

技術論文

超高速・高精度プロファイル研削盤の開発

Development of ultra high speed, high-accuracy profile grinding machine

齋尾 克男
Katsuo Saio
森本 茂夫
Shigeo Morimoto
有壁 剛生
Takeo Arikabe
板東 賢一
Ken-ichi Bandou
辻村 真治
Shinji Tsujimura

自動車エンジンのカム形状加工に用いるプロファイル研削盤は、エンジンの高効率化要求に伴う特殊形状加工の実現と高精度化という性能面の課題と、製造ラインにおける設置面積削減と高剛性化の両立という構造面の課題を併せ持つ。

このたび、コマツ固有技術である振動解析、熱・流体解析、制御技術それぞれからのアプローチで、プロファイル研削盤のベッドおよび砥石軸最適構造による低振動・高剛性化と、研削加工しながら加工精度を予測する超高速・高精度新型研削盤の技術開発をコマツ NTC（株）と共同で行ったのでそれを紹介する。

Profile grinding machines used for machining automobile engine cams are required to have performance to shape special contours at a higher accuracy that can meet demands of higher efficiency in engines, as well as a structure to achieve both reduction of installation area and high rigidity.

We would like to introduce our technology development conducted in cooperation with Komatsu NTC. Approaching with vibration analysis technology which is unique to Komatsu, together with thermo-fluid analyses and control technologies, low vibration and high rigidity have been achieved by optimizing the structure of the profile grinding machine bed and its abrasive wheel spindle. A new ultrafast, high-accuracy grinding machine capable of predicting machining accuracy while performing grinding has been developed.

Key Words: プロファイル研削盤, 振動, 熱・流体, 制御, カム

1. はじめに

近年、自動車のEV化が注目される一方で、自動車メーカーにおいては引き続きエンジンの技術革新を推進し、高効率化によるCO₂排出量の削減を進めている。高効率エンジンを製造するには、それを加工する工作機械の性能の向上も必須となる。

そこで、エンジンカムを高精度に研削加工するプロファイル研削盤を対象とし、これまでにない、超高速・高精度加工と、後工程である検査工程をも加工工程に取り込む事を可能にした革新的機能を付加した装置の開発を実施した。

以下に、その技術開発の概要、および技術的特長について紹介する。

2. プロファイル研削盤

2.1 プロファイル研削盤の構造と加工方法

カム用プロファイル研削盤の構造と加工の概念図を図1および、図2に示す。ワークの中心軸上に複数並んだ卵型形状をしたカム部分の表面が加工対象である。低速で回転するワークに対して4,000~6,000 rpmで回転するφ350 mm程度の砥石をサドル上で前後させて高精度なカム形状の加工を行う。

