

# 砥石作業面のレーザーコンディショニングを併用した研削焼入れの実現

著者	細川 晃
著者別表示	Hosokawa Akira
雑誌名	平成19(2007)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2006-2007
ページ	58p.
発行年	2008-05
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00053772">http://doi.org/10.24517/00053772</a>



---

砥石作業面のレーザコンディショニングを併用した  
研削焼入れの実現

---

(課題番号：18560100)

平成18年度～平成19年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (C)) 研究成果報告書

平成20年5月

研究代表者 細川 晃  
金沢大学自然科学研究科教授

金沢大学附属図書館



1300-05188-4

---

砥石作業面のレーザコンディショニングを併用した  
研削焼入れの実現

---

(課題番号：18560100)

平成18年度～平成19年度科学研究費補助金  
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

金沢大学附属図書館



1300-05188-4

平成20年5月

研究代表者 細川 晃  
金沢大学自然科学研究科教授

著 者 寄 贈

## 目 次

は し が き	1
研 究 組 織	2
交 付 決 定 額 ( 配 分 額 )	2
研 究 発 表	2
研 究 成 果 に よ る 産 業 財 産 権 の 出 願 ・ 取 得 状 況	2

### [ 研 究 成 果 ]

#### 第 1 章 研削熱を利用した表面硬化加工法 ～ 研削焼入れの試み ～

1.1 緒 言	3
1.2 円筒プランジ研削による表面硬化加工	3
1.2.1 はじめに	3
1.2.2 実験装置	3
(1) 円筒研削盤の仕様	3
(2) 研削砥石	3
(3) 工作物	4
1.2.3 実験方法および条件	5
1.2.4 硬度測定と組織観察	8
1.2.5 プランジカットによる研削焼入れ	10
(1) 砥石切込み速度の影響	10
(2) 工作物回転回数の影響	10
(3) 工作物周速度の影響	17
(4) 研削液の影響	20
1.2.6 まとめ	23
1.3 同時硬化加工法としての研削焼入れの有効性	24
1.3.1 はじめに	24
1.3.2 実験方法および条件	24
1.3.3 工作物のスパークアウト	25
(1) 工作物の真円度	25
(2) 工作物の仕上げ面粗さ	28
(3) スパークアウトによる焼入れ結果への影響	28
1.3.4 まとめ	33
1.4 結 言	34

## 第2章 Nd:YAGレーザーによるレーザーコンディショニング ～メタルダイヤモンド砥石のサーマルドレッシング～

2.1 緒言	37
2.2 超砥粒砥石のコンディショニング	37
2.2.1 はじめに	37
2.2.2 レーザドレッシングの原理	38
2.2.4 メタルボンドダイヤモンド砥石のレーザードレッシング	39
(1) ドレッシング方法	39
(2) ドレッシング結果	41
2.2.5 研削実験による砥石の性能評価	41
2.2.6 まとめ	41
2.3 レーザ・エアジェット一体型ノズルによるレーザードレッシング	44
2.3.1 はじめに	44
2.3.2 実験装置	44
2.3.3 レーザドレッシング実験	47
(1) 実験方法および実験条件	47
(2) 実験結果	48
2.3.3 研削実験による砥石の性能評価	50
(1) 砥石作業面の変化	50
(2) 研削抵抗	50
2.3.4 まとめ	53
2.4 結言	54

## はしがき

主軸や案内面など機械の運動精度を保証する要素部品は主として鉄系金属が用いられるが、通常、旋削加工やフライス加工などの切削加工および高周波焼入れや浸炭などの熱処理を経て最終的に研削加工によって所定の形状と仕上げ面が形成される。これは、母材のじん性や疲労強度を維持したまま表面のみを硬化させ、摺動面の強度・耐摩耗性の向上を図るためである。しかしながら、一連の機械加工工程に熱処理を挿入することは、搬送・取付けはもとより、熱処理の前後処理工程に多くの時間を費やし、生産効率の低下を来す。

一方、研削加工では「研削焼け」と称される熱的現象が知られている。これは表面に過度の「焼き」が入り変色する現象で、このとき、加工条件によっては研削表面のかなり深い領域まで硬化されることがわかっている。そこで本研究では、研削時に発生する研削熱を積極的に利用し、研削と同時に仕上げ面に硬化層を生成する“研削焼入れ(Grind-hardening)”の実用化を図ることを目的としている。

さて、研削焼入れを実現させるためには、砥石と工作物の干渉領域で発生する熱量(研削熱)をいわば移動熱源として工作物に流入させることが不可欠であり、そのためには加工状態を一定に保つ必要がある。すなわち、砥石作業面の状態(切れ味)を一定に創成しなければならず、ツルーイングやドレッシングが極めて重要になる。通常、研削加工においては、砥石作業面は摩滅摩耗や欠損摩耗や目づまりなどによってその状態が変化するため、周期的にツルーイングやドレッシングをしなければならない。特に、研削焼入れなどの高負荷研削ではその頻度が高く、現状のダイヤモンドツルアやWA(GC)ドレッサを用いた機械的方法では極めて効率が悪い。状況によってはインプロセスで行う必要もある。

そこで本研究では、ツルーイングやドレッシングだけではなく、目づまりを除去するクリーニング等を含めた総括的な砥石作業面の創成工程をコンディショニングと名付け、より効率的なレーザを用いた熱的手法(サーマルコンディショニング)を構築することをさらなる目的としている。

上記のように、本研究は、“研削焼入れ”と“レーザコンディショニング”という大きな2つのテーマからなっており、本研究成果報告書も2章の構成になっている。具体的な研究課題は以下の通りである。

- (1) 研削条件が工作物表面の硬度変化、表面硬化層深さに及ぼす影響を明確にすることによって、研削焼入れの実現性を明確にする。ここで、焼入れ層深さは数百 $\mu\text{m}$ ~数 $\text{mm}$ をねらっているが、極表面では酸化膜や研削割れなどの加工変質層などが形成されよう。これらは、スパークアウト研削において除去すべきものであり、それらを含めた組織変化を定量的に把握する。
- (5) レーザビームの照射という単一の操作で、砥粒の先端を揃えるツルーイング、結合剤を除去し、砥粒に適切な突出し量をもたせるドレッシング、目づまりや工作物材料の凝着・溶着層を取り除くクリーニングの3つのプロセスを行う手法(コンディショニング)を構築する。

## 研究組織

- 研究代表者：細川 晃（金沢大学自然科学研究科教授）  
研究分担者：上田 隆司（金沢大学自然科学研究科教授）  
研究分担者：田中隆太郎（金沢大学自然科学研究科助教）  
研究分担者：古本 達明（金沢大学自然科学研究科助教）

## 交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	2,600,000	0	2,600,000
平成19年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

## 研究発表

### 《雑誌論文》

- (1) Akira HOSOKAWA, Takashi UEDA, Tsutomu YUNOKI: Laser Dressing of Metal Bonded Diamond Wheel, Annals of the CIRP, Vol.55, No.1, 2006, pp. 329-332.
- (2) メタルボンダダイヤモンド砥石のレーザードレッシング, 日本機械学会誌, 第110巻, 1068号, 2007年, 865-967頁.

### 《学会発表》

- (1) 森本雅憲, 鈴木将吾, 細川 晃, 上田隆司, 田中隆太郎: 研削熱を利用した表面硬化加工法 — 研削焼入れの試み —, 2006年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2006年, 625-626頁.
- (2) 吉田 剛, 細川 晃, 古本達明, 田中隆太郎, 上田隆司: メタルボンダダイヤモンド砥石のレーザードレッシング — レーザ・エアー一体照射型ヘッドによるドレッシング特性 —, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2008年, 311-312頁.

### 《図書》

なし

## 研究成果による産業財産権の出願・取得状況

なし

# 研究成果

## 第1章 研削熱を利用した表面硬化加工法 ～ 研削焼入れの試み ～

### 1.1 緒言

一般に、しゅう動面を持つ鉄鋼部品の製造工程では、切削加工による前加工、熱処理による表面硬化、研削加工等による仕上加工といった数段階の工程を要する。一方、研削加工では、研削時に発生する加工熱による工作物への熱損傷が問題となっている。このような背景の下、研削時に発生する熱を積極的に利用して、加工と同時に熱処理することができれば、生産ラインの集約を可能にし、生産期間の短縮、コスト低減などが期待される。そこで本研究では、円筒研削盤を用い、鋼材の同時硬化研削法（研削焼入れ:Grind-hardening）の可能性とその最適条件を明らかにすることを目的とする。

### 1.2 円筒プランジ研削による表面硬化加工

#### 1.2.1 はじめに

まず主軸の製作を想定し、本章では円筒研削盤を用いて円筒外周面プランジ研削による研削焼入れを行う。プランジ研削は、工作物幅を砥石幅よりも狭くし、砥石に切込み方向の一定の送りを与えて加工するものである。この方式では一般にテーブルを送るトラバース研削よりも研削抵抗が大きくなるので、それによって発生する熱量が大きくなることが考えられる。実験試料には比較的焼入性の良い低炭素鋼のクロム・モリブデン鋼を用い、研削焼入れによる工作物の硬度上昇を測定し、工作物の研削焼入れの可能性と研削条件が工作物の硬化達成度に与える影響について検討している。

#### 1.2.2 実験装置

##### (1) 円筒研削盤の仕様

本研究で使用した円筒研削盤(GDP10-30型:豊田工機製)の仕様を表1-1に示す。表からわかるように、砥石軸電動機の出力が7.5kWと大きく、高速な砥石周速度で大きな切込みを与える研削も十分可能な性能を有する機種であると言える。

円筒研削盤の概観を図3-1に示す。

##### (2) 研削砥石

本研究で使用する砥石はA80Q3B( $\phi 305\text{mm} \times 25\text{mm}$ )とした。砥粒は一般鉄鋼や工具鋼などの金属用として適するアラシダムとし、また、1回分の切込み量を大きくとるために砥石に加わる力が非常に大きなものになると予想されるので、砥石の強度が大きくなるような観点から粒度や結合度の選定を行った。さらに、比較的砥粒が密になるように組織を選定した。結合剤に関しては、合成樹脂(ベークライト)の結合剤で主にフェノール樹脂が主成分であるレジノイドを選定した。

### (3) 工作物

本実験の試料として用いた材料は、比較的焼入れ性も良く、クランクシャフトやカムシャフトの材料としても多く利用される構造用炭素鋼であるクロム・モリブデン鋼 (SCM435) とした。なお、試料は生材のままでは組織の状態にばらつきがある可能性があるため、前処理として焼入れ焼戻し処理を行い、材料組織の均一化を図った。SCM435の焼入れ条件は、Ac3変態点が鉄-炭素系状態図の場合よりも若干高くなるため、焼入れ温度は850°C程度である。すなわち炉で850°Cまで加熱し、30分間保持した後に油冷して焼入れし、再び炉で600°Cまで加熱し、1時間保持した後に水冷して焼戻しした試料を使用するものとする。試料の加工前の硬さは310~350HVである。

また、研削焼入れは急速加熱なので、炭化物が十分固溶しない内に温度が上昇するため、焼入れ硬さは焼入れ前の素地組織によって大きく影響される。図1-2に工作物の母材組織を示す。SCM435の焼入れ焼戻し材はほぼソルバイト組織となり、ソルバイト組織のものは炭化物が十分に固溶するので、焼入れ硬さを高くすることが可能である。

表 1-1 円筒研削盤の仕様

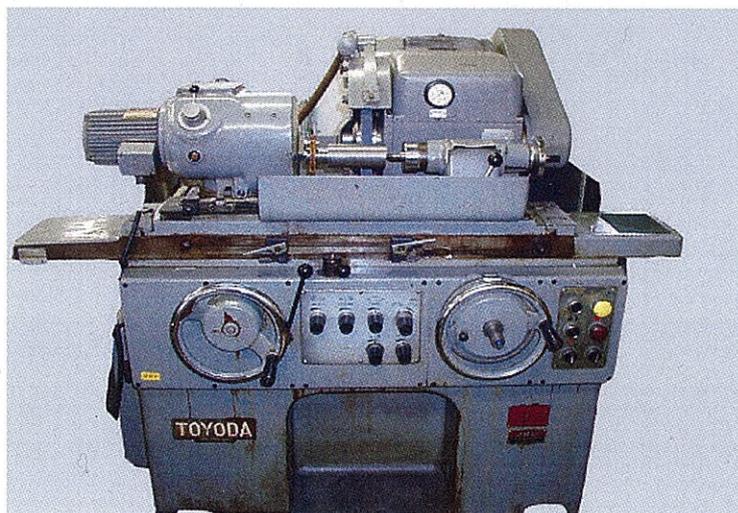
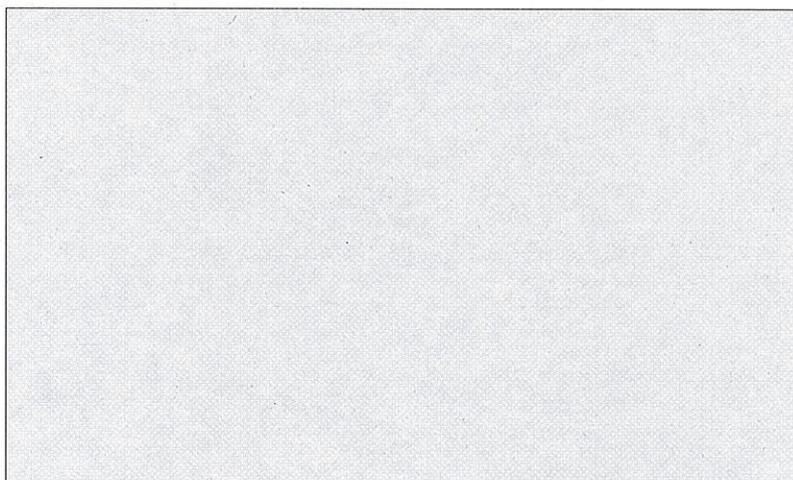


図 1-1 円筒研削盤の外観

### 1.2.3 実験方法および条件

加工物の形状を図1-3に、加工物を取り付けた研削加工部周辺の概観を図1-4に示す。実験試料のSCM435を実験後に分析しやすいように外径70mm、厚さ10mmの中空のシリンダ状にし、それを両脇から試料固定用の2枚のシリンダ状ジグおよびホルダで挟み込み、ホルダを介して円筒研削盤に取り付ける。工作物は両センタで保持し、主軸台側にケレを取り付け、主軸台の動力により駆動する。

研削サイクルは、工作物軸方向に送り運動を与えず、砥石を工作物の半径方向に送り込み、試料に相当する部分を研削するプランジ研削で行った。プランジ研削では、工作物幅以上の広い砥石幅が必要とされ、その研削抵抗は大きくなる。研削抵抗の増大は研削熱の増大に比例するため、研削焼入れに適していると考えられる。切込みは、砥石の中央部に試料がくるようにテーブルを調整した後プランジ研削を行った。

取り付けた工作物は、まず研削液をかけながら手動で10mmずつ切込み（プランジ研削）、火花がでなくなるまでスパークアウトを行い試料表面を整える。この作業により、試料の表面の微妙な傾きや凹凸の影響をなくし、試料の外径部と砥石の外径部が平行になるようにすることで試料表面の砥石との接触状態を均一にすることができる。それから、砥石と試料の最終的な接触面を基準点として100mm戻す。これは砥石台の切込速度を一定にするための加速区間である。その後、研削液を止め、コンプレッサーにより圧縮した空気で試料表面に残った研削液を取り去る。ここまです実験前に行う。

実験は、試料正面から所定の切込み速度 $v_a$ で切込みを与え、試料が所定の回転回数 $n_g$ に到達した後研削を停止する。表1-2に本実験で行った加工条件をまとめた。また、このときの概要を図1-5に、図1-6には研削焼入れ実験時の様子を示す。図から、砥石と工作物との接触領域下には非常に大量の火花が見え、加工条件の過酷さを物語っている。このとき、工作物表面には黒い酸化膜が生じている。この酸化膜の存在が研削面下に硬化層が形成されたことを示しているの。

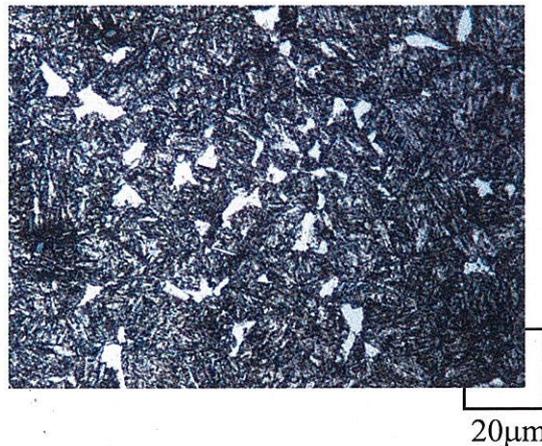


図1-2 クロムモリブデン鋼の組織写真

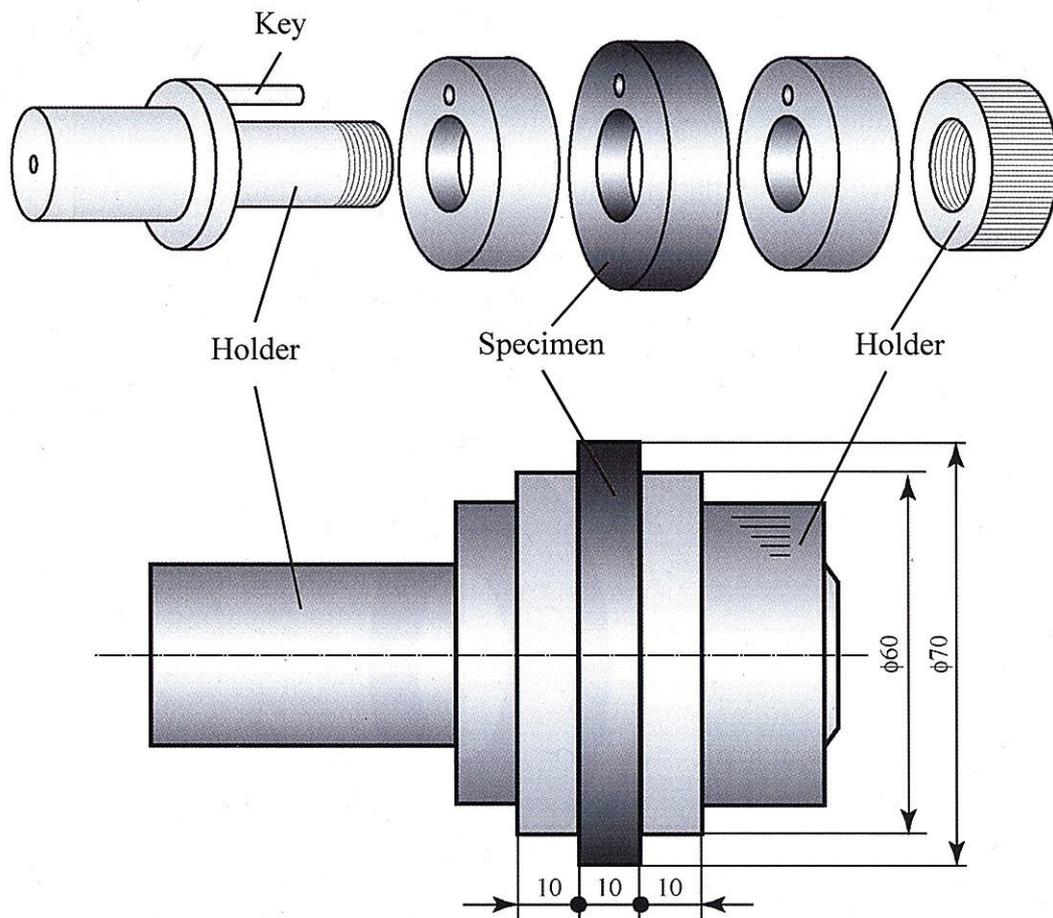


図 1-3 工作物の形状

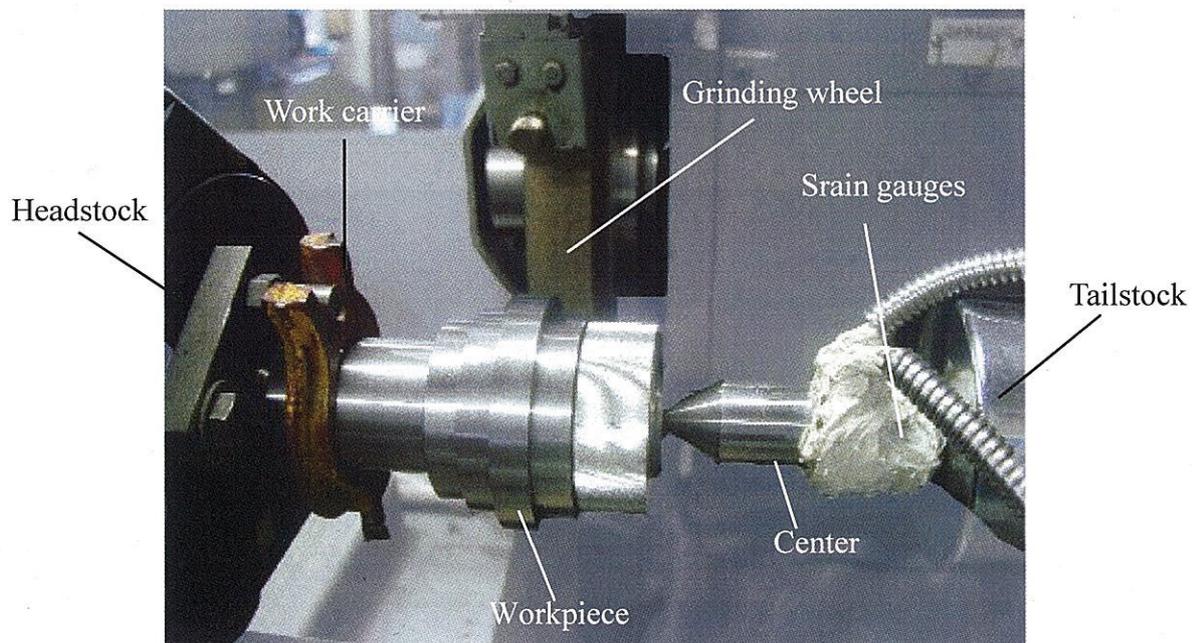


図 1-4 実験装置の外観

表 1-2 実験条件

--

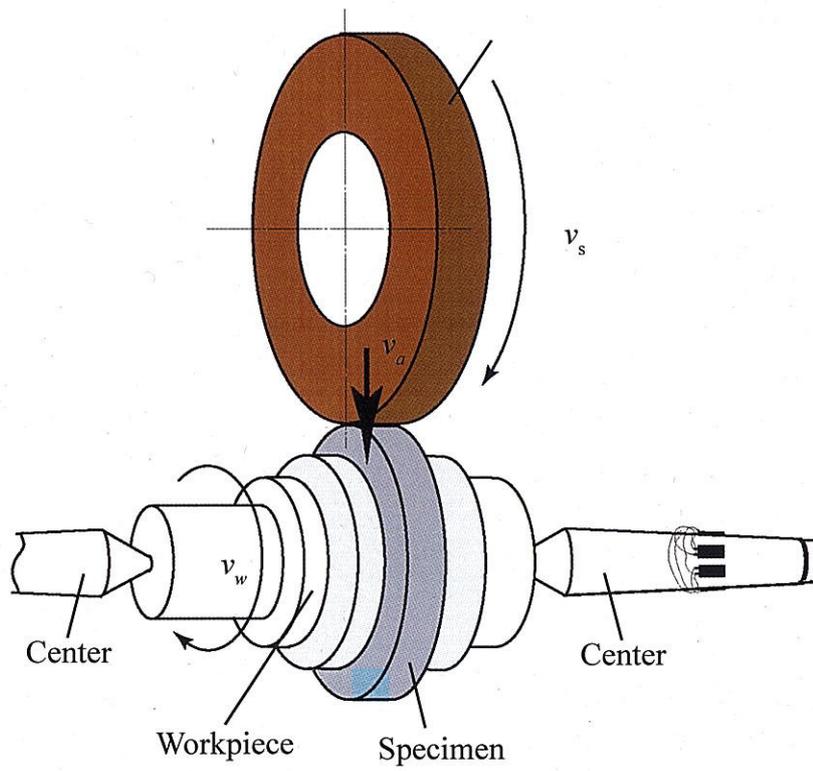


図 1-5 実験装置



図 1-6 実験の様子

#### 1.2.4 硬度測定と組織観察

研削した後の試料は、硬度測定および組織観察を容易にするために、外周部で研削面に対して垂直な面を10×10mm程度になるように切断し、樹脂(Technobit 4071 : Kulter 製)に埋め、ポリッシャー (PRO-128B REFINE・POLISHER, HV : Refine Tec 製) にて #1500までのエメリーペーパーで研磨、粒径0.3μmまでのダイヤモンドペーストによるバフ研磨仕上げを施した。エッチング処理を行った後、組織観察および微小硬さ試験機 (HM-101 : Akashi 製) により硬度測定を行った。エッチングには3%のナイトール液を使用し、組織観察には微分干渉顕微鏡 (ECRIPSE ME600 : Nikon 製) を使用した。また、硬度測定は研削面から試料中心の深さ方向に対して研削面付近を中心に硬度 (HV, 2.94N) を測定した。なお、測定・観察を行う部分は、心押台側の面とする。

