

高精度ワングランプ研削を追求した CNC 複合円筒研削盤 KELLENBERGER シリーズ

1. はじめに

欧州では日本に先駆けてワングランプ全加工のモノづくりが進み、旋盤やマシニングセンタだけでなく研削盤もその流れを受け機械の開発が行われてきた。ワングランプ加工の利点は主に3つあり、1つ目は多工程を一工程に集約することで、一度のセットアップでサイクル完了まで無人加工が可能となり、省人化が見込めること。2つ目は、多工程間で発生していた段取り作業や精度管理、仕掛在庫が不要となり、それを管理する手間や時間、人、場所を省くことができ、付加価値のない工程を削減することで、工場の生産性が向上すること。そして最後に、複雑形状を加工する場合、同じクランプ基準で加工ができるためワークの直角度や同軸度、真円度の高精度化に置いて優位性を持っていることが挙げられる。

昨今、モノづくりの現場では、ワークの複雑化や高精度化に加え、変種変量生産に短納期で対応しなければならないという課題を抱えており、研削加工業界も例外ではない。その解決策として、「ワークを1台で仕上げる」というコンセプトは理想的な加工方法の1つとして考えられ、ワングランプ加工に応える複合研削のニーズは高まっている。しかし要求精度の高い複雑部品をワングランプで研削するためには、多工程に対応する砥石の自由度や再現性に優れる砥石の割出し、複数軸の同時制御、多様なワークサイズに応える機械剛性が必要となる。

本稿では、複合研削技術の発展を100年以上にわたり牽引してきたスイス・ケレンベルガ社の複合円筒研削盤 KELLENBERGER1000 を例に、同機で実現される付加価値の高いワングランプ加工技術を紹介する。

2. KELLENBERGER (ケレンベルガ) シリーズ

スイスのケレンベルガ社は1917年に Mr. Leonhard Kellenberger により創業され、翌1918年には汎用 B 軸付き円筒研削盤、1945年には同社研削盤の代名詞である油静圧スライドを採用した円筒研削盤が製造されている。ケレンベルガの複合円筒研削盤は世界1000台以上の販売実績を誇り、特に要求精度の厳しく、形状が複雑な工作機械向けのスピンドルやツールホルダなどのアプリケーションにおいて高い評価を得ている。全てのケレンベルガ機は例外なくスイスの工場で70%以上の内製率をもって製造されており、製造コストの低減ではなく、品質を徹底的に追求した機械づくりがユーザの精密加工を支えている。故に、ハイエンドモデルのみならずコストパフォーマンス機でさえ、真円度0.4 μ m以下(オプションで0.2 μ m)を保証している。現在同社の CNC 複合円筒研削盤 KELLENBERGER シリーズからは、コストパフォーマンスモデルの KELLENBERGER10、ミドルレンジの KELLENBERGER100、そしてハイエンド機の KELLENBERGER1000 の3機種が展開されている(図1)。

3. 高精度加工を支えるこだわりの機械仕様

3.1 油静圧軸受がもたらす剛性と優れた研削面

研削盤の直動案内に求められる要素としては、スライ



KELLENBERGER1000

- 外径、端面、内面、ねじ、ポリゴン
- センタ間距離 1,000/1,600mm
- センタ高さ 200/250/300mm
- 両センタ最大荷重 300kg



KELLENBERGER100

- 外径、端面、内面、ねじ、ポリゴン
- センタ間距離 600/1,000mm
- センタ高さ 200mm
- 両センタ最大荷重 150kg



KELLENBERGER10

- 外径、端面、内面、ねじ研削
- センタ間距離 1,000mm
- センタ高さ 200mm
- 両センタ最大荷重 100kg

図1 : KELLENBERGER1000 (左)、100 (中央)、10 (右) 外観

ドの動作を妨げる摩擦が小さいこと、ワーク荷重や研削負荷に耐えること、研削や軸動作を起因とする振動を吸収できること、そして初期精度を長期間維持できることが考えられる。

