

量産部品の超工程集約を実現するニューコンセプトマシン

New-Concept Machine for Parts Mass-Production Featuring Super Process Integration

若園賀生 Y. WAKAZONO 太田浩充 H. OTA 小野直人 N. ONO
古畑鉄朗 T. FURUHATA 長濱貴也 T. NAGAHAMA

Recently, requirements for parts with improved accuracy and higher added value have intensified. Likewise, demands for machining systems characterized by high productivity, high accuracy, quick changeover capability and energy efficiency have increased. The mass-production of shaft-shaped parts requires numerous processes, including turning, heat treatment and grinding. Conventionally, the integration of these processes has been considered too difficult. However, as the result of a project carried out under NEDO*, JTEKT has succeeded in the development of necessary element technologies and a multi-tasking machine integrating the turning, heat treatment and grinding processes, effectively raising mass-production productivity in regard to shaft-shaped parts. This report presents the element and multi-tasking technologies of this machine.

Key Words: multi-tip cutter, traverse grinding, laser hardening, automatic tool changer, parallel mechanism, multi-tasking machine

1. はじめに

シャフト形状部品の量産製造において、加工精度向上と、設備・ランニングコストの低減の両立は重要である。今回、旋削から熱処理、研削加工までを同一の加工機上で実現することを目的とし、各要素技術・加工技術の開発を行った(図1)。最終工程では高精度加工が必要であるため、研削盤を基にした複合加工機を開発した。旋削工程ではバイトによる旋削加工と同等の加工性能を発揮する回転工具と加工技術、熱処理工程では低コスト・

省スペースで消費エネルギーの少ない機上レーザ熱処理システム、さらに熱処理後の研削工程ではラップ領域の表面粗さを高い能率で加工可能な研削加工技術をそれぞれ開発した。

これらの加工技術を実現するためには工具・加工ヘッドの姿勢や位置を任意にコントロールする必要があるため、加工機上に新開発の多自由度メカニズム・高精度砥石自動交換装置を搭載した。本報では、これらの各要素技術の研究開発内容を述べる。

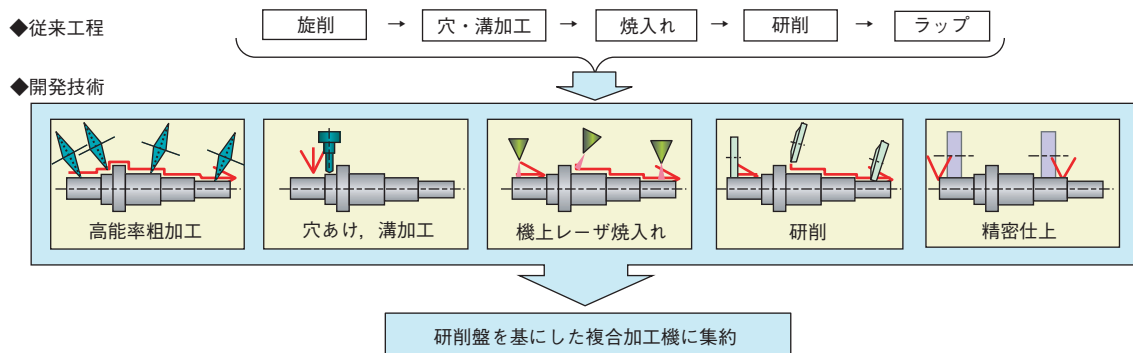


図1 開発コンセプト
Development concept

2. 回転工具による粗加工技術の開発

加工機のコスト低減のため、研削工程で使用する砥石軸に装着可能な粗加工用回転工具を開発した。この回転工具の性能は、旋削並の加工能率とツールコストを目標とした。開発当初は多結晶高じん性 cBN 砥粒に着目し、砥粒突出し量が多い粗粒電着 cBN 砥石を試作し、加工特性評価試験を実施した。その結果、砥粒切込深さを増加させると比研削抵抗が低減し、ツールコストを低減できることが分かった。しかし、cBN 砥石では旋削並のツールコストとすることは困難であり、研削加工方式よりもミリング方式の方がツールコスト低減には有利であると判断した。

