

## 調査対象技術の技術概要

### 「切削工具」

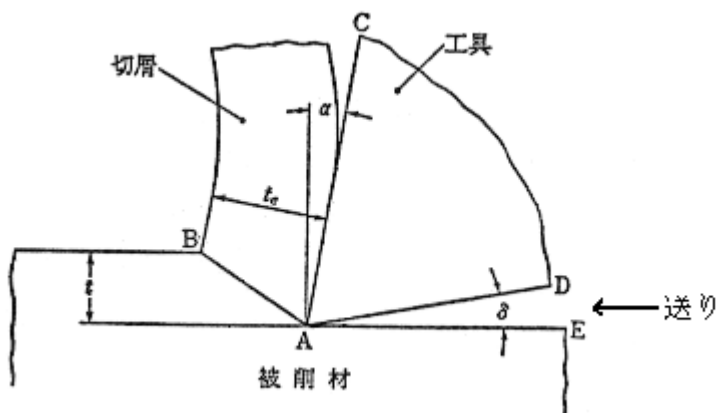
#### 1 切削加工とは

素材を機械部品に加工する方法は、圧延に代表される変形加工、溶接のような付着加工および除去加工の三つに大別され、おのにおに多くの加工法がある。切削加工は、研磨・エネルギー加工とともに除去加工に分類される。切削加工は工具と工作対象物間の相対運動により、工作物の不要部分を削り取って、工作物を所定の形状・寸法に仕上げる加工法である。工具と工作物の運動の組み合わせにより、平面、円筒、穴、溝、ねじなど多様な形状が得られる。木材、プラスチック、セラミックスにも適用されるが、高能率で比較的高精度の加工法として金属が主対象である。

金属の切削は 1900 年頃までは、斧で丸太を割るときのように工具が進むにつれ被削材が工具の前に引き裂かれてゆくものと考えられていた。

しかし、切屑厚さが切込みよりも数倍厚く、切屑長さが切削長より短くなる事実などより、現在では図 1 に示すものが切削の基本概念となっている。切削は被削材(work)、工具(tool)、切屑(chip)よりなり、工具にはすくい角(rake angle、 $\alpha$ )、逃げ角(clearance angle、 $\phi$ )がつけられる。

図 1 切削基本形式



工具に切込み深さ  $t$  を与えて切削するとき、切削される部分が工具すくい面 AC によって強い圧力を受け圧縮され AB 面で AB 方向にせん断を生じ、厚さ  $t_c$  の切屑となって AC 面を連続して流出する。

ここで、

- (1) せん断面 AB
- (2) 切削すくい面 AC
- (3) 加工面 AE

以上三つの面は切削機構上重要な箇所であり、(1) では被削材の塑性変形、(2) で摩擦と工具摩擦、(3) では工具摩耗、仕上面粗さおよび仕上面の残留応力が問題となる。なお、刃先稜 A は鋭く線として扱っているけれども微視的には丸みがある。

## 2 切削加工および切削工具の種類

切削加工には、以下に述べるような種類の基本型がある。

図2に示すように、平削、形削および旋削の突切作業のように切刃が切削方向に直角な場合を2次元切削 (orthogonal cutting) という。

図2 2次元切削 (平削、形削)

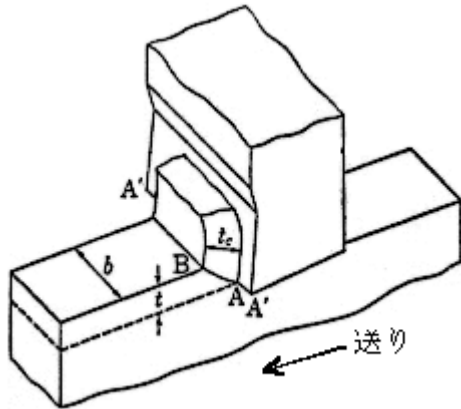
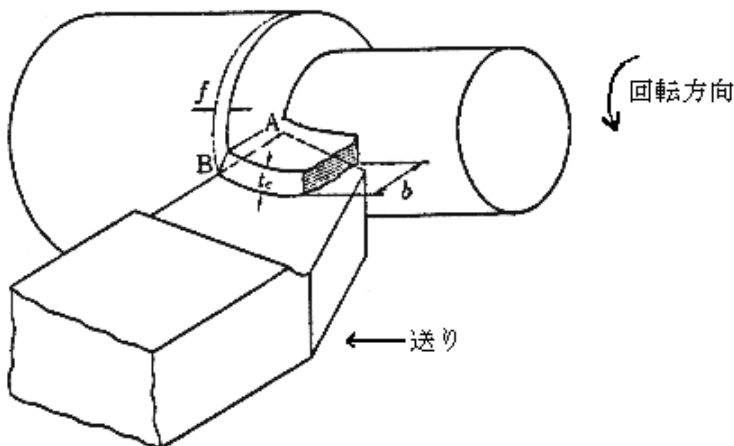


