特集

電子回路基板のドリル・ルーター加工入門（第1回）

ユニオンツール株式会社
津坂　英夫

はじめに

電子回路基板の製造工程の中で機械加工は、表１に示されているように、穴あけのみならず積層板の切断からバリ取りなど多岐にわたるが、穴あけがもっとも基板加工の中心であり、品質上も重要な工程となっている。基板の高機能化、高密度化とともに、パッケージを中心とした基板材料が耐熱性の向上のために難削化した材料が多く使われるようになり、また、高精度化、微細径化、コスト低減など様々な穴あけ工程に対する要求が増し、より高度化した技術が求められている。今や、プリント配線板の穴あけは、最高のレベルで300万毎分回転スピンドルを持つ６軸の高速穴あけ機で毎分700ヒット（穴あけストロークが毎秒10回以上繰り返される）のスピードで径100μm以下のドリルで穴あけがなされた場合、毎秒500穴が明けられる高能率加工も出現している。

また、ドリルビットの消費量から推定される毎日の穴あけの数は、200億穴位は加工されているのではと計算出来る。この他に、レーザーによって加工されている穴あけを加算すると一日に数百億の穴加工がプリント配線板上に加工されていると思われる。これは、膨大な量である。

このように、電子回路基板の製造において、穴あけは重要な加工プロセスなっているが、体系づけられた教育的資料は少ない。このシリーズは、新人などを念頭に置いて、基礎的な加工技術の手引き的なものを目的として、少しでも役に立てばと願うものである。

・穴あけ加工（ドリル、レーザー、エッチング）
・ルーター加工（外郭加工）
・整面（バリ取り）加工
　–穴加工時に生じたバリの除去
　–サンダー、丸ブラシなどによる
・端面加工（面取りも含む）
・切断加工
　–切断ソー（ダイアモンド砥粒、カッターによる）

図 .1-1　電子回路基板機械加工の種類

１．ドリル加工について

１．１　穴あけ加工技術の変遷と動向

電子回路基板、第二次世界大戦前後に開発されたが、民生用に使われ始めたのが戦後になってからである。当初は、ベークライトの基板を卓上のボール盤で穴あけ位置を目視で確認しながら加工していくものだったのが、ポザタイプと呼ばれる拡大鏡付きの単軸ボール盤が開発され、拡大鏡で所定位置を確認し、足踏みスイッチを踏むことで基板が固定され、下からドリルが上昇して穴を加工するものにかわった。

それまでストレートタイプのドリルだったのが、70年代に入り米国でカード式、後に紙テープ式のNC（数値制御）機が開発されて、工具の自動交換のためにシャンクが1/8インチ、全長が1.5インチで外観が変わらない現在のドリルの基となるスペックが作られた。米国で開発されたために、ドリル径はミリサイズになったにもかかわらず、いまだにシャンク径と全長でインチサイズが生きている。これ以降はボール盤の高精度化、多軸化、高速化とひたすら高性能なドリリングマシンと工具が開発され、樹脂付きあて板などの普及により一気に極小径化、高速化がすすんだ。

ドリル		ハイスツイストドリル	超硬ストレートドリル	超硬ルーマ型ドリル（1/8"shank）	超硬ルーマ型ドリル（1/8"shank）	超硬ルーマ型ドリル（1/8"shank）	超硬ルーマ型ドリル（2mm shankも）
	量産径	1.5mm	1～1.5	0.9～1.1	0.4～1.0	0.3～0.4	0.1～0.3
	加工最小径			0.5	0.3	0.15	0.05
穴あけ機		卓上ボール盤	単軸半自動ボール盤	CNC多軸ボール盤			
				NC多軸ボール盤	CNC多軸ボール盤	ACサーボ技術	リニアモーターの採用
	スピンドル回転数	ボールベアリング数千rpm	ボールベアリング1～2万rpm	ボールベアリング5～8万rpm	エアーベアリング8～10万rpm	エアーベアリング10～16万rpm	エアーベアリング16～35万rpm
	ヒットレート	～20hits/分	～60	～150	～250	～400	～750
PCB市場	PCBの潮流	片面のベーク板	ガラエポ基板	多層板	20層以上の多層板	ビルトアップ基板	パッケージ基板
			テレビなどに採用	業務コンピューター・産業機器	パソコンの普及	携帯電話の普及IT化の波	デジタル家電
年代		50	60	70	80	90	00～

図 .1-2　PCB 穴あけ加工の変遷、発展

90年代に実用化されたレーザーによる穴あけ加工が高速、低コストで普及し始めたため、ドリルによる機械加工でも十分な採算性がとれるよう、対抗上、高速化の必要性があった。レーザーは、熱による樹脂への影響や、レンズでの絞りの限界、複合材料である基材部の特性の制限から、浅い、径が0.15未満でビルトアップ配線板に主に使われている。

1.2 ドリル加工の要因

工具の穴あけ加工を最適化していく上で、ドリルやドリリングマシンの他にいろいろな因子が影響しており、それらが一つでも問題があるとうまく加工できなくなる。大きくは、ドリルやドリリングマシン以外に、基板材料、あて板・捨て板を含むスタッキング、加工条件、環境などであるが、それらの要因を図にすると図１－３のようにまとめることが出来る。これよりこの連載に、これらの要因について、解説して行くことにする。

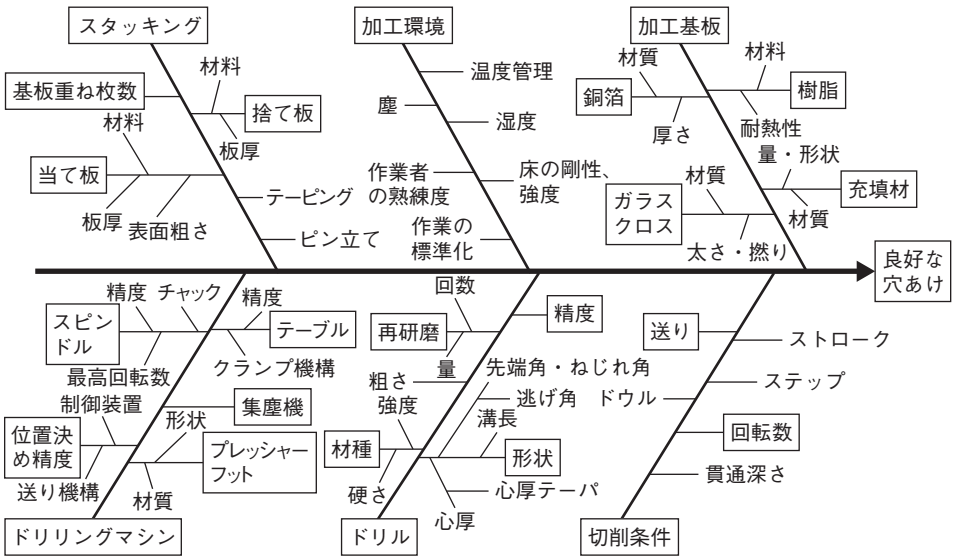


図 .1-3　穴あけ加工要因図

1.3 ドリルの切削機構

電子回路基板を加工する場合でも、ドリルの切削機構は金属の穴あけとそれは一緒であり、古くから行われてきた研究や教科書的なところから紐解いていく必要がある。ツイストドリルの切削機構を初期に解析的に研究したもっとも基礎となる文献は1957年に当時 National Twist Drill にいた D.F.Galloway[(1)]であろう。その後、Oxford[(2)]や日本では佐久間敬三氏[(3)]などがその基礎を築いてきた。

