



「微細・精密」は、今日の日本の技術を語る上でのキーワードとなっている。原子や分子の大きさを対象とする「ナノ・テクノロジー」だけでなく、一般的な生産・加工技術においても、従来以上の精緻さが求められるようになっている。

そんな生産・加工の現場を最も基礎となる部分で支えている「縁の下の力持ち」が、マシニングセンタと呼ばれる工作機械である。その製造現場を訪ね、精度を裏づけている職人技を取材した。



マシニングセンタには用途により大型・小型、スピンドルが横型・縦型のものなど各種ある。安田工業の小型・縦型機種、YMC325。

マシニングセンタを製造する技術

キサゲ加工中の様子。褐色の塗料（光明丹）を塗った加工面をキサゲ（のみのような道具）で削ったところが銀色に見えている。

切削加工の精度を司る「マザーマシン」

マシニングセンタとは、フライス盤から発展したNC（数値制御）工作機械の一種である。プログラムに従って、ドリル刃などの切削刀具（エンドミル）を交換しながら、素材のブロックから求める形状を削り出していく。1台のマシニングセンタに収納される切削刀具は、一般に数十種であり、多い場合は百種以上に及ぶ。

マシニングセンタによる切削加工物は、航空機のリブ、自動車のエンジンパーツ、工作機械の部品、鍛造成型用・樹脂成型用の金型など、多岐にわたる。日常生活で目にすることは少ないが、工業製品を作り上げるうえで欠かすことのできない機械が、マシニングセンタである。

「機械を作る機械」である工作機械を、「マザーマシン」と呼ぶことがある。なかでも「工作機械を作る機械」という役割をも担うマシニングセンタは、まさにマザーマシンの名にふ

さわしい。市場が工業製品に精度の高さを求めれば、生産・加工の現場では、工作機械にそれ以上の精度の高さが求められる。さらに、マシニングセンタには、一般の工作機械以上の精度が要求されていくことになる。

「高硬度の素材を高精度で加工」の要求に応える

マシニングセンタの精度を高める要素はいくつかある。

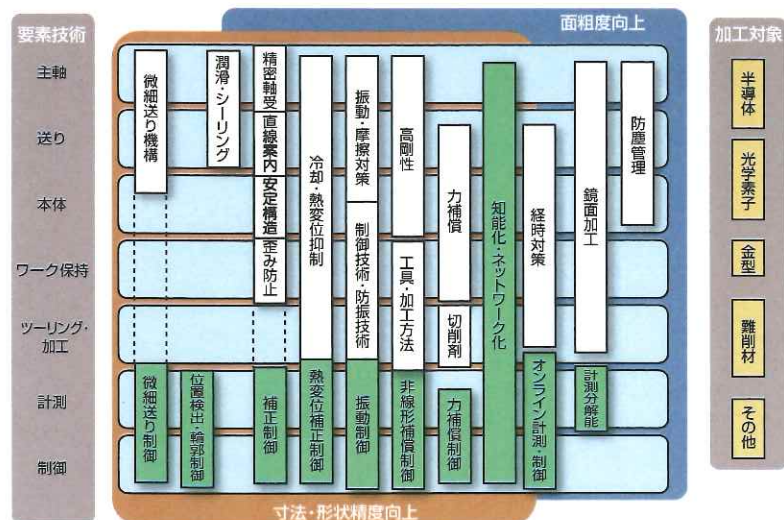
主要な要素をあげれば、まず第一に、対象を削り出す刃先＝エンドミルのぶれが少ないことである。

第二に、機械全体の変形が小さいことがあげられる。剛性が高く熱変形が小さいことが必要である。

第三に、機械の動作、特に送り機構の正確さである。

近年、金型製作用のマシニングセンタの需要が増加している。その背景には、電子機器、特にモバイル機器の小型高性能化が続いていることがある。携帯電話などの筐体や、LSIに付属する極小部品などの樹脂製品の量産に、高精度の金型

超精密加工工作機械の技術俯瞰図



素材、形状から制御まで、工作機械の「超精密」へのアプローチには、さまざまな要素が関係してくる。「次世代工作機械（高精度・高効率・環境対応、超精密機械加工技術）に関する特許出願技術動向調査」（特許庁、平成15年5月15日）より。

が求められているのである。

形状の複雑な電子機器用の金型は、従来、切削加工と放電加工を組み合わせで製作されてきた。合金鋼の素材に、マシニングセンタで基本形状の切削を行い、次に焼き入れを施して硬度を高め、放電加工で仕上げるという工程である。焼き入れ後のHRC（ロックウェル硬度）が40を超えると、エンドミルの摩耗が激しいなどの問題から高精度の切削加工が難しいのが、仕上げ工程に放電加工が適用されてきた理由である。