そこで、汎用性が高いターンミリング方式に着目し、目標の加工能率とツールコストを推定した。その結果、ターンミリング方式でも旋削並のツールコストに及ばないことが判明した。そのため、この方式においてツールコスト低減を図ることができる画期的な方法として、切れ刃が摩耗しても使い続けられる長寿命切削刃先を検討した。

一般に、刃先の逃げ面の摩耗幅が増大すれば最終的には刃先欠損に至るが、逃げ面の摩耗幅の増大を抑制できれば、刃先欠損が発生せずに使い続けることができると考えられる。これを実現するために、薄板状の高じん性高硬度切れ刃と、それを支える高弾性率ぜい性支持部から成る切削性能維持形切削刃先を考案した（図2）。

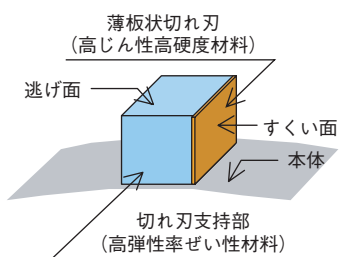


図2 長寿命切削刃先
New-concept long-life cutter tip

切れ刃は高じん性の高硬度切削材料である超硬とし、支持部材質を選定した。最初に切削力を推定し、さまざまな支持部材質でFEMによる応力解析を行い、候補となる支持部材質を選定した。これらの支持部材質でそれぞれ刃先を試作し、欠損性を把握するための加工評価試験を実施した。試験の結果、銀合金とアルミナ研磨材との複合材料から成る、メタルボンド砥石形支持部の切削

刃先を用いたとき、良好な切削性能を示した。この刃先に対して連続加工による消耗特性評価試験を実施し、切れ刃の摩耗に伴い支持部が減耗することを確認した。

開発した切削性能維持形切削刃先の効果検証のため、多刃工具を試作し、加工特性評価試験を実施した。図3に試作多刃工具を示す。この工具を用いた加工特性評価試験により、目標の能率領域で刃先の欠損がなく加工できることを確認した。

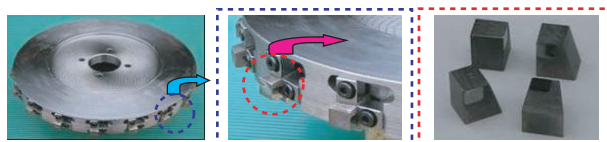


図3 切削性能維持形切削刃先を装着した試作多刃工具
Prototype multi-tip cutter

3. 可変傾斜研削法の開発

熱処理後の仕上げ工程で生産性と高精度加工を両立させるためには、研削抵抗による工作物のたわみ量抑制が必要である。そこで傾斜姿勢の砥石により、工作物の剛性の高い方向に法線抵抗のベクトルを傾ける研削法を開発した。この加工方法は、砥石の外周面で工作物の軸方向に切り込んで研削することにより、加工中の工作物たわみ量を低減し高精度加工を実現できる。また、砥粒径や砥粒種類などの仕様が異なる砥石面を多段状にし、研削工程や研削部位に適した砥石面を選択使用することにより、加工面性状や精度の向上が可能となった。

傾斜姿勢で加工できるビトリファイド cBN 砥石を試作し、砥石の回転軸を工作物回転軸に対して 60° 傾斜させた姿勢でトラバース研削加工を実施した。加工時に工作物に作用する力と砥石の消耗特性を評価した結果、傾斜トラバース加工法は、工作物のラジアル方向に作用する力を抑制する効果があることが分かった。

トラバース送り速度と工作物回転速度を変えて加工試験を行った結果、工作物のラジアル方向に作用する力を抑制する効果は、工作物一回転当たりの砥石トラバース送り量が小さい領域で特に大きいことが分かった。さらに、傾斜トラバース加工とプランジ加工を比較した結果、研削能率に対する研削エネルギーには差がほとんどみられないが、工作物のラジアル方向に作用する力は、傾斜トラバース加工では研削能率が増加しても抑制されることを確認した。図4に研削能率と工作物のラジアル方向に作用する力の関係を示す。