一つのカムについて砥石台を複数回前後させて粗加工、および仕上げ加工を行う。加工が終了すればサドルを横方向に移動させて順次カム部分を加工していく。

一箇所のカムに対して加工時間は10秒程度と短時間で加工が要求される装置である。

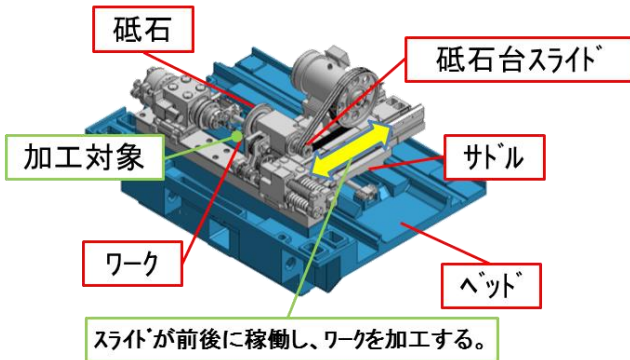


図1 カム用プロファイル研削盤の構造

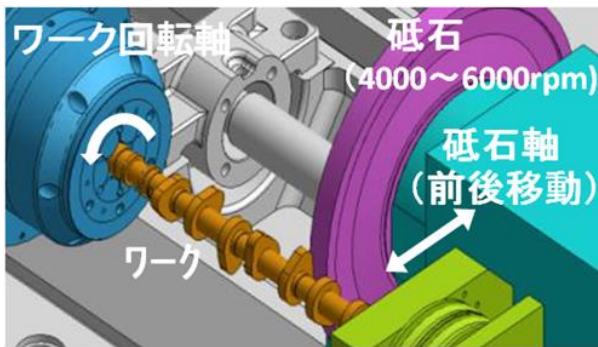


図2 カム加工の概念図

2.2 プロファイル研削盤の課題

カム形状は円形部分とエンジンバルブを上下させる凸部分からなる。砥石台の前後動作とワークの回転動作を同期させて加工するが、図3に示した様に、形状の変化点(点b, 点c, 点d)で装置剛性, 制御性能に起因する形状誤差(プロファイルエラー)が発生しやすい。また, 砥石に残留する微小なアンバランスにより砥石に回転振れが発生する。これがカムの加工面にびびりとして転写される。これらを削減することがカム用プロファイル研削盤の大きな課題となっている。さらに生産性向上のために加工速度の向上および設置面積の削減が望まれている。

2.3 形状誤差への部位別寄与度と対策方針

カム加工面の形状誤差は、図4に示すように主に3つの部位の寄与が高い。最も影響が高い部位は砥石軸で、軸および軸受の連成した剛性が関与している。二番目は砥石台で、静圧ガイド脚部剛性とその剛性によるクリアランス変化が関与している。三番目はベッドやサドルから成る構造系であり、ベッドねじれ振動および、ベッド曲げ振動の共振による動剛性の低下が関与している。

加工精度を向上させるには、まずは寄与度の高い3つの部位の構造を変化させ高剛性化する構造対策が考えられるが、目標の加工精度を達成するには、質量の増加, 軸径の大幅アップ等の背反が大きいことが予想された。