こうした過去の研究者がドリル加工の特徴について、他の工具による加工に比べて、難しい点を以下の理由をあげて、述べている。

① 汎用性があり、手軽に使用できる
② 低消費エネルギーで経済的
③ 切り屑を限られた溝から外部へ排出させる困難性
④ 穴が深くなるに伴い切削熱が蓄積され、切削油も届きにくくなるため冷却が困難
⑤ 切れ刃の半径位置により切削速度が異なる
⑥ 工具直径によって穴径が決まるため、用いる工具の直径が制限を受ける
⑦ 穴深さよりも長い工具を使用しなければならない
⑧ 加工箇所を外部から観察できない

切れ刃に対する切削速度は、中心で０であっても外周に向かうほど増大するが、同時にラジアル方向のすくい角も変わり、その方向もネガからポジ側に変化していく。また、垂直方向のすくい角も切れ刃に沿って、中心部のチゼル部では大きな負の角であったものが外周でねじれ角と同じ角度まで変化する。したがって切れ刃各部で切削状態、切り屑流出方向が異なるにもかかわらず、一体化された切り屑が生成されていく。切り屑は、最外周まで厚みと長さが異なる切り屑が生じている。連続して一体化している場合、切り屑は基本的に螺旋状となる。

チゼルエッジは大きな負のすくい角であり、その切削状態はむしろ「押しわけ」作用に近い（図 .1-4）。そのためチゼルエッジでは大きなスラスト方向の力を受けており、ドリル全体に受けるスラスト力の大部分がここで受けることになる。このことによって、チゼル部が回転中心にあり安定してスラスト力を受けている限りは、チャック側とチゼルで２点支持となり安定した加工が行われていく。しかし、チゼル部が正しく中心にない場合や、チャック側の剛性が弱い、被加工物が不安定であるという場合には、自己求心性が乏しくなり、しばしばチゼル内で回転中心が移動して起こる「みそすり」運動を生じやすい。このみそすり運動の結果、穴壁にらせん状のライフリングと呼ばれるスパイラルの模様が穴内壁に生じる（図 .1-5）。これをライフリングマークと呼ぶ。こうした穴は、真円度に乏しく、軸方向からみると三角形または五角形（もしくは奇数の多角形）の「おむすび」状である。チゼルエッジの両端が交互に瞬間回転中心となっていくとき、チゼルエッジの長さは一定であるから、対角線間に必ず二等辺三角形を含む正多角形、すなわち三角形、五角形などの奇数多角形のおむすびを生ずるわけである（図 .1-6）。

「みそすり」運動は、加工している系全体の剛性が乏しい場合や、チゼルが中心としてずれている時、チゼルが

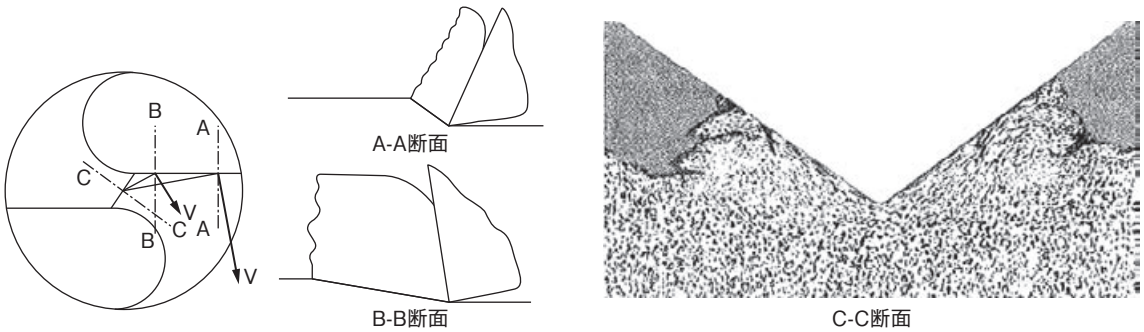


図 .1-4　ドリル切れ刃位置による切削状態の相違[(3)]

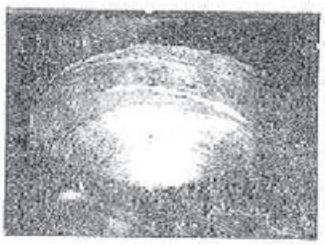
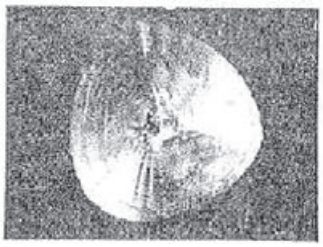


図 .1-5　ライフリング現象[3]



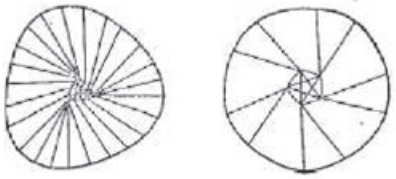


図 .1-6　みそすり運動[3]

点ではなく直線の稜線になっているために生じやすいが､中心が点となるスパイラルポイントや４面逃げドリル（二段平面研削法ともいう）が中心がずれにくい効果があるということで、４面逃げドリルが採用されている。

構造上ドリルの曲げおよびねじり剛性には限度があり、これが求心性の乏しさとともにドリル切削の精度、振動に対する安定性を阻害している。図 .1-7は、穴曲がりを模式的に示したもので、最初に主軸に対して q_0だけ偏心して食込みだすと、ドリルの進行とともに先端の変位 q は

$q = q0e^{3p/2l}$

の関係で増大し、穴の傾斜が増大していく（図 .1-7）。

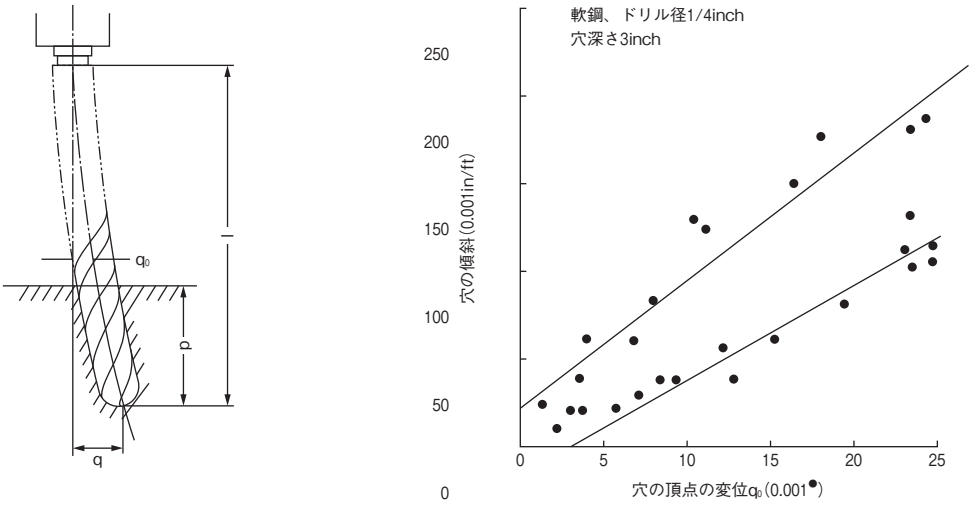


図 .1-7　ドリル偏心による穴曲がり[3]