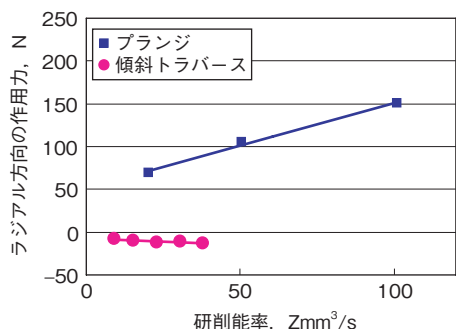


図4 研削能率とラジアル方向に作用する力
Radial grinding force per grinding stock removal for plunge and leaned traverse grinding



図5 異種組成多段砥石
Prototype multi-composition multi-angle wheel

しかしながら、この加工法では砥石エッジ部の偏摩耗が激しいため、これを避けるためにはエッジ部と円筒部で異なる組成の砥石を組み合わせる方法（異種組成多段砥石）が効果的であると分かった。

異種組成多段砥石（図5）を試作し、効果検証のため加工特性評価試験を実施した。その結果、現状の研削加工法と同等の加工能率で加工し、研削焼けを生じることなくラップ領域である表面粗さ 0.5μmRz を達成した。

4. 機上レーザ熱処理技術の開発

従来、旋削と研削の工程間で存在する高周波焼入れなどの熱処理機により、製造ラインの工程が分断され、ライン全体の工程集約が困難であった。この問題を解決するために高周波焼入れなどに比べ低コスト・コンパクトで消費エネルギーの少ない半導体レーザによる熱処理を複合加工機上で実現させた。そのためのレーザヘッド搭載装置およびシャフト形状工作物の機上熱処理技術を開発した。

半導体レーザによる熱処理の基礎試験として、ブロック形状工作物を用いて焼入れ性を調査した。焼入れ時の

工作物の温度分布および変化を予測するために、熱処理解析ソフトを用いて熱解析を実施した。また熱解析精度の向上を目的とし、解析と実測の温度変化データを比較評価した。その結果を基に熱解析に補正を与え、解析精度を向上させた。さらに、解析可能範囲（条件）を広げる検討を実施した。また、レーザ照射条件と焼入れ性の関係を調査し、レーザ照射条件を把握した。これによりレーザ焼入れした工作物がマルテンサイト変態していることを確認した。

次に、シャフト形状工作物への焼入れ性評価を実施した。その結果、硬化層深さ 0.45mm、硬化層硬さ 780Hv の焼入れ硬化層が得られ、シャフト形状工作物に対しレーザ焼入れが可能であることを確認した。

さらに、限定部位のみでなく、シャフト形状工作物全体へのレーザ焼入れを実現する方法を検討し、らせん状加熱法を考案した（図6）。評価テストを実施した結果、レーザ照射重複部に再加熱の影響による焼戻し軟化層が確認され、この方法では工作物全体を一様に焼入れすることが困難であることが判明した（図7）。

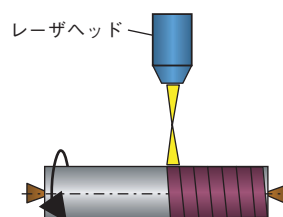


図6 らせん状加熱法概略図
Laser heating along a spiral trajectory

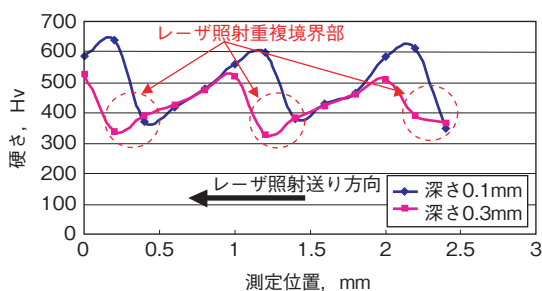


図7 焼入れ断面硬さ測定結果
Hardness measurements of hardened steel

らせん状加熱法で生じた照射重複部の焼戻し軟化層の発生を防ぎ、均一な焼入れを達成するため、工作物の回転速度を高めレーザを多重に照射する多重照射加熱法の評価を実施した。その結果、レーザ照射重複部に焼戻し軟化層が生じることなく、全体均一な焼入れ層が得られた。多重照射加熱法では熱処理時間が長くなる点が課題