KELLENBERGER1000 では、切込み X 軸、長手 Z 軸、砥石台回転 B 軸に油静圧軸受を採用しており、油静圧軸受の面当たりが生む高剛性と油膜がスティックスリップ現象を抑制する。最大荷重 300kg のワークを片持ちで、切込み X 軸は 0.1 μ m の位置決めが可能である (図 2)。この優れた振動減衰性と高い追従性により、2 軸補間でも、テーパ部の面粗さ Ra0.05 を達成する (図 3)。さらに、摺動面に機械的な接触がないことで、部品摩擦が発生せず、導入時の機械精度を長期間にわたり維持する。

3.2 ダイレクトドライブ (DD) モータと油静圧軸受の砥石台

KELLENBERGER1000 の砥石台回転 B 軸は、減速機がなく、

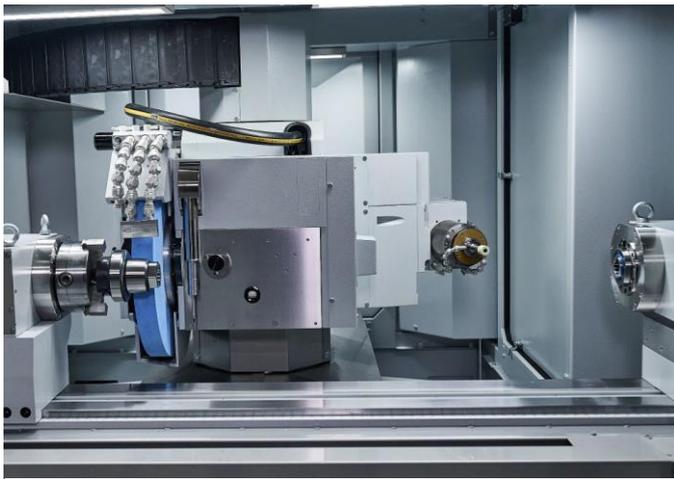


図 2：ゆとりある機械内部 (主軸台/左手前、砥石台/中央、

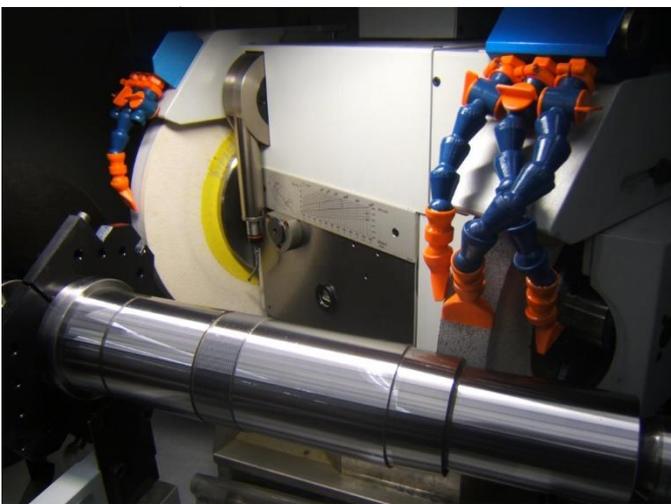


図 3：2 軸補間によるスピンドルテーパ部の研削

歯車やベルトの振動・バックラッシュを排除した DD モータを採用しており、振動減衰性に優れた油静圧軸受と組み合わせることで、位置決め精度 0.0001 度以下を長期間にわたり維持する。さらにオプションの油動圧軸受の砥石スピンドルが振動を抑制し、砥石形状の形崩れを防ぎ、優れた研削面を達成する。また割出し回転速度はハースカップリングと比べ約 3 倍の速度で回転するため、非生産時間が短縮され、砥石ポジションの切り替えが頻繁に必要な加工時でも、高い生産性をもたらす (図 4)。

