

平成 13 年度卒業論文

# トラバースクリープフィード研削特性

高知工科大学  
知能機械システム工学科  
1020169 和田 快也  
指導教員 松井 敏 教授

## 目次

1. 緒言	1
1. 1 研削加工自動化の現状	1
1. 2 砥石と工作物の位置合せの現状	2
1. 3 本研究の目的	4
2. 砥石位置合わせ自動化の考え方	5
2. 1 クリープフィード研削の応用	5
2. 2 前年度の研究概要	6
3. 実験方法および実験装置	7
3. 1 実験方法	7
3. 1. 1 研削実験	7
3. 1. 2 研削抵抗の測定	9
3. 1. 3 砥石寿命の判定	10
3. 1. 4 表面粗さの測定	10
3. 2 実験装置	11
4. 実験結果及び考察	13
4. 1 ドレッシング条件と総研削量（砥石寿命）の関係	13
4. 2 ドレッシング条件と研削抵抗の関係	16
4. 3 ドレッシング条件と表面粗さ	18
5. 結言	24
謝辞	24
参考文献	25

# 1. 緒言

## 1. 1 研削加工自動化の現状

人間が行う加工作業を機械が代行すること，すなわち加工作業の自動化の目的は，作業者の肉体的な疲労やリスク，精神的な負担を軽減することである．また，最近では，熟練技能者の不足や，人間が関わるために生じる様々な制限を取り払うことなども目的として上げられるようになってきた．例えば，作業者と工作機械との物理的な距離の制限である．人間が行わなければならない作業を自動化することにより，日本から海外の工作機械を操作することも，宇宙空間などの人間が工作機械の近くにいることが困難な場所での作業も可能になる．

機械加工の自動化・無人化は，1960年代後半から70年代のNC工作機械の普及により急速な発展を遂げ，現在は作業のほとんどが自動化された工作機械も多い．多くの工作機械は，加工の状況をインプロセスで監視し，収集した情報をフィードバックして加工を制御することで自動化を実現している．しかし，研削加工は比較的簡単なシーケンス動作を主体としていたため，他の工作機械に比べてNC化が立ち遅れていたが，現在は，研削盤においてもNC化が進み，総合的な自動化を目的とした研究が行われている．

図1に示す通り，平面研削盤において，自動化が実現されているのはNC制御が行われている研削加工サイクルに関する作業だけであり，そのほかは一部を除いて自動化されていない．研削盤の自動化が遅れている一つの原因として，研削加工の性質が上げられる．研削加工は一般に最終仕上工程として用いられるため，研削に至る以前の加工で，加工物の状態が変化していることも多い．加工後に表面処理などを施した場合は形状に歪みが生じるが，そのようなわずかな形状誤差であっても，研削加工では大きな支障になる．そのため，作業者が工作物の状態を認識して，加工時の切込み量を変更するといった制御が必要となる．工作機械の自動化を考えた場合，加工中に様々な現象を工作機械自身が測定し，判断しなければならない．例えば，工作物の寸法や形状，加工面の状態，切くずの生成状態，工具の摩耗や破損などである．しかしこれらの測定や判断は，熟練した技能者のカンや経験に依存しているのが現状で，作業を代行できる計測装置や制御装置はまだ実現していない<sup>1)</sup>．

## 1. 2 砥石と工作物の位置合せの現状

研削を行う場合、まず砥石と工作物の位置を正確に合わせる必要がある。NC 平面研削盤における切込み方向の動きは、図 2 に示すように、あらかじめ決定された加工原点を基準に、プログラミングされた移動量だけ砥石が下降して、そこから研削が開始される。よって、プログラマは、工作物の高さを考慮し、砥石の下降量を決定しなければならない。

しかし、研削前の工作物表面は図 2 のように、熱処理などによって数マイクロメートルから数十マイクロメートル程度、形状に誤差が生じている場合があるため、前もってマイクロメートルオーダーで工作物の高さを知ることは難しい。一般に行われている普通研削では一回の切込み量が数マイクロメートルから、大きくても十数マイクロメートルと少ないため、図 3 に示すように、例えばプログラムで自動的に最初の切込み位置を決めた場合、もし加工面にそれよりも高い場所があれば過大切込みになり、研削焼けや砥石作業面の損傷を引き起こす恐れがある。

過大切込みを避けるため、砥石下降量を図面上から算出した値よりも少なくプログラミングすることが行われているが、この場合は、図 2 のようにエアカット時間が増えるため能率が低下する。

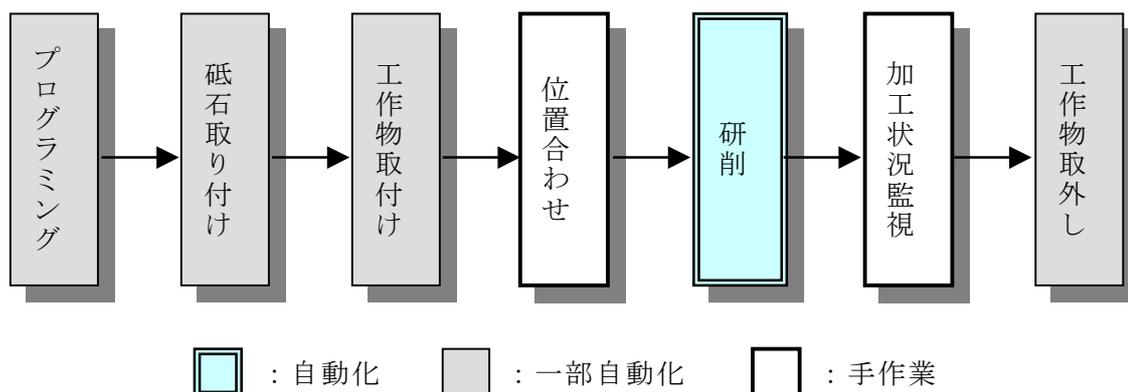


図 1 平面研削盤の作業手順

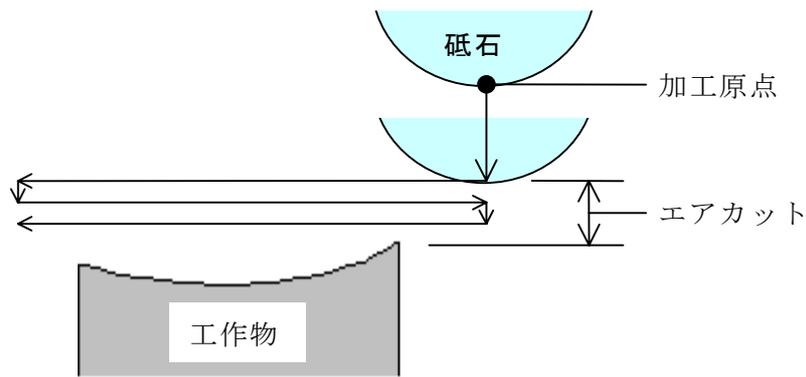


図2 砥石と工作物との位置関係

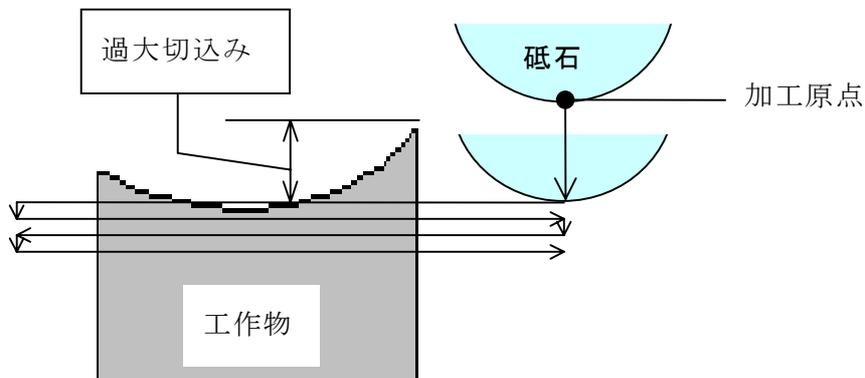


図3 砥石降下量の設定が不適切な場合の例

能率低下と過大切込みの両方を防ぐためには、図4および図5に示すように、工作物の全面に砥石を走査させて最高点を探し出し、その高さを加工原点とする方法も行われている。この作業は、現在手作業により行われているため、作業者の経験とともに、時間も必要とする。

