

# 電着cBNクイルのYAGレーザードレッシングに関する研究

(課題番号 06650124)

平成6年度～平成7年度科学研究費補助金（一般研究（C）(2)）  
研究成果報告書



00008631570

平成9年3月

研究代表者 田牧 純一  
(北見工業大学工学部・教授)

532  
7278 官庁刊行物

00008631570

北見工業大学

# 平成6年度～平成7年度科学研究費補助金 (一般研究(C)) 研究成果報告書

## は し が き

研削加工の高速・高能率化に伴い、破壊強度および切屑排出性に優れた電着砥石の使用が増加している。電着砥石の抱える最大の課題は形状精度の高精度化であり、反転電着法など製造技術に関する研究開発が活発に行われているが、スピンドル装着時の砥石面振れ量の除去も解決しなければならない問題である。ツールとしてロータリドレッサを用いる方法もあるが、小径内面研削に用いられるCBNあるいはダイヤモンド電着クイルに対しては、クイル剛性の不足による弾性変形が障害となりその適用が難しい。

本研究は、接触剛性に劣る超砥粒電着クイルの切れ刃ドレッシング/ツルueイングを行う手段として、従来の機械的方法に替わりYAGレーザをクイル作業面の接線方向に照射することによってクイルに弾性変形をもたらすことなく砥粒突出し量の調整(ドレッシング)および切れ刃密度、形状の調整(ツルueイング)効果を得ることの可能性について実験的検討を行ったものである。

### 研究組織

研究代表者 : 田牧 純一 (北見工業大学工学部・教授)  
研究分担者 : 北川 武揚 (北見工業大学工学部・教授)  
研究分担者 : 久保 明彦 (北見工業大学工学部・助手)

### 研究経費

平成6年度	1, 500	千円
平成7年度	700	千円
計	2, 300	千円

### 研究発表

#### (1) 学会誌等

- 1) 田牧純一, 杉野豪: 電着CBNクイルのYAGレーザツルueイング, 砥粒加工学会誌, 40巻2号 (1996年3月)
- 2) 田牧純一, 二俣正美, 井山俊郎, 近藤和久: 電着ダイヤモンド砥石のレーザビームツルueイング, 精密工学会誌 (発表予定)

(2) 口頭発表

- 1) 田牧純一, 二俣正美, 北川武揚: YAGレーザーによるCBN小径砥石のドレッシング, 精密工学会東北支部仙台地方講演会 (1991年12月)
- 2) 杉野豪, 田牧純一, 北川武揚: CBN小径砥石のレーザードレッシングに関する研究, 精密工学会北海道支部講演会 (1993年8月)
- 3) 田牧純一, 杉野豪, 北川武揚: 電着CBNクイルのYAGレーザードレッシング (LAD) に関する研究, 1994年度精密工学会春季全国大会 (1994年4月)
- 4) Jun'ichi Tamaki and Takeaki Kitagawa: YAG Laser-aided Truing of Electroplated Superabrasive Quill, International Conference on Precision Engineering '95 (2nd ICMT), November, 1995
- 5) 田牧純一, 二俣正美, 杉野豪, 井山俊郎, 水野雅裕: 電着ダイヤモンドクイルのYAGレーザーツルーイング, 1996年度精密工学会春季全国大会 (1996年3月)
- 6) 田牧純一, 井山俊郎, 水野雅裕: 超砥粒電着クイルのレーザーツルーイングとその研削性能, 砥粒加工学会学術講演会 (1996年9月)

# 研 究 成 果

## 目 次

1. 緒 言	1
2. 接線照射LBTの概要	2
3. 実験装置および方法	3
4. CBNクイルへのレーザ照射実験結果	5
4.1 垂直照射方式LBT	5
4.2 接線照射方式LBT	7
4.3 接線照射式LBTのツルーイング効果	10
4.3.1 Qスイッチパルス発振の場合	10
4.3.2 連続 (CW) 発振の場合	12
4.4 クイルの温度上昇	15
4.5 CBNクイルの研削性能	15
4.6 CBNクイルについてのまとめ	18
5. Dクイルへのレーザ照射実験結果	19
5.1 単結晶ダイヤモンドへのレーザ照射	19
5.2 ダイヤモンドクイルへのレーザ照射	22
5.3 レーザ近接量の影響	24
5.4 ダイヤモンド電着クイルの研削性能	26
5.5 ダイヤモンドクイルについてのまとめ	29
6. 結 論	30
7. 謝 辞	31
参考文献	31

# 1. 緒 言

電着CBNおよび電着ダイヤモンド研削砥石は破壊強度および切屑排出性に優れているため超高速・高能率研削への適用が期待されている。また、台金に固定された単層砥粒部で構成される包絡面プロフィールを要求どおりの形状に成形できれば再電着によるリサイクル利用が可能となり生産コストを低減化できる。電着ダイヤモンド砥石を硬脆材料の延性モード研削に適用しようとする場合には、この砥石形状ツルーイングの他にダイヤモンド砥粒先端を平坦化して砥石作業面に揃える切れ刃ツルーイング<sup>1)</sup>も併せて行わなければならない。

さて電着CBNおよび電着ダイヤモンド砥石のツルーイングには一般にロータリダイヤモンド工具が用いられるが、研削盤はその際に生ずる大きな接触抵抗に耐え得るに十分な剛性を有していることが必要である。また電着砥石の有用性が最も発揮される総型ツルーイングの場合にはそれぞれの形状に応じたダイヤモンドツルアが必要であり、コスト的に不利な側面を抱えてしまう。

この問題解決法の一つとしてYAGレーザ等の熱エネルギーを用いて非接触すなわちフォース・フリーでツルーイングを行おうとする考えが提案<sup>2)</sup>されている。これは研削砥石作業面の接線方向に熱ビームを照射することによって要求する形状に作業面を成形しようとする方法であり、接線照射LBT(Laser Beam Truing)と呼ばれているが、その適用結果については詳細な報告が行われておらず未解明な部分が多い。一方、同じ熱ビームを用いる方法ではあるが接線照射LBTとは異なりドレッシングを主目的とする方法として、垂直照射LBD(Laser Beam Dressing)が提案されている。この方法については通常砥石<sup>3)</sup>およびレジンボンDCBN砥石<sup>4)</sup>に対する適用結果が既に報告されその有効性が主張されている。

本研究は、これら熱エネルギー援用法の中でも総型電着砥石の高能率ツルーイング法としての可能性を有している接線照射LBTに注目し、特に、その低い剛性の故に機械的ツルーイングの困難な超砥粒(CBN, ダイヤモンド)研削クイルを対象として実験的検討を行ったものである。

## 2. 接線照射LBTの概要

図1に「接線照射LBT」の概要を示す。この方法はKapp社(独)が特許<sup>2)</sup>でその概念を提案しており、その特徴として、レーザービームあるいは電子ビームの軌跡をCNC制御することにより高価な総型ダイヤモンド工具を用いることなく研削砥石を任意形状に創成できる点を主張している。適用例として歯車研削用総型電着砥石をあげているが、実際の作業において必要となる砥石作業面へのビーム接近状態やビーム出力等については言及していない。

本研究では、クイル軸中心Oからレーザービームスポット中心までの位置をレーザービーム位置 $X$ と定義する。また、図に示すように砥粒先端の包絡線で与えられる砥石最外周面からレーザースポット中心までの距離をレーザー近接量 $X_s$ と定義し、この値をパラメータとしてレーザービームのツルーイング効果を評価することにする。すなわち、レーザースポット中心がクイル最外周面と一致する場合、レーザー近接量は $X_s=0$ となる。また、 $X_s \geq 0$ の場合にはレーザースポット中心はクイル最外周面の外側に位置し、 $X_s \leq 0$ の場合には内側に入り込んでいることを意味する。

なお、図中には、「接線照射LBT」法との比較のためにレーザービームをクイル作業面に対して垂直に照射する「垂直照射LBD」法も示している。垂直照射LBDは、後述するように、結合材および砥粒の両者に対して均等にレーザーが照射される点の特徴である。

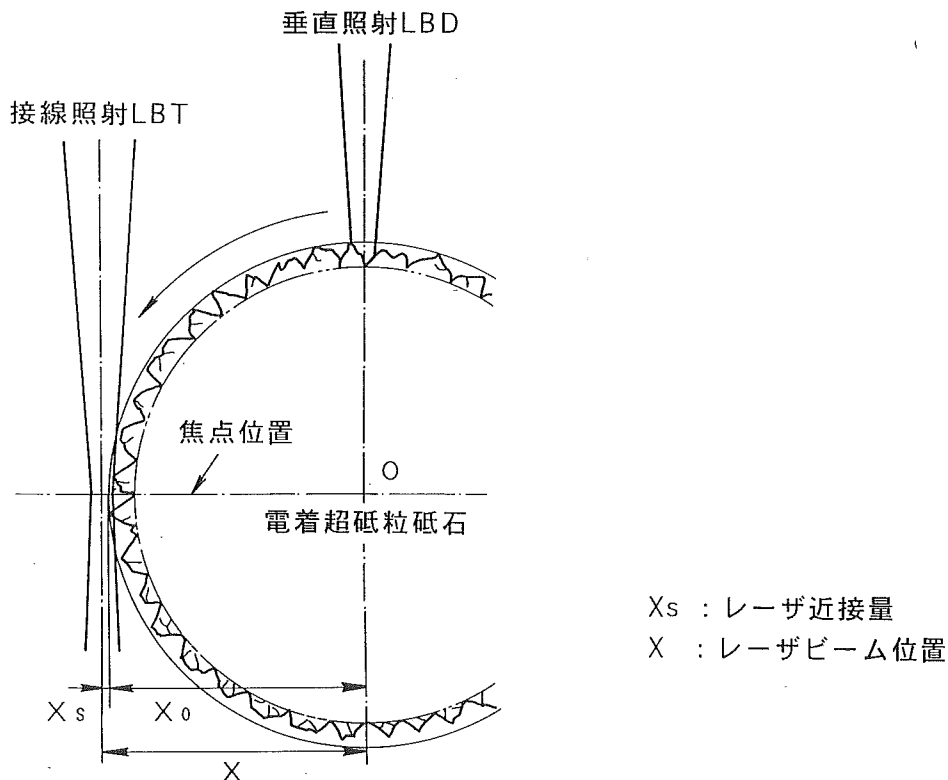


図1. レーザービームによるトポグラフィコンディショニングの2方法

### 3. 実験装置および方法

図2にレーザー照射実験に用いた装置の概要を示す。レーザービームツルーイング(LBT)の実用性を考えるならば内面研削盤等の実機上にレーザー照射装置を搭載した実験システムを構築すべきであるが、現有する装置の制約から研削スピンドルとして空気タービン駆動の小型治具研削装置を用いた。このスピンドルヘッドを同図に示すようにボールねじ駆動のキャリアに固定し、キャリアをYAGレーザー照射テーブル上に設置した。

使用したYAGレーザー発振装置にはCCDTVカメラが装備されており、研削クイル作業面に対するレーザービーム近接量はスピンドルヘッド保持具に取り付けたマイクロメータヘッド(1/1000mm目盛)で任意に設定することができる。レーザービームの研削クイル軸方向への走査はボールねじを駆動することにより与えた。

ところで、図1に示したレーザー近接量 $X_s$ を定義するためにはクイル最外周面の位置を知る必要がある。この作業は、スピンドルに装着した研削クイルの回転振れを球状触針( $\phi 10\text{mm}$ )で予め測定しておき、次に、最大振れを示すクイル作業面の位置をCCDTVカメラで観察しながらスピンドルヘッドを移動し、モニタ用レーザースポットの中心とクイル最外周面を一致させることによって達成した。

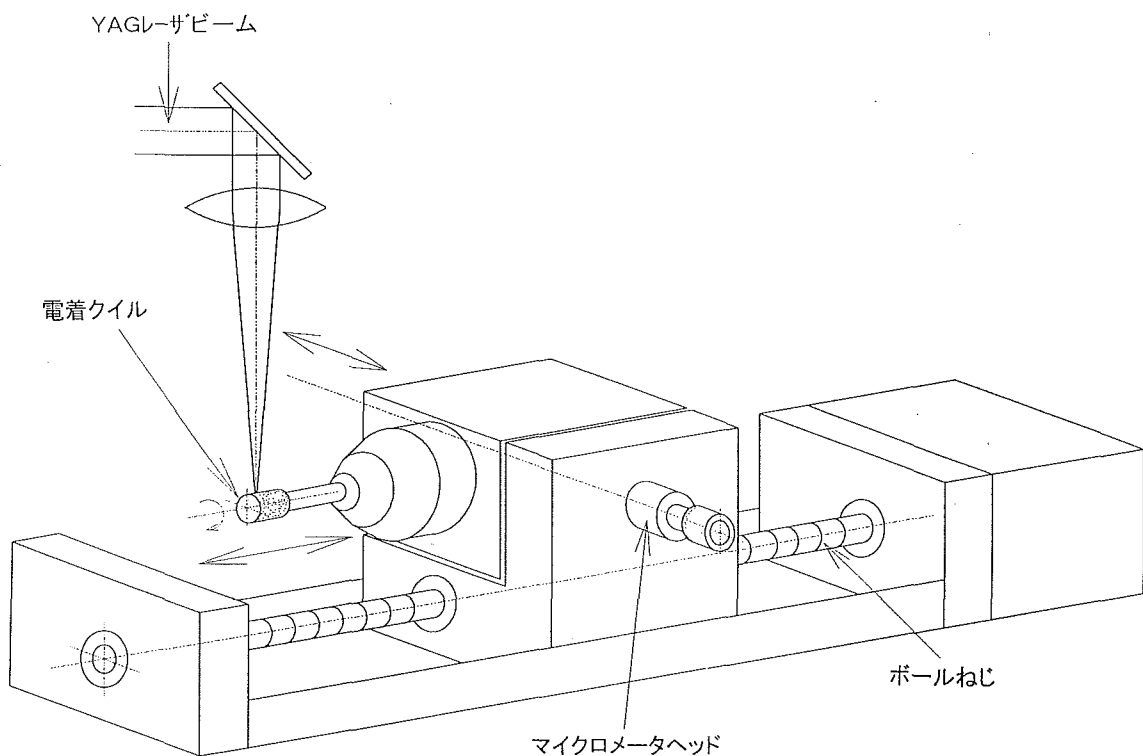


図2. レーザービームドレッシング/ツルーイング装置の概要



研削クイル作業面のトポグラフィ(切れ刃密度, 砥粒突出し量)測定には, ワイヤ巻掛け駆動により研削クイルを0.1rpmで回転させながらクイル作業面の円周方向プロフィールを円錐形ダイヤモンド触針で走査する方法を用いた. なお, 切れ刃位置の同定作業を行う場合には, データ離散化の際のサンプリング誤差を回避するために記録プロフィールを目視観察しながら切れ刃位置をデジタルでクリックする方法を用いた.