先端切削に加わる切削抵抗は、図 .1-8のように切れ刃と直角に切削抵抗Ｐが生じ水平方向分力ｒと軸方向分力ｎに分けられる。分力ｒの力は、図のように半径方向分力 r1と接線方向分力 r2に分けられる。切れ刃の抵抗力は左右刃において同時に発生するので、r1は互いに打ち消しあい、回転方向に生じるトルクとして抵抗力が発生する。チゼルエッジには、被削材に食い込むときに生ずる切削抵抗 n1が軸方向に生じ、スラスト抵抗となる。トルクは、穴内壁との摩擦抵抗や切りくず詰まりによる抵抗からも生じている。

基本的にドリルの穴径の拡大しろは、ドリル径によって異なるが、図 .1-9のようにドリル径の１～２％に達する。この原因は、本来の自己求心性の乏しさを、２刃の対称性の誤差、剛性の乏しさ、軸受けの回転むら、構成刃先などの溶着物による影響が働くためである。実際、被削材と接触後のドリルの先端は、図 .1-7のような「よたり」運動をしている。この「よたり」は、食い付き時のガイドブッシュにより改善される。電子回路基板で用いられるエントリーシートは、このガイドブッシュの役割も果たしている。非常に細長く剛性の弱いドリルは、柔らかいエントリーシートの効果によって自己求心性を持つことが最近の研究で分かってきた。

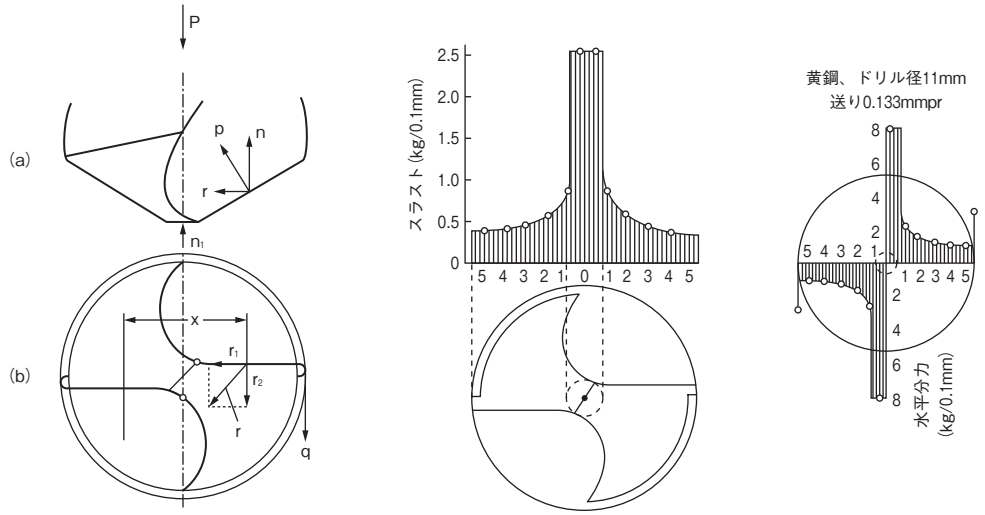


図 .1-8　ドリル切れ刃上の切削力分布[3]

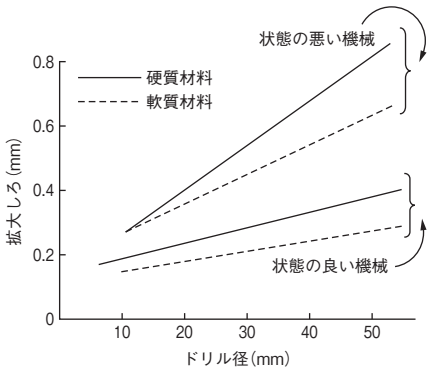


図 .1-9　ドリル加工の穴径拡大[3]

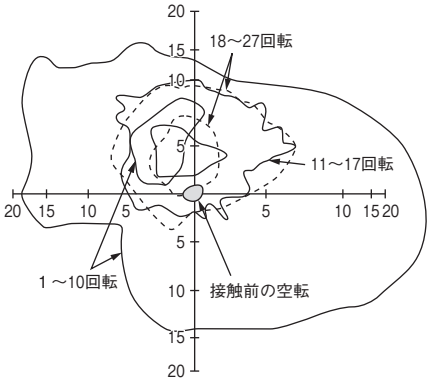


図 .1-10　ドリルのよたり運動[3]

1.4　ドリル形状と各部のはたらき

1.4.1　全長、シャンク径

前で述べているが、電子回路基板用ドリルのシャンク径、全長は、穴あけ機により自動で工具交換をするために一定の形状になっている。また、シャンク径が一定でドリル径の部分が変化していくドリルをルーマー型ドリルと呼ぶが、最初に電子回路基板用工具として開発されたのが米国であったために、インチ系の寸法が使われ以下の２つ形状になっている。このうち、最近開発された２mm のシャンクは径のみメトリックになっている。

① 3.175mm シャンクドリル　　シャンク径：Φ3.175mm、全長38.1mm

② ２mm シャンクドリル　　シャンク径：Φ2.0mm、全長：31.75mm

3.175mm シャンクドリルでは、もともと超硬ソリッドタイプ（すべて超硬合金）が主流であったが、タングステンの高騰やコスト低減のためコンポジット化、すなわち先端のチップ部分のみを（差し込みやロー付けなどで）超硬合金とし、シャンク部分はステンレス鋼が主流となっている。また、現在は、シャンク径の違いにより、遠心力の影響や軽量化によってスピンドルの最高回転が異なり、3.175mm シャンクは200krpm ～300krpm、２mm シャンクは300krpm ～350krpm となっている。今後、ドリル径の極小径化、微細径化に伴いスピンドルの高速化がさらに進むと期待されている。