図3は切刃が切削方向にある角度をなす場合であり、これを3次元切削 (three-dimensional cutting) という。

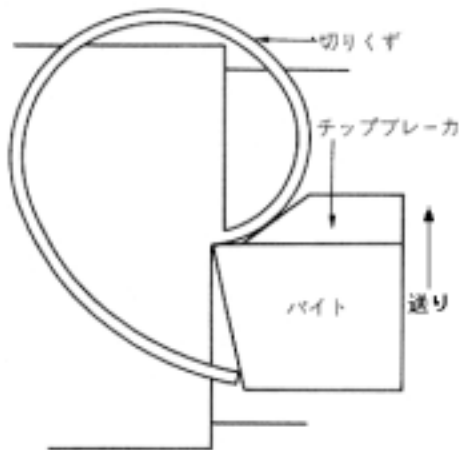
図3 3次元切削 (旋削)



3次元切削でも切刃ABに沿って考えるとき2次元切削と見なすことができる。この場合、2次元切削としての切りこみ深さ  $f$  は、送り  $f$  と切刃傾き角から求めることができる。

これらの工具はバイトと呼ばれ、単純な形状を有している。これらの加工では図3のように工作物が回転する旋削加工が中心である。加工により発生する切屑は工具や工作物に絡み付き、工具の欠けや破損、工作物加工面の損傷などの原因となる厄介な副産物である。そのため切屑の生成過程をコントロールして、トラブルの生じにくい形状とする。これが重要な課題であり、そのためにチップブレーカが用いられる。チップブレーカは発生した切屑を強制的に障害物に当て曲げなどの二次的作用を与え、処理し易くするものである (図4)。

図4 チップブレーカによる切屑生成

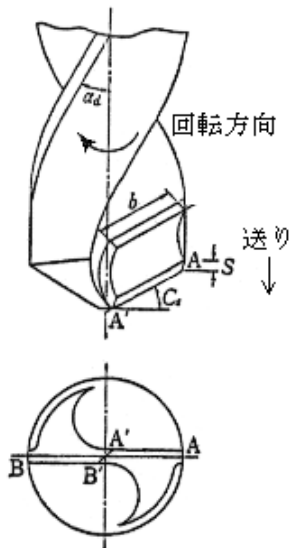


複数の切刃を有する工具に穴あけ工具のドリルやフライスやエンドミル等の転削工具がある。

ドリルは図5に示すように傾角  $C_s$  を有する二つのバイト（切刃  $AA'$ 、 $BB'$ ）と見なされる。この場合、2次元切削としての  $t$  は、送りと  $C_s$  とから求めることができる。

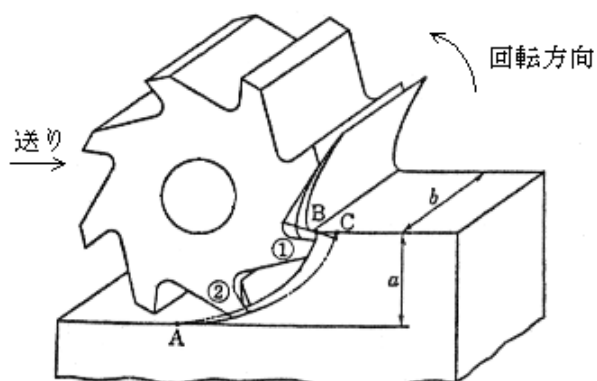
すくい角  $\alpha_d$  は外周ではねじれ角  $\phi$  であるが、中心に近くなるほど小さくなり、切れ味は低下する。