表1に実験に用いた研削クイルの寸法と諸元およびYAGレーザー照射条件を示す. ツルレーン対象の砥石として外径 $\phi$ 8mm, 粒度#140/170の電着ダイヤモンドクイルおよび外径 $\phi$ 10mm, 粒度#140/170の電着CBNクイルを採用したが, その他に, 両面研磨した単結晶ダイヤモンドペレットも照射試料として用いた. YAGレーザー発振方式には連続発振とQスイッチパルス発振の2つを用いたが, Qスイッチパルス発振の周波数には, 特性試験において最大出力を示した5kHzを用いた. この場合の出力とはパルスピーク値ではなくパワーメータを用いて測定した平均レーザー出力を意味する.

表1 クイル仕様およびレーザー照射条件

研削装置	空気タービン駆動治具研削装置 無負荷時回転数 85,000 rpm
照射対象	電着CBNクイル (#140/170) 外径 $\phi$ 10mm, 幅5mm 電着Dクイル (#140/170) 外径 $\phi$ 8mm, 幅5mm 単結晶Dペレット (両面研磨仕上げ)
レーザー	Nd:YAGレーザー (マルチモード) 焦点距離 100mm 焦点ずらし $\pm$ 0mm スポット径 245 $\mu$ m (推定値) 発振方式 Qスイッチパルス (繰返し周波数5kHz) 連続発振 (CW) 照射出力 20, 30, 40W (平均値) 雰囲気 大気
照射条件	クイル回転数 300~1000rpm 走査速度 0.55mm/sec (垂直照射) 0.10mm/sec (接線照射)

レーザー照射を行ったクイルの研削性能を評価する場合には, 図3に示すように, レーザー照射を施したクイルを装着したスピンドルヘッドを片持ち梁構造の動力計上に固定し, 動力計をCNC旋盤(出力2kW, 最小設定切込み量0.5 $\mu$ m)の工具台に

取付けることによって鋼材あるいはセラミックスの研削実験を行った。動力計には図に示すように櫛歯状溝を作成しその内部にシリコンゴムを封入することによって動力計の動特性に高周波振動成分吸収効果を与えた。

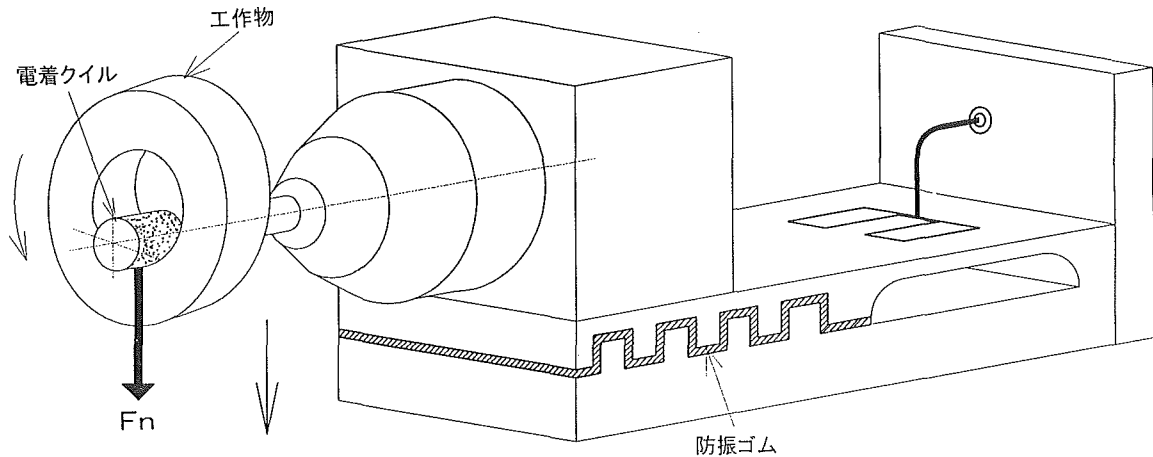


図3. 垂直方向研削抵抗測定用動力計の構造

## 4. CBNクイルのレーザー照射実験結果

### 4.1 垂直照射方式LBT

接線照射方式LBTの特徴を明確にするため、まず初めに、従来法である垂直照射方式によるLBT実験を行い、そのトポグラフィ特性を検討した。

図4は、平均出力40WのQスイッチパルス発振レーザーをCBNクイル作業面に対して垂直に照射した場合に得られるトポグラフィをSEMステレオ写真により観察した例である。図より、レーザー照射によってCBN砥粒が破碎（矢印に注目）するとともに砥粒を保持しているNi素地面の表面が熔融し球状に再凝固した痕跡が観察できる。また、観察倍率を上げることによって、レーザー照射により蒸発したNi粒子がCBN砥粒の破碎面全体に付着していることも確認できた。

図5は、レーザー照射前後における砥粒突出し量の変化を比較した結果である。レーザー照射前には最大で $120\mu\text{m}$ あった砥粒突出し量がレーザー照射後には $90\mu\text{m}$ まで分布範囲が狭まるとともに、平均砥粒突出し量 $H$ も $35\mu\text{m}$ から $23\mu\text{m}$ まで減少していることがわかる。この結果からもYAGレーザーの垂直照射によるCBN砥粒の破碎現象を確認することができる。

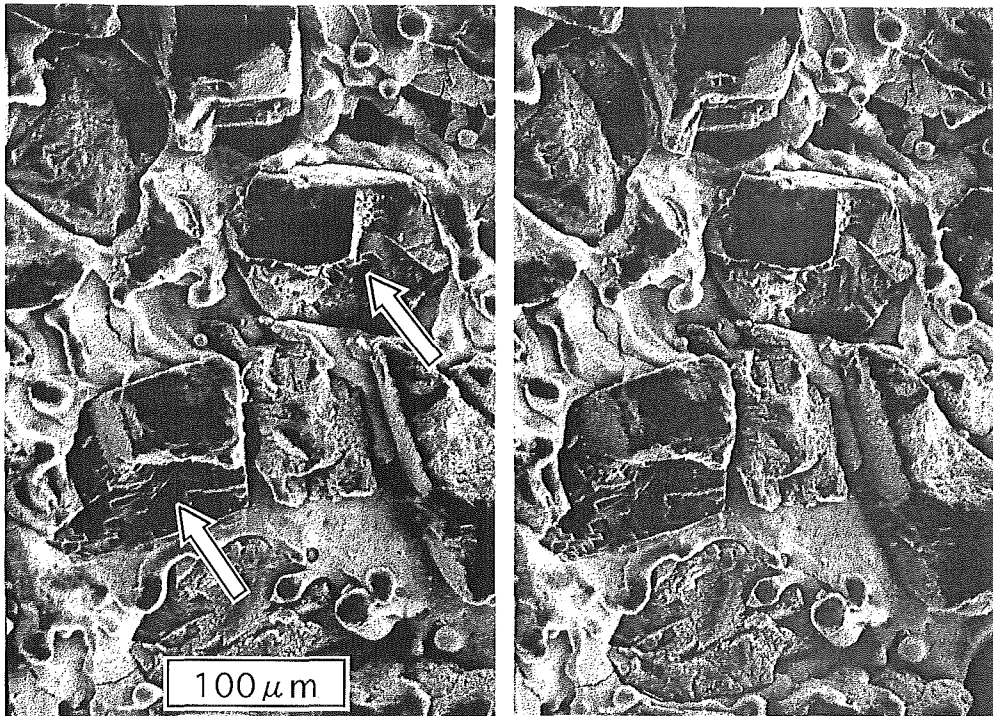


図4. レーザ垂直照射後のCBN電着タイルのトポグラフィSEM写真

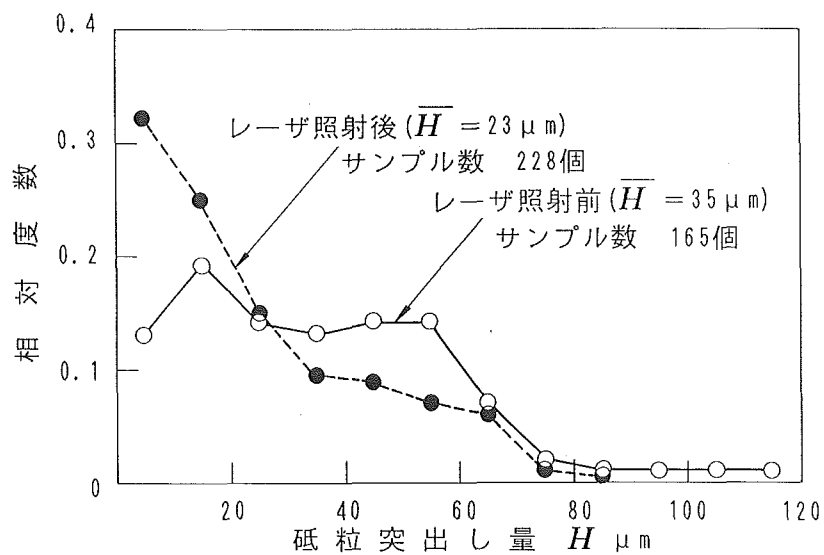


図5. レーザ垂直照射前後におけるCBN電着タイルの砥粒突出し量分布

一方、図6は、レーザー照射前後におけるタイル円周プロフィールの変化を同一断面について比較した結果である。図5の結果とは異なり、レーザー照射による顕著な変化はこの図からは認められず、レーザー照射前後の最大高さを比較してみても51  $\mu\text{m}$ から53  $\mu\text{m}$ へとレーザー照射前の値をほぼ維持している。

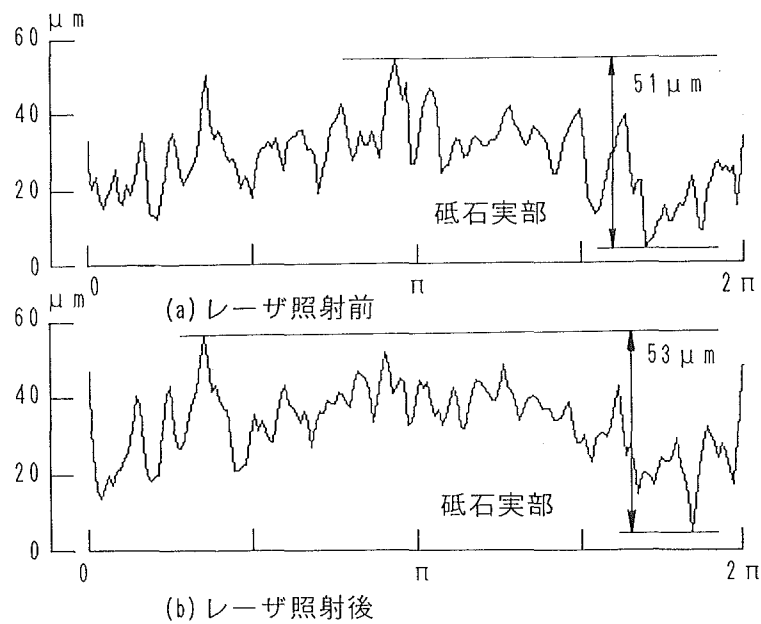
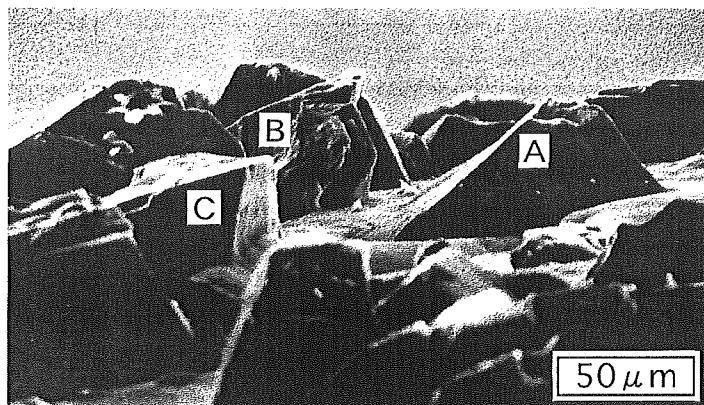


図 6. レーザ垂直照射前後におけるCBN電着クイルの円周方向プロフィール変化

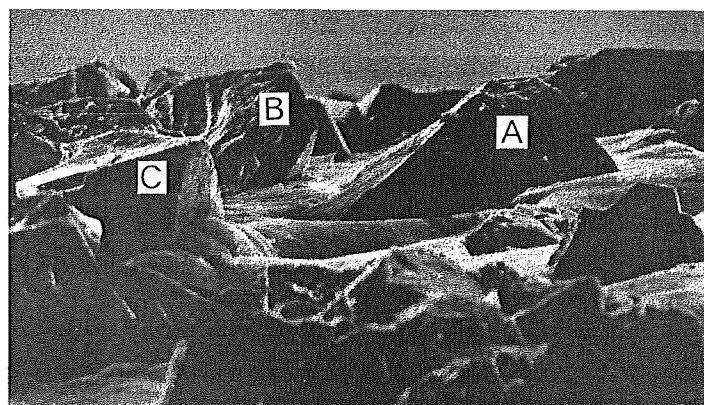
図 5, 6 の結果に得られた砥粒突出し量が減少するだけで円周プロフィールに顕著な変化が認められないという事実は, クイル作業面に対して垂直にレーザを照射した場合, 作業面に存在する砥粒がその砥石深さ方向位置に関わらず一定パワーの熱衝撃を受け, したがって破碎サイズも一定となることが起因しているものと考えられる.