しかし、放電加工は加工速度が遅くコストもかかる。金型製作の全工程を切削で行えば、それだけ効率化を図ることができるのである。

高精度、高硬度の切削加工を行う方策のひとつが、スピンドルの高速回転化である。エンドミルの送り速度が同一であれば、回転が高速であるほどエンドミルの回転数あたりの切削量を減じることができる。そのぶん切削抵抗（ねじりモーメント）は減じ、刃具の損耗も抑えられる。一方で、炭素工具鋼や超硬合金などの素材に、炭化チタン（TiC）や窒化チタン（TiN）、窒化チタンアルミ（Ti,Al）Nなどのコーティングを施すことで刃具自体の耐摩耗性、耐熱性を高めている。刃具のコーティングは、切削加工の高精度化や対象素材の高硬度化への対応に加え、加工速度改善にも効果を発揮する。

こうした技術を組み合わせ、「微細・精密な加工」かつ「高硬度素材の切削」という要求に応える、高精度金型製作向けのマシニングセンタが製品化されている。

ハイエンドをねらう日本の技術

90年代、韓国において電子・電気分野を中心に製造業が急成長を示したとき、韓国メーカーではこのようなことを語る

人がよくいた。

「工業生産量ではわが国・韓国のメーカーは日本に迫る勢いで頑張っている。しかし今のところ、その生産のための機材やノウハウは、まだ日本に及ばない。そのために生産量が伸びるほど、日本からの設備や技術の輸入も増える傾向にある」

その後、工作機械の分野でも、その韓国を筆頭にアジア諸国の伸張は著しく、日本も安穏としていられる状態ではなくなってきた。しかし、高精度を要求される分野では、なお、日本の技術に定評がある。

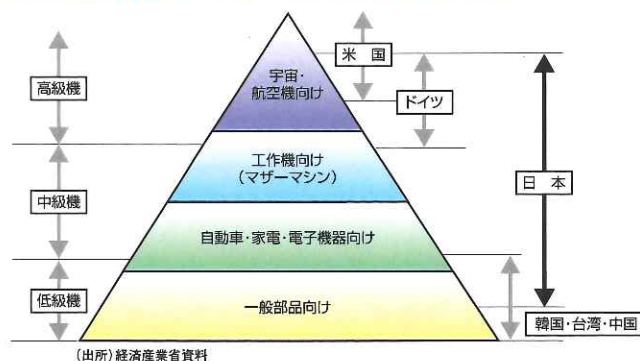
そんなマシニングセンタの「高精度化」への取り組みのひとつとして、安田工業株式会社（本社・岡山県浅口郡）のケースを取り上げる。イタリアのフェラーリ社が、1990年代初頭、エンジン

部品の加工ラインを刷新する際、より優秀な工作機械を求めて、4年をかけて世界中のメーカーを訪ね歩いたという。そして白羽の矢を立てたのが、この安田工業（株）である。同社のマシニングセンタは、エンジンのクランクケースにシャフトを通す穴を開ける加工において、両側から削り進んで、中央で寸分の狂いもなく同軸につなぐことができる。この高精度が評価されたのである。

同社のマシニングセンタは、フェラーリ社の他にも、当然ながら、日本の自動車メーカー各社で使われている。また前述のように、最近では高精度の金型製作の需要も増えているという。

マシニングセンタの精度を高める技術はさまざまあるが、同社で適用している一例として、熱変形への対策をあげる。前述のように、スピンドルの回転はますます高速化する傾向にある。スピンドルを支える軸受け部（ベアリング）は、通

主要国工作機械メーカーの得意分野の位置付け



超精密加工用機種については航空・宇宙産業を持つ欧米メーカーの力が伝統的に強い。日本メーカーの製品は量産に適した汎用機種を中心としていたが、近年はより「精密・微細」へと得意分野の範囲を広げ、欧米メーカーに匹敵する高い評価を得て、その分野を強化しつつある。「輸出促進事業について 重点分野の概況 1. 部品・機械 工作機械」日本貿易振興機構（ジェトロ）Webサイト（<http://www.jetro.go.jp/top-j/index.html>）より。