図5 3次元切削（ドリル）



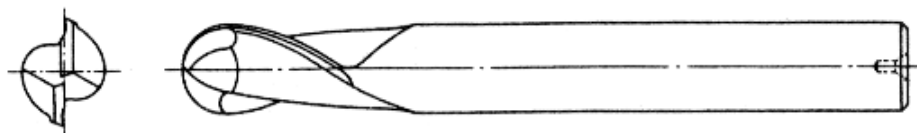
平フライス削りは図6に示すように、切刃  $AB$  およびこれの次の切刃  $AC$  が描く軌跡をそれぞれ  $AB$ 、 $AC$  とするとき、切刃  $AB$  が切削する面積は  $ABC$  であり、図2の2次元切削において切込み深さ  $t$  が0から最大厚さまで変化する場合に相当する。

図6 平フライスによる切削



エンドミルは外周面および端面に切刃をもつシャンクタイプフライスの総称である。二枚刃のボールエンドミルを図7に示す。

図7 ボールエンドミル



切削加工は使用する工具の種類によって(1)刃物(tool)による加工、(2)砥粒(abrasive)による加工とに大別される。普通前者をせまい意味で単に切削加工とよび、後者を砥粒加工とよぶ。ここでは砥粒加工は含めない。

刃物は多くの場合、高速度工具鋼あるいは超硬合金など高硬度の金属から作られ、その切刃を希望する形状、角度に成形して使用する。

以前は、大部分には高硬度の金属で作られた本体に切刃を持つチップをろう付けしていたが、本体との熱膨張率の違いにより発生する内部応力が工具寿命に影響を及ぼしていた。近年では、チップをホルダまたはカートリッジに機械的に固定するスローアウェイ方式が普及している。

本標準技術集に収められた切削事例においてあげられるスローアウェイチップの呼び記号のつけ方はJISB4120に規格化されており、ISOとの整合性も図られている。

刃物をその切刃の数によって分類すると単一刃工具(single point tool)と多刃工具(multi point tool)となる。単一刃工具とは旋削用バイトのようにその先端に1個だけの主切刃を備えているもので、工具は加工中には普通は固定させて使用するが、または直線の運動が与えられる。多刃工具はドリルやフライスのように2個以上の切刃をもっているもので、多くは回転させて使用する。単一刃工具は切込みや送りの比較的大きな重切削に適し、多刃工具は軽切削に用いることが多い。刃物による切削加工法種類およびそれに使用される工具、工作機械並びに主な加工面形状をまとめて表1に示す。

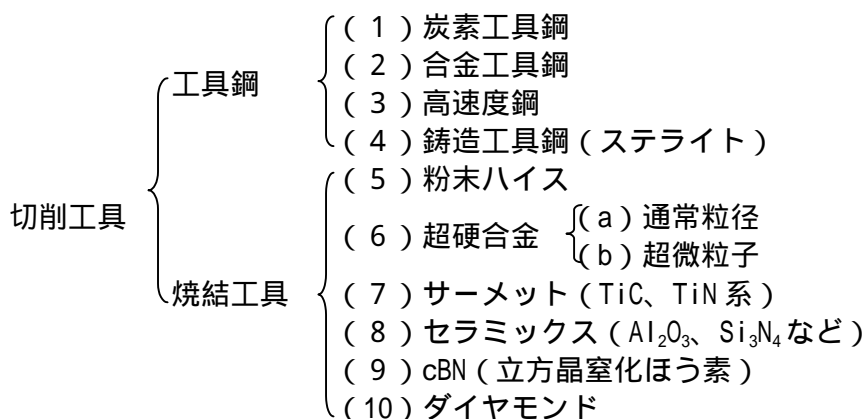
表1 切削加工法の種類

分類	切削法	工具	工作機械	主な加工面形状
単 一 刃 工 具 によるもの	旋削 中ぐり 平削り	旋削バイト 中ぐりバイト 平削りバイト	旋盤 中ぐり盤 平削盤	円筒外面、円錐面 円筒内面 平面
多 刃 工 具 によるもの	フライス加工（ミーリング） 穴あけ リーマ仕上 ブローチ加工 ホブ切り	フライス ドリル リーマ ブローチ ホブ	フライス盤 ボール盤 ボール盤、旋盤 ブローチ盤 ホブ盤	平面、溝 丸穴 丸穴 異形穴 歯車歯面

