加工の高能率化・高精度化を実現する 複合加工機*

—現状と今後の展開—

Multi-tasking Machine Realizing High Productive and Accurate Machining
—Present State and Evolution in Future—

清水伸二**
Shinji SHIMIZU

Key words hybrid machine, hybrid machining, high productivity, high accuracy, machining

1. はじめに

生産加工の革新的な高能率化・高精度化を実現するためには、現存する加工技術だけでは不十分となっており、加工のハイブリッド化が進められている。ここでは、それら加工のハイブリッド化の現状を概観し、そのメリットと問題点を明らかにして、加工のハイブリッド化を実現する複合加工機のそれら問題点への取組みの現状と今後の技術課題について述べる。

2. 加工のハイブリッド化の現状

表1は、現在ものづくりに使われている加工法を、工作物形状に変化を与える方法とその際に用いられるエネルギーによりマトリックス状に分類整理したものである。これら多くの加工法のうち、機械的加工を中心とした加工法は、これまで最も多く使用されてきた加工法である。一方、レーザを中心とした熱的エネルギー加工や化学的・電気化学的加工法は、放電加工を除いては、特殊な用途に使われてきた加工法で、まだ一般的な加工法とはいえない状況にある。しかしながら、デジタル家電産業や医療機器産業を中心として微細加工へのニーズが高まる中、レーザ加工などは産業界に浸透し、一般化が進んでいる。このように、ものづくりには非常に多くの加工法が採用されているが、これらの加工法では、最近の加工能率、加工精度への要求に応えることが次第に困難になってきている。そこで、各加工法がもっている長所を生かし、短所を補うため、これら加工法をハイブリッド化した加工法による対応が進められている。これまでに提案されているハイブリッ

ド化された加工法の状況をまとめてみると、表2のようになる。これらの中でも工程短縮による高能率化を目指した機械的除去加工の複合化によるハイブリッド化が、最も進んでいることがわかる。

表1 「ものづくり」に使われている加工法

加工形式	機械的加工 (機械的エネルギー加工)	熱的加工 (高エネルギー密度加工)	化学的・ 電気化学的加工
付加工	接合 圧接、圧入	レーザ、電子	溶接、焼きばめ、 接着
被覆	クラッディング、 ラビッドプロトタイピング	電子、イオン、レーザ、ラビッドプロトタイピング、 金属溶射、肉盛	めっき、電鍍、蒸着、コーティング
成形	鋳造、射出成形、 焼結	レーザ	
変形加工	鍛造、圧延、押し出し、引き抜き、 プレス(せん断、 曲げ、絞り)、スプリング		
除去加工	切削、研削、研磨、 超音波、噴射	放電、レーザ、電子、 イオン、プラズマ、 ウォータージェット、 微粒子噴射	電解加工、電解研削、 電解研削、化学加工、 化学研削
表面改質	ショットピーニング	レーザ、電子、イオン	各種熱処理

表2 加工のハイブリッド化の現状

ハイブリッド化の形態	事例
機械的除去加工の複合	旋削+ミリング、旋削+研削、ミリング+研削、旋削+ミリング+研削、旋削+ミリング+歯切り+研削、旋削+ミリング+歯切り+ブローチ、歯切り+歯面研削、研削+研磨、ミリング+ギアシェーパ
機械的加工法の複合	プレス+穴あけ+タッピング、ラビッドプロトタイピング+ミリング、インサートモールドデング、ファインブランクング
機械的加工法以外の加工法の複合	ウォータージェット+ワイヤ放電
機械的加工と他のエネルギーの複合	ミリング+放電、超音波+ミリング、ラビッドプロトタイピング+ミリング、レーザ+ミリング、プレス+フォーミング+レーザ
その他、アシスト的加工のための複合	レーザエッチング、レーザアシストめっき、ウォータビームアシストレーザ加工

