 更に、加工パラメータ、センシングデータ、測定結果を加工システム構築AIにフィードバックして再学習を行うことが可能な仕組み作りを目指している。
これにより、自社での結果を学習データに反映させ、より良い結果を生み出すことが可能となる。

- 本テーマにおけるDX化～AI化の課題

教師あり学習を使用したAIシステムでは、教師データの数によって、モデルの精度が大きく影響を受けるため、膨大なデータを集める必要があることが課題と言えます。

- 今回のNEDOプロジェクトで得られた成果、実用化・事業化の見込み

実用化は、最初にテーマに参加した研削盤メーカー4社で行い、次いでマシンユーザで行う。実用化、事業化は企業4社で構成するAI研削推進会議が主導し、工具である砥石の製造メーカーなどの周辺機器メーカーも参画する実証委員会を設立して進める。

- 今後の研究開発の方向性

今回の研究で実施した加工条件の算出、加工状態の判定、結果に基づく加工条件や加工システムの提案などが、急速な発達を遂げているLLMをつなぎ合わせて使用する事で、今まで以上に性能の良いAIシステムが構築できるのではないかと期待しております。

- その他特記事項

今回、4社と2機関による開発を行いました。この開発当初は、共通の仕様になる様に、言葉などの統一を図るなどしていましたが、言葉の統一ではなく、メーカー毎に異なる表現を、システム側で考え方を統一できるように開発を行いました。

END