3.3 精度の安定性を生むマシンベッド

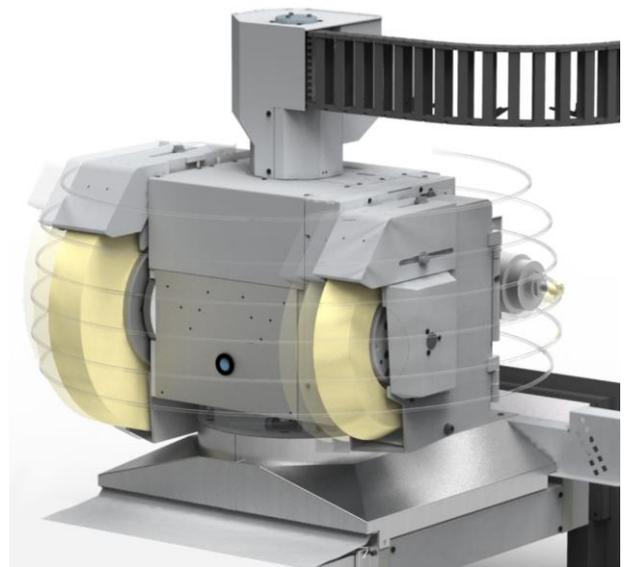


図 4：油静圧軸受と DD モータ搭載の砥石台回転 B 軸

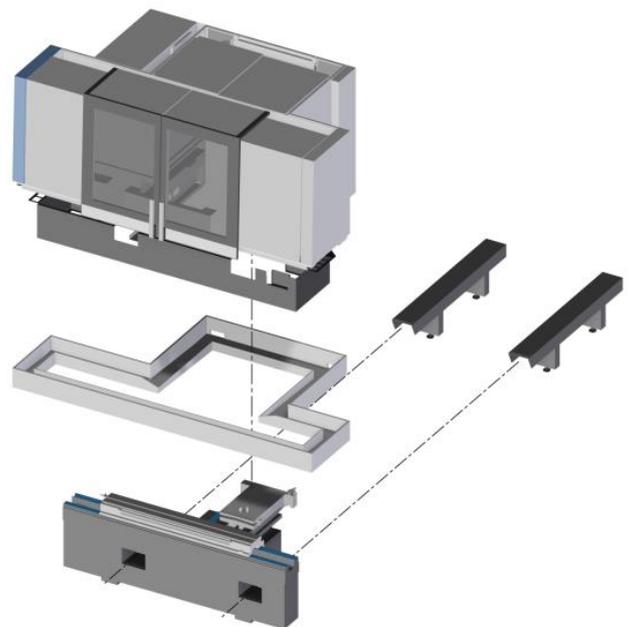


図 5：マシンベッドが分離された機械設計

全てのケレンベルガ機は、機械カバーを含む加工エリアと機械ベッドがメカ的に接触しないよう完全に分離されている（図5）。加工熱により温度が上昇した研削用クーラントが機械ベッドにかからないよう設計されており、機械内部に搭載された温度管理機能と合わせて、熱変位の影響を最小限に抑える。機械ベッドのスライド部は、クーラント液の熱の影響だけでなく、機械カバーからの振動も遮断されるため、精度の安定性に寄与する。またFEM（有限要素法）解析に基づく三点支持構造の鋳物マシンベッドにより機械の剛性と重量バランスが最適化され、機械の長寿命化にも寄与する。

4. 卓越したワックランプ全加工・複合研削を実現する機能

外径、端面、内面、ねじ、ポリゴン研削といった多工程に分けて複雑形状部品を研削するのとは比べ、ワックランプ全加工には、ワークや工具の段取り時間を省けることや、ワーク原点が加工中維持されるため、ワーク着脱による精度劣化がないといった利点がある。ただし複雑形状をワックランプで全加工するためには、多様な砥石の選択肢や複数の軸を活用した複合研削が必要となってくる。

4.1 内外径・ポリゴンに定める複合加工能力

ワックランプ全加工を実現するためには、アプリケーションに適した砥石を可能な限り多く搭載することに加え、複雑な軸動作に応える複数の軸の同時制御が肝要となる。KELLENBERGER1000は、外径、端面、内面に加え、X-Z 2軸補間のテーパ研削、X-Z-C 3軸同時制御のねじ、ポリゴンの3軸同時制御の研削に対応する（図

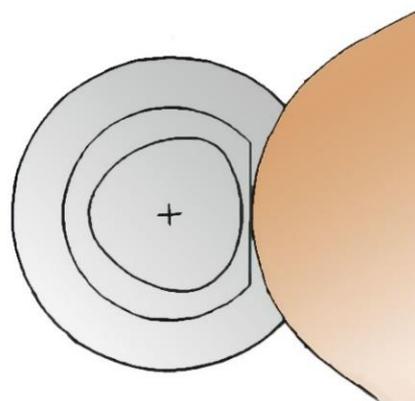
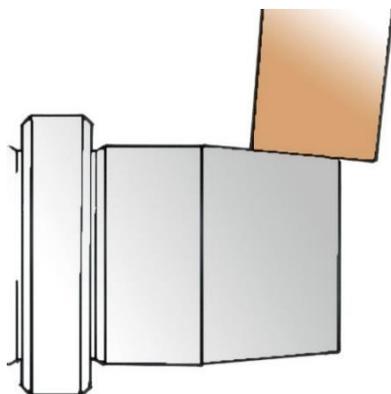


