夢の工作機械の実現に向けて*

An Approach for Dream Machine Tools

佐藤 眞**
Makoto SATO

Key words metal cutting, machining center, laser machining, micro cutting, diamond tool, high speed cutting

1. はじめに

製造技術の基盤である工作機械はこの半世紀において日本で目を見張る発展を遂げた。当初は欧米に学び、徐々に追いつき、1960年代に始まったNC工作機械の幕開けとともに日本の工作機械は独自に進歩をはじめ、その後発展を続け、質・量ともに世界をリードし続けるほどとなった。この発展と成功は工作機械に関係する人々の研鑽によるが、日本の各機械産業の厳しい要求が育てたことは間違いない。近年では韓国・中国をはじめとする新興勢力の台頭が著しく、ドイツ・イタリアも依然として工作機械産業に熱心であり、25年後を想像すると気を抜けない状況である。人類が現在抱える基本的な課題であるCO₂排出量削減に対して工作機械は大きな関係をもつ。自動車や家庭電気製品などの消費財や各産業の生産効率が向上することによりCO₂の排出量削減が行われるが、効率の高い消費財や生産設備を製造するためには高い精度でかつ効率の良い工作機械を必要とする。したがって高精度で効率の良い日本の工作機械の活躍の場は今後も期待されている。

2. 工作機械産業の近況

わが国の工作機械生産高は1982年に米国を追い越し、現在まで26年間世界一の座を維持してきた。当初主として汎用MCの性能価格比が高いことが評価されていたが、最近では高品質で高性能と評価が定着している。図1に国別の工作機械生産高¹⁾の年次推移を上位5カ国について示す。日本は1982年に米国を抜き生産高で世界一となり現在まで継続して世界一を維持している。2009年は世界

同時不況の影響を受けて各国とも大幅に製造額が低下することは確実である。2008年1月から2009年8月までの日本における工作機械受注額²⁾の変遷をグラフにして図2に示す。2008年10月以降は前例を見ない急激な受注低下となり、一挙に以前の15%まで落ち込んだ状況が見て取れる。現在は受注の低下傾向は収まったものの本格的な回復には至っていない。いずれ世界の経済は回復するが、日本の工作機械が他の先進国に先駆けてこの不況を抜け出し、世界をリードし続けることが重要である。その鍵は他国と違う効率の良い工作機械を早く安く提供することにある。新しい加工技術や機械技術に立脚して画期的に生産効率が向上する新しい工作機械を創出し、世界の機械産業の設備更新を行うことが期待される。今後も産官学の研究者・経営者が精密工学会の場においてお互いに触発し、新しい加工方法や加工システムの開発を加速することこそが日本の工作機械の次の25年を成功に導く鍵と信じている。

3. 最近の工作機械の状況

現在日本で生産されている工作機械の大部分はマシンングセンター（MC）である。最近の傾向として自動車産

図1 工作機械の国別生産高

*原稿受付 2009年10月10日

**元(株)牧野フライス製作所顧問(神奈川県愛甲郡愛川町中津4023)

佐藤 眞

1963年北海道大学工学部卒業。同年株式会社牧野フライス製作所入社。1990年R&Dセンター所長、2006年専務取締役、2008年顧問、2009年退職。現在に至る。専門は加工技術および工作機械の研究開発。

図2 工作機械受注額動向

業・金型産業・航空機産業などの個々の使用目的に合わせて特化した目的別 MC と呼ぶべき MC が増加している。それぞれの MC は専門的な要求にこたえておのおの特徴をもった MC となっている。また最近の MC に共通した傾向は多軸化であり、新製品の多くは 5 軸制御 MC である。各目的別の MC は大幅に向上進歩しており、数年前は夢であった加工性能がどんどん実現している。最近の MC の中から典型事例を選び以下に紹介する。

3.1 高速高精度微細加工用 MC の事例

地球温暖化対応のため自動車を筆頭に世の中のすべての機械は省エネルギー化を急いでおり、機械の軽量化および摩擦や不釣合いの低減を進めている。多くの場合その実現には加工精度の向上が必須となる。ハイブリット車や電気自動車で電池が脚光を浴びている。電池の軽量化と大容量化も高い精度の金型によって実現される。また効率よく機械を制御するためには各種のセンサーや計測装置が必須であり、これらの製作にも高精度な工作機械が欠かせない。

