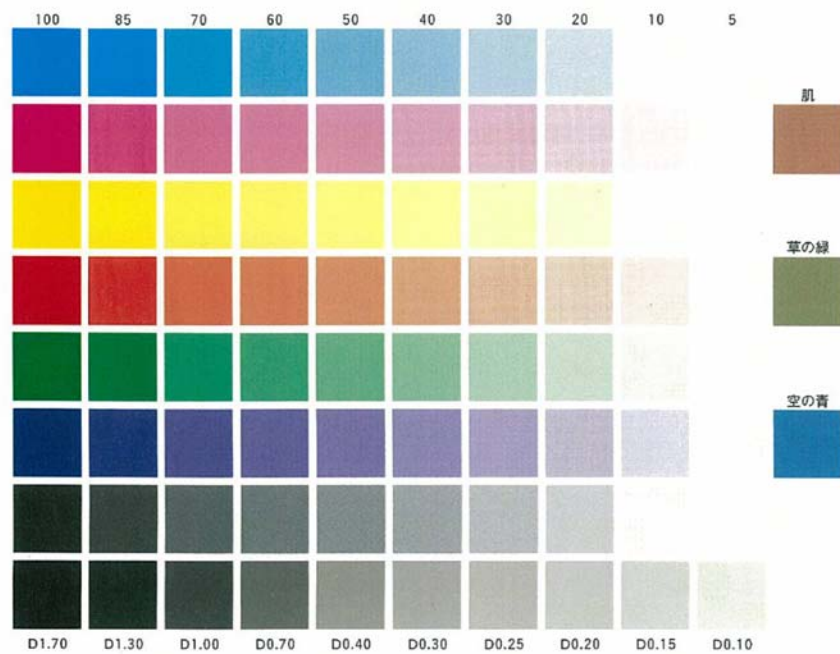




PVD コーティング工具の刃先稜線および すくい面粗さが切削特性に及ぼす影響



2012年3月期

古野 真弘

目次	
第1章 緒論	1
第2章 超硬チップを用いた研削面粗さが及ぼす切削特性への影響	
2-1. 緒言	5
2-2. 実験に用いた超硬チップ	5
2-3. 実験に用いた PVD コーティング膜質	8
2-3-1. TiAlN コート	9
2-3-2. TiSiN コート	10
2-3-3. CrSiN コート	12
2-4. 実験内容	13
2-5. 実験結果	15
2-5-1. 表面状態の比較	15
2-5-2. スクラッチ試験比較	18
2-5-3. 圧痕試験比較	19
2-5-4. トライボロジー試験比較	21
2-6. 考察	23
2-7. 結言	25
2-8. 参考文献	26
第3章 旋盤加工における研削面粗さが及ぼす切削特性への影響	
3-1. 緒言	27
3-2. 実験内容	27
3-2-1. 実験用試料	27
3-2-2. 実験装置およびその方法	28
3-3. 実験結果	29
3-3-1. すくい面の摩耗形態	29
3-3-2. 仕上げ面粗さ	33
3-3-3. 切削抵抗	35
3-3-4. 凝着量の測定	36
3-4. 考察	37
3-4-1. すくい面の摩耗状態と仕上げ面粗さ	37
3-4-2. 仕上げ面粗さと切削抵抗の関係	37
3-4-3. 切れ刃エッジと凝着状態の関連	37
3-4-4. コーティング膜質の影響	38
3-5. 結言	39
3-6. 参考文献	40
第4章 フライス切削における研削面粗さが及ぼす切削特性への影響	
4-1. 緒言	41
4-2. 実験内容	43
4-2-1. 実験用試料	43
4-2-2. 実験装置およびその方法	48
4-3. 実験結果	50
4-3-1. ボールすくい面研削面粗さによる切削抵抗の違い	50
4-3-2. ボールすくい面研削面粗さによる加工表面粗さの違い	51
4-3-3. 加工面性状の比較	53
4-3-4. 摩耗形態の比較	54
4-4. 考察 [I]	58
4-4-1. 研削面粗さによる摩耗形態、 すくい面の溶着状態と切削抵抗の関連性	59
4-4-2. 切れ刃稜線とすくい面における理想の研削面粗さ	58
4-5. 追加実験	64
4-5-1. 刃先処理を施したボールエンドミルの切削現象	64
4-6. 考察 [II]	70
4-7. 結言	73
4-8. 参考文献	74
第5章 結論	75

第1章 緒論

学術論文および講演発表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78

謝辞

近年、金型加工を取り巻く環境は劇的に変化してきている。金型はものづくりにおける基本的な部品のひとつであり、日本の工業発展を支えてきた技術である。自動車や電化製品など幅広い分野で金型は使用されるが、各製品の技術向上には、必ず金型加工技術の向上が伴う。特に、近年の金型加工は、納期の短納期化やコスト削減の要求が求められており、それに伴い、切削の段階で仕上面が良好になるような刃形開発やコーティング膜の設計等が検討されている。材料面における研究は各種進められており、特にプラスチック金型材料においては、射出成型を行う際に金型の寿命を延長するための組成や組織の調整が図られている。プラスチック金型では射出成型の繰り返し数が多くなってくると、金型に熱影響や衝撃によるクラックが入ってしまうことが問題となる。したがって、近年の求められる材料特性としては、従来と同等の硬度を有しつつ、衝撃によるクラックが入りにくいような材料設計が重要視されている。これは金型としての寿命延長にはつながるが、切削による形状加工という観点では、難しくなる方向であり、工具性能の向上も同時に検討せねばならない。こういった用途に対応するための工具検討は今までもされている。形状開発に関しては、刃先強度の確保や切屑排出を考慮した種々の形状検討、また、振動を抑制するための不等分割形状や不等リードといった形状も存在する。コーティングにおいても皮膜自体の硬度を高くして、耐熱性や耐摩耗性を兼ね備えた皮膜や皮膜自身に潤滑性を付与した皮膜などの開発が進んでおり、工具による直彫りでも良好な加工面が長時間得られるようになってきた。しかしながら、摩耗形態の詳細を観察してみると、まだまだ改善できる点が多い。特に、被削材が粘り強さと硬度を兼ね備えたような難削材の場合、また、そういった材質を湿式による加工法で切削する場合、コーティングが早期に剥離してしまい、皮膜の機能を果たさないといった点である。これは、一見、コーティング膜の最適化を行えば解決できると考えられるが、実際はそれだけでは難しい部分がある。コーティング成膜の際、その密着強度を高めるための様々な工夫が施されている。それでもこのすくい面側はPVD装置で成膜する際は、影になりやすい部分になるため、なかなか逃げ面と同等の密着強度を得ることが困難なのが現状である。また、コーティングの密着強度は、下地の超硬合金を研削する際に形成される研削面にも大きく影響を受けているのではないかと考えられる。後に述べるが、湿式加工で加工してコーティング剥離を起こしている部

位の詳細を観察すると、すくい面の研削条痕に沿って剥がれ落ちている状態が観察できるからである。今回の研究は、その点に着目し、基礎的な部分からの検証を行った。今までの文献においても、種々のコーティング皮膜の研究やエッチング処理検討はなされてはいない。具体的には、特にDLC薄膜に関する薄膜の密着性やトライボロジー特性の報告がある。それらの報告の中ではDLC皮膜の皮膜硬度によらず、超硬母材と皮膜との中間層の元素系によって、30Nから100Nを超える密着強度が得られるという報告がなされている^{*1)}。また、DLC皮膜に関しては、最大の特徴として多くの金属、セラミックスに対して大気中で0.1から0.2という非常に低い摩擦係数を示し、潤滑油中とほぼ同程度の摩擦係数を発現できる^{*2)*3)}。つまり密着強度は膜質、製法によって大きくその数値は変化する。密着強度が高い方が皮膜の機能を損なうことなく、また耐摩耗性としても確保した状態で長時間の切削が可能となる。仕上げ加工においては、長時間切削を一本の工具で仕上げてしまいたいという要望が多い。それは、仕上げ工程の途中で工具交換が入ると交換のタイミングで加工面に工具の磨滅量の分の段差が生じるためである。加工段差を生じさせないためには一本の工具で意匠面の仕上げが完了しなければならない。したがって、いかに長時間の切削を皮膜の機能を損なわずに加工するかが重要な課題となる。DLC皮膜に関しては摩擦摩耗特性、低相手攻撃性、凝着抑制効果などに対する研究は盛んに行われている^{*4)}。そしてその実用範囲も拡大してきている^{*5)}。

前述したようにDLC皮膜のような薄膜の研究に実施されているスクラッチテストやトライボロジー評価を今回の実験方法の参考にした。今回の研究対象はPVDコーティングである。仕上げ加工の一本化は、特にプラスチック金型に関して要望が非常に多く、自動車のバンパーやフロントグリルといった金型でも比較的大型のものが対象となる。これらの仕上げ加工で工具が走る加工距離は非常に長いために工具寿命が問題となるケースが多く発生する。こういった問題を解決するために、単に耐摩耗性の高いコーティング膜質を見出すだけでなく、コーティングはく離やコーティング表面への溶着を抑制を検討する必要がある。そこで、研削面粗さに着目したのである。研削面の粗さの程度によってコーティングの密着性や切り屑流れ、切削抵抗などが異なると考えたのである。しかし、成膜前のエッチング工程で既に、超硬合金表面は粗く形成されるという概念があるためか、工具の現物における研削面粗さとPVDコーティングの密着強度に関する詳細な研究はあまり多くはなされていない。今回の研究目的は、PVDコーティングを施した超硬母材のすくい研削面粗さが、切削特性に対してどのような影響度をもつのかを調査して、最適な研削面粗

さと最適なコーティング膜質を見出すことにある。切削特性に対する影響が明らかにして、工具に求められる最適な研削面粗さとコーティング皮膜に求められる機能、およびそれを満たす組成系、成分比を見出すことにある。また最終的には、刃先稜線の均一化を実現するために刃先処理を加えたものでも検討を実施し、ボールエンドミルにおける最適な状態を究明した。これらを明確にすることによって、特にプラスチック金型をはじめとする仕上げ加工の領域で安定した良好な切削が求められる箇所において最適な提案ができると考える。またこれらの提案がもたらす効果としては、工具寿命の延長による金型の面品位の向上、また寿命延長による工具交換回数の削減、などが挙げられる。こういったニーズを満たすため、2章からのコーティングの物性の基礎実験、3章～4章における実際の旋盤加工、フライス加工における切削性能実験を実施した。そして5章には結言として各章の研究成果を要約し、総括している。

参考文献

- 1) K.Akai and E.Iwamura: DLC Coating Film Properties in Unbalanced Magnetron Sputtering;Kobe Steel Engineering Reports,Vol.50,No.2,58-61,(2000)
- 2) H.Suzuki and M.Ikenaga; DLC Coating Technologies Learned From Case Example, p.79 (The Nikkan Kogyo Shinbun, Ltd.,2003)
- 3) M.Ikenaga and H.Suzuki ; The principle of Super Hard Coating and Commercial Applications by Dry Process,p.81(The Nikkan Kogyo Shinbun,Ltd.2000)
- 4) K.Suzuki,H.Akebono and H.Suzuki; The Control of Coefficient of DLC Coatings Using Micro-Dimpled Substrate;表面技術, Vol.59,No.9,621-626,2008
- 5) Highly-Adhesive DLC Coating for Automotive Parts: 日立金属技報, Vol.26.68(2010)

第2章 超硬チップを用いた研削面粗さが及ぼす切削特性への影響

2-1. 諸言

前章で述べたように、今回の研究目的は、超硬母材の研削面粗さとコーティング膜質の種類が、切削におけるコーティング剥離にどのように影響を及ぼすかを明らかにして、工具に求められる最適な研削面粗さとコーティング皮膜に求められる機能、およびそれを満たす組成系、成分比を見出すことにある。

これを実現させるためには、まず基礎実験を行い、研削面粗さとコーティング皮膜の種類による密着性への影響をみる必要がある。基礎実験としては、超硬のインサートチップを使用して行った。ここでインサートチップを使用したのは、最初の段階で通常、市場で使用されているようなエンドミルを用いると、逃げ面、すくい面の形状が湾曲しており、基礎データを採取するには難しいと考えたためである。まずは、単純な正方形の旋盤用インサートを使用して基礎実験を行うことを検討した。ただし、実際には、旋盤用インサートの研削面粗さやコーティング膜の密着性も同様のことが言えるため、本章で得られるデータは、製品の基礎的データとしても当然、展開できるのである。

2-2. 実験に用いた超硬チップ

ここで実験に用いた超硬チップの概要を示す。本章で行う基礎実験は、単純に研削面と密着性との関係をつかむために単純な形状のものを採用した。超硬チップの寸法は、10mm×10mm×5mmである。また超硬合金の材質は、タングステンカーバイドの粒径 $0.8\mu\text{m}$ の微粉末にCo8%(重量%)を添加・焼結したものをを用いた。表2-1には超硬合金の物性値、図2-1に示すのは超硬合金の組織写真である。今回の研究で使用した超硬合金は、超微粒子超硬合金に分類され、超硬合金の中でも耐摩耗性、耐熱性に優れる材質になる。

表 2-1. 超硬合金の分類

分類	特徴	用途
P種	WC の他に、高融点炭化物 TiC、TaC、NbC などを加えて耐熱性を増大	鋼、鋳鋼切削用
K種	WC-Co 系、耐アブレッシブ摩耗性、ヒートクラック性が大きい	鋳鉄、非鉄金属、非金属切削用
M種	P種、K種の中間材質。各種性質も中間的性質を示す。	汎用性がある。鋼、鋳鉄、ステンレス切削用
超微粒合金 Z種	極めて微細な WC を用いているため、高い硬さと高い靱性をもつ	エンドミル、ドリルの高能率切削に効果が大きい。



図 2-1. 超硬合金断面組織写真(タングステンカーバイド粒径 0.8 μm、Co 量 8%)

この超硬素材を平面研磨機によって上下面を研磨した。平行研磨時に用いた砥石の粒度を変化させることで異なる研削面を形成させた。使用した砥石の粒度は、#230・#400・#800・#1500 である。また極端に研削面が良好な場合の密着強度を調べるために#1500 で研磨した後ラップ機による仕上研磨まで行い、鏡面まで仕上げるものまで作製した。

図 2-2 には平面研磨時のセット状態を示す。図に示すように超硬合金を焼結後、ロータリ

ーポンプの平行研削盤を用いて行った。研削圧力は0.2~2MPa とし、超硬チップを貼付したキャリアギア自身とを回転させながら超硬チップ表面研削加工を行った。ラップに関しては、#1500 の研削砥石で研削した後、さらに直径Φ300mm の定盤を用いて、超精密仕上げ加工用の水性ダイヤモンドスラリーによる研磨を行って鏡面状態に仕上げた。-

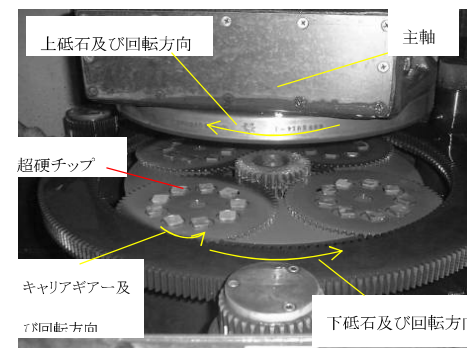


図2-2 平面研削時のセット状態

各研削砥石で削った超硬チップを図 2-3 に示す。鏡面性の違いを比較すると明らかに砥石の粒度によって大きく異なることが分かる。研削砥石番手の小さなもの (#230) は光沢感がなくくすんだ面になっている。それに対して研削番手の大きなもの (#1500) は光沢があり、写しこんだ紙面がはっきりと見える。研削砥石は番手が大きいものほど砥石の粒径が細くなる。今回の研削条件は砥石によらず一定で加工を行っている。従って、粒径の細かなものほど超硬チップに対して高低さなく研削できた。



図 2-3. 研削砥石の粒度変化による超硬チップ表面の比較

2-3. 実験に用いた PVD コーティング膜質

前章において試作した超硬チップの研削面に対して各種の PVD コーティングを実施した。

ここでは、物理蒸着法の中でも特にイオン化率が高く、生産性に優れる PVD (物理蒸着法) による AIP 法を適用してコーティングを実施した。その AIP 法の原理図を図 2-4 に示す。^{*1)}

減圧下の反応ガス雰囲気中で、カソードである金属ターゲットと、減圧容器であるアノードとの間でアーク放電を発生させると、ターゲット表面上にランダムに点在する微小なアークスポット (数 μm ~ 十数 μm) が形成される。このアークスポットに集中する電流密度は $106 \sim 108 \text{ A/cm}^2$ にも達するため、そのジュール加熱によってターゲット材は瞬時に溶解・蒸発し、同時に多数の金属イオンを発生する。このとき、ターゲットに対抗して設置された被処理物は、バイアス電源によって任意に設定可能である負の電圧が印加されているため、放出された金属イオンが被処理物近傍で加速し、反応ガスイオンとともに被処理物表面に堆積する。次に、本論文において採用したコーティング膜質の特性を以下に簡単に述べる。今回の研究にて採用した皮膜は 3 種類あり、TiAlN 皮膜・CrSiN 皮膜・TiSiN 皮膜である。TiAlN 皮膜は PVD コーティングでは最も一般的であり、本研究においてはベンチマークとしての位置づけで入れた。一方 TiSiN 皮膜は弊社の主流のエンドミルに採用している高硬度用のコーティングである。皮膜硬度が高いことが密着性や摩耗形態にどう影響しているかを見極めるために入れた。CrSiN 皮膜は弊社の実験の中では最も潤滑性の高い皮膜で