*原稿受付 平成20年1月22日

**正会員 上智大学理工学部機能創造理工学科
(東京都千代田区紀尾井町7-1)

清水伸二

1981年上智大学大学院理工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。工学博士。上智大学理工学部機能創造理工学科教授。専門は工作機械の結合部の静・動・熱特性、熱変形フリー工作機械、工作機械の性能評価、ツーリングシステム。

3. 加工のハイブリッド化のメリットと問題点

3.1 ハイブリッド化のメリット

前述のように、加工のハイブリッド化が多岐にわたって進められているが、それらハイブリッド化のメリットを整理してみると、以下ようになる。

- 1) ワンチャッキングで多種の加工が可能のため、工程間移動時に生じていた工作物の着脱誤差は生じない。
 - 2) 工作物の取付具を削減でき、取付具のためのコストを削減できる。
 - 3) 工程間移動、工作物着脱などに要する非加工時間を削減できる。
 - 4) 複合加工機上でのリードタイムの削減が、直接トータルサイクルタイムの削減につながり、工程管理が楽になる。
 - 5) 分割された加工工程では、製作不可能な製品が、製作可能になる。
- 1)～3) は、高精度化というよりは、飛躍的な高能率化を実現するために有効なものであり、主として従来の機械的エネルギー加工内でのハイブリッド化により実現されている。そして、最近では、5) のメリットを実現すべく多くの技術開発が行われている。

3.2 ハイブリッド化の問題点

上述のごとく多くのメリットを有するものの、その実現のためには解決しなければならない多くの問題点が存在している。それらをまとめてみると、以下ようになる。

- (1) 単独加工とは異なり、以下のような加工技術上の配慮が必要となる。
 - 1) 性質の異なる切りくずが発生するため、その処理法に工夫を要する。
 - 2) 性質の異なる加工液が必要な場合は、その切り替え、処理などに工夫を要する。
 - 3) 工程集約加工のため、ミスの発生は、多数工程の同時停止に相当する影響がある。
 - 4) 一般的に複雑形状工作物が多く、量産部品には向かない。
 - 5) 異種加工に対応できる使い勝手の良い CNC 装置、CAM ソフトウェアが少ない。
 - 6) 各種加工を行える人材の育成には、時間とコストが掛かる。
- (2) ハイブリッド加工を実現する複合加工機の設計にあたり以下のような点に配慮する必要がある。
 - 1) 機械構成要素が多いため、静剛性が低下しやすく、加工精度への影響が複雑となる。
 - 2) 熱源が多くなり、機械構成要素の熱変位の加工精度への影響が複雑となる。
 - 3) 運動要素が多くなり、運動誤差の加工精度への影響が複雑となる。
 - 4) 機械サイズが大きくなりがちである。

以上のように、加工技術と複合加工機の開発に当たり、

図1 ガントリー構造小形5軸加工機 (HERMLE ドイツ)

多くの問題点があり、次節で述べるように、それらの解決に向けた取組みが鋭意行われている。

4. 複合加工機の現状と今後の技術課題

4.1 新構造設計技術

本体構造関係では、前述の問題点を解決するため、高剛性で、より良い熱変形特性と運動特性をもった、コンパクトな機械の開発が行われている。まず、基本構造形態としては、図1のような、モノブロックで、ガントリー構造のものが多く採用されている。本機は、旋削機能をもつ5軸マシニングセンタの事例で、機械フレームとなるベッドやコラムに相当する構造要素を一体の箱形構造として、剛性を高めている。また、フレームの両側の壁をクレードル旋回のための軸受支持部とすることにより、コンパクトな構造を実現している。さらにフレーム後部中央にも案内を設け、3本の案内でクロスレールを案内することにより、案内剛性と運動精度を高めている。また、直進運動軸を工具側に、旋回運動軸を工作物側に独立的に配置して、組立精度を出しやすくしている。さらに、本フレームには、減衰特性と熱変形特性を改善するためグラナイトコンクリートを採用している。