### 3 切削工具材種と表面処理

現在使用されている工具材は表2のように分類され、またおのこの品種がさらに多くのものに細分されている。そのうえ、工具メーカーにより品名および切削性能は異なる。

表2 切削工具材の分類



工具の材料は被削材よりも硬く、かつ衝撃に耐えられるために靱性が高くなければならない。さらに加工時には発生する熱により高温になるので、高温でも硬度が下がらず耐摩耗性の良いことが必要である。

表2のうち、(1)、(2)、(4)は過去のものとなり、ほとんど使用されていない。高速度鋼は「ハイス」と呼ばれ、0.7~0.85%のCで、18%W、4%Cr、1%Vの組成が標準で、炭化物が微細かつ均一に分布するように熱処理を行なうことが重要である。Coを添加して耐熱性を上げたもの、Wの一部をMoで置き換えて靱性を高め、焼き入れ温度を低くしたものなどがある。W系はバイトに使われ、Mo系はドリルに使われる。鑄造の際生じ易い偏析を避けるために炭化物の分布を均一化させ、組織を微細化できる粉末焼結技術が使われ、粉末ハイスと呼ばれる。ハイス系は硬さでは他に劣るが、靱性は最も高いのが特徴である。

超硬工具は超硬合金を使用したもので、WCを主成分として焼結の結合剤にCoを用いる。JISでは用途分類として、普通鋼や合金鋼などに用いられるP種（WC-TiC-TaC-Co）、鑄鉄や非鉄金属、非金属材料に用いられるK種（WC-Co）があり、その中間に耐熱鋼、鑄鋼、ダ

クタイル鋳鉄などに用いる M 種がある。

K 種は、切削温度が高くない状態では超硬合金で最も切削特性が良い。TiC を加えると高温強度は向上するが、もろくなるので TaC を加えて靱性をアップしている。粒径が 1 $\mu$  以下の超微細の WC を用いるものが超微粒子超硬合金であり、焼結の際に WC 粒同士が合体して粗大化するのを防ぐために VC や Mo<sub>2</sub>C などを少量加えている。WC 粒子が小さくなるとシャープな切刃を精度良く形成でき、一般超硬合金に比べ硬さが同じなら強度が高く、強度が同じなら硬度が高まる。ただ高温になると問題が生じるので、温度があまり上昇せず、シャープさ、耐磨耗性、靱性が要求される用途に向いている。

サーメットはセラミック・メタルを略したもので TiC、TiN などを硬質層とし、結合層には Ni や Mo を用いたものである。TiC、TiN は WC と比較すると高温強度や耐酸化性に優れ、被削材との反応性も低い特徴がある。セラミックスの高速切削や超硬合金の低速切削まで幅広く使用されており、被削材表面状態も良好である。超硬合金に比べて硬さは少し大きいが靱性が若干劣る。

工具に用いられるセラミックスは、高純度・微細な酸化物 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> など) や窒化物 (TiN、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> など) などの粉末を高温で加圧しながら緻密に焼結させたものである。当初はアルミナ系が中心で耐磨耗性に優れているが欠損し易く、使用範囲が限られていたが、TiC や SiC を加えて靱性が改善され、鋳鉄や高硬度の被削材に用いられるようになった。さらに窒素けい素系セラミックスも用いられる。

ダイヤモンドは全物質中で硬度が一番高く、ヤング率、熱伝導率も大きく工具材料として極めて優れている。単結晶ダイヤモンドは人工で最大 0.6mm 程度なので、高温・高圧下で超硬合金母材上に焼結された焼結ダイヤモンドが主として使用される。アルミや銅などの非鉄金属とその合金、セラミックス、プラスチック、ゴム、CFRP などの切削に用いられる。しかしダイヤモンドは Fe、Ni、Co とは通常の切削温度で化学反応を起こすので鉄系金属、耐熱合金の加工には適用できない。

cBN (立方晶窒化ほう素) はダイヤモンドと同様、超高压装置で合成され、ダイヤモンドに次ぐ硬さと熱伝導率を持ち、鉄と反応しにくい上に耐熱衝撃性も高いなどの特徴を有している。そのため、鋳鉄の高速切削、高硬度材の仕上げ切削、鉄系焼結合金の切削などに使用される。cBN 焼結体は結合剤としてセラミックス系、サーメット系、メタル系が用いられる。