図 .1-11はドリルの各部名称と3.175mm シャンクドリル／２mm シャンクドリルの主要寸法を示す。

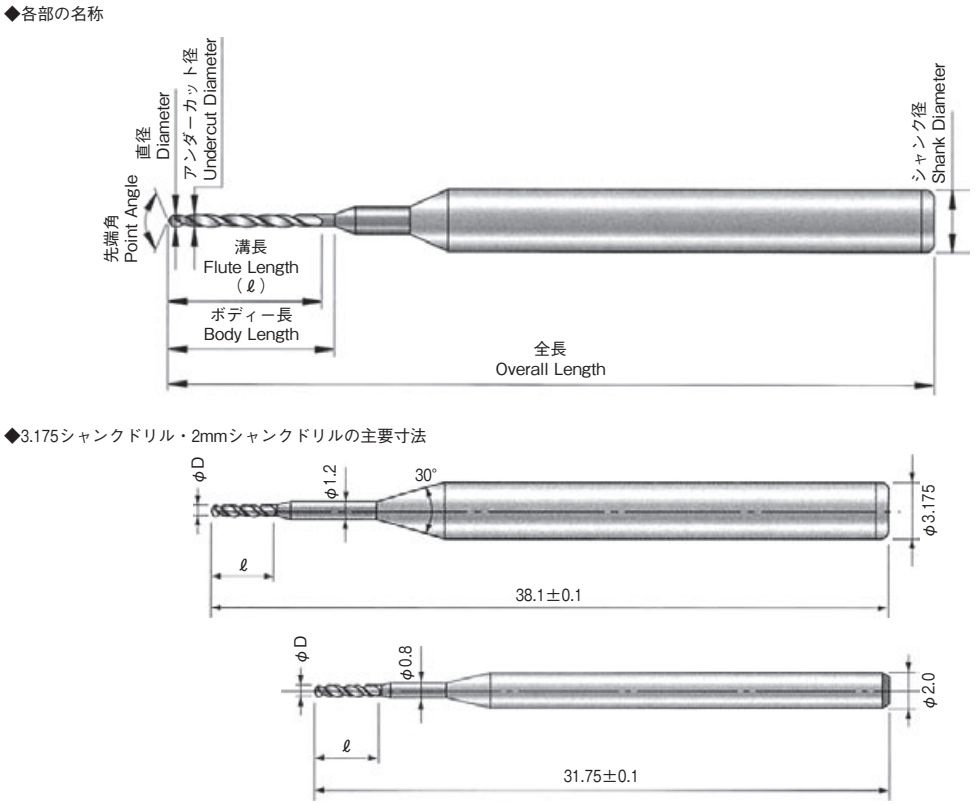


図 .1-11　ドリル各部名称と寸法

1.4.2　心厚、溝幅比、溝形状

⑴　心厚

心厚はドリルの剛性、切り屑排出性を決める非常に重要なパラメータである。心厚を大きくするとドリルの剛性は向上し、穴位置精度も良好となるが、その分溝体積が減少して切り屑排出性は悪化し、極端な場合は切り屑詰まりで折損に至る。反対に、心厚を小さくすると溝体積が増し切り屑排出性は向上し良好な内壁粗さを得ることができるが、剛性が小さくなり、一般的に穴位置精度は悪化する。近年のパッケージ向け電子回路基板用ドリルは、径が0.1mm 前後と小さく剛性を確保するため相対的に心厚が大きくなる傾向で、直径に対する心厚比が40～50％となっている。

⑵　心厚テーパ

心厚テーパは、ドリルの曲げ剛性を強くするため、心厚を先端から溝の根本に向かうに従い厚くしていくことをいう（図1-13)。心厚テーパも心厚同様、ドリルの剛性や切り屑排出性を決める非常に重要なパラメータのひとつである。心厚テーパを大きくするとドリル根元の強度が増し , 穴位置精度が良好となるが、根元の溝が浅くなり切り屑が出にくくなり、切り屑による内壁の荒れが発生する。反対に、心厚テーパを小さくすると溝容積（チップポケット）が増えて切りくず排出性が良好となり内壁粗さも改善されるが、反対に剛性不足による穴位置精度悪化を招く。一般的には心厚テーパ0.015～0.025の値である。また、一般的な直線的に心厚が増加するテーパ（ストレートテーパ）の他に、溝の途中で心厚テーパを変化させる可変心厚テーパを採用する場合がある。特に穴位置精度の要求が厳しい場合には、１段目の心厚テーパを大きくし、２段目を小さくする変則心厚テーパとし、食付き性がよく良好な穴位置精度を特徴としたドリルも使われている。図 .1-13は心厚テーパの例を示す。

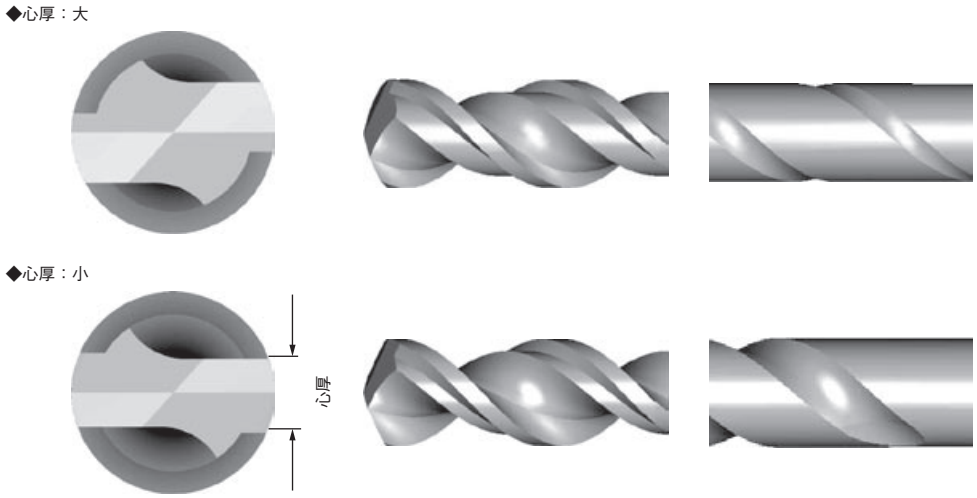


図 .1-12　心厚設計によるドリル特性の差

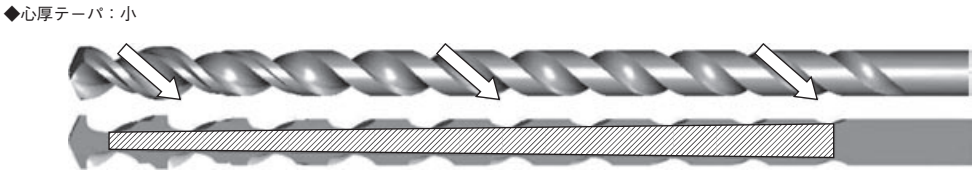


図 .1-13　心厚テーパ設計によるドリル特性の差

⑶　溝幅比

溝幅比は、図 .1-14のように溝の部分とランドの部分の比で心厚と並んで溝容積（チップポケット）の大きさを左右するパラメータのひとつである。溝幅比を大きくすると溝容積が拡大し切り屑の排出性が良好となる。反対に溝幅比を小さくすると溝容積は縮小し切り屑排出性は悪化する。溝幅比を大きくし切り屑排出性を良好にし、内壁の荒れを改善する事は可能であるが、前述の心厚や心厚テーパほどの影響力はなく、また、あまりに溝幅比を大きくするとドリルの剛性にも悪影響を及ぼすので適度な値に設定する必要がある。心厚やクリアランスの量により最適値は変化するが、溝幅比2.0前後が一般的となっている。

⑷　ネジレ角

ネジレ角は切り屑の排出性や、切削時のモーメント荷重（回転方向の負荷）を左右する重要なパラメータである。一般的にネジレ角を大きくした方が、切り屑の排出性が良好となり、穴壁面の粗さが改善される。また、回転時の負荷も軽減され、折損しにくくなる。小径化が進む以前は30～35°が一般的だったが、現在、電子回路基板ドリルにおいてはΦ0.3以下の極小径では強度、剛性を重視して溝部の容積が小さくなっているため、切り屑排出性を補完するため40°～45°ネジレが主流となっている。

ただし、切り屑の巻付きに関しては、ネジレ角を大きくした方が巻付きやすくなる。特に電子回路基板加工のように樹脂付アルミをあて板に使用した場合、強ねじれ品においては切り屑が薄く長くなるため巻付きが発生する事がある。近年は、樹脂の性質や厚さを改善する事で極端な巻付きは軽減される傾向にある。

⑸　先端角

先端角は基板（当て板）にドリルが進入する際の食付き性や、基板進入後の穴曲がり、切り屑の長さに影響を及ぼすパラメータである。電子回路基板用ドリルにおいては130°が多く使われているが、おおよそ120°～140°の範囲