あるため、耐溶着性が高いとされている。それらと密着性、切削性能への影響、関連性を見出すために比較としている。

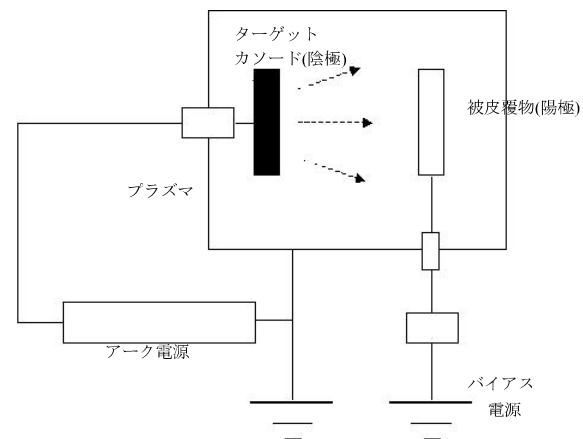


図 2-4. AIP の基本構成図

2-3-1. TiAlN コート^{*2),*5)}

チタンとアルミ窒化物から形成されており、柱状晶の構造を有している。図 2-5 はコーティング断面写真を示す。図に示すとおり、研削面に対して垂直方向にイオンが堆積していくため、柱状の組織が形成されていることが分かる。また、逆に皮膜組織が微細ではな

いために 800℃～1000℃で酸化を開始し、コーティング層の内部にまで酸化が浸透しやすい性質を備えている。

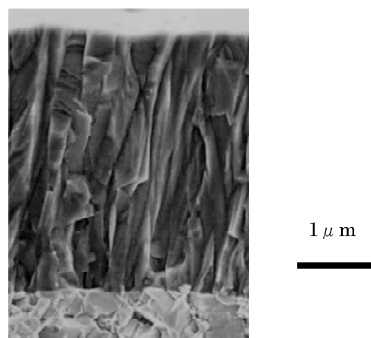


図 2-5. TiAlN コーティング皮膜断面写真

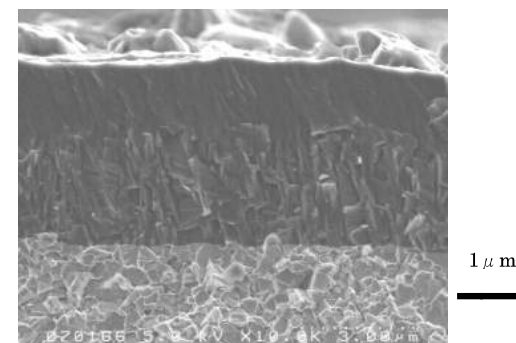


図 2-6. TiSiN コーティング断面組織写真

2-3-2. TiSiN コーティング*1)

皮膜組織は非常に微細で緻密な構造になっており、コーティング膜における粒径は約 5nm である。図 2-6 に組織写真を示す。組織が微細であるために酸化温度が高く、コーティング層内部にまで酸化が浸透しにくい性質を有している。また Al レスにして、Ti と Si の含有量を最適化したことで非常に高硬度な皮膜が形成できた。硬度はピッカース硬さで 3200Hv であり、従来の PVD コーティング皮膜の中では最も高い硬度を有する。またそれに伴い、耐熱性や耐酸温度も高い。図 2-7 に示すのは、大気 1,000℃の状態 で 60 分放置した時の皮膜の酸化状態を示す。前項で示した TiAlN 皮膜では皮膜の膜厚の約半分程度まで酸化が浸透してしまっており、皮膜構造の破壊が進んでいることがわかる。しかし、TiSiN 皮膜の酸化層は表面のごくわずかな範囲でとどまっており、皮膜組織の破壊はほとんど確認できない。従って、この皮膜は高速切削や高硬度材料の直彫り切削に対して非常に有効に働く。また本研究に用いた皮膜は超硬母材との密着強度を高めるために二層構造としており、アンダーレイヤーには前項で説明した TiAlN 皮膜を皮覆している。膜厚は二層のトータルで 4 μm 狙いで成膜している。トップレイヤーとアンダーレイヤーとで皮膜組成は異なるが、複数のターゲットを用いて成膜するため、同時放電による一回の成膜処理で形成できる。

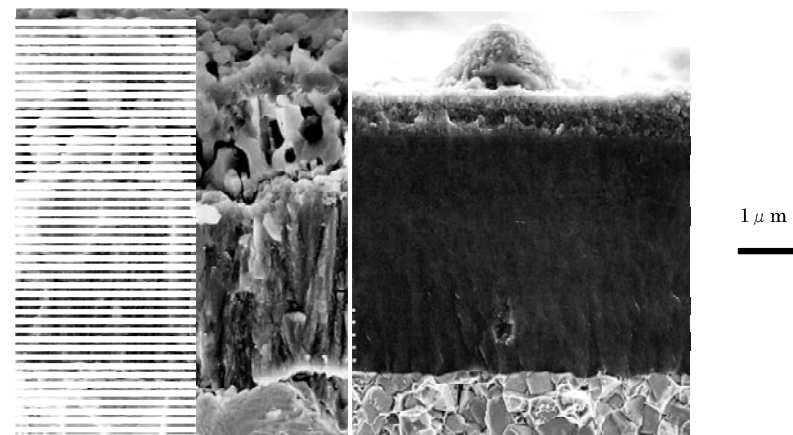


図 2-7. 大気 1,000℃で 60 分放置した際の皮膜酸化状態の違い

2-3-3. CrSiN コーティング*3)

皮膜組織は TiSiN と同様で非常に微細で緻密な構造になっており、コーティング膜における粒径は約 5nm である。図 2-8 に示す。組織が微細であるために酸化温度が高く、コーティング層内部にまで酸化が浸透しにくい性質を有している。また、クロムが添加されているためにコーティング膜表面の潤滑性が向上し、摩擦係数は 0.3 と低い値を有している。図 2-9 に示すのは、スクラッチ試験による溶着の違いを示す。従来の TiAlN 皮膜と鉄の溶着の違いを比較した。後の実験でも実施するが、S50C 鋼球を用いてスクラッチ試験を行い、チップ表面に付着した溶着量を比較している。写真からも明らかに CrSiN 皮膜の溶着が減少しており、コーティング表面の潤滑性に優れていることがわかる。この際に用いた超硬チップの表面粗さは鏡面まで磨いた状態で同様のものと比較している。また、こういった特徴を有することから、溶着を起しやすような粘り強い材質の安定切削に向くと見える。さらにこの CrSiN コーティングも先の TiSiN コーティングの構造と同様で二層レイヤーになっており、アンダーレイヤーには TiAlN コーティングを採用している。これも目的は超硬との密着強度の確保である。

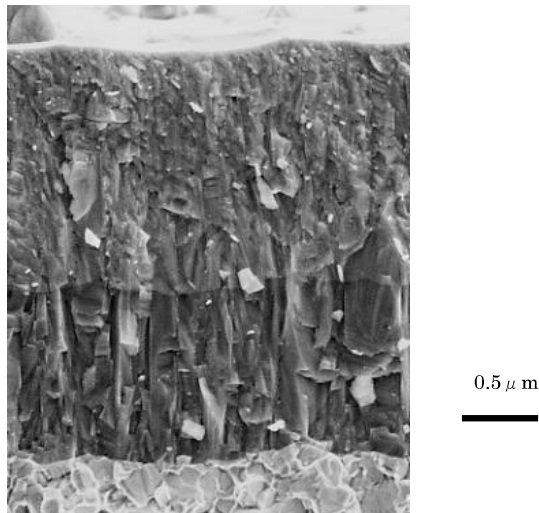


図 2-8. CrSiN コーティングの断面組織写真

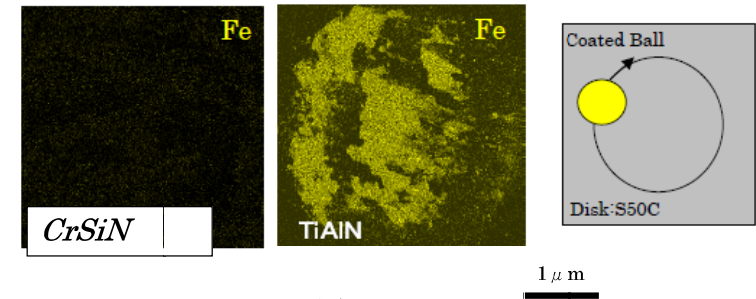


図 2-9. Fe 溶着量の比較

2-4. 実験内容

ここからは具体的な実験内容の詳細について述べる。前項までで準備した研削面粗さ別の超硬チップと 3 種の PVD コーティングの組合せで合計 15 種類について検討した。まず、研削面粗さ別に 5 種類のチップを準備したが、PVD コーティングを施す前と施した後で研削面粗さがどの程度変化するかを面粗さ測定器を用いて比較した。図 2-10 に用いた面粗さ測定器を示した。また、皮覆前の段階で密着強度を向上させるためにエッチング処理を行うのが通常であるが、今回は、エッチングだけを施した状態でも面粗さを測定し、比較に加えた。

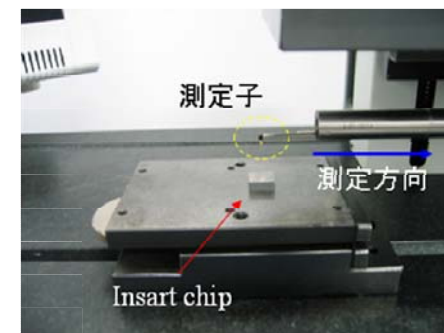


図 2-10. 面粗さ測定機外観写真

ここでのエッチング処理は、アルゴンイオンによるクリーニングを行うことによって、超硬母材表面の酸化層とCoを脱し、超硬母材表面に微細なポーラスを形成する。そうすることで実際の皮膜が含有するイオン粒子が工具母材表面に堆積しやすい状態を形成することができる処理を指す。面粗さ値の違いを確かめた上で、実際の密着性の評価を行なった。まず、スクラッチテストによる剥離性の試験である。スクラッチテストは図2-11に示すようなダイヤモンド圧子を用いた評価を実施した*6)。これで研削面粗さおよびPVDコーティング膜質による剥離の傾向をつかむ。2種類のコーティング膜質を皮覆した超硬チップについてスクラッチ試験による評価を行なった。スクラッチ試験では、一定の曲率半径を持つ硬い(ダイヤモンド)圧子を超硬チップ表面に押付け、荷重を0Nから最大100Nまで増加させながら引っ掻き、薄膜の剥離が生じる荷重値(臨界荷重値)を計測した。圧子を押し付け、スクラッチ時にコーティング膜と工具母材間の界面に作用するずり応力が両者間の密着強度を上回ると、界面剥離を生じることになる。



図 2-11. スクラッチ評価試験機

次に圧痕試験による剥離の傾向を確認した。圧痕試験はCスケールのロックウェル硬度試験機を用い、その圧痕周りのコーティング膜の剥離状況から判断した。実際には、硬度を測定するのではなく、圧痕の境界部に発生したコーティング膜の最大剥離幅を評価するものである。押し込み荷重は150kgで実施した。

最後にトライボロジー試験における溶着具合の傾向を確認した。研削面粗さの異なる超硬チップを用いて、トライボロジー試験による摩擦力に対する評価を行なった。図2-12は、トライボロジー試験の概略図を示したもので、供試超硬チップの表面上にΦ4mmのR面を有するSUJ2材のピンを相手材としてピン・オン・ディスク試験を常温大気中においてドライ環境下で行った。SUJ2は焼入れ焼き戻し処理を行なった52HRCの硬度のものを使用した。このピンの表面粗さはいずれもRa0.19~0.22μm、Rz0.89~1.05μmであった。超硬側のチップの面粗さは図2-13に示した通りである。試験条件は、摺動半径を6mm、荷重2N、周速度10mm/s、時間900sである。ここで荷重を2Nと設定したのは、各種の膜厚が約3μm~4μmで堆積されているため、膜質が剥離や異常な破壊が生じないように安定して摩擦させて比較できるためである。またドライ環境で評価を行なったのは摩擦形態の差が短時間で明確に現れることを想定したためである。*4)

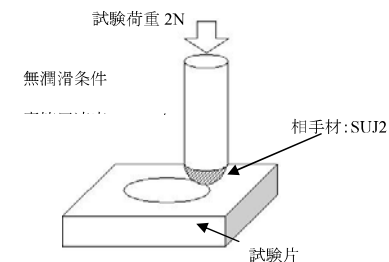


図 2-12. トライボロジー試験の概略図

2-5 実験結果

2-5-1. 表面状態の比較

3種類のコーティング膜質を5種類の超硬チップ表面に皮覆し、それぞれの表面粗さの結果を図2-13に示す。ここで、各膜質を皮覆する際のバイアス条件やなどのパラメータは全て統一した状態で同じ炉内で処理を実施している。また同図は研削砥石粒度とPVDコーティング前後の表面粗さの関係も示している。全てのラインにおいて共通していることは、研削砥石粒度が大きいほど、研削面粗さが小さくなっている。皮覆前のライ

ンとエッチング処理のラインを比べると、エッチング処理がコーティング前のよりも研削面粗さが粗くなっている。このことは、PVDコーティングの密着性を向上させるために、アルゴンガスによるエッチング処理によって研削面粗さを粗くしていることを意味している。コーティングにおいては、CrSiN皮膜はTiSiN皮膜やTiAlN皮膜と比べると最も摩擦係数が低い。CrSiN皮膜は非常に表面が滑らかになっているため、すべての研削面粗さにおいて、TiAlN皮膜よりも良好な結果を示している。そして、逆にTiSiN皮膜は表面が滑らかではない。従って、研削面粗さが全体的に高くなっている。図2-14はコーティング前後の各膜質の表面のSEM像を示す。研削時の粒度は、上が#400、下がラップ仕上げである。写真からも明白であるが、粒度によらず表面にはコーティング時に生成される異常粒子が認められる。

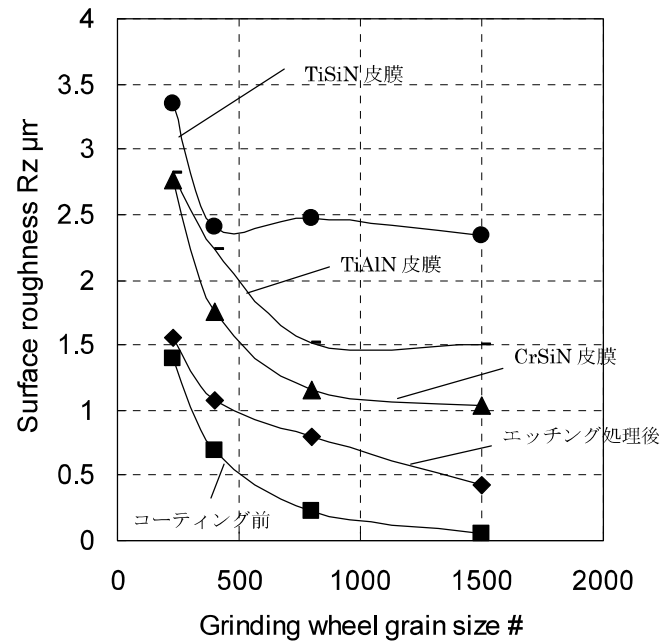


図 2-13. 研削砥石粒度と PVD コーティング前後の表面粗さの関係

皮膜組成	表面状態 (#400)	表面状態 (Lap polishing)
コーティング前		
TiAlN 膜質		
CrSiN 膜質		
TiSiN 膜質		

図 2-14. コーティング前後での表面状態

2-5-2. スクラッチ試験比較

スクラッチテストの評価概要は先に示したが、密着強度の算出方法は、ダイヤモンド圧子を超硬チップに押し付け、0N から 100N まで徐々に荷重をかけた際のコーティング剥離量の測定値から出した。図 2-15 は各コーティングを皮覆した超硬チップによるコーティングの密着性の比較を示す。