#### 4.2 接線照射方式LBT

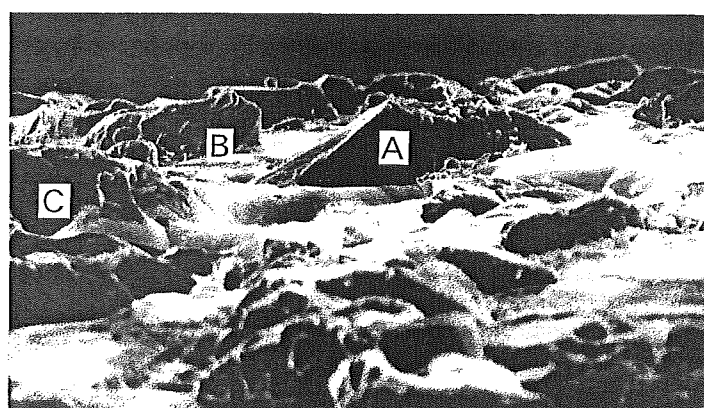
図 7 は, 平均出力40WのQスイッチパルス発振レーザをCBNクイル作業面の接線方向に照射した場合のクイル作業面の同一箇所トップグラフィ変化をSEMで追跡観察した結果である. この場合, YAGレーザは紙面手前から奥に向かって照射されながら右側に移動している. レーザ近接量 $X_s = -30 \mu\text{m}$ の位置でレーザ照射した後のトップグラフィ(図 7 (a))をレーザ照射前(図 7 (b))と比較すると, 砥粒Bの先端が欠けその背後にある砥粒の消失していることがわかる. 但し, 突出し量の低い砥粒Cはレーザの損傷を受けていない. レーザをより一層クイル作業面に近づけてレーザ近接量を $X_s = -80 \mu\text{m}$ (図 7 (c))にすると, 砥粒A, B, Cのすべてが破碎し, 全体的に砥粒突出し量が低くなっていることを確認できる. 一方, Ni素地面にはレーザ垂直照射時と同様の熔融痕跡が現れており, 砥粒周辺部を拡大観察すると砥粒とNi素地面の境界部に間隙が生じており, 素地の一部には急激な熱収縮により発生したと思われる亀裂を確認することができた. このような状態になると砥粒保持力が著しく低下し電着クイルとしての性能を維持できなくなる. 以上のSEM観察結果から, レーザ近接量 $X_s$ がトップグラフィ特性に対して大きな影響を与えていることを確認できる.



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後 ( $X_s = -30 \mu m$ )



(c) レーザ照射後 ( $X_s = -80 \mu m$ )

図7. 接線方向にレーザーを照射した時のCBN電着ワイルのトポグラフィ変化

図8は、レーザ近接量 $X_s = -60 \mu\text{m}$ におけるトポグラフィをクイル作業面上方から観察したSEMステレオ写真である。この写真を図4に示した垂直照射方式LBTの場合の結果と比較すると、砥粒破碎現象は同様に観察できるが（例えば写真中央部の砥粒に注目）、Ni素地面の熱損傷状態に顕著な違いのあることを観察できる。すなわち、この場合には、レーザ照射によるNi素地の溶融再凝固現象が認められない。この結果は、レーザ近接量 $X_s$ が適切であるならば接線照射方式LBTは電着結合材に損傷を与えずに砥粒だけを破碎するという選択的ツルーイングが可能であることを示唆している。

図9は、レーザ照射前後のクイル作業面プロフィールを測定した結果である。両者を比較すると、レーザ照射によって高く突き出した部分が除去され、その結果、最大プロフィール高さがレーザ照射前後で $10 \mu\text{m}$ だけ減少していることがわかる。このプロフィール修正効果は図6に示した垂直照射方式の場合には認められないものであり、接線照射方式の優位性を確認することができる。

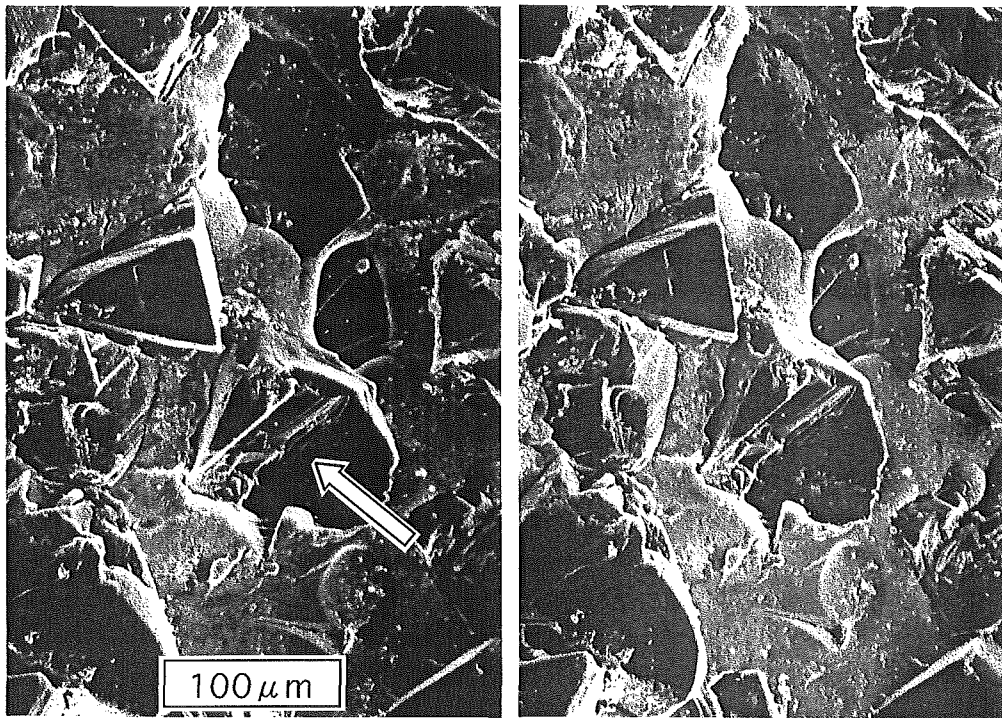


図8．接線方向レーザ照射前後のCBN電着クイルトポグラフィ変化のSEMによる比較

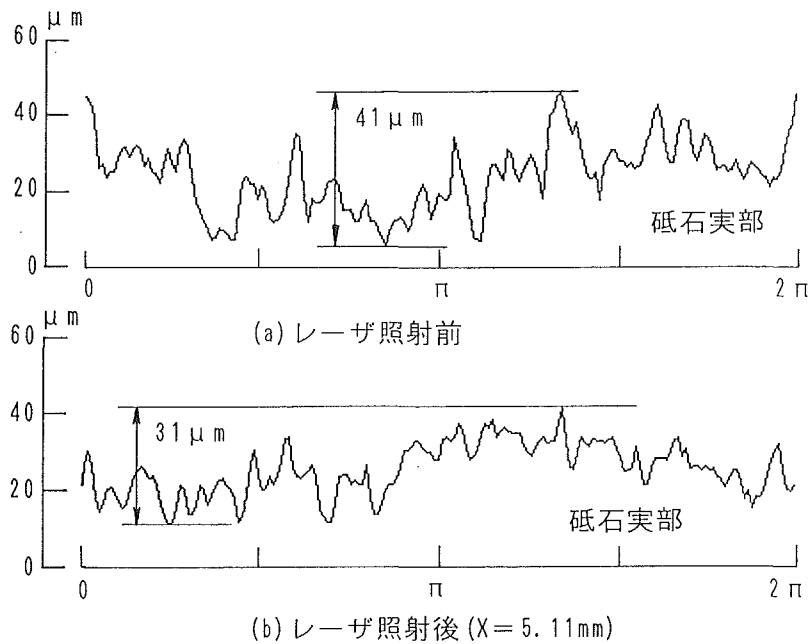


図9. 接線方向レーザー照射前後のCBN電着クイルの円周方向プロフィール変化

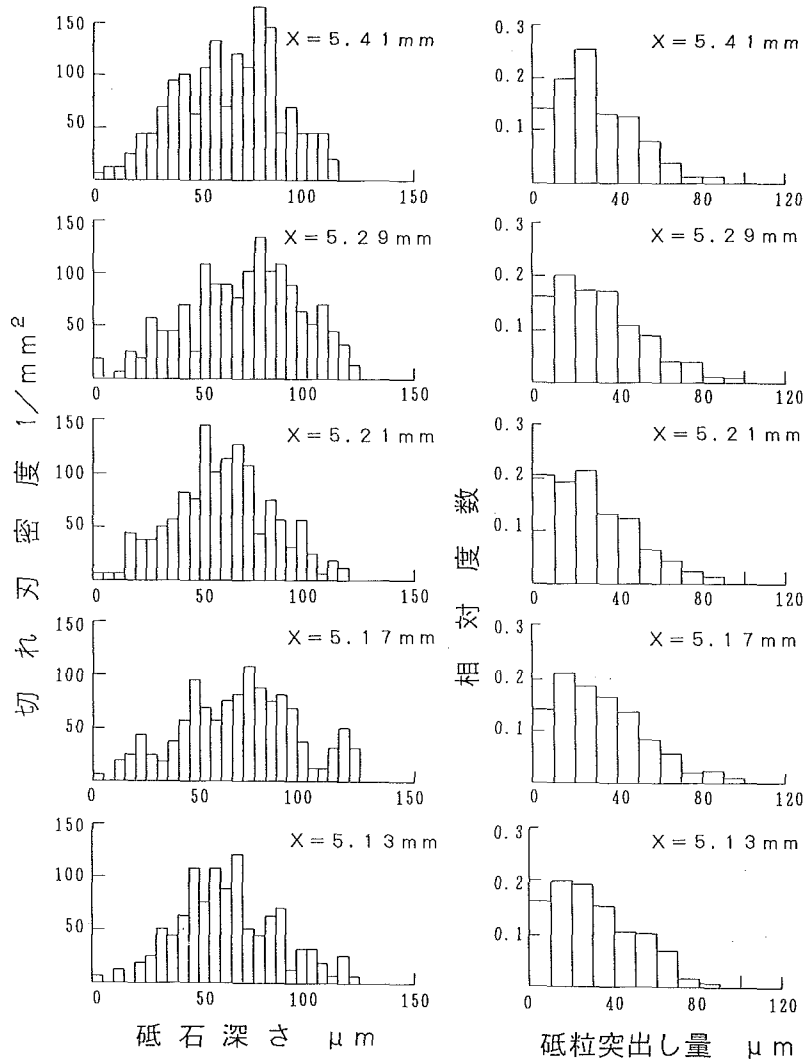
### 4.3 接線照射式LBTのツルーイング効果

以上に述べた実験結果より、接線照射方式LBTが従来の垂直照射方式LBTでは得られない作業面プロフィール修正能力を有することが確認された。次に、この接線照射方式LBTについて、レーザービームスポット位置  $X$  およびレーザー発振方式の違いがトポグラフィ特性に及ぼす影響を検討する。

#### 4.3.1 Qスイッチパルス発振の場合

図10(a)(b)は、平均出力40wのQスイッチパルス発振レーザーを用いて、レーザービーム位置  $X$  を少しずつ減少させながら（レーザービームを徐々にクイル作業面に近づけながら）その都度レーザーを照射し、砥粒切れ刃密度および砥粒突出し量に及ぼす影響を追跡した結果である。この場合、クイル最外周面は  $X=5.18\text{mm}$  の位置に存在しており、初期値  $X=5.41\text{mm}$  の時点ではクイル作業面がレーザービームと干渉することはない。同図に示したヒストグラムの変化に注目すると、レーザービーム位置が  $X=5.21\text{mm}$  以下になった時点でトポグラフィに変化が現れている。すなわち、砥粒切れ刃がクイル作業面の表層部に揃うようになり(図10(a))、砥粒突出し量の分布範囲が狭まっていく傾向(図10(b))を確認できる。

図11は、図10(b)の結果から最大砥粒突出し量  $H_{\max}$  と平均砥粒突出し量  $\bar{H}$  を求め、レーザービーム位置  $X$  との関係プロットした結果である。図中の1点鎖線がクイル最外周面を指しており、それより右側の部分がクイル実部であることを意味する。同図より、Qスイッチパルス発振のレーザーを用いた場合、レーザービーム位置が  $X=5.22\text{mm}$  付近、すなわちレーザー近接量  $X_s = +40\ \mu\text{m}$  の距離までレーザービームが接近した時点で初めて砥粒突出し量に変化が現れ、その後、砥粒突出し量はレーザービームの接近に伴い減少していくことがわかる。



(a) 砥粒切れ刃密度

(b) 砥粒突出し量

図10. CBN電着クイルの切れ刃密度，砥粒突出し量変化 (Qスイッチパルス)