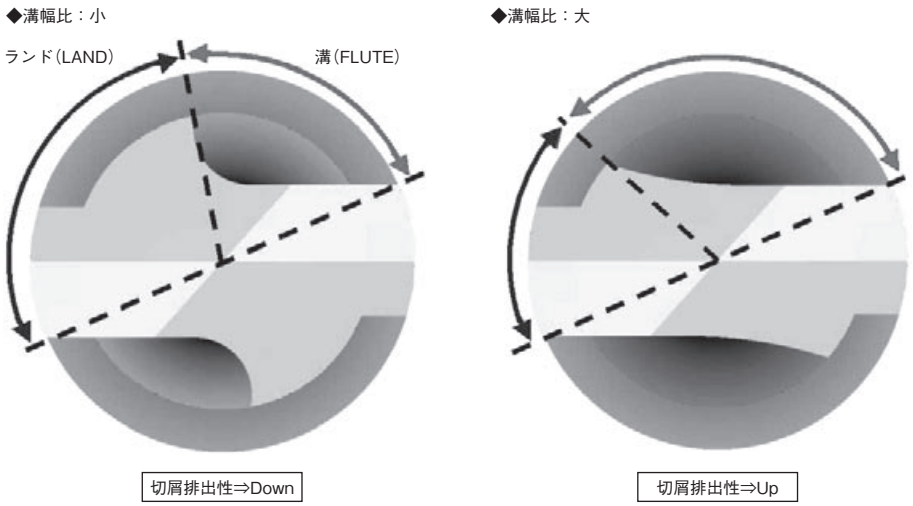


図 .1-14　溝幅比の差

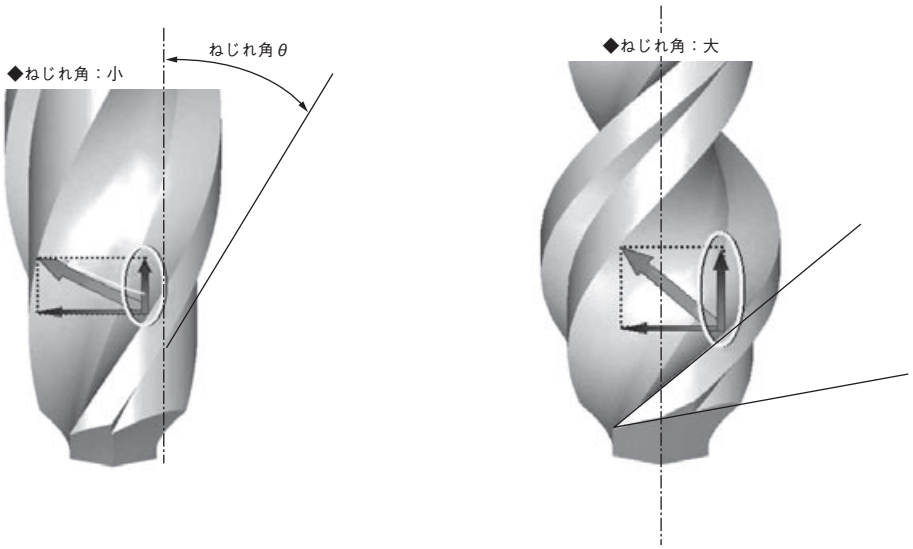


図 .1-15　ねじれ角の違いによる形状の差

が一般的である。先端角が小さい方が当て板への食付きは良いが、基板進入後はガラス繊維などの反力を受けやすく、曲がりは大きくなる。また、先端角が小さい方が切り屑は長くなり巻付きやすくなる。

先端角は内壁面へも影響を及ぼし、太径などで見られる“掘り起こし”（ガラスクロスの抜け）などは、先端角を大きくする事で改善される。(大学の研究でも工具肩部形状の影響を調査しており、工具肩部形状が鋭角（= 先端角鈍角）の方がガラスクロスの損傷が小さい事を報告している。

⑹　逃げ角

スパイラルに切れ刃が下降していく切削時に、被削材との接触を避ける為に設けられる逃げ面の角度を逃げ角という。金属切削用のツイストドリルの場合、逃げ面は円弧状または放物線的に角度をもって逃げ面が形成されるが、電子回路基板用ドリルの場合、二つの逃げ面（第一逃げ面、第二逃げ面）で形成される二段平面研削法で形成されている。逃げ角を大きくした方が切削時の摩擦抵抗は軽減できるがくさび角が小さくなり鋭利になるが切れ刃の強度が弱く、切れ刃に対する負荷が大きくなるとチッピング（欠け）を発生しやすくなる。45° など強ねじれにおいては、逃げ角を小さくし、くさび角を大きくすることで切れ刃強度を上げ、チッピングを避けるのが一般的である。

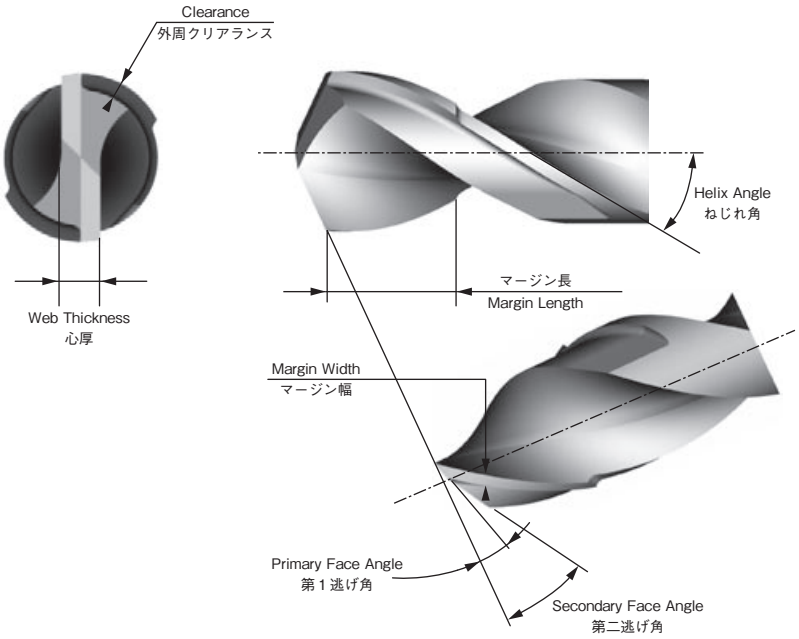


図 .1-16　ドリル先端部の名称

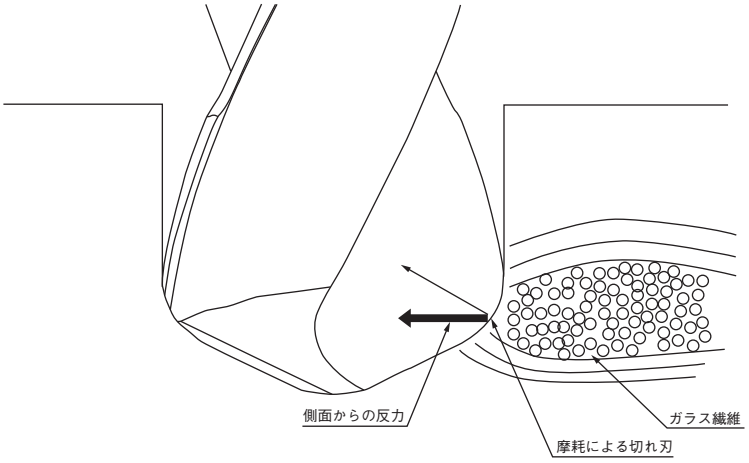


図 .1-17　ドリル加工時のドリルの壁から受ける反力

1.5　工具材料

1.5.1　工具用材料について

切削工具用材料には、よく知られ一般に売られているもっとも靱性の高いハイス（高速度鋼）や超硬合金の他に、Al_2O_3（酸化アルミニウム＝アルミナ）、または Si_3N_4（窒化珪素）を主成分とした焼結体の高速切削用セラミックス、TiC（炭化チタン）、TiN（窒化チタン）を主成分とした焼結金属のサーメット、あるいは超硬合金表面に、耐摩耗性、耐酸化性を更に向上させる目的で、TiC や TiN、Al_2O_3等をコーティングしたコーティング超硬合金等がある。最近では、C（炭素）や BN（窒化ボロン）等を５万気圧以上、1500° 前後で高温高圧下で焼結した多結晶の焼結体（ダイヤモンド焼結体や CBN 焼結体等）がある。さらに、もっとも硬い材料と位置付けられるダイヤモンド単