工具には成型後、コーティングを含めた表面処理を行い、性能向上を図っている場合が多い。特にコーティングは、スローアウェイチップの半数近くに施されているといわれている。高速度鋼の場合、工具表面の摩擦抵抗を減らし、耐磨耗性を向上させるため、種々の表面処理が行なわれている。浸炭処理、窒化処理、窒化物・炭化物コーティングなどあり、TiN や TiC をコーティングすることにより大きな効果を上げている例がある。

超硬合金については、当初 TiC だけの単層コーティングであったが、最近では TiN、TiCN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの硬質物質を数  $\mu$ m の厚みで化学的・物理的に強固に蒸着させたものが、単層のみならず、2 層、3 層と多層構造へと発展している。例えば、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TiC Ti 化合物の 3 層コーティングでは、最外層の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は化学的に安定なため、高熱で生じるすくい面の摩耗に有効で、その下の TiC は硬く、被削材との摩擦で生じる逃げ面摩耗に効果を発揮し、さらにその下の Ti 化合物は母材とコーティング層との強固な付着の役割を担っている。

1980 年代に CVD (化学的蒸着) 法により、ダイヤモンド薄膜の合成が行なわれ、工具コーティングに応用されるようになった。ダイヤモンドコーティングは、単結晶ダイヤや焼結ダ

イヤに比べて工具の形状の自由度が高いことに特徴があるが、母材材種としてはFe、Coを含むものには付着しにくいという制限がある。K種の超硬合金、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>などにコーティングされ、アルミや銅の合金、FRPや黒鉛材料などに使用されている。

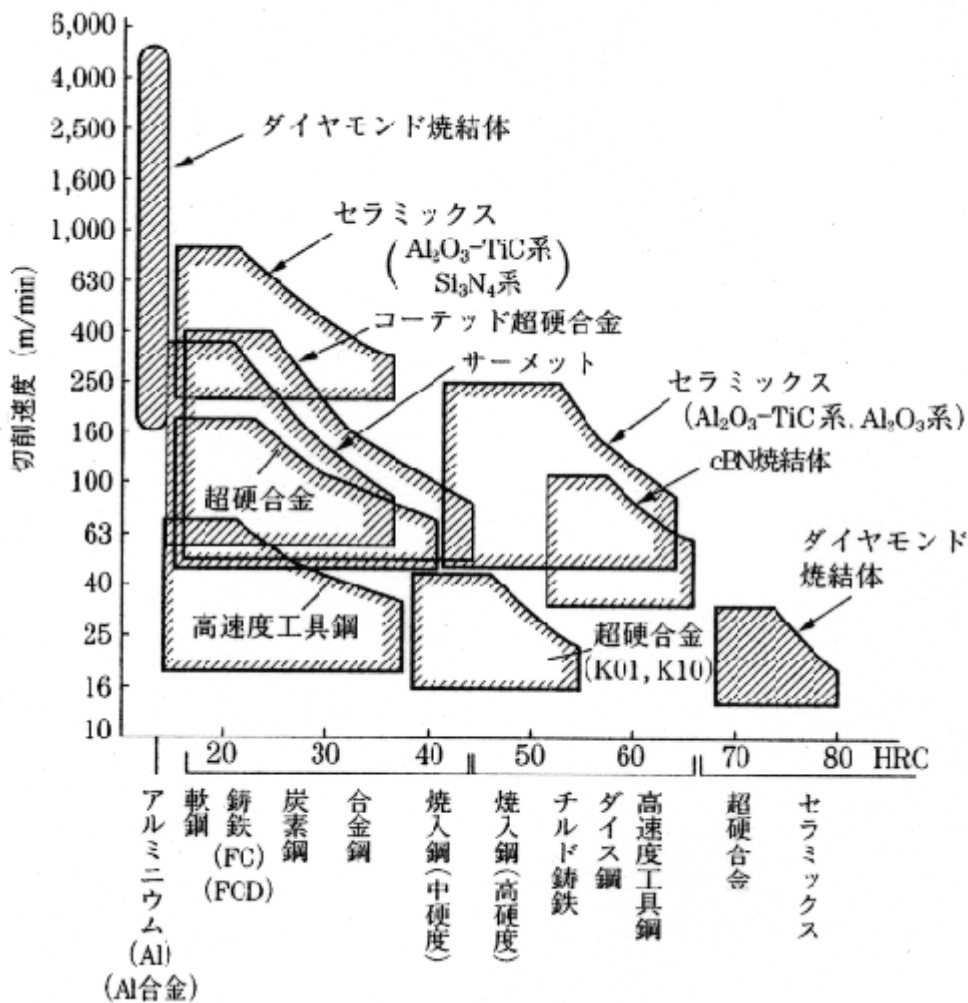
気相合成法により作成されるものに、水素を若干含む非晶質構造を持つカーボン薄膜があり、ダイヤモンドに類似した高硬度を持ち、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)と呼ばれる。DLCは作成法により特性が異なるが、潤滑性、摺動性に優れていることを特徴とし、工具へのコーティングも行なわれており、ダイヤモンドと同様の被削材に適用されている。