位置合わせに対する従来の研究としては、センサを利用するものがあるが<sup>2)</sup>、センサでは1点しか計測できないことや、精度の問題などで普及していない。

このため、砥石と工作物の位置合わせ作業は、平面研削盤の自動化を進める上での大きな課題の1つとなっている。

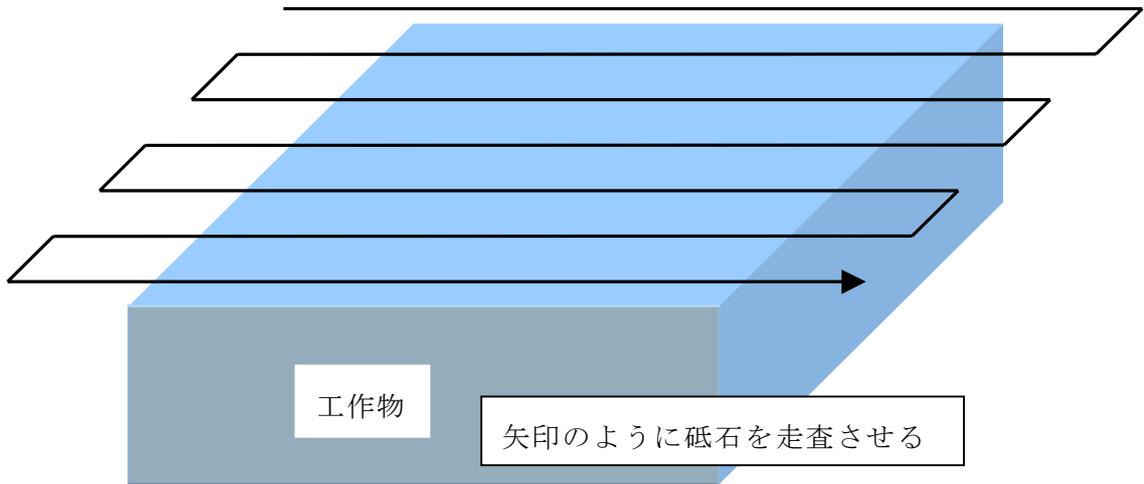


図4 工作物表面の最高点を見つけるための砥石の動き

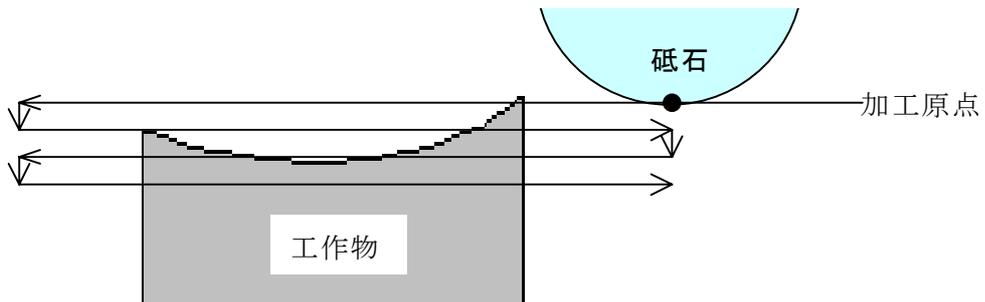


図5 最高点に加工原点を合わせた場合の普通研削の例

### 1. 3 本研究の目的

そこで本研究は、数値制御平面研削盤の自動化の中で、砥石の位置合わせ作業を自動化するための技術を開発することを目的とする。

## 2. 砥石位置合わせ自動化の考え方

### 2.1 クリープフィード研削の応用

センサにより正確で信頼性のある位置合わせを行うことは困難であると考え、センサを使用せずに、砥石と工作物との位置合わせをする方法を検討した。その方法として、図6に示すクリープフィード研削<sup>3)</sup>を応用することを考えた。

クリープフィード研削は、主に成形研削に用いられる研削方法で、非常に遅い速度でテーブルを送るかわりに、通常の数十倍から数百倍の切込み量を与えて、工作物を1パスで加工することができる。

この技術を利用し、普通研削で仕上げることを前提に、加工物表面の状態を問題としない量を一度に切込んで粗研削することによって、加工前の位置合わせを簡略化できるのではないかと考えた。

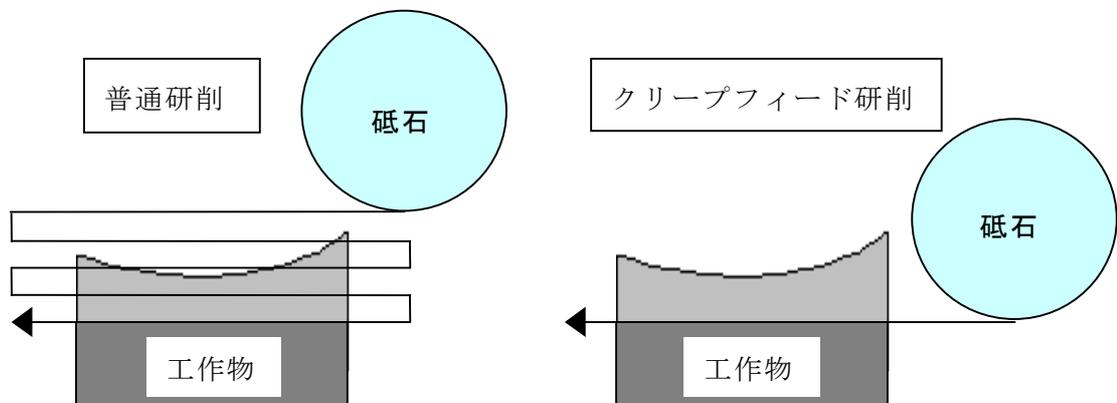


図6 普通研削とクリープフィード研削の違い

## 2. 2 前年度の研究概要

今まで、クリープフィード研削が用いられるのはプランジ研削がほとんどで、トラバース研削に使用された例は見られなかったが、前年度の研究<sup>4)</sup>で、幅 100mm×長 150mm の工作物について、トラバースクリープフィード研削を行い、以下の結果を得ている。

### 1) 研削液供給方法

研削点に対して確実に研削液を供給するために、**図 7**に示すようなクーラントガイドが必要である。

### 2) 研削砥石の種類

WA 砥石よりも砥粒を構成する結晶が小さく、自生作用の大きい SG 砥石の方が適している。

### 3) ドレッシング送り速度と切込み量限界の関係

ドレッシング送り速度が速いほうが限界切込み量は大きい。

### 4) 研削能率

普通研削と同等以上の研削能率を得られる。

また、条件を適切に選択すれば、幅 100mm×長さ 150mm の工作物を、途中でドレッシングすることなくクリープフィード研削が可能であることが確認されている。しかしながら、どの程度の工作物表面積まで研削可能であるかは確認されていない。