そこで、構造対策, 起振源対策, 制御対策の3つのアプローチを並行して実施することで目標加工精度を達成する対策方針を採用した。

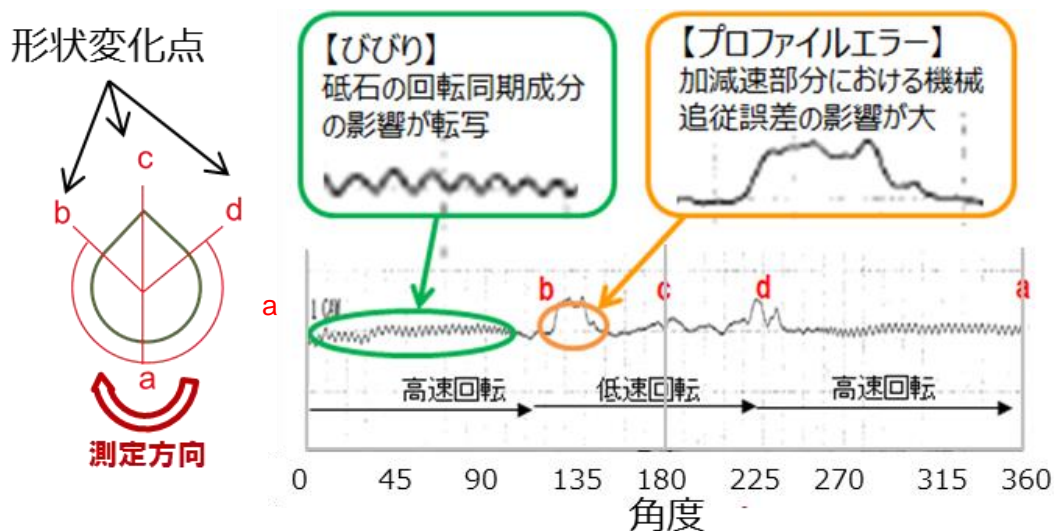


図3 加工面の形状誤差

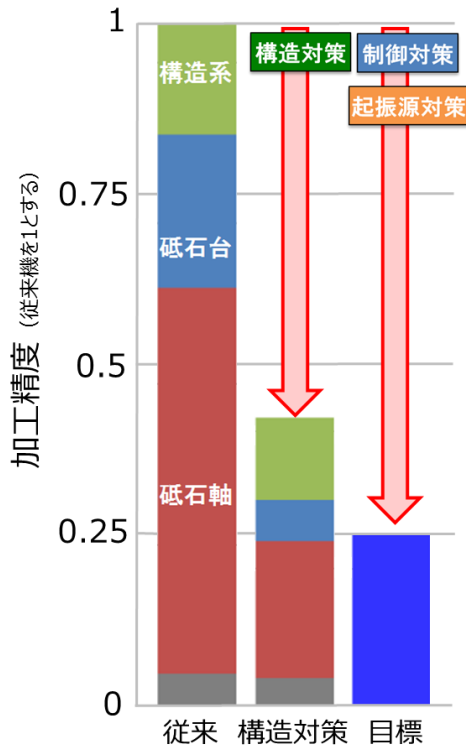


図4 加工精度の部位別寄与と対策方針

3. 構造対策

3.1 砥石台静圧ガイドの高剛性設計

従来機の砥石台静圧ガイドは図5の静解析結果のように静圧による脚開き変形が発生しており、脚部剛性が不足していることが判った。

さらに、この変形によって静圧ガイド面の隙間が変化し、図6のように設計値に対して実際のガイド剛性が大幅に低下することも判明した。

これらを改善するため、開発機では静圧ガイド脚部の肉厚増加と、一つの脚に対して両側から静圧を付加する構造を採用している。

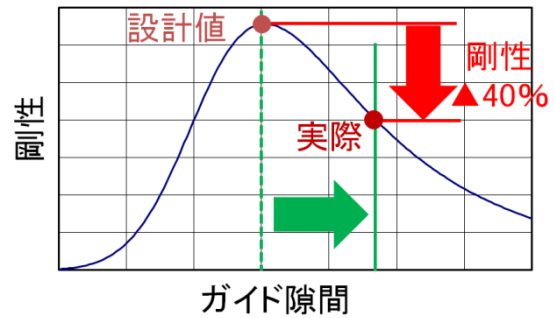


図6 静圧ガイド隙間による剛性変化

3.2 ベッドの最適設計

図7は従来機と開発機のベッド動剛性解析結果を比較したものである。砥石軸回転周波数に構造系の弾性固有振動数が存在すると、動剛性が低下し形状精度劣化の原因となる。

そこで、開発機においては最低次弾性モードの固有振動数が砥石軸使用回転周波数の範囲外になる構造を、FEMによる最適化手法により検討して採用している。

図8は最適化設計のフローを示している。図8(a)のように無垢形状を用いた固有値解析を行い、そこから得られた要素密度指標が図8(b)である。この図において赤部位は剛性寄与が高く、青部分は寄与が低いことを示している。そのため、青部位を削除すれば剛性を維持したままでの軽量化が可能であり、最低次固有振動数を高くする設計が可能となる。この手順によって図8(c)のような前面V型の3点支持形状が得られ、この構造を開発機に採用している。

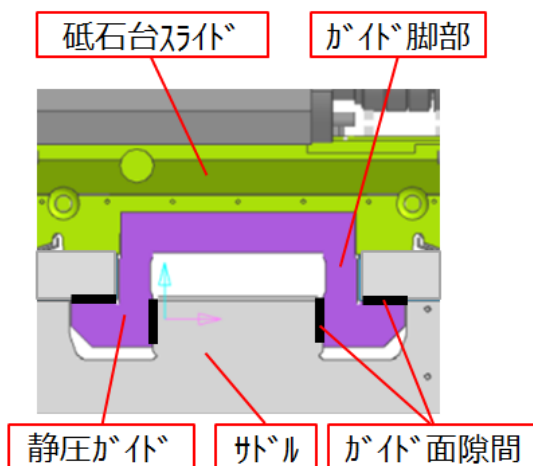
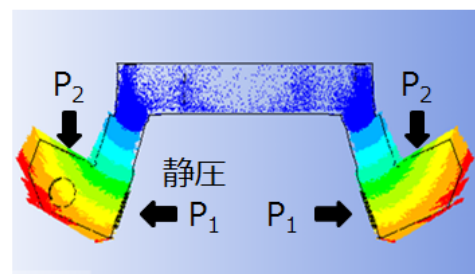