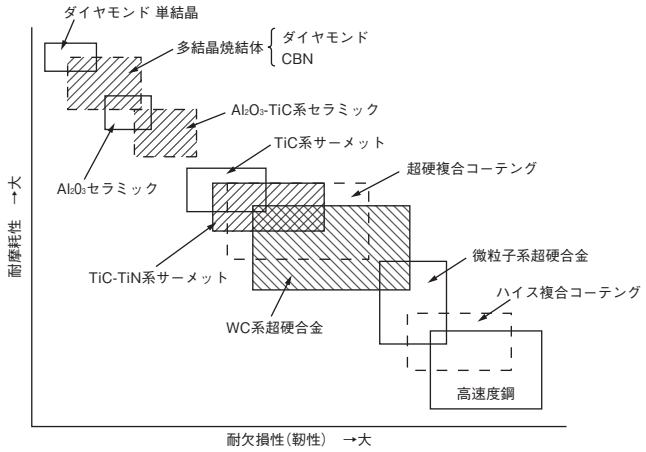


図 .1-19　工具材料の特性と適用範囲[7]

結晶まで様々な材料が使われている。これらの工具材料はそれぞれの切削特性を持っており、目的に応じ材料を選択する必要がある（図 .1-19）。

この中で、電子回路基板用ドリル用には、微粒子系超硬合金が主に使われている。電子回路基板用ドリルは0.3mm以下の極小径の用途であるために、折損に強い特性を持っている必要があり、超硬合金の中でも欠陥の少ない信頼性の高い超硬合金である必要がある。電子回路基板のような銅、ガラス、樹脂などからなる複合材料を、「切削する事」だけを考えた場合、最も硬く耐摩耗性のあるダイヤモンドが優れているが、単結晶や多結晶焼結体のダイヤモンドでは、ドリルに製作すること自体難しくコストがかかり価格も非常に高価となる。また、ダイヤモンドは、脆性体で突発的に折損事故などもあり、一時市場で使われたことがあるが、今では、超硬では加工が不可能なシリコンウエハーなどに一部用途として使われているのみである。

その他の工具材料であるセラミックスやサーメットなどもかつてはドリル用として検討されたこともある。しかし、電子回路基板ドリルのように工具として高い靱性や刃先に鋭利さ、そして高い信頼性を特性に求められている用途には、これらの材料は脆性・刃先のもろさ、信頼性の面で適さず、使われていない。ハイス（高速度鋼）は十分な靱性をもっているが、硬度が低く、耐摩耗性に著しく劣るため、ごく初期の手動のボール盤が使われていた時期を除いて、現在は使われていない。

表 1-2　工具材料の機械特性

		超硬合金		TiCN系サーメット	セラミックス			ダイヤモンド焼結体
		WC-Co	WC-TiC TaC-Co		Al_2O_3	Al_2O_3-TiC	Si_3N_4	
密度	[g/cm^3]	14.9	12.5	6.9	3.9	4.3	3.3	3.8
硬さ	HV	1650	1500	1650	2000	2200	2000	7000
	HRA	92.0	90.5	92.5	93.0	94.0	93.0	—
抗折力	[kgf/mm^2]	200	200	160	50	80	100	—
ヤング率	[10^{4}kgf/mm^2]	6.4	5.3	4.5	3.5	4.0	3.2	9.0
熱膨張率	[10^{-6}/℃]	4.6	5.5	7.7	8.0	7.8	3.5	3.8
熱伝導率	[cal/cm・s・℃]	0.19	0.09	0.07	0.07	0.07	0.07	0.30

1.5.2　超硬合金（超微粒子超硬合金）

超硬合金は1923年にドイツの化学者シュロッターが製法を開発し、1927年にはドイツのクルップ社が「ウィディア」と名づけて販売を始めたのがきっかけであり、日本では1929年日本初の超硬合金を開発したことに始まる。切削加工用の超硬合金は、主にコバルト（Co）をバインダーとしてタングステンカーバイト（WC）を焼結した材料

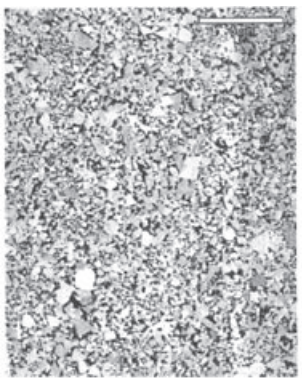


図 .1-20　超微粒超硬合金

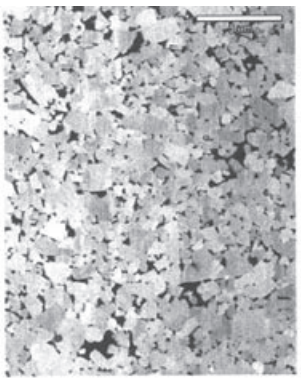


図 .1-21　一般超硬合金

であり、金属の一種であるが、その製法も構造も性能も異なっている。また、WC 粒子を熔解せず焼き固めることから、どちらかというと陶磁器、セラミックに似ている材料であり、内部組織は、金属というよりコンクリート（WC ＝砂利＋ Co ＝セメントの粉）のイメージに近い構造となっている。また、超硬合金は切削工具材種の他に、鉱山土木用、耐摩耗性工具用等でも利用されている。

超微粒子合金は超硬合金の中でもハイス系材種寄りに位置しており、従来から超硬合金とハイスとの間のギャップを埋める材種として期待されていた。超微粒子合金（図 .1-20）中の WC 粒径は一般超硬合金（図 .1-21）のものよりもはるかに小さく、１ミクロン以下の粒径のタングステンカーバイトが使われている。超微粒子合金を使用した切削工具では研磨によりシャープな切れ刃を精度良く形成する事が出来る。

また、WC 粒径が小さくなると表面積が増加して活性になり、焼結性が良くなるという利点もある。しかしながら、取扱い中に酸化しやすくなり、また、焼結中に粗大化した WC 粒子が出来やすくなるという欠点もある。そのため粒成長抑制剤として副炭化物バナジュームカーバイト、クロムカーバイト、タンタルカーバイトなどが使われている。超微粒子超硬合金と一般超硬合金の常温下での硬さと抗折力は、一般超硬合金よりも、硬く、高い抗折力を有している。これは WC と Co が共に細かく、粒界では破壊の起点になりにくい事に起因していると考えられている。

1.5.3　コーティング超硬合金

コーティング超硬は、母材の耐熱性や摩擦係数などの補完し性能を向上させるために、超硬表面に TiC や TiN、TiCN、Al_2O_3等の硬質物質（炭化物、窒化物、酸化物）を、数μmの厚みで化学的、物理的に強固に付着（蒸着）させ表面改質を施したもの。ダイヤモンドライクコーティング（DLC）や CVD ダイヤコートなどの炭素系硬質膜もアルミや複合材料などの切削加工用として使われている。