図 7 クーラントガイド

### 3. 実験方法および実験装置

#### 3. 1 実験方法

本研究は砥石と工作物の位置合わせを自動化することが目的であるから、1度工作物の全面を粗研削できれば、それ以降はクリープフィード研削である必要はない。今回使用する研削盤の加工可能な工作物最大寸法は、チャック面積と同じと考えて、幅 300mm×長さ 600mm である。よって、この加工可能な最大寸法に相当する面積を、途中でドレッシングすることなくトラバースクリープフィード研削することを目標として、ドレッシング条件が砥石寿命などに及ぼす影響を検討した。

##### 3. 1. 1 研削実験

工作物を、チャック上に設置された動力計に固定して研削した。

1回の切込み量を3通り、送り速度を3通り、合計9通りのドレッシング条件を設定し、各ドレッシング条件でドレッシングしてから、所定のクリープフィード研削条件で研削し、砥石寿命を比較した。表1にドレッシング条件を、表2にクリープフィード研削条件を示す。

研削には、幅 100mm×長さ 150mm の工作物の全面を、送り量 25mm でアップカットのみ4回クリープフィード研削するプログラムを使用した。

最大加工面積を幅 300mm×長さ 600mm と設定しているため、今回使用した幅 100mm×長さ 150mm の工作物では、プログラムを12回実行した時点で実験終了とし、それ以上の研削は行わなかった。

表1 ドレッシング条件

ドレッサ	自転形単石ドレッサ (図8)
切込み回数	6回
1回の切込み量	10, 20, 30 $\mu$ m
送り速度	100, 300, 500mm/min

表2 クリープフィード研削条件

研削砥石	3SG46I12V クレノートン $\phi$ 305mm $\times$ 32mm $\times$ $\phi$ 76.2mm
研削液	シンセティック#870 ユシロ化学工業 希釈率20倍
工作物	S45C, 幅100mm $\times$ 長さ150mm
切込み量	500 $\mu$ m (アップカット研削)
テーブル送り速度	300mm/min
送り量	25mm $\times$ 4回
クーラントガイド	全てのクリープフィード研削に使用



図8 自転形単石ドレッサ

### 3. 1. 2 研削抵抗の測定

動力計からの信号をチャージアンプで増幅し、オシログラフィックレコーダとパソコンに接続したデータ収集システムを使用して研削抵抗を記録した。

研削抵抗は図 9 に示すようなアナログ波形として記録されるが、そのままでは分析が困難なので、アナログ波形を数値化した。

図 9 に示すように、アナログ波形は研削中と研削外とに分けられる。そこで、1 パス分の研削中の波形を図 10 のように 3 等分し、A、B、C それぞれの部分の平均値で研削抵抗を示した。

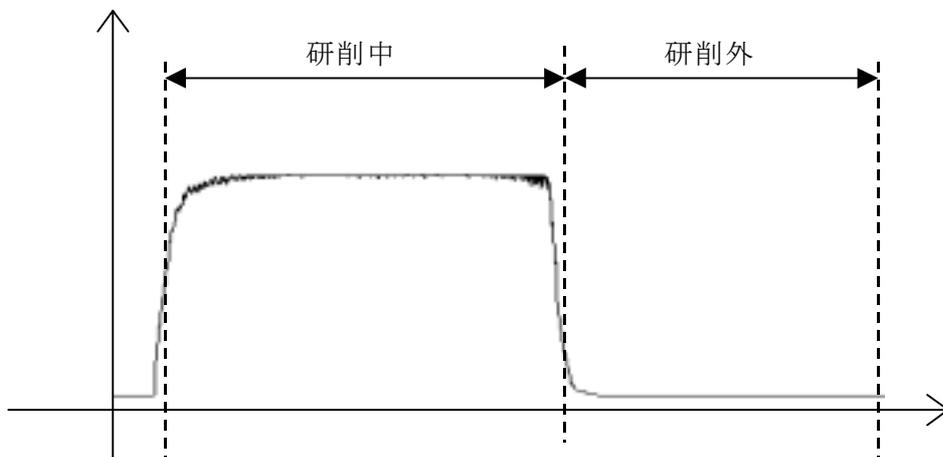


図 9 記録された研削抵抗波形

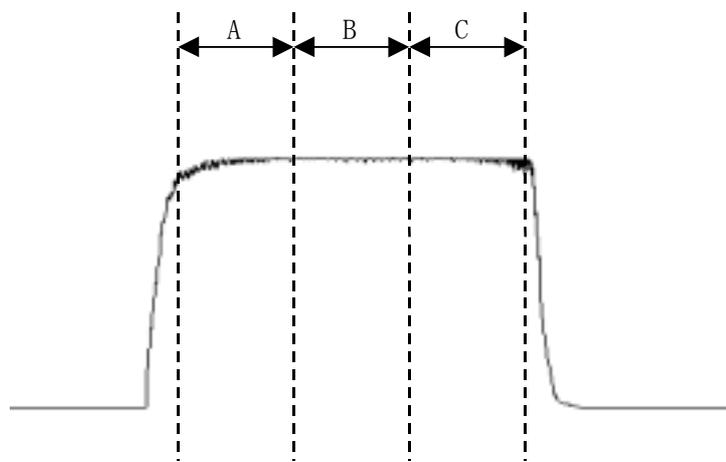


図 10 研削抵抗波形の分割

### 3. 1. 3 砥石寿命の判定

砥石寿命の判定には研削抵抗を用いた。今回使用した研削盤は、クリープフィード用モータの電流値が基準の数値を超えた場合に、テーブルが停止して、研削が停止する構成になっている。昨年度の研究から、テーブル停止時の研削抵抗は、接線抵抗で 170N 前後であることが求められているので、接線抵抗が 170N に達するか、目標の最大面積に達するまで研削を行った。

ただし、4章で詳述するように、砥石寿命は研削抵抗が急激に変動し始める時点で判定し、その時点までの総研削量で表した。

### 3. 1. 4 表面粗さの測定

加工後に工作物の表面粗さを測定した。表面粗さ測定は、最初の研削面の1パス目と、最終研削面の最終パスの2回行い、両者を比較した。また、ばらつきが予想されるので、それぞれの場合について3箇所ずつ測定し、平均値を求めた。

### 3. 2 実験装置

本研究に使用した NC 平面研削盤の型式と本体仕様および写真を表 3 と図 11 に、使用した測定機器の型式・仕様と写真を表 4 と図 12 から図 15 に示す。

ドレッサはドレッサ摩耗の影響をなくすために、図 8 に示した自転形単石ドレッサを使用<sup>5)</sup>し、1 回の実験ごとにドレッシングを行った。

昨年度の研究から、研削開始点に研削液を十分に供給する必要性が指摘されているので、今回の実験も、図 7 に示したクーラントガイドを使用して行った。

表 3 NC平面研削盤の仕様

本体製造元	日立精工株式会社
型式	GHL-NB306M (FANUC Series0-MC付)
テーブル作業面積 (長さ×幅)	600mm×300mm
テーブル左右送り速度	2~25m/min
砥石の大きさ (外径×幅×内径)	φ 305mm×32mm×φ 76. 2mm
砥石回転数	1800min <sup>-1</sup>
砥石軸用電動機	AC 3. 7kW
テーブル駆動方式	油圧送り
クリープフィード方式	ピニオン・ラック送り
クリープフィード用電動機	100W (安川電機製)
クリープフィード送り速度	10~1000mm/min