図5 静圧ガイド構造と脚部静解析



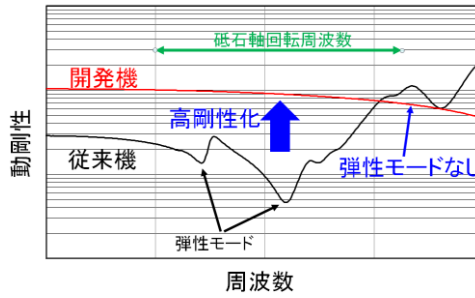


図7 ベッド動剛性解析結果

「ハット」最適化の例

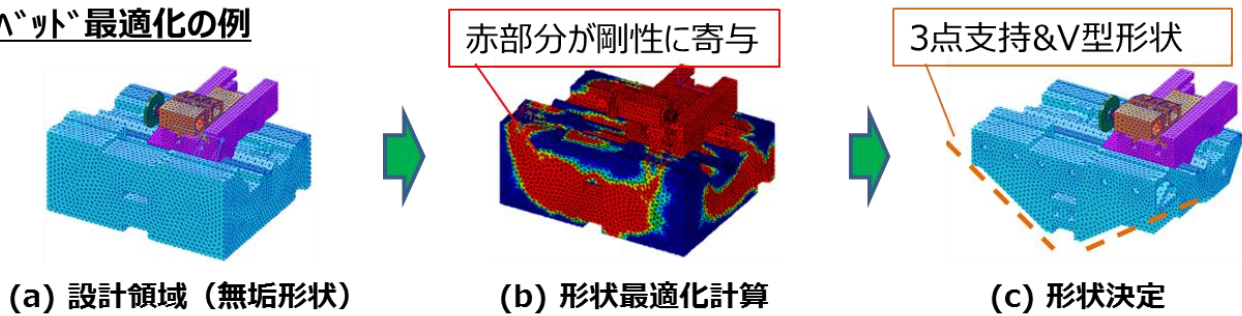


図8 ベッド最適化設計のフロー

3.3 砥石軸（軸および軸受）の高剛性化

従来機において、図4に示した寄与度分析から分かるように、砥石軸は加工精度に対する寄与が非常に大きく高剛性化が必須の重要部品である。この砥石軸動剛性は軸自身の剛性と軸受剛性の両者が影響するため、これらを考慮した砥石軸動剛性予測技術を確立し、従来比2倍の動剛性を目指し高剛性化を図った。

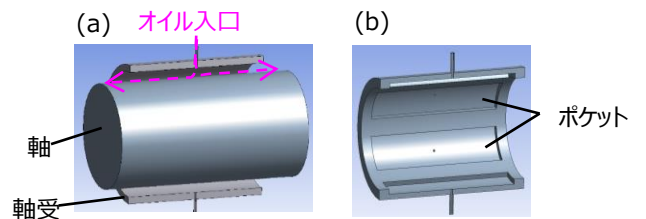
ットにより軸受内部での温度が抑制されていることが確認できる。軸受直径と長さが同じ場合、軸受剛性は軸受隙間が狭いほど、ポケット面積が小さいほど軸受剛性は高くなるが、軸受内部温度上昇も大きくなる。このため軸受内部温度上昇を抑えつつ軸受剛性向上が見込める軸受隙間とポケット形状について、CFDを用いた形状最適化による軸受設計を行った。