研削表面付近の組織および硬度測定の一例を図1-7に示す。図の上方にある境界線が研削加工面であり、下に向かって試料中心の深さ方向である。図の下方には母材が広がっているが、加工面直下には母材とは異なる加工変質層が存在していることがわかる。図1-8には母材および加工変質層の組織拡大写真を示す。(d)のように工作物の母材はSCM435の焼入れ焼戻し材であるので全体的にほぼソルバイト組織であり、(c)に示す加工変質層にはマルテンサイト組織が見られる。またビッカース圧子による圧痕の対角線長さは加工変質層では25μm程度、母材では40μm程度である。圧痕が小さいほど硬度は高いので、加工変質層は母材よりも高硬度であることがわかる。これによって組織と硬度の両面から見て、加工変質層は硬化層であることがいえる。なお、この硬化層は工作物の研削表面に酸化膜が一様にできたときに生成されている。

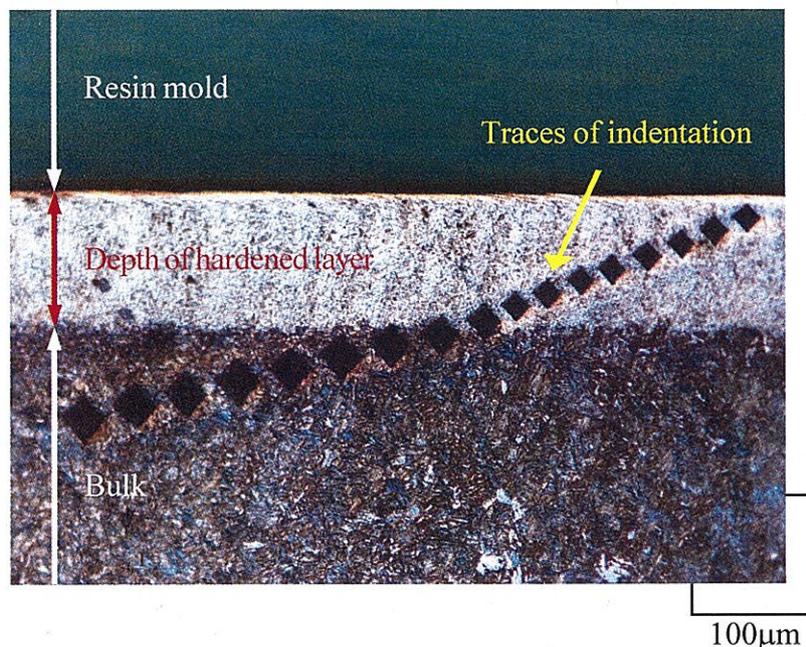


図1-7 資料表面近傍のビッカース圧痕

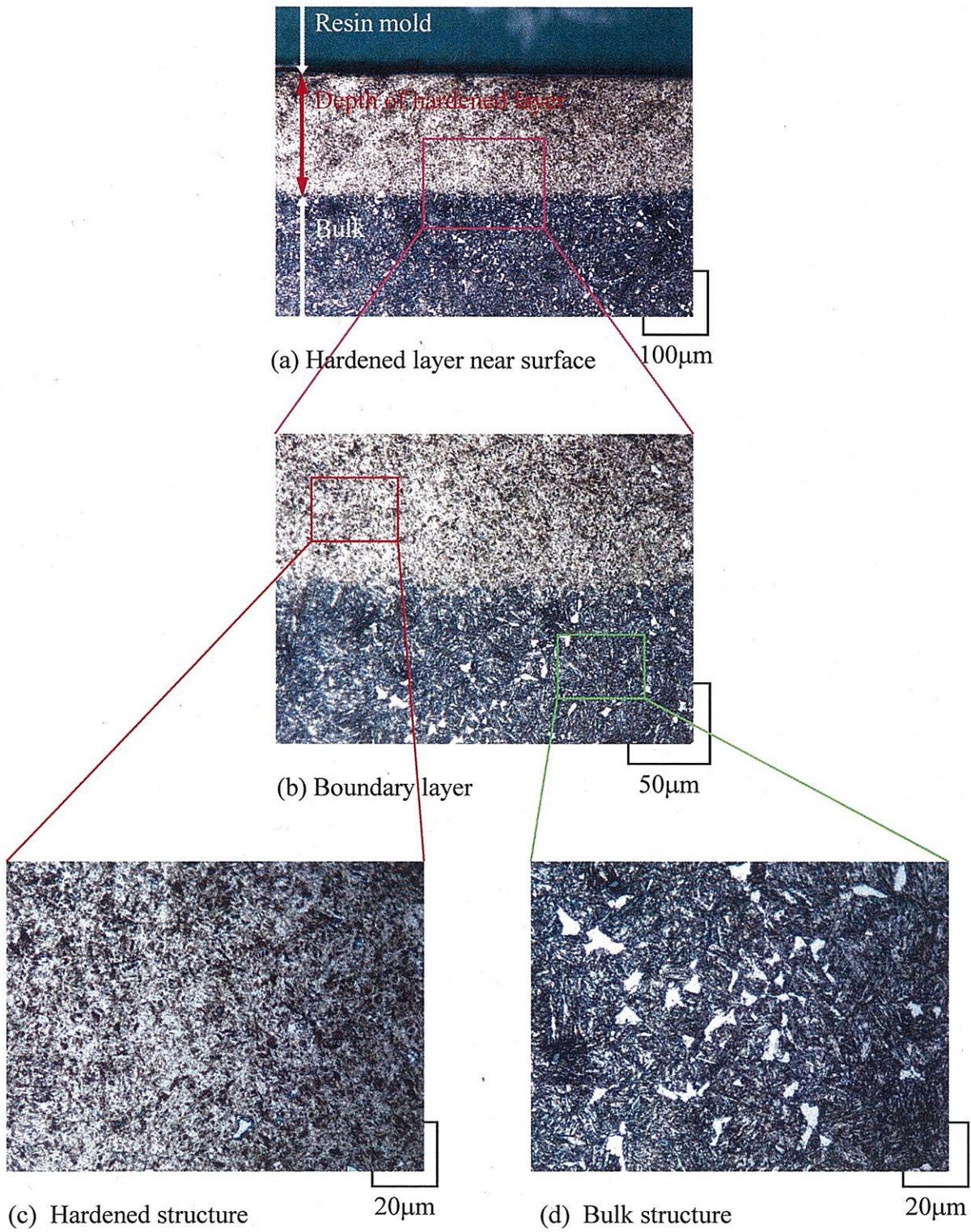


図1-8 研削面表層の組織変化

## 1.2.5 プランジカットによる研削焼入れ

### (1) 砥石切込み速度の影響

図1-9に加工後の試料の顕微鏡による組織写真を示す。写真下方向に試料半径方向の深さとした。写真の上方の境界線が研削表面であり、その上は樹脂である。写真の下部には母材であるソルバイト組織が拡がっており、研削表面下には母材とは異なるマルテンサイト組織が拡がっていることが確認できる。なお、硬化層深さ $z_d$ は研削表面から母材との境界線までの距離としている。

また、図1-10に砥石切込み速度を変化させたときの硬化層深さとの関係を示す。さらに、図1-11には各加工条件で研削焼入れを行った試料の研削表面近傍における半径方向の硬度分布測定の結果を示す。

$v_a=60\mu\text{m/s}$ で深さ $50\mu\text{m}$ 、 $v_a=80\mu\text{m/s}$ で深さ $80\mu\text{m}$ 、 $v_a=100\mu\text{m/s}$ で深さ $140\mu\text{m}$ 付近まで700HV以上の硬度が見られ、硬さの最大値は $v_a=60\mu\text{m/s}$ で724HV、 $v_a=80\mu\text{m/s}$ で759HV、そして $v_a=100\mu\text{m/s}$ で807HVであった。このとき、 $v_a=40\mu\text{m/s}$ では、図1-11から硬化層がみられるが、硬度測定において700HV以上の硬度は検出されなかった。これは、研削面より深さ $30\mu\text{m}$ 未満ではピッカース圧子が打てないこと、また硬化層が小さく圧痕の大きさとあまり差がないことから、硬化層内で圧子を打ち込むことができなかったためである。すなわち、圧痕が全て硬化層内に入ればマルテンサイト変態した組織では700HV以上の硬度が見られるが、圧痕が母材との境界線をまたがるとき、硬度は小さくなるのが分かる。

図1-9、図1-10、図1-11より、切込み速度が大きくなるにつれ硬化層深さの上昇が認められ、ほぼ直線的に増加していることが分かる。これらのことから、次のようなことがいえる。

- (1) 砥石切込み速度を大きくすると、単位時間当たりの材料除去率が大きくなるので熱の発生も多くなり、硬化層深さは大きくなる。
- (2) さらに砥石と工作物の接触弧の長さが増えるために、接触面積が大きくなることでそこから発生する熱量が多くなり、硬化層深さは大きくなるといえる。

### (2) 工作物回転回数の影響

本節では工作物の回転回数の影響について検討した。同じ砥石切込み速度において、工作物の回転回数が増えることは即ち研削時間の増加を意味し、流入熱量の増加が期待される。しかし、時間が長引くほど熱的に過酷な状態になるため砥石作業面の劣化が考えられる。さらに、研削時間の長期化は加熱時間や熱伝導による冷却速度にも影響を及ぼすことから、硬化層の変化にも大きな影響を及ぼすと考えられる。

工作物の回転回数については、一定の切込み速度で所定の回転回数に到達した後、手で砥石を急速後退させる。図1-12に工作物の回転回数の違いによる乾式研削後の工作物の概観を示す。図1-12をみると、(a)および(b)では研削表面に黒い酸化膜が一樣に形成されているが、(c)では表面にびびりマークがみられる。これは研削時間が長くなったために砥石の損耗が大きくなり、また目づまりも多くなったためびびり振動が起きたと考えられる。図は省略するが、湿式では表面の変色はみられるが、乾式ほど

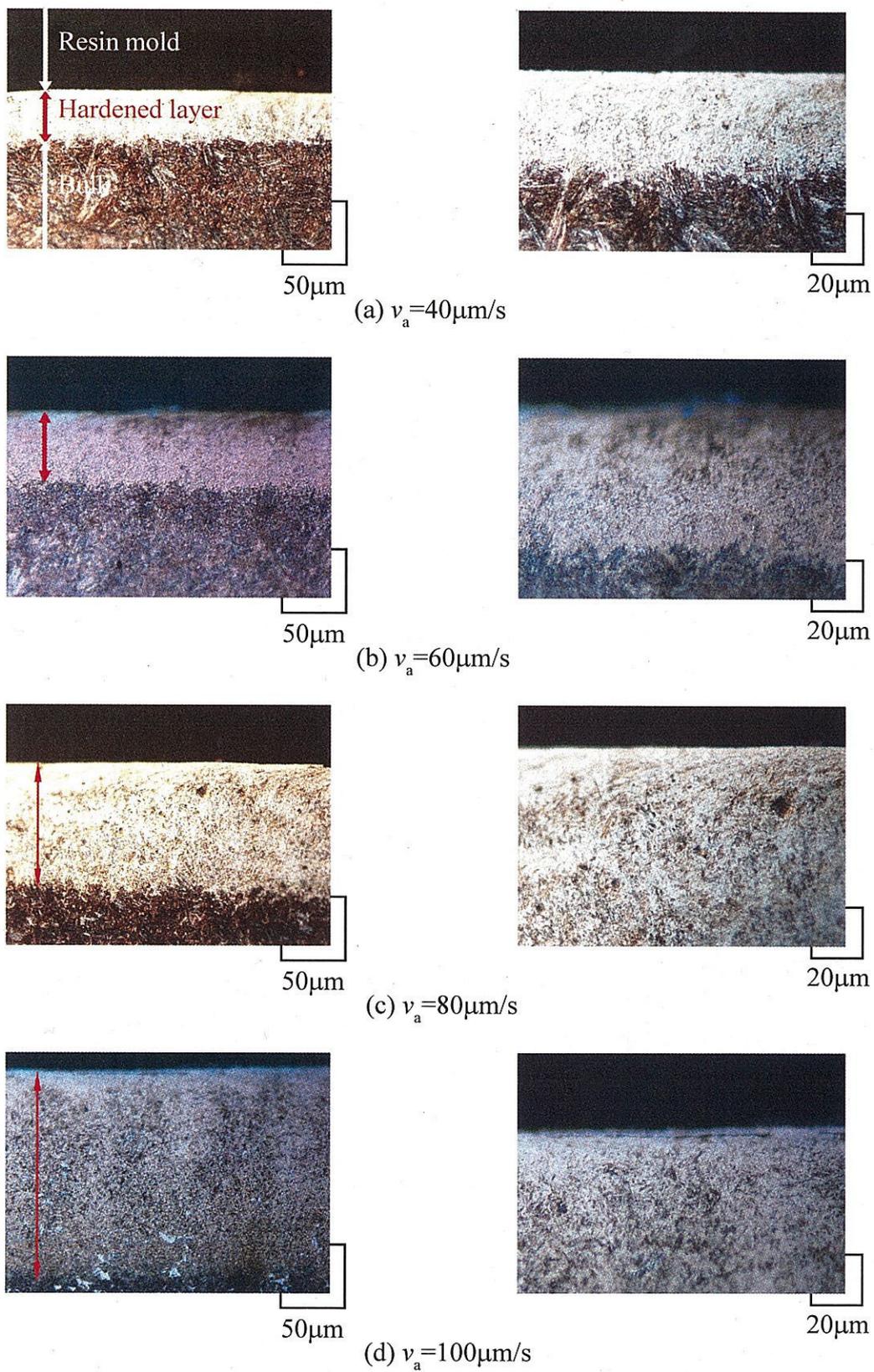


図1-9 加工物表面層の組織に及ぼす切り込み速度の影響

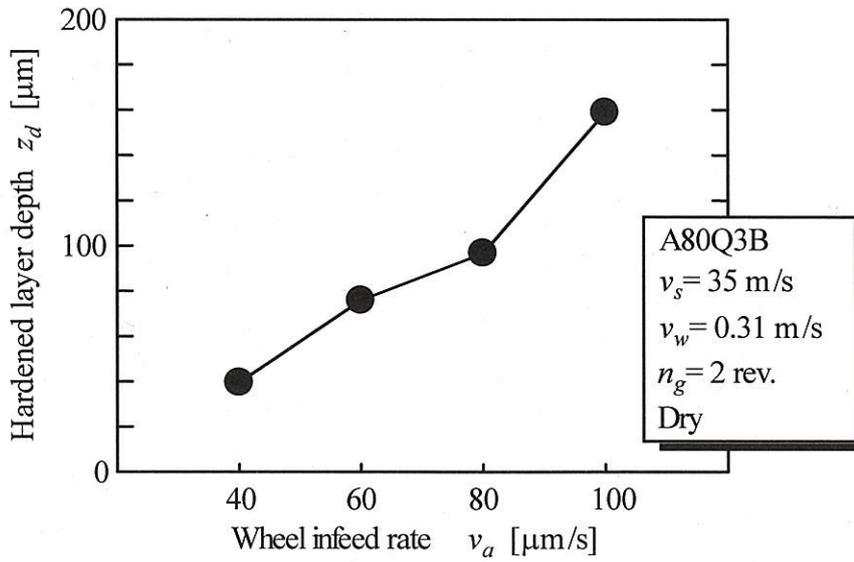


図1-10 砥石切り込み速度と硬化層深さの関係

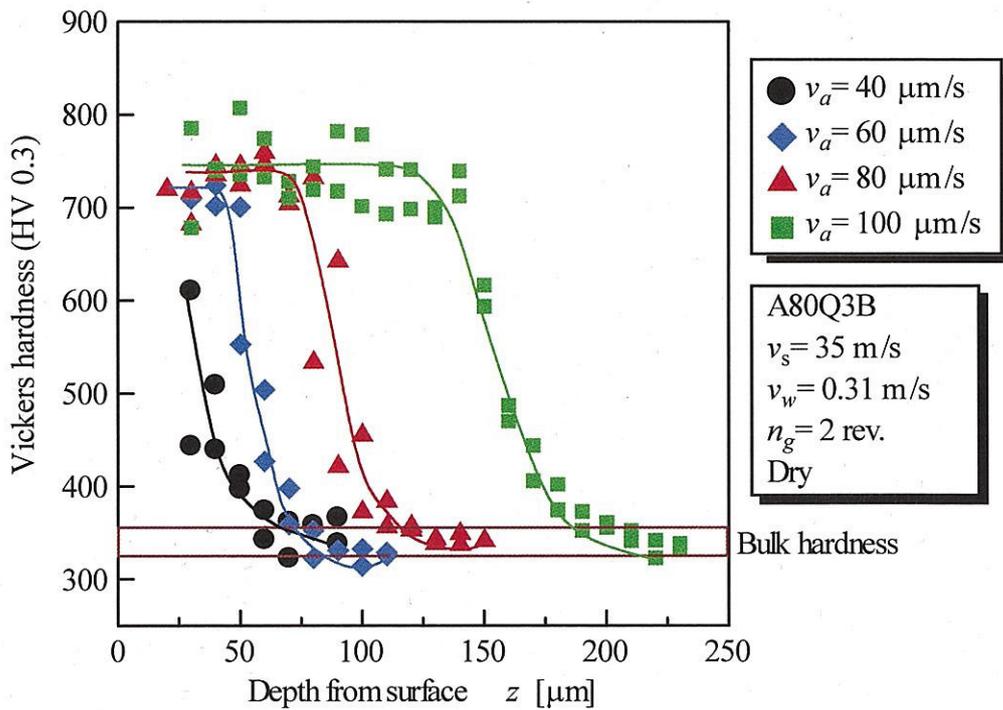


図1-11 切り込み速度が硬度分布に及ぼす影響

黒くなく茶色であり、回転回数の多い(b)の方が色が濃くなっていることが分かる。

図1-13および図1-14にそれぞれ乾式および湿式時の工作物回転回数 $n_g$ の違いによる加工後の試料の顕微鏡写真を示す。また、図1-15には工作物回転回数と硬化層深さとの関係を示す。さらに、図1-16、図1-17には各加工条件で研削焼入れを行った試料の研削面近傍における硬度分布の結果を示す。

図1-16にみられるように、 $v_a=40\mu\text{m/s}$ での乾式研削においては、硬化層深さが浅かったためどの条件下においても700HVを超える硬度が検出されなかった。工作物回転回数が2周、3周と回転回数の増加により一旦硬化層深さは増大するものの、5周、6周となると減少する。これは研削時間の増加により流入熱量は増加するものの、工作物内部にまで熱流束が伝達されるため、研削後の冷却速度が遅くなり硬化層は減少したと考えられる。同時に、研削が長期化するため加工と同時に硬化層を削り取ってしまっているため硬化層の増加には至らなかったと思われる。

一方、 $v_a=60\mu\text{m/s}$ での湿式研削では、工作物3周で深さ50 $\mu\text{m}$ まで700HV以上の硬さがみられた。最大値は819HVであり高硬度を示した。この理由については後述する。湿式の場合も、工作物回転回数の増加により硬化層深さは増加していることがわかる。

これらのことをまとめると、次のようなことがいえる。

- (1) 工作物回転回数が少なすぎると、研削時間が短いため発生する熱量が小さく、そのため浅い場所しか加熱されず、硬化層深さは抑制される。
- (2) 工作物回転回数が多すぎると、流入する熱量は増加するものの、工作物内部にまで熱流束が伝達されるために急冷されず硬化層深さは再び減少する。また、加工と同時に硬化層を削り取るため、硬化層は増加しない。

以上のことから、工作物の回転回数には最適な加工回転回数があることがわかる。

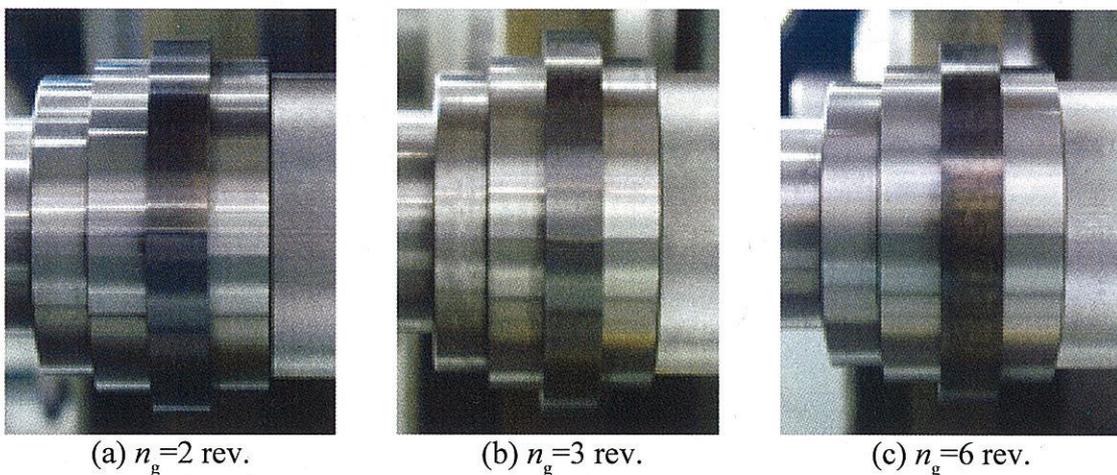


図1-12 焼入れ研削後の加工物表面の色調の変化  
( $v_a=40\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ , Dry)