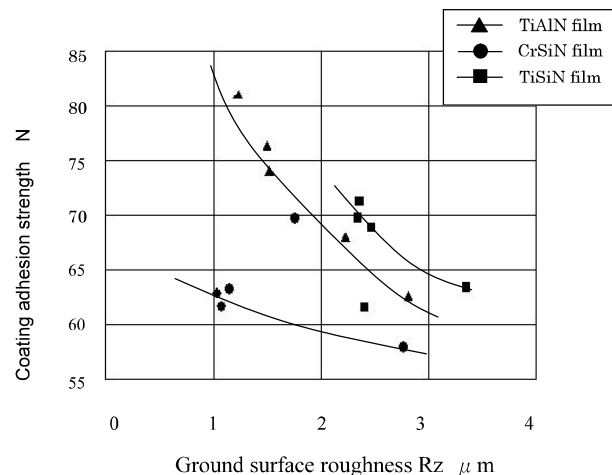


図2-15 超硬チップの表面粗さと密着強度との関係

図 2-15 が意味することは、いずれのコーティングにおいても研削面粗さが小さいほど、コーティングの密着性は高くなるということである。特に研削面粗さが 2 μm 以下の時密着強度は高くなっている。なぜなら、研削面粗さが小さい場合、スクラッチされる表面積が狭くなるためである。従ってスクラッチの際にかかる抵抗は、粗い研削面粗さを持つチップよりも小さくなる。もちろん研削面粗さが 2 μm 以下の場合、密着強度がさらに上がることが期待できる。図 2-16 はスクラッチ評価した後のコーティングと超硬基体との界面の拡大図を示す。研削面粗さが地位際場合は、コーティングの剥離幅も小さくなっている。また、コーティングの膜質によって剥離の形態が異なっている。TiAlN 皮膜は超硬母材の変形に膜が追従している。しかしながら CrSiN 皮膜や TiSiN 皮膜は非常に硬い皮膜になる。従ってコーティング膜質としては超硬母材の変形に追従できないため、コーティングの剥離が起こりやすい傾向を持つ。

皮膜組成	表面状態 (#400)	表面状態 (Lap polishing)
	5.0 μm	5.0 μm
TiAlN 皮膜		
CrSiN 皮膜		
TiSiN 皮膜		

図2-16 スクラッチ痕上のコーティング層と超硬母材間の断面写真

2-5-3. 圧痕試験比較

続いて圧痕試験による比較評価を行なった。図 2-17 は、圧痕試験によってコーティング膜が剥離を起こした状態の拡大写真を示したものである。3 種類のコーティング膜質を施したもので研削砥石の番手が #230 のものと Lap 仕上げのものそれぞれ 2 種類を代表としてあげた。最大剥離幅は荷重を押し込んだ際の圧痕の中心から法線方向に見て、最も剥離が生じている箇所の圧痕界面からの剥離距離を測定した。また研削面粗さの相違によって圧痕試験の際に生じる応力で剥離する面積が大きく異なることがわかる。特に TiAlN 皮膜の研削面粗さが粗い表面では、圧痕の界面から全周にわたって剥離が生じている。

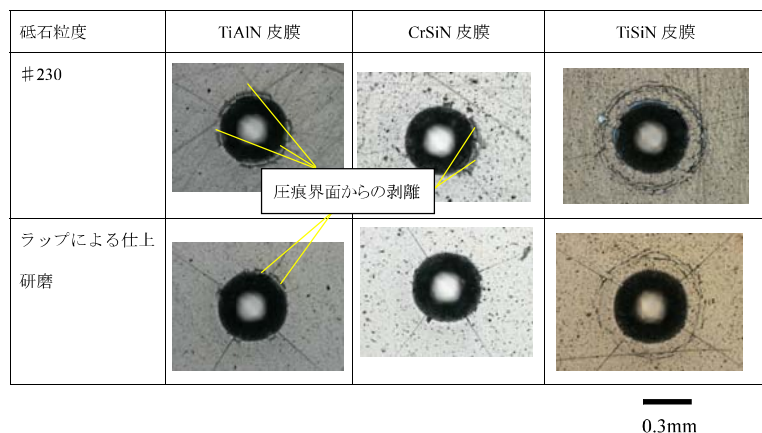


図2-17. 圧痕試験後の剥離状態の比較

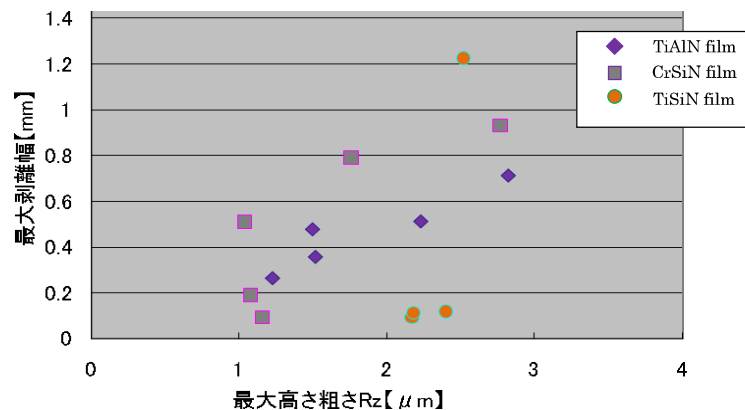


図2-18. 剥離最大幅と研削面の最大高さ粗さとの比較

図2-18は、その時の研削面粗さと最大剥離幅の関係を示したものである。同図からもわかるように、コーティング膜質によってその傾向が大きく異なるが、TiAlNコーティング膜

は研削面粗さが粗い場合には剥離面積も増大していることがわかる。研削面粗さ1 μm前後のものと同研削面粗さ3 μm前後のものとは、ダイヤモンド円錐を押し込む際の応力に差異を生じる。すなわち、研削面粗さが大きくなれば、先端角120°のダイヤモンド円錐の接触面が不均一になり、研削面の粗い部分においては研削による内部クラックを発生しており、接触面が不均一になることも影響してより大きなコーティング膜の剥離を発生するものと推測される。一方、研削面粗さが小さい場合は、ダイヤモンド円錐の接触面積は均一になるために、力を均一に掛かりやすくなる。さらに、研削による内部クラックの発生も少なくなるためにコーティング膜の剥離も減少する傾向にあるものと推測される。本研究の試験結果においては確認できなかったが、研削面粗さ1.0 μm以下の領域においては、さらに密着強度は高くなることが予測されるが、現状のPVDコーティング膜の範疇においては、コーティング後の研削面粗さにて1.0 μm以下の研削面粗さを形成するにはコーティング技術に対する課題が残るものと思われる。

2-5-4. トライボロジー試験比較

図2-19は、TiAlNコーティング膜における研削面粗さの異なる超硬チップに対するトライボロジー試験結果を示したものである。同図より、研削面粗さの小さい超硬チップほど摩擦係数が高くなっており、摺動抵抗としては増大する結果となった。本トライボロジー試験においては、鋼球を超硬チップ表面に接触させるため、2 Nの荷重で研削面粗さの相違によって鋼球の接触面積にも差異を生じることになる。したがって、研削面粗さ2 μm前後の超硬チップは接触面積が小さくなり、点接触状態になるために摺動抵抗値が減少したものと考えられる。また全般的に摩擦係数は0.4以下と低い値を有しているが、これは成膜時のコーティング用ターゲットの消耗の程度が異なったために成膜時の表面状態に差が生じたと推測する。一方、研削面粗さ1 μmに仕上げた超硬チップでは鋼球との接触面積が点接触ではなく面接触として形成されるため、摺動抵抗値が増大したと思われる。実際の切削加工においては、すくい面は切屑が接触して流出する部分であり、すくい面の研削面粗さは切屑の流動に対して非常に重要な要因になる。本トライボロジー試験は、フライス切削における切屑の流動とは異なるが、研削面粗さが摩擦抵抗値に及ぼす影響を見極める上で重要な評価項目であると考えられる。今後、超硬チップを用いた旋削試験においては、切屑がすくい面を流出する過程で摩擦力に対してどのような影響を及ぼすのかを解明することにより、すくい面の最適研削面粗さを見出していきたいと考えている。

また、図 2-20 に研削面粗さと摩擦係数の関係を 2 種類のコーティング膜質について比較したものである。図からもわかるように、研削面粗さが小さくなるほど摩擦係数は大きくなる傾向を示している。研削面粗さが小さいほど鋼球との接触面積が大きく、すなわち、膜種の種類によらず同様の傾向を現すことがわかる。また、コーティング膜種によって摩擦係数は異なり、表 1 に示したように CrSiN コーティング膜の摩擦係数は全般的に良好な結果となっている。

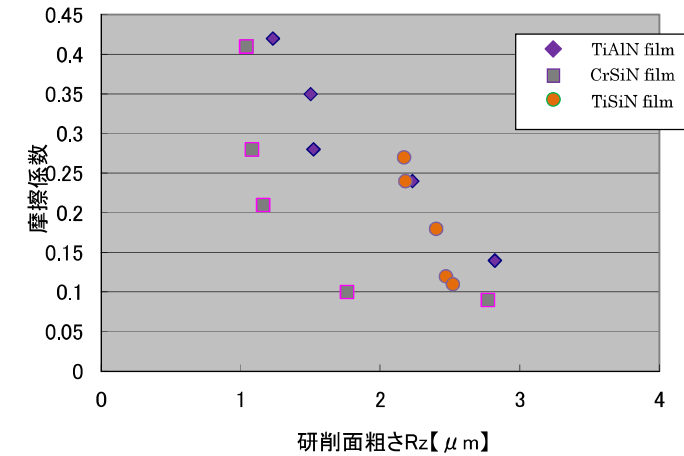


図 2-20. 各コーティング皮膜の研削面粗さと摩擦係数の関係

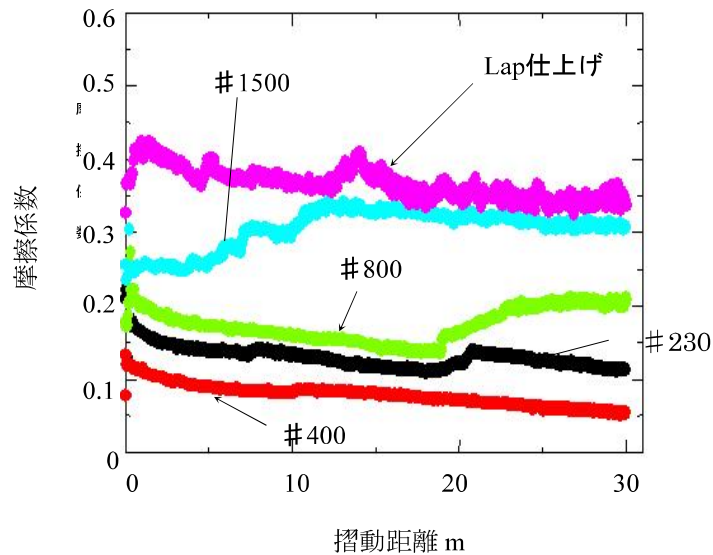


図 2-19. TiAlN 皮膜の摺動距離と摩擦係数との関係

2-6. 考察

前項までにおいて、基礎評価として研削面粗さ、またコーティング膜質の種類に対するスクラッチ評価、圧痕評価およびトライボ評価によって密着特性を比較した。これまでの結果として、研削面粗さに関しては粗さが小さければ小さいほど密着強度が増大する傾向にあることが明白になった。そこでコーティング膜質の種類による傾向を考察する。

図 2-18 および図 2-20 より、研削面粗さ Rz1.5 μm 付近の TiAlN コーティング膜、TiSiN コーティング膜と CrSiN コーティング膜の間で差異が生じていることがわかる。CrSiN コーティングの方が密着強度が低いために剥離量が大きくなったものである。TiAlN コーティング膜は密着強度が高いため剥離量も小さくなる。元来、TiAlN コーティングより CrSiN コーティング膜は表面の摩擦係数は低い特性を有している。しかしながら、工具母材との密着性という観点では、TiAlN コーティング膜よりも剥離量が増大する結果を示した。これは、図 2-21、図 2-22 に示すように TiAlN コーティング膜が柱状晶の結晶状態であるのに対して、CrSiN コーティング膜は粒子サイズが 5nm という微細構造となっており超硬工具母材と接地されるコーティング粒子数の違いによるものと推測する。皮膜構造の観点でいえば粒径の影響が考えられる。それと研削時の面粗さとの最適な組合せが重要となる。

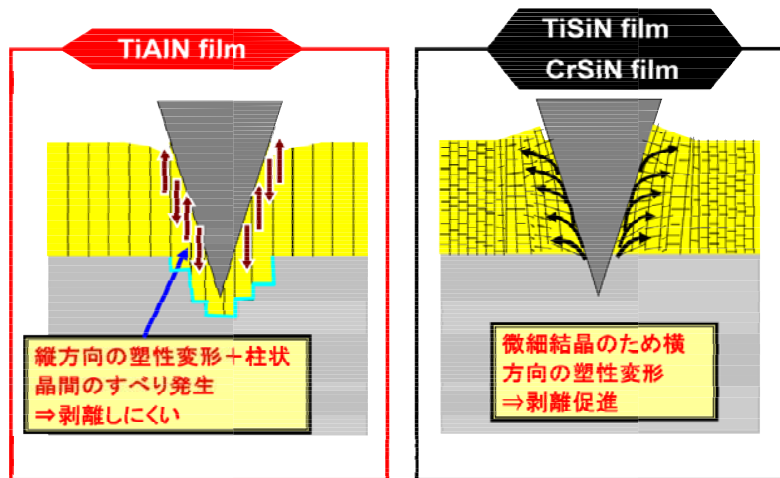


図 2-21. コーティング断面組織の違いによる皮膜破壊モード

2-7. 結言

工具すくい面の研削面粗さがコーティング膜の密着特性に及ぼす基礎実験を研削面粗さを変化させて行った結果、以下の結論を得た。

- (1) すくい面の研削面粗さが小さくなれば、PVDコーティングは膜質によらず、剥離が生じにくい傾向になることが分かった。その理由は、研削面粗さが小さくなるほど、皮膜の構造内に圧縮応力がかからず、膜割れ等の異常が起こらないためである。
- (2) 皮膜の比較においてはCrSiN皮膜が最も低摩擦係数である結果が得られたが、横方向への塑性変形が発生しており、密着強度を向上させる必要がある。同じ膜質間で見つた場合、研削面が平滑なほど、膜は安定的に成長していく。
- (3) TiAlN皮膜は非常に靱性の高い皮膜であり、超硬母材の変形に追従することが可能である。

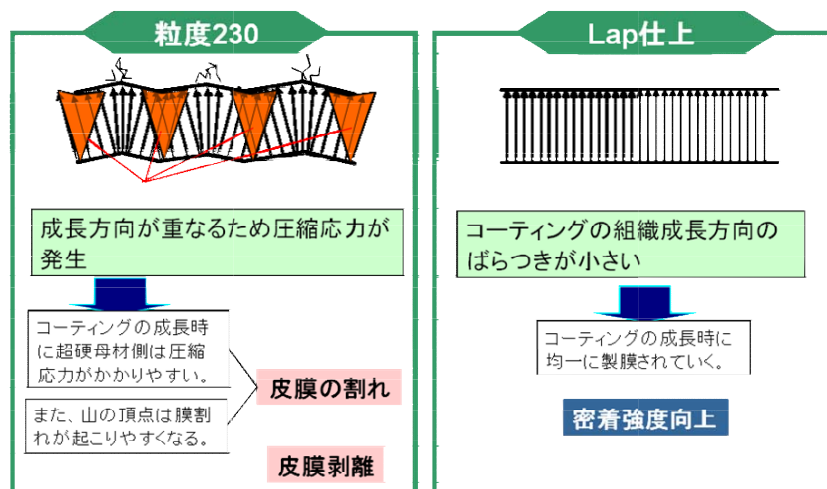


図2-22. 研削面粗さの違いによるPVD皮膜の堆積方向の違い

2-8. 参考文献

- 1)T.ISHIKAWA and K.INOUE : TiSiN Based Ultra-Hard Coating Materials:Hitachi Metals
Technical Review Vol.21,59,2005
- 2)H.FUKUI, S.IMAMURA and D.TABAYASHI :Effects of linearly ramping substrate bias on
microstructure and cutting performance of TiAlN coating: Journal of the Japan Society for Abrasive
Technology ,53(10),638,2009
- 3)N.CHAOYIN, A.ANDO and H.WATANABE :Mechanical Properties of Cr-Si-N Coatings
Prepared by Arc Ion Plating Method and Influence of Bias Voltage on them: The journal of the
Surface Finishing Society of Japan, 55(4),286-291,2004
- 4)N.NIHIRA : , 防錆管理, 46(2),46,2002
- 5)N.NIHIRA :Effect of frictional environment on tribological properties of TiAlN film; ,No.6
(2003)
- 6)A.MOTOI,S.KATAOKA,K.MORIKAWA : An evaluation method for the adhesion of DLC coated
tools intended for plastic forming: Bulletin of Tokyo metropolitan industrial technology research
institute, No.6 .2003

第3章 旋盤加工における研削面粗さが及ぼす 切削特性への影響

3-1. 緒言

前章においては、基礎実験として、超硬インサートチップを用いた各種の定量実験を行った。コーティングの膜質においても3種類で検討した。本章では、コーティング膜の密着特性と実際の切削特性との関連性を明らかにするために、研削加工によって工具すくい面粗さを変化させた超硬チップを用いて旋削加工を行った。その際のコーティング皮膜の損傷形態、とくに切りくずのすくい面への凝着状態に着目した。また、仕上げ面粗さおよび切削抵抗を測定することにより、研削面粗さの相違による切削特性を究明した。旋盤での加工であるため、連続切削となり、すくい面側への溶着が多量に発生するため、その形態にも着目している。そして、最終的には本章で得られた知見をボールエンドミルのすくい面の研削面粗さにも展開してコーティングが剥離を起こさないための最適な研削面粗さを見出すことを目的とする。