3.3.1 軸受解析

砥石軸に用いる軸受は図9(a)に示すような軸と軸受の間の狭い隙間にオイルを圧送し、隙間に発生する静圧と動圧により支持するハイブリッド流体軸受を採用している。古くから流体軸受設計にはレイノズル方程式と呼ばれる近似式が用いられているが、単純形状の解析に限られているため、本研究ではComputational fluid dynamics (CFD)を用いた3次元熱流体解析モデルを構築し軸受設計を行った。CFDを用いる利点は以下の通りである。

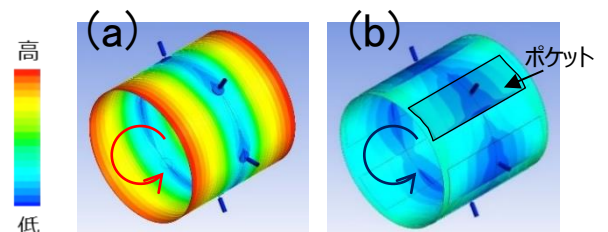
- ・研削盤特性を考慮した複雑なポケット形状、配置や不等間隔な軸受オイル供給ノズル配置が可能
- ・軸受剛性低下要因となる局所的な負圧発生の確認が可能
- ・高速回転に伴う粘性発熱によるオイル粘度低下を考慮可能

図10に代表的な流体軸受形状についてCFD解析の実施例を示す。図10(a)は真円軸受、図10(b)はポケット付軸受(図9(b)参照)の軸受温度分布である。ポケ



(a) 軸と真円軸受, (b) ポケット付軸受の例

図9 流体軸受構造



(a) 真円軸受, (b) ポケット付軸受

図10 解析例：軸受温度分布

3.3.2 砥石軸動剛性解析手法

次に加工精度悪化の要因である砥石アンバランスに伴う軸の振れ回りに影響を与える砥石軸回転中動剛性の予測手法を示す。軸と軸受を併せた砥石軸動剛性は下記 2 ステップにより予測した。

- ① 軸受特性の導出：CFD により砥石アンバランスに伴う微小振動 e による流体反力 f を解析し、この結果と下記流体反力の釣合い式から軸受減衰 c 、ばね定数 k を予測 (x, y : 回転軸に垂直な平面)

$$\begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix}$$

- ② 回転中動剛性：上記①で導出した軸受特性を用いて、アンバランス力に対するロータダイナミクス解析を実施、主軸回転数に対する軸と軸受を併せた動剛性を予測 (図 11)

CFD から回転数に依存した軸受特性を与える

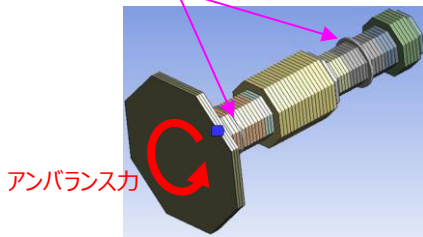


図 11 ロータダイナミクス解析

3.3.3 砥石軸動剛性の予測と実機測定と比較

上述の解析手法を用いて、開発機の砥石軸および軸受構造の検討・最適化を図り、実機検証を行った。図 12 は従来定格回転数基準の砥石軸動剛性比を、また図 13 はオイル温度上昇比を示す。実線は解析予測、記号は実機測定結果である。これより解析予測と実測結果はほぼ一致しており、本予測手法の妥当性が確認できる。そして、開発機では従来機に比べ、オイル温度上昇は同等に抑えながらも砥石軸動剛性は約 2 倍に向上し、目標動剛性を達成した。