図 3³⁾に事例として紹介する工作機械は 300 mm 以下の複雑高精度な部品を高精度に高速加工することを目的に最近開発された MC で、特徴は X-Y-Z3 軸リニアモーター駆動で 5 nm のフルクローズ制御を行い 16 m/min の高速送りが可能な高精度高速 MC であり、レンズ周辺部品や燃料電池セパレータ、センサーなどの金型製作の精密微細加工に俊敏で高精度な動作で効果を発揮する MC である。主軸系は動バランスを強く意識して設計製作され振動や回転精度が良く管理され、加工精度のみならず加工面の品位も大幅に改善されている。設置環境温度の変化への対応や駆動時の発熱の制御も積極的に行われ、長時間の無人運転が高精度で行える仕様となっている。限りなく続く高精度化・高速化の要求を微細加工分野で一步進めた事例である。微細加工の特性を確認する目的で、実際に微細な円形を加工し真円度 $0.98 \mu\text{m}$ の良好な精度を得た。加工条件は以下に示し、測定条件と測定結果は図 4⁴⁾に示す。

被削材種：NAK55 40HRC

移動量：X400 mm Y350 mm
Z200 mm
テーブル：600×400 mm
主軸回転数：45000 min⁻¹
主軸端：HSK-E32
最小指令単位：0.1 μm
スケール：5 mm
最大送り速度：16 m/min

図3 小型高精度高速 MC iQ300

図4 iQ300 微細円形加工精度

360°/Admin/TR365	
2009/09/09 16:51:58	
測定名 円 181	
仕様/条件	
フィルタの種類	ガウシアン
フィルタレンジ	1~50 upr
Z 軸位置	-1.544 mm
パラメータ	
RONt	0.98 μm
偏心度	0.45 μm

使用工具： $\phi 3 \text{ mm}$ 2 枚刃超硬エンドミル

主軸速度：20000 min⁻¹ 送り速度：200 mm/min

加工穴径： $\phi 3.2 \text{ mm}$ (工具中心の運動径 $\phi 0.2 \text{ mm}$)

3.2 超高速アルミニウム合金部品加工用 MC の事例

近年すべての MC は高速化されているが、最も高速化された MC はアルミ合金加工用の MC である。アルミニウム合金の実用的な切削速度には事実上上限がなく、時間当たりの加工量すなわち材料除去量は主軸の出力に比例することは良く知られている。したがって切りくずの排出や工具の強度が問題ない範囲で高速加工は進められ得る。中でも航空機用部品加工の高速化は顕著である。燃料油の高騰と CO₂ 排出削減対策から航空機の軽量化と省エネ化が重要課題となり機体の軽量化が一気に進み、部品の大型化と薄肉複雑化が強まった。翼部品で代表される航空機部品は空気力学に適合した形状に設計され、部品形状は複雑となり、ほとんどの部品は 5 軸制御が必須である。結果として主軸姿勢制御の際に干渉の少ないコンパクトで高出力な剛性も高い高速主軸が必要となる。航空機用アルミ合金部品加工用の事例を図 5⁴⁾に示す。この MC は比較的大型のアルミニウム合金部品を超高速で加工できる専用の大型 5 軸 MC である。大型の部品加工もワークの搬送を含めた自動化が進められており、この例では 2 台の大型 MC を設置した事例である。主な仕様を図 5 に記載してあるが、7×2 m の板状の比較的大型の航空機用アルミニウム合金部品を加工対象としている。加工能力は 5000 cc/min 以上の高速切削を実現している。表 1⁴⁾にその加工条

移動量：X7000 mm
Y2500 mm Z1000 mm
A ±110 度, B 無制限
送り速度：40 m/min
主軸回転数：33000 min⁻¹
主軸出力：80 kW
主軸端：HSK-F80

図5 超高速アルミニウム合金部品加工用 MC A7

表1 アルミ合金の高速切削事例

被削材質	アルミ合金 A7050 T7451
使用工具	φ25 mm 2 枚刃超硬ソリッドエンドミル
工具ホルダ	焼入れホルダー ホルダー長 80 mm
主軸回転数	33000 min ⁻¹
送り速度	20600 mm/min
切り込み量	軸方向 10.5 mm, 径方向 25 mm (全幅)
1 分間当り加工体積	5407.4 cc/min