図6：X-Z軸の2軸補間によるテーパ研削（左）、X-Z-Cの3軸同時制御によるポリゴン研削（右）

6)。

4.2 高効率複合研削を生む研削点制御機能

複雑部品をワックランプで加工する複合研削の場合、砥石の加工点基準で砥石ヘッドが旋回し、ワークに対し砥石が無駄な動作なく効率的に研削を行うことが理想である。一般的に砥石ヘッドは、旋回基準で制御されるため、ストレートからテーパの加工時に一旦セーフティポジションへ回避し、位置決め後に加工プロセスに入る。

KELLENBERGER100と1000専用オプションである特許取得済み砥石測定・管理機能（図7）は、砥石の外径、左右側面、テーパ、B軸旋回時の砥石研削点をセンサで計測することで、研削点基準による加工を可能とし、砥石はセーフティポジションへ回避せずに、ストレートとテーパを効率的に連続加工することができる。無駄な機械動作を省くことで、精度が向上し、加工時間の短縮も実現する。特に、目視による干涉確認が困難な内面のテーパ加工に有効で、作業性が格段に改善する。

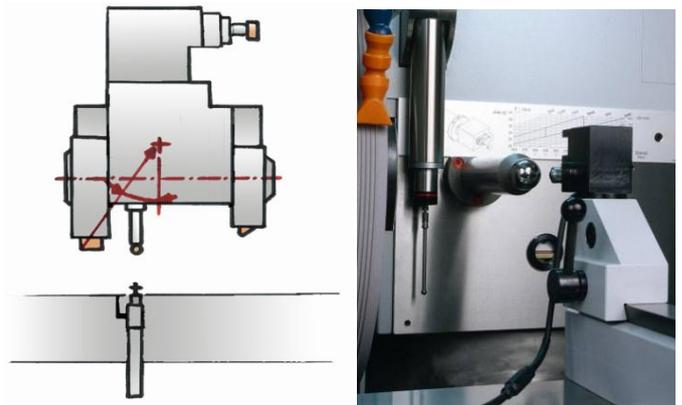
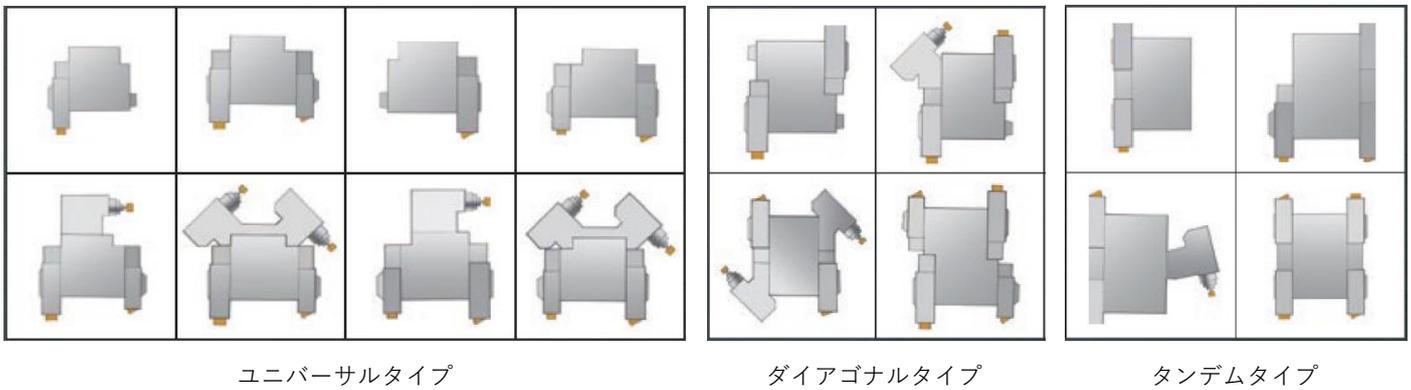