図 11 NC 平面研削盤の外観

表4 使用した測定機器の型式・仕様

測定機器	型式 (製造元)	仕様	
3成分動力計	9254 (KISTLER)	測定範囲	Fx, Fy -500~500N Fz -1000~1000N
マルチチャンネル チャージアンプ	5019B (KISTLER)	チャンネル数	最大3チャンネル
		測定範囲	±10~999000pC
オシログラフィック レコーダ	OR1400 (横河電機)	チャンネル数	最大8チャンネル
表面粗さ形状測定器	SARFCOM 480A-12 (東京精密)	測定範囲	X軸(横方向) 100mm Z軸(縦方向) 800μm
		記録倍率	縦方向 50000倍 横方向 2000倍
データ収集システム	NR-2000 (KEYENCE)	チャンネル数	最大16チャンネル
		測定レンジ	±0.25V~±10V



図12 動力計



図13 チャージアンプ(左)と  
オシログラフィックレコーダ(右)

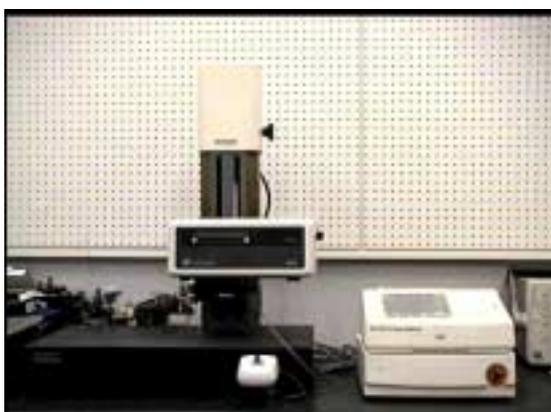


図14 表面粗さ形状測定器



図15 データ収集システム

## 4. 実験結果および考察

### 4. 1 ドレッシング条件と総研削量（砥石寿命）の関係

図 16 は，ドレッシング送り速度をパラメータとして，各ドレッシング切込み量での研削量と接線抵抗の関係を表している．グラフが途中で終わっているものは，その段階で接線抵抗が 170N に達したため，実験を終了したものである．

図 16 に見られる顕著な現象は，それぞれの図に赤い破線の○で示したように，接線抵抗が 120N 前後から急激に変動している部分が数箇所あることである．この部分では，研削中の火花，研削音ともに非常に激しくなった．しかし，研削抵抗が急増してから数秒後までに，火花も研削音もおさまり，研削抵抗も増加する前より低い値まで減少した．

研削抵抗が減少した原因としては，過大な研削抵抗のため，砥石作業面に目こぼれが発生し，砥石の自生作用が促進されたことが考えられる．この結果として，砥石寿命が延びているように見られる．しかしながら，この場合は，通常の自生作用と違って，過大抵抗による砥粒の脱落や破砕であるため，研削焼けなどの不良が生じる場合がある．今回の場合も，研削焼けが確認できた箇所があったので，正常な仕上がり面とは言えず，このような状態を無視して砥石寿命を考えることは好ましくないと判断した．

そこで，研削は接線抵抗が 170N に達する時点または，目標の最大面積に達するまで行ったが，砥石寿命の判定は上記の現象が最初に発生した時点とした．

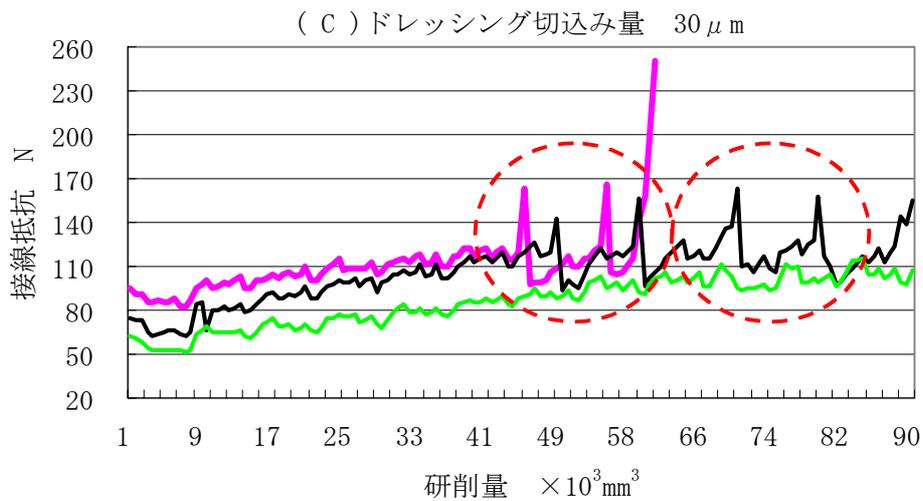
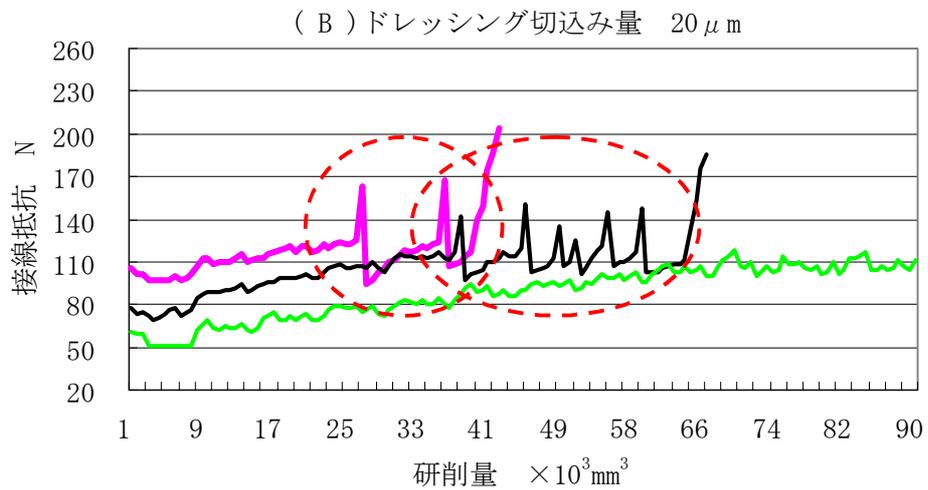
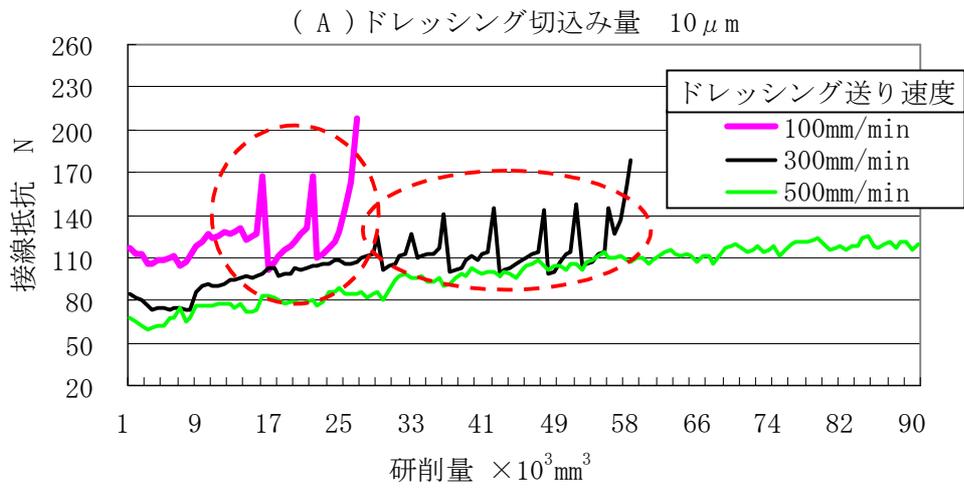