3-2. 実験内容

3-2-1. 実験用試料

研削加工条件の相違によるコーティング皮膜の密着特性を明らかにするために研削面粗さの異なる超硬チップすくい面を製作した。超硬合金の素材には、タングステンカーバイドの粒径 $0.8\mu\text{m}$ の微粉末に $\text{Co}8\%$ (重量%) を添加・焼結したものをを用いた。超硬チップの寸法は、 $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ である。焼結後にロータリタイプの平面研削盤を用いて研削砥石粒度を変化させ、4種類のすくい面粗さの異なる超硬チップを製作した。研削盤に取り付けた直径 $\Phi 350\text{mm}$ の研削砥石の粒度は、#230、#400、#800、#1500のものである。研削圧力は $-0.2 \sim +2\text{Mpa}$ とし、超硬チップを貼付した $\Phi 150\text{mm}$ のキャリアギアとを接触させながら研削加工を行った。また、#1500の研削砥石で研削した超硬チップに関しては、さらに直径 $\Phi 300\text{mm}$ の錳定盤を用いて90分間の仕上げ研磨を行い、鏡面状態のすくい面に仕上げた。工具すくい面粗さとしては合計5種類の超硬チップを用意した。この超

硬インサートチップは前章の基礎実験で用いたものと同様であり、すくい面に相当する面の研削面粗さを変化させている。

準備したPVDコーティング皮膜においても前章で用いたものと同様であり、3種類で実験を行った。各膜質の詳細な説明は第2章で行っているため、割愛する。^{*1)~*3)}

3-2-2. 実験装置およびその方法

3種類のコーティング皮膜を覆った超硬チップを用いて旋削加工による切削特性の評価を行った。切削特性の評価に対しては、被削材として日立金属社製のHPM-MAGICを用いた^{*4)~*5)}。HPM-MAGICはプラスチック金型材料であり、ロックウェル硬さで40HRCの硬度を有している。

近年のプラスチック金型材はその寿命向上のために、硬度を維持しつつ靱性を高め、ショット回数の繰り返によるクラックの発生を抑えることに主眼を置いて設計されている。つまり、安定した切削加工を行うためには、工具側に切削性と耐溶着性、耐剥離性が求められることになる。

また、使用した旋盤は、図3-1に示すTAKIZAWA社製のCNC旋盤(TSL-360CNC)である。切削条件としては、切削速度120m/min、1回転当たりの送り量0.1mm/rev、切込み量0.1mmを採用した。切削方式はドライ加工で行った。



図3-1. 使用したCNC旋盤外観

また、超硬チップを支持するホルダは、タンガロイ製のCSBNR2525を使用した。超硬チ

ップには日立ツール製のSNMN120400を使用した。チップホルダに取り付けた際の工具のすくい角は -5° 、逃げ角は 5° となる。そのチップホルダの概要を図3-2に示す。

これらの評価は、超硬チップのすくい面の摩耗形態と凝着状態の観察、加工面粗さおよび切削抵抗分力をそれぞれ測定し、超硬チップの研削面粗さとそれらの観察・測定結果とを比較、検討した。

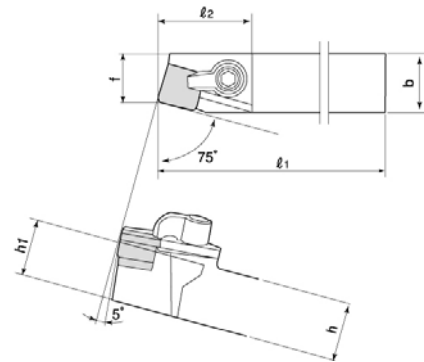
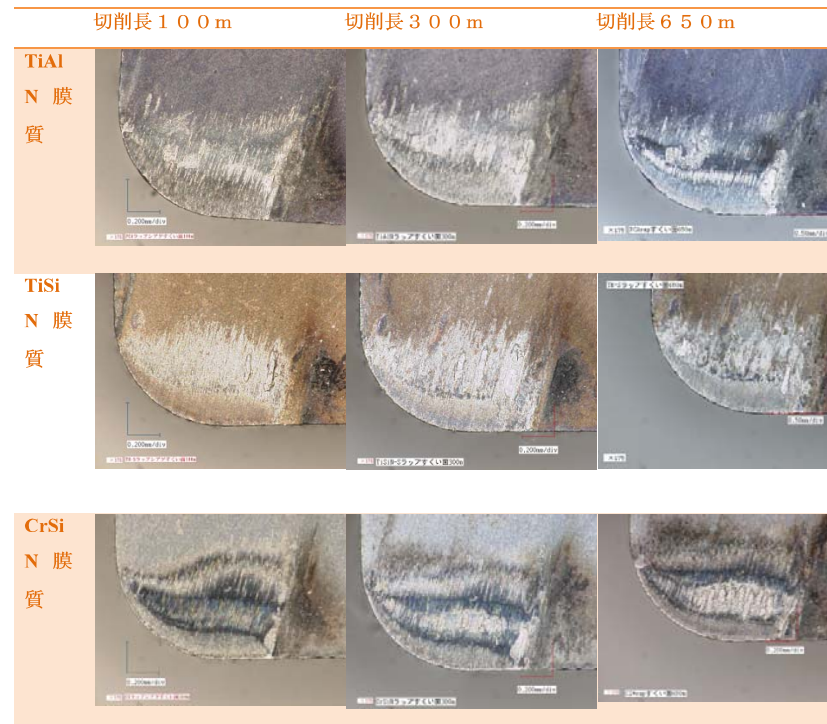


図3-2 チップホルダ概要

3-3. 実験結果

3-3-1. すくい面の摩耗形態

まず、切削後のすくい面の状態を観察して研削面粗さによる傾向を確認した。図に示すのは、CCD上のすくい面全体の状態である。代表として3膜質のラップ仕上げまで行ったものを示す。切削長別に100m、300m、650mと時系列で摩耗形態を調査した。いずれもすくい面側の溶着は加工距離が伸びるほどに増大していく。膜質別にみると、特にTiSiN膜質は100mの段階から全体的に溶着物が多く発生しており、ただし、いずれの膜質でも650mの段階ではすくい面全体に溶着が広がっている状態であった。しかしながら100m時点の各膜質のチップを見ると、刃先近傍部とすくい面全体とでは形態が異なることも観察からわかる。そこでさらに刃先近傍部とすくい面全体部とに観察部を分けて溶着状態の詳細をSEMにて観察した結果を纏めたのが次の図3-3になる。



0.2mm

図3-3. 加工距離別のすくい面溶着状態

図3-4は、すくい面側の摩耗形態を切削長650mにおいて観察、比較したものを示す。観察箇所は、刃先エッジ部のすくい面および切りくずが流出時に接触するすくい面の2箇所で行った。同図では、各種のコーティング膜質において砥石粒度#230による研削仕上げとラップ仕上げによるすくい面を取り上げている。いずれのコーティング膜質においても、研削面粗さの相違による傾向が明白に現れている。刃先エッジ部においては、ラップ仕上げによるチップの摩耗形態が安定しており、異常なチッピングなどは確認されない。しかしながら、#230の砥石粒度で研削を行ったチップにおいては、刃先稜線部の摩耗は不均一で微小チッピングが先行したような摩耗形態を示している。一方、すくい面全体を観察すると、逆にラップ仕上げによるチップは切りくずの凝着が広い範囲で発生していることが認められ、切りくずの流出に影響を及ぼしていることが予測される。砥石粒度#230で研削したチ

ップにおいては、すくい面全体の凝着はラップ仕上げのチップよりも狭い範囲で発生しており、その凝着形態も異なっていることがわかる。また、コーティング膜質の種類によって摩耗形態に差異を生じており、摩擦係数の低いCrSiN膜質^{※3)}は凝着量が少なく、研削条痕に沿って均一な凝着形態を呈している。摩擦係数の大きいTiSiN膜質^{※1)4)}の凝着量は過大に発生しているのが認められる。研削条痕の溝に沿って凝着物が広い範囲で発生しており、連続切削によってそれらが時間とともに堆積していったものと考えられる。TiAlN皮膜^{※2)}のチップに関しては、CrSiN皮膜とTiSiN皮膜との中間的な位置付けである。ただし、研削面粗さによる傾向は、前述のとおり刃先稜線部とすくい面全体とにおいて凝着形態が異なっている。このことからエッジ先稜線部に求められるすくい面状態と刃先エッジ部から離れたすくい面全体に求められる研削面粗さは決して同様ではないと考えられる。また、表面の摩擦係数の差異が切削時に発生する凝着量に直接比例しないことが確認された。

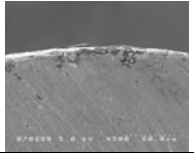
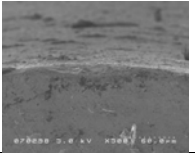
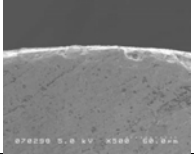
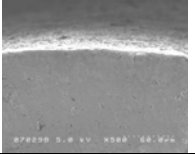
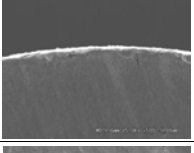
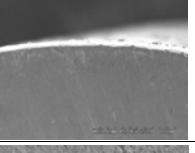


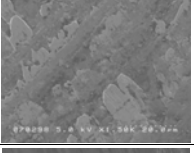
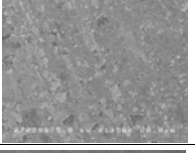
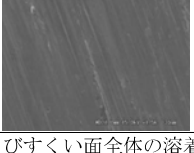

		#230	Lap
刃先稜線部	TiAlN 皮膜 60 μm		
	TiSiN 皮膜 60 μm		
	CrSiN 皮膜 60 μm		
すくい面全体部	TiAlN 皮膜 20 μm		
	TiSiN 皮膜 20 μm		
	CrSiN 皮膜 20 μm		

図3-4. 各膜質の刃先近傍およびすくい面全体の溶着状態の詳細（切削長650m）

3-3-2. 仕上面粗さ

図3-5は、切削加工によって創成された加工面粗さの切削距離による推移を示したものである。加工面粗さはMitutoyo製SURFTEST-701を用いて測定距離4mm、カットオフ値0.25で測定を行い、平均高さ粗さRaによって評価した。

仕上面粗さの推移を比較すると、TiSiN皮膜およびTiAlN皮膜においては研削面粗さが良好な切削工具は加工面粗さも比例的に良好になる傾向を持つことが明らかである。しかしながら、CrSiN皮膜に関しては研削面粗さによる上述のような傾向が認められなかった。また、切削初期と加工距離650m時におけるそれぞれのRa値を比較すると、TiSiN皮膜およびTiAlN皮膜の2種については、ラップ仕上げした超硬チップのRaの変化量は少なくなっており、研削面粗さの粗い超硬チップでは、Raの変化量が大きく表れている。

一方、CrSiN皮膜に関しては切削初期から650mの切削後までRaの変化は、研削面粗さの粗い超硬チップの方が少なくなる結果を示している。これは、切削初期と650m切削時における刃先の摩耗状態が定常的であるかどうか、さらにすくい面上の凝着状態の相違によって切りくずの流出状態が変化したことが加工面に影響を与えたものと考えられる。

図3-6は、切削初期と切削距離650m時における仕上面粗さRaの変化率を示したものである。切削初期(10m)の仕上げ面粗さRaを100%とした時の650m切削時のRaの値を%表示した。図からもわかるように、TiAlN皮膜およびTiSiN皮膜のそれぞれのラップ仕上げした超硬チップは、砥粒粒度#230で検索した超硬チップに比べて変化率がそれぞれ小さくなることわかる。これは、切れ刃エッジの研削面粗さによって刃先の食付き方が異なることによるものである。ラップ仕上げによる超硬チップの方が刃先エッジの稜線が均一に形成されているため、被削材の食付きが良くなり仕上面粗さも良好になったと考えられる。また、ラップ仕上げした超硬チップは切れ味が維持できたため、650mまで切削距離を延長しても仕上げ面粗さの変化率が小さくなる傾向を示している。しかしながら、CrSiN皮膜ではその傾向が逆転しており、ラップ仕上げした超硬チップよりも砥粒粒度#230で研削したものの方が仕上げ面粗さの変化率が小さくなる結果を示している。これは、CrSiN皮膜の耐摩耗性が影響を及ぼしたものと考えられる。CrSiN皮膜の硬度は本研究の膜質の中で最も低い値を示しており、皮膜表面の損傷が早期に進んだことが推察される。

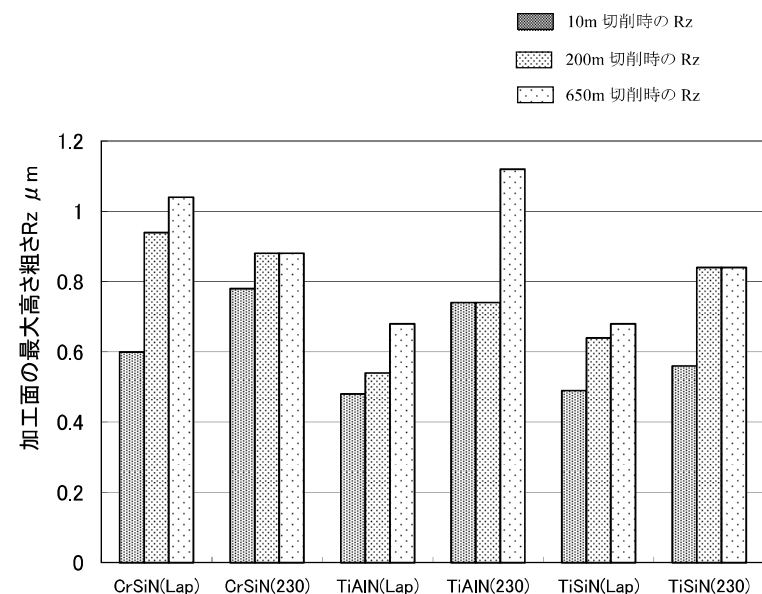


図3-5 仕上面粗さRaの推移

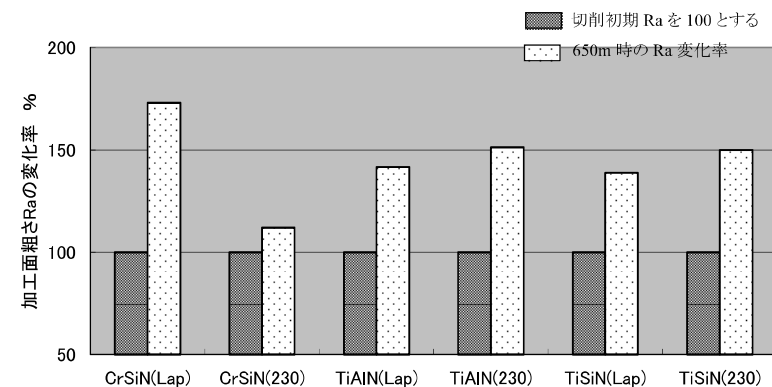


図3-6 各膜質および研削面による加工面粗さ値の変化率

3-3-3. 切削抵抗

図3-7は、各コーティング皮膜について砥粒粒度#230による研削仕上げとラップ仕上げの研削面粗さを有する超硬チップの主成分力を測定した結果をまとめたものである。切削距離10mにおける切削抵抗値を比較している。研削面粗さについての傾向を見ると、いずれのコーティング膜種においても#230の研削仕上げの超硬チップよりもラップ仕上げによるものの方が切削抵抗は低くなることが明らかである。これは、工具切れ刃のエッジが被削材に食付く際に作用する瞬間的な力の差異によるものであり、研削面粗さが良好な超硬チップほど刃先エッジ性状が均一かつ安定しているため、切削抵抗が減少したものと考えられる。

一方、研削面粗さが悪い超硬チップにおいては、刃先エッジの均一性もかなり劣ることになる。したがって、切削抵抗の絶対値も大きくなるものと考えられる。切れ刃の食付き性、つまり切削性を考慮した場合には、刃先エッジ部近傍の研削面粗さが良好になるほど、切削抵抗の低下が期待できる。