熱変形対策事例としては、複合加工機を構成する各構造要素の熱変形特性を最適化し、構造全体として素直な熱変位が生じるように設計し、その熱変位を、機械の数箇所の温度との相関関係を用いることにより、CNC 機能で補正する方式などが採用されている¹⁾。加工のハイブリッド化に伴う機械の複合化により、熱源が増える一方であることから、設計時点で、曲げやねじれない素直な熱変形特性として、熱変位補正を行いやすい構造とする設計技術は、今後益々重要になるものと思われる。今後は、環境温度などの温度変化に鈍感な本体構造の設計技術の開発も必要といえる。

以上のような熱特性に加えて、剛性重量比の改善も狙った新しい構造材料の採用が進んでいる。特に最近では、前述のコンクリートに加えて、CFRP、セラミックス、発泡金属充填材などが注目されている。CFRP をクロスレールに

図2 モジュラ構成の旋盤ベース複合加工機 (TRAUB)

採用した超音波加工とミリング加工の複合加工機の事例では、剛性、熱特性が高まるとともに、軽量化が可能となり、2Gの送り加速度が実現されている²⁾。

複合加工機に対してもユーザーニーズが多様化し、フル仕様ではなく、必要とする仕様に限定した加工機の要求が出てくることは容易に想像される。これらに迅速に応えるとともに、製造コストを抑えるために、図2に示すようなモジュラ構成の複合加工機が多くなっている。本機は、旋盤ベースの複合加工機の例であるが、ベッドと工作物主軸台は、標準構成要素として、ミリング主軸頭などの旋回送りが可能な刃物台、上部タレット刃物台（右勝手、左勝手）、下部刃物台（右勝手、左勝手）、心押台などが標準モジュールとして準備されている。ユーザーの要求に応じて、これらモジュールを組み合わせることにより、同図に示すような各種複合加工機を構成できるようになっている。複合加工機の仕様が複雑になるに従い、モジュラ構成設計技術は、益々重要になるものと思われる。

4.2 高精度・高剛性化・コンパクト化のための新しい駆動機構と案内機構

複合加工機では制御軸数が多くなり、剛性と精度が低下しがちであるが、これを抑制するために有効と思われるのが、リニアモータ駆動である。リニアモータ駆動は、ボールねじ駆動と異なり、ボールねじやナットなどの機械要素がないため、駆動系の剛性が高く、慣性も小さくなり、高精度、高速・高加速度送りが可能となることから、軸数の多い複合加工機には適しているといえる。また、リニアモータは、構成要素としては、移動要素（1次側コイル）と永久磁石レール（2次側）しかないため、非常にコンパクトな駆動系を構成できる。このため、ツインドライブ方式も容易に実現が可能で、高剛性、高精度な駆動系を構成できる。さらには、永久磁石レールの上に複数のコイル（運動要素）を配置して、独立に駆動することができるため、機械のコンパクト化にも有効な駆動方式といえる。この他、回転軸へのDDモータの採用も進み、高精度、高速化が進められている。

複合加工機の運動要素が増えるのに従い、運動誤差が累積されることから、各運動軸の高精度化がますます重要に

図3 全面複雑形状部品の長時間連続加工可能な複合加工機 (STAMA)

なるものと思われる。この要求に応えるものとして、標準化された油静圧案内、油静圧送りねじが市販されるようになってきたことを挙げることができる。両者ともに、今後、複合加工機の高精度・高速化に大いに貢献するものと思われる。

4.3 安全・高信頼性化

複合化に伴い機械の運動と操作が複雑になり、加工プログラムミスや段取り時の操作ミスによる衝突事故が多くなっている。これらを未然に防ぐための衝突防止機能を備えた機械が増えつつある。あらかじめ機械の構成要素やチャックをはじめとしたツーリングの幾何学的形状寸法データをCNC装置に登録しておくことで、プログラム動作時だけではなく、段取り時のパルスハンドルによるマニュアル送りの際にも、衝突を予測して、機械を停止する機能を有している。この機能によりプログラムチェックをワンブロックずつ行うなどの必要もなくなり、作業者のストレス解消とともにプログラムチェック時間の大幅削減を可能にしている。この他、主軸のインテリジェント化なども進められ、加工時の異常検知など、機械を安全で、信頼性の高いものとするための技術開発が行われている。