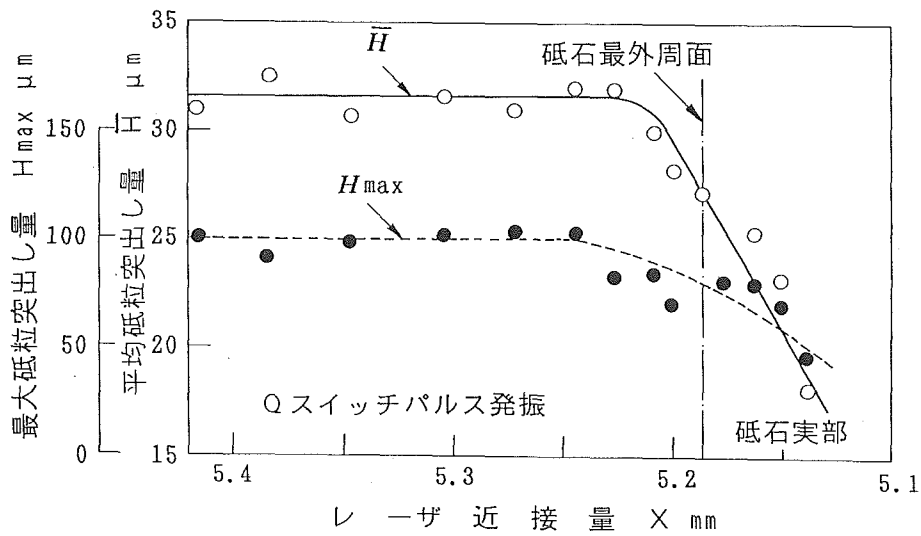


図11. レーザビーム近接量 vs 砥粒突出し量 (Qスイッチパルス発振)



図12は、図10(a)の結果を用いて砥石深さ $20\mu\text{m}$ までの領域に存在する累積砥粒切れ刃数を求め、レーザービーム位置 $X$ との対応関係をプロットした結果である。図11と同様、レーザービームスポットの中心が $X=5.2\text{mm}$ 付近を通過すると切れ刃密度に変化が現れ、その後、クイル作業面の表層部に存在する累積砥粒切れ刃数は増加していくことがわかる。

実験に使用したレーザービームスポット径の計算値は表1に示すように $245\mu\text{m}$ であり、この値を参考にするならば、クイル最外周面からレーザービームスポット半径分( $122.5\mu\text{m}$ )だけ離れた位置、すなわち、レーザービーム位置 $X$ に換算して $X=5.31\text{mm}$ 付近でレーザービームとクイルが干渉し始めるはずであるが、実際にトポグラフィ変化の現れるのは、図11、12の結果が示すように、レーザービームがそれよりも $0.1\text{mm}$ 程度クイルに接近してからであることがわかる。

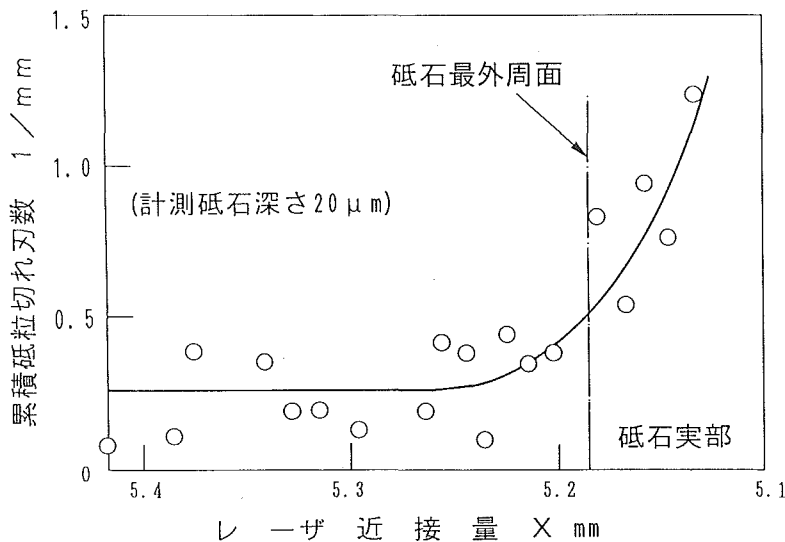


図12. レーザービーム近接量 vs 累積砥粒切れ刃数 (Qスイッチパルス発振)

#### 4.3.2 連続(CW)発振の場合

CBN砥粒の熱衝撃破壊機構は、レーザー出力形態、すなわち、熱衝撃のサイクルパターンおよび加える熱エネルギーの大きさの影響を受けることが容易に想像できる。そこで、平均出力 $40\text{W}$ の連続発振レーザーを用いて電着CBNクイルの接線照射方式LBTを行い、トポグラフィ生成に及ぼす影響を検討した。

図13、14は、連続発振レーザーについてレーザービーム位置 $X$ の変化に伴う砥粒突出し量および累積砥粒切れ刃数の変化を追跡した結果である。連続発振の場合、レーザービーム位置 $X$ の全範囲にわたって累積切れ刃密度、砥粒突出し量ともほとんど一定値を示しており、レーザービームスポットの中心がクイルのNi素地面に一致する状態( $X=5.12\text{mm}$ )になっても顕著な変化は認められないことがわかる。すなわち、Qスイッチパルス発振の場合に得られたツルーイング効果は連続発振の場合には認められない。

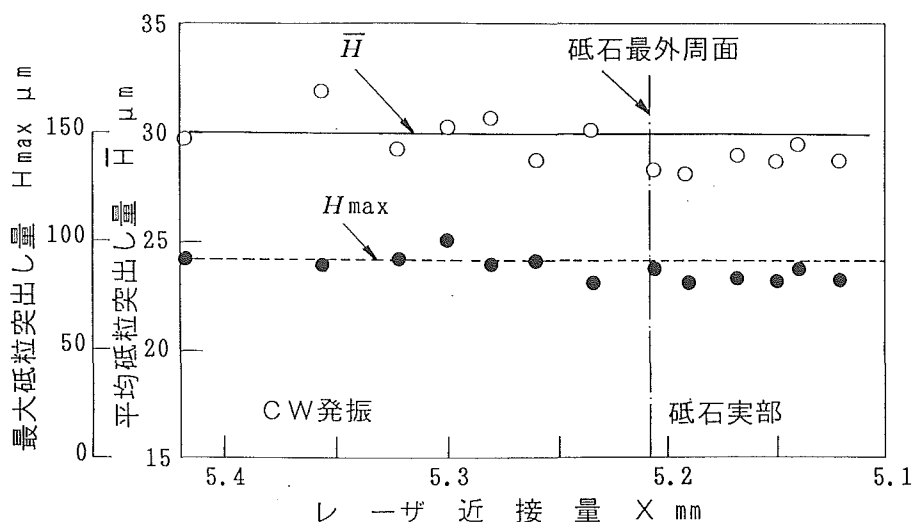


図13. レーザビーム近接量 vs 累積砥粒切れ刃数 (連続発振)

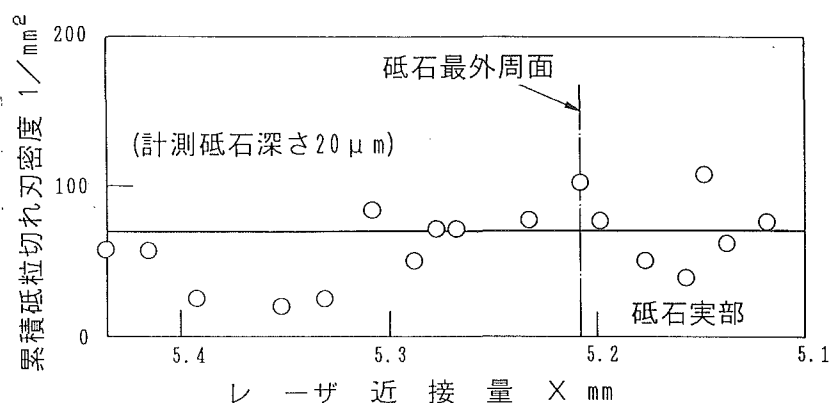


図14. レーザビーム近接量 vs 累積砥粒切れ刃数 (連続発振)

この出力形態の違いがCBN砥粒の損傷状態に及ぼす影響をSEMステレオ写真によって観察した結果を以下に示す。

図15は、Qスイッチパルス発振のレーザを照射した場合にCBN砥粒の受ける損傷パターンの典型的例である。

この場合、砥粒破砕面は複数の劈開面で構成されており、熱衝撃破砕が主体をなしていることがわかる。

一方、図16は、連続発振のレーザを照射した場合の結果である。この場合には、CBN砥粒が破砕した痕跡は認められず、砥粒表面は滑らかであり、昇華した痕跡と思われるピットが点在していることがわかる。このSEM観察結果および図13、14の結果より、連続発振YAGレーザはCBN砥粒を破砕する能力を有しておらず、したがってツルイーイング効果を期待できないことが確認できる。

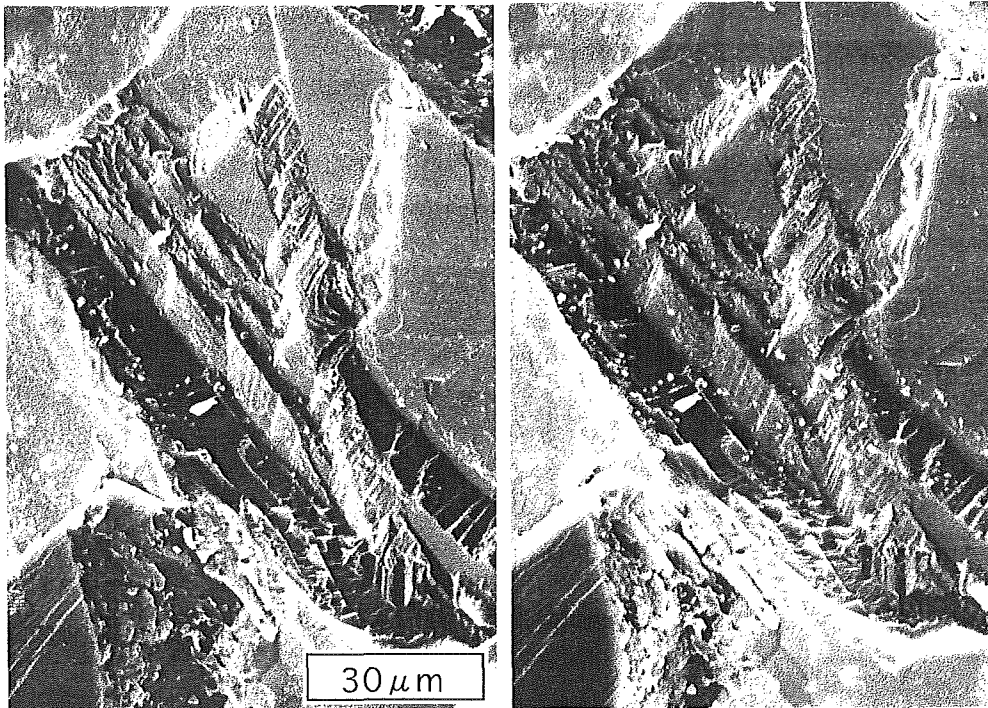


図15. Qスイッチパルス発振YAGレーザー照射後のCBN砥粒

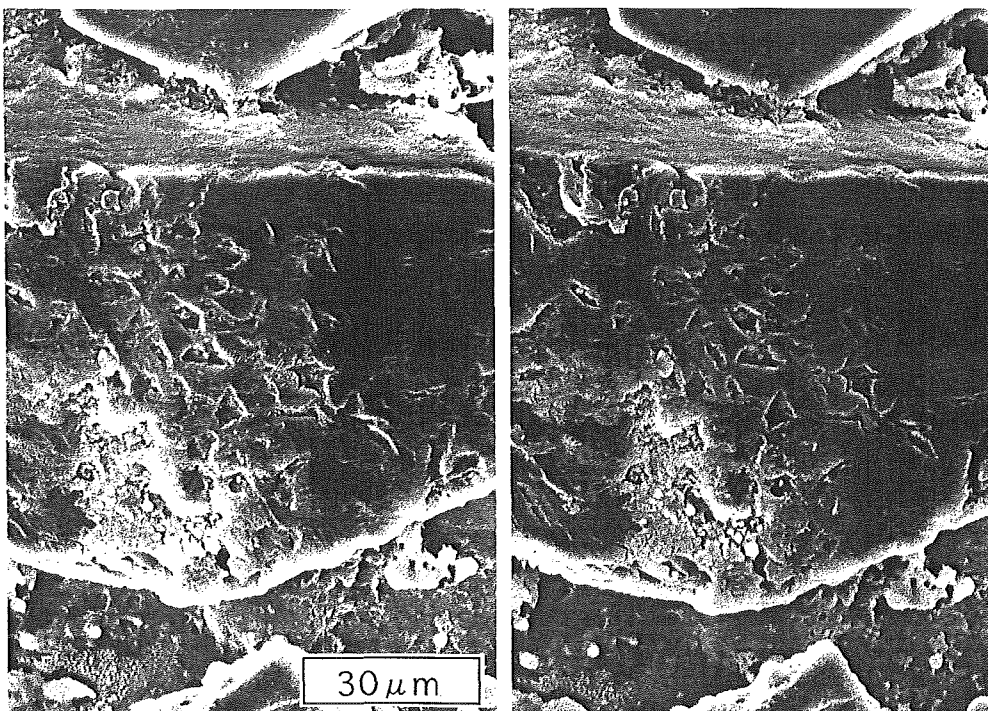


図16. 連続発振YAGレーザー照射後のCBN砥粒

#### 4.4 クイルの温度上昇

YAGレーザー照射によって砥粒に与えられる熱はNi素地面を介してクイル母材に伝達されクイルの温度上昇をもたらすが、この温度が過度の場合にはクイルの熱膨張等により研削スピンドル部に悪影響を及ぼすことが考えられる。