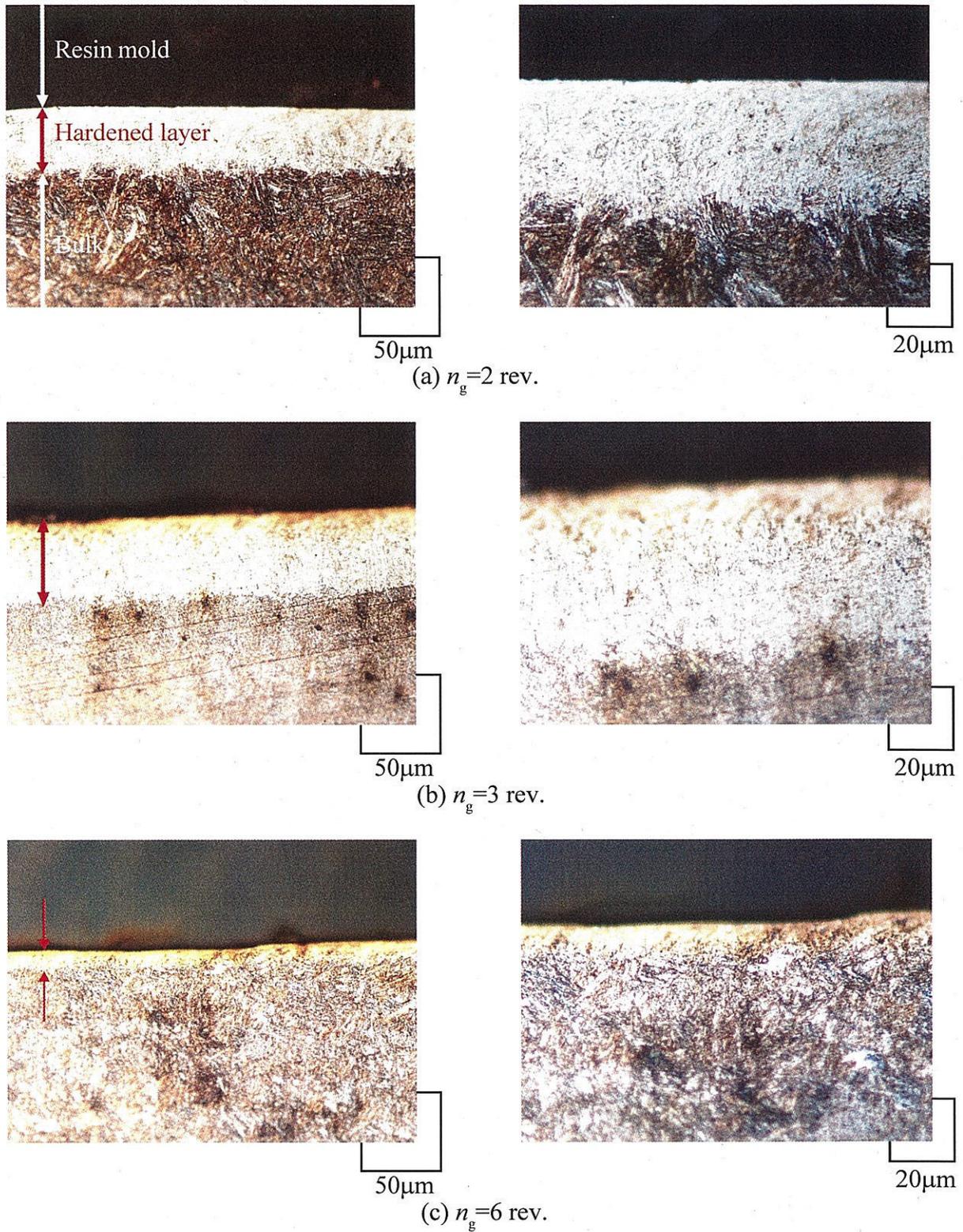


図1-13 加工物回転回数が研削表面層組織に及ぼす影響  
 $(v_a = 40\mu\text{m/s}, v_w = 0.31\text{m/s}, \text{Dry})$

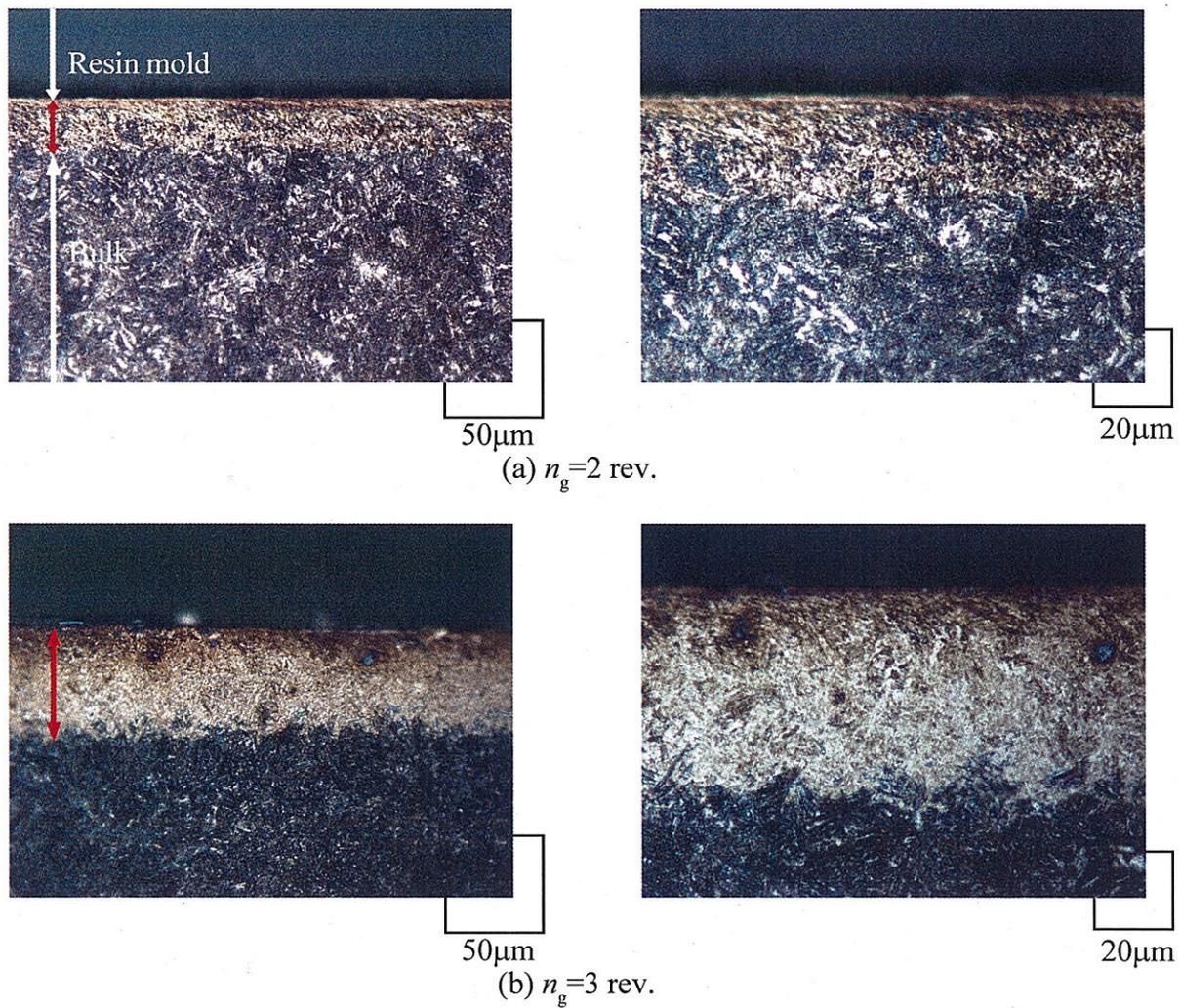


図1-14 加工物回転回数が研削表面層組織に及ぼす影響  
 ( $v_a=60\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ , wet)

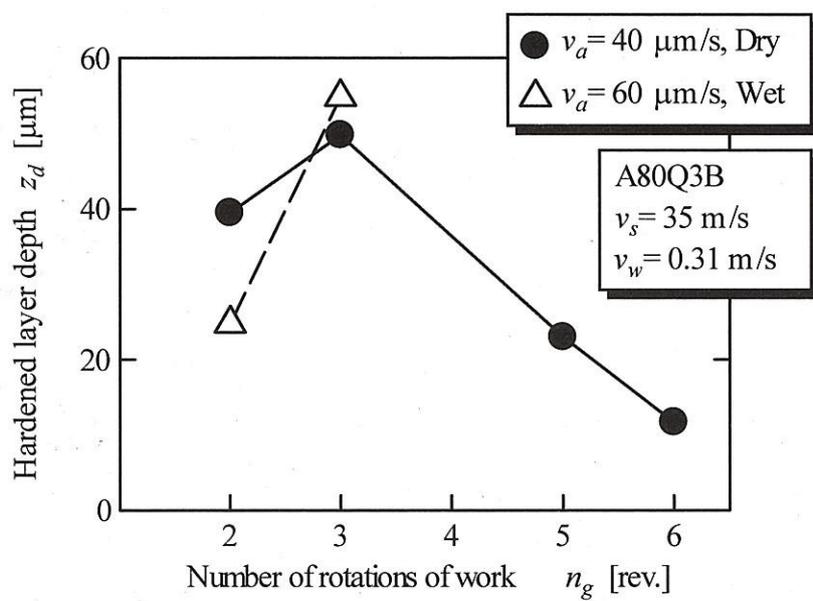


図1-15 加工物回転回数と硬化層深さの関係

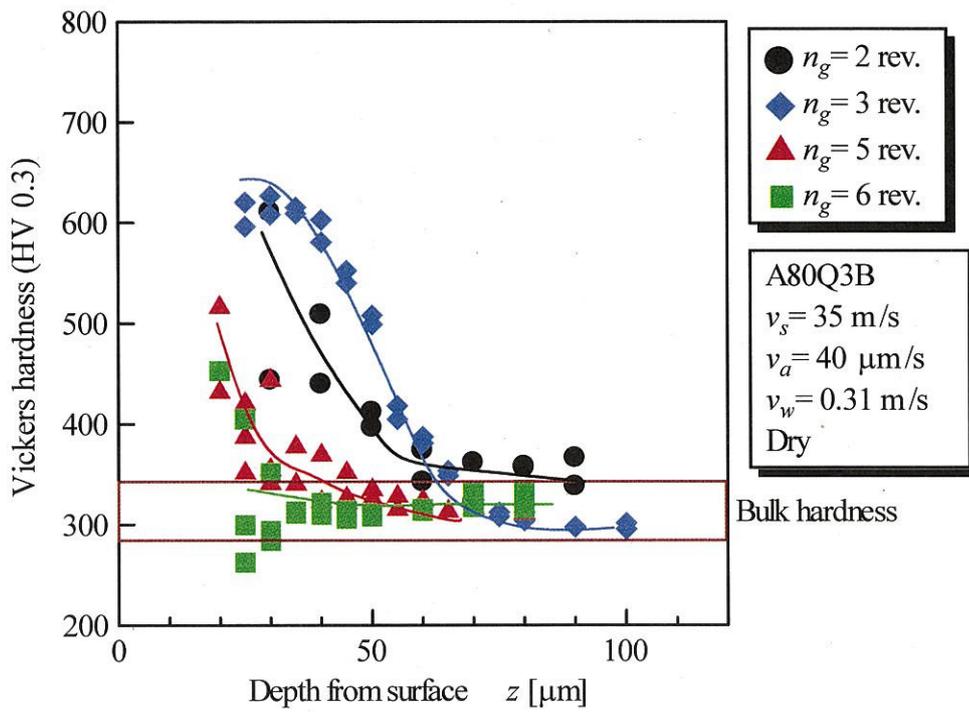


図1-16 加工物回転回数が研削面表層硬度分布に及ぼす影響  
 ( $v_a = 40 \mu\text{m/s}$ , Dry)

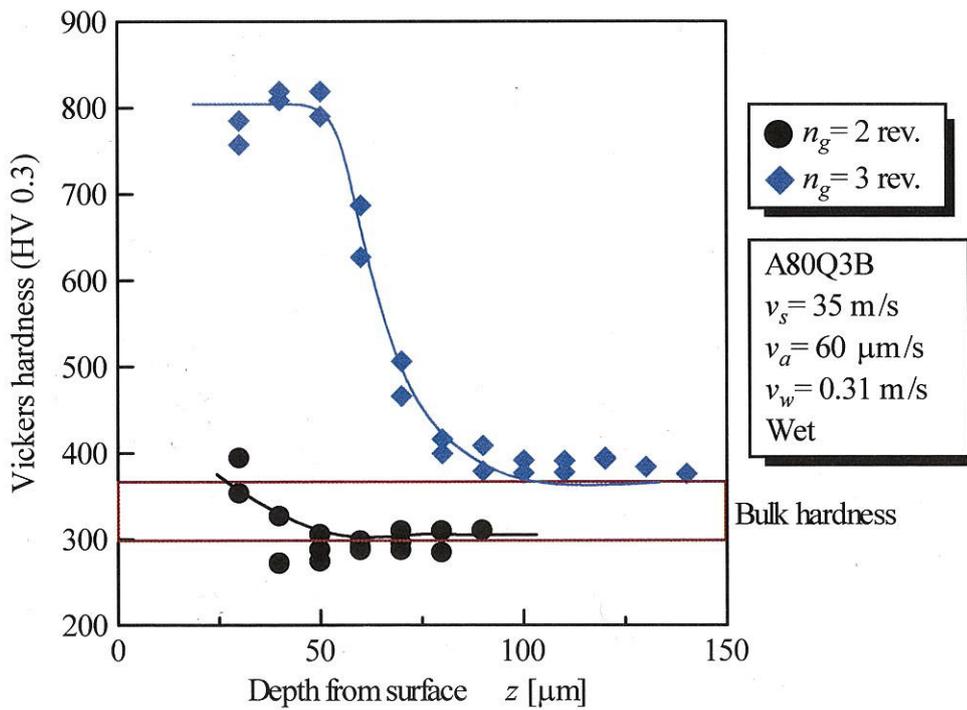


図1-17 加工物回転回数が研削面表層硬度分布に及ぼす影響  
 ( $v_a = 60 \mu\text{m/s}$ , Wet)

### (3) 工作物周速度の影響

本節では、工作物周速度による研削焼入れへの影響について検討した。本実験で使用する円筒研削盤の主軸台の回転数が研削中の負荷により一定とならず変動するため、実験前に設定した工作物周速度（回転数）についての比較のみを行った。

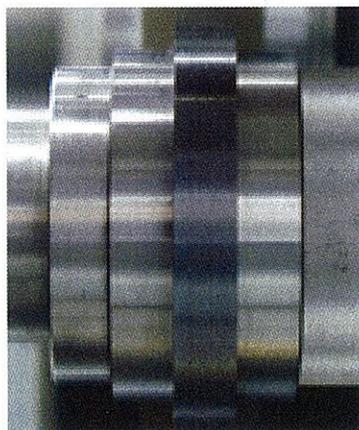
図1-18に研削焼入れ後の工作物概観を示す。(a)では研削面には一様に黒い酸化膜が生じており硬化層形成の期待ができる。これに対し、(b)においては、研削面は変色しているが薄く黒くない。これは工作物周速度が大きいため、熱源である砥石と工作物との接触時間が短くなったために、研削面が十分加熱されなかったためと考えられる。

図1-19に研削焼入れ後の試料の顕微鏡による組織写真を示す。また、図1-20に工作物周速度を変化させたときの硬化層深さとの関係を示す。さらに、図1-21には各加工条件で研削焼入れを行った試料の研削面近傍における半径方向の硬度分布測定の結果を示す。

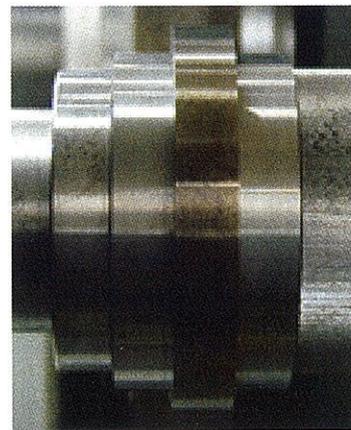
(a)、(b)の条件下では研削面表層に明らかな硬化層がみられるが、(c)ではごくごく表面にのみ母材とは異なる層がみられた。なお700HV以上の硬度がみられたのは(a)の場合のみであるが、(b)でも母材よりも明らかに硬度が高くなっていることから、硬化層の存在が裏付けられる。

それぞれの図から、工作物周速度の増加によって硬化層深さが減少していることが分かる。これは、周速度の増加により、切削速度はわずかに上昇するものの、熱源である砥石と工作物との接触時間が短くなり、研削面が十分加熱されず、工作物内部まで十分に熱流束が入らなかったためであると考えられる。

これらの結果から、工作物周速度を大きくすると、切削速度は増加するものの、砥石と工作物との接触時間が減少して入熱時間が短くなり、その影響が作用して硬化層深さは減少すると言える。



(a)  $v_w = 0.31 \text{ m/s}$



(b)  $v_w = 0.47 \text{ m/s}$

図1-18 焼入れ研削後の加工物表面の色調の変化  
( $v_a = 60 \mu\text{m/s}$ ,  $n_g = 2 \text{ rev.}$ , Dry)

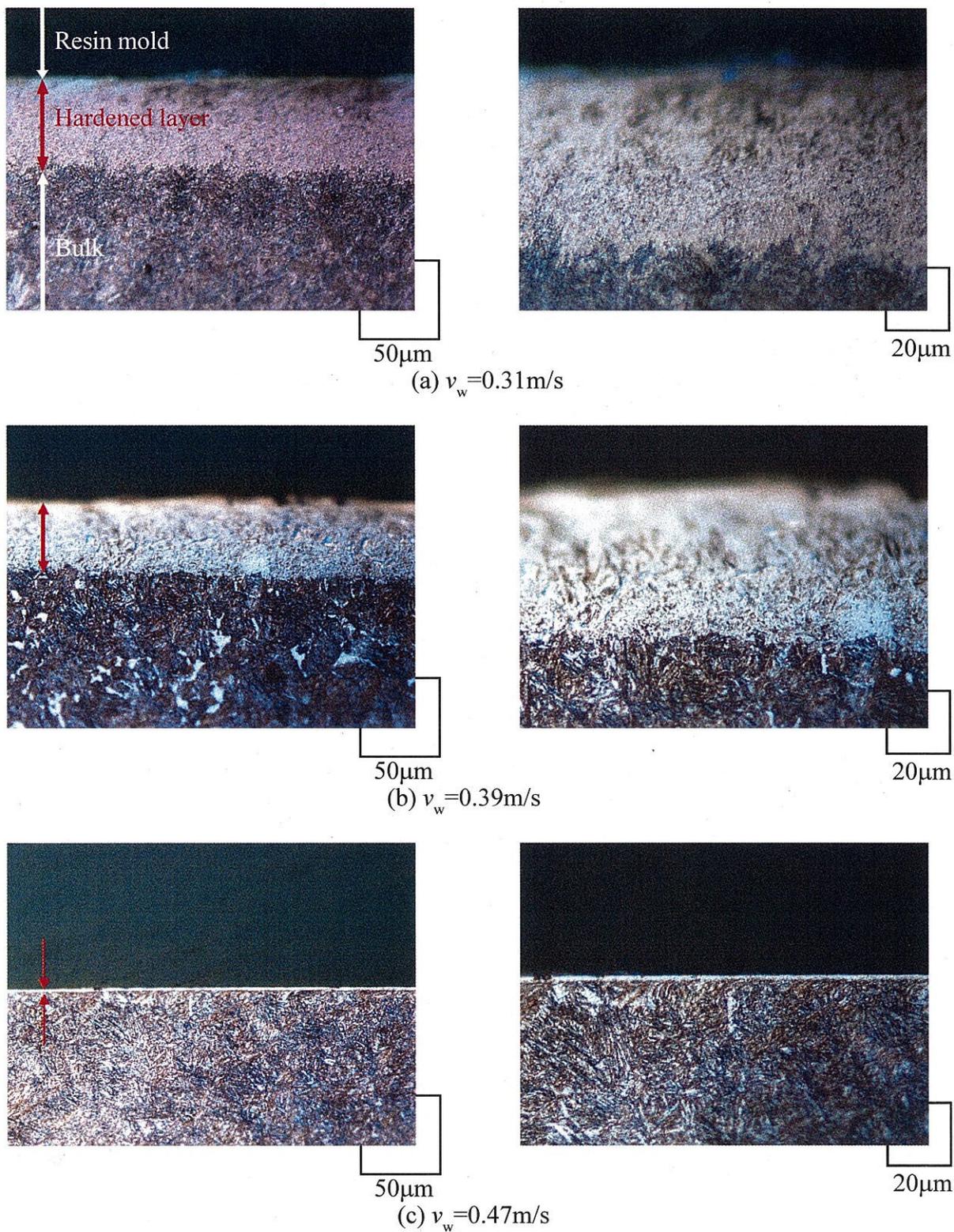


図1-19 工作物速度が研削面表層組織へ及ぼす影響  
 $(v_a = 60 \mu\text{m/s}, n_g = 2 \text{ rev.}, \text{Dry})$

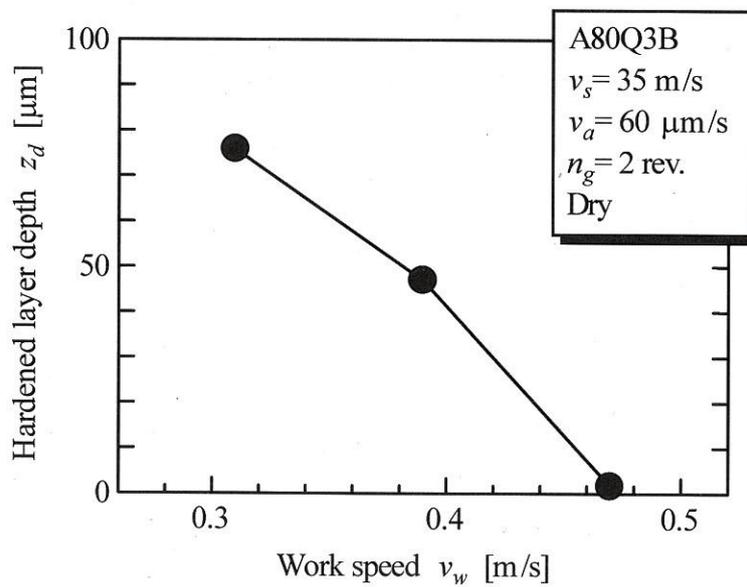


図1-20 工作物速度と硬化層深さの関係

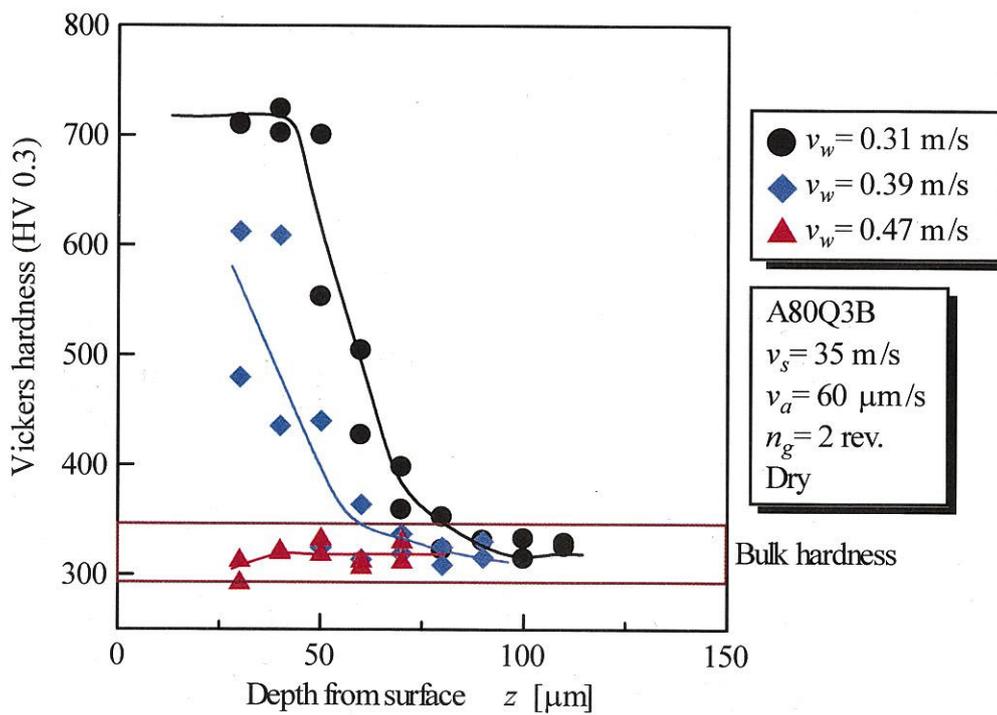


図1-21 工作物速度が研削面表層硬度分布に及ぼす影響

#### (4) 研削液の影響

研削液の使用目的は、効率良く、かつ仕上面精度の高い研削加工を行うことであり、以下に示す三つの作用によりその効果を発揮する。

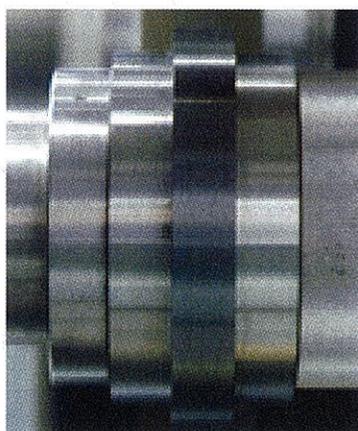
- (1) 研削加工時に発生する熱を吸収して温度を下げる冷却作用。
- (2) 研削加工時の境界面の摩擦を減少させて砥粒切れ刃の鈍化を遅らせたり、摩擦熱の発生を抑える潤滑作用。
- (3) 研削加工時に生じる切りくずや脱落した砥粒を砥石から除く洗浄作用。