図 16 研削量と接線抵抗の関係

図 17 に、ドレッシング切込み量をパラメータとして、各ドレッシング送り速度での研削量と接線抵抗の関係を示す。同様に、図 18 に、ドレッシング送り速度をパラメータとして、各ドレッシング切込み量での研削量と接線抵抗の関係を示す。なお、グラフが途中で終わっているものは、その段階で砥石の寿命と判定したものである。

図 19 に、ドレッシング切込み量をパラメータとして、ドレッシング送り速度と総研削量の関係を示す。また、図 20 にドレッシング送り速度をパラメータとして、ドレッシング切込み量と総研削量の関係を示す。ここで示す総研削量とは、砥石寿命と判定するまでに研削した工作物の総体積である。なお、今回の研削条件では、 $90 \times 10^3 \text{mm}^3$  が総研削量の最大値である。

図 19 から、ドレッシング送り速度を大きくすると総研削量が増加することがわかる。ドレッシング送り速度が  $500 \text{mm/min}$  の場合は、砥石寿命に達する前に研削を中止しているので、砥石寿命点まで研削を続ければ総研削量はさらに大きくなるものと考えられる。また、図 20 から、ドレッシング切込み量を大きくすると、総研削量が増加することがわかる。ドレッシング送り速度が  $500 \text{mm/min}$  の場合には、ドレッシング切込み量による総研削量の違いはないが、これも砥石寿命に達する前に研削を中止したためであり、砥石寿命点まで研削を続ければ、ドレッシング切込み量による違いが出るものと考えられる。

ドレッシング送り速度とドレッシング切込み量のそれぞれを大きくした場合に、総研削量が増加する原因としては、次のような理由が考えられる。ドレッシング送り速度を速くすると、砥石作業面の仕上がりが粗くなるため、砥石の目詰まり起きにくくなる。目詰まりが起きにくいことは、そのまま研削量の増加につながる。また、ドレッシング切込み量を大きくすると、砥粒の破碎が促進され、大きな切れ刃が出現しやすくなり切れ味が向上する。

図 19 と図 20 を見て特徴的なのは、ドレッシング送り速度を  $300 \text{mm/min}$  から  $500 \text{mm/min}$  に変化させた場合の総研削量の増加が著しいことである。原因については、今のところわからないが、ドレッシング送り速度  $300 \text{mm/min}$  と  $500 \text{mm/min}$  の間で砥石作業面の仕上がりについて、境界のようなものが存在すると推察する。

以上の結果から、ドレッシング送り速度を  $500 \text{mm/min}$  にすれば、目標とした最大面積(幅  $300 \text{mm}$  × 長さ  $600 \text{mm}$ )まで、途中でドレッシングすることなく研削できることが明らかになった。