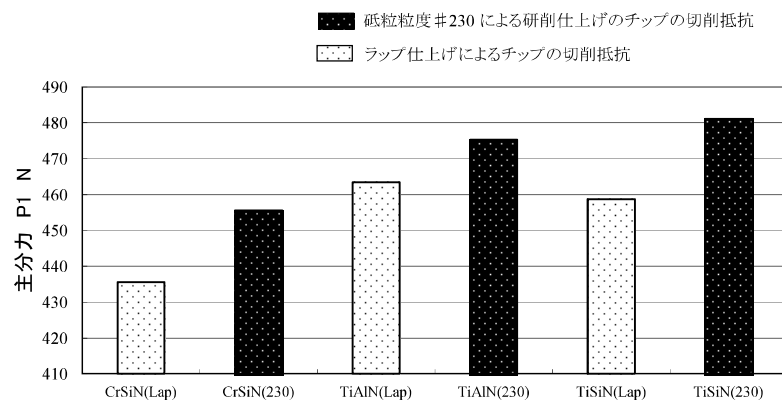


図3-7 各膜質による切削抵抗主成分値の比較

3-3-4. 凝着量の測定

工具のすくい面上に観察された切削による凝着物の定量的評価を試みた。その評価方法としては、すくい面上の垂直方向に堆積された凝着量の測定を行うもので、図3-8に示すように100 μ m \times 500 μ mの種類の超硬チップにおいて、刃先のエッジ近傍部（刃先から50 μ mの位置までの凝着容積）とエッジ部から内側に入ったすくい面全体部（刃先から300 μ m \sim 400 μ mの凝着容積）の2箇所における凝着量の測定を行い研削面粗さおよびコーティング膜種の相違による傾向を比較した。測定にはキーエンス製のレーザ顕微鏡を用いた。

図3-9は、エリア①およびエリア②における凝着容積の比較を示したものである。刃先のエッジ部近傍（エリア①）の凝着量を比較すると、研削面粗さが良好な超硬チップはいずれのコーティング膜質においても少なくなっている。それに対して、研削面粗さが粗い超硬チップではと高くなる傾向が認められる。これは、切れ刃エッジの食付き性の相違いに比例しており研削面粗さが良好なラップ仕上げの超硬チップが傾向として良好になる。また、切削距離650mの段階においても凝着量を比較すると、エリア①の部分はあまり傾向が認められなかった。これは、切削距離が長くなって刃先エッジ部の摩滅が進行したため、凝着量として大きく堆積したものと考えられる。一方、エリア②で示されるすくい面上の凝着容積は、いずれのコーティング膜質においてもラップ仕上げによるものよりも砥粒粒度#230で研削仕上げした超硬チップの方が少なくなる結果を示している。

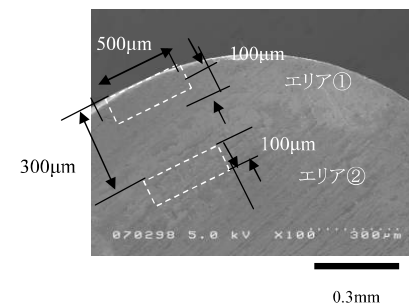


図3-8 凝着量測定範囲

3-4. 考察

3-4-1. すくい面の摩耗状態と仕上面粗さ

4節における実験結果より、すくい面の摩耗形態については、刃先エッジ部とすくい面全域部分とでその形態が異なる結果となった。研削面粗さが良好な超硬チップの刃先エッジ部は摩耗状態も安定しており、チッピング等の発生も観察されないが、研削面粗さが粗くなるほど摩耗形態にチッピングの発生が含まれる傾向となって現れている。仕上げ面粗さにおいても傾向は定性的に同様であり、研削面粗さの粗いと粒度#230の研削仕上げによる超硬チップの加工面粗さの推移は数値が高い位置に存在する。ラップ仕上げによる超硬チップの加工面粗さの推移が低い位置であり、切削初期から切削距離650mに至るまでのその変化量も小さいことが認められる。つまり、仕上面粗さは、切りくずの流出状態よりも刃先エッジの状態によって形成されるため、刃先エッジを如何に均一な状態のままに維持できるかが重要なポイントになる。したがって、刃先エッジの摩耗形態が安定しているラップ仕上げを施した超硬チップが最も良好であるといえる。

3-4-2. 仕上面粗さと切削抵抗の関係

次に、仕上げ面粗さと切削抵抗の関連について考察する。先の実験結果より、切削初期の仕上面粗さに関しては、いずれのコーティング膜質においてもラップ仕上げによる超硬チップが最も良好な加工面を形成していることが明らかである。これは、切削抵抗の結果と比べても共通しており、全体的にラップ仕上げによる超硬チップにおける切削抵抗の主分力は、#230の超硬チップよりも小さい値となっている。これらの結果は、刃先の切れ刃エッジの品質が大きく影響していることを示しており、切削抵抗が低い状態で安定した切削加工を行うためには、工具すくい面の良好な研削面粗さが求められることを意味するものである。

3-4-3. 切れ刃エッジと凝着状態の関連

3-4-2項において、切削抵抗や仕上面粗さの向上のためには切れ刃エッジ近傍部の研削面粗さの改善が必須であることがわかる。

しかしながら、凝着量の抑制を考慮した場合、図3-9に示したように研削面粗さの粗い砥石粒度#230で研削仕上げした超硬チップの方が凝着量が少なくなる結果となっている。これは、すくい面上を流出する切りくずのすくい面との接触面積が関連しているものと思

われる。ラップ仕上げによる超硬チップは研削条痕がないため、切りくずがすくい面と全体的に接触することになり、そのために凝着量が増えるものと推察される。一方、砥石粒度#230で研削した超硬チップは深い研削条痕が存在するため、切りくずとの接触面積が減少して凝着量も少なくなるものと推測される。したがって、切削抵抗と工具すくい面への切りくずの凝着を抑制し、かつ良好な仕上面粗さを得るためには、切れ刃エッジ近傍部と切れ刃エッジから300 μ m程度離れたすくい面においてそれぞれのすくい面に最適な研削面粗さを形成することが必要であるといえる。

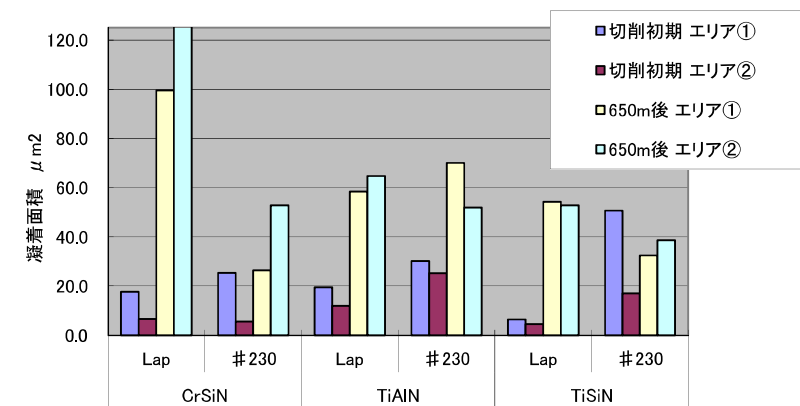


図3-9 各膜質および研削面粗さ別による凝着量の比較

3-4-4. コーティング膜質の影響

コーティング膜質の影響において、切削初期では潤滑性の高いCrSiN皮膜の切削抵抗が低くなる結果となった。しかし、加工面粗さではTiAlN皮膜およびTiSiN皮膜のラップ仕上げによる超硬チップが良好な結果を示している。さらに、切削距離が650mに到達した段階においては、CrSiN皮膜は加工面粗さが急激に悪化し、凝着量も増大する結果を示している。これは、コーティング皮膜の硬度が大きく影響しているものと考えられる。本研究の範囲内では、いずれのコーティング皮膜においても剥離現象は観察されなかったため、

本切削条件においてはいずれのコーティング膜質も密着強度としては十分に確保できているものと考えられる。コーティング皮膜の硬度による耐摩耗性と耐熱性はお互いに影響し合っており、理想的には、TiSiN 皮膜並みの硬度を有しつつ、表面は潤滑性に富んだ皮膜が最も理想的なものであるといえる。

3-5. 結言

工具すくい面の研削面粗さがコーティング皮膜の密着特性に及ぼす基礎検討に対して、研削面粗さを種々変化させて切削実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1)刃先エッジ近傍部の研削面粗さは、切削抵抗と加工面の仕上げ面粗さに影響を及ぼし、研削面粗さが小ければ切削抵抗が低減され、仕上げ面粗さの小さい加工面が得られる。
- (2)すくい面の研削面粗さは被削材と凝着量に影響を及ぼし、研削面粗さが小さければ刃先エッジ近傍部の凝着量を抑制することができる。また、刃先エッジから離れたすくい面については、研削面粗さの大きい面の方が切りくずとの接触面積を低減できるために凝着量も減少する。
- (3)コーティング膜質においては、刃先エッジ部からすくい面全体にかけて CrSiN 皮膜の切削初期の凝着量は抑制できるが、切削距離が増大すると凝着量が多くなる結果を示す。これらの結果より、刃先エッジ部は研削面粗さを良好にしてその品質を向上させ、すくい面全般に関しては研削面粗さの大きい面性状を形成させることによって、すくい面の摩耗形態や切削加工面の面性状の安定化を図ることが可能である。

3-6. 参考文献

- 1)T.ISHIKAWA and K.INOUE : TiSiN Based Ultra-Hard Coating Materials:Hitachi Metals Technical Review ,21 (2005) 59.
- 2)H.FUKUI, S.IMAMURA and D.TABAYASHI :Effects of linearly ramping substrate bias on microstructure and cutting performance of TiAlN coating: Journal of the Japan Society for Abrasive Technology ,53,10(2009.10)638.
- 3)N.CHAOYIN, A.ANDO and H.WATANABE :Mechanical Properties of Cr-Si-N Coatings Prepared by Arc Ion Plating Method and Influence of Bias Voltage on them: The journal of the Surface Finishing Society of Japan ,55,4(2004.04)286.
- 4)T.ISHIKAWA,F.OBATA and K.INOUE :Wear mechanism of TiSiN-coated cutting tools on high-speed cutting of hardened die steel: Journal of the Japan Society for Precision Engineering ,75,12(2009.12)1439.
- 5)F.TOHYAMA :Development and application of new generation tool steel :HPM-MAGIC : for commodity plastics :Plastics Age ,54,9(2008.09)56.

第4章 フライス切削における研削面粗さが及ぼす 切削特性への影響

4-1. 緒言

PVD コーティング工具の切削特性について、工具の刃先稜線および研削面が大きく影響を及ぼすことは前章までの基礎実験データからも明白である。しかしながら、実際にフライス切削においての現象で再現性があるのかどうかはまだ不明瞭である。本章では、ボールエンドミルを用いた等高線加工を行い、コーティングの剥離と研削面粗さとの関係を導き出していく。ボールエンドミルを使用した金型加工では、三次元曲面を形成するような複雑なツールパスの元で加工が進んでいき加工面を形成していく。その中で、特にプラスチック金型においては、加工面粗さを良好にして、磨き時間を短縮するために水溶性切削液を使用して加工するケースが多い。しかしながら、水溶性切削液を使用した加工においては工具のすくい面側のコーティングが剥離を起こす可能性が高い。PVD コーティングは炉内で回転している工具に対してイオンを照射し、コーティングを堆積していく。したがって、工具の回転の際に影となりやすい工具のすくい面側には逃げ面と比べるとコーティングの膜厚が薄まる傾向がある。そういったことからすくい面のコーティングは逃げ面に比べて剥離を起こしやすい状況にある。図4-1には、水溶性切削液を用いた場合のすくい面の剥離の状態を示した。これは、工具径が $\Phi 1.0$ で2枚刃のボールエンドミルである。被削材がSUS420J2で硬度が52HRC入ったものである。切削条件は図に示す通りで、溝切削を行ない、ボールエンドミルのチゼル近傍の摩耗状態とすくい面の剥離の状態を観察した。クーラントとしては剥離現象が再現されやすいように水溶性切削液を用いた。摩耗写真は切削初期の段階であるが、すでに剥離が生じている。このまま切削が進めば、剥離を起点として、チッピング等の異常な摩耗が生じる可能性が高い。

水溶性切削液を使用すると、切削によって上がった熱を冷却する効果は得られるが、工具側から見ると、刃先の温度変化が激しい状態になるため、特に表面のコーティング部分においては、熱によるクラックが発生しやすくなる。その上、すくい面側の膜厚が薄めに形成されていると、剥離が生じやすくなるのである。そういった問題を研削面粗さを改善することによって、剥離を抑制できるかどうかを明確にすることが本章の目的となる。

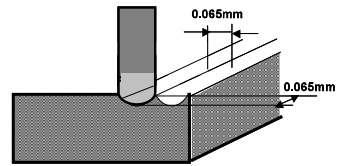
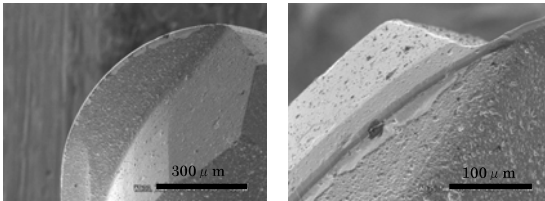
切削方法	溝切削
加工形状	
供試工具	R0.5×2NT 首下長さ2
被削材	HPM-MAGIC 39HRC
回転数 n (min^{-1})	20,000
切削速度 V_c (m/min)	63
送り速度 V_f (mm/min)	1,500
1刃送り量 f_z (mm/tooth)	0.0375
軸方向切込み a_p (mm)	0.065
径方向切込み a_e (mm)	0.065
クーラント	Wet emulsion
摩耗形態	

図4-1. ボールエンドミルのすくい面剥離例

4-2. 実験内容

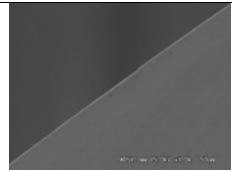

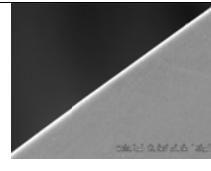
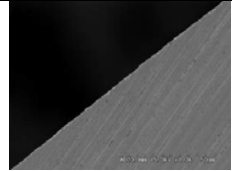
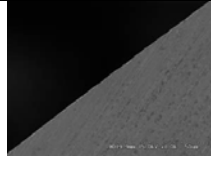
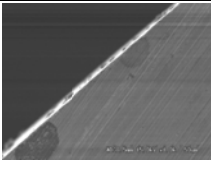
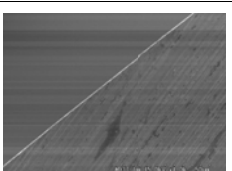
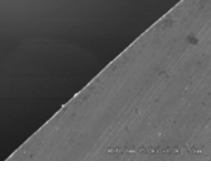
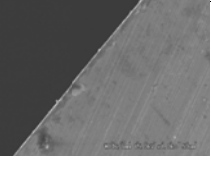
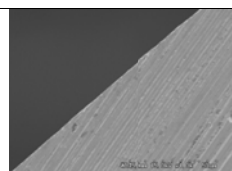
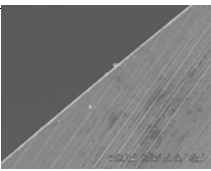
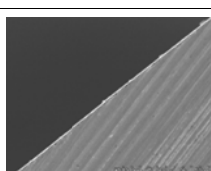
4-2-1. 実験用試料

研削面粗さがコーティングの剥離に影響を及ぼすのか確認するために、以下の工具を準備して切削評価を行なった。供試工具の諸元を図4-2に示す。

	
刃先 R	5
刃径 D	10
刃長 l	18
全長 L	100
シャンク径	10
刃数	2
外周ねじれ角	30
工具材種	超硬合金

図4-2. 共試エンドミルの仕様

今回の実験は、すくい面の研削面粗さを変化させて、すくい面の摩耗形態の違いと仕上げ面粗さへの影響を調査する必要があるため、研削時に使用する砥石番手を変化させた。図4-3および図4-4には使用した砥石番手とそれぞれの砥石で研削された後のボール刃のチゼル刃から45度部のすくい面の研削面の状態を示す。砥石番手の粒度が上がるほど、すくい面側の研削状態が良好になり、研削による条痕が残っていない。ここで研削面のレベルを4段階に区別して、それぞれの傾向を見た。研削レベル2、3、4においては、砥石の番手が#325、#600、#800で研削し、研削レベル1に関しては、砥石の番手#800で研削した後にダイヤモンドペストを使用して手作業にてすくい面のみ磨きを実施した。また、ボールの二番面に関しては、全て、砥石番手#600と同様のものを使用した。Lap仕上げまで行ったエンドミルのすくい面には研削条痕はほとんど残っておらず、平滑な研削面が形成されている。以下、すくい面研削面の4段階の区別した工具の呼び名を、研削面粗さのレベル1～4で表記する。

すくい面 砥石番手	逃げ面砥石番手 #600		
	TiAlN皮膜前	TiSiN皮膜前	CrSiN皮膜前
Lap レベル1			
#325 レベル2			
#600 レベル3			
#800 レベル4			