図7：砥石を研削点基準とした高効率研削



ユニバーサルタイプ

ダイアゴナルタイプ

タンデムタイプ

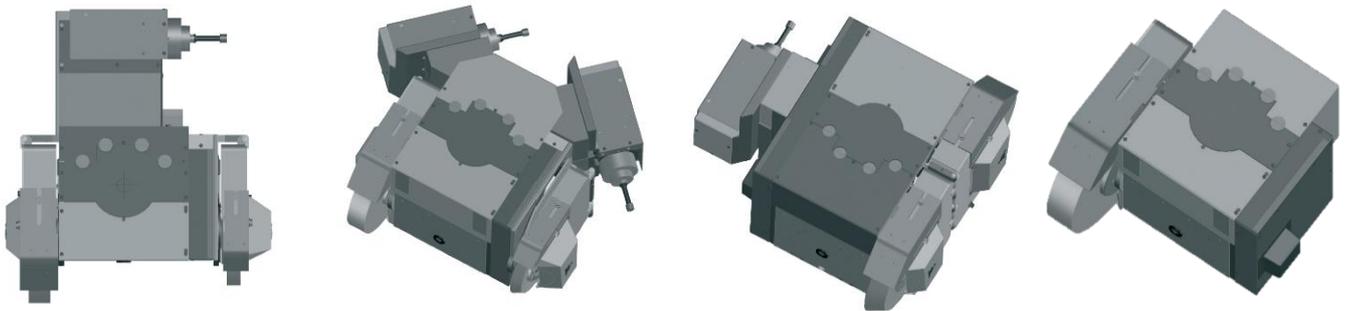


図 8：ワークに最適な砥石レイアウトが選択可能

4.3 ワークにあった最適な砥石台の選択

20 以上の豊富なバリエーションから選べる砥石台のレイアウトは、100 年にわたり複合研削を追求してきたケレンベルガの軌跡であり、最適な砥石で幅広いアプリケーションに応える（図 8）。砥石搭載枚数や種類が多いほど、ワークランプで加工を完結できるワークの選択肢が広がる。また加工時間が短縮されるだけでなく、段取り替えによる精度劣化も回避でき、ワークの品質が安定する。KELLENBERGER1000 には、汎用性が高く干渉リスクを軽減できるレイアウトのユニバーサルタイプ、粗・仕上げの砥石を対角位置に配置するダイアゴナルタイプ、そしてストレートとアンギュラ研削を行うのに最適なタンデムタイプの砥石台が用意されている。

4.4 作業性が向上するテーブル側面固定式ドレッサ

安定した研削条件や形状精度を保つためには、砥石のドレスは欠かせない。主軸台、心押台への固定だけでなく、アーム式の採用により、テーブル側面へのドレッサ搭載が可能になった（図 9）。単石ダイヤモンドや総形、高周波ロータリなど様々なドレッサをテーブル全長に渡り任意の位置に複数設置することができる。主軸台や心押台にドレッサが搭載されている場合、ワークサイズが変わる度にドレッサのセットアップが再度必要になるが、テーブル側面に固定した場合は、一度取り付けしたドレッサを動かす必要がない為、ワーク

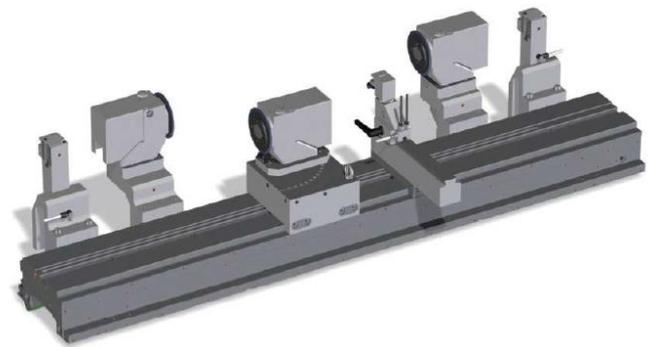


図 9：選択肢が豊富なドレッサ

毎の段取り替えや新たなドレスサイクルの設定が不要となる。

4.5 複合研削からポリゴン研削まで網羅するソフトウェア群

複合研削はワークランプで様々な加工ができる一方、プログラミングが複雑化し、時間を要することが多い。KELLENBERGER シリーズでは直感的な操作が可能な独自開発の対話式プログラミングソフトウェアとシミュレーションソフトウェアを用意している。