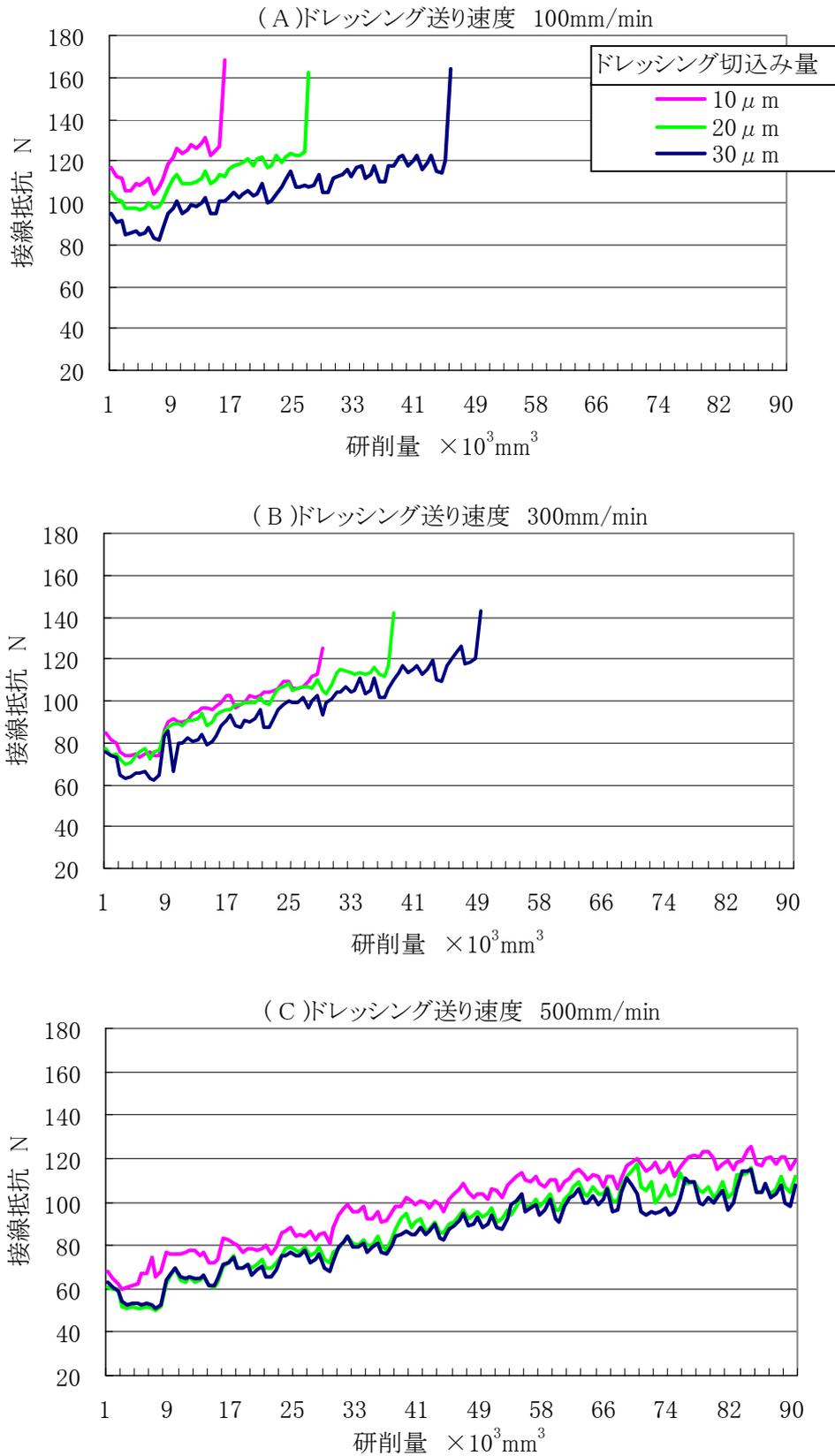


図 17 各ドレッシング送り速度での研削量と接線抵抗の関係

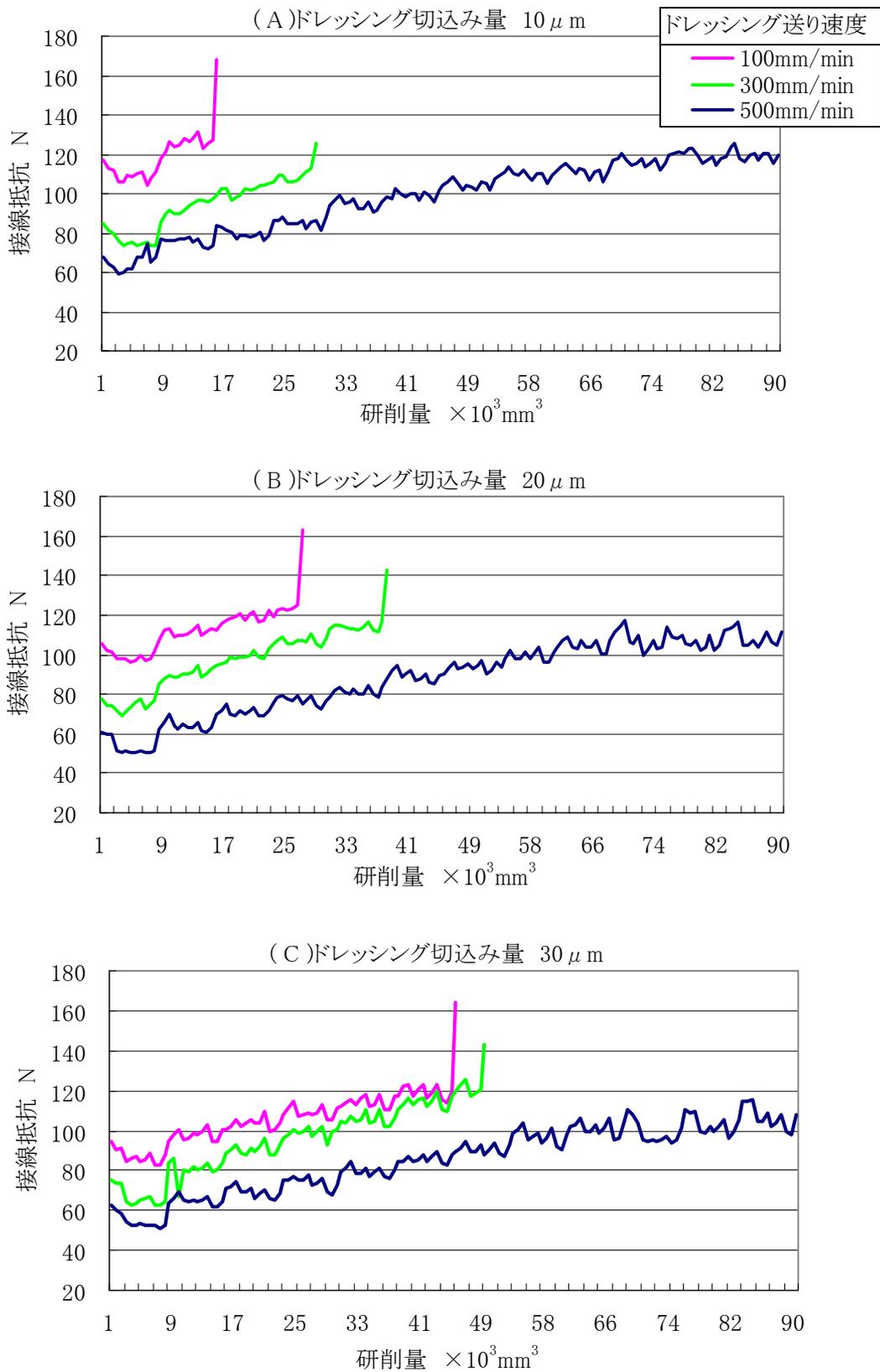


図 18 各ドレッシング切込み量での研削量と接線抵抗の関係

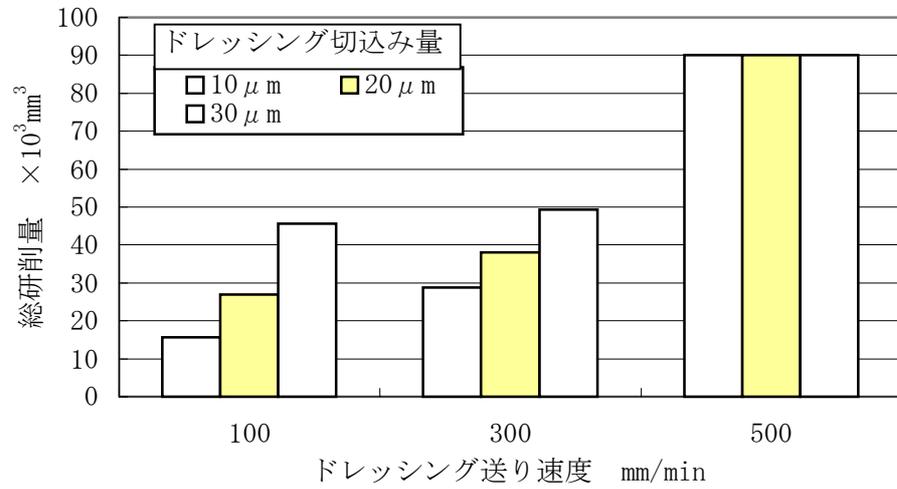


図 19 ドレッシング送り速度と総研削量の関係

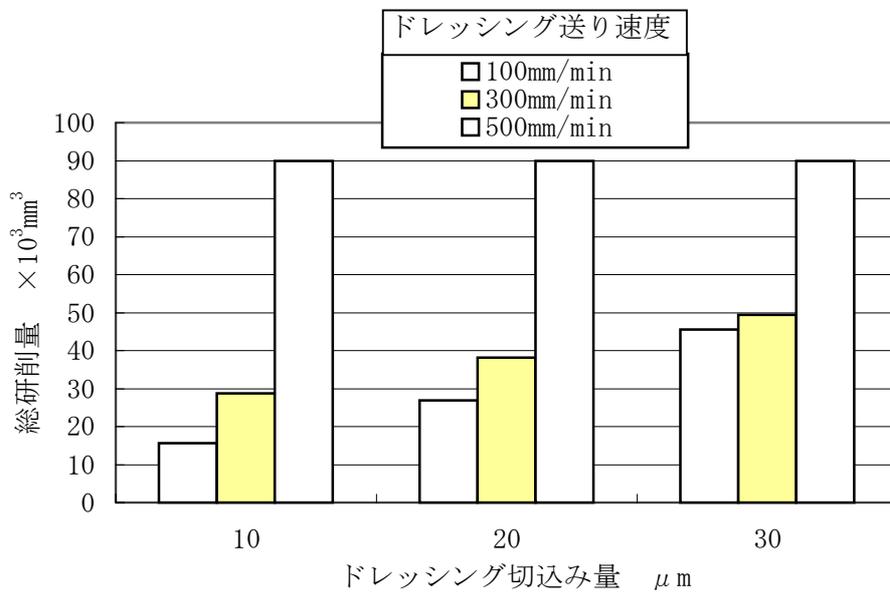


図 20 ドレッシング切込み量と総研削量の関係

#### 4. 2 ドレッシング条件と研削抵抗の関係

ドレッシング条件が研削抵抗に及ぼす影響を調べた。研削抵抗は2回目研削面の4パス目を研削した時の接線抵抗と比較した。第2面の4パス目を選択した理由は、研削初期の方が砥石摩耗などの影響が少なく、ドレッシング条件の影響を正確に評価できると考えたからである。