50 μm

図4-3. 各砥石番手によって研削されたボール45°部のすくい面状態

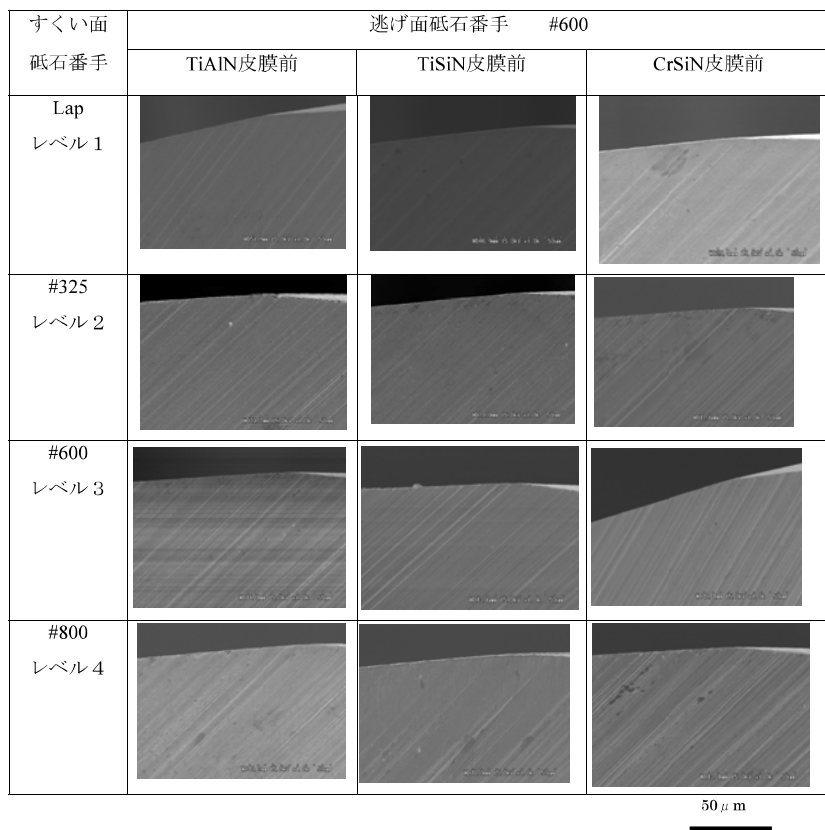


図4-4. 各砥石番手によって研削されたボールチゼル近傍部のすくい面状態

また、上記のエンドミルに対して前章にて検討してきた3種類のPVDのコーティングを施した。^{*1)~4)}コーティング後の研削面粗さの状態を図4-5および図4-6に示す。いずれもマイクロパーティクルが表面上に現れており、平滑な面が形成されていない様子がわかる。しかしながら、研削条痕が明瞭かどうかで違いが生じているため、コーティング前の状態で悪いものはコーティング後も研削条痕が残るために悪い。

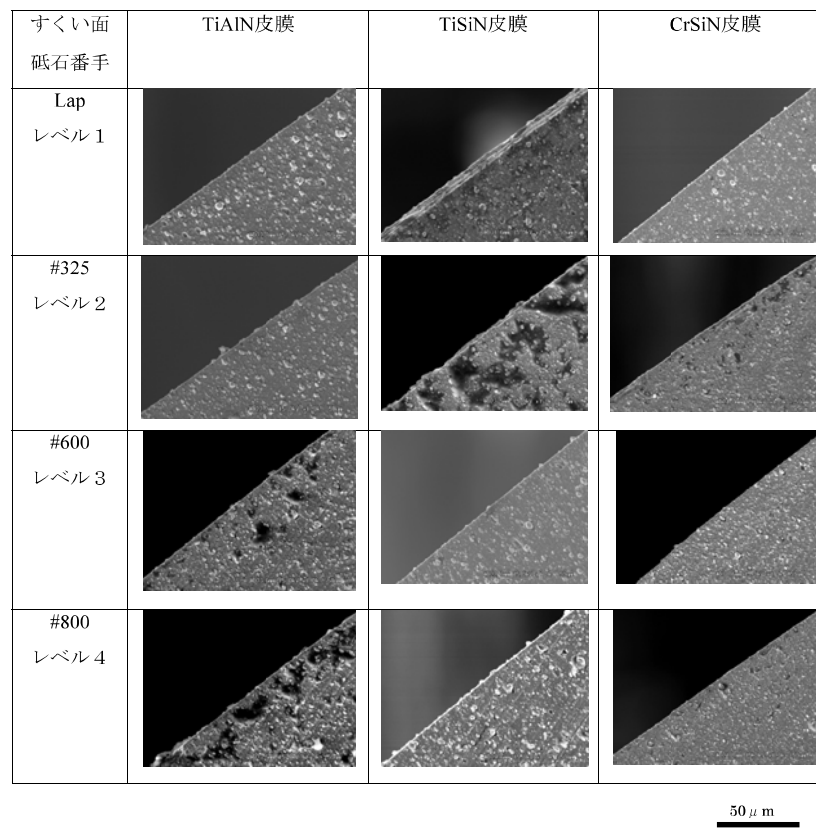


図4-5. 各砥石番手によって研削されたボール45°部のコート後のすくい面状態

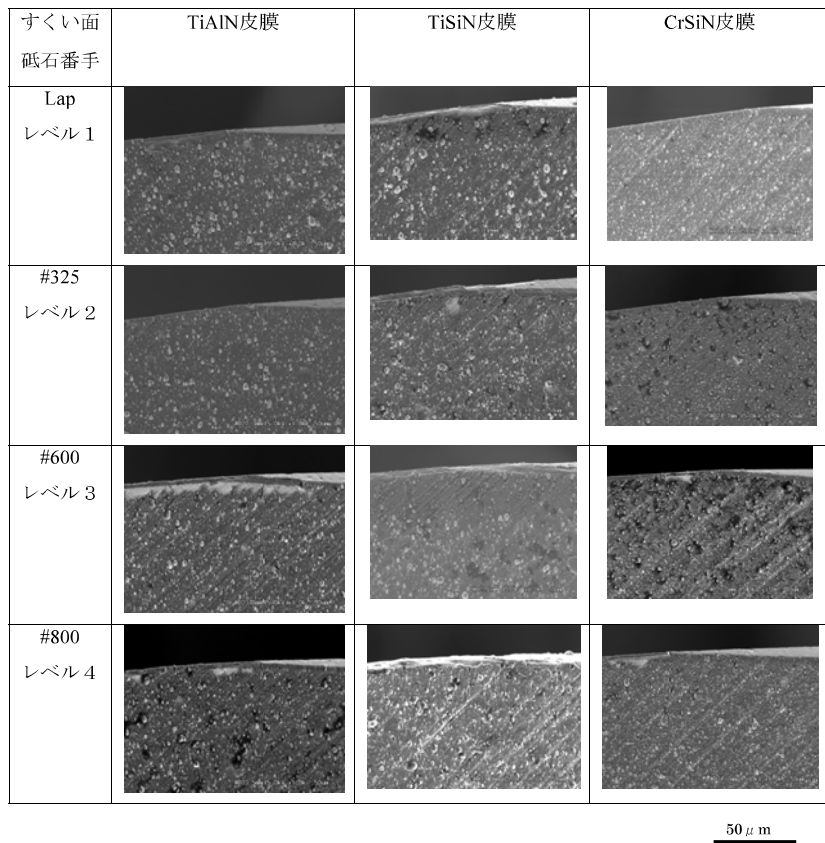


図4-6. 各砥石番手によって研削されたボールチゼル近傍部のコート後のすくい面状態

4-2-2. 実験装置およびその方法

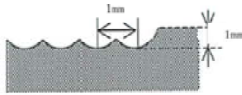
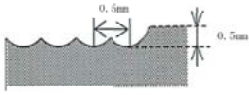
次に実験装置の概要と実験方法を示す。マシニングセンターには図4-7に示すOKK社製のPCV40を使用した。最高回転数が10,000min⁻¹で主軸動力が7.5kwである。このマシニングセンターを用いて、上記で準備したボールエンドミルの切削実験を実施した。被削材には、第3章でも用いたHPM-MAGICを使用した*⁵⁾。また、切削条件は、表4-1に示した。

実際にプラスチック金型を切削する場合を想定した切削条件に設定した。荒加工と仕上げ加工に分類してそれぞれで工具の評価を行なった。また仕上げ加工に関しては仕上げ面粗さの評価も加えた。従って、評価項目としては、工具の摩耗形態、すくい面の溶着状態の観察、加工面仕上げ面粗さおよび切削抵抗を測定して評価を行なった。図4-8には切削抵抗の測定概要を示す。工作物を取り付けた3分力動力計をエンドミルを使用して直接削り、その際の工作物にかかる抵抗電流値をチャージアンプを介してデジタル化してコンピューターに取り込む。



図. 4-7 OKK製マシニングセンター

表4-1 ボールエンドミルの切削条件

使用工具 刃径	日立ツール製ボールエンドミル R5×2NT	
	荒加工	仕上げ加工
回転数【min-1】	5500	5500
切削速度【m/min】	100	75
送り速度【mm/min】	1430	1100
一刃送り量【mm/tooth】	0.13	0.1
軸方向切り込み量【mm】	1	0.5
径方向切り込み量【mm】	1	0.5
クーラント	ドライ	ドライ
加工形状 (単純な底面切削)		

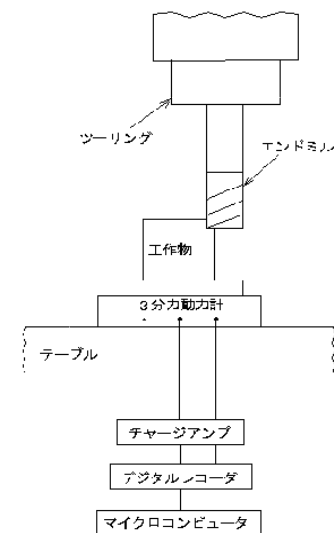


図4-8. 切削抵抗の測定概要

4-3. 実験結果

4-3-1. ボールすくい面研削面粗さによる切削抵抗の違い

前項で説明した動力計を用いて、まず切削初期から切削長200mまでの切削抵抗を段階的に測定して、研削面粗さによる傾向を確認した。その結果を図4-9に結果を示す。図からもわかるように膜質によらず、研削面粗さが小さい工具（研削レベル4）で削った場合の方が、切削抵抗の値は大きくなる傾向にあることがわかる。TiSiN皮膜とTiAlN皮膜は切削途中である50m～150m付近では研削面粗さによる傾向が顕著に現れているが、最終的には同等の数値に収束している。一方、CrSiN皮膜は、最終の切削長まで切削抵抗の推移は同じ傾向を示しており、研削面粗さが粗い方（研削レベル1）が抵抗値が小さい値となった。これは、ボールエンドミルの刃先の食付きと切層がすくい面を流れていく際にかかる摩擦力によるものと考えられる。

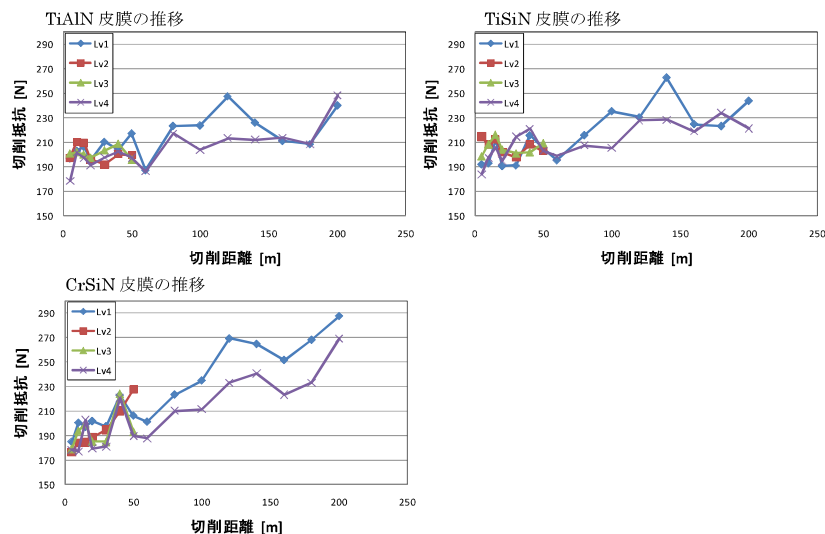


図4-9. 研削面粗さによる切削抵抗の推移

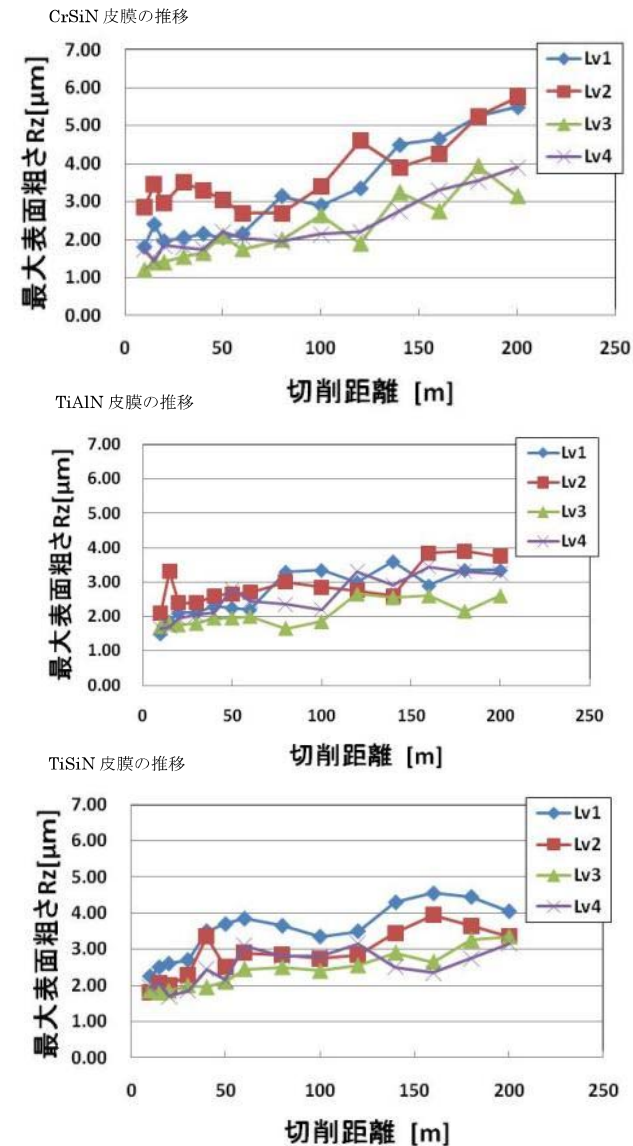


図4-10. 研削面粗さによる加工面粗さの推移

4-3-2. ボールすくい面研削面粗さによる加工表面粗さの違い

次にすくい面粗さの違いで加工面の表面粗さにどのような影響を及ぼすかを調査した。切削抵抗を測定した加工距離のタイミングで加工面を残し、その際の平均高さ粗さRaを測定して、その推移を調べた。図4-10に加工距離と加工面粗さの関係を膜質別に示す。膜質別でその推移の傾向を見ると、TiSiN皮膜とCrSiN皮膜においては、切削抵抗の値と同様の傾向を示した。つまり、すくい面の研削面粗さが良好なほど、加工距離が伸びるにつれて加工面粗さが悪化するのである。切削抵抗との関係から考えても比例の関係を持っているといえる。しかしながら、TiAlN皮膜においては、ボールすくい面研削面粗さによる加工面粗さの相違は大きくなかった。ほぼ同等の加工面粗さで200mまで推移している。これは、TiSiN皮膜・CrSiN皮膜とTiAlN皮膜との膜質の組織形態の差が影響していると考えられる。

膜質間での加工面粗さを比べると、TiSiN皮膜の研削レベル1のものは、0.4 μm～0.6 μmの間で200mまで推移しており、他の膜質と比べても最も良好な傾向を示している。

4-3-3. 加工面性状の比較

次に加工面性状の比較を行った。加工長200mの段階の加工面を拡大観察して、カッターマークの出方および加工面への溶着具合を観察した。加工面に残留する溶着は、切削の際に発生する切屑が流れきらずに引きづられ、加工面に跡を残すものと考えられる。したがって、切屑流れがスムーズでない場合、溶着物が多く存在することになると考えられる。図4-11には、各膜質および研削レベル1、4における加工面性状の状態の拡大写真を示す。加工面粗さの推移で示した傾向とほぼ比例するが、研削レベル1よりも研削レベル4の工具で削った加工面の方が、カッターマークが明白であり、切屑が引きづられることによ