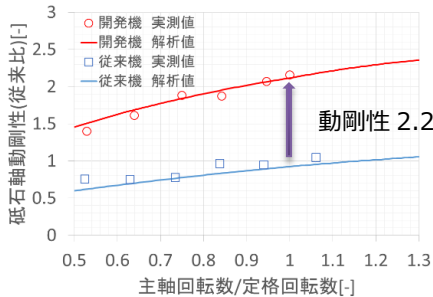


図 12 砥石軸動剛性比

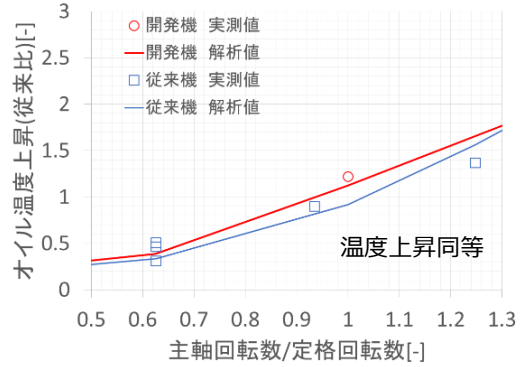


図 13 軸受オイル温度上昇比

4. 起振力対策

4.1 砥石台モーション最適化

プロファイル研削盤には、構造系の弾性モードのほかに設置剛性に起因する剛体モードが存在しており、その固有振動数はおよそ 20~30 Hz である。加工時には砥石台が前後に動いてカム形状を創生する機構のため、砥石台の慣性力を受けて剛体振動モードが励起されることになる。

開発機では図 14 のように砥石台加速度を滑らかに変化させることで加速度高周波成分を小さくするアルゴリズムを採用しており、剛体振動モードの発生を 1/4 以下に抑制できている。

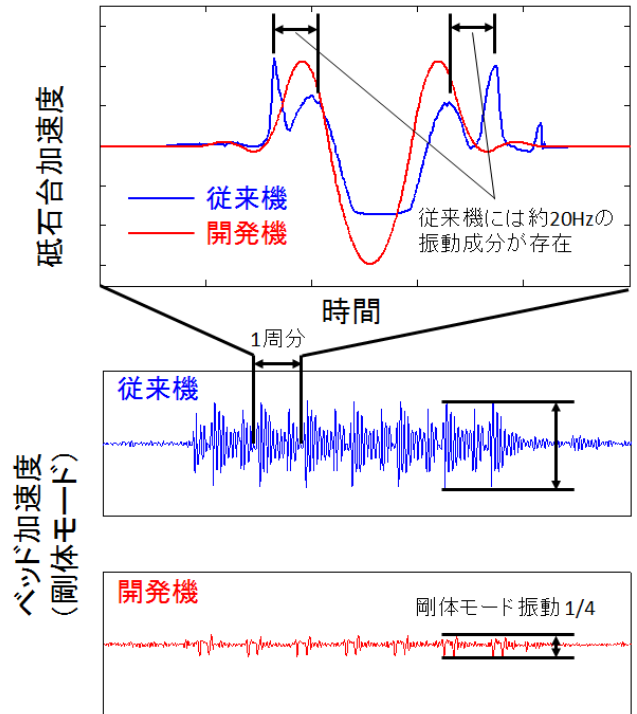


図 14 砥石台加速度と剛体振動

5. 革新的サーボ技術の開発

本章では、加工精度を自ら予測・補償する制御技術「RT-VISION (商標名) : Real Time - Virtual Quality Control System on Machining」について説明する。図 15 は、RT-VISION を搭載した研削盤の開発機である。



図 15 「RT-VISION」を搭載した研削盤

5.1 新サーボ

図 16 にコマツ NTC 社製コントローラで構成した「高速汎用通信 EtherCAT を用いた PC ネットワーク化サーボシステム」を示す。本コントローラは、加工中の全情報のリアルタイムフィードバックとその全情報を用いた大規模な高速演算（後述の RT-VISION）を可能にする。

本コントローラ内に機械に最適・ロバストな独自の高度な制御手法を組み込むことによって制御性能の改善（高速化と形状誤差低減）を図る。図 17 に従来の市販サーボと新サーボの制御性能（偏差）の比較を示す。新サーボは、粗加工の高速領域において特に制御性能が高い。また、実加工では、加工時間短縮 30%と形状誤差低減を同時に達成している。