携帯電話の筐体の樹脂用金型と、機械のグリップ部品の金属鍛造用金型。金型を最終工程まで切削加工するニーズが高まっている。

高精度マシニングセンタによる切削加工例



高硬度材料加工見本。手前は自動車のギア部品で、ロックウェル硬度60を超えるが、これらも仕上げまで切削で作ることができる。



精細段差加工見本。一見ただの金属ブロックに見えるが、表面には順に1.5~0.3μmの段差で「YASDA」の文字が彫り込んである。

常、静止状態では多少緩めに組みつけている。そうでなければ、高速回転での稼動状態でベアリング部に熱膨張が起きたときに、圧力が上がりすぎ、回転に余計な抵抗がかかるからだ。しかしこれでは、温度がさほど高くない低速回転時には望む精度が得られないことになる。そこで、ベアリングの内側と外側に熱膨張率の違う材料を使い、低速域から高速域まで、常に適正な圧力が得られるような工夫がある。

また、加工効率を上げるために、各軸送りの速度も上がっている。この結果、設置場所の環境による温度変化はもとより、マシニングセンタそのものの動作により発生する熱の影響も無視できない大きさになっている。

鉄の線膨張率は20℃において $11.8 \times 10^{-6} / \text{K}$ であるから、長さ1mの鉄は、室温付近で1℃温度が高くなれば、約 $12 \mu\text{m}$ 膨張する。一方、高精度マシニングセンタには、 $\pm 1 \mu\text{m}$ の位置決め精度が要求されるが、その主要部品は鉄鋼材料製である。つまり、この部品の長さが1mあれば、わずか1℃の温度変化で、目標とする位置決め精度の10倍の狂いが出てしまう。これに関しては、主コンポーネント（ベッド、コラム）の内部に、室温 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ に管理された冷却油を循環させ、温度変化

が機械の精度に及ぼす影響を最小限にとどめている。

機械を上回る「人の手」の精度

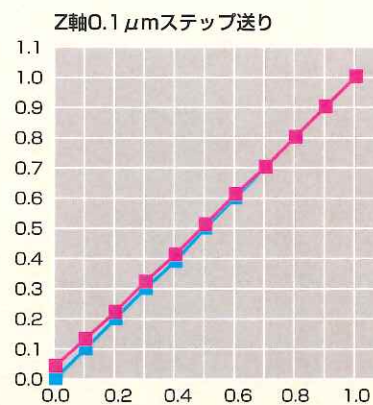
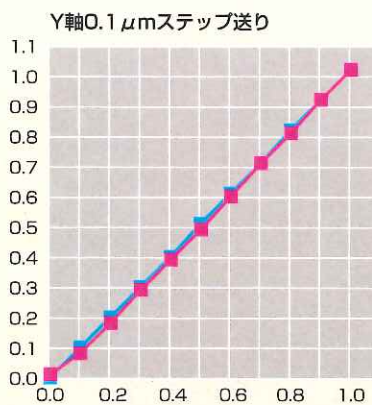
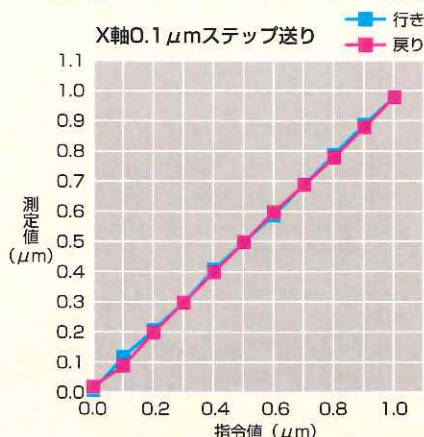
こうした材料、機構上の工夫以上に重要なのが、マシニングセンタの製造それ自体における「加工精度」である。

一般的に、機械で作られた製品の精度は、もとの機械の精度以上にはならない。つまり、何かの工作機械でマシニングセンタを作れば、マシニングセンタはその工作機械以上の精度にはならない。しかし一方で、「マザーマシン」であるマシニングセンタは、その製品である工作機械以上の精度を持っていなければならない。このパラドックスを解決するには、マシニングセンタの精度にかかわる部分を人の手によって製造するしかない。

安田工業（株）のマシニングセンタ製造工程において、特に丁寧に、長時間かけて仕上げられる部分がある。

切削刃具が付くスピンドル、および加工する対象素材が載るテーブルは、ガイドウェイと呼ばれるレール上を上下・左右・前後に動いて、対象素材に当たる刃の位置を自由に調整

高精度マシニングセンタの送り精度



安田工業の小型精密機械部品用機種、YMC325の各軸の「動き」の精度。全軸の駆動に、従来のボールネジに代わりリニアモータを採用するなどして、高い送り精度を実現。同社資料より。

するようになっている。この摺動が正確でなければ、当然、対象素材を正確に切削することはできない。つまり、ガイドウェイがどれだけ正確に水平・垂直の平面性を保ったうえで、摺動面の平滑さを持っているかが、正確な摺動を実現するには不可欠ということになる。