4.4 高度自動化

人件費の安い国々でのものづくりが進む中で、ものづくりを国内回帰させるための手段として複合加工機の活用が期待されている。この要求にさらに応えるためには、複合加工の付加価値をさらに高め、高度な自動化を図る必要がある。そのための重要技術として、工作物のハンドリングの自動化が挙げられる。図3は、その一例で、ミリング加工と旋削加工の複合加工機の場合を示している。本機は、自動盤と同様の棒状工作物の自動供給装置を装備し、工作物の全面に同等の3次元複雑形状加工を行うことができ、長時間にわたって、高付加価値部品の無人連続加工が可能となっている。また、同図に示すように、あるユニットに使われる部品群を連続的に加工し、全必要部品を1セットずつ生産するセット生産にも対応可能で、これに組立機能を付与すれば、さらなる工程短縮が可能となる。

一方、鋳物や鍛造部品のハンドリングを行うためには、

図4 内径加工用ラム主軸付き5軸加工機（ヤマザキマザック）

ロボットが必要であり、ロボットと工作機械の融合が進んでいる。この他、前述のような工作機械のインテリジェント化も重要な技術課題である。

4.5 ユーザ分野特定化

複合加工機は、高度な機能を有しているからといって、どんな加工にも対応可能というわけではない。むしろ、複合加工機の機能を有効活用し、特定の産業分野に的を絞った仕様の機械に変身させる設計技術が必要である。図4は、その一例で、ジェットエンジンなどのケーシングの加工用として開発された複合加工機である。旋削機能付き5軸MCに、さらに中ぐり加工用のヘッドを付加し、ケーシングの内径加工に加えて、内径側に穴加工を行うことも可能にして、一度取り付ければ、すべての加工を行うことができるようになっていく。このように、大物部品の複合加工化は、大物工作物の工程間移動や着脱時間などを不要とすることから、中・小物部品の複合加工以上の効果があると考えられる。

4.6 量産ラインへの適合化

複合加工機の量産加工ラインへの導入が進められている。これは、前述のメリットの他に工程短縮に伴う生産ラインの短縮化という大きなメリットがあるからである。量産ラインへの複合加工機の導入のためには、単に工程短縮にともなうメリットだけではなく、さらなるサイクルタイムの短縮を実現する必要がある。このためには、同時加工軸数の増大と重切削加工への対応などが上げられ、機械の高剛性化と同時加工技術の開発が進められている。図5

図5 同時加工数と複合加工数の増大を進める複合加工機（TRAUB）

は、図2で示したモジュラ構成の複合加工機の加工事例であるが、フライス加工での同時加工の他に、歯切り、ブローチ加工までを複合化してさらなる工程短縮を図っている。

5. ま と め

以上、加工のハイブリッド化を実現するための複合加工機の現状と今後について述べさせていただいた。ここでは、記述できなかったが、切りくず処理の問題、加工液の問題、CAMの問題など多くの課題が残されている。また、まだハイブリッド化が行われていない加工法もある。特に、熱的加工（高エネルギー密度加工）、化学的・電気化学的加工など単独の加工法としてもまだ十分に一般化されていない加工技術もあり、これらの加工法をより使いやすい加工技術にすることも今後の課題といえる。本稿が複合加工機の現状を把握する際のご参考になれば、幸いである。

参 考 文 献

- 1) 清水伸二：新たなニーズに応える工作機械の最新動向，機械と工具，50，11（2006）10.
- 2) DMG 社カタログ：ULTRASONIC 製品ライン，（2006）5.