工具材料の特性は高温での硬度、耐磨耗性、耐欠損性、耐塑性変形性、耐熱衝撃性、耐熱疲労性、耐溶着性、高温での化学的安定性などが要求されるが、コーティングされたものは、その耐剥離性が要求される。

これらの特性をすべて兼ね備えている材料はあり得ず、それぞれ強弱があり、被削材の特性、加工速度、精度などにより、バランスをとって決定される。

図8は、切削熱を最も上昇させる要因である切削速度と、それぞれの被削材に適用し得る工具材料との関係を、被削材の硬さをパラメーターとして示したものである。

図8 被削材硬さと工具材種および適用切削速度



(出典:「データでみる次世代の切削加工技術」(2000) 狩野勝吉著、日刊工業新聞社、11頁 図2.4)

#### 4 潤滑・冷却

切削加工に際しては、工具寿命の延長、切屑の除去、仕上面の改善などを目的として切削液を用いることが多い。切削液は潤滑作用（切削工具のすくい面と逃げ面の摩擦を減少させ、熱の発生を抑制するので工具の摩耗を防ぎ、仕上面を改善する）と、冷却作用（切削温度を低下させることにより、工具の硬度の低下を防ぎ、切削速度を大きくできる。また、工作物の精度も向上する）が主であるが、切屑の洗浄作用、さび防止の被覆作用もある。

切削液には不溶性切削油と水溶性切削油があり、効果の点では前者は大きいですが、環境汚染に問題があり、後者が広く用いられている。

従来切削加工では、大量の切削液が用いられてきたが、環境調和型の生産技術が求められる時代となり、切削液を使用しないドライ切削、あるいは切削液の使用量を大幅に減少させたセミドライ切削の開発が進められている。

セミドライ切削には、次のような例がある。

##### （１）MQL（Minimal Quantity Lubrication = 最小量潤滑）切削

切削油をミスト状にして切削点に供給する方式である。ミストは植物性の潤滑油を高圧空気と混合し、極微細粒に生成される。

微細粒ミストの生成および微細粒を維持したまま、切削点に供給することが技術上のポイントとなる。

##### （２）複合ミスト冷却

MQL では、切削熱の除去がミスト搬送用空気による冷却が主であるため、十分でない。この点を改良したものとして、ミスト状水滴の表面に薄い油膜を張って切削点に供給する油膜付水滴加工法が開発された。