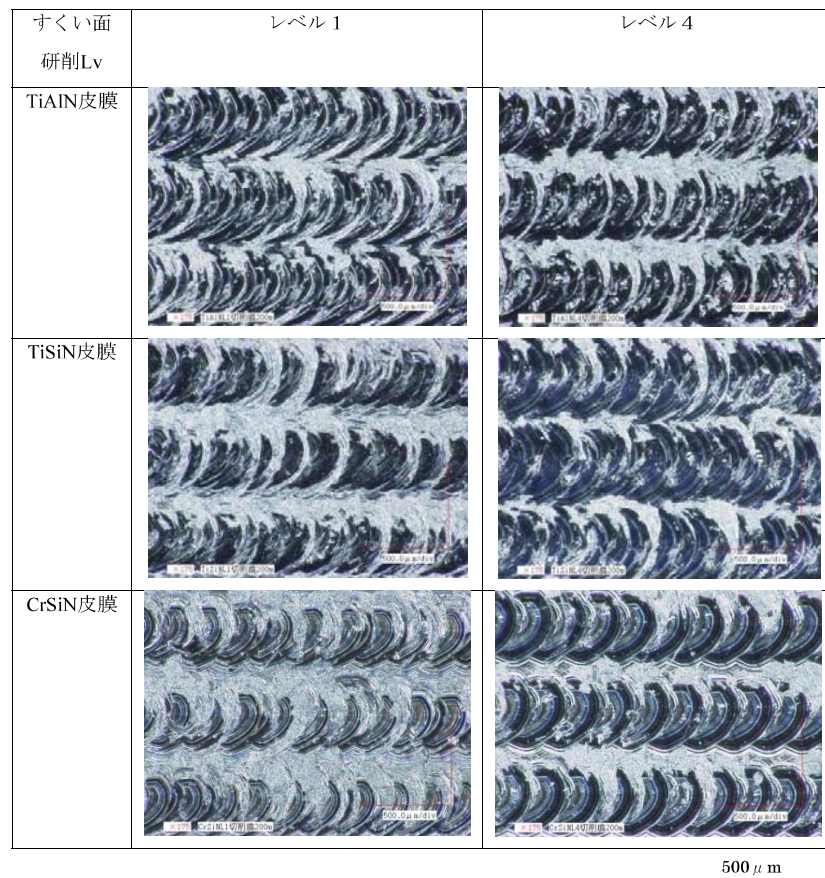


図4-11. 研削面粗さによる加工面性状の比較

て発生する白い溶着物の面積は小さい。溶着物の大小が加工面粗さに比例していることも示されている。

本結果より、研削レベル4の方が溶着が少なく切屑流れが良好な状態で加工ができることを示している。これは前章で検討した切屑がすくい面を流れる際の接触面積および摩擦の抵抗に大きく関係すると思われる。

4-3-4. 摩耗形態の比較

次に各工具で切削した後の工具摩耗状態の比較を行った。図4-12および図4-13に示すのは、ボールのチゼル〜境界摩耗の摩耗形態の写真であり、すくい面と逃げ面の両方が写るよう刃先切れ刃稜線を中心に撮影を行った。各膜質および研削レベルにおける形態の差を示す。切削長が200mであるため、いずれの工具も損傷はある程度進んでいる。その中で、切れ刃稜線の損傷と、すくい面全体の溶着具合を分けて観察行ってみると、研削レベル1のすくい面においては、溶着が多く堆積しており、写真上では研削面が目視で確認ができない。一方、研削レベル4は溶着の堆積量が少なく、研削条痕が残っていることが明らかである。これは、切屑が通過するすくい面の接触面積の差が表れていると考えられる。また、切れ刃稜線に関しては、切削長200mの段階では、損傷が大きく、一概に比較は難しいが、すくい面の溶着堆積量が多い工具ほど、切れ刃の損傷が大きい傾向にある。さらに、研削面レベル4のものは、切削前から切れ刃稜線が不安定なためにチップング等が起こりやすい性状となっている。逆に研削レベル1は切削前の切れ刃稜線の状態は良好なのだが、すくい面に溶着物が堆積することによって、実質ボール刃のすくい角が負の方向に変化するため、食付き性が悪くなり、切削抵抗が上昇してしまうために、チップング等の不安定な摩耗が生じると考えられる。したがって、摩耗形態を安定させるためには、すくい面の溶着を抑制させるための最適すくい面粗さが必要であり、かつ、切れ刃稜線に関しては、食付き性が安定するために一定の切れ刃稜線を設けることが必要であるといえる。

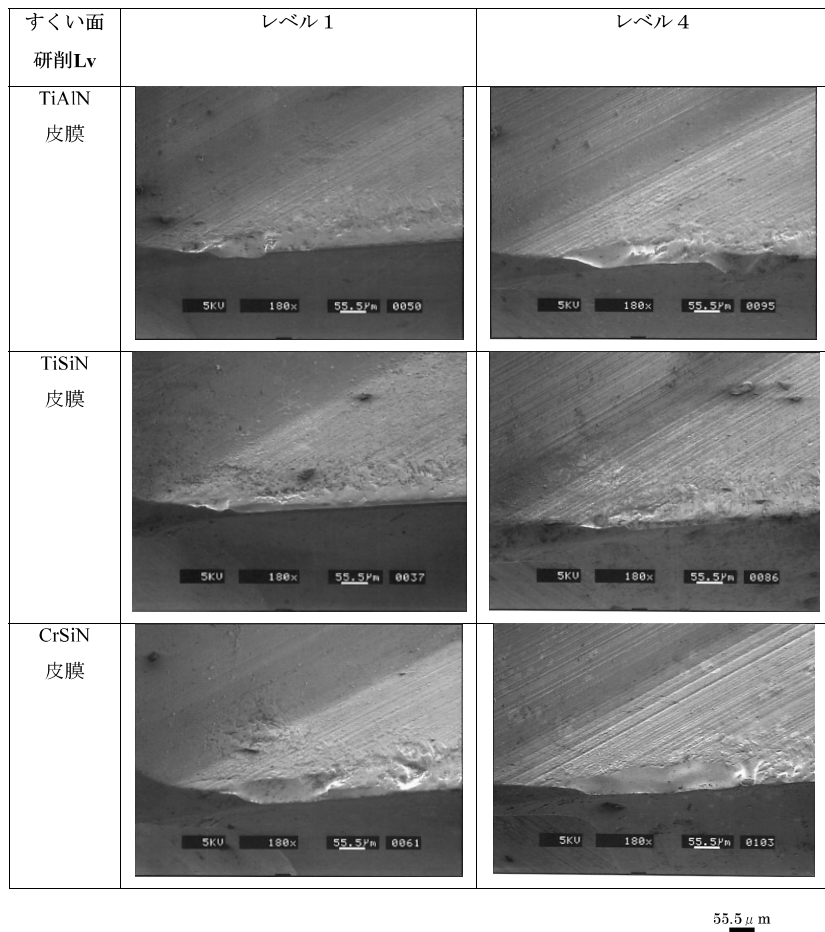


図4-12. ボールチゼル刃近傍の摩耗形態の比較

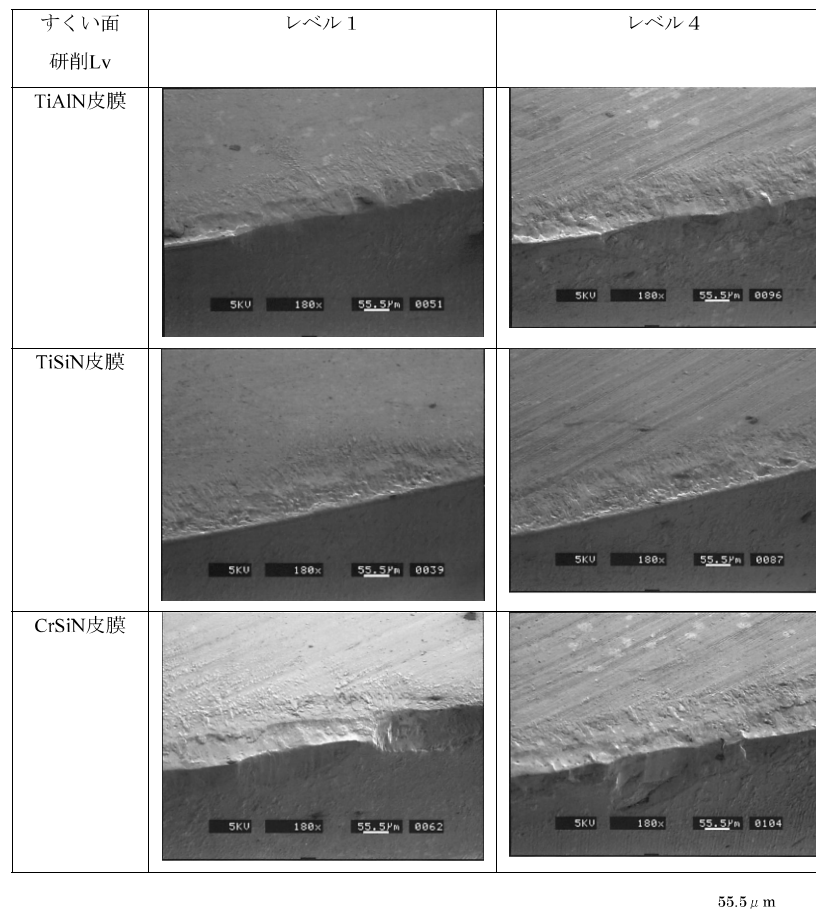
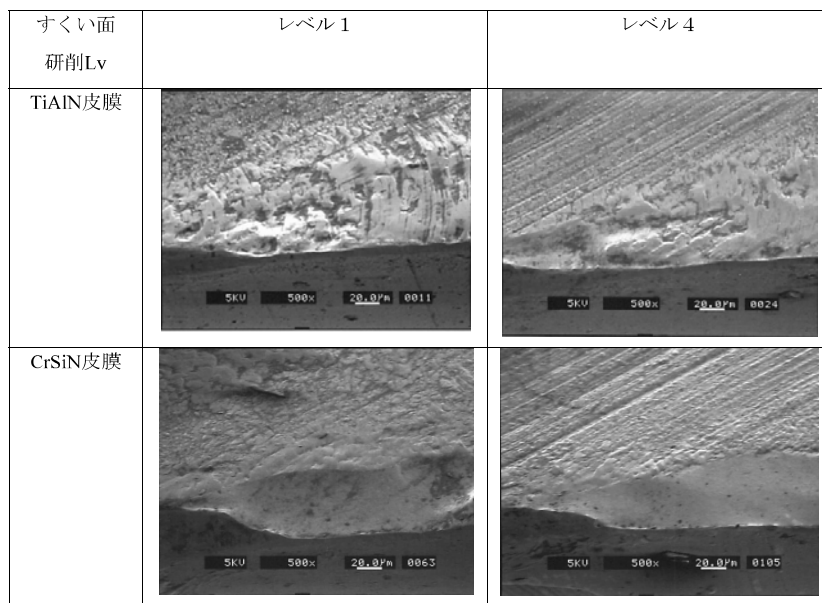


図4-13. ボールチゼル刃近傍の摩耗形態の比較

図4-14に示すのは、特に顕著な差が明白に現れたTiAlN皮膜とCrSiN皮膜のチゼル近傍の摩耗損傷の拡大観察結果である。切削長は100mの段階の摩耗状態である。特にチゼル刃近

傍部のすくい面溶着具合を研削レベル別に比較すると、顕著な差が現れている。研削レベル1の方は、溶着の堆積量が多く、チゼル直下のすくい面のすくい角が負側に変化していることがわかる。しかしながら研削レベル4の方は、溶着の堆積量は少なく、切屑がスムーズに流れていることが確認できる。この図の違いからも刃先稜線に求められる理想の状態、すくい面全体に求められる理想の面状態は異なると考えられる。



20 μm

図4-14. TiAlN皮膜およびCrSiN皮膜のすくい面溶着状態の拡大比較

4-4. 考察[I]

4-4-1. 研削面粗さによる摩耗形態、すくい面の溶着状態と切削抵抗の関連性

前項の実験結果に基づき、考察を行う。研削面粗さレベル別で摩耗形態を観察すると、研削レベル1の良好な工具ほど、すくい面への溶着は多い傾向である。さらに切削抵抗の推移を見ても研削レベル1の良好な工具ほど、抵抗値が距離を追う毎に上がっている。これは、すくい面への溶着が進むことで切屑流れが悪くなり、さらにすくい角も負の方向へ変化していくことから、切れ味が悪くなり、切削抵抗が増大していくものと考えられる。逆に研削レベル4の粗いものについては、溶着量は少なく、切屑が抵抗無く流れていると考えられる。図4-15はそれらの簡易モデルを図示したものである。

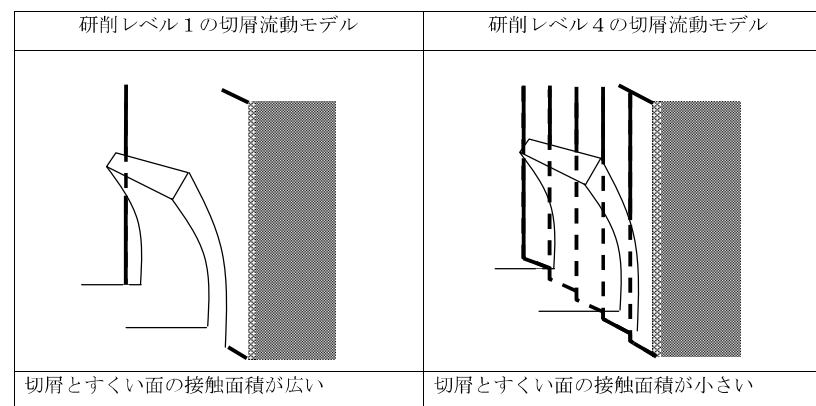


図4-15. 切屑流れの流動モデル

また図4-15に示したように研削面粗さによって、切りくずとの接触面積は変化することが考えられる。ここで図4-16に示すボールエンドミルのすくい面の一部の研削条痕から切りくずとのトータルの接触長さを求めてみる。一定の研削条痕で形成されていることを前提とした場合、Rzが大きいほど、一定距離間における研削条痕の山数は少なくなり、Rzが小さいほど山数は多くなる。切りくずが山の頂点部を通るとすると、図4-16に示すように、Rzが小さくなればなるほど急激に接触長さが長くなる。逆にRzが大きくなればなるほど、接触長さは少なくなるので切りくずとの接触だけを考慮すれば良好になると考えられる。

しかしながら、前章で検討した通り、すくい面の研削面粗さは刃先のエッジ品質に影響をおよぼすため、エッジの品質に影響が出ない範囲で抑えることも考慮する必要がある。

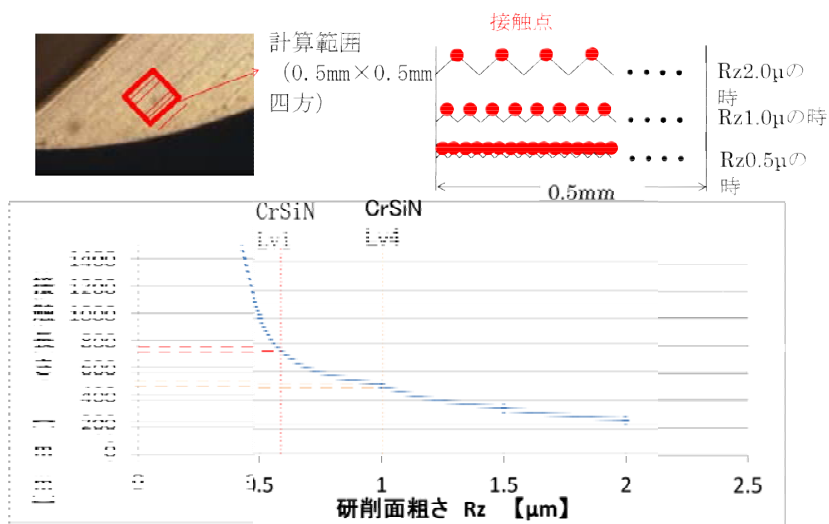


図4-16. ボールエンドミルのすくい面の一定区間内における研削条痕の長さ

4-4-2. 切れ刃稜線とすくい面における理想の研削面粗さ

次に理想と考えられる切れ刃稜線とすくい面の研削面について考察を行う。今までの結果より、切屑流れや切削抵抗の抑制を行うためには、切屑が流れるすくい面自身には良好な凹凸の少ない良好な研削面よりも、3~4µm程度の凹凸が表面に存在することで切屑流れが抵抗無く流れることが明白となった。しかし、切れ刃稜線においては、食付き時の切削抵抗を抑制する必要がある。またさらには、研削してコーティングした後の切れ刃稜線の状態を安定したものを形成する必要がある。それらを実現するために、図4-17に示す試作品を追加で製作して、評価に加えた。工具の基本諸元は図4-2に示したものと同様である。

	
すくい面面粗さRz	3.5µm
コーティング膜質	TiSiN TiAlN CrSiN
コーティング後の刃先処理	バレル処理

図4-17. 追加試作工具

ここで刃先処理として、バレル処理を用いている^{*)6)}。バレル処理は OTEC 社製(ドイツ)のドラッグフィニッシュバレル研磨装置を使用した。この装置は、エッジホーニングやドロップレットの除去を目的とした装置である。工具を取り付けたホルダーを、メディアの中で高速に自転、公転させ、これによって起こる摩擦を利用して高精度な研磨を行う。メディアは SiC を基本として、用途に応じてくるみやセラミックを混合させている。SiC は粒径 0.2~1.0mm、セラミックは 1.0~2.0mm、くるみは 1.5~2.0mm である。今回使用したメディアは、SiC とくるみを混合させたメディアを使用した。図 4-18 には、使用したバレル処理機とメディアの拡大写真を示す。また装置の機構と簡易的な処理モデルも合わせて示した。今回行ったバレル処理の処理条件は、刃先稜線部が均一に処理がなされるような領域で実施した。テーブル回転数 3 5 rpm、処理時間は 3 分である。メディアへの工具先端はメディアの状面から 80mm ホルダーごと入れた状態で処理を行った。尚、回転は右回転のみである。