であることが判明し、この課題を克服するために、全体加熱後に全体冷却を行う「全体加熱→全体冷却工法」を考案した(図8)。この方法により、一定幅以内の焼入れ範囲であれば、処理時間の短縮が可能となった。焼入れ硬化深さは3mmで、円周、軸方向ともに均一な焼入れ層が得られた。また焼入れ部の金属組織観察および硬さ測定においても均一な焼入れ硬化層が得られていることを確認した(図9)。

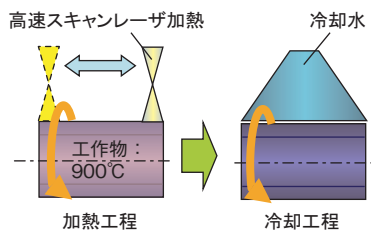


図8 全体加熱→全体冷却工法
Overall heating → Overall quenching process

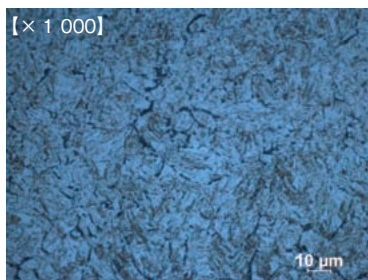


図9 焼入れ部の金属組織観察
Metallographic observation of hardened steel

5. 高精度砥石自動交換機構の開発

粗工程から仕上げ工程の間で仕上げ加工用砥石の工具交換が必要である。砥石の場合、工具交換精度において、従来のマシニングセンタなどで行われている工具交換精度に比べ、より高精度な再現性の確保が必要であり、これらを実現する高精度砥石自動交換装置を開発した。

先行技術調査として、二面拘束クランプ方式のATC(Auto Tool Change)装置を使用し、工具交換時に発生する振れ精度不良と繰返し精度不良の定量的評価を実施した。振れ精度および繰返し精度は、ばらつき幅を持ち、 $\pm 4\sigma$ で評価すると、工具根元位置で $\pm 4\sigma = \pm 0.43\mu\text{m}$ 、工具先端位置で $\pm 4\sigma = \pm 0.47\mu\text{m}$ となり目標値 $0.2\mu\text{m}$ 以下($\pm 4\sigma = \pm 0.1\mu\text{m}$)を達成しないことが分かった。

次に交換精度のばらつき要因を推定し、工具クランプの作用過程に着目し、工具テーパ部のしめしろの影響を

検証した。さらに、二面拘束クランプ方式における各拘束面(端面とテーパ面)での繰返し位置決め精度に着目し、工具交換による工具先端位置のばらつき量を測定し、偏心量と倒角量のばらつきで繰返し位置決め精度の評価を実施した(図10)。

その結果、テーパのしめしろが少なく端面で拘束する場合は倒れを抑制でき、逆にテーパのしめしろが大きい場合は偏心量を抑制できることが判明した。

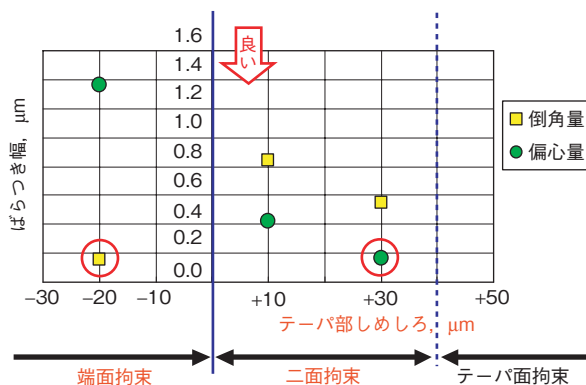


図10 テーパ部しめしろの違いによるクランプ精度の影響

Influence of clamping accuracy at different taper interference

この相反する条件を同時に満たすために、工具挿入時に工具保持器により押付力を作用させて端面を密着させ、次にクランプ力により工具テーパを内側から押し広げ心出し精度を出す方式を開発した。つまり、端面とテーパ面にそれぞれ独立に位置決め力を作用させ、順番に位置決めを行う方式といえる。本方式は、端面を密着させた時点でテーパ面はすきまとなっているため、クランプ時の引込み力により、確実にテーパ面を密着させることが課題である。図11に示すような独自のショートテーパ形状を考案し、試験の結果、従来のHSK(Hollow Shank Kegel)方式と比べ目標精度を上回る高精度が得られることを確認した。