これら冷却、潤滑、洗浄作用はそれぞれ独立して行われるものではなく、研削加工中に互いに作用しあって、研削液としての効果を発揮するものである。

上記のうち、研削液の冷却作用による加工直後の急冷効果を期待して湿式研削を行った。図1-22に研削後の加工物の概観を示す。(a)は乾式、(b)は湿式研削での結果である。(a)では研削面に黒い酸化膜が生じているが、(b)では研削液の冷却作用、潤滑作用によってオーステナイト化が十分されないため、研削後の酸化膜の色にもその影響が現れ、黒い変色はみられなかったと考えられる。

図1-23、図1-24に各加工条件での乾式研削と湿式研削による加工後の試料の顕微鏡写真を示す。また、図1-25に乾式および湿式研削での砥石切込速度を変化させたときの硬化層深さとの関係を示す。図1-26、図1-27ではそれぞれの条件での研削焼入れ後の試料の研削面近傍における硬度分布測定の結果を示す。

それぞれの図より、同条件下では乾式研削に比べ、湿式研削は明らかに硬化層深さは小さい。また湿式での硬度は、硬化層は組織写真からみられるが、その小ささから700HVを超える値は検出されなかった。これは、湿式研削では、砥石の切込んでいる加熱時にも研削液によって接触領域が冷却されるため、十分加熱されずオーステナイト化しない。そのため、マルテンサイト変態する組織の密度が低く、硬化層深さは乾式時に比べて小さいと考えられる。



(a) Dry



(b) Wet

図1-22 焼入れ研削後の加工物表面の色調の変化  
( $v_a=60\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $n_g=2\text{ rev.}$ )

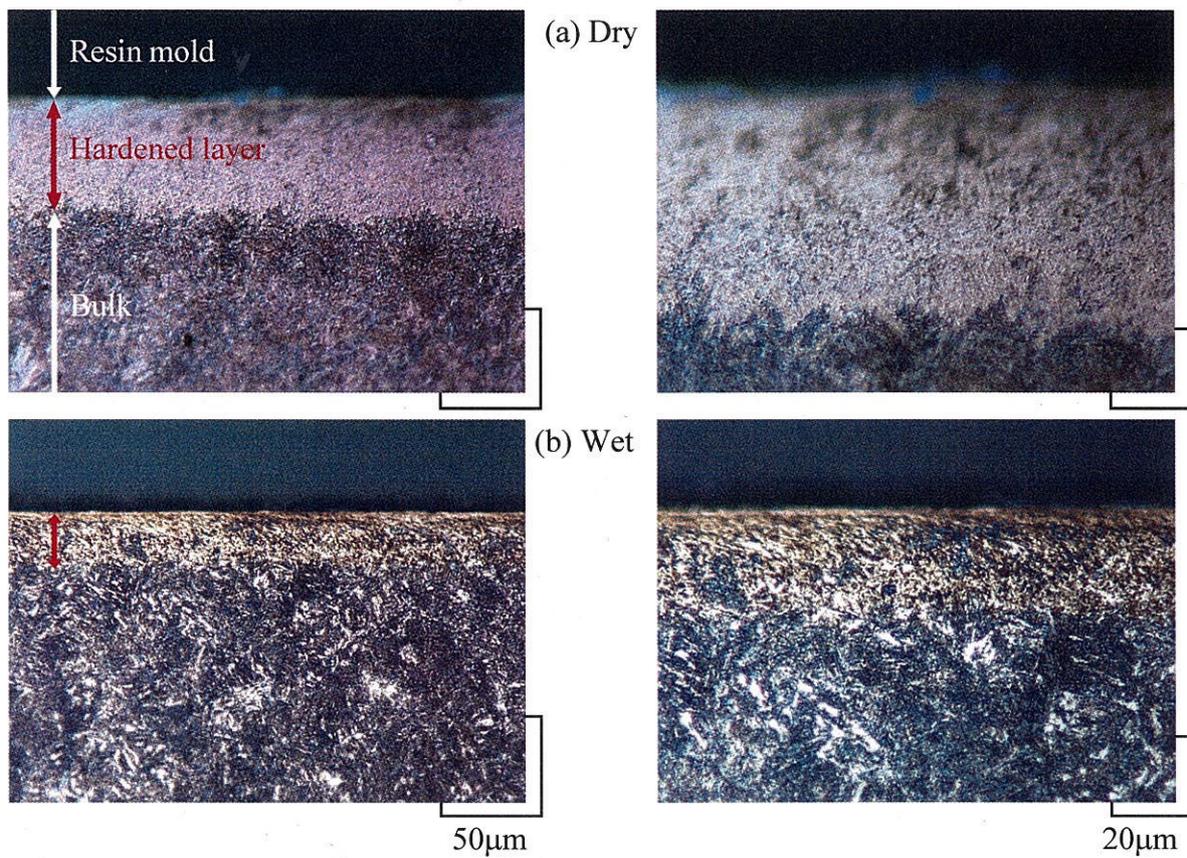


図 1-23 研削液が加工物組織に及ぼす影響( $v_a=60\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $n_g=2\text{ rev.}$ )

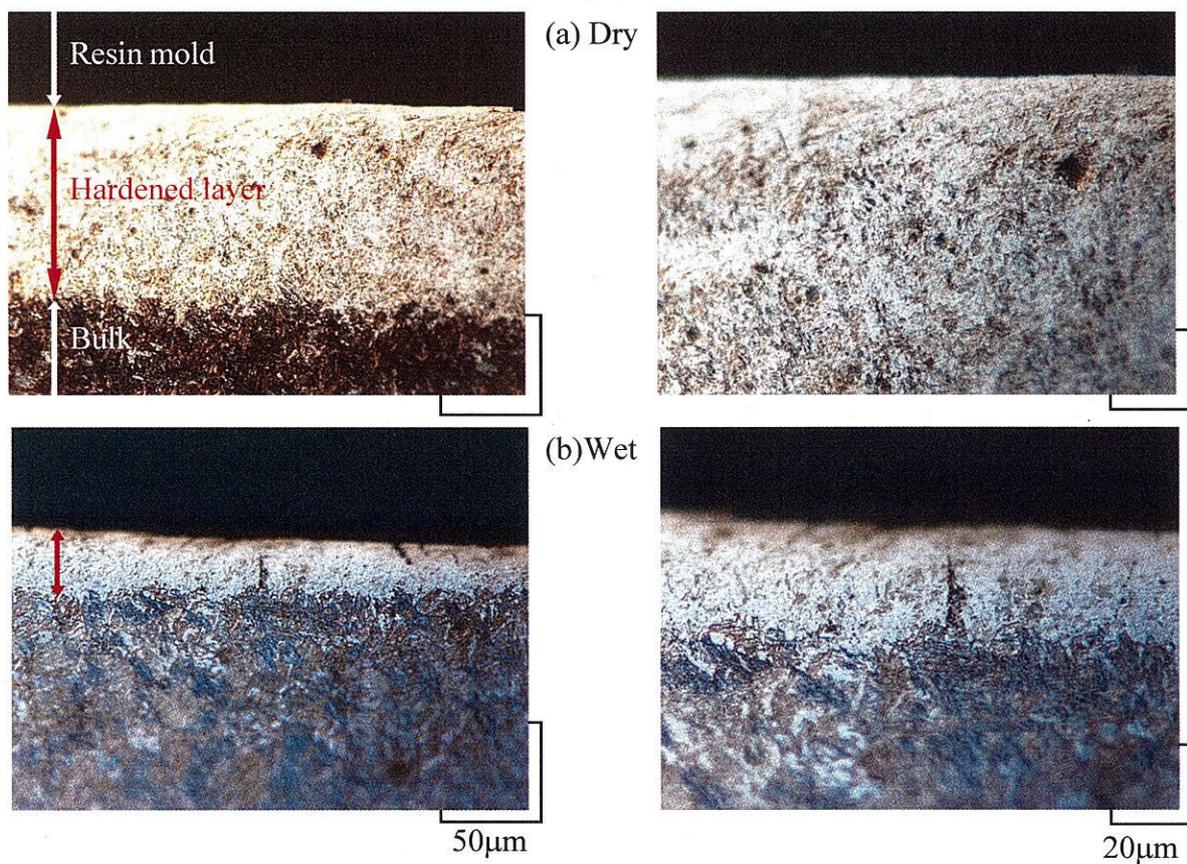


図 1-24 研削液が加工物組織に及ぼす影響( $v_a=80\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $n_g=2\text{ rev.}$ )

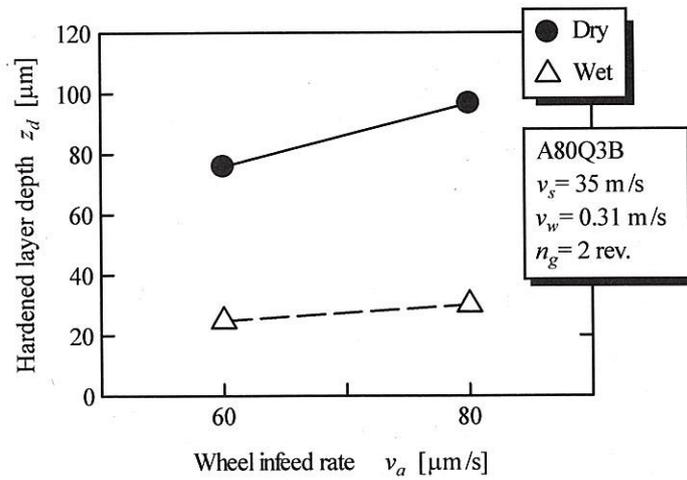


図1-25 研削液が硬化層深さに及ぼす影響

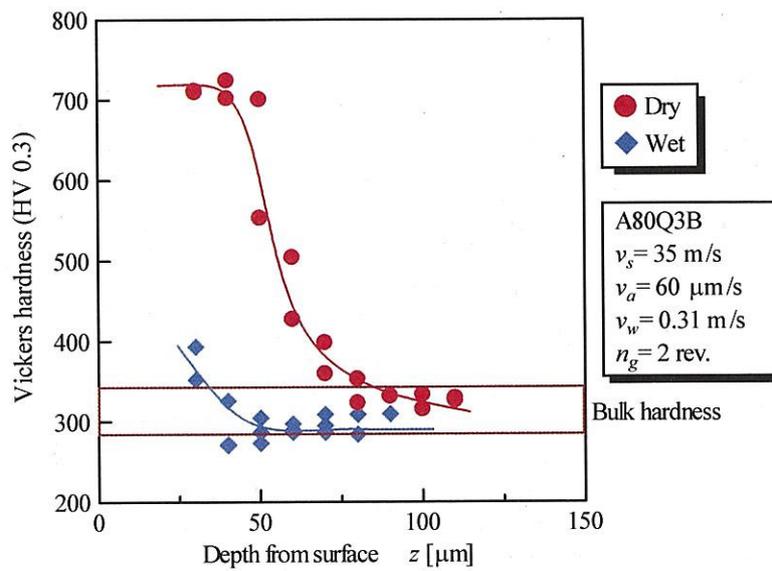


図1-26 研削液が研削面表層硬度分布に及ぼす影響( $v_a=60\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $n_g=2\text{ rev.}$ )

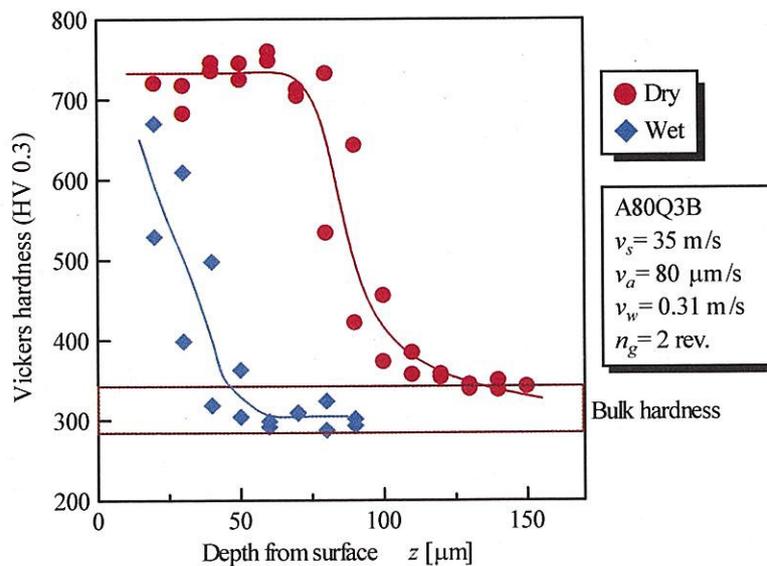


図1-27 研削液が研削面表層硬度分布に及ぼす影響( $v_a=80\mu\text{m/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $n_g=2\text{ rev.}$ )

### 1.2.6 まとめ

レジンボンド砥石を用いた円筒外周プランジ研削による研削焼入れにおいて、各研削条件が表面硬化加工結果に及ぼす影響について検討した。以下に本章で得られた実験結果をまとめる。

- (1) 研削焼入れにおいては、その過酷な条件から非常に大量の熱が発生し、まず工作物表面に黒い酸化膜が形成される。この酸化膜の存在によって、研削面表層に硬化層が形成されることが確認できる。
- (2) 砥石切込み速度 $v_a$ を増加すると、単位時間当たりの材料除去率が大きくなるため発熱量が増大するとともに、砥石と工作物との接触面積が大きくなるため、硬化層深さは増大する。 $v_a=100\mu\text{m/s}$ のとき、硬化層深さは最大で $z_d=159.0\mu\text{m}$ を得ることができた。
- (3) 砥石切込み速度 $v_a=40\mu\text{m/s}$ 、工作物周速度 $v_w=0.31\text{m/s}$ での乾式研削において、工作物回転回数を変化させたとき、 $n_g=2\text{ rev.}$ で $z_d=39.5\mu\text{m}$ 、 $n_g=3\text{ rev.}$ で $z_d=49.8\mu\text{m}$ 、 $n_g=5\text{ rev.}$ で $z_d=23.0\mu\text{m}$ 、 $n_g=6\text{ rev.}$ で $z_d=11.7\mu\text{m}$ と硬化層深さは一旦増大し、その後減少する。これは、工作物回転回数が多いと、流入する熱量は増加するものの、工作物内部まで熱が伝わり、そのため急冷されず硬化層深さは減少する。逆に、工作物回転回数が少ないと、接触時間が短いため発熱量が小さく、浅い場所しか加熱されないため硬化層深さは抑制される。これにより工作物には最適な加工回転回数があることが考えられる。
- (4) 工作物周速度を大きくすると、切削速度は増加するものの、砥石と工作物との接触時間が減少して加熱時間が短くなり、その影響が作用して硬化層深さは減少する。
- (5) 湿式研削では、加工加熱時にも研削液により接触領域が冷却されるため、マルテンサイト化する組織の密度が低くなり、硬化層深さは乾式時に比べて小さい。しかし、研削液の冷却作用は、切込み時の加熱の抑制だけでなく、研削焼入れ直後の急冷を促進することがあり、硬化層内で高硬度がみられた。 $v_a=60\mu\text{m/s}$ 、 $v_w=0.31\text{m/s}$ 、 $n_g=3\text{ rev.}$ での湿式研削で、最大硬度818HVが得られた。
- (6) 研削焼入れにおける工作物幅方向の硬化層は、研削面表層全域にわたり一様に広がっており、工作物両端部で特に硬化あるいは軟化することはない。すなわち、工作物半径方向の硬化層の分布によって、研削焼入れによる硬化層への評価を可能にさせる。

### 1.3 同時硬化加工法としての研削焼入れの有効性

#### 1.3.1 はじめに

第2節では研削焼入れの可能性とその最適条件について検討してきた。その結果、表面を安定的に硬化できることを示した。そこで、次の段階としてこの表面硬化加工法が実用的に有効であるかどうか問題になる。2節で述べたように、研削焼入れ後の工作物には、研削面に酸化膜が生じており、この状態ではこれを工業製品として用いることはできない。また、非常に過酷な条件での研削加工であるため、砥石への影響も大きいことが懸念される。

そこで本章では、研削焼入れ後の工作物にさらにスパークアウト研削を行うことにより、所定の真円度と仕上げ面粗さを有する製品として用いられる状態にできるかを検討した。また、同時硬化加工法として、研削焼入れ技術が実用的に有効であるかを砥石への影響からも検討し、熱処理工程と加工工程の生産ラインの集約を可能にし得ることを検討した。

#### 1.3.2 実験方法および条件

図1-28に本実験での実験装置を示す。本実験では円筒研削盤を用いてプランジ研削を行い、試料はCrMo鋼:SCM435とした。研削比の算出のため、実験前に砥石の径の測定、および試料の径と重量の測定を行う。図に示すように、試料正面から砥石に所定の切込み速度 $v_a$ で自動で切込みを与え、設定した切込み深さに到達した後、砥石台を急速後退させて研削を停止する。その後、最初に設定した切込み位置まで各種研削条件でスパークアウト研削を行う。表1-3に本実験での実験条件を示す。

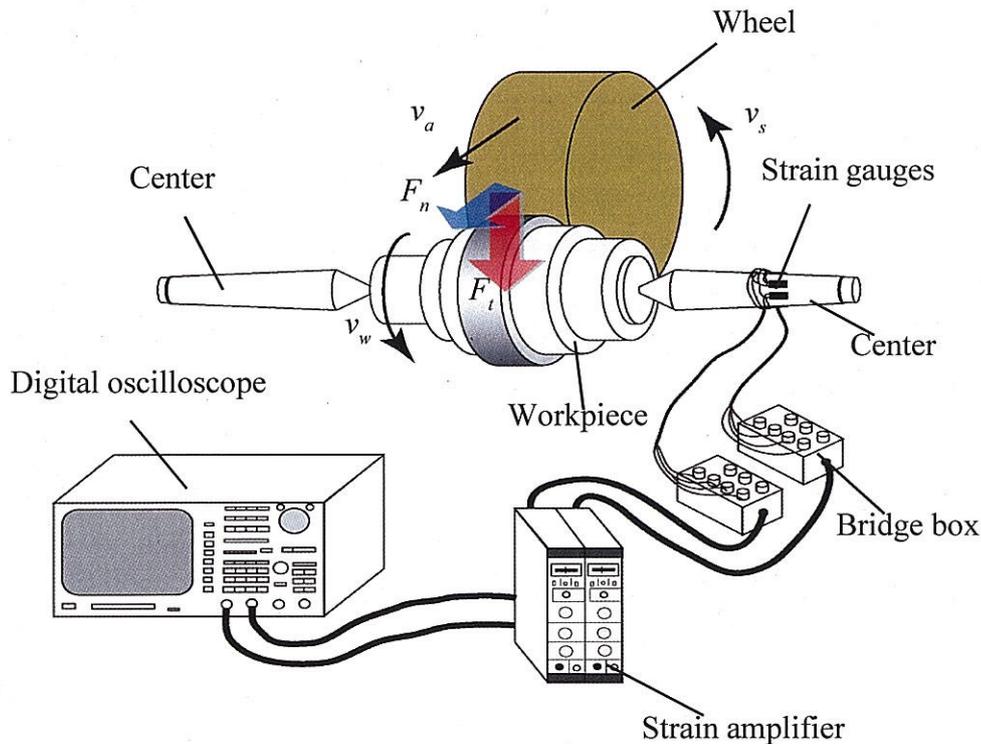


図1-28 実験装置

### 1.3.3 工作物のスパークアウト

研削加工では、砥石の切れ刃である砥粒がランダムに配置されており、研削過程で進行する砥石の摩耗や砥石の弾性変形、工作物の塑性変形や表面粗さのため、切り残しを生じる。このままでは精度の良い優れた仕上げ面を持つ工作物は得られない。そこで、砥石台の送り込みが終了した地点で砥石台を停止し、研削火花が認められなくなるまで研削を行うとこれまでの切り残しを削り取っていく。この作業を一般的にスパークアウト研削という。スパークアウトにより、切り残し量を完全になくすることはできないが、その砥石の仕様にあった良好な仕上げ面を得ることが可能となる。したがって、本研究におけるスパークアウトとは、焼入れ研削で形成した硬化層を極力残すように真円にすることである。

本実験における円筒プランジ研削では、目標となる切込み深さに到達した後、砥石台を急速後退させるため、工作物は真円とはならない。これを真円に近づけ、また酸化膜の除去と表面粗さの改善を目的としてスパークアウト研削を行った。

表1-4にスパークアウト研削での研削条件を示す。

#### (1) 工作物の真円度

真円度とは工作物外周部の幾何学的な円からの誤差の大きさをいい、円形部分を二つの同心の幾何学的円ではさんだとき、両円の間領域が最小となる場合の半径の差で表すものである。本実験における円筒プランジ研削では、図1-29に示すように、所定の切込み深さまで到達した直後、砥石台を急速後退させるため工作物はらせん形状となる。そのため、研削焼入れしたままの状態では真円とはほど遠いため、工業製品として用いることはできない。そこで、真円度測定機(タリセンタSI-1: Taylor Hobson製)を用いて、工作物の研削焼入れ後のスパークアウト研削の違いによる真円度を測定した。

まず、図1-30に焼入れ研削後とその後スパークアウト研削を行ったものの工作物概観を示す。(a)は研削焼入れ後、(b)はスパークアウト後のものである。(a)では研削面全面にわたって一様に黒い酸化膜がみられ、表層での硬化層が形成されることが推察される。(b)では、研削焼入れ後に一旦砥石台を後退させ、砥石切込み速度を小さくし、湿式にて研削焼入れ時の設定切込み深さまでスパークアウトを行った。図からわかるように、酸化膜は除去され、鏡面になっている。

図1-31に真円度の測定結果を示す。(a)は研削焼入れ後スパークアウトを行わなかったもので、(b)と(c)はそれぞれの研削条件で研削焼入れの終了地点 ( $a_e=160\mu\text{m}$ )までスパークアウトを行ったものである。(a)では研削焼入れ終了時にできた段差のようなものが生じており、その高さが真円度となっていて $66.6\mu\text{m}$ を数える。これに対し、スパークアウトを行った工作物をみると、(b)で $1.88\mu\text{m}$ 、(c)で $2.24\mu\text{m}$ となっており、ほぼ真円といえる。これによって、スパークアウトによって工作物は鏡面と同時に、真円の状態となるため、工業製品として用いることが可能となるといえよう。なお、スパークアウトの研削条件の違いによる真円度への影響はないものといえる。