そこで、図17の付図に示すように、砥粒部から2mmだけ離れたクイルの1点に注目し、レーザー照射によって上昇する温度を赤外線放射温度計を用いて測定した。レーザー照射方式としては接線方式Aと垂直方式Bの2つを採用し、レーザー照射時間を10secに設定して両者の比較を行った。図に示すように、接線照射方式の場合の温度上昇が22℃であるのに対して垂直照射方式の場合にはその4倍の87℃まで達しており、接線照射方式のほうが上昇温度が低くなっている。また、照射時間を今回採用したツルーイング時間である50secに設定して接線照射実験を行った結果、照射時間(10sec→50sec)にほぼ比例した5倍近くの温度上昇が得られた。

今回の実験の場合、この程度の温度上昇はクイルスピンドル部に損傷をもたらすことはなかったが、レーザーツルーイングを平面研削あるいは円筒研削用砥石に展開する場合には、レーザーの長時間照射による温度上昇の悪影響を防ぐための冷却対策を考えることも必要となろう。

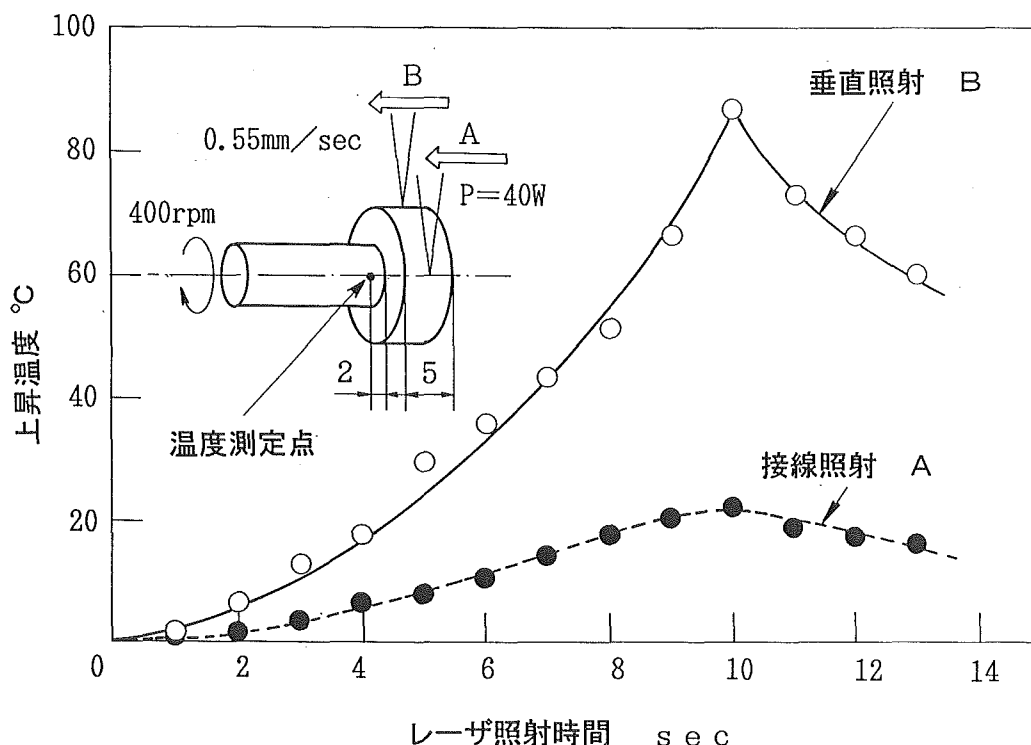


図17. YAGレーザー照射時のクイル軸部の温度上昇

#### 4.5 CBNクイルの研削性能

本研究の目的とするツルーイング効果、すなわち砥粒切れ刃のクイル最外周面へのアライメント効果を研削性能の観点から検討するため、レーザー照射後のCBN

クイルおよびレーザー照射を行わないCBNクイルを用いてSKD61材の内面プランジ研削実験およびSK3材の外周トラバース研削実験を行った。

それぞれの研削条件を表2に示す。

表2 CBNクイルの研削条件

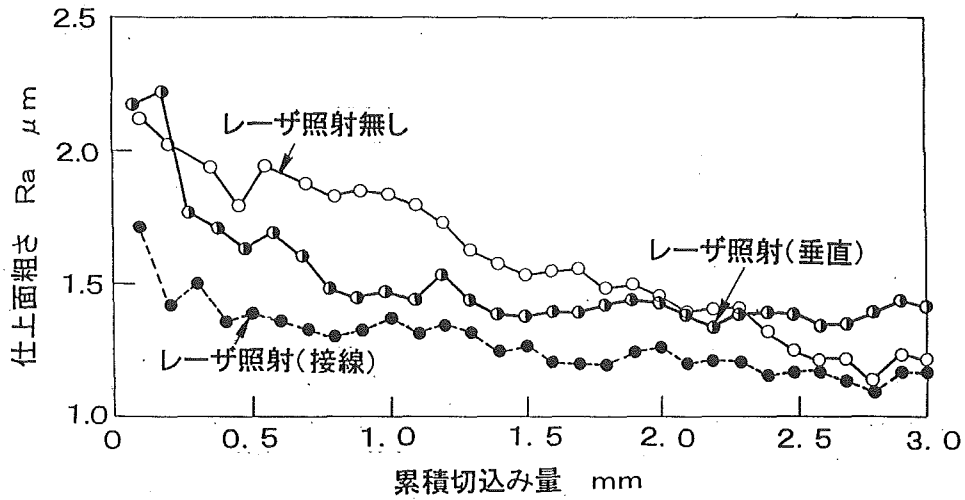
研削装置	CNC旋盤に治具研削装置を搭載 クイル回転数 85,000rpm (無負荷時)
内面プランジ	工作物 SKD61 (480mHv) 内径 $\phi$ 12.6mm, 幅4mm 工作物回転数 200rpm プランジ速度 0.1mm/min 研削油剤 ユシローケン S60
外周トラバース	工作物 SK3 (760mHv) 外径 $\phi$ 65mm, 幅15mm 工作物回転数 60rpm トラバース速度 30mm/min 切込み量 10 $\mu$ m/pass 研削油剤 無し

図18は、レーザー照射方式の違いが研削性能に及ぼす影響を検討するために、CBNクイルでSKD61材の内面プランジ研削実験を行い、仕上面粗さおよび垂直研削抵抗を追跡した結果である。図において○印はレーザー照射を行わないクイル、●印はクイル作業面の垂直方向にレーザー照射を行ったクイル、●印はレーザー近接量  $X_s = -50 \mu\text{m}$  の位置で接線照射方式ツルueイングを行ったクイルを示す。

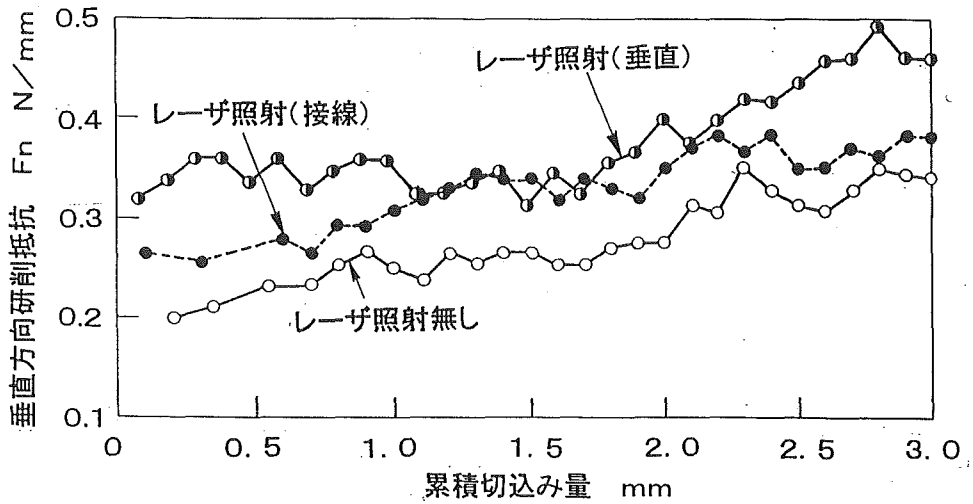
図18(a)に示す研削仕上面粗さの推移を比較すると、レーザー照射後のクイルはレーザー照射を行わないクイルに比べて良好な仕上面粗さを維持すること、切れ刃位置をクイル作業面上に揃える効果を有する接線照射方式のほうが垂直照射方式に比べて良好な仕上面粗さを与えることがわかる。一方、図18(b)に示す結果から、レーザー照射後のクイルがレーザー照射を行わないクイルに比べて高い研削抵抗を示していることがわかる。これは、SEM観察で示したようにレーザー照射によってCBN砥粒切れ刃が微細化するためであるが、レーザー照射方式の違いに注目すると、接線照射方式のほうが低い値を示している。以上の結果より、接線照射方式レーザーツルueイングは低い研削抵抗で良好な仕上面を生成できるという点で垂直照射方式よりも優れていることを確認できる。

図19は、接線照射方式でツルueイングを行った場合について、研削性能に及ぼすレーザー近接量の影響を検討した結果である。図に示すように、レーザー照射を行わないクイル(○印)、レーザー近接量  $X_s = +20 \mu\text{m}$  の位置でレーザー照射したクイ

ル( $\Delta$ 印), レーザ近接量  $X_s = -30 \mu\text{m}$  の位置でレーザ照射したクイル( $\bullet$ 印)を用いてSK3材の外面円筒トラバース研削を行い, 研削の経過に伴う垂直方向研削抵抗および仕上面粗さの変化を追跡した. 図19(a)に示す結果より, レーザビームをクイルに接近させてツルーイングするほど仕上面粗さの向上することがわかるが, 図19(b)に示すように, 研削抵抗はレーザ照射によって高めに推移するようになる. したがって, 両者のバランスのとれた研削性能を与える「最適レーザ近接量」を見出すことが今後の実用化のために必要であろう.

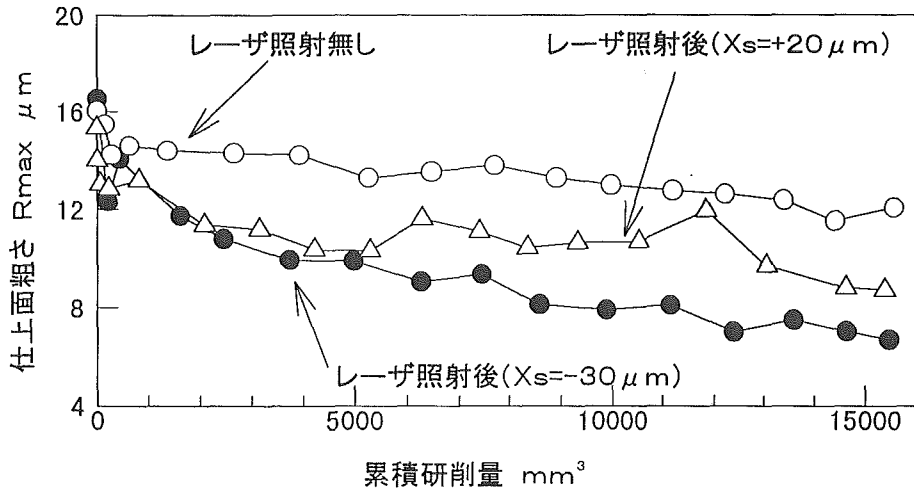


(a) 研削仕上面粗さ

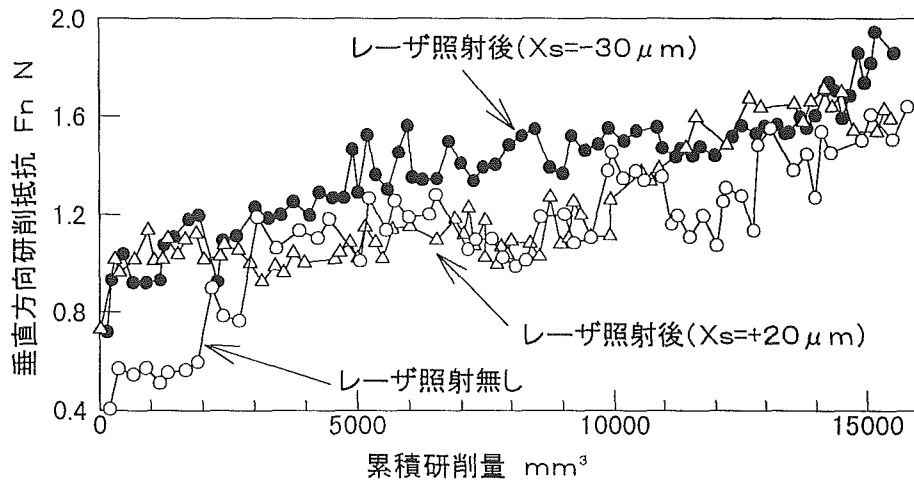


(b) 垂直方向研削抵抗

図18. CBN電着クイルの内面プランジ研削性能 (SKD61材)



(a) 研削仕上面粗さ



(b) 垂直方向研削抵抗

図19. 研削性能に及ぼすレーザービーム近接量の影響 (SK3材)

#### 4.6 CBNクイルについてのまとめ

電着CBNクイルの非接触ツルージング法として、YAGレーザーをクイル作業面の接線方向に照射する方法を試みた。この方法により得られるトポグラフィ特性を従来用いられている垂直照射方法と比較した結果、次に示す結論が得られた。

1) Qスイッチパルス発振のYAGレーザーをCBN電着クイル作業面の垂直方向に照射することによって砥粒を破碎させ砥粒突出し量を小さくすることはできるが、ツルージング能力は得られない。また、Ni素地面を溶融してしまうという欠点を有している。