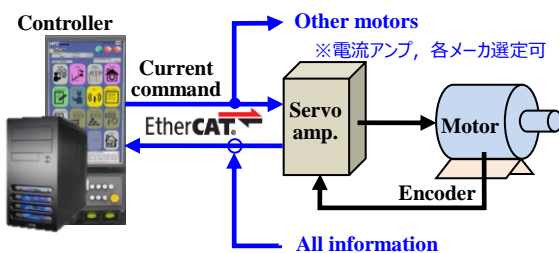


図 16 高速汎用通信 EtherCAT を用いた PC ネットワーク化サーボシステム

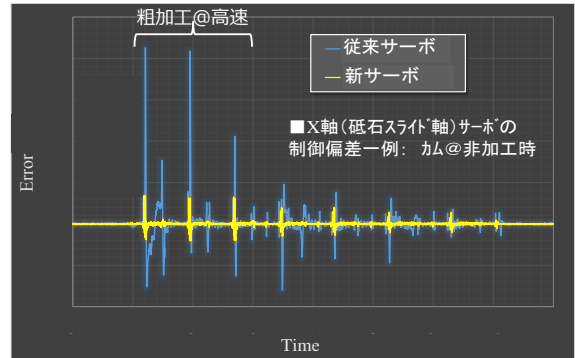


図 17 新サーボの制御性能

5.2 RT-VISION

図 18 に RT-VISION の概念を示す。従来の市販サーボはモータの位置・速度を高精度に制御する。これに対し、RT-VISION は、ワークの出来上がり加工品精度をリアルタイムに予測しながら加工中にその精度を自動補償する。砥石とワークの接触によるカム研削の場合、加工品精度がワーク撓み、砥石アンバランス、カム形状、および加工条件等によって劣化する。リアルタイムに計測できない加工品精度は、カルマンフィルタ応用等で精度とロバスト性の向上を図った「Virtual Metrology」(以後、VM と呼ぶ) によって 1 [ms] 以下のサンプリングで予測可能である。図 19 は VM の NC 画面であり、カム研削盤の加工品精度である形状誤差とびびりの他、重要な加工の状態量も見える化できている。図 20 に後工程の測定機による形状誤差と VM の予測による形状誤差の比較を示すが、よく一致していることがわかる。また、図 21 に砥石アンバランス (研削加工におけるびびり発生の主要因) 有無のときの加工表面と VM の予測によるびびりの比較を示す。これらの図から、構築した VM は加工品精度を高精度に予測している。

次に、VM のリアルタイム予測値を用いてカム研削の加工品精度を自動補償した結果を示す。図 22 は、VM とサーボを連動させた自動補償によって、びびりと形状誤差を改善した結果である。びびり制御 (自動補償) は、1 [μ m] 精度でカムの輪郭を制御しつつ極表面のびびりを加工中に自動で取り除くことができる。以上の図から、RT-VISION の VM および自動補償を搭載した研削盤は、加工中に品質管理可能であることがわかる。

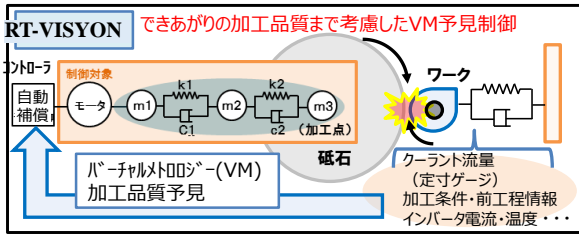
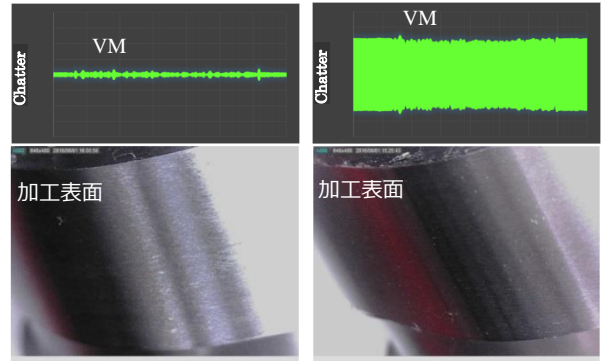