件例を示す。この例では従来の一般的な加工時間を 1/3 以下に短縮している。

3.3 チタン合金加工用 MC の事例

省エネルギーは各産業分野で重要な課題である。そのために軽量で高強度のチタン合金の適用が増加している。特に航空機産業ではこの傾向が顕著である。最近では大型のチタン合金部品も増えている。しかしチタン合金の加工はびびり振動を起こしやすくかつ切りくずが刃先へ凝着しやすく工具寿命が短い難削材料の一つとして知られていた。最近では欧米も含め各国で研究が進められ、加工法・切削工具・工具ホルダの研究が進められ、工作機械も剛性の強化や積極的にびびり振動を抑制する能力を付加する等のいろいろなアイデアと方策が行われチタン合金の加工能力は飛躍的に向上してきた。最近ではチタン合金加工専用の MC も開発されている。図 6³⁾に示す事例は最近発表されたチタン合金加工専用の大型 MC の事例である。剛性の高い機械構造と専用開発された高トルク主軸、高減衰能を得るための半浮上案内面などの特徴をもった MC で積極的にびびり振動対策を講じている。高圧切削液を大量に供給して切りくずの良好な排出と刃先の十分な冷却を行い工具寿命を延ばす機能も設けている。テスト加工では 500 cc 毎分以上の加工能力を発揮できている。表 2⁵⁾にチタン合金加工事例の切削条件を示す。数年前では夢とされていた切削量である。短時間の工具寿命を覚悟した実験では 700 cc 毎分を超える加工データも出始めている。しかし実際のチタン合金部品の形状は複雑形状が多い。実際には単位時間当たりの加工能力より中仕上げ加工や仕上げ加工における加工時間短縮と工具の長寿命化が経済的には重要である。今後さらに切削の基本メカニズムの見直しや新しいアイデアに基づく加工法を研究し、さらに工具寿命が長い能率の良い加工法の開発がまたれている。

3.4 複合化工機の実例

ターニングセンタや複合加工機と呼ばれている旋削加工

移動量：X4200 mm
Y2000 mm Z1000 mm
A ±110° C 無制限
主軸出力：150 kW
主軸速度：4000 min⁻¹
主軸端：HSK-A125
積載加重：5000 kgf
パレット：4000×1500 mm

図6 チタン合金専用 MC MAGT4

表2 チタン合金の加工事例

被削材質	チタン合金 Ti-6AL-4V
使用機械	MAGT4
使用工具	φ80 mm 5 枚刃超硬ソリッドエンドミル
主軸回転数	245 min ⁻¹ 送り速度：123 mm/min
切り込み量	軸方向 52 mm, 径方向 78.4 mm
1 分間当り「加工体積」	502 cc/min

最大ワーク寸法：Φ2400×1440 mm
移動量：x 1875/y 1040/z 1595 mm
B150/C360 度 W900 mm
旋削主軸：500 min⁻¹, 37 kW
MC 主軸：10000 min⁻¹, 37 kW
ラム主軸：3000 min⁻¹, 7.5 kW

図7 大型5軸複合加工機 INTEGREX e-RAMTEC

主体の工作機械も目を見張る進歩を成し遂げている。近年は精度も加工能力も一段と向上し、加工機能もさらに広範囲となっている。その一例を図 7⁶⁾に示す。この事例は大型 5 軸加工機の複合機で、5 軸加工可能なミーリング主軸のほかに昇降ラムにもラム主軸をもち、両主軸共にミーリング加工と旋削を行える。B 軸（旋削主軸）と合わせて主軸を 3 個保有する複合加工機である。従来の MC やターニングセンタでは何度か工程を換えて加工しなければできない加工を 1 台 1 段取りで可能となる最も進歩した複合化工機のひとつである。図 8⁶⁾にはおのおのの主軸で加工している写真を示す。大型の風力発電機・船舶部品・建設機械・航空機エンジンなどの大型回転形状をもつ複雑形状部品の加工で大きな効果を挙げている。

以上、各分野別に事例を使って進歩した最近の工作機械を紹介してきた。今後もさらに専用分化し進化発展することと思われる。現在日本の工作機械が世界の生産現場で広く使われ成功してきた理由は上記の性能や精度の高さだけではない。使いやすさと信頼性の高さが根本的で重要な評価ポイントである。現在日本の工作機械がもつ広いサービス網と迅速なサービス体制が重要で今後もその維持発展が必要である。

4. 夢の工作機械の実現に向けて

上記のように日本の工作機械は精度・速度・機能・能力など各方面で独自に大きな進歩を成し遂げ世界をリードし続けてきた。しかし今後も発展し続けるためには常に原点

図8 各主軸による加工状況写真

から工作機械を考え直し、自由な発想で新しい可能性を考えることが必要である。本来工作機械は加工に使う道具が発達して機械となり現在ではコンピュータをふんだんに使ったMCとなってきた。したがって加工技術の進歩により工作機械は大きく変わる。また工作機械に携わる者は情熱家が多く、その夢は尽きなくまたいろいろである。工作機械が進歩し高精度となってきた現在、最も大きな加工精度攪乱要因は工具摩耗といえる。実際に工具摩耗を減じる研究は膨大に行われている。また工具摩耗と無関係の加工方法の研究に取り組んでいる研究者も多い。これらの研究は困難で時間も費用もかかり、実用化にはまだ道のりが長い物もあるが、夢の工作機械実現につながる重要な研究である。以下に幾つか事例を挙げて研究の一端を紹介する。