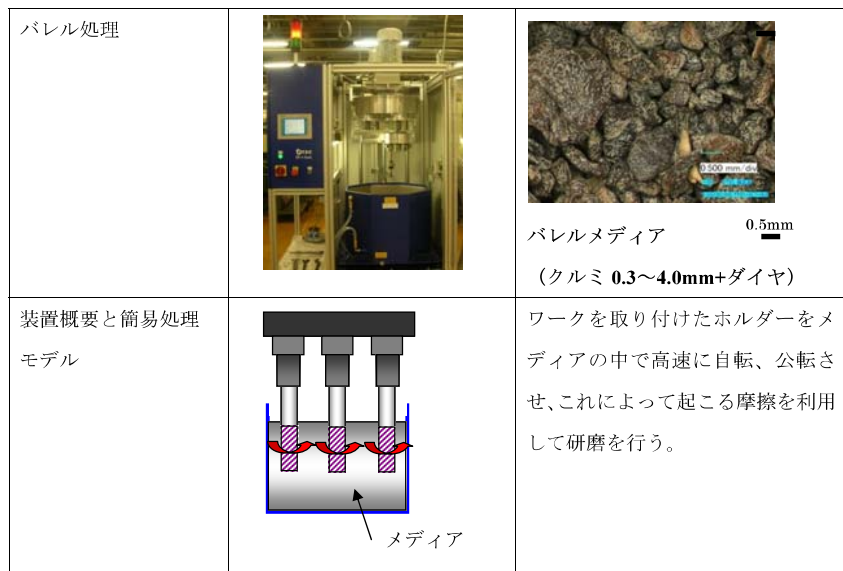


図4-18. バレル処理機

上記の装置を用いて処理を行った工具の刃先写真と刃先稜線に R 値を図 4-21 に示す。刃先稜線 R に関しては、図 4-19 に示すキーエンス社製の VX-8700 を用いて測定した。図 4-20 に示すようにボール刃の一部をレーザーにて画像を取り込み刃先の稜線部の丸みを求めている。すくい面に関しては、研削条痕で安定しない箇所もあるために、一定距離の刃先稜線の平均値で数値を求めている。



図 4-19.キーエンス社製レーザー顕微鏡 VX-8700

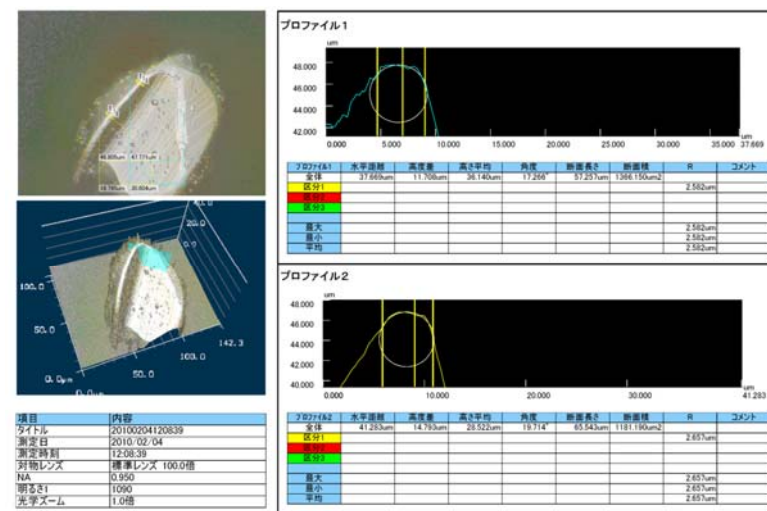
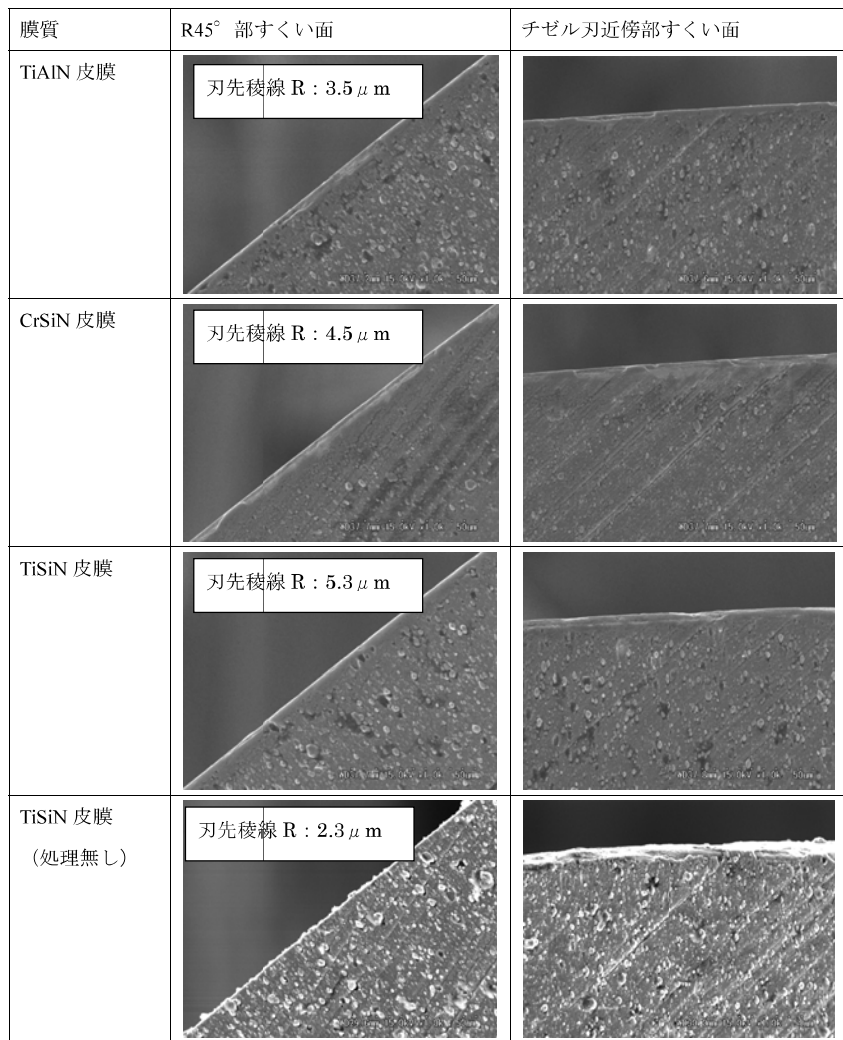


図 4-20.刃先稜線測定画面例

写真からも明白であるが、すくい面全体は研削条痕が残っているが、刃先稜線の近傍部は均一な処理が成されており刃先品位は良好な状態になっている。また、膜質によらず、いずれの工具も同様な傾向を示している。刃先処理された刃先稜線部は、すくい面の一部の皮膜が除去され母材が露出している部分が観察される。逃げ面に関しては、ドロップレットが無く、完全に除去できているが、すくい面はメディアがドロップレットを擦ったような跡が観察されるが、大きなものは点在したままであり、研削条痕も目立ったものは残っている。メディアは、SiC にくるみを混合させた HSC というメディアを選定した。これは、SiC 単体では研磨する力が強く刃先稜線部がチップングする可能性があるからである。くるみを混合させることで SiC 単体よりも研磨する力を和らげる効果があるが、処理時間や回転スピードが最適化されていなかったため研磨する力が勝り、すくい面の一部の皮膜が除去されたと考えられる。



50 μm

図4-21. パレル処理後の刃先処理状態比較

また次に、研削面粗さの比較を行ったものを図4-22に示す。刃先処理は刃先稜線近傍部しか処理がなされないため、すくい面自体には処理前後で変化はない。面粗さの測定値を見ても大差がない。ただし、工具の逃げ面に関しては、処理前には散見されたドロップレットが処理後には除去されており、面性状としては、良好なものになっている。

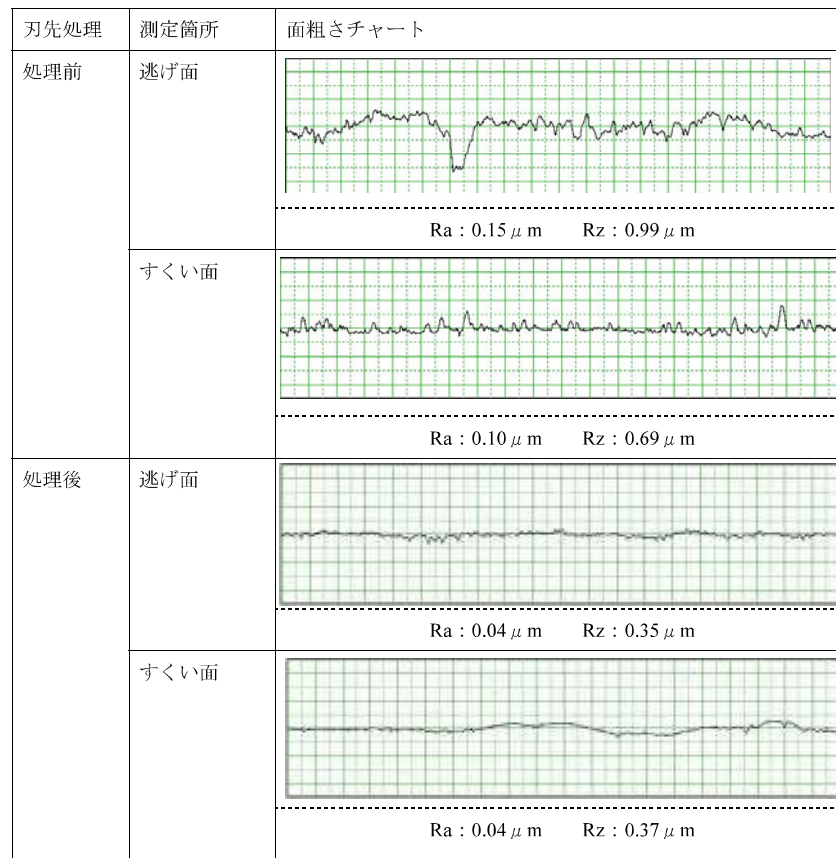


図4-22. 刃先処理前後の面粗さ比較

4-5. 追加実験

4-5-1. 刃先処理を施したボールエンドミルの切削現象

前項で示した工具を用いて、追加の切削実験を行った。実験内容と方法については、4-2で示した内容と同様である。切削抵抗値の推移を図4-23に示す。同図からも明らかのように、切削抵抗の合力値の推移は刃先処理の有無による大きな差異は認められない。その理由として、刃先稜線自体は均一に安定化されているが、刃先を構成する角度自体は同等であるため、切削抵抗としての差異が生じなかったものと思われる。

続いて、加工面の面性状を比較した写真を図4-24に示す。これは刃先処理の有無による加工面性状を示したものである。切削距離は200mである。刃先処理の前後で加工面性状の比較を行い、切りくずの分離・排出に伴う加工面の性状を評価した。4-2項では研削面粗さによって加工面の性状が異なることを示したが、刃先処理によってさらに改善を図ることができるかを確認した。図からも明らかのように、刃先処理を施している加工面は、カッターマークがより明確に示されており、切屑がスムーズに排出されないで残存する凝着の面積が少なくなっている。これは、刃先処理を行ったことによって均一な刃先稜線からすくい面側へ切屑処理がスムーズになされた結果であると言える。さらに、均一な刃先稜線が形成されたために切屑の形態も安定していると考えられる。また、図4-25には加工面粗さの推移を示している。いずれのコーティング膜質においても最終的な加工面粗さは刃先処理を施したものが良好になっており、さらに切削初期からの変化も小さくなっていることがわかる。

図4-26は、刃先処理前後における刃先稜線からの摩耗状態を示したものである。いずれも200mまで切削した後の工具摩耗状態を比較したものである。同図からも明らかであるが、刃先処理を施さないものはチッピングが先行したような摩耗形態を示しており、かつすくい面の状態が不安定で、切屑の排出を阻害するような形態を示している。しかしながら、刃先処理を施したものに関しては、摩耗形態が刃先稜線からすくい面にかけて非常に安定しており、良好な状態であることがわかる。

最適化されたすくい面粗さと刃先稜線状態、および摩擦係数の低いPVD皮膜の組合せにより、工具摩耗の安定化と加工面品位の向上が見込める。

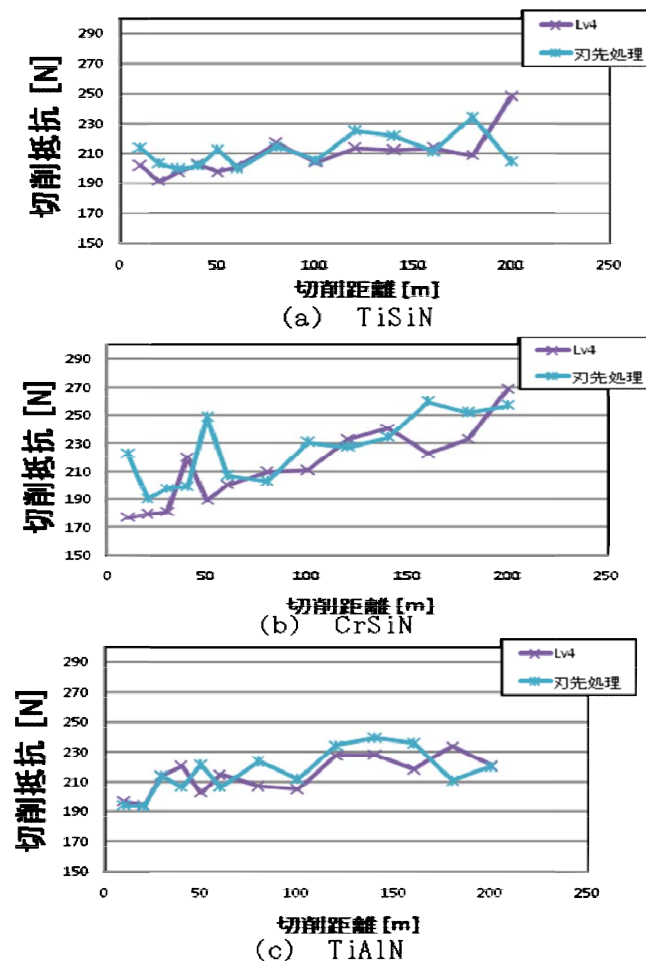


図4-23 刃先処理の有無による各皮膜の切削抵抗推移

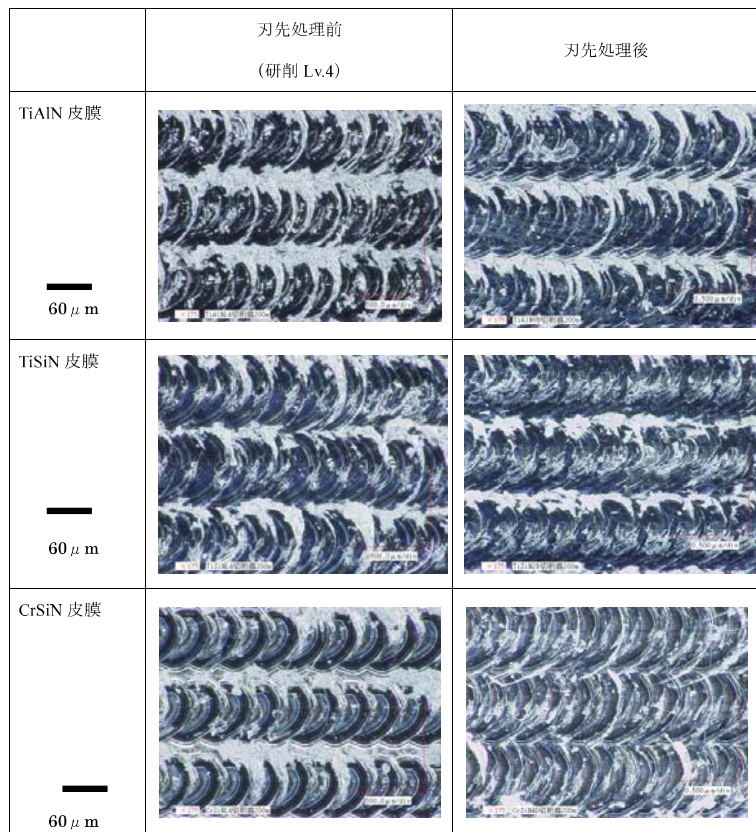


図 4-24. 刃先処理の有無による加工面性状の違い

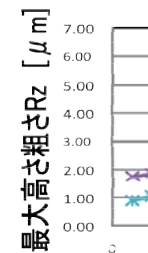
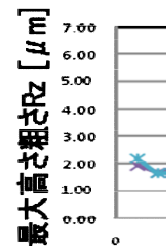


図 4-25. 刃先処理の有無による各皮膜の面粗