表 1-3 実験条件

--

表 1-4 スパークアウト研削条件

--

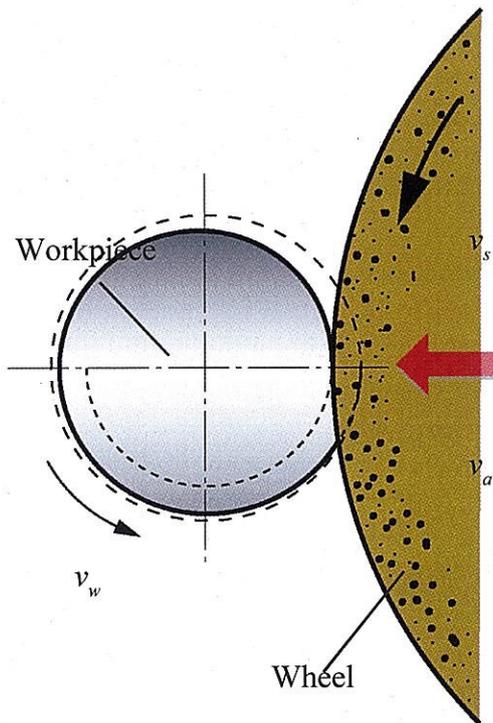
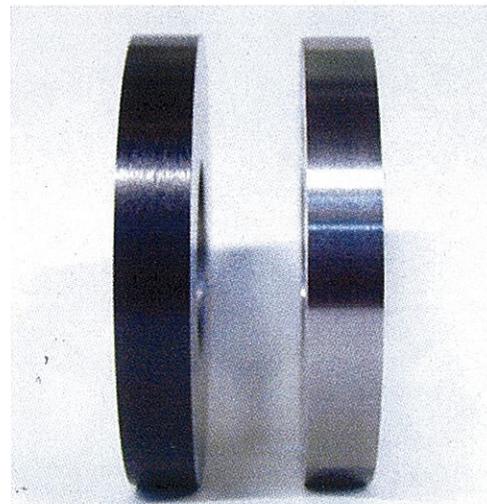
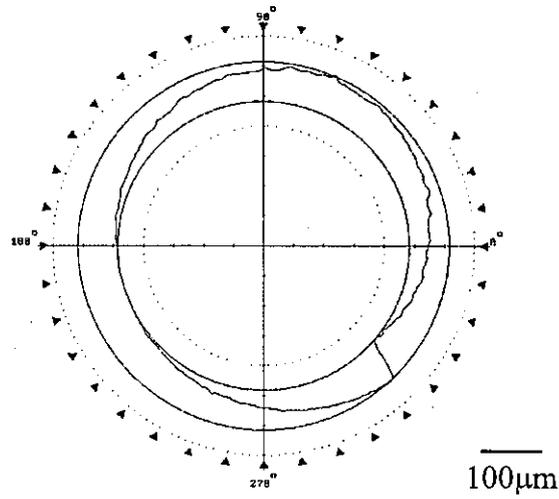


図 1-29 プランジ研削

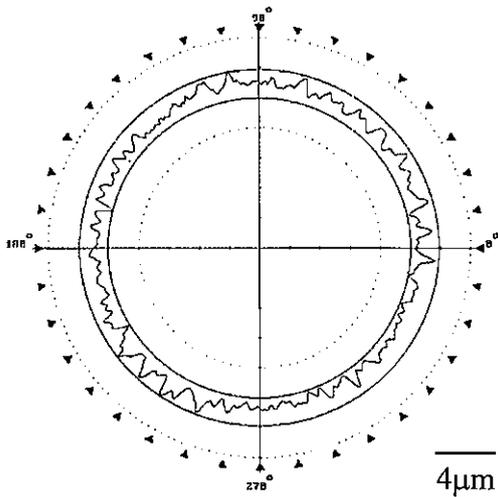


(a) After grind-hardening (b) After spark-out grinding

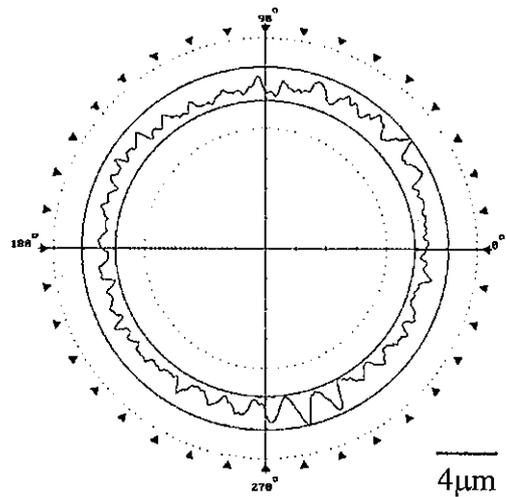
図 1-30 研削後の加工物表面



(a) After grind-hadening without sparkout



(b) After sparkout  
( $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Wet)



(c) After sparkout  
( $v_a=10\mu\text{m/s}$ , Wet)

図1-31 研削加工物の真円度プロファイル  
(Grinding condition :  $v_a=80\text{mm/s}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ ,  $a_c=160\text{mm}$ , dry)

## (2) 工作物の仕上げ面粗さ

真円度の計測と同様、研削面の表面粗さ測定を行った。粗さの測定には表面粗さ計（フォームタリサーフ S4 : Taylor Hobson 製）を用いて 3 次元および 2 次元粗さを測定した。測定箇所は、前節のスパークアウトをしない工作物(a)に関しては、研削終了地点にあられる境界線段差の 180° 対岸部分とし、スパークアウトを行った(b), (c)については工作物のキー穴上部の研削面とした。3 次元粗さ測定は、その部分内の 4×4mm の範囲とし、2 次元粗さはその範囲内での任意の箇所とした。

図 1-32 および図 1-33 に工作物の 3 次元粗さの測定結果を示す。(a)がスパークアウトなし、(b), (c)は各条件においてスパークアウトを行ったものである。図 1-32 では、研削面のプロファイルであり、工作物は曲面であるので、そのうねり成分を除き平面化したものを図 1-33 とし、粗さの分布とした。なお、(a)と(b), (c)とでは縦軸のスケールが異なっている。

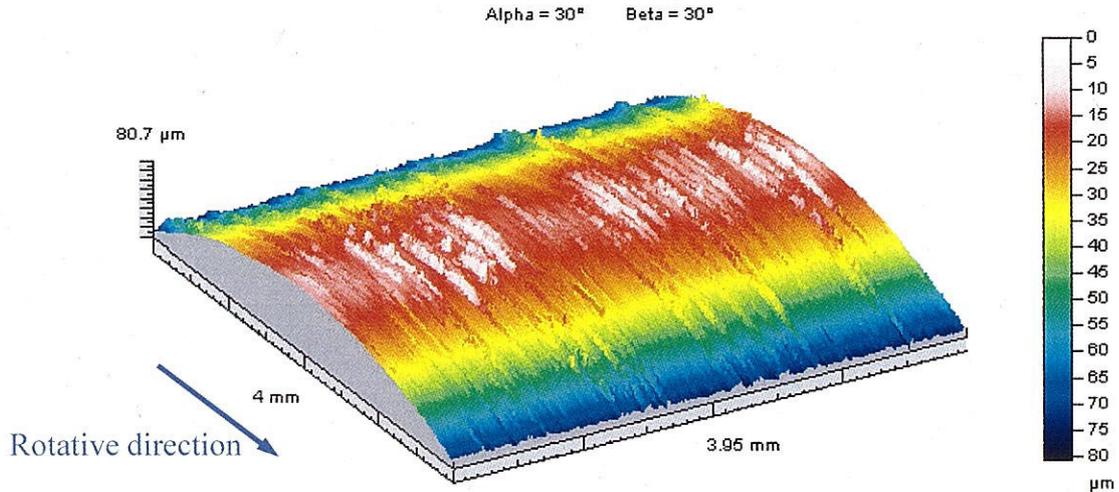
図は省略するが、(a)の状態では 2 次元粗さで  $R_a=1.58\mu\text{m}$ ,  $R_t=15.1\mu\text{m}$  と大きなものとなっている。これに対し、スパークアウトを行った(b), (c)についてはスパークアウトの条件は異なるものの、2 次元粗さにおいて(b)では  $R_a=0.515\mu\text{m}$ ,  $R_t=5.86\mu\text{m}$ , (c)では  $R_a=0.736\mu\text{m}$ ,  $R_t=5.17\mu\text{m}$  とほぼ等しい粗さの値を示しており、(a)に比べて非常に小さくなっている。これによって、スパークアウトを行うことにより、研削表面の酸化膜を除去し、仕上げ面は良好となり、工業製品として使用できる状態を作り上げることが可能であることがわかる。

## (3) スパークアウトによる焼入れ結果への影響

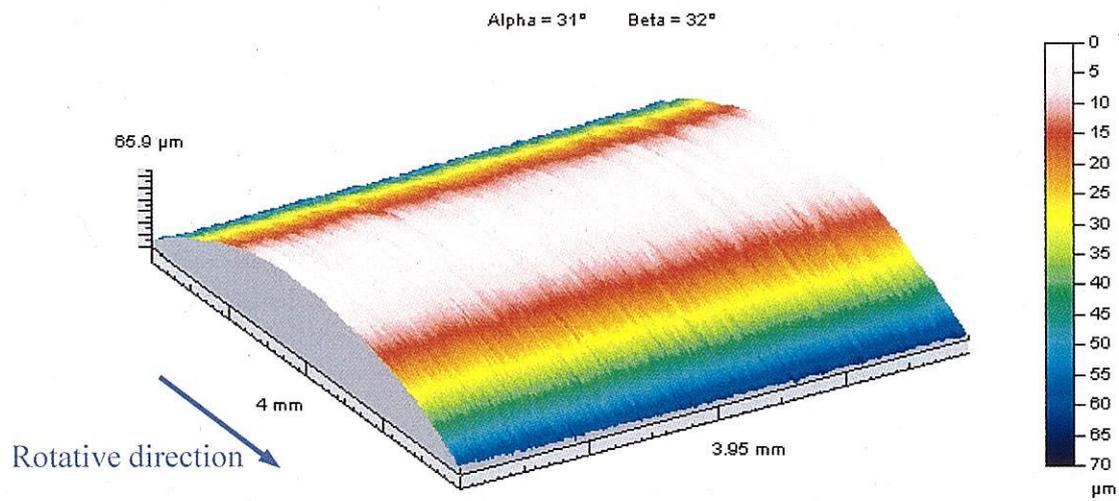
スパークアウト研削により、真円度および表面粗さが改善され、見かけ上工業製品として有用なものとなることがわかった。本節では、スパークアウト後に硬化層がどのようなになるかを検討している。

図 1-34 は研削焼入れ加工を行った後に、各種研削条件でのスパークアウト研削を行った試料の組織写真を示す。(1)は研削焼入れ直後、(2)は研削焼入れで砥石切込みが終わった後工作物 1 回転分のスパークアウトを、(3)は(2)の後にそのまま火花が治まるまでスパークアウトを行ったものである。ゆえにこれらは乾式でのスパークアウト研削である。これに対し、(4)は研削焼入れ後砥石台を急速後退させ、 $v_a=80\mu\text{m/s}$ のまま湿式でスパークアウト研削を、(5)では  $v_a=10\mu\text{m/s}$  で湿式スパークアウト研削を行った。また、図 1-35 にそれぞれの番号の硬度分布を示す。

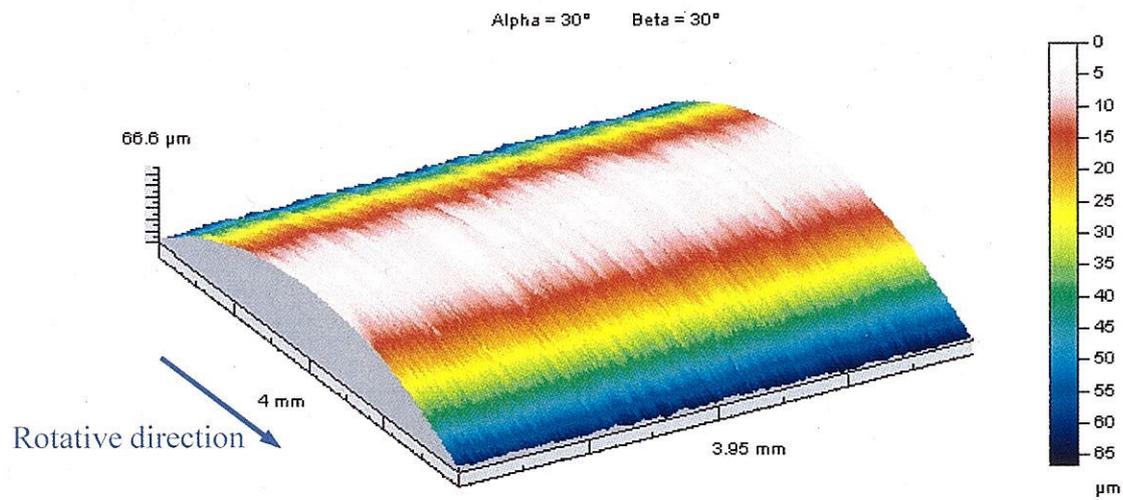
図 1-36 に  $v_a=100\mu\text{m/s}$ ,  $a_e=400\mu\text{m}$ , 乾式研削での研削焼入れ後、スパークアウトを行った時の研削面近傍 2 箇所での硬度分布である。(a)では硬度が研削面近傍でも母材と変わらず、(b)では硬度が母材に比べて上昇している。ただし、硬化層が薄い場合硬化層内でビッカース圧痕が形成されないため 700HV 以上を越える値は検出されなかったと思われる。したがって、 $v_a=100\mu\text{m/s}$ ,  $a_e=400\mu\text{m}$ , 乾式研削での研削焼入れ実験により硬化層深さは非常に大きな値も示したが、工作物の真円度のためにスパークアウトで再び硬化層を削り取ってしまったと考えられる。



(a) After grind-hadening without sparkout

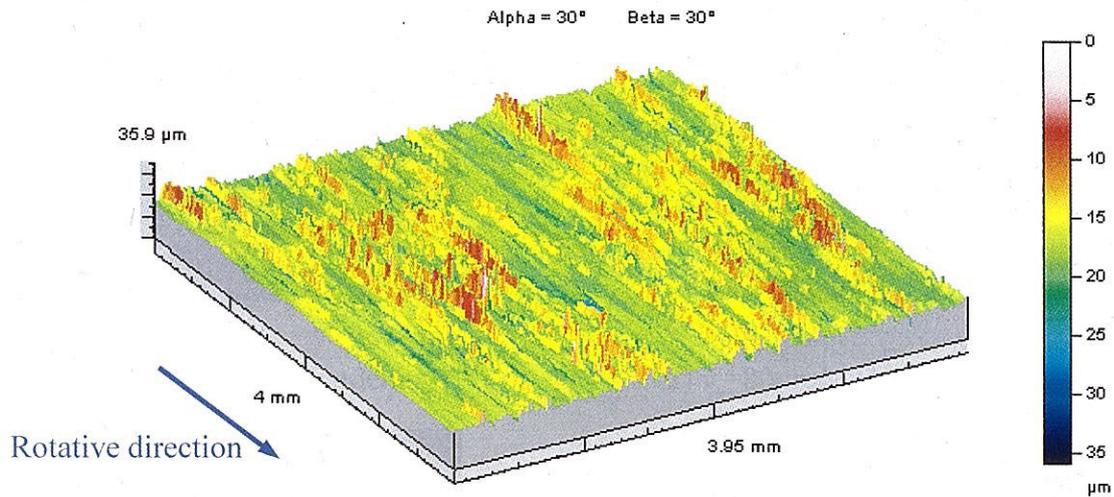


(b) After sparkout ( $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Wet)

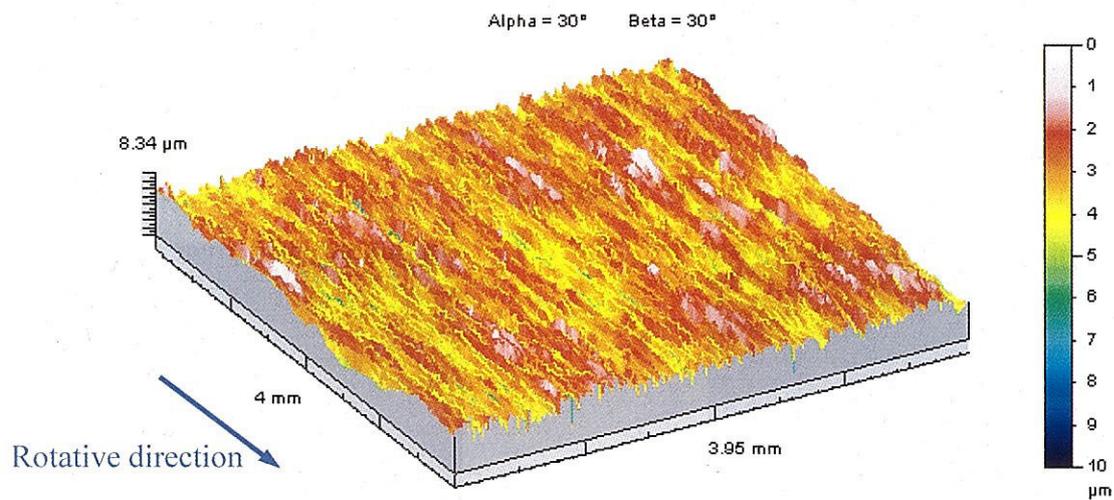


(c) After sparkout ( $v_a=10\mu\text{m/s}$ , Wet)

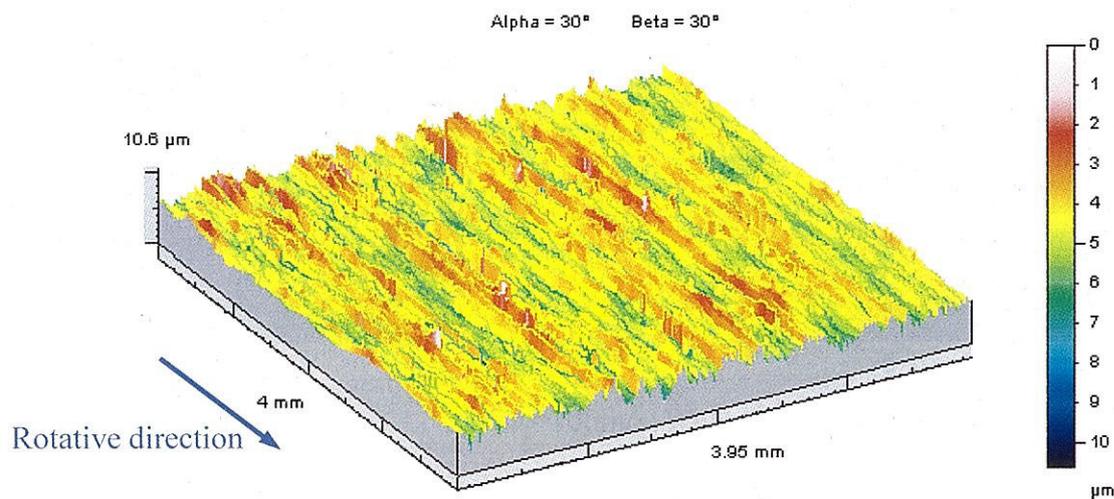
図1-32 工作物表面の3次元プロファイル



(a) After grind-hadening without sparkout



(b) After sparkout ( $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Wet)



(c) After sparkout ( $v_a=10\mu\text{m/s}$ , Wet)

図1-33 工作物表面粗さ成分の3次元プロファイル

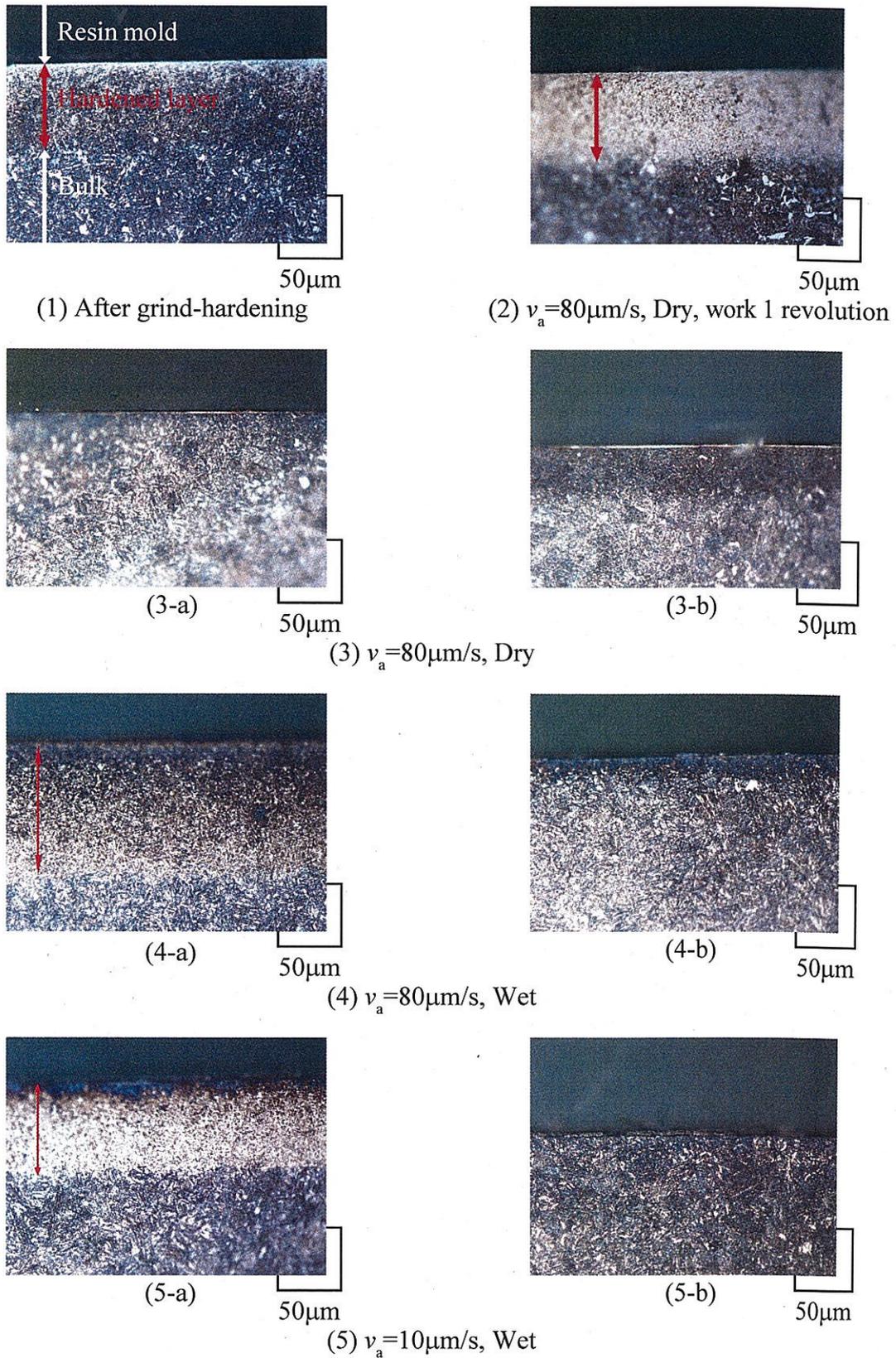
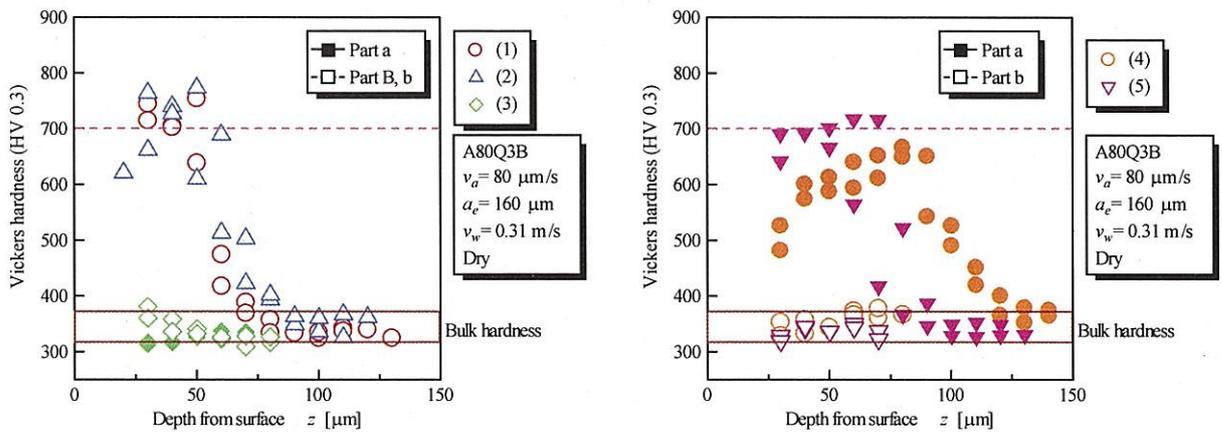