図11 開発工具
Developed tool shank

開発方式による工具交換精度を検証した結果、交換精度 $0.2\mu\text{m}$ 以下 ($\pm 0.1\mu\text{m} = \pm 4\sigma$) を達成した (図12)。

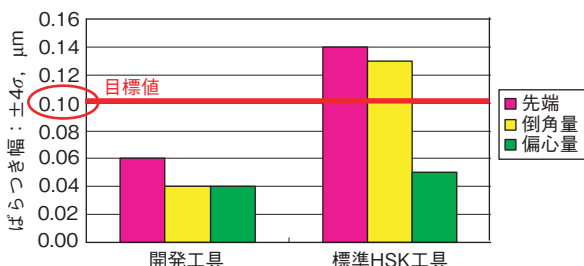


図12 工具交換精度の比較
Comparison of exchange repeatability

6. 高速高精度多自由度メカニズムの開発

これまでに述べた加工技術、熱処理技術を実現するためには、選択交換された工具と加工ヘッドの姿勢や位置決めを任意に実現する機構が必要である。さらに設備コストを低減するために、従来の直交軸と回転軸による位置決め精度や剛性に匹敵する多自由度メカニズムを開発した。

平行メカニズムにおいて、回転軸方向に広い可動範囲を持たせるため、必要な自由度 (x, z, B) に対し、工具軸側、アクチュエータ軸側双方に冗長な自由度を持たせることで、可動範囲の中心部における、特異点回避および過拘束の回避を可能にする基本的な考え方を考案した。さらに、この考え方に基づいて、必要な自由度をすべて平行メカニズムでまかなう機構 α (図13) を考案した。機構 α では、工具軸側に (x, z, B, d)、アクチュエータ軸側に (U_1, U_2, U_3, U_4) の自由度を持っている。

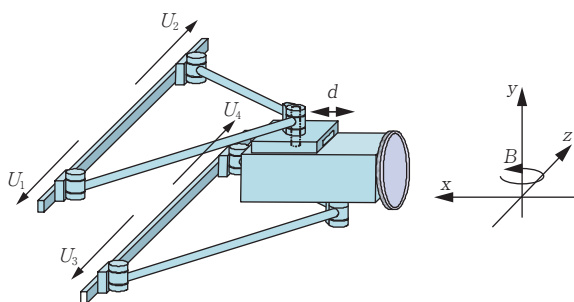


図13 平行メカニズム型多自由度機構 (機構 α)
Planer full-parallel mechanism (platform α)

本機構では、一組のリンクペア (U_1, U_2) が砥石軸上の一点を回転ジョイントと直動ジョイントを介して支持する。もう一組のリンクペア (U_3, U_4) が、砥石軸上の別の一点を回転ジョイントを介して支持している。工具座標指令値に基づいてアクチュエータ軸を独立に制御することにより、3自由度 (x, z, B) の動作を可能にしている。

動作の直交軸座標 (x, z, B) とアクチュエータ軸座標 ($U_1 \sim U_4$) の相互の座標変換を可能にするため、汎用 CNC およびアプリケーション組込用カスタマーズボードを利用して、順逆変換ロジックを組み込んだ (図14)。直交軸からアクチュエータ軸座標に変換する逆変換では、NC プログラムの座標を補完処理を介してカスタマーズボード内に取り込み、逆変換処理を行った後、アクチュエータ軸サーボアンプに出力する。また、電源立ち上げ時に実施される順変換は、アクチュエータ軸エンコーダから受け取った座標値をカスタマーズボード内で順変換処理した後、CNC 本体側に直交軸座標値を出力する。さらに、機構パラメータ (リンクの長さ、原点位置、ジョイントの位置など) のセルフキャリブレーションを可能にするため、C 言語によるキャリブレーションロジックを組み込んだ¹⁾。

機構 α では冗長自由度により特異点回避と過拘束の回避を可能にするという基本的な考え方があった。この特長を残し、機構 α に対して組付け性と剛性の向上、および小型化を図った平行・シリアルハイブリッドによる3自由度機構 (機構 β) を考案した (図15)。本機構では、 x 軸、 B 軸の2自由度を平行メカニズムで駆動し、平行メカニズムプラットフォーム全体を z 軸方向に駆動する構成とした。