##### （３）冷風冷却

マイナス 20～30 度程度に冷却された冷風を吹き付け、加工熱を除去する方式である。

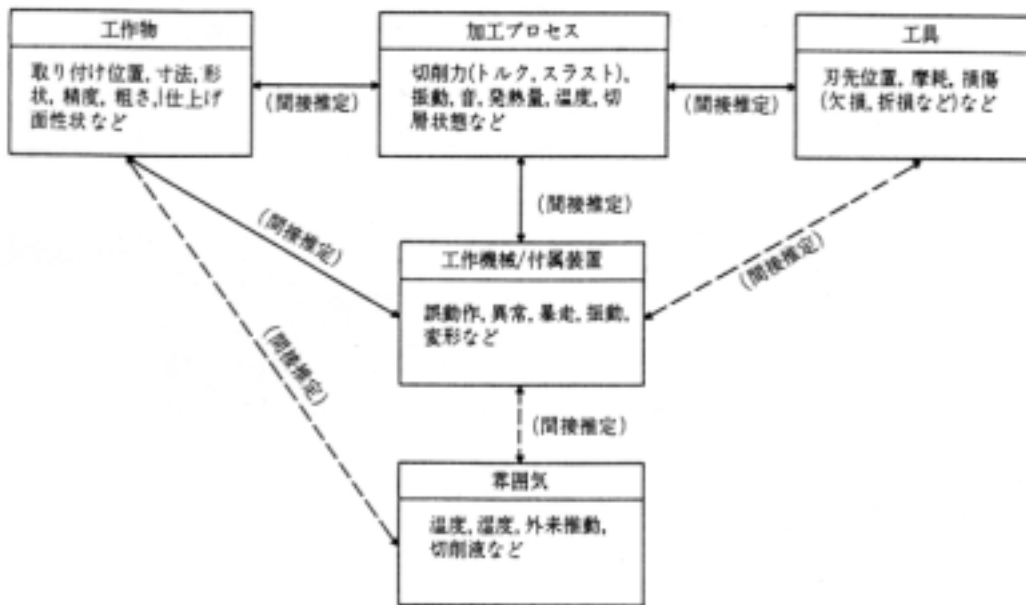
本標準技術集では、潤滑・冷却方法が刃物の形状、材質、表面処理、切削性能に大きな影響を及ぼす技術事例および切削点に切削液、ミストをピンポイントで供給する技術事例を主たる技術として取り上げ、単に切削条件として扱われているものは、従たる技術とした。

また工作機械の一部と見なし得る切削液の供給装置は収集していない。

#### 5 工具監視

近年、切削工具の監視に多大な関心が寄せられ、技術開発が進められている。切削加工における検出、計測する項目として、図 9 に概要を示す。

図9 機械加工システムを構成する要素と計測・監視システム



(出典：機械と工具、(1994年10月号) 森脇俊道著、P5、機械加工におけるセンシングの現状と今後の課題)

このうち現在汎用化されている事例としては、工作機械の主軸電動機電流より切削抵抗を監視するもの、ドリル等の工具の長さを計測するタッチセンサ、放射温度計により切削温度を監視するものなどがある。

また最近開発された実施事例として、数例を以下に示す。

(1) 光学的監視装置

切削液の供給路に設置した ITV カメラにより、切削中の切屑の状態、工具の切刃を直接観察する。

(2) アコースティックエミッション (AE) による監視装置

切削液の供給路に AE センサを設置し、検出された AE 信号を定量化処理することにより、工具寿命を判定する。

(3) 切削トルク計測による刃具折損予知システム

工具保持筒に変位検出センサを取付け、過負荷トルクが作用した時、変位検出子と基準検出子の回転方向のズレを検出し、工具の異常を検出する。

本標準技術集では刃物、シャンクなど切削工具に直接取り付けられたセンサにより、インプロセスで切削工具の状態を監視する技術を取り上げる。

6 切削加工の最近の動向

これまで切削加工技術全般を概観したが、切削加工は工業製品を生産する上で、非常に大きな役割を担っており、より多くの製品をより早く、歩留まりよく生産することを追及した加工技術として発展してきた。製造業の総生産に占める機械加工費の割合は約9%、11兆円にも達している。最近では、工業製品の性能向上、小型化・軽量化に対応した被削材の多様

化(難削材の増加など)・微小化の傾向があり、さらにボーダレス化による価格破壊等により、安価で高性能な製品を作る必要からより一層の生産性の向上が求められている。また、地球環境保全への配慮から「エコ加工」「エコ工具」が強く要請され始めている。この方向では切削のドライ化・高速化が追及されている。このような社会・経済環境の急激な変化に対応して、切削加工技術も急激な進歩を遂げている。特に「切削工具」では、コーティング工具の普及が顕著である。

本標準技術集では、工具についてはバイト、ドリル、フライス、エンドミルに限定する。材質においては、組成、表面処理、コーティングとその適用例等につき標準技術を集める。また工具性能、切削条件、工具監視、被削材料の観点からも技術を調査する。