図1-34 各種スパークアウト研削後の加工物組織  
 ( $v_a=80\mu\text{m/s}$ ,  $a_e=160\mu\text{m}$ ,  $v_w=0.31\text{m/s}$ , Dry)



- (1) After grind-hardening
- (2)  $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Dry, work 1 revolution
- (3)  $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Dry

- (4)  $v_a=80\mu\text{m/s}$ , Wet
- (5)  $v_a=10\mu\text{m/s}$ , Wet

図1-35 スパークアウトが工作物硬度分布に及ぼ影響

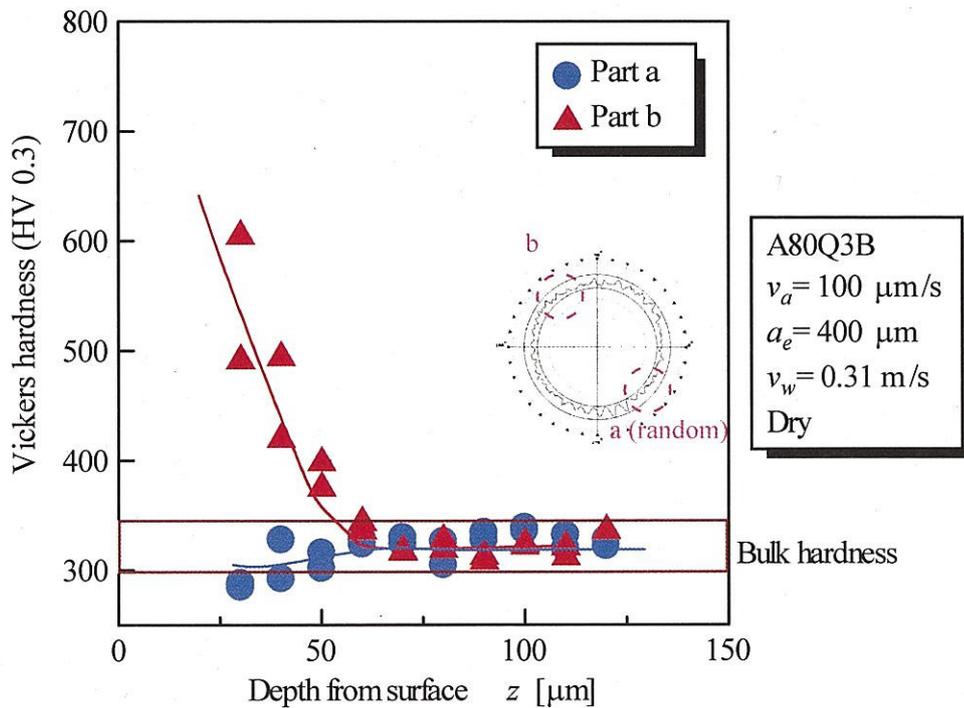


図1-36 スパークアウト後の研削面表層の硬度分布

### 1.3.4 まとめ

第3節では、研削焼入れ技術が同時硬化加工法として実用的に有効的であるかを工作物、および砥石の様々な面から検討した。以下に本章で得られた実験結果を述べる。

- (1) 研削焼入れ後にスパークアウト研削を行うことで、工作物表面から酸化膜を除去することができ、鏡面となる。その際、真円度は改善され、焼入れ研削直後では $67\mu\text{m}$ であったものがスパークアウト研削を行うことで $2\mu\text{m}$ 程度となり、ほぼ真円の状態といえる。また、仕上げ面粗さも焼入れ研削後に $R_a=1.58\mu\text{m}$ ,  $R_t=15.1\mu\text{m}$ であったものがスパークアウト研削によって $R_a=0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ ,  $R_t=5.1\sim 5.8\mu\text{m}$ 程度と良好になり、工業製品として使用できる状態を作り上げることが可能であるといえる。
- (2) 乾式でのスパークアウト研削は、長時間にわたって熱流束が工作物内部にまで流入するため、急冷がされず硬化層はみられない。これは工作物表面近傍で焼入れがなされず焼なましが起こったためと考えられる。
- (3) 湿式でのスパークアウト研削は、工作物の真円度が改善されるが、その際に生じていた硬化層が削り取られてしまう。また、スパークアウト時の研削条件が厳しいと、その際に発生した研削熱によって硬化層が焼戻しされる場合がある。それゆえに、スパークアウト時には熱流入が極力少なく、研削焼入れ時の真円度以上の深い硬化層が必要とされる。
- (4) 研削焼入れ後の砥石は、その作業面に切りくずの目づまりが多くみられ、砥粒がなく脱落痕が確認できる。作業面の色の変化は、工作物酸化膜の切りくずの目づまりとレジンボンドの熱影響による変化である。
- (5) アルミダイキャストへの転写法による砥石損耗量の測定によって、その段差が生じているときには砥石へのダメージが大きいことがわかる。このとき、工作物表面にはびびりマークが生じており、硬化層は安定したものが得られない。すなわち、砥石損耗量が測定可能なときには、研削焼入れは有効ではないといえる。

## 1.4 結 言

- (1) 研削焼入れにおいては、その過酷な条件から非常に大量の熱が発生し、まず工作物表面に黒い酸化膜が形成される。この酸化膜の存在によって、研削面表層に硬化層が形成されることが確認できる。
- (2) 砥石切込み速度  $v_a$  を増加すると、単位時間当たりの材料除去率が大きくなるため発熱量が増大するとともに、砥石と工作物との接触面積が大きくなるため、硬化層深さは増大する。  $v_a=100\mu\text{m/s}$  のとき、硬化層深さは最大で  $z_d=159.0\mu\text{m}$  を得ることができた。
- (3) 砥石切込み速度  $v_a=40\mu\text{m/s}$ 、工作物周速度  $v_w=0.31\text{m/s}$  での乾式研削において、工作物回転回数を変化させたとき、  $n_g=2 \text{ rev.}$  で  $z_d=39.5\mu\text{m}$ 、  $n_g=3 \text{ rev.}$  で  $z_d=49.8\mu\text{m}$ 、  $n_g=5 \text{ rev.}$  で  $z_d=23.0\mu\text{m}$ 、  $n_g=6 \text{ rev.}$  で  $z_d=11.7\mu\text{m}$  と硬化層深さは一旦増大し、その後減少する。これは、工作物回転回数が多いと、流入する熱量は増加するものの、工作物内部まで熱が伝わり、そのため急冷されず硬化層深さは減少する。逆に、工作物回転回数が少ないと、接触時間が短いため発熱量が小さく、浅い場所しか加熱されないため硬化層深さは抑制される。これにより工作物には最適な加工回転回数があることが考えられる。
- (4) 工作物周速度を大きくすると、切削速度は増加するものの、砥石と工作物との接触時間が減少して加熱時間が短くなり、その影響が作用して硬化層深さは減少する。
- (5) 湿式研削では、加工加熱時にも研削液により接触領域が冷却されるため、マルテンサイト化する組織の密度が低くなり、硬化層深さは乾式時に比べて小さい。しかし、研削液の冷却作用は、切込み時の加熱の抑制だけでなく、研削焼入れ直後の急冷を促進することがあり、硬化層内で高硬度がみられた。  $v_a=60\mu\text{m/s}$ 、  $v_w=0.31\text{m/s}$ 、  $n_g=3 \text{ rev.}$  での湿式研削で、最大硬度 818HV が得られた。
- (6) 研削焼入れにおける工作物幅方向の硬化層は、研削面表層全域にわたり一様に広がっており、工作物両端部で特に硬化あるいは軟化することはない。すなわち、工作物半径方向の硬化層の分布によって、研削焼入れによる硬化層への評価を可能にさせる。
- (7) 砥石切込み速度の増加により、研削抵抗および硬化層深さは増加した。これは単位時間当たりの材料除去率の増加、および砥石と工作物の接触面積の増加によるもので、抵抗とともに研削熱が増え、工作物への入熱量の増大によって硬化層深さが大きくなったといえる。工作物流入割合  $r_w=80\%$  であるとして、  $v_a=40\mu\text{m/}$

s のとき  $F_{t,ave}=66.0\text{N}$  で、 $q_w=4625\text{W/mm}^2$ 、 $v_a=100\mu\text{m/s}$  のとき  $F_{t,ave}=235.7\text{N}$  で  $q_w=10441\text{W/mm}^2$  であった。これは他の表面熱処理と比べてもそのパワー密度において有効であるといえる。

- (8) 工作物回転回数は研削時間に比例する。接線分力とともに硬化層深さは、回転回数の増大に伴い、一旦上昇し、その後下降する。研削熱は研削時間にも比例するため、発生熱としては分力の減少以上に時間によって増加する。研削時間が長くなることで、流入熱量は大きくなるが、熱流束が工作物内部深くまで流入したために、冷却速度が遅くなり硬化層深さが小さくなった。接線研削抵抗は研削熱への影響は非常に大きいものの、研削時間もまた発生熱に影響を及ぼし、より深い硬化層を得るには、研削後の冷却速度の影響も考えなければならない。
- (9) 工作物周速度が大きくなると、切削速度は増加するが、研削時間は短くなり、また工作物1周あたりの砥石切込み量は小さくなる。そのため接触弧長さは小さくなり、研削抵抗は減少する。研削時間の減少はすなわち熱源である砥石と工作物との接触時間が短くなり、工作物内部まで十分な熱流束が伝わらないので、硬化層深さも得られない。
- (10) 湿式研削の場合、乾式研削時に比べて、研削液の持つ潤滑作用のため接線分力は減少し、また研削液の冷却作用のため工作物への熱流入が抑えられるために十分なオーステナイト化がなされず、硬化層の拡がりも抑制される。
- (11) より深い硬化層を得るには、発生熱量の増加はもちろんであるが、研削後の急冷も考慮すべきである。発生熱を大きくするためには、研削抵抗および研削時間の増加が影響する。すなわち、砥石切込み速度は大きく、工作物回転回数は少なすぎず多すぎず、周速度は遅いが研削時間は短くして、乾式研削で行うことがよいといえる。
- (12) 研削焼入れ後にスパークアウト研削を行うことで、工作物表面から酸化膜を除去することができ、鏡面となる。その際、真円度は改善され、焼入れ研削直後では  $67\mu\text{m}$  であったものがスパークアウト研削を行うことで  $2\mu\text{m}$  程度となり、ほぼ真円の状態といえる。また、仕上げ面粗さも焼入れ研削後に  $R_a=1.58\mu\text{m}$ 、 $R_t=15.1\mu\text{m}$  であったものがスパークアウト研削によって  $R_a=0.5\sim 0.7\mu\text{m}$ 、 $R_t=5.1\sim 5.8\mu\text{m}$  程度と良好になり、工業製品として使用できる状態を作り上げることが可能であるといえる。
- (13) 乾式でのスパークアウト研削は、長時間にわたって熱流束が工作物内部にまで流入するため、急冷がされず硬化層はみられない。これは工作物表面近傍で焼入れがなされず焼なましが起こったためと考えられる。

- (14) 湿式でのスパークアウト研削は、工作物の真円度が改善されるが、その際に生じていた硬化層が削り取られてしまう。また、スパークアウト時の研削条件が厳しいと、その際に発生した研削熱によって硬化層が焼戻しされる場合がある。それゆえに、スパークアウト時には熱流入が極力少なく、研削焼入れ時の真円度以上の深い硬化層が必要とされる。
- (15) 研削焼入れ後の砥石は、その作業面に切りくずの目づまりが多くみられ、砥粒がなく脱落痕が確認できる。作業面の色の変化は、工作物酸化膜の切りくずの目づまりとレジンボンドの熱影響による変化である。
- (16) アルミダイキャストへの転写法による砥石損耗量の測定によって、その段差が生じているときには砥石へのダメージが大きいことがわかる。このとき、工作物表面にはびびりマークが生じており、硬化層は安定したものが得られない。すなわち、砥石損耗量が測定可能なときには、研削焼入れは有効ではないといえる。

## 第2章 Nd:YAGレーザーによるレーザーコンディショニング ～メタルダイヤモンド砥石のサーマルドレッシング～

### 2.1 緒言

超砥粒砥石と称されるダイヤモンド砥石やCBN砥石は、従来の砥石と比較して耐摩耗性・耐熱性に優れているため、硬脆材料や焼入れ鋼の研削に使用される。しかしながら、その特性を有効に利用するためには、ツルージングやドレッシングなどのコンディショニングを周期的に行い、砥石作業面の切れ味を維持しなければならない。そしてこの作業には多大な時間と労力を要し、生産能率上問題となっている。

そこで本研究では、レーザーを用いた超砥粒砥石のサーマルコンディショニング法を提案する。本報では、その第1段階としてNd:YAGレーザーを用いたメタルボンドダイヤモンド砥石のドレッシングについて検討している。レーザードレッシングとは、レーザー照射により砥石表面のボンドを熔融・飛散させることで砥粒を突き出させ、砥石の切れ味を生成することである。

### 2.2 超砥粒砥石のコンディショニング

#### 2.2.1 はじめに

超砥粒砥石と称されるcBN（立方晶窒化硼素）砥石やダイヤモンド砥石は、焼入れ鋼や高硬度ぜい性材料の高品位・高能率加工に優れた特性を発揮する。ところで、これら超砥粒砥石として一般的なレジンボンドやメタルボンドなどの無気孔型砥石は、砥石の振れ回りを除いて真円にするツルージングと砥石作業面の結合剤を取り除いて適度に砥粒を突き出させるドレッシングを行った後、“砥石”として使用される。しかしながら、超砥粒砥石はその高硬度・耐摩耗性のためツルージングおよびドレッシングが容易ではなく、生産能率上問題が多い。現在、超砥粒砥石のツルージングはGC砥石を用いたブレーキツルアやダイヤモンドツルア、ドレッシングはWAスティックや遊離砥粒を用いた機械的な方法の他、放電加工や電解加工を利用した非機械的方法などが行われている。しかし、これらの方法は多大な時間と労力を要するのみならず、ドレッサ・ツルアの消耗も激しく、かつ研削液の混濁なども無視できない。

このような背景から、レーザービームを砥石作業面に照射することによって、熱的あるいは熱化学的に砥粒や結合剤を除去・成形・再調整する手法が筆者らを含め、多くの研究者によって試みられている。このようなレーザーを用いた手法は非接触加工のため、砥石に機械的な負荷を与えず、極短時間に砥石作業面を調整できることが期待されており、生産の高精度化・高能率化を図る上でその意義は大きい。

本報では、筆者らが行ったメタルボンドダイヤモンド砥石のレーザードレッシングを取り上げ、結合剤の除去機構や懸念される砥粒や結合剤への熱損傷について種々の面から検証するとともに、ドレッシングされた砥石の研削性能を従来の方法と比較しながら評価したので報告する。

### 2.2.2 レーザドレッシングの原理

図2-1にレーザドレッシングの原理を示す。レーザの照射によって結合剤を溶融あるいは気化させることによって除去する。このとき、結合剤を過度に除去することなく、図のように砥粒が適度に突き出た状態にしなければならない。レーザを結合剤のみに選択的に照射することは不可能であるから、当然ながら砥粒にもレーザは照射される。したがって、ダイヤモンド砥粒に黒鉛化などの熱損傷を与えることなく、結合剤のみを除去することがポイントになる。本研究では、実用化の観点から、レーザ光を光ファイバによって伝送できるなど取り扱いが比較的容易なNd:YAGレーザ(パルス発振)を用いている。

表2-1にレーザドレッシングと従来の機械的ドレッシングの特性を比較して示す。実用化には解決すべき問題はあるものの、ドレッシング時間が短いこと、ドレッサの消耗がないこと、インプロセスでのドレッシングが可能など多くの特長をもっている。また、レーザのエネルギー密度、スポット径などの照射条件を変えることによって、1台のレーザで仕様の異なる砥石にも適用できる。さらに、ドレッシングだけでなく、ツルージングや目づまりを取り除くクリーニングへの適用など、総合的な砥石作業面の創成・調整が可能になる。

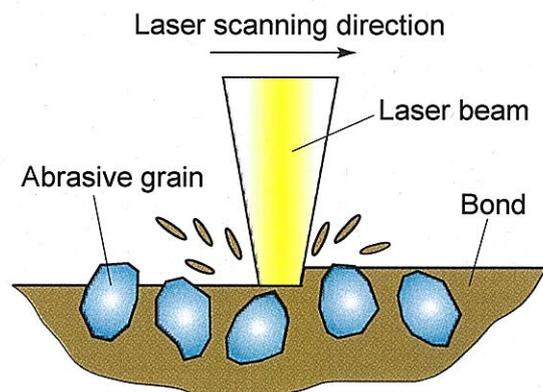


図2-1 レーザドレッシングの原理

表2-1 レーザドレッシングと汎用ドレッシングの比較

	汎用ドレッシング	レーザドレッシング
ドレッシング時間	長	短
ドレッサ摩耗	大	無
研削液の混濁	有	無
ドレッシング抵抗	有	無
熱損傷	小	可制御
インプロセスドレッシング	難	容易

メタルボンド砥石にレーザを照射した時の結合剤の除去機構を知るため、まずブロック砥石を用いて照射実験を行った。その結果、砥石表面にレーザを照射した場合、結合剤は加熱され溶融するが急激に冷却され、中に気泡を持つ再凝固層が砥石表面に生成されてしまう。そこで、レーザ照射と同時にエアジェットを吹きつけることにより溶融層の除去を試みた。

図2-2はエアを吹きつけながらレーザの単発照射痕が隣接するように断続的にレーザを照射したダイヤモンド砥石片表面の3Dプロファイルである。一部溶融層が残っている部分もあるが、全体的に除去深さがおよそ30 $\mu\text{m}$ になっており、エアを吹きつけることにより溶融層が再凝固する前に効果的に除去できたことがわかる。また、詳細な写真観察により黒鉛化など砥粒への損傷はほとんど生じていない。これは、エアを吹きつけることにより砥粒への熱損傷を抑える効果があったものと推察される。

## 2.2.4 メタルボンドダイヤモンド砥石のレーザドレッシング

### (1) ドレッシング方法

ブロンズボンドダイヤモンドホイールを用いてレーザドレッシング実験を行った。図2-3(a)に示すように、回転する砥石にレーザを砥石表面に垂直に照射しながら、エアをレーザスポット点に45°の方向から供給している。図にみるように、単一パルスのレーザによって帯状の照射痕が生成されるが、その長さ $l$ および幅 $w$ はレーザパワー $P$ 、砥石回転数 $N$ に依存して変化する。この単一パルス痕の集積が砥石全面を覆うようにドレッシング条件を設定している(図2-3(b)参照)。表2-2に主たるドレッシング条件を示す。なお、ドレッシング実験はツルーイングによって砥石表面を平坦にした後に行った。

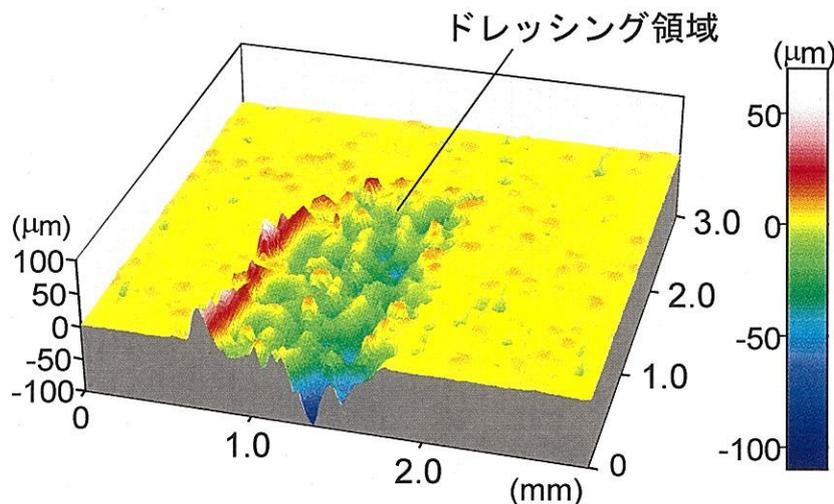


図2-2 局部的にドレッシングしたブロック砥石表面

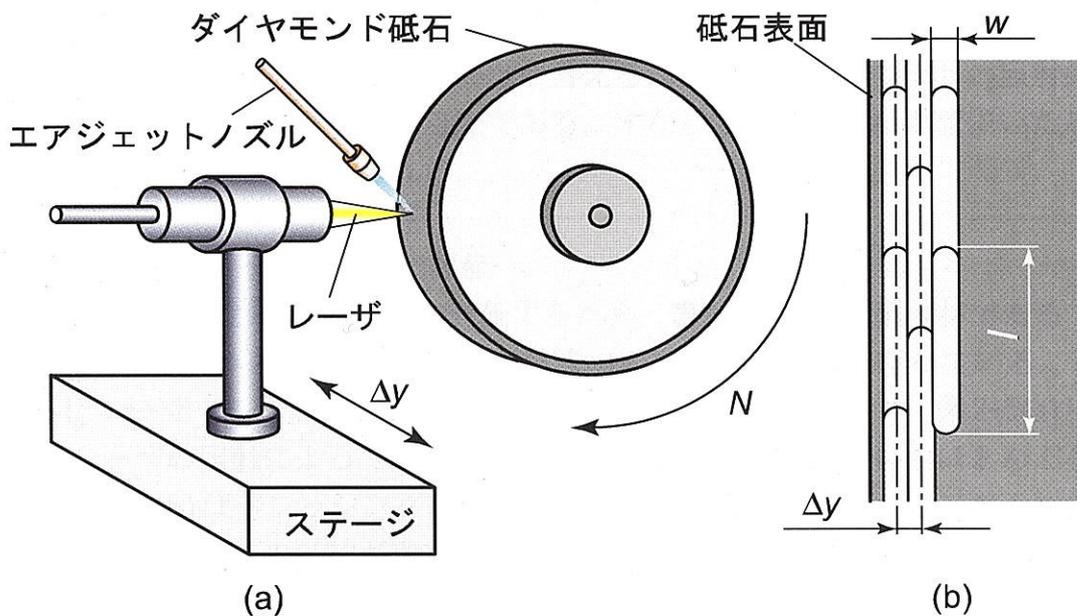


図2-3 レーザドレッシング装置

表2-2 ドレッシング条件

研削砥石	SD120N75M (φ200x10)		
Nd:YAGレーザー			
波長	$\lambda$	$\mu\text{m}$	1.064
ピークパワー	$P_p$	W	469.3
パルス幅	$\tau$	ms	5.0
周波数	$f$	pps	2.5
スポット径	$2a$	mm	1.26
ドレッシングパラメータ			
砥石回転数	$N$	$\text{min}^{-1}$	325
レーザーパルス数	$n$	$\text{rev}^{-1}$	48
半径方向レーザー走査間隔	$\Delta y$	mm	0.15
エア圧力	$p_a$	MPa	0.3