コーティングには大きく CVD（化学蒸着）法や PVD（物理蒸着）法がある。従来 TiC 等の単層であったものが、最近では２層、または３層とさらに複雑な構造になってきている。電子回路基板用の工具用には、ダイヤモンドライクコーティング（DLC）や CVD ダイヤコートなどの炭素系硬質膜は使われ始めており、TiC や TiN などの膜は熱などに強い特徴を持っているが、基板材料の加工として必要な物性と適合しないため、使われていない。

ダイヤモンドコーティングは単結晶ダイヤモンド工具や、焼結ダイヤモンド工具に比べ工具形状を自由に選択する事が出来、様々な切れ刃形状、チップブレーカ等が選べ、加工形態に合わせた最適な工具形状を利用する事が出来る。

ダイヤモンドは各種材料中最も硬く、ヤング率や熱伝導率も極めて高い事を特徴とした材料である（図 .1-22）。しかしながら、その成分のほとんどがＣ（炭素）である事から、耐酸化性は低く、空気中においては600℃で酸化してしまう為、高温になる切削や、反応しやすいＣを含む鉄系材料の切削には不向きである。電子回路基板工具としては、外形加工用ルーター工具として超硬合金の十倍以上の耐摩耗性があり、実用化されている（図 .1-23）。

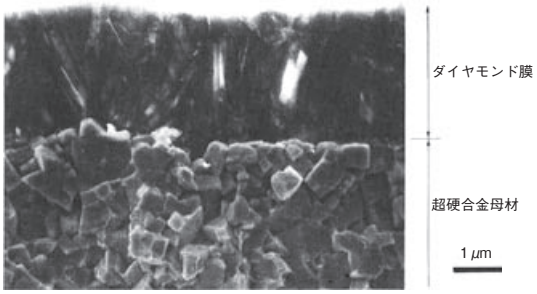


図 .1-22　ダイヤモンドコーティング

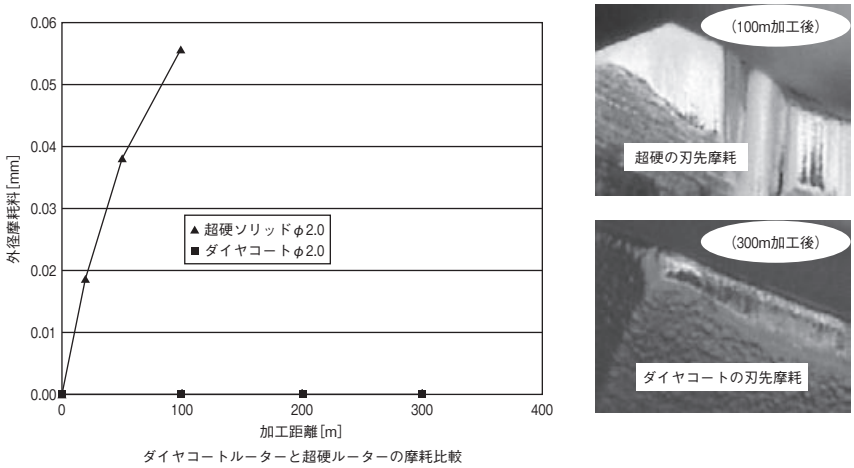


図 .1-23　ダイヤモンドコーティングルーターの摩耗比較[9]

もう一つの炭素系硬質膜である DLC コートはダイヤモンドの結晶構造である Sp3構造を含むアモルファスカーボンである。膜の持つ硬度もさることながら、潤滑性（低摩擦係数）によって、切りくずの排出性、穴内壁面との摩擦の低下などによって、トルクが下がり極小径のドリルに対して効果を発揮している（図 .1-24）。特に、非常に硬いシリカ（SiO_2）を多く含有している低熱膨張である IC サブストレートの材料などには非常に効果的な結果が得られている（図 .1-24）。

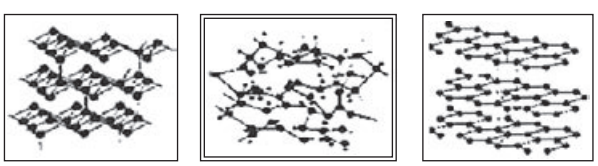


図 .1-24 DLC の結晶構造[9]

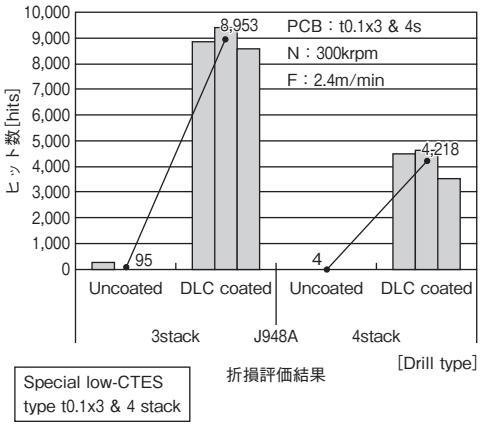


図 .1-25 DLC ドリルの性能
（難削である IC 基板における折損寿命）[9]

1.5.4 超硬合金の性質

合金の硬さ表示には、通常、ビッカース（Hv）またはロックウェル（HRA）が用いられる。ビッカース硬さはJIS Z2244、ロックウェル硬さはJIS Z2245に準ずる。双方とも圧子には、ダイヤモンドを使用するので、先端部のカケや摩耗状況により、値が変わるので、使用時には注意が必要である。

超硬合金の硬さは、ビッカース硬さ（Hv）とロックウェルA硬さ（HRA）で表され、Co量が少ないほど、また、WC粒子径が小さいほど、硬さは高くなる傾向にある（図.1-26）。

硬度を左右するものには前述以外にも炭化物の粒子の純度、粉末分散性などが挙げられる。従ってその製造工程は十分管理されないと十分な硬度を持つ合金を作ることは出来ない。また、硬度は焼結温度と時間とに関係し、時間が長くなれば、再結晶が起こり低く、温度がさらに上がれば融解量が増える為低下する。

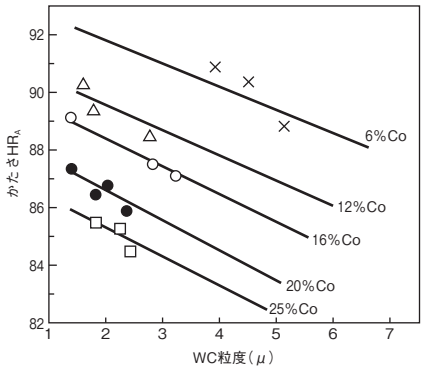


図.1-26　超硬合金の組成と硬さの関係1[8]

また、抗折力は工具の折損寿命に関係する特性である。抗折力は研磨された丸棒試験片を一定距離に配置された２つの支点上に置き、支点間の中央の１点に荷重を加え、試験片が破断したときの荷重から求めた最大曲げ応力の値を抗折力（３点曲げ破断強度）としている（図.1-27）。尚、CIS 026では試験片を四角柱としているが、電子回路基板用工具に用いられる超硬合金では、丸棒をそのまま用いる場合が多い。抗折力は、コバルト量の多い方、WC粒径が細かい、粒子の大きさ分布が均一、低炭素側が高い傾向にある。ポア（空孔）、粗大粒子、不純物、イータ層、フリーカーボンなどは破壊の起点となり抗折力を低下させる原因となる。