機構 α と同様に機構 β の順変換・逆変換アルゴリズム、力とモーメントの釣合いに基づく力解析アルゴリズム、ヤコビ行列による速度解析アルゴリズムなどを組み込んだシミュレーションツールを作成した。これを用いて負荷特性の解析を実施し、 B 軸角度に従って各軸の負荷がどのように変動するかを明らかにした (図16)。速度特性解析では、アクチュエータ軸速度と可動部の速度との関係の B 軸角度による変動を明らかにした (図17)。

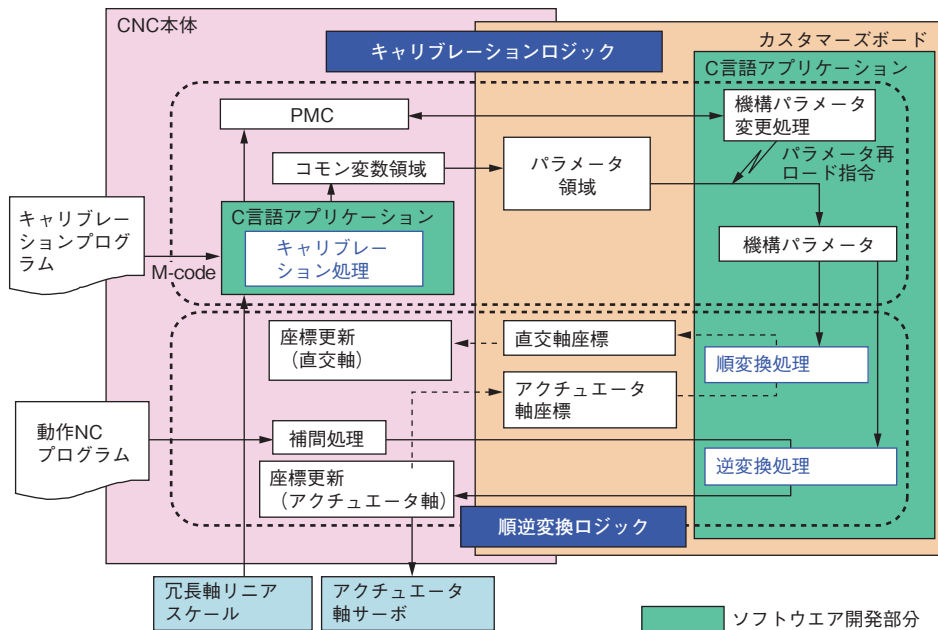


図14 汎用CNCへの順逆変換、キャリブレーションロジックの組み込み
Software built in the CNC for forward and inverse kinematics, and kinematic calibration

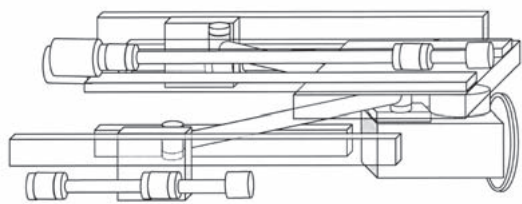


図15 パラレル・シリアルハイブリッドによる3自由度機構(機構β)
Parallel-serial hybrid mechanism (platform β)

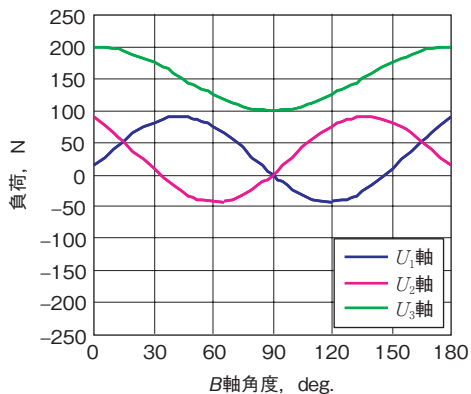


図16 x軸方向負荷(100N)に対するアクチュエータ軸方向負荷
Force of axial direction on actuators-when applying force of 100N on tool in x-direction