2) クイル作業面に対して接線方向にレーザーを照射する方法は、高く突出した砥粒だけを破碎させクイル作業面上に砥粒切れ刃先端を揃えるというツルージン

グ能力を有する。また、Ni素地面に熱損傷を与えることもない。

3) 接線照射方式を採用すれば、レーザービームスポット中心位置のクイル最外周面に対する近接量を変えることによってトポグラフィ調整が可能である。

4) 連続発振(CW)YAGレーザーは、CBN砥粒を破砕する能力に乏しく、ツルディング効果を得ることができない。

5) 接線照射方式レーザーツルディングを施したCBN電着クイルは、レーザー照射処理を行わないクイルに比べて良好で安定した仕上面粗さをもたらす。

## 5. Dクイルへのレーザー照射実験結果

### 5.1 単結晶ダイヤモンドへのレーザー照射

電着ダイヤモンドクイルのレーザービームツルディング(LBT)の可能性を見極めるために、その基礎実験として、研磨加工した単結晶ダイヤモンドペレット面へのYAGレーザー垂直照射実験を行った。

図20は、平均出力 $P=40\text{W}$ のQスイッチパルス発振YAGレーザーを単結晶ダイヤモンドに照射した場合に得られる加工溝をSEMで観察した結果である。なお、レーザー照射後に加工溝の両側に盛り上がり付着する溶融物は混酸で煮沸洗浄することにより除去した<sup>6)</sup>。図20(a)は、加工溝断面の形状を観察したものであり、図20(b)は、図20(a)に矢印で示した部分を拡大して観察した結果である。

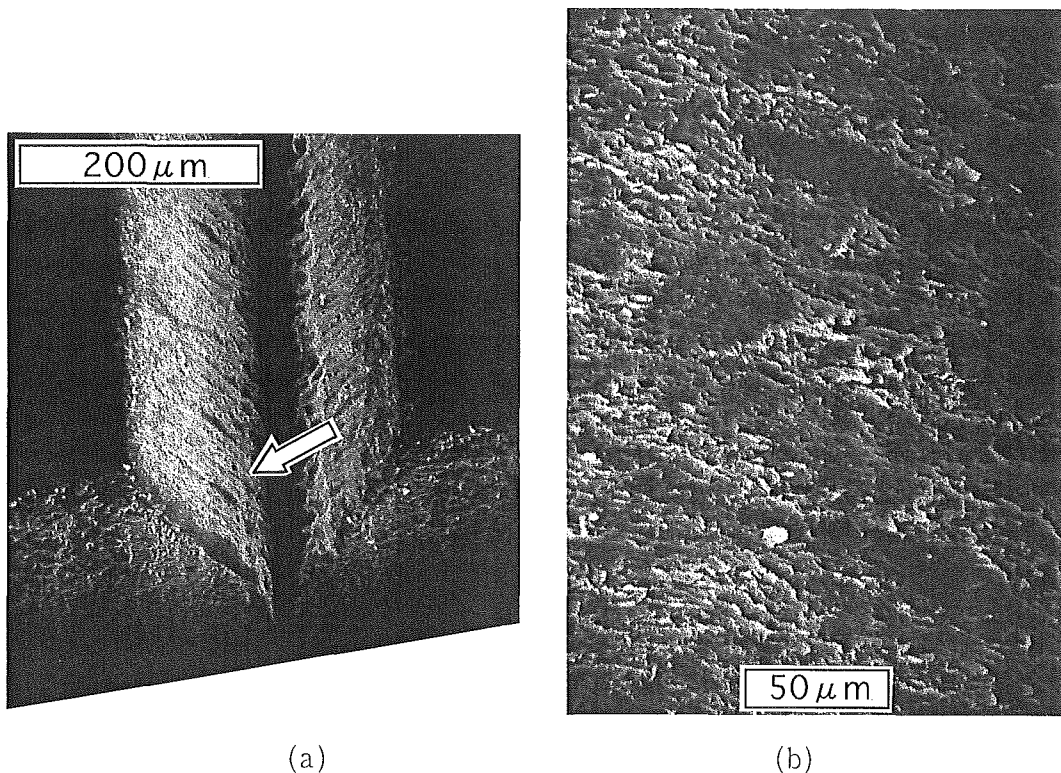


図20. QスイッチパルスYAGレーザーによる単結晶ダイヤモンドペレットの溝加工  
SEM写真 (a)加工溝断面 (b)矢印部分の拡大図



切断面にはCBN砥粒の場合に得られたような劈開破壊面が認められず、溶融したような様相を全体的に示している。これらの図から、QスイッチパルスYAGレーザーによる単結晶ダイヤモンドの除去過程は熱衝撃破壊ではなくダイヤモンドの黒鉛化および酸化反応による熱損傷を主体としていることを確認できる。

なお、同様のレーザー照射実験を連続発振モードでも行ったが、実験で用いた最大出力40Wの条件下においてもダイヤモンドの除去加工は不可能であった。

図21は、図20(a)に示した加工溝断面のプロファイルをレーザー顕微鏡で測定した結果である。

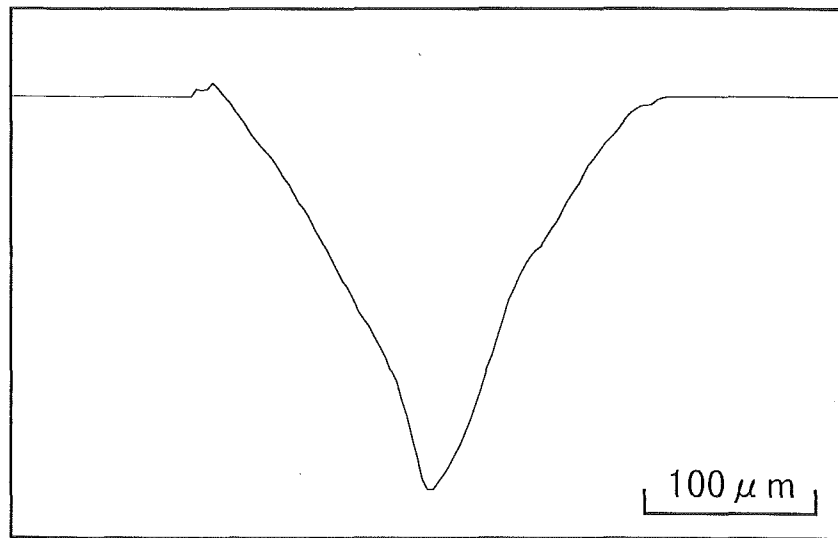


図21. 図20(a)に示した加工溝プロファイルの測定結果

図22は、この結果から加工溝断面の深さ $h$ 、幅 $w$ およびアスペクト比( $h/w$ )を求め、平均レーザー出力 $P$ に対してプロットした結果である。いずれのレーザー出力においても加工溝断面のアスペクト比はほぼ1に近い値を示しているが、加工溝深さ $h$ 、加工溝幅 $w$ とも平均レーザー出力 $P$ の増加に伴って大きくなることがわかる。ところで、加工溝幅 $w$ を幾何光学的に得られる公称レーザースポット径( $245\mu\text{m}$ )と比較すると、両者はレーザー出力 $P=40\text{W}$ の点でほぼ一致していることがわかる。接線照射式LBTにおいてはレーザービーム内のパワー密度分布がダイヤモンド工具などを用いた機械的ツールイングにおける工具先端形状に対応すると考えられるため、緻密な考察に耐え得る実験データを獲得するためにはレーザービームの形状特性を定量的に把握しておかねばならない。したがって、以後の電着ダイヤモンドクイルへのレーザー照射実験では、ダイヤモンドの除去加工能力を有するQスイッチパルスレーザーを用い、レーザー平均出力として公称レーザースポット径と同等の加工溝幅が得られた $P=40\text{W}$ を用いた。

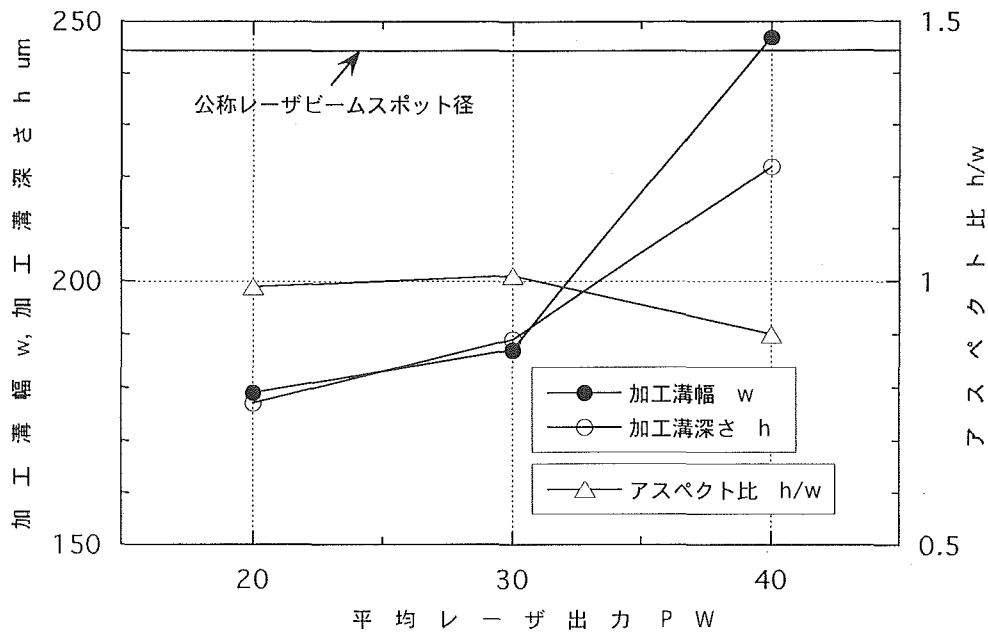
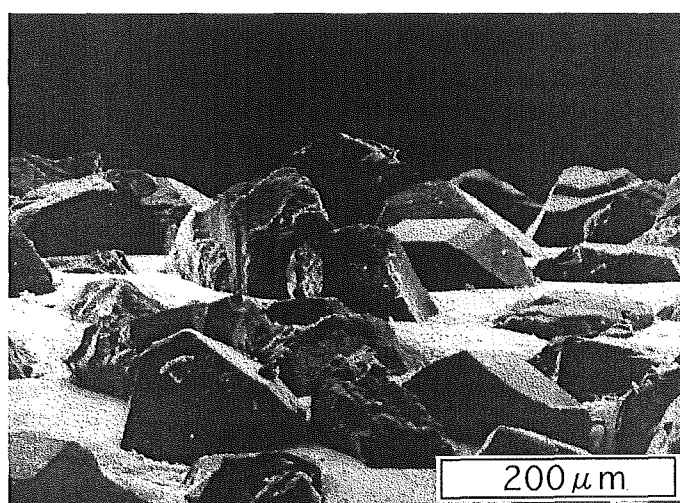


図22. 加工溝断面形状 vs 平均レーザー出力(Qスイッチパルス)

## 5.2 ダイヤモンドクイルへのレーザー照射

図23に示す一対の写真は、レーザー近接量 $X_s = -50 \mu\text{m}$ の位置で電着ダイヤモンドクイルにレーザーを照射し、レーザー照射前後における同一箇所へのトポグラフィ変化をSEMで観察した結果である。この場合、YAGレーザーは紙面に向かって垂直方向に照射され、クイル作業面上を左から右に移動している。図より、Qスイッチパルス発振のYAGレーザー照射によってダイヤモンド砥粒の先端が除去されていることがわかる。一方、ダイヤモンド砥粒を保持しているNi層にはレーザー照射を受けて溶融再凝固した痕跡が認められず、CBN電着クイルの場合と同様、接線照射LBTを採用することによりYAGレーザーの除去対象を砥粒だけに限定できることを確認できる。