4.5.1 BLUE Solution(ブルーソリューション)

標準搭載の BLUE Solution は、加工プログラム、インプロセス測定を含む複雑な複合研削のサイクルにおいても、プログラムを手入力する必要がなく、マウスクリックと諸元入力だけでプログラムを作成することができる。複合研削に不慣れなオペレータでも短時間で

プログラミングを行うことができ、リードタイムの削減にも繋がる。

4.5.2 RED Solution(レッドソリューション)

多様な研削プロセスに柔軟に対応する RED Solution は、加工プログラムのカスタマイズが可能で、研削プロセスの最適化、サイクルタイム短縮に寄与する。また変種変量生産の現場では機械の稼働率を向上させるため機外での加工プログラムの最適化が事前に求められる。

4.5.3 BLACK CAM Solution(ブラックカムソリューション)

オプションとして用意されている機外 PC 用 CAM ソフ



図 10：ポリゴン研削のシミュレーション（左）と実際の加工時（右）

トウェア BLACK CAM Solution は、DXF データのインポート機能を有し、ねじ、ポリゴン研削の三次元シミュレーションや干渉確認が可能である（図 10）。

5 加工事例

5.1 CAPTO シャンクのツールホルダ

CAPTO シャンクは、テーパが 1/20 で、おにぎりの様なポリゴン形状によって曲げ剛性、ねじり剛性、トルク

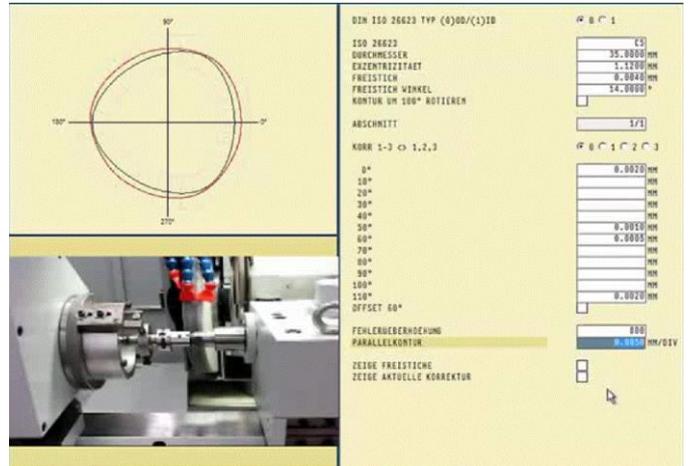


図 13：プロフィール補正画面



ワーク：Capto C8
材質：特殊構造用鋼合金
加工時間：82 秒
砥石台：ユニバーサル or
ダイアゴナル

【加工パス】

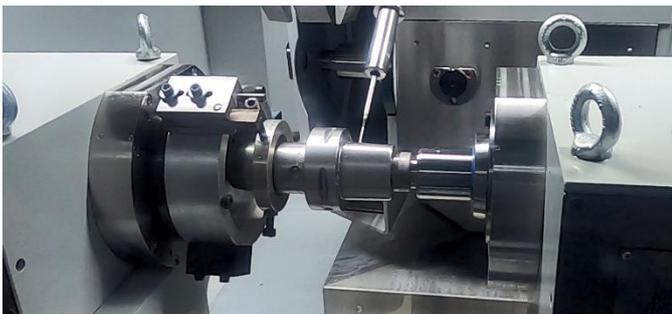
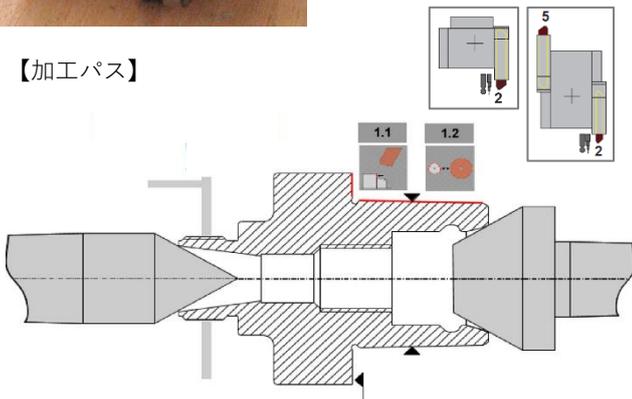