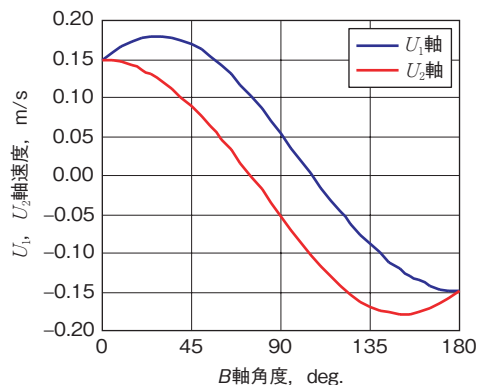


図17 B軸方向速度(1rad/s)に対するアクチュエータ軸方向速度
Actuators velocity in axial direction at B-axis velocity of 1 rad/s

機構βに基づき複合加工機本体への組み込みを想定した機構を設計・製作した(図18)。本機構ではパラレルメカニズムプラットフォームの幅を最小化し、従来のシリアルメカニズム機と同等の機械幅としている。また、回転軸部分にモータが不要なため、回転軸高さ寸法をシリアルメカニズムの約1/2にすることを可能にした。これによりモーメントを受けにくくし高剛性化を図った。さらに、重力は案内面で受け、リンク機構には引張・圧縮の力のみがかかる構成にすることでリンク部分を簡略化し、組付けが容易な構成にした。これにより、組付け精度不良によるリンク変形などの影響を排除した。

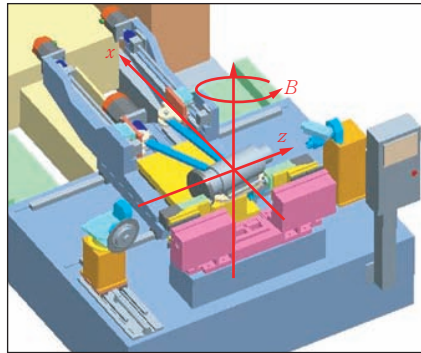


図18 複合加工機本体部
Schematic of new-concept machine

7. おわりに

シャフト形状部品の量産製造において、粗加工から熱処理、仕上げ加工までを工程集約可能なニューコンセプトマシンと、構成する要素技術、加工技術を開発した。以下に各技術の開発成果をまとめる。

(1)回転工具による粗加工技術の開発

粗加工領域において、旋削加工と同等の加工能率で加工でき、ツールコスト低減に有効である切削性能維持型刃先多刃工具を開発した。

(2)可変傾斜研削法の開発（仕上げ加工）

仕上げ加工領域において、従来の仕上げ研削加工の加工能率で、ラップ領域の粗さ精度 $0.5\mu\text{mRz}$ を達成できる組合せ砥石による可変傾斜トラバース研削加工技術を開発した。

(3)機上レーザー熱処理技術開発

機上熱処理として、半導体レーザー焼入れテストを実施し、レーザー照射条件と加熱状態の関係を究明した。さらに、円筒工作物へのレーザー焼入れ法を各種評価し、必要な焼入れ状態における最適なレーザー照射方法を明確にした。

(4)高精度砥石自動交換機構の開発

自動交換対応の高精度工具クランプ機構として、標準 HSK 工具に対し、心出し精度および倒れ精度（工具装着精度）が $0.2\mu\text{m}$ で工具交換可能な新クランプ方式を開発した。

(5)高速高精度多自由度メカニズムの開発

x, z, B の 3 自由度機構として、従来機構に対し小型・低コストを可能にするハイブリッド機構を開発した。また、汎用 CNC にハイブリッド機構の順逆変換アルゴリズム、セルフキャリブレーションアルゴリズムを組み込み、従来機構と変わらない制御を可能にした。

謝 辞

本研究開発は、平成 17 年度～平成 19 年度 NEDO* 課題設定型産業技術開発費助成事業（高度機械加工システム開発事業）の助成をいただいた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 太田浩充, 渋川哲郎, 遠山退三, 内山 勝: 精密工学会誌, vol. 66, no. 10, (2000) 1568.

* NEDO: 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

筆 者



若園賀生*
Y. WAKAZONO



太田浩充**
H. OTA



小野直人*
N. ONO



古畑鉄朗*
T. FURUHATA



長濱貴也**
T. NAGAHAMA

* 研究開発センター 加工システム研究部

** 研究開発センター FP 研究部