4.1 ベラーク (Belag) の利用

工具と被削材が直接触れない加工法は構成刃先を利用した方法が知られているが、工具と被削材の間に複合酸化物や窒化物の皮膜ベラークを自動的に生成して拡散摩耗を防止する方法もある。この技術はOpitzが発見し、従来は鋼の快削手法として使われていた。最近コーティング工具において研究⁷⁾が行われ、まだ実用には至っていないがチタン合金や高ニッケル合金の難削材の加工に期待されている。

4.2 高純度ナノ多結晶ダイヤモンドの利用

自然界で最も硬いダイヤモンドも劈開性があり硬度異方向性が大きく靱性が低く衝撃に弱い。ダイヤモンド焼結体(PCD)は靱性も高く衝撃には強いが焼結助剤が残留して強度・耐摩耗性に影響を与えている。最近焼結助剤を使わずに極めて高純度で微小组織のダイヤモンド多結晶体(NPD)の合成に成功⁸⁾している。これは単結晶ダイヤモンドの硬度を越え、高い靱生をもち、劈開性もない切削工具の夢の新素材である。すでに実際の加工試験が始まり報告⁹⁾が出始めている。早い時期に切削工具へ応用が待たれるが、強靱な夢の素材であるがために成形方法が困難で今後の研究が待たれる。特に超硬材料の切削加工や微細高精度加工分野で期待されている。

4.3 レーザー加工の高精度微細加工への利用

必ず磨耗する切削工具ではなく、機械的な磨耗の生じない放電・レーザー・電子ビームなどの物理エネルギーの加

工への利用は以前から広い分野で行われている。最近放電加工の高精度化も著しい。レーザー加工もすでにいろいろな分野で広く普及している。微細・高精度加工の分野のレーザー加工の利用は早くにドイツの研究があるが、最近日本で精度と加工能率の両面で大きく進歩した研究が報告¹⁰⁾されている。超硬材料やガラス質などの高脆材料の超微細加工では特に大きな期待が寄せられている。

5. ま と め

過去26年間世界をリードし続けた日本の工作機械は現在未曾有の経済危機に遭遇している。しかしメーカー各社は現在も研究開発を続け次の飛躍に備えている。また新しい工作機械のための研究・開発の芽はわが国でもたくさん出始めている。精密工学会の100周年を迎える25年後には「磨耗しない工具」を用い、使いやすく効率の良い夢の工作機械が世界で広く普及していることと期待される。また工作機械は今後その形態も機械の概念から加工設備システムとしてマシニングプロセッサ(Machining Processor)¹¹⁾と呼ばれるようなシステム装置へと変化していくと思われる。最近のように工作機械も工具も進歩を続け、かつ各MCや工具も高度専門目的別となってくると実際の利用には専門知識とデータベースが必要となってくる。加工に必要な機械とソフトとデータベースが組み込まれたシステムがマシニングプロセッサの概念である。幸いに必要な技術要素を開発できる企業はすべて日本に現存している。今後精密工学会を中心に関係する業界と官学の研究者が一同となり、新しい加工方法が日本で産声を上げ、近い将来日本発のマシニングプロセッサが世界中で実用・普及されると信じている。25年後も日本の工作機械は世界をリードしている可能性は大きい。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本工作機械工業会資料 2009 年。
- 2) 社団法人日本工作機械工業会速報値 2009 年 9 月。
- 3) (株)牧野フライス製作所カタログ 2009 年。
- 4) (株)牧野フライス製作所内部資料 2009 年。
- 5) (株)牧野フライス製作所内部資料 2008 年。
- 6) ヤマザキマザック(株)資料 2009 年。
- 7) 長井則孝, 臼杵年, 多尾田有字, 坂本智, 中島省吾, 久保田和幸, 伊坂正和, 狩野隆, 山根八州男: コーテッド工具における Belag の生成と工具磨耗, 2009 年度精密工学会春季学術講演会論文集, 精密工学会, (2009)。
- 8) 角谷均, 入船徹男: 高純度ナノダイヤモンド多結晶体の合成とその特徴, 住友電気工業(株)テクニカルレビュー (2004)。
- 9) 仙波卓也, 岡崎隆一, 角谷均: ナノ多結晶ダイヤモンド製マイクロボールエンドミル, 2009 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2009)。
- 10) 山口哲郎, 仙波卓也: 集束レーザー光を用いた高速微細加工技術の開発, 日本機械学会論文集 C 編, **73**, 732 (2007) 220-226。
- 11) (株)牧野フライス製作所内部資料 2000 年。