図 18 RT-VISION の概念



(a) 砥石アンバランス無 (b) 砥石アンバランス有

図 21 VM のびびりの予測精度



図 19 VM の NC 画面 (加工品精度の見える化)

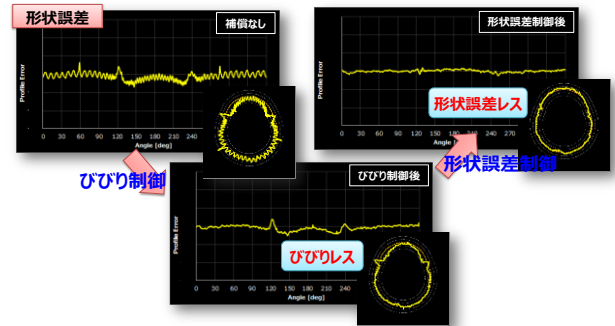


図 22 「VM+自動補償」による加工精度の改善

6. まとめ

表 1 に、本技術開発で達成した改善性能を示す。

表 1 改善性能一覧

項目	改善性能 (従来比)
砥石軸動剛性	2倍
加工精度 (形状誤差)	70% 改善
加工精度 (びびり)	40% 改善
加工時間	30% 短縮

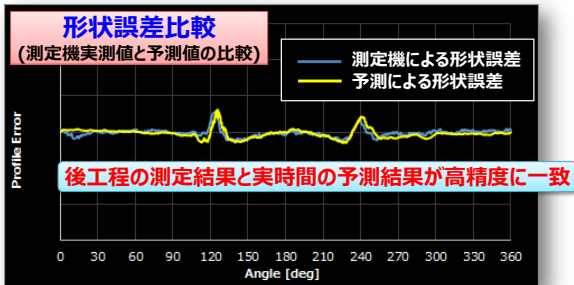


図 20 VM の形状誤差の予測精度

以上、このたび新たに開発した 超高速・高精度プロファイル研削盤の概要と、その技術的特長について紹介した。

コマツ開発本部技術イノベーションセンタの固有技術である振動解析、熱・流体解析、制御技術をフル活用して開発を行い、市場ニーズに合わせるだけでなく、世界初の革新制御技術を織り込み、差別化を図った装置が開発できたものとする。今後は、コマツ NTC のプロファイル研削盤ラインナップへの水平展開だけでなく、他機種への展開も視野に開発を継続予定である。

参考文献

- 【1】 「プロファイル研削盤 PX3560」コマツ NTC(株)
製品カタログ

筆者紹介



Katsuo Saio
齋尾 克男 1992年, コマツ入社.
開発本部 技術イノベーションセンタ



Shigeo Morimoto
森本 茂夫 1983年, コマツ入社.
開発本部 技術イノベーションセンタ



Takeo Arikabe
有壁 剛生 2004年, コマツ入社.
開発本部 技術イノベーションセンタ



Ken-ichi Bandou
板東 賢一 1997年, コマツ入社.
開発本部 技術イノベーションセンタ



Shinji Tsujimura
辻村 真治 2001年, コマツ入社.
開発本部 技術イノベーションセンタ

【筆者からひと言】

2014年度下期から2016年度にかけてコマツ開発本部技術イノベーションセンタとコマツ NTC 開発本部とが一丸となって取り組んだ『コマツ NTC プロジェクト』の成果を紹介させていただきました。本プロジェクトでは、開発完了まで担当者全員参加のテレビ会議を毎週開催し、その回数は通算 100 回を超えました。振り返ればそこでのディスカッションは互いの進捗、問題点、方針を共有し、開発のベクトルを合わせる重要な場であった様に思います。プロジェクトは完了し、現在は研削盤の派生テーマにて共同開発を実施中です。もちろん、毎週の定例 TV 会議は継続して実施中です（開催記録更新中）。