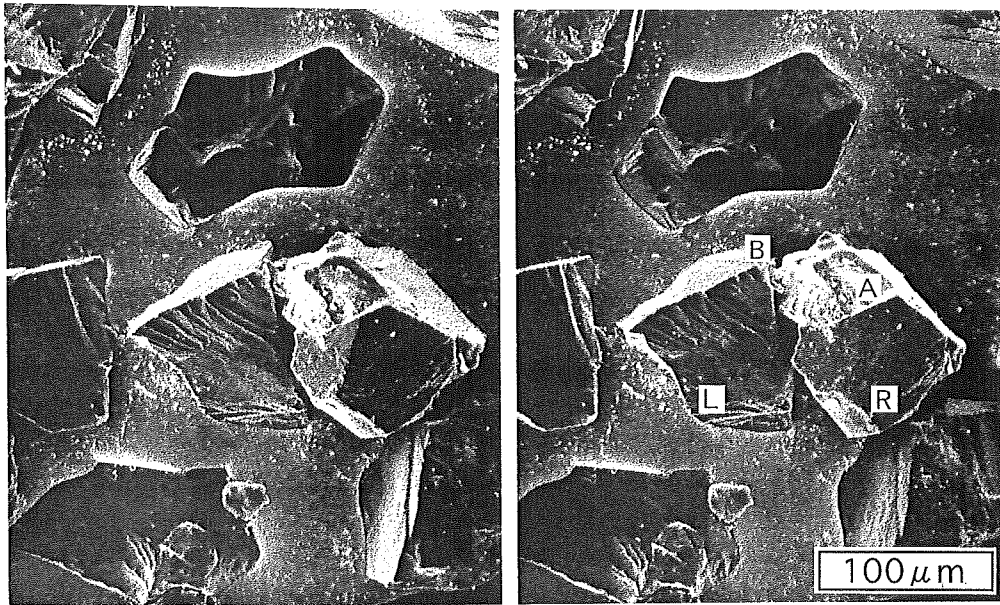
(a) レーザ照射前



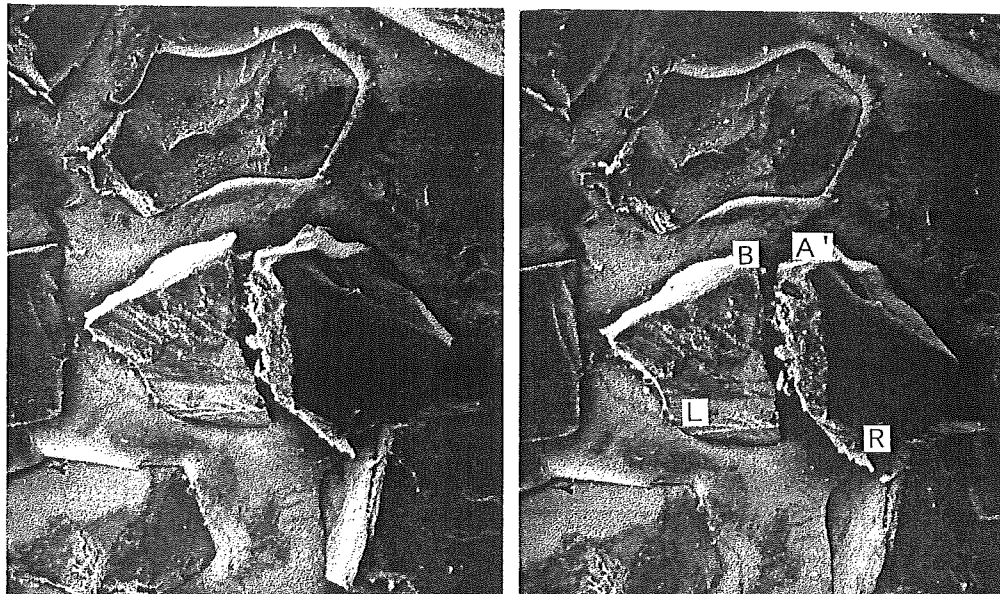
(b) QスイッチパルスYAGレーザー照射後

図23. 電着ダイヤモンドクイルへの接線照射LBTによるトポグラフィ変化

図24は、ダイヤモンド砥粒の形状変化を上方から観察したSEMステレオ写真である。この場合、YAGレーザーは紙面右側から左側に向かって照射されている。図より、砥粒Rの陰に隠れてレーザー照射を免れた砥粒Lに形状変化は認められないが、レーザー照射を受けた砥粒Rは急峻な稜線を消失し平滑な面になっていることがわかる。このステレオ写真を画像解析<sup>7)</sup>すると、砥粒Rの最先端位置はレーザー照射前後でAからA'に変化し、2つの砥粒(R, L)の先端部の相対高さは $23\mu\text{m}$ から $17\mu\text{m}$ に減少していることがわかる。



(a) レーザ照射前



(b) レーザ照射後(Qスイッチパルス発振)

図24. 接線照射LBT前後のダイヤモンド砥粒形状の変化

以上の結果から、YAGレーザを用いて電着ダイヤモンドクイルをツールイングすることの可能性が確認できたので、その定量的評価のために砥粒切れ刃密度および砥粒突出し量を測定し、トポグラフィ変化に及ぼすレーザ近接量 $X_s$ の影響を検討した。

### 5.3 レーザ近接量の影響

図25は、レーザビームをクイル作業面に徐々に接近(レーザ近接量 $X_s$ を減少)させながらそれぞれの位置においてレーザを照射し、その際の累積切れ刃密度 $N$ の変化を抜粋して示したものである。図より、レーザビームの接近によってダイヤモンド砥粒のレーザ除去作用が進行し、ダイヤモンド切れ刃はクイル作業面に集中して分布する形態に移行していくことがわかる。例えば累積切れ刃密度が単位長さあたり1個/mmに達する砥石深さ $Z$ を比較すると、レーザ照射前に $70\mu\text{m}$ であった値は $X_s=30\mu\text{m}$ で $48\mu\text{m}$ 、 $X_s=-10\mu\text{m}$ で $22\mu\text{m}$ まで減少している。また、切れ刃の存在する砥石深さ、すなわちマトリクス深さ $Z_m$ は、レーザ照射前の値 $Z_m=135\mu\text{m}$ から、 $X_s=+30\mu\text{m}$ で $Z_m=95\mu\text{m}$ 、 $X_s=-10\mu\text{m}$ で $Z_m=60\mu\text{m}$ まで減少していることがわかる。

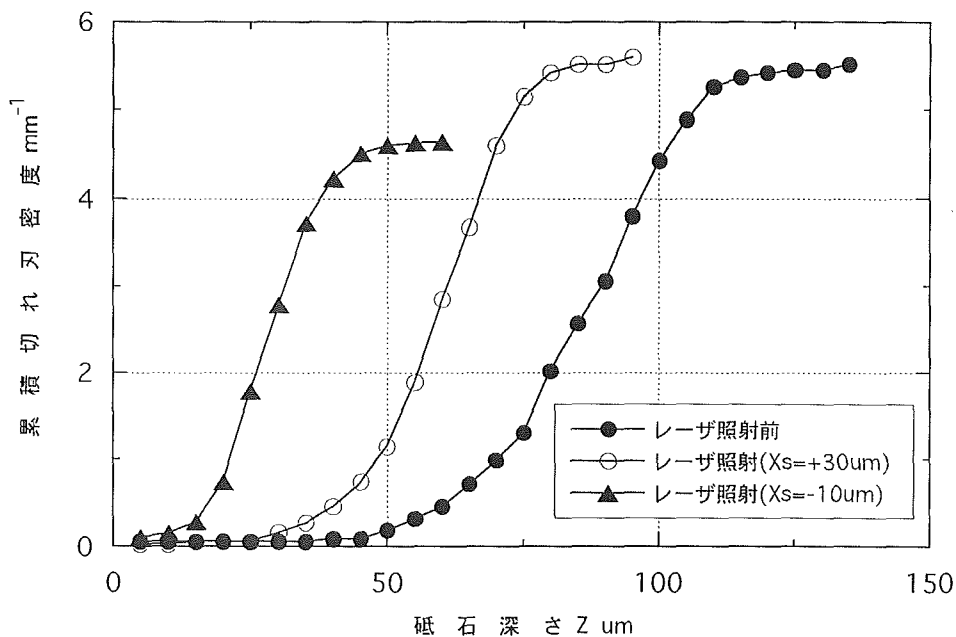


図25. 累積切れ刃密度に及ぼすレーザ近接量の影響 (Dクイル, Qスイッチ)

図26は、ダイヤモンド砥粒の突出し量 $H$ の分布を追跡した結果である。レーザ照射前(●印)に $80\mu\text{m}$ の範囲まで分布していた砥粒突出し量はレーザ近接量 $X_s=+30\mu\text{m}$ の地点(○印)でその分布範囲を $60\mu\text{m}$ まで狭めているが、クイル作業面上に存在する砥粒切れ刃の総数は140個から142個へとあまり変化していない。この結果は、レーザ照射によってダイヤモンド砥粒が破壊消滅するのではなく、図24のSEM写真に示したように、突出したダイヤモンド砥粒の先端が黒鉛化お

よび酸化によって除去されることを意味している。

一方、 $X_s = -10 \mu\text{m}$  (▲印)の地点までレーザを接近させると、砥粒突出し量はより一層小さくなるがそれと同時に砥粒総数も117個に減少している。さて、レーザビームのスポット径を先に述べたように $245 \mu\text{m}$ とすると、レーザ近接量が $X_s = -10 \mu\text{m}$ の地点でレーザビームは研削クイルの最外周面から深さ $132 \mu\text{m}$ の位置まで入り込んでいることになる。しかるに、レーザ照射前におけるマトリクス深さは、図25の結果から得られるように $135 \mu\text{m}$ であるから、Ni素地面はクイル最外周面から深さ $135 \mu\text{m}$ の位置に存在していることになる。したがって、レーザ近接量 $X_s = -10 \mu\text{m}$ の地点でレーザビームはNi素地面と干渉していることがわかる。このような状態になるとNi素地面からわずかに突出したダイヤモンド砥粒がレーザの除去作用を受けて消失するようになり、その結果として、Ni素地面上に存在するダイヤモンド砥粒の総数が減少したものと考えられる。

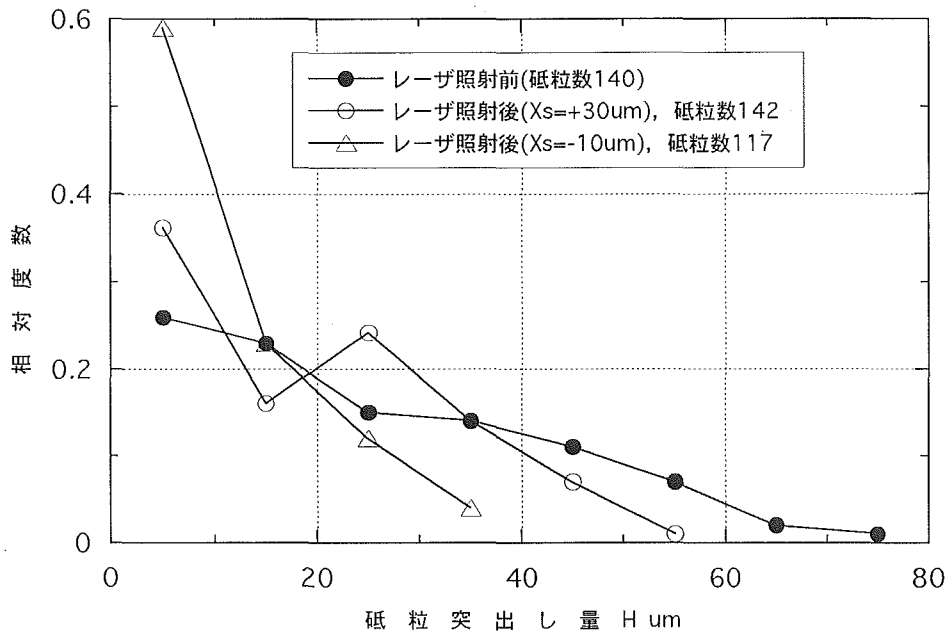


図26. 砥粒突出し量に及ぼすレーザ近接量の影響 (Dクイル, Qスイッチ)

図27は、平均化した砥粒突出し量 $\bar{H}$ および砥石深さ $30 \mu\text{m}$ の範囲に存在する累積砥粒切れ刃数 $N_{30}$ をレーザ近接量 $X_s$ に対してプロットした結果である。図より、レーザ近接量が $X_s = +60 \mu\text{m}$ 以下になると、平均砥粒突出し量 $H$  (○印)が減少を開始し累積砥粒切れ刃数 $N_{30}$  (●印)が増加し始めてトポグラフィに変化の現れることがわかる。

レーザスポット径( $245 \mu\text{m}$ )を用いると、このレーザツルーイング効果が発現するレーザ近接量 $X_s = +60 \mu\text{m}$ の地点でレーザビームはすでに研削クイルと砥石深さ方向に $62 \mu\text{m}$ だけ干渉していることになる。この現象は、先に行った電着CBN

クイルの接線照射LBT実験の場合にも認められたものである。レーザービームをこの位置まで接近させなければダイヤモンド砥粒あるいはCBN砥粒の除去加工作用が得られない理由として、レーザー入射角の影響が考えられる。接線照射方式でLBTを行う場合、クイル作業面に対するYAGレーザービームの入射角 $\theta$ は原理上 $\theta=90^\circ$ になる。しかるに入射角 $\theta=90^\circ$ におけるYAGレーザー光の反射率はほぼ100%であり照射対象物のレーザー吸収率は0%になってしまう<sup>8)</sup>。したがってダイヤモンド砥粒がレーザーを吸収し除去加工されるためには入射角 $90^\circ$ 以下でレーザー照射を受けることが必要であり、具体的にはダイヤモンド砥粒あるいはCBN砥粒の側面部がレーザービームと干渉するようになる位置まで研削クイルを接近させなければならないことを意味する。以上の考察から、ツルージング効果の発現するレーザー近接量は、YAGレーザーの照射対象である超砥粒の形状および粒度によって異なることが予想される。

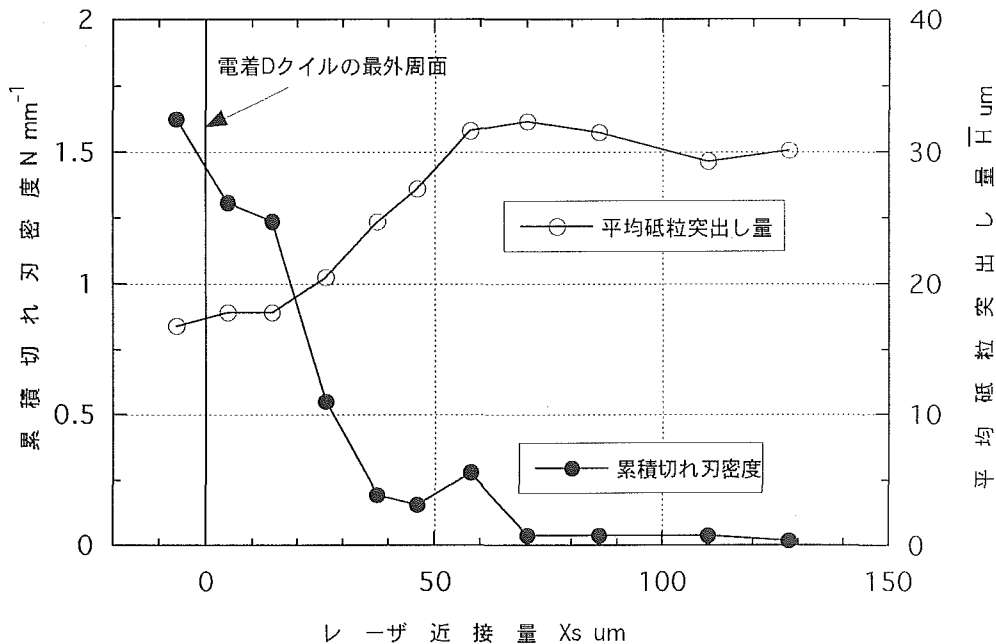


図26. レーザ近接量 vs トポグラフィ特性 (Dクイル, Qスイッチ)