## (2) ドレッシング結果

図2-4にレーザドレッシング後の砥石表面の3次元プロファイルを示す。再凝固した結合剤の一部が砥石表面に付着しているが、エアジェットを吹き付けながらレーザを照射することによって、ほぼ全面にわたり結合剤が除去され、砥粒がボンド面より突出している。平均粒径がおよそ100 $\mu\text{m}$ の砥石(#120)に対し、平均砥粒突出し量29 $\mu\text{m}$ を得ており、適切にドレッシングされたと言える。当然ながら、レーザの照射条件に応じて、結合剤の除去深さを制御可能である。すなわち、粗粒から微粒にいたる砥石のドレッシングが可能と考えられる。

### 2.2.5 研削実験による砥石の性能評価

ドレッシングされた砥石の性能を評価するため、表2-3の条件で難削材であるファインセラミックス(HP-SiC)の定切り込み湿式平面プランジ研削を行っている。

図2-5にレーザドレッシング後と研削後の砥石表面の状態を示す。図2-5(a)にみるように、レーザの照射によって砥粒の脱落や黒鉛化などの熱的損傷もほとんど生じていない。図2-5(b)はドレッシング後に100パスのプランジ研削した砥石表面状態であるが、ほとんどすべての砥粒が残存しており、結合剤がレーザによってダメージを受け、その砥粒把持力の低下がないことも確認された。

図2-6にレーザドレッシングと一般的なWAホイールを用いたロータリドレッシングによって調整された砥石について、研削パス数にともなう研削抵抗の変化を示す。図にみるように、法線方向の抵抗は従来の方法と比べて若干低い値になったが、接線方向の抵抗は単位幅研削量 $V_w'=50\text{mm}^3/\text{mm}$ まで同程度の値が得られている。この結果から、レーザドレッシングされた砥石作業面に熱的な損傷はなく、従来のドレッシング方法と遜色のない研削性能をもつことがわかる。

### 2.2.6 まとめ

Nd:YAGレーザを用いてメタルボンドダイヤモンド砥石のレーザドレッシング法について報告した。実験に供したレーザの性能の限界もあり、現段階では適用できる砥石に制限があるが、十分実用化が期待できると考えている。レーザの性能が飛躍的に向上している昨今、さらに適用範囲が広がるものと思われる。今後はレーザドレッシングだけでなく、砥粒先端形状を揃えるツルーイング、目づまりを取り除くクリーニングなどを含めた総合的なレーザコンディショニングの構築に向けた研究を行う予定である。

また、本手法はインプロセスでドレッシングを行うことが可能なため、第1章で報告した研削焼入れに対しても適用することができると考えている。この場合、研削条件が比較的過酷なため、砥石作業面が変化しやすく、常に一定の切れ味を保つためにもレーザの間欠的な照射が有効と思われる。今後、レーザドレッシングを研削焼入れにも適用したいと考えている。

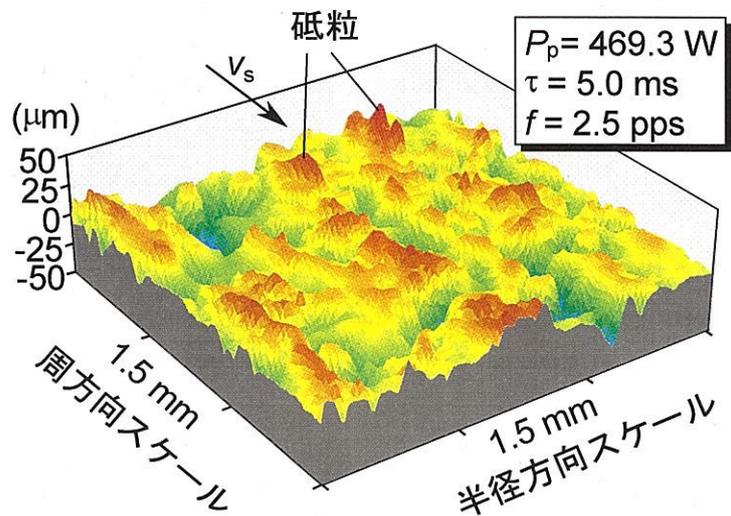


図2-4 レーザドレッシングされた砥石表面の3D形状

表2-3 研削条件

研削砥石	SD120N75M (φ200x10)		
工作物	HP-SiC		
長さ	$l_w$	mm	50
幅	$w_w$	mm	8
研削条件			
砥石周速度	$v_s$	m/s	25
テーブル速度	$v_w$	m/min	10
切り込み	$a$	μm	10
研削液	ソリュースブル(50倍希釈)		

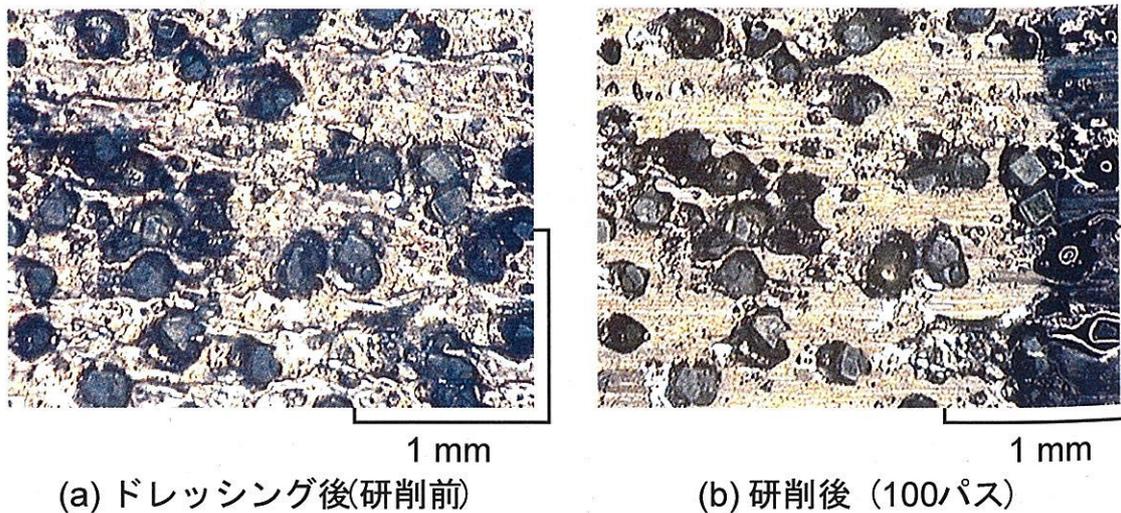


図2-5 研削にともなう砥石作業面の変化

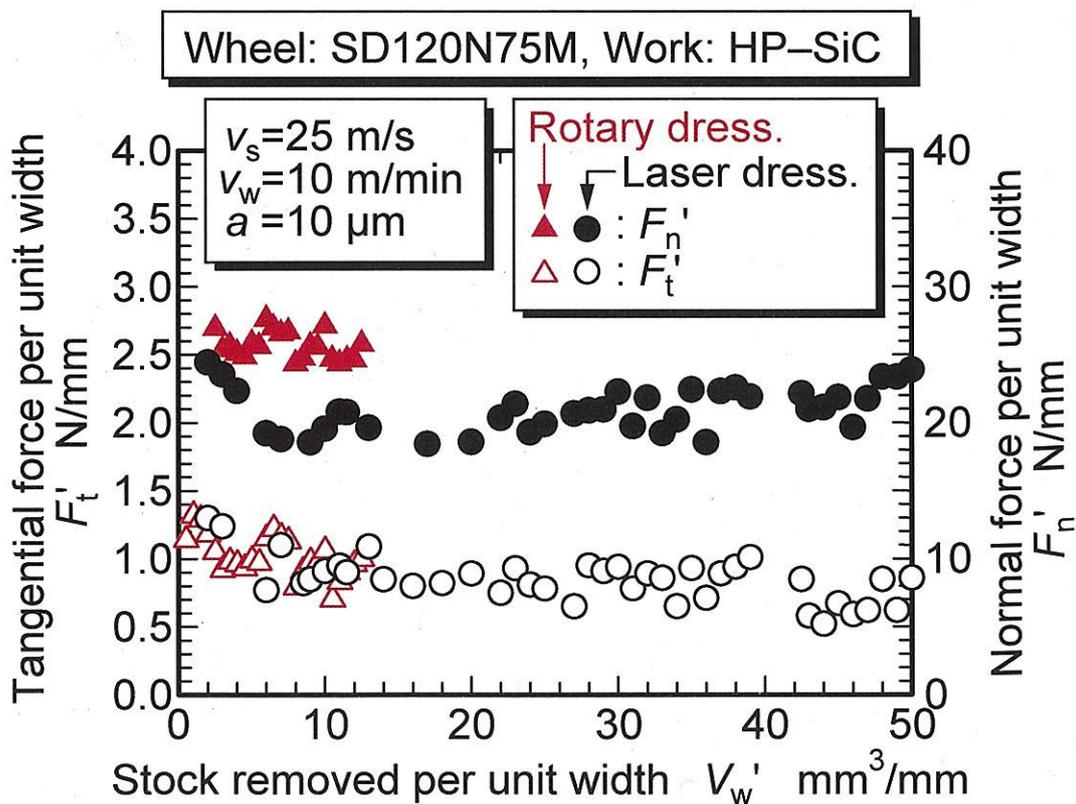


図2-6 研削にともなう研削抵抗の変化

## 2.3 レーザ・エアジェット一体型ノズルによるレーザドレッシング

### 2.3.1 はじめに

第2.2節のレーザドレッシング実験において、レーザ照射時にエアジェットを吹き付けることで砥石表面のボンド材を除去することに成功している。しかし、再凝固層が局所的に残り、完全に除去するまでには至らなかった。その結果、研削時に再凝固層が砥石作業面で目づまりをおこし、研削性能を低下させるという問題があった。また、これまでのレーザドレッシング実験では、レーザをダイヤモンドホイールに対して垂直の照射していたため、レーザの反射光がレーザプローブに損傷を与えるという問題があった。

本章ではこれらの問題を解消すべく、レーザ・エアジェット一体型ノズルによるメタルボンドダイヤモンドホイールのレーザドレッシングの可能性について検討する。レーザ・エアジェット一体型ノズルとは、レーザの出射部とエアを出すエアジェット一体型にしたノズルのことである。レーザ照射部に正確にエアを当てるとともに、レーザを砥石に対して傾けてレーザドレッシングを行うことによりレーザの反射光の影響を回避する方法を提案した。

対象とする砥石は第2.2節と同じくメタルボンドダイヤモンドホイールである。実験は回転するホイール砥石にレーザおよびエアを傾けてレーザドレッシング実験をおこなった。初めに、溶融層が最も除去できる条件を設定するために予備実験として、メタルボンドダイヤモンドホイールのボンド材に材質の似たブロンズ製のセグメントホイールを用いてレーザ照射を行い、ボンド材の除去特性について調べた。その後、メタルボンドダイヤモンドホイールでレーザドレッシング実験を行い、その後、三次元プロファイル測定や研削抵抗の測定によりレーザドレッシングの有効性を確認する。また、従来のドレッシング法としてロータリドレッサーを用いてドレッシングを行い、レーザドレッシングと結果を比較している。

### 2.3.2 実験装置

図2-7にレーザ照射実験装置およびその概観を示す。ホイールをエアスピンドルの軸に取り付け、ベルトでつないだモーターによって任意の速度に回転させている。レーザ加工機は前節で用いたものと同様の物を使用し、レーザ・エアジェット一体型ノズルを自動ステージ上の軸に固定し、砥石幅方向に移動できるようにした。

レーザ照射実験はホイールを一定速度で回転させ、レーザをホイールの中心方向にデフォーカスなしで砥石幅方向に傾けてレーザ照射することにより行った。

図2-8にレーザ・エアジェット一体型ノズルの外観を、図2-9にレーザ・エアジェット一体型ノズルの断面図を示す。本実験で使用したエア・エアジェット一体型ノズルは3つの部品から成っており、レーザ出射部固定治具、エア供給部およびレーザ・エアノズルである。このレーザ・エアジェット一体型ノズル（照射プローブ）を使用することによって、レーザドレッサーの取り扱いが容易になり、実用化をにらんだ改良である。

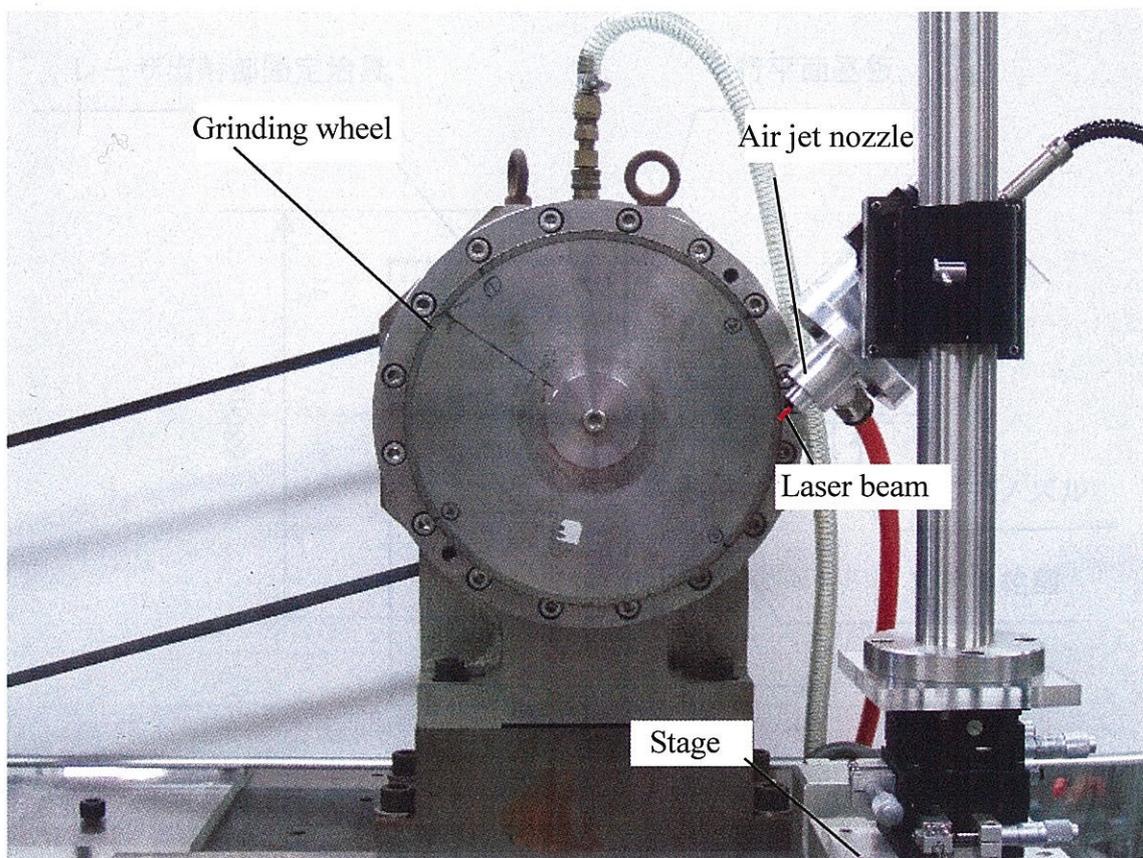
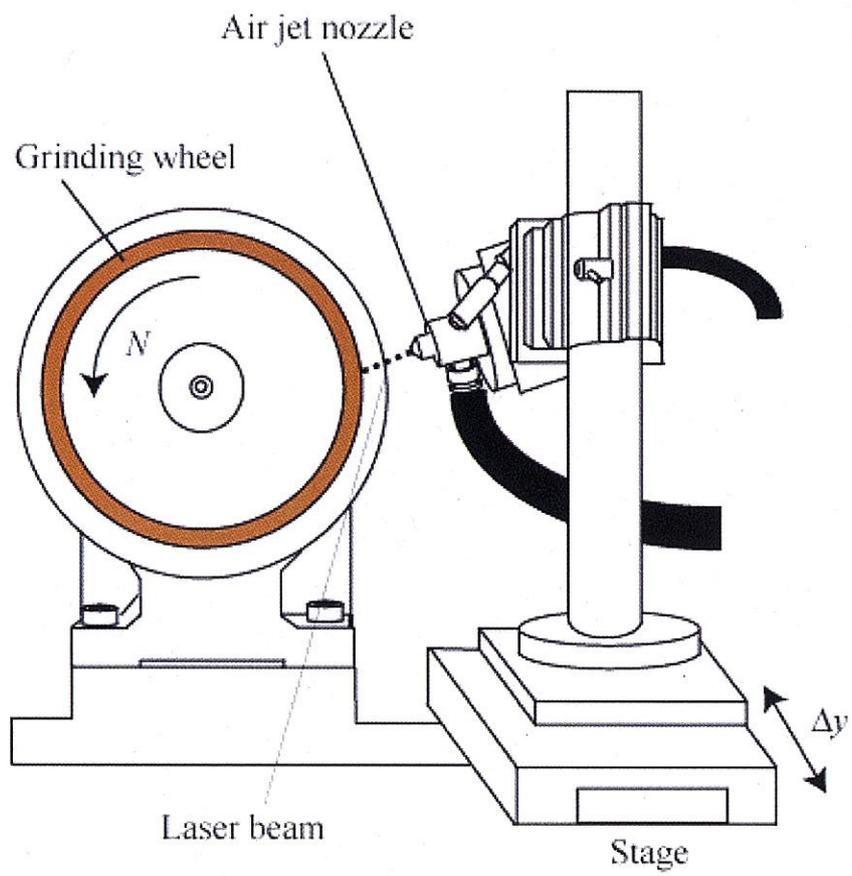


図2-7 実験装置および外観

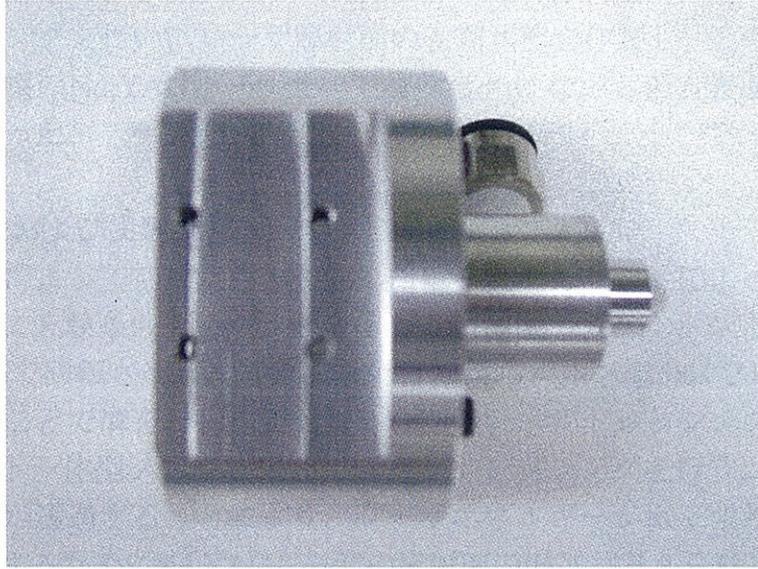


図2-8 レーザ・エアジェット一体型ノズル概観

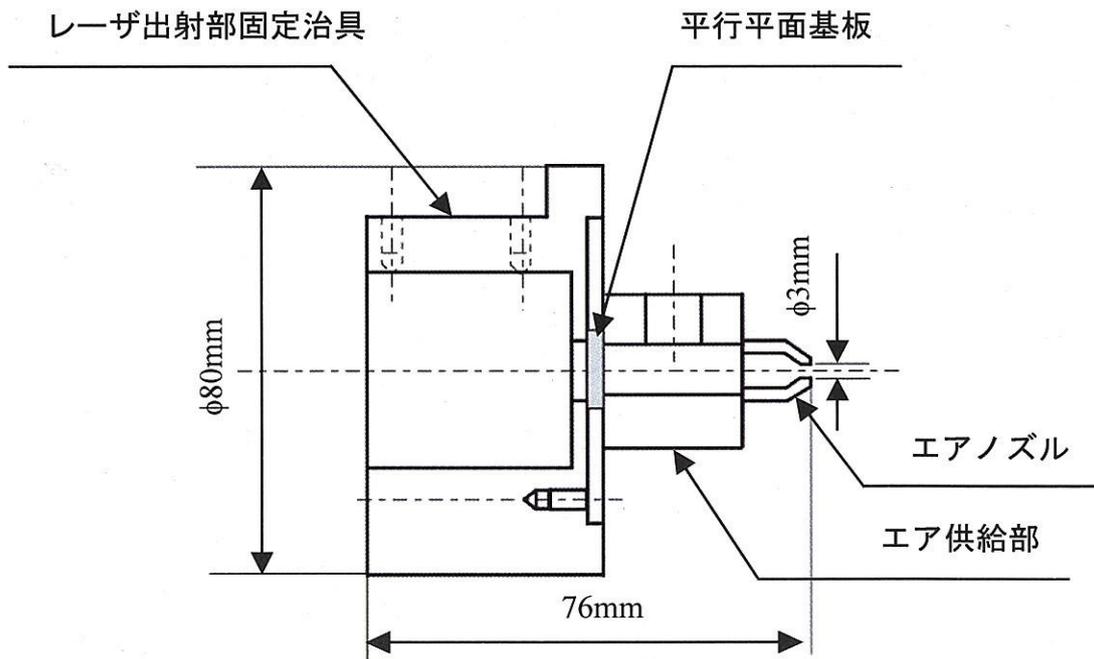


図2-9 レーザ・エアジェット一体型ノズルの断面図

### 2.3.3 レーザドレッシング実験

メタルボンドダイヤモンドホイール砥石 (SD120N75M) を用いてレーザドレッシング実験を行った。レーザドレッシングは第2.2節の砥石作業面のツルージング条件と同条件でツルージングを行い、レーザ照射前の初期状態を作製し、その後エアスピンドル上でパルス発振のNd:YAGレーザをエアを吹きつけながら砥石表面全面にレーザ照射することで行った。

#### (1) 実験方法および実験条件

ツルージングによって初期状態を作製した砥石表面をレーザによってドレッシングを行う。表2-4に実験条件を示す。図2-7の実験装置でメタルボンドダイヤモンドホイールを326rpmで回転させ、エアを吹き付けながらパルス幅5msでレーザを $f=1.25\text{Hz}$ で48発照射することで溝を一行作製した。今回のレーザドレッシング実験では、レーザ・エアジェット一体型ノズルを用いてレーザドレッシングを行う。そのため平行平面基板をレーザが透過することにより、レーザエネルギーが低下することやレーザを斜めに傾け照射するためにNd:YAGレーザの反射率の増加が考えられる。そのため、ボンド材を除去するためには第2.2節のレーザドレッシング実験よりも高いレーザエネルギーが必要である。今回のドレッシング実験では値を小さくし、安定したレーザエネルギーを得られるように変更した。セグメントホイールにおけるレーザ照射実験の結果より、砥石表面に一行作製された溝から砥石幅方向に移動ステージを0.15mmずつ移動して繰り返し行うことにより全周に照射した。また、レーザ・エアノズル角度を $45^\circ$ 、エア圧力を0.5Mpaに設定しレーザドレッシング実験を行っている。

図2-10にレーザドレッシング実験中の写真を示す。レーザ照射部から火花が出て、溶融層がエアによって飛散している様子が確認できる。

表2-4 レーザドレッシング条件

Grinding wheel		SD120N75M ( $d_s=200\text{mm}$ )
Wheel revolution	$N, \text{rpm}$	326
Laser		Nd:YAG(pulse)
Peak power	$P, \text{W}$	887.7
Pulse duration	$\tau, \text{ms}$	5.0
Frequency	$f, \text{Hz}$	1.25
Number of pulses	$n$	48
Operating parameters		
Transverse interval	$\Delta y, \text{mm}$	0.15
Air pressure	$P_a, \text{Mpa}$	0.5
Angle of air nozzle	$\theta, ^\circ$	45