ガイドウェイ自体は、高硬度の焼き入れ鋼にダイヤモンドラップという微細研磨を施すことで、高い平滑度を持たせてある。しかし、ガイドウェイの最終的な平面度は、それを取り付ける面に左右される。この取り付け面が、1カ所1カ所、手作業によって仕上げられていく部分である。

鍛造されたものを機械研磨した段階での、取り付け面の平面性の誤差はおよそ $5\mu\text{m}$ 以内だが、この誤差が $2\mu\text{m}$ 以下になるまで、キサゲ（ハンドスクレーパー、掻き取り工具）という工具を使って表面をならしていく。この作業自体も「キサゲ（刮げ、削げ）」という。

実際の作業では、荒削りした加工面の真直度をレーザー計測器で測り、その結果に応じて、キサゲでさらっていく。キサゲはのみ（鑿）のような工具で、柄の部分を含めた長さが、人の腕の長さよりも若干短いくらいとなっている。作業者は、キサゲの根元を腰に当て、腕だけでなく、体全体を使って、鉄の表面を小刻みに削る。

しばらく削ると、光明丹と呼ばれる褐色の塗料を加工面に塗り、正確な平面を持つ「摺り合わせ定盤」をその上に置いて滑らせる。すると、表面の細かい凹凸に従って、凹部には



キサゲによる削り作業。光明丹を塗っては定盤と摺り合わせ、出っ張った部分をまたキサゲでわずかに削り、ならしていくという作業を繰り返す。削り跡の微妙な形状から、「誰が削ったのか、一目でわかる」という。



キサゲ加工前の材料表面状態の、断面図イメージ。摺り合わせ定盤を滑らせたときに鉄の地肌が出る部分（三角形の先端）の数が少なく、面として凹凸が大きい。



キサゲ加工後のイメージ。凸部の個数密度が多くなり、平面性が高まっている。

塗料の色がそのまま残り、凸部は擦れて鉄の地色が出る。当初は1インチ角の中に数個しかない凸部を、キサゲでわずかにさらっては、また定盤を滑らせる。この作業を繰り返し、最終的には、1インチ角の中に等しい高さを持つ凸部が20カ所くらいになるまで、全体を均していく。

正確な平面を出す方法としては、「三面摺り」と呼ばれるものが知られている（コラム参照）。安田工業（株）の場合、この方法で「マスター定盤」を作り、常時使用する複数の「摺り合わせ定盤」は、マスター定盤から作成している。

キサゲを終えた加工面は、銀色の花びらを敷き詰めたようにも、何かの多結晶固体の断面のようにも見える。大自然の

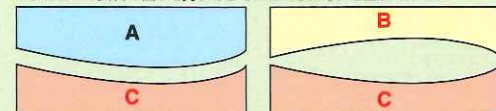
正確な平面を出す方法「三面摺り」

ある試料の面Aと、別の試料の面Bとがぴったりと隙間なく重なったとする。しかし、そのことによって、AとBとが平面であるとはいえない。それぞれが向かい合わせに等しく凹凸を持っている可能性があるからだ。そこに、もうひとつの試料の面Cを持ってきて、A、Bそれぞれと重ねてみる。もしA-B、A-C、B-Cのどの組み合わせでも面がぴったりと重なるとすれば、そこで初めてこの3つの面は正しく平面であるといえることになる。原始的に思えるかもしれないが、これがいちばん確実な方法なのである。