#### 5.4 ダイヤモンド電着クイルの研削性能

YAGレーザーで切れ刃ツルージング(LBT)を施した電着ダイヤモンドクイルの研削性能を検討するため、レーザー照射を行わないクイルとLBTを行ったクイルの2本を用意し、それぞれのクイルについて $\text{Si}_3\text{N}_4$ セラミックスの内面研削実験を行った。表3に研削条件を示す。

表3 Dクイルの研削条件

研削装置	CNC旋盤に治具研削装置を搭載 クイル回転数 85,000rpm (無負荷時)
工作物	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> セラミックス 内径φ12mm, 幅4mm
研削条件	内面プランジ研削 工作物回転数 1,000rpm プランジ速度 0.1mm/min(0.1μm/rev of w.p.) 内面トラバース研削 工作物回転数 500rpm トラバース速度 5mm/min(0.01mm/rev of w.p.) 切り込み量 1μm/pass
研削油剤	ユシローケン S60

図28は、それぞれのクイルについて、研削前の累積切れ刃密度を測定した結果である。△印は、レーザ照射を行わずに研削実験に用いたクイル1の切れ刃密度を示している。図より、レーザ照射前に○印に示す切れ刃密度を有していたクイル2は、LBTによって●印に示すように多くの切れ刃を作業面近傍に有するようになることがわかる。例えば砥石深さ10μmまでに存在する累積切れ刃数を比較した場合、レーザ照射前後で2.5倍に増加している。

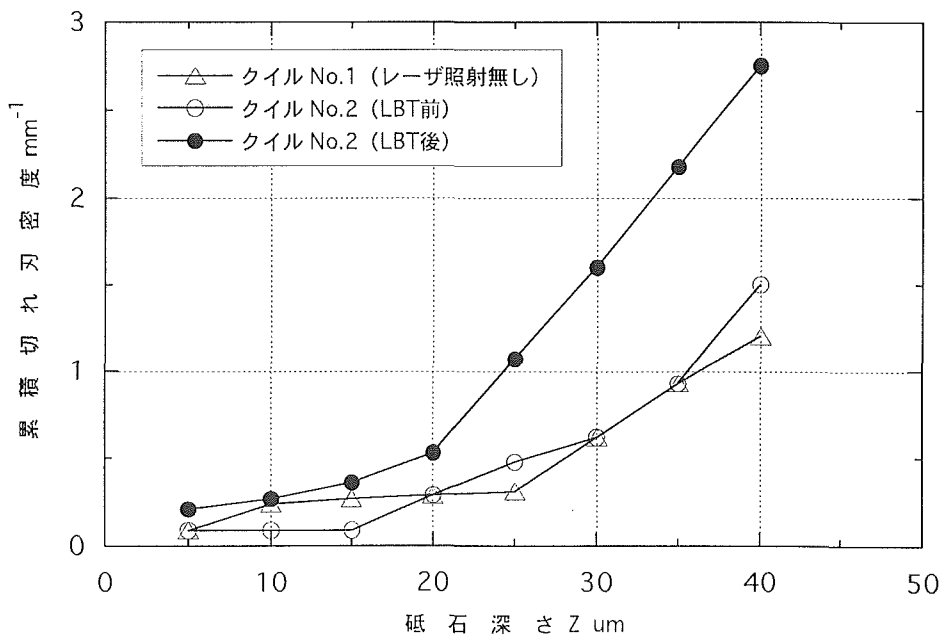


図28. 研削実験に使用した電着CBNクイルの切れ刃密度



なお、この場合のLBT条件として、ダイヤモンド砥粒の先端をツルーイングしながらもできるだけ高い砥粒突出し量を確保するために、図27の結果を参考にしてレーザ近接量を $X_s=+30\mu\text{m}$ に設定した。図29は、内面トラバース研削実験を行い累積切り込み量の経過に伴う仕上面粗さの変化を追跡した結果である。LBT処理を行った研削クイルにより得られる仕上面粗さは通常の研削クイルのもたらす値に比べて約30%向上していることがわかる。

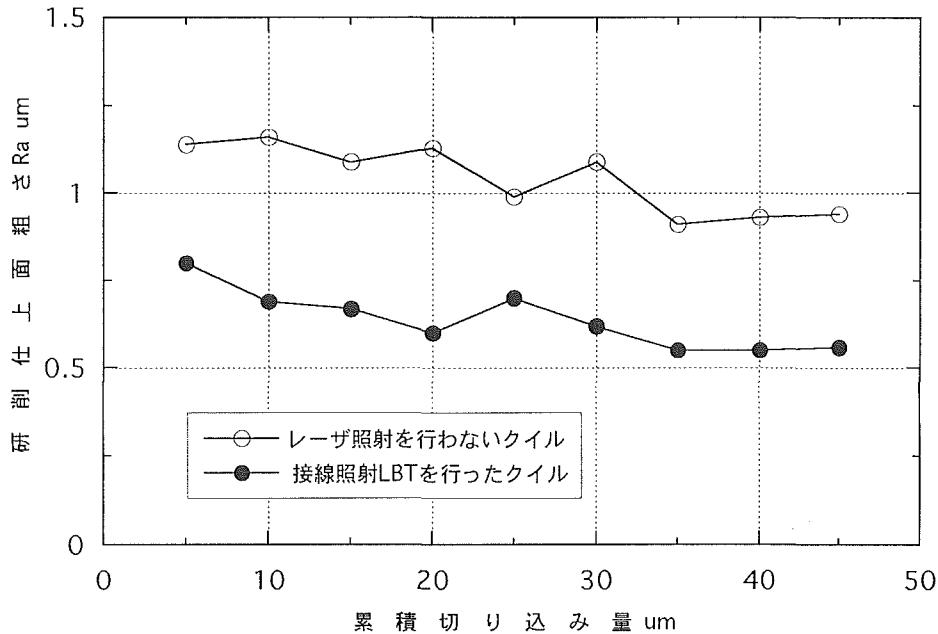


図29. 電着CBNクイルの内面トラバース研削性能

図30は、LBT効果を内面プランジ研削実験により検討した結果である。LBTを施したクイルの研削抵抗は通常研削クイルに比べて高い値を推移するものの仕上面粗さは向上していることを確認できる。

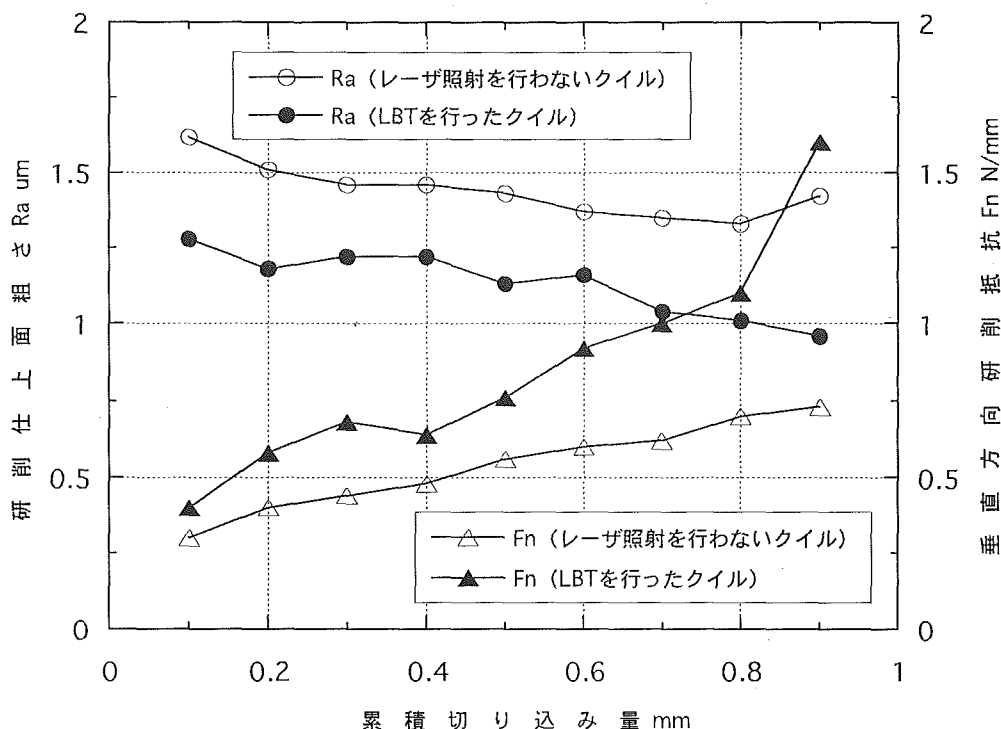


図30. 電着CBNクイルの内面プランジ研削性能

### 5.5 ダイヤモンドクイルについてのまとめ

電着ダイヤモンドクイルについてトポグラフィ特性および研削性能に及ぼすレーザー照射条件の影響を検討した結果、以下に示す結論が得られた。

1) YAGレーザーの平均出力が40W以下では連続発振モードによる単結晶ダイヤモンドの加工は不可能であり、Qスイッチパルス発振モードを用いることによって可能となる。

2) QスイッチパルスYAGレーザーの照射による単結晶ダイヤモンドの除去過程は黒鉛化による熱損傷が主体であり、レーザー照射を受けたダイヤモンド砥粒面は平滑な面になる。

3) 砥石最外周面に対するYAGレーザービームの近接量がある値以下になるとトポグラフィに変化が現れ始める。今回の実験に用いた#140/170の電着ダイヤモンド研削クイルの場合には、レーザービームが砥石作業面と深さ方向に約 $60\mu\text{m}$ 干渉する位置においてツルーイング効果が発現した。

4) レーザーツルーイングを行うことによってダイヤモンド砥粒先端が除去され砥石作業面上に揃うようになるため、研削仕上面粗さはレーザーツルーイングを行わない砥石に比べて良好になる。

## 6. 結 論

電着CBN研削クイルおよび電着ダイヤモンド研削クイルの切れ刃コンディショニングをYAGレーザーを用いて非接触・force freeで行うことの可能性を実験的に検討した。

その結果、Qスイッチパルス発振YAGレーザーを研削クイル作業面の接線方向に照射することによってその目的を達成できることを確認した。この接線照射式レーザービームツルーイング(LBT)法を用いれば総形電着砥石の成形をダイヤモンドツルア等の機械工具に替わって行うことができる。また、この方法は、レーザービーム軌跡のCNC制御によって多様な砥石形状に対応できるという柔軟性も有している。

YAGレーザービームの熱的作用は砥粒の種類によって大きく異なる。CBN砥粒の場合には熱衝撃による劈開破壊が切れ刃ツルーイングの主体となり、ダイヤモンド砥粒の場合には熱分解による平滑化が切れ刃ツルーイングの主体となる。

接線照射式LBTにおいては研削砥石作業面に対するレーザービーム近接量がトポグラフィコンディショニングのための重要なパラメータとなる。レーザービーム近接量が不十分の場合にはツルーイング効果が発現せず、レーザービームを近づけ過ぎると砥粒突出し量を過度に減少させてしまう他にニッケル素地面にも熱溶融損傷を与えてしまうことになる。

切れ刃ツルーイング効果の発現するレーザービーム位置は砥粒の種類によって異なる。また、粒度によっても異なることが予想されるため、接線照射式LBTを適用する場合には、予めレーザービームの最適位置を把握しておくことが必要である。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり実験試料をご提供いただいた大阪ダイヤモンド工業，ニートレックス，測定をお引き受けいただいたエリオニクス，レーザテックに感謝します。また研究資料の収集にご協力いただいたBristol大学T.R.A Pearce博士に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 田村利夫，山倉英雄，栴田正美：切れ刃先端を研磨仕上げしたメタルボンドダイヤモンド砥石の高精度ツルーイング，精密工学会誌，59，12（1993）1979.
- 2) Manfred Lorenz: Method and device for the fine profiling of tools coated with super-hard materials, UK Patent application GB 2113583, (1983).
- 3) 中島利勝，大橋一仁，孫黎曦，実盛健郎，八木大輔：移動熱源によるレジノイド砥石のドレッシングに関する研究(第2報)－YAGレーザによるドレッシング効果－，精密工学会誌，61，4(1995)556.
- 4) E. Westkamper, J. Freytag, U. Harbs: Dressing of Resin-Bonded CBN Grinding Wheels by Means of a Pulsed Nd:YAG Solid-State Laser, Proceedings of the Laser Assisted Net shape Engineering, LANE'94, 1, (1994)491.
- 5) 田牧純一，杉野豪：電着CBNクイルのYAGレーザツルーイング，砥粒加工学会誌，40，2（1996）81.
- 6) 手塚信一，吉川昌範：YAGレーザによるダイヤモンド粒の切断，精密工学会誌，55，10（1989）1863.
- 7) 庄司克雄，周立波，松井正己：ダイヤモンド砥石のツルーイング及びドレッシングに関する研究(第1報)－ステレオ写真法による砥粒突出し量の測定と研削性能に及ぼす砥粒突出し量の影響－，精密工学会誌，55，5（1989）865.
- 8) William M. Steen: Laser Material Processing, Springer-Verlag London Ltd. (1991)49.