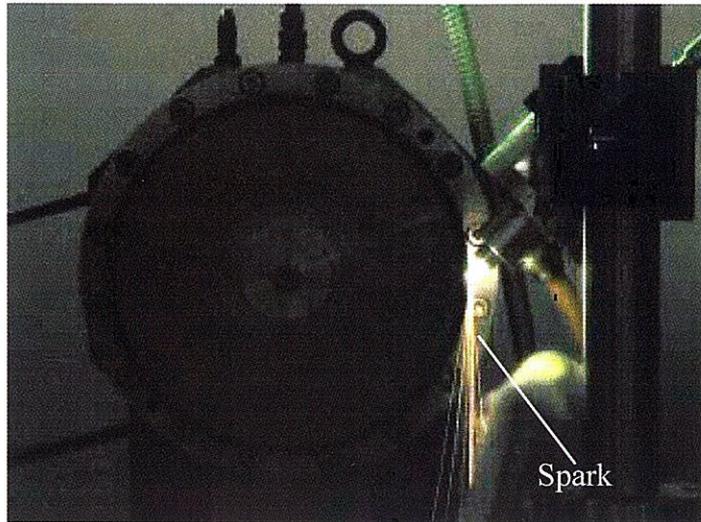


図2-10 レーザドレッシング実験

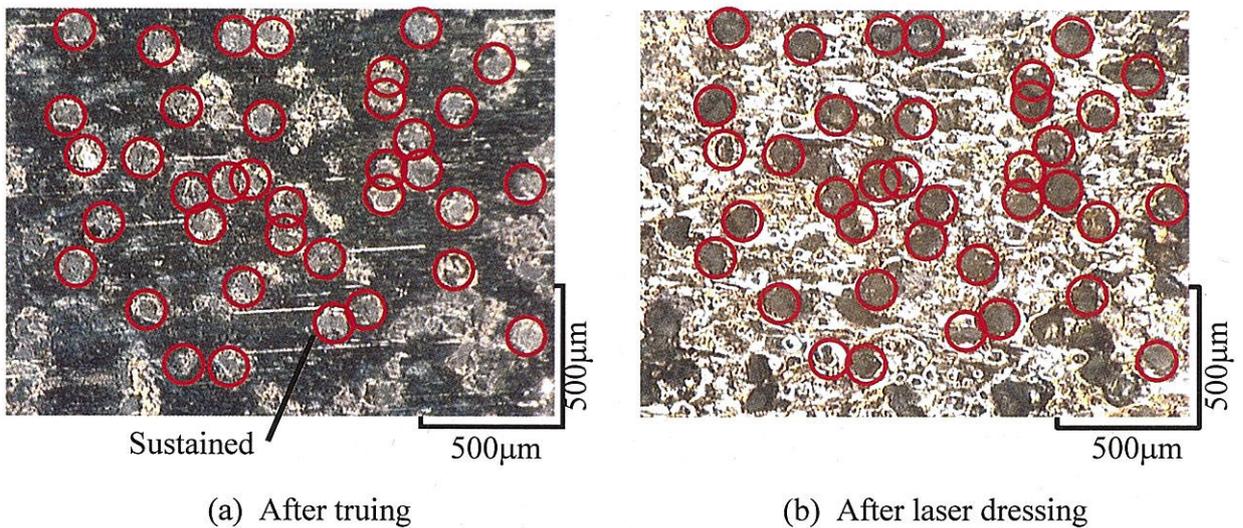


図2-11 レーザドレッシングによる砥石作業面の変化

## (2) 実験結果

図2-11にドレッシング前後の状態を示す。両者は砥石表面の同一箇所のものである。レーザドレッシング前後で砥石表面の砥粒の脱落について確認した結果、ほとんどの砥粒が脱落せずに残留しており、レーザ照射による砥粒の脱落は確認されなかったことがわかる。図2-12にレーザドレッシングの砥石表面の三次元プロファイルおよび写真を示す。レーザ照射によりチップポケット平均深さ27 $\mu\text{m}$ の砥石表面状態が得られた。レーザ照射による炭化などの熱損傷は見られなかった。三次元プロファイルより砥粒が突出しており、レーザ・エアジェット一体型ノズルにより、レーザにより熔融したボンド材に正確にエアがあたり、熔融層を除去できたことがわかる。

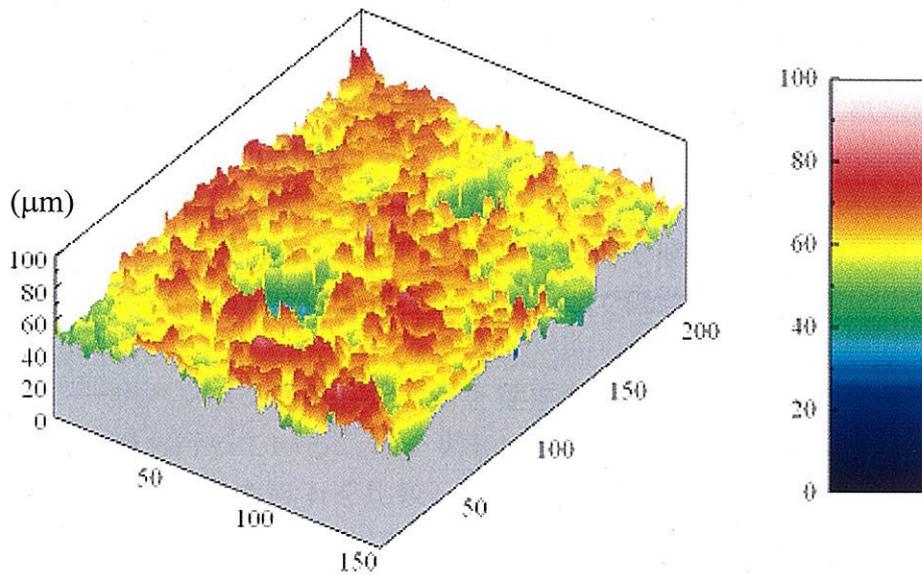
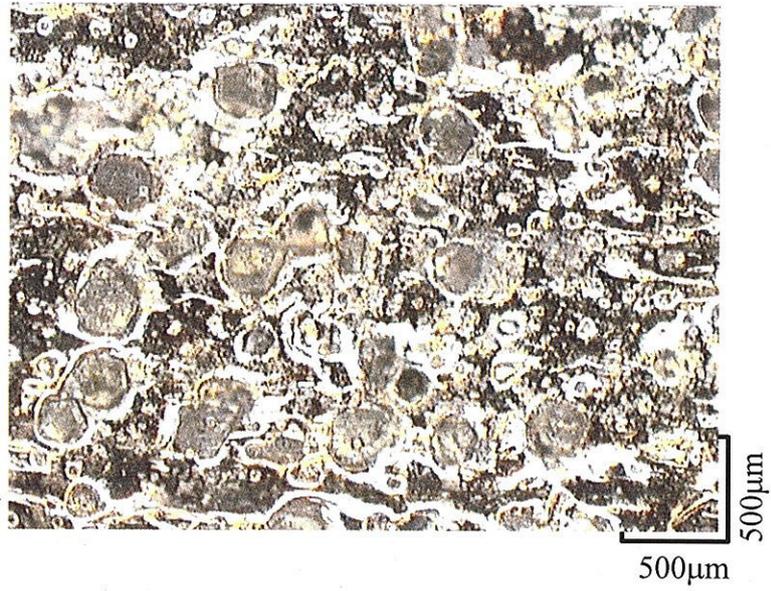


図2-12 レーザドレッシングの砥石表面の三次元プロファイルおよび写真

### 2.3.4 研削実験による砥石の性能評価

レーザドレッシングの有効性を調べるために研削実験を行った。ドレッシング後の砥石でホットプレス炭化ケイ素HP-SiCを研削し、研削前後の砥石表面の写真観察および研削抵抗を測定することにより砥石作業面を評価した。また、従来の方法としてWA砥石のロータリードレッサーを用いてドレッシングを行い、レーザドレッシングの結果と比較を行った。実験装置および実験条件は第2.2節と同様である。

#### (1) 砥石作業面の変化

図2-13に砥石表面の同一箇所の、レーザドレッシング後、および研削を15パス、30パス、50パス、80パス、100パス行った後の砥石表面を撮影した画像を示す。ドレッシング後から15パス研削する間に砥石の表面のボンド材が削られ、平らになっていることがわかる。また、パス数が増えるに連れて砥石表面に目づまりが目立つようになっている。研削前後で砥粒が脱落は行っていないことがわかり、レーザ照射によるボンドの砥粒の保持力の低下は確認されなかった。

また、図2-14に研削実験後の砥石表面の三次元プロフィールを示す。研削によって砥石表面は平らになっていることがわかる。

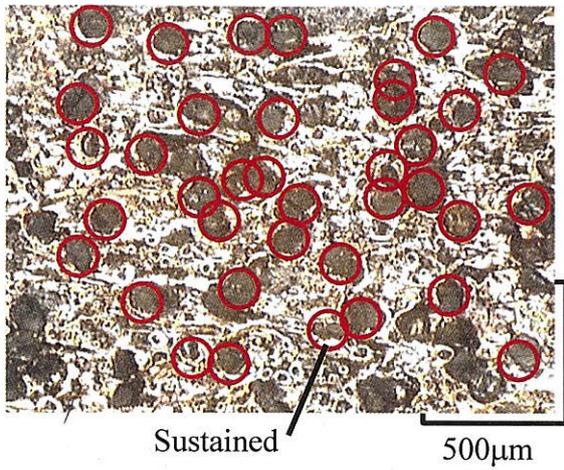
#### (2) 研削抵抗

図2-14に研削パス数にともなう単位幅あたりの研削抵抗の変化を示す。 $F_n$ は研削開始直後から研削抵抗が緩やかに増加している。 $F_t$ は研削初期から一定の値で推移していった。これは砥粒の突出が十分に得られていないため、研削時に砥粒が工作物に食い込まず、上滑りしたことが原因であると考えられる。

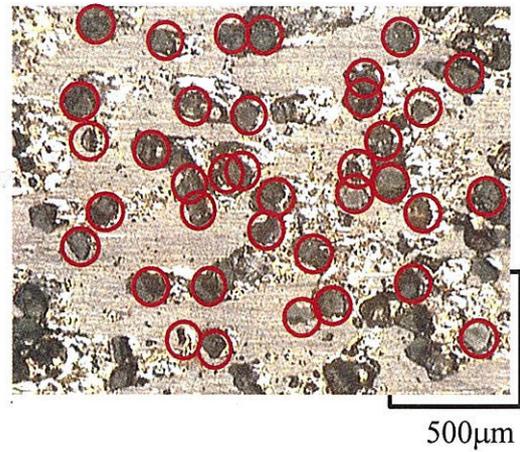
今回のレーザドレッシング実験では、レーザ・エアジェット一体型ノズルを使用して実験を行った。レーザを砥石に対して斜めに傾けて照射したため、垂直照射に比べて安定したボンド材の除去特性が得られず、一部で砥粒の突出が不十分であったと考えられる。

図2-14にレーザドレッシングした砥石と従来のドレッシング法によりドレッシングした砥石との比較も行っている。レーザドレッシングした砥石と従来のドレッシング法によりドレッシングした砥石を比較した場合、 $F_p$ 、 $F_n$ とも同様の傾向をしていることがわかる。従来のドレッシング法による砥石よりもレーザドレッシングした砥石の方が $F_n$ が高く、 $F_t$ が低い理由としては、砥粒の突出が不十分であったために、研削時に砥粒が工作物に食い込み難く、工作物との間で上滑りを起こしたため、レーザを砥石に対して斜めに傾けてレーザ照射したため、垂直照射に比べて安定したボンド材の除去特性が得られなかったことが原因であると考えられる。

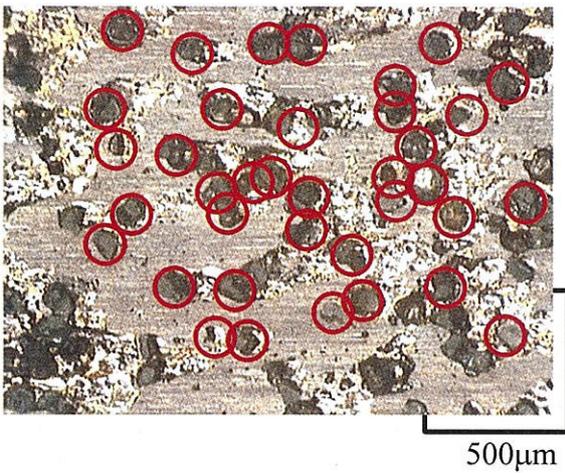
今回のレーザ・エアジェット一体型ノズルによるレーザドレッシング実験では、第2.2節で問題となっていたレーザ照射時の熔融層を完全に除去することに焦点を当て、レーザドレッシングの条件を決め実験を行ってきた。その結果レーザ・エアジェット一体型ノズルによって熔融層を除去することができた。今後は、レーザ照射による安定した除去特性について考え、レーザドレッシングの最適条件を決定する必要がある。



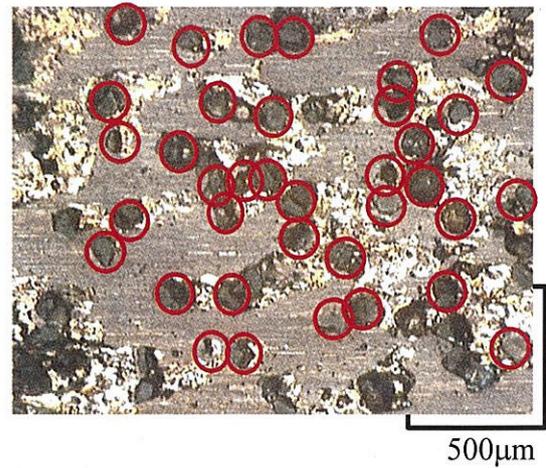
(a) After Laser dressing



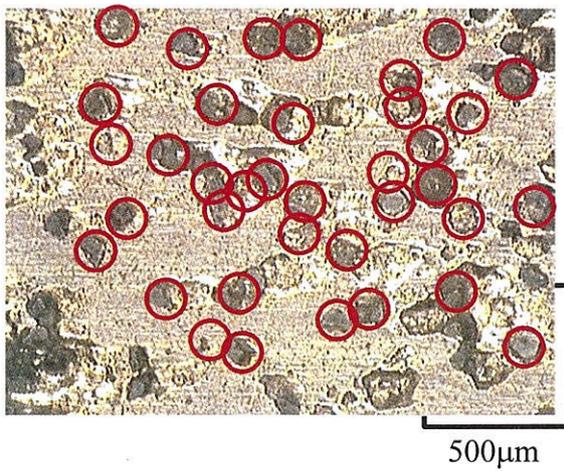
(b) After 15passes grinding



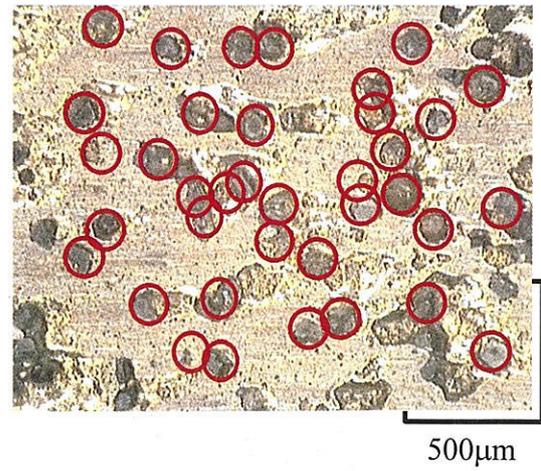
(c) After 30passes grinding



(d) After 50passes grinding



(e) After 80passes grinding



(f) After 100passes grinding

図2-13 研削後の砥石表面の写真

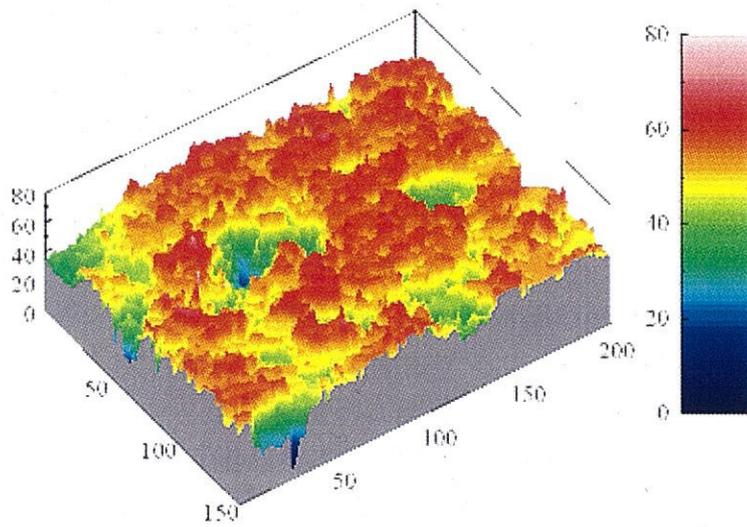


図2-14 研削後の砥石表面の三次元プロファイル

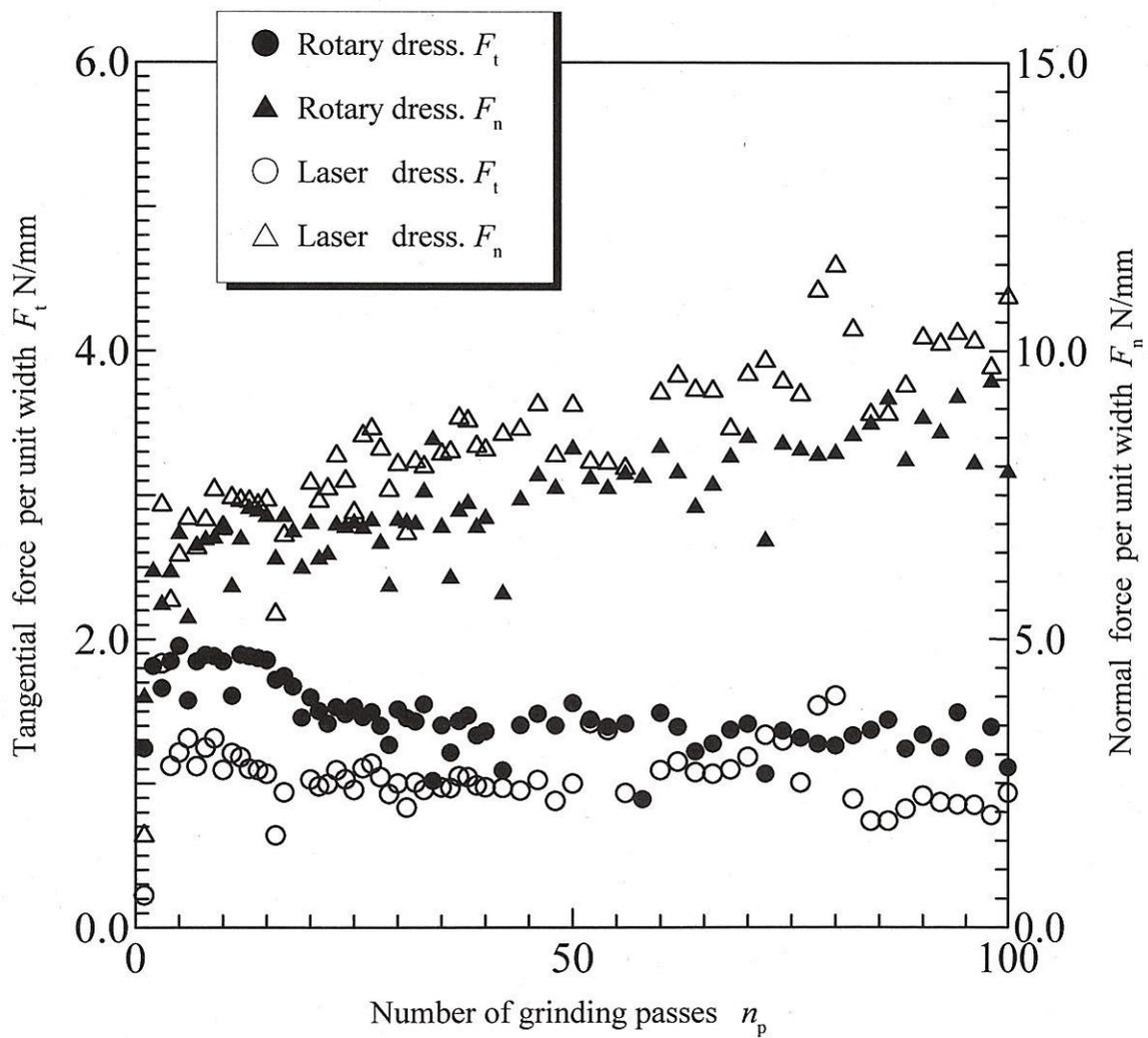


図2-15 研削パス数にともなう研削抵抗の変化

### 2.3.5 まとめ

パルスNd:YAGレーザを使用し、レーザ・エアジェット一体型ノズルを用いてメタルボンドダイヤモンドホイールのレーザドレッシングを行い、研削実験によりその有効性を評価した。本章における結論を以下に示す。

- (1) レーザ・エアジェット一体型ノズルを用いてレーザ照射部することにより照射部に正確にエアを当てることができる。
- (2) メタルボンド材にレーザ照射すると照射部は膨張して再凝固する。しかし、エアジェットを吹き付けることで除去することができる。
- (3) レーザドレッシング条件を適切に調節することで、ホイール表面にレーザドレッシングすることは可能となる。
- (4) レーザドレッシングによって砥粒の炭化や脱落はほとんど確認されなかった。
- (5) 研削実験でのダイヤモンドホイール砥石表面にある砥粒の脱落は確認されなかった。ボンド材の砥粒の保持力の低下はないものと思われる。
- (6) 研削抵抗測定において、レーザドレッシングした砥石は従来の方法によりドレッシングされた砥石と比べて、砥粒の突出量が不十分であり、そのため工作物との間で上滑りを起こしていると考えられる。今後さらに適切な条件でレーザドレッシングすることにより、従来のドレッシング方と同様な研削性能が得られると考えられる。

## 2.4 結 言

本研究では、パルスNd:YAGレーザを用いてメタルボンドダイヤモンド砥石のレーザドレッシングを行った。本研究によって明らかになったことを以下に示す。

- (1) ホイールの外周に感熱紙を貼り付けレーザを照射し、単パルス照射による照射痕の形状から熱影響域の大きさを確認した。パルス幅が一定のとき、照射痕長さは回転数の増加に比例して長くなり、照射痕幅はホイールの回転数が大きくなるにつれて減少する。回転数を一定にした場合、照射痕長さはパルス幅の増加に比例して長くなったが、照射痕幅はパルス幅にかかわらず一定であった。
- (2) メタルボンド剤にレーザ照射すると照射部は膨張して再凝固するが、エアジェットを吹き付けることにより再凝固層を除去することができる。
- (3) レーザパルス幅、発振周波数、ホイール回転速度を適切に調整することによりホイール全面にレーザドレッシングする事が可能となり、適切な突出量の砥粒が生成できる。
- (4) レーザドレッシングによって砥粒の炭化や脱落などは確認されなかった。
- (5) 研削実験でのダイヤモンドホイール砥石表面における砥粒の急激な摩耗や脱落はほとんどみられない。
- (6) 研削抵抗測定において、レーザドレッシングされた砥石は従来の方法によりドレッシングされた砥石と同等の研削抵抗が得られた。
- (7) レーザ・エアジェット一体型ノズルを用いてレーザ照射部することにより照射部に正確にエアを当てることができる。
- (8) レーザ・エアジェット一体型ノズルは取り扱いが容易で、実用化に一步近づいたと言える。
- (9) ただし、照射角度によってドレッシング性能が大きく変化するため、最適値を見つける必要がある。
- (10) 今後は、レーザーツールリングやレーザークリーニングを含めたレーザコンディショニングに展開していく予定である。