図 21 にドレッシング切込み量をパラメータとして、ドレッシング送り速度と接線抵抗の関係を、図 22 にドレッシング送り速度をパラメータとして、ドレッシング切込み量と接線抵抗の関係を示す。なお、この場合の接線抵抗は、上述した第2面4パス目の接線抵抗である。

図 21 から、ドレッシング送り速度が大きいほど、研削抵抗が小さい値になることがわかる。これは、ドレッシング送り速度が速い場合、砥石作業面の仕上がりが粗くなって目詰まりが起きにくいいためだと考えられる。

また、図 22 から、ドレッシング切込み量が大きいほど、研削抵抗が小さくなることがわかる。この原因としては、ドレッシング切込み量が小さいと、砥石作業面の砥粒の脱落やへき開が起きにくいですが、逆にドレッシング切込み量が大きいと砥粒の破碎等が起きやすく、大きく鋭い切れ刃が出現して、より小さな力で工作物を削ることができるためと考えられる。

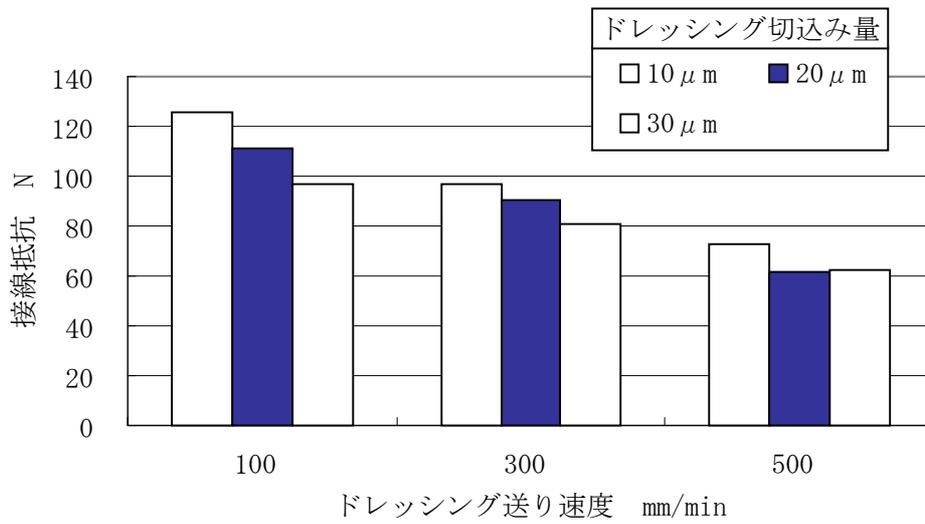


図 21 ドレッシング送り速度と接線抵抗の関係

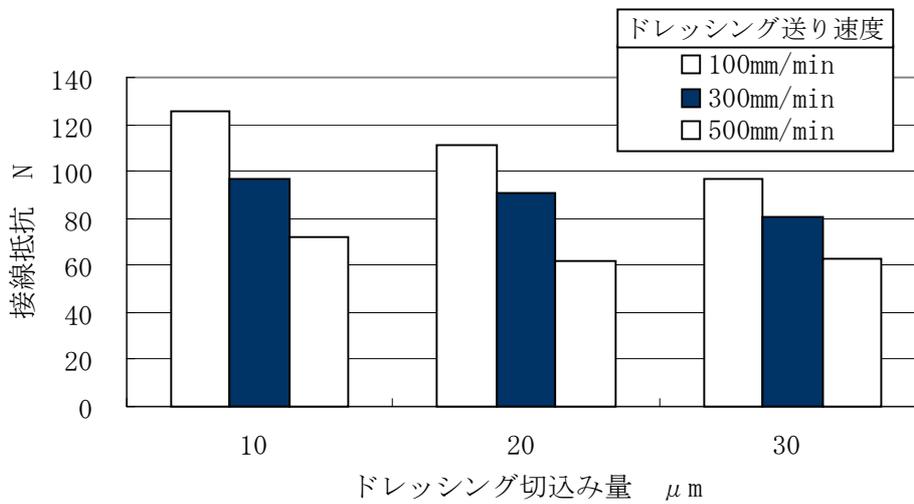


図 22 ドレッシング切込み量と接線抵抗の関係

#### 4. 3 ドレッシング条件と表面粗さの関係

図 23 に、ドレッシング送り速度と表面粗さの関係を示す。また同様に、図 24 にドレッシング切込み量と表面粗さの関係を示す。

図 23 から、ドレッシング送り速度が大きい方が表面粗さは大きくなる傾向が見られる。しかしながら、ドレッシング切込み量が  $20\mu\text{m}$  と  $30\mu\text{m}$  の場合に、ドレッシング送り速度  $300\mu\text{m}$  での表面粗さが、最も大きくなっている。この原因については、今のところわかっていない。