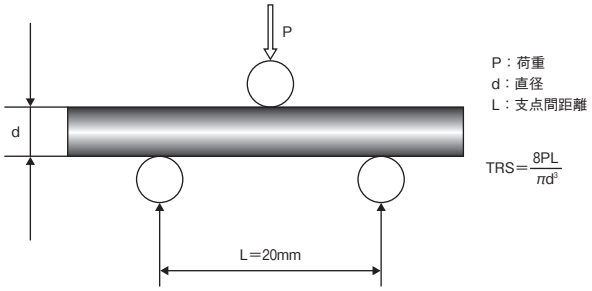


図.1-27　抗折力試験方法

適正な範囲ではCoを多く含む超硬合金の方が抗折力は高くなるが、Coがある一定量（20～25%）を過ぎると抗折力は低下する傾向にある。これは硬さの低下、すなわちWC粒子の構成する硬いもので支え合うものが無く、Co中にWC粒子が浮かんでいるような状態になる為であると考えられている。また、WC粒径が大きくなった場合においても、炭化物粒子間のCo層の厚みが大きくなることから抗折力は低下する傾向にある。

電子回路基板用工具の耐折損性は一般的にCo量が多いほど向上する。これはCo含有量の多い材料の方が曲げ強度、

疲労強度が高くなる事による。しかしながら、折損に至る現象は、曲げ強度、疲労強度以外にも摩耗による切削抵抗の増加や切りくず形状、切屑が通る溝体積の減少等の影響も受けるため、被削材、工具形状の選定による影響も受ける。

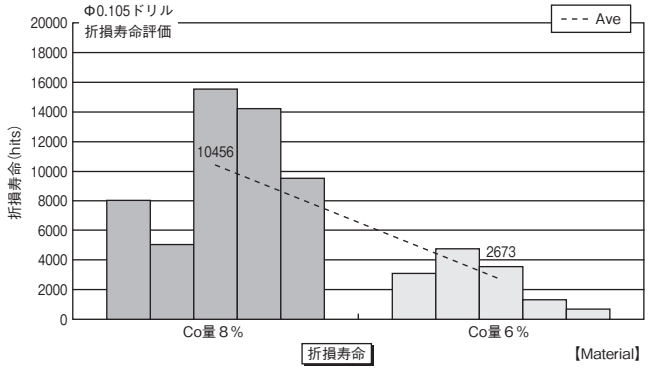


図 .1-28　超硬合金の Co 量と折損寿命[9]

耐摩耗性は、一般的に WC 粒子が小さい程、Co 含有量が少ない程向上する傾向にある（図 .1-29）。耐摩耗性が劣る場合、加工寸法不良や切削抵抗増加による精度不良、バリ、内壁不良等の不良を引き起こす原因となる。

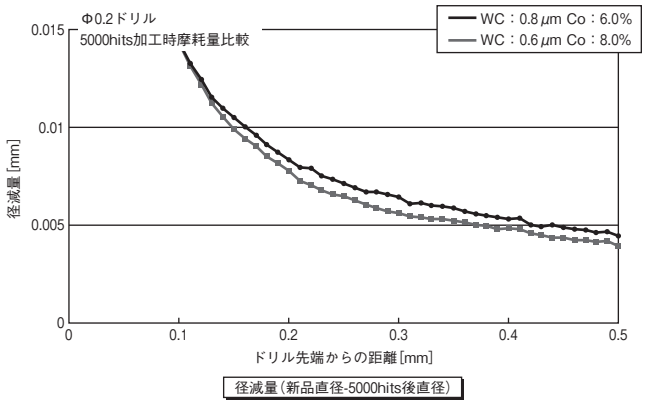


図 .1-29　超硬合金の Co 量と径減量（＝摩耗）

６）ヤング率（Young's modulus、縦弾性係数　単位：Pa、tf/m2 ）

ヤング率は、弾性範囲で応力に対するひずみ（歪み）の値をきめる定数である。超硬合金はおおよそ鋼の３倍のヤング率である。ヤング率は、[ひずみ ε] = [応力 σ] ／ [ヤング率 E] (フックの法則)より、$E = \sigma / \varepsilon$ である。一方向の引っ張りまたは圧縮応力の方向に対するひずみ量の関係から求める事が出来る。

７）超硬合金の材料欠陥

超硬合金の材料欠陥は、製造工程に起因する欠陥、異常組織に起因する欠陥の２つに分類される。それぞれの不良は以下のように区別される。

主に製造工程に起因する欠陥は、① クラック（亀裂、割れ）、② 腐食（コバルトの腐食）、③ 巣孔（穴欠陥）であり、また、主に異常組織に起因する欠陥は、①イータ相（η 相、低級炭化物、健全２相域を低カーボン側に外れている）、②遊離炭素（フリーカーボン、FC、炭素の析出、健全２相域を高カーボン側に外れている）、③ポア（ミクロ的な巣孔）、④ α 2相（α 2、WC 粒子の異常成長）が主なものである。これらの欠陥は、破壊の基点となり極端に強度を低下させ、工具折損の危険度が高くなる（図 .1-29）。

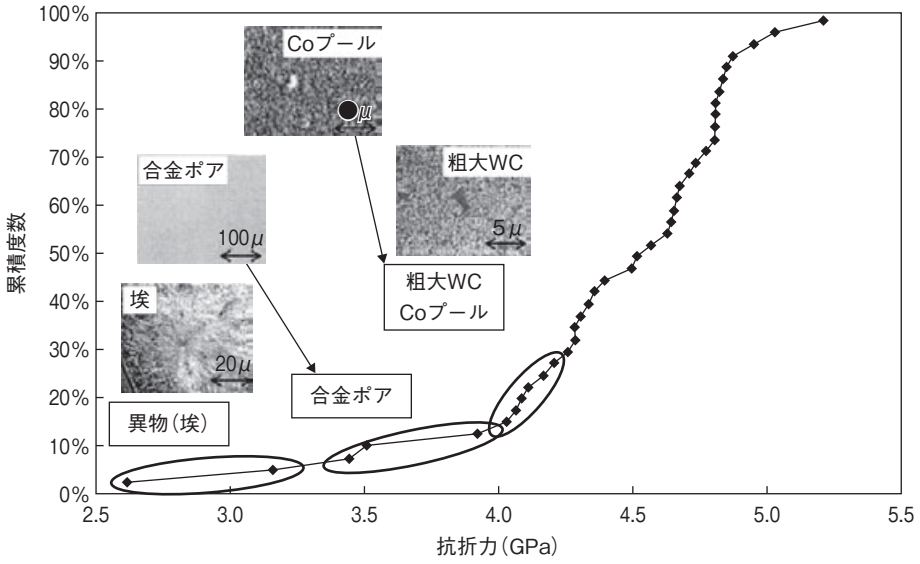


図 .1-29　超硬合金の欠損と抗折力[8]

参考文献

(1) D.F.Galloway：Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance, Transaction of ASME, 79（1957）191

(2) C.J.Oxford：On the Drilling of Metal 1,Transaction of ASME, 77（1955）103

(3) 佐久間敬三：穴加工と穴加工工具の設計　機械工学全書　1965

(4) 超硬工具協会資料　各種

(5) PWB 機械加工研究会（編集）：プリント配線板の穴あけ・外形加工、日刊工業新聞　1994

(6) 住友電工株式会社　製品カタログ

(7) ㈱タンガロイ　製品カタログ

(8) 鈴木　壽　編：超硬合金と焼結硬質材料―基礎と応用 、丸善 1986

(9) ユニオンツール㈱カタログおよび社内資料