図 11：加工事例 1



ワーク：Capto C6
材質：特殊構造用鋼合金
加工長：φ63mm×L110mm
加工時間：10 分
砥石台：ユニバーサル

【加工パス】

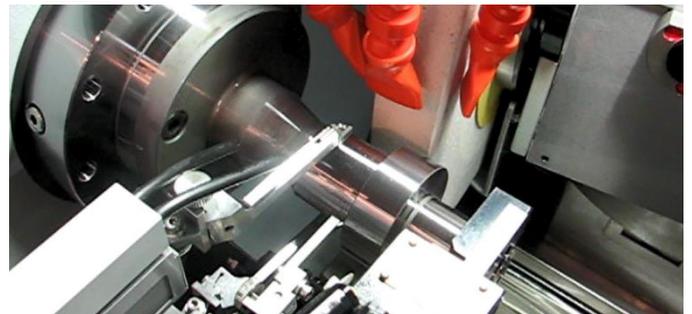
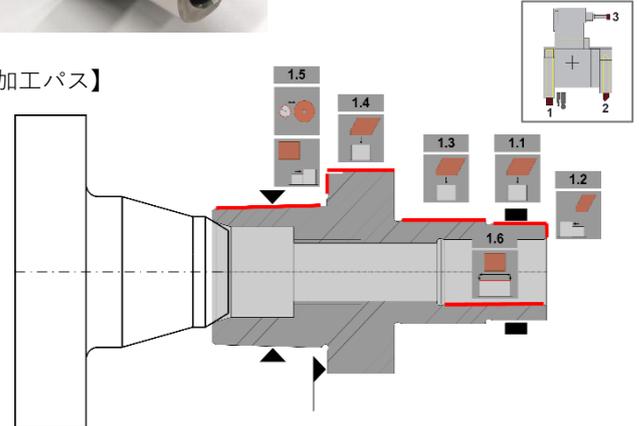


図 12：加工事例 2

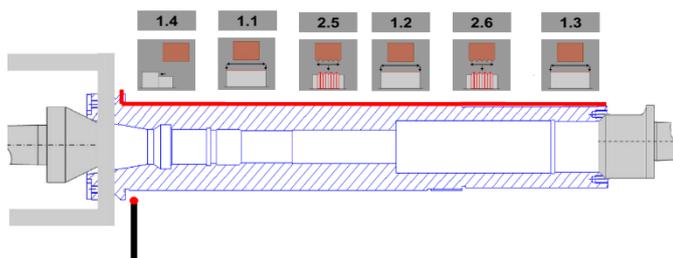
伝達に優れ、多くの複合加工機に採用されている。複数要素の高精度加工を必要とする CAPTO シャンクは KELLEBERGER シリーズに最適なアプリケーションの一つである。

図 11 では、ワンチャックで端面とポリゴン形状を研削、図 12 では外径、端面、ポリゴン形状に加え内面研削にも対応する。CAPTO の加工に特化したプログラムが用意されており、対話式加工ソフトウェアに CAPTO の規格データがあらかじめ内蔵されているため、加工する CAPTO を選択することで研削加工プログラムが作られる。研削後のワークを外部の測定機で計測し、10° 単位で形状誤差を入力すると、補正用加工プログラムが自動で作成される(図 13)。

5.2 工作機械用スピンドル

テーパやねじ、ポリゴン形状の高精度仕上げを必要とするスピンドルは、ワンクランプで精密な複合研削が可能な KELLEBERGER シリーズが優位性を発揮する代表的なアプリケーションである。図 14 は、アンギュラ砥石とねじ状砥石を使用した加工事例である。

【加工パス】



ワーク：スピンドル

材質：機械構造用合金鋼

加工長：φ85mm×L491mm

砥石台：ユニバーサル

図 14：加工事例 3

6 おわりに

ワンクランプ加工そして高精度に応える CNC 複合円筒研削盤 KELLEBERGER シリーズは、付加価値の高いモノづくりを目指すお客様を、その優れた研削技術と機械づくりで今後も支えていく。

以上