一方、図 24 から、ドレッシング切込み量を大きくすると、表面粗さは大きくなることわかる。

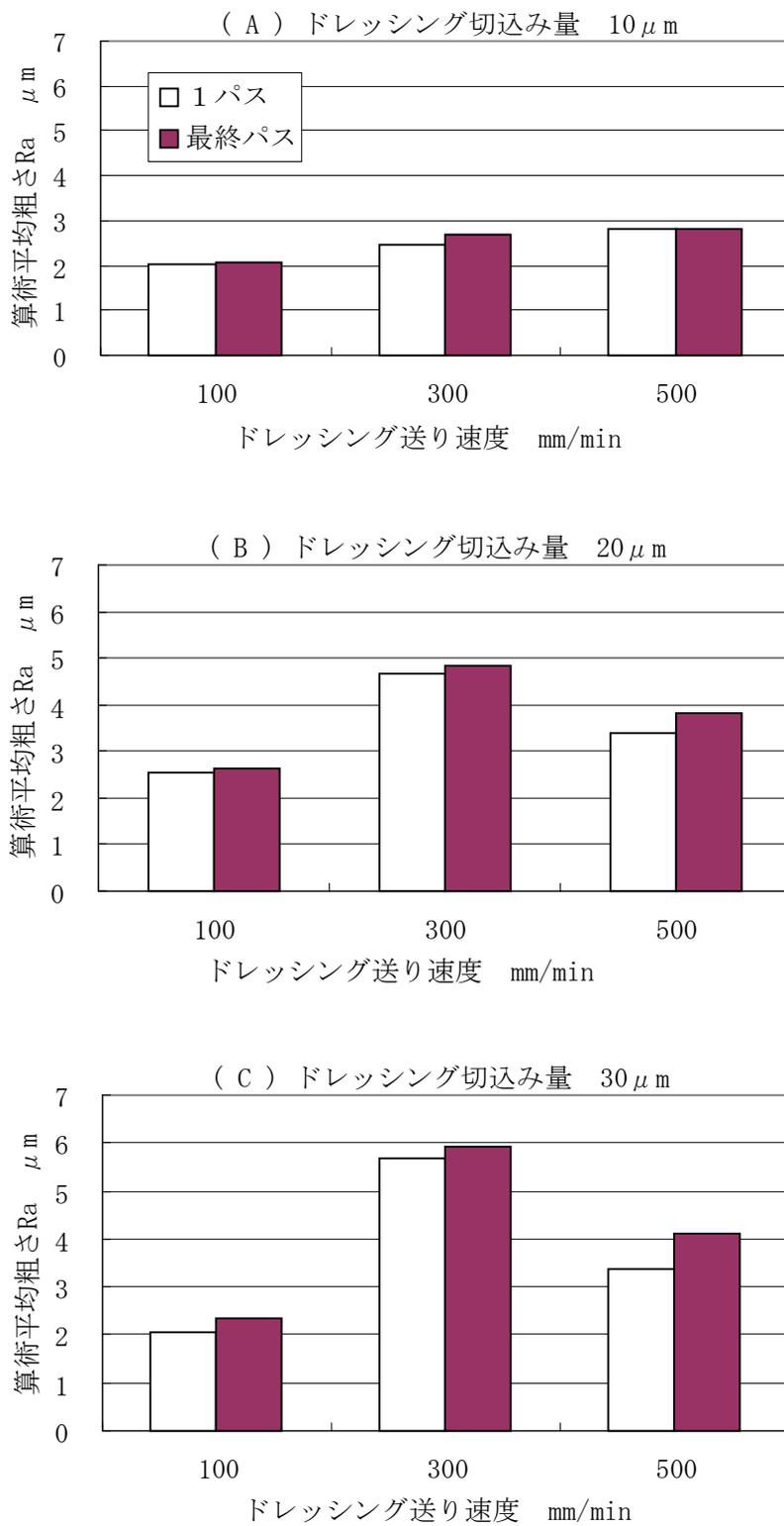


図 23 ドレッシング送り速度と表面粗さの関係

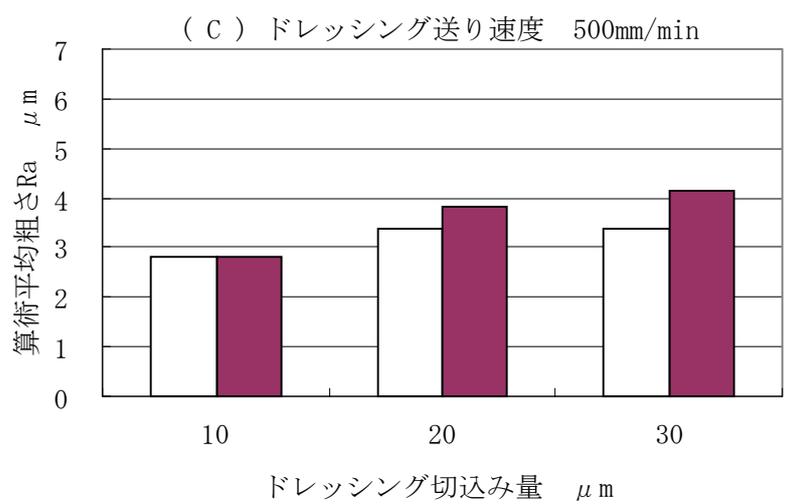
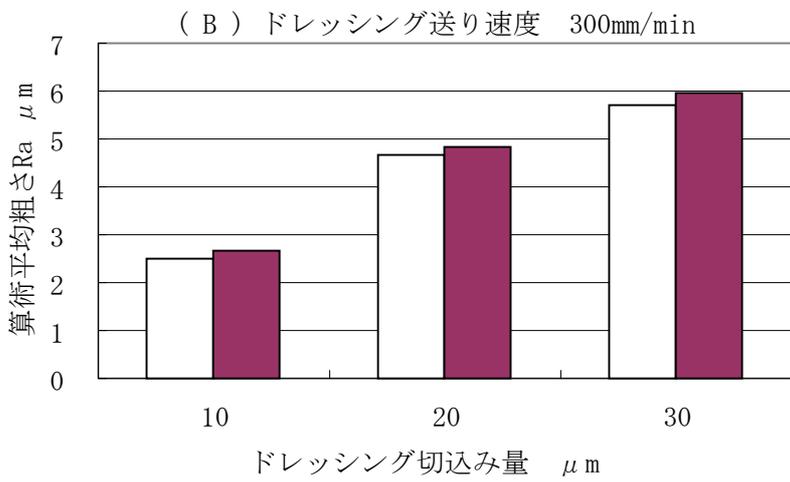
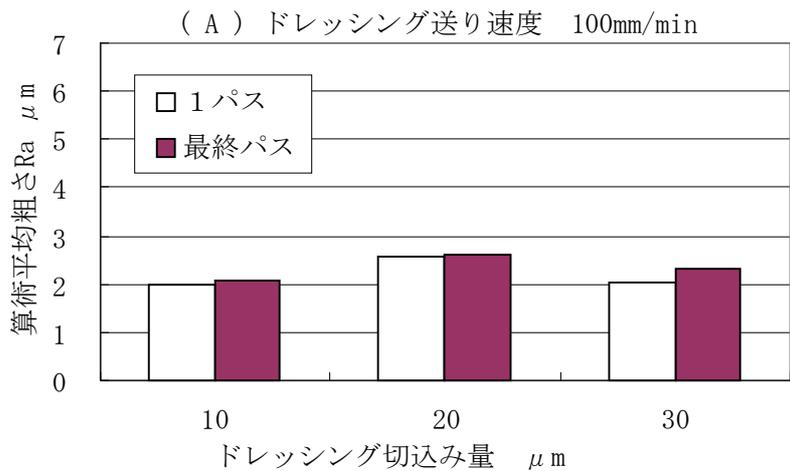


図 24 ドレッシング切込み量と表面粗さの関係

## 5. 結言

チャック面積に相当する工作物を途中でドレッシングすることなく，トラバースクリープフィード研削出来る条件を検討するとともに，ドレッシング条件が砥石寿命等に及ぼす影響を調査した結果，次のようなことがわかった．

- (1) ドレッシング送り速度を 500mm/min にすると，目標であるチャック面積に相当する工作物を，途中でドレッシングすることなく研削できる．
- (2) ドレッシング送り速度やドレッシング切込み量を大きくすると，砥石寿命が延びる．
- (3) ドレッシング送り速度やドレッシング切込み量を大きくすると，研削抵抗が小さくなる．
- (4) ドレッシング送り速度やドレッシング切込み量を大きくすると，表面粗さが粗くなる．

今後の課題としては，次のようなことについて検討が必要であると考えられる．

- (1) クリープフィード研削条件と砥石寿命の関係について．
- (2) 砥石摩耗特性について．
- (3) 従来の研削法との総合的な比較について．

## 謝辞

本研究を行うにあたって，実験および論文作成の全てにおいてご指導頂きました，高知工科大学知能機械システム工学科松井敏教授に深謝致します．

## 参考文献

- 1) 稲崎一郎：研削加工の知能制御を目指して，マシンスト，25，1(1981)68
- 2) 斎藤義夫：実用性の高い加工状態認識用インプロセスセンサ，マシンスト，29，8(1985)84
- 3) 古川勇二，大石進：クリープフィード研削の基礎とその応用，マシンスト，24，6(1980)35
- 4) 中越順哉，川村聡：トラバースクリープフィード研削の基礎特性－砥石と工作物位置合わせの効率向上－，(2001)
- 5) 松井敏，堀内毅：自転形単石ドレッシングに関する研究，精密工学会誌，59，3(1993)