AとBとがぴったりと隙間なく重なったとしても、そのことによって、AとBとが平面であるとはいえない。



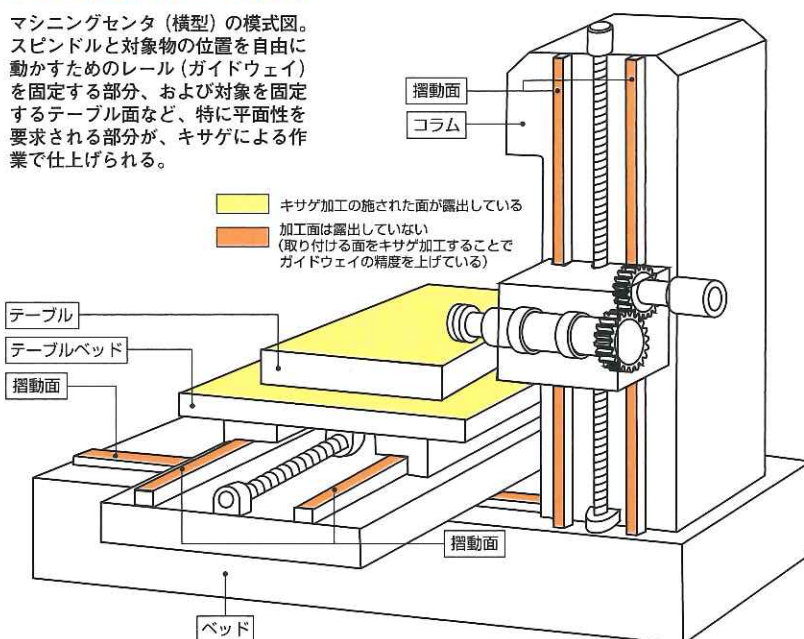
もうひとつの試料の面Cを持ってきて、A、Bそれぞれと重ねてみる。



AとCともぴったりと隙間なく重なったとしても、正しい平面でなければBとCとずれが出る。3つがぴったり重なるまでそれぞれを削っていき、3つの正しい平面が得られる。

キサゲ加工が施される箇所

マシニングセンタ（横型）の模式図。スピンドルと対象物の位置を自由に動かすためのレール（ガイドウェイ）を固定する部分、および対象物を固定するテーブル面など、特に平面性を要求される部分が、キサゲによる作業で仕上げられる。



法則にも通じる、秩序だった美しさを感じられる。

「鉄の目」を読む熟練者が高精度を実現する

もちろん、マシニングセンタの機種によって、ガイドウェイの長さ・面積（すなわち取り付け部の長さ・面積）は違うが、おおまかにいえば、1カ所のキサゲ加工に、熟練者1人が1日かかるという。つまり、3軸方向に2本ずつのガイドウェイが設置される機種であれば、それだけで1台につき1週間が費やされることになる。

また、マシニングセンタで平滑度や正確な曲率を要求される部分は、ガイドウェイだけではない。対象素材を載せるテーブル、駆動部の軸受け（スピンドル）など、いくつもある。それらの部分が、基本的にはキサゲやハンドラップ（微細研磨。研磨剤を塗布した対象素材を、手に持った工具で研磨する）などの手作業で仕上げられていく。

こうした工程を支えているのは、まさに職人芸といえる現場技術である。

キサゲを操って、加工面を平滑に、真っ直ぐに削れるようになるまでには、およそ3年の経験が必要というのが現場での常識という。しかし、「平滑で真っ直ぐ」だけでは充分ではない。矛盾しているようではあるが、「平らにするために、

見た目も異なる、キサゲ作業前後の加工面



キサゲ加工前の、機械加工のままの表面（写真は大型機種のテーブル表面）。この段階で平面性には最大5 μ m程度の誤差がある。



キサゲ加工後。最終的には、1インチ平方の中に、定盤を摺り合わせて当てる「山」が20か所くらいになり、平面性の誤差は2 μ m以下になっている。



大型機種の最終組み立て作業。据え付けようとしているテーブルが、左写真でキサゲ加工していたのと同じもの。

あえて平らには削らない」技が求められる。

たとえば対象素材を載せるテーブルは、油圧で作業位置に圧着し、固定する。この力がかかるぶん、テーブルにはわずかに変形が生じる。その変形を見込んだうえで平面を実現するために、キサゲ作業も同様の負荷をかけ、

稼動状態を再現して行く。

あるいは、キサゲを施す対象が、ブリッジ状の台座の水平部分であれば、鉛直方向にかかる、俗にいう「垂れようとする力」を考慮する。マシニングセンタが稼動状態になったときに、正しい平面が実現されるためには、中央部分をわずかに盛り上げて仕上げなければならない。変形寸法は、最大となる中央部分で何 μ mか。台座の脚部に向かってどんな曲線を描くか。このような変形も、ある程度シミュレーションによって予測は可能である。しかしシミュレーションを超えた微妙な変化を読み取り、それに応じた加工を行う技は、熟練工と呼ばれる人々にして初めて可能になるという。

その域に達するまでには、少なくともおよそ10年を要する。宮大工が1本1本の柱や梁に木の目を読むように、彼らには「鉄の目」が読めるのだという。

こうした、キサゲを使った手作業による精度向上は、同社のマシニングセンタだけでなく、半導体製造機器のメーカーなどでも適用されている手法である。先端技術の土台を支える、 μ m単位の高精度を実現する機械の真髄ともいえる部分は、やすやすと真似のできない「人の手」の技によって支えられているのであった。

〔取材・文=川畑英毅、写真撮影=三浦健司〕



小型機種の組み立て途中の姿。主に金型加工などに使われる縦型のマシニングセンタで、ブリッジ状の摺動部に、スピンドルが垂直に装着される。左写真がスピンドル部装着後。

取